

施氮量对晚粳稻甬优 1538 产量、品质及氮素吸收利用的影响

成 臣, 曾勇军, 王 祺, 谭雪明, 商庆银, 曾研华, 石庆华

(作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室, 江西省作物生理生态与遗传育种重点实验室,
江西农业大学双季稻现代化生产协同创新中心, 南方粮油作物协同创新中心, 南昌 330045)

摘要: 为明确南方双季稻区晚粳稻氮肥合理施用量, 通过 2 年(2016—2017 年)田间试验, 设置了 6 种不同施氮水平 N1(0 kg/hm²)、N2(165 kg/hm²)、N3(210 kg/hm²)、N4(255 kg/hm²)、N5(300 kg/hm²) 和 N6(345 kg/hm²), 研究不同施氮量对南方晚粳稻产量、品质及氮素吸收利用的影响。结果表明: 随着施氮量增加, 晚粳稻产量呈抛物线的变化趋势; 与 N4 产量相比, N1、N2、N3、N5 和 N6 产量分别降低 29.2%~34.9%, 10.1%~11.8%, 5.5%~5.7%, 1.2%~4.4%, 2.3%~9.0%, 其中 N4 处理 2 年产量均显著高于 N1 和 N2 处理, 而有效穗数和每穗粒数的提高是晚粳稻产量增加的主要原因。随施氮量增加, 水稻氮素总积累量增加, 水稻氮素的干物质生产效率、生理利用率、偏生产力、农学利用率和收获指数均降低, 而氮素吸收利用率先增后降。随施氮量增加, 晚粳稻加工品质、外观品质和营养品质均提高, 蒸煮与食味品质中直链淀粉含量降低, 胶稠度增加; RVA 谱特征值中峰值黏度、热浆黏度、冷胶黏度和崩解值均逐渐降低, 而消减值和回复值均呈增加的趋势。综上所述, 在试验设置条件下, 南方晚粳稻施氮量以 N4(255 kg/hm²) 为宜, 其能使水稻高产、优质及高效得到较好的协调统一。

关键词: 氮肥用量; 产量; 品质; 籼改粳

中图分类号: S511

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)05-0222-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.05.036

Effects of Nitrogen Application Rates on Japonica Rice Yield, Quality, and Nitrogen Uptake and Utilization During the Late-rice Cropping Seasons in Southern China

CHENG Chen, ZENG Yongjun, WANG Qi, TAN Xueming,

SHANG Qingyin, ZENG Yanhua, SHI Qinghua

(Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Ministry of Education, Jiangxi Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Southern Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil Crops in China, Collaborative Innovation Center for the Modernization Production of Double Cropping Rice, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045)

Abstract: In order to clarify the reasonable application amount of nitrogen fertilizer in late japonica rice in the southern double season rice area, an field experiment was conducted in 2016—2017 during the late-rice cropping seasons in southern China, the six nitrogen levels including N1 (0 kg/hm²), N2 (165 kg/hm²), N3 (210 kg/hm²), N4 (255 kg/hm²), N5 (300 kg/hm²) and N6 (345 kg/hm²) were set, and the effects of different nitrogen application rates on the japonica rice yield, quality and nitrogen use efficiency were studied. The results showed that the yield of late japonica rice showed a parabolic trend with the increasing of nitrogen application. Compared with the yield of N4 plots, the grain yield of the N1, N2, N3, N5 and N6 plots decreased by 29.2% ~ 34.9%, 10.1% ~ 11.8%, 5.5% ~ 5.7%, 1.2% ~ 4.4% and 2.3% ~ 9.0%, respectively. The grain yield of the N4 plots was significantly higher than those of the N1 and N2 plots in two years. The main reason for the increase of late japonica rice yield was the increase of productive panicle number and seed setting rate. With the increasing of nitrogen application, the total nitrogen accumulation of rice increased, while the nitrogen dry matter production efficiency, nitrogen physiological efficiency, nitrogen fac-

收稿日期: 2018-03-29

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300501, 2017YFD0301605); 江西省水稻产业技术体系专项(JXARS-02-03); 江西省重点研发计划项目(20161ACF60013, 20171BBF60030); 江西现代农业科研协同创新专项(JXXTCX2015001-011)

第一作者: 成臣(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事水稻栽培理论与技术研究。E-mail: chengchenxm@163.com

通信作者: 曾勇军(1978—), 男, 教授, 主要从事水稻栽培理论与技术研究。E-mail: zengyj2002@163.com

tor productivity for applied nitrogen, nitrogen agronomic efficiency and nitrogen harvest index were all decreased, and the nitrogen uptake and utilization efficiency first increased and then decreased. With the increasing of nitrogen application, the industrial quality, appearance quality and nutrition quality of the late japonica rice were all improved, the content of amylose content in eating and cooking quality decreased and the gel consistency increased. The peak viscosity, hot viscosity, cool viscosity and breakdown of RVA spectrum decreased gradually with the increasing of nitrogen application, while the setback and consistence increased. To sum up, it is advisable to apply nitrogen to N4 (255 kg/hm²) of japonica rice under the experimental conditions during the late-rice cropping seasons in southern China, which can reach the high yield, quality and efficiency.

