

DOI: 10.11766/trxb202408270343

CSTR: 32215.14.trxb202408270343

刘涛, 吴能祥, 王萍, 刘亚龙, 汪景宽. 长期植稻土壤团聚体有机质组分的变化特征及其积累机制[J]. 土壤学报, 2026, 63(3): 802–811.
LIU Tao, WU Nengxiang, WANG Ping, LIU Yalong, WANG Jingkuan. Variation Characteristics and Accumulation Mechanism of Organic Matter Molecular Components in Soil Aggregates Under Long-Term Rice Cultivation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026, 63(3): 802–811.

长期植稻土壤团聚体有机质组分的变化特征及其积累机制*

刘涛, 吴能祥, 王萍, 刘亚龙[†], 汪景宽

(沈阳农业大学土地与环境学院/农业农村部东北耕地保育重点实验室, 沈阳 110866)

摘要: 作为陆地生态系统中重要的碳源和碳汇, 稻田土壤有机质 (SOM) 积累过程已较为明晰, 但团聚体中 SOM 分子组成的变化及其对 SOM 积累的作用机制尚不明确。本研究借助慈溪地区稻田土壤时间序列, 结合傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 和三维荧光光谱 (3D-EEM) 技术, 探究长期植稻土壤不同粒径团聚体中 SOM 分子组成的变化特征及其在固碳过程中的贡献。结果表明: 大团聚体 (>250 μm) 和微团聚体 (<250 μm) 中的有机碳含量均在前 100 年快速增加, 之后缓慢增长。脂肪族类 SOM 在植稻 100 年间由 12%~13% 快速降至 1%, 而芳香族类 SOM 由 16%~17% 增至 30%~38%。可溶性有机质 (DOM) 中的色氨酸类 DOM 由 16%~17% 增至 33%, 而富里酸和胡敏酸类腐殖质由 41%~42% 分别下降至 36%~37% 和 31%。此后, 各类组分均保持相对稳定。DOM 的荧光指数 (FI) 和自生源指数 (BIX) 均先升后降, 而腐殖化指数 (HIX) 则是先降后增。表明植稻初期微生物群落活跃, 活性代谢物质含量高; 长期植稻后, 微生物持续产生复杂结构的腐殖类物质。综上所述, 长期植稻下不同粒径团聚体中有机质分子组成的变化较小, 但也进一步证实了稻田土壤有机碳的积累不仅受团聚体的化学吸附和物理保护的作用, 微生物的转化作用同样重要。研究结果将为完善稻田土壤有机碳积累机制以及土壤肥力的可持续提供科学依据。

关键词: 长期植稻; 团聚体; 有机碳分子组成; 傅里叶变换红外光谱; 三维荧光光谱

中图分类号: S158 **文献标志码:** A

Variation Characteristics and Accumulation Mechanism of Organic Matter Molecular Components in Soil Aggregates Under Long-Term Rice Cultivation

LIU Tao, WU Nengxiang, WANG Ping, LIU Yalong[†], WANG Jingkuan

(Key Laboratory of Arable Land Conservation (Northeast China) of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: 【Objective】 As important carbon sources and sinks in terrestrial ecosystems, the accumulation process of paddy soil organic matter (SOM) is relatively well understood. However, changes in the molecular composition of SOM within soil

* 辽宁省教育厅基本科研项目 (JYTYB2024009) 资助 Supported by the Scientific Research Fund of Liaoning Provincial Education Department (No. JYTYB2024009)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: liuyalong@syau.edu.cn

作者简介: 刘涛 (1999—), 男, 山西朔州人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤肥力与耕地保育。E-mail: 850897463@qq.com

收稿日期: 2024-08-20; 收到修改稿日期: 2025-02-28; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-07-08

aggregates and the mechanisms underlying SOM accumulation remain unclear. [Method] This investigation employed a paddy soil chronosequence in Cixi, utilizing Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and three-dimensional excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy(3D-EEM). These methods were implemented to elucidate the variation patterns of SOM molecular components across different aggregate sizes and their contributions to SOM sequestration processes within the paddy chronosequence. [Result] Our findings revealed distinct temporal patterns in soil organic carbon (SOC) dynamics. Both macroaggregates ($>250 \mu\text{m}$) and microaggregates ($<250 \mu\text{m}$) exhibited rapid SOC accumulation within the initial century, followed by a gradual stabilization. Aliphatic SOM components demonstrated a substantial decrease from 12%-13% to 1% within the first 100 years of rice cultivation, while aromatic SOM components showed a progressive increase from 16%-17% to 30%-38%. In dissolved organic matter (DOM) fractions, tryptophan-like DOM increased from 16%-17% to 33%, whereas fulvic acid and humic acid components decreased from 41%-42% to 36%-37% and 31%, respectively, subsequently maintaining relative stability. The fluorescence index (FI) and biological index (BIX) of DOM displayed an initial increase followed by a decrease, while the humification index (HIX) showed the opposite trend. These observations suggest an initial period of microbial activity characterized by high metabolic substance content, followed by microbial community stabilization and continuous production of complex humic substances during prolonged rice cultivation. [Conclusion] Despite relatively minor differences in SOC molecular components across various aggregate sizes under extended rice cultivation, our results substantiate that SOC accumulation in paddy fields is influenced not only by chemical adsorption and physical protection within soil aggregates but also significantly by microbial transformations. These findings contribute to a comprehensive understanding of SOC accumulation mechanisms in paddy soils and provide valuable insights for enhancing soil fertility sustainability.

