

氮肥和栽植密度对水稻产量及氮肥利用率的影响

周江明¹, 赵琳², 董越勇², 徐进², 边武英², 毛杨仓¹, 章秀福^{3*}

(1 江山市农业技术推广中心, 浙江江山 324100; 2 浙江省土壤肥料站, 浙江杭州 310020;

3 中国水稻研究所, 浙江杭州 310006)

摘要: 针对部分地区水稻生产中氮肥用量过高及水稻移植密度越来越低的情况, 选择 2 个早稻和 2 个晚稻品种为试验材料, 设置施氮水平和移植密度互作试验, 分析两因素及其互作对水稻产量和氮素利用率的影响。结果表明, 氮水平和移植密度对水稻产量有显著影响, 但其互作效应不显著; 氮水平、移植密度及其互作对氮素利用率的影响均达显著水平。其中, 低氮水平处理平均氮素利用率比高氮水平增加 2.1%~5.6%; 高密度的氮素利用率比低密度增加 10.1%~45.7%。说明提高移植密度, 减少氮肥用量, 既可通过大幅度增加有效穗来实现高产, 又能显著提高氮素利用率。在资源日益短缺、生产成本渐高及面源污染越来越严重的形势下, 密植少氮应是值得推广的水稻栽培技术。在本试验条件下, 早稻移植密度在 29.3~36.0 万穴/hm² 的基础上施 N 153.1~169.4 kg/hm²、晚稻移植密度在 23.1~30.0 万穴/hm² 的基础上施 N 161.5~190.1 kg/hm² 氮素是高产高效节氮的合理组合。

关键词: 水稻; 氮肥; 移植密度; 产量; 氮肥利用率

中图分类号: S511.06; S352.3

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2010)02-0274-08

Nitrogen and transplanting density interactions on the rice yield and N use rate

ZHOU Jiang-ming¹, ZHAO Lin², DONG Yue-yong², XU Jin², BIAN Wu-ying², MAO Yang-cang¹, ZHANG Xiu-fu^{3*}

(1 The Agricultural Technique Popularization Centre of Jiangshan City, Jiangshan, Zhejiang 324100, China;

2 Soil and Fertilizer Station of Zhejiang Province, Hangzhou, Zhejiang 310020, China;

3 China National Rice Research Institute, Hangzhou 310006, China)

Abstract: An experiment was carried out to study the interactive effect of increasing N fertilizer and reducing planting density on rice yield and N use rate. Two early rice varieties and two late rice varieties was used as test materials. The results showed that there was a significant influence of N level and transplanting density on the rice yield separately, but interactive effect was no significant. However, the influence of N level, transplanting density and their interactive effect on N use rate was significant. The average absorption rate of N fertilizer increased 4.2% - 14.0% under the low N level in comparison with that under high N level with same planting density. The average absorption rate of N fertilizer under high transplanting density increased by 10.1% - 14.6% in comparison with that under the condition of low density. The results of the trial indicated that both the rice yield and N use efficiency could be raised by properly increasing the transplanting density and decreasing the amount of nitrogen application. As a result, high yield of the rice and high N use rate can be obtained by increasing the transplanting density and decreasing the amount of nitrogen application. Take the yield and N use rate into consideration, the N fertilization rate was recommended as: N 153.1 - 169.4 kg/ha for the early rice with the transplanting density of $29.3 \times 10^4 - 36.0 \times 10^4$ clusters/ha and N 161.5 - 190.1 kg/ha for the late rice with the transplanting density of $23.1 \times 10^4 - 30.0 \times 10^4$ clusters/ha.

Key words: rice; nitrogen fertilizer; planting density; yield; N use efficiency

收稿日期: 2009-02-24

接受日期: 2009-06-03

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2006BA02AB); 农业部测土配方施肥项目资助。

作者简介: 周江明(1968—), 男, 浙江省江山人, 高级农艺师, 硕士研究生, 主要从事土壤肥力、植物营养及肥料施用等研究和应用工作。

Tel: 0570-4011075, E-mail: man-0034@163.com. * 通讯作者 Tel: 0571-63370584, E-mail: Zhangxf169@sohu.com

中国是世界上最大的产稻国,产量占世界稻米总产的 1/3,2008 年我国水稻种植面积达到 2920 万公顷^[1]。作为我国第一大粮食作物^[2],如何提高其产量,一直是我国科学家的研究热点,而氮肥施用和移植密度作为水稻生产的主要栽培技术,更是研究的重点。近年来,随着高产耐肥水稻品种的培育和推广,氮肥施用量越来越大,在促进水稻单产大幅度上升的同时,过度施用氮肥所带来的氮素增产效率下降、氮素利用率低、病虫害重、水稻生产成本低和环境污染等问题,也越来越突出^[3-5]。针对这一问题,许多学者从氮肥品种、施氮方式、水分管理等方面研究了与氮素利用率的关系^[6-9],并取得了很大的成效;而自大生物量的超级杂交稻面世以来,种植密度有密植向稀植的发展趋势。如蒋彭炎的稀少平栽培法^[10]、张洪程的小苗稻高产节本栽培技术^[11]、当今普遍流行的水稻强化栽培技术(SRI)^[12]和其他相关研究^[13-15],均表明壮苗稀植,能改善水稻群体质量,显著提高水稻产量。林玉棋^[16]、马国辉等^[17]系统研究了氮肥、密度及其互作对水稻产量的影响,并提出了氮肥用量与密度水平最佳组合。但对于水稻移植密度与氮素利用率的关系还未见有关报道。为此,本试验在不同氮肥水平下,研究了不同移植密度对水稻产量和氮素利用率的影响,旨在为水稻高产高效节本栽培提供理论依据和技术途径。

1 材料与方法

1.1 试验设计

早稻试验于 2007 年在江山市长台镇华丰村毛章维户稻田进行。供试的早稻 2 个品种为穗大粒多、耐肥抗倒的“中早 22”和“金早 47”。晚稻试验于 2008 年在江山市长台镇华丰村毛文道户稻田进行,2 个晚稻品种为大穗大粒型“国稻 6 号”和分蘖强、穗型中等、粒数较少的“协优 46”。早稻和晚稻试验田土壤基础性状分别为:有机质 29.54、35.35 g/kg,全氮 1.67、1.93 g/kg,碱解氮 119.0、144.2 mg/kg,有效磷 8.7、11.6 mg/kg,速效钾 83.4、112.5 mg/kg,pH 6.13、5.92。

