

武雅楠, 郝翔翔, 张明聪, 邹文秀, 王守宇, 陆欣春, 胡岩峰, 韩晓增. 农田黑土自然恢复过程中土壤有机碳及其组分的变化特征[J]. 土壤学报, 2025,

WU Yanan, HAO Xiangxiang, ZHANG Mingcong, ZOU Wenxiu, WANG Shouyu, LU Xinchun, HU Yanfeng, Han Xiaozeng. Change Characteristic of Soil Organic Carbon and Its Fractions During the Natural Restoration of Cultivated Black Soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025,

农田黑土自然恢复过程中土壤有机碳及其组分变化特征^{*}

武雅楠^{1,2}, 郝翔翔^{2†}, 张明聪^{1†}, 邹文秀², 王守宇², 陆欣春², 胡岩峰², 韩晓增²

(1. 黑龙江八一农垦大学, 黑龙江大庆 163319; 2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所黑土地保护与利用全国重点实验室, 哈尔滨 150081)

摘要: 农田恢复为自然草地的过程能够显著提高土壤有机碳(SOC)含量。为探究植被恢复过程中黑土SOC的变化规律, 基于19年的长期定位试验, 研究农田黑土恢复为草原化草甸植被过程中SOC数量及其组分随时间的动态变化, 并与农田(CL)和无植被覆盖的裸地(BL)进行对比分析。结果表明: (1) 与初始土壤相比, 自然恢复草地(GL)使表层(0~20 cm)SOC含量显著增加了26.19%, 年均增长率1.38% ($0.41\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$), 而BL处理的SOC含量显著降低了7.99%, CL处理则无显著变化; (2) 从整个0~100 cm土层看, GL不仅提升了表层SOC含量, 还显著增加了20~60 cm土层的SOC含量, 其中0~20、20~40和40~60 cm土层的增幅分别为26.19%、12.08%和8.70%, 而CL和BL处理对20 cm以下土层的SOC含量无显著影响; (3) 与初始土壤相比, GL处理使土壤游离态轻组碳(fLFC)、闭蓄态轻组碳(oLFC)和重组碳(HFC)含量分别增加了199.45%、112.83%和12.00%, 同时提升了fLFC和oLFC两个活性组分的比例, 降低了HFC的比例; (4) 从腐殖质组分来看, GL处理使土壤富里酸(FA)、胡敏酸(HA)和胡敏素(HM)含量分别增加了74.82%、29.69%和11.46%, 并降低了胡敏酸与富里酸比值(HA/FA), 表明土壤有机质的腐质化程度有所下降。综上所述, 农田长期恢复能够有效提升黑土有机碳含量, 并促进活性SOC组分的积累。

关键词: 农田黑土; 植被恢复; 土壤有机质; 土壤密度分组; 土壤腐殖质分组

中图分类号: S714.5

文献标志码: A

Change Characteristic of Soil Organic Carbon and Its Fractions During the Natural Restoration of Cultivated Black Soil

WU Yanan^{1,2}, HAO Xiangxiang^{2†}, ZHANG Mingcong^{1†}, ZOU Wenxiu², WANG Shouyu², LU Xinchun², HU Yanfeng², Han Xiaozeng²

^{*} 国家重点研发计划项目(2022YFD1500100, 2021YFD1500400)、国家自然科学基金区域联合基金(U24A20632)和龙江科技英才春雁支持计划(CYCX24026)资助 Supported by the National Key R & D Program of China (Nos. 2022YFD1500100, 2021YFD1500400), the National Natural Science Foundation of China (No. U24A20632), and the Chunyan Support Program of Technology Talent of Heilongjiang Province (No. CYCX24026)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: haoxx@iga.ac.cn, zhangmingcong@163.com

作者简介: 武雅楠(1998—), 女, 山西大同人, 硕士研究生, 主要从事土壤有机碳周转研究。E-mail: wuyan2025@163.com

收稿日期: 2025-03-14; 收到修改稿日期: 2025-05-11; 网络首发日期(www.cnki.net): 2025-

(1. Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China; 2. State Key Laboratory of Black Soils Conservation and Utilization, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China)

Abstract : 【Objective】 The restoration of cultivated land to natural grassland can increase soil organic carbon (SOC) content. This study aimed to investigate the changes in black soil organic carbon during vegetation restoration. 【Method】 Based on a 19-year long-term field experiment, the temporal dynamics of SOC and its fractions were examined during the restoration of cultivated black soil to natural grassland vegetation (GL), with comparisons made to continuous cultivated land (CL) and bare land (BL) without vegetation cover. 【Result】 The results showed that: (1) Compared to the initial soil, the SOC content in the topsoil (0-20 cm) increased by 26.19% in the GL treatment, with an annual growth rate of 1.38% ($0.41 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$). In contrast, the SOC content decreased by 7.99% in the BL treatment, while no significant change was observed in the CL treatment; (2) Across the entire 0-100 cm soil profile, GL not only significantly increased the SOC content in the topsoil (0-20 cm), but also increased the SOC content in the subsoil layers (20-60 cm). The increments in the 0-20, 20-40 and 40-60 cm layers were 26.19%, 12.08% and 8.70%, respectively. However, no significant changes in SOC content were observed below 20 cm in the CL and BL treatments; (3) Compared to the initial soil, the GL treatment increased the carbon contents of free light fraction (fLFC), occluded light fraction (oLFC) and heavy fraction (HFC) by 199.45%, 112.83% and 12.00%, respectively. Additionally, GL increased the proportions of fLFC and oLFC while reducing the proportion of HFC in the SOC; (4) For humus fractions, the GL treatment increased the contents of fulvic acid (FA), humic acid (HA) and humin (HM) by 74.82%, 29.69% and 11.46%, respectively, and decreased the HA/FA ratio, indicating a reduction in the humification degree of soil organic matter. 【Conclusion】 In conclusion, long-term restoration of cultivated land can effectively increase the organic carbon content of black soil and promote the accumulation of labile SOC fractions.

Key words: Cultivated black soil; Vegetation restoration; Soil organic matter; Soil density fraction; Soil humus fraction

土壤有机碳 (SOC) 作为陆地生态系统最大碳库, 其动态变化对全球碳循环具有重要调控作用^[1]。与此同时, SOC 在维系土壤养分供给、保障生物多样性和维持生态系统生产力等方面具有不可替代的生态功能^[2]。黑土所富含的 SOC 是其发挥高肥力的关键, 自然植被下, 典型黑土表层有机碳可达 8% 以上^[3]。然而, 当黑土自然生态系统转化为农田生态系统后, 原有植物-土壤间的物质循环平衡被打破导致长期积累的有机质加速分解。数据显示, 与开垦前相比, 黑土 SOC 储量普遍下降超过 50%^[4-5]。因此, 黑土区 SOC 的恢复不仅是应对全球气候变化的重要碳汇策略, 亦是维持区域土壤可持续利用的核心途径。

