

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2026.05.032

CSTR:32310.14.stbxb.2026.05.032

王治英, 吴淑芳, 胡亚瑾, 等. 覆膜配施有机肥条件下土壤结构与微生物介导的固碳效应与路径解析[J]. 水土保持学报, 2026, 40(5): 442-454.

Wang Zhiying, Wu Shufang, Hu Yajin, et al. Soil structure and microorganisms mediate carbon sequestration and its accumulation pathway under film mulching with organic fertilizer substitution[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(5): 442-454.

覆膜配施有机肥条件下土壤结构与微生物介导的固碳效应与路径解析

王治英^{1,2}, 吴淑芳^{1,2}, 胡亚瑾^{1,2}, 冯浩^{2,3}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学中国旱区节水研究院, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 为明确多年地膜覆盖配施有机肥对旱作农田土壤有机碳固存的调控效应, 揭示土壤结构与微生物群落介导下有机碳积累的内在机制与演变路径。[方法] 以关中平原麦玉轮作体系5 a长期定位试验为基础, 设置地膜覆盖(M)与不覆盖、有机肥等氮替代氮肥梯度(0~100%, CK、T0、T25、T50、T75、T100)的双因素裂区试验, 2020年和2024年冬小麦收获后测定0~20 cm土壤理化性质与微生物群落结构, 结合Pearson相关分析、Mantel检验和偏最小二乘路径模型(PLS-PM)解析有机碳积累路径。[结果] 1) 多年覆膜配合有机肥替代显著降低土壤体积质量, 促进水稳性团聚体形成, 并提高土壤有机碳(SOC)质量分数、储量及氮素水平。试验确定的最优处理为MT75, 其土壤体积质量较MCK降低4.67%; 机械稳定性大团聚体和水稳性大团聚体(≥ 0.25 mm)的质量比例分别为97.04%和62.66%, 较MCK分别提高0.75%和12.92%; SOC(12.75 g/kg)和有机碳储量(SOCs)(33.80 t/hm²)分别较MCK提高79.97%和80.89%; 全氮、硝态氮和铵态氮质量分数分别较MCK提高45.79%、100.21%和46.71%。2) 随着试验持续细菌群落丰富度下降而多样性升高, 真菌群落丰富度和多样性均下降。Mantel检验表明, 细菌群落由早期主要受有机碳和全氮驱动, 后期转变为土壤养分与物理结构共同驱动; 真菌群落则由碳源驱动转向土壤团聚体结构主导。3) PLS-PM表明, 有机碳积累路径由施肥直接驱动转变为团聚体结构优化和土壤微生物群落共同调控, 其中2024年土壤团聚体对碳库的路径系数达0.99。[结论] 多年覆膜与有机肥替代可显著改善土壤结构与养分状况, 重塑微生物群落结构, 其中, 覆膜结合75%有机肥替代综合效果最佳。在该条件下, 有机碳积累路径由外源有机物投入驱动向团聚体与微生物协同驱动路径转变。

关键词: 覆膜; 有机肥替代; 土壤结构; 微生物群落; 土壤有机碳; 固碳路径

中图分类号: S156.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0442-13

Soil Structure and Microorganisms Mediate Carbon Sequestration and Its Accumulation Pathway under Film Mulching with Organic Fertilizer Substitution

Wang Zhiying^{1,2}, Wu Shufang^{1,2}, Hu Yajin^{1,2}, Feng Hao^{2,3}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Shaanxi, Yangling 712100, China; 2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Shaanxi, Yangling 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Shaanxi, Yangling 712100, China)

Abstract: [Objective] To clarify the regulatory effect of long-term plastic film mulching combined with organic fertilizer substitution on soil carbon sequestration in dryland farmlands, and reveal the internal mechanism and evolution pathway of soil organic carbon accumulation mediated by soil structure and microbial community,

收稿日期: 2026-04-16

修回日期: 2026-05-11

录用日期: 2026-05-19

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-08-18

资助项目: “十四五”国家重点研发计划项目(2023YFD1900300)

第一作者: 王治英(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事旱作农田土壤改良研究。E-mail: 18636821854@163.com

通信作者: 吴淑芳(1977—), 女, 博士, 博士生导师, 主要从事旱区中低产田土壤改良及水肥高效利用研究。E-mail: wsfs@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

[Methods] A 5-year field experiment was conducted under a winter wheat-summer maize rotation in the Guanzhong Plain, using a split-plot design with plastic film mulching (M) and an organic fertilizer substitution gradient (0–100%; CK, T0, T25, T50, T75, T100) as the two factors. Soil properties and microbial communities in the top 0–20 cm layer were analyzed after wheat harvest in 2020 and 2024. Soil organic carbon accumulation pathways were assessed via Pearson correlation, Mantel test, and partial least squares path modeling (PLS-PM). **[Results]** 1) Long-term film mulching combined with organic fertilizer substitution significantly reduced soil bulk density, promoted the formation of water-stable aggregates, and increased soil organic carbon (SOC) content, SOC stock (SOCs) and nitrogen levels. The optimal treatment was MT75 (film mulching+75% organic fertilizer substitution), in which soil bulk density was 4.67% lower than that of MCK; the mass percentages of mechanically stable macroaggregates and water-stable macroaggregates (≥ 0.25 mm) were 97.04% and 62.66%, which were 0.75% and 12.92% higher than those of MCK, respectively; SOC (12.75 g/kg) and SOCs (33.80 t/hm²) were 79.97% and 80.89% higher than those of MCK, respectively; total nitrogen, nitrate nitrogen and ammonium nitrogen contents were 45.79%, 100.21% and 46.71% higher than those of MCK, respectively. 2) As the experiment progressed, bacterial community richness decreased while diversity increased, and both richness and diversity of fungal community decreased. Mantel test indicated that bacterial community was mainly driven by SOC and total nitrogen at the early stage, and gradually shifted to be jointly driven by soil nutrients and physical structure at the late stage; fungal community was transformed from carbon source-driven to soil aggregate structure-dominated. 3) PLS-PM revealed that the accumulation pathway of soil organic carbon changed from direct fertilization drive to joint regulation of aggregate structure optimization and soil microbial community, and the path coefficient of soil aggregates to carbon pool reached 0.99 in 2024. **[Conclusion]** Long-term film mulching and organic fertilizer substitution could significantly improve soil structure and nutrient status, and reshape microbial community structure. Among all treatments, film mulching combined with 75% organic fertilizer substitution presented the best comprehensive performance. Under this condition, the accumulation pathway of soil organic carbon shifted from exogenous organic matter input drive to synergistic drive of soil aggregates and microorganisms. The results can provide a theoretical basis for soil fertility improvement and low-carbon tillage mode construction in dryland farmlands.

Keywords: film mulching; organic fertilizer substitution; soil structure; microbial community; soil organic carbon; carbon sequestration pathway

Received: 2026-04-16

Revised: 2026-05-11

Accepted: 2026-05-19

Online(www.cnki.net): 2026-08-18

土壤有机碳(SOC)作为陆地生态系统中最大的碳库,在直接调节全球碳循环及影响农业生产力、生态系统稳定性和气候变化方面发挥着重要作用^[1-2]。然而,农田土壤生态系统受人为活动影响强烈,在长期集约化耕作和过量化肥投入下,普遍存在有机碳积累缓慢、土壤结构退化等问题,已成为制约农业可持续发展的因素^[3-4]。

覆膜与有机肥替代化肥是提高旱地农田土壤地力的重要措施。覆膜作为干旱与半干旱地区一项关键的节水增产技术,通过改变土壤水热条件影响作物生长。然而,覆膜对SOC的影响并不一致。部分研究^[5]表明,长期覆膜可维持甚至增加表层SOC质量分数,而Ma等^[6]的Meta分析显示,我国西北地区地膜覆盖下表层土壤(0~10 cm)SOC质

量分数下降1.8%。施肥同样是调控SOC积累的关键因素。有机肥富含有机质和植物必需的养分,能直接输入大量有机质,有效提高土壤肥力,改善土壤结构并激发微生物活性^[7]。有研究^[8-9]表明,施用有机肥可显著增加SOC总量及其活性组分和稳定组分,并增强微生物多样性与功能潜力。这些改善促进微生物介导的碳稳定和转化,从而增强土壤固碳潜力^[10]。然而,单施有机肥因其养分释放缓慢,往往难以满足高产作物当季的养分需求^[11]。化学肥料虽能确保养分快速供应和作物稳产,但过量施用会带来土壤退化、水体富营养化和温室气体排放增加等环境风险^[12]。因此,探索化学氮肥减量配施有机肥的替代模式,对协调作物高产与土壤健康至关重要。

适宜的农田管理措施能够有效增加 SOC 积累,但其背后的积累路径,特别是微生物与团聚体对覆膜与有机肥替代的响应与反馈,仍存在诸多不确定性。有学者^[13-14]研究指出,植物残体碳腐解在 SOC 形成中发挥重要作用,也有研究^[15]进一步表明,土壤微生物与团聚体对 SOC 积累起到关键作用。微生物作为土壤碳循环的核心驱动力,通过分解植物残体(异化呼吸)与合成微生物生物量(同化合成)2个关键过程调节 SOC 形成^[16],土壤团聚体则通过物理闭蓄作用和调控微生物栖息环境降低 SOC 分解损失^[17]。

