



兰 艳, 黄 鹏, 江谷驰弘, 等. 施氮量和栽插密度对粳稻 D46 产量及氮肥利用率的影响[J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(1): 20-28.

施氮量和栽插密度对粳稻 D46 产量及氮肥利用率的影响

兰 艳¹, 黄 鹏¹, 江谷驰弘¹, 雷小波¹, 许光利¹, 丁春邦², 李 天¹

(1 四川农业大学 农学院, 四川 温江 611130; 2 四川农业大学 生命科学学院, 四川 雅安 625014)

摘要:【目的】探明成都平原区粳稻产量与氮素吸收利用效率协同高效的最优施氮量和栽插密度, 为制定高效栽培技术提供理论依据。【方法】以粳稻 D46 为供试品种, 设置 3 个施氮水平(N 150、225、300 kg · hm⁻²) 和 3 个栽插密度(2.000 × 10⁵、2.667 × 10⁵、4.000 × 10⁵ 穴 · hm⁻²), 研究施氮量和栽插密度对粳稻 D46 产量和氮素利用效率的影响。【结果】施氮量和栽插密度均显著影响粳稻 D46 产量及其构成因素($P < 0.05$)。粳稻 D46 籽粒产量随施氮量(< 225 kg · hm⁻²) 和栽插密度($< 2.667 \times 10^5$ 穴 · hm⁻²) 的增加而增加, 在施氮量 225 kg · hm⁻² 和栽插密度为 2.667 × 10⁵ 穴 · hm⁻² 时, 水稻产量最高(7 580 kg · hm⁻²) 且显著高于其他处理($P < 0.05$)。提高氮肥施用量, 氮肥农学利用率(NAE)、生理利用率(NPE)、偏生产力(NPFP)和氮素稻谷生产效率(NUEG)均显著降低($P < 0.05$), 而氮收获指数(NHI)和氮素表观利用率(NAUR)无明显变化。随着栽插密度提高, NAE、NPE 和 NPFP 均降低, 其中 NAE 和 NPE 降低程度较大, 而 NUEG、NHI 和 NAUR 变化不大。【结论】在本试验条件下, 成都平原稻作区施氮量为 225 kg · hm⁻²、栽插密度为 2.667 × 10⁵ 穴 · hm⁻² 时, 能够促进粳稻 D46 高产和提高氮素的利用效率。

关键词:水稻; 施氮量; 栽插密度; 产量; 氮肥利用率

中图分类号:S511;S352.3

文献标志码:A

文章编号:1001-411X(2016)01-0020-09

Effect of planting density and nitrogen application on yield and nitrogen uptake and utilization of japonica rice cultivar D46

LAN Yan¹, HUANG Peng¹, JIANG Guchihong¹, LEI Xiaobo¹, XU Guangli¹, DING Chunbang², LI Tian¹

(1 College of Agriculture, Sichuan Agricultural University, Wenjiang 611130, China;

2 College of Life Sciences, Sichuan Agricultural University, Yaan 625014, China)

Abstract:【Objective】To explore the optimum nitrogen (N) application rate and planting density and N use efficiency of rice production in Chengdu plain, and provide a basis for establishment of rational cultivation management.【Method】Field experiments were carried out to investigate the interactive effect of N application rates (N 150、225、300 kg · hm⁻²) and planting densities (2.000 × 10⁵、2.667 × 10⁵、4.000 × 10⁵ seedlings · hm⁻²) on rice yield and N uptake and utilization efficiency of japonica rice cultivar D46 in Chengdu plain.【Result】Both N application rate and planting density showed significant effects on the rice yield ($P < 0.05$). The rice yield increased with the increase of N application rate (< 225 kg · hm⁻²) and planting density ($< 2.667 \times 10^5$ seedlings · hm⁻²). The highest rice yield (7 580 kg · hm⁻²) was found with the N application rate of 225 kg · hm⁻² and planting density of 2.667 × 10⁵ seedlings · hm⁻², which was significantly higher than that of other treatments ($P < 0.05$). Increasing N

收稿日期:2015-04-12 优先出版时间:2015-12-07

优先出版网址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20151207.1116.008.html>

作者简介: 兰 艳(1992—), 女, 硕士研究生, E-mail: lanyansicau@163.com; 通信作者: 李 天(1962—), 男, 教授, 博士, E-mail: lit@scau.edu.cn

基金项目: 四川省科技厅科技支撑计划项目(2014NZ0103)

<http://xuebao.scau.edu.cn>

application amount could significantly decrease N agronomic efficiency (NAE), N physiological efficiency (NPE), N partial factor productivity (NPFp) and N use efficiency for grain output (NUEg) ($P < 0.05$), while harvest index (NHI) and nitrogen apparent utilization rate (NAUR) had no obvious change. NAE, NPE and NPFp decreased with the increase of planting density, especially for NAE and NPE, while the planting density had little effect on NUEg, NHI and NAUR. 【Conclusion】The combination of N 225 kg · hm⁻² and 2. 667 × 10⁵ seedlings · hm⁻² is the best for high yield and high N use efficiency of japonica rice D46 in Chengdu plain.

