

DOI: 10.12357/cjea.20230517

王治统, 凌俊, 刘子熙, 赵德强, 李泽学, 周顺利, 袁兴茂, 李霄鹤, 温媛. 秸秆还田方式对土壤理化性质和玉米产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(4): 663–674

WANG Z T, LING J, LIU Z X, ZHAO D Q, LI Z X, ZHOU S L, YUAN X M, LI X H, WEN Y. Effect of straw return practices on soil physico-chemical properties and maize yield[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(4): 663–674

秸秆还田方式对土壤理化性质和玉米产量的影响^{*}

王治统¹, 凌俊¹, 刘子熙¹, 赵德强¹, 李泽学¹, 周顺利¹, 袁兴茂², 李霄鹤²,
温媛^{1**}

(1. 中国农业大学农学院 北京 100193; 2. 河北省农业机械化研究所有限公司 石家庄 050051)

摘 要: 高强度集约化农业生产导致耕地质量下降、农田土壤退化, 而秸秆还田是改善土壤环境、提高土壤有机质的重要途径。目前的秸秆还田方式主要针对表土, 忽略了对底土质量的改善效果。本研究设置了秸秆富集深层还田、秸秆覆盖还田、秸秆浅旋还田、秸秆深翻还田、秸秆不还田 5 种秸秆还田方式, 以探究不同秸秆还田方式对不同土层土壤理化性质和玉米产量的影响, 为高效利用秸秆资源、提高土壤质量和作物产量提供科学依据。本研究结果表明: 秸秆覆盖还田提高了 0~20 cm 土层土壤含水量、有机碳含量、氮循环酶活性; 深翻还田提高了表层土壤水分含量与磷循环酶活性; 秸秆富集深层还田显著降低了 20~40 cm 土层土壤容重、增加了土壤含水量、有机碳含量、全氮含量、矿质氮含量以及胞外酶活性。与不还田相比, 秸秆还田处理下玉米产量显著提高 13.4%~21.0%。因此, 秸秆还田是秸秆资源有效利用的重要方式, 有利于改善农田土壤环境, 提高土壤养分含量, 减少化肥使用, 促进作物增产, 对农业可持续发展具有重要意义。秸秆富集深层还田对于改善底土质量, 扩大土壤碳库, 提高耕地质量和土地生产力具有重要作用, 可以作为构建深厚肥沃耕层的有效措施。

关键词: 秸秆还田; 土壤理化性质; 玉米产量; 土壤酶; 秸秆富集深层还田

中图分类号: S513; S156.92

Effect of straw return practices on soil physico-chemical properties and maize yield^{*}

WANG Zhitong¹, LING Jun¹, LIU Zixi¹, ZHAO Deqiang¹, LI Zexue¹, ZHOU Shunli¹, YUAN Xingmao²,
LI Xiaohu², WEN Yuan^{1**}

(1. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Hebei Agricultural Mechanization Research Institute Co., Ltd., Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: Highly intensive agricultural production has led to a decline in the quality of cultivated land and soil degradation. Straw return is an important method for improving the soil environment and increasing soil organic matter content. However, the current method of straw return mainly focuses on the surface soil, ignoring its effects on improving the quality of the subsoil. Five straw return practices were investigated: deep-injected straw incorporation (DI-SI), straw mulching (SM), straw incorporation (SI), deep-ploughed straw incorporation (DP-SI), and straw removal (SR). The objective of this study was to investigate the impacts of various straw return methods on the physical and chemical properties of different soil layers and maize yield. The aim is to offer scientific

^{*} 国家重点研发计划项目 (2021YFD1500500)、国家自然科学基金项目 (31901472) 和国家玉米产业技术体系 (CARS-02-16) 资助

^{**} 通信作者: 温媛, 主要研究方向为农田高效栽培管理模式构建、农田生态系统固碳减排、农田碳氮循环。E-mail: wenyuan@cau.edu.cn
王治统, 主要研究方向为农田高效栽培管理模式构建。E-mail: wangzhitong@cau.edu.cn

收稿日期: 2023-09-14 接受日期: 2023-12-26

^{*} This study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2021YFD1500500), the National Natural Science Foundation of China (31901472), and the China Agriculture Research System of MOF and MARA (CARS-02-16).

^{**} Corresponding author, E-mail: wenyuan@cau.edu.cn
Received Sep. 14, 2023; accepted Dec. 26, 2023

evidence for the efficient utilization of straw resources and contribute to enhancing soil quality and crop yield. The results showed that straw mulching increased soil water content, soil organic carbon, and N-acquisition enzyme activities in the 0–20 cm soil layer; deep-ploughed straw incorporation increased soil water content and P-acquisition enzyme activities in the surface soil. Deep-injected straw incorporation significantly decreased soil bulk density and increased soil water content, soil organic carbon, total nitrogen content, mineral nitrogen content, and extracellular enzyme activities in the 20–40 cm soil layer. Compared with straw removal, straw return methods significantly increased maize yield by 13.4%–21.0%. Therefore, straw return is an important way to efficiently utilize straw resources, which is conducive to improving the soil environment of farmlands, increasing soil nutrient content, reducing the use of chemical fertilizers, promoting crop yield, and significantly contributing to the sustainable development of agriculture. Deep-injected straw incorporation plays an important role in improving subsoil quality, expanding the soil carbon pool, and improving cultivated land quality and productivity, and can be considered an effective measure to build a deep and fertile plow layer.

Keywords: Straw return; Soil physico-chemical properties; Maize yield; Soil enzyme; Deep-injected straw incorporation

随着农业技术的高速发展,粮食产量不断增长,作物秸秆产量也随之提高。2020 年,我国秸秆资源总量达到 8.56 亿 t,其中玉米秸秆约有 2.9 亿 t^[1],占秸秆总量的 1/3。秸秆还田可以显著改善土壤结构,增加大团聚体数目,提高土壤有机质,为土壤补充氮、磷和微量元素等养分,提高土地生产力^[2-4]。此外,秸秆还可以为土壤微生物提供丰富的有机质,从而提高微生物活性,并促进酶的释放,加快农田土壤养分周转速率^[5]。由于秸秆中富含氮、磷、钾等养分,经过腐解释放能够供给下茬作物利用^[6],从而有效增加作物产量^[7]。因此,秸秆还田被认为是农业可持续发展的有效措施,并得到大范围推广。然而不同秸秆还田方式对土壤理化性质和作物产量的影响存在差异,探究合适的秸秆还田方式能够为农田土壤生产力和粮食产量的提高提供科学依据。目前,农业生产中存在多种秸秆还田方式,如免耕覆盖还田、浅旋还田、深翻还田等。免耕覆盖还田能够稳定土壤结构,促进有机碳的积累,减少矿化^[8-9]。但常年免耕会使土壤容重增加,孔隙度减少,影响作物的出苗和根系下扎^[10]。秸秆浅旋还田改善了土壤表层理化性质,有效提高表土有机碳含量,但对底层土壤的培肥能力有限^[11]。长期浅旋还田还会使耕层变浅、犁底层增厚,影响作物根系的垂直分布^[12-13]。深翻还田能够改变耕层结构,打破犁底层,增加下层土壤养分,有利于创造较深厚的耕层,具有增产效果^[14]。但是,翻耕费时费工,作业过程还伴随着剧烈的土壤扰动,不利于土壤团聚体的形成^[15],可能加速有机质矿化,导致养分损失和温室气体的排放^[16]。近年来,一种秸秆深还田新模式(即秸秆富集深层还田技术)逐渐发展成熟,能够在充分利用大量秸秆的基础上,快速培肥亚表层,改善土壤结构,提升耕地土壤质量。Zheng 等^[17]在东北黑土地开展的试验发现秸秆深层还田可将土壤有机碳含量提高 27.47%。Yang 等^[18-19]在南

