

DOI: 10.11766/trxb202105260276

缪玉琳, 梁丰, 谢军, 张嵌, 刘益仁, 赵小敏. 长期有机肥替代化肥对水稻土有机碳稳定性的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(2): 512–522.
MIAO Yulin, LIANG Feng, XIE Jun, ZHANG Qin, LIU Yiren, ZHAO Xiaomin. Effects of Long-term Organic Fertilizer Instead of Chemical Fertilizer on Organic Carbon Stability of Paddy Soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(2): 512–522.

长期有机肥替代化肥对水稻土有机碳稳定性的影响*

缪玉琳¹, 梁丰¹, 谢军¹, 张嵌¹, 刘益仁^{2†}, 赵小敏^{1†}

(1. 江西农业大学国土资源与环境学院/江西省鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室, 南昌 330045; 2. 江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所, 南昌 330200)

摘要: 针对不同有机肥替代化肥比例下红壤性水稻土有机碳稳定性不明确的科学问题, 以第四纪红色黏土发育的水稻土的长期定位试验为研究对象, 选取不施肥处理(CK)、化肥处理(100F0M)、化肥处理中 30%、50%及 70%的氮量被有机肥替代(70F30M、50F50M、30F70M) 5 个处理, 明确长期不同有机肥替代化肥比例对水稻土活性/惰性碳组分含量及有机碳化学结构稳定性的影响。结果表明: 不同有机肥替代化肥比例均提高了水稻土有机碳、活性碳、惰性碳的含量, 活性碳含量表现为 70F30M、30F70M > CK、50F50M, 惰性碳含量表现为 30F70M > 70F30M、50F50M > 100F0M > CK。随着有机肥替代比例的增加, 惰性碳比例从 69.67% 逐渐增加至 77.26%。不同有机肥替代比例下土壤有机碳的化学结构种类相同, 相对含量百分比表现出相同的趋势: 芳香碳(33.28%~37.79%)、烷基碳(27.81%~31.19%)最高, 烷氧碳(16.19%~20.10%)、羧基碳(10.35%~12.07%)居中, 羧基碳(2.52%~5.75%)最低。同时随着有机肥替代化肥比例的增加, 芳香度从 0.40 增加至 0.44, 脂族碳/芳香碳和烷基碳/烷氧碳的比值均降低, 有机碳的稳定性增强。pH ($P < 0.05$) 和阳离子交换量(CEC, $P < 0.01$) 是活性碳含量的主要影响因素, pH、CEC、碱解氮(AN)、碳投入(有机肥、水稻根系、水稻留茬) ($P < 0.01$) 是惰性碳含量的主要影响因素。因此, 30F70M 不仅提高了活性、惰性碳的含量, 同时增加惰性碳的芳香度, 更有利于提高土壤有机碳的稳定性。

关键词: 有机无机配比; 长期定位试验; 土壤有机碳组分; 有机碳稳定性; 影响因素

中图分类号: S153.6 **文献标志码:** A

Effects of Long-term Organic Fertilizer Instead of Chemical Fertilizer on Organic Carbon Stability of Paddy Soil

MIAO Yulin¹, LIANG Feng¹, XIE Jun¹, ZHANG Qin¹, LIU Yiren^{2†}, ZHAO Xiaomin^{1†}

(1. College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University/Key Laboratory of Agricultural Resources and Ecology in Poyang Lake Basin of Jiangxi Province, Nanchang 330045, China; 2. National Engineering Research Center for Red Soil Improvement/Institute of Soil, Fertilizer and Resources and Environment, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, China)

Abstract: [Objective] The effects of long-term and different proportions of organic fertilizer on the content of labile/non-labile

* 国家自然科学基金项目(42067024)和江西省教育厅科学技术项目(GJJ180196)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42067024) and the Science and Technology Project of Jiangxi Provincial Department of Education (No. GJJ180196)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: jxnclyr@163.com, zhaoxm889@126.com

作者简介: 缪玉琳(1996—), 女, 江西新余人, 硕士研究生, 主要从事土壤有机碳方面的研究。E-mail: 997316682@qq.com

收稿日期: 2021-05-26; 收到修改稿日期: 2022-07-26; 网络首发日期(www.cnki.net): 2022-12-13

carbon components and the stability of the chemical structure of organic carbon in paddy soil were determined. 【 Method 】 This study selected a long-term positioning test of paddy soil developed by Quaternary red clay as the research object. Five treatments were selected: no fertilizer treatment (CK), chemical fertilizer treatment (100F0M), 30%, 50% and 70% of the nitrogen in chemical fertilizer treatment was replaced by organic fertilizer (70F30M、50F50M、30F70M). During the study, we measured the content of total organic carbon, labile/non-labile organic carbon pool, the chemical structure of organic carbon, and soil properties. 【 Result 】 The contents of organic carbon, labile carbon and non-labile carbon in paddy soil were increased by different proportions of organic fertilizer instead of chemical fertilizer. The contents of labile carbon were 70F30M, 30F70M > CK, 50F50M, and the contents of non-labile carbon were 30F70M > 70F30M, 50F50M > 100F0M > CK. With an increase in the replacement proportion of organic fertilizer, the proportion of non-labile carbon gradually increased from 69.67% to 77.26%. Under different organic fertilizer substitution ratios, the chemical structure of soil organic carbon remained the same, and the relative content percentage shows the same trend: aromatic carbon (33.28%–37.79%), alkyl carbon (27.81%–31.19%), alkoxy carbon (16.19%–20.10%), carbonyl carbon (10.35%–12.07%), and carboxyl carbon (2.52%–5.75%). Alky, carbonyl, and carboxyl carbons made up the largest, second largest and lowest proportions, respectively. With the increase in the proportion of organic fertilizer instead of chemical fertilizer, the aromaticity increased from 0.40 to 0.44 while the ratios of aliphatic carbon/aromatic carbon and alkyl carbon/alkoxy carbon decreased, suggesting an increase in the stability of organic carbon. PH ($P<0.05$) and Cation exchange capacity (CEC, $P<0.01$) were the main influencing factors of activated carbon content. pH, CEC, Alkali hydrolyzed nitrogen (AN) and carbon input (organic fertilizer, rice root and rice stubble) ($P<0.01$) were the main influencing factors of non-labile carbon content. 【 Conclusion 】 30F70M not only improved the content of labile and non-labile carbon but also increased the aromaticity of organic carbon, which is more conducive to improve the stability of soil organic carbon.