Key words:rice; nitrogen application rate; planting density; yield; nitrogen use efficiency

近年来,由于我国对粳米需求量快速增加,粳稻 *Oryza sativa* L. subsp. *japonica* Kato 生产得到快速发展,其面积和产量已跃居世界首位。粳稻在我国的种植区主要分布于以东北为中心的北方粳稻区、以江苏为中心的南方粳稻区和以云南为中心的云贵高原粳稻区^[1]。然而,在成都平原区由于产量低^[2]以及缺乏相应的栽培配套技术,粳稻未能大面积生产种植。朱文东等^[3]多年来致力于粳稻品种选育和推广种植,筛选出了米饭食味独特,产量高,适宜在成都平原区种植的粳稻品种 D46。鉴于籼稻与粳稻的差异性以及成都平原无现成的粳稻栽培技术可借鉴,本试验在前人研究证明施氮量和栽插密度是影响水稻产量形成和氮素吸收利用效率主要因素的基础上^[4-8],以施氮量和栽插密度为因素,研究了粳稻 D46 的配套高产栽培技术,这对于在成都平原区生态条件下推广种植粳稻、提高氮肥利用率具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 材料

供试水稻品种:D46,粳稻,该品种株型适中,产量高,品质优,稳产,全生育期为 140 d 左右。

1.2 试验设计

试验于 2013 年在四川农业大学成都校区试验农场进行。试验田 0 ~ 20 cm 土层土壤质地为沙质壤土,有机质 25. 09 g · kg⁻¹,全氮 1. 53 g · kg⁻¹,全磷 0. 38 g · kg⁻¹,全钾 14. 23 g · kg⁻¹,碱解氮 150. 20 mg · kg⁻¹,速效磷 58. 64 mg · kg⁻¹,速效钾 108. 52 mg · kg⁻¹,pH 6. 79。

采用两因素裂区试验设计,栽插密度为主区,设 2. 000 × 10⁵ (25 cm × 20 cm)、2. 667 × 10⁵ (25 cm × 15 cm) 和 4. 000 × 10⁵ 穴 · hm⁻² (25 cm × 10 cm) 3 个水平,分别记为 D1、D2、D3;施氮(N)量为副区,设置低氮(150 kg · hm⁻², N1)、中氮(225 kg · hm⁻², N2)和

高氮(300 kg · hm⁻², N3) 3 个水平,对照为无氮(N0);共 12 个处理,每个处理 3 次重复。每个小区面积 24 m²,所有试验小区四周做埂并包塑料膜,以防止串水串肥,设保护行。4 月 2 日播种,早育秧,5 月 7 日移栽,叶龄为“五叶一心”,每穴双苗。

试验氮肥为尿素[w(N) ≥ 46. 4%],作为基肥和穗肥施入,质量比为 7:3;磷肥为过磷酸钙[w(P₂O₅) 12. 0%],施用量为 120 kg · hm⁻²,全部作为基肥一次性施入;钾肥为氯化钾[w(K₂O) 60%],施用量为 180 kg · hm⁻²,作为基肥和穗肥施入,质量比为 1:1。其他田间管理措施与一般大田水稻生产相同。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 产量的测定 成熟前每小区选取 30 株调查有效穗数;取具有代表性植株 5 株进行考种,调查每穗粒数、结实率、千粒质量、理论产量等指标,然后分区收获脱粒、晒干,实测产量。

1.3.2 植株氮含量的测定 在拔节期、抽穗期和成熟期,选取各处理代表性植株 6 穴,分不同器官(茎、叶、穗)在 105 ℃ 下杀青 30 min,75 ℃ 烘干至恒质量,测定各器官的干质量。随后粉碎过筛,使用全自动凯氏定氮仪(FOSS8400)测定各部位全氮含量。

植株各器官氮素积累量 = 植株各器官干质量 × 植株各器官含氮量;

茎鞘(叶)氮素转运量 = 抽穗期茎鞘(叶)氮素积累量 - 成熟期茎鞘(叶)氮素积累量;

茎鞘(叶)氮素转运率 = [茎鞘(叶)氮素转运量/抽穗期茎鞘(叶)氮素积累量] × 100% ;

茎鞘(叶)的氮贡献率 = [茎鞘(叶)氮素转运量/成熟期籽粒含氮量] × 100% ;

氮肥农学利用率(NAE) = (施氮区产量 - 空白区产量)/施氮量;

氮肥生理利用率(NPE) = (施氮区产量 - 空白区产量)/(施氮区植株氮素积累总量 - 空白区植株氮素积累总量);

氮肥偏生产力(NPFP) = 施氮区产量/施氮量;
氮收获指数(NHI) = 成熟期籽粒中氮素积累量/植株氮素积累总量 × 100%;
氮素籽粒生产效率(NUEG) = 成熟期籽粒产量/成熟期植株氮素积累总量;
氮表观利用率(NAUR) = [(施氮区植株吸氮量 - 无氮区植株吸氮量)/施氮量] × 100%。

1.4 统计分析

所有数据利用 SPSS 19.0 (SPSS Institute Inc., Chicago, USA) 进行统计分析,结果均为 3 次重复的平均值,利用最小显著差数法(LSD)进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 施氮量及栽插密度对产量及产量构成因素的影响

表 1 可见,增施氮肥能显著地提高粳稻 D46 籽粒产量,N1、N2 和 N3 处理的籽粒产量分别为 6 720、

7 330 和 6 990 kg · hm⁻²,与不施氮肥 N0 (5 860 kg · hm⁻²) 相比,分别增产 14.61%、25.01% 和 19.27%,差异达显著水平($P < 0.05$)。N2 和 N3 处理间的籽粒产量差异不显著($P > 0.05$),这表明施氮量超过 225 kg · hm⁻²时,继续增加氮肥用量对产量影响不明显。在本试验栽插密度范围内,粳稻 D46 籽粒产量随栽插密度增加而增加,D2 处理的籽粒产量(6 870 kg · hm⁻²)比 D1 (6 640 kg · hm⁻²)增加了 3.41%,差异不显著($P > 0.05$);但当栽插密度增加到 2.667 × 10⁵ 穴 · hm⁻²时,继续增加栽插密度,籽粒产量反而下降。本研究结果显示,粳稻 D46 籽粒产量以 D2N2 处理最高(7 580 kg · hm⁻²),即粳稻 D46 以施氮量 225 kg · hm⁻²和栽插密度 2.667 × 10⁵ 穴 · hm⁻²的处理产量最优。方差分析的结果(表 2)表明,施氮量、栽插密度以及两者间的互作对粳稻 D46 籽粒产量的影响均达到显著或极显著水平。

表 1 施氮量和栽插密度对粳稻 D46 产量及其构成因素的影响¹⁾

Tab.1 Effects of N application amount and planting density on grain yield and its components of japonica rice cultivar D46

