

刘蓉,陈春兰,傅心赣,等. 秸秆还田替代部分化肥对红壤稻田土壤活性有机碳、有机氮含量及相关酶活性的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(10): 1954-1961.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.10.009

秸秆还田替代部分化肥对红壤稻田土壤活性有机碳、有机氮含量及相关酶活性的影响

刘蓉^{1,2}, 陈春兰^{1,3}, 傅心赣^{1,3}, 秦红灵^{1,3}, 方成^{1,3}

(1.中国科学院亚热带农业生态研究所,湖南长沙 410125; 2.华南农业大学资源环境学院,广东广州 510642; 3.中国科学院桃源农业生态试验站,湖南常德 415700)

摘要: 红壤稻田长期施用高量化肥,导致微生物活性受到抑制,碳氮循环失衡,影响土壤健康和稻田生产力。本研究基于连续 17 年的长期定位田间试验结果,探讨化肥减施配合秸秆还田对土壤活性有机碳、有机氮含量及相关酶活性的影响,以优化红壤稻田的可持续施肥策略。本研究设置 3 个处理:不施肥(CK)、施用高量氮磷钾化肥处理(NPK)和减量施用化肥+秸秆还田处理(OF)。结果表明,与 CK 和 NPK 处理相比,OF 处理显著提高红壤稻田土壤微生物生物量碳、可溶性有机氮含量和微生物生物量氮含量($P < 0.05$)。土壤 β -葡萄糖苷酶(BG)和 N -乙酰- β -D-氨基葡萄糖苷酶(NAG)活性的总体趋势均表现为 OF 处理 > NPK 处理 > CK。土壤微生物生物量碳、微生物生物量氮、可溶性有机氮含量与 BG 活性、NAG 活性之间均呈现显著或极显著正相关。综上,连续 17 年实施化肥减施并配合秸秆还田,可整体提升红壤稻田土壤活性有机碳和有机氮的含量,增强 BG 和 NAG 的活性,进而提高土壤肥力与质量。减量施用化肥+秸秆还田是提升红壤稻田土壤质量的较优施肥管理方案,并通过优化氮磷钾肥配施,间接促进了农业生态环境的改善。

关键词: 化肥减施; 秸秆还田; 可溶性有机碳; 可溶性有机氮; 微生物生物量碳; 微生物生物量氮; 土壤酶活性

中图分类号: S154;S158 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2025)10-1954-08

Effects of straw incorporation as a partial substitute for chemical fertilizers on labile organic carbon, organic nitrogen content, and relevant enzyme activities in red paddy soils

LIU Rong^{1,2}, CHEN Chunlan^{1,3}, FU Xingan^{1,3}, QIN Hongling^{1,3}, FANG Cheng^{1,3}

(1. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. The College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 3. Taoyuan Agro-Ecology Research Station, Chinese Academy of Sciences, Changde 415700, China)

收稿日期: 2025-02-12

基金项目: 科技基础资源调查专项(2021FY100504); 国家生态系统观测研究网络(CNERN)湖南桃源农田生态系统国家野外科学观测研究站运行服务项目; 中国生态系统研究网络(CERN)桃源农业生态试验站运行项目

作者简介: 刘蓉(2002-),女,湖北咸宁人,硕士研究生,主要从事稻田综合种养技术研究。(E-mail) lr020109@stu.scau.edu.cn

通讯作者: 方成, (E-mail) fangcheng@isa.ac.cn

Abstract: Long-term application of large amounts of chemical fertilizers in red paddy soils inhibits microbial activity, disrupts carbon and nitrogen cycling, and ultimately compromises soil health and paddy field productivity. To optimize the sustainable fertilization strategies for red paddy soils, this study explored the effects of chemical fertilizer reduction combined with straw returning on soil labile organic carbon, organic nitrogen content, and relevant enzyme activities based on the long-term field experi-

ment for 17 consecutive years. We set up three treatments: no fertilizer (CK), high-rate nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer (NPK) and reduced chemical fertilizer combined with straw incorporation (OF). The results showed that compared with CK and NPK treatment, OF treatment significantly increased the content of microbial biomass carbon, soluble organic nitrogen and microbial biomass nitrogen in red paddy soils ($P < 0.05$). The overall trend of soil β -glucosidase (BG) and *N*-acetyl- β -D-glucosaminidase (NAG) activities was OF treatment > NPK treatment > CK. Soil microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen, and soluble organic nitrogen (SON) content all exhibited significant or highly significant positive correlations with BG and NAG activities. Based on the above findings, the 17-year continuous practice of reducing chemical fertilizer combined with straw incorporation comprehensively enhanced soil labile organic carbon and organic nitrogen content, increased BG and NAG activities, and thereby improved soil fertility and quality in red paddy soils. Reduced chemical fertilizer application combined with straw incorporation is a superior management strategy for enhancing soil quality in red paddy soils, which also indirectly improves the agricultural ecological environment through optimized nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer formulation.

