

长期不同有机肥替代 20% 化肥氮对稻田土壤有机碳组分及肥力的差异化影响

彭复细^{1,2}, 雷文硕^{1,2}, 牟廷森^{1,2}, 陈俊^{1,2}, 林娇^{1,2}, 姜利红^{1,2}, 张振华^{1,2*}, 夏银行^{1,2*}

(1 湖南农业大学资源学院, 湖南长沙 410128; 2 湖南省岳麓山实验室, 湖南长沙 410128)

摘要: 【目的】施用有机肥是增加土壤有机碳、提升土壤肥力的重要途径。研究不同有机肥等比例替代化肥氮对土壤肥力和有机碳及其组分积累的影响, 有助于阐明有机肥提升稻田土壤肥力和促进有机碳固存的机理。

【方法】本研究基于 10 年的长期施肥定位试验, 选取了其中 5 个处理: 仅施磷钾肥 (T1), 施氮磷钾肥 (T2), 以及分别以早稻季紫云英还田和晚稻水稻秸秆还田 (T3)、商品有机肥 (T4) 和猪粪 (T5) 替代 20% 化肥氮。分析了土壤有机碳及其组分含量, 以及碳转化相关酶 (纤维二糖水解酶、 β -1,4-葡萄糖苷酶和多酚氧化酶) 活性, 计算了土壤综合肥力指数。【结果】相较于 T1 处理, T2 处理显著提高了土壤综合肥力指数。与 T2 处理相比, 3 种有机肥替代处理 (T3、T4、T5) 的土壤综合肥力指数和有机碳含量分别显著提高 4.56%~7.80% 和 2.34%~5.04%, 其中 T5 处理的提升幅度最大。有机肥替代处理 (T3 和 T4) 使土壤矿物结合态有机碳含量提高 2.80%~3.91%, 且 T3 和 T4 处理的提升幅度达到显著水平; T5 处理显著增加了土壤颗粒态有机碳含量及其在总有机碳中的占比, 增幅分别为 18.30% 和 12.63%。T3 和 T4 处理提高了土壤微生物生物量碳含量以及 3 种碳转化相关酶 (纤维二糖水解酶、 β -1,4-葡萄糖苷酶和多酚氧化酶) 的活性, 促进了有机物料的分解并加速了矿物结合态有机碳的积累; 而 T5 处理由于猪粪有机碳的稳定性指数和脂肪性指数高, 增强了对有机碳的保护作用, 导致土壤有机碳中颗粒态有机碳的积累量及其在总有机碳中的占比显著增加。结构方程模型分析结果表明, 颗粒态有机碳含量是影响土壤综合肥力的主要因素。【结论】在替代 20% 化肥氮的用量下, 3 种有机肥均增加了土壤有机碳积累量, 提高了土壤综合肥力, 秸秆和商品有机肥更利于增强稳定性土壤有机碳组分的积累, 猪粪则更利于提升土壤有机碳库中不稳定性颗粒有机碳的积累和占比, 因而提升了土壤有机碳的活性。

关键词: 有机替代; 稻田土壤; 土壤肥力; 有机碳组分; 酶活性

Differential effects of long-term substitution of 20% chemical nitrogen fertilizer with different organic amendments on soil organic carbon fractions and fertility in paddy fields

PENG Fu-xi^{1,2}, LEI Wen-shuo^{1,2}, MOU Ting-sen^{1,2}, CHEN Jun^{1,2}, LIN Jiao^{1,2}, JIANG Li-hong^{1,2},
ZHANG Zhen-hua^{1,2*}, XIA Yin-hang^{1,2*}

(1 College of Resources, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2 Yuelushan Laboratory of Hunan Province, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: 【Objectives】Application of organic fertilizers is an important way to improve organic carbon and soil fertility. Studying the effects of different organic fertilizers proportionally replacing chemical nitrogen fertilizers on soil fertility and the accumulation of organic carbon and its fractions can help elucidate how organic fertilizers improve paddy soil fertility and enhance carbon sequestration. 【Methods】The research was based on a 10-year long-term fertilization experiment, located in Hunan Province. The soil samples were collected from the

收稿日期: 2024-11-05 接受日期: 2025-03-13

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2023YFD1901504); 国家自然科学基金青年基金项目 (42207409); 湖南省教育厅科学研究项目青年项目 (22B0215); 湖南省重点研发计划项目 (2022NK2009); 国家水稻产业技术体系项目 (CARS-01-30)。

联系方式: 彭复细 E-mail: 1767604739@qq.com

* 通信作者 张振华 E-mail: zhzh1468@163.com; 夏银行 E-mail: bank.12345@163.com

treatment plots of PK fertilization (T1) and NPK fertilization control (T2), as well as three organic amendment treatments where 20% of the chemical nitrogen fertilizer was substituted with the return of Chinese milk vetch in the early-rice season and rice straw in the late-rice season (T3), commercial organic fertilizer (T4), and pig manure (T5), respectively. The content of soil total organic carbon (SOC) and organic carbon fractions, the activities of organic carbon metabolism related enzymes (cellobiose hydrolase, β -1,4-glucosidase and polyphenol oxidase) were analyzed, and the integrated soil fertility index (IFI) was calculated. **【 Results 】** T2 significantly increased IFI, relative to T1. Compared with T2 treatment, the organic substitution treatments significantly increased IFI and SOC by 4.56%–7.80% and 2.34%–5.04%, respectively, and T5 was recorded the highest increment. T3 and T4 increased the content of soil mineral-bound organic carbon by 2.80%–3.91%, while T5 treatment increased soil particulate organic carbon content and its proportion by 18.30% and 12.63%, respectively. The T3 and T4 treatments increased the soil microbial biomass carbon content and the activities of three carbon conversion-related enzymes, which contributed to the decomposition of organic materials and their accumulation to mineral-bound organic carbon, T5 treatment enhanced the physical protection of organic carbon due to the high stability index and fatness index of organic carbon from pig manure, resulting in a significant increase in the accumulation of particulate organic carbon in soil and its proportion in the total organic carbon. The results of structural equation modeling indicated that the content of particulate organic carbon was the main factor affecting soil integrated fertility. **【 Conclusions 】** Long-term application of organic fertilizers promoted soil organic carbon accumulation and improved the integrated soil fertility under the condition of replacing 20% of chemical fertilizer nitrogen. Straw (including milk vetch) and commercial organic fertilizer were more conducive to enhancing the accumulation of stable soil organic carbon fractions, while pig manure was more conducive to increasing the proportion of unstable soil organic carbon accumulation (ie. particle organic carbon) and its proportion in total organic carbon pool, so resulted in highest soil fertility index and the active organic carbon pool.