Key words: Organic-inorganic ratio; Long-term positioning test; Soil organic carbon composition; Organic carbon stability; Influencing factors

稻田农业是保证我国粮食安全的重要支撑，稻田有机碳含量较高、固碳潜力较大^[1]，其表层碳储量达 47 Mg·hm⁻²（以 C 计），是旱地表层碳储量的 1.5 倍~2.1 倍^[2]。因此，稻田土壤碳库对于农田土壤碳的固定具有重要意义。土壤有机碳库又可分为活性和惰性碳库，活性碳通过调节能源物质供应和微生物活性影响土壤碳库的有效性^[3]，而惰性碳较难分解，表示土壤长期积累和固碳的能力，对土壤固碳保肥尤为重要^[4-5]。因此，稻田土壤活性、惰性碳库对农田生态系统中有机碳的迁移、转化、固持和缓解全球气候变暖意义重大。

有机肥替代化肥对稻田土壤活性、惰性碳库影响深远。与不施肥处理（CK）相比，不同比例有机肥替代化肥处理均提高了稻田活性碳含量^[6]，但是对惰性碳含量的影响差异较大^[7]。有机肥替代化肥的比例为 50%~100%时，稻田活性碳可增加 15.38%~305.93%（替代比例以 100%时最佳），惰性碳可增加-4.50%~33.67%（替代比例以 60%最佳）；替代比例为 30%~50%时，稻田活性碳可增加

43.62%~177.97%，惰性碳可增加 0.35%~31.63%（替代比例均以 50%最佳）^[6-8]。此外，有机碳组分还受外源碳投入（作物根系、残茬及有机肥）和土壤理化性质（pH、全量养分、速效养分等）影响显著^[5, 9-12]。然而，目前多数有关有机肥替代比例对稻田活性、惰性碳库影响的田间试验研究主要为短期（≤5a）试验，缺乏长期不同有机肥替代比例下活性、惰性碳库含量和百分比变化的对比研究。

土壤有机碳的稳定性与其结构的稳定性密切相关，其中烷氧碳是易分解的结构，烷基碳和芳香碳则较为稳定^[13]。脂族碳/芳香碳比值能反映腐殖物质分子结构的复杂程度；而烷基碳/烷氧碳比值可反映有机碳的分解程度^[14]。施肥通过影响土壤有机碳的化学结构影响有机碳的稳定性。与 CK 相比，施化肥使水稻土脂族碳/芳香碳比值升高 0.46%~16.79%，使烷基碳/烷氧碳比值、芳香度分别降低 4.48%~20.26%、0.21%~11.60%，有机碳的稳定性减弱^[15-17]；化肥配施有机肥使水稻土脂族碳/芳香碳比值降低 7.17%~32.94%，使烷基碳/烷氧碳比值、芳香度分

别升高 6.30%~12.08%、6.01%~34.90%，有机碳稳定性增强^[15]。然而，目前不同有机肥替代比例对稻田土壤有机碳化学结构及稳定性的影响尚不明确。

因此，本研究选取水稻土长期定位试验的 5 个有机肥替代化肥处理，明确长期不同有机肥替代化肥比例下水稻土活性、惰性碳库的含量及碳库稳定程度；通过傅里叶红外光谱分析 (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) 和 X 射线光电子能谱分析 (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS)，明确有机碳的化学结构及其稳定机制；并探讨土壤性质和外源碳投入对活性碳、惰性碳含量的影响。本研究将为研究第四纪红色黏土发育的水稻土有机碳的稳定机制及优化培肥措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验点位于江西省农业科学院试验农场内 (28°57'N, 115°94'E)，属于中亚热带，试验始于 1984 年。该区域年均温 17.5℃，年均降水量 1 600 mm，年均蒸发量 1 800 mm，无霜期约 280 d。供试土壤为第四纪红色黏土母质发育的中潴黄泥田。试验前耕层 (0~20 cm) 土壤性质为：pH 6.50，有机质

25.6 g·kg⁻¹，全氮 1.36 g·kg⁻¹，全磷 0.49 g·kg⁻¹，碱解氮 81.6 mg·kg⁻¹，有效磷 20.8 mg·kg⁻¹，速效钾 35.0 mg·kg⁻¹^[18]。

1.2 试验设计

试验共设置 8 个处理，本研究选取其中 5 个处理，分别是：不施肥处理 (CK)、化肥处理 (100F0M)、化肥处理中 30%、50% 及 70% 的氮量被有机肥替代，分别记为 70F30M、50F50M、30F70M。每个处理设三次重复，随机区组排列，小区面积 33.3 m²，小区间以 0.45 m 深和 0.5 m 宽的水泥田埂隔开，独立排灌。种植制度为一年两熟制 (早稻-晚稻)。早稻在每年的 4 月中下旬移栽，7 月中旬收获，晚稻在 7 月下旬移栽，10 月下旬收获。

早稻 N、P₂O₅、K₂O 施用量分别为 150、60、150 kg·hm⁻²；晚稻 N、P₂O₅ 和 K₂O 施用量分别为 180、60 和 150 kg·hm⁻²。早晚稻化肥施用种类相同，均为尿素 (N 46.7%)、过磷酸钙 (P₂O₅ 12%) 和氯化钾 (K₂O 60%)，有机肥为紫云英和腐熟猪粪，紫云英 N、P₂O₅ 和 K₂O 含量分别为 0.30%、0.08% 和 0.23%，腐熟猪粪分别为 0.45%、0.19% 和 0.60%。磷肥和有机肥全部作基肥；化学氮肥 50% 作基肥，25% 作分蘖肥，25% 作幼穗分化肥；钾肥 50% 作分蘖肥，50% 作幼穗分化肥。各处理具体肥料施用量见表 1。

表 1 长期不同比例有机肥替代化肥处理的肥料施用量

Table 1 Fertilizer application rate of long-term treatment with different proportions of organic fertilizer instead of chemical fertilizer/ (kg·hm⁻²)

处理 Treatment	早稻 Early rice				晚稻 Late rice			
	尿素 Urea (N)	过磷酸钙 SSP (P ₂ O ₅)	氯化钾 KCl (K ₂ O)	紫云英 Milk vetch	尿素 Urea (N)	过磷酸钙 SSP (P ₂ O ₅)	氯化钾 KCl (K ₂ O)	猪粪 Pig manure
CK	0	0	0	0	0	0	0	0
100F0M	323	500	250	0	395	500	250	0
70F30M	235	400	194	14 600	277	310	130	12 000
50F50M	162	340	156	24 700	196	180	50	20 000
30F70M	100	280	119	34 300	118	57	0	28 000

注：CK 为不施肥处理、100F0M 为全施化肥处理、30%、50% 及 70% 的氮量被有机肥替代，分别记为 70F30M、50F50M、30F70M。下同。Note: CK is no fertilizer treatment, 100F0M is full fertilizer treatment, 30%, 50% and 70% of nitrogen is replaced by organic fertilizer, which are recorded as 70F30M, 50F50M and 30F70M, respectively. The same as below.