Keywords: nitrogen application rate; yield; quality; indica to japonica

随着我国经济的快速发展和人民生活水平的提高,发展高产、优质和高效的水稻生产模式是我国粮食生产的重要走向,也是目前缓解我国粮食质量与数量间矛盾问题的有效措施之一^[1]。发展和优化水稻高产高效优质栽培技术,对我国粮食生产的高效持续发展具有重要作用。氮素作为调控水稻生长发育的三大营养元素之一,对水稻群体结构、产量、品质、稻田生态以及经济效益等方面都具有显著的调控作用,其中氮肥用量的影响效应尤为突出^[2]。

南方稻区是我国最重要的粮食主产区之一,双季稻种植制度作为主要的农业生产模式,在保障我国粮食安全起着不可替代的作用^[3]。徐新朋等^[4]研究表明,高肥力下水稻氮素吸收利用率较低,产量并未增加,合理的氮肥用量可以提高水稻产量和氮素利用率,建议施氮量180 kg/hm²。吴建富等^[5]研究表明,双季超级籼稻产量随施氮量增加呈先增后降的规律,其中在施氮量为180 kg/hm²时产量达到最高;随着施氮量增加,早晚季氮素生理利用率、农学利用率以及氮素收获指数均降低,而氮素吸收利用率早稻季增加,晚稻季却降低。何虎等^[6]对双季晚稻研究表明,淦鑫688品种的产量与施氮量呈抛物线相关,施氮量在180~200 kg/hm²范围内稻米加工品质和外观品质表现最佳,产量构成因素间较为协调,水稻产量达到最高。综上所述,目前南方稻区已有的研究报道主要以籼稻为试验材料,而以粳稻为试验材料的研究甚少。

近年来,南方双季稻区“粳改粳”得到迅速发展,其中“晚粳”种植模式是当地推广粳稻的主要模式^[7]。与当地籼稻相比粳稻的产量及米质均表现较好,特别是粳粳杂交稻^[8]。若水稻种植方式改变后仍然沿用当地籼稻的施氮量方案,可能致使晚粳稻产量和品质优势没有充分发挥。然而目前对南方双季稻区晚粳稻适宜施氮量尚未见相关的研究报道,晚粳稻能否同步达到高产、高效和优质等多重目标目前还不明确。因此,本研究以南方晚粳稻为对象,研究不同施氮量对水稻产量、品质及氮素吸收利用的影响,旨在为南方晚粳稻增产、高效和优质栽培提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点与供试品种

试验于2016—2017年晚稻季在江西省上高县泗溪镇曾家村江西农业大学校外试验基地(115°06′52″E, 28°16′42″N)开展。供试品种为粳粳杂交稻甬优1538。前茬作物为双季早籼稻(产量约为7.5 t/hm²)。供试土壤地力中等,2016年和2017年种植前土壤有机碳含量分别为20.5, 22.6 g/kg,全氮分别为2.27, 2.42 g/kg,速效钾分别为71.4, 83.7 mg/kg,速效磷分别为21.3, 23.7 mg/kg,土壤pH为5.25, 5.29。

1.2 试验设计

采用随机区组设计,施氮量(纯氮)设N1(0 kg/hm²)、N2(165 kg/hm²)、N3(210 kg/hm²)、N4(255 kg/hm²)、N5(300 kg/hm²)和N6(345 kg/hm²)共6种氮肥水平。各氮肥处理设3次重复,小区面积为30.0 m²,小区之间构筑土埂,保证单独排灌,并用塑料薄膜包埂防止串水串肥。采用机插塑料秧盘育秧,机插行株距为25 cm×14 cm,每穴4苗。试验中施用氮肥、磷肥和钾肥分别为尿素、钙镁磷肥和氯化钾,以N、P₂O₅和K₂O计,各处理施P₂O₅和K₂O分别为127.5, 204 kg/hm²,氮肥施用比例为基肥:蘖肥:穗肥为4:2:4,磷肥一次性施用作基肥,钾肥按基肥:穗肥为7:3施用。2016年(2017年)试验于6月25日(6月27日)播种,7月18日(7月20日)移栽。其他管理措施均按高产优质栽培要求实施。

1.3 测定内容与方法

1.3.1 产量构成 成熟期各小区调查100穴水稻的有效穗数,按平均有效穗选取考种样5穴,测定每穗粒数、结实率及千粒重等性状。各小区实收6 m²水稻进行测产。

1.3.2 氮素测定 成熟期按平均有效穗对各小区进行干物质取样,每小区取5穴,剪根洗净后分别将茎、叶及穗装袋,并放进烘箱105℃杀青30 min,随后将烘箱温度调至80℃直至样品恒重。将水稻成熟期茎、叶及穗的干物质样品分别粉碎,过80目筛后用全自动凯氏定氮仪(FOSS—8400)测定样品全氮含量。

1.3.3 稻米品质及稻米淀粉黏滞性测定 水稻籽粒收获后 3 个月,送至农业农村部食品质量监督检验测试中心(武汉)进行加工品质、外观品质、蒸煮与食味品质及营养品质等主要米质指标测定。稻米淀粉黏滞性(RVA)采用澳大利亚 Newport Scientific 仪器公司生产的 Super3 型 RVA 分析仪测定,用 TCW 配套软件进行数据分析。

1.4 数据处理

1.4.1 计算方法 氮素吸收与利用效率的计算方法参考霍中洋等^[9]方法,计算公式为:

氮素干物质生产效率(NDMPE,kg/kg)=单位面积植株干物质总量(kg/hm²)/单位面积植株氮素累积量(kg/hm²)

氮素吸收利用率(NRE,%)=(施氮区植株氮素累积量(kg/hm²)-不施氮区植株氮素累积量(kg/hm²))/施氮量(kg/hm²)

