

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2026.02.039

CSTR:32310.14.stbcb.2026.02.039

廖盼, 杨璐, 罗加巧, 等. 玉米与毛叶苕子及黑麦间作对土壤有机碳及其组分的影响[J]. 水土保持学报, 2026, 40(2): 348-356.

LIAO Pan, YANG Lu, LUO Jiaqiao, et al. Effects of maize intercropping with hairy vetch and rye on soil organic carbon and its fractions[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(2): 348-356.

## 玉米与毛叶苕子及黑麦间作对土壤 有机碳及其组分的影响

廖盼<sup>1</sup>, 杨璐<sup>2</sup>, 罗加巧<sup>1</sup>, 宁鹏<sup>1</sup>, 于洋<sup>3</sup>, 巴晓博<sup>3,4</sup>, 鲍雪莲<sup>3</sup>

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 中国农业科学院油料作物研究所, 农业农村部油料作物生物学与遗传育种重点实验室, 武汉 430062; 3. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** [目的] 探究玉米 (*Zea mays* L.) 与不同科属绿肥 (也称覆盖作物) 间作对土壤耕层和亚耕层有机碳组分的影响, 明确间作体系中微生物残体碳在土壤固碳中的贡献, 为绿肥种植促进农田土壤固碳和地力提升提供理论支撑。[方法] 田间设置玉米单作 (MM)、玉米间作豆科绿肥毛叶苕子 (*Vicia villosa* Roth.) (LM)、玉米间作禾本科绿肥黑麦 (*Secale cereale* L.) (PM) 3 个处理, 测定 0~20、20~40 cm 土壤有机碳 (SOC)、SOC 组分 (颗粒态有机碳 POC 和矿物结合态有机碳 MAOC)、微生物残体碳及土壤理化性质。[结果] 在 0~20 cm 耕层土壤中, 3 个处理之间 SOC 质量分数无显著差异; 而在 20~40 cm 亚耕层土壤中, 与玉米单作相比, 间作豆科绿肥和禾本科绿肥处理 SOC 质量分数分别明显增加 35.0% 和 29.1%, 全氮质量分数分别增加 19.2% 和 28.8%。间作绿肥显著提升  $\beta$ -1,4-葡萄糖苷酶活性, LM 和 PM 处理亚耕层微生物残体碳质量分数分别增加 38.1% 和 34.1%, 且亚耕层 SOC 与微生物残体碳呈显著线性正相关。表土层中, 豆科绿肥处理土壤 POC 质量分数显著增加 45.4%, 亚耕层中, 间作禾本科绿肥处理土壤 MAOC 质量分数提升 27.8%。[结论] 间作绿肥后, 表土层绿肥植物残体分解生成 POC, 通过增加 POC 维持耕层土壤有机碳质量分数, 而亚耕层土壤中微生物碳泵的周转促进 FNC 积累进而增加 SOC。豆科绿肥通过增加 POC 和 MAOC 积累促进亚耕层土壤有机碳固存, 禾本科绿肥主要促进 MAOC 积累增加亚耕层土壤有机碳。研究结果为黑土区地力提升与保育提供理论与技术支撑。

**关键词:** 绿肥; 土壤有机碳; 亚耕层; 黑土区

中图分类号: S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)02-0348-09

## Effects of Maize Intercropping with Hairy Vetch and Rye on Soil Organic Carbon and Its Fractions

LIAO Pan<sup>1</sup>, YANG Lu<sup>2</sup>, LUO Jiaqiao<sup>1</sup>, NING Peng<sup>1</sup>, YU Yang<sup>3</sup>, BA Xiaobo<sup>3,4</sup>, BAO Xuelian<sup>3</sup>

(1. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193; 2. Oil Crops Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Oil Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430062, China; 3. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**Abstract:** [Objective] To investigate how maize (*Zea mays* L.) intercropped with green manure (cover crops) from different plant families affects soil organic carbon (SOC) fractions in the topsoil (0–20 cm) and subsoil (20–40 cm) layers, quantify the contribution of microbial necromass carbon (MNC) to SOC sequestration in such intercropping systems, and provide a theoretical basis for improving SOC sequestration and soil fertility through green manure cultivation. [Methods] A field experiment was established with three treatments: maize

收稿日期: 2025-10-29

修回日期: 2025-11-25

录用日期: 2025-12-04

网络首发日期 (www.cnki.net): 2026-01-14

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFD1501400); 国家自然科学基金项目 (32202616); 国家绿肥产业技术体系项目 (CARS-22); 中国农业科学院科技创新工程项目 (CAAS-ASTIP-2021-OCRI)

第一作者: 廖盼 (2002—), 女, 硕士研究生, 主要从事养分资源管理研究。E-mail: 2702157127@qq.com

通信作者: 杨璐 (1987—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事绿肥固碳培肥原理与技术研究。E-mail: yanglu02@caas.cn

<http://stbcb.alljournal.com.cn>

monoculture (MM), maize intercropped with leguminous green manure hairy vetch (*Vicia villosa* Roth., LM), and maize intercropped with graminaceous green manure rye (*Secale cereale* L., PM). Soil organic carbon, SOC fractions (particulate organic carbon, POC, and mineral-associated organic carbon, MAOC), MNC, and key soil biochemical properties were measured at 0–20 cm and 20–40 cm depths. [Results] In the 0–20 cm topsoil, SOC mass fractions did not differ significantly among treatments. Compared to the MM control, SOC mass fractions under the LM and PM increased by 35.0% and 29.1% in the 20–40 cm layer, respectively. Total nitrogen content increased significantly by 19.2% and 28.8%, respectively. Intercropping significantly enhanced  $\beta$ -1,4-glucosidase activity. Compared to the control, MNC in the subsoil rose by 38.1% under LM and by 34.1% under PM, and SOC was strongly and significantly correlated with MNC. In the topsoil layer, POC content under LM increased by 45.4% compared to the MM control, whereas in the subsoil layer MAOC content under PM increased by 27.8%. [Conclusion] Intercropping with green manure sustains SOC in the topsoil layer by generating POC from decomposing plant residues, While in the subsoil layer the "microbial carbon pump" enhances MNC accumulation, thereby increasing SOC. Leguminous green manure promotes SOC sequestration in the subsoil layer by raising both POC and MAOC, whereas graminaceous green manure acts mainly through MAOC accumulation. These findings provide theoretical and technical support for fertility improvement and conservation of black-soil regions..

