

渭北旱塬区不同坡向土地利用类型对土壤性质的影响

赵妮¹, 金晶炜^{2,3}, 程光庆⁴, 程积民^{1,2,3}

(1. 西北农林科技大学动物科技学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;
3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4. 世纪龙信息网络有限责任公司, 广州 510630)

摘要: 为了研究不同坡向土地利用类型对土壤性质的影响, 以渭北旱塬区 5 种土地利用类型(不同坡向)为研究对象, 系统分析该区不同坡向土地利用类型剖面土壤物理、化学和生物性质的差异。结果表明: (1) 除土壤 pH 和土壤颗粒组成外, 5 种土地利用类型土壤含水量、总孔隙度、有机质、全氮、微生物量碳和氮含量总体随土层加深呈下降趋势, 土壤容重则相反。(2) 0—30 cm 土层, 阳坡农用地土壤含水量、黏粒含量和 pH 最高, 粉粒和全氮含量最低; 人工草地砂粒和全氮含量最高, 黏粒含量最低; 人工林地土壤总孔隙度、土壤有机质、微生物量碳和氮含量最高, 土壤含水量、土壤容重和 pH 最低; 天然草地土壤容重和粉粒含量最高, 总孔隙度和砂粒含量最低; 退耕地有机质、微生物量碳和氮含量最低。阴坡农用地土壤含水量、粉粒含量和 pH 最高, 黏粒和全氮含量最低; 人工草地土壤容重、黏粒和微生物量氮含量最高, 土壤总孔隙度、粉粒、砂粒和有机质含量最低; 人工林地有机质含量和微生物量碳含量最高; 天然草地土壤总孔隙度、砂粒和全氮含量最高, 土壤容重和 pH 最低; 退耕地土壤含水量、微生物量碳和氮含量最低。(3) 5 种土地利用类型中, 土壤容重、细黏粒、粗黏粒、细粉粒、粗砂粒、土壤 pH 和有机质(退耕地除外)表现为阳坡>阴坡, 土壤含水量(退耕地和农用地除外)、总孔隙度、粗粉粒、细砂粒、土壤质地粗化度、全氮(人工草地除外)、土壤微生物量碳和氮含量则为阴坡>阳坡。

关键词: 渭北旱塬; 坡向; 土地利用类型; 土壤性质

中图分类号: S154.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0271-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.03.041

Effects of Land Use Types with Different Slope Aspect on Soil Properties in Weibei Highlands

ZHAO Ni¹, JIN Jingwei^{2,3}, CHENG Guangqing⁴, CHENG Jimin^{1,2,3}

(1. College of Animal Science and Technology, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100;

3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 4. Century Dragon Information Network Co. LTD., Guangzhou 510630)

Abstract: In order to explore the effects of land use types with different slope aspects on soil properties, five land use types (different slope aspect) in Weibei highlands were selected to analyze the differences of soil physical, chemical and biological properties in different land use types. The results showed that: (1) Soil water content, soil total porosity, soil organic matter content, total nitrogen content, microbial biomass carbon and nitrogen content decreased with the increase of soil depth, soil bulk density was the opposite except soil pH and particle composition in different land use types. (2) In 0—30 cm soil layer, on the sunny slope, soil water content, clay content and pH were the highest, while silt and total nitrogen content were the lowest in farmland; sand and total nitrogen content were the highest, while clay content was the lowest in artificial grassland; soil total porosity, soil organic matter content, microbial biomass carbon and nitrogen content were the highest, while soil water content, soil bulk density and pH were the lowest in artificial forest; soil bulk density and silt content were the highest, while soil total porosity and sand content were the lowest in natural grassland; soil organic matter content, microbial biomass carbon and nitrogen content were the lowest in abandoned farmland. On the shady slope, soil water content, silt content and pH were the highest,

收稿日期: 2017-12-08

资助项目: 国家自然科学基金项目(31601987, 41230852); 国家重点研发计划项目(2016YFC0500700); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2016JM3019, 2013JQ3013); 中国典型自然保护区保护成效评估项目(KFJ-SW-YW028-07)

第一作者: 赵妮(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事恢复生态研究。E-mail: yczhaonijy@163.com

通信作者: 程积民(1955—), 男, 研究员, 主要从事恢复生态研究。E-mail: gyzcjm@ms.iswc.ac.cn

金晶炜(1980—), 女, 博士, 主要从事恢复生态研究。E-mail: jinjingweisoi2008@163.com

while clay content and total nitrogen content were the lowest in farmland; soil bulk density, clay content and microbial biomass nitrogen content were the highest, while soil total porosity, silt, sand and soil organic matter content were the lowest in artificial grassland; soil organic matter content and microbial biomass carbon content were the highest in artificial forest; soil total porosity, sand and total nitrogen content were the highest, while soil bulk density and pH were the lowest in natural grassland; soil water content, microbial biomass carbon and nitrogen content were the lowest in abandoned farmland. (3) Among the 5 types of land use, soil bulk density, fine clay, coarse clay, fine silt, coarse sand, soil pH, soil organic matter content (except abandoned farmland) of sunny slope were higher than those of shady slope. Soil water content (except abandoned farmland and farmland), soil total porosity, the coarse silt, fine sand, soil texture coarsening degrees, soil total nitrogen content (except artificial grassland), soil microbial biomass carbon and nitrogen content of shady slope were higher than those of sunny slope.

Keywords: Weibei highlands; slope aspect; land use types; soil properties

土壤是人类赖以生存的空间,是人类社会生产中重要的自然资源和生产资源,是地球上各类复杂生态系统的载体及物种的栖息地^[1]。随着工业化、城镇化速度的加快,人口的激增,土地利用格局不断发生变化。这不仅直接改变土壤的理化性质,还改变着生态系统的结构和功能。因此,不合理的土地利用类型会给土壤生态环境带来风险,进而影响土壤质量^[2]。而土壤质量是土壤特性的综合反映,是揭示土壤条件动态的最敏感指标,其直接关系到环境和发展的可持续性^[3-4]。

渭北旱塬区是我国生态环境最脆弱的地区之一,水土流失是该区域生态环境恶化的主要原因。自 20 世纪 90 年代实施退耕还林还草生态恢复工程以来,土地利用发生巨大变化,而土地利用是生态恢复工程最直接的后果,其进而会对生态系统、全球生物地球化学、气候变化及人类可持续发展产生重要影响^[5]。目前,许多学者从植被、土壤、生物以及气候大环境等方面在渭北旱塬区开展科学研究,关于土壤方面的研究主要集中在果园的土壤干燥化、土壤微生物空间分布特征、土壤水分以及土壤基本性质与微形态特征方面^[6-9],系统研究不同坡向土地利用类型对土壤性质的影响还很少。本研究以渭北旱塬区典型的 5 种土地利用类型为研究对象,分析研究区不同坡向土地利用类型剖面土壤物理、化学和生物性质的差异,探讨不同坡向土地利用类型对剖面土壤性质的影响,旨在为合理有效的利用该地区土地资源,采取正确的保护措施以及更好地改善生态环境提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省咸阳市彬县永乐乡东高辉村,地理位置 108°06'18" E, 35°15'01" N, 属于典型的渭北旱塬残塬沟壑区。该地区恰为 2 省 3 县的交界,是连接陕西与甘肃的要道。平均海拔 1 040 m,年平均气

温约 9.7 ℃,昼夜温差达 11.7 ℃,最低气温 -24.3 ℃,最高气温 36.3 ℃,≥10 ℃活动积温 2 955.8 ℃,年降水量 561 mm,无霜期 180 d,从气温、降水等气候条件上判定,属典型的大陆性暖温带半干旱气候。土壤类型主要以黄绵土为主。人工草地以紫花苜蓿为代表大量种植,且多集中连片分布于沟壑的中下部,种植面积大。天然草地为铁杆蒿—白羊草群落,主要优势种有铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、本氏针茅(*Stipa bungeana*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)等。人工林地以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)为主,并形成多树龄人工林,农用地主要以种植玉米为主。

1.2 样地选择与样品采集

1.2.1 样地选择 根据采样的典型性、代表性和随机性原则,在试验地选取地形相似且地理位置相邻的不同坡向的土地利用类型作为样地(表 1)。本文主要选取退耕还林还草以后实行的 5 种土地利用类型,分别为人工林地(刺槐)、人工草地(紫花苜蓿)、天然草地、农用地(玉米)和退耕地(以自然恢复为主),坡向为阳坡和阴坡。

1.2.2 土壤样品采集 2014 年 8 月,在每种土地利用类型采集 3 个土壤剖面,作为 3 次重复。土壤剖面深 30 cm,分 3 层(0—10, 10—20, 20—30 cm)采样,利用原状土进行物理性质、化学性质和生物性质的测定。

1.3 测定项目及方法

土壤含水量采用烘干法测定;容重采用环刀法测定;总孔隙度采用环刀称重法测定;颗粒组成采用激光粒度仪(MS-2000)测定;pH 采用酸度计法测定;有机质采用重铬酸钾容量法测定;全氮采用凯氏法消解—AA₃连续流动分析仪测定;微生物量碳(Microbial Biomass Carbon, MBC)和微生物量氮(Microbial Biomass Nitrogen, MBN)采用氯仿熏蒸—浸提法测定^[10]。

1.4 数据处理与统计分析

统计分析采用 SPSS 18.0 软件,各土地利用类型

的差异显著性采用单因素方差分析(one-way ANOVA),均值多重比较采用 Duncan 法分析。

表 1 样地基本特征

土地利用类型	序号	坡向	缩写	年限/a	坡度/(°)	海拔/m
人工林地	1/2/3	阳坡	AF_S	20/20/20	36/35/38	1150/1155/1153
	1/2/3	阴坡	AF_N	20/20/20	35/33/35	1155/1152/1159
人工草地	1/2/3	阳坡	AG_S	10/10/10	33/34/37	1149/1143/1154
	1/2/3	阴坡	AG_N	10/10/10	36/34/37	1151/1145/1147
天然草地	1/2/3	阳坡	NG_S	—/—/—	35/34/35	1150/1148/1152
	1/2/3	阴坡	NG_N	—/—/—	37/36/34	1153/1152/1153
农用地	1/2/3	阳坡	FL_S	—/—/—	34/32/31	1154/1155/1154
	1/2/3	阴坡	FL_N	—/—/—	30/28/32	1153/1154/1155
退耕地	1/2/3	阳坡	AL_S	8/8/8	33/29/31	1146/1142/1144
	1/2/3	阴坡	AL_N	8/8/8	34/31/30	1148/1146/1148

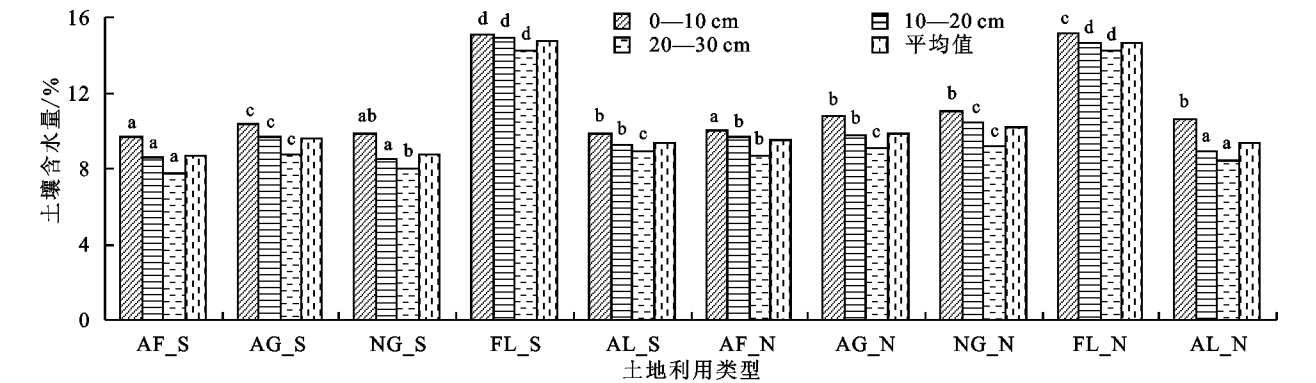
2 结果与分析

2.1 不同坡向土地利用类型对土壤物理特性的影响

2.1.1 土壤含水量 由图 1 可知,在同一坡向的土壤垂直尺度上,阳坡 5 种土地利用类型的土壤含水量随着土层深度的增加而降低。在 0—30 cm 土层,FL_S 土壤含水量最高(14.71%),显著高于其他土地利用类型($P<0.05$),而 AF_S 土壤含水量最低(8.67%)。不同土地利用类型相同土层比较,0—10 cm 土层,FL_S>AG_S>AL_S=NG_S=AF_S,其中 AL_S 与 NG_S 之间、NG_S 与 AF_S 之间均无显著性差异;10—20 cm 土层,FL_S>AG_S>AL_S>AF_S=NG_S,其中,NG_S 与 AF_S 之间无显著性差异;20

—30 cm 土层,FL_S 土壤含水量最高,显著高于其他 4 种土地利用类型。

垂直尺度上,阴坡 5 种土地利用类型土壤含水量也随着土层深度的增加而降低。在 0—30 cm 土层,FL_N 土壤含水量最高(14.67%),且显著高于其他土地利用类型($P<0.05$),AL_N 土壤含水量最低(9.32%)。0—10 cm 土层,FL_N>NG_N=AG_N=AL_N>AF_N,其中,NG_N、AG_N 与 AL_N 之间无显著性差异;10—20 cm 土层,FL_N>NG_N>AG_N=AF_N>AL_N,其中,AG_N 与 AF_N 之间无显著性差异;20—30 cm 土层,FL_N>NG_N=AG_N>AF_N>AL_N,NG_N 与 AG_N 之间无显著性差异。



注:不同小写字母表示同一坡向同一垂直尺度不同土地利用类型间差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1 不同坡向土地利用类型土壤含水量

2.1.2 土壤容重 由图 2 可知,在同一坡向的土壤垂直尺度上,除 AL 外,阳坡 5 种土地利用类型的土壤容重随土层深度增加而增加。在 0—30 cm 土层,NG_S 土壤容重最高(1.58 g/cm³),且显著高于其他土地利用类型($P<0.05$),AF_S 土壤容重最低(1.34 g/cm³)。0—10 cm 土层,NG_S>AG_S>FL_S=AL_S=AF_S,其中 FL_S、AL_S 与 AF_S 之间无显著性差异;10—20 cm 土层,NG_S=FL_S=AL_S=AG_S=AF_S,其中 NG_S 与 FL_S 之间无显著性差异,且 NG_S 显著高于其他 3 种土地利用类型;20—30 cm 土层,NG_S>FL_S=AG_S=AF_S=AL_S,其中,FL_S、AG_S 与 AF_S 之间,AF_S

与 AL_S 之间均无显著性差异。

垂直尺度上,阴坡 5 种土地利用类型的土壤容重也随土层深度的增加而增加。在 0—30 cm 土层,土壤容重表现为 AG_N(1.35 g/cm³)>AF_N>AL_N>FL_N>NG_N(1.34 g/cm³),但 5 种土地利用类型的土壤容重差异值并不大。0—10 cm 土层,FL_N 土壤容重显著低于其他 4 种类型,且其他 4 种类型间无显著性差异;10—20 cm 土层,5 种利用类型并无显著差异;20—30 cm 土层,FL_N=AF_N=AL_N=NG_N=AG_N,其中 FL_N 与 AF_N 之间无显著性差异,且 FL_N 显著高于其他 3 种土地利用类型。

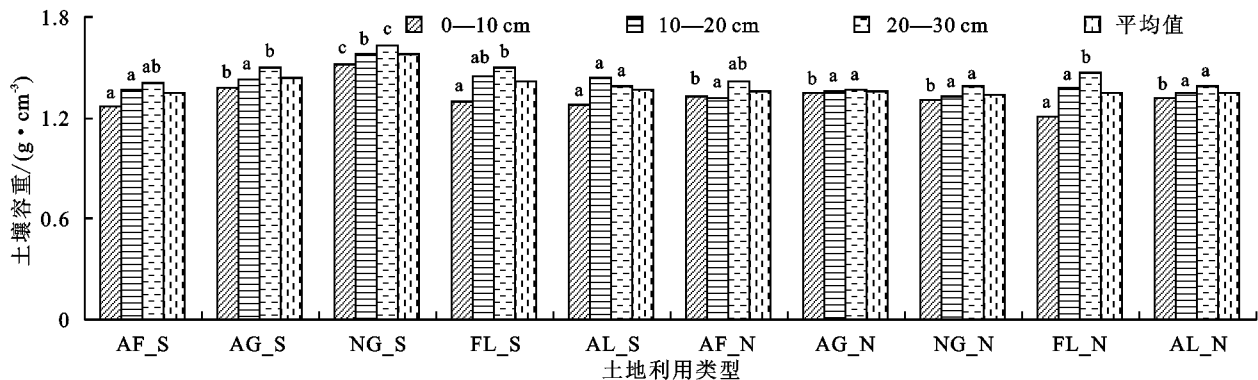


图 2 不同坡向土地利用类型土壤容重

2.1.3 土壤总孔隙度 由图 3 可知,在同一坡向的土壤垂直尺度上,阳坡 5 种土地利用类型的土壤总孔隙度变化规律与土壤容重相反,即随土层深度的增加而减小。在 0—30 cm 土层,土壤总孔隙度表现为: AF_S(49.26%)>AL_S>FL_S>AG_S>NG_S(40.50%)。0—10 cm 土层中,AF_S=AL_S=FL_S>AG_S>NG_S,其中 FL_S,AL_S 与 AF_S 之间无显著性差异;10—20 cm 土层,AF_S=AG_S>FL_S=

AL_S>NG_S,而 FL_S 与 AL_S 之间、AG_S 与 AF_S 之间均无显著性差异;20—30 cm 土层,AL_S=AF_S>AG_S=FL_S>NG_S,其中 AL_S 与 AF_S 之间、AG_S 与 FL_S 之间均无显著性差异。

垂直尺度上,阴坡 5 种土地利用类型的土壤总孔隙度也随土层深度的增加而减小,土壤总孔隙度表现为 NG_N(49.48%)>FL_N>AL_N>AF_N>AG_N(48.89%)。

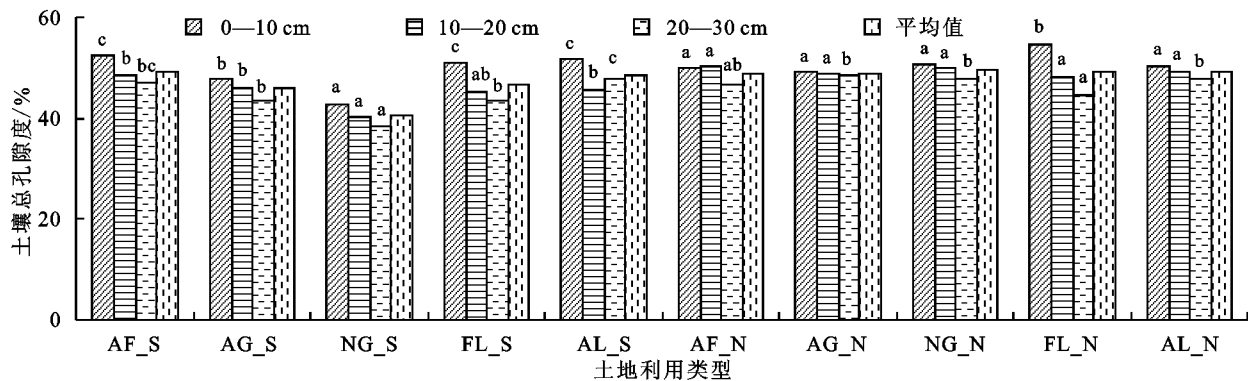


图 3 不同坡向土地利用类型土壤总孔隙度

2.1.4 土壤颗粒组成 由表 2 可知,阳坡和阴坡的土壤颗粒组成均表现为粉粒含量(尤其是粗粉粒)>黏粒含量>砂粒含量。阳坡粉粒在土壤颗粒中的比例达到 63.05%,阴坡为 62.93%,均为粉质壤土。

0—30 cm 土层,随着土壤剖面深度的增加,阳坡 AF_S 土壤细黏粒、粗黏粒、细粉粒和粗粉粒含量增加,土壤细砂粒含量和土壤质地粗化度降低;AG_S 土壤细黏粒含量增加,粗黏粒、细粉粒和粗粉粒含量呈现单谷型变化,细砂粒含量和土壤质地粗化度呈现单峰型变化;NG_S 土壤细黏粒、粗黏粒和细粉粒含量呈现单谷型变化,粗粉粒含量呈现单峰型变化,细砂粒含量和土壤质地粗化度降低;FL_S 土壤细黏粒含量呈现单峰型变化,粗黏粒、细粉粒和粗砂粒含量降低,粗粉粒、细砂粒含量和土壤质地粗化度增加;AL_S 土壤细黏粒含量增加,粗黏粒和细粉粒呈现单谷型变化,粗粉粒、细砂粒含量和土壤质地粗化度呈现单峰型变化。

随着土壤剖面深度的增加,阴坡 AF_N 土壤细

黏粒、细砂粒含量和土壤质地粗化度呈现单峰型变化,粗黏粒、细粉粒和粗粉粒含量呈现单谷型变化;AG_N 土壤细黏粒和粗粉粒含量增加,细黏粒、细粉粒含量呈现单峰型变化,细砂粒含量和土壤质地粗化度降低;NG_N 土壤细黏粒含量增加,粗黏粒和细粉粒含量呈现单峰型变化,粗粉粒含量先增加然后趋于稳定,细砂粒含量和土壤质地粗化度呈现单谷型变化;FL_N 土壤细黏粒、粗黏粒和细粉粒含量呈现单谷型变化,粗粉粒含量增加,细砂粒含量和土壤质地粗化度呈现单峰型变化;AL_N 土壤细黏粒和粗黏粒含量降低,细粉粒和粗粉粒含量增加,细砂粒含量呈现单谷型变化,土壤质地粗化度先降低然后趋于稳定。

除 AG 外,其他 4 种土地利用类型各土层的土壤细黏粒、粗黏粒和细粉粒含量均为阳坡高于阴坡,土壤细砂粒含量和土壤质地粗化度与之相反;除 NG 外,土壤粗砂粒含量均为阳坡高于阴坡;除 AG 和 NG 外,土壤粗粉粒含量均为阳坡低于阴坡。

表 2 土壤颗粒组成描述性统计及垂直分布

土地利用 类型	深度/cm	细黏粒	粗黏粒	细粉粒	粗粉粒	细砂粒	粗砂粒	质地粗化度
		<0.001 mm	0.001~0.005 mm	0.005~0.01 mm	0.01~0.05 mm	0.05~0.2 5mm	0.25~1mm	
AF_S	0—10	12.86(1.52)b	13.13(1.53)b	8.90(0.72)b	52.65(0.69)b	12.02(2.89)c	0.45(33.71)a	14.25(3.30)c
	10—20	14.96(2.07)c	13.61(1.86)c	9.11(1.46)c	53.26(1.35)b	8.76(1.43)b	0.30(70.39)b	9.96(1.42)b
	20—30	14.84(0.87)d	14.22(1.22)c	10.11(2.34)d	55.11(0.48)b	5.72(1.58)a	0	6.07(1.67)a
AG_S	0—10	10.61(1.93)a	10.41(0.26)a	7.22(1.62)a	56.25(0.89)c	15.21(2.01)d	0.31(48.14)a	18.37(3.30)d
	10—20	10.73(0.30)a	9.78(0.52)a	6.44(0.40)a	54.00(1.10)b	19.01(3.43)d	0.03(199.70)a	23.53(4.48)d
	20—30	10.73(1.15)a	9.83(1.59)a	6.49(2.14)a	55.65(0.43)b	17.30(3.72)d	0	20.92(4.50)d
NG_S	0—10	13.34(1.44)c	13.26(1.90)bc	9.73(2.58)d	55.69(0.48)c	6.54(37.53)a	0.45(84.53)a	7.57(36.95)a
	10—20	13.04(2.32)b	12.68(2.70)b	9.43(2.23)d	58.18(0.53)c	6.67(17.36)a	0	7.16(18.58)a
	20—30	13.82(4.31)c	13.56(4.54)b	9.99(5.14)d	57.03(1.10)c	5.59(19.73)a	0	5.93(20.86)a
FL_S	0—10	14.37(0.49)e	15.59(0.30)d	10.26(0.61)e	50.78(0.30)a	8.70(0.39)b	0.30(63.33)a	9.89(1.97)b
	10—20	15.04(0.51)d	14.17(1.47)d	9.18(2.11)cd	52.22(0.71)a	9.31(8.23)b	0.08(99.87)a	10.37(9.75)b
	20—30	13.59(0.27)b	13.14(0.45)b	8.66(0.34)b	52.67(0.57)a	11.93(2.14)c	0.01(200.00)	13.56(2.63)c
AL_S	0—10	13.86(4.05)d	13.60(3.63)c	9.19(2.73)c	53.18(1.20)b	9.98(5.96)b	0.19(43.92)a	11.33(7.35)b
	10—20	14.61(3.01)c	13.04(3.11)b	8.37(3.04)b	53.31(1.04)b	10.62(6.43)c	0.06(199.84)a	11.96(6.77)c
	20—30	15.45(1.08)e	14.26(1.18)c	9.48(0.81)c	53.25(1.72)a	7.57(6.72)b	0	8.19(7.27)b
AF_N	0—10	12.10(1.55)b	11.55(1.12)b	8.08(0.59)b	54.67(0.32)d	13.16(3.24)c	0.45(69.39)a	15.75(3.87)c
	10—20	12.52(1.10)a	11.14(0.88)a	7.56(0.72)a	54.37(0.37)b	14.28(2.27)e	0.12(120.78)b	16.83(2.90)e
	20—30	14.89(1.42)c	13.78(0.22)d	9.72(1.33)d	54.91(0.76)c	6.69(5.02)a	0	7.18(5.38)a
AG_N	0—10	15.86(2.08)d	14.20(2.80)d	9.17(3.45)c	51.59(0.74)a	8.91(7.34)a	0.26(19.68)a	10.10(7.97)a
	10—20	16.65(5.56)c	15.01(5.94)d	9.97(6.48)c	52.24(1.45)a	6.14(27.88)a	0	6.57(29.59)a
	20—30	16.72(2.50)d	14.70(2.69)e	9.72(1.81)d	52.78(0.66)a	6.07(10.64)a	0	6.47(11.33)a
NG_N	0—10	10.70(1.09)a	10.85(1.12)a	7.64(1.17)a	53.82(1.10)c	16.16(3.35)d	0.84(109.25)b	20.48(6.14)d
	10—20	13.29(0.53)b	14.62(0.13)cd	9.92(0.81)c	54.18(1.07)b	8.00(7.30)b	0	8.70(7.94)b
	20—30	13.68(0.25)b	13.31(0.73)c	8.74(1.28)c	54.18(0.20)b	10.10(1.06)b	0	11.23(1.18)b
FL_N	0—10	13.48(3.65)c	12.29(3.94)c	8.20(3.96)b	55.52(1.39)e	10.34(8.13)b	0.17(199.94)a	11.75(8.49)b
	10—20	12.75(2.67)a	11.48(2.81)a	7.61(2.71)a	55.71(0.20)c	12.44(6.18)d	0	14.22(7.05)d
	20—30	12.99(1.25)a	11.90(1.44)a	8.06(1.68)a	55.80(0.15)d	11.26(4.73)c	0	12.69(5.33)c
AL_N	0—10	13.10(1.39)c	12.42(1.58)c	8.24(1.79)b	52.93(0.17)b	13.32(4.23)c	0	15.38(4.87)c
	10—20	13.01(2.64)ab	12.27(2.98)b	8.38(3.50)b	55.87(0.18)c	10.47(8.72)c	0	11.70(9.73)c
	20—30	12.97(1.40)a	12.22(1.39)b	8.40(1.12)b	55.94(0.16)d	10.48(3.82)b	0	11.70(4.27)b

注:不同小写字母表示同一坡向同一垂直尺度不同土地利用类型间差异显著($P<0.05$);表中数据为不同粒径含量和质地粗化度平均值(%),括号内数据为变异系数(CV,%).

2.2 不同坡向土地利用类型对土壤化学特性的影响

2.2.1 土壤 pH 由表 3 可知,0—30 cm 土层,阳坡 AG_S 和 NG_S 土壤 pH 随土层深度的增加呈现先增后减趋势,其他 3 种土地利用类型土壤 pH 随土层深度的增加而降低。土壤 pH 为 7.28~8.55,各利用类型间基本表现为 FL_S>AG_S>

AL_S>NG_S>AF_S。

阴坡除 AL_N 外,其他土地利用类型土壤 pH 随土层深度的增加呈现先减后增的趋势。土壤 pH 为 7.38~8.42,各利用类型间基本表现为 FL_N>AG_N>AL_N>AF_N>NG_N。相对于阳坡,阴坡各土地利用类型土壤 pH 偏低。

表 3 不同坡向土地利用类型土壤 pH

土地利用 类型	0—10 cm				10—20 cm				20—30 cm			
	阳坡 S		阴坡 N		阳坡 S		阴坡 N		阳坡 S		阴坡 N	
	平均值	变异系数/%	平均值	变异系数/%	平均值	变异系数/%	平均值	变异系数/%	平均值	变异系数/%	平均值	变异系数/%
AF	7.41	0.02	7.62	0.03	7.31	0.02	7.21	0.03	7.12	0.05	7.51	0.03
AG	8.21	0.03	8.52	0.02	8.61	0.01	7.92	0.03	8.31	0.03	8.52	0.02
NG	7.61	0.02	7.41	0.02	7.92	0.03	7.31	0.02	7.42	0.01	7.41	0.03
FL	8.72	0.04	8.41	0.05	8.52	0.04	8.32	0.05	8.42	0.06	8.52	0.01
AL	8.32	0.03	8.12	0.02	8.23	0.01	8.22	0.03	8.11	0.03	8.21	0.01

2.2.2 土壤有机质 由图 4 可知,阳坡 0—30 cm 土层,除 AL_S 样地各层土壤有机质随土层深度无明显变化外,其他 4 种土地利用类型土壤有机质含量随土层深度的增加而减少,但不同利用类型下各层间减少的差距

不同。各利用类型间基本表现为 AF_S(23.94 g/kg)>NG_S>AG_S>FL_S>AL_S(20.41 g/kg)。0—10 cm 土层,AF_S=NG_S>AG_S=FL_S>AL_S,其中,AF_S 与 NG_S 之间、AG_S 与 FL_S 之间均无显著性差异,但

均显著高于 AL_S ; 10–20 cm 土层, $AF_S = NG_S = AG_S = FL_S = AL_S$, AF_S 与 NG_S 之间、 NG_S , AG_S 与 FL_S 之间以及 AG_S , FL_S 与 AL_S 之间均无显著性差异; 20–30 cm 土层, $AF_S > NG_S > FL_S = AL_S = AG_S$, AF_S 与 NG_S 土壤有机质含量显著高于其他 3 种土地利用类型 ($P < 0.05$)。

阴坡 0–30 cm 土层, 垂直尺度上, 5 种土地利用类型下土壤有机质含量均随土层深度的增加而降低。各利用类型间平均值基本表现为 $AF_N (23.55 \text{ g/kg}) >$

$NG_N > AL_N > FL_N > AG_N (19.94 \text{ g/kg})$ 。0–10 cm 土层, $AF_N = NG_N = AL_N = FL_N = AG_N$, 其中, AF_N 与 FL_N , AG_N 差异显著, 其他两两之间均无显著性差异; 10–20 cm 土层, $AF_N > AL_N = NG_N > FL_N = AG_N$, 其中 NG_N 与 AL_N 之间、 FL_N 与 AG_N 之间均无显著性差异; 20–30 cm 土层, $AF_N = AL_N = NG_N = FL_N = AG_N$, 其中 AG_N , FL_N 与 AF_N , AL_N 之间均差异显著, NG_N 与 AF_N 之间差异显著。

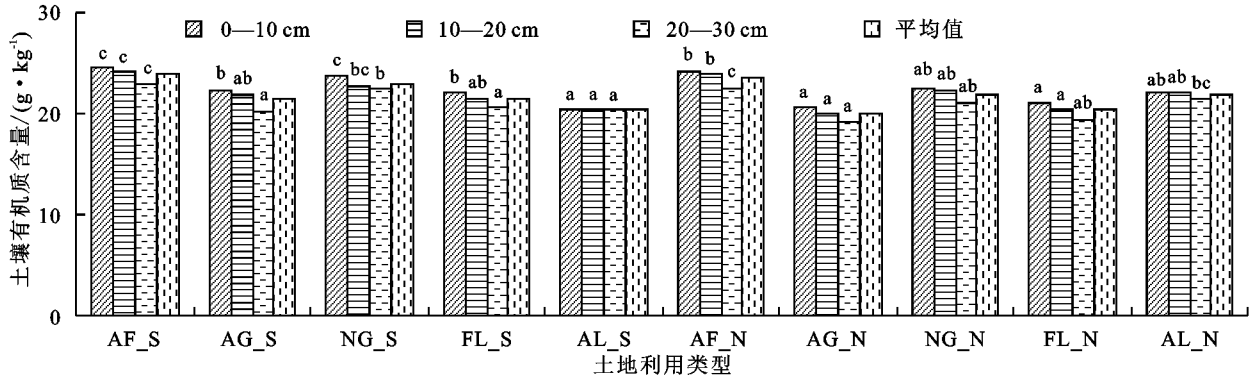


图 4 不同坡向土地利用类型土壤有机质含量

2.2.3 土壤全氮 由图 5 可知, 阳坡 0–30 cm 土层, 5 种土地利用类型下土壤全氮含量均随土层深度的增加而不同程度的降低。土壤全氮含量为 0.52~0.76 g/kg, 各种利用类型对土壤全氮含量的促进作用变现为 $AG_S > AF_S > NG_S > AL_S > FL_S$ 。土壤全氮含量在不同土层间存在差异, 0–10 cm 土层, $AG_S = FL_S = AF_S = NG_S = AL_S$, 其中 AG_S 与 NG_S , AL_S 之间差异显著, 其他两两之间均无显著性差异; 10–20 cm 土层, $AG_S = AF_S = NG_S = AL_S = FL_S$, 其中 AG_S 与

AF_S 之间、 AF_S , NG_S 与 AL_S 之间以及 NG_S , AL_S 与 FL_S 之间均无显著性差异; 20–30 cm 土层, $AG_S = AF_S > NG_S = AL_S > FL_S$, FL_S 显著低于其他 4 种土地利用类型。

阴坡 0–30 cm 土层, 5 种土地利用类型下土壤全氮含量均随土层深度的增加而降低。5 种土地利用类型土壤全氮含量平均值为 0.67 g/kg, 高于阳坡 (0.61 g/kg), 且阴坡 5 种土地利用类型下 0–30 cm 各层土壤全氮含量基本无显著性差异, 平均值为 0.63~0.72 g/kg。

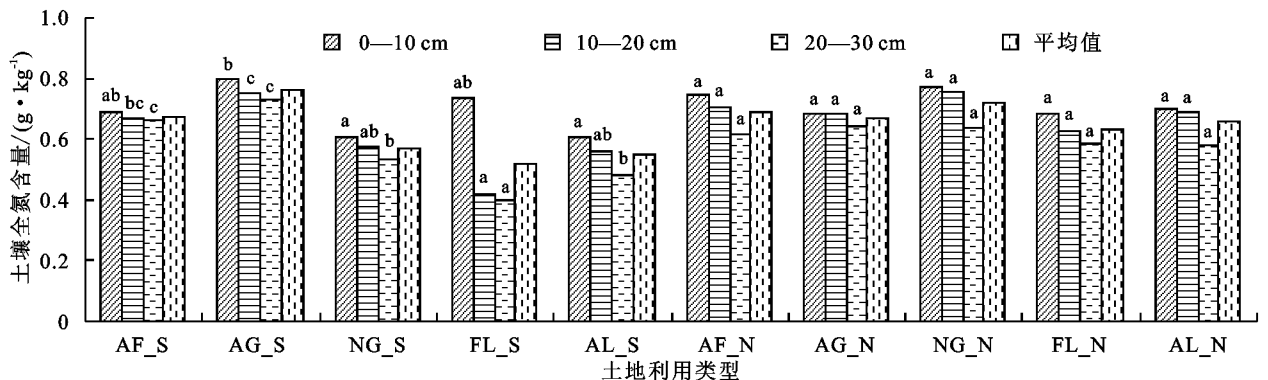


图 5 不同坡向土地利用类型土壤全氮含量

2.3 不同坡向土地利用类型对土壤微生物特性的影响

2.3.1 土壤微生物量碳 由图 6 可知, 阳坡 5 种土地利用类型土壤微生物量碳含量均随土层深度的增加而降低。在 0–30 cm 土层, 土壤微生物量碳含量在不同土地利用类型下存在着较大的差异, 表现为 $AF_S (47.60 \text{ mg/kg}) > AG_S > FL_S > NG_S > AL_S (5.77 \text{ mg/kg})$ 。对各层微生物量碳而言, 0–10 cm 土

层, $AF_S > AG_S > FL_S > NG_S > AL_S$, 土壤微生物量碳含量在 5 种土地利用类型下均差异显著 ($P < 0.05$); 10–20 cm 土层, AF_S 土壤微生物量碳含量显著高于其他 4 种利用类型, AG_S 与 FL_S 之间、 NG_S 与 AL_S 之间均无显著性差异; 20–30 cm 土层, $AF_S > FL_S > NG_S = AG_S > AL_S$, NG_S 与 AG_S 之间无显著性差异。

在垂直尺度上,阴坡 5 种利用类型下土壤微生物量碳含量均随土层深度的增加而降低。在 0—30 cm 土层,土壤微生物量碳含量表现为 $AF_N(63.09\text{ mg/kg}) > FL_N > AG_N > NG_N > AL_N(24.20\text{ mg/kg})$ 。其中 0—10 cm 土层, $AF_N > FL_N = AG_N > NG_N > AL_N$, FL_N 与 AG_N 之间无显著性差异;

10—20 cm 土层, $AF_N > FL_N > AG_N > NG_N = AL_N$, NG_N 与 AL_N 之间无显著性差异;20—30 cm 土层, AF_N 与 AL_N 土壤微生物量碳含量显著高于其他 3 种利用类型 ($P < 0.05$)。除 FL 20—30 cm 土层外,其他土地利用类型各土层土壤微生物量碳含量均为阴坡高于阳坡。

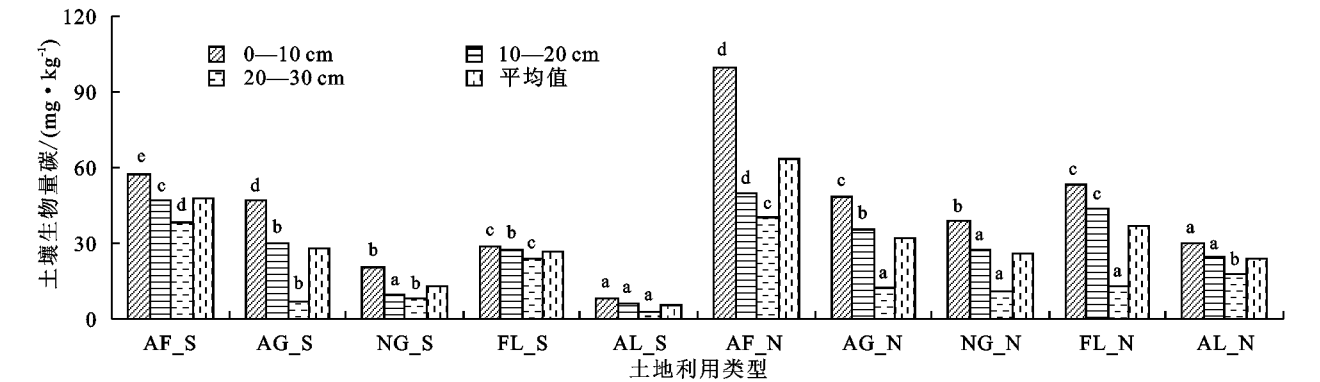


图 6 不同坡向土地利用类型土壤微生物量碳含量

2.3.2 土壤微生物量氮 由图 7 可知,阳坡 0—30 cm 土层,除 FL_S 外,其他 4 种土地利用类型土壤微生物量氮含量均随土层深度的增加而降低。不同土地利用类型下土壤微生物量氮也存在着较大差异,表现为 $AF_S(28.94\text{ mg/kg}) > FL_S > AG_S > NG_S > AL_S(6.06\text{ mg/kg})$ 。0—10 cm 土层, AF_S 与 AG_S 土壤微生物量氮含量最高,显著高于其他利用类型 ($P < 0.05$),且二者间差异不显著;10—20 cm 土层, FL_S 土壤微生物量氮含量最高,达到 37.11 mg/kg ,且在 3 层中含量无规律性;20—30 cm 土层, $FL_S > AF_S > AG_S > NG_S > AL_S$,不同利用类型间差异显著。

阴坡 5 种土地利用类型土壤微生物量氮含量均随土层深度的增加而降低。0—30 cm 土层,土壤微

生物量氮含量为 $AG_N(34.00\text{ mg/kg}) > AF_N > FL_N > NG_N > AL_N(21.30\text{ mg/kg})$ 。5 种土地利用类型各层之间存在着显著性差异,其中在 0—10 cm 土层, AF_N 与 AG_N 土壤微生物量氮含量显著高于其他 3 种土地利用类型;10—20 cm 土层, FL_N 土壤微生物量氮含量最高,显著高于其他土地利用类型,而 AL_N 土壤微生物量氮含量显著低于其他 4 种土地利用类型, AF_N 、 AG_N 与 NG_N 之间无显著性差异;20—30 cm 土层, AF_N 与 AG_N 土壤微生物量氮含量显著高于其他 3 种土地利用类型。 AG 、 NG 以及 AL 3 种土地利用类型土壤微生物量氮含量各土层均为阴坡高于阳坡。5 种利用类型下 0—30 cm 土层土壤微生物量氮平均值均呈现阳坡低于阴坡。

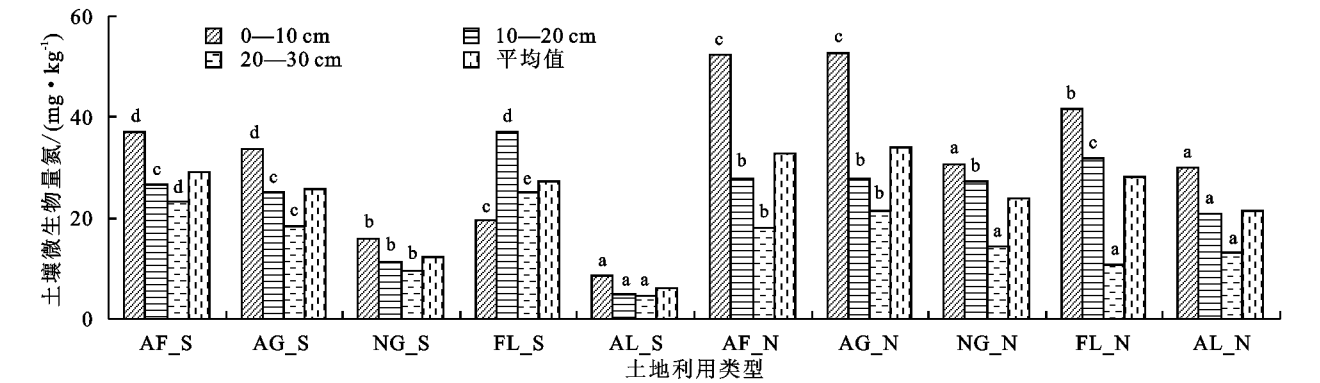


图 7 不同坡向土地利用类型土壤微生物量氮含量

3 讨论

3.1 不同坡向土地利用类型对土壤物理特性的影响

土地利用类型影响土壤表面的覆盖度,进而影响土壤的物理性质^[12]。土壤水分是土壤—植被—大气连续体的关键因子,是土壤系统中物质和能量循环的载体,对土壤特性、植被生长分布以及区域生态系统有着重要的影响^[13—14]。本研究中不同土地利用类型

下土壤含水量存在显著差异。农用地土壤含水量明显高于其他 4 种土地利用类型,这可能是因为农用地种植的作物生长季相对较短,对土壤水分的消耗较少,因而具有较高的土壤含水量^[15]。人工林地、人工草地、天然草地土壤含水量阳坡低于阴坡,这是因为阳坡的太阳辐射较大,表层土壤物理蒸发较强,相对较干。而农用地和退耕地相反,这可能是太阳光热和地表性质相互作用的结果^[16]。本研究中,5 种土地利

用类型土壤含水量总体表现为上层大于下层,这与地表植被类型的根系分布及其耗水特性密切相关。

土壤容重和总孔隙度是表征土壤物理性质的重要指标,其大小与土壤质地、有机质含量及土壤紧实度等密切相关。土地利用类型是影响土壤容重和总孔隙度的重要因素之一。研究区内阳坡人工林地土壤容重含量最低,土壤总孔隙度最高,这是因为人工林地种植 20 年的刺槐林,其根系和大量的凋落物使土壤中的有机质增加,使其保持了较好的物理性质,例如较小的土壤容重和较大的土壤总孔隙度^[17]。另外,不同土地利用类型土壤容重总体呈现阳坡高于阴坡,上层低于下层,土壤总孔隙度与之相反,这与阴坡水热条件较好、土地人为干扰和植物的根系分布有关。

研究区 0—30 cm 土层,5 种土地利用类型下粉粒含量最高,且粗粉粒变异系数(CV)最小,说明其在土壤颗粒组成中趋于稳定。不同土地利用类型下,0—30 cm 土层退耕地黏粒含量最高,这可能是因为退耕地受人为活动的影响较小,且微生物量碳和氮含量很低,很难使小粒径团聚为大粒径^[18];而人工草地砂粒含量最高,这可能与苜蓿根系对土壤团聚体的黏结作用以及土地管理方式有关^[19-20]。5 种土地利用类型土壤细黏粒含量和粗粉粒含量总体表现为表层低于亚表层、底层,这可能是因为细黏粒和粗粉粒粒径较小,在土壤剖面中容易随着降水入渗等向土壤下层移动^[21]。相同土地利用类型下,土壤砂粒含量总体表现为阳坡<阴坡,土壤黏粒则相反。这可能是因为土壤有机质与土壤砂粒含量呈极显著负相关^[22],本研究中,阳坡有机质含量大于阴坡,所以砂粒含量表现为阳坡小于阴坡。

3.2 不同坡向土地利用类型对土壤化学特性的影响

本研究中,0—30 cm 土层,5 种土地利用类型下农用地土壤 pH 最高,这是因为农作物的耕作使得土壤有机质和腐殖质增多,它们分解产生的各种有机酸分离去除 H^+ ,使土壤的碱性增强。而阳坡人工林地 pH 最低,这是因为人工林地会产生较多的枯枝落叶,在分解过程中向土壤释放有机酸,从而使土壤 pH 降低^[23-24]。随土层深度加深,人工林地和人工草地土壤 pH 总体升高,其他 3 种土地利用类型则呈现先增后减趋势,这可能与植物根系的深浅多寡及微生物的活动有关。另外,土壤 pH 总体表现为阴坡低于阳坡,可能是因为阴坡温度较阳坡低,土壤矿化速率减弱,从而导致土壤 pH 降低。

不同土地利用类型土壤有机质含量具有明显差异^[25-27],本研究中人工林地有机质含量最高,这是因为人工林地大量的凋落物沉积到土壤中,增加了土壤有机质的含量^[28]。退耕地土壤有机质含量表现为阳坡低于阴坡,其他 4 种土地利用类型则相反,这是因为退耕地地表裸露,阳坡光照条件好,蒸发量较大,土壤含水量较低,土温较高,土壤中的有机物质分解

速度加快^[29],从而导致有机质含量低于阴坡。而人工林地、人工草地和天然草地阳坡的凋落物归还量较大,进入土壤的腐殖质较多,有机质含量较阴坡高。农用地种植的玉米阳坡产量高于阴坡,玉米产出的植株残体归还量较大,导致有机质含量高于阴坡^[30]。5 种土地利用类型土壤有机质含量基本变现为表层高于亚表层、底层,这可能是因为土壤表层地表枯落物较为丰富,使得表层有机质含量较高,而亚表层、底层受地表枯落物的影响较小,导致亚表层、底层有机质含量低于表层。

本研究中,0—30 cm 土层,阳坡人工草地土壤全氮含量最高,这与人工草地种植的苜蓿根瘤菌有关^[31];农作物的收割导致氮素流失,因此,农用地土壤全氮含量最低。除人工草地以外,其他土地利用类型土壤全氮含量均为阴坡高于阳坡,这是因为阳坡土壤接受光照较强,植被蒸腾强烈,土壤水分蒸发较快,导致土壤水分大量流失,植被生长差,无法及时补充土壤氮素,不利于土壤氮的积累;同时,阳坡的强烈光照使地表具有较高温度,加快了土壤全氮的矿化速率,使得全氮在阳坡积累量较低^[32]。5 种土地利用类型土壤全氮含量表现为表层高于亚表层、底层,一方面可能与进入土壤的肥料、植物残体的数量和性质有关,另一方面可能与土壤水分管理、耕作方式等农艺措施有关。

3.3 不同坡向土地利用类型对土壤微生物特性的影响

土壤微生物是生态系统的重要组成部分,作为重要的调控土壤源和库的因子,其易受土地利用的影响,是评价土壤环境质量的重要参数^[33-35]。本研究中,0—30 cm 土层人工林地土壤 MBC 含量最高,说明在该研究区,人工林地更有利于土壤微生物量碳的积累,这可能与刺槐在生长过程中林地凋落物分解及土壤微生物的代谢有关^[36],而退耕地的土壤 MBC 和 MBN 含量最低,可能是因为耕地撂荒后,生态系统的开放性物质循环结构转变为封闭或半封闭物质循环结构,同时植被覆盖度降低,返还到生态系统中的枯枝落叶和营养元素等物质较少,微生物可利用碳源和氮源降低,从而导致土壤 MBC 和 MBN 含量最低。

本研究中,5 种土地利用类型土壤 MBC 和 MBN 含量均表现为上层>下层,这是由于表层土壤的枯枝落叶和细根生物量较深层土壤高,随着对碳氮源的吸收,导致微生物活性增强,促进植物残体及地表凋落物的分解及腐殖质化,加快有机物质的积累,使表层土壤的微生物量碳和氮含量最高^[37-39]。另外,阳坡土壤 MBC 和 MBN 含量均低于阴坡,这可能是因为阳坡光照强度大,土壤温度较高,蒸发量大,土壤含水量较低,进而影响土壤微生物的生长繁殖和营养物质的累积。

4 结论

(1)0—30 cm 土层,5 种土地利用类型下土壤含

水量变现为阳坡农用地最高,人工林地最低,阴坡农用地最高,退耕地最低,且阴坡>阳坡(退耕地和农用地相反);土壤容重表现为阳坡天然草地最高,人工林地最低,阴坡人工草地最高,天然草地最低,且阴坡<阳坡;土壤总孔隙度与土壤容重呈相反变化趋势;土壤颗粒组成中粉粒含量最高,阳坡粉粒在土壤颗粒中的比例达到63.05%,阴坡为62.93%。

(2)0—30 cm 土层,5种土地利用类型下pH表现为阳坡农用地最高,人工林地最低,阴坡农用地最高,天然草地最低,且阴坡<阳坡;土壤有机质含量表现为阳坡人工林地最高,退耕地最低,阴坡人工林地最高,人工草地最低,且阴坡<阳坡(退耕地相反),上层>下层;全氮含量表现为阳坡人工草地最高,农用地最低,阴坡天然草地最高,农用地最低,且阴坡>阳坡(人工草地相反),上层>下层。

(3)0—30 cm 土层,5种土地利用类型下土壤微生物量碳含量表现为阴、阳坡人工林地最高,退耕地最低,且阴坡>阳坡,上层>下层;土壤微生物量氮含量表现为阳坡人工林地最高,退耕地最低,阴坡人工草地最高,退耕地最低,且阴坡>阳坡,上层>下层。

参考文献:

- [1] Fleskens L, Duarte F, Eicher I. A conceptual framework for the assessment of multiple functions of agro-ecosystems: A case study of Trás-os-Montes olive groves [J]. *Journal of Rural Studies*, 2009, 25 (1): 141-155.
- [2] 秦红,李昌晓,任庆水.不同土地利用方式对三峡库区消落带土壤细菌和真菌多样性的影响[J]. *生态学报*, 2017,37(10):3494-3504.
- [3] 赵其国,孙波,张桃林.土壤质量与持续环境:I.土壤质量的定义及评价方法[J]. *土壤*,1997,29(3):113-120.
- [4] United States Department of Agriculture. Natural resources conservation service. American's private land: A geography of hope [M]. Washington D. C.: U. S. Government Office, 1997:16-17.
- [5] Foley J A, De Fries R, Asner G P, et al. Global consequences of land use [J]. *Science*, 2005, 309 (5734): 570-574.
- [6] 包睿,邹养军,马锋旺,等.种植年限及密度对渭北旱塬苹果园深层土壤干燥化的影响[J]. *农业工程学报*, 2016,32(15):143-149.
- [7] 甘卓亭,张蓓蓓,张掌权,等.渭北塬区不同龄苹果园土壤微生物空间分布特征[J]. *生态学报*,2015,35(21): 6965-6973.
- [8] 张露,王益权,石宗琳,等.干旱季节渭北果园土壤水分时空变化特征[J]. *干旱地区农业研究*,2012,30(1):83-89.
- [9] 张卫青,庞奖励,张彩云.陕西渭北旱塬典型苹果园土壤基本性质与微形态特征研究[J]. *干旱区地理*,2010,33 (4):564-571.
- [10] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000:180-192.

- [11] 王雪梅,柴仲平,毛东雷,等.不同土地利用方式下渭一库绿洲土壤质量评价[J]. *水土保持通报*,2015,35(4): 319-323.
- [12] Wei W, Chen L D, Fu B J, et al. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 335(3): 247-258.
- [13] 邹文秀,韩晓增,江恒,等.东北黑土区降水特征及其对土壤水分的影响[J]. *农业工程学报*,2011,27(9):196-202.
- [14] 张玉翠,孙宏勇,沈彦俊,等.氢氧稳定同位素技术在生态系统水分耗散中的应用研究进展[J]. *地理科学*, 2012,32(3):289-293.
- [15] 黄奕龙,陈利顶,傅伯杰,等.黄土丘陵小流域土壤水分空间格局及其影响因素[J]. *自然资源学报*,2005,20 (4):483-492.
- [16] 胡伟,邵明安,王全九.黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异性研究[J]. *水科学进展*,2006,17(1):74-81.
- [17] Albiach R, Canet R, Pomares F, et al. Organic matter components and aggregate stability after the application of different amendments to a horticultural soil [J]. *Bioresource Technology*, 2001, 76(2): 125-129.
- [18] 杨婷,景航,姚旭,等.黄土丘陵不同土地利用方式下土壤颗粒组成及其分形维数特征[J]. *水土保持研究*, 2016,23(3):2-5,24.
- [19] Philip H, Rebekka R, Peter Z, et al. Soil changes under different land-uses in the Cerrado of Mato Grosso, Brazil [J]. *Geoderma Regional*, 2015, 4: 31-43.
- [20] Deng Y S, Xia D, Cai C F, et al. Effects of land uses on soil physic-chemical properties and erodibility in collapsing-gully alluvial fan of Anxi County, China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(8): 1863-1873.
- [21] 邹文秀,韩晓增,陆欣春,等.不同土地利用方式对黑土剖面土壤物理性质的影响[J]. *水土保持学报*,2015,29 (5):187-193,199.
- [22] 王洪杰,李宪文,史学正,等.不同土地利用方式下土壤养分的分布及土壤颗粒组成关系[J]. *水土保持学报*, 2003,17(2):44-50.
- [23] 胡婵娟,傅伯杰,靳甜甜,等.黄土丘陵沟壑区植被恢复对土壤微生物生物量碳和氮的影响[J]. *应用生态学报*,2009,20(1):45-50.
- [24] 于博威,刘高焕,刘庆生,等.晋西黄土丘陵区不同退耕年限刺槐林土壤养分效应[J]. *水土保持学报*,2016,30 (4):188-193.
- [25] Li C L, Li Q, Zhao L, et al. Land-use effects on organic and inorganic carbon patterns in the topsoil around Qinghai Lake basin, Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Catena*, 2016, 147: 345-355.
- [26] Sidzabda D D, Houria D, Mathurin Z, et al. Biodiversity and carbon stocks in different land use types in the Sudanian Zone of Burkina Faso, West Africa [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2016, 216: 61-72.

轮耕秸秆还田促进冬小麦干物质积累提高水氮利用效率

关小康¹, 王静丽¹, 刘影¹, 杨明达¹, 王和洲², 王怀苹³, 王同朝¹

(1. 河南农业大学农学院, 河南粮食作物协同创新中心, 郑州 450046;

2. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002; 3. 浚县丰黎种业有限公司, 河南 鹤壁 456250)

摘要: 通过田间定位试验, 探究了不同耕作措施及秸秆还田对 2015—2017 年 2 个生长季冬小麦物质积累、氮素积累及水氮利用效率的影响。采用 2 因素裂区试验设计, 主区为秸秆还田(S)和秸秆不还田(NS); 副区分别为深耕(DT)、轮耕(RT)和免耕(NT)处理。结果表明: S 处理较 NS 处理显著增加冬小麦旗叶 SPAD 和光合速率, 提高成熟期植株生物量, 但产量增加不显著。RT 处理于 2015—2016 年和 2016—2017 年较 DT 处理分别显著增产 4.88% 和 9.05%, 2016—2017 年较 NT 处理显著增产 3.64%。秸秆还田和耕作方式交互作用显著影响冬小麦产量, S+RT 处理 2015—2016 年和 2016—2017 年较 NS+DT 处理分别显著提高 8.68% 和 16.98%。S 处理显著增加植株氮素积累量 and 水分利用效率; RT 处理显著提高冬小麦水分利用效率, 增加冬小麦氮素积累量、籽粒氮素积累量、氮素转运及其利用效率。2015—2016 年和 2016—2017 年 RT 处理水分利用效率较 NT 处理分别提高 8.45% 和 8.92%, 2015—2016 年较 DT 处理提高 5.24%; 2016—2017 年 RT 处理氮肥偏生产力较 NT 和 DT 处理分别显著提高 3.68% 和 9.16%; 氮素籽粒生产效率较 NT 和 DT 处理分别显著提高 10.60% 和 4.78%。S+RT 处理花后 SPAD 下降幅度最小, 花期和成熟期均具有较高的光合速率, 产量、水分利用效率和氮肥偏生产力与 NS+DT 和 S+DT 相比分别平均提高了 12.58%, 8.53%, 7.95% 和 4.11%, 19.79%, 11.44%。因此, 秸秆还田配合轮耕措施是黄淮海南部较为适宜的节水省肥型冬小麦耕作栽培措施。

关键词: 秸秆还田; 轮耕; 冬小麦; 水氮利用效率

中图分类号: S145.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0280-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2018.03.042

Rotational Tillage with Straw Returning Increased Dry Matter Accumulation and Utilization Efficiency of Water and Nitrogen in Winter Wheat

GUAN Xiaokang¹, WANG Jingli¹, LIU Ying¹, YANG Mingda¹,

WANG Hezhou², WANG Huaiping³, WANG Tongchao¹

(1. Collaborative Innovation Center of Henan Grain Crops, Agronomy College, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046; 2. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of

Agricultural Science, Xinxiang, Henan 453002; 3. Xunxian Fengli Seed Industry Co. Ltd., Hebi, Henan 456250)

Abstract: The field experiment has been conducted to investigate the effects of different tillage practices and straw treatments on dry matter accumulation, nitrogen accumulation, and water, nitrogen use efficiency of winter wheat in 2015—2017. The split-plot experiment design was adopted. The main plot was straw returning (S) and no straw returning (NS). The sub-plot was deep tillage (DT), rotation tillage (RT) and no tillage (NT). The results showed that, compared with NS treatment, S treatment significantly increased flag leaf SPAD, photosynthetic rate and aboveground biomass in mature stage of winter wheat, while the yield of winter wheat was not significantly increased. The yield of winter wheat was significantly influenced by tillage practices. Yield of RT was significantly higher than that of DT for 4.88% and 9.05% in 2015—2016 and 2016—2017 respectively, and it was significantly higher than that of NT for 3.64% in 2016—2017. Significant interaction existed between straw returning and tillage practices. Yield of S+RT was significantly higher than that of NS+DT for 8.68% and 16.98% in 2015—2016 and 2016—2017 respectively. Compared with NS treatment, S treatment significantly increased aboveground N accumulation and water use efficiency of

收稿日期: 2017-12-30

资助项目: 国家自然科学基金项目(31471452, 31601258); 国家重点研发计划项目(2017YFD0301106)

第一作者: 关小康(1984—), 男, 讲师, 主要从事作物抗旱节水栽培理论与技术研究。E-mail: guanxk06@126.com

通信作者: 王同朝(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事作物抗旱节水栽培理论与技术研究。E-mail: wtcwrn@126.com

winter wheat. RT treatment significantly increased water use efficiency, aboveground N accumulation, kernel N accumulation, nutritional organs N operation rate and N grain production efficiency. Water use efficiency of RT was significantly higher than that of NT for 8.45% and 8.92% in 2015—2016 and 2016—2017 respectively, and it was higher than that of DT for 5.24% in 2015—2016. The partial productivity of N fertilizer in RT was higher than in NT and DT for 3.68% and 9.16% respectively, and N grain production efficiency of RT was significantly higher than that of NT and DT for 10.60% and 4.78%. There was a small decline in SPAD after anthesis, higher photosynthesis rate in anthesis and mature stage of winter wheat existed in S+RT treatment, that yield, water use efficiency, N partial productivity were significantly higher than those of NS+DT and S+DT treatments for 12.58% and 8.53%, 7.95% and 4.11%, 19.79% and 11.44% respectively. Therefore, the treatment of straw returning with rotational tillage was suitable for Huang-Huai-Hai Plain as a water and N saving cultivation practice.

