

邓俊, 杨尔保, 张珂源, 等. 减氮对四川丘陵区水稻生理特性、氮素利用及产量的影响[J]. 上海农业学报, 2026, 42(4): 1-11.

减氮对四川丘陵区水稻生理特性、氮素利用及产量的影响

邓俊, 杨尔保, 张珂源, 王然, 丁建明, 张荣萍, 兰艳, 马鹏*

(西南科技大学生命科学与农林学院, 四川绵阳 621000)

摘要:为探究四川丘陵区减氮措施对水稻氮素利用效率、生长发育及产量的影响, 筛选适合四川丘区的最佳氮肥用量, 以深优粤禾丝苗和徽两优粤禾丝苗为试验材料, 设置四个施氮量, 分别为 180 kg/hm²(CK)、150 kg/hm²(N-30)、120 kg/hm²(N-60)、0 kg/hm²(N-180), 分析氮肥减施对水稻叶面积指数、干物质积累、叶绿素含量、氮素利用率及产量形成的影响。结果表明, 与CK相比, 两品种在N-30处理下产量均无显著差异, 而在N-60和N-180处理下, 深优粤禾丝苗分别显著降低了8.03%和16.67%, 徽两优粤禾丝苗分别显著降低了15.15%和20.00%。分析产量构成因素表明, 在CK和N-30处理下, 两个品种的有效穗、每穗总粒数和千粒重均无显著差异, 结实率均在N-30处理下最高。生理指标表明, 在N-30处理下, 深优粤禾丝苗的干物质积累量和叶绿素含量均显著高于CK处理; 徽两优粤禾丝苗的酶活性在N-30下最高, 与N-30相比, N-180、N-60和CK的NR平均活性分别降低了47.83%、28.36%和14.13%, GS平均活性分别降低了37.58%、28.96%和21.53%。两个品种的氮素积累量和利用率在CK和N-30下均无显著差异。产量与氮素减施量的回归分析表明, 深优粤禾丝苗的产量在N-60和N-30处理间达到最大值, 为9665.52 kg/hm², 最适宜的施氮量为137.07 kg/hm², 徽两优粤禾丝苗的产量则随氮肥用量的增加而增加。因此综合产量和氮素利用效率等因素, 在四川弱光区将深优粤禾丝苗和徽两优粤禾丝苗的施氮量控制在150 kg/hm²能实现水稻稳产增效协同发展。

关键词:水稻; 氮肥减施; 生理特性; 氮素利用; 产量

中图分类号:S **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3924(2026)04-001-

Impacts of nitrogen reduction on rice physiological traits, nitrogen utilization efficiency and yield in the hilly region of Sichuan

DENG Jun, YANG Er-luo, ZHANG Ke-yuan, WANG Ran, DING Jian-min,

ZHANG Rong-ping, LAN Yan, MA Peng*

(College of Life Sciences and Agri-forestry, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621000, China)

Abstract: To explore the effects of nitrogen reduction measures on nitrogen use efficiency, growth and development, and yield of rice in the hilly areas of Sichuan Province, and to screen out the optimal nitrogen application rate suitable for this region, a field experiment was conducted using two rice variety, Shenyu Yuehe Simiao and Huiliangyou Yuehe Simiao. Four nitrogen application levels were set: 180 kg/hm²(CK), 150 kg/hm²(N-30), 120 kg/hm²(N-60), and 0 kg/hm²(N-180). The impacts of reduced nitrogen application on rice leaf area index, dry matter accumulation, chlorophyll content, nitrogen use efficiency, and yield formation were analyzed. The results showed that compared with CK, there was no significant difference in the yield of both variety under the N-30 treatment. However, under the N-60 and N-180 treatments, the yield of Shenyu Yuehe Simiao decreased significantly by 8.03% and 16.67%, respectively, while that of Huiliangyou Yuehe Simiao decreased significantly by 15.15% and 20.00%, respectively. Analysis of yield components indicated that under CK and N-30 treatments, there were no significant differences in the number of effective panicles, total grains per

投稿时间: 2025-10-24

[基金项目] 广适抗病高产三系杂交稻在印度尼西亚的选育与推广(2025YFHZ0119); 高产高效型“岳池米粉”专用稻种质资源的发掘及应用(2024NYF02); 国家重点研发计划项目“西南丘陵区多熟种植资源高效利用与机艺融合丰产增效技术集成”(2023YFD2301903)

作者简介: 邓俊(1998—), 女, 硕士, 主要从事水稻高产、优质、抗逆栽培研究。E-mail: 15528510375@163.com.

*通信作者: 马鹏, mapeng 7815640@163.com

panicle, and 1 000-grain weight of the two variety, and the seed setting rate was the highest under the N-30 treatment. The physiological index analysis revealed that under the N-30 treatment, the dry matter accumulation and chlorophyll content of Shenyou Yuehe Simiao were significantly higher than those under CK treatment. The enzyme activity of Huiliangyou Yuehe Simiao reached the peak under N-30 treatment; compared with N-30, the average nitrate reductase (NR) activity under N-180, N-60 and CK treatments decreased by 47.83%, 28.36% and 14.13%, respectively, and the average glutamine synthetase (GS) activity decreased by 37.58%, 28.96% and 21.53%, respectively. There were no significant differences in nitrogen accumulation and nitrogen use efficiency of the two variety between CK and N-30 treatments. Regression analysis between yield and nitrogen reduction rate showed that the yield of Shenyou Yuehe Simiao reached the maximum (9 665.52 kg/hm²) between N-60 and N-30 treatments, with the optimal nitrogen application rate of 137.07 kg/hm². In contrast, the yield of Huiliangyou Yuehe Simiao increased with the increase of nitrogen application rate. Therefore, considering comprehensive factors such as yield and nitrogen use efficiency, controlling the nitrogen application rate of Shenyou Yuehe Simiao and Huiliangyou Yuehe Simiao at 150 kg/hm² can achieve the coordinated development of stable yield and efficiency improvement of rice in the low-light hilly areas of Sichuan Province.

Key words: rice; nitrogen fertilizer reduction; physiological characteristics; nitrogen utilization; yield

近年来,随着人口增长和耕地资源的持续减少,水稻生产面临提高单产与增强可持续性的双重挑战^[1]。四川是水稻生产大省,四川盆地及周边低山丘陵区(如川中丘陵、成都平原等)因地形相对封闭,常年多云雾、阴雨,光照时长和强度显著低于省内其他区域,弱光胁迫已成为制约四川水稻可持续生产的限制因素之一^[2]。研究表明,弱光胁迫会导致水稻分蘖数和净光合速率下降,进而削弱水稻前期的营养生长,减缓干物质的生产与积累速度,减少分配至穗部的比例,最终导致水稻产量降低^[3]。在生产上,常通过施用化肥尤其是氮肥来稳产,而四川作为我国的农业大省,单位面积的化肥施用量显著超出全国平均水平47.76%^[4]。特别是近年来,随着农业集约化程度的提高,四川丘陵区的化肥使用量呈现出持续增长的趋势,这不仅打破了农田生态系统中作物-土壤-肥料之间的动态平衡,还引发了一系列生态环境问题。

