

不同密度和氮肥用量对水稻产量、构成因子及氮肥利用率的影响^①

邓中华¹, 明日¹, 李小坤^{1*}, 郑磊², 徐维明³, 杨运清³,
任涛¹, 丛日环¹, 鲁剑巍¹

(1 农业部长江中下游耕地保育重点实验室/华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2 全国农业技术推广服务中心, 北京 100026;
3 湖北省沙阳县土壤肥料工作站, 湖北沙洋 448200)

摘要: 针对水稻生产中氮肥用量过高、劳动力成本上涨及移栽密度越来越低的现状, 设置氮肥、密度互作试验, 研究施氮量和移栽密度及其互作效应对水稻产量和氮肥利用率的影响, 以期水稻节氮、省工合理栽培及高效施肥提供理论依据。结果表明, 氮肥用量和密度均可显著影响水稻产量, 互作效应显著。施氮(N_{82.5}、N_{165.0}、N_{247.5})后平均分别增产 30.6%、47.8%、44.6%; 密度为 21 万蔸/hm² 时, 籽粒产量最高。有效穗数随施氮量和移栽密度的增加而增加, 提高密度后实粒数、结实率和千粒重则出现降低。氮肥利用率随施氮量增加而下降, 随密度增加先上升后下降。在资源短缺、环境污染及生产成本上涨的形势下, 低氮水平时应适当增加密度, 提高移栽密度时则应控制氮肥用量。在本试验条件中, 移栽密度为 22.1 万蔸/hm² 的基础上施氮 194.9 kg/hm² 是实现水稻高产高效、节氮、省工栽培的合理组合。

关键词: 氮肥; 密度; 水稻; 产量; 氮肥利用率

中图分类号: S147.3

水稻产量是品种遗传特性和环境条件综合作用的结果^[1-2], 各种环境因素中, 氮肥和密度是影响水稻生长发育和产量形成的关键因素^[3-4]。近年来, 随着高产品种的培育推广, 氮肥用量越来越大, 成为水稻增产的有力措施^[5]。王伟妮等^[6]表明, 合理施氮可促进水稻产量的形成, 产量和有效穗数分别显著增加 27.5%~37.6% 和 $(39 \sim 68) \times 10^4/\text{hm}^2$, 但施氮过量时无效分蘖增加、生育期延长, 氮素的淋洗、挥发加剧, 肥料利用率低下, 环境污染加剧^[7]。陈安强等^[8]指出, 南方丘陵区水稻最佳施氮量为 184.5~249.5 kg/hm²; 施氮 135~225 kg/hm² 时, 氮肥利用率出现拐点, 之后则急剧下降。目前, 对农田氮素的研究主要集中在氮肥种类、运筹等方面^[9], 如何在不影响产量的前提下, 选择恰当的栽培密度, 将氮肥总用量降至最适水平是氮肥管理的重要措施。

随着农业发展和农村劳动力结构的变化, 优质劳

动力转移, 价格上涨, 使得水稻的移栽成本不断提高, 影响农民种植的积极性^[10]。近年来推广的“稀少平”、“早育稀植省苗”、“强化栽培”等技术^[11], 表明稀植可促使水稻分蘖, 提高单株生产力。然而, 水稻高产需发挥群体结构优势, 只有建立适宜的群体才能确保高产^[3]。密度过低固然可以省工节本, 但基本苗不足, 分蘖能力有限, 群体无法利用光能进行物质生产。郎有忠等^[12]指出, 密度过低时有效穗数和叶面积指数分别降低 26.6% 和 41.0%; 王会民等^[13]发现, 密度会影响水稻群体对光能的利用, 低密度时剑叶、倒二叶和倒三叶的群体净光合物质生产能力降低; 李静等^[14]则指出, 密度过高会影响分蘖成穗, 高密度下成穗率仅为 60%, 结实率则下降 5.7%~18.4%。因此, 要想获得高产, 需协调优化穗、粒结构, 保证个体正常发育的同时满足群体稳健发展。为明确不同氮肥、密度下产量特征及变化规律, 完善水稻节氮、省

