

引用格式: 姚权, 唐旭, 肖谋良, 等. 缓释氮肥配施有机肥对稻麦轮作体系作物生长和土壤养分的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(1): 175-184. YAO Quan, TANG Xu, XIAO Mouliang, et al. Effects of slow release nitrogen fertilizer combined with organic fertilizer on crop growth and soil nutrient content in rice-wheat rotation system[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2025, 42(1): 175-184.

缓释氮肥配施有机肥对稻麦轮作体系作物生长和土壤养分的影响

姚权^{1,2}, 唐旭², 肖谋良¹, 姜振辉¹, 吴春艳², 李艳², 尹昌², 李永夫¹

(1. 浙江农林大学 省部共建亚热带森林培育国家重点实验室, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江省农业科学院 环境资源与土壤肥料研究所, 浙江 杭州 310021)

摘要: 【目的】过度使用无机氮肥会导致严重的环境问题。适当减少氮肥并配合有机肥的施用, 不仅可以保持作物产量, 还能确保稻麦轮作体系的长期可持续耕作。【方法】通过田间试验, 以常规施氮量(小麦 *Triticum aestivum* 季 180 kg·hm⁻²、水稻 *Oryza sativa* 季 210 kg·hm⁻²) 为基准, 氮肥种类为缓控释尿素, 设置 4 个处理: 不施氮肥(ck)、常规施氮(N100)、减氮 15% 配施有机肥(MN85)和减氮 30% 配施有机肥(MN70), 明确氮肥减量配施有机肥对稻麦轮作体系作物产量、植株氮和土壤养分的影响。【结果】氮肥增产贡献率为 46.0% (小麦季为 66.2%, 水稻季为 25.8%), 施氮肥显著提高了作物产量 ($P < 0.05$), 尤其是 MN85 处理的作物产量增幅最大。与 N100 相比, MN85 处理的水稻有效穗数提高了 16.8% ($P < 0.05$)。与 MN70 相比, N100 和 MN85 处理的小麦籽粒氮质量分数分别提高了 8.7% 和 9.0% ($P < 0.05$), 秸秆氮质量分数分别提高了 16.6% 和 16.0% ($P < 0.05$)。与 N100 和 MN70 相比, MN85 处理的水稻籽粒吸氮量分别提高了 23.5% 和 19.8% ($P < 0.05$), 秸秆吸氮量分别提高了 25.5% 和 26.6%。施肥处理均导致一部分氮素累积在土壤中, 尤其是减氮配施有机肥处理拥有更多的氮素盈余量。与 N100 相比, 小麦氮肥表现利用率、氮肥农学效率和氮肥偏生产率在 MN85 处理下分别降低了 37.0%、36.4% 和 41.5%, 在 MN70 处理下分别降低了 60.2%、55.1% 和 47.5%; 但水稻季减氮配施有机肥处理的氮素生理效率提高了 30.5%~33.4% ($P < 0.05$), MN85 处理的氮肥农学效率提高了 33.3%。与 N100 相比, 减氮配施有机肥处理的土壤有机质和全氮质量分数分别增加了 12.2%~13.9% 和 10.4%~13.0% ($P < 0.05$); 微生物生物量氮和硝态氮分别增加了 37.9%~42.7% 和 72.2%~107.4% ($P < 0.05$); 而且 MN85 处理的土壤速效钾和有效磷也增加了 45.9% 和 152.0% ($P < 0.05$), 水溶性氮增加了 68.8% ($P < 0.05$)。【结论】缓控释尿素减量 15% 配施有机肥能够提升土壤养分质量分数, 促进作物对氮素的吸收, 从而提高作物产量和氮肥利用效率, 可作为一种有效的氮肥减量增效措施。图 1 表 6 参 40

关键词: 缓释肥料; 氮肥减施; 产量; 氮肥效率; 土壤养分质量分数

中图分类号: S714.8 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)01-0175-10

Effects of slow release nitrogen fertilizer combined with organic fertilizer on crop growth and soil nutrient content in rice-wheat rotation system

YAO Quan^{1,2}, TANG Xu², XIAO Mouliang¹, JIANG Zhenhui¹, WU Chunyan², LI Yan², YIN Chang², LI Yongfu¹

(1. State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China;
2. Institute of Environmental Resources and Soil Fertilizers, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, Zhejiang, China)

收稿日期: 2024-01-28; 修回日期: 2024-09-24

基金项目: 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项项目(2022YFE0127800); 国家自然科学基金资助项目(32271845)

作者简介: 姚权(ORCID: 0009-0003-5097-6220), 从事土壤碳氮循环研究。E-mail: yaoquanzafu@163.com。通信作者: 李永夫(ORCID: 0000-0002-8324-5606), 教授, 博士, 从事土壤碳氮循环研究。E-mail: yongfuli@zafu.edu.cn

Abstract: [Objective] Excessive application of inorganic nitrogen fertilizer could result in severe environmental problems whereas appropriate reduction of nitrogen fertilizer combined with organic fertilizer can avoid the decrease of yield, hence an important way to support the sustainable cultivation of rice-wheat rotation system. [Method] This study, using conventional nitrogen application rate as the standard ($180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ for wheat and $210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ for rice) and with the controlled-release urea as the nitrogen fertilizer, is aimed to clarify the effects of nitrogen reduction combined with organic fertilizer on crop yield, plant nitrogen and soil nutrient content in a rice-wheat rotation system. This field experiment consisted of four treatments: no nitrogen application (ck), conventional nitrogen application (N100), 15% reduction of nitrogen combined with organic fertilizer (MN85), and 30% reduction of nitrogen combined with organic fertilizer (MN70). [Result] Contribution of nitrogen fertilizer to yield increase was 46.0% (wheat 66.2%, rice 25.8%) and nitrogen fertilization significantly increased crop yield ($P < 0.05$), especially in the treatment of 15% nitrogen reduction combined with organic fertilizer. Compared with N100, MN85 treatment significantly increased the effective panicle number of rice by 16.8% while compared with MN70, the nitrogen content in wheat grains in N100 and MN85 treatments increased by 8.7% and 9.0% ($P < 0.05$), and the nitrogen content in straw increased by 16.6% and 16.0%, respectively ($P < 0.05$). Compared with N100 and MN70, the MN85 treatment exhibited a 23.5% and 19.8% increase in nitrogen content of rice grains, and a 25.5% and 26.6% increase in nitrogen content of straw, respectively ($P < 0.05$). Nitrogen fertilizer application resulted in the accumulation of nitrogen in soil, especially in the treatments of reducing nitrogen combined with organic fertilizer, which had more nitrogen surplus. Compared with N100, the N apparent utilization rate (RE), N agronomic efficiency (AE), and N partial production rate (PFP) of wheat decreased by 37.0%, 36.4%, and 41.5% under MN85 treatment, respectively, and decreased by 60.2%, 55.1%, and 47.5% under MN70 treatment, respectively. During the rice planting season, the nitrogen reduction combined with organic fertilizer treatments showed a 30.5% to 33.4% increase ($P < 0.05$) in N physiological efficiency (PE), while the AE of the MN85 treatment increased by 33.3% comparing to the N100 treatment. Compared with N100, the nitrogen reduction combined with organic fertilizer increased soil organic matter and total nitrogen content by 12.2%–13.9% and 10.4%–13.0%, respectively ($P < 0.05$) whereas microbial biomass nitrogen and nitrate nitrogen increased by 37.9%–42.7% and 72.5%–107.9%, respectively ($P < 0.05$). The soil available potassium and available phosphorus in MN85 treatment also increased by 45.9% and 152.0% ($P < 0.05$), while water-soluble nitrogen increased by 68.8% ($P < 0.05$). [Conclusion] A 15% reduction of controlled-release urea combined with organic fertilizer can increase soil nutrient content, promote crop nitrogen absorption, thereby improving crop yield and nitrogen fertilizer utilization efficiency. This approach can serve as an effective measure to reduce nitrogen fertilizer usage while increasing its efficiency. [Ch, 1 fig. 6 tab. 40 ref.]