2007 年早稻试验,施氮水平设: N 0、105、150、195 kg/hm² 4 水平,以 N₀、N₁、N₂、N₃ 表示;移栽密度设:每公顷 36 万穴(16.6 cm × 16.6 cm)、30 万穴(16.6 cm × 20.0 cm)、24 万穴(16.6 cm × 25.0 cm)3 种,分别用 D₃₆、D₃₀、D₂₄ 表示。各处理施过磷酸钙 625 kg/hm²、氯化钾 225 kg/hm²,折合 P₂O₅ 75

kg/hm²、K₂O 135 kg/hm²。

2008 年晚稻试验,氮肥水平设:施 N 0、120、165、210 kg/hm²,以 N₀、N₁、N₂、N₃ 表示;移栽密度,设:每公顷 30 万穴(16.6 cm × 20.0 cm)、24 万穴(16.6 cm × 25.0 cm)、18 万穴(16.6 cm × 33.3 cm)3 种,分别用 D₃₀、D₂₄、D₁₈ 表示。各处理施过磷酸钙 650 kg/hm²、氯化钾 250 kg/hm²,折合 P₂O₅ 78 kg/hm²、K₂O 150 kg/hm²。

试验以肥料用量为主区,面积 60 m²;密度为副区,面积为 20 m²,3 次重复,随机排列,2 个品种共 72 个小区。各小区起埂隔离,埂上覆膜,实行单独排灌。

早稻播种期为 3 月 20 日,移栽期为 4 月 21 日,收获期 7 月 19 日;晚稻播种期为 6 月 14 日,移栽期为 7 月 20 日,收获期 10 月 19 日。氮肥分 4 次施用,40%为基肥,在插秧前 1 d 施用;插秧后 10 d、穗分化始期、倒 1~2 叶期分 3 次追施,各占 20%。磷肥全部用作基肥。钾肥作基肥和穗肥各占 50%。田间水分管理及病虫草害按当地常规方法进行。

1.2 测定项目与方法

子粒和秸秆产量测定:水稻植株与子粒在成熟期小区实收测产,并取部分样品分析水分和氮含量。

氮素测定:用凯氏定氮法分析植株和子粒的含氮量。

相关参数的计算方法^[9]:

氮素收获指数(N harvest index, NHI) = 子粒吸氮量/植株总吸氮量;

氮素农学利用率(Agronomic N use efficiency, ANUE) = (施氮区产量 - 空白区产量)/施氮量;

氮素吸收利用率(Apparent N recovery efficiency, ANRE) = (施氮区植株总吸氮量 - 空白区植株总吸氮量)/施氮量 × 100%;

氮素生理利用率(Physiological N use efficiency, PNUE) = (施氮区产量 - 空白区产量)/(施氮区植株总吸氮量 - 空白区植株总吸氮量)。

数据采用 Excel 2003 和 DPS 进行分析处理。

2 结果与分析

2.1 氮肥和密度对水稻产量及其构成因子的影响

2 年 4 个水稻品种的试验结果(表 1、表 2)表明,氮肥用量和移植密度对水稻产量有显著影响。其中早稻以 D₃₀N₁₅₀处理产量最高,中早 22 和金早 47 分别为 7652.5 和 7864.5 kg/hm²;晚稻国稻 6 号和协

优46则以 $D_{24}N_{210}$ 和 $D_{30}N_{120}$ 处理产量最高,分别为 7319.5 和 7037.3 kg/hm²。表明不同品种存在显著

的需肥及栽培特性的差异性。从施氮水平单因子看,早稻施 150 kg/hm²、晚稻施 165 kg/hm² 时产量最

表 1 不同处理下早稻产量及其构成因子

Table 1 The grain yield and its components of early rice under different treatments

品种 Variety	处理 Treat.	有效穗 Panicles (No./m ²)	穗粒数 Grain No. (No./panicle)	结实率 Seed-setting rate (%)	产量 Yield (kg/hm ²)	品种 Variety	处理 Treat.	有效穗 Panicles (No./m ²)	穗粒数 Grain No. (No./panicle)	结实率 Seed-setting rate (%)	产量 Yield (kg/hm ²)
中早 22 Zhongzao 22	$D_{36}N_0$	243.1 ef	112.4 ab	87.4 a	5894.0 e	金早 47 Jinza 47	$D_{36}N_0$	241.2 ef	102.7 e	96.2 a	5806.5 e
	$D_{30}N_0$	231.0 f	116.5 ab	86.6 a	5758.5 e		$D_{30}N_0$	232.8 fg	102.3 e	97.3 a	5652.0 e
	$D_{24}N_0$	228.8 f	109.2 b	86.9 a	5221.5 f		$D_{24}N_0$	219.6 g	108.4 de	95.9 ab	5358.0 e
	$D_{36}N_{105}$	285.0 cd	112.3 ab	81.4 ab	6986.5 bc		$D_{36}N_{105}$	299.3 bc	109.6 cde	92.7 abc	7353.0 bcd
	$D_{30}N_{105}$	286.8 cd	108.3 b	81.9 ab	6974.0 c		$D_{30}N_{105}$	285.0 c	116.7 bed	87.6 cde	7230.0 cd
	$D_{24}N_{105}$	251.8 e	113.8 ab	81.3 ab	6432.5 d		$D_{24}N_{105}$	249.4 def	118.6 abc	90.1 bed	6905.0 d
	$D_{36}N_{150}$	309.3 ab	115.8 ab	76.9 b	7464.5 abc		$D_{36}N_{150}$	311.0 b	115.3 bed	79.9 fg	7815.0 ab
	$D_{30}N_{150}$	291.2 bc	117.7 ab	79.0 b	7652.5 a		$D_{30}N_{150}$	312.5 b	113.3 cd	84.8 def	7864.5 a
	$D_{24}N_{150}$	271.1 d	120.8 a	83.6 ab	7216.5 abc		$D_{24}N_{150}$	262.9 d	123.4 ab	85.4 d ef	7453.0 abc
	$D_{36}N_{195}$	317.5 a	118.8 a	76.5 b	7441.5 abc		$D_{36}N_{195}$	338.0 a	115.0 bed	76.8 g	7637.0 abc
	$D_{30}N_{195}$	314.8 a	117.3 ab	76.9 b	7511.5 ab		$D_{30}N_{195}$	284.5 c	117.1 bed	83.9 ef	7825.0 ab
	$D_{24}N_{195}$	295.1 bc	121.1 a	78.9 b	7340.5 abc		$D_{24}N_{195}$	258.4 de	126.7 a	88.6 cde	7552.0 abc
	N	* *	*	* *	* *		N	* *	* *	* *	* *
	D	77	ns	ns	* *		D	* *	ns	ns	*
	N × D	ns	ns	ns	ns		N × D	* *	ns	*	ns

