

江淮稻作区氮肥用量对高产优质中粳稻产量、品质及氮肥利用效率的影响

阮新民^{1,2,3} 从夕汉^{1,2,3} 杜弘杨^{1,2,3} 岳伟⁴
施伏芝^{1,2,3} 罗彦长^{1,2,3} 王元奎^{1,2,3} 罗志祥^{1,2,3}

(¹安徽省农业科学院水稻研究所, 230031, 安徽合肥; ²安徽省水稻遗传育种重点实验室, 230031, 安徽合肥;
³水稻种质创新与分子改良安徽省重点实验室, 230031, 安徽合肥; ⁴安徽省农业气象中心, 230088, 安徽合肥)

摘要 为研究施氮量对江淮稻作区高产优质中粳型水稻产量、品质及氮肥利用率的影响, 以大面积应用的产量高、品质优、综合性状优良的水稻新品种为材料, 设置 7 个氮肥梯度进行评估。结果表明, 除常规品种 R202 在施氮量 180 kg/hm² 时达最高产量外, 其余杂交品种均在 225 kg/hm² 时产量最高。氮肥对高产水稻品种产量构成主要影响的是有效穗数和穗粒数。在达最高产量时, 荃两优 879、两优 5043、R202 和荃优 6019 的氮肥农学利用率较对照丰两优 4 号均增加 20% 以上, 氮肥吸收利用率均增加 5% 以上, 氮肥生理利用率均增加 7% 以上, 氮肥偏生产力均增加 10% 以上。氮肥干物质生产效率、氮肥籽粒生产效率和氮肥偏生产力随施氮量的增加而下降。增加施氮量提高了高产优质水稻品种的整精米率, 降低了垩白度和直链淀粉含量, 透明度和碱消值变化不明显。

关键词 水稻; 施氮量; 产量; 品质; 氮肥利用率

水稻是我国最主要的粮食作物之一, 播种面积占粮食总播种面积的 24.8%, 产量占粮食总产量的 30.4%^[1]。目前, 我国水稻种植面积约 3000 万 hm², 其中 90% 为灌溉水稻^[2]。氮是水稻生长发育最重要的营养元素之一, 水稻的高产与大量施用氮肥有关。低氮肥利用率是当前水稻品种的一个主要特征^[3]。过量施用氮肥, 不仅造成资源的大量浪费, 也严重污染了生态环境。目前, 水稻育种目标仍以高产、优质、抗逆为主, 氮利用效率并未成为目标性状改良的重点。因此, 从现有大面积推广品种中筛选氮高效水稻品种仍是减少氮肥施用量、提高氮肥利用效率的重要策略。

长江中下游地区是我国最大的水稻产区, 水稻种植面积和产量均居全国首位。高产水稻在该区域的广泛应用为粮食的持续增产提供了品种支撑, 但也导致化肥施用强度明显高于全国平均水平, 施用量也远超实际需求, 如太湖地区水稻平均施氮量为 303 kg/hm², 有 74% 的农户过量施用氮肥^[4]。氮肥的施用量直接影响水稻的产量。增施氮肥可以显著增加有效穗数和每穗颖花数^[4-5]。但过量的氮肥投入造成穗粒数和结实率显著下

降, 使产量增加率逐渐降低, 甚至造成减产^[6]。随氮肥用量增加, 高产水稻品种氮肥生理利用率、农学利用率和偏生产力显著降低^[7]。氮肥用量对稻米品质有明显影响, 前人^[8-10]研究表明, 对于高产型中粳水稻, 一般增加氮肥用量会导致垩白米率和垩白度显著升高, 氮肥用量与整精米率和精米率等加工品质指标呈先上升后下降的抛物线关系, 而氮肥用量增加也会降低稻米直链淀粉含量, 提高胶稠度。对于优质中粳水稻, 氮肥用量对品质指标的影响与品种特性有关。吴健强等^[11]研究表明, 氮肥用量增加使整精米率和精米率下降, 垩白粒率和垩白度上升, 透明度和碱消值并无明显变化, 胶稠度和直链淀粉呈下降趋势。吴子帅等^[12]研究表明, 氮肥用量增加使整精米率和精米率呈上升趋势, 垩白粒率和垩白度呈下降趋势, 直链淀粉呈上升趋势。郝蓉蓉等^[13]研究表明, 随施氮量增加, 精米率和整精米率均表现出先增后降的趋势, 垩白粒率和垩白度逐渐减少, 直链淀粉含量降低。前人关于氮肥与产量、品质和氮利用效率的研究诸多, 而关于多梯度氮肥条件下, 高产优质水稻品种氮素利用效率与稻米品质差异的研究较少。

作者简介: 阮新民, 主要从事水稻遗传育种与资源高效利用研究, E-mail: rxinmin@126.com

罗志祥为通信作者, 主要从事水稻遗传育种研究, E-mail: lzx6176@126.com

基金项目: 安徽省重点研发计划项目 (2023n06020013, 2023h11020006); 安徽省自然科学基金 (2208085UQ06); 安徽省科技重大专项 (202103a06020008)

收稿日期: 2026-01-18; 修回日期: 2026-03-18; 网络出版日期: 2026-06-08

因此，以江淮稻作区推广面积较大、产量高、品质优、综合性状优良的水稻新品种为材料，比较分析多梯度氮肥条件下水稻产量、品质和氮素利用效率的差异，为水稻高产优质栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

征集生产上大面积应用的产量高、品质优、

综合性状优良的水稻新品种，在 2022 年试验基础上筛选出 V1（R202）、V2（丰两优 4 号）、V3（荃广优 532）、V4（荃两优 879）、V5（荃优 6019）、V6（两优 5043）和 V7（深两优 686）7 个品种进一步设置多梯度氮肥大田试验，其中以 V2（国家及安徽省区域性试验的对照品种）为对照品种（CK）。材料由安徽省农业科学院水稻研究所、安徽荃银高科种业股份有限公司和合肥丰乐种业股份有限公司提供（表 1）。

