

王坤庭,陶钰,邢志鹏,等. 穗肥施氮量和结实期遮光对水稻产量和干物质积累特征的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(8):105-110.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.08.020

穗肥施氮量和结实期遮光对水稻产量和干物质积累特征的影响

王坤庭,陶钰,邢志鹏,冯源,郭力,赵欣怡,缪孙静,陈慧敏,胡雅杰

(扬州大学江苏省作物栽培生理重点实验室/江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心,江苏扬州 225009)

摘要:穗肥施氮量和结实期遮光通过改变灌浆结实期植株营养和叶片光合影响水稻产量。以淮稻 5 号、南粳 9108 为材料,设置 3 种穗肥施氮量处理和结实期 2 种光照处理,研究穗肥施氮量和结实期遮光对水稻产量及其构成因素和干物质积累特征的影响。结果表明,随穗肥施氮量的增加,结实期 2 种光照处理下水稻产量均表现为先增后降的趋势。结实期遮光显著降低了水稻产量,且水稻产量于穗肥施氮量处理间的差异也减小。穗肥施氮量的增加有利于有效穗数和穗粒数的增加,群体颖花量同时增加,但结实率和千粒质量下降。结实期遮光显著降低水稻的结实率和千粒质量。随穗肥施氮量的增加,水稻成熟期干物质积累量增加,淮稻 5 号抽穗至成熟阶段的干物质积累量增加,南粳 9108 抽穗至成熟阶段的干物质积累量呈先增后降的趋势。与自然光照处理相比,结实期遮光显著减少了水稻成熟期干物质积累量和抽穗至成熟阶段干物质积累量与比例。水稻抽穗至成熟阶段的光合势随穗肥施氮量的增加而增大,群体生长率和净同化率呈先增大后减小的趋势。结实期遮光提高了各穗肥施氮量处理下水稻抽穗至成熟阶段的光合势,但显著降低了群体生长率和净同化率。

关键词:穗肥施氮量;结实期遮光;产量;光合物质;积累特征

中图分类号:S511.04 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)08-0105-06

水稻是高温短日照作物,光照度是影响水稻植株生长与产量形成的主要气候因子之一^[1]。充足

的光照是水稻叶片光合和产量形成的必然条件。相关研究表明,80% 以上的水稻产量来源于结实期水稻叶片的光合产物,光照不足则显著抑制叶片光合作用以及干物质积累与产量形成,且生育后期的光照度差异对水稻产量形成的影响更大^[2]。近几十年的卫星资料统计报道,陆地区域地表太阳辐射通量总体上呈逐年减少趋势,各国家和地区的地表太阳辐射通量与全球变化趋势基本一致^[3]。受气候异常变化和环境污染的影响,寡日照可能逐步成

收稿日期:2021-10-21

基金项目:国家自然科学基金(编号:31801293);江苏省大学生创新创业训练计划(编号:202011117087Y)。

作者简介:王坤庭(2000—),男,河南焦作人,主要从事水稻优质高产栽培技术研究。E-mail:389157462@qq.com。

通信作者:邢志鹏,博士,助理研究员,主要从事水稻优质丰产精简化栽培技术研究。E-mail:zpxing@yzu.edu.cn。

[13] 罗永华,张吉民,牛瑞明,等. 氯化钙对坝亚 7 号亚麻种子萌发及幼苗活力的影响[J]. 贵州农业科学,2014,42(1):48-50.

[14] 宋松泉. 种子生物学研究指南[M]. 北京:科学出版社,2005.

[15] 李合生. 植物生理学实验技术指导[M]. 北京:高等教育出版社,2001.

[16] Khajeh - Pour M. Industrial crops[M]. Isfahan: University Jihad Publications of Isfahan Branch,2004.

[17] 孙莲强,顾学花,张佳蕾,等. 锌肥对花生生理特性、产量及品质的影响[J]. 花生学报,2014,43(1):1-6.

[18] McAinsh M R, Brownlee C, Hetherington A M. Calcium ions as second messengers in guard cell signal transduction[J]. Physiologia Plantarum,1997,100(1):16-29.

[19] 刘振宇,于雯,张倩文,等. 不同化学试剂浸种对银杏种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 临沂大学学报,2019,41(6):32-38.