注(Notes): N—氮肥 N fertilizer; D—种植密度 Planting density. 同列数值后不同字母者表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in the same column mean significant at 5% level; ns 表示未达显著水平 Indicates no significant; * 和 * * 分别表示达 5% 和 1% 显著水平 Mean significant at 5% and 1% levels, respectively.

表 2 不同处理下晚稻产量及其构成因子

Table 2 The grain yield and its components of late rice under different treatments

品种 Variety	处理 Treat.	有效穗 Panicles (No./m ²)	穗粒数 Grain No. (No./panicle)	结实率 Seed-setting rate (%)	产量 Yield (kg/hm ²)	品种 Variety	处理 Treat.	有效穗 Panicles (No./m ²)	穗粒数 Grain No. (No./panicle)	结实率 Seed-setting rate (%)	产量 Yield (kg/hm ²)
国稻 6 号 Guodao No.6	$D_{30}N_0$	210.2 de	135.2 abc	75.9 b	5938.7 c	协优 46 Xieyou 46	$D_{30}N_0$	265.2 fg	105.5 abc	86.8 a	5800.8 c
	$D_{24}N_0$	194.0 e	128.5 bc	78.8 ab	5653.3 c		$D_{24}N_0$	256.5 gh	103.8 abc	88.5 a	5069.3 d
	$D_{18}N_0$	166.3 f	136.4 abc	81.2 a	5072.0 d		$D_{18}N_0$	235.6 h	109.5 ab	88.6 a	4981.3 d
	$D_{30}N_{120}$	235.2 bc	127.7 c	76.8 ab	6926.5 ab		$D_{30}N_{120}$	313.6 bc	102.1 abc	88.7 a	7037.3 a
	$D_{24}N_{120}$	220.0 cd	139.5 ab	78.1 ab	6880.0 ab		$D_{24}N_{120}$	300.0 cd	110.6 ab	87.3 a	6968.0 ab
	$D_{18}N_{120}$	205.0 de	137.0 abc	78.2 ab	6552.0 b		$D_{18}N_{120}$	266.4 efg	114.1 a	86.7 a	6162.7 c
	$D_{30}N_{165}$	276.2 a	131.1 bc	75.3 b	7254.2 a		$D_{30}N_{165}$	350.0 a	98.3 bc	85.5 ab	6837.3 ab
	$D_{24}N_{165}$	240.1 b	133.7 abc	78.3 ab	7304.3 a		$D_{24}N_{165}$	311.6 bc	103.2 abc	85.6 ab	6982.8 ab
	$D_{18}N_{165}$	207.3 e	139.6 ab	79.3 ab	7110.0 a		$D_{18}N_{165}$	287.6 de	108.5 ab	85.7 ab	6637.3 b
	$D_{30}N_{210}$	265.0 a	131.5 bc	76.7 ab	7221.0 a		$D_{30}N_{210}$	365.2 a	93.5 c	79.3 d	6856.5 ab
	$D_{24}N_{210}$	244.0 b	137.2 abc	74.2 b	7319.5 a		$D_{24}N_{210}$	327.5 b	104.6 abc	80.2 cd	6892.7 ab
	$D_{18}N_{210}$	220.2 cd	143.0 a	78.1 ab	7184.5 a		$D_{18}N_{210}$	285.7 def	112.9 a	82.8 bc	6704.0 ab
	N	* *	ns	* *	* *		N	* *	ns	* *	* *
	D	* *	*	ns	*		D	* *	* *	ns	* *
	N × D	ns	ns	ns	ns		N × D	ns	ns	ns	*

注(Notes): N—氮肥 N fertilizer; D—种植密度 Planting density. 同列数值后不同字母者表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in the same column mean significant at 5% level; ns 表示未达显著水平 Indicates no significant; * 和 * * 分别表示达 5% 和 1% 显著水平 Mean significant at 5% and 1% levels, respectively.

高,分别显著高于 N_{105} 处理和 N_0 处理;早稻 N_{150} 与 N_{195} 处理无显著性差异,表明施氮与产量呈现抛物线关系,早稻施 N 105 kg/hm²、晚稻施 N 165 kg/hm² 是水稻施氮的技术拐点。从种植密度水平上看,有密度越高产量越高的趋势,表明提高种植密度有利于增加产量。方差分析结果表明,氮肥和密度的产量效应达显著或极显著水平,而二者的互作效应对产量影响不显著,这与马国辉等人^[17]的研究结果不一致。

进一步分析氮肥、种植密度及氮密互作对产量构成因子的影响看出,氮肥用量和移植密度的增加均会大幅度提高单位有效穗数,它们之间呈现极显著的正相关关系,相关系数(r)分别在 0.9606 ~ 0.9998 和 0.9715 ~ 0.9994;而氮肥与密度互作效果不显著。氮肥与密度对穗粒数的影响,总的趋势是随着氮肥水平和种植密度的提高而上升,但各品种及各因子间影响程度不一样。密度对早、晚稻的影响基本达到显著水平,氮肥则显著影响早稻穗粒数,对晚稻影响未达显著水平;氮肥与密度互作效应也不显著。结实率基本以早稻 $D_{24}N_0$ 、晚稻 $D_{18}N_0$ 处理最高,并有随氮肥和密度提高而下降的趋势。其中氮肥影响较为显著,密度影响较小,基本未达显著水平。以上结果表明,氮肥与密度对水稻产量构成因子的影响以有效穗最大。氮肥增加促进大量分蘖而提高有效穗;密度增加则是通过基本苗数量的增加而提高有效穗。随着有效穗和总粒数的增加,水稻库容量变大,光合产物相对其大库而显得不足,造成结实率下降。

