

张兴义,李媛媛,Francisco Alberto Sosa,等.长期秸秆全量覆盖免耕对黑土有机碳及其组分剖面分异的影响[J].水土保持学报,2026,40(5):204-212.
Zhang Xingyi, Li Yuanyuan, Francisco Alberto Sosa, et al. Effects of long-term no-till with full straw mulching on profile differentiation of soil organic carbon and its fractions in mollisols[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2026,40(5):204-212.

长期秸秆全量覆盖免耕对黑土有机碳及其 组分剖面分异的影响

张兴义^{1,2}, 李媛媛¹, Francisco Alberto Sosa³, Yuriy Kravchenko⁴, 李建业²

(1.东北农业大学资源与环境学院,哈尔滨 150030; 2.中国科学院东北地理与农业生态研究所,哈尔滨 150081;

3.奥比斯波·科伦布雷斯农业工业实验站,阿根廷 图库曼省 T4101XAC;

4.乌克兰国立生命与环境科学大学,基辅 03041)

摘 要: [目的] 为深入揭示长期保护性耕作对黑土质量恢复与固碳潜力的作用机制。[方法] 本研究依托连续 17 a 的长期定位田间试验,系统探究秸秆全量覆盖免耕(NT)和传统耕作旋耕(CT)对黑土有机碳(SOC)及其组分在 0~100 cm 土壤剖面的分布特征与稳定机制的差异。[结果] 1) 与传统耕作旋耕(CT)相比,NT 提升表层 0~20 cm 土壤的 SOC 含量和储量分别为 23.38% 和 19.40% ($p < 0.05$),同时增加 20~40、40~60、80~100 cm 深层土壤的 SOC 含量,增幅分别达 15.32%、33.06% 和 12.58%; 2) NT 差异化调控各碳组分,0~20 cm 土层活性碳库颗粒有机碳(POC)含量增加 72%, 40~60 cm POC 含量增加 289%,各土层稳定碳库矿物结合态有机碳(MOC)含量均增加,40~60 cm 增幅最大,达 26%; 溶解性有机碳(DOC)向深层 60~100 cm 迁移并积累,增幅达 34%~54%,表明 NT 通过差异化途径优化土壤碳库结构; 3) NT 显著降低下层 40~60 cm 土壤体积质量 9.93%,改善土壤团聚体结构和持水能力,形成“以结构保碳、以碳稳结构”的互馈机制。[结论] 从长期、全剖面视角发现,秸秆全量覆盖免耕通过“物理保护-生物化学稳定-垂直迁移”协同机制,驱动黑土有机碳库从量变到质变的提升,为黑土地保护性耕作技术的长期效益评估与推广提供科学依据。

关键词: 黑土; 秸秆全量覆盖免耕; 有机碳组分; 剖面分布; 长期定位试验

中图分类号: S281

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0204-09

Effects of Long-Term No-Till with Full Straw Mulching on Profile Differentiation of Soil Organic Carbon and Its Fractions in Mollisols

Zhang Xingyi^{1,2}, Li Yuanyuan¹, Francisco Alberto Sosa³, Yuriy Kravchenko⁴, Li Jianye²

(1.School of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

2.Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China;

3.Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, Tucumán T4101XAC, Argentina;

4.National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv 03041, Ukraine)

Abstract: [Objective] This study aims to elucidate the mechanisms by which long-term conservation tillage affects black soil quality restoration and carbon sequestration potential. [Methods] Based on a 17-year long-term fixed-location field experiment, this study systematically investigated the differences in distribution characteristics and stabilization mechanisms of soil organic carbon (SOC) and its fractions in the 0—100 cm soil profile under no-tillage with full straw mulching (NT) and conventional rotary tillage (CT) of mollisols. [Results] 1) Compared with CT, NT increased SOC content and storage in the 0—20 cm surface layer by 23.38% and 19.40% ($p < 0.05$), respectively. Meanwhile, NT enhanced the stability of deeper soil layers at 20—40, 40—60, and 80—100 cm, with increases of 15.32%, 33.06%, and 12.58%, respectively. 2) NT differentially regulated individual soil

收稿日期: 2026-03-17

修回日期: 2026-04-02

录用日期: 2026-04-08

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-07-24

资助项目: 中国科学院国际合作局国际伙伴计划项目(131323KYSB20210004); 国家自然科学基金项目(42177312)

第一作者: 张兴义(1966—), 男, 博士, 研究员, 主要从事黑土农业生态研究。E-mail: zhangxy@iga.ac.cn

通信作者: 李建业(1988—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事黑土地退化修复与质量提升研究。E-mail: lijianye@iga.ac.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

carbon fractions. In the 0–20 cm layer, the content of particulate organic carbon (POC), a labile carbon pool, increased by 72%, and POC in the 40–60 cm layer increased by 289%. Mineral-associated organic carbon (MOC), a stable carbon pool, increased in all layers, with the largest increase of 26% in the 40–60 cm layer. The dissolved organic carbon (DOC) pool migrated to and accumulated in the 60–100 cm layer, increasing by 34%–54%. These results indicate that NT optimized soil carbon pool structure through differentiated pathways. 3) NT significantly reduced soil bulk density in the 40–60 cm layer by 9.93%, improved soil aggregate structure and water-holding capacity, forming a mutual feedback mechanism of "carbon preservation through structural protection and structural stabilization through carbon enrichment". [Conclusion] From a long-term, whole-profile perspective, no-till with full straw mulching drives both qualitative and quantitative improvements of the SOC pool in mollisols through a synergistic mechanism of physical protection, biochemical stabilization, and vertical translocation. These findings provide scientific evidence for evaluating and promoting the long-term benefits of conservation tillage in mollisol regions.