而在弱光生态区,氮肥过量施用的问题更为复杂。这些地区由于日照时间短、光照强度弱,作物对氮素的吸收和利用效率本就受到限制,过量施用的氮肥无法被充分吸收,反而会通过多种途径造成环境破坏。研究表明,过量施氮会使土壤氮素过剩,导致农作物细胞壁变薄、茎蔓变粗、叶片大而薄易折断。同时,叶片肥大使植株间郁闭,通风透光与群体光能利用率降低,作物呼吸旺盛增加光合产物消耗、减少干物质积累,最终造成减产^[5-6]。这一系列反应在弱光条件下尤为显著,形成了恶性循环。同时过量施氮使得大量氮素通过氨挥发、径流等途径进入大气与水环境,造成环境污染^[7-8],如氨氮含量增加、酸雨和水体富营养化等^[9]。而减少氮肥施用量一方面可以降低土壤水溶性氮含量,减少其向氨气或硝酸气体的转化,从而降低气体中毒的风险,同时还能平衡土壤中的各种营养元素,避免因氮素过量而导致的磷、钾及微量元素吸收受阻,缓解土壤酸化进程,保护土壤团粒结构,维持土壤健康的化学环境。另一方面,合理的氮素水平可以优化作物的碳氮代谢平衡,促进光合产物在生殖生长和营养生长间的合理分配,提高经济产量。另外,氮肥减施可以影响土壤中氮转化菌群的组成和活性,进而调节氮素在土壤中的转化路径和留存时间。

在四川弱光区域,减施氮肥有望优化水稻的源-库-流平衡,提升生产效益。因此,本研究通过在四川丘陵区系统评估不同减氮幅度对水稻生长发育、产量与氮素利用效率的影响,来明确四川弱光区水稻田最适施氮量,提高资源利用效率,实现弱光区水稻的高产稳产,为四川西北丘陵区绿色施肥和稳产增效提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

深优粤禾丝苗是由安徽台沃农业科技有限公司、广东省农业科学院水稻研究所、国家杂交水稻工程研究中心清华深圳龙岗研究所联合选育的籼型三系杂交水稻品种,亲本组合为深95 A和粤禾丝苗。

徽两优粤禾丝苗是籼型两系杂交水稻品种,由西科农业集团股份有限公司联合广东省农科院水稻研究所、四川台沃种业有限责任公司等单位选育,亲本组合为1892S×粤禾丝苗。

两个品种均为生育期相近的代表性籼稻品质,均具有株型紧凑、分蘖能力强、抗倒伏、耐高温等特性。植株矮健,抗病性良好,产量高,米质达一级标准,食味品质优,已在四川省水稻生产中推广种植。

1.2 试验设计

试验于2024年在西南科技大学农园试验田(31°53'N, 104°70'E)进行,试验田土壤为紫色土,前作作物为小麦,年平均太阳总辐射量为4500 MJ/m²。采用随机区组设计,耕层土壤(0-20 cm)全氮含量为1.48 g/kg,全磷0.63 g/kg,全钾1.58 g/kg,碱解氮192.92 mg/kg,速效磷18.69 g/kg,速效钾133.96 mg/kg, pH值7.04。氮肥用普通尿素(含氮46%),设4个施氮量,分别为常规施氮180 kg/hm²(CK)、150 kg/hm²(N-30)、120 kg/hm²(N-60)、0 kg/hm²(N-180),基肥:蘖肥:穗肥=5:3:2;磷肥用过磷酸钙90 kg/hm²(以P₂O₅计),全部作为基肥施用;钾肥用氯化钾180 kg/hm²(以K₂O计),基肥:穗肥=5:5。于4月24日育秧,5月24日移栽,株行距为16 cm×30 cm,每穴栽插单株。小区面积为17.6 m²,设3次重复,共24个小区,各小区之间用覆塑料膜的田埂隔开,单排单灌,田间管理措施参照当地高产栽培模式。施肥量和时间如表1所示,各生育时期如表2所示。试验期间的气温和降雨量数据如图1所示。

表1 肥料施用量及时间

Table 1 Fertilizer application rate and time

处理	N			P ₂ O ₅ (5月23日)	K ₂ O	
	基肥(5月23日)	分蘖肥(5月30日)	穗肥(7月18日)		基肥(5月23日)	穗肥(7月18日)
N-180	0	0	0	90	90	90
N-60	60	36	24	90	90	90
N-30	75	45	30	90	90	90
CK	90	54	36	90	90	90

表2 水稻各生育时期

Table 2 Growth stages of rice

品种	分蘖期	拔节期	抽穗期	成熟期
深优粤禾丝苗	6月5日	7月11日	7月26日	8月31日
徽两优粤禾丝苗	6月5日	7月16日	8月5日	9月11日

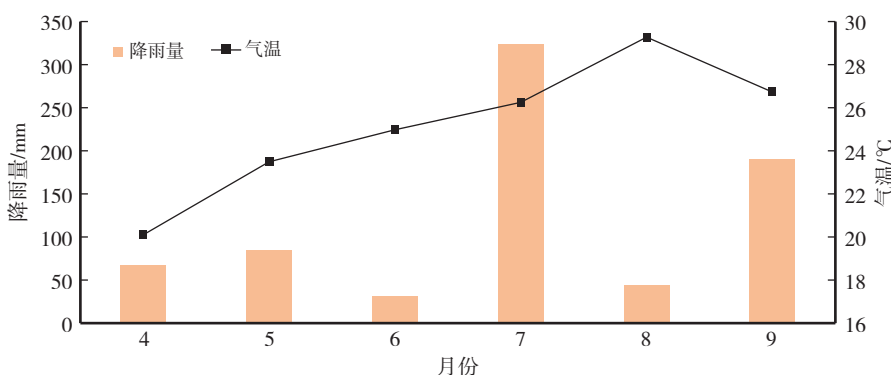


图1 2024年试验区温度和降雨量数据

Fig. 1 Temperature and rainfall data of the experimental area in 2024

1.3 测定项目及方法

1.3.1 叶面积系数、干物质积累量

于最高分蘖期、齐穗期、成熟期,每小区调查30穴植株的茎蘖数,计算单穴平均茎蘖数,按单穴平均茎蘖数取代表性植株3穴,测量叶片的长和宽(最高分蘖和齐穗期),计算叶面积系数;将3穴植株的地上部分分为茎、叶、穗(齐穗和成熟期)三部分,于105℃杀青30 min,75℃烘干至恒重,测定各部分干物质重量,并按以下公式计算相关参数^[10]:

干物质积累量(kg/hm²)=植株地上部各部位干物质质量之和

抽穗后干物质积累量(kg/hm²)=成熟期干物质积累量-齐穗期干物质积累量

茎叶干物质转运量(kg/hm²)=齐穗期茎叶干物质积累量-成熟期茎叶干物质积累量

茎叶干物质转运率(%)=茎叶干物质转运量/齐穗期茎叶干物质积累量

籽粒贡献率(%)=茎叶干物质转运量/成熟期籽粒干重

1.3.2 叶绿素含量

从齐穗期开始,每隔7 d取长势一致的剑叶,去掉叶脉和两端,剪碎混匀后称取0.2 g放入25 mL具塞试管中,加入20 mL 95%乙醇,密封后于暗处浸提24 h,采用分光光度计在663 nm和645 nm下测定吸光值,用以下公式计算叶绿素含量^[11]:

$$Ca=12.7 \times A_{663} - 2.69 A_{645}$$

$$Cb=22.9 \times A_{645} - 4.68 \times A_{663}$$

$$C(a+b)=Ca+Cb$$

1.3.3 酶活性

于齐穗0、7、14、21 d取长势一致的剑叶,去除叶脉,立即用液氮冷冻后置于-80℃超低温冰箱中保存,测定硝酸还原酶(NR)^[12]和谷氨酰胺合成酶(GS)^[13]活性。

1.3.4 植株全氮含量

将齐穗期与成熟期取得的干物质烘干粉碎后过100目筛(孔径为0.15 mm),采用H₂SO₄-H₂O₂法消煮,利用凯氏定氮法测定各器官含氮量,并按以下公式计算相关参数^[14]:

地上部氮素积累量(kg/hm²)=器官氮含量(%)×器官干重(kg)×种植密度(株/hm²);

氮肥吸收利用率(%)=(施氮区植株氮素积累总量-不施氮区植株氮素积累总量)/施氮量×100%;

氮肥农学利用率(kg/kg)=(施氮区稻谷产量-不施氮区稻谷产量)/施氮量;

氮肥贡献率(%)=(施氮区稻谷产量-不施氮区稻谷产量)/施氮区稻谷产量×100%

氮素收获指数=稻谷氮吸收量/成熟期植株氮总吸收量

氮肥偏生产力(kg/kg)=施氮区稻谷产量/施氮量

1.3.5 产量及其构成因子

于成熟期在每个小区按单穴平均有效穗数选取5株,将稻穗割下放入尼龙网袋中,自然风干至含水量低于14%后进行室内考种,测定实粒数、空瘪粒数和千粒重,并计算有效穗数、每穗粒数、结实率和产量。

1.4 数据处理与分析

采用Excel 2021进行数据整理,采用SPSS 26.0进行方差齐性检验,采用GraphPad Prism 10.2.3绘图。

2 结果与分析

2.1 氮肥减施对水稻产量及构成因子的影响

施氮量对水稻产量及其构成因子影响较大(表3)。深优粤禾丝苗产量随施氮量的增加呈先增加后降低的趋势,在N-30处理下达最大,为9 665.52 kg/hm²,与N-30相比,N-180、N-60和CK处理的产量分别降低了37.54%、17.43%和3.38%;而徽两优粤禾丝苗产量则表现为CK>N-30>N-60>N-180,与CK相比,在N-180、N-60和N-30处理下的产量分别降低了27.63%、17.43%和3.41%,各处理间均存在显著差异。

从产量构成因子看,深优粤禾丝苗的有效穗、结实率均在 N-30 处理下表现最好,与 N-30 相比,N-180、N-60 和 CK 的有效穗分别降低了 22.86%、14.86% 和 7.43%,结实率分别降低了 6.24%、0.33% 和 0.05%;每穗总粒数表现为 CK>N-30>N-60>N-180,各施氮量间有显著差异;除不施氮处理外,千粒重在各施氮量下无显著差异。徽两优粤禾丝苗的有效穗在 CK 处理下最高,分别比 N-180、N-60 和 N-30 增加了 25.00%、17.86% 和 4.43%;每穗总粒数在 N-30 与 CK 处理下无显著差异,但均显著高于 N-60 和 N-180 处理;结实率在 N-30 处理下最高,为 96.13%,显著高于其他处理;千粒重与深优粤禾丝苗表现一致,均显著高于不施氮处理。

方差分析表明,品种与有效穗和每穗粒数呈显著或极显著相关;施氮量与有效穗、每穗总粒数、结实率和千粒重均呈显著或极显著相关,最终对产量产生极显著影响;氮肥和品种互作对水稻的有效穗、每穗总粒数和结实率均有极显著影响,进而影响产量的形成,说明两个品种均是通过影响有效穗和每穗总粒数进而影响产量。

因此,为确定四川丘陵区机插稻的适宜施氮量,通过建立产量与施氮量的方程式(图 2),得出深优粤禾丝苗的最适宜的施氮量为 137.07 kg/hm²,徽两优粤禾丝苗产量则随氮肥用量的增加而增加。

表 3 不同施氮量对水稻产量及其构成因子的影响

Table 3 Effects of different nitrogen application rates on nitrogen use efficiency of rice on rice yield and its components						
品种(V)	施氮量(N)	有效穗($\times 10^4/\text{hm}^2$)	每穗总粒数(个)	结实率(%)	千粒重(g)	产量(kg/hm ²)
深优粤禾丝苗	N-180	187.50 c	147.40 b	85.40 b	25.58 b	6 036.77 c
	N-60	206.94 b	162.17 a	90.70 a	26.22 a	7 980.64 b
	N-30	243.06 a	165.60 a	91.08 a	26.37 a	9 665.52 a
	CK	225.00 a	169.87 a	91.03 a	26.84 a	9 338.65 a
徽两优粤禾丝苗	N-180	183.33 b	179.80 b	89.41 c	24.74 b	7 290.43 c
	N-60	194.44 b	182.73 a	89.48 c	26.17 a	8 318.25 b
	N-30	219.44 a	185.46 a	91.63 a	26.09 a	9 730.43 a
	CK	229.17 a	187.81 a	90.73 b	25.80 a	10 074.19 a
F 值	V	13.71*	41.32**	0.44	9.86	7.45
	N	85.08**	3.3*	2.36*	10.44*	44.65**
	V×N	7.06**	28.25**	165.90**	1.41	36.81**

注:V 表示不同水稻品种;N 表示不同施氮量,N-180:0 kg/hm²;N-60:120 kg/hm²;N-30:150 kg/hm²;CK:180 kg/hm²。同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著;*和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著性。