**Keywords:** green manure; soil organic carbon; subsoil; black soil

**Received:** 2025-10-29

**Revised:** 2025-11-25

**Accepted:** 2025-12-04

**Online**(www.cnki.net): 2026-01-14

土壤有机碳是全球碳循环的巨大碳库,据统计<sup>[1-2]</sup>,农田土壤每年可固存0.90~1.85 Pg C,加强农田土壤有机碳固存对于缓解气候变化和提升土壤质量及作物生产力具有重要意义。东北地区是我国重要的粮食主产区,黑土面积超过109万hm<sup>2</sup>,但由于长期单一集约化种植以及浅耕、化肥农药过量使用、有机资源还田不足等原因,再加上风蚀和水蚀等自然因素的共同作用,使黑土“变薄”“变瘦”与“变硬”等问题突出<sup>[3]</sup>。提升耕层和亚耕层有机碳积累是遏制黑土退化趋势的关键。绿肥(覆盖作物)作为一种天然的有机肥源,能够从内源驱动土壤碳氮循环并改善土壤结构,是固碳培肥、地力提升和作物增产的重要措施<sup>[4-5]</sup>。

种植绿肥覆盖作物能将土壤有机碳提高12%,并且颗粒态有机碳(POC)和矿物结合态有机碳(MAOC)组分分别增加15%和7%。土壤POC主要来源于植物残体的分解,相对容易被微生物分解利用<sup>[6]</sup>。MAOC由植物源碳或微生物分解产生的可溶性有机碳(DOC)直接吸附到矿物表面形成,或DOC经过微生物同化、死亡后形成的胞外化合物和微生物残体与矿物结合形成,受土壤团聚体保护不易被微生物降解,在土壤中较为稳定<sup>[7]</sup>。在农田土壤中,经土壤微生物体内周转形成的微生物残体对SOC的贡献达到51%<sup>[8]</sup>。绿肥还田或死亡后能够增加土壤中碳的输入,经微生物吸收同化促进微生物残体积累,同时,绿肥根系可改善土壤团聚过程,有利于土

壤碳受到物理化学保护,促进土壤碳的固存和稳定<sup>[4]</sup>。有研究<sup>[9]</sup>发现,绿肥的固碳效应受土层影响,绿肥种植可显著提升0~10、10~20 cm的SOC及其组分含量,随土层深度增加增碳效果减弱。然而,种植绿肥对黑土区耕层和亚耕层SOC及组分积累的影响与机制尚不清楚。

不同科属绿肥作物的根系形态、残体质量、生物量和养分含量存在较大差异,还田后土壤固碳效应悬殊<sup>[4]</sup>。豆科绿肥具有固氮功能,能提供丰富的氮素,其残体碳氮比低,禾本科绿肥较豆科生物量大<sup>[10]</sup>,残体碳氮比高。因此,绿肥作物种类可能通过调节微生物群落结构和代谢过程而影响土壤碳库组成和固碳能力<sup>[5]</sup>。有研究<sup>[11]</sup>表明,豆科绿肥通过显著增加POC和MAOC质量分数,将SOC提升38%,且固碳效应较非豆科绿肥提升16%,更有利于土壤SOC固持;也有研究<sup>[12]</sup>发现,绿肥作物的生物量或碳输入总量是SOC积累的主导因素,而非绿肥残体质量。可见,不同种类绿肥作物的固碳效应存在争议,可能与绿肥作物自身特性(碳氮比、生物量与养分积累、根系特性)、土壤条件(质地、类型、结构、酸碱度、水分、温度)、气候条件和管理措施(种植方式、翻压时间、施肥与耕作)等因素有关<sup>[9]</sup>。但黑土区种植不同科属绿肥作物的固碳效果差异尚不明确。因此,本研究通过田间定位试验,探究玉米单作、玉米间作豆科绿肥毛叶苕子、玉米间作禾本科绿肥黑麦等模式下,间作不同

科属绿肥对耕层和亚耕层SOC积累及其组分的影响及原因,以期为东北黑土区合理利用绿肥固碳培肥与耕地保育提供理论依据与技术支持。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

田间试验设在中国科学院沈阳应用生态研究所昌图现代农业试验站保护性耕作基地进行,位于辽宁省昌图县亮中桥镇(42.74°N,123.86°E)。该区属温带大陆性季风气候,年平均气温8.9℃,年平均降水量602 mm,供试土壤类型为棕壤土。定位试验始于2022年4月,耕层(0~20 cm)土壤砂粒、粉粒和黏粒质量分数分别为35.1%、46.7%和18.2%,根据美国农业部土壤分类标准,土壤质地为粉质黏壤土。初始土壤理化性质为pH 5.32,有机碳12.04 g/kg,全氮1.20 g/kg,全磷0.46 g/kg,全钾19.20 g/kg<sup>[13]</sup>。

### 1.2 试验设计及田间管理

试验设3个处理,玉米(*Zea mays* L.)单作(MM)、豆科绿肥毛叶苕子(*Vicia villosa* Roth.)-玉米间作(LM)和禾本科绿肥黑麦(*Secale cereale* L.)-玉米间作(PM),随机区组设计,重复4次。供试玉米品种为“东单1331D”,黑麦品种为“冬牧70”,毛叶苕子为普通品种。小区面积为126 m<sup>2</sup>(15.0 m×8.4 m),玉米采用宽窄行种植(50 cm+90 cm),其中,间作体系在玉米宽行种植3行绿肥,窄行种植2行玉米,每年玉米与绿肥进行倒茬。每年于5月上旬同时播种玉米和绿肥(2024年播期为5月8日),玉米播种密度为67 500株/hm<sup>2</sup>,所有小区基肥施入等量复合肥(26-10-12)900 kg/hm<sup>2</sup>,无追肥;毛叶苕子和黑麦播种密度分别为120、90 kg/hm<sup>2</sup>,不额外施肥,绿肥一般于9月自然死亡,并于10月收获玉米(2024年收获于10月13日)。整个生育期内雨养、无灌溉,玉米种植带采用化学药剂除草,绿肥种植带进行人工除草,其他管理措施与当地常规一致。

### 1.3 样品采集与测定

本研究于2024年10月9日玉米成熟期采集0~20、20~40 cm土壤样品,在各小区玉米窄行采集3个土壤,混合成1个土壤样品。去除砾石、根系等杂质,过2 mm筛,分成2份,其中1份置于冰盒带回实验室保存于-20℃,用于测定土壤铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、可溶性有机碳(DOC)、可溶性有机氮(DON)、微生物生物量碳(MBC)、微生物生物量氮(MBN)和酶活性;另外1份自然风干,用于测定土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、颗粒态有机碳(POC)、矿物结合态有机碳(MAOC)和氨基糖。

