

引用格式：

刘琼峰, 刘锋, 谷雨, 陈鸽, 周峻宇, 吴海勇, 冯延召. 湖南典型水稻土施用有机肥比例对水稻产量及氮素吸收利用的影响 [J]. 农业现代化研究, 2025, 46(1): 165-173.

LIU Q F, LIU F, GU Y, CHEN G, ZHOU J Y, WU H Y, FENG Y Z. Effects of organic fertilizer ratio on rice yield and nitrogen uptake and utilization in typical paddy soil in Hunan Province[J]. Research of Agricultural Modernization, 2025, 46(1): 165-173.

DOI: 10.13872/j.1000-0275.2024.1285

CSTR: 32240.14.1000.0275.2024.1285



湖南典型水稻土施用有机肥比例对水稻产量及氮素吸收利用的影响

刘琼峰^{1,3}, 刘锋^{2*}, 谷雨^{1,3}, 陈鸽^{1,3}, 周峻宇^{1,3}, 吴海勇^{1,3}, 冯延召⁴

(1. 湖南省土壤肥料研究所, 湖南长沙 410125; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 湖南长沙 410125; 3. 岳麓山实验室, 湖南长沙 410128; 4. 湖南农业大学环境与生态学院, 湖南长沙 410128)

摘要: 畜禽废弃物作为有机肥源, 其替代化肥在提高水稻产量和氮素利用效率方面具有潜力。本研究通过盆栽试验, 选取湖南省主要成土母质发育的水稻土, 研究在等氮条件下, 不同比例的牛粪有机肥 (30%、50%、60%、75%、100%) 与化肥配施对水稻产量及氮素吸收的影响。结果表明, 砂岩风化物、河湖沉积物、板页岩风化物发育的水稻土在牛粪有机肥替代比例为 60%、75%、30% 时稻谷产量最高, 差异具有显著性; 花岗岩风化和砂岩风化物发育的水稻土, 施用 75% 牛粪 + 化肥的处理显示最高的氮素收获指数; 石灰岩风化物水稻土施用 60% 牛粪 + 化肥、第四纪红色粘土水稻土施用 50% 或 100% 牛粪 + 化肥时, 氮素收获指数最高; 板页岩风化物水稻土施用 30% 牛粪 + 化肥时, 氮素吸收效率最高; 花岗岩风化和河湖沉积物发育的水稻土施用 75% 牛粪 + 化肥时, 氮素利用效率最高; 砂岩风化物、河湖沉积物、板页岩风化物发育水稻土的氮素偏生产力分别在 60%、75%、30% 牛粪 + 化肥配施时最高, 且差异显著。研究表明, 湖南典型成土母质发育的水稻土施用不同比例牛粪有机肥对水稻产量及氮素吸收利用的影响存在差异, 因此, 稻田中适宜的氮肥有机肥替代比例应考虑土壤成土母质的差异。

关键词: 成土母质; 水稻土; 牛粪有机肥; 水稻产量; 氮素吸收利用

中图分类号: S147.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-0275 (2025) 01-0165-09

Effects of organic fertilizer ratio on rice yield and nitrogen uptake and utilization in typical paddy soil in Hunan Province

LIU Qiongfeng^{1,3}, LIU Feng², GU Yu^{1,3}, CHEN Ge^{1,3}, ZHOU Junyu^{1,3},
WU Haiyong^{1,3}, FENG Yanzhao⁴

(1. Hunan Soil and Fertilizer Institute, Changsha, Hunan 410125, China; 2. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hunan 410125, China; 3. Yuelushan Laboratory, Changsha, Hunan 410128, China; 4. College of Environment and Ecology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128)

Abstract: As a source of organic fertilizer, livestock and poultry waste has the potential to replace chemical fertilizers in improving rice yield and nitrogen use efficiency. In this study, a pot experiment was conducted using paddy soils from Hunan Province developed from different parent materials, to investigate the effects of various proportions of cow manure organic fertilizer (30%, 50%, 60%, 75%, and 100%) combined with chemical fertilizers on rice yield and nitrogen absorption under equal nitrogen conditions. The results showed that rice yield was highest when the cow manure organic fertilizer substitution ratio was 60%, 75%, and 30% in paddy soils developed from sandstone weathering, river and lake sediments, and shale weathering, respectively, with significant differences. The nitrogen harvest index was highest with the 75% cow manure + chemical fertilizer treatment in paddy soils developed from granite weathering and sandstone weathering. The highest nitrogen harvest index in limestone weathering paddy soils was observed with 60% cow manure + chemical fertilizer, while in Quaternary red clay paddy soils, the highest nitrogen harvest index was observed with 50% or 100% cow manure + chemical fertilizer. The highest nitrogen absorption efficiency was achieved with the 30% cow manure + chemical fertilizer treatment in paddy soils developed from shale weathering. The highest nitrogen use efficiency was found in paddy soils developed from granite weathering and river

收稿日期 Received: 2024-08-16; 接受日期 Accepted: 2024-12-12

基金项目: 湖南省土壤肥料研究所所长基金项目 (2020tfs102); 湖南省自然科学基金面上项目 (2020JJ4411)。Supported by the Director Fund Project of Soil and Fertilizer Institute of Hunan Province (2020tfs102); Natural Science Foundation Project of Hunan Province (2020JJ4411).

* 通信作者 Corresponding author (liufeng@isa.ac.cn)

lake sediment with the 75% cow manure + chemical fertilizer treatment. The nitrogen partial productivity was highest at the 60%, 75%, and 30% cow manure + chemical fertilizer ratios for paddy soils developed from sandstone weathering, river and lake sediments, and shale weathering, respectively, with significant differences. The study shows that the effects of different proportions of cow manure organic fertilizer on rice yield and nitrogen uptake and utilization vary across paddy soils developed from typical soil parent materials in Hunan Province. Therefore, the suitable organic replacement ratio for nitrogen fertilizer in paddy fields should consider the differences in soil parent materials.

