

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2026.52013

减氮配施有机肥对机插稻产量形成与氮素利用的影响

刘 宁¹ 樊 平^{1,2} 王 成¹ 陈琪琪¹ 成庆悦¹ 铁夏娜¹ 汤菁莎¹
刘彬彬¹ 谢鸿堃¹ 王嘉悦¹ 施园青¹ 马 均^{1,*}

¹ 四川农业大学水稻研究所 / 作物生理生态及栽培四川省重点实验室, 四川成都 611130; ² 乐山市农业科学研究院, 四川乐山 614001

摘 要: 为探究减氮配施有机肥对机插杂交稻产量形成及其相关特性的影响, 本研究以籼型杂交稻 F 优 498 为材料, 采用二因素裂区设计, 主区设不施有机肥(Mo)和施有机肥(Mc, 有机肥 1500 kg hm⁻²) 2 种施肥方式; 副区为减氮处理, 在常规施化学氮肥 180 kg hm⁻² (N₃, CK)的基础上, 设置减氮 25% (N₂)、减氮 50% (N₁)和不施氮肥(N₀) 4 个施氮水平, 通过测定产量、光合特性、干物质积累、氮素转运及利用效率等指标, 明确减氮配施有机肥的协同增效机制。结果显示, 与 Mo 相比, Mc 处理提高了光合叶面积指数和光合势, 叶绿素含量下降速率减缓, 有效延缓叶片衰老, 提高光合能力。适量减氮配施有机肥能够优化群体构成, 有效穗数、穗粒数及千粒重显著提升, 配施有机肥下减氮 25% (McN₂)处理产量最高, 2 年平均较单施化肥(MoN₃)增产 6.04%。减氮配施有机肥处理下, 成熟期干物质积累量与氮素积累量均表现为 N₂ > N₃ > N₁ > N₀。同时, 与 MoN₃ 相比, McN₂ 的氮素干物质生产效率、氮肥表观利用率、生理利用率、氮肥农学利用率、氮肥偏生产力均有所提高。表明, 减氮 25%配施有机肥通过协同优化物质积累分配与氮素高效转运, 来提升光合产物向籽粒的定向供应能力, 构建“足源大库”群体, 实现机插稻高产与氮肥高效利用的平衡, 为绿色丰产栽培提供了理论支撑。

关键词: 机插稻; 减氮施肥; 有机无机配施; 产量构成; 干物质分配; 氮素转运

Effects of reduced nitrogen application combined with organic fertilizer on yield formation and nitrogen utilization in mechanically transplanted rice

Liu Ning¹, Fan Ping^{1,2}, Wang Cheng¹, Chen Qi-Qi¹, Cheng Qing-Yue¹, Tie Xia-Na¹, Tang Jing-Sha¹, Liu Bin-Bin¹, Xie Hong-Kun¹, Wang Jia-Yue¹, Shi Yuan-Qing¹, and Ma Jun^{1,*}

¹ Rice Research Institute of Sichuan Agricultural University / Crop Ecophysiology and Cultivation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 611130, Sichuan, China; ² Leshan Academy of Agricultural Sciences, Leshan 614001, Sichuan, China

Abstract: To investigate the effects of reduced nitrogen application combined with organic fertilizer on yield formation and related traits of machine-transplanted hybrid rice, this study used the indica hybrid rice F You 498 as the experimental material and employed a two-factor split-plot design. The main plots included two fertilization methods: no organic fertilizer (Mo) and organic fertilizer application (Mc, 1500 kg hm⁻²). The subplots consisted of nitrogen reduction treatments. Based on a conventional chemical nitrogen application rate of 180 kg hm⁻² (N₃, used as the control), four nitrogen levels were established: 25% reduction (N₂), 50% reduction (N₁), and no nitrogen application (N₀). Yield, photosynthetic characteristics, dry matter accumulation, nitrogen transport, and nitrogen use efficiency were measured to clarify the synergistic mechanisms of reduced nitrogen application combined with organic fertilizer. The results showed that compared with Mo, the Mc treatment increased the

本研究由国家重点研发计划项目(2017YFD0301701, 2017YFD0301706), 四川省育种攻关专项(2016NYZ0051)和四川省教育厅重点项目(18ZA0390)资助。

This study was supported by the National Key Research and Development Program (2017YFD0301701, 2017YFD0301706), the Sichuan Provincial Breeding Research Project (2016NYZ0051), and the Sichuan Provincial Department of Education Key Project (18ZA0390).

* 通信作者(Corresponding author): 马均, E-mail: majunp2002@163.com

第一作者联系方式: E-mail: 15520567967@163.com

Received (收稿日期): 2025-04-25; Accepted (接受日期): 2025-11-18; Published online (网络出版日期): 2025-12-11.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20251211.1141.002>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

photosynthetic leaf area index and photosynthetic potential, slowed chlorophyll degradation, effectively delayed leaf senescence, and enhanced photosynthetic performance. A moderate reduction in nitrogen combined with organic fertilizer optimized population structure, significantly increasing the number of effective panicles, grains per panicle, and 1000-grain weight. The treatment with 25% nitrogen reduction under organic fertilizer application (McN_2) achieved the highest yield, with a two-year average increase of 6.04% compared with the treatment using chemical fertilizer alone (MoN_3). Under the combined treatment, dry matter and nitrogen accumulation at maturity followed the order: $\text{N}_2 > \text{N}_3 > \text{N}_1 > \text{N}_0$. Additionally, compared with MoN_3 , McN_2 significantly improved nitrogen dry matter production efficiency, apparent nitrogen recovery efficiency, physiological nitrogen use efficiency, agronomic nitrogen use efficiency, and partial factor productivity of nitrogen. These results suggest that applying organic fertilizer in combination with a 25% nitrogen reduction can enhance the targeted allocation of photosynthates to grains by synergistically optimizing the accumulation and distribution of assimilates and improving nitrogen transport efficiency, thereby establishing a population characterized by a “large source and sufficient sink”. This strategy achieves a balance between high yield and high nitrogen use efficiency in machine-transplanted rice and provides theoretical support for green, high-yield cultivation practices.

Keywords: machine-transplanted rice; reduced nitrogen fertilization; organic-inorganic combination; yield composition; dry matter distribution; nitrogen transport

水稻(*Oryza sativa* L.)作为全球半数以上人口的主食, 其高产稳产是对粮食安全的重要保障^[1]。适量化肥投入是提升水稻产量的重要途径^[2]。数据表明, 自1961年至2015年, 中国的化肥使用量激增约70倍^[3], 然而, 粮食产量只增长了约6.6倍。以往研究发现, 在一定范围内水稻产量随化肥用量的增加而增加, 继续增加化肥用量则会出现明显的边际效应递减特征^[4]。此外, 我国氮肥利用率(nitrogen use efficiency, NUE)仅为25%~35%, 而欧美国家可达55%~65%^[5]。当前, 不合理的化肥施用已使成本上升、土壤退化^[6]和环境污染^[7]等一系列问题愈加突出。因此, 优化氮肥管理并提高氮肥利用效率, 成为实现水稻高产高效和推动农业可持续发展的重要方向。

在水稻栽培体系中, 有机无机肥配施技术展现出显著的生理调控效应与产量提升作用^[8], 研究表明, 有机、无机肥配施方案可有效调控功能叶叶绿素合成代谢^[9], 同步改善植株茎蘖动态^[10]与籽粒灌浆特性, 单位面积穗数和每穗粒数可分别增加6.08%、7.76%^[11], 籽粒产量可增加8%~9%^[12]。其增产机制源于独特的养分缓释效应, 通过延长水稻花后氮素同化窗口期, 促进光合产物向穗部的定向转运, 使谷粒干物质积累量增加7.06%~11.79%。这种生理优势最终转化为产量构成要素的协同优化, 为水稻绿色高产栽培提供了科学依据。机插秧技术是推动水稻机械化发展的关键技术之一, 是提高生产效率、促进水稻规模化生产的有效途径^[13]。值得注意的是, 不同栽培方式(如机插秧、手插秧、直播)因其植株损伤程度、栽插密度、根系分布以及田间微环境的不同, 会导致水稻群体起点、养分需求规

律及利用效率存在显著差异^[14]。与传统手插秧相比, 机插秧分蘖节位低, 群体空间分布均匀度提升^[15]。这种结构性优势延伸至生理代谢层面, 尤其在生长发育进程、氮素利用效率^[16]及稻米品质形成等农艺性状层面呈现显著差异。机插秧的群体建成与产量形成过程对氮素供应表现出显著敏感性^[17], 其产量构成要素与氮素吸收动态呈现高度耦合关系。机插秧条件下, 配施有机肥是否可以实现减氮增效, 其协同增效机制尚缺乏系统性研究。

为此, 本研究选用籼型杂交稻F优498为试验材料, 拟通过2年大田试验, 研究配施有机肥条件下化肥氮素减施对水稻产量及其构成因素、剑叶光合作用、干物质积累与分配和氮素积累与转运的影响, 旨在为机插秧高产高效、优质绿色栽培提供理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验点概况

试验于2021—2022年在四川省成都市崇州市四川农业大学水稻研究所试验田(30°42'N, 103°28'E)进行。供试品种为四川稻区主栽品种杂交籼稻F优498(中籼迟熟型, 全生育期约145~152 d)。试验点为亚热带季风气候, 2021年和2022年水稻全生育期日平均气温分别为22.82℃和23.34℃, 全生育期降水量分别是869.29 mm和685.27 mm, 水稻生育期间试验区气象数据由四川省气象局提供, 如图1所示。2年气温无明显差异, 2022年6月下旬至9月中旬降雨量较2021年相同时段有所减少。耕层土壤(0~20 cm)的土壤质地为沙壤土, 土壤基础理化性状见表1。