表 1 供试材料基本信息及主要特征
Table 1 Basic information and main characteristics of the test materials

编号 Number	品种 Variety	审定编号 Approval number	株高 Plant height (cm)	生育期 Growth period (d)	主要特征 Main characteristic
V1	R202	—	110.0	125.0	常规稻品种，品质达部颁一等优质食用稻标准。
V2	丰两优 4 号 (CK)	国审稻 2009012	124.8	135.3	杂交籼稻品种，国家 2 年区域试验平均较对照增产 7.04%，品质达部颁二等优质食用稻标准，为长江中下游迟熟中粳组区域试验和安徽省中粳区域试验的对照品种。
V3	荃广优 532	国审稻 20243086	120.0	131.8	杂交籼稻品种，国家 2 年区域试验平均较对照增产 6.00%，品质达部颁三等优质食用稻标准。
V4	荃两优 879	国审稻 20216089	119.4	130.0	杂交籼稻品种，国家 2 年区域试验平均较对照增产 6.30%，品质达部颁二等优质食用稻标准。
V5	荃优 6019	国审稻 20232050	125.9	133.9	杂交籼稻品种，国家 2 年区域试验平均较对照增产 6.20%，品质达部颁一等优质食用稻标准。
V6	两优 5043	国审稻 20231019	119.4	135.4	杂交籼稻品种，国家 2 年区域试验平均较对照增产 9.20%，中抗稻瘟病，品质达部颁二等优质食用稻标准。
V7	深两优 686	国审稻 20210286	120.2	132.3	杂交籼稻品种，国家 2 年区域试验平均较对照增产 8.04%，品质达部颁二等优质食用稻标准。

1.2 试验设计

试验于 2022–2023 年在安徽省合肥市岗集试验基地进行。土质为水稻土，肥力中等，前茬空闲田。土壤基本理化性质为有机质 15.50 g/kg、全氮 1.13 g/kg、碱解氮 82.75 mg/kg、速效磷 32.10 mg/kg、速效钾 78.50 mg/kg。

试验设 N0（不施氮）、N45（45 kg/hm²）、N90（90 kg/hm²）、N135（135 kg/hm²）、N180（180 kg/hm²）、N225（225 kg/hm²）和 N270（270 kg/hm²）共计 7 个处理。氮肥运筹为基肥：分蘖肥（移栽后 7 d）：穗肥（幼穗分化始期）=5：3：2。采取裂区试验设计，以不同施氮量为主区，材料为裂区，小区面积 13.3 m²，3 次重复，主区间用塑料薄膜覆盖埂体。5 月 19 日播种，6 月 19 日移栽，株行距为 16.7 cm×26.4 cm，杂交稻品种单苗移栽，常规水稻品种双苗移栽。一次性基施磷、钾肥，分别为 P₂O₅ 90 kg/hm²、K₂O 150 kg/hm²，其他栽培管理措施按照大田水稻生产进行。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 测产与考种 于水稻成熟时，各小区连续调查 20 株有效分蘖，取平均值，取 5 株有效分蘖与平均值相等的单株进行考种，主要考察农艺性状和产量构成因素等。并将小区产量全部收获后，晾晒称量。

1.3.2 稻米品质指标 稻谷收获后，风干，放置 3 个月后砻谷、碾米，按照 GB/T 17891-2017^[14]测定整精米率（HMR）；使用万深扫描仪测定稻米的垩白度（CD）和垩白粒率（CR）；同时测定米粉的胶稠度（GC）、直链淀粉（AC）和碱消值（ASV）。由安徽省稻米及制品检测中心完成检测。

1.3.3 氮肥利用率 有关参数的计算方法参照文献[15–16]。氮素吸收总量（g/hm²）=成熟期地上部植株干物重×含氮率；

氮肥干物质生产效率（NDE，kg/kg）=地上部干物质总量/氮素吸收总量；

氮肥籽粒生产效率（NGE，kg/kg）=籽粒产

量/氮素吸收总量；

氮肥生理利用率（NPE，kg/kg）=（施氮区作物产量-无氮区作物产量）/（施氮区植株总吸氮量-无氮区植株总吸氮量）；

氮肥吸收利用率（NRE，%）=（施氮区植株总吸氮量-无氮区植株总吸氮量）/氮肥施用量×100；

氮肥农学利用率（NAE，kg/kg）=（施氮区作物产量-无氮区作物产量）/氮肥施用量；

氮肥偏生产力（NPPE，%）=籽粒产量/氮肥施用量×100。

1.4 数据处理

使用 SPSS 25.0 软件对试验数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 施氮量对高产优质水稻产量及其构成因素的影响

由表 2 可知，施氮量和品种对水稻产量及其构成因素的影响达显著或极显著水平。施氮量与品种互作对产量及其构成因素的影响亦达显著或极显著水平。

表 2 产量及其构成因素在品种间及施氮量间的方差分析

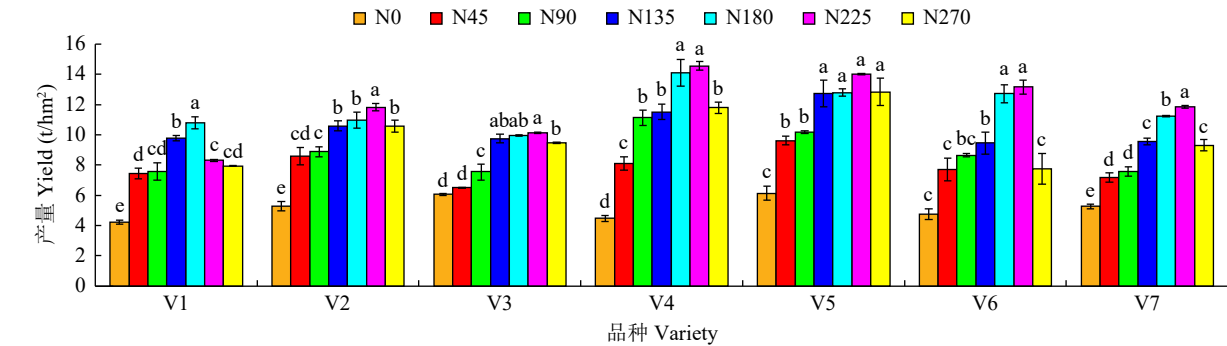
Table 2 Analysis of variance for yield and its components among varieties and nitrogen application rates

