

不同施肥措施对旱地采煤塌陷区复垦 土壤结构及玉米品质的影响

曹寒冰^{1,2}, 谢钧宇^{1,2}, 王楚涵¹, 强久次仁³,
尼玛曲珍³, 张杰¹, 孟会生¹, 洪坚平¹, 李廷亮¹

(1.山西农业大学资源环境学院,山西 太谷 030801;2.土壤环境与养分资源山西省重点实验室,
太原 030031;3.西藏山南市错那县农牧局,西藏 错那 856700)

摘要: 研究不同施肥措施对复垦土壤结构及玉米品质的影响,以期深入理解采煤塌陷区复垦土壤有机碳固持机制。采集复垦 1 年的定位试验各处理耕层(0—20 cm)土样以及玉米籽粒,分析土壤水稳性团聚体($>2, 0.25\sim 2, 0.053\sim 0.25$ mm)及粉黏粒组分(<0.053 mm)中有机碳(SOC)及全氮(TN)含量、玉米籽粒蛋白质、淀粉和脂肪含量的变化。试验设不施肥(CK)、施化肥(NPK)、单施有机肥(M)和有机无机肥配施(MNPK)4 个处理。结果表明,同 CK 相比,NPK 处理显著提高 TN 含量、玉米籽粒产量、淀粉和脂肪含量,增幅分别为 11.23%,98.53%,1.16%和 12.71%;M 处理显著提高 SOC、TN、 >2 mm 和 $0.25\sim 2$ mm 团聚体中有机碳含量、籽粒产量、蛋白质、淀粉和脂肪含量,增幅分别为 44.77%,13.23%,52.73%,60.22%,255.15%,23.28%,1.67%和 12.71%;MNPK 处理显著提高 SOC、TN、各粒径团聚体及粉黏粒组分中 SOC 和 TN 含量(除 $0.25\sim 2$ mm 团聚体中 TN 含量)、玉米籽粒产量、蛋白质、淀粉和脂肪含量,增幅分别为 46.21%,29.08%,39.23% (>2 mm—C),49.07% ($0.25\sim 2$ mm—C),110.41% ($0.053\sim 0.25$ mm—C),40.35% (<0.053 mm—C),22.48% (>2 mm—N),43.29% ($0.053\sim 0.25$ mm—N),33.33% (<0.053 mm—N),211.37%,35.34%,0.48%和 25.18%。表明当养分投入量相同时,有机无机肥配施(MNPK)有利于采煤塌陷区复垦土壤团聚体对有机碳的物理保护,增加土壤有机碳累积,提升土壤肥力,提高作物产量,改善作物品质。

关键词: 复垦土壤;土壤团聚体;籽粒产量;蛋白质;淀粉;脂肪

中图分类号:S157.2

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)02-0251-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2021.02.033

Effects of Different Fertilization Regimes on Reclaimed Soil Structure and Maize Quality in Dryland

CAO Hanbing^{1,2}, XIE Junyu^{1,2}, WANG Chuhan¹, QIANGJIU Ciren³, NIMA Quzhen³,

ZHANG Jie¹, MENG Huisheng¹, HONG Jianping¹, LI Tingliang¹

(1.College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taiyu,

Shanxi 030801; 2.Shanxi Province Key Laboratory of Soil Environment and Nutrient Resources,

Taiyuan 030031; 3.Agriculture and Animal Husbandry Bureau in Shannan Cona County, Cona, Tibet 856700)

Abstract: To better understand the mechanism of soil organic carbon (SOC) sequestration in the reclaimed coal-mining subsiding region, we investigated the response of the structure of reclaimed soil and maize quality. Top soil samples (0—20 cm) and maize grain were collected from different treatments of a 1-year reclaimed field, and the wet sieving method was used to analyze the changes of soil organic carbon and total nitrogen (TN) contents within water-stable aggregates and silt and clay fractions, and grain analyzer was used to analyze protein, starch and fat contents in maize grain. The experiment was set up with four treatments: no fertilizer (CK), chemical fertilizer (NPK), organic fertilizer (M) and combined application of organic and inorganic fertilizer (MNPK). The results showed that compared with CK, NPK treatment significantly increased TN content, maize grain yield, starch and fat content by 11.23%, 98.53%, 1.16% and

收稿日期:2020-09-22

资助项目:国家自然科学基金项目(41807102,U1710255-3);山西省土壤环境与养分资源重点实验室开放基金项目(2019003,2020001);山西省高等学校科技创新项目(2019L0363);山西农业大学科技创新基金(博士科研启动)项目(2020BQ50);山西农业大学科技创新基金(青年科技创新)项目(2019004)

