

DOI: 10.11766/trxb202404290176

CSTR: 32215.14.trxb202404290176

张佳麒, 王翠, 王明明, 潘凤娟, 郝翔翔, 隋跃宇. 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.

ZHANG Jiaqi, WANG Cui, WANG Mingming, PAN Fengjuan, HAO Xiangxiang, SUI Yueyu. 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.

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^{*}

张佳麒^{1, 2}, 王翠³, 王明明^{1†}, 潘凤娟¹, 郝翔翔¹, 隋跃宇¹

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 哈尔滨学院信息工程学院, 哈尔滨 150086)

摘要: 秸秆还田是提高农田土壤有机碳(SOC)含量的有效措施, 为研究长期秸秆还田条件下黑土SOC的动态变化规律, 基于典型黑土区18年长期玉米-大豆轮作定位试验, 对无肥(NF)、化肥(NPK)和秸秆还田配施化肥(NPKS)3个处理下耕层(0~20 cm)SOC随时间的动态变化进行研究, 同时采用物理和化学分组方法, 探讨秸秆还田对SOC组成的影响。结果表明: (1)与初始(2004年)土壤相比, NPKS处理使SOC含量显著增加了12.97%, 年均增加0.18 g·kg⁻¹, NF处理SOC含量显著降低了3.90%, 而NPK处理无显著变化。(2)NPKS处理下的SOC含量与年份以及累积碳投入呈显著正相关, 但从不同时间段来看, 2004—2015年NPKS处理的SOC含量与累积碳投入呈显著正相关, 2015—2022年二者无显著相关性, 说明连续秸秆还田导致的SOC提升主要发生在前11年, 11年后SOC达到了平衡。(3)NPKS处理使得土壤游离态轻组碳(fLFC)、闭蓄态轻组碳(oLFC)、重组碳(HFC)、胡敏酸碳(HAC)、富里酸碳(FAC)和胡敏素碳(HMC)含量分别增加了47.77%、34.77%、11.18%、13.00%、6.32%和11.71%。秸秆还田增加了fLFC和oLFC两个活性组分的比例, 降低了HFC的比例, 但HFC对SOC增量的贡献超过了80%, 是SOC长期固存的核心组分。此外, 秸秆还田提高了土壤的胡敏酸-富里酸比值(HA/FA), 使土壤有机质的腐质化程度提高。综上, 长期连续秸秆还田可有效提升黑土有机碳含量, 但连续秸秆还田11年后, SOC会达到新的平衡而不再持续增长; 尽管活性组分的提升比例高于稳定性组分, 但稳定性组分对维持SOC的稳定性和数量方面仍起着关键作用。

关键词: 长期秸秆还田; 土壤碳饱和; 土壤有机质; 土壤密度分组; 土壤腐殖质

中图分类号: S714.5 **文献标志码:** A

Temporal Dynamics and Fraction Accumulation Characteristics of Black Soil Organic Carbon Under Long-term Continuous Straw Return

ZHANG Jiaqi^{1, 2}, WANG Cui³, WANG Mingming^{1†}, PAN Fengjuan¹, HAO Xiangxiang¹, SUI Yueyu¹

(1. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Information Engineering, Harbin University, Harbin 150086, China)

* 国家重点研发计划项目(2022YFD1500100, 2021YFD1500400)资助 Supported by the National Key R & D Program of China (Nos. 2022YFD1500100, 2021YFD1500400)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wangmingming@iga.ac.cn

作者简介: 张佳麒(1999—), 女, 黑龙江海伦人, 硕士研究生, 主要从事土壤有机质研究。E-mail: zhangjiaq@iga.ac.cn

收稿日期: 2024-04-29; 收到修改稿日期: 2024-08-21; 网络首发日期(www.cnki.net): 2024-12-25

Abstract: 【Objective】Straw returning is an effective measure to increase the amount of soil organic carbon (SOC) in agroecosystems. The objective of this study was to study the temporal dynamic of SOC in Mollisols during long-term straw return. 【Method】Based on an 18-year long-term field experiment using a maize-soybean rotation cropping system in the typical black soil region, the temporal dynamic of topsoil (0–20 cm) organic carbon was studied under three treatments: no fertilizer (NF), mineral fertilizer (NPK), and mineral fertilizer with straw return (NPKS). Furthermore, physical and chemical fraction methods were applied to study the effect of straw return on SOC pools. 【Result】The results showed that: (1) Compared with the initial (2004) soil, the SOC content significantly increased by 12.97% in the NPKS treatment, with an annual increase of $0.18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, and the SOC content significantly decreased by 3.90% in the NF treatment, while no significant change was found in NPK treatment. (2) There was a significant positive correlation between SOC content and year and the cumulative carbon input in the NPKS treatment. In particular, a significant relationship between SOC and cumulative carbon was observed from 2004 to 2015 under NPKS, while not from 2015 to 2022, indicating that the increase of SOC caused by straw return mainly occurred in the first 11 years, and after 11 years, the SOC reached a state of equilibrium. (3) The NPKS treatment increased the carbon content in free light fraction (fLFC), occluded light fraction (oLFC), the heavy fraction (HFC), humic acid (HAC), fulvic acid (FAC), and humin (HMC) by 47.77%, 34.77%, 11.18%, 13.00%, 6.32%, and 11.71%, respectively. Straw return improved the C proportion in labile fractions(fLFC and oLFC)and decreased the proportion of HFC, but the contribution of HFC to SOC improvement was more than 80%. Thus, the stable HFC was a key component for the long-term sequestration of SOC. In addition, straw return increased the ratio of HA/FA, consequently, increasing the humification degree of soil organic matter. 【Conclusion】Long-term continuous straw return can effectively improve the content of SOC and its fractions in black soil, but after 11 years of continuous straw return, SOC will stop growing and reach a new equilibrium. Although the labile SOC was elevated at a higher percentage than the stable SOC, the stable SOC still plays a crucial role in maintaining the stability and quantity of SOC.

Key words: Long-term straw returning; Soil carbon saturation; Soil organic matter; Soil density fraction; Soil humic substance

土壤有机碳 (Soil organic carbon, SOC) 是陆地生态系统中最大的碳库, 全球 1 m 土体的碳储量甚至超过大气和陆地植被碳库总和, 其微小的变化即可对大气 CO₂ 浓度和气候变化产生重大影响。此外, SOC 在供应土壤养分、维持生物多样性和保证生产力等方面发挥着关键作用^[1], 因此, 提高 SOC 含量被认为是缓解气候变化和提高土壤肥力的双赢策略^[2]。在农田生态系统中, 精耕还田是影响 SOC 最为深刻的农田管理措施之一, 探讨长期精耕还田下农田 SOC 的动态演变与周转特征显得尤为重要。