Key words: slow release fertilizer; nitrogen fertilizer reduction; yield; nitrogen efficiency; soil nutrient content

氮素是植物生长所必需的大量营养元素之一，然而自然环境中的氮素无法满足作物的需求。施用氮肥可以缓解作物生长中的氮限制，是提高作物产量的有效措施。目前中国是世界上最大的氮肥消费国之一，其氮肥投入约占世界总消费量的32%^[1]。长期过量施用氮肥，会导致作物倒伏、产量品质下降等一系列问题^[2-3]，而适当减施氮肥不仅不会影响作物产量，还有助于提高氮肥利用效率，减轻环境负荷，是农业可持续发展的重要举措^[4-6]。但减氮是否可行，取决于减氮量和土壤本身的供氮水平。值得注意的是，即使在高氮水平的稻田中，如果土壤氮素一直处于亏缺状态，短期内减少氮肥可能不会影响作物产量，但随着作物的连续种植，作物产量必然会下降^[5]。

有机肥中富含植物所需的营养物质，增施有机肥可以大幅提高土壤中有机的持续供应能力。然而，由于有机肥中速效养分水平较低且释放速度较慢，单独施用有机肥可能会因为土壤养分供应不足而

导致作物产量降低^[7]。与此同时，适当施用氮肥并配施有机肥可以提高土壤碳氮磷等养分质量分数，从而提高作物产量^[8-9]。可见，有机肥和化肥的配合施用对促进作物生长、提高土壤的氮素供应能力和可持续性生产、改善土壤理化性质和土壤养分状况都具有积极影响^[4]。不同地区的作物产量、土壤肥力和施肥方式等对氮肥配施有机肥的响应存在差异。全国每年的水稻 *Oryza sativa* 和小麦 *Triticum aestivum* 产量约占谷物生产总量的 72%。稻麦轮作是长江中下游地区主要的农田耕作模式之一，对于保障粮食供给和维护粮食安全均具有重大意义^[10]。其季节性的干湿交替导致土壤氧化与还原过程交替进行，影响了土壤养分的转化及其有效性，对肥料的响应在水旱两季存在差异^[11]。因此，在水旱轮作条件下，探讨作物生长和土壤肥力如何响应施肥模式的变化具有重要意义。

缓控释尿素是一种新型肥料，它通过减缓氮肥在土壤中的转化过程和释放速率，使氮素释放与作物需氮同步，从而减少施氮量及施肥次数，降低劳动力成本，实现高产高效的目的^[12]。目前，对于缓控释尿素肥效的研究集中在单独施用或与普通尿素配施，而关于缓控释尿素和有机肥配施条件下对周年轮作作物和土壤肥力的影响报道较少。研究表明：减氮 15%~30% 并不会对作物产量造成影响^[5-6]。因此，本研究以稻麦轮作田为试验区，在缓释氮肥和有机肥配施的条件下，研究不同氮肥减量水平配施有机肥对稻麦轮作体系作物产量、氮素吸收利用以及土壤养分的影响，以为化肥减量和有机肥施用提质增效提供科学依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

浙江省嘉兴市海宁市许村镇杨渡村 (30°26'07"N, 120°24'23"E) 处于浙北平原区，海拔为 3~4 m；气候为北亚热带季风气候，年均气温为 16~17 °C，≥10 °C 的积温为 4 800~5 200 °C，年降水量为 1 500~1 600 mm，无霜期为 240~250 d，年日照时数为 1 900~2 000 h，年太阳辐射量为 100~115 J·cm⁻²。土壤属于水稻土类渗育型水稻土亚类黄松田土属。试验地块农田排灌便利，其耕层土壤 (0~20 cm) 基本理化性状为：容重 0.898 g·cm⁻³、pH 7.17、有机质 35.00 g·kg⁻¹、全氮 1.87 g·kg⁻¹、全磷 0.82 g·kg⁻¹、全钾 14.70 g·kg⁻¹、铵态氮 5.01 mg·kg⁻¹、硝态氮 2.12 mg·kg⁻¹、有效磷 14.10 mg·kg⁻¹ 和速效钾 94.40 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验设置 4 个处理：①对照 (ck)，不施氮肥；②常规施氮 (N100)，当地农户的习惯施肥量，小麦季氮 (N)、磷 (P₂O₅)、钾 (K₂O) 肥用量分别为 180.0、34.5 和 90.0 kg·hm⁻²，水稻季分别为 210.0、40.5 和 90.0 kg·hm⁻²；③无机氮肥减施 15% 并配施有机肥 (MN85)；④无机氮肥减施 30% 并配施有机肥 (MN70)。每个处理重复 3 次，共 12 个小区，每个小区面积为 30 m² (5 m×6 m)，随机区组排列。各处理田块间使用塑料薄膜将田埂包裹住，使其单排单灌，避免串灌串排，试验区域外围设置保护行，保护行种植作物但不施肥，其他田间管理措施一致。