变异来源 Source of variation	产量 Yield	有效穗数 Effective panicles	每穗粒数 Grain number per panicle	结实率 Seed-setting rate	千粒重 1000-grain weight
施氮量 Nitrogen application rate (N)	93.29**	451.12**	32.20**	2.455*	4.722**
品种 Variety (V)	14.67**	287.15**	100.94**	21.921**	76.376**
施氮量×品种 (N×V)	1.91**	39.12**	16.56**	1.687*	1.873*

“*”和“**”分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平差异显著。下同。
“*” and “**” indicate significant differences at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels, respectively. The same below.

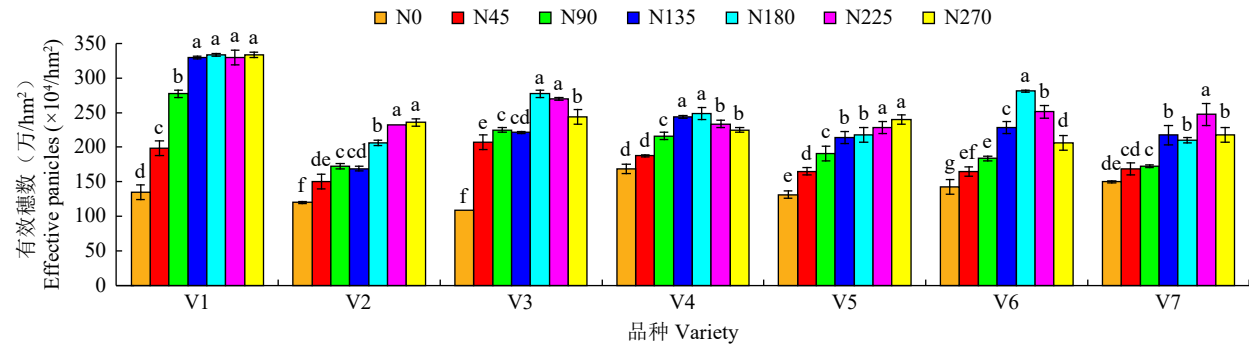
随施氮量的增加各品种产量均呈先增加后下降趋势（图 1）。除 V1 品种在 N180 达最高产外，其余品种均在 N225 时产量最高，其次是 N180。产量最高的品种为 V4，其次是 V5 和 V6，分别为

14.56、14.02 和 13.17 t/hm²。氮肥对品种产量构成影响较大的是有效穗数和每穗粒数，对千粒重和结实率影响较小（图 2）。产量较高品种 V4、V5 和 V6 表现出较高的每穗粒数。不同品种的有效穗数



不同小写字母表示各处理间差异显著（ $P < 0.05$ ）。下同。
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below.