SOC 的动态变化取决于碳投入和分解之间的平衡, 由于直接增加了土壤中有机物质的输入, 多数研究发现精耕还田可显著提高 SOC 含量^[3-4]。在不同区域和土壤类型中开展的研究证实, SOC 的增加量与精耕还田量呈显著正相关^[5-6], 但 SOC 含量不会随着外源碳投入的增加而持续的线性增加, 而是到达一定阶段 SOC 会逐渐趋于饱和状态^[7]。Liu 等^[4]通过 Meta 分析表明, 连续精耕还田条件下, SOC 在第 12 年左右会达到饱和状态。Wang 等^[8]全面分析了精耕还田对中国农田 SOC 的影响, 发现精耕还

田对 SOC 的提升作用主要发生在前 6 至 9 年, 随着还田的持续, SOC 的积累会逐渐减弱, 甚至出现降低趋势。因此, 精耕碳转化为 SOC 的比例是随着还田时间而不断变化的。

黑土所富含的 SOC 是其发挥高肥力的关键, 但由于持续高强度利用和土壤侵蚀等因素导致黑土 SOC 含量逐年下降, 土壤肥力明显降低, 严重威胁了黑土资源的可持续利用和粮食产能的稳定与提升^[9]。此外, 拥有较高固碳潜力的农田黑土, 是我国未来重要的“碳汇”之一^[10]。提高黑土 SOC 含量意义重大, 我国开展了大量有关精耕还田对黑土 SOC 积累转化的研究。短期内, 精耕还田对 SOC 的提升效果显著, 但随着外源碳的持续输入, 其转化为 SOC 的效率会逐渐降低, 直至 SOC 达到新的平衡或者“碳饱和”状态, 且当某一土壤具有较高的 SOC 时, 其更易出现碳饱和现象^[7]。遗憾的是, 精耕还田期间黑土 SOC 随时间的动态变化规律仍不清晰, 长期精耕还田条件下, 黑土 SOC 是否会出现、何时出现碳饱和现象, 仍有待进一步明确。有研究发现, 在玉米连作模式下, 连续 13 年精耕还田

期间, 黑土 SOC 持续增长, 并未出现饱和趋势^[11]。但碳投入相对较低的玉米-大豆轮作模式下, 长期秸秆还田是否会导致黑土 SOC 达到新的平衡点尚不明确。

土壤有机碳库组成复杂, 不同活性碳库组分对秸秆还田的响应不同。土壤轻组有机碳、颗粒有机碳和溶解性有机碳等活性组分周转速率快, 秸秆还田后, 活性有机碳的数量会显著提升, 且提升比例普遍高于总有机碳^[12], 这反映了活性有机碳对外源有机物输入的高度敏感性。土壤稳定性组分有机碳(包括重组有机碳、矿物结合态、胡敏素等)通常与矿物紧密结合, 是植物源碳在微生物的代谢下发生复杂分解反应后所形成, 其微生物分解程度高, 对外源碳投入的响应较为迟缓^[13]。因此, 有研究发现秸秆还田后, 土壤稳定性组分未发生明显变化, 但随着秸秆还田时间延长, 稳定性有机碳会得到显著提升^[14]。有研究甚至发现, 随着外源碳的不断输入, 稳定程度较高的矿质组分先达到“碳饱和”状态, 随后新输入的碳仅在具有较高周转速率的活性有机碳库中积累^[15]。总之, 不同活性有机碳组分对秸秆碳投入的响应不同, 反之, 秸秆来源碳在不同活性组分的分配也会存在较大差异。因此, 分析长期秸秆还田条件下不同 SOC 组分的变化, 有助于深入了解 SOC 的形成和稳定机制。本研究基于典型黑土区秸秆还田 18 年长期定位试验, 分析连续秸秆还田期间 SOC 的动态变化特征, 并采用土壤物理和化学连续分组方法, 研究秸秆还田对 SOC 组分的影响, 以期为我国农田土壤固碳潜力估算和黑土可持续利用提供数据和理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长期定位试验位于中国科学院海伦国家野外科学观测研究站($47^{\circ}27'N$, $126^{\circ}55'E$), 地处黑龙江省海伦市, 属温带大陆性季风气候, 年降水量 500~600 mm, 65%以上集中在 6—8 月。年均气温约 $1.5^{\circ}C$, 年均 $\geq 10^{\circ}C$ 的有效积温为 $2\,450\sim 2\,500^{\circ}C$, 无霜期 120~130 d。土壤为典型黑土(Mollisol), 由第四纪黄土状亚黏土发育而成。试验区地势平坦, 土壤肥力均匀, 耕作历史约 120 a。

1.2 试验设计与管理

长期定位试验始于 2004 年, 种植方式为玉米(*Zea mays L.*)—大豆(*Glycine max (L.) Merr.*)轮作, 一年一熟制, 设 3 种不同施肥处理: (1) 无肥(NF)、(2) 化肥(NPK)和(3) 化肥+秸秆还田(NPKS)。试验采用单因素裂区, 每个处理面积为 $1\,800\text{ m}^2$ ($30\text{ m} \times 60\text{ m}$), 将每个处理均匀划分 6 个分区, 作为 6 次重复。NF 和 NPK 处理秋季收获后将作物地上部全部移除, NPKS 处理每年秋季作物收获后, 采用秸秆粉碎机将地上部全量秸秆粉碎至长度 $3\sim 4\text{ cm}$, 均匀平铺于试验区内, 后同 NF 和 NPK 处理同时进行旋耕起垄作业, 旋耕深度为 20 cm。NPK 和 NPKS 处理的化肥施用量: 大豆 N、P₂O₅、K₂O 分别 64、70、20 kg·hm⁻², 玉米 N、P₂O₅、K₂O 分别 138、70、20 kg·hm⁻², 大豆化肥在播种时以基肥一次性施入土壤, 玉米 1/3 氮肥同磷肥和钾肥在播种时以基肥施入, 2/3 氮肥在拔节期以追肥施入。

1.3 土壤样品采集

于 2004—2022 年每年秋季收获后采集土壤样品, 采样深度 $0\sim 20\text{ cm}$ 。每个处理分区按“之”字形选取 15 个采样点, 每个样点采集约 500 g 样品, 混合后用“四分法”收集土样约 1 kg, 轻轻掰成直径 1 cm 以下的土块, 挑除根系和石砾后风干, 过 2 mm 和 0.25 mm 筛, 分别用于土壤总有机碳和有机碳组分的分析, 其余部分保存至广口瓶中备用。

1.4 作物碳投入估算

作物残体的碳投入分为秸秆、根茬、根系($0\sim 20\text{ cm}$)和根际碳沉淀四部分。每年秋季收获时, 在每个处理的 6 个分区, 采集 2 m^2 的玉米或大豆地上部分, 测定籽粒和秸秆产量。根茬和根系生物量分别通过根茬/籽粒比(大豆 0.05、玉米 0.13)和根系/籽粒比(大豆 0.14、玉米 0.26)计算所得^[16], 根际沉积碳假定与根系碳相等^[17]。

1.5 土壤有机碳及其组分的测定

将土壤样品置于 $105^{\circ}C$ 烘 8 h 去除土壤吸湿水。采用元素分析仪(EA3000, Euro Vector, Italy)测定土壤有机碳含量。