综合来看,栽培条件对水稻产量的影响主要通过影响有效穗、穗粒数及结实率来实现的,但它们之间存在一定的负相关关系。要提高水稻产量,必须协调好各因子的关系,在保足单位穗数的基础上,着重提高穗粒数和结实率。分析水稻产量最高的各构成因子也可看出,早稻 $D_{30}N_{150}$ 处理和晚稻 $D_{24}N_{210}$ 处理、 $D_{30}N_{120}$ 处理的产量构成因子都不是最高水平,但它们比较平衡协调,因此产量最高。

2.2 氮肥、密度和水稻产量的回归模型分析

以水稻产量为因变量(Y),氮肥(X_1)、密度(X_2)为自变量,通过 DPS 软件二项回归分析建立氮肥和移植密度对产量的回归方程:

$$\text{早稻 } Y_E = -604.254 + 24.305X_1 + 370.383X_2 - 0.043X_1^2 - 5.310X_2^2 - 0.190X_1X_2, R^2 = 0.984;$$

$$\text{晚稻 } Y_L = 1839.071 + 23.582X_1 + 229.947X_2 -$$

$$0.040X_1^2 - 3.235X_2^2 - 0.311X_1X_2, R^2 = 0.988。$$

对上述方程进行 F 检验,早稻 $F = 75.8110$, $P = 0.00012$,为极显著水平;实际产量与方程预测值的相关性极显著, $R = 0.9922$ 。晚稻 $F = 99.5228$, $P = 0.00011$,为极显著水平;实际产量与方程预测值的相关性也极显著, $R = 0.9940$ 。表明氮肥、密度和产量之间的回归关系极显著。同时,对各项回归系数进行显著性检验,结果除早稻的 X_1X_2 和晚稻的 X_2^2 系数不显著,其他均达显著性水平。早、晚稻 t 值 X_1 为 6.00**、9.74**, X_2 为 2.50*、2.56*, X_1^2 为 4.20**、5.88**, X_2^2 为 2.76*、1.75, X_1X_2 为 1.61、3.80**。

从回归方程可看出,氮肥和密度单因子对水稻产量的影响呈现单峰曲线关系,即随着氮肥用量的增加和移植密度的提高,产量逐渐上升,增幅逐渐下降;当氮肥或密度达到一定数量时,进一步增加氮肥或密度反而导致产量下降。氮肥用量和密度的互作为负效应,表明它们对产量的影响有相互抑制作用;增施氮肥宜适当降低移植密度,提高移植密度时氮肥用量则不宜过高。从图 1、图 2 看,氮肥与移植密度的互作效应曲面有唯一最大值的向上凸起曲面,是氮肥与密度互作的最佳点,也即是产量最高点,表明生产中氮肥与密度要合理搭配才能真正达到高产。本试验中,通过回归方程模拟试验,早稻和晚稻最高产为 7745.0 kg/hm² 和 7135.3 kg/hm²,早稻最高产的氮量和密度则为 N 195.0 kg/hm² 和 31.4 万穴/hm²,晚稻最高产的氮量和密度为 N 193.4 kg/hm² 和 26.2 万穴/hm²。另曲面两边的斜率可以看出,本试验中氮肥对产量的影响比移植密度大,表明水稻生产中更要注重氮肥施用量。