表 1 土壤基本理化性状
Table 1 Basic soil physical and chemical properties

年份 Year	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	速效氮 Available N (mg kg ⁻¹)	速效磷 Available P (mg kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg kg ⁻¹)	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	pH	容重 Bulk density (g cm ⁻³)
2021	2.18	125.30	20.20	141.40	29.80	7.58	1.31
2022	2.24	130.22	25.32	202.25	33.74	7.20	1.23

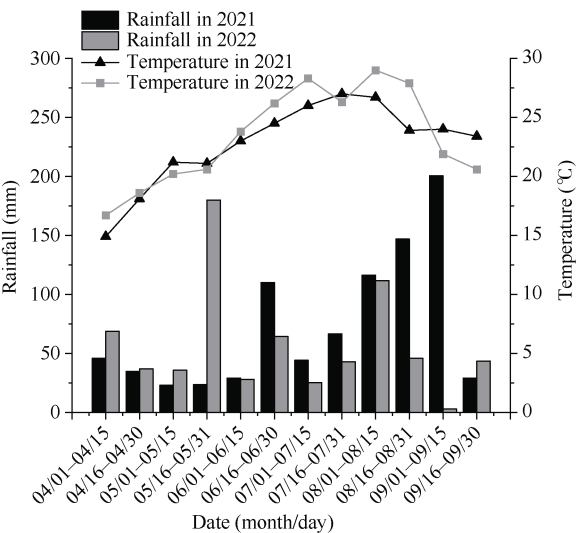


图 1 试验区水稻生育期平均气温和降雨量
Fig. 1 Average temperature and rainfall during the growth period of rice in the experimental area

1.2 试验设计

试验采用二因素裂区设计。主区设不施有机肥 (Mo)、施用有机肥 (Mc, 1500 kg hm⁻²) 2 种施肥处理, 有机肥购自成都容盛农业科技有限公司, 主要成分为 N 2.5%、P₂O₅ 2.5%、K₂O 4.1%、有机质 59%; 副

区为减氮处理, 以常规施化学氮肥 180 kg hm⁻² (N₃) 为对照, 在此基础上减氮 25% (N₂)、减氮 50% (N₁) 和不施氮肥 (N₀), 共 4 个施氮水平, 氮肥按照基肥: 蘖肥: 穗肥= 3: 3: 4 施用。各处理所用磷肥为过磷酸钙 (P₂O₅ ≥ 12%, 75 kg hm⁻²), 全作底肥一次性施用, 钾肥为氯化钾 (K₂O ≥ 60%, 150 kg hm⁻²), 按照基肥: 穗肥= 7: 3 施用, 其中, 基肥在移栽前 1 d 施入, 蘖肥在移栽后 7 d 施用, 促花肥和保花肥分别在倒四叶 (拔节期) 和倒二叶 (孕穗期) 施用。各处理总用量相同, 见表 2。共 8 个处理, 重复 3 次, 24 个小区, 小区面积 26.6 m² (长 7.0 m、宽 3.8 m)。采用塑料软盘育秧, 洋马插秧机移栽, 移栽株行距为 30 cm × 20 cm, 横向插秧, 每穴移栽 3~5 苗。于 2021 年 3 月 25 日播种, 4 月 22 日移栽; 2022 年 3 月 26 日播种, 4 月 23 日移栽。其他田间管理按大面积生产田进行。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤理化性质测定 在水稻移栽前按五点取样法取土, 测定土壤有机质、全氮、速效氮、磷、钾含量。于水稻齐穗期、成熟期用对角线取土法, 于 0~20 cm 土层取土, 自然风干后, 磨细过 60 目筛, 用重铬酸钾氧化-外加热法^[18]测定土壤有机碳含量;

表 2 各处理施肥量
Table 2 Fertilizer application rates for each treatment (kg hm⁻²)

处理 Treatment	养分投入量 Nutrient input			有机肥 Organic fertilizer	尿素 Urea	过磷酸钙 Calcium superphosphate	氯化钾 Potassium chloride
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O				
MoN ₀	0	75	150	0	0	625.0	250.0
MoN ₁	90	75	150	0	196	625.0	250.0
MoN ₂	135	75	150	0	294	625.0	250.0
MoN ₃	180	75	150	0	392	625.0	250.0
McN ₀	0	75	150	1500	0	312.5	147.5
McN ₁	90	75	150	1500	196	312.5	147.5
McN ₂	135	75	150	1500	294	312.5	147.5
McN ₃	180	75	150	1500	392	312.5	147.5

Mc、Mo 分别代表施用有机肥和未施用有机肥; N₀、N₁、N₂ 和 N₃ 分别表示施用 0、90、135 和 180 kg hm⁻² 的化学氮肥。
Mc and Mo represent treatments with and without organic fertilizer, respectively; N₀, N₁, N₂, and N₃ indicate chemical nitrogen fertilizer application rates of 0, 90, 135, and 180 kg hm⁻², respectively.

用消解蒸馏滴定法^[19]测定土壤全氮含量; 用碱解扩散法^[20]测定碱解氮含量; 用硫酸-高氯酸-钼锑抗比色法^[21]测定速效磷含量; 用醋酸铵提取-火焰光度法^[22]测定速效钾含量; 用电位滴定法^[19]测定 pH。

1.3.2 水稻干物质积累与转运 分别于拔节期、齐穗期和成熟期, 各小区按平均茎蘖数取 3 穴代表性水稻植株, 在实验室内将植株分成茎鞘、叶、穗(齐穗期和成熟期) 3 个部分, 在 105℃下杀青 45 min 后在 80℃下烘干至恒重, 分别称取各器官干物质。

茎鞘干物质转运量(kg hm⁻²) = 齐穗期茎鞘干物质质量 - 成熟期茎鞘干物质质量 (1)

叶片干物质转运量(kg hm⁻²) = 齐穗期叶片干物质质量 - 成熟期叶片干物质质量 (2)

茎鞘干物质输出率(%) = 茎鞘干物质转运量 / 齐穗期茎鞘干物质质量 × 100% (3)

叶片干物质输出率(%) = 叶片干物质转运量 / 齐穗期叶片干物质质量 × 100% (4)

茎鞘干物质转运贡献率(%) = 茎鞘干物质转运量 / 成熟期穗部干物质质量 × 100% (5)

叶片干物质转运贡献率(%) = 叶片干物质转运量 / 成熟期穗部干物质质量 × 100% (6)

1.3.3 氮素积累及氮肥利用效率的计算 将 1.3.2 中各器官样品粉碎过 60 目筛, 采用浓 H₂SO₄ 消煮, 用凯氏定氮仪测定氮含量, 计算氮素积累与氮肥利用效率。

茎鞘氮素转运量(kg hm⁻²) = 齐穗期茎鞘氮素积累量 - 成熟期茎鞘氮素积累量 (7)

叶片氮素转运量(kg hm⁻²) = 齐穗期叶片氮素积累量 - 成熟期叶片氮素积累量 (8)

茎鞘氮素输出率(%) = 茎鞘氮素转运量 / 齐穗期茎鞘氮素积累量 × 100% (9)

叶片氮素输出率(%) = 叶片氮素转运量 / 齐穗期叶片氮素积累量 × 100% (10)

茎鞘氮素转运贡献率(%) = (茎鞘氮素转运量 / 成熟期穗部氮素积累量) × 100% (11)

叶片氮素转运贡献率(%) = (叶片氮素转运量 / 成熟期穗部氮素积累量) × 100% (12)

氮素干物质生产效率(kg kg⁻¹) = 成熟期单位面积植株干物质质量 / 植株地上部分含氮量 (13)

氮肥生理利用率(kg kg⁻¹) = (施氮区产量 - 无氮区产量) / (施氮区植株总吸氮量 - 无氮区植株总吸氮量) (14)

氮量 (15)

氮肥表观利用率(%) = (施氮区植株地上部含氮量 - 无氮区植株地上部含氮量) / 施氮量 × 100% (16)

氮肥农学利用率(kg kg⁻¹) = (施氮区产量 - 无氮区产量) / 施氮量 (17)

1.3.4 水稻灌浆结实期剑叶光合能力及 SPAD 测定

分别于齐穗后 0 d 和 15 d, 在晴朗无云的上午 09:00—11:00, 使用便携式光合测定仪(LI-6400, LI-COR Biosciences, 美国), 测定剑叶净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)及胞间 CO₂ 浓度(C_i), 计算光合势, 每处理选取 5 片具有代表性且生长一致的剑叶测定, 每叶重复 3 次。环境参数设置: CO₂ 浓度 400 μmol mol⁻¹, 温度 30℃, 光照强度 1200 μmol m⁻² s⁻¹。于拔节期、齐穗期, 各小区按平均茎蘖数取 5 穴具有代表性的稻株, 使用叶面积分析仪(i-3100C, CID Bio-Science, 美国)测定剑叶绿叶面积, 计算叶面积指数(leaf area index, LAI)。同时, 于水稻抽穗后 0、7、14、21 和 28 d 的上午 09:00 左右, 各处理点选择生长一致的连续 10 穴植株共 10 片剑叶, 使用叶绿素计(SPAD-502, Konica Minolta, 日本)测定叶片叶绿素含量的相对值(测定剑叶的中部及其上、下 1/3 处 3 点的 SPAD 值, 取平均值)。

光合势 = 1/2 (LAI1 + LAI2) (t₂ - t₁) (18)