Key words: replacement of chemical fertilizer nitrogen with organic fertilizer; paddy soil; soil fertility; organic carbon components; enzyme activity

我国稻田面积约 3000 万 hm^2 , 是重要的耕地资源。水稻产量约占全国粮食总产量的 30%, 对保障国家粮食安全至关重要^[1-2]。2024 年中央一号文件明确指出: 把粮食增产的重心放到大面积提高单产上。水稻单位面积产量的提高在很大程度上依赖于土壤肥力的改善, 而增加土壤有机碳固持是提升土壤肥力的重要途径^[3-4]。大量试验结果表明, 土壤有机碳含量的增加显著促进了粮食作物单位面积产量的提升和稳定^[5]。有机物料还田是提升稻田土壤有机碳、培肥土壤的重要途径^[6]。外源有机碳进入土壤后, 一部分与矿物结合形成稳定性较高的矿物结合态有机碳 (mineral-associated organic carbon, MAOC; $<53 \mu\text{m}$), 构成了土壤稳定性碳库; 另外一部分以游离态或颗粒态存在于土壤颗粒中, 形成颗粒态有机碳 (particulate organic carbon, POC, $>53 \mu\text{m}$), 为不稳定性有机碳库^[7-9]。外源有机碳在 MAOC 和 POC 之间的分配影响土壤有机碳库的稳定性。因此, 研究稻田土壤有机碳及其组分的累积规律, 对于采取合理施肥措施提高土壤肥力、促进水稻增产具有重

要的意义。

由于形成途径、稳定性和功能的不同, POC 和 MAOC 组分通常对施肥措施表现出不同的响应规律^[10]。如在稻田土壤中, 猪粪替代化肥氮 30% 以上使 POC 含量随着替代率增加而升高, 并未显著改变 MAOC 含量^[11]。商品有机肥分别替代 50% 和 100% 的化肥氮均能增加 POC 含量及占有有机碳比例, 却降低了 MAOC 的占比^[12]。此外, 利用生物有机肥替代化肥氮 50% 以上尽管提高了 POC 含量, 但随替代率增加并未再显著提高 POC 含量^[13]。同时, 也有研究发现粪肥替代 30% 化肥显著提高 POC 含量及其占比; 而每季作物秸秆一半还田处理降低了 POC 含量及其占比^[14]。上述研究结果表明, 有机物料替代比例和种类均会对土壤有机碳组分的积累产生影响, 且不同研究的结果差异较大。现有研究多集中在同种有机肥不同比例替代或不同有机肥不同比例替代化肥氮之间的比较, 而关于不同有机肥等比例替代化肥氮处理下土壤有机碳及其组分积累特征的研究还较少, 难以评价不同有机肥在同一替代水平下的土壤

培肥效果, 尤其是土壤有机碳各组分对肥力的贡献特征有待深入研究。

稻田生态系统是我国主要的农业生态系统之一, 长期淹水环境使其具有特殊的氧化还原过程, 影响着土壤养分循环以及有机物料分解^[15]。目前, 具有不同性质(如碳氮比)的有机肥等比例替代化肥氮对稻田土壤肥力水平、有机碳及其组分积累影响的研究鲜有报道。基于此, 本研究以长期有机肥替代化肥双季稻田定位试验的土壤为对象, 探究早稻紫云英-晚稻水稻秸秆、商品有机肥和猪粪 3 种有机肥等比例替代化肥氮处理对土壤肥力和有机碳及其组分积累特征的影响, 以期为生产中制定合理的施肥模式, 优化有机肥施用, 促进土壤有机碳积累, 培肥土壤提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验位于湖南省浏阳市湖南农业大学试验基地(28°19'N, 113°49'E), 该区域属于亚热带季风性湿润气候, 年平均温度和降雨量分别为 17.5℃ 和 1551.3 mm。供试土壤为河流冲积物发育的潮沙土。定位试验始于 2013 年, 试验前土壤有机质、全氮、全磷和全钾的初始值分别为 16.61、1.21、0.54 和 11.5 g/kg, 碱解氮、有效磷和速效钾初始值分别为 48.9、21.3 和 155.7 mg/kg, pH 值为 5.61。

本研究包括 5 个处理: 施磷钾肥 (T1)、施氮磷钾肥 (T2)、早稻紫云英+晚稻水稻秸秆替代 20% 化肥氮 (T3)、商品有机肥替代 20% 化肥氮 (T4) 和腐熟后的猪粪替代 20% 化肥氮 (T5)。每个处理设置 3 次重复, 每个小区面积 20 m², 随机区组排列。所有处理水稻种植规格、田间管理措施(如水分管理)均保持一致, 收获后, 所有稻草移走不还田。早稻季 N、P₂O₅、K₂O 施用量分别为 120、72 和 90 kg/hm², 晚稻季 N、P₂O₅、K₂O 施用量分别为 135、60 和 105 kg/hm²。除 T1 处理不施氮外, 各处理氮、磷、钾养分离用量一致, 有机肥施用量为施氮量的 20% 除以有机肥含氮量, 对有机肥替代化肥氮处理中磷和钾不足的部分, 以化肥补充。在早稻季, 猪粪、商品有机肥和紫云英施用量分别为 2605、2335 和 6020 kg/hm², 在晚稻季, 猪粪、商品有机肥和水稻秸秆施用量分别为 2932、2627 和 3483 kg/hm²。有机肥和磷肥做基肥, 氮和钾肥 60% 做基肥, 40% 做分蘖肥。化肥品种分别为尿素 (N≥46.0%)、过磷酸钙 (P₂O₅≥

12.0%) 和氯化钾 (K₂O≥60.0%)。供试水稻品种: 早稻为金早香 1 号, 晚稻品种为荃早优 1606。供试有机肥料养分含量如表 1, 其中猪粪为腐熟后施用。

1.2 样品采集

于 2022 年 7 月早稻收获后采集土样, 采用五点取样法取 0—20 cm 土壤并混合土壤样品, 挑出动植物残体和其他杂物后充分混匀, 然后按四分法分为两份, 一份室内风干后磨细过筛, 用于测定土壤 MAOC、POC 及其他基本理化性质; 一份新鲜土样用于测定微生物生物量碳 (MBC) 含量和土壤酶活性。

1.3 指标测定及计算

土壤基本理化性质采用《土壤农化分析》^[16]中的方法进行测定。MBC 采用氯仿熏蒸—K₂SO₄ 提取法, 利用 TOC 分析仪测定^[17]。

土壤纤维二糖水解酶 (CBH)、β-1,4-葡萄糖苷酶 (BG) 和多酚氧化酶 (PPO) 活性采用 96 微孔酶标板荧光分析法测定^[18-19]。

采用湿筛和粒径分组法, 将土壤有机碳 (soil organic carbon, SOC) 分离为 MAOC 和 POC。具体试验过程和计算公式参考刘伟民等^[20]的方法。

土壤综合肥力指数 (integrated fertility index, IFI) 是对土壤肥力水平进行综合评价的量化指标。采用相关系数法计算^[21-22]: 1) 指标选取 选取有机质、全氮、全磷、碱解氮、有效磷和速效钾 6 项土壤基本养分指标计算土壤综合肥力指数; 2) 隶属度值确定 所选指标均属 S 型隶属函数, 隶属度函数和隶属函数中转折点的取值参考相关文献^[23]; 3) 权重值计算 利用相关性分析求出某评价指标与其他指标间的相关系数均值, 该均值占有所有评价指标相关系数均值总和的比值就是该评价指标的权重。根据模糊数学加乘法原则, IFI 按下式计算:

$$IFI = \sum_{i=1}^n q_i w_i$$

式中: q_i 和 w_i 分别表示第 i 项土壤肥力评价指标的隶

表 1 供试有机肥料养分含量 (%)