1.3 样品采集及指标测定

2018 年 10 月，晚稻收获后采用直径为 5 cm 的土钻采集水稻耕层土 (0~20 cm)，每个小区随机采集 3 个土钻样品混合成一个土壤样品，放入保温箱

保存带回实验室。土样在自然条件下风干，剔除石块及植物残体，研磨过 20 目和 100 目筛后备用。

土壤样品测定指标及方法如下^[19]：pH (电位法，土水比 1:5)；土壤有机碳 (SOC，重铬酸钾容量

法);土壤阳离子交换量(CEC,中性乙酸铵交换法);碱解氮(AN,碱解扩散法)。

活性、惰性碳组分采用 KMnO_4 氧化法^[20]。活性碳为 $333 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ KMnO_4 氧化的有机碳含量;惰性碳为总有机碳含量与 $333 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ KMnO_4 氧化的有机碳含量之差。

采用傅里叶红外光谱分析(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)及X射线光电子能谱分析(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS)测定有机碳的官能团及相对含量。其中FTIR:采用傅里叶红外光谱仪(Burker Invenio S, 德国)进行样品测定,具体方法如下:将样品与干燥的溴化钾(光谱纯)按1:100的比例在玛瑙研钵中充分研磨混匀后,在75 KPa下压片,通过傅里叶变换红外光谱仪扫描并记录光谱图。光谱测定范围为 $4000 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$,分辨率为 4 cm^{-1} ,扫描频次64次。XPS:采用X射线光电子能谱仪(Thermo Scientific K-Alpha, 美国)进行样品测定,X射线源为单色 $\text{Al K}\alpha$ ($h\nu = 1486.6 \text{ eV}$),束斑面积为 $400 \mu\text{m}$ 。在扫描 $\text{C}1\text{s}$ 的高分辨率图谱时,步长设为 0.05 eV ,以 $\text{C}1\text{s}$ 峰(284.80 eV)为标准进行能量校正。

1.4 计算方法

碳库指数(CPI) = 样品总有机碳含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) / 对照土壤总有机碳含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$);

活度指数(LI) = 样本的碳库活度(L) / 对照的碳库活度(L_0);

碳库活度(L) = 样本中的活性碳(LOC) / 样本中的非活性碳(NLOC);

有机肥碳投入($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$) = 有机肥的有机碳含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) \times (1-有机肥含水量(%)) \times 有机肥鲜重($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) / 1000 ;

水稻根茬碳投入($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$) = ((籽粒+秸秆) \times (30%+5.6%)) \times (1-14%) \times 0.418;

对照土壤为不施肥处理;30%—水稻地下部分占地上部分的比例;5.6%—水稻所有处理残茬占地上部分的比例;14%—风干地上部分含水量; $418 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ —水稻地上部分平均有机碳含量^[21-22]。

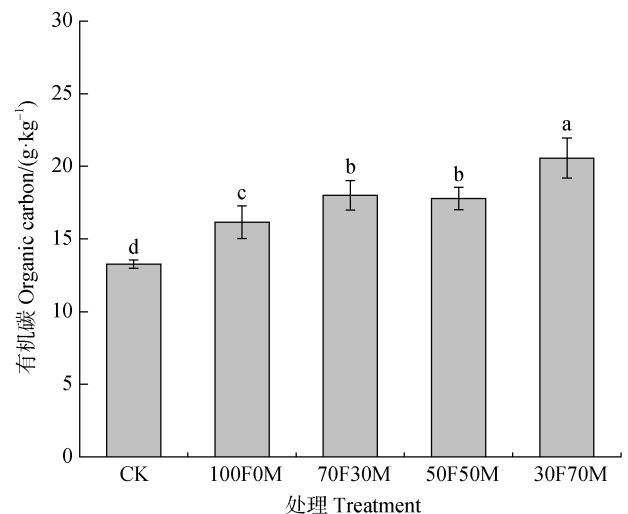
1.5 数理统计方法

采用单因素方差分析(One-way ANOVA)(SPSS 22.0 软件)明确不同处理之间土壤有机碳组分含量及比例、碳库指数、碳库活度的显著性差异($P < 0.05$);采用 Origin 2019 对红外光谱图像进行吸光度转化图像光滑和基线校准;采用 Avantage 软件拟合 XPS 光谱;采用相关性分析(Correlation analysis)明确 pH、CEC、AN 及碳投入对活性、惰性碳含量的影响,并用 Origin 2019 进行相关性热图绘制($P < 0.05$)。

2 结果

2.1 长期不同有机肥替代比例对土壤有机碳含量的影响

CK、100F0M、70F30M、50F50M、30F70M 施肥处理下有机碳的含量分别为 13.27、16.16、18.00、17.79、20.57 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 1)。单因素方差分析结果表明不同有机肥替代比例下有机碳含量为 30F70M > 70F30M、50F50M > 100F0M > CK, 其中以 30F70M 处理增幅最大,而 70F30M 与 50F50M 两处理之间无显著差异($P < 0.05$)。与 CK 处理相比,100F0M、70F30M、50F50M、30F70M 处理分别使土壤有机碳



注:图中不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。Note: Different letters represent significant differences ($P < 0.05$).

图 1 长期不同比例有机肥替代化肥下土壤有机碳含量
Fig. 1 Soil organic carbon content under long-term replacement of chemical fertilizers with organic fertilizers in different proportions

含量提高了 21.78%、35.64%、34.06%、55.01%。与 100F0M 处理相比, 70F30M、50F50M、30F70M 处理分别使土壤有机碳含量提高了 11.39%、10.09%、27.29%。

2.2 长期不同有机肥替代比例对土壤有机碳组分含量、比例及碳库指数的影响

不同有机肥替代比例下活性碳的含量在 4.02~5.08 g·kg⁻¹ 之间, 且 70F30M、30F70M > CK、50F50M 处理; 惰性碳的含量介于 9.25~15.49 g·kg⁻¹ 之间, 且 30F70M > 70F30M、50F50M > 100F0M > CK (表 2)。相较于 CK 处理, 70F30M、30F70M 使活性碳分别提高了 19.90%、26.37%, 但 50F50M 活性碳含量影响较小。100F0M、70F30M、50F50M、30F70M 处理分别使惰性碳含量提高了 24.65%、42.49%、48.86%、67.46%。相较于 100F0M 处理, 不同有机肥替代比例对活性碳的影响均较小; 70F30M、50F50M、30F70M 处理分别使惰性碳含量提高了 14.31%、19.43%、34.35%。