Keywords: mollisols; no-till with full straw mulching; soil organic carbon fractions; profile distribution; long-term fixed-location experiment

Received: 2026-03-17

Revised: 2026-04-02

Accepted: 2026-04-08

Online(www.cnki.net): 2026-07-24

黑土地是我国最重要的商品粮生产基地^[1], 长期高强度的农业开发利用导致该区域土壤退化问题日益突出^[2]。农户为追求作物高产过度施用化肥农药、长期实施传统耕作和旋耕等, 已造成农田土壤-作物系统失衡与种植效益的下滑^[3]。粗放的耕作制度严重破坏土壤自然结构, 频繁的机械作业引起土壤压实, 加剧土壤结构退化^[4], 进一步导致土壤肥力降低, 表现为土壤有机质含量迅速下降^[5]。相关数据^[6]显示, 表层土壤(0~20 cm)SOC含量下降达38%, 底土(20~40 cm)SOC含量亦下降22%, 严重威胁该区域土壤质量和粮食的可持续生产。

土壤有机碳库由溶解性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)、颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)和矿物结合态有机碳(mineral-associated organic carbon, MOC)3个关键功能组分构成, 其形态与稳定性共同决定土壤碳汇潜力。DOC是SOC最活跃的组分, 可作为微生物直接利用的碳源, 其迁移与分解行为受分子特性(如芳香性、疏水性)调控, 亦会反作用于土壤碳循环过程^[7]; POC主要为部分分解的植物残体, 是SOC累积的重要来源, 其周转速率介于DOC与MOC之间, 易受微生物分解和土地利用方式影响, 常与砂粒结合形成较大的颗粒^[8]; MOC是指通过物理化学作用与矿物结合的有机碳, 因受矿物的保护通常比POC更稳定^[9], SOC的储量变化是DOC、POC、MOC动态权衡与协同作用的综合结果, 当POC向MOC的转化效率高于DOC的淋溶流失与POC的分解速率时, SOC呈现累积趋势, 反之则出现亏损。传统耕作模式下, 土壤频

繁扰动会破坏团聚体结构, 导致被物理保护的POC暴露于外界环境^[10], 加速其微生物分解, 同时降低土壤矿物对有机碳的吸附能力, 减少MOC的形成^[9]; 传统耕作缺乏地表覆盖, 易引发土壤侵蚀与水分流失, 进一步加剧DOC的淋溶与SOC的矿化^[7], 最终导致SOC库亏损及各碳组分间的权衡失衡, 最终表现为POC含量降低, MOC固存能力下降, DOC淋溶流失增加, 形成恶性循环。

保护性耕作是当前东北黑土区推广的重要保育性农艺措施, 其核心措施包括秸秆覆盖、少免耕和合理轮作^[11], 旨在通过增加地表覆盖、减少土壤扰动, 提高土壤有机质、增强团聚体稳定性、降低有机碳矿化速率, 同时减少水分蒸发、维持土壤水分, 促进作物生长, 从而改善土壤结构与提升功能^[12]。已有研究^[13]显示, 长期免耕配合秸秆还田可显著改变土壤活性碳库动态, 秸秆还田使土壤POC含量显著提高30.96%, 通过激发效应与更新效应的协同作用, 推动光合碳向土壤活性碳库的高效转化; Liu等^[14]研究表明, 秸秆还田显著提高表土层SOC与DOC含量; 黄璐^[15]研究发现, 连续4 a秸秆全量还田后, 土壤有机碳固存量较不还田提高约12%~18%。同时, 免耕对土壤惰性碳组分亦有所影响, 杨玥^[16]研究表明, 旱地6 a免耕可显著提高0~20 cm土层MOC 4.9%。然而, 保护性耕作对深层土壤碳库的影响仍存争议, 梁尧等^[17]基于6 a定位试验发现, 秸秆覆盖还田+免耕显著增加0~10 cm土层SOC含量(增幅22.4%), 但对10~40 cm土层SOC含量无显著影响; 而Hewelke等^[18]基于波兰的46 a长期试验证明, 持续的

免耕管理显著增加表层 SOC 含量,为碳通过物理、化学和生物过程逐渐向深层迁移,进而提升整个土壤剖面的碳储量提供必要的前提条件。

目前,针对东北黑土区秸秆覆盖免耕效应的研究多基于短期试验,长期土壤碳库储量变化及剖面分异机制尚不明确,关于保护性耕作下有机碳通过“物理保护-生物化学稳定-垂直迁移”协同机制影响深层碳库的研究尚缺乏系统阐释。因此,本研究依托连续 17 a 长期定位田间试验,系统测定分析秸秆全量覆盖免耕(NT)与传统旋耕(CT)2 种处理方式下 0~100 cm 土层 SOC 组分的分布特征,旨在评估 NT 综合技术模式对黑土全剖面 SOC 的累积效应,并探讨其可能的稳定化路径及其在土壤结构改善中所起的关键作用,以期为黑土地保护与农业可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地点位于中国科学院海伦农田生态系统国家野外科学观测研究站(47°26'N,126°38'E)(图 1),土壤为典型黑土,地形平缓,无水土流失。研究区属于北温带大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,多西北风,夏季高温多雨,多偏南风,年平均气温 1.5℃,年平均降雨量 530 mm^[19],平均风速 1.8 m/s,雨热同期,主要降水量集中在 5—9 月,无霜期 125 d。2004 年秋耕层(0~20 cm)土壤基本理化性状为:土壤体积质量为 1.15 g/cm³,土壤含水率为 20.20%,SOC 含量为 24.42 g/kg,砂粒(2~0.02 mm)、粉粒(<0.02~0.002 mm)和黏粒(<0.002 mm)3 个粒级的占比分别为 29.92%、29.41% 和 40.67%。

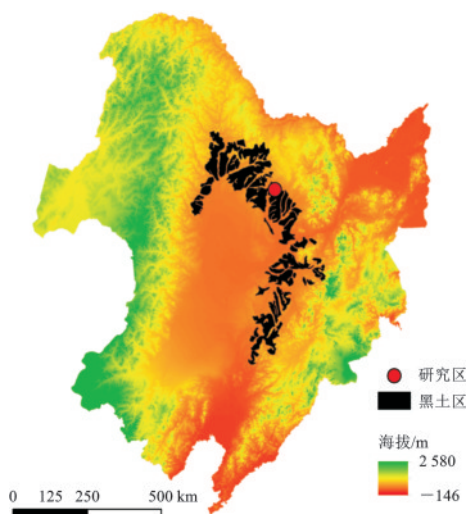


图 1 研究区位置

Fig.1 Location of study site

1.2 试验设计

试验开始于 2004 年秋,设置秸秆全量覆盖免耕(NT)和传统耕作旋耕(CT)2 种处理,小区面积为 336 m²(40.0 m×8.4 m,12 垄),小区间留有 4 m 机耕路,试验小区采用随机区组布设,3 次重复。NT:在作物收获后直接将秸秆粉碎全量覆盖于地表,不进行土壤翻动,不清理作物残茬,翌年春季使用免耕播种和施肥,通过喷施化学除草剂除草,全生育期不进行任何秋整地和中耕作业;CT:在秋收后清除全部秸秆,使用旋耕机旋耕起垄,耕翻深度 20 cm,垄宽 65 cm,翌年春季进行播种,播种后采用广谱性除草剂控制杂草,并按当地传统进行 3 次中耕扶垄作业(旋耕是东北地区普遍传统耕作,均为秸秆离田)。