农田系统向自然植被的逆向演替 (即植被恢复) 被证实是提升 SOC 水平的有效途径^[6]。目前国际上相关研究多集中于北美及欧亚大陆区^[7-9]。Mclauchlan 等^[7]对北美寒温带农田恢复为多年生草地的研究表明, 40 年间 0~10 cm 土层 SOC 年均积累量达 $62.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 据此推算 55~75 年后可基本恢复至垦前水平。与之形成对比的是, 俄罗斯黑钙土区耕地恢复为草地 59 年后, 虽然表层 SOC 含量提升了 40% (由 $38.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增至 $54.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 但仍显著低于自然植被状态下的基准值 ($78.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[9]。美国北部温带草原区的相关研究则显示, 退耕后 SOC 的恢复周期可长达 230 年^[10]。这种显著的区域差异性可能源于气候类型、植被群落特征及土壤理化性质等多种因素的交互作用^[11]。与国外研究进展相比, 国内相关研究主要聚焦于黄土高原、矿山复垦及喀斯特等生态脆弱区^[12-14]。由于黑土区在我国粮食安全保障体系中具有特殊战略地位, 大范围实施退耕还草尚缺乏现实可行性, 加之长期定位观测数据的稀缺, 致使黑土植被恢复过程中 SOC 动态演变规律与稳定机制的研究仍存显著空白。现有成果多局限于单一时间点的 SOC 组分分析^[15-18], 对于自然演替序列下 SOC 组分的动态转化规律、稳定化机制等关键科学问题仍未得到系统研究。值得注意的是, SOC 作为不同活性组分的混合体, 其组成特征将直接影响生态系统的碳库功能和稳定性。因此, 系统解析不同活性碳库组分随时间的动态变化特征, 对揭示黑土碳库稳定机理至关重要。

不同活性碳库组分对土壤管理方式变更的响应程度存在较大差异。研究表明, 活性组分如轻组有机碳 (LFOC), 具有快速周转特性, 其含量会随着外源碳输入的增加而迅速提升, 且提升比例普遍高于总有机碳^[19]。活性碳库作为微生物代谢的主要底物, 在土壤养分周转中发挥着重要调控作用。相较而言, 稳定性组分 (如重组有机碳与胡敏素) 一般与矿物紧密结合, 是植物源碳在微生物的代谢下发生复杂的分解反应后所形成的, 其微生物分解程度高, 占 SOC 的 60% 以上, 构成了减缓碳释放的关键缓冲体系^[20]。本研究依托典型黑土区 19 年植被恢复长期定位试验, 采用 SOC 物理和化学分组方法, 系统解析自然恢复过程中 SOC 及其组分的动态演变规律, 以期为东北黑土固碳增汇阈值估算和耕地保育制度优化提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院海伦国家野外科学观测研究站 (47°27' N, 126°55' E), 地处黑龙江省海伦市, 属温带大陆性季风气候, 年平均气温 1.5 °C, 年降水量 500~600 mm, 65% 以上降雨集中在 6~8 月, 年均 ≥ 10 °C 的有效积温为 2 450 °C, 无霜期 120 d。土壤为第四纪黄土状亚黏土发育而成的中厚黑土 (Mollisol), 无碳酸盐反应。研究区地势平坦, 土壤肥力均匀, 土壤开垦年限约 120 年, 开垦之前为草原化草甸植被, 开垦后至 1980 年种植方式为小麦-大豆轮作, 1980 至 2002 年为小麦-玉米-大豆轮作, 一年一熟^[21]。

1.2 试验设计

试验设立于 2003 年 5 月, 包括 3 个处理, 分别为: 1) 自然恢复草地 (GL), 退耕休闲, 目前已恢复为黑土区典型草原化草甸植被; 2) 农田 (CL), 玉米连作, 施用 NPK 化肥, 施肥量为: N 112.5 kg·hm⁻²、P₂O₅ 45 kg·hm⁻²、K₂O 60 kg·hm⁻², 秋季收获后玉米地上部全部移除; 3) 裸地 (BL), 退耕休闲, 在植物生长初期将其全部铲除, 始终保持无植被覆盖。试验采用随机区组排列, 4 次重复。

1.3 土壤样品采集

表层土壤样品分别于每年秋季收获后采集, 采样深度为 0~20 cm, 每个小区采用土钻随机选取 3 个点, 混合为一个样品, 本研究选取 2003 (起始年份)、2007、2012、2017 和 2022 年 5 个时间段的历史表层土样。另于 2003 和 2022 年用土钻采集剖面样品, 采集层次为 0~20、20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm。

1.4 根系和地上部生物量测定

2022 年 8 月采集自然恢复处理的生物量: 每个小区随机选取 3 个 1 m² 样方, 切割收集地上部植物及凋落物, 然后用直径为 9 cm 的根钻按土层 (0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm) 采集土壤并分离根系。2022 年秋季收获后, 收集农田小区随机选取的 3 株玉米根茬及地下根系 (与剖面土样采集同步)。全部样本经烘干称重后, 草地处理按样方面积计算生物量, 农田处理按小区玉米株数折算单位面积生物量。

1.5 分析方法

土壤有机碳采用元素分析仪 (EA3000, Euro Vector, 意大利) 测定。

土壤密度组分: 采用碘化钠 (NaI) 分离三个组分^[22], 游离态轻组 (fLF, $d < 1.8$ g·cm⁻³) 使用密度为 1.8 g·cm⁻³ 的 NaI 溶液离心 (8 000 r·min⁻¹, 30 min) 获取; 闭蓄态轻组 (oLF, $d < 1.8$ g·cm⁻³) 经冰浴超声破碎 (300 J·ml⁻¹, 15 min) 后二次离心; 重组 (HF, $d > 1.8$ g·cm⁻³) 为最终残留物。所有组分干燥称重后, 过 0.25 mm 筛测定碳含量。

腐殖质组分: 采用碱液提取法^[23], 重组经 0.1 mol·L⁻¹ NaOH 和 0.1 mol·L⁻¹ Na₄P₂O₇ 混合液在 70 °C 浸提, 获得可提取腐殖质物质 (HE), 浸提后的残渣为胡敏素 (HM)。用 0.5 mol·L⁻¹ 的 H₂SO₄ 酸化

HE, 经沉淀、过滤后分离出胡敏酸 (HA) 和富里酸 (FA)。用重铬酸钾容量法测定 HE 和 HA 的碳含量, FA 的碳含量和 HM 的碳含量用差减法计算, 公式如下:

$$FA = HE - HA$$

$$HMC = SOC - fLFC - oLFC - HE$$

式中, FA、HE 和 HA 分别为富里酸含量、可提取腐殖质物质含量和胡敏酸含量, HM、fLFC 和 oLFC 分别为胡敏素含量、游离态轻组碳含量和闭蓄态轻组碳含量。

微生物生物量碳测定采用氯仿熏蒸— K_2SO_4 浸提法, 土壤容重采用环刀取样—烘干法, pH 采用电位法, 土壤全氮采用凯氏定氮法, 碱解氮采用碱解扩散法, 全磷采用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法, 有效磷采用 $NaHCO_3$ 浸提—钼锑抗比色法, 全钾采用 NaOH 熔融—火焰光度法, 速效钾采用 NH_4OAc 浸提—火焰光度法。