根据 Llorente 等^[18]的方法测定土壤密度组分有机碳。将 10 g 土样置于 50 mL 碘化钠(NaI)溶液(密度 $1.8\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)中, $8\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心 30 min, 过滤上清液, 滤膜上残留颗粒用去离子水冲洗 5 次, 得到游离态轻组(fLF, $d < 1.8\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)。试管中残留

物加入 50 mL NaI, 置于冰浴中, 用超声破碎仪在 300 J·mL⁻¹ 下超声 15 min, 漂浮物为闭蓄态轻组 (oLF, $d < 1.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。用蒸馏水清洗离心管中残留的土壤 5 次, 离心后弃去上清液, 该组份为重组 (HF, $d > 1.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。所有组分于 50 ℃ 干燥称重, 过 0.25 mm 筛, 用元素分析仪测定碳含量。

腐殖质提取参照窦森等^[19]的方法。重组中加入 30 mL 0.1 mol·L⁻¹NaOH 和 0.1 mol·L⁻¹Na₄P₂O₇ 混合溶液 (50 : 50, V/V), 70 ℃ 水浴中浸提 1 h 后, 3 500 r·min⁻¹ 离心 15 min, 上清液过滤至 50 mL 容量瓶中, 再用上述混合液洗残渣 2 次, 将 2 次离心液合并过滤到 50 mL 容量瓶中定容, 即为可提取腐殖质物质 (HE)。离心管中残渣用蒸馏水洗净烘干, 过 60 目筛, 即为胡敏素 (HM)。取 30 mL HE 用 0.5 mol·L⁻¹ 的 H₂SO₄ 酸化至 pH 1.0 后, 60 ℃ 保温 1.5 h, 静置过夜, 次日将溶液过滤, 定容于 50 mL 容量瓶中, 即为富里酸 (FA)。滤纸上的沉淀用 0.025 mol·L⁻¹ 的 H₂SO₄ 洗涤 3 次, 用 60 ℃ 的 0.05 mol·L⁻¹NaOH 将沉淀溶解到 50 mL 容量瓶中, 用蒸馏水定容, 即为胡敏酸 (HA)。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:

$$\text{FAC} = \text{HEC} - \text{HAC}$$

$$\text{HMC} = \text{SOC} - \text{fLPC} - \text{oLFC} - \text{HEC}$$

式中, FAC、HEC 和 HAC 分别为富里酸碳含量、可提取腐殖质物质碳含量和胡敏酸碳含量, HMC、fLPC 和 oLFC 分别为胡敏素碳含量、游离态轻组碳

含量和闭蓄态轻组碳含量。

1.6 数据处理

运用 SPSS 26.0 和 GraphPad Prism 8 软件进行数据分析和绘图。不同处理间 SOC 及其组分的差异显著性采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 进行比较, 方差齐性和正态性假设采用 Levene's Test 检验。初始年份 (2004 年) 和 2022 年之间的差异采用配对 T 检验进行比较, SOC 与试验年份间的关系采用 Spearman 相关分析进行评估。

2 结 果

2.1 2004—2022 年土壤累积碳投入

在 18 年试验中, NF、NPK 和 NPKS 处理的土壤累积碳投入分别为 15.11、21.82 和 66.90 Mg·hm⁻² (表 1)。NPKS 处理的累积碳投入分别是 NF 和 NPK 的 4.42 倍和 3.06 倍, 且 NPKS 处理下有 66.20% 的碳投入来源于秸秆。

2.2 土壤有机碳含量的变化

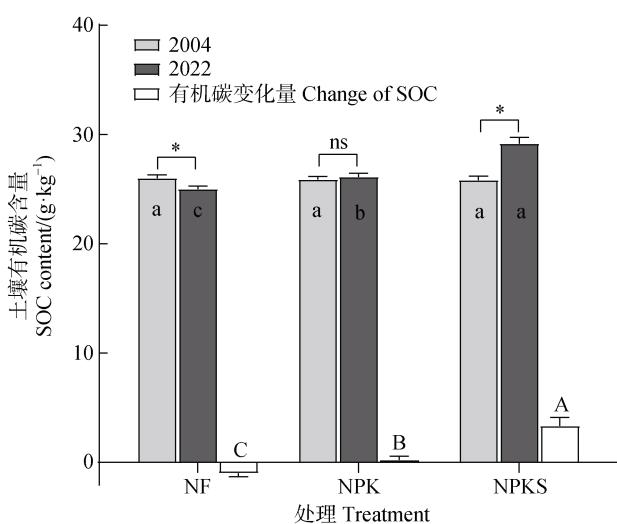
试验进行 18 年后, 各处理间的 SOC 含量差异显著 ($P < 0.05$), 表现为 NPKS > NPK > NF (图 1), NPKS 的 SOC 含量分别较 NF 和 NPK 高 16.68% 和 11.69%。与初始土壤相比, NPKS 处理使 SOC 含量显著增加了 12.97% ($P < 0.05$), 年均增加 0.68%, 固碳速率为 0.18 g·kg⁻¹·a⁻¹; NF 处理则使 SOC 显著下降了 3.90%, NPK 处理的 SOC 含量无显著变化。NPKS、NPK 和 NF 处理 SOC 的变化量分别为 3.35、0.25 和 -1.02 g·kg⁻¹。

表 1 2004—2022 年间不同处理土壤累积碳投入

Table 1 Plant-derived C input under different treatments from 2004 to 2022 (Mg·hm⁻²)

处理 Treatment	秸秆 Straw		根系 Root		根茬 Stubble		根际碳沉淀 Rhizodeposition		累积碳投入 Cumulative C input
	大豆 Soybean	玉米 Maize	大豆 Soybean	玉米 Maize	大豆 Soybean	玉米 Maize	大豆 Soybean	玉米 Maize	
NF	0	0	1.38	4.72	0.49	2.42	1.38	4.72	15.11
NPK	0	0	1.52	7.26	0.54	3.72	1.52	7.26	21.82
NPKS	9.14	35.18	1.65	7.44	0.59	3.81	1.65	7.44	66.90

注: NF, 不施肥; NPK, 单施化肥; NPKS, 精秆还田配施化肥。Note: NF, No fertilizer; NPK, mineral fertilizers; NPKS, mineral fertilizers with straw return.



注: NF, 不施肥; NPK, 单施化肥; NPKS, 稼秆还田配施化肥。不同小写字母表示同一年份各处理间土壤有机碳含量差异显著 ($P<0.05$)。不同大写字母表示处理间土壤有机碳含量变化差异显著 ($P<0.05$)。* 表示 2004 年和 2022 年处理间差异显著 ($P<0.05$)。ns 表示 2004 年和 2022 年无显著差异。误差线代表标准差 ($n=6$)。下同。Note: NF, No fertilizer; NPK, mineral fertilizers; NPKS, mineral fertilizers with straw return. 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 change among treatments. * indicates significant differences ($P<0.05$) between 2004 and 2022. ns indicates no significant differences between 2004 and 2022. Error bars represent the standard deviations ($n=6$). The same below.

