



罗子恒,李宗,刘曦瑶,郭威宏,张雯,白伟,任永峰,侯志研,刘洋,官香伟,姜英.玉米绿肥间作对东北褐土区农田土壤碳库组分的影响[J].中国农业大学学报,2025,30(12):119-132.

LUO Ziheng, LI Zong, LIU Xiyao, GUO Weihong, ZHANG Wen, BAI Wei, REN Yongfeng, HOU Zhiyan, LIU Yang, GONG Xiangwei, JIANG Ying. Effects of maize-green manure intercropping on soil carbon pool fractions in farmland with cinnamon soil of Northeast China [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(12): 119-132.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.12.11

玉米绿肥间作对东北褐土区农田土壤碳库组分的影响

罗子恒¹ 李宗¹ 刘曦瑶¹ 郭威宏¹ 张雯¹ 白伟² 任永峰³ 侯志研²
刘洋² 官香伟¹ 姜英^{1*}

(1. 沈阳农业大学 农学院, 沈阳 110866;

2. 辽宁省农业科学院 耕作栽培研究所, 沈阳 110161;

3. 内蒙古自治区农牧业科学院 资源环境与可持续发展研究所, 呼和浩特 010031)

摘要 为探究东北褐土区农田间作绿肥对农田土壤碳库组分及碳库管理指数的影响,于2023—2024年在辽宁省阜蒙县国家农业环境阜新观测实验站选择玉米常规单作(CK)为对照,设置玉米二比空单作(MC)、玉米||紫花苜蓿(MA)、玉米||毛叶苕子(MH)、玉米||箭筈豌豆(MP)共5种处理开展田间试验,通过测定0~40 cm土层的土壤有机碳(SOC)、易氧化有机碳(EOC)、非活性有机碳(NLOC)、颗粒态有机碳(POC)和矿物结合态有机碳(MAOC)含量与储量,分析土壤各组分有机碳的分配比例以及土壤碳库管理指数(CPMI),揭示不同种植模式下土壤各组分有机碳含量、储量及碳库质量的变化特征。结果表明:1)间作绿肥处理SOC含量和储量比CK高2.27%~26.42%和0.28%~32.85% ($P<0.05$);2)CK处理EOC、NLOC和MAOC含量比间作绿肥处理低5.68%~54.69%、3.49%~28.89%、1.27%~19.14% ($P<0.05$),间作绿肥处理EOC、NLOC和MAOC储量比CK高18.81%~112.98%、0.52%~36.13%、4.84%~29.76% ($P<0.05$);3)与CK相比,间作绿肥处理提高了EOC/SOC、MAOC/SOC,而MC处理提高了POC/SOC;4)在0~20 cm土层,MA处理CPMI比CK平均高17.43% ($P<0.05$)。综上,在东北褐土区,间作绿肥处理是提高农田土壤有机碳含量并改善碳库质量的有效措施。

关键词 玉米;绿肥;土壤有机碳;土壤碳库管理指数;碳库质量

中图分类号 S142

文章编号 1007-4333(2025)12-0119-14

文献标志码 A

Effects of maize-green manure intercropping on soil carbon pool fractions in farmland with cinnamon soil of Northeast China

LUO Ziheng¹, LI Zong¹, LIU Xiyao¹, GUO Weihong¹, ZHANG Wen¹, BAI Wei²,
REN Yongfeng³, HOU Zhiyan², LIU Yang², GONG Xiangwei¹, JIANG Ying^{1*}

(1. College of agronomy, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110866, China;

2. Institute of Crop Cultivation and Farming System, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, China;

3. Institute of Resource, Environment and Sustainable Development, Inner Mongolia Academy of Agricultural & Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, China)

Abstract In order to explore the effects of intercropping green manure on soil carbon pool composition and carbon pool management index in the cinnamon soil area in Northeast China, the conventional monoculture of maize (CK) as the control, maize 2:0 monoculture (MC), maize intercropping alfalfa (MA), maize intercropping

收稿日期: 2025-07-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1500600, 2024YFD1500300);国家自然科学基金项目(32071976)

第一作者: 罗子恒(ORCID:0009-0001-1610-474X), 硕士研究生, E-mail: luoziheng22@syau.stu.edu.cn

通讯作者: 姜英(ORCID:0000-0001-6217-9614), 副教授, 主要从事农作制度研究, E-mail: jiangying@syau.edu.cn

hairy vetch (MH), and maize intercropping common vetch (MP), thus five treatments were employed in this study in 2023—2024. The content and storage of soil organic carbon (SOC), easily oxidizable organic carbon (EOC), inactive organic carbon (NLOC), particulate organic carbon (POC) and mineral-associated organic carbon (MAOC) in 0-40 cm soil layer were measured. The distribution ratio of soil organic carbon and soil carbon pool management index (CPMI) were analyzed to reveal the variation characteristics of soil organic carbon content, storage and carbon pool quality under different planting patterns. The results showed that: 1) SOC content and storage of intercropping green manure treatment were 2.27%-26.42% and 0.28%-32.85% higher than CK ($P<0.05$); 2) The content of EOC, NLOC, and MAOC in the CK treatment was 5.68%-54.69%、3.49%-28.89%、1.27%-19.14% lower than that in intercropping green manure treatment ($P<0.05$). The reserves of EOC, NLOC, and MAOC in intercropped green manure treatments were 18.81%-112.98%、0.52%-36.13%、4.84%-29.76% higher than that in CK treatment ($P<0.05$); 3) Compared with CK, intercropping green manure treatment increased EOC/SOC and MAOC/SOC, while MC treatment increased POC/SOC; 4) In the 0-20 cm soil layer, the CPMI of MA treatment was 17.43% higher than that of CK ($P<0.05$). In summary, intercropping green manure measures is an effective measure to increase the organic carbon content of farmland soil and improve the quality of carbon pools in the brown soil area of Northeast China.

Keywords maize; green manure; soil organic carbon; soil carbon pool management index; carbon pool quality

玉米是我国主要的粮食作物,近年来其播种面积保持在粮食播种总面积的35%以上^[1]。作为玉米主产区之一的东北褐土区由于其农业生态系统较为脆弱且种植结构配置不合理,该区域普遍存在土壤质量退化、养分水平偏低等问题^[2-3]。因此,探索高效可持续的种植方式、改善耕地质量成为提升区域农业生产力与保障粮食安全的重要途径。间作是我国传统农业的重要组成部分,具有良好的资源配置潜力,而间作绿肥可以进一步提升农业生产的可持续性,缓解耕地质量退化等问题^[4-5]。在评估土壤质量和碳库变化的研究中,Blair等^[6]提出土壤碳库管理指数(CPMI)能够综合反映不同农田管理措施对土壤碳库数量和质的影响,既可以衡量外界因素对土壤碳固存效率与养分循环潜力,又能揭示其对碳库的调控效果^[7]。因此,针对东北褐土区土壤有机质降低导致的肥力下降问题,深入研究间作绿肥对土壤有机碳(SOC)及其组分的影响机制,对于改善区域土壤养分状况、提升土壤健康水平具有重要的理论意义与实践价值。

当前研究表明,间作绿肥能够促进农田土壤有机碳的积累,对提升土壤有机碳储量具有积极作用,具备一定的增碳潜力^[8-9]。一项Meta分析发现,绿肥还田通过增加有机物料投入,可实现提升土壤有机质含量,为作物生长提供充足的养分^[10]。

不同土壤碳组分对农田管理措施的响应呈现显著异质性,深入探究各组分的变化规律,是揭示间作绿肥影响土壤碳库质量的关键途径^[11]。因此,基于物理、化学及生物分级方法对土壤有机碳组分进行研究,能够更加深入地解析间作绿肥对土壤碳动态的影响过程^[12-13]。根据土壤碳库组分的形成、持久性和功能差异,土壤有机碳可划分为易氧化有机碳(EOC)、非活性有机碳(NLOC)、颗粒有机碳(POC)和矿质结合态有机碳(MAOC)等组分^[14-15]。通过有机碳组分与有机碳含量、储量的变化整合分析,有助于理解间作绿肥对土壤碳库质量的调控途径^[16]。不同种类绿肥在改善土壤碳库方面存在显著差异。研究表明,果树与白豌豆间作显著提高土壤各碳组分含量与土壤有机质含量^[17],种植紫云英有助于增加土壤表层易氧化有机碳含量^[18]。此外,黄璐等^[19]研究发现相较于传统耕作模式,冬小麦夏闲期种植并翻压绿肥土壤养分归还效率更高,且短期内对活性有机碳组分的提升最为明显,豆科与非豆科绿肥在提升土壤有机碳及其组分方面差异显著。可见,豆科绿肥由于其较高的生物固氮能力和较低的碳氮比,对土壤有机碳组分具有显著调控作用,相较非豆科绿肥表现出改土增碳效应优势^[20]。

紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)、毛叶苕子(*Vicia villosa* Roth)、箭筈豌豆(*Vicia sativa* L.)属

于耐旱耐寒型豆科绿肥作物^[21-23],已被证实同禾本科作物间作有利于土壤有机质含量的提升^[24]。然而,现有相关研究多集中于我国西北及南方地区,研究重点主要聚焦土壤综合肥力与作物产量效应,而在东北典型玉米产区,关于间作绿肥对农田土壤碳库组分及碳库管理指数的影响仍缺乏系统研究。本研究拟通过监测东北褐土区不同玉米绿肥种植模式下农田土壤碳库组分变化,揭示其影响土壤有机碳组分含量、储量及碳库管理指数动态规律,以期为该地区玉米绿肥间作模式的推广提供科学依据,并为改善农田土壤碳库质量提供理论和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验区位于辽宁省阜蒙县国家农业环境阜新观测实验站(42°06' N, 121°75' E),该区属温带季风大陆性气候,典型半干旱区,年均气温 7.2 °C,年均降水量 499.5 mm,且 60%~80% 的降水集中在 6—8 月,降水变率较大。试验区地势平坦,土壤为典型褐土,试验前土壤 0~20 cm 土层理化性质:有机质 14.42 g/kg,全氮 0.87 g/kg,速效磷 12.44 mg/kg,速效钾 96.82 mg/kg,土壤容重 1.42 g/cm³,pH 7.57,2023—2024 年作物生育季日均降雨量和气温如图 1 所示。

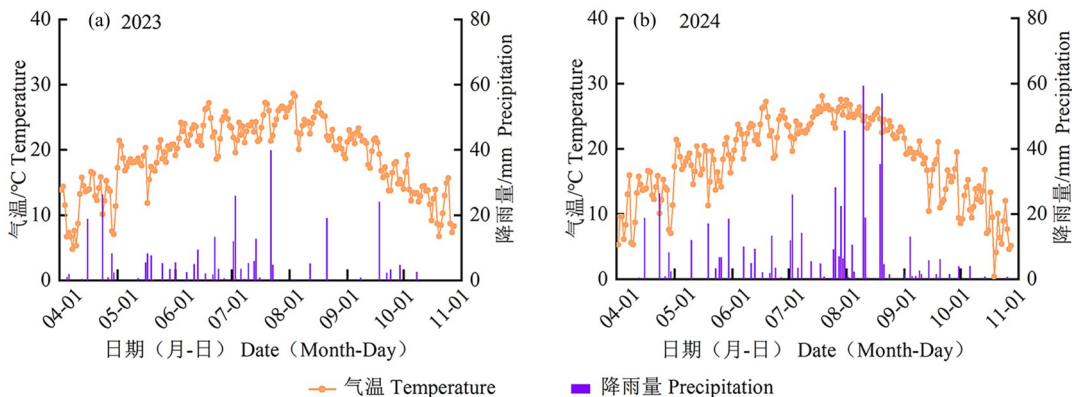


图 1 2023—2024 年作物生育期内降水量及气温

Fig. 1 Precipitation and temperature during crop growing period in 2023—2024

1.2 试验设计

试验设置玉米常规单作(CK)、玉米二比空单作(MC)、玉米 || 紫花苜蓿(MA)、玉米 || 毛叶苕子(MH)、玉米 || 箭筈豌豆(MP)共 5 个种植模式。作物供试品种:玉米为‘东单 1331’、紫花苜蓿为‘中苜 1 号’、毛叶苕子为‘蒙苕 1 号’、箭筈豌豆为‘清水河箭豌’,毛叶苕子与箭筈豌豆品种由内蒙古自治区农牧业科学院资源环境与可持续发展研究所提供。试验采用随机区组设计,单作和间作小区面积均为 36 m²(6 m×6 m),重复 3 次。玉米收获后秸秆全量还田,播种前旋耕起垄,试验区施用复合肥(含 N 17%、P₂O₅ 17%、K₂O 17%)420 kg/hm²;玉米拔节期追施尿素(含 N 46%)280 kg/hm²,绿肥不追肥。人工除草及病虫害防治,作物生育期无灌溉。

CK 处理株距 29.7 cm,行距 50 cm;MC、MA、MH 和 MP 处理采用二比空种植,即种植两行玉米

空一行,并于空行处间作绿肥,玉米与绿肥幅宽比 1:1,行比 2:3,带宽 150 cm,每个小区设重复 4 个自然带。间作系统中玉米株距 19.7 cm,行距 50 cm,绿肥作物种植行距 25 cm。单作与间作模式玉米播种密度均为 6.75 万株/hm²。田间布局示意图如图 2 所示。紫花苜蓿、毛叶苕子及箭筈豌豆的播种量分别为 15、15、60 kg/hm²。玉米于 2023 年 5 月 13 日和 2024 年 5 月 11 日播种,2023 年 9 月 26 日和 2024 年 9 月 24 日收获,间作绿肥处理在绿肥长至 30~40 cm 高度进行适时刈割原位还田。

1.3 样品采集及测定

间作和单作玉米均在小区中间的玉米带,采用 5 点取样法使用土钻取 0~10、10~20、20~30 和 30~40 cm 土层土样,剔除可见的秸秆、根系和杂质后,经自然风干、研磨、过筛后测定 SOC 及其组分含量^[25]。采用重铬酸钾热氧化法测定 SOC 含量^[26],采

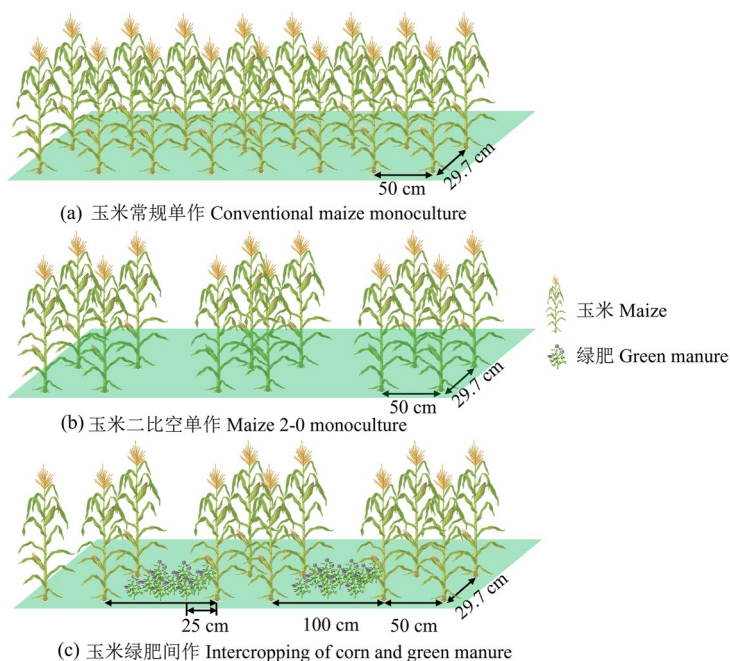


图2 单作和间作处理作物布局示意图

Fig. 2 Schematic diagram of crop planting in mono and intercropping system

用高锰酸钾氧化法测定 EOC 含量,由 SOC 与 EOC 含量之差得出 NLOC 含量^[6]。采用六偏磷酸钠分散法测定 POC 含量,由 SOC 与 POC 含量的差值得出 MAOC 含量^[27]。

1.4 数据计算及统计分析

土壤有机碳储量计算公式为^[28]:

$$SOC_s = SOC_i \times H_i \times BD_i \times 0.1 \quad (1)$$

式中: i 为 0~10、10~20、20~30 和 30~40 cm 土层; SOC_s 为土壤有机碳储量,t/hm²; SOC_i 为第 i 层土壤有机碳含量,g/kg; H_i 为第 i 层土壤厚度,cm; BD_i 为第 i 层土壤容重,g/cm³。

土壤有机碳组分分配比例计算公式为^[29]:

$$F_j = \frac{SOC_j}{SOC} \times 100\% \quad (2)$$

式中: F_j 为土壤有机碳 j 组分的分配比例,%; SOC_j 为土壤有机碳 j 组分含量,g/kg。

以玉米常规单作(CK)土壤为参照土壤,以 EOC 为土壤活性有机碳,进行土壤碳库管理指数的计算^[6]。计算公式如下:

$$CPA = \frac{EOC}{SOC - EOC} \quad (3)$$

$$CPAI = \frac{CPA_j}{CPA_{CK}} \quad (4)$$

式中:CPA(Carbon pool activity)为碳库活性;CPAI

(Carbon pool activity index)为碳库活性指数; CPA_{CK} 为 CK 处理碳库活性; CPA_j 为其他处理碳库活性。

$$CPI = \frac{SOC_n}{SOC_{CK}} \quad (5)$$

式中:CPI(Carbon pool index)为碳库指数; SOC_{CK} 为 CK 处理土壤有机碳含量,g/kg; SOC_n 为其他处理土壤有机碳含量,g/kg。

$$CPMI = CPI \times CPAI \times 100 \quad (6)$$

式中:CPMI(Carbon pool management index)为碳库管理指数,转换系数为 100。

研究数据采用 SPSS 27.0.1 软件进行统计分析,单因素方差分析(One-way ANOVA)采用 LSD 多重比较法分析处理间农田土壤 SOC 储量、土壤有机碳组分含量和土壤碳库管理指数等指标的差异显著性($P < 0.05$),使用 Origin 2021 和 Excel 2019 进行图形和表格绘制。

