



隋鹏祥, 罗洋, 王浩, 任英, 刘小丹, 袁野, 刘鸿雁, 赵春凯, 李明森, 郑金玉. 保护性耕作对黑土农田土壤质量和玉米产量相关性状的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025,30(12):75-88.

SUI Pengxiang, LUO Yang, WANG Hao, REN Ying, LIU Xiaodan, YUAN Ye, LIU Hongyan, ZHAO Chunkai, LI Mingsen, ZHENG Jinyu. Effects of conservation tillage on soil quality and related traits of maize yield in black soil farmland[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025,30(12):75-88.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.12.07

保护性耕作对黑土农田土壤质量和玉米产量相关性状的影响

隋鹏祥¹ 罗洋¹ 王浩¹ 任英¹ 刘小丹¹ 袁野¹ 刘鸿雁²
赵春凯² 李明森² 郑金玉^{1*}

(1. 吉林省农业科学院(中国农业科技东北创新中心)农业资源与环境研究所/
农业农村部东北作物生理生态与耕作重点实验室, 长春 130033;
2. 吉林省农业机械研究院 秸秆还田应用技术研究所, 长春 130022)

摘要 为探究保护性耕作对黑土农田土壤质量和玉米产量的影响。依托连续8年田间耕作定位试验,研究传统耕作(CT)、秸秆覆盖免耕(NTS)、秸秆覆盖深松(STS)和秸秆耙混还田(HTS)对0~40 cm土层土壤理化、生物学特性、玉米抗倒伏与产量及其构成因素的影响。结果表明:与CT相比,NTS、STS和HTS处理显著提高0~40 cm土层土壤田间持水量、饱和含水量、有机碳、全氮、全磷、碱解氮、速效磷含量、 β -葡萄糖苷酶、乙酰葡萄糖胺糖苷酶、木质素过氧化物酶、多酚氧化酶活性和微生物生物量氮含量($P<0.05$),NTS和STS处理显著降低土壤容重和三相R值($P<0.05$)、提高几何平均直径和微生物生物量磷含量。NTS、STS和HTS均较CT处理显著提高0~40 cm土层土壤质量指数($P<0.05$),前两者从土壤物理、化学和生物学3个维度提高,而后者主要增加土壤化学和生物学2个维度。STS和HTS均较CT处理显著降低穗位高、增加茎粗和压折强度、提高茎秆抗倒伏指数($P<0.05$)。STS较CT和NTS处理显著提高多雨年份百粒重和玉米产量,其年际间平均玉米产量较其他处理提高7.10%~11.86%($P<0.05$)。相关分析和冗余分析发现,20~40 cm土层理化指标质量指数和0~10 cm土层生物学指标质量指数是影响产量及其构成因素的重要因子。综上,在松嫩平原南部黑土区,秸秆覆盖深松是实现黑土耕地质量多维度协同优化与玉米单产提升的保护性耕作技术模式。

关键词 秸秆覆盖; 少免耕; 土壤质量; 玉米; 黑土

中图分类号 S344.9

文章编号 1007-4333(2025)12-0075-14

文献标志码 A

Effects of conservation tillage on soil quality and related traits of maize yield in black soil farmland

SUI Pengxiang¹, LUO Yang¹, WANG Hao¹, REN Ying¹, LIU Xiaodan¹, YUAN Ye¹,
LIU Hongyan², ZHAO Chunkai², LI Mingsen², ZHENG Jinyu^{1*}

(1. Research Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Science (Northeast Agricultural Research Center of China)/Northeast Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Cultivation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Changchun 130033, China;

2. Institute of Straw Return Application Technology, Jilin Province Academy of Agricultural Machinery, Changchun 130022, China)

Abstract To explore the effects of conservation tillage on soil quality and maize yield in black soil farmland, a continuous 8-year field tillage positioning experiment was conducted. The study examined the impacts of conventional tillage (CT), straw mulching with no-tillage (NTS), straw mulching with subsoiling tillage (STS),

收稿日期: 2025-04-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1500104);吉林省科技发展计划项目(20230302005NC)

第一作者: 隋鹏祥(ORCID:0000-0001-8791-0004),副研究员,主要从事耕层调控技术研究,E-mail: suipengxiang1990@163.com

通讯作者: 郑金玉(ORCID:0009-0008-6858-9137),研究员,主要从事现代农作制度研究,E-mail:15844052867@163.com

and straw incorporation with harrowing tillage (HTS) on the physical, chemical, and biological properties of the soil in the 0-40 cm layer, as well as on maize lodging resistance, yield, and its contributing factors. The results indicated that, compared with CT, NTS, STS, and HTS treatments significantly increased the field capacity, saturated moisture content, organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, alkaline-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus content, β -glucosidase, N-acetyl-glucosaminidase, lignin peroxidase, polyphenol oxidase activity, and microbial biomass nitrogen in the 0-40 cm soil layer ($P < 0.05$). Moreover, NTS and STS treatments significantly reduced soil bulk density and three-phase R value ($P < 0.05$), and enhanced the geometric mean diameter and microbial biomass phosphorus content. NTS, STS, and HTS all significantly improved the soil quality index in the 0-40 cm layer compared to CT ($P < 0.05$), with the first two enhancing it from the physical, chemical, and biological dimensions, while the latter primarily increased from two dimensions of soil chemistry and biology. Both STS and HTS significantly reduced spike height, increased stem thickness and bending strength, thereby improving the lodging resistance index of the stem compared to CT ($P < 0.05$). STS significantly increased 100 grain weight and maize yield in wet years compared to CT and NTS, with the interannual average maize yield improving by 7.10% to 11.86% compared to other treatments ($P < 0.05$). Correlation analysis and redundancy analysis revealed that the quality index of physical and chemical indicators in the 20-40 cm layer and the quality index of biological indicators in the 0-10 cm layer were important factors influencing yield and its components. In conclusion, in the southern black soil area of the Songnen Plain, straw mulching with subsoiling tillage is a conservation tillage technology model that can achieve multidimensional coordinated optimization of black soil farmland quality and enhance maize yield.

Keywords straw mulching; minimum tillage and no-tillage; soil quality; maize; black soil

中国东北黑土区总面积 109 万 km^2 , 约占全球黑土区总面积的 12%, 是中国最大的粮食生产基地和商品粮调出地, 是保障国家粮食安全的“压舱石”。然而, 长期不合理耕作和高强度利用导致黑土“薄、瘦、硬”加剧, 土壤结构劣化, 有机质数量减少, 质量退化。如何保护和利用好黑土地成为亟待解决的关键议题。保护性耕作通过秸秆还田和降低土壤扰动能优化土壤结构、促进有机质培育, 是加强黑土地保护和实现农业可持续发展的重要措施^[1]。

保护性耕作有效降低土壤侵蚀, 在薄层黑土区效果显著, 可防止土壤流失, 最高可减少水土流失 80 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{年})$, 使风蚀导致的土壤跃移量降低 13.1%^[2-3]。保护性耕作较传统耕作增加土壤容重和紧实度, 促进黑土大团聚体形成^[4-5], 提高大孔隙数量 and 水分入渗速率, 改善土壤蓄水保墒能力^[6-7]。此外, 保护性耕作能提升黑土固碳能力。长期定位试验发现, 秸秆覆盖免耕 15 年后 0~20 cm 土层黑土有机碳储量提高 30%, 新增有机碳 70% 储存在大团聚体中; 该技术不仅增加轻组有机碳组分, 对黏粉粒结合碳的提升也有显著作用, 同时增加的有机碳储量中有近 50% 为微生物残体碳的增加, 其中真菌残体碳比例是细菌残体碳的 2 倍^[8]。随着保护性耕

作年限增加, 耕层土壤氮磷钾养分含量提高 5%~30%^[9-10]。黑土区长期保护性耕作形成“复杂”的土壤食物网结构, 提高生物群落多样性^[11], 增加蚯蚓数量和个体质量^[12]。

保护性耕作对作物产量的影响受气候条件、地形和土壤类型等多因素控制, 其减少土壤扰动, 一定程度上造成土壤板结、水分流动不畅、作物水肥利用难^[1]。秸秆覆盖地表在湿润冷凉区会降低土壤温度影响春播和出苗, 进而降低保苗率和延后生育进程, 导致减产^[13-15]。对吉林省实施保护性耕作的 50 个合作社和家庭农场调研发现, 保护性耕作能获得与传统耕作相似或稍高的玉米产量^[16], 在抗台风方面有优势, 降低倒伏率^[1]; 同时在极端干旱年份, 保护性耕作播种至出苗耕层土壤含水量比传统耕作高 7.8%~30.4%, 可缓解干旱胁迫的危害^[14], 提高年际间作物的稳产性。

目前, 多数研究集中在保护性耕作对黑土物理、化学和生物学特性的影响, 或保护性耕作对作物生长发育的影响, 对不同维度土壤质量变化及其对作物生长发育影响的研究相对较少。本研究依托 8 年田间定位试验探索保护性耕作对黑土地农田土壤质量和玉米产量的影响, 旨在明确不同保护性耕作方式下土壤质量提升和稳产增产效果。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验于 2023—2024 年在吉林省公主岭市范家屯镇香山村(43°45' N, 125°01' E)进行。该地区属于寒温带大陆性气候,雨热同季,年均降水量 567 mm 左右,无霜期约 140 d,年均气温 4.5℃,≥10℃积温

