中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture

稻秸–有机肥联合还田对黄泥田水稻产能与化肥替代的影响

王　飞，李清华，何春梅，刘彩玲，游燕玲，黄毅斌

Combined return of rice straw and organic fertilizer to yellow-mud paddy soil to improve the rice productivity and substitute chemical fertilizers

WANG Fei, LI Qinghua, HE Chunmei, LIU Cailing, YOU Yanling, and HUANG Yibin

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12357/cjea.20210267

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长期不同供磷水平下南方黄泥田生产力及磷组分特征

Yellow–mud paddy soil productivity and phosphorus fractions under long–term different phosphorus supply levels in southern China

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(7): 960–968

有机肥部分替代化肥氮对叶菜产量和环境效应的影响

Effects of the partial replacement of chemical fertilizer with manure on the yield and nitrogen emissions in leafy vegetable production

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(3): 349–356

不同代际传递方式对稻农有机肥施用意愿的影响

The influence of intergenerational transmission of farming practices on organic fertilizer utilization willingness of rice producers

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(4): 644–653

有机无机配施体系中有机肥腐熟程度对化肥氮利用率的影响机制

Effects of organic fertilizer maturity degree on nitrogen utilization efficiency of chemical fertilizer

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(6): 1051–1060

长期施肥下黑土有机肥替代率变化特征

Substitution rate of organic fertilizer under long–term fertilization in black soils

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(9): 1398–1406

福建黄泥田肥力质量特征与最小数据集

Characteristics of soil fertility quality and minimum dataset for yellow–mud paddy fields in Fujian Province

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(12): 1855–1865

关注微信公众号，获得更多资讯信息

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 12 月 第 29 卷 第 12 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Dec. 2021, 29(12): 2024−2033

DOI: 10.12357/cjea.20210267

王飞, 李清华, 何春梅, 刘彩玲, 游燕玲, 黄毅斌. 稻秸-有机肥联合还田对黄泥田水稻产能与化肥替代的影响[J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2021, 29(12): 2024−2033
WANG F, LI Q H, HE C M, LIU C L, YOU Y L, HUANG Y B. Combined return of rice straw and organic fertilizer to yellow-mud paddy soil to improve the rice productivity and substitute chemical fertilizers[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(12): 2024−2033

稻秸-有机肥联合还田对黄泥田水稻产能与化肥替代的影响*

王 飞, 李清华, 何春梅, 刘彩玲, 游燕玲, 黄毅斌

(福建省农业科学院土壤肥料研究所 福州 350013)

摘 要: 作物秸秆和畜禽粪肥是有机肥资源的主要组成。研究等氮施肥下稻秸-有机肥联合还田对南方黄泥田水稻产能、化肥替代与养分吸收利用的影响, 可为南方丘陵稻田改土培肥、增产提质增效提供依据。基于连续 4 年田间定位试验, 设置 6 个处理, 有机物料联合还田氮素投入分别占农田总氮投入的 0 (RO0)、20% (RO20)、40% (RO40)、60% (RO60)、80% (RO80) 与 100% (RO100), 其中 RO20、RO40、RO60、RO80 和 RO100 处理稻秸干物量 (kg·hm^{-2}) 投入分别为 750、1500、2250、3000 和 3750, 氮素不足部分有机肥补足, 分析了水稻产量、养分吸收利用以及肥力因子变化。结果表明, 连续 4 年, RO20、RO40、RO60 与 RO80 处理的水稻籽粒平均产量较 RO0 增幅 8.4%~13.9%(P<0.05), 但随着有机物料配施比重的提高, 产量增幅呈下降趋势, RO100 处理与 RO0 产量基本持平。在产量组成因子中, 配施有机物料处理的有效穗增加最为明显。RO20 和 RO40 处理的水稻效益分别较 RO0 增加 2204 元·hm^{-2} 和 527 元·hm^{-2}。除 RO100 处理外, 其他有机物料联合还田处理的水稻地上部植株氮、磷和钾养分吸收量较 RO0 分别显著增加 8.5%~14.9%、8.5%~14.8% 和 8.6%~16.9% (P<0.05), 均以 RO20 处理最高; 有机物料联合还田处理的氮素回收率较 RO0 提高 6.5~11.4 个百分点, 其中 RO20 显著高于 RO80 和 RO100 处理 (P<0.05)。有机物料联合还田不同程度提高了籽粒钙、镁、锌含量, 但降低了铁含量。此外, 有机物料联合还田提高了土壤 pH、有机质、全氮、有效磷、速效钾含量以及微生物量碳、氮及脲酶活性, 降低了土壤容重。综上, 连续 4 年, 稻秸-有机肥联合还田提高了黄泥田产能与养分利用水平, 有机物料联合还田可替代化肥。综合考虑水稻增产效应、化肥减施、效益与肥力提升效果, 等氮施肥下, 稻秸-有机肥联合还田, 以替代 20% 化肥效果最佳, 其次为替代 40% 化肥效果较好。

关键词: 黄泥田; 稻秸还田; 有机肥; 氮肥回收率; 化肥替代; 水稻产能; 养分吸收

中图分类号: S143; S153; S158 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Combined return of rice straw and organic fertilizer to yellow-mud paddy soil to improve the rice productivity and substitute chemical fertilizers*

WANG Fei, LI Qinghua, HE Chunmei, LIU Cailing, YOU Yanling, HUANG Yibin

* 国家重点研发计划子课题 (2018YFD02003035*)、闽侯农田生态系统福建省野外科学观测研究站 (闽科基 [2018]17 号)、“5511”协同创新工程 (XTCXGC2021009) 资助
王飞, 主要从事土壤资源评价与持续利用研究。E-mail: fjwangfei@163.com
收稿日期: 2021-05-02 接受日期: 2021-08-03

* This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2018YFD02003035*), the Fund of Minhou Field Scientific Observation and Research Station for Farmland Ecosystem in Fujian (MIN KEJI [2018]17), and ‘5511’ Collaborative Innovation Project (XTCXGC2021009).
Corresponding author, WANG Fei, E-mail: fjwangfei@163.com
Received May 2, 2021; accepted Aug. 3, 2021

(Institute of Soil and Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China)

