

江苏省早熟晚粳高产水稻新品种氮素吸收利用特征及成因分析

吴越^{1,2} 胡静^{1,3} 陈琛¹ 张家星¹ 李万元¹ 唐东南¹ 仲军¹ 羊彬¹ 朱正康¹
姚友礼¹ 王余龙¹ 董桂春^{1,*}

(¹扬州大学 江苏省作物遗传生理国家重点实验室培育点/粮食作物现代产业技术协同创新中心, 江苏 扬州 225009; ²苏州市委办公室, 江苏 苏州 215000; ³苏州市知识产权局, 江苏 苏州 215000; *通讯联系人, E-mail: gcdong@yzu.edu.cn)

Nitrogen Absorption and Utilization Characteristics of the Newly Approved Early-Maturity Late *japonica* Rice Cultivars in Jiangsu Province

WU Yue^{1,2}, HU Jing^{1,3}, CHEN Chen¹, ZHANG Jiaying¹, LI Wanyuan¹, TANG Dongnan¹, ZHONG Jun¹,
YANG Bin¹, ZHU Zhengkang¹, YAO Youli¹, WANG Yulong¹, DONG Guichun^{1,*}

(¹Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province/Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, College of Agriculture, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; ²General office, Suzhou Municipal Committee, Suzhou 215000, China; ³Intellectual Property Office, Suzhou Municipality, Suzhou 215000, China; *Corresponding author, E-mail: gcdong@yzu.edu.cn)

Abstract: 【Objective】To clarify the characteristics of nitrogen absorption and utilization in early-maturity late *japonica* rice cultivars, the grain yield components and their relationship with nitrogen uptake and utilization efficiency were investigated in comparison to a control cultivar Ningjing 1. 【Method】A field experiment was conducted in the Rice Research Institute of Jiangsu (Wujin) in 2012 and 2013 with eight newly released early-maturity late *japonica* rice cultivars in Jiangsu Province (namely Wuyunjing 29, Wuyunjing 23, Yangjing 4227, Tongjing 981, Changnongjing 7, Ningjing 3, Zhendao 16 and Nanjing 5055) as materials. 【Results】The actual grain yield of the eight new cultivars surpassed the control by 7.87% on average, with four(Wuyunjing 29, Wuyunjing 23, Yang 4227, and Tongjing 981) increased significantly ($P<0.01$). The total nitrogen uptake and nitrogen utilization efficiency at maturity in the eight new cultivars increased by 4.97% and 2.85%, respectively, compared to the control, which led to the improved grain yield. Further analysis revealed that the nitrogen content showed little variation among the new cultivars, while the dry matter production was significantly higher than that of the control. The nitrogen absorption before heading contributed about 80%-85% of the total in the whole growth duration. The nitrogen uptake at heading stage and heading-maturity period in the eight new cultivars were 1.35% and 25.94%, respectively, higher than that of the control. The panicle number showed limited contribution to the variation of total nitrogen uptake in the new cultivars, whereas the nitrogen uptake per panicle was 3.19% higher than that of the control. New cultivars had less than five days differences in the whole growth duration (life cycle), whereas the nitrogen uptake rate (average daily nitrogen absorption) of the new cultivars was 5.85% higher than that of the control. Correlation and path analysis revealed that larger dry matter production, daily nitrogen absorption rate, nitrogen absorption per panicle and amount of nitrogen uptake after heading contributed significantly to the higher total nitrogen absorption. In the new cultivars, the nitrogen percentage of the whole rice plants was generally higher. The nitrogen assimilated into and translocated to grains was higher in the new cultivars. All these characteristics contributed to higher total nitrogen uptake and nitrogen grain production efficiency. The nitrogen harvest index, nitrogen absorption percentage, nitrogen agronomic efficiency, and nitrogen partial production efficiency were higher in the new cultivars with more grain yield. 【Conclusion】In short, the eight new cultivars from Southern Jiangsu Province had more nitrogen uptake and higher nitrogen utilization efficiency, and grain yield. Increasing total nitrogen uptake and improving nitrogen utilization efficiency were helpful in further raising the grain yield in rice production.