第一作者:曹寒冰(1989—),男,博士,讲师,主要从事旱地水肥管理及其生态环境效应研究。E-mail:caohanbing119@163.com

通信作者:李廷亮(1982—),男,博士,教授,主要从事土壤肥力与环境研究。E-mail:litlingliang021@126.com

12.71% respectively. The M treatment significantly increased SOC, TN, the organic carbon contents, grain yield, protein, starch and fat contents in >2 mm and $0.25\sim 2$ mm aggregates by 44.77%, 13.23%, 52.73%, 60.22%, 255.15%, 23.28%, 1.67% and 12.71%, respectively. The MNPK treatment significantly increased SOC, TN, SOC and TN contents in aggregates of various particle sizes and powder clay components (except for total nitrogen content in $0.25\sim 2$ mm aggregates), maize grain yield, protein, starch and fat contents. The increase was 46.21%, 29.08%, 39.23% (>2 mm-C), 49.07% ($0.25\sim 2$ mm-C), 110.41% ($0.053\sim 0.25$ mm-C), 40.35% (<0.053 mm-C), 22.48% (>2 mm-N), 43.29% ($0.053\sim 0.25$ mm-N), 33.33% (<0.053 mm-N), 211.37%, 35.34%, 0.48% and 25.18%, respectively. This study shows that when the nutrient input is the same, the combined application of organic and inorganic fertilizers (MNPK) is beneficial to the physical protection of organic carbon by reclaimed soil aggregates in the coal mining subsidence area, increasing SOC accumulation, improving soil fertility, and increasing crop yields and quality.

Keywords: reclaimed soil; soil aggregates; grain yield; protein; starch; fat

全球土壤有机碳库作为陆地生态系统中最大的碳库,其储量约为 2 500 Pg,分别是大气碳库和植被碳库的 2,3 倍^[1]。土壤有机碳含量的微小变化会对大气中的碳浓度产生重要的影响,土壤既是碳源又是碳汇,备受农业工作者的关注^[2-3]。土壤团聚体是土壤结构的基本组成单位,其数量和大小与土壤养分、微生物多样性及土壤酶活性密切相关,对于稳定和改良土壤结构至关重要^[4-5]。土壤有机碳与团聚体紧密相连,有机碳作为重要的胶结物质,通过黏结矿物颗粒形成团聚体,稳定的团聚体又可以保护有机碳,使其避免在微生物的作用下发生矿化、损失。因此,二者相互作用,共同维持土壤结构,提升土壤肥力,为作物生长创造适宜的环境^[6-8]。

施肥作为当前生产中最普遍采用的农田管理措施^[9],其对团聚体中有机碳和全氮含量的影响成为研究的焦点。毛霞丽等^[10]在潜育型水稻土上研究发现,长期不施肥显著提高各大小粒径团聚体($>2, 0.25\sim 2, 0.053\sim 0.25$ mm)及粉黏粒组分(<0.053 mm)中有机碳含量,增幅分别为 30.4%~36.5% (>2 mm), 15.3%~32.3% (0.252 mm), 11.0%~36.5% ($0.053\sim 0.25$ mm)和 7.7%~18.2% (<0.053 mm),且以化肥配施栏肥效果最佳;但吕欣欣等^[11]报道,在棕壤上施化肥(NP)对各粒径团聚体中有机碳含量无显著影响,而显著降低 <0.053 mm 组分中有机碳含量;李文军等^[12]以第四纪红土母质发育的水稻土为研究对象,分析了不同施肥措施下土壤团聚体中有机碳含量的变化特征发现,无论是化肥还是有机肥处理均能显著提高大团聚体中有机碳含量。此外,苏慧清等^[13]和谢钧宇^[14]在棕壤和塿土上都发现,单施有机肥以及有机无机肥配施均显著提高棕壤各大小粒径团聚体及 <0.053 mm 组分中全氮含量,且全氮主要富集于 <0.053 mm 组分中,施化肥虽然对团聚体中全氮含量有明显的提升作用,然而并未对 <0.053 mm 组分

中全氮含量产生显著影响。但是也有研究^[15]报道,施有机肥对各粒径团聚体中全氮含量无显著影响。由此可见,施肥对不同类型土壤团聚体中有机碳、全氮含量的影响并不一致,研究结果之间有所差异,可能与种植制度、施肥水平、施肥历史、土壤性质等因素有关。

肥料施用是保障玉米稳产增产的重要农业措施,玉米是全球分布最广和产量最高的粮食作物^[16-17]。自 1960 年第一次绿色革命以来,全球玉米种植面积从 1.05 亿 hm^2 增加到 1.97 亿 hm^2 ,单产从 1 942 kg/hm^2 增加到 5 755 kg/hm^2 ,总产量从 2.05 亿 t 增至 11.34 亿 t^[18]。玉米作为我国主要的粮食作物,对于保障我国粮食安全、改善人民生活水平具有重大意义。尤其在西北旱作区,玉米作为广泛种植的粮食作物,对发展旱作农业经济有重要意义^[19]。山西省地处黄土高原干旱半干旱地区东部,年平均降水量少,仅为 400~650 mm,旱地占总耕地面积的 70%以上,这其中又有 50%以上的面积为坡耕地^[19]。因此,旱地已成为农业发展的前沿阵地,确保山西乃至全国粮食安全和粮食科技发展。同时也迫切需要挖掘旱作区域作物产量潜力,持续提高作物产量^[20]。在现代集约化农业生产中,人们对籽粒营养品质的重视不亚于对作物产量的关注,尤其是谷类作物籽粒蛋白质品质,如蛋白质含量^[21]。玉米作为人们日常饮食中主要的蛋白质和能量来源,在我国推荐使用 9%~11%蛋白质含量的玉米用于制作食品^[22]。因此,高蛋白质含量对玉米的营养品质和加工品质至关重要,如何在高产的同时协同提高蛋白质含量对粮食和食品营养安全具有重要意义。