处理	有效穗数/(×10 ⁵ 条 · hm ⁻²)				每穗粒数				结实率/%			
	D1	D2	D3	平均	D1	D2	D3	平均	D1	D2	D3	平均
N0	21.02	21.84	23.80	22.22c	120.10	139.77	120.72	126.86a	89.68	83.16	82.11	84.98a
N1	26.22	30.48	30.84	29.18b	130.90	130.06	115.84	125.60a	79.64	82.00	76.63	79.42a
N2	30.54	31.76	31.24	31.18ab	150.93	143.57	131.97	142.16a	81.75	85.20	83.92	83.62a
N3	30.62	34.32	33.32	32.75a	136.70	115.31	121.62	124.54a	84.04	87.76	80.44	84.08a
平均	27.10b	29.60a	29.80a		135.00a	137.80a	122.84b		83.78a	84.53a	80.78b	

处理	千粒质量/g				产量/(kg · hm ⁻²)			
	D1	D2	D3	平均	D1	D2	D3	平均
N0	25.55	26.71	26.20	26.15a	5 560	6 000	6 030	5 860c
N1	24.84	23.78	25.20	24.60b	6 630	6 750	6 780	6 720b
N2	23.09	23.78	22.80	23.22c	7 240	7 580	7 170	7 330a
N3	22.56	22.84	22.70	22.70c	7 140	7 150	6 690	6 990ab
平均	24.01a	24.30a	24.00a		6 640a	6 870a	6 670a	

1) N0、N1、N2、N3 表示施氮量分别为 0、150、225、300 kg · hm⁻², D1、D2、D3 表示栽插密度分别为 2.000 × 10⁵、2.667 × 10⁵、4.000 × 10⁵ 穴 · hm⁻²; 同列或同行平均值后凡是有有一个相同小写字母表示差异不显著($P > 0.05$, LSD 法)。

表 2 施氮量和栽插密度对粳稻 D46 产量及其构成因素的影响的方差分析¹⁾

Tab.2 Variance analysis of effects of N application amount and planting density on grain yield and its components of japonica rice cultivar D46

处理	有效穗数	每穗粒数	结实率	千粒质量	产量
N	967.03 **	120.96 **	30.28 **	221.76 **	78.31 **
D	3.99 *	96.02 **	26.14 **	1.46	3.02 *
N × D	18.07 **	47.77 **	13.62 **	8.66 **	2.88 *

1) N:施氮量,D:栽插密度;* 和 ** 分别表示 F 值达显著($P < 0.05$)和极显著($P < 0.01$)水平。

从表 1 可知,有效穗数随着施氮量的增加而增加,但 N2 和 N3 处理间差异不明显($P > 0.05$),表明在田间生产中施氮量为 225 kg · hm⁻²就可保证高产的足够有效穗数;多重比较结果显示,施氮量对每穗粒数和结实率影响均未达到显著水平($P > 0.05$),说明粳稻 D46 的每穗粒数和结实率对氮肥响应不敏感;施氮量对千粒质量影响达到显著水平($P < 0.05$),且随着氮肥用量的增加而下降。有效穗数随栽插密度增加而增加,但在中密度 D2 和高密度 D3 处理间差异不显著;而每穗粒数、结实率和千粒质量

在高栽插密度时均呈下降的趋势。方差分析(表 2)表明除栽插密度对千粒质量的影响不显著外,施氮水平、栽插密度以及两者间的互作对粳稻 D46 产量构成因素的影响均达到显著或极显著水平。

2.2 施氮量及栽插密度对氮素吸收利用的影响

2.2.1 不同生育期内粳稻 D46 氮素积累特性 随生育期进程推进,水稻植株氮素积累量整体上呈逐渐递增趋势。拔节期之后氮素积累量表现为 D2 > D1 > D3,这表明适度的栽插密度(2.667×10^5 穴·hm⁻²)有利于水稻植株的氮素积累(表 3)。抽穗期至成熟期互作影响除外,施氮水平、栽插密度以及两者间的互作对粳稻 D46 各生育期氮素积累量和总量均达到显著水平而且栽插密度对各生育阶段水

稻氮素积累量影响程度差异较大,以幼苗期至拔节期最大($F = 38.65$),抽穗期至成熟期($F = 21.49$)及拔节期至抽穗期($F = 12.67$)次之(表 4)。说明幼苗期至拔节期对氮素积累比较敏感,此时追施氮肥可能提高其氮素积累量。

粳稻 D46 各生育阶段氮素积累量和总量随着施氮量增加而增加,均表现为 N3 > N2 > N1 > N0,且在中施氮量下(≤ 225 kg·hm⁻²)增加均达到显著差异水平($P < 0.05$)。粳稻 D46 幼苗期至拔节期氮素积累量和整个生育期总量均以 D1N3 组合最大(表 3)。施氮量、栽插密度以及两者之间的互作对粳稻 46 不同生育阶段氮素积累的影响绝大多数均达显著或极显著水平(表 4)。

表 3 施氮量和栽插密度对粳稻 D46 不同生育阶段氮素(N)积累量的影响¹⁾

Tab.3 Effects of N application amount and planting density on N accumulation of japonica rice cultivar D46 at different growth stages

kg·hm⁻²

处理	幼苗期至拔节期				拔节期至抽穗期			
	D1	D2	D3	平均	D1	D2	D3	平均
N0	47.21	37.15	33.22	39.19c	60.50	59.77	52.61	57.63d
N1	88.15	91.71	90.86	90.24b	89.21	104.49	81.65	91.78c
N2	127.13	125.41	123.75	125.43a	129.08	128.31	119.00	125.46b
N3	143.20	117.57	124.84	128.54a	140.19	134.66	141.30	138.72a
平均	101.42a	92.96b	93.17b		104.75a	106.81a	98.64a	