方稻麦轮作体系中也发现将水稻秸秆深层还田有利于维持最适土壤含水量,截留淋溶氮,并提高该土层土壤酶活性的效果。总体来看,前人研究多在南方水稻(*Oryza sativa* L.)田和东北玉米(*Zea mays* L.)田开展,鲜有研究关注华北平原。华北平原是中国最大的玉米种植区,占全国种植面积的 35% 以上,粮食生产占全国粮食总产量的 30% 以上^[20],高度集约化的种植模式生产出了大量玉米秸秆,合理的秸秆还田方式对实现区域农业绿色可持续发展具有重要意义。因此,本试验设置了 5 种秸秆还田方式:秸秆富集深层还田、浅旋还田、覆盖还田、深翻还田和不还田,分析不同秸秆还田方式对表土(0–20 cm)和底土(20–40 cm)的土壤理化性质和玉米产量影响,并阐明不同秸秆还田方式对土壤的固碳培肥机制,以期探索出适宜的秸秆还田方式,为促进华北平原玉米秸秆高质高效利用、提高耕地质量和作物产量提供理论与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于河北省沧州市吴桥县中国农业大学吴桥实验站(37°36'N, 116°21'E)展开。该地位于华北平原东部,属于温带半干旱季风性气候,年平均气温 13℃,降水量约 500 mm,雨季降雨集中在 7—9 月(玉米季)。该地区典型的种植方式为冬小麦(*Triticum aestivum* L.)-夏玉米两熟制,土壤为潮土粉质土壤,0–20 cm 土层土壤有机碳含量为 6.32 g·kg⁻¹,全氮为 0.52 g·kg⁻¹,pH 为 8.04,容重为 1.34 g·cm⁻³,电导率为 146.56 μS·cm⁻¹。

1.2 试验设计

试验于 2019 年 10 月布设,设置秸秆富集深层还田(DI-SI)、覆盖还田(SM)、浅旋还田(SI)、深翻还田(DP-SI)与秸秆不还田(SR)共 5 个处理,每个处理 3 个重复,共 15 个小区,小区面积为 120 m²。秸秆

还田处理主要针对玉米秸秆, 还田秸秆均粉碎至 5 cm 左右, 具体操作如下:

1) 秸秆富集深层还田处理

在玉米收获后, 利用秸秆深还机将秸秆集中粉碎深还进底层土壤中(该机器幅宽 1.8 m, 将 3 行玉米秸秆收拢粉碎, 并直接注入到 18~38 cm 土层深度, 形成一条宽度为 25 cm 的秸秆带), 通过错位还田的方式实现全田秸秆富集深还, 3 年完成 1 个周期。土壤样品采集位置为第 2 年富集深还秸秆带。秸秆富集深还条带处土壤扰动深度约为 40 cm, 而后全田进行旋耕(约 15 cm)和小麦播种。

2) 秸秆覆盖还田处理

在玉米收获后, 将秸秆粉碎置于地表(0 cm), 小麦免耕播种。

3) 秸秆浅旋还田处理

在玉米收获后, 将秸秆粉碎, 利用旋耕机进行旋耕(秸秆均匀分布在 15 cm 表层土中)和小麦播种。

4) 秸秆深翻还田处理

在玉米收获后, 将秸秆粉碎, 用深翻机翻地, 再进行旋耕(秸秆均匀分布在 30 cm 表层土中)和小麦播种。

5) 秸秆不还田处理

在玉米收获后, 将秸秆从地面清除, 再进行旋耕(深度 15 cm)和小麦播种。

小麦季, 除秸秆不还田处理将小麦秸秆移除外, 其余 4 个处理均采取留茬还田(约 20 cm), 且下茬玉米均进行免耕播种。

小麦品种为‘济麦 22’, 每年 10 月中旬播种, 播种量为 $350 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。底肥为尿素 [$300 \text{ kg}(\text{N}) \cdot \text{hm}^{-2}$]、磷酸二铵 [$300 \text{ kg}(\text{P}_2\text{O}_5) \cdot \text{hm}^{-2}$] 和硫酸钾 [$150 \text{ kg}(\text{K}_2\text{O}) \cdot \text{hm}^{-2}$]。拔节期灌溉量 $1125 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。玉米品种为‘郑单 958’, 于每年 6 月中旬播种, 密度为 $6.75 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$, 行距为 60 cm。播后灌溉量 $750 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, 底肥为尿素 [$100 \text{ kg}(\text{N}) \cdot \text{hm}^{-2}$]、磷酸二铵 [$230 \text{ kg}(\text{P}_2\text{O}_5) \cdot \text{hm}^{-2}$] 和硫酸钾 [$100 \text{ kg}(\text{K}_2\text{O}) \cdot \text{hm}^{-2}$], 于 7 月下旬追肥尿素 [$200 \text{ kg}(\text{N}) \cdot \text{hm}^{-2}$]。其余农事操作与当地农户一致。

1.3 取样及测定方法

1.3.1 土壤理化性质

在 2021 年 10 月玉米成熟期, 使用土钻采集各处理 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤样品, 每个重复(小区)随机采集 3 个样点混合成 1 个样品。相较于其他处理, 富集深层还田处理的秸秆富集成条带, 使田间土壤呈现异质性。为了全面评估秸秆富集深层还田的影响和效果, 秸秆条带上(DI-SIa)和条带侧(DI-SIb)的土壤样品进行分别采集。由于深还机幅宽为

1.8 m, 因此条带侧取样位置设定为距条带 90 cm。样品采集后装入自封袋, 并迅速运回实验室。挑去鲜土中肉眼可见的秸秆、根系等杂质, 过 2 mm 筛, 一部分鲜土用于测定土壤氨态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、速效磷、可溶性有机碳(DOC), 以及土壤酶活性; 另一部分鲜土自然风干, 研磨后过 0.15 mm 筛, 用于测定有机碳(SOC)、全氮(TN)、pH 和电导率(EC)。

土壤 pH 使用水土比 2.5 : 1 (v : m) 浸提后用 pH 计进行测量。土壤 EC 采用电导率仪测量。SOC 采用重铬酸钾氧化法进行测定^[21]。TN 使用凯氏定氮法测定^[22]。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 K_2SO_4 溶液浸提, 水土比为 5 : 1 (v : m), 分别采用比色法测定^[23]。DOC 在鲜土浸提后采用 TOC 仪(TOC-L CPN, Shimadzu Corp., Tokyo, Japan)测定。速效磷采用钼蓝比色法^[24], 用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaHCO_3 溶液浸提鲜土样品, 水土比为 10 : 1 (v : m)。0~40 cm 土层的土壤容重(BD), 使用 100 cm^3 的环刀, 每 10 cm 取一次样, 105°C 烘干至恒重, 测定单位体积的土壤重量。

1.3.2 土壤酶活性

土壤酶活测定主要包括碳循环酶、氮循环酶、磷循环酶和氧化酶。其中, 碳循环酶包括 β -1,4-葡萄糖苷酶、 β -1,4-木糖苷酶和 β -D-纤维二糖水解酶; 氮循环酶包括 β -1,4-N-乙酰葡萄糖苷酶和 L-亮氨酸氨基肽酶; 磷循环酶包括碱性磷酸酶; 氧化酶包括酚氧化酶和过氧化物酶^[25]。主要操作步骤如下: 称取 1 g 鲜土并加入 50 mL 蒸馏水, $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 振荡 30 min, 将悬浊液转移至玻璃器皿, 在磁力搅拌器持续搅拌保持均质情况下移取 50 μL 于 96 孔微孔板中, 并依次加入 50 μL 缓冲液和 100 μL 反应底物。以 4-甲基伞叶酮(MUB)和 7-氨基-4-甲基香豆素(AMC)分别制作标准曲线(0、100、200、500、800 和 1200 $\text{pmol} \cdot \text{well}^{-1}$), 其中 β -1,4-葡萄糖苷酶、 β -1,4-木糖苷酶、 β -D-纤维二糖水解酶、 β -1,4-N-乙酰葡萄糖苷酶和碱性磷酸酶参考 MUB 标准曲线, L-亮氨酸氨基肽酶参考 AMC 标准曲线。最后在微孔板中于 25°C 下培养 30 min、60 min 和 120 min, 使用荧光酶标仪(Fluoroskan, ThermoFisher, USA)在激发光波长为 355 nm、发射光波长为 460 nm 条件下进行荧光测定。参考标准溶液中的荧光值, 将土壤样品中的荧光值转化为 AMC 和 MUB 的含量。以 1-3,4-二羟基苯丙氨酸为底物, 在 96 孔微孔板上用分光光度法测定酚氧化酶和过氧化物酶活性^[26]。土壤酶活的单位为 $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。用 Z 分数对 8 种土壤酶进行标准化计算, 并对同一

类型的酶活进行归一化计算^[26]:

$$C\text{-acq} = \sqrt[3]{BG \times BX \times CBH} \quad (1)$$

$$N\text{-acq} = \sqrt[3]{NAG \times LAP} \quad (2)$$

$$P\text{-acq} = AP \quad (3)$$

$$Ox\text{-acq} = \sqrt[3]{PhOx \times PEO} \quad (4)$$

式中: C-acq 表示碳循环酶, BG 表示 β -1,4-葡萄糖苷酶, BX 表示 β -1,4-木糖苷酶, CBH 表示 β -D-纤维二糖水解酶; N-acq 表示氮循环酶, NAG 表示 β -1,4-N-乙酰葡萄糖苷酶, LAP 表示 L-亮氨酸氨基肽酶; P-acq 表示磷循环酶, AP 表示碱性磷酸酶; Ox-acq 表示氧化酶, PhOx 表示酚氧化酶, PEO 表示过氧化物酶。

