

不同氮肥群体最高生产力类型粳稻品种的氮素吸收利用特性

李敏^{1,2} 张洪程^{1,*} 马群¹ 杨雄¹ 李国业¹ 魏海燕¹ 戴其根¹ 霍中洋¹ 许轲¹

(¹扬州大学 农业部长江流域稻作技术创新中心/江苏省作物遗传生理重点实验室, 江苏 扬州 225009; ²贵州省水稻研究所, 贵州 贵阳 550006; * 通讯联系人, E-mail: hc Zhang@yzu.edu.cn)

Nitrogen Absorption and Utilization Characteristics of japonica Rice Cultivars with Different Productivities at Their Optimum Nitrogen Levels

LI Min^{1,2}, ZHANG Hong-cheng^{1,*}, MA Qun¹, YANG Xiong¹, LI Guo-ye¹, WEI Hai-yan¹, DAI Qi-gen¹, HUO Zhong-yang¹, XU Ke¹

(¹Innovation Center of Rice Technology in Yangtze River Valley, Ministry of Agriculture/Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; ²Rice Research Institute of Guizhou Province, Guiyang 550006, China; * Corresponding author, E-mail: hc Zhang@yzu.edu.cn)

LI Min, ZHANG Hongcheng, MA Qun, et al. Nitrogen absorption and utilization characteristics of japonica rice cultivars with different productivities at their optimum nitrogen levels. *Chin J Rice Sci*, 2012, 26(2): 197-204.

Abstract: Based on the concept of the highest population productivity, the yield components and the characteristics of nitrogen absorption and utilization of three types of rice cultivars with low, medium and high level of the highest population productivities were investigated at their optimum nitrogen levels. With the increase of the highest population productivity, the total spikelet number increased remarkably, while the seed setting rate and 1000-grain weight showed no significant differences. The nitrogen accumulation at *N-n*, heading and maturing stages increased correspondingly as the productivities increased, whereas no significant difference was found at elongation. In order to analyze the nitrogen absorption progress of rice genotypes with different productivities, the whole growth duration was divided into four phases, i. e., from transplanting to critical stage of productive tillering, from critical stage of productive tillering to elongation, from elongation to heading, and from heading to maturing. Results indicated that, the nitrogen accumulation during each period increased typically as the productivity increased during all growth phases except the phase from critical stage of productive tillering to elongation. Compared with low productivity genotype, the nitrogen translocation amount and nitrogen translocation rate of medium-productivity genotype increased evidently. However, there was negligible difference between medium and high productivity types. Based on the results above, it was concluded that rice cultivars with the highest population productivity were featured by rapid nitrogen absorption before *N-n*, slow nitrogen absorption from *N-n* to elongation, steady nitrogen absorption from elongation to heading, and massive nitrogen absorption from heading to maturing; and a large but not excessive amount of transferred nitrogen from stems and leaves after heading.

Key words: rice; nitrogen-fertilizer; productivity; absorption; utilization

李敏, 张洪程, 马群, 等. 不同氮肥群体最高生产力类型粳稻品种的氮素吸收利用特性. *中国水稻科学*, 2012, 26(2): 197-204.

摘要: 以氮肥群体最高生产力的定义为基础, 在各基因型最适氮肥水平下, 研究了低、中、高 3 种氮肥群体最高生产力类型粳稻品种的产量结构及其氮素吸收利用特性。结果表明, 随着氮肥群体最高生产力递增, 总颖花量不断增加, 而结实率和千粒重变化不明显。随着氮肥群体最高生产力递增, 够苗期、抽穗期和成熟期的氮素积累量逐渐增加, 而拔节期无显著差异。各阶段氮素积累量, 除够苗至拔节阶段外, 其余各阶段均随着氮肥群体最高生产力递增而逐渐增加。与低氮肥群体最高生产力类型相比, 中等氮肥群体最高生产力类型氮素转移量和转移率显著增加, 而高氮肥群体最高生产力类型氮素转移能力较中等类型相比无显著提高。较之中、低生产力类型, 高生产力类型水稻品种具有够苗前氮素积累快, 够苗至拔节积累少, 拔节至抽穗积累稳, 抽穗至成熟积累多, 且抽穗后氮素向籽粒转移量大但不过量的特点。

关键词: 水稻; 氮肥; 生产力; 吸收; 利用

中图分类号: Q945.12; S511.2⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2012)02-0197-08

收稿日期: 2011-06-30; 修改稿收到日期: 2011-11-22。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30971732, 31101102); 国家粮食丰产科技工程资助项目(2011BAD16B03); 贵州省水稻育种、栽培与产业化创新能力建设资助项目(黔科合院所创能合[2011]4003); 贵州山区水稻科研基础条件建设资助项目(黔科条中补地[2011]4005)。

水稻是我国第一大粮食作物,充分挖掘水稻产量潜力是保障粮食安全的基本途径^[1]。氮素是影响水稻产量潜力发挥的重要营养元素,据统计,我国水稻氮肥用量占全球水稻氮肥总用量的 37%^[1],江苏省大面积的高产粳稻施氮量高达 270~330 kg/hm²^[2-3]。过量施氮不仅增加水稻倒伏的危险,且降低氮肥利用率,引发能源浪费、环境污染和生产效益降低等一系列问题^[4]。因此,在提高水稻产量的同时,如何协同提高水稻的氮肥利用效率是水稻研究与生产中面临的一大难题。

