

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.02.008

CSTR:32310.14.stbcbx.2026.02.008

孙万春,周家昊,叶静,等.长期有机替代土壤团聚体及有机碳分布特征[J].水土保持学报,2026,40(2):339-347.

SUN Wanchun, ZHOU Jiahao, YE Jing, et al. Soil aggregates and organic carbon distribution characteristics based on long-term organic substitution[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(2): 339-347.

## 长期有机替代土壤团聚体及有机碳分布特征

孙万春<sup>1,2</sup>, 周家昊<sup>1,2</sup>, 叶静<sup>1,2</sup>, 黄郑宸<sup>1,2</sup>, 马军伟<sup>1,2</sup>, 俞巧钢<sup>1,2</sup>

(1.浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所,杭州 310021;

2.全省土壤修复与质量提升重点实验室,杭州 311300)

**摘要:** [目的] 为探究长期有机替代模式下土壤团聚体及其有机碳质量分数和结构分布特征。[方法] 通过连续10 a的田间定位试验,研究了有机肥替代部分化肥模式对土壤团聚体水稳定性和不同粒级有机碳质量分数及官能团结构分布的影响。[结果] 1)长期有机替代可明显提升土壤团聚体平均质量直径、几何平均直径及 $>0.25$  mm团聚体质量分数,增加2~0.25 mm粒级团聚体比例。2)与常规单施化肥处理相比,有机替代处理 $>2$ 、2~0.25、0.25~0.053、 $<0.053$  mm团聚体中土壤有机碳质量分数分别提高14.49%~61.84%、21.85%~41.32%、13.51%~36.86%、15.51%~38.47%。有机替代较常规单施化肥处理提高土壤微团聚体(0.25~0.053 mm)颗粒有机碳质量分数11.67%~13.87%,提高矿物结合态有机碳质量分数77.24%~101.01%,显著增加微团聚体颗粒有机碳和矿物结合态有机碳质量分数。3)有机替代促进不同粒级团聚体中有机碳官能团的结构多样化,优化芳香族碳和多糖的均匀分布及增加数量。[结论] 长期有机替代可有效增加土壤团聚体的水稳性和不同粒级团聚体有机碳质量分数,促使有机碳官能团结构分布多样化和数量增加,有助于增强农田土壤的结构稳定性、保水性和抗侵蚀能力。

**关键词:** 有机肥; 有机碳; 土壤团聚体; 土壤肥力; 养分管理

中图分类号: S157.4; S141.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)02-0339-09

## Soil Aggregates and Organic Carbon Distribution Characteristics Based on Long-Term Organic Substitution

SUN Wanchun<sup>1,2</sup>, ZHOU Jiahao<sup>1,2</sup>, YE Jing<sup>1,2</sup>, HUANG Zhengchen<sup>1,2</sup>, MA Junwei<sup>1,2</sup>, YU Qiaogang<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Environment Resource and Soil Fertilizer, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China;

2. Zhejiang Key Laboratory of Soil Remediation and Quality Improvement, Hangzhou 311300, China)

**Abstract:** [Objective] To explore the characteristics of soil aggregates, their organic carbon content and structural distribution under the long-term organic substitution model. [Methods] Through 10 consecutive years of field positioning experiments, the effects of organic fertilizer replacing part of chemical fertilizer on the water stability of soil aggregates, the content of organic carbon and the distribution of functional group structures at different particle sizes were studied. [Results] 1) The results show that, long-term organic substitution can significantly increase the average mass diameter and geometric average diameter of soil aggregates, as well as the content of soil aggregates  $>0.25$  mm, and increase the proportion of particle sizes ranging from 2 to 0.25 mm. 2) Compared with the conventional single application of chemical fertilizers, the organic replacement treatment increased the soil organic carbon content in aggregates of larger than 2 mm by 14.49%–61.84%, 2–0.25 mm by 21.85%–41.32%, 0.25–0.053 mm by 13.51%–36.86%, and  $<0.053$  mm by 15.51%–38.47%. Organic substitution can significantly increase the content of organic carbon in micro-aggregate particles and mineral-bound organic carbon, which is 11.67%–13.87% and 77.24%–101.01% respectively compared with the conventional single application

收稿日期: 2025-08-11

修回日期: 2025-09-18

录用日期: 2025-09-26

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-12-23

资助项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1902900)

第一作者: 孙万春(1976—),男,博士,副研究员,主要从事农田有机替代施肥技术研究。E-mail: sunwc@zaas.ac.cn

通信作者: 俞巧钢(1973—),男,博士,研究员,主要从事农田土壤碳氮循环与环境保护研究。E-mail: yuqg@zaas.ac.cn

http://stbcbx.alljournal.com.cn

of chemical fertilizers. 3) In addition, organic substitution also promotes the structural diversification of organic carbon functional groups in aggregates at different particle sizes, optimizes the uniform distribution and increases the quantity of aromatic carbon and polysaccharides. [ **Conclusion** ] Long-term organic substitution can effectively increase the water stability of soil aggregates and the organic carbon content in different particle sizes, promote the diversification of the structural distribution and quantity increase of organic carbon functional groups, and help enhance the soil structural stability, water retention and erosion resistance.

**Keywords:** organic fertilizer; organic carbon; soil aggregates; soil fertility; nutrient management

**Received:** 2025-08-11

**Revised:** 2025-09-18

**Accepted:** 2025-09-26

**Online**(www.cnki.net): 2025-12-23

土壤是由大小不同的颗粒、有机质、水分、空气和生活在其中的生物构成的集合体,具有气体交换、水分渗透、抗侵蚀、碳储存等生态系统功能<sup>[1]</sup>。土壤的物理结构是土壤实现这些生态系统功能的关键,作为土壤结构和功能最小单元的土壤团聚体是土壤健康的重要指标,是土壤有机碳(SOC)物理保护不可或缺的一部分<sup>[2-3]</sup>。现代农业日益关注土壤的可持续性利用,如何维持作物高产稳产和培肥地力是迫切需要解决的问题。传统施用化肥在短期内虽能显著提高作物产量,但长期不当施用可能导致土壤结构退化、生物多样性减少、酸化及肥效下降等问题<sup>[4-5]</sup>。因此,以畜禽粪便堆制的有机肥部分替代化肥的施肥策略日益受到重视。