氮素生理利用率(NPE,kg/kg)=(施氮区产量(kg/hm²)-不施氮区产量(kg/hm²))/(施肥区植株总吸氮量(kg/hm²)-不施氮区植株总吸氮量(kg/hm²))

氮素偏生产力(NPFP,kg/kg)=施氮区产量(kg/hm²)/施氮量(kg/hm²)

氮素农学利用率(NAE,kg/kg)=(施氮区产量(kg/hm²)-不施氮区产量(kg/hm²))/施氮量(kg/hm²)

氮素收获指数(NHI,%)=植株籽粒吸氮量(kg/hm²)/植株总吸氮量(kg/hm²)

1.4.2 统计方法 试验数据均采用 Excel 2010 和 DPS 7.05 软件进行分析和处理,制图采用 Origin 9.0 软件,用 LSD 法进行差异显著性检验($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 晚粳稻产量及其构成因素

由表 1 可知,产量在年份和施氮处理上差异均达显著水平,在年份与施氮互作上无显著性差异。随着施氮量增加,粳粳杂交稻两年产量均先增加后降低,在 N4 时产量最高。与 N4 产量相比,N1、N2、N3、N5 和 N6 产量分别降低 29.2%~34.9%,10.1%~11.8%,5.5%~5.7%,1.2%~4.4%,2.3%~9.0%,其中 N4 处理 2 年产量均显著高于 N1 和 N2 处理。方差分析表明,结实率和千粒重在年份、氮肥及年份与氮肥互作上差异均存在显著性差异,有效穗数在年份、氮肥上存在显著性差异,而每穗粒率仅在氮肥上差异存在显著性。从产量构成因素来看,随施氮量的增加,有效穗数增加,而结实率呈降低的趋势。与 N1 相比,N2、N3、N4、N5 和 N6 有效穗数分别显著增加 29.4%~39.4%,32.9%~41.5%,37.3%~46.4%,41.8%~48.7%,38.5%~51.6%,而结实率分别显著降低 9.0%~14.4%,10.5%~14.9%,10.8%~15.9%,11.0%~18.5%,13.3%~22.0%。随着施氮量增加,每穗粒数呈先增后降趋势,与 N4 相比,N1、N2、N3、N5 和 N6 每穗粒数分别降低 18.2%~21.4%,6.6%~7.1%,3.2%~3.4%,0.3%~3.0%,2.9%~7.3%,其中 N4 与 N1 处理间差异达到显著水平。相关分析表明,产量与有效穗数和每穗粒数呈极显著正相关(相关系数分别为 0.923** 和 0.988**),与结实率呈极显著负相关(相关系数为-0.759**),而与千粒重无显著相关。

表 1 施氮量对南方晚粳稻产量及其构成因素的影响

年份	施氮处理	有效穗数/ ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	每穗 粒数/穗	结实率/ %	千粒重/ g	产量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)
2016	N1	192.1 $\pm$ 8.1d	192.5 $\pm$ 5.3b	88.5 $\pm$ 0.2a	24.7 $\pm$ 0.3c	7.37 $\pm$ 0.32d
	N2	267.8 $\pm$ 1.0c	227.5 $\pm$ 6.4a	75.8 $\pm$ 0.8b	25.4 $\pm$ 0.1ab	9.98 $\pm$ 0.29c
	N3	271.7 $\pm$ 7.1bc	236.5 $\pm$ 14.1a	75.3 $\pm$ 0.8b	25.5 $\pm$ 0.3a	10.70 $\pm$ 0.34b
	N4	281.3 $\pm$ 10.2abc	244.9 $\pm$ 14.5a	74.4 $\pm$ 1.2b	25.5 $\pm$ 0.1ab	11.32 $\pm$ 0.46a
	N5	285.6 $\pm$ 7.8ab	244.1 $\pm$ 12.9a	72.2 $\pm$ 1.3c	25.3 $\pm$ 0.1ab	11.18 $\pm$ 0.10ab
	N6	291.1 $\pm$ 13.3a	237.7 $\pm$ 2.0a	69.1 $\pm$ 0.7d	25.1 $\pm$ 0.1b	11.06 $\pm$ 0.13ab
2017	N1	194.8 $\pm$ 7.3d	201.5 $\pm$ 14.2b	89.3 $\pm$ 0.1a	24.7 $\pm$ 0.3b	8.29 $\pm$ 0.32c
	N2	252.0 $\pm$ 7.1c	230.0 $\pm$ 15.7a	81.3 $\pm$ 1.5b	24.9 $\pm$ 0.2b	10.52 $\pm$ 0.37b
	N3	258.8 $\pm$ 5.9bc	238.2 $\pm$ 15.3a	80.0 $\pm$ 2.5b	25.2 $\pm$ 0.1a	11.03 $\pm$ 0.51ab
	N4	267.4 $\pm$ 11.0abc	246.2 $\pm$ 6.1a	79.7 $\pm$ 3.3b	25.3 $\pm$ 0.2a	11.70 $\pm$ 0.70a
	N5	276.3 $\pm$ 15.0a	238.8 $\pm$ 14.3a	79.5 $\pm$ 1.2b	23.7 $\pm$ 0.3c	11.19 $\pm$ 0.59ab
	N6	269.7 $\pm$ 8.1ab	228.3 $\pm$ 2.4a	77.5 $\pm$ 2.2b	23.6 $\pm$ 0.1c	10.65 $\pm$ 0.06b
年份		14.03**	0.01ns	92.01**	128.43**	6.46*
氮肥		74.15**	13.68**	62.51**	36.50**	86.97**
年份 $\times$ 氮肥		1.12ns	0.46ns	3.66*	22.59**	2.53ns

