

赵 凌, 张 勇, 朱 镇, 等. 南粳系列品种氮素利用效率初探[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(5) : 1153-1161.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2022.05.001

南粳系列品种氮素利用效率初探

赵 凌, 张 勇, 朱 镇, 陈 涛, 赵庆勇, 张亚东, 王才林
(江苏省农业科学院粮食作物研究所, 国家耐盐碱水稻技术创新中心华东分中心, 江苏 南京 210014)

摘要: 研究南粳系列品种产量及其构成因素对氮素的响应, 为大面积绿色生产提供依据。以南粳系列 7 个粳稻品种为试验材料, 研究 4 个氮肥水平[不施氮肥 (N_0 : 0 kg/hm²)、低氮 (N_1 : 150 kg/hm²)、中氮 (N_2 : 300 kg/hm²)、高氮 (N_3 : 450 kg/hm²)] 对品种的影响。试验采用裂区设计, 氮肥水平为主区, 品种为裂区, 3 次重复, 考察了剑叶性状、节间抗折力、产量及其构成因素对氮肥的响应及不同品种的氮肥利用特性。结果表明, 施氮处理均提高了南粳系列品种的产量, 7 个品种呈不同程度的增产, 增产范围从 1.61 t/hm² 到 3.43 t/hm², 氮素偏生产力为 59.61~66.61 kg/kg, 氮素收获指数为 60.29%~68.07%, 氮素农学利用效率为 9.82~18.98 kg/kg, 氮素生理利用效率为 41.31~58.20 kg/kg。南粳 5818、南粳 9036 和南粳 60 为氮肥高效敏感型品种, 南粳 5818、南粳 9036 的氮肥贡献率、氮素农学利用效率较高, 南粳 60 的氮素生理利用效率较高, 这 3 个品种在生产中需要优化氮肥运筹方式以充分发挥氮肥的增产作用。对氮素反应较迟钝的品种, 在生产中需要适当降低氮肥用量, 进一步协调氮肥与产量的关系, 以获得较高的氮肥利用率。在本研究中, 南粳系列品种高产的关键是在稳定结实率和千粒质量的基础上, 稳步提高群体颖花量。南粳 5718 和南粳 9036 高氮条件下具有较强的抗倒性, 是江苏省高氮条件下种植水稻的良好选择。

关键词: 水稻; 氮素利用效率; 产量; 品种

中图分类号: S511.2+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2022)05-1153-09

Study on nitrogen use efficiency of Nanjing series *japonica* rice varieties

ZHAO Ling, ZHANG Yong, ZHU Zhen, CHEN Tao, ZHAO Qing-yong, ZHANG Ya-dong, WANG Cai-lin
(Institute of Food Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, East China Branch of National Center of Technology Innovation for Saline-Alkali Tolerant Rice, Nanjing 210014, China)

Abstract: The response of yield and its components of seven Nanjing *japonica* varieties to nitrogen (N) was studied to provide a basis for reasonable application of N fertilizer on large-scale green production. The effects of four nitrogen levels (N_0 : 0 kg/hm², N_1 : 150 kg/hm², N_2 : 300 kg/hm² and N_3 : 450 kg/hm²) on seven rice varieties were explored. The split-plot design was used in the experiment, the nitrogen level was the main plot, the variety was the split plot, and the experiment was repeated three times. The response of flag leaf traits, internode breaking resistance, yield and its components to nitrogen fertilizer and nitrogen utilization characteristics of different varieties were investigated. The results showed that the yield was increased by nitrogen application, and the yield increasing range was 1.61–3.43 t/hm². Partial factor productivity of applied N fertilizer was 59.61–66.61 kg/kg, N harvest index was 60.29%–68.07%, agronomic N use efficiency was 9.82–18.98 kg/kg, and physiological N use efficiency was 41.31–58.20 kg/kg. Nanjing 5818, Nanjing 9036 and Nanjing 60 were sensitive varieties with high N use efficiency. Nanjing 5818 and Nanjing 9036 had high agronomic N use efficiency and N fertilizer contribution rate. Nanjing 60 had

收稿日期: 2022-03-02

基金项目: 江苏省重点研发计划项目 (BE2019375); 江苏省揭榜挂帅项目 [JBGS(2021)001]

作者简介: 赵 凌 (1976–), 女, 江苏南京人, 博士, 研究员, 主要从事水稻遗传育种研究。 (E-mail) zhaoling@jaas.ac.cn

通讯作者: 王才林, (E-mail) clwang@jaas.ac.cn

high physiological N use efficiency. These three varieties need to optimize nitrogen fertilizer management in production to give full play to the role of nitrogen fertilizer in increasing yield. For varieties with show response to nitrogen, it is necessary to appropriately reduce the amount of nitrogen fertilizer in production, and further coordinate the relationship between

nitrogen and yield, so as to obtain higher nitrogen use efficiency. In this study, the steady increase of spikelet is the key to high yield on the basis of stable seed setting rate and thousand-grain weight. Nanjing 5718 and Nanjing 9036 have strong lodging resistance and are good choices for planting under high nitrogen conditions in Jiangsu province.

Key words: rice; nitrogen use efficiency; yield; variety

水稻是世界上最重要的三大粮食作物之一,也是中国居民最重要的口粮作物。氮是水稻生长发育的必需营养元素,是影响水稻最敏感的因素,对水稻的生长发育和产量形成具有重要作用^[1]。上世纪以来,中国水稻产量的提高主要依赖于应用半矮秆品种以及加大水肥资源投入,其中氮肥大量施用为提高产量做出了重要贡献。

氮肥是水稻生产中施入量最大的肥料。自 20 世纪 70 年代以来,追求高产导致中国水稻生产中氮肥施用量迅速增加。据统计,中国已成为世界上最大的氮肥消费国,稻田施氮量达世界氮肥总用量的 25% 以上^[2]。但是中国水稻的平均氮素农学利用效率比发达国家低 10%~20%,有些地区还不到发达国家的 50%^[3-4]。氮素过量施用导致了严重的空气、土壤、水体污染。提高水稻氮素利用效率对减少生态系统污染,促进农业可持续发展,保障国家粮食安全具有重要意义^[5]。

氮肥用量是调节水稻产量与品质的重要栽培措施。合适的氮肥供应能保障水稻正常生长发育进程,提高产量,改善稻米品质^[6]。在一定范围内增施氮肥,可以增加分蘖,提高干物质积累量、氮积累量和产量;过高的氮肥投入则促进发生无效分蘖,干物质、氮积累量下降,不仅影响产量和品质,还导致氮素的生产效率和收获指数均下降^[7-10]。水稻不同品种对氮素的吸收利用存在显著差异^[11-12],氮高效水稻品种在较低施氮量下可以获得较高产量和氮肥利用率。筛选氮素高效利用的种质资源,培育氮高效品种是解决氮素过量使用的重要措施^[1,13]。2019 年农业农村部提出水稻绿色品种的指标体系,提出大力发展资源节约型绿色品种,深入推进农业供给侧结构性改革,构建资源节约型、环境友好型生产体系。