图 1 不同处理土壤有机碳含量变化

Fig. 1 Changes in soil organic carbon content under different treatments

2.3 土壤有机碳含量随时间的动态变化及其与碳投入的关系

随着稼秆还田年份的增加, NPKS 处理 SOC 含量显著提升, NF 和 NPK 处理的 SOC 含量与时间无显著相关性(图 2)。连续稼秆还田 4 年后(2007 年后), NPKS 处理的 SOC 含量开始显著高于其他两个处理, 12 年后(2016 年后), 3 个处理间的差异达到显著水平(2018 年除外)。

NPKS 处理的 SOC 含量与累积碳投入量呈显著正相关 ($R^2=0.72$, $P<0.001$), NF 和 NPK 无显著相关性(图 3a)。但分段拟合证明, NPKS 处理的 SOC 变化可分为两个不同阶段, 即 2004—2015 年和 2015—2022 年(图 3b), 进一步相关分析表明, 在第一阶段, SOC 与累积碳投入呈极显著正相关

($P<0.001$), 但第二阶段, 二者无显著相关性(图 3c)。

2.4 土壤有机碳组分含量的变化

与初始土壤有机碳含量相比, NPKS 处理使各 SOC 组分的碳含量显著增加($P<0.05$), fLFC、oLFC、HFC、HAC、FAC 和 HMC 分别增加了 47.77%、34.77%、11.18%、13.00%、6.32% 和 11.71%(图 4a~图 4f)。而在 NF 处理下, fLFC、oLFC、HFC、HAC 和 FAC 分别显著降低了 17.53%、11.07%、3.22%、6.87% 和 2.86%(图 4a~图 4e)。NPK 处理下, 所有组分的碳含量与初始土壤相比均无显著差异。试验 18 年后, 除 HMC 外, 3 个处理间的 SOC 组分碳含量差异均达到了显著水平, 且均表现为 NPKS>NPK>NF(图 4a~图 4e); NF 和 NPK 处理间的 HMC 含量无显著差异, 但二者显著低于 NPKS 处理(图 4f)。

2.5 土壤有机碳组分相对比例的变化

HMC、HAC、FAC、fLFC 和 oLFC 含量分别占 SOC 的 44.00%~46.46%、32.01%~33.20%、16.15%~17.17%、3.48%~5.25% 和 1.18%~1.51%(图 5a~图 5f)。从密度组分来看, 与初始土壤相比, NPKS 处理显著($P<0.05$)提高了 fLFC 和 oLFC 的比例(图 5a, 图 5b), 分别提高了 30.85% 和 19.38%, 但使 HFC 的比例显著降低(图 5c); NF 处理则导致 fLFC 和 oLFC 的比例显著降低(图 5a, 图 5b), HFC 的比例显著增加(图 5c)。对腐殖质组分而言, 除了 NPKS 处理下的 FAC 比例与初始土壤相比显著降低了 5.89% 外, 其余组分均无显著变化。NPK 处理下各 SOC 组分的比例均无显著变化。此外, 无肥处理导致 HAC/FAC 比值降低 4.12%, 而 NPKS 处理则使 HAC/FAC 比值增加 6.29%, 且 18 年后, NPKS 处理的 HAC/FAC 比值显著高于 NF 和 NPK 处理(图 6)。

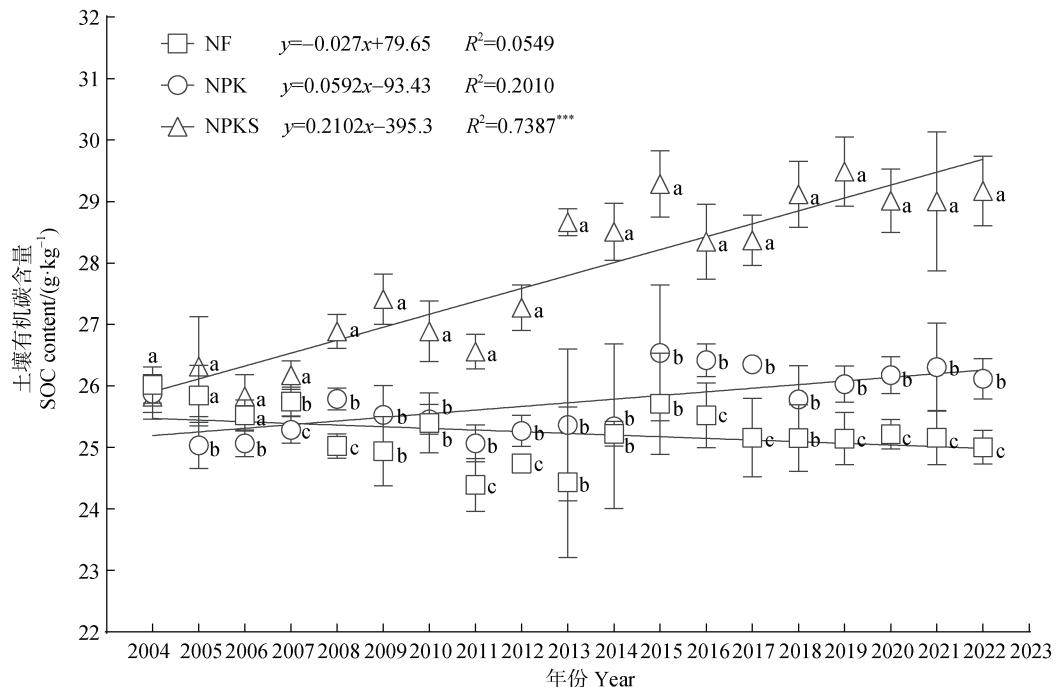
3 讨论

3.1 连续稼秆还田期间黑土总有机碳的积累特征

稼秆还田直接将外源碳输入土壤中, 其对 SOC 具有显著提升效果。对全球 176 个研究结果的 Meta 分析表明, 稼秆还田后, SOC 的平均增加量为 12.80%^[4]。本研究连续稼秆还田 18 年后, SOC 含量增加了 12.97%。从 SOC 的年均增加量来看, 本研

究的结果 ($0.18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 图 1) 明显低于 Guan 等^[20]在黑土区的试验结果 ($0.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 以下原因均可能导致这种差异的出现: 一是秸秆还田量的差异, 土壤的固碳速率与秸秆碳投入显著相关^[21]。本研究

采用玉米-大豆轮作方式, 但后者为玉米连作, 秸秆还田条件下, 玉米连作的碳投入远高于玉米-大豆轮作方式, 因此, 玉米连作模式下秸秆还田对 SOC 的提升效果优于玉米-大豆轮作。二是 SOC 对外源碳



注: ***表示显著性水平在 $P < 0.001$ 。下同。Note: *** indicates a significance level at $P < 0.001$. The same below.