Table 1 Nutrient contents of the tested organic fertilizers				
有机肥种类 Organic fertilizer type	N	P	K	C
猪粪 Pig manure	0.92	0.33	0.47	12.29
商品有机肥 Organic manure	1.03	0.62	1.62	23.50
紫云英绿肥 Green manure	0.40	0.10	0.32	6.45
秸秆 Rice straw	0.77	0.21	2.19	32.54

属函数值和权重系数, n 为评价指标个数。IFI 值在 0~1 范围内, 数值越大, 表明土壤的综合肥力水平越高。

土壤有机碳固持效率是指外源有机碳固定为土壤有机碳的效率, 是评价土壤有机碳固持的关键因素, 具体计算公式如下^[24-26]:

$$\text{SOC}_s = C \times b \times d \times 10^{-1}$$

$$C_{\text{input-M}} = M_c \times (1 - W) \times \frac{A_m}{1000} \times N$$

$$\text{SOC}_{\text{SE}} = \frac{\text{SOC}_{\text{stock-t}} - \text{SOC}_{\text{stock}}}{C_{\text{input-M}}} \times 100\%$$

式中: SOC_s 为土壤有机碳储量, C 为耕层土壤有机碳含量 (g/kg), b 为土壤容重 (g/cm³), d 为耕层厚度 (cm), 10^{-1} 为转化系数。 $C_{\text{input-M}}$ 为有机肥输入碳量, M_c 为有机肥的有机碳含量 (g/kg); W 为有机肥含水量 (%); A_m 为施用有机肥的鲜重 [kg/(hm²·a)]; N 为有机肥施用年限。 SOC_{SE} 为土壤有机碳固持效率 (%); $\text{SOC}_{\text{stock-t}}$ 、 $\text{SOC}_{\text{stock}}$ 分别代表各有机肥替代处理、施氮磷钾处理有机碳储量 (kg/hm²)。

1.4 数据统计和分析

分别通过 Shapro-Wilk 和 Leven's 方法检验数据的正态分布和方差齐性, 所有数据均符合正态分布和齐性要求。数据采用 SPSS (IBM SPSS Statistics 23) 进行统计分析, 利用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 检验差异显著性, 采用邓肯 (Duncan) 法进

行多重比较 ($P < 0.05$); 利用线性回归分析确定 POC 和 MAOC 含量如何随土壤微生物生物量碳含量和酶活性变化。利用 Amos 20.0 软件构建结构方程模型, 分析长期不同施肥模式处理下, 土壤理化性质、微生物生物量碳含量和酶活性对土壤综合肥力的影响。采用 Origin 8.5 作图。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理下土壤养分和综合肥力指数

经过连续 10 年的试验, T2 处理较 T1 处理显著增加了土壤综合肥力指数和碱解氮含量 ($P < 0.05$)。相较于 T2 处理, 3 个有机肥替代处理的土壤综合肥力指数、有机碳、全氮、全磷、碱解氮、有效磷含量分别显著提高 4.56%~7.80%、2.34%~5.04%、4.62%~8.07%、6.30%~8.83%、3.66%~6.69%、4.98%~9.23%, 升幅均以 T5 处理最高 ($P < 0.05$), 而速效钾含量无显著变化。土壤综合肥力指数与有机碳含量呈现极显著正相关 (图 1)。这些结果表明不同有机肥等比例替代化肥氮均能促进土壤养分的积累及速效养分的供应, 提升土壤综合肥力, 其中猪粪处理效果最佳; 且提高土壤有机碳含量有助于增加土壤肥力。

2.2 不同施肥处理下土壤有机碳及其组分的变化

由图 2 可知, 与 T1 处理相比, T2 处理没有显

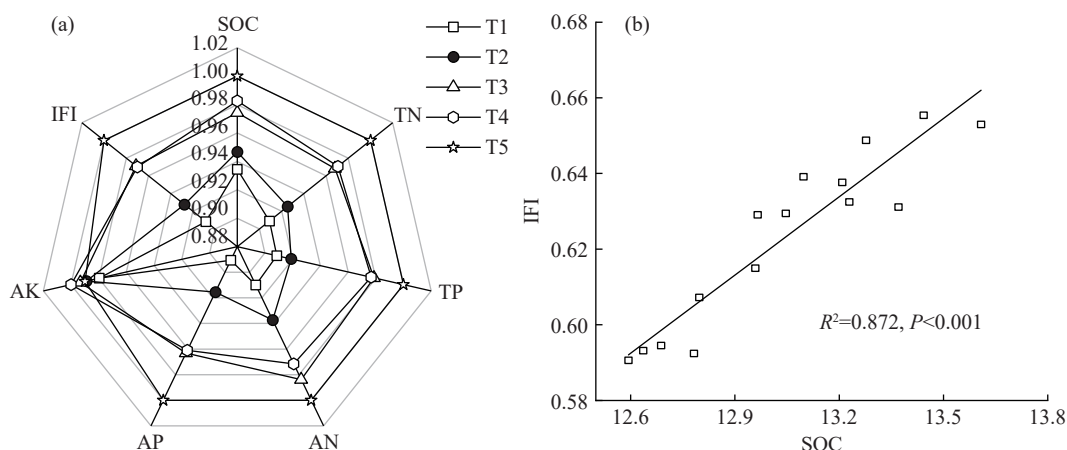


图 1 不同施肥处理土壤养分和综合肥力指数及二者的关系

Fig. 1 Effects of different fertilization treatments on soil nutrients and integrated fertility index and the relationship between soil integrated fertility index and organic carbon content

注: T1—仅施磷钾肥; T2—施氮磷钾; T3—早稻紫云英+晚稻水稻秸秆替代 20% 化肥氮; T4—商品有机肥替代 20% 化肥氮; T5—猪粪替代 20% 化肥氮。IFI—综合肥力指数; SOC—土壤有机碳; TN—全氮; TP—全磷; AN—碱解氮; AP—有效磷; AK—速效钾。

Note: T1—PK fertilizer control, T2—NPK fertilizer control, T3—Substitution of 20% chemical N with milk vetch for early rice and rice straw for late rice; T4—Substitution of 20% chemical N with commercial organic fertilizer; T5—Substitution of 20% chemical N with pig manure. SOC—Soil organic carbon; TN—Total N; TP—Total P; AN—Alkali-hydrolyzed N; AP—Available P; AK—Available K; IFI—Integrated fertility index.