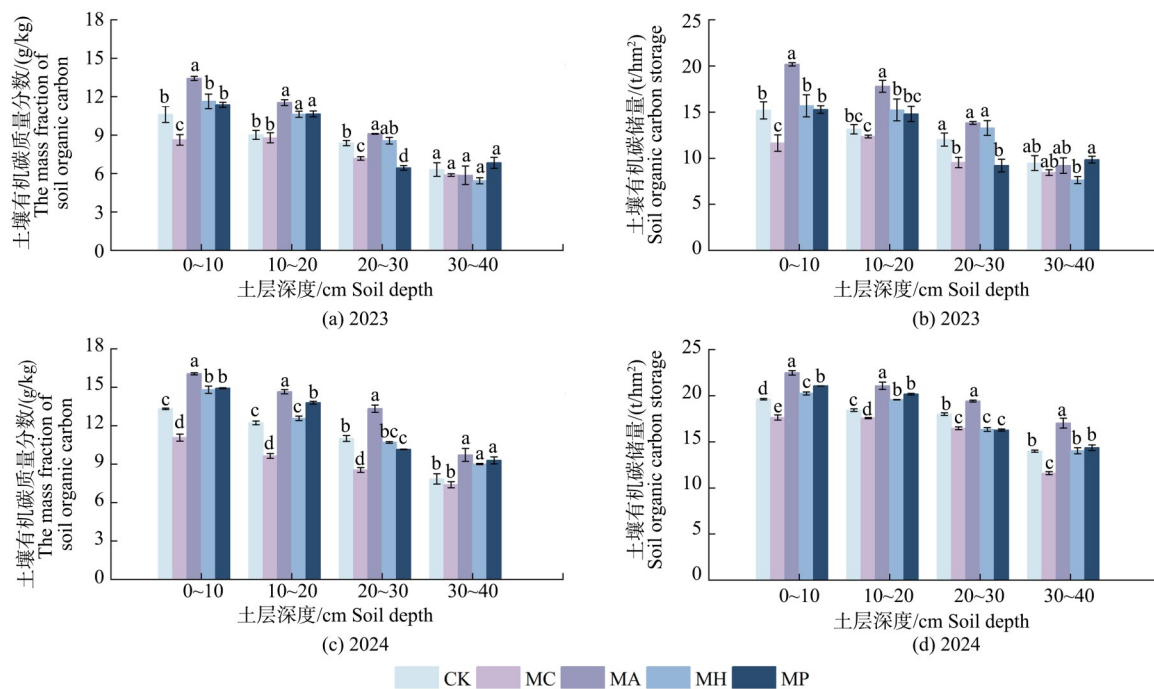
2 结果与分析

2.1 土壤有机碳含量和储量

由图 3 可知,2023 年 MA 处理 SOC 含量和储量较其他处理在 0~10 和 10~20 cm 土层分别增加 4.79%~26.42%、2.75%~27.98% 和 8.54%~32.85%、5.45%~35.52%($P < 0.05$),表明该处理在表层土壤中具有明显的固碳优势,但 MH 和 MP 处理

间差异不显著,说明二者对SOC的影响比较接近。2023年在20~30 cm土层MA和MH处理SOC含量和储量差异不显著,但均显著高于MC和MP处理($P<0.05$),表明MA和MH处理在深层土壤中仍具备一定的增碳能力。2024年间作绿肥处理SOC含量

和储量在0~20 cm土层显著高于MC处理,其中MA处理显著高于MH和MP处理($P<0.05$)。MA处理在20~30 cm土层SOC含量与储量较其他处理高4.79%~23.82%和2.95%~16.21%($P<0.05$),而30~40 cm土层MH和MP处理之间无显著差异。



CK: 玉米常规单作; MC: 玉米二比空单作; MA: 玉米 || 紫花苜蓿; MH: 玉米 || 毛叶苕子; MP: 玉米 || 箭筈豌豆; 不同字母表示同土层有机碳含量或储量在不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

CK: Conventional maize monoculture; MC: Maize 2-0 monoculture; MA: Maize/Alfalfa intercropping; MH: Maize/Hairy vetch intercropping; MP: Maize/Common vetch intercropping. Different letters indicated that soil organic carbon or stocks was significantly different among different treatments within the same soil layer ($P<0.05$). The same below.

图3 玉米绿肥间作对土壤有机碳含量和储量的影响

Fig. 3 Effects of maize-green manure intercropping on SOC content and stocks

2.2 土壤有机碳组分含量及储量

2年间各处理在0~40 cm土层的土壤有机碳组分的含量和储量变化如图4和5所示。2023年,MA处理在0~30 cm土层的EOC、NLOC、POC和MAOC含量分别较CK提高21.48%~35.21%、6.32%~23.68%、14.01%~26.95%和5.27%~26.14%($P<0.05$),表明该处理对各类有机碳组分均具有显著的提升作用;在30~40 cm土层,MP处理的EOC含量较其他处理显著提高20.41%~120.73%($P<0.05$)。2024年,0~20 cm土层中MA、MH与MP处理的各组分含量较CK显著提高3.98%~50.66%($P<0.05$),进一步说明间作绿肥处理有助于促进有机碳组分含量的积累;在20~40 cm土层中,CK处理的各组分含量比MA处理显

著降低13.76%~42.41%($P<0.05$)。

2023年在0~30 cm土层中,MA处理的EOC、NLOC、POC与MAOC储量分别较CK提高18.81%~40.28%、4.84%~14.79%、11.61%~31.62%和6.04%~30.54%($P<0.05$),表明该处理在土壤碳固存方面具备显著优势。2024年在0~20 cm土层中MA、MH与MP处理的各组分储量较CK显著提高5.75%~77.96%($P<0.05$),说明间作绿肥处理均有助于耕层土壤有机碳组分储量的提升;在20~40 cm土层中,CK处理的各组分储量均显著低于MA处理($P<0.05$)。