Key words: Long-term rice cultivation; Aggregates; Organic carbon molecular component; FTIR; 3D-EEM

水稻土是长期人为管理形成的特殊土壤，其特殊的氧化还原过程区别于旱地土壤^[1]。长期水耕熟化促使稻田土壤有机质（SOM）积累，使其单位面积有机碳储量较早地高 20%^[2]。作为重要的固碳生态系统，深入了解水稻土碳汇功能对推动我国农业的固碳减排及绿色可持续发展至关重要^[3]。

长期水稻种植驱动土壤 SOM 的积累与土壤团聚体的形成稳定^[4]。团聚体限制 SOM 与微生物和酶的接触，结合稻田淹水缺氧条件进一步抑制了微生物活性，共同延缓 SOM 的生物转化，形成物理保护机制^[5]。此机制下不同粒径团聚体中有机碳含量呈现出显著差异：黑土区水稻土有机碳及其颗粒有机碳主要集中在 $>250 \mu\text{m}$ 团聚体，以 $2\ 000\sim 250 \mu\text{m}$ 团聚体最为显著^[6]；长期秸秆还田下， $>250 \mu\text{m}$ 团聚体中土壤有机碳、可溶性有机碳和微生物生物量碳含量均显著高于 $<250 \mu\text{m}$ 团聚体^[7]。深入研究团聚体有机质及其组分的分异规律，可揭示稻田 SOM 积累的分子调控机制，为优化土壤碳库稳定理论提供科学支撑。

有机质分子组成显著影响土壤碳的周转与固持。脂类和芳香类等难分解 SOM 具有较高的稳定性

^[8]，而胡敏酸和富里酸类 SOM 通过形成有机-矿质复合物助力长期碳储存^[9]。王慧等^[10]利用傅里叶变换红外光谱（FTIR）分析发现紫云英还田会增加土壤团聚体中脂肪族和芳香族 SOM。Xue 等^[11]通过 FTIR 分析发现稻油轮作下，土壤中 $> 250 \mu\text{m}$ 团聚体以烷烃、芳香烃和烯烃类 SOM 为主，而 $250\sim 53 \mu\text{m}$ 团聚体以多糖类 SOM 为主。三维荧光光谱（3D-EEM）分析显示，有机肥可提高类色氨酸可溶性有机质（DOM）和腐殖化指数，降低类酪氨酸 DOM 和生物学指数以及荧光指数^[12]。Zhu 等^[13]发现施肥方式显著影响类蛋白质物质向类腐殖质物质的转化，促进大团聚体富里酸类 DOM 的增加。然而，长期植稻下土壤团聚体中有机碳组分如何变化以及不同粒径团聚体是否存在差异尚不明确。

因此，借助稻田土壤时间序列，采用 FTIR 探究土壤有机碳分子组成，应用 3D-EEM 研究可溶性有机质分子组成的变化，阐明长期植稻土壤团聚体中有机碳分子组成的变化特征并探讨潜在机制。研究结果将有助于更好地理解稻田土壤固碳过程，并为提升稻田土壤肥力和土壤质量提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 供试土壤样地概述

研究区域位于中国浙江省慈溪市, 地处季风性气候区域, 年均气温 16.3 °C, 年均降水量 1 325 mm。自公元 25 年起广泛种植水稻, 之后根据海涂地形垒土筑塘向北推进, 至今已建成十四座海塘。根据《慈溪市水利志》和《慈溪海堤集》对海塘植稻时间的记载, 可以估算出特定区域内水稻的种植历史。由此选择植稻年限约为 50、100、300、700、1 000 年的稻田土壤时间序列作为研究对象 (P50-P1000)。供试土壤有机碳含量 15.6~21.8 g·kg⁻¹, 全氮 1.6~2.3 g·kg⁻¹, pH 5.2~7.7, 详见本组最近的研究^[3]。

1.2 土壤样品采集及预处理

于 2021 年 11 月在水稻成熟时采集土壤样品。在每个植稻年限区域内, 随机选取 3 个约 600 m³ 小区。在每个小区内, 按照“Z”字形随机采集五个原状表层土壤样本 (20 cm) 并放置在塑料小桶中 (Φ18 cm×15 cm)。将采集的原状土在室温条件下风

干至理想含水量 (土壤塑性下限)^[14], 用手轻轻将土块破碎至 5~7 mm 大小, 移除土壤内所有可见的植物根系和石块。用振荡筛将土壤筛分为大团聚体 (>250 μm) 和微团聚体 (<250 μm)。

1.3 土壤有机碳含量及有机分子官能团的测定

使用元素分析仪 (Vario ELIII Elementar) 测定不同粒径团聚体中的土壤有机碳 (SOC) 含量; 有机碳官能团组分采用傅里叶变换红外光谱仪 (Thermo Scientific Nicolet iS 50 型) 进行测定。将样品在 60 °C 下烘干 16 h, 与 KBr 按 1:100 比例在玛瑙研钵中充分研磨混匀, 在 20 MPa 下压片, 通过傅里叶变换红外光谱仪扫描并记录光谱图^[15]。光谱范围为 4 000~850 cm⁻¹, 分辨率为 4 cm⁻¹, 扫描次数 32 次。

红外光谱数据导入 OMNIC 软件进行分析, 根据吸收峰可将有机质分为四类 (表 1)。用脂肪族碳与芳香族碳的比例来表征脂族化程度。低脂族化程度表明土壤中芳香族环状结构较为丰富, 其分子结构较为复杂, 这通常会增强土壤有机质的稳定性^[16]。

表 1 官能团吸收峰分类

Table 1 Classification of functional group absorption peaks

吸收峰位 Absorption peaks/cm ⁻¹	官能团 Functional group	分类 Classification
3 616、3 420	羧酸、碳水化合物和苯酚中的-OH 伸缩振动以及酰胺中 N-H 伸缩振动	酚羟基类物质 ^[17]
2 930、2 832	脂肪族中 CH ₂ 和 CH ₃ 的对称和不对称伸展振动	脂肪族类物质 ^[18]
1 600、1 433	芳香族 C=C、C=O 伸缩振动	芳香族类物质 ^[19]
1 030	多糖中的 C-O 伸缩振动	多糖类物质 ^[20]