Key words: early-maturing late *japonica* rice cultivar; high yielding; nitrogen uptake; nitrogen utilization efficiency

摘 要: 【目的】为阐明江苏省早熟晚粳新品种氮素吸收与利用的品种差异及其影响因素, 【方法】于 2012-2013

年在江苏(武进)水稻研究所,以江苏省新近育成的8个早熟晚粳稻为供试材料,研究其与对照在产量、氮素吸收、氮素利用上的差异,分析氮素吸收利用及影响因素。【结果】1)8个早熟晚粳新品种实收产量均高于对照宁粳1号,平均增加7.87%,其中,武运粳29、武运粳23、扬粳4227、通粳981极显著高于对照;新品种总吸氮量和氮素籽粒生产效率分别比对照平均增加4.97%、2.85%。随着品种吸氮量、氮素籽粒生产效率的提高,稻谷产量均增加;2)高产新品种干物质生产量高、吸氮强度大、单穗吸氮量多和抽穗后吸氮量多,导致总吸氮量多;3)高产新品种结实期茎鞘叶氮素转运量、转运率大,氮素比例下降值大,成熟期茎鞘叶氮素比例低,结实期穗氮素增加量大,成熟期穗氮素比例高,这些特征均有利于总吸氮量、氮素籽粒生产效率的提高,且对前者的促进作用明显大于后者;4)高产新品种氮素收获指数、氮肥吸收利用率、氮肥农学利用率、氮肥偏生产力等指标均高于对照,产量越高趋势越明显。总氮吸收量、氮素籽粒生产效率高的品种有利于氮素收获指数、氮肥农学利用率、氮肥偏生产力的提高,但前者的影响更大。吸氮量高的品种氮肥利用率也较高,氮素籽粒生产效率高的品种氮素干物质生产效率、氮肥生理利用率也高。【结论】在苏南稻区,8个早熟晚粳新品种产量明显高于对照,氮肥(素)吸收利用率、总吸氮量、氮素籽粒生产效率均比对照表现出一定的优势。

关键词: 早熟晚粳; 高产; 氮素吸收; 氮素利用效率

中图分类号: S143.1; S511.062

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2017)06-0619-12

江苏是我国水稻主要生产大省之一,其单产水平居水稻主产省首位。江苏又是氮肥投入大省,氮肥利用率较低,个别地区甚至低于30%^[1]。氮肥利用率低造成氮肥的大量损失及经济效益的降低,并出现明显的报酬递减效应,一定程度上加剧了农业面源污染。目前,在江苏开展水稻新品种选育及与之配套的精确定量栽培技术的研究工作,对持续提高水稻产量潜力、肥料利用率,改善稻田生态环境具有极其重要的意义。前人研究表明,在适宜施量水平下,水稻产量受氮素吸收(即总吸氮量)、氮素利用(氮素籽粒生产效率)两个因素共同影响,提高两者均可显著提高水稻产量水平^[2-4]。从高产、高效、生态等水稻生产目标来看,水稻产量的提高还要兼顾氮肥利用率等因素。近年来,氮肥施用量已处于比较高的水平,但有些地区施氮水平仍有增加的趋势,虽然通过片面增加植株吸氮量获得了水稻产量的提高,但也导致了氮肥吸收利用率持续下降。薛亚光等^[5-7]研究表明,高投入超高产栽培处理水稻总吸氮量较高,但氮肥的农学利用率、生理利用率和偏生产力较低。如何在保证不降低甚至适度提高氮肥利用率的前提下,充分利用氮素吸收、氮素利用对水稻产量的综合作用,实现水稻产量水平持续提高值得进一步深入研究。近年来,苏南地区培育和引种了一批高产早熟晚粳新品种,在生产中表现出较高的产量潜力,但对这些品种产量表现、氮素吸收利用特点研究不多,尚不清楚它们之间的相互关系。本研究选取近几年育成的、产量潜力较大的江苏早熟晚粳水稻栽培区主推的8个新品种为研究对象,针对上述问题开展相应的研究工作,旨在为江苏早熟晚粳水稻栽培新品种的选育及高产、高效、生态的稻作生产提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于2012、2013年在江苏(武进)水稻研究所超高产试验田进行,以江苏省近几年新育成的8个早熟晚粳高产新品种武运粳29、武运粳23、扬粳4227、通粳981、常农粳7号、宁粳3号、镇稻16号、南粳5055和1个对照(CK)宁粳1号共9个品种作供试材料。试验田位于太湖平原地区,常年积温5800℃,土质为白土,pH值6.2,土壤耕层厚度16 cm,有机质含量32.2 g/kg,全氮2.3 g/kg,速效磷25.4 mg/kg,速效钾146 mg/kg。