前人^[23-26]就施肥措施对土壤结构及作物品质影响的研究主要集中在农田土壤上,而在复垦土壤上研究较少,其中二者之间的关系也鲜见报道。山西省煤炭资源极为丰富,长期以来,煤炭资源开采在服务国民经济的同时,也带来了不容忽视的生态环境问题。据统计,已

有 10.1 万 hm² 的土地大面积沉陷,0.4 万 hm² 的林地遭到损毁。因此,研究采煤塌陷区复垦土壤肥力定向培育,是缓解人地矛盾、实现区域生产和资源可持续利用的当务之急。本研究在黄土高原典型旱地—山西省长治市襄垣县采煤塌陷区复垦基地进行了 1 年的田间试验,研究不同施肥措施下有机碳和全氮在土壤水稳性团聚体及粉黏粒组分中的固存特征,以及玉米籽粒蛋白质含量、淀粉含量和脂肪含量,通过比较它们之间的关系,以期为提升旱地复垦土壤肥力、实现作物高产优质提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于黄土高原东南部的山西省长治市襄垣县王桥镇西山底村潞安集团五阳煤矿采煤塌陷区内(36°28′11.95″N,113°00′52.57″E),平均海拔 980 m,属低山丘陵带,无霜期 160 d,年平均气温 9.5 ℃,年降水量

532.8 mm,属于暖温带半湿润大陆性季风气候。供试土壤为石灰性褐土(黄土母质)。试验开始前 0—20 cm 土层土壤有机质含量为 7.24 g/kg,全氮含量为 0.50 g/kg,速效磷(Olsen—P)含量 2.01 mg/kg,有效钾(K)含量 106.85 mg/kg,土壤容重 1.49 g/cm³。基本理化性状见曹寒冰等^[27]。

1.2 试验设计

试验开始于 2008 年,采用混堆的方式对塌陷地进行复垦,即将表层 30 cm 土壤剥离后,挖高垫低,待底土平整之后,将之前剥离的表土均匀地覆盖于底土之上。土壤肥力介于农田和生土之间,属混合土壤。种植作物为春玉米“大丰 30 号”,播种密度为 6 000 株/hm²,于每年 4 月底至 5 月初播种,9 月底至 10 月初收获。玉米收获后,秸秆全部还田。2017 年开始进行第 1 年复垦,不同施肥处理下 0—20 cm 土层土壤基本理化性状见表 1。

表 1 不同施肥处理下 0—20 cm 土层土壤基本理化性状

处理	pH	SOM/ (g · kg ⁻¹)	TN/ (g · kg ⁻¹)	AP/ (mg · kg ⁻¹)	AK/ (mg · kg ⁻¹)
对照(CK)	8.28b	10.56b	0.99c	4.37d	82.43d
施化肥(NPK)	8.16d	10.71b	1.00b	9.09c	220.83b
单施有机肥(M)	8.44a	15.29a	1.15b	38.24a	204.55c
有机无机肥配施(MNPK)	8.25c	15.44a	1.24a	27.36b	237.11a

注:SOM 为有机质;TN 为全氮;AP 为速效磷;AK 为有效钾。

试验共设 4 个处理,分别为不施肥(CK)、施用氮磷钾化肥(NPK)、单施有机肥(M)和有机无机肥配施(MNPK)。其中,供试有机肥为完全腐熟的鸡粪,有机质含量为 25.80%,氮(N)含量为 1.68%,磷(P₂O₅)含量为 1.54%,钾(K₂O)含量为 0.82%。每个处理设置 3 次重复,采用完全随机排列。小区面积为 50 m²(10 m×5 m)。各施肥处理的总养分投入量相同(表 2)。

表 2 不同施肥处理的肥料用量

处理	单位:kg/hm ²			
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	M
CK	0	0	0	0
NPK	201.5	184.8	98.4	0
M	0	0	0	12000
MNPK	100.8	92.4	49.2	6000

注:N 为尿素;P₂O₅ 为过磷酸钙;K₂O 为氯化钾;M 为有机肥。

1.3 样品采集与分析

土壤样品采集:为了保证土壤结构不被破坏,于春玉米收获前 1 天(2018 年 9 月 28 日),采用实验室定制的大环刀(高度和直径均为 10 cm)运用多点采样法采集耕层(0—20 cm)原状土样,并混合成 1 个样品,装入纸盒中,避免在运输途中破坏土壤结构。带回实验室后,沿土壤本身的纹理结构掰成<1 cm 的土块,剔除肉眼可见杂物,过 8 mm 土筛,在阴凉通风处自然风干,装入塑封

袋中供后续筛分团聚体使用。

同时,春玉米收获后,在每个小区利用土钻(内径为 2.5 cm,高度为 20 cm)采用多点采样法采集 0—20 cm 土层土壤样品,混合成 1 个样品后,装入塑封袋中带回实验室,经风干、研磨过 0.15 mm 筛,保存于塑封袋中供后续测定碳氮含量使用。