试验采用玉米-大豆年际轮作(即每年种植 1 种作物,逐年轮换)。供试作物品种为大豆“东生 17 号”和玉米“德美亚 3 号”。各小区播种量一致,5 月初进行播种,播种方式为人工点播。施肥管理根据轮作作物种类按年度分别进行。

大豆种植年:播种时一次性施入全部肥料,施氮肥 20.25 kg/hm²(以 N 计)、磷肥 51.75 kg/hm²(以 P 计)、钾肥 15 kg/hm²(以 K 计),生育期内不追肥;玉米种植年:播种时施基肥,施氮肥 69 kg/hm²(以 N 计)、磷肥 51.75 kg/hm²(以 P 计)、钾肥 15 kg/hm²(以 K 计),于当年 6 月末进行人工追肥,追施一次氮肥 69 kg/hm²(以 N 计)。

1.3 土壤样品采集与测定

本研究使用的土壤样品来源于东北地理所黑土退化与修复课题组在海伦农业生态实验站 2004 年设置的长期定位试验。于 2021 年 10 月玉米收获后,在每个小区垄沟和垄台中间位置采用五点法用土钻采集 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 共 5 层的土壤样品,清理干净土壤样品中的植物残体和根系等杂物后,用塑封袋封装,一部分新鲜土样置于 4℃冰箱保存用来测定 DOC;另一部分土样通过室内风干过筛后保存,在本研究期间用于 SOC、POC 和 MOC 的测定。同步使用环刀取样测定土壤体积质量、含水率、孔隙度和非毛管孔隙度^[20],取样锹取原状土测定土壤团聚体。

1.4 测试指标与方法

1.4.1 土壤物理性质的测定 采集深度为 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 的土壤样品。土壤体积质量(bulk density, BD)和土壤含水率(moisture content, MC):使用室内环刀烘干法测定并计算;田间持水量(field capacity, FC)、土壤孔隙度(porosity, P)和非毛管孔隙度(non-capillary porosity, NCP):采用室内环刀浸泡法^[20]测定和计算。

1.4.2 土壤水稳性团聚体的测定 使用五点法采集深度为0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm的土壤样品。室内风干后混匀称取50 g,利用土壤团粒分析仪(DIK-2001,日本)湿筛法测定:土壤样品过10 mm孔径,在真空条件下用蒸馏水慢速浸润后,移至团聚体分析仪(套筛孔径自上而下为2、1、0.5、0.25、0.053 mm),浸泡10 min,振荡2 min。最后将各级套筛中的土样在60℃烘干,测定质量,计算>0.25 mm团聚体的含量(>0.25 mm aggregate content, $WR_{0.25}$)和几何平均直径(geometric mean diameter, GMD)。土壤团聚体稳定性指标采用土壤大团聚体质量分数和几何平均直径GMD表征^[21]。

1.4.3 土壤可溶性有机碳测定方法 称取10 g过2 mm筛风干土样于100 mL三角瓶中,加入0.5 mol/L K_2SO_4 盐溶液浸提(土液比1:5)振荡30 min,离心机离心(5 000 r/min)15 min,上清液用0.45 μm 滤膜抽滤,滤液在TOC分析仪上测定,通过土液比将溶解性有机碳浓度(mg/L)换算成DOC含量(mg/kg)^[22]。

1.4.4 土壤颗粒有机碳和矿物结合态有机碳测定方法 称取过2 mm筛的风干土样20 g于250 mL烧杯,加水100 mL,在超声波发生器清洗槽中超声分散土样30 min,然后将分散悬浮液冲洗过53 μm 筛,直至洗出液变清亮为止。采用六偏磷酸钠分离法进行分离提取测定,使用六偏磷酸钠处理土壤样品,振荡后过53 μm 筛,冲洗后的筛上土样为POC组分,筛下土样为MOC组分,烘干磨细后采用元素分析仪(EA3000)测定^[23]。

1.5 数据处理与分析

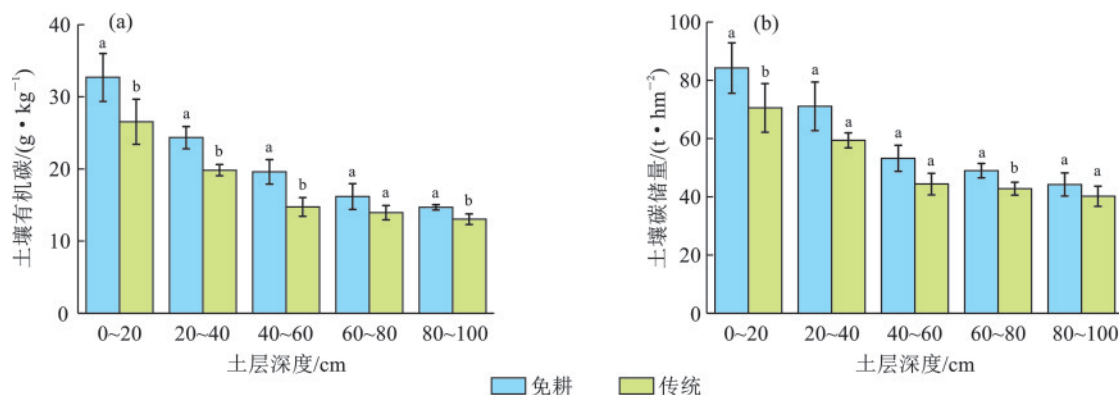
用Excel 2019软件进行数据处理和数据分析,用独立样本 t 检验(independent samplest-test)进行数据的差异分析。用SPSS 27进行单因素方差分析(ANOVA)、双因素方差分析(two-way ANOVA)和Pearson相关性分析,分别分析耕作处理与土层对土壤物理性质及土壤碳组分的影响;用Origin 2022软件进行部分图形绘制与处理。