Abstract: Crop straw and livestock manure, the main components of organic fertilizer resources, play important roles in the improvement of soil fertility and reduction of chemical fertilizer. To provide a basis for improving the soil fertility, crop yield and benefits of rice in a southern hilly area, various amounts of combined rice straw and organic fertilizer were returned to yellow-mud paddy soils under uniform total N input conditions and the effects on the rice production capacity, chemical fertilizer substitution, and plant nutrient uptake were studied. The field experiment was conducted in a yellow-mud paddy field in Minqin County, Fujian Province over four consecutive years. The experiment involved six treatments with uniform total N input but varying percentages of replacing N from a mix of rice straw and organic fertilizer (RO); that was, 0 (RO0, CK), 20% (RO20), 40% (RO40), 60% (RO60), 80% (RO80), and 100% (RO100) of N input. The dry amounts of rice straw applied in treatments of RO20, RO40, RO60, RO80, and RO100 were 750 kg·hm^{-2}, 1500 kg·hm^{-2}, 2250 kg·hm^{-2}, 3000 kg·hm^{-2}, and 3750 kg·hm^{-2}, respectively; and the shortage of N was supplied by organic ferilizer. The variations in rice yield, nutrient uptake, and soil fertility factors were analyzed. As a result, the 4-year average yield of rice grains of RO20, RO40, RO60, and RO80 treatments significantly increased by 8.4%–13.9% relative to the yield of CK (P<0.05). However, the increasement of yield tended to decline with the increased application rates of organic materials, as the rice yield of RO100 was comparable to that of CK. Among the yield components, the effective spike significant increased by RO treatments. The benefits of rice of RO20 and RO40 treatments were 2204 ¥·hm^{-2} and 527 ¥·hm^{-2} higher than that of CK, respectively. The uptake of N, P and K by rice plants under various RO treatments significantly increased by 8.5%−14.9%, 8.5%−14.8% and 8.6%−16.9%, respectively, compared with CK, except for RO100 treatment. The recovery rate change of N in all RO treatments increased by 6.5−11.4 percentage points, with the differences between RO20 and RO80 or RO100 were statistically significant (P<0.05). Although the contents of Ca, Mg and Zn in rice grains increased, the content of Fe decreased following the return of organic materials. The RO treatments increased soil pH and the contents of organic matter, total N, available P, available K, microbial biomass C, microbial biomass N and urease activity; but decreased the soil bulk density. In conclusion, the combined return of rice straw and organic fertilizer to yellow-mud paddy soil for 4 consecutive years improved rice productivity and fertilizer uptake. In this study, the combination of organic materials can completely replace the chemical fertilizers. Based on the rice yield, reduction of chemical fertilizer use, and improvement of farmer earnings and soil fertility, RO20 treatment was considered as the best fertilization regime, followed by RO40 treatment.

Keywords: Yellow-mud paddy soil; Straw incorporation; Organic fertilizer; Nitrogen recovery rate; Chemical fertilizer substitution; Rice productivity; Nutrient uptake

水稻土是我国南方最主要的耕作土壤, 供应着接近全国粮食总产的 50%[1-2]。而随着农业集约化的发展, 大量农田化肥投入促进了土壤酸化并造成环境胁迫, 一项长达 20 年的红壤耕地 pH 的定位观察试验发现, 红壤耕地 pH 每 10 年下降 0.8 个单位[3]。另一方面, 我国有机肥料资源丰富, 但养分利用不足。研究表明, 我国当前有机肥养分资源潜力 N 为 3200 万 t, P_2O_5 为 1440 万 t, K_2O 为 3400 万 t, 当前畜禽粪肥的氮、磷、钾养分还田比例约分别为 32%、57%和 52%, 秸秆的氮、磷、钾养分还田比例约为 34%、49% 和 50%, 即畜禽粪肥和作物秸秆中, 目前全国范围内只有 1/3 左右的氮和 50% 左右的磷、钾能有效还田[4-5], 说明全国有超过一半的有机肥源养分未得到充分利用, 有机肥料资源利用潜力巨大。作物秸秆和畜禽粪肥是有机肥资源的主要组成。秸秆还田配施化肥可以提高土壤有机碳、胡敏酸、胡敏素含量及土壤养分含量, 培肥土壤并提高其稳定性, 促进作物增产[6]。秸秆还田配施不同比例化肥可以提高晚稻 (*Oryza sativa*) 植株干物质积累速率、群体生物量, 改善土壤养分, 保证较高的水稻增产潜力, 其中秸秆 3000 kg·hm^{-2}+N 150 kg·hm^{-2}+P_2O_5 75 kg·hm^{-2}+K_2O 37.5 kg·hm^{-2} 效果最为显著[7]。有机肥是土壤有机氮的重要来源, 其当季有效性低, 但对土壤肥力提升和质量改良起到重要作用[8]。商品有机肥部分替代化肥能保证华北平原小麦 (*Triticum aestivum*)-玉米 (*Zea mays*) 轮作体系的作物稳产、高产, 并且能够培肥地力, 有利于土壤可持续利用[9]。红壤稻田系统的增产和稳产性能均以有机-无机肥配施最好, 高量有机肥更有利于稻田持续增产[10]。在氮磷钾化肥基础上增施有机肥及秸秆还田会提高作物产量、增强土壤碳氮库容、提升土壤肥力, 且随着施肥年限的延长, 效果愈加明显。同时, 潮褐土施用有机肥对作物产量、碳库的增强效应强于秸秆还田, 而对氮库的提升效果低于秸秆还田[11]。化肥有机肥配合施用能提高水稻产量和肥料利用率、减少环境污染、培肥土壤, 是南方水稻田简单易行的环境保护性施肥技术[12]。虽然当前稻秸还田或施用有机肥对稻田产量及肥力的报道较多, 但多为单个培肥因素效果, 由

于稻秆与有机肥碳/氮比存在较大差异, 可能存在互补性, 在等氮条件下, 稻秸-有机肥联合还田利用对地力提升与化肥替代效果尚不明确。南方低产水稻土分布广泛, 面积达 0.077 亿 hm^2, 占水稻土面积的 32%[13]。黄泥田为福建稻区主要的一类中低产田, 属渗育型水稻土, 主要分布在山地丘陵、山前倾斜平原、滨海台地和河谷阶地, 存在酸、瘦、黏、浅、旱等障碍因素[14], 其同时承载着地力提升与化肥减施增效双重任务。为此, 本研究连续 4 年在黄泥田水稻上开展稻秸-有机肥联合还田替代部分化肥研究, 旨在为南方黄泥田粮食产能提升、有机肥源养分高效利用及化肥减施提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验区位于福建省闽清县东桥镇湖洋村。供试土壤为渗育型水稻土亚类的黄泥田土属, 发育于残积物母质。土壤基本化学性状: pH 5.3、有机质 29.5 $g·kg^{-1}$、碱解氮 162.5 $mg·kg^{-1}$、有效磷 11.6 $mg·kg^{-1}$、速效钾 74.0 $mg·kg^{-1}$。试验按等氮量设计, 设 6 个处理: 1) 100% 化肥 (RO0, 对照); 2) 80% 化肥+20% 稻秸-有机肥 (RO20); 3) 60% 化肥 +40% 稻秸 -有机肥 (RO40); 4) 40% 化肥 +60% 稻秸 -有机肥 (RO60); 5) 20% 化肥 +80% 稻秸 -有机肥 (RO80); 6) 100% 稻秸-有机肥 (RO100)。每处理设 3 个重复, 每个小区面积 15 m^2。100% 化肥处理施氮肥 135 $kg·hm^{-2}$, N : P_2O_5 : K_2O=1 : 0.4 : 0.7。根据调查, 福建省稻秸全量还田干物量约为 3750 $kg·hm^{-2}$, 以此作为最高稻秸翻压量, 确定配施 20%、40%、60%、80% 与 100% 有机物料联合还田中的稻秸干物量分别为 750 $kg·hm^{-2}$、1500 $kg·hm^{-2}$、2250 $kg·hm^{-2}$、3000 $kg·hm^{-2}$ 和 3750 $kg·hm^{-2}$, 氮不足部分由有机肥补足, 相应的有机肥用量 (含水量 29.2%) 为 1368 $kg·hm^{-2}$、2736 $kg·hm^{-2}$、4140 $kg·hm^{-2}$、5472 $kg·hm^{-2}$ 和 6840 $kg·hm^{-2}$。稻秸干物量平均含有机质 671.2 $g·kg^{-1}$、全氮 8.7 $g·kg^{-1}$、P_2O_5 3.3 $g·kg^{-1}$、K_2O 15.9 $g·kg^{-1}$; 有机肥干物量平均含有机质 428.2 $g·kg^{-1}$、全氮 21.2 $g·kg^{-1}$、P_2O_5 15.9 $g·kg^{-1}$、K_2O 27.2 $g·kg^{-1}$。有机肥主要由猪粪与菌渣高温堆肥而成, 产品达到有机肥料行业标准 (NY/T 525—2021)。各处理磷肥全部作基肥施用; 氮钾肥基肥占 60%, 分蘖肥占 40%。氮肥用尿素, 磷肥用过磷酸钙, 钾肥用氯化钾。于 2015—2018 年连续 4 年于每年 4—5 月将稻秸、有机肥翻压至耕层 20 cm 以下。单季稻 6 月下旬移栽, 10 月上旬收割。供试水稻品种为‘甬优 15 号’。各处理养分投入量如表 1 所示。