[20] 李妹芳. 转 BADH 基因植物的抗逆性与钙离子信号及热激蛋白的关系[D]. 泰安:山东农业大学,2013.

[21] 周录英,李向东,王丽丽,等. 钙肥不同用量对花生生理特性及产量和品质的影响[J]. 作物学报,2008,34(5):879-885.

[22] 李永胜,杜建军,赵荣芳,等. 花生中微量元素营养特性及研究进展[J]. 花生学报,2011,40(2):24-28.

[23] 张佳蕾,郭峰,孟静静,等. 钙肥对旱地花生生育后期生理特性和产量的影响[J]. 中国油料作物学报,2016,38(3):321-327.

[24] 熊路,曾红远,吴佳宝,等. 花生钙素营养研究进展[J]. 中国农学通报,2012,28(12):13-17.

[25] Gong M, Li Y J, Dai X, et al. Involvement of calcium and calmodulin in the acquisition of heat - shock induced thermotolerance in maize seedlings[J]. Journal of Plant Physiology, 1997,150(5):615-621.

为制约水稻生长的重要生态因子。寡照影响水稻的生长发育,特别是结实期的连续寡日照,易致水稻籽粒充实不良,籽粒光合产物不足,胚乳淀粉等有机物质积累少,成熟期推迟甚至不能正常成熟,造成减产^[4]。氮素是影响水稻产量形成最敏感的元素之一,特别是穗期合理施用氮肥不仅可以协调产量各因素之间的关系来提高产量,还可以通过调控籽粒灌浆过程中物质的合成、积累与转运来协调稻米中碳氮营养的比例来达到改善品质的作用^[5-6]。

水稻产量的形成实际上是水稻植株干物质生产、积累与分配的结果,因此提高群体干物质积累量是实现高产的有效途径^[7-8]。抽穗至成熟阶段是水稻产量形成的关键时期,该阶段水稻植株干物质生产、积累与分配的多少与水稻群体叶片光合强弱、氮素营养好坏等因素直接相关。其中结实期光照强弱是直接影响水稻叶片光合作用的关键因子,穗肥氮肥施用是直接影响稻株营养好坏的关键因子^[9-10]。二者复合作用通过影响结实期植株碳氮代谢途径,进而影响水稻群体光合物质生产和产量形成,碳代谢途径强、氮代谢途径弱常会引起植株早衰等现象,而氮代谢途径强、碳代谢途径弱常会引起植株贪青晚熟等现象,只有当二者维持在一个协调、平衡的水平,才能达到最佳的光合物质生产能力和产量形成能力^[11]。穗肥施氮量和结实期光照强弱是直接影响这一途径的关键因子,而关于穗肥施氮量和结实期光照度复合作用对水稻产量形成的影响尚缺乏系统的比较研究。因此,本研究以常规粳稻为材料,在穗肥施氮量和结实期遮光复合作用下探索水稻产量和干物质积累特征,以期对光氮资源高效综合利用的水稻丰产优质高效栽培技术集成创新提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

2019、2020 年在江苏省姜堰市沈高镇试验创新基地开展试验。土壤地力中等,为潴育型亚类黏土,质地黏性。试验地前茬种植小麦,产量为 6.97 t/hm²。0~20 cm 土层中,有机质含量为 38.3 g/kg、全氮含量为 2.01 g/kg、速效磷含量为 53.28 mg/kg、速效钾含量为 173.34 mg/kg。

试验材料为淮稻 5 号,江苏徐淮地区淮阴农业科学研究所选育;南粳 9108,江苏省农业科学院

选育。

1.2 试验设计

2019、2020 年 2 年均于 5 月 31 日播种,采用盘式塑料软盘育秧,每盘播种量 110 g,早育管理,培育壮秧;于 6 月 18 日人工模拟机械移栽,行距 30.0 cm,株距 12.0 cm,每穴 4 苗。