1.2 试验设计与管理

早育秧,2012年5月12日播种,6月12日移栽;2013年5月10日播种,6月10日移栽。移栽时平均单株带蘖1~2个。行株距30 cm×14 cm,栽插密度24万穴/hm²,每穴2苗。小区面积15 m²,随机排列,3次重复。肥料设2个处理:1)总施氮量为20 kg/667 m²,氮、磷、钾肥(分别折合成纯氮、P₂O₅和K₂O)用量之比为2:1:2。氮肥按基肥30%、分蘖肥30%、促花肥(倒3.5叶期)20%、保花肥(倒2叶期)20%施用,磷肥全部作基肥一次施入;钾肥按基肥50%、壮秆肥(倒5叶期)50%施用。2)0氮处理(对照),磷、钾肥用量施用方法同处理1。其他管理同大田生产,水稻生长正常。

1.3 测定内容与方法

1.3.1 干物质质量的测定

在普查穗数(茎蘖数)的基础上,抽穗期和成熟期每小区取代表性植株5株,按茎鞘、黄叶、绿叶、穗分样,105℃下杀青30 min,80℃下烘至恒重(72 h左右)后称取干物质质量。

1.3.2 产量及其构成因素的测定

在普查穗数(茎蘖数)的基础上,成熟期每小区取代表性植株5株,测定穗数、每穗粒数、饱粒率(水漂法,沉入水底者为饱粒),计算饱粒千粒重和理论产量,同时每小区收获 2m^2 (共48穴)内的水稻籽粒,计算实收产量。

1.3.3 植株全氮含量的测定

将抽穗期和成熟期各器官(茎秆、叶、穗)的样品烘干粉碎,采用 FOSS 凯氏定氮仪测定其含氮率。按照植株各器官干物质质量 \times 氮浓度计算水稻各器官氮素吸收量,按照(植株总吸氮量 $\times 100\%$)/总干物质质量计算出植株含氮率(%)。

1.4 数据分析

两年试验结果趋势相似,以两年合并数据进行分析。以 Excel 进行数据处理和图表绘制,用 SPSS 19.0 统计软件进行统计分析。

氮素干物质生产效率=全株干物质生产量/全株氮素吸收量 $\times 100\%$;氮素收获指数=穗氮素吸收量/全株氮素吸收量 $\times 100\%$;氮素籽粒生产效率=籽粒产量/成熟期植株总吸氮量;氮肥利用率=(施氮区吸氮量-空白区吸氮量)/施用的氮肥量 $\times 100\%$;氮素农学利用率=(施氮区籽粒产量-空白区籽粒产量)/施用的氮肥量;氮肥生理利用率=(施氮区籽粒产量-空白区籽粒产量)/(施氮区吸氮量-空白区吸氮量);氮素偏生产力=施氮区籽粒产量/施氮量。