著改变土壤有机碳含量。相对于 T2 处理, 有机肥替代化肥各处理使土壤有机碳含量显著提升了 2.34%~5.04% ($P<0.05$)。3 种有机肥替代化肥处理下土壤有机碳固持效率大小为 $T5>T4>T3$ 。T1 和 T2 处理之间有机碳组分含量无显著差异 (图 3)。相对于 T2 处理, T3 和 T4 处理显著提高了 MAOC 含量, 增幅分别为 2.80% 和 3.91%; 而 T5 处理显著提高了 POC 含量, 增幅为 18.30% ($P<0.05$)。

T1 与 T2 处理有机碳组分占土壤总有机碳的比例无显著差异, 施用有机肥处理不同程度地改变了 POC 和 MAOC 占土壤有机碳的比例 (图 3)。与 T2 处理相比, T3 和 T4 处理土壤有机碳组分占土壤有机碳的比例没有显著改变, T5 处理 POC 占土壤有机碳的比例显著增加了 12.63%。这些结果表明, 秸秆和商品有机肥促进了土壤有机碳及其组分的同步积累, 而猪粪提高了不稳定性碳库的占比。

2.3 不同施肥处理下土壤酶活性和微生物生物量以及影响土壤综合肥力的关键因子

长期施肥不同程度改变了土壤酶活性 (图 4)。与 T1 和 T2 处理相比, 有机肥替代化肥处理均显著提高了土壤纤维二糖水解酶和多酚氧化酶活性 ($P<0.05$); T3、T4 处理显著提高了 β -1,4-葡萄糖苷酶活性, 表现为 $T3>T4>T5$ 。此外, 有机肥替代化肥均显著提升了土壤微生物生物量碳含量 ($P<0.05$), 尤其是 T3 处理。

在稻田土壤中, MAOC 含量与微生物生物量碳含量和酶活性呈正相关 (图 5)。利用最大似然估计法

拟合关于土壤综合肥力的结构方程模型, 模型评价标准采用 X^2 检验、拟合优度检验 (GFI) 和近似误差均方 ($RMSEA$), 关于土壤综合肥力的结构方程模型适配度指标分别为 $X^2=3.3$, $df=3$, $P=0.346$, $GFI=0.93$, $RMSEA=0.08$, 能解释土壤综合肥力提升 94% 的变异 (图 6)。其中施肥模式间接影响土壤综合肥力 (影响系数 0.65), POC 直接影响土壤综合肥力 (影响系数 0.49)。因此, 长期有机肥替代化肥通过增加土壤 POC 含量, 影响土壤综合肥力。

3 讨论

3.1 不同有机肥替代化肥对土壤有机碳累积和土壤肥力的影响

施用有机肥增加外源有机碳输入, 促进土壤有机质形成, 增强土壤有机碳积累, 进而提高土壤肥力^[8, 27]。前人探究有机肥输入对土壤有机碳积累的影响多为同种有机肥在不同替代比例之间的比较^[11, 28], 对于不同有机肥等比例替代化肥下土壤有机碳积累的研究较少, 因此难以评价不同有机肥之间的有机碳固持效果。在本研究中, 定位试验 (10 年) 的结果表明, 有机肥替代化肥处理能提高土壤有机碳含量 (图 2), 与以往研究中有有机肥能够增加土壤有机碳的观点一致^[24-26, 29]。其主要原因可能是, 有机肥替代化肥向土壤输入大量的碳源, 并且增强了碳转化相关酶活性 (图 4), 促进有机物料中碳转化为土壤有机碳。值得一提的是, 3 种不同碳氮比的有机肥在等比例替代化肥氮条件下, 向土壤输入碳总量大小为秸秆>

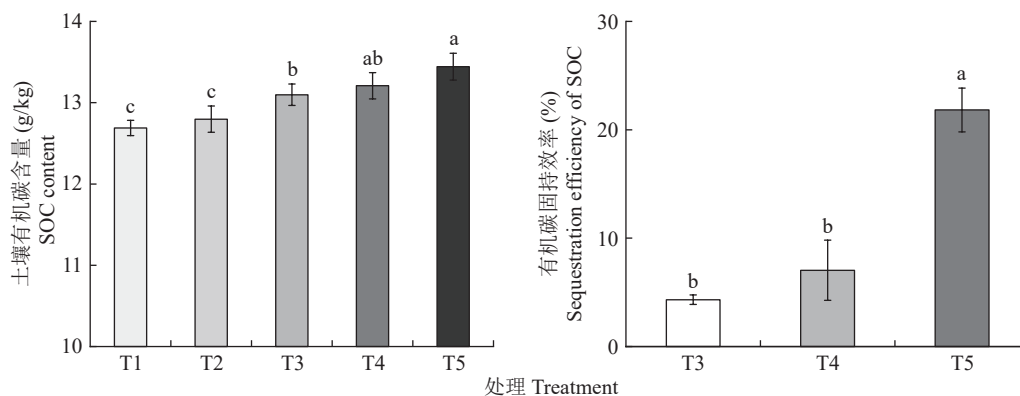


图 2 不同施肥处理下土壤有机碳含量和有机碳固持效率

Fig. 2 Soil organic carbon (SOC) content and organic carbon sequestration efficiency under different fertilization treatments

注: T1—仅施磷钾肥; T2—施氮磷钾; T3—早稻紫云英+晚水稻秸秆替代 20% 化肥氮; T4—商品有机肥替代 20% 化肥氮; T5—猪粪替代 20% 化肥氮。图中误差线为标准差, 柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: T1—PK fertilizer control, T2—NPK fertilizer control, T3—Substitution of 20% chemical N with milk vetch for early rice and rice straw for late rice; T4—Substitution of 20% chemical N with commercial organic fertilizer; T5—Substitution of 20% chemical N with pig manure. Error bars in the figures indicate standard deviation. Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