2.3 土壤有机碳组分分配比例

通过分析各碳组分在SOC中的占比情况可知,不同种植模式处理显著影响0~40 cm土壤有机碳组分在总有机碳的分配比例(图6, $P<0.05$)。

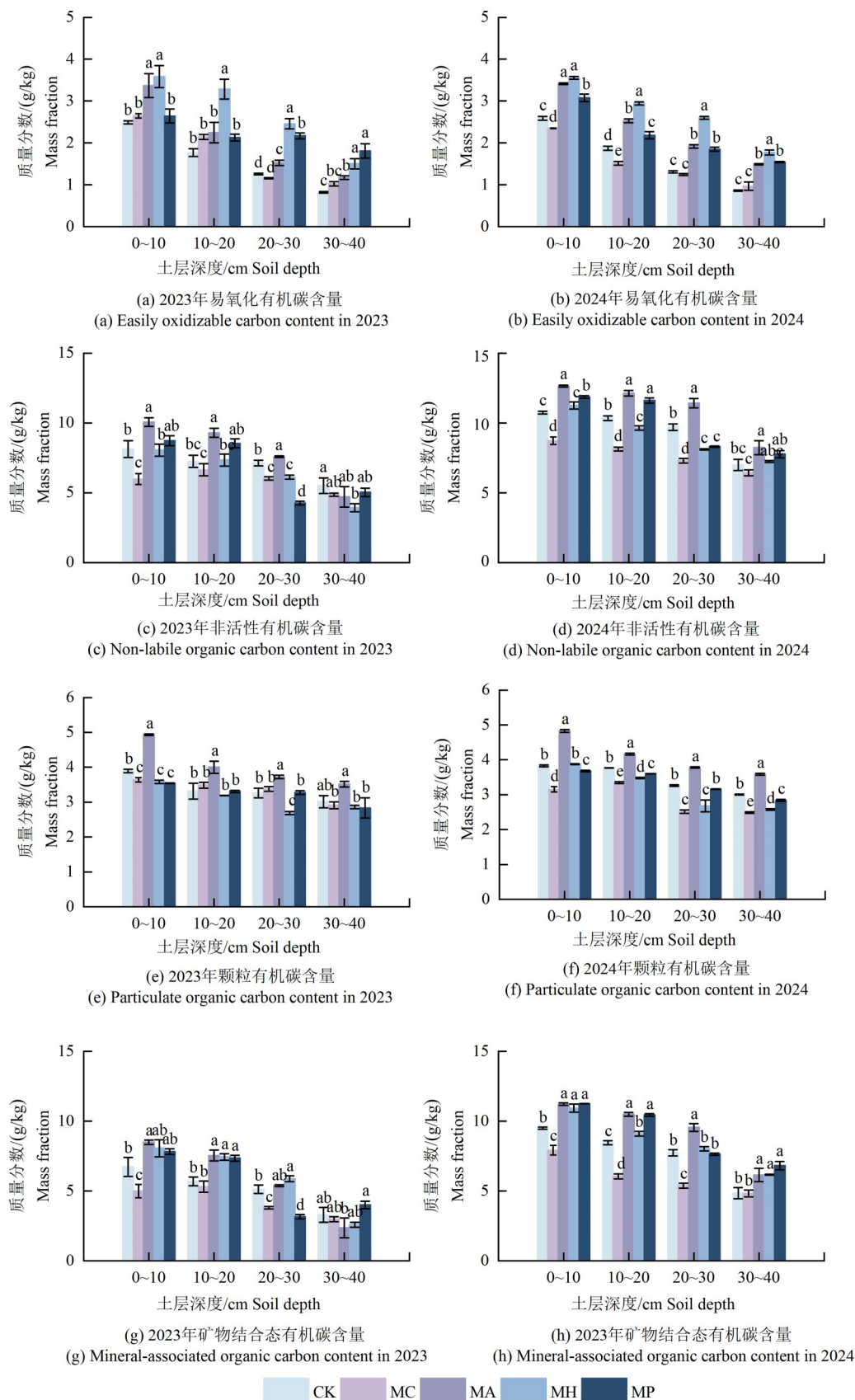


图4 玉米绿肥间作对土壤有机碳组分含量的影响

Fig. 4 Effect of maize-green manure intercropping on SOC fractions content

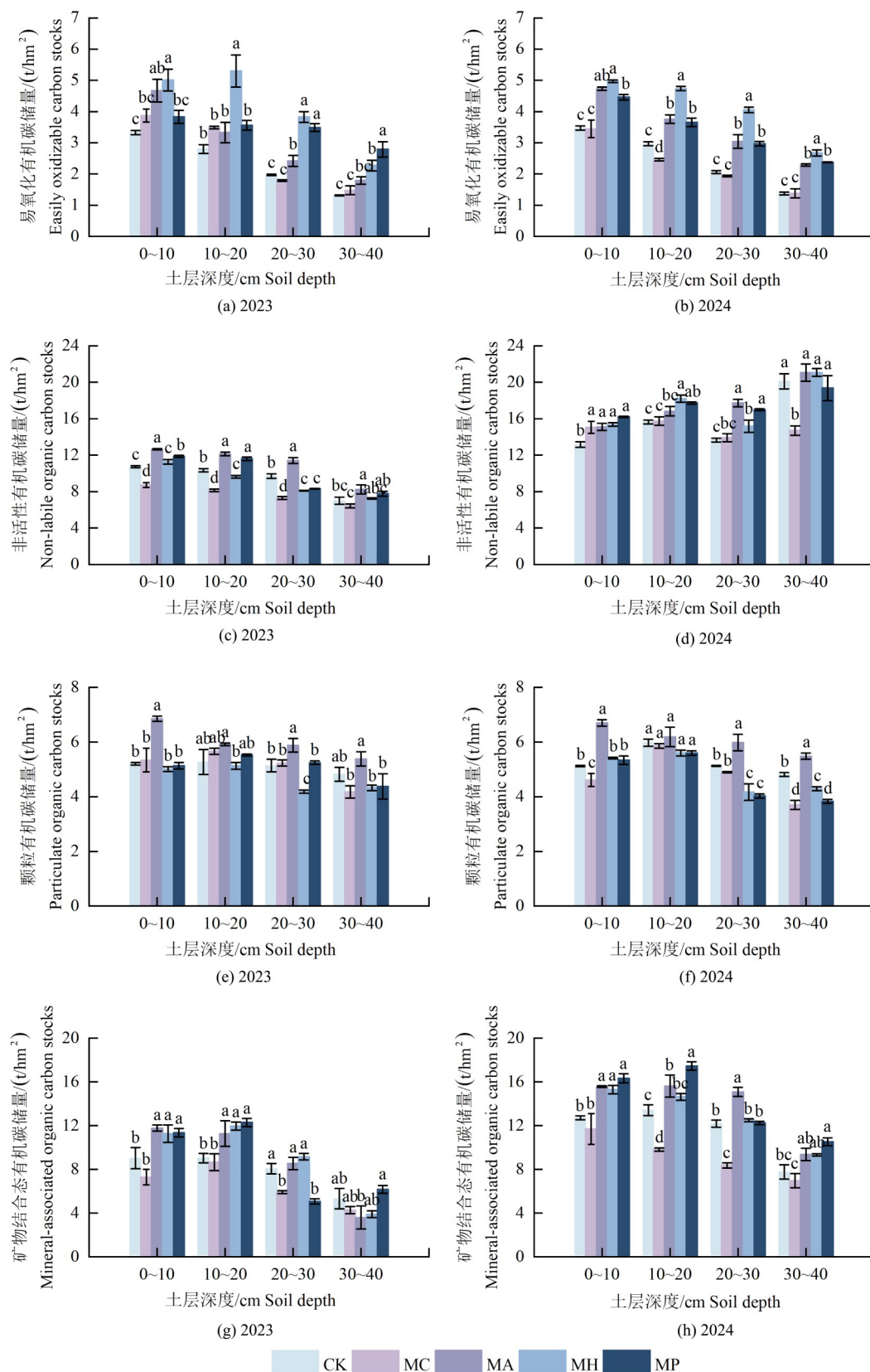
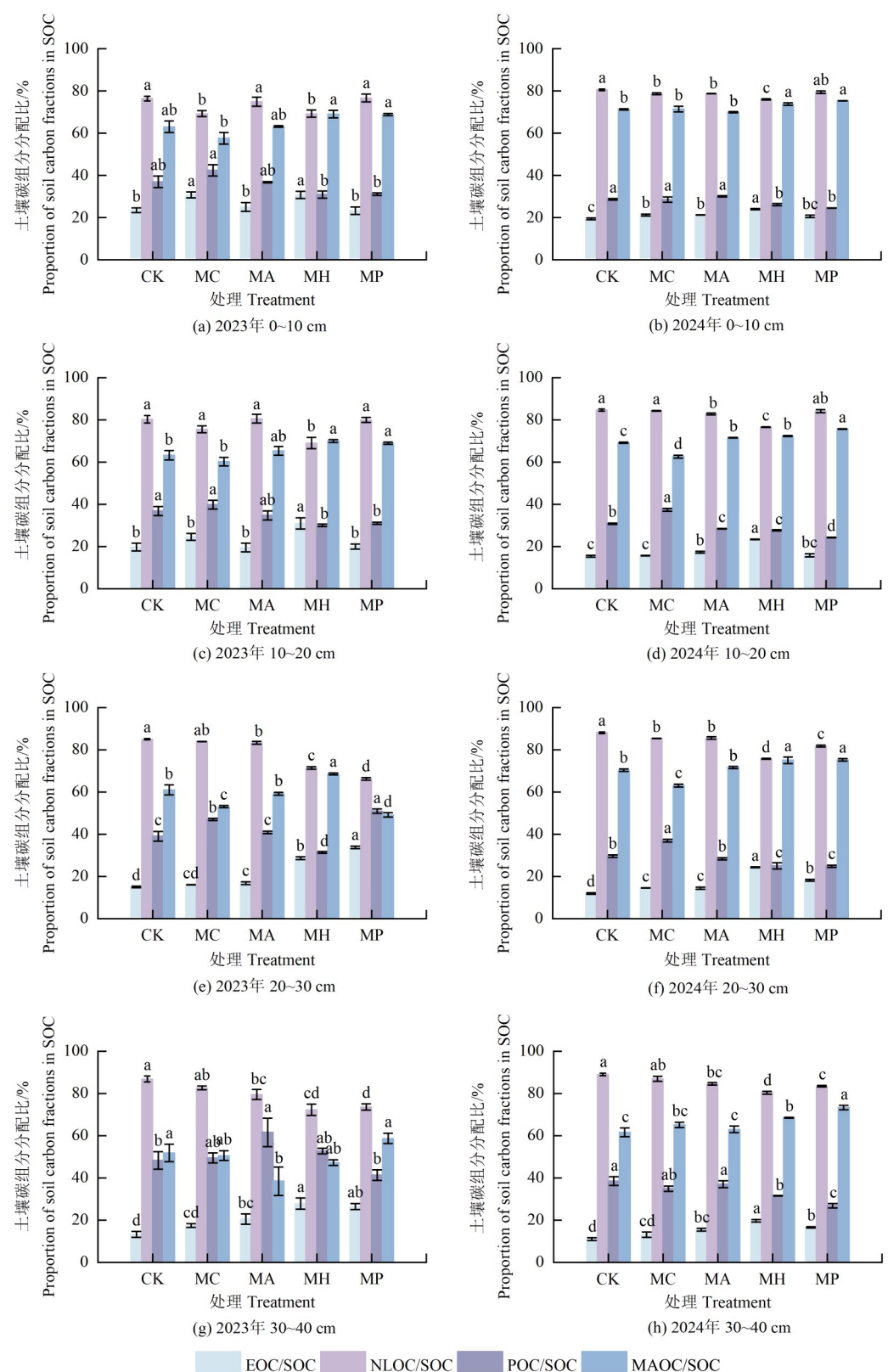