处理	抽穗期至成熟期				总量			
	D1	D2	D3	平均	D1	D2	D3	平均
N0	76.45	87.92	74.86	79.74c	184.15	184.84	160.69	176.56c
N1	117.22	131.03	122.59	123.61b	294.57	327.23	295.10	305.63b
N2	156.56	155.59	143.15	151.77a	412.77	409.31	385.89	402.66a
N3	167.08	170.38	156.55	164.67a	450.47	422.61	422.69	431.92a
平均	129.33ab	136.23a	124.29b		335.49a	336.00a	316.09a	

1) N0、N1、N2、N3 表示施氮量分别为 0、150、225、300 kg·hm⁻², D1、D2、D3 表示栽插密度分别为 2.000×10^5 、 2.667×10^5 、 4.000×10^5 穴·hm⁻²; 同列或同行平均值后凡是有有一个相同小写字母表示差异不显著($P > 0.05$, LSD 法)。

表 4 施氮量和栽插密度对粳稻 D46 不同生育阶段氮素积累量影响的方差分析¹⁾

Tab.4 Variance analysis of effects of N application amount and planting density on N accumulation of japonica rice cultivar D46 at different growth stages

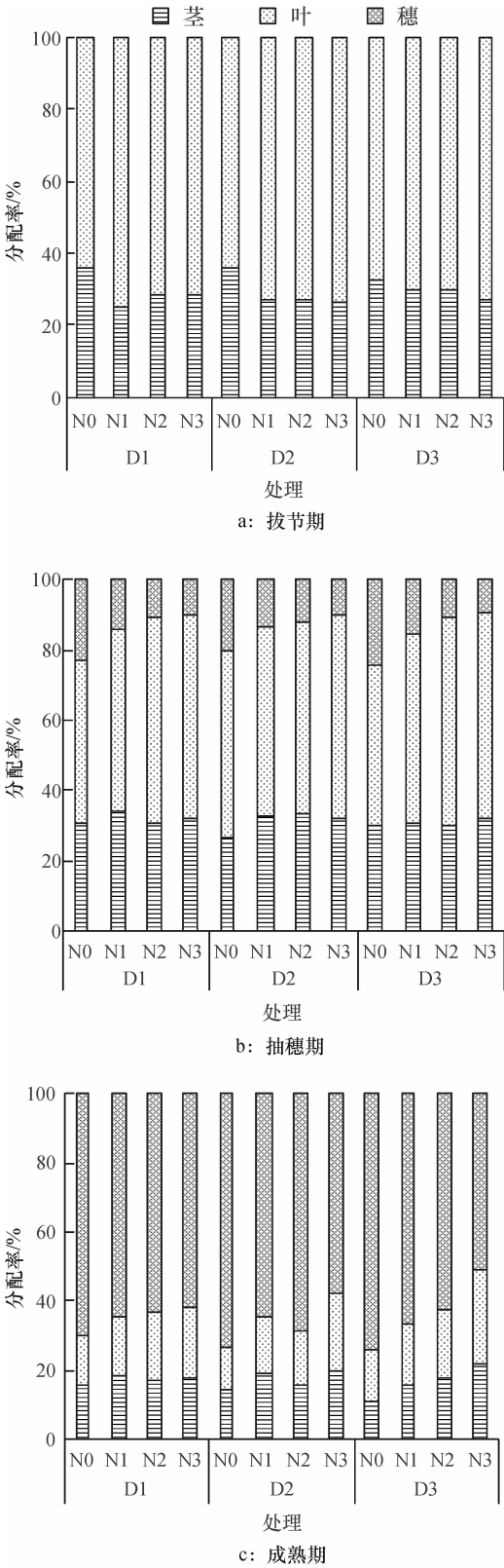
处理	幼苗期 至拔节期	拔节期 至抽穗期	抽穗期 至成熟期	总量
N	1 072.58 **	1 105.03 **	445.58 **	1 291.55 **
D	38.65 **	12.67 *	21.49 **	42.76 **
N × D	9.63 **	11.73 **	2.23	5.36 **

1) N:施氮量,D:栽插密度;* 和 ** 分别表示 F 值达显著($P < 0.05$)和极显著($P < 0.01$)水平。

2.2.2 各生育期粳稻 D46 不同器官氮素分配特性 在不同施氮量下,不同生育期茎、叶和穗的氮素分

配率略有差异(图 1)。拔节期,不施氮处理下(N0)粳稻 D46 的茎氮素累积显著高于其他施氮处理($P < 0.05$);而茎和叶片的氮素分配在各施氮处理间差异不明显。在抽穗期,随着氮肥用量增加,叶片氮素分配率逐渐增加,而穗部则明显下降。成熟期,氮素主要分配在穗部且随氮肥用量增加而下降。因此,通过协调栽插密度与施氮量之间的关系,可以改善水稻各器官氮素的分配,低氮处理利于氮素向穗部分配。

不同栽插密度下,粳稻 D46 茎、叶和穗等器官在不同生育期氮素分配特性表现各异(图 1)。在拔节期各栽插密度下,均以不施氮处理的茎鞘氮素含量最大,相反,其叶片氮素则最低。抽穗期,茎鞘和叶



N0、N1、N2、N3 表示施氮量分别为 0、150、225、300 kg · hm⁻²，D1、D2、D3 表示栽插密度分别为 2.000 × 10⁵、2.667 × 10⁵、4.000 × 10⁵ 穴 · hm⁻²

图 1 施氮量和栽插密度对梗稻 D46 植株各生育期器官氮素分配的影响

Fig. 1 Effects of N application amount and planting density on N distribution in organs of japonica rice cultivar D46 at different growth stages

片氮素积累量下降而逐步向穗转移;各器官氮素分配随栽插密度增加无显著变化($P > 0.05$)。经过灌浆结实,茎鞘和叶片氮素积累量迅速转移至穗部,而茎鞘和叶片氮素积累量明显下降;在相同栽插度下,不施氮处理的茎鞘和叶片氮素分配率均显著低于施氮处理($P < 0.05$);高密度(4.000×10^5 穴 · hm⁻²)时茎鞘和叶片氮素分配率均随着施氮量增加而增加,而穗部的氮素分配依次下降。可见,栽插密度对水稻各器官氮素积累分配影响不明显。