江苏省年种植水稻 2.2×10^6 hm^2 左右,不仅是高产省份和中国水稻主产区之一,还是化肥高投入区,每公顷的化肥平均使用量为 1 050 kg 左右,其中氮肥用量超过 450 kg,利用效率低^[3]。肥料高投入不但增加了水稻生产成本,而且造成土壤板结酸化和江河湖泊富营养化,引起严重的环境污染,提高江苏

省水稻生产的氮素利用效率迫在眉睫。

南粳系列品种是江苏省农业科学院选育的优质粳稻品种,其种植面积占目前全省水稻面积的三分之一以上,而且在周边的沪、皖、鲁、浙等地均推广应用。大面积生产中,农户对南粳系列品种施纯氮量一般为 $240 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 以上,部分田块达到 $300 \text{ kg}/\text{hm}^2$,甚至更高。由于这些品种对氮肥响应的差异目前还不清楚,迫切需要在明确品种氮素利用特性的基础上,优化南粳系列品种的氮肥管理,确定合理施肥量,才能在保证产量和品质的同时提高氮素利用效率。本研究拟以江苏省及周边地区近年来影响较大的南粳系列粳稻品种南粳 9108、南粳 5718 等为研究对象,根据生产应用情况,设置不施氮肥到施氮量 $450 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 共 4 个氮素水平,研究施氮量对产量相关要素的影响及南粳系列品种氮肥利用率的差异,以期江苏省及周边地区水稻绿色生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试品种及种植

供试材料为南粳系列粳稻品种,共 7 个,分别为南粳 9108、南粳 9308、南粳 9036、南粳 5818、南粳 5718、南粳 60 和南粳 5758。试验于 2021 年进行,种植于江苏省南京市江苏省农业科学院南京本部试验基地。土壤全氮含量 $1.40 \text{ g}/\text{kg}$,速效磷含量 $14.10 \text{ mg}/\text{kg}$,速效钾含量 $112.80 \text{ mg}/\text{kg}$ 。

试验采用裂区设计,以施氮处理为主区,水稻品种为裂区。设 4 个纯氮施用量 ($N_0: 0 \text{ kg}/\text{hm}^2$; $N_1: 150 \text{ kg}/\text{hm}^2$; $N_2: 300 \text{ kg}/\text{hm}^2$; $N_3: 450 \text{ kg}/\text{hm}^2$)。不同氮素处理区用水泥埂隔离,单独排灌。裂区种植 18 行,每行 18 株,单本栽插,行株距为 $25.0 \text{ cm} \times 13.3 \text{ cm}$,重复 3 次。5 月 10 日播种,6 月 15 日移栽。复合肥统一用量基施,施用量为 P_2O_5 $45 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、 K_2O $60 \text{ kg}/\text{hm}^2$,氮肥运筹模式为基肥: 蘖肥: 穗肥 = 2: 4: 4。塑盘毯苗育秧,秧龄 25 d,人工模拟机插移栽。其他管理措施同常规大田栽培。

1.2 产量相关性状测定

剑叶叶绿素含量测定: 使用叶绿素仪 (SPAD-

502, Monito 公司产品)于抽穗期(抽穗后 3 d)开始测量剑叶的叶绿素含量直至成熟,每 7 d 测量一次。每个品种随机抽取 3 穴植株,每穴选择 3 张剑叶,每张叶片测量 5 个不同位置的 SPAD 值,取平均值。叶绿素含量(mg/dm^2) = $0.128\ 5 \times \text{SPAD 值} - 0.565\ 6$ [14]。本研究中叶绿素含量均用 SPAD 值表示。

剑叶叶面积测定:在各小区中人工挑选长势一致的 5 穴水稻,齐穗后测量主茎穗剑叶的长度和宽度,乘积得出后再乘以换算系数 0.75,计算出水稻剑叶的叶面积 [15]。

节间抗折力测定:齐穗期测定节间抗折力。各小区选择分蘖数一致的 5 穴植株,在距地面 20 cm 处使用 YYD-1A 抗倒伏计(浙江托普云农科技股份有限公司产品)从垂直于茎秆开始向前推压整株至 45 ° 倾角处,记录的最大推压阻力即为节间抗折力 [16]。

农艺性状测定:品种成熟后从每个小区中去除边际,随机挑选 6 穴植株,测定株高和穗数后采集地上部分。3 穴植株考察结实率、千粒质量等农艺性状,3 穴植株测定氮素含量。

产量测定:成熟后每个小区避免边际效应,去除小区四周两排后全部收获,晒至水分含量为 15% 后称质量。

1.3 氮素利用效率测定

采集单株的地上部分,105 °C 处理 30 min 杀青,然后将样品分为秸秆和籽粒 2 部分,70 °C 烘箱烘干至恒质量后称质量,然后用植株粉碎机粉碎样品。样品消化后采用连续流动分析仪 (Analytical AA3, Seal 公司产品)进行总氮含量的测定 [17]。计算氮素利用效率相关指标 [18]。

氮素农学利用效率 ($ANUE, \text{kg}/\text{kg}$) = (氮肥施用量高的区域单位面积水稻籽粒产量 - 氮肥施用量低的区域单位面积水稻籽粒产量) / 当季两地单位面积农田施氮量 (换算为纯氮) 差值

氮素生理利用效率 ($PNUE, \text{kg}/\text{kg}$) = 单株籽粒产量 / 单株地上部总氮含量

氮肥贡献率 (NCP) = (施氮区产量 - 无氮区产量) / 施氮区产量 $\times 100\%$

氮素偏生产力 ($PFP, \text{kg}/\text{kg}$) = 施氮区产量 / 氮肥施用量

氮素收获指数 (NHI) = 收获时单株籽粒氮素含量 / 单株地上部总氮含量 $\times 100\%$

利用 SPSS 22.0 软件对数据进行相关性分析和

方差分析。相关性分析采用 Pearson 分析方法,依循 Duncan's 方法判定差异显著性。

2 结果与分析

2.1 氮素水平、品种及其互作对南粳系列品种农艺性状的影响

在调查的 8 个农艺性状中,每穗颖花数在重复间的差异达到显著水平,其他 7 个性状,包括剑叶叶绿素含量、剑叶叶面积、节间抗折力、每穴穗数、结实率、千粒质量、产量的重复间差异均不显著。不同氮素水平的剑叶叶绿素含量、剑叶叶面积、节间抗折力、每穴穗数、每穗颖花数、产量存在显著差异,而结实率和千粒质量的差异不显著。不同品种间的结实率差异不显著,每穴穗数差异显著,其他性状均存在极显著差异。氮素水平与品种互作对抗倒性、每穗颖花数具有极显著影响 (表 1)。