图 5 玉米绿肥间作对土壤有机碳各组分储量的影响

Fig. 5 Effect of maize-green manure intercropping on SOC fractions stocks



EOC:土壤易氧化有机碳;NLOC:土壤非活性有机碳;POC:土壤颗粒态有机碳;MAOC:土壤矿物结合态有机碳。下同。
EOC: Soil easily oxidizable organic carbon; NLOC: Soil non-labile organic carbon; POC: Soil particulate organic carbon;
MAOC: Soil mineral-associated organic carbon. The same below.

图6 玉米绿肥间作对土壤各组分有机碳分配比例的影响
Fig. 6 Effects of maize-green manure intercropping on the proportion of soil organic carbon fractions in SOC

2023 年,在 0~20 cm 土层中,MH 和 MP 处理较 CK 的 MAOC/SOC 比例显著提升,而 POC/SOC 比例显著降低($P<0.05$),表明 2 种处理均有助于促进有机碳向更为稳定的矿物结合态转化;在 20~40 cm 土层 MA、MH 和 MP 处理的 EOC/SOC 比例显著高于 CK,而 NLOC/SOC 比例则显著低于 CK ($P<0.05$),说明间作绿肥处理在深层土壤中增加了碳库的活性组分比例。2024 年在 0~40 cm 土层中,CK 处理的 POC/SOC 比例较 MA、MH 和 MP 处理显著提高 3.92%~43.76% ($P<0.05$),表明常规单作处理能够促进 POC 的积累,但其周转速率较快,稳定性较低;MH 处理的 EOC/SOC 较其他处理显著提高 12.75%~52.53%,NLOC/SOC 较其他

处理显著降低 3.48%~14.04% ($P<0.05$);MP 处理的 MAOC/SOC 分别比其他处理高 0.33%~20.93% ($P<0.05$),表明间作箭筈豌豆在促进有机碳向矿物结合态转化方面具有显著作用,有助于稳定碳库结构的形成。

2.4 土壤碳库管理指数

2023 和 2024 年 0~40 cm 土层不同处理的土壤碳库活度、碳库指数、碳库活度指数和碳库管理指数表现出显著差异,间作绿肥处理(MA、MH 和 MP)显著提升 0~40 cm 土层的 CPI 和 CPMI(表 1, $P<0.05$)。2023 年,在 10~20 cm 土层 MA 处理的 CPI 较其他处理显著提高 8.47%~31.96% ($P<0.05$);MH 处理在 0~20 cm 土层的 CPAI 较 CK 增

表 1 2023 和 2024 年玉米绿肥间作对土壤碳库管理指数的影响

Table 1 Effects of maize-green manure intercropping on soil carbon pool management index in 2023—2024

土层深度/cm Soil layer	处理 Treatment	碳库活度 Carbon pool activity		碳库指数 Carbon pool index		碳库活度指数 Carbon pool activity index		碳库管理指数 Carbon pool management index	
		2023	2024	2023	2024	2023	2024	2023	2024
0~10	CK	0.31b	0.24c	1.00b	1.00c	1.00b	1.00c	100.00c	100.00b
	MC	0.44a	0.27b	0.81c	0.83d	1.44a	1.12b	56.38e	74.39d
	MA	0.33b	0.27b	1.27a	1.20a	1.09b	1.12b	117.19a	107.72a
	MH	0.44a	0.32a	1.10b	1.11b	1.44a	1.31a	76.19d	84.95c
	MP	0.31b	0.26b	1.07b	1.12b	0.98b	1.07b	109.17b	104.4ab
10~20	CK	0.25b	0.18c	1.00c	1.00c	1.00c	1.00c	100.00c	100.00b
	MC	0.33b	0.19c	0.97c	0.79d	1.33b	1.03c	73.59d	76.85c
	MA	0.24b	0.21b	1.28a	1.20a	0.98c	1.15b	130.73a	104.12a
	MH	0.45a	0.30a	1.18b	1.03c	1.83a	1.69a	64.65d	61.05d
	MP	0.25b	0.19c	1.18b	1.13b	1.02c	1.04c	116.33b	108.79ab
20~30	CK	0.18c	0.14d	1.00a	1.00b	1.00c	1.00d	100.00a	100.00a
	MC	0.19c	0.17c	0.86b	0.78d	1.09c	1.27c	78.90b	61.43b
	MA	0.20c	0.17c	1.09a	1.21a	1.14c	1.24c	95.36a	97.50a
	MH	0.40b	0.32a	1.02a	0.97b	2.28b	2.37a	44.98c	41.06d
	MP	0.51a	0.22b	0.77b	0.92c	2.89a	1.65b	26.78d	56.07c
30~40	CK	0.15d	0.12d	1.00ab	1.00b	1.00c	1.00d	100.00a	100.00a
	MC	0.21cd	0.15cd	1.07ab	0.95b	1.41bc	1.21c	75.87b	78.54b
	MA	0.26bc	0.18bc	0.90b	1.24a	1.70b	1.48b	53.26c	83.96b
	MH	0.39a	0.25a	1.10ab	1.15a	2.54a	1.98a	43.13d	58.36c
	MP	0.36ab	0.20b	1.17a	1.19a	2.40a	1.61b	49.03cd	74.04b

注:CK:玉米常规单作;MC:玉米二比空单作;MA:玉米||紫花苜蓿;MH:玉米||毛叶苕子;MP:玉米||箭筈豌豆;不同小写字母代表处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

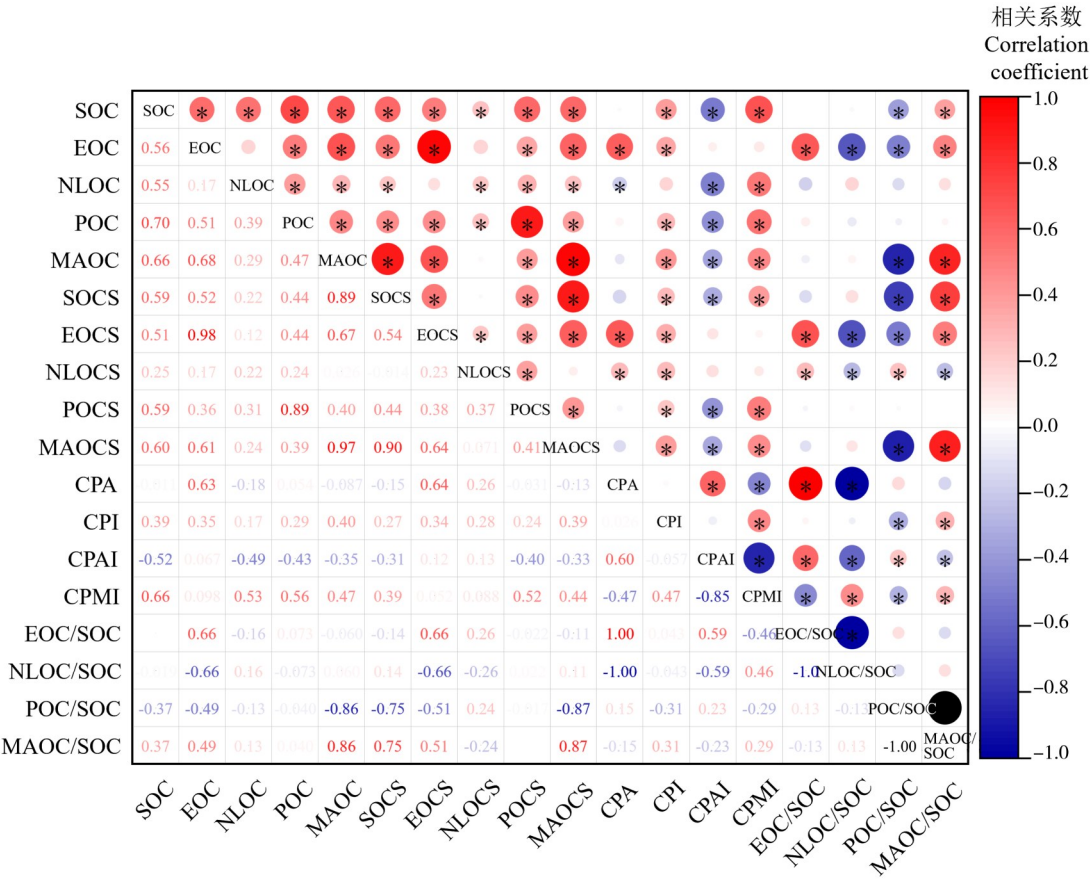
Note: CK: Conventional maize monoculture; MC: Maize 2-0 monoculture; MA: Maize/Alfalfa intercropping; MH: Maize/Hairy vetch intercropping; MP: Maize/Common vetch intercropping. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