Keywords: straw returning; rotational tillage; winter wheat; water and nitrogen utilization efficiency

优良的土壤结构是实现作物高产稳产的基础^[1]。土壤耕作直接作用于土壤,通过改变土壤结构改善土壤水分条件,促进土壤养分的循环与转化,为作物创造良好的耕层环境,从而促进植株生长和氮素吸收运转^[2]。已有研究^[3]表明,以少、免耕结合秸秆还田措施的保护性耕作不仅能有效降低土壤养分流失,而且能够提高土壤养分供应能力,改善土壤生物学活性,提高养分利用效率进而增产。黄明等^[4]研究表明,免耕和秸秆覆盖结合能延缓小麦叶片的衰老,降低旗叶绿素降解,改善其光合特性,从而使干物质积累量增加,提高小麦产量。然而,长期采用单一耕作模式容易产生不利于作物生长的土壤条件,如长期免耕或深松秸秆覆盖后会出现养分及杂草种子在土壤表层富集现象^[5],导致作物早衰、倒伏问题加重,降低作物产量^[6]。长期深耕则易引起耕层土壤养分下移,甚至会造成硝态氮淋失^[7],并且连续深耕增加了动力消耗,提高成本,并导致农田碳排放加剧^[8]。针对连续单一耕作模式存在的问题,国内研究人员提出轮耕概念并建立了适用于不同区域的土壤轮耕技术体系^[9-10]。土壤轮耕继承并发扬了深耕、免耕等耕作方式的优点,可以有效避免长期单一耕作模式下的不利因素,并通过秸秆还田技术有效促进土壤培肥,对维持农田土壤质量健康具有重要作用。

针对轮耕技术体系前人进行的大量研究,蒋向等^[11]研究发现,旋耕2年后再深耕可以有效打破连续旋耕形成的犁底层,并且2年后深耕也未造成新犁底层。在长期免耕的农田上进行适度深耕能够打破机械压迫形成的紧实土壤,降低深层土壤容重,增加土壤孔隙度,改善土壤水气热条件,为作物根系生长创造疏松深厚的土壤环境^[12],从而实现作物增产^[13]。陈宁宁等^[14]的研究也表明,免耕/深松、深松/翻耕和翻耕/免耕的轮耕模式较连续翻耕有利于耕层土壤物理结构构建,免耕/深松模式更有利于耕层形成土壤

大团聚体,稳定的土壤结构利于土壤蓄水保墒和作物增产。此外,秸秆还田也可以改善土壤结构,增强土壤蓄水保墒能力,促进土壤肥力提升和养分循环,提高作物的产量^[15]。秸秆还田结合适宜的轮耕在改变土壤物理结构的基础上,改善土壤养分及水分状况,进而影响植株地上部生理特性、植株对水分和氮素的积累及转运,从而实现作物对水分、氮素的高效利用。然而,有关以深耕/免耕为主并结合秸秆还田措施的研究仍然有待深入研究。因此,本研究在长期定位试验的基础上,探究连年深耕、连年免耕及深耕/免耕模式并结合秸秆还田对冬小麦光合特性、氮素转运及水氮利用效率的影响。旨在优化耕作管理,提高冬小麦水氮素利用效率,为黄淮海南部地区选取适宜的耕作模式提供科学依据和技术支撑。

1 试验材料与设计

1.1 试验地概况

2012年10月在河南省商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站(34°34' N, 115°33' E)开始进行大田耕作模式定位试验。本研究在长期定位试验的基础上主要研究了2015年10月至2017年6月连续2年小麦季试验效应。商丘试验站海拔55.6 m,年均气温13.9℃,无霜期180~230 d,年蒸发量1 735 mm,年降水量708 mm,而小麦生育期内近30年的平均降水量为232.8 mm,仅占年降水量的32.9%。试验地土壤类型为潮土,成土母质为黄河冲积后的沉淀物,0—40 cm土层平均土壤容重为1.45 g/cm³,田间持水量为25.21%(质量含水量),地下水埋深2.9~6.8 m。2015年和2016年冬小麦播前试验地0—40 cm耕层土壤全氮含量分别为0.86, 0.95 g/kg,有机质分别为16.39, 15.22 g/kg,速效磷分别为18.52, 10.69 g/kg,速效钾分别为143.02, 131.78 g/kg。2015—2016年冬小麦生育期内降水量为188.8 mm, 2016—2017年冬小麦生育期内降水量为265.0

mm,降水量见图 1。

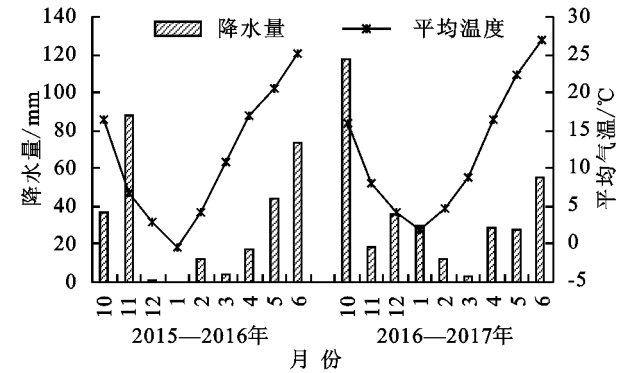


图 1 小麦生育期降水量与月平均气温

1.2 试验设计

试验采用双因素裂区试验设计,主区为 2 种秸秆还田处理,副区为 3 种耕作措施,共计 6 个处理组合,各处理耕作及秸秆处理如表 1 所示,3 次重复,共 18 个小区,每小区大小为 10 m×12 m。主区之间留有 2 m 观测通道,副区之间留出 1 m 的观测通道,试验

区周围 2 m 范围为保护区。

2015—2016 年和 2016—2017 年冬小麦供试品种均为‘矮抗 58’,冬小麦播种日期分别为 2015 年 10 月 15 日和 2016 年 10 月 19 日,播量均为 150 kg/hm²;分别于 2016 年 6 月 4 日和 2017 年 6 月 3 日收获。2015—2016 年冬小麦播前复合肥料(N—P₂O₅—K₂O=20:20:6)600 kg/hm²,拔节期(2016 年 2 月 24 日)追施复合肥料(N—P₂O₅—K₂O=30:10:0)600 kg/hm²;2016—2017 年冬小麦播前施掺混肥料(N—P₂O₅—K₂O=20:20:5)600 kg/hm²,拔节期(2017 年 2 月 19 日)追施复合肥料(N—P₂O₅—K₂O=30:10:0)600 kg/hm²。2015—2016 年冬小麦生育期内降雨量为 188.8 mm,因此在返青期—拔节期间(2016 年 3 月 2 日)采用低压喷灌灌水 45 mm,2016—2017 年冬小麦生育期内降雨量为 265.0 mm,试验期间没有灌溉。试验期间喷施农药防治病虫害,其他田间管理均与一般大田管理相同。

表 1 各试验处理描述

秸秆处理	耕作措施	代码	处理措施
秸秆不还田(NS)	深耕(DT)	NS+DT	玉米秸秆全部清除,2012 年 10 月开始每年冬小麦种前均进行深耕(耕深 30 cm 左右);试验期 2015 年 10 月、2016 年 10 月均深耕
	轮耕(RT)	NS+RT	玉米秸秆全部清除,2012 年 10 月开始为第 1 年深耕,每 3 年深耕 1 次;试验期 2015 年 10 月深耕后播种,2016 年 10 月免耕播种
	免耕(NT)	NS+NT	玉米秸秆全部清除,2012 年 10 月开始每年冬小麦播种前均无耕作措施;试验期 2015 年 10 月、2016 年 10 月均免耕播种
秸秆还田(S)	深耕(DT)	S+DT	玉米秸秆粉碎全量还田,还田量 11 700 kg/hm ² ;2012 年 10 月开始,耕作措施同于秸秆不还田深耕处理
	轮耕(RT)	S+RT	玉米秸秆粉碎全量还田,还田量 11 700 kg/hm ² ;2012 年 10 月开始,耕作措施同于秸秆不还田轮耕处理
	免耕(NT)	S+NT	玉米秸秆粉碎全量还田,还田量 11 700 kg/hm ² ;2012 年 10 月开始,耕作措施同于秸秆不还田免耕处理

注:耕作均在冬小麦种植前进行,前茬作物均为夏玉米,秸秆还田即经过秸秆粉碎机粉碎后全量均匀抛洒地表还田,秸秆不还田为人工清除植株地上部分;深耕处理采用铧式犁翻耕,作业深度为 30 cm,深耕作业后均耙地 2 遍。

1.3 测定指标

采用 SPAD—502(Konica Minolta,Japan)在冬小麦开花期和灌浆期测定旗叶的 SPAD 值;采用便携式光合测定系统(Li—6400,LI—COR, USA)在冬小麦开花期和灌浆期测定冬小麦旗叶的净光合速率(P_n);在返青期、拔节期、开花期、成熟期于每个小区选取长势均匀一致 30 cm 样段的冬小麦植株在 105 ℃条件下杀青 30 min,80 ℃下烘干至恒重,测定生物量;分别在开花期和成熟期选取植株分样、烘干、粉碎后采用全自动凯氏定氮仪(海能 K1100,中国)测定植株各器官全氮含量;在小麦播种后,采用时域反射仪(TRIME,German)测定土壤体积含水量,在播期—返青期的每个生育时期测定 1 次,在拔节期—收获期间隔 10 d 测定 1 次,测定深度分别为 0—20,20—40,40—

60,60—80,80—100,100—120,120—140 cm。每个处理收获 3 个 1 m² 样方,籽粒脱粒后晒干,测定产量;同时,每个小区选取 10 株进行室内考种。

1.4 指标计算

1.4.1 氮素运转效率

营养器官氮素运转量(kg/hm²)=开花期营养器官氮素积累量(kg/hm²)—成熟期营养器官氮素积累量(kg/hm²)

营养器官氮素运转率(%)=营养器官氮素运转量(kg/hm²)/开花期营养器官氮素积累量(kg/hm²)×100%

氮素收获指数(%)=籽粒氮素积累量(kg/hm²)/植株总氮素积累量(kg/hm²)×100%

氮肥偏生产力(kg/kg)=施氮区产量(kg/hm²)/施氮量(kg/hm²)

氮素籽粒生产效率(kg/kg)=籽粒产量(kg/hm²)/植株总氮素积累量(kg/hm²)

1.4.2 农田耗水量与水分利用效率 采用水分平衡法,按照公式计算农田耗水量(ET_a ,mm)。

$$ET_a = I + P + U - R - F \pm \Delta W$$

式中: I 为时段内灌水量(mm); P 为时段内有效降水量(mm); U 为地下水通过毛管作用上移补给作物的水量(mm),商丘试验点地下水埋深3 m以下,因此地下水补给量视为0; R 为地表径流量(mm),试验地地势平坦,可视地表径流为0; F 为深层渗漏量(mm),商丘试点深层渗漏为0; ΔW 为时段内土壤储水变化量,即土壤贮水消耗量。

土壤贮水消耗量(ΔW)计算公式为:

$$\Delta W = 10 \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i (\theta_{i1} - \theta_{i2})$$

式中: i 为土层编号; n 为总土层数; γ_i 为第 i 层土壤容重(g/cm³); H_i 为第 i 层土壤厚度(cm); θ_{i1} 和 θ_{i2} 分别为第 i 层土壤时段初和时段末土壤质量含水量(%)。

土壤质量含水量计算公式为:

$$\theta = W/\gamma$$

式中: θ 为质量含水量(%); W 为采用TRIME测定所得的体积含水量(%); γ 为土壤容重(g/cm³)。

水分利用效率(WUE,kg/(hm²·mm))=籽粒产量(kg/hm²)/耗水量(mm)

1.5 数据处理及统计分析

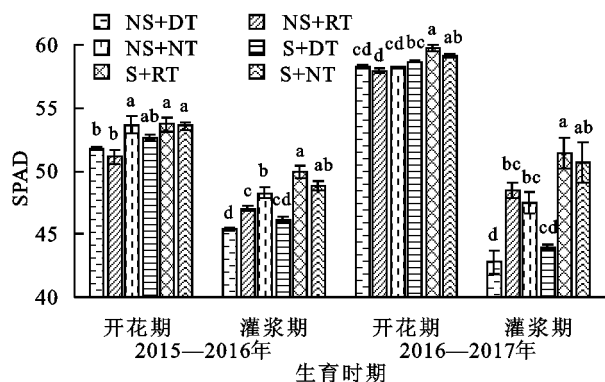
采用Excel 2013对试验数据进行处理分析与作图,并用SAS V8.0进行单因素方差分析和2因素裂区试验方差分析,采用LSD最小显著极差法进行显著性检验($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田和耕作措施对冬小麦生长发育的影响

2.1.1 冬小麦 SPAD 值 由图2可知,秸秆还田显著增加2015—2016年和2016—2017年冬小麦开花期、灌浆期SPAD。2015—2016年从开花期到灌浆期S处理下降幅度为7.62%~14.14%,NS处理下降幅度为8.70%~14.06%;2016—2017年从开花期到灌浆期S处理下降幅度为16.25%~33.48%,NS处理下降幅度为15.59%~36.15%,2年S+RT处理开花期到灌浆期SPAD下降幅度均最低,2015—2016年和2016—2017年分别为7.62%和16.25%。耕作处理显著影响两年灌浆期冬小麦旗叶的SPAD。2015—2016年秸秆还田下RT处理冬小麦开花期和灌浆期SPAD较DT处理分别高1.90%和3.68%,秸秆不还田下RT处理冬小麦灌浆期SPAD较DT处理高8.07%;S+RT处理灌浆期SPAD较NS+DT显著高9.98%。2016—2017年秸秆还田下RT

处理冬小麦开花期和灌浆期SPAD较DT处理分别高1.75%和16.82%,秸秆不还田下RT处理冬小麦灌浆期SPAD较DT处理高13.25%;S+RT处理灌浆期SPAD较NS+DT显著高20.09%。



注:同一组内不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图2 秸秆处理与耕作措施对冬小麦各生育期SPAD的影响

2.1.2 冬小麦光合速率 由图3可知,秸秆还田显著增加2015—2016年和2016—2017年冬小麦开花期和灌浆期旗叶光合速率。耕作处理对2年冬小麦开花期和灌浆期冬小麦旗叶的光合速率影响显著。2015—2016年开花期秸秆还田下RT处理和DT处理冬小麦光合速率较NT处理分别高18.72%和20.47%,秸秆不还田下RT处理和DT处理冬小麦光合速率较NT处理分别高20.77%和20.43%;灌浆期秸秆还田下RT处理冬小麦光合速率较DT处理高7.10%,秸秆不还田下RT处理冬小麦光合速率较DT处理高15.33%;S+RT处理灌浆期光合速率较NS+DT处理显著高22.53%。2016—2017年开花期秸秆还田下RT处理冬小麦光合速率较NT处理高4.10%,秸秆不还田下RT处理冬小麦光合速率较DT处理高5.75%;灌浆期秸秆还田下RT处理冬小麦光合速率较DT处理高31.34%,秸秆不还田下RT处理冬小麦光合速率较DT处理高33.63%;S+RT处理灌浆期光合速率较NS+DT处理显著高34.41%。

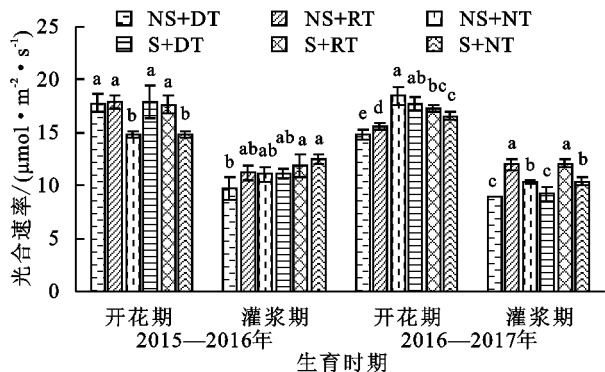


图3 秸秆处理与耕作措施对冬小麦各生育期光合速率的影响

2.2 秸秆还田和耕作措施冬小麦生物量和产量的影响

2.2.1 冬小麦生物量 由图4可知,2015—2016年

秸秆还田冬小麦返青期和拔节期的生物量与秸秆不还田差异不显著,但开花期和成熟期生物量较秸秆不还田显著增加 4.78%~18.89%。2016—2017 年秸秆还田冬小麦开花期、成熟期生物量较秸秆不还田显著增加 2.19%~5.70%。耕作处理显著影响两年冬小麦开花期和成熟期生物量。2015—2016 年拔节期秸秆还田下 RT 处理和 DT 处理冬小麦生物量较 NT 处理分别高 11.63%和 8.94%,秸秆不还田下 RT 处理和 DT 处理冬小麦生物量较 NT 处理分别高 2.81%和 13.69%;开花期秸秆还田下 RT 处理冬小麦生物量较 DT 处理低 12.46%,秸秆不还田下 RT

处理冬小麦生物量较 DT 处理高 6.60%;成熟期秸秆还田下 RT 处理冬小麦生物量较 NT 处理高 4.52%,秸秆不还田下 RT 处理冬小麦生物量较 DT 处理高 3.18%;成熟期 S+RT 处理冬小麦生物量显著高于 NS+DT 处理 9.52%。2016—2017 年度开花期秸秆还田下 RT 处理冬小麦生物量较 DT 处理高 13.61%,秸秆不还田下 RT 处理较 DT 处理高 7.93%;成熟期秸秆还田下 RT 处理冬小麦生物量较 DT 处理高 3.65%,秸秆不还田下 RT 处理冬小麦生物量较 DT 处理高 3.58%;成熟期 S+RT 处理较 NS+DT 处理显著高 6.81%。

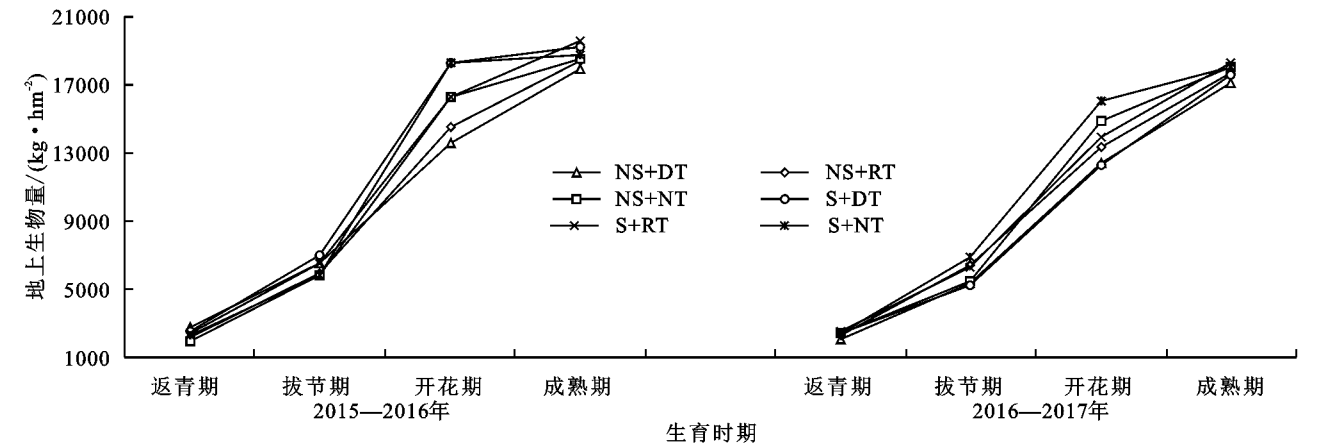


图 4 秸秆处理与耕作措施对冬小麦各生育期地上生物量的影响

2.2.2 冬小麦产量及构成要素 由表 2 可知,秸秆处理方式显著影响 2015—2016 年和 2016—2017 年冬小麦穗粒数、2015—2016 年冬小麦千粒重($P<0.05$),耕作处理和秸秆处理两者交互作用显著影响 2 年度冬小麦的穗粒数、千粒重和产量及其 2016—2017 年有效穗数($P<0.05$)。2 年度秸秆还田处理平均穗粒数、千粒重均高于秸秆不还田处理,2015—2016 年和 2016—2017 年秸秆还田冬小麦产量较秸秆不还田分别高 1.24%和 1.63%。2015—2016 年秸秆还田下 RT 处理冬小麦有效穗数和穗粒数较 NT 处理分别高 3.26%和 11.26%,千粒重和产量分

别较 DT 处理高 4.32%和 6.42%;秸秆不还田下 RT 处理冬小麦有效穗数、千粒重和产量分别较 DT 处理高 3.60%,4.73%,3.31%;S+RT 处理冬小麦穗粒数、千粒重和产量较 NS+DT 处理分别显著高 5.19%,8.78%,8.68%。2016—2017 年秸秆还田下 RT 处理冬小麦有效穗数、穗粒数、千粒重和产量较 NT 处理分别高 6.51%,8.01%,1.35%,13.88%;秸秆不还田下 RT 处理冬小麦有效穗数、穗粒数、千粒重和产量分别较 DT 处理高 9.87%,2.96%,9.76%,6.53%;S+RT 处理有效穗数、穗粒数、千粒重和产量显著高于 NS+DT 处理,分别高 8.90%,9.61%,9.76%,16.98%。

表 2 不同处理对冬小麦产量及其构成要素的影响

处理		2015—2016 年				2016—2017 年			
		有效穗数/ ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	穗粒数	千粒重/ g	产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	有效穗数/ ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	穗粒数	千粒重/ g	产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
NS	DT	555.0ab	38.5b	44.4c	8497.0d	515.6d	40.6c	41.0c	7546.0c
	RT	575.0a	35.9c	46.5b	8778.0bc	566.5a	41.8bc	45.0a	8038.7b
	NT	560.0ab	36.0c	48.2a	9012.0ab	539.9bc	42.4b	44.7a	8522.2a
	均值	563.4	36.8	46.3	8762.3	540.7	41.58	43.6	8035.6
S	DT	557.5ab	41.8a	46.3b	8677.4cd	535.8cd	42.0bc	43.4b	7920.2bc
	RT	566.3ab	40.5a	48.3a	9234.8a	561.5ab	44.5a	45.0a	8827.2a
	NT	548.4b	36.4c	48.2a	8700.2cd	527.2cd	41.2bc	44.4ab	7751.6bc
	均值	557.4	39.6	47.6	8870.8	541.5	42.58	44.3	8166.4
秸秆处理		1.29	35.45**	34.25**	2.64	0.03	8.97*	4.41	1.73
F 值 耕作处理		3.87	23.91**	61.88**	13.48**	23.26**	10.84**	26.97**	16.64**
交互作用		0.67	7.17*	7.72*	11.33**	4.19	11.78**	6.94*	21.98**

注:同一栏中不同字母表示差异显著($P<0.05$);*表示在 0.05 水平上差异显著;**表示在 0.01 水平上差异极显著。下同。

2.3 冬小麦氮素积累及其水氮利用效率

2.3.1 氮素在冬小麦茎、叶、穗中的分配 由表 3 可知,2016—2017 年秸秆还田方式和耕作措施均对冬小麦的氮素积累量具有显著影响。从冬小麦开花期到成熟期氮素在茎、叶和颖壳中的分配比例逐渐下降,其中开花期氮素分配比例表现为茎、叶>颖壳,成熟期氮素分配比例由大到小为籽粒>叶、茎>颖壳。

2016—2017 年秸秆还田处理与秸秆不还田处理相比,在开花期和成熟期小麦植株氮素总积累量分别显著提高 10.25%和 3.81%。开花期秸秆还田较秸秆不还田处理茎、叶、颖壳平均氮素积累量分别提高 8.94%,15.12%,3.71%,成熟期秸秆还田较秸秆不还田处理籽粒氮素积累量提高了 1.78%。开花期秸

秆还田下 RT 处理较 DT 处理显著增加了小麦氮素总积累量 18.36%,茎、叶、颖壳氮素积累量分别提高了 25.03%,19.70%,4.14%;秸秆不还田下 RT 处理小麦氮素总积累量较 DT 处理提高 1.79%,茎和叶氮素积累量分别提高 0.69%和 6.02%。成熟期秸秆还田下 RT 处理较 DT 处理小麦氮素总积累量显著增加了 8.87%,颖壳和籽粒的氮素积累量分别提高 24.27%和 8.76%;秸秆不还田下 RT 与 DT 处理小麦氮素总积累量差异不显著,但籽粒的氮素积累量 RT 处理较 DT 处理提高 7.81%。S+RT 处理冬小麦开花期和成熟期的氮素总积累量,成熟期籽粒氮素积累量均高于其他处理,分别比 NS+DT 处理增加 21.52%,11.74%,21.86%。

表 3 不同处理对开花期和成熟期各器官氮素积累量的影响

生育期	处理	植株氮素总积累量/ (kg·hm ⁻²)	叶氮素积累量/ (kg·hm ⁻²)	茎氮素积累量/ (kg·hm ⁻²)	颖壳氮素积累量/ (kg·hm ⁻²)	籽粒氮素积累量/ (kg·hm ⁻²)
开花期	NS+DT	188.75c	75.79d(40.15bc)	71.81d(38.05b)	41.15c(21.81ab)	
	NS+RT	192.12c	76.31d(39.73c)	76.13cd(39.63a)	39.69c(20.64bc)	
	NS+NT	213.66b	85.35c(39.99bc)	78.04bc(36.52c)	50.28a(23.49a)	
	S+DT	193.79c	76.59d(39.53c)	74.25cd(38.29b)	42.95bc(22.81ab)	
	S+RT	229.37a	95.76b(41.75ab)	88.88a(38.75ab)	44.73abc(19.50c)	
	S+NT	232.22a	100.99a(43.49a)	83.02b(35.74c)	48.31ab(20.77c)	
	秸秆处理	58.05**	158.86** (9.26*)	24.11** (2.15)	1.26(4.93)	
成熟期	F 值					
	耕作处理	47.97**	107.50** (4.19)	17.74** (30.95**)	10.89** (6.49*)	
	交互作用	12.25**	35.89** (5.03*)	5.12* (1.24)	1.96(2.91)	
	NS+DT	224.52b	32.14b(15.73a)	23.96c(11.73bc)	12.35a(6.04a)	135.78c(66.49b)
	NS+RT	223.32b	24.21c(12.05b)	21.96c(10.89c)	8.88b(4.41bcd)	146.39b(72.65a)
	NS+NT	252.28a	39.63a(17.26a)	28.65b(12.50b)	8.77b(3.82d)	152.4b(66.41b)
	S+DT	233.67b	25.09c(11.89b)	25.13c(11.91bc)	8.57b(4.06cd)	152.14b(72.13a)
F 值	S+RT	254.40a	28.95bc(12.80b)	24.61c(10.88c)	10.65a(4.71bc)	165.46a(73.16a)
	S+NT	253.42a	39.44a(17.03a)	31.96a(13.80a)	11.53a(4.98b)	148.33b(64.19b)
	秸秆处理	28.94**	0.50(4.65)	8.66* (2.29)	0.31(0.86)	33.71** (4.75)
	耕作处理	28.71**	46.96** (30.30**)	28.64** (19.17**)	0.82(4.12)	14.79** (52.00**)
	交互作用	12.09**	8.48* (7.52*)	0.61(1.9)	21.05** (24.95**)	16.61** (14.05**)

注:括号内数值为氮素分配比例及差异 F 值。

2.3.2 冬小麦氮素转运及其利用率 由表 4 可知,秸秆处理对 2016—2017 年冬小麦营养器官氮素转运量和氮素籽粒生产效率影响显著($P<0.05$)。耕作措施对营养器官氮素转运量、转运率、氮肥偏生产力、氮素生产指数及其氮素籽粒生产效率影响显著($P<0.05$)。秸秆处理和耕作措施两者交互作用对冬小麦营养器官氮素转运量、氮肥偏生产力、氮素生产指数影响和氮素籽粒生产效率具有显著影响($P<0.05$)。秸秆还田营养器官氮素转运量较秸秆不还田高 7.51%;秸秆还田下 RT 处理冬小麦氮素转运量、运转率、氮肥偏生产力、氮素生产指数和氮素籽粒生产效率较 NT 处理分别高 17.28%,11.33%,13.85%,8.62%,11.24%;秸秆不还田 RT 处理冬小麦氮素转运量、氮运转率、氮素生产指数和氮素籽粒生产效率较 DT 处理分别提高了 13.99%,9.90%,9.39%,8.36%,8.09%。S+RT 处理氮素转运量、运转率、氮肥偏生产力和氮素生产指数均高于其他处理,较

NS+DT 处理分别提高了 33.66%,6.47%,19.85%,6.41%,氮素籽粒生产效率较 S+NT 高 11.24%。

2.3.3 冬小麦耗水量及其水分利用率 由表 5 可知,2015—2016 年秸秆还田下 RT 处理土壤贮水消耗量较 NT 处理减少 48.22%,耗水量较 NT 处理减少 9.72%,水分利用效率较 DT 和 NT 处理分别提高了 5.23%和 16.49%。秸秆不还田下 RT 处理土壤贮水消耗量较 NT 处理减少 14.95%,耗水量较 NT 处理减少 3.71%。S+RT 处理冬小麦水分利用效率显著高于 NS+DT 和 NS+NT 处理,分别高 6.22%和 12.91%;2016—2017 年秸秆还田下 RT 处理土壤贮水消耗量 NT 处理减少 10.61%,耗水量较 NT 处理减少 10.26%,水分利用效率较 DT 和 NT 处理分别提高了 2.85%和 15.86%。秸秆不还田下 RT 处理土壤贮水消耗量 NT 处理减少 75.43%,耗水量较 NT 处理减少 8.70%,水分利用效率较 DT 处理高

7.83%。S+RT 处理冬小麦水分利用效率分别比 S +NT 和 NS+DT 显著提高了 15.86%和 10.00%。

表 4 不同处理对 2016—2017 年冬小麦植株氮素运转及氮素利用的影响

处理		营养器官氮素运转 量/(kg·hm ⁻²)	营养器官 氮素运转率/%	氮肥偏生产力/ (kg·kg ⁻¹)	氮素收获 指数/%	氮素籽粒生产效率/ (kg·kg ⁻¹)
NS	DT	123.56d	65.53b	24.56c	69.52b	32.15b
	RT	140.85b	72.02a	26.80b	75.33a	34.75a
	NT	142.51b	65.2b	28.40a	69.44b	32.31b
	均值	135.64	67.58	26.78	71.43	33.07
S	DT	130.02c	67.16b	26.40bc	74.84a	32.67b
	RT	165.16a	72.00a	29.42a	75.93a	32.46b
	NT	140.82b	60.67c	25.84bc	67.31b	29.18c
	均值	145.34	66.61	27.22	72.70	31.45
F 值	秸秆处理	60.59**	1.03	1.74	4.75	17.84**
	耕作处理	148.49**	30.50**	16.65**	52.00**	18.36**
	交互作用	37.98**	3.70	21.80**	14.05**	8.10*

表 5 不同处理对小麦耗水量及水分利用效率的影响

处理		2015—2016 年			2016—2017 年		
		土壤贮水	耗水量/	水分利用效率/	土壤贮水	耗水量/	水分利用效率/
		消耗量/mm	mm	(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	消耗量/mm	mm	(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
NS	DT	47.23b	281.00b	29.72b	38.13b	303.14b	24.90bc
	RT	77.10a	310.89a	28.23c	34.60b	299.61b	26.85a
	NT	88.63a	322.42a	27.96c	60.70a	325.67ab	26.16ab
	均值	70.99	304.77	28.64	49.79	309.47	25.97
S	DT	55.47b	289.26b	30.00b	29.10b	294.11b	26.63a
	RT	58.90b	292.67b	31.57a	57.20a	322.22a	27.39a
	NT	87.30a	321.11a	27.10c	63.07a	328.05a	23.64c
	均值	67.22	301.01	29.55	51.30	314.79	25.89
F 值	秸秆处理	1.19	1.19	14.39**	1.79	1.79	0.05
	耕作处理	37.49**	37.32**	42.24**	16.96**	16.89**	12.57**
	交互作用	4.99*	5.03*	26.93**	5.42*	5.41*	12.05**

3 讨论

3.1 耕作措施和秸秆还田对冬小麦光合特性、生物量及产量的影响

小麦生育后期的光合性能对干物质积累和转运具有重要作用,作物光合作用除了受其遗传因素的影响外,同时还会受外部环境条件的限制。已有研究^[16]表明,不同耕作措施能通过调节土壤环境来影响作物的旗叶绿素含量和光合特性,增加后期干物质积累,提高小麦的籽粒产量。侯贤清等^[16]于宁夏南部旱区以 免耕和深松相结合的轮耕模式与传统翻耕相比,免耕/深松/免耕和深松/免耕/深松模式均能显著提高小麦旗叶绿素含量,使小麦花后旗叶保持较高的光合能力,显著提高产量。张盼峰等^[17]于河南西部半干旱区的研究结果也表明,在常年旋耕后深耕,提高了小麦、玉米功能叶 SPAD 值,显著提高了净光合速率,使小麦—玉米周年产量提高了 6.7%~13.0%。本研究结果表明,耕作方式显著影响冬小麦的光合特性、生物量及产量,尤其是通过秸秆还田措施配合轮耕处理在冬小麦开花期和灌浆期均具有较高的 SPAD 和光合速率(图 1,图 2)。花后冬小麦叶片保持较高光合能力和较长的叶片功能期是提高冬小麦产量的重要的基础条件^[18]。本研究中秸秆还田配合轮耕处理花后 SPAD 和光合速率下降幅度最

低,显著提高了冬小麦的千粒重,增加了成熟期生物量和籽粒产量,两年平均产量分别比深耕、免耕处理提高了 6.86%和 2.36%(表 2)。

秸秆还田对作物产量的影响并不完全是正向增产效应^[19-20]。本研究表明与秸秆不还田处理相比,秸秆还田处理虽然增加成熟期生物量,但 2015—2016 年秸秆还田冬小麦产量与不还田处理相比差异不显著,2016—2017 年秸秆还田与不还田冬小麦产量与地上生物量差异均不显著,说明秸秆还田并未促进干物质向籽粒运转。张素瑜等^[21]研究指出,干旱条件下进行秸秆还田,秸秆腐解时会导致与作物争夺水分现象,加重作物的干旱程度,显著降低产量。战秀梅等^[19]的研究也表明,秸秆还田显著抑制了花后干物质从营养器官向籽粒转移的效率,从而导致产量并未显著增加。同时,本研究还发现虽然秸秆还田显著提高了冬小麦穗粒数和千粒重,但有效穗数降低影响了秸秆还田条件下冬小麦产量提升,其中 2015—2016 年秸秆还田处理冬小麦有效穗数低于不还田处理,致使秸秆还田下冬小麦产量较秸秆不还田虽然略有增加,但两者差异不显著。张姍等^[22]和陈金等^[23]研究也表明,秸秆还田会降低冬小麦的穗数。秸秆还田和轮耕处理 2 因素交互作用使得该处理冬小麦开花期和灌浆期均具有较高的 SPAD 和光合速率,且花后

SPAD 和光合速率的下降幅度最低,从而提高了冬小麦穗粒数和千粒重,增加了成熟期生物量和产量。

3.2 耕作措施和秸秆还田对冬小麦水氮利用效率的影响

作物吸收的氮素一方面用以实现营养器官生长发育,另一方面通过营养器官物质转运和花后氮素吸收利用来实现籽粒氮素供给。采用适当的耕作措施可以调节土壤团聚体大小、孔隙度、土壤水分状况等促进土壤微生物进行硝化作用,促进作物氮素吸收利用,提高作物水氮利用效率。刘世平等^[24]研究表明,轮耕(犁耕1季,旋耕3季)促进了土壤氮素矿化,增加了土壤供氮能力,连续旋耕、连续犁耕和轮耕(犁耕1季,旋耕3季)3种耕作措施下无论施肥或不施肥籽粒含氮率和累积吸氮量多以轮耕为最高。本研究发现轮耕处理显著提高了籽粒氮素积累量、营养器官氮素转运量、转运效率、植株籽粒氮素生产效率和氮肥偏生产力。张静等^[25]研究表明,秸秆还田能够有效缓解土壤氮流失,提高土壤微生物氮的固持和供给效果,增强土壤供氮水平。赵鹏等^[26]研究也认为,秸秆还田增强了氮素再利用能力,优化了氮素分配,增加籽粒含氮量,从而提高了氮转运效率和氮收获指数。本研究表明,秸秆还田显著增加了花期和成熟期植株氮素总积累量,并且显著增加了成熟期籽粒氮素积累量与分配比例,显著提高营养器官氮素向籽粒的运转量,从而提高了氮素收获指数。

提高作物水分利用效率的关键在于通过适当农艺措施增加产量,降低耗水量。虽然秸秆还田可以降低土面无效蒸发^[27],但是由于还田秸秆的培肥作用,促进小麦生长,提高小麦叶面积指数,增加小麦蒸腾量^[28],其耗水量也同时增加。赵亚丽等^[29]研究表明,秸秆还田虽然增加了冬小麦耗水量,但秸秆还田增产幅度更大,因此显著提高了水分利用效率。本研究中秸秆还田冬小麦耗水量并未降低(表5),但产量略高于秸秆不还田,因此提高了其水分利用效率,2015—2016年秸秆还田冬小麦水分利用效率较不还田处理显著提高了3.18%。从耕作措施来看,轮耕处理土壤贮水消耗量和耗水量均小于免耕处理,而大于深耕处理,这是由于免耕处理增加了花前冬小麦干物质积累,而深耕处理花前冬小麦干物质积累量显著低于轮耕处理,因此轮耕处理耗水量和土壤贮水量介于二者之间,说明轮耕处理能够增加水分入渗,增加蓄水能力^[30]。轮耕处理在耗水量低于免耕处理的条件下,显著提高了产量,因此其水分利用效率两年分别较免耕处理提高了8.92%和8.45%。柏炜霞^[31]的研究也表明,免耕/深松和深松/翻耕轮耕处理比传统连续翻耕水分利用效率提高9.6%和11.0%。秸秆还田配合适当的耕作措施能够有效提高耕层土壤蓄水量,促进了冬小麦获得较高的物质生产,2015—2016年和2016—2017年秸秆还田和轮耕

处理冬小麦的水分利用效率分别高于其他处理2.01%~18.86%和5.23%~16.49%。

4 结论

通过连续2年研究表明,秸秆还田显著增加冬小麦旗叶 SPAD 和光合速率,提高成熟期植株生物量,但并未显著增加产量;轮耕处理显著增加冬小麦产量。秸秆还田轮耕处理2年度冬小麦产量较秸秆不还田深耕处理高8.68%和16.98%。秸秆还田显著提高植株氮素积累量和水分利用效率,分别较秸秆不还田增加5.91%和6.34%。轮耕显著提高冬小麦水分利用效率,增加冬小麦氮素积累量、籽粒氮素积累量、氮素转运及其利用效率。秸秆还田结合轮耕延缓花后 SPAD 下降速度,提高花期和成熟期光合速率,增加冬小麦产量、水分利用效率和氮肥偏生产力。

参考文献:

- [1] Chen W, Liang X, Sheng X U, et al. Effects of conservation tillage on the content of carbon, nitrogen in fluvo-aquic soil [J]. Agricultural Science & Technology, 2016, 17(2): 379-384.
- [2] 侯贤清,李荣,贾志宽,等.不同农作区土壤轮耕模式与生态效应研究进展[J].生态学报,2016,36(5):1215-1223.
- [3] 曲超,刘俊梅,胡昌录,等.氮肥施用对旱地秸秆覆盖冬小麦旗叶生理特性的影响[J].麦类作物学报,2015,35(2):207-214.
- [4] 黄明,吴金芝,李友军,等.不同耕作方式对旱作冬小麦旗叶衰老和籽粒产量的影响[J].应用生态学报,2009,20(6):1355-1361.
- [5] Fabrizio K P, Garci A F O, Costa J L, et al. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina [J]. Soil & Tillage Research, 2009, 81(1): 57-69.
- [6] 孔凡磊,袁继超,张海林,等.耕作方式对华北两熟区冬小麦生长发育和产量的影响[J].作物学报,2013,39(9):1612-1618.
- [7] 胡立峰,胡春胜,安忠民,等.不同土壤耕作法对作物产量及土壤硝态氮淋失的影响[J].水土保持学报,2005,19(6):186-189.
- [8] 禄兴丽,廖允成.不同耕作措施对旱作夏玉米田土壤呼吸及根呼吸的影响[J].环境科学,2015,36(6):2266-2273.
- [9] 高旺盛.论保护性耕作技术的基本原理与发展趋势[J].中国农业科学,2007,40(12):2702-2708.
- [10] 王振忠,许学前.“久免需耕”:再谈轮耕的意义[J].江苏农业科学,1995(5):43-45.
- [11] 蒋向,贺德先,任洪志,等.轮耕对麦田土壤容重和小麦根系发育的影响[J].麦类作物学报,2012,32(4):711-715.
- [12] 谢迎新,靳海洋,孟庆阳,等.深耕改善砂姜黑土理化性状提高小麦产量[J].农业工程学报,2015,31(10):167-173.
- [13] 孔凡磊,陈阜,张海林,等.轮耕对土壤物理性状和冬小麦产量的影响[J].农业工程学报,2010,26(8):150-155.

- [14] 陈宁宁,李军,吕薇,等.不同轮耕方式对渭北旱塬麦玉轮作田土壤物理性状与产量的影响[J].中国生态农业学报,2015,23(9):1102-1111.
- [15] 赵鹏,陈阜.秸秆还田配施化学氮肥对冬小麦氮效率和产量的影响[J].作物学报,2008,34(6):1014-1018.
- [16] 侯贤清,贾志宽,韩清芳,等.轮耕对宁南旱区冬小麦花后旗叶光合性能及产量的影响[J].中国农业科学,2011,44(15):3108-3117.
- [17] 张盼峰,杨鹏,焦念元,等.轮耕与隔灌对麦玉两熟光合特性的影响[J].核农学报,2014,28(1):131-137.
- [18] Thomas H, Morgan W G, Thomas A M, et al. Expression of the stay-green character introgressed into *Lolium temulentum* Ceres from a senescence mutant of *Festuca pratensis* [J]. Theoretical & Applied Genetics, 1999, 99(1/2): 92-99.
- [19] 战秀梅,李秀龙,韩晓日,等.深耕及秸秆还田对春玉米产量、花后碳氮积累及根系特征的影响[J].沈阳农业大学学报,2012,43(4):461-466.
- [20] 朱利群,张大伟,卞新民.连续秸秆还田与耕作方式轮换对稻麦轮作田土壤理化性状变化及水稻产量构成的影响[J].土壤通报,2011,42(1):81-85.
- [21] 张素瑜,王和洲,杨明达,等.水分与玉米秸秆还田对小麦根系生长和水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2016,49(13):2484-2496.
- [22] 张娜,石祖梁,杨四军,等.施氮和秸秆还田对晚播小麦养分平衡和产量的影响[J].应用生态学报,2015,26(9):2714-2720.
- [23] 陈金,唐玉海,尹燕桦,等.秸秆还田条件下适量施氮对冬小麦氮素利用及产量的影响[J].作物学报,2015,41(1):160-167.
- [24] 刘世平,陆建飞,单玉华,等.稻田轮耕土壤氮素矿化及土壤供氮量的研究[J].扬州大学学报(农业与生命科学版),2003,24(2):36-39.
- [25] 张静,温晓霞,廖允成,等.不同玉米秸秆还田量对土壤肥力及冬小麦产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(3):612-619.
- [26] 赵鹏,陈阜.豫北秸秆还田配施氮肥对冬小麦氮利用及土壤硝态氮的短期效应[J].中国农业大学学报,2008,13(4):19-23.
- [27] 逢焕成.秸秆覆盖对土壤环境及冬小麦产量状况的影响[J].土壤通报,1999,30(4):174-175.
- [28] 王庆杰,王宪良,李洪文,等.华北一年两熟区玉米秸秆覆盖对冬小麦生长的影响[J].农业机械学报,2017,48(8):192-198.
- [29] 赵亚丽,薛志伟,郭海斌,等.耕作方式与秸秆还田对冬小麦一夏玉米耗水特性和水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2014,47(17):3359-3371.
- [30] 王玉玲,李军,柏炜霞.轮耕体系对黄土台塬麦玉轮作土壤生产性能的影响[J].农业工程学报,2015,31(1):107-116.
- [31] 柏炜霞.渭北旱塬小麦玉米轮作制保护性耕作与轮耕效应研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2014.

(上接第 288 页)

- [27] Li Z W, Liu C, Dong Y T, et al. Response of soil organic carbon and nitrogen stocks to soil erosion and land use types in the Loess hilly-gully region of China [J]. Soil & Tillage Research, 2017, 166: 1-9.
- [28] 吕金林,闫美杰,宋变兰,等.黄土丘陵区刺槐、辽东栎林地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征[J].生态学报,2017,37(10):3385-3393.
- [29] 南雅芳,郭胜利,张彦军,等.坡向和坡位对小流域梯田土壤有机碳、氮变化的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(3):595-601.
- [30] 王泽,颜安,张文太.区域绿洲农田土壤有机碳分布及其影响因子研究[J].农业资源与环境学报,2014,31(4):308-312.
- [31] 邵继承,杨恒山,张庆国,等.种植年限对紫花苜蓿人工草地土壤碳、氮含量及根际土壤固氮力的影响[J].土壤通报,2010,41(3):603-607.
- [32] 李龙,姚云峰,秦富仓,等.黄花甸子流域土壤全氮含量空间分布及其影响因素[J].应用生态学报,2015,26(5):1306-1312.
- [33] Sudeshna B, Debarati B, Swati C, et al. Comparative evaluation of three contrasting land use systems for soil carbon, microbial and biochemical indicators in North-Western Himalaya [J]. Ecological Engineering, 2017, 103: 21-30.
- [34] Van Leeuwen J P, Djukic I, Bloem J, et al. Effects of land use on soil microbial biomass, activity and community structure at different soil depths in the Danube floodplain [J]. European Journal of Soil Biology, 2017, 79: 14-20.
- [35] 付勇,庄丽,王仲科,等.新疆野生多伞阿魏生境土壤理化性质和土壤微生物[J].生态学报,2012,32(10):3279-3287.
- [36] 薛莲,刘国彬,戴全厚,等.不同植被恢复模式对黄土丘陵区侵蚀土壤微生物量的影响[J].自然资源学报,2007,22(1):20-27.
- [37] 吴然,康峰峰,韩海荣,等.环境因子对山西太岳山土壤微生物量的影响[J].土壤通报,2016,47(5):1126-1133.
- [38] 赵彤,闫浩,蒋跃利,等.黄土丘陵区植被类型对土壤微生物量碳氮磷的影响[J].生态学报,2013,33(18):5615-5622.
- [39] Shipra S, Mastro R E, Ram L C, et al. Rhizosphere soil microbial index of tree species in a coal mining ecosystem [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(9): 1824-1832.

氮肥后移对强筋小麦氮素积累转运及籽粒产量与品质的影响

代新俊, 夏清, 杨珍平, 高志强

(山西农业大学农学院, 山西 太谷 030801)

摘要: 为探索强筋小麦施用氮肥的合理基追比模式, 在山西中部麦区水地小麦田, 研究了氮肥基施、拔节期追施和孕穗期追施的不同比例(10:0:0, 7:3:0, 7:2:1, 6:4:0, 6:2:2, 5:5:0, 5:3:2)对强筋小麦 CA0547 氮素积累转运及籽粒产量与品质的影响。结果表明: (1) 适当追氮对强筋小麦 CA0547 氮素与干物质积累转运及产量品质有显著的调节效应。 (2) 追氮能显著提高小麦拔节期后的含氮量, 提高花前氮素转运量和花后氮素积累量, 促进氮素向籽粒中的累积, 同时增加花前干物质转运量和花后干物质积累量, 为产量提高提供了物质基础。 (3) 籽粒氮素中约有 68.38%~75.18% 是来自花前氮素转运, 籽粒产量中约有 55.12%~70.04% 是来自花后干物质积累。追氮通过显著增加穗数和穗粒数来提高产量, 并提高氮素吸收效率和氮素生产效率。 (4) 追氮可提高籽粒醇溶蛋白、谷蛋白、总蛋白质和湿面筋含量, 提高面筋指数和淀粉含量, 改善谷醇比和直/支比, 进而改善籽粒品质。相关分析亦表明, 提高干物质花后积累量与花前氮素转运量可以改善小麦品质。 (5) 拔节期和孕穗期 2 次施氮效果不如拔节期 1 次追施。综合分析得出, 在本试验条件下, 施氮量 150 kg/hm² 时, 基肥、拔节肥、孕穗肥比例为 6:4:0 能较好的协调产量品质之间的关系。

关键词: 氮肥后移; 氮素转运; 干物质积累; 产量; 品质

中图分类号: S512.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0289-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.03.043

Effects of Postponing Nitrogen Application on Accumulation and Transport of Nitrogen and Yield and Quality of Grain in Strong-gluten Wheat

DAI Xinjun, XIA Qing, YANG Zhenping, GAO Zhiqiang

(College of Agriculture, Shanxi Agriculture University, Taigu, Shanxi 030801)

Abstract: In order to explore the reasonable ratio of topdressing gluten wheat with nitrogen fertilizer, the effect of basal nitrogen application rate, dressing rate at jointing stage and booting stage (10:0:0, 7:3:0, 7:2:1, 6:4:0, 6:2:2, 5:5:0 and 5:3:2) on the N accumulate and transfer and grain yield and quality of CA0547 (strong gluten wheat) were studied in the irrigated wheat field in central of Shanxi Province. The results showed: (1) Appropriate dressing N had a significant regulatory effect on accumulation and translocation of N and dry matter, yield and quality of CA0547. (2) Dressing nitrogen could significantly increase nitrogen content after jointing stage, N transfer amount pre-anthesis and N accumulation amount post-anthesis, promote accumulation of N in grain, increase dry matter transport pre-anthesis and dry matter accumulation post-anthesis, which provided a material basis for the increase of yield. (3) About 68.38%~75.18% of N in the grains came from nitrogen translocation pre-anthesis, and 55.12%~70.04% of yield came from dry matter accumulation post-anthesis. Dressing nitrogen increased yield by increasing the number of ears and per spike, and increased N absorption and production efficiency. (4) Dressing nitrogen could improve the contents of gliadin, gluten, protein and wet-gluten, improve the gluten index and starch content, improve glutenin/gliadin ratio and straight/branch ratio, and improve grain quality. Correlation analysis also showed that increase dry matter accumulation post-anthesis and pre-anthesis nitrogen translocation amount of vegetative organs could improve quality. (5) The effect of N application at jointing and booting stage was inferior to N application at jointing stage. Comprehensive analysis showed that N amount

收稿日期: 2017-12-18

资助项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD23B04-2); 国家公益性行业(农业)科研专项(201503120); 山西省回国留学人员重点科研资助项目(2015-重点 4); 山西省科技创新团队项目(201605D131041)

第一作者: 代新俊(1993-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事旱作栽培与作物生理研究。E-mail: 18735423170@163.com

通信作者: 高志强(1964-), 男, 博士, 教授, 主要从事旱作栽培与作物生理研究。E-mail: gaozhiqiang1964@126.com

of 150 kg/hm², at nitrogen ratio of 6 : 4 : 0 (base fertilizer : jointing fertilizer : boosting fertilizer) could better coordinate the relationship between yield and quality.

Keywords: postponing nitrogen application; nitrogen transport; dry matter accumulation; yield; quality

小麦的集约化生产需要投入大量氮肥,随着农业生产的持续发展和人们对产量水平要求的不断提高,小麦的施氮量仍然在逐年增大^[1-2]。然而,运用传统施肥方式施入农田的氮肥有很大一部分流失到了生态环境中,仅有小部分氮肥被小麦吸收利用,传统施肥方式不仅使小麦的氮肥利用率较低,也造成了严重的氮素污染,制约着生态农业的发展^[3]。因此,通过改进施氮方式来提高小麦氮肥利用效率成为农业关注的焦点^[4-5]。已有研究^[6-7]表明,小麦籽粒的氮素大部分由植株开花前储存在营养器官中的氮素转化而来,小部分是植株开花后吸收的,增加小麦花前氮素积累量可以提高籽粒氮素。王晨阳等^[8]研究表明,高肥力麦田追氮过早不利于小麦群体控制,实施“氮肥后移”能够有效控制群体发展,施氮总量相同时,施氮时期不同也会影响籽粒对氮素的利用效率。氮素除了能够提高小麦产量,对小麦籽粒的品质也具有明显的调节作用^[9]。小麦籽粒品质包括营养品质和加工品质,营养品质主要指蛋白质含量,加工品质包括湿面筋含量和面筋指数等。氮素不仅与籽粒蛋白质含量有关,与各组分蛋白质含量和比例也有密切的关系^[10]。

目前,很多地区针对不同施氮量、施氮时期及施氮比例对小麦产量和品质的影响进行了许多单因子研究,在确定了当地适宜的小麦施氮总量后,氮素利用率仍较低,氮素损失仍然较为严重,减轻氮素污染依旧是农业面源污染急需解决的问题。因此,在施氮总量相同时,改变追氮次数和追氮比例对氮素损失严重的地区提高小麦氮素利用率和增产提质很有意义。本研究利用优质强筋小麦品种 CA0547,在总施氮量为 150 kg/hm² 的情况下,对追氮次数(包括拔节期 1 次追氮和拔节期与孕穗期 2 次追氮)、追氮比例与小麦植株氮素干物质积累转运及产量品质的关系进行探讨,以期对山西中部冬小麦优质高产高效栽培提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2016 年 9 月至 2017 年 6 月在山西省晋中市太谷县山西农业大学农学院实验农场进行。试验田土壤肥力中等,土质中壤土,其 0—40 cm 耕层土壤养分含量为:有机质 12.6~13.9 g/kg,全氮 1.80~1.98 g/kg,全磷 770~320 mg/kg,速效氮 53.6 mg/kg,速效磷 9.63 mg/kg,速效钾 135 mg/kg。

1.2 试验设计

供试小麦品种为 CA0547。按照常规,播前旋耕施 NPK 配合肥,氮肥为硫酸铵(硫酸铵 N≥20.5%),将氮

肥(硫酸铵 N≥20.5%)均匀撒入小区,同时每个小区施用纯磷肥(过磷酸钙,16% P₂O₅)105 kg/hm²、纯钾肥(氯化钾,52% K₂O)75 kg/hm²。氮肥施用包括基肥和追肥 2 种方式,追肥又分为拔节期 1 次追肥和拔节期与孕穗期 2 次追肥。磷钾肥全部底施。共设 7 个处理(表 1)。每个处理播种面积 30 m²,密度 225 万株/hm²,行距 20 cm,重复 3 次。共计 21 个小区。于小麦越冬期(2016 年 12 月 20 日)和拔节期(2017 年 4 月 13 日)灌溉,每次灌水量均为 50 mm,常规管理。

表 1 试验设计 单位:kg/hm²

施肥比例	基施	拔节期	孕穗期	总施氮量
10 : 0 : 0	150	0	0	150
7 : 3 : 0	105	45	0	150
7 : 2 : 1	105	30	15	150
6 : 4 : 0	90	60	0	150
6 : 2 : 2	90	30	30	150
5 : 5 : 0	75	75	0	150
5 : 3 : 2	75	45	30	150

注:施肥比例为氮肥基施、拔节期追施和孕穗期追施的比例。下同。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 植株干物质质量及含氮率的测定 于小麦越冬期(2016 年 12 月 18 日)、返青期(2017 年 3 月 20 日)、拔节期(2017 年 4 月 11 日)、孕穗期(2017 年 4 月 28 日)、开花期(2017 年 5 月 8 日)和成熟期(2017 年 6 月 19 日)分别取样 20 株,样品经 105 ℃杀青 0.5 h,80 ℃下烘至恒重,称干重。然后粉碎,采用 H₂SO₄—H₂O₂—靛酚蓝比色法测定含氮率。

氮素积累量(kg/hm²)=干物质质量(kg/hm²)×含氮率(%)

花前氮素转运量(kg/hm²)=开花期植株氮素积累量(kg/hm²)—成熟期营养器官氮素积累量(kg/hm²)

花后氮素积累量(kg/hm²)=成熟期植株氮素积累量(kg/hm²)—开花期植株氮素积累量(kg/hm²)

花前氮素转运率(%)=花前氮素转运量/开花期氮素积累量(kg/hm²)×100%

花前氮素转运对籽粒氮素贡献率(%)=花前氮素转运量/籽粒氮素积累量(kg/hm²)×100%

花后氮素积累对籽粒氮素贡献率(%)=花后氮素积累量/籽粒氮素积累量(kg/hm²)×100%

花前干物质转运量(kg/hm²)=开花期植株干物质积累量(kg/hm²)—成熟期营养器官干物质积累量(kg/hm²)

花后干物质积累量(kg/hm²)=成熟期植株干物质积累量(kg/hm²)—开花期植株干物质积累量(kg/hm²)

干物质转运率(%)=花前干物质转运量/开花期植株干物质积累量(kg/hm²)×100%

花前转运(花后积累)干物质对籽粒贡献率(%)=花前干物质转运量(花后干物质积累量,kg/hm²)/籽粒产量(kg/hm²)×100%

氮素吸收效率(NUPE,kg/kg)=植株氮素积累量(kg/hm²)/施氮量(kg/hm²)

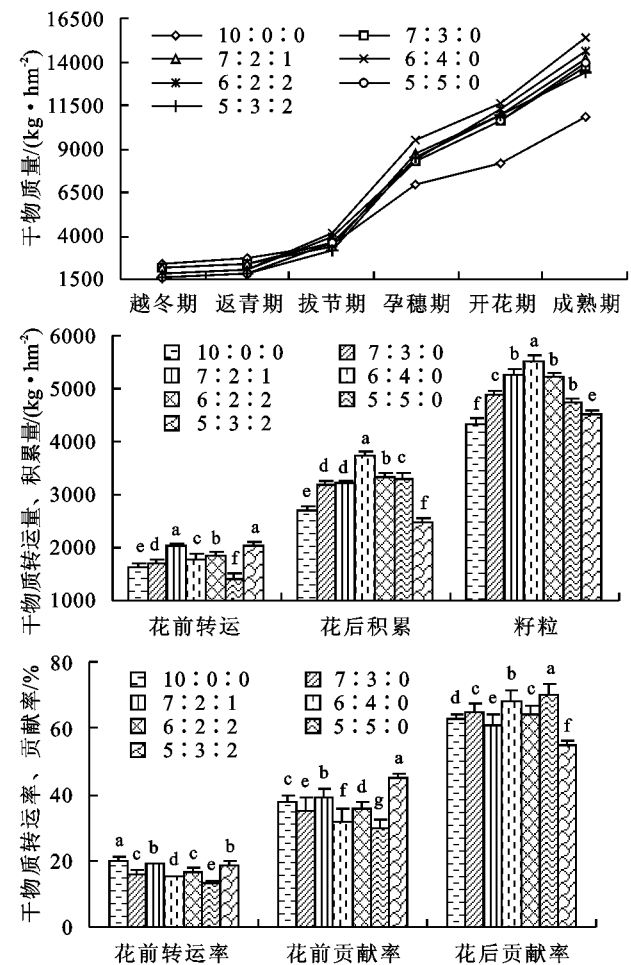
氮素生产效率(NPE,kg/kg)=籽粒产量(kg/hm²)/施氮量(kg/hm²)

1.3.2 产量的测定 于小麦成熟期,每个小区选取固定样段 3 个,每个样段 16 m²,调查总穗数(穗)、穗粒数(粒)、千粒重(g)、生物产量和经济产量。

1.3.3 品质指标的测定 蛋白质测定采用连续提取法进行;用双波长法测定淀粉及直、支链淀粉^[11];可溶性糖和蔗糖用蒽酮比色法测定;将籽粒晒干,采用瑞典 Perten 公司生产的 DA7200 型品质分析仪测定湿面筋含量和面筋指数。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 和 STATA 12.0 软件对数据进



注:同一指标下的不同字母表示不同处理差异显著(P<0.05)。

图 1 氮肥后移对小麦干物质和氮素积累转运的影响

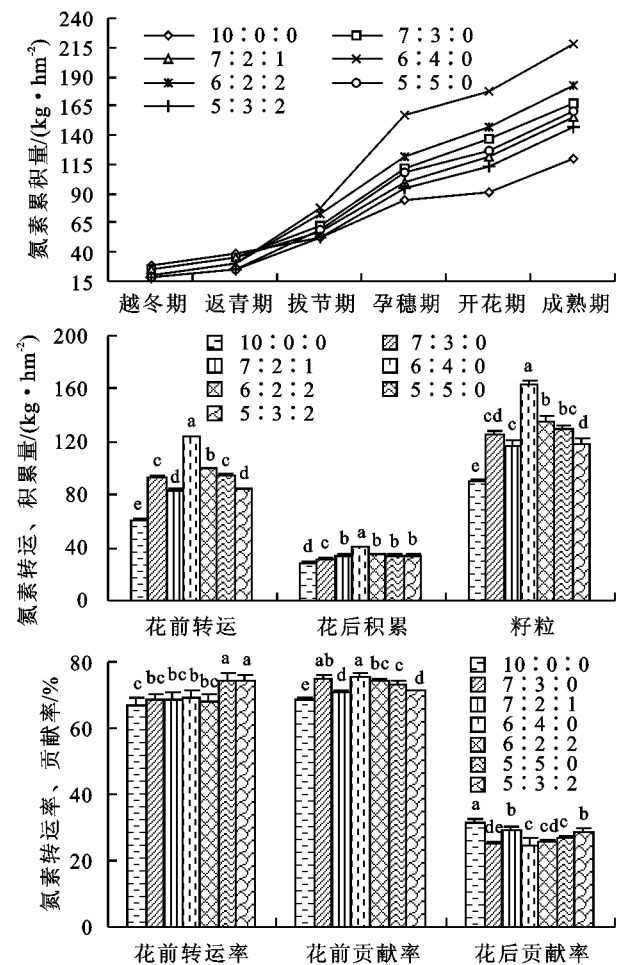
由图 1 可知,随生育进程推移,各处理冬小麦植株氮素积累量呈明显增加的趋势,增加幅度最大的时期是拔节到孕穗期,所有含追肥处理均提高了这种增加幅度,其中以 6:4:0 处理的增加幅度最大(72.58%)。拔节期前以单一基肥处理(10:0:0)的植株含氮量最高,

行处理和分析,并用 LSD 法进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 氮肥后移对冬小麦植株氮素积累特性的影响

由图 1 可知,植株干物质随着生育时期明显增加,拔节到孕穗期增加的幅度最大,在成熟期达到最大值。追肥处理在拔节后的各时期干物质质量显著增加,以 6:4:0 处理增幅最为明显。籽粒产量中约有 55.12%~70.04%是来自花后干物质积累。1 次追肥时,随着追肥用量的增加,花前干物质转运量、花后干物质积累量和籽粒产量呈现先增后减的趋势。2 次追肥与 1 次追肥相比,花前干物质转运量明显增加。1 次追肥时,随着基肥用量降低,花前干物质转运率和花前干物质贡献率显著减少,花后积累干物质贡献率显著增加。分 2 次追肥时,与 1 次追肥相比,花前干物质转运率、转花前转运干物质贡献率均明显增加,花后干物质积累量对籽粒的贡献率显著降低(P<0.05)。



随基肥用量降低,植株含氮量呈明显降低的趋势。拔节期后到成熟期,随追肥用量增加,植株含氮量呈先升高后降低的趋势,且 1 次追施拔节肥明显优于分 2 次追施。籽粒氮素中约有 68.38%~75.18%是来自花前氮素转运,随着追肥用量的增加,花前氮素转运

量和花后氮素积累量呈先升高后降低的趋势,6 : 4 : 0 处理的氮素转运量和积累量显著高于其他处理。1 次追肥花前氮素转运量明显优于分 2 次追肥($P<0.05$)。花前氮素转运率随追肥用量增加而增大,花前转运氮素贡献率随追肥用量先增后减,单一基肥处理(10 : 0 : 0)花后积累氮素对籽粒氮素贡献率最大,这是由于其籽粒氮素含量最少导致的。

可见,拔节期是干物质和氮素积累的关键期,与“一炮轰”的传统施肥方式相比,适当重施拔节肥提高了花前干物质转运量和花后干物质积累量,进而提高籽粒产量。同时,重施拔节肥能明显提高拔节期后植株氮素积累量,提高花前氮素转运量和花后氮素积累量,促进氮素向籽粒的转运。可见,按 6 : 4 : 0 方式施肥时,籽粒产量和籽粒氮素积累量同时达到最高。

表 2 氮肥后移对小麦产量构成因素及氮效率的影响

施肥处理	穗数/ ($\times 10^4$ 穗 $\cdot$ hm^{-2})	穗粒数/粒	千粒重/ g	氮素吸收效率/ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	氮素生产效率/ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
10 : 0 : 0	296.50 $\pm$ 5.71c	38.50 $\pm$ 1.63c	39.85 $\pm$ 0.11bc	0.80 $\pm$ 0.03e	28.95 $\pm$ 0.52f
7 : 3 : 0	317.75 $\pm$ 5.72b	42.00 $\pm$ 1.71b	38.47 $\pm$ 0.24bc	1.12 $\pm$ 0.01c	32.66 $\pm$ 0.36c
7 : 2 : 1	317.75 $\pm$ 5.41b	42.50 $\pm$ 2.52b	40.88 $\pm$ 0.09ab	1.03 $\pm$ 0.05cd	35.13 $\pm$ 0.49b
6 : 4 : 0	327.75 $\pm$ 7.06a	45.50 $\pm$ 1.42a	38.68 $\pm$ 0.14bc	1.46 $\pm$ 0.02a	36.70 $\pm$ 0.40a
6 : 2 : 2	325.75 $\pm$ 6.68a	41.50 $\pm$ 1.56b	40.39 $\pm$ 0.18ab	1.22 $\pm$ 0.01b	34.75 $\pm$ 0.33b
5 : 5 : 0	315.50 $\pm$ 5.83b	42.50 $\pm$ 1.62b	36.91 $\pm$ 0.10c	1.08 $\pm$ 0.01c	31.50 $\pm$ 0.45d
5 : 3 : 2	290.75 $\pm$ 6.46c	37.50 $\pm$ 1.38c	43.53 $\pm$ 0.14a	0.98 $\pm$ 0.02d	30.13 $\pm$ 0.50e
平均值	313.11	41.43	39.81	1.10	32.83
CV/%	4.51	6.48	5.31	17.27	7.98

注:同一列不同字母表示不同处理差异显著($P<0.05$)。下同。

2.3 氮肥后移对冬小麦营养品质的影响

2.3.1 氮肥后移对冬小麦蛋白质和面筋的影响 由表 3 可知,拔节期 1 次追肥时,6 : 4 : 0 处理的蛋白质含量和湿面筋含量达到强筋小麦标准(GB/T 17892—1999),随着追肥用量增加,醇溶蛋白、谷蛋白、总蛋白、蛋白质产量、湿面筋含量和面筋指数呈先升高后降低的趋势($P<0.05$),较单一基肥处理(10 : 0 : 0)分别增加了 18.4%,26.4%,14.6%,45.5%,13.8%,10.0%。2

表 3 氮肥后移对冬小麦蛋白质和面筋的影响

施肥处理	清蛋白/ %	球蛋白/ %	醇溶蛋白/ %	谷蛋白/ %	谷醇比	蛋白质含量/%	蛋白质产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	湿面筋含量/%	面筋指数
10 : 0 : 0	2.42 $\pm$ 0.06a	1.93 $\pm$ 0.05a	4.13 $\pm$ 0.04e	4.39 $\pm$ 0.04f	1.06 $\pm$ 0.01cd	12.86 $\pm$ 0.19e	558.50 $\pm$ 17.92f	33.23 $\pm$ 0.46e	75.47 $\pm$ 0.52e
7 : 3 : 0	2.39 $\pm$ 0.13a	1.91 $\pm$ 0.11a	4.62 $\pm$ 0.01c	5.08 $\pm$ 0.02c	1.10 $\pm$ 0.03b	13.99 $\pm$ 0.21d	685.49 $\pm$ 20.86c	35.56 $\pm$ 0.15c	79.12 $\pm$ 0.31c
7 : 2 : 1	2.40 $\pm$ 0.03a	1.92 $\pm$ 0.02a	4.34 $\pm$ 0.05d	4.60 $\pm$ 0.07e	1.06 $\pm$ 0.03d	13.25 $\pm$ 0.13c	698.46 $\pm$ 14.20c	32.17 $\pm$ 0.51f	76.73 $\pm$ 0.38d
6 : 4 : 0	2.40 $\pm$ 0.04a	1.92 $\pm$ 0.03a	4.89 $\pm$ 0.02a	5.55 $\pm$ 0.12a	1.13 $\pm$ 0.01a	14.75 $\pm$ 0.17a	812.29 $\pm$ 18.52a	37.82 $\pm$ 0.81a	83.03 $\pm$ 0.76a
6 : 2 : 2	2.42 $\pm$ 0.01a	1.94 $\pm$ 0.02a	4.78 $\pm$ 0.06b	5.22 $\pm$ 0.03b	1.09 $\pm$ 0.01bc	14.36 $\pm$ 0.11b	748.28 $\pm$ 16.87b	36.57 $\pm$ 0.21b	81.13 $\pm$ 0.42b
5 : 5 : 0	2.41 $\pm$ 0.01a	1.92 $\pm$ 0.01a	4.55 $\pm$ 0.01c	5.04 $\pm$ 0.03c	1.11 $\pm$ 0.02ab	13.91 $\pm$ 0.14c	657.29 $\pm$ 19.85d	35.25 $\pm$ 0.23cd	78.50 $\pm$ 0.46c
5 : 3 : 2	2.36 $\pm$ 0.15a	2.03 $\pm$ 0.06a	4.39 $\pm$ 0.01d	4.89 $\pm$ 0.01d	1.12 $\pm$ 0.01ab	13.67 $\pm$ 0.08c	617.97 $\pm$ 23.63e	34.26 $\pm$ 0.17d	77.02 $\pm$ 0.57d
平均值	2.40	1.94	4.53	4.97	1.10	13.83	682.61	34.98	78.71
CV/%	0.87	2.14	5.82	7.78	2.52	4.63	12.20	5.53	3.36

2.3.2 氮肥后移对冬小麦淀粉和可溶性糖的影响 由表 4 可知出,拔节期 1 次追肥时,小麦总淀粉、直链淀粉、支链淀粉、可溶性糖和蔗糖含量呈现呈先升高后降低的趋势($P<0.05$);6 : 4 : 0 处理总淀粉、直链淀粉、支

2.2 氮肥后移对冬小麦产量构成因素及氮效率的影响

由表 2 可知,拔节期 1 次追肥时,显著增加了穗数和穗粒数;随追肥用量增加,穗数和穗粒数呈先升高后降低的趋势,6 : 4 : 0 处理产量显著高于其他追肥处理($P<0.05$)。追肥处理的氮肥吸收效率和氮素生产效率明显高于以单一基肥处理(10 : 0 : 0)。分 2 次追肥时,与 1 次追肥相比,千粒重均有所增加,产量在 7 : 2 : 1 处理与 1 次追肥 7 : 3 : 0 处理虽有增加,却仍然明显低于 6 : 4 : 0 处理($P<0.05$)。经计算比较,氮肥吸收效率变异最大(17.27%),产量构成因素变异较大的是穗粒数(6.48%),其次是千粒重(5.31%)和穗数(4.51%)。可见,拔节期追肥能通过显著增加穗数和穗粒数来提高小麦产量,提高氮肥吸收效率,适当重施拔节肥(6 : 4 : 0)能明显提高籽粒产量和氮素吸收效率。

次追肥时,醇溶蛋白、谷蛋白、湿面筋含量和面筋指数都小于 1 次追肥。经计算比较,处理间变异较大的是蛋白质产量(12.20%),其次是谷蛋白(7.78%),清蛋白几乎不受追肥影响(0.87%),其余指标变异系数为 2.14%~5.82%。可见,氮肥后移能调节蛋白质组分和面筋质量,6 : 4 : 0 处理能够明显提高蛋白质含量、湿面筋含量和面筋指数,提高面筋数量和质量,改善籽粒品质。

链淀粉较单一基肥处理(10 : 0 : 0)分别提高了 9.8%,20.78%,5.5%;2 次追肥时,总淀粉、直链淀粉、支链淀粉含量均小于 1 次追肥,可溶性糖和蔗糖含量则出现了差异。经计算比较,蔗糖受追肥变异较大(15.72%),其次

是直链淀粉(7.48%)和可溶性糖(6.41%),支链淀粉变异最小(1.80%)。可见,氮素是影响淀粉品质的活跃因素,6:4:0 施肥方式能明显提高淀粉各组分含量,提高直/支比,进而影响面粉糊化特性,改善小麦籽粒品质。

表 4 氮肥后移冬小麦淀粉和可溶性糖的影响

施肥处理	总淀粉/%	直链淀粉/%	支链淀粉/%	直/支比	可溶性糖/%	蔗糖/%
10:0:0	61.40±0.17f	17.42±0.26d	43.98±0.12d	0.40±0.01d	59.49±0.49d	15.95±0.11d
7:3:0	65.24±0.16d	19.57±0.30b	45.67±0.11b	0.43±0.02b	63.47±0.37c	20.86±0.17b
7:2:1	63.14±0.07e	18.46±0.36c	44.68±0.22c	0.41±0.02c	66.57±0.46b	21.96±0.10b
6:4:0	67.47±0.12a	21.04±0.21a	46.43±0.32a	0.45±0.03a	65.53±0.64b	21.21±0.22b
6:2:2	66.07±0.06c	20.55±0.25a	45.52±0.28b	0.45±0.01a	68.84±0.35a	23.41±0.08a
5:5:0	66.59±0.14b	21.03±0.29a	45.57±0.15b	0.46±0.01a	62.59±0.33c	17.84±0.17c
5:3:2	62.99±0.12e	18.27±0.18c	44.72±0.20c	0.41±0.02cd	57.16±0.47e	15.60±0.16d
平均值	64.70	19.48	45.22	0.43	63.38	19.55
CV%	3.44	7.48	1.80	5.54	6.41	15.72

2.4 产量品质性状与氮素、干物质转运特性的关系

对冬小麦产量品质性状与氮素、干物质转运特性的相关分析表明(表 5),在产量及其构成因素上:干物质花前转运量与千粒重呈显著正相关($P<0.05$),干物质花后积累量与穗数、穗粒数呈极显著正相关($P<0.01$),进一步影响了产量,与产量显著正相关。花前氮素转运量与穗数、穗粒数、产量呈显著正相关,花后氮素积累量与产量显著正相关。在品质性状方面:干物质花后积累量与球蛋白呈负相关,与蛋白质产量呈极显著正相关。花前氮素转运量与醇溶蛋白、谷蛋白、蛋白质含量、蛋白质产量、面筋指数、总淀粉、支链淀粉均呈极显著正相关,相关系数分别是 0.959,0.968,0.963,0.922,0.950,0.924,0.966,与产量、湿面筋含量、直链淀粉和直/支比均呈显著正相关。花后氮素积累量与醇溶蛋白、谷蛋白、蛋白质含量、蛋白质产量、面筋指数、支链淀粉呈显著正相关。表明提高干物质花后积累量与花前氮素转运量更能提高小麦产量及改善小麦的营养品质。

表 5 产量品质性状与氮素、干物质转运特性的相关系数

指标	干物质		氮素	
	花前转运量	花后积累量	花前转运量	花后积累量
穗数	-0.110	0.960**	0.760*	0.614
穗粒数	-0.200	0.975**	0.798*	0.713
千粒重	0.848*	-0.655	-0.339	-0.094
产量	0.299	0.856*	0.785*	0.792*
醇溶蛋白	-0.066	0.792*	0.959**	0.784*
谷蛋白	-0.102	0.711	0.968**	0.811*
蛋白质含量	-0.069	0.721	0.963**	0.807*
蛋白质产量	0.174	0.880**	0.922**	0.867*
湿面筋含量	-0.280	0.642	0.861*	0.649
面筋指数	-0.058	0.846*	0.950**	0.827*
总淀粉	-0.332	0.842*	0.924**	0.748
直链淀粉	-0.390	0.825*	0.872*	0.708
支链淀粉	-0.213	0.826*	0.966**	0.779*
直/支比	-0.478	0.762*	0.791*	0.614
可溶性糖	0.114	0.809*	0.540	0.464
蔗糖	0.256	0.760*	0.574	0.466

注:*和**表示 5%和 1%显著水平。

3 讨论

3.1 氮肥运筹对冬小麦氮素和干物质积累转运的影响

已有研究^[12]表明,增施氮肥提高了小麦植株吸氮强度,吸氮量增加,是提高产量和蛋白质含量的基础。也有研究^[13]表明,在施氮量 180 kg/hm² 时籽粒氮素积累量达到最高,继续增加氮肥用量时籽粒氮素积累量降低。施氮量相同时,分次施用氮肥可以提高小麦植株氮素积累量和氮素吸收效率^[14]。赵士诚等^[15]研究表明,增加氮肥基追比会导致小麦旺长且影响后期生长,氮肥基追比 3:7 能提高氮肥利用效率。本研究表明,在施氮总量相同时,增加拔节期追氮比例,有利于增加植株开花期、成熟期含氮量、花前氮素转运量、花后氮素积累量,促进花前氮素向籽粒的转运,提高了氮肥的吸收与利用。随着追肥时期后移。花后积累氮素对籽粒氮素的贡献率增加,这可能是因为拔节期小麦生长的关键阶段,于拔节期之后追肥能与小麦的生育阶段相吻合,这与马冬云等^[16]研究结果基本一致。本研究结果还表明,分 2 次追肥的效果不及拔节期 1 次追肥。

干物质积累是产量形成的前提,养分吸收是干物质形成的基础,氮素供应与干物质质量直接相关^[17]。追氮时期不同,施氮对干物质积累的调控效应也不同^[18]。本研究表明,在施氮总量为 150 kg/hm² 下,与传统“一炮轰”施肥方式相比,重施拔节期能够增加花前干物质转运量和花后干物质积累量,为高产提供了物质基础,在增产稳产的同时,增强了小麦对氮素的吸收利用,减少了氮素对农田的污染。

3.2 氮肥运筹对冬小麦产量及氮效率的影响

氮肥运筹对产量调节效应的研究很多,但是结果不太一致。卜冬宁等^[19]研究表明,追氮比例对小麦产量及其构成因素影响不显著。姜丽娜等^[20]研究表明,在豫中麦田全生育期施纯氮 270 kg/hm²,在拔节期基追比例 3:7 追氮,可以提高穗粒数和千粒重。本研究表明,在山西晋中麦区,拔节期 1 次追氮通过显著增加穗数和穗粒数来提高小麦产量,提高了氮肥吸收效率,降低了氮肥在土壤中的蓄积。这与王月福

等^[21] 研究结果基本一致。同时,将拔节期追氮量分为拔节期和孕穗期两次追肥,其效果不如拔节期 1 次追肥,这是因为拔节期是小麦由营养生长向生殖生长转换的关键时期,需水需肥最多,无效分蘖逐渐消失,有效分蘖向着成穗的方向生长。将一部分氮素后移到孕穗期,无法满足小麦拔节期的氮素需求,造成无效分蘖增多,小麦群体通风透光差,光合作用降低,影响了干物质的生成和花前干物质向籽粒中的转运,与拔节期 1 次追肥相比产量有下降趋势。

3.3 氮肥运筹对冬小麦品质的影响

贺明荣等^[22] 研究表明,小麦拔节期 1 次全量追肥,对蛋白质品质改善效应更为显著。本研究表明,追氮对提高蛋白质含量和面筋含量具有明显的效果,拔节期 1 次追氮比拔节期和孕穗期 2 次追氮对醇溶蛋白、谷蛋白、蛋白质含量、湿面筋含量、面筋指数、淀粉的调节作用更为显著,从而改善了籽粒品质。相关分析还表明,提高干物质花后积累量与花前氮素转运量更能改善小麦品质。可见,通过改变追氮比例和追氮时期,能够调控冬小麦的蛋白质含量和湿面筋含量,对山西中部麦区改进施肥方式有一定的指导意义。

4 结论

拔节期追氮对强筋小麦 CA0547 的产量和品质有显著的调节作用,既可满足小麦拔节期需肥,促进植株氮素和干物质的累积,增加花前氮素和干物质向籽粒中的转运,进而通过显著增加穗数和穗粒数提高产量,提高氮素吸收效率和氮素生产效率,又可增加蛋白质含量和淀粉含量,改变谷醇比和直/支比,从而调节小麦品质。拔节期 1 次重追氮肥效果比拔节期和孕穗期分 2 次追氮肥的效果好。综合分析得出,在本试验条件下,施氮量为 150 kg/hm^2 时,基肥:拔节肥:孕穗肥比例为 6:4:0 能较好的协调产量品质之间的关系。

参考文献:

- [1] 霍中洋,葛鑫,张洪程,等. 施氮方式对不同专用小麦氮素吸收及氮肥利用率的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(5):449-454.
- [2] Pask A J D, Sylvester-Bradley R, Jamieson P D, et al. Quantifying how winter wheat crops accumulate and use nitrogen reserves during growth [J]. Field Crops Research, 2012, 126: 104-118.
- [3] Sylvester-Bradley R, Kindred D R. Analysing nitrogen responses of cereals to prioritize routes to the improvement of nitrogen use efficiency [J]. Journal of Experimental Botany, 2009, 60(7): 1939-1951.
- [4] 陈新平,周金池. 冬小麦、夏玉米不同品种(系)之间的氮营养效率的差异[J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(1):80-83.
- [5] Foulkes M J, Hawkesford M J, Barraclough P B, et al.