图 1 施氮量对水稻产量的影响
Fig.1 Effects of nitrogen application rate on rice yield



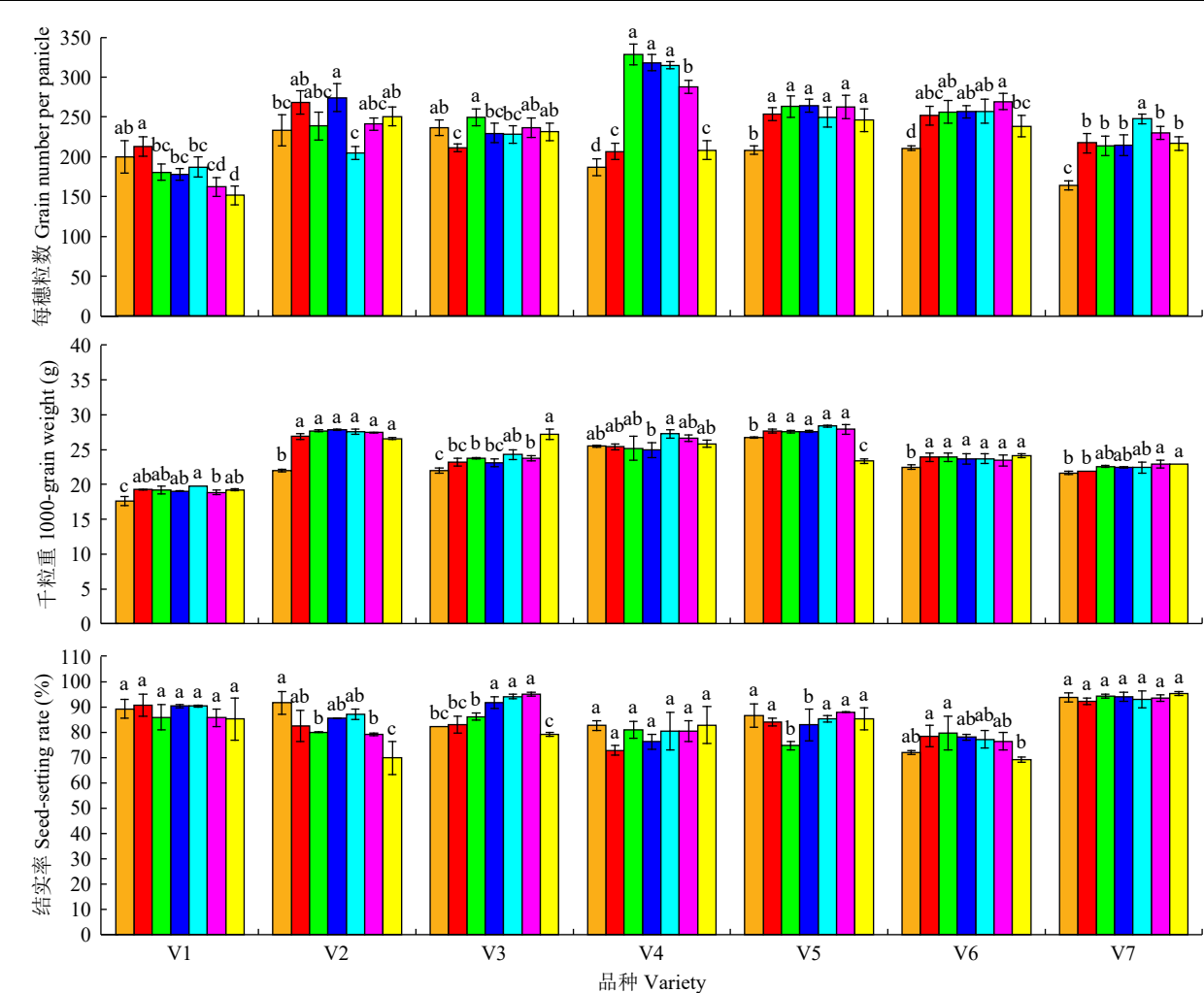


图2 施氮量对水稻产量构成因素的影响
Fig.2 Effects of nitrogen application rate on the component factors of rice yield

对施氮量响应不一致，V1、V2 和 V5 品种的有效穗数随施氮量的增加整体呈增加趋势，而 V3、V4、V6 和 V7 品种的有效穗数随施氮量的增加呈先上升后下降的趋势。

2.2 施氮量对高产优质水稻氮肥利用率的影响
由表 3 可知，施氮量和品种对氮肥利用效率的影响达到极显著水平。施氮量与品种互作除对干物质生产效率影响不显著外，其余均达到显著或

表 3 氮肥利用率在品种及施氮量间的方差分析						
Table 3 Analysis of variance for nitrogen use efficiency of rice among varieties and nitrogen application rates						
变异来源 Source of variation	NDE	NGE	NPE	NRE	NAE	NPPE
施氮量 Nitrogen application rate (N)	12.944**	51.999**	28.167**	15.819**	56.786**	66.919**
品种 Variety (V)	186.170**	165.450**	39.250**	7.618**	29.263**	619.715**
施氮量×品种 (N×V)	1.327	2.065**	2.236**	3.808**	5.722**	8.385**

极显著水平。
表 4 表明，不同品种的干物质生产效率、籽粒生产效率和氮肥偏生产力基本随施氮量的增加而下降，在 N0 时效率最高，N270 时效率最低。施氮量对氮肥生理利用率、氮肥吸收利用率和氮肥农学利用率影响的规律并不明显。氮肥生理利用率最高的是 N45 施氮量下的 V5 品种，为 92.04 kg/kg，其次为 V6 品种，为 83.97 kg/kg。氮肥吸收利用率和氮肥农学利用率最高的是 V4 品种在 N90 施氮量下，分别为 57.07%和 39.48 kg/kg。但整体仍是过量施氮降低了肥料的吸收利用效率。
相关分析（表 5）表明，施氮量与氮肥利用效

表 4 施氮量对氮肥利用率的影响
Table 4 Effects of nitrogen application rates on nitrogen use efficiency