1.3.3 玉米产量

在玉米成熟期,采用 10 m 双行的方法对玉米进行测产。同时选取有代表性的玉米穗进行穗粒数的测定,脱粒风干后称取籽粒重量和百粒重。

1.4 数据分析

分别使用 SPSS 22.0、双因素方差分析 (ANOVA) 和 Origin 2022 进行数据分析、显著性分析和作图。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

在 0~20 cm 土层中, SM 和 DP-SI 土壤含水量分别比 SR 高 21.2% 和 19.1% ($P<0.05$)。20~40 cm 土层中, DI-SIa 土壤含水量比 SM 和 DP-SI 处理分别高 18.3% ($P<0.05$) 和 15.1% ($P<0.05$) (图 1)。0~20 cm 土层

中, SM 容重为 $1.51 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 显著高于 DP-SI; 20~40 cm 土层中, DI-SIa 的土壤容重相对于 SM、SI、DP-SI 和 SR, 分别降低 6.9%、6.2%、3.7% 和 6.2% ($P<0.05$), DI-SIb 容重与其他处理差异不显著 (图 1)。

DI-SIa 和 DI-SIb 在 0~20 cm 土层中土壤 pH 分别为 7.96 和 8.19, 显著低于其他处理 ($P<0.05$); 20~40 cm 土层, DP-SI 的土壤 pH 比其他处理高 3.0%~8.4% ($P<0.05$), DI-SIa、SI 和 SR 间无显著差异 (图 2A)。不同秸秆还田方式对 0~20 cm 和 20~40 cm 土层的土壤电导率无显著影响 (图 2B)。0~20 cm 土层 SOC 含量均高于 20~40 cm 土层。0~20 cm 土层中, SM 的 SOC 含量最高 ($6.64 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 且比 DP-SI 高 42.1% ($P<0.05$)。20~40 cm 土层中, DI-SIa 的 SOC 含量为 $5.04 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 比 SM、SI、DP-SI 和 SR 分别高 115.7%、122.7%、49.4% 和 139.5% ($P<0.05$), DI-SIb 与其他处理无显著性差异 (图 2C)。除 DI-SIa 外, 各处理 0~20 cm 土层 TN 含量均高于 20~40 cm 土层。0~20 cm 土层 TN 含量无显著性差异; 在 20~40 cm 土层中, DI-SIa 的 TN 含量为 $0.80 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 比 SM、SI、DP-SI 和 SR 处理分别高 116.8%、167.5%、102.2% 和 134.3% ($P<0.05$), 其他处理间无显著性差异 (图 2D)。

不同秸秆还田方式对 0~20 cm 土层铵态氮和硝态氮含量无显著影响。20~40 cm 土层中, DI-SIa 的土壤铵态氮含量比 SM 和 SI 分别高 5.5% 和 5.4% ($P<0.05$), 其土壤硝态氮含量在 20~40 cm 土层中也是最高的, 但是与 SM、SI、DP-SI 和 SR 无显著差异, DI-SIb 的土壤硝态氮含量显著低于 DI-SIa, 但是与 SI、

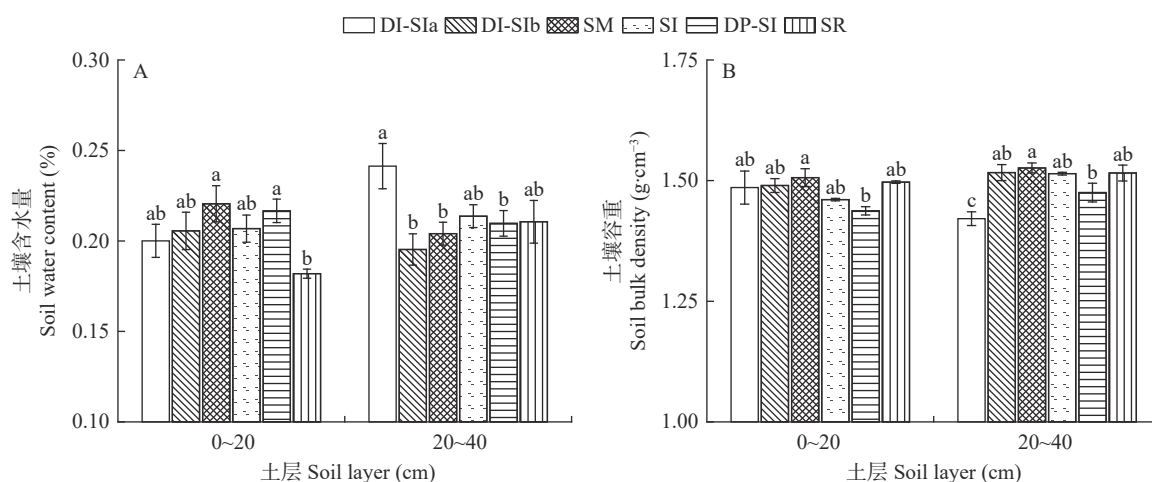


图 1 秸秆还田方式对土壤含水量和土壤容重的影响

Fig. 1 Effects of straw return methods on soil water content and bulk density

不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。DI-SIa: 秸秆富集深层还田条带上; DI-SIb: 秸秆富集深层还田条带侧; SM: 秸秆覆盖还田; SI: 秸秆浅旋还田; DP-SI: 秸秆深翻还田; SR: 秸秆不还田。Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments in the same soil layer ($P<0.05$). DI-SIa: deep-injected straw incorporation (sampled on the straw cluster); DI-SIb: deep-injected straw incorporation (sampled beside the straw cluster); SM: straw mulching; SI: straw incorporation; DP-SI: deep-ploughed straw incorporation; SR: straw removal.

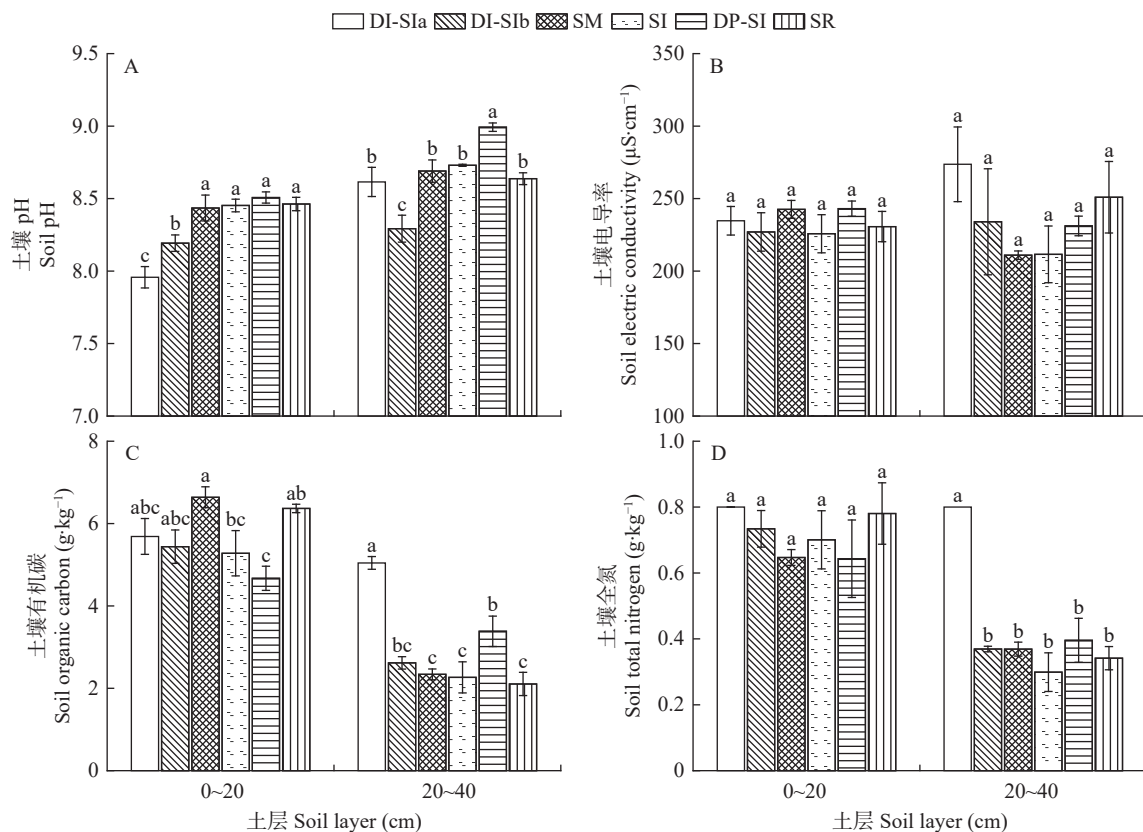


图2 秸秆还田方式对土壤 pH、电导率、有机碳和全氮的影响

Fig. 2 Effects of straw return methods on soil pH, conductivity, soil organic carbon and total nitrogen