式中, LAI1 和 LAI2 为相邻 2 次测定的叶面积指数; t₁ 和 t₂ 为 2 次测定间隔天数。

1.3.5 产量及产量构成因素 于成熟期各小区选取 60 穴调查有效穗数, 推算公顷有效穗数。按平均分蘖数在每小区取 5 穴植株进行考种, 调查空瘪粒数、实粒数、千粒重, 计算结实率等产量构成指标, 待稻谷含水量为 13.5% 时实测产量。各小区去除边行后, 按实际株数计产。

1.4 数据计算与统计分析

采用 Microsoft Excel 2017 进行数据统计, 采用 SPSS27.0 统计软件进行方差分析, 以最小极差显著法(LSD)检验显著性, α = 0.05, 采用 Origin 26.0 作图。

2 结果与分析

2.1 减氮配施有机肥对机插稻产量及其构成因素的影响

由表 3 可知, 减氮处理、配施有机肥及二者的交互作用对机插稻产量均表现出显著或极显著影响。配施有机肥能够显著提高机插杂交稻产量, 2021

年增产 7.73%, 2022 年增产 4.59%。在不施有机肥条件下, 2 年中机插稻产量均随减氮量的增加而显著降低; 在配施有机肥(Mc)条件下, 2021 年 McN_2 处理较 McN_3 处理的产量增加 2.58%, 2022 年增加 0.30%, McN_2 处理的产量在 2 年试验中均为最高, 2021 年 McN_2 处理较不施有机肥常规施氮处理产量提高 5.89%, 2022 年提高 1.12%。以上结果表明, 在本试验施氮总量为 180 kg hm^{-2} 的条件下, 配施有机肥并减少 25% 的化学氮肥用量, 水稻产量最高。

从产量构成因素来看, 各有机肥配施处理对有

效穗数和穗粒数具有极显著影响, 减氮处理对所有产量构成因素均具有极显著影响, 二者的交互作用对产量构成要素具有显著影响(有效穗数与结实率除外)。相较于常规施肥(Mo), 配施有机肥(Mc)使有效穗数、穗粒数、千粒重及产量分别提高 4.75%、0.57%、0.39% 和 6.04%。在各减氮处理下, 有效穗数、穗粒数均随着氮肥的减少而减少, 结实率与之相反, McN_2 处理下千粒重最大。以上结果表明, 减氮配施有机肥能够优化产量构成, 形成库容充实优势, 从而提高水稻产量。

表 3 减氮配施有机肥对机插稻产量及其构成因素的影响

Table 3 Effects of reduced nitrogen application combined with organic fertilizer on yield and yield components in mechanically transplanted rice

年份 Year	处理 Treatment	有效穗数 Effective panicles ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	穗粒数 Spikeletes per panicle	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (kg hm^{-2})
2021	MoN_0	145.18 h	148.89 f	87.29 a	30.27 e	7082.58 e
	MoN_1	185.79 f	168.44 e	85.79 ab	30.98 cd	8371.31 d
	MoN_2	214.99 d	174.98 d	82.77 c	31.15 c	9246.28 c
	MoN_3	234.12 b	182.67 ab	81.56 c	31.51 b	9504.38 b
	平均值 Mean	195.02	168.75	84.35	30.98	8551.14
	McN_0	153.93 g	166.75 e	85.95 ab	30.79 d	7446.84 e
	McN_1	201.70 e	176.50 cd	85.41 b	31.18 c	9528.19 b
	McN_2	224.20 c	180.53 bc	82.11 c	31.79 a	10,063.74 a
	McN_3	242.06 a	185.61 a	79.39 d	30.41 e	9810.29 ab
	平均值 Mean	205.48	177.35	83.22	31.04	9212.27
	F 值 M	112.42**	276.83**	6.64	1.41	43.75*
	F value N	355.41**	122.95**	51.81**	43.09**	180.76**
	M×N	3.11	10.38**	1.02	46.24**	5.12*
2022	MoN_0	201.83 f	163.00 f	87.83 a	30.24 e	7960.86 e
	MoN_1	221.00 d	192.99 e	82.94 b	30.96 cd	9848.46 c
	MoN_2	242.83 b	216.76 b	81.14 b	31.14 bc	10,567.64 b
	MoN_3	250.83 a	221.08 a	78.94 c	31.45 ab	11,071.98 a
	平均值 Mean	229.13	198.46	82.71	30.95	9862.24
	McN_0	215.17 e	163.18 f	87.42 a	30.63 d	8373.02 d
	McN_1	235.67 c	191.54 e	82.20 b	31.59 a	10,528.92 b
	McN_2	251.72 a	204.36 d	80.98 b	31.61 a	11,195.53 a
	McN_3	252.67 a	208.67 c	78.65 c	30.72 d	11,161.42 a
	平均值 Mean	238.80	191.94	82.31	31.14	10,314.72
	F 值 M	33.76*	47.30*	1.70	1.58	9.97
	F value N	289.70**	82.17**	63.99**	24.14**	237.96**
	M×N	6.20*	20.65**	0.07	13.03**	2.46

处理同表 2。M: 有机肥; N: 化学氮肥; M×N: 有机肥与化学氮肥互作。同列数据后不同字母表示处理间在 0.05 概率水平差异显著。

*和**分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平差异显著。

Treatments are the same as those given in Table 2. M: organic fertilizer; N: chemical nitrogen fertilizer; M×N: interaction between organic fertilizer and chemical nitrogen fertilizer. Values followed by different letters within a column indicate significant differences among treatments at the 0.05 probability level. * and ** indicate significance at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

2.2 减氮配施有机肥对机插稻剑叶光合作用、叶绿素含量的影响

由表4可知, 施肥处理对叶面积和光合势的影响均达到显著或极显著水平, 且交互作用对拔节期叶面积指数和齐穗期高效叶面积指数的影响均达到显著水平。与 Mo 相比, Mc 拔节期 LAI 提高 17.41%, 齐穗期 LAI 提高 9.58%, 齐穗期高效叶面

积率提高 2.98%, 拔节期至齐穗期光合势提高 12.06%。随着氮肥施用的减少, 除齐穗期 LAI 和高效叶面积率外, 各指标均呈逐一下降趋势。齐穗期叶面积指数 LAI 在 N_2 处理下达到最大值, 与 McN_3 、 MoN_3 相比, McN_2 的齐穗期叶面积指数 LAI 分别提高 3.47%、11.64%, 表明减氮 25% 配施有机肥处理下的水稻具有更大的光合叶面积。

表4 减氮配施有机肥对机插稻叶面积和光合势的影响(2022年)

Table 4 Effects of reduced nitrogen application combined with organic fertilizer on leaf area and photosynthetic potential in mechanically transplanted rice (2022)

处理 Treatment	叶面积指数 LAI		齐穗期高效 叶面积指数 High effective LAI at	齐穗期高效 叶面积率 High effective LAI rate at	拔节期-齐穗期光合势 Photosynthetic potential of jointing- full heading
	拔节期 Jointing stage	齐穗期 Full heading stage	full heading stage	full heading stage (%)	($\times 10^4 \text{ m}^2 \text{ d hm}^{-2}$)
MoN_0	1.75 f	3.27 f	2.28 e	67.33 d	95.36 f
MoN_1	2.15 e	4.37 d	3.08 d	70.49 c	123.84 d
MoN_2	2.29 d	5.25 ab	3.94 ab	69.59 c	143.41 bc
MoN_3	2.77 c	5.07 bc	4.13 a	75.58 a	149.12 b
平均值 Mean	2.24	4.49	3.36	68.70	127.93
McN_0	1.82 f	3.72 e	2.49 e	66.95 d	105.19 e
McN_1	2.36 d	4.82 c	3.22 d	66.97 d	136.32 c
McN_2	3.07 b	5.66 a	3.53 c	67.25 d	165.88 a
McN_3	3.27 a	5.47 ab	3.74 bc	73.65 b	166.03 a
平均值 Mean	2.63	4.92	3.25	70.75	143.36
F 值 M	124.52**	27.19*	2.52	28.29*	49.15*
F value N	337.89**	92.81**	123.15**	93.41**	189.86**
M×N	29.41**	0.02	7.11**	3.56	2.05

处理同表2。M: 有机肥; N: 化学氮肥; M×N: 有机肥与化学氮肥互作。同列数据后不同字母表示处理间在 0.05 概率水平差异显著。*和**分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平差异显著。

Treatments are the same as those given in Table 2. M: organic fertilizer; N: chemical nitrogen fertilizer; M×N: interaction between organic fertilizer and chemical nitrogen fertilizer. Values followed by different letters within a column indicate significant differences among treatments at the 0.05 probability level. * and ** indicate significance at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

由图2可知, 水稻齐穗后, 随着籽粒灌浆的进行, 叶片叶绿素含量逐步降低, 均表现为 $N_3 > N_2 > N_1 > N_0$, 其中 N_1 、 N_2 处理下 SPAD 值(相对叶绿素含量)下降较快, 这可能是养分不足导致了光合潜能受限。Mc 处理下 N_3 、 N_2 、 N_1 较 Mo 同减氮水平处理分别提高 3.47%、5.27%、5.03%。同时, 与 Mo 相比, Mc 处理下 SPAD 值小幅提高, 且下降速率稍缓, 表明有机肥能够延长叶片功能期, 维持较高的叶绿素含量和光合作用能力, 从而支持水稻在生育后期的生长和产量形成。

由表5可知, 氮肥减施对净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、表观叶肉导度(apparent mesophyll conductance, AMC)均有极显著影响, 配