氮肥用缓释尿素 (N 质量分数为 44%，山东多益成肥料农业科技有限公司，释放期 60 d)，磷肥用过磷酸钙 (P₂O₅ 质量分数为 12%)，钾肥用氯化钾 (K₂O 质量分数为 60%)。稻麦两季的有机肥施用量相同，以当地常用的有机肥施用量为依据，均设置为 7 500 kg·hm⁻²，有机肥以猪粪为基质的颗粒有机肥，pH 为 7.60，其养分质量分数分别为：N 1.88%、P₂O₅ 2.07%、K₂O 1.58% 和碳 (C) 32.3%。各处理有机无机养分投入量见表 1。所有肥料均作为基肥在小麦播种或水稻移栽前随翻地一次性施入。

田间管理按当地常规栽培措施进行。小麦于 2021 年 11 月 1 日播种，2022 年 5 月 19 日收获，供试小麦品种为‘浙华 1 号’ ‘Zhehua No.1’，播种密度为 187.5 kg·hm⁻²；水稻于 2022 年 6 月 15 日播种育苗，7 月 6 日进行人工移栽，10 月 27 日收获，供试水稻品种为‘秀水 134’ ‘Xiushui 134’，种植密度为 15×10⁴ 株·hm⁻²。

1.3 样品采集与测定

采用人工收获，作物产量来源于整个小区，小麦收获的同时采集取样框内 (0.5 m²) 的所有植株样品，水稻收获的同时采集有代表性植株样品 10 穴，植株样品除选取部分样品用于室内考种外，其余样品经风干、脱粒后粉碎，用于植株全氮分析。

水稻收获后，利用直径 3.5 cm 的不锈钢土钻采集耕层 (0~20 cm) 土壤样品，每个小区按“梅花型”

表1 施肥处理养分投入量

Table 1 Amount of pure nutrient input in fertilization treatments

项目	处理	氮素投入量/(kg·hm ⁻²)			磷素投入量/(kg·hm ⁻²)			钾素投入量/(kg·hm ⁻²)		
		有机	无机	合计	有机	无机	合计	有机	无机	合计
小麦	ck	0	0	0	0	34.50	34.50	0	90.00	90.00
	N100	0	180.00	180.00	0	34.50	34.50	0	90.00	90.00
	MN85	141.00	153.00	294.00	155.25	34.50	189.75	118.50	90.00	208.50
	MN70	141.00	126.00	267.00	155.25	34.50	189.75	118.50	90.00	208.50
水稻	ck	0	0	0	0	40.50	40.50	0	90.00	90.00
	N100	0	210.00	210.00	0	40.50	40.50	0	90.00	90.00
	MN85	141.00	178.50	319.50	155.25	40.50	195.75	118.50	90.00	208.50
	MN70	141.00	147.00	288.00	155.25	40.50	195.75	118.50	90.00	208.50
总计	ck	0	0	0	0	75.00	75.00	0	180.00	180.00
	N100	0	390.00	390.00	0	75.00	75.00	0	180.00	180.00
	MN85	282.00	331.50	613.50	310.50	75.00	385.50	237.00	180.00	417.00
	MN70	282.00	273.00	555.00	310.50	75.00	385.50	237.00	180.00	417.00

采集5个点,混匀后,将其分成2份,一份过2.000 mm筛后,用作土壤微生物生物量氮、水溶性氮、铵态氮和硝态氮的测定;另一份在室内风干,分别过2.000和0.149 mm筛后用于土壤养分分析。

1.4 指标测定

根据鲁如坤^[13]的土壤农业化学分析方法,容重采用环刀法测定,pH采用电位法(土水质量体积比为1.0:2.5),有机质采用重铬酸钾外加热法测定,土壤全钾和全磷使用氢氧化钠熔融后分别采用火焰光度计和钼锑抗比色法测定,速效钾用乙酸铵浸提后采用火焰光度计测定,有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定,硝态氮采用双波长紫外分光光度法测定,铵态氮采用靛酚蓝比色法测定,土壤水溶性氮和微生物生物量氮分别采用去离子水浸提和氯仿熏蒸-硫酸钾浸提后,使用总有机碳(TOC)分析仪测定,植株全氮质量分数使用元素分析仪测定。

参照QIAO等^[14]的方法计算作物吸氮量、氮肥表观利用率(%)、氮肥农学效率(kg·kg⁻¹)、氮肥偏生产率(kg·kg⁻¹)、氮素内部效率(kg·kg⁻¹)和氮素生理效率(kg·kg⁻¹)。作物收获指数=籽粒产量/(籽粒产量+秸秆产量)×100;作物地上部吸氮量=(籽粒产量×籽粒氮质量分数+秸秆产量×秸秆氮质量分数)/1000;氮肥表观利用率=(U_N-U_0)/ F_N ×100;氮肥农学效率=(Y_N-Y_0)/ F_N ;氮素内部效率= Y_N/U_N ;氮肥偏生产率= Y_N/F_N ;氮素生理效率=(Y_N-Y_0)/(U_N-U_0)。其中: U_N 指施氮肥处理的作物地上部吸氮量; U_0 指不施氮肥处理的作物地上部吸氮量; F_N 指施氮量; Y_N 指施氮肥处理的作物产量; Y_0 指不施氮肥处理的作物产量。

1.5 数据处理与分析

使用Excel整理数据,SPSS 22.0对数据进行统计分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验模型,各处理间的显著性使用新复极差法(Duncan)分析。同时使用Origin 2019绘图。

2 结果与分析

2.1 作物籽粒产量及其构成因素

不施氮肥处理周年轮作体系作物产量为7945 kg·hm⁻²(小麦1439 kg·hm⁻²、水稻6506 kg·hm⁻²)(图1),占常规施氮处理(N100)的54.0%(小麦和水稻分别占33.8%和74.2%),这说明在本试验条件下的氮肥增产贡献率为46.0%(小麦季66.2%、水稻季25.8%)。与ck相比,施用氮肥处理下小麦和水稻产量分别提高了176.4%和50.5%($P<0.05$)。无论是小麦还是水稻,MN85处理的产量均最高。尽管施氮处理间小麦产量差异不显著,但与N100相比,MN85处理的水稻产量提高了26.8%($P<0.05$)。这说明在本研究条件下MN85处理能提高作物产量,稻季增产效果更好。