有机肥的使用是改善土壤质量、增加 SOC 质量分数和提升土壤团聚体稳定性的有效手段<sup>[6-8]</sup>。增施有机物料、扩大 SOC 库容量是促进土壤团聚体形成和增加土壤肥力的有效途径<sup>[6,9-10]</sup>。有机肥部分替代化肥不仅能维持或提高作物产量和养分利用效率,还可改善土壤结构,显著增加土壤有机质质量分数<sup>[11]</sup>。与单一化肥处理相比,长期配施畜禽粪肥通常促进土壤团聚体的形成与稳定,水稳性大团聚体比例提高,微团聚体比例下降,团聚体平均重量直径(MWD)和稳定性显著增加<sup>[12]</sup>。李清华等<sup>[13]</sup>在 28 a 水稻土长期定试验表明,配施牛粪显著提高 0.25~2 mm 大团聚体质量分数,并使各粒径团聚体中有机碳质量分数提高 1.6%~32.6%,其中以有机无机配施处理培肥地力效果最佳。在西南喀斯特黄壤上以部分有机肥替代化肥,水稳性团聚体 MWD 提高约 29.0%~69.0%,>0.25 mm 大团聚体比例提高约 5.0%~87.0%,而土壤团聚体破碎率和不稳定指数显著降低<sup>[12]</sup>。有机肥的长期施用能有效改善稻田土壤的团聚结构和稳定性,对土壤养分和肥力提升具有积极作用<sup>[14]</sup>。团聚体内部有机碳的赋存形态及结构特征是评价土壤固碳机制的重要方面。有机肥通常含有大量易分解的有机质,长期投入后土壤颗粒有机态碳(POC)显著增加,而矿物结合态有机碳(MAOC)相对贡献下降。RONG 等<sup>[15]</sup>研究表明,在红

壤上施用猪粪使土壤总有机碳提高 65.0%~127.0%,其中增量主要归属于 POC,而 MAOC 在有机肥处理中的相对贡献率从对照的 82.4% 降至约 65.0%~71.0%。同时,有机肥部分替代化肥还能优化各粒级团聚体的有机碳分配。罗贞宝等<sup>[14]</sup>在长期施肥试验中发现,施用厩肥或生物有机肥使各粒径团聚体有机碳贡献率的离散程度比不施肥处理降低约 44%,有机碳在团聚体间的分布更趋均衡,团聚体稳定性由此得到增强。团聚体中有机碳的化学结构也随有机肥投入发生改变。相较化肥,有机肥处理中有机质的饱和度和含氧官能团含量提高,而芳香碳含量降低,体现出有机碳向更具脂肪烃类特征转化的趋势<sup>[15]</sup>。

当前关于有机肥替代化肥的研究仍存在不足,已有研究多集中于北方旱地土壤或单季稻等体系,且大多数研究集中在短期效应评估上,而对长期施用有机肥在有机替代模式下的效果,尤其是在特定土壤类型如长江中下游东南沿海青紫泥田中的综合影响及其有机碳的结构分布特征的深入探讨还不够充分。此外,关于南方典型稻油轮作制度下,不同粒径土壤团聚体中有机碳和官能团结构分布特征及其对团聚体稳定性影响的探究还比较缺乏。因此,开展长期有机替代对土壤团聚体稳定性、粒径分布特征及各粒级有机碳含量和官能团结构对团聚体稳定性贡献的研究,阐明有机替代模式在提升土壤团聚体稳定性的关键作用,对促进南方典型土壤青紫泥田的可持续利用和保障粮食安全具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验点位

试验点位于东南沿海杭州湾南岸的浙江宁绍平原绍兴市越城区,土壤为青紫泥属潜育水耕人为土,成土母质为湖河、湖海相沉积物。该区域属亚热带季风气候区,季风显著,四季分明,气候温和,湿润多雨。年平均气温 15~18℃,年日照时间 1 100~2 200 h,年平均降水量 1 100~2 000 mm。试验地初始土壤基本理化性质为 pH 5.75,有机质 36.49 g/kg,全氮 1.79 g/kg,有效磷 5.83 mg/kg,速效钾 61.00 mg/kg。

## 1.2 试验设计与样品采集

试验小区面积为18 m<sup>2</sup>(4.5 m×4.0 m),用水泥砖块田埂隔开,利用排水沟排水,以避免各小区水肥串流。选用随机区组设计,设5个处理:1)不施肥处理;2)常规单施化肥处理;3)低量有机替代处理,采用2 250 kg/hm<sup>2</sup>有机肥替代部分化肥;4)中量有机替代处理,采用4 500 kg/hm<sup>2</sup>有机肥替代部分化肥;5)高量有机替代处理,采用9 000 kg/hm<sup>2</sup>有机肥替代部分化肥,分别记作CK、CF、LOF、MOF和HOF。每个处理3次重复。种植制度采用该区域典型的稻油轮作模式,水稻品种为当地主推单季杂交稻品种“绍梗18”,油菜品种为“浙油50”。油菜、水稻2季均施用有机肥,有机肥施用量相同,水稻季稻草秸秆全部还田,油菜季仅还田油菜荚(约占地上部秸秆总生物量的40%)。除不施肥处理外,水稻季各施肥处理均为N 255 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 60 kg/hm<sup>2</sup>, K<sub>2</sub>O 45 kg/hm<sup>2</sup>,油菜季各施肥处理均为N 255 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg/hm<sup>2</sup>, K<sub>2</sub>O 60 kg/hm<sup>2</sup>, LOF、MOF和HOF 3个处理全年有机肥替代化肥总养分的比例分别为38.98%、52.42%和71.50%。有机肥源为猪粪商品有机肥,化肥为尿素、磷酸一铵和氯化钾。有机替代处理扣除有机肥氮磷钾养分后,其余部分用化肥补足处理设计氮磷钾养分量。有机肥、磷肥、钾肥作为基肥一次性施用,油菜季氮肥分基肥、越冬肥、薹肥3次施用,基追肥比为6:2:2;水稻季氮肥分基肥、分蘖肥、拔节肥3次施用,基追肥比为4:4:2。

长期定位试验于2013年开始保持相应的耕种模式,在第10 a(2023年)水稻收获后各小区用方形不锈钢锹采集5个样点的耕作层0~20 cm的原状土样,用硬质塑料盒运回实验室后,沿自然断裂面掰成1 cm左右的土块,并挑出砾石、侵入体及植物残根等,自然风干后进行团聚体分级。

## 1.3 分析方法

土壤水稳性团聚体组成测定采用湿筛法对土壤团聚体进行分级(套筛直径为2、0.25、0.053 mm),称取100 g风干土,置于2 mm土筛上,蒸馏水浸泡10 min,然后利用团聚体分析仪将土样依次通过2、0.25、0.053 mm的土筛。团聚体的分离通过上下移动筛子3 cm,重复50次(2 min内)进行,收集各级筛子上的团聚体并分别转移至铝盒中。<0.053 mm的团聚体通过将溶液沉降、离心获得。于60 °C下烘干至恒重后进行称量,计算各级粒径比例并取均值,得到水稳性团聚体在土壤中的分布特征。把>0.25 mm粒级的团聚体称为水稳性大团聚体,而<0.25~0.053 mm粒级的团聚体称为水稳性微团聚体,<0.053 mm粒级的为黏粒+粉粒。各粒级水稳性团聚体有机碳质