图 2 2004—2022 年不同处理土壤有机碳含量变化
Fig. 2 Changes in soil organic carbon content under different treatments from 2004 to 2022

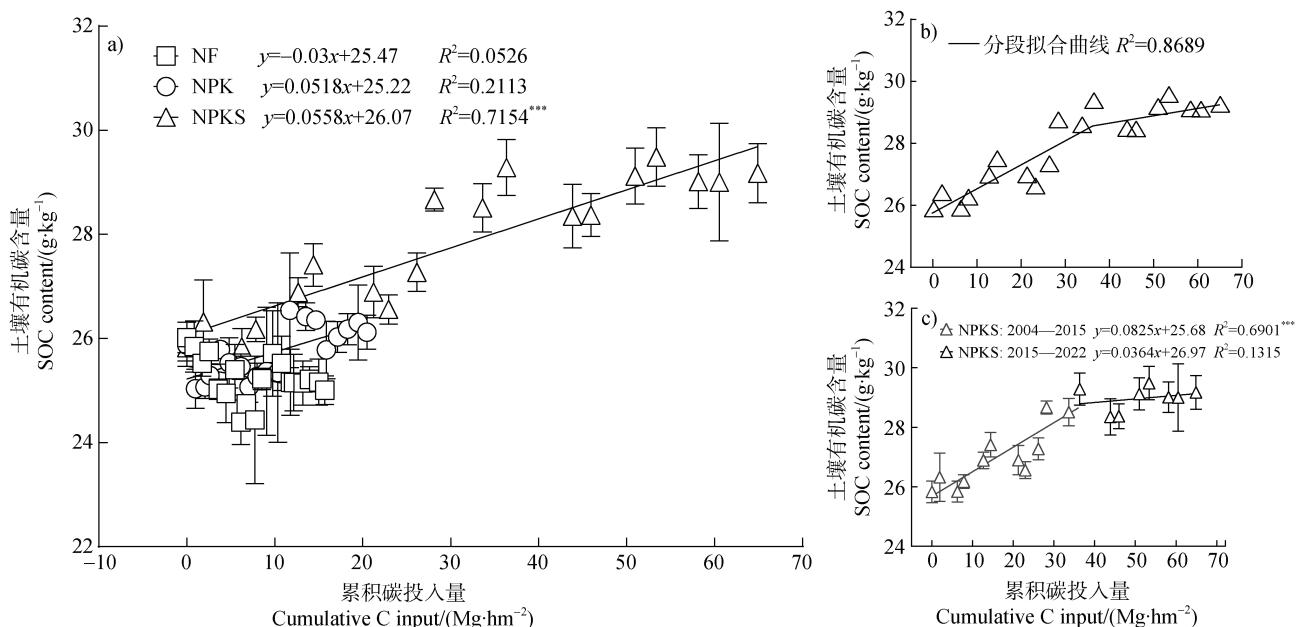


图 3 2004—2022 年不同处理土壤累积碳投入与土壤有机碳含量关系

Fig. 3 The relationship between cumulative C inputs and soil organic carbon content under different treatments from 2004 to 2022

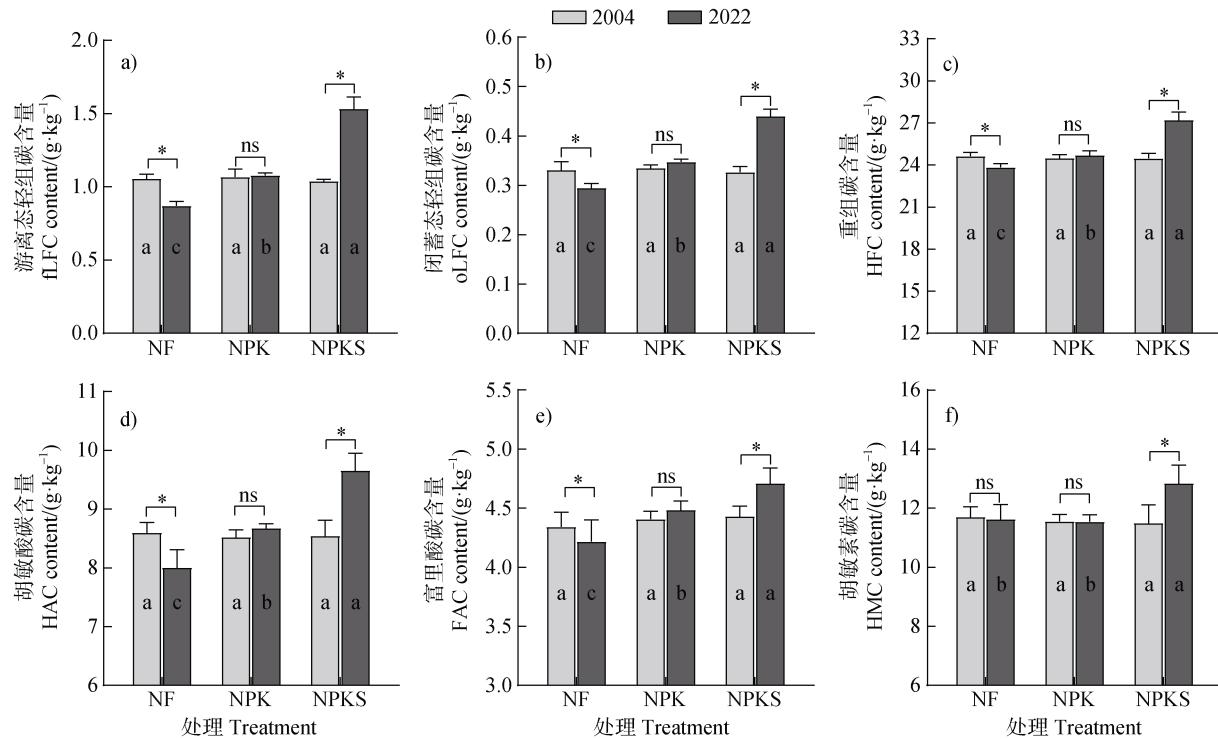


图4 2004年和2022年不同处理土壤有机碳组分碳含量

Fig. 4 Carbon content of soil organic carbon fractions under different treatments in 2004 and 2022