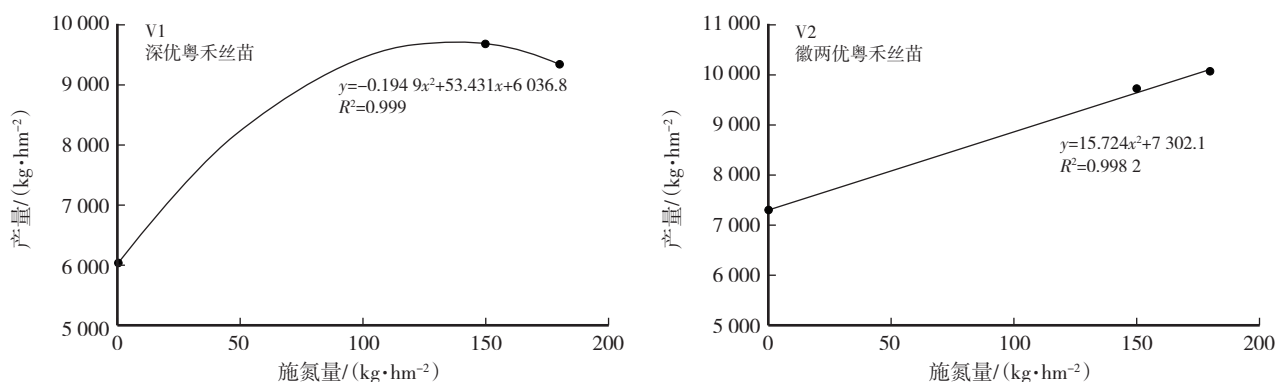


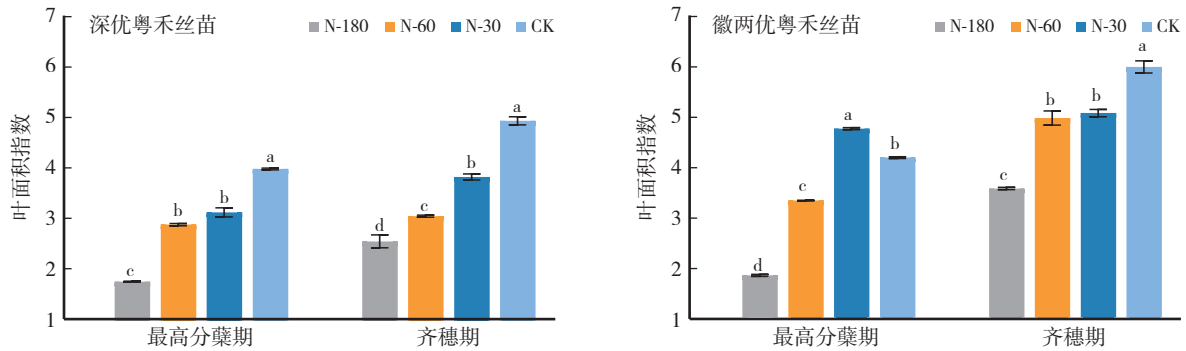
图 2 产量与施氮量的关系

Fig. 2 Relationship between yield and nitrogen application rate

2.2 氮肥减施对水稻叶面积指数的影响

施用氮素能显著提高水稻的叶面积指数(图 3)。在不同施氮量下,深优粤禾丝苗的叶面积指数在最高分蘖期和齐穗期表现一致,均为 CK>N-30>N-60>N-180,达到显著差异;徽两优粤禾丝苗的叶面积指数在最高分蘖期表现为 N-30 显著高于其他处理,而在齐穗期时则为 CK 处理最高,与其他处理有显著差异,N-30 和 N-60 处理间无显著差异。对于同一品种来说,齐穗期叶面积指数均显著高于最高分蘖期,与最高

分蘖期相比,深优粤禾丝苗的齐穗期叶面积指数在 N-180、N-60、N-30 和 CK 处理下分别增加了 45.20%、5.86%、22.29% 和 23.75%,徽两优粤禾丝苗分别增加了 93.99%、49.24%、6.55% 和 43.03%。



注: N-180: 0 kg/hm²; N-60: 120 kg/hm²; N-30: 150 kg/hm²; CK: 180 kg/hm²; 对于同一时期来说, 柱上无相同字母的表示差异显著 ($p < 0.05$)。

图3 不同施氮量对水稻叶面积指数的影响

Fig. 3 Effects of different nitrogen application rates on rice leaf area index

2.3 氮肥减施对水稻干物质积累及转运的影响

由表4可知,品种、氮肥、品种与氮肥互作对水稻干物质积累量均有显著或极显著影响;此外品种与干物质转运量和转运率显著相关,施氮量与干物质转运量极显著相关;品种和氮肥互作对干物质转运率和贡献率有极显著影响,说明施用氮素能显著促进干物质积累,且在150–180 kg/hm²施氮量下干物质积累和转运量及贡献率均能保持在较高水平。

在不同施氮量下,不同品种的干物质积累量表现不同,深优粤禾丝苗在N-30处理下的积累量最高,齐穗期和成熟期分别达到10 661.11 kg/hm²和15 934.03 kg/hm²,徽两优粤禾丝苗在CK处理下的积累量最高,齐穗期和成熟期分别达到13 282.64 kg/hm²和19 388.19 kg/hm²,均与其他处理有显著差异。从干物质转运量看,深优粤禾丝苗在N-30处理下最高,较N-180、N-60和CK处理分别增加了108.90%、34.03%和26.00%,徽两优粤禾丝苗在CK处理下最高,较N-180、N-60和N-30处理分别增加了123.24%、37.47%和19.76%。深优粤禾丝苗和徽两优粤禾丝苗的干物质转运率分别在N-60和CK处理下最高,说明不同品种的干物质转运率在对氮素的需求量上有较大差异。深优粤禾丝苗的籽粒贡献率表现为N-30>N-60>CK>N-180,N-60与N-30无显著差异,徽两优粤禾丝苗的籽粒贡献率表现为N-30>CK>N-60>N-180,N-30与CK无显著差异。

表4 不同施氮量对水稻干物质积累及转运的影响

Table 4 Effects of different nitrogen application rates on dry matter accumulation and translocation in rice

品种(V)	施氮量(N)	干物质积累量(kg/hm ²)		抽穗后干物质 积累量(kg/hm ²)	干物质转运量 (kg/hm ²)	干物质 转运率(%)	籽粒 贡献率(%)
		齐穗期	成熟期				
深优粤禾丝苗	N-180	5 347.22 d	10 113.89 d	4 766.67 b	1 279.17 c	28.99 b	18.33 c
	N-60	7 143.66 c	11 664.58 c	4 521.53 b	1 993.75 b	34.28 a	25.43 a
	N-30	10 661.11 a	15 934.03 a	5 272.92 a	2 672.22 a	30.73 b	26.96 a
	CK	8 656.25 b	14 245.14 b	5 588.89 a	2 120.83 b	29.70 b	22.98 b
徽两优粤禾丝苗	N-180	7 829.17 d	13 611.11 d	5 781.94 b	1 344.44 d	21.39 c	15.51 c
	N-60	10 567.16 c	17 478.47 b	6 911.11 a	2 183.33 c	25.79 b	19.49 b
	N-30	12 018.75 b	16 988.19 c	4 969.44 c	2 506.25 b	25.67 b	25.75 a
	CK	13 282.64 a	19 388.19 a	6 105.56 b	3 001.39 a	28.72 a	25.13 a
	V	147.63**	33.65*	344.88**	11.04*	85.74**	19.21**
F值	N	87.50**	13.04*	50.78**	76.43**	12.56**	81.31**
	V×N	45.28**	284.26**	134.45**	2.71	7.93**	14.32**

注: V表示不同水稻品种; N表示不同施氮量, N-180: 0 kg/hm²; N-60: 120 kg/hm²; N-30: 150 kg/hm²; CK: 180 kg/hm²; V×N为品种与氮肥互作; 同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著; *和**分别表示在0.05和0.01水平上显著性。