在小麦种植季,作物收获指数无显著差异(表2);在水稻种植季,ck处理的水稻收获指数最高,为

53.20%，比 MN70 处理的高了 5.02% ($P < 0.05$)；与 N100 相比，减氮配施有机肥处理的收获指数无显著差异。无论是小麦还是水稻，ck 处理的有效穗均最低，分别只有 219 和 134 万个· hm^{-2} 。MN85 处理的有效穗高于 N100 和 MN70，尤其是在水稻季，相比 N100，MN85 处理使有效穗提高了 16.8% ($P < 0.05$)。与有效穗变化规律相似，ck 处理的千粒重和穗粒数均最低。水稻千粒重和穗粒数在施肥处理间无显著差异。

2.2 地上部氮质量分数和吸氮量

施氮肥提高了作物中氮质量分数(籽粒和秸秆)(表 3)。与 ck 相比，施氮处理的水稻籽粒和秸秆氮质量分数分别提高了 11.3%~15.3% 和 46.3%~73.3% ($P < 0.05$)。与 N100 和 MN85 处理相比，MN70 处理显著降低了小麦籽粒和秸秆氮质量分数 ($P < 0.05$)。

表 2 减氮配施有机肥对作物构成因素的影响

Table 2 Effect of nitrogen reduction combined with organic fertilizer on crop composition

作物	处理	收获指数/%	有效穗/ (万个· hm^{-2})	千粒重/g	穗粒数/粒
小麦	ck	48.06±2.61 a	219±70 b	41.35±2.35 b	22±6 b
	N100	50.35±0.77 a	306±90 a	45.09±0.93 a	38±3 a
	MN85	50.09±2.50 a	325±107 a	45.48±2.28 a	41±8 a
	MN70	48.90±1.64 a	281±43 a	45.42±0.41 a	40±11 a
水稻	ck	53.20±2.52 a	134±3 c	20.80±0.42 a	207±28 a
	N100	49.32±0.26 ab	196±27 b	20.95±0.56 a	233±5 a
	MN85	50.07±0.76 ab	229±36 a	21.03±0.78 a	230±3 a
	MN70	48.18±1.12 b	213±25 ab	21.65±0.60 a	213±21 a

说明：数值为平均值±标准差。不同小写字母表示同一指标相同作物在不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

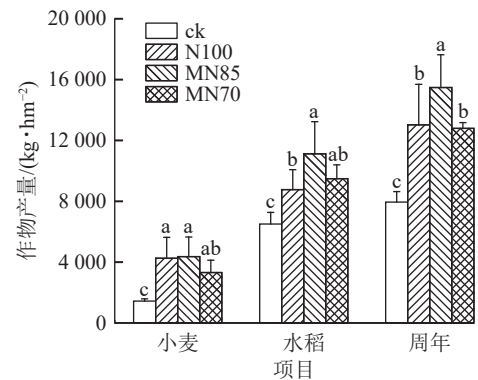
与植株氮质量分数变化趋势相似，施氮肥促进了作物对氮的吸收(表 3)。在小麦季，施氮处理下籽粒和秸秆吸氮量分别比 ck 提高了 11.3%~15.3% 和 46.3%~73.3% ($P < 0.05$)；与 N100 处理相比，减氮配施有机肥处理的籽粒和秸秆吸氮量无显著差异。在水稻季，MN85 处理下籽粒和秸秆吸氮量比其他处理提高了 19.8%~93.7% 和 25.5%~234.7% ($P < 0.05$)。

此外，小麦吸收的 86.4% 氮和水稻吸收的 66.1% 氮被储存在籽粒中，而秸秆还田只能将 13.6% 和 33.9% 的氮素重新归还到土壤中(表 3)。

2.3 氮素表观平衡和氮素利用效率

从表 4 可见：不施氮处理土壤周年氮素亏缺 114.63 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (小麦季 27.66 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，水稻季 86.97 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)，水稻种植过程中土壤氮素亏损更严重。施氮能有效缓解氮素亏缺，甚至出现盈余，尤其在增施有机肥的 MN85 和 MN70 处理中，周年氮素盈余量比单施无机肥的(138.04 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 分别提高了 182.64 和 188.36 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

小麦在所有处理中，N100 处理下氮肥表观利用率、氮肥农学效率和氮肥偏生产率均最高。配施有机肥的处理间氮素生理效率和内部效率没有显著变化。施氮处理下小麦氮素内部效率为 47.27~51.24 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，平均为 48.58 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，说明在施氮肥条件下每生产 100.00 kg 小麦籽粒，需要吸收氮



ck. 不施氮肥处理；N100. 常规施氮处理；MN75. 减氮 15% 配施有机肥处理；MN70. 减氮 30% 配施有机肥处理。不同字母表示同一项目不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 1 减氮配施有机肥对作物籽粒产量的影响

Figure 1 Effect of nitrogen reduction combined with organic fertilizer on crop yields

表 3 减氮配施有机肥对作物氮质量分数和吸氮量的影响

Table 3 Effect of nitrogen reduction combined with organic fertilizer on crop nitrogen content and uptake

作物	处理	氮质量分数/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)		吸氮量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	
		籽粒	秸秆	籽粒	秸秆
小麦	ck	16.54±0.56 b	2.43±0.11 b	23.84±3.09 b	3.81±0.78 b
	N100	18.42±1.67 a	2.89±0.29 a	78.93±16.10 a	12.29±2.85 a
	MN85	18.47±2.11 a	2.88±0.38 a	80.23±22.90 a	12.85±5.60 a
	MN70	16.94±0.80 b	2.48±0.11 b	56.54±15.30 ab	8.63±2.44 ab
水稻	ck	9.97±0.46 b	3.89±0.61 b	64.77±6.87 c	22.20±3.89 c
	N100	11.49±1.07 a	6.52±1.27 a	101.58±22.90 b	59.17±16.60 b
	MN85	11.27±0.25 a	6.74±0.25 a	125.47±25.20 a	74.27±9.84 a
	MN70	11.06±0.26 a	5.69±0.74 a	104.74±7.83 b	58.68±14.80 b

说明：数值为平均值±标准差。不同小写字母表示同一指标相同作物在不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.06 kg。施氮处理的氮肥偏生产率为 12.40~23.64 kg·kg⁻¹，平均为 16.96 kg·kg⁻¹，与 N100 处理相比，MN85 和 MN70 处理的氮肥偏生产率分别降低了 59.5% 和 90.3% ($P<0.05$)。