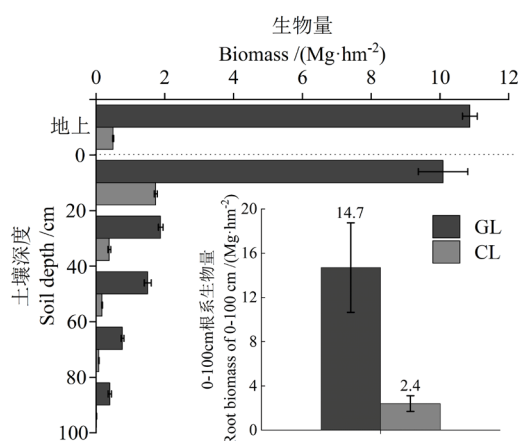
1.6 数据处理

运用 SPSS 19.0 和 Origin 8.0 软件进行数据分析和绘图。采用单因素方差分析(one-way ANOVA) 对不同处理之间的差异显著性进行检验, 采用双因素方差分析(two-way ANOVA) 对量化处理方式与年份条件的主效应及交互作用, 方差齐性和正态性假设采用 Levene's Test 检验。采用 Duncan 多重比较分析不同处理间的差异, 通过 Pearson 法分析 SOC 与土壤理化性质的相关性。

2 结 果

2.1 地上和地下生物量

经过 19 年的植被恢复后, GL 处理的地上生物量可达 $10.87 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 是 CL 处理的 21.82 倍(图 1)。从垂直分布特征看, GL 和 CL 的根系生物量均随土层深度的增加呈显著递减趋势。GL 处理各土层根系生物量均显著高于 CL 处理 ($P < 0.05$), 其 1m 土体总根系生物量是 CL 的 6.11 倍。



注: GL, 自然恢复草地; CL, 农田。GL, natural restoration of grassland; CL, cropland.

图 1 不同处理的地上和地下生物量

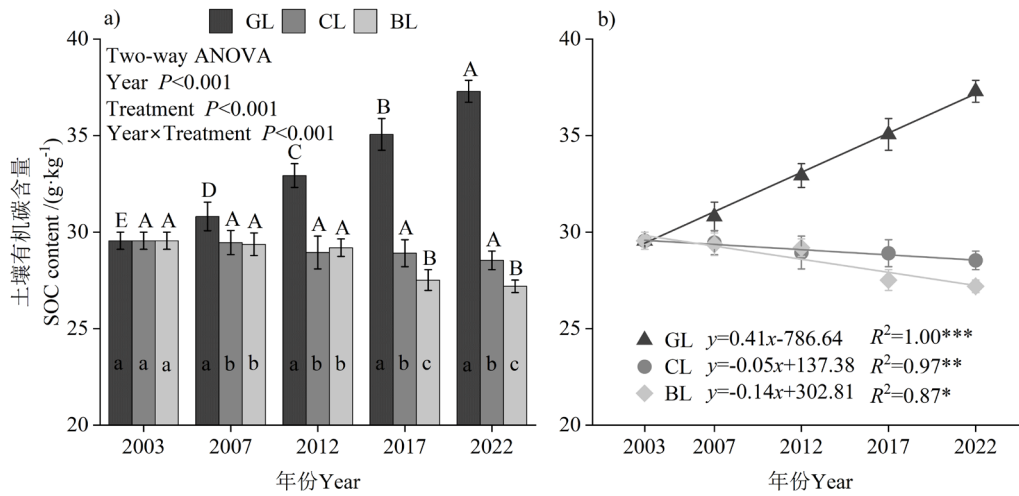
Fig. 1 Aboveground and belowground biomass under different treatments

2.2 表层土壤有机碳含量的变化

从 SOC 的时间变化来看, GL 处理的 SOC 含量显著上升(图 2), 19 年间增加了 26.19%, 年均增速 $0.41 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 且与时间呈显著正相关 ($P < 0.001$)。CL 和 BL 处理的 SOC 则呈缓慢下降趋势, 降幅分别为 3.44% 和 7.99%, 其中 BL 在 14 年后显著 ($P < 0.05$) 低于初始土壤, 但 CL 在 19 年内变化未达显著水平 ($P > 0.05$)。

与 CL 相比, 自然恢复 (GL) 4 年后, 其 SOC 含量即显著 ($P < 0.05$) 高于 CL, 对于 BL, 试验

前 9 年, 其 SOC 含量与 CL 处于同一水平, 但 14 年后, BL 的 SOC 含量显著低于 CL ($P<0.05$), 最终导致三个处理间的 SOC 含量达到相互差异的水平 ($P<0.05$)。



注: GL, 自然恢复草地; CL, 农田; BL, 裸地。误差线代表标准差 ($n=3$)。不同小写字母表示同一年份各处理间 SOC 含量差异显著 ($P<0.05$), 不同大写字母表示同一处理不同年份间 SOC 含量变化差异显著 ($P<0.05$)。显著性水平: *表示 $P<0.05$; ** $P<0.01$; *** $P<0.001$ 。下同。Note: GL, natural restoration of grassland; CL, cropland; BL, bare ground. Error bars represent the standard deviations ($n=3$). Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) in SOC content among treatments in the same year. Different uppercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) in SOC content between different years of the same treatment. Significance levels:

* $P<0.05$; ** $P<0.01$; *** $P<0.001$. The same below.

图 2 表层土壤有机碳含量变化及其与年份的相关性

Fig. 2 Changes in surface soil organic carbon content and its correlation with years

2.3 剖面土壤有机碳含量的变化

与起始土壤相比, GL 处理显著提升了 0~60 cm 土层的 SOC 含量 ($P<0.05$), 但提升量和提升比例均随土层深度增加而逐渐降低 (图 3)。具体而言, 0~20、20~40 和 40~60 cm 土层的 SOC 增量分别为 7.74、3.39 和 1.70 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 提升比例分别为 26.19%、12.08%和 8.70%。CL 处理各土层 SOC 含量虽未达显著差异水平 ($P>0.05$), 但均呈现出下降趋势。值得注意的是, BL 处理仅导致表层 (0~20 cm) SOC 显著降低 7.99%, 20 cm 以下土层 SOC 含量无显著变化。