加了33.33%~83.00% ($P<0.05$),说明常规单作处理的碳库活度显著低于间作绿肥处理;MA处理在0~20 cm土层的CPMI较CK显著提高4.40%~7.72% ($P<0.05$),表明其有助于提升耕层土壤的碳库质量。2024年,0~20 cm土层MA处理的CPA较CK增加12.50%~16.67% ($P<0.05$);MH处理在0~20 cm土层的CPAI较其他处理高16.96%~69.00% ($P<0.05$);MA和MP处理在0~20 cm土层的CPMI较CK分别提高4.40%~7.72%、4.12%~8.79% ($P<0.05$),说明间作紫花苜蓿和箭筈豌豆处理的碳库质量明显高于常规单作处理。总体看,MA、MH和MP处理较CK处理增加了土壤0~40 cm土层的CPA和20~40 cm土层的

CPAI,减少了20~40 cm土层的CPMI($P<0.05$)。

2.5 土壤有机碳组分与土壤碳库管理指数的相关性

土壤有机碳组分与碳库管理指数的相关分析结果表明(图7),CPA与EOC、EOCS呈显著正相关,表明土壤碳库的活性程度主要受活性有机碳组分含量的影响;CPI(除NLOC)和CPMI(除EOC、EOCS、NLOCS)与其他土壤有机碳组分、储量呈显著正相关($P<0.05$)。相反,CPAI对土壤有机碳组分(SOC、NLOC、POC、MAOC)和储量(SOCS、POCS、MAOCS)普遍表现出显著负相关关系($P<0.05$),说明较高的土壤碳库活性能够导致有机碳组分储量的降低。



SOCs:土壤有机碳储量;EOCS:土壤易氧化有机碳储量;NLOCS:土壤非活性有机碳储量;POCS:土壤颗粒态有机碳储量;MAOCS:土壤矿物结合态有机碳储量。红色和蓝色分别代表正相关和负相关程度,图中数字和圆形大小代表相关系数水平。*表示在 $P<0.05$ 水平显著。

SOCs: Soil organic carbon stocks; EOCS: Soil easily oxidizable organic carbon stocks; NLOCS: Soil non-labile organic carbon stocks; POCS: Soil particulate organic carbon stocks; MAOCS: Soil mineral-associated organic carbon stocks. Red and blue color represent positive and negative correlation, respectively, the number and size of circle in the figure represent the correlation coefficient. * represents significant difference at the 0.05 level.

图7 土壤有机碳组分与碳库管理指数的相关性

Fig. 7 Correlation between soil organic carbon fractions and carbon pool management index

3 讨 论

3.1 玉米绿肥间作对 SOC 含量及储量的影响

作为土壤肥力的关键决定因素和生态系统功能的重要组成部分, SOC 具有保持土壤健康、促进土壤微生物活性和维持生态多样性等多重功能^[6]。因此, 提升土壤有机碳水平成为有效应对土壤退化、改善土壤健康和促进可持续农业生产的关键途径^[30]。本研究结果表明, 间作紫花苜蓿、毛叶苕子及箭筈豌豆处理(MA、MH 和 MP) 0~40 cm 土层土壤有机碳储量比玉米常规单作平均提高 19.10%, 这可能由于间作绿肥通过增加根系分泌物的输入、加快有机碳循环并改善土壤结构, 显著增强了 SOC 的积累能力^[31], 而该理由在本研究有待于被进一步证实。本研究表明, 间作绿肥能够提高土壤有机碳组分含量进而促进 SOC 的积累, 这与管彤彤等^[32]研究结果一致; 同时间作绿肥显著提高了 EOC/SOC 的分配比例, 由于 EOC 是土壤中最具生物活性的碳库部分, 其增加表明微生物可利用碳源的增加, 有利于提高微生物对有机底物的分解与转化能力, 促进有机碳在土壤中的循环与积累^[33], 与陈虹等^[34]研究结果一致。在此过程中, 部分有机碳被转化为较高分子量和结构稳定性的腐殖质及腐植酸类物质, 推动土壤有机碳的积累。此外, 本研究结果表明, 间作绿肥处理提升了 MAOC 水平及 MAOC/SOC 的比例, 这一结果与已有研究结果一致^[35], 可能是由于绿肥根际释放的有机分子可与土壤中的铁、铝等金属化合物发生络合或吸附反应, 进而形成相对稳定的 MAOC, 该过程显著增强了 SOC 的结合强度与空间稳定性, 且在酸性环境中表现出更强的碳固持潜力, 从而系统提升了 SOC 含量^[35]。

3.2 玉米绿肥间作对 SOC 组分含量及分配比例的影响

前人研究表明, 间作绿肥对 SOC 各组分的动态积累和空间分布规律具有显著影响, 其内在效应主要体现在提升碳周转速率、土壤碳库质量与扩容潜力, 这一过程通过驱动不同碳组分的积累与提高活性有机碳组分比例实现^[36-37]。本研究发现, 两季试验中 MH 和 MP 处理有显著提升 20~40 cm 土层 EOC/SOC 比例水平的现象, MH 处理在 0~20 cm 土层也表现出较高水平的 EOC/SOC, 说明间作绿肥系统显著促进活性有机碳组分的积累。研究表

明, EOC 作为微生物代谢的优先底物, 其含量的增加表明土壤碳的有效性得到了提升; 而 NLOC 则是较为惰性的碳库, 其含量的增加可能与绿肥作物根系分泌的木质素类难降解物质积累密切相关^[38]。间作绿肥并还田可通过增加植物残体归还量和根系分泌物的输入, 使得 EOC 和 NLOC 含量和储量对种植模式产生差异响应, 进一步表明较传统单作玉米种植模式土壤固碳潜力与碳库质量具有显著差异^[39]。此外, POC 作为游离态且易降解的高活性碳组分, 主要来源于植物凋落物和根系分泌物。在间作绿肥系统中, 绿肥地上部的植物生物量翻压以及地下根系持续释放的有机物为 POC 的形成提供了充足的碳源^[40]。这一过程可通过活性碳库的快速周转, 增强了土壤碳的短期固存能力, 从而显著提高了 POC 的含量和 POC/SOC 比值, 而玉米单作长期依赖化肥且缺乏有机物料的输入, 导致土壤中的 POC 含量显著下降^[41]。本研究中仅 MA 处理显著提升了 POC 的储量, 间作绿肥处理显著增加了 MAOC 储量及 MAOC/SOC 占比水平。MAOC 作为通过化学键与土壤矿物结合的稳定碳库, 其周转周期较长, MAOC 的稳定性对土壤碳的长期储存起到了重要作用, 与微生物残体转化密切相关^[42]。这从另一角度说明间作绿肥能够通过影响土壤稳定碳库组分, 而其中涉及的微生物残体碳的续埋效应机制有待深入研究。

3.3 玉米绿肥间作对土壤碳库管理指数的影响

土壤碳库管理指数是一种基于土壤碳库动态特征的综合性评价指标, 通过量化人为干扰条件下土壤碳库和碳库活度两方面的指标, 系统表征外源驱动因子对土壤总有机碳库储量与其活性组分分配的调控效应, 从而揭示土壤质量的变化特征^[43]。该指数与土壤碳库质量呈显著正相关, 值越大表明土壤碳库质量越高。本研究结果表明, 间作绿肥普遍提高了 CPAI 水平, 间作绿肥可能通过提供额外的有机物质输入, 增加了土壤中微生物的生物量和活动性, 进而导致 CPAI 水平提高, 反映出土壤碳更高的矿化活性和微生物更强的代谢能力。另一方面, 2 年间 MA 和 MP 处理在 0~20 cm 土层均表现出通过增加活性碳组分的比例, 进而提升 CPMI 水平。汪景宽等^[44]研究也表明, 绿肥作物的根系分泌物和残体输入所提供的碳源能够通过激发效应增强土壤微生物代谢活性, 促进活性碳的周转过程,