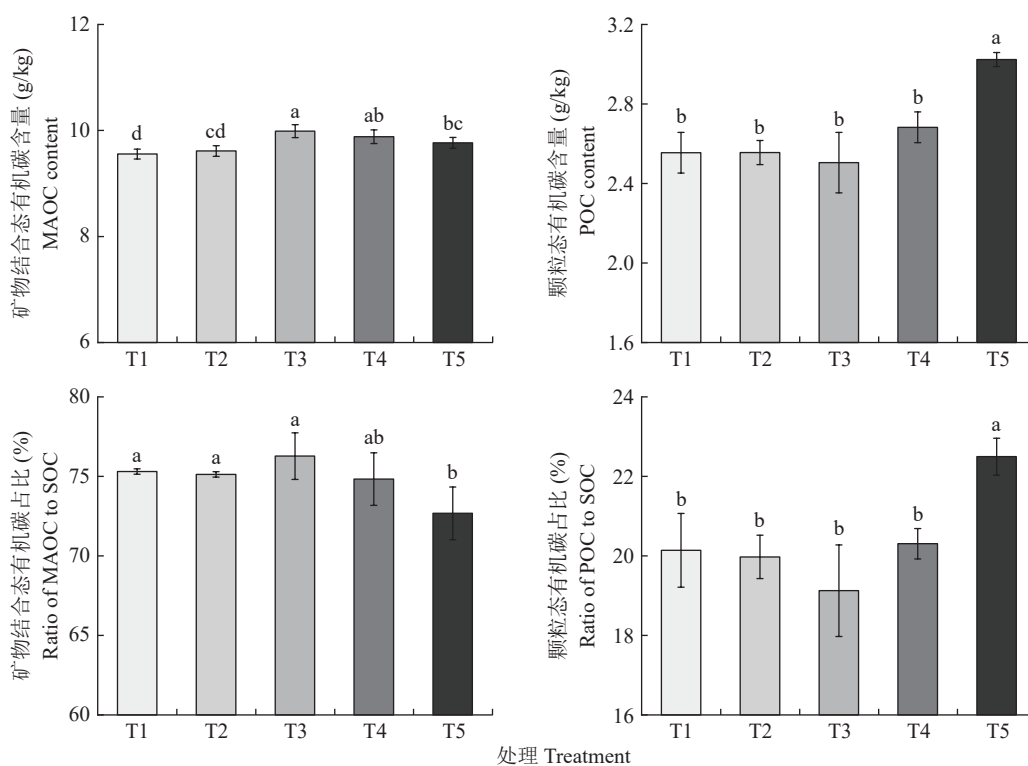


图3 不同施肥处理下土壤矿物结合态有机碳和颗粒态有机碳含量及其占土壤总有机碳比例

Fig. 3 Contents of soil mineral-associated organic carbon (MAOC) and particulate organic carbon (POC) and their proportion to total soil organic carbon (SOC) under different fertilization treatments

注: T1—仅施磷钾肥; T2—施氮磷钾; T3—早稻紫云英+晚稻水稻秸秆替代20%化肥氮; T4—商品有机肥替代20%化肥氮; T5—猪粪替代20%化肥氮。图中误差线为标准差, 柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: T1—PK fertilizer control, T2—NPK fertilizer control, T3—Substitution of 20% chemical N with milk vetch for early rice and rice straw for late rice; T4—Substitution of 20% chemical N with commercial organic fertilizer; T5—Substitution of 20% chemical N with pig manure. Error bars in the figures indicate standard deviation. Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

商品有机肥>猪粪, 而三者导致的土壤有机碳固持效率和含量变化趋势相反(图2)。这与秸秆还田比粪肥施用更利于土壤有机碳封存的研究结果^[30]不同, 说明不同处理间土壤有机碳含量的差异主要与有机肥自身的种类和性质有关。其主要原因可能是猪粪中难分解性有机碳的比例较高^[31], 比秸秆和商品有机肥更难被微生物分解利用; 而秸秆富含纤维素、半纤维素和糖类等物质, 易被微生物分解以 CO_2 形式释放到空气中^[32]。此外, 我们前期的研究表明秸秆还田降低了土壤pH^[16], 不利于土壤有机碳的累积^[24]。

有机肥等比例替代化肥不仅能够促进土壤有机碳积累, 同时也提高了土壤中全量养分和速效养分含量, 从而提高土壤肥力水平^[33](图1), 这与我们前期研究有机肥替代化肥提高水稻产量的结果相对应^[34], 表明土壤有机碳积累提高土壤肥力水平(图1), 为作物生长提供养分, 促进作物增产。这可能是因为有有机物料投入, 为土壤带来大量的有机物质, 不仅能

促进土壤氮、磷等养分含量的累积, 也能增强土壤微生物活性, 提高了土壤速效养分的供应能力^[35]。此外, 有机物料分解为微生物提供大量的碳、氮以及其他代谢活动所需的其他营养元素^[25], 增加了土壤微生物生物量含量和酶活性(图4), 这与前人^[25, 35-36]研究结果相似。

3.2 不同有机肥替代化肥对土壤有机碳组分及其稳定性的影响

将土壤有机碳按照不同粒径大小分为MAOC和POC两个组分, 可以更好地反映土壤有机碳对不同有机肥的响应。MAOC是土壤有机碳的重要组分, 具有更强的稳定性, 有利于土壤有机碳长期封存, 相比之下, POC是由破碎的有机物残留物形成的, 是不稳定的组分, 易分解, 对土壤肥力具有重要作用^[7-9, 37]。本研究发现, 3种有机肥替代化肥不同程度提高了土壤MAOC含量(图3), 这与以往研究结果^[11, 14]相似。其原因可能是有机物料投入提高了土壤微生物生物

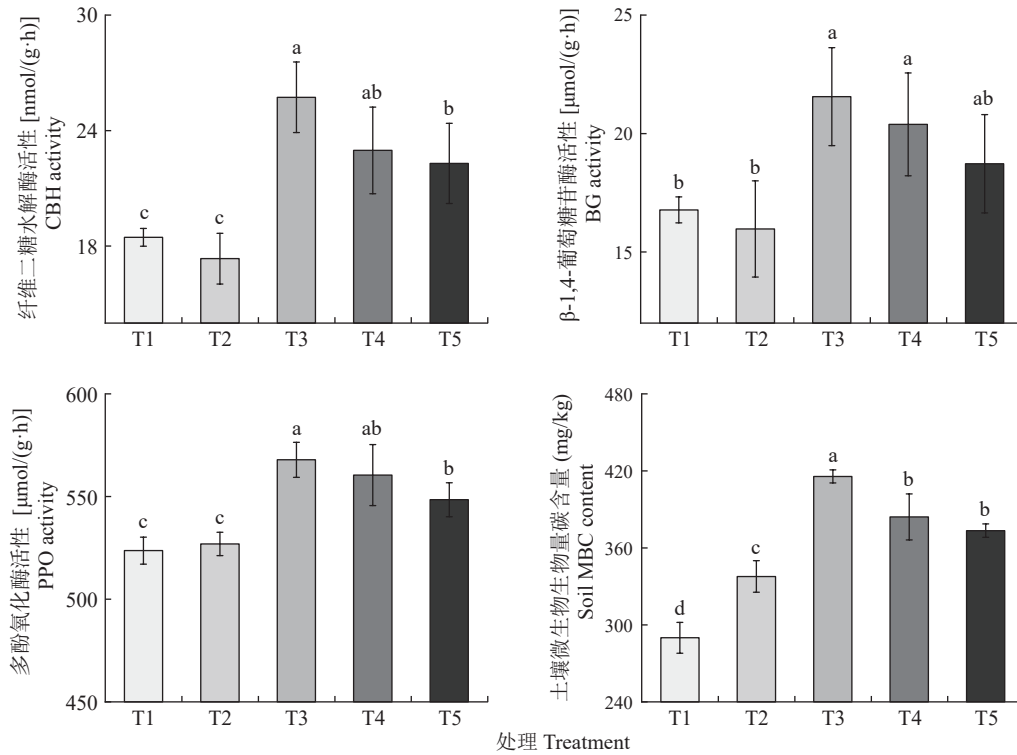


图 4 不同施肥处理对土壤酶活性和微生物生物量碳含量的影响

Fig. 4 The soil enzyme activities and microbial biomass carbon content under different fertilization treatments

注: T1—仅施磷钾肥; T2—施氮磷钾; T3—早稻紫云英+晚稻水稻秸秆替代 20% 化肥氮; T4—商品有机肥替代 20% 化肥氮; T5—猪粪替代 20% 化肥氮。图中误差线为标准差, 柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: CBH—Cellobiose hydrolase, BG— β -1,4-Glucosidase, PPO—Polyphenol oxidase, MBC—Microbial biomass carbon. T1—PK fertilizer control, T2—NPK fertilizer control, T3—Substitution of 20% chemical N with milk vetch for early rice and rice straw for late rice; T4—Substitution of 20% chemical N with commercial organic fertilizer; T5—Substitution of 20% chemical N with pig manure. Error bars in the figures indicate standard deviation. Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