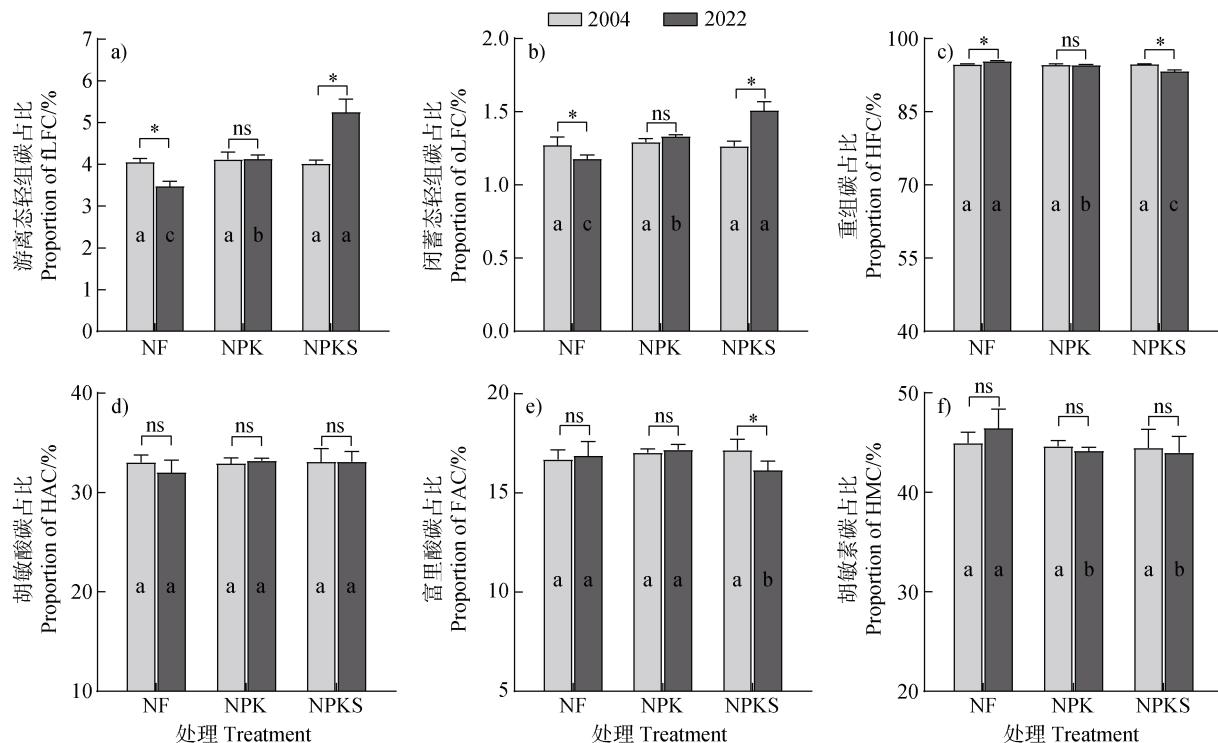


图5 2004年和2022年不同处理土壤有机碳中各组分占比

Fig. 5 Proportion of carbon fractions in soil organic carbon under different treatments in 2004 and 2022

投入的响应取决于初始 SOC 含量^[22]，初始 SOC 较低的土壤一般具有更高的固碳速率^[7]，本研究初始

SOC 含量高于该研究，可能导致了其固碳速率相对较低。此外，秸秆还田方式也会深刻影响 SOC 的提

升效果,一般混合还田对 SOC 的提升效果要优于覆盖还田^[4]。梁尧等^[23]对黑土的研究证实,秸秆覆盖还田对 SOC 的提升主要集中于表层 0~10 cm, 而秸秆混合还田则促进了整个 0~40 cm 土层 SOC 积累,且混合还田的固碳速率高于覆盖还田。虽然秸秆在混合还田过程中,耕作措施会对土壤结构造成一定破坏,加速 SOC 的矿化,但大部分秸秆会与土壤相接触,更多秸秆来源的碳会被土壤所固定。NF 和 NPK 处理的 SOC 含量与年份之间无显著相关性(图 1),但与初始年份相比,NF 的 SOC 含量显著降低,而 NPK 则无变化,说明不施肥条件下,长期较低的碳投入(表 1)导致黑土 SOC 处于亏损状态,呈现出逐渐降低趋势;而单施化肥时,SOC 的形成和分解则基本处于平衡状态。但有学者从更长时间尺度(35 年)上得出了不同结论,即单施化肥导致黑土 SOC 含量降低了 11.60%,呈现出亏损状态^[24]。可能是由于随着化肥的持续投入,逐渐降低的土壤 C/N 比值提高了微生物活性,从而促进了土壤原有机质的分解矿化,导致 SOC 含量下降^[25]。因此,SOC 的变化规律与时间尺度密切相关,需要从不同的时间尺度来评估 SOC 变化趋势。

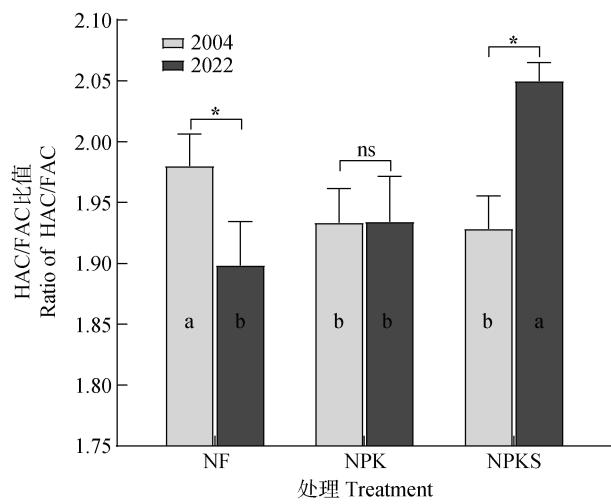


图 6 2004 年和 2022 年不同处理土壤 HAC/FAC 比值
Fig. 6 The ratio of HAC/FAC of soil organic carbon under different treatments in 2004 and 2022

SOC 含量不会随着碳投入的增加而持续增加,因为当 SOC 形成和分解达到平衡后,SOC 就会达到饱和。碳饱和,是指土壤长期在某一管理方式或碳投入下,SOC 达到了一个新的平衡点,并不意味着 SOC 不会继续增加,当提高外源碳的年均投入量时,

SOC 可能会继续增加,直至达到新的平衡,或新的饱和点。对全球数据的分析发现,在连续秸秆还田条件下,SOC 达到饱和的平均时间为 12 年^[4]。尽管本研究结果证明,整个试验的 18 年内,秸秆还田处理的 SOC 含量与累积碳投入呈显著正相关(图 2),但进一步分析发现,SOC 的提升主要发生在前 11 年(2004—2015 年),11 年之后(2015—2022 年)SOC 并未随着累积碳投入的增加而出现明显的增长趋势。这说明本研究的黑土有机碳在持续秸秆还田 11 年后,达到了新的平衡或饱和状态。当然,在同一土壤条件下,SOC 达到新的平衡点所需的时间与外源碳投入密切相关,Hao 等^[11]在与本研究完全相同的试验站点的研究发现,长期秸秆还田 13 年内,SOC 处于持续增长的趋势,并未出现饱和,主要原因是其研究土壤为玉米连作模式,年均碳投入($7.93 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$)是本研究($3.72 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$)的 2 倍。较大外源碳投入会使 SOC 达到饱和所需的时间更长,且达到饱和点时的 SOC 含量更高^[22]。本研究中黑土未开垦前的 SOC 含量可达 $50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上^[26],仍有较大提升其潜力,因此,推断当提高玉米-大豆轮作模式黑土的秸秆还田量时,SOC 有望继续增长。