1.4 可溶性有机质提取及分子组成测定

采用水土振荡法提取 DOM^[21], 取 3 g 风干土按照固液比 1:10 与超纯水混合, 220 r·min⁻¹ 振荡 24 h 后 4 000 r·min⁻¹ 离心 30 min, 取上清液过 0.45 μm 滤膜过滤, 得到的滤液即为 DOM 溶液。

使用日立 F-7100 分光光度计对 DOM 样品的荧光光谱进行测量, 设置激发波长 (Ex) 在 200 至 500 nm, 以 5 nm 为增量; 发射波长 (Em) 在 200 至 550 nm, 增量为 4 nm。测量过程的扫描速度设定为 12 000 nm·min⁻¹, 狭缝宽度固定在 5 nm。

通过 MATLAB 软件配合 Delaunay 三角插值对

土样荧光数据进行预处理, 消除瑞利散射和拉曼散射。利用 DOM Fluor 和 dr EEM 软件包对荧光光谱数据进行平行因子分析 (Parallel Factor Analysis, PARAFAC)^[22]。为验证 PARAFAC 模型的准确度, 采用半分裂方法和残差检验评估模型可靠性, 从而精确确定合适的荧光组分数。此外, 利用荧光指数 (FI)、自生源指数 (BIX) 和腐殖化指数 (HIX) 表征 DOM 来源的变化^[23-24]。

1.5 数据分析

利用 Microsoft Excel 2019 软件进行数据计算, SPSS 27 软件进行显著性分析, 使用 Origin 2021 绘图。

2 结 果

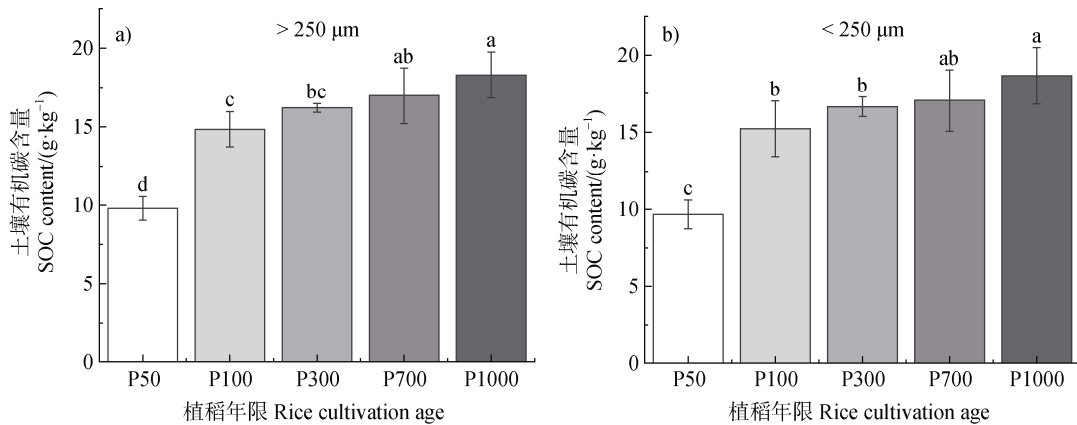
2.1 长期植稻下不同粒径团聚体中有机碳含量的变化

大团聚体和微团聚体中的有机碳 (SOC) 含量随着植稻年限的增加呈现出相似的变化趋势, 且两者之间没有显著差异 ($P < 0.05$), 均在植稻 100 年前, SOC 含量快速提高, 之后增长速率减缓。大团聚体和微团聚体中的 SOC 含量从 9.80 和 9.67 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 快速增至 14.83 和 15.23 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 之后逐渐增至 18.28 和

18.66 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 1)。

2.2 长期植稻下不同粒径团聚体有机质分子官能团组成特征

不同粒径团聚体中, 多糖类 SOM 的相对含量最高, 大团聚体为 37%~53%, 微团聚体为 32%~46%; 其次芳香族类 SOM, 大团聚体和微团聚体中分别占 16%~30%、17%~38%; 酚醇类 SOM 组分分别占 10%~38%、26%~35%, 而脂肪族类 SOM 组分的相对含量最低, 分别占 1%~12%和 1%~13% (图 2)。



注: 图中误差线为标准差; 不同小写字母表示不同植稻年限间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Note: Error bars indicate standard deviation. Different lowercase letters indicate a significant difference between ages ($P < 0.05$). The same below.

图 1 不同粒径团聚体有机碳含量随植稻年限的变化

Fig. 1 Changes in SOC content of different size aggregates with rice cultivation ages

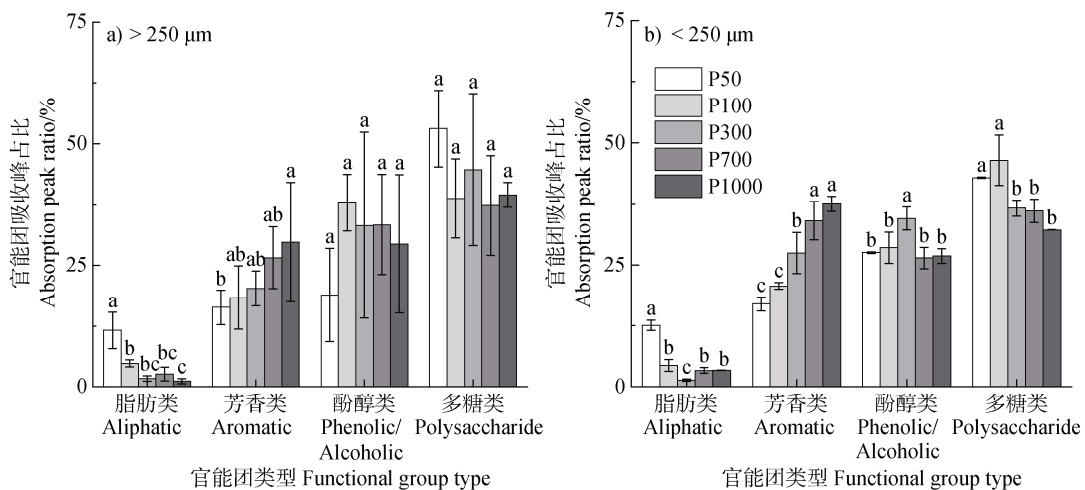


图 2 不同粒径团聚体中有机质官能团相对丰度随植稻年限的变化

Fig. 2 Changes in relative abundance of SOC functional groups in different size aggregates with rice cultivation ages