量分数测定采用元素分析法,有机碳官能团结构测定用傅里叶变换红外光谱仪法<sup>[16-17]</sup>。

微团聚体POC和MAOC的测定步骤<sup>[18]</sup>:在完成团聚体分级后,取0.25~0.053 mm微团聚体部分,称取约5 g风干土样,加入25 mL 5 g/L的六偏磷酸钠溶液,手动摇匀后置于摇床上(25 °C, 90 r/min)振荡18 h使其充分混合。将分散后的悬浊液过53 μm筛,用去离子水反复冲洗至筛下呈无色,将筛上和筛下内容物分别于40 °C(或更低)烘干至恒重,其中筛上部分记为POC组分,筛下部分记为MAOC组分,研磨过100目筛,用元素分析仪分别测定有机C质量分数。计算公式为:

$$C_{\text{POC}} = C_{\text{SOC}_{\text{上}}} \times \frac{W_{\text{上}}}{W_{\text{s}}} \quad (1)$$

式中: $C_{\text{POC}}$ 为微团聚体POC质量分数,g/kg; $C_{\text{SOC}_{\text{上}}}$ 为筛上组分SOC质量分数,g/kg; $W_{\text{上}}$ 为筛上组分干重,g; $W_{\text{s}}$ 为土壤干重,g。

$$C_{\text{MAOC}} = C_{\text{SOC}_{\text{下}}} \times \frac{W_{\text{下}}}{W_{\text{s}}} \quad (2)$$

式中: $C_{\text{MAOC}}$ 为微团聚体MAOC质量分数,g/kg; $C_{\text{SOC}_{\text{下}}}$ 为筛下组分SOC质量分数,g/kg; $W_{\text{下}}$ 为筛下组分干重,g; $W_{\text{s}}$ 为土壤干重,g。

## 1.4 土壤水稳性团聚体稳定性指标计算

平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、>0.25 mm水稳性团聚体( $R_{>0.25}$ )计算公式为:

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i \frac{M_i}{M} \quad (3)$$

$$\text{GWD} = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}\right) \quad (4)$$

式中: $\bar{x}_i$ 为不同团聚体的平均粒径,mm; $M_i$ 为不同团聚体的重量,g; $M$ 为团聚体的总重量,g; $\omega_i$ 为不同团聚体的重量与团聚体的总重量比值。

$$R_{>0.25} = \frac{M_{>0.25}}{M_{\text{t}}} \quad (5)$$

式中: $M_{>0.25}$ 为粒级>0.25 mm团聚体质量总数,g; $M_{\text{t}}$ 为供试土壤团聚体总质量,g。

## 1.5 土壤团聚体有机碳官能团T-FTIR光谱图统计计算

使用Python和Pandas库对光谱数据进行预处理,包括读取数据、添加列名(波数和吸光度)及筛选特定波数区间的数据。对每个官能团的积分面积进行计算,以近似表示在特定波数区间内吸光度的总和。随后,计算每种官能团的归一化吸收面积百分比:

$$S = \frac{S_{\text{核}}}{S_{\text{t}}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: $S$ 为归一化吸收面积百分比,%; $S_{校}$ 为官能团的校正峰面积; $S_i$ 为选定4种有机官能团校正峰面积之和。

采用Omnice 9.9软件对红外光谱进行基线校正并另存为CSV文本,使用Microsoft 365软件整理数据、R v4.3.2软件进行数据分析,用Origin 2021软件制图。数据采用SPSS软件进行统计分析,各处理间比较采用One-way ANOVA分析,差异显著性分析用Duncan法,相关性分析采用Pearson指数表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 有机替代对土壤团聚体稳定性的影响

土壤团聚体的水稳定性是决定农田耕地土壤结构及可持续性利用的关键因子,对土壤的保水性、通气性及抗侵蚀能力有着非常大的直接影响。从表1可以看出,与CK处理相比,LOF、MOF和HOF处理组的团聚体平均质量直径(MWD)均表现为显著提高,且总体随着有机替代量的增加而增加,而CF处理却显著降低。与CF处理相比,LOF、MOF和HOF处理团聚体平均质量直径分别显著提高7.92%、7.92%和8.91%。从几何平均直径(GMD)看,与CK处理相比,LOF、MOF和HOF处理之间相互差异均不显著。与CF处理相比,LOF、MOF和HOF处理几何平均直径(GMD)分别显著提高24.68%、20.78%和22.08%。从 $>0.25$  mm团聚体质量分数组分( $R_{0.25}$ )来看,与CK处理相比,LOF、MOF处理均差异不显著,HOF处理则有所提高且差异显著。与CF处理相比,LOF、MOF和HOF处理均分别显著提高6.47%、5.52%和7.71%。采用有机肥有机替代措施,在土壤水稳定性团聚体形成方面优于传统单施化肥和不施肥处理,还可明显提升平均质量直径(MWD)和 $>0.25$  mm土壤团聚体质量分数。

表1 土壤团聚体水稳定性分析

Table 1 Analysis on water stability of soil aggregates

处理	平均质量直径(MWD)/mm	几何平均直径(GMD)/mm	$>0.25$ mm 团聚体质量分数( $R_{0.25}$ )/%
CK	2.10±0.02b	0.88±0.04a	77.57±0.39b
CF	2.02±0.02c	0.77±0.05b	74.53±1.93c
LOF	2.18±0.03a	0.96±0.02a	79.36±1.04ab
MOF	2.18±0.03a	0.93±0.06a	78.65±0.69ab
HOF	2.20±0.06a	0.94±0.02a	80.28±0.28a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同

### 2.2 有机替代对土壤团聚体粒径分布的影响

水稳定性团聚体的粒径分布是反映土壤抗侵蚀能力和健康状况的重要参数。从整体来看,各处理的土壤水稳定性团聚体的粒径分布规律基本一致,

各粒级分布从大到小顺序依次为 $2\sim 0.25$ 、 $>2$ 、 $0.25\sim 0.053$ 、 $<0.053$  mm团聚体(图1)。采用有机肥有机替代的3个处理,其粒径分布特征基本相似,特别是 $0.25\sim 0.053$  mm和 $<0.25$  mm团聚体的粒径分布相对稳定。对于 $>2$  mm团聚体,粒径含量分布规律为LOF $>$ CK $>$ HOF $>$ MOF $>$ CF,该粒级含量在有机替代处理较化肥处理有所增加。 $2\sim 0.25$  mm团聚体,粒径含量分布规律为HOF $>$ MOF $>$ LOF $>$ CK $>$ CF,其中采用有机肥替代处理的该粒级含量较常规施肥有所增加。 $0.25\sim 0.053$  mm团聚体,粒径含量分布规律为CF $>$ CK $>$ LOF $>$ MOF $>$ HOF。 $<0.053$  mm团聚体,粒径含量分布规律为CF $>$ CK $>$ LOF $>$ MOF $>$ HOF,其中采用有机肥替代处理的该粒级含量均减少。随着有机替代量的增加,总体表现为 $2\sim 0.25$  mm粒级团聚体含量增加, $0.25\sim 0.053$  mm、 $<0.053$  mm粒级团聚体含量减少。