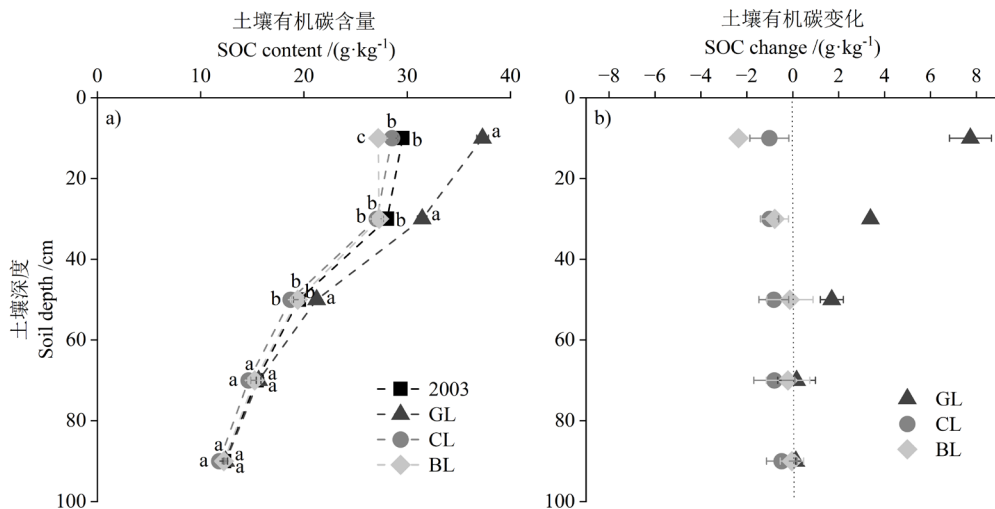


图 3 不同处理剖面土壤有机碳含量变化

Fig. 3 Changes in profile soil organic carbon content under different treatments

2.4 土壤密度组分有机碳的变化

经过 19 年植被恢复, fLFC、oLFC 和 HFC 含量较初始土壤分别增加 199.45%、112.83%和 12.00% (图 4a~图 4c)。与之形成对比, BL 处理导致 fLFC 和 oLFC 含量分别下降 71.74%和 36.02%, HFC 下降 5.62%。CL 处理下, 只有 fLFC 含量显著降低 11.88%, oLFC 和 HFC 保持稳定。不同处理对比显示, 植被恢复 4 年后 fLFC 和 oLFC 即显著高于 BL 和 CL 处理 ($P<0.05$), 而 HFC 的显著优势出现在恢复 14 年后。从组分比例来看 (图 4d~图 4f), GL 处理促使 fLFC 和 oLFC 占比持续上升, HFC 占比下降; BL 处理呈现完全相反趋势; CL 处理各组分比例则保持相对稳定。

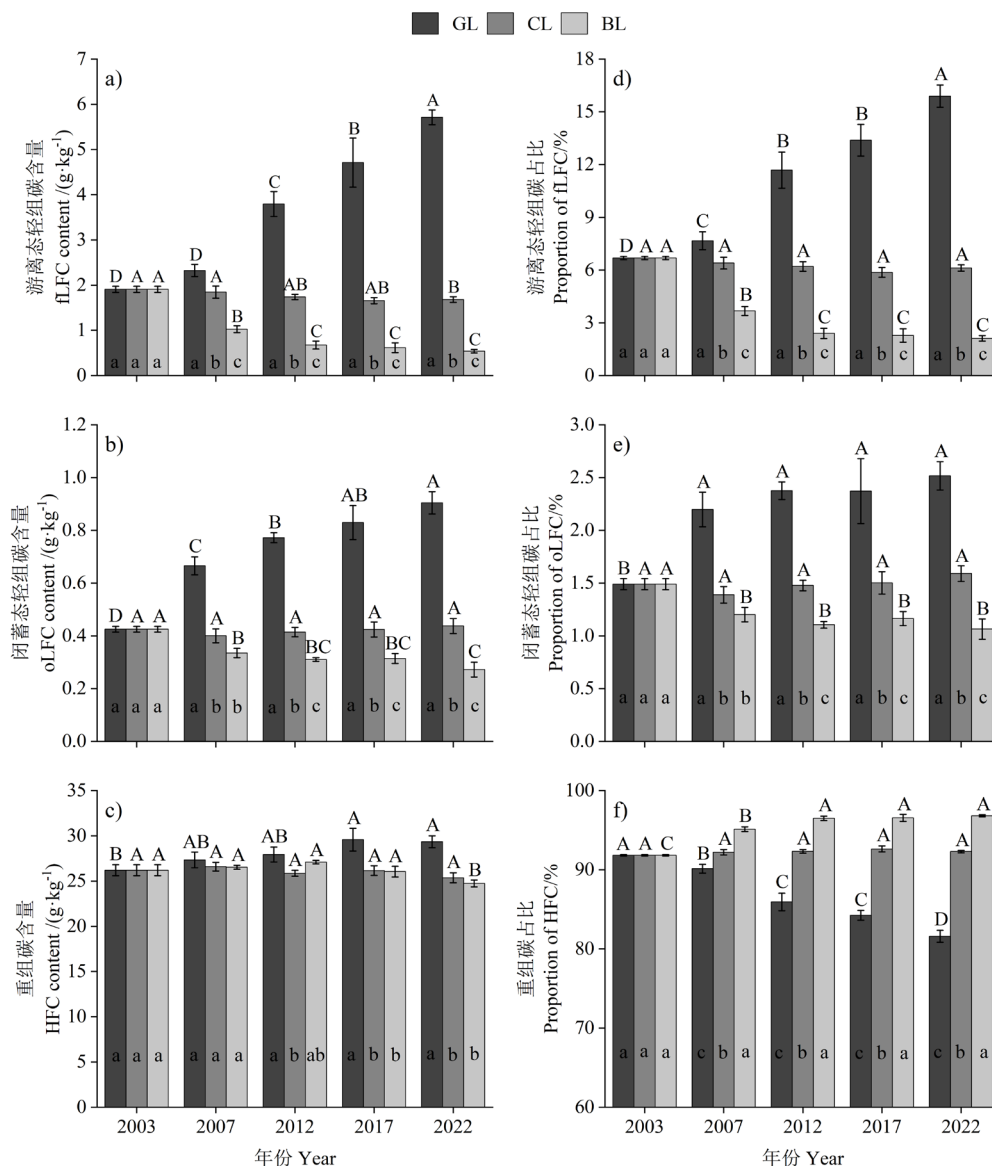


图 4 不同处理土壤有机碳密度组分含量和比例变化

Fig.4 Changes in content and proportion of soil organic carbon density components under different treatments

2.5 土壤腐殖质组分有机碳的变化

富里酸 (FA) 含量范围为 $3.02 \sim 7.27 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占 SOC 的 11.09%~19.61% (图 5a、图 5d)。GL 处理下 FA 含量以每年 $0.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的速率持续增长, 19 年间增幅达 74.82% ($P<0.05$), 同时其 SOC 占比提升 38.57%; BL 处理呈现相反趋势, FA 含量与占比分别下降 20.69%和 13.77%; CL 处理则维持

稳定。最终 GL 的 FA 含量较 CL 和 BL 分别高出 90.78%和 120.42%。

胡敏酸 (HA) 含量达 $8.05\sim 12.97\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占 SOC 的 28.74%~35.70% (图 5b、图 5e)。GL 处理使其含量提升 29.69% (年均增加 $0.15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 而 BL 和 CL 处理分别降低 11.56%和 11.64%。尽管 GL 的 HA 含量最终较 CL 和 BL 高出 46.79%和 46.65%, 但其占 SOC 比例未发生显著改变。

胡敏素 (HM) 在 3 个腐殖质组分中含量最高, 占 SOC 比例达 46.71%~58.29% (图 5c、图 5f)。植被恢复 19 年, HM 含量累积增加 11.46%, 但其 SOC 占比下降 6.26%。与之形成对比的是, CL 和 BL 处理的 HM 含量保持稳定, 但两者比例均随年限增加。试验末期 GL 的 HM 含量显著高出 CL 和 BL 处理 8.40%和 14.34%, 但其占比显著低于后两者。