关中平原作为我国西北地区重要粮食产区,以冬小麦-夏玉米轮作体系为主,但该区降水季节分布不均、蒸发量大,长期化肥高投入导致土壤体积质量增大、团聚体稳定性下降及有机碳积累缓慢等问题^[18-19]。因此,本研究依托关中平原 5 a 定位的冬小麦-夏玉米轮作试验(2019 年 6 月至 2024 年 6 月),旨在系统分析覆膜与不同比例有机肥替代化肥对土壤理化性质、团聚体特征及微生物群落结构的影响,采用 Pearson 相关性分析、Mantel 检验与偏最小二乘路

径模型(PLS-PM),揭示土壤结构与微生物介导下覆膜配施有机肥的固碳效应及积累路径,明确最优技术模式,为旱作农田地力提升、化肥减量与低碳耕作提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究依托西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室灌溉试验站开展长期定位观测。该站点地处黄土高原南部典型旱作农业区(34°16′56″N,108°04′30″E),位于陕西省咸阳市杨陵区,海拔 521 m,属暖温带半湿润季风气候,年平均气温 12.9℃,无霜期 169~200 d,年日照时间 2 196 h,昼夜温差 11.5℃。区域降水年内分配极不均衡,7—9 月集中全年大部分降水,年平均降水量 635.55 mm,而蒸发量高达 1 440 mm,水分亏缺显著(图 1)。试验田地势平坦,土层深厚,耕层(0~20 cm)基础理化性状为:土壤 pH(1:1 H₂O)8.07,全氮(TN)1.01 g/kg,速效磷(AP)17.66 mg/kg,速效钾(AK)273.33 mg/kg,土壤体积质量 1.39 g/cm³,地下水埋深较大,对土壤水分补给可忽略。

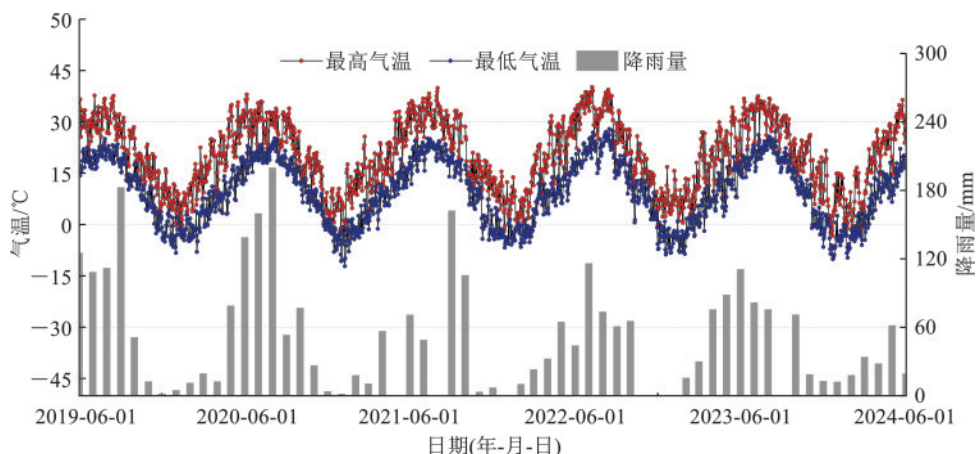


图 1 研究区气温与降水变化

Fig.1 Air temperature and precipitation variations of the study area

1.2 试验设计

田间试验采用裂区设计,主区为是否覆膜(地膜覆盖 M),副区设置 6 个有机肥等氮替代施肥梯度:不施肥(CK)、单施化肥(T0)及有机肥替代化肥 25%(T25)、50%(T50)、75%(T75)、100%(T100),共 12 个处理组合(表 1),3 次重复,小区面积 4.0 m×4.5 m,南北向布设,随机区组排列。供试作物为夏玉米“郑单 958”(生育期 95 d)和冬小麦“小偃 22”(生育期 233 d)。夏玉米行距 60 cm、株距 40 cm,密度 41 667 株/hm²;冬小麦行距 30 cm,每小区 15 行,播量 187.50 kg/hm²。氮磷肥基施,夏玉米季施 N 225 kg/hm²、P₂O₅ 90 kg/hm²,冬小麦季施 N 150 kg/hm²、P₂O₅

100 kg/hm²(表 1)。所用有机肥由中国科学院水利部水土保持研究所节水研究团队与杨凌霖科生态技术有限公司联合研制生产(有机质:30.36%,全氮:1.40%,P₂O₅:1.95%,K₂O:0.38%),全部肥料于播前一次性基施。

1.3 样品采集与测定方法

分别于 2020 年和 2024 年 6 月冬小麦收获后在各小区 0~20 cm 土层取 100 cm³的环刀和原状土样,用于测定土壤物理性质。

1)土壤体积质量。采用环刀法测定,立即称量刚取回的环刀鲜重,烘箱设置 105℃恒温,直至环刀恒重,称取其质量,计算土壤体积质量。

2)团聚体。机械稳定性团聚体:采用干筛法,称取 500 g 风干土放在振荡式机械筛分仪上(筛网孔径依次为 5、2、1、0.5、0.25、0.053 mm),以 300 次/min 的频率振荡 3 min 后停止,按从上到下的次序依次取筛,得到不同级别的土壤团聚体,收集并称取质量;土壤水稳性团聚体:采用湿筛法,将干筛后的土样按上述级别土样在原状土中所占比例

取混合土样 50 g,将其混匀放置在最上层孔径为 5 mm 的套筛中,下层套筛孔径依次分别为 2、1、0.5、0.25、0.053 mm,将最上层筛子中的团聚体刚好浸入去离子水中 10 min 后开启仪器,以 30 次/min 的频率上下振荡 1 min,控制水量洗出各层筛子中的团聚体,烘干称质量,并计算在土样中的质量百分含量。

表 1 2019—2024 年冬小麦与夏玉米不同处理施肥量
Table 1 Fertilizer application rates for winter wheat and summer maize under different treatments from 2019 to 2024
kg/hm²

处理	冬小麦			夏玉米		
	化肥		有机肥 N	化肥		有机肥 (N)
	N	P ₂ O ₅		N	P ₂ O ₅	
MCK/CK	0	0	0	0	0	0
MT0/T0	150.00	100.00	0	225.00	90.00	0
MT25/T25	112.50	100.00	37.50	168.70	90.00	56.30
MT50/T50	75.00	100.00	75.00	112.50	90.00	112.50
MT75/T75	37.50	100.00	112.50	56.30	90.00	168.70
MT100/T100	0	100.00	150.00	0	90.00	225.00

分别于 2020 年和 2024 年 6 月冬小麦收获后,从每个小区采集 5 份土壤样品(0~20 cm)。去除可见根系、残体和非土壤物质,混匀后分为 3 部分:一部分室温风干用于测定土壤全氮和有机碳;一部分于 4 ℃ 保存用于测定土壤硝态氮和铵态氮;另一部分用于立即测定土壤微生物生物量碳氮。土壤 TN 采用凯氏定氮法水解,AA3 连续流动分析仪(SEAL Analytical)测定。SOC 采用重铬酸钾容量法测定;土壤硝态氮和铵态氮用 1 mol/L KCl 浸提,AA3 连续流动分析仪(SEAL Analytical)测定;微生物生物量采用氯仿熏蒸培养法,TOC-L 分析仪(岛津)测定。

1.4 土壤微生物组测序

2020 年和 2024 年冬小麦收获当天,立即清除地表杂物,使用灭菌采样工具从每个小区 0~20 cm 深度采集代表性土壤样品,避免污染或非典型条件。新鲜土壤样品储存在无菌离心管中,液氮速冻≥4 h (或过夜),随后转移至-80 ℃超低温冰箱保存。在 NovaSeq 测序平台通过 16S rDNA 扩增子(靶向 V4 区)和 ITS(内转录间隔区)测序,及时进行细菌和真菌群落分析。

试验流程:

1)基因组 DNA 提取。采用十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)法提取 DNA。通过 1% 琼脂糖凝胶电泳评估纯度和浓度。样品用无核酸酶水稀释至工作浓度 1 ng/μL。

2)PCR 扩增。模板:稀释的基因组 DNA。引物:16S V4:515F(5'-GTGCCAGCMGCCGCGGTAA-

3') 和 806R(5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3'), ITS1: ITS5-1737F(5'-GGAAGTAAAAGTC-GTAACAAGG-3') 和 ITS2-2043R(5'-GCTGCG-TTCTTCATCGATGC-3')。试剂:Phusion® High-Fidelity PCR Master Mix with GC Buffer(New England Biolabs)。

3)PCR 反应体系。包括 Phusion 混合液(2×)15 μL、引物(各 2 μM)3 μL、gDNA(1 ng/μL)和无核酸酶水 2 μL,总体积 30 μL。