1)土壤基础理化性质:土壤pH采用电位法(水土比为2.5:1)测定;土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)采用元素分析仪(Elementar vario PYRO cube,德国)测定。新鲜土样用2M KCl溶液浸提(水土比为5:1),使用全自动间断化学分析仪(Smartchen 450,AMS,意大利)测定土壤NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N质量分数,并采用烘干法测定土壤水分体积分数。新鲜土样用超纯水进行浸提后过0.45 μm滤膜<sup>[14]</sup>,使用总有机碳分析仪(Elementar vario TOC,德国)测定可溶性有机碳(DOC)和可溶性总氮,通过可溶性总氮和无机氮的差值得到可溶性有机氮(DON);土壤微生物生物量碳(MBC)和微生物生物量氮(MBN)采用氯仿熏蒸-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>浸提<sup>[15]</sup>,并使用总有机碳分析仪测定碳氮质量分数。

2)有机碳组分:土样经六偏磷酸钠溶液分散后,53 μm孔径筛分,获得POC(>53 μm)和MAOC(≤53 μm)组分,并采用重铬酸钾-硫酸氧化法测定各组分有机碳质量分数。

3)土壤酶活性:采用96孔微孔板荧光法,使用全功能微孔板检测仪(SynergyH1 microplate reader, BioTek,美国)测定土壤酶活性,包括β-1,4-葡萄糖苷酶(BG)、纤维二糖水解酶(CB)、β-木糖苷酶(BX)、β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(NAG)、亮氨酸氨基肽酶(LAP)和磷酸酶(PA)。

4)氨基糖含量:将0.5 g土样在6M HCl中水解8 h,得到水解物过滤、中和并纯化以分离有机部分,通过液相色谱分析得到4种氨基糖含量<sup>[16]</sup>,包括胞壁酸(MurA)、氨基葡萄糖(GluN)、氨基半乳糖(GalN)和甘露糖胺(ManN),细菌残体碳(BNC)、真菌残体碳(FNC)和微生物残体碳(MNC)含量计算公式<sup>[17]</sup>见公式(1)~公式(3),通过微生物残体碳与微生物量碳的比值计算得到微生物残体质量积累系数(NAC)。

$$\text{BNC}=\text{MurA}\times 31.3 \quad (1)$$

$$\text{FNC}=(\text{GluN}-1.16\times\text{MurA})\times 10.8 \quad (2)$$

$$\text{MNC}=\text{BNC}+\text{FNC} \quad (3)$$

$$\text{NAC}=\text{MNC}/\text{MBC} \quad (4)$$

### 1.4 统计分析

采用R软件(4.4.1)中的“Agricolae”包进行方差分析,采用LSD方法在 $p<0.05$ 的水平上进行多重比较,并使用Benjamini-Hochberg法校正 $p$ 值。使用Graphdpad Prism 9.5软件进行作图,使用Origin 2025软件对SOC与碳组分及微生物残体碳等指标进行皮尔逊相关分析,使用R的“linkET”包进行Mantel检验,分析环境因素对SOC及其组分间的相关性。使用R的“plsmpm”包进行土壤性质与有机碳组分间的偏最小二乘路径分析(PLS-PM)。

## 2 结果与分析

### 2.1 间作绿肥对土壤化学性质的影响

由表 1 可知,玉米间作绿肥对土壤化学性质有显著影响。与单作 MM 相比,间作绿肥处理 0~20、20~40 cm 土层 pH 降低 5.2%~6.7%;LM 和 PM 处理 20~40 cm 土壤的全氮质量分数分别增加 19.2% 和 28.8%。间作绿肥后土壤 SOC/TN 无显著变化。

不同处理间各土层 DOC 质量分数无显著差异,

表 1 玉米间作豆科及禾本科绿肥对土壤化学性质的影响

Table 1 Effects of maize intercropping with leguminous and gramineous green manures on soil chemical properties

土层深度/cm	处理	pH	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	可溶性 有机碳/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	微生物 量碳/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	可溶性 有机氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	微生物 量氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	无机氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	有机碳/ 全氮	可溶性有机 碳/可溶性有 机氮
0~20	MM	5.75±0.04a	0.96±0.10a	15.98±1.18a	97.05±8.84a	23.63±0.34ab	12.55±0.63a	16.34±1.48a	10.32±0.62 a	0.68±0.03b
	LM	5.45±0.09b	1.04±0.06a	15.99±1.21a	45.26±7.27b	24.30±0.46a	8.55±0.35b	15.76±0.95a	10.59±0.53 a	0.66±0.02b
	PM	5.44±0.05b	0.90±0.07a	20.69±4.47a	78.52±6.61a	22.61±0.05b	8.90±0.63b	10.20±0.36b	10.97±0.69 a	0.91±0.10a
20~40	MM	6.39±0.05a	0.73±0.03b	8.02±1.30a	37.54±10.16b	23.27±0.41a	5.55±0.21a	8.13±0.24b	9.93±0.78 a	0.34±0.03a
	LM	5.96±0.06b	0.87±0.03a	7.77±2.60a	69.54±5.43a	22.54±0.40a	3.06±0.39b	8.59±0.26b	11.25±0.46 a	0.35±0.06a
	PM	5.99±0.04b	0.94±0.03a	9.77±1.80a	30.57±4.54b	21.80±0.34a	3.69±0.59b	10.26±0.06a	9.97±0.45 a	0.45±0.04a