不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。DI-SIa: 秸秆富集深层还田条带上; DI-SIb: 秸秆富集深层还田条带侧; SM: 秸秆覆盖还田; SI: 秸秆浅旋还田; DP-SI: 秸秆深翻还田; SR: 秸秆不还田。Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments in the same soil layer ($P < 0.05$). DI-SIa: deep-injected straw incorporation (sampled on the straw cluster); DI-SIb: deep-injected straw incorporation (sampled beside the straw cluster); SM: straw mulching; SI: straw incorporation; DP-SI: deep-ploughed straw incorporation; SR: straw removal.

DP-SI 和 SR 无显著差异 (图 3)。0~20 cm 土层的土壤可溶性有机碳含量均高于 20~40 cm; 在 0~20 cm 土层中, DI-SIa 可溶性有机碳含量为 $181.61 \text{ mg kg}^{-1}$, 比 SM、SI、DP-SI 和 SR 处理分别高 63.2%、185.1%、84.2% 和 146.4% ($P < 0.05$), DI-SIb 与其他处理无显著差异; 20~40 cm 土层中土壤可溶性有机碳含量在各处理之间的趋势与 0~20 cm 类似, DI-SIa 比 SM、SI、DP-SI 和 SR 分别高 39.3%、135.9%、131.3% 和 44.0% (图 3)。0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤速效磷含量各处理趋势一致, SR 均最高, 其次是 DI-SIb、DI-SIa、SM、SI 和 DP-SI, 各处理间差异均显著 (图 3)。

2.2 土壤酶活性

0~20 cm 土层中, SM 处理较其他处理显著提高了过氧化物酶活性, DP-SI 处理的碱性磷酸酶活性显著高于 DI-SIa 和 SI 处理 (图 4A); 20~40 cm 土层中, DI-SIa 和 SR 处理的 L-亮氨酸氨基肽酶显著高于 SM、SI 和 DP-SI 处理, DI-SIa 处理中除 L-亮氨酸氨基肽酶外, 其余各土壤酶活性均高于 SM、SI、DP-SI 和

SR 处理, DI-SIb 中的 β -1,4-木糖苷酶、酚氧化酶和过氧化物酶活性也高于 SM、SI、DP-SI 和 SR 处理, SR 处理的 L-亮氨酸氨基肽酶活性高于 SM、SI、DP-SI 处理 (图 4B)。DI-SIa 在 20~40 cm 土层土壤中碳、氮、磷循环相关酶和氧化酶活性显著高于其他处理, 同时与 0~20 cm 无显著差异, 其余处理在 0~20 cm 土层酶活性均显著高于 20~40 cm。0~20 cm 土层中土壤碳循环相关酶活性没有显著差异, 20~40 cm 土层土壤中, DI-SIa 处理碳循环酶活性最高, 且显著高于 SI 处理 (图 4C)。SM 处理的氮循环酶活性在 0~20 cm 土层土壤中最高, 分别比 SI 和 DP-SI 高 57.6% ($P < 0.05$) 和 55.7% ($P < 0.05$); DI-SIa 处理在 20~40 cm 土层土壤中氮循环相关酶活性最高, 比 SM、SI、DP-SI 和 SR 处理分别高 114.3% ($P < 0.05$)、201.5% ($P < 0.05$)、257.3% ($P < 0.05$) 和 134.7% ($P < 0.05$), 其余处理间没有显著性差异 (图 4D)。0~20 cm 土层土壤中, DP-SI 磷循环相关酶活性分别比 DI-SIa 和 SI 提高 12.7% ($P < 0.05$) 和 37.6% ($P < 0.05$); 20~40 cm 土层中,

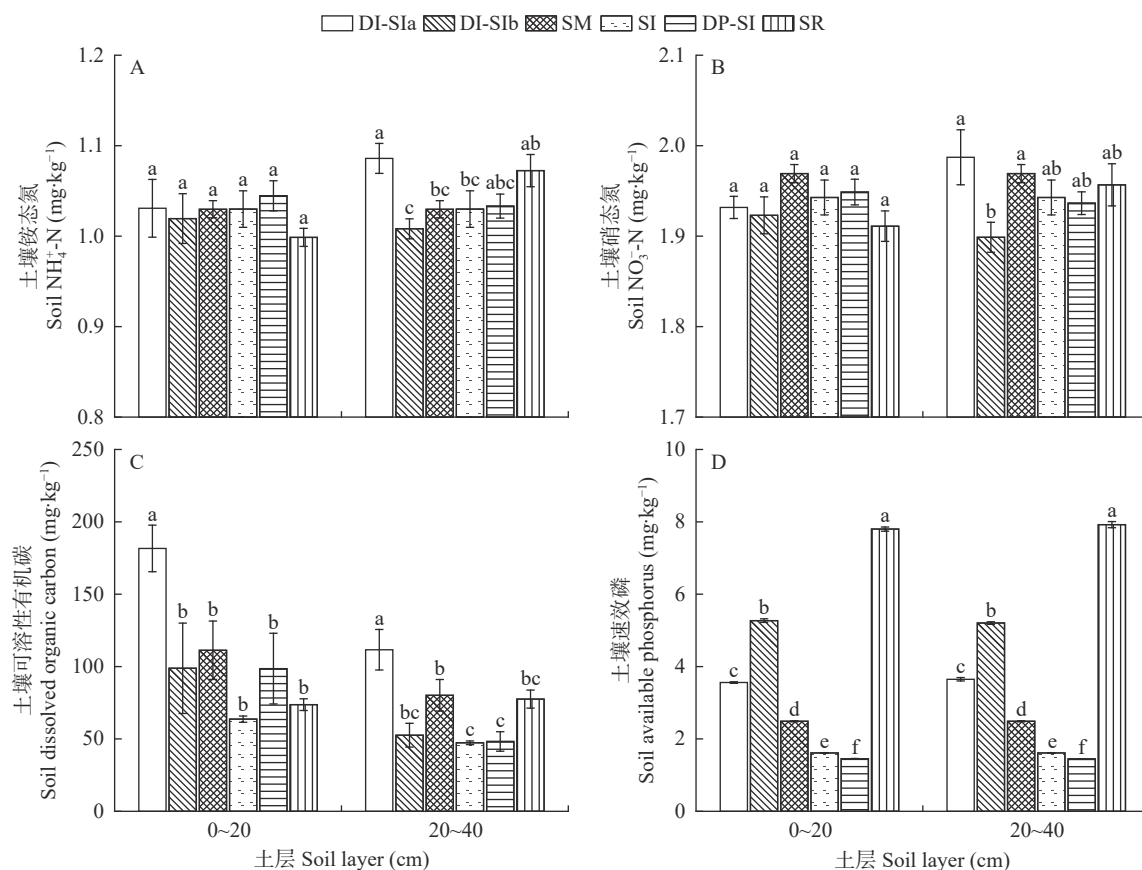


图 3 秸秆还田方式对土壤铵态氮、硝态氮、可溶性有机碳和速效磷的影响

Fig. 3 Effects of straw return methods on soil NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, soil dissolved organic carbon and available phosphorus

不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。DI-SIa: 秸秆富集深层还田条带上; DI-SIb: 秸秆富集深层还田条带侧; SM: 秸秆覆盖还田; SI: 秸秆浅旋还田; DP-SI: 秸秆深翻还田; SR: 秸秆不还田。Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments in the same soil layer ($P < 0.05$). DI-SIa: deep-injected straw incorporation (sampled on the straw cluster); DI-SIb: deep-injected straw incorporation (sampled beside the straw cluster); SM: straw mulching; SI: straw incorporation; DP-SI: deep-ploughed straw incorporation; SR: straw removal.