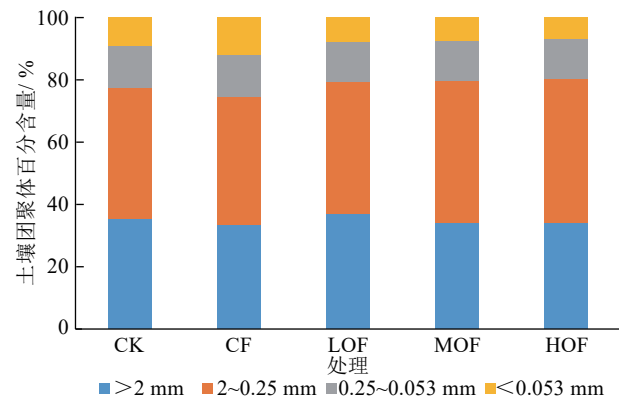


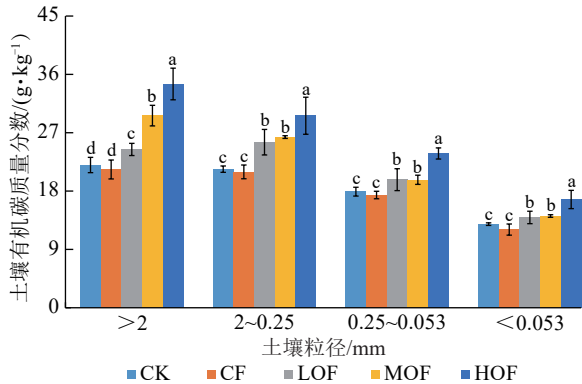
图1 土壤团聚体粒径分布特征

Fig. 1 Particle size distribution characteristics of soil aggregates

### 2.3 有机替代对土壤不同粒径团聚体有机碳分布的影响

由图2可知,不同粒径团聚体中SOC含量的分布呈现出差异,同一处理土壤团聚体有机碳含量总体表现为随团聚体粒径的减小而降低,有机替代处理总体表现为随着有机替代量的增加而增加。 $>2$  mm团聚体中,采用有机替代LOF、MOF和HOF处理的SOC含量分别比CF处理提高14.49%、38.96%、61.84%,表现为该粒径土壤团聚体SOC含量随有机肥替代水平增加而增加的趋势。其中,高量有机替代水平HOF处理SOC质量分数达34.52 g/kg,比CK和CF处理分别提高12.50、13.19 g/kg。 $2\sim 0.25$  mm团聚体中,采用有机替代的LOF、MOF和HOF处理SOC资料分数比CF处理分别提高21.85%、25.62%、41.32%。其中,高量有机替代HOF处理SOC达29.62 g/kg,比CK和CF处理分别提高8.24、8.66 g/kg。 $0.25\sim 0.053$  mm团聚体中,采

用有机替代 LOF、MOF 和 HOF 处理 SOC 比 CF 处理分别提高 13.63%、13.51%、36.86%。其中, HOF 处理 SOC 达 23.80 g/kg, CK 和 CF 处理分别提高 5.89、6.41 g/kg。 <0.053 mm 团聚体中, 采用有机替代的 LOF、MOF 和 HOF 处理 SOC 比 CF 处理分别提高 15.51%、17.33%、38.47%。其中, HOF 处理 SOC 为 16.7 g/kg, 比 CK 和 CF 处理分别提高 3.80、4.64 g/kg。



注: 图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $p < 0.05$ )。下同。

图 2 土壤团聚体不同粒径有机碳质量分数

Fig. 2 The content of organic carbon at different particle sizes in soil aggregates

2.4 土壤微团聚体颗粒和矿物结合态有机碳

微团聚体在土壤碳库的周转循环中有着非常重要的作用, 是影响 SOC 稳定性和动态变化的关键因素。由图 3 可知, 微团聚体中 POC 远大于 MAOC, 采用有机肥有机替代能够提升土壤微团聚体中 POC 和 MAOC, 特别是土壤 MAOC 的增加幅度更显著。

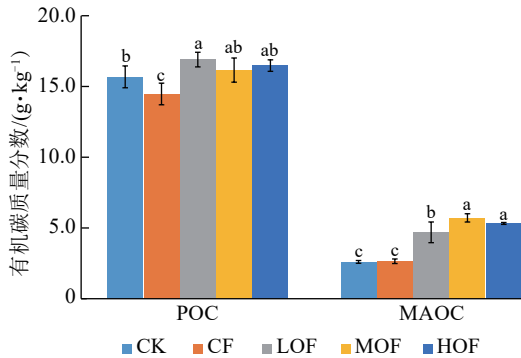


图 3 0.25~0.053 mm 微团聚体 POC 和 MAOC 质量分数

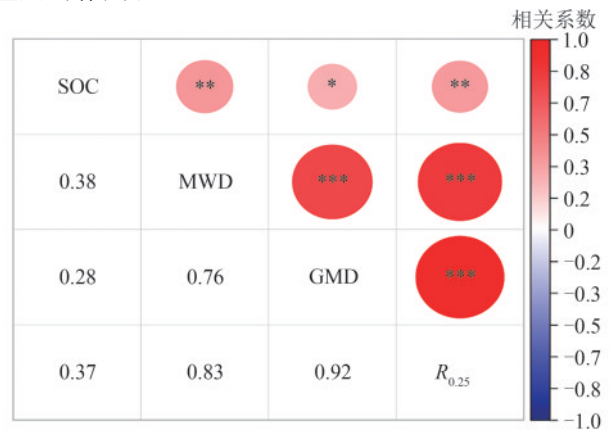
Fig. 3 POC and MAOC content of soil microaggregates in 0.25-0.053 mm

与 CK 相比, MOF 和 HOF 处理 POC 差异不显著, LOF 则显著提高, 而 CF 处理显著降低。与 CF 处理相比, 有机替代 LOF、MOF 和 HOF 处理 POC 分别显著提高 16.80%、11.67%、13.87%。与 CK 处理相比, LOF、MOF 和 HOF 处理 MAOC 均显著提高, 但 CK 与 CF 处理间差异不显著。与 CF 处理相比, 有机替代 LOF、MOF 和 HOF 处理的 MAOC 分别提高