①基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201303103)、中央高校基本科研业务费专项(2013PY113)、长江学者和创新团队发展计划项目(IRT1247)资助。

* 通讯作者(lixiaokun@mail.hzau.edu.cn)

作者简介: 邓中华(1989—), 男, 湖北麻城人, 硕士研究生, 主要从事植物营养与现代施肥技术方面研究。E-mail: dengzhonghua@webmail.hzau.edu.cn

工栽培技术,本研究采用田间试验,探讨氮肥、密度调控对水稻产量及肥料利用率的影响,建立二者与产量间的数学模型,为制定合理的施肥及栽培措施,实现水稻高产、高效生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验概况

试验于 2013 年在湖北省沙洋县曾集镇张池村进行。前茬作物为油菜,供试土壤为水稻土,试验前 0~20 cm 耕作层土壤 pH 6.5,有机质 18.7 g/kg,碱解氮 94 mg/kg,速效磷 18.3 mg/kg,速效钾 80 mg/kg。水稻品种为当地主栽丰两优 9 号,2013 年 4 月 27 日育苗,5 月 24 日移栽,6 月 5 日施分蘖肥,7 月 19 日施穗肥,8 月 31 日收获。

1.2 试验设计

试验采用氮肥(N)、密度(D)双因素随机区组设计,施氮量(以纯 N 计)分别为 0、82.5、165.0、247.5 kg/hm²,用 N₀、N_{82.5}、N_{165.0}、N_{247.5} 表示,各处理磷肥均为 P₂O₅ 75 kg/hm²、钾肥均为 K₂O 75 kg/hm²。试验所用氮肥为尿素(含 N 460 g/kg)、磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 120 g/kg)、钾肥为氯化钾(含 K₂O 600 g/kg),氮肥分 3 次施用,基肥:分蘖肥:穗肥比例为 50%:25%:25%;磷肥全部基施;钾肥分两次施用,基肥:穗肥比例为 70%:30%。基肥于水稻移栽前撒施,分蘖肥于水稻分蘖初期撒施,穗肥于水稻孕穗末期撒施。移栽密度分别为低(15 万蔸/hm²)、中(21 万蔸/hm²)、高(27 万蔸/hm²)3 个水平,用 D₁、D₂、D₃ 表示。小区面积 20 m²,各处理 3 次重复,共计 36 个小区。其他管理措施按常规方法进行。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤样品的采集与分析 试验前取 0~20 cm 耕层土壤,混匀、风干,依次过 20 目和 100 目筛,测定 pH(水土比为 2.5:1, pH 计测定)、有机质(K₂Cr₂O₇ 外加热法)、碱解氮(碱解扩散法)、速效磷(NaHCO₃法)和速效钾(NH₄OAc=浸提法)^[15]。

1.3.2 植物样品采集与分析 水稻成熟收获前,每小区确定 2 m²,选择具有代表性的植株 12 蔸齐地平割,考查有效穗数、每穗实粒数和千粒重等指标。考种完成后,将 12 蔸水稻分成稻谷和稻草两部分,分别烘干称重,粉碎过 0.5 mm 筛,测定各部位氮含量。植物全氮采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,连续流动分析仪(AA3, SEAL, 德国)测定^[15]。

取样后,各小区单打单收,稻谷晒干后测其产量。

1.3.3 肥料效率及经济效益的计算 氮总吸收量

=稻草生物量×稻草氮含量(%) + 稻谷生物量×稻谷氮含量(%) ;

氮肥吸收利用率(%)^[16]=(施氮区氮总吸收量-不施氮区氮总吸收量)/施氮量×100 ; 互作效应^[17]=[(施氮中/高密度处理-不施氮低密度处理)-(施氮低密度处理-不施氮低密度处理)-(不施氮中/高密度处理-不施氮低密度处理)]/2。

1.4 数据处理

用 Excel 2003、DPS7.05 进行数据处理和分析, Origin 8.5 作图,通过 Duncan 新复极差法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 氮肥与密度互作对水稻产量的影响