品种 Variety	施氮量 Nitrogen application rate	NDE (kg/kg)	NGE (kg/kg)	NPE (kg/kg)	NRE (%)	NAE (kg/kg)	NPPE (%)
V1	N0	155.43a	93.51a	—	—	—	—
	N45	137.35b	81.11b	68.94a	42.44a	27.76a	66.23a
	N90	125.02c	75.76cd	59.65b	41.58a	19.26b	44.90b
	N135	121.17c	70.33c	59.28b	41.93a	24.30ab	43.54b
	N180	106.84d	64.31d	53.52bc	43.61a	23.00ab	38.39c
	N225	109.71d	61.28d	45.23c	26.88b	11.80c	24.62d
	N270	102.14d	54.01e	36.49d	25.88b	9.19c	20.18d
V2	N0	147.40a	94.49a	—	—	—	—
	N45	130.22b	84.62b	72.62a	40.84a	29.52a	76.44a
	N90	125.61bc	81.47b	52.54b	40.53a	21.32bc	52.60b
	N135	125.13bc	80.82b	70.55a	33.32a	23.55ab	47.01b
	N180	116.24d	62.85c	44.82bc	35.15a	15.80cd	35.57c
	N225	111.15cd	64.46c	51.29bc	37.76a	19.38bcd	35.02c
	N270	103.60d	56.10d	39.83c	33.64a	13.42d	26.82d
V3	N0	132.68a	71.88a	—	—	—	—
	N45	128.77a	67.52ab	38.41b	10.68b	3.95d	57.78a
	N90	113.91b	59.25b	32.68b	27.24ab	8.84c	44.73b
	N135	111.65b	59.81b	47.47a	35.47a	16.38a	43.30b
	N180	105.15b	56.30b	35.23b	20.93ab	6.79cd	30.32c
	N225	100.58b	54.60bc	40.28b	30.14a	12.14b	30.08c
	N270	85.08c	43.12c	25.42c	34.75a	8.69c	24.07d
V4	N0	151.75a	95.56a	—	—	—	—
	N45	132.72b	80.46b	67.59ab	47.79ab	32.25bc	71.98a
	N90	122.26c	79.86b	69.44ab	57.07a	39.48a	65.96a
	N135	120.36c	78.23b	71.70a	36.79b	26.35c	56.21b
	N180	105.01d	69.48c	61.75b	55.61a	34.20ab	50.09b
	N225	104.13d	68.73c	61.19b	48.94ab	29.90bc	43.15c
	N270	103.70d	62.19d	51.27c	36.27b	18.61d	29.96d
V5	N0	154.98a	93.93a	—	—	—	—
	N45	139.83b	90.97a	92.04a	35.71bc	31.00a	85.44a
	N90	123.92c	77.24b	56.85b	42.16ab	23.90ab	60.19b
	N135	118.66cd	75.12b	63.64b	46.13a	29.37a	56.59b
	N180	114.48cde	75.56b	64.06b	28.26bc	23.47b	45.24c
	N225	112.17de	70.21b	58.77b	39.78ab	23.38ab	41.53c
	N270	107.89e	69.20b	56.23b	30.56c	17.07b	32.62d
V6	N0	150.56a	92.98a	—	—	—	—
	N45	135.62b	89.25a	83.97a	31.32cd	26.20a	68.40a
	N90	118.74c	73.50b	57.14b	40.42abc	23.07a	51.20b
	N135	117.61c	73.28b	60.44b	34.72bc	21.00a	45.10bc
	N180	110.98d	64.17c	53.05b	53.39a	28.33a	45.21bc
	N225	106.34d	64.58c	55.04b	45.30ab	24.97a	39.03c
	N270	98.46e	58.23d	36.57c	20.74d	7.61b	19.67d
V7	N0	147.22a	87.84a	—	—	—	—
	N45	139.73a	82.36a	69.91a	24.09bc	16.95ab	63.73a
	N90	124.91b	75.20b	48.62c	28.51bc	13.77bc	44.96b
	N135	124.63b	74.86b	63.30ab	30.15b	19.08a	42.47bc
	N180	108.60c	68.11b	56.86bc	37.40a	21.27a	39.98c
	N225	107.72c	63.02c	47.88c	40.75a	19.51a	35.10d
	N270	107.55c	62.48c	45.39c	22.61c	10.25c	23.62e

不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below.

表 5 施氮量及氮肥利用率间相关分析
Table 5 Correlation analysis between nitrogen application rates and nitrogen use efficiency

项目 Item	NDE	NGE	NPE	NRE	NAE	NPPE
NGE	0.926**	1.000				
NPE	-0.010	0.232	1.000			
NRE	0.401**	0.672**	0.860**	1.000		
NAE	0.739**	0.942**	0.405**	0.800**	1.000	
NPPE	0.843**	0.849**	0.346*	0.668**	0.780**	1.000
施氮量 Nitrogen application rate	-0.906**	-0.811**	-0.101	-0.390*	-0.563**	-0.882**

“*” 和 “**” 分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平相关性显著。
“*” and “**” indicate significant correlations at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels, respectively.

率呈显著或极显著负相关（除氮肥生理利用率外）。氮肥生理利用率、氮肥吸收利用率、氮肥农学利用率和氮肥偏生产力间呈显著或极显著正相关。

2.3 高产优质水稻在产量最高时氮肥利用率差异

由于施氮量显著影响水稻品种的产量和氮肥利用率，为保证水稻产量不降低，选取水稻品种

在其产量最高时的氮肥利用率与对照品种进行比较。由表 6 可知，从品种间氮肥利用率变异系数来看，氮肥农学利用率、氮肥吸收利用率和氮肥生理利用率的变异系数较高。V4、V6、V1 和 V5 的氮肥农学利用率较对照增加 20%以上，氮肥吸收利用率增加 5%以上，氮肥生理利用率增加 7%

表 6 品种间氮利用效率差异
Table 6 Difference in nitrogen use efficiency among varieties

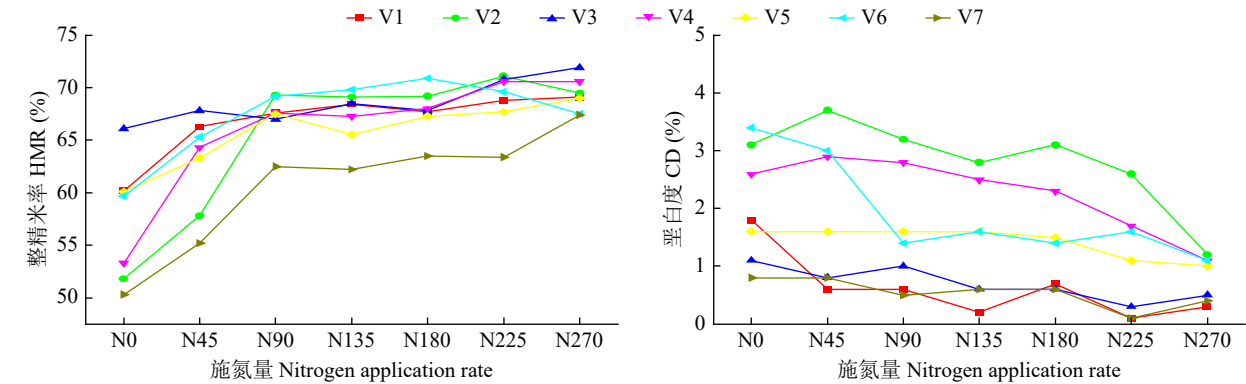
品种 Variety	NDE (kg/kg)	±CK (%)	NGE (kg/kg)	±CK (%)	NPE (kg/kg)	±CK (%)	NRE (%)	±CK (%)	NAE (kg/kg)	±CK (%)	NPPE (%)	±CK (%)
V1	121.2a	9.01	70.3a	9.10	59.3a	15.57	41.9abc	11.03	24.3b	25.41	43.5a	24.32
V3	100.6d	-9.51	54.6c	-15.31	40.3d	-21.47	30.1d	-20.18	12.1d	-37.37	30.1e	-14.10
V4	104.1bcd	-6.32	68.7a	6.62	61.2a	19.30	48.9a	29.61	29.9a	54.31	43.2ab	23.21
V5	112.2b	0.92	70.2a	8.91	58.8a	14.57	39.8bc	5.35	23.4b	20.65	41.5b	18.58
V6	106.3bcd	-4.33	64.6ab	0.18	55.0ab	7.32	45.3ab	19.98	25.0b	28.83	39.0c	11.46
V7	103.0cd	-7.32	60.0bc	-6.89	47.9c	-6.65	40.8bc	7.91	19.5c	0.51	35.1d	0.24
V2 (CK)	111.2bc	—	64.5ab	—	51.3bc	—	37.8c	—	19.4c	—	35.0d	—
变异系数 CV (%)	7.04	—	9.82	—	15.09	—	15.44	—	26.91	—	13.58	—