试验各小区基肥用量一致,基肥、分蘖肥各施纯氮 94.5 kg/hm²,于穗肥施用时期设置 3 个施用量处理,以大面积生产全程施氮量 270 kg/hm² (基肥:穗肥=7:3) 中穗肥用量 81 kg/hm² 为标准量(N2),在标准量基础上减量 50% (N1) 和在标准量基础上增量 50% (N3)。各小区基施 135 kg/hm² 的 P₂O₅,135 kg/hm² 的 K₂O,促花肥施 135 kg/hm² 的 K₂O,其中磷肥施用过磷酸钙,钾肥施用氯化钾。结实期光照处理采用人工遮阴控制水稻冠层光照,于抽穗期(50% 稻穗露出剑叶叶鞘)至成熟期全程设置,包括自然光照(S0)、50% 自然光照(S50,采用遮阳网遮光,遮阳网距离地面高度 2 m,四周通风透光,遮光后光照度为自然光照度的 50%)。

试验采用裂区试验设计,结实期光照处理为主区,穗肥施氮量处理为裂区,水稻品种为小裂区,小区面积 25 m²,各处理重复 3 次。小区间作土埂并用塑料薄膜包覆以保证单独排灌。除氮肥用量、光照处理外,水分管理及病虫害防治按照高产栽培要求实施。

1.3 测定内容与分析方法

1.3.1 干物质积累量和叶面积指数 在拔节期、抽穗期和成熟期进行测定,各小区按照调查的茎蘖平均数取 5 穴代表性植株样本,用叶面积仪(LI-3100,LI-COR,USA)测定植株叶面积,采用 105 ℃ 条件下杀青 30 min,80 ℃ 条件下烘干至恒质量的方法测定植株干物质积累量。

1.3.2 产量及其构成 有效穗数于成熟前测定,各小区采用 5 点取样法普查 100 穴进行计算。根据有效穗数的普查结果,各小区取代表性 10 穴进行每穗粒数和结实率测定。成熟后,各小区收割 8 m² 稻谷,测定水分,折算实产(14.5% 含水量)。以 1 000 个实粒样本(干种子)称质量,重复 5 次(误差不超过 0.05 g),测定千粒质量。

1.4 统计与分析

采用 Microsoft Excel 2013 进行数据录入和处理,采用 SPSS 22.0 软件进行数据统计与分析。2 年试验结果趋势一致,本研究以 2019 年的数据为主进

行阐述。

2 结果与分析

2.1 穗肥施氮量和结实期遮光对水稻产量及其构成因素的影响

2.1.1 产量 随着穗肥施氮量的增加,2 种结实期光照处理下水稻的产量均呈 $N_2 > N_3 > N_1$ 的趋势(表 1),除 2020 年南粳 9108 的 S50 处理外, N_1 的水稻产量显著低于 N_3 。在相同穗肥施氮量处理下,S0 处理的水稻产量显著高出 S50 处理 40.3% ~ 48.3% (2019 年)、19.8% ~ 28.5% (2020 年)。在穗肥施氮量和结实期光照的影响下,水稻产量表现出 $S_0N_2 > S_0N_3 > S_0N_1 > S_50N_2 > S_50N_3 > S_50N_1$ 的变化趋势,且 N_1 处理下结实期光照处理间的水稻产量差异小于 N_2 和 N_3 处理。

表 1 穗肥施氮量、结实期遮光对水稻产量及其构成因素的影响

品种	光照处理	施氮处理	有效穗数 (万穗/hm ²)	每穗粒数	群体颖花量 (万朵/hm ²)	结实率 (%)	千粒质量 (g)	实产(t/hm ²)	
								2019 年	2020 年
淮稻 5 号	S0	N1	304.95b	113.70c	38 759.10c	92.78a	28.17a	9.71b	9.36b
		N2	364.65a	118.83b	43 337.25b	89.09a	28.06a	10.45a	10.24a
		N3	375.15a	123.30a	46 263.75ab	83.15b	27.69b	10.25a	10.07a
	S50	N1	343.95b	113.58c	39 073.50c	70.05c	26.91c	6.92d	7.46d
		N2	367.05a	122.40ab	44 928.45ab	65.51d	26.72cd	7.44c	7.97c
		N3	379.20a	126.03a	47 796.90a	60.25e	26.36d	7.18d	7.93c
南粳 9108	S0	N1	334.95b	122.64c	41 071.05b	93.60a	27.05a	9.98b	9.89b
		N2	360.45a	129.09b	46 537.80a	88.28b	26.86a	10.62a	10.41a
		N3	376.50a	133.28ab	50 173.65a	82.13c	26.41b	10.50a	10.25a
	S50	N1	336.15b	120.02c	40 349.55b	70.18d	25.75c	6.86d	8.10c
		N2	362.10a	130.12b	47 124.75a	66.51e	25.29cd	7.50c	8.49c
		N3	375.45a	136.02a	51 072.00a	59.07f	24.65d	7.08d	8.36c