氮肥和密度均显著影响水稻产量(表 1),随施氮量和移栽密度的增加,表现出先上升后下降的趋势。D₁(15 万蔸/hm²)、D₂(21 万蔸/hm²)、D₃(27 万蔸/hm²)下产量均以 N_{165.0} 处理最高,与 N_{82.5} 处理相比,分别增产 970、1 129、829 kg/hm²,增幅为 13.7%、15.0%、10.9% ; 与 N_{247.5} 处理相比,分别增产 31、95、419 kg/hm²,增幅为 0.4%、1.1%、5.2%。不施氮时,密度越大,产量越高, D₃ 处理平均增产 9.4%~20.6% ; 随着施氮量的增加(N_{82.5} 和 N_{165.0}), D₃ 和 D₂ 处理产量无显著差异;施氮量为 247.5 kg/hm² 时, D₃ 处理产量反而下降。说明合理的移栽密度与氮素水平有一定关系,供氮能力较弱时应当适当密植,供氮能力较强时则应控制移栽密度。

2.2 氮肥与密度互作对水稻产量构成因子的影响

氮肥、密度对产量构成因子也有较大影响。有效穗数均随着施氮量和密度的增加分别提高 10.5%~28.6% 和 22.2%~31.0% ; 实粒数、结实率和千粒重随施氮量增加呈先上升后下降的趋势,相比 N₀、N_{82.5}、N_{247.5} 处理, N_{165.0} 处理实粒数分别增加 6.7%、4.5%、8.5%。密度增加后,实粒数、结实率和千粒重均出现下降,其中高密时实粒数降低 10.5%~14.1%。各指标最优耦合处理为 N_{165.0}D₂(表 2),互作效应均为正值,充分发挥了氮肥、密度耦合的优势, N_{165.0}D₂ 处理各产量构成都没有达到最高水平,但相互间比较平衡协调;其他处理出现交互优势减弱甚至负的效应,虽然某些指标达到最大,但整体上均不利产量的形成。有效穗数与每穗实粒数、结实率呈显著的负相关关系(表 3),即高密、高氮处理下有效穗数较高时,每穗实粒数、结实率较低,低密、低氮处理下则相反。

表 1 氮肥与密度互作对水稻产量及其构成因子的影响
Table 1 Effects of N rates and planting densities on grain yields and grain yield components of rice

密度	氮肥	产量(kg/hm ²)	有效穗数(×10 ⁴ /hm ²)	实粒数	结实率(%)	千粒重(g)
D ₁	N ₀	5 144 c	129.5 c	192.7 b	91.1 a	27.4 a
	N _{82.5}	7 082 b	149.0 b	194.9 ab	90.0 a	28.4 a
	N _{165.0}	8 052 a	160.5 a	200.9 a	89.6 ab	28.9 a
	N _{247.5}	8 021 a	169.5 a	192.4 b	87.0 a	29.1 a
D ₂	N ₀	5 670 c	155.4 c	179.7 c	85.3 b	27.1 a
	N _{82.5}	7 534 b	178.5 b	188.3 b	86.0 b	28.5 a
	N _{165.0}	8 663 a	200.9 a	198.0 a	92.7 a	28.7 a
	N _{247.5}	8 568 a	208.6 a	183.3 bc	84.3 b	28.0 a
D ₃	N ₀	6 204 c	181.8 c	168.3 b	83.7 a	26.7 a
	N _{82.5}	7 607 b	188.1 c	168.7 b	83.7 a	27.5 a
	N _{165.0}	8 436 a	205.2 b	177.7 a	83.3 a	28.0 a
	N _{247.5}	8 017 ab	222.3 a	156.0 c	74.3 b	26.9 a
平均 (N)	N ₀	5 672 c	155.6 d	180.2 bc	86.7 a	27.1 b
	N _{82.5}	7 408 b	171.9 c	183.9 b	86.5 a	28.1 a
	N _{165.0}	8 384 a	188.9 b	192.2 a	88.6 a	28.5 a
	N _{247.5}	8 169 a	200.1 a	177.2 c	81.9 b	28.0 ab
平均 (D)	D ₁	7 075 b	152.1 c	195.2 a	89.4 a	28.5 a
	D ₂	7 609 a	185.9 b	187.3 b	87.3 a	28.1 ab
	D ₃	7 566 a	199.4 a	167.7 c	81.3 b	27.3 b
方差分析	N	**	**	**	**	**
	D	**	**	**	**	**
	N×D	*	*	*	*	ns