2.2 氮素对南粳系列品种叶色和剑叶叶面积的影响

在不同氮素处理下,7 个南粳系列品种抽穗后至成熟的剑叶叶片 SPAD 值均呈现先缓慢上升后下降的趋势。剑叶叶色在 4 个氮素水平下有明显不同,其中 N_0 处理叶色最淡,SPAD 值最低,随着施氮量的增加,叶色变深 (图 1)。在所有 7 个试验品种中,南粳 5718 的叶色比较深,8 月 26 日测定其不同处理的 SPAD 值均在 44.0 以上,其中在 N_2 处理下抽穗期 (8 月 18 日) 的剑叶 SPAD 值达到了 46.8,灌浆初期 (9 月 4 日) 剑叶 SPAD 值达到 56.6。南粳 60 在抽穗期不施氮肥 (N_0) 时叶色最淡,SPAD 值为 35.0 左右。

不同品种间叶色对氮素处理的响应趋势存在一定差异。对于抽穗期而言,虽然所有品种均表现为不施氮肥时叶色最淡,但是随着氮素施肥量的增加,不同品种表现出不同的叶色变化。南粳 9108、南粳 5758、南粳 5818、南粳 9308 和南粳 9036 均表现为 N_2 、 N_3 处理下的剑叶 SPAD 值没有显著差异,且高于其他 2 个氮素水平。随着灌浆进程的推进,7 个品种的剑叶 SPAD 值均呈现先缓慢上升后快速下降的趋势,在抽穗后 20 d 左右剑叶 SPAD 值达到顶峰 (图 2)。

7 个南粳系列品种的剑叶大小不同。在不施肥条件下,南粳 5758 和南粳 5718 的剑叶叶面积大于其他品种。在适宜范围内,随着氮素水平的增加,7 个品种剑叶叶面积总体呈增大的趋势。其中南粳 9108、南粳 9308 和南粳 60 的叶面积增幅最大,超过了 $15\ \text{cm}^2$ 。南

梗 5758 和南梗 9036 在 N_2 处理下的剑叶叶面积显著高于其他处理。南梗 9108、南梗 5718 和南梗 60 的剑叶叶面积对氮素水平的增加不敏感,南梗 9108 的剑叶叶面积在 N_1 、 N_2 、 N_3 处理间差异不显著,但均高于 N_0 处理;

南梗 5718 和南梗 60 的剑叶叶面积 N_1 、 N_2 、 N_3 处理间无显著差异,但 N_1 处理与 N_0 处理差异不显著, N_2 、 N_3 处理显著高于 N_0 处理(表 2)。

表 1 抽穗期剑叶、节间抗折力、产量及其构成要素在品种、氮素水平间的方差分析

Table 1 Variance analysis for flag leaf traits, breaking resistance, yield and its components among varieties and nitrogen levels

变异来源	剑叶叶绿素含量	剑叶叶面积	节间抗折力	每穴穗数	每穗颖花数	结实率	千粒质量	产量
重复间	—	—	—	—	**	—	—	—
氮素水平	**	**	**	**	**	—	—	**
品种	**	**	**	*	**	—	**	**
氮素水平×品种	—	—	**	—	**	—	—	—

* 表示在 0.05 水平显著; ** 表示在 0.01 水平显著;—表示不显著。

表 2 施氮对不同南梗系列品种水稻抽穗期剑叶、节间抗折力、产量及其构成要素的影响

Table 2 Effects of nitrogen application on flag leaf traits, breaking resistance, yield and its components of different rice varieties