量和有机碳转化相关酶(多酚氧化酶、纤维二糖水解酶和 β -1,4-葡萄糖苷酶)活性(图 5), 促进外源有机碳向矿物结合态有机碳转化^[37]。土壤 MAOC 含量增加有助于增强土壤团聚体的稳定性并改善土壤的物理结构^[38]。值得一提的是, 在 3 种有机肥替代化肥处理中, 秸秆和商品有机肥替代化肥更利于土壤稳定性有机碳组分含量增加; 猪粪替代化肥则是倾向于促进土壤不稳定性有机碳组分积累(图 3)。该结果与微生物效率-基质稳定假说相反, 即低质量有机物有利于 POC 的形成, 而高质量有机物更利于 MAOC 形成^[7]。这可能是由于本研究中有有机肥替代处理向土壤投入物料(有机肥和化肥)的 C:N 值均低于土壤 C:N 值, 氮源相对丰富, 这促进了微生物对有机质的分解与利用^[39], 使其一部分碳转化成 CO_2 排放到空气中, 另外一部分则转化成小分子有机碳与矿物结合, 形成矿物结合态有机碳^[39-40]; 而猪粪相对于秸秆和商品有机肥, 尽管其具有更低的 C:N 值, 但由于猪粪是肠胃消化和微生物分解后的产物,

其含有的稳定有机碳比例较高, 相对难分解^[41], 可能更多地以 POC 的形态积累到土壤中。同时, 结构方程模型分析结果表明, POC 是影响土壤肥力高低的主要原因; 不同施肥方式可以通过调控 POC 的积累间接影响土壤肥力(图 6)。这主要是因为土壤碳库中, 相对于 MAOC, POC 是不稳定的碳库, 更易被微生物分解并释放养分^[44]。猪粪替代化肥处理中 POC 含量最高(图 3), 这可能也是其土壤肥力最高的原因。

3 种有机肥替代化肥处理中, 仅猪粪替代化肥显著改变了有机碳组分的比例, 使 POC 占有有机碳的比例增加, 这表明猪粪替代化肥有利于土壤有机碳库活性的增加; 而秸秆和商品有机肥替代化肥对土壤 POC 和 MAOC 积累的促进程度是一致的, 并没有改变土壤碳库的稳定性。这可能是由于猪粪中碳的稳定性指数和脂肪性指数高^[32], 使更多有机化合物和土壤颗粒结合形成大团聚体^[42], 增强了对 POC 的物理保护, 促使更多外源有机碳向 POC 分配, 从而提高 POC 占土壤有机碳的比例(图 3)。

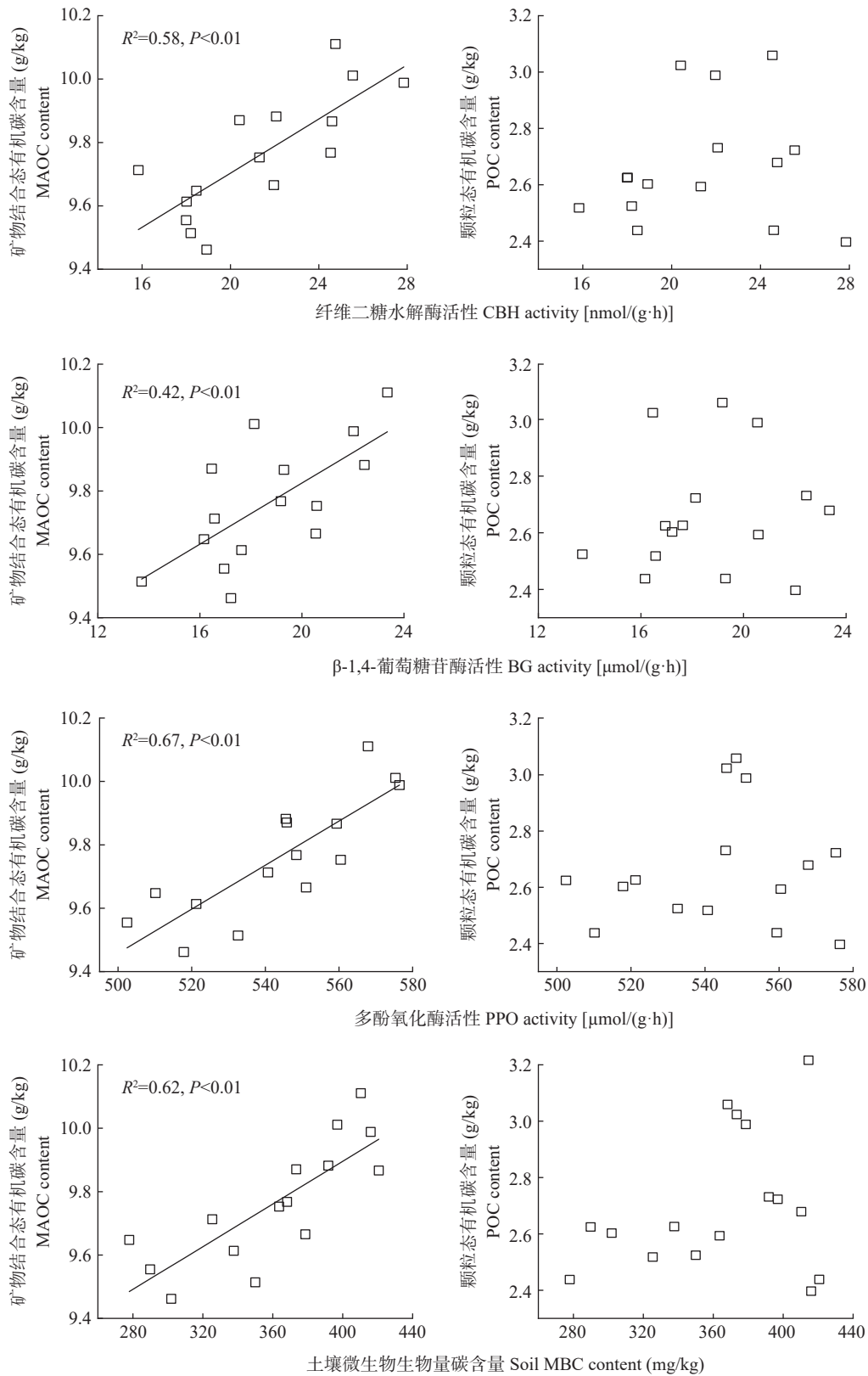


图 5 稻田土壤酶活性和微生物生物量碳含量与有机碳组分的关系

Fig. 5 Relationships of soil enzyme activities and microbial biomass carbon with organic carbon fractions in paddy soil

Note: CBH—Cellobiose hydrolase; BG— β -1,4-glucosidase; PPO—Polyphenol oxidase; MBC—Microbial biomass carbon; MAOC—Mineral-associated organic carbon; POC—Particulate organic carbon.