4)热循环程序。热循环程序包括初始变性 98 ℃ 1 min,随后 30 个循环的变性(98 ℃,10 s)、退火(50 ℃,30 s)和延伸(72 ℃,30 s),最后 72 ℃延伸 5 min,使用 Bio-Rad T100 梯度 PCR 仪进行。PCR 产物在 1× TAE 缓冲液中的 2%(w/v)琼脂糖凝胶上进行电泳以验证质量。为纯化扩增子,基于荧光定量将 PCR 产物等量混合,然后在 2% 琼脂糖凝胶上进行电泳。切取目标条带(400~450 bp),使用 GeneJET 凝胶回收试剂盒(Thermo Scientific)纯化。使用 Illumina TruSeq DNA PCR-Free Library Preparation Kit 构建文库,通过 Qubit 荧光定量法进行定量,经质量验证后,在 NovaSeq 6000 平台上进行双端测序(2×250 bp)。原始读长经过质量过滤、双端合并和嵌合体去除以生成高质量序列。使用 VSEARCH 在 97% 相似度水平下聚类操作分类单元(OTU),并分别针对 SILVA(16S rRNA)和 UNITE(ITS)数据库进行细菌和真菌群落分析的分类学鉴定。

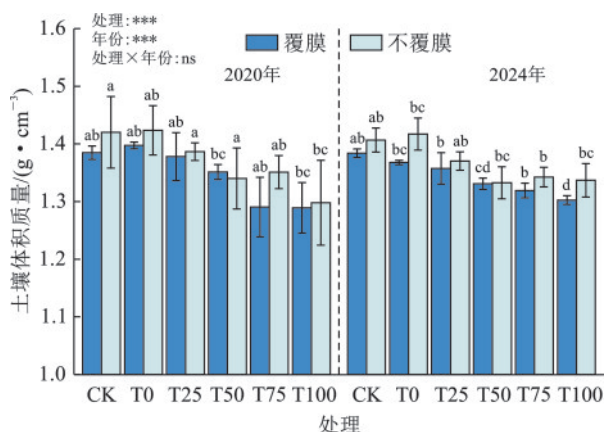
1.5 数据分析

所有试验数据均使用 Microsoft Excel 2016 软件处理。用 SPSS 26 软件对数据进行统计分析。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)比较同一年份内不同处理间的差异,并运用 Tukey's HSD 法进行多重比较($p < 0.05$)。采用双因素方差分析(Two-way ANOVA)评估年份、处理及其交互作用对各测定指标的影响。基于 Bray-Curtis 距离的主坐标分析(PCoA)用于表征微生物群落结构的差异,并辅以 PERMANOVA(非参数多元方差分析)检验处理间的显著性。为探究环境因子、土壤养分与微生物群落间的复杂关系,利用软件 R(v4.4.2);调用 ggcor 程序包进行 Pearson 相关性分析与 Mantel 检验;调用 plsmp 程序包构建偏最小二乘路径模型(PLS-PM),以解析多变量间的直接与间接影响效应。所有统计图表均通过 Origin 2022 软件生成。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

2.1.1 土壤体积质量 2020 年和 2024 年 0~20 cm 土层土壤体积质量在不同处理间存在明显差异,整体随有机肥替代比例的增加而下降,且覆膜处理下降幅度更大(图 2)。2020 年,覆膜条件下土壤体积质量为 1.29~1.40 g/cm³,T100 最低,较 CK 低 6.91%,T50、T75、T100 处理分别较 CK 下降 2.41%、6.80% 和 6.91%;不覆膜条件下同样 T100 最低,较 CK 降低 8.59%,T50、T75、T100 处理分别较 CK 下降 5.64%、4.87% 和 8.59%。2024 年,覆膜条件下土壤体积质量变化较 2020 年减小,为 1.30~1.38 g/cm³,T100 最低,较 CK 下降 5.88%;不覆膜条件下 T50 最低,较 CK 下降 5.26%。



注:图柱上方不同小写字母表示同一年份内不同处理间差异显著($p < 0.05$);***表示 $p < 0.001$ 。下同。

图 2 2020 年和 2024 年 0~20 cm 土层土壤体积质量

Fig.2 Soil bulk density in the 0-20 cm soil layer in 2020 and 2024

2.1.2 土壤团聚体粒级结构 2020 年和 2024 年 0~20 cm 土层机械稳定性团聚体均以 ≥ 5 mm 粒级为主(图 3a、图 3b)。2020 年,T75、CK 和 MT50 处理 ≥ 5 mm 机械稳定性团聚体含量较高,T50 最低。与土壤大团聚体变化趋势一致,T50 处理在 5~2、2~1、1~0.5 mm 粒级上的比例均较高,团聚体结构较差。相较于对照,覆膜条件下 T0、T50 和 T75 均提高大团聚体比例,而不覆膜条件下除 T75 外,其余处理对 ≥ 5 mm 团聚体的促进作用不显著。2024 年,各处理机械稳定性团聚体分布仍以 ≥ 5 mm 粒级为主,MT50 最高,CK 和 T75 也处于较高水平,而 T50 仍为最低。覆膜条件下,大多数处理较 2020 年大团聚体质量比例提高,其中 T50 和 T75 最为明显。

与机械稳定性团聚体相比,水稳性团聚体对覆膜与有机肥替代的响应更为明显(图 3c、图 3d)。2020 年,各处理水稳性团聚体以 < 0.05 mm 粒级为主,土壤中易分散细颗粒比例较高,水稳性较弱。其中,CK 和 MCK 处理 < 0.05 mm 粒级含量最高,而 MT50 最低。与之对应,MT50、MT75 和 MT100 在 0.5~0.25 mm 粒级上的比例相对较高,T25、T50 和 T75 在该粒级质量比例也明显增加,表明有机肥替代能够促进部分细颗粒向较大粒级团聚体转化。2020 年各处理水稳性团聚体 ≥ 0.25 mm 的含量约为 14.57%~35.18%,MT75、MT50 和 MT100 较高,表明覆膜与有机肥替代对水稳性大团聚体形成有一定促进作用。2024 年,各处理水稳性团聚体组成发生明显变化, < 0.05 mm 粒级显著下降,而 2~1、1~0.5、0.5~0.25 mm 等粒级比例普遍上升,土壤水稳性团聚体稳定性增强。覆膜条件下,T0 在 1~0.5 mm 粒级上的比例最高,T75 在 2~1、0.5~0.25 mm 粒级上较突出,T100 则在 ≥ 5 mm 粒级上达到最高值。各处理 ≥ 0.25 mm 的水稳性团聚体含量大幅提高,明显高于 2020 年。

2.1.3 土壤有机碳及储量 2020 年和 2024 年 0~20 cm 土层土壤有机碳含量和有机碳储量在不同处理间均存在明显差异,总体随有机肥替代比例增加而提高(图 4),中高替代比例处理有机碳含量较高。2020 年,覆膜条件下,T100 处理 SOC 含量最高,为 12.50 g/kg,其次为 T50,分别较 CK 提高 85.87% 和 44.83%,T0 最低,较 CK 下降 8.34%;在不覆膜条件下,SOC 含量为 5.99~10.77 g/kg,同样 T100 处理最高,10.77 g/kg,T0 最低。2020 年 SOC 储量在覆膜条件下 T100 最高,为 30.31 t/hm²,较 CK 提高 71.40%。

2024 年,SOC 含量和储量进一步变化。覆膜条件下 SOC 含量 T75 处理最高,为 12.75 g/kg,较 CK 提高 79.97%;不覆膜条件下 T50 最高,较 CK 提高

32.30%,SOC 储量覆膜条件下 T75 也达到最高,为 33.80 t/hm²,显著高于其他处理。2024 年大多数处理 SOC 储量有所增加,覆膜条件下 T25、T50 和 T75 较为显著,不覆膜条件下 T0、T25 和 T50 提升明显,随着试验持续,中高有机肥替代比例对土壤碳库积累的促进作用逐渐增强。

