

有机肥替代化肥氮素对麦田土壤碳氮迁移特征的影响

杨修一, 耿计彪, 于起庆, 闫早发, 李慧, 崔园超, 杨皓

(山东省水土保持与环境保育重点实验室, 临沂大学资源环境学院, 临沂大学农林科学学院, 山东 临沂 276000)

摘要: 利用小麦田间试验, 设置控释尿素(CRU)、有机肥(OF)替代 30%, 50%, 70% 控释尿素氮量处理, 并以普通尿素(Urea)为对照, 研究等氮条件下有机肥替代不同比例化肥氮素对土壤碳氮迁移特征及小麦产量的影响。结果表明: 有机肥处理小麦总生物量较 Urea 显著增加 13.83%~17.57%, 籽粒产量增加 1.6%~10.5%, 随有机肥替代化肥氮素比例增加, 籽粒增产效应降低, 70% OF 与 Urea 无显著差异, 但显著低于 CRU 处理。CRU、30% OF 和 50% OF 处理氮素农学效率较 Urea 显著提高 90.2%~124.4%, 70% OF 与 Urea 相比差异不显著。有机肥比例增加, 土壤总碳含量呈上升趋势, 且高于 CRU 和 Urea; 全氮含量大致呈下降趋势, 整个生育期先增加后降低, 30% OF 自灌浆期至成熟期含量高于其他施肥处理。随土层深度增加, 硝态氮和铵态氮含量减少, 有机肥比例增加, 各层土壤硝态氮减少, 铵态氮增加(尤以返青期最为显著); 整个生育期土壤无机氮呈下降趋势, 但与 Urea 相比, 有机肥处理的硝态氮主要集中在 0—40 cm 土层, 且 0—100 cm 土壤铵态氮含量高于 Urea 和 CRU(苗期除外)。因此, 用 30%~50% 有机肥替代化肥氮素, 配合控释尿素施用, 可显著增加土壤总碳和铵态氮含量, 减少 60—100 cm 土壤硝态氮淋溶, 提高小麦氮素利用率和籽粒产量。

关键词: 有机肥; 控释尿素; 小麦; 产量; 土壤碳素; 土壤氮素

中图分类号: S158.3; S512.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)05-0230-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.05.034

Effects of Organic Fertilizer Replacing Nitrogen of Chemical Fertilizer on Transport Characteristics of Soil Carbon and Nitrogen in Wheat Field

YANG Xiuyi, GENG Jibiao, YÜ Qiqing, YAN Zaofa, LI Hui, CUI Yuanchao, YANG Hao

(Shandong Provincial Key Laboratory of Water and Soil Conservation and Environmental Protection, College of Resources and Environment, College of Agricultural and Forestry Science, Linyi University, Linyi, Shandong 276000)

Abstract: A field experiment was conducted to investigate the effects of organic fertilizer replacing nitrogen of chemical fertilizer on transporting characteristics of soil carbon/nitrogen and wheat yield. The treatments included controlled release urea (CRU), organic fertilizer (OF) replacing 30%, 50% and 70% nitrogen dosage of controlled release urea, with the common urea (Urea) as the control. The results showed that the total biomass of organic fertilizer treatments were significantly increased by 13.83% ~ 17.57%, the grain yield increased by 1.6% ~ 10.5% compared with Urea. With the increase of replacing proportions of organic fertilizer, the increase effect on yield was reduced, and no significant difference was observed between 70% OF and Urea, but they were still significantly lower than the CRU treatment. The agronomic use efficiencies of CRU, 30% OF and 50% OF were significantly improved by 90.2% ~ 124.4% compared with Urea. But there was no significant difference between 70% OF and Urea. The nitrogen partial productivity among organic fertilizer treatments and CRU showed no significant difference. With the increase of replacing proportion of organic fertilizer, the soil total carbon contents showed an upward trend, which was higher than CRU and Urea. However, the total nitrogen contents generally showed a downward trend with the increase of organic fertilizer. During the whole growth period, total nitrogen contents increased from sowing to regreening stage and then decreased. The total nitrogen contents of 30% OF were higher than those in other nitrogen fertilization treatments from grouting stage to maturity stage. With the increase of soil depth, the contents of nitrate nitrogen and ammonium nitrogen decreased. With the increased proportion of organic fertilizer, the nitrate

收稿日期: 2019-04-08

资助项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2018PD001); 中国博士后科学基金项目(2017M622120); 山东省水土保持与环境保育重点实验室开放基金项目(STKF201606)

第一作者: 杨修一(1992—), 男, 博士, 讲师, 主要从事新型肥料研制与应用研究。E-mail: woshiyangxiuyi@163.com

通信作者: 耿计彪(1988—), 男, 博士, 讲师, 主要从事土壤养分管理研究。E-mail: gengjibiao@126.com

nitrogen contents decreased, but ammonium nitrogen increased in each layer of soil (especially in the regreening period). Inorganic nitrogen contents in soil showed a declining trend during the whole growth period. However, compared with Urea, the nitrate nitrogen treated with organic fertilizer was mainly concentrated in the 0—40 cm soil layer, and the contents of ammonium nitrogen in 0—100 cm soil was higher than Urea and CRU (except seedling stage). Therefore, the application of 30%~50% organic fertilizer replacing nitrogen of chemical fertilizer, combined with controlled release urea, could significantly increase the contents of soil total carbon and ammonium nitrogen, reduce the nitrate nitrogen leaching in 60—100 cm soil, and improve the nitrogen use efficiency and grain yield of wheat.