Key words: fertilizer reduction; straw incorporation; soluble organic carbon; soluble organic nitrogen; microbial biomass carbon; microbial biomass nitrogen; soil enzyme activities

在全球人口持续增长、农业生产不断发展的背景下,土壤质量已成为提升作物气候适应能力、实现增产稳产、保障粮食安全的核心要素,良好的土壤质量不仅能够增加作物产量,还能有效增强作物应对气候变化的能力^[1]。中国南方红壤丘陵地区,由于长期不合理的开发利用和过量施肥,产生土壤酸化(pH值降低)、耕层变薄、黏粒含量增加、肥力下降等一系列问题,进而导致作物产量和品质下降^[2-3]。

碳氮循环通过养分转化与供应、土壤结构形成与稳定、微生物群落调控以及环境质量与可持续性维持等机制,多方面影响土壤质量,是保障土壤健康和农业可持续发展的重要过程。一方面,土壤中的有机养分在微生物作用下分解,为微生物活动提供能量,也将有机态养分转化为无机态养分,如有机氮通过碳化、硝化等过程转化为铵态氮和硝态氮等无机氮,供植物吸收利用,维持土壤养分供应^[4]。另一方面,固氮微生物转化、利用大气中的氮气,增加土壤氮素含量。同时,在氨化、硝化、反硝化等过程中,土壤中不同形态氮素的比例会被调节,使氮素在土壤中有效转化和供应^[5],满足植物生长需求。在农田生态系统中,碳氮循环为作物提供了重要物质和养分^[6]。不同的施肥策略直接影响稻田土壤有机碳、有机氮的输入及循环过程,造成不同土壤活性有机碳、活性有机氮含量呈现出明显差异。周珺等^[7]研究发现,与施用化肥相比,化肥与有机肥配施显著提升了土壤活性有机碳含量($P < 0.05$),增幅为99.6%~259.4%。土壤中的活性有机碳、活性有机氮虽然在土壤总碳和总氮中的占比并不高,但其

对土壤的碳氮周转、养分转化和生态环境变化及作物生长有重要的作用^[8]。土壤中的活性有机碳、活性有机氮具有周转快、活性高,可直接参与土壤生物的化学转化过程,能较快地反映土壤有机质的变化特征,因此常被用作衡量土壤碳库变化的指标^[9]。土壤中的活性有机碳、活性有机氮包括微生物生物量碳(MBC)、微生物生物量氮(MBN)、可溶性有机碳(DOC)、可溶性有机氮(DON)等。此外,土壤酶在土壤有机质分解过程中也发挥重要作用,在土壤酶的催化作用下,土壤有机质加速分解^[10], β -1,4-*N*-乙酰氨基葡萄糖苷酶(NAG)和 β -1,4-葡萄糖苷酶(BG)^[11]的作用尤为显著,土壤酶活性不仅是评估有机质质量的核心指标^[12-13],还是调控碳氮循环的关键因子^[6]。

红壤稻田长期以来高量施用化肥,导致微生物活性受抑制,碳氮循环失衡,影响土壤质量和稻田生产力。因此,在农业化肥减施的大趋势下,在坚持推进化肥农药减量增效、秸秆资源综合利用等措施的背景下^[14],减量施用化肥并配施有机物的施肥方式已成为当前研究的热点之一^[15]。减量施用化肥配合秸秆还田可以减少农田地表径流,提高农业资源的利用率和红壤稻田的质量。秸秆还田作为传统的土壤改良策略,在调节土壤结构、提升土壤有机质丰度、保水保肥等方面成效显著。这一措施能够有效降低农田对化肥的依赖程度,切实减轻农业生产活动给生态环境带来的负面影响^[16]。有学者发现单施化肥或施用有机物料(秸秆或紫云英)均可提高水稻生育期土壤可溶性有

机碳、可溶性有机氮含量^[17-18]。在对红壤稻田土壤开展的深入研究发现,化肥与有机肥配施,可以显著提升土壤养分含量,促进微生物生物量增加,同时增强土壤胞外酶活性^[19]。化肥减量配合动物有机肥能有效代替全量化肥,显著提高土壤脱氢酶、磷酸酶和过氧化氢酶的活性以及水稻产量^[20]。李春雅等^[14]的研究结果表明,与秸秆堆肥还田配合微生物菌剂相比,秸秆直接还田配合微生物菌剂更有利于土壤有机质含量、土壤微生物多样性和土壤酶活性的提升。

本研究拟依托长期定位试验(2005年至2022年),探究减量施用化肥+秸秆还田处理与施用高量氮磷钾化肥处理对红壤稻田土壤活性有机碳、有机氮含量以及相关酶活性的影响,通过分析不同处理下土壤活性有机碳、有机氮含量和关键酶活性的变化,优化红壤稻田的可持续施肥策略,旨在为红壤稻田可持续管理体系的构建提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验区位于湖南省常德市桃源县漳江街道中国科学院桃源农业生态试验站(28°55′49.8″N, 111°26′25.7″E)。该地区年均降雨量1440 mm,日照时数1520 h,年均气温16.5℃。长期定位试验开始前,土壤基础理化性状为全氮含量1.91 g/kg,有机碳含量16.90 g/kg,有效磷含量7.81 mg/kg,速效钾含量70.75 mg/kg,碱解氮含量158.12 mg/kg, pH值5.61。