进而提高CPMI。绿肥作物通过其根系分泌物、植物残体分解和微生物群落的相互作用,增强了土壤有机碳的矿化过程,丰富了土壤中的碳源,值得进一步系统研究阐明间作绿肥影响农田土壤碳库周转的作用机制。此外,相关分析表明SOC组分含量及储量与CPMI存在显著的正相关关系,表明玉米间作绿肥可能通过增加活性碳组分比例,优化土壤碳库的结构,最终改善土壤的碳库稳定性和质量^[45]。

4 结 论

与玉米单作相比,在东北褐土区进行玉米宽窄行种植宽行间作绿肥能够提升土壤有机碳含量及储量,并提高土壤碳库管理指数。综合比较紫花苜蓿、毛叶苕子和箭筈豌豆这3种绿肥的间作效应,玉米宽窄行种植间作紫花苜蓿能够在一定程度上增加土壤有机碳含量,提高土壤碳库的稳定性,改善土壤碳库质量。

参考文献 References

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2024
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China Statistical Yearbook*[M]. Beijing: China Statistical Press, 2024 (in Chinese)
- [2] 白伟, 孙占祥, 郑家明, 刘洋, 侯志研, 冯良山, 杨宁. 辽西地区土壤耕层及养分状况调查分析[J]. 土壤, 2011, 43(5): 714-719
Bai W, Sun Z X, Zheng J M, Liu Y, Hou Z Y, Feng L S, Yang N. Soil plough layers and soil nutrients in western Liaoning[J]. *Soils*, 2011, 43(5): 714-719 (in Chinese)
- [3] 张凯. 辽西褐土耕层结构障碍因素分析及其耕作培肥措施研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016
Zhang K. Analysis of factors in cinnamon topsoil structure and the research on the measures of tillage and fertilizing [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016 (in Chinese)
- [4] 罗跃, 张久东, 周国朋, 常单娜, 高嵩涓, 包兴国, 车宗贤, 朱青, 曹卫东. 河西绿洲灌区间作绿肥及其不同利用方式对玉米产量及土壤肥力的提升效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(3): 402-413
Luo Y, Zhang J D, Zhou G P, Chang D N, Gao S J, Bao X G, Che Z X, Zhu Q, Cao W D. Intercropping maize with green manure crops at various utilization patterns improves maize yield and soil fertility in Hexi Oasis irrigated area[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(3): 402-413 (in Chinese)
- [5] 刘博. 间作不同豆科绿肥对玉米生长与土壤水分养分的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023
Liu B. Effects of intercropping different leguminous green manure on maize growth and soil moisture and nutrients [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023 (in Chinese)
- [6] Blair G J, Lefroy R, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 1459-1466
- [7] 卢恒, 程旭, 罗梦琦, 贾舟, 钟自勉, 章力干, 刘兆辉, 吴祥为, 李硕. 缓释氮肥减量替代对水稻-小麦/紫云英轮作土壤有机碳组分、碳库管理指数及经济效益的影响[J/OL]. 中国生态农业学报(中英文), 2025: 1-13 [2025-08-21]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=ZGTN20250821001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
Lu H, Cheng X, Luo M Q, Jia Z, Zhong Z M, Zhang L G, Liu Z H, Wu X W, Li S. Effects of slow-release nitrogen fertilizer reduction substitution on soil organic carbon fractions, carbon pool management index and economic benefits in rice - wheat/Chinese milk vetch rotation systems[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2025: 1-13 [2025-08-21]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=ZGTN20250821001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ> (in Chinese)
- [8] 张曦慧, 车宗贤, 张久东. 玉米间作绿肥对土壤呼吸及土壤有机碳的影响[J]. 国土与自然资源研究, 2021(4): 75-79
Zhang X H, Che Z X, Zhang J D. Effects of inter-cropped corn with green manures on soil respiratory rates and soil organic carbon[J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2021(4): 75-79 (in Chinese)
- [9] Ablimit R, Li W K, Zhang J D, Gao H N, Zhao Y M, Cheng M M, Meng X Q, An L Z, Chen Y. Altering microbial community for improving soil properties and agricultural sustainability during a 10-year maize-green manure intercropping in Northwest China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 321: 115859
- [10] Liang K L, Wang X Q, Du Y T, Li G M, Wei Y Q, Liu Y Z, Li Z Y, Wei X M. Effect of legume green manure on yield increases of three major crops in China: A meta-analysis[J]. *Agronomy*, 2022, 12(8): 1753
- [11] von Lützow M, Kögel-Knabner I, Ekschmitt K, Flessa H, Guggenberger G, Matzner E, Marschner B. SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(9): 2183-2207
- [12] 黄雅楠. 绿肥还田下有机碳与矿物的结合特征及团聚体稳定性[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023
Huang Y N. The combined characteristics of soil organic carbon and minerals with aggregate stability under green manure returning [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023 (in Chinese)
- [13] Plaza-Bonilla D, Álvaro-Fuentes J, Cantero-Martínez C. Identifying soil organic carbon fractions sensitive to agricultural management practices[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 139: 19-22
- [14] Bongiorno G, Bünemann E K, Oguejiofor C U, Meier J, Gort G, Comans R, Mäder P, Brussaard L, de Goede R. Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 99: 38-50
- [15] Singh S, Nouri A, Singh S, Anapalli S, Lee J, Arelli P, Jagadamma S. Soil organic carbon and aggregation in response to thirty-nine years of tillage management in the southeastern US[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 197: 104523
- [16] Li Y, Li Z, Cui S, Liang G P, Zhang Q P. Microbial-derived carbon components are critical for enhancing soil organic carbon in no-tillage croplands: A global perspective[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 205: 104758
- [17] 陈利云, 汪之波, 呼丽萍. 6种豆科绿肥植物与苹果树套种对果园土壤碳氮特征的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(4): 671-676
Chen L Y, Wang Z B, Hu L P. Effects of interplanting six leguminous green