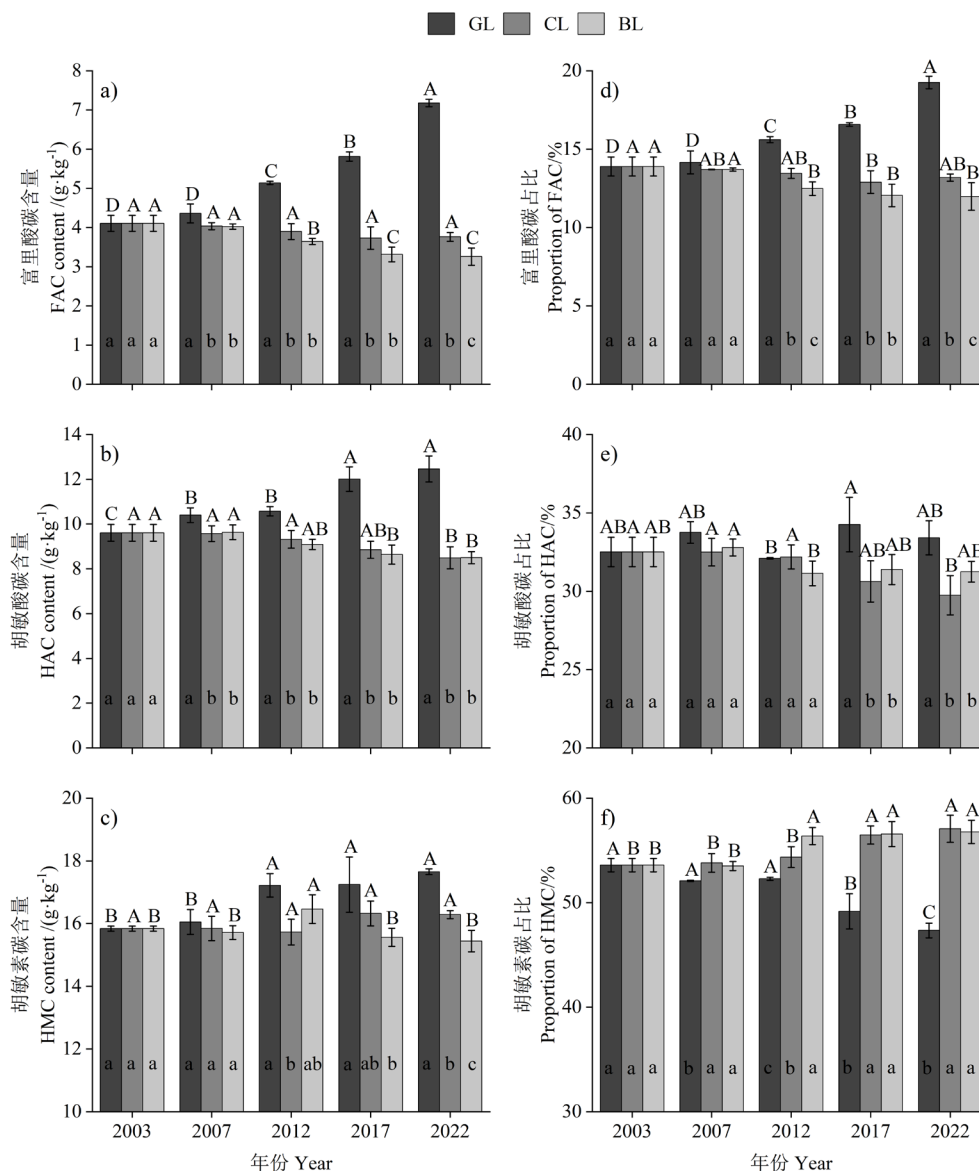


图 5 不同处理土壤腐殖质组分碳含量和比例变化

Fig.5 Changes in carbon content and proportion of soil humic substance under different treatments GL 处理导致 HA/FA 比值持续下降 (图 6), 从初始值 2.34 降至 1.74, CL 和 BL 处理的 HA/FA 比值无显著变化。但 19 年后, 3 个处理间呈现出 BL>CL>GL 的显著性梯度差异 ($P<0.05$)。

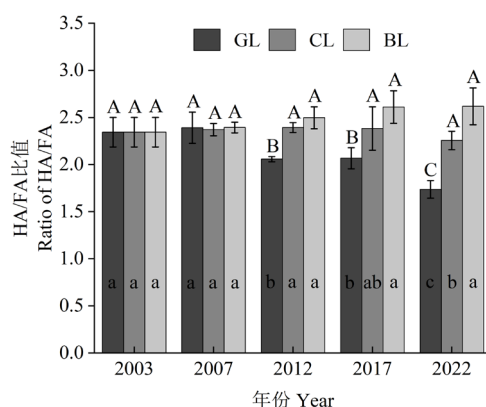


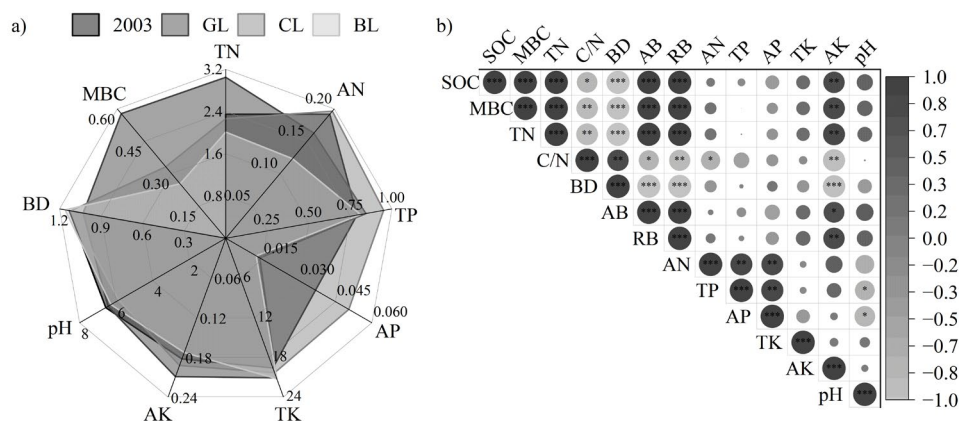
图 6 不同处理土壤 HA/FA 比值

Fig. 6 The ratio of HA/FA under different treatments

2.6 土壤有机碳与土壤理化性质相关性

与 2003 年相比, GL 处理的全氮、全钾、速效钾分别增加了 29.79%、7.65%和 14.66% (图 7a), 而碱解氮、有效磷和容重分别降低了 15.23%、62.0%和 8.85%, 且经过 19 年的不同处理后, GL 的微生物生物量碳分别较农田和裸地高 74.10%和 129.06%。

SOC 含量与微生物生物量碳、全氮、地上生物量、0~20 cm 根系生物量以及速效钾均呈显著正相关 (图 7b), 与碳氮比和土壤容重呈显著负相关。



注: TN, 全氮; AN, 碱解氮; TP, 全磷; AP, 有效磷; TK, 全钾; AK, 速效钾; BD, 容重; MBC, 微生物生物量碳; AB, 地上生物量; RB, 0~20 cm 根系生物量。显著性水平: *表示 $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$ 。Note: TN, total nitrogen; AN, alkaline hydrolyzable nitrogen; TP, total phosphorus; AP, available phosphorus; TK, total potassium; AK, available potassium; BD, bulk density; MBC, microbial biomass carbon; AB, Above-ground biomass; RB, 0-20 cm root biomass. Significance levels: * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$.