表 1 不同处理稻秸-有机肥联合还田下氮磷钾养分每年投入量

Table 1 Annual input of nitrogen, phosphorus and potassium of different treatments of combined returning of rice straw and organic fertilizer $kg·hm^{-2}$

处理 Treatment	N	P_2O_5	K_2O
RO0	135.0	54.0	94.5
RO20	135.0(27.0)	61.1(17.9)	114.1(38.5)
RO40	135.0(54.0)	68.2(35.8)	133.4(76.7)
RO60	135.0(81.0)	75.3(53.7)	152.8(115.0)
RO80	135.0(108.0)	82.4(71.6)	172.2(153.3)
RO100	135.0(135.0)	89.5(89.5)	191.6(191.6)

括号外数据为养分总投入, 括号内数据为稻秸-有机肥联合还田养分投入量。The data outside the parentheses are total nutrient input, the data in the parentheses are nutrients input from rice straw and organic fertilizer. RO0: 100% of chemical fertilizer; RO20: 20% of combined organic material and 80% of chemical fertilizer; RO40: 40% of combined organic material and 60% of chemical fertilizer; RO60: 60% of combined organic material and 40% of chemical fertilizer; RO80: 80% of combined organic material and 20% of chemical fertilizer; RO100: 100% of combined organic material.

1.2 样品采集与测试方法

于每年水稻成熟期 (10 月份) 采集各处理小区植株样品。按随机方式, 采集各小区 5 丛植株籽粒与地上部茎叶; 同时采集各小区土壤样品, 土壤采样按 S 形布点, 采集 0~20 cm 深度 5 个位点土壤混合成 1 个样品, 部分土壤鲜样用于土壤微生物量碳、氮分析, 其余土壤自然风干, 用于土壤理化分析与酶活性分析。水稻籽粒与茎叶鲜样于 105 ℃ 烘箱中杀青 30 min, 65 ℃ 烘干至恒重, 经粉碎供植株养分含量分析。

土壤理化生化分析与植株养分含量分析参照《土壤农业化学分析方法》测定[15]。具体如下: 籽粒钙、镁、铁、锌采用干灰化稀盐酸溶解-原子吸收分光光度计法, 植株全氮用硫酸-过氧化氢消煮-定氮法; 土壤有机碳采用元素分析仪 (美国 TruMax CNS) 测定, 土壤碱解氮采用碱解扩散法, 土壤有效磷用碳酸氢钠-钼锑抗比色法, 土壤速效钾采用乙酸铵-火焰光度计法, 土壤容重采用环刀法, 土壤微生物量碳、氮采用氮仿熏蒸浸提-TOC 法 (日本 TOC-LCSH), 土壤 pH 采用水土比为 5 : 1 进行测定, 土壤脲酶活性用靛酚蓝比色法, 转化酶活性用硫代硫酸钠滴定法, 酸性磷酸酶活性用磷酸苯二钠比色法[16]。

1.3 数据分析与处理

地上部养分吸收量($kg·hm^{-2}$) = 籽粒产量×籽粒养分含量 + 秸秆产量×秸秆养分含量 (1)

氮素回收率变化 (%) = (有机无机肥配施处理地上部氮素吸收量–100%化肥处理地上部氮素吸收量)/氮素投入量×100%[17] (2)

数据采用 Excel 和 DPS 软件进行统计分析。

2　结果与分析

2.1　稻秸-有机肥联合还田对水稻分蘖期生长的影响

图 1a 显示, 等氮条件下, 第 4 年水稻分蘖期有机物料联合还田各处理 6 次观测分蘖数均值范围在 8.5~10.6 穗·丛$^{-1}$, 其中以 RO40 分蘖速率最为明显, 均值较 RO0 (对照) 增加 2.0 穗·丛$^{-1}$, 其次为 RO60, 均值较 RO0 增加 1.2 穗·丛$^{-1}$; 图 1b 显示, 有机物料联合还田各处理 6 次观测株高均值范围在 75.7~80.3 cm, 其中以 RO60 分蘖期株高增长最为明显, 均值较 RO0 增加 3.1 cm。有机物料联合还田下分蘖数与株高总体呈随有机物料还田比重的增加先上升后下降的趋势。

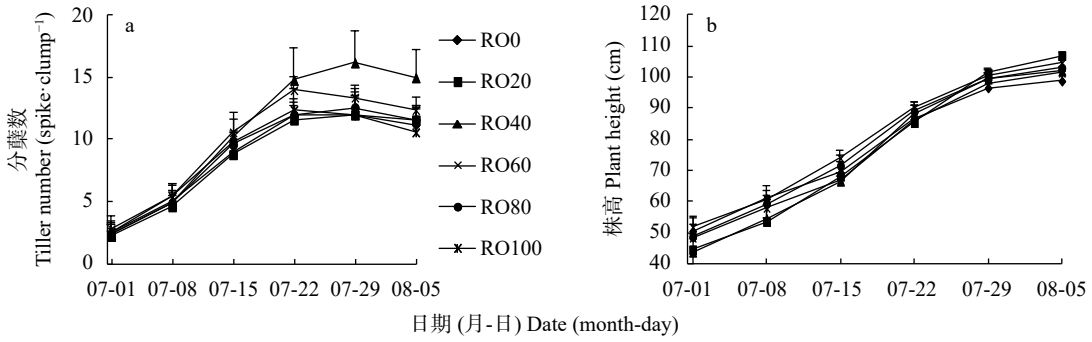

图 1　不同稻秸-有机肥联合还田处理下水稻分蘖期分蘖数 (a) 和株高 (b) 的变化 (第 4 年)

Fig. 1　Changes of tillering number (a) and plant height (b) of rice plant at tillering stage under different treatments of combined returning of rice straw and organic fertilizer in the fourth year of experiment

各处理简称见表 1。Abbreviations for each treatment are shown in Table 1.