2 结果与分析

2.1 NT对SOC含量及其储量的影响

NT处理可显著提高耕地SOC含量(图2a)。连续实施17 a后,NT处理下SOC储量在各土层均高于CT处理,随着土层加深,NT与CT间的差异逐渐减小(图2b)。与CT比较,除60~80 cm外各层SOC含量均达到显著差异($p<0.05$),0~20 cm表层,NT的SOC含量为32.79 g/kg,较CT增加23.38%;20~40 cm土层,NT的SOC含量为24.34 g/kg,较CT高出15.32%;40~60、80~100 cm土层SOC含量较CT分别高出33.06%和12.58%。

SOC储量与含量具有相似的分布规律(图2b),在0~20、60~80 cm土层碳储量达到差异显著水平($p<0.05$),增幅分别为19.40%和14.45%,表现为在0~20 cm土层SOC含量和储量均为最高,表明NT不仅促进耕层(0~20 cm)SOC的积累,更能显著增加深层土壤碳库。



注:图柱上方不同小写字母表示相同土层在不同耕作方式下差异显著($p<0.05$)。下同。

图2 不同耕作方式下土壤有机碳含量的垂直分布和不同土层的碳储量分布

Fig.2 Vertical distributions of soil organic carbon content and storage in different soil layers under different tillage practices

2.2 NT对SOC组分的影响

NT处理显著影响各碳组分含量,POC和MOC含量随土层的加深而降低($p<0.05$),而DOC含量则随土层深度的增加而上升($p<0.05$)。相比于CT,NT显著提高0~20、40~60、60~80 cm的POC含量($p<0.05$)(图3b),增幅分别为72%、289%和239%;

显著提高0~20、40~60、80~100 cm的MOC含量($p<0.05$),增幅分别为24%、26%和18%(图3c);显著提高60~80、80~100 cm DOC含量($p<0.05$),增幅分别为34%和54%(图3a)。表明表层腐解的SOC一部分与矿物结合被固定,一部分溶解于水中向下迁移。

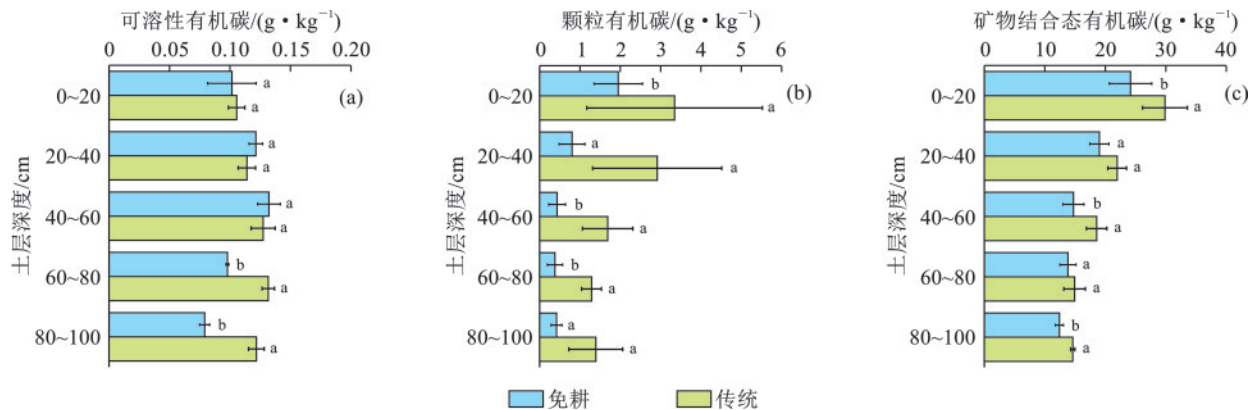


图3 不同耕作方式下同一土层可溶性有机碳、颗粒有机碳和矿物结合态有机碳含量

Fig.3 Contents of dissolved, particulate, and mineral-associated organic carbon in the same soil layer under different tillage practices

连续 17 a 实施保护性耕作后,有机碳组分占总有机碳比例受耕作与土层的交互效应影响(表 1)。

表 1 不同耕作方式下土壤可溶性有机碳、颗粒有机碳和矿物结合态有机碳在总有机碳中的占比

Table 1 Proportions of dissolved, particulate, and mineral-associated organic carbon in total soil organic carbon under different tillage practices

土层/cm	处理	DOC/SOC	POC/SOC	MOC/SOC
0~20	免耕	0.003±0a	0.126±0.043a	0.882±0.092a
	传统	0.004±0a	0.074±0.017a	0.910±0.012a
20~40	免耕	0.005±0b	0.093±0.041a	0.902±0.009b
	传统	0.006±0a	0.040±0.015a	0.958±0.024a
40~60	免耕	0.007±0.001b	0.071±0.030a	0.947±0.031b
	传统	0.009±0.001a	0.030±0.014a	1.000±0.008a
60~80	免耕	0.008±0.001a	0.081±0.023a	0.923±0.025a
	传统	0.007±0.001a	0.027±0.012b	0.991±0.039a
80~100	免耕	0.008±0a	0.095±0.046a	0.996±0.036a
	传统	0.006±0b	0.032±0.010a	0.907±0.288a
耕作		0.293	0.001	0.523
		ns	***	ns
土层		0.001	0.048	0.701
		***	*	ns
耕作 × 土层		0.001	0.977	0.640
		***	ns	ns

注:DOC 为可溶性有机碳;POC 为颗粒有机碳;MOC 为矿物结合态有机碳;*、**、***和 ns 分别表示显著性达 0.05、0.01、0.001 和 >0.05 水平。表中数据为平均值±标准差;不同小写字母表示不同耕作方式下相同土层之间的显著差异性($p<0.05$)。下同。

在表层(0~20 cm),NT 与 CT 的 SOC 组分比值差异不显著($p>0.05$),但在 20~40 cm 土层,NT 处理的 MOC/SOC 显著低于 CT(0.902 vs. 0.958, $p<0.05$),DOC/SOC 也略低(0.005 vs. 0.006, $p<0.05$)。在 40~60 cm 土层,NT 处理的 DOC/SOC 显著低于 CT(0.007 vs. 0.009, $p<0.05$),MOC/SOC 则显著更