- manure plants in apple orchard on soil carbon and nitrogen characteristics[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(4): 671-676 (in Chinese)
- [18] 周兴, 廖育林, 鲁艳红, 谢坚, 杨曾平, 聂军, 曹卫东. 肥料减施条件下水稻土壤有机碳组分对紫云英-稻草协同利用的响应[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 283-290
- Zhou X, Liao Y L, Lu Y H, Xie J, Yang Z P, Nie J, Cao W D. Responses of contents of soil organic carbon fractions to Chinese milk vetch-rice straw synergistic dispatching under the condition of reducing fertilizer application [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(3): 283-290 (in Chinese)
- [19] 黄璐, 李廷亮, 李顺, 吕卓呈, 王嘉豪. 旱地冬小麦休闲期种植不同豆科绿肥对还田养分和土壤有机碳、氮组分的影响[J]. 生态学杂志, 2022, 41(12): 2335-2343
- Huang L, Li T L, Li S, Lyu Z C, Wang J H. Effects of planting legume green manure crops in summer fallow period of dryland winter wheat on nutrient returning, soil organic carbon and nitrogen components[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(12): 2335-2343 (in Chinese)
- [20] Hu Q J, Jiang T, Thomas B W, Chen J, Xie J, Hu Y X, Kong F M, Yang Y Y, Chen X P, Zhang Y T, Shi X J. Legume cover crops enhance soil organic carbon via microbial necromass in orchard alleyways[J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 234: 105858
- [21] 王鑫, 马永祥, 李娟. 紫花苜蓿营养成分及主要生物学特性[J]. 草业科学, 2003(10): 39-41
- Wang X, Ma Y X, Li J. Fat-breeding effects of full-grazing Turkey on regressed grassland[J]. *Pratacultural Science*, 2003(10): 39-41 (in Chinese)
- [22] 张成兰, 刘春增, 李本银, 张梦, 吕玉虎, 陈雪青, 曹卫东. 不同施肥条件下毛叶苕子的腐解及养分释放特征[J]. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2275-2283
- Zhang C L, Liu C Z, Li B Y, Zhang M, Lyu Y H, Chen X Q, Cao W D. The characteristics of decomposition and nutrient release of *Vicia villosa* under different fertilization treatments[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(7): 2275-2283 (in Chinese)
- [23] 韩梅, 张宏亮, 郭石生, 曹卫东, 刘雪莲. 绿肥作物箭筈豌豆种质产量性状综合评价[J]. 作物杂志, 2013(4): 67-69
- Han M, Zhang H L, Guo S S, Cao W D, Liu X L. Germplasm evaluation for yield in *Vicia sativa* L[J]. *Crops*, 2013(4): 67-69 (in Chinese)
- [24] 黄蝶, 鲁洪智, 丁瑞, 姜华. 青贮玉米与绿肥作物间作对土壤理化性状和微生物的影响[J]. 云南农业大学学报: 自然科学, 2025, 40(3): 131-137
- Huang D, Lu H Z, Ding R, Jiang H. Effect of intercropping silage corn with green manure crops on soil physicochemical properties and microbial communities[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University: Social Science*, 2025, 40(3): 131-137 (in Chinese)
- [25] Ellert B H, Bettany J R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1995, 75(4): 529-538
- [26] 陈寒, 南运有, 董勇杰, 王晓丽, 邵娟, 张欢欢, 樊志龙, 柴强, 殷文, 胡发龙. 不同施氮量下玉米氮素利用对间作豆科绿肥的响应[J]. 灌溉排水学报, 2025, 44(9): 37-48
- Chen H, Nan Y Y, Dong Y J, Wang X L, Shao J, Zhang H H, Fan Z L, Chai Q, Yin W, Hu F L. Effects of intercropped leguminous green manure on maize nitrogen use of maize under different nitrogen fertilizations[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2025, 44(9): 37-48 (in Chinese)
- [27] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3): 777-783
- [28] 姜勇, 张玉革, 梁文举, 闻大中. 潮棕壤不同利用方式有机碳剖面分布及碳储量[J]. 中国农业科学, 2005, 38(3): 544-550
- Jiang Y, Zhang Y G, Liang W J, Wen D Z. Profile distribution and storage of soil organic carbon in an aquic brown soil as affected by land use[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(3): 544-550 (in Chinese)
- [29] 唐国勇, 李昆, 孙永玉, 张春华. 干热河谷不同利用方式下土壤活性有机碳含量及其分配特征[J]. 环境科学, 2010, 31(5): 1365-1371
- Tang G Y, Li K, Sun Y Y, Zhang C H. Soil labile organic carbon contents and their allocation characteristics under different land uses at dry-hot valley [J]. *Environmental Science*, 2010, 31(5): 1365-1371 (in Chinese)
- [30] 全紫曼, 漆燕, 周泽弘, 莫坤, 韩文斌, 梁琴. 山黧豆还田与氮肥减施对稻田土壤活性有机碳组分及酶活性的影响[J]. 草业科学, 2024, 41(5): 1057-1067
- Quan Z M, Qi Y, Zhou Z H, Mo K, Han W B, Liang Q. Effects of Lathyrus sativus return to the field and nitrogen rate reduction on paddy soil labile organic carbon and soil enzyme activities[J]. *Pratacultural Science*, 2024, 41(5): 1057-1067 (in Chinese)
- [31] Yang X, Meng J, Lan Y, Chen W F, Yang T X, Yuan J, Liu S N, Han J. Effects of maize stover and its biochar on soil CO₂ emissions and labile organic carbon fractions in Northeast China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 240: 24-31
- [32] 管彤彤, 张燕, 陶海宁, 董秀, 沈禹颖. 绿肥还田对土壤有机碳组分及碳转化酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2024, 57(14): 2791-2802
- Guan T T, Zhang Y, Tao H N, Dong X, Shen Y Y. Effects of green manure return on soil organic carbon component and carbon invertase enzyme activities[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(14): 2791-2802 (in Chinese)
- [33] 向蕊, 伊文博, 赵薇, 王顶, 赵平, 龙光强, 汤利. 间作对土壤团聚体有机碳储量的影响及其氮调控效应[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 303-308
- Xiang R, Yi W B, Zhao W, Wang D, Zhao P, Long G Q, Tang L. Effects of intercropping on soil aggregate-associated organic carbon storage and nitrogen regulation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(5): 303-308 (in Chinese)
- [34] 陈虹, 唐昊治, 郭家欢, 潘畅, 王如海, 吴永红, 俞元春. 根系分泌物主要作用及解析技术进展[J]. 土壤, 2023, 55(2): 225-233
- Chen H, Tang H Y, Guo J H, Pan C, Wang R H, Wu Y H, Yu Y C. Root exudates' roles and analytical techniques progress[J]. *Soils*, 2023, 55(2): 225-233 (in Chinese)
- [35] 张维理, KOLBE H, 张认连. 土壤有机碳作用及转化机制研究进展[J]. 中国农业科学, 2020, 53(2): 317-331
- Zhang W L, Kolbe H, Zhang R L. Research progress of SOC functions and transformation mechanism[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(2): 317-331 (in Chinese)
- [36] 曹卫东, 周朋朋, 高嵩涓. 绿肥内源驱动土壤健康的作用与机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(7): 1274-1283
- Cao W D, Zhou G P, Gao S J. Effects and mechanisms of green manure on endogenous improving soil health [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(7): 1274-1283 (in Chinese)
- [37] Su G, Zhao R, Wang Y Z, Yang Y A, Wu X D, Wang J L, Ge J Z. Green manure return strategies to improve soil properties and spring maize productivity under nitrogen reduction in the North China Plain [J]. *Agronomy*, 2022, 12(11): 2734
- [38] Zhou G P, Chang D N, Gao S J, Liang T, Liu R, Cao W D. Co-incorporating leguminous green manure and rice straw drives the synergistic release of carbon and nitrogen, increases hydrolase activities, and changes the composition of main microbial groups[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2021, 57(4): 547-561
- [39] Zhou G P, Li G L, Liang H, Liu R, Ma Z B, Gao S J, Chang D N, Liu J, Chadwick D R, Jones D L, Cao W D. Green manure coupled with straw

- returning increases soil organic carbon via decreased priming effect and enhanced microbial carbon pump[J]. *Global Change Biology*, 31(5), 2025, e70232
- [40] 何伟, 王会, 韩飞, 胡国庆, 娄燕宏, 宋付朋, 潘红, 魏猛, 诸葛玉平. 长期施用有机肥显著提升潮土有机碳组分[J]. *土壤学报*, 2020, 57(2): 425-434
He W, Wang H, Han F, Hu G Q, Lou Y H, Song F P, Pan H, Wei M, Zhuge Y P. Effect of long-term application of organic manure expanding organic carbon fractions in fluvo-aquic soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(2): 425-434 (in Chinese)
- [41] 肖可青, 李心男, 邢稳, 冯孟熙, 张铭, 赵瑶, 朱永官. 土壤“矿物碳泵(MnCP)”介导有机碳的固存与稳定机制[J]. *土壤学报*, 2025, 62(3): 595-609
Xiao K Q, Li X N, Xing W, Feng M X, Zhang M, Zhao Y, Zhu Y G. Mechanisms of organic carbon sequestration and stabilization mediated by the soil “mineral carbon pump (MnCP)”[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62(3): 595-609 (in Chinese)
- [42] Zhao X P, Hao C K, Zhang R Q, Jiao N Y, Tian J, Lambers H, Liang C, Cong W F, Zhang F S. Intercropping increases soil macroaggregate carbon through root traits induced microbial necromass accumulation [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2023, 185: 109146
- [43] 郑玉婷, 黄鑫慧, 李浩, 王彪, 李攀锋, 崔吉晓, 隋鹏, 高旺盛, 陈源泉. 有机和常规管理对茶园土壤固碳的影响: 以林地作为对照[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2024, 32(1): 53-60
Zheng Y T, Huang X H, Li H, Wang B, Li P F, Cui J X, Sui P, Gao W S, Chen Y Q. Effects of organic and conventional management on soil carbon sequestration in tea gardens: Comparison with forest land [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, 32(1): 53-60 (in Chinese)
- [44] 汪景宽, 徐英德, 丁凡, 高晓丹, 李双异, 孙良杰, 安婷婷, 裴久渤, 李明, 王阳, 张维俊, 葛壮. 植物残体向土壤有机质转化过程及其稳定机制的研究进展[J]. *土壤学报*, 2019, 56(3): 528-540
Wang J K, Xu Y D, Ding F, Gao X D, Li S Y, Sun L J, An T T, Pei J B, Li M, Wang Y, Zhang W J, Ge Z. Process of plant residue transforming into soil organic matter and mechanism of its stabilization: A review [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(3): 528-540 (in Chinese)
- [45] Liu R, Yang L, Zhang J D, Zhou G P, Chang D N, Chai Q, Cao W D. Maize and legume intercropping enhanced crop growth and soil carbon and nutrient cycling through regulating soil enzyme activities[J]. *European Journal of Agronomy*, 2024, 159: 127237

责任编辑: 董金波



第一作者简介: 罗子恒, 硕士研究生, 现就读于沈阳农业大学作物栽培学与耕作学专业。2022年毕业于沈阳农业大学农学院, 并获推免资格。本科期间获三等奖学金1次, 硕士期间获得一等学业奖学金2次。



通讯作者简介: 姜英, 副教授, 主要从事耕作制度与农田生态等方面的研究。兼任中国农学会耕作制度分会理事, 是全国高校黄大年式教师团队成员。主持国家和省部级科研项目8项。发表论文近30篇, 其中SCI论文20余篇; 主编著作1部, 参编2部; 授权发明专利2件。