2.2　稻秸-有机肥联合还田对水稻产量及效益的影响

与 RO0 相比, 有机物料联合还田与化肥配施均表现为增产趋势 (表 2), RO20、RO40、RO60 与 RO80 处理连续 4 年平均籽粒产量较 RO0 增幅 8.4%~13.9%, 差异均显著 (P<0.05), 其中以 RO20 处理增产最为明显。不同施肥处理的稻秸产量同样以 RO20 处理最高, 较 RO0 增产 17.5%, 差异显著 (P<0.05)。第 4 年不同处理的籽粒产量变化趋势与 4 年平均基本一致。从中也可看出, 等氮水平下, 随着有机物料联合还田替代化肥比重的增加, 籽粒产量与稻秸产量较 RO0 增幅总体呈下降趋势。此外, 无论是第 4 年的籽粒产量, 还是 4 年平均籽粒产量, RO100 与 RO0 处理均无显著性差异, 显示等氮条件下, 从籽粒产量角度考量, 黄泥田有机物料联合还田养分可以完全替代化肥。

从第 4 年产量构成来看, 有机物料联合还田的有效穗均较 RO0 有不同程度提高, 但随有机料物比重的增加呈逐步降低的趋势, 其中以 RO20 最高, 较 RO0 显著提高 36.0%(P<0.05), 其次为 RO40, 较 RO0 显著提高 24.5%(P<0.05); 不同处理的每穗实粒数均有高于 RO0 的趋势, 但未达到显著差异水平; 不同处理的千粒重无显著差异, 说明有效穗是决定不同施肥处理产量差异的主要构成因子。

表 3 显示, RO20、RO40 处理连续 4 年平均的水稻施肥效益要优于 RO0, 分别增幅 2204 元·hm^{-2} 与 527 元·hm^{-2}, RO60 处理效益与 CK 基本持平。RO80

表 2　不同稻秸-有机肥联合还田处理下水稻产量

Table 2　Rice yield under different treatments of combined returning of rice straw and organic fertilizer

处理 Treatment	有效穗 Effective panicle (×10^4·hm^{-2})	每穗实粒数 Filled grains number per panicle	千粒重 1000-grain weight (g)	第4年 In the fourth year		4年平均 Four years average	
				籽粒产量 Grain yield (kg·hm^{-2})	稻秸产量 Straw yield (kg·hm^{-2})	籽粒产量 Grain yield (kg·hm^{-2})	稻秸产量 Straw yield (kg·hm^{-2})
RO0	98.84±14.52b	185.5±10.2a	27.33±0.58a	5863±673c	4139±233b	6403±429b	3650±194c
RO20	134.40±6.40a	206.8±22.0a	26.72±0.91a	6576±713a	5585±110a	7295±435a	4290±135a
RO40	123.02±13.03a	218.6±38.1a	27.74±0.64a	6580±953a	5654±1224a	6974±434a	4151±261ab
RO60	118.04±10.52ab	186.7±18.4a	27.40±0.51a	6287±808ab	4970±554ab	7017±582a	4025±202b
RO80	114.49±15.14ab	224.3±5.2a	27.27±0.20a	6163±919bc	5059±1006ab	6944±481a	3967±231b
RO100	101.69±2.46b	210.4±36.8a	26.69±0.54a	5783±584c	4645±1570ab	6493±345b	3406±278d

有效穗、每穗实粒数与千粒重为第4年观测值。同列数据后不同小写字母表示不同处理间在P<0.05水平差异显著。各处理简称见表1。The data of effective panicle, filled grains number per panicle and 1000-grain weight were the fourth year values. Values followed by different lowercase letters in a column are significantly different at P<0.05 level. Abbreviation for each treatment is shown in Table 1.

表 3 不同稻秸-有机肥联合还田处理下水稻施肥经济效益 (4 年平均)

Table 3 Rice benefits under different fertilization treatments of combined returning of rice straw and organic fertilizer (4-year average)

处理 Treatment	产值 Output value (¥·hm^{-2})	肥料成本 Fertilizer cost (¥·hm^{-2})	施肥效益 Fertilization benefit (¥·hm^{-2})
RO0	20 490	1539	18 951
RO20	23 344	2189	21 155
RO40	22 317	2839	19 478
RO60	22 454	3488	18 966
RO80	22 221	4138	18 083
RO100	20 778	4788	15 990

籽粒价格为3.2元·kg^{-1}, 尿素价格为2.2元·kg^{-1}, 过磷酸钙价格为0.9元·kg^{-1}, 氯化钾价格为3.1元·kg^{-1}, 有机肥价格为0.7元·kg^{-1}。效益仅计肥料成本。各处理简称见表1。The prices of grain, urea, superphosphate, potassium chloride, organic fertilizer are 3.2 ¥·kg^{-1}, 2.2 ¥·kg^{-1}, 0.9 ¥·kg^{-1}, 3.1 ¥·kg^{-1} and 0.7 ¥·kg^{-1}. Only fertilizer cost was calculated. Abbreviation for each treatment is shown in Table 1.

与 RO100 处理较 RO0 有不同程度降低, 且有机物料配施比重越大效益降低越明显。综合增产、化肥减施与效益分析, 以 RO20 处理最佳, 其次是 RO40。本研究施肥效益是基于不同处理稻谷价格一致的前提下计算的, 由于全量有机肥生产的稻米价格要高于化肥生产的稻米, RO100 处理的施肥效益仍可能高于 RO0。

2.3 稻秸-有机肥联合还田对水稻植株养分吸收及肥料利用的影响

表 4 显示, 除 RO100 处理外, 有机物料联合还田的籽粒氮素吸收较 RO0 增幅为 8.4%~13.9%, 稻秸氮素吸收增幅为 8.7%~17.5%, 地上部分氮素吸收增幅为 8.5%~14.9%, 差异均显著 (P<0.05), 且均以 RO20 氮吸收量最高。从表中也可看出, 氮素吸收量总体随有机物料施用比重增加而降低。此外, 从氮素回收率来看, 除 RO100 外, 有机物料联合还田的氮素回收率较 RO0 提高 6.5~11.4 个百分点, RO20 处理的氮素回收率显著高于 RO80 与 RO100 处理 (P<0.05)。

从磷养分吸收来看 (表 5), 除 RO100 外, 有机物料联合还田的籽粒、稻秸与地上部植株磷素吸收量均显著高于 RO0 (P<0.05), 分别增加 8.4%~13.9%、8.8%~17.6% 和 8.5%~14.8%, 均以 RO20 吸收量最高; 钾养分吸收表现出相同趋势, 除 RO100 外, 有机物料联合还田的籽粒、稻秸与地上部植株钾素吸收总量分别较 RO0 增幅 8.4%~13.9%、8.7%~17.5% 和 8.6%~

表 4 不同稻秸-有机肥联合还田处理下水稻植株氮素养分吸收量及回收率变化 (4 年平均)

Table 4 N uptake and recovery efficiency change of rice under different treatments of combined returning of rice straw and organic fertilizer (4-year average)

处理 Treatment	籽粒吸收量 Grain uptake (kg·hm^{-2})	稻秸吸收量 Straw uptake (kg·hm^{-2})	吸收总量 Total uptake (kg·hm^{-2})	回收率变化 Recovery rate change (%)
RO0	75.37±5.05b	27.91±1.48c	103.28±4.70c	—
RO20	85.87±5.11a	32.80±1.03a	118.67±4.08a	11.4±3.0a
RO40	82.09±5.10a	31.74±2.00ab	113.83±5.25ab	7.8±3.9ab
RO60	82.60±6.85a	30.77±1.54b	113.37±6.61ab	7.5±4.9ab
RO80	81.73±5.66a	30.33±1.76b	112.06±3.90b	6.5±2.9b
RO100	76.43±4.07b	26.04±2.13d	102.47±2.59c	−0.6±1.9c

同列数据后不同小写字母表示不同处理间在P<0.05水平差异显著。各处理简称见表1。Values followed by different lowercase letters in a column are significantly different at P<0.05 level. Abbreviation for each treatment is shown in Table 1.