注:表中数据为平均值 $\pm$ 标准误差;同列不同小写字母表示不同处理同一季节差异达 5%显著水平($P<0.05$);* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著;ns 表示差异不显著($P>0.05$)。下同。

根据 2 年施氮量与产量间关系建立效应方程(表 2),当 2016 年和 2017 年施氮量分别为 287.5,230.0 kg/

hm² 时产量达到最高,而当 2016 年和 2017 年施氮量分别为 272.6,217.0 kg/hm² 时收益最高。就目前

种植成本和粮食单价来看,晚粳稻最高收益的施氮量 为最高产量时施氮量的 94.3%~94.8%。

表 2 南方晚粳稻产量与施氮量之间的关系

年份	拟合方程	R ²	最高产量		最高收益	
			施氮量/	产量/	施氮量/	产量/
			(kg·hm ⁻²)	(t·hm ⁻²)	(kg·hm ⁻²)	(t·hm ⁻²)
2016	$Y=-4\times10^{-5}X^2+0.023X+7.324$	0.983**	287.5	10.63	272.6	10.62
2017	$Y=-5\times10^{-5}X^2+0.023X+8.223$	0.944**	230.0	10.87	217.0	10.86

注:Y 为晚粳稻产量(kg/hm²);X 为施氮量(kg/hm²);在经济收益计算中,粳稻稻谷单价以当年最低收购价计(2016 年和 2017 年分别为 3 100,3 000 元/t);纯 N 价格以当年当地价格计(2016 年和 2017 年纯 N 价格分别为 3.66,3.88 元/kg);本试验中除稻谷外无其他经济收益来源,不同处理间除氮肥成本外,其他生产成本均一致,故设为 1 个常数代入计算。

2.2 晚粳稻氮素吸收与利用

从水稻成熟期干物质生产及群体吸氮特性来看(表 3),随着施氮量增加,水稻茎、叶及穗含氮率均逐渐增加,其中 N5 与 N6 间差异均不显著。而水稻各

器官单位面积干物质质量均先增加后降低,N4 与 N5 间差异不显著。最终水稻各器官的吸氮量表现为增加的趋势,其中 N4、N5 及 N6 之间各器官吸氮量差异均不显著,总吸氮量也表现出类似规律。

表 3 施氮量对晚粳稻成熟期各器官干物质积累及含氮率的影响(2016 年)

施氮处理	含 N 率/%			干物质质量/(t·hm ⁻²)			含氮量/(kg·hm ⁻²)			
	茎	叶	穗	茎	叶	穗	茎	叶	穗	总和
N1	0.36e	0.91c	0.88d	2.89d	1.06d	7.22c	10.4d	9.7d	63.5d	83.6d
N2	0.52d	1.48b	1.17c	3.77c	1.80c	10.56b	19.6c	26.7c	123.4c	169.7c
N3	0.67c	1.59ab	1.28bc	4.21ab	2.00bc	11.18ab	28.0b	31.6b	143.1b	202.7b
N4	0.70bc	1.77ab	1.32ab	4.54a	2.23a	11.86a	31.9a	39.5a	156.6a	228.1a
N5	0.79ab	1.84a	1.39ab	4.20ab	2.08ab	11.34ab	33.0a	38.2a	157.6a	228.8a
N6	0.83a	1.88a	1.41a	4.08bc	2.02ab	11.14ab	33.8a	37.9a	156.2a	227.9a

从水稻氮素吸收利用效率来看(表 4),随施氮量增加,水稻 NDMPE、NPE、NPFP、NAE、NHI 均逐渐降低,而 NRE 呈先增后降的趋势。与 N1 相比,N2、N3、N4、N5 和 N6 的 NDMPE 分别显著降低 28.8%,35.8%,38.8%,42.3%,43.4%,NHI 分别显著降低 4.3%,7.1%,9.1%,9.4%,9.8%,其中 N3、N4、N5 和 N6 之间

NDMPE 和 NHI 均无显著性差异。NRE 在 N3 和 N4 时最高,显著高于 N5 和 N6 处理。与 N2 相比,N3、N4、N5 和 N6 的 NPE 分别显著降低 14.8%,18.1%,27.3%,30.5%,NPFP 分别显著降低 16.8%,27.3%,40.9%,49.6%,NAE 分别降低 6.7%,10.2%,32.1%,43.9%,其中 N5 与 N6 间在 NPE、NPFP 和 NAE 均无显著性差异。

表 4 施氮量对南方晚粳稻氮素利用率的影响(2016 年)

施氮处理	NDMPE/ (kg·kg ⁻¹)	NRE/%	NPE/ (kg·kg ⁻¹)	NPFP/ (kg·kg ⁻¹)	NAE/ (kg·kg ⁻¹)	NHI/%
N1	133.6±10.3a					76.0±0.8a
N2	95.1±5.1b	52.2±2.5ab	39.1±1.4a	64.0±2.2a	20.3±4.9a	72.8±0.7b
N3	85.7±2.8bc	56.7±1.9a	33.3±1.0b	53.3±2.2b	18.9±0.1a	70.6±0.8bc
N4	81.7±2.3c	56.7±3.3a	32.0±3.5bc	46.5±1.2c	18.2±3.0ab	69.1±0.9c
N5	77.0±0.7c	48.4±2.2bc	28.4±0.3bc	37.8±2.0d	13.8±0.5ab	68.9±0.4c
N6	75.6±3.9c	41.8±0.2c	27.2±1.7c	32.3±2.0d	11.4±0.7b	68.5±0.6c