植株样品采集:玉米生育期结束后,取样方 30 m²,脱粒计产。

采用 Elliott^[28]提出的湿筛法获得土壤水稳性团聚体,采用重铬酸钾容量法—外加热法测定其中的有机碳含量^[29];采用 K₂SO₄—CuSO₄—Se 催化剂和浓硫酸消煮,半微量凯氏法测定其中的全氮含量^[29]。

玉米品质采用 InfrateTM 1241 Grain Analyzer V5.00 品质分析仪进行测定。

1.4 数据处理

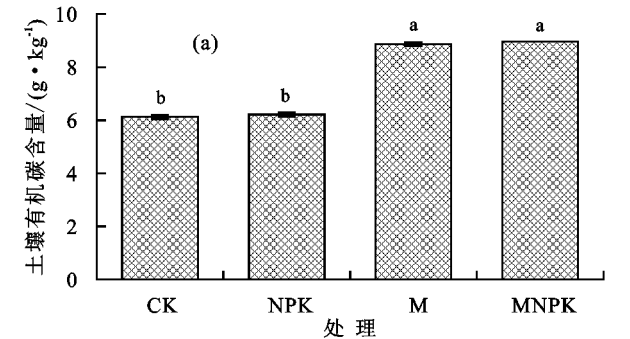
不同施肥处理对全土和团聚体及粉黏粒组分中有机碳和全氮含量,以及作物产量、籽粒蛋白质、淀粉、脂肪含量的影响采用单变量方差分析,当方差分析结果显著时,采用 LSD 法进行处理间平均值的多重比较。所有数据采用 DPS 7.05 统计软件进行分析,R 软件 corrplot 包用于分析团聚体中有机碳、全氮含量、籽粒蛋白质、淀粉、脂肪含量与作物产量的相

关关系,采用 Origin 8.1 软件作图。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳和全氮含量

不同施肥措施显著影响土壤有机碳(SOC)含量(图 1a)。同 CK 相比,施化肥(NPK)对 SOC 含量无显著影响,但单施有机肥(M)以及有机无机肥配施(MNPK)均显著提高 SOC 含量,增幅达 44.77%~



注:不同小写字母表示不同处理间达 5%显著水平。下同。

2.2 不同粒径水稳性团聚体及粉黏粒组分中有机碳含量

施肥一定程度上影响各粒径团聚体及粉黏粒组分中有机碳含量(表 3),且以施有机肥处理(M 和 MNPK)对水稳性团聚体及粉黏粒组分中有机碳含量的增幅更明显。就各粒径水稳性团聚体及粉黏粒组分相比而言,大团聚体(>2,0.25~2 mm)和微团聚体(0.053~0.25mm)中有机碳含量相近,且显著高于粉黏粒组分(<0.053 mm)中的有机碳含量。

同 CK 相比,NPK 处理对各粒径团聚体及粉黏粒组分中有机碳含量无显著影响。M 处理显著提高>2,0.25~2 mm 团聚体中有机碳含量,增幅为 52.73%~60.22%。MNPK 处理显著提高>2,0.25~2,0.053~0.25 mm 团聚体及<0.053 mm 组分中有机碳含量,增幅分别为 39.23%,49.07%,110.41%和 40.35%。

由此可见,单施有机肥对大团聚体中有机碳含量的提升效果最明显,有机无机肥配施对微团聚体及粉黏粒组分中有机碳含量的提升效果最明显。

表 3 不同施肥措施土壤水稳性团聚体及粉黏粒组分中有机碳含量				
单位:g/kg				
处理	>2 mm	0.25~2 mm	0.053~0.25 mm	<0.053 mm
CK	3.44±0.21bA	2.97±0.14bA	2.44±0.15bB	1.89±0.29bC
NPK	3.48±0.23bA	3.33±0.31bAB	2.89±0.24bB	2.24±0.14abC
M	5.25±0.52aA	4.76±0.19aAB	4.28±0.27abB	2.55±0.30abC
MNPK	4.79±0.55aA	4.43±0.79aA	5.14±0.52aA	2.65±0.50aB

注:不同小写字母表示同一粒径不同处理间达 5%显著水平;不同大写字母表示同一处理不同粒径间达 5%显著水平。下同。

2.3 不同粒径水稳性团聚体及粉黏粒组分中全氮含量

施肥在一定程度上亦影响各粒径团聚体及粉黏

46.21%,且以 MNPK 处理增幅最大。

不同施肥措施亦显著影响全氮(TN)含量(图 1b)。同 CK 相比,NPK、M 以及 MNPK 处理均显著提高 TN 含量,增幅达 11.23%~29.08%,且仍以 MNPK 处理下增幅最大。