Identifying traits to improve the nitrogen economy of wheat: Recent advances and future prospects [J]. Field Crops Research, 2009, 114: 329-342.

- [6] 岳寿松,于振文. 不同生育时期施氮对冬小麦氮素分配及叶片代谢的影响[J]. 作物学报, 1998, 24(6):811-815.
- [7] 尚兴甲,王梅芳,付宝余. 运用同位素¹⁵N 研究冬小麦不同时期追施尿素的效果及氮肥的利用率[J]. 中国土壤与肥料, 2001(6):9-11.
- [8] 王晨阳,朱云集. 氮肥后移对超高产小麦产量及生理特性的影响[J]. 作物学报, 1998, 24(6):978-983.
- [9] 孙辉,姚大年,李宝云,等. 普通小麦谷蛋白大聚合体的含量与烘焙品质相关关系[J]. 中国粮油学报, 1998(6): 13-16.
- [10] 王月福,于振文. 施氮量对小麦籽粒蛋白质组分含量及加工品质的影响[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9):1071-1078.
- [11] 刘襄河,郑丽璇,郑丽勉,等. 双波长法测定常用淀粉原料中直链淀粉、支链淀粉及总淀粉含量[J]. 广东农业科学, 2013, 40(18):97-100.
- [12] 王月福,于振文,李尚霞,等. 土壤肥力和施氮量对小麦氮素吸收运转及籽粒产量和蛋白质含量的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11):1868-1872.
- [13] 赵满兴,周建斌,杨绒,等. 不同施氮量对旱地不同品种冬小麦氮素累积、运输和分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(2):143-149.
- [14] Demotes-Mainard S, Jeuffroy M H. Effects of nitrogen and radiation on dry matter and nitrogen accumulation in the spike of winter wheat [J]. Field Crops Research, 2004, 87: 221-233.
- [15] 赵士诚,魏美艳,仇少君,等. 氮肥管理对秸秆还田下土壤氮素供应和冬小麦生长的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(2):20-25.
- [16] 马冬云,郭天财,岳艳军,等. 不同时期追氮对冬小麦植株氮素积累及转运特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2):262-268.
- [17] 胡梦芸,张正斌,徐萍,等. 亏缺灌溉下小麦水分利用效率与光合产物积累运转的相关研究[J]. 作物学报, 2007, 33(11):1711-1719.
- [18] 吴光磊,郭立月,崔正勇,等. 氮肥运筹对晚播冬小麦氮素和干物质积累与转运的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(16):5128-5137.
- [19] 卜冬宁,李瑞奇,张晓,等. 氮肥基追比和追氮时期对超高产冬小麦生育及产量形成的影响[J]. 河北农业大学学报, 2012, 35(4):6-12.
- [20] 姜丽娜,郑冬云,王言景,等. 氮肥施用时期及基追比对豫中地区小麦叶片生理及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(1):149-153.
- [21] 王月福,于振文,李尚霞,等. 氮素营养水平对小麦开花后碳素同化、运转和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2002, 22(2):55-59.
- [22] 贺明荣,杨雯玉,王晓英,等. 不同氮肥运筹模式对冬小麦籽粒产量品质和氮肥利用率的影响[J]. 作物学报, 2005, 31(8):1047-1051.

滨海盐碱地不同施肥模式对棉花氮磷养分积累和产量的影响

何伟, 韩飞, 关瑞, 王桂伟, 王会, 姜燕宏, 宋付朋, 诸葛玉平

(土壤资源高效利用国家工程实验室, 山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018)

摘要: 为探索盐碱地棉花种植最佳施肥模式, 在山东省东营市中度滨海盐碱地设置了 6 种施肥模式(包括不施肥对照、习惯施肥、优化施肥、一次性施肥、减量化肥以及减量化肥+有机肥), 通过对棉花关键生育时期植株调查取样和测定分析, 探讨了不同施肥模式对棉花养分积累及产量的影响。结果表明: 一次性施肥处理(非控释氮和控释氮 1:2 配合)与同等养分水平的优化施肥处理相比, 棉花的干物质积累量和各器官氮磷含量均有显著提高, 前者花铃期氮磷养分总积累量分别比优化施肥处理高 23.39% 和 13.97%, 比不施肥处理高 50.98% 和 46.94%。减量化肥(N、P₂O₅、K₂O 减量 20%) + 有机肥处理棉花产量最高, 比不施肥处理高 31.14%, 比习惯施肥处理高 13.37%, 经济效益增长 1 925 元/hm²; 一次性施肥处理棉花产量与习惯施肥相近, 经济效益比习惯施肥增长了 279 元/hm²。籽棉产量与吐絮期土壤碱解氮、有效磷含量呈显著正相关。在中度滨海盐碱地采用减量化肥(N、P₂O₅、K₂O 减量 20%) + 有机肥和一次性施肥处理措施节本增产效果较好。

关键词: 滨海盐碱地; 一次性施肥; 有机肥; 棉花; 养分积累

中图分类号: S143 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)03-0295-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.03.044

Effects of Different Fertilization Models on Nitrogen, Phosphorus Accumulation and Yield of Cotton in Coastal Saline-alkali Soil

HE Wei, HAN Fei, GUAN Rui, WANG Guiwei, WANG Hui,

LOU Yanhong, SONG Fupeng, ZHUGE Yuping

(National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources,

College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018)

Abstract: In order to get optimal fertilization model for cotton planting in saline-alkali soil, a field experiment was conducted in a moderate saline-alkali soil in Dongying, Shandong Province. Six fertilization treatments (including control without fertilization, conventional fertilization, optimized fertilization, one-time fertilization, chemical fertilizer reduction, chemical fertilizer reduction + organic fertilizer) were set up. The nutrient accumulation and yield of cotton were studied by sampling and analyzing the plant during the key growth periods. Results showed that compared with optimized fertilization treatment, dry matter yield and the nutrient contents of nitrogen and phosphorus in the organs for the one-time fertilization treatment were significantly increased. The total accumulations of nitrogen and phosphorus in the boll stage of one-time fertilization treatment were 23.39% and 13.97% higher than those of optimized fertilization treatment, respectively. Furthermore, these two increasing rates were 50.98% and 46.94% respectively compared with control. The treatment of chemical fertilizer reduction (N, P₂O₅, K₂O reduced 20%) + organic fertilizer had the highest cotton yield, which was 31.14% higher than control, 13.37% higher than conventional fertilization treatment, and the economic benefit was 1 925 Yuan/hm² higher than conventional fertilization. Cotton yield of one-time fertilization treatment was similar to that of custom fertilization treatment, and economic benefit was 279 Yuan/hm² higher than conventional fertilization. Cotton yields were positively correlated with the contents of soil alkaline hydrolysable nitrogen and available phosphorus. In the moderate coastal saline soil,

收稿日期: 2018-01-03

资助项目: 山东省自主创新及成果转化专项(2014ZZCX07402); 国家科技支撑计划项目(2013BAD05B03); 中国博士后科学基金项目(2016M602169); 山东农业大学泉林黄腐酸肥料工程实验室开放基金项目; 山东农业大学青年科技创新基金项目

第一作者: 何伟(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤质量演变与退化治理研究。E-mail: hewei0534@163.com

通信作者: 王会(1989—), 女, 博士, 讲师, 主要从事土壤养分循环及其环境效应研究。E-mail: huiwang@sdau.edu.cn

诸葛玉平(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事土壤生态及环境调控研究。E-mail: zhugeyp@sdau.edu.cn

the chemical fertilizer reduction (N , P_2O_5 , K_2O reduced 20%) + organic fertilizer and one-time fertilization measures would give the better performance in cost-saving and yield-increasing.

Keywords: coastal saline soil; one-time fertilization; organic fertilizer; cotton; nutrient accumulation

黄河三角洲盐碱地是我国重要的后备土地资源,面积 $4.43 \times 10^5 \text{ hm}^2$,且每年约有 $(1.33 \sim 2.00) \times 10^3 \text{ hm}^2$ 新生的盐碱地形成^[1]。在土壤退化严重、土地资源紧缺的严峻形势下,对黄河三角洲盐碱地资源进行绿色开发和可持续利用具有重要的现实和长远意义。盐渍土中过多的可溶性盐分,对土壤的物理、化学及生物学性质均有负面影响^[2-4],导致土壤不能正常地向作物提供其生长发育所需的水、肥、气、热条件,从而抑制作物出苗和生长。在长期的生产实践中,研究者总结出一系列的盐碱地开发治理技术如挖沟开渠、秸秆还田、种植耐盐作物、深耕深翻、添加化学改良剂等^[5-7]。其中,发展耐盐植物不仅能提高土地生产力水平,并且有利于盐渍环境下农业生态的良性循环和环境改善,在获得作物产出的同时实现对盐碱土壤进行改造,被普遍认为是盐碱地开发利用最为经济有效的措施。

棉花是我国重要的经济作物之一,具有较强的抗盐碱能力,在黄河三角洲区域经济和社会发展中占有重要地位^[8]。水肥管理措施是影响棉花产量和品质的重要因素,合理的施肥可以显著提高棉花产量品质,提高经济效益和环境效益。迄今为止,研究者对盐碱地的养分特征及其对棉花生长的影响进行了较多研究,但关注点多集中于对土壤本身的改良和养分利用效率的提高^[9-12]。司转运等^[13]通过不同水氮供应方式发现氮肥在一次灌溉过程前期施用能得到最大程度的利用。董合忠等^[14]对山东东营滨海盐渍棉田的研究发现,土壤盐分的高低影响土壤有机质和氮磷钾等的含量,进而影响棉花的产量。而关于替代性施肥技术如一次性施肥(控释肥与非控释肥配合)、化肥减量配施有机肥对棉花生长状况和产量的影响鲜有报道。

本研究拟开展滨海盐碱地一次性施肥、化肥减量、化肥减量配施有机肥等替代性施肥技术对棉花生长和各部位氮磷养分含量的影响,探明滨海盐碱地上棉花在不同施肥模式下的养分积累规律,以探索特定自然条件下提高棉花种植经济效益的最佳施肥手段,为进一步提高盐碱地养分利用水平、促进盐碱地高效利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在山东省东营市利津县汀罗镇渤海农场(37.79°N , 118.63°E)进行,农场南抵黄河尾间北岸,西接利津县汀罗镇,东接济南军区黄河三角洲生

产基地,北至河口区六合乡。该地属暖温带大陆性季风气候,多年平均气温 12.8°C ,无霜期 206 d, $\geq 10^\circ \text{C}$ 的积温约 4300°C 。年降水量 555.9 mm,多集中在夏季,占全年降水量的 65%^[15]。

土壤为中度盐化潮土(中国土壤系统分类名称:淡色潮湿雏形土),试验开始前土壤有机质含量为 11.06 g/kg,碱解氮、有效磷和速效钾的含量分别为 42.33, 12.14, 209.40 mg/kg,土壤 pH(土水质量比为 1:2.5)为 7.70,土壤电导率为 556.6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (土水比 1:5),全盐含量为 3.66‰。

1.2 试验设计

棉花于 2016 年 5 月 7 日播种。试验共设 6 个施肥处理,包括 1 个不施肥对照、1 个习惯施肥、1 个优化施肥和 3 个替代性施肥技术(表 1),3 次重复,共计 18 个试验小区。试验为随机区组设计,每个试验小区面积为 20 m^2 ($4 \text{ m} \times 5 \text{ m}$)。每小区种植 6 行棉花,宽窄行种植,窄行 0.5 m,宽行 0.9 m。各小区之间分别留 0.3 m 的垄背,垄背之间留 0.9 m 的排水沟,排放雨水。距离道路保持 3 m,种植棉花作为保护行。

本次试验所使用的化肥为尿素(N 46%)、磷酸二铵(N 15%, P_2O_5 42%)、硫酸钾(K_2O 50%)。控施尿素为山东农业大学新型肥料研制中心生产的树脂包膜尿素(N 43%);有机肥为当地商品有机肥,以牛粪、糠醛渣为主要原料,有机质含量 45%,氮磷钾总养分 5% (N 1.3%, P_2O_5 1.9%, K_2O 1.8%)。一次性施肥处理(CNPK)全部肥料均做基肥施用,其他施肥处理(CF、NPK、RNPK、RNPKM)化肥基肥和追肥施用比例分别为 40% 和 60%,化肥减量+有机肥处理(RNPKM)的有机肥做基肥一次性施用。棉花播种前撒施基肥并翻耕,花铃期进行追肥。其他栽培、管理措施与大田相同。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 样品采集 分别于苗期(6 月 20 日)、蕾期(7 月 10 日)、花铃期(8 月 15 日)、吐絮期(9 月 17 日)采集土壤样品和植物样品。每小区按对角线取样法用土钻(内径 5 cm)在棉花窄行中间采集 3 个 0—20 cm 耕层土样,并将 3 个土样合并为一个混合样,样品带回实验室风干,测定土壤有效磷、土壤碱解氮等。在每个小区取 3 株棉花,根茎叶萼桃等各部位分离,测定生物量,植物样品在 105°C 下杀青 30 min 后,在 60°C 烘干称重,粉碎测定养分含量。收获期每小区棉花分别采摘并测产。

表 1 各处理施肥方式及施肥量								单位:kg/hm ²
处理	施肥方式	化肥施用量			有机肥施用量			控施氮施
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	用量
CK	对照,不施肥	0	0	0	0	0	0	0
CF	习惯施肥,基追比 2:3	228	90	90	0	0	0	0
NPK	优化施肥,基追比 2:3	180	105	90	0	0	0	0
CNPK	一次性施肥(非控释氮和控释氮 1:2 配合)	180	105	90	0	0	0	120
RNPK	化肥减量 20%,基追比 2:3	144	84	72	0	0	0	0
RNPKM	化肥减量 20%,基追比 2:3,施有机肥	144	84	72	39	57	54	0

1.3.2 测定方法 将不同时期的样品烘干粉碎后,按照器官分别测定其全氮、全磷含量。并通过加权统计方法得到整株棉花养分积累量。植物氮磷含量的测定均采用浓 H₂SO₄—H₂O₂ 消煮做预处理,全自动化学分析仪(Smartchem200)测定,测氮采用水杨酸盐—次氯酸盐比色法,测磷采用钒钼黄比色法^[16]。土壤碱解氮测定采用碱解扩散法;土壤有效磷为 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提,钼蓝比色法测定^[17]。

1.4 数据处理与分析

试验数据采用 SPSS 18.0 数据处理软件进行方差分析和相关性分析,多重比较采用 Duncan 新复极差法,相关分析采用 Pearson 法。

2 结果与分析

2.1 不同施肥模式对棉花干物质积累量的影响

就不同生育期而言,棉花生长最快的时期是蕾期到花铃期,表现为这一时期棉花植株干物质积累量的增幅最多,不同处理增幅在 66.32~92.47 g/株(表 2);花铃期到吐絮期棉花植株的干物质质量增幅相对较小,不同处理增幅在-3.09~44.69 g/株,尤其是对照处理(CK)干物质量甚至有所降低,这与这一阶段棉花由前期营养生长转入生殖生长有关。但是不同处理干物质量在各生育期均表现为差异不显著($P>0.05$),此与盐碱地空间异质性较大有关。

表 2 不同处理在不同时期整株棉花的干物质总量					单位:g/株
处理	苗期	蕾期	花铃期	吐絮期	
CK	1.71±0.33a	16.07±2.18a	92.95±5.43a	89.86±10.34a	
CF	3.19±1.20a	19.92±4.06a	90.70±18.36a	135.39±19.31a	
NPK	2.46±1.30a	13.01±6.73a	79.33±25.59a	114.17±47.34a	
CNPK	2.47±0.98a	16.65±6.13a	109.12±10.26a	113.77±27.37a	
RNPK	2.48±0.53a	13.00±3.25a	80.60±11.75a	120.05±21.06a	
RNPKM	2.49±0.14a	13.56±1.47a	96.80±10.39a	132.64±15.32a	

注:表中数据为平均值±标准误差;同列中不同字母代表差异达显著性水平($P<0.05$)。下同。

2.2 不同施肥模式对棉花氮素积累特征的影响

就棉花不同生长时期而言,苗期氮素积累量差异不明显($P>0.05$),蕾期 CK 和 RNPK 处理低于 CF 处理,差异显著($P<0.05$),花铃期氮素积累量最大,CK 处理明显低于其他各处理(表 3)。对比不同施肥处理,一次性施肥(非控释氮和控释氮 1:2 配合)处理(CNPK)吸收积累的氮最多,为 134.57 kg/hm²,其次为化肥减量+有机肥的 RNPKM 处理,为 117.69 kg/hm²,CK 最少为 89.13 kg/hm²,其

他处理氮积累量在 101.6~109.06 kg/hm²(表 3)。CNPK 和 RNPKM 处理氮积累量分别比 CK 高 50.98%和 32.04%,分别比 CF 处理高 33.16%和 16.46%。在化肥氮施用量相同的条件下,一次性施肥处理(非控释氮和控释氮 1:2 配合)(CNPK)比 NPK 处理的氮积累量高 23.39%;而施有机肥的 RNPKM 处理比 RNPK 处理的氮积累量高 9.96%。与花铃期相比,吐絮期氮积累量略有降低,这与此时期棉花各器官含氮量均有所降低有关。

表 3 不同施肥模式下棉花各时期氮积累量					单位:kg/hm ²
处理	苗期	蕾期	花铃期	吐絮期	
CK	1.68±0.39a	12.86±1.70b	89.13±3.24b	60.90±4.73c	
CF	2.12±0.19a	25.54±3.98a	101.06±12.76ab	97.49±3.60a	
NPK	1.97±0.21a	18.80±4.18ab	109.06±9.02ab	101.60±3.89a	
CNPK	2.32±0.10a	17.72±2.17ab	134.57±15.91a	112.04±8.47a	
RNPK	2.05±0.15a	16.87±1.71ab	107.03±15.30ab	74.03±3.38bc	
RNPKM	2.34±0.36a	11.30±1.24b	117.69±5.18ab	90.24±11.50ab	

2.3 不同施肥模式对棉花磷素积累特征的影响

苗期磷素积累量差异不明显($P>0.05$),蕾期 NPK

处理的磷素积累量高于其他各处理,差异显著($P<0.05$),在花铃期 CNPK 处理吸收的磷显著高于其他处

理($P<0.05$),达到 35.26 kg/hm^2 ,其次为优化施肥处理 NPK,为 30.94 kg/hm^2 ,CK 磷积累最少为 24.00 kg/hm^2 (表 4)。CF、NPK、CNPK、RNPK 和 RNPKM 处理的磷积累量分别比 CK 高 24.09% 、 28.93% 、 46.94% 、 17.62% 、 15.75% 。NPK 和 CNPK 处理的磷的积累量比习惯施肥处理(CF)分别高 3.89% 和 18.41% ,化肥减量处理 RNPK 和 RNPKM 的磷积累量比 CF 处理分别低

5.22% 和 6.73% ,表明磷肥施用量越多,棉花磷的积累量越多,但差别不显著,可见化肥减量同样能满足棉花对磷的需求。在化学磷肥施用量相同的条件下,CNPK 处理的磷积累量比 NPK 高 13.97% ,RNPK 和 RNPKM 处理的磷积累量相差不大,说明磷肥作基肥一次性施用即可满足棉花整个生长期对磷的需求,而施用有机肥对棉花磷素积累未表现出明显促进作用。

表 4 不同施肥模式下棉花各时期磷积累量 单位: kg/hm^2

处理	苗期	蕾期	花铃期	吐絮期
CK	$0.55\pm0.12\text{a}$	$3.63\pm0.34\text{b}$	$24.00\pm2.68\text{b}$	$23.68\pm2.16\text{b}$
CF	$0.67\pm0.09\text{a}$	$5.69\pm0.82\text{b}$	$29.78\pm1.27\text{b}$	$28.69\pm1.30\text{ab}$
NPK	$0.60\pm0.09\text{a}$	$8.63\pm1.58\text{a}$	$30.94\pm3.05\text{b}$	$31.02\pm2.90\text{ab}$
CNPK	$0.67\pm0.06\text{a}$	$6.39\pm0.88\text{ab}$	$35.26\pm3.58\text{a}$	$34.16\pm2.66\text{a}$
RNPK	$0.50\pm0.10\text{a}$	$5.00\pm0.50\text{b}$	$28.23\pm2.19\text{b}$	$24.14\pm1.72\text{b}$
RNPKM	$0.56\pm0.14\text{a}$	$4.17\pm0.63\text{b}$	$27.78\pm1.33\text{b}$	$30.54\pm3.47\text{ab}$

2.4 不同施肥模式对棉花产量及其经济效益的影响

不同施肥处理相比于不施肥对棉花均有显著提高产量的效果,其中以 RNPKM 处理产量最高,每个小区达到 6.19 kg ,相比于 CF 处理提高了 13.37% 。不同施肥模式中,RNPK 产量最低,每个小区为 5.34 kg ,相比于 CK 增产了 14.59% (图 1),NPK 和 CNPK 分别比 CF 增产了 3.11% 和 2.20% 。

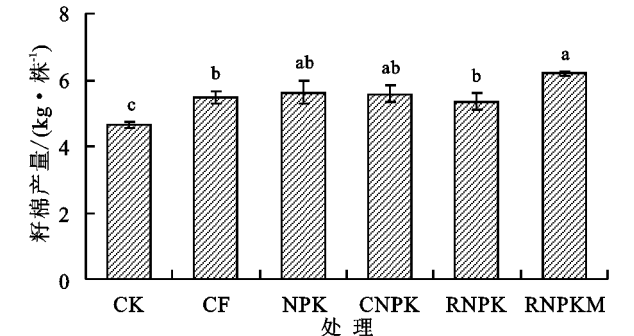


图 1 不同施肥模式下的棉花产量

根据 2016—2017 年棉花收购价格平均值,在其他生产成本相同情况下,仅考虑各种肥料成本,计算各个施肥模式产值与利润。由表 5 可知,从各种肥料增加产值和利润角度考虑,减量化肥+有机肥处理的利润最大,为 $18\ 298\text{ 元/hm}^2$,比 CK 利润增加 $2\ 920\text{ 元/hm}^2$,比 CF 利润增加 $1\ 925\text{ 元/hm}^2$,其次为优化施肥处理,利润为 $17\ 042\text{ 元/hm}^2$,比 CK 利润增加 $1\ 664\text{ 元/hm}^2$,比 CF 利润增加 669 元/hm^2 。

表 5 各种施肥方式下种植棉花的经济效益

处理	籽棉产量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	籽棉价格/ ($\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$)	产值/ ($\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$)	肥料成本/ ($\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$)	利润/ ($\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$)
CK	2330	6.6	15378	0	15378
CF	2730	6.6	18018	1645	16373
NPK	2815	6.6	18579	1537	17042
CNPK	2790	6.6	18414	1762	16652
RNPK	2670	6.6	17622	1229	16393
RNPKM	3095	6.6	20427	2129	18298

2.5 不同施肥模式对土壤有效养分的影响

吐絮期 CK 处理土壤碱解氮含量低于其他各处理,仅与 RNPKM 处理达到差异显著性($P<0.05$),除 RNPKM 处理,其他各处理间无明显差异($P>0.05$),RNPKM 处理土壤碱解氮含量比 CK 处理高 41.39% ,比 CF 处理高 10.51% (图 2)。吐絮期 CK 处理有效磷含量最低,与除 CF 处理以外的其他处理差异均达到显著性水平($P<0.05$),RNPKM 处理土壤有效磷含量比 CK 处理高 64.32% ,比 CF 处理高 39.21% (图 3)。

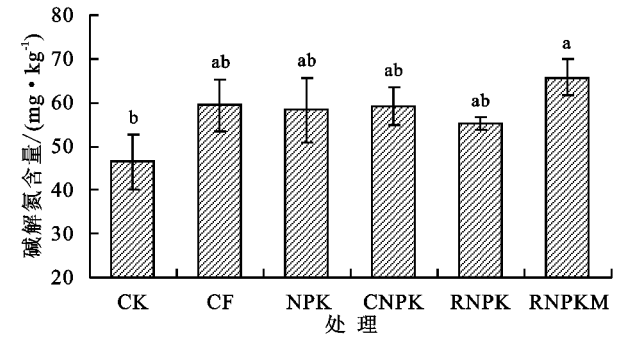


图 2 棉花施肥后吐絮期土壤碱解氮含量

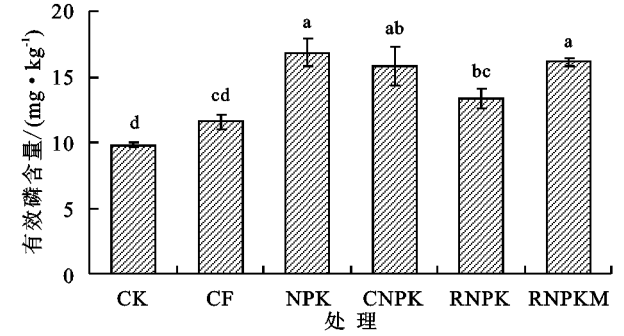


图 3 棉花施肥后吐絮期土壤有效磷含量

3 讨论

作物的生物学潜力是由其农艺性状所决定的,并能对作物的产量性状产生一定的影响^[18]。有研究^[19-20]指出作物的干物质量、作物养分积累量、土壤

养分含量等都与作物的产量存在一定的关系,但这种关系可能因作物种类、土壤性质、气候特点等而异。本研究对吐絮期干物质量、氮积累量、磷积累量、土壤碱解氮含量、有效磷含量及棉花产量数据进行了相关分析(表 6),结果发现籽棉产量与植株干物质量的相关系数为 0.783,相关性未达到显著性水平($P=0.066$),李成亮等^[21]研究了不同控释肥用量对棉花生长特性和土壤肥力的影响也有类似结果;籽棉产量与氮积累量和磷积累量的相关系数分别为 0.643 ($P=0.168$)和 0.682($P=0.135$),也未表现出明显的相关关系,这与罗佳等^[22]和陈宝燕等^[23]对不同有机肥或化肥施用条件下棉花田间试验的研究结果相似。棉花干物质量、养分积累量与产量之间不存在显著的相关关系,这与对小麦等其他作物的研究结果不一致^[24],可能与相对其他作物,棉花收获指数较低有关;同时也说明棉花的养分需求与养分供应不对称,棉花的营养生长过于旺盛,转入生殖生长时供肥量不足,高的养分积累量未能转化成高的产量^[25]。籽棉产量与土壤碱解氮含量的相关系数为 0.981,表现出极显著的正相关关系($P=0.001$),籽棉产量与土壤有效磷含量的相关系数为 0.815,也表现出显著的正相关关系($P=0.048$),徐文修等^[26]通过对作物茬口对连作棉田土壤环境及棉花产量的影响也得出类似结果。由此可知,吐絮期土壤有效养分的高低直接关系着棉花的产量。

表 6 积累量及土壤化学性质与产量间的相关关系

指标	干物质量	氮积累量	磷积累量	碱解氮	有效磷	籽棉产量
干物质量	1					
氮积累量	0.505	1				
磷积累量	0.376	0.946**	1			
碱解氮	0.862*	0.705	0.707	1		
有效磷	0.378	0.702	0.762	0.736	1	
籽棉产量	0.783	0.643	0.682	0.981**	0.815*	1

注:干物质量、氮磷积累量、土壤有效养分含量的数据均采用吐絮期数据; ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关,* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

有机肥既能改善土壤物理性质又能提高土壤的保肥供肥能力,是维持土壤生物肥力、保证耕地可持续利用的有效替代性肥料^[27-28]。前期研究^[22]表明,增施有机肥既能增加棉花养分积累量又能提高棉花产量。本试验的结果也显示施有机肥处理(RNPKM)与相同化肥施用量的未施有机肥处理(RNPK)相比既可增加棉花氮、磷积累量,也使得棉花产量提高了 15.92%,这可能与施有机肥后棉花成苗率、棉铃数增加有关^[29-30],同时施用有机肥后土壤养分有效性有明显提高,对滨海盐碱地有较大的改土作用。将有机肥作为

化肥的替代性肥料,陶磊等^[31]在北疆棉区的研究发现,有机肥替代 20%~40% 常规化肥用量能满足棉花正常生长,并且能达到与单施化肥处理相同产量。本研究结果也显示,减量化肥+有机肥处理比习惯施肥增产 13.37%、比优化施肥处理增产 9.95%,证实即使在减施化肥条件下增加有机肥的施用也可提高滨海盐碱地棉花的产量。

与常规肥料相比,控释肥料的养分供应更加稳定而持续,被认为是提高农业生产经济效益和环境效益的有效手段^[32]。控释肥与非控释肥结合一次性施用,可以解决控释肥在作物生育前期养分释放稍慢的问题,满足作物整个生长发育期的养分需求,提高土壤养分有效性,具有更为显著的增产效果^[33],既能促进作物增产又能节约劳动力,增加农民收入^[34]。段然等^[35]在湖垵旱地的研究发现,控释肥与非控释肥结合的一次性施肥对作物产量影响显著,施用少量控释肥的作物产量能达到与施用高量普通化肥的作物产量相同的效果。本研究结果表明,一次性施肥处理(非控释氮和控释氮 1:2 配合)的棉花产量比习惯施肥处理的棉花产量增加 2.20%。说明控释肥与非控释肥结合的一次性施肥在氮肥减量的情况下同样能提高棉花生产效率,实现农业生产的节本增效,可作为盐碱地绿色开发及规模化种植的一种有效的替代性施肥技术。

4 结论

与其他处理相比,一次性施肥处理(非控释氮和控释氮 1:2 配合)的氮和磷的积累均为最高,花铃期氮、磷积累量分别达到 134.57,35.26 kg/hm²。减量化肥+有机肥处理籽棉产量最高,比习惯施肥高 13.37%,经济效益比习惯施肥增长了 1 925 元/hm²,有效提升了中度盐碱地棉花生产水平。一次性施肥处理(非控释氮和控释氮 1:2 配合)籽棉产量与习惯施肥效果接近,经济效益比习惯施肥增长了 279 元/hm²。籽棉产量与植物氮、磷积累量无明显相关关系,但与吐絮期土壤碱解氮、有效磷含量呈显著正相关,意味着土壤养分有效性是影响棉花产量的关键因素。鉴于本研究试验年限较短,研究结果还需多年田间试验进一步验证。

参考文献:

[1] 刘国平. 黄河三角洲滨海盐渍土改良措施[J]. 山东农业大学学报(社会科学版), 2009, 11(3): 68-69.

[2] Karamesouti M, Detsis V, Kounalaki A, et al. Land-use and land degradation processes affecting soil resources: Evidence from a traditional Mediterranean cropland (Greece) [J]. Catena, 2015, 132: 45-55.

[3] Xie X F, Pu L J, Wang Q Q, et al. Response of soil

- physicochemical properties and enzyme activities to long-term reclamation of coastal saline soil, Eastern China [J]. Science of The Total Environment, 2017, 607/608: 1419-1427.
- [4] Nouri H, Borujeni S C, Nirola R, et al. Application of green remediation on soil salinity treatment: A review on halophytoremediation[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2017, 107: 94-107.
- [5] Han L P, Liu H T, Yu S H, et al. Potential application of oat for phytoremediation of salt ions in coastal saline-alkali soil[J]. Ecological Engineering, 2013, 61: 274-281.
- [6] 张克强,白成云,马宏斌,等.大同盆地金沙滩盐碱地综合治理技术开发研究[J].农业工程学报,2005,21(增刊2):136-141.
- [7] 田长彦,买文选,赵振勇.新疆干旱区盐碱地生态治理关键技术研究[J].生态学报,2016,36(22):7064-7068.
- [8] 关元秀,刘高焕,刘庆生,等.黄河三角洲盐碱地遥感调查研究[J].遥感学报,2001,5(1):46-52.
- [9] 秦都林,王双磊,孙学振,等.滨海盐碱地棉花秸秆还田对土壤理化性质及棉花产量的影响[J].作物学报,2017,43(7):1030-1042.
- [10] Tian X F, Li L, Zhang M, et al. Controlled release urea improved crop yields and mitigated nitrate leaching under cotton-garlic intercropping system in a 4-year field trial [J]. Soil and Tillage Research, 2018, 175: 158-167.
- [11] 张季阳,段爱旺,孟兆江,等.不同水分状况下棉花茎直径变化规律研究[J].农业工程学报,2005,21(5):7-11.
- [12] 毛树春,薛中立,杨汝献,等.麦棉两熟平衡施肥效应研究[J].棉花学报,1994,6(增刊1):46-51.
- [13] 司转运,高阳,申孝军,等.水氮供应对夏棉产量、水氮利用及土壤硝态氮累积的影响[J].应用生态学报,2017,28(12):3945-3954.
- [14] 董合忠,辛承松,唐薇,等.山东东营滨海盐渍棉田盐分与养分的季节性变化及对棉花产量的影响[J].棉花学报,2006,18(6):362-366.
- [15] 尹建道.山东滨海地区盐碱地土壤分析研究[J].内蒙古林业科技,1998(6):13-16.
- [16] 潘延安,雷沛,张洪,等.重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算[J].环境科学,2014,35(5):1727-1734.
- [17] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [18] 张丽英,张正斌,徐萍,等.黄淮小麦农艺性状进化及对产量性状调控机理的分析[J].中国农业科学,2014,47(5):1013-1028.
- [19] 聂新辉,尤春源,鲍健,等.基于关联分析的新陆早棉花品种农艺和纤维品质性状优异等位基因挖掘[J].中国农业科学,2015,48(15):2891-2910.
- [20] Pandey V, Patra D D. Crop productivity, aroma profile and antioxidant activity in *Pelargonium graveolens* L'Hér. under integrated supply of various organic and chemical fertilizers [J]. Industrial Crops and Products, 2015, 67: 257-263.
- [21] 李成亮,黄波,张民,等.控释肥用量对棉花生长特性和土壤肥力的影响[J].土壤学报,2014,51(2):295-305.
- [22] 罗佳,陈波浪,向光荣,等.有机肥对盐渍化耕地棉花干物质积累、养分吸收及产量的影响[J].中国土壤与肥料,2017(2):107-113.
- [23] 陈宝燕,马兴旺,杨涛,等.棉花生育时期 SPAD 值准确性与样本数的关系[J].中国农业科学,2011,44(22):4748-4755.
- [24] 杜承林,祝斌,陶帅平,等.施钾对扬麦 158 等小麦品种的养分吸收与生物产量的影响[J].土壤学报,2001,38(3):301-307.
- [25] 薛晓萍,郭文琦,王以琳,等.不同施肥水平下棉花生物量动态增长特征研究[J].棉花学报,2006,18(6):323-326.
- [26] 徐文修,罗明,李银平,等.作物茬口对连作棉田土壤环境及棉花产量的影响[J].农业工程学报,2011,27(3):271-275.
- [27] 田小明,李俊华,危常州,等.连续 3 年施用生物有机肥对土壤有机质组分、棉花养分吸收及产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(5):1111-1118.
- [28] Geng J B, Sun Y B, Zhang M, et al. Long-term effects of controlled release urea application on crop yields and soil fertility under rice-oilseed rape rotation system [J]. Field Crops Research, 2015, 184: 65-73.
- [29] 陶瑞,李锐,谭亮,等.减少化肥配施有机肥对滴灌棉花 N、P 吸收和产量的影响[J].棉花学报,2014,26(4):342-349.
- [30] 谭新霞.滴灌棉田增施有机肥对棉花产量的影响研究[J].江西棉花,2010,32(4):42-44.
- [31] 陶磊,褚贵新,刘涛,等.有机肥替代部分化肥对长期连作棉田产量、土壤微生物数量及酶活性的影响[J].生态学报,2014,34(21):6137-6146.
- [32] Trinh T H, Kishaari K Z. Dynamic of Water absorption in controlled release fertilizer and its relationship with the release of nutrient [J]. Procedia Engineering, 2016, 148: 319-326.
- [33] Nardi P, Neri U, Matteo G D, et al. Nitrogen release from slow-release fertilizers in soils with different microbial activity [J]. Pedosphere, 2017, doi: 10.1016/S1002-0160(17)60429-6.
- [34] 孙强生,张民,苏秋红,等.控释肥在盆栽棉花上的肥效研究[J].水土保持学报,2006,20(6):133-136.
- [35] 段然,汤月丰,文炯,等.减量施肥对湖垵旱地作物产量及氮磷径流损失的影响[J].中国生态农业学报,2013,21(5):536-543.

水氮互作对冬小麦光合生理特性和产量的影响

王磊, 董树亭, 刘鹏, 张吉旺, 赵斌

(山东农业大学农学院, 作物生物学国家重点实验室, 山东 泰安 271018)

摘要: 针对黄淮海地区农业生产中存在的水资源供应短缺, 肥料利用率低等问题, 设计试验研究水氮互作对冬小麦光合生理特性和产量的影响, 为黄淮海地区高效利用水氮资源提供理论依据。2015—2017年以石麦15(SM15)为材料, 利用水肥渗漏研究池, 设计2个供水量水平(500, 250 mm); 2个施氮量水平(90, 180 kg/hm²); 2个氮肥类型(无机肥尿素, 有机肥牛粪)。结果表明: 2年试验内冬小麦旗叶光合生理特性变化规律相似, 各处理的冬小麦旗叶光合速率, 蒸腾速率, 单叶水分利用效率在生育期内均呈现先上升后下降的趋势。水氮互作对小麦旗叶光合速率影响显著, W1(供水量500 mm)处理的旗叶光合速率明显高于W2(供水量250 mm)处理, 施氮肥180 kg/hm²处理的旗叶光合速率明显高于施氮肥90 kg/hm²的处理, 与施用无机肥相比, 施用有机肥可保证冬小麦生育后期维持较高的旗叶光合速率。2年试验干物质积累量最多、产量最高的处理为W1M1(供水量500 mm, 施有机氮肥180 kg/hm²)。综合冬小麦光合生理特性, 籽粒产量, 本试验条件下有机肥增产效果优于无机肥, 冬小麦生育期供水量500 mm, 施有机氮肥180 kg/hm²时冬小麦旗叶光合生理特性较优, 获得较高产量。

关键词: 水氮互作; 冬小麦; 光合生理特性; 干物质; 籽粒产量

中图分类号: S512.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0301-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.03.045

Effects of Water and Nitrogen Interaction on Physiological and Photosynthetic Characteristics and Yield of Winter Wheat

WANG Lei, DONG Shuting, LIU Peng, ZHANG Jiwang, ZHAO Bin

(College of Agronomy, Shandong Agricultural University, State Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an, Shandong 271018)

Abstract: Water resource deficiency and low nitrogen use efficiency are very common in Huang Huai-Hai Plain (HHP). In order to deal with these problems, the experiment, using SM15 as the tested winter wheat cultivar, with different water supplies and nitrogen fertilizer combinations (two types of fertilizers, two application rates, two water supply levels), was carried out in the lysimeters in 2015—2017. The photosynthetic characteristics of all the treatments showed the same variation pattern: the flag leaf photosynthetic rate, transpiration rate and leaf water use efficiency (LWUE) increased firstly and then decreased. The flag leaf photosynthetic rate of W1 water supply quantity of 500 mm was significantly higher than that of W2 (water supply quantity of 250 mm), and the flag leaf photosynthetic rate of 180 kg/hm² was significantly higher than that of nitrogen application of 90 kg/hm². Comparing with the application of inorganic fertilizers, the application of organic fertilizer could ensure the higher growth rate of flag leaf photosynthesis. The grain yield and dry matter accumulation in the W1M1 (water supply quantity of 500 mm and application of organic manure with about 180 kg/hm² treatment) were significantly higher than those in other treatments in the two growing seasons. According to the photosynthetic characteristics and grain yields of winter wheat, the experiment areas with organic fertilizers got higher yield and the rate of increasing production than those with inorganic. W1M1 was the best treatment, which had the highest yield and better photosynthetic characteristics.

Keywords: water and nitrogen interaction; winter wheat; photosynthetic and physiological characteristics; dry matter; grain yield

收稿日期: 2018-01-16

资助项目: 国家自然科学基金项目(31071358, 30871476); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2013BAD07B06-2); 国家重点研发计划项目(2017YFD0301001); 国家现代农业产业技术体系建设项目(CARS-02-20); 山东省现代产业技术体系项目(SDAIT02-08); 山东省财政支持农业重大应用技术创新课题项目

第一作者: 王磊(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事作物高产生理生态研究。E-mail: 18763825593@163.com

通信作者: 董树亭(1953—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事玉米高产优质高效栽培生理研究。E-mail: stdong@sdau.edu.cn

黄淮海地区是国家粮食主产区,粮食产量占到全国粮食总产的三分之一,冬小麦—夏玉米轮作是该地区的主要种植模式,小麦作为我国北方第一大粮食作物,其产量稳定和高产高效在国家粮食安全中具有重要的战略地位^[1]。近年来,黄淮海地区水资源供应紧张,过度施肥等问题日益突出。据统计,黄淮海地区水资源总量仅占全国的 20%,而人口总量达到全国的 41%,供需矛盾突出^[2],农业生产中小麦季施氮量普遍偏高,肥料利用率仅为 20%~40%^[3]。如何协调水、肥资源投入与产量之间的矛盾已引起广泛重视。农业生产中只有水分和肥料投入协调,合理的水氮运筹才会产生明显的互作效应^[4],通过水氮互作调节作物光合生理特性,是实现作物高产的重要措施,适度减少水分供应不会降低作物光合速率,却显著减少作物蒸腾失水,从而提高单叶水分利用效率^[5]。大量研究^[6-8]表明,土壤中的水肥变化显著影响作物的光合作用及产量,李廷亮等^[9]研究表明,施用氮肥促进小麦光合性能及产量提高。张珂珂等^[10]的研究指出,水分亏缺显著降低冬小麦旗叶光合速率,生育后期适当灌溉显著提高光合性能,籽粒产量随之增加。Gu 等^[11]研究表明,在缺水条件下增施氮肥,或者在肥力水平较低的土壤条件下增加供水量,通过水氮互作也可显著提高小麦干物质积累量,促进小麦增产。郭天财等^[12]研究表明,适度减少施氮量和供水量,不会影响作物产量,水分和氮素利用效率却显著提高。关静^[13]研究指出,合理灌溉与施肥,提高水分和肥料利用效率是北方地区水土控制措施中有待进一步研究和探讨的问题。目前有关施氮量、供水量及其互作效应的研究较多^[14-15],而肥料类型、施氮量、供水量 3 因素的互作研究较少。本试验从氮素和水分供应平衡入手,重点研究不同肥料类型下施氮量与供水量互作对冬小麦光合生理特性及产量的影响,旨在探讨提高籽粒产量途径,为黄淮海地区小麦种植中水分和氮肥的合理施用提供理论依据及技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

2015—2017 年在山东农业大学黄淮海玉米技术创新中心(36°09' N,117°09' E)利用水肥渗漏研究池进行试验。试验地位于山东省中部,年平均气温 12.8℃,年降水量 700 mm,降水多集中于夏季,占 65%,冬季降水仅占 3.6%。2 年小麦生长季自然降水量分别为 110,120.8 mm。种植制度为冬小麦—夏玉米一年两熟制。土壤类型为棕壤土。每个渗漏池的长、宽、高分别为 2.5,2.5,2 m,池子由下向上依次装填 15 cm 粗砂,5 cm 细砂,180 cm 土壤,土壤取自附近农田,土壤类型为棕壤土。试验开始前各渗漏池理化性质基本一致,2015 年播种前 0—20 cm 土层有机质含量 11.21 g/kg,全氮 0.7 g/kg,速效磷 27.41 mg/kg,速效钾 92.01 mg/kg;2016 年播种前 0—20 cm 土层有机质含量 14.01 g/kg,全氮 1.21 g/kg,速效磷 26.92 mg/kg,速效钾 97.01 mg/kg。

1.2 试验设计

试验设置 2 个肥料类型、2 个施氮量、2 个供水量,8 个处理,3 次重复,共计 24 个水肥渗漏池,供试冬小麦品种为石麦 15(半冬性品种,生育期 250 d,成株株型紧凑,旗叶上冲,较抗倒伏,抗寒性好),种植基本苗为 240 万株/hm²,每个小区种植 12 行,行距 20 cm。2 个生长季播种及收获日期分别为 2015 年 10 月 10 号播种,2016 年 6 月 8 号收获;2016 年 10 月 10 号播种,2017 年 6 月 6 号收获。设置 2 种水分条件:生育期总供水量 500 mm(W1),250 mm(W2);W1 处理总水分投入量为 500 mm,除去自然降雨,2 个生长季实际灌溉量分别为 390,379.2 mm,W2 处理与 W1 灌溉时期相同,灌溉量减半,除去自然降雨,2 个生长季实际灌溉量分别为 147.5,129.2 mm。灌溉水源为地下水,灌溉时每个池子单独灌溉,灌溉方式为水表精确控制灌溉量。2015—2017 年具体灌溉情况见表 1。

表 1 冬小麦不同生育期的灌溉量 单位:mm

年份	处理	播种期	返青期	拔节期	开花期	开花—成熟	总灌溉量
2015—2016	W1	75.0	16.0	75.0	75.0	146.0	390.0
	W2	37.5	0	37.5	37.5	35.0	147.5
2016—2017	W1	75.0	0	75.0	75.0	154.2	379.2
	W2	37.5	0	37.5	37.5	16.7	129.2

注:播种期时间为 2015 年 10 月 10 日和 2016 年 10 月 10 日;返青期时间为 2016 年 3 月 5 日和 2017 年 3 月 6 日;拔节期时间为 2016 年 3 月 29 日和 2017 年 4 月 1 日;开花期时间为 2016 年 4 月 29 日和 2017 年 4 月 30 日;灌浆期时间为 2016 年 5 月 12 日和 2017 年 5 月 13 日。

2 种肥料类型分别为普通尿素(U)和腐熟的有机肥牛粪(M)。施氮水平分别为 180 kg/hm²(U1,M1)和 90 kg/hm²(U2,M2)。施肥前对牛粪的养分含量及含水量进行测定,2 年试验所用牛粪养分含量分别

为 2015—2016 年,全氮(N)0.35%,全磷(P₂O₅)0.42%,全钾(K₂O)0.33%,质量含水量为 78.98%;2016—2017 年,全氮(N)0.40%,全磷(P₂O₅)0.49%,全钾(K₂O)0.35%,质量含水量为 77.25%。每个处理的 P、K

量分别为 P_2O_5 150 kg/hm² 与 K_2O 150 kg/hm²。施用
时减去牛粪所含磷钾量。牛粪、磷钾肥一次性基
施,尿素是基肥和拔节肥 1 : 1 施用,2 年试验基肥施
用日期均为 10 月 10 日,追肥施用日期为 2016 年 3
月 29 日,2017 年 4 月 1 日,2015—2017 年具体施肥
量见表 2。

表 2 不同施肥处理的具体施肥量

单位:kg/hm ²					
年份	处理	腐熟牛粪	尿素	过磷酸钙	硫酸钾
2015—2016	U1	0	218	2158	470
	U2	0	109	2158	470
	M1	50561	0	234	132
	M2	25280	0	1196	301
2016—2017	U1	0	218	2158	470
	U2	0	109	2158	470
	M1	47474	0	171	167
	M2	23737	0	1164	319

1.3 测定项目及方法

1.3.1 小麦光合处理特性测定 于小麦花前 30 天
(2016 年 3 月 31 日和 2017 年 4 月 1 日),花前 15 天
(2016 年 4 月 14 日和 2017 年 4 月 21 日),开花期
(2016 年 4 月 29 日和 2017 年 4 月 30 日),花后 15 天
(2016 年 5 月 15 日和 2017 年 5 月 16 日),花后 30 天
(2016 年 5 月 30 日和 2017 年 6 月 1 日),分别在 3 个
重复的小区中随机选取 5 片生长一致的完全展开旗
叶,并挂牌标记,采用 CIRAS—II 型便携式光合测定
系统在晴天上午 9:30—11:30 测定旗叶光合速率
(P_n ,mmol/(m²·S)),蒸腾速率(Tr ,mmol/(m²·
S))等光合指标,每片读取数据 2 次,取 10 次结果的
平均值。根据测定的净光合速率和蒸腾速率计算单
叶水分利用效率(LWUE,μmol/mmol)计算公式为
 $LWUE=P_n/Tr$ 。

1.3.2 叶面积指数(LAI) 在花前 30 天,花前 15
天,开花期,花后 7 天,花后 15 天,花后 30 天取样,每
处理选取 20 株长势一致的代表性植株,测量植株的
叶片长和宽,计算叶面积指数。单株叶面积=叶长×
叶宽×0.83,叶面积指数=(单株叶面积×单位土地
面积株数)/单位土地面积。

1.3.3 叶绿素总含量测定 在花前 30 天,花前 15
天,开花期,花后 7 天,花后 15 天,花后 30 天取样,每
小区选取 5 片整齐一致具有代表性的叶片,参照
Arnon^[16]的方法,取鲜样称量后,用 10 mL 95%乙醇
避光提取 48 h,用双通道紫外—可见分光光度计
(UV—2450 型,日本岛津公司)比色。

1.3.4 干物质及产量测定 于冬小麦花前 30 天,花
前 15 天,开花期,花后 15 天,花后 30 天,花后 40 天
取样,每个小区随机取样 20 个单茎,3 次重复,去掉

根部,将地上部分分成茎秆、叶片、颖壳+穗轴、籽粒
四部分,样品 105 ℃条件下杀青 30 min,80 ℃烘干至
恒重,称干重。冬小麦成熟期每个小区中部 1 m² 收
获测产,脱粒并经自然风干后称重。收获时计数穗数
和穗粒数,在脱粒后风干的籽粒中随机取样测定千粒
重,重复 3 次。

$$\text{产量(kg/hm}^2\text{)} = \text{穗数(穗/hm}^2\text{)} \times \text{穗粒数} \times \text{千粒重}/10^6 \times (1 - \text{含水量}\%) / (1 - 14\%)$$

1.4 数据处理

采用 Excel 2010、DPS 7.5 和 SPSS 19.0 软件进行试
验数据分析,用 LSD 法进行差异显著性检验($\alpha=0.05$),
利用 Sigmaplot 12.5 软件作图。

2 结果与分析

2.1 水氮互作对冬小麦光合生理特性的影响

由图 1 可知,水氮互作对冬小麦旗叶净光合速
率影响显著,各处理光合速率在开花期达到峰值,
花后随着时间推进,各处理的光合速率均呈现持续
下降的趋势,2015—2016 年开花期 W1U1 处理的
旗叶光合速率最高,W2M2 最低,2016—2017 年开花
期 W1M1 处理的光合速率峰值最高,W2U2 最低;从
供水水平看,2 年试验内,W₁ 处理的光合速率均显著
高于 W₂ 处理,供水量显著影响旗叶光合速率;从施
氮水平来看,施氮量为 180 kg/hm² 的处理的旗叶光
合速率显著高于施氮量为 90 kg/hm² 的处理,说明
高施氮量显著提高小麦旗叶光合速率;不同肥料类型
相比,花后随着生育期推进,U 处理的净光合速率下
降明显,而 M 处理的净光合速率下降较为平缓,
灌浆期光合速率维持在较高水平。经显著性检验,
冬小麦光合速率的水氮互作效应达显著水平($P<$
0.05),供水量对冬小麦旗叶光合速率的影响达到极
显著水平($P<0.01$)。

旗叶蒸腾速率与光合速率的变化趋势基本一致,
这说明蒸腾速率与光合速率有很好的平衡关系(图
2)。各处理的蒸腾速率峰值均在开花期出现,2 年试
验峰值最高的处理均为 W1M1。不同灌溉量之间相
比,W₂ 处理的蒸腾速率显著低于 W₁ 处理,第 2 年
试验内 W₂ 处理的蒸腾速率下降幅度更大;高施氮量
处理的蒸腾速率显著高于低施氮量处理,这也是光合
速率出现差异的原因;供水量与施氮量相同的条件
下,不同氮肥类型之间的蒸腾速率差异不显著。

单叶水分利用效率(LWUE)反映了作物光合指标
测定时的生长状况,由图 3 可知,不同氮肥类型之间的
LWUE 差异不明显,高施氮量处理的 LWUE 高于低施
氮量处理,W₂ 处理的 LWUE 高于 W₁ 处理。

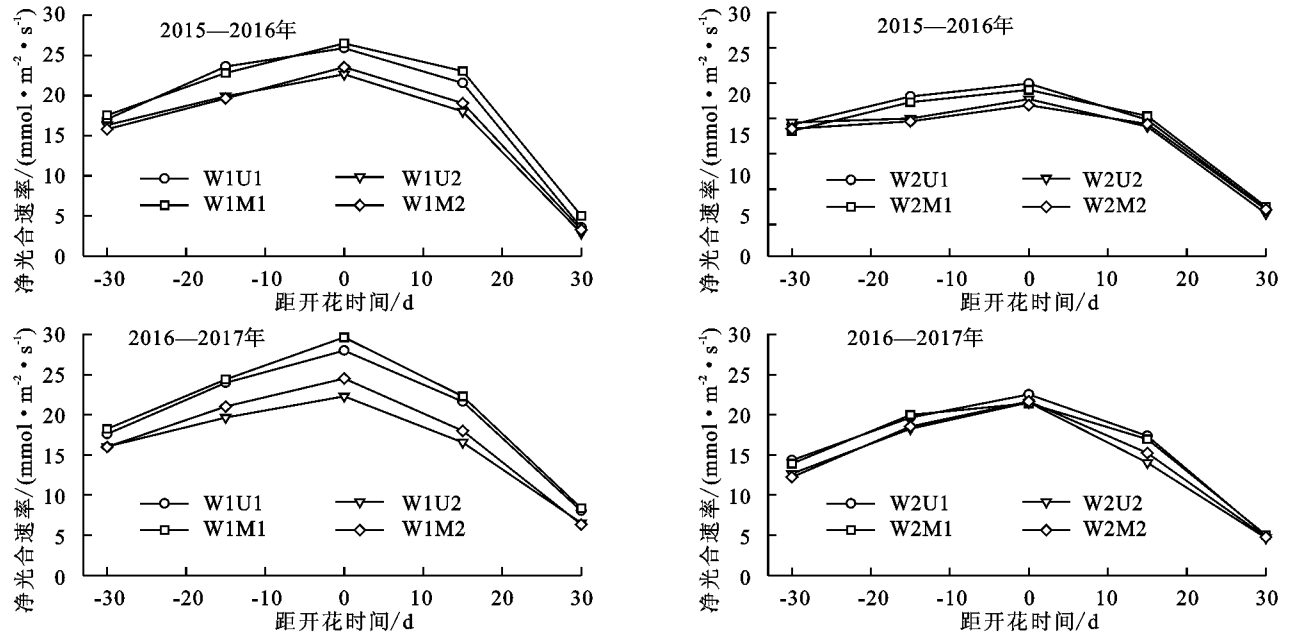


图 1 不同水氮处理下小麦旗叶光合速率

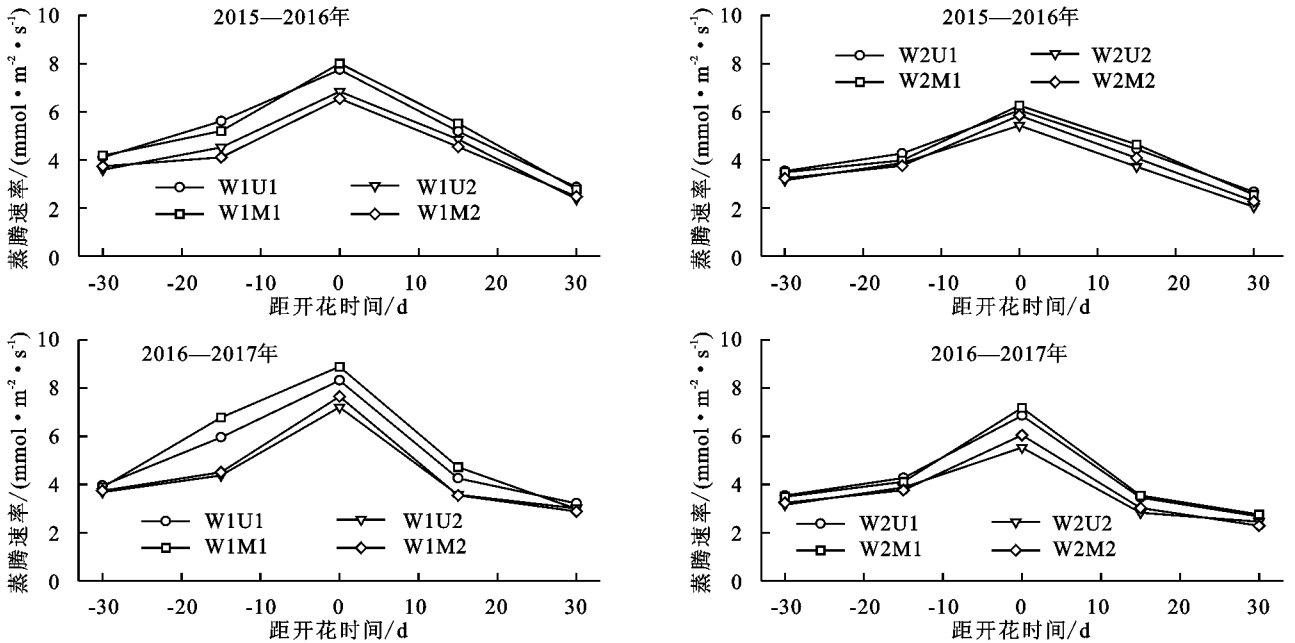


图 2 不同水氮处理下小麦旗叶蒸腾速率

2.2 水氮互作对冬小麦叶面积指数(LAI)的影响

由图 4 可知,冬小麦叶面积指数(LAI)呈现出先增加后降低的趋势,花前 15 天(挑旗期)左右达到峰值,之后逐渐降低。供水量和施氮量均显著影响冬小麦 LAI。W2 条件下各处理 LAI 显著低于 W1;灌溉量和氮肥类型相同的条件下,施 180 kg/hm² 的处理的 LAI 高于施 90 kg/hm² 的处理。第 1 年试验内不同肥料类型的 LAI 存在差异,表现为 U>M,第 2 年试验不同肥料类型的叶面积指数差异不明显,生育后期 M 处理的 LAI 下降平缓,而 U 处理的 LAI 随生育进程迅速下降。

2.3 水氮互作对冬小麦叶绿素总含量的影响

冬小麦的旗叶绿素总含量呈现出先增加后降低的趋势(图 5),2 年试验叶绿素总含量均在花后 7

天达到峰值,之后随生育进程有不同程度的降低,2 年试验峰值最高的处理均为 W1U1,2015—2016 年叶绿素总含量峰值达到 6.72 mg/g,2016—2017 年峰值达到 7.64 mg/g。不同灌溉量相比,适宜灌溉量 W1 处理的叶绿素含量显著高于胁迫灌溉量 W2,灌溉量和氮肥类型相同的条件下,施氮量为 180 kg/hm² 的处理的叶绿素含量显著高于施氮量为 90 kg/hm² 的处理,不同肥料类型之间 2015—2016 年 U 处理的叶绿素含量略高于 M 处理,2016—2017 年 M 处理的叶绿素含量高于 U 处理,U 处理的叶绿素总含量在生育后期迅速下降,M 处理的叶绿素总含量随生育进程平稳下降。2 年试验相比,第 2 年各处理之间差异较第 1 年显著。

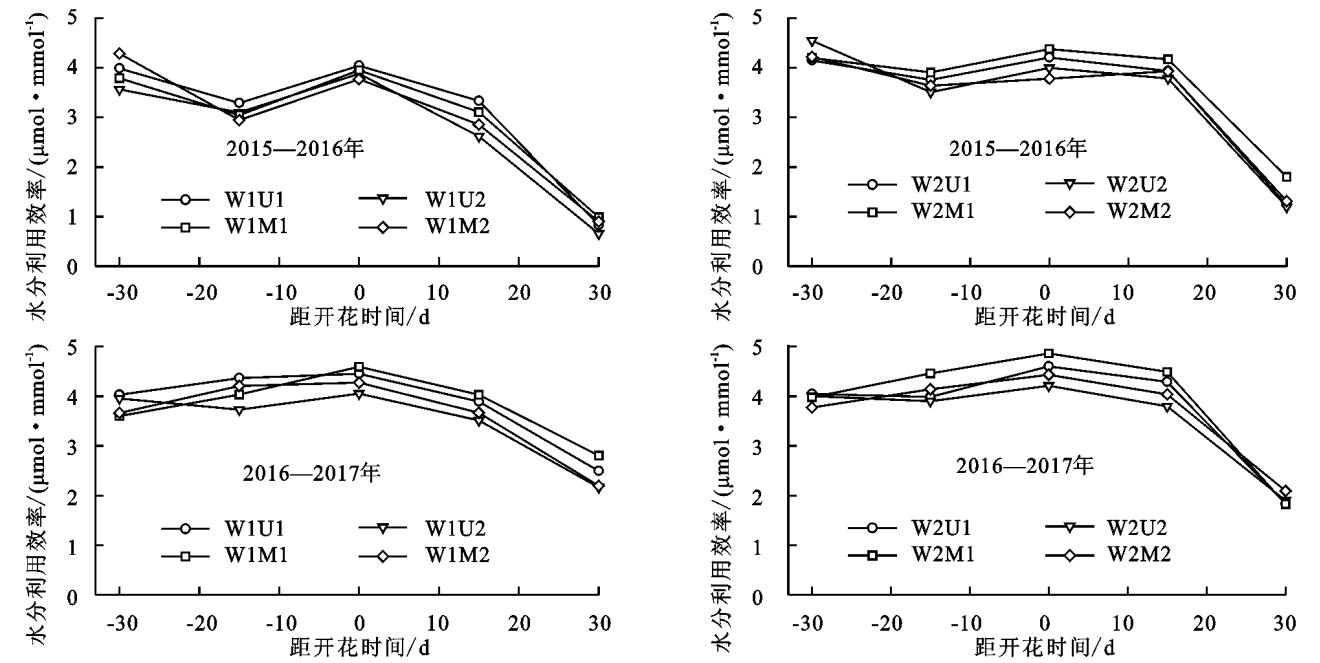


图 3 不同水氮处理下小麦旗叶水分利用效率

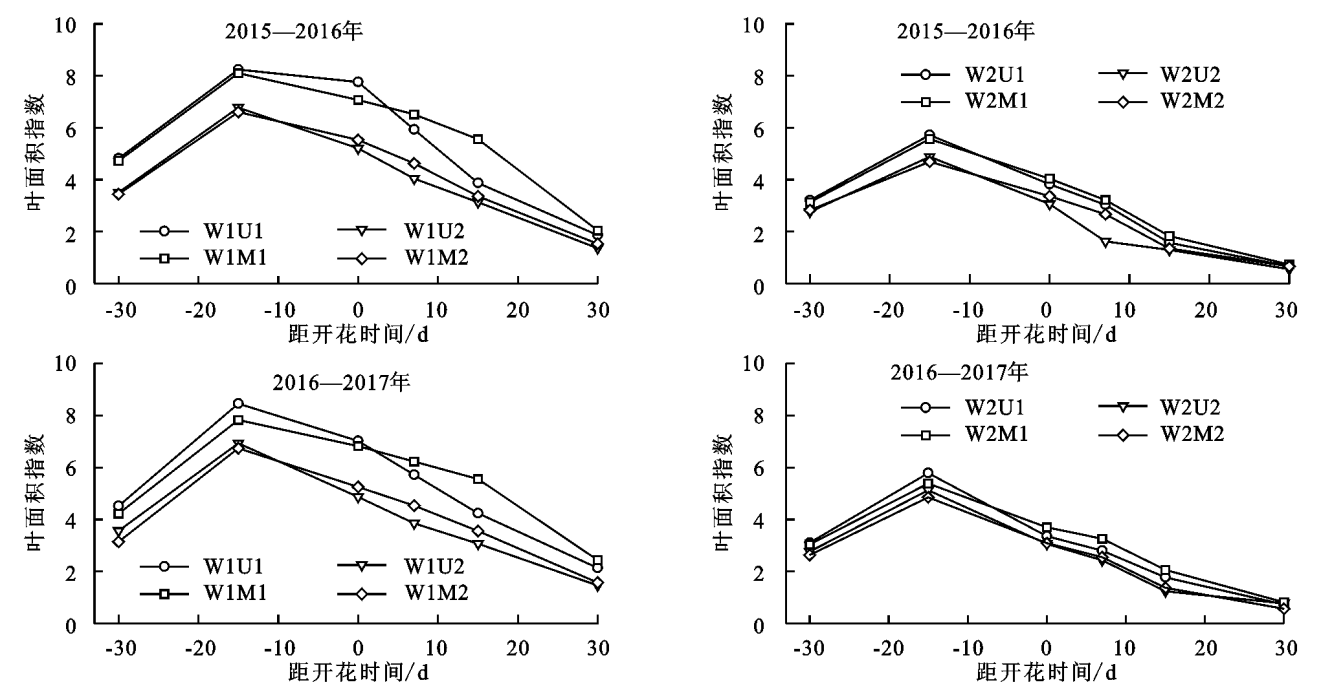


图 4 不同水氮处理下小麦叶面积指数

2.4 水氮互作对冬小麦干物质积累与分配的影响

2.4.1 不同生育时期干物质积累量 由图 6 可知,供水量、施氮量、肥料类型均影响冬小麦干物质积累,2 年试验内干物质积累量最多的处理均为 W1M1,施氮量和肥料类型相同的条件下,W1 处理的干物质积累量高于 W2 处理;不同施氮量条件下,施氮量 180 kg/hm² 处理的干物质积累量高于 90 kg/hm²,不同氮肥类型相比,2 年试验均表现为花后 15 天前 U 处理的干物质积累量大于 M 处理,花后 15 天后 M 处理的干物质积累量高,这可能与有机氮肥肥效更持久有关。

2.4.2 水氮互作对冬小麦成熟期干物质在不同器官

中分配的影响 由表 3 可知,2 年试验内冬小麦成熟期干物质在各器官中分配的比例为:籽粒占 37.71%~47.13%;叶片占 11.68%~16.28%;茎+叶鞘占 27.20%~32.90%;颖壳+穗轴占 12.03%~18.98%;各处理间干物质向叶片、茎+叶鞘的分配量差异不明显,2015—2016 年生长季各处理间干物质向籽粒、颖壳+穗轴的分配量差异不显著;2016—2017 年生长季中,W2U2、W2M2 处理的干物质向颖壳+穗轴分配量显著高于其他处理;W1U1、W1M1 处理的干物质向籽粒分配量显著高于其他处理,W1 处理的籽粒分配量高于 W2 处理。