施有机肥对 P_n 和 AMC 具有极显著影响。随着减氮量的增加, P_n 、 G_s 及 AMC 降低, 均表现为 $N_3 > N_2 > N_1 > N_0$, 而 C_i 与之相反, 表现为 $N_0 > N_1 > N_2 > N_3$, 这可能是氮肥减少导致植物氮素供应不足, 影响叶绿素合成和光合作用相关酶的活性, 从而降低光合作用效率, CO_2 的消耗减少, 导致 C_i 上升。与 Mo 相比, 除 C_i 外, Mc 的各项光合特征指标均有所提高。齐穗期和齐穗期后 15 d 净光合速率分别提高 7.35% 和 4.99%, 气孔导度分别提高 8.64% 和 5.08%, 表观叶肉导度分别提高 7.88% 和 5.53%。以上结果表明, 配施有机肥能够提升 P_n , 增加 G_s , 改善 AMC, 增强水稻碳同化能力, 促进干物质积累。

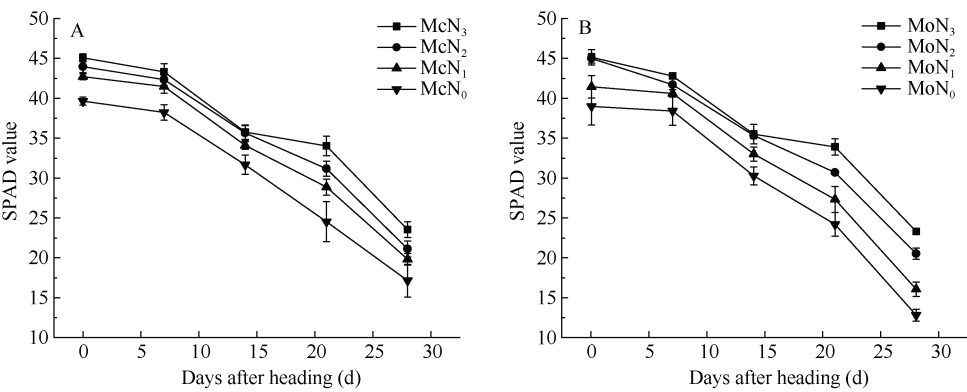


图 2 减氮配施有机肥对机插稻生育后期剑叶 SPAD 值的影响(2022 年)
Fig. 2 Effects of reduced nitrogen application combined with organic fertilizer on flag leaf SPAD values in mechanically transplanted rice during late growth stages (2022)
处理同表 2。Treatments are the same as those given in Table 2.

表 5 减氮配施有机肥对机插稻光合特性的影响(2022 年)
Table 5 Effects of reduced nitrogen application combined with organic fertilizer on photosynthetic characteristics in mechanically transplanted rice (2022)

处理 Treatment	净光合速率 P_n ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		气孔导度 G_s ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		胞间 CO_2 浓度 C_i ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)		表观叶肉导度 AMC ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	
	齐穗期 FHS	齐穗后 15 d 15 d after FHS	齐穗期 FHS	齐穗后 15 d 15 d after FHS	齐穗期 FHS	齐穗后 15 d 15 d after FHS	齐穗期 FHS	齐穗后 15 d 15 d after FHS
	齐穗期 FHS	齐穗后 15 d 15 d after FHS	齐穗期 FHS	齐穗后 15 d 15 d after FHS	齐穗期 FHS	齐穗后 15 d 15 d after FHS	齐穗期 FHS	齐穗后 15 d 15 d after FHS
MoN ₀	19.12 e	15.20 e	0.68 e	0.43 e	314.03 a	313.97 a	60.91 e	48.43 d
MoN ₁	22.03 cd	16.28 de	0.80 d	0.56 cd	311.24 bc	311.53 b	70.79 cd	52.27 cd
MoN ₂	22.88 bcd	17.31 bcd	0.85 c	0.67 ab	308.83 d	309.51 cd	75.18 bcd	55.94 bc
MoN ₃	24.10 ab	18.52 b	0.89 b	0.70 a	309.58 cd	306.86 e	76.79 abc	60.33 b
平均值 Mean	22.04	16.83	0.81	0.59	310.92	310.01	70.92	54.24
McN ₀	21.35 d	16.22 de	0.77 d	0.50 de	311.90 b	312.96 a	68.44 d	51.84 cd
McN ₁	23.38 bc	16.57 cde	0.87 bc	0.60 bc	309.95 bcd	310.73 bc	75.45 bcd	53.33 c
McN ₂	24.30 ab	17.89 bc	0.91 b	0.66 ab	307.83 d	308.22 de	78.95 ab	58.05 b
McN ₃	25.60 a	19.99 a	0.98 a	0.73 a	307.74 d	304.10 f	83.19 a	65.73 a
平均 Mean	23.66	17.67	0.88	0.62	309.35	309.00	76.51	57.24
F 值 M	124.67**	84.22*	29.98*	0.65	9.63	6.44	157.28**	176.28**
F value N	20.08**	21.49**	88.29**	34.80**	20.75**	114.52**	19.35**	32.43**
M×N	1.72	5.32*	1.51	0.81	0.30	1.93	0.31	0.89

处理同表 2。M: 有机肥; N: 化学氮肥; M×N: 有机肥与化学氮肥互作。同列数据后不同字母表示处理间在 0.05 概率水平差异显著。
*和**分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平差异显著。
Treatments are the same as those given in Table 2. M: organic fertilizer; N: chemical nitrogen fertilizer; M×N: interaction between organic fertilizer and chemical nitrogen fertilizer. FHS: full heading stage; AMC: apparent mesophyll conductance. Values followed by different letters within a column indicate significant differences among treatments at the 0.05 probability level. * and ** indicate significance at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

2.3 减氮配施有机肥对机插稻干物质积累转运的影响

由图 3 可知, 配施有机肥能够提高水稻茎鞘(齐穗期除外)、叶片、穗部(拔节期除外)的干物质积累及总干物质积累, 为产量的提升奠定基础。在拔节

期, 随着氮肥的减施, 水稻各部位干物质积累量降低, 均表现为 $N_3 > N_2 > N_1 > N_0$; 在齐穗期, 减氮配施有机肥处理下(2022 年), 水稻各部位干物质积累量均表现为 $N_2 > N_3 > N_1 > N_0$; 在成熟期, 减氮配施有机肥下, 茎鞘、叶片的干物质积累量随着氮肥的减

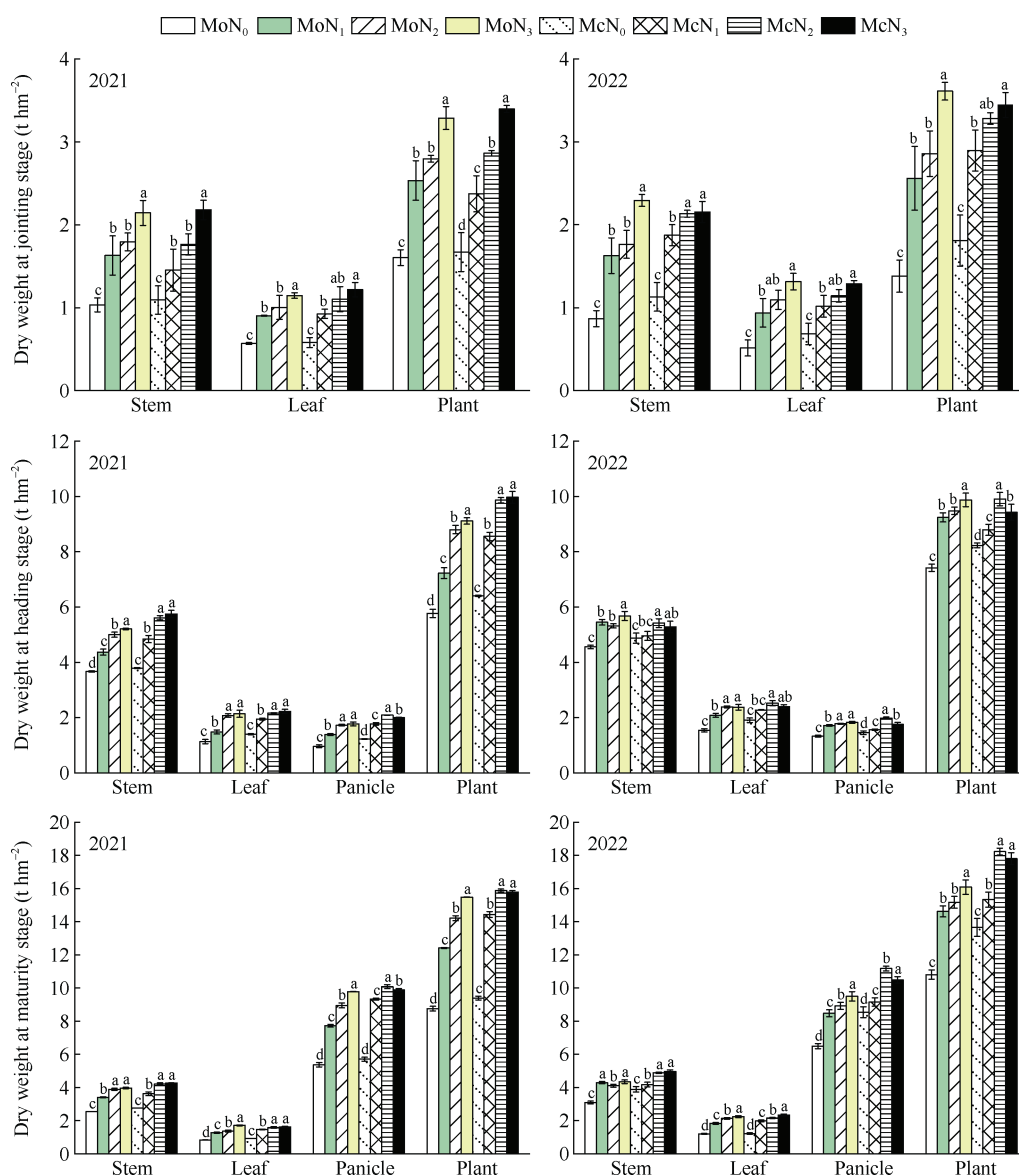


图 3 减氮配施有机肥对机插稻干物质积累的影响

Fig. 3 Effects of reduced nitrogen application combined with organic fertilizer on dry matter accumulation in mechanically transplanted rice (t hm^{-2})

处理同表 2。柱上不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

Treatments are the same as those given in Table 2. Different lowercase letters on the column indicate significant differences at the 0.05 level.