由此可见,有机无机肥配施处理对于提升土壤肥力效果最佳。

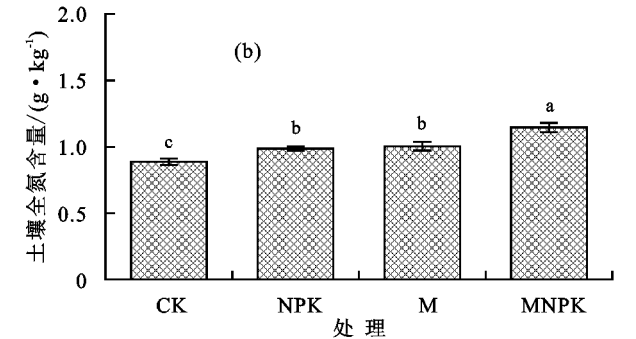


图 1 不同施肥措施土壤有机碳和全氮含量

粒组分中全氮含量(表 4)。所有施肥处理较 CK 均对 0.25~2 mm 团聚体中全氮含量无显著影响。同 CK 相比,NPK、M 处理对各粒径团聚体及粉黏粒组分中全氮含量无显著影响。MNPK 处理显著提高>2,0.053~0.25 mm 团聚体和<0.053 mm 组分中全氮含量,增幅分别为 22.48%,43.29%和 33.33%。

由此可见,有机无机肥配施对各粒径团聚体中全氮含量的提升效果最明显(除 0.25~2 mm 团聚体外)。

表 4 不同施肥措施下土壤水稳性团聚体及粉黏粒组分中全氮含量				
单位:g/kg				
处理	>2 mm	0.25~2 mm	0.053~0.25 mm	<0.053 mm
CK	1.10±0.11bA	1.12±0.21aA	1.08±0.25bA	0.89±0.13bA
NPK	1.28±0.17abA	1.08±0.13aB	1.08±0.11bB	1.04±0.11abB
M	1.28±0.06abA	1.23±0.11aA	1.27±0.05bA	0.99±0.23abB
MNPK	1.35±0.15aAB	1.30±0.05aB	1.55±0.20aAB	1.18±0.04aB

2.4 玉米籽粒产量与蛋白质、淀粉和脂肪含量

施肥显著影响玉米产量、籽粒蛋白质、淀粉和脂肪含量(图 2)。同 CK 相比,不同施肥处理均显著提高玉米产量,增幅为 98.53%~255.15%,且以 M 处理的增产效果最明显(图 2a)。与作物产量相同,NPK 处理对籽粒蛋白质含量无显著影响(图 2b),却显著提高淀粉含量(图 2c)和脂肪含量(图 2d),分别提高 1.16%和 12.71%。M、MNPK 处理显著提高蛋白质含量、淀粉含量和脂肪含量,增幅分别为 23.28%~35.34%,0.48%~1.67%和 12.71%~25.18%。

由此可见,单施有机肥对作物产量和淀粉含量的提升效果最明显,有机无机肥配施对蛋白质含量和脂肪含量的提升效果最明显。

2.5 土壤肥力指标与作物产量、营养品质之间的关系

相关矩阵表明,SOC、各粒径团聚体及粉黏粒组

分中有机碳含量与作物产量之间存在较强的正相关关系($P<0.05$)。

同时还发现,0.053~0.25 mm 团聚体和<0.053 mm

组分中有机碳含量以及>2 mm 团聚体和<0.053 mm 组分中全氮含量与蛋白质含量和脂肪含量之间呈正相关($P<0.05$)(图 3)。

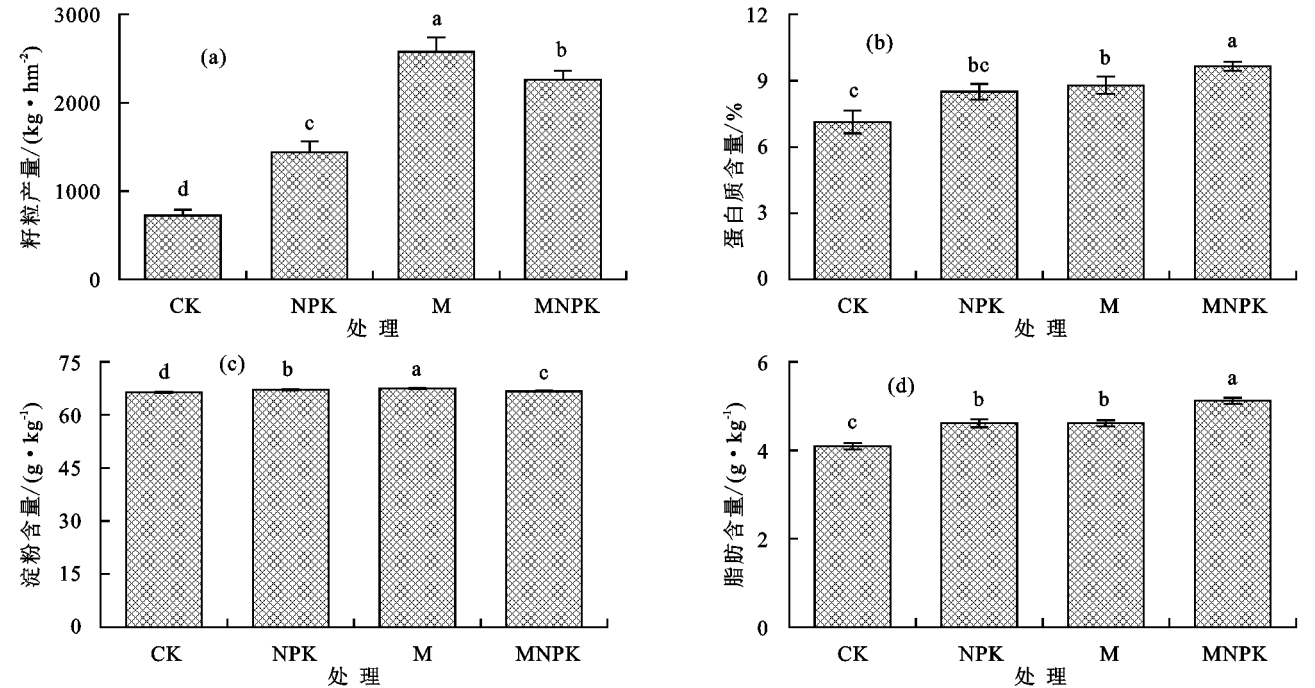
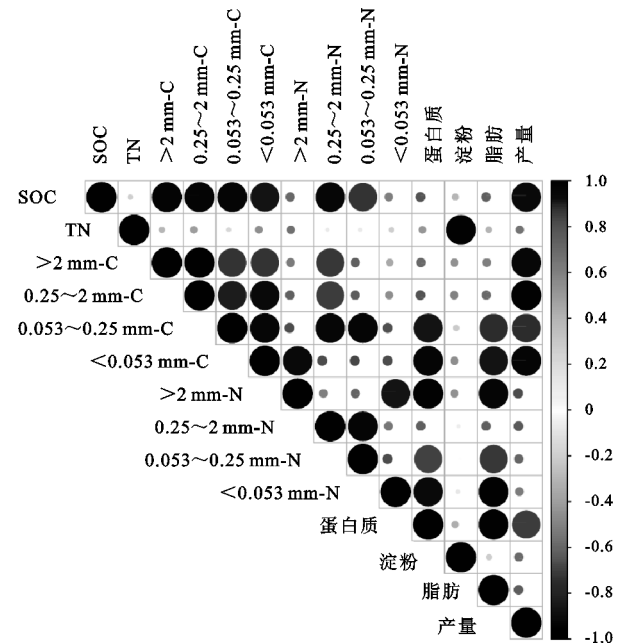