随着植稻年限的增加, 不同粒径团聚体中 SOM 分子组成变化基本一致。酚醇类 SOM 组分相对含量

保持稳定; 多糖类 SOM 组分在大团聚体中保持稳定, 但在微团聚体中在植稻 100 年后显著降至 36%

后趋于稳定。脂肪族类 SOM 组分随植稻年限增加由 12%和 13%均快速降至 1%，而芳香族类 SOM 组分随植稻年限增加由 16%和 17%逐渐增至 30%和 38%。

长期种植水稻下大团聚体和微团聚体的脂族化程度变化规律相同（图 3）。在种植水稻 50 年时，大团聚体和微团聚体脂族化程度最高分别为 71%和 75%。随着种植水稻年限的增加，脂族化程度在植稻 1 000 年时达到最小，分别为 5%和 8%。

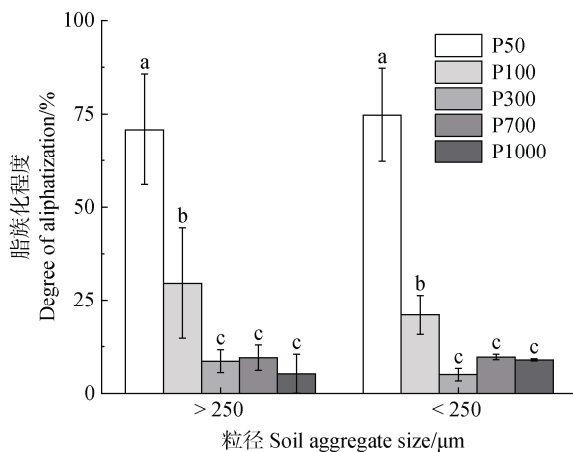


图 3 不同粒径团聚体脂族化程度随植稻年限的变化
Fig. 3 Changes in aliphaticization of different size aggregates with rice cultivation ages

2.3 长期植稻下不同粒径团聚体可溶性有机质分子组成特征

通过 PARAFAC 分析发现不同植稻年限土壤团聚体中主要存在三种 SOM 有机分子（图 4）。其中，C1 组分分子量较大，是芳香化程度高的类胡敏酸结构^[25-27]。C2 组分相对分子质量大，是生物可降解性低的类富里酸^[28-29]。C3 组分为类色氨酸物质^[30]，可作为指示蛋白质结构特征的标志^[31]。

在不同粒径团聚体中，类色氨酸 DOM 相对含量在植稻 50~100 年间从 16%~17%上升至 33%，植稻 100 年后又逐渐下降至 20%~22%；类富里酸和类胡敏酸 DOM 在植稻 50~100 年间分别从 41%~42%降至 36%~37%和 31%，但在植稻 100 年后，类富里酸 DOM 相对含量处于动态平衡状态，而类胡敏酸在植稻 100~300 年显著增加至 36%~37%后保持稳定（图 5）。

2.4 长期植稻下不同粒径团聚体可溶性有机质荧光光谱指数

大团聚体 DOM 中 FI 均值为 1.76 (1.66~1.88)，为外源和自生源混合特征，植稻 100 年时最高，在植稻 50 年和 1 000 年时最低。BIX 数均值为 0.64 (0.57~0.77)，在植稻 100 年时达到最大值，其余植稻年限稳定在 0.6 左右。HIX 均值为 5.41 (3.46~