Keywords : parent materials; paddy soil; cow manure organic fertilizer; rice yields; nitrogen uptake and utilization

畜禽粪便肥料化还田是目前我国规模化养殖场处理畜禽粪便的主要途径,不仅有助于减少畜禽粪便排放带来的环境污染问题,还能大大提高畜禽粪便养分资源的利用效率。农田土壤-作物系统对畜禽废弃物的消纳能力,主要取决于土壤的质地与肥力、粪肥与化肥的施用量,以及作物对肥料的利用效率。土壤质量是影响作物养分利用效率的关键因素,在不同土壤类型和地力条件下,作物对肥料养分的利用效率存在差异。湖南省不同成土母质发育的稻田土壤理化特性差异较大,因此,开展典型水稻土中养殖废弃物替代化肥比例的相关研究,具有重要意义。这不仅有助于稻田土壤生态保育与作物养分资源的高效利用,也为区域种养系统养分资源的平衡与结构优化配置提供了理论支持。

国内外学者已对畜禽粪便有机肥替代部分化肥对土壤-作物系统养分吸收利用及产量品质的影响进行了广泛研究^[1-4]。多数研究集中在有机肥替代氮肥的比例及其对水稻产量和氮素吸收的影响。研究表明,适当的猪粪或牛粪替代化肥氮肥可提高水稻产量及氮素吸收效率。例如,钱银飞等^[5]研究发现,猪粪替代 25% 化学氮肥可提高南方红黄壤双季稻的产量,并促进氮素吸收和利用;徐明岗等^[6]则指出,猪粪代替 50% 的化学氮肥可使水稻籽粒产量显著提高;而王昭等^[7]、魏静等^[8]的研究表明,50% 的牛粪配施化肥不仅能保持水稻产量,还能降低田面水中氮素浓度,提高土壤氮素的累积。纪洪亭等^[9]研究也表明,猪粪有机肥替代 50% 化学氮肥能有效减少化肥用量,稳定水稻生产,并避免过量有机肥导致的养分流失。此外,关于有机肥替代比例与施肥水平的关系,研究结果也有所不同。例如,赵军等^[10]、刘红江等^[11]研究指出,在稻麦轮作系统中,猪粪有机无机复合肥替代 70% 的常规化肥能够提高作物产量并促进微生物区系的形成;任科宇等^[12]提出,在长江中游地区,氮肥有机替代比例应控制在 30% 至 60% 之间,以实现高效利用。土壤条件和施氮水平是影响水稻产量和籽粒氮含量的关键因素^[13-15],不同肥力水平稻田应选择适合的比例,研究建议低肥力稻田可适用 30% 的有机肥配施,而高肥力稻田则宜选择更高比例的有机肥配施^[16]。在土

壤类型方面,不同成土母质对水稻的产量及养分吸收有重要影响。研究表明,河湖沉积物母质发育的土壤较为肥沃,能促进水稻的氮吸收和生长,而红土层较粘重的土壤则相对贫瘠,限制了水稻的产量和养分吸收。于天一等^[17]的研究显示,不同母质的水稻土对早稻和双季稻的产量影响显著,河流沉积物母质土壤有利于作物根系的氮储蓄,促进水稻的高产,而石灰岩不利于水稻对磷的吸收,河流沉积物则对钾素吸收有抑制作用。

目前,国内外关于水稻产量及养分吸收、利用规律的研究多集中在单一土壤类型下不同施肥水平、耕作措施及品种特性等方面^[18-20],而针对不同成土母质发育的稻田土壤施用有机肥替代化肥比例的研究仍较为匮乏。水稻土的母质类型不同,导致土壤理化性质差异,从而影响水稻产量和养分吸收,进一步影响有机肥替代化肥的比例。本文选取湖南省主要成土母质发育的典型水稻土,开展盆栽试验,研究牛粪有机肥氮投入不同比例对土壤-水稻系统氮素利用效率及作物产量的影响。旨在为种养结合模式的养殖废弃物肥料化合理还田提供理论参考,并为不同土壤条件下合理施用牛粪的生产实践提供科技支撑。

1 材料与方法

1.1 供试土壤、肥料与水稻

本试验选取湖南省不同成土母质发育的典型水稻土,包括石灰岩风化物、板页岩风化物、砂岩风化物、花岗岩风化物、第四纪红色粘土、紫色砂页岩风化物及河湖沉积物发育的土壤,具体土壤基本情况见表 1。所有供试土壤的稻田耕作制度均为双季稻。供试水稻品种为创宇 9 号,由湖南省水稻研究所提供。供试牛粪由长沙瑞隆肉牛养殖场提供,经过处理后的牛粪作为有机肥使用。

1.2 试验设计

本试验牛粪有机肥替代化肥处理均使用等量氮,经过测定,牛粪养分含量为:氮 1.68%,磷 (P_2O_5) 1.34%,钾 (K_2O) 0.49%,不同处理肥料施用量,以有机肥中测定出的氮含量为基准进行计算,有机肥养分不足部分以化肥代替。试验设置不同牛粪氮

表 1 供试土壤基本情况
Table 1 Basic situation of test soil

采样地点	母质类型	pH	有机质 / (g/kg)	碱解氮 / (mg/kg)	有效磷 / (mg/kg)	速效钾 / (mg/kg)	全氮 / (g/kg)	全磷 / (g/kg)	全钾 / (g/kg)
岳阳市弼时镇	花岗岩风化物发育水稻土	6.13	39.90	251.00	10.30	171.00	2.46	0.82	19.20
浏阳市沙市镇	砂岩风化物发育水稻土	6.47	17.30	244.00	10.60	206.00	1.30	0.74	18.50
常德鼎城区十美堂镇	河湖沉积物发育水稻土	8.26	35.10	216.00	25.40	161.00	2.52	1.12	24.00
浏阳市达浒镇	板页岩风化物发育水稻土	6.13	22.90	192.00	38.20	146.00	1.82	0.97	21.80
邵东市仙槎桥镇	石灰岩风化物发育水稻土	7.65	39.60	188.00	12.60	118.00	2.22	0.58	12.20
长沙县黄花镇	第四纪红色粘土发育水稻土	6.76	21.00	183.00	12.70	106.00	1.55	0.41	15.80
浏阳市沙市镇	紫色砂砾岩发育水稻土	6.72	8.28	97.00	16.80	63.00	0.86	0.28	19.40

投入比例，分别为 30%、50%、60%、75%、100% 来研究其对水稻产量和氮素吸收的影响。试验设置 5 个处理：T1 (30% 牛粪 + 化肥)、T2 (50% 牛粪 + 化肥)、T3 (60% 牛粪 + 化肥)、T4 (75% 牛粪 + 化肥)、T5 (100% 牛粪 + 化肥)，每个处理设 4 次重复。试验所用钵为底径 22 cm、口径 30 cm、高 75 cm 的塑料钵，每盆装土 10 kg。施肥量每盆施用尿素 2.17 g、过磷酸钙 4.17 g、氯化钾 1.00 g，其中磷、钾肥作基肥，基肥在秧苗移栽前 1 天施入，追肥在移栽后 10 天施入。施肥后，土壤与肥料充分搅匀，保证每盆水层深度为 2~3 cm，且保持一致。水稻于 7 月下旬移栽，10 月下旬收获。移栽前精细选苗，确保每盆栽 3 蔸，每蔸 2 株。整个生长期的试验管理遵循常规试验方法。