水稻在所有处理中，MN85 处理下氮肥表观利用率为 35.3%，比 MN70 处理提高了 33.2% ($P<0.05$)。与 N100 相比，MN85 和 MN70 处理的氮素生理效率分别提高了 33.2% 和 30.2% ($P<0.05$)。在 3 个施氮处理中，MN85 处理的氮肥农学效率最高，分别比 N100 和 MN70 处理提高了 33.3% 和 39.8% ($P<0.05$)。ck 处理的水稻氮素内部效率最高，比施氮处理显著提高了 32.8% (28.7%~35.0%)。施氮处理间水稻氮素内部效率为 55.51~58.20 kg·kg⁻¹，说明在施氮肥条件下每生产 100.00 kg 籽粒，需要水稻吸收氮 1.83 kg。同样，施氮处理间氮肥偏生产率也没有显著差异。

周年轮作的氮肥效率中，N100 处理的氮肥表观利用率、氮肥偏生产率分别比 MN85 和 MN70 处理提高了 21.4%、32.5% 和 71.7%、44.6% ($P<0.05$)。与 N100 处理相比，减氮配施有机肥处理的氮肥生理效率提高了 11.1%~12.1%。MN70 处理的氮肥农学效率最低，分别比 N100 和 MN85 处理降低了 32.9% 和 28.9% ($P<0.05$)。与 ck 处理相比，施氮处理使内部利用效率降低了 19.2%~24.2% ($P<0.05$)，而不同施氮处理间没有显著差异。

表 4 减氮配施有机肥对氮素表观平衡和利用效率的影响

Table 4 Effect of nitrogen reduction combined with organic fertilizer on nitrogen apparent balance and use efficiency

项目	处理	氮输出/ (kg·hm ⁻²)	氮投入/ (kg·hm ⁻²)	氮素表观平衡/ (kg·hm ⁻²)	氮肥表观利 用率/%	氮素生理效率/ (kg·kg ⁻¹)	氮肥农学效率/ (kg·kg ⁻¹)	氮素内部效率/ (kg·kg ⁻¹)	氮肥偏生产率/ (kg·kg ⁻¹)
小麦	ck	27.66	0	-27.66	-	-	-	52.22±2.47 a	-
	N100	91.21	180.00	88.79	35.31±10.40 a	45.54±6.35 a	15.64±7.64 a	47.27±4.59 a	23.64±7.64 a
	MN85	93.07	294.00	200.93	22.25±9.67 b	45.33±7.88 a	9.95±4.39 b	47.24±5.30 a	14.84±4.39 b
	MN70	65.17	267.00	201.83	14.05±6.82 b	51.44±5.22 a	7.02±3.03 b	51.24±2.42 a	12.40±3.03 b
水稻	ck	86.97	0	-86.97	-	-	-	74.90±6.72 a	-
	N100	160.75	210.00	49.25	35.14±18.11 a	29.75±7.07 b	10.78±6.23 b	55.51±6.64 b	41.76±6.23 a
	MN85	199.74	319.50	119.76	35.30±10.86 a	39.70±5.90 a	14.44±6.63 a	55.56±0.89 b	34.80±6.63 a
	MN70	163.42	288.00	124.58	26.55±7.57 b	38.82±3.35 a	10.34±3.17 b	58.22±2.51 b	32.93±3.17 a
周年	ck	114.63	0	-114.62	-	-	-	69.27±4.60 a	-
	N100	251.96	390.00	138.04	35.22±14.54 a	37.91±4.56 b	13.02±4.62 a	52.50±5.69 b	33.39±4.62 a
	MN85	292.82	613.50	320.68	29.05±7.43 b	42.05±1.59 a	12.29±3.51 a	52.97±1.10 b	25.23±3.51 b
	MN70	228.60	555.00	326.40	20.54±1.00 b	42.54±1.91 a	8.74±0.69 b	55.97±0.88 b	23.05±0.69 b

说明：数值为平均值±标准差。-表示无数据。不同小写字母表示同一指标相同项目在不同处理间差异显著($P<0.05$)。

2.4 土壤理化性质

由表 5 可见：土壤 pH 为 7.14~7.16，平均为 7.14，均为中性，处理间无显著差异。减氮配施有机肥处理的土壤容重有变小的趋势，但处理间差异不显著。MN85 处理的速效钾和有效磷质量分数显著高于其他 3 个处理 ($P<0.05$)，而其他处理间没有显著差异。与 N100 相比，配施有机肥使土壤有机质和全氮质量分数显著提高 ($P<0.05$)。

表 5 减氮配施有机肥对土壤理化性质的影响

Table 5 Effect of nitrogen reduction combined with organic fertilizer on soil physical and chemical properties

处理	pH	容重/ (g·cm ⁻³)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)
ck	7.16±0.08 a	0.859±0.064 a	65.96±1.44 b	8.35±1.93 b	34.01±0.56 b	1.90±0.07 b
N100	7.14±0.16 a	0.857±0.034 a	64.40±6.84 b	7.96±2.60 b	35.01±1.67 b	2.02±0.02 b
MN85	7.14±0.08 a	0.851±0.024 a	93.94±19.46 a	20.06±9.54 a	39.29±1.99 a	2.29±0.13 a
MN70	7.15±0.07 a	0.844±0.040 a	76.81±10.99 b	12.39±2.74 b	39.89±2.54 a	2.23±0.13 a

说明：数值为平均值±标准差。不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

2.5 土壤活性氮

由表 6 可见：施氮处理提高了土壤中微生物生物量氮、水溶性氮、铵态氮和硝态氮质量分数，尤其是在氮肥减量配施有机肥的处理中增幅更大。其中，MN85 处理的土壤微生物生物量氮、水溶性氮和硝态氮质量分数最高，分别比 N100 处理提高了 42.7%、68.8% 和 107.4% ($P < 0.05$)。此外，与 N100 相比，MN70 处理的土壤微生物生物量氮和硝态氮质量分数也提高了 37.9% 和 72.2% ($P < 0.05$)。

表 6 减氮配施有机肥对土壤活性氮质量分数的影响

Table 6 Effect of nitrogen reduction combined with organic fertilizer on soil active nitrogen

处理	微生物生物量氮/(mg·kg ⁻¹)	水溶性氮/(mg·kg ⁻¹)	铵态氮/(mg·kg ⁻¹)	硝态氮/(mg·kg ⁻¹)
ck	9.98±3.27 b	6.57±0.67 c	4.99±0.61 a	1.99±0.29 c
N100	10.26±1.18 b	7.41±3.06 bc	5.09±1.33 a	3.09±1.13 b
MN85	14.74±4.13 a	12.51±4.53 a	6.24±0.77 a	6.41±2.08 a
MN70	14.17±4.56 a	10.76±4.35 ab	5.37±1.29 a	5.32±3.22 a