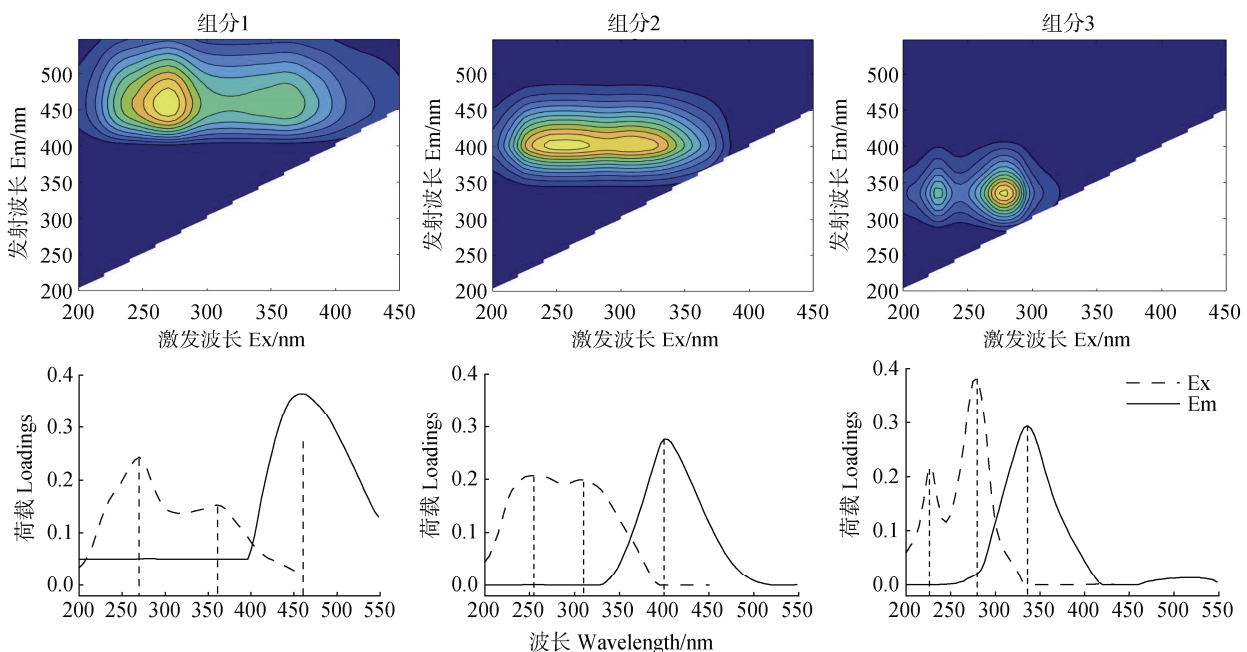


图 4 通过 PARAFAC 模型识别出的三种 DOM 组分的激发-发射矩阵 (EEMs) 位置和荷载

Fig. 4 Excitation-emission matrix (EEMs) locations and loadings for the three DOM components identified by the PARAFAC model

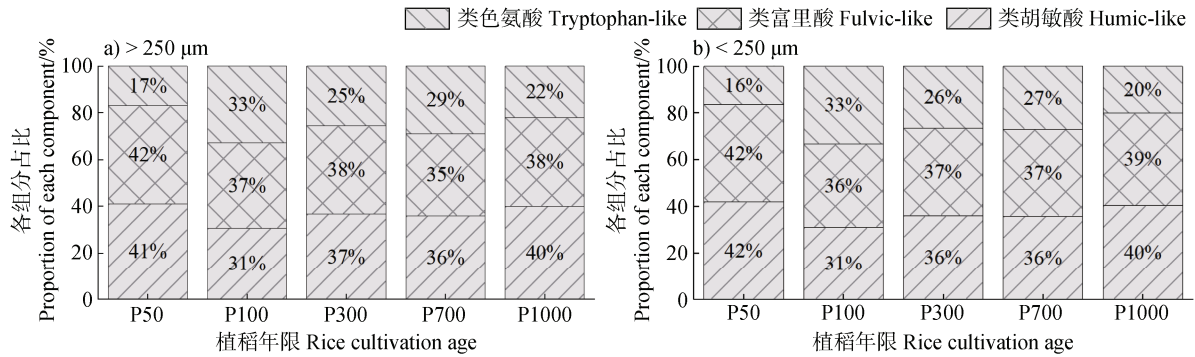


图 5 不同粒径团聚体中 DOM 分子组成相对丰度随植稻年限的变化

Fig. 5 Changes in the relative abundance of DOM components in different size aggregates with rice cultivation ages

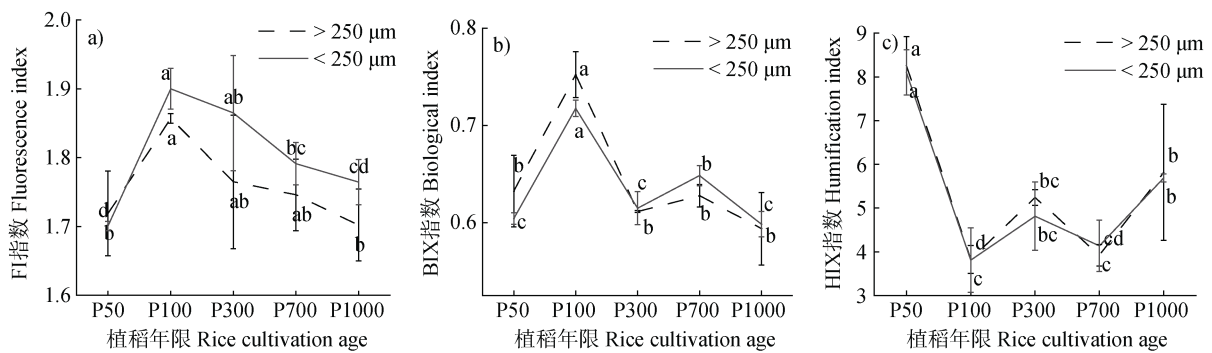


图 6 不同粒径团聚体荧光光谱指数随植稻年限的变化

Fig. 6 Changes in fluorescence spectral index in different size aggregates with rice cultivation ages

9.01), 在植稻 100 年时最小。微团聚体 DOM 的 FI 值变化趋势与大团聚体相似: FI 均值为 1.80 (1.69~1.95), BIX 均值为 0.64 (0.59~0.73), HIX 均值为 5.31 (3.07~8.62) (图 6)。

3 讨 论

3.1 土壤团聚体有机质分子组成随植稻年限的演变过程

长期植稻下,各粒径团聚体中脂肪族类 SOM 均呈现下降趋势,而芳香族类 SOM 则逐步上升(图 2)。这是因为脂肪族类 SOM 可作为微生物的主要碳源被分解利用^[32]。而芳香族类 SOM 具有较高的化学稳定性且难被降解,有助于其长期固持^[33]。周萍等^[34]利用核磁共振技术分析发现,稻田土壤团聚体中的芳香类 SOM 含量会逐渐积累。各粒径团聚体中酚醇类 SOM 随植稻时间的变化均不显著,可能是由于其分解和转化速率维持动态平衡。此外,大团聚体中的多糖类 SOM 随植稻年限没有显著变化,但小团聚体中多糖类 SOM 显著下降(图 2a),可能是因为