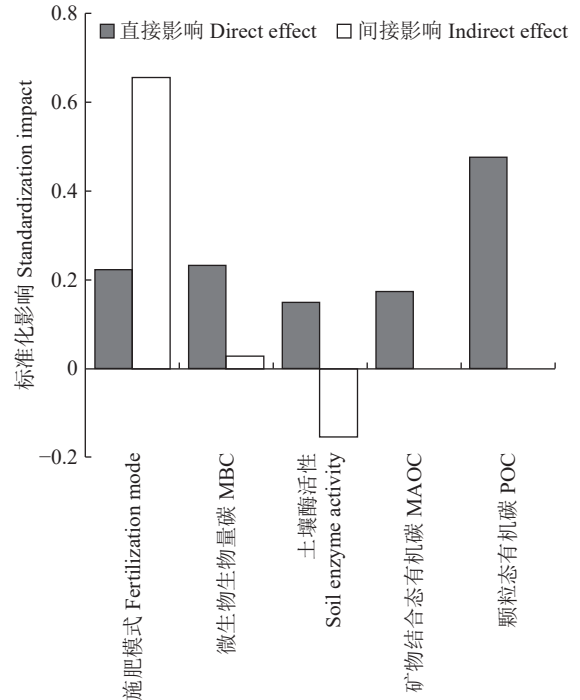
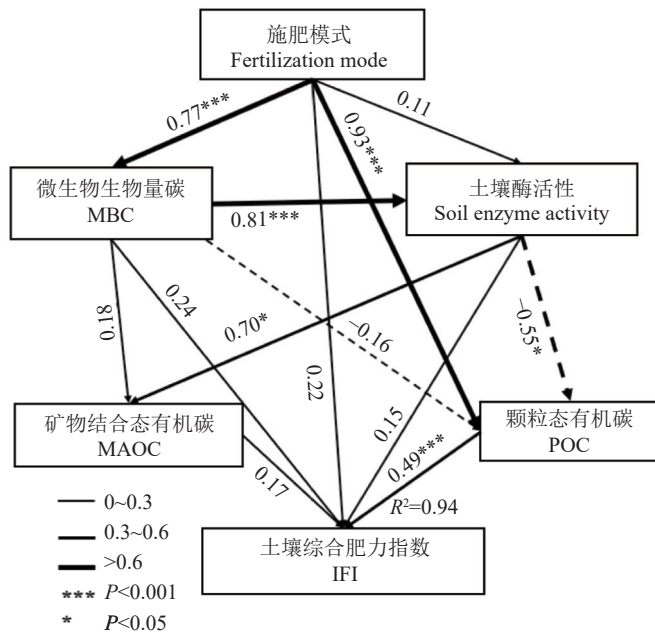


图 6 结构方程模型描述施肥对土壤综合肥力的影响

Fig. 6 Structural Equation Modeling (SEM) describing the influence of fertilization on soil integrated fertility

注: 实线表示正相关, 虚线表示负相关。

Note: MAOC—Mineral-associated organic carbon, POC—Particulate organic carbon, MBC—Microbial biomass carbon, IFI—Integrated fertility index. A solid line indicates a positive correlation, while a dashed line indicates a negative correlation.

4 结论

长期施用有机肥替代 20% 的化肥氮显著提高了稻田土壤综合肥力指数和有机碳含量, 提升效果表现为猪粪>商品有机肥>秸秆(包括翻压紫云英)。秸秆和商品有机肥提高土壤微生物生物量和酶活性的效果较为突出, 促进了矿物结合态有机碳的积累, 但没有改变土壤有机碳库的稳定性。猪粪增加了土壤中颗粒态有机碳(不稳定有机碳)含量及其在总有机碳中的占比, 提高了土壤有机碳库的活性, 是土壤综合肥力提高的主要原因。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2023.
- [2] 吴金水, 李勇, 童成立, 等. 亚热带水稻土碳循环的生物地球化学特点与长期固碳效应[J]. 农业现代化研究, 2018, 39(6): 895–906.
Wu J S, Li Y, Tong C L *et al.* The key geo-biochemical processes of the long-term carbon sequestration and its mechanisms in the subtropical paddy soils[J]. Research of Agricultural Modernization, 2018, 39(6): 895–906.
- [3] 司绍诚, 吴宇澄, 李远, 等. 耕地和草地土壤健康研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 625–642.
- [4] Si S C, Wu Y C, Li Y, *et al.* The current research progress and prospects of cultivated and grassland soil health—a review[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(3): 625–642.
- [5] Pan G, Smith P, Pan W. The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2009, 129(1): 344–348.
- [6] 潘根兴, 赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和粮食安全[J]. 地球科学进展, 2005, 20(4): 384–393.
Pan G X, Zhao Q G. Study on evolution of organic carbon stock in agricultural soils of China: Facing the challenge of global change and food security[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(4): 384–393.
- [7] Liu S, Wang J, Pu S, *et al.* Impact of manure on soil biochemical properties: A global synthesis[J]. Science of the Total Environment, 2020, 745: 141003.
- [8] Cotrufo M F, Ranalli M G, Haddix M L, *et al.* Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter[J]. Nature Geoscience, 2019, 12(12): 989–994.
- [9] Tang B, Rocci K S, Lehmann A, *et al.* Nitrogen increases soil organic carbon accrual and alters its functionality[J]. Global Change Biology, 2023, 29: 1971–1983.
- [10] 何伟, 王会, 韩飞, 等. 长期施用有机肥显著提升潮土有机碳组分[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 425–434.
He W, Wang H, Han F, *et al.* Effect of long-term application of organic manure expanding organic carbon fractions in fluvo-aquic soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(2): 425–434.
- [11] Chen J, Xiao W, Zheng C, *et al.* Nitrogen addition has contrasting