注：同列不同字母分别表示各移栽密度处理下不同施氮量间差异在 $P<0.05$ 水平显著；*，**分别在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平显著，ns 表示未达到显著水平；下同。

表 2 氮肥与密度互作下产量及其构成因子的互作效应分析
Table 2 Effects between grain yield and yield component under nitrogen-density interaction

处理	产量		有效穗数		实粒数		结实率	
	D ₂	D ₃	D ₂	D ₃	D ₂	D ₃	D ₂	D ₃
N _{82.5}	-37.2	-267.8	1.8	-6.6	3.1	-0.9	1.0	0.5
N _{165.0}	42.8	-338.2	7.3	-3.8	4.9	0.5	4.5	0.6
N _{247.5}	10.3	-532.3	6.6	0.3	1.8	-6.0	1.7	-2.6

表 3 氮肥与密度互作下产量及其构成因子的相关性
Table 3 Correlation between grain yield and yield component under nitrogen-density interaction

	有效穗数	实粒数	结实率	千粒重
实粒数	-0.56*			
结实率	-0.64*	0.92**		
千粒重	-0.11	0.79**	0.58*	
产量	0.73**	0.05	-0.16	0.56*

2.3 氮肥、密度与产量的回归模型分析

通过二项回归分析建立氮肥(X_1)、密度(X_2)与产量(Y)之间的回归方程： $Y = 577.79 + 34.87X_1 + 419.04X_2 - 0.07X_1^2 - 8.01X_2^2 - 0.34X_1X_2$ ， $R^2=0.981^{**}$ 。

式中： X_1 、 X_2 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_1X_2 的 t 值分别为：12.45^{**}、3.59^{**}、10.26^{**}、2.91^{**}、3.26^{**}，效果显著。产量预测值与实际值相关分析 $R^2 = 0.989^{**}$ ，通过回归方程进行产量预测效果良好。由方程可知，施氮量、密度与产量均呈现单峰曲线的关系，满足报酬递减规律，氮肥用量和密度较低时，产量随施氮量和移栽密度的增加而提高，增幅逐渐减小；但二者较高时，进一步增加将导致单产的下降。互作效应曲面上具有唯一的向上凸起的最大值(图 1)，即二者互作效应的最佳点。利用求偏导数法计算得出最高产量为 8 599 kg/hm²，最佳施氮量和密度为 194.9 kg/hm² 和 22.1 万蔸/hm²。

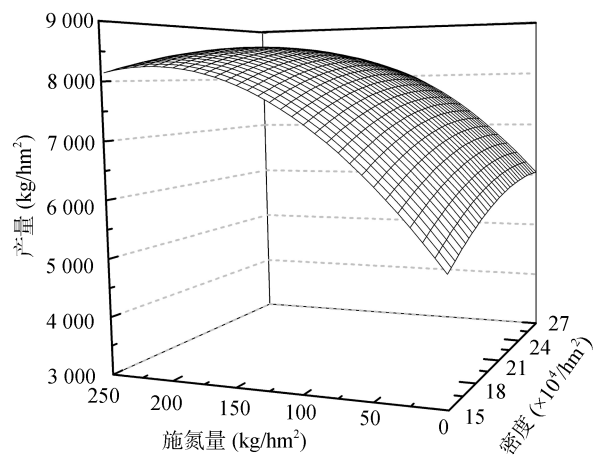


图 1 氮肥与密度互作下水稻产量效应模型
Fig. 1 Model of rice yield response to nitrogen-density interaction

表 4 氮肥与密度互作对水稻氮素累积量及氮肥吸收利用率的影响
Table 4 Effects of nitrogen-density interaction on nitrogen accumulation and fertilizer utilization of rice