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。表 1 至表 5 同。

2.2 穗肥施氮量和结实期遮光对水稻干物质积累特征的影响

2.2.1 干物质积累量 2 种结实期光照处理下,水稻抽穗期和成熟期干物质积累量对穗肥施氮量增加的响应趋势一致,均随穗肥施氮量的增加而增加, N_1 处理的抽穗期和成熟期干物质积累量显著低于 N_3 处理(表 2)。与 S50 处理相比,S0 处理的水稻成熟期干物质积累量显著增加 14.9% ~ 18.0%。受穗肥施氮量和结实期遮光的影响,水稻成熟期干物质积累量表现为 $S_0N_3 > S_0N_2 > S_0N_1 > S_50N_3 > S_50N_2 > S_50N_1$ 。

2.2.2 阶段干物质积累量 水稻拔节前的干物质积累量于穗肥施氮量和结实期遮光处理间差异不

2.1.2 产量构成因素 从表 1 可以看出,S0、S50 处理下水稻的群体颖花量均随穗肥施氮量的增加而升高,结实率和千粒质量则下降。相同穗肥施氮量下,2 种结实期光照处理下水稻的群体颖花量无显著差异,S0 处理的水稻结实率和千粒质量分别显著高于 S50 处理 32.4% ~ 39.0% 和 4.6% ~ 7.1%。S0 处理下水稻结实率和千粒质量于穗肥施氮量处理间的差异小于 S50 处理。在穗肥施氮量和结实期光照的影响条件下,结实率和千粒质量受的影响大于群体颖花量,均呈 $S_0N_1 > S_0N_2 > S_0N_3 > S_50N_1 > S_50N_2 > S_50N_3$ 的趋势。

进一步分析水稻群体颖花量的构成发现,随穗肥施氮量的增加,2 种结实期光照处理下水稻的有效穗数和穗粒数均升高。S0 和 S50 处理间,水稻的有效穗数和穗粒数无显著差异。

显著。同一结实期光照处理下, N_3 处理的水稻拔节至抽穗期干物质积累量分别较 N_2 和 N_1 增加 5.8% ~ 9.9% 和 10.0% ~ 20.8%。抽穗至成熟期干物质积累量对穗肥施氮量增加的响应于品种间有差异,淮稻 5 号呈增加的趋势,南粳 9108 呈先增加后减少的趋势。结实期光照处理对抽穗至成熟期的干物质积累量影响显著,与 S50 处理相比,S0 处理显著增加了 52.4% ~ 65.0% (表 2)。

2.2.3 阶段干物质积累比例 水稻播种至拔节期和抽穗至成熟期的干物质积累比例对穗肥施氮量增加的响应趋势于 2 种结实期光照处理下表现一致,播种至拔节期干物质积累比例呈 $N_1 > N_2 > N_3$ 的趋势,抽穗至成熟期干物质积累比例呈 N_2 处理

表2 穗肥施氮量和结实期遮光对水稻主要生育阶段干物质积累量的影响

品种	光照处理	施氮处理	干物质积累量(t/hm ²)		阶段干物质积累量(t/hm ²)		
			抽穗期	成熟期	播种至拔节	拔节至抽穗	抽穗至成熟
淮稻5号	S0	N1	11.26b	18.16b	4.49a	6.77c	6.90b
		N2	11.74a	19.32a	4.39a	7.35b	7.58a
		N3	12.07a	19.74a	4.27a	7.80a	7.67a
	S50	N1	11.33b	15.80d	3.93a	7.39b	4.48d
		N2	11.83a	16.78c	4.14a	7.69a	4.95c
		N3	12.24a	17.28c	4.11a	8.13a	5.03c
南粳9108	S0	N1	11.53c	18.39c	4.14a	7.38c	6.86b
		N2	11.93b	19.58b	3.99a	7.94b	7.65a
		N3	12.76a	20.13a	4.04a	8.73a	7.36a
	S50	N1	11.41c	15.58e	4.43a	6.98c	4.17d
		N2	11.98b	16.67d	4.30a	7.69b	4.69c
		N3	12.61a	17.07d	4.18a	8.43a	4.46cd