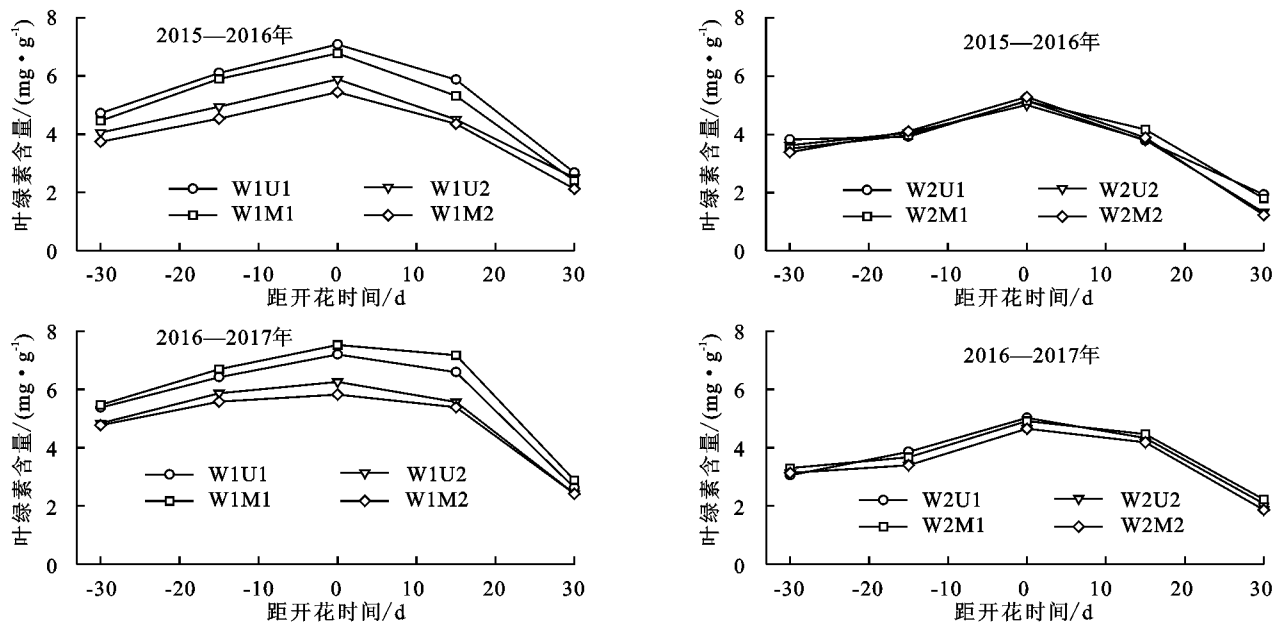


图 5 不同水氮处理下小麦旗叶叶绿素含量

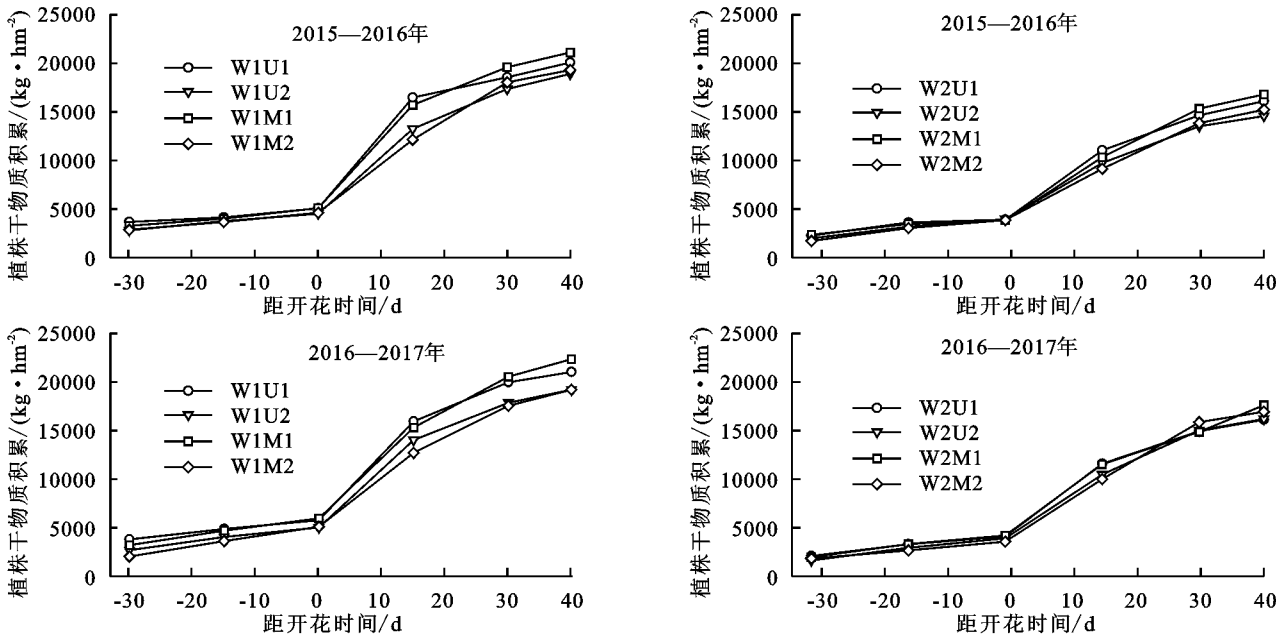


图 6 不同水氮处理下小麦干物质积累动态

表 3 不同水氮处理对成熟期不同器官中干物质分配量及其分配比例的影响

年份	处理	单株不同器官干物质重/g				干物质分配比例/%			
		籽粒	叶片	茎+叶鞘	颖壳+穗轴	籽粒	叶片	茎+叶鞘	颖壳+穗轴
2015—2016	W1U1	3.21ab	1.17b	2.59a	1.21b	39.20a	14.36b	31.66a	14.76d
	W1U2	3.07b	1.01bc	2.18c	1.22b	40.98a	13.55c	29.10b	16.35b
	W1M1	3.38a	1.42a	2.65a	1.27b	38.73ab	16.28a	30.42ab	14.55d
	W1M2	2.95b	1.11b	2.11c	1.31a	39.38a	14.86b	28.17bc	17.57a
	W2U1	2.82bc	0.83cd	2.28b	1.16c	39.72a	11.68e	32.18a	16.39b
	W2U2	2.54c	0.78d	2.15c	1.05c	38.90ab	12.01d	32.90a	16.17b
	W2M1	2.97b	0.92c	2.36b	1.02c	40.79a	12.63cd	32.44a	14.11d
	W2M2	2.52c	0.80d	2.06cd	0.99d	39.60ab	12.58d	32.29a	15.51c
2016—2017	W1U1	3.50b	1.01ab	2.36a	0.95b	44.66ab	12.96d	30.19ab	12.17d
	W1U2	2.93c	0.97ab	2.29a	1.17ab	39.73b	13.26c	31.09a	15.90c
	W1M1	3.88a	1.09a	2.27ab	0.99b	47.13a	13.27c	27.55c	12.03d
	W1M2	3.22bc	0.99ab	2.09b	1.22a	42.72ab	13.17c	27.83c	16.26bc
	W2U1	2.46d	0.81c	1.89bc	1.12ab	39.16b	12.76d	30.17ab	17.90ab
	W2U2	2.18e	0.86c	1.65c	0.98b	38.41b	15.17a	29.12b	17.27b
	W2M1	2.47d	0.94b	2.00b	1.14ab	37.71b	14.33ab	30.54ab	17.40b
	W2M2	2.25de	0.94b	1.61c	1.13ab	37.92b	15.87a	27.20c	18.98a

2.5 水氮互作对冬小麦产量及产量构成因素的影响

由表 4 可知,水氮互作对冬小麦产量构成因素有显著影响。氮肥类型与供水量对小麦千粒重和穗粒数的影响存在交互作用,W1 条件下,千粒重表现为 M1>U1,U2 与 M2 差异较小,穗粒数表现为 M1>U1,W2 条件下,2 种肥料类型穗粒数无显著差异。施氮量和供水量增加,穗粒数和千粒重也随之增加。2 年试验产量最高的处理均为 W1M1,2015—2016 年最高产量为 8 655.1 kg/hm²,2016—2017 年产量为 9 953.4 kg/hm²。

表 4 不同施肥灌溉处理下冬小麦产量及产量构成因素

年份	处理	穗数/ (×10 ⁴ 穗·hm ⁻²)	穗粒数	千粒重/ g	产量/ (kg·hm ⁻²)
2015—2016	W1U1	433.0a	41.0b	46.4b	8239.7b
	W1U2	426.5a	40.8bc	45.3c	7871.6c
	W1M1	434.0a	42.3a	47.2c	8655.1a
	W1M2	426.0a	40.2cd	44.2d	7561.6d
	W2U1	415.5b	39.6d	43.9d	7224.8e
	W2U2	409.0b	37.7f	42.3d	6510.1f
	W2M1	432.5a	38.7e	45.5e	7614.8d
	W2M2	408.0b	37.8f	41.9e	6473.5f
2016—2017	W1U1	458.5a	40.8bc	47.9b	8970.3b
	W1U2	440.5b	39.8bc	43.9d	7703.8d
	W1M1	471.0a	42.1a	50.2a	9953.4a
	W1M2	443.0b	40.1b	45.7c	8248.9c
	W2U1	387.5c	38.8cd	41.9e	6307.1e
	W2U2	377.5c	36.3e	40.1ef	5602.5g
	W2M1	388.0c	38.9c	41.9e	6336.3e
	W2M2	378.5c	37.9d	40.3f	5778.3f

3 讨论

3.1 水氮互作对冬小麦光合生理特性的影响

叶片光合能力是植物光合作用强弱的重要反映,决定着植物生产力的高低。水氮通过影响叶片色素、叶面积指数大小等多种因素对植株光合作用造成影响,进而影响产量。供水不足会导致旗叶蒸腾速率变低,李晶晶等^[17]研究表明,减少供水量导致冬小麦旗叶光合速率、蒸腾速率明显下降。本试验结果表明,供水量 500 mm(W1)处理的旗叶光合速率,蒸腾速率显著高于供水量 250 mm(W2)处理,W2 处理的单叶水分利用效率高于 W1 处理,表明低供水量导致小麦叶片的净光合速率、蒸腾速率为适应水分供应不足而显著下降,从而提高了单叶水分利用效率,这与王红光等^[18]研究结果基本一致。水分短缺条件下施用氮肥可以缓解水分胁迫对小麦光合生理特性的不利影响,董博等^[19]研究表明,增施氮肥提高了小麦旗叶叶绿素含量和单叶水分利用效率,施氮量越高,光和参数增加数值越大,本试验相同供水量条件下高施氮量处理的叶绿素含量和单叶水分利用效率明显高于低施氮量处理,供水量 500 m,施有机氮肥 180 kg/hm² 处理叶绿素含量相对其他处理一直保持较高水平,这为其保持较高的净光合速率,提高光合能力,进

而增加产量奠定了基础。叶面积指数变化直接反映了植株叶片生长发育情况,本试验结果表明,与无机肥处理相比,有机肥处理的叶面积指数在小麦生育后期下降速率缓慢,供水量 500 mm 条件下高施氮量有效缓解叶面积指数下降速率,供水量 250 mm 条件下各处理差异不显著,说明生育后期水分供应不足影响籽粒灌浆环境进而影响氮素对旗叶生理性状的优化。施用有机肥条件下合理的水氮互作在小麦生育后期可有效缓解叶面积指数下降速率,提高光合速率,保持较高的生理代谢能力,为小麦高产提供保障。

3.2 水氮互作对冬小麦干物质及产量的影响

小麦成熟籽粒中的干物质有 20%~30% 来自旗叶的光合作用,光合作用对作物产量的贡献率达到 90%^[20],适宜的水氮管理和干物质积累与分配密切相关。谷艳芳等^[21]研究表明,不同供水处理条件下小麦干物质积累量存在差异,本试验供水量 500 mm 条件下各处理的干物质积累量明显高于供水量 250 mm 的处理,说明较高的供水量有效满足了小麦地上部生长发育的需要;金修宽等^[22]研究表明,小麦干物质积累量随施氮量增加而增加,本试验相同供水量条件下施氮 180 kg/hm² 处理的干物质积累量明显高于施氮 90 kg/hm² 的处理,表明增施氮肥促进干物质的积累^[23];小麦花后籽粒干重及地上部总干重随生育进程不断增加,本试验供水量 500 mm 条件下不同施氮量处理的成熟期植株干物质重及籽粒干物质分配量差异较大,施氮量 180 kg/hm² 处理的干物质积累量及籽粒干物质分配量明显高于施氮 90 kg/hm² 的处理表明适宜的供水量与施氮量互作提高了冬小麦干物质积累能力,增加光合产物向籽粒的分配^[24],供水量 250 mm(W2)条件下各处理的干物质积累量明显低于供水量 500 mm(W1),说明 W2 条件不能满足小麦对水分需求,供水不足导致光合速率下降,影响光合同化产物合成。干物质生产是产量形成的基础,水氮对冬小麦光合生理特性的影响反映在干物质积累动态变化与分配比例上进而最终影响小麦产量。本试验供水量 500 mm 条件下,施氮 180 kg/hm² 处理的干物质积累量和产量均显著高于施氮 90 kg/hm² 处理,说明充足的供水量与施氮量互作保证了氮肥肥效的充分发挥,促进光合产物的积累,提高小麦产量;本试验条件下有机肥处理增产幅度高于无机肥处理,可能的原因是施肥并灌溉后无机肥尿素迅速分解释放养分,有机肥肥效持久且增加土壤有机质和矿化氮含量,活化土壤中潜在养分和增强生物学活性,水肥效果相互促进,满足了小麦生育后期的氮素需求因而施用有机肥的处理获得更高的产量^[25]。

4 结 论

(1)施氮量、供水量、氮肥类型 3 因素互作对冬小麦旗叶光合速率及籽粒产量的影响达到显著水平,合理的水氮运筹可以改善冬小麦光合性能,影响干物质积累与分配进而促进产量增加。水分因子主要影响了叶肉细胞的净光合速率、蒸腾速率和单叶水分利用效率,进而影响了小麦的光合生理特性;而氮肥效应中施氮量主要通过提高叶绿素含量,缓解水分胁迫带来的逆境伤害来增强光合速率;有机氮肥的“缓效性”延长了开花期后叶面积的高值持续期,确保灌浆期小麦光合速率维持在较高水平,提高了冬小麦干物质积累能力,促进生育后期光合产物向籽粒分配,有利于小麦的产量形成;同时保证了生育后期的养分供应,与小麦生育后期需肥需水的同步性更好,有利于作物对养分的吸收利用。

(2)水分、氮肥用量、氮肥类型对冬小麦光合生理特性有明显的互作效应,有机肥的增产效果优于无机肥。本试验条件下,生育期内供水 500 mm,施用 180 kg/hm² 有机氮肥时冬小麦光合性能好,产量高。

参考文献:

[1] Yang X L, Gao W S, Shi Q H, et al. Impact of climate change on the water requirement of summer maize in the Huang-Huai-Hai farming region [J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 124(2): 20-27.

[2] 宋先松,石培基,金蓉. 中国水资源空间分布不均引发的供需矛盾分析[J]. *干旱区研究*, 2005, 22(2): 162-166.

[3] 串丽敏,何萍,赵同科. 中国小麦季氮素养分循环与平衡特征[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(1): 76-86.

[4] 赵连佳,薛丽华,孙乾坤. 不同水氮处理对滴灌冬小麦田耗水特性及水氮利用效率的影响[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(8): 1050-1059.

[5] 孟兆江,卞新民,刘安能,等. 调亏灌溉对夏玉米光合生理特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(3): 182-186.

[6] 谢英荷,栗丽,洪坚平,等. 施氮与灌水对夏玉米产量和水氮利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(6): 1354-1361.

[7] 张瑞,董琦,王爱萍,等. 等氮条件下有机无机肥配施对小麦光合特性和群体结构的影响[J]. *激光生物学报*, 2017, 26(3): 281-288.

[8] Wang Y Q, Wen-xing X I, Wang Z M, et al. Contribution of ear photosynthesis to grain yield under rainfed and irrigation conditions for winter wheat cultivars released in the past 30 years in North China Plain [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(10): 2247-2256.

[9] 李廷亮,谢英荷,洪坚平,等. 施氮量对晋南旱地冬小麦光合特性、产量及氮素利用的影响[J]. *作物学报*, 2013, 39(4): 704-711.

[10] 张珂珂,周苏玫,张嫚,等. 减氮补水对小麦高产群体光合性能及产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(3): 863-872.

[11] Gu L M, Liu T N, Zhao J, et al. Nitrate leaching of winter wheat grown in lysimeters as affected by fertilizers and irrigation on the North China Plain [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(2): 374-388.

[12] 郭天财,冯伟,赵会杰,等. 水分和氮素运筹对冬小麦生育后期光合特性及产量的影响[J]. *西北植物学报*, 2003, 23(9): 1512-1517.

[13] 关静. 农业肥料施用中存在的问题以及建议[J]. *中国农业信息*, 2017(18): 15-17.

[14] 孙永健,孙园园,李旭毅,等. 水氮互作下水稻氮代谢关键酶活性与氮素利用的关系[J]. *作物学报*, 2009, 35(11): 2055-2063.

[15] 孙永健,孙园园,徐徽,等. 水氮管理模式对不同氮效率水稻氮素利用特性及产量的影响[J]. *作物学报*, 2014, 40(9): 1639-1649.

[16] Arnon D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts: Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris* [J]. *Plant Physiology*, 1949, 24(1): 1.

[17] 李晶晶,尹钧,李武超,等. 不同水氮运筹对冬小麦光合特性和产量的影响[J]. *河南农业科学*, 2017, 46(5): 27-33.

[18] 王红光,于振文,张永丽,等. 测墒补灌对小麦光合特性和干物质积累与分配的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(10): 2495-2503.

[19] 董博,张绪成,张东伟,等. 水氮互作对春小麦叶片叶绿素含量及光合速率的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(6): 88-93.

[20] 于显枫,郭天文,张仁陟,等. 水氮互作对春小麦叶片气体交换和叶绿素荧光参数的作用机制[J]. *西北农业学报*, 2008, 17(3): 117-12.

[21] 谷艳芳,丁圣彦,高志英,等. 干旱胁迫下冬小麦光合产物分配格局及其与产量的关系[J]. *生态学报*, 2010, 30(5): 1167-1173.

[22] 金修宽,赵同科. 测墒补灌和施氮对冬小麦产量及氮素吸收分配的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 233-239.

[23] 徐国伟,陆大克,王贺正,等. 干湿交替灌溉与施氮量对水稻叶片光合性状的耦合效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(5): 1225-1237.

[24] 尹飞,陈明灿,刘君瑞. 氮素形态对小麦花后干物质积累与分配的影响[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(13): 78-81.

[25] 刘益仁,李想,郁洁,等. 有机无机肥配施提高麦—稻轮作系统中水稻氮肥利用率的机制[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(1): 81-86.

不同配比的控释肥对日光温室袋培番茄基质养分及其生长、产量和品质的影响

张小兰, 徐 阳, 张金伟, 吴晓阳, 孙周平

(设施园艺省部共建教育部重点实验室, 辽宁省设施园艺重点实验室, 辽宁省设施蔬菜工程实验室,
沈阳农业大学园艺学院, 沈阳 110866)

摘要: 控释肥料由于可控的释放养分, 一次性使用便可以满足作物 4 个多月生育期间对养分的需求, 实现了肥料的高效利用, 在大田中得到重视和应用。在课题组前期袋培番茄营养基质研究的基础上, 根据日光温室番茄养分吸收规律, 在基质中添加不同用量的控释尿素和控释氯化钾, 氮钾比例为 1 : 1.5, 呈 4 倍关系递增, 设置 4 个全生育期营养基质配方处理(A、B、C、D), 以不施肥(CK)和常规施肥(CKT)为对照, 研究了不同处理的袋培基质养分变化及其对番茄植株生长、产量和品质的影响。结果表明: 随着控释肥用量的增大, 番茄植株的长势与产量呈现先增加后降低的趋势, 其中, 处理 C 的应用效果最佳, 基质 EC 值稳定, 试验末期速效氮磷钾含量略低于初始值; 与 CK 比较, 处理 C 株高提高 21.75%、茎粗提高 59.46%、生物量提高 75.12%、产量提高 226.36%, 可溶性糖、可溶性固形物含量较高, 果实品质提高; 与 CKT 相比, 处理 C 的肥料用量少, 基质养分残留少, 养分损失少, 产量提高 24.48%, 肥料利用率高。结果说明, 在生产中, 控释肥不仅可以提高日光温室基质袋培番茄养分利用效率, 而且增加产量, 实现轻简化管理。

关键词: 番茄; 基质袋培; 控释肥; 产量; 品质

中图分类号: S641.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0309-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.03.046

Effects of Controlled Release Fertilizer with Different Ratio on the Substrate Nutrient, Growth, Yield and Quality of Tomato Cultured in Bags in Solar Greenhouse

ZHANG Xiaolan, XU yang, ZHANG Jinwei, WU Xiaoyang, SUN Zhouping

(Key Laboratory of Protected Horticulture, Ministry of Education, Liaoning Key
Laboratory of Protected Horticulture, Key Laboratory of Protected Vegetables Engineering of
Liaoning Province College of Horticulture, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866)

Abstract: As a result of the controlled release of nutrients, controlled release fertilizer (CRF), used once, can meet the nutrient demand of field crops for more than 4 months, which can realize the efficient use of fertilizer. Now it is applied successfully in field crops. For this reason, according to the law of tomato nutrient absorption in solar greenhouse, four kinds of different CRF treatments (A, B, C, D) were established through added different quantity of controlled release urea and potassium chloride into growth-bag substrate, the paper investigated the effects of different CRF treatments on the growth-bag substrate nutrient change, and the growth, yield and quality of tomato in solar greenhouse compared with no fertilizer (CK) and conventional fertilization (CKT). The experiment results showed that with the increase of CRF dosage, tomato plants growth and yield showed a change trend of first increase and then decrease. Among all treatments, the treatment C was the best, of which the substrate EC value was stable, the nutrient content of available nitrogen, phosphorus and potassium in growth-bag substrate of treatment C became slightly lower than that at the beginning; Compared with CK, the plant height increased by 21.75%, the stem width increased by 59.46%, the biomass accumulation increased by 75.12%, the yield increased by 226.36%, and the fruit quality was much improved. Compared with CKT, little nutrient was left in the substrate and the fruit yield increased by 24.48%. The experiment result indicates that CRF could increase the nutrient use efficiency and

fruit yield for substrate growth-bag of tomato in solar greenhouse.

Keywords: tomato; substrate growth-bag; controlled release fertilizer; yield; quality

番茄作为主要的设施蔬菜栽培作物之一,其对养分的需求量很大,生产过程中需要多次追肥以获得高产,但是过量施肥并不会带来持续的增产,多余的养分会残留在土壤中,不仅造成肥料浪费,还会对环境造成威胁。同时,由于传统化学肥料多为速效肥料,养分释放速度快,不能根据作物需肥规律适时供应养分,肥料中的大部分养分容易被淋溶、挥发、固定,养分利用率低。

控释肥料^[1]作为一种新型肥料,可以根据作物生长对养分的需要可控的释放养分,生长初期一次性施入,便可以满足作物整个生育期间对营养的需求,有利于简化肥料管理技术^[2],提高肥料利用率。同时,由于控释肥料养分释放比较缓慢,养分在土壤中累积少,减少了营养元素的损失,还可以避免烧苗现象的发生。控释肥料对于促进作物生长、提高产量和品质有显著影响,与普通尿素相比,可以减少肥料的使用量。王鑫等^[3]研究表明,与普通尿素相比,包膜肥可显著提高番茄产量,即使在养分用量减少 1/3 时,产量依然没有显著降低。龙锦林等^[4]研究表明,在等氮素条件下,控释尿素处理的产量比普通尿素增产 24.55%,氮素减半时,控释尿素处理产量依然高于普通尿素处理。朱余清等^[5]研究表明,减氮 30% 和减量 20% 的控释肥处理对‘中蔬 4 号’番茄生长发育的促进作用最明显,番茄株高、茎粗、生物量、果实重量等显著增大,果实品质大幅提高,番茄的产量和经济效益显著提高。

控释肥料的养分释放期虽然比较长,但是有的控释肥会出现前期供肥不足的问题,因此需要在控释肥的使用中添加底肥。已有研究^[6]表明,有机基质中含有作物需要的大量元素和微量元素,在作物栽培过程中基本不需要再添加微量元素。蒋卫杰等^[7]利用有机基质栽培番茄,定植后 20 d,其基质中氮钾含量有所下降,需要通过追肥补充养分使基质中氮钾的水平维持在一个适宜范围内,而速效磷在基质中消耗较少,并且还有积累的趋势,生产过程中可以减少磷肥的追施量。因此可以考虑将控释肥料与有机基质栽培相结合,既可以满足作物前期对养分的需求,又可以满足作物对后续养分的需求。

目前对于控释肥料的研究多集中于大田作物,而且主要是单一肥料的使用,对于不同养分控释肥料混合使用的研究较少。为此,本试验采用本课题组研制的有机基质袋培方式,通过添加不同用量控释尿素和控释氯化钾,研究不同控释肥处理对日光温室袋培番茄的基质养分动态变化、植株生长、产量和品质的影响。明确日光温室番茄基质袋培最佳控释肥使用量,实现控释肥料一

次性基施,生产后期只浇灌清水,简化劳动程序,提高生产效率的目的,为日光温室番茄基质袋培生产的标准化与轻简化管理提供理论与技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2016 年 3—7 月在沈阳农业大学科研基地 28 号辽沈 II 型日光温室进行,番茄品种为‘DF09’,供试基质由本课题科研团队自行研发,主要原料以牛粪和草炭为主,其基本理化性质为:pH 6.39,EC 1.97 mS/cm,容重 0.51 g/cm³,孔隙度 78.94%,碱解氮 423.11 mg/kg,速效磷 336.25 mg/kg,速效钾 2 651.31 mg/kg。试验中所用控释尿素(N 43%)和控释氯化钾(K₂O 57%)由中科院沈阳应用生态所提供,试验所用速溶平衡复合肥(黄博 1 号)养分比例为 22-12-16,速溶高钾复合肥(黄博 2 号)养分比例为 19-6-25。

1.2 试验设计

试验共 2 个对照,4 个配方处理,分别为 CK(基质中不添加任何肥料),CKT(传统施肥方案:苗期和花期施用速溶平衡复合肥 5 d/次,盛果期施用速溶高钾复合肥 5 d/次,拉秧前 1 个月停止施肥),配方 A、B、C、D(整体养分供应按照 N:K₂O=1:1.5,基质中添加不同用量控释尿素和控释氯化钾),各配方处理养分添加量见表 1,试验所用控释肥料一次性基施,后期不再进行追肥。试验采用黑白膜基质袋培方式,栽培袋长×宽×高为 50 cm×20 cm×10 cm,每袋装 0.01 m³ 基质,定植 2 株番茄,株距 30 cm,行距 100 cm,每个处理的小区面积为 5 m²,共定植 20 株番茄。试验采用滴箭配套全自动灌水设备进行浇水。番茄进行单干整枝,番茄留 5 穗果进行掐尖,日常管理依照番茄高产管理方式。每个处理重复 3 次,随机排列。

表 1 各处理养分添加量 单位:kg/m³

养分	A	B	C	D
N	0.43	0.86	1.29	1.72
K ₂ O	0.65	1.29	1.94	2.58

1.3 取样及测定

番茄植株三叶一心时定植,定植后 1 个月开始测定形态指标,包括株高(茎基部到生长点之间的距离)、茎粗(生长点以下 4~5 片茎的直径),之后每隔 15 d 测定 1 次。定植后 45,75 天对植株进行两次破坏性取样,测定其不同部位生物量。定植后 45,75,120 天对基质进行取样,测定其理化性质,包括 EC 值(土水 1:5 浸提)、碱解氮(碱解扩散法)、速效磷(碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法)和速效钾(醋酸铵浸

提一火焰光度法)^[8]。番茄果实成熟后进行测产,计算其单株坐果数、平均单果重、单株产量和小区产量,选取同一时期果实进行果实品质测定,包括可溶性还原糖(蒽酮法)、有机酸(酸碱滴定)、可溶性固形物(折光计)、Vc(钼蓝比色法)、硝酸盐(水杨酸法)^[9]。

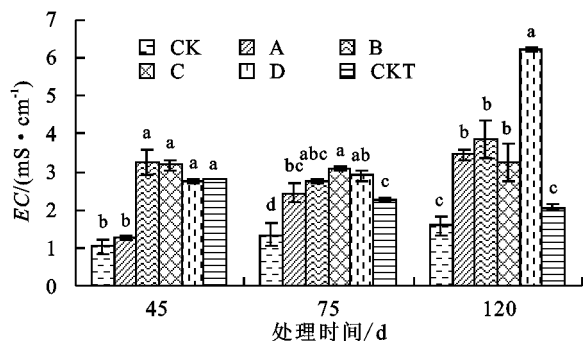
1.4 数据处理和分析

本试验采用 Excel 2010 进行数据处理,DPS 软件进行数据显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对基质养分动态的影响

2.1.1 不同处理对基质 EC 的影响 由图 1 可知,基质 EC 值可以反映基质内养分水平,整个生育期间,添加肥料的各处理的 EC 值均高于 CK。定植后 45 d,处理 B、C、D、CKT 的 EC 值均显著高于 CK,且高于初始值 1.97。定植后 75 d,添加肥料各处理的 EC 值均显著高于 CK,处理 A、D 的 EC 值相比 45 天时增加 95.74%,5.46%,处理 B、C 与 45 d 时相比减少 14.65%,2.10%,但是各处理 EC 值依然高于初始值,添加控释肥处理的 A、B、C、D 高于 CKT 8.26%,21.98%,37.61%,28.17%。定植后 120 天(盛果期),施肥各处理基质 EC 值均高于初始值,添加控释肥处理 A、B、C、D 基质的 EC 值显著高于 CK 和 CKT,相比于上一时期处理 A、B、C、D 增加 41.01%,39.90%,4.40%,114.61%,处理 CKT 相比 120 d 降低了 9.15%。



注:不同小写字母表示处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图1 不同控释肥处理对基质 EC 的影响

2.1.2 不同处理对基质碱解氮含量的影响 由图 2 可知,施肥各处理的碱解氮含量在整个生育期间均显著高于 CK。定植后 45 天,控释肥处理 A、B、C 基质中碱解氮含量相比 CKT 提高 6.66%,21.03%,22.68%。定植后 75 天,处理 A、C、D 的碱解氮含量相比上一时期提高 10.88%,35.59%,22.73%,相比 CKT 提高 4.90%~47.55%,均高于基质初始值。定植后 120 天,添加控释肥处理 A、B、C、D 基质中碱解氮含量显著高于 CK 和 CKT,与 CKT 相比提高 22.11%~37.43%,均高于基质初始值。

2.1.3 不同处理对基质速效磷含量的影响 由图 3 可

知,处理 CKT 在番茄整个生育期间其速效磷含量均显著高于其他处理,高于基质初始值,添加控释肥处理的速效磷含量随着肥料用量增加有降低的趋势。定植后 75 天,各处理相比 45 天速效磷含量降低了 8.99%~35.36%,处理 D 的降低幅度最大。定植后 120 天,处理 A、B 相比上一时期降低了 4.24%,4.18%,处理 C、D 相比上一时期升高了 6.31%,19.82%。

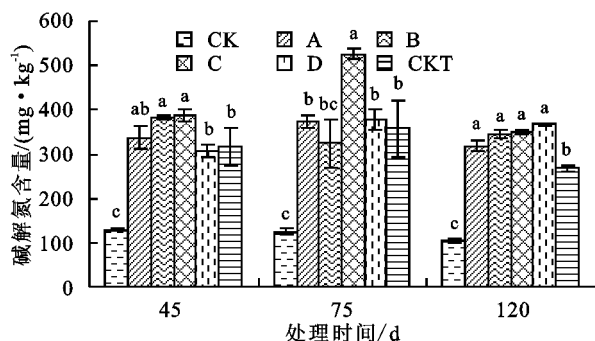


图2 不同处理对基质碱解氮的影响

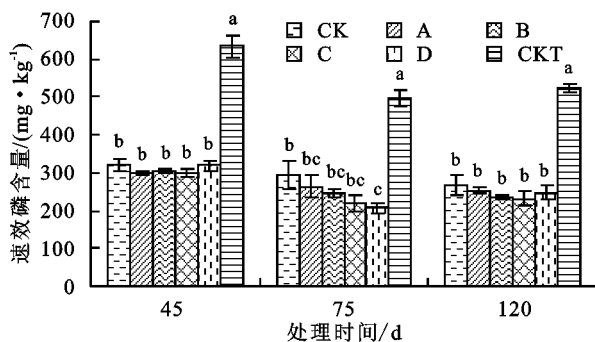


图3 不同处理对基质速效磷的影响

2.1.4 不同处理对基质速效钾含量的影响 由图 4 可知,随着肥料用量的增加,基质中速效钾含量增加,施肥各处理均高于 CK。定植后 45 天,施肥各处理基质中速效钾含量高于 CK 54.08%~444.79%,其中处理 CKT 的值最大,为 3 189.61 mg/k。定植后 75 天,施肥各处理与 CK 相比提高 82.27%~486.82%,最大值是处理 CKT,处理 C 和 D 与其差异不显著。定植后 120 天,各处理与 75 天相比降低 28.82%~63.21%,施肥各处理基质速效钾含量显著高于 CK,处理 CK 的值最大。

2.2 不同处理对番茄植株生长的影响

2.2.1 不同处理对番茄株高的影响 由图 5 可知,各处理株高随着肥料用量的增加而增大,生长过程中整体呈现先增加迅速后增加缓慢的趋势。定植后 30、45 d,施肥各处理株高均显著高于 CK,定植后 45 天,各处理株高增长率为 73.18%~87.95%,其中 C 处理值最大,为 109.67 cm,高于其他施肥处理 1.86%~9.31%,高于 CKT 10.78%。定植后 60 天,各处理株高增长率为 16.61~41.34,各施肥处理除处理 B 外株高均显著高于 CK,最大为处理 C,为 155 cm,高于其他施肥处理 7.64%~19.23%,且显著高于 CKT 9.31%。定植后 75

天,各处理株高增长率为 6.55%~19.15%,施肥处理的株高显著高于 CK,各施肥处理与 CK 相比,增长 17.91%~40.11%,处理 C 值大,为 174.67 cm,高于其他施肥处理 5.65%~19.15%,高于 CKT17.13%。

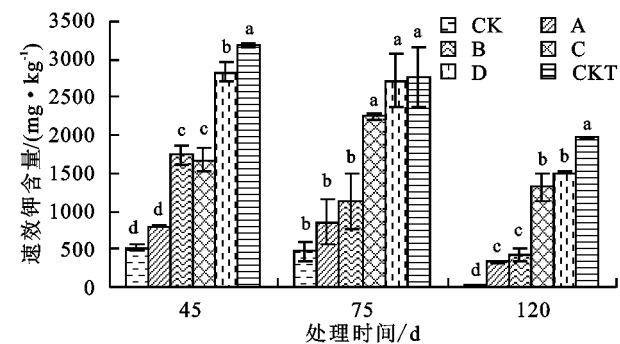


图 4 不同处理对基质速效钾的影响

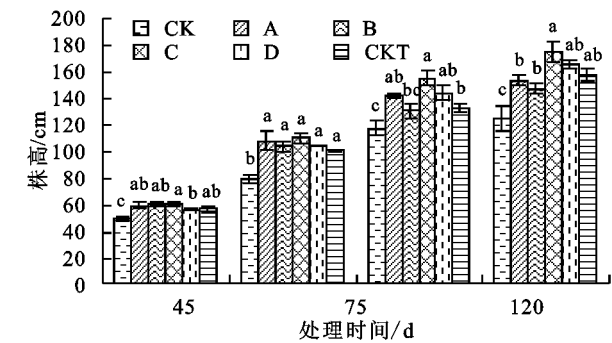


图 5 不同处理对番茄株高的影响

2.2.2 不同处理对番茄植株茎粗的影响 由图 6 可知,各处理茎粗随着肥料用量增加而增加,整个生长过程中,各处理茎粗呈现先增加后降低的趋势。定植后 30 天,除处理 D 外,其他施肥处理茎粗均高于 CK,其中,处理 B 最大,为 0.895 cm。定植后 45 天,各处理茎粗增长率为 14.37%~73.78%,施肥处理的茎粗均高于 CK,其中,处理 D 最大,为 1.273 cm,高于其他

施肥处理 10.08%~29.05%,高于 CKT 16.46%。定植后 60 天,各处理茎粗增长率为-34.14%~10.15%,施肥处理茎粗均大于 CK,其中最大是处理 D,为 1.083 cm,高于其他施肥处理 4.23%~32.11%,高于 CKT 21.99%。定植后 75 天,各处理茎粗增长率为-25.23%~20.05%,各施肥处理茎粗均高于 CK,其中最大是处理 CKT,为 1.066 cm,高于其他施肥处理 19.41%~63.00%。

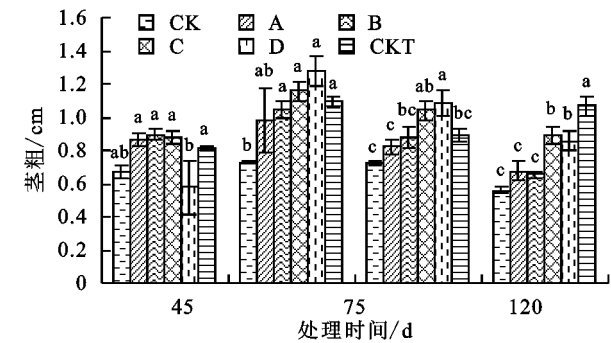


图 6 不同处理对植株茎粗的影响

2.2.3 不同处理对番茄生物量的影响 由表 2 可知,定植后 45 d,各处理生物量与 CK 相比提高 43.89%~70.56%,各处理的根鲜重均高于 CK,茎鲜重、叶鲜重和果鲜重,除配方 A 外均高于 CK,且随着控释肥料用量的增加,其值也越大,配方 C 根鲜重、茎鲜重均是最大,配方 D 值反而有降低的趋势。定植后 75 天,各处理生物量与 CK 相比提高 32.59%~87.03%,添加控释肥料各处理的根鲜重、茎鲜重、叶鲜重和果鲜重均高于 CK,处理 D 根鲜重最大,CK 根鲜重最小,各处理之间差异不显著,配方 C 的茎鲜重、叶鲜重最大,且显著高 CK。且 2 次取样,配方 C 各部分生物量要高于常规施肥处理 CKT。综上,添加控释肥料有利于促进番茄植株生物量增加。

表 2 不同处理对番茄生物量的影响

单位:g

处理	定植后 45 d				定植后 75 d			
	根	茎	叶	果	根	茎	叶	果
CK	28.10d	39.37a	113.39b	29.51bc	51.67a	83.33b	198.00b	741.67b
A	30.25cd	31.16a	107.26b	21.48c	51.67a	85.00b	258.33ab	1030.00ab
B	48.74ab	45.39a	139.53ab	69.04abc	61.67a	111.67ab	360.00ab	1258.33a
C	53.89a	50.17a	177.37a	77.37ab	62.00a	148.33a	398.33a	1273.33a
D	41.96abc	44.48a	128.56ab	92.93a	71.67a	138.33a	336.67ab	1070.00ab
CKT	36.93bcd	39.42a	178.90a	76.06ab	63.33a	111.67ab	310.00ab	1525.00a

注:不同小写字母表示处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

2.3 不同处理对番茄产量的影响

由表 3 可知,各施肥处理的平均单果重、单株坐果数、产量均显著高于 CK。平均单果重最大的是处理 C,为 122.09 g,同时也显著高于处理 A 和 B。单株坐果数最大的是处理 B,为 23.89 个,显著高于处理 C、D 和 CKT。单株产量最大是处理 C,为 2.84 kg,显著高于处理 B,与其他施肥处理之间差异不显著。单位面积产量最大是处理 C,为 104.75 t/hm²,显著高于其他施肥处

理。各个施肥处理与 CK 相比依次增产 154.14%, 203.12%, 226.32%, 160.84%, 162.18%, 添加控释肥的处理 B、C 与 CKT 相比增产 15.61%, 24.47%, 添加控释肥对于番茄产量具有显著提高作用。

2.4 不同处理对番茄果实品质的影响

由表 4 可知,各处理之间的可溶性固形物含量差异不显著,添加控释肥的处理 A、B、C、D 可溶性固形物含量要高于 CK 和 CKT,其中最大是处理 D,为

6.43%,之后是处理 C。施肥各处理的可溶性糖含量均显著高于 CK,且添加控释肥的处理 A、B、C、D 的可溶性糖含量大于处理 CKT,其中处理 D 最大,为 3.37%。施肥各处理的有机酸含量均高于 CK,但是各处理之间差异不显著,添加控释肥的处理 A、C、D 的有机酸含量要低于 CKT。各处理的糖酸比差异不显著,其中,处理 D 的糖酸比最大,为 10.73,高于其他处理,处理 A 的糖酸比最小,为 6.37。除处理 B 外,其他施肥处理的 Vc 含量均高于 CK,处理 D 的 Vc 含量最高,高于其他处理 18.98%~113.04%。各施肥处理的硝酸盐含量均低于 CK,处理 A、D、CKT 显著低于 CK,各处理番茄果实的硝酸盐含量均显著低于国家标准 432 mg/kg。

表 3 不同控释肥处理对番茄产量的影响

处理	平均单果重/g	单株坐果数/个	单株产量/kg	产量/(t·hm ⁻²)	较 CK 增产率/%	较 CKT 增产率/%
CK	75.78c	15.32c	1.17c	32.10d		
A	105.00b	23.26ab	2.43b	81.58c	154.14	-3.07
B	110.67b	23.89a	2.64ab	97.30b	203.12	15.61
C	122.09a	22.61b	2.84a	104.75a	226.32	24.47
D	114.41ab	22.78b	2.60ab	83.73c	160.84	-0.51
CKT	118.09ab	22.27b	2.63ab	84.16c	162.18	

表 5 不同处理氮素表现损失

处理	试验前期氮素累积/(mg·kg ⁻¹)	氮素投入/(kg·m ⁻³)	作物中氮素累积/(g·株 ⁻¹)	基质中氮素累积/(mg·kg ⁻¹)	表观氮素损失/(g·m ⁻³)
CK	423.11	0	0.96	203.00	0.14
A	423.11	0.43	2.16	343.00	1.15
B	423.11	0.86	1.98	346.50	10.51
C	423.11	1.29	2.57	350.00	15.56
D	423.11	1.72	2.50	367.17	25.23
CKT	423.11	1.40	3.07	267.17	18.96

3 讨论

3.1 控释肥对番茄植株生长的影响

控释肥对植株生长具有促进作用,本研究表明,整个生长期,添加控释肥处理的株高和茎粗都高于 CK,且在定植后 45,60,75 天,添加控释肥处理的株高要大于常规施肥处理 CKT,说明控释肥对于植株株高的促进作用优于普通化肥。这与吴正景等^[10]的研究结果相同,而吴艳丽等^[11]研究则表明,控释肥在番茄生长初期对其生长影响不大,添加控释肥处理的番茄株高、茎粗等并未有明显差异。孙哲等^[12]研究表明,控释肥稳定持续的养分供应有利于番茄植株根系的生长,从而促进其地上部生长,对生物量有促进作用,有报道^[13]指出,施肥频率对于植株生物量也有一定影响,本研究添加控释肥处理的生物量均显著高于 CK,且在定植后 45 天,控释肥处理的根干物质比重要显著高于 CK。

3.2 控释肥对番茄产量的影响

番茄对于养分的需求较大,其产量的提高与肥料的供应密不可分^[14],施肥决定着番茄的产量,控释肥对于

表 4 不同处理对番茄果实品质的影响

处理	可溶性固形物/%	可溶性还原糖/%	有机酸/%	糖酸比	Vc/mg	硝酸盐/(mg·kg ⁻¹)
CK	6.03a	2.49b	0.31a	10.49a	14.52ab	238.99a
A	6.13a	3.06a	0.39a	6.37a	16.22ab	151.10bc
B	6.04a	3.06a	0.42a	7.51a	9.28b	193.69ab
C	6.37a	3.01a	0.39a	9.13a	15.54ab	191.13ab
D	6.43a	3.37a	0.36a	10.73a	19.76a	99.17cd
CKT	5.53a	2.96a	0.42a	8.03a	16.61ab	78.99d

注:Vc 含量用 100 g 鲜重番茄果实中 Vc 的质量表示(mg)。

2.5 不同处理的表观氮素损失

按照氮素表观损失=试验前期氮素累积+氮素投入-作物中氮素累积-基质中氮素累积计算各处理的表观氮素损失,比较其肥料利用率。各处理起始氮素含量一致,不同处理氮素后期添加不同,各处理植株中氮素含量并没有随着氮素投入增多而增加,试验后期基质中氮素累积随着起始肥料的增多呈正相关,且添加控释肥料的各处理碱解氮含量高于常规施肥处理。各处理表观氮损失,随着氮素投入的增多,其损失也增多,结合产量考虑处理 C 的氮素投入低于常规施肥处理,且氮素损失低于常规施肥处理,其养分利用率高(表 5)。

番茄产量具有显著提高作用。控释肥对于番茄单株坐果数、平均单果重的影响从而影响到其产量^[15],本研究中,控释肥处理的单株坐果数、平均单果重均显著高于 CK,其产量相比 CK 提高 154.14%~226.32%。控释肥处理 B 和 C 的养分供应用量低于 CKT,但是其产量与 CKT 相比,提高 15.61%~34.47%,说明控释肥料对番茄产量的促进作用要优于普通化学肥料,且在肥料减量的条件下,仍然促进产量^[16-17]。本研究中,处理 D 和 CKT 的氮素供应量大于处理 B 和 C,但是其产量却降低了,可能是因为其养分供应较多,使植株的营养生长比较旺盛,而生殖生长相对较弱,导致其果实成熟较慢,产量降低。

3.3 控释肥对番茄果实品质的影响

控释肥料对于番茄果实的品质也有一定的影响^[18],其中,可溶性还原糖、Vc、有机酸、糖酸比等都是评价番茄果实品质优良的重要指标。本研究中,各施肥处理的可溶性还原糖、有机酸等均高于 CK,除处理 D 外其他处理的糖酸比要低于 CK,其 Vc 含量也有提高。本试验中,控释肥处理的可溶性还原糖均

高于 CKT, 控释肥对于番茄品质的促进作用优于化肥, 处理 C 的施肥量大于处理 A 和 B, 但是其可溶性还原糖较小, 处理 D 的施肥量最大, 其可溶性还原糖含量也最高, 综合考虑其产量, 处理 C 的肥料用量对于番茄产量和果实促进作用较显著。本研究中, 施肥各处理番茄果实中硝酸盐含量均低于 CK, 但是控释肥处理果实中硝酸盐含量要高于 CKT, 说明控释肥对于果实品质的提高还有待进一步改善。

3.4 控释肥对基质养分的影响

控释肥料根据作物需肥模式释放养分, 养分可以被作物及时吸收^[19], 其养分供应浓度稳定, 生长环境更具安全性。本试验中, 施用控释肥料各处理的 EC 值随着肥料用量增加而增加, 说明其养分含量随着肥料用料增加而增加, 在整个生育期间的 EC 值都比较稳定。氮、磷、钾是植株生长过程中吸收最多的 3 种元素, 番茄在生长前期对于氮需求较多, 坐果期对于钾需求较多, 各个时期对于磷的吸收较少^[20], 植株对于氮、钾的吸收还会促进对磷的吸收。本研究中, 控释肥处理基质中碱解氮的含量在番茄开花初期与坐果盛期均高于 CKT, 说明其氮素供应充足。控释肥处理基质中速效磷含量显著低于 CKT, 但是生长过程中并未出现缺磷, 基质中磷元素可以满足作物对磷的吸收, 生产过程中增施磷肥会产生浪费, 控释肥处理 C 和 D 的基质中速效钾含量在试验后期的含量依然较高, 养分残留低于 CKT。同时, 控释肥还对会增大基质的孔隙度^[21], 使作物根系可以更好地进行呼吸, 对生长起到促进作用。控释肥料的使用, 可以减少施肥用量和次数, 有效提高肥料利用率^[22]。

4 结论

控释肥料对于番茄植株生长具有促进作用, 随着肥料用量增加, 其株高、茎粗、生物量均增加, 其中, 配方 C 应用效果最佳。定植后 75 天, 配方 C 株高为 174.67 cm, 与 CK 相比, 株高提高 21.75%, 与 CKT 相比株高提高 17.13%; 茎粗为 0.893 cm, 与 CK 相比提高 59.46%; 生物量与 CK 相比提高 75.12%。随着控释肥用量的增大, 番茄的产量呈现先增加后降低的趋势, 处理 C 的产量最高, 为 104.75 t/hm², 与 CK 相比提高 226.32%, 与 CKT 相比提高 24.47%。基质中添加控释肥, 其基质理化性质稳定, 养分残留较常规施肥减少, 养分利用率高, 还节省了施肥的劳动力投入, 经济效益显著。

参考文献:

- [1] 于立芝, 李东坡, 俞守能, 等. 缓/控释肥料研究进展[J]. 生态学杂志, 2006, 25(12): 1559-1563.
- [2] 张德奇, 季书勤, 王汉芳, 等. 缓/控释肥的研究应用现状及展望[J]. 耕作与栽培, 2010(3): 46-48.
- [3] 王鑫, 张占军, 马生发, 等. 包膜控释尿素与普通尿素配比对大棚番茄的增产及品质效应的研究[J]. 甘肃科技,

- 2005, 21(10): 200-202.
- [4] 龙锦林, 杨守祥, 史衍玺. 控释氮肥对温室番茄增产效应及利用率的研究[J]. 北方园艺, 2003(5): 38-40.
- [5] 朱余清, 王军. 控释肥料对中蔬 4 号番茄产量和品质的影响[J]. 长江蔬菜, 2011(12): 60-63.
- [6] 韩晓日. 新型缓/控释肥料研究现状与展望[J]. 沈阳农业大学学报, 2006, 37(1): 3-8.
- [7] 蒋卫杰, 余宏军, 刘伟, 等. 蔬菜无土栽培新技术(修订版)[M]. 北京: 金盾出版社, 2012: 107-112.
- [8] 鲁如坤. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [9] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [10] 吴正景, 吕静霞, 苗艳芳, 等. 包膜尿素对日光温室土壤理化特性及番茄生长的影响[J]. 河南农业科学, 2005, 34(6): 71-73.
- [11] 吴丽艳, 黎志彬, 葛正平, 等. 不同缓释肥料对大棚番茄生长、产量及品质的影响[J]. 西南农业学报, 2015, 28(6): 2605-2609.
- [12] 孙哲, 郑建利, 朱国梁, 等. 不同控释肥养分释放特征及对番茄根系生长、产量与品质的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(28): 65-70.
- [13] Shah S H. Effects of nitrogen fertilisation on nitrate reductase activity, protein, and oil yields of *Nigella sativa* L. as affected by foliar GA3 application [J]. Turkish Journal of Botany, 2008, 32(2): 165-170.
- [14] 薛娟, 颜建明, 肖雪梅, 等. 不同缓释肥对茄子生长、产量及品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(4): 579-584.
- [15] 王鑫, 刘建新, 徐秋明, 等. 包膜控释尿素对大棚番茄的增产与品质提高效应[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(6): 137-140.
- [16] 张小玲, 徐万里, 刘骅, 等. 施用不同控释肥料对加工番茄产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2005, 42(4): 257-259.
- [17] Grant C A, Wu R, Selles F, et al. Crop yield and nitrogen concentration with controlled release urea and split applications of nitrogen as compared to non-coated urea applied at seeding [J]. Field Crops Research, 2012, 127: 170-180.
- [18] 梁玉芹, 高慧敏, 宋炳彦, 等. 控释肥施入方式对樱桃番茄产量和品质的影响[J]. 河北农业科学, 2007, 11(2): 67-68.
- [19] Zheng W, Liu Z, Zhang M, et al. Improving crop yields, nitrogen use efficiencies, and profits by using mixtures of coated controlled-released and uncoated urea in a wheat-maize system [J]. Field Crops Research, 2017, 205: 106-115.
- [20] 颜冬云, 张民. 控释复合肥对番茄生长效应的影响研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(1): 110-115.
- [21] 孙玲丽, 张民. 控释肥在基质栽培中的养分淋溶及其对基质理化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 151-154.
- [22] 杨俊刚, 张冬雷, 徐凯, 等. 控释肥与普通肥料混施对设施番茄生长和土壤硝态氮残留的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(18): 3782-3791.

不同水氮条件对东北寒地黑土直播稻光响应特征的影响

贡宁晗¹, 张忠学^{1,2}, 李美娟³, 李铁男³

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 农业部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030; 3. 黑龙江省水利科学研究院, 哈尔滨 150080)

摘要: 为了揭示寒地黑土直播稻在不同灌水方式和施氮水平下功能叶片光响应特征, 以测坑试验水直播水稻为研究对象, 采用全面试验方法, 设灌水方式和施氮量 2 个因素, 针对水稻分蘖期和抽穗开花期开展了不同水肥条件下直播水稻叶片光响应特征的研究。结果表明: 随氮肥施用量的增加, 直播稻功能叶片的光响应曲线上升, 光强高于 $600 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, 不同施氮量处理的光响应曲线间距变大。运用非直角双曲线模型建立水稻叶片光合光响应曲线的拟合, 得出不同水氮处理下直播水稻叶片的光响应特征参数, 结果显示, 随着施氮量的增加, 最大净光合速率 P_{max} 、表观量子效率 α 和光饱和点 LSP 上升, 光补偿点 LCP 下降; 而同施氮量条件下, 控制灌溉处理的 P_{max} 、 α 和 LSP 高于淹灌处理, LCP 低于淹灌处理。因此, 在 $0 \sim 135 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 的范围内增加施氮量和控制灌溉有助于提升直播稻功能叶片光合作用能力, 提高其对光能的利用率和对强光及弱光的适应能力, 有效改善叶片光响应特征, 提高水稻产量, 所以在进行直播水稻栽培研究时, 要充分考虑不同水肥条件对其光响应特征的影响。

关键词: 直播稻; 水稻; 控制灌溉; 氮肥; 光响应

中图分类号: S311; S511

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0315-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.03.047

Effects of Different Water and Nitrogen Conditions on Characteristics of Light Response Curve of Direct-seeding Rice in Cold and Black Soil Region of Northeast China

YUN Ninghan¹, ZHANG Zhongxue^{1,2}, LI Meijuan³, LI Tienan³

(1. College of Water and Civil Engineering, Northeast Agriculture University, Harbin 150030; 2. Key Laboratory of Water-saving Agriculture of Heilongjiang Province, Harbin 150030; 3. Heilongjiang Water Conservancy Science Research Institute, Harbin 150080)

Abstract: In order to reveal the influence of irrigation methods and nitrogen fertilizer on characteristics of functional leaf's photosynthetic light response of direct-seeding rice in cold and black soil region, the test-pit experiments was carried out Two factors were set, including irrigation methods and nitrogen fertilizers. The characteristics of photosynthetic light curve of rice leaf with different water and nitrogen regulations in the tillering stage and the heading-and-flowering stage was studied by using comprehensive test design. The result showed that when nitrogen rate increased, photosynthetic light response curves of direct-seeding leaf rised, especially when the photosynthetic photon flux density was higher than $600 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. Parameters derived from non-rectangular hyperbola model indicated P_{max} (maximum photosynthesis rate), α (apparent quantum yield) and LSP (light saturation points) increased with the increase of the nitrogen rate, while LCP (light compensation points) reduced. P_{max} , α and LSP of controlled irrigation treatments were higher than those of flood irrigation treatments at the same nitrogen rate, while LCP was lower. In conclusion, higher nitrogen inputs, within the range of $0 \sim 135 \text{ kg}/\text{hm}^2$, and controlled irrigation method lead to the increase of photosynthetic capacity, enhancing the light use efficiency and the adaptability to both strong and weak light of rice leaf. These findings were helpful for improvement of photosynthetic light response curve and rice yield. It should be taken into full consideration for the effects different nitrogen levels and irrigation ways on leaf's photosynthetic light response curve in paddy of direct-seeding rice.

收稿日期: 2017-12-15

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400108); 黑龙江省应用技术与开发计划重大项目(GA15B101)

第一作者: 贡宁晗(1993—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事农业节水理论研究。E-mail: ygpcslww@163.com

通信作者: 张忠学(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持技术、生态农业研究。E-mail: zhangzhongxue@163.com

Keywords: direct-seeding rice; rice; controlled irrigation; nitrogen fertilizer; photosynthetic light response curve

在我国当前水资源极度短缺的大背景下,农业节水成为当前我国一个重要课题。目前,我国稻作水分管理主要采用淹灌的灌水方式,容易造成灌水不均、大量水分无效渗漏和蒸发、灌溉水利用系数低等问题,进而导致农业水资源严重浪费,加剧水资源短缺,很不适应现在农业精准灌溉的要求,而控制灌溉作为水稻的高效节水技术,节水增产效果显著,已经得到了大面积的推广应用^[1-5]。控制灌溉实际上是适度降低土壤水分而改变作物生理,提高作物抗旱能力,从而在高产基础上实现水资源的高效利用^[6-10]。氮肥是水稻生理生长的重要限制因子,它对水稻生产的影响仅次于水分^[11],氮肥施用量的变化对水稻生长发育有着重要影响^[12]。因此,不同水氮条件下水稻生理变化规律十分值得研究。光合作用是作物生长发育的基础和生产力高低的决定性因素^[13],是作物进行干物质积累的重要生理过程。光是光合作用的主导因子,不同生育阶段、不同生长条件下作物的光响应机制也有所差异^[14-18]。研究水稻叶片的光响应特征,对于研究水稻光合产物积累的运转机理和水稻产量的形成具有重要意义。

黑龙江省属于典型的寒地黑土稻作区,移栽是目前水稻种植的主要方式,但由于育秧移栽投入成本大、费工费时、不便于进行水稻大面积机械化生产等问题,移栽稻的可持续发展问题面临严峻考验^[19]。当前水稻直播技术日臻成熟,已在全国多个省市推广应用,取得了显著的增产提效成果^[20],但在黑龙江省范围内还未得到大范围推广,直播稻的光合特性和光响应特征对不同水氮条件的响应也鲜有研究。基于此,本文以寒地黑土区直播水稻为研究对象,进行不同灌水方式和施氮水平调控试验,以研究寒地黑土区直播水稻功能叶片的光合光响应特征,为进行更高效合理的直播稻的水肥管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2017 年 5—10 月在黑龙江省庆安国家灌

溉试验重点站进行,该站(东经 127°30′04″,北纬 46°52′41″)地处于绥化市庆安县和平灌区,是典型的寒地黑土分布区。该地临界于第 2 积温带和第 3 积温带之间,多年平均气温为 2.5℃,年降水量 550 mm,作物水热生长期为 164 d,无霜期 128 d^[3]。气候特征属寒温带大陆性季风气候。土壤类型为白浆土型水稻土,容重 1.01 g/cm³,孔隙度 61.8%。土壤基本理化性质为:有机质含量 41.8 g/kg,pH 6.40,全氮 15.06 g/kg,全磷 15.23 g/kg,全钾 20.11 g/kg,碱解氮 154.36 mg/kg,有效磷 25.33 mg/kg 和速效钾 157.25 mg/kg。

1.2 试验材料与设计

试验水稻品种为龙庆稻 3 号。供试氮肥为尿素(含 N 46%)。试验于测坑进行,配全自动遮雨棚。小区面积 4 m²,四周种植同种水稻作为保护行。水泥测坑无侧向渗透和垂直渗漏。试验采用水直播栽培方式,水稻品种、播种、植保及用药等技术措施以及田间管理条件相同。种植密度为 175 株/m²,每穴播种 8~10 粒,定苗 5 株。

试验选定灌水方式和氮肥 2 个因素,设淹灌(F)、控制灌溉(C)2 个灌水方式和 0,85,110,135 kg/hm² 4 个施氮水平。采用全面试验,共设 F0、F60、F110、F135 和 C0、C60、C110、C135 共 8 个处理,每个处理重复 3 次。

水稻不同灌水方式的土壤水分调节标准如表 1 所示,苗期按照水直播水稻要求进行统一的田间管理。氮肥按照基肥:分蘖肥:促花肥:保花肥比例为 4.5:2:1.5:2 分施;磷肥作为基肥一次性施入;钾肥按照基肥:幼穗分化期肥比例为 1:1 分 2 次施入。5 月 6 日施基肥,5 月 10 日泡田,5 月 12 日播种,5 月 22 日出苗,6 月 20 日施分蘖肥,7 月 28 日施促花肥,8 月 6 日施保花肥,9 月 23 日收获。水稻生育期 125 d,分为苗期(5 月 22 日至 6 月 12 日)、分蘖期(6 月 13 日至 7 月 16 日)、拔节孕穗期(7 月 17 日至 8 月 1 日)、抽穗开花期(8 月 2—11 日)、乳熟期(8 月 12—31 日)、黄熟期(9 月 1—22 日)。

表 1 不同灌水方式下的稻田田间水分管理

处理	分蘖 初期	分蘖 盛期	分蘖 末期	拔节 孕穗期	抽穗 开花期	乳熟期	黄熟期
控制灌溉	85~100	85~100	晒田	85~100	85~100	75~100	落干
淹灌	10~50	10~30	晒田	10~50	10~50	10~30	落干

注:表中控制灌溉灌水量为田间土壤含水率占土壤饱和含水率的值(%) ;淹灌灌水量为灌水深度(mm)。

1.3 观测方法

分别于水稻分蘖期和抽穗开花期,选择晴朗无风天气,于 9:00—11:30 利用 LI-6400XT 型光合测定

仪测定直播水稻叶片的光响应特征,以此绘制光响应特征曲线。测定时,控制光合有效辐射通量密度(PPFD)分别在 0,20,50,75,100,200,400,600,800,

1 000,1 200,1 500,1 800,2 000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,每个光强梯度下测定时间为 120~180 s,采用仪器内置功能控制 CO_2 浓度、叶温等环境条件恒定不变。每次测定时,夹住水稻倒数第 2 功能叶片距离叶尖 1/3 处进行测定。

1.4 数据处理方法

利用 Excel、Matlab 2014a、SPSS 18.0 等软件进行数据处理和统计分析。

1.5 光响应曲线模型

描述光响应曲线的数学方程有很多,本文选用非直角双曲线模型(即 Farquhar 模型)^[21]对不同水氮调控下直播水稻叶片的光响应特征进行数学模拟,得到不同灌水方式和施氮条件下直播水稻分蘖期和抽穗开花期叶片的光响应特征参数,包括最大净光合速率 P_{max} 、暗呼吸速率 R_d 、表观量子效率 α 和光响应曲线凸度 θ 等。对曲线 0~200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 进行线性回归,得到的直线与净光合速率值为零(x 轴)和净光合速率为最大净光合速率值两条水平线的交点分别为光补偿点 LCP 和光饱和点 LSP。非直角双曲线模型表达式为:

$$P_n = \frac{\alpha I + P_{\text{max}} - \sqrt{(\alpha I + P_{\text{max}})^2 - 4\theta\alpha I P_{\text{max}}}}{2\theta} - R_d$$

(1)

式中: P_n 为叶片净光合速率($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); α 为表观量子效率(AQY, $\mu\text{mol}/\mu\text{mol}$); P_{max} 为叶片达到光饱和时的表观最大净光合速率($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); θ 为非直角双曲线的凸度,无量纲; R_d 为暗呼吸速率

($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); I 为入射到叶片上的光合有效光子通量密度($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)。

光响应曲线模型中的参数是描述植物光合作用特征的重要生理生态特征参数。 α 反映了植物光合作用对光的利用效率,即每片叶子每吸收 1 mol 量子所固定的摩尔数; P_{max} 是叶片光合能力的度量,反映了叶片的光合潜力; LCP 是植物进行光合作用所需的最低光照强度,反映了植物对弱光的利效率; LSP 表示了植物光合作用达到最大时的光照强度,反映了植物对强光的利用效率, R_d 为暗呼吸速率,一定程度反映了植物的生理活动活跃程度^[22]。

2 结果与分析

2.1 不同水氮条件下直播稻叶片的光响应特征

由图 1、图 2 可知,光强 PPFD 由 0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 增加到 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,各时期各处理的净光合速率呈线性增加趋势,之后曲线斜率随光强增加而不断下降,直到光强在 600 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 后光响应曲线呈水平状,即光合速率达到光饱和和同化速率的光饱和阶段。随着施氮水平提高,直播水稻功能叶片的净光合速率增加,且在光强高于 400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时各氮处理光响应曲线的间距增大,表明在 0~135 kg/hm^2 内提高施氮水平可以提升水稻功能叶片对强光的转化利用能力,有效改善其光合光响应特征。不同灌水方式间做对照,2 个时期的淹灌处理水稻净光合速率均略低于控制灌溉净光合速率。相同光强下,同施氮量不同灌水方式的处理间控制灌溉的净光合速率大多高于淹灌,淹灌处理受氮肥亏缺的影响大于控制灌溉处理。

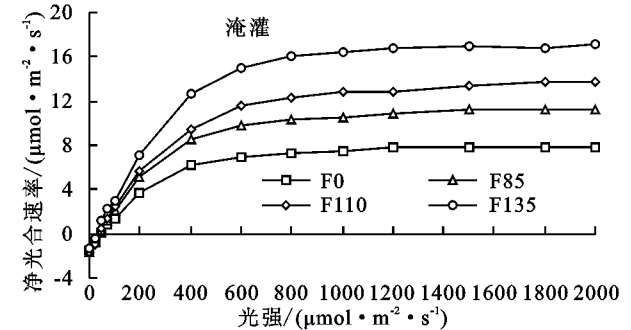


图 1 分蘖期不同水氮条件下直播稻叶片的光响应曲线

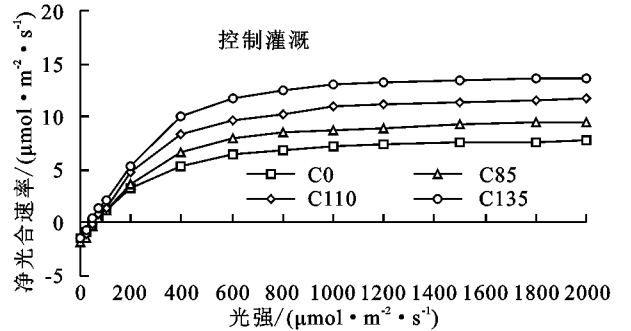
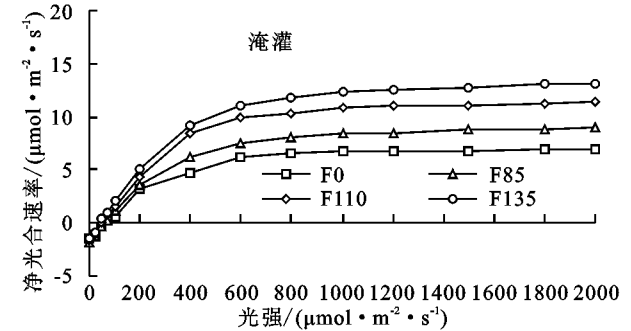
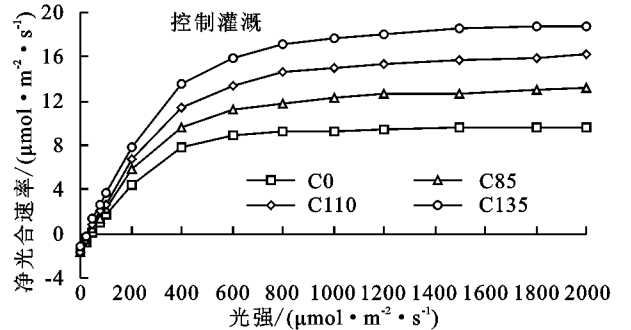


图 2 抽穗开花期不同水氮条件下直播稻叶片的光响应曲线

2.2 不同水氮处理光响应曲线特征参数变化规律

应用公式(1)中的非直角双曲线模型建立直播水稻功能叶片光响应曲线的数学拟合,得到的大部分拟合决定系数 R^2 都在 0.9 以上,最低为 0.879,在 0.850 以上;模型拟合结果的均方根误差 RMSE 除个别较大外(0.52~0.61 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$),都小于 0.5 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot$

s);所有拟合结果均显著($p<0.05$)。表明非直角双曲线模型能够很好地表述不同水氮条件下分蘖期和抽穗开花期直播稻功能叶片的光响应特征。模型拟合出的光响应特征参数见表 2,所有参数均具有明确的物理意义,比较不同处理的模型拟合的光响应特征参数能够全面准确地揭示直播水稻叶片的光合光响应特性。

表 2 不同水氮处理直播稻叶片光响应曲线特征参数

生育期	灌水 方式	施氮水平/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	$P_{\text{max}}/$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	$\alpha/$ ($\mu\text{mol} \cdot \mu\text{mol}^{-1}$)	$R_d/$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	LSP/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	LCP/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	θ	R^2	RMSE/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
分蘖期	淹灌	0	8.83	0.025	1.571	448.70	66.53	0.845	0.879	0.52
		85	11.12	0.030	1.795	473.89	64.99	0.812	0.915	0.29
		110	13.36	0.034	1.724	491.03	52.97	0.891	0.916	0.30
		135	15.43	0.040	1.649	506.15	42.67	0.792	0.930	0.26
	控制灌溉	0	9.51	0.027	1.395	454.74	56.84	0.775	0.906	0.24
		85	11.86	0.033	1.927	485.37	63.48	0.796	0.924	0.27
		110	14.01	0.037	1.778	497.47	51.26	0.800	0.900	0.36
		135	15.88	0.042	1.632	511.96	37.81	0.834	0.911	0.45
		0	12.06	0.039	1.809	424.62	50.18	0.815	0.980	0.23
		85	16.72	0.050	2.340	443.88	42.94	0.808	0.937	0.31
抽穗开花期	淹灌	110	20.41	0.056	2.147	481.49	40.67	0.745	0.963	0.40
		135	24.08	0.062	1.843	488.38	27.16	0.860	0.930	0.61
		0	14.29	0.043	1.924	427.37	46.33	0.892	0.959	0.28
		85	19.26	0.056	2.189	457.14	41.10	0.786	0.912	0.36
	控制灌溉	110	23.18	0.062	2.005	485.32	32.68	0.772	0.974	0.49
		135	26.39	0.068	1.651	496.24	21.54	0.796	0.978	0.43

对 2 个生育期的光响应曲线参数进行纵向对比,发现抽穗开花期的最大净光合速率 P_{max} 、表观量子效率 α 分别较分蘖期上升 33.6%~66.2%,56.0%~61.9%,而光饱和点 LSP 和光补偿点 LCP 分别下降 1.9%~6.3%和 18.5%~43.0%,可知直播水稻抽穗开花期时叶片的光合潜力得到大幅提升,光能转化率显著升高,但对强光的利用能力降低而对弱光的利用能力提高。这表明直播水稻各生育期的光合光响应特性与其本身生育阶段密切相关,会随着水稻本身的长势盛衰而起伏。

比较不同处理光响应曲线的参数可以得知,直播水稻在分蘖期和抽穗开花期功能叶片的最大净光合速率 P_{max} 、表观量子效率 α 、光饱和点 LSP 均随着施氮量的增加而上升,光补偿点 LCP 除分蘖期 C0 处理外,基本随着施氮量的增加而降低,而暗呼吸速率 R_d 和光响应曲线凸度 θ 与施氮量没有明显的对应关系。灌水方式处理间对比表明,相同施氮量条件下, P_{max} 、 α 、LSP 均为控制灌溉处理大于淹灌, LCP 值也基本为控制灌溉小于淹灌,不同灌水方式间 R_d 和 θ 无显著差别。综合分析表明,高施氮量和控制灌溉有助于改善直播水稻分蘖期和抽穗开花期的光合特性,提高叶片对光能的利用率,增强该时期水稻对强光

和弱光的利用能力。一定范围内较高的施氮量有利于改善水稻对水分亏缺的适应,而控制灌溉有利于改善氮肥亏缺时的光响应特性,因此在进行直播水稻水肥调控时,要充分考虑不同水肥调控对水稻光响应特征的影响。

进一步进行分析,可以得出与 F0 相比,分蘖期和抽穗开花期 F85、F110、F135 处理的 P_{max} 分别提高 26.0%,51.3%,74.8%和 38.7%,69.3%,99.7%; α 分别提高 20%,36%,60%和 28.2%,43.6%,59.0%; LSP 分别提高 5.6%,9.4%,12.8%和 4.5%,13.4%,15.0%;而 LCP 分别下降 2.3%,20.4%,35.9%和 14.4%,19.0%,45.9%。与 C0 相比,分蘖期和抽穗开花期 C85、C110、C135 处理的 P_{max} 分别提高 24.7%,47.3%,67.0%和 34.8%,62.2%,84.7%; α 分别提高 22.2%,37.0%,55.6%和 30.2%,44.2%,58.1%; LSP 分别提高 6.7%,9.4%,12.6%和 7.0%,13.6%,16.1%;而 LCP 分别下降 11.7%(分蘖期 C0 处理 LCP 较低),9.8%,33.5%和 11.3%,29.5%,53.5%。对比可知,淹灌条件下,增施氮肥时光合光响应参数变化的幅度明显大于控制灌溉,说明淹灌处理有助于在直播稻分蘖期和抽穗开花期获得更高的光合速率反弹。且抽穗开花期光响应参数随施氮量的变化幅度又显著大于分

蘖期,可能与抽穗开花期保花肥和促花肥所占施肥比例较大,氮肥施用量对该时期水稻生理生态变化影响较分蘖期更大所致。

相同供氮水平处理下,分蘖期控制灌溉 $P_{\max}$ 和 α 较淹灌对应处理分别升高 7.7%,6.6%,4.9%,2.9% 和 8.0%,10.0%,8.8%,5.0%,而抽穗开花期 $P_{\max}$ 和 α 较淹灌对应处理分别升高 18.5%,18.2%,13.5%,9.6%和 10.3%,12.0%,10.7%,9.7%。LSP 控制灌溉均高于淹灌而 LCP 均低于淹灌,但两者升降幅度差异不大。可见抽穗开花期时,控制灌溉的 $P_{\max}$ 和 α 与淹灌相比上涨的幅度大于分蘖期的上涨幅度,这与抽穗开花期是水稻的关键需水期,该时期水稻对水分变化较敏感而分蘖期较不敏感所致。氮肥量升高时控制灌溉与淹灌的差异缩小,表明高施氮量可以减小水分差异对光合光响应带来的负面影响,改善淹灌时的光响应特征。

表 3 不同水氮处理直播稻叶片光响应特征参数与产量相关系数

生育期	$P_{\max}$	α	R_d	LSP	LCP	θ
分蘖期	0.963**	0.954**	0.443	0.973**	-0.772*	0.104
抽穗开花期	0.970**	0.969**	-0.171	0.984**	-0.882**	-0.454

注: * 表示在 0.05 水平上差异显著; ** 表示在 0.01 水平上差异显著。

3 讨论

直播水稻在分蘖期和抽穗开花期时功能叶片的净光合速率 $P_{\max}$ 、表观量子效率 α 和光饱和点 LSP 均为高氮大于低氮,控制灌溉大于淹灌,而光补偿点 LCP 为低氮大于高氮,淹灌大于控制灌溉,与刘宇峰等^[23]的研究结论相同,与陈劲丰等^[24]的研究中采用间歇灌溉的节水灌溉方式比淹灌净光合速率、 $P_{\max}$ 、LSP 增大,且随施氮量增加,灌溉方式导致的差异减弱的结论基本一致。这说明施氮量的增加提高了水稻叶片内叶绿素的相对含量,促进了叶片与环境的气体交换,而控制灌溉条件下,水稻将水分更多地运用于光合物质积累等更重要的生理活动,减少水分的蒸腾损耗,从而共同促进了水稻叶片光合光响应特性的改善。

徐俊增等^[13]研究指出,非充分灌溉会导致水稻叶片对强光的适应能力降低,光响应曲线下降;张忠学等^[25]的研究指出控制灌溉相较淹灌而言光饱和点后延而光补偿点前移,有利于对弱光的适应而不利于强光,与本研究中控制灌溉有助于提升水稻叶片对弱光和强光的转化利用率大有不同,这可能与直播水稻与插秧移栽水稻对土壤水分的需求不完全相同有关。且本研究中的控制灌溉水分管理虽然在一定范围内降低了田间土壤含水量,但并没有造成严重的水分亏缺,损害水稻器官,影响作物生理,说明本研究中控制灌溉形成的水分胁迫处在较适宜的范围内,不仅不会

2.3 光响应曲线模型参数与产量相关性分析

为了研究直播水稻分蘖期和抽穗开花期的光响应特性对产量的影响,将各时期不同水氮条件下直播水稻的光响应模型参数与水稻产量进行相关性分析(表 3)。由 Pearson 相关性分析结果可知,在直播水稻的分蘖期和抽穗开花期,水稻最大净光合速率 $P_{\max}$ 、表观量子效率 α 、光饱和点 LSP 分别与水稻产量呈 0.01 水平上的极显著正相关,且抽穗开花期相关系数均略高于分蘖期。光补偿点 LCP 与产量在分蘖期呈 0.05 水平上的显著负相关,在抽穗开花期呈 0.01 水平上的极显著负相关。暗呼吸速率 R_d 和光响应曲线凸度 θ 在 2 个生育期均与水稻产量无显著的相关性。相关性分析结果表明,直播水稻分蘖期和抽穗开花期光响应模型特征参数变化对水稻产量影响显著,通过对这两个时期叶片光响应特征参数的分析,可以对水稻产量进行初步预测。

对直播水稻光合特性造成负面作用,反而能提高水稻对土壤水分的利用率,在达到节水目的的同时,促进叶片光合作用,有利于光合产物的积累。

通过光响应模型参数与产量的相关性分析可知,直播水稻分蘖期和抽穗开花期的光响应特性与其产量有明显的相关关系,即分蘖期和抽穗开花期光合光响应特征表现越好,产量则相应越高。可见施氮水平的提高和控制灌溉有助于直播稻通过叶片光合作用积累有机物质,从而提高水稻产量。

此外,本研究的供氮水平为 0~135 kg/hm²,而张忠学等^[25]研究中施氮量为 0~160 kg/hm²,徐俊增等^[13]研究中施氮量为 200~300 kg/hm²,陈劲丰等^[24]研究中施氮量为 135~225 kg/hm²,施氮水平均大于本研究中施氮水平,与试验区为黑土区、土壤中营养成分含量较多有关,但也表明本试验中施氮量水平可以增设几个高氮水平,以便更加全面地了解施氮量对直播水稻光响应特征影响的变化趋势。同时,研究缺乏同样条件下移栽水稻的对照处理,无法对直播水稻和移栽水稻光响应特征的差异进行对比分析,今后研究中应当予以改善。

4 结论

(1)随着施氮水平的增加,水稻功能叶片净光合速率增大,光响应曲线上升,且在光强高于 400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,不同施氮水平间的光响应曲线的间

距变大。控制灌溉处理的净光合速率高于淹灌处理,但随着施氮量增加,由于灌水方式引起的差异逐渐弱化。控制灌溉处理受氮肥亏缺的影响低于淹灌处理。

(2)直播水稻在分蘖期和抽穗开花期功能叶片的 $P_{\max}$ 、 α 、LSP 均随施氮量的增加而上升,LCP 基本随施氮量的增加而降低。同施氮量条件下,控制灌溉的 $P_{\max}$ 、 α 、LSP 均大于淹灌,LCP 值基本为控制灌溉小于淹灌。 $0\sim 135\text{ kg/hm}^2$ 内增加施氮量和控制灌溉有利于提升直播水稻分蘖期和抽穗开花期的光合光响应水平,增强水稻叶片对弱光和强光的转化利用能力,更有利于水稻进行光合作用。

(3)淹灌处理有助于在直播稻分蘖期和抽穗开花期获得更高的光合反弹。抽穗开花期时,光响应参数随施氮量的变化幅度显著大于分蘖期,控制灌溉的 $P_{\max}$ 和 α 与淹灌相比上涨的幅度明显大于分蘖期。

(4)直播水稻分蘖期和抽穗开花期水稻叶片的 $P_{\max}$ 、 α 、LSP、LCP 与产量相关系数分别为 0.963 和 0.970,0.954 和 0.969,0.973 和 0.984,-0.772 和 -0.882,该时期叶片的光响应特征参数与产量间具有明显的相关关系。

因此,不同的灌水方式和施氮水平对水稻不同时期的光响应特征的影响具有差异性,且会对水稻产量产生一定影响。在进行水稻节水灌溉和施肥管理时,应综合考虑不同水氮水平的影响,合理安排灌溉施肥措施。

参考文献:

- [1] 彭世彰,蔡敏,孔伟丽,等.不同生育阶段水分亏缺对水稻干物质与产量的影响[J].水资源与水工程学报,2012,23(1):10-13.
- [2] 葛岩,窦超银,魏丹,等.拔节孕穗和抽穗开花期控制灌溉对水稻生长的影响[J].灌溉排水学报,2012,31(3):78-82.
- [3] 王孟雪,张忠学.适宜节水灌溉模式抑制寒地稻田 N_2O 排放增加水稻产量[J].农业工程学报,2015,31(15):72-79.
- [4] 郭群善,贺玮.水氮互作对水稻产量及品质的影响[J].节水灌溉,2016(5):42-47.
- [5] 周明耀,赵瑞龙,顾玉芬,等.水肥耦合对水稻地上部分生长与生理性状的影响[J].农业工程学报,2006,22(8):38-43.
- [6] 康绍忠,胡笑涛,蔡焕杰,等.现代农业与生态节水的理论创新及研究重点[J].水利学报,2004,35(12):1-7.
- [7] Ierna A, Mauromicale G. Physiological and growth response to moderate water deficit of off-season potatoes in a mediterranean environment [J]. Agricultural Water Management, 2006, 82(1): 193-209.
- [8] 郝树荣,郭相平,张展羽.水分胁迫及复水对水稻冠层结构

的补偿效应[J].农业机械学报,2010,41(3):52-55,61.