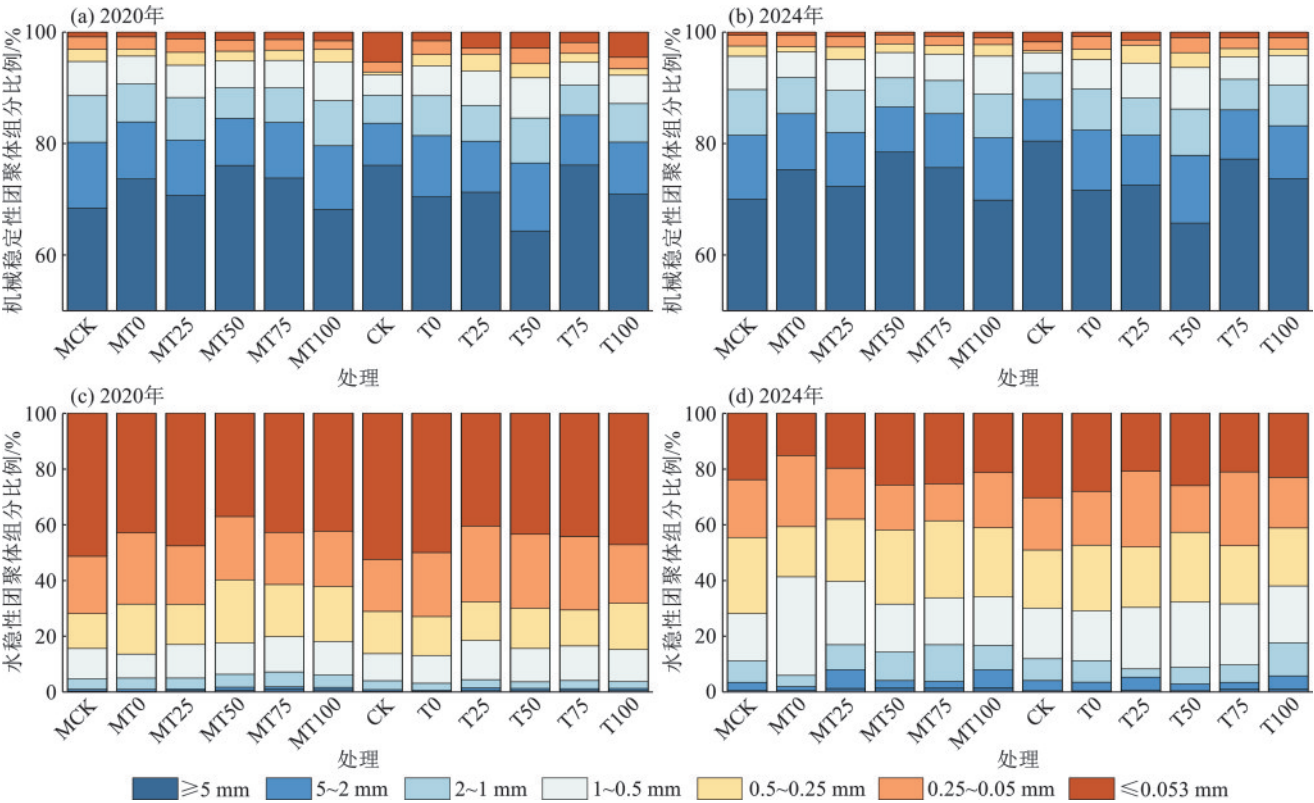


图 3 2020 年和 2024 年 0~20 cm 土层土壤团聚体粒径分布
Fig. 3 Particle size distribution of soil aggregates in the 0~20 cm soil layer in 2020 and 2024

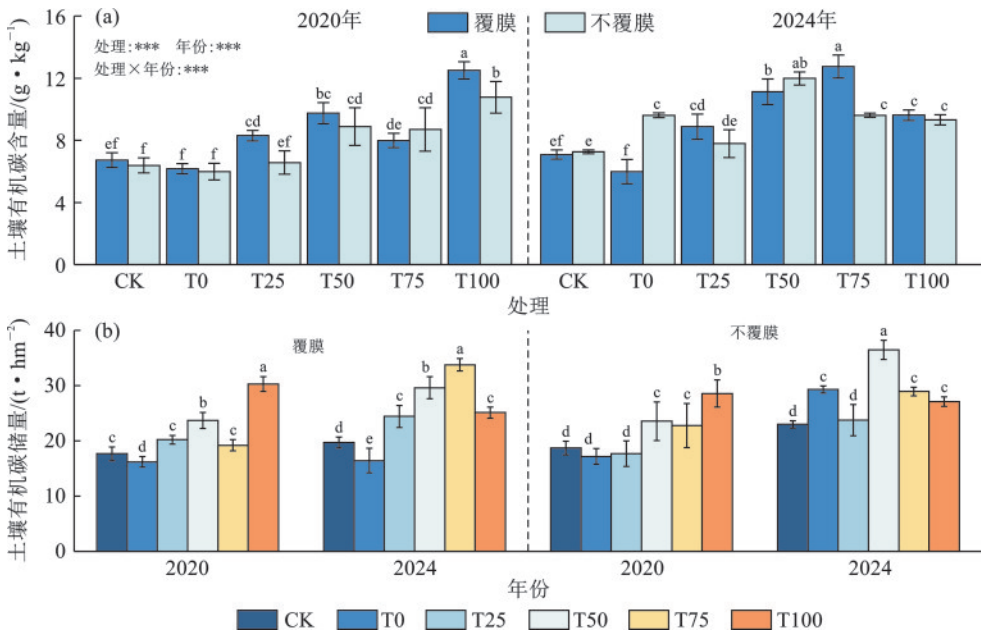


图 4 2020 年和 2024 年 0~20 cm 土层土壤有机碳含量与储量
Fig. 4 Soil organic carbon mass fraction and stock in the 0~20 cm soil layer in 2020 and 2024

2.1.4 土壤全氮及无机氮 2020 年和 2024 年 0~20 cm 土层土壤全氮及无机氮含量在不同处理间均存在明显差异,随有机肥替代比例增加呈上升趋势,硝态氮含量显著高于铵态氮,是土壤中无机氮的主要组成部分(表 2)。2020 年,覆膜条件下土壤全氮含量 T75 处理最高,较 CK 提高 11.16%;不覆膜条件下 T100 最高,较 CK 提高 4.71%。铵态氮含量覆膜与不覆膜处理差异不显著,整体增幅较小。覆膜处理后

硝态氮含量明显高于不覆膜处理,但均在 100% 有机替代比例下达到最高。2024 年,各处理土壤氮素状况改善。覆膜条件下土壤全氮、铵态氮和硝态氮平均含量较 2020 年分别提高 3.48%、5.20% 和 16.09%,不覆膜条件下分别提高 4.98%、0.00% 和 10.25%,硝态氮增幅最大。与对照相比,有机肥替代处理提高土壤全氮和无机氮含量,替代比例为 50%、75% 和 100% 的处理表现较为突出,覆膜条件下促进作用更强。

表 2 2020 年和 2024 年全氮及无机氮含量
Table 2 Total nitrogen and inorganic nitrogen contents in 2020 and 2024

年份	处理	全氮/ (g·kg ⁻¹)	硝态氮/ (mg·kg ⁻¹)	铵态氮/ (mg·kg ⁻¹)
2020	MCK	0.58±0.06bc	42.66±3.61d	1.87±0.21cd
	MT0	0.58±0.06bc	48.33±4.42cd	1.83±0.24cd
	MT25	0.58±0.06bc	47.53±8.75cd	2.01±0.30bc
	MT50	0.62±0.02ab	57.09±7.89ab	1.92±0.24cd
	MT75	0.64±0.02a	57.18±5.91ab	2.22±0.18ab
	MT100	0.64±0.02a	60.09±3.26a	2.29±0.35a
	CK	0.59±0.03bc	44.95±5.78d	1.71±0.31d
	T0	0.47±0.02e	45.45±5.30d	1.74±0.23d
	T25	0.51±0.04de	48.94±4.65cd	1.95±0.09c
	T50	0.53±0.03cd	54.16±5.97bc	2.14±0.36ab
2024	T75	0.56±0.02bc	54.67±6.56bc	2.32±0.19a
	T100	0.62±0.02ab	55.73±5.14ab	2.08±0.30ab
	MCK	0.48±0.01e	38.27±3.56e	1.70±0.07e
	MT0	0.56±0.03cd	42.65±4.25de	1.80±0.04de
	MT25	0.69±0.03ab	58.97±5.46d	2.19±0.23bc
	MT50	0.68±0.04ab	70.40±7.24ab	2.26±0.26b
	MT75	0.70±0.01a	76.63±5.38a	2.49±0.32a
	MT100	0.66±0.02b	76.30±4.73a	2.35±0.47ab
	CK	0.49±0.01e	32.65±4.74e	1.71±0.31de
	T0	0.58±0.02c	46.97±6.29de	1.74±0.23de
	T25	0.57±0.01c	54.34±4.06d	1.95±0.09cd
	T50	0.59±0.04c	61.70±4.86c	2.14±0.36bc
	T75	0.59±0.01c	67.41±4.92b	2.32±0.19ab
	T100	0.62±0.02bc	71.97±4.28ab	2.08±0.30bc

注:同列不同小写字母表示同一年份内不同处理间差异显著($p<0.05$)。

2.2 土壤微生物群落结构变化

2.2.1 土壤微生物生物量碳氮 2020 年和 2024 年表层土壤微生物量碳(MBC)、微生物量氮(MBN)及微生物量碳氮比(MBC/MBN)在不同处理间差异明显,覆膜与不覆膜条件下变化趋势不一致(图 5)。2020 年 MBC 和 MBN 均随有机肥替代比例提高而增加,MBC 在覆膜条件下 T75 处理最高,为 298.19 mg/kg,不覆膜条件下 T100 最高,为 290.92 mg/kg,较对照分别提高 207.01% 和 144.46%;

MBN 则在不覆膜 T75 处理达到最高,为 34.20 mg/kg。2024 年覆膜处理下 MBC 在 CK、MT50 和 MT75 处理中较 2020 年分别提高 50.34%、12.71% 和 0.40%;不覆膜处理中仅 CK 提高 35.08%,其余处理均下降,其中 T25 降幅最大。MBN 在 2024 年整体低于 2020 年,覆膜处理不同有机肥替代比例处理降低 23.23%~54.65%,不覆膜处理中仅 CK 和 T100 处理有所提高。MBC/MBN 在覆膜条件下明显升高,尤其 MT50 和 MT75 处理分别增加到 15.32 和 19.90,不覆膜处理变化幅度较小。