微团聚体比表面积相对较大,吸附能力也较强,附着的多糖类 SOM 提高了微生物的捕食效率,导致多糖含量比例的下降^[35]。

通过对长期植稻下不同粒径团聚体 DOM 分子组成分析后发现,类胡敏酸和富里酸 DOM 呈现先下降后上升趋势(图 5)。这主要是因为滩涂开垦的早期阶段,农业活动加剧了两类比较稳定的 DOM 的分解^[36]。而且大量植物残体的输入导致微生物的快速增殖,加速了胡敏酸和富里酸等有机大分子的分解^[4]。当继续植稻超过 100 年,持续的有机质输入足以满足土壤微生物的需求,促使类胡敏酸和富里酸 DOM 开始逐渐积累(图 5)。随着时间的推移,长期的淹水厌氧环境为类胡敏酸和类富里酸持续积累创建了有利条件^[37]。但色氨酸类 DOM 表现出先增后减的动态规律。植稻初期有机物的输入促进了微生物的增长,类色氨酸 DOM 作为代谢产物随着微生物丰度的增加而提升(图 5)。随着植稻时间的延长,土壤环境和微生物群落结构逐渐稳定^[38],微生物开始有效地同化色氨酸这类小分子物质,同时减少对结构更加复杂稳定的类胡敏酸和富里酸的利用^[25]。

3.2 土壤团聚体有机质随植稻年限积累的分子机制

长期植稻过程中,不同粒径的土壤团聚体中有机碳随水稻种植年限的增加逐渐积累(图1)。团聚体可以通过物理保护作用包裹作物残留物,减少被分解的风险,延长其滞留时间,从而促进了团聚体中有机碳的积累。微团聚体除了物理保护之外,由于其较大的比表面积,还对小分子有机质有较强的化学吸附作用,因而微团聚体较大团聚体的有机质积累作用更强一些(图1)。此外,长期种植水稻的持续耕作和施肥提高了土壤微生物丰度,从而也会提升团聚体中的微生物生物量^[39]。

随着植稻年限的增加,SOM脂族化程度逐渐降低,具体表现为脂肪族类SOM下降而芳香族类SOM增加(图2)。这主要是因为化学结构相对简单的脂肪族类SOM被微生物和酶分解转化为更为稳定的芳香族类SOM^[40],而芳香族类SOM的逐渐增加,正是稻田土壤SOM不断积累的物质基础^[41]。然而,在植稻1000年间,大团聚体和微团聚体中SOM组分的丰度并没有表现出显著差异(图2)。这一结果进一步证实了大团聚体是微团聚体的弱结合,大团聚体对有机质的保护作用主要通过微团聚体起主要作用^[5]。

作为SOM中最活跃的部分,DOM是土壤微生物活动的能源和土壤养分周转的驱动力^[42]。本研究通过对千年尺度水稻土壤时间序列的DOM进行PARAFAC分析和计算荧光光谱指数发现:在植稻初期(<50年),FI值和BIX值均最小(图6),表明此时水稻及其他植物(残体和根系分泌物等)和其他外源性输入(有机肥或其他有机物料等)占主导地位;而HIX值最大,且类胡敏酸和类富里酸DOM相对含量较高,类色氨酸相对含量较少(图5和图6),表明这一时间腐殖化程度已经较高。在植稻初期,土壤微生物丰度相对较低^[4],但由于持续的外源碳输入导致微生物有大量容易利用的碳源,而不必去矿化性质稳定的腐殖质类DOM,进而导致腐殖质类DOM相对较高。植稻100年后,FI值和BIX值均达到最大(图6),说明经过一个世纪的水稻种植,微生物代谢等内源性过程产生的有机组分显著积累。这与此前对微生物丰度演变过程的研究结果相一致,微生物细菌丰度在植稻100年后达到最大值^[4],因而会产生较多的微生物代谢物,出现新近自生源特征^[43]。这些类色氨酸新近自生源物质

相对积累,导致了HIX指数的下降,类胡敏酸和富里酸DOM相对较低,即腐殖化程度变低(图5和图6)。在此之后,随着土壤微生物群落结构和土壤环境的稳定,微生物主导的有机碳周转过程逐步转化成更为复杂稳定的腐殖化过程,类胡敏酸和类富里酸DOM含量上升,使得SOM持续积累,表现为HIX指数增加(图6)。苏打盐碱型水稻土中DOM的相关研究也证实了这一点,类富里酸和腐殖物质以及含有不饱和双键的芳香族化合物含量均随种植年限的增加而增加^[44]。与此同时,长期植稻引起的土壤养分限制和微生物代谢活性的变化,可能促使FI和BIX值下降,以及活性物质类色氨酸的下降(图5和图6)。因此,本研究结果可以进一步说明,稻田土壤中有机碳的积累,除了团聚体的物理保护和化学结合作用,微生物的转化为作用也是土壤有机碳积累的重要机制。

4 结 论

基于滩涂围垦形成的稻田时间序列,本研究发现随着植稻年限的增加,在土壤团聚体中有机碳持续积累的同时,不同粒径团聚体中有机质分子组成及可溶性有机质分子的差异并不大。土壤有机质中芳香类有机碳组分持续积累,但脂肪类有机质组分持续下降,酚醇类有机质组分保持相对稳定。而可溶性有机质中,色氨酸类物质在植稻100年内显著增加,类富里酸和胡敏酸类可溶性有机质在100年内显著下降,此后均保持相对稳定。由此可知,随着植稻年限的增加,微生物将类脂肪和色氨酸等活性有机物质转化为类芳香和富里酸及胡敏酸等稳定物质,促进了稻田有机碳的持续积累。进一步证实稻田土壤有机碳的积累不仅受团聚体的化学吸附和物理保护的作用,微生物的转化作用同样重要。

参考文献 (References)