在 3 200℃~3 300℃。2023 和 2024 年 5~9 月累计降雨量分别为 416.5 mm 和 719.0 mm(图 1(a)和(b)),土壤类型为黑土。定位试验前 0~20 cm 土层的基本肥力水平为:有机质 29.9 g/kg、全氮 1.5 g/kg、全磷 0.5 g/kg、全钾 19.0 g/kg、碱解氮 124.8 mg/kg、速效磷 29.2 mg/kg、速效钾 196.9 mg/kg,pH=6.1。试验区域为一年一熟制,玉米连作。

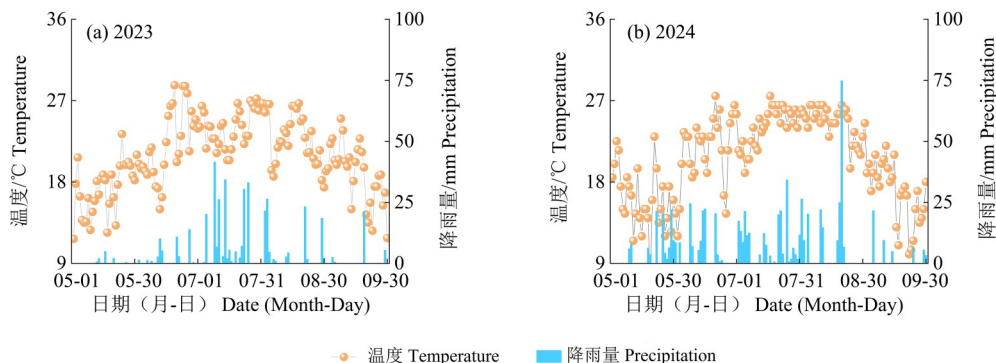


图 1 玉米生育期温度和降雨量

Fig. 1 Temperature and precipitation during maize growth period

1.2 试验设计

定位试验始于 2017 年,包括 4 种耕作模式:传统耕作(CT)、秸秆覆盖免耕(NTS)、秸秆覆盖深松(STS)和秸秆耙混还田(MTS)。随机区组试验设计,每个小区的面积为 130 m×8 m (1 040 m²),3 次重复,种植方式为玉米连作,供试玉米品种为富民‘985’,种植密度为 6.75 万株/hm²,行距 65 cm。施肥量分别为 N 224 kg/hm²、P₂O₅ 96 kg/hm²、K₂O 112 kg/hm²。传统耕作

在春季灭茬起垄时一次性施入肥料,秸秆覆盖免耕、秸秆覆盖深松和秸秆耙混还田免耕播种时肥料侧深施。每年 5 月 10 日左右播种,10 月 5 日左右收获。不同处理的耕作方式详见表 1。

1.3 样品采集及指标测定

2024 年,在玉米收获后按“S”型取土法在 0~40 cm 土层采集土壤样品,其中传统耕作分别以垄顶、垄侧和垄沟为起点向下采集 0~40 cm 土层土壤

表 1 不同耕作方式的田间操作方法

Table 1 Methods of field operations for different tillage practices

处理 Treatment	操作方法 Field operation
传统耕作 Conventional tillage	秋季玉米收获后将地上部秸秆全部运出田外,春季利用旋耕起垄机进行浅旋灭茬和起垄,旋耕深度 15 cm,垄宽 65 cm,垄高 15 cm,整地时一次性施入复合肥。采用常规播种机垄上播种,然后用镇压器镇压
秸秆覆盖免耕 Straw mulching with no-tillage	秋季机械收获时秸秆全部粉碎覆盖地表,粉碎长度≤20 cm 时抛撒于地表,不进行任何秸秆处理。春季采用免耕播种机等行距 65 cm 平作播种
秸秆覆盖深松 Straw mulching with subsoiling tillage	将传统 65 cm 的等行距垄作改成宽行 90 cm(秸秆带)、窄行 40 cm(苗带)平作,春季在上一年的宽行用免耕播种机播种。在玉米拔节期进行宽行深松 30~35 cm。玉米收获后,地上部秸秆归行到茬带,清理播种带,春季采用免耕播种机在苗带宽窄行播种
秸秆耙混还田 Straw incorporation with harrowed tillage	秋季机械收获时,将全部秸秆粉碎长度<20 cm 时喷洒于地表,采用松耙联合整地机整地,耕作后 30% 的秸秆覆盖在地表,70% 的秸秆均匀分布 0~20 cm 的耕作层中。春季顶凌作业,采用种床整理复式作业机对耕作层 6~12 cm 再次整理,达到待播状态。采用免耕播种机等行距 65 cm 平作播种

样品。混合样品分成2份,一份过2 mm筛后存储在-80℃下用于生物特性测定;一份自然风干,过筛研磨后用于土壤化学性质测定。

采用SC-900土壤硬度计测定土壤紧实度;采集的土壤环刀样品用土壤三相仪(DIK-1150)测定气相占比,土壤三相 R 值计算参考周思琪等^[17];用室内环刀法测定环刀样品饱和含水量和田间持水量;用烘干法测定土壤容重。取50 g原状土样,采用湿筛法测定土壤水稳性团聚体,土壤几何平均直径计算参考隋鹏祥等^[5]。土壤基本理化性质测定参照《土壤农化分析》^[18]:土壤酸碱度采用土水比1:1电极法,有机碳采用高温外加热重铬酸钾氧化容量法、全氮用凯氏定氮法、全磷使用钼锑抗比色法、全钾采用NaOH熔融-火焰光度法、碱解氮采用碱解扩散法、土壤速效磷采用碳酸氢钠浸提-比色法测定,土壤速效钾采用醋酸铵浸提-火焰光度法测定。微生物生物量碳、氮、磷含量采用氯仿熏蒸浸提法测定^[19]。采用酶标法测定 β -葡萄糖苷酶、乙酰葡萄糖胺糖苷酶、亮氨酸氨肽酶、酸性磷酸酶、木质素过氧化物酶和多酚氧化酶活性^[20]。

2024年,在玉米成熟期,用精度为1 mm的卷尺测量株高和穗位高,计算穗高系数,穗高系数=穗位高/株高。每个处理采集9棵玉米植株,确定每个茎秆(带穗、叶和鞘)的平衡支点,量取茎秆基部至平衡支点的距离作为中心高度。玉米茎节选取基部向上第三伸长节间,用茎秆强度仪测定节间力学参数(包括穿刺强度、压碎强度和压折强度)。计算茎秆抗倒伏指数,茎秆抗倒伏指数=基部第三节压碎强度/植株重心高度。

在2023和2024年玉米成熟期时,每个处理取3株植株,将植株分为叶片、茎鞘、苞叶+轴、籽粒和根系,分别装入牛皮纸袋中于烘箱内105℃进行杀青30 min,再75℃烘至恒重,冷却至室温后用1/1 000天平分别称量,并记录数据。秋季测产面积为20 m²,测定有效穗数和鲜重,选取折算重量相等的10穗,自然风干后于室内考种;测定行数和粒数、10穗籽粒重量、百粒重、籽粒含水量;最后计算公顷穗数、穗粒数、14%含水量百粒重和产量。

1.4 土壤质量指数计算

采用线性评分方法将土壤物理、化学和生物指标转化为无量纲值,范围为(0,1)^[21-22]。如果指标值的增加有利于土壤质量,则采用“越大越好”的评分

曲线(式1),反之则采用“越小越好”的评分曲线(式2)(本研究中容重、三相 R 值和紧实度采用该曲线计算)。对于有最佳范围的指标,可根据需要使用式(1)或(2)进行转换,并将最佳范围内的指标值等同于1。

$$S_L = \frac{X}{X_{\max}} \quad (1)$$

$$S_L = \frac{X_{\min}}{X} \quad (2)$$

式中: S_L 为土壤指标的线性得分; X 为测量值; $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 分别为本研究中4个处理的土壤指标测量值的最大值和最小值^[23]。

通过面积法计算土壤质量指数^[24],计算公式如下:

$$SQI = 0.5 \times \sum_{i=1}^n S_{L_i}^2 \times \sin\left(\frac{2 \times \pi}{n}\right) \quad (3)$$

式中:SQI为土壤质量指数; n 为指标总数,个; $\pi=3.14$ 。

1.5 数据处理及分析

在SPSS 22.0软件中利用单因素方差分析土壤理化、生物性质和植株指标在不同耕作措施中的差异,采用Duncan法进行多重显著性比较($P<0.05$)。采用皮尔森相关分析法和线性拟合进行土壤质量和植株指标相关性分析,用Canoco 4.5软件中冗余分析(Redundancy analysis, RDA)解析土壤质量与植株指标的相关性,采用Origin 9.0进行制图。