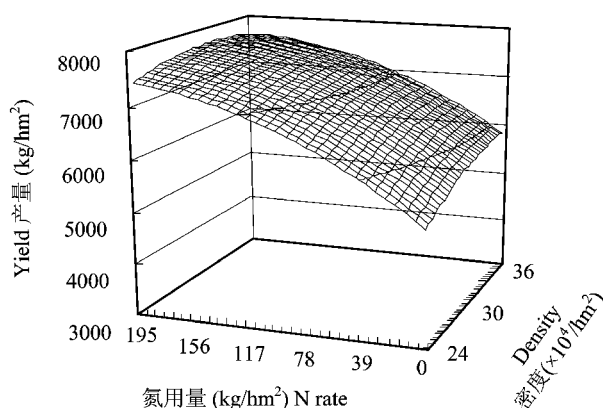


图 1 氮肥与移植密度互作对早稻产量的影响

Fig.1 Effects of nitrogen rate and planting density on yield of early rice

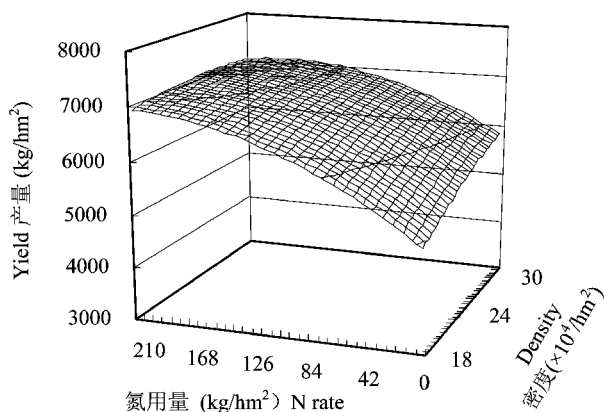


图2 氮肥与移植密度互作对晚稻产量的影响

Fig.2 Effects of nitrogen rate and planting density on yield of late rice

2.3 氮肥水平和密度对水稻氮素利用率的影响

氮素农学利用率反映单位施肥量下作物子粒产量的增加情况,是农业生产中最关心的经济指标之一。试验表明,氮肥、密度对水稻农学利用率有显著的影响,而互作效应各不相同。中早22、国稻6号达到显著水平,另2个未达显著水平。表3看出,随着氮用量的增加,早稻和晚稻不同密度的氮素农学利用率呈现下降的趋势,均以低氮处理的平均农学利用率最高,在10.3~14.8 kg/kg之间,其高氮处理在7.3~10.6 kg/kg之间,其显著低于低氮和中氮处理,说明氮用量的增加,单位氮素增产效果降低。移植密度对农学利用率的影响与氮素相同,在试验设计范围内,增加移植密度能降低单位氮素的增产能力,表明稀植施氮素的增产幅度高于密植施氮的增产幅度。氮素吸收利用率(即氮素当季利用率)是作物吸收利用氮肥的主要指标。方差分析表明,氮肥水平、种植密度及其互作对水稻氮素吸收利用率有显著或极显著的影响(表3)。从整体上看(图3),低氮水平或中氮水平比高氮水平更有利于吸收利用率的提高,其中早稻以 N_{150} 处理最高,平均分别为33.6%和45.7%,比 N_{95} 增1.6个百分点和5.6个百分点;晚稻以 N_{120} 处理最高,平均分别为35.1%和44.7%,比 N_{210} 增2.4个百分点和1.8个百分点,这与晏娟等人研究结果相符^[18]。在不同的移植密度条件下,均是高密度处理的吸收利用率最高,平均在34.9%~45.7%之间,显著高于低密度处理。上述结果表明,氮肥用量的增加并不能使水稻同步增加吸收量,多余部分会因作物来不及吸收而流失;增加单位苗穴数,会因增加吸收的作物量而提高氮素积累总量,减少氮素流失,从而提高氮素利用率。二项

回归分析表明,早稻和晚稻氮素吸收利用率均为42.9%,大大高于我国氮素利用率的平均水平,氮素利用率最高时早稻用氮量和移植密度为 $N\ 116.5\text{ kg/hm}^2$ 与36.0万穴/ hm^2 ,晚稻用氮量和移植密度则为 $N\ 120.0\text{ kg/hm}^2$ 与30.0万穴/ hm^2 ,表明我国低氮利用率可通过合理的氮肥运筹技术进行提高。进一步分析统计表明,早稻氮量在 $N\ 105.0\sim 169.4\text{ kg/hm}^2$ 之间和移植密度在29.3~36.0万穴/ hm^2 之间、晚稻氮量在 $N\ 120.0\sim 190.1\text{ kg/hm}^2$ 之间和移植密度在23.1~30.0万穴/ hm^2 之间进行组合,氮素吸收利用率值均大于40%,说明这是个适宜的氮肥运筹范围。

表3还表明,同样作为反映作物氮素利用效率重要指标的氮收获指数,受到氮肥和移植密度的显著影响,它们与收获指数均呈现负相关,即随着氮肥用量和移植密度的提高,收获指数显著下降。这进一步表明增加氮肥和移植密度虽然能提高氮素总积累量,但并没有有效地同步提高水稻的经济产量。

3 讨论

3.1 氮肥、移植密度与水稻产量的关系

氮素施用与移植密度作为水稻生产的主要栽培技术,它们对水稻产量有决定性的影响,本试验条件下,氮肥和密度对早稻和晚稻产量的贡献率达到98.4%和98.8%。诸多研究表明,适量的氮肥、适宜的密度及其合理的搭配能极显著地提高水稻产量。晏娟^[18]认为,氮肥 150 kg/hm^2 时晚稻4007产量最高;朱兆良^[19]则认为,单季稻施氮量 218 kg/hm^2 是适宜量,经济产量最高。种植密度方面,张玉屏^[20]提出,连作晚稻种植应稀播壮穗夺高产,种植密度以21万穴/ hm^2 为佳;杨惠杰^[21]、袁伟玲^[22]等则提倡合理密植,水稻保足穗数是高产的基础。林玉棋^[16]提出,Ⅱ优航2号最佳氮肥与密度搭配是 135 kg/hm^2 和25.5万穴/ hm^2 ;马国辉^[17]则认为,超级杂交中稻Y两优1号在施氮 189.5 kg/hm^2 、种植密度20.8万穴/ hm^2 时产量最高。综上所述,不同水稻品种存在耐肥能力的差异性,氮肥最佳施用量并不相同。而种植密度也没有统一的最佳量,只要合理搭配均可达高产。但这些研究有一个共性,即在一定范围内,产量随着氮肥或密度的增加而提高,而增产效果逐渐下降;当氮用量或密度越过一定界限后,产量出现下降趋势。也就是说,氮肥、密度与水稻产量的关系呈现单峰曲线的关系,本试验结果与之相符。同时,氮肥与密度对产量的影响又存在相互牵