2.2.3 抽穗期至成熟期梗稻 D46 各器官氮素转运特性 梗稻 D46 抽穗期至成熟期叶片氮素转运量和转运率明显高于茎鞘(表 5)。施氮处理下,随氮肥用量提高各营养器官的氮素转移量以及转运率均呈现先增加后降低的趋势;且当氮肥用量大于 225 kg · hm⁻²时,叶片和茎鞘中氮素转移总量、氮素转运的贡献率及穗部氮素增加量均呈不同程度的降低,特别是在中、高密度(D2、D3)时。不同栽插密度下,D2 处理叶和茎鞘氮素运转量分别比 D1、D3 高 4.3%、20.6% 和 5.0%、22.1%,穗氮素增加量分别高 8.4%、17.5%;而叶片氮素运转率和氮素贡献率 D2 处理高于 D1 和 D3 处理。以上结果表明,不施氮肥以及氮肥施用量过高均不利于梗稻 D46 氮素向籽粒的转运,只有合理的氮肥运筹与栽培密度调控才能够提高茎鞘和叶片氮素转运量及转运率,促进穗部氮素的增加,表明适宜的氮肥用量和栽插密度提高“库”容量,促进了“源”向“库”氮素的转运量,提高氮转运率,这可能与水稻拔节期至抽穗期氮素的吸收密切相关。而抽穗期叶和茎鞘氮素分配率较高(图 1)限制了氮素运转率的提高。施氮量、栽插密度以及两者之间的互作对叶、茎鞘的氮素运转量、转运率、贡献率以及成熟期穗部氮素增加量均存在显著或极显著影响。

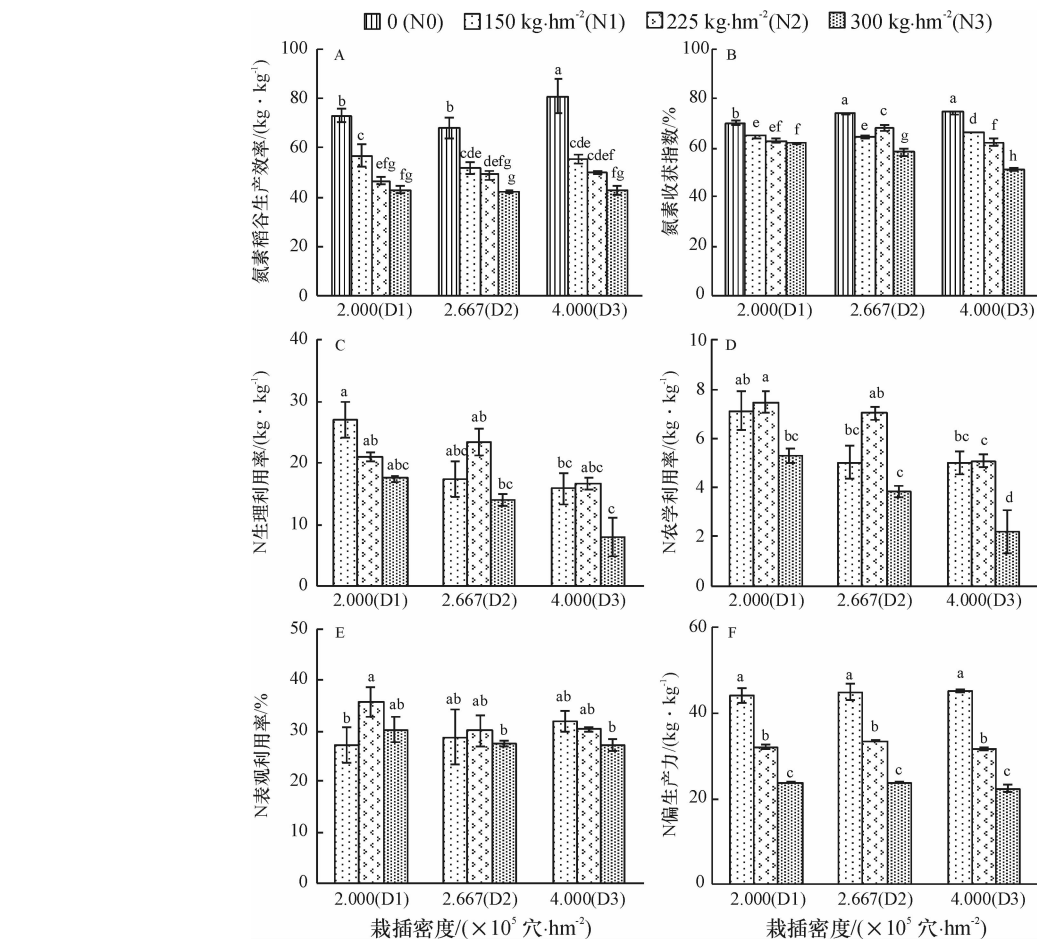
2.2.4 对氮素利用效率的影响 不同施氮量和栽插密度能显著影响梗稻 D46 氮素生产和利用效率(图 2)。不同施氮水平下,氮素稻谷生产效率、氮收获指数和氮肥偏生产力均随着施氮量增加而降低,而 N 农学利用率、生理利用率和表观利用率整体上表现为中等施氮量(225 kg · hm⁻²)最大。由于高氮量(>225 kg · hm⁻²)促进了水稻植株对氮素吸收,氮素累积总量较大(表 3),故氮素稻谷生产效率、氮收获指数和氮肥偏生产力相对较低。不同栽插密度下,氮收获指数大致相当;氮素表观利用率为 D1 > D3 > D2;氮素稻谷生产效率 D3 > D1 > D2;N 农学利用率和生理利用率随着栽插密度增加而降低,氮肥偏生产力 D2 > D1 > D3。