Keywords: organic fertilizer; controlled release urea; wheat; yield; soil carbon; soil nitrogen

肥料是保障粮食安全和质量的重要战略物资,是保持地力、实现农业可持续发展的物质基础^[1]。随化肥用量增加,肥料增产效应降低,氮肥利用率仅为 29.1%~39.0%^[2];且氮肥的过量施用导致了土壤酸化、有机质含量降低和理化性状恶化,氨挥发和硝态氮淋溶也造成了生态环境问题^[3-4]。为此,国家农业部提出了《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》目标,要求示范推广控释肥等新型肥料,合理利用有机养分资源,有机无机相结合^[5]。因此,用有机氮源部分替代化肥氮素,是减少化肥用量,提高养分利用率,增加作物产量的重要技术手段,也是实现宏观控制化肥氮素减量施用的重要途径。

土壤碳素是肥力的重要物质基础,在维持土壤结构、保持土壤水分和养分供应等方面具有重要作用^[6]。而硝态氮和铵态氮是植物体能够吸收的主要氮素形态,也是保证作物正常生长和产量的先决条件^[7]。不合理或过量施用氮肥,易造成土壤碳氮比例失调,作物产量下降。有研究^[8]表明,控释尿素可持续提供无机氮素,满足冬小麦中后期生长需求,促进植株对氮素的吸收,避免追肥用工问题,显著增加籽粒产量。有机肥含大量有益菌和供作物所需微量元素,均衡土壤养分,释放土壤固定态的元素^[9]。采用有机肥氮替代部分化肥氮,增强了土壤微生物对化肥氮素的固持率,降低了土壤矿质态氮含量^[10],改善小麦根系对营养元素的吸收,抑制根系膜脂过氧化作用^[11],增加植株对氮的吸收累积和向籽粒的转运^[12],进而提高小麦籽粒产量和品质。但是有机肥分解慢、肥效迟,对当季作物增产效应并不明显。因此,为弥补有机肥前期无机态养分供应不足、无机氮肥肥效短的缺点,本试验以有机肥替代不同比例控释尿素,研究等氮条件下有机肥对土壤碳氮时空变化和小麦产量的影响,为有机肥的合理利用提供科学依据,为减少氮素损失、培肥土壤提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验地选在山东省临沂市牛家小河村(35°07'04"N,

118°16'50"E),耕层土壤含黏粒 17.6%,砂粒 15.8%,粉粒 66.6%,为粉砂质黏壤土。0—20 cm 土壤硝态氮、铵态氮、有效磷和速效钾含量分别为 68.42,39.47,34.98,155.87 mg/kg,全氮和有机质含量为 0.88,12.5 g/kg,总碳含量为 1.01%,pH 为 6.32。

供试肥料包括木薯渣有机肥(金沂蒙集团有限公司提供,主要原料为木薯制酒精副产的糟泥,含 N—P₂O₅—K₂O 为 2.5—1.2—2.1,有机质含量为 47.7%,pH 为 6.8);树脂包膜尿素(CRU,含 N 42%,静水释放期 4 个月);大颗粒尿素(含 N 46%);过磷酸钙(含 P₂O₅ 16%);氯化钾(含 K₂O 60%)。

1.2 试验设计

采用单因素随机区组设计试验,共设 6 个处理,分别为:(1)CK,不施氮肥;(2)Urea,施普通尿素;(3)CRU,施控释尿素;(4)30%OF,用有机肥代替 30%的控释尿素氮量;(5)50%OF,用有机肥代替 50%的控释尿素氮量;(6)70%OF,用有机肥代替 70%的控释尿素氮量。每个处理重复 3 次,小区面积 30 m²(5 m×6 m)。小麦季 N、P₂O₅、K₂O 施用量为 180,150,150 kg/hm²,其中,根据木薯渣有机肥样品的养分含量,以全氮量为标准折算,代替相应的化肥氮素比例,剩余氮量由控释尿素提供,并计算有机肥提供的磷钾量,不足量由过磷酸钙和氯化钾提供。

所有肥料均匀撒施后,用翻耕机翻入土中,深度为 13 cm,磷钾肥作为基肥等量施用,其他按照常规高产方式进行田间管理,且各小区间保持一致。尿素在播种前施用 60%,返青期施用 40%,其他肥料均在播种前一次性施用。小麦品种为“济麦 22”,播种量 150 kg/hm²,种植前茬为玉米,试验处理与小麦季相同,肥料施用量 240,150,180 kg/hm²,无秸秆还田。