表 5 不同稻秸-有机肥联合还田处理下水稻植株磷、钾养分累积量 (4 年平均)

Table 5 P and K uptake of rice under different treatments of combined returning of rice straw and organic fertilizer (4-year average) kg·hm^{-2}

处理 Treatment	P			K		
	籽粒吸收量 Grain uptake	稻秸吸收量 Straw uptake	吸收总量 Total uptake	籽粒吸收量 Grain uptake	稻秸吸收量 Straw uptake	吸收总量 Total uptake
RO0	16.59±1.11b	5.34±0.28c	21.93±1.04c	18.21±1.22b	92.63±4.91c	110.84±4.60c
RO20	18.90±1.13a	6.28±0.20a	25.18±0.93a	20.75±1.24a	108.86±3.43a	129.61±2.20a
RO40	18.07±1.12a	6.07±0.38ab	24.15±1.14ab	19.84±1.23a	105.33±6.63ab	125.17±6.60ab
RO60	18.18±1.51a	5.89±0.30b	24.07±1.46b	19.96±1.66a	102.13±5.13b	122.09±4.95b
RO80	17.99±1.25a	5.81±0.34b	23.80±0.91b	19.75±1.37a	100.66±5.85b	120.41±4.49b
RO100	16.83±0.90b	4.98±0.41d	21.81±0.60d	18.47±0.98b	86.43±7.06d	104.90±6.27d

同列数据后不同小写字母表示不同处理间在P<0.05水平差异显著。各处理简称见表1。Values followed by different lowercase letters in a column are significantly different at P<0.05 level. Abbreviation for each treatment is shown in Table 1.

16.9%, 差异均显著 (P<0.05), 且均以 RO20 处理吸收量最高。

2.4　稻秸-有机肥联合还田对水稻籽粒中、微量元素含量的影响

与 RO0 相比, 化肥与有机物料联合还田不同比例配施, 籽粒钙、镁、锌含量均有不同程度提高(表 6)。钙含量增幅 9.7%~21.0%, 差异均显著 (P<0.05), 其中以 RO100 处理最高; 镁含量增幅 5.1%~13.9%, 同样以 RO100 处理最高, 其中 RO40、RO80 与 RO100 处理与 RO0 差异显著 (P<0.05); 锌含量以 RO100 处理最高, 但各处理间差异均未达显著水平; 各配施处理的铁含量均较 RO0 显著降低 20.1%~32.8% (P<0.05)。从表中也可看出, 高量有机物料配施的籽粒钙、镁、铁含量总体高于低量有机物料配施比例。

2.5　稻秸-有机肥联合还田对水稻土肥力的影响

表 7 显示, 有机物料联合还田不同程度改善了土壤理化和生化性状。与 RO0 相比, 有机物料联合还田的土壤 pH 增幅 0.05~0.34 个单位, 有机质含量增幅 4.51~9.21 g·kg^{-1}, 全氮含量增幅 0.04~0.46 g·kg^{-1}, 有效磷增幅 2.0~13.1 mg·kg^{-1}, 速效钾增幅 36.7~112.7 mg·kg^{-1}, 其中联合还田处理的有机质含量与 RO0 差异均显著 (P<0.05), 速效钾除 RO20 外与 RO0 差异均显著 (P<0.05)。从表中还可以看出, 土壤 pH、有机质、全氮、有效磷与速效钾养分变化总体随有机物料比重的增加而增加, 而有机物料联合还田的土壤容重则逐步下降, 降幅 0.06~0.14 g·cm^{-3}, 差异均显著 (P<0.05)。有机物料联合还田还不同程度提高了土壤微生物量碳、氮含量 (表 8), 其中 RO100 处理与 CK 的微生物量氮含量差异显著 (P<0.05), 稻秸-有机肥联合还田处理也不同程度提高了脲酶、酸性磷酸酶活性, 但转化酶活性均有所降低。另与供试前土壤相比, RO0 处理的有机质与速效养分均有不同程度下降, 而有机物料联合还田处理提高了有机质与有效磷与速效钾含量。上述说明, 稻秸-有机肥联合还田总体改善了土壤理化、生化性状, 提高了土壤肥力水平。

3　讨论

3.1　稻秸-有机肥联合还田提高黄泥田产能与氮素利用率

南方黄泥田连续 32 年定位试验表明, 与单施化肥相比, 化肥+秸秆还田和化肥+有机肥模式的水稻历年平均产量分别提高 9.3% 与 12.6%[18]。本研究在等氮条件下, 除 RO100 外, 连续 4 年稻秸-有机肥联合还田与化肥不同比例配施均明显提高了水稻产量, 提升了肥力水平以及氮素利用率。其原因可能如下: 第一, 稻秸-有机肥联合还田改善了土壤物理特性。

表 6　不同稻秸-有机肥联合还田处理下水稻籽粒中、微量元素含量 (第 4 年)

Table 6　Contents of intermediate and trace elements under different treatments of combined returning of rice straw and organic fertilizer (the fourth year)　　mg·kg^{-1}

处理 Treatment	Ca	Mg	Fe	Zn
RO0	541.82±11.05c	667.84±24.04b	68.25±10.45a	54.71±3.50a
RO20	594.21±8.98b	700.88±11.12ab	45.87±2.12b	67.22±6.97a
RO40	622.05±49.65ab	756.69±36.00a	45.86±5.33b	67.49±13.00a
RO60	612.25±30.39ab	721.44±27.50ab	51.36±4.16b	55.40±14.42a
RO80	621.10±28.87ab	730.42±27.6a	54.55±2.19b	61.41±13.02a
RO100	655.79±19.71a	759.55±43.05a	52.40±1.22b	68.53±26.78a

同列数据后不同小写字母表示不同处理间在P<0.05水平差异显著。各处理简称见表1。Values followed by different lowercase letters are significantly different at P<0.05 level. Abbreviation for each treatment is shown in Table 1.

表 7　不同稻秸-有机肥联合还田处理下土壤理化特性 (第 4 年)

Table 7　Soil chemicophysical properties under different treatments of combined returning of rice straw and organic fertilizer (the fourth year)

处理 Treatment	pH	有机质 Organic matter (g·kg^{-1})	全氮 Total N (g·kg^{-1})	碱解氮 Available N (mg·kg^{-1})	有效磷 Available P (mg·kg^{-1})	速效钾 Available K (mg·kg^{-1})	容重 Bulk density (g·cm^{-3})
RO0	5.09±0.19b	26.02±0.67c	1.37±0.14b	103.4±21.0a	10.8±3.4b	28.6±7.1d	1.28±0.02a
RO20	5.14±0.06b	31.02±1.45ab	1.48±0.43b	101.0±8.7a	12.8±8.0b	65.3±18.9cd	1.20±0.05bc
RO40	5.23±0.14ab	30.53±1.60b	1.41±0.44b	102.5±6.4a	20.2±6.4ab	96.0±42.9bc	1.19±0.02bc
RO60	5.33±0.05ab	32.55±1.93ab	1.55±0.44b	112.8±13.7a	20.0±7.2ab	110.0±38.9ab	1.22±0.01b
RO80	5.33±0.11ab	35.23±5.85a	1.83±0.38a	111.9±8.4a	23.9±6.3a	115.9±34.0ab	1.17±0.01cd
RO100	5.43±0.15a	31.42±2.00ab	1.80±0.25a	114.3±18.6a	19.1±8.5ab	141.3±27.9a	1.14±0.01d

同列数据后不同小写字母表示不同处理间在P<0.05水平差异显著。各处理简称见表1。Values followed by different lowercase letters are significantly different at P<0.05 level. Abbreviation for each treatment is shown in Table 1.