图 2 不同施肥措施下玉米籽粒产量及蛋白质含量、淀粉含量和脂肪含量



注:相关矩阵展示 $P<0.05$ 的相关系数,圆点的大小和灰度表示不同指标之间相关性的强弱。

图 3 土壤肥力指标与玉米籽粒产量、营养品质的关系

3 讨论

3.1 不同施肥措施团聚体中有机碳含量

本研究结果显示,施化肥(NPK)对团聚体及粉黏粒组分中有机碳含量无显著影响,而单施有机肥(M)以及有机无机肥配施(MNPK)均显著提高团聚体及粉黏粒组分中有机碳含量(表 3),这与张秀芝等^[30]在黑土 37 年定位试验的研究结果一致。因为

有机肥的施用直接提高土壤有机碳含量;此外,作物在施肥的条件下能获得更高的生产力,增加作物残茬还田量,同时促进根系分泌物的增加,从而导致土壤有机碳额外的投入量增加^[30]。这一现象也说明施用有机肥有利于有机碳在土壤中累积。

值得注意的是,本研究结果表明,M 处理对大团聚体中有机碳含量的提升效果最明显,MNPK 处理对微团聚体及粉黏粒组分中有机碳含量的提升效果最明显(表 3)。但也有报道^[13,31]认为,MNPK 处理对各粒径团聚体及粉黏粒组分中有机碳含量的提升效果优于 M 处理。造成研究结果之间的差异是因为 MNPK 处理为微生物的生长繁殖和活动提供了充足的碳源和营养物质,创造了良好的环境,导致很强的正激发效应,加速大团聚体中有机碳的矿化^[32]。而且也有研究^[31]认为,大团聚体中有机碳的稳定性本身低于微团聚体和粉黏粒组分中的,大团聚体中有机碳的寿命只有几年,而微团聚体中有机碳的寿命能达到几十年以上,所以大团聚体中的有机碳更容易被有机物矿化分解;Six 等^[33]进一步分析发现,大团聚体中有机碳的更新周期为 42 年,而微团聚体高达 200 多年。这也是导致 MNPK 处理对大团聚体中有机碳含量的提升效果不如 M 处理的另一个原因。

3.2 不同施肥措施玉米籽粒营养品质特征

土壤肥力的高低是反映土壤质量的一项重要指标,直接影响作物产量。与不施肥(CK)相比,施化肥

(NPK)、单施有机肥(M)以及有机无机肥配施(MNPK)均显著提高玉米籽粒产量(图 2a),这与 Xie 等^[24]和 Wang 等^[34]的研究结果一致,因为施肥能够补充土壤中的氮、磷、钾含量,保证养分的持续供应,增加籽粒中的养分浓度,使作物获得高产。

蛋白质含量是衡量玉米籽粒加工品质的重要指标。肥料是影响籽粒蛋白质含量最重要的因素。玉米籽粒中的氮主要来源于 2 个方面:一部分是花前营养器官中储存氮的再转移;另一部分是花后的氮素吸收^[35]。本研究结果表明,同 CK 相比,M、MNPK 处理均显著提高籽粒蛋白质含量,且以 MNPK 处理效果更显著(图 2b),这与王存连等^[36]和潘晓丽^[37]的研究结果一致。因为施加有机肥延缓了籽粒灌浆后期植株衰老,增强玉米氮的同化和转移,且 MNPK 处理基础地力高于其他处理,促进根系生长发育,提高根系活力^[38],为地上部氮素吸收同化和花后氮素向籽粒的转运提供良好的基础,同时在高肥力水平土壤上可加快贮藏蛋白的合成和积累速率。