施而下降, 但穗部及总干物质积累量表现为 $N_2 > N_3 > N_1 > N_0$ 。与 McN_3 相比, McN_2 在齐穗期、成熟期的总干物质积累量分别提高 4.89%、2.42%。

由表 6 可知, 氮肥减施、氮肥减施与有机肥配施的交互作用对水稻生育后期的干物质转移与贡献有极显著影响。2022 年配施有机肥对茎鞘的干物质转移量、输出率、贡献率具有极显著影响。不同处理下, 水稻干物质转移量、贡献率均表现为茎鞘 > 叶。与 Mo 相比, Mc 处理下的叶片转移量、叶片输出率、叶片贡献率分别提高 30.60%~42.95%、19.79%~31.27%、16.97%~26.57%。在减氮配施有机

肥处理下, 茎鞘贡献率、叶贡献率与总贡献率随着氮肥施用的减少而下降。

2.4 减氮配施有机肥对机插稻氮素吸收转运的影响

由图 4 可知, 配施有机肥能够提高水稻各器官氮素积累(除齐穗期穗部外), 从而进一步提高氮素总积累量。从减氮处理来看, 除成熟期 Mc 处理下穗部在 N_2 处理达到最大外, 茎、叶、穗的氮素积累量和植株总氮均随减氮量的增加逐渐降低, 表现为 $N_3 > N_2 > N_1 > N_0$ 。在配施有机肥下减氮降低了茎鞘、叶部和总氮素积累量, 降低了齐穗期各器官和

表 6 减氮配施有机肥对机插稻干物质转运的影响
Table 6 Effects of reduced nitrogen application combined with organic fertilizer on dry matter translocation in mechanically transplanted rice

年份 Year	处理 Treatment	茎鞘干物质转运 Stem sheath dry matter transport			叶片干物质转运 Leaf dry matter transport		
		转运量 Transfer amount (kg hm ⁻²)	输出率 Output rate (%)	贡献率 Contribution rate (%)	转运量 Transfer amount (kg hm ⁻²)	输出率 Output rate (%)	贡献率 Contribution rate (%)
2021	MoN ₀	1116.15 cd	30.42 a	25.30 a	302.16 ef	26.45 b	6.84 bc
	MoN ₁	959.49 d	21.94 d	15.13 c	194.00 f	13.05 d	3.06 d
	MoN ₂	1105.54 cd	22.12 cd	15.32 c	700.48 a	33.81 a	9.71 a
	MoN ₃	1231.70 bc	23.67 bcd	15.37 c	418.46 de	19.44 c	5.21 c
	平均值 Mean	1103.22	24.54	17.78	403.77	23.19	6.21
	McN ₀	1020.00 cd	26.93 b	22.76 a	470.61 bcd	33.81 a	10.49 a
	McN ₁	1217.99 bc	25.10 bcd	16.10 bc	465.09 cd	23.92 bc	6.14 bc
	McN ₂	1399.40 ab	24.92 bcd	17.50 bc	575.90 bc	26.61 b	7.21 bc
	McN ₃	1474.38 a	25.63 bc	18.69 b	597.67 ab	26.77 b	7.58 b
	平均值 Mean	1277.94	25.65	18.76	527.32	27.78	7.86
	F 值 M	4.53	21.23	2.43	19.62**	13.4	14.38**
	F value N	18.77**	10.31**	37.85**	24.16**	20.84**	19.37**
	M×N	8.37*	4.14*	4.03	9.47**	10.25**	10.48*
2022	MoN ₀	1452.88 a	31.89 a	28.13 a	325.95 b	21.08 b	6.34 b
	MoN ₁	1166.43 ab	20.97 b	16.97 b	246.84 b	11.83 c	3.65 c
	MoN ₂	1258.11 ab	22.67 b	16.89 b	256.03 b	10.73 c	3.59 c
	MoN ₃	1255.46 ab	23.30 b	17.28 b	131.90 c	5.38 d	1.75 cd
	平均值 Mean	1283.22	24.71	19.82	240.18	12.25	3.83
	McN ₀	978.77 bc	20.00 bc	13.90 c	676.48 a	35.44 a	9.60 a
	McN ₁	792.34 c	15.55 c	10.23 d	286.32 b	12.59 c	3.79 c
	McN ₂	500.24 d	9.68 d	5.70 e	354.47 b	14.01 c	3.85 c
	McN ₃	294.26 d	5.72 d	3.56 e	56.04 c	2.27 d	0.65 d
	平均值 Mean	641.40	12.74	8.35	343.33	16.08	4.48
	F 值 M	37.46*	34.50*	99.12**	3.47	7.03	0.34
	F value N	8.08**	23.66**	78.49**	47.49**	90.75**	33.59**
	M×N	4.08*	5.83*	9.93**	13.79**	12.24**	3.65*

处理同表 2。M: 有机肥; N: 化学氮肥; M×N: 有机肥与化学氮肥互作。同列数据后不同字母表示处理间在 0.05 概率水平差异显著。
*和**分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平差异显著。
Treatments are the same as those given in Table 2. M: organic fertilizer; N: chemical nitrogen fertilizer; M×N: interaction between organic fertilizer and chemical nitrogen fertilizer. Values followed by different letters within a column indicate significant differences among treatments at the 0.05 probability level. * and ** indicate significance at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

总氮的氮素积累,但是提高了叶片和穗部氮素的分配,同时降低了成熟期茎氮、叶氮的积累和氮素的分配,提高了总氮和穗氮的积累与分配。
由表 7 可知,减氮、减氮配施有机肥对各指标具有显著或极显著影响。不同处理下水稻的氮素转运量、贡献率均表现为叶片>茎鞘。与 Mo 相比,Mc 处理下的叶氮素转运量、叶氮素输出率分别提高

14.04%~19.29%、4.15%~4.17%。随着氮肥施用的减少,茎鞘氮素转运量、叶氮素转移量降低,均表现为 N₃ > N₂ > N₁ > N₀。在 2022 年不施有机肥减氮处理下,与 MoN₃ 相比,MoN₂、MoN₁ 的茎鞘氮素转运量、叶氮素转运量降低,但叶片氮素贡献率显著提高;与 McN₃ 相比,2022 年 McN₂、McN₁ 的茎鞘氮素转运量、茎鞘氮素贡献率降低,但叶片氮素贡献率提高。

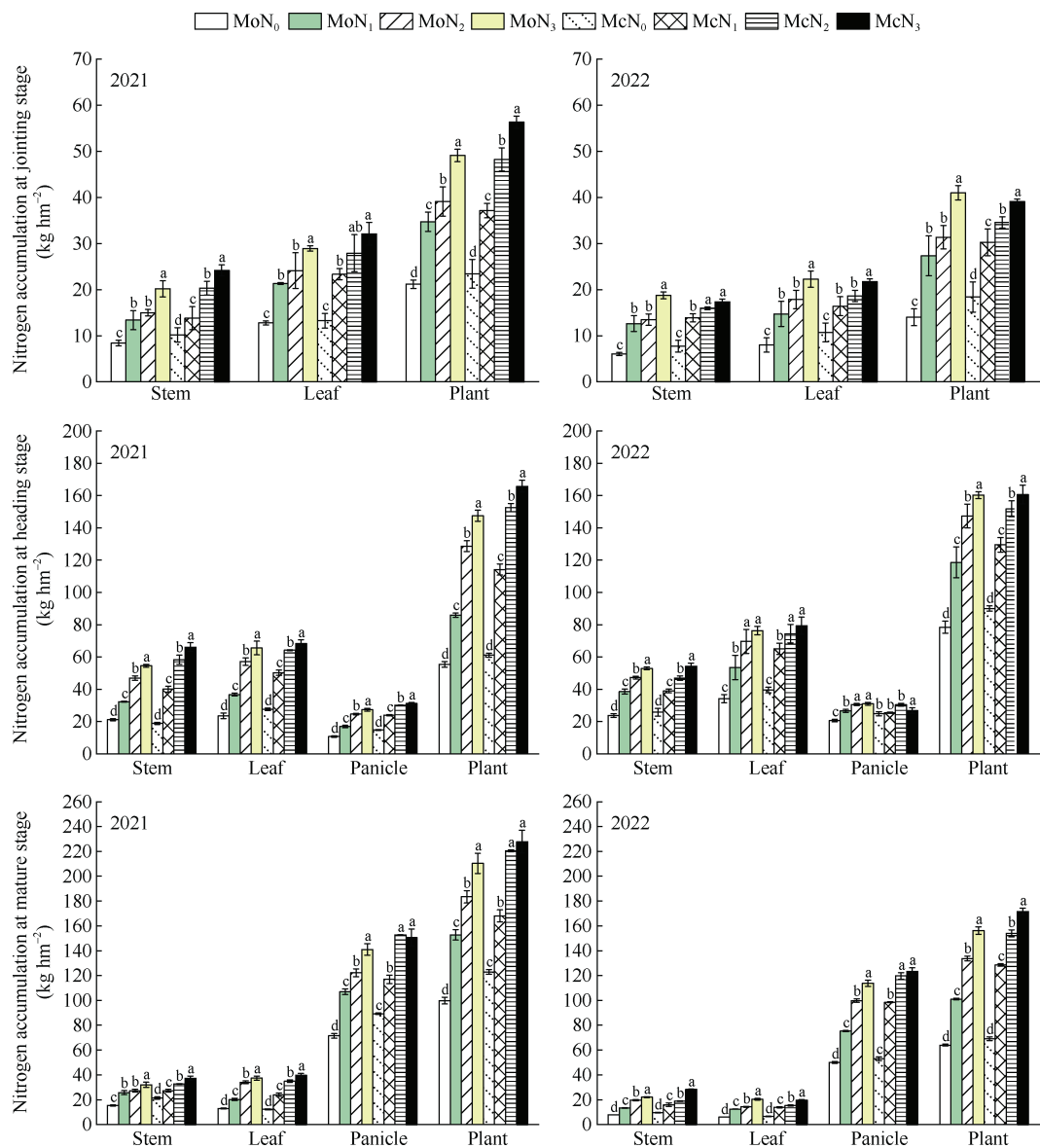


图 4 减氮配施有机肥对机插稻氮素积累量的影响
Fig. 4 Effects of reduced nitrogen application combined with organic fertilizer on nitrogen accumulation in mechanically transplanted rice (kg hm⁻²)
处理同表 2。柱上不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。
Treatments are the same as those given in Table 2. Different lowercase letters on the column indicate significant differences at the 0.05 level.