表 8 不同稻秸-有机肥联合还田处理下土壤生化特性 (第 4 年)

Table 8 Soil biochemical properties under different treatments of combined returning of rice straw and organic fertilizer (the fourth year)

处理 Treatment	微生物量碳 Microbial biomass C content ($mg \cdot kg^{-1}$)	微生物量氮 Microbial biomass N content ($mg \cdot kg^{-1}$)	脲酶 Urease activity [$mg(NH_3\text{-}N) \cdot kg^{-1} \cdot (24\ h)^{-1}$]	酸性磷酸酶 Acid phosphatase activity [$mg(P_2O_5) \cdot (100\ g)^{-1} \cdot (24\ h)^{-1}$]	转化酶 Invertase activity [$mL(0.1\ mol \cdot L^{-1} Na_2S_2O_3) \cdot g^{-1}$]
RO0	611.0±93.6a	70.6±11.8b	12.33±0.45b	424.26±9.23a	1.64±0.23a
RO20	699.6±60.9a	70.9±8.0b	15.47±2.62a	447.81±44.75a	1.26±0.43ab
RO40	677.3±107.8a	80.3±4.4ab	14.74±1.95ab	423.71±33.76a	1.03±0.29bc
RO60	678.0±52.7a	81.6±15.9ab	13.96±2.07ab	463.87±4.44a	1.13±0.29abc
RO80	642.8±25.3a	84.7±7.0ab	14.25±0.77ab	427.16±31.89a	0.68±0.16c
RO100	644.9±95.7a	90.5±9.4a	14.83±0.77ab	442.47±30.09a	1.20±0.59abc

同列数据后不同小写字母表示不同处理间在$P<0.05$水平差异显著。各处理简称见表1。Values followed by different lowercase letters are significantly different at $P<0.05$ level. Abbreviation for each treatment is shown in Table 1.

相关研究表明, 长期秸秆还田配施粪肥尤其是配施化肥显著增加了大团聚体 (>0.25 mm) 含量, 降低了微团聚体 (<0.25 mm) 的含量, 增大了水稳性团聚体平均当量直径, 显著改善了土壤团粒结构[19]。经过 25 a 的秸秆还田, 稻-麦轮作区全量秸秆还田能够降低土壤容重, 增加土壤有机碳含量和各级团聚体中有机碳含量, 增大土壤总孔隙度和大孔隙度, 改善水稻土的物理结构[20]。本研究也表明, 与单施化肥相比, 稻秸-有机肥联合还田的土壤容重显著降低, 降幅为 0.06~0.14 $g \cdot cm^{-3}$, 这一定程度上促进了黄泥田黏性土壤疏松透气, 有利于水稻根系生长与养分吸收利用。第二, 稻秸-有机肥联合还田增加了土壤养分供应, 且速缓相济, 肥效更加均衡。本研究是等氮条件下的试验处理, 但稻秸-有机肥联合还田各处理的磷、钾实际投入总量要高于单施化肥 (表 1)。另外, 有机物料还田也增加了土壤中、微量营养元素, 促进植株养分均衡吸收, 本研究中有机物料联合还田的籽粒钙、镁、锌含量高于单施化肥也说明了这一点。值得一提的是, 有机物料联合还田显著降低了籽粒铁的含量, 这与相似类型红壤性水稻土研究结果一致[21], 其可能原因是铁一般不构成南方红壤性土水稻植株养分的限制因子, 有机物料联合还田处理产量显著提高, 铁为难移动元素, 受基因型影响, 水稻根系吸收及转运铁的能力较弱, 随着产量的升高, 吸收的铁素养分在籽粒中呈“稀释效应”。另外本研究条件下有机物料联合还田不同程度提高了土壤 pH, 这一定程度降低了土壤铁的化学活性, 影响到根系对铁的吸收利用, 导致籽粒铁含量降低。另从养分供应的长效而言, 适宜的有机物料与化肥配比增加了养分固持, 可以显著提高土壤中氮肥的残留, 减少养分流失与损失[22], 这从本研究有机物料联合还田增加了土壤微生物量碳、氮固持得到佐证。此外, 南方稻区有机无机肥配施, 可减少氨挥发与氮淋溶损失。相关研究表明, 南方双季稻田有机肥与化肥各半配施, 氨挥发损失为 7.2%~18.2%, 而单施化肥氨挥发损失高达 37.8%[23]。江苏常熟稻田在氮 240 $kg \cdot hm^{-2}$ 水平下, 秸秆还田可减少氮淋溶等损失, 氮肥总损失率降低 6.0% [24]。第三, 有机物料联合还田改善了土壤生物学性状。本研究表明, 稻秸-有机肥联合还田提高了土壤微生物量碳、氮含量与土壤脲酶、磷酸酶活性, 促进了养分高效循环利用。相关研究表明, 土壤微生物生物量是土壤重要的活性养分库。红壤区长期有机无机肥配合施用显著提高了土壤微生物量碳、微生物量氮周转速率及水稻产量[25]。刘骁蒨等[26]研究表明秸秆覆盖还田配施充足氮磷钾肥能显著提高土壤微生物生物量碳、氮, 且配施充足氮磷钾肥处理的土壤固氮菌多样性最丰富。此外, 有机无机肥配施提高了微生物同化化肥氮的能力, 降低了黏土矿物晶格固持化肥氮的水平[27]。上述说明通过稻秸-有机肥联合还田, 促进了土壤相关功能微生物的繁殖生长, 促进了土壤矿质养分的循环转化与利用, 提高了肥料吸收利用效率。

3.2 稻秸-有机肥联合还田与化肥替代比例

红壤性稻田双季稻生产实践中, 有机无机肥配施模式值得推荐, 但需均衡配施化肥氮、磷、钾[28]。冀建华等[29]研究表明, 江西双季稻有机无机肥配施处理表现为随有机肥配施比例增加而产量年变化量显著增大。有机无机肥配施有利于双季稻高产稳产, 可有效维持系统可持续性, 以 70% 化肥配施 30% 有机肥效果最佳。孟琳等[30]也研究表明, 与单施化学氮肥相比, 氮用量在 180 $kg \cdot hm^{-2}$ 并且有机肥料氮的替代率在 15%~30% 或者氮用量在 240 $kg \cdot hm^{-2}$ 并且有机肥料氮的替代率在 10%~20% 时可以获得较为平稳的氮素供应过程。本研究在等氮条件下, 随着稻秸-有机肥联合还田比例的增加, 土壤有机质与养分逐渐增加而产量增幅却呈下降趋势, 其中 4 年平