由表 2 可知, 活性碳占总有机碳的比例在 22.74%~30.33% 之间, 且 CK > 50F50M、30F70M, 而 100F0M、70F30M 与 CK 之间无显著性差异; 惰

性碳占总有机碳的比例在 69.67%~77.26% 之间, 且 50F50M、30F70M > CK, 而 100F0M、70F30M 与 30F70M 之间无显著性差异。相较于 CK 处理, 50F50M、30F70M 使活性碳的占比分别降低 25.02%、18.27%, 使惰性碳的占比升高 10.89%、7.95%; 相较于 100F0M 处理, 50F50M 使活性碳的占比分别降低 20.55%, 使惰性碳的占比升高 8.24%。

不同有机肥替代比例下土壤碳库活度指数在 0.69~1 之间, 表现为 CK、100F0M > 50F50M、30F70M, 而 70F30M 与 CK、100F0M 及 30F70M 之间无显著差异; 土壤碳库指数在 1~1.55 之间, 表现为 30F70M > 70F30M、50F50M > 100F0M > CK。与 CK 处理相比, 50F50M、30F70M 使碳库活度指数分别降低了 0.31 及 0.23 个单位; 与 100F0M 处理相比, 50F50M、30F70M 使碳库活度指数分别降低了 0.25 及 0.17 个单位。相较于 CK 处理, 100F0M、70F30M、50F50M、30F70M 的碳库指数升高了 0.22、0.36、0.34 和 0.55 个单位; 相较于 100F0M 处理, 70F30M、50F50M、30F70M 的碳库指数升高了 0.14、0.12 和 0.33 个单位。

表 2 长期不同比例有机肥替代化肥下土壤有机碳组分含量、比例及碳库指数

Table 2 The content and proportion of soil organic carbon components and the carbon pool index under long-term replacement of chemical fertilizers with organic fertilizers in different proportions

处理 Treatment	活性碳 Labile organic carbon/ (g·kg ⁻¹)	惰性碳 Non-labile organic carbon/ (g·kg ⁻¹)	活性/总有机碳 Labile / TOC / %	惰性/总有机碳 Non-labile/ TOC / %	碳库活度指数 Carbon pool labile index (LI)	碳库指数 Carbon pool index (CPI)
CK	4.02±0.73b	9.25±0.82d	30.33±5.64a	69.67±5.64c	1.00±0.00a	1.00±0.00d
100F0M	4.63±0.60ab	11.53±0.91c	28.62±3.10ab	71.38±3.10bc	0.94±0.15a	1.22±0.08c
70F30M	4.82±0.50a	13.18±1.29b	26.92±3.59ab	73.08±3.59bc	0.86±0.16ab	1.36±0.08b
50F50M	4.03±0.73b	13.77±1.32b	22.74±4.70c	77.26±4.70a	0.69±0.19c	1.34±0.06b
30F70M	5.08±0.70a	15.49±1.51a	24.79±3.57bc	75.21±3.57ab	0.77±0.15bc	1.55±0.10a

注: 图中不同字母表示同一指标不同处理之间的差异显著 ($P < 0.05$)。Note: Different letters represent the same index, and the difference between different treatments is significant ($P < 0.05$).

2.3 长期不同有机肥替代化肥比例下有机碳傅里叶红外光谱特征

由图 2 可知, CK、100F0M、70F30M、50F50M、30F70M 等施肥处理的红外吸收光谱的特征峰形态基本一致, 红外吸收光谱区均在 4 000~500 cm⁻¹ 之

间, 几个主要的吸收峰分别为 O-H 和 N-H 伸缩振动 (3 700 cm⁻¹、3 624 cm⁻¹); 芳香族的 C=C、酰胺 C=O 和 COO⁻ 伸缩振动 (1 642 cm⁻¹); 糖类 C-OH 和有机硅化物中 Si-O 伸缩振动 (1 080 cm⁻¹); 多糖中 C-O 和有机硅化物中 Si-O-Al 伸缩振动

($1\ 031\ \text{cm}^{-1}$)；多糖中 C-O 和有机硅化物中 Si-O-Si 伸缩振动 ($1\ 009\ \text{cm}^{-1}$)；烯烃中的 C-H 的顺式变形振动 ($690\ \text{cm}^{-1}$) [23-24]。

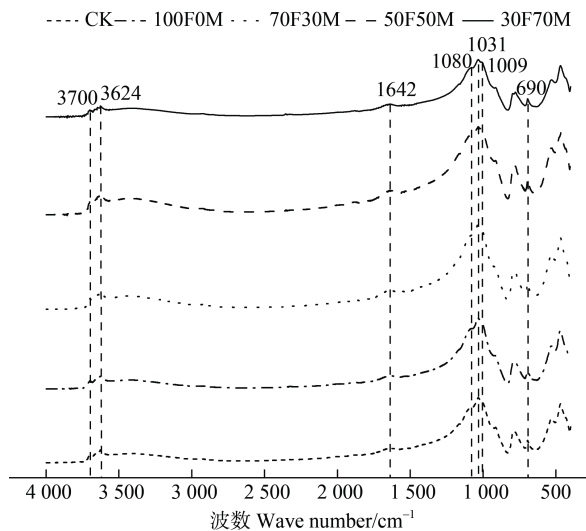


图 2 长期不同比例有机肥替代化肥下土壤红外光谱特征
Fig. 2 Soil infrared spectroscopy characteristics under long-term replacement of chemical fertilizers with organic fertilizers in different proportions

2.4 长期不同有机肥替代比例下有机碳 X 射线光电子能谱

XPS 的结果表明，5 种施肥处理土壤样品的化学结构主要为芳香碳 (Aromatic C)、烷基碳 (C-H/C-C)、烷氧碳 (C-O)、羰基碳 (C=O)、羧基碳 (O-C=O) 等 (表 3)。从 XPS 的 C1s 分峰拟合结果来看，5 种施肥处理土壤中不同类型碳的相对含量百分比表现出相同的趋势，芳香碳 (33.28%~37.79%)、烷基碳 (27.81%~31.19%) 最高，烷氧碳 (16.19%~20.10%)、羰基碳 (10.35%~12.07%) 居中，羧基碳 (2.52%~5.75%) 最低。