1.3 样品采集与测定

2017 年 10 月 4 日播种小麦,并在 2017 年 11 月 5 日(苗期),2018 年 3 月 18 日(返青期),2018 年 5 月 13 日(灌浆期)和 2018 年 6 月 5 日(成熟期)采取土壤样品。用土钻以对角线法 5 点采集作为 1 个样品,分别取 0—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm 土壤。将样品带回实验室,避光通风处风干,过

10,60 目筛,待测定备用。

土壤样品于 2018 年 6 月和 7 月集中测定,硝态氮和铵态氮用 0.01 mol/L 的氯化钙浸提,AA3 连续型流动注射分析仪测定^[13];土壤全氮和总碳采用元素分析仪(德国 Elementar Vario EL 有机元素分析仪)测定^[14]。收获成熟期割取 4 m² (2 m×2 m) 小麦,测定总生物量,然后单独脱粒,测定籽粒重量和千粒重,折算单位面积小麦的产量。按(施氮区产量-空白区产量)/施氮量计算氮肥农学利用率,根据施氮区产量/施氮量计算氮肥偏生产力^[15]。

1.4 数据处理

数据用 Microsoft Excel 2010 软件预处理,经 SAS 8.0 统计软件进行差异性显著分析($p < 0.05$)及 ANOVA 方差分析,处理后的数据采用 Sigmaplot 12.5 软件作图。

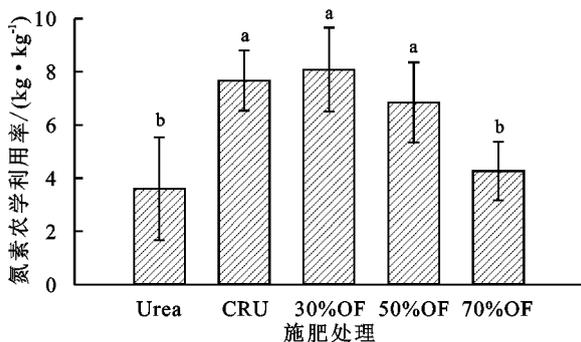
表 1 不同施肥处理小麦的生物量及产量

处理	总生物量/ (kg·hm ⁻²)	秸秆重/(kg·hm ⁻²)	千粒重/ g	籽粒重/ (kg·hm ⁻²)	籽粒较 Urea 增产率/%
CK	14878.3c	7818.3c	40.57a	7060.0c	-8.4
Urea	16144.8b	8436.3bc	40.43a	7708.5b	0
CRU	18376.9a	9936.0ab	39.66a	8440.8a	9.5
30%OF	18980.8a	10465.4a	40.05a	8515.4a	10.5
50%OF	18606.7a	10313.4a	39.54a	8293.3ab	7.6
70%OF	18782.8a	10954.4a	38.52a	7828.4b	1.6

注:表中同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

2.2 不同施肥处理对小麦氮素利用率的影响

不同施肥处理对小麦氮素农学利用率影响显著(图 1),Urea 处理最低,仅为 3.6 kg/kg,CRU、30%OF 和 50%OF 间无显著差异,但较 Urea 显著提高 90.2%~124.4%。此外,CRU、30%OF 和 50%OF 的小麦氮素偏生产力无显著差异(图 2),分别为 46.9,47.3,46.1 kg/kg,显著高于 Urea,但与 70%OF 差异不显著,且 70%OF 和 Urea 间未表现出显著差异。



注:图中不同小写字母表示处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 1 不同施肥处理小麦氮素农学利用率

2.3 不同施肥处理土壤总碳及全氮迁移特征

CK 处理各生育期小麦土壤总碳含量均处于最低水平(图 3),苗期时各施肥处理差异不显著,Urea 在返青期以后显著低于其他施氮处理,维持在 9.1~

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对小麦生物量及籽粒产量的影响

不同施肥处理对小麦生物量和产量影响显著(表 1),各施肥处理的总生物量和籽粒重量均显著高于 CK。CRU、30%OF、50%OF 和 70%OF 间总生物量无显著差异,但显著高于 Urea,增加 13.83%~17.57%。有机肥处理秸秆重量显著高于 Urea 和 CK,与 CRU 差异不显著,且 CRU 和 Urea 间差异不显著。CK 处理小麦千粒重最高,但各处理间的千粒重无显著差异,保持在 38.52~40.57 g。CRU 和 30%OF 籽粒较 Urea 显著增加 10.5%和 9.5%,较 70%OF 增加 8.8%和 7.8%,但这 2 个处理与 50%OF 无显著差异;50%OF 和 70%OF 较 Urea 籽粒增加 7.6%和 1.6%,但该 3 个处理间未表现出显著差异。