2.3 晚粳稻主要品质性状

2.3.1 加工品质 方差分析表明,出糙率和精米率在年份间差异不显著,而整精米率受年份影响达极显著水平;精米率和整精米率在年份与氮肥互作上均存在显著性差异;加工品质各指标对氮肥的响应均表现极显著性差异(表 5)。随着施氮量的增加,南方晚粳稻的加工品质(出糙率、精米率和整精米率)呈变优的趋势,其中在 N1~N4 之间加工品质变优幅度较大,而在 N4~N6 变优幅度较为缓慢甚至略有降低的趋势。

2.3.2 外观品质 方差分析表明,垩白粒率和垩白度在年份和氮肥处理间差异均呈极显著差异,在年份与氮肥互作上差异不显著(表 5)。随施氮量增加,

垩白粒率和垩白度降低,外观品质提升。与 N1 相比,N2、N3、N4、N5 和 N6 垩白粒率分别显著降低 10.2%~13.6%,14.6%~17.8%,18.2%~22.0%,23.4%~28.0%,29.9%~39.0%,垩白度分别显著降低 17.9%~19.2%,23.3%~23.6%,25.6%~25.6%,33.9%~35.2%,40.2%~46.2%。

2.3.3 蒸煮与食味品质 方差分析表明,直链淀粉和胶稠度均在年份和氮肥处理间差异极显著(表 5)。随着施氮量增加,稻米直链淀粉含量降低,而胶稠度表现增加的趋势。稻米直链淀粉和胶稠度两年变化趋势较为一致,但年际间变幅较大。

2.3.4 营养品质 方差分析表明,稻米粗蛋白含量

在年份、氮肥以及年份与氮肥互作上均表现显著差异(表5)。随着施氮量增加(N1~N5), 稻米粗蛋白含量均呈增加的趋势, 而 N6 略有降低, 与 N5 相比差异不显著。说明增加施氮量有利于提高稻米粗蛋白含量, 但过高的施氮量难以进一步提升稻米粗蛋白含量。

表 5 施氮量对南方晚粳稻主要品质性状的影响

年份	施氮处理	出糙率/%	精米率/%	整精米率/%	垩白粒率/%	垩白度/%	直链淀粉含量/%	胶稠度/mm	粗蛋白含量/%
2016	N1	82.4±0.4e	74.0±0.3c	66.3±0.2c	45.7±1.5a	12.9±0.3a	16.1±0.1a	52.0±2.0c	5.18±0.30e
	N2	83.8±0.2d	75.0±0.2b	67.9±0.7b	41.0±1.0b	10.6±0.7b	15.9±0.1ab	52.7±1.2bc	6.82±0.24d
	N3	84.2±0.2c	75.2±0.1b	68.0±0.3b	39.0±1.0bc	9.9±1.6bc	15.8±0.1ab	53.0±1.0bc	7.50±0.16c
	N4	84.5±0.1bc	75.5±0.3b	68.2±1.1b	37.3±2.1cd	9.6±0.5bcd	15.7±0.3bc	53.3±2.3abc	7.91±0.16b
	N5	84.9±0.2a	76.2±0.1a	70.1±0.7a	35.0±2.0de	8.5±1.0cd	15.3±0.3cd	54.0±1.0ab	8.55±0.15a
	N6	84.7±0.2ab	75.5±0.7b	67.9±1.6b	32.0±2.6e	7.7±1.2d	15.2±0.2d	55.0±1.0a	8.43±0.18a
2017	N1	81.2±0.2d	72.9±0.3d	60.0±0.7e	39.3±2.1a	11.8±1.0a	14.5±0.5a	69.3±1.2d	5.38±0.15e
	N2	82.9±0.1c	74.7±0.5c	64.4±0.2d	34.0±2.6b	9.6±0.5b	14.3±0.4a	70.7±1.2cd	7.56±0.10d
	N3	83.1±0.2c	75.5±0.4bc	65.4±0.4c	32.3±2.9b	9.0±0.2b	14.0±0.1ab	73.3±2.9cd	7.72±0.09c
	N4	83.2±0.2bc	75.7±0.4ab	65.9±0.3bc	30.7±0.6bc	8.8±0.6bc	13.6±0.4bc	74.7±1.5bc	7.91±0.06b
	N5	83.6±0.1ab	76.2±0.4ab	66.2±0.5b	28.3±1.5c	7.7±0.3c	13.3±0.1c	77.7±2.5ab	8.91±0.07a
	N6	83.7±0.5a	76.6±0.8a	67.0±0.7a	24.0±2.0d	6.4±0.6d	13.2±0.3c	80.7±4.0a	8.77±0.03a
年份		0.1ns	0.4ns	315.2**	117.7**	11.0**	496.0**	1262.2**	36.0**
氮肥		127.7**	30.0**	58.9**	40.2**	25.9**	18.5**	13.4**	399.0**
年份×氮肥		0.1ns	4.0*	12.7**	0.5 ns	0.1ns	0.9ns	4.9**	3.9*