品种	处理	剑叶叶绿素含量	剑叶叶面积 (cm ²)	节间抗折力 (N)	每穴穗数	每穗颖花数 (粒)	结实率 (%)	千粒质量 (g)	产量 (t/hm ²)
南梗 9108	N_0	37.70±0.2c	25.08±5.5b	62.0±9.6b	9.3±0.54b	100.2±1.40ab	95.3±0.16a	25.7±0.18a	7.45±0.16b
	N_1	41.47±2.2b	34.05±2.5a	133.7±6.2a	10.4±1.26ab	90.6±5.57b	93.1±5.36a	25.7±1.03a	8.93±0.65a
	N_2	46.87±1.1a	42.16±4.9a	38.5±6.2c	9.9±0.68b	108.3±5.05a	96.6±0.02a	26.7±0.76a	9.21±0.15a
	N_3	45.23±0.8a	37.28±3.3a	40.9±8.2c	12.2±0.70a	93.8±0.35b	96.3±0.55a	25.1±0.28a	8.46±0.24ab
南梗 5758	N_0	37.90±0.7b	31.49±2.4b	173.4±13.1a	10.7±0.02ab	97.0±1.37b	96.8±0.06a	25.6±0.28a	7.82±0.22b
	N_1	41.57±1.7ab	31.63±3.3b	129.0±18.5b	10.0±0.27b	125.9±3.39a	95.7±1.19ab	26.0±0.39a	9.49±0.21a
	N_2	45.00±1.2a	39.34±2.0a	31.6±2.2c	10.8±0.54a	121.0±4.38a	95.2±0.51ab	25.0±0.57a	9.84±0.15a
	N_3	47.50±2.7a	32.84±5.8b	39.9±6.9c	11.1±0.63a	116.3±12.93a	93.7±1.21b	24.8±0.68a	9.57±0.39a
南梗 5718	N_0	44.03±0.8b	31.48±5.1b	69.7±10.6b	8.7±0.72b	93.1±2.65c	97.3±0.70a	29.4±0.50a	8.38±0.29c
	N_1	46.97±1.5ab	37.05±2.1ab	151.1±20.9a	9.9±2.04ab	111.1±7.82ab	93.9±1.59b	29.7±0.73a	9.99±0.13a
	N_2	49.97±0.1a	40.69±6.1a	61.4±10.3b	13.1±1.64a	125.4±3.62a	96.0±0.60ab	28.9±0.42a	9.39±0.06b
	N_3	48.10±3.9ab	44.05±5.5a	87.7±11.5b	10.8±1.57ab	108.6±3.11b	96.3±0.68ab	29.5±0.89a	9.36±0.27b
南梗 5818	N_0	39.90±1.1c	22.90±2.1c	60.5±9.9c	10.4±1.37b	74.7±8.34b	96.4±0.41a	27.2±0.80a	6.46±0.26b
	N_1	42.20±0.2b	26.22±4.7bc	122.4±4.3a	11.9±0.96ab	100.7±8.31a	93.2±1.87a	26.3±0.51a	9.30±0.33a
	N_2	45.67±2.2a	37.45±4.1a	100.3±16.4b	13.9±0.96a	110.2±6.16a	93.9±0.87a	25.4±1.56a	9.53±0.23a
	N_3	45.03±2.2a	33.28±5.4ab	60.6±7.4c	12.1±0.16ab	114.5±15.00a	92.7±2.29a	25.1±0.49a	9.89±0.43a
南梗 60	N_0	35.00±0.9c	24.17±4.5b	51.8±8.7bc	9.2±0.57b	116.1±2.86a	93.7±1.22a	25.7±0.25a	7.57±0.04b
	N_1	39.40±1.8bc	32.37±2.0ab	142.3±28.2a	10.3±1.19ab	119.8±1.37a	93.3±1.29a	26.3±0.04a	9.36±0.16a
	N_2	45.00±1.3ab	39.90±6.2a	41.4±8.1c	12.4±1.29a	122.9±2.56a	93.7±2.36a	26.8±1.00a	9.98±0.07a
	N_3	46.73±2.0a	38.64±8.7a	74.0±10.8b	12.1±0.87a	104.8±4.14b	94.0±0.75a	25.8±0.38a	10.00±0.34a
南梗 9308	N_0	40.83±2.0b	19.12±1.2c	38.6±4.7b	11.8±1.26a	79.1±3.80b	95.7±0.59a	25.7±0.30a	7.23±0.64b
	N_1	41.50±2.0b	30.10±4.1bc	114.9±22.9a	12.7±0.82a	100.2±5.26a	95.4±0.20a	25.7±0.80a	9.10±0.52a
	N_2	48.97±0.2a	39.04±5.8a	34.8±6.1b	13.3±0.72a	111.6±8.40a	95.1±1.05a	24.8±0.46a	9.22±0.39a
	N_3	47.97±1.3a	35.06±5.5ab	38.1±6.1b	11.2±0.95a	108.4±0.17a	92.0±0.27b	25.5±0.50a	9.21±0.09a
南梗 9036	N_0	36.30±1.2c	29.81±2.8b	79.4±4.3a	9.7±0.54b	88.9±7.13b	94.6±0.69a	25.6±0.31a	6.92±0.10b
	N_1	41.40±0.5b	34.19±2.3b	86.7±18.5a	10.3±0.98b	110.6±5.84a	95.4±1.25a	26.5±0.40a	9.49±0.27a
	N_2	46.77±1.3a	43.19±5.5a	64.6±7.8b	13.3±0.98a	120.0±2.52a	94.5±1.06a	26.0±0.35a	9.47±0.26a
	N_3	45.37±1.3a	35.33±3.4b	86.2±18.4a	12.2±1.64ab	95.9±7.16b	95.7±1.06a	26.0±1.26a	9.11±0.53a

同一品种中同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。 N_0 : 纯氮施氮量 0 kg/hm²; N_1 : 纯氮施氮量 150 kg/hm²; N_2 : 纯氮施氮量 300 kg/hm²; N_3 : 纯氮施氮量 450 kg/hm²。表中数据均为平均数 ($n=3$)。剑叶叶绿素含量为 8 月 26 日测量的 SPAD 值。

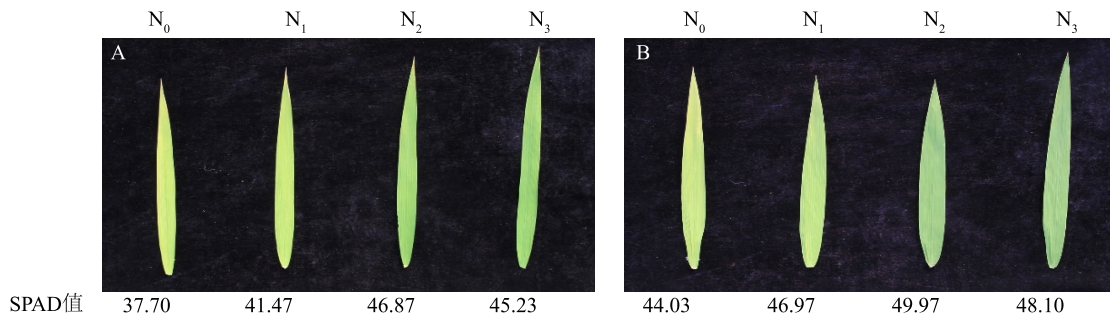
A:南梗 9108;B:南梗 5718。N₀、N₁、N₂、N₃ 见表 1 注。

图 1 不同氮素水平处理下南梗 9108 和南梗 5718 的剑叶

Fig.1 The flag leaves of Nanjing 9108 and Nanjing 5718 under different nitrogen levels

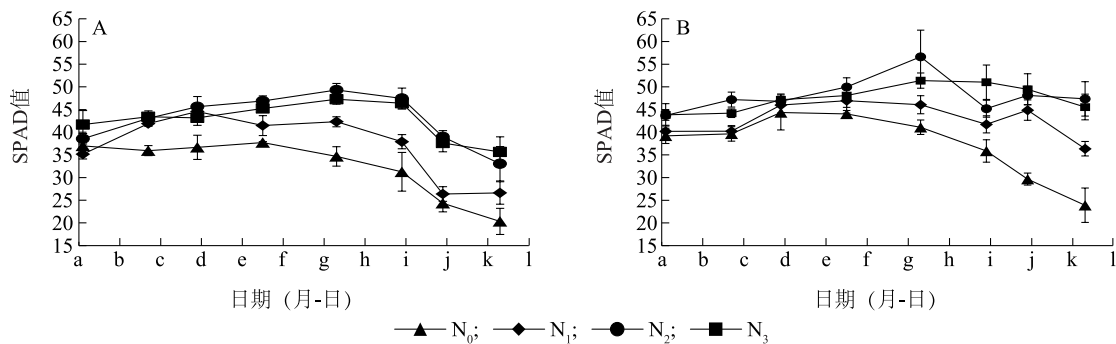
A:南梗 9108;B:南梗 5718。a:08-04;b:08-09;c:08-14;d:08-19;e:08-24;f:08-29;g:09-03;h:09-08;i:09-13;j:09-18;k:09-23;l:09-28。N₀、N₁、N₂、N₃ 见表 1 注。