DI-SIa 磷循环相关酶活性分别比 SM 和 SI 高 31.5% ($P < 0.05$) 和 46.1% ($P < 0.05$) (图 4E)。SR 的氧化酶活性在 0~20 cm 土层土壤中最低, 分别比 DI-SIa、SM 和 SI 低 25.4% ($P < 0.05$)、25.6% ($P < 0.05$) 和 24.8% ($P < 0.05$), 20~40 cm 土层土壤中, DI-SIa 的氧化酶活性最高, 分别比 SM、SI、DP-SI 和 SR 高 25.3% ($P < 0.05$)、45.5% ($P < 0.05$)、29.3% ($P < 0.05$) 和 41.9% ($P < 0.05$, 图 4F)。0~40 cm 土层土壤中 SOC 含量与碳循环酶呈显著正相关关系 ($R^2 = 0.77$, $P < 0.01$), 土壤 TN 含量与氮循环酶也呈显著正相关关系 ($R^2 = 0.73$, $P < 0.01$) (图 5)。

2.3 玉米产量

与 SR 相比, DI-SI、SM、SI 和 DP-SI 玉米产量提高 13.4%~21.0% ($P < 0.05$)。DI-SI 显著提高了玉米籽粒的百粒重, 分别比 SM、SI、DP-SI 和 SR 显著高 10.7%、10.7%、9.5% 和 22.9% ($P < 0.05$)。各处理的穗数和穗粒数没有显著性差异 (表 1)。

3 讨论

3.1 不同秸秆还田方式对土壤理化性质的影响

土壤含水量是保证作物正常生长的重要条件, 前人研究表明, 秸秆还田增加了土壤毛管孔隙度和含水量^[27-28]。本研究中秸秆还田处理相较于秸秆不还田均提高了表层土壤含水量 (图 1), 同样表明秸秆还田在土壤保水方面的效果。原因可能是秸秆覆盖还田减少阳光直射, 降低了土壤蒸散; 秸秆还田后, 土壤形成大孔隙, 减少了地下毛管水的上移, 从而降低水分散失^[29]; 秸秆还田腐解后有助于形成适宜的土壤团聚体结构^[30], 增强了土壤保水能力。本研究中, 秸秆富集深层还田条带上在 20~40 cm 土层的土壤水分含量高于秸秆不还田和其他秸秆还田处理, 表明秸秆富集深层还田有利于下层土壤保水, 可能是秸秆富集深层还田打破了犁底层, 有利于灌溉水和雨水下渗。Baumhardt 等^[31]的研究也证明了合理的深耕可以提高底土土壤含水量。此外, 秸秆富集深

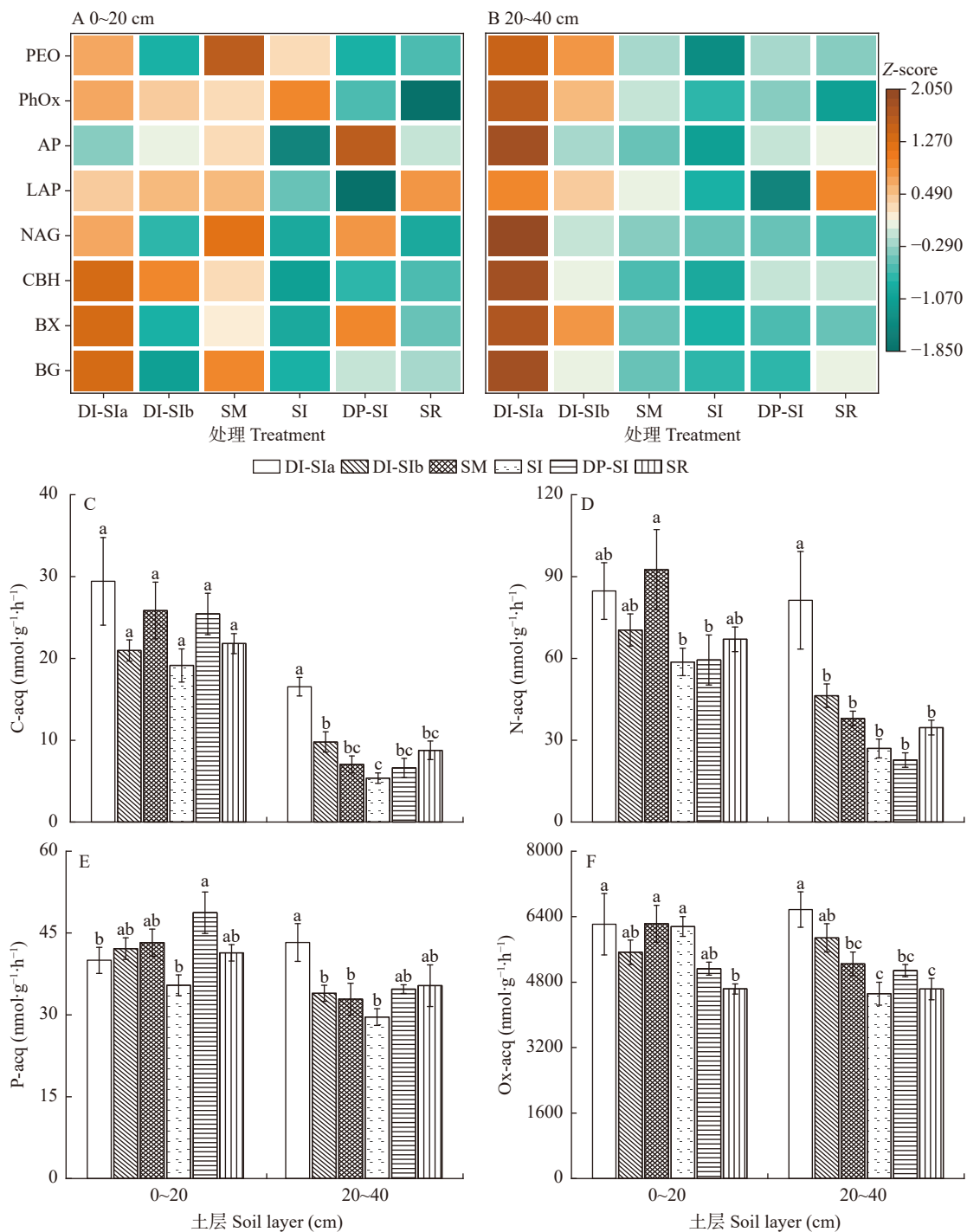


图4 秸秆还田方式对土壤酶活性的影响

Fig. 4 Effects of straw return methods on soil enzyme activities

不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。Z-score: Z 标准分数; BG: β -1,4-葡萄糖苷酶; BX: β -1,4-木糖苷酶; CBH: β -D-纤维二糖水解酶; NAG: β -1,4-N-乙酰葡萄糖苷酶; LAP: L-亮氨酸氨基肽酶; AP: 碱性磷酸酶; PhOx: 酚氧化酶; PEO: 过氧化物酶。DI-SIa: 秸秆富集深层还田条带上; DI-SIb: 秸秆富集深层还田条带侧; SM: 秸秆覆盖还田; SI: 秸秆浅旋还田; DP-SI: 秸秆深翻还田; SR: 秸秆不还田。C-acq: 碳循环酶; N-acq: 氮循环酶; P-acq: 磷循环酶; Ox-acq: 氧化酶。Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments in the same soil layer ($P < 0.05$). Z-score: Z standard score. BG: β -1,4-glucosidase; BX: β -1,4-xylosidase; CBH: β -D-cellobiosidase; NAG: β -1,4-N-acetylglucosaminidase; LAP: L-leucine aminopeptidase; AP: alkaline phosphatase; PhOx: phenol oxidase; PEO: peroxidase. DI-SIa: deep-injected straw incorporation (sampled on the straw cluster); DI-SIb: deep-injected straw incorporation (sampled beside the straw cluster); SM: straw mulching; SI: straw incorporation; DP-SI: deep-ploughed straw incorporation; SR: straw removal. C-acq: C-acquisition; N-acq: N-acquisition; P-acq: P-acquisition; Ox-acq: Oxidase-acquisition.