表 3 不同处理的氮素利用率

Table 3 N use efficiency of different treatments

早稻品种 Early-rice Variety	处理 Treat.	农学 利用率 ANUE (kg/kg)	吸收 利用率 ANRE (%)	生理 利用率 PNUE (kg/kg)	收获 指数 NHI	晚稻品种 Late-rice Variety	处理 Treat.	农学 利用率 ANUE (kg/kg)	吸收 利用率 ANRE (%)	生理 利用率 PNUE (kg/kg)	收获 指数 NHI
中早 22 Zhongzao 22	D ₃₆ N ₁₀₅	10.4 ab	35.3 b	34.2 a	0.589 bc	国稻 6 号 Guodao No.6	D ₃₀ N ₁₂₀	8.2b c	39.3 a	32.1abc	0.662 a
	D ₃₀ N ₁₀₅	11.6 ab	33.7 bc	29.0 ab	0.621 a		D ₂₄ N ₁₂₀	10.2 ab	35.7 ab	33.6 a	0.655 a
	D ₂₄ N ₁₀₅	11.5 ab	25.1 d	31.3 ab	0.616 ab		D ₁₈ N ₁₂₀	12.3 a	30.3 d	36.1 ab	0.649 ab
	D ₃₆ N ₁₅₀	10.5 ab	38.2 a	27.2 ab	0.595 abc		D ₃₀ N ₁₆₅	8.0 bc	35.2 b	26.6 abc	0.636 ab
	D ₃₀ N ₁₅₀	12.6 a	31.6 c	31.4 ab	0.592 bc		D ₂₄ N ₁₆₅	10.0 ab	35.0 b	27.6 abc	0.645 ab
	D ₂₄ N ₁₅₀	13.3 a	31.0 c	31.2 ab	0.594 abc		D ₁₈ N ₁₆₅	12.4 a	33.8 bcd	30.4 abc	0.628 ab
	D ₃₆ N ₁₉₅	7.9 b	31.2 c	25.7 ab	0.558 d		D ₃₀ N ₂₁₀	6.1 c	34.1 bc	20.2 c	0.598 b
	D ₃₀ N ₁₉₅	9.0 b	32.7 bc	26.6 ab	0.573 cd		D ₂₄ N ₂₁₀	7.9 bc	33.3 bcd	21.4 bc	0.619 ab
	D ₂₄ N ₁₉₅	10.9 ab	32.0 c	23.9 b	0.596 abc		D ₁₈ N ₂₁₀	10.1 ab	30.6 cd	24.8 abc	0.608 ab
	N	* *	*	ns	* *		N	* *	*	*	*
	D	* *	* *	ns	*		D	*	* *	ns	ns
	N × D	*	* *	ns	ns		N × D	*	*	ns	ns
金早 47 Jinza 47	D ₃₆ N ₁₀₅	14.7 a	48.4 a	30.9 a	0.617 bc	协优 46 Xieyou 46	D ₃₀ N ₁₂₀	10.3 bc	47.5 a	23.4 a	0.635 ab
	D ₃₀ N ₁₀₅	15.0 a	43.1 bc	31.2 a	0.615 c		D ₂₄ N ₁₂₀	15.8 a	47.1 a	23.8 a	0.639 ab
	D ₂₄ N ₁₀₅	14.7 a	35.1 d	31.8 a	0.628 ab		D ₁₈ N ₁₂₀	9.8 bc	39.6 b	24.9 a	0.644 a
	D ₃₆ N ₁₅₀	13.4 ab	46.6 ab	27.6 a	0.628 ab		D ₃₀ N ₁₆₅	6.3 de	44.2 ab	18.1 a	0.623 bc
	D ₃₀ N ₁₅₀	14.8 a	47.6 ab	28.9 a	0.639 a		D ₂₄ N ₁₆₅	11.6 b	43.2 ab	22.0 a	0.634 ab
	D ₂₄ N ₁₅₀	14.0 ab	42.9 bc	28.6 a	0.639 a		D ₁₈ N ₁₆₅	10.0 bc	44.8 ab	22.4 a	0.641 ab
	D ₃₆ N ₁₉₅	9.4 c	39.5 cd	25.7 a	0.620 bc		D ₃₀ N ₂₁₀	5.0 e	45.5 a	16.3 a	0.579 e
	D ₃₀ N ₁₉₅	11.1 bc	40.1 cd	26.2 a	0.623 bc		D ₂₄ N ₂₁₀	8.7 bcd	43.1 ab	17.7 a	0.589 de
	D ₂₄ N ₁₉₅	11.3 bc	40.6 c	26.0 a	0.634 bc		D ₁₈ N ₂₁₀	8.2 cde	40.0 b	19.1 a	0.607 cd
	N	*	* *	*	* *		N	* *	*	ns	* *
	D	* *	* *	ns	*		D	ns	*	n	* *
	N × D	ns	* *	ns	ns		N × D	ns	ns	ns	ns

注(Notes): N—氮肥 N fertilizer; D—种植密度 Planting density. 同一品种数值后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters within a variety mean significant among different treatment at 5% level; ns 表示未达显著水平 Indicates no significant; * 和 * * 分别表示达 5% 和 1% 显著水平 Mean significant at 5% and 1% level, respectively.

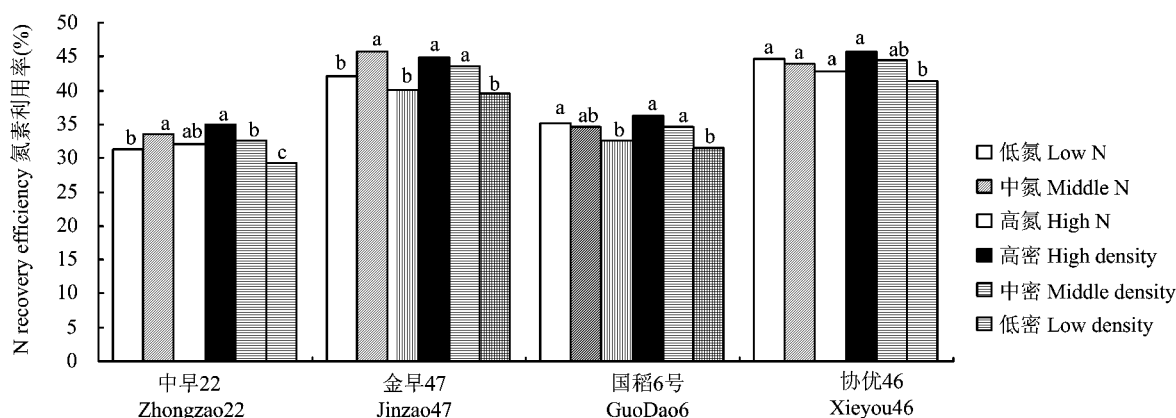


图 3 不同处理对氮素吸收利用率的影响

Fig.3 Effects of different treatments on apparent N recovery efficiency

[注(Notes): 柱上不同字母表示同一品种间在 $P < 0.05$ 水平差异显著 Different letters above the bars indicate a significant different among treatment ($P < 0.05$).]