3 讨论

3.1 缓释氮肥减量配施有机肥对土壤肥力的影响

施用有机肥可以改善土壤结构，促进团粒结构的形成，为土壤微生物的活动提供能量，提高土壤微生物的活性和养分供应能力^[15]。有研究指出：有机无机配施能够显著提高土壤中的有机质、全氮等质量分数^[16-18]。在本研究中，缓释氮肥减量配施有机肥能提高土壤的有机质、全氮、速效钾和有效磷质量分数，这是由于有机肥中可利用的养分直接或间接地刺激了微生物的活动，加速有机质分解为土壤有效养分^[19]。此外，施入的无机氮会改善土壤氮素的供给水平，降低土壤中的碳氮比，这更有利于微生物的增殖和土壤中可溶性物质的转化，从而增强了土壤中养分的可利用性，提升了土壤中速效养分的质量分数^[20]。LAN 等^[21]研究表明：配施有机肥增加了土壤有机质和全氮质量分数，并且提高了氮利用率。因此，减氮配施有机肥不仅可以提高土壤碳、氮、磷、钾质量分数，同时也能保持较高水平的作物产量。

土壤微生物生物量氮是土壤活性氮的重要储备库，是植物氮营养的重要来源，是评估土壤活性氮分库的重要指标^[22-23]。在本研究中，减氮配施有机肥增加了土壤微生物生物量氮、水溶性氮和硝态氮质量分数。可能是施加有机肥改善了土壤结构，且有机肥中的有效养分可以激活微生物活性，引起激发效应，从而促进土壤中有机氮的释放^[24]，因此，土壤水溶性氮和硝态氮质量分数随之提高，这些速效氮可以直接被作物吸收利用，有利于作物的生长发育^[25-26]。此外，有机肥可以通过吸附土壤中的氮，减少氮淋溶，增加氮矿化，对提高土壤氮质量分数和有效性具有积极作用^[27-28]。有机肥中的氮主要以有机氮的形态存在，速效氮质量分数较低，并且有机肥的种类和施用量、试验时间、土壤性质甚至气候等因素都会影响研究结果^[29]。因此，土壤氮对缓释氮肥减量配施有机肥的响应仍需进一步监测。

3.2 缓释氮肥减量配施有机肥对作物产量的影响

在本研究中，与常规施氮处理的作物产量相比，减氮配施有机肥处理使水稻增产 8.2%~26.8%，但减氮 30% 配施有机肥处理的小麦产量比常规施氮处理的降低了 28.5%，这可能是因为减氮 30% 所供应的速效养分较少，小麦季有机肥分解所提供的养分不能满足小麦生长所需^[30-31]。而在水稻种植期间，由于有机肥经过较长时间转化，土壤中积累的养分可以补足由于减氮处理而缺少的速效养分，使得养分供应可以满足水稻生长的需求^[32-33]。以往研究表明：有机氮肥占比大于 30% 时，作物产量基本呈下降趋势^[34]。而 DAI 等^[35]的长期研究表明：有机氮肥占比较高的处理反而提高了作物产量，可能是因为有机肥改良土壤是一个长期的工程，随着种植年限的增长，有机肥发挥的作用越强，对作物的增产效果越明显^[36]。

3.3 缓释氮肥减量配施有机肥对作物氮素吸收和利用的影响

在本研究中，无机肥比例为 85% 的处理中，作物地上部吸氮量最高；随着无机肥比例降到 70% 时，作物地上部吸氮量也随之降低。这可能是因为随着减氮比例的提高，土壤中的速效氮质量分数就会降低，从而影响作物生长，导致吸氮量下降^[6]。不同施氮处理均有较多氮素盈余，尤其是 2 个配施有机肥处理，且减氮 30% 配施有机肥处理中的氮素盈余更多，这主要是因为速效氮肥减少，而配施有机肥中氮的有效性较低，释放缓慢，大部分氮素以有机氮形态留存于土壤^[37]，使得土壤中有了更多的氮素盈余。而在养分充足的情况下，作物可以将吸收的养分分配至其他部分，提高作物地上部整体的氮素积累量，作物产量也不会减少，从而保证作物的正常发育^[38]。因此，不施氮肥处理的氮素内部利用率比施氮处理提高了 23.8%~32.0%，尤其是在水稻季。这可能是由于不施氮肥处理土壤中氮供应不足，作物

可吸收的氮较少,使不施氮肥处理的作物吸氮量较低,为了保障作物生殖生长,需要相对比例的氮素转移到籽粒中^[39]。因此,较低的地上部氮素积累量往往会导致较高的氮素内部利用率^[6]。

在本研究中,小麦减氮配施有机肥处理的氮素表观利用率、氮肥农学效率和氮肥偏生产率均低于单施化肥处理,尤其是减氮30%配施有机肥的处理。但是水稻减氮15%配施有机肥处理的氮素表观利用率、氮素生理效率和氮素农学效率要高于单施化肥处理。这是由于速效氮质量分数减少,有机肥中氮的有效性较低,再加上小麦种植季气温较低,微生物活性降低,分解能力减弱,使可供小麦吸收的氮始终处于较低水平,进而出现施用有机肥处理的小麦吸氮量处于较低水平^[40]。在水稻种植季,气温较高,微生物活性增强,有机氮分解较快,氮素吸收利用的水平较高,且无机氮减量较少的情况下(减氮15%),速效氮养分能充分满足水稻对氮的生长需求,进而提高了水稻的产量和吸氮量,从而获得较高的利用效率^[32]。综上所述,缓释氮肥减量配施有机肥增强了氮素的利用效率,尤其是减氮15%配施有机肥处理。

4 结论

施用有机肥对于提升土壤养分质量分数作用显著,缓释氮肥减量配施有机肥的土壤有机质、全氮、水溶性氮和硝态氮均显著提高。并且缓释氮肥减量配施有机肥增强了作物对氮素的吸收能力,从而提高了作物产量和吸氮量,提高了氮素的利用效率,尤其是缓释氮肥减量15%配施有机肥,对作物产量和氮素吸收的提升最为显著。此外,使用缓释肥料还可以通过减少肥料使用量和施用次数来降低生产成本和人工成本。因此,合理的施用缓释氮肥,通过化肥减量配施有机肥的方式,可以提高土壤肥力,促进粮食增收增产。