2.4 氮肥减施对水稻叶绿素含量的影响

施用氮素显著增加了水稻齐穗后叶片叶绿素含量(图4)。在同一时期,随着施氮量的增加,深优粤禾丝苗叶绿素含量呈先升后降趋势,徽两优粤禾丝苗则持续升高。齐穗后随天数增加,深优粤禾丝苗在N-180和N-60处理下叶绿素含量整体下降,N-30和CK处理在齐穗后7 d达到峰值后逐渐降低;除N-180处理外,徽两优粤禾丝苗叶绿素含量均表现为0 d>7 d>14 d>21 d。

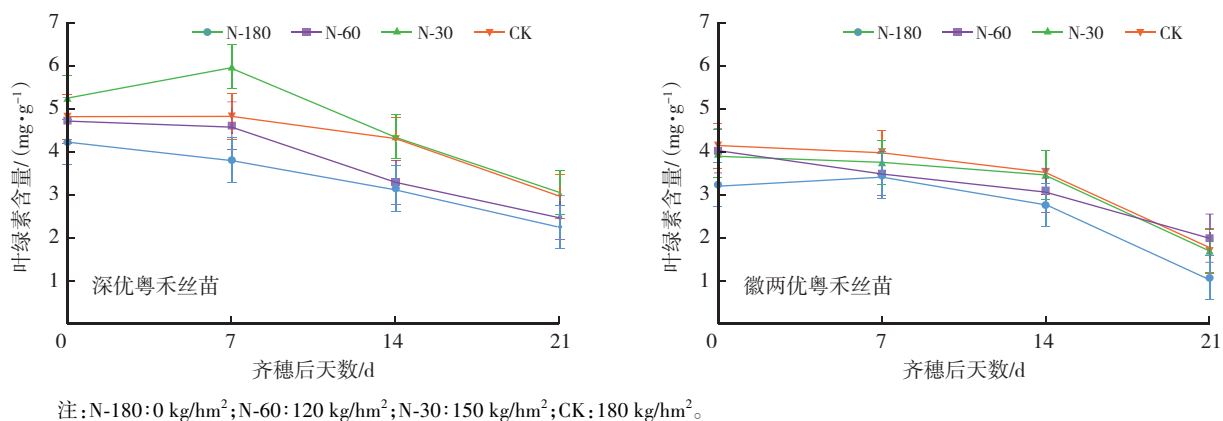


图4 不同施氮量对水稻叶绿素含量的影响

Fig. 4 Effects of different nitrogen application rates on chlorophyll content in rice

2.5 氮肥减施对水稻氮代谢相关酶活性的影响

两个品种在不同施氮量下,齐穗期水稻叶片中氮代谢酶存在显著差异(图5)。从齐穗后天数看,两个品种的NR酶活性均表现为随天数的增加逐渐降低。在同一时期,深优粤禾丝苗NR酶活性在各处理下表现一致,即CK>N-30>N-60>N-180;徽两优粤禾丝苗NR酶活性在N-180处理下最低,其他处理在齐穗0 d时表现为N-30>CK>N-60,各处理间有显著差异,在齐穗7-14 d时无显著差异,齐穗21 d与齐穗0 d表现一

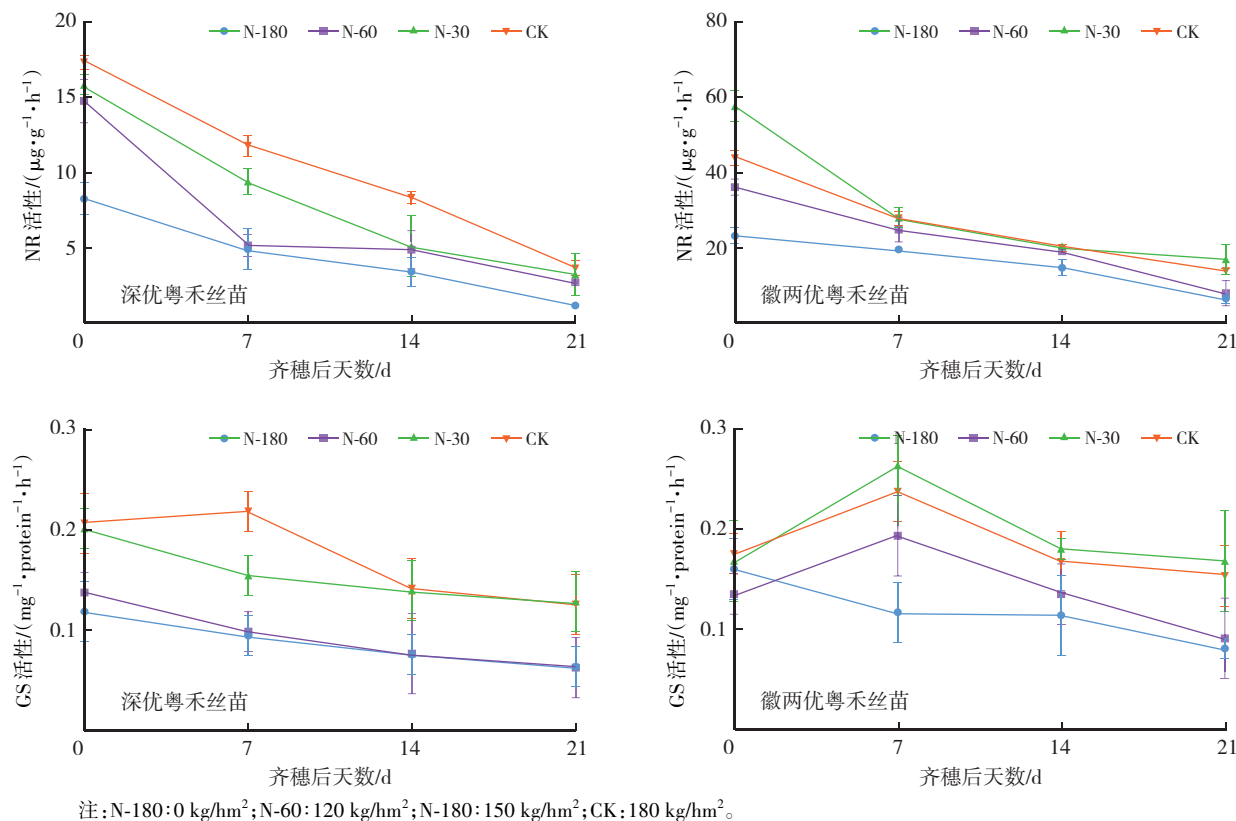


图5 齐穗期剑叶硝酸还原酶(NR)和谷氨酰胺合成酶(GS)活性

Fig. 5 Nitrate reductase(NR)and glutamine synthetase(GS) activities of flag leaves at heading stage

致,均为N-30>CK>N-60。深优粤禾丝苗的GS酶活性在CK处理下最高,且在0-7 d内有上升趋势;徽两优粤禾丝苗的GS酶活性则表现为N-30>CK>N-60>N-180,除N-180处理外,各处理在齐穗0-7 d内均有上升趋势,在7-21 d内逐步降低。