以上，氮肥偏生产力增加 10%以上。

2.4 氮肥水平对高产优质水稻稻米品质的影响

施氮量增加提高了高产优质水稻品种的整精米率，降低了垩白度。但对透明度和碱消值影响较小（V7 品种除外）。随着施氮量的增加，直链淀

粉含量有降低趋势，但品种间的降幅差异明显。施氮量对胶稠度的影响因品种不同有所差异。V2、V3、V7 胶稠度随施氮量增加而提高，而 V1、V4 和 V6 随施氮量变化不明显，V5 则表现出先升后降的趋势（图 3）。



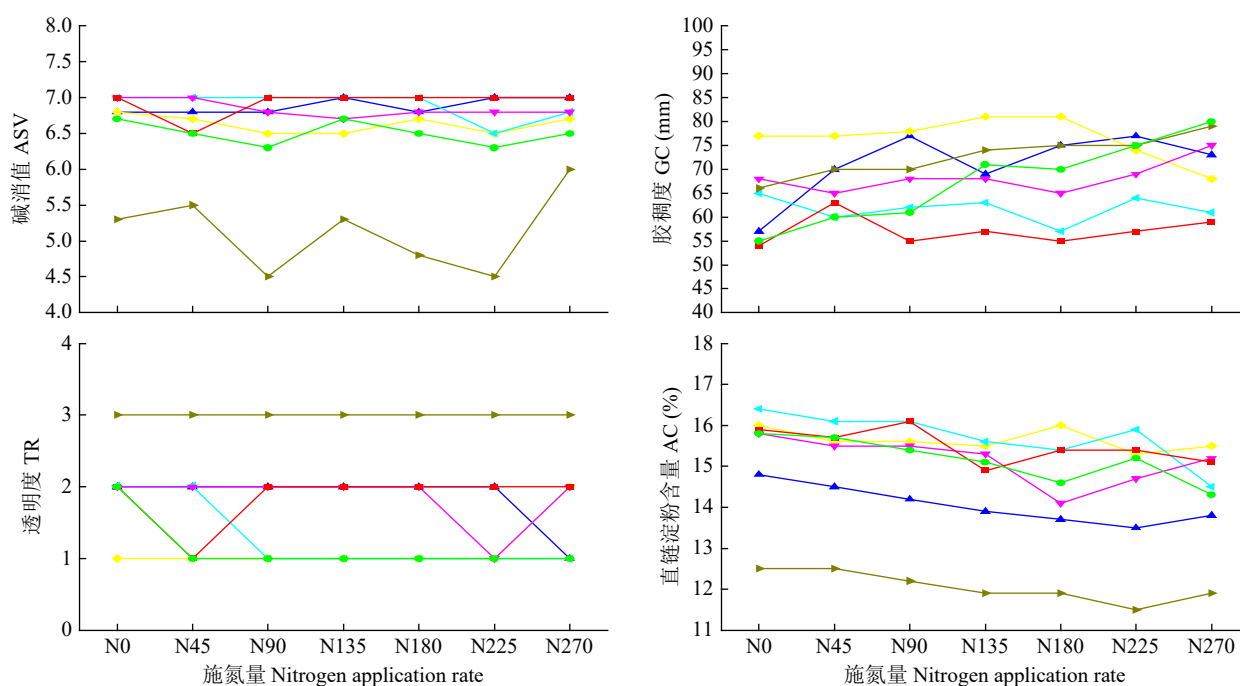


图 3 施氮量对水稻稻米品质的影响

Fig.3 Effects of nitrogen application rates on rice quality

3 讨论

3.1 施氮量对高产优质水稻产量及其构成因素的影响

我国水稻常规施氮量的范围在 135~363 kg/hm², 平均为 225 kg/hm²^[17]。据安徽省农户水稻施肥抽样调查, 安徽省水稻施氮量主要集中在 100~300 kg/hm², 占样本总数的 93.6%, 施氮量超过 200 kg/hm² 的占比达到了 36.8%, 超过 250 kg/hm² 的占比为 10.5%, 氮肥施用过量现象较严重。对于高产杂交水稻而言, 因其生物量大、产量潜力高, 单位种植面积的需氮量高于常规稻^[18]。本研究表明, 供试的高产杂交稻品种的施氮量在 225 kg/hm² 时均能获得最高产量, 这与人^[7,19-20]在达高产时的施肥量研究结果基本一致, 要高于一般水稻品种的施氮量^[21], 但超过 270 kg/hm² 时氮肥均表现过量。肖大康等^[22]基于 119 篇已发表的有关稻田氮肥管理的论文, 采用整合分析方法得出, 施用氮肥能够显著提高水稻实际产量、理论产量、有效穗数和每穗粒数, 结实率和千粒重下降。而本研究认为, 氮肥对高产品种产量构成因素主要影响的是有效穗数和每穗粒数, 对千粒重和结实率影响较小。这与罗锡坤等^[23]的结论基本相同, 与肖大康等^[22]的结论不完全一致的原因可能与本研