1.3 样品测定与方法

在水稻成熟期采集 0~20 cm 深度的土壤样品，经风干、磨细、过筛、混匀后由湖南省农业科学院农化检测中心采用碱解扩散法测定土壤碱解氮的含量。水稻成熟期将地上部分取回，将样品在 105 °C 杀青 30 min 后，65 °C 烘干至恒重并称重后粉碎，采用凯氏 / 杜马斯法测定植株和稻谷的全氮含量。水稻成熟期测定植株株高，以及有效穗、分蘖数、实粒数、千粒重、谷重等各产量构成因子。参考已有研究^[16, 21-22]，氮素吸收和利用有关指标采用如下公式计算：

$$HI=GA/AP \quad (1)$$

$$UA=PU/TA \quad (2)$$

$$UE=GY/PA \quad (3)$$

$$PFP=YA/TA \quad (4)$$

式中：HI 为氮素收获指数；GA 为籽粒氮累积量 /kg；AP 为地上部植株总氮累积量 /kg，UA 为氮素吸收效率 / (kg/kg)；PU 为植株吸氮量 /kg；TA 为总施氮量 /kg；UE 氮素利用效率 / (kg/kg)；GY 为籽粒产量 /kg；PA 为植株氮累积量 /kg；PFP 为氮肥偏生

产力 / (kg/kg)；YA 为施氮区产量 /kg；TA 为总施氮量 /kg。

2 结果与分析

2.1 湖南典型水稻土施用牛粪比例对水稻产量及构成因素的影响

盆栽试验结果显示 (图 1)，在湖南不同成土母质条件下的典型水稻土中，施用牛粪的比例对水稻产量及其构成因素有显著影响。具体来说，花岗岩风化物发育水稻土、砂岩风化物发育水稻土、河湖沉积物发育水稻土、紫色砂砾岩发育水稻土的 T2、T3、T4 处理稻谷产量均高于 T1 和 T5 处理。其中，砂岩风化物发育水稻土的 T3 处理稻谷产量显著高于其他处理，河湖沉积物发育水稻土的 T4 处理稻谷产量也显著高于其他处理；然而，在板页岩风化物发育水稻土中，T1 处理的稻谷产量显著高于其他处理，T5 处理则产量显著低于其他处理；石灰岩风化物水稻土中，T1 处理的稻谷产量相对较高，T5 处理产量相对较低，尽管这种差异未达到显著性水平；在第四纪红色粘土发育的水稻土中，T5 的稻谷产量相对较高，但未表现出显著性差异。以上结果表明，在等氮量条件下，由于不同成土母质的土壤理化特性差异，施用牛粪有机肥的比例对产量的影响存在差异。具体而言，湖南不同成土母质发育的水稻土在施用牛粪有机肥时，土壤类型的不同导致产量反应的差异。

从水稻的株高和产量构成因子来看 (表 2)，花岗岩风化物发育水稻土 T3 处理、板页岩风化物发育水稻土 T4 处理的株高均显著高于其他处理；而花岗岩风化物和板页岩风化物发育水稻土的 T1 处理株高显著低于其他处理。在花岗岩风化物、河湖沉积物、紫色砂砾岩发育水稻土中，T5 处理的株高显著低于其他处理。板页岩风化物和石灰岩风化物发育水稻土 T1 处理的有效穗数显著高于其他处理。板页岩风化物发育水稻土 T1 处理的实粒数显著高

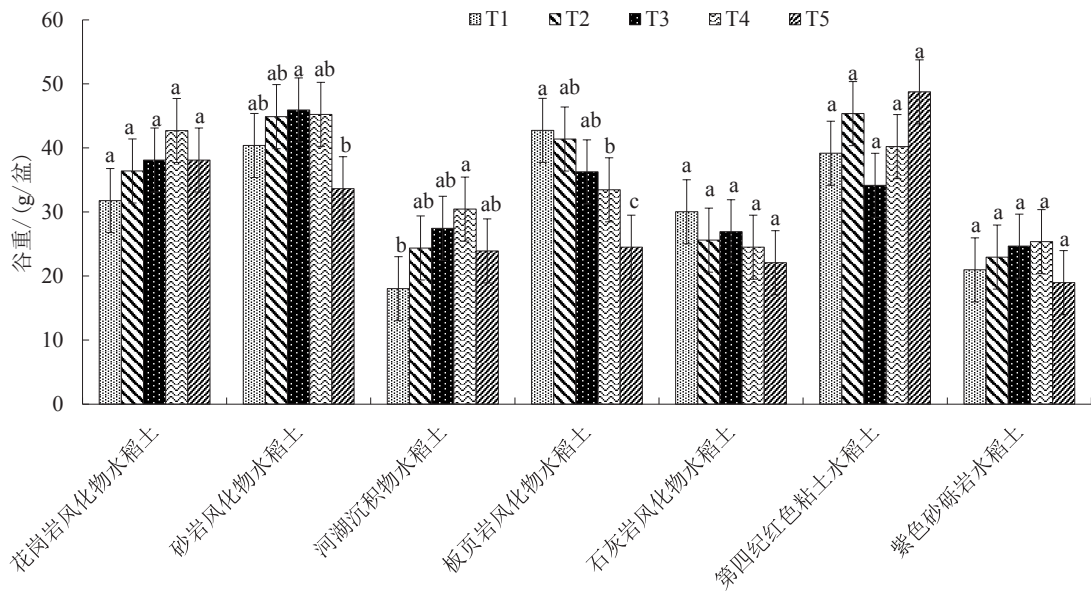


图 1 湖南典型水稻土施用牛粪比例对水稻谷重的影响

Fig. 1 Effect of cow dung ratio on rice weight in typical paddy soil in Hunan Province

注：不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

表 2 湖南典型水稻土施用牛粪比例对水稻株高及产量构成因素的影响

Table 2 Effects of cow dung ratio on rice plant height and yield components in typical paddy soil in Hunan Province