不同水稻基因型间氮效率存在显著差异^[5-10],并最终影响到籽粒产量^[11-12]。不同产量等级水稻氮素吸收利用也存在明显差异。殷春渊等^[13]报道,高产基因型水稻在各个生育阶段的氮素积累量和氮素利用效率均比低产基因型高,说明通过选育氮高效品种来提高水稻的产量水平是可行的。氮肥施用量影响着水稻产量潜力的发挥。马国辉等^[14]认为,在一定施氮水平内,超级杂交中稻 Y 两优 1 号产量随氮肥用量增加而提高,但超出一定用量范围其产量反而随施氮量增加而下降,Y 两优 1 号在施氮 189.5 kg/hm² 时产量最高。李华等^[3]研究表明,施氮量 270~330 kg/hm² 范围内,300 kg/hm² 最佳,再增加施氮量,产量不能获得显著提高,反而略降。可见,任何水稻品种都有一个发挥其产量潜力的最适施氮量。李敏等^[4]、马群等^[15]在研究长江中下游地区常见五种生育类型中有代表性的 120 个水稻品种(系)产量与施氮量的关系时发现,产量随氮肥水平呈抛物线变化;并由此提出“氮肥群体最高生产力”的概念,即在统一的最佳栽培管理体系中,水稻品种在某一氮肥水平下最大限度地发挥其增产潜力并达到的最高产量。虽然有关氮肥对水稻氮素吸收利用特性的影响以及不同水稻品种间氮素吸收利用特性的差异已有很多报道,但在不同水稻品种通过合理施用氮肥充分发挥其产量潜力并获得相应最高产量(即氮肥群体最高生产力)的基础上,分析不同粳稻品种间氮素吸收利用特性差异的研究尚未见报道。因此,笔者于 2008—2009 年精心挑选了广泛应用且最适宜在本地区种植的 50 个早熟晚粳品种(系)为供试材料,设置了 7 个氮肥水平,比较不同品种间氮肥群体最高生产力的差异^[16]。在前期研究的基础上,选用相对最佳施氮量为 262.5 kg/hm² 水平,分蘖力基本相同但群体最高生产力不同的三种类型粳稻品种为材料,分析氮肥群体最高生产力与氮素吸收利

用的关系,试图阐明不同氮肥群体最高生产力类型水稻氮素吸收利用特性及其变化规律,以期水稻高产栽培和品种改良提供理论依据和技术参考。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

依据 2008—2009 年的研究与分类(表 1),选用在施纯氮 262.5 kg/hm² 条件下最高产量(即氮肥群体最高生产力,简称生产力)不同但分蘖力基本相同的低、中、高 3 类早熟晚粳品种各 2 个。其中,低生产力类型包括镇稻 158 和苏香粳 1 号;中等生产力类型包括银 2084 和南 46;高生产力类型包括常粳 09-5 和常粳 09-6。

1.2 试验设计

试验于 2009—2010 年在扬州大学农学院试验农场进行。土质为砂壤土,含全氮 1.3 g/kg,碱解氮 88.41 mg/kg,速效磷 33.3 mg/kg,速效钾 89.7 mg/kg。采用裂区设计,以施氮(纯氮)水平为主区,设不施氮和施纯氮 262.5 kg/hm² 2 个施氮水平。以品种为裂区,裂区面积为 8 m²,3 次重复,主区间作大埂隔离,并用塑料薄膜覆盖埂体,保证各区间单独排灌。5 月 13 日播种,6 月 12 日移栽,栽插密度为 27 万穴/hm² (26.0 cm×14.4 cm),3 本栽插。氮肥施尿素,用量为 $m_{\text{基肥}} : m_{\text{穗肥}} : m_{\text{穗肥}} = 1 : 1 : 2$,其中穗肥分别于倒 4 叶和倒 2 叶期等量施入;P、K 肥同常规栽培,施磷肥(折合 P₂O₅)150 kg/hm²,钾肥(折合 K₂O)150 kg/hm²,全部用作基肥。其他管理措施统一按常规栽培要求实施。

2008—2009 年的 7 个氮肥水平试验结果基本一致^[15-16],本研究中的 6 个供试品种达到最高产量的施氮量均为 262.5 kg/hm²,用表 1 中数据作抛物线求出的理论适氮量多数品种基本一致,个别品种差异稍大,但连续两年试验结果仍在 262.5 kg/hm² 左右。因此,本研究统一在此氮肥水平下比较它们的生产力差异及氮素利用特性。

1.3 测定项目与分析方法

1.3.1 植株全氮的测定

分别于够苗(*N-n* 叶龄)、拔节、抽穗、成熟期每小区取有代表性植株 4 穴,105℃ 下杀青,80℃ 下烘至恒重后测定各器官(茎鞘、叶片和穗)干物质量,并用半微量凯氏定氮法测定其含氮量。