从表 4 的结果可知，脂族碳/芳香碳的比值在 1.27~1.50 之间，且 CK 最高；烷基碳/烷氧碳的比值在 1.38~1.93 之间，且 100F0M 最高。随着有机肥替代化肥比例的增加，脂族碳/芳香碳和烷基碳/烷氧碳的比值分别降低至 1.27 和 1.38，表明有机肥替代化肥的比例越高，脂族中的烷基化程度越低，芳香性越强，分子结构复杂，有机碳稳定性增强。芳香度的范围介于 0.40~0.44 之间，CK 最低，随着

表 3 长期不同比例有机肥替代化肥下土壤样品表面吸附碳的官能团含量百分比

Table 3 Percentage of functional groups of adsorbed carbon on the surface of soil samples under long-term replacement of chemical fertilizer with different proportions of organic fertilizer /%

处理 Treatment	芳香碳 Aromatic C	烷基碳 Alkyl C	烷氧碳 O-alkyl C	羰基碳 C=O	羧基碳 O-C=O
CK	33.28	30.33	19.49	13.62	3.27
100F0M	34.80	31.19	16.19	12.07	5.75
70F30M	36.32	29.50	18.86	10.35	4.98
50F50M	37.61	28.67	19.81	11.28	2.62
30F70M	37.79	27.81	20.10	11.79	2.52

表 4 长期不同比例有机肥替代化肥下有机碳稳定性指标

Table 4 Organic carbon stability index under long-term replacement of chemical fertilizers with organic fertilizers in different proportions

处理 Treatment	脂族碳/芳香碳 Aliphatic C/Aromatic C	烷基碳/烷氧碳 Alkyl C/O-alkyl C	芳香度 Aromaticity
CK	1.50	1.56	0.40
100F0M	1.36	1.93	0.42
70F30M	1.33	1.56	0.43
50F50M	1.29	1.45	0.44
30F70M	1.27	1.38	0.44

注：脂族碳=烷基碳+烷氧碳；芳香度=芳香碳/(芳香碳+烷基碳+烷氧碳)。Note: Aliphatic C=Alkyl C+O-alkyl C; Aromaticity=Aromatic C/(Aromatic C+Alkyl C+O-alkyl C)。

有机肥替代化肥比例的增加, 芳香度增加至 0.44, 有机碳矿化的稳定性增加。

2.5 长期不同有机肥替代比例下土壤有机碳组分含量影响因素

碳投入(水稻根系、水稻留茬、有机肥)可直接影响土壤活性、惰性碳的含量; 土壤性质可通过影响微生物的数量和活性影响有机碳的转化分解, 进而影响活性、惰性碳的含量。相关性分析结果表明, 活性碳含量与 pH 呈显著正相关($P < 0.05$)、与 CEC 呈极显著正相关($P < 0.01$), 相关系数分别为 0.344 和 0.440, 惰性碳含量与 pH、AN、CEC、碳投入(水稻根系、水稻留茬、有机肥)均呈极显著正相关($P < 0.01$), 相关系数分别为 0.469、0.906、0.648、0.766、0.763 和 0.821。

3 讨论

3.1 不同有机肥替代化肥比例对土壤有机碳组分的影响

本研究的结果表明, 长期有机肥替代化肥增加了稻田土壤有机碳和活性、惰性碳的含量, 且 30F70M 的配施比例下三者含量相对较高。有机无机配施能通过增加外源碳(有机肥、根系、残茬)的投入, 进而提高土壤有机碳和活性、惰性碳的含量^[25-27]。因此, 外源碳投入越多, 土壤有机碳和活性、惰性碳含量越高。当外源碳增加时, 活性及惰性有机碳均增加, 且惰性碳的增加幅度大于或等于活性碳的增加幅度^[26-27], 有机碳的稳定性增加。外源碳中部分可固定为土壤中稳定态有机碳, 其中水田中有机肥可固定 73%^[28]、植物源、微生物源碳可分别固定 32.89%~54.49%、28.24%~37.21%; 就江西省而言, 植物源、微生物源碳可分别固定 35.88%、54.49%^[29]。外源碳投入中的惰性成分进入土壤后一部分碳直接形成了难分解有机碳或被团聚体保护的有机碳^[30], 另一部分分解成小分子的活性碳或 CO₂, 分解后的活性碳也可参与惰性碳的形成^[31]; 而对于活性组分而言, 一部分被微生物分解为活性更高的有机碳或 CO₂, 另一部分成为了微生物生物量碳及稳定的有机碳^[32], 从长远角度考虑更有利于固碳潜力及耕地质量的提升。

同时本研究还表明当有机肥替代比例为 30%和 50%时, 有机碳含量无显著性差异。该试验 2012 年

结果显示 70F30M 和 50F50M 处理的有机碳含量无显著性差异^[18], 而 2017 年有机碳含量结果显示 50F50M>70F30M ($P < 0.05$)^[33]。研究表明, 长期定位试验的年限超过 15~20 a 后, 土壤肥力会处于相对稳定的状态, 同一处理的有机碳在某一均值附近波动(本研究近 10 年 70F30M、50F50M 处理的有机碳含量分别在 17~20、18~22 g·kg⁻¹之间)^[34]; 而 2018 年 70F30M、50F50M 两个处理的有机碳含量均在该波动范围内, 导致同一试验不同处理的有机碳含量在不同年份之间显著性差异不一致。且同一试验的肥料效应还受试验年限、采样点位的影响^[35]。70F30M 和 50F50M 惰性碳含量无显著差异, 但均显著低于 30F70M。首先, 70F30M 和 50F50M 处理下碳投入的种类(水稻根系、残茬、有机肥包括紫云英和猪粪)相同, 但碳投入的数量(70F30M 5.67 t·hm⁻², 50F50M 7.49 t·hm⁻²)不同。在一定范围内, 碳投入增加会促进土壤中原有有机碳的矿化分解, 产生正向激发效应^[36], 且激发效应大小随碳投入的增加呈上升趋势^[37], 导致 50F50M 有机碳分解较 70F30M 多, 故 70F30M 和 50F50M 惰性碳含量无显著差异。另一方面, 微生物对外源碳的利用存在一个饱和阈值, 在一定范围之内, 当外源碳量增加时, 有机质的转化速率与添加量成正比; 超出一定范围, 有机质的转化速率变慢^[38]。因此, 在本试验条件下, 微生物对外源碳利用的饱和阈值可能在 7.49 t·hm⁻²(50F50M)~8.81 t·hm⁻²(30F70M)之间。此外, 惰性碳在有机碳中占比高达 69.67%~77.26%, 同时有研究表明有机碳的含量与惰性碳含量呈正相关^[5], 故 70F30M 和 50F50M 处理下惰性碳含量无显著差异的原因同有机碳的一致, 与试验年份、采样点位等有关。因此, 30F70M 配施比例下, 更有利于土壤质量的提升。