株高及产量构成因素	处理	花岗岩风化物发育水稻土	砂岩风化物发育水稻土	河湖沉积物发育水稻土	板页岩风化物发育水稻	石灰岩风化物发育水稻土	第四纪红色粘土发育水稻土	紫色砂砾岩发育水稻土
株高 /cm	T ₁	76.50±4.20b	79.75±7.93a	83.75±4.35a	78.25±3.30b	78.75±6.08a	83.75±4.79a	80.00±2.94a
	T ₂	80.5±4.36ab	82.25±3.30a	81.25±4.79a	82.25±2.22ab	80.75±4.35a	81.50±2.38a	76.50±6.45ab
	T ₃	84.75±3.77a	81.75±2.36a	80.50±9.26a	80.75±4.57ab	78.00±5.23a	80.25±4.11a	76.75±2.75ab
	T ₄	81.50±6.95ab	83.50±5.07a	79.75±2.63a	84.75±2.22a	75.50±3.32a	87.25±5.12a	81.50±5.80a
	T ₅	76.75±4.99b	82.75±1.71a	69.75±3.40b	81.75±6.70ab	81.25±5.44a	86.25±6.60a	72.00±4.97b
有效穗 / (穗 / 盆)	T ₁	28.00±4.55a	25.00±1.15a	22.00±6.48a	26.75±4.65a	21.00±0.82a	25.50±1.00a	16.00±0.82a
	T ₂	24.75±2.63a	24.00±2.94a	19.25±2.22a	21.75±2.22b	17.75±1.50b	24.25±4.65a	18.50±2.52a
	T ₃	24.50±2.65a	27.25±3.40a	17.50±2.08a	18.50±1.73bc	15.75±2.36bc	23.25±6.13a	16.25±0.96a
	T ₄	24.50±1.73a	26.75±1.71a	20.25±3.86a	18.00±3.37bc	17.00±2.58bc	24.50±4.20a	16.25±2.50a
	T ₅	26.00±2.16a	23.00±4.97a	18.00±3.74a	16.00±1.41c	14.00±3.65c	24.00±0.82a	15.50±2.08a
实粒数 / (粒 / 盆)	T ₁	1 514±207a	1 793±474a	701±266b	2 053±175a	1 451±341a	1 849±566a	998±336a
	T ₂	1 733±91.26a	2 081±329a	1 161±432ab	1 706±402ab	1 268±198a	2 150±386a	1 088±370a
	T ₃	1 795±191a	2 141±369a	1 292±247a	1 691±205ab	1 312±538a	1 619±522a	1 174±196a
	T ₄	2 011±450a	2 124±197a	1 450±182a	1 444±532bc	1 208±362a	1 823±605a	1 208±306a
	T ₅	1 793±454a	1 601±280a	1 139±564ab	1 119±256c	1 129±436a	2 321±476a	895.25±354a
千粒重 /g	T ₁	21.00±0.002b	21.58±0.51a	21.00±0.002b	21.58±0.51a	21.15±0.17a	21.15±0.17a	21.00±0.002a
	T ₂	21.00±0.001b	21.50±0.58a	21.00±0.001b	21.58±0.51a	21.00±0.001a	21.08±0.15a	21.08±0.15a
	T ₃	21.23±0.15a	21.40±0.42a	21.23±0.15a	21.40±0.42a	20.75±0.50a	21.08±0.15a	21.00±0.003a
	T ₄	21.23±0.15a	21.30±0.003a	21.00±0.003b	21.33±0.47a	20.75±0.49a	21.08±0.15a	21.00±0.001a
	T ₅	21.23±0.15a	21.00±0.001a	21.00±0.002b	21.00±0.002a	20.75±0.50a	21.00±0.004a	21.15±0.17a

注：同列不同小写字母分别表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。±表示标准差。下表同。

于其他处理，河湖沉积物发育水稻土的 T3 和 T4 处理实粒数显著高于其他处理。花岗岩风化物发育水稻土 T3、T4、T5 处理的千粒重显著高于其他处理，河湖沉积物发育水稻土 T3 处理的千粒重也显著高于其他处理。以上结果表明，在湖南不同成土母质发育的水稻土中，适当施用牛粪有机肥可以显著

影响水稻的株高及其产量构成因子，尤其是牛粪与化肥的比例调整对水稻生长和产量有不同的促进作用。

2.2 湖南典型水稻土施用牛粪比例对土壤与水稻氮素的影响

从表 3 可知，湖南主要成土母质为花岗岩风化

物和砂岩风化物发育的水稻土中, T5 处理土壤碱解氮含量高于其他处理, 而 T1 处理水稻植株与籽粒的全氮含量则显著高于其他处理。这表明, 较高比例有机肥的施用有助于土壤中氮素的累积, 而较高比例化肥的施用则有利于作物氮素的积累。在板页岩风化物发育的水稻土中, T4 处理土壤碱解氮含量显著高于其他处理, 而 T5 处理水稻植株与籽粒的全氮含量均显著高于其他处理。在石灰岩风化物发育的水稻土、第四纪红色粘土发育的水稻土及紫色砂砾岩发育的水稻土中, T1 处理土壤碱解氮含量较高, 但未达到显著水平。石灰岩风化物发育水稻土中, T4 处理水稻植株和籽粒的全氮含量高于其他处理, 且植株的全氮含量差异显著。第四纪红色粘土发育水稻土的 T3 处理水稻植株与籽粒的全氮含量显著高于其他处理。这些结果表明, 由于成土母质和土壤肥力水平的差异, 在等氮量替代条件下, 牛粪施用比例对水稻土碱解氮以及水稻植株和籽粒的氮素含量具有不同的影响。

2.3 湖南典型水稻土施用牛粪比例对氮素吸收利用的影响

从表 4 可以看出, 花岗岩风化物发育的水稻土在 T4 处理下, 氮素收获指数和氮素利用效率显著高于其他处理。同时, T4 处理的氮肥偏生产力也较高。砂岩风化物发育的水稻土在 T4 处理下, 氮素收获指数显著高于其他处理, 而 T3 处理的氮肥偏生产力显著高于其他处理。T5 处理的氮素吸收效率和氮肥偏生产力显著低于其他处理。在河湖沉积物发育的水稻土中, T4 处理的氮素利用效率和氮肥偏生产力显著高于其他处理, 而 T1 处理的氮素收获

指数、氮素利用效率与氮肥偏生产力显著低于其他处理。板页岩风化物发育的水稻土在 T1 处理下的氮素收获指数和氮肥偏生产力显著高于其他处理, 而 T5 处理的氮素吸收效率和氮肥偏生产力显著低于其他处理。石灰岩风化物发育的水稻土在 T3 处理下, 氮素收获指数显著高于其他处理。第四纪红色粘土发育的水稻土在 T2 和 T5 处理下的氮素收获指数显著高于其他处理。紫色砂砾岩发育的水稻土在 T3、T4 处理下, 氮素收获指数、氮素吸收效率、氮素利用效率和氮肥偏生产力均高于其他处理, 但差异未达到显著水平。