1.3.2 产量的测定

在收获前每小区收割 100 穴,脱粒,晒干,测定

实际产量;每小区取 10 株成熟稻穗,自然风干用于测定产量构成因素。

1.3.3 氮素吸收利用相关参数

(1) 氮肥吸收利用率^[1] (Recovery efficiency, RE) = (施氮区水稻吸氮量 - 氮空白区水稻吸氮量) / 作物施氮量。

(2) 氮素阶段积累率^[17] (Period percentage of nitrogen accumulation, PPNA) = (氮素阶段积累量 / 成熟期氮素积累量) × 100%。

(3) 氮素转运率^[4] (Nitrogen translocation rate, NTR) = (抽穗期水稻茎叶吸氮量 - 成熟期水稻茎叶吸氮量) / 抽穗期水稻茎叶吸氮量 × 100%。

(4) 氮肥生理利用率^[1] (Physiological efficiency, PE) = (施氮区籽粒产量 - 氮空白区籽粒产量) / (施氮区水稻吸氮量 - 空白区水稻吸氮量)。

(5) 氮素干物质生产率^[4] (Nitrogen dry matter production efficiency, NEMPD) = 总干物质质量 / 总吸氮量。

(6) 氮素籽粒生产效率^[18] (Nitrogen grain production efficiency, NGPE) = 水稻的稻谷产量 / 水稻吸氮量。

(7) 氮肥偏生产力^[1] (Partial factor productivity of applied N, PFP) = 水稻产量 / 施氮量。

(8) 农学利用率^[1] (Agronomic efficiency, AE) = (施氮区水稻产量 - 氮空白区水稻产量) / 施氮量。

1.4 数据处理

所测数据在 Excel 和 DPS 软件中进行分析 and 处

理。

2 结果与分析

2.1 各基因型在不同氮肥水平下的产量表现

表 1 显示各品种 2008—2009 年在 7 个氮肥水平下的平均产量。随着氮肥水平升高,各品种产量均呈抛物线变化趋势,过低或过高的氮肥水平均不利于产量潜力的发挥。6 个供试品种最佳施氮量均为 262.5 kg/hm²,就氮肥群体最高生产力(即各氮肥水平下出现的最高产量)而言,高生产力类型较中、低生产力类型分别提高 12.38% 和 25.16%,差异达极显著水平。马群^[16]的研究结果表明,各品种最佳施氮量多为 262.5 kg/hm² 和 300 kg/hm²,均未出现在低氮水平(0~187.5 kg/hm²)。说明在当前水稻生产条件下,充分发挥品种的最高生产力,还需保证氮肥投入。另外,高生产力品种在各个氮肥水平下的产量均有明显提高,即使同在氮肥过量的情况下。如施 N 337.5 kg/hm² 条件下,高生产力类型品种较中、低生产力类型品种产量平均提高 10.24% 和 22.50%,说明高生产力品种耐肥性、稳产性也具有优势。

方差分析表明(表 2),各品种产量及氮素吸收利用各指标在年度间以及年度与基因型互作差异均未达到显著水平,因此下文主要对 2010 年试验数据进行分析。

2.2 不同氮肥群体最高生产力类型水稻品种的产量及其构成

在各基因型相对最适氮肥水平下,低、中、高 3

表 1 各基因型在不同氮肥水平下的产量表现

Table 1. Yield of six japonica rice cultivars under different nitrogen application rates.

类型 Type	施氮水平 Nitrogen application level/(kg · hm ⁻²)							平均值 Average	变异系数 CV/%
	0	150	187.5	225	262.5	300	337.5		
低群体生产力 LP									
镇稻 158 ZD158	5464.28 bB	7622.40 dD	8048.26 dD	8354.71 dD	8545.13 dC	8229.38 fC	7901.70 eC	7737.98 eC	13.53
苏香粳 1 号 SXJ1	5175.98 dD	7377.42 eE	7838.25 eE	8158.71 eE	8422.05 eC	8294.63 eC	8081.78 dC	7621.26 fC	14.85
中群体生产力 MP									
银 2084 Y2084	5124.15 eE	7959.02 cC	8471.64 cC	8822.20 cC	9384.45 cB	9129.45 dB	8807.10 cB	8242.57 dB	17.58
南 46 N46	5371.13 cC	8192.08 bB	8783.68 bB	9223.72 bB	9513.55 bB	9294.46 cB	8952.75 bB	8475.91 cB	16.93
高群体生产力 HP									
常粳 09-5 CJ09-5	5733.75 aA	9097.31 aA	10085.83 aA	10372.51 aA	10651.37 aA	10460.33 aA	9843.95 aA	9463.58 aA	18.20
常粳 09-6 CJ09-6	5702.93 aA	9006.57 aA	10044.45 aA	10316.19 aA	10585.45 aA	10221.32 bA	9735.23 aA	9373.16 bA	18.11

同一列中,数据后跟不同大小写字母分别表示 1% 和 5% 差异显著水平。下同。

Values followed by different uppercase and lowercase letters are significantly different at 1% and 5% probability levels, respectively.