究选取的是高产优质品种有关。

3.2 施氮量对高产优质水稻氮肥利用率的影响

提高氮肥利用率, 尤其是在确保水稻高产、优质的前提下, 提高水稻品种氮肥利用效率已成为育种工作者亟需解决的问题。氮肥干物质生产效率、籽粒生产效率、生理利用率、吸收效率、农学效率和氮肥偏生产力等指标均从不同侧面反映作物对氮肥的利用效率^[24-25]。本研究以生育期相近同类型高产优质品种为研究对象, 发现不同品种的干物质生产效率、籽粒生产效率和氮肥偏生产力均随施氮量的增加而下降, 说明施氮量是主要原因, 而氮肥生理利用率、吸收利用率和农学利用率的变化不仅受施氮量影响, 还与品种特性有关。这与人^[20,26]研究基本一致。Dobermann^[27]提出粮食作物氮肥利用率在如下范围内比较适宜, 农学利用率 10~30 kg/kg, 吸收利用率 30%~50%, 生理利用率 30~60 kg/kg, 本试验参试的荃两优 879、两优 5043、R202 和荃优 6019 的这些指标均达到适宜范围的高值水平, 具有较高的氮肥利用效率。

本研究还表明, 氮肥农学利用率、氮肥吸收利用率和氮肥生理利用率在充分发挥产量潜力的施氮条件下具有较大的变异系数, 区分度较好。综合相关报道^[7,16-17]和本研究结果, 提出氮肥高效

利用大田试验主要评价指标为氮肥农学效率、吸收利用率和生理利用率。因此，可以在确定目标产量的施氮量后，用氮肥农学利用率指标进行田间大规模组合筛选，再利用氮肥吸收利用率和氮肥生理利用率评价指标进一步确定，以解决大田筛选效率不高的问题。这与前人^[8,19,28-30]评价氮肥利用率所采用的主要指标相符。

3.3 施氮量对高产优质水稻品质的影响

水稻品种的优质化已成为趋势。我国稻谷产量连续多年稳定在 2 亿 t 以上，实现了供需平衡，但对优质大米的需求日益增长。现代杂交稻品种为追求高产，往往需要较高的氮肥支持，但这恰恰可能损害稻米品质。高产与优质协同提升的水稻品种的培育与推广，不仅可保障国家的粮食安全，还满足了市场对优质米的快速需求。已有研究^[31-33]表明，施氮提高了水稻品种的整精米率，降低了垩白度和直链淀粉含量。这与本研究结论相同。但本研究表明，施氮量对透明度和碱消值影响较小（V7 品种除外），与霍中洋等^[34]研究结果不尽一致，可能与研究的品种特性有关。V7 品种随施氮量增加变化较大，有待进一步研究。

4 结论

江淮稻作区高产优质中粳型水稻品种在施氮量 225 kg/hm² 时产量较高，影响产量的主要因素是有效穗数和每穗粒数。氮肥干物质生产效率、氮肥籽粒生产效率和氮肥偏生产力随施氮量的增加而下降。荃两优 879、两优 5043、R202 和荃优 6019 等高产优质品种具有较高的氮肥利用率。

参考文献

- [1] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴 2023. 北京：中国统计出版社，2023.
- [2] Jing Q, Bouman B A M, Hengsdijk H, et al. Exploring options to combine high yields with high nitrogen use efficiencies in irrigated rice in China. *European Journal of Agronomy*, 2007, 26(2): 166-177.
- [3] Cassman K G, Peng S, Olk D C, et al. Opportunities for increased nitrogen-use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems. *Field Crops Research*, 1998, 56(1): 7-39.
- [4] 杜文婷, 雷肖肖, 卢慧宇, 等. 氮肥减量施用对我国三大粮食作物产量的影响. *中国农业科学*, 2022, 55(24): 4863-4878.
- [5] 从夕汉, 施伏芝, 阮新民, 等. 施氮量对不同品种水稻氮素利用及碳氮代谢关键酶的影响. *河南农业大学学报*, 2019, 53(3): 325-330.
- [6] Zhang Z J, Chu G, Liu L J, et al. Mid-season nitrogen application strategies for rice varieties differing in panicle size. *Field Crops*

Research, 2013, 150: 9-18.