表 7 减氮配施有机肥对机插稻氮素转运的影响
Table 7 Effects of reduced nitrogen application combined with organic fertilizer on nitrogen translocation in mechanically transplanted rice

年份 Year	处理 Treatment	茎鞘氮素转运 Stem sheath N transport			叶片氮素转运 Leaf N transport		
		转运量 Transfer amount (kg hm ⁻²)	输出率 Output rate (%)	贡献率 Contribution rate (%)	转运量 Transfer amount (kg hm ⁻²)	输出率 Output rate (%)	贡献率 Contribution rate (%)
2021	MoN ₀	13.30 f	62.85 b	33.78 cd	17.51 e	74.31 ab	44.47 cd
	MoN ₁	18.98 e	58.74 bc	32.50 d	24.25 d	65.99 e	41.54 d
	MoN ₂	27.30 c	58.15 c	36.32 cd	42.81 b	74.91 ab	56.97 a

(续表 7)

年份 Year	处理 Treatment	茎鞘氮素转运 Stem sheath N transport			叶片氮素转运 Leaf N transport		
		转运量 Transfer amount (kg hm ⁻²)	输出率 Output rate (%)	贡献率 Contribution rate (%)	转运量 Transfer amount (kg hm ⁻²)	输出率 Output rate (%)	贡献率 Contribution rate (%)
2021	MoN ₃	32.46 b	59.52 bc	37.55 bc	45.23 ab	68.82 d	52.38 ab
	平均值 Mean	23.01	59.81	35.04	32.45	71.01	48.84
	McN ₀	9.35 g	49.44 d	24.45 e	21.07 de	76.46 a	55.11 a
	McN ₁	24.11 d	60.01 bc	32.26 d	36.29 c	72.25 bc	48.55 bc
	McN ₂	39.36 a	67.49 a	43.85 a	48.89 a	76.14 a	54.55 ab
	McN ₃	37.76 a	57.00 c	40.96 ab	48.59 a	71.02 cd	52.66 ab
	平均值 Mean	27.65	58.49	35.38	38.71	73.97	52.72
	F 值 M	38.388*	1.92*	0.13	45.34**	2.43	2.08
	F value N	220.25**	8.47*	30.77*	203.43**	30.33*	11.06**
	M×N	19.27*	24.30**	13.98*	4.73*	3.23*	4.84**
2022	MoN ₀	8.24 e	34.74 bc	16.18 bc	21.24 d	62.00 b	41.79 ab
	MoN ₁	12.91 cd	33.38 c	16.10 bc	33.22 b	61.73 b	41.28 ab
	MoN ₂	20.04 a	42.39 a	21.89 a	35.62 b	50.75 c	38.97 bc
	MoN ₃	20.93 a	39.49 ab	19.11 ab	38.95 a	50.95 c	35.45 cd
	平均值 Mean	15.53	37.50	18.32	32.26	56.36	39.37
	McN ₀	4.41 f	16.74 d	6.80 e	27.18 c	68.81 a	42.23 ab
	McN ₁	11.81 d	30.20 c	12.95 cd	41.17 a	63.27 b	44.95 a
	McN ₂	14.14 c	30.08 c	11.55 d	39.15 a	52.85 c	32.27 d
	McN ₃	16.98 b	31.13 c	13.80 cd	39.65 a	49.87 c	32.00 d
	平均值 Mean	11.83	27.04	11.27	36.79	58.70	37.86
	F 值 M	2.77	29.55*	27.23*	44.90**	14.93	0.20
	F value N	143.05**	13.26**	10.47**	151.51**	76.76**	31.15**
	M×N	4.37*	5.76*	5.17*	7.70**	3.66*	7.40**

处理同表 2。M: 有机肥; N: 化学氮肥; M×N: 有机肥与化学氮肥互作。同列数据后不同字母表示处理间在 0.05 概率水平差异显著。
*和**分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平差异显著。

Treatments are the same as those given in Table 2. M: organic fertilizer; N: chemical nitrogen fertilizer; M×N: interaction between organic fertilizer and chemical nitrogen fertilizer. Values followed by different letters within a column indicate significant differences among treatments at the 0.05 probability level. * and ** indicate significance at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

2.5 减氮配施有机肥对机插稻氮素利用的影响

由表 8 可知, 减氮、有机肥配施及二者的交互作用对氮肥表观利用率、氮肥生理利用率、氮肥偏生产力的影响均达到显著或极显著水平。减氮处理下(2022 年), 氮素干物质生产效率、氮肥生理利用率、氮肥农学利用率、氮肥偏生产力显著上升, 均表现为 N₀ > N₁ > N₂ > N₃, 与只施化肥相比, 配施有机肥处理下, 除氮肥表观利用率、氮肥生理利用率外, 其余各指标均有所提高。

2022 年, 与 McN₃ 相比, McN₂、McN₁ 的氮素干物质生产效率分别提高 5.60%、16.42%, 氮肥表观利用率分别提高 22.89%、4.49%, 生理利用率分别提高 6.92%、41.58%, 氮肥农学利用率分别提高 31.86%、43.36%, 氮肥偏生产力分别提高 32.24%、85.58%。在有机肥与化肥配施的条件下, 适度降低氮肥用量有助于增强水稻对氮素的吸收, 从而提升氮肥利用率。以上结果表明, 减少 25% 的氮肥施用量的处理效果尤为显著。

表 8 减氮配施有机肥对机插稻氮素利用率的影响
Table 8 Effects of reduced nitrogen application combined with organic fertilizer on nitrogen use efficiency in mechanically transplanted rice

年份 Year	处理 Treatment	氮素干物质生产效率 Dry matter production efficiency of N (kg kg ⁻¹)	氮肥表观利用率 Use efficiency of N (%)	氮肥生理利用率 Physiological efficiency of N (kg kg ⁻¹)	氮肥农学利用率 Agronomic efficiency of N (kg kg ⁻¹)	氮肥偏生产力 Partial factor productivity of N (kg kg ⁻¹)
2021	MoN ₀	136.23 a	—	—	—	—
	MoN ₁	112.37 c	66.11 a	25.46 c	14.32 d	102.25 b
	MoN ₂	103.12 e	62.96 ab	23.58 d	16.03 c	76.54 d
	MoN ₃	91.95 f	57.07 c	21.66 e	13.45 e	61.95 e
	平均值 Mean	110.92	62.05	23.56	14.60	80.24
	McN ₀	136.90 a	—	—	—	—
	McN ₁	122.86 b	41.22 e	56.10 a	23.13 a	110.71 a
	McN ₂	106.24 d	51.68 d	37.51 b	19.38 b	81.51 c
	McN ₃	101.60 f	51.28 d	25.60 c	13.13 e	61.20 e
	平均值 Mean	116.90	48.06	39.74	18.55	84.47
	F 值 M	3.54	6.53*	31.33**	41.18**	52.77**
	F value N	341.24**	52.32**	216.55**	76.88**	231.20**
	M×N	55.43**	18.69**	12.34**	1.43	13.02**
2022	MoN ₀	107.06 b	—	—	—	—
	MoN ₁	94.79 c	51.87 d	47.17 a	19.45 c	110.49 b
	MoN ₂	82.95 e	57.24 b	27.61 c	17.27 d	77.52 d
	MoN ₃	76.91 f	56.18 bc	21.91 e	13.72 e	58.90 f
	平均值 Mean	90.43	55.09	32.23	16.81	82.30
	McN ₀	111.27 a	—	—	—	—
	McN ₁	90.99 d	56.14 bc	33.54 b	24.07 a	118.10 a
	McN ₂	82.54 e	66.03 a	25.33 d	22.14 b	84.16 c
	McN ₃	78.16 f	53.73 cd	23.69 de	16.79 d	63.64 e
	平均值 Mean	90.74	58.64	27.52	21.00	88.63
	F 值 M	1.38	73.54*	25.99**	40.12**	50.56**
	F value N	328.76**	44.97**	162.86**	81.68**	221.20**
	M×N	7.61*	20.83**	13.38**	1.76	4.49*

处理同表 2。M: 有机肥; N: 化学氮肥; M×N: 有机肥与化学氮肥互作。同列数据后不同字母表示处理间在 0.05 概率水平差异显著。
*和**分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平差异显著。
Treatments are the same as those given in Table 2. M: organic fertilizer; N: chemical nitrogen fertilizer; M×N: interaction between organic fertilizer and chemical nitrogen fertilizer. Values followed by different letters within a column indicate significant differences among treatments at the 0.05 probability level. * and ** indicate significance at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