LP, Low population productivity; MP, Medium population productivity; HP, High population productivity. ZD, Zhendao 158; SXJ1, Suxiangjing 1; Y2048, Yin 2048; N46, Nan 46; CJ 09-5, Changjing 09-5; CJ 09-6, Changjing 09-6. The same as below.

表2 供试水稻品种2009和2010年间产量及氮素吸收利用各指标值的方差分析(F值)

Table 2. Analysis of variance for yield and indexes of N absorption and utilization in 2009 and 2010 (F-value)

指标 Parameter	生育期 Growth stage	年度 Year	基因型 Genotype	年度×基因型 Year×Genotype
实产 Grain yield		0.17	499.98**	0.39
氮素积累量 NAA	够苗 <i>N-n</i>	0.22	41.66**	0.15
	拔节 EG	0.62	3.87*	0.12
	抽穗 HE	0.29	197.01**	2.01
	成熟 MA	2.17	412.60**	0.95
	移栽-够苗 <i>TR-N-n</i>	0.66	207.88**	0.42
氮素阶段积累量 PNAA	够苗-拔节 <i>N-n-EG</i>	3.23	419.64**	1.00
	拔节-抽穗 <i>EG-HE</i>	0.97	227.84**	0.24
	抽穗-成熟 <i>HE-MA</i>	0.55	288.84**	0.52
氮素转移量 NTA		1.01	199.66**	0.67
氮素转移率 NTR	0.88	124.58**	0.52	
氮肥吸收利用率 RE	0.54	7.43**	0.78	
氮肥生理利用率 PE		3.02	90.41**	0.34
氮素籽粒生产率 NGPE		1.24	56.62**	0.18
氮肥偏生产力 PFP		1.02	107.74**	0.41

*, ** 分别表示达到 0.05 和 0.01 显著水平。下同。

*, ** denote significant difference at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

N-n, Critical stage of productive tillering; EG, Elongation; HE, Heading; MA, Maturing; TR, Transplanting; NAA, N accumulation amount; PNAA, Period N accumulation amount; NTA, N translocation amount; NTR, Nitrogen translocation rate; RE, Recovery efficiency; PE, Physiological efficiency; NGPE, Nitrogen grain production efficiency; PFP, Partial factor productivity of applied N. The same as below.

表3 不同氮肥群体最高生产力类型水稻品种的产量及其构成

Table 3. Yield and its components of rice cultivars with different highest population productivities.

类型 Type	实际产量 Actual yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	有效穗数 Productive panicle number ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	每穗粒数 Spikelet number per panicle	颖花量 Total spikelet number ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	结实率 Seed setting rate / %	千粒重 1000-grain weight/g
低群体生产力 LP						
镇稻 158 Zhendao 158	8550.00 dC	296.31 bcB	135.71 bcB	40212.23 dC	87.31 aA	24.45 bA
苏香梗 1号 Suxiangjing 1	8213.04 eC	277.53 dC	132.71 cC	36831.01 eD	85.51 bA	26.38 aA
中群体生产力 MP						
银 2084 Yin 2084	9272.55 cB	304.16 bB	139.60 bB	42460.74 cB	88.71 aA	25.02 abA
南 46 Nan 46	9557.85 bB	313.70 bB	137.52 bB	43140.02 bB	89.75 aA	25.19 abA
高群体生产力 HP						
常梗 09-5 Changjing 09-5	10645.86 aA	333.37 aA	144.91 aA	48308.65 aA	86.80 aA	26.07 aA
常梗 09-6 Changjing 09-6	10519.72 aA	331.30 aA	143.96 aA	47693.37 bA	86.04 abA	26.50 aA

种生产力类型平均产量分别为 8381.52 kg/hm^2 、9415.2 kg/hm^2 和 10582.79 kg/hm^2 (表 3), 差异极显著。从产量结构分析, 结实率和千粒重在生产力类型间差异大多不显著, 而有效穗数和每穗粒数随生产力递增均不断增加, 差异达极显著水平, 其中有效穗数的增加主要与成穗率高有关^[15]。随着氮肥群体最高生产力由低到高, 群体颖花量分别为 38521.62 $\times 10^4/\text{hm}^2$ 、42800.38 $\times 10^4/\text{hm}^2$ 和 48001.01 $\times 10^4/\text{hm}^2$, 单位面积颖花量与产量呈极显著正相关 ($r=0.9893^{**}$, $n=6$), 说明群体颖花量大是高生产力类型水稻的基本产量特征。

2.3 不同氮肥群体最高生产力类型水稻含氮率

由表 4 可知, 各品种的含氮率均随生育进程逐渐降低, 够苗期最高, 成熟期最低。随着氮肥群体最高生产力的提高, 植株含氮率在够苗期有增加的趋势, 但在拔节、抽穗和成熟期, 生产力类型间差异不显著。

2.4 不同氮肥群体最高生产力类型水稻氮素积累量及氮肥吸收利用率

各生育时期, 水稻的氮素积累量均存在显著的基因型差异 (表 5)。其中, 够苗、抽穗和成熟期均表现为随着氮肥群体最高生产力提高, 水稻植株的氮

表 4 不同氮肥群体最高生产力类型水稻品种含氮率

Table 4. Nitrogen content of rice cultivars with different highest population productivities.