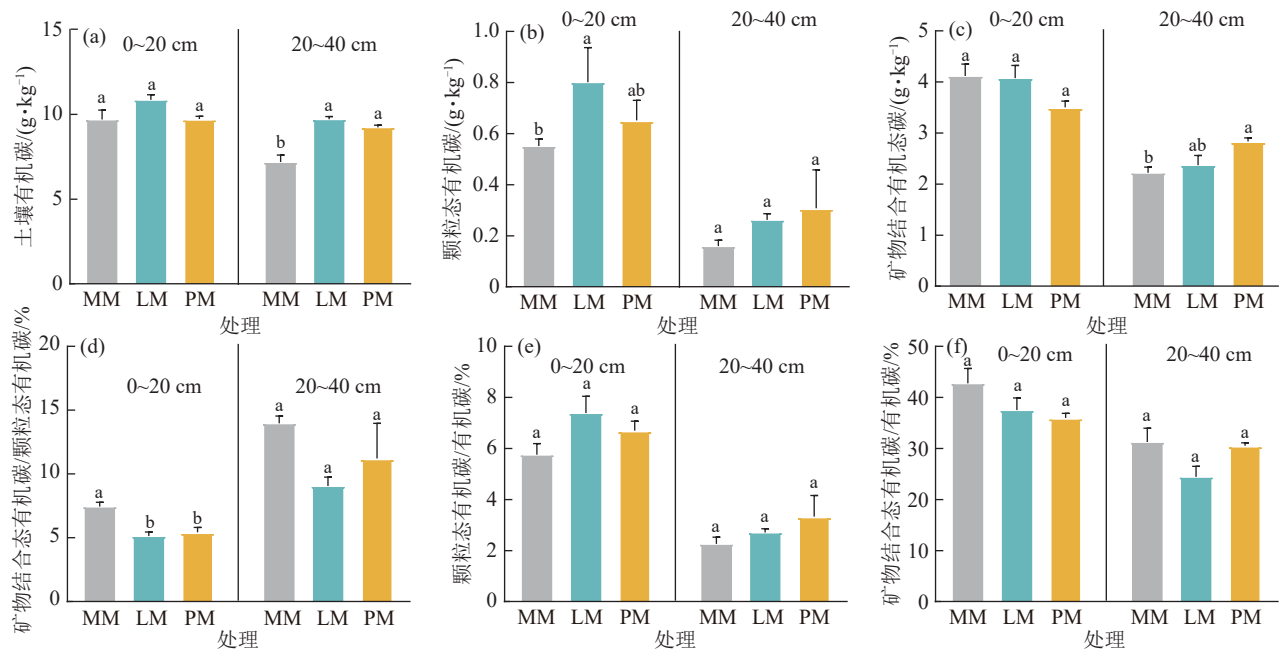
注:表中数据为平均值±标准误;同列不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著( $p < 0.05$ ); $n=4$ 。

### 2.2 间作绿肥对土壤有机碳及碳组分的影响

由图 1 可知,在 0~20 cm 土层,不同处理之间 SOC 和 MAOC 质量分数均无显著差异,但 LM 较 MM 处理 POC 质量分数增加 45.4%。与 MM 相比,LM 和 PM 处理 20~40 cm 土层 SOC 质量分数分别显著增加 35.0% 和 29.1%;间作绿肥处理 POC 质量分

但与 LM 相比,PM 处理 0~20 cm 土层 DON 质量分数降低 7.0%,DOC/DON 比值增加 37.9%。与 MM 相比,PM 处理对 2 个土层 MBC 质量分数无显著影响,但 LM 处理耕层土壤 MBC 质量分数降低 53.4%,亚耕层中增加 85.2%;间作绿肥处理 2 个土层 MBN 质量分数平均降低 34.8%。与 MM 对照相比,LM 处理对土壤无机氮质量分数无显著影响,PM 处理耕层土壤无机氮降低 37.6%,亚耕层增加 26.2%。

数呈增加趋势;PM 较 MM 处理亚耕层土壤 MAOC 质量分数显著提升 27.8%。间作绿肥后,0~20 cm 土壤 MAOC 与 POC 的比值平均降低 29.1%,亚耕层平均降低 27.5%;各处理间 POC 和 MAOC 组分对 SOC 的贡献无显著差异,但与耕层土壤相比,亚耕层 POC 的贡献平均降低 58.1%,MAOC 的贡献降低 25.7%。



注:误差线表示平均值的标准误;图柱上方不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著( $p < 0.05$ ); $n=4$ 。下同。

图 1 玉米间作豆科及禾本科绿肥对土壤有机碳和碳组分的影响

Fig. 1 Effects of maize intercropping with leguminous and gramineous green manures on soil organic carbon and its fractions

### 2.3 间作绿肥对土壤酶活性及微生物残体碳积累的影响

由图 2 可知,对于微生物碳获取酶,间作毛叶苕子和黑麦土壤 BG 酶活性无显著差异,但二者在 0~20、20~40 cm 土层较 MM 对照分别平均提高 46.3% 和 51.0%。间作绿肥处理较 MM 处理 0~20 cm 土层 CB 酶活性平均增加 56.8%, 20~40 cm 土层 CB 和 BX 活性呈增加趋势,但不显著。对于微生物氮获取酶,耕层土壤中 PM 较 LM 处理的 LAP 活性降低 49.1%, 亚耕层土壤中无显著差异;间作绿肥处理的 NAG 活性呈增加趋势,但与 MM 无显著差异。间作绿肥对土壤磷获取相关酶活性无显著影响。

由图 3 可知,在 0~20 cm 土层,仅 LM 处理总微生物残体碳和总氨基糖质量分数显著增加,但在 20~40 cm 土层,LM 和 PM 处理较 MM 对照的真菌残体碳质量分数分别显著提升 37.4% 和 33.0%, 细菌残体碳质量分数分别增加 41.7% 和 40.2%。与 MM 处理相比,LM 和 PM 处理 20~40 cm 土壤氨基甘露糖、氨基半乳糖、氨基葡萄糖和总氨基糖质量分数显著增加 31.2%~47.5%。