77.24%、115.80%、101.01%, 差异显著。表明有机替代能显著增加土壤微团聚体中的 POC 和 MAOC, 其中对 MAOC 的影响更加明显。因此, 在农业生产提升土壤肥力实践中, 需要综合考虑有机肥与化肥协同的有机替代模式, 以促进 SOC 的积累和土壤可持续利用。

2.5 土壤团聚体有机碳含量与其稳定性关系

从图 4 可以看出, 土壤有机碳 (SOC)、平均质量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD) 和 >0.25 mm 的团聚体质量比 ( $R_{0.25}$ ) 之间均存在显著正相关, 表明土壤有机物在维护和改善土壤结构中的关键性作用。从显著性差异来看, 3 个团聚体水稳定性指标之间存在极显著正相关 ( $p < 0.001$ ), 说明这些指标间有着密切的关联性。特别是 SOC 与 MWD 及  $R_{0.25}$  之间呈极显著正相关 ( $p < 0.001$ ), 与 GMD 之间呈显著正相关 ( $p < 0.05$ ), 表明有机碳含量的高低可作为预测土壤团聚体物理稳定性的 1 个有效指标。这种相关性揭示有机物质在土壤颗粒间作用的生物地球化学机制, 可能通过增强颗粒间的结合力, 促进更大团聚体的形成和稳定, 这些形成的更大团聚体在保持土壤结构、减少侵蚀及保持水分和养分方面发挥着至关重要的作用。



注: \*表示  $p < 0.05$  水平差异显著; \*\*表示  $p < 0.01$  水平差异显著; \*\*\*表示  $p < 0.001$  水平差异显著。

图 4 SOC 和土壤团聚体水稳定性变量间相关性热图

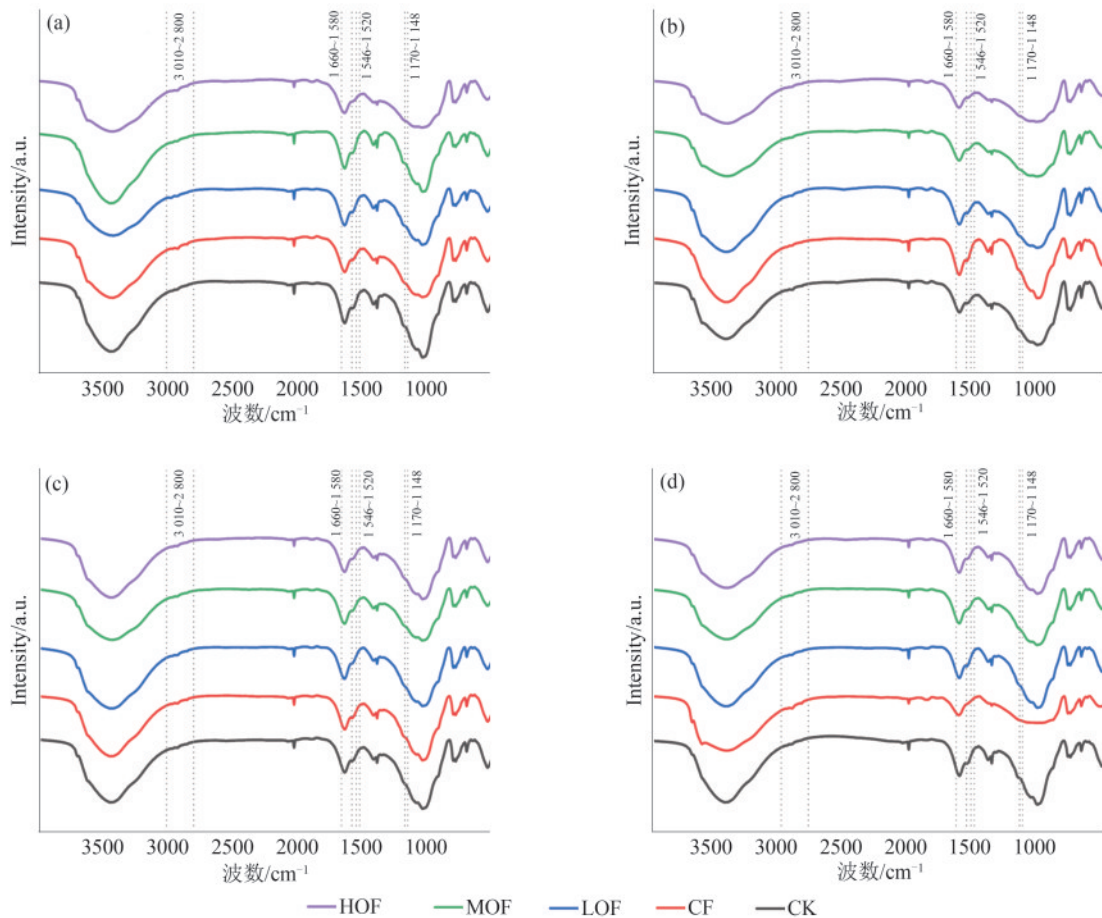
Fig. 4 Heat map of correlation between SOC and soil aggregate stability variables

2.6 土壤团聚体有机碳官能团结构与相对含量分析

由图 5 可知, 有机替代增加官能团吸收峰的强度, 且总体随着替代量的增加使吸收峰强度增强。3 400~3 200  $cm^{-1}$  的宽带是 O-H 伸缩振动, 为醇、酚和水分子结构; 2 920~2 850  $cm^{-1}$  的峰代表 C-H 伸缩振动, 通常是烷基链官能团。1 700  $cm^{-1}$  附近的尖锐峰是 C=O 伸缩振动, 指示酮、酸或酯官能团的存在; 在 1 600~1 580  $cm^{-1}$  的峰是芳香环的 C=C 伸缩振动或某些羧酸盐; 1 040~1 150  $cm^{-1}$  的峰与 C-O

伸缩振动相关,多为醇、醚或多糖结构官能团。CF 在特征峰中表现出较好的吸收峰(图 5a),有机替代处理 HOF 和 LOF 都表现出与 CF 处理相当的吸收特征,表明有机替代处理 $>2$  mm 土壤团聚体中的有机质具有更多这类官能团。常规单施化肥 CF 处理在  $1\ 000\ \text{cm}^{-1}$  附近出现明显尖峰,而有机肥有机替代处理都趋于平缓无明显尖峰(图 5b),表明常规单施