3.2 连续秸秆还田期间土壤物理组分的变化特征

轻组有机碳(LFC)作为介于新鲜植物残体和腐殖化有机质之间的有机碳库,具有较高的生物活性,代表着土壤中的不稳定有机碳库。根据 LFC 的稳定程度,可将其分为不受团聚体保护的游离态轻组(fLFC)和位于团聚体内部的闭蓄态轻组(oLFC)。本研究中,秸秆还田不仅显著提高了 fLFC 和 oLFC 的含量,还提高了其在 SOC 中的占比(图 4, 图 5)。以往研究表明,LFC 的周转速率快,一般只有几周到几年,其对耕作、施肥等土壤管理措施的响应较为敏感,且秸秆还田对 LFC 的影响较对 SOC 更显著^[27],本研究中 LFC 的增加量为 44.65%,是 SOC 增加量(12.97%)的 3.4 倍。值得注意的是,连续秸秆还田 18 年后,LFC 占 SOC 的比例由 5.28% 提高到了 6.76%,这说明秸秆还田提升了土壤有机碳的活性。LFC 主要来源于植物残体,秸秆还田可为 LFC 的形成提供丰富来源,但在不施肥处理下,土壤中的外源植物残体投入不足,并加速了微生物对土壤原 LFC 的分解,导致其含量和比例均显著降低(图 4, 图 5)。

HFC 是存在于土壤有机无机复合体中的有机质, 主要成分是与矿物态紧密结合的腐殖质, 在 SOC 中的占比超过 80%, 其不易被微生物分解, 代表着土壤的稳定性碳库。从增加比例来看, 连续秸秆还田 18 年后 HFC 仅增加了 11.18% (图 4), 远低于 fLFC 和 oLFC 的增加比例, 但 HFC 的增加量 ($2.74 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 占总 SOC 增加量 ($3.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的 81.80%。与本研究结果类似, 刘淑霞等^[28]在吉林省开展的研究表明, 连续 10 年玉米秸秆还田后, HFC 的增量占总 SOC 增量的 70.70%, 这表明输入土壤中的外源碳大部分被固存到了 HFC 组分中。在与本文相同区域的连续玉米秸秆还田长期定位试验证明, 17 年间外源碳转换为 HFOC、fLFOC 和 oLFOC 的比例分别为 23.50%、4.10% 和 0.60%^[11]。因此, 尽管 HFC 对土壤管理措施的反应缓慢, 但其在维持 SOC 的稳定性和数量方面起着关键作用^[18]。但有一点值得注意, 土壤重组对 SOC 的固持会出现饱和现象, 但轻组不会^[7, 13], 所以不能忽视土壤轻组的长期固碳潜力。

3.3 连续秸秆还期间土壤腐殖质组分的变化特征

腐殖质作为土壤中最大的稳定性有机碳库, 其与土壤矿物紧密结合。经典理论认为, 腐殖质化是土壤有机质形成的核心, 即植物残体在微生物的代谢下合成一系列高分子有机化合物^[29]。根据腐殖质在不同 pH 条件下的溶解性, 将其分为稳定性不同的 3 个组分: 分子量较小而化学性质较活泼的富里酸 (FA), 分子量较大且以杂环结构为特征的复杂胡敏酸 (HA) 以及高度缩合、惰性的胡敏素 (HM)^[1]。不同土壤和区域开展的试验表明, 秸秆还田对土壤腐殖质的形成具有积极作用^[30]。本文得出类似结果: 秸秆还田 18 年后, HA、FA 和 HM 的碳含量均显著提高 (图 5)。土壤腐殖质的形成理论包括木质素酚、微生物合成、微生物多酚等学说, 尽管这些理论假设尚未明确定论, 但这些观点普遍认为, 植物源碳是腐殖质形成的主要初始来源, 持续秸秆还田可为腐殖质的形成和积累提供丰富的来源。此外, 近年来的“微生物碳泵”理论指出, 微生物在 SOM 的形成中扮演着重要角色^[31], 它们可对秸秆等植物源有机碳进行充分利用和同化, 在生长、增殖、死亡过程中积累大量的细胞残体, 并被土壤所固定, 成为腐殖质的重要组成部分^[32]。有研究证实, 秸秆还田时配施 N 肥, 可显著提高微生物对秸秆的利用率, 并最终提高微生物残体碳对 SOC 的贡献^[33]。与秸秆

还田相反的是, 在无肥条件下, 一方面植物源碳输入相对较低, 腐殖质合成受阻, 另一方面, 养分的匮乏, 尤其是 N 的不足, 会引发微生物对原 SOM 的分解, 以获取更多养分, 从而加速土壤腐殖质的分解, 导致土壤 HAC 和 FAC 显著降低 (图 5)。总之, 秸秆还田配施化肥可同时从植物源和微生物源两个方面, 促进土壤腐殖质组分的积累。今后的研究中, 将运用生物标识物分析技术, 进一步分析还田过程中植物和微生物源碳对 SOC 的贡献。

腐殖质中各组分的比例可反映腐殖质的腐质化程度及其品质优劣, HA 比例或者 HA/FA 比值越高, 说明腐殖质的腐质化程度越高, 品质越好, 越有利于 SOC 的长期稳定。本研究中, 秸秆还田处理导致 FAC 的比例显著降低 (图 5), 这使其 HAC/FAC 比值显著增加 (图 6)。在黑土^[34]、潮土^[35]、灰漠土^[35-36]、盐碱土^[37]等土壤类型下开展的研究都获得了与本文相同的结果, 这说明秸秆还田有利于 HA 的积累, 导致分子结构相对简单的 FA 向芳香化程度高、结构复杂的 HA 转化, 促进了腐殖质的聚合程度以及腐质化程度的提高, 改善了土壤腐殖质品质。有研究指出, 秸秆在土壤中转化为腐殖质时, FA 组分在初期形成较快, 但后期会在微生物的作用下不断转化为更稳定的 HA^[29], 因此, HA 组分在土壤固碳过程中发挥着关键作用。

4 结 论

玉米-大豆轮作模式下, 连续 18 年秸秆还田配施化肥使黑土 SOC 含量提升了 12.97%, 年均增加量为 $0.18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。但秸秆还田后 SOC 的提升主要发生在前 11 年, 11 年后 SOC 达到了新的平衡, 并未随着累积碳投入的增加而持续增长。秸秆还田对 SOC 的提升表现在土壤密度组分和腐殖质组分中, 活性组分 (轻组) 的提升比例高于稳定性组分 (重组), 但稳定性更高的重组贡献了 SOC 增量的 80% 以上, 其对 SOC 的长期固存至关重要。此外, 秸秆还田有利于腐殖质中 HA 的积累, 改善了土壤腐殖质品质。总之, 秸秆还田可有效提升黑土 SOC 含量, 并改变 SOC 的组分比例, 但长期 (10 年以上) 秸秆还田会出现 SOC 增长缓慢, 表现出“后劲不足”趋势, 今后的农业措施中, 应设法提高秸秆的转化率, 充分发挥黑土的固碳潜力。

参考文献 (References)