总体上,真菌残体碳在微生物残体碳中占比较大,是细菌残体碳的 4.69~5.62 倍。耕层土壤中 LM 残体碳质量积累系数呈增加趋势,亚耕层土壤中趋势相反。

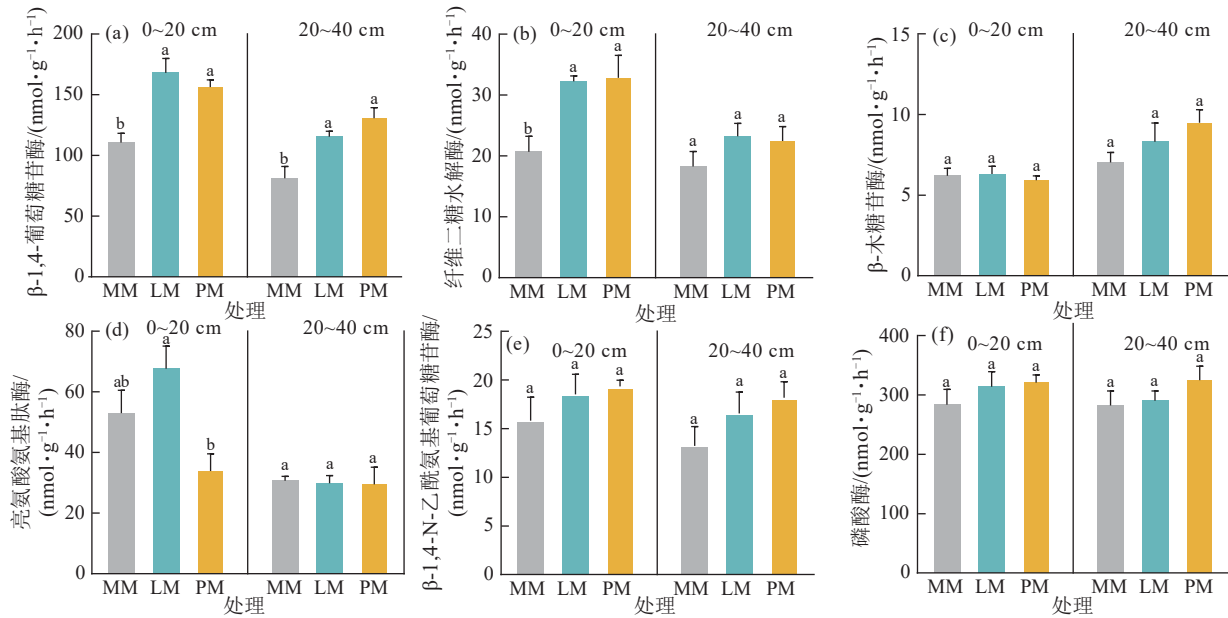
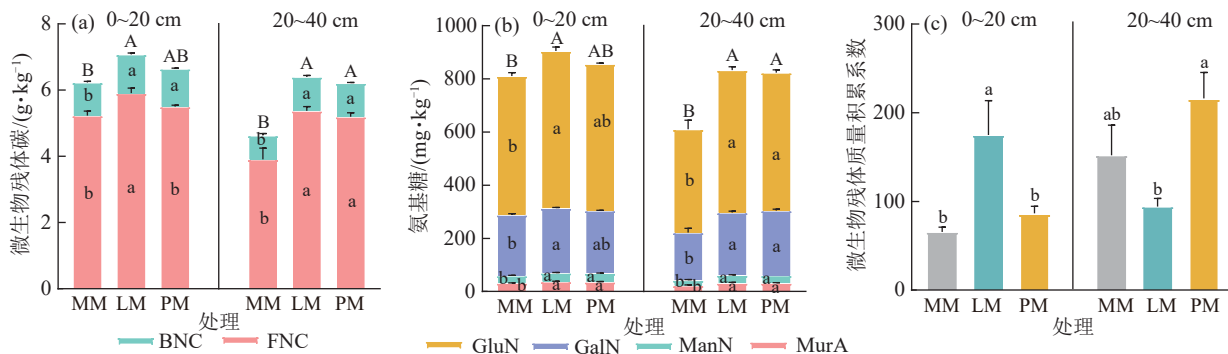


图 2 玉米间作豆科及禾本科绿肥对土壤碳氮磷相关酶活性的影响

Fig. 2 Effects of maize intercropping with leguminous and gramineous green manures on activities of soil carbon, nitrogen and phosphorus-related enzymes



注: 图柱上方不同大写字母表示同一土层不同处理间差异显著 ( $p < 0.05$ ); 不同小写字母表示同一处理不同土层间差异显著 ( $p < 0.05$ ); FNC 和 BNC 为真菌残体碳和细菌残体碳; MurA、ManN、GalN、GluN 分别表示胞壁酸、甘露糖胺、氨基半乳糖、氨基葡萄糖。

图 3 玉米间作豆科及禾本科绿肥对土壤微生物残体碳和残体质量积累系数的影响

Fig. 3 Effects of maize intercropping with leguminous and gramineous green manures on microbial necromass carbon and the microbial-residue accumulation coefficient

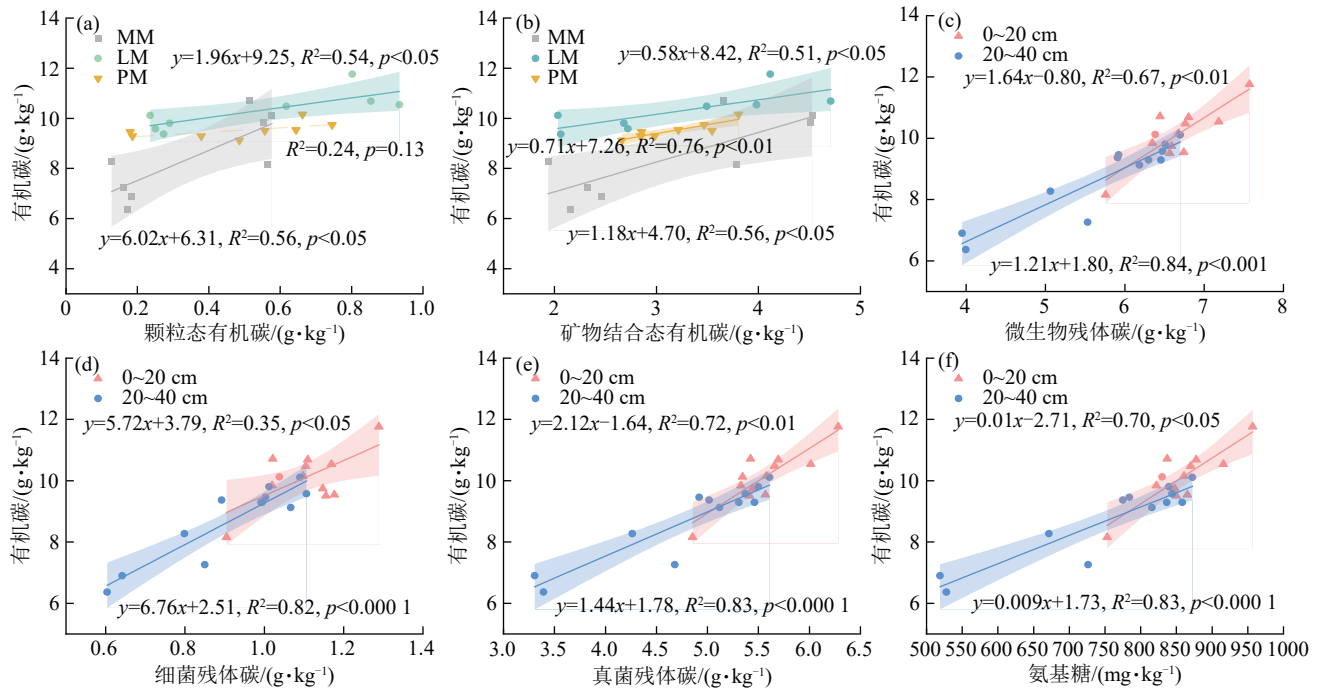
### 2.4 土壤有机碳及碳组分与土壤生物化学性质的相关性分析

由图 4 可知,MM 和 LM 处理的 SOC 质量分数与

POC 和 MAOC 质量分数呈显著正相关;对于 PM 处理, SOC 质量分数与 POC 无明显相关性,但与 MAOC 质量分数呈显著正相关。0~20、20~40 cm