- [1] Zhang G L, Gong Z T. Classification of paddy soil as anthropogenic soil[J]. *Advances in Soil Science*, 1991, 19(4): 30-36. [张甘霖, 龚子同. 水稻土作为人为土的分类研究[J]. *土壤学进展*, 1991, 19(4): 30-36.]
- [2] Liu Y L, Ge T D, Zhu Z K, et al. Carbon input and allocation by rice into paddy soils: A review[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2019, 133: 97-107.
- [3] Liu Y L, Wang P, Cai G, et al. Divergent accumulation of microbial and plant necromass along paddy soil

- development in a millennium scale[J]. *Soil & Tillage Research*, 2023, 232: 105769.
- [4] Liu Y L, Wang P, Ding Y J, et al. Microbial activity promoted with organic carbon accumulation in macroaggregates of paddy soils under long-term rice cultivation[J]. *Biogeosciences*, 2016, 13 (24): 6565—6586.
- [5] 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. [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.]
- [6] Xu W J, Cong Y H, Zhang Y L, et al. Distribution of organic carbon and particulate organic carbon in water-stable aggregates of paddy soil in black soil area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30 (4): 210—215. [徐文静, 丛耀辉, 张玉玲, 等. 黑土区水稻土水稳性团聚体有机碳及其颗粒有机碳的分布特征[J]. *水土保持学报*, 2016, 30 (4): 210—215.]
- [7] Li X Y, Li B, Wang C Q, et al. Effects of long-term straw returning on organic carbon and extracellular enzymes in paddy soil aggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61 (1): 235—246. [李新悦, 李冰, 王昌全, 等. 长期秸秆还田对水稻土团聚体有机碳及胞外酶的影响[J]. *土壤学报*, 2024, 61 (1): 235—246.]
- [8] Xu J H, Sun Y, Gao L, et al. A review of the factors influencing soil organic carbon stability[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26 (2): 222—230. [徐嘉晖, 孙颖, 高雷, 等. 土壤有机碳稳定性影响因素的研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26 (2): 222—230.]
- [9] Mai F S, Li X W, Lü R, et al. Adsorption and sequestration of soil-dissolved organic matter by ferrihydrite[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43 (3): 627—635. [麦富生, 李晓雯, 吕睿, 等. 水铁矿对土壤溶解性有机质的吸附固持作用[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43 (3): 627—635.]
- [10] Wang H, Han S, Tang S, et al. Continuous multi-year application of Chinese milk vetch in paddy soil and its effect on soil aggregates distribution and their carbon and nitrogen content[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60 (3): 868—880. [王慧, 韩上, 唐杉, 等. 紫云英翻压还田对稻田土壤团聚体组成及其碳氮的影响[J]. *土壤学报*, 2023, 60 (3): 868—880.]
- [11] Xue B, Huang L, Huang Y N, et al. Effects of organic carbon and iron oxides on soil aggregate stability under different tillage systems in a rice-rape cropping system[J]. *Catena*, 2019, 177: 1—12.
- [12] Liu J, Chen X F, Li D M, et al. Variation of soil dissolved organic carbon under long-term different fertilizations and its correlation with maize yields[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20 (7): 2761—2770.
- [13] Zhu Y C, Zhang M, Han X Z, et al. Evaluation of the soil aggregate stability under long term manure and chemical fertilizer applications: Insights from organic carbon and humic acid structure in aggregates[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2024, 376: 109217.
- [14] Kristiansen S M, Schjønning P, Thomsen I K, et al. Similarity of differently sized macro-aggregates in arable soils of different texture[J]. *Geoderma*, 2006, 137 (1/2): 147—154.
- [15] Chang H D, Wang J, Zhang F H. Effects of continuous cropping with straw return on particulate organic carbon and Fourier transform infrared spectroscopy in cotton field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30 (4): 1218—1226. [常汉达, 王晶, 张凤华. 棉花长期连作结合秸秆还田对土壤颗粒有机碳及红外光谱特征的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30 (4): 1218—1226.]
- [16] Spaccini R, Mbagwu J S C, Conte P, et al. Changes of humic substances characteristics from forested to cultivated soils in Ethiopia[J]. *Geoderma*, 2006, 132 (1/2): 9—19.
- [17] Stevenson F J. *Humus chemistry: Genesis, composition, reactions*[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 1994.
- [18] Tivet F, de Moraes Sá J C, Lal R, et al. Assessing humification and organic C compounds by laser-induced fluorescence and FTIR spectroscopies under conventional and no-till management in Brazilian Oxisols[J]. *Geoderma*, 2013, 207: 71—81.
- [19] Madari B E, Reeves J B, Machado P L O A, et al. Mid- and near-infrared spectroscopic assessment of soil compositional parameters and structural indices in two Ferralsols[J]. *Geoderma*, 2006, 136 (1/2): 245—259.
- [20] Ellerbrock R H, Kaiser M. Stability and composition of different soluble soil organic matter fractions—evidence from $\delta^{13}\text{C}$ and FTIR signatures[J]. *Geoderma*, 2005, 128 (1/2): 28—37.
- [21] Fan T T, Yao X, Sun Z L, et al. Properties and metal binding behaviors of sediment dissolved organic matter (SDOM) in lakes with different trophic states along the Yangtze River Basin: A comparison and summary[J]. *Water Research*, 2023, 231: 119605.
- [22] Shi C Q, Li Y, Hu Y, et al. Fluorescence spectral characteristics of soil dissolved organic matter in the river wetland of northern cold region, China[J].