9.5 g/kg。CRU 总碳含量在灌浆期升高,随后下降,各生育期与 30%OF 趋势一致且差异不显著。随有机肥替代化肥氮素比例的增加,土壤总碳含量呈逐渐上升趋势;70%OF 与 50%OF 在返青期和灌浆期差异不显著,但自灌浆至收获成熟期,70%OF 总碳含量最高。整个生育期,全氮含量先升高后降低(图 4),70%OF 与 CK 在苗期时差异不显著,其他时期 CK 均处于最低水平;Urea 土壤在苗期时最高,返青期升至 1.52 g/kg,随后逐渐下降,并显著低于其他施氮处理;CRU 在苗期时与 30%OF 和 50%OF 差异不显著,返青期显著升高,至收获成熟时与 50%OF 和 70%OF 无显著差异,但低于 30%OF 处理;随有机肥替代化肥氮素比例的增加,各时期土壤全氮含量大致呈下降趋势,收获成熟期,30%OF 全氮含量最高,达到 1.47 g/kg。

2.4 不同施肥处理土壤硝态氮和铵态氮时空迁移特征

由图 5 可知,不同施肥处理各生育期土壤硝态氮随土层深度的增加呈逐渐下降的趋势,在苗期时含量最大,Urea,CRU,70%CRU,50%CRU,70%CRU 分别为 10.67,11.1,11.07,10.93,11.13 mg/kg,返青期含量最小,分别为 9.26,10.16,10.79,11.67,11.43 mg/kg。有机肥处理硝态氮随土层深度的增加而降低,并随有机肥替代化肥氮素比例的增加,呈下降趋势,0—20 cm 尤为明显;自返青期至成熟期,60—100 cm 土层硝态氮含量变化不显著。苗期 0—20 cm 土

层硝态氮含量,30%OF和50%OF高于CRU,70%OF低于CRU,但有机肥处理80—100 cm土层硝态氮均低于CRU。返青期,30%OF处理0—20,60—80 cm硝态氮含量高于CRU,分别为32.3,17.8 mg/kg,其余土层与CRU差异不显著;20—40 cm土层,50%OF和70%OF处理硝态氮含量低于CRU。灌浆期有机肥处理提高了20—100 cm土层硝态氮含量,成熟期,有机肥处理0—20 cm土层的硝态氮含量差异不显著,但30%OF和50%OF处理20—100 cm土层均高于70%OF。CRU处理苗期0—20 cm土层硝态氮与30%OF和50%OF差异不显著,但显著高于70%OF,自返青期至成熟期显著高于Urea;各时期0—60 cm土层含量较高,60—100 cm低于Urea处理。Urea处理苗期0—20 cm土层硝态氮含量为123.6 mg/kg,显著高于其他施氮处理,但随生育期进程迅速下降,收获结束时与CK差异不显著;在0—100 cm土壤剖面中,40—60 cm是硝态氮含量最低的土层,60—100 cm逐步上升。