土层, SOC 与微生物残体碳、细菌残体碳、真菌残体碳质量分数及氨基糖总量呈显著正相关, 但 20~

40 cm 土层中决定系数 ( $R^2=0.82\sim 0.84$ ) 大于 0~20 cm 土层 ( $R^2=0.35\sim 0.72$ )。



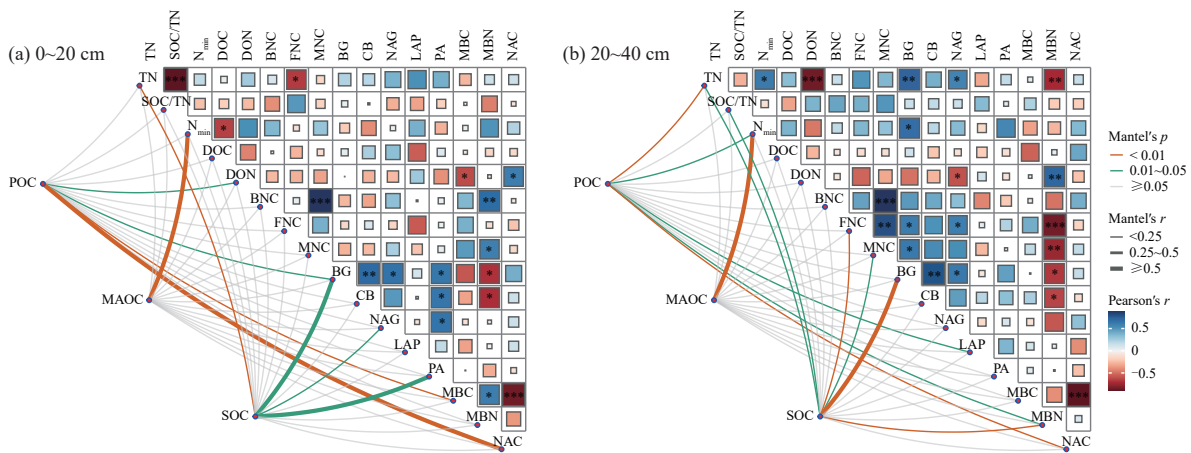
注: 图(a)和图(b)按照不同处理对有机碳及其组分(POC 和 MAOC)进行线性拟合; 图(c)~图(f)按照不同土层对有机碳与微生物残体碳进行线性拟合; 实线表示线性显著相关 ( $p < 0.05$ )。

图 4 土壤有机碳与碳组分及残体碳间的相关性

Fig. 4 Correlations between soil organic carbon, carbon fractions, and necromass carbon

由图 5 可知, 耕层与亚耕层 SOC 及组分受土壤理化性质的影响存在较大差异。耕层土壤 POC 与 BG 酶活性、FNC、MNC、DON、MBC 和 NAC 相关, SOC 与土壤 TN、BG、NAG、PA 酶活性、FNC、

BNC、MNC 相关; 亚耕层土壤中, POC 主要受 TN、Nmin、LAP、MBN 和 NAC 影响, SOC 与土壤 TN、SOC/TN 比、BNC、FNC、MNC、MBN 以及 BG 酶活性相关。



注: 线宽表示部分 Mantel's  $r$  统计量, 线条颜色表示统计显著性; \*表示  $p < 0.05$ ; \*\*表示  $p < 0.01$ ; \*\*\*表示  $p < 0.001$ 。

图 5 土壤有机碳及其组分与环境因素间的 Mantel 检验

Fig. 5 Mantel test between soil organic carbon, carbon fractions and environmental factors

由图 6 可知, 在玉米单作中, 土壤可溶性有机碳对 POC 有显著正向影响 (路径系数为 0.877<sup>\*\*</sup>)。在玉米间作豆科绿肥方式下, 土壤可溶性有机碳氮对土壤碳获取酶活性有显著正向影响 (路径系数为 0.834<sup>\*</sup>), 并对 POC 和 MAOC 有显著正向效应 (路径系数为 0.769<sup>\*</sup> 和 0.858<sup>\*</sup>)。对于玉米间作禾本科绿肥

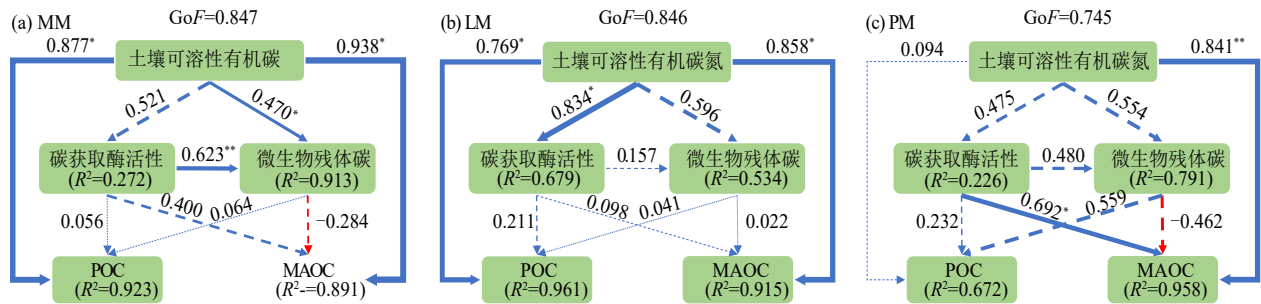
种植系统, 土壤可溶性有机碳氮对 MAOC 具有直接正向作用 (路径系数为 0.841<sup>\*\*</sup>), 碳获取酶活性对 MAOC 具有正向影响 (路径系数为 0.692<sup>\*</sup>)。

### 3 讨论

亚耕层土壤固碳是促进长期碳库稳定的重要途径<sup>[18]</sup>, 绿肥通过物理、化学和生物机制协同促进

土壤有机碳的固存<sup>[4]</sup>。长期间作绿肥不仅能提升耕层有机碳含量,而且可通过增加地下碳输入和改善微生物活动增加底土的碳储量<sup>[19]</sup>。本研究条件下,与玉米单作相比,玉米间作豆科和禾本科绿肥显著提高 20~40 cm 亚耕层土壤有机碳和全氮质量分数(表 1 和图 1),可能与间作豆科绿肥提高 20~40 cm 大团聚体中 SOC 和 TN 质量分数有关<sup>[20]</sup>。虽然间作绿

肥处理增加耕层碳源输入,但有机碳增加并不显著,可能与耕层土壤碳获取酶(如  $\beta$ -葡萄糖苷酶)活性较高及微生物矿化有关。有研究<sup>[21]</sup>表明,添加外源碳后耕层土壤有机碳矿化损失量大于底层土壤;间作绿肥处理耕层 MAOC 呈下降趋势,且 MAOC/POC 比值显著降低(图 1),表明新鲜碳输入所触发的 SOC 周转在表层土壤中可能比在底层土壤中更快。