图 2 不同氮素水平处理下南梗 9108 和南梗 5718 的剑叶 SPAD 值

Fig.2 SPAD values of flag leaves of Nanjing 9108 and Nanjing 5718 under different nitrogen levels

2.3 氮素对南梗系列品种产量的影响

表 1 显示,在磷、钾施肥量一致的基础上,随着氮肥水平的变化,不同品种产量变幅较大。不施氮条件(N₀)下产量为6.46~8.38 t/hm²,N₁施氮水平下产量为8.93~9.99 t/hm²,N₂处理下产量为9.21~9.98 t/hm²,高氮肥水平(N₃)下产量为8.46~10.00 t/hm²。从整体趋势看,随着氮素水平逐渐升高,产量增加,但是到了高氮水平时,部分品种的产量并不持续增加,南梗 5758、南梗 5818、南梗 60、南梗 9308 和南梗 9036 的小区产量在 N₁、N₂、N₃ 处理间无显著差异,均高于不施氮肥处理。

虽然所有参试品种施氮后都表现增产,但是品种间施氮的增产效果差异较大(图 3)。在不施氮肥的情况下,南梗 5718 的产量超过了 8.00 t/hm²,在参试品种中产量最高,南梗 5818 产量最低(6.46 t/hm²)。与 N₀相比,低氮(N₁)和中氮(N₂)条件下均是南梗 5818 增产最高,分别为 2.84 t/hm²和 3.07 t/hm²。南梗 5758、南梗 5818、南梗 60、南梗 9308、南梗 9036 施氮肥后的产量均显著高于不施氮,但不

同施氮水平间的产量并没有显著差异。南梗 9108 和南梗 5718 施肥后产量增加,南梗 9108 在低氮、中氮条件的下产量高于高氮,南梗 5718 则是 N₁ 处理下产量最高。7 个水稻品种施氮后的最高产量与不施氮条件下产量相比,产量增加范围为 1.61~3.43 t/hm²。

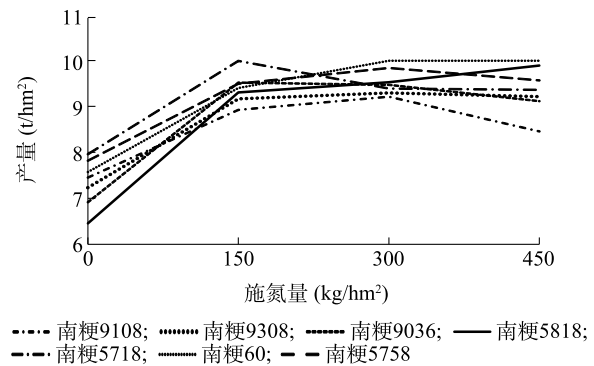


图 3 不同施氮水平下南梗系列品种产量

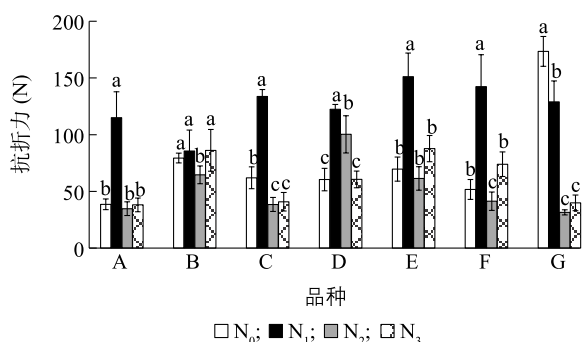
Fig.3 Yield of Nanjing series varieties under different nitrogen levels

在高氮条件下品种的增产趋势与中氮条件下不

同。高氮条件下南梗 60 产量最高,达 10.00 t/hm^2 ,南梗 9108 产量最低,为 8.46 t/hm^2 。南梗 5818 在不施氮的情况下产量最低,在高氮条件下南梗 5818 产量增加最高,达到 3.43 t/hm^2 ,增产率为 53.10%;南梗 9108 和南梗 5718 的增产都比较低,为 1.00 t/hm^2 左右,增产率分别为 13.56% 和 11.69%。说明南梗 5818 对氮肥比较敏感,而南梗 9108 和南梗 5718 对氮肥较不敏感(表 1)。

2.4 氮素对南梗系列品种产量构成及相关因素的影响

抗倒性对品种产量和品质的形成具有非常重要的作用,尤其是在追求高产的情况下,灌浆后期遇到不利天气更易造成倒伏,节间抗折力是评价抗倒性的重要指标之一。不同氮素处理下,7 个南梗系列品种的节间抗折力表现不同(图 4)。在不施氮肥条件下,南梗 5758 的节间抗折力最大,抗倒伏能力最强,其次为南梗 9036。高氮条件下,南梗 5718 和南梗 9036 的节间抗折力高于其他 5 个品种。在全部 7 个试验品种中,除了南梗 5758 的抗倒性在不施氮肥条件下高于其他氮素水平外,其他 6 个品种均表现为低氮水平的抗倒性最强。



A:南梗 9308; B:南梗 9036; C:南梗 9108; D:南梗 5818; E:南梗 5718; F:南梗 60; G:南梗 5758。图中不同小写字母表示同一品种不同氮素处理间差异达 0.05 显著水平。N₀、N₁、N₂、N₃ 见表 1 注。

图 4 不同南梗系列品种各氮素处理下的基部节间抗折力

Fig.4 Breaking resistance of basal internodes under different nitrogen treatments

各个品种的产量构成要素穗数、每穗颖花数、结实率和千粒质量对氮素处理的响应并不相同。氮素水平对穗数和每穗颖花数均有比较明显的影响(图 5)。7 个品种中只有南梗 9308 的每穴穗数在不同氮素处理间不存在显著差异。从整体趋势看,随着施氮量的增加,每穴穗数呈现增加的趋势。南梗

5758、南梗 60 的每穴穗数在 N₃、N₂ 处理间没有显著差异,均高于 N₁、N₀ 处理。南梗 5718、南梗 5818 和南梗 9036 的每穴穗数则为 N₂ 处理下最高,分别为 1 穴 13.1 穗、13.9 穗、13.3 穗,其中南梗 5718、南梗 5818 的每穴穗数在 N₁、N₃ 处理间没有显著差异。南梗 9108 的每穴穗数对氮素的响应与其他品种稍有不同,表现为高氮水平下最高。N₀ 处理下,南梗系列品种中南梗 9308 的每穴穗数最多,为 11.8 穗,南梗 5718 每穴穗数最少,只有 8.7 穗(表 2)。