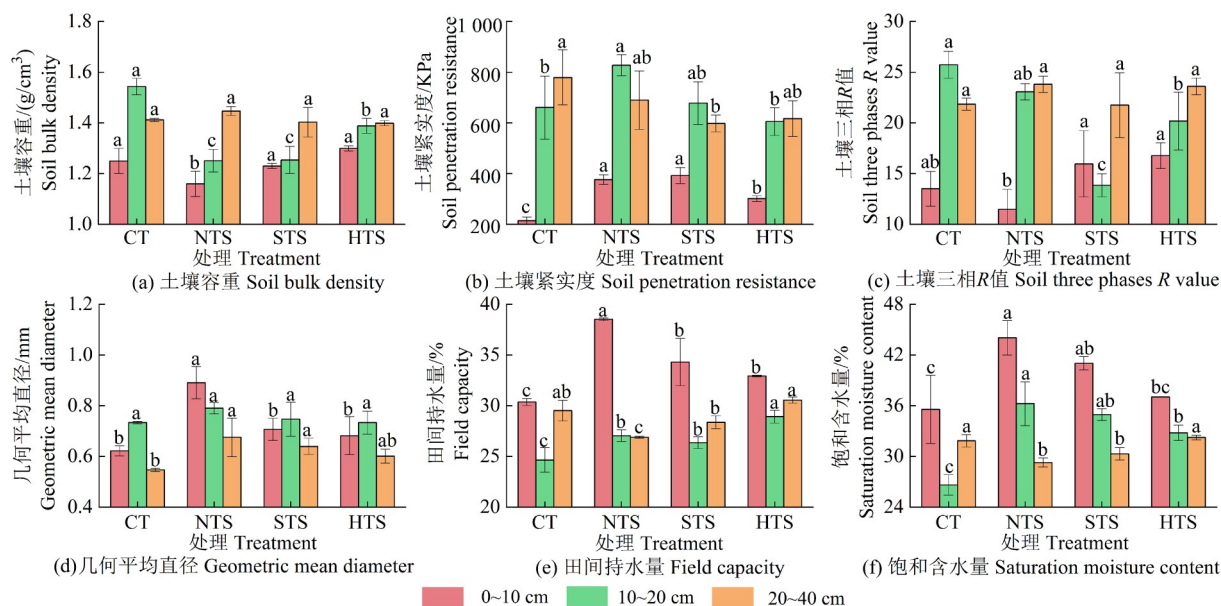
2 结果与分析

2.1 不同耕作方式对土壤物理性质的影响

不同耕作方式对土壤物理性质的影响见图2。与CT处理相比,在0~10 cm土层,NT处理显著降低土壤容重(BD),NTS、STS和HTS处理增加土壤紧实度(PR)、几何平均直径(GMD)与田间持水量(FC),NTS和STS处理提高土壤饱和含水量(SMC) ($P<0.05$);在10~20 cm土层,NTS、STS和HTS处理显著降低BD、提高FC和SMC,NTS处理增加PR,STS和HTS处理显著降低三相 R 值 ($P<0.05$);在20~40 cm土层,STS处理显著降低PR,NTS和STS处理提高GMD和降低SMC,NTS处理降低FC ($P<0.05$)。

2.2 不同耕作方式对土壤化学性质的影响

不同耕作方式对土壤化学性质的影响见图3。与CT处理相比,在0~10 cm土层,NTS和STS处



CT: 传统耕作; NTS: 秸秆覆盖免耕; STS: 秸秆覆盖深松; HTS: 秸秆耙混还田。不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)。下同。

CT: Conventional tillage; NTS: Straw mulching with no-tillage; STS: Straw mulching with subsoiling tillage; HTS: Straw incorporation with harrowing tillage. Different letters indicated a significant difference ($P < 0.05$), while the same letter indicated no significant difference ($P > 0.05$). The same below.

图 2 不同耕作方式对土壤物理性质的影响

Fig. 2 Effects of different tillage practices on soil physical properties

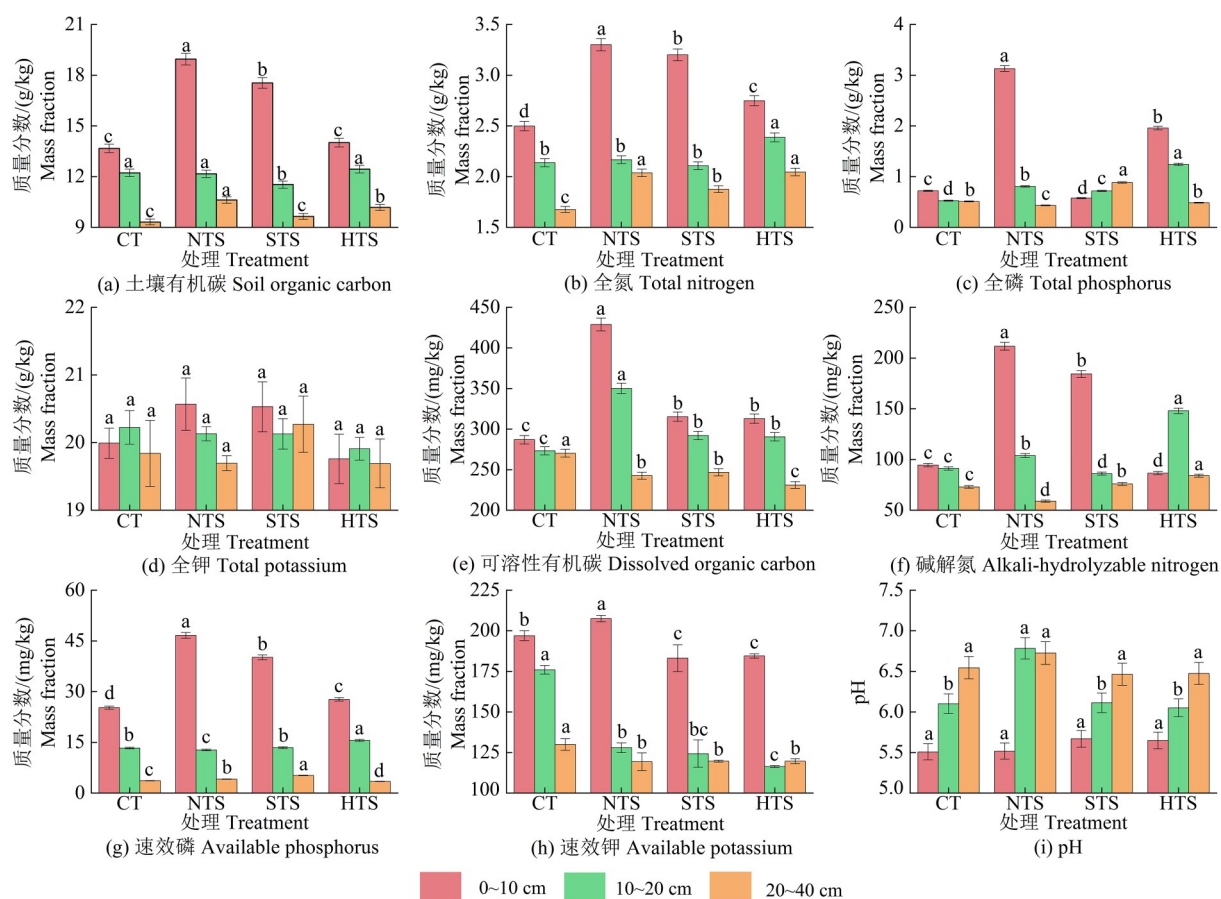


图 3 不同耕作方式对土壤化学性质的影响

Fig. 3 Effects of different tillage practices on soil chemical properties

理显著提高土壤有机碳(SOC)和碱解氮(AN)含量,NTS、STS和HTS处理增加土壤全氮(TN)、可溶性有机碳(DOC)和速效磷(AP)含量,NTS和HTS处理提高土壤全磷(TP)含量,NTS较其他处理增加土壤速效钾(AK)含量($P<0.05$);在10~20 cm土层,NTS、STS和HTS处理显著提高TP和DOC含量、降低AK含量,NTS和HTS处理增加AN含量,HTS较其他处理增加TN和AP含量,NTS较其他处理提高pH($P<0.05$);在20~40 cm土层,NTS、STS和HTS处理提高TN含量、降低DOC和AK含量,NTS和HTS处理增加SOC含量,NTS和STS处理提高AP含量,STS较其他处理增加TP含量,HTS处理提高AN含量($P<0.05$)。

2.3 不同耕作方式对土壤生物学性质的影响

图4为不同耕作方式对土壤生物学性质的影响。

与CT处理相比,在0~10 cm土层,NTS和STS处理显著提高乙酰葡萄糖胺糖苷酶(NAG)和多酚氧化酶(PPO)活性,NTS和HTS处理提高木质素过氧化物酶(LiP)活性,STS和HTS处理增加微生物生物量氮(MBN)含量,HTS较其他处理提高 β -葡萄糖苷酶(BG)活性,NTS较其他处理增加亮氨酸氨肽酶(LAP)、酸性磷酸酶(ACP)和微生物生物量磷(MBP)含量($P<0.05$)。在10~20 cm土层,NTS、STS和HTS处理显著提高BG、NAG、PPO活性和MBN含量,NTS和HTS处理增加LAP和LiP活性,STS和HTS处理提高MBP含量,STS较其他处理提高ACP活性($P<0.05$)。在20~40 cm土层,NTS、STS和HTS处理增加BG、NAG、LiP、PPO活性和MBN含量,降低MBP含量;STS和HTS处理提高ACP活性;HTS较其他处理提高LAP活性和微生物生物量碳(MBC)含量($P<0.05$)。