低(0.947 vs. 1.000, $p<0.05$)。60~80 cm 土层中,NT 处理的 POC/SOC 显著高于 CT(0.081 vs. 0.027, $p<0.05$),表明 NT 促进深层土壤中活性较高的 POC 的积累。80~100 cm 土层中,NT 处理的 DOC/SOC 显著高于 CT(0.008 vs. 0.006, $p<0.05$)。双因素方差分析显示,耕作方式对 POC/SOC 占比影响极显著($p<0.001$),对 DOC/SOC 和 MOC/SOC 无显著影响;土层深度对 DOC/SOC ($p<0.001$) 和 POC/SOC($p<0.05$)影响显著,对 MOC/SOC 影响不显著;耕作方式与土层深度的交互作用仅对 DOC/SOC 影响极显著($p<0.001$)。上述结果表明,NT 处理在深层土壤(60~100 cm)中促进活性有机碳组分(DOC、POC)的积累,而对矿质组分 MOC 占比的影响相对有限。

2.3 土壤 SOC 组分之间的相关性

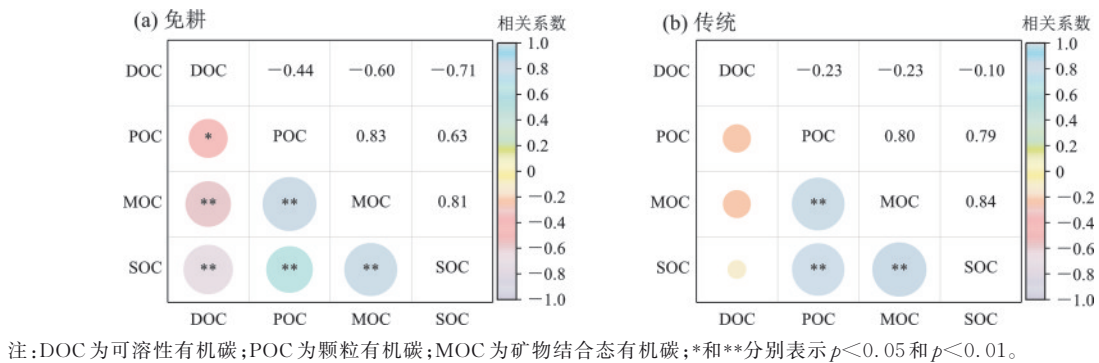
有机碳组分之间具有较高相关性(图 4),免耕条件下,除 DOC 外,POC、MOC 均与 SOC 呈极显著正相关($p<0.01$),其中 MOC 与 SOC 的相关系数最高达 0.81;POC 与 SOC 和 MOC 呈极显著正相关($p<0.01$),且相关系数分别为 0.63 和 0.83。DOC 与 SOC 和 MOC 呈极显著负相关($p<0.01$),相关系数为 -0.71 和 -0.60;DOC 与 POC 则表现为显著负相关($p<0.05$),相关系数为 -0.44。传统措施下,POC、MOC 与 SOC 均呈极显著正相关($p<0.01$),相关系数分别为 0.79 和 0.84;POC 与 MOC 呈极显著正相关($p<0.01$),相关系数达 0.89。此外 DOC 与 SOC、POC、MOC 呈现负相关性但均未达到显著水平($p>0.05$),相关系数分别为 -0.16、-0.21、-0.23。

2.4 土壤结构对于耕作措施的响应及其与 SOC 组分的相关性

NT 明显改变土壤结构特征,增加表层 MC(表 2)。与 CT 相比,NT 处理下 0~20 cm 土层 BD、P、

NPC 和 $WR_{0.25}$ 均无显著差异 ($p>0.05$), MC 为 31.23%, 较 CT 处理显著提高 9.43% ($p<0.05$)。在 40~60 cm 土层下, 与 CT 相比, NT 显著降低 BD

9.93%, 显著提高 FC 和 P 分别为 23.98% 和 15.57%, 表明 NT 可以通过改善土壤结构减少表层土壤水分蒸发, 同时从根本上改善深层土壤的通透性。



注:DOC为可溶性有机碳;POC为颗粒有机碳;MOC为矿物结合态有机碳;*和**分别表示 $p<0.05$ 和 $p<0.01$ 。
图 4 免耕和传统措施下不同碳组分之间的相关性

Fig.4 Correlations among different carbon fractions under no till with full straw mulching and conventional tillage practices

表 2 不同耕作措施下 0~100 cm 土层的土壤结构状态
Table 2 Soil structural properties in 0—100 cm soil layer under different tillage practices

土层深度/cm	处理	土壤体积质量/ (g·cm ⁻³)	土壤含水率/ %	田间持水量/ %	孔隙度/ %	非毛管孔隙 度/%	土壤水稳性大团聚 体(>0.25 mm)/%	几何平均 直径/mm
0~20	免耕	1.29±0.07a	31.23±2.00a	33.73±3.61a	45.81±3.30a	2.71±1.02a	61.18±9.67a	34.31±16.41a
	传统	1.33±0.07a	28.54±1.61b	30.89±3.21a	43.28±3.21a	3.00±1.27a	63.86±8.77a	33.81±8.96a
20~40	免耕	1.46±0.08a	20.28±6.85a	25.47±3.79a	39.40±3.85a	2.54±0.58a	40.65±7.73a	16.99±3.90a
	传统	1.50±0.01a	23.23±0.78a	25.21±1.37a	39.24±1.86a	1.46±0.32a	57.56±11.26a	25.10±7.78a
40~60	免耕	1.36±0.03b	25.72±3.98a	29.88±2.62a	43.41±1.76a	2.90±1.18a	—	—
	传统	1.51±0.01a	23.12±1.72a	24.10±1.72b	37.56±2.17b	1.26±0.66a	—	—
60~80	免耕	1.52±0.10a	14.54±2.87a	25.00±2.54a	41.19±3.21a	3.36±1.96a	—	—
	传统	1.54±0.07a	18.52±0.50a	23.38±3.36a	38.56±4.08a	2.78±1.75a	—	—
80~100	免耕	1.50±0.11a	15.77±4.71a	24.55±2.26a	40.93±2.61a	4.16±2.48a	—	—
	传统	1.54±0.05a	18.38±1.33a	23.11±3.03a	37.32±4.17a	1.86±0.65a	—	—

注:“—”表示数据未测定;同列不同小写字母表示相同土层在不同耕作方式下差异显著($p<0.05$)。

土壤结构影响土壤功能,进而影响 SOC 组分。对于 2 个耕作处理中土壤 0~20、20~40 cm 土层的碳组分与土壤结构相关性分析结果(图 5)显示,NT 措施下 FC 与 P 及 MOC 含量呈显著正相关($p<0.05$),相关系数分别为 0.58 和 0.60;BD 与 FC、P 和 NCP 含量呈极显著负相关($p<0.01$),但与 MC 呈极显著正相关;MC 对于 NCP 呈极显著负相关($p<0.05$),却和 GMD 呈显著正相关($p<0.05$)。FC 与 P 和 NCP 呈极显著正相关($p<0.01$);P 和 NCP 也呈极显著正相关($p<0.01$),GMD 和 $WR_{0.25}$ 呈极显著正相关($p<0.01$)(图 5),表明土壤物理结构的改善与碳组分的积累密切相关。