3.2 不同有机肥替代化肥比例对土壤有机碳稳定性的影响

本研究中红外光谱的分析结果表明, 不同有机肥替代比例下土壤有机碳的化学结构种类相同(芳香碳、烷基碳、烷氧碳、羰基碳、羧基碳)。本研究不同有机肥替代化肥比例下涉及的外源碳种类均相同。研究表明, 有机肥和植物残体中含有单宁、木质素等芳香性物质^[39]。腐熟猪粪较堆肥前脂肪类物质减少、芳香结构成分增加, 腐殖化程度高^[40]。紫云英中木质素含量占比(14.7%)略高于半纤维素

(5.81%) 和纤维素 (11.5%)^[41]。水稻秸秆中木质素、纤维素和半纤维素的含量占比分别为 28.89%~29.40%、39.86%~43.88%、10.81%~14.48%^[42]。而单宁、木质素、纤维素和半纤维中含有芳香碳、烷基碳和烷氧碳等化学结构^[13]。因此,稻田生态系统外源碳投入的种类对有机碳化学结构的种类影响较大。

此外,本研究的结果表明:70F30M、50F50M、30F70M 三种施肥处理均提高了有机碳自身结构的稳定性,其中 30F70M 的稳定性最强。这是由外源碳投入的数量、土壤微生物和酶活性以及土壤性质的差异导致的。首先,不同有机肥替代比例下外源碳投入的量存在较大差异(CK 1.98 t·hm⁻², 100F0M 2.82 t·hm⁻², 70F30M 5.67 t·hm⁻², 50F50M 7.49 t·hm⁻², 30F70M 8.81 t·hm⁻²),进入土壤中的木质素、纤维素等含量不同,导致芳香碳、烷基碳和烷氧碳等化学结构的含量存在差异。其次,微生物(细菌在红壤性水稻土中约为微生物总量的 70%~80%)^[43]率先分解利用有机肥中较易分解的烷氧碳组分(氨基酸、半纤维素等),而芳香碳(木质素、单宁)、烷基碳(角质、木栓质、蜡质)等相对稳定碳组分会在分解初期被选择性保留下来^[13],因此芳香碳和烷基碳的含量百分比会高于烷氧碳。有机肥施用量的增加为土壤提供了大量可直接利用的有机碳源,从而也提高了土壤中微生物、碳转化酶(多酚氧化酶、过氧化物酶、纤维素酶、蔗糖酶和 β-葡萄糖苷酶)的数量和活度,促进有机碳库的周转^[44-45]。因此,随着有机肥替代比例的增加,有机碳的稳定性逐渐增强。

此外,某些土壤性质也会通过影响微生物的数量和活性间接影响有机碳的转化分解,如 pH 降低,微生物活性会降低并且微生物群落组成也会发生变化^[46],此时土壤有机质与矿物结合增强,从而导致微生物对有机碳的分解效率低^[47]。土壤中氮可通过影响微生物与酶的活性,进而影响有机碳的分解:(1)氮含量增高,微生物呼吸作用减弱、对碳的利用率增加,促进有机碳积累^[48]。(2)氮含量增高间接导致了土壤中水解酶和氧化还原酶的活性降低,加速有机碳中的活性部分分解,抑制稳定态碳的分解,从而影响有机碳组分的含量^[49]。(3)氮含量增高可促进其与较难分解的凋落物残体(如木质素等)结合形成更难降解的杂环类物质(如吡啶等)和酚

类^[50]。CEC 含量越高越容易形成水稳性团聚体,有利于有机碳的固存^[51]。

4 结 论

通过对江西省水稻土长期定位试验的 5 个有机肥替代化肥处理的有机碳组分及碳化学结构的研究表明,不同有机肥替代化肥处理可以增加稻田土壤有机碳和活性、惰性碳的含量,且 30F70M 的配施比例下三者含量相对较高。不同有机肥替代比例下土壤有机碳的化学结构种类相同,不同类型碳的相对含量百分比变化趋势相同:芳香碳(33.28%~37.79%)、烷基碳(27.81%~31.19%)最高,烷氧碳(16.19%~20.10%)、羰基碳(10.35%~12.07%)居中,羧基碳(2.52%~5.75%)最低。本研究中 30F70M 处理脂族中的烷基化程度最低、难分解有机碳比例少,芳香性强,分子结构复杂,有机碳稳定性最好。pH ($P<0.05$) 和 CEC ($P<0.01$) 是影响活性碳含量的主要因素,pH、CEC、AN、碳投入(有机肥、水稻根系、水稻留茬) ($P<0.01$) 是影响惰性碳含量的主要因素。因此,本研究长期定位试验条件下 30F70M 施肥处理更有利于土壤有机碳的固持。

参考文献 (References)

- [1] Pan G X, Li L Q, Zheng J F, et al. Perspectives on cycling and sequestration of organic carbon in paddy soils of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (5): 901—914. [潘根兴, 李恋卿, 郑聚锋, 等. 土壤碳循环研究及中国稻田土壤固碳研究的进展与问题[J]. *土壤学报*, 2008, 45 (5): 901—914.]
- [2] Wei L, Ge T D, Zhu Z K, et al. Comparing carbon and nitrogen stocks in paddy and upland soils: Accumulation, stabilization mechanisms, and environmental drivers[J]. *Geoderma*, 2021, 398: 115121.
- [3] Tang Z Z, Zhu Z K, Shen B J, et al. Effect of stoichiometric ratio of soil nutrients on mineralization and priming effect of glucose in paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (1): 246—254. [汤珍珠, 祝贞科, 沈冰洁, 等. 养分化学计量比对稻田土壤葡萄糖矿化及其激发效应的影响[J]. *土壤学报*, 2017, 54 (1): 246—254.]
- [4] Cao P, Zhu J, Zhu B, et al. Short-term effects of paddy-upland rotation systems on soil organic carbon and yield[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47 (4): 81—85, 101. [曹培, 朱杰, 朱波, 等. 稻田