化肥 CF 处理在  $2\sim 0.25$  mm 土壤团聚体中有机碳结构较简单,而有机替代处理的有机质官能团表现出较高的复杂性和多样性。所有处理光谱特征趋于相似,表明在  $0.25\sim 0.053$  mm 团聚体中有机碳官能团结构具有趋同性(图 5c)。有机替代处理吸收峰的程度比常规单施化肥(CF)处理强,表明有机质中官能团的分布较高(图 5d)。



注:a、b、c、d 分别表示 $>2$ 、 $2\sim 0.25$ 、 $0.25\sim 0.053$ 、 $<0.053$  mm 粒级土壤团聚体。

图 5 不同粒级土壤团聚体有机碳官能团 FTIR 光谱图

Fig. 5 FTIR spectra of organic carbon functional groups of soil aggregates at different particle sizes in soil aggregates

由表 2 可知,通过红外光谱峰面积定量评估不同粒径土壤团聚体中的有机碳官能团表明,各处理脂肪族碳(Aliphatic C)的相对含量居多占主导地位。CK 处理脂肪族 C 含量为  $64.05\%\sim 64.55\%$ ,芳香族 C 含量为  $22.04\%\sim 22.63\%$ ,酰胺态 N 含量约为  $7.70\%$ ,多糖含量为  $5.57\%\sim 5.75\%$ ,不同粒径团聚体间各指标值变化不大,说明其土壤有机质分布相对均匀。与 CK 处理相比,CF 处理  $0.25\sim 0.053$  mm 粒径团聚体脂肪族 C 含量略有下降,但芳香族 C 含量升高至  $23.36\%$ ,酰胺态 N 含量增加到  $7.93\%$ ,多糖含量增加到  $6.10\%$ ,其原因可能是常规单施化肥促进该粒径土壤团聚体中脂肪族类有机质的分解。而在  $<0.053$  mm 小粒径团聚体中,常规单施化肥处理下脂肪族 C 含量增加至  $63.97\%$ ,且芳香族 C 含量下降至  $22.24\%$ ,酰胺态 N 含

量也较低,说明常规单施化肥对 $<0.053$  mm 粒径土壤有机质影响不大。有机替代处理总体呈现出规律性,在所有粒径团聚体中,脂肪族 C 含量总体低于 CK 处理,其中低量有机替代处理 $<0.053$  mm 粒径脂肪族 C 含量最高为  $64.47\%$ ,而高量有机替代处理最低为  $63.81\%$ ,说明有机替代对芳香族组分影响不大。对于脂肪族 C,有机替代处理总体低于 CK 与 CF 处理,表明有机替代会略微降低土壤团聚体脂肪族有机质。对于芳香族 C, $>2$  mm 和  $0.25\sim 0.053$  mm 粒径有机替代处理含量比 CK 处理高,其他粒径中表现相当,说明有机替代处理能够优化芳香族 C 的分布。有机替代处理各粒径团聚体中多糖含量均高于 CK,且各粒径间的含量较为接近,分布较为均匀。而常规化肥处理多糖含量在  $0.25\sim 0.053$  mm 最高,各粒径间含量分布不均。

表 2 土壤团聚体有机碳官能团相对含量分析  
Table 2 Analysis on the relative content of organic carbon functional groups in soil aggregates

处理	团聚体粒径/mm	脂肪族 C/%	芳香族 C/%	酰胺态 N/%	多糖/%
CK	>2	64.55	22.04	7.74	5.67
	2~0.25	64.05	22.52	7.77	5.65
	0.25~0.053	64.42	22.11	7.71	5.75
	<0.053	64.14	22.63	7.67	5.57
CF	>2	64.04	22.53	7.75	5.68
	2~0.25	64.11	22.41	7.76	5.72
	0.25~0.053	62.61	23.36	7.93	6.10
	<0.053	63.97	22.24	7.88	5.92
LOF	>2	64.17	22.22	7.78	5.83
	2~0.25	63.76	22.58	7.91	5.74
	0.25~0.053	63.76	22.58	7.89	5.77
	<0.053	64.47	22.27	7.66	5.61
MOF	>2	63.77	22.34	7.93	5.96
	2~0.25	64.10	22.33	7.75	5.83
	0.25~0.053	64.21	22.33	7.71	5.75
	<0.053	63.97	22.59	7.66	5.79
HOF	>2	63.97	22.55	7.68	5.80
	2~0.25	64.07	22.44	7.74	5.75
	0.25~0.053	64.13	22.35	7.73	5.79
	<0.053	63.81	22.69	7.65	5.84

### 3 讨论

适宜的水稳定性团聚体粒径分布对提升土壤结构至关重要<sup>[19-22]</sup>。通过综合分析不同有机替代处理的土壤团聚体水稳定性指标,包括平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和>0.25 mm团聚体含量( $R_{0.25}$ ),及土壤各粒径团聚体中SOC含量的变化发现,施用有机肥对增强土壤团聚体稳定性具有显著作用<sup>[8]</sup>。本研究结果表明,与单施化肥和不施肥(CK)相比,有机肥有机替代可显著提高土壤团聚体的MWD和 $R_{0.25}$ 值,说明有机肥的施用能有效增强土壤团聚体的水稳定性,与SIEDT等<sup>[23]</sup>的研究结果一致,充分说明有机肥料的施入可以改善土壤结构,增加土壤大团聚体的比例,从而提高土壤的保水性和通气性。采用长期有机肥部分替代化肥有利于土壤团聚体的形成与稳定,可有效增强稻田土壤的结构稳定性和保水性,对提高土壤可持续性的利用有着关键性的重要作用<sup>[9-10,22]</sup>。一般认为,理想土壤中应以2~0.25 mm为核心占主导地位,0.25~0.053 mm为适中水平,以保证土壤具有良好的保水能力和透气性,>2 mm团聚体应较少含量避免土壤过松。同时<0.053 mm的土壤团聚体保持在较低比例含量,以避免土壤过于紧实影响根系生长和水气交换<sup>[3,9,20]</sup>。本

研究发现,采用有机肥有机替代处理优化团聚体分布比例,特别是中量有机替代水平在提升2~0.25 mm和0.25~0.053 mm团聚体中效果最佳,有助于形成更健康高效的土壤环境,进而有助于农作物的生长。因此,有机肥部分替代化肥的模式是一种可有效优化土壤水稳定性团聚体粒径分布的管理策略。