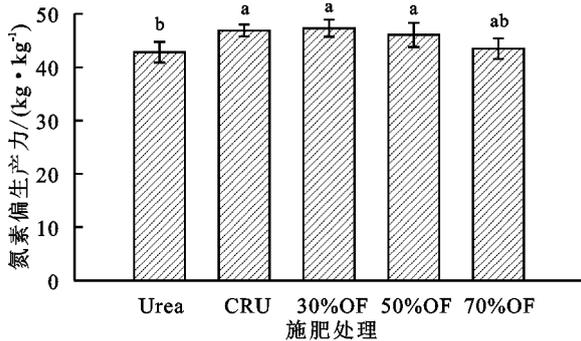


图2 不同施肥处理小麦氮素偏生产力

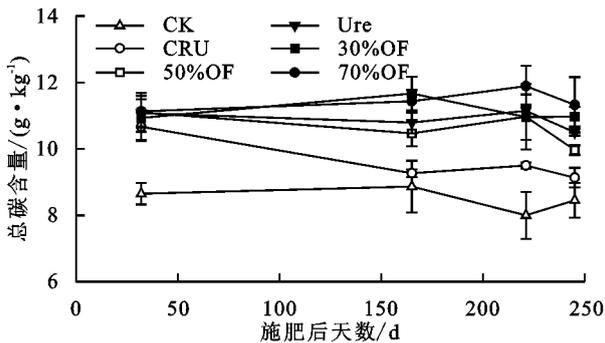


图3 不同生育期0—20 cm土壤总碳量变化特征

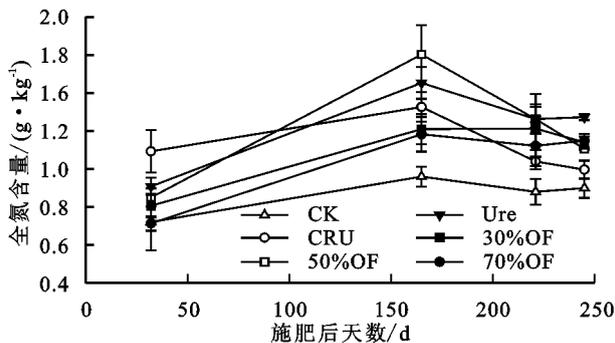


图4 不同生育期0—20 cm土壤全氮含量变化特征

由图6可知,不同施肥处理苗期各层土壤铵态氮

含量显著低于硝态氮,返青期后无明显规律。随有机肥替代化肥氮素比例增加,0—20 cm土层铵态氮呈上升趋势。苗期时,有机肥处理0—20 cm土层铵态氮与CRU差异不显著,20—100 cm土层含量均低于CRU(70%OF处理80—100 cm土层除外);返青期有机肥处理0—20 cm土层铵态氮高于CRU,30%OF和70%OF处理20—40 cm土层高于CRU,其余土层间差异不显著;灌浆期有机肥处理0—40 cm土层铵态氮高于CRU,70%OF各土层均处于最高值;成熟时有有机肥处理0—40 cm土层铵态氮与CRU差异不显著,40 cm以下土层无明显规律。CRU苗期在0—20,40—60 cm土层有2个高峰值,分别为60.31,53.52 mg/kg,返青期和灌浆期变化趋势与苗期一致,收获成熟时随深度增加逐渐降低,但自返青期至成熟期,各层土壤铵态氮含量均高于Urea。

CK处理各层土壤铵态氮含量处于最低水平,CK、Urea和CRU在返青期含量最低,而有机肥处理在成熟期最低。Urea处理随生育期的进行,0—20 cm土层铵态氮含量逐渐降低,苗期时显著低于CRU、30%OF和50%OF,与70%OF相比差异不显著,但灌浆和成熟期显著低于其他施氮处理;苗期20—40 cm土层含量达到59.16 mg/kg,显著高于其他处理,返青至成熟期随土层深度增加呈下降趋势。

3 讨论

有机肥显著增加土壤微生物量和养分供应强度^[16],利于培肥土壤和作物增产^[17]。已有研究^[18]表明,有机氮与无机氮以3:2比例配施,可增强土壤氮素矿化与固持能力,提升全氮与有机碳及作物产量;以农家肥氮替代70%或秸秆氮替代30%化肥氮素,可减少化肥氮投入,提高植株对氮素吸收和利用率^[19];但是长期单施有机肥虽增加了土壤有机质含量,小麦产量较均衡施用无机肥料显著下降^[20]。本试验表明,与普通尿素处理相比,以有机肥替代不同比例控释尿素的氮素,小麦总生物量显著增加13.83%~17.57%,籽粒增加1.6%~10.5%,但是70%OF与普通尿素差异不显著。由于控释尿素根据小麦养分需求,缓慢释放氮素^[13],满足了植株对无机态氮素的吸收;有机肥中有机质含量高,增强了土壤氮素的潜在供应量,使土壤具有强大而持久的供氮能力,也是施用有机肥产生后效的根本原因和物质基础。采用有机肥替代部分控释尿素用量,既能弥补有机肥前期无机态养分供应不足的缺点,保证小麦前期氮素吸收和分蘖的发生,又能延长无机肥的肥效,使生育后期维持较高的叶面积指数和叶片保护酶活性^[8],进而增加籽粒产量,提高氮素利用率。但是70%OF籽粒与氮素利用率和普通尿素未产生显著