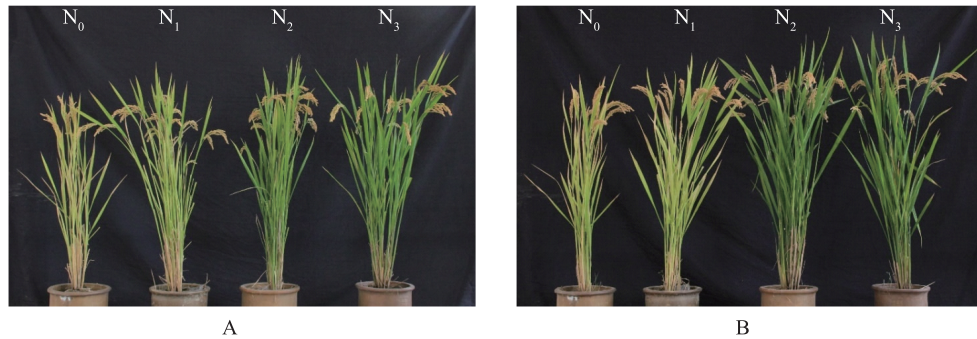
氮素水平对每穗颖花数和每穴穗数的影响明显不同。南梗 5758、南梗 5818 和南梗 9308 在高氮、中氮、低氮条件下的每穗颖花数没有显著差异,均显著高于不施氮肥处理。南梗 60 在高氮水平下的每穗颖花数只有 104.8 粒,显著低于其他 3 个氮素水平。南梗 9036 在中氮条件和低氮条件下的每穗颖花数分别为 120.0 粒和 110.6 粒,没有显著差异,显著高于不施氮肥条件下的 88.9 粒和高氮条件下的 95.9 粒(表 2)。

氮素处理对各南梗系列品种结实率的影响不大,所有参试品种的结实率都在 90% 以上。7 个品种中只有 3 个品种,即南梗 5758、南梗 5718 和南梗 9308 的结实率在各氮素水平间存在显著差异。南梗 5758 和南梗 5718 表现为不施氮处理结实率最高。南梗 9308 则是高氮处理结实率最低,显著低于其他 3 个处理(表 2)。

氮素处理对各南梗系列品种千粒质量的影响与穗数、每穗颖花数和结实率均不相同。参试 7 个品种的千粒质量在各氮素水平间均不存在显著差异(表 2)。

2.5 南梗系列品种的氮素利用效率

表 3 显示,7 个品种的氮素偏生产力(PFP)为 $59.61 \sim 66.61 \text{ kg/kg}$ 。南梗 9108 的氮素偏生产力最低, 59.61 kg/kg ,另外 6 个品种的氮素偏生产力均高于 60.00 kg/kg ,其中南梗 5718 的氮素偏生产力最高,为 66.61 kg/kg 。7 个品种的氮素收获指数(NHI)均在 60.00% 以上,其中南梗 5758 的氮素收获指数最高,为 68.07%,南梗 5718 的氮素收获指数最低,为 60.29%。品种间的氮肥贡献率(NCP)具有一定差异,7 个品种中,南梗 5818 的氮肥贡献率最高,为 30.60%,其次为南梗 9036,氮肥贡献率为 27.34%,其余 5 个品种的氮素贡献率为 16.50%~21.09%。



A:南粳 9108;B:南粳 5718。

图 5 不同氮素水平处理下南粳 9108 和南粳 5718 的农艺性状

Fig.5 Agronomic traits of Nanjing 9108 and Nanjing 5718 under different nitrogen levels

南粳系列 7 个品种的氮素农学利用效率 ($ANUE$) 存在较大的差异。南粳 5818 的 $ANUE$ 最高, 达到 18.98 kg/kg; 南粳 9036 的 $ANUE$ 稍低, 为 17.17 kg/kg, 南粳 9108 的 $ANUE$ 最低, 为 9.82 kg/kg, 其余 4 个品种的 $ANUE$ 为 11.00~14.00 kg/kg。对于氮素生理利用效率 ($PNUE$) 来说, 在低氮条件下, 7 个品种的 $PNUE$ 均在 40.00 kg/kg 以上, 其中南粳 60 的 $PNUE$ 较高, 达到 58.20 kg/kg (表 3)。

表 3 施氮对不同品种水稻氮肥利用率的影响

Table 3 Effects of nitrogen application on nitrogen use efficiency of different rice varieties

品种	PFP (kg/kg)	NHI (%)	NCP (%)	$ANUE$ (kg/kg)	$PNUE$ (kg/kg)
南粳 9108	59.61	60.79	16.50	9.82	49.26
南粳 5758	63.28	68.07	17.63	11.15	47.89
南粳 5718	66.61	60.29	20.33	13.54	41.37
南粳 5818	62.03	61.75	30.60	18.98	41.31
南粳 60	62.38	65.09	19.45	12.11	58.20
南粳 9308	60.22	64.63	21.09	12.89	45.44
南粳 9036	63.27	62.40	27.34	17.17	47.88

PFP : 氮素偏生产力; NHI : 氮素收获指数; NCP : 氮肥贡献率; $ANUE$: 氮素农学利用效率; $PNUE$: 氮素生理利用效率。

3 讨论

氮素是水稻生长中的重要元素, 施用氮肥在一定范围内能有效提升水稻产量。随着施氮量的增加, 土壤中硝态氮的大量残留导致水稻氮肥利用率降低, 氮肥的增产效果不明显^[19]。中国目前氮肥年施用量已经达到甚至超过世界平均水平的 3 倍, 氮肥利用效率却处于较低水平^[20]。长期大量施肥造成土壤背景中氮过高, 在这种田块中育成的水稻品种对氮肥的敏感性低, 耐肥性强, 这也是中国稻田氮