同 CK 相比,NPK、M、MNPK 处理均显著提高籽粒淀粉含量(图 2c)和脂肪含量(图 2d),这与刘淑云^[38]的研究结果一致;但是也有研究^[39]报道,MNPK 处理较 NPK 处理降低了淀粉含量。而本研究结果也显示,MNPK 处理的增幅效果明显低于 NPK、M 处理。这是因为 MNPK 处理下 TN 含量最高(图 1b),导致玉米可从土壤中吸收的氮素也相对较多,若植物“奢侈吸收”过多氮素,反而会更多促进氮代谢,合成较多的蛋白质、氨基酸类物质,从而在一定程度上抑制碳代谢。因此,淀粉的合成也会相对减少。此外,MNPK 处理因大幅度提高玉米籽粒产量(图 2a),使淀粉含量产生“稀释效应”而有所降低,又因在养分协调供应条件下籽粒产量较高,而淀粉含量仍比不施肥有明显的增加。

通过合理施肥,协同实现作物高产与优质具有一定的挑战性,考虑作物吸收养分的“稀释效应”和“奢侈吸收”。获得最高产量的施肥量并不一定是品质最佳的施肥量,养分供应对品质具有直接作用和间接作用^[37]。本研究结果显示,玉米产量只与 SOC 和各粒径团聚体及粉黏粒组分中有机碳含量呈显著相关,而与 TN、各粒径团聚体及粉黏粒组分中全氮含量以及品质指标不相关(图 3)。这是因为作物体内蛋白质的合成和淀粉的合成竞争光合产物,且氮、磷、钾营养对促进碳水化合物的合成和累积速度超过了对蛋白质的合成和累积速度^[40],毫无疑问只有在养分协调供应的前提下,才能使作物既能保持较高的产量,又能保持优良的品质,达到高产优质的双重目的。

4 结论

施肥对复垦土壤 0—20 cm 土层土壤团聚体及粉黏粒组分中有机碳和全氮含量产生不同影响。施化肥没有显著影响团聚体及粉黏粒组分中有机碳和全氮含量。单施有机肥对大团聚体中有机碳含量的提升效果最明显,增幅为 52.73%~60.22%,但对团聚体及粉黏粒组分中全氮含量无显著影响。有机无机肥配施对微团聚体及粉黏粒组分中有机碳含量的提升效果最明显,增幅达 39.23%~110.41%,且亦显著提高各粒径团聚体及粉黏粒组分中全氮含量(除 0.25~2 mm 团聚体外),增幅达 22.48%~43.29%。同时,施肥对玉米产量及各品质指标也产生不同影响。施化肥显著提高籽粒产量、淀粉和脂肪含量,但是对蛋白质含量无显著影响。而单施有机肥以及有机无机肥配施均显著提高籽粒产量及各品质含量,且以单施有机肥对产量和淀粉含量的提升效果最明显,分别增加 255.15%和 1.67%,有机无机肥配施对蛋白质和脂肪含量的提升效果最明显,分别增加 35.34%和 25.28%。结合土壤肥力指标与作物产量、品质之间的关系分析,土壤有机碳、各粒径团聚体及粉黏粒组分中有机碳含量与作物产量之间存在较强的正相关关系。因此施肥增加了采煤塌陷区复垦土壤的固碳量,特别是有机无机肥配施(MNPK),显著提高团聚体中有机碳含量(尤其是<0.25 mm 团聚体),进而促进土壤肥力提升,提高作物产量与品质。

参考文献:

- [1] 刘兴华,章海波,李远,等.黄河三角洲滩涂—湿地—旱地土壤团聚体有机质组分变化规律[J].土壤学报,2019,56(2):374-385.
- [2] 陆太伟,蔡岸冬,徐明岗,等.施用有机肥提升不同土壤团聚体有机碳含量的差异性[J].农业环境科学学报,2018,37(10):2183-2193.
- [3] 张淑香,张文菊,徐明岗.土壤活性有机碳的影响因素与综合分析[J].中国农业科学,2020,53(10):1178-1179.
- [4] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(14): 2099-2103.
- [5] 孟庆英,邹洪涛,韩艳玉,等.秸秆还田量对土壤团聚体有机碳和玉米产量的影响[J].农业工程学报,2019,35(23):119-125.
- [6] 袁晶晶,同延安,卢绍辉,等.生物炭与氮肥配施改善土壤团聚体结构提高红枣产量[J].农业工程学报,2018,34(3):159-165.
- [7] 李景,吴会军,武雪萍,等.长期保护性耕作提高土壤大团聚体含量及团聚体有机碳的作用[J].植物营养与肥料学报,2015,21(2):378-386.