均产量以 RO20 处理最高, 即产量提升与有机质等肥力性状改善并没有完全表现一致性。这主要原因一方面可能是随着稻秸-有机肥物料配施比重的增加, 农田系统碳氮比过高, 引起水稻生长早期土壤微生物与水稻争氮, 从而影响氮素的早期供应[31], 进而影响到水稻的分蘖生长, 本研究分蘖期低量有机物料处理的分蘖数增长速率高于高量有机物料处理佐证了这一点, 成熟期各处理有效穗数也呈类似趋势; 另一方面, 有机肥物料类型存在性质差异, 不同类型有机物料腐解一年后的残留率表现为绿肥<秸秆<根茬≈有机肥[32], 即不同的有机物料腐解速率不同导致养分供应速率差异, 高有机物料配施比重尤其是配施有机肥导致短期内有效养分供应不足。刘守龙等[33]认为, 等氮投入条件下不同施肥方式对产量影响的差异可能只是试验时间较短情况下出现的暂时现象, 随着培肥时间的延长和基础地力的提高, 当土壤本身可以提供较多的矿质养分时, 施肥方式之间的差异将降低。此外, 稻秸-有机肥联合还田与化肥最佳配比还受到地力水平影响。相关研究表明, 低肥力土壤有机肥的替代比例要低, 高肥力的土壤有机肥替代比例要高, 如棕壤的中低产田, 25% 有机肥替代获得与单施化肥相当的产量, 继续增加有机替代比例会降低作物产量, 而高肥力农田有机肥替代比例可达 70% 或 75%, 仍能维持与单施化肥相当或更高的产量[34-36]。龚海青等[37] 也研究表明, 化肥氮的有机氮替代率 70% 取决于土壤有机碳含量的高低, 黑土土壤有机碳含量达到 24.89 g·kg^{-1} 时, 有机肥对化肥的替代率趋近 95%, 达最大值。本研究中的黄泥田属渗育性水稻土, 等氮投入下, 连续 4 年稻秸-有机肥联合还田提高了黄泥田产能与养分利用水平, 有机物料联合还田可完全替代化肥, 但黄泥田具有酸、薄、黏、瘦的特点, 地力水平总体较低, 为保证产量稳步提升, 在当前肥力条件下, 应选择较低配施比例的有机物料联合还田方式, 以保证产量稳步提升, 但随着肥力水平提升, 有机物料联合还田的比例可进一步加大, 化肥替代率将进一步提高。

4　结论

在每公顷 135 kg 等氮投入下, 黄泥田连续 4 年稻秸-有机肥联合还田与化肥不同比例配施, 其中稻秸干物量 (kg·hm^{-2}) 投入分别为 750、1500、2250、3000 与 3750, 替代 20%~80% 化肥处理的水稻籽粒产量较单施化肥增幅 8.4%~13.9%, 以替代 20% 化肥处理增产效果最佳, 但随着有机物料替代化肥比重的增加, 产量增幅呈降低趋势。有效穗是决定不同施肥处理产量差异的主要构成因子。从籽粒产量角度考量, 连续 4 年黄泥田有机物料联合还田可完全替代化肥。经济效益以替代 20% 化肥处理增效最为明显, 较全部施用化肥处理增加 2204 元·hm^{-2}, 相同稻谷价格条件下, 替代 80% 化肥与 100% 化肥处理较单施化肥有所降低。

稻秸-有机肥联合还田提高了水稻地上部植株氮、磷、钾累积吸收量, 除 RO100 处理外, 稻秸-有机肥联合还田的氮素回收率较全部化肥处理提高 6.5~11.4 个百分点, 说明等氮条件下, 有机物料联合还田与化肥配施提高了氮素利用率。此外, 有机无机肥配施的籽粒钙、镁、锌含量有不同程度提高, 但铁含量有所降低。

稻秸-有机肥连续联合还田有提高土壤 pH、有机质、全氮、有效磷、速效钾及微生物量碳、氮含量的趋势, 土壤容重呈现显著下降趋势。稻秸-有机肥联合还田处理也不同程度提高了土壤脲酶、磷酸酶活性。土壤性状改善总体随有机物料配施比重的增加而增加。

综合考虑黄泥田增产效果、化肥减施效应、施肥效益与培肥因素, 等氮条件下, 稻秸-有机肥联合还田与化肥配施, 以替代 20% 化肥效果最佳, 其次为替代 40% 化肥效果较好。

参考文献　References

[1] 谢军, 梁丰, 姜冠杰, 等. 不同培肥模式下红壤性水稻土的酸度变化特征及其影响因素[J]. 江西农业大学学报, 2020, 42(3): 626−632
XIE J, LIANG F, JIANG G J, et al. Characteristics of soil acidity change and its influencing factors of red paddy soil under different fertilization patterns[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2020, 42(3): 626−632

[2] 胡月明, 欧阳村香, 戴军, 等. 我国红壤资源农业利用研究进展[J]. 土壤与环境, 1999, 8(1): 53−57
HU Y M, OUYANG C X, DAI J, et al. Research progress on utilization of red soil resources in China[J]. Soil and Environmental Sciences, 1999, 8(1): 53−57

[3] 吴道铭, 傅友强, 于智卫, 等. 我国南方红壤酸化和铝毒现状及防治[J]. 土壤, 2013, 45(4): 577−584
WU D M, FU Y Q, YU Z W, et al. Status of red soil acidification and aluminum toxicity in South China and prevention[J]. Soils, 2013, 45(4): 577−584

[4] 李书田, 刘晓永, 何萍. 当前我国农业生产中的养分需求分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1416−1432
LI S T, LIU X Y, HE P. Analyses on nutrient requirements in current agriculture production in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(6): 1416−1432

[5] LI S T, LIU X Y, DING W C. Estimation of organic nutrient

sources and availability for land application[J]. Better Crops, 2016, 100(3): 4−6

[6] 袁嫚嫚, 邬刚, 胡润, 等. 秸秆还田配施化肥对稻油轮作土壤有机碳组分及产量影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 27−35
YUAN M M, WU G, HU R, et al. Effects of straw returning plus fertilization on soil organic carbon components and crop yields in rice-rapeseed rotation system[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(1): 27−35

[7] 杨滨娟, 黄国勤, 徐宁, 等. 秸秆还田配施不同比例化肥对晚稻产量及土壤养分的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(13): 3779−3787
YANG B J, HUANG G Q, XU N, et al. The effects of returning straw containing fertilizer with varying nutrient ratios on rice yield and soil fertility[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(13): 3779−3787

[8] 王如芳, 张吉旺, 董树亭, 等. 我国玉米主产区秸秆资源利用现状及其效果[J]. 应用生态学报, 2011, 22(6): 1504−1510
WANG R F, ZHANG J W, DONG S T, et al. Present situation of maize straw resource utilization and its effect in main maize production regions of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(6): 1504−1510

[9] 温延臣, 张曰东, 袁亮, 等. 商品有机肥替代化肥对作物产量和土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(11): 2136−2142
WEN Y C, ZHANG Y D, YUAN L, et al. Crop yield and soil fertility response to commercial organic fertilizer substituting chemical fertilizer[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(11): 2136−2142

[10] 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

[11] 盖霞普, 刘宏斌, 杨波, 等. 不同施肥年限下作物产量及土壤碳氮库容对增施有机物料的响应[J]. 中国农业科学, 2019, 52(4): 676−689
GAI X P, LIU H B, YANG B, et al. Responses of crop yields, soil carbon and nitrogen stocks to additional application of organic materials in different fertilization years[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(4): 676−689

[12] 徐明岗, 李冬初, 李菊梅, 等. 化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10): 3133−3139
XU M G, LI D C, LI J M, et al. Effects of organic manure application combined with chemical fertilizers on nutrients absorption and yield of rice in Hunan of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(10): 3133−3139

[13] 周卫. 低产水稻土改良与管理: 理论•方法•技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015
ZHOU W. Theories and Approaches of Amelioration and Management of Low Yield Paddy Soils[M]. Beijing: Science Press, 2015

[14] 王飞, 李清华, 林诚, 等. 福建黄泥田肥力质量特征与最小数据集[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(12): 1855−1865
WANG F, LI Q H, LIN C, et al. Characteristics of soil fertility quality and minimum dataset for yellow-mud paddy fields in Fujian Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(12): 1855−1865