肥利用率低的原因之一^[21-23]。

目前中国水稻生产迫切需要提高氮肥利用效率, 在保障高产稳产的基础上, 尽可能降低氮肥的用量^[19]。由于不同品种对氮肥的响应模式并不相同, 明确不同品种对氮肥的响应方式, 确定合理的施氮量和施氮方式是提高氮肥利用率, 减少农田氮素污染, 挖掘产量潜力的重要措施和手段。大量研究表明, 水稻产量随着施氮水平的提高呈先升后降的趋势^[24-25]。李向辉等^[26]发现, 低氮水平下增施氮肥能够提高氮肥利用率, 但施氮量超过 180 kg/hm²后氮肥利用效果则随施氮量的增加而下降。魏海燕等^[27]发现 5 个超级粳稻品种的产量随氮肥用量的增加先增加后下降, 300 kg/hm²施氮条件下获得最高产量。徐杰姣^[28]发现南粳 9108 的产量随施氮量增加先增后降, 以 300 kg/hm²处理下的产量最大。张庆等^[29]发现南粳 46 和南粳 5055 在施氮量为 240 kg/hm²和 300 kg/hm²时能够达到产量和品质的协调, 240 kg/hm²是兼顾效益的最佳施氮量。实际生产中, 还需要根据种植田块中土壤的养分本底和不同品种的需肥特点来确定适宜施氮量。在本研究中, 虽然南粳 5818 和南粳 60 在高氮条件下产量最高, 但是南粳 5758、南粳 5818、南粳 60、南粳 9308 和南粳 9036 在高、中、低氮肥条件下的产量并没有显著差异, 均表现为施氮肥处理下的产量显著高于不施氮肥处理。南粳 5718 在低氮条件下产量最高, 南粳 9108 在低氮、中氮条件下产量没有显著差异, 但高于高氮处理和不施氮肥处理。南粳 5718 是对低氮敏感的品种。本研究的 7 个南粳系列品种在低氮 (150 kg/hm²) 条件下可以更好地实现氮素利用和产量的协同。

只有探明不同品种对氮素的吸收、利用特性, 才能实现高产与氮肥高效利用的有机协调。前人研究结果

表明,不同类型的水稻品种间氮素利用率存在明显差异^[30-32]。培育和推广应用氮肥利用率高且产量水平高的品种,是减少氮肥施用,降低环境污染的根本途径^[33]。品种的氮素吸收、利用能力与干物质生产能力有关^[28]。目前评价氮利用效率的指标有 *PNUE*、*ANUE* 和 *PFP* 等。一般来讲,氮肥贡献率越高,*PNUE* 和 *ANUE* 也越高。健康的水稻群体在无其他限制因子时,其 *PNUE* 一般为 50 kg/kg 左右,氮肥施用过量会造成 *PNUE* 急剧下降^[34]。在本研究的 7 个南粳系列品种中,南粳 5818 和南粳 9036 的 *ANUE* 较高,南粳 60 的 *PNUE* 最高,这 3 个品种的产量对氮素比较敏感。本团队对南粳 60 和南粳 9036 连续 3 年进行试验,均发现它们具有较高的氮素利用效率(数据未展示)。对于这种氮肥高效敏感型品种,需要优化氮肥运筹方式,从而在保证产量的前提下实现更高的氮肥利用率。南粳 9108 和南粳 5758 施氮后增产潜力较低,表现为对氮肥较不敏感,耐缺氮能力较强,对于这种氮肥低效迟钝型品种,生产上可适当减少氮肥的用量,以获得较高的氮肥利用率。南粳 5718 和南粳 9308 属于氮素利用效率中等的中间型品种,其产量潜力大,可进一步优化氮肥用量和施用方法,以同时实现水稻高产和氮肥高效利用^[35]。对每种氮肥响应类型的品种,要进一步提高氮肥利用率,都需要通过田间试验来确定最佳氮肥用量和施用方式,实现良田、良种和良法配套。

从水稻产量构成因素分析,一般结实率和千粒质量表现为随着施氮量的增加略有降低^[24-25]。魏海燕等^[27]发现当施氮量为 0~337.5 kg/hm² 时,有效穗数随着施氮量的提高先升后降,每穗颖花数增加。吴培^[36]认为当施氮量为 0~300.0 kg/hm² 时,随着氮肥施用量的增加,机直播粳稻的有效穗数和每穗颖花数都持续增加。剧成欣^[4]也发现,与氮钝感品种相比,氮高效品种的总颖花量、茎蘖成穗率、叶面积指数、颖花粒叶比、实粒粒叶比(实粒数/叶面积)和粒重粒叶比(产量/叶面积)均较高,可以利用上述性状筛选氮高效水稻品种。本研究结果表明,氮高效品种南粳 5818 和南粳 9036 施氮肥后产量较高,主要得益于每穴穗数和每穗颖花数对氮肥的较高敏感性,2 个品种的结实率和千粒质量对氮肥均表现比较钝感,施氮量不同条件下的结实率和千粒质量无显著差异。申勇等^[37]也发现氮高效品种施肥后千粒质量并无显著变化,产量升高的主要原因是总颖花数的升高。张庆等^[29]指出,软米品种的结实率

和千粒质量随施氮量增加而保持相对稳定,穗数增高但增幅不大,每穗粒数随氮肥量提高而增加。因此,对本研究的南粳系列品种,在兼顾氮素高效利用的情况下实现高产的关键是稳定结实率和千粒质量,同时提高群体颖花量。

叶片不仅是植物吸收和利用光能的重要场所,还是制造同化物、促进干物质积累的重要源。大量研究表明,水稻叶片的叶绿素含量与施氮量呈正相关^[38-41]。叶片含氮量的增加能够提高光合色素含量,从而提高光合能力,更加充分地发挥叶绿体的光合潜能^[42]。本研究中,除了南粳 5758 和南粳 60 的剑叶叶绿素含量、南粳 5718 的剑叶叶面积外,其他品种的剑叶叶绿素含量和叶面积均表现出随着氮素水平的增加呈现先增加后降低的趋势,其中中氮条件下的剑叶叶绿素含量和叶面积基本与高氮水平下的无显著差异。综合考虑,对于本研究的大多数南粳系列品种而言,中氮水平可以使剑叶叶绿素含量、叶面积达到较高的水平,满足产量和品质形成的需要。

足够的氮肥投入是保障水稻高产的必要条件,但同时也加大了植株倒伏的风险。随着施氮量的增加,水稻茎秆抗折力呈下降的趋势,倒伏指数与产量呈显著或极显著正相关^[43]。筛选、培育氮肥利用率高水稻品种,需要同时关注品种的抗倒伏能力。本研究中,高氮条件下南粳 5718 和南粳 9036 的节间抗折力较高,抗倒性表现出色,中氮条件下南粳 5818 具有较好的抗倒性。

参考文献:

- [1] 陈雅君,闫庆伟,张璐,等. 氮素与植物生长相关研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2013, 44(4): 144-148.
- [2] CHENG B, JIANG Y, CAO C G. Balance rice yield and eating quality by changing the traditional nitrogen management for sustainable production in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 312:127793.
- [3] PENG S B, BURESH R J, HUANG J L, et al. Improving nitrogen fertilization in rice by site-specific N management: a review [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2010, 30:649-656.
- [4] 剧成欣. 不同水稻品种对氮素响应的差异及其农艺生理性状[D]. 扬州:扬州大学, 2017.
- [5] 李娜,黄允智,刘学英,等. 作物氮肥利用效率遗传改良研究进展[J]. 遗传, 2021, 43(7): 629-641.
- [6] OHNISHI M, HORIE T, HOMMA K, et al. Nitrogen management and cultivar effects on rice yield and nitrogen use efficiency in Northeast Thailand [J]. Field Crops Research, 1999, 64(1/2):