表 5 施氮量和栽插密度对梗稻 D46 抽穗期至成熟期各器官氮素转运的影响¹⁾

Tab.5 Effects of N application amount and planting density on N translocation characteristics in organs of japonica rice cultivar D46 from heading to maturity stage

处理	氮转运量/(kg·hm ⁻²)		氮转运率/%		氮贡献率/%		穗氮素增加量/ (kg·hm ⁻²)
	叶	茎鞘	叶	茎鞘	叶	茎鞘	
D1N0	16.92±0.47 f	6.78±0.13 fg	60.09±3.02 bc	36.66±1.29 b	22.18±1.53 c	12.70±0.61 bc	39.65±2.46 e
D1N1	26.15±3.17 d	8.72±0.81 de	56.36±5.71 cde	29.00±2.26 cd	22.42±3.70 c	11.56±1.47 bc	62.89±3.32 c
D1N2	45.66±1.19 a	11.70±0.45 c	59.88±1.33 bc	30.00±0.05 cd	29.18±0.49 a	11.87±0.09 bc	84.84±1.90 a
D1N3	46.25±3.34 a	15.27±1.06 b	57.87±3.41 bcd	33.60±1.48 bc	27.78±3.25 ab	14.85±1.78 b	88.42±6.08 a
D2N0	21.73±0.16 e	2.98±0.14 h	67.41±1.58 a	19.03±1.05 f	24.73±0.63 abc	4.60±0.34 d	52.86±1.40 d
D2N1	34.30±3.59 c	9.24±0.63 de	61.18±0.28 bc	26.91±1.04 de	26.13±1.12 abc	10.97±0.01 bc	70.08±5.75 bc
D2N2	44.56±1.10 ab	18.53±1.52 a	63.85±0.01 ab	43.27±2.85 a	28.69±1.95 ab	17.57±2.52 a	90.37±6.65 a
D2N3	40.25±2.11 b	9.68±0.87 cd	52.10±3.26 def	22.11±1.16 ef	23.63±1.49 bc	9.76±1.05 c	85.65±1.15 a
D3N0	13.35±1.02 f	7.38±1.14 ef	55.05±2.33 cde	46.86±4.80 a	17.93±2.35 d	13.39±2.92 bc	42.98±3.27 e
D3N1	22.23±3.08 e	5.46±0.69 g	50.40±3.61 ef	21.85±1.29 ef	18.10±2.05 d	6.70±0.66 d	68.63±0.96 bc
D3N2	41.12±1.82 b	10.75±0.44 cd	58.88±0.24 bc	29.98±0.25 cd	28.73±1.41 ab	12.05±0.81 bc	76.03±2.83 b
D3N3	40.12±0.90 b	11.37±1.78 c	48.81±1.34 f	24.99±3.96 de	25.63±0.57 abc	14.16±2.34 b	66.73±1.63 c
D	30.70 **	27.60 **	34.55 **	42.42 **	34.47 **	25.04 **	92.45 **
N	314.91 **	180.23 **	15.93 **	36.45 **	23.53 **	17.23 **	182.99 **
D×N	7.57 **	47.53 **	3.69 *	55.19 **	4.67 **	21.46 **	859.00 **

1) N0、N1、N2、N3 表示施氮量分别为 0、150、225、300 kg·hm⁻²，D1、D2、D3 表示栽插密度分别为 2.000×10⁵、2.667×10⁵、4.000×10⁵ 穴·hm⁻²，同一列数据后凡是有一个相同小写字母者表示差异不显著(P>0.05, LSD 法); D 为施氮量、N 为栽插密度、D×N 为施氮量与栽插密度的交互, 数据后标注“*”、“**”分别表示 F 值达 0.05、0.01 的显著水平。



各图中相同栽插密度柱子上凡是有一个相同小写字母者,表示差异不显著(P>0.05, LSD 法)。

图 2 施氮量和栽插密度及对梗稻 D46 氮肥吸收利用的影响

Fig.2 Effects of N application amount and planting density on N absorption and utilization of japonica rice cultivar D46

2.2.5 粳稻 D46 产量及其构成因素和氮素吸收、运转、分配及氮效率的相关性分析 粳稻 D46 产量与有效穗数和千粒质量呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 与每穗粒数呈显著正相关关系 ($P < 0.05$); 有效穗数与千粒质量呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$) (表 6)。

表 6 粳稻 D46 产量与产量影响因子的相关性¹⁾
Tab.6 Correlation of yield and yield components of japonica rice cultivar D46

性状	有效穗数	每穗粒数	结实率	千粒质量	产量
有效穗数	1.000				
每穗粒数	-0.007	1.000			
结实率	-0.172	-0.018	1.000		
千粒质量	0.816 **	0.202	0.089	1.000	
产量	0.822 **	0.369 *	-0.166	0.762 **	1.000

1) * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关。

表 7 的结果显示,各生育期的氮素积累量、叶和

茎鞘氮素运转量与有效穗、每穗粒数、结实率、千粒质量、产量呈显著或极显著正相关关系;叶和茎鞘的氮素分配率与有效穗、结实率呈显著或极显著负相关关系,与产量呈极显著正相关;氮稻谷生产效率与有效穗和每穗粒数呈显著负相关,与千粒质量极呈显著正相关;氮生理利用率与千粒质量呈显著正相关;氮偏生产力与每穗粒数、结实率、产量呈显著负相关,与千粒质量呈极显著正相关;氮表观利用率与每穗粒数呈显著正相关,与千粒质量呈显著负相关。可见,水稻植株体内氮素积累及转运分配与产量关系密切。水稻产量形成主要是通过其生育期内氮素积累与运转影响有效穗、每穗粒数、结实率以及千粒质量来实现的。不同生育期氮素吸收以及叶、茎鞘氮素转运对水稻有效穗数、穗粒数、产量起正效应,叶、茎鞘和穗氮素分配却表现为负效应。氮稻谷生产效率、氮素偏生产力和氮表观利用率均能很好地响应施氮对产量和植株氮素吸收利用的影响。