[15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
LU R K. Analytical Methods for Soil and Agrochemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000

[16] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986: 267–272
GUAN S Y. Research Methods of Soil Enzyme[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986: 267–272

[17] 张文学, 孙刚, 何萍, 等. 脲酶抑制剂与硝化抑制剂对稻田氨挥发的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1411−1419
ZHANG W X, SUN G, HE P, et al. Effects of urease and nitrification inhibitors on ammonia volatilization from paddy fields[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(6): 1411−1419

[18] 王飞, 李清华, 林诚, 等. 不同施肥模式对南方黄泥田耕层有机碳固存及生产力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1447−1454
WANG F, LI Q H, LIN C, et al. Effect of different fertilization modes on topsoil organic carbon sequestration and productivity in yellow paddy field of Southern China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(6): 1447−1454

[19] 李委涛, 李忠佩, 刘明, 等. 秸秆还田对瘠薄红壤水稻土团聚体内酶活性及养分分布的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(20): 3886−3895
LI W T, LI Z P, LIU M, et al. Enzyme activities and soil nutrient status associated with different aggregate fractions of paddy soils fertilized with returning straw for 24 years[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(20): 3886−3895

[20] 房焕, 李奕, 周虎, 等. 稻麦轮作区秸秆还田对水稻土结构的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 297−302
FANG H, LI Y, ZHOU H, et al. Effects of straw incorporation on paddy soil structure in rice-wheat rotation system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 297−302

[21] 王飞, 林诚, 李清华, 等. 长期不同施肥对南方黄泥田水稻子粒与土壤锌、硼、铜、铁、锰含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(5): 1056−1063
WANG F, LIN C, LI Q H, et al. Effects of long-term fertilization on contents of Zn, B, Cu, Fe and Mn in rice grain and soil in yellow paddy fields of southern China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(5): 1056−1063

[22] 邵兴芳, 申小冉, 张建峰, 等. 外源氮在中、低肥力红壤中的转化与去向研究[J]. 中国土壤与肥料, 2014, (2): 6−11
SHAO X F, SHEN X R, ZHANG J F, et al. Exogenous nitrogen transformation and fate characteristics under different fertility red soils[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2014, (2): 6−11

[23] 李菊梅, 徐明岗, 秦道珠, 等. 有机肥无机肥配施对稻田氨

挥发和水稻产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(1): 51−56
LI J M, XU M G, QIN D Z, et al. Effects of chemical fertilizers application combined with manure on ammonia volatilization and rice yield in red paddy soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizing Science, 2005, 11(1): 51−56

[24] 张刚, 王德建, 俞元春, 等. 秸秆全量还田与氮肥用量对水稻产量、氮肥利用率及氮素损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(4): 877−885
ZHANG G, WANG D J, YU Y C, et al. Effects of straw incorporation plus nitrogen fertilizer on rice yield, nitrogen use efficiency and nitrogen loss[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(4): 877−885

[25] 吕美蓉, 李忠佩, 刘明, 等. 长期不同施肥处理对红壤水稻土微生物量氮周转的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(2): 275−282
LYU M R, LI Z P, LIU M, et al. Soil microbial biomass N turnover after long-term fertilization in paddy field[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(2): 275−282

[26] 刘骁蒨, 涂仕华, 孙锡发, 等. 秸秆还田与施肥对稻田土壤微生物生物量及固氮菌群落结构的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(17): 5210−5218
LIU X Q, TU S H, SUN X F, et al. Effect of different fertilizer combinations and straw return on microbial biomass and nitrogen-fixing bacteria community in a paddy soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(17): 5210−5218

[27] 彭佩钦, 仇少君, 侯红波, 等. ^{15}N交叉标记有机与无机肥料氮的转化与残留[J]. 生态学报, 2011, 31(3): 858−865
PENG P Q, QIU S J, HOU H B, et al. Nitrogen transformation and its residue in pot experiments amended with organic and inorganic ^{15}N cross labeled fertilizers[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(3): 858−865

[28] 董春华, 高菊生, 曾希柏, 等. 长期有机无机肥配施下红壤性稻田水稻产量及土壤有机碳变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 336−345
DONG C H, GAO J S, ZENG X B, et al. Effects of long-term organic manure and inorganic fertilizer combined application on rice yield and soil organic carbon content in reddish paddy fields[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(2): 336−345

[29] 冀建华, 侯红乾, 刘益仁, 等. 长期施肥对双季稻产量变化趋势、稳定性和可持续性的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 607−619
JI J H, HOU H Q, LIU Y R, et al. Effects of long-term fertilization on yield variation trend, yield stability and sustainability in the double cropping rice system[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(3): 607−619

[30] 孟琳, 张小莉, 蒋小芳, 等. 有机肥料氮替代部分化肥氮对稻谷产量的影响及替代率[J]. 中国农业科学, 2009, 42(2): 532−542
MENG L, ZHANG X L, JIANG X F, et al. Effects of partial mineral nitrogen substitution by organic fertilizer nitrogen on the yields of rice grains and their proper substitution rate[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(2): 532−542

[31] 唐玉霞, 孟春香, 贾树龙, 等. 不同碳源物质对土壤无机氮生物固定的影响[J]. 河北农业科学, 2004, 8(1): 6−9
TANG Y X, MENG C X, JIA S L, et al. Effects of different organic substance on biological nitrogen fixation in soil[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2004, 8(1): 6−9

[32] 王金洲, 卢昌艾, 张文菊, 等. 中国农田土壤中有机物料腐解特征的整合分析[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 16−27
WANG J Z, LU C A, ZHANG W J, et al. Decomposition of organic materials in cropland soils across China: a meta analysis[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(1): 16−27

[33] 刘守龙, 童成立, 吴金水, 等. 等氮条件下有机无机肥配比对水稻产量的影响探讨[J]. 土壤学报, 2007, 44(1): 106−112
LIU S L, TONG C L, WU J S, et al. Effect of ratio of organic manure/chemical fertilizer in fertilization on rice yield under the same N condition[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(1): 106−112

[34] 李占, 丁娜, 郭立月, 等. 有机肥和化肥不同比例配施对冬小麦—夏玉米生长、产量和品质的影响[J]. 山东农业科学, 2013, 45(7): 71−77
LI Z, DING N, GUO L Y, et al. Effects of different ratios of organic manure and chemical fertilizer on growth, yield and quality of winter wheat and summer maize[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2013, 45(7): 71−77

[35] 周江明. 有机-无机肥配施对水稻产量、品质及氮素吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 234−240
ZHOU J M. Effect of combined application of organic and mineral fertilizers on yield, quality and nitrogen uptake of rice[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(1): 234−240

[36] 吕凤莲, 侯苗苗, 张弘弢, 等. 垆土冬小麦–夏玉米轮作体系有机肥替代化肥比例研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 22−32
LYU F L, HOU M M, ZHANG H T, et al. Replacement ratio of chemical fertilizer nitrogen with manure under the winter wheat–summer maize rotation system in Lou soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(1): 22−32

[37] 龚海青, 付海美, 徐明岗, 等. 黑土有机氮肥替代率演变及其对土壤有机碳的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6): 1520−1527
GONG H Q, FU H M, XU M G, et al. Potential substitution rate of chemical nitrogen with organic nitrogen in black soil and its correlation with soil organic carbon[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(6): 1520−1527