高于 N1 和 N3 处理的趋势(表 3)。水稻拔节至抽穗期干物质积累比例表现为 N3 高于 N1 和 N2 处理的趋势。结实期光照处理影响了水稻阶段干物质积累比例,结实期遮光增加了播种至拔节期和拔节至抽穗期的干物质积累比例,显著降低了抽穗至成熟期的干物质积累比例。

表3 穗肥施氮量和结实期遮光对水稻主要生育阶段干物质积累比例的影响

品种	光照处理	施氮处理	干物质积累比例(%)		
			播种至拔节期	拔节至抽穗期	抽穗至成熟期
淮稻5号	S0	N1	24.72a	37.28d	38.00b
		N2	22.73c	38.04d	39.22a
		N3	21.64c	39.51c	38.85a
	S50	N1	24.89a	46.78a	28.33d
		N2	24.66ab	45.84b	29.50c
		N3	23.78b	47.09a	29.13cd
南粳9108	S0	N1	22.53d	40.16d	37.31b
		N2	20.36e	40.55d	39.09a
		N3	20.06e	43.36c	36.58b
	S50	N1	28.44a	44.78c	26.78d
		N2	25.77b	46.11b	28.12c
		N3	24.50c	49.37a	26.14d

2.3 穗肥施氮量和结实期遮光对水稻叶面积指数的影响

由于各处理小区基肥一致,移栽期和拔节期水稻的叶面积指数于处理间差异不显著(表 4)。2 种结实期光照处理下水稻抽穗期和成熟期叶面积指数均表现为 N3 > N2 > N1。与结实期自然光照处理相比,结实期遮光显著增加了成熟期水稻植株叶面积指数。受穗肥施氮量和结实期光照的影响,成

熟期叶面积指数表现为 S50N3 > S50N2 > S50N1 > S0N3 > S0N2 > S0N1 的趋势。表明穗肥施氮量增加和结实期遮光均具有增加成熟期水稻叶面积指数的作用。

表4 穗肥施氮量和结实期遮光对水稻叶面积指数的影响

品种	光照处理	施氮处理	叶面积指数			
			移栽期	拔节期	抽穗期	成熟期
淮稻5号	S0	N1	0.84a	3.65a	6.97b	3.06c
		N2	0.92a	3.52a	7.32ab	3.37b
		N3	0.86a	3.60a	7.51a	3.50b
	S50	N1	0.92a	3.64a	6.89b	3.92a
		N2	0.89a	3.57a	7.39a	4.01a
		N3	0.87a	3.61a	7.47a	4.04a
南粳9108	S0	N1	0.93a	4.06a	7.03c	3.25d
		N2	0.88a	4.14a	7.41ab	3.54c
		N3	0.89a	4.11a	7.58a	3.67c
	S50	N1	0.81a	4.08a	7.10c	3.78bc
		N2	0.86a	4.14a	7.27bc	3.83ab
		N3	0.93a	4.09a	7.41ab	3.95a

2.4 穗肥施氮量和结实期遮光对水稻群体生长率、光合势和净同化率的影响

试验中各处理间基肥一致,因此播种至拔节期间的水稻群体生长率、光合势、净同化率均无显著差异(表 5)。穗肥施氮量处理后,水稻拔节至抽穗期的群体生长率、光合势和净同化率均随着穗肥施氮量的增加而增大。水稻抽穗至成熟期光合势随穗肥施氮量的增加而增大,S50 处理下水稻抽穗至成熟期的光合势较 S0 平均升高 7.99%。水稻抽穗至成熟期群体生长率和净同化率表现为 N2 大于 N1 和 N3 处理,S50 较 S0 处理分别显著降低 38.92% 和 42.53%。因此,适宜穗肥施氮量可提高水稻抽穗至