现代农业生产中有机碳的角色越来越受重视,特别是其在促进水稻等作物生长的潜在益处。有机碳作为土壤有机质的主要成分,不仅是土壤肥力的关键指标,也是维持土壤健康和提高作物产量的基础<sup>[11,24-25]</sup>。有机肥作为一种重要的土壤有机碳来源,可向农田系统补充丰富的有机物质,对提升土壤质量和促进作物生长发挥着极其重要的作用<sup>[6-7]</sup>。有机肥有机替代不仅对土壤团聚体稳定性有着重要影响,尤其是有机碳的增加对提升土壤团聚体稳定性的作用更加重要<sup>[20,26-27]</sup>。本研究表明,长期有机肥部分替代化肥能明显提高土壤不同粒径团聚体的SOC含量,并且随着有机肥替代量的增加而增加。随着土壤团聚体粒径的减小,不同替代水平处理间SOC含量的差异逐渐降低。在大粒径土壤团聚体中,有机物质较易于聚集,而在小粒径土壤团聚体中,由于比表面积大,有机碳更趋于均匀分布。粒径越小,有机替代对SOC的影响越不明显,是由于小粒径土壤本身较高的物理吸附能力,使得SOC的增加程度受限。CF处理的SOC含量在所有粒径组别中均最低,表明仅投入化肥的土壤其SOC积累有限,长期施用可能导致土壤肥力下降。在高量有机替代的HOF处理中,随着土壤粒径的减小,SOC含量也呈下降趋势,说明SOC主要分布于较大颗粒土壤团聚体,而过于细小的土壤颗粒有机碳的长期稳定积累有限。有机替代可使土壤团聚体SOC含量显著提升,尤其是高量有机替代时提升更明显,充分说明有机肥在提高SOC含量方面的重要性。

土壤SOC与平均质量直径之间拟合度 $R^2$ 为0.52~0.73,说明存在着一定的关联性。SOC与>0.25 mm团聚体含量拟合度 $R^2$ 为0.38~0.79,说明它们之间也存在着相关关系且存在极值。SOC含量与土壤团聚体的水稳定性指标MWD和 $R_{0.25}$ 之间存在显著的正相关关系,表明SOC的增加有助于增强土壤团聚体的稳定性。与WANG等<sup>[27]</sup>和ZHANG等<sup>[28]</sup>研究发现的SOC是维持土壤团聚体稳定性的关键因素相符合。通过FTIR光谱分析发现,有机替代可提升土壤团聚体中特定有机碳官能团的相对含量,如脂肪族碳、芳香族碳、酰胺态氮和多糖等。因此,有机替代对有机碳官能团的分布产生一定影响,尤其在脂肪族碳和多糖的分布上,有机替代促进不

同粒径土壤团聚体中芳香族碳和多糖的均匀优化分布,具有改善土壤结构性能的潜在优势。这些官能团的提升不仅反映土壤有机质的改善质量,还可促进土壤团聚体间的化学结合作用,从而增强土壤团聚体的稳定性,与SONSRI等<sup>[29]</sup>的研究结果相似。有机替代处理在不同粒径的土壤团聚体中具有更为均匀和多样化的有机碳官能团,其原因主要是有机替代有机肥的施用能丰富土壤有机质官能团的结构,进而增加相应有机官能团的含量,从而能更好地促进土壤有机质和土壤肥力的保持<sup>[20-21,25]</sup>。长期有机肥替代化肥的措施可有效增强土壤团聚体的水稳定性,增加土壤团聚体SOC含量,优化土壤团聚体中有机碳官能团的分布,对于改善土壤结构和稳定性,提高土壤的保水性、通气性及抗侵蚀能力具有重要意义。

## 4 结论

1)较常规单施化肥处理,有机替代处理的土壤平均质量直径MWD提高7.92%~8.91%,几何平均直径GMD提高20.78%~24.68%,>0.25 mm土壤团聚体含量提高5.52%~7.71%;SOC含量在>2 mm团聚体中提高14.49%~61.84%,2~0.25 mm提高21.85%~41.32%,0.25~0.053 mm提高13.51%~36.86%,<0.053 mm提高15.51%~38.47%。长期采用有机肥部分替代化肥的有机替代,可明显增加2~0.25 mm粒径团聚体含量,优化团聚体粒径分布比例,增加不同粒级土壤团聚体尤其是大颗粒团聚体SOC含量,并且随着有机肥替代量的增加而增加,提高土壤结构稳定性。

2)有机替代能显著增加微团聚体颗粒有机碳和矿物结合态有机碳含量,与常规单施化肥处理相比,POC含量显著提高11.67%~13.87%,MAOC含量显著提高77.24%~101.01%。有机替代还可丰富土壤团聚体中的芳香族碳和多糖结构和提高相应有机碳官能团含量,且在不同团聚体粒级中均匀增加,优化土壤团聚体有机碳官能团结构分布。长期有机肥替代化肥的措施可有效增强土壤团聚体的水稳定性,增加土壤团聚体SOC含量,促进土壤团聚体中有机碳官能团均匀和多样化分布,从而改善土壤结构和提高肥力。

### 参考文献:

- [1] CROWTHER T W, TODD-BROWN K E O, ROWE C W, et al. Quantifying global soil carbon losses in response to warming[J].*Nature*,2016,540(7631):104-108.
- [2] RABOT E, WIESMEIER M, SCHLÜTER S, et al. Soil structure as an indicator of soil functions: A review[J].*Geoderma*,2018,314:122-137.
- [3] 刘红梅,李睿颖,高晶晶,等.保护性耕作对土壤团聚体

及微生物学特性的影响研究进展[J].*生态环境学报*,2020,29(6):1277-1284.

LIU H M, LI R Y, GAO J J, et al. Research progress on the effects of conservation tillage on soil aggregates and microbiological characteristics[J].*Ecology and Environmental Sciences*,2020,29(6):1277-1284.