1.2 试验设计

本试验设置不施肥(CK)、施用高量氮磷钾化肥(NPK)和减量施用化肥+秸秆还田(OF),共3个处理,试验设计与文献[21]一致。试验从2005年开始,施肥方式为每年插秧前撒施基肥,返青期追施氮肥,具体施肥情况见表1。小区面积为7.0 m×14.3 m,每个处理均设3次重复。

1.3 采样与指标测定

土壤样品采集:试验于2022年7月早稻收获后进行样品采集,每个小区按梅花布点采样法采集0~20 cm的土壤样品6~9个,组成一个混合土壤样品,土壤样品均低温保存。除去小碎石、细根等杂质后,部分新鲜采集的土壤样品妥善置于4℃的冷藏环境下保存,后续将用于开展土壤酶活性的精准测定与分

表1 不同施肥处理的化肥施用量及秸秆还田量

Table 1 The application rates of chemical fertilizers and straw incorporation under different fertilization treatments

处理	氮肥施用量 (kg/hm ²)	磷肥施用量 (kg/hm ²)	钾肥施用量 (kg/hm ²)	秸秆还田量 (kg/hm ²)
CK	0	0	0	0
NPK	348.9	108.8	305.1	0
OF	221.4	70.3	99.2	5 702.0

CK:不施肥,对照;NPK:施用高量氮磷钾化肥;OF:减量施用化肥+秸秆还田。

析工作,剩余部分在室内自然风干后过20目筛,用于土壤化学性质的测定分析。指标测定均采用常规方法^[22],土壤有机质含量采用重铬酸钾外加热法进行测定;可溶性有机碳、铵态氮和硝态氮用0.5 mol/L的K₂SO₄溶液浸提,然后用岛津Vwp有机碳分析仪测定可溶性有机碳含量,用FIAstar 5000流动注射仪测定铵态氮和硝态氮的含量;速效钾用1.0 mol/L的NH₄OAc浸提,然后采用原子吸收分光光度计测定其含量;有效磷含量用Olsen法测定;土壤微生物生物量碳、土壤微生物生物量氮含量采用氯仿熏蒸浸提法测定;可溶性有机氮含量为未熏蒸土壤样品浸提液全氮含量与铵态氮含量的差值,其中全氮含量采用半微量开氏法测定;土壤BG和NAG的活性均采用96微孔酶标板荧光分析法测定^[23-24]。

1.4 数据处理与分析

利用Microsoft Office Excel 2016进行数据整理,采用Origin 2021进行作图,用SPSS 26进行统计分析,采用Duncan's法进行多重比较,用Pearson相关系数法进行相关性分析,图表中数据均为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对土壤理化性质及碳、氮含量的影响

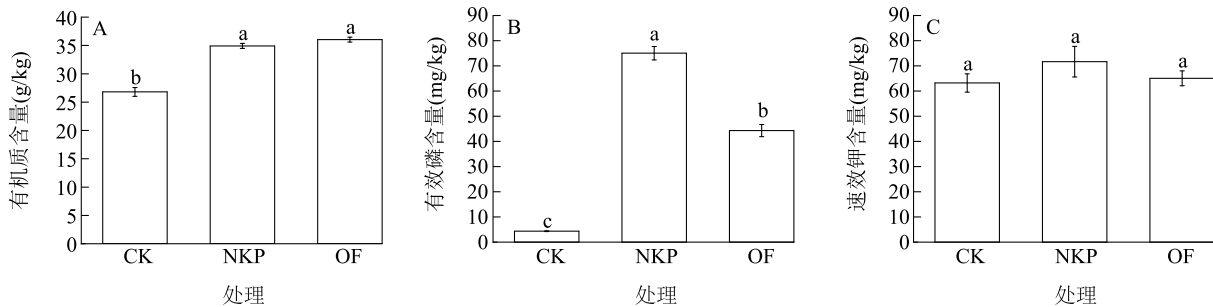
2.1.1 不同施肥处理对土壤理化性质的影响 图1显示,与CK相比,NPK处理和OF处理均显著提高了土壤的有机质(SOM)含量($P<0.05$),但OF处理和NPK处理之间无显著差异。与CK相比,NPK处理和OF处理的土壤速效钾含量没有显著的变化,有效磷含量显著提高($P<0.05$),且NPK处理显著高于OF处理($P<0.05$)。

2.1.2 不同施肥处理对土壤活性碳组分的影响

不同施肥处理的土壤活性碳组分均发生了一些变

化。图2显示,与CK相比,NPK处理和OF处理的土壤可溶性有机碳含量没有显著变化。与NPK处理相比,OF处理的土壤可溶性有机碳含量显著增加($P < 0.05$),增加到1.2倍。微生物生物量碳与可溶性有