差异,表明高比例施用有机肥,可能导致土壤速效养分供应不足,使当季小麦无显著的增产效应。因此,

有机肥替代 30%~50% 控释尿素氮量,更利于小麦产量和氮素利用率的提高。

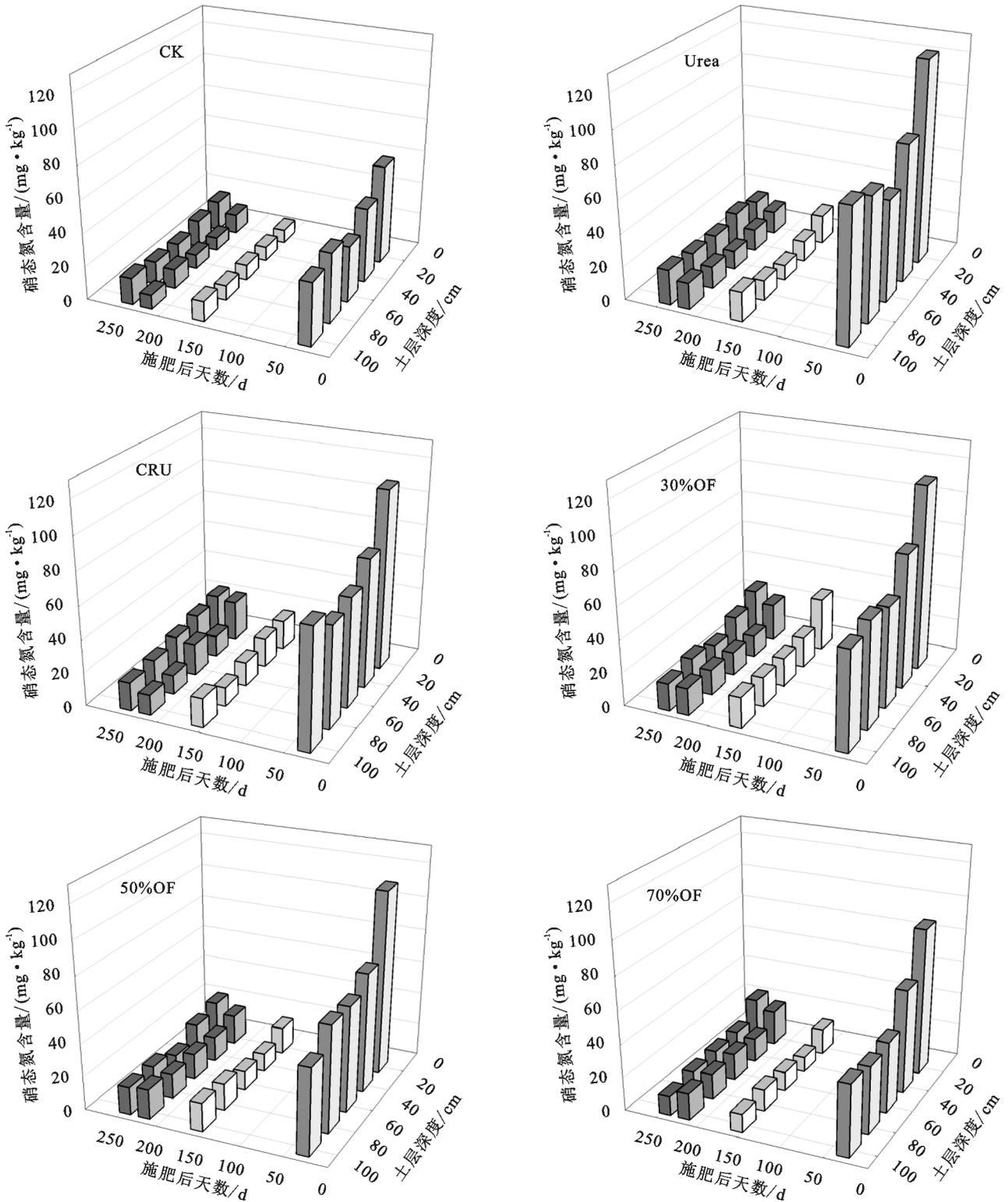


图 5 不同施肥处理土壤硝态氮含量的时空变化特征

碳素积累可改良土壤结构,提高土壤保水保肥能力,增加作物产量^[21],对农业可持续发展具有重要意义。土壤硝态氮是植物吸收利用氮素的主要形态,铵态氮易经硝化作用转化成硝态氮,两者的季节变化可反映不同施肥管理下的土壤氮素养分状况^[22]。本试验结果表明,随有机肥替代化肥氮素比例增加,土

壤总碳含量呈上升趋势,这与 Arif 等^[23] 研究结果一致,这是由于有机肥料带入的有机质增加了总碳含量。各时期土壤硝态氮含量高于铵态氮,随土层深度增加,两者含量呈下降的趋势。在苗期时,有机肥处理土壤硝态氮含量低于无机化肥处理,铵态氮含量高于化肥处理,这与陈志龙等^[24] 研究结果相反,可能