类型 Type	够苗 N-n	拔节 EG	抽穗 HE	成熟 MA	%
低群体生产力 LP					
镇稻 158 Zhendao 158	1.88 cC	1.62 bA	1.37 aA	0.97 aA	
苏香粳 1 号 Suxiangjing 1	1.78 cC	1.71 abA	1.45 aA	1.03 aA	
中群体生产力 MP					
银 2084 Yin 2084	2.08 bB	1.66 abA	1.42 aA	0.96 aA	
南 46 Nan46	2.06 bB	1.77 aA	1.41 aA	1.03 aA	
高群体生产力 HP					
常粳 09-5 Changjing 09-5	2.20 aA	1.70 abA	1.43 aA	1.00 aA	
常粳 09-6 Changjing 09-6	2.19 aA	1.74 aA	1.37 aA	0.99 aA	

表 5 不同氮肥群体最高生产力类型水稻品种氮素积累量及氮肥吸收利用率

Table 5. Nitrogen accumulation and Recovery efficiency of rice cultivars with different highest population productivities.

类型 Type	够苗 N-n /(kg·hm ⁻²)	拔节 EG /(kg·hm ⁻²)	抽穗 HE /(kg·hm ⁻²)	成熟 MA /(kg·hm ⁻²)	氮肥吸收利用率 RE/%
低群体生产力 LP					
镇稻 158 Zhendao 158	30.45 cC	67.09 bcA	141.63 cCD	163.54 dCD	38.06 cC
苏香粳 1 号 Suxiangjing 1	29.70 cC	69.24 aA	146.93 cBC	169.54 cC	37.09 cC
中群体生产力 MP					
银 2084 Yin 2084	34.66 bB	66.94 cA	149.69 bB	177.98 bB	41.56 bB
南 46 Nan 46	36.87 bB	68.16 abcA	150.93 bB	178.74 bB	41.29 bB
高群体生产力 HP					
常粳 09-5 Changjing 09-5	38.72 aA	68.68 aA	162.44 aA	195.24 aA	46.16 aA
常粳 09-6 Changjing 09-6	38.98 aA	68.48 abA	159.62 aA	193.33 aA	45.05 aA

表 6 不同氮肥群体最高生产力类型水稻品种氮素阶段积累量

Table 6. Period nitrogen accumulation of rice cultivars with different highest population productivities.

类型 Type	够苗前 (TR-N-n)	够苗-拔节 (N-n-EG)	拔节-抽穗 (EG-HE)	抽穗-成熟 (HE-MA)	t/hm ²
低群体生产力 LP					
镇稻 158 Zhendao 158	30.45 dC	36.64 bB	74.55 eE	21.91 cC	
苏香粳 1 号 Suxiangjing 1	29.70 dC	39.54 aA	77.69 dD	22.61 cC	
中群体生产力 MP					
银 2084 Yin 2084	34.66 cB	32.28 dCD	82.75 cC	28.30 bB	
南 46 Nan 46	36.87 bB	31.29 eE	82.77 cC	27.81 bB	
高群体生产力 HP					
常粳 09-5 Changjing 09-5	38.72 aA	32.34 dCD	91.38 aA	32.81 aA	
常粳 09-6 Changjing 09-6	38.98 aA	33.43 cC	87.21 bB	33.71 aA	

素积累量极显著增加,而拔节期差异不明显。此外,随着氮肥群体最高生产力递增,水稻氮肥吸收利用率极显著提高(表 5),其中低生产力类型平均为 37.58%,高生产力类型平均为 45.61%。

2.5 不同氮肥群体最高生产力类型水稻氮素阶段积累量

随着氮肥群体最高生产力提高,水稻够苗前的氮素积累量极显著增加(表 6),这与高生产力类型前期分蘖能力强,群体发育较快有关。够苗至拔节

期,低生产力类型的氮素阶段积累量高于中、高生产力类型。拔节至抽穗期,以及抽穗至成熟期,氮素阶段积累量均随着生产力提高而不断增加,不同生产力类型间差异均达极显著水平。

2.6 不同氮肥群体最高生产力类型水稻氮素阶段积累率

从氮素阶段积累率来看(表 7),各品种均以拔节至抽穗阶段为最高。不同生产力类型间比较,移栽至够苗以及高、中等群体生产力类型间无显著差

表7 不同氮肥群体最高生产力类型水稻品种氮素阶段积累率

Table 7. Period percentage of N accumulation of rice cultivars with different highest productivities.

类型 Type	够苗前 (TR-N-n)	够苗-拔节 (N-n-EG)	拔节-抽穗 (EG-HE)	抽穗-成熟 (HE-MA)	%
低群体生产力 LP					
镇稻 158 Zhendao 158	18.62 cA	22.40 bA	45.58 aA	13.40 cC	
苏香粳 1号 Suxiangjing 1	17.52 cA	23.32 aA	45.83 aA	13.33 cC	
中群体生产力 MP					
银 2084 Yin 2084	20.13 abA	18.74 cB	46.49 aA	15.90 bB	
南 46 Nan 46	21.34 aA	18.11 cBC	46.31 aA	15.56 bB	
高群体生产力 HP					
常粳 09-5 Changjing 09-5	19.83 abA	16.56 eD	46.80 aA	16.80 aA	
常粳 09-6 Changjing 09-6	20.16 abA	17.29 dCD	45.11 aA	17.44 aA	

表8 不同氮肥群体最高生产力类型水稻品种氮素转移特性

Table 8. Nitrogen translocation of rice cultivars with different highest population productivities.