2.2.2 土壤微生物群落结构 2020 年和 2024 年表层土壤细菌和真菌群落的 Chao1 指数与香农指数在不同处理间存在差异(图 6)。2024 年细菌群落 Chao1 指数较 2020 年整体下降,而香农指数有所升高;真菌群落的 Chao1 指数和香农指数则均明显低于 2020 年。2020 年细菌群落 Chao1 指数在 MT50 和 T25 处理中最高,2024 年 T50 和 T100 处理较高。总体来看,长期覆膜与有机肥替代下土壤细菌群落丰富度下降但多样性升高,而真菌群落的丰富度和多样性均呈下降趋势。

随着试验的持续,不同处理后的土壤细菌和真菌群落组成均发生明显变化(图 7a)。细菌群落 2020 年主要优势菌门为变形菌门、酸杆菌门和放线菌门;2024 年则以酸杆菌门、放线菌门、变形菌门、芽单孢菌门和绿弯菌门为主,群落结构随处理持续而趋于稳定。真菌群落在 2020 年和 2024 年均以子囊菌门为绝对优势菌门,2024 年子囊菌门相对丰度较 2020 年升高,群落集中化更为明显。PCoA 分析表明,覆膜处理对土壤微生物群落结构具有显著影响(图 7b)。2020 年和 2024 年,细菌与真菌群落在覆膜与不覆膜处理间均表现出明显分离,覆膜处理总体分布于 PC1 正轴,不覆膜处理则主要分布于 PC1 负轴,表明覆膜是驱动群落结构差异的重要因素。同时,不同有机肥替代处理也表现出一定离散,表明有机肥替代比例也对群落结构产生影响。

2.2.3 微生物群落对覆膜配施有机肥的响应特征 将 2020 年、2024 年土壤微生物群落结构与土壤理化性质(SOC、有机碳储量 SOC_s、TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、MBC、MBN、体积质量和团聚体破坏率)进行 Mantel 检验和 Pearson 相关分析。结果表明,随着试验持续,微生物群落对土壤环境变化的响应特征发生显著转变(图 8)。2020 年,细菌群落与 SOC、TN 呈显著正相关,在覆膜配施有机肥的初始作用下,细菌群落主要受土壤碳氮养分驱动。2024 年,SOC、SOC_s 和 TN 仍保持显著作用,同时 NO₃⁻-N、

土壤体积质量(BD)和团聚体破坏率(PAD)与细菌群落结构的相关性明显增强,长期覆膜与有机肥替代使细菌群落由单一养分驱动转向土壤养分与物理结构协同驱动,NO₃⁻-N成为重要筛选因子。与细菌群落相比,真菌群落对覆膜配施有机肥的响应特征存在显著差异,且响应具有滞后性。2020年,真菌群

落仅与SOCs呈显著相关,主要依赖稳定碳源供给,对新鲜外源有机质的敏感性显著低于细菌。2024年,与SOC、SOCs、TN的相关性逐步减弱甚至完全消失,而与PAD、BD的相关性显著提升,长期处理引起土壤结构优化,真菌群落结构驱动机制由碳源驱动转向团聚体稳定与土壤体积质量主导。

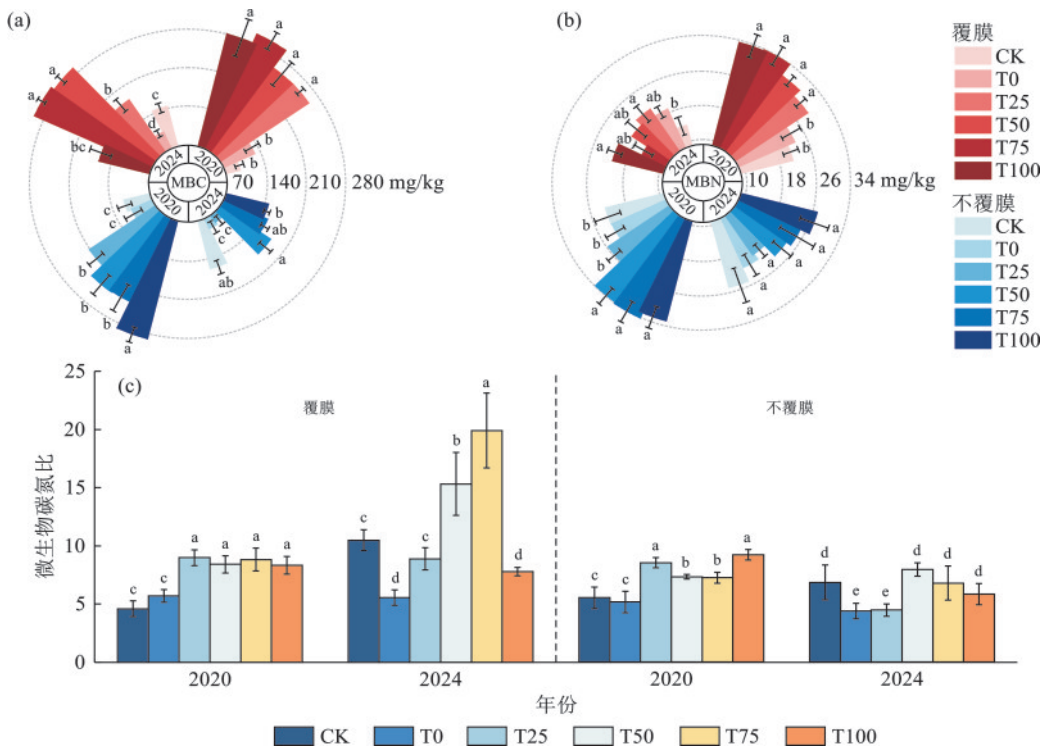


图5 2020年和2024年0~20 cm土壤微生物量

Fig.5 Microbial biomass in the 0-20 cm soil in 2020 and 2024

2.3 土壤结构与微生物介导的有机碳积累路径分析

采用偏最小二乘路径模型(PLS-PM)对2020年和2024年土壤各项指标进行分析。模型包含5个潜变量:外源驱动因子(覆膜和施肥)、微生物群落特征(细菌群落、真菌群落和微生物量)、土壤物理结构(土壤团聚体)和土壤碳库(土壤有机碳含量和储量)。结果表明,2020年模型拟合优度为0.555,2024年提升至0.711,随试验持续,模型对各变量间调控关系的解释度更高,结果稳定性更强(图9)。2020年施肥是有机碳积累的核心驱动因子,对微生物量和土壤碳库均表现出显著的直接正效应;覆膜对有机碳积累的直接效应不显著。土壤团聚体对细菌、真菌群落及微生物量具有一定调控作用,对土壤碳库存在正向影响,但该效应显著低于施肥的直接驱动效应。2024年有机碳积累路径发生显著变化。土壤团聚体对土壤碳库的正向驱动效应大幅增强,路径系数高达0.99,成为有机碳积累的主导因子;施肥与覆膜对土壤碳库的直接效应减弱,微生物群落结构在土壤团聚体结构与土壤碳库间的介导作用显著增强,与土壤团聚体共同促进土壤有机碳积累。

3 讨论

3.1 覆膜配施有机肥对旱作农田土壤结构与碳氮养分的协同调控效应

多年覆膜配合有机肥替代能够显著降低土壤体积质量,提高团聚体稳定性,并促进土壤有机碳和氮素积累,有利于旱地农田地力提升,与多数研究^[20-21]结果一致。有机肥替代能够输入外源有机质,提升土壤有机碳质量分数,为土壤团聚体形成提供充足的胶结物质,有效改善团聚体结构和体积质量^[22];地膜覆盖能够改善土壤水热条件,促进作物根系生长与微生物代谢活动^[23],根系分泌物与微生物胞外多糖等代谢产物进一步强化土壤颗粒的胶结作用^[24],二者耦合能够显著提升土壤结构的优化效果。本研究中覆膜配施有机肥处理的SOC质量分数与团聚体稳定性均显著高于不覆膜处理,可能是由于有机肥持续输入外源碳抵消覆膜增温保墒可能引发的有机质矿化加速,同时覆膜提升作物生物量,进一步补充土壤碳源,最终实现土壤结构优化与碳库积累的正向效应^[25]。