- 109-120.
- [7] 江立庚,曹卫星,甘秀芹,等. 不同施氮水平对南方早稻氮素吸收利用及其产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(4):490-496.
- [8] ZEBARTH B J, DRURY C F, TREMBLAY N, et al. Opportunities for improved fertilizer nitrogen management in production of arable crops in eastern Canada: A review [J]. Canadian Journal of Soil Science, 2009, 89(2): 113-132.
- [9] HAEFELE S M, JABBAR S M A, SIOPONGCO J D L C, et al. Nitrogen use efficiency in selected rice (*Oryza sativa* L.) genotypes under different water regimes and nitrogen levels [J]. Field Crops Research, 2008, 107(2): 137-146.
- [10] 晏娟,尹斌,张绍林,等. 不同施氮量对水稻氮素吸收与分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5): 835-839.
- [11] 黄见良,李合松,李建辉,等. 不同杂交水稻吸氮特性与物质生产的关系[J]. 核农学报, 1998, 12(2): 89-94.
- [12] ISHIKAWA S, MAEKAWA M, ARITE T, et al. Suppression of tiller bud activity in tillering dwarf mutants of rice [J]. Plant Cell Physiology, 2005, 46(1): 79-86.
- [13] JU C X, BURESH R J, WANG Z Q, et al. Root and shoot traits for rice varieties with higher grain yield and higher nitrogen use efficiency at lower nitrogen rates application [J]. Field Crops Research, 2015, 175: 47-55.
- [14] 曹树青,陆巍,翟虎渠,等.用水稻苗期叶绿素含量相对稳定期估算水稻剑叶光合功能期的方法研究[J]. 中国水稻科学, 2001, 15(4):309-313.
- [15] 谈聪,翁小煜,鄢文豪,等. 多效性基因 *Ghd7* 调控水稻剑叶面积[J]. 遗传, 2012, 34(7): 901-906.
- [16] 张晶,石扬娟,任洁,等. 硅肥用量对水稻茎秆抗折力的影响研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(3): 49-55.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2000:264-268.
- [18] CHEN J, ZHANG Y, TAN Y, et al. Agronomic nitrogen-use efficiency of rice can be increased by driving *OsNRT2.1* expression with the *OsNAR2.1* promoter [J]. Plant Biotechnology Journal, 2016, 14: 1705-1715.
- [19] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- [20] 熊正琴,张晓旭. 氮肥高效施用在低碳农业中的关键作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1433-1440.
- [21] FAGERIA N K. Yield physiology of rice [J]. Journal of Plant Nutrition, 2007, 30: 843-879.
- [22] PENG S B, BURESH R J, HUANG J L, et al. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China [J]. Field Crops Research, 2006, 96(1):37-47.
- [23] 彭少兵,黄见良,钟旭华,等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095-1103.
- [24] 苏祖芳,周培南,许乃霞,等. 密肥条件对水稻氮素吸收和产量形成的影响[J]. 中国水稻科学, 2001, 15(4): 42-47.
- [25] 万靓军,张洪程,霍中洋,等. 氮肥运筹对超级杂交粳稻产量、品质及氮素利用率的影响[J]. 作物学报, 2007, 33(2): 175-182.
- [26] 李向辉,鲁艳红,廖育林,等. 氮肥施用量对晚稻产量和氮肥利用效率的影响[J]. 湖南农业科学, 2010(15): 52-54.
- [27] 魏海燕,王亚江,孟天瑶,等. 机插超级粳稻产量、品质及氮肥利用率对氮肥的响应[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 488-496.
- [28] 徐杰姣. 壮秧培育、氮肥运筹对机插水稻南粳9108产量、稻米品质及氮素吸收利用的影响[D]. 扬州:扬州大学, 2021.
- [29] 张庆,郭保卫,胡雅杰,等. 不同氮肥水平下优质高产软米粳稻的产量与品质差异[J]. 中国水稻科学, 2021, 35(6): 606-616.
- [30] BROADBENT F E, DE DATTA S K, LAURELES E V. Measurement of nitrogen utilization efficiency in rice genotypes [J]. Agronomy Journal, 1987, 79(5): 786-791.
- [31] 江立庚,戴廷波,韦善清,等. 南方水稻氮素吸收与利用效率的基因型差异及评价[J]. 植物生态学报, 2003, 27(4): 466-471.
- [32] 崔世友,缪亚梅,史传怀,等. 氮高效水稻育种研究及展望[J]. 中国农业科技导报, 2006, 8(6): 47-51.
- [33] 叶全宝. 不同水稻基因型对氮肥反应的差异及氮素利用效率的研究[D]. 扬州:扬州大学, 2005.
- [34] 赵宏伟,沙汉景. 我国稻田氮肥利用率的研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2014, 45(2): 116-122.
- [35] 卜东升,刘冬碧,肖依波,等. 江汉平原稻区16个水稻品种对氮肥的响应及其利用率差异[J]. 土壤通报, 2021, 52(5): 1182-1192.
- [36] 吴培. 施氮量和直播密度互作对优质食味水稻产量和品质的影响[D]. 扬州:扬州大学, 2019.
- [37] 申勇,谢昊,潘竹栋,等. 不同氮效率粳稻品种的冠层特征[J]. 作物杂志, 2021(1): 90-97.
- [38] 陈晓群,张学军,白建忠,等. 基于水稻不同生育期叶绿素值推荐追施氮量的研究初报[J]. 中国农学通报, 2010, 26(7): 147-151.
- [39] 王慧,吴迪,李东升,等. 氮肥施用量和运筹比例对稻茬晚播小麦群体结构、光合性能及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(20): 97-102.
- [40] 纪洪亭,周炜,郭智,等. 猪粪有机肥替代化学氮肥对水稻农学效应、安全效应及经济效益影响的综合评价[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(6): 1451-1459.
- [41] 王绍华,曹卫星,王强盛,等. 水稻叶色分布特点与氮素营养诊断[J]. 中国农业科学, 2002, 35(12): 1461-1466.
- [42] 吴良欢,陈峰. 水稻叶片氮素营养对光合作用的影响[J]. 中国农业科学, 1995, 28(增刊): 104-107.
- [43] 李国辉,钟旭华,田卡,等. 施氮对水稻茎秆抗倒伏能力的影响及其形态和力学机理[J]. 中国农业科学, 2013, 46(7): 1323-1334.

(责任编辑:王妮)