类型 Type	茎叶吸氮量 N accumulation in stems and leaves				氮素转移量 N translocation /(t·hm ⁻²)	氮素转移率 N transfer rate /%
	抽穗期 Heading stage /(t·hm ⁻²)		成熟期 Mature stage /(t·hm ⁻²)			
	比例 Rate/%	比例 Rate /%	比例 Rate/%	比例 Rate /%		
低群体生产力 LP						
镇稻 158 Zhendao 158	128.94 dC	91.04	76.32 bB	46.67	52.62 cC	40.81 cC
苏香粳 1号 Suxiangjing 1	134.65 cBC	91.64	81.26 aA	47.93	53.39 cC	39.65 cC
中群体生产力 MP						
银 2084 Yin 2084	137.19 bB	91.65	72.17 dD	40.55	65.02 bB	47.39 bB
南 46 Nan 46	137.97 bB	91.41	72.87 dD	40.77	65.09 bB	47.18 bB
高群体生产力 HP						
常粳 09-5 Changjing 09-5	147.40 aA	90.74	73.49 cBC	37.64	73.91 aA	50.14 aA
常粳 09-6 Changjing 09-6	145.06 aA	90.88	72.90 dD	37.71	72.16 aA	49.74 aA

异,但均显著高于低生产力类型;够苗至拔节,氮素阶段积累率随生产力升高而不断下降,差异达显著水平。这说明够苗期后适当降低氮素积累是高生产力的表现;拔节至抽穗的氮素阶段积累率类型间无显著差异;抽穗至成熟,高生产力类型分别较中、低生产力类型提高 3.76%和 4.81%,差异达极显著水平。进一步证明高生产力类型水稻生育后期(抽穗至成熟)具有较强的吸氮能力,能满足籽粒形成期植株对氮素的需要。

2.7 不同氮肥群体最高生产力类型水稻氮素转移特性

由表 8 可知,随着生产力递增,抽穗期茎叶吸氮量显著升高,但茎叶吸氮量比例并无明显差异。成熟期茎叶吸氮量以低生产力类型最高(78.79 t/hm²),中等生产力类型最低(72.54 t/hm²),高生产力类型居中,成熟期茎叶吸氮量比例随着生产力递增逐渐降低。随着生产力递增,氮素转移量和氮素转移率均极显著增加,平均来看,高生产力品种较中、低生产力品种分别提高 12.27%、37.79%和 5.61%、24.14%。总的来看,抽穗后氮素由营养器

官向生殖器官转移量大,充分满足籽粒灌浆所需营养条件,有利于水稻生产力的提高。

2.8 不同氮肥群体最高生产力类型水稻氮利用率

从水稻氮利用率分析(表 9),随着氮肥群体最高生产力递增,氮肥生理利用率极显著升高,说明施入同量氮肥,高生产力类型品种增产潜力更大。氮素干物质生产率低、中生产力类型高于高生产力类型,氮素籽粒生产效率随生产力的提高有所升高,但升幅不大。相关分析表明,3个生理利用指标中,以氮肥生理利用率与生产力关系最为密切,其次是氮素籽粒生产效率,而氮素干物质生产率与生产力呈负相关。氮肥偏生产力和农学利用率均直接以产量和施氮量的关系来评价氮效率,随着生产力递增,这两个指标均极显著增加,从相关系数可以看出其与生产力关系十分密切(表 9)。

3 讨论

3.1 不同类型水稻品种的氮肥群体最高生产力与氮素积累

作物营养特性鉴定与评价的关键是营养水平和

表 9 不同氮肥群体最高生产力类型水稻氮利用率

Table 9. N use efficiency indexes of rice cultivars with different highest population productivities.

类型 Type	氮肥生理	氮素干物质	氮素籽粒	氮肥偏	农学
	利用率	生产率	生产效率	生产力	利用率
	PE	NEMPD	NGPE	PPF	AE
低群体生产力 LP					
镇稻 158 Zhendao158	31.58 cC	109.21 aA	52.28 bA	32.57 cC	12.02 cC
苏香粳 1 号 Suxiangjing 1	31.36 cC	97.09 dE	48.44 cB	31.29 cC	11.63 cC
中群体生产力 MP					
银 2084 Yin 2084	34.26 bB	104.17 bBC	53.90 abA	35.32 bB	14.24 bB
南 46 Nan 46	36.98 bB	104.88 bB	53.07 abA	36.41 bB	15.27 bB
高群体生产力 HP					
常粳 09-5 Changjing 09-5	41.12 aA	99.87 cDE	54.53 aA	40.56 aA	18.98 aA
常粳 09-6 Changjing 09-6	40.62 aA	101.01 cCD	54.41 aA	40.08 aA	18.30 aA
与生产力的相关系数 Correlation coefficient with productivity($n=6$)	0.989**	-0.194	0.833*	1.000**	0.996**