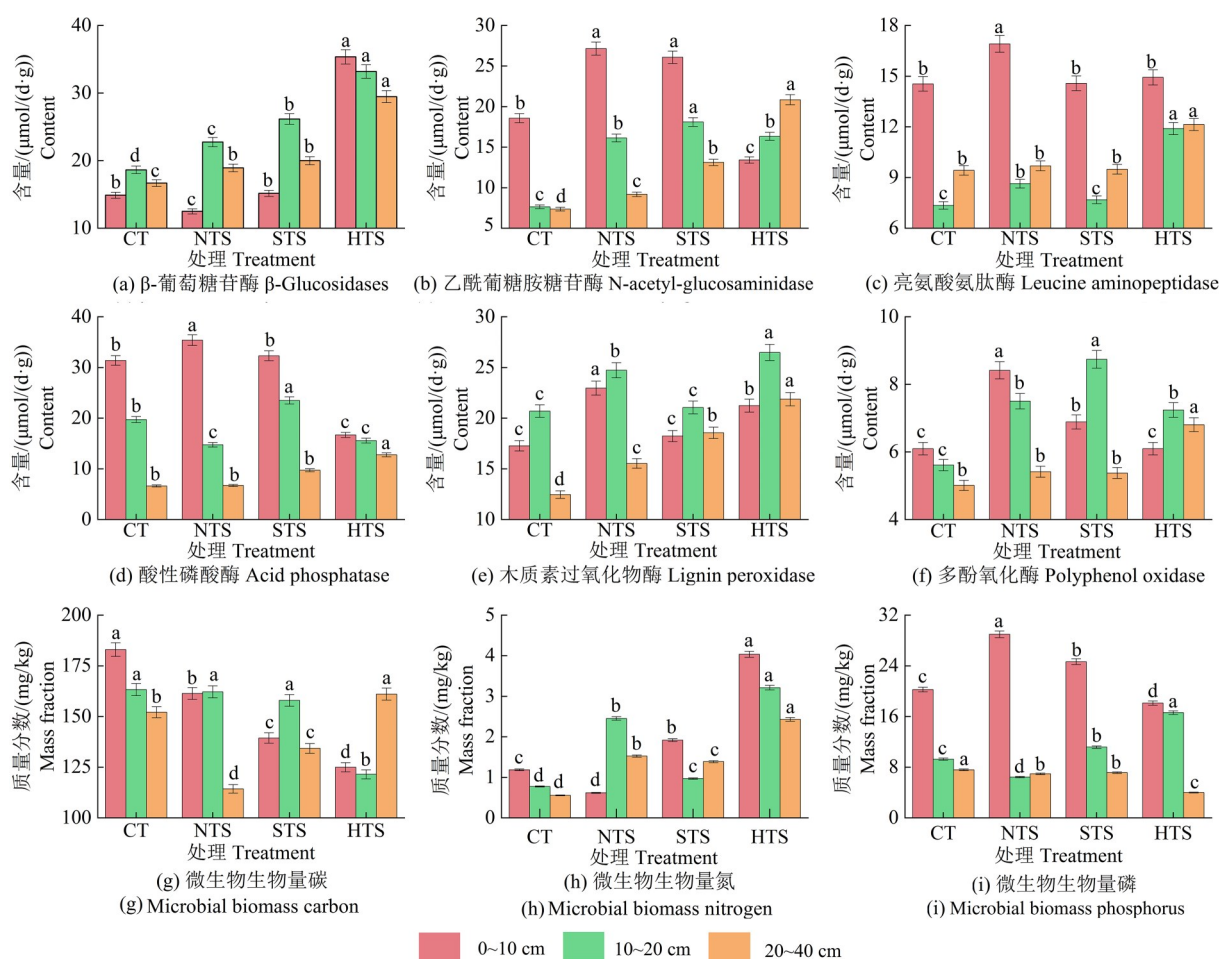


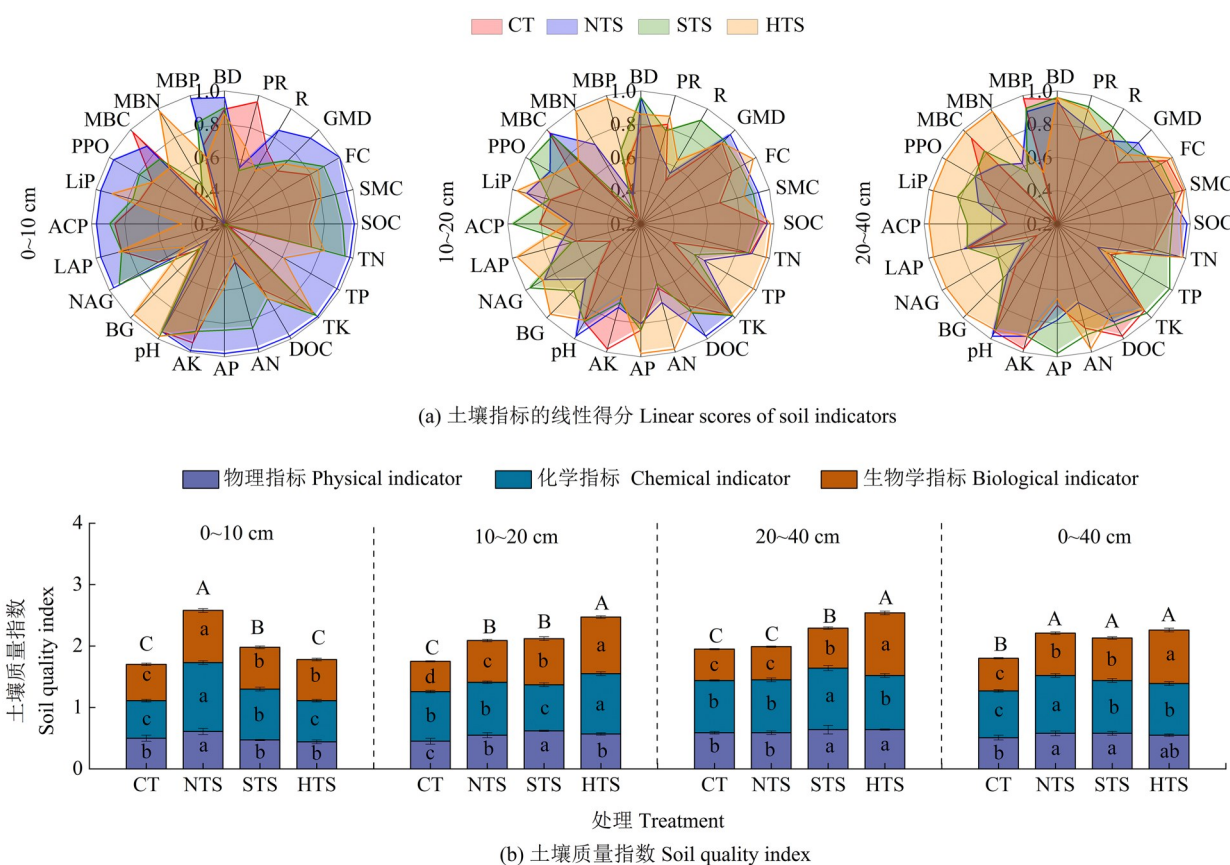
图4 不同耕作方式对土壤生物学的影响

Fig. 4 Effects of different tillage practices on soil biological properties

2.4 不同耕作方式对土壤质量的影响

图 5 为不同耕作方式对土壤质量指数的影响。与 CT 处理相比,在 0~10 cm 土层,NTS 和 STS 处理显著提高土壤化学指标质量指数和土壤质量指数,NTS 较其他处理增加物理指标质量指数和生物学指标质量指数($P<0.05$);在 10~20 cm 土层,NTS、STS 和 HTS 处理提高土壤物理指标质量指数、生物学指标质量指数和土壤质量指数,HTS 较其他处理增加化学指标质量指数($P<0.05$);在

20~40 cm 土层,STS 和 HTS 处理提高土壤物理指标质量指数、生物学指标质量指数和土壤质量指数,STS 较其他处理增加土壤化学指标质量指数($P<0.05$)。与 CT 处理相比,NTS、STS 和 HTS 处理 0~40 cm 土层土壤化学指标质量指数、生物学指标质量指数和土壤质量指数分别提高 10.5%~23.7%、30.2%~64.2% 和 18.3%~25.6%,NTS 和 STS 处理土壤物理指标质量指数增加 12.7%~13.7%($P<0.05$)。



BD: 土壤容重; PR: 土壤紧实度; R: 土壤三相 R 值; GMD: 几何平均直径; FC: 田间持水量; SMC: 饱和含水量; SOC: 土壤有机碳; TN: 全氮; TP: 全磷; TK: 全钾; DOC: 可溶性有机碳; AN: 碱解氮; AP: 速效磷; AK: 速效钾; BG: β -葡萄糖苷酶; NAG: 乙酰葡萄糖胺糖苷酶; LAP: 亮氨酸氨肽酶; ACP: 酸性磷酸酶; LiP: 木质素过氧化物酶; PPO: 多酚氧化酶; MBC: 微生物量碳; MBN: 微生物量氮; MBP: 微生物量磷。图(b)中不同小写字母表示相同土层深度物理、化学或生物学指标驱动的土壤质量指数在处理间差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示相同土层深度土壤质量指数在处理间差异显著($P<0.05$),下同。

BD: Soil bulk density; PR: Soil penetration resistance; R: Soil three phases R value; GMD: Geometric mean diameter; FC: Field capacity; SMC: Saturation moisture content; SOC: Soil organic carbon; TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus; TK: Total potassium; DOC: Dissolved organic carbon; AN: Alkali-hydrolyzable nitrogen; AP: Available phosphorus; AK: Available potassium; BG: β -glucosidases; NAG: N-acetyl-glucosaminidase; LAP: Leucine aminopeptidase; ACP: Acid phosphatase; LiP: Lignin peroxidase; PPO: Polyphenol oxidase; MBC: Microbial biomass carbon; MBN: Microbial biomass nitrogen; MBP: Microbial biomass phosphorus. In (b), different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) in soil quality indices driven by physical, chemical or biological indicators at the same soil depth among treatments, while different uppercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) in soil quality indices at the same soil depth among treatments. The same below.