总体而言, 对于花岗岩风化和河湖沉积物发育的水稻土, T4 处理的氮素收获指数、氮素利用效率和氮肥偏生产力高于其他处理。砂岩风化和紫色砂砾岩发育的水稻土, T2、T3 和 T4 处理的氮素收获指数、氮素利用效率及氮肥偏生产力高于 T1 和 T5 处理。对于板页岩风化和石灰岩风化物发育的水稻土, 随着牛粪有机肥比例的增加, 氮素吸收效率、氮素利用效率和氮肥偏生产力呈下降趋势, T1 处理的氮素吸收效率、氮素利用效率和氮肥偏生产力高于其他处理。对于第四纪红色粘土发育的水稻土, T2 和 T5 处理的氮素收获指数、氮素利用效率和氮肥偏生产力高于 T1、T3 和 T4 处理。

3 讨论

3.1 有机肥替代部分化肥对水稻产量的影响

化肥与有机肥配施可以改善土壤的理化性质, 提升土壤肥力, 从而促进水稻的高产稳产^[23]。然而, 不同土壤肥力条件下, 适宜的有机肥与化肥配施比

表 3 湖南典型水稻土施用牛粪比例对土壤与水稻氮含量的影响

Table 3 Effects of cow dung ratio on soil and rice nitrogen content in typical paddy soil in Hunan Province

处理	花岗岩风化物发育水稻土	砂岩风化物发育水稻土	河湖沉积物发育水稻土	板页岩风化物发育水稻土	石灰岩风化物发育水稻土	第四纪红色粘土发育水稻土	紫色砂砾岩发育水稻土
土壤碱解氮 / (mg/kg)	T ₁	192±11.91b	133±4.92a	189±15.19a	162±9.06ab	179±3.64a	145±11.75a
	T ₂	191±6.17b	133±4.66a	189±11.51a	159±6.16b	172±17.12a	143±23.61a
	T ₃	195±6.40b	139±11.71a	203±7.27a	159±8.35b	178±5.13a	140±12.32a
	T ₄	205±5.49ab	137±8.26a	195±23.71a	176±6.46a	178±9.30a	138±12.64a
	T ₅	218±9.52a	145±19.44a	189±5.51a	169±11.84ab	175±11.09a	142±16.15a
植株全氮 / (g/kg)	T ₁	10.17±0.12a	10.02±0.12a	8.40±0.10a	8.40±0.04ab	6.37±0.05c	9.26±0.09ab
	T ₂	8.93±0.11a	9.36±0.19a	7.30±0.02a	7.76±0.04b	6.98±0.06bc	7.64±0.07bc
	T ₃	9.72±0.13a	8.20±0.10a	8.09±0.12a	9.35±0.11ab	7.61±0.09ab	10.90±0.18a
	T ₄	8.78±0.05a	8.16±0.07a	7.22±0.07a	9.23±0.23ab	8.07±0.02a	8.28±0.08bc
	T ₅	9.23±0.17a	8.02±0.10a	7.36±0.10a	10.42±0.11a	7.64±0.14ab	6.67±0.04c
籽粒全氮 / (g/kg)	T ₁	16.40±0.04a	15.80±0.09a	14.90±0.06a	14.58±0.03b	15.09±0.09a	15.53±0.13ab
	T ₂	15.65±0.03a	15.60±0.06a	15.40±0.07a	14.85±0.09ab	14.74±0.08a	15.23±0.05ab
	T ₃	15.90±0.04a	15.23±0.06a	14.80±0.03a	14.85±0.02ab	14.94±0.08a	16.35±0.06a
	T ₄	15.70±0.12a	15.10±0.06a	14.20±0.07a	14.88±0.08ab	15.32±0.08a	15.25±0.04ab
	T ₅	15.45±0.11a	15.10±0.06a	14.90±0.18a	16.18±0.14a	15.14±0.14a	14.50±0.05b

表 4 湖南典型水稻土施用牛粪比例对氮素吸收利用的影响

Table 4 Effect of cow dung ratio on nitrogen absorption and utilization in typical paddy soil in Hunan Province

处理	花岗岩风化物发育水稻土	砂岩风化物发育水稻土	河湖沉积物发育水稻土	板页岩风化物发育水稻土	石灰岩风化物发育水稻土	第四纪红色粘土发育水稻土	紫色砂砾岩发育水稻土	
氮素收获指数	T ₁	0.39b	0.45c	0.33b	0.55a	0.57ab	0.48b	0.52a
	T ₂	0.46ab	0.50abc	0.48a	0.55a	0.57ab	0.60a	0.56a
	T ₃	0.46ab	0.54ab	0.51a	0.54a	0.62a	0.45b	0.59a
	T ₄	0.52a	0.55a	0.56a	0.50a	0.52b	0.55ab	0.58a
	T ₅	0.47ab	0.47bc	0.51a	0.49a	0.53b	0.63a	0.52a
氮素吸收效率 / (kg/kg)	T ₁	0.61a	0.63a	0.31a	0.54a	0.36a	0.57a	0.26a
	T ₂	0.57a	0.64a	0.35a	0.46b	0.31a	0.53a	0.27a
	T ₃	0.61a	0.59a	0.37a	0.46b	0.27a	0.57a	0.28a
	T ₄	0.59a	0.57a	0.31a	0.41bc	0.30a	0.50a	0.29a
	T ₅	0.57a	0.50b	0.30a	0.35c	0.27a	0.51a	0.23a
氮素利用效率 / (kg/kg)	T ₁	23.98b	28.86a	23.24b	38.13a	30.04a	31.19a	37.07a
	T ₂	29.53ab	32.42a	31.56ab	36.89a	25.61a	39.51a	38.31a
	T ₃	29.05ab	35.54a	34.38ab	36.32a	26.92a	27.56a	40.57a
	T ₄	33.30a	36.29a	49.51a	34.10a	24.51a	35.98a	39.37a
	T ₅	30.82ab	30.99a	35.25ab	30.85a	22.09a	43.64a	36.67a
氮肥偏生产力 / (kg/kg)	T ₁	14.65a	18.61ab	8.31b	20.44a	13.84a	18.06a	9.66a
	T ₂	16.78a	20.69ab	11.24ab	17.03ab	12.41a	20.90a	10.59a
	T ₃	17.57a	21.17a	11.03ab	16.71ab	12.41a	15.75a	11.37a
	T ₄	19.69a	20.85ab	14.04a	14.27bc	11.29a	18.53a	11.69a
	T ₅	17.57a	15.5b	11.03ab	10.83c	10.18a	22.47a	8.75a