- [9] 上官周平,邵明安.改善旱区作物水分利用的生理调控机制[J].水利学报,1999,30(10):33-37.
- [10] 郝树荣,郭相平,张展羽,等.水稻根冠功能对水分胁迫及复水的补偿响应[J].农业机械学报,2010,41(5):52-55.
- [11] 潘圣刚,黄胜奇,汪金平,等.不同灌溉模式下氮肥水平对水稻生物学特性及水分利用效率的影响[J].干旱区研究,2012,29(1):161-166.
- [12] 徐优,王学华.水肥耦合及其对水稻生长与 N 素利用效率的影响研究进展[J].中国农学通报,2014,30(24):17-22.
- [13] 徐俊增,彭世彰,魏征,等.不同供氮水平及水分调控条件下水稻光合作用光响应特征[J].农业工程学报,2012,28(2):72-76.
- [14] 李力,张祥星,郑睿,等.夏玉米光合特性及光响应曲线拟合[J].植物生态学报,2016,40(12):1310-1318.
- [15] 方保停,邵运辉,岳俊芹,等.冬小麦灌浆后期光响应曲线特征参数及其对施氮量响应[J].西北农业学报,2011,20(3):52-56.
- [16] 陆红飞,郭相平,甄博,等.旱涝交替胁迫条件下梗稻叶片光合特性[J].农业工程学报,2016,32(8):105-112.
- [17] Zhang H H, Zhong H X, Wang J F, et al. Adaptive changes in chlorophyll content and photosynthetic features to low light in physocarpus amurensis maxim and physocarpus opulifolius "diabolo" [J]. PeerJ, 2016, 4(3): e2125.
- [18] Jiao X R, Kørup K, Andersen M N, et al. Low-temperature leaf photosynthesis of a miscanthus germplasm collection correlates positively to shoot growth rate and specific leaf area [J]. Annals of Botany, 2016, 117(7): 1229-1239.
- [19] 李志民.寒地水稻折衷直播栽培技术体系研究[J].黑龙江农业科学,2011(1):28-31.
- [20] 张洪程,龚金龙.中国水稻种植机械化高产农艺研究现状及发展探讨[J].中国农业科学,2014,47(7):1273-1289.
- [21] Farquhar G D, Caemmerer S, Berry J A. A biochemical model of photosynthetic CO_2 assimilation in leaves of C3 species [J]. Planta, 1980, 149(1): 78-90.
- [22] 于贵瑞,王秋凤.植物光合、蒸腾与水分利用的生理生态学[M].北京:科学出版社,2010.
- [23] 刘宇锋,李伏生.灌溉方式与施肥水平对超级稻光合生理的影响[J].中国生态农业学报,2013,21(4):416-425.
- [24] 陈劲丰,时元智,崔远来,等.不同水肥模式下水稻光合光响应特性研究[J].中国农村水利水电,2015(7):16-20.
- [25] 张忠学,郑恩楠,王长明,等.不同水氮处理对水稻荧光参数和光合特性的影响[J].农业机械学报,2017,48(6):176-183.

河西绿洲苕蓝生长、光合特性及品质对膜下滴灌调亏的响应

邓浩亮^{1,3}, 张恒嘉¹, 李福强¹, 王玉才¹, 周宏^{2,3}, 邓展瑞⁴, 浩楠⁴

(1. 甘肃农业大学水利水电工程学院, 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 兰州 730070;

2. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000; 3. 兰州大学生命科学学院干旱农业生态研究所, 草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州 730000; 4. 甘肃农业大学食品科学与工程学院, 兰州 730070)

摘要: 通过苕蓝的水分控制试验(2016年), 研究了不同生育期不同梯度调亏灌溉对河西绿洲苕蓝生长、光合特性及产量品质的影响。试验以河西走廊中部张掖市水务局国家重点灌溉试验站为平台, 甘肃农业大学中草药系自繁苕蓝种子为供试材料, 采用不同生育期和不同梯度调亏灌溉方式二因素随机区组试验设计, 共9个处理。在每个生育期测定苕蓝光合参数, 收获后测定新鲜板蓝根产量及品质, 为河西绿洲灌区合理种植和提高苕蓝产量品质及可持续发展提供理论依据。结果表明: (1) 营养生长和肉质根生长期水分亏缺显著降低了苕蓝叶片净光合速率、蒸腾速率和气孔导度, 且降幅随水分亏缺程度加大而增大。(2) 水分亏缺造成苕蓝产量降低, 调亏处理中肉质根成熟期轻度水分亏缺产量最高(7 342.05 kg/hm²), 较充分灌溉降低5.32% ($P>0.05$)。 (3) 苗期轻度水分亏缺水分利用效率最高(2.14 kg/m³), 肉质根成熟期轻度水分亏缺次之。(4) 肉质根成熟期轻度调亏处理的苕蓝综合品质最优, 其苕蓝靛蓝、靛玉红、(R,S)-告依春含量比生育期充分灌溉提高了0.09, 0.41, 0.007 8 mg/g, 但多糖含量下降3.37 mg/g。因此, 综合考虑苕蓝产量、水分利用效率及品质等指标, 肉质根成熟期进行轻度调亏, 即该时期土壤相对含水率为60%~90%, 可以作为河西走廊绿洲灌区苕蓝最优栽培灌溉的一种方式。

关键词: 调亏灌溉; 生长指标; 光合特性; 品质; 苕蓝

中图分类号: S274.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0321-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.03.048

Responses of Growth, Photosynthetic Characteristics and Quality of Isatis in Hexi Corridor to Mulched Drip Irrigation Under Water Deficit

DENG Haoliang^{1,3}, ZHANG Hengjia¹, LI Fuqiang¹, WANG Yucai¹,

ZHOU Hong^{2,3}, DENG Zhanrui⁴, HAO Nan⁴

(1. College of Water Resources and Hydropower engineering, Gansu Agricultural University/Gansu

Key Laboratory of Arid Land Crop Science, Lanzhou 730070; 2. Northwest Institute of

Eco-Environment and Resources Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000; 3. The Institute of Arid

Agroecology, School of Life Sciences, Lanzhou University, State Key Laboratory of Grassland Agroecology,

Lanzhou 730000; 4. College of Food Science and Engineering Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070)

Abstract: The field experiment was carried out to study the effects of different growing stages and different gradient way of regulated deficit irrigation (RDI) on growth, photosynthetic characteristics, yield and quality in *Isatis indigotica* of the Hexi oasis. Field experiments were conducted from 2016 in the National Key Irrigation Experimental Station of Zhangye Water Resources Bureau in Central Hexi Corridor District, from numerous *Isatis indigotica* seeds, bred by the Department of Chinese herbal medicine of Gansu Agricultural University, were used as tested materials. Two-factor randomized blocks were designed with nine treatments, including different growing periods and different gradient way of RDI. Each treatment had three plots as repeats in a completely random-sized design. In each growth period, the photosynthetic parameters of *Isatis indigotica* were determined, and after the harvest, yield and quality index were measured on fresh *Radix Isatis*. The results would provide a theoretical basis for reasonable planting and sustainable development of *Isatis indigotica* in Hexi oasis. The results showed that: (1) In the periods of vegetative stage and fleshy root growth, the water deficit significantly reduced the *Isatis* leaf net photosynthetic rate, transpiration rate and

stomata conductance, and the declines increased with the raising water deficit regulation (WDR) level. (2) The highest yield was achieved under light WDR ($7\,342.05\text{ kg/hm}^2$) in the mature period of the regressed deficit, which was 5.32% lower than that of the full irrigation ($P > 0.05$). (3) The highest utilization efficiency of WDR (2.14 kg/m^3), was followed by mild WDR in the flesh root maturity stage. (4) The quality of Isatis root was greatly improved especially in maturity period by mild WDR. The indigo, indirubin and (R,S)-goitrin content of Isatis root were improved by 0.09 , 0.41 mg/kg and $0.007\,8\text{ mg/g}$, but content of polysaccharide reduced by 3.37 mg/g , respectively. Therefore, considering the yield, water use efficiency and quality, the fleshy root maturity could be implemented with RDI slightly, i. e., the relative water content of the soil was $60\%\sim 90\%$ during this period, which could be used as the optimum way of cultivating irrigation.

Keywords: Regulated deficit irrigation; growth index; photosynthetic characteristics; quality; Isatis (*Isatisindigotica* Fort)

菘蓝(*Isatisindigotica* Fort.)又名茶蓝、山蓝等,为十字花科植物,以其干燥根和叶入药,性寒,味苦,清热解毒,凉血利咽^[1]。在我国新疆、内蒙古、甘肃、河北等省份均有栽培,其中甘肃省张掖市以其独特的地理环境和气候条件,产出的菘蓝产量和品质较优,已成为西北著名的道地药材之一。但由于当地灌溉制度不合理,导致菘蓝产量与品质下降,极大制约了菘蓝产业的可持续发展。目前,关于滴灌调亏技术在国内外生产实际中的应用已有大量研究报道,如 Saraiva 等^[2]、Léllis 等^[3]、Greaves 等^[4]、Levin 等^[5]、李昭楠等^[6]、乔延丽等^[7]分别进行了滴灌调亏对西瓜(*Citrulluslanatus*)、胡萝卜(*Daucuscarota* L.)、玉米(*Zea mays* L.)、芒果(*Mangiferaindica* L.)、葡萄(*Vitis vinifera* L.)、甜椒(*Capsicum annuum* var. *grossum*)等作物生长状况、产量和品质进行研究,证明了合理的滴灌调亏制度具有较好的节水、增产效果,并能有效改善作物品质。在菘蓝栽培种植方面,国内学者先后从栽培方式、追施肥量、灌溉制度等不同角度对菘蓝产量的影响研究^[8-10]。王恩军等^[8]通过研究不同栽培模式、覆膜方式对菘蓝农艺性状指标、产量及品质的影响,表明垄作覆黑膜栽培模式下,菘蓝快速生长持续期最长,根系最发达,产量最高;肖云华等^[9]通过研究不同追施氮肥量对菘蓝的光合参数、外形品质、干物质积累及活性成分含量的影响,表明追施氮肥量为 $675\sim 900\text{ kg/hm}^2$ 时有利于提高菘蓝叶片的净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率,同时产量和药用品质最佳。李文明等^[10]通过研究不同灌水定额、灌水次数对菘蓝的耗水特征、产量的影响,发现 2 次灌水时间在 7 月和 8 月上旬、灌溉定额为 $2\,250\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 时,产量最大。目前国内外对菘蓝的研究主要集中在对菘蓝药理学活性、含量测定,制剂与工艺等方面^[11-12],对于菘蓝种植方式研究较少且仅集中于对其产量的影响,关于不同生育期和不同梯度膜下滴灌调亏对菘蓝生长状况、生理参数、产量和品质的综合研究更少。

因此,寻求一种合理、高效的灌溉制度,是解决菘蓝产量、水分利用效率和品质下降等问题的关键。本研究以甘肃农业大学中草药系自繁的菘蓝种子为研究对象,借助膜下滴灌技术,通过大田定位试验,综合分析了不同生育期、不同梯度的调亏灌溉对菘蓝生长状况、光合生理参数、产量和品质指标的影响,以期为河西灌区菘蓝高效种植提供技术参考,达到节水增产调质的目的。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2016 年 5—10 月在甘肃省张掖市水务局国家重点灌溉试验站($100^{\circ}26'\text{ E}$, $38^{\circ}56'\text{ N}$)进行。该试验区属大陆性干旱气候,海拔约 $1\,482.7\text{ m}$,年均气温 $6.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,年日照时间 $3\,000\text{ h}$,无霜期 128 d 。据 1995—2015 年气象资料显示,该地区年平均降水量为 140 mm ,蒸发量 $2\,000\text{ mm}$,昼夜温差大,干旱频繁。试验地土壤为中壤土,土壤肥力中等, $\text{pH}\,8.4$,耕层土壤田间最大持水量 22.8% ,土壤容重 1.46 g/cm^3 。0—20 cm 耕层土壤有机质含量 13.56 g/kg ,速效磷含量 13.4 mg/kg ,碱解氮含量 61.8 mg/kg ,速效钾含量 190.4 mg/kg 。试验区地下水位埋深较深,盐碱化影响较小。

1.2 试验设计

播前 10 d 对试验小区进行 30 cm 的翻耕处理,人工除去杂草,同时施入尿素(N 含量 46%) 210 kg/hm^2 ,过磷酸钙(P_2O_5 含量 12% 、S 含量 10% 、Ca 含量 16%) 340 kg/hm^2 ,氯化钾(K_2O 含量 60%) 130 kg/hm^2 ,所有肥料都作为基肥在播种时一次施入。供试品种选用甘肃农业大学中草药系自繁的粒大饱满、均匀一致的菘蓝种子,种子纯度 96% 。于 5 月 5 日播种,10 月 21 日收获,播种量为 45.0 kg/hm^2 ,种植密度为 $850\,000\text{ 株/hm}^2$,灌溉方式采用膜下滴灌,每小区面积 55 m^2 ($10\text{ m}\times 5.5\text{ m}$)。试验依不同水分调亏水平和调亏生育期设 8 个水分调控处理(WD1~WD8),1 个对照(CK),分别在菘蓝幼苗期、营养生长期、肉质根生长期和根成熟期 4

个生育阶段进行水分调控(表 1)。

表 1 不同试验处理的土壤含水量
(占田间持水率的百分数) 单位: %

处理	苗期	营养 生长期	肉质根 生长期	肉质根 成熟期
CK	65~100	65~100	65~100	65~100
WD1	60~90	65~100	65~100	65~100
WD2	65~100	60~90	65~100	65~100
WD3	65~100	65~100	60~90	65~100
WD4	65~100	65~100	65~100	60~90
WD5	55~80	65~100	65~100	65~100
WD6	65~100	55~80	65~100	65~100
WD7	65~100	65~100	55~80	65~100
WD8	65~100	65~100	65~100	55~80

注:CK 表示各生育期正常供水;WD1 表示苗期轻度亏水;WD2 表示营养生长期轻度亏水;WD3 表示肉质根生长期轻度亏水;WD4 表示肉质根成熟期轻度亏水;WD5 表示苗期中度亏水;WD6 表示营养生长期中度亏水;WD7 表示肉质根生长期中度亏水;WD8 表示肉质根成熟期中度亏水。下同。

1.3 测定指标

1.3.1 生长指标 苕蓝进入肉质根成熟期后,每个小区选取长势基本一致的 20 株苕蓝定苗,定苗后用精度 0.1 cm 直尺测定株高,用 LAM-B 活体叶面积测量仪(南京东迈科技仪器有限公司)测定叶面积。

1.3.2 生理参数 每个生育期在水分调亏处理后第 5 天进行测定,选取由里至外第 3 片功能叶片中部作为测定部位,用 LI-6400 便携式光合仪在 1 000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的光子强度下测定叶片的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)等生理参数日变化,各小区测定 5 株,结果取各处理平均值。

1.3.3 产量和根系形态特性测定 待苕蓝成熟后,每个小区单独收获测产计算,3 个重复的平均值为各处理的实际产量。用精度为 0.01 的电子秤进行称量,并换算为标准产量(kg/hm^2)。同时各小区将定苗的 20 株苕蓝收获,带回室内冲洗、晾干。将根部从植株上剪下,采用精度为 0.1 cm 直尺测定主根长,采用精度为 0.01 mm 游标卡尺测定主根直径(芦头下 1 cm 处的直径),结果取各处理均值。

1.3.4 水分利用效率^[13]

$$R_{\text{WUE}} = Y/E_{\text{Ta}}$$
$$I_{\text{WUE}} = Y/I$$

式中: R_{WUE} 表示苕蓝全生育期水分利用效率(kg/m^3); I_{WUE} 表示苕蓝全生育期灌溉水利用效率(kg/m^3); Y 表示苕蓝单位面积产量(kg/hm^2); E_{Ta} 表示苕蓝全生育期实际单位面积耗水量(m^3/hm^2); I 表示全生育期单位面积灌水量(m^3/hm^2)。

1.3.5 品质测定 靛蓝、靛玉红、(R,S)-告依春含量均采用高效液相色谱法^[14-15]测定。LC-10AT_{VP} 高效液相色谱仪色谱条件:SPD-10A_{VP}(UV-VIS)检测器,色

谱柱为 Agilent Zorbax SB-C18 (100 mm $\times$ 4.6 mm, 3.5 μm),以甲醇-0.1%甲酸溶液为流动相;流速为 1.0 mL/min,自动样器进样,进样量为 20 μL ;检测波长为 280 nm,柱温箱柱温为 25 $^{\circ}\text{C}$ 。苕蓝根中多糖的测定方法:采用酚-硫酸比色法^[16]测定。

1.4 数据统计分析

利用 Excel 2010 对所测数据进行计算,利用 SPSS 19.0 软件中 Duncan 多重比较法比较各处理相关数据差异的显著性,Origin 8.0 作图,各表中出现的数据均为平均值。

2 结果与分析

2.1 膜下滴灌调亏对苕蓝生长指标的影响

由表 2 可知,不同梯度水分调亏对苕蓝各生长指标影响程度不同。与 CK 相比,各处理株高均不同程度的降低,但 WD1、WD4 和 WD8 对株高的影响并不显著,而其他调亏处理对株高的影响则达到显著水平。CK 的平均株高为 31.87 cm,而 WD2、WD6 分别为 26.15、22.61 cm,降低幅度达 17.95%和 29.06%;叶面积指数变化趋势与株高基本一致,CK 的叶面积指数最大,达到 8.30,WD1 次之,WD2 和 WD6 下降幅度最为显著,分别下降 23.61%和 34.58%($P<0.05$)。说明在苕蓝营养生长期水分亏缺较其他生育期水分亏缺对株高和叶面积指数影响更大,且影响程度随着调亏幅度的增加而增加。水分调亏对苕蓝根系生长影响程度不同,WD1 和 WD5 主根长度较 CK 分别增加 6.58%和 0.48%,其余处理主根长度减少幅度亦不相同,其中 WD3、WD6 和 WD7 减少幅度显著,分别为 9.11%、12.77%、13.56%($P<0.05$);各处理均造成主根直径不同程度降低,降低幅度为 1.56%~18.75%,其中尤以肉质根生长期轻度和中度水分调亏处理 WD3 和 WD7 最显著,分别为 14.06%和 18.75%($P<0.05$),其余处理之间无显著差异。说明在苕蓝肉质根生长期水分亏缺较其他生育期水分亏缺对主根长和主根直径影响更大,且中度水分亏缺影响程度大于轻度水分亏缺。

表 2 膜下滴灌调亏对苕蓝生长指标的影响

处理	株高/ cm	叶面积 指数	主根长/ cm	主根 直径/cm
CK	31.87±1.15a	8.30±0.42a	22.94±1.14ab	1.92±0.058a
WD1	31.67±2.33ab	7.94±0.35ab	24.45±0.95a	1.89±0.076ab
WD2	26.15±1.47c	6.34±0.39c	21.52±1.37bc	1.76±0.082bcd
WD3	29.60±1.14b	7.69±0.30ab	20.85±1.40bc	1.65±0.077de
WD4	31.07±2.83ab	7.87±0.28ab	22.52±1.65abc	1.86±0.102abc
WD5	29.54±1.05b	7.74±0.44ab	23.05±0.84ab	1.85±0.088abc
WD6	22.61±1.19d	5.43±0.21d	20.01±1.23c	1.69±0.093cde
WD7	28.37±1.22bc	7.04±0.57bc	19.83±1.01c	1.56±0.064e
WD8	30.45±2.10ab	7.38±0.41b	22.22±0.66b	1.79±0.070a

注:表中数据为平均值±标准误差;同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

2.2 膜下滴灌调亏对苕蓝叶片光合气体交换参数的影响

2.2.1 净光合速率 净光合速率(P_n)的大小可以反映出苕蓝叶片光合作用的强弱。调亏处理下苕蓝叶净光合速率从苗期到肉质根生长期表现上升趋势,肉质根生长期达到最大值,随后开始下降,呈单峰曲线变化(图 1)。苗期,轻度水分调亏 WD1 处理的 P_n 略高于 CK,为 1.14%,而中度水分调亏 WD5 较 CK 降低 1.23%($P>0.05$);营养生长期,WD1 和 WD5 在复水后 P_n 出现补偿效应而超过 CK,分别达 18.32,18.18 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,而该生育期轻度和中度水分调亏 WD2、WD6 的 P_n 均呈降低趋势,且 WD6 降低幅度达 10.39%($P<0.05$);肉质根生长期,WD2 和 WD6 在复水后 P_n 均表现出一定程度的补偿效应,但仍低于 CK,分别为 18.43,18.10 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,而轻度和中度水分调亏 WD3、WD7 的 P_n 在该生育期内降低幅度最大,均显著小于同期 CK 的 11.75%和 16.55%($P<0.05$);肉质根成熟期,轻度水分调亏 WD4 和中度水分调亏 WD8 较 CK 分别下降 0.20%和 1.69%($P>0.05$),而 WD3 复水后 P_n 略高于 CK,仅为 0.84%。

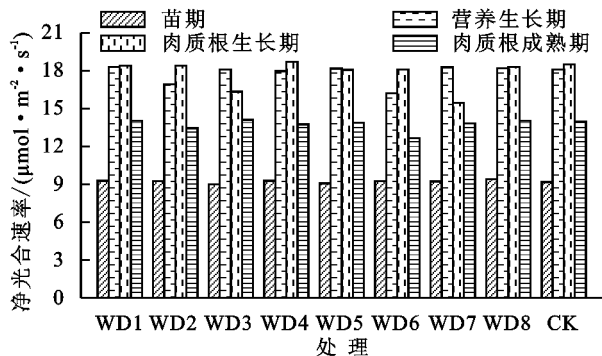


图 1 膜下滴灌调亏对苕蓝净光合速率的影响

2.2.2 气孔导度 由图 2 可知,随着生育期的延长,各处理苕蓝的气孔导度(G_s)逐渐增大,但是不同处理间表现不同。以苗期、营养生长期和肉质根生长期表现尤为突出,而根成熟期调亏处理对 G_s 影响最小。苗期,轻度水分调亏处理 WD1 的 G_s 较同期 CK 降低 16.02%,而同期中度水分调亏处理 WD5 的 G_s 仅为 0.10 $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,与 CK 差异显著($P<0.05$);营养生长期,WD1 和 WD5 在复水后 G_s 均表现出一定程度的补偿效应,且 WD1 补偿效应明显,达 0.32 $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,较同期 CK 提高 12.64%($P<0.05$)。轻度和中度水分调亏处理 WD2、WD6 该时期 G_s 分别为 0.19,0.15 $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,较同期 CK 降低 30.69%和 48.01%($P<0.05$);肉质根生长期,WD2 复水后 G_s 高于 CK,为 5.65%,但与 CK 无显著差异。同时,该生育期轻度和中度水分调亏处理 WD3、WD7 的 G_s 均显著小于同期 CK 35.44%和 21.74%($P<0.05$);

肉质根成熟期,WD3、WD7 复水后 G_s 有一定程度的补偿效应,但补偿幅度不显著,仍低于同期 CK。轻度和中度水分调亏处理 WD4、WD8 的 G_s 分别为 0.79,0.74 $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,分别较同期 CK 降低 9.37%和 14.95%($P<0.05$)。

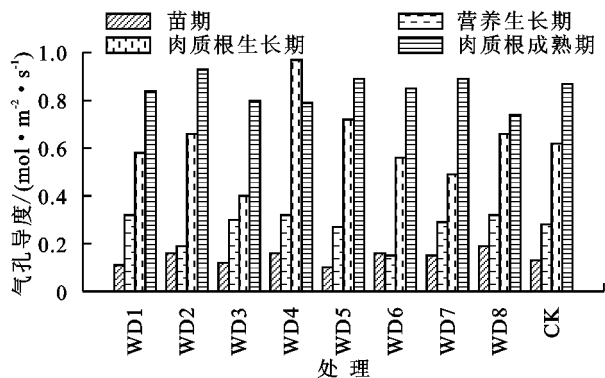


图 2 膜下滴灌调亏对苕蓝气孔导度的影响

2.2.3 蒸腾速率 调亏处理下苕蓝各生育期叶片蒸腾速率(T_r)从苗期到营养生长期表现上升趋势,随后开始下降,在营养生长期达到最大值,呈单峰曲线变化(图 3)。水分调亏对苕蓝整个生育期内叶片蒸腾速率均有影响,肉质根成熟期亏水对苕蓝叶片蒸腾速率影响不显著,而苗期、营养生长期和肉质根生长期对亏水对该生育阶段内 T_r 影响显著,且随着水分调亏程度的增加, T_r 降低幅度增加。

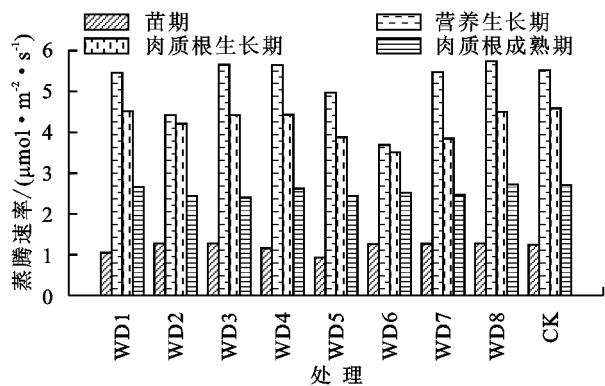


图 3 膜下滴灌调亏对苕蓝蒸腾速率的影响

苗期,轻度和中度水分调亏处理 WD1 和 WD5 分别为 1.05,0.93 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,较 CK 分别降低 15.27%和 25.40%,且差异显著($P<0.05$);营养生长期,WD1 和 WD5 在复水后 G_s 与同期 CK 无显著差异,表现出一定程度的补偿效应。该时期轻度和中度水分调亏处理 WD2 和 WD6 分别为 4.42,3.69 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,较 CK 分别降低 19.94%和 33.18%,差异显著($P<0.05$);肉质根生长期,WD2 复水后叶片 G_s 较 CK 低 8.19%,与 CK 无显著差异($P>0.05$),而 WD6 较 CK 低 23.62%,差异显著($P<0.05$)。轻度水分调亏处理 WD3 较 CK 降低 3.71%,与 CK 无显著差异($P>0.05$),而中度水分调亏处理 WD7 为 3.85 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,较 CK 降低 16.15%,

差异显著 ($P<0.05$);肉质根成熟期,轻度和中度水分调亏处理 WD4 和 WD8 与 CK 之间无差异显著 ($P>0.05$),为 $2.62, 2.47 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,较 CK 分别降低 3.50% 和 8.86% 。

2.3 膜下滴灌调亏对苕蓝品质的影响

由表 3 可知,适时适度的水分调亏能够在不影响多糖含量的同时增加苕蓝中靛蓝、靛玉红、(R,S)一告依春含量,从而提高苕蓝品质,且随着水分调亏程度的增加,苕蓝品质越高。苗期轻度和中度水分调亏处理 WD1、WD5 靛蓝含量分别为 $5.82, 5.85 \text{ mg/kg}$,分别较 CK 降低 1.02% 和 0.51% ,但无显著差异 ($P>0.05$),其余生育期进行调亏处理均可增加苕蓝靛蓝含量,增幅为 $0.51\%\sim 2.55\%$,其中尤以肉质根成熟期中度水分调亏处理 WD8 含量最高,达 6.03 mg/kg ;苗期中度水分调亏处理 WD5 造成苕蓝中靛玉红含量降低 1.74% ,其余生育期水分调亏可增加靛玉红含量,增幅为 $0.93\%\sim 5.10\%$ 。其中,肉质根成熟期轻度和中度水分调亏处理 WD4 和 WD8 靛玉红含量增加幅度最高,增幅分别达 $0.41, 0.44 \text{ mg/kg}$;水分调亏处理对(R,S)一告依春影响与靛蓝和靛玉红不同,在苗期轻度和中度水分调亏处理 WD1 和 WD5 (R,S)一告依春含量减少 0.98% 和 2.64% ,与 CK 无显著差异 ($P>0.05$),在营养生长期轻度和中度水分调亏处理 WD2 和 WD6 (R,S)一告依春含量减少幅度较大,分别为 4.43% 和 12.07% ,与 CK 差异显著 ($P<0.05$),而在肉质根生长期和肉质根成熟期进行水分调亏有利于(R,S)一告依春含量的提高,处理 WD3、WD4、WD7 和 WD8 较 CK 分别增加 $6.88\%, 3.49\%, 7.02\%, 7.11\%$;除苗期调亏处理外,其他调亏灌溉处理均使苕蓝中多糖含量下降,降幅为 $2.67\%\sim 17.02\%$,在苗期和肉质根成熟期营养生长期进行轻度水分调亏多糖含量与 CK 无显著差异 ($P>0.05$),但在营养生长期和肉质根生长期则降幅较大。

2.4 膜下滴灌调亏对苕蓝产量和水分利用效率的影响

由表 4 可知,不同生育期水分调亏对苕蓝全生育期耗水量、产量、灌溉水利用效率和水分利用效率影

响不同。苗期中度水分调亏处理 WD5 全生育期耗水量最少,分别为 $3\ 237.3 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,较 CK 降低 15.97% ,苗期轻度水分调亏处理 WD1 次之,较 CK 降低 11.09% ($P<0.05$),其余处理全生育期耗水量与 CK 无显著差异;水分调亏均造成苕蓝产量降低,调亏处理中,肉质根成熟期轻度水分调亏处理 WD4 产量最高,达 $7\ 342.05 \text{ kg}/\text{hm}^2$,较 CK 降低 5.32% ($P>0.05$),肉质根生长期中度水分调亏处理 WD7 最低,仅为 $5\ 075.77 \text{ kg}/\text{hm}^2$,较 CK 降低 34.55% ($P>0.05$)。WD1 产量较 CK 降低 5.37% ($P>0.05$),其余生育期水分调亏处理后产量均显著下降,且中度水分调亏处理产量降幅大于轻度水分调亏处理;苗期轻度和中度水分调亏处理 WD1、WD5 灌溉水利用效率最高,分别比 CK 提高 27.52% 和 29.19% ,营养生长期轻度水分调亏处理 WD2 次之,较 CK 提高 10.17% ($P<0.05$),而 WD3、WD7、WD8 较 CK 分别降低 $8.46\%, 23.82\%, 8.82\%$,且差异显著 ($P<0.05$);WD1 可显著提高苕蓝水分利用效率,较 CK 增加 6.59% ($P<0.05$),尽管 WD2、WD4 水分利用效率较 CK 有一定幅度的提高,但增加幅度较小 ($P>0.05$),而 WD3、WD5、WD6、WD7、WD8 均造成水分利用效率降低,降幅为 $1.17\%\sim 30.40\%$,其中 WD7 降幅最为显著。表明,苗期、营养生长期和肉质根成熟期轻度水分调亏可提高灌溉水利用效率和水分利用效率,但随着水分调亏程度的增加,灌溉水利用效率和水分利用效率呈递减趋势。

表 3 膜下滴灌调亏对苕蓝品质的影响

处理	靛蓝/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	靛玉红/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	(R,S)一告依春/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	多糖/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)
CK	$5.88\pm 0.03\text{b}$	$8.62\pm 0.13\text{bc}$	$0.2237\pm 0.0053\text{c}$	$126.05\pm 2.60\text{a}$
WD1	$5.82\pm 0.09\text{b}$	$8.70\pm 0.09\text{b}$	$0.2311\pm 0.0024\text{bd}$	$72.82\pm 3.77\text{a}$
WD2	$5.91\pm 0.08\text{ab}$	$8.82\pm 0.14\text{ab}$	$0.2138\pm 0.0045\text{d}$	$120.54\pm 1.04\text{b}$
WD3	$5.93\pm 0.01\text{ab}$	$8.89\pm 0.07\text{a}$	$0.2391\pm 0.0036\text{a}$	$119.42\pm 2.63\text{b}$
WD4	$5.97\pm 0.05\text{a}$	$9.03\pm 0.11\text{a}$	$0.2315\pm 0.0042\text{bd}$	$22.68\pm 3.58\text{ab}$
WD5	$5.85\pm 0.05\text{b}$	$8.47\pm 0.05\text{c}$	$0.2178\pm 0.0063\text{cd}$	$20.85\pm 3.19\text{b}$
WD6	$5.94\pm 0.07\text{ab}$	$8.84\pm 0.10\text{ab}$	$0.1967\pm 0.0070\text{e}$	$111.37\pm 2.35\text{c}$
WD7	$6.00\pm 0.04\text{a}$	$8.99\pm 0.12\text{a}$	$0.2394\pm 0.0027\text{a}$	$104.59\pm 2.27\text{d}$
WD8	$6.03\pm 0.04\text{a}$	$9.06\pm 0.15\text{a}$	$0.2396\pm 0.0033\text{a}$	$115.17\pm 4.52\text{bc}$

表 4 膜下滴灌调亏对苕蓝产量和全生育期水分利用状况的影响

处理	降水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	全生育期灌水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	全生育期耗水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	灌溉水利用效率/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	水分利用效率/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
CK	1874	1898	3852.7a	7754.70a	4.09c	2.01b
WD1	1874	1407	3425.3bc	7338.41ab	5.22a	2.14a
WD2	1874	1565	3498.2ab	7051.61b	4.51b	2.02ab
WD3	1874	1683	3653.6ab	6301.39c	3.74d	1.72c
WD4	1874	1660	3608.2ab	7342.05ab	4.42b	2.03ab
WD5	1874	1217	3237.3c	6430.52c	5.28a	1.99b
WD6	1874	1592	3611.7ab	6112.56c	3.84cd	1.69c
WD7	1874	1629	3628.1ab	5075.77e	3.12e	1.40d
WD8	1874	1511	3473.8abc	5634.90d	3.73d	1.62c

3 讨论

相关研究^[17]证明,植物在生长过程中受到干旱胁迫时,其体内生理代谢会发生变化,导致生长状况也随之变化。膜下滴灌调亏技术对菘蓝生长有重要影响^[15]。本试验中,在菘蓝不同生育期进行轻度和中度水分亏缺对其地上生长产生抑制,株高和叶面积指数均不同程度的降低。与 CK 相比,菘蓝营养生长期水分亏缺处理 WD2、WD6 对菘蓝的株高和叶面积指数分别降低 17.95%、23.61%和 29.06%、34.58%,且影响程度随着调亏幅度的增加而增加。相关研究^[18]表明,适时适度的水分亏缺对作物根系生长有明显促进效应,且复水后对根系有不同程度的补偿生长效应。本研究表明,在菘蓝苗期水分亏缺处理 WD1、WD5 可增加主根长,增加幅度分别为 6.58%、0.48%,这是由于苗期是菘蓝扎根生长的基础生育期,适度干旱胁迫使根系向下深入而获取足量的水分,从而提高其抗旱能力。而在菘蓝肉质根生长期水分亏缺不利于主根的生长,这是由于该生育期内根系细胞处于快速增殖时期,此时水分亏缺抑制细胞分裂而造成根系生长缓慢,且复水后产生的补偿效应不足以弥补亏水对根系生长产生的影响。

水分亏缺可造成植物叶绿素含量下降、气孔关闭,限制 CO_2 的吸收,叶绿体片层膜体系结构改变,光合系统 II 活性减弱,甚至丧失,光合磷酸化解偶联,已合成的叶绿素分解,叶绿素合成速度减慢,光合酶活性降低,进而影响光合产物积累^[19-20]。李翠等^[19]研究发现,不同生育期水分调亏均可引起作物叶片净光合速率降低,且随着胁迫程度的加剧,降低幅度增大,但恢复供水后,作物叶面积会受激发而继续增大,其净光合速率会逐渐恢复正常。于文颖等^[20]研究发现,水分胁迫导致作物叶片净光合速率、蒸腾速率和气孔导度下降以及光合速率日变化的峰值提前,且该响应具有明显的滞后性。本研究表明,菘蓝营养生长期和肉质根生长期内进行水分亏缺(WD2、WD6、WD3、WD7)可显著降低 P_n (6.48%~16.55%)、 G_s (21.74%~48.01%)和 T_r (3.71%~33.18%),且影响程度随着调亏幅度的增加而增加。气孔在植物光合和蒸腾作用中有重要作用,气孔开闭直接影响植物光合和蒸腾,在菘蓝某一时期缺水时,气孔导度下降,复水后出现一定的补偿作用,与净光合速率变化趋势基本一致,这是由于在土壤缺水时气孔通过部分或全部关闭使蒸腾速率降低,减少水分散失的同时,也减少了 CO_2 的进入,从而导致光合速率的下降^[21-22]。作物不同生育期进行水分亏缺对产量和水分利用效

率的影响不同。申孝军等^[23]研究表明,适时适度的水分亏缺有利于作物产量、灌溉水利用效率和水分利用效率的提高。本试验表明,苗期和肉质根成熟期轻度水分亏缺处理 WD1、WD4 对产量影响不显著,与 CK 相比,灌溉水利用效率和水分利用效率分别提高 27.52%、8.41%和 6.59%、1.23%,而肉质根生长期水分调亏 WD3、WD7 产量和水分利用效率显著降低 18.74%、34.55%和 14.19%、30.40%。肉质根生长期是菘蓝需水的关键生育期,在该时期水分亏缺不利于产量形成和水分的高效利用,因此在该生育阶段内不适宜调亏灌溉。

中药材品质受多因素影响,如气候因素、土壤因素、地形因素和生物因素等,其中水分和温度是对药用植物生长影响较为突出的环境因素。药用植物人工栽培时其产量取决于初生代谢产物的积累,而质量则取决于次生代谢产物的积累,次生代谢产物在植物抗旱机制中发挥着重要作用,同时也是中药材发挥临床疗效的物质基础^[24]。本研究表明,作为药用植物,板蓝根其有效成分靛蓝、靛玉红、告依春均为次生代谢产物,在肉质根成熟期水分亏缺处理 WD7、WD8 可显著提高菘蓝中靛蓝、靛玉红、(R,S)-告依春含量,且随着水分亏缺程度越高,有效成分积累越多。而在苗期水分亏缺 WD1、WD5 不利于菘蓝有效成分的积累,且随着水分亏缺程度增加,品质影响越大,这与谭勇等^[25]的研究结果基本一致。而多糖为初生代谢产物,其含量积累需要良好的环境条件,水分亏缺直接影响多糖积累,尤其在轻度水分亏缺处理中多糖含量较 CK 降幅较大,直接影响板蓝根品质。因此,确定既能促进次生代谢又不影响初生代谢产物积累的干旱胁迫阈值以及最佳调亏时期,能够为菘蓝规范化种植过程中合理控制水分提供依据。

4 结论

(1)不同生育期水分调亏均可引起菘蓝叶片净光合速率、蒸腾速率和气孔导度降低,且降低程度与水分亏缺程度和生育阶段有关。其中,营养生长期和肉质根生长期水分亏缺对菘蓝叶片净光合速率、蒸腾速率和气孔导度降低程度最为显著,且水分亏缺程度越高,降幅越大。

(2)苗期和肉质根成熟期轻度水分调亏不会显著降低菘蓝产量,而营养生长期和肉质根生长期轻度和中度水分调亏显著降低菘蓝产量。苗期、营养生长期和肉质根成熟期轻度水分调亏能够提高菘蓝水分利用效率,而肉质根生长期轻度和中度水分调亏、营养生长期和肉质根成熟期中度水分调亏显著降低菘蓝

水分利用效率。

(3)水分调亏能够显著提高苕蓝品质,且亏缺程度越高,综合品质越好。肉质根成熟期进行水分调亏后苕蓝品质显著高于其他生育期水分调亏。

在苕蓝肉质根成熟期轻度水分胁迫的调亏灌溉方法,即在肉质根成熟期保持土壤相对含水率为60%~65%、其余生育期土壤相对含水率为65%~70%,既能平衡苕蓝的营养生长与生殖生长,又能提高灌溉水利用效率和水分利用效率,在稳产的同时,还能获得较好的品质。因此,综合考虑苕蓝生长、产量、水分生产效率及品质等指标,苕蓝肉质根成熟期轻度水分胁迫的调亏灌溉方式是河西走廊苕蓝栽培灌溉方式中的首选。

参考文献:

- [1] 唐晓清,肖云华,赵雪玲,等.不同氮素形态及其比例对苕蓝生物学特性的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(1):129-138.
- [2] Saraiva K R, Bezerra F M L, Costa S C, et al. Regulated deficit irrigation and different mulch types on fruit quality and yield of watermelon [J]. Revista Caatinga, 2017, 30(2): 437-446.
- [3] Lellis B C, Carvalho D F, Martínez-Romero A, et al. Effective management of irrigation water for carrot under constant and optimized regulated deficit irrigation in Brazil [J]. Agricultural Water Management, 2017, 192: 294-305.
- [4] Greaves G E, Wang Y M. Effect of regulated deficit irrigation scheduling on water use of corn in southern Taiwan tropical environment [J]. Agricultural Water Management, 2017, 188: 115-125.
- [5] Levin A G, Peres M, Noy M, et al. The response of field-grown mango (cv. Keitt) trees to regulated deficit irrigation at three phenological stages [J]. Irrigation Science, 2017, 35: 1-11.
- [6] 李昭楠,李唯,姜有虎,等.西北干旱区戈壁葡萄膜下滴灌需水量和灌溉制度[J].水土保持学报,2011,25(5): 247-251.
- [7] 乔延丽,安进强,张芮,等.膜下滴灌水分调控对甜椒生长和产量的影响[J].水土保持学报,2015,29(3):237-241.
- [8] 王恩军,陈垣,韩多红,等.栽培方式对苕蓝农艺性状及产量和品质的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(11):1661-1670.
- [9] 肖云华,吕婷婷,唐晓清,等.追施氮肥量对苕蓝根的外形品质、干物质积累及活性成分含量的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(2):437-444.
- [10] 李文明,施炯林,韩辉生,等.节水灌溉制度对板蓝根耗水特征及产量的影响[J].灌溉排水学报,2007,26(6): 106-109.
- [11] 马毅敏,李娜,刘承伟,等.板蓝根不同提取部位抗炎镇痛活性比较研究[J].中草药,2014,45(17):2517-2521.
- [12] 胡彦君,王雅琪,李冰涛,等.板蓝根制剂制备过程中成分变化及其药效相关性研究[J].中草药,2016,47(9): 1515-1519.
- [13] 张恒嘉,李晶.绿洲膜下滴灌调亏马铃薯光合生理特性与水分利用[J].农业机械学报,2013,44(10):143-151.
- [14] 国家药典委员会.中华人民共和国药典·一部[S].北京:中国医药科技出版社,2010.
- [15] 王玉才,张恒嘉,邓浩亮.不同生育期调亏滴灌对苕蓝光合特性及品质的影响[J].核农学报,2017,31(9): 1847-1855.
- [16] 鲁建江,王莉,顾承志,等.板蓝根多糖的提取及含量测定[J].广东药学,2001,11(4):16-18.
- [17] 崔婷茹,于慧敏,李会彬,等.干旱胁迫及复水对狼尾草幼苗生理特性的影响[J].草业科学,2017,34(4):788-793.
- [18] 孟兆江,段爱旺,王晓森,等.调亏灌溉对棉花根冠生长关系的影响[J].农业机械学报,2016,47(4):99-104.
- [19] 李翠,赵伟洁,张大爱,等.水分胁迫对糜子物质生产及光合特性的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(1):89-95.
- [20] 于文颖,纪瑞鹏,冯锐,等.不同生育期玉米叶片光合特性及水分利用效率对水分胁迫的响应[J].生态学报,2015,35(9):2902-2909.
- [21] 安玉艳,梁宗锁.植物应对干旱胁迫的阶段性策略[J].应用生态学报,2012,23(10):2907-2915.
- [22] Wang Y Y, Zhou R, Zhou X. Endogenous levels of ABA and cytokinins and their relation to stomatal behavior in dayflower (*Commelina communis* L.) [J]. Journal of Plant Physiology, 1994, 144: 45-48.
- [23] 申孝军,孙景生,张寄阳,等.水分调控对麦茬棉产量和水分利用效率的影响[J].农业机械学报,2014,45(6): 150-160.
- [24] 司灿,张君毅,徐护朝.药用植物在干旱胁迫下生长代谢变化规律及应答机制的研究进展[J].中国中药杂志,2014,39(13):2432-2437.
- [25] 谭勇,梁宗锁,董娟娥,等.水分胁迫对苕蓝生长发育和有效成分积累的影响[J].中国中药杂志,2008,33(1):19-22.

煤矿区土壤有机碳含量的遥感反演与分布特征

孙问娟, 李新举

(山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018)

摘要: 高光谱数据与多光谱影像结合能实现区域高精度、大面积的土壤有机碳含量反演。以山东省鲍店矿区表层 0—20 cm 土壤有机碳含量为研究对象, 采用波段平均法把高光谱的窄波段拟合成 GF-1 WFV 影像的宽波段, 建立土壤有机碳含量的高光谱模型, 进而通过比值订正法, 将最优高光谱模型校正到多光谱模型并通过决策树分类获取土壤有机碳含量空间分布状况, 结合土地利用现状分析土壤有机碳含量分布特征。结果表明: (1) 通过波段拟合和比值订正获得的多光谱模型, 检验决定系数为 0.76, 可以稳定实现矿区土壤有机碳含量的反演。(2) 研究区土壤有机碳含量范围为 0.71 ~ 38.15 g/kg, 均值为 14.12 g/kg, 总体上处于中等水平; 区域内土壤有机碳含量以 11.60 ~ 17.40 g/kg 为主, 其次是 5.80 ~ 11.60 g/kg, 分别占据 48%, 29%。(3) 采矿区和部分道路、居民点的有机碳含量偏高, 耕地处于中等水平, 林地和草地含量较低; 塌陷地形成的水域周围有机碳含量明显偏低。

关键词: 高光谱; 多光谱; 土壤有机碳含量; 土地利用类型

中图分类号: S127

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0328-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.03.049

Remote Sensing Inversion and Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon Content in Coal Mining Area

SUN Wenjuan, LI Xinju

(College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018)

Abstract: The combination of hyperspectral data and multi spectral image enables high-precision and large-area inversion of soil organic carbon content to be achieved. Taking the organic carbon content in 0—20 cm soil layer of Bao Dian mining area in Shandong Province as the study object, this study first applied the band averaging method to synthesize the hyperspectral narrow band into the wide band of GF-1 WFV, based on which the hyperspectral model of soil organic carbon content were established. Then the optimal hyperspectral model was corrected to the multispectral model through the ratio correction method, and the spatial distribution map of soil organic carbon content was obtained through decision tree classification. Finally, the distribution characteristics of soil organic carbon content were analyzed combined with the land use status map. The results showed: (1) The determination coefficient of the multi spectral model obtained by band fitting and ratio correction was 0.76, indicating that the soil organic carbon content could be retrieved steadily via the model. (2) The soil organic carbon content in the study area varied from 0.71 to 38.15 g/kg, with a mean value of 14.12 g/kg, which was at a medium level in general. The soil organic carbon content was mainly 11.60 ~ 17.40 g/kg, followed by 5.80 ~ 11.60 g/kg, occupying 48% and 29% respectively in the study area. (3) The soil organic carbon content of mining area, some roads and settlements was high. The soil organic carbon content of cultivated land was at medium level, and the content in woodland and grassland was relatively low. The content of organic carbon around the subsidence area was obviously lower than that in other land use types.

Keywords: hyperspectral; multispectral; soil organic carbon content; land-use type

煤炭资源的开发与利用带动了经济发展的同时,也带来了严重的地表塌陷问题,直接导致土壤质量的下降^[1-2]。当前主要的应对措施就是土地复垦及区域综合

整治,在此过程中,土地质量的快速监测及评估具有重要意义。土壤有机碳作为土壤质量的核心,以微小的比重对土壤质量及功能的调节起着关键作用^[3]。

传统的土壤养分监测,在野外定点采样后把样品带到实验室进行农化分析,不仅耗时、费力,而且成本高、实时性差,测点少,代表性差^[4]。借助遥感手段反演土壤有机碳含量,具有实时、高效、低成本的特点,能有效弥补传统方法的不足。高光谱波段窄而多、光谱线精细,能高效监测土壤中的隐藏信息。特定的多光谱影像,具有覆盖面积广、时空分辨率高等优点,与高光谱数据结合,能有效提高土地动态监测的精度、广度和深度^[5]。

20世纪70年代以来,随着统计学方法的普及,生命带法、土壤类型法、有机碳模型法等开始大量应用于有机碳的研究^[6-10]。近年来,遥感方法在土壤有机碳的研究中越来越常见。Barthomoleus等^[11]研究发现,来源于不同母质的土壤中的有机碳与近红外长波波段都有很好的相关性;申艳等^[12]通过833~2703 nm近红外波段的原始光谱吸光度建立了较高精度的土壤有机碳含量预测模型;侯艳军等^[13]研究发现,光谱反射率经过微分及倒数的对数等数学变换能显著提高模型预测精度。周稀等^[14]通过提取landsat8 OLI数据影像上的DN值建立了土壤有机碳含量反演模型,并利用空间插值法实现了土壤有机碳空间分布格局可视化,但是精度较低。王琼等^[15]的研究进一步表明,多光谱数据反演土壤有机碳含量的精度不够高。总体而言,高光谱估测土壤有机碳含量精度较高,但多为单纯研究估测模型,而多光谱估测土壤有机碳含量精度较低,但易实现区域化反演。本研究以此为切入点,利用野外实测高光谱,通过波段平均法把高光谱的窄波段拟合到GF-1号多光谱影像宽波段,建立土壤有机碳含量的高光谱模型,然后依据反射率的比值订正法把高光谱模型校正为多光谱模型,进行研究区表层土壤有机碳含量反演,并进一步将土壤有机碳含量反演结果与土地利用类型结合,对土壤有机碳分布状况进行分析。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

鲍店矿区位于邹城市西北部,属于邹城西部矿区的重要组成部分,地理坐标为北纬35°23′13″—35°28′08″,东经116°48′07″—116°52′26″,面积约为35.76 km²。矿区气候是四季分明的温带大陆季风性气候,作物种类丰富,地形以平原为主,土壤类型主要是潮土和砂姜黑土。自1986年投产以来,长期的采煤活动造成了严重的地面塌陷问题,塌陷形成的水域面积占矿区的1/8。

1.2 土样采集与分析

根据研究区的耕作机制,为避免其他地物遮挡地面,影响采样,在2016年10月初,按照室内设计路线,在

避开水域的基础上尽量均匀采样,共采集样点107个,每个样点均通过Geo7x进行定位,采样深度为表层0—20 cm,每份土样是在16 m×16 m的范围内按照对角线取样法由5份土样混合组成,约1 kg,装入自封袋。

土样带回实验室后,挑出植物根系、石子砖块、小动物等侵入物,经风干、敲打、研磨后,过100目筛后进行土壤有机碳含量测定,采用重铬酸钾氧化法。

1.3 多光谱遥感影像的获取与处理

1.3.1 高分一号WFV1数据影像 本研究采用的高分一号WFV1数据影像来源于中国资源卫星应用中心,采集于2016年10月14日(与土壤样品采集时间一致),空间分辨率为16 m,包含蓝(450~520 nm)、绿(520~590 nm)、红(630~690 nm)、近红(770~890 nm)4个波段。

多光谱影像做为土壤有机碳含量的反演底图,需要包含尽可能多的土壤信息。因此,除了常见的辐射校正、几何校正及裁剪等预处理外,本研究对影像还进行了水域及植被信息的去除。

1.3.2 归一化差异水体指数去除水域 McFeeters^[16]研究表明,归一化差异水体指数(NDWI)能有效提取出遥感影像上的水体。计算公式为: $NDWI = \frac{p(\text{Green}) - p(\text{NIR})}{p(\text{Green}) + p(\text{NIR})}$, $NDWI > 0$ 时影像显示为水域。首先通过ENVI的波段运算获取影像NDWI,然后利用 $NDWI > 0$ 制作掩膜,即得到去除水域后的遥感影像。

1.3.3 混合像元分解法去除植被信息 本研究采用线性混合像元分解方法,即假设组成遥感影像的像元信息都是由土壤和植被混合而成的,根据像元二分模型,得到像元中的土壤信息^[17]。

计算公式为: $R_b = \frac{(R_b - f_v R_{vb})}{(1 - f_v)}$ 。式中: R_b 为像元中

波段 b 中的土壤反射率; R_{vb} 为像元中波段 b 中的植被反射率; R_b 为像元中波段 b 总的发射率; f_v 为像元中植被信息所占的比例,通过归一化植被指数(NDVI)确定,计算公式为: $f_v = \frac{(NDVI - NDVI_{\min})}{(NDVI_{\max} - NDVI_{\min})}$, ($NDVI = \frac{p(\text{NIR}) - p(\text{Red})}{p(\text{NIR}) + p(\text{Red})}$)。式中: $p(\text{NIR})$ 、 $p(\text{Red})$ 分别表示近红外波段和红光波段; $NDVI_{\min}$ 、 $NDVI_{\max}$ 分别为遥感影像上归一化植被指数的最小值和最大值。

1.4 光谱采集与处理

考虑到多光谱影像的采集环境,本研究在野外采集土样的同时,测量高光谱数据。光谱测量采用美国ASD Field Spec4地物光谱仪,光谱范围为350~2500 nm。光谱数据采集选择无风晴朗的天气10:00—14:00,选择表面平坦且无植被的原状土壤,探头垂直向下,距离地

面约为 80 cm,每个样点共采集 10 条光谱曲线。

将测得的土壤光谱曲线用自带的 ViewSpec Pro 进行简单的处理,每份土样取 10 条曲线的均值波谱作为样本实测曲线,并去除噪声较大的起始波段(350~499 nm)和尾部波段(2 451~2 500 nm)以及受环境水汽影响较大的 1 300~1 450,1 800~1 950 nm 波段^[18]。然后利用软件 R 对光谱数据进行 Savitzky-Golay 平滑去噪。

1.5 平均波长法拟合多光谱

采用平均波长法把高光谱的窄波段拟合成多光谱数据的宽波段,即选用与 GF-1 号各个波段相对应波长范围的高光谱数据的平均反射率作为相应波段拟合后的反射率^[19]。

计算公式为: $b_{m\sim n} = \frac{\sum_{i=m}^n B_i}{n-m+1}$ 。式中: $b_{m\sim n}$ 为多光谱数据中波长为 $m\sim n$ 的波段的反射率; B_i 为高光谱在波长 i 的反射率。

1.6 光谱参量的构建

以拟合得到的 4 个波段为基础,通过不同的波段组合及数学变换方法,包括倒数($\frac{1}{B_i}$),对数($\lg B_i$),倒数的对数($\lg \frac{1}{B_i}$),比值($\frac{B_i}{B_j}$),差值($B_i - B_j$),以及前减后加($\frac{B_i - B_{(i-1)}}{B_i + B_{(i+1)}}$),前加后减($\frac{B_i + B_{(i-1)}}{B_i - B_{(i+1)}}$)等。式中: B_i, B_j 分别表示波段 i 和 j 的反射率, i, j 取值 1,2,3,4,且 $i \neq j$,共获得 40 个参量,并通过相关性分析确定模型参量。

1.7 多元线性回归分析

土壤有机碳含量模型通过多元线性逐步回归分析方法构建,选择相关性大于 0.40,0.45,0.50 的 3 组参量分别参与模型构建,并通过模型决定系数 R^2 和均方根误差 RMSE 确定反演模型。

1.8 决策树分类

决策树分类是基于遥感图像数据及其他空间数据,通过专家经验总结、简单的数学统计和归纳方法等,获得分类规则进行遥感分类的方法^[20],是一种逐级分层分类方法。本研究把土壤有机碳含量模型作为决策树分类规则,利用 ENVI 的决策树分类方法将有机碳含量分级,分级标准根据全国第二次土壤普查中土壤有机质的分级标准确定。土壤有机碳含量共划分为 6 个级别,I 级为 >23.20 g/kg,II 级为 $17.40\sim23.20$ g/kg,III 级为 $11.60\sim17.40$ g/kg,IV 级为 $5.80\sim11.60$ g/kg,V 级为 $3.48\sim5.80$ g/kg,VI 级为 $0.58\sim3.48$ g/kg。

1.9 矿区土地利用现状分类

借助 eCognition 利用面向对象分类方法把研究区土地利用类型分为耕地、林地、草地、居民点、采矿区、道路和水域等 7 类,并通过 ArcGIS 的叠加分析功能,讨论

研究区土壤有机碳含量与土地利用类型的关系。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳的样本特征

去除一个异常值 49.94 g/kg,共 106 个样本参与建模。由表 1 可知,土壤有机碳含量样本均值小于 13.00 g/kg,土壤有机碳含量偏低;标准差和变异系数较大,样本有一定的离散性。训练集和验证集中的均值及标准差与样本总集相近,表明训练集与验证集样本分布较为均匀,划分结果具有代表性,构建的模型有较好的稳定性。

表 1 土样样本有机碳含量统计特征

样本集	样本数	有机碳含量/(g·kg ⁻¹)				变异 系数/%
		最小值	最大值	平均值	标准差	
样本总集	106	1.85	30.76	12.89	5.59	43.41
训练集	76	1.98	29.83	12.95	5.27	40.72
验证集	30	1.85	29.70	12.71	5.68	43.90

2.2 土壤有机碳含量高光谱模型的构建

通过相关性分析, $B_1/B_2, B_1 - B_2, B_1 - B_3, (B_2 - B_1)/(B_2 + B_3)$ 等 4 个组合变量与土壤有机碳含量的相关性最高,大于 0.50;此外,变量 $B_1/B_3, B_1 - B_4, B_2 - B_3, 1/B_3, \lg(B_3)$ 与土壤有机碳含量相关性也较高,大于 0.45。以上结果表明,波段组合、差值变换以及倒数和对数变换可以有效提高变量与土壤有机碳含量的相关性。由表 2 可知,18 个相关性大于 0.40 的参量、9 个相关性大于 0.45 的参量、4 个相关性大于 0.50 的参量分别作为模型 1、模型 2、模型 3 的自变量,进行多元逐步回归分析建模。

表 2 土壤有机碳含量与建模参量的相关性分析

相关性系数 绝对值	模型 1 参量 (>0.40)	模型 2 参量 (>0.45)	模型 3 参量 (>0.50)
0.42	B_3		
0.41	B_4		
0.54	B_1/B_2	B_1/B_2	B_1/B_2
0.46	B_1/B_3	B_1/B_3	
0.40	B_2/B_3		
0.51	$B_1 - B_2$	$B_1 - B_2$	$B_1 - B_2$
0.51	$B_1 - B_3$	$B_1 - B_3$	$B_1 - B_3$
0.46	$B_1 - B_4$	$B_1 - B_4$	
0.50	$B_2 - B_3$	$B_2 - B_3$	
0.42	$B_2 - B_4$		
0.44	$1/B_2$		
0.46	$1/B_3$	$1/B_3$	
0.41	$1/B_4$		
0.42	$\lg(B_2)$		
0.47	$\lg(B_3)$	$\lg(B_3)$	
0.45	$\lg(B_4)$		
0.52	$(B_2 - B_1)/(B_2 + B_3)$	$(B_2 - B_1)/(B_2 + B_3)$	$(B_2 - B_1)/(B_2 + B_3)$
0.45	$(B_3 - B_2)/(B_3 + B_4)$		

由表 3 可知,参量最多的模型 1 最终由 4 个自变

量构成,精度最好,预测模型验证系数为 0.778, RMSE 为 3.05 g/kg,显著性小于 0.001,能够实现土壤有机碳含量的稳定预测;参量相关性最高的模型 3 的建模结果中 4 个参量全部参与模型构建,精度在 3

个模型中最低(表 3),表明相关性的高度限制会导致部分敏感信息缺失,造成模型精度降低;精度相对较高的模型 1 和模型 2 的自变量都是由波段比值及波段倒数构成,表明其敏感性较强。

表 3 土壤有机碳含量反演模型及参数

模型	自变量	表达式	显著性	训练集		验证集	
				R ²	RMSE	R ²	RMSE
1	$B_1/B_2, B_1/B_3, B_2/B_3, 1/B_4$	$Y_{soc} = -179.573 + 298.195 \times B_1/B_2 - 292.541 \times B_1/B_3 + 175.940 \times B_2/B_3 + 0.407/B_4$	0.000	0.784	3.18	0.778	3.05
2	$B_1/B_2, B_1/B_3, (B_2 - B_1)/(B_2 + B_3), 1/B_3$	$Y_{soc} = -243.194 + 349.916 \times B_1/B_2 - 101.507 \times B_1/B_3 + 460.712 \times (B_2 - B_1)/(B_2 + B_3) + 0.295/B_3$	0.001	0.781	3.20	0.766	3.17
3	$B_1/B_2, B_1 - B_2, B_1 - B_3, (B_2 - B_1)/(B_2 + B_3)$	$Y_{soc} = -280.891 + 299.838 \times B_1/B_2 + 1515.541 \times (B_1 - B_2) - 626.752 \times (B_1 - B_3) + 674.793 \times (B_2 - B_1)/(B_2 + B_3)$	0.000	0.751	3.36	0.727	4.13

2.3 土壤高光谱模型校正到土壤多光谱模型

考虑到高光谱和多光谱数据采集方式与环境的差异,根据样点的地理坐标从 GF-1 影像上提取各点对应的 4 个波段反射率,取所有点每个波段的平均值和与高光谱拟合后的对应波段的平均值进行对比分析。由图 1 可知,GF-1 影像的各波段反射率明显高于高光谱拟合的反射率,但是二者在形状和趋势上较为一致,相关性可达 0.989,表明二者线性关系极好,因此通过比值订正法将高光谱模型应用到多光谱切实可行。

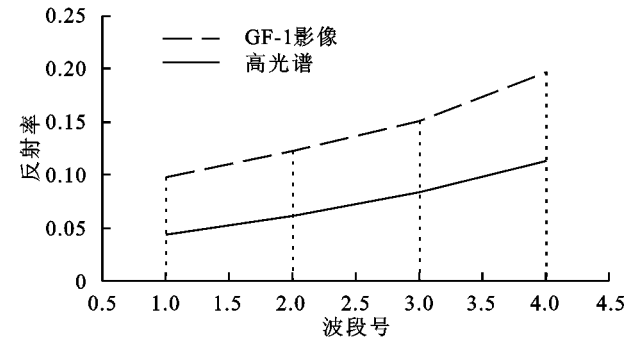


图 1 高光谱拟合波段反射率与多光谱影像反射率的对比

计算实测点与遥感影像上相对应点的各个波段反射率的比值的均值,将其作为订正系数把高光谱模型转换为多光谱模型, $B_1、B_2、B_3、B_4$ 波段订正系数分别为 0.430,0.483,0.549,0.569。选择最优模型一订正为多光谱模型,表达为:

$$Y_{soc} = -179.573 + 298.195 \times \frac{B_1 \times 0.430}{B_2 \times 0.483} - 292.541 \times \frac{B_1 \times 0.430}{B_3 \times 0.549} + 175.940 \times \frac{B_2 \times 0.483}{B_3 \times 0.549} + 0.407 \times \frac{1}{B_4 \times 0.569}$$

将该模型应用于遥感影像,提取验证样本的反演值联合实测值绘制散点图。由图 2 可知,验证模型决定系数为 0.761, RMSE 为 2.95 g/kg,与高光谱模型精度近似。因此,高光谱模型可通过系数订正转换为