还田的秸秆集中还田模式下大量秸秆聚集在秸秆沟中,形成腐殖质层,具有很好的吸水 and 保水效果。

土壤容重是土壤重要的物理性质。Yang 等^[32]在研究中发现,由于机械扰动,深松耕作相比于传统

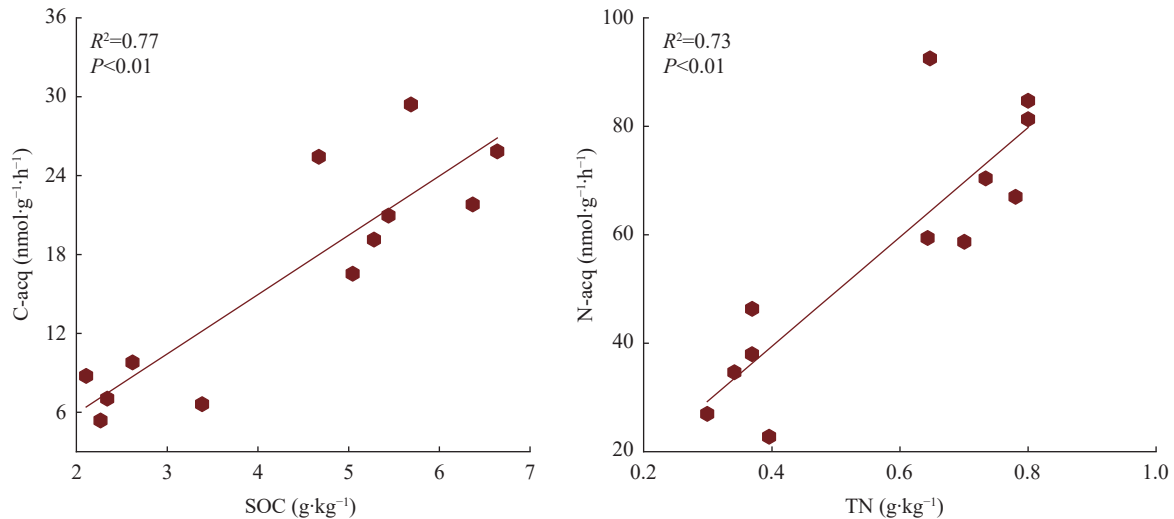


图 5 碳循环和氮循环相关酶活性与有机碳 (SOC) 和全氮 (TN) 的相关性

Fig. 5 Relationships between soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) with related enzymatic activity of C-acquisition and N-acquisition

C-acq: 碳循环酶; N-acq: 氮循环酶。C-acq: C-acquisition; N-acq: N-acquisition.

表 1 秸秆还田方式对玉米产量及其构成要素的影响

Table 1 Effects of straw return methods on maize yield and yield components

处理 Treatment	穗数 Ear number ($\times 10^4$ ears $\cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒数 Grain number per ear	百粒重 100-grain weight (g)	籽粒产量 Grain yield ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)
DI-SI	5.39 $\pm$ 0.15a	659.07 $\pm$ 23.67a	30.10 $\pm$ 0.27a	14.36 $\pm$ 0.43a
SM	5.81 $\pm$ 0.10a	627.97 $\pm$ 9.19a	27.21 $\pm$ 0.06b	13.74 $\pm$ 0.30a
SI	5.89 $\pm$ 0.12a	613.89 $\pm$ 8.75a	27.12 $\pm$ 0.08b	13.48 $\pm$ 0.11a
DP-SI	5.75 $\pm$ 0.12a	621.44 $\pm$ 8.68a	27.47 $\pm$ 0.30b	13.85 $\pm$ 0.37a
SR	5.64 $\pm$ 0.11a	628.55 $\pm$ 10.47a	24.46 $\pm$ 0.27c	11.88 $\pm$ 0.21b

同列不同小写字母表示各处理间差异显著 ($P < 0.05$)。DI-SI: 秸秆富集深层还田; SM: 秸秆覆盖还田; SI: 秸秆浅旋还田; DP-SI: 秸秆深翻还田; SR: 秸秆不还田。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$). DI-SI: deep-injected straw incorporation; SM: straw mulching; SI: straw incorporation; DP-SI: deep-ploughed straw incorporation; SR: straw removal.

耕作增加了土壤孔隙度,降低了土壤容重。秸秆密度小,腐解后土壤有机质积累,能够降低土壤的颗粒密度^[33],因此,前人认为秸秆还田可以降低土壤容重^[34-36]。这可以解释秸秆富集深层还田条带上秸秆集中还田的 20~40 cm 土层土壤容重显著低于其他处理,且低于条带侧位置 (图 1)。本研究显示覆盖还田处理的土壤容重最高 (图 1),因为该秸秆还田方式下土壤未受到机械扰动,且播种和收获等农机操作也导致土壤进一步压实,容重增大。秸秆腐解能够产生有机酸,有机酸释放 H^+ ,从而降低碱性土壤的 pH^[37]。本研究结果表明,秸秆富集深层还田处理不仅可以降低秸秆条带上的 pH,同时对条带侧也有影响。

作物秸秆还田是增加土壤有机碳含量的有效途径。在 1 项长达 30 年的秸秆还田长期定位实验中,秸秆覆盖还田和浅旋还田的有机碳含量较不还田处理分别提高 17.90% 和 12.26%^[38]。Jin 等^[39]指出,传统秸秆浅旋还田可以在短时间内提高有机碳含量,但仅限于表层土壤,长期来看,秸秆集中深层还田对

土壤有机碳的积累可能优于其他秸秆还田方式。本研究中,覆盖还田处理 0~20 cm 土层土壤有机碳含量最高 (图 2),因为连续在土壤表层投入秸秆使得土壤表层有机碳含量不断提高^[40]。而在 20~40 cm 土层土壤中,秸秆富集深层还田条带上土壤有机碳含量高于其他处理,这是由于该处理将秸秆埋入底层土壤,大量的秸秆补充了底土碳库。土壤微生物介导了碳循环的关键过程,且受温度影响显著,在较高温度下,微生物偏向于代谢碳而非储存碳,导致不稳定有机组分损失^[41],加速土壤有机碳的矿化。富集深层还田条带下层土壤温度较低、水分充足、土壤环境厌氧程度更高,可能有利于微生物碳利用效率的提高,进而有利于秸秆腐殖化和有机碳积累^[42]。与其他还田相比,秸秆深还田表层土壤有机碳含量并未发生显著的降低,并且由于富集深还显著提高了底土有机碳含量。秸秆还田后,在秸秆腐解的过程中可溶性有机碳作为不稳定碳组分得到释放^[43],因此秸秆还田处理的可溶性有机碳含量要高于秸秆不还田处理。

秸秆富集深还田处理伴随着机械开沟, 土壤透水透气性增加, 与其他处理相比, 微生物活性得以提高, 产生更多的可溶性有机碳^[28] (图3)。由此可见, 秸秆富集深还田能够提高底土有机碳的积累和养分释放, 从而提高土壤质量和农田生产力。

土壤中的速效养分能够直接供给作物的生长, 并直接影响土壤肥力的高低, 秸秆腐解释放的养分能够对土壤养分进行补充, 有利于维持农田长期生产力^[44]。刘淑军等^[45]对我国近30年来小麦玉米秸秆资源进行分析, 结果显示充分利用我国小麦和玉米秸秆释放的养分可减少约10%~20%的氮肥和5%~20%的磷肥施用。在本研究中, 0~20 cm土层中各处理的土壤铵态氮和硝态氮含量没有显著差异, 然而秸秆富集深层还田处理下, 秸秆大量还入底土, 随着秸秆腐解和养分释放, 该处理20~40 cm土层中土壤铵态氮和硝态氮含量较高 (图3), 而且底土中土壤全氮含量显著高于其他处理和条带侧 (图2), 说明秸秆深层还田有利于培肥亚耕层土壤。Chen等^[46]的研究显示, 秸秆大量还田后, 秸秆中有机磷的输入, 向土壤中补充了磷, 保持了土壤磷库的相对稳定。土壤中的磷与土壤颗粒结合能力较强^[47], 秸秆还田处理改善了土壤的颗粒结构, 能够增强磷的结合能力, 降低磷的矿化过程; 施用磷肥后, 秸秆还田处理下更好的土壤结构有利于磷的固定, 且秸秆还田处理的作物生长更好, 能够利用更多的磷, 而秸秆不还田处理中施用的磷多以速效形式留存, 造成磷资源的浪费。这可能是本研究中不还田处理土壤速效磷含量较高的原因。

3.2 不同秸秆还田方式对土壤酶活性的影响

土壤酶是土壤健康的重要指标, 在农田生态系统土壤养分循环中起着重要作用。土壤酶有水解酶和氧化酶两大类, 水解酶能够向土壤中输送碳、氮、磷等元素。 β -1,4-葡萄糖苷酶能够将纤维素多糖转变为小分子单糖, β -1,4-N-乙酰葡萄糖苷酶则能够将几丁质分解为氨基葡萄糖, 加快秸秆的分解, 参与土壤碳氮循环^[48]。秸秆还田以后, 增加了有机质和养分有效性, 为微生物生长提供大量底物, 刺激微生物分泌胞外酶^[49]。Gelsomino等^[50]研究表明, 在农田、草原、森林生态系统中, 土壤酶活性显示出随深度增加而降低的趋势, 本研究中除秸秆富集深层还田外, 其余4个处理结果与该研究一致, 可能是由其独特的秸秆处理方式引起的。当秸秆深还田后, 底土中养分的增加和土壤结构的改善为微生物提供了合适的环境, 能够促进微生物生长, 从而分泌更多的胞外酶^[51-52]。