例有所不同^[16]。本研究结果表明,在湖南省不同成土母质发育的典型水稻土中,尽管总施氮量相同,牛粪有机肥与化肥配施对水稻产量和氮素吸收利用的影响存在差异。具体来说,花岗岩风化物、河湖沉积物和紫色砂砾岩发育的水稻土中,T4处理的稻谷产量最高;砂岩风化物发育的水稻土中,T3处理的稻谷产量最高;而板页岩风化和石灰岩风化物发育的水稻土中,T1处理的稻谷产量最高;第四纪红色粘土发育的水稻土则表现为T5处理的稻谷产量最高。

在总施氮量相同的情况下,施入适量的有机肥通过提高水稻的穗粒数、结实率或千粒重,从而有效提升水稻产量^[24-25]。例如,板页岩风化和石灰岩风化物发育的水稻土T1处理的有效穗数显著高于其他处理,其中板页岩风化物发育水稻土T1处理的实粒数也显著高于其他处理,这两种成土母质发育的水稻土T1处理的稻谷产量也明显高于其他处理。河湖沉积物发育水稻土中,T4和T3处理的实粒数显著高于其他处理,T3处理的千粒重也显著高于其他处理,这些土壤类型中的T4处理的稻谷产量也显著高于其他处理。综上所述,有机肥与化肥的配施比例应根据不同土壤类型和成土母质的发育情况来调整,才能实现水稻产量的最优化。这一结果进一步证实了适当比例的有机肥配施能够提升

水稻的生产性能,尤其是在改善土壤肥力和水稻氮素吸收利用方面的显著作用。

3.2 有机肥替代部分化肥对土壤氮素的影响

已有研究表明^[11,26],有机肥施入土壤后,由于其矿化速度较慢,容易在土壤中积累,能够持续释放速效氮素养分。合理配施有机肥与化肥有助于扩充土壤养分容量,改善土壤肥力,并促进农作物的优质高产^[27-28]。刘红江等^[11]的研究指出,在等氮量替代条件下,水稻生育前期化肥施用比例较高的处理,其土壤速效氮含量较高;而水稻生育后期,有机肥替代比例较高的处理,其土壤速效氮含量更高。研究还发现,50%有机肥替代化肥的处理在保证水稻高产稳产的同时,显著增加了水稻氮素的累积量。因此,施用有机肥是提升红壤水稻土氮素水平的有效手段。张国荣等^[29]的研究发现,相比单纯施用化肥,牛粪配施化肥能够显著提高土壤全氮和碱解氮含量,特别是在50%牛粪物料配施时,土壤全氮和碱解氮含量达到最高。

本研究结果表明,由于不同成土母质和土壤肥力水平的差异,在等氮量替代条件下,牛粪施用比例对水稻土碱解氮含量的影响存在明显差异。具体而言,花岗岩风化和砂岩风化物发育的水稻土背景碱解氮含量较高(>240 mg/kg),在等氮量替代条件下,施用较高比例的牛粪有机肥(如T5处理)

有助于显著提高碱解氮的累积。这表明，较高比例的牛粪施用能够更有效地提升这些土壤类型中的碱解氮含量。然而，在石灰岩风化物、第四纪红色粘土和紫色砂砾岩发育的水稻土中，碱解氮的背景值较低 ($< 180 \text{ mg/kg}$)。在这些土壤类型中，低比例的牛粪有机肥施用（如 T1 处理）能够显著增加碱解氮的累积。这说明，在氮素背景较低的土壤中，低比例的有机肥配施能够促进土壤氮素的积累。

对于河湖沉积物和板页岩风化物发育的水稻土，这些土壤类型中的碱解氮背景值处于中等水平。在等氮量替代条件下，中等比例的牛粪有机肥（如 T4 处理）更有利于增加碱解氮的累积，特别是板页岩风化物发育的水稻土中，T4 处理的碱解氮含量显著高于其他处理。综上所述，不同成土母质和土壤肥力水平对牛粪有机肥替代化肥的效果产生了显著影响。合理的牛粪有机肥配施比例能够在不同土壤中有效提高土壤的氮素水平，促进土壤肥力的提升，从而为水稻的高产和高效氮素利用奠定基础。

3.3 有机肥替代部分化肥对氮素利用效率的影响

氮肥的施用量和管理对氮素利用效率起着至关重要的作用^[30]。在有机肥与化肥配施的情况下，化肥提供了水稻生长前期所需的速效氮，而有机肥则能够满足水稻生长后期的养分需求，从而提高水稻的氮肥利用率并促进增产。合理的有机肥与化肥配比不仅能增加水稻的氮素积累，还能提高氮素利用效率和氮素偏生产力^[23, 31-32]。已有研究表明，少量的有机肥替代 ($\leq 30\%$) 虽然能提高水稻产量，但不能显著提高籽粒的氮含量；而过量的有机肥替代则对水稻产量和籽粒氮含量的提升效果不明显。因此，有机肥的替代比例应控制在 $30\% \sim 60\%$ ^[12]。王昭等^[7]的研究发现，在等氮量替代条件下，50% 牛粪物料与化肥配施的处理，水稻籽粒产量、籽粒氮素累积量、氮肥农学利用率、氮肥偏生产力和氮肥贡献率均达到最大；而进一步增加牛粪物料比例则会导致这些指标的显著下降。唐丽等^[23]则发现，30% 有机肥替代比例时水稻籽粒氮含量和氮肥利用效率最高，而当有机肥替代比例超过 40% 时，水稻籽粒氮含量显著下降。肖大康等^[15]指出，氮肥有机肥替代比例在 $10\% \sim 30\%$ 时，水稻产量呈现增加趋势；而周江明^[24]则发现，20% 有机肥氮替代化肥氮时，水稻氮素累积量达到最高。周运陆等^[26]的研究表明，25% 有机肥氮替代化肥氮能够显著提高水稻的氮肥农学利用率、水稻吸收利用率、氮肥生理利用率和氮肥偏生产力。