是由土壤水分和温度造成的。本试验苗期土壤取样时水分较高(大水漫灌后),可能会抑制硝化细菌的

活动,创造了有利于有机氮氨化的条件,矿化的最终产物是铵态氮^[25]。

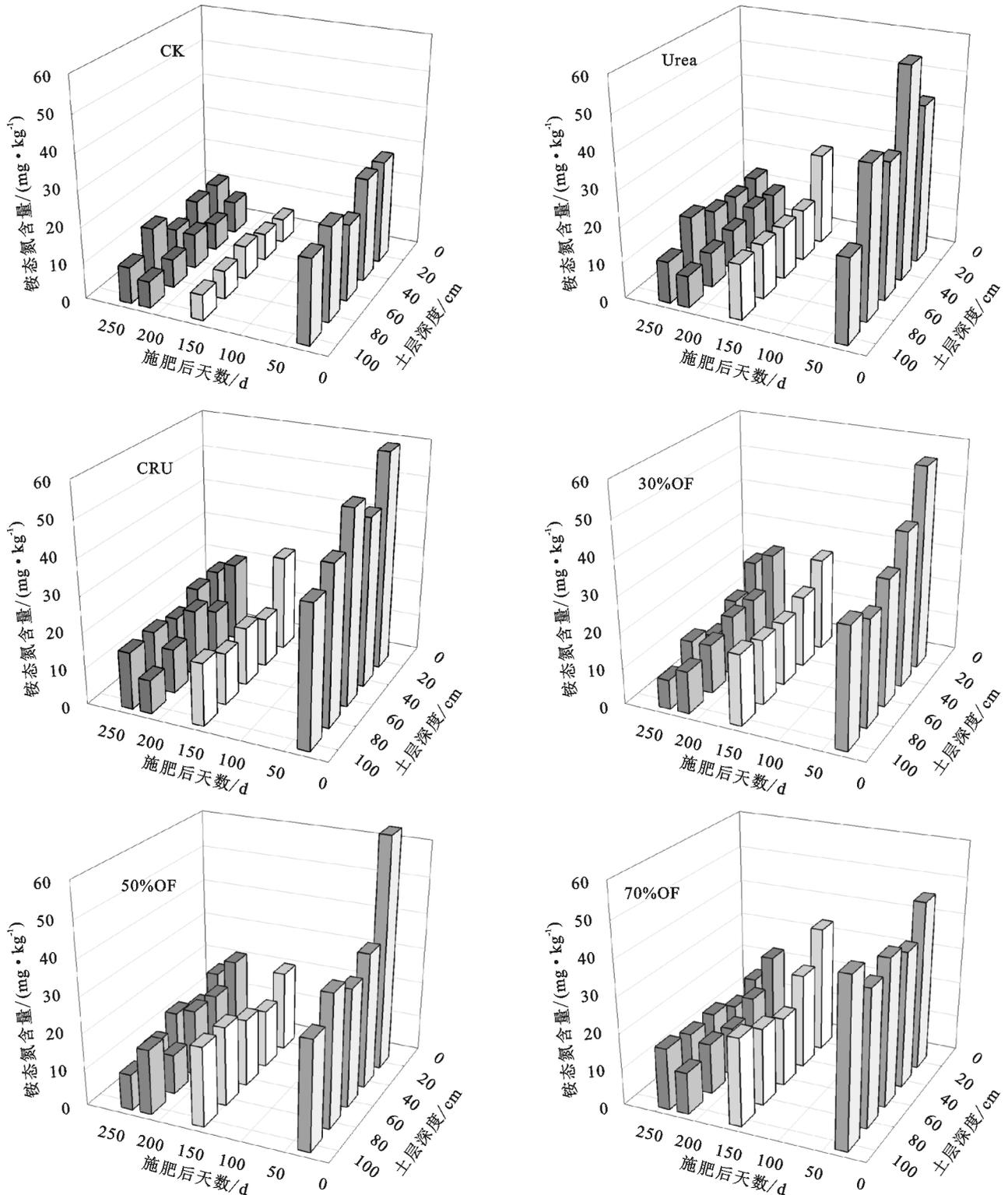


图6 不同施肥处理土壤铵态氮含量的时空变化特征

整个生育期而言,由于普通尿素水溶性好,施入土壤后迅速水解为硝态氮和铵态氮^[14],使苗期时两者含量较高,而此时小麦植株小,氮素需求总量少,过多的氮素积累易造成养分流失和淋溶;自返青至成熟期迅速下降,导致养分供应不足而减产。有机肥处理无机氮含量变化较平缓,随替代化肥氮素比例的增

加,硝态氮减少,铵态氮增加。返青期有机肥较其他施氮处理铵态氮增加显著,使植株迅速恢复营养生长,为籽粒高产打下坚实的物质基础。与普通尿素相比,返青期以后有机肥处理的无机氮显著增高,且主要集中在0—40 cm 土层,保证了植株生长后期的氮素供应,减少淋溶污染。

4 结论

(1)有机肥与控释尿素处理间总生物量无显著差异,但较普通尿素显著增加 13.83%~17.57%;不同施肥处理小麦千粒重为 38.52~40.57 g,未表现出显著差异;有机肥处理较普通尿素籽粒增加 1.6%~10.5%,且随有机肥替代化肥氮素比例增加,增产效应逐渐降低,70%OF 与 Urea 籽粒产量无显著差异。

(2)CRU、30%OF 和 50%OF 氮素农学效率分别为 7.7、8.1、6.8 kg/kg,较 Urea 显著提高 90.2%~124.4%,但 70%OF 与 Urea 差异不显著;有机肥替代化肥氮素与 CRU 处理间氮素偏生产力无显著差异。

(3)随有机肥替代化肥氮素比例增加,土壤总碳含量基本呈上升趋势,且高于 CRU 和 Urea,但全氮含量呈下降趋势,尤其是苗期和返青期,50%OF 和 70%OF 显著低于 Urea。

(4)土层深度增加硝态氮和铵态氮含量减少,随有机肥替代化肥氮素比例的增加,硝态氮减少,铵态氮增加(返青期最为显著),且与 Urea 相比,有机肥处理的无机氮主要集中在 0—40 cm 土层。