- 水旱轮作系统对土壤有机碳及产量的短期影响[J]. 安徽农业科学, 2019, 47 (4): 81—85, 101.]
- [5] Wang X Y, Yu D S, Liao D, et al. Characteristics of typical paddy soil organic carbon fractions and their main control factors in the Yangtze River Delta[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (15): 4729—4738. [王玺洋, 于东升, 廖丹, 等. 长三角典型水稻土有机碳组分构成及其主控因子[J]. 生态学报, 2016, 36 (15): 4729—4738.]
- [6] Li Z Q, Zhang X, Wang J H, et al. Effect of chemical fertilizer reduction with return of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) on soil labile organic carbon and carbon conversion enzyme activities[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25 (4): 525—534. [李增强, 张贤, 王建红, 等. 化肥减施对紫云英还田土壤活性有机碳和碳转化酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25 (4): 525—534.]
- [7] Tang H M, Xiao X P, Li C, et al. Short-term responses of soil organic carbon and its labile fractions to different manure Nitrogen input in a double-cropping rice field[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2020, 158 (1/2): 119—127.
- [8] Wang J D, Zhang H, Zhang Y C, et al. Effect of different ratios of chicken manure N on organic matter accumulation and acidification of paddy soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20 (5): 1178—1185. [汪吉东, 张辉, 张永春, 等. 连续施用不同比例鸡粪氮对水稻土有机质积累及土壤酸化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20 (5): 1178—1185.]
- [9] Wu P P, Wang J J, Li L J. Responses of labile organic carbon components to different fertilization practices in white soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34 (12): 3474—3479. [吴萍萍, 王家嘉, 李录久. 白土活性有机碳组分对不同施肥措施响应[J]. 生态学杂志, 2015, 34 (12): 3474—3479.]
- [10] Mo R J. The study on soil labile organic carbon in the upper reaches of Minjiang River[D]. Yaan, Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2012. [莫汝静. 岷江上游土壤活性有机碳组分研究[D]. 四川雅安: 四川农业大学, 2012.]
- [11] An S Q, Gong L, Li Y M, et al. Soil organic carbon components and their correlation with soil physicochemical factors in four different land use types of the northern Tarim Basin[J]. *Environmental Science*, 2018, 39 (7): 3382—3390. [安申群, 贡璐, 李杨梅, 等. 塔里木盆地北缘绿洲 4 种土地利用方式土壤有机碳组分分布特征及其与土壤环境因子的关系[J]. 环境科学, 2018, 39 (7): 3382—3390.]
- [12] Wang X Y, Yu D S, Xu Z C, et al. Regional patterns and controls of soil organic carbon pools of croplands in China[J]. *Plant and Soil*, 2017, 421 (1/2): 525—539.
- [13] Li N, Sheng M, You M Y, et al. Advancement in research on application of ^{13}C NMR techniques to exploration of chemical structure of soil organic matter[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (4): 796—812. [李娜, 盛明, 尤孟阳, 等. 应用 ^{13}C 核磁共振技术研究土壤有机质化学结构进展[J]. 土壤学报, 2019, 56 (4): 796—812.]
- [14] Zhang J J, Dou S, Zhu P, et al. Effect of long-term application of organic fertilizer on structural characteristics of humin in black soil—A solid-state ^{13}C NMR study[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42 (6): 2223—2228. [张晋京, 窦森, 朱平, 等. 长期施用有机肥对黑土胡敏素结构特征的影响——固态 ^{13}C 核磁共振研究[J]. 中国农业科学, 2009, 42 (6): 2223—2228.]
- [15] Zhou P. A study on soil carbon sequestration fate in typical paddy soils from South China—Based on long-term agro-ecosystem experiments and cross-site analysis[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009. [周萍. 南方典型稻田土壤有机碳固定机制研究——基于长期试验及跨地域统计分析[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.]
- [16] Wang Q J, Zhang L, Zhang J C, et al. Effects of compost on the chemical composition of SOM in density and aggregate fractions from rice-wheat cropping systems as shown by solid-state ^{13}C -NMR spectroscopy[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2012, 175 (6): 920—930.
- [17] Mao X L, Lu K P, Sun T, et al. Effect of long-term fertilizer application on the stability of organic carbon in particle size fractions of a paddy soil in Zhejiang Province, China[J]. *Environmental Science*, 2015, 36 (5): 1827—1835. [毛霞丽, 陆扣萍, 孙涛, 等. 长期施肥下浙江稻田不同颗粒组分有机碳的稳定特征[J]. 环境科学, 2015, 36 (5): 1827—1835.]
- [18] Lü Z Z, Wu X D, Hou H Q, et al. Effect of different application ratios of chemical and organic fertilizers on soil quality in double cropping paddy fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23 (4): 904—913. [吕真真, 吴向东, 侯红乾, 等. 有机-无机肥配施比例对双季稻田土壤质量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23 (4): 904—913.]
- [19] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [20] He C C, Wang L G, Wang Y C, et al. Effect of long-term fertilization on labile organic matter in and carbon pool management index of black soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (1): 194—202. [何翠翠, 王立刚, 王迎春, 等. 长期施肥下黑土活性有机质和碳库管理指数研究[J]. 土壤学报, 2015, 52 (1): 194—202.]
- [21] National Agricultural Technology Extension Service Center. China organic fertilizer nutrients [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999. [全国农业技术推广服务