图 5 不同耕作方式对土壤质量指数的影响

Fig. 5 Effects of different tillage practices on soil quality index

2.5 不同耕作方式对玉米产量及其构成因素的影响

在2023年,各处理籽粒产量、公顷穗数和百粒重差异不显著(表2),NTS处理较其他处理穗粒数显著提高6.8%~8.6%($P<0.05$)。在2024年,与CT处理相比,STS处理较CT和NTS处理显著增

加籽粒产量和百粒重($P<0.05$),增加幅度分别为12.2%~18.8%和9.3%~15.5%,NTS处理穗粒数显著提高9.3%($P<0.05$),各处理间公顷穗数差异不显著。与2023年相比,CT、NTS和HTS处理显著降低2024年籽粒产量,降幅为10.4%~15.5%。

表2 不同耕作方式对玉米产量及其构成因素的影响

Table 2 Effects of different tillage practices on maize yield and its constituent factors

年份 Year	处理 Treatment	籽粒产量/(kg/hm ²) Grain yield	公顷穗数/(×10 ³ 个) Number of spikes	穗粒数/个 Kernel per spikes	百粒重/g Hundred kernel weight
2023	CT	10 358.58±194.39a	52.83±2.47a	532.87±14.17b	30.92±1.48a
	NTS	10 336.46±500.97a	51.00±2.29a	578.93±29.80a	31.04±0.43a
	STS	10 942.37±257.26a	56.00±3.50a	544.40±22.22b	32.65±0.12a
	HTS	10 583.09±323.34a	52.17±1.44a	540.80±9.27b	31.66±0.28a
2024	CT	8 969.84±705.30b	53.00±2.50a	594.01±13.00c	30.13±0.85b
	NTS	8 970.81±661.99b	50.17±2.26a	649.48±5.14a	28.59±0.92b
	STS	10 654.73±772.08a	52.17±1.89a	620.32±45.05abc	32.94±0.76a
	HTS	9 583.18±987.13ab	49.83±4.54a	632.61±30.39abc	31.81±0.93ab

注:CT:传统耕作;NTS:秸秆覆盖免耕;STS:秸秆覆盖深松;HTS:秸秆耙混还田。不同字母表示差异显著($P<0.05$),相同字母表示差异不显著($P>0.05$)。下同。

Note: CT: Conventional tillage; NTS: Straw mulching with no-tillage; STS: Straw mulching with subsoiling tillage; HTS: Straw incorporation with harrowing tillage. Different letters indicated a significant difference ($P<0.05$), while the same letter indicated no significant difference ($P>0.05$). The same below.

2.6 不同耕作方式对植株干物质积累与分配的影响

不同耕作方式对玉米各部分干物质积累与分配的影响如图6所示。在2023年,NTS较其他处理显著提高秸秆和根系干物质积累量,STS和HTS较CT处理显著增加籽粒干物质积累量($P<0.05$)。在2024年,与CT处理相比,NTS、STS和HTS处理显著提高秸秆干物质积累量,STS较CT处理显著增加籽粒干物质积累量,NTS较其他处理提高根茬干物质积累量($P<0.05$)。在2023年,与CT处理相比,NTS、STS和HTS处理降低籽粒占比和根茬占比,提高秸秆占比($P<0.05$)。在2024年,与CT处理相比,NTS、STS和HTS处理降低籽粒占比,STS和HTS处理提高秸秆占比,NTS较其他处理提高根茬占比($P<0.05$)。

2.7 不同耕作方式对植株茎秆性状的影响

与CT处理相比,STS和HTS处理显著降低穗

位高,增加茎粗;HTS处理较CT和NTS处理显著降低株高,STS处理较CT和NTS处理显著降低穗位系数($P<0.05$,表3)。与CT处理相比,NTS和HTS处理显著增加压碎强度,STS和HTS处理提高压折强度,NTS处理提高穿刺强度,NTS、STS和HTS处理茎秆抗倒伏指数增加55.66%~60.52%($P<0.05$,表3)。

2.8 植株指标间及其与土壤质量相关性

由产量及其构成因素与植株指标相关性表明(图7),产量与公顷穗数和百粒重呈显著正相关(图7(a)和(b), $P<0.05$),与穗粒数呈显著负相关(图7(c), $P<0.05$)。产量构成因素与植株秸秆占比、籽粒占比、根茬占比、穗位高、穗位系数、茎粗、穿刺强度和压碎强度显著相关(图7(d))。土壤质量和玉米指标的相关分析表明(图8),0~10 cm土壤质量指数与根系干物重、根系占比、穿刺强度和压碎强度呈正相关,与百粒重呈负相关;10~20 cm

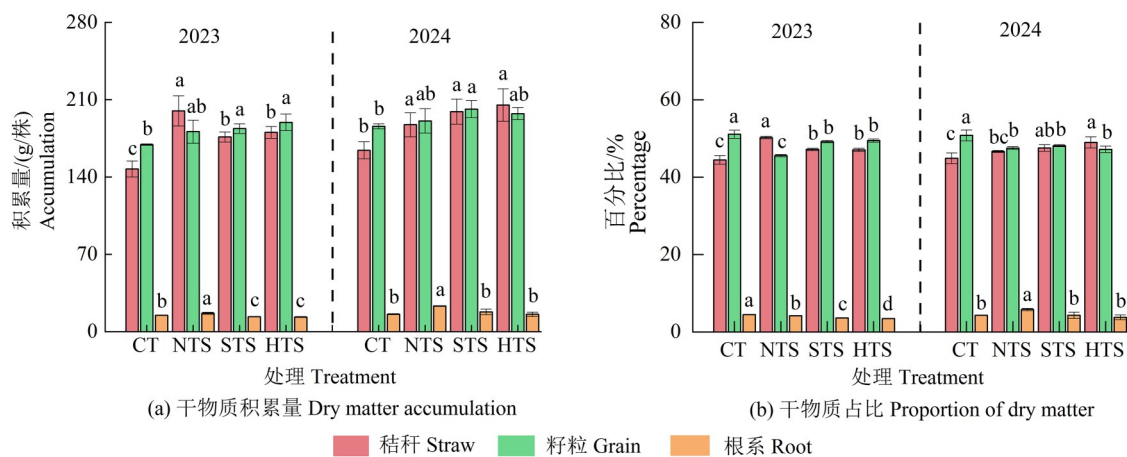


图 6 不同耕作方式对玉米各部分干物质积累与分配的影响

Fig. 6 Effects of different tillage practices on dry matter accumulation and distribution in various parts of maize

表 3 不同耕作方式对玉米茎秆农艺和力学性状的影响

Table 3 Effects of different tillage practices on agronomic and mechanical strength characteristic of maize stalk

指标 Indicator	CT	NTS	STS	HTS
株高/cm Plant height	282.00±8.72a	286.67±10.02a	275.67±1.53ab	264.00±13.00b
穗位高/cm Ear height	105.33±3.06a	104.33±1.53a	88.33±2.31b	90.00±7.21b
穗位系数 Ear position coefficient	0.37±0.02a	0.36±0.02a	0.32±0.01b	0.34±0.04ab
茎粗/mm Stem diameter	24.31±1.01b	23.84±0.53b	28.94±0.19a	28.28±2.39a
穿刺强度/(N/mm ²) Penetration strength	84.33±13.31b	112.97±14.41a	83.97±4.35b	54.53±10.12c
压碎强度/(N/cm ²) Crushing strength	315.43±21.58c	489.90±65.11a	411.23±57.67abc	427.87±53.99ab
压折强度/N Bending strength	504.10±24.53b	609.60±79.54ab	633.27±82.32a	694.90±46.63a
茎秆抗倒伏指数 Stem lodging resistance index	3.09±0.26b	4.84±0.71a	4.81±0.61a	4.96±0.90a