5 参考文献

- [1] DHILLON A K, SHARMA N, DOSANJH N K, *et al.* Variation in the nutritional quality of rice straw and grain in response to different nitrogen levels [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2018, **41**(15): 1946–1956.
- [2] GIL-ORTIZ R, NARANJO M A, RUIZ-NAVARRO A, *et al.* Enhanced agronomic efficiency using a new controlled-released, polymeric-coated nitrogen fertilizer in rice [J/OL]. *Plants*, 2020, **9**(9): 1183 [2024-01-10]. DOI: [10.3390/plants9091183](https://doi.org/10.3390/plants9091183).
- [3] HUANG Jing, DUAN Yinghua, XU Minggang, *et al.* Nitrogen mobility, ammonia volatilization, and estimated leaching loss from long-term manure incorporation in red soil [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, **16**(9): 2082–2092.
- [4] ZHAO Yanhui, XIONG Xiong, WU Chenxi. Effects of deep placement of fertilizer on periphytic biofilm development and nitrogen cycling in paddy systems [J]. *Pedosphere*, 2021, **31**(1): 125–133.
- [5] NING Chuanchuan, LIU Rui, KUANG Xizhi, *et al.* Nitrogen fertilizer reduction combined with biochar application maintain the yield and nitrogen supply of rice but improve the nitrogen use efficiency [J/OL]. *Agronomy*, 2022, **12**(12): 3039 [2024-01-10]. DOI: [10.3390/agronomy12123039](https://doi.org/10.3390/agronomy12123039).
- [6] 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 Yanqing, WEN Yanchen, LIN Zhi'an, *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.
- [7] HOU Qiong, NI Yuemin, HUANG Shan, *et al.* Effects of substituting chemical fertilizers with manure on rice yield and soil labile nitrogen in paddy fields of China: a meta-analysis [J]. *Pedosphere*, 2023, **33**(1): 172–184.
- [8] 柴健, 于爱忠, 李悦, 等. 绿肥还田量结合氮肥减施对绿洲灌区小麦产量和氮素吸收利用的影响[J]. *作物学报*, 2023, **49**(11): 3131–3140.
CHAI Jian, YU Aizhong, LI Yue, *et al.* Effects of green manure incorporation combined with nitrogen fertilizer reduction on wheat yield and nitrogen utilization in oasis irrigated area [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, **49**(11): 3131–3140.
- [9] CHEN Danmei, YUAN Ling, LIU Yiren, *et al.* Long-term application of manures plus chemical fertilizers sustained high rice yield and improved soil chemical and bacterial properties [J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, **90**: 34–42.
- [10] DONG Wenyi, ZHANG Xinyu, DAI Xiaoqin, *et al.* Changes in soil microbial community composition in response to fertilization of paddy soils in subtropical China [J]. *Applied Soil Ecology*, 2014, **84**: 140–147.
- [11] ZHANG Shijie, ZHANG Gang, WANG Dejian, *et al.* Investigation into runoff nitrogen loss variations due to different crop

- residue retention modes and nitrogen fertilizer rates in rice-wheat cropping systems [J/OL]. *Agricultural Water Management*, 2021, **247**: 106729[2024-01-10]. DOI: [10.1016/j.agwat.2020.106729](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106729).
- [12] 许仙菊, 马洪波, 宁运旺, 等. 缓释氮肥运筹对稻麦轮作周年作物产量和氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, **22**(2): 307–316.
- XU Xianju, MA Hongbo, NING Yunwang, *et al.* Effects of slow-released nitrogen fertilizers with different application patterns on crop yields and nitrogen fertilizer use efficiency in rice-wheat rotation system [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, **22**(2): 307–316.
- [13] 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 Rukun. *The Analysis Method of Soil Agricultural Chemistry* [M]. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 2000.
- [14] QIAO Jun, YANG Linzhang, YANA Tingmei, *et al.* Nitrogen fertilizer reduction in rice production for two consecutive years in the Taihu Lake area [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, **146**: 103–112.
- [15] MUHAMMAD Y N, ZHANG Jianwei, ZHOU Yan, *et al.* Quantifying the impact of reduced nitrogen rates on grain yield and nitrogen use efficiency in the wheat and rice rotation system of the yangtze river region [J/OL]. *Agronomy*, 2022, **12**(4): 920[2024-01-10]. DOI: [10.3390/agronomy12040920](https://doi.org/10.3390/agronomy12040920).
- [16] LI Peipei, HAN Yanlai, HE Jizheng, *et al.* Soil aggregate size and long-term fertilization effects on the function and community of ammonia oxidizers [J]. *Geoderma*, 2019, **338**: 107–117.
- [17] SHAHID M, NAYAK A K, PUREE C, *et al.* Carbon and nitrogen fractions and stocks under 41 years of chemical and organic fertilization in a sub-humid tropical rice soil [J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, **170**: 136–146.
- [18] HAN Zhe, DI Chengqian, RAHMAN M K U, *et al.* Repeated application of rice straw stabilizes soil bacterial community composition and inhibits clubroot disease [J/OL]. *Agriculture*, 2021, **11**(2): 108[2024-01-10]. DOI: [10.3390/agriculture11020108](https://doi.org/10.3390/agriculture11020108).
- [19] 杨艳华, 苏瑶, 何振超, 等. 还田秸秆碳在土壤中的转化分配及对土壤有机碳库影响的研究进展[J]. 应用生态学报, 2019, **30**(2): 668–676.
- YANG Yanhua, SU Yao, HE Zhenchao, *et al.* Transformation and distribution of straw-derived carbon in soil and the effects on soil organic carbon pool: a review [J]. *China Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(2): 668–676.
- [20] 胡宏祥, 汪玉芳, 陈祝, 等. 秸秆还田配施化肥对黄褐土氮磷淋失的影响[J]. 水土保持学报, 2015, **29**(5): 101–105.
- HU Hongxiang, WANG Yufang, CHEN Zhu, *et al.* Effects of straw return with chemical fertilizer on nitrogen and phosphorus leaching from yellow cinnamon soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, **29**(5): 101–105.
- [21] LAN Ting, XIE Nan, CHEN Cheng, *et al.* Effects of biological nitrification inhibitor in regulating NH₃ volatilization and fertilizer nitrogen recovery efficiency in soils under rice cropping [J/OL]. *Science of the Total Environment*, 2022, **838**(1): 155857[2024-01-10]. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2022.155857](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155857).
- [22] 潘丽霞, 姜振辉, 张雯怡, 等. 秸秆及其生物质炭输入对毛竹林土壤氨氧化微生物与氮循环相关酶活性的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2024, **41**(1): 1–11.
- PAN Lixia, JIANG Zhenhui, ZHANG Wenyi, *et al.* Effects of straw and its biochar application on soil ammonia-oxidizing microorganisms and N cycling related enzyme activities in a *Phyllostachys edulis* forest [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, **41**(1): 1–11.
- [23] 张闻汉, 陈照明, 张金萍, 等. 硝化抑制剂对稻田土壤氧化亚氮排放及硝化作用的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2023, **40**(4): 820–827.
- ZHANG Wenhan, CHEN Zhaoming, ZHANG Jinping, *et al.* Effects of nitrification inhibitors on soil N₂O emission and nitrification in a paddy soil [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, **40**(4): 820–827.
- [24] 史登林, 王小利, 刘安凯, 等. 生物炭氮替代部分化肥氮对黄壤水稻的生物效应[J]. 中国土壤与肥料, 2021(2): 199–205.
- SHI Denglin, WANG Xiaoli, LIU Ankai, *et al.* Biological effects of biochar nitrogen replacing partial fertilizer nitrogen on rice in yellow soil [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(2): 199–205.
- [25] 左婷, 王新霞, 侯琼, 等. 稻-麦轮作条件下不同施肥模式土壤水溶性氮的变化与籽粒产量的关系[J]. 中国土壤与肥料, 2021(6): 112–119.
- ZUO Ting, WANG Xinxia, HOU Qiong, *et al.* Variety of soil water-soluble nitrogen as affected by different fertilization and