处理	氮吸收量(kg/hm ²)				氮肥吸收利用率(%)			
	D ₁	D ₂	D ₃	平均	D ₁	D ₂	D ₃	平均
N ₀	57.5 c	65.0 c	68.0 d	63.5 d	—	—	—	—
N _{82.5}	80.3 b	96.6 b	94.7 c	90.5 c	27.7 a	38.2 a	32.4 a	32.7 a
N _{165.0}	102.5 a	121.5 a	123.1a	115.7 a	27.3 a	34.2 a	33.4 a	31.6 a
N _{247.5}	101.9 a	118.6 a	117.8 b	112.8 b	18.0 b	21.6 b	20.1 b	19.9 b
平均	85.5 b	100.4 a	100.9 a		24.3 b	31.3 a	28.6 ab	

注：同列不同字母(不包括平均值)分别表示各移栽密度处理下不同施氮量间差异在 $P<0.05$ 水平显著，同列和同行平均值后不同字母分别表示施氮量和移栽密度处理间差异在 $P<0.05$ 水平显著。

3 讨论

氮素的缺乏或过量都会导致叶绿素含量、酶含量(GS、NR 和 GOGAT 等氮代谢主要酶类)以及活性的下降,影响水稻产量,适宜的施氮量可以提高幼穗分化期叶片和乳熟期籽粒中氮代谢酶的活性,增加抽穗前氮素和干物质积累,从而促进产量的增加^[18]。本研究显示,施氮后平均增产 30.6%~47.8%,有效穗数也明显增加 10.5%~28.6%;但穗粒数、结实率等则先上升后下降,施氮量为 247.5 kg/hm² 时产量反而降低,这与前人的研究结果相一致^[8]。可能原因是,氮素供应不足时,水稻植株生长缓慢,叶面积减小、叶色变淡,植株叶绿素含量降低,影响有效光合作用的进行;同时,植株营养体生长不良,生育进程缩短,导致早衰、早熟,也会影响产量。施氮后水稻生长后期氮素供应充足,有效保障光合产物的形成和运输,促进籽粒的发育和成熟。然而,过量施用氮肥,一方面产生大量无效分蘖,并且造成作物对氮素的奢侈吸收,贪青晚熟、籽粒灌浆不充分,并且容易引发多种病虫害,后期容易出现倒伏;另一方面虽然其有效穗

2.4 氮肥与密度互作对水稻氮素吸收及利用率的影响

施氮可显著提高植株对氮素的吸收(表 4)。施氮后(N_{82.5}、N_{165.0}、N_{247.5})氮素吸收量平均显著增加 42.5%、82.2%、77.6%。密度也显著影响氮素吸收,相比 D₁ 处理,D₂ 和 D₃ 处理氮吸收量增加 17.4% 和 17.9%。随施氮量的增加氮肥利用率逐渐下降,与 N_{82.5} 相比,N_{165.0} 和 N_{247.5} 处理分别下降 1.1 和 12.8 百分点。氮肥利用率随密度增加先上升后下降,D₂ 分别高出 D₁ 和 D₃ 处理 7.0 和 2.7 百分点,说明过量施氮并不能促使水稻对氮素的同步吸收,适当提升移栽密度则会增加作物对氮素的吸收,降低氮素损失,从而提高氮肥利用率。

数略有增加,但无法弥补穗粒数、结实率等较大程度下降所造成的影响。合理施用氮肥则可以充分发挥其分蘖特性,增加单位面积穗数,形成足量的有效穗,且避免过多的无效分蘖争肥、争水,同时改善后期群体光照、通风条件,协调穗、粒结构,提高光合效率而获取高产^[19]。

冠层的光合物质生产以及根系从土壤中吸收利用有效养分是作物产量形成的重要保证,适宜的冠层群体与一定施肥水平相适应,有利于增加群体的光合作用而提高产量。合理的密度可以调控水稻株型特征和冠层结构,协调个体、群体以及源、库之间的矛盾,既可以发挥较强个体优势,又可建立高光合效率的群体^[20]。郎有忠等^[12,21]指出,中密度时有效穗数、实粒数均不是最优,但产量最高,本试验与其研究相一致。可能是,低密度时,基本苗少,有效穗数有限,增施氮肥对有效穗的提升空间有限,且大量分蘖又会抑制实粒数、结实率的提升;密度过高时,田间过于荫蔽相互遮挡,个体之间竞争激烈,单株生产力低,容易诱发病虫害等而降低产量;合理的密度充分协调穗、粒结构,满足个体、群体的发展,改善田间群体光照、