表 7 粳稻 D46 氮素吸收分配利用与产量性状间的相关性¹⁾
Tab.7 Correlation between yield components and N accumulation, translocation, distribution and use efficiency of japonica rice cultivar D46

性状	生育期或部位	有效穗数	每穗粒数	结实率	千粒质量	产量
氮素积累	拔节期	0.582 *	0.633 *	0.659 **	0.885 **	0.729 **
	抽穗期	0.745 **	0.617 *	0.695 **	0.894 **	0.763 **
	成熟期	0.679 **	0.663 **	0.630 *	0.963 **	0.740 **
氮素运转量	叶	0.792 **	0.670 **	0.711 **	0.822 **	0.813 **
	茎鞘	0.663 **	0.443	0.835 **	0.577 *	0.843 **
氮素分配	叶	-0.739 **	-0.442	-0.617 *	0.487	0.707 **
	茎鞘	-0.748 **	-0.539 *	-0.596 *	0.510	0.746 **
	穗	-0.236	-0.174	0.174	0.162	0.191
氮收获指数		0.120	0.066	0.314	0.220	0.387
氮稻谷生产效率		-0.596 *	-0.558 *	-0.514	0.938 **	0.474
氮农学利用率		-0.092	0.409	-0.189	0.175	0.469
氮生理利用率		-0.315	-0.070	-0.213	0.522 *	0.187
氮偏生产力		-0.474	-0.543 *	-0.601 *	0.818 **	-0.574 *
氮表观利用率		0.321	0.719 **	-0.030	-0.586 *	0.393

1) * 和 ** 分别表示 0.05 和 0.01 水平显著相关。

3 讨论与结论

3.1 施氮量及栽插密度对水稻产量形成的影响

施氮量和栽插密度是影响水稻产量的决定性因素。大量的研究表明,适宜的种植密度、适量的施氮量不仅能够显著地提高水稻产量,还能够提高肥料利用效率。鲁艳红等^[9]研究指出,当氮肥施用量为 180 kg · hm⁻² 时, 粳稻 皖 153 产量最高 (9 259.5 kg · hm⁻²), 比不施肥增产 26.8%; 周江明等^[10]研究指出早稻施氮 105 kg · hm⁻²、晚稻施氮 165 kg · hm⁻²

是水稻施氮的技术拐点。林洪鑫等^[5]提出超级早稻中早 22 发挥其高产潜力是氮肥施用量为 195 kg · hm⁻²与种植密度 3.00 × 10⁵ 蔸 · hm⁻² 搭配;雷振山等^[11]则认为 II 优 838 在高密度 (2.04 × 10⁵ 穴 · hm⁻²) 下的产量比低密度 (1.08 × 10⁵ 穴 · hm⁻²) 高出 13 ~ 424 kg · hm⁻², 而冈优 1237 则高出 588 ~ 2 579 kg · hm⁻²;陈海飞等^[12]研究指出, 低产田水稻栽培密度为 2.1 × 10⁵ 穴 · hm⁻²、施氮量为 180 kg · hm⁻²可获得较高水稻产量和氮肥利用效率。综上所述,不同水稻品种的最适栽插密度和施

氮量不尽相同,水稻产量随种植密度或者施氮量增加而提高,但增产效率逐渐下降。一定范围内施氮量、种植密度与产量呈抛物线关系^[9, 12-14]。本研究中,水稻产量与有效穗数之间呈极显著正相关关系,这表明施氮量和栽插密度提高水稻产量是通过增加有效穗数实现的。这与徐春梅等^[15]的研究结果一致。在施氮量 $< 225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,提高栽插密度显著提升水稻籽粒产量,这是由于栽插密度的提高,增加了水稻群体茎蘖数量和干物质量的积累,而干物质量是保障高产的基础^[16]。但当进一步提高氮肥用量和栽插密度时,水稻群体之间的竞争加强,无效分蘖数增加,结实率降低,从而导致产量增加不显著。当氮肥用量从 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加至 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,水稻产量下降,这说明通过高施氮量来提高水稻产量是不现实的。本试验条件下,粳稻 D46 在施氮量为 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、栽插密度为 $2.667 \times 10^5 \text{ 穴} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时的产量是最高的,达到 $7\,580 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

3.2 施氮量及栽插密度对水稻氮素利用率的影响

我国稻田单季氮肥吸收利用效率在 30% 左右^[10, 17],大部分氮素未被作物吸收利用而残留在土壤或者进入到环境中。面对氮肥吸收利用效率低下、农业面源污染严重以及农业生产成本投入高等问题,已有研究采用高效水稻品种^[8, 18-21]、水肥耦合调控技术^[22-24]以及精准高效的田间管理栽培技术^[25-28]等措施来提高氮素利用率和减少氮素淋溶损失。本研究结果显示,减少氮肥施用量能够显著提升其利用效率,这与前人研究结果^[9, 29-30]相符。粳稻 D46 施氮量从 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加至 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,氮素生理利用率、农学利用率和偏生产力分别从 20.07% 、 5.71% 、 $44.79 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低至 13.16% 、 3.76% 、 $23.31 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别降低了 34.43% 、 34.15% 和 47.96% 。这是由于施氮量增加,部分氮素未被植株吸收利用而随着田间灌溉水流失或者渗漏至地下,从而降低了氮肥吸收利用效率;另一方面外源氮肥用量增加导致水稻植株体内氮素积累过剩而发生贪青晚熟,使运输到籽粒部分的物质相对较少,导致氮素的收获指数和生理利用率下降。以上结果表明,在保证水稻稳产高产的前提下,适度地增加栽插密度,提高水稻植株体内氮素累积量,以减少氮素的损失,并结合水稻秸秆还田等废弃物循环利用途径,提高氮肥利用效率。在本研究试验条件下,施氮量 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、栽插密度 $2.667 \times 10^5 \text{ 穴} \cdot \text{hm}^{-2}$ 是粳稻 D46 的高效节本栽培技术组合。