- [8] Besnard E, Chenu C, Balesdent J, et al. Fate of particulate organic matter in soil aggregates during cultivation[J]. *Europe Journal of Soil Science*, 1996, 47(4): 495-500.
- [9] 李磊, 张玉军, 申凤敏, 等. 长期施肥对红壤性水稻土不同土层活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(6): 1189-1201.
- [10] 毛霞丽, 陆扣萍, 何丽芝, 等. 长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. *土壤学报*, 2015, 52(4): 828-838.
- [11] 吕欣欣, 丁雪丽, 张彬, 等. 长期定位施肥和地膜覆盖对棕壤团聚体稳定性及其有机碳含量的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2018, 35(1): 1-10.
- [12] 李文军, 杨基峰, 彭保发, 等. 施肥对洞庭湖平原水稻土团聚体特征及其有机碳分布的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(20): 4007-4015.
- [13] 苏慧清, 韩晓日, 杨劲峰, 等. 长期施肥棕壤团聚体分布及其碳氮含量变化[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(4): 924-932.
- [14] 谢钧宇. 冬小麦/夏玉米体系长期施肥土壤固碳潜力及机制研究[D]. 陕西 杨陵: 西北农林科技大学, 2017.
- [15] Yang Z H, Singh B R, Hansen S. Aggregate associated carbon, nitrogen and sulfur and their ratios in long-term fertilized soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 95(1/2): 161-171.
- [16] Chen X P, Cui Z L, Fan M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. *Nature*, 2014, 514: 486-489.
- [17] Zhang F S, Chen X P, Vitousek P. An experiment for the world[J]. *Nature*, 2013, 497: 33-35.
- [18] 金继运, 李家康, 李书田. 粮食作物对化肥的需求分析[J]. *磷肥与复肥*, 2006, 21(3): 1-6.
- [19] 路海东, 薛吉全, 郝引川, 等. 播期对雨养旱地春玉米生长发育及水分利用的影响[J]. *作物学报*, 2015, 41(12): 1906-1914.
- [20] 罗来超, 王朝辉, 惠晓丽, 等. 覆膜栽培对旱地小麦籽粒产量及硫含量的影响[J]. *作物学报*, 2018, 44(6): 886-896.
- [21] Chen Y L, Xiao C X, Wu D L, et al. Effects of nitrogen application rate on grain yield and grain nitrogen concentration in two maize hybrids with contrasting nitrogen remobilization efficiency[J]. *Europe Journal of Agronomy*, 2015, 62: 79-89.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会. 中华人民共和国国家标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [23] Xie J Y, Hou M M, Zhou Y T, et al. Carbon sequestration and mineralization of aggregate-associated carbon in an intensively cultivated Anthrosol in north China as affected by long term fertilization[J]. *Geoderma*, 2017, 296: 1-9.
- [24] Xie J Y, Peng B, Wang R J, et al. Responses of crop productivity and physical protection of organic carbon by macroaggregates to long-term fertilization of an Anthrosol[J]. *Europe Journal of Soil Science*, 2018, 69: 555-567.
- [25] Luo L C, Wang Z H, Huang M, et al. Plastic film mulch increased winter grain but reduced its protein content in dryland of northwest China[J]. *Field Crop Research*, 2018, 218: 69-77.
- [26] Luo L C, Hui X L, Wang Z H, et al. Multi-site evaluation of plastic film mulch and nitrogen fertilization for wheat grain yield, protein content and its components in semiarid areas of China[J]. *Field Crop Research*, 2019, 240: 86-94.
- [27] 曹寒冰, 谢钧宇, 强久次仁, 等. 施肥措施对复垦土壤团聚体碳氮含量和作物产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(18): 135-143.
- [28] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. *Soil Science of Social American Journal*, 1986, 50: 627-633.
- [29] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [30] 张秀芝, 李强, 高洪军, 等. 长期施肥对黑土水稳性团聚体稳定性及其有机碳分布的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(6): 1214-1223.
- [31] 赵亚南. 长期不同施肥下紫色水稻土有机碳变化特征及影响机制[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
- [32] Kuzyakov Y. Priming effects: Interactions between living and dead organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42: 1363-1371.
- [33] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. *Plant Soil*, 2002, 41: 155-176.
- [34] Wang R J, Zhou J X, Xie J Y, et al. Carbon sequestration in irrigated and rain-fed cropping systems under long-term fertilization regimes[J/OL]. *Journal of Soil Science Plant Nutrient*, 2020, 2016(6). DOI: 10.1007/s42729-020-00181-6.
- [35] 陈延玲. 协调玉米高产与氮高效转运的机制[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [36] 王存连, 黄智鸿, 张晓霞. 有机无机肥料配合施用对通油一号玉米品质及产量的影响[J]. *河北北方学院学报(自然科学版)*, 2008, 24(1): 46-50.
- [37] 潘晓丽. 不同水肥措施对小麦玉米水氮吸收与利用的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- [38] 刘淑云. 不同施肥制度对夏玉米产量与品质形成的影响及其生理机制[D]. 山东 泰安: 山东农业大学, 2005.
- [39] 王月福, 于振文, 李尚霞, 等. 土壤肥力和施氮量对小麦根系氮同化及子粒蛋白质含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(1): 39-44.
- [40] 蒋仁成, 厉志华, 李德民. 施肥对小麦、玉米产量和品质的影响[J]. *土壤肥料*, 1991, 1(1): 13-16.