最佳时期的确定。肥料水平过高或过低,都不能使不同基因型的基因潜力得到充分发挥。因此,对众多水稻基因型而言,只有找到其相对合适的氮素水平,并在该水平下评价其对氮素的吸收利用才更具科学性。鉴于中国始终把产量放在首位的国情,高产条件下的氮效率研究才更具现实意义。因此,本研究以氮肥群体最高生产力为定义,在各基因型相对最适氮肥水平下研究了不同生产力类型水稻的产量构成及氮素吸收利用特性。结果表明,生产力差异主要由群体颖花量引起,而千粒重变化较小。换言之,巨大的库容量是高生产力基因型之基本产量特性。据吴桂成等^[2]报道,群体颖花量大是超高产粳稻的主要产量特征。单玉华等^[19]和董桂春等^[20]也曾报道大库容量类型水稻抽穗后氮素吸收能力强,结实期茎鞘叶氮素转运量大,这说明大库容是水稻高产和氮高效协同的一个可靠指标。

对水稻氮素吸收基因型差异的研究较多,一般认为,氮高效基因型生育前期及抽穗后均有较强的氮素吸收能力^[17,21]。本研究表明,随着氮肥群体最高生产力递增,够苗前的氮素吸收量不断增加,这与氮高效品种根系性状优、活力强的观点一致^[22-23],够苗至拔节期的氮素积累量以低生产力类型最高,这与氮低效类型品种无效分蘖多、成穗率低一致^[24]。本研究还发现,随着氮肥群体最高生产力递增,拔节至抽穗阶段的氮素积累量呈极显著增加,但由于氮积累总量的原因,此阶段的氮素积累率在 3 种生产力类型间无显著差异,而抽穗至成熟期高生产力类型则体现出明显的吸氮优势。以上说明高生产力类型水稻品种的氮素积累特点力够苗前积累快,够苗至拔节积累少,拔节至抽穗积累稳,抽穗至成熟积累

多。

氮素干物质生产率反映了对物质积累与氮素积累影响的相对大小,当干物质积累效应大于氮素积累效应时,氮素干物质生产率提高;反之则降低。单玉华等^[19]曾报道,随着库容量增加,氮素干物质生产率显著提高。本研究则表明,高生产力类型水稻的氮素干物质生产率并未表现出优势,甚至还略低于中、低生产力类型。可见,高生产力类型水稻的氮素积累与干物质积累间是一种动态平衡关系,氮素吸收与物质积累互为因果。

评价氮利用率的指标很多,且目前国内仍然没有统一的标准^[25-26]。本课题组以往研究表明,在施氮量相同、运筹不同时,氮肥的农学利用率与产量有更好的相关性,更能说明氮素利用状况。本研究表明,在相同的施氮量和运筹条件下,高生产力类型水稻在氮素干物质生产率、氮素籽粒生产效率方面,较中生产力甚至低生产力类型并无恒定优势;而氮肥偏生产力和农学利用率与生产力的相关性更为密切,在建立以提高经济产量潜力为中心的超高产育种与栽培体系中,笔者认为以其作为评价指标更能体现高生产力类型水稻的氮肥利用优势。

3.2 不同氮肥群体最高生产力类型水稻品种的氮素转移

不同基因型水稻氮素转移也存在明显差异。大多数研究认为,氮高效基因型在抽穗后向籽粒的氮素转运量大。如董桂春等^[18,27]报道,高氮素籽粒生产效率类型品种抽穗期、成熟期茎鞘叶中氮素比例小、穗中氮素比例大,成熟期尤为明显;且结实期茎鞘叶氮素运转量大、运转率高。张亚丽等^[10]报道,水稻成熟时较低的秸秆氮浓度可表明水稻具有较高