CO₂、气温等因子而实现增产^[3,22]。

水稻产量主要取决于群体库容量(总颖花数、粒重),高产关键是确保一定的总颖花数,总颖花数可以通过增加有效穗数和每穗粒数来获取^[19]。由表 3 可知,氮肥、密度对产量构成影响最大为有效穗数,增施氮肥促进分蘖提高有效穗数,而密度通过提高基本苗数来提升有效穗数,有效穗数的增加又制约着实粒数和结实率;密度较低时基本苗不够,增施氮肥对有效穗数的提升空间有限,产量增加受到限制;高密度下群体空间有限,增施氮肥虽可提高有效穗数,但加剧个体竞争,影响光合效率^[23]。高氮、高密度下,分蘖虽多但加剧个体之间对生长空间、养分、光照、CO₂等资源的争夺,导致个体生长空间和营养面积缩小,影响光合效率,限制了总颖花数的提升,故有效穗数虽高,但穗粒数、结实率等显著降低,造成库容量不足而限制产量潜力发挥,同时后期群体郁闭,光照、通风差,也会影响颖花和枝梗分化;低氮、低密相结合时,分蘖不足,个体数量偏少,穗粒数和结实率虽高,但难以弥补有效穗数偏少而造成的籽粒减产;但是,适当的施氮量和移栽密度有利于减少无效分蘖,协调群体环境,在保证足够有效穗数的同时,兼顾叶片的合理配置和高产群体的培育,同时保证良好的通风、光照条件,增强光能截获,提高成穗率和高效叶面积率,减缓孕穗至成熟期叶面积的衰减,而实现高产^[3,21]。因此,选择合理的施氮量和密度,协调好个体与群体的关系,在确保足量有效穗数的基础上,提高穗粒数和结实率,以保证高产。模型分析得出氮肥、密度的最优组合为 194.9 kg/hm²和 22.1 万蔸/hm²,降低了氮肥用量,控制适当的移栽密度,保证产量的同时很好地满足了节氮、省工的需求。

参考文献:

- [1] 张洪程主编. 水稻新型栽培技术[M]. 北京市: 金盾出版社, 2011
- [2] Cheng WD, Zhang GP, Zhao GP, Yao H, Xu H. Variation in rice quality of different cultivars and grain positions as affected by water management[J]. Field Crops Research, 2003, 80(3): 245-252
- [3] 苏祖芳, 霍中洋. 水稻合理密植研究进展[J]. 耕作与栽培, 2006(5): 6-9
- [4] Cassman KG, Peng SB, Olk DC, Ladha JK, Reichardt W, Dobermann A, Singh U. Opportunities for increased nitrogen use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems[J]. Field Crops Research, 1998, 56(1/2): 7-39
- [5] Peng S, Cassman KG. Upper thresholds of nitrogen uptake rates and associated nitrogen fertilizer efficiencies in irrigated rice[J]. Agronomy Journal, 1998(90): 178-185
- [6] 王伟妮, 鲁剑巍, 鲁明星, 李小平, 李云春, 李慧. 湖北省早、中、晚稻施氮增产效应及氮肥利用率研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 545-553
- [7] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 崔振岭, 马文奇, 陈新平, 江荣风. 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
- [8] 陈安强, 雷宝坤, 鲁耀, 毛妍婷, 张丹. 南方山地丘陵区考虑水稻产量和生态安全的容许施氮量[J]. 农业工程学报, 2013, 29(9): 131-139
- [9] Tirol PA, Ladha JK, Singh U, Laureles E, Punzalan G, Akita S. Grain yield performance of rice genotypes at suboptimal levels of soil N as affected by N uptake and utilization efficiency[J]. Field Crops Research, 1996, 46(1): 127-143
- [10] 王丹英, 章秀福, 周昌南, 郑根生, 张根贤, 徐锡虎, 金炳华, 张文松, 陈宏伟, 李瑾. 浙江省水稻产量构成差异调查与合理种植密度分析[J]. 浙江农业学报, 2010, 22(3): 330-336
- [11] 朱永川, 熊洪, 徐富贤, 张林, 郭晓艺, 周兴兵, 刘茂. 中国水稻强化栽培技术的研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(5): 10-17
- [12] 郎有忠, 王美娥, 吕川根, 张祖建, 朱庆森. 水稻叶片形态、群体结构和产量对种植密度的响应[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(1): 7-11
- [13] 王会民. 栽植密度对不同株型水稻光能利用影响的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010
- [14] 李静. 生态条件和栽培密度对水稻群体特征、产量和品质的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2013
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-110
- [16] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 杨建昌, 王光火, 邹应斌, 张福锁, 朱庆森, Roland Buresh, Christian Witt. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学, 2002(9): 1 095-1 103
- [17] 毛达如, 申建波. 植物营养研究方法[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2005: 52-53
- [18] 孙永健, 孙园园, 李旭毅, 郭翔, 马均. 水氮互作下水稻氮代谢关键酶活性与氮素利用的关系[J]. 作物学报, 2009, 35(11): 2 055-2 063
- [19] 杨建昌, 杜永, 刘辉. 长江下游稻麦周年超高产栽培途径与技术[J]. 中国农业科学, 2008(6): 1 611-1 621
- [20] 刘树金. 栽培地点和密度对不同类型品种水稻形态特征与群体质量影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2010
- [21] 金峰. 水稻超高产株型模式的生理生态基础研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2013
- [22] 金千瑜, 欧阳由男, 王会民, 朱练峰, 禹盛苗, 张均华. 栽培密度对不同株型水稻光合特性与产量的影响[A]//中国作物学会. 中国作物学会 50 周年庆祝会暨 2011 年学术年会论文集[C]. 北京: 中国作物学会, 2011: 1
- [23] 苏金平, 范芳, 徐昌旭, 袁福生, 刘光荣. 不同种植密度对冷浸田水稻产量的影响[J]. 江西农业学报, 2013, 25(12): 16-18

Effects of Nitrogen Application Rate and Planting Density on Grain Yields, Yield Components and Nitrogen Use Efficiencies of Rice

DENG Zhong-hua¹, MING Ri¹, LI Xiao-kun^{1*}, ZHENG Lei², XU Wei-ming³, YANG Yun-qing³,
REN Tao¹, CONG Ri-huan¹, LU Jian-wei¹

(1 Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtse River), Ministry of Agriculture/ College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2 National Agricultural Technology Extension and Service Center, Beijing 100026, China; 3 Soil and Fertilizer Station of Shayang City, Shayang, Hubei 448200, China)

Abstract: An experiment was carried out to study the interactive effect of nitrogen(N) fertilizer rate and planting density on rice yield and N use efficiency in order to provide a basis for rational cultivation management. The results indicated that the N rate and planting density had significant effects on grain yield of rice and the interactive effect was also significant. Compared with the no N treatment, the average yields of the treatments with N rates of 82.5, 165.0 and 247.5 kg/hm² increased by 30.6%, 47.8% and 44.6%, respectively. The plant density was 21×10^4 seedlings/hm² for the highest grain yield. Increasing the N rate and planting density significantly increased the number of spikes per unit. However, grains per spike, seed setting rate and thousand grain weight decreased with the increase of planting density. N use efficiency decreased at the higher N application rate, but increased first and then dropped with the increase of planting density. Planting density also had significant effects on grain yields of rice, increasing density promoted rice yield under the condition of low N rate (0 and 82.5 kg/hm²), but for the high density treatment, higher N rate significantly decreased the yield. In this study, the appropriate nitrogen application rate and plant density of rice were 194.9 kg/hm² and 22.1×10^4 seedlings/hm², respectively.

Key words: Nitrogen; Density; Rice; Yield; Nitrogen use efficiency