- its relation to grain yields with a rice-wheat rotation [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(6): 112–119.
- [26] 张祥明, 孙义祥, 王文军, 等. 有机肥部分替代化肥对水稻土壤供氮特征和氮素表观盈亏的影响[J]. *农学学报*, 2018, 8(12): 28–34.
ZHANG Xiangming, SUN Yixiang, WANG Wenjun, *et al.* Organic manure partial replacing chemical fertilizer: effect on supply ability and apparent budget of rice soil nitrogen [J]. *Journal of Agriculture*, 2018, 8(12): 28–34.
- [27] LUO Chaoyi, JIANG Jingjing, CHEN Wen, *et al.* Effect of biochar on soil properties on the Loess Plateau: results from field experiments [J/OL]. *Geoderma*, 2020, 369: 114323 [2024-01-10]. DOI: 10.1016/j.geoderma.2020.114323.
- [28] MALINSKA K, ZABOCHNICKA-SWIATEK M, DACH J. Effects of biochar amendment on ammonia emission during composting of sewage sludge [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 71: 474–478.
- [29] LIU Zunqi, HE Tianyi, CAO Ting, *et al.* Effects of biochar application on nitrogen leaching, ammonia volatilization and nitrogen use efficiency in two distinct soils [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2017, 17: 515–528.
- [30] MAJOR J, RONDON M, MOLINA D, *et al.* Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol [J]. *Plant and Soil*, 2010, 333: 117–128.
- [31] 杨利, 张建峰, 张富林, 等. 长江中下游地区氮肥减施对稻麦轮作体系作物氮吸收、利用与氮素平衡的影响[J]. *西南农业学报*, 2013, 26(1): 195–202.
YANG Li, ZHANG Jianfeng, ZHANG Fulin, *et al.* Effects of reducing N application on crop N uptake' utilization and soil N balance under rice-wheat rotation system on middle and lower reaches of Yangtze River Region [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 26(1): 195–202.
- [32] ZHOU Chunhuo, ZHAO Zunkang, PAN Xiaohua, *et al.* Integration of growing milk vetch in winter and reducing nitrogen fertilizer application can improve rice yield in double-rice cropping system [J]. *Rice Science*, 2016, 23(3): 132–143.
- [33] HUANG Min, FAN Long, CHEN Jiana, *et al.* Continuous applications of biochar to rice: effects on nitrogen uptake and utilization [J/OL]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 11461 [2024-01-10]. DOI: 10.1038/s41598-018-29877-7.
- [34] SONG Weifeng, SHU Aiping, LIU Jia, *et al.* Effects of long-term fertilization with different substitution ratios of organic fertilizer on paddy soil [J]. *Pedosphere*, 2022, 32(4): 637–648.
- [35] DAI Xianglin, SONG Dali, ZHOU Wei, *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/OL]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 205: 104753 [2024-01-10]. DOI: 10.1016/j.still.2020.104753.
- [36] GAI Xiapu, LIU Hongbin, LIU Jian, *et al.* Long-term benefits of combining chemical fertilizer and manure applications on crop yields and soil carbon and nitrogen stocks in North China Plain [J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 208: 384–392.
- [37] 孟琳, 张小莉, 蒋小芳, 等. 有机肥料氮替代部分无机氮对水稻产量的影响及替代率研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(2): 290–296.
MENG Lin, ZHANG Xiaoli, JIANG Xiaofang, *et al.* Effects of partial mineral nitrogen substitution by organic fertilizer nitrogen on the yields of rice grains and its proper substitution rate [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(2): 290–296.
- [38] 刘彦伶, 李渝, 张雅蓉, 等. 西南黄壤性水稻土长期不同施肥模式下作物产量及氮肥利用率演变特征[J]. *中国土壤与肥料*, 2017(3): 20–27.
LIU Yanling, LI Yu, ZHANG Yarong, *et al.* The dynamic of crop yield and nitrogen use efficiency under different long-term fertilization patterns in paddy soil from yellow earth in Southwest China [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(3): 20–27.
- [39] YANG Yonghui, LI Minjie, WU Jicheng, *et al.* Impact of combining long-term subsoiling and organic fertilizer on soil microbial biomass carbon and nitrogen, soil enzyme activity, and water use of winter wheat [J/OL]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 12: 788651 [2024-01-10]. DOI: 10.3389/fpls.2021.788651.
- [40] MA Peng, FAN Ping, YANG Zhiyuan, *et al.* Increasing the contents of paddy soil available nutrients and crop yield via optimization of nitrogen management in a wheat-rice rotation system [J/OL]. *Plants*, 2022, 11(17): 2209 [2024-01-10]. DOI: 10.3390/plants11172209.