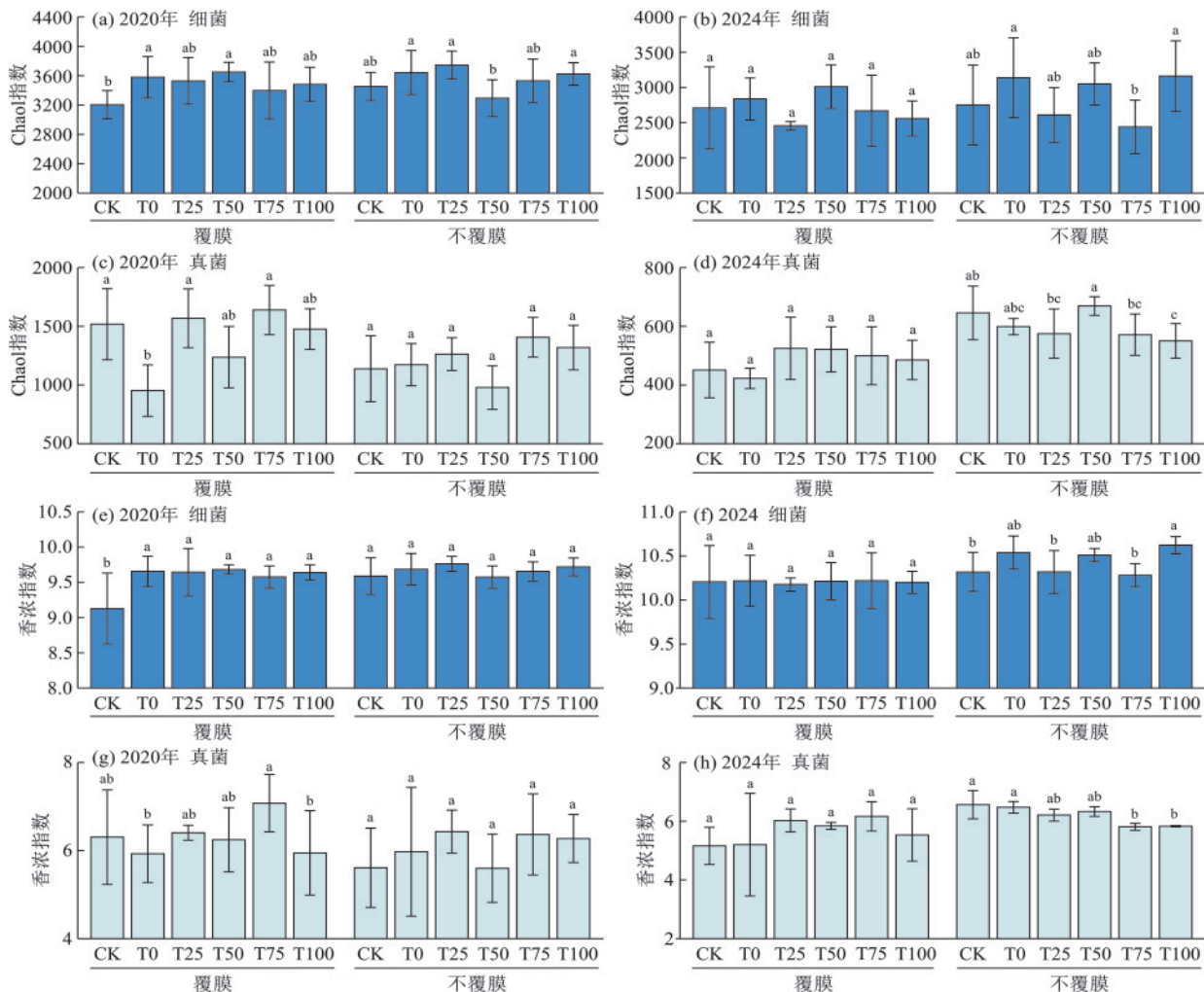


图 6 2020 年和 2024 年表层土壤微生物 α 多样性指数

Fig.6 Topsoil microbial alpha diversity indices in 2020 and 2024

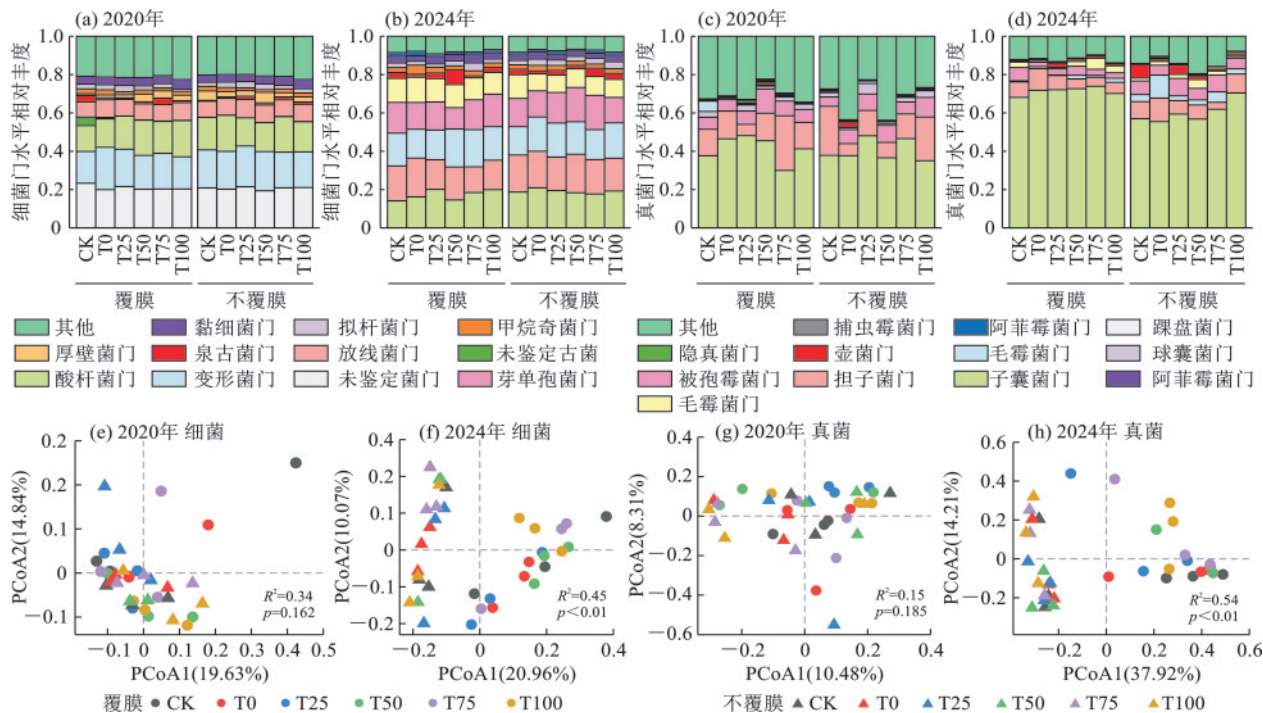
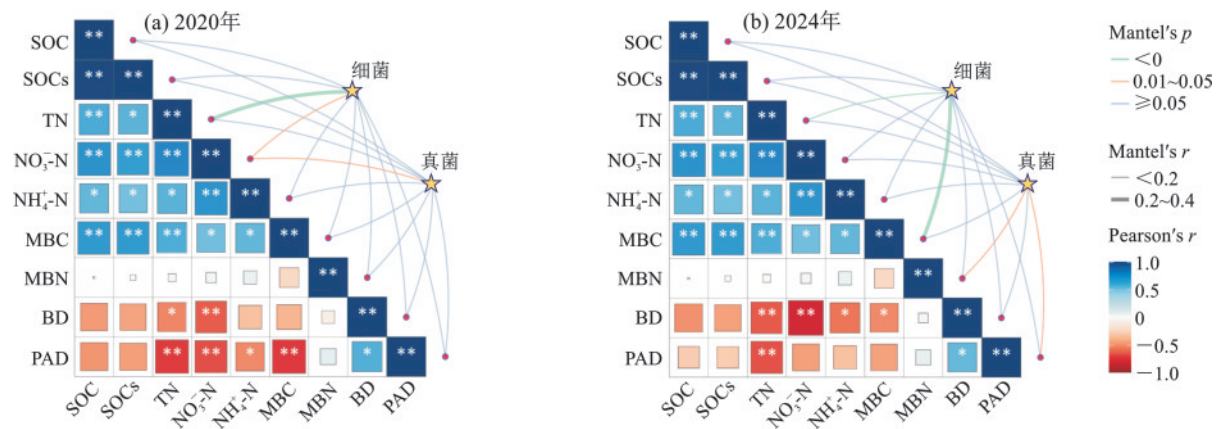


图 7 2020 年和 2024 年不同处理下微生物群落组成与结构

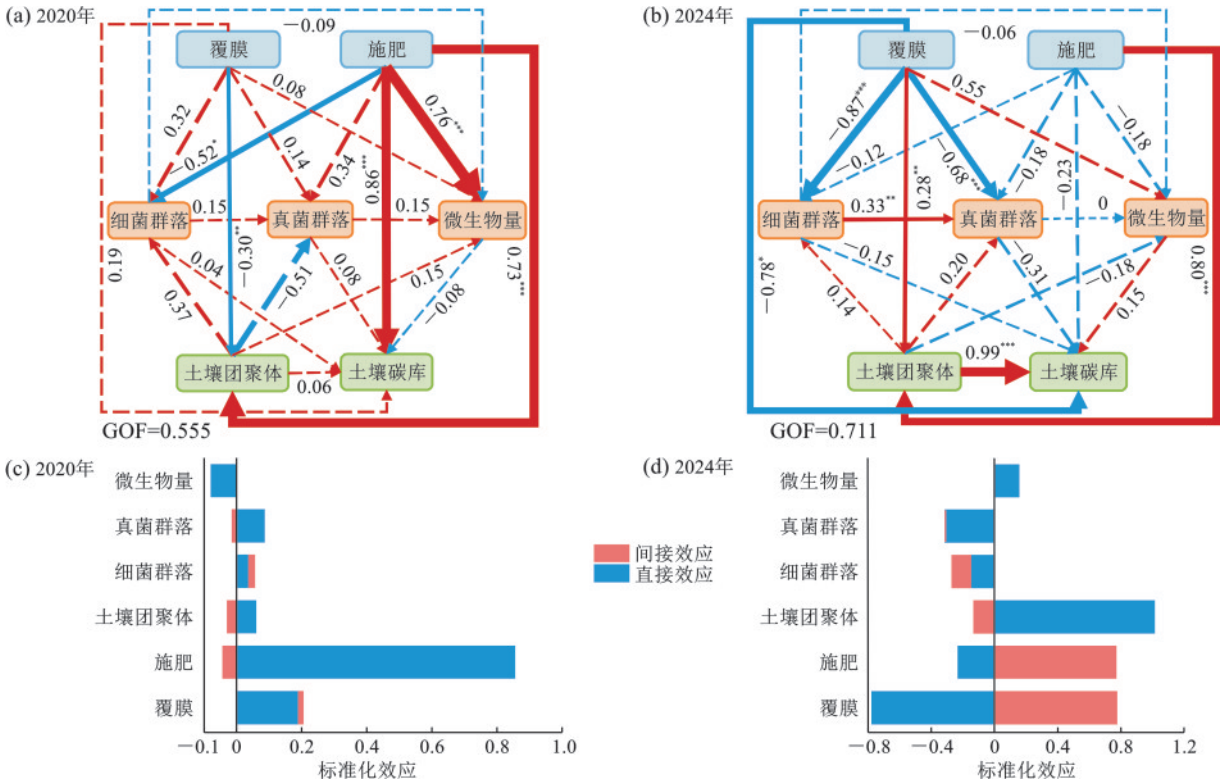
Fig.7 Composition and structure of microbial communities under different treatments in 2020 and 2024