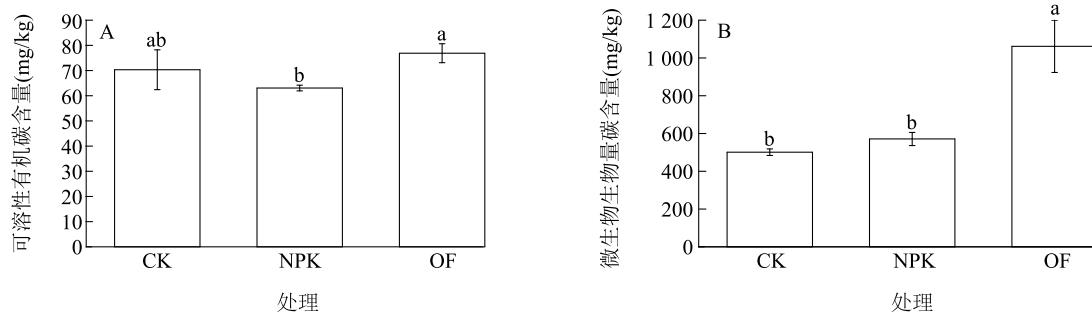
机碳含量的变化不同,与CK和NPK处理相比,OF处理的微生物生物量碳含量显著提高($P < 0.05$),分别为CK和NPK处理的2.1倍和1.9倍。



CK:不施肥,对照;NPK:施用高量氮磷钾化肥;OF:减量施用化肥+秸秆还田。图中不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

图1 不同施肥处理对土壤速效养分及有机质的影响

Fig.1 Effects of different fertilization treatments on soil available nutrients and organic matter



CK:不施肥,对照;NPK:施用高量氮磷钾化肥;OF:减量施用化肥+秸秆还田。图中不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

图2 不同施肥处理下土壤活性碳组分的变化

Fig.2 Changes of soil active carbon components under different fertilization treatments

2.1.3 不同施肥处理对土壤无机氮、活性氮组分的影响 表2显示,在水稻田中无机氮主要以铵态氮的形式存在,硝态氮含量极少。不同施肥处理的土壤无机氮含量有着明显的差异,总体表现为OF处理>NPK处理>CK。NPK处理和OF处理的土壤铵态氮含量与CK相比分别显著提高了73.2%和124.8% ($P < 0.05$);与NPK处理相比,OF处理的土壤铵态氮含量显著提高($P < 0.05$),是NPK处理的1.3倍。与CK相比,NPK处理和OF处理的硝态氮含量分别显著提高了60.8%和88.7% ($P < 0.05$)。而NPK处理与OF处理之间的硝态氮含量无显著差异。综合分析,OF处理对无机氮含量的提升效果最为显著。

NPK处理和OF处理的土壤可溶性有机氮含量与CK相比均显著增加($P < 0.05$),分别是CK的3.0倍和4.3倍;OF处理的土壤可溶性有机氮含量是NPK处理的1.5倍(表2)。

NPK处理的微生物生物量氮含量是CK的1.1倍,但NPK处理的微生物生物量氮含量与CK的微生物生物量氮含量之间差异不显著($P > 0.05$)。与CK相比,OF处理的微生物生物量氮含量显著增加($P < 0.05$),为CK的1.7倍。由此可知,OF处理能显著提高土壤中微生物生物量氮含量。

表2 不同施肥处理下无机氮、活性氮组分的变化

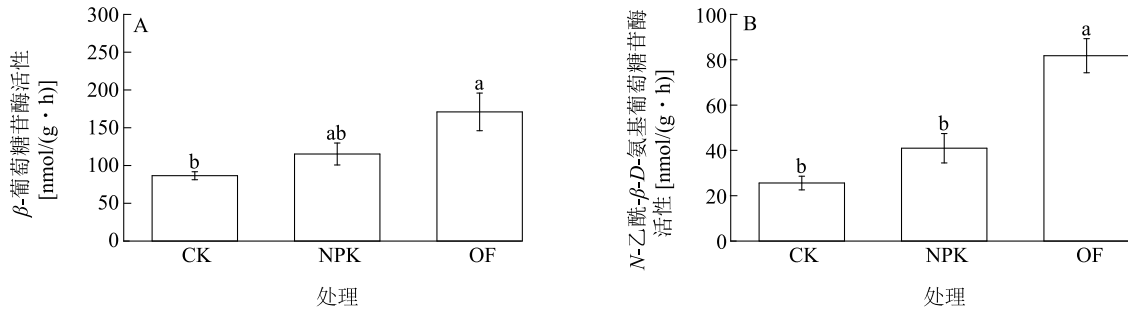
Table 2 Changes of inorganic nitrogen and active nitrogen components under different fertilization treatments

处理	铵态氮含量 (mg/kg)	硝态氮含量 (mg/kg)	可溶性有机氮含量 (mg/kg)	微生物生物量氮含量 (mg/kg)
CK	4.47±0.35c	0.097±0.015b	2.18±0.14c	57.57±1.67b
NPK	7.74±0.73b	0.156±0.006a	6.45±0.09b	63.93±4.30b
OF	10.05±0.34a	0.183±0.009a	9.39±0.25a	99.43±7.43a