有机肥替代的增产效果主要受管理措施、土壤

因素和气候条件等多方面因素的共同影响，而提升籽粒氮含量的效果则主要受土壤因素的影响^[12]。本研究表明，由于成土母质与土壤理化特性的差异，牛粪施用比例对氮素吸收和利用的影响存在差异。在花岗岩风化物和河湖沉积物发育的水稻土中，T4 处理表现出较高的氮素收获指数、氮素利用效率和氮素偏生产力，同时获得了较高的稻谷产量；在砂岩风化物和紫色砂砾岩发育的水稻土中，T3 和 T4 处理的氮素收获指数、氮素利用效率、氮素偏生产力均高于其他处理，并获得了较高的稻谷产量；在板页岩风化物和石灰岩风化物发育的水稻土中，T1 处理的氮素吸收效率、氮素利用效率和氮肥偏生产力相对较高，也获得了较高的稻谷产量；而在第四纪红色粘土发育的水稻土中，T2 和 T5 处理的氮素收获指数、氮素利用效率和氮肥偏生产力也较高，且产量相对较高。综上所述，不同成土母质和土壤理化性质对牛粪与化肥配施比例对氮素利用效率的影响存在差异。合理的牛粪有机肥与化肥配施比例有助于提高氮素利用效率，促进水稻的高产和高效氮素利用。

4 结论

1) 氮肥有机替代比例应综合考虑土壤条件、施氮水平及有机肥替代对籽粒含氮量的影响。本研究表明，湖南省不同成土母质发育的水稻土在土壤理化特性上存在显著差异，这些差异对水稻产量、土壤氮素积累以及水稻氮素吸收和利用效率的影响也各不相同。

2) 在湖南省主要成土母质发育的典型水稻土中，不同比例的牛粪有机肥配施化肥能够显著影响土壤氮素积累和水稻氮素吸收利用效率，进而影响水稻产量。具体来说，花岗岩风化物、河湖沉积物、紫色砂砾岩发育的水稻土施用 75% 牛粪 + 化肥；砂岩风化物发育的水稻土施用 60% 牛粪 + 化肥；板页岩风化物和石灰岩风化物发育的水稻土施用 30% 牛粪 + 化肥；第四纪红色粘土发育的水稻土施用 50% 或 100% 牛粪 + 化肥的处理效果较为理想。然而，本研究仅基于盆栽试验，适宜牛粪替代化肥的比例仍需通过长期大田试验进一步验证。

3) 根据不同成土母质及土壤理化特性的差异，在水稻推荐施肥量的基础上，配施一定比例的牛粪有机肥可提高水稻产量，减少化学氮肥的施用量。进一步研究不同成土母质水稻土中牛粪有机肥的适宜替代比例、消纳能力及其对土壤 - 作物系统养分吸收与利用的影响机制，有助于为种养结合模式下

养殖废弃物还田利用提供理论支持和实践指导。

参考文献：

- [1] 徐明岗, 邹长明, 秦道珠, 等. 有机无机肥配合施用下的稻田氮素的转化与利用 [J]. 土壤学报, 2002, 39(S1): 147-156.
XU M G, ZHOU C M, QIN D Z, et al. Transformation and utilization on nitrogen in paddy soil under combining application of chemical and organic fertilizers[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(S1): 147-156.
- [2] 唐海明, 李超, 肖小平, 等. 不同有机无机肥氮投入比例对双季水稻生理特性与产量的影响 [J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(6): 149-160.
TANG H M, LI C, XIAO X P, et al. Impacts of different manure and chemical fertilizer N input ratios on physiological characteristics of leaves and yield of rice under double-cropping rice field[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(6): 149-160.
- [3] 唐先干, 秦文婧, 谢金水, 等. 不同比例猪粪有机肥配施对稻穗不同部位氮含量分布的影响 [J]. 南方农业学报, 2018, 49(10): 1940-1945.
TANG X G, QIN W J, XIE J S, et al. Effects of organic pig manure application with different proportions on grain nitrogen contents at different positions of rice spike[J]. Journal of Southern Agriculture, 2018, 49(10): 1940-1945.
- [4] 李燕青, 温延臣, 林治安, 等. 不同有机肥与化肥配施对氮素利用率和土壤肥力的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(10): 1669-1678.
LI Y Q, WEN Y C, LIN Z A, et al. Effect of different organic manures combined with chemical fertilizer on nitrogen use efficiency and soil fertility[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(10): 1669-1678.
- [5] 钱银飞, 邵彩虹, 邱才飞, 等. 猪粪与化肥配施对双季稻产量及氮素吸收利用的影响 [J]. 江西农业学报, 2019, 31(8): 27-34.
QIAN Y F, SHAO C H, QIU C F, et al. Effects of combined application of pig manure and chemical fertilizer on yield and nitrogen uptake and utilization of double cropping rice[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2019, 31(8): 27-34.
- [6] 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.
- [7] 王昭, 王春雪, 祖艳群, 等. 牛粪 - 化肥配施对水稻氮素利用的影响 [J]. 江西农业学报, 2019, 31(10): 70-76.
WANG Z, WANG C X, ZU Y Q, et al. Effects of combined application of cow manure and chemical fertilizer on nitrogen utilization in rice[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2019, 31(10): 70-76.
- [8] 魏静, 郭树芳, 翟丽梅, 等. 有机无机肥配施对水稻氮素利用率与氮流失风险的影响 [J]. 土壤, 2018, 50(5): 874-880.
WEI J, GUO S F, ZHAI L M, et al. Effects of combined application of organic manure and different levels of chemical fertilizers on nitrogen use efficiency and nitrogen loss risk in rice growing system[J]. Soils, 2018, 50(5): 874-880.
- [9] 纪洪亭, 周炜, 郭智, 等. 猪粪有机肥替代化学氮肥对水稻农学效应、安全效应及经济效益影响的综合评价 [J]. 江苏农业学报, 2021, 37(6): 1451-1459.
JI H T, ZHOU W, GUO Z, et al. Comprehensive evaluation for the influence of substituting fertilizer by pig manure on agronomic effect, safety effect and economic benefit of rice[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2021, 37(6): 1451-1459.
- [10] 赵军, 李勇, 冉炜, 等. 有机肥替代部分化肥对稻麦轮作系统产量及土壤微生物区系的影响 [J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(4): 594-602.
ZHAO J, LI Y, RAN W, et al. Effects of organic manure partial substitution for chemical fertilizer on crop yield and soil microbiome in a rice-wheat cropping system[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2016, 39(4): 594-602.
- [11] 刘红江, 蒋华伟, 孙国峰, 等. 有机 - 无机肥不同配施比例对水稻氮素吸收利用率的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2017(5): 61-66.
LIU H J, JIANG H W, SUN G F, et al. Effect of different organic-inorganic fertilizers combination ratio on nitrogen use efficiency of rice[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2017(5): 61-66.
- [12] 任科宇, 陆东明, 邹洪琴, 等. 有机替代对长江流域水稻产量和籽粒含氮量的影响 [J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(4): 716-725.
REN K Y, LU D M, ZOU H Q, et al. Effects of substituting manure for fertilizer on yield and nitrogen content of rice grain in the Yangtze River basin[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2022, 39(4): 716-725.
- [13] 刘立军, 徐伟, 唐成, 等. 土壤背景氮供应对水稻产量和氮肥利用率的影响 [J]. 中国水稻科学, 2005, 19(4): 343-349.
LIU L J, XU W, TANG C, et al. Effect of indigenous nitrogen supply of soil on the grain yield and fertilizer-N use efficiency in rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2005, 19(4): 343-349.
- [14] 何进勤, 雷金银, 桂林国, 等. 不同氮水平及生物有机肥对旱地土壤养分和马铃薯产量及品质的影响 [J]. 江苏农业科学, 2021, 49(10): 191-196.
HE J Q, LEI J Y, GUI L G, et al. Effects of different nitrogen levels and bio-organic fertilizers on dryland soil nutrients and potato yield and quality[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(10): 191-196.
- [15] 肖大康, 丁紫娟, 胡仁, 等. 不同地力水平和施氮量下水稻优质高产的氮肥有机替代比例 [J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(10): 1804-1815.
XIAO D K, DING Z J, HU R, et al. A suitable replacement ratio of organic nitrogen for high rice yield and quality under different soil fertility levels and nitrogen application rates[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(10): 1804-1815.
- [16] 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.
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.
- [17] 于天一, 逢焕成, 唐海明, 等. 不同母质发育的土壤对双季稻产量及养分吸收特性的影响 [J]. 作物学报, 2013, 39(5): 896-904.
YU T Y, PANG H C, TANG H M, et al. Effects of paddy soils from different parent materials on yield and nutrient uptake