3 讨论

本研究发现,经过 17 a 连续实施,秸秆全量覆盖免耕处理在 SOC 储量、不同碳组分(POC、MOC、DOC)的剖面分布及土壤团聚体稳定性方面,均产生不同于传统耕作的显著变化。

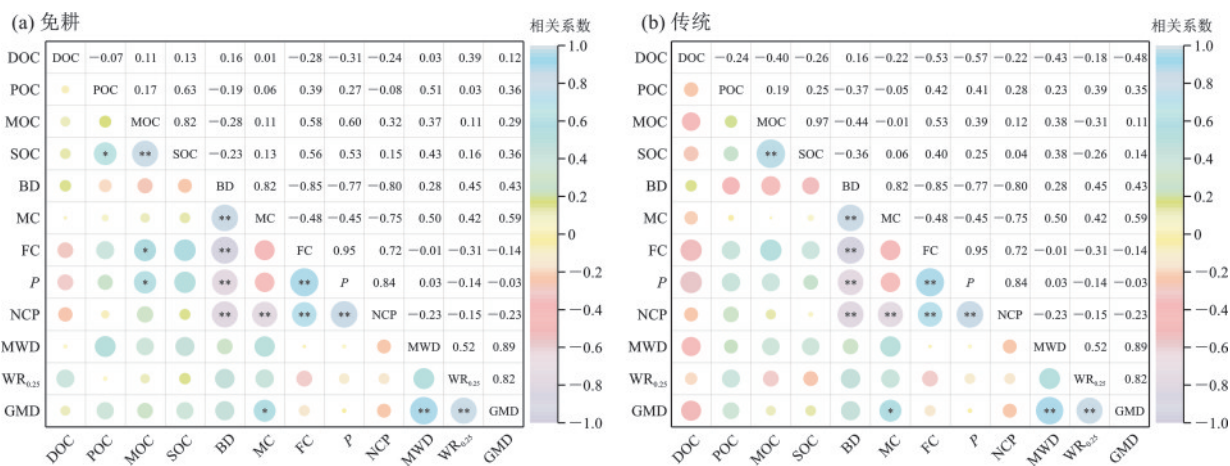
3.1 SOC 剖面变化的分布特征

本研究结果显示,NT 处理不仅显著增加 0~20 cm 土层的 SOC 含量与储量,而且在 20~40、40~60 cm 乃至 80~100 cm 的深层土壤中同样观测到 SOC 含量的显著增加。与过去短期研究中保护性耕作增碳效应主要局限于表层的普遍认知不同,本研究结果表明,长期 NT 管理下黑土固碳模式实现从表层增碳到全剖面增碳的转变。

导致表层 SOC 含量显著增加(0~20 cm 提高 23.38%)的机制是明确的。秸秆全量覆盖提供稳定、大量的外源碳直接输入,而免耕措施最大程度地减少对土壤团聚体的机械破坏,为新输入和原有的 SOC 提供物理保护,显著降低其矿化分解速率^[24]。然而,深层土壤(如 40~60 cm 层 SOC 含量提高 33%)的增碳现象则需要更复杂的机制解释。本研究中,深层土壤(60~100 cm)DOC 含量及其占 SOC 的比例(DOC/SOC)均同步提升,为 DOC 迁移机制

提供直接证据^[7]。在 NT 处理下,土壤结构改善(增加孔隙度和团聚体稳定性),MC 的增加(0~20 cm 表层,增加 9.43%)共同创造有利的水分运移条件。表层丰富的有机质在微生物作用下部分转化为 DOC,并随土壤水向下淋溶,在深层土壤中被黏土矿物吸附或通过微生物转化重新固定,从而实现 SOC 在剖面深层的累积与稳定^[7]。长期免耕条件下作物根系分布发生改变,促进根系向深层发育,增加

深层根系生物量及根际沉积物的输入,为深层土壤提供额外的活性碳源^[25];同时,深层微生物群落结构与功能可能发生适应性变化,随着连续免耕年限的增加,深层微生物对输入碳的利用效率提高,通过微生物残体积累进一步促进 SOC 在深层的稳定化过程^[26]。上述机制与 DOC 迁移过程共同作用,可以解释本研究观察到的 40~60 cm 土层 SOC 含量增幅尤为显著的现象。



注:BD 为土壤体积质量;MC 为土壤含水率;FC 为田间持水量;P 为土壤孔隙度;NCP 为土壤非毛管孔隙度;WR_{0.25} 为 >0.25 mm 的土壤水稳性大团聚体含量;GMD 为土壤水稳性团聚体几何平均直径;DOC 为可溶性有机碳;POC 为颗粒有机碳;MOC 为矿物结合态有机碳; *表示 $p < 0.05$; **表示 $p < 0.01$ 。

图 5 免耕和传统措施下不同碳组分与土壤结构之间的相关性

Fig.5 Correlations between different carbon fractions and soil structure under no till with full straw mulching and conventional tillage practices

3.2 碳组分固碳路径的差异响应

对 SOC 不同组分的分析(图 3、表 1)进一步揭示 NT 处理下碳库结构优化的微观路径。结果中 POC、MOC 和 DOC 对 NT 的响应模式存在明显差异,反映它们在碳循环中的不同功能与周转速率。

POC 作为活性较高的碳库,其含量在表层 0~20 cm 增加 72%、深层 40~60 cm 增加 289%,响应尤为剧烈。主要是由于 NT 下秸秆覆盖提供的植物残体直接来源增加^[27];长期 NT 避免机械扰动,改善土壤结构,提升土壤孔隙度,为 POC 提供物理储存场所,使其免于快速分解^[10];MOC 作为惰性碳库,在 40~60 cm 深层含量普遍增加 26%,表明 NT 促进 SOC 化学稳定化过程。持续的外源碳输入和免耕改善的水热条件,刺激微生物活动,其产生的代谢产物和细胞残体更易于与土壤矿物表面结合,形成稳定的矿物-有机复合物^[28]。DOC 作为最活跃的碳迁移载体,其在深层土壤(80~100 cm)中 DOC 的含量增幅达 54%,与 DOC/SOC 同步提升,不仅印证上述的迁移机制,也暗示深层土壤的碳汇功能有所增加^[7]。相关性分析(图 4)进一步支持这些组分的功能分异:在 NT 下,POC 和 MOC 与 SOC 呈强正相关,表明它们