多光谱模型,实现可视的、区域的有机碳含量反演。

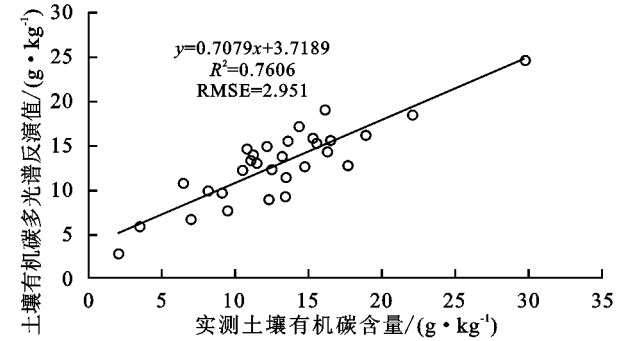


图 2 多光谱模型反演值与土壤有机碳含量实测值的对比

2.4 土壤有机碳含量反演结果

通过 ENVI 的决策树分类及 ArcGIS 的空间制图功能得到的土壤有机碳含量的分级分布(图 3)。研究区土壤有机碳含量范围为 0.71~38.15 g/kg,平均值为 14.12 g/kg;区域内土壤有机碳含量以 11.60~17.40 g/kg (III 级)为主,其次是 5.80~11.60 g/kg(IV 级),两者在分布区域上也最为广泛。此外,区域内大于 23.20 g/kg 的 I 级土壤几乎没有,II、V、VI 级分布较少;相比其他区域,水域(白色)周围土壤有机碳含量明显偏低,大多为 IV 级和 VI 级。

2.5 土壤有机碳含量与土地利用类型对比分析

由图 4 可知,煤矿区内土地利用类型仍以耕地为主,其分布也最为广泛;林地、草地较少,主要分布在西北部,其中草地多临水域分布,林地多临草地和居民点分布;采矿区主要集中在中部地区,与大片居民点相接,区域内有主干道路通过,交通位置优越;水域面积较大,约为 4.92 km²,占整个区域的近 1/8。

进一步通过 ArcGIS 的叠加分析功能,将土地利用现状图与土壤有机碳含量分级图交叉叠加,面积统计结果见表 4。矿区内的土地面积为 30.749 km²,其中耕地为 18.732 km²,占整个区域的 60.92%;草地、林地、居民点面积相当,均占 10%左右;采矿区与道路面积较少,均低于 1%。研究区内耕地土壤有机碳

含量处于中等水平,以 III 级为主,IV 级次之,还有少
许的 V,VI 级,I 级最少,不到 0.1%;林地、草地土壤
有机碳含量分别以 V,VI 级为主,处于较低水平;居
民点则主要处于 III,IV 级的中等水平;采矿区约
70%的面积处于 II 级,还有部分处于 I 级,有机碳含
量高于其他地类;道路以 IV 级为主,与居民点相似。



图 3 土壤有机碳含量分级空间分布

I、II 级土壤中采矿区均占据了大半,分别为 68%和

表 4 土地利用类型与土壤有机碳含量级别的交叉面积统计							单位:km ²
类别	I	II	III	IV	V	VI	汇总
耕地	0.016		13.048	4.289	0.875	0.504	18.732
	0.09% ^A	0	69.66% ^A	22.89% ^A	4.67% ^A	2.69% ^A	60.92%
	32.00% ^B		88.32% ^B	47.07% ^B	31.86% ^B	16.99% ^B	
林地		0.113		0.716	1.452	0.248	2.529
	0	4.47% ^A	0	31.71% ^A	57.41% ^A	9.81% ^A	8.22%
		10.25% ^B		7.86% ^B	52.88% ^B	8.36% ^B	
草地				1.009	0.419	2.113	3.541
	0	0	0	28.49% ^A	11.84% ^A	59.67% ^A	11.52%
				11.07% ^B	15.26% ^B	71.24% ^B	
居民点		0.201	1.726	2.172		0.101	4.200
	0	4.79% ^A	41.10% ^A	51.71% ^A	0	2.40% ^A	13.66%
		18.24% ^B	11.68% ^B	23.84% ^B		3.41% ^B	
采矿区	0.034	0.632		0.238			0.904
	3.76% ^A	69.91% ^A	0	26.33% ^A	0	0	2.94%
	68.00% ^B	57.35% ^B		2.61% ^B			
道路		0.156		0.687			0.843
	0	18.51% ^A	0	81.49% ^A	0	0	2.74%
		14.16% ^B		7.54% ^B			
汇总	0.050	1.102	14.774	9.111	2.746	2.966	30.749
	0.16%	3.58%	48.05%	29.63%	8.93%	9.65%	

注释:A 为土壤有机碳含量级别占土地利用类型的面积百分比;B 为土地利用类型占土壤有机碳含量级别的面积百分比。

57.35%。此外耕地占了 I 级土壤的 32%,II 级土壤中
还包含部分居民点和林地;III 级土壤分布面积最大,占
总面积的 48.05%,其中 88.32%为耕地,其余为居民点;IV
级土壤在分布面积上小于 III 级,分布范围却是最广,在
各个地类中均有分布,耕地和居民点较多,采矿区较少;
V,VI 级土壤分布面积和分布范围都相差不大,前者林
地分布较多,后者草地分布较多。

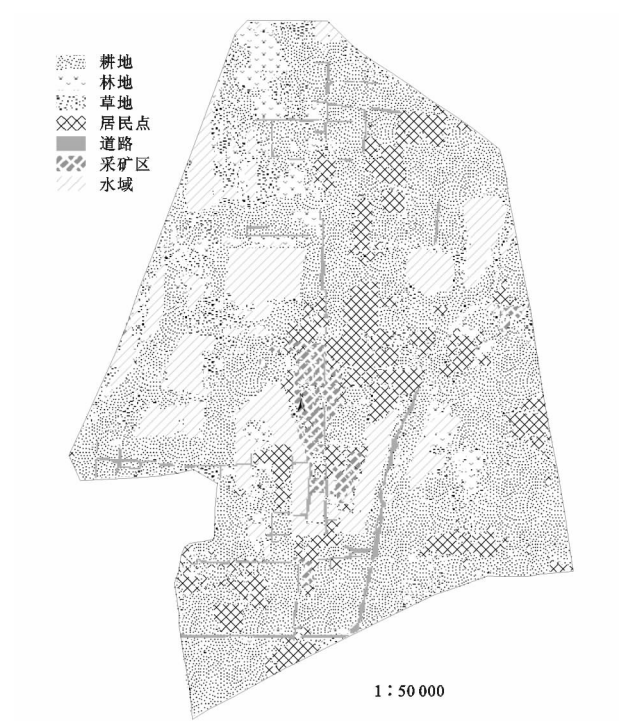


图 4 研究区土地利用现状

3 讨论

本研究通过波段拟合把高光谱的窄波段拟合到多光谱的宽波段,并对各波段进行数学变换,发现比值及倒数变换可以明显提高相关性,王琼等^[15]在研究棉田土壤有机质时也有同样的结论。通过多元线性回归分析建立土壤有机碳含量高光谱模型,发现4个波段都参与的模型精度最高,即土壤有机碳含量对蓝、绿、红、近红4个波段都比较敏感,这与郭燕等^[21]认为土壤有机质仅对蓝、绿2个波段敏感的研究结果有所不同。推测可能是区域土壤环境或类型差异的原因,郭登巍等^[22]就认为土壤母质与土地利用类型对土壤的可见光—近红外波段光谱有较大影响。

本研究区是煤矿区,由于长年煤炭的开采,造成了严重的地面塌陷,区域内的水域主要就是由于土地塌陷后积水形成。观察土壤有机碳含量分布,水域周围地区明显偏低,因此推测土地塌陷对其边缘地区除了破坏土壤结构外,也影响土壤有机碳的分布,具体影响机制,还需进一步研究探讨。Yang等^[23]研究也表明,采煤引起的地表沉降会干扰土壤有机碳的分布,导致土壤有机碳含量的降低和区域差异。

结合土地利用现状,部分居民点和道路有机碳含量较高。可能是煤炭的生产与运输过程中,煤粉散落的原因。耕地有机碳含量明显高于林地与草地,主要与植被覆盖类型和施肥有关,罗友进等^[24]的研究认为,植被类型其根系分布以及根系分泌物的性质会对土壤微生物和有机碳的空间分布产生影响;易亚男等^[25]认为,施肥作为农田的重要管理措施,可以直接影响土壤有机碳含量。此外,部分林地有机碳含量明显高于其他林地,甚至高于耕地,本研究认为该部分林地是矿场周围防护林地,受煤炭开采的影响。

4 结论

(1)高光谱与多光谱的结合,实现了土壤有机碳含量区域化与高精度的反演。通过波段拟合和比值订正获得的多光谱模型,检验决定系数为0.76,可以稳定实现矿区土壤有机碳含量反演。

(2)研究区表层0—20 cm的土壤有机碳含量为0.71~38.15 g/kg,变异性较大;III级分布占总面积的48.05%,即研究区内有机碳含量以11.60~17.40 g/kg为主;I级分布最少,主要在采矿区,仅占0.16%;平均土壤有机碳含量为14.12 g/kg,因此研究区有机碳含量总体上处于中等水平,高质量土壤极少,耕地中更是不到0.1%。

(3)土地利用方式不同,土壤有机碳含量存在一定差异。整体上土壤有机碳含量表现为采矿区>耕地>居民点>林地>草地。此外,本研究区受煤炭生产和运输的影响,采矿区有机碳含量最高,部分居民点和道路有机碳含量也偏高。

(4)煤矿开采引起的地面塌陷会扰乱土壤有机碳分布。采煤塌陷边缘土壤表层有机碳含量低于周边区域。

参考文献:

- [1] 莫爱,周耀治,杨建军,等.山地煤矿开采对土壤理化性质的影响[J].水土保持学报,2015,29(1):86-89.
- [2] 雷少刚,卞正富.西部干旱区煤炭开采环境影响研究[J].生态学报,2014,34(11):2837-2843.
- [3] 刘景双,杨继松,于君宝,等.三江平原沼泽湿地土壤有机碳的垂直分布特征研究[J].水土保持学报,2003,17(3):5-8.
- [4] Chang C W, Laird D A. Influence of soil moisture on near-infrared reflectance spectroscopic measurement of soil properties [J]. Canadian Journal of Soil Science, 2002, 82(4): 413-422.
- [5] 王静,何挺,李玉环.基于高光谱遥感技术的土地质量信息挖掘研究[J].遥感学报,2005,9(4):438-445.
- [6] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, et al. Soil carbon pools and world life zones [J]. Nature, 1982, 298(5870): 156-159.
- [7] Foley J A. An equilibrium model of the terrestrial carbon budget [J]. Tellus Series B-chemical & Physical Meteorology, 1995, 47(3): 310-319.
- [8] 薛志婧,侯晓瑞,程曼,等.黄土丘陵区小流域尺度上土壤有机碳空间异质性[J].水土保持学报,2011,25(3): 160-163.
- [9] 黄雪夏,倪九派,高明,等.重庆市土壤有机碳库的估算及其空间分布特征[J].水土保持学报,2005,19(1):54-58.
- [10] 袁芳,赵小敏,乐丽红,等.江西省表层土壤有机碳库储量估算与空间分布特征[J].生态环境学报,2008,17(1):268-272.
- [11] Bartholomeus H M, Schaepman M E, Kooistra L, et al. Spectral reflectance based indices for soil organic carbon quantification [J]. Geoderma, 2008, 145(1): 28-36.
- [12] 申艳,张晓华,梁爱珍,等.近红外光谱分析法测定东北黑土有机碳和全氮含量[J].应用生态学报,2010,21(1):109-114.
- [13] 侯艳军,塔西甫拉提·特依拜,买买提·沙吾提,等.荒漠土壤有机质含量高光谱估算模型[J].农业工程学报,2014,30(16):113-120.
- [14] 周稀,潘洪旭,邓欧平,等.基于RS和GIS的西河流域土壤有机碳含量的空间反演[J].中国土壤与肥料,2016(4):32-38.
- [15] 王琼,陈兵,王方永,等.基于HJ卫星的棉田土壤有机质空间分布格局反演[J].农业工程学报,2016,32(1): 174-180.
- [16] Mc Feeters S K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features [J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432.

保水剂和微生物菌肥对半干旱区造林和土壤改良的影响

宋双双, 孙保平, 张建锋

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 试验分别设置低、中、高浓度保水剂(20, 40, 60 g/株)和微生物菌肥(150, 300, 450 g/株)用于张北半干旱区风沙土樟子松造林。通过分析不同处理对土壤田间持水量、有效水分含量、水稳性团聚体含量、微生物菌落数量和微生物量碳、氮等指标的差异, 研究保水剂与微生物菌肥对土壤物理性质、土壤微生物以及樟子松成活率的影响, 探究适用于干旱、半干旱区樟子松造林的最佳配比。结果表明: 保水剂和微生物菌肥能够显著改良土壤, 提高造林成活率, 但不同浓度配比对各项指标影响效果不同。高浓度保水剂单施对田间持水量, 有效水分含量和水稳性团聚体含量提高最明显, 分别较对照组提高了141%, 150%, 63.8%; 中浓度保水剂和高、中浓度菌肥混施显著提高了土壤微生物活性和土壤微生物量, 其中真菌、细菌和放线菌分别较对照组高77%, 108%, 93%, 微生物碳、氮分别较对照组增加132%, 178%。此外, 施加保水剂和微生物菌肥对樟子松生长具有显著促进作用, 株高、地径平均值分别较对照组提高6%, 12%。保水剂提高樟子松成活率的效果优于其与微生物菌肥混施, 且中浓度保水剂条件下造林成活率最高。在干旱、半干旱区造林时, 采用中浓度保水剂和微生物菌肥配施可以改良土壤, 提高造林成活率。

关键词: 保水剂; 微生物菌肥; 半干旱区; 风沙土; 成活率

中图分类号: S728.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0334-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.03.050

Research on Soil Absorbent Polymer and Microbial Fertiliser to Improve Semi-arid Soil and Afforestation

SONG Shuangshuang, SUN Baoping, ZHANG Jianfeng

(Beijing Forestry University, School of Soil and Water Conservation, Beijing 100083)

Abstract: The mixed applications of an eco-friendly soil absorbent polymer (SAP) and a compound microbial fertiliser (MF) in the aeolian sandy soil was studied for the improvement project of afforestation in Zhangbei County. The mixed applications with low, moderate or high SAP (20, 40, 60g/tree) and MF (150, 300, 450 g/tree) concentrations were used for the afforestation of Scots pine. Differences in field moisture capacities, available water contents, WSA percentages, microbial colony count and soil microbial biomass carbon/nitrogen (S_{mbc}/S_{mbn}) at different mixing ratios were analysed. The effects of SAP and MF on soil physical properties, soil microbes and survival rates of Scots pine were examined. The mixing ratio and amount applicable to afforestation in arid and semi-arid regions were explored. Results showed that SAP and MF could remarkably improve soil and increase survival rate, but the effects of the mixing ratio on these indicators varied with concentrations. When a single highly concentrated SAP was used, the field moisture capacity, available water content and WSA content were increased by 141%, 150% and 63.8% respectively compared with the control. The mixed application of moderate SAP concentration and MF significantly increased the microbial activity and microbial colony count. In particular, the microbial activity and microbial colony count of fungi/bacteria/actinomycetes increased by 77%, 108% and 93% compared with the control, respectively, and the S_{mbc}/S_{mbn} increased by 132%, 178%. The application of SAP and MF significantly promoted plant growth. The plant height and basal diameter respectively increased by 6% and 12% compared with the control. The improvement of survival rate by single SAP was greater than that of the mixed application. The moderate SAP concentrations increased the survival rate of Scots pine. During afforestation in arid and semi-arid regions, the application of moderate SAP concentration mixed with MF could improve soil and increase survival rate of afforestation.

收稿日期: 2017-11-20

资助项目: 河北省张家口地区干旱造林保水材料试验研究项目(2014HXFWSBXY003)

第一作者: 宋双双(1990—), 女, 博士研究生, 主要从事水土保持工程研究。E-mail: avasong90@sina.com

通信作者: 孙保平(1956—), 男, 博士, 教授, 主要从事水土保持工程研究。E-mail: sunbp@163.com

Keywords: soil absorbent polymer; microbial fertiliser; semi-arid area; aeolian sandy soil; survival rate

在干旱、半干旱风沙区营造防护林是建设中国生态安全屏障的重要措施,但干旱、半干旱地区风沙土具有土粒分散、结构性差、透水透肥、养分含量低,土地生产能力低下的特点,导致植物恢复困难。如何提高造林成活率和造林质量对“三北”防护林改造工程和京津源风沙治理等防风固沙项目的推进具有重要意义。大量研究^[1-2]表明,土壤水分和养分条件的好坏是直接影响植物生长的关键。为解决造林困难的问题,多种土壤改良剂的应用研究逐渐开展,保水剂(SAP, Super absorbent polymers)作为一种土壤改良剂,能显著增加土壤水分^[3],有效减少养分淋溶^[4],增加土壤水稳性团聚体^[5-6],提高作物成活率^[7-8]。施加 SAP 能促进玉米、小麦、马铃薯等种子萌发和提高作物产量^[9-10]。此外,将 SAP 用于干旱区造林和育苗,通过种子包衣、蘸根或层施等施用方式,显著提高了油松、侧柏、中槐、红柳、柠条、梭梭、紫穗槐等树种的苗木成活率^[11]。目前有关 SAP 的研究多关注在如何促进农作物增产以及提高造林成活率方面。但是,将 SAP 用于半干旱区造林和对风沙土改良的作用机理方面研究较少。

此外,SAP 单施存在功能单一^[3]、残留物易造成土壤二次污染等问题,为此,很多学者对环保型 SAP 以及 SAP 和其他材料复合混施进行了研究。但传统的化肥、有机肥存在投入高、利用率低的问题,长期使用易造成土壤板结,环境污染^[12-13],为保证环境安全和农业可持续发展,微生物菌肥(MF)研究得到开展。微生物菌肥含有固氮、解钾、解磷等微生物,腐殖酸等有机营养物以及大量微量元素,具有改善土壤微生物活性、提高植物抗逆性、促进有机质分解、加快有效养分转化、提高土壤肥力等功能,被广泛用于农业生产^[14-15]。但微生物菌群的生长繁殖需要良好的土壤环境,菌肥的施用效果受到土壤类型、pH、水分等土壤环境影响^[16]。因此,为了探索 SAP 的复合混施以及微生物菌肥在干旱区的应用,将 SAP 与微生物菌肥混施应用于干旱、半干旱地区造林具有一定的研究价值。

本研究依托张家口市张北县半干旱区防护林改造工程,选择环保型 SAP 与复合微生物菌肥,采用野外造林的试验手段,通过设置低、中、高浓度的保水剂和微生物菌肥进行交叉配施,对比不同处理对土壤田间持水量、有效水分含量、水稳性团聚体含量、微生物数量和微生物量碳氮等指标的差异,分析不同浓度配比对风沙土物理性质、土壤微生物活性以及对樟子松成活率的影响,探索适用于干旱、半干旱区造林的改

良材料和混施配比,改良土壤,提高造林成活率,对风沙土造林具有一定的指导意义。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地点位于河北省张家口市张北县,属于“三北防护林”过熟林更新改造示范工程(41°07′56″—41°08′00″N, 114°39′46″—114°39′50″E)。试验区属于坝上高寒区,中温带大陆性季风气候,雨热同季,昼夜温差大,干旱、多风、少雨、无霜期短,年日照时间 2 897.8 h,年均降水量 300 mm 左右,集中在 6—8 月,年平均气温 3.2 ℃。试验面积约 5 000 m²,地形为缓坡地,土壤为风沙土,土壤容重为 1.46 g/cm³,总孔隙度,毛管孔隙度和田间持水量分别为 40.65%, 37.52%, 15.84%。水稳性团聚体含量为 50.9%。土壤全氮、全磷、全钾和速效氮、速效磷、速效钾的含量分别为 0.62, 0.29, 23.45 g/kg 和 53.81, 44.69, 63.81 mg/kg,土壤有机质含量为 9.28 g/kg,土壤 pH 8.3。过熟林原有树种主要为杨树,试验前只有少量草本覆盖。

1.2 试验材料

保水材料采用聚丙烯酸钾盐类高分子吸水材料(AG301 台湾塑胶股份有限公司,中国)。性状为白色粉末,粒径为 850~150 μm,密度为 600~700 g/L, pH(1 g/L 去离子水)6~7,反复吸水 8~10 次后吸水倍率下降,残留丙烯酸约 350 mg/L,无添加丙烯酰胺。微生物菌肥采用固体复合微生物菌肥(山西绿色承诺永宝腐肥有限公司,中国)。天然矿物营养包括麦饭石粉(74 μm)、天然沸石粉(74 μm)、生物黄腐殖酸钾合计 30%,风化煤(74~149 μm)70%,添加复合益生菌有效活菌数 $\geq 3 \times 10^9$ cfu/g,主要菌种为固氮菌、光合菌、根瘤菌、解淀粉芽孢杆菌和枯草芽孢杆菌等。试验树种选择当地乡土树种樟子松,为 2 年生容器苗。选择根系完整、长势良好、株高相近的苗木以减小不同样本间的差异。试验第 1 年为养护期,采用水罐车浇水 5 次,每次浇透处理。

1.3 试验设计

樟子松人工林,株行距为 4 m×4 m。穴植,种植穴深 0.5 m,采用干拌的方式,将设计用量试验材料与土壤均匀混合施于樟子松根系的底部和周围,使其均匀分布在 0.2~0.5 m 深度。保水剂设置低、中、高 3 个浓度分别与微生物菌肥低、中、高 3 种浓度进行分组混施处理(表 1),用 A_iB_j 表示,其中 A_i(*i*=1, 2, 3)为保水剂浓度,单位为 g/穴, B_j(*j*=0, 1, 2, 3)为微生物菌肥浓度,单位为 g/穴,设置空白对照组 CK, 一共 13 组处理。每组处理设置 3 个重复,以 R_{m(m} =

1,2,3)表示,每个重复种植 8 株樟子松,共种植樟子松 312 株。野外试验从 2015 年 5 月和 2016 年 11 月取土壤样品,每个样地随机选取 3 处取样点,取样点位于植物主茎周围 1 m 范围内,取土深度为 0.2~0.4 m,每个取样点共采集 2 份原状土样和 1 份新鲜土样,共 324 份土样。土样分别用来测定土壤物理指标以及土壤微生物指标,每个指标测定 2 次。

表 1 试验设计和浓度配比

处理	用量/(g·株 ⁻¹)		组别
	保水剂	微生物菌肥	
CK(A0B0)	0	0	对照
A1B0	20	0	保水剂低浓度单施
A1B1	20	150	低浓度混施
A1B2	20	300	低、中浓度混施
A1B3	20	450	低、高浓度混施
A2B0	40	0	保水剂中浓度单施
A2B1	40	150	中、低浓度混施
A2B2	40	300	中浓度混施
A2B3	40	450	中、高浓度混施
A3B0	60	0	保水剂高浓度单施
A3B1	60	150	高、低浓度混施
A3B2	60	300	高、中浓度混施
A3B3	60	450	高浓度混施

1.4 土壤水稳性团聚体

土壤水稳性团聚体采用湿筛法测量^[17]。首先将原状土土样风干,按照>5,2~5,1~2,0.5~1,0.25~0.5,<0.25 mm 6 个粒径等级过筛,将>0.25 mm 的 5 个粒径级的土壤按比例称量并配成 100 g 待测土样,使用水稳性团聚体分析测定仪(DM200,上海德玛信息技术有限公司,中国)进行测定。将含有待测土样的套筛放入水桶中,上下振动 30 min,振幅 4 cm。振动结束后分别收集每层筛子上的土壤颗粒,并放入烘箱中 105 ℃烘干 8 h 后称重,计算不同粒径的水稳性团聚体的质量百分含量。

1.5 田间持水量和土壤有效含水量

田间持水量的测量参考威尔科克斯法进行测定^[18],将装有原状土的环刀有孔并铺有滤纸的一端放入盛有水的平底盘中,使其充分吸水,24 h 后取出置于干沙上,放置 8 h,此时的土壤含水量为田间持水量。另外,在称量瓶中加入 20 g 过 1 mm 筛风干土样,并置于下部盛有饱和硫酸钾溶液的干燥器有孔瓷板上,保持 20 ℃恒温放置 1 周,称重后重新放入干燥器中继续吸水,之后每天称重 1 次直至质量不在变化,此时土样的土壤含水量为土壤最大吸湿水含量。利用土壤最大吸湿水含量计算土壤有效水分含量,计算公式为^[19]:

$$W_a = W_c - 1.5 \times W_m \quad (1)$$

式中: W_a 代表有效水分含量(%); W_c 代表田间持水量(%); W_m 代表最大吸湿水量(%).

1.6 土壤微生物碳、氮和土壤微生物数量

采用氯仿熏蒸浸提法测定土壤微生物碳、氮含量^[20],试验开始时,将待测新鲜土样分为 2 份,1 份进行氯仿熏蒸,1 份空白,之后用 K_2SO_4 浸提。采用总有机碳分析仪(Lotix, Teledyne Tekmar, 美国)分别测定浸提液中的碳含量 C_m 、 C_k ,采用全自动凯式定氮仪(ATN-300, 上海洪纪仪器设备有限公司, 中国)分别测定浸提液中的氮含量 N_m 、 N_k 。微生物量碳氮计算公式为:

$$S_{mbc} = (C_m - C_k) / a \quad (2)$$

$$S_{mbn} = (N_m - N_k) / b \quad (3)$$

式中: S_{mbc} 为土壤微生物碳(mg/kg); S_{mbn} 为土壤微生物氮(mg/kg); C_m 、 C_k 为氯仿熏蒸和空白浸提液中的碳含量(mg/kg); N_m 、 N_k 为氯仿熏蒸和空白浸提液中的氮含量(mg/kg); a 、 b 为转换系数,分别为 0.45、0.54。

土壤微生物数量采用稀释平板法测定^[21],细菌采用牛肉膏-蛋白胨培养基,接种后放于 28 ℃恒温箱培养 1~2 d 后计数,真菌采用 PDA 培养基,接种后 28 ℃恒温培养 1~2 d 后计数,放线菌采用高氏一号培养基,接种后 28 ℃恒温培养 6~7 d 后计数。

1.7 数据分析

运用 Excel 2010、SPSS 20.0 进行数据处理分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对樟子松成活率的影响

由图 1 可知,在施加了保水剂和菌肥后,樟子松的成活率都相比于对照组有所提高,但提高的程度不同。在相同保水剂用量条件下,樟子松的成活率随菌肥施用量的增加而呈现先增加而后下降的趋势。樟子松成活率最大值均出现在中浓度菌肥条件下。而当菌肥用量不变条件下,樟子松的成活率随保水剂的施用而有较大的提升,而后成活率则不随保水剂用量的增加而变化。在不施用保水剂和菌肥的条件下,樟子松的成活率为 79.2%,成活率的最大值出现在 A1B2、A2B2、A3B2,达到了 95.8%,在少量菌肥用量的条件下,樟子松成活率有所增加,但增加的幅度较小,当菌肥用量增加,樟子松成活率出现明显的下降趋势。因此试验的结果表明,低浓度保水剂和中浓度菌肥混施对樟子松成活率提升的效果最佳。

2.2 不同处理对土壤水稳性团聚体的影响

由图 2 可知,施加保水剂和微生物菌肥能够显著提高土壤水稳性团聚体含量。土壤水稳性团聚体总量随单施保水剂浓度增加而增加,含量最大的为 A3B0,较对照组提高 63.8%。保水剂单施均高于该浓度保水剂与微生物菌剂混施各处理,随保水剂浓度

的增加土壤水稳性团聚体总量分别比对照组高 18.8%,26.5%,47.2%。相同保水剂用量下随微生物菌肥浓度提高,水稳性团聚体含量降低。相同微生物菌肥用量下随保水剂浓度提高,水稳性团聚体含量增大,最大值出现在 A3B1,较对照组提高 52.2%。施加保水剂和微生物菌肥对不同粒级团聚体含量提高程度不同,对 0.25~0.5、0.5~1、1~2 mm 3 个粒级土壤水稳性团聚体含量最大值出现在 A3B0,分别较对照提高 44.2%,62.8%,106.3%,2~5、>5 mm 2 个粒级土壤水稳性团聚体含量最大值出现在 A3B1,分别较对照提高 46.9%,370%。

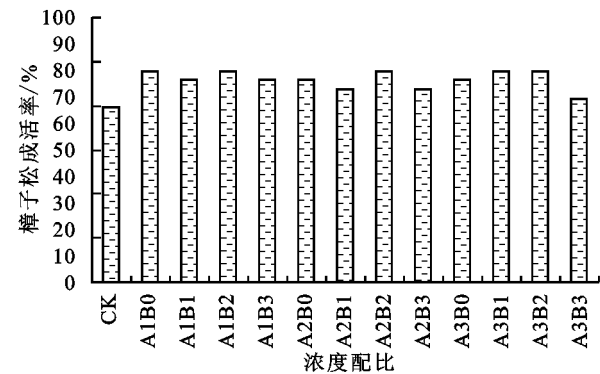


图 1 不同处理条件下樟子松的成活率

施加保水剂后土壤水稳性团聚体含量随保水剂浓度的增加而增加。保水剂能够显著提高土壤水稳性团聚体含量,一方面是保水剂具有吸附作用,保水剂分子吸附于土壤颗粒表面或渗透于土壤颗粒的空隙中,进入土壤团聚体^[22];另一方面是由于保水剂的吸水性能,使其与土壤颗粒通过水吸力粘连在一起,从而形成大团聚体^[23]。在一定范围内,土壤水稳性团聚体含量的增加,代表土壤肥力的增加,这有助于提高造林质量^[3]。混施微生物菌肥后,土壤水稳性团聚体含量虽有增加,且随着菌肥浓度的增加而降低。微生物菌肥中含有大量细菌、真菌和放线菌,这些微生物会分解土壤有机质,并对聚丙烯酸钾高分子聚合物具有一定降解作用,相对于保水剂单施处理,降低了土壤水稳性团聚体含量^[24]。

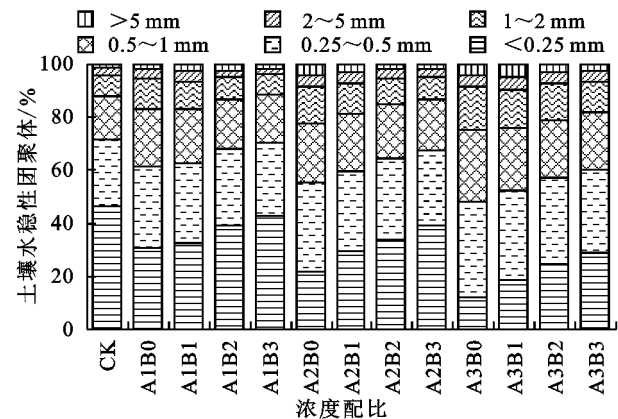


图 2 不同处理下不同粒级土壤水稳性团聚体含量

2.3 不同处理对土壤水分变化的影响

由表 2 可知,施加保水剂和微生物菌肥显著提高了土壤田间持水量、最大吸湿水量和土壤有效水分含量。单施保水剂或混施菌肥浓度不变时,土壤田间持水量随保水剂浓度增大逐渐增大。最大吸湿量随保水剂和微生物菌肥的浓度增大而呈递增趋势。土壤有效水分含量随保水剂浓度增加而呈现递增趋势,低浓度保水剂处理下,随菌肥浓度增大,土壤有效水分含量降低,中高浓度保水剂处理下,与菌肥混施各处理土壤有效水分含量均低于该浓度保水剂单施,且随菌肥浓度增大而呈降低趋势。土壤有效水分含量最高为 A3B0 处理,高于对照组 150%。

表 2 不同处理对土壤水分变化的影响

处理	田间持水量	最大吸湿量	单位: %
			有效水含量
CK(A0B0)	14.91±0.40a	0.98±0.04a	13.44±0.44a
A1B0	24.32±0.92b	2.07±0.10b	21.22±0.92b
A1B1	25.47±0.68bc	2.15±0.10b	22.25±0.64bc
A1B2	24.36±0.99b	2.19±0.17b	21.08±0.91b
A1B3	23.85±1.34b	2.35±0.21b	20.33±1.18b
A2B0	29.73±1.82d	3.32±0.15c	24.75±1.71cde
A2B1	28.28±1.07cd	3.48±0.24c	23.06±0.70bcd
A2B2	27.74±1.33cd	3.78±0.23cd	22.07±0.99bc
A2B3	27.99±0.44cd	4.41±0.59de	21.38±1.31b
A3B0	35.86±1.42e	4.83±0.23ef	28.62±1.54f
A3B1	35.47±0.39e	4.95±0.37ef	28.05±0.22f
A3B2	34.91±0.85e	5.21±0.28f	27.10±0.54ef
A3B3	33.84±0.46e	5.38±0.43f	25.77±0.36def

注:表中数据为平均值±标准误差;同列不同小写字母表示处理间差异显著(P>0.05)。下同。

保水剂同时增加了土壤田间持水量和土壤最大吸湿水量。保水剂的网状结构对土壤水分具有强烈的吸附作用,有效地提高土壤对水分的固持作用,增加了土壤田间持水量,使植物生长具有足够的水分来源^[8]。同时,保水剂增加了不能被植物吸收利用的土壤吸湿水量,但吸湿水相比于田间持水量增加量所占比例很小,因此保水剂提高的大部分水分为土壤有效水分,能够直接被植物吸收利用,且保水剂用量越大,提供植物生长有效水分越多。随微生物菌肥的施入,土壤最大吸湿量有所增加。固体肥自身存在一定的对空气水的吸附能力,导致处理后的土壤中不能被植物利用的水分含量增加^[25]。除此之外,土壤微生物含量增加,导致微生物消耗土壤水分增多,从而在一定程度上减少了土壤有效水分含量^[26]。干旱自然条件下,保水剂与高浓度菌肥混施增加的植物生长有效水分含量低于保水剂单施处理。

2.4 不同处理对土壤微生物变化的影响

施加保水剂和微生物菌肥显著提高了土壤微生物数量和微生物活性(表 3)。随保水剂浓度的增

加,各指标均呈现先增加后减小的趋势,但变化的浓度范围不同。混施条件下,低、中浓度保水剂与不同浓度菌肥混施,土壤细菌、真菌数量和微生物碳含量均随菌肥浓度增大而增大,在高浓度保水剂各混施处理下,随菌肥浓度增大,土壤细菌、真菌数量和微生物碳含量则均呈先增长后减小的趋势。土壤放线菌数量在低浓度保水剂处理下随菌肥浓度增大而增加,在中、高浓度保水剂处理下,随菌肥浓度增大呈现先增加后减少的趋势。微生物氮含量在保水剂浓度一定时,随微生物菌肥浓度增大呈现先增长后减小的趋势。微生物数量增加最多的分别为细菌 A2B3,528 cfu/mg;真菌 A2B3,238 cfu/mg;放线菌 A2B2,623 cfu/mg,分别较对照组提高 77%,108%,93%,微生物量碳、氮最大的为 A2B3、A2B2,分别较对照组增加 132%,178%。

土壤微生物种群和数量与土壤理化性质、土壤肥力与林木生长状况成正相关关系,微生物数量和微生物碳的量在一定程度上可反映微生物活性的强弱,土壤微生物菌落数量和微生物量碳氮的增加,改善了土壤物理结构,促进土壤有机质分解和土壤养分循环,促进植物生长^[27]。保水剂提高了土壤含水量,为微生物生长创造有利条件^[26],同时施加微生物菌肥含大量有机质和微生物菌种,促使微生物群落大量繁殖,固氮菌、解钾菌、解磷菌等有益菌加速了土壤速效养分的转化,为植物生长提供养分,同时微生物活动产生的植物调节激素和多种活性酶能够促进植物生长^[25]。中浓度保水剂与微生物菌剂混施对土壤微生物量碳氮含量提高效果最佳,适量的保水剂能够促进菌肥施加效果,但过高浓度保水剂增加了土壤毛管孔隙水,降低土壤空气通透性,从而抑制部分土壤微生物活性^[28]。

表 3 不同处理对土壤微生物变化的影响

处理	细菌/ (cfu · mg ⁻¹)	真菌/ (cfu · mg ⁻¹)	放线菌/ (cfu · mg ⁻¹)	土壤微生物碳/ (mg · kg ⁻¹)	土壤微生物氮/ (mg · kg ⁻¹)
CK(A0B0)	298±25.24a	114±24.33a	323±37.54a	38.10±4.91a	1.74±0.26a
A1B0	357±16.46b	185±27.89b	476±32.91bc	50.60±8.91abcd	2.10±0.44abc
A1B1	381±21.08bc	215±20.88bc	531±30.44cde	51.68±6.50abcd	2.31±0.48abc
A1B2	424±27.07c	219±12.00bc	543±13.75def	58.81±5.92cde	3.78±0.24e
A1B3	485±14.11d	230±24.21bc	636±29.87f	71.58±8.21e	3.24±0.52de
A2B0	403±16.52bc	193±8.19bc	538±6.25cde	45.60±4.42abc	2.00±0.40ab
A2B1	491±11.60d	209±15.28bc	584±19.55ef	54.35±7.11bcd	2.49±0.16bc
A2B2	497±8.02d	211±20.96bc	623±20.08f	64.74±2.17de	4.83±0.200e
A2B3	528±42.67d	238±13.45bc	604±26.54f	88.45±2.56e	3.43±0.13e
A3B0	378±19.08bc	210±10.39bc	435±7.94b	41.30±4.81ab	2.00±0.45ab
A3B1	387±23.18bc	232±30.27c	492±24.42bcd	52.18±3.86abcd	2.71±0.27cd
A3B2	355±11.06b	215±7.00bc	619±3.61f	58.38±2.54cde	3.25±0.28de
A3B3	348±18.01b	196±20.30bc	604±28.83f	53.33±3.95abcd	1.92±0.44ab

3 结论

借助野外造林试验,通过对比分析不同配比处理对土壤田间持水量、有效水分含量、水稳性团聚体百分比含量、微生物菌落数量和微生物量碳、氮等指标的差异,研究保水剂与微生物菌肥对土壤物理性质、土壤微生物、以及樟子松成活率的影响。结果表明,保水剂和微生物菌肥混施对风沙土物理特性具有改良作用,表现在显著提高了土壤田间持水量和土壤有效水分含量,为植物生长提供所需水分;改善了土壤结构,提高土壤水稳性团聚体含量。除此之外,改善了土壤微生物环境,增加土壤微生物含量,提高土壤活性,促进土壤有效养分转化,为植物生长提供所需养分。低浓度保水剂和中浓度微生物菌剂混施提高了樟子松成活率。在干旱、半干旱区造林时,采用中浓度保水剂和微生物菌肥配施对土壤改良和造林造林成活率的提升效果最优。由于本研究并未分析不

同处理对土壤速效氮磷钾的影响,因此无法评价其对土壤肥力的影响,因此在以后的研究中应重点分析保氮释磷促钾效应,综合评价保水剂和微生物菌肥对于旱区土壤改良的作用。

参考文献:

[1] Moslemi Z, Habibi D, Asgharzadeh A, et al. Effects of super absorbent polymer and plant growth promoting rhizobacteria on yield and yield components of maize under drought stress and normal conditions[J]. African Journal of Agricultural Research, 2011, 6(19): 4471-4476.

[2] Qian P, Schoenau J, Urton R. Effect of soil amendment with thin stillage and glycerol on plant growth and soil properties[J]. Journal of Plant Nutrition, 2011, 34(14): 2206-2221.

[3] 庄文化,冯浩,吴普特. 高分子保水剂农业应用研究进展[J]. 农业工程学报,2007,23(6),265-270.

[4] 杜建军,苟春林,崔英德,等. 水剂对氮肥氨挥发和氮磷钾养分淋溶损失的影响[J]. 农业环境科学学报,2007,

- 26(4), 1296-1301.
- [5] 周磊, 刘景辉, 郝国成, 等. 沙质土壤改良剂对科尔沁地区风沙土物理性质及玉米产量的影响[J]. 水土保持通报, 2014, 34(5): 4-48.
- [6] 杨红善, 刘瑞凤, 张俊平, 等. PAAM-atta 复合保水剂对土壤持水性及其物理性能的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 38-41.
- [7] 刘桂花, 杨正国, 谷英, 等. 抗旱保水剂对干旱荒漠区沙棘造林的影响[J]. 防护林科技, 2011(1): 31-32.
- [8] Bai W, Zhang H, Liu B, et al. Effects of super-absorbent polymers on the physical and chemical properties of soil following different wetting and drying cycles[J]. Soil Use and Management, 2010, 26(3): 253-260.
- [9] Islam M R, Hu Y, Mao S, et al. Effectiveness of a water-saving super-absorbent polymer in soil water conservation for corn (*Zea mays* L.) based on eco-physiological parameters[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2011, 91(11): 1998-2005.
- [10] Khodadadi D D. Effect of superabsorbent polymer on soil and plants on steep surfaces[J]. Water and Environment Journal, 2017, DOI:10.1111/wej.12309.
- [11] 田佳, 曹兵, 宋丽华, 等. 宁夏干旱风沙区 5 种灌木保水剂造林试验与饲用价值研究[J]. 畜牧与饲料科学, 2014, 35(5): 24-27.
- [12] 陈印军, 方琳娜, 杨俊彦. 我国农田土壤污染状况及防治对策[J]. 中国农业资源与区划, 2014, 35(4): 1-5.
- [13] 陆文聪, 刘聪. 化肥污染对粮食作物生产的环境惩罚效应[J]. 中国环境科学, 2017, 37(5): 1988-1994.
- [14] 许景钢, 孙涛, 李嵩. 我国微生物肥料的研究及其在农业生产中的应用[J]. 作物杂志, 2016(1): 1-6.
- [15] 孙琪然, 徐燕, 相立, 等. 生物炭和菌肥的混合使用对苹果园连作土壤环境及平邑甜茶幼苗生理指标的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(8): 52-59.
- [16] 彭飞, 黄敦元, 余江帆, 等. 生物菌肥对于油茶的应用前景以及施用条件和方法初探[J]. 江西林业科技, 2013(1): 39-42.
- [17] 王秀颖, 高晓飞, 刘和平, 等. 土壤水稳性大团聚体测定方法综述[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(3): 106-113.
- [18] 高肖彦, 刘廷玺, 段利民, 等. 科尔沁沙丘一草甸田间持水量的综合测定与影响[J]. 干旱区研究, 2016, 33(6): 1336-1344.
- [19] 赵世伟, 周印东, 吴金水. 子午岭次生植被下土壤蓄水性能及有效性研究[J]. 西北植物学报, 2003, 23(8): 1389-1392.
- [20] 黄懿梅, 安韶山, 曲东, 等. 2 种测定土壤微生物量氮方法的比较初探[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 124-129.
- [21] 沈萍, 陈向东. 微生物学实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [22] Dhodapkar R, Rao N N, Pande S P, et al. Adsorption of cationic dyes on Jalshakti(R), super absorbent polymer and photocatalytic regeneration of the adsorbent[J]. Reactive and Functional Polymers, 2007, 67(6): 540-548.
- [23] Han Y G, Yu X X, Li B, et al. Dynamic study on water diffusivity of soil with super-absorbent polymer application[J]. Environmental Earth Sciences. 2013, 69(1): 289-296.
- [24] 林海琳, 崔英德, 杜林, 等. 海藻酸钠复合吸水树脂的生物降解[J]. 化工进展, 2006, 25(6): 700-703.
- [25] Li X, He J Z, Liu Y R, et al. Effects of super absorbent polymers on soil microbial properties and Chinese Cabbage (*Brassica chinensis*) growth[J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, 13(4): 711-719.
- [26] Paradelo R, Barral M T. Effect of moisture and disaggregation on the microbial activity of soil[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 104(2): 317-319.
- [27] Lee J. Effect of application methods of organic fertilizer on growth, soil chemical properties and microbial densities in organic bulb onion production[J]. Scientia Horticulturae, 2010, 124(3): 299-305.
- [28] 杨涛, 徐慧, 李慧, 等. 樟子松人工林土壤养分、微生物及酶活性的研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 50-53.
- (上接第 333 页)
- [17] 李萍. 黄河三角洲土壤含水量状况的高光谱估测与遥感反演[D]. 山东 泰安: 山东农业大学, 2016.
- [18] 何挺, 刘荣, 王静. 野外波谱测量的影响因素研究[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(5): 6-10, 31.
- [19] 孙俊. 基于环境一号卫星的那曲地区青藏铁路沿线区域土壤含水量反演研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011.
- [20] 邓书斌. 遥感图像处理方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 150-164.
- [21] 郭燕, 程永政, 王来刚, 等. 利用高光谱和 GF-1 模拟多光谱进行土壤有机质预测和制图研究[J]. 土壤通报, 2016, 47(3): 537-542.
- [22] 郭登巍, 张甘霖. 母质与土地利用类型对土壤光谱反演模型的影响[J]. 土壤, 2016, 48(1): 173-179.
- [23] Yang D, Bian Z, Lei S. Impact on soil physical qualities by the subsidence of coal mining: A case study in Western China [J]. Environmental Earth Sciences, 2016; 75(8): 1-14.
- [24] 罗友进, 赵光, 高明, 等. 不同植被覆盖对土壤有机碳矿化及团聚体碳分布的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 117-122.
- [25] 易亚男, 尹力初, 张蕾, 等. 施肥对不同地下水水位水稻土团聚体组成及有机碳分布的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 144-148.

外源锌对水稻植株镉的累积差异分析

辜娇峰^{1,2}, 杨文骏¹, 周航^{1,2}, 张平^{1,2}, 彭佩钦^{1,2}, 廖柏寒^{1,2}

(1. 中南林业科技大学环境科学与工程学院, 长沙 410004; 2. 稻米品质安全控制湖南省工程实验室, 长沙 410004)

摘要: 通过水稻威优46盆栽种植试验, 研究了外源Zn施用(0, 40, 80, 160 mg/kg 4个水平)对Cd中度(0.72 mg/kg)和重度(5.26 mg/kg)污染土壤中Cd生物有效性及水稻Cd累积的差异。结果表明: 施Zn对各检测指标存在影响, 但土壤Cd总量仍是土壤Cd活性和水稻Cd累积差异变动的主控因素。在Cd中度污染土壤中, 施Zn降低了土壤交换态Cd含量1.9%~17.0%, 但水稻根表铁膜、根和糙米中Cd含量随Zn施用浓度的增大而增大, 糙米Cd含量从0.09 mg/kg上升到0.17 mg/kg, 相关分析显示糙米Cd含量与土壤交换态Zn含量显著正线性相关。在Cd重度污染土壤中, 施Zn增大了土壤交换态Cd含量2.1%~4.8%, 但降低了水稻各部位中Cd含量, 当施Zn浓度超过80 mg/kg时, 糙米Cd含量可从对照组的0.45 mg/kg降低到0.12 mg/kg, 符合国家食品污染物限量标准(GB 2762—2017)的要求, 相关分析显示糙米Cd含量与土壤交换态Zn含量显著负线性相关。对2种Cd污染程度的土壤, 施Zn均可增大Cd在水稻地下部的累积率, 从而降低水稻地上部Cd的累积率。在Cd重度污染土壤中, 可通过施Zn降低糙米Cd含量, 施Zn量80 mg/kg是试验中最佳施用量; 但在Cd中度污染土壤中, 施Zn有增大糙米Cd含量的风险。

关键词: 锌; 镉; 累积; 水稻; 土壤

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0340-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcb.2018.03.051

Diffident Analysis on Accumulation of Cadmium in Rice Plants with Zinc Application

GU Jiaofeng^{1,2}, YANG Wentao¹, ZHOU Hang^{1,2}, ZHANG Ping^{1,2}, PENG Peiqin^{1,2}, LIAO Bohan^{1,2}

(1. College of Environment Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004; 2. Hunan Engineering Laboratory for Control of Rice Quality and Safety, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004)

Abstract: The objectives of this study were to investigate the influences of different concentrations of zinc (Zn) application on cadmium (Cd) bioavailability in soil and Cd accumulation in rice grown in two Cd-polluted soils. Rice pot experiment was carried out and the rice variety was Weiyou 46. Application exogenous Cd and Zn, curing generated two Cd-polluted soil (0.72 and 5.26 mg/kg Cd) and four Zn-treated soil (0, 40, 80 and 160 mg/kg). Results showed that the application of Zn had an influence on the test indexes, while soil Cd concentration was the dominant factor affecting the soil Cd activity and the Cd accumulation in the rice plants. In the 0.72 mg/kg Cd treatment, the application of Zn reduced exchangeable Cd concentration in soil by 1.9%~17.0%, while increased the uptake and accumulation of Cd in the iron plaque, roots, and brown rice, the Cd concentration in brown rice was ranging from 0.09 to 0.17 mg/kg, furthermore, the Cd concentration in brown rice was linearly positively related to the exchangeable Zn concentration in soil. In the 5.26 mg/kg Cd treatment, the exchangeable Cd concentration in soil was increased by 2.1%~4.8%, the Cd concentration in various rice organs was decreased. Moreover, the Cd concentration in brown rice decreased to 0.12 mg/kg when the Zn concentration increased to 80 mg/kg, whereas it was 0.45 mg/kg at 0 mg/kg Zn, lower than the National Food Safety Standard of 0.2 mg/kg (GB 2762—2017). In addition, the correlations of the Cd concentration in brown rice and exchangeable Zn in soil were linear and negative. The experiment results also found that application of Zn increase the accumulation rate of Cd in the underground part of

收稿日期: 2017-12-18

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0800705); 湖南省教育厅科学研究项目(17C1645)

第一作者: 辜娇峰(1979—), 女, 湖北武汉人, 博士, 讲师, 主要从事土壤污染与控制研究。E-mail: gujiaofeng@163.com

通信作者: 廖柏寒(1957—), 男, 湖南醴陵人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤污染与控制研究。E-mail: liaobh1020@163.com

rice planed in two Cd-polluted soils, and then decreased the Cd accumulation rate of aerial part. A certain amount of Zn to reduce the Cd concentration in brown rice was feasible in the soil treated with 5.26 mg/kg Cd and the amount of Zn 80 mg/kg was the best applied in the experiment, while it increased the risk of Cd accumulation in the soil treated with 0.72 mg/kg.

Keywords: zinc; cadmium; accumulation; rice; soil

2014 年国家环境保护部和国土资源部联合公布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,我国受污染的农业用地点位超标率占 19.4%,受镉(Cd)污染的农业用地点位超标率占比达 7%^[1],每年粮食受重金属污染达 1 000 多万 t,直接经济损失 200 多亿元,这些有毒重金属可通过土壤—水稻的食物链进入人体,对人体造成潜在危害^[2]。稻米是我国居民的主食之一,也是人体 Cd 摄入的最主要途径^[3],因此,开展降低稻米 Cd 的吸收累积研究,实现稻米安全生产,提高稻米品质,具有十分重要的意义。锌(Zn)与 Cd 是同族元素,价态相同、离子半径相似^[4]。研究发现,施用 Zn 肥可降低 Cd 污染土壤中种植的水稻籽实及玉米籽实中 Cd 含量^[5-6],叶面喷施 Zn 肥也有相同的降低效果^[7]。张建辉等^[8]采集的 108 组湖南大米与土壤发现,土壤有效态 Zn 含量高可抑制稻米对 Cd 的积累。因此,利用施 Zn 肥降低土壤 Cd 危害,降低农作物可食部位 Cd 含量,被认为是一种积极有效的方法。但也有研究发现,施 Zn 增大了土壤游离 Cd²⁺的生物有效性,加大了植物对 Cd 的累积^[9],施 Zn 增大了番茄对 Cd 的吸收,同时 100~150 μm Zn 处理致使植物光合作用受阻^[10]。施 Zn 虽降低了烟草根和茎叶中 Cd 含量,但加重了 Cd 对谷胱甘肽还原酶

(GR)和超氧化物歧化酶(SOD)破坏,使得植物生长受抑制^[11]。可见,施用 Zn 肥不一定总是有效的降低作物可食部位 Cd 含量,土壤污染程度的变化、作物品种的变化都会影响 Zn 的降低效应。当前利用施 Zn 尝试缓解 Cd 毒害的研究主要是从水培溶液施 Zn^[10]、叶面喷施 Zn 肥^[7,12]、固化剂配施 Zn 肥治理 Cd 污染土壤^[5-6]等方面进行,而对比研究中度和重度 Cd 污染稻田土壤不同施 Zn 浓度对稻米 Cd 累积的相关研究还很少,缺乏指导实际生产的应用案例。本研究选用湖南无重金属污染的稻田土壤,通过外源施 Cd 制备中度(0.72 mg/kg)和重度(5.26 mg/kg)2 个 Cd 污染程度土壤,然后再施用不同浓度 Zn,研究土壤 Cd 交换态含量的变化以及水稻各部位 Cd 含量的变化,为 Cd 污染土壤治理及水稻安全生产提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤从湖南省长沙市宁乡县双江口镇采集(28°27.716' N,113°16.356' E),基本理化性质见表 1。水稻品种为威优 46 号,籼型晚稻,湖南湘潭市兴农种业公司生产。试验试剂为分析纯,由国药集团化学试剂有限公司提供。

表 1 供试土壤基本理化性质

土壤类型	pH	阳离子交换量/ (cmol·kg ⁻¹)	有机质含量/ (g·kg ⁻¹)	总 Cd/ (mg·kg ⁻¹)	交换态 Cd/ (mg·kg ⁻¹)	总 Zn/ (mg·kg ⁻¹)	交换态 Zn/ (mg·kg ⁻¹)
红壤	5.61	31.3	32.0	0.23A/0.72B/5.26B	0.06	78.80	4.17

注:A 表示原始土壤 Cd 含量;B 表示添加 CdCl₂ 后土壤总 Cd 含量。

1.2 试验方法

1.2.1 不同浓度 Cd 和 Zn 污染土壤的制备 按 0.5,5.0 mg/kg 污染水平制备中度和重度 Cd 污染土壤,分别标注为 Cd0.72、Cd5.26,土壤 Cd 总量见表 1。按供试土壤总 Zn 量(78.80 mg/kg)的 0,0.5,1,2 倍,设计 4 个水平的 Zn 施用浓度,即 0,40,80,160 mg/kg,分别标注为 Zn0,Zn40,Zn80,Zn160,其中 Zn0 为对照。具体制备方法为:在柱型塑料桶(直径 30 cm,高 24 cm)内装入自然风干无杂质的供试土壤 5 kg,加入自来水完全湿润。使用分析纯 CdCl₂·2.5H₂O 配制浓度为 250.0 mg/L CdCl₂ 母液,每盆土壤分别加入 10,100 mL 母液制备出中度和重度 Cd 污染土壤。使用分析纯 ZnCl₂ 配制浓度为 20 mg/L 的 ZnCl₂ 母液,每盆土壤分别加入 0,10,20,40

mL 母液制备出 4 个浓度的 Zn 土壤。供试土壤先加入 CdCl₂ 溶液,平衡熟化 7 天,再加入 ZnCl₂ 溶液平衡熟化 14 天,从而制备出试验盆栽土壤,每个处理设置 3 个重复。

1.2.2 盆栽试验 2015 年 7—10 月进行水稻盆栽试验,种植场地为校内水稻种植基地。盆栽土壤随机区组摆放,秧苗移栽前 2 d,施入基肥(尿素 0.28 g/kg(按 N 计算),K₂CO₃ 0.22 g/kg(按 K₂O 计算),(NH₄)₃PO₄ 0.21 g/kg(按 P₂O₅ 计算))。7 月 26 日选长势茁壮的威优 46 号秧苗移栽(秧苗提前在无 Cd 污染的原始供试土壤中培育),1 盆 1 穴 2 株。种植过程自来水灌溉,常规农田肥水及农药管理。水稻移栽 95 天后于 10 月 29 日收获,采集水稻植株,分根、茎叶、谷壳、糙米 4 个部位,超纯水洗净,采集根表铁

膜后,105 ℃杀青再 70 ℃烘干,重量平衡后称取干重,粉碎,过 10 目筛,密封保存分析备用。同时采集水稻根系 0~2 cm 处土壤,自然风干后,研钵碾碎,分别过 10,100 目筛,密封保存分析备用。

1.3 测定指标与方法

土壤基本理化性质按《土壤农业化学分析方法》^[13]中所述方法测定,土壤中 Cd 和 Zn 总量采用盐酸—硝酸—高氯酸法消解^[14],1 mol/L MgCl₂ 溶液提取土壤中 Cd 和 Zn 的交换态含量^[15],连二亚硫酸钠—柠檬酸三钠—碳酸氢钠(DCB)法^[16]提取水稻根系表面附着的根表铁膜。采用干灰法(GB/T 5009.15—2003)消解水稻组织部位中 Cd 和 Zn 总量。电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP 6300, Thermo)测定水稻样品溶液中 Zn 含量、土壤样品溶液中 Cd 和 Zn 含量,石墨炉原子吸收分光光度计(iCE—3500, Thermo)测定水稻样品溶液中 Cd 含量。试验中以湖南大米(GBW 10045 (GSB—23))和国家标准物质土壤(GBW(E)—070009)进行质量控制分析,同时做空白试验,Cd 的回收率为 94.5%~98.6%,Zn 的回收率为 97.2%~102.3%。

1.4 数据统计与分析

水稻各部位 Cd 累积量(BA, μg/pot)^[17]计算公式为:

$$BA = C_i \times B_i$$

式中: C_i 分别为根、茎叶、谷壳、糙米 Cd 含量(mg/

kg); B_i 为根、茎叶、谷壳、糙米干重(mg/pot)。

根表铁膜中 Cd 累积量(T_{DCB}, μg/pot))计算公式为:

$$T_{DCB} = C_{DCB} \times B_{root}$$

式中: C_{DCB} 为根表铁膜中 Cd 含量(mg/kg); B_{root} 为水稻根系干重(mg/pot)。水稻根表铁膜、水稻各部位 Cd 累积率^[16]计算公式为:

$$Cd \text{ 累积率}(\%) = \frac{T_{DCB} \text{ 或 } BA}{T_{DCB} + BA}$$

试验数据采用 SPSS 19.0 进行统计分析。采用多因素方差分析及 LSD 检验分析不同程度 Cd 污染土壤和不同浓度 Zn 施用量对试验中检测指标的影响效应,单因素 ANOVA 中 Duncan 比较分析各处理间差异,Person 系数分析数据间的相关关系。Origin 8.5 绘制图形。

2 结果与分析

2.1 土壤 pH 及重金属交换态含量变化

由表 2 可知,随 Zn 施用浓度的增大(40~160 mg/kg),与对照 Zn0 相比,在 Cd0.72 土壤中,土壤 pH 变化不显著,但土壤交换态 Cd 含量呈现降低趋势,降低了 1.9%~17.0%;在 Cd5.26 土壤,土壤 pH 有降低趋势,交换态 Cd 含量呈现上升趋势,增大了 2.1%~4.8%;各处理间差异不显著。在 2 种 Cd 污染土壤中,交换态 Zn 含量随 Zn 施用量增加而增大。双因素分析表明,土壤 Cd 污染程度是土壤 pH 及土壤交换态 Cd 含量变化的主控因素,而 Zn 的施用浓度则是土壤交换态 Zn 含量变化的主控因素。

表 2 不同浓度 Zn 施用对壤 pH 及重金属交换态含量变化的影响

处理	交换态 Cd/(mg·kg ⁻¹)		交换态 Zn/(mg·kg ⁻¹)		pH	
	Cd0.72	Cd5.26	Cd0.72	Cd5.26	Cd0.72	Cd5.26
Zn0	0.53±0.05a	3.30±0.14a	4.46±0.60d	2.06±0.18d	4.89±0.24a	5.23±0.05a
Zn40	0.52±0.06a	3.37±0.18a	13.49±4.14c	19.53±5.86c	4.70±0.32a	5.05±0.03bc
Zn80	0.46±0.02a	3.39±0.19a	35.59±6.88b	37.34±13.49b	5.00±0.10a	5.08±0.07b
Zn160	0.44±0.04a	3.46±0.03a	65.61±12.87a	62.16±3.33a	4.78±0.30a	4.96±0.05c
Cd F 值	4197.35*		0.02		10.24*	
Zn F 值	0.16		72.91*		1.86	
Cd×Zn F 值	1.36		0.49		0.73	

注:表中数据为平均值±标准误差,n=3;同列不同字母表示在同一 Cd 污染程度,不同 Zn 处理间的差异显著(p<0.05);*表示双因素分析 F 值在 p<0.05 水平存在显著性。下同。

2.2 水稻各部位 Cd 和 Zn 含量的变化

由表 3 可知,在 Cd0.72 土壤中,随着 Zn 施用浓度的增大(40~160 mg/kg),根表铁膜、根和糙米对 Cd 的吸收累积增大,相比 Zn0 处理分别增大 8.8%~184.2%,25.4%~63.5%,11.1%~88.9%;各处理糙米 Cd 含量均低于 0.2 mg/kg,符合国家食品污染物限量标准(GB 2762—2017)的要求。在 Cd5.26 土壤,随 Zn 施用浓度的增大(40~160 mg/kg),根表铁膜、根、茎叶、谷壳和糙米中 Cd 含量均低于 Zn0 处理,分别降低了 11.6%~34.5%,0.4%~51.9%,57.8%~78.1%,

66.7%~87.5%,33.3%~73.3%;Zn80 和 Zn160 处理,糙米 Cd 含量降低到 0.12 mg/kg,也低于 0.2 mg/kg 的限量标准,达到了安全生产的要求。双因素分析显示,土壤 Cd 的污染程度以及 Zn 的施用水平共同影响了水稻各部位 Cd 的吸收和累积。

由表 4 可知,施 Zn 是影响水稻各部位 Zn 含量的主控因素。随着 Zn 施用浓度的增大(40~160 mg/kg),水稻各部位 Zn 含量逐渐升高;在 Cd0.72 和 Cd5.26 土壤中,糙米 Zn 含量分别升高 13.2%~36.5%和 0.5%~19.0%。

表 3 不同浓度 Zn 施用对水稻各组织部位中 Cd 含量的影响

单位:mg/kg

处理	根表铁膜		根		茎叶		谷壳		糙米	
	Cd0.72	Cd5.26	Cd0.72	Cd5.26	Cd0.72	Cd5.26	Cd0.72	Cd5.26	Cd0.72	Cd5.26
Zn0	0.57±0.38b	1.45±0.08a	1.15±0.18b	4.86±1.36a	0.12±0.01a	0.64±0.01a	0.06±0.03b	0.48±0.07a	0.09±0.00b	0.45±0.06a
Zn40	0.64±0.22b	1.27±0.08ab	1.88±0.11a	4.63±0.20a	0.13±0.02a	0.27±0.04b	0.11±0.04a	0.16±0.02b	0.10±0.02b	0.30±0.02b
Zn80	0.73±0.22b	1.18±0.13bc	1.65±0.22ab	2.34±0.47b	0.09±0.01b	0.15±0.01c	0.06±0.01b	0.11±0.02bc	0.17±0.02a	0.12±0.02c
Zn160	1.62±0.20a	0.95±0.20c	1.44±0.33b	4.84±1.53a	0.09±0.01b	0.14±0.04c	0.06±0.01b	0.06±0.01c	0.15±0.01a	0.12±0.02c
Cd F 值	24.12 *		71.23 *		417.02 *		96.04 *		118.64 *	
Zn F 值	5.82 *		3.15 *		179.20 *		53.54 *		32.84 *	
Cd×Zn F 值	27.58 *		4.74 *		138.73 *		54.72 *		82.51 *	

表 4 不同浓度 Zn 施用对水稻各组织部位中 Zn 含量的影响

单位:mg/kg

处理	根表铁膜		根		茎叶		谷壳		糙米	
	Cd0.72	Cd5.26	Cd0.72	Cd5.26	Cd0.72	Cd5.26	Cd0.72	Cd5.26	Cd0.72	Cd5.26
Zn0	18.82±3.78c	22.85±1.72c	8.26±0.48c	23.12±8.22b	28.54±4.40b	21.15±2.54c	17.11±2.63b	16.35±1.24a	19.30±0.74b	21.90±1.84b
Zn40	36.10±7.67bc	41.42±5.33b	39.23±9.41b	29.04±9.41b	45.28±5.05b	41.91±9.18b	23.83±1.06a	16.30±4.06a	29.59±4.27a	22.01±1.38b
Zn80	55.89±18.89b	40.74±4.60b	54.84±11.72b	27.52±5.38b	67.11±9.53a	39.42±8.34b	16.70±2.89b	18.43±6.61a	21.85±0.62b	25.90±1.28a
Zn160	98.65±18.56a	102.23±9.50a	94.55±16.32a	74.09±9.22a	72.65±9.47a	73.34±3.55a	21.35±1.66a	17.89±0.70a	26.34±0.25a	26.06±2.82a
Cd F 值	0.01		7.31 *		6.82 *		3.71		0.13	
Zn F 值	65.78 *		53.15 *		31.64 *		1.52		9.18 *	
Cd×Zn F 值	1.33		5.38 *		3.15		2.33		9.41 *	

2.3 水稻株高与生物量的变化

由表 5 可知,在 Cd0.72 土壤种植的水稻株高比 Cd5.26 土壤高出 1.66~8.00 cm,糙米干重也相应高出 2.43~4.54 g/pot,而水稻根、茎叶和谷壳的干重之间差异较小。相比对照 Zn0,Zn40、Zn80 处理对

2 种 Cd 污染土壤种植的水稻株高和生物量有增大趋势,具增产效应,但 Zn160 处理呈减小趋势,尤其在 Cd5.26 土壤中糙米干重显著下降 19.5%($p<0.05$)。双因素分析显示,土壤 Cd 的污染水平是水稻株高、茎叶和糙米干重变化的主要控制因素。

表 5 不同浓度 Zn 施用对水稻株高和生物量的影响

处理	株高/cm		根/(g·pot ⁻¹)		茎叶/(g·pot ⁻¹)		谷壳/(g·pot ⁻¹)		糙米/(g·pot ⁻¹)	
	Cd0.72	Cd5.26	Cd0.72	Cd5.26	Cd0.72	Cd5.26	Cd0.72	Cd5.26	Cd0.72	Cd5.26
Zn0	83.33±2.89a	81.67±2.52b	5.62±0.35a	5.88±0.60a	17.40±1.65b	19.12±2.15a	4.67±1.04a	4.37±1.80c	16.80±4.63a	14.37±0.55ab
Zn40	86.33±1.53a	86.67±1.15a	6.48±0.73a	5.67±0.51a	19.50±5.21a	18.90±2.94a	4.23±0.57a	5.30±0.26b	17.93±2.75a	15.20±2.60a
Zn80	88.00±2.65a	83.00±2.00ab	6.74±0.42a	5.67±0.53a	20.50±4.78a	19.83±2.30a	4.70±1.25a	5.40±0.20b	18.63±1.15a	15.67±3.31a
Zn160	91.33±7.57a	83.33±3.06ab	5.78±0.86a	5.94±0.46a	13.23±1.10c	21.87±1.35a	4.37±0.25a	5.83±1.95a	16.10±2.55a	11.57±0.96b
Cd F 值	6.42 *		2.35		9.02 *		1.10		8.63 *	
Zn F 值	2.23		0.77		1.85		0.34		1.81	
Cd×Zn F 值	1.69		2.05		4.00 *		0.99		0.19	

2.4 水稻各部位 Cd 累积率的变化

对比水稻各部位 Cd 累积率(图 1),在 Cd0.72 土壤,随着 Zn 施用浓度的增大,根表铁膜对 Cd 的累积率逐渐增大,茎叶对 Cd 的累积率逐渐减小;在 Cd5.26 土壤,施 Zn 则使得水稻根表铁膜、根对 Cd 的累积率增大,茎叶和糙米对 Cd 的累积率逐渐减小。在 Cd0.72 和 Cd5.26 土壤中,水稻地下部(根及根表铁膜)均是 Cd 主要累积部位,Cd 累积率分别是 71.0%~82.0%和 63.2%~87.8%,而地上部(茎叶、谷壳和糙米)Cd 的累积率则分别占到 18.4%~32.0%和 12.8%~42.6%。Cd0.72 土壤种植的水稻地上部 Cd 累积率低于 Cd5.26 土壤。随着 Zn 施用浓度的增大(40~160 mg/kg),Cd0.72 土壤水稻地下部位对 Cd 的累积率从 71.0%逐渐增大到 82.0%,而地上部位对 Cd 的累积率从 32.0%减小到 18.4%;Cd5.26 土壤水稻地下部位对 Cd 的累积率从 63.2%

逐渐增大到 87.8%,而地上部位对 Cd 的累积率从 42.6%减小到 12.8%,可见施 Zn 增大了水稻地下部的累积率而降低了地上部的累积率。

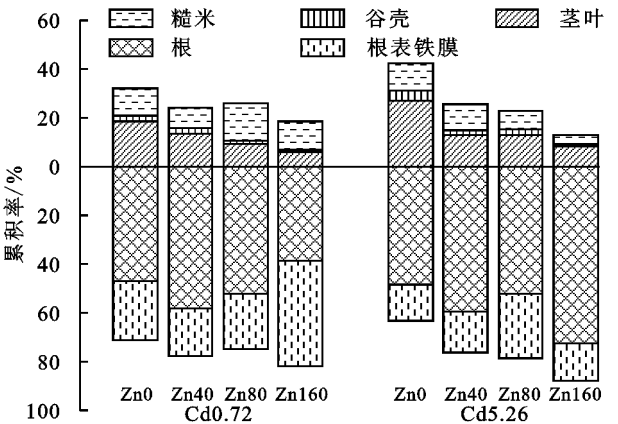


图 1 不同浓度 Zn 施用对水稻各部位 Cd 累积率的影响

2.5 相关性分析

2.5.1 水稻各部位 Cd 和 Zn 含量的关系 由表 6

可知,在 Cd0.72 土壤,水稻根表铁膜和谷壳部 Cd 和 Zn 含量显著正线性相关,这说明水稻根表铁膜和谷壳部 Zn 含量越大,Cd 含量也越大,这可能意味着在 Cd0.72 土壤中施 Zn,会使得根表铁膜和谷壳中 Cd 和 Zn 含量同时增大。在 Cd5.26 土壤,根表铁膜和糙米中 Cd 和 Zn 含量分别呈现负线性相关,说明根表铁膜和糙米中 Zn 含量越大,Cd 含量就越小,表明向土壤施 Zn,会增大根表铁膜和糙米中 Zn 含量,同时降低相应部位 Cd 含量。

表 6 水稻各组织部位中 Cd 和 Zn 含量之间的相关系数

处理	根表铁膜	根	茎叶	谷壳	糙米
Cd0.72	0.871**	0.063	-0.554	0.664*	0.130
Cd5.26	-0.748**	0.303	-0.499	0.170	-0.693*

注: * 和 ** 分别表示 $p<0.05$ 和 $p<0.01$ 显著水平。下同。

2.5.2 土壤重金属交换态含量与水稻各部位 Cd、Zn

表 7 土壤重金属交换态含量与水稻各部位 Cd 和 Zn 含量之间的相关系数

处理	土壤重金属	水稻各部位 Cd 含量					水稻各部位 Zn 含量				
	交换态	根表铁膜	根	茎叶	谷壳	糙米	根表铁膜	根	茎叶	谷壳	糙米
Cd0.72	交换态 Cd	-0.557	0.281	0.591*	0.118	-0.687*	-0.546	-0.588*	-0.581*	-0.020	-0.005
	交换态 Zn	0.875**	0.134	-0.626*	-0.358	0.710**	0.923**	0.934**	0.873**	0.121	0.217
Cd5.26	交换态 Cd	-0.256	0.245	-0.787**	-0.960**	-0.671**	0.377	0.247	0.174	-0.161	0.321
	交换态 Zn	-0.838**	0.152	-0.736**	-0.801**	-0.837**	0.875**	0.777**	0.876**	0.364	0.660*