2 结果与分析

2.1 早熟晚粳高产新品种产量的表现

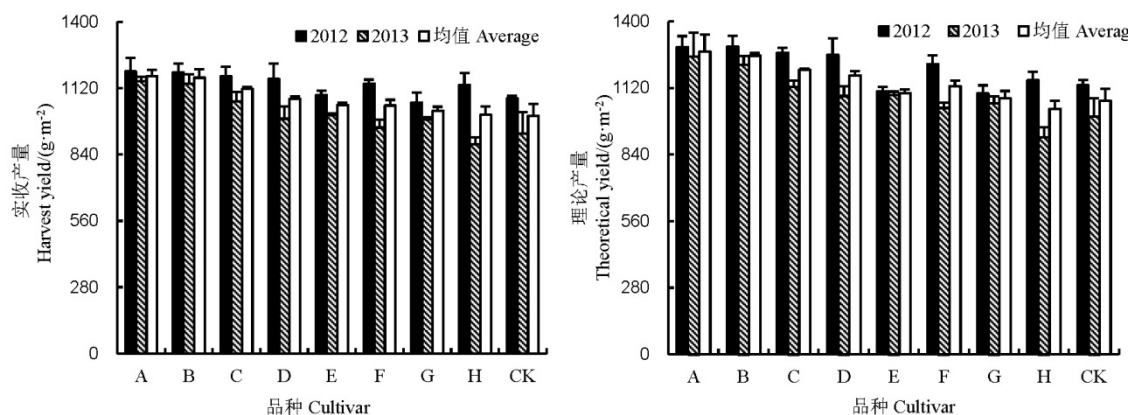
由图1可知,8个早熟晚粳新品种(以下简称新

品种)实收平均产量为 $672.48\sim 776.29\text{ kg}/667\text{m}^2$,均比对照宁粳1号实收产量有不同程度的增加,平均增产 $52.66\text{ kg}/667\text{m}^2$ ($3.61\sim 111.69\text{ kg}/667\text{m}^2$),增幅达 7.87% ($0.54\%\sim 16.70\%$),其中,武运粳29、武运粳23、扬粳4227、通粳981达极显著水平。方差分析表明,实收产量在品种间、品种与年度的互作差异达极显著水平,年度间的差异不显著,说明新品种产量比对照高产主要是因为品种间的差异。实收产量与理论产量(图1)趋势相似,两者相关系数为 0.980^{**} ,达极显著水平,说明实收产量与理论产量吻合度高,可用理论产量进行其他分析。

2.2 早熟晚粳高产新品种成熟期氮素吸收量、氮素籽粒生产效率的表现及其对产量的影响

由图2可知,8个新品种成熟期吸氮量平均值为 $18.98\sim 21.14\text{ g}/\text{m}^2$,除南粳5055外,其他品种吸氮量均比对照宁粳1号增加,8个高产品种平均比对照增加 $0.94\text{ g}/\text{m}^2$ ($-0.05\sim 2.11\text{ g}/\text{m}^2$),增幅达 4.97% ($-0.25\%\sim 11.08\%$)。其中,武运粳29、武运粳23、扬粳4227、通粳981增幅达显著或极显著水平($F=11.266^{**}$)。相关分析表明,成熟期吸氮量与产量呈极显著正相关($r=0.904^{**}$),表明提高成熟期氮素吸收量有利于提高水稻的产量水平。

由图2可知,8个新品种氮素籽粒生产效率平均值为 $52.98\sim 55.41\text{ g}/\text{g}$,分别比对照增加 5.23% 、 5.00% 、 3.09% 、 2.54% 、 2.18% 、 2.37% 、 1.67% 和 0.61% ,品种间差异未达显著水平($F=1.197$),各品种氮素籽粒生产效率均显著高于对照宁粳1号。相关分析表明,氮素籽粒生产效率与产量呈极显著线性正相关($r=0.643^{**}$),说明提高氮素籽粒生产效率有利于提高水稻的产量水平。



按产量高低进行品种排序,依次为武运粳29、武运粳23、扬粳4227、通粳981、常农粳7号、宁粳3号、镇稻16、南粳5055和对照宁粳1号,分别用字母A、B、C、D、E、F、G、H、CK表示。下同。

The letters A, B, C, D, E, F, G, H and CK represent Wuyunjing 29, Wuyunjing 23, Yang 4227, Tongjing 981, Changnongjing 7, Ningjing 3, Zhendao 16, Nanjing 5055 and Ningjing 1, respectively according to their grain yield order from high to low. The same as in the following figures.