注:*,**和***分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平上显著。

图 8 基于 Mantel 检验和 Pearson 相关分析的土壤环境因子与微生物群落结构关系

Fig.8 Relationships between soil environmental factors and microbial community structure based on Mantel test and Pearson correlation analysis



注:图中红色和蓝色箭头分别表示正、负效应;实线和虚线分别表示显著、不显著路径;箭头旁数字为标准化路径系数;GOF 表示模型拟合优度。

图 9 偏最小二乘路径模型 (PLS-PM) 模拟 2020 年和 2024 年土壤有机碳积累路径

Fig.9 PLS-PM illustrating the pathways of soil organic carbon accumulation in 2020 and 2024

土壤 SOC 与氮素含量整体随有机肥替代比例升高呈上升趋势,但并非 100% 有机肥替代处理效果最优,而是 MT75 处理达到峰值,该结果与蓝贤瑾等^[26]关于有机无机配施在旱作农田长期培肥中的效果最优一致。75% 有机肥替代既能通过有机肥实现外源有机碳的持续补充与养分缓释,又能通过适量化肥满足作物当季生长的速效养分需求,保障作物生物量与根系分泌物的稳定输入,因此长期培肥效果最优。

3.2 覆膜配施有机肥下土壤微生物群落的演替特征及其环境驱动机制

土壤微生物群落结构与多样性的动态变化,直接反映旱作农田土壤生态系统对长期覆膜配施有机肥的响应规律。本研究发现,经过 5 a 定位试验,土壤细菌群落丰富度下降而多样性升高,真菌群落丰富度与多样性均呈下降趋势,与 Liu 等^[27]、胡媛媛等^[28]研究结论一致,主要是由于长期覆膜配施有机肥使环境筛选效应与生态位分化共同作用增强^[29]。试验

初期细菌优势菌门为变形菌门,属于典型的富营养型微生物,对新鲜有机底物与速效养分响应敏感^[30],而随着试验持续,酸杆菌门、放线菌门逐步成为优势类群,这类寡营养型微生物更适应稳定的土壤微环境,可分解利用复杂有机质,其相对丰度提升表明土壤生态过程由初期的养分快速周转,逐步转向后期的有机质稳定转化^[31]。真菌群落初期仅受土壤稳定碳库驱动,后期则完全转向土壤团聚体结构与土壤体积质量主导,子囊菌门绝对优势地位进一步强化。此现象与真菌的生长繁殖特性直接相关^[32]:真菌主要通过菌丝延伸实现定殖与养分获取,土壤体积质量过高与团聚体不稳定直接破坏菌丝连续性、限制菌丝延伸空间,因此真菌对土壤物理结构变化的敏感性远高于养分变化。

3.3 覆膜配施有机肥下土壤有机碳积累的路径演变

试验初期,SOC 积累路径以施肥的直接正向驱动为核心,有机肥和新鲜有机物料直接补充土壤碳库,快速提升 SOC 与 SOC_s;同时化肥补充速效氮,改善有机肥的碳氮比,为微生物分解有机物料提供足够氮源,大幅提升微生物对新鲜有机质的分解利用效率,短期内快速提升微生物量碳(MBC),促进活性有机碳组分的积累^[33]。经过 5 a 处理,土壤团聚体成为 SOC 积累的绝对主导因子,覆膜与施肥几乎完全通过改善土壤结构、调控微生物群落间接调控土壤有机碳积累,形成土壤团聚体物理保护层介导与微生物群落功能转化介导的协同固碳机制,与 Ni 等^[34]、Li 等^[35]研究结论一致。

基于土壤团聚体层级理论^[36],长期覆膜配施有机肥通过多层级发挥对 SOC 的物理保护作用。长期处理下水稳性大团聚体质量比例大幅提升,通过闭蓄作用减少有机碳与氧气、胞外酶的接触,大幅降低有机质的矿化分解速率,为 SOC 固存提供物理屏障;大团聚体内部形成的微团聚体,通过对微生物残体碳、腐殖质等稳定有机碳组分的纳米级包裹,形成 SOC 长期稳定的重要场所;团聚体内部形成的有氧与厌氧异质微环境,既为好氧微生物分解有机质提供场所,也为厌氧微生物合成稳定有机质提供适宜条件,同时限制土壤动物对微生物的捕食活动,维持微生物群落的功能稳定性。长期处理促使微生物群落结构重构,成为 SOC 稳定积累的核心动力。微生物群落功能转化:细菌群落优势菌门由富营养型转为寡营养型,能快速固定活性有机碳,真菌群落功能特化,菌丝可通过物理缠绕构建团聚体骨架,成为土壤结构优化与有机碳积累的桥梁;同时,微生物群落的介导效率大幅提升,尽管试验后期微生物生物量

氮有所下降,但 MBC/MBN 比值显著升高,微生物群落由氮素限制的繁殖转向碳库限制的同化,碳利用效率显著提升,更多的有机碳被同化为微生物生物量,最终以微生物残体碳的形式稳定固存于土壤中。

土壤团聚体与微生物的介导作用并非 2 个独立过程,而是形成“外源有机物料输入促进微生物代谢同化,微生物分泌物胶结土壤颗粒促进土壤团聚体形成,从而提升微生境异质性,引发微生物功能定向演替,高效固定有机碳,分泌胶结物质,最终进一步促进团聚体稳定”的正向循环,随着循环的建立,土壤固碳效应从初期的无序不稳定状态,逐步演化为有序自我维持的稳定状态。

4 结 论

1)覆膜配施有机肥可显著优化旱作农田土壤结构,提升土壤碳氮养分库容。MT75 处理综合效果最优,可有效降低土壤体积质量,增加水稳性大团聚体比例,显著提升土壤有机碳、有机碳储量及氮素水平,SOC 和 SOC_s 分别较 MCK 提高 79.97% 和 80.89%,是旱作区土壤改良与固碳增效的适宜耕作模式。

2)长期覆膜配施有机肥显著重塑微生物群落结构与演替规律。细菌群落由养分单一驱动转向养分与物理结构协同驱动,真菌群落由碳源驱动转向团聚体结构主导。

3)长期覆膜配施有机肥下土壤有机碳积累路径随试验持续发生根本转变,由早期外源施肥直接驱动,演变为土壤团聚体物理保护与微生物群落共同介导的稳定固碳模式,团聚体对碳库的调控作用占主导地位。

参考文献:

- [1] Hari M, Tyagi B. Terrestrial carbon cycle: Tipping edge of climate change between the atmosphere and biosphere ecosystems [J]. *Environmental Science: Atmospheres*, 2022, 2(5): 867-890.
- [2] Lin Junjie, Hui Dafeng, Kumar A, et al. Editorial: Climate change and/or pollution on the carbon cycle in terrestrial ecosystems [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, 11: e1253172.
- [3] 欧阳硕, 庞国伟, 袁笑甜, 等. 黄土高原土壤质量评价及其主导影响因素[J]. *土壤学报*, 2025, 62(6): 1635-1650. Ouyang Shuo, Pang Guowei, Yuan Xiaotian, et al. Assessment of soil quality and dominant influencing factors on the Loess Plateau [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62(6): 1635-1650.
- [4] 蒋锐, 郭升, 马德帝. 旱地雨养农业覆膜体系及其土壤生态环境效应[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(3): 317-328. Jiang Rui, Guo Sheng, Ma Dedi. Review of plastic film