2.4 晚粳稻稻米淀粉黏滞性

方差分析表明(表 6),除峰值黏度和消减值外,其他 RVA 谱特征值均在年份和氮肥用量上差异呈极显著,在年份与施氮量互作上表现差异不显著。峰值时间在施氮量及施氮量与年份互作上表现差异极显著,在年份上差异不显著;而糊化温度在年份、施氮

量以及年份与施氮量互作上均表现差异极显著。

不同施氮量对南方优质粳稻稻米淀粉黏滞性(RVA)影响存在显著性差异(表 6)。随着施氮量增加,2 年粳稻杂交稻的峰值黏度、热浆黏度、冷胶黏度和崩解值均逐渐降低,而消减值和回复值均呈增加的趋势。随施氮量增加,峰值时间和糊化温度均呈先增加后降低的趋势。

表 6 施氮量对南方优质晚粳稻 RVA 谱特征值的影响

年份	施氮处理	峰值黏度/cp	热浆黏度/cp	冷胶黏度/cp	崩解值/cp	消减值/cp	回复值/cp	峰值时间/min	糊化温度/℃
2016	N1	3941.0a	2313.3a	3684.3a	1627.7a	-256.7c	1371.0d	6.24c	71.93c
	N2	3769.0b	2158.3b	3605.7ab	1610.7a	-163.3bc	1447.3cd	6.29c	72.07c
	N3	3662.3b	2082.0bc	3570.3b	1580.3a	-92.0b	1488.3bc	6.38b	72.60b
	N4	3457.0c	1995.3cd	3533.0bc	1461.7b	76.0a	1537.7abc	6.53a	73.32a
	N5	3365.3cd	1909.3de	3456.0cd	1456.0b	90.7a	1546.7ab	6.29c	72.78b
	N6	3246.3d	1799.3e	3382.3d	1447.0b	136.0a	1583.0a	6.24c	72.33bc
2017	N1	3985.3a	2492.7a	3567.7a	1492.7a	-417.7b	1075.0a	6.36b	74.63c
	N2	3723.0b	2367.3b	3470.3b	1355.7ab	-252.7a	1103.0a	6.50a	87.08b
	N3	3615.7bc	2282.0bc	3388.0c	1333.7ab	-227.7a	1106.0a	6.38b	87.12b
	N4	3563.7c	2232.3cd	3343.3c	1331.3ab	-220.3a	1111.0a	6.35b	87.88a
	N5	3422.3d	2118.3de	3237.7d	1304.0b	-184.7a	1119.3a	6.31b	87.82a
	N6	3397.0d	2100.0e	3220.7d	1297.0b	-176.3a	1120.7a	6.29b	87.6ab
年份		3.7ns	108.2**	125.2**	40.1**	137.4**	452.6**	4.3 ns	14031.2**
氮肥		71.6**	40.1**	43.1**	4.5**	29.2**	4.3**	10.5**	439.0**
年份×氮肥		2.0ns	0.7 ns	1.0ns	0.7ns	4.6**	1.9ns	9.2**	351.6**

3 讨论

3.1 施氮量对南方晚粳稻产量及氮素吸收与利用的影响

适宜的施氮量是水稻高产、稳产的重要保障,对同步提高水稻增产效果和氮肥利用率起着关键性作用^[10]。有关施氮量对水稻产量的影响,研究结果因供试品种、地力、栽培方式及生态区等多因素不同而存在一定差异。何虎等^[11]研究表明,超级晚粳稻随着施氮量增加(0~240 kg/hm²)产量先增后降,在施

氮量为 180 kg/hm² 产量达到最高;随着施氮量增加,有效穗数增加、每穗粒数降低,而受每穗粒数影响不大。魏海燕等^[12]对 5 个超级粳稻研究表明,随着施氮量增加(0~337.5 kg/hm²),水稻产量均呈先增后降的变化规律,较高的群体颖花量是产量的增加主要因素。本研究结果较为一致,随施氮量增加,南方晚粳稻产量先增加后下降,其中有效穗数、每穗粒数与产量呈极显著正相关。其中 2016 年和 2017 年水稻产量最高时施氮量分别为 287.5、230.0 kg/hm²,

不同年份最高产量时施氮量的差异可能与供试土壤地力及年份间生态气候条件的差异相关。经济效益最大化是水稻生产最重要的目标之一,本研究表明,种植收益最高时的施氮量为产量最高时施氮量的94.3%~94.8%。魏海燕等^[12]也得到类似结果,表明水稻经济最佳的施氮量与水稻产量的最高施氮量相比降幅达7.8%。

适宜的施氮量可以保证水稻比较平衡的氮素需求,促进氮素吸收利用,降低氮素的损失,提高氮肥利用效率,从而同步实现增产并节约肥料成本^[13]。魏海燕等^[12]认为,随施氮量增加,水稻氮素吸收利用率、农学利用率及生理利用率均下降,而水稻籽粒吸氮量增加。江立庚等^[14]研究表明,随着施氮量增加,水稻氮素积累总量增加,氮素干物质生产率、氮素稻谷生产效率、氮素收获指数和氮素农学效率降低,而氮素吸收利用率和氮素转运效率因品种而异。本研究得到类似结果,随施氮量增加,植株成熟期茎、叶、穗及总吸氮量呈增加的趋势,且N4~N6之间差异不显著;氮肥NDMPE、NPE、NPFP、NAE、NHI均逐渐降低。但本试验中,氮素吸收利用率(NRE)的变化规律不同,呈先增后降的趋势。由于不同施氮量条件下植株对土壤氮素的吸收是不同的,若施氮后对土壤氮素的吸收增加则为正激发效应,反之为负激发效应^[15]。可能是在低施氮量范围内下增施氮肥会促进水稻对土壤氮素吸收,氮素吸收利用率提高;若氮素吸收利用率达到最高值时,再继续增施氮肥,植株对土壤氮素吸收可能有所降低,并且植株总吸氮量并不再继续增加,因此过高施氮量下氮素吸收利用率将降低。张洪程等^[16]也研究认为,随施氮量增加,氮肥利用率先增后降,其与产量呈线性相关,因此较高的氮肥利用率有利于高产。