CK:不施肥,对照;NPK:施用高量氮磷钾化肥;OF:减量施用化肥+秸秆还田。同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.2 不同施肥处理对土壤酶活性的影响

图 3 显示,土壤 β -葡萄糖苷酶 (BG) 活性和 N -乙酰- β - D -氨基葡萄糖苷酶 (NAG) 活性的总体变化趋势表现一致。OF 处理的土壤 BG 活性比 CK 高 97.7%, 差异显著 ($P < 0.05$), 与 NPK 处理相比增幅



CK: 不施肥, 对照; NPK: 施用高量氮磷钾化肥; OF: 减量施用化肥+秸秆还田。图中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 3 不同施肥处理对土壤 β -葡萄糖苷酶 (BG)、 N -乙酰- β - D -氨基葡萄糖苷酶 (NAG) 活性的影响

Fig.3 Effects of different fertilization treatments on the activities of β -glucosidase (BG) and N -acetyl- β - D -glucosaminidase (NAG) in soil

2.3 土壤理化指标、土壤酶活性、微生物生物量碳含量、微生物生物量氮含量之间的相关性分析

对不同施肥处理的土壤理化指标与相关酶活性等进行相关性分析, 结果(表 3)表明, 微生物生物量碳含量与可溶性有机氮含量之间呈极显著相关 ($P < 0.01$), 与铵态氮含量、硝态氮含量之间呈显著相关 ($P < 0.05$); 微生物生物量氮含量与铵态氮含量、可溶性有机氮含量之间呈显著相关 ($P < 0.05$)。土壤 BG 活性与铵态氮含量、可溶性有机氮含量、微生物生物量碳含量、微生物生物量氮含量之间呈显著正相关 ($P < 0.05$); NAG 活性与可溶性有机氮含量、微生物生物量氮含量、微生物生物量碳含量之间均呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与硝态氮含量、铵态氮含量之间呈显著正相关 ($P < 0.05$)。上述结果说明参与碳循环的 BG 受土壤中铵态氮含量、可溶性有机氮含量、微生物生物量碳含量及微生物生物量氮含量的影响较大, 参与氮循环的 NAG 与土壤中无机氮(铵态氮、硝态氮)含量关系密切, 更易受土壤中微生物量的影响。

3 讨论

本研究对比了优化施肥处理(减量施用化肥+秸秆还田)、施用高量氮磷钾化肥处理及不施肥(对照)对土壤理化性质及酶活性的影响。本研究结果

达到 48.4%, 但二者差异未达到显著水平。与 CK 和 NPK 处理相比, OF 处理下 NAG 活性显著提高 ($P < 0.05$), 分别提高了 219.4% 和 99.7%。综上, OF 处理对 BG 活性和 NAG 活性的影响最为显著。

表明, 施用高量氮磷钾化肥处理或减量施用化肥+秸秆还田处理均可提高土壤有效磷含量, 且减量施用化肥+秸秆还田处理在提升无机氮含量方面总体较施用高量氮磷钾化肥处理效果更为显著。减量施用化肥+秸秆还田处理的土壤活性碳、活性氮含量高于施用高量氮磷钾化肥处理。与对照相比, 减量施用化肥+秸秆还田处理显著提高了 BG 和 NAG 的活性。

与对照相比, 减量施用化肥+秸秆还田处理显著提高了土壤中无机氮含量, 一方面与秸秆本身的含氮量有关, 另一方面秸秆还田向土壤环境大量输入碳元素, 为土壤微生物的新陈代谢、生长繁殖等营造了有利条件, 进而促进了土壤中氮素的矿化^[25]。李辉信等^[26]在相关研究中指出, 秸秆还田可改变土壤微生物群落结构, 增强微生物对氮素的转化能力。土壤中速效养分含量的提升, 为土壤微生物提供了充足且容易利用的营养物质, 增强了土壤保肥保水能力, 提升了土壤肥力。有研究指出, 单独施用秸秆能增加土壤中解磷类细菌数量^[27], 在本研究中, 减量施用化肥+秸秆还田处理的有效磷含量仍显著低于施用高量氮磷钾化肥处理, 说明秸秆配施无法达到外源磷肥的效果。有研究结果表明, 单独施用秸秆能增加土壤中解磷类细菌数量, 但与大量磷肥供应处理相比, 外源磷肥的作用效果更显著^[28]。

表 3 土壤酶活性、微生物生物量碳含量、微生物生物量氮含量与土壤理化指标之间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between soil enzyme activities, microbial biomass carbon content, microbial biomass nitrogen content and soil physical and chemical properties