- mulching system and its impact on soil ecological environment in China's rainfed drylands[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(3): 317-328.
- [5] Liu Jianliang, Bu Lingduo, Zhu Lin, et al. Optimizing plant density and plastic film mulch to increase maize productivity and water-use efficiency in semiarid areas[J]. Agronomy Journal, 2014, 106(4): 1138-1146.
- [6] Ma Dedi, Chen Lei, Qu Hongchao, et al. Impacts of plastic film mulching on crop yields, soil water, nitrate, and organic carbon in northwestern China: A meta-analysis[J]. Agricultural Water Management, 2018, 202: 166-173.
- [7] 魏夏新, 熊俊芬, 李涛, 等. 有机物料还田对双季稻田土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(7): 2373-2380.
- Wei Xiaxin, Xiong Junfen, Li Tao, et al. Effects of different organic amendments on soil organic carbon and its labile fractions in the paddy soil of a double rice cropping system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(7): 2373-2380.
- [8] 简秀梅, 陈学濡, 刘富豪, 等. 不同灰分生物质炭对红壤理化特性与微生物特性的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 282-291.
- Jian Xiumei, Chen Xueru, Liu Fuhao, et al. Effects of biochars with various ash contents on physiochemical properties and microbial community quantity and activity in red soils[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 282-291.
- [9] 赵娜, 王小利, 何进, 等. 有机肥替代化学氮肥对黄壤活性有机碳组分、酶活性及作物产量的影响[J]. 环境科学, 2024, 45(7): 4196-4205.
- Zhao Na, Wang Xiaoli, He Jin, et al. Effects of replacing chemical nitrogen fertilizer with organic fertilizer on active organic carbon fractions, enzyme activities, and crop yield in yellow soil[J]. Environmental Science, 2024, 45(7): 4196-4205.
- [10] Shu Xiangyang, He Jia, Zhou Zhenghu, et al. Organic amendments enhance soil microbial diversity, microbial functionality and crop yields: A meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2022, 829: e154627.
- [11] 唐继伟, 徐久凯, 温延臣, 等. 长期单施有机肥和化肥对土壤养分和小麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(11): 1827-1834.
- Tang Jiwei, Xu Jiukai, Wen Yanchen, et al. Effects of organic fertilizer and inorganic fertilizer on the wheat yields and soil nutrients under long-term fertilization[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(11): 1827-1834.
- [12] 李婷, 吴海波. 施用化肥对农业生态环境的影响及对策[J]. 智慧农业导刊, 2022, 2(19): 46-48.
- Li Ting, Wu Haibo. Effect of chemical fertilizer application on agricultural ecological environment and its countermeasures[J]. Journal of Smart Agriculture, 2022, 2(19): 46-48.
- [13] Loranger G, Ponge J F, Imbert D, et al. Leaf decomposition in two semi-evergreen tropical forests: Influence of litter quality[J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, 35(4): 247-252.
- [14] Hedges J I, Keil R G. Sedimentary organic matter preservation: An assessment and speculative synthesis[J]. Marine Chemistry, 1995, 49(2/3): 81-115.
- [15] Wen Yunjie, Liu Xian, Yang Na, et al. The contribution of microbial- and plant-derived carbon to soil organic carbon fractions and stability under manure application combined with straw incorporation[J]. Agronomy, 2025, 15(6): e1424.
- [16] Liang Chao, Schimel J P, Jastrow J D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage[J]. Nature Microbiology, 2017, 2(8): e17105.
- [17] 张迎春, 王萍, 刘亚龙, 等. 长期植稻土壤团聚体有机碳组分的演变规律及其潜在固持机制[J]. 土壤学报, 2025, 62(4): 1049-1058.
- Zhang Yingchun, Wang Ping, Liu Yalong, et al. Evolution patterns and underlying sequestration mechanisms of organic carbon components in soil aggregates under long-term rice cultivation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(4): 1049-1058.
- [18] 谢钧宇, 彭博, 王仁杰, 等. 长期不同施肥对壤土大团聚体中有机碳组分特征的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(7): 1073-1083.
- Xie Junyu, Peng Bo, Wang Renjie, et al. Effects of long-term different fertilizations on organic carbon fractions of macroaggregates in Anthrosol[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(7): 1073-1083.
- [19] 尹本酥, 李振发, 岳蓉, 等. 基于温度植被干旱指数的关中地区旱情监测[J]. 农业工程学报, 2024, 40(17): 111-119.
- Yin Bensu, Li Zhenfa, Yue Rong, et al. Monitoring drought in Guanzhong areas using temperature-vegetation drought index[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(17): 111-119.
- [20] 冯浩亮, 韩晓增, 陆欣春, 等. 有机培肥影响土壤团聚体形成与稳定的研究进展[J]. 土壤与作物, 2023, 12(4): 393-400.
- Feng Haoliang, Han Xiaozeng, Lu Xinchun, et al. Research progress on the formation and stability of soil aggregates by organic fertilization[J]. Soils and Crops, 2023, 12(4): 393-400.
- [21] 石艳香, 迟凤琴, 张久明, 等. 不同施肥处理黑土中添加秸秆对土壤团聚体稳定性及有机碳贡献率的影响[J]. 土壤通报, 2023, 54(4): 856-863.
- Shi Yanxiang, Chi Fengqin, Zhang Jiuming, et al.

- Effects of straw addition on stability of soil aggregates and contribution of organic carbon under different fertilization treatments in black soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(4): 856-863.
- [22] Wang Ping, Wang Jidong, Zhang Hui, et al. The role of iron oxides in the preservation of soil organic matter under long-term fertilization[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(2): 588-598.
- [23] 王永亮, 胥子航, 李申, 等. 不同覆盖措施对土壤水热状况及春玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 作物学报, 2024, 50(5): 1312-1324.
- Wang Yongliang, Xu Zihang, Li Shen, et al. Effects of different mulching measures on moisture and temperature of soil and yield and water use efficiency of spring maize [J]. Acta Agronomica Sinica, 2024, 50(5): 1312-1324.
- [24] 马征, 李振轮, 杨裕然, 等. 土壤生物驱动团聚体形成及稳定的机制与相关应用研究进展[J]. 土壤学报, 2026, 63(1): 135-150.
- Ma Zheng, Li Zhenlun, Yang Yuran, et al. Research progress on the mechanism and related application of soil bio-driven aggregates formation and stability [J]. Acta Pedologica Sinica, 2026, 63(1): 135-150.
- [25] 王钰皓, 庞津雯, 卫婷, 等. 旱作农田覆膜和秸秆碳投入对土壤团聚特性及作物产量的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61(1): 272-284.
- Wang Yuhao, Pang Jinwen, Wei Ting, et al. Coupled effects of film mulching and straw-derived carbon inputs on soil aggregate characteristics and crop yields in semiarid areas[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(1): 272-284.
- [26] 蓝贤瑾, 刘益仁, 侯红乾, 等. 长期有机无机肥配施对红壤性水稻土微生物生物量和有机质结构的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(5): 810-819.
- Lan Xianjin, Liu Yiren, Hou Hongqian, et al. Effect of long-term organic manure application combined with chemical fertilizers on soil microbial biomass and organic matter structure in red paddy [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(5): 810-819.
- [27] Liu Xiaowei, Wen Zongyu, Zhou Wei, et al. Effect of multiyear biodegradable plastic mulch on soil microbial community, assembly, and functioning[J]. Microorganisms, 2025, 13(2): e259.
- [28] 胡媛媛, 屈洁, 马琨. 长期施肥对旱作区农田土壤细菌群落组成和多样性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(7): 138-148.
- Hu Yuanyuan, Qu Jie, Ma Kun. Effects of long-term fertilization on soil bacterial community composition and diversity in dry farming region[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023(7): 138-148.
- [29] Tian Lixin, Cao Xinxin, Zhang Lei, et al. Plastic film mulching regime altered fungal, but not bacterial community structure at the regional scale [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2023, 347: e108356.
- [30] 刘京伟, 李香真, 姚敏杰. 植物根际微生物群落构建的研究进展[J]. 微生物学报, 2021, 61(2): 231-248.
- Liu Jingwei, Li Xiangzhen, Yao Minjie. Research progress on assembly of plant rhizosphere microbial community [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2021, 61(2): 231-248.
- [31] Su Ronglin, Wu Xian, Hu Jinli, et al. Warming promotes the decomposition of oligotrophic bacterial-driven organic matter in paddy soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2023, 186: e109156.
- [32] 李艳红. 真菌菌丝对土壤碳、肥力及结构组成影响的初步研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- Li Yanhong. Preliminary study of fungal hyphae impacts on soil carbon and fertility-related parameters, as well as structure and image of soil colloids[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013.
- [33] 林伟, 李玉中, 李昱佳, 等. 氮循环过程的微生物驱动机制研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(6): 1146-1155.
- Lin Wei, Li Yuzhong, Li Yujia, et al. Advances in the mechanism of microbe-driven nitrogen cycling[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(6): 1146-1155.
- [34] Ni Haowei, Jing Xiaoyan, Xiao Xian, et al. Microbial metabolism and necromass mediated fertilization effect on soil organic carbon after long-term community incubation in different climates[J]. The ISME Journal, 2021, 15(9): 2561-2573.
- [35] Li Xu, Bol R, An Tingting, et al. Plastic film mulching combined with manure fertilizer application promotes microbial necromass carbon accumulation within soil macroaggregates [C/OL]. EGU General Assembly Conference Abstracts. Vienna: EGU, 2023. DOI: 10.5194/egusphere-egu23-3581.
- [36] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(14): 2099-2103.