- 中心. 中国有机肥料养分志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.]
- [22] Liang F. Spatiotemporal variation and driving factors of carbon sequestration efficiency in typical upland agricultural soils of China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018. [梁丰. 我国典型农田土壤固碳效率的时空差异特征及驱动因素[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.]
- [23] Luo L, Zhou P, Tong C L, et al. Study on mechanism of SOM stabilization of paddy soils under long-term fertilizations[J]. *Environmental Science*, 2013, 34 (2): 692—697. [罗璐, 周萍, 童成立, 等. 长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究[J]. *环境科学*, 2013, 34 (2): 692—697.]
- [24] Chang H D, Wang J, Zhang F H. Change in soil organic matter structure before and after reclamation for the abandoned farmland based on Fourier transform infrared spectrometer[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50 (2): 333—340. [常汉达, 王晶, 张风华. 基于傅里叶红外光谱弃耕地开垦前后土壤有机质结构变化分析[J]. *土壤通报*, 2019, 50 (2): 333—340.]
- [25] Yang Y H, Su Y, He Z C, et al. Transformation and distribution of straw-derived carbon in soil and the effects on soil organic carbon pool: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(2): 668—676. [杨艳华, 苏瑶, 何振超, 等. 还田秸秆碳在土壤中的转化分配及对土壤有机碳库影响的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2019, 30 (2): 668—676.]
- [26] Li J, Wen Y C, Li X H, et al. Soil labile organic carbon fractions and soil organic carbon stocks as affected by long-term organic and mineral fertilization regimes in the North China Plain[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 175: 281—290.
- [27] Chaudhary S, Dheri G S, Brar B S. Long-term effects of NPK fertilizers and organic manures on carbon stabilization and management index under rice-wheat cropping system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 166: 59—66.
- [28] Mandal B, Majumder B, Adhya T K, et al. Potential of double-cropped rice ecology to conserve organic carbon under subtropical climate[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14 (9): 2139—2151.
- [29] Chen X B, Hu Y J, Xia Y H, et al. Contrasting pathways of carbon sequestration in paddy and upland soils[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27 (11): 2478—2490.
- [30] Singh Brar B, Singh J, Singh G, et al. Effects of long term application of inorganic and organic fertilizers on soil organic carbon and physical properties in maize-wheat rotation[J]. *Agronomy*, 2015, 5 (2): 220—238.
- [31] Lehmann J, Kleber M. The contentious nature of soil organic matter [J]. *Nature*, 2015, 528 (7580): 60—68.
- [32] Yu H Y, Ding W X, Luo J F, et al. Effects of long-term compost and fertilizer application on stability of aggregate-associated organic carbon in an intensively cultivated sandy loam soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 48 (3): 325—336.
- [33] Lü Z Z, Liu X M, Zhong J F, et al. Effects of long-term fertilization on mineralization of soil organic carbon in red paddy soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52 (15): 2636—2645. [吕真真, 刘秀梅, 仲金凤, 等. 长期施肥对红壤性水稻土有机碳矿化的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52 (15): 2636—2645.]
- [34] Liang F, Li J, Yang X, et al. Three-decade long fertilization-induced soil organic carbon sequestration depends on edaphic characteristics in six typical croplands[J]. *Scientific Reports* 2016, 6 (1): 30350.
- [35] Hou H Q, Ji J H, Liu X M, et al. Effect of long-term combined application of organic and inorganic fertilizers on rice yield, nitrogen uptake and utilization in red soil area of China[J]. *Soils*, 2020, 52 (4): 758—765. [侯红乾, 冀建华, 刘秀梅, 等. 不同比例有机肥替代化肥对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. *土壤*, 2020, 52 (4): 758—765.]
- [36] Chen C M, Xie Z B, Zhu J G. Advances in research on priming effect of soil organic carbon[J]. *Soils*, 2006, 38 (4): 359—365. [陈春梅, 谢祖彬, 朱建国. 土壤有机碳激发效应研究进展[J]. *土壤*, 2006, 38 (4): 359—365.]
- [37] Wang H, Xu W H, Hu G Q, et al. The priming effect of soluble carbon inputs in organic and mineral soils from a temperate forest[J]. *Oecologia*, 2015, 178 (4): 1239—1250.
- [38] Wang J F, Tong Y Y, Zhu Z K, et al. Transformation and distribution of soil organic carbon and the microbial characteristics in response to different exogenous carbon input levels in paddy soil[J]. *Environmental Science*, 2019, 40 (2): 970—977. [王季斐, 童瑶瑶, 祝贞科, 等. 不同水平外源碳在稻田土壤中转化与分配的微生物响应特征[J]. *环境科学*, 2019, 40 (2): 970—977.]
- [39] Lan X J, Liu Y R, Hou H Q, 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. [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.]
- [40] Yu Z X, Yang J J, Wang Y Y, et al. Physical and chemical maturity indexes and Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy of animal manures during composting[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27 (6): 2015—2023. [于子旋, 杨静静, 王玉嫣, 等. 畜禽粪便堆肥的理化腐熟指标及其红外光谱[J]. *应用生态学报*,

- 2016, 27 (6): 2015—2023.]
- [41] Dai J Y, Zhou J M, Qin S P. Dynamic changes of chemical composition of dissolved organic matter during decomposition of organic materials[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2004, 35 (6): 724—727. [代静玉, 周江敏, 秦淑平. 几种有机物料分解过程中溶解性有机物质化学成分的变化[J]. 土壤通报, 2004, 35 (6): 724—727.]
- [42] Zhao M M, Jiang M, Zhou Z W. The components analysis of several kinds of agricultural residues[J]. Materials Review, 2011, 25 (16): 122—125. [赵蒙蒙, 姜曼, 周祚万. 几种农作物秸秆的成分分析[J]. 材料导报, 2011, 25 (16): 122—125.]
- [43] Xia X, Shi K, Huang Q R, et al. The changes of microbial community structure in red paddy soil under long-term fertilization[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 (3): 697—705. [夏昕, 石坤, 黄欠如, 等. 长期不同施肥条件下红壤性水稻土微生物群落结构的变化[J]. 土壤学报, 2015, 52 (3): 697—705.]
- [44] Wang P, Zheng X B, Liang H B, et al. Effects of different fertilization models on active organic carbon components and enzyme activities of tobacco-growing brown soil[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2021, 36(1): 187—196. [王鹏, 郑学博, 梁洪波, 等. 不同施肥模式对植烟棕壤活性有机碳组分和酶活性的影响[J]. 华北农学报, 2021, 36 (1): 187—196.]
- [45] Ge T D, Wu X H, Chen X J, et al. Microbial phototrophic fixation of atmospheric CO₂ in China subtropical upland and paddy soils[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2013, 113: 70—78.
- [46] Liu J, Liu M, Wu M, et al. Soil pH rather than nutrients drive changes in microbial community following long-term fertilization in acidic Ultisols of Southern China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18 (5): 1853—1864.
- [47] Zhang X M, Guo J H, Vogt R D, et al. Soil acidification as an additional driver to organic carbon accumulation in major Chinese croplands[J]. Geoderma, 2020, 366: 114234.
- [48] Wang J S, Zhao X H, Zhang C Y, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on soil organic carbon and total nitrogen content in plantation and natural forests of *Pinus tabuliformis*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38 (10): 88—94. [汪金松, 赵秀海, 张春雨, 等. 模拟氮沉降对油松林土壤有机碳和全氮的影响[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38 (10): 88—94.]
- [49] Ramirez K S, Craine J M, Fierer N. Consistent effects of nitrogen amendments on soil microbial communities and processes across biomes[J]. Global Change Biology, 2012, 18 (6): 1918—1927.
- [50] 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.]
- [51] Liu G Q, Zhang M K. Effects of land-use patterns and parent material types on accumulation and stability of soil organic carbon in jinqu basin[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2020, 32 (10): 29—34. [刘国群, 章明奎. 利用方式与成土母质对金衢盆地土壤有机碳积累及其稳定性影响的研究[J]. 江西农业学报, 2020, 32 (10): 29—34.]

(责任编辑: 檀满枝)