图1 不同高产新品种实收产量与理论产量差异

Fig. 1. Harvest yield and theoretical yield of different high yielding varieties.

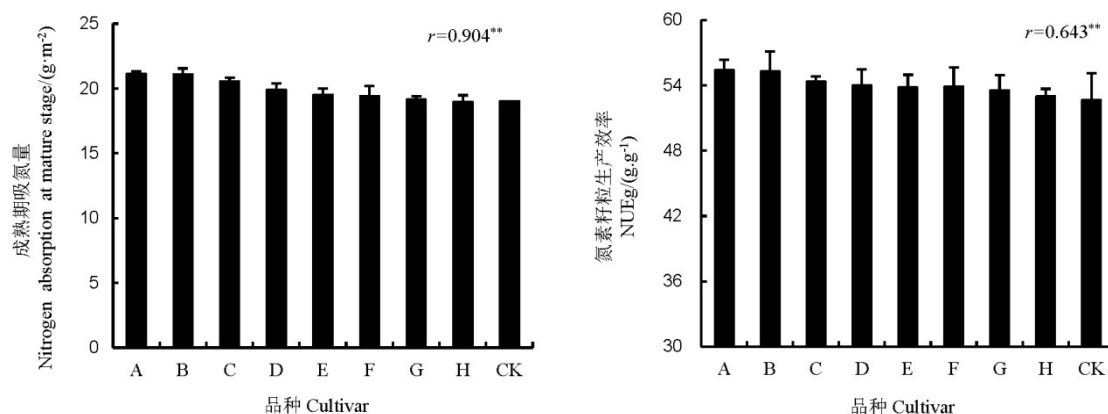


图 2 不同高产新品种成熟期吸氮量、氮素籽粒生产效率的差异

Fig. 2. Nitrogen absorption per unit area and nitrogen use efficiency for grain output(NUEg) of different high yielding cultivars.

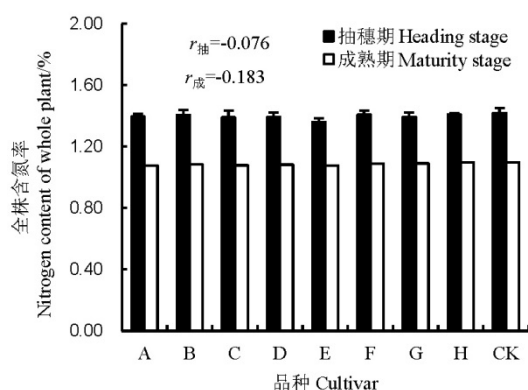


图 3 不同高产新品种含氮率的差异

Fig. 3. Average nitrogen content in the whole plant of different high yielding cultivar.

2.3 早熟晚粳高产新品种成熟期总吸氮量构成因子分析

2.3.1 植株全株含氮率和干物质生产量对成熟期吸氮量的影响

由图 3 可知, 8 个新品种抽穗期、成熟期的植株全株含氮率与对照宁粳 1 号相比, 无显著差异($F_{抽}=1.135$, $F_{成}=0.713$), 相关分析表明, 成熟期吸氮量与抽穗期全株含氮率($r_1=-0.076$)、成熟期全株含氮率($r_2=-0.183$)相关未达显著水平。

2.3.2 抽穗期和抽穗后干物质生产量及吸氮量对成熟期吸氮量的影响

由表 1 可知, 8 个新品种抽穗期干物质生产量为 $1142.74 \sim 1206.77 \text{ g/m}^2$, 除南粳 5055 以外, 其他品种均比对照宁粳 1 号有所增加, 8 个高产品种平均比对照增加 35.56 g/m^2 ($-2.99 \sim 61.04 \text{ g/m}^2$), 增幅达 3.1% ($-0.26\% \sim 5.33\%$), 品种间差异不显著 ($F=1.02$); 8 个新品种抽穗后干物质生产量为