本研究结果显示, 秸秆富集深层还田条带上在20~40 cm土层中的碳氮循环酶活性均得到显著提高, 是因为秸秆的添加刺激土壤微生物分泌更多的酶来分解秸秆, 同时秸秆集中条带还田条件下, 秸秆量较大, 使得该区域微生物能够长期获得碳源。本研究结果显示, 碳循环相关酶活性和土壤有机碳的含量、氮循环相关酶活性和土壤全氮含量均呈显著的正相关关系 (图5, $P<0.05$), 说明秸秆添加可以刺激碳、氮循环酶活性的提高。秸秆富集深层还田处理将秸秆集中深还至土壤底层, 有效提高了底层土壤的酶活性, 促进底层土壤碳氮固持和养分循环。酚氧化酶和过氧化物酶是氧化酶的代表性酶类, 对微生物生长和营养循环有重要作用, 但氧化酶活性通常受到低温和低含氧量的限制^[53], 而玉米季温度较高且伴随着富集深还开沟增加了土壤的透气性, 导致该处理底土氧化酶活性高于其他处理。

3.3 不同秸秆还田方式对玉米产量的影响

作物产量与环境因素密切相关, 例如土壤质量、耕作措施和气候条件等^[54]。秸秆还田通过改善土壤物理结构、增加土壤有机碳与养分含量而提高土地生产力和作物产量^[55]。刘晋平^[56]通过10年的长期秸秆还田试验结果表明, 秸秆还田处理10年来玉米的累计产量比不还田处理高14.18%~18.61%。本研究结果表明, 在秸秆还田条件下, 玉米产量相较于不还田显著提高13.4%~21.0%。通过对产量构成因素的分析发现, 秸秆还田增产主要体现在百粒重上, 说明秸秆还田后, 土壤容重减小、含水量增加和有机碳等养分增加可以促进玉米籽粒的生长发育。前人研究^[57]显示, 秸秆富集深层还田能够提高作物产量。与浅旋还田、深翻还田和覆盖还田相比, 本试验秸秆深层还田处理没有显著提高玉米产量, 可能是由于处理时间较短, 但秸秆富集深层还田处理在百粒重和穗粒数上都表现出优势, 表明秸秆富集深层还田处理改善了底层土壤质量^[58], 进而促进根系发育和营养物质的吸收, 使干物质积累增加, 有利于玉米籽粒形成。

4 结论

本研究阐明了华北平原不同秸秆还田方式对土壤理化性质和玉米产量的影响。秸秆覆盖还田和深翻还田可以提高表土含水量, 而在底土中, 秸秆富集深层还田条带上的土壤含水量高于其他处理。覆盖还田的土壤容重最高; 与其余4种还田方式相比, 富集深层还田降低了20~40 cm土层的土壤容重(3.7%~

6.9%)。秸秆还田方式对表层土壤的有机碳、全氮、矿质态氮影响较小,而秸秆富集深层还田将大量的有机质注入深层土壤,显著提高了 20~40 cm 土层土壤有机碳和全氮含量。同时,秸秆富集深层还田也提高了底土中的土壤酶活性,如分解纤维素的 β -1,4-葡萄糖苷酶,从而使秸秆更快腐解,提高底土质量。相较于秸秆不还田,各处理的玉米产量均有提升。因此,秸秆还田能够改善土壤的理化性质,降低容重,增加含水量,并在一定程度上降低 pH。同时,秸秆还田为农田提供了部分养分来源,提高了农田生产力,可以增加作物产量。秸秆富集深层还田将大量秸秆埋入下层土壤,对于改善下层土壤质量状况尤为明显,缓解了长期表土耕作带来的下层土壤养分匮乏、耕层变浅、土壤压实等问题。由此可见,秸秆富集深层还田能够增加土壤碳库和氮库,提高土地质量,为农田长期健康发展提供支持。

参考文献 References

- [1] 饶越悦,周顺利,黄毅,等. 秸秆富集深层还田对农田土壤质量影响研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(10): 1579–1587
RAO Y Y, ZHOU S L, HUANG Y, et al. Advances in research of deep incorporation of enriched straw on soil quality[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(10): 1579–1587
- [2] FAN W, WU J G, AHMED S, et al. Short-term effects of different straw returning methods on the soil physicochemical properties and quality index in dryland farming in NE China[J]. *Sustainability*, 2020, 12(7): 2631
- [3] MA S T, KAN Z R, QI J Y, et al. Effects of straw return mode on soil aggregates and associated carbon in the North China Plain[J]. *Agronomy*, 2020, 10(1): 61
- [4] 林洪羽,周明华,张博文,等. 生物炭及秸秆长期施用对紫色土坡耕地土壤团聚体有机碳的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(1): 96–103
LIN H Y, ZHOU M H, ZHANG B W, et al. Effect of long-term application of biochar and straw on soil organic carbon in purple soil aggregates of sloping uplands[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(1): 96–103
- [5] KALKHAJEH Y K, HE Z F, YANG X R, et al. Co-application of nitrogen and straw-decomposing microbial inoculant enhanced wheat straw decomposition and rice yield in a paddy soil[J]. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2021, 4: 100134
- [6] YIN H J, ZHAO W Q, LI T, et al. Balancing straw returning and chemical fertilizers in China: role of straw nutrient resources[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 2695–2702
- [7] GOVAERTS B, SAYRE K D, DECKERS J. Stable high yields with zero tillage and permanent bed planting?[J]. *Field Crops Research*, 2005, 94(1): 33–42
- [8] NIU L G, HAO J M, ZHANG B Z, et al. Influences of long-term fertilizer and tillage management on soil fertility of the North China Plain[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(6): 813–820
- [9] KAN Z R, LIU W X, LIU W S, et al. Mechanisms of soil organic carbon stability and its response to no-till: a global synthesis and perspective[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(3): 693–710
- [10] FATUMAH N, TILAHUN S A, MOHAMMED S. Water use efficiency, grain yield, and economic benefits of common beans (*Phaseolus Vulgaris* L.) under four soil tillage systems in Mukono District, Uganda[J]. *Heliyon*, 2021, 7(2): e06308
- [11] HU N J, SHI H, WANG B J, et al. Effects of different wheat straw returning modes on soil organic carbon sequestration in a rice-wheat rotation[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2019, 99(1): 25–35
- [12] LI L, LI Q K, LIN Z H, et al. Effects of nitrogen deep placement coupled with straw incorporation on grain quality and root traits from paddy fields[J]. *Crop Science*, 2021, 61(5): 3675–3686
- [13] WANG X C, SAMO N, ZHAO C K, et al. Negative and positive impacts of rape straw returning on the roots growth of hybrid rice in the Sichuan basin area[J]. *Agronomy*, 2019, 9(11): 690
- [14] CHEN J, ZHENG M J, PANG D W, et al. Straw return and appropriate tillage method improve grain yield and nitrogen efficiency of winter wheat[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(8): 1708–1719
- [15] SCHNEIDER F, DON A, HENNINGS I, et al. The effect of deep tillage on crop yield – What do we really know?[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 174: 193–204
- [16] HEVIA G G, MENDEZ M, BUSCHIAZZO D E. Tillage affects soil aggregation parameters linked with wind erosion[J]. *Geoderma*, 2007, 140(1/2): 90–96
- [17] ZHENG S, DOU S, DUAN H M, et al. Fluorescence spectroscopy and ^{13}C NMR spectroscopy characteristics of HA in black soil at different corn straw returning modes[J]. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2021, 2021: 9940116
- [18] YANG H S, ZHAI S L, LI Y F, et al. Waterlogging reduction and wheat yield increase through long-term ditch-buried straw return in a rice-wheat rotation system[J]. *Field Crops Research*, 2017, 209: 189–197
- [19] YANG H S, XU M M, LI Y F, et al. The impacts of ditch-buried straw layers on the interface soil physicochemical and microbial properties in a rice-wheat rotation system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 202: 104656
- [20] REN H, HAN K, LIU Y E, et al. Improving smallholder farmers' maize yields and economic benefits under sustainable crop intensification in the North China Plain[J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 763: 143035
- [21] SOON Y K, ABBODU S. A comparison of some methods for soil organic carbon determination[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1991, 22(9/10): 943–954
- [22] BREMNER J M. Determination of nitrogen in soil by the Kjeldahl method[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 1960,