3.2 施氮量对南方晚粳稻米品质的影响

稻米品质主要由品种遗传、栽培管理技术以及生态环境等多因素共同作用的结果,而氮素调控是影响水稻生长发育的一项重要措施,合理的施氮量利于水稻优质的形成^[17]。本研究表明,随着施氮量增加,稻米出糙率、精米率和整精米率增加,但不同施氮量范围下加工品质变优幅度有所差异,其中高施氮量下变优程度较小;而垩白粒率和垩白度降低。说明增施氮肥利于南方晚粳稻稻米加工品质和外观品质的提升,这与张军等^[18]研究报道一致,而周培南等^[19]却得到相反的结论,其认为随施氮量增加稻米加工品质和外观品质变劣。孙楠等^[20]认为随施氮量增加,稻米的加工品质有所改善,但外观品质明显变差。殷春渊等^[21]认为施氮量对外观品质影响较小,而垩白粒率和垩白度随施氮量增加呈先降后增变化趋势,适宜的施氮量是改善稻米外观品质的重要因素。有关稻米蛋白质含量与施氮量的关系,众多报道均认为稻米蛋

白质含量随着施氮量的增加而增加^[16]。本研究也表明,随着施氮量增加,稻米粗蛋白含量呈增加的趋势,至N5时达到最高值,而N6略有降低,与N5差异不显著。说明施氮量增加有利于提高稻米粗蛋白含量,但过高的施氮量难以使稻米粗蛋白含量进一步提升。

食味品质是稻米商品价值的直接体现。本研究表明,随着施氮量增加,稻米直链淀粉含量降低,胶稠度表现增加的趋势,其中胶稠度在不同年份间变化幅度存在较大差异。高辉等^[22]研究认为,各生育期类型品种的直链淀粉含量均随施氮量的增加而降低,而胶稠度随施氮量增加略有缩短,但变幅较小,因此氮肥水平对胶稠度的影响不大。从夕汉等^[23]却认为,随施氮量增加稻米直链淀粉含量逐渐增加,胶稠度变长。上述结果存在差异的原因可能与品种的氮肥敏感程度、施氮量及气候生态条件等不同有关。此外,稻米RVA谱特征值与蒸煮与食味品质存在高度相关性,能较好的区分稻米的优劣,而氮肥对RVA谱也具有一定的调节作用。本研究表明,随施氮量增加,南方晚粳稻稻米淀粉RVA谱特征值中峰值黏度、热浆黏度、冷胶黏度和崩解值均逐渐降低,而消减值和回复值均呈增加的趋势。表明稻米淀粉黏滞性对施氮量存在负效应,这与朱邦辉等^[24]研究结果相似,但金军等^[25]却认为,随着施氮量增加,峰值黏度和崩解值先增加后下降,米质呈先变优后变劣的规律。

3.3 关于协调南方晚粳稻高产、优质和高效的问题

发展高产优质高效及环境友好型农业,是目前农业发展的主要方向。本研究表明,随施氮量增加(0~345 kg/hm²),南方晚粳稻水稻NDMPE、NPE、NPFP、NAE、NHI均逐渐降低,而NRE呈先增后降的趋势。然而实际生产中氮肥利用效率的各项指标并不是越高越好,而是要在保证作物在获得较高的产量的同时,土壤的氮素输入与输出能维持相对平衡条件下提高氮肥利用率。本试验中N1~N3处理植株对土壤吸收的总氮量高于或略等于氮肥投入量,再考虑氮肥氨挥发、硝化一反硝化、淋洗和径流等途径的损失,以上处理土壤养分应均处于亏缺状态,不利于农业可持续发展;而N5~N6处理氮素利用率较低,氮素流失易造成面源污染并增加成本。再从水稻产量及品质来看,随施氮量增加,南方晚粳稻产量先增加后降低,在N4时达到最高;而较高的施氮量能改善南方晚粳稻加工品质、外观品质和营养品质,却有降低食味品质的趋势。因此在本试验条件下,籼粳杂交稻在南方稻区晚稻季种植纯施氮量以N4为宜,能较好协调水稻高产、优质及高效的问题。张军等^[18]还认为,高地力农田只需少量氮肥,就能获得高产,并同步提高稻米品质和氮素吸收利用率,而低肥力下难以同步实现水稻高产、优质和高效的之间协调关系。由此可见,在生产中应加强对稻田土壤地力的提高和

维持,如开展秸秆还田、增施有机肥以及制定合理的轮作制度等措施,使农田土壤养分始终保持一个高肥力的供需平衡体系,并且还应结合品种需氮特性、合理的肥料配比、栽培技术(如精确定量栽培及超稀植强化栽培)以及市场预期目标。此外,由于不同粳稻品种对氮肥的响应存在差异,而本研究仅以甬优 1538 为试验材料,故研究结果存在一定局限性,因此还有待于进一步研究。