综上,用 30%~50%有机肥替代化肥氮素,配合控释尿素施用,可显著提高耕层土壤总碳和铵态氮含量,减少 60—100 cm 土壤硝态氮,增加小麦产量和氮素利用率,具有显著的经济和生态效益。

参考文献:

- [1] 朱兆良,金继运.保障我国粮食安全的肥料问题[J].植物营养与肥料学报,2013,19(2):259-273.
- [2] 于飞,施卫明.近 10 年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析[J].土壤学报,2015,52(6):1311-1324.
- [3] Liu X J, Zhang Y, Han W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China [J]. Nature, 2013, 494 (7438): 459-462.
- [4] Geng J B, Chen J Q, Sun Y B, et al. Controlled release urea improved nitrogen use efficiency and yield of wheat and corn [J]. Agronomy Journal, 2016, 108(4): 1666-1673.
- [5] 张建军,樊廷录,赵刚,等.长期定位施不同氮源有机肥替代部分含氮化肥对陇东旱塬冬小麦产量和水分利用效率的影响[J].作物学报,2017,43(7):1077-1086.
- [6] 于鹏,张玉玲,王春新,等.不同生育期光合碳在水稻—土壤系统中的分配[J].土壤学报,2017,54(5):1218-1229.
- [7] 濮超,刘鹏,阚正荣,等.耕作方式及秸秆还田对华北平原土壤全氮及其组分的影响[J].农业工程学报,2018,34(9):160-166.
- [8] 司贤宗,韩燕来,王宜伦,等.缓释氮肥与普通尿素配施提高冬小麦—夏玉米施肥效果的研究[J].中国农业科学,2013,46(7):1390-1398.
- [9] 刘红江,陈虞雯,孙国峰,等.有机肥—无机肥不同配施比例对水稻产量和农田养分流失的影响[J].生态学杂

志,2017,36(2):405-412.

- [10] 朱莱红,董彩霞,沈其荣,等.配施有机肥提高化肥氮利用效率的微生物作用机制研究[J].植物营养与肥料学报,2010,16(2):282-288.
- [11] 张向前,曹承富,陈欢,等.长期定位施肥对砂姜黑土小麦根系性状和根冠比的影响[J].麦类作物学报,2017,37(3):382-389.
- [12] 谢军,赵亚南,陈轩敬,等.有机肥氮替代化肥氮提高玉米产量和氮素吸收利用效率[J].中国农业科学,2016,49(20):3934-3943.
- [13] 张务帅,陈宝成,李成亮,等.控释氮肥控释钾肥不同配比对小麦生长及土壤肥力的影响[J].水土保持学报,2015,29(3):178-183.
- [14] 耿计彪,张民,马强,等.控释氮肥对棉花叶片生理特性和产量的影响[J].水土保持学报,2015,29(4):267-271.
- [15] 于淑芳,杨力,张民,等.控释尿素对小麦—玉米产量及土壤氮素的影响[J].农业环境科学学报,2010,29(9):1744-1749.
- [16] Maltas A, Charles R, Jeangros B, et al. Effect of organic fertilizers and reduced-tillage on soil properties, crop nitrogen response and crop yield: Results of a 12-year experiment in Changins, Switzerland[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 126: 11-18.
- [17] 欧杨虹,徐阳春,沈其荣.有机氮部分替代无机氮对水稻产量和氮素利用率的影响[J].江苏农业学报,2009,25(1):106-111.
- [18] 赵征宇,孙永红,赵明,等.有机无机肥配施对土壤氮素转化和番茄产量品质的影响[J].华北农学报,2013,28(1):208-212.
- [19] 高洪军,朱平,彭畅,等.等氮条件下长期有机无机配施对春玉米的氮素吸收利用和土壤无机氮的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(2):318-325.
- [20] 杨旸,张树兰,杨学云,等.长期施肥对壤土冬小麦产量及土壤养分的影响[J].土壤通报,2018,49(2):156-162.
- [21] 田慎重,宁堂原,王瑜,等.不同耕作方式和秸秆还田对麦田土壤有机碳含量的影响[J].应用生态学报,2010,21(2):373-378.
- [22] 贺美,王立刚,王迎春,等.长期定位施肥下黑土呼吸的变化特征及其影响因素[J].农业工程学报,2018,34(4):151-161.
- [23] Arif M, Ilyas M, Riaz M, et al. Biochar improves phosphorus use efficiency of organic- inorganic fertilizers, maize-wheat productivity and soil quality in a low fertility alkaline soil [J]. Field Crops Research, 2017, 214: 25-37.
- [24] 陈志龙,陈杰,许建平,等.有机肥氮替代部分化肥氮对小麦产量及氮肥利用率的影响[J].江苏农业科学,2013,41(7):55-57.
- [25] 李世清,李生秀.淹水培养条件下铵态氮肥对土壤氮素的激发效应[J].植物营养与肥料学报,2001,7(4):361-367.