- [1] Pan G X, Ding Y J, Chen S T, et al. Exploring the nature of soil organic matter from humic substances isolation to SOMics of molecular assemblage[J]. *Advances in Earth Science*, 2019, 34 (5): 451—470. [潘根兴, 丁元君, 陈硕桐, 等. 从土壤腐殖质分组到分子有机质组学认识土壤有机质本质[J]. 地球科学进展, 2019, 34 (5): 451—470.]
- [2] Oliveira M, Barré P, Trindade H, et al. Different efficiencies of grain legumes in crop rotations to improve soil aggregation and organic carbon in the short-term in a sandy Cambisol[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 186: 23—35.
- [3] Zhang X T, Wang J, Feng X Y, et al. Effects of tillage on soil organic carbon and crop yield under straw return[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 354: 108543.
- [4] Liu C, Lu M, Cui J, et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20 (5): 1366—1381.
- [5] Berhane M, Xu M, Liang Z Y, et al. Effects of long-term straw return on soil organic carbon storage and sequestration rate in North China upland crops: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26 (4): 2686—2701.
- [6] Gao H J, Peng C, Zhang X Z, et al. Effects of corn straw returning amounts on carbon sequestration efficiency and organic carbon change of soil and aggregate in the black soil area[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53 (22): 4613—4622. [高洪军, 彭畅, 张秀芝, 等. 玉米秸秆还田量对黑土区土壤及团聚体有机碳变化特征和固碳效率的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53 (22): 4613—4622.]
- [7] Stewart C E, Paustian K, Conant R T, et al. Soil carbon saturation: Concept, evidence and evaluation[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 86 (1): 19—31.
- [8] Wang Y L, Wu P N, Mei F J, et al. Does continuous straw returning keep China farmland soil organic carbon continued increase? A meta-analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 288: 112391.
- [9] 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.]
- [10] Zhao Y C, Xu S X, Wang M Y, et al. Carbon sequestration potential in Chinese cropland soils: Review, challenge, and research suggestions[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33 (2): 191—197. [赵永存, 徐胜祥, 王美艳, 等. 中国农田土壤固碳潜力与速率: 认识、挑
- 战与研究建议[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33 (2): 191—197.]
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Dong S S, Dou S. Effect of different ways of corn stover application to soil on composition and structural characteristics of organic carbon in black soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36 (2): 322—328. [董珊珊, 窦森. 玉米秸秆不同还田方式对黑土有机碳组成和结构特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36 (2): 322—328.]
- [15] Gulde S, Chung H, Amelung W, et al. Soil carbon saturation controls labile and stable carbon pool dynamics[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72 (3): 605—612.
- [16] Hao X X, Han X Z, Zou W X, et al. Changes in soil organic carbon and its fractions after 13 years of continuous straw return in a soybean-maize cropping system[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2020, 18 (6): 8267—8284.
- [17] Bolinder M A, Angers D A, Giroux M, et al. Estimating C inputs retained as soil organic matter from corn (*Zea mays* L.) [J]. *Plant and Soil*, 1999, 215 (1): 85—91.
- [18] 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.
- [19] 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 CO₂ 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.]
- [20] Guan S, Liu S J, Liu R Y, et al. Soil organic carbon associated with aggregate-size and density fractions in a Mollisol amended with charred and uncharred maize straw[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18 (7): 1496—1507.
- [21] Li Z P, Liu M, Wu X C, et al. Effects of long-term chemical fertilization and organic amendments on

- dynamics of soil organic C and total N in paddy soil derived from barren land in subtropical China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2010, 106 (2): 268—274.
- [22] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. *Plant and Soil*, 2002, 241 (2): 155—176.
- [23] Liang Y, Cai H G, Yang L, 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. [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.]
- [24] Hao X Y, Ma X Z, Zhou B K, et al. Effect of different long-term fertilization practices on carbon sequestration in black soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30 (5): 316—321. [郝小雨, 马星竹, 周宝库, 等. 长期不同施肥措施下黑土有机碳的固存效应[J]. *水土保持学报*, 2016, 30 (5): 316—321.]
- [25] Zhou L, Li B G, Zhou G S. Advances in controlling factors of soil organic carbon[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2005, 20 (1): 99—105. [周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005, 20 (1): 99—105.]
- [26] 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.]
- [27] Malhi S S, Nyborg M, Goddard T, et al. Long-term tillage, straw management and N fertilization effects on quantity and quality of organic C and N in a Black Chernozem soil[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, 90 (2): 227—241.
- [28] Liu S X, Wang Y, Zhou P, et al. Effect of various fertilization on the organo-mineral complexation and the combined forms of humus of phaeozem[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2008, 31 (2): 76—80. [刘淑霞, 王宇, 周平, 等. 不同施肥对黑土有机无机复合及腐殖质结合形态的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2008, 31 (2): 76—80.]
- [29] 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.
- [30] Zhang X W, Dou S, Ndzelu B S, et al. Effects of different corn straw amendments on humus composition and structural characteristics of humic acid in black soil[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2020, 51 (1): 107—117.
- [31] Zhu X F, Kong W D, Huang Y M, et al. Soil microbial carbon pump conceptual framework 2.0[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35 (1): 102—110. [朱雪峰, 孔维栋, 黄懿梅, 等. 土壤微生物碳泵概念体系 2.0[J]. *应用生态学报*, 2024, 35 (1): 102—110.]
- [32] Yang Y, Wang B R, Dou Y X, et al. Advances in the research of transformation and stabilization of soil organic carbon from plant and microbe[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35 (1): 111—123. [杨阳, 王宝荣, 窦艳星, 等. 植物源和微生物源土壤有机碳转化与稳定研究进展[J]. *应用生态学报*, 2024, 35 (1): 111—123.]
- [33] Meng X T, Zhang X C, Li Y N, et al. Nitrogen fertilizer builds soil organic carbon under straw return mainly via microbial necromass formation[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2024, 188: 109223.
- [34] Zhang Y H, Dou S, Dong S S, et al. Effect of deep incorporation of corn stover combined chemical fertilizer on composition of soil humus and structure of humic acid in soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (3): 694—702. [张艳鸿, 窦森, 董珊珊, 等. 精秆深还及配施化肥对土壤腐殖质组成和胡敏酸结构的影响[J]. *土壤学报*, 2016, 53 (3): 694—702.]
- [35] Zhang J J, Hu F, Li H X, et al. Effects of earthworm activity on humus composition and humic acid characteristics of soil in a maize residue amended rice-wheat rotation agroecosystem[J]. *Applied Soil Ecology*, 2011, 51: 1—8.
- [36] Liu J, Jing F, Li T H, et al. Effects of returning stalks into field on soil humus composition of continuous cropping cotton field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48 (2): 293—302. [刘军, 景峰, 李同花, 等. 精秆还田对长期连作棉田土壤腐殖质分含量的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48 (2): 293—302.]
- [37] Chen X D, Wu J G, Fan W, et al. Effects of different organic materials on the morphology and composition of soil humus binding in primary saline and alkaline land[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33 (1): 200—205. [陈晓东, 吴景贵, 范伟, 等. 不同有机物料对原生盐碱地土壤腐殖质结合形态及组成的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33 (1): 200—205.]

(责任编辑: 卢萍)