$519.50 \sim 755.22 \text{ g/m}^2$, 除南粳 5055 以外, 其他品种均比对照宁粳 1 号有所增加, 平均增量达到 70.04 g/m^2 ($-0.29 \sim 163.43 \text{ g/m}^2$), 平均增幅达 11.83% ($-0.04\% \sim 27.61\%$), 品种间差异达极显著水平 ($F=4.26^{**}$)。相关分析表明, 抽穗期干物质生产量 ($r=0.535^{**}$)、抽穗后干物质生产量 ($r=0.808^{**}$) 与成熟期吸氮量均呈线性正相关, 达极显著水平。表明提高抽穗期、成熟期干物质生产量有利于提高成熟期吸氮量。

由表 1 可知, 8 个新品种抽穗期吸氮量为 $16.05 \sim 16.91 \text{ g/m}^2$, 与对照宁粳 1 号相比, 武运粳 29、武运粳 23、扬粳 4227、通粳 981、宁粳 3 号均略有增加, 8 个高产品种平均比对照增加 0.22 g/m^2 ($-0.18 \sim 0.68 \text{ g/m}^2$), 平均增幅为 1.35% ($-1.11\% \sim 4.2\%$), 品种间的差异不显著 ($F=0.687$), 其与成熟期吸氮量呈极显著线性正相关 ($r=0.592^{**}$), 表明提高抽穗期吸氮量有利于成熟期吸氮量的增加。

8 个新品种抽穗后吸氮量在 $2.80 \sim 4.31 \text{ g/m}^2$ 之间, 均比对照宁 1 号有所增加, 平均增量达到 0.73 g/m^2 ($0.13 \sim 1.5 \text{ g/m}^2$), 平均增幅为 25.94% ($4.80\% \sim 54.01\%$)。品种间差异达显著水平 ($F=2.381^*$), 其与成熟期吸氮量呈极显著线性正相关 ($r=0.718^{**}$), 表明提高抽穗后吸氮量可显著提高成熟期吸氮量。

2.3.3 单位面积穗数与单穗吸氮量的差异

由图 4 可知, 8 个新品种单位面积穗数平均为 326.91 ($296.30 \sim 344.25$) 个/ m^2 , 与对照宁粳 1 号相比, 有增有减, 增幅最大是常农粳 7 号 (增 7.44%), 最少的为武运粳 29 (降 7.53%), 品种间差异达极显著水平 ($F=8.985^{**}$)。单位面积穗数与成熟期吸氮量呈线性负相关 ($r=-0.331$), 但未达显著水平。表明单

表 1 不同高产新品种抽穗期、抽穗后干物质生产量和氮素吸收量的差异

Table 1. Differences of dry matter production and nitrogen absorption at heading and grain-filling period of different high yielding cultivars.

品种 Cultivar	干物质生产量 Dry matter production		吸氮量 Nitrogen absorption	
	抽穗期	抽穗后	抽穗期	抽穗后
	Heading stage	Post-heading	Heading stage	Post-heading
A	1206.77	755.22 a	16.83	4.31 a
B	1203.99	743.89 a	16.91	4.20 a
C	1204.00	702.99 ab	16.75	3.82 bc
D	1180.68	658.75 abc	16.44	3.47 bc
E	1193.98	628.74 bc	16.22	3.29 bc
F	1156.14	618.95 bc	16.24	3.18 bc
G	1162.03	954.63 c	16.16	2.98 c
H	1142.74	591.50 c	16.05	2.93 c
CK	1145.73	591.80 c	16.23	2.80 c
<i>r</i>	0.535**	0.808**	0.592**	0.718**
<i>F</i> 值 <i>F</i> Value	1.023	4.265**	0.687	2.381*

不同字母表示差异显著， $P < 0.05$ (新复极差测验)。下同
Data flanked by different letters indicate significant difference at $P < 0.05$ by Duncan's multiple new range test. The same as in the following tables.