是 SOC 积累的主体;而 DOC 与 SOC、MOC 呈负相关,反映出其在剖面迁移过程中作为“中间载体”的功能^[29]。

3.3 不同耕作措施下土壤碳的固存差异

本研究发现,土壤物理结构改善是 NT 实现多重固碳效应的核心物理桥梁。数据(表 2、图 5)表明,NT 处理显著提高表层 MC,降低深层 BD,同时改善孔隙状况和持水能力。这些物理指标的积极变化与碳组分浓度的提升存在显著相关性。

通过以结构保碳和以碳稳结构的正反馈循环进行,一方面 NT 通过减少扰动,直接保护团聚体结构,而秸秆覆盖的缓冲作用减轻雨滴对地表的直接冲击,从而维持结构的完整性^[12]。稳定的团聚体通过包裹、隔离作用保护 POC,形成对抗微生物分解的物理屏障^[10]。另一方面,团聚体内部分解产生的有机胶结物质如微生物分泌的多糖和外部输入的秸秆降解产物,又能进一步促进更小颗粒黏结成团聚体,从而提升结构的稳定性^[30]。这种结构与碳的互馈机制,正是长期 NT 下土壤质量得以持续改善的基础。孔隙结构优化了 P 和 NPC,为水分和 DOC 的垂直迁移提供通道,从而将碳固存效应从表层拓展至深层土壤。本研究

长期NT后土壤体积质量降低,可能与秸秆覆盖促进土壤生物活动(如蚯蚓、根系)增加、有机质积累导致土壤膨松及形成更多稳定的团聚体有关,这些过程共同作用,抵消因缺乏耕作而可能导致的土壤紧实。

3.4 研究的局限性与展望

本研究基于17 a长期定位试验,系统揭示秸秆全量覆盖免耕这一综合技术模式对黑土有机碳库的积极影响。本研究的试验设计旨在评估秸秆全量覆盖免耕(NT)的整体效应,因此无法定量区分耕作方式(免耕 vs. 旋耕)与秸秆管理(全量覆盖 vs. 移除)2个因素对观测结果的独立贡献。例如,深层SOC的增加,既可能是免耕减少扰动的结果,也可能是秸秆覆盖后DOC淋溶所致,更可能是二者的协同作用。未来研究可设置2×2析因试验(如免耕+秸秆、免耕-秸秆、旋耕+秸秆、旋耕-秸秆),以进一步阐明耕作与秸秆管理各自在碳固持中的作用及其交互机制。结合同位素示踪技术和微生物群落分析,将有助于更深入地揭示有机碳在剖面中的转化、迁移和稳定机制。

4 结论

1)长期NT通过表层富集与深层固碳的双重机制,显著提升黑土全剖面SOC储量。NT不仅通过秸秆输入显著增加表层SOC含量,还通过改善深层土壤物理结构,促进DOC向下迁移与固定,实现对深层土壤碳库的积累,表明其固碳效应具有全剖面尺度的特征。

2)NT通过差异化调控各碳组分,优化土壤碳库的稳定性与功能。NT处理显著增加各土层POC、MOC和DOC的含量。表层POC的增加主要得益于秸秆输入与团聚体物理保护;各土层MOC的普遍增加反映SOC的化学稳定化过程增强;而深层DOC含量及占比均同步显著提升,则成为SOC垂直迁移的关键证据。这种组分分异表明,NT协同促进活性碳的转化与稳定碳的累积。

3)改善土壤结构是NT提升固碳能力的关键物理桥梁。长期NT显著降低深层BD,优化孔隙结构,促进土壤水分和DOC向下运移。研究证实以结构保碳,以碳稳结构的互馈机制,阐明土壤结构改善在联结保护性耕作措施与持久固碳效益中的核心作用。

4)本研究结果为黑土地保护实践提供明确的科学启示。一是保护性耕作的增碳效应具有长期坚持的必要性,其深层固碳、结构改良的最大生态效益需要足够的时间才能充分显现,政策与技术推广应立足长远;二是明确“有机碳-结构-养分”协同管理路径,在秸秆还田时配套科学的氮肥管理以平衡碳氮比,促进秸秆碳向稳定态有机碳高效转化;三是拓展

对黑土地保护多功能性的认识,长期NT带来的不仅是碳储量的增加,更是通过结构优化全面提升土壤持水、保肥、抗蚀和生物活力等生态系统服务功能,使其成为应对黑土层变薄、地力下降、气候变化和面源污染等多重挑战的综合性解决方案。

综上,长期秸秆全量覆盖免耕通过物理保护-生物化学稳定-垂直迁移的协同机制,不仅能够有效提升黑土有机碳储量,还能从优化碳库组分和结构方面全面提升土壤质量与固碳潜力。该研究结果为将秸秆全量覆盖免耕作为东北黑土区实现地力恢复、碳汇增强与农业绿色发展的关键技术模式提供数据支撑和科学依据。

参考文献:

- [1] He Cong, Niu Jiarui, Xu Chengtang, et al. Effect of conservation tillage on crop yield and soil organic carbon in Northeast China: A meta-analysis[J]. Soil Use and Management, 2022, 38(2): 1146-1161.
- [2] 车延静, 谷思玉, 王紫颖, 等. 保护性耕作下不同区域农田黑土溶解性有机碳荧光特性分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(9): 1544-1555.
Che Yanjing, Gu Siyu, Wang Ziyang, et al. DOC fluorescence spectral structure of black soil in different regions under conservation tillage[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(9): 1544-1555.
- [3] Hu Xiaojing, Liu Junjie, Wei Dan, et al. Soil bacterial communities under different long-term fertilization regimes in three locations across the black soil region of Northeast China[J]. Pedosphere, 2018, 28(5): 751-763.
- [4] Liu Zhe, Cao Shiliu, Sun Zenghui, et al. Tillage effects on soil properties and crop yield after land reclamation[J]. Scientific Reports, 2021, 11: e4611.
- [5] 张兴义, 胡伟, 李建业, 等. 水土流失防控是黑土地保护的重点[J]. 科学通报, 2024, 69(11): 1401-1405.
Zhang Xingyi, Hu Wei, Li Jianye, et al. Control of soil and water losses is the critical issue for black earth conservation[J]. Chinese Science Bulletin, 2024, 69(11): 1401-1405.
- [6] Ni Haowei, Liu Chaoyang, Sun Bo, et al. Response of global farmland soil organic carbon to nitrogen application over time depends on soil type[J]. Geoderma, 2022, 406: e115542.
- [7] Xiao Yang, Zhou Meng, Liu Xiaobing, et al. Pore connectivity and anisotropy affect carbon mineralization via extracellular enzymes in > 2 mm aggregates under conservation tillage of mollisols [J]. Soil and Tillage Research, 2024, 244: e106253.
- [8] Guo Ziyu, Liu Jianzhao, He Liyuan, et al. Dominant edaphic controls on particulate organic carbon in global soils[J]. Global Change Biology, 2024, 30(12): e17619.