制作用,增施氮肥宜适当降低移植密度,提高移植密度时氮肥用量则不宜过高。在本试验条件下,早稻和晚稻最高产的氮肥用量及移植密度分别为 N 195.0 kg/hm² 和 31.4 万穴/hm² 以及 N 193.4 kg/hm² 和 26.2 万穴/hm²。通过计算机模拟,水稻高产(本试验中早稻大于 7600 kg/hm²,晚稻大于 7100 kg/hm²)的施氮量和密度适宜范围分别为早稻 N 153.1~195.0 kg/hm² 和 26.1~36 万穴/hm²、晚稻 N 161.5~210 kg/hm² 和 22.6~29.8 万穴/hm²。

3.2 氮肥、移植密度与氮素利用率的关系

我国稻田的氮肥利用率一般为 30% 左右(指吸收利用率),低于世界平均水平,比美国、日本等发达国家低 10~15 个百分点^[23]。面对氮素利用率低、农业生产成本高、面源污染重等突出问题,我国学者围绕提高氮素利用率进行了氮用量、施氮方式、氮肥品种等研究^[6-9,18,23],认为适量减少氮肥、少量多次、使用缓释氮肥等可以有效提高利用率。本试验中氮用量与利用率的关系研究结果和前人研究相符,减少氮肥用量能显著提高利用率。本试验结果显示,早稻上施 N 105 kg/hm² 和 195 kg/hm² 相比,农学利用率和吸收利用率平均提高 30.7% 和 2.1%;晚稻上施 N 120 kg/hm² 和 210 kg/hm² 相比,农学利用率和吸收利用率提高 45.8% 和 5.6%。这是因为增加施氮量,部分氮素植株来不及吸收,进入田水随水排出而流失,或向地下渗漏流失,降低了吸收利用率;而且外源氮肥供应增加,提高了植株氮素积累量,植株过多的氮素积累导致贪青,在物质积累上表现为运转到子粒中的物质相对减少,使氮素生理利用率和收获指数下降。本试验表明,移植密度及氮密互作效应均能显著地影响氮素利用率,随着水稻种植密度的增加,植株地上部分物质量相应增加,氮素积累量上升,提高了氮素吸收利用率。2 个早稻品种密度为 36 万穴/hm² 时,氮素吸收利用率平均分别为 34.9% 和 44.8%,比低密度 24 万穴/hm² 增 18.7% 和 13.1%,2 个晚稻品种密度在 30 万穴/hm² 时,氮素吸收利用率平均分别为 36.2% 和 45.7%,比低密度 18 万穴/hm² 增 14.6% 和 10.1%,差异均达到了显著水平。另外,由于增加氮素积累部分不能同步增加相应转运到经济产量中的物质,农学利用率、生理利用率及收获指数呈现下降趋势。以上结果表明,水稻生产中在稳定高产的基础上,应尽可能增加移植密度,提高植株氮素积累量,将施入的无机氮最大量地转化为有机氮,减少氮肥流失,并通过秸秆还田,为下茬作物提供丰富的有机氮源,提高氮

素利用率。同时,本试验的回归分析表明,早稻施氮量在 N 105.0~169.4 kg/hm² 和移植密度在 29.3~36.0 万穴/hm²、晚稻施氮量在 N 120.0~190.1 kg/hm² 和移植密度在 23.1~30.0 万穴/hm² 进行组合,氮素吸收利用率值均大于 40%,是高效节本的最佳搭配。

3.3 水稻高产高效节氮栽培技术

水稻产量构成因子包括有效穗、总粒数、结实率和千粒重等,不同品种、不同群体对产量构成因子的要求不同。徐正进等^[24]认为,降穗数、促大穗大粒是高生物产量和高产的主要原因;程在全等^[25]则认为,超高产水稻在有效穗、粒数、千粒重和干物质积累等各方面均要有优势;杨惠杰等^[21]确信高产稻应具有足够的穗数和穗粒数,等等。这些资料并没有涉及氮素利用率的问题。在当前一方面资源短缺,另一方面又因氮素大量流失的形势下,只有摸索高产节氮栽培技术,才能促进农业可持续发展。本试验结果显示,提高水稻种植密度,减少氮肥用量,在保足穗的基础上,提高穗粒数和千粒重,是既高产又高效利用氮素的水稻高效节本栽培技术。统计分析表明,在本试验的 4 个水稻品种中,早稻和晚稻移植密度以 29.3~36.0 万穴/hm² 和 23.1~30.0 万穴/hm²、氮肥 N 153.1~169.4 kg/hm² 和 N 161.5~190.1 kg/hm²,产量和氮素当季吸收利用均较高,是适宜的移植密度和施氮量。

参考文献:

- [1] FAO. World Rice Statistics[DB/OL]. <http://faostat.fao.org>, 2008.
- [2] 程式华,胡培松. 中国水稻科技发展战略[J]. 中国水稻科学, 2008, 22(3): 223-226.
Cheng S H, Hu P S. Development strategy of rice science and technology in China [J]. Chin. J. Rice Sci., 2008, 22(3): 223-226.
- [3] 钟旭华,黄农荣,郑海波. 华南双季杂交稻氮素养分消耗量及其影响因素研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 569-576.
Zhong X H, Huang N R, Zheng H B. Nitrogen consumption of double-season hybrid rice and influence factors in South China [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(4): 569-576.
- [4] Cassman K G, Dobermann A, Walters D T. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management[J]. Ambio, 2002, 31: 132-140.
- [5] Wei J Y, Shen Z, Pu S *et al.* How do nitrogen inputs to the Changjiang basin impact the Changjiang River nitrate: A temporal analysis for 1968-1997[J]. Glob. Biogeochem. Cycl., 2003, 17(4): 1091-1099.
- [6] Hao H J, Wei Y Z, Yang X E *et al.* Effects of different nitrogen fertilizer levels on Fe, Mn, Cu and Zn concentrations in shoot and grain