指标	相关系数										
	有机质含量	速效钾含量	有效磷含量	硝态氮含量	铵态氮含量	可溶性有机碳含量	可溶性有机氮含量	BG 活性	NAG 活性	微生物生物量碳含量	微生物生物量氮含量
有机质含量	1.000										
速效钾含量	0.367	1.000									
有效磷含量	0.820 *	0.322	1.000								
硝态氮含量	0.911 **	0.109	0.771 *	1.000							
铵态氮含量	0.929 **	0.037	0.746 *	0.921 **	1.000						
可溶性有机碳含量	0.100	-0.243	0.555	0.147	0.277	1.000					
可溶性有机氮含量	0.945 **	0.128	0.893 **	0.931 **	0.977 **	0.359	1.000				
BG 活性	0.701	0.163	0.422	0.690	0.748 *	0.327	0.790 *	1.000			
NAG 活性	0.772 *	0.168	0.375	0.771 *	0.815 *	0.555	0.893 **	0.906 **	1.000		
微生物生物量碳含量	0.696	0.041	0.239	0.752 *	0.758 *	0.650	0.853 **	0.759 *	0.955 **	1.000	
微生物生物量氮含量	0.652	0.059	0.201	0.691	0.718 *	0.680	0.817 *	0.771 *	0.959 **	0.994 **	1.000

* 表示在 0.05 水平上显著相关; ** 表示在 0.01 水平上显著相关。BG: β -葡萄糖苷酶; NAG: *N*-乙酰- β -D-氨基葡萄糖苷酶。

在本研究中,土壤活性有机碳含量、有机氮含量均表现为减量施用化肥+秸秆还田处理高于施用高量氮磷钾化肥处理,说明秸秆还田对提升土壤活性有机碳含量、有机氮含量的贡献更大。向土壤中投入含有机碳和有机氮的秸秆,通过微生物的分解,在一定时间内产生高浓度水溶性有机物^[29],这使得减量施用化肥+秸秆还田处理的土壤可溶性有机碳、有机氮的含量高于施用高量氮磷钾化肥处理。而长期施用大量化肥加快了土壤有机碳的消耗^[30],降低土壤 pH,抑制微生物活性^[31-32],进而降低了有机物的分解效率,减少了积累在土壤中的有机碳,导致施用高量氮磷钾化肥处理的可溶性有机碳含量较对照略有降低,这与谢芳等^[33]的研究结果一致。王翠红等^[34]对红壤稻田的研究结果表明,长期投入化肥会改变土壤理化性质,影响有机碳的积累与分解。同时,秸秆还田具有稳定土壤温度、提高土壤蓄水和供水能力的作用,能给土壤微生物提供相对适宜的活动场所,增加微生物的数量^[35-36],而微生物通过矿化将秸秆分解成简单无机物^[37-38],使得微生物生物量碳、微生物生物量氮得到积累。

虽然化肥等外源物对多数酶活性有抑制作用,但氮磷钾肥的施入对 BG 活性有一定激活作用^[6],同时秸秆还田分解产物转化为碳源,促使微生物分泌更多与碳转化相关的酶^[39],进而提高了 BG 活

性。这也解释了本研究中得出的减量施用化肥+秸秆还田处理的 β -葡萄糖苷酶活性显著高于对照的结果。对于参与氮循环的 NAG,秸秆还田增加了微生物生物量碳含量、微生物生物量氮含量,使土壤中真菌丰度增加,由于 NAG 是参与真菌细胞壁几丁质分解的重要酶^[40],因此减量施用化肥+秸秆还田处理的 NAG 活性显著高于其他处理。减量施用化肥+秸秆还田处理增加了土壤中部分养分含量和微生物数量,从而提升了碳氮循环相关酶活性。已有研究结果^[41]表明,与土壤碳氮转化相关的 BG 活性和 NAG 的活性之间存在正相关关系,这与本研究结果一致。同时,BG 活性、NAG 活性与土壤铵态氮含量、可溶性有机氮含量、微生物生物量碳含量、微生物生物量氮含量之间均呈显著或极显著正相关,再次验证了土壤酶参与碳氮循环,并且与土壤环境相互影响。

本研究结果与刘继培等^[42]的研究结果均证实秸秆还田可以提升土壤无机氮含量。但现有研究多关注单一因素对土壤无机氮含量的影响,本研究则在红壤稻田生态系统中,综合考虑在减量施用化肥与秸秆还田共同作用下无机氮含量及其他土壤性质的变化。本研究结果表明,与施用高量氮磷钾化肥处理相比,减量施用化肥与秸秆还田共同作用可以提高土壤可溶性有机碳、有机氮含量,这与裴鹏刚

等^[43-44]的研究结果基本一致。然而,现有研究多侧重于秸秆还田处理短期内对土壤可溶性有机碳、有机氮含量的影响,本研究基于 17 年的长期定位试验,发现长期减量施用化肥+秸秆还田处理与施用高量氮磷钾化肥处理相比,土壤可溶性有机碳、有机氮的转化优势依然存在,丰富了该领域的研究成果。

向土壤中投入含有有机碳、有机氮的作物秸秆,一方面,通过微生物的分解,使得土壤中可溶性有机碳、有机氮含量增加,这为微生物的生长、繁殖和代谢提供了物质基础,促进了微生物的活动,使微生物生物量碳含量、微生物生物量氮含量增加,进而提高了碳氮循环相关酶的活性;另一方面,改善了土壤环境,也有助于微生物对土壤中的有机物质进行分解和转化,改善土壤质量。虽然减量施用化肥+秸秆还田处理在多个方面均展现出了优势,但在有效磷含量提升上,无法达到外源磷肥的效果。本研究结果主要针对红壤稻田生态系统,对于其他类型土壤及不同生态系统下优化施肥模式的效果和机制,可能需要进一步研究和验证。同时,尽管本研究是长期定位试验,但对于更长期的土壤变化及生态系统响应,仍需持续监测和深入研究。