2.6 氮肥减施对水稻氮素积累的影响

由图6可知,不同部位的氮素积累量存在较大差异。在齐穗期各部位氮素积累量表现为茎>叶>穗,到成熟期时,大量氮素从茎鞘和叶片转移到穗部,为穗部灌浆和成熟提供了充足的养分。在齐穗期,随着施氮量的增加,深优粤禾丝苗的氮素积累量呈先增加后降低的趋势,在N-30处理下达最大,为151.06 kg/hm²;在成熟期则表现为N-180<N-60<N-30<CK,N-30与CK处理无显著差异。徽两优粤禾丝苗的氮素积累量在CK处理下达到最大,齐穗期和成熟期分别为161.82 kg/hm²和155.07 kg/hm²,说明适当施用氮素能增加植株氮素含量,而不同品种对氮素的吸收量也存在一定差异。

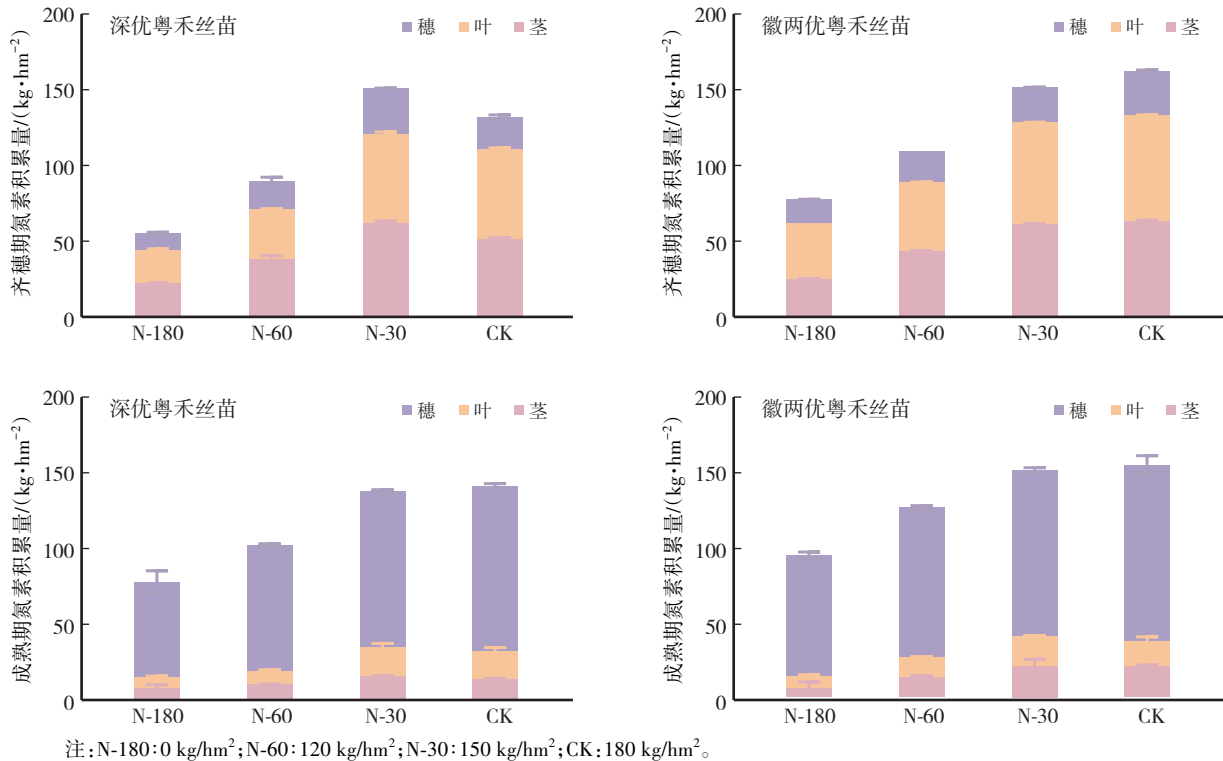


图6 不同施氮量下水稻植株各部位氮素积累量

Fig. 6 Nitrogen accumulation in different parts of rice plants under different nitrogen application rates

2.7 氮肥减施对水稻氮素利用效率的影响

施用氮肥显著提高了植株氮素积累量和利用率(表5)。深优粤禾丝苗的氮素积累量在CK处理下达最大,与N-180相比,N-60、N-30和CK分别提高了31.06%、76.30%和79.56%;徽两优粤禾丝苗的氮素积累量在CK处理下达最大,与N-180相比,N-60、N-30和CK分别提高了33.68%、59.64%和63.68%,两个品种在N-30与CK处理下均无显著差异。在不同施氮量下,两个品种的氮肥吸收利用率和氮肥农学利用率表现一致,即N-30>CK>N-60。深优粤禾丝苗氮肥贡献率在N-30处理下最高,达37.54%,其次是CK处理,N-60最低,而徽两优粤禾丝苗氮肥贡献率在CK处理下最高,达27.61%,其次是N-30处理,N-60最低。与氮素积累量和利用率相反,在不同施氮量下,氮素收获指数和氮肥偏生产力则随施氮量的增加而降低。此外,品种与氮素积累量、氮肥农学利用率、氮肥贡献率和氮肥偏生产力达极显著相关性;施氮量与氮素积累量、氮肥吸收利用率、氮肥农学利用率、氮肥贡献率、氮素收获指数和氮肥偏生产力均有极显著相关性;品种与施氮量互作对氮肥吸收利用率、氮肥农学利用率、氮肥贡献率和氮肥偏生产力有极显著相关性。

表5 不同施氮量对水稻氮素利用效率的影响

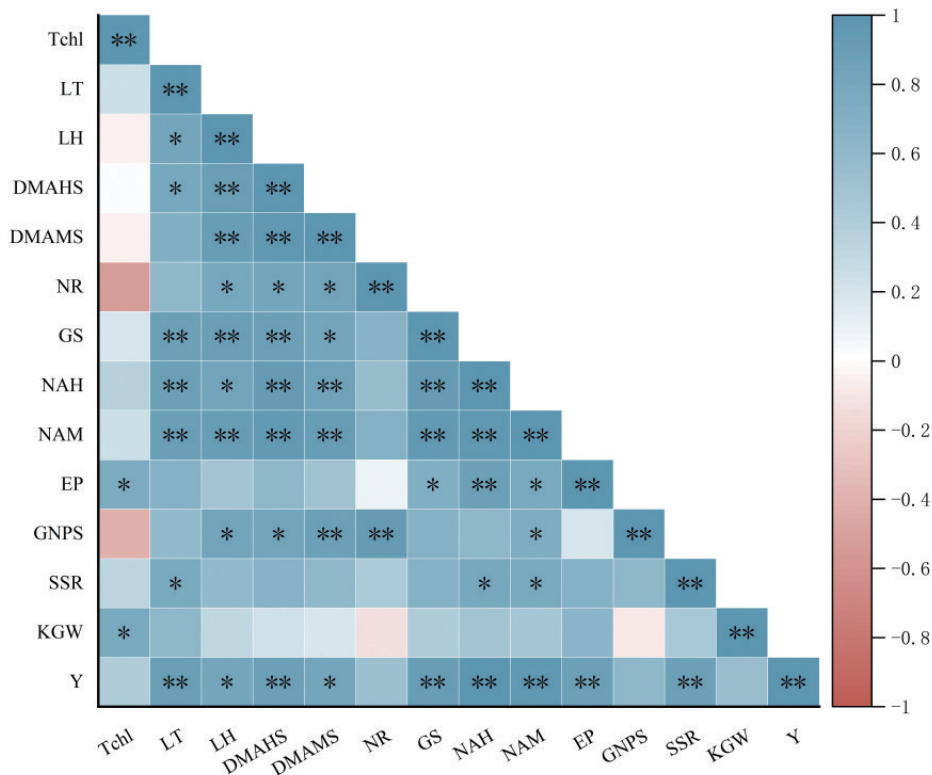
Table 5 Effects of different nitrogen application rates on nitrogen use efficiency of rice