3 讨论

施 Zn 后,中度 Cd 污染土壤(Cd0.72)中交换态 Cd 含量呈现降低趋势,而重度 Cd 污染土壤(Cd5.26)中呈现增大趋势(表 2),出现这一相反趋势的原因可能是水稻根系细胞膜上的转运蛋白质可主动或被动运输吸附在根表细胞壁上的重金属离子^[18-21],将其带入细胞内,有毒元素 Cd 通过营养元素 Zn 的运输通道进入水稻植株体内,水稻对 Zn 是主动吸收,对 Cd 则是被动吸收^[21],这源于 Cd 与 Zn 有相同的价态和近似相同的离子半径^[4]。在 Cd0.72 土壤种植的水稻一方面通过根部吸收累积土壤溶液中活性 Cd,另一方面,则是土壤溶液中交换态 Zn 含量增多,水稻主动吸收 Zn 的同时,连带吸收了 Cd,进而降低了根际土壤中交换态 Cd 含量;而在 Cd5.26 土壤,土壤中交换态 Cd 与 Zn 同时大量存在,Cd 与 Zn 在植物根细胞膜竞争结合位点,根细胞膜吸附 Zn,则导致 Cd 的溶解性增强^[4,9],使得 Cd 交换态含量增大,生物有效性增强,根系 Cd 胁迫加重。

由表 3 可知,在土壤 Cd 中度污染(Cd0.72),因为 Cd 与 Zn 共用相同的运输通道,水稻对 Zn 元素主动吸收的同时,被动吸收 Cd^[18-21],所以,当土壤中交换态 Zn 大量存在于水稻根系环境后,水稻在主动吸收 Zn 的同时连带吸收了土壤溶液中游离的 Cd,从而使得土壤溶液中交换态 Cd 含量呈现降低趋势,而水稻根表铁膜、根和糙米中 Cd 含量呈现增大趋势,水

含量的关系 将土壤中 Cd、Zn 交换态含量(表 5)以及水稻各部位 Cd、Zn 含量(表 2、表 3)分别进行相关性分析。由表 7 可知,在 Cd0.72 土壤,土壤交换态 Cd 含量与茎叶 Cd 含量显著正线性相关($p<0.05$),而与糙米中 Cd 含量显著负线性相关($p<0.01$);土壤交换态 Zn 含量,与根表铁膜和糙米中 Cd 含量显著正线性相关($p<0.01$),而与茎叶中 Cd 含量显著负线性相关($p<0.05$)。在 Cd5.26 土壤,土壤交换态 Cd 含量及交换态 Zn 含量均与水稻茎叶、谷壳和糙米中 Cd 含量显著负线性相关($p<0.01$),且交换态 Zn 含量与根表铁膜中 Cd 含量显著负线性相关($p<0.01$)。水稻根表铁膜、根和茎叶部 Zn 含量均与土壤交换态 Zn 含量显著正线性相关($p<0.01$)。可见,在 Cd0.72 土壤中施 Zn,使得土壤交换态 Zn 越多,糙米中 Cd 含量越大;在 Cd5.26 土壤,则是交换态 Zn 越多,糙米 Cd 含量越小。

稻糙米中 Cd 含量与土壤中 Zn 交换态含量正线性相关(表 7),以及水稻根表铁膜和谷壳中 Cd 和 Zn 含量正线性相关(表 6),也是这一作用的结果。Cherif 等^[10]研究表明,施 Zn 促进番茄对 Cd 吸收和 Tkalec 等^[11]研究表明,施 Zn 加重了烟草 Cd 毒害作用,与本试验结果相似。

由表 3 也可知,在土壤 Cd 重度污染(Cd5.26),施 Zn 浓度在 40,80 mg/kg 可以减少水稻根系对 Cd 的吸收,降低水稻糙米对 Cd 的累积,这可能是因为 Zn 与 Cd 在吸收和运输过程中共用同一个转运蛋白 ATPase 2 (OsHM2)^[18,21],而 Zn 是 Cd 在该转运蛋白结合位点的主要竞争者^[4,9],当土壤溶液中交换态 Zn 大量存在时,根细胞膜吸附位点吸附 Zn,从而对 Cd 吸附位点的减少,施 Zn 降低了根细胞对 Cd 的吸收与转运。根表铁膜和糙米中 Cd 含量与 Zn 含量负线性相关(表 6),且与土壤中交换态 Zn 含量负线性相关(表 7),就可能是这一作用的结果。Akay 等^[12]报道,叶面喷施 Zn 肥,降低了灌浆期 Cd 从根部转运到籽粒中的量,本试验结果与之相符。在 Cd5.26 土壤,当 Zn 施用浓度继续增加到 160 mg/kg 时,水稻根部和茎叶部 Cd 含量相比 Zn 在 80 mg/kg 浓度处理上有增加的趋势,激发水稻对 Cd 吸收,这是因为土壤中交换态 Cd 与 Zn 同时大量存在,在植物根细胞膜竞争结合位点,导致土壤 Cd 的溶解性增强^[4,9],交换态含量增大(表 2),加大了根系 Cd 胁迫,促使 Cd 从根部向地上部转移,缓解 Cd 胁迫^[22]。

2 种 Cd 污染程度土壤,施 Zn 对水稻 Cd 累积率的影响趋于一致。对比水稻各组织部位的累积率,在 Cd0.72 和 Cd5.26 土壤,随着 Zn 施用浓度的增大,根表铁膜对 Cd 的累积率均是逐渐增大的,而水稻根表铁膜可阻隔水稻根系对 Cd 的吸收,减少根系对 Cd 的累积^[16],可见本试验中施 Zn 使得根表铁膜阻隔 Cd 的能力加强,从而减少了地上部位对 Cd 的累积量。对比水稻地上部和地下部,2 种 Cd 污染程度土壤,施 Zn 均增大了水稻地下部的累积率而降低了地上部的累积率,且降低茎叶部 Cd 累积率趋势明显,可见施 Zn 是可以降低水稻地上部 Cd 累积量的,尤其是在土壤 Cd 重度污染状况下,但鉴于 Cd0.72 土壤种植水稻的糙米 Cd 含量有增大趋势,就需慎重选择是否施用 Zn 肥。试验中 2 种 Cd 污染程度土壤,Zn40 和 Zn80 处理对水稻生物量均有增大趋势(表 5),但当施用浓度达到 160 mg/kg,使得土壤总 Zn 达到约 240 mg/kg 时,水稻糙米生物量大幅下降,这应该是土壤 Zn 含量超过水稻生态阈值^[23],产生了 Zn 毒害,更不利用水稻的正常生长。

本试验采用双因素分析了施 Zn 对土壤中交换态 Cd 和 Zn 含量以及水稻各部位累积的 Cd 和 Zn 含量的影响权重(表 2~表 5),可以发现,土壤 Cd 的污染程度、Zn 的施用水平以及两者的综合作用都会影响到土壤-水稻系统中的 Cd 含量以及水稻的生长,但土壤 Cd 的污染程度仍是主控因素。通过施加 Zn 降低水稻糙米 Cd 污染的效果因施 Zn 量、土壤 Cd 污染程度不同而存在差异,只有在 Cd 重度污染程度下,Zn 的施用才能够有效降低糙米中的 Cd 含量。本试验也发现,土壤溶液中交换态 Cd 和 Zn 的浓度不同,水稻根细胞膜转运 Cd 的响应是不同的,未来研究中需设置逐步递增的土壤 Cd 和 Zn 施用量,从而利于找到水稻响应 Cd 和 Zn 的比值转折点,为 Cd 污染土壤的治理及水稻的安全生产提供技术支持。

4 结论

在 Cd 中度污染土壤中,施 Zn 虽可降低土壤交换态 Cd 含量,但增大了 Cd 在糙米中的累积,Cd 含量从 0.09 mg/kg 上升到 0.17 mg/kg;土壤交换态 Zn 含量与糙米 Cd 含量显著正线性相关。在 Cd 重度污染土壤中,施 Zn 可增大土壤交换态 Cd 含量,但是降低了水稻各部位 Cd 含量,糙米 Cd 含量从 0.45 mg/kg 降低到 0.12 mg/kg,达到安全生产的要求;土壤交换态 Zn 含量与糙米 Cd 含量显著负线性相关。在 Cd 中度和重度污染土壤,施 Zn 均可增大水稻地下部 Cd 累积率,降低地上部 Cd 累积率,但利用施 Zn 降低土壤 Cd 污染风险,需提前判断土壤 Cd 污染水平,仅在土壤 Cd 重度污染情况下才有较好效果,Zn 施用水平在 80 mg/kg 为最佳。

参考文献:

- [1] Zhao F J, Ma Y, Zhu Y G, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies[J]. Environmental Science and Technology, 2015, 49: 50-759.
- [2] Moulis J M, Thevenod F. New perspectives in cadmium toxicity: An introduction [J]. Biometals, 2010, 23(5): 763-768.
- [3] Clemens S, Aarts M G M, Thomine S, et al. Plant science: The key to preventing slow cadmium poisoning [J]. Trends in Plant Science, 2013, 18(2): 92-99.
- [4] Yoneyama T, Ishikawa S, Fujimaki S. Route and regulation of zinc, cadmium, and iron transport in rice plants (*Oryza sativa* L.) during vegetative growth and grain filling: Metal transporters, metal speciation, grain Cd reduction and Zn and Fe biofortification [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2015, 16(8): 19111-19129.
- [5] Fahad S, Hussain S, Khan F, et al. Effects of tire rubber ash and zinc sulfate on crop productivity and cadmium accumulation in five rice cultivars under field conditions [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(16): 12424-12434.
- [6] Fahad S, Hussain S, Saud S, et al. Grain cadmium and zinc concentrations in maize influenced by genotypic variations and zinc fertilization [J]. Clean-Soil Air Water, 2015, 43(10): 1433-1440.
- [7] Yang J X, Wang L Q, Wei D P, et al. Foliar spraying and seed soaking of zinc fertilizers decreased cadmium accumulation in cucumbers grown in Cd-contaminated soils [J]. Soil and Sediment Contamination, 2011, 20(4): 400-410.
- [8] 张建辉,王芳斌,汪霞丽,等. 湖南稻米镉和土壤镉锌的关系分析[J]. 食品科学, 2015, 36(22): 156-160.
- [9] Hart J J, Welch R M, Novell W A, et al. Transport interactions between cadmium and zinc in roots of bread and durum wheat seedlings [J]. Physiologia Plantarum, 2002, 116(1): 73-78.
- [10] Cherif J, Derbel N, Nakkach M, et al. Spectroscopic studies of photosynthetic responses of tomato plants to the interaction of zinc and cadmium toxicity [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 2012, 111(11): 9-16.
- [11] Tkalec M, Stefanic P P, Cvjetko P, et al. The effects of cadmium-zinc interactions on biochemical responses in tobacco seedlings and adult plants [J]. PLoS One, 2014, 9(1): e87582.
- [12] Akay A, Koleli N. Interaction between cadmium and zinc in barley (*Hordeum vulgare* L.) grown under field conditions [J]. Bangladesh Journal of Botany, 2008, 36(1): 13-19.

施磷对吊兰修复镉污染土壤及土壤酶活性的影响

潘芳慧¹, 张晓玮¹, 王友保^{1,2}

(1. 安徽师范大学生命科学学院, 安徽 芜湖 241000;

2. 安徽师范大学生物环境与生态安全安徽省高校省级重点实验室, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 选用吊兰进行室内盆栽, 研究在 Cd 污染土壤中, 施用不同剂量磷肥对吊兰生理指标、土壤酶活性等的影响, 为合理施用磷肥, 提高 Cd 污染土壤的植物修复效果提供参考依据。结果表明: 吊兰在 100 mg/kg 的 Cd 污染土壤中能正常生长, 施 P 对吊兰的叶绿素、细胞膜透性、抗氧化酶活性影响显著 ($p < 0.01$), 表现为低浓度促进, 高浓度抑制作用。当施磷量为 200 mg/kg 时, 叶绿素含量、CAT 酶活性最大, 外渗电导率和 MDA 含量最低, POD 酶活性开始上升, 说明施磷能使吊兰的细胞膜受害程度最低, 抗氧化作用增强。同时, 施 P 有利于改善 Cd 污染土壤的酶系统, 对过氧化氢酶、脲酶的活性表现为低浓度促进、高浓度抑制, 对蔗糖酶的活性表现相反, 对磷酸酶的活性表现抑制作用; 且 200 mg/kg 的磷处理时, 过氧化氢酶、脲酶的活性最高, 蔗糖酶的活性最低。4 种土壤酶活性均与 P 浓度呈高度相关性 ($p < 0.05$), 相关性为脲酶 > 过氧化氢酶 > 蔗糖酶 > 磷酸酶。

关键词: 磷肥; 镉污染土壤; 吊兰; 土壤酶; 植物修复

中图分类号: X173; X53

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0346-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.03.052

Effects of Phosphate Fertilizer on Phytoremediation of *Chlorophytum comosum* and Soil Enzyme Activity in Cd-contaminated Soils

PAN Fanghui¹, ZHANG Xiaowei¹, WANG Youbao^{1,2}

(1. College of Life Sciences, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241000;

2. Anhui Key Laboratory of Biotic Environment and Ecological Safety, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241000)

Abstract: The effect of phosphate fertilization on the growth of *Chlorophytum comosum* and soil enzyme activities in Cd-contaminated soils were investigated. The results showed that *C. comosum* was able to grow well in Cd-contaminated soils contained 100 mg/kg Cd. The appropriate addition of P fertilization was capable of distinctly improving chlorophyll content, cell membrane permeability and antioxidase activities of *C. comosum* ($p < 0.01$). The chlorophyll content, cell membrane permeability and antioxidase activities of *C. comosum* were promoted by low P level fertilization and inhibited by high P level fertilization. Both the chlorophyll content and the CAT activity increased to the maximum at 200 mg/kg of P. Election Conductivity and MDA content dropped to the minimum value at the same time. The POD activity started to rise when the P content were at 200 mg/kg. The results indicated that P addition could reduce the degree of damage to the cell membrane to the lowest level, and significantly enhance antioxidation. Simultaneously, the soil enzyme system in Cd-contaminated soils could also be improved by using phosphate fertilizer. The activities of catalase and urease were enhanced at low P content while they were decreased at high P content. The urease activity showed the opposite trend of the catalase and urease activities. The phosphatase activity was inhibited. Besides, the activities of catalase and urease were elevated to the maximum values while the sucrase activity was decreased to the minimum value at 200 mg/kg of P content. Moreover, the four soil enzyme were highly correlated with P concentration ($p < 0.05$) and the correlation sequence of the four soil enzymes was urease > catalase > sucrose > phosphatase.

Keywords: phosphate fertilization; Cd-contaminated soils; *Chlorophytum comosum*; soil enzyme; phytoremediation

我国及世界土壤 Cd 污染现象突出^[1]。美国宾夕法尼亚州 Palmerton 锌冶炼厂附近部分土壤 Cd 含量达 1 020 mg/kg^[2-3],而在我国辽宁省葫芦岛锌厂、湖南宝山矿厂附近,有些表层土壤 Cd 含量甚至高达 2 587 mg/kg^[4]。土壤 Cd 浓度超标不但危及农作物的生长,而且通过食物链的传递危害人类健康。利用植物修复技术对 Cd 污染土壤的治理已迫在眉睫。近年来,针对磷肥作用植物吸收和富集土壤重金属 Cd 方面的研究引起科学家们浓厚的兴趣^[2-3]。磷肥可以有效提高植物的生物量,促进植物的快速生长。另一方面,磷肥能改变土壤中的离子分布,从而改变土壤微环境,进而改变重金属在土壤中的形态分布,提高植物对重金属污染土壤的修复效果^[5-6]。在 Cd 污染土壤植物修复技术中,外源性磷可活化土壤有效态镉含量,促使植物根系对镉的吸收,减少土壤镉的危害^[1,3]。同时,外源性磷也对土壤酶活性产生重要作用。土壤酶活性是土壤肥力的重要指标,植物吸收营养元素能力受土壤酶活性大小的影响^[7-8]。因此,在受重金属污染的土壤中,适量地施用磷肥以促进植物生长和改善土壤微环境显得十分重要^[4,9]。

吊兰(*Chlorophytum comosum*)属于百合科吊兰属,是重要的观赏植物,对重金属 Cd 具有很好的耐性与积累特性^[3,10-11]。它作为修复土壤重金属 Cd 的物种,不会造成土壤的二次污染,也不会进入食物链威胁人类健康。因此,本研究选用吊兰进行室内盆栽,探讨在 Cd 污染土壤中,施用不同剂量磷肥对吊兰生理生态指标、土壤酶活性等的影响,为合理施用磷肥,提高植物对 Cd 污染土壤修复效果提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自安徽师范大学后山山坡,土壤为黄棕壤,pH 5.33,磷、氮、钾、有机质含量分别为 2.06, 1.55, 9.69, 25.55 g/kg,镉含量 0.68 mg/kg。土壤采回后风干,过 3 mm 筛后充分混匀备用。

供试吊兰幼苗取自相同母本培育的同一批植物。这些均带有气生根的幼苗土培 2 周,待生根稳定后取生长情况相近的幼苗进行试验。

以供试土壤为栽培土,一次性加入磷酸氢二铵,使土壤含 P 含量(以 P_2O_5 计)分别为 50, 100, 200, 400, 600, 800 mg/kg(所有处理用 NH_4Cl 补足 N 含量,避免 N 对试验的影响)^[3],并以不添加 P 处理的供试土壤为对照(CK),进行盆栽试验,每花盆(直径 10 cm)装土 300 g。

考虑吊兰在高浓度 Cd 污染土壤中可生长,满足高浓度 Cd 污染土壤植物修复的要求^[10-11],向供试土

壤中添加乙酸镉(以 Cd 计),使土壤含 Cd 浓度 100 mg/kg。添加乙酸镉的土壤稳定 15 d 后,每盆种植吊兰 2 株。以不添加 Cd 的土壤为对照,另设不栽培吊兰的空白。以上所有处理均设 3 个重复。处理期间观察植物的长势和症状,60 d 后采样分析。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤背景值测定 土壤 N、P、K 含量参照文献^[10-12]进行测定;有机质含量采用油浴加热— $K_2Cr_2O_7$ 容量法测定;Cd 含量采用 $HNO_3-H_2SO_4-HClO_4$ (8:1:1)消化后火焰原子吸收分光光度计(AA6800 型,日本岛津)。

1.2.2 吊兰长势观测和叶片叶绿素含量测定 试验中对吊兰的长势进行观测,取各处理相同功能区有代表性叶片 0.2 g,研磨匀浆,用 755B 型分光光度计测定 663, 645 nm 处的光密度,计算叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 a+b 含量(mg/g FW)^[1,10-13]。

1.2.3 吊兰叶片细胞膜透性、MDA 含量及抗氧化酶活性测定 叶片细胞膜透性通过 DDS-11A 型电导仪测定其相对电导率($\mu S/cm$)^[1,12-13];丙二醛(MDA)含量测定采用硫代巴比脱酸法^[1,11-13];过氧化物酶(POD)活性采用愈伤木酚法测定^[1,4,11];过氧化物氢酶(CAT)采用紫外分光光度法测定^[1,4,11]。

1.2.4 土壤酶活性测定 将吊兰从各处理土壤中连根取出,取吊兰根部表面的土壤,去掉土样中残余根系,风干,磨细,过 0.1 mm 筛后保存。过氧化物酶用滴定法测定,以 1 g 土壤培养 20 min 后所消耗 0.1 mol/L $KMnO_4$ 体积(mL)表示其活性;蔗糖酶采用 0.1 mol/L Na_2SO_3 滴定,其活性用 0.1 mol/L Na_2SO_3 滴定体积(mL)之差表示;脲酶用苯酚钠比色法测定,活性以 24 h 内 1 g 土壤中 NH_3^+-N 的质量(mg)表示;酸性磷酸酶用磷酸苯二钠比色法测定,其活性以 2 h 内 100 g 土壤中 P_2O_5 的质量(mg)表示^[1,4,13]。

1.2.5 数据分析 使用 Excel 2003 软件进行平均值和标准差计算,根据公式计算叶绿素 a、叶绿素 b 含量,酶活性。使用 SPSS 19.0 软件进行方差估计、多重比较、相关分析和曲线估计等。所有数据均为 3 次重复的均值。

2 结果与分析

2.1 不同 P 浓度对吊兰叶绿素含量的影响

叶绿素在植物的光合作用中发挥着重要的作用,其含量越高,越有利于植物的光合作用,反之光合作用减弱,不利于植物生长^[13]。添加 100 mg/kg Cd 处理吊兰长势为优,无任何不良症状,与未添加处理无明显差别。由表 1 可知,吊兰在 100 mg/kg Cd 的污染土壤中仍能正常生长。随着 P 浓度提高,叶绿素 a 含量表现出先增加后降低的趋势,但这种变化不显著

($p=0.062$),而叶绿素 b 含量先增加后降低,变化极显著($p<0.01$)。当 P 含量达到 200 mg/kg 时,所有处理叶绿素 a、叶绿素 b 含量均达到最大。这说明添加适量的磷对吊兰的生长有利。

表 1 施加 P 和 Cd 对吊兰叶绿素含量的影响

Cd 浓度/ (mg · kg ⁻¹)	P 浓度/ (mg · kg ⁻¹)	叶绿素 a/ (mg · g ⁻¹ FW)	叶绿素 b/ (mg · g ⁻¹ FW)	叶绿素(a+b)/ (mg · g ⁻¹ FW)
0	CK	2.79±0.56abc	1.21±0.22c	4.00±0.78c
0	50	2.86±0.12abc	1.46±0.02bc	4.32±0.14bc
0	100	3.20±0.31ab	1.60±0.25b	4.80±0.13ab
0	200	3.55±0.06a	1.99±0.16a	5.54±0.15a
0	400	3.27±0.50ab	2.05±0.24a	5.31±0.26a
0	600	2.56±0.44bc	1.59±0.14b	4.15±0.47bc
0	800	2.29±0.48c	1.48±0.22bc	3.77±0.55c
100	CK	3.16±0.32a	1.90±0.21b	5.05±0.14bc
100	50	3.42±0.53a	2.33±0.44ab	5.75±0.47ab
100	100	3.64±0.49a	2.38±0.16a	6.03±0.60c
100	200	3.68±0.22a	2.51±0.08a	6.19±0.23a
100	400	3.68±0.31a	2.37±0.23a	6.05±0.18a
100	600	2.73±0.23a	2.28±0.23ab	6.01±0.46a
100	800	3.23±0.13a	1.32±0.23c	4.55±0.11c

注:表中数据为平均值±标准误差;同列不同字母用表示同一个指标在不同处理条件下差异性显著($p>0.05$)。下同。

2.2 施 P 对吊兰抗氧化系统的影响

2.2.1 施 P 对吊兰叶片细胞膜透性的影响 细胞膜透性的大小可间接用组织的相对电导率来衡量。组

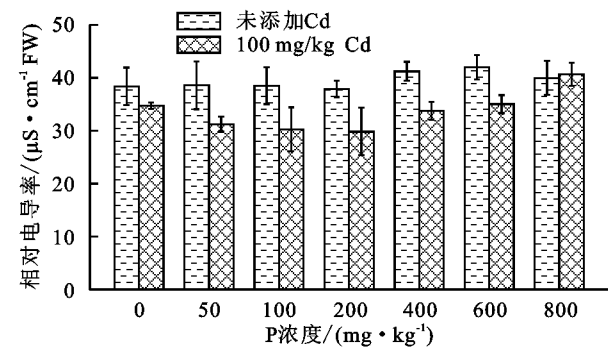


图 1 不同浓度 P 对吊兰叶片组织电导率和 MDA 含量的影响

2.2.2 施 P 对吊兰抗氧化酶活性的影响 由图 2 可知,随着 P 浓度增加,对照组中 POD 活性先升后降,当 P 浓度为 200 mg/kg 时达到最大,符合低浓度促进,高浓度抑制的趋势。而添加 100 mg/kg Cd 处理中 POD 活性在低 P 浓度下变化不明显,当磷浓度增加至 200 mg/kg 时开始增加,说明吊兰的抗氧化作用从磷浓度为 200 mg/kg 开始变得明显,据此推测吊兰对重金属的吸收也将显著提升。

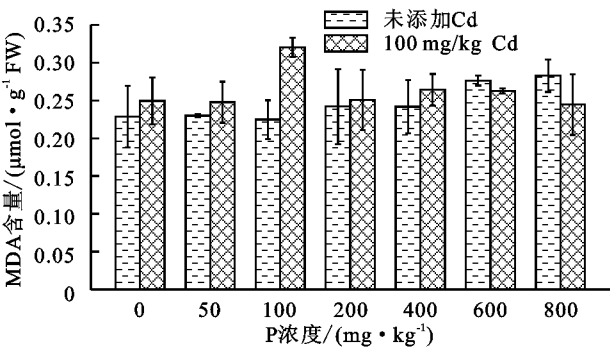
所有处理 CAT 酶活性随着磷浓度增加均先升后降(图 2),但是 0~200 mg/kg 的磷浓度下,添加 100 mg/kg Cd 处理的 CAT 酶活性变化更加显著,说明在此浓度范围内添加 P 能显著促进吊兰对 Cd 的吸收。

织相对电导率越高,细胞膜完整性遭到破坏的程度越大。通过测定外渗电导率,可以间接反映质膜受伤害的程度^[10-13]。

由图 1 可知,在不添加 Cd 的处理中,添加 P 对叶片组织相对电导率的影响不显著,推测添加的磷肥对细胞膜透性影响不大;而添加 100 mg/kg Cd 处理中外渗电导率随着 P 浓度的升高,先降低后增加(在低磷下变化不明显,而 P 达到 200 mg/kg 时开始增加),说明当 P 浓度超过 200 mg/kg 时,吊兰吸收的重金属转运到叶片中达到一定阈值,对细胞膜造成一定的伤害。

丙二醛(MDA)作为质膜过氧化作用的重要产物之一,可以与蛋白质、核酸、氨基酸等活性物质交联,形成脂褐素(一种不溶于水的沉积化合物),从而干扰细胞的正常生命活动。在衰老或逆境等条件下,植物器官会产生过多的自由基,这些自由基会促进植物体内膜的过氧化作用,对植物产生毒害作用,其产物 MDA 含量常作为植物受伤害程度的重要标志^[14]。

由图 1 可知,在对照组中,MDA 的含量变化不明显,通过 SPSS 的单因素方差分析,添加 P 对于 MDA 的含量影响不显著($p>0.05$)。而在添加 100 mg/kg Cd 处理中 P 浓度达到 100 mg/kg,MDA 的含量明显高出很多,可能与根部吸收来的 Cd 引起叶片组织质膜过氧化作用增强有关。



逆境条件的胁迫会使植物直接或间接地形成过量的活性氧自由基(ROS),而 ROS 对细胞内的膜系统、脂类、蛋白质和核酸等大分子具有强烈的破坏作用^[14]。Ferrer-Sueta 等^[15]认为,逆境条件下,植物体细胞膜内存在抗氧化的保护系统,能够清除体内多余的自由基,其活性氧自由基代谢是一个动态的变化过程,这一保护酶系统实际上是一个抗氧化系统,它是由许多酶和还原型物质组成,其中 SOD、POD、CAT 是主要的抗氧化酶,它们协同起来可清除有害的体内活性氧,保护植物细胞免受活性氧的损伤,从而保护植物的膜系统。在植物受到重金属胁迫时,POD 和 CAT 酶活性会改变,从而间接反映植物受伤害的程度。

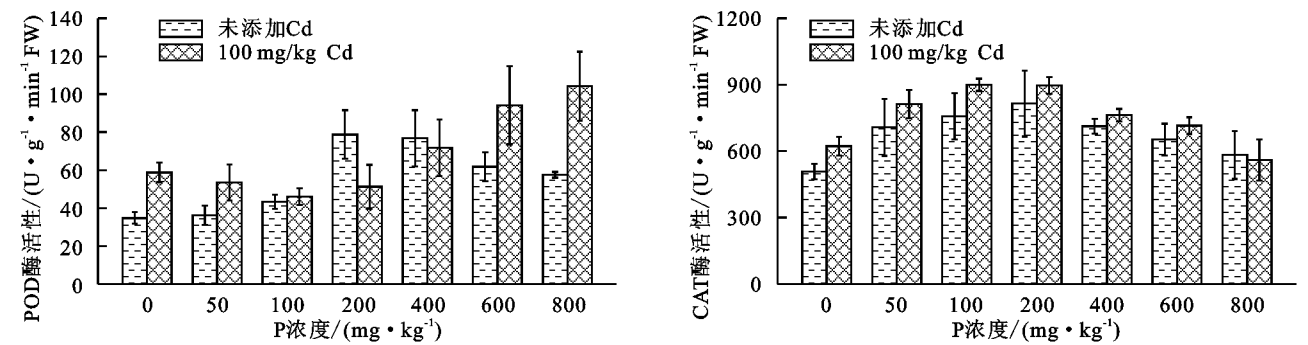


图 2 不同浓度 P 作用下吊兰的 POD 酶活性和 CAT 酶活性

2.3 施 P 对吊兰修复 Cd 污染土壤酶的影响

2.3.1 栽培吊兰对 Cd 污染土壤酶活性的影响 土壤酶作为生物活性物质,几乎催化土壤中所有的生化反应和物质循环,其酶活性是土壤肥力的重要指标^[7-8]。由表 2 可知,100 mg/kg Cd 的无吊兰空白处理与不添加 Cd 的无吊兰空白处理对比,其过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶的活性显著降低,说明重金属 Cd 对土壤中这 3 种酶有明显的抑制作用,可能与酶活性分子中的活性部位和配

体等结合产生了与底物的竞争性抑制作用有关^[1,16];磷酸酶的活性却增高,说明 100 mg/kg Cd 对土壤磷酸酶活性有一定的促进作用。100 mg/kgCd 的吊兰栽培组与 100 mg/kg Cd 的无吊兰空白组相比,过氧化氢酶活性变化不明显,蔗糖酶、脲酶、磷酸酶活性增高,说明栽培吊兰在 100 mg/kg Cd 污染的土壤中能有效地增加土壤酶活性,对 Cd 污染的土壤起到修复作用。这和王友保等^[4]的研究结果一致。

表 2 不添加 P 吊兰的栽培组与不栽培吊兰的空白组土壤酶活性

Cd 浓度/ (mg · kg ⁻¹)	吊兰栽培	过氧化氢酶/ (mL · g ⁻¹)	蔗糖酶/ (mL · g ⁻¹ · d ⁻¹)	脲酶/ (mg · g ⁻¹ · d ⁻¹)	磷酸酶/ (10 ³ mg · 100 g ⁻¹ · 2 h ⁻¹)
0	无吊兰	0.47±0.032	2.002±0.248	14.3±0.3	7.293±0.165
100	无吊兰	0.36±0.044	1.430±0.143	11.4±0.6	11.959±0.675
100	有吊兰	0.32±0.025	1.573±0.000	19.2±1.4	14.337±0.604

注:表中数据为平均值±标准误差。

2.3.2 施 P 对 Cd 污染土壤酶活性的影响 由表 3 可知,在不添加 Cd 的处理中,随着 P 浓度增加,过氧化氢酶、蔗糖酶活性都表现出先降后升的趋势,而脲酶活性变化趋势正好相反,在 200 mg/kg P 浓度时它们都达到极值;磷酸酶的活性一直呈现降低趋势。结果表明,施加磷肥能够刺激土壤酶活性,且对它们的活化产生显著影响^[8,17]。

解,从而降低毒性^[18],有利吊兰的良好生长。蔗糖酶的活性先降低后增加,200 mg/kg 的磷浓度处理时,蔗糖酶的活性降到最低,这可能是由于吊兰生长旺盛,吸收大量的有机物,出现无底物活性降低的现象^[16,19]。脲酶的活性先上升后下降,200 mg/kg 的 P 处理时,脲酶的活性达到最高,说明低浓度 P 对脲酶有促进作用,高浓度 P 反而起抑制作用,土壤脲酶是具有氨化作用的高度专一性的一类好气性水解酶^[20],脲酶活性增强后会加快氨化作用,改变 N 循环,进而影响土壤环境质量^[17]。磷酸酶的活性一直下降,可能是因为当土壤中施加磷肥时,植物对于无机磷的需求相对减少,向土壤中释放的磷酸酶也随之减少^[7]。故而,磷酸酶不能作为反映施 P 强化吊兰修复 Cd 污染土壤效果的指标。

由表 3 可知,添加 100 mg/kg Cd 处理,随着 P 浓度的增加,过氧化氢酶活性呈现先增后降趋势,而蔗糖酶活性变化趋势恰好相反,且 P 浓度为 200 mg/kg 时它们的活性达到极值,脲酶的活性呈增加趋势,磷酸酶的活性表现降低趋势,前两种酶活性的均值比不添加 Cd 的处理相应的酶活性均值低(差异显著性分别为 0.038,0.051),而后 2 种酶活性的均值要高于不添加 Cd 的处理土壤中相应的酶活性(差异显著性分别为 0.055,0.041)。结果表明,100 mg/kg Cd 土壤中酶活性因受 Cd 污染有所抑制,施加 P 后,可改善土壤理化性质,土壤酶活性得到一定程度的活化^[17-18]。

将过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶及磷酸酶的活性与 P 浓度作曲线估计。由表 4 可知,4 种土壤酶均与 P 浓度呈高度相关性($p<0.05$),且相关性大小为脲酶>过氧化氢酶>蔗糖酶>磷酸酶,说明脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶的活性可成为施 P 对土壤变化的重要指标。并且根据理论计算得到土壤中过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶活性达到最值时,需要施加的最适 P 浓度分别为 269,243,315 mg/kg。通过测定土壤酶活性,可实现对施 P 修复土壤 Cd 污染的效果进行监测。

2.3.3 施 P 对吊兰修复土壤酶活性的影响 由图 3 可知,与不添加 Cd 处理相比,添加 100 mg/kg Cd 处理中过氧化氢酶的活性表现先升后降的趋势,200 mg/kg 的磷浓度处理时,其活性达到最大,这可能与土壤的氧化强度有关,加速土壤中过氧化氢酶对过氧化氢的分

表 3 无吊兰的空白组土壤酶活性

Cd 浓度/ (mg · kg ⁻¹)	P 含量/ (mg · kg ⁻¹)	过氧化氢酶/ (mL · g ⁻¹)	蔗糖酶/ (mL · g ⁻¹ · d ⁻¹)	脲酶/ (mg · g ⁻¹ · d ⁻¹)	磷酸酶/ (10 ³ mg · 100g ⁻¹ · 2h ⁻¹)
0	CK	0.47±0.032a	2.002±0.248a	14.3±0.3d	7.293±0.165a
0	50	0.38±0.023bc	2.145±0.286ab	15.2±0.6cd	7.167±0.219ab
0	100	0.36±0.078bc	1.478±0.330abc	17.0±0.5bc	7.076±0.118ab
0	200	0.34±0.021c	1.239±0.165c	22.2±0.6a	6.859±0.165bc
0	400	0.38±0.055bc	1.430±0.248bc	21.8±3.0a	6.805±0.124bc
0	600	0.43±0.040ab	1.811±0.541abc	18.2±0.3b	6.534±0.377c
0	800	0.48±0.025a	2.097±0.541ab	16.1±0.9bcd	6.488±0.122c
100	CK	0.36±0.044ab	1.430±0.143bc	11.4±0.6e	11.959±0.675a
100	50	0.37±0.060ab	1.430±0.000bc	21.1±0.9d	9.518±0.685b
100	100	0.38±0.074ab	1.287±0.000cd	20.2±0.9d	8.704±1.449b
100	200	0.40±0.035a	1.192±0.083d	25.7±0.8c	8.442±0.596bc
100	400	0.31±0.020abc	1.287±0.000cd	31.6±1.4b	8.161±0.587bc
100	600	0.29±0.050bc	1.478±0.083b	35.6±1.8b	7.076±0.346cd
100	800	0.24±0.052c	1.764±0.083a	46.7±5.4a	5.991±0.591d

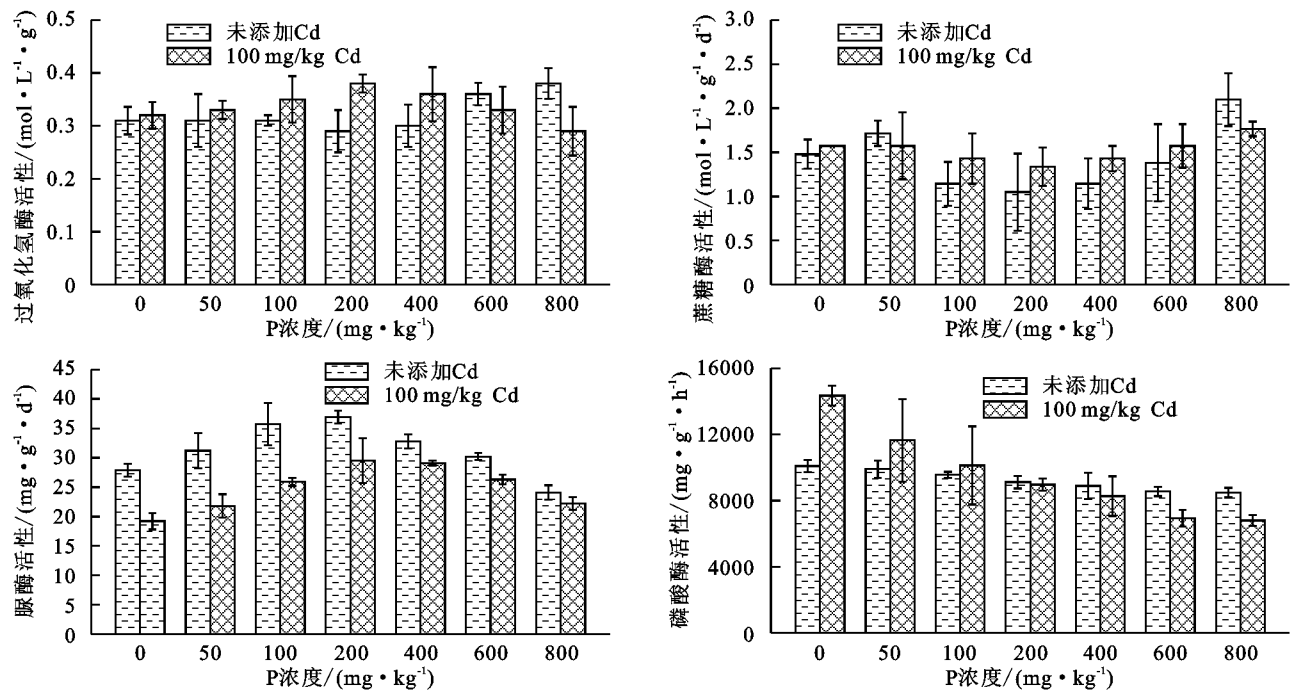


图 3 不同 P 浓度对吊兰栽培组中过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶以及磷酸酶活性的影响

表 4 土壤酶活性(y)与 P 浓度(x)的曲线估计

测定指标	曲线估计方程	R ²	p	峰值 P 浓度/ (mg · kg ⁻¹)
过氧化氢酶	y=0.315+4.877×10 ⁻⁴ x-1.167×10 ⁻⁶ x ² +6.480×10 ⁻¹⁰ x ³	0.964	0.011	269
蔗糖酶	y=1.604-0.002x+5.145×10 ⁻⁶ x ² -2.847×10 ⁻⁹ x ³	0.944	0.002	243
脲酶	y=18.945+0.082x-1.774×10 ⁻⁴ x ² +1.003×10 ⁻⁷ x ³	0.981	0.004	315
磷酸酶	y=11976.3-7.799x	0.763	0.010	—

3 结论

(1)施加适量的磷肥有利于吊兰的生长。在 100 mg/kg Cd 污染土壤中,施加 P 对吊兰的叶绿素含量、细胞膜透性、抗氧酶活性影响显著,表现为低浓度促进,高浓度抑制作用。当 P 浓度为 200 mg/kg 时,叶绿素含量、CAT 酶活性达到最大,POD 酶活性开始增加,即吊兰细胞膜的破坏程度最小,吊兰的抗氧化作用增加明显。

(2)施加 P 有助于改善 Cd 污染土壤中的酶活

性。尤其当施 P 量为 200 mg/kg 时,过氧化氢酶、脲酶的活性升至最高。4 种土壤酶活性均与 P 浓度显著相关 ($p<0.05$),依次为脲酶>过氧化氢酶>蔗糖酶>磷酸酶,表明前 3 种酶更能较好地反映施 P 对吊兰植物修复所起的作用。

参考文献:

[1] 吴丹,王友保,李伟,等. 镉胁迫对吊兰生长与土壤酶活性的影响[J]. 环境化学,2012,31(10):1562-1569.
[2] 王伯仁,蔡泽江,李冬初. 长期不同施肥对土壤旱地肥力

- 的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 85-88.
- [3] Wang Y B, Zhu C F, Yang H F, et al. Phosphate fertilizer affected rhizospheric soils: Speciation of cadmium and phytoremediation by *Chlorophytum comosum* [J]. Environmental Science & Pollution Research, 2017, 24(4): 3934-3939.
- [4] 王友保, 燕傲雷, 张旭情, 等. 吊兰生长对土壤镉形态分布与含量的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 163-166.
- [5] 廖晓勇, 陈同斌, 阎秀兰, 等. 提高植物修复效率的技术途径与强化措施[J]. 环境科学学报, 2007, 27(6): 881-893.
- [6] Gao X P, Flaten D N, Tenuta M, et al. Soil solution dynamics and plant uptake of cadmium and zinc by durum wheat following phosphate fertilization [J]. Plant and Soil, 2011, 338(1): 423-434.
- [7] 马亚娟, 徐福利, 王渭玲, 等. 氮磷提高华北落叶松人工林地土壤养分和酶活性的作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3): 664-674.
- [8] 陈波浪, 蒋平安, 盛建东. 磷肥对棉田土壤有效磷及土壤酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(1): 185-188.
- [9] 曾鹏, 曹霞, 郭朝辉, 等. 珊瑚树 (*Viburnum odoratissimum*) 对污染土壤中镉的耐受和富集特征[J]. 生态学报, 2017, 37(19): 1-8.
- [10] Wang Y B, Yan A, Wu T T, et al. Accumulation and remediation of cadmium-polluted soil by a potential cadmium-hyperaccumulator *Chlorophytum comosum* [J]. Energy Sources Part A, 2012, 34(16): 1523-1533.
- [11] Wang Y B, Yan A L, Dai J, et al. Accumulation and tolerance characteristics of cadmium in *Chlorophytum comosum*: A popular ornamental plant and potential Cd hyperaccumulator [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, 184(2): 927-937.
- [12] Wang Y B, Liu D L, Zhang L, et al. Patterns of vegetation succession in the process of ecological restoration on the deserted land of Shizishan copper tailings in Tongling City [J]. Acta Botanica Sinica, 2004, 46(7): 780-787.
- [13] 燕傲雷, 吴亭亭, 王友保, 等. 3种观赏植物对重金属镉的耐性与积累特性[J]. 生态学报, 2010, 30(9): 2491-2498.
- [14] 郑荣梁, 黄中洋. 自由基生物学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [15] Ferrer-Sueta G, Vitturi D, Batinic-Haberle I, et al. Reactions of manganese porphyrins with peroxynitrite and carbonate radical anion [J]. Journal of Biological Chemistry, 2003, 278(30): 27432-27438.
- [16] 王友保, 刘登义. 污灌对作为生长及其活性氧清除系统的影响[J]. 环境科学学报, 2003, 23(4): 555-557.
- [17] 孙锋, 赵灿灿, 李江涛, 等. 与碳氮循环相关的土壤酶活性对施用氮磷肥的响应[J]. 环境科学学报, 2014, 34(4): 1016-1023.
- [18] 李江遐, 光强, 黄伏森, 等. 不同改良剂对矿区土壤重金属有效性及土壤酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 211-215.
- [19] 陈红军, 孟虎, 陈钧鸿. 2种生物农药对土壤蔗糖酶活性的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(2): 584-588.
- [20] 王天元, 宋雅君, 滕鹏起. 土壤脲酶及脲酶抑制剂[J]. 化学工程师, 2004, 8(2): 22-24.
- (上接第345页)
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 3版. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [14] Bunluesin S, Pokethitiyook P, Lanza G R, et al. Influences of cadmium and zinc interaction and humic acid on metal accumulation in *Ceratophyllum Demersum* [J]. Water Air and Soil Pollution, 2007, 180(1/4): 225-235.
- [15] Wu Y J, Zhou H, Zou Z J, et al. A three-year in-situ study on the persistence of a combined amendment (limestone+sepiolite) for remedying paddy soil polluted with heavy metals [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, 130: 163-170.
- [16] Zhou H, Zeng M, Zhou X, et al. Heavy metal translocation and accumulation in iron Plaques and plant tissues for 32 hybrid rice (*Oryza sativa* L.) cultivars [J]. Plant and Soil, 2015, 386(1): 317-329.
- [17] 陈新红, 叶玉秀, 潘国庆, 等. 杂交水稻不同器官重金属铅浓度与累积量[J]. 中国水稻科学, 2014, 28(1): 57-64.
- [18] Gomes D S, Fragoso L C, Riger C J, et al. Regulation of cadmium uptake by *Saccharomyces cerevisiae* [J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects, 2002, 1573(1): 21-25.
- [19] Jan Stomph T, Jiang W, Struik P C. Zinc biofortification of cereals: Rice differs from wheat and barley [J]. Trends in Plant Science, 2009, 14(3): 123-124.
- [20] Hall J L, Williams L E. Transition metal transporters in plants [J]. Journal of Experimental Botany, 2003, 54(393): 2601-2613.
- [21] Satoh-Nagasawa N, Mori M, Nakazawa N, et al. Mutations in rice (*Oryza sativa*) heavy metal ATPase 2 (*OsHMA2*) restrict the translocation of zinc and cadmium [J]. Plant and Cell Physiology, 2015, 53(1): 213-224.
- [22] Hart J J, Welch R M, Novell W A, et al. Zinc effects on cadmium accumulation and partitioning in near-isogenic lines of durum wheat that differ in grain cadmium concentration [J]. New phytologist, 2005, 167(2): 391-401.
- [23] Chang H B, Lin C W, Huang H J. Zinc-induced cell death in rice (*Oryza sativa* L.) roots [J]. Plant Growth Regulation, 2005, 46(3): 261-266.

基于电阻率成像技术的土层精细划分

张平松, 欧元超, 汪武, 李建宁

(安徽理工大学地球与环境学院, 安徽淮南, 232001)

摘要: 土壤层次的精确划分关系到土壤学相关研究结果的精确程度。为对田间尺度上层状土壤进行无损精细分层, 采用电阻率成像技术, 同时结合电阻率曲线纵向上的变化特征精细划分土壤层次, 并将精细分层结果应用于层状土壤电阻率空间变异性研究。结果表明: 运用电阻率曲线法对反演电阻率数据进行精细划分后, 形成结果图能很好的满足研究过程中可视化呈现及精细化表达等需要; 根据温纳四极反演电阻率曲线法将研究区内的剖面浅层土壤划分为 5—13, 13—24, 24—50, 50—70 cm 4 个层次; 5—13 cm (耕作层) 电阻率值的变异系数最高(0.28), 13—24 cm (犁底层) 平均电阻率值最低(17.35 $\Omega \cdot m$)。研究成果可为土壤水文学和精准农业等相关研究提供技术支撑。

关键词: 电阻率成像; 层状土壤; 精细分层; 土壤结构; 空间变异

中图分类号: S152.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)03-0352-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.03.053

Experimental Study on the Accurate Division of Soil Layers Based on Resistivity Imaging

ZHANG Pingsong, OU Yuanchao, WANG Wu, LI Jianning

(School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001)

Abstract: Layered soil medium is a commonly existed soil layer structure. The accurate division of soil layers determines the accuracy of related researches on soil science. Therefore, it is of practical significance to study the techniques of fine soil layering. In order to classify the upper soil non-destructively in the field scale, the resistivity imaging technology was used. Based on the changes of the resistivity curve longitudinally, the stratification results were adopted to study the spatial variability of the soil resistivity. Results showed that: After finely classifying resistivity data using resistivity curve method, the result map could meet the need of visualization and fine expression in the research process. Using the Wenner quadrupole inversion resistivity curve method, the shallow soil in the research area were divided into four layers, including 5—13, 13—24, 24—50 and 50—70 cm, the prediction value and actual value were closest. I was found that the coefficient of variation of 5—13 cm (plough layer) was the highest (0.28) and the average resistivity value at 13—24 cm (plow bottom layer) was the lowest (17.35 $\Omega \cdot m$). The results conformed to the actual soil conditions in the test area, through this method, the soil condition could be obtained accurately, quickly and even non-destructively. The findings attained in this research provided technical support for the research on accurate agriculture and preferential flow of soil fracture.

Keywords: electrical resistivity tomography; layered soil; fine stratification; soil structure; spatial variability

土壤是浅地表层中普遍存在的一种分层次结构体^[1], 快速、准确获取土壤层次及相关特性一直是农业、土壤、水文以及高压电接地等领域专家关注的问题^[2-3]。目前, 对于层状土壤的层次划分广泛采用分层取样^[4]及钻孔资料^[5], 其在实际操作时普遍耗时费力。另外, 许多学者则利用多种分析手段对不同层次土壤的物性差异进行划分判断。Shin 等^[6]通过实地分析

不同深度的土壤质地等物性差异, 将 0—200 cm 的土壤剖面划分为沙壤土、粉砂壤土、黏壤土 3 个层次; 张波等^[7]综合利用灰关联分析法和有序聚类法, 从蒸散耗水角度对黄土区刺槐林地土壤水分剖面进行垂直分层。地球物理学方法具有无损、高效且探测准确等优点, 已在地质勘查及找矿等领域应用多年, 近年来也被越来越多的研究者引入到土壤学相关研究中^[8-10]。杜翠等^[11]

收稿日期: 2018-01-02

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0600900); 国家自然科学基金项目(41172137); 安徽省高校学科(专业)拔尖人才学术资助重点项目(gxbjZD2016048)

第一作者: 张平松(1971—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地球物理探测技术教学与研究。E-mail: pszhang@sohu.com

通信作者: 欧元超(1993—), 男, 硕士, 主要从事地球物理探测技术的应用研究。E-mail: ycou623@163.com

研究表明探地雷达层析成像探测技术可以用于复垦土壤层次探测;郭在华等^[12]在三极法的基础上研制出了可同时测量不同深度电阻率的分层土壤电阻率在线监测系统;Hsu 等^[13]采用二维电阻率成像技术检测了台湾某河流沿岸的沉积物与基岩之间的接触面分布情况,研究结果表明电阻率图中两者界限清晰,该技术在景观演变,沉积物运移和沉积物预算研究中具有广阔的应用前景。虽然地球物理学方法已在土层厚度、土壤电阻率与含水率空间差异、土壤质量状况等方面开展了较多的研究^[14-16],但针对层状土壤高精度分层的报道较少,所以将其进一步用于土壤精细分层探究具有一定的实践意义。

土壤电阻率反映土壤的导电性能,是土壤的一种基本物理特性,其受土壤质地及含水量等多种因素共同影响^[17-19]。基于层状土壤不同层次间土壤质地及含水量的差异,本文研究运用电阻率成像技术对层状土壤的分层探测效果,对比分析了运用电阻率曲线法对温纳三极和温纳四极反演电阻率数据进行层次划分的精度高低,并以分层结果为依据进行层状土壤电阻率空间变异性研究,以期为土壤水文学和精准农业等相关研究提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 土地利用与土壤剖面特征

探查试验于2016年5月选择在安徽省淮南市北部的淮河河漫滩上进行,该区的农田以水旱轮作方式为主,该研究区地势平坦,由于自然沉积形成了分层明显的层状土壤,浅层地下水埋藏约2 m,农田作物以水稻、小麦、油菜为主。为准确了解研究区土壤层次状况,考虑剖面存在的边界效应,依据电法勘探体积效应^[20],并结合本次测试有效勘探深度,在选择的典型农田内开挖出长6.0 m×宽0.7 m×高1.6 m的4组剖面。去除表层较松散且有团聚颗粒与植物根系的5 cm土壤,并对剖面的侧壁及上表面进行简单平整处理。剖面的颜色和手感质地,在0—85 cm范围内的垂直方向上存在明显的变异,通过对剖面不同层位内的土壤进行取样分析,确定了其质地类型,层次划分为5—15 cm(暗灰色,砂质壤土),15—22 cm(黄棕色,壤质黏土),22—45 cm(棕白色,粉砂质壤土),45—70 cm(红棕色,砂质黏土)和70—85 cm(黄棕色,砂质黏壤土)5个层次。

1.2 电阻率成像技术的实地探测

本试验使用 NPEI—DHZI—1 型网络并行电法仪^[21-22](江苏靖江,东华测试)进行层状土壤电阻率数据采集。该仪器具有单点电源场(AM 法)与偶极子电源场(ABM 法)2种数据工作方式,AM 法所采集的电位反映的是单点电源供电下的电场,即任一电极供电(A 极),其余电极作为 M 极同时进行电位测量,然

后自动顺次切换电极,直至所有电极完成供电,其中 B 极放置于无穷远处供电,公共电极 N 极置于测线附近作为测量电极电位的参照标准;ABM 法采集数据所反映的则是偶极子供电情况,与 AM 法不同的是有一对电流电极 AB 供电。与传统的高密度电法采集相比,并行电法为拟地震式数据采集方式及多次覆盖式叠加系统,可获得更为稳定的地电场信息^[22-23]。

电法测试系统布置示意图 1,其中空心箭头所指的为自制微型电极^[24],其为打磨处理后的紫铜棒(长 3 cm,直径 1 mm)。另外,电极与仪器之间的连接器转接头和电缆线由上海第一海洋地质工程有限公司专门设计研发。黑色箭头所指的方向为电极从 1# 至 64# 的布置方向。测试时将电极布设在剖面的中轴线上并插入地表 2 cm 深,其中两个电极间距离为 5 cm,每条测线布置 64 个电极,测线长为 3.15 m,测线距离剖面边界 0.35 m。为消除偶然因素给测试结果带来的误差,对研究区内的剖面均进行了数据采集。现场采集了剖面内层状土壤各点的视电阻率值,并采用 EarthImager 2D 软件中的阻尼最小二乘法反演出真实电阻率及其分布图像。

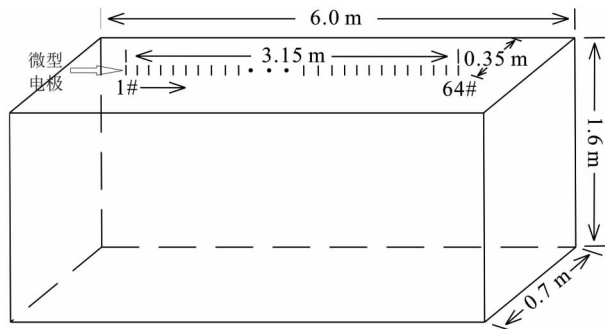


图1 电法测试系统布置示意

1.3 土壤精细分层方法及电阻率剖面图精细处理流程

自然沉积作用使得土壤不同层次间质地、含水量等物理参数存在差异^[25-28],导致保水性、入渗性及蒸发性等水力学参数各异,这些差异共同影响层状土壤的导电性特征^[29],故电阻率在土壤分层处会有明显反映。

依据反演电阻率剖面图,选取其同一深度处的若干数据点相加取平均值即得到该装置类型下随深度变化的电阻率曲线。观察曲线的变化趋势及拐点位置等相关信息,对剖面进行精细分层^[30],分别得到多组层位预测结果。为了选取最接近实地观察获取的实测层位的预测结果,于是比较了不同装置类型预测层位与实测层位的相对误差及均方根误差,得到精细分层方法中最接近实测层位的分层方法,依据该方法的分层结果确定其电阻率标定值,进而有针对性的对其剖面图进行色标标定,最终得到精细分层后的层状土壤电阻率剖面图。基于此,将电阻率曲线方法^[30]应用于层状土壤精细分层研究,以期提高分层结果的精度。

2 结果与分析

2.1 不同装置类型下层状土壤分层效果对比

选择 5 种不同装置型数据进行反演电阻率成图处理,并从有效探测深度、土壤纵向层次分辨率、数据信号强度等方面综合对比分析各装置型数据的结果图对层状土壤的分层探测效果。由表 1 可知,对于田间尺度上的层状土壤分层探测而言,不同装置类型的探测效果存在很大差别。其中,从装置的探测深度比较得出温纳三极、偶极—偶极探测最深,而温纳四极探测深度最浅;对各装置的纵向分辨率比较发现温纳四极的效果最好,而偶极—偶极、单极—偶极的效果最差,故在土壤层次的精细划分中,温纳四极具有一定的优势;另外,信号的强度也同样影响着不同测量装置探测的灵敏度和准确性,比较各装置发现温纳四极的信号强度较高,施伦贝尔、温纳三极次之,偶极—偶极、单极—偶极较弱;在各测量装置纵向测深的适宜性方面,温纳四极、施伦贝尔较佳,温纳三极次之,偶极—偶极、单极—偶极较差;但在横向剖面适宜性方面,各测量装置的效果除了施伦贝尔最差外,其余效果均一般。通过对探测深度、纵向分辨率、信号强度等方面综合分析,认为应用于土层划分的各装置中温纳四极表现最佳,紧接着是温纳三极、施伦贝尔、偶极—偶极,单极—偶极效果最差。

表 1 应用于土层划分中的常用电阻率测量装置效果

参数	温纳四极	施伦贝尔	偶极—偶极	温纳三极	单极—偶极
探测深度	L	M	H	H	M
纵向分辨率	H	M	L	M	L
信号强度	H	M	L	M	L
纵向测深适宜性	H	H	L	M	L
横向剖面适宜性	M	L	M	M	M

注:用 H、M、L 分别代表高、中、低的装置特征显示效果。

2.2 层状土壤精细分层

若仅以分层效果最优的电法装置类型及简单的

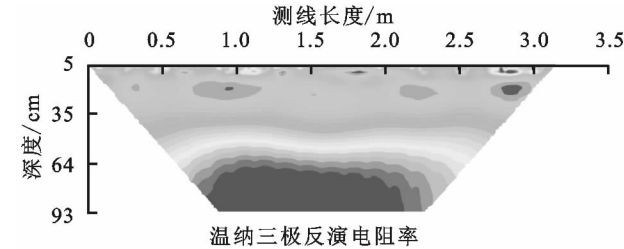


表 2 为不同分层方法的预测层位与实测层位表(有效探测深度达不到 70 cm 的以 70 cm 为该处分层位置),表中包含了不同精细分层方法的土壤层次预测结果与实测结果的相对误差(RE)和均方根误差(RMSE)大小等信息。可以看到,运用电阻率曲线处理方法对层状土壤层次进行预测,厘米尺度上的精度

人为色标标定等划分层状土壤层次,可能会降低分层精度,故此引入电阻率曲线法来辅助提高分层精度。由于不同温纳装置类型采集到的数据效果存在差异,故本次研究仅选取对剖面土壤分层效果较好的温纳三极和温纳四极反演电阻率数据进行对比分析。

图 2 为应用精细分层方法前的两种装置反演电阻率剖面。在电阻率剖面图中选择标定点,选取其相同深度的两边若干数据点相加取平均值即得到该电极排列方式下随深度变化的电阻率曲线图。图 3 为层状土壤精细分层,分析 4 幅曲线图发现,除表层受到人类耕作活动影响而造成电阻率数据波动无规则外,其他各层次内的土壤由于具有相似的物性参数,故其电阻率数据有着相同的变化趋势;另外,需结合各剖面的反演电阻率图进而对反演电阻率曲线进行分层。以剖面 1 为例进行说明,图 2 即为剖面 1 的反演电阻率剖面图,从 2 幅反演电阻率剖面图中均可见土壤表层的电阻率值比较杂乱,对应分析剖面 1 的反演电阻率曲线亦可发现上部数据波动无规律,这也符合研究区的表层土壤受到耕作扰动影响,故可将 NO.1 曲线 5—14 cm 范围、NO.2 曲线 5—13 cm 范围划定为耕作层;接着观察反演电阻率图可见存在电阻率值整体较低且数据稳定的一个层次范围,对应 NO.1 曲线 14—29 cm 范围、NO.2 曲线 13—24 cm 范围的数据稳定在一个较小电阻率范围内,这也符合耕作层下部犁底层电性特点,故可进行对应分层;图 2 中 2 幅反演电阻率剖面图下部的电阻率色标值为迅速增大后保持稳定,对照曲线图可见 NO.1 曲线 29—59 cm 范围、NO.2 曲线 24—50 cm 范围内的数据持续增大后,NO.1 曲线 59—77 cm 范围、NO.2 曲线 50—70 cm 范围内的数据基本保持稳定。故通过对反演电阻率剖面图以及对应的电阻率曲线进行综合分析后,可更为准确划定出对应的层次分界点。

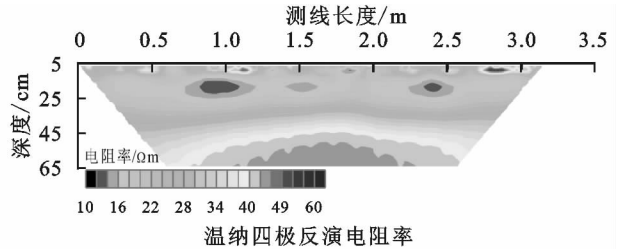
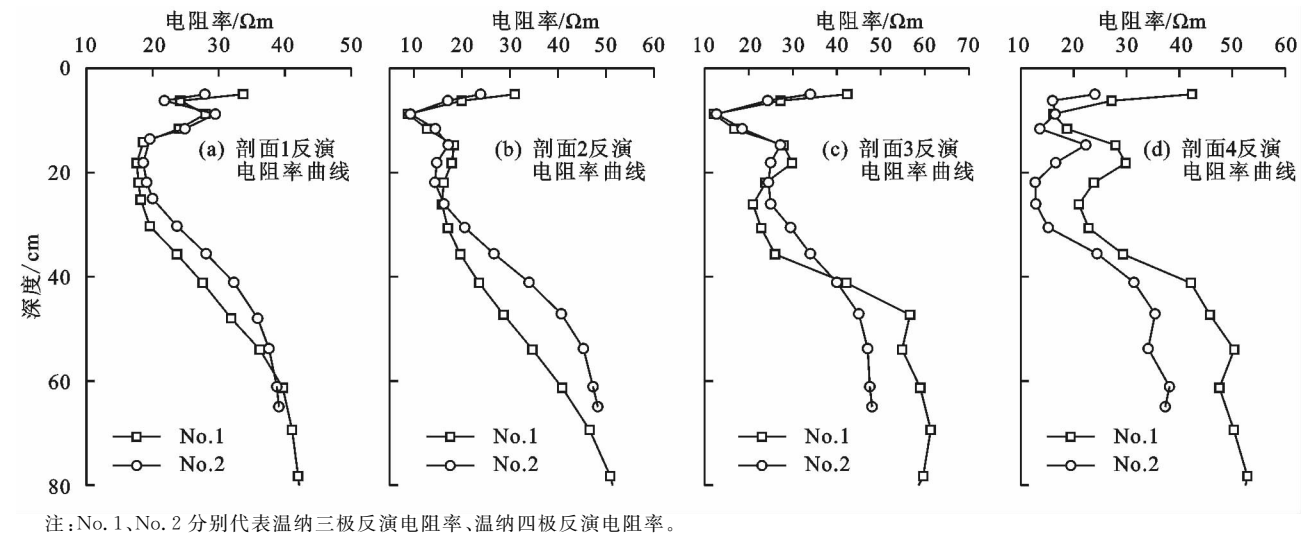


图 2 反演电阻率剖面图对比

均较高($2.12 \leq RMSE \leq 8.55$),初步验证了其应用于层状土壤层次划分的可适用性。但 A 和 B(分别为温纳三极与四级反演电阻率曲线法)之间的精度存在差别,综合分析比较 A 和 B 的平均相对误差及均方根误差,认为 B 的预测层位相对而言准确度更高,即该精细分层方法的预测结果与实际测量结果最为接近。



注:No. 1、No. 2 分别代表温纳三极反演电阻率、温纳四极反演电阻率。

图 3 层状土壤精细分层

表 2 层状土壤不同分层方法的预测层位与实测层位

剖面号	实测层位	预测层位/cm					
		温纳三极			温纳四极		
		A	相对误差/%	均方根误差/cm	B	相对误差/%	均方根误差/cm
1	15	14	−0.07	6.46	13	−0.13	3.57
	22	29	0.32		24	0.09	
	45	59	0.31		50	0.11	
	70	77	0.10		70	0	
2	15	16	0.07	8.55	15	0	2.42
	22	31	0.41		26	0.18	
	45	50	0.11		48	0.07	
	70	60	−0.14		70	0	
3	15	19	0.27	7.17	15	0	2.12
	22	36	0.64		26	0.18	
	45	46	0.02		46	0.02	
	70	80	0.14		70	0	
4	15	18	0.20	7.60	14	−0.07	5.24
	22	32	0.45		31	0.41	
	45	42	−0.07		47	0.04	
	70	80	0.14		70	0	

注:A 和 B 分别代表温纳三极反演电阻率曲线法及温纳四极反演电阻率曲线法。

本文以剖面 1 为例进行精细电阻率成图并针对该剖面进行层状土壤电阻率空间变异特征研究。根据温纳四极电阻率曲线法对剖面 1 的土层划分(5—13,13—24,24—50,50—70 cm)情况,将其划分深度对应于图 3a 中 No. 2 曲线上的电阻率值。首先,深度为 13 cm 处对应的横坐标上电阻率值为 20 Ω·m,确定出 20 Ω·m 为划分该位置的电阻率特征值,其次,深度为 24 cm 对应的横坐标上的电阻率值也为 20 Ω·m,故 20 Ω·m 同样为该深度的电阻率特征值,深度为 50 cm 对应横坐标上的电阻率值为 37 Ω·m,故其为该位置处的电阻率特征值。最终,根据得到的层状土壤分层电阻率特征值(20,37 Ω·m),有针对性的对其色标进行精确标定。

应用层状土壤精细分层方法前后效果对比如图 4 所示,其中图 4b 上标出的虚线为划分出的层状土壤分界面位置(即电阻率特征值为 20,37 Ω·m 的位

置)。通过对比图 4 中精细分层前后的效果图可以看出精细分层后的土壤层次位置更加精细、清晰,电阻率剖面图中的颜色区分效果更加明显。该精细分层方法提高了对土壤层次划分的精确度,改变了以往运用电阻率成像技术对土壤层次进行简单、粗犷划分的老办法,这对于解决田间尺度上的土壤相关研究中存在的误差问题具有一定的推动作用。

2.3 农田层状土壤电阻率空间变异特征

通过分析土壤电阻率所反映的土壤异质性以及土壤内部结构的差异,进而可研究与剖面土壤相关的特性参数及之间的关系。

选取剖面 1 为研究对象,以上述分层研究结果为依据,对图 4b 中不同层次内的数据点进行统计分析,其结果如表 3 所示。由表 3 可以看出,5—13 cm 处土层变异系数最高(0.28),电阻率值相差最大,结合实际情况及分层结果图分析认为是长期的农事活动

导致,该层为耕作层;13—24 cm 处土层变异系数较低(0.13),电阻率最大值与最小值相差仅为 11.33 $\Omega \cdot \text{m}$,且平均电阻率值为 17.35 $\Omega \cdot \text{m}$,这主要由于耕作活动使该层长期受到压实以及黏粒淀积所致,该层土壤密实度大、含水率高,为耕作层下方较为紧实的土层,推断为犁底层;24—50 cm 处变异系数较高(0.23),电阻率最大与最小值差异达 25.39 $\Omega \cdot \text{m}$,可能是由于作物根系的吸水作用以及下部土体的水分和盐分在土壤毛细管力的驱使下聚集到了该层上部,又因犁底层的存在阻碍了其继续向上,且由于表层作物根系空间分布不均导致该层水分、盐分等分布不均,从而造成该层电阻率值差异较大且变异系数较高;50—70 cm 处变异系数在各层中最低但平均电阻率值最大,主要因为上部土壤蒸发较为强烈,作物生长必然要汲取下部的养分和水分,致使该层更多的是向上补给,然而地下潜水位深度达 2 m,很难对该层的水分进行有效的补给,从而导致电阻率值整体较高。这与张建兵等^[31]应用电导率法测定的田间不同深度范围内土壤特性一致,其认为表层受到耕作影响强烈,垂直方向上的土壤盐分主要集中在犁底层。但他们的研究并没有划分出各个层次的准确位置,而是人为的以 20 cm 范围为一个层次。本文运用电阻率曲线法对剖面电性数据进行精细划分,进而对各层位内的参数进行统计分析,得到的数据分析结果具有更高的准确性。

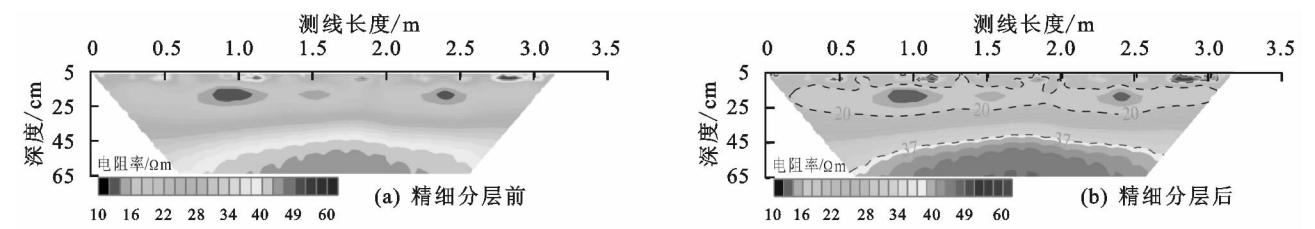


图 4 应用层状土壤精细分层方法前后效果对比

表 3 剖面 1 层状土壤各层电阻率统计特征参数

土层 深度/cm	数据 点数	电阻率/ $\Omega \cdot \text{m}$				变异 系数	偏度	峰度	分布 类型
		最小值	最大值	平均值	标准差				
5—13	512	13.10	66.70	26.88	7.60	0.28	1.49	3.42	正态
13—24	384	12.48	23.81	17.35	2.17	0.13	0.20	-0.02	正态
24—50	640	16.59	41.98	28.02	6.31	0.23	0.25	-0.78	正态
50—70	384	30.38	45.47	39.36	4.44	0.11	-0.40	-1.19	正态

3 讨论

为对比分析土壤电阻率与含水量、孔隙度等土壤物理特性间的变化关系,分别在深度 10,20,30,40,50,60,70 cm 处采集现场土样,测取了土壤体积含水量、孔隙度等土壤物理特性。其中,为了保证测量的准确性,每层均取 3 个土样。由图 5 可知,各物理特性随深度的增加均有一定的变化规律。对比图 3 的土壤电阻率曲线图能够发现,随着土层深度的增加,土壤体积含水量先增大后逐渐减小,而电阻率则是先减小后逐渐增大,认为土壤中含水量高时电阻率相对会低,反之则相反;另外,深度 10 cm 处与 20 cm 处的含水量差异大,从 30 cm 到 50 cm 处范围的含水量较一致,60,70 cm 处的含水量较一致,从该变化规律能够发现不同层位内的土壤体积含水量存在较为明显的差异。比较土壤孔隙度与电阻率之间的变化规律发现,深度 10 cm 处孔隙度最大,这是由于农事活动而导致的耕作层内部土壤松散,而深度 20 cm 处的孔隙度最小,符合犁底层密实度大、孔隙度小且含水量高等物理性质,分析认为当孔隙度大时,电阻率相对会大,反之则相反。根据不同土层内质地、含水量、孔隙度等的差异,采用电阻率成像技术对田间尺度上的土壤进行探查研究,并利用电阻率曲线纵向上的变化特征可精细划分土壤层次。有效、精确地掌握土壤层次结构,对于土壤水文学和

环境工程科学研究中参数间相关性分析及解释具有一定的推动作用。电阻率成像技术具有的优势为:微扰动原位稳定监测、多尺度同步实时监测、可重复长期自动监测及对地可视化精细监测。

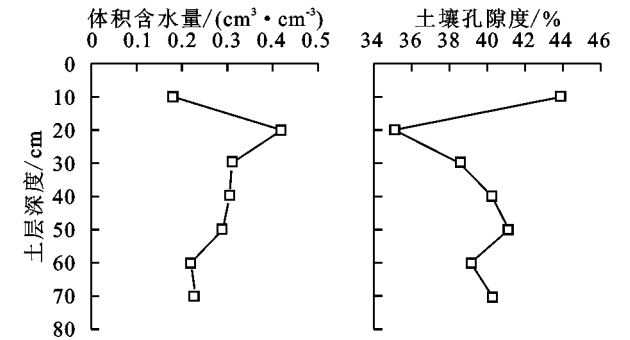


图 5 不同土层深度的土壤物理特性变化

4 结论

(1)电阻率成像技术在层状土壤层次划分中具有良好的适用性,运用电阻率曲线法对数据进行处理后可有效的提高分层的精细程度。其中,温纳四极反演电阻率曲线法对本研究区内层状土壤层次划分效果最好。另外,电阻率能反映土壤结构特性及水盐状态等信息,结合土壤电阻率与土壤特性间的岩土物理学关系,电阻率成像法可实现对土壤特性或状态的多尺度无损连续监测,这为通过土壤电阻率测定预测其他

土壤特性提供了一种可行的途径。

(2)依据剖面1各层电阻率值,其可划分为5—13 cm(耕作层),该层电阻率范围最大,变异系数最高,为人类农事活动造成;13—24 cm(犁底层),该层电阻率平均值最小,变异系数较低,是因为含水量高且土体密实;24—50 cm处电阻率最大与最小值相差较大,变异系数较高,是由于该层含水量低且水分分布不均;50—70 cm处平均电阻率值最大,变异系数最低,是由于含水量低且水分分布均匀造成的。

参考文献:

- [1] 宋亚路,刘苏峡,马英,等.土壤分层关键因子确定:以新乡实验农地为例[J].地理研究,2014,33(11):2125-2134.
- [2] 甘永德,贾仰文,仇亚琴,等.降雨条件下分层土壤入渗特性[J].水土保持学报,2012,26(5):217-219.
- [3] Coulouma G, Samyn B, Grandjean G, et al. Combining seismic and electric methods for predicting bedrock depth along a Mediterranean soil toposequence [J]. Geoderma, 2012, 170(15): 39-47.
- [4] Lookingbill T, Urban D. An empirical approach towards improved spatial estimates of soil moisture for vegetation analysis [J]. Landscape Ecology, 2004, 19(4): 417-433.
- [5] Morse M, Lu N, Godt J, et al. Comparison of soil thickness in a zero-order basin in the Oregon coast range using a soil probe and electrical resistivity tomography [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(12): 1470-1482.
- [6] Shin Y, Mohanty B P, Ines A V M. Soil hydraulic properties in one-dimensional layered soil profile using layer-specific soil moisture assimilation scheme [J]. Water Resources Research, 2012, 48(48): 116-120.
- [7] 张波,张建军,李轶涛,等.黄土区刺槐林地土壤水分剖面的垂直分层[J].中国水土保持科学,2010,8(4):39-44.
- [8] Samouelian A, Cousin I, Tabbagh A, et al. Electrical resistivity survey in soil science: A review [J]. Soil & Tillage Research, 2005, 83(2): 173-193.
- [9] 解迎春,李霞,张凤宝,等.基于电阻率断层扫描技术探测林地土层厚度[J].农业工程学报,2015,31(4):212-216.
- [10] Coulouma G, Lagacherie P, Samyn K, et al. Comparisons of dry ERT, diachronic ERT and the spectral analysis of surface waves for estimating bedrock depth in various Mediterranean landscapes [J]. Geoderma, 2013, 199(5): 128-134.
- [11] 杜翠,杨峰,彭猛,等.雷达层析成像对复垦土壤分层结构的探测[J].计算机仿真,2013,30(9):217-220.
- [12] 郭在华,朱泽伟,邢天放,等.分层土壤电阻率在线监测系统研制[J].仪器仪表学报,2014,35(6):1306-1314.
- [13] Hsu H L, Yanites B J, Chen C C, et al. Bedrock detection using 2D electrical resistivity imaging along the Peikang River, central Taiwan [J]. Geomorphology, 2010, 114(3): 406-414.
- [14] 杨磊,周启友,雷鸣,等.基于自然电位方法的土壤水分入渗过程监测[J].水文地质工程地质,2012,39(3):1-5.
- [15] Brunet P, Clement R, Bouvier C. Monitoring soil water content and deficit using Electrical Resistivity Tomography (ERT): A case study in the Cevennes area, France [J]. Journal of Hydrology, 2010, 380: 146-153.
- [16] 赵国平,史社强,李军保,等.毛乌素沙地采煤塌陷区土壤水分空间变异研究[J].水土保持学报,2017,31(6):90-93,219.
- [17] 马东豪,张佳宝,吴忠东,等.电阻率成像法在土壤水文学研究中的应用及进展[J].土壤学报,2014,51(3):439-447.
- [18] 谷裕,王金满,刘慧娟,等.干旱半干旱煤矿区土壤含水率研究进展[J].灌溉排水学报,2016,35(4):81-86.
- [19] Mojid M A, Cbo H. Wetting solution and electrical double layer contributions to bulk electrical conductivity of sand-clay mixtures [J]. Vadose Zone Journal, 2008, 7(3): 972-980.
- [20] 汤洪志,邓居智.电法勘探原理[M].南昌:地质出版社,2013.
- [21] 张平松,凡净,吴荣新,等.大倾角煤层工作面底板岩层富水异常区探查方法研究[J].采矿与安全工程学报,2015,32(4):639-643.
- [22] 刘盛东,张平松.分布式并行智能电极电位差信号采集方法和系统.中国:ZL200410014020.0[P].2005-05-18.
- [23] 欧元超,张平松,李建宁,等.基于并行电法的重阳木根系空间分布探测试验研究[J].科学技术与工程,2017,17(10):131-135.
- [24] 肖宏跃,武骄阳,雷宛,等.实验室高密度电法微测系统的模型研究[J].地球物理学进展,2011,26(4):1464-1472.
- [25] Chu X, Marino M A. Determination of ponding condition and infiltration into layered soils under unsteady rainfall [J]. Journal of Hydrology, 2005, 313(3): 195-207.
- [26] 李仕华,王超凡.不同种植作物对梯田土壤水分的影响[J].灌溉排水学报,2016,35(5):89-92.
- [27] Rilling M C, Mummey D L. Mycorrhizas and soil structure [J]. New Phytologist, 2006, 171(1): 41-53.
- [28] Samouelian A, Cousin I, Tabbagh A, et al. Electrical resistivity survey in soil science: A review [J]. Soil and Tillage Research, 2005, 83(2): 173-193.
- [29] Wright A L, Hons F M. Carbon and nitrogen sequestration and soil aggregation under sorghum cropping sequences [J]. Biology and fertility of soils, 2005, 41(2): 95-100.
- [30] 陈小芳.视电阻率及其差分曲线在岩土分层中的应用[J].地球物理学进展,2004,19(2):455-459.
- [31] 张建兵,杨劲松,姚荣江,等.田块尺度下的苏北滩涂新垦农田土壤盐分空间变异性分析[J].灌溉排水学报,2013,32(1):39-42.