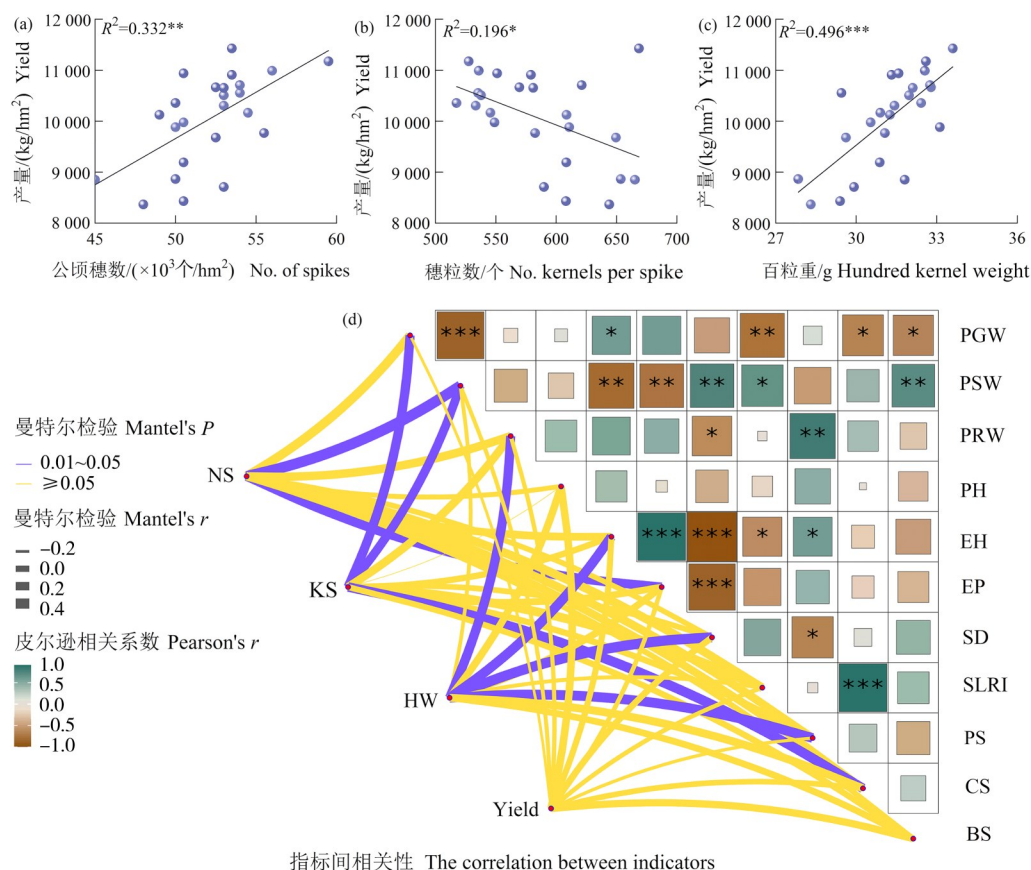
土壤质量指数与秸秆占比和茎秆抗倒伏指数呈正相关,与穿刺强度呈负相关;20~40 cm 土壤质量指数与百粒重、秸秆干物重、秸秆占比、茎粗和茎秆抗倒伏指数呈正相关,与根茬比例、株高、穗位高和穿刺强度呈负相关。冗余分析进一步明确土壤物理、化学和生物学指标驱动的质量指数对玉米指标的影响,发现 20~40 cm 土壤物理和化学指标质量指数和 0~10 cm 土壤生物学指标质量指数能解释产量及其构成因素变异的 71.0%(图 9(a)),而 20~40 cm 土壤生物学指标质量指数、0~10 cm 土壤物

理、化学和生物学指标质量指数能解释玉米植株性状变异的 80.7%(图 9(b))。

3 讨论与结论

3.1 不同耕作方式对黑土农田土壤质量的影响

本研究表明,与传统耕作相比,8 年的秸秆覆盖免耕和深松均降低 0~40 cm 土层土壤容重和三相 R 值,提高几何平均直径。主要因为少免耕降低土壤扰动,促进黑土大团聚体形成,提升土壤结构稳定性,改善土壤三相比。同时,轻简化作业减少土壤



指标间相关性 The correlation between indicators

Yield:产量;NS:公顷穗数;KS:穗粒数;HW:百粒重;SW:秸秆干物重;GW:籽粒干物重;RW:根系干物重;PSW:秸秆占比;PGW:籽粒占比;PRW:根系占比;PH:株高;EH:穗位高;EP:穗位系数;SD:茎粗;PS:穿刺强度;CS:压碎强度;BS:压折强度;SLRI:茎秆抗倒伏系数;*代表 $P<0.05$;**代表 $P<0.01$;***代表 $P<0.001$ 。下同。

Yield: Yield; NS: No. of spikes; KS: No. kernels per spike; HW: Hundred kernel weight; SW: Straw weight; GW: Grain weight; RW: Root weight; PSW: Proportion of straw weight; PGW: Proportion of grain weight; PRW: Proportion of root weight; PH: Plant height; EH: Ear height; EP: Ear position coefficient; SD: Stem diameter; PS: Penetration strength; CS: Crushing strength; BS: Bending strength; SLRI: Stem lodging resistance index. * indicates $P<0.05$; ** indicates $P<0.01$; *** indicates $P<0.001$. The same below.

图7 产量及其构成因素的线性拟合与植株指标相关性

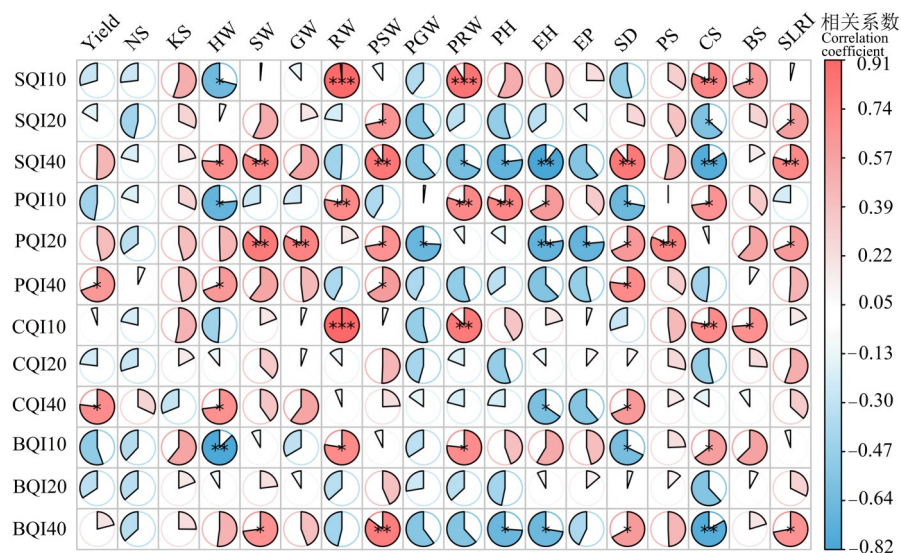
Fig. 7 The linear fitting of yield and its constituent factors and the correlation with plant indicators

压实,有效降低10~20 cm土层土壤容重^[9]。长期免耕虽然土壤紧实度增加14.4%,但土壤紧实度值均 $<1\ 000$ kPa,未对根系生长造成影响^[4]。秸秆耙混还田显著降低0~40 cm土层土壤紧实度,但全耕层扰动破坏大团聚体,降低土壤结构稳定性,对土壤结构的优化作用低于少免耕。此外,秸秆覆盖免耕、深松和秸秆耙混还田均提高土壤田间持水量和饱和含水量,可能是少免耕增加0~20 cm土层土壤大孔隙数量和入渗速率,而圆盘耙整地增加20~40 cm深层土壤非毛管孔隙度,均有利于降雨入渗^[1,14]。

本研究中秸秆覆盖免耕、深松和秸秆耙混还田均增加0~40 cm土层土壤有机碳、全氮、全磷、碱解氮和速效磷含量,降低速效钾含量,秸秆覆盖免耕

还较其他处理提高可溶性有机碳含量和pH。可能是秸秆还田增加碳源,有效降低有机质矿化分解,增加土壤有机质和全量氮磷积累^[8]。秸秆还田还促进微生物活动,加速有机氮、磷的矿化,提升养分供应^[11]。钾离子移动性强,2024年为多雨年份,秸秆还田处理导致部分速效钾淋溶到深层土壤^[25]。此外,良好的土壤环境促进根系生长,提高对速效钾的吸收利用^[26]。秸秆覆盖免耕提高可溶性有机碳含量是因为秸秆在地表缓慢分解,深层土壤微生物活动较弱,产生更多小分子可溶性有机物,而深松或耙混可能加速秸秆分解为稳定的大分子有机质^[10]。

本研究中秸秆覆盖免耕、深松和秸秆耙混还田均增加0~40 cm土层土壤 β -葡萄糖苷酶、乙酰葡萄糖



SQI10: 0~10 cm 土壤质量指数; SQI20: 10~20 cm 土壤质量指数; SQI40: 20~40 cm 土壤质量指数; PQI10: 0~10 cm 土壤物理指标质量指数; PQI20: 10~20 cm 土壤物理指标质量指数; PQI40: 20~40 cm 土壤物理指标质量指数; CQI10: 0~10 cm 土壤化学指标质量指数; CQI20: 10~20 cm 土壤化学指标质量指数; CQI40: 20~40 cm 土壤化学指标质量指数; BQI10: 0~10 cm 土壤生物学指标质量指数; BQI20: 10~20 cm 土壤生物学指标质量指数; BQI40: 20~40 cm 土壤生物学指标质量指数。下同。

SQI10: 0-10 cm soil quality index; SQI20: 10-20 cm soil quality index; SQI40: 20-40 cm soil quality index; PQI10: 0-10 cm soil physical properties quality index; PQI20: 10-20 cm soil physical properties quality index; PQI40: 20-40 cm soil physical properties quality index; CQI10: 0-10 cm soil chemical properties quality index; CQI20: 10-20 cm soil chemical properties quality index; CQI40: 20-40 cm soil chemical properties quality index; BQI10: 0-10 cm soil biological properties quality index; BQI20: 10-20 cm soil biological properties quality index; BQI40: 20-40 cm soil biological properties quality index. The same below.