- 55(1): 11–33
- [23] WU G, LING J, XU Y P, et al. Effects of soil warming and straw return on soil organic matter and greenhouse gas fluxes in winter wheat seasons in the North China Plain[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 356: 131810
- [24] TRUOG E. The determination of the readily available phosphorus of soils I[J]. *Agronomy Journal*, 1930, 22(10): 874–882
- [25] CUI Y X, FANG L C, GUO X B, et al. Ecoenzymatic stoichiometry and microbial nutrient limitation in rhizosphere soil in the arid area of the northern Loess Plateau, China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 116: 11–21
- [26] BACH C E, WARNOCK D D, VAN HORN D J, et al. Measuring phenol oxidase and peroxidase activities with pyrogallol, L-DOPA, and ABTS: effect of assay conditions and soil type[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 67: 183–191
- [27] 宋依依, 曹阳, 段鑫盈, 等. 秸秆还田深度对土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J]. *土壤*, 2022, 54(2): 344–350
- SONG Y Y, CAO Y, DUAN X Y, et al. Effects of different straw-returning depths on soil aggregate composition and organic carbon distribution[J]. *Soils*, 2022, 54(2): 344–350
- [28] WANG W Y, AKHTAR K, REN G X, et al. Impact of straw management on seasonal soil carbon dioxide emissions, soil water content, and temperature in a semi-arid region of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 471–482
- [29] YAO M Z, LI B, WANG T L, et al. Effects of straw size in buried straw layers on water movement in adjacent soil layers[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2016, 9: 74–84
- [30] ZHAO H L, SHAR A G, LI S, et al. Effect of straw return mode on soil aggregation and aggregate carbon content in an annual maize-wheat double cropping system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 175: 178–186
- [31] BAUMHARDT R L, JONES O R, SCHWARTZ R C. Long-term effects of profile-modifying deep plowing on soil properties and crop yield[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(3): 677–682
- [32] YANG Y H, WU J C, ZHAO S W, et al. Impact of long-term sub-soiling tillage on soil porosity and soil physical properties in the soil profile[J]. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(10): 2892–2905
- [33] HUANG T T, YANG N, LU C, et al. Soil organic carbon, total nitrogen, available nutrients, and yield under different straw returning methods[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 214: 105171
- [34] ZHAO Y C, WANG P, LI J L, et al. The effects of two organic manures on soil properties and crop yields on a temperate calcareous soil under a wheat-maize cropping system[J]. *European Journal of Agronomy*, 2009, 31(1): 36–42
- [35] 董建新, 丛萍, 刘娜, 等. 秸秆深还对黑土亚耕层土壤物理性状及团聚体分布特征的影响[J]. *土壤学报*, 2021, 58(4): 921–934
- DONG J X, CONG P, LIU N, et al. Effects of deep straw incorporation on subsoil physical properties and aggregate distribution in black soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(4): 921–934
- [36] 赵占辉, 张丛志, 蔡太义, 等. 不同稳定性有机物料对砂姜黑土理化性质及玉米产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(10): 1228–1235
- ZHAO Z H, ZHANG C Z, CAI T Y, et al. Effects of different stable organic matters on physicochemical properties of lime concretion black soil and maize yield[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(10): 1228–1235
- [37] LI Y, CHANG S X, TIAN L H, et al. Conservation agriculture practices increase soil microbial biomass carbon and nitrogen in agricultural soils: a global meta-analysis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 121: 50–58
- [38] 胡雪纯, 解文艳, 马晓楠, 等. 长期秸秆还田对旱地玉米土壤有机碳及碳库管理指数的影响[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(34): 8–13
- HU X C, XIE W Y, MA X N, et al. Effects of long-term straw returning on organic carbon and carbon pool management index in dryland maize soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(34): 8–13
- [39] JIN Z Q, SHAH T, ZHANG L, et al. Effect of straw returning on soil organic carbon in rice-wheat rotation system: a review[J]. *Food and Energy Security*, 2020, 9(2): e200
- [40] LIU N, LI Y Y, CONG P, et al. Depth of straw incorporation significantly alters crop yield, soil organic carbon and total nitrogen in the North China Plain[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 205: 104772
- [41] WEN Y, ZANG H D, FREEMAN B, et al. Microbial utilization of low molecular weight organic carbon substrates in cultivated peats in response to warming and soil degradation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 139: 107629
- [42] HICKS PRIES C, RYALS R, ZHU B, et al. The deep soil organic carbon response to global change[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2023, 54: 375–401
- [43] 孙雪, 张玉铭, 张丽娟, 等. 长期添加外源有机物料对华北农田土壤团聚体有机碳组分的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(8): 1384–1396
- SUN X, ZHANG Y M, ZHANG L J, et al. Effects of long-term exogenous organic material addition on the organic carbon composition of soil aggregates in farmlands of North China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(8): 1384–1396
- [44] 李一, 王秋兵. 我国秸秆资源养分还田利用潜力及技术分析[J]. *中国土壤与肥料*, 2020(1): 119–126
- LI Y, WANG Q B. Study on potential of straw resource nutrient return to field and application technology in China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(1): 119–126
- [45] 刘淑军, 李冬初, 黄晶, 等. 近30年来我国小麦和玉米秸秆资源时空变化特征及还田减肥潜力[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(16): 3140–3155
- LIU S J, LI D C, HUANG J, et al. Spatial-temporal variation characteristics of wheat and maize stalk resources and chemical fertilizer reduction potential of returning to farmland in recent 30 years in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(16): 3140–3155

- 3140–3155
- [46] CHEN L M, SUN S L, YAO B, et al. Effects of straw return and straw biochar on soil properties and crop growth: a review[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 986763
- [47] 常珺枫, 刘莹, 李陈, 等. 农田氮磷流失特征及影响因素研究[J]. *中国农学通报*, 2023, 39(15): 69–75
- CHANG J F, LIU Y, LI C, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss in farmland and the influencing factors[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(15): 69–75
- [48] JIAN S, LI J, CHEN J, et al. Soil extracellular enzyme activities, soil carbon and nitrogen storage under nitrogen fertilization: a meta-analysis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 101: 32–43
- [49] ZHAO S C, LI K J, ZHOU W, et al. Changes in soil microbial community, enzyme activities and organic matter fractions under long-term straw return in north-central China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 216: 82–88
- [50] GELSOMINO A, AZZELLINO A. Multivariate analysis of soils: microbial biomass, metabolic activity, and bacterial-community structure and their relationships with soil depth and type[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2011, 174: 381–394
- [51] ZHAO D Q, LING J, WU G, et al. The incorporation of straw into the subsoil increases C, N, and P enzyme activities and nutrient supply by enriching distinctive functional microorganisms[J]. *Land Degradation & Development*, 2023, 34(5): 1297–1310
- [52] YANG H S, ZHOU J J, FENG J X, et al. Ditch-buried straw return: a novel tillage practice combined with tillage rotation and deep ploughing in rice-wheat rotation systems[J]. *Advances in Agronomy*, 2019, 154: 257–290
- [53] SINSABAUGH R L. Phenol oxidase, peroxidase and organic matter dynamics of soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42: 391–404
- [54] 杨竣皓, 骆永丽, 陈金, 等. 秸秆还田对我国主要粮食作物产量效应的整合 (Meta) 分析[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(21): 4415–4429
- YANG J H, LUO Y L, CHEN J, et al. Effects of main food yield under straw return in China: a meta-analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(21): 4415–4429
- [55] LI S, HU M J, SHI J L, et al. Improving long-term crop productivity and soil quality through integrated straw-return and tillage strategies[J]. *Agronomy Journal*, 2022, 114(2): 1500–1511
- [56] 刘晋平. 长期秸秆还田对玉米产量及效益的影响[J]. *中国农业文摘-农业工程*, 2023, 35(4): 12–16
- LIU J P, Effects of long-term straw returning on yield and benefit of maize[J]. *Agricultural Science and Engineering in China*, 2023, 35(4): 12–16
- [57] WU G, LING J, ZHAO D Q, et al. Deep-injected straw incorporation improves subsoil fertility and crop productivity in a wheat-maize rotation system in the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2022, 286: 108612
- [58] LING J, ZHOU J, WU G, et al. Deep-injected straw incorporation enhances subsoil quality and wheat productivity[J]. *Plant and Soil*, 2022: 1–14