的氮生理利用效率。本研究表明,低生产力类型抽穗后茎叶氮积累量最高,氮转移率最低,说明氮素向籽粒转运受阻是导致生产力较低的原因之一,此与前人研究结果基本一致。研究还发现,较之中等生产力类型,高生产力品种成熟期茎叶氮素积累量更高,氮素转移率虽有提高但增幅不大,说明生产力由中到高,氮素转移能力渐趋于稳定。究其原因,茎秆是植株的支撑,其氮素过量转移而使自身氮浓度过低势必会增加倒伏的风险,而叶片是光合作用重要器官,本身也需要较高的氮素水平以维持较高的二氧化碳同化能力^[28]。对玉米^[29]的研究表明,抽穗后叶片过多的氮素转移会影响自身的光合作用和加速叶片衰老。因此,笔者认为,氮素转移并非一味求高,而必须控制在适宜的范围之内以利于高生产力的表现。有关水稻生育后期碳氮代谢平衡与氮利用率及其氮肥群体最高生产力的关系有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Peng S B, Khush G S, Virk P, et al. Progress in ideotype breeding to increase rice yield potential. *Field Crops Res*, 2008, 108: 32-38.
- [2] 吴桂成, 张洪程, 钱银飞, 等. 粳型超级稻产量构成因素协同规律及超高产特征的研究. *中国农业科学*, 2010, 43(2): 266-276.
- [3] 李华, 徐长青, 李世峰. 不同氮肥管理对机插水稻产量及氮肥利用的影响. *贵州农业科学*, 2008, 36(5): 39-41.
- [4] 李敏, 张洪程, 李国业, 等. 水稻氮效率基因型差异及其机理研究进展. *核农学报*, 2011, 25(5): 1057-1063.
- [5] Singh U, Lagha J K, Castillo E G, et al. Genotypic variation in nitrogen use efficiency in medium and long duration rice. *Field Crops Res*, 1998, 58: 35-53.
- [6] Koutroubasa S D, Ntanosb D A. Genotypic differences for grain yield and nitrogen utilization in indica and japonica rice under Mediter-ranean conditions. *Field Crops Res*, 2003, 83: 251-260.
- [7] 单玉华, 王余龙, 山本由德, 等. 不同类型水稻在氮素吸收及利用上的差异. *扬州大学学报:自然科学版*, 2001, 4(3): 21-26.
- [8] 单玉华, 王余龙, 山本由德. 常规籼稻与杂交籼稻氮素利用效率的差异. *江苏农业研究*, 2001, 22(1): 12-15.
- [9] 程建峰, 戴廷波, 曹卫星, 等. 不同类型水稻种质氮素营养效率的变异分析. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(3): 175-183.
- [10] 张亚丽, 樊剑波, 段英华, 等. 不同基因型水稻氮利用效率的差异及评价. *土壤学报*, 2008, 45(2): 267-273.
- [11] Peng S B, Roland J, Buresh, et al. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China. *Field Crops Res*, 2006, 96: 37-47.
- [12] Yoshiaki K, Hiroe Y, Jairo A, et al. N applications that increase plant N during panicle development are highly effective in increasing spikelet number in rice. *Field Crops Res*, 2011, 122: 242-247.
- [13] 殷春渊, 张庆, 魏海燕, 等. 不同产量类型水稻基因型氮素吸收、利用效率的差异. *中国农业科学*, 2010, 43(1): 39-50.
- [14] 马国辉, 龙继锐, 戴清明, 等. 超级杂交中稻 Y 两优 1 号最佳缓释氮肥用量与密度配置研究. *杂交水稻*, 2008, 23(6): 73-77.
- [15] 马群, 杨雄, 李敏, 等. 不同氮肥群体最高生产力水稻品种的物质生产积累. *中国农业科学*, 2011, 44(20): 4159-4169.
- [16] 马群. 水稻品种氮肥群体最高生产力及其增长因素的研究[学位论文]. 扬州大学: 扬州. 2011.
- [17] 魏海燕, 张洪程, 杭杰, 等. 不同氮利用效率水稻氮素积累与转移的特性. *作物学报*, 2008, 34(1): 119-125.
- [18] 董桂春, 王余龙, 周娟, 等. 不同氮素籽粒生产效率类型籼稻品种氮素分配与运转的差异. *作物学报*, 2009, 35(1): 149-155.
- [19] 单玉华, 王海候, 龙银成, 等. 不同库容量类型水稻在氮素吸收利用上的差异. *扬州大学学报:农业与生命科学版*, 2004, 25(1): 41-45.
- [20] 董桂春, 于小凤, 董燕萍, 等. 不同库容量类型常规籼稻品种氮素吸收与分配的差异. *中国农业科学*, 2009, 42(10): 3432-3441.
- [21] 程建峰, 戴廷波, 荆奇, 等. 不同水稻基因型的根系形态生理特性与高效氮素吸收. *土壤学报*, 2007, 44(2): 266-272.
- [22] Fan J B, Zhang Y L, Turner D., et al. Root physiological and morphological characteristics of two rice cultivars with different nitrogen-use efficiency. *Pedosphere*, 2010, 20(4): 446-455.
- [23] 樊剑波, 沈其荣, 谭炯壮, 等. 不同氮效率水稻品种根系生理生态指标的差异. *生态学报*, 2009, 29(6): 3052-3058.
- [24] Zhang Y L, Fan J B, Wang D S, et al. Genotypic differences in grain yield and physiological nitrogen use efficiency among rice cultivars. *Pedosphere*, 2009, 19(6): 681-691.
- [25] 江立庚, 曹卫星. 水稻高效利用氮素的生理机制及有效途径. *中国水稻科学*, 2002, 16(3): 261-264.
- [26] 程建峰, 蒋海燕, 刘宜柏, 等. 氮高效水稻基因型鉴定与筛选方法的研究. *中国水稻科学*, 2010, 24(2): 63-70.
- [27] 董桂春, 李进前, 张彪, 等. 高氮素籽粒生产效率类型籼稻品种的一些相关性状. *中国水稻科学*, 2009, 23(3): 289-296.
- [28] 徐克章, 黑田荣喜, 平野贡. 水稻开花后叶片含氮量与光合作用的动态变化及其关系. *作物学报*, 1995, 21(2): 171-175.
- [29] 金继运, 何洋. 钾营养对春玉米后期碳氮代谢与粒重形成的影响. *中国农业科学*, 1999, 32(4): 55-62.