3 讨论

3.1 减氮配施有机肥对机插稻产量和干物质积累的影响

施肥方式是调控水稻产量形成的关键栽培措施之一^[23]。本试验表明, 减氮处理下, 有效穗数、穗粒数和产量均随减氮量的增加而降低, 结实率与之相反。可能与氮素限制下光合产物向籽粒高效转运有关, 这与王玉雯等^[24]研究结果类似。有研究认为, 相

比单独施用化肥, 配合施用有机肥, 其缓释效应能够延长氮素供应窗口期, 促进分蘖成穗和籽粒分化^[25]、增加有效穗数及每穗粒数^[26], 而适度减氮则通过减少冗余生长优化群体结构, 进而提高产量^[27-28]。本研究表明, 适量减氮配施有机肥显著提高机插杂交稻产量, 其中配施有机肥下减氮 25%处理产量最高, 有效增加了机插杂交稻的有效穗数和千粒重, 形成库容和籽粒充实优势。

作为水稻灌浆期的主要光合器官, 剑叶的光合

能力决定了植株的同化物生产,进而影响籽粒充实和产量形成^[29]。前人研究表明,配施有机肥能够提高叶绿素含量^[30],进而提高光合效率^[31],为碳同化提供充足的光合产物。在本试验中,随着氮肥施用量的进一步减少,除齐穗期 LAI 外,部分光合指标均呈下降趋势,这可能是因为过量减少氮肥会限制水稻光合速率^[32-33]。适量减氮配施有机肥,使机插杂交稻叶面积扩大,高效叶面积率提高,同时延缓叶片衰老,在生育后期维持较高的叶绿素含量和剑叶净光合速率,提升干物质转运速率,为籽粒灌浆提供持续同化物供应,缓解减氮对光合性能的抑制效应^[34],为高产奠定基础。

干物质积累量是决定水稻产量高低的重要指标之一^[23],水稻籽粒的灌浆充实与干物质的积累、分配及转运密切相关。无机肥与有机肥的组合施用,能够提高水稻的群体生长速率和各部位干物质积累^[35],促进养分向籽粒运输^[36],提高水稻收获指数^[35],最终提高实际产量^[31-32]。本研究表明,在本试验条件下适量减氮 25%配施有机肥处理下,机插稻各生长期干物质积累量提高,特别是成熟期穗部干物质积累量提高显著,同时促进了干物质向穗部转运,从而提高产量。

3.2 减氮配施有机肥对机插稻氮素吸收与利用的影响

氮素利用效率的提升是水稻绿色生产的核心目标^[37]。前人研究表明,有机肥和无机肥配合施用处理能提高氮肥吸收利用率^[8]、氮肥农学利用效率^[38]、氮肥生理利用效率^[36,38]、氮肥偏生产力^[8,36]。适量减少氮肥施用量并配施有机肥,可以在保证水稻光合性能的前提下,提高肥料利用效率^[32],促进水稻的生长和发育,最终实现水稻的高产稳产。本研究结果显示,氮肥表观利用率随施氮量减少呈现下降趋势,但有机肥配施条件下实施适度减氮处理,可显著提升水稻干物质生产效能,同步改善氮素表观利用率、农学利用效率及偏生产力等多项指标。分析其原因可能是,有机肥、无机肥配施模式通过调控养分释放,更加贴合水稻生育阶段对养分的时空需求,这种“减量不减压”的供肥特征,既保障了齐穗期氮积累增幅,又避免了成熟期氮素过剩导致的贪青晚熟,为高产稳产提供了可持续的氮素利用基础。

减氮配施有机肥对水稻氮素积累与分配具有显著调控效应^[39]。在本试验中,与 McN_3 相比, McN_2 的茎鞘氮素转运量、贡献率降低,但叶片氮素贡献

率提高。减氮配施有机肥处理能够优化氮素在水稻生育后期的分配,提高穗部氮素的积累,干物质分配模式向生殖器官倾斜,增强籽粒的充实度和产量。与 Mo 相比, Mc 处理下的叶氮素转移量、叶氮素输出率分别提高了 14.04%、4.15%,这与前人的研究结果一致,有机肥配施可提高功能叶的氮素转运效率^[40]。试验数据进一步显示,有机肥配施结合减氮处理显著增加了水稻各营养器官的氮素贮存量,与 McN_3 相比, McN_2 在齐穗期、成熟期的穗部氮素积累量分别提高了 13.18%、1.39%。有机与无机养分缓释耦合水稻生育需求,避免成熟期氮过剩导致的贪青晚熟。水稻通过提升光合速率和延长功能叶持绿期,为籽粒灌浆构建了高效的碳氮代谢基础,促进干物质与氮素向穗部定向分配,降低茎鞘冗余转运,最终形成“足源大库”的高产架构。

4 结论

适量减氮配施有机肥通过协同调控干物质与氮素的积累及转运过程,显著影响机插稻产量形成,提高机插稻产量。一方面,减氮 25%配施有机肥 (McN_2) 优化了群体光合性能,延缓叶片衰老,提高齐穗期至成熟期的干物质总积累量,较常规施肥增产 6.04%,通过增强茎鞘与叶片干物质向穗部的转运效率,构建“足源大库”群体。另一方面,该处理促进了氮素在生育后期的再分配,提高机插稻氮素利用效率。二者协同作用下,光合产物向籽粒的定向供应能力增强,有效穗数、穗粒数及千粒重协同优化,最终实现机插稻高产与氮肥高效利用的平衡。本研究表明,“配施 1500 kg hm^{-2} 的有机肥+减施 25% 化学氮肥”是实现机插稻高产高效的推荐模式。该有机无机配施策略通过协同调控光合产物分配与氮素转运,在维持高产的同时优化了氮肥利用效率。在实际推广中,最佳替代比例应视有机肥种类与土壤肥力而定。综上,适量减氮配施有机肥能够兼顾产量提升与资源可持续利用,为机插稻绿色丰产栽培提供了实践依据。

References

- [1] van Dijk M, Morley T, Rau M L, et al. A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010–2050. *Nat Food*, 2021, 2: 494–501.
- [2] Huang Y Z, Ji Z, Tao Y J, et al. Improving rice nitrogen-use efficiency by modulating a novel monouniquitination machinery for optimal root plasticity response to nitrogen. *Nat Plants*, 2023, 9: 1902–1914.