4 结论与展望

本研究通过长期定位试验,明确了减量施用化肥+秸秆还田处理对红壤稻田土壤活性有机碳含量、活性有机氮含量以及相关酶活性的影响,为红壤稻田合理施肥和土壤质量提升提供了科学依据。在桃源县红壤稻田环境下,减量施用化肥+秸秆还田处理相较于施用高量氮磷钾化肥处理及对照,在土壤质量提升方面具有显著优势。与对照相比,长期减量施用化肥+秸秆还田处理,不仅能提高土壤有机质含量,还能显著增加微生物生物量碳含量、微生物生物量氮含量及其相关酶活性。本研究结果进一步表明,BG 活性、NAG 活性与土壤铵态氮含量、可溶性有机氮含量、微生物生物量碳含量、微生物生物量氮含量之间存在显著或极显著正相关,明确了土壤铵态氮含量、可溶性有机氮含量、微生物生物量碳含量、微生物生物量氮含量的增加是提升土壤酶活性的重要环境因素。因此,减量施用化肥+秸秆还田处理是提高桃源县红壤稻田质量的较优的施肥管理措施,同时,从农业生态环境角度来看,通过减少化肥施用量,从源头上阻断了因过度施肥引发的生

态危害,为农业生态系统的自我修复与良性循环创造了有利条件,进而间接促进了农业生态环境的改善。

就目前的研究结果来看,减量施用化肥+秸秆还田处理对红壤稻田生态系统中活性有机碳、活性有机氮影响的研究仍需深入,后续研究建议着重聚焦于以下几个关键点:(1)土壤酶如何调控该稻田生态系统中活性有机碳、活性有机氮的含量以及碳氮循环过程;(2)施用高量氮磷钾化肥处理与减量施用化肥+秸秆还田处理下,稻田土壤中与碳元素和氮元素转化相关的功能微生物及其功能基因的变化;(3)在红壤稻田中,不同处理下的碳、氮功能基因如何调控土壤活性有机碳、有机氮含量,进而影响碳、氮的生物地球化学循环过程。

参考文献:

- [1] QIAO L, WANG X H, SMITH P, et al. Soil quality both increases crop production and improves resilience to climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2022, 12:574-580.
- [2] 赵其国,黄国勤,马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J]. *生态学报*, 2013, 33(24):7615-7622.
- [3] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968):1008-1010.
- [4] 马南,陈智文,张清. 不同类型秸秆还田对土壤有机碳及酶活性的影响综述[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(3):53-57.
- [5] 项鸿志. 氮循环过程功能基因的研究进展[J]. *环境保护前沿*, 2024, 14(6):1348-1357.
- [6] 边雪廉,赵文磊,岳中辉,等. 土壤酶在农业生态系统碳、氮循环中的作用研究进展[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(4):171-178.
- [7] 周珺,王莹,孙德龙,等. 长期施肥对设施土壤活性有机碳含量及碳库管理指数的影响[J]. *土壤*, 2024, 56(4):760-768.
- [8] 关之昊,杨丽娟,姚澜,等. 不同比例蚓粪替代化肥对设施土壤活性碳氮含量的影响[J]. *土壤通报*, 2022, 53(2):403-412.
- [9] 杜雪,王海燕. 中国森林土壤有机碳活性组分及其影响因素[J]. *世界林业研究*, 2022, 35(1):76-81.
- [10] 肖华翠,李雪,盛浩,等. 湘西北天然林转换对土壤活性有机碳与酶活性的影响[J]. *水土保持通报*, 2023, 43(5):411-418.
- [11] GISPERT M, EMRAN M, PARDINI G, et al. The impact of land management and abandonment on soil enzymatic activity, glomalin content and aggregate stability[J]. *Geoderma*, 2013, 202:51-61.
- [12] 金章利,刘高鹏,周明涛,等. 喀斯特山地草地土壤酶活性及土壤微生物碳代谢活性研究[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(3):37-44.
- [13] 矫丽娜,李志洪,殷程程,等. 秸秆还田深度对黑土腐殖质和酶