- quality in rice (*Oryza sativa*) [J]. *Rice Sci.*, 2007, (4): 55-60.
- [7] 叶全宝,张洪程,魏海燕,等. 不同土壤及氮肥条件下水稻氮利用效率和增产效应研究[J]. *作物学报*, 2005, 31(11): 38-44.
Ye Q B, Zhang H C, Wei H Y *et al.* Effects of nitrogen fertilizer on nitrogen use efficiency and yield of rice under different soil conditions [J]. *Acta Agron. Sin.*, 2005, 31(11): 38-44.
- [8] 樊小林,廖宗文. 控释肥料与平衡施肥和提高肥料利用率[J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(3): 219-223.
Fan X L, Liao Z W. Increasing fertilizer use efficiency by means of controlled release fertilizer (CRF) production according to theory and techniques of balanced fertilization [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 1998, 4(3): 219-223.
- [9] 万靛军,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.
Wan L J, Zhang H C, Huo Z Y *et al.* Effects of nitrogen application regimes on yield, quality, and nitrogen use efficiency of super Japonica hybrid rice [J]. *Acta Agron. Sin.*, 2007, 33(2): 175-182.
- [10] 蒋彭炎,姚长溪,任正龙,等. 论早稻稀少高产栽培法[J]. *浙江农业大学学报(农业和生命科学版)*, 1983, 9(2): 127-129.
Jiang P Y, Yao C X, Ren X L *et al.* A Discussion on the "T F S" high yield cultivation method for early rice [J]. *J. Zhejiang Univ. (Agric. Life Sci.)*, 1983, 9(2): 127-129.
- [11] 张洪程,苏祖芳,戴其根,等. 麦茬小苗单季稻改善群体质量的高产节本技术[J]. *扬州大学学报(农业和生命科学版)*, 1989, 10(2): 1-6.
Zhang H C, Su Z F, Dai Q G *et al.* A high yield and low cost cultivation through improving population quality in the single cropping rice following wheat using young seedlings [J]. *J. Yangzhou Univ. (Agric. Life Sci.)*, 1989, 10(2): 1-6.
- [12] Stoop W A, Uphoff N, Kassam A. A review of agricultural research issues raised by the system of rice intensification (SRI) from Madagascar: Opportunities for improving farming systems for resource-poor farmers [J]. *Agric. Systems*, 2002, 17(3): 249-274.
- [13] Akita K, Tanaka N. Effects of planting density and planting patterns of young seedlings transplanting on the growth and yield of rice plants [J]. *Jpn. J. Crop Sci.*, 1992, 61(1): 80-86.
- [14] 王秋菊. 节水条件下不同栽培密度对水稻产量的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2008, (3): 41-42, 59.
Wang Q J. Effects of different plant density on yield of rice under restricted irrigation [J]. *Heilongjiang Agric. Sci.*, 2008 (3): 41-42, 59.
- [15] 李崇云,张正伦,张正国. 运用回归方法研究汕优 63 优化配套[J]. *四川农业大学学报*, 1987, (4): 66-71.
Li C Y, Zhang Z L, Zhang Z G. A study on excellent model of main cultivated technique in hybrid rice ShanYou63. [J]. *J. Sichuan Agric. Univ.*, 1987, (4): 66-71.
- [16] 林玉棋. II 优航 2 号作双季晚稻栽培的适宜氮肥用量和移栽密度探讨[J]. *杂交水稻*, 2008, 23(3): 42-45.
Lin Y Q. Suitable nitrogen application rate and transplanting density of II You Hang 2 planted as late rice in the double-cropping system [J]. *Hybrid Rice*, 2008, 23(3): 42-45.
- [17] 马国辉,龙继锐,戴清明,周静. 超级杂交中稻 Y 两优 1 号最佳缓释氮肥用量和密度配置研究[J]. *杂交水稻*, 2008, 23(6): 73-77.
Ma G H, Long J R, Dai Q M, Zhou J. Studies on the optimized allocation of controlled-release nitrogen fertilizer application and planting density for medium super hybrid rice Combination Y Liangyou 1 [J]. *Hybrid Rice*, 2008, 23(6): 73-77.
- [18] 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.
Yan J, Yin B, Zhang S L *et al.* Effect of nitrogen application rate on nitrogen uptake and distribution in rice [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2008, 14(5): 835-839.
- [19] 朱兆良. 推荐氮肥适宜施用量的方法论刍议[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(1): 1-4.
Zhu Z L. On the methodology of recommendation for the application rate of chemical fertilizer nitrogen to crops [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2006, 12(1): 1-4.
- [20] 张玉屏,陈穗哲,周爱珠,等. 浙江省连作晚稻产量差异及其成因分析[J]. *中国稻米*, 2008, (4): 43-45.
Zhang Y P, Cheng S Z, Zhou A Z *et al.* Analysis of factors inducing yield gap of hybrid later rice among farmer's fields in Zhejiang Province [J]. *China Rice*, 2008, (4): 43-45.
- [21] 杨惠杰,李义珍,黄育民,等. 超高产水稻的产量构成和库源结构[J]. *福建农业学报*, 1999, 14(1): 1-5.
Yang H J, Li Y Z, Huang Y M *et al.* Yield components and structures of sink source in super high yielding rice [J]. *Fujian J. Agric. Sci.*, 1999, 14(1): 1-5.
- [22] 袁伟玲,曹湊贵,程建平. 水稻产量及构成因素的灰色关联度分析[J]. *湖北农业科学*, 2005, (2): 24-25.
Yuan W L, Cao C G, Cheng J P. Gray correlation analysis of rice yield and its compositions [J]. *Hubei Agric. Sci.*, 2005, (2): 24-25.
- [23] 吴文革,张四海,赵决建,等. 氮肥运筹模式对双季稻北缘水稻氮素吸收利用及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(5): 757-764.
Wu W G, Zhang S H, Zhao J J *et al.* Nitrogen uptake, utilization and rice yield in the north rimland of double-cropping rice region as affected by different nitrogen management strategies [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2007, 13(5): 757-764.
- [24] 徐正进,薛亚杰,车正昭. 水稻超高产品种与产量分析[J]. *辽宁农业科学*, 1992, (3): 1-4.
Xu X J, Xue Y J, Che Z Z. The varieties and yield analysis with super-high rice [J]. *Liaoning Agric. Sci.*, 1992, (3): 1-4.
- [25] 程在全,宋令荣,黄兴奇,等. 高产和超高产水稻产量差异比较及其原因探讨[J]. *西南农业学报*, 1997, 10(2): 20-25.
Cheng Z Q, Song L R, Huang X Q *et al.* Comparison of components and their main affecting factors between high yielding rice and super high yielding rice [J]. *Southwest China J. Agric. Sci.*, 1997, 10(2): 20-25.