品种(V)	施氮量(N)	氮素积累量	氮肥吸收利用率(%)	氮肥农学利用率(kg/kg)	氮肥贡献率(%)	氮素收获指数	氮肥偏生产力(kg/kg)
深优粤禾丝苗	N-180	77.97 c				0.80 a	
	N-60	102.19 b	20.19 c	16.2 c	24.36 b	0.81 a	66.50 a
	N-30	137.46 a	39.66 a	24.19 a	37.54 a	0.75 b	64.44 a
	CK	140.00 a	34.46 b	18.34 b	35.36 a	0.77 ab	51.88 c
徽两优粤禾丝苗	N-180	94.74 c				0.85 a	
	N-60	126.65 b	26.59 b	8.57 b	12.35 b	0.79 b	69.32 a
	N-30	151.24 a	37.66 a	16.26 a	25.08 a	0.73 c	64.87 a
	CK	155.07 a	33.51 a	15.47 a	27.61 a	0.76 bc	55.98 b
F值	V	120.29**	1.29	520.55**	992.53**	0.13	82.41**
	N	323.05**	80.08**	284.85**	650.68**	11.26**	984.07**
	V×N	2.24	6.84**	36.93**	19.42**	2.54	15.76**

注: V表示不同水稻品种; N表示不同施氮量, N-180: 0 kg/hm²; N-60: 120 kg/hm²; N-30: 150 kg/hm²; CK: 180 kg/hm²; V×N为品种与氮肥交互; 同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著; *和**分别表示在0.05和0.01水平上显著性。

2.8 各指标的相关性分析

由图7可知, 从水稻整个生育时期的农艺性状来看, 叶绿素含量与有效穗和千粒重呈显著正相关。最高分蘖期和齐穗期叶面积指数、齐穗期和成熟期干物质积累量、GS酶活性与齐穗期和成熟期氮素积累量呈极显著正相关。齐穗期和成熟期氮素积累量与叶面积指数、干物质积累量、酶活性、呈极显著正相关。产量与叶面积指数、干物质积累量、GS酶活性、氮素积累量有效穗和结实率均呈显著正相关。



注: Tchl, 总叶绿素含量; LT: 最高分蘖期叶面积指数; LH: 齐穗叶面积指数; DMAHS: 齐穗干物质积累量; DMAMS: 成熟干物质积累量; NR, 硝酸还原酶; GS: 谷氨酰胺合成酶; NAH: 齐穗期氮素积累量; NAM: 成熟期氮素积累量; EP: 有效穗; GNPS: 每穗着粒数; SSR: 结实率; KGW: 千粒重; Y: 产量。*: 0.05水平上显著; **: 0.01水平上显著。

图7 产量与农艺性状和氮素积累量的相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis between yield, agronomic traits and nitrogen accumulation

3 讨论

3.1 水稻产量对氮肥减施的响应

施用氮肥是提高水稻产量的重要途径之一,其施用量对土壤肥力、产量均有着显著影响^[15]。研究表明不同氮肥施用量下水稻有效穗、每穗粒数、千粒重和产量均随着施氮量增加表现为先升后降的趋势,在施氮量为 150 kg/hm²时达到最大产量^[16]。说明高氮条件下,氮素没有被水稻充分地吸收利用,不利于产量的持续提高。赵艳岭等^[17]研究表明,减氮可将氮肥农学利用效率和偏生产力分别提高 34% 和 9%,同时在产量构成上通过提高结实率(5%~8%)与千粒重(2%~4%)补偿穗数略降的负面影响,实现“减氮不减产”。在本试验中,N-30处理降低了深优粤禾丝苗的每穗总粒数和千粒重,但增加了有效穗和结实率,同样达到了“减氮不减产”的效果。此外,随着施氮量的增加,徽两优粤禾丝苗的有效穗和每穗总粒数有所增加,但结实率和千粒重均呈下降趋势,最终产量与N-30处理无显著差异。这与前人研究结果一致。因此,适度减氮可减少冗余生长,优化群体结构,进而提高产量。

3.2 水稻生理指标对氮肥减施的响应

叶片是水稻生产与输出同化物的重要器官,适宜的叶面积指数和叶绿素含量对提高水稻干物质积累量和产量有着至关重要的作用。前人研究表明,适量施用氮肥能促进叶面积指数、叶绿素含量的提高^[18-19]。本试验中,两品种的叶绿素含量均随齐穗后时间推移而下降,这是水稻由营养生长向生殖生长过渡过程中功能叶衰退加速的典型表现。灌浆阶段植株需将光合产物和营养物质由叶片重新分配至籽粒,使叶片衰老进程提前并导致叶绿素含量逐渐降低。在施氮水平较高的CK处理中,两品种的叶面积指数显著增大,使得冠层结构趋于郁闭,中下部叶片光照不足,通风透光性下降,群体长期承受弱光胁迫。而适度减氮虽然使叶面积指数略有降低,但显著改善了群体冠层结构,有效提高了群体整体光合效率^[10]。

干物质积累量是产量形成的物质基础。研究表明,干物质转运量及其对穗部的贡献率会随施氮量的增加呈抛物线式的变化趋势^[20]。适量减氮 25% 配施有机肥可使水稻各生长期干物质积累量提高,同时促进干物质向穗部转运,从而提高产量^[21]。本试验表明,深优粤禾丝苗的干物质积累量、转运量和籽粒贡献率均表现为先增后降的变化趋势,而徽两优粤禾丝苗在CK处理下的干物质积累量和转运量最高,但籽粒贡献率低于N-30。通过分析氮代谢关键酶活性发现,CK虽然提高了深优粤禾丝苗的NR和GS的活性,但其干物质和产量却并未得到提高,说明弱光条件已显著限制光合作用,而过量施氮进一步提高了维持高氮代谢所需的能量和碳骨架消耗,形成“高氮×弱光”的耦合胁迫效应。适度减氮(N-30)则能够使氮代谢处于更为协调的状态,增强群体光合能力和干物质向籽粒转运的比例,为籽粒灌浆提供更稳定的同化物供应,进而提高水稻产量。