图 7 不同处理表层土壤理化性质 (a) 以及 SOC 与理化性质相关性 (b)

Fig. 7 Physicochemical properties of top soil under different treatments (a) and correlation analysis between SOC and soil physicochemical properties (b)

3 讨论

3.1 农田黑土自然植被恢复过程中表层土壤有机碳的积累特征

农田恢复为自然植被后 SOC 会不断积累, 从而向其开垦前的水平恢复^[6]。在与本研究相同的海伦市, 未开垦的自然植被下, SOC 含量为 $61.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[24]。经过 19 年的恢复, SOC 含量由 $29.55 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$

¹增至 $37.29 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 2), 已恢复至开垦前的 60.63%。相关分析证明, SOC 与地上、地下生物量显著相关 (图 7)。黑土的自然草原化草甸植被, 每年均会产生大量的地上凋落物、根系及其根系分泌物 (图 1), 为 SOC 提供了丰富的来源, 从而促使 SOC 持续升高。相反, 经过相同时间的植被退化 (裸地) 过程后, 由于土壤长期缺乏有机物的输入, 表层 SOC 加速矿化, 其含量逐渐降低, 19 年间降低了 7.99%。有研究人员指出, 黑土 SOC 的损失主要是在开垦之后的 0~50 年间, 此后 50~200 年间, SOC 含量以非常缓慢的速度下降或基本上维持在同一水平而不再下降^[24-25], 本研究中的黑土开垦年限在 120 年以上, 证实了以上结论, 即农田处理的 SOC 含量呈缓慢降低趋势, 19 年间降低了 3.42%, 但变化未达显著水平 (图 2), 表明其 SOC 含量基本处于稳定期。

以往研究中, 黑土由农田恢复为自然植被 22~29 年间, SOC 的提升速度为 $0.16 \sim 0.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[15-17], 本研究为 $0.41 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, 这一增速高于相同研究站点的玉米秸秆全量还田处理 ($0.29 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)^[21], 但低于施用有机肥处理 (施用量为 $22.5 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 的增速 ($0.88 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)^[26], 导致上述差异的原因主要是由于有机物料的投入量不同。据第二次土壤普查数据^[3], 开垦 20 年的自然黑土 SOC 以 $2.14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 速率下降, 是本研究逆向恢复阶段提升速率的 5.2 倍。因此, 植被恢复虽然促进 SOC 积累, 但速率不及开垦期下降速度的五分之一。Novara 等^[27]在意大利的研究也证实, 农田恢复为自然草地后 SOC 的积累速率较草地开垦为农田后分解速率低 1.8 倍。此外, 全球范围的最新荟萃分析表明, 与原始生态系统相比, 植被恢复后的生态系统仍存在显著的 SOC “赤字” (SOC deficit), 无法恢复到原始水平^[28]。总之, 自然土壤一旦被开垦后, 由于受人类活动、土壤特性和自然环境的共同影响, 其 SOC 恢复潜力难以达到自然土壤的理想值^[29]。

随着植被恢复过程中 SOC 的提高, 土壤的部分物理和化学性质均有明显改善 (图 7), 其中, 容重的降低说明保水通气性增强, 全钾和速效钾升高表明供钾能力提高, 微生物生物量碳增加则意味着微生物活性和种群数量的增加。但碱解氮和有效磷降低, 说明植被恢复后黑土的氮磷供给能力弱于施化肥的农田。总体而言, SOC 的增长与肥力指标正向关联, 增加有机质是黑土培肥的关键途径和核心目标。

3.2 农田黑土自然植被恢复过程中黑土剖面有机碳的变化特征

不同植被覆盖条件不仅影响表层 SOC, 还对下层土体中的 SOC 产生重要影响。植被恢复显著提升 0~60 cm 土层 SOC 含量, 但随深度增加增幅递减 (图 3), 这是因为草地有大量的枯枝落叶聚集在表层, 植被类型差异所导致的根系生物量差异也在上层土壤表现得较为明显 (图 1)。农田处理下, 各土层 SOC 较初始年份均呈下降趋势, 主要原因包括: 在养分相对亏缺的下层, 玉米根系通过分泌有机酸加速土壤有机质分解以获取氮素^[30]; 少量根系残体的输入, 诱导微生物产生激发效应, 促进下层有机质的分解^[31]。但值得注意的是, 植被移除 (裸地) 对 SOC 的影响主要体现在 0~20 cm 土层, 20 cm 以下无显著变化, 因为无根系条件避免了农田的养分竞争与微生物激发效应, 加之裸地下层较低的微生物代谢强度^[32], 会减缓 SOC 周转。

3.3 农田黑土自然植被恢复过程中有机碳物理组分的变化规律

轻组有机碳 (LFC) 作为土壤活性有机碳库, 介于新鲜残体和腐殖质之间, 具有较高的生物活性^[20], 可分为未受团聚体保护的 fLFC 和团聚体包裹的 oLFC; 而重组分有机碳 (HFC) 是与矿物结合的高度稳定组分, 占 SOC 80% 以上。植被恢复显著提升各密度组分有机碳含量, LFC 在恢复 4 年后即显著高于农田和裸地 (图 4), 而稳定态 HFC 需 14 年才显著积累, 表明植被通过碳输入同时调控活性与稳定性碳库。黑土草原化草甸植被下, 根系与枝叶比例均衡, 不仅地上生物量丰富, 而且有大量碳分配于地下, 其 0~20 cm 的根系生物量较农田高 5 倍 (图 1), 且根系来源的 SOC 较凋落物更稳定, 直接决定 LFC 含量^[33]。此外, 草地根系和凋落物的分解率明显低于农田, 也有利于 LFC 比例的提升^[34]。在无植被覆盖的裸地, 碳输入中断导致原 fLFC 被微生物分解, LFC 含量最低。农田处理下, 作物地上部被移除, 只有少量的枯枝落叶、根茬及根系分泌物归还到土壤, 此外, 耕作破坏团聚体加速 oLFC 矿化^[20]。不同植被覆盖还改变了密度组分有机碳的比例 (图 4)。自然植被下,

fLFC 和 oLFC 的占比升高而 HFC 下降, 说明 SOC 活性增强; 裸地则呈现 SOC 向稳定态转化趋势。不过植被恢复过程中, 活性组分有机碳比例并不会持续增长, 全球荟萃分析发现^[35], 在恢复前期(<25 年), SOC 的活性组分比例会迅速提升, 但后期(>25 年)又会逐渐降低, 说明短期恢复后 SOC 的稳定性下降, 而长期恢复后逐渐提高。