- [3] 冷文如. 农业面源污染的影响因素及对策研究: 以四川省屏山县为例. 四川大学硕士学位论文, 四川成都, 2022.
- Leng W R. Research on Influencing Factors and Countermeasures of Agricultural Non-point Source Pollution: Taking Ping-shan County, Sichuan Province as An Example. MS Thesis of Sichuan University, Chengdu, Sichuan, China, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [4] Wang L, Zhou H L, Fei C. Substituting partial chemical nitrogen fertilizers with organic fertilizers maintains grain yield and increases nitrogen use efficiency in maize. *Front Plant Sci*, 2024, 15: 1442123.
- [5] Chen X P, Cui Z L, Vitousek P M, et al. Integrated soil-crop system management for food security. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108: 6399–6404.
- [6] Parasar B J, Agarwala N. Unravelling the role of biochar-microbe-soil tripartite interaction in regulating soil carbon and nitrogen budget: a *Panacea* to soil sustainability. *Biochar*, 2025, 7: 37.
- [7] Wang X Y, Zhu H, Hou S N, et al. Environmental impacts of fertilization during rice production in saline-alkali paddy fields based on life cycle assessment. *J Clean Prod*, 2024, 467: 142947.
- [8] 伍杂日曲, 郭长春, 李飞杰, 等. 减氮和机械侧深施肥对机插杂交稻产量及氮素吸收利用的影响. *核农学报*, 2022, 36: 1034–1041.
- Wu Z R Q, Guo C C, Li F J, et al. Effects of nitrogen reduction and mechanical side-deep fertilization on yield and nitrogen uptake and utilization of mechanically transplanted hybrid rice. *J Nucl Agric Sci*, 2022, 36: 1034–1041 (in Chinese with English abstract).
- [9] 侯红乾, 林洪鑫, 刘秀梅, 等. 长期施肥处理对双季晚稻叶绿素荧光特征及籽粒产量的影响. *作物学报*, 2020, 46: 280–289.
- Hou H Q, Lin H X, Liu X M, et al. Influence of long-term fertilizer application on chlorophyll fluorescence characteristics and grain yield of double cropping late rice. *Acta Agron Sin*, 2020, 46: 280–289 (in Chinese with English abstract).
- [10] 吴茜虞, 雷宝坤, 徐卓颖, 等. 洱海流域有机肥全量替代化肥满足水稻氮素营养并减少土壤气态活性氮排放. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30: 252–267.
- Wu Q Y, Lei B K, Xu Z Y, et al. Total organic fertilizer substitution of nitrogen fertilizer in Erhai watershed can satisfy rice nitrogen nutrition and reduce gaseous reactive nitrogen emission in paddy fields. *J Plant Nutr Fert*, 2024, 30: 252–267 (in Chinese with English abstract).
- [11] 秦建权, 冯跃华, 叶勇, 等. 有机无机肥配施对杂交水稻干物质生产、养分吸收及产量形成的影响. *中国稻米*, 2017, 23(3): 59–62.
- Qin J Q, Feng Y H, Ye Y, et al. Effects of combined inorganic-organic fertilizer on dry matter production, nutrient absorption and yield formation in hybrid rice. *China Rice*, 2017, 23(3): 59–62 (in Chinese with English abstract).
- [12] Zhao T C, He A B, Khan M N, et al. Coupling of reduced inorganic fertilizer with plant-based organic fertilizer as a promising fertilizer management strategy for colored rice in tropical regions. *J Integr Agric*, 2024, 23: 93–107.
- [13] 王海月, 李玥, 孙永健, 等. 不同施氮水平下缓释氮肥配施对机插稻氮素利用特征及产量的影响. *中国水稻科学*, 2017, 31: 50–64.
- Wang H Y, Li Y, Sun Y J, et al. Effects of slow-release urea on nitrogen utilization and yield in mechanically-transplanted rice under different nitrogen application rates. *Chin J Rice Sci*, 2017, 31: 50–64 (in Chinese with English abstract).
- [14] 王成, 马杨明, 王春雨, 等. 种植方式与施氮量对杂交水稻养分吸收特性及根系活力的影响. *作物学报*, 2024, 50: 3069–3082.
- Wang C, Ma Y M, Wang C Y, et al. Effects of planting methods and nitrogen application rates on nutrient uptake characteristics and root activity in hybrid *indica* rice. *Acta Agron Sin*, 2024, 50: 3069–3082 (in Chinese with English abstract).
- [15] 李珍珍, 周伟, 张培培, 等. 播种密度和方式对机插水稻分蘖成穗的影响. *核农学报*, 2021, 35: 722–736.
- Li Z Z, Zhou W, Zhang P P, et al. Effect of seeding density and method on tillering characteristics of mechanical transplanting in *indica* rice. *J Nucl Agric Sci*, 2021, 35: 722–736 (in Chinese with English abstract).
- [16] 孙园园, 张桥, 孙永健, 等. 不同育秧方式下播种量和插秧机具对机插稻氮素利用和产量的影响. *中国水稻科学*, 2021, 35: 595–605.
- Sun Y Y, Zhang Q, Sun Y J, et al. Effects of seeding quantity and transplanting machine type on nitrogen utilization and yield of mechanically transplanted rice in different seedling raising ways. *Chin J Rice Sci*, 2021, 35: 595–605 (in Chinese with English abstract).
- [17] 张军, 周冬冬, 许轲, 等. 淮北地区麦茬机插优质食味梗稻氮肥减量的精确运筹. *作物学报*, 2022, 48: 410–422.
- Zhang J, Zhou D D, Xu K, et al. Nitrogen fertilizer reduction and precise application model on mechanical transplanting *Japonica* rice with good taste quality under straw returning in Huaibei area. *Acta Agron Sin*, 2022, 48: 410–422 (in Chinese with English abstract).
- [18] 双龙, 妮萨娜, 杜江, 等. 重铬酸钾氧化-外加热法测定化探土壤样品中有机碳含量. *安徽化工*, 2016, 42(4): 110–112.
- Shuang L, Ni S N, Du J, et al. Determination of organic carbon in geochemical soil sample by potassium dichromate oxidation-heating method. *Anhui Chem Ind*, 2016, 42(4): 110–112 (in Chinese with English abstract).
- [19] 栗忱. 碱解扩散法测定土壤中碱解氮含量的测定条件分析. *新疆有色金属*, 2022, 45(1): 23–24.
- Li C. Analysis of determination conditions of alkali-hydrolyzable nitrogen content in soil by alkali-hydrolyzable diffusion method. *Xinjiang Youse Jinshu*, 2022, 45(1): 23–24 (in Chinese with English abstract).
- [20] 汪敬恒, 刘蕊, 马新荣, 等. 多元素长效碳铵颗粒肥中总氮含量的测定方法研究. *河南科学*, 2011, 29: 1045–1048.
- Wang J H, Liu R, Ma X R, et al. Determination of total nitrogen for multi-element long-acting granular ammonium bicarbonate. *Henan Sci*, 2011, 29: 1045–1048 (in Chinese with English abstract).
- [21] 赵金兰, 张树莲, 祁建峰. 硫酸-高氯酸-钼锑抗比色法测定土壤全磷的注意事项. *现代农业科技*, 2009(21): 234.
- Zhao J L, Zhang S L, Qi J F. Matters needing attention in determination of total phosphorus in soil by sulfuric acid-perchloric acid-molybdenum-antimony colorimetric method. *Mod Agric Sci*

- Technol, 2009(21): 234 (in Chinese with English abstract).
- [22] 何琳华, 曹红娣, 李新梅, 等. 浅析火焰光度法测定土壤速效钾的关键因素. 上海农业科技, 2012(2): 23.
He L H, Cao H D, Li X M, et al. Analysis on the key factors of determining soil available potassium by flame photometry. Shanghai Agric Sci Technol, 2012(2): 23 (in Chinese with English abstract).
- [23] 宋志文, 赵蕾, 毕俊国, 等. 滴灌条件下施氮量对不同氮效率水稻品种物质积累及养分吸收的影响. 作物学报, 2024, 50: 2025–2038.
Song Z W, Zhao L, Bi J G, et al. Effects of nitrogen fertilization levels on matter accumulation and nutrient uptake in rice cultivar with different nitrogen efficiency under drip irrigation. Acta Agron Sin, 2024, 50: 2025–2038 (in Chinese with English abstract).
- [24] 王玉雯, 郭九信, 孔亚丽, 等. 氮肥优化管理协同实现水稻高产和氮肥高效. 植物营养与肥料学报, 2016, 22: 1157–1166.
Wang Y W, Guo J X, Kong Y L, et al. Nitrogen optimize management achieves high grain yield and enhances nitrogen use efficiency of rice. J Plant Nutr Fert, 2016, 22: 1157–1166 (in Chinese with English abstract).
- [25] Anisuzzaman M, Rafii M Y, Jaafar N M, et al. Effect of organic and inorganic fertilizer on the growth and yield components of traditional and improved rice (*Oryza sativa* L.) genotypes in Malaysia. Agronomy, 2021, 11: 1830.
- [26] Muhindo D, Lelei J J, Munyahali W, et al. Irrigation management and biochar × mineral fertilization for improving rice yield and profitability. Agron J, 2025, 117: e21741.
- [27] 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. 植物营养与肥料学报, 2022, 28: 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 Plant Nutr Fert, 2022, 28: 1804–1815 (in Chinese with English abstract).
- [28] 张文学, 王少先, 金伟, 等. 有机无机氮肥比例对稻田土壤肥力和作物产量的短期效应. 植物营养与肥料学报, 2023, 29: 1300–1312.
Zhang W X, Wang S X, Jin W, et al. Short-term effects of organic to chemical nitrogen proportion on paddy soil fertility and double rice yield. J Plant Nutr Fert, 2023, 29: 1300–1312 (in Chinese with English abstract).
- [29] Elekhtyar N M, AL-Huqail A A. Influence of chemical, organic, and biological silicon fertilization on physiological studies of Egyptian *Japonica* green super rice (*Oryza sativa* L.). Sustainability, 2023, 15: 12968.
- [30] Jang Y H, Park J R, Kim E G, et al. OsBHLHq11, the basic helix-loop-helix transcription factor, involved in regulation of chlorophyll content in rice. Biology, 2022, 11: 1000.
- [31] Zhang H, Jing W J, Zhao B H, et al. Alternative fertilizer and irrigation practices improve rice yield and resource use efficiency by regulating source-sink relationships. Field Crops Res, 2021, 265: 108124.
- [32] 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. 应用生态学报, 2021, 32: 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. Chin J Appl Ecol, 2021, 32: 154–162 (in Chinese with English abstract).
- [33] Gao S, Zhou M, Xu J H, et al. The application of organic selenium (SeMet) improve the photosynthetic characteristics, yield and quality of hybrid rice. Plant Physiol Biochem, 2024, 208: 108457.
- [34] Kubar M S, Zhang Q, Feng M C, et al. Growth, yield and photosynthetic performance of winter wheat as affected by co-application of nitrogen fertilizer and organic manures. Life, 2022, 12: 1000.
- [35] 郭诗梦, 牟静怡, 翟文举, 等. 有机肥等氮替代化肥对粳稻产量及干物质积累的影响. 江苏农业科学, 2022, 50(19): 56–61.
Guo S M, Mou J Y, Zhai W J, et al. Influences of equal replacement of chemical fertilizer by organic fertilizer on yield and dry matter accumulation of *Japonica* rice. Jiangsu Agric Sci, 2022, 50(19): 56–61 (in Chinese with English abstract).
- [36] Hu Y J, Cai Q, Xu Y, et al. One-time fertilization of controlled-release urea with compound fertilizer and rapeseed cake maintains rice grain yield and improves nitrogen use efficiency under reduced nitrogen conditions. Front Plant Sci, 2023, 14: 1281309.
- [37] 郭超仪. 长江经济带粮油作物系统的资源环境评价与绿色发展策略. 西南大学博士学位论文, 重庆, 2023.
Guo C Y. Resource and Environmental Evaluation and Green Development Strategies for the Grain and Oil Crop Production System in the Yangtze River Basin. PhD Dissertation of Southwest University, Chongqing, China, 2023 (in Chinese with English abstract).
- [38] Zhu X J, Ros G H, Xu M G, et al. Long-term impacts of mineral and organic fertilizer inputs on nitrogen use efficiency for different cropping systems and site conditions in southern China. Eur J Agron, 2023, 146: 126797.
- [39] Liu B, Guo C Y, Xu J, et al. Co-benefits for net carbon emissions and rice yields through improved management of organic nitrogen and water. Nat Food, 2024, 5: 241–250.
- [40] Farooq M S, Majeed A, Ghazy A H, et al. Partial replacement of inorganic fertilizer with organic inputs for enhanced nitrogen use efficiency, grain yield, and decreased nitrogen losses under rice-based systems of mid-latitudes. BMC Plant Biol, 2024, 24: 919.