- [9] Zhang Zhenrui, Gao Hui, Gao Xiaoxia, et al. Short-term warming supports mineral-associated carbon accrual in abandoned croplands [J]. *Nature Communications*, 2025, 16: e344.
- [10] Kpemoua T P I, Barré P, Chevallier T, et al. Drivers of the amount of organic carbon protected inside soil aggregates estimated by crushing: A meta-analysis [J]. *Geoderma*, 2022, 427: e116089.
- [11] 敖曼, 张旭东, 关义新. 东北黑土保护性耕作技术的研究与实践[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(10): 1203-1215.
Ao Man, Zhang Xudong, Guan Yixin. Research and practice of conservation tillage in black soil region of Northeast China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(10): 1203-1215.
- [12] 曹允淞, 李和平, 肖波. 秸秆覆盖量对不同容重黑土坡耕地水土流失的影响[J]. 水土保持通报, 2021, 41(3): 56-61.
Cao Yousong, Li Heping, Xiao Bo. Effects of straw mulching on soil and water loss under different soil bulk densities on slope cropland in black soil region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(3): 56-61.
- [13] Tian Yijia, Kou Xinchang, An Tingting, et al. Stover return enhances the transformation and sequestration of photosynthetic carbon through regulating soil food web [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2025, 531: e146910.
- [14] Liu Jiaren, Wang Xuehai, Zhang Hu, et al. Long-term *in situ* straw returning increased soil aggregation and aggregate associated organic carbon fractions in a paddy soil[J]. *Heliyon*, 2024, 10(11): e32392.
- [15] 黄璐. 秸秆还田对黄土旱塬冬小麦产量及土壤有机碳固存的影响[D]. 山西 太谷: 山西农业大学, 2023.
Huang Lu. Effects of straw returning on winter wheat yield and soil organic carbon sequestration in the Loess Plateau [D]. Taigu, Shanxi: Shanxi Agricultural University, 2023.
- [16] 杨玥. 旱地保护性耕作对土壤水肥特征与作物产量的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
Yang Yue. Effects of conservation tillage on water, nutrient use and crop yield in dryland [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2021.
- [17] 梁尧, 蔡红光, 杨丽, 等. 玉米秸秆覆盖与深翻两种还田方式对黑土有机碳固持的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 133-140.
Liang Yao, Cai Hongguang, Yang Li, et al. Effects of maize stovers returning by mulching or deep tillage on soil organic carbon sequestration in mollisol [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(1): 133-140.
- [18] Hewelke E, Mielnik L, Weber J, et al. Chemical and physical aspects of soil health resulting from long-term no-till management [J]. *Sustainability*, 2024, 16(22): e9682.
- [19] Han Jinze, Li Jianye, Jiang Yanyan, et al. Effect of long-term strip tillage on soil macropore structure in cool black soil region of Northeast China [J]. *Land Degradation and Development*, 2024, 35(1): 484-495.
- [20] Zhang Jiuming, Li Yan, Yuan Jiahui, et al. Analysis of the fluorescence spectral characteristics of dissolved organic matter in a black soil with different straw return amounts [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: e29948.
- [21] Sun T, Chen Q, Chen Y, et al. A novel soil wetting technique for measuring wet stable aggregates [J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 141: 19-24.
- [22] 李煜, 毕卫红, 孙建成, 等. 紫外-可见吸收光谱结合化学计量学算法的水体总有机碳浓度快速检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(3): 722-730.
Li Yu, Bi Weihong, Sun Jiancheng, et al. Rapid detection of total organic carbon concentration in water using UV-vis absorption spectra combined with chemometric algorithms [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2024, 44(3): 722-730.
- [23] Ruiz F, Bernardino A F, Queiroz H M, et al. Iron's role in soil organic carbon (de)stabilization in mangroves under land use change [J]. *Nature Communications*, 2024, 15: e10433.
- [24] Zhang Yan, Li Xiujun, Gregorich E, et al. Tillage and cropping effects on soil organic carbon: Biodegradation and storage in density and size fractions [J]. *European Journal of Soil Science*, 2020, 71(6): 1188-1199.
- [25] Hu Xiaojing, Liu Junjie, Liang Aizhen, et al. Soil metagenomics reveals reduced tillage improves soil functional profiles of carbon, nitrogen, and phosphorus cycling in bulk and rhizosphere soils [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2025, 379: e109371.
- [26] Patra R, Saha D, Neupane A, et al. Deep-rooted winter wheat cover crop promotes subsoil organic carbon storage through improved microbial functional traits [J]. *Applied Soil Ecology*, 2024, 199: e105413.
- [27] 朱勇, 李建业, 张程远, 等. 长期保护性耕作对坡耕地黑土有机碳组分的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(10): 103-111.
Zhu Yong, Li Jianye, Zhang Chengyuan, et al. Effects of long-term conservation tillage on black soil organic carbon components in sloping farmland [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(10): 103-111.
- [28] Kan Zhengrong, Liu Wenxuan, Liu Wensheng, 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.
- [29] Adil M, Yao Zijie, Zhang Cheng, et al. Climate change stress alleviation through nature based solutions: A global perspective [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: e1007222.
- [30] Zong Donglin, Quan Ying, Penttinen P, et al. Organic amendments drive soil organic carbon sequestration and crop growth *via* microorganisms and aggregates [J]. *Agronomy*, 2025, 15(12): e2919.