4 结论

(1)随施氮量增加,南方晚粳稻产量呈先增后降的抛物线关系,在 N_4 时水稻产量达到最高,其中 2016 年和 2017 年产量最高时施氮量分别为 287.5、230.0 kg/hm²,而从种植收益最大化来看,晚粳稻最高收益的施氮量为最高产量时施氮量的 94.3%~94.8%。

(2)施氮量为 $N_1 \sim N_3$ 时氮素吸收利用率较高,但土壤养分处于亏缺状态,而 $N_5 \sim N_6$ 处理氮肥施用量过多,氮肥利用率较低。

(3)随施氮量增加,南方晚粳稻加工品质、外观品质及营养品质变优,蒸煮与食味品质中直链淀粉含量降低,胶稠度增加,以及 RVA 谱特征值有变劣的趋势。

因此,在本试验条件下(土壤肥力中等),同步实现南方晚粳稻高产、优质和高效等目标,施氮量以 N_4 (255 kg/hm²)为宜,并建议在南方晚粳稻种植中,应加强土壤培肥地力、采用高效施肥方案及栽培技术。

参考文献:

- [1] 凌启鸿,张洪程,丁艳锋,等.水稻高产技术的新发展:精确定量栽培[J].中国稻米,2005,11(1):3-7.
- [2] 何海兵,杨茹,廖江,等.水分和氮肥管理对灌溉水稻优质高产高效调控机制的研究进展[J].中国农业科学,2016,49(2):305-318.
- [3] 成臣,汪建军,程慧煌,等.秸秆还田与耕作方式对双季稻产量及土壤肥力质量的影响[J].土壤学报,2018,55(1):247-257.
- [4] 徐新朋,周卫,梁国庆,等.氮肥用量和密度对双季稻产量及氮肥利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(3):763-772.
- [5] 吴建富,潘晓华,石庆华.施氮量对免耕抛栽稻产量及氮素吸收利用的影响[J].江西农业大学学报,2011,33(6):1031-1036.
- [6] 何虎,黄山,才硕,等.稻草全量还田下氮肥运筹对双季晚稻产量和稻米品质的影响[J].江西农业大学学报,2015,37(3):385-391.
- [7] 张军,张洪程,霍中洋,等.不同栽培方式对双季晚粳稻产量及温光利用的影响[J].中国农业科学,2013,46(10):2130-2141.
- [8] 郭保卫,李超,韦还和,等.不同株高类型甬优系列籼粳杂交稻产量差异及其形成机理[J].核农学报,2017,31(1):135-144.
- [9] 霍中洋,李杰,张洪程,等.不同种植方式下水稻氮素吸

收利用的特性[J].作物学报,2012,38(10):1908-1919.

- [10] Zhou W, Lü T, Zhang P, et al. Regular nitrogen application increases nitrogen utilization efficiency and grain yield in indica hybrid rice [J]. Agronomy Journal, 2016, 108(5): 1951-1961.
- [11] 何虎,吴建富,曾研华,等.稻草全量还田下氮肥运筹对双季晚稻产量及其氮素吸收利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(4):811-820.
- [12] 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.
- [13] Li G H, Liu J, Dong S T, et al. Effects of close planting and nitrogen application rates on grain yield and nitrogen utilization efficiency of different density-tolerance maize hybrids [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(12): 2247-2258.
- [14] 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.
- [15] Peng W F, Zeng Y J, Shi Q H, et al. Responses of rice yield and the fate of fertilizer nitrogen to soil organic carbon [J]. Plant, Soil and Environment, 2017, 63(9): 416-421.
- [16] 张洪程,王秀芹,戴其根,等.施氮量对杂交稻两优培九产量、品质及吸氮特性的影响[J].中国农业科学,2003,36(7):800-806.
- [17] Shi W, Yin X, Struik P C, et al. Grain yield and quality responses of tropical hybrid rice to high night-time temperature [J]. Field Crops Research, 2016, 190: 18-25.
- [18] 张军,张洪程,段祥茂,等.地力与施氮量对超级稻产量、品质及氮素利用率的影响[J].作物学报,2011,37(11):2020-2029.
- [19] 周培南,冯惟珠,许乃霞,等.施氮量和移栽密度对水稻产量及稻米品质的影响[J].扬州大学学报(农业与生命科学版),2001,22(1):27-31.
- [20] 孙楠,王术,黄元财,等.氮肥施用量对粳米品质的影响[J].作物杂志,2012(3):109-113.
- [21] 殷春渊,王书玉,刘贺梅,等.氮肥施用量对超级粳稻新稻 18 号强、弱势籽粒灌浆和稻米品质的影响[J].中国水稻科学,2013,27(5):503-510.
- [22] 高辉,马群,李国业,等.氮肥水平对不同生育类型粳稻稻米蒸煮食味品质的影响[J].中国农业科学,2010,43(21):4543-4552.
- [23] 从夕汉,施伏芝,阮新民,等.氮肥水平对不同基因型水稻氮素利用率、产量和品质的影响[J].应用生态学报,2017,28(4):1219-1226.
- [24] 朱邦辉,徐晓杰,徐玉峰,等.氮肥用量对机插优质粳稻武运梗 27 号产量和品质的影响[J].中国稻米,2015,21(5):63-66.
- [25] 金军,徐大勇,蔡一霞,等.施氮量对水稻主要米质性状及 RVA 谱特征参数的影响[J].作物学报,2004,30(2):154-158.