- Spectroscopy and Spectral Analysis, 2023, 43 (5): 1517—1523. [史传奇, 李艳, 胡钰, 等. 北方寒区河流湿地土壤溶解性有机质荧光光谱特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43 (5): 1517—1523.]
- [23] Huguet A, Vacher L, Relexans S, et al. Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary[J]. *Organic Geochemistry*, 2009, 40 (6): 706—719.
- [24] Inamdar S, Finger N, Singh S, et al. Dissolved organic matter (DOM) concentration and quality in a forested mid-Atlantic watershed, USA[J]. *Biogeochemistry*, 2012, 108 (1): 55—76.
- [25] Wen Y L, Xiao J, Goodman B A, et al. Effects of organic amendments on the transformation of Fe(oxyhydr)oxides and soil organic carbon storage[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2019, 7: 257.
- [26] Li Y, Bai Y, Wei D, et al. Fluorescence spectrum characteristics of fulvic acid in black soil under different ratios of organic-inorganic fertilizers combined application[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41 (11): 3518—3523. [李艳, 白杨, 魏丹, 等. 不同比例有机无机肥配施条件下黑土富里酸荧光光谱特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41 (11): 3518—3523.]
- [27] Li W, Jia X X, Li M, et al. Insight into the vertical characteristics of dissolved organic matter in 5-m soil profiles under different land-use types on the Loess Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 692: 613—621.
- [28] Stedmon C A, Markager S, Bro R. Tracing dissolved organic matter in aquatic environments using a new approach to fluorescence spectroscopy[J]. *Marine Chemistry*, 2003, 82 (3/4): 239—254.
- [29] Ishii S K L, Boyer T H. Behavior of reoccurring PARAFAC components in fluorescent dissolved organic matter in natural and engineered systems: A critical review[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46 (4): 2006—2017.
- [30] Cao J R, Gong K Y, Bie Y J, et al. Analysis of dynamics of soil dissolved carbon and nitrogen fractions and its three-dimensional fluorescence characteristics during restoration of soil and water conservation forests[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41 (19): 7679—7688. [曹佳锐, 龚可杨, 别宇静, 等. 水土保持林恢复土壤可溶性碳氮组分动态与三维荧光特征分析[J]. 生态学报, 2021, 41 (19): 7679—7688.]
- [31] Stedmon C A, Markager S. Resolving the variability in dissolved organic matter fluorescence in a temperate estuary and its catchment using PARAFAC analysis[J]. *Limnology and Oceanography*, 2005, 50 (2): 686—697.
- [32] Pan G X, Ding Y J, Chen S T, et al. Exploring the nature of soil organic matter from humic substances isolation to SOMics of molecular assemblage[J]. *Advances in Earth Science*, 2019, 34 (5): 451—470. [潘根兴, 丁元君, 陈硕桐, 等. 从土壤腐殖质分组到分子有机质组学认识土壤有机质本质[J]. 地球科学进展, 2019, 34 (5): 451—470.]
- [33] Sui P X, Luo Y, Zheng H B, et al. Effects of long-term tillage practices on the stability of soil aggregates and organic carbon in black soil farmland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34 (7): 1853—1861. [隋鹏祥, 罗洋, 郑洪兵, 等. 长期耕作对农田黑土团聚体和有机碳稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2023, 34 (7): 1853—1861.]
- [34] Zhou P, Piccolo A, Pan G X, et al. Soc enhancement in three major types of paddy soils in a long-term agro-ecosystem experiment in south China III. Structural variation of particulate organic matter of two paddy soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(3): 398—405. [周萍, Alessandro Piccolo, 潘根兴, 等. 三种南方典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究 III. 两种水稻土颗粒有机质结构特征的变化[J]. 土壤学报, 2009, 46 (3): 398—405.]
- [35] Zhang J C, Liu Y Y, He H Z, et al. Research advances on mechanism of organic carbon sequestration in soil aggregates[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 31 (3): 319—325. [张家春, 刘盈盈, 贺红早, 等. 土壤团聚体与有机碳固定关系研究进展[J]. 福建农业学报, 2016, 31 (3): 319—325.]
- [36] Kölbl A, Schad P, Jahn R, et al. Accelerated soil formation due to paddy management on marshlands (Zhejiang Province, China) [J]. *Geoderma*, 2014, 228: 67—89.
- [37] Liu S N, Zhao L P. Effects of different rice cultivation years on humus content and composition of soda saline-alkaline soil[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2018, 40 (6): 707—715. [刘胜楠, 赵兰坡. 种稻年限对苏打盐碱土腐殖质含量及组成的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2018, 40 (6): 707—715.]
- [38] Liu Y L, Wang P, Pan G X, et al. Functional and structural responses of bacterial and fungal communities from paddy fields following long-term rice cultivation[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16 (5): 1460—1471.
- [39] Wang P, Liu Y L, Li L Q, et al. Long-term rice cultivation stabilizes soil organic carbon and promotes soil microbial

- activity in a salt marsh derived soil chronosequence[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 15704.
- [40] Kamimura N, Sakamoto S, Mitsuda N, et al. Advances in microbial lignin degradation and its applications[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2019, 56: 179—186.
- [41] Bagheri Novair S, Cheraghi M, Faramarzi F, et al. Reviewing the role of biochar in paddy soils: An agricultural and environmental perspective[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2023, 263: 115228.
- [42] Liu D, Du Y X, Yu S J, et al. Human activities determine quantity and composition of dissolved organic matter in lakes along the Yangtze River[J]. *Water Research*, 2020, 168: 115132.
- [43] Wang J, Zhuang S Y, Zhu Z L. Soil organic nitrogen composition and mineralization of paddy soils in a cultivation chronosequence in China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17 (6): 1588—1598.
- [44] Li Y N, Wu J N, Gao Q, et al. Three-dimensional fluorescence spectral characteristics of water extractable organic matter in soda saline-alkaline paddysoil with different planting years of rice[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2017, 38 (1): 44—49. [李亚男, 武俊男, 高强, 等. 不同种植年限苏打盐碱型水稻土水溶性有机物三维荧光光谱特征分析[J]. *华南农业大学学报*, 2017, 38 (1): 44—49.]

(责任编辑：卢 萍)