- [7] 黄玲娟, 陆钧平. 不同氮肥用量对水稻产量和氮肥利用率的影响. *安徽农业科学*, 2020, 48(21): 169-171, 197.
- [8] 彭显龙, 车业琦, 李鹏飞, 等. 氮量对高产水稻品种产量和氮肥效率的影响. *东北农业大学学报*, 2021, 52(7): 1-8, 55.
- [9] 李浩晶, 张丹珂, 李海润, 等. 施氮量对水稻根系分泌特性与解剖结构及品质的影响. *湖南农业大学学报 (自然科学版)*, 2025, 51(1): 1-7.
- [10] 卫云飞, 李猛, 季新, 等. 不同施氮量对超级粳杂交稻产量和品质的影响. *杂交水稻*, 2023, 38(4): 119-127.
- [11] 吴健强, 张大双, 彭强, 等. 不同氮肥施用量对优质稻品种大粒香稻米品质的影响. *现代农业科技*, 2018(22): 9-10.
- [12] 吴子帅, 刘广林, 李虎, 等. 施氮量对优质常规粳稻米品质的影响. *作物杂志*, 2023(1): 84-88.
- [13] 郝蓉蓉, 王雪艳, 党程成, 等. 不同施氮量对江汉平原长粒型优质粳稻产量品质的影响. *福建农业学报*, 2023, 38(4): 387-400.
- [14] 国家质量监督检验检疫总局. 优质稻谷: GB/T 17891-2017. 北京：中国标准出版社，2017.
- [15] 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. *作物学报*, 2020, 46(1): 117-130.
- [16] 阮新民, 从夕汉, 施伏芝, 等. 氮素高效利用水稻新品种筛选与评价. *上海农业学报*, 2020, 36(5): 7-11.
- [17] 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. *作物学报*, 2007, 33(2): 175-182.
- [18] 任万军. 杂交稻高产高效施氮研究进展与展望. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1505-1513.
- [19] 王家宝, 郭刚, 袁漫漫, 等. 不同施氮量及施氮方式对水稻田氮挥发及氮肥利用率的影响. *中国土壤与肥料*, 2022(5): 10-17.
- [20] 陆海. 不同施氮量对江浙优 1 号水稻产量、品质及氮肥利用率的影响. *南方农业*, 2024, 18(8): 8-10.
- [21] 杨林生, 张宇亭, 杨柳青, 等. 不同钾水平对水稻干物质累积、转运及产量的影响. *中国土壤与肥料*, 2019(4): 89-95.
- [22] 肖大康, 胡仁, 韩天富, 等. 氮肥用量和运筹对我国水稻产量及其构成因子影响的整合分析. *中国水稻科学*, 2023, 37(5): 529-542.
- [23] 罗锡坤, 李敏, 张恒栋, 等. 不同类型杂交稻品种在贵州兴义的高产潜力及氮肥利用特性研究. *中国稻米*, 2023, 29(5): 105-109.
- [24] 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. *中国农业科学*, 2002, 35(9): 1095-1103.
- [25] 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. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915-924.
- [26] 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. *土壤通报*, 2021, 52(5): 1182-1192.
- [27] Dobermann A. Nitrogen use efficiency-state of the article.//IFA international workshop on enhanced-efficiency fertilizers. FrankFurt, Germany: International Fertilizer Association, 2005.
- [28] 张玉屏, 姜蕲琳, 朱德峰, 等. 早稻氮高效利用主栽品种的筛选. *中国稻米*, 2019, 25(4): 44-46.
- [29] 阮新民, 施伏芝, 罗志祥. 施氮对高产杂交水稻生育后期叶碳氮比与氮素吸收利用的影响. *中国土壤与肥料*, 2011(2): 35-38.
- [30] 付景, 马梦娟, 张骐飞, 等. 干湿交替灌溉和施氮量对粳稻光合特性和氮素吸收利用的影响. *作物学报*, 2024, 50(7): 1787-1804.

- [31] 张继宁, 王乐惠, 孙会峰, 等. 稻田施氮量对水稻产量和稻米品质的影响. 土壤通报, 2024, 55(1): 130-139.
- [32] 陈梦云, 李晓峰, 程金秋, 等. 秸秆全量还田与氮肥运筹对机插优质食味水稻产量及品质的影响. 作物学报, 2017, 43(12): 1802-1816.
- [33] 殷春渊, 王书玉, 刘贺梅, 等. 不同水稻基因型优良食味品质的氮素调控与评价. 西南农业学报, 2022, 35(7): 1604-1612.
- [34] 霍中洋, 万靓军, 张洪程, 等. 不同施氮比例对杂交水稻产量及品质的影响. 中国作物学会栽培专业委员会换届暨学术研讨会论文集, 2007: 200-206.

Effects of Nitrogen Fertilizer Rates on Grain Yield, Grain Quality, and Nitrogen Use Efficiency of High-Yield and High-Quality Medium Indica Rice in the Jianghuai Rice-Growing Region

Ruan Xinmin^{1,2,3}, Cong Xihan^{1,2,3}, Du Hongyang^{1,2,3}, Yue Wei⁴, Shi Fuzhi^{1,2,3},
Luo Yanchang^{1,2,3}, Wang Yuanlei^{1,2,3}, Luo Zhixiang^{1,2,3}

(¹Rice Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;
Anhui Provincial Key Laboratory of Rice Genetics and Breeding, Hefei 230031, Anhui, China;

³Anhui Provincial Key Laboratory of Rice Germplasm Innovation and Molecular Improvement, Hefei 230031, Anhui, China; ⁴Anhui Agricultural Meteorology Center, Hefei 230088, Anhui, China)

Abstract To investigate the effects of nitrogen (N) application rates on yield, grain quality, and nitrogen use efficiency (NUE) of high-yield and high-quality medium indica rice in the Jianghuai rice-growing region, seven N application gradients were established to evaluate newly developed rice varieties characterized by high yield, excellent quality, and favorable comprehensive traits, which are widely adopted in large-scale production. The results showed that, except for the conventional variety R202, which achieved the highest yield at an N application rate of 180 kg/ha, all hybrid varieties attained their maximum yield at 225 kg/ha. The influence of N fertilizer on the yield of high-yield rice varieties was primarily attributed to the number of effective panicles and grain number per panicle. At the optimal yield level, the agronomic nitrogen use efficiency (NAE) of varieties Quanliangyou 879, Liangyou 5043, R202, and Quanyou 6019 increased by more than 20% compared with the control variety Fengliangyou 4. Additionally, their nitrogen uptake efficiency (NRE) increased by over 5%, physiological nitrogen use efficiency (NPE) by more than 7%, and partial factor productivity of nitrogen (NPPE) by over 10%. The dry matter production efficiency, grain production efficiency, and partial factor productivity of nitrogen decreased with increasing N application rates. Elevated N application improved the head rice rate of high-yield and high-quality rice varieties while reducing chalkiness degree and amylose content. However, transparency and alkali spreading value exhibited no significant changes.

Key words Rice; Nitrogen application rates; Yield; Quality; Nitrogen use efficiency