适量施用氮肥可以促进水稻对氮素的吸收和积累,过量施用氮肥则容易降低氮肥利用效率^[22-23]。有研究表明,适量施用氮肥能提高氮素积累量,但当施氮量超过 150 kg/hm²时成熟期氮素积累量增加幅度放缓^[24]。本研究与之一致,两品种成熟期氮素积累量均在CK处理下达到最大,但与N-30处理均无显著差异。此外,本研究发现籽粒中氮素积累量占比随着施氮量的降低而降低,氮肥吸收利用率和农学利用率在N-30处理最高,氮素收获指数和氮肥偏生产力更是表现出随施氮量的增加而降低的趋势,这也与尹鑫军^[25]等的研究结果一致,因此适量减氮反而能提高水稻氮积累量和利用率,是促进高产稳产的重要管理措施。

本研究发现,深优粤禾丝苗和徽两优粤禾丝苗在氮素利用和产量方面存在差异,这可能和两品种在氮素吸收及利用途径上的遗传特性有关。深优粤禾丝苗表现出强的氮素吸收能力,更依赖高的氮素摄取速率来形成生产力;徽两优粤禾丝苗在遗传上更倾向于协调碳氮代谢,从而增强氮素向籽粒的转运效率,表现出较高的氮素生理利用效率。在产量构成方面,深优粤禾丝苗分蘖能力强,群体规模大,主要通过较多的有效穗数来实现高产;相比之下,徽两优粤禾丝苗则更侧重于穗大粒重,灌浆充实。然而,作物表型同时受基因型与环境的影响,本研究得出的品种表现可能与2024年试验区气候或土壤条件有关。因此,为进一步验证结果的稳定性,并确定其在不同生态环境下的适用性,后续还需在多个生长季节和多个生态区开展多年、多点验证试验。

4 结论

适当减氮可兼顾产量与生理特性,其中,较CK减氮16.67%(150 kg/hm²,N-30)处理的水稻生理指标和氮素利用率表现最佳,其有效穗、每穗总粒数和千粒重与CK处理无显著差异,结实率高于CK处理。基于产量与施氮量的方程式得出,深优粤禾丝苗在137.07 kg/hm²时可获得较高产量,为9 665.52 kg/hm²,徽两优粤禾丝苗产量随施氮量增加呈上升趋势。综合产量和氮素利用效率,在四川弱光区将深优粤禾丝苗和徽两优粤禾丝苗的施氮量控制在150 kg/hm²,可实现稳产与减氮双目标。

参 考 文 献

- [1] YU Q G, YE J, YANG S N, et al. Effects of nitrogen application level on rice nutrient uptake and ammonia volatilization[J]. *Rice Science*, 2013, 20: 139-147.
- [2] AN Z S, HUANG R J, ZHANG R Y, et al. Severe haze in northern China: A synergy of anthropogenic emissions and atmospheric processes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(18): 8657-8666.
- [3] 高泽雨. 弱光胁迫对稻麦生长生理、产量和品质的影响[D]. 南京信息工程大学, 2025.
- [4] 庞庆. 四川农田生态环境问题及川中紫色丘陵区农田生态系统可持续发展研究[D]. 四川大学, 2004.
- [5] 郭浪, 肖敏, 崔璨, 等. 施氮量对小粒型杂交稻产量与氮素利用效率的影响[J]. *杂交水稻*, 2023, 38(5): 108-114.
- [6] 徐冉, 陈松, 徐春梅, 等. 施氮量对籼粳杂交稻甬优1540产量和氮肥利用效率的影响及其机制[J]. *作物学报*, 2023, 49(6): 1630-1642.
- [7] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant Acidification in Major Chinese Croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [8] 刘新宇, 巨晓棠, 张丽娟, 等. 不同施氮水平对冬小麦季化氮去向及土壤氮素平衡的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2): 296-303.
- [9] JIANG J Y, JIANG S S, XU J Y, et al. Lowering nitrogen inputs and optimizing fertilizer types can reduce direct and indirect greenhouse gas emissions from rice-wheat rotation systems[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2020, 97: 103152.
- [10] 廖雪环, 张珂塬, 阿尔力色, 等. 柯杈肥与功能肥复配对接杂交稻生长与产量的影响[J]. *浙江农业学报*, 2024, 36(11): 2447-2455.
- [11] 郭胜伟, 高云东. 比色法测定中华芦荟叶片中叶绿素含量方法的研究[J]. *中医药学刊*, 2004(1): 53-76.
- [12] 吴强盛. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018.
- [13] 陈明霞, 周彩云, 李明军, 等. 光呼吸和谷氨酰胺合成酶抑制剂对水稻冠层NH₃挥发的影响[J]. *植物科学学报*, 2011, 29(2): 206-211.
- [14] 周宇, 孙童, 张艳红, 等. 施氮量对不同源库类型粳稻物质积累与氮素吸收的影响[J]. *中国农业科学*, 2025, 58(11): 2096-2117.
- [15] 李海渤, 冯慧敏, 杨春亚, 等. 不同施肥处理对土壤质量及芥菜产量与品质的影响[J]. *广东农业科学*, 2024, 51(7): 13-24.
- [16] 郭齐霞. 氮肥施用对水稻干物质积累产量和氮肥利用率的影响[J]. *农业技术与装备*, 2024(7): 157-159.
- [17] 赵艳岭, 余海波, 林蔚伦, 等. 不同氮肥运筹下2种主栽粳稻生长发育和加工品质的差异[J]. *大麦与谷类科学*, 2024, 41(1): 49-56+73.
- [18] 宋晓华, 柳楷婧, 彭波, 等. 施氮水平对豫南地区杂交粳稻群体质量和产量的影响[J]. *杂交水稻*, 2019, 34(4): 39-43.
- [19] 石爱龙, 祝海竣, 唐舟, 等. 氮肥与密度对水稻光合特性和产量的影响[J]. *杂交水稻*, 2022, 37(2): 109-117.
- [20] 韩志丽, 许桂玲, 冯跃华, 等. 不同地力条件下施氮量对杂交籼稻干物质积累、氮肥利用率和产量的影响[J]. *中国稻米*, 2023, 29(2): 34-39.
- [21] 刘宁, 樊平, 王成, 等. 减氮配施有机肥对机插稻产量形成与氮素利用的影响[J/OL]. *作物学报*, 1-16[2025-12-12].
- [22] 黄乾龙, 王楚桃, 欧阳杰, 等. 施氮量及栽插密度对广适型杂交籼稻Q6优28产量和品质的影响[J]. *杂交水稻*, 2019, 34(3): 39-43.
- [23] 唐健, 唐闯, 郭保卫, 等. 氮肥施用量对机插优质晚稻产量和稻米品质的影响[J]. *作物学报*, 2020, 46(1): 117-130.
- [24] 张凤杰, 李扬, 王宏伟, 等. 不同施氮量对节水抗旱稻产量及氮肥利用效率的影响[J]. *北方水稻*, 2025, 55(4): 1-7+17.
- [25] 尹鑫军, 王鑫澳, 尹新芳, 等. 不同施氮量对玫两优系列水稻品种产量及氮素利用效率的影响[J]. *山东农业科学*, 2025, 57(7): 116-122.