- 活性的影响[J]. 中国土壤与肥料,2015(2):17-21.
- [14] 李春雅,王炎伟,王 荣,等. 秸秆还田方式对东北水稻土壤理化性质及微生物群落的影响[J]. 微生物学报,2022,62(12):4811-4824.
- [15] 胡中泽,衣政伟,杨大柳,等. 氮肥减施与花生秸秆还田对麦田土壤氨挥发、氮肥利用率及产量的影响[J]. 江苏农业学报,2022,38(6):1492-1499.
- [16] ZHANG Y, DING W, LUO J, et al. Effects of straw returning on soil organic carbon and total nitrogen in farmland: a meta-analysis [J]. *Science of the Total Environment*,2019,653:1532-1542.
- [17] 黄 威,陈安磊,王 卫,等. 长期施肥对稻田土壤活性有机碳和氮的影响[J]. 农业环境科学学报,2012,31(9):1854-1861.
- [18] 季诗域,王旭东,石思博,等. 秸秆还田与化肥配施对稻茬麦田土壤肥力和小麦产量的影响[J]. 江苏农业学报,2020,36(5):1181-1188.
- [19] 夏文建,柳开楼,张丽芳,等. 长期施肥对红壤稻田土壤微生物生物量和酶活性的影响[J]. 土壤学报,2021,58(3):628-637.
- [20] 周东兴,李 欣,宁玉翠,等. 蚯蚓粪配施化肥对稻田土壤性状和酶活的影响[J]. 东北农业大学学报,2021,52(2):25-35.
- [21] 陈春兰,陈安磊,魏文学,等. 长期施肥对红壤稻田剖面土壤碳氮累积的影响[J]. 水土保持研究,2021,28(2):14-20.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [23] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1986.
- [24] 张丽莉,武志杰,陈利军,等. 微孔板荧光法对土壤糖酶活性的测定研究[J]. 光谱学与光谱分析,2009,29(5):1341-1344.
- [25] 欧 茜,何 君,熊 瑞,等. 长期秸秆还田与耕作方式对稻田土壤有机碳及甲烷功能基因的影响[J]. 江苏农业科学,2024,52(22):222-227.
- [26] 李辉信,胡 锋,刘满强,等. 秸秆还田对土壤微生物群落结构及功能多样性的影响[J]. 土壤学报,2007,44(5):895-900.
- [27] 孙翠焕,郭玲玲,陈丽媛,等. 秸秆还田及磷细菌对土壤微生物生态及豆角产量的影响[J]. 微生物学杂志,2024,44(1):84-89.
- [28] 赵秉强,张福锁,廖宗文,等. 我国新型肥料发展战略研究[J]. 植物营养与肥料学报,2004,10(5):536-545.
- [29] 张叶叶,莫 非,韩 娟,等. 秸秆还田下土壤有机质激发效应研究进展[J]. 土壤学报,2021,58(6):1381-1392.
- [30] 关连珠,张伯泉,颜 丽,等. 有机肥料配施化肥对土壤有机质组分及生物活性影响的研究[J]. 土壤通报,1990,21(4):180-184.
- [31] 徐阳春,沈其荣,雷宝坤,等. 水旱轮作下长期免耕和施用有机肥对土壤某些肥力性状的影响[J]. 应用生态学报,2000,11(4):549-552.
- [32] 邵兴芳,徐明岗,张文菊,等. 长期有机培肥模式下黑土碳与氮变化及氮素矿化特征[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(2):326-335.
- [33] 谢 芳,韩晓日,杨劲峰,等. 长期施肥对棕壤微生物量碳和水溶性有机碳的影响[J]. 农业科技与装备,2008(3):10-13.
- [34] 王翠红,黄运湘,周卫军,等. 长期施肥对红壤稻田土壤有机碳含量和团聚体稳定性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(3):607-614.
- [35] HUANG T T, YANG N, LU C, et al. Soil organic carbon, total nitrogen, available nutrients, and yield under different straw returning methods[J]. *Soil and Tillage Research*,2021,214:105171.
- [36] 吴海梅,周彦莉,郑浩飞,等. 秸秆带状覆盖对土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 干旱地区农业研究,2022,40(1):61-69.
- [37] NEHER D A. Ecology of plant and free-living nematodes in natural and agricultural soil[J]. *Annual Review of Phytopathology*,2010,48:371-394.
- [38] FU S L, FERRIS H, BROWN D, et al. Does the positive feedback effect of nematodes on the biomass and activity of their bacteria prey vary with nematode species and population size? [J]. *Soil Biology and Biochemistry*,2005,37(11):1979-1987.
- [39] 包建平,袁根生,董方圆,等. 生物质炭与秸秆施用对红壤有机碳组分和微生物活性的影响[J]. 土壤学报,2020,57(3):721-729.
- [40] LI Z M, JIN B, ZHANG H X, et al. Purification and characterization of three alkaline endopolygalacturonases from a newly isolated *Bacillus gibsonii*[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*,2008,8(4):768-773.
- [41] 于 洋,张常仁,杨雅丽,等. 长期免耕和秸秆覆盖量对黑土碳氮含量及碳氮循环相关酶活性的影响[J]. 应用生态学报,2024,35(3):695-704.
- [42] 刘继培,张 扬,崔广禄,等. 秸秆还田对土壤理化性质及小麦产量的影响[J]. 河北农业科学,2017,21(6):44-48,98.
- [43] 裴鹏刚,张均华,朱练峰,等. 培养条件下秸秆还田对水稻土壤微生物活性的影响[J]. 中国稻米,2014,20(3):6-10.
- [44] 吴立鹏,张士荣,娄金华,等. 秸秆还田与优化施氮对稻田土壤碳氮含量及产量的影响[J]. 华北农学报,2019,34(4):158-166.

(责任编辑:王 妮)