3.3 结论

本试验条件下,施氮量和栽插密度对产量有显

著影响,且存在交互效应,产量提高主要是通过增加有效穗数实现的。施氮量 $< 225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,提高栽插密度能显著提升水稻籽粒产量;施氮量 $> 225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,继续增施氮肥水稻产量下降,这说明通过提高施氮量来提高水稻产量是不现实的。因此,在中氮水平 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,适当提高移栽密度对提高产量有重要作用。

水稻氮素吸收、运转、分配及氮效率受施氮量和栽插密度及其互作的影响。随着施氮量的增加,水稻植株体内氮素累积量增加,但增加的氮素积累部分不能同步增加相应的水稻籽粒产量,导致氮素生理利用率、农学利用率和偏生产力分别降低了 34.43% 、 34.15% 和 47.96% 。在相同施氮量条件下,随栽插密度增加水稻氮素累积量呈降低趋势,因此,选择适宜栽插密度有利于提高水稻氮素吸收利用效率。综合考虑水稻产量、氮素吸收利用效率以及环境污染等因子,成都平原地区粳稻 D46 的高效节本栽培技术组合为施氮量 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、栽插密度 $2.667 \times 10^5 \text{ 穴} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

参考文献:

[1] 陈温福,潘文博,徐正进. 我国粳稻生产现状及发展趋势[J]. 沈阳农业大学学报, 2006, 37(6): 801-805.

[2] 李旭毅,池忠志,姜心禄,等. 成都平原两熟区粳稻品种籽粒灌浆特性[J]. 中国农业科学, 2012, 45(16): 3256-3264.

[3] 朱文东,江微. 引进稻种资源农艺与品质特异性分析[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(31): 15183-15185.

[4] 殷春渊,魏海燕,张庆,等. 不同氮肥水平下中熟粳稻和粳稻产量、氮素吸收利用差异及相互关系[J]. 作物学报, 2009, 35(2): 348-355.

[5] 林洪鑫,潘晓华,石庆华,等. 施氮量与栽插密度对超级早稻中早 22 产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 22-28.

[6] 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.

[7] DENG F, WANG L, REN W, et al. Optimized nitrogen managements and polyaspartic acid urea improved dry matter production and yield of indica hybrid rice[J]. Soil Till Res, 2015, 145: 1-9.

[8] 黄永兰,黎毛毛,芦明,等. 氮高效水稻种质资源筛选及相关特性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2015, 16(1): 87-93.

[9] 鲁艳红,廖育林,汤海涛,等. 不同施氮量对水稻产量、氮素吸收及利用效率的影响[J]. 农业现代化研究, 2010, 31(4): 479-483.

[10] 周江明,赵琳,董越勇,等. 氮肥和栽植密度对水稻产量

- 及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 274-281.
- [11] 雷振山,肖荣英,卫云飞,等. 豫南丘陵区施氮与密度对水稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(14): 3247-3250.
- [12] 陈海飞,冯洋,蔡红梅,等. 氮肥与移栽密度互作对低产田水稻群体结构及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1319-1328.
- [13] 冯洋,陈海飞,胡孝明,等. 高、中、低产田水稻适宜施氮量和氮肥利用率的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(1): 7-16.
- [14] 樊红柱,曾祥忠,张冀,等. 移栽密度与供氮水平对水稻产量、氮素利用影响[J]. 西南农业学报, 2010, 23(4): 1137-1141.
- [15] 徐春梅,周昌南,郑根深,等. 施氮量和栽培密度对超级早稻不同器官氮素积累与转运及其吸收利用率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2011(1): 15-20.
- [16] 龚金龙,张洪程,李杰,等. 水稻超高产栽培模式及系统理论的研究进展[J]. 中国水稻科学, 2010, 24(4): 417-424.
- [17] 巨晓棠,谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783-795.
- [18] 叶利庭,宋文静,吕华军,等. 不同氮效率水稻生育后期氮素积累转运特征[J]. 土壤学报, 2010, 47(2): 303-310.
- [19] 戢林,杨欢,李廷轩,等. 氮高效利用基因型水稻干物质生产和氮素积累特性[J]. 草业学报, 2014, 23(6): 327-335.
- [20] 冯洋,陈海飞,胡孝明,等. 我国南方主推水稻品种氮效率筛选及评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1051-1062.
- [21] 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 Res, 2008, 107(2): 137-146.
- [22] 徐优,王学华. 水肥耦合及其对水稻生长与N素利用效率的影响研究进展[J]. 中国农学通报, 2014, 30(24): 17-22.
- [23] 孙永健,马均,孙园园,等. 水氮管理模式对杂交水稻冈优527群体质量和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(10): 2047-2061.
- [24] SUN Y, MA J, SUN Y, et al. The effects of different water and nitrogen managements on yield and nitrogen use efficiency in hybrid rice of China[J]. Field Crops Res, 2012, 127: 85-98.
- [25] 梁天锋,徐世宏,刘开强,等. 耕作方式对还田稻草氮素释放及水稻氮素利用的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(10): 3564-3570.
- [26] 梁天锋,徐世宏,刘开强,等. 栽培方式对水稻氮素吸收利用与分配特性影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 20-26.
- [27] 孙永健,杨志远,孙园园,等. 成都平原两熟区水氮管理模式与磷钾肥配施对杂交稻冈优725产量及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(1): 17-28.
- [28] 严奉君,孙永健,马均,等. 不同土壤肥力条件下麦秆还田与氮肥运筹对杂交稻氮素利用、产量及米质的影响[J]. 中国水稻科学, 2015, 29(1): 56-64.
- [29] 潘圣刚,黄胜奇,翟晶,等. 氮肥用量与运筹对水稻氮素吸收转运及产量的影响[J]. 土壤, 2012, 44(1): 23-29.
- [30] 孙琴,彭萍,易镇邪,等. 施氮量对超级早稻产量形成与氮利用效率的影响[J]. 作物研究, 2013, 27(1): 9-14.

【责任编辑 庄 延,周志红】