图 8 土壤质量与玉米指标相关性

Fig. 8 Correlation between soil quality and maize indicators

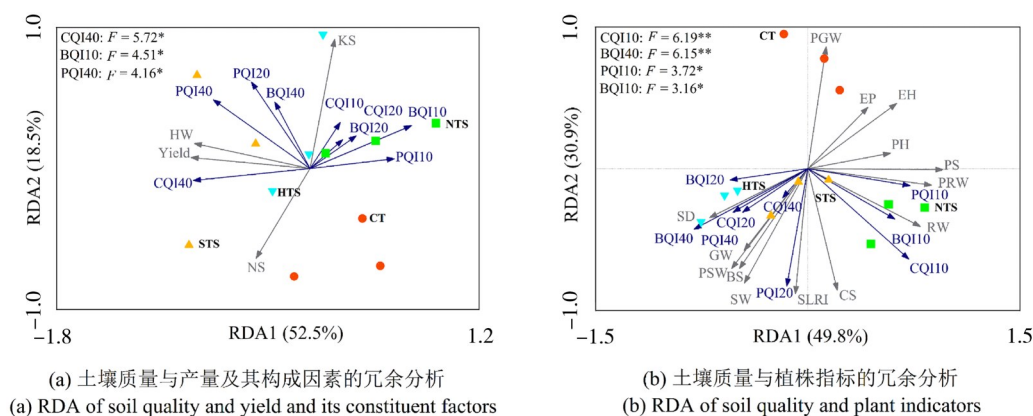


图 9 土壤质量与玉米指标冗余分析

Fig. 9 Redundancy analysis of soil quality and maize indicators

胺糖苷酶、木质素过氧化物酶、多酚氧化酶活性和微生物生物量氮,降低微生物生物量碳,秸秆覆盖免耕和深松还增加土壤微生物生物量磷含量。秸秆还田后促进微生物增殖,提高碳循环酶分泌,将秸秆中的纤维素、木质素等分解成可以被植物和微生物利用的葡萄糖和果糖,有利于秸秆残体转化和有机质周转^[27]。大多数研究发现秸秆还田会增加

土壤微生物生物量碳含量,本研究趋势相反,可能是因为秸秆量高于 10 t/hm²,配施氮磷钾肥的用量不适宜,微生物养分利用受碳限制^[10,28]。长期秸秆还田可以通过分泌乙酰氨基葡萄糖苷酶缓解微生物碳限制,促进微生物源氮的产生和固存^[29-30]。此外,秸秆覆盖免耕和深松后土壤全磷和速效磷含量的增加,缓解微生物养分利用的磷限制,提高微生物

物生物量磷含量^[10]。

本研究发现秸秆覆盖免耕、深松和秸秆耙混还田均增加0~40 cm土层土壤质量指数,其中,秸秆覆盖免耕和深松从土壤物理、化学和生物学指标3个维度提升土壤质量指数,而秸秆耙混还田主要从化学和生物学指标2个维度提升土壤质量指数。主要因为秸秆覆盖下少免耕有效改善土壤结构和持水能力,增加有机碳和养分供应,促进酶和微生物活性提高,其中免耕固碳和培肥效果优于深松。秸秆耙混还田虽然破碎团聚体,影响土壤结构稳定性,但显著提高深层土壤养分供应和生物学活性,其对0~40 cm土层土壤质量的提升效果优于秸秆覆盖免耕和深松。

3.2 不同耕作方式对黑土农田玉米产量的影响

在本试验田前4年的定位研究中,秸秆覆盖免耕由于播种至苗期耕层土壤平均温度降低2.6~3.1℃,玉米出苗延迟5~7 d,出苗率降低4.3%,导致植株干物质积累减少,减产7.5%~15.6%,而秸秆覆盖深松和秸秆耙混还田均缓解土壤温度降幅,缩短生育期进程延迟天数,6叶之后干物质积累降低幅度逐渐缩小,产量与传统耕作差异不显著^[14-15]。在定位的第7~8年,秸秆覆盖免耕改善有效穗数和百粒重,显著提高穗粒数,其产量与传统耕作差异不显著。降雨量是影响土壤温度和水分的的重要环境因子^[31],在多雨年份,秸秆覆盖深松和秸秆耙混还田能消减涝害,降低穗位高,增加茎粗,提升茎秆的压折强度和抗倒伏能力,改善百粒重和增产,其产量年际间稳定性优于免耕和传统耕作。该结果与Liu等^[32]关于留高茬深松较免耕增产研究结果相同,抗倒伏能力增强是因为深松后提高茎秆纤维素、半纤维素和木质素含量,茎秆结构性物质组成增加,提高茎秆刺穿强度和压折强度^[33]。增产主要因为秸秆还田和深耕通过改善玉米各阶段的灌浆速率参数,促进籽粒粗脂肪含量的提高,显著提高了粒重^[34]。此外,秸秆覆盖免耕、深松和秸秆耙混还田植株干物质分配时均增加秸秆占比,可能是秸秆还田减少土壤水分蒸发,增加土壤储水量,促进玉米光合作用和干物质积累,降低吐丝后干物质转运量,增加了秸秆比例^[35]。

植株指标与土壤质量相关性分析发现,优化表层养分含量、耕层结构与持水特性及深层生物学特性改善茎秆抗倒伏能力。因为秸秆覆盖还田免

耕、深松和秸秆耙混还田能够调节黑土结构,增加土壤水肥“蓄保供”能力,提高土壤微生物和酶活性,促进玉米根系活力,优化根系构型,加强根土结合能力,增加茎粗,提高茎秆的抗弯曲力和茎节横折强度,增强玉米抗倒伏能力^[36]。此外,产量和百粒重与深层土壤物理和化学指标质量指数呈正相关,与表层生物学指标质量指数呈负相关。主要因为长期深耕较传统耕作和免耕能打破犁底层,增加深层土壤孔隙分形维数、大孔隙度和总孔隙面积,提升深层土壤持水能力,促进深层土壤全量养分积累和速效养分供应,驱动产量变异的64%^[37]。长期秸秆覆盖免耕显著提高表层微生物活性,随着微生物氮素需求增加,会短期内与作物竞争土壤氮素,影响作物前期生长,免耕养分聚集在表层土壤,在多雨年份造成氮磷素淋失增加,均影响作物养分吸收和利用^[38]。

参考文献 References

- [1] 梁爱珍, 张延, 陈学文, 张士秀, 黄丹丹, 杨学明, 张晓平, 李秀军, 田春杰, McLaughlin Neil, 相洋. 东北黑土区保护性耕作的发展现状与成效研究[J]. 地理科学, 2022, 42(8): 1325-1335
- [2] Liang A Z, Zhang Y, Chen X W, Zhang S X, Huang D D, Yang X M, Zhang X P, Li X J, Tian C J, McLaughlin N, Xiang Y. Development and effects of conservation tillage in the black soil region of Northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(8): 1325-1335 (in Chinese)
- [3] Yang X M, Zhang X P, Fang H J, Zhu P, Ren J, Wang L C. Long-term effects of fertilization on soil organic carbon changes in continuous corn of Northeast China: RothC model simulations [J]. *Environmental Management*, 2003, 32(4): 459-465
- [4] 杨润城. 海伦黑土农田风蚀监测研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018
- [5] Yang R C. Monitoring study on wind erosion in Hailun of the typical mollisols farmland[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018 (in Chinese)
- [6] 郑洪兵, 郑金玉, 罗洋, 李瑞平, 李伟堂, 王浩, 任红, 齐华, 刘武仁. 长期不同耕作方式下的土壤硬度变化特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 63-70
- [7] Zheng H B, Zheng J Y, Luo Y, Li R P, Li W T, Wang H, Ren H, Qi H, Liu W R. Change characteristic of soil compaction of long-term different tillage methods in cropland [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(9): 63-70 (in Chinese)
- [8] 隋鹏祥, 罗洋, 郑洪兵, 李瑞平, 王浩, 袁野, 郑金玉, 刘武仁. 长期耕作对农田黑土团聚体和有机碳稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2023, 34(7): 1853-1861
- [9] Sui P X, Luo Y, Zheng H B, Li R P, Wang H, Yuan Y, Zheng J Y, Liu W R. Effects of long-term tillage practices on the stability of soil aggregates and organic carbon in black soil farmland [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(7): 1853-1861 (in Chinese)
- [10] Chen X W. Earthworm positively influences large macropores under extreme drought conditions and conservation tillage in a Chinese Mollisol [J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2018, 16(1): 663-675
- [11] Fan R Q, Zhang X P, Yang X M, Liang A Z, Jia S X. Effects of tillage