3.4 农田黑土自然植被恢复过程中腐殖质组分的变化规律

腐殖质作为受化学保护的土壤有机碳(SOC)主体, 占有有机质 90%以上^[36], 其微生物抗性使其成为稳定持久的碳库。本研究基于传统分组方法, 将腐殖质分为分子量小、化学活性高的 FA; 分子量大、含杂环结构的 HA 和高度缩合、惰性强的 HM。HA 和 HM 占 SOC 的 75.45%以上(图 5), 表明黑土 SOC 主要储存于结构稳定的腐殖质组分中, 这对维持黑土碳库至关重要。根据“多酚学说”, 植物残体经微生物作用首先生成 FA, 随后缩合为 HA 和 HM^[36]。植被恢复中, 草地丰富的有机残体输入使 FA 含量及其占 SOC 比例随恢复年限增加(与轻组有机碳趋势一致), 说明草地有利于活性较高的 FA 的形成。相反, 裸地因缺乏有机物料输入, FA 含量和比例持续下降。对于 HA 而言, 植被恢复使 HA 含量随年限递增, 而农田和裸地呈下降趋势, 因为农田长期耕作破坏团聚体, 导致受团聚体保护的 HA 被微生物分解, 而裸地碳源匮乏促使微生物矿化与矿物结合的 HA。植被恢复过程中 HM 的含量未明显变化, 但其占 SOC 比例在下降, 因为 FA 和 HA 的增长稀释了 HM 的占比; 农田和裸地的 HM 占比则呈升高趋势, 表明高扰动环境与低活性碳输入促进了 HM 的相对积累。

HA/FA 比值表征有机质腐殖化进程的重要指标, 其与腐殖化程度及分子结构复杂度呈正相关。本研究发现, 植被恢复 19 年后 HA/FA 比值显著降低 25.93%, 表明高凋落物覆盖的草地生态系统通过促进活性较高的 FA 形成, 抑制了土壤有机质进一步腐殖化。窦森等^[37]研究发现, 当向腐殖化程度较高的土壤输入新鲜有机物料时, FA 的数量和比例会显著提升, 从而导致 HA/FA 比值降低。值得注意的是, 在黑土农田生态系统, 长期新鲜秸秆还田虽然同样增加 FA 含量, 但 HA/FA 比值反而呈现上升趋势^[38], 可能是因为与自然杂草掉落物相比, 秸秆的 C/N 比及木质素含量更高, 因而更有利于 HA 的形成。因此, 不同品质有机物料输入对土壤腐殖化进程发挥着重要的调控作用。

综上, 新鲜的外源有机质是提升黑土 SOC 的关键, 其输入后优先转化为活性组分(如轻组有机碳), 显著增加 SOC 总量。矿物结合态有机碳对管理措施响应滞后, 但其高稳定性可维持 SOC 长期保存。活性组分经微生物转化后形成腐殖质, 并最终与矿物结合形成稳定碳库, 实现活性碳向稳定碳的转化。因此, 黑土 SOC 的提升需协同活性碳输入与稳定碳保护, 一方面要增碳源, 黑土大面积植被恢复不现实, 但可通过秸秆还田、施用有机肥或绿肥等措施, 快速提升活性有机质含量; 另一方面要控损失, 减少耕作扰动, 避免团聚体破坏与稳定碳库分解, 实现 SOC 的长期稳定保存。本研究聚焦有机碳组分变化特征, 未来拟结合稳定性同位素技术, 量化植被恢复过程中新碳形成与老碳分解速率, 揭示碳周转的动态平衡机制。

4 结 论

农田黑土自然恢复过程中, SOC 表现出显著的时空分异特征。表层(0~20 cm)SOC 含量呈现持续增长趋势, 19 年间提升了 26.19%(年均增量 0.41 g·kg⁻¹)。植被恢复同时显著提升了下层土体(20~60 cm)SOC 含量, 但随着深度的增加, 提升比例逐渐降低。不同形态有机碳组分对植被恢复的响应存在较大差异, 活性组分(fLF、oLF、FA)增量达 74.82%~199.45%, 而稳定态组分(HA、HF、HM)仅增加 11.46%~29.69%, 这种增量的差异最终导致 SOC 中 fLF、oLF 和 FA 三个活性组分的比例逐渐升高, 而 HF 和 HM 的比例以及 HA/FA 比值逐渐降低。因此, 植被恢复在提升 SOC 数量的同时, 还改变了 SOC 的组成和稳定性, 使其活性组分增加, 腐质化程度降低。作为一种有效的生物调控手段, 植被恢复可通过改变 SOC 组分构成来调节生态系统碳循环过程, 这对黑土区退化土壤有机质重构和碳库稳定性管理具有重要参考价值。

参考文献 (References)