表 5 穗肥施氮量和结实期遮光对水稻群体生长率、光合势和净同化率的影响

品种	光照施氮处理		群体生长率[g/(m ² ·d)]			光合势(m ² ·d/m ²)			净同化率[g/(m ² ·d)]		
	处理	处理	播种至拔节	拔节至抽穗	抽穗至成熟	播种至拔节	拔节至抽穗	抽穗至成熟	播种至拔节	拔节至抽穗	抽穗至成熟
淮稻 5 号	S0	N1	7.74a	19.91d	12.78b	105.71a	180.39ab	270.79d	2.75a	3.88c	2.69a
		N2	7.57a	21.62cd	13.78a	99.12a	184.23ab	294.01c	2.72a	4.17bc	2.71a
		N3	7.37a	22.94ab	13.22ab	110.27a	188.95a	319.45b	2.59a	4.31ab	2.52a
	S50	N1	6.78a	21.75c	8.14c	102.79a	179.15b	297.28c	2.42a	4.27b	1.55b
		N2	7.13a	22.62bc	8.69c	109.44a	186.46a	325.03b	2.51a	4.31ab	1.57b
		N3	7.08a	23.93a	8.39c	110.50a	188.31a	345.25a	2.49a	4.51a	1.50b
南粳 9108	S0	N1	6.90a	21.72c	12.95a	121.82a	188.47c	272.19d	2.38a	4.02b	2.64a
		N2	6.64a	23.35b	13.92a	124.97a	196.23ab	301.11c	2.28a	4.16b	2.66a
		N3	6.73a	25.67a	12.69a	123.33a	198.80a	326.37b	2.31a	4.53a	2.35a
	S50	N1	7.38a	20.52c	7.59b	120.61a	190.13bc	299.36c	2.56a	3.76c	1.44b
		N2	7.16a	22.61b	8.22b	124.47a	193.94ab	316.43bc	2.46a	4.07b	1.53b
		N3	6.97a	24.79a	7.44b	118.66a	195.45a	340.90a	2.42a	4.44a	1.35b

成熟期的植株光合物质生产能力,结实期遮光则显著降低了水稻的光合物质生产能力。

3 讨论与结论

干物质积累量是水稻产量形成的物质基础。前人研究发现,灌浆结实期遮光会减缓水稻生长发育,显著减少水稻干物质积累量^[12-13],适量增施氮肥可减轻遮光对干物质积累的影响^[14-15]。王强等采用盆栽试验,研究发现,抽穗后干物质积累量随光照度的减弱而减少,随着氮素水平的增加呈现先升后降的趋势,同时弱光下的植株在降低氮素水平下具更高的干物质生产能力,强光下则相反^[11]。黄丽芬等通过水培研究发现,随氮素水平的升高,地上部的干物质积累量显著增加,遮光对地上部的干物质积累从生育前期抑制作用转到生育后期的促进作用,在成熟期弱光处理(自然光照度的 81.88%)下氮肥施用量越大,水稻干物质积累量越大^[10]。本试验在穗肥施用时期进行了氮肥施用量处理,增施氮肥促进了水稻拔节至抽穗阶段的干物质生产与积累,因此抽穗期干物质积累量随施氮量的增加而显著增加。穗肥施氮量对抽穗至成熟阶段的干物质积累量的影响因品种差异而表现不同,其中淮稻 5 号抽穗至成熟阶段的干物质积累量表现为 N3 > N2 > N1,南粳 9108 表现为 N2 处理高于 N3 和 N1 处理,这可能与 2 个水稻品种物质生产能力、生育进程、结实期环境温光特征等不同有关。成熟期供试水稻干物质积累量随穗肥施氮量的增加而增加,但干物质积累量增幅减小。结实期光照处理主要影响了水稻抽穗至成熟阶段的干物质积累能