注:分析过程仅保留载荷量 $>0.7$ 的变量;箭头旁的数字为路径系数,箭头粗细与路径系数大小呈正比;蓝色和红色线条分别表示正向和负向效应;实线箭头表示路径系数显著,虚线箭头表示路径系数不显著;\*表示 $p<0.05$ ;\*\*表示 $p<0.01$ 。

图 6 不同种植方式下土壤性质对有机碳组分的 PLS-PM 分析

Fig. 6 PLS-PM analysis of the effects of soil properties on organic carbon fractions under different cropping systems

土壤微生物残体碳对有机碳的贡献达 55.6%~61.8%<sup>[16]</sup>。与玉米单作相比,豆科绿肥处理增加亚土层的总氨基糖,间作绿肥后亚表土层的 BNC 和 FNC 均显著增加(图 3)。亚表土层中,土壤有机碳与微生物残体碳、细菌残体碳及真菌残体碳呈显著正相关(图 4)。可见,间作绿肥后通过促进微生物残体碳的积累增加亚表土层的有机碳<sup>[22]</sup>。绿肥碳源的输入促进微生物碳泵的周转,玉米间作绿肥后增加土壤碳获取相关酶的活性(图 2),微生物分解植物残体并吸收同化,一部分用于呼吸作用,一部分用于生物合成,在微生物衰亡后释放到土壤中形成微生物残体<sup>[23]</sup>。细菌主要利用易分解的简单化合物,代谢周转速度快,真菌可利用复杂的化合物,且真菌也能有效地与细菌竞争易分解的碳源<sup>[24]</sup>。真菌残体碳含有黑色素和几丁质,具有较高的化学稳定性,不易被分解<sup>[25]</sup>,促进亚耕层有机碳积累。

与玉米单作相比,豆科绿肥处理中耕层土壤 MBC 下降,间作豆科和禾本科绿肥处理的 MBN 均降低(表 1),与相关研究<sup>[26]</sup>结果存在差异,可能是因为微生物量碳氮是土壤中活跃的碳组分,对环境变化较敏感,受到绿肥分解阶段和环境因素的影响。本研究在绿肥死亡还田后 40 d 取样,已有研究<sup>[27]</sup>表明,绿肥还田 40 d 左右,其残体以较难分解利用的纤维素及木质素等组分为主,可能限制  $r$ -型策略微生物生长而导致微生物量碳氮降低<sup>[28]</sup>。新鲜绿肥残体还田主要集中在耕层土壤,容易引起激发效应,一般外

源有机碳的输入会使土壤原有有机质的矿化速率平均提高 26.5%<sup>[29]</sup>。间作绿肥后 NAC 呈现增加趋势,促进 MBC 向残体碳转化的速度,而 PM 处理耕层残体碳增加并不显著,可能因为绿肥的投入加快残体碳的矿化。间作绿肥后,土壤碳获取酶活性增强(图 2),且耕层土壤 POC 与 BG 酶活性存在显著相关性(图 5),促进绿肥植物残体分解形成 POC 组分。而间作绿肥后耕层土壤有机碳含量提升并不显著,MAOC 与 POC 的比值下降(图 1),表明有机碳的稳定性下降,可能是由于受到耕作措施的影响,且存在激发效应,矿化损失部分土壤原有有机质和固定的有机碳。豆科绿肥处理显著提高 POC,线性分析中 POC 与 SOC 呈显著正相关(图 4),进而维持耕层土壤有机碳。综上所述,间作绿肥后通过促进 POC 组分的形成维持耕层土壤有机碳累积,亚耕层土壤有机碳积累主要是由微生物残体碳的积累所介导。

不同科属绿肥在其自身生物量、根系特征、植株养分含量、碳氮比和还田后残体腐解程度等方面存在较大区别<sup>[4]</sup>,造成固碳效应差异<sup>[11]</sup>。不同科属绿肥根分泌物总量和组成各异,从而会招募形成不同的微生物群落<sup>[5]</sup>。研究<sup>[13]</sup>发现,豆科绿肥相比禾本科绿肥更有利于改善微生物群落结构。本研究条件下间作豆科绿肥处理中耕层和亚耕层土壤有机碳含量均最高。间作豆科绿肥模式下,土壤可溶性有机碳氮对土壤 POC 和 MAOC 有显著正向影响(图 6)。耕层土壤中,豆科处理增加 POC 质量分数,高质量(低 C:

N)植物残体的输入为微生物提供更多氮源,促进微生物分解植物残体形成POC<sup>[30]</sup>。禾本科具有更大的根系生物量,可促进土壤团聚体的形成,有利于对土壤碳形成物理保护<sup>[4]</sup>,能够解释亚耕土层禾本科处理中MAOC的增加,而豆科处理中土壤碳可能存在矿化分解,MAOC质量分数提升不显著。豆科处理中土壤POC、MAOC与SOC呈显著正相关,对于禾本科处理,SOC与MAOC呈显著正相关(图4)。有研究<sup>[11]</sup>发现,豆科绿肥通过增加POC和MAOC进土壤有机碳质量分数提高,表明豆科处理中亚表土层有机碳的增加与POC和MAOC组分相关,而禾本科处理中MAOC的增加主导有机碳的固存。

受区域气候条件等因素限制,东北地区绿肥应用仍面临多重约束。本研究虽初步阐明玉米与豆科和禾本科绿肥间作对土壤耕层及亚耕层有机碳组分的影响,并明确微生物残体碳对土壤固碳的贡献,但关于绿肥内源驱动黑土地力的机理、绿肥应用下的微生物碳泵机制、绿肥种植技术模式等研究仍然不足。后续可对间作绿肥体系耕层和亚耕层绿肥残体碳转化与固定过程、微生物生活史策略转换、矿物结合态有机碳库的形成等方面开展系统研究,从绿肥视角为黑土区土壤固碳和地力提升提供新的理论依据。

## 4 结论

1)与玉米单作体系相比,玉米间作豆科绿肥和禾本科绿肥对耕层土壤有机碳影响不大,但二者通过增加微生物残体碳积累促进亚耕层土壤有机碳固存,较单作体系分别增加35%和29%。