- [4] YANG Y H, WU J C, ZHAO S W, et al. Effects of long-term super absorbent polymer and organic manure on soil structure and organic carbon distribution in different soil layers[J].*Soil and Tillage Research*,2021,206:e104781.
- [5] 朱君康,叶桂萍,丁维新,等.有机替代和团聚化对红壤微生物动物群落的影响[J].*水土保持学报*,2025,39(1):113-119.
- ZHU J K, YE G P, DING W X, et al. Effects of organic fertilizer substitution and aggregation on microfauna communities in a red soil[J].*Journal of Soil and Water Conservation*,2025,39(1):113-119.
- [6] TIAN S Y, ZHU B J, YIN R, et al. Organic fertilization promotes crop productivity through changes in soil aggregation[J].*Soil Biology and Biochemistry*,2022,165:e108533.
- [7] 雷琬莹,李娜,滕培基,等.农田生态系统有机物料腐解过程及土壤培肥机制研究[J].*中国生态农业学报(中英文)*,2022,30(9):1393-1408.
- LEI W Y, LI N, TENG P J, et al. Decomposition processes of organic materials and their mechanisms of improving soil fertility in cropland ecosystems[J].*Chinese Journal of Eco-Agriculture*,2022,30(9):1393-1408.
- [8] 张平良,付强,刘晓伟,等.有机肥等氮量替代化肥对半干旱区马铃薯农田土壤团聚体稳定性及其有机碳、全氮含量的影响[J].*中国土壤与肥料*,2025(5):29-35.
- ZHANG P L, FU Q, LIU X W, et al. Effects of organic manure replacing chemical fertilizer with equal nitrogen on the stability and organic carbon and total nitrogen content of soil aggregates in potato field of semi-arid area[J].*Soil and Fertilizer Sciences in China*,2025(5):29-35.
- [9] ABIVEN S, MENASSERI S, CHENU C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability: A literature analysis [J].*Soil Biology and Biochemistry*,2009,41(1):1-12.
- [10] MA S H, CAO Y D, LU J W, et al. Response of soil aggregation and associated organic carbon to organic amendment and its controls: A global meta-analysis[J].*Catena*,2024,237:e107774.
- [11] 郭校伟,潘军晓,张济世,等.好氧发酵猪粪部分替代化肥提高夏玉米氮素利用率和土壤肥力[J].*植物营养与肥料学报*,2020,26(6):1025-1034.
- GUO X W, PAN J X, ZHANG J S, et al. Partial substitution of chemical fertilizer with aerobic fermented pig manure increases nitrogen use efficiency of summer maize and soil fertility[J].*Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*,2020,26(6):1025-1034.
- [12] LIU Y L, ZHANG M, XIONG H, et al. Influence of

- long-term fertilization on soil aggregates stability and organic carbon occurrence characteristics in karst yellow soil of Southwest China [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: e1126150.
- [13] 李清华, 王飞, 林诚, 等. 长期施肥对黄泥田土壤微生物群落结构及团聚体组分特征的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1599-1606.  
LI Q H, WANG F, LIN C, et al. Effects of long-term fertilization on soil microbial community structure and aggregate composition in yellow clayey paddy field [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(6): 1599-1606.
- [14] 罗贞宝, 李志宏, 朱经伟, 等. 长期有机无机配施对土壤团聚体及有机碳的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2024(10): 1-8.  
LUO Z B, LI Z H, ZHU J W, et al. Effects of long-term combined organic-inorganic fertilizer application on soil aggregates and organic carbon [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2024(10): 1-8.
- [15] RONG H, DU Z, GAO W, et al. Long-term pig manure application increases soil organic carbon through aggregate protection and Fe-carbon associations in a subtropical red soil (Udic Ferralsols) [J/OL]. *EGUsphere*, 2025. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-2405>.
- [16] ELLIOTT E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3): 627-633.
- [17] 张欣跃, 赵玉国, 刘峰, 等. 基于可见-近红外光谱与化学属性的土壤来源地判别[J]. *土壤学报*, 2019, 56(5): 1060-1071.  
ZHANG X Y, ZHAO Y G, LIU F, et al. Identification of sources of soils based on vis-NIR spectroscopy and chemical attributes [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(5): 1060-1071.
- [18] 李欢, 王艳玲, 殷丹, 等. 水稻秸秆/根系添加对稻田红壤发生层颗粒态及矿物结合态有机碳的影响[J]. *土壤通报*, 2022, 53(2): 384-391.  
LI H, WANG Y L, YIN D, et al. Effect of rice straw or/and root additions on the particulate-and mineral-associated organic carbon in the pedogenic horizon of paddy red soils [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(2): 384-391.
- [19] 王艺乔, 郑春莲, 李科江, 等. 施用有机肥对咸水灌溉农田耕层土壤有机质及水稳性团聚体的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(2): 268-274.  
WANG Y Q, ZHENG C L, LI K J, et al. Effects of organic fertilizer application on soil organic matter and water-stable aggregates of plow layer in farmland with saline water irrigation [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2): 268-274.
- [20] 刘亚龙, 王萍, 汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制: 研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2023, 60(3): 627-643.  
LIU Y L, WANG P, WANG J K. Formation and stability mechanism of soil aggregates: Progress and prospect [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(3): 627-643.
- [21] 薛志婧, 李霄云, 焦磊, 等. 土壤矿质结合态有机碳形成及稳定机制的研究进展[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(5): 12-23.  
XUE Z J, LI X Y, JIAO L, et al. Advance in the formation and stabilization mechanisms of soil mineral-associated organic carbon [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(5): 12-23.
- [22] 李天娇, 张乃于, 申文艳, 等. 长期施肥对黑土和棕壤团聚体稳定性的影响及驱动因素[J]. *中国农业科学*, 2024, 57(19): 3835-3847.  
LI T J, ZHANG N Y, SHEN W Y, et al. Effects of long-term fertilization on soil aggregate stability and its driving factors in black soil and brown soil [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(19): 3835-3847.
- [23] SIEDT M, SCHÄFFER A, SMITH K E C, et al. Comparing straw, compost, and biochar regarding their suitability as agricultural soil amendments to affect soil structure, nutrient leaching, microbial communities, and the fate of pesticides [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 751: e141607.
- [24] 李圆宾, 李鹏, 王舒华, 等. 稻麦轮作体系下有机肥施用对作物产量和土壤性质影响的整合分析[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(9): 3231-3239.  
LI Y B, LI P, WANG S H, et al. Effects of organic fertilizer application on crop yield and soil properties in rice-wheat rotation system: A meta-analysis [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(9): 3231-3239.
- [25] 郭昕宇, 赵巍, 吴春艳, 等. 有机无机肥配施增加土壤团聚体中芳香碳比例和土壤养分有效性[J]. *植物营养与肥料学报*, 2025, 31(6): 1095-1108.  
GUO X Y, ZHAO W, WU C Y, et al. Combined application of organic and inorganic fertilizers improves nutrient availability through high carbonyl carbon in soil aggregates [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2025, 31(6): 1095-1108.
- [26] ZHU L Q, HU N J, ZHANG Z W, et al. Short-term responses of soil organic carbon and carbon pool management index to different annual straw return rates in a rice-wheat cropping system [J]. *Catena*, 2015, 135: 283-289.
- [27] WANG Y L, WU P N, QIAO Y B, et al. The potential for soil C sequestration and N fixation under different planting patterns depends on the carbon and nitrogen content and stability of soil aggregates [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 897: e165430.
- [28] ZHANG W J, MUNKHOLM L J, LIU X, et al. Soil aggregate microstructure and microbial community structure mediate soil organic carbon accumulation: Evidence from one-year field experiment [J]. *Geoderma*, 2023, 430: e116324.
- [29] SONSRI K, WATANABE A. Insights into the formation and stability of soil aggregates in relation to the structural properties of dissolved organic matter from various organic amendments [J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 232: e105774.