- [1] Bossio D A, Cook-Patton S C, Ellis P W, et al. The role of soil carbon in natural climate solutions[J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3(5): 391-398.
- [2] Minasny B, Malone B P, McBratney A B, et al. Soil carbon 4 per mille[J]. *Geoderma*, 2017, 292: 59-86.
- [3] He W Y. Heilongjiang soil[M]. Beijing: Agriculture Press, 1992: 150-154. [何万云. 黑龙江土壤[M]. 北京: 农业出版社, 1992: 150-154.]
- [4] Wang J K, Wang T Y, Zhang X D, et al. An approach to the changes of black soil quality I: Changes of the indices of black soil with the years of reclamation[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2002, 33(1): 43-47. [汪景宽, 王铁宇, 张旭东, 等. 黑土土壤质量演变初探 I——不同开垦年限黑土主要质量指标演变规律[J]. 沈阳农业大学学报, 2002, 33(1): 43-47.]
- [5] Yang X M, Zhang X P, Fang H J, et al. Changes in organic matter and total nitrogen of black soils in Jilin Province over the past two decades[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(6): 710-714. [杨学明, 张晓平, 方华军, 等. 20 年来部分黑土耕层有机质和全氮含量的变化[J]. 地理科学, 2004, 24(6): 710-714.]
- [6] Zhang Q Y, Hu Y X, Shao M G, et al. Revegetation re-carbonizes soil: Patterns, mechanisms, and challenges[J]. *Fundamental Research*, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2024.06.004>.
- [7] McLauchlan K K, Hobbie S E, Post W M. Conversion from agriculture to grassland builds soil organic matter on decadal timescales[J]. *Ecological Applications*, 2006, 16(1): 143-153.
- [8] Nelson J D J, Schoenau J J, Malhi S S. Soil organic carbon changes and distribution in cultivated and restored grassland soils in Saskatchewan[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2008, 82(2): 137-148.
- [9] Kalinina O, Barmin A N, Chertov O, et al. Self-restoration of post-agrogenic soils of Calcisol-Solonetz complex: Soil development, carbon stock dynamics of carbon pools[J]. *Geoderma*, 2015, 237: 117-128.
- [10] Knops J M H, Tilman D. Dynamics of soil nitrogen and carbon accumulation for 61 years after agricultural abandonment[J]. *Ecology*, 2000, 81(1): 88-98.
- [11] Qin H L, Liu Y, Chen C L, et al. Differential contribution of microbial and plant-derived organic matter to soil organic carbon sequestration over two decades of natural revegetation and cropping[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 949: 174960.
- [12] An S S, Hu Y, Wang B R. Research advance on soil organic carbon stabilization mechanisms during vegetation restoration on the Loess Plateau, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(9): 2413-2422. [安韶山, 胡洋, 王宝荣. 黄土高原植被恢复中土壤有机碳稳定机制研究进展[J]. 应用生态学报, 2024, 35(9): 2413-2422.]
- [13] Li J M, Kang Y X, Jiang F Z, et al. Effect of vegetation restoration on soil organic carbon storage in coal mining areas based on meta-analysis[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(3): 1629-1643. [李健明, 康雨欣, 蒋福祯, 等. 基于 Meta 分析的煤矿区植被恢复对土壤有机碳储量的影响[J]. 环境科学, 2024, 45(3): 1629-1643.]
- [14] Cai H, Shu Y G, Wang C M, et al. Evolution characteristics of soil active organic carbon and carbon pool management index under vegetation restoration in karst area[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(12): 6880-6893. [蔡华, 舒英格, 王昌敏, 等. 喀斯特地区植被恢复下土壤活性有机碳与碳库管理指数的演变特征[J]. 环境科学, 2023, 44(12): 6880-6893.]
- [15] Li H B, Han X Z, Wang F, et al. Impact of soil management on organic carbon content and aggregate stability[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2007, 38(13/14): 1673-1690.
- [16] Hou X Y, Han X Z, Li H B, et al. Composition and organic carbon distribution of organomineral complex in black soil under different land uses and management systems[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2010, 41(9): 1129-1143.
- [17] You M Y, Han X Z, Li H B, et al. Characteristics of soil organic carbon and nitrogen distributed in different density fractions of mollisols under long-term continuous cropping and natural restoration[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(6): 1301-1306. [尤孟阳, 韩晓增, 李海波, 等. 作物连作与自然恢复下黑土密度组分中碳、氮分布特征[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(6): 1301-1306.]
- [18] You M Y, Zhu-Barker X, Hao X X, et al. Profile distribution of soil organic carbon and its isotopic value following long term land-use changes[J]. *Catena*, 2021, 207: 105623.
- [19] Duval M E, Galantini J A, Martínez J M, et al. Labile soil organic carbon for assessing soil quality: Influence of management practices and edaphic conditions[J]. *Catena*, 2018, 171: 316-326.

- [20] Lavallee J M, Soong J L, Cotrufo M F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(1): 261-273.
- [21] Hao X X, Han X Z, Wang C, et al. Temporal dynamics of density separated soil organic carbon pools as revealed by $\delta^{13}\text{C}$ changes under 17 years of straw return[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 356: 108656.
- [22] Llorente M, Glaser B, Turrión M B. Storage of organic carbon and Black carbon in density fractions of calcareous soils under different land uses[J]. *Geoderma*, 2010, 159(1/2): 31-38.
- [23] Dou S, Yu S Q, Zhang J J. Effects of carbon dioxide concentration on humus formation in corn stalk decomposition[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(3): 458-466. [窦森, 于水强, 张晋京. 不同 CO_2 浓度对玉米秸秆分解期间土壤腐殖质形成的影响[J]. *土壤学报*, 2007, 44(3): 458-466.]
- [24] Zhang X Y, Sui Y Y, Song C Y. Degradation process of arable Mollisols[J]. *Soil and Crop*, 2013, 2(1): 1-6. [张兴义, 隋跃宇, 宋春雨. 农田黑土退化过程[J]. *土壤与作物*, 2013, 2(1): 1-6.]
- [25] Han X Z, Zou W X. Research perspectives and footprint of utilization and protection of black soil in Northeast China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(6): 1341-1358. [韩晓增, 邹文秀. 东北黑土地保护利用研究足迹与科技研发展望[J]. *土壤学报*, 2021, 58(6): 1341-1358.]
- [26] Zou W X, Qiu C, Han X Z, et al. Effects of long-term manure application on black soil fertility and maize yield[J]. *Soils and Crops*, 2020, 9(4): 407-418. [邹文秀, 邱琛, 韩晓增, 等. 长期施用有机肥对黑土土壤肥力和玉米产量的影响[J]. *土壤与作物*, 2020, 9(4): 407-418.]
- [27] Novara A, Gristina L, Kuzyakov Y, et al. Turnover and availability of soil organic carbon under different Mediterranean land-uses as estimated by ^{13}C natural abundance[J]. *European Journal of Soil Science*, 2013, 64(4): 466-475.
- [28] Ascenzi I, Hilbers J P, van Katwijk M M, et al. Increased but not pristine soil organic carbon stocks in restored ecosystems[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 637.
- [29] Wang J K. Dynamics and sequestration potential of soil organic carbon in the farmland of Northeast China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015. [汪景宽. 东北地区主要农田土壤有机碳动态变化及固碳潜力[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.]
- [30] Ridgeway J, Kane J, Morrissey E, et al. Roots selectively decompose litter to mine nitrogen and build new soil carbon[J]. *Ecology Letters*, 2024, 27(1): e14331.
- [31] Zhang Y Y, Mo F, Han J, et al. Research progress on the native soil carbon priming after straw addition[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(6): 1381-1392. [张叶叶, 莫非, 韩娟, 等. 秸秆还田下土壤有机质激发效应研究进展[J]. *土壤学报*, 2021, 58(6): 1381-1392.]
- [32] Zhang Z M, Han X Z, Yan J, et al. Keystone microbiomes revealed by 14 years of field restoration of the degraded agricultural soil under distinct vegetation scenarios[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2020, 11: 1915.
- [33] Somenahally A, McLawrence J, DuPont J I, et al. Root-mycorrhizae interactions contributed to organic carbon density in the sandy soil profiles of adapted grazing lands[J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 154: 103656.
- [34] Cao Q Q, Liu B, Wu J H, et al. Soil organic carbon fraction accumulation and bacterial characteristics in curtilage soil: Effects of land conversion and land use[J]. *PLoS One*, 2023, 18(4): e0283802.
- [35] Zhao Y Q, Xu Y L, Cha X Y, et al. A global meta-analysis of land use change on soil mineral-associated and particulate organic carbon[J]. *Global Change Biology*, 2025, 31(3): e70111.
- [36] Dou S, Shan J, Song X Y, et al. Are humic substances soil microbial residues or unique synthesized compounds? A perspective on their distinctiveness[J]. *Pedosphere*, 2020, 30(2): 159-167.
- [37] Dou S. Soil organic matter[M]. Beijing: Science Press, 2010. [窦森. 土壤有机质[M]. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [38] Zhang J Q, Wang C, Wang M M, et al. Temporal dynamics and fraction accumulation characteristics of black soil organic carbon under long-term continuous straw return[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62(5): 1460-1470. [张佳麒, 王翠, 王明明, 等. 长期秸秆还田条件下黑土有机碳的动态变化及其组分积累特征[J]. *土壤学报*, 2025, 62(5): 1460-1470.]

(责任编辑: 卢 萍)