- management on infiltration and preferential flow in a black soil, Northeast China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2013, 23(3): 312-320
- [8] 张延. 秸秆还田下耕作措施对农田黑土有机碳组分及其稳定性的影响[D]. 哈尔滨: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2019
- Zhang Y. Effects of tillage management with residue return on soil organic carbon fractions and stability[D]. Harbin: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2019 (in Chinese)
- [9] 李瑞平. 吉林省半湿润区不同耕作方式对土壤环境及玉米产量的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021
- Li R P. Effects of different tillage methods on soil environment and maize yield of semi-humid region in jilin province [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021 (in Chinese)
- [10] 隋鹏祥, 罗洋, 王浩, 任英, 袁野, 周思琪, 田圣陶, 刘武仁, 郑金玉. 耕作方式对农田黑土有机碳库和酶化学计量特征的影响[J]. 环境科学, 2025, 46(7): 4441-4449
- Sui P X, Luo Y, Wang H, Ren Y, Yuan Y, Zhou S Q, Tian S T, Liu W R, Zheng J Y. Impact of tillage practices on the organic carbon pool and enzyme stoichiometry characteristics in black soil farmland [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(7): 4441-4449 (in Chinese)
- [11] Sui P X, Li R P, Zheng H B, Wang H, Yuan Y, Luo Y, Zheng J Y, Liu W R. Long-term conservation tillage practices directly and indirectly affect soil micro-food web in a Chinese mollisol[J]. *Agronomy*, 2022, 12(10): 2356
- [12] 郭亚飞. 保护性耕作下蚯蚓在土壤结构形成和有机碳周转过程中的作用[D]. 哈尔滨: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2018
- Guo Y F. Impacts of earthworm on soil structure formation and soil organic carbon turnover under conservation tillage[D]. Harbin: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2018 (in Chinese)
- [13] Li R P, Zheng J Y, Xie R Z, Ming B, Peng X H, Luo Y, Zheng H B, Sui P X, Wang K R, Hou P, Hou L Y, Zhang G Q, Bai S J, Wang H, Liu W R, Li S K. Potential mechanisms of maize yield reduction under short-term no-tillage combined with residue coverage in the semi-humid region of Northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 217: 105289
- [14] 李瑞平, 谢瑞芝, 罗洋, 隋鹏祥, 郑洪兵, 明博, 王浩, 刘武仁, 郑金玉, 李少昆. 典型黑土区不同保护性耕作方式对玉米生长发育及产量形成的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(1): 71-82
- Li R P, Xie R Z, Luo Y, Sui P X, Zheng H B, Ming B, Wang H, Liu W R, Zheng J Y, Li S K. Effects of conservation tillage methods on maize growth and yields in a typical black soil region [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, 32(1): 71-82 (in Chinese)
- [15] 李瑞平, 罗洋, 隋鹏祥, 郑洪兵, 明博, 李少昆, 王浩, 郑金玉. 玉米秸秆不同还田方式对黑土耕层温度影响的短期效应[J]. 应用生态学报, 2023, 34(10): 2693-2702
- Li R P, Luo Y, Sui P X, Zheng H B, Ming B, Li S K, Wang H, Zheng J Y. Short-term effect of different returning methods of maize straw on the temperature of black soil plough layer [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(10): 2693-2702 (in Chinese)
- [16] 蔡红光, 刘剑钊, 梁尧, 张畅, 陈宝玉, 展文洁, 曹庆军, 王洪君, 袁静超, 于冬, 曹铁华, 任军, 王立春. 玉米秸秆全量条带覆盖还田耕种技术模式生产实证[J]. 玉米科学, 2022, 30(1): 115-122
- Cai H G, Liu J Z, Liang Y, Zhang C, Chen B Y, Zhan W J, Cao Q J, Wang H J, Yuan J C, Yu D, Cao T H, Ren J, Wang L C. Demonstration on integrated cultivation mode of maize straw stripe mulching [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2022, 30(1): 115-122 (in Chinese)
- [17] 周思琪, 罗洋, 隋鹏祥, 王浩, 任英, 郑洪兵, 李瑞平, 赵宇, 袁野, 田圣陶, 傅民杰, 郑金玉, 刘武仁. 长期宽窄行交替种植条带深松对农田黑土理化特性和玉米产量的影响[J]. 玉米科学, 2024, 32(9): 70-77
- Zhou S Q, Luo Y, Sui P X, Wang H, Ren Y, Zheng H B, Li R P, Zhao Y, Yuan Y, Tian S T, Fu M J, Zheng J Y, Liu W R. Effects of long-term wide-narrow row alternative planting with strip subsoiling tillage on physicochemical properties and maize yield in farmland black soil[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2024, 32(9): 70-77 (in Chinese)
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000
- Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [19] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 肖和艾. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006
- Wu J S, Lin Q M, Huang Q Y, Xiao H A. *Determination Methods for Soil Microbial Biomass and Their Applications* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006 (in Chinese)
- [20] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986
- Guan S Y. *Soil Enzymes and Their Research Methods* [M]. Beijing: Agricultural Press, 1986 (in Chinese)
- [21] Yu P J, Liu S W, Zhang L, Li Q, Zhou D W. Selecting the minimum data set and quantitative soil quality indexing of alkaline soils under different land uses in northeastern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 616-617: 564-571
- [22] Andrews S S, Karlen D L, Mitchell J P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California [J] *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2002, 90: 25-45
- [23] Askari M S, Holden N M. Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management[J]. *Geoderma*, 2014, 230-231: 131-142
- [24] Kuzyakov Y, Gunina A, Zamanian K, Tian J, Luo Y, Xu X L, Yudina A, Aponte H, Alharbi H, Ovsepyan L, Kurganova I, Ge T D, Guillaume T. New approaches for evaluation of soil health, sensitivity and resistance to degradation[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2020, 7(3): 282
- [25] Fan Y F, Gao J L, Sun J Y, Liu J, Su Z J, Wang Z G, Yu X F, Hu S P. Effects of straw returning and potassium fertilizer application on root characteristics and yield of spring maize in China Inner Mongolia [J]. *Agronomy Journal*, 2021, 113(5): 4369-4385
- [26] Zhao X, He C, Liu W S, Liu W X, Liu Q Y, Bai W, Li L J, Lal R, Zhang H L. Responses of soil pH to no-till and the factors affecting it: A global meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(1): 154-166
- [27] 马立晓, 李婧, 邹智超, 蔡岸冬, 张爱平, 李贵春, 杜章留. 免耕和秸秆还田对我国土壤碳循环酶活性影响的荟萃分析[J]. 中国农业科学, 2021, 54(9): 1913-1925
- Ma L X, Li J, Zou Z C, Cai A D, Zhang A P, Li G C, Du Z L. Effects of No-tillage and straw returning on soil C-cycling enzyme activities in China: Meta-analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(9): 1913-1925 (in Chinese)
- [28] Wang Q J, Cao X, Jiang H, Guo Z H. Straw application and soil microbial biomass carbon change: A meta-analysis[J]. *CLEAN - Soil, Air, Water*, 2020, 49(2): 2000386
- [29] Xu L, Zhou Y, Miao C R, Chen H, Zhang J W, Qian H Y, Hou P F, Ding Y F, Liu Z H, Li W W, Wang S H, Jiang Y, Li G H. Long-term straw return increases fungal residual contribution to soil microaggregate nitrogen pool: An eco-enzymatic stoichiometric study[J]. *Soil and Tillage Research*, 2024, 244: 106278
- [30] 于洋, 张常仁, 杨雅丽, 徐欣, 吕付泽, 郑甜甜, 解宏图, 鲍雪莲. 长期免耕和秸秆覆盖量对黑土碳氮含量及碳氮循环相关酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2024, 35(3): 695-704

- Yu Y, Zhang C R, Yang Y L, Xu X, Lyu F Z, Zheng T T, Xie H T, Bao X L. Effects of long-term no-tillage and different stover mulching amounts on soil carbon and nitrogen contents and enzyme activities of carbon and nitrogen cycle in Mollisols[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(3): 695-704 (in Chinese)
- [31] 崔文倩, 赵锦, 杨晓光. 基于Meta分析的4种保护性耕作措施对东北春玉米生长季农田土壤水热环境影响[J]. *中国农业大学学报*, 2022, 27(8): 24-34
- Cui W Q, Zhao J, Yang X G. Effects of four conservation tillages on soil hydrothermal environment during maize growing season in Northeast China: A meta-analysis[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(8): 24-34 (in Chinese)
- [32] Liu Z, Nie L, Zhang M, Zhang S, Yang H, Guo L, Xia J, Ning T, Jiao N, Kuzyakov Y. Long-term subsoiling and straw return increase soil organic carbon fractions and crop yield[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 78(3): 234-244
- [33] Feng X Y, Ma D L, Lei T E, Hu S P, Yu X F, Gao J L. Subsoil tillage improved the maize stalk lodging resistance under high planting density[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1396182
- [34] Wang L Q, Yu X F, Gao J L, Ma D L, Liu H Y, Hu S P. Regulation of tillage on grain matter accumulation in maize[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1373624
- [35] Zhang L H, Zhao H X, Xu C, Yan W P, Sun N, Tan G B, Yu J, Meng X M, Li F, Bian S F. Effects of straw returning on soil moisture and maize yield in semi-humid area[J]. *Cereal Research Communications*, 2022, 50(3): 539-548
- [36] 孟令轩. 辽西半干旱区不同耕作方式对玉米抗倒伏能力的影响研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2024
- Meng L X. The influence of different tillage method on the lodging resistance of maize in the semi-arid region of western Liaoning Province[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2024 (in Chinese)
- [37] Liu C Z, Si B C, Zhao Y, Wu Z M, Lu X C, Chen X, Han X Z, Zhu Y C, Zou W X. Drivers of soil quality and maize yield under long-term tillage and straw incorporation in Mollisols[J]. *Soil and Tillage Research*, 2025, 246: 106360
- [38] Zhang W J, Feng J Y, Bai X Y, He W Y, Mo J X, Gao Q C, Wang K J, Gu S Y. Crop yield and soil quality of soya bean-maize rotation in response to 8-year keep stubble with no tillage practices on the Northeast China[J]. *European Journal of Agronomy*, 2025, 164: 127526

责任编辑: 董金波



第一作者简介: 隋鹏祥, 副研究员, 主要从事旱地耕层调控和保护性耕作理论与技术研究工作。主持中国博士后基金、国家重点研发计划子课题、吉林省科技发展计划重点研发项目、青年科技人才培养项目等项目7项。获吉林省科技进步奖一等奖1项, 制定地方标准3项, 参编著作2部, 授权专利4件; 发表论文36篇, 其中以第一和通讯作者发表中文核心期刊10篇、SCI论文5篇。



通讯作者简介: 郑金玉, 研究员, 主要从事农作制度和保护性耕作研究。主持国家重点研发计划课题、公益性行业(农业)科研专项课题、中国科学院先导专项、吉林省科技发展计划重点研发项目等项目20余项。获吉林省科技进步奖一等奖1项、二等奖2项, 中华农业科技二等奖1项, 吉林省自然科学学术成果奖二等奖2项; 制定地方标准5项, 参编著作6部, 授权发明专利5件, 发表论文60余篇。