2)豆科绿肥通过增加POC和MAOC积累来促进亚耕层土壤有机碳固存,禾本科绿肥则主要通过促进MAOC积累来实现。

综合而言,间作绿肥有利于促进亚耕层土壤固碳,为东北黑土区有机质提升和耕地保育提供技术支持。

### 参考文献:

- [1] LEHMANN J, KLEBER M. The contentious nature of soil organic matter[J]. *Nature*, 2015, 528(7580): 60-68.
- [2] ZOMER R J, BOSSIO D A, SOMMER R, et al. Global sequestration potential of increased organic carbon in cropland soils[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: e15554.
- [3] 李保国, 刘忠, 黄峰, 等. 巩固黑土地粮仓 保障国家粮食安全[J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36(10): 1184-1193.  
LI B G, LIU Z, HUANG F, et al. Ensuring national food security by strengthening high-productivity black soil granary in Northeast China [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(10): 1184-1193.
- [4] 王国瑾, 胡发龙, 李含婷, 等. 绿肥提高农田土壤有机碳固存机制的研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(6): 1185-1198.  
WANG G C, HU F L, LI H T, et al. Research advances on the effect and mechanism of green manure on improving soil carbon sequestration in cropland [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(6): 1185-1198.
- [5] 曹卫东, 周国朋, 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.
- [6] HU Q J, THOMAS B W, POWLSON D, et al. Soil organic carbon fractions in response to soil, environmental and agronomic factors under cover cropping systems: A global meta-analysis [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2023, 355: e108591.
- [7] COTRUFO M F, LAVALLEE J M. Soil organic matter formation, persistence, and functioning: A synthesis of current understanding to inform its conservation and regeneration [M]// *Advances in Agronomy*. Amsterdam: Elsevier, 2022: 1-66.
- [8] WANG B R, AN S S, LIANG C, et al. Microbial necromass as the source of soil organic carbon in global ecosystems [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 162: e108422.
- [9] MCCLELLAND S C, PAUSTIAN K, SCHIPANSKI M E. Management of cover crops in temperate climates influences soil organic carbon stocks: A meta-analysis [J]. *Ecological Applications*, 2021, 31(3): ee02278.
- [10] 杨叶华, 张松, 王帅, 等. 中国不同区域常见绿肥产量和养分含量特征及替代氮肥潜力评估[J]. *草业学报*, 2020, 29(6): 39-55.  
YANG Y H, ZHANG S, WANG S, et al. Yield and nutrient concentration in common green manure crops and assessment of potential for nitrogen replacement in different regions of China [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(6): 39-55.
- [11] HU Q J, ZHANG Y T, CAO W D, et al. Legume cover crops sequester more soil organic carbon than non-legume cover crops by stimulating microbial transformations [J]. *Geoderma*, 2024, 450: e117024.
- [12] ARDENTI F, CAPRA F, LOMMI M, et al. Long-term C and N sequestration under no-till is governed by

- biomass production of cover crops rather than differences in grass *vs.* legume biomass quality [J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 228: e105630.
- [13] SUI X, BAO X L, XIE H T, et al. Contrasting seasonal effects of legume and grass cover crops as living mulch on the soil microbial community and nutrient metabolic limitations [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2025, 380: e109374.
- [14] JONES D L, WILLET V B. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(5): 991-999.
- [15] VANCE E D, BROOKES P C, JENKINSON D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6): 703-707.
- [16] LIANG C, AMELUNG W, LEHMANN J, et al. Quantitative assessment of microbial necromass contribution to soil organic matter [J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(11): 3578-3590.
- [17] HU H, QIAN C, XUE K, et al. Reducing the uncertainty in estimating soil microbial-derived carbon storage [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2024, 121(35): e2401916121.
- [18] JONES D L, COOLEGE E C, ALSTON D, et al. Agricultural management strategies to actively promote subsoil carbon storage [J]. *Soil and Tillage Research*, 2026, 256: e106846.
- [19] YANG L, LUO Y, LU B L, et al. Long-term maize and pea intercropping improved subsoil carbon storage while reduced greenhouse gas emissions [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2023, 349: e108444.
- [20] 孙涛, 冯晓敏, 高新昊, 等. 多样化种植对土壤团聚体组成及其有机碳和全氮含量的影响 [J]. *中国农业科学*, 2023, 56(15): 2929-2940.
- SUN T, FENG X M, GAO X H, et al. Effects of diversified cropping on the soil aggregate composition and organic carbon and total nitrogen content [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(15): 2929-2940.
- [21] DAI S S, HE P, GUO X L, et al. Faster carbon turnover in topsoil with straw addition is less beneficial to carbon sequestration than subsoil and mixed soil [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2022, 86(6): 1431-1443.
- [22] HU Q J, JIANG T, THOMAS B W, et al. Legume cover crops enhance soil organic carbon *via* microbial necromass in orchard alleyways [J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 234: e105858.
- [23] LIANG C, SCHIMMEL J P, JASTROW J D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage [J]. *Nature Microbiology*, 2017, 2: e17105.
- [24] LIU X, TANG S, TOU C Y, et al. Opposite roles of plant quality and soil exoenzymes in regulation of litter carbon transfer to fungal and bacterial necromass [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2025, 210: e109940.
- [25] FERNANDEZ C W, LANGLEY J A, CHAPMAN S, et al. The decomposition of ectomycorrhizal fungal necromass [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 93: 38-49.
- [26] MUHAMMAD I, WANG J, SAINJU U M, et al. Cover cropping enhances soil microbial biomass and affects microbial community structure: A meta-analysis [J]. *Geoderma*, 2021, 381: e114696.
- [27] 王吕, 吴玉红, 陈浩, 等. 陕南猕猴桃果园绿肥还田腐解特征及养分释放规律 [J]. *果树学报*, 2025, 42(1): 112-122.
- WANG L, WU Y H, CHEN H, et al. Characteristics of decomposition and nutrient release of green manure returning to kiwifruit orchards in southern Shaanxi Province [J]. *Journal of Fruit Science*, 2025, 42(1): 112-122.
- [28] 陈霄龙, 郭腾飞, 张倩, 等. 基于稳定性同位素核酸探针技术的同化利用玉米秸秆碳微生物群落演替研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(3): 430-440.
- CHEN X L, GUO T F, ZHANG Q, et al. Microbial community succession of assimilating and utilizing straw-derived carbon based on DNA stable-isotope probing technique [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(3): 430-440.
- [29] ZHANG W D, WANG X F, WANG S L. Addition of external organic carbon and native soil organic carbon decomposition: A meta-analysis [J]. *PLoS One*, 2013, 8(2): e54779.
- [30] KALLENBACH C M, WALLENSTEIN M D, SCHIPANKSI M E, et al. Managing agroecosystems for soil microbial carbon use efficiency: Ecological unknowns, potential outcomes, and a path forward [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: e1146.