- characteristics of double-cropping rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(5): 896-904.
- [18] 徐国伟, 吴长付, 刘辉, 等. 秸秆还田与氮肥管理对水稻养分吸收的影响[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(7): 191-195.
XU G W, WU C F, LIU H, et al. Effects of straw residue return and nitrogen management on nutrient absorption of rice[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(7): 191-195.
- [19] XU Y Z, NIE L X, BURESH R J, et al. Agronomic performance of late-season rice under different tillage, straw, and nitrogen management[J]. *Field Crops Research*, 2010, 115(1): 79-84.
- [20] 殷春渊, 张庆, 魏海燕, 等. 不同产量类型水稻基因型氮素吸收、利用效率的差异[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(1): 39-50.
YIN C Y, ZHANG Q, WEI H Y, et al. Differences in nitrogen absorption and use efficiency in rice genotypes with different yield performance[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(1): 39-50.
- [21] 王朦, 曹国军, 耿玉辉, 等. 吉林省东部氮钾互作对玉米氮素吸收积累的影响[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(1): 70-73.
WANG M, CAO G J, GENG Y H, et al. Effect of nitrogen and potassium interaction on nitrogen absorption and accumulation of maize in eastern Jilin Province[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43(1): 70-73.
- [22] 霍中洋, 姚义, 张洪程, 等. 不同播期直播稻氮素吸收、利用效率的差异[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2012, 33(4): 39-45, 71.
HUO Z Y, YAO Y, ZHANG H C, et al. Differences of nitrogen absorption and utilization efficiency in direct seeding rice with different sowing date[J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2012, 33(4): 39-45, 71.
- [23] 唐丽, 谢勇, 荣湘民, 等. 有机肥不同比例替代化肥氮对水稻产量、氮素吸收与流失风险的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2020, 22(9): 132-142.
TANG L, XIE Y, RONG X M, et al. Effects of different ratios of inorganic-N substituted by manure on rice yield, nitrogen absorption and nitrogen loss risk[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2020, 22(9): 132-142.
- [24] 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.
- [25] 石鑫蕊, 任彬彬, 江琳琳, 等. 有机肥替代部分化肥对水稻光合速率、氮素利用率和产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(1): 154-162.
SHI X R, REN B B, JIANG L L, et al. Effects of organic manure partial substitution for chemical fertilizer on the photosynthetic rate, nitrogen use efficiency and yield of rice[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(1): 154-162.
- [26] 周运陆, 张永发, 陈仕迁, 等. 有机-无机肥配施对水稻氮素吸收利用率的影响[J]. *热带农业科学*, 2021, 41(11): 1-6.
ZHOU Y L, ZHANG Y F, CHEN S Q, et al. Effect of combined application of organic and inorganic fertilizers on nitrogen uptake and utilization efficiency by paddy rice[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2021, 41(11): 1-6.
- [27] 毛伟, 李文西, 赵雨涵, 等. 有机肥替代部分化肥对水稻产量及土壤理化性质的影响[J]. *农学学报*, 2021, 11(8): 32-36.
MAO W, LI W X, ZHAO Y H, et al. Effects of organic fertilizer substitute for chemical fertilizer on rice yield and soil physicochemical properties[J]. *Journal of Agriculture*, 2021, 11(8): 32-36.
- [28] YE L, ZHAO X, BAO E C, et al. Bio-organic fertilizer with reduced rates of chemical fertilization improves soil fertility and enhances tomato yield and quality[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 177.
- [29] 张国荣, 李菊梅, 徐明岗, 等. 长期不同施肥对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(2): 543-551.
ZHANG G R, LI J M, XU M G, et al. Effects of chemical fertilizer and organic manure on rice yield and soil fertility[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(2): 543-551.
- [30] 张发明, 毛昆明, 刘宏斌, 等. 不同量有机肥与化肥配施对水稻氮素吸收利用的影响[J]. *云南农业大学学报(自然科学版)*, 2011, 26(5): 694-699.
ZHANG F M, MAO K M, LIU H B, et al. Effects of the application of different levels manure and fertilizers on nitrogen uptake and utilization of rice[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2011, 26(5): 694-699.
- [31] ZHANG X Y, FANG Q C, ZHANG T, et al. Benefits and trade-offs of replacing synthetic fertilizers by animal manures in crop production in China: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(2): 888-900.
- [32] HAN S, DELGADO-BAQUERIZO M, LUO X S, et al. Soil aggregate size-dependent relationships between microbial functional diversity and multifunctionality[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 154: 108143.

(责任编辑: 孟岑)