力,表现为 S50 显著低于 S0 处理。在穗肥施氮量和结实期光照的互作影响下,各穗肥施氮量处理的水稻成熟期干物质积累量在结实期遮光处理下均少于自然光照处理,且表现为 SON3 > SON2 > SON1 > S50N3 > S50N2 > S50N1。由此可见,适度增施穗氮用量可以减轻结实期遮光对抽穗至成熟期干物质积累的不利影响,但在遮光照度大和遮光时间长的条件下,通过增施穗肥减轻遮光对干物质积累的不利影响效应减弱。

水稻群体生长率、光合势、净同化率与干物质积累密切相关,且对穗肥施氮量和结实期遮光响应明显。邓安凤等研究发现,在一定施氮量范围内,结实期水稻群体生长率、群体叶面积指数和总颖花数均随着施氮量的增加而增加^[16]。王亚江等认为,水稻光合势随施氮量增多而上升,但穗后 20 d 遮光处理下的水稻光合势小于不遮光处理^[17]。本试验研究发现,随着穗肥施氮量的增加,水稻拔节至抽穗期群体生长率、光合势和净同化率呈上升趋势,可能与穗肥施用促进拔节至抽穗期水稻植株生长,茎秆充实,叶片变长增宽,抽穗期叶面积指数增大,干物质积累量增加有关^[18]。抽穗至成熟期的水稻光合势上升与穗肥施氮量增加和遮光互作减缓了叶面积衰减和延长了水稻叶片持绿时间有关。但过量穗肥施氮量可能会引起抽穗期叶片交错,群体郁闭,不利于叶片光合作用,使得抽穗至成熟期群体生长率和净同化率下降,灌浆结实期遮光同样减弱了叶片光合能力,水稻群体生长率和净同化率显著降低^[19]。穗肥施氮过量虽不利于结实期群体生长率和净同化率提高,但延缓了叶片延缓衰老,水

稻成熟期推后,在环境温度适宜的条件下,水稻有效光合物质生产时间延长,因此在 2 种光照条件下,成熟期干物质积累增加。

穗肥施氮量和结实期遮光对水稻产量有显著的调控作用。刘博等研究发现,随遮光照度的增加,水稻千粒质量、结实率和产量显著下降,且遮光照度增加,上述指标下降幅度增大,在遮光 60% (重度遮光) 的情况下,水稻产量降低达 63.98%,千粒质量降低达 55.94%,结实率降低达 72.10%^[4]。Wei 等以 2 个粳型超级稻为研究对象,认为在较低氮水平下抽穗后遮光 20 d 会降低每穗粒质量和水稻产量,高施氮量(300 kg/hm²)可以抵消遮光对二次枝梗数和每穗粒质量的不利影响,从而提高遮光处理产量^[5]。潘圣刚等研究发现,在单层遮阴下通过增施氮肥可以减轻遮阴对杂交水稻产量的不利影响,穗期施氮下水稻有效穗、每穗粒数、水稻产量都显著高于穗期不施氮处理,而结实率和千粒质量却显著低于穗期不施氮^[14]。本试验中,穗肥施氮量 N2 处理的水稻产量较高,说明合理范围内增加穗肥施氮量是增加水稻产量的有效途径。结实期遮光主要通过引起结实率和千粒质量的显著下降,进而引起水稻产量的显著降低^[20-22]。增施氮肥可以缓解结实期遮光对产量形成的不利影响,过量增施氮肥会降低干物质向籽粒的转运,因为植株在高穗肥氮素和遮光的共同作用下,水稻群体库容增加,但群体贪青迟熟,虽增加了抽穗至成熟阶段的干物质积累,但籽粒灌浆充实减弱,从而造成产量下降^[23-25]。试验中观测到在穗肥施氮量和结实期遮光的共同作用下,水稻粒质量呈规律性变化,这可能与形成的灌浆结实期贪青或早熟的不同类型群体及不同碳氮代谢能力梯度型差异的群体有关^[14],可为研究以籽粒灌浆为主线的水稻籽粒形成、品质形成特征与机制提供理论基础。

参考文献:

- [1] 杨东,段留生,谢华安,等. 花前光照亏缺对水稻物质积累及生理特性的影响[J]. 中国生态农业学报,2011,19(2):347-352.
- [2] 蔡昆争,骆世明. 不同生育期遮光对水稻生长发育和产量形成的影响[J]. 应用生态学报,1999,10(2):193-196.
- [3] 杜彦修,晏云,季新,等. 沿黄稻区水稻灌浆期遮阴对产量和品质的影响及耐弱光粳稻品种筛选[J]. 植物遗传资源学报,2019,20(5):1160-1169.
- [4] 刘博,韩勇,解文孝,等. 灌浆结实期弱光对水稻产量、生理及品质的影响[J]. 中国稻米,2008,14(5):36-40.
- [5] Wei H Y,Zhu Y,Qiu S,et al. Combined effect of shading time and nitrogen level on grain filling and grain quality in japonica super rice [J]. Journal of Integrative Agriculture,2018,17(11):2405-2417.
- [6] 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.
- [7] 邹应斌. 粳型超级杂交水稻高产栽培研究进展[J]. 沈阳农业大学学报,2007,38(5):707-713.
- [8] 万淑红,田应兵,许昌雨,等. 氮素调控对水稻黄华占生长发育及产量的影响[J]. 江苏农业科学,2020,48(6):68-72.
- [9] 罗亢,曾勇军,胡启星,等. 不同时期弱光胁迫对晚稻不同耐弱光品种源库特征及叶片保护酶活性的影响[J]. 中国水稻科学,2018,32(6):581-590.
- [10] 黄丽芬,全晓艳,张蓉,等. 光氮及其互作对水稻干物质积累与分配的影响[J]. 中国水稻科学,2014,28(2):167-176.
- [11] 王强,钟旭华,黄农荣. 光氮互作对水稻开花后物质生产和产量的影响[J]. 中国稻米,2015,21(4):53-55.
- [12] Thangaraj M,Sivasubramanian V. Effects of low light intensity on growth and productivity of irrigated rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Madras Agriculture Journal,1990,77:220-224.
- [13] Mawaki M,Morita S,Suga T,et al. Effect of shading on root system morphology and grain yield of rice plants (*Oryza sativa* L.). I. An analysis on root length density [J]. Japanese Journal of Crop Science,1990,59(1):89-94.
- [14] 潘圣刚,闻祥成,莫钊文,等. 施氮量和遮阴对不同基因型水稻产量及一些生理特性的影响[J]. 中国水稻科学,2015,29(2):141-149.
- [15] Kobata T,Sugawara M,Takatu S. Shading during the early grain filling period does not affect potential grain dry matter increase in rice[J]. Agronomy Journal,2000,92(3):411-417.
- [16] 邓安凤,杨从党,陈清华,等. 不同施肥方式对不同密度下直播稻的产量及群体光合物质生产的影响[J]. 中国稻米,2017,23(4):123-129.
- [17] 王亚江,葛梦婕,颜希亭,等. 光、氮及其互作对超级粳稻产量和物质生产特征的影响[J]. 作物学报,2014,40(1):154-165.
- [18] 严桂江,戴正元,赵步洪,等. 穗肥对机插超级粳稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 江苏农业科学,2014,42(12):75-78.
- [19] 戈长水,应武,陈惠哲,等. 遮阴对 2 个水稻品种叶片生理生态学特征的影响[J]. 浙江农业科学,2012,53(7):927-931,935.
- [20] 周庆红,吕伟生,符明金,等. 光、氮互作对超级晚稻产量形成的影响[J]. 中国稻米,2013,19(4):35-38,43.
- [21] 王亚江,颜希亭,孟天瑶,等. 抽穗前后遮光对超级粳稻产量形成的影响[J]. 中国稻米,2014,20(5):18-21.
- [22] 陈宇眺,闫川,洪晓富. 花前、花后遮阴对籼粳杂交稻产量形成特性的影响[J]. 中国稻米,2019,25(5):79-83.
- [23] 杜彦修,季新,张静,等. 弱光对水稻生长发育影响研究进展[J]. 中国生态农业学报,2013,21(11):1307-1317.
- [24] 任万军,杨文钰,徐精文,等. 弱光对水稻籽粒生长及品质的影响[J]. 作物学报,2003,29(5):785-790.
- [25] Wang L,Deng F,Ren W J. Shading tolerance in rice is related to better light harvesting and use efficiency and grain filling rate during grain filling period[J]. Field Crops Research,2015,180:54-62.