- effects on particulate and mineral-associated soil organic carbon in a subtropical forest[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 142: 107708.
- [11] Lan X, Shan J, Huang Y, *et al.* Effects of long-term manure substitution regimes on soil organic carbon composition in a red paddy soil of southern China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2022, 221: 105395.
- [12] 梅婷婷. 有机肥替代化肥对稻田土壤有机碳稳定性和水稻产量的影响[D]. 贵阳: 贵州大学硕士学位论文, 2023.
Mei T T. Effects of organic fertilizer replacing chemical fertilizer on soil organic carbon stability and rice yield in paddy field[D]. Guiyang: MS Thesis of Guizhou University, 2023.
- [13] 张伟彬. 不同比例化肥与有机肥配施对土壤碳组分及微生物碳代谢的影响[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(15): 188–195.
Zhang W B. Effects of different proportions of chemical fertilizer and organic fertilizer on soil carbon composition and microbial carbon metabolism[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(15): 188–195.
- [14] 佟小刚, 徐明岗, 张文菊, 等. 长期施肥对红壤和潮土颗粒有机碳含量与分布的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(11): 3664–3671.
Tong X G, Xu M G, Zhang W J, *et al.* Influence of long-term fertilization on content and distribution of organic carbon in particle-size fractions of red soil and fluvo-aquic soil in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(11): 3664–3671.
- [15] 陈丽铭, 吴月颖, 李财生, 等. 土壤溶解性有机质分子特征对不同来源有机肥分解的响应[J]. *土壤学报*, 2023, 60(4): 1101–1112.
Chen L M, Wu Y Y, Li C S, *et al.* Molecular characteristics of soil dissolved organic matter in response to decomposition of organic fertilizers from different sources[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(4): 1101–1112.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析(3版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (3rd edition)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [17] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
Wu J S, Lin Q M, Huang Q Y, *et al.* Soil microbial biomass determination method and its application[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006.
- [18] Saiya-Cork K R, Sinsabaugh R L, Zak D R, *et al.* The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34(9): 1309–1315.
- [19] DeForest L J. The influence of time, storage temperature, and substrate age on potential soil enzyme activity in acidic forest soils using MUB-linked substrates and 1-DOPA[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(6): 1180–1186.
- [20] 刘伟民, 舒业勤, 夏银行, 等. 长期复种绿肥下光合碳在水稻-土壤系统中的分配与稳定[J]. *土壤学报*, 2023, 60(4): 1067–1076.
Liu W M, Shu Y Q, Xia Y H, *et al.* Distribution and stabilization of photosynthetic carbon in rice-soil system under long-term multiple cropping of green manure[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(4): 1067–1076.
- [21] 于寒青, 徐明岗, 吕家珑, 等. 长期施肥下红壤地区土壤熟化肥力评价[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(7): 1772–1778.
Yu H Q, Xu M G, Lü J L, *et al.* Variations of soil fertility level in red soil region under long-term fertilization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(7): 1772–1778.
- [22] 包耀贤, 徐明岗, 吕粉桃, 等. 长期施肥下土壤肥力变化的评价方法[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(20): 4197–4204.
Bao Y X, Xu M G, Lü F T, *et al.* Evaluation method of soil fertility change under long-term fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(20): 4197–4204.
- [23] 陈智坤, 郝雅琪, 任英英, 等. 长期定位施肥对两种小麦耕作系统土壤肥力的影响[J]. *土壤*, 2021, 53(1): 105–111.
Chen Z K, Hao Y J, Ren Y Y, *et al.* Effects of long-term fertilization on soil fertility under different wheat cultivation systems[J]. *Soils*, 2021, 53(1): 105–111.
- [24] 高洪军, 彭畅, 张秀芝, 等. 秸秆还田量对黑土区土壤及团聚体有机碳变化特征和固碳效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(22): 4613–4622.
Gao H J, Peng C, Zhang X Z, *et al.* Effects of corn straw returning amounts on carbon sequestration efficiency and organic carbon change of soil and aggregate in the black soil area[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(22): 4613–4622.
- [25] Ren F L, Zhang R Q, Sun N, *et al.* Patterns and driving factors of soil organic carbon sequestration efficiency under various manure regimes across Chinese croplands[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2024, 359: 108723.
- [26] 蔡岸冬, 张文菊, 申小冉, 等. 长期施肥土壤不同粒径颗粒的固碳效率[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1431–1438.
Cai A D, Zhang W J, Shen X R, *et al.* Soil carbon sequestration efficiency of different particle-size fractions after long-term fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(6): 1431–1438.
- [27] Tian S, Zhu B, Yin R, *et al.* Organic fertilization promotes crop productivity through changes in soil aggregation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, 165: 108533.
- [28] 侯红乾, 刘秀梅, 刘光荣, 等. 有机无机肥配施比例对红壤稻田水稻产量和土壤肥力的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(3): 516–523.
Hou H Q, Liu X M, Liu G R, *et al.* Effect of long-term located organic-inorganic fertilizer application on rice yield and soil fertility in red soil area of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(3): 516–523.
- [29] Sun R, Zhang X, Guo X, *et al.* Bacterial diversity in soils subjected to long-term chemical fertilization can be more stably maintained with the addition of livestock manure than wheat straw[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 88: 9–18.
- [30] Xu S, Shi X, Zhao Y, *et al.* Carbon sequestration potential of recommended management practices for paddy soils of China, 1980–2050[J]. *Geoderma*, 2011, 166(1): 206–213.
- [31] Ye G, Lin Y, Kuzyakov Y, *et al.* Manure over crop residues increases soil organic matter but decreases microbial necromass relative contribution in upland Ultisols: Results of a 27-year field experiment [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 134: 15–24.
- [32] Zheng H P, Yang T J, Bao Y Z, *et al.* Network analysis and subsequent culturing reveal keystone taxa involved in microbial litter

- decomposition dynamics[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 157: 108230.
- [33] 宇万太, 姜子绍, 马强, 等. 施用有机肥对土壤肥力的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2009, 15(5): 1057–1064.
Yu W T, Jiang Z S, Ma Q, *et al.* Effects of application of manure on soil fertility[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2009, 15(5): 1057–1064.
- [34] 刘华, 彭复细, 陈俊, 等. 不同有机肥替代20%化肥氮的稻田土壤有机氮组分积累特征[J]. *湖南农业科学*, 2024, (8): 29–35.
Li H, Peng F X, Chen J, *et al.* Accumulation characteristics of organic nitrogen fractions in paddy soil upon replacement of 20% chemical nitrogen fertilizer with different organic fertilizers[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2024, (8): 29–35.
- [35] Dai X, Song D, Wei L, *et al.* Partial substitution of chemical nitrogen with organic nitrogen improves rice yield, soil biochemical indicators and microbial composition in a double rice cropping system in south China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2021, 205: 104753.
- [36] Liu S, Razavi R, Su X, *et al.* Spatio-temporal patterns of enzyme activities after manure application reflect mechanisms of niche differentiation between plants and microorganisms[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 112: 100–109.
- [37] Begill N, Don A, Poeplau C. No detectable upper limit of mineral-associated organic carbon in temperate agricultural soils[J]. *Global Change Biology*, 2023, 29: 4662–4669.
- [38] Fu Z, Hu W, Beare M, *et al.* Soil macroaggregate-occluded mineral-associated organic carbon drives the response of soil organic carbon to land use change[J]. *Soil and Tillage Research*, 2024, 244: 107271.
- [39] Manzoni S, Taylor P, Richter A, *et al.* Environmental and stoichiometric controls on microbial carbon use efficiency in soils[J]. *New Phytologist*, 2012, 196(1): 79–91.
- [40] Li Z, Duan X, Guo X B, *et al.* Microbial metabolic capacity regulates the accrual of mineral-associated organic carbon in subtropical paddy soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2024, 195: 109457.
- [41] 张维理, Kolbe H, 张认连. 土壤有机碳作用及转化机制研究进展[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(2): 317–331.
Zhang W L, Kolbe H, Zhang R L. Research progress of SOC functions and transformation mechanisms[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(2): 317–331.
- [42] Adnan M, Xu M, Shah S, *et al.* Soil aggregation and soil aggregate stability regulate organic carbon and nitrogen storage in a red soil of southern China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 270: 110894.