面向 GF-1 数据不同融合方法对扰动地块的提取

刘二佳¹, 罗志东^{2,3}, 张晓丽¹, 瞿帅¹, 何亮⁴, 朱程浩¹, 赵院³

(1. 北京林业大学林学院, 精准林业北京市重点实验室, 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 3. 水利部水土保持监测中心, 北京 100053;

4. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 以 GF-1 影像为数据源, 采用 HPF 变换 (High-Pass fusion, 高通滤波变换)、Ehlers 变换 (空间滤波变换)、Brovey 变换 (彩色标准变换)、GS 变换 (Gram-Schmidt, 正交化变换)、PC 变换 (Principle Components, 主成分变换) 等 5 种常用融合算法, 根据视觉分析和数理统计分析对融合后的影像进行质量评价, 并通过面向对象分类方法对扰动图斑信息进行提取, 研究适用于生产建设项目集中区扰动地表信息提取的融合算法。结果表明: 基于 PC 和 GS 算法的融合结果影像视觉效果好, 细节清晰, 色调自然, 纹理增强明显, 较好的融合了多光谱影像的光谱信息和全色影像的空间信息。通过定量分析可知, PC 变换最大程度地保持原多光谱影像的光谱特性, GS 融合算法在增益效果上具有优势, 融合影像信息量最大, 纹理最为细致。总体而言, PC 变换和 GS 变换影像融合算法在生产建设项目扰动图斑信息提取上具有很大的优势, 在煤炭覆盖区提取正确率均为 100%, 在裸露地表和在建筑物用地混合区大于 80%, 较原始多光谱影像分类精度提高了约 10%。该研究为推进国产高分遥感数据在生产建设项目水土保持监管中的高效应用奠定数据基础, 对提升生产建设项目水土保持监管效率和信息化水平具有非常重要的意义。

关键词: 影像融合; GF-1 卫星; 生产建设项目扰动地表提取; 面向对象分类算法

中图分类号: P237

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0358-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.03.054

Comparison of Fusion Algorithms for GF-1 Data from Extracted of Distribution Information on Production and Construction Projects

LIU Erjia¹, LUO Zhidong^{2,3}, ZHANG Xiaoli¹, QU Shuai¹,

HE liang⁴, ZHU Chenghao¹, ZHAO Yuan³

(1. Beijing Key Laboratory of Precision Forestry, Key Lab. for Silviculture and Conservation
Co-constructed by China Ministry of Education and Beijing, Forestry College, Beijing Forestry

University, Beijing 100083; 2. Beijing Institute of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry

University, Beijing 100083; 3. Water and Soil Conservation Monitoring Center of Ministry of Water Resources,

Beijing 100053; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Based on the GF-1 satellite images, the study used five different methods including high-pass fusion, Ehlers transformation, Brovey transformation, Gram-Schmidt spectral sharpening, and principle components spectral sharpening to obtain an optimal method for image enhancement of production and construction projects. To access the performance of these fusion methods, the quality of the fused image was evaluated by the visual and statistical analyses. Moreover, the object-oriented classification method was used to examine the accuracy of extracting the disturbance information on production and construction projects in the central area. Results showed that the principle components and gram-schmidt fusion algorithm achieved better fusion of multispectral spectral information and panchromatic image spatial information, and therefore, higher spectral fidelity, richer spatial information and better visual effect were obtained. Quantitative analysis showed that the principle components transform preserved the spectral characteristics of the original multispectral image to the maximum extent. The gram-schmidt fusion algorithm had the advantage of gain, and the fused image had the largest amount of information and the most detailed texture. Overall, the principle components and Gram-Schmidt image fusion algorithms had great advantages in information extraction of disturbance information on production and construction projects. The extraction accuracy in the coal-covering

收稿日期: 2018-01-25

资助项目: 高分水利遥感应用示范系统项目 (一期) (08-Y30B07-9001-13/15)

第一作者: 刘二佳 (1987—), 女, 山西临汾人, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀监测和遥感应用研究。E-mail: ejlovesmile@163.com

通信作者: 张晓丽 (1967—), 女, 河北张家口人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事遥感和 GIS 在资源与环境中的应用研究。E-mail: zhang-xl@263.net

area was 100%, and greater than 80% in the mixed area of bare land and construction land and the classification accuracy was 10% higher than that of the original multispectral image. This research provide a solid foundation for promoting the efficient application of domestic high-resolution remote sensing data in water and soil conservation regulation of production and construction projects, and is of great significance to advance the efficiency and informationization of soil and water conservation supervision on production and construction projects.

Keywords: fused image; GF-1 satellite; extraction of distribution on production and construction projects; object-oriented image classification

近 20 多年来,我国经济社会发展迅速,城镇化、工业化和基础设施建设处于快速发展过程中,生产建设活动频繁剧烈,水土流失日益加剧^[1-2]。因此加强生产建设项目水土保持监管,对保护区域内水土资源有着重要意义。根据中国水土保持公报,2005—2014 年,全国每年审批的生产建设项目水土保持方案的数量约 3 万个,据不完全统计平均每年在建项目扰动地表的规模约为 2 万 km²。通常利用现场跟踪检查为主的方式对生产建设项目进行水土保持监管,工作量大、效率低、实时性差,难以满足监管及时性的要求,未监管的区域易造成水土流失隐患。基于航空、航天、无人机等高分遥感技术,结合地面实地检查等措施,开展生产建设项目水土保持全周期、全流程的监管,是加强生产建设项目水土保持事中事后监管的重要探索与实践。因此,应用高分辨率卫星数据解决生产建设项目的监管问题成为水土保持行业发展的重要趋势。高分一号卫星作为我国中长期科技重大专项高分辨率对地观测系统的首颗高分卫星,具有高空间、高时间与高光谱分辨率相结合的特点,为生产建设项目天地一体化监管提供重要的基础数据支撑^[3]。影像融合是将不同卫星或相同卫星不同传感器所获取数据高效利用的重要手段,既提高了多光谱影像的空间纹理细节,又保留其丰富的波谱特性,削弱因时相造成的影像特征差异,减少信息冗余,增加有效信息量,突出影像层次和细节信息,增强扰动地表特殊对象的影像特征,提高后续目视解译或自动识别的准确率和分类精度^[4-5]。遥感影像融合的算法自上个世纪 80 年代开始发展,主要包括图形变换、数学运算、彩色技术等 3 种^[6]。针对特殊的地物要素,融合方法不同融合结果可能有差异,需将影像特点、应用需求及融合方法综合考虑^[7]。目前研究中对于高分一号影像的融合虽然已有报道^[8-11],但是针对适用于生产建设项目扰动图斑的融合算法尚未有学者提出。因此,针对目前常用融合方法,探讨适合于高分一号卫星生产建设项目集中区扰动地表影像的融合方法,为天地一体化监管影像大规模的融合应用提供参考具有重要意义。本文选择 5 种具有代表性融合方法 HPF 变换(High-Pass fusion,高通滤波变换)、Ehlers

变换(空间滤波变换)、Brovey 变换(彩色标准变换)、GS 变换(Gram-Schmidt,正交化变换)、PC 变换(Principal Components,主成分变换),根据目视分析和定量分析对融合后的影像进行质量评价,并通过面向对象分类方法对扰动图斑进行提取,研究适用于生产建设项目集中区扰动地表信息提取的融合算法,为大规模推进国产高分遥感数据在生产建设项目水土保持监管中的高效应用提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黔西县地处黔中山原西部,地势西北高,东南低,属喀斯特丘陵地貌类型,地理位置为东经 105°47′—106°26′,北纬 26°45′—27°21′,面积 2 389.5 km²。境内碳酸盐岩分布面积约占全县总面积的 95%,喀斯特发育、溶丘、洼地、峰丛、溶斗、伏流等分布普遍。该县属中亚热带向北亚热带过渡的季风气候区,多年平均气温为 13.89℃,平均蒸发量为 1 234.90 mm,年降水量为 954.88 mm。区内自东南向西北地带性植被由中亚热带常绿阔叶林向北亚热带常绿阔叶混交林交替^[12]。研究区自然资源丰富,地表扰动活跃,生产建设项目类型多样,特征多样,包括公路、火电、铁路、房地产、井采矿、露天矿、输变电、水利枢纽、加工制造。生产建设项目扰动急速扩张,严重影响生态环境。本文选择黔西县中部的生产建设项目集中,面积为 425 km² 区域进行研究,重点分析该区生产建设项目扰动地块的空间分布情况。影像资料的采集时间为 2017 年 8 月 24 日,该时期扰动地块与其他地物的差异较为明显,有利于进行扰动地块提取。为保证影像融合的质量,消除影像传感器和大气对地物光谱值的影响,对多光谱影像进行大气校正。以 1:10 000 的数字高程模型为基准影像进行正射校正,误差控制在 2 个像素内。

1.2 影像融合及评价方法

采用 HPF、Brovey、PC、Ehlers、Gram-Schmidt 等 5 种算法对 GF-1 全色和多光谱影像进行融合。HPF 变换和 Ehlers 融合由 ERDASIMAGINE 2014 软件实现,其余融合算法均由 ENVI 5.2 实现。由于 Brovey 融合算法只有 3 波段参与运算,因此分别采

取 R、G、B 波段融合以及 R、G、NIR 波段与全色进行融合试验。为更好地满足生产建设项目扰动图斑的提取,综合视觉效果定性分析和数理统计定量分析方法,评价融合影像效果质量。其中视觉效果是通过影像的光谱清晰度、保真度、纹理特征进行直观分析,定量分析从融合影像的光谱信息、纹理信息进行评价分析,减少评价的随机性,使得评价更加科学全

面^[8,10,13-14]。以人工勾绘的扰动图斑区域为基础,按照裸露地表和在建建筑用地混合区、煤炭覆盖区开展融合算法的定量评价。光谱特征评价包括光谱角^[15-16]、相关系数^[17]、平均梯度^[18],主要是分析融合影像与原始影像的 4 个波段之间的关系。纹理特征评价的方法包括二阶角矩、信息熵。本研究中所有指标的计算均由 matlab 实现。定量分析公式见表 1。

表 1 影像融合评价指标分析

指标	名称	计算公式	式中字母含义
光谱评价指标	光谱角/(°)	$\alpha = \cos^{-1} \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N P_{i,j} Q_{i,j}}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N Q_{i,j}^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N P_{i,j}^2}}$	$P_{i,j}$ 为原始多光谱影像光谱向量 $Q_{i,j}$ 为融合影像光谱向量 M, N 为图形的行列数
	相关系数	$c = \cos^{-1} \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [(P_{i,j} - \overline{P_{i,j}})(Q_{i,j} - \overline{Q_{i,j}})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (P_{i,j} - \overline{P_{i,j}})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (Q_{i,j} - \overline{Q_{i,j}})^2}}$	$\overline{P_{i,j}}$ 为原始多光谱影像的均值 $\overline{Q_{i,j}}$ 为融合后多光谱影像的均值
	平均梯度	$\Delta = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sqrt{[(Q_{i,j} + Q_{i+1,j})^2 + (Q_{i,j} + Q_{i,j+1})^2] / 2}$	同上
纹理评价指标	二阶角矩	$ASM = - \sum_{i=1}^L Q_i^2$	Q_i 为灰度值为 i 的概率密度; L 为图像灰度级数
	信息熵	$ENT = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N M(\chi_{i,j})^2$	$M(\chi_{i,j})^2$ 是灰度共生矩阵元素

1.3 融合影像分类方法

为探讨各种融合算法对生产建设项目扰动图斑信息提取的适宜性,本研究采用面向对象多尺度分割方法,通过 Jeffries-Matusita 距离(J-M 距离)法筛选适用于本研究提取目标的多特征指数,生成树型结构的判别函数,建立下层节点和分支,实现生产建设项目扰动图斑提取。

1.3.1 面向对象多尺度分割 遥感影像分割是面向对象遥感影像分类的基础,影像分割的质量影响分类提取的精度。本文利用基于分形网络进化分割算法(Fractal Net Evolution Algorithm, FNEA)的面向对象多尺度分割方法,综合考虑各典型地物的分布特点,根据影像不同的光谱、纹理、形状和空间特征,选用信息熵作为内部同质性评价指标,分割强度作为邻域异质性评价指标,通过逐次调整分割尺度大小使各典型地物实现最优分割^[19-21]。确定的最佳分割尺度因子:分割尺度 100,颜色因子 0.7,紧凑度 0.5,各波段的权重均设置为 1。

1.3.2 J-M 距离可分离性特征分析 结合典型地物的地表特征,通过 J-M(Jeffries-Matudita)距离变量,获取各类在各特征上的 J-M 距离可分离性矩阵,选择与其他地物距离最大,区分性最强的特征进行组合,构建描述某类地物的最优特征空间^[22-24]。J-M 距离法的取值范围是[0,2],J-M 距离越大,说明 2 类在特征的可分性越强。其中:0 表示 2 种类别在某个特征上完全混淆;2 表示 2 种类别在某个特

征上能够完全分开,通常认为 J-M 距离大于 1.8 的类别分离性较强,而小于 1 的类别可分性较差,可进行合并处理。计算公式为:

$$J = 2(1 - e^{-B})$$

$$B = \frac{1}{8} (m_1 - m_2)^2 \frac{2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{2\sigma_1\sigma_2} \right)$$

式中: B 表示 c_1 和 c_2 基于 f 特征的巴氏距离; m_1 和 m_2 表示 c_1 和 c_2 基于 f 特征的均值; σ_1 和 σ_2 表示 c_1 和 c_2 基于 f 特征的标准差。

1.3.3 面向对象多层次分类提取及精度评价 以分割后的影像为基础,综合考虑影像对象特征组合,利用决策树的模糊分类方式,结合专家知识,确定各特征规则的隶属度函数和参数,形成典型地物提取的规则集,识别生产建设项目扰动图斑。针对点型和线型生产建设项目的不同特点,对比分析 5 种融合算法的分类效果,以外业实地调查和专家目视解译结果为真值,通过单变量统计法分别从数量和面积方面对扰动图斑提取结果进行精度评价。其中,点型生产建设项目扰动图斑的精度评价指标为:

$$Q_n = Q_{r,n} / Q_{tot,n}$$

式中: Q_n 为点型生产建设项目扰动图斑数量提取正确率; $Q_{r,n}$ 为点型生产建设项目正确图斑数量; $Q_{tot,n}$ 为点型生产建设项目提取图斑总数量。

$$Q_a = Q_{r,a} / Q_{tot,a}$$

式中: Q_a 为点型生产建设项目扰动图斑面积提取正确率; $Q_{r,a}$ 为点型生产建设项目正确图斑总面积(m^2); $Q_{tot,a}$ 为点型生产建设项目提取图斑总面积(m^2)。

$$Q_l=Q_{l_a}/Q_{tot_a}$$

式中: Q_l 为线型生产建设项目图斑长度提取精度; Q_{l_a} 为线型生产建设项目图斑的正确提取的长度(m); Q_{tot_a} 为线型生产建设项目图斑的总长度(m)。

2 结果与分析

2.1 基于视觉结果的定性分析

不同生产建设项目由于建设特点不同、施工工艺不同,项目特点差异很大。即使同一类型生产建设项目,由于施工时序不同,在遥感影像上所体现的特征差异也很大。水土保持重点关注的对象是生产建设项目施工建设过程对地表造成的扰动^[25]。生产建设项目扰动地块具有组合结构的特征,主要包含裸露地表和在建建筑用地混合地表区、煤炭覆盖区 2 个类别

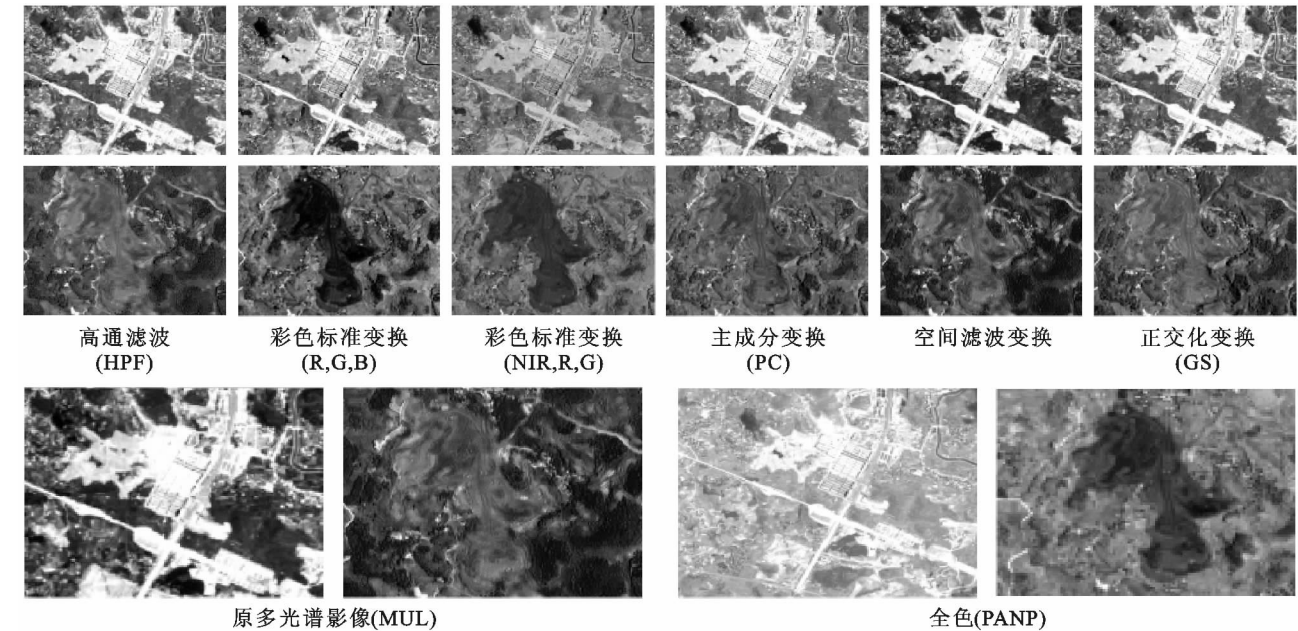


图 1 裸露地表和在建建筑用地混合地表区、煤炭覆盖区融合影像细节对比

2.2 基于数理统计的特征

2.2.1 光谱分析 光谱角反映原始多光谱影像与融合后影像光谱特征的相差程度,值越小,二者差异越小,光谱保真度越高,继承性越好。由表 2 可知,PC 变换在 R、G、B 波段上光谱角均较小,最大程度地保持原多光谱影像的光谱特性;Brovey 假彩色变换和 Ehlers 变换光谱角为 0.2,保真度最低;Hpf 变换在 R 波段上的保真度最高,但在 G、B 波段上的保真度较低。对于 NIR 波段而言,Hpf、Ehlers、PC 和 GS 变换光谱角和光谱偏差均较小,Brovey 假彩色变换值大,偏差幅度达 50%以上。光谱相关系数反映影像光谱信息的继承性,相关系数越高说明光谱扭曲程度小,对原始影像光谱信息改变小。HPF、PC 和 GS 融合算法在各波段上的相关系数均大于 0.9,说明该算法光谱继承特征优于其他算法。其中,NIR 波段对于裸露地表和建筑物提取具有重要意义,除 Brovey 变换外,其他算法的相关系数均大于 0.90,PC

的覆盖类型。通过分析 5 种不同的融合方法融合后的典型的生产建设项目扰动图斑的区域(图 1)可知,影像的空间分辨率、清晰度均有很大的提高,边界变得更加清晰,目视容易判断。其中,Brovey 变换改变了多光谱影像的色调,光谱信息损失比较大,在建建筑物和裸露地表色调和纹理比较清晰,但煤炭覆盖区与未耕作的耕地易混淆;Ehlers 融合后的影像,所有扰动图斑的特征地物纹理均有些模糊,边缘清晰度低,有明显的晕边现象;HPF 融合影像在色调上有较大的改变,但是煤炭覆盖区出现重影,轮廓和层次感差;PC 和 GS 融合算法影像目视效果好,细节清晰,色调自然,较好的融合了多光谱影像的光谱信息和全色影像的空间信息。

算法的值高达 0.98,表示 PC 融合算法在 NIR 波段上光谱保持性均较好。Brovey 真彩色变换相关系数较低,R、G、B 波段上均不到 0.65,光谱扭曲度较高。平均梯度反映影像的清晰度,值越大表示影像层次越丰富,对比度越大。对于原始影像,各融合算法在不同波段平均梯度值上均有较大幅度的提高,其中 PC 和 GS 变换融合算法的平均梯度增幅均在 35%以上,说明其融合结果的清晰度和对比度提高显著。总体而言,PC 和 GS 变换影像融合算法在生产建设项目扰动图斑信息提取上具有很大的可能性。

2.2.2 纹理分析 选择生产建设项目特征地物裸露地表和在建建筑用地混合区域、煤炭覆盖区 2 种类型分析其二阶矩、熵值 2 个指标。为消除方向参数对纹理特征提取的影响,更好地反映图像的特点,对 0°,45°,90°,135°这 4 个方向的计算结果求平均,距离参数为 3 个像元。二阶矩值小说明影像灰度分布越

均匀,纹理细致。由图 2 可知,与原始多光谱影像相比,各融合算法在生产建设项目扰动图斑的典型地物特征上均有一定的改善,二阶距值均有所下降。其中,裸露地表和在建建筑用地混合区域,除 Brovey 真彩色变换外,其他融合算法二阶距值下降幅度达 55%以上,纹理改善明显;煤炭覆盖区,除 Hpf 和 Ehlers 外,其他算法的改善效率接近 60%。熵值反

映影像所包含的信息量,熵值越大则影像空间细节越丰富。由图 3 可知,HPF 和 Brover 真彩色 2 种融合算法信息熵增幅较少,分别为 37%和 16%,GS 信息量改善最好,高达 64%。综合上述分析的 2 个纹理特征指标,GS、PC 和 Ehlers 算法对纹理具有稳定和显著的改善,其中 GS 在增益效果上更具优势,融合影像信息量最大,纹理最为细致。

表 2 生产建设项目扰动图斑原多光谱影像各波段与融合影像特征

方法	光谱角/(°)				相关系数				平均梯度			
	R	G	B	NIR	R	G	B	NIR	R	G	B	NIR
Hpf	0.13	0.51	0.62	0.13	0.94	0.95	0.95	0.95	107.12	104.02	103.31	152.40
PC	0.11	0.12	0.11	0.15	0.96	0.93	0.90	0.98	124.02	122.03	134.09	151.02
Brovey(R,G,B)	0.21	0.22	0.23		0.61	0.58	0.30		104.50	104.42	103.44	
Brovey(R,G,NIR)	0.28	0.23		0.37	0.84	0.83		0.85	104.00	104.40		104.80
Ehlers	0.25	0.21	0.18	0.13	0.89	0.86	0.89	0.95	103.27	98.24	97.15	100.12
GS	0.21	0.18	0.16	0.14	0.18	0.15	0.13	0.11	124.97	142.55	145.83	148.41

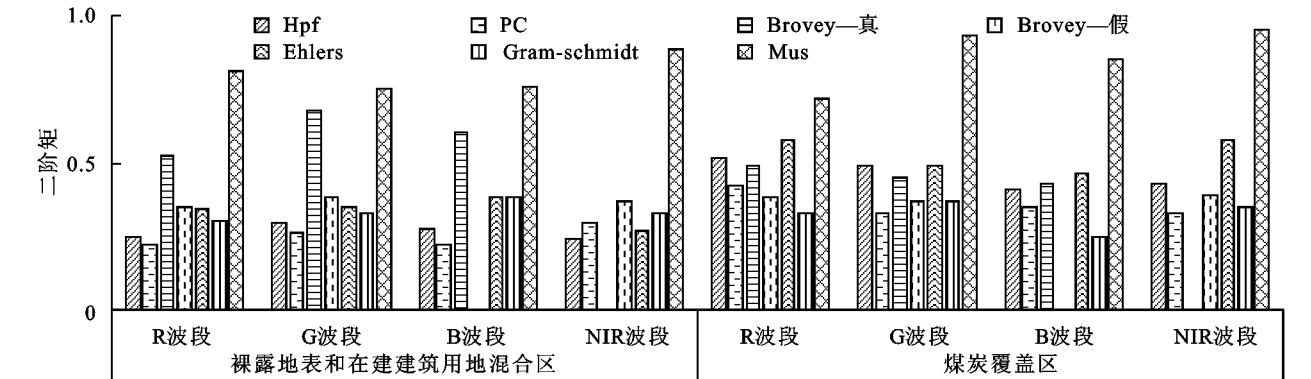


图 2 二阶距指标统计

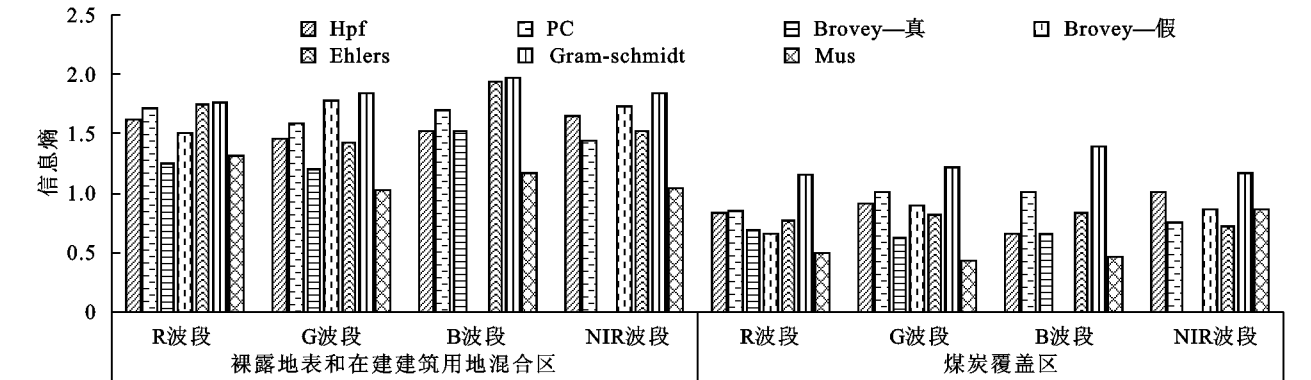


图 3 信息熵指标统计

2.3 扰动图斑多层次模型构建

为了探究各融合算法下在特殊地物信息提取上的应用效果,本研究基于研究区不同的影像结果,利用上述面向对象的方法提取生产建设项目扰动图斑。结合专家目视解译和实地调查的数据,选择生产建设项目特征地物裸露地表和在建建筑用地混合区域、煤炭覆盖区 2 种类型共 56 个分类样本,按照点型和线型分别对提取结果进行精度评价。由表 3 可知,生产建设项目扰动图斑中的煤炭覆盖区所有融合算法的数量提取正确率均为 100%,除 Hpf 变换融合结果外,其他融合算法面积正确率均为 100%,较原始多光谱影像分类精度提高了约

10%。GS 变换融合结果在点型裸露地表和在建建筑用地混合区数量提取正确率和面积正确率最高,分别为 92%和 83%,其次是 Hpf 和 PC 变换,Brovey 变换融合结果正确率低于原始多光谱影像;GS 变换融合结果在线型长度提取正确率也是最高,其次是 Ehlers、PC、Hpf 变换,最小为 Brovey 变换,说明并非所有融合变换算法都能增强影像信息提取的能力。面积精度低的原因主要是由于生产建设项目裸露地表和在建建筑用地混合区扰动图斑边缘多为裸露地面向植被过渡的区域,在一定程度上影响了面积提取的精度。漏提的主要原因是其地表组成比较破碎,部分图

斑没有达到筛选阈值,或者周边地物干扰扰动图斑的连续性,误提的图斑主要是植被覆盖率较低的耕地。综上所述,PC 和 GS 融合算法增强信息,适宜于生产建设项目扰动图斑信息提取。

表 3 生产建设项目扰动图斑分类精度评价

融合数据	裸露地表和在建建筑			煤炭覆盖区	
	用地混合区				
	点型	线型		点型	
	Q_n	Q_a	Q_l	Q_n	Q_a
Mul	0.72	0.81	0.72	1.00	0.90
Hpj	0.73	0.85	0.74	1.00	0.83
PC	0.77	0.89	0.80	1.00	1.00
Brovey(R,G,B)	0.66	0.77	0.53	1.00	1.00
Brovey(R,G,NIR)	0.68	0.79	0.62	1.00	1.00
Ehlers	0.71	0.80	0.78	1.00	1.00
GS	0.83	0.92	0.83	1.00	1.00

3 结论

(1)通过目视分析 5 种不同的融合方法融合后生产建设项目扰动图斑区域,可知 PC 和 GS 融合算法影像目视效果好,细节清晰,色调自然,较好的融合了多光谱影像的光谱信息和全色影像的空间信息。

(2)通过数据统计分析可知 Principle Components 变换最大程度地保持原多光谱影像的光谱特性,GS 变换在增益效果上更具优势,融合影像信息量最大,纹理最为细致。

(3)通过面向对象的方法提取生产建设项目扰动图斑的结果可知,煤炭覆盖区提取正确率高,除 HPF 融合结果外,其他融合算法较原始多光谱影像分类精度提高了约 10%。裸露地表和在建建筑用地混合区在 GS 和 PC 融合算法提取正确率大于 80%。

(4)综合考虑融合图像质量和融合影像分类结果,针对 GF-1 影像,PC 变换和 GS 变换融合效果优于其他融合算法,为天地一体化监管影像大规模的融合应用提供参考具有重要意义。

参考文献:

[1] 李智广,王敬贵.生产建设项目“天地一体化”监管示范总体实施方案[J].中国水土保持,2015(2):14-17.

[2] 王龔,宋立旺,王琦.基于 3S 技术的生产建设项目水土保持监督检查[J].中国人口·资源与环境,2017,27(增刊 1):92-94.

[3] 云影.高分分辨率对地观测系统重大专项首发星:高分一号卫星[J].卫星应用,2013(3):72.

[4] 王华斌,李国元,张本奎,等.资源三号卫星影像融合算法对比分析[J].测绘科学,2015,40(1):47-51.

[5] 孙攀,董玉森,陈伟涛,等.高分二号卫星影像融合及质量评价[J].国土资源遥感,2016,28(4):108-113.

[6] 赵英时.遥感应用分析原理与方法[M].北京:科学出版社,2013.

[7] 李爽.融合方法及空间分辨率比率对遥感影像融合结果

影响的研究[D].武汉:武汉大学,2010.

[8] 周嘉男,艾海滨,张力.高分一号遥感影像融合方法比较研究[J].地理空间信息,2016(2):47-49.

[9] 林雪.面向林地信息的高分一号遥感影像融合与分类研究[D].北京:北京林业大学,2016.

[10] 王晓绵,姜芸.高分一号遥感卫星影像融合及质量评价方法研究[J].测绘与空间地理信息,2015,38(8):178-179,182.

[11] 郭会敏,洪运富,李营,等.基于高分一号卫星影像的多种融合方法比较[J].地理与地理信息科学,2015,31(1):23-26,40.

[12] 陈发军,陈坤浩,谢永贵,等.黔西北喀斯特生态系统中主要植物物候格局[J].山地学报,2010,28(6):57-65.

[13] 李存军,刘良云,王纪华,等.2 种高保真遥感影像融合方法比较[J].中国图象图形学报,2004,9(11):1376-85.

[14] 胡曼,彭道黎.面向林地分类的 GF-2 影像融合算法评价[J].浙江农林大学学报,2017,34(2):340-348.

[15] 郑中,祁元,张金龙.基于光谱角和光谱距离评价指标的遥感影像融合方法比较研究:以 QuickBird 数据为例[J].遥感技术与应用,2013,28(3):437-443.

[16] 李霖,余梦媛,罗恒. ZY-3 卫星全色与多光谱影像融合方法比较[J].农业工程学报,2014,30(16):157-165.

[17] Li S, Li Z L, Gong J Y. Multivariate statistical analysis of measures for assessing the quality of image fusion[J]. International Journal of Image & Data Fusion. 2010,1(1): 47-66.

[18] 王乐.遥感影像融合及其质量评价[D].长春:吉林大学,2012.

[19] 杨亦宁.基于优度准则的遥感影像最优分割参数组合选择研究[D].兰州:兰州大学,2013.

[20] 黄慧萍.面向对象影像分析中的尺度问题研究[D].北京:中国科学院遥感应用研究所,2003.

[21] 于文婧,刘晓娜,孙丹峰,等.基于 HJ-CCD 数据和决策树法的干旱半干旱灌区土地利用分类[J].农业工程学报,2016,32(2):212-219.

[22] 马娜,胡云锋,庄大方,等.基于最佳波段指数和 J-M 距离可分性的高光谱数据最佳波段组合选取研究:以环境小卫星高光谱数据在东莞市的应用为例[J].遥感技术与应用,2010,25(3):358-365.

[23] Nussbaum S, Niemyer I, Canty M J. SEaTH - A new tool for automated feature extraction in the context of object-based image analysis[C]//. Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro (PUC-Rio). International Conference on Object-Based Image Analysis, Brazilian: Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro (PUC-Rio), 2012: 434-439.

[24] 朱永森,曾永年,张猛.基于 HJ 卫星数据与面向对象分类的土地利用/覆盖信息提取[J].农业工程学报,2017,33(14):258-265.

[25] 姜德文,郭索彦,赵永军,等.生产建设项目水土保持准入条件通用条款[J].中国水土保持科学,2010,8(3):43-54.

施用腐殖酸对煤矸石养分释放的影响

余健¹, 周光¹, 汪梦甜¹, 房莉¹, 朱凯群¹, 解进飞¹, 俞元春², 徐占军³

(1. 安徽师范大学国土资源与旅游学院, 安徽省自然灾害过程与防控省级实验室, 安徽 芜湖 241003;

2. 南京林业大学生物与环境学院, 南京 210037; 3. 山西农业大学资源与环境学院, 山西 太谷 030801)

摘要: 煤矸石是一种潜在的资源, 在现有技术条件下无法快速处理的大量煤矸石裸露堆放造成占地及生态环境问题, 已成为矿区生态环境治理关注的热点。煤矸石山的植被恢复是其原位保存的最有效办法。腐殖酸作为腐殖质的主要组成成分对改善不利的植物生长环境具有积极作用。为探讨腐殖酸对煤矸石养分释放的影响, 采用室内培养试验方法, 研究了添加不同浓度腐殖酸及不同培养时间下煤矸石的 pH、电导率 (EC) 变化及氮、磷、钾速效养分的释放特征。结果表明: 相对于不添加腐殖酸处理 (CK), 添加腐殖酸的煤矸石 pH 明显升高, 最高达到 7.77, 而 EC 急剧下降, 平均为 126.13 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 比 CK 的平均 EC 下降 77.81%; 添加腐殖酸的煤矸石速效磷和碱解氮均大幅度增加, 速效磷含量平均为 CK 的 2.33 倍, 碱解氮含量最高达到 CK 的 1.94 倍; 速效钾含量相对于 CK 也有一定增加; 添加的腐殖酸浓度越大, 促进煤矸石养分释放效果越好; 在培养期间, 各项研究指标值总体表现“V”和“N”形, 在后期逐渐呈现稳定作用趋势。煤矸石具有一定养分供给潜力, 腐殖酸添加到煤矸石中可以提高其植物养分可获得性。

关键词: 腐殖酸; 煤矸石; 速效养分; 生态修复; 有机酸

中图分类号: TD926

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0364-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.03.055

Effects of Humic Acid on Nutrient Release from Coal Gangue

YU Jian¹, ZHOU Guang¹, WANG Mengtian¹, FANG Li¹,

ZHU Kaiqun¹, XIE Jinfei¹, YU Yuanchun², XU Zhanjun³

(1. College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Anhui Key Laboratory of Natural

Disaster Process and Prevention, Wuhu, Anhui 241003; 2. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry

University, Nanjing 210037; 3. College of Resource and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801)

Abstract: Coal gangue is a potential resource. A large number of coal gangues not able to be disposed quickly due to the existing technical conditions occupied land and caused ecological environment problem, which has become a hot issue of ecological environment conservation in coal mining area. The vegetation restoration of coal gangue mountain is the best way for in-situ conservation and environmental protection. Humic acid (HA), as the main component of humus, has a positive effect on improving the unfavorable plant growth environment. To discuss the effects of HA on nutrient release from coal gangue, an experiment of incubator at constant temperature was conducted to study the characteristics of the pH and electrical conductivity (EC) of coal gangue and the release of alkali hydrolysable nitrogen (AN), available phosphorus (AP) and available potassium (AK) from gangues under different humic acid concentrations and incubation durations. Compared with treatment without HA (CK), the pH of coal gangue with HA increased significantly, the highest value reached 7.77, while the EC value decreased sharply, with an average of 126.13 $\mu\text{S}/\text{cm}$, dropped by 77.81% compared with the average EC value of CK. All the AP and AN of coal gangue added with HA increased greatly. The content of AP was 2.33 times that of CK, and the content of AN reached 1.94 times that of CK. The same is true of AK. The greater the concentration of humic acid added, the better the effect of promoting the release of nutrients from coal gangue. During the incubation, all the indicators for study presented a change characterized as “V” or “N”, and in the later stage, the change gradually showed trend of stability. Coal gangue has a certain potential for nutrient supply, therefore, adding humic acid to coal gangue can improve the availability of plant nutrients.

Keywords: humic acid; coal gangue; available nutrient; ecological restoration; organic acid

收稿日期: 2017-12-25

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41101529, 31670615); 安徽高校自然科学研究项目 (KJ2017A308); 安徽师范大学博士启动基金项目 (2016XJJ107); 山西省自然科学基金项目 (2015021125)

第一作者: 余健 (1979—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土地复垦与生态重建研究。E-mail: yujian2033@126.com

通信作者: 余健 (1979—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土地复垦与生态重建研究。E-mail: yujian2033@126.com

煤矸石是夹在煤层中的岩石或采煤和洗煤过程中排出的多种岩石的混合物^[1-2]。我国煤矸石产量大约是原煤产量的15%~20%,2012年的煤矸石排放量已经达到50多亿t,且每年以数亿吨的速度增加^[3-4]。不同煤矿区采煤排出的煤矸石理化性质差异较大,如含硫、重金属及硅铝量等^[5]。煤矸石含碳量一般在10%,氮磷钾养分的全量较高或部分养分全量较高,但有效养分相对较低^[6]。目前我国的煤矸石主要用作工程填料、建材原料、燃烧发电等,也有一些新的利用方向,如土壤调理剂、生物肥料载体、复混肥配料、吸附剂等^[7]。但由于成本及技术不成熟等问题,煤矸石的资源化利用量不大,大部分煤矸石仍堆积在地表形成煤矸石山,不仅造成土地资源浪费,也带来一系列生态环境问题^[8]。因此将煤矸石作为一种潜在可利用资源,在堆放点原位保存,并恢复其上植被,防控其生态环境影响,具有重要意义。

腐殖酸是植物凋落物分解合成腐殖质的主要组成物质,是一种大分子有机酸。已有研究^[9]表明,煤矸石也含有一定的腐殖酸成分。据调研及文献资料显示^[10],煤矸石山局部地区可以生长植物,也为腐殖酸提供了来源。在土壤上研究表明,腐殖酸富含众多活跃官能团^[11-12],对改良土壤、调查土壤pH、促进土壤团粒结构形成、提高土壤供肥能力、修复污染土壤等方面均具有重要作用^[13-14]。对小分子有机酸的研究结果显示,其对土壤养分具有活化作用^[15]。然而,对腐殖酸释放土壤养分这方面的研究不多^[16],腐殖酸对煤矸石性质及养分释放影响方面的研究目前尚未见报道。因此,本文以淮南煤矿区低硫煤矸石为研究对象进行室内模拟培养试验,分析腐殖酸作用下煤矸石pH、电导率变化及氮、磷、钾有效养分释放特征,探讨腐殖酸对煤矸石pH、电导率及氮、磷、钾有效养分释放的影响机制,为科学解释植物对煤矸石环境的适应性机制和腐殖酸及其肥料在煤矸石山植物定植、环境改善方面的应用提供一定理论依据。

1 材料与方法

1.1 培养试验

供试煤矸石样品取自淮南市潘集矿区未覆土的煤矸石山,该煤矸石在取样前被多次搬运供销售,从运出矿井到现在经历年限约20年,为多年堆放的矸石混合物。煤矸石pH为6.72,电导率为416.67 $\mu\text{S}/\text{cm}$,全氮1.7 g/kg,全钾101.84 g/kg,全磷0.3 g/kg,碱解氮4.90 mg/kg,速效钾175.07 mg/kg,速效磷0.66 mg/kg。为消除矸石风化物表面已经风化颗粒养分和外源养分对试验结果的影响,从采回的样品中挑取大块矸石,经人工破碎后过2 mm尼龙筛煤矸石颗粒作为供试样品。试验所用的腐殖酸采用分析纯试剂。参考植物根际有机酸的浓度范围,设置0(对照CK),2,5,10,

15,20 mmol/L 6种腐殖酸浓度。

培养试验于2017年3月15日至7月25日。称取200 g的经上述处理后的煤矸石样品放于500 mL的烧杯中,以取样矸石山附近的壤质土的田间持水量为参照,加入供试腐殖酸溶液至煤矸石含水量为参照田间持水量的80%(CK用等量的去离子水来代替)。采用保鲜膜封口,防止水分过度蒸发,保证煤矸石湿度,转入25℃恒温箱中培养。每个水平设置3次重复。培养时间分为5个阶段进行分段采样,分别为7,30,60,90,120 d(培养总时间为120 d,为1个植物生长季)。分段采集样品按国家标准方法测定样品的pH、电导率(EC)的数值以及碱解氮(AN)、速效钾(AK)和速效磷(AP)等的含量。

1.2 数据处理与分析

所得试验数据采用SPSS 22.0和Excel 2007软件进行数据处理和分析,利用Origin 8.5软件进行绘图制作。

2 结果与分析

2.1 施用腐殖酸后煤矸石pH和电导率的变化

2.1.1 煤矸石pH差异及变化 培养期间,煤矸石的pH均有所升高,添加腐殖酸处理的pH(7.70)均比不添加腐殖酸处理(CK,0 mmol/L)的pH(7.17)高。培养7,30 d,煤矸石的pH均表现随着腐殖酸浓度的升高而降低;而进一步培养到60,90,120 d,煤矸石的pH随腐殖酸浓度的增加,未表现明显差异。在整个120 d的培养过程中,样品的pH总体表现为在前30 d内持续下降,第30天到第90天为持续上升,第90天到第120天趋于稳定,大致呈“V”形(图1)。

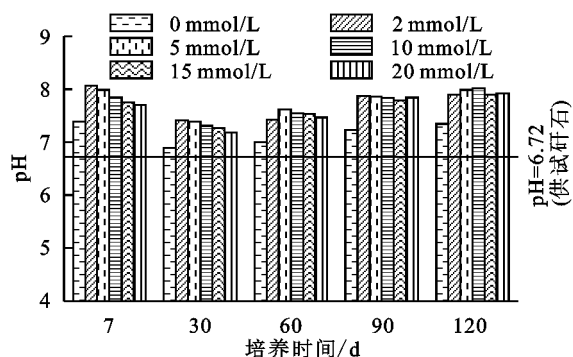


图1 腐殖酸对煤矸石pH的影响

2.1.2 煤矸石电导率差异及变化 供试煤矸石的初始电导率(EC)为416.67 $\mu\text{S}/\text{cm}$,培养期间,CK的EC平均值为568.40 $\mu\text{S}/\text{cm}$,均高于供试煤矸石的初始值。添加腐殖酸处理的EC均下降较大,平均值为126.13 $\mu\text{S}/\text{cm}$,比供试煤矸石初始值低69.73%,比CK的平均EC值低77.81%。培养7 d和培养第90~120天2个阶段,添加腐殖酸煤矸石的EC均随腐殖酸浓度的增大而增大;而培养30,60,90 d 3个阶段,添加腐殖酸煤矸石的EC均随腐殖酸的浓度增大而下降。在整个培养期间,

包括 CK 在内的所有处理的 EC 均表现在前 30 d 逐渐升高,第 30 天到第 90 天逐渐下降,第 90 天到第 120 天呈微弱升高的特征,呈“N”形(图 2)。

煤矸石在水分浸润下会释放一定盐基离子,导致其 pH 和 EC 值升高,这符合土壤盐基离子浓度越大 pH 和 EC 越大的一般规律^[17]。而煤矸石加入腐殖酸后,释放出来的盐基离子与腐殖酸各种官能团发生络合反应,形成一种腐殖酸—腐殖酸盐缓冲体系^[18],进而降低了其导电性,而 pH 仅决定于溶液中的 H^+ 浓度,因此表现为 EC 降低而 pH 升高的特征。煤矸石的碳质泥岩、砂岩的缝隙中含有大量的碳酸盐胶结物质,其在水解后也导致 pH 升高^[19],腐殖酸添加会加速消耗 H^+ ,从而导致腐殖酸处理水平下的矸石 pH 上升^[20],刘宇锋等^[21]、Ifansyah 等^[22]也在土壤研究中也得到相似的结论。

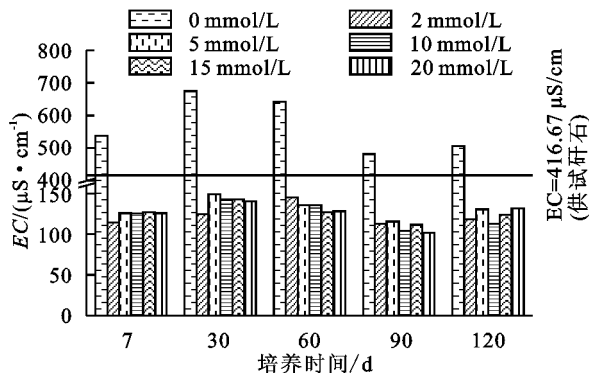


图 2 腐殖酸对煤矸石电导率的影响

2.2 施用腐殖酸后煤矸石速效养分释放差异及变化

2.2.1 煤矸石碱解氮释放量差异及变化

供试煤矸石碱解氮的初始含量为 4.90 mg/kg。由图 3 可知,培养期间,各处理的碱解氮含量与初始含量相比均有明显升高,其中 CK 的碱解氮释放量平均为 26.87 mg/kg,比供试煤矸石初始含量高 448.37%;添加腐殖酸处理的碱解氮释放量平均为 24.57 mg/kg,为初始含量的 4.01 倍。总体来看,培养的前 60 d,添加腐殖酸处理的煤矸石碱解氮释放量较 CK 低,而第 60~120 天期间,释放量明显增加,并逐渐超过 CK 的碱解氮释放量,最大值达到 63.00 mg/kg,为供试煤矸石碱解氮初始含量的 11.86 倍,比相应培养阶段的 CK 的碱解氮释放量高 94.26%。而 CK 在培养的前 30 d 碱解氮释放量差异不显著,而第 30~60 天碱解氮释放量大幅度增加,达到 43.93 mg/kg,在培养的第 60~120 天则表现一定下降的特征。在培养的前 60 d,腐殖酸浓度差异并未引起煤矸石碱解氮释放量的明显差异;但在培养第 60~120 天,不同腐殖酸浓度处理下的煤矸石碱解氮释放量差异显著,并表现为碱解氮释放量在一定程度上随腐殖酸浓度的增大而增大的特征。

2.2.2 煤矸石速效钾释放量差异及变化 由图 4 可知,培养的前 90 d,包括 CK 在内的各处理的速效钾释放

量均比供试煤矸石的初始速效钾含量(175.07 mg/kg)小,在培养第 90~120 天,各处理的速效钾释放量才逐渐增大,并超过初始速效钾含量。添加腐殖酸处理仅在培养 60 d 时,其速效钾含量表现明显高于 CK 的特征。在整个培养期间,各处理的速效钾释放量均表现出前期下降,后期增大的“V”形。不同的腐殖酸浓度对煤矸石速效钾释放量的影响差异不显著。

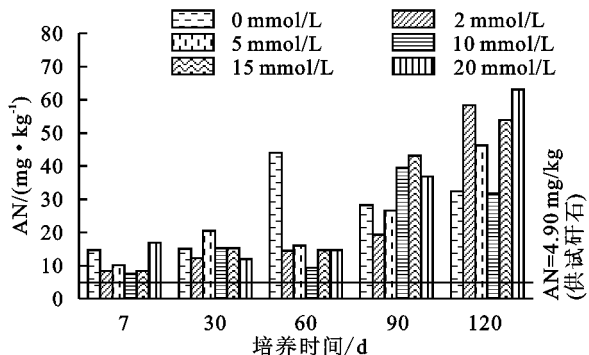


图 3 腐殖酸对煤矸石碱解氮含量的影响

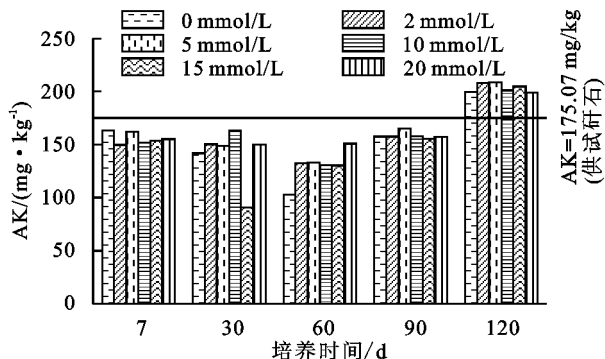


图 4 腐殖酸对煤矸石速效钾含量的影响

2.2.3 煤矸石速效磷释放量差异及变化

供试煤矸石的速效磷初始含量为 0.66 mg/kg。在培养过程中,CK 处理的速效磷含量平均为 0.39 mg/kg,均低于初始含量,而添加腐殖酸的处理的速效磷含量平均为 0.91 mg/kg,为初始含量值的 1.38 倍,是 CK 的 2.33 倍。从 5 次测定结果来看,煤矸石释放速效磷的量在一定程度上表现出随添加腐殖酸浓度的增大而增加的特征。从整个培养过程来看,各处理的速效磷释放量总体表现为前 90 d 内逐渐降低,而第 90~120 天逐渐升高,呈“V”形(图 5)。

上述结果表明,水分浸润对煤矸石氮养分释放具有促进作用,而对磷和钾养分具有一定抑制作用;腐殖酸添加对煤矸石氮、磷、钾的释放具有较强的促进作用,而且在一定浓度范围内,添加的腐殖酸浓度越大,作用的时间越长,越能稳定地促进氮、磷、钾养分的释放。腐殖酸主要通过溶出作用和其官能团对离子的络合、交换、同晶替代等作用,使矸石中的固定态养分释放出并成为有效态养分^[23],其中水浸润溶出的主要是水溶态养分,而腐殖酸参与解离出来的是有机结合态养分,两者均为植物有效性养分。另外腐殖酸本身也是一种微生物可利用碳源,可促进微生物生长并将矿物固定

的氮养分转化为可利用态^[24]。腐殖酸与从煤矸石上解离出来的养分离子发生络合形成稳定络合物,并形成一个络合平衡体系,既提高了养分的可供给性,同时也减少了溶液中可移动养分离子的量,可以促进养分进一步从煤矸石中解离出来^[24]。

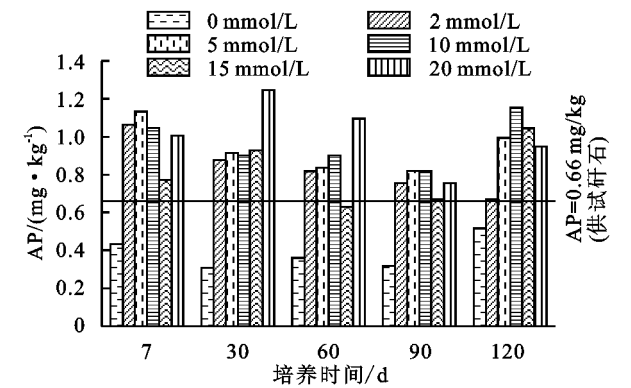


图 5 腐殖酸对煤矸石速效磷含量的影响

从腐殖酸对煤矸石养分释放的作用阶段性变化特征来看,可以初步认为在培养过程的前期主要体现对表面可溶态养分的溶解作用,然后进一步转为对近表面矿物晶格中发生同晶替代和离子交换作用释放养分,同时伴随着微生物生长活动对矸石养分的解吸作用;中期存在一个养分解离和吸附及微生物养分利用的动态平衡过程;后期转为稳定作用。如果在此期间,没有植物及微生物对释放的养分进行吸收利用,腐殖酸对煤矸石养分的释放量可能长期处于某个动态平衡状态。本研究的培养时间为 4 个月,可能培养时间不够久,另外采样分析的次数也不够多,所以中间表现仅根据有限次数分析结果判定,而长期的观测将为更加准确的判定结果提供证据。

2.3 速效养分与 pH、电导率的相关性分析

相对于原供试煤矸石而言,未添加腐殖酸处理 pH 与电导率、碱解氮均成正相关,而与速效磷和速效钾释放量成负相关(图 1~图 5)。添加腐殖酸后,煤矸石的 pH 与电导率之间呈极显著的负相关关系($R=-0.542, p<0.05$);煤矸石 pH 和速效磷、速效钾、速效氮之间都呈极显著的正相关关系($R=0.443, 0.439, 0.283, p<0.05$);煤矸石电导率和速效磷呈极显著的负相关关系($R=-0.718, p<0.05$),与钾也存在一定负相关关系(表 1)。该结果与前人^[25-27]研究结果基本一致,

表明腐殖酸添加可以促进煤矸石中养分及一些盐基离子的释放,进而造成溶液 pH 升高,而释放的盐基离子与腐殖酸发生络合反应形成络合物,降低了导电性,使溶液电导率下降。而对碱解氮、速效磷和速效钾而言,这种络合作用尤以速效磷最为明显,速效磷与其他盐基离子共同参与腐殖酸的竞争络合作用。

表 1 施入腐殖酸煤矸石速效养分与 pH、电导率的相关性

指标	pH	电导率	速效磷	速效钾	碱解氮
pH	1				
电导率	-0.542**	1			
速效磷	0.443**	-0.718**	1		
速效钾	0.439**	-0.169	0.107	1	
碱解氮	0.283**	0.016	-0.161	0.638**	1

注: * 表示相关性达显著性水平 ($p<0.05$); ** 表示相关性达到极显著性水平 ($p<0.01$)。

2.4 腐殖酸影响下煤矸石养分的植物可获得性分析

由表 2 可知,供试煤矸石的部分指标值与郑永红等^[28]、王兴明等^[29]在淮南矿区采集的煤矸石的相应指标不完全一致,这主要与煤矸石的风化程度和供试煤矸石前处理有关。本试验供试材料为大块矸石破碎而来,并非矸石风化后的碎屑,消除了外源因素的影响。根据全国第二次土壤普查养分分级标准,供试煤矸石的全氮处于 2 级水平,全磷处于 5 级水平,全钾为 4 级,碱解氮和速效磷含量均低于 6 级水平,速效钾含量为 2 级水平。表明供试煤矸石具有较高的全氮和全钾养分,而全磷养分较为缺乏;速效养分中,除钾养分外,碱解氮和速效磷均较缺乏。而郑永红等^[28]、王兴明等^[29]采集的样品各指标值基本都比供试煤矸石高;淮南矿区的煤矸石主要含石英、高岭石、白云母等矿物,是富含钾元素的主要原因^[19]。另外该区煤矸石有机碳含量也较高,风化后可为植物生长提供大量有机碳源。因此,总体来看,该矿区的煤矸石具有较高的氮和钾养分的供应潜力。添加腐殖酸后,供试煤矸石处理 pH 有所升高,最大值为 7.95,为中性偏碱水平,对一般植物的生长不会产生大的影响。添加腐殖酸后,在培养后期,碱解氮含量平均为 50.63 mg/kg,达到 5 级水平,比供试煤矸石初始值提高了 1 个等级;速效磷含量平均为 0.91 mg/kg,仍处于 6 级水平以下;速效钾含量平均为 160.75 mg/kg,达到 2 级水平,表明腐殖酸的添加可以提高煤矸石养分的植物可获得性。

表 2 供试煤矸石与其他样品的理化性质比较

统计项目	pH	总有机碳/ (g · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)	速效磷/ (mg · kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg · kg ⁻¹)	全氮/ (mg · kg ⁻¹)	全磷/ (g · kg ⁻¹)	全钾/ (g · kg ⁻¹)	电导率/ (μS · cm ⁻¹)
煤矸石风化物 A ^[19]	9.57	87.4	175.33	6.73		2.62			
新鲜煤矸石 ^[19]	8.83	65.5	193.46	5.53		4.20			
附近农田 ^[19]	7.99	23.6	109.14	4.19		2.35			
煤矸石风化物 B ^[20]	8.62	32.3				2.75	1.38	4.28	426.90
供试样品	6.72		175.07	0.66	4.9	1.70	0.30	10.18	416.67

注:表中煤矸石风化物 A、新鲜煤矸石和附近农田的总有机碳均采用岛津 SSM-5000 A 有机碳固体分析仪测定;煤矸石风化物 B 和供试样品的总有机碳采用重铬酸钾外加热法测定;其他指标分析方法一致;表中未填数据为未测指标。

3 结 论

在水分浸润下,煤矸石因释放了一定养分和盐基离子而导致 pH(中性偏碱性水平)和电导率均升高。水分浸润可以促进氮养分释放,但对磷和钾养分的释放具有抑制作用;添加腐殖酸可以进一步促进煤矸石养分及盐基离子的释放,对氮、磷、钾养分释放均具有积极作用,煤矸石 pH 进一步升高,而腐殖酸与盐基离子形成络合物降低了缓冲液导电性。添加腐殖酸浓度越大,上述效果越明显;添加腐殖酸后,煤矸石短期内主要表现可溶性养分进入溶液,随着时间的延长,逐渐发生交换作用释放交换态养分,并形成一个腐殖酸及其盐基离子的动态的络合平衡体系,最后达到一个相对稳定的状态;研究区煤矸石的有机碳、全氮和全钾含量、速效磷含量均较高,具有较高的供给养分的潜力,腐殖酸的添加可以提高煤矸石养分的植物可获得性。

参考文献:

- [1] 严家平,陈孝杨,蔡毅,等. 不同风化年限的淮南矿区煤矸石理化性质变化规律[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 168-174.
- [2] 蔡毅,严家平,陈孝杨,等. 表生作用下煤矸石风化特征研究:以淮南矿区为例[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(5): 937-943.
- [3] 郭彦霞,张圆圆,程芳琴. 煤矸石综合利用的产业化及其展望[J]. 化工学报, 2014, 65(7): 2443-2453.
- [4] 彭富昌,王青松. 我国煤矸石的综合利用研究进展[J]. 能源环境保护, 2016, 30(1): 17-20.
- [5] 赵瑞芬,张强,程滨,等. 不同类型煤矸石养分状况对比研究[J]. 山西农业科学, 2009, 37(8): 35-37.
- [6] 吴汉福,田玲,翁贵英,等. 煤矸石山优势植物对重金属吸收及富集特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 317-322.
- [7] 牛玉亭. 淮南矿区煤矸石资源化利用实践[J]. 中国资源综合利用, 2017, 35(8): 41-42, 46.
- [8] 徐良骥,黄臻,章如芹,等. 煤矸石充填复垦地理化特性与重金属分布特征[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 211-219.
- [9] 赵丽,田云飞,王世东,等. 煤矸石中溶解性有机质(DOM)溶出的动力学变化[J]. 煤炭学报, 2017, 42(9): 2455-2461.
- [10] 王晓春,蔡体久,谷金锋. 鸡西煤矿矸石山植被自然恢复规律及其环境解释[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3744-3751.
- [11] Peña A, Mingorance M D, Guzmán-Carrizosa I, et al. Improving the mining soil quality for a vegetation cover after addition of sewage sludges: Inorganic ions and low-molecular-weight organic acids in the soil solution [J]. Journal of Environmental Management, 2015, 150: 216-225.
- [12] Dorado J, Almendros G, González-Vila F J. Response of humic acid structure to soil tillage management as revealed by analytical pyrolysis [J]. Journal of Analytical & Applied Pyrolysis, 2016, 117: 56-63.
- [13] Ciarkowska K, Solec-Podwika K, Filipek-Mazur B, et al. Comparative effects of lignite-derived humic acids and FYM on soil properties and vegetable yield [J]. Geoderma, 2017, 303: 85-92.
- [14] 郑东方,许嘉阳,许自成,等. 钾肥和腐殖酸互作对烤烟有机钾盐指数的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 637-645.
- [15] Waithaisong K, Robin A, Martin A, et al. Quantification of organic P and low-molecular-weight organic acids in ferralsol soil extracts by ion chromatography [J]. Geoderma, 2015, S257/258: 94-101.
- [16] 张水勤,袁亮,林治安,等. 腐殖酸促进植物生长的机理研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 1065-1076.
- [17] 张继舟,袁磊,马献发. 腐植酸对设施土壤的养分、盐分及番茄产量和品质的影响研究[J]. 腐植酸, 2008(3): 19-22.
- [18] 陈静,黄占斌. 腐植酸在土壤修复中的作用[J]. 腐植酸, 2014(4): 30-34.
- [19] 程功林,陈永春. 淮南矿区煤矸石资源化利用实践[J]. 能源环境保护, 2009, 23(4): 61-64.
- [20] 王斌. 腐植酸对棉田土壤磷素有效性影响研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2007.
- [21] 刘宇锋,罗佳,苏天明,等. 外源腐殖酸对栽培基质性状和辣椒生长发育的影响[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(3): 647-655.
- [22] Ifansyah H. Soil pH and solubility of aluminum, iron, and phosphorus in ultisols: The roles of humic acid [J]. Jurnal Tanah Tropika, 2013, 18(3): 203-208.
- [23] 王静婷,姚岑,李福春,等. 草酸和酒石酸促进花岗岩中钾释放的实验研究[J]. 土壤通报, 2011, 42(2): 320-324.
- [24] 杨小燕. 外源有机酸对黑土土壤磷形态及有效性的影响[D]. 长春:东北林业大学, 2016.
- [25] 曹丽花,刘合满,普塔拉. 西藏主要农作区土壤 pH 和电导率分布特征及其相关性分析[J]. 西南农业学报, 2016, 29(5): 1189-1192.
- [26] 林万树. 古田县果园土壤氮磷钾状况及其与有机质和 pH 的相关性[J]. 上海农业学报, 2015, 31(1): 44-48.
- [27] 张玉. 巴丹吉林沙漠南北边缘植被群落特征与土壤理化性质研究[D]. 西安:陕西师范大学, 2014.
- [28] 郑永红,张治国,胡友彪,等. 淮南矿区煤矸石风化物特性及有机碳分布特征[J]. 水土保持通报, 2014, 34(5): 18-24.
- [29] 王兴明,王运敏,储昭霞,等. 煤矸石对铜尾矿中重金属(Zn, Pb, Cd, Cr 和 Cu)形态及生物有效性的影响[J]. 煤炭学报, 2017, 42(10): 2688-2697.