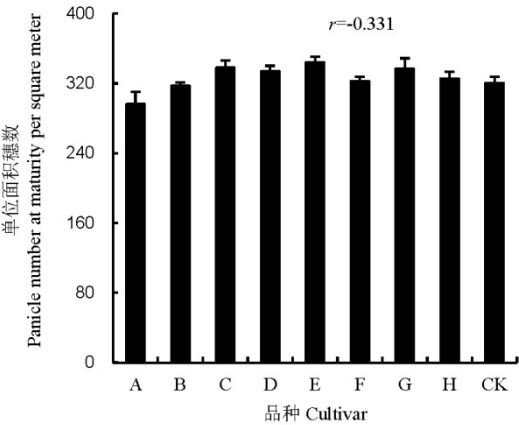


图 4 不同高产新品种单位面积穗数的差异
Fig. 4. Panicle number at maturity of different high yielding cultivars.

位面积穗数变化对成熟期吸氮量有一定的影响，但未达显著水平。

由图 5 可知，8 个新品种成熟期单穗吸氮量为 56.74~71.44 mg，与对照宁粳 1 号相比有增有减，平均增加 1.9(−2.69~12.01) mg，平均增幅 3.19%(−4.53~20.21%)，品种间的差异达极显著水平($F=22.03^{**}$)，其与成熟期吸氮量呈极显著线性正相关($r=0.807^{**}$)，说明提高成熟期单穗吸氮量有利于提高成熟期吸氮量。

2.3.4 生长天数与吸氮强度的差异

由图 6 可知，9 个品种(含 CK)抽穗前生长天数变幅为 100.67~108 d，全生育期天数变幅为 155.50~160.17 d，品种间差异均达显著水平($F_{抽前}$

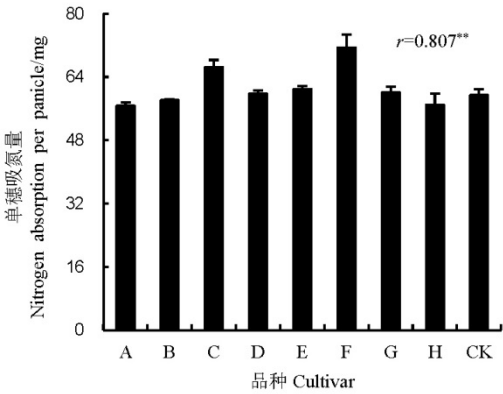


图 5 不同高产新品种成熟期单穗吸氮量的差异
Fig. 5. Nitrogen absorption per panicle of different high yielding cultivars.

=2.901*, $F_{全}=12.07^{*}$)，但两者与成熟期吸氮量相关未达显著($r_1=0.160$, $r_2=0.022$)。

由表 2 可知，8 个新品种抽穗期吸氮强度的变幅为 150.2~165.01 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。与对照宁粳 1 号相比有增有减，平均增加 3.48(−4.84~9.97) $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ，平均增幅达 2.24%(3.12%~6.43%)，品种间差异未显著水平($F=1.262$)，其与成熟期吸氮量呈显著线性正相关($r_{抽}=0.448^{*}$)。

由表 3 可知，8 个新品种全生育期吸氮强度为 120.78~135.45 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ，均大于对照宁粳 1 号，平均增加 6.98(1.3~15.98) $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ，增幅达 5.85%(1.09%~10.44%)，品种间差异达极显著水平($F=11.681^{**}$)，其与成熟期吸氮量的相关性呈极显著

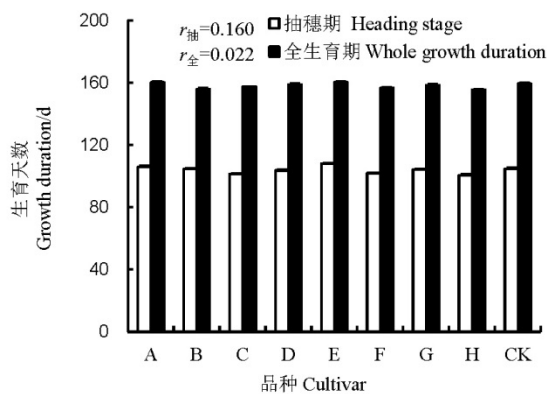


图 6 不同高产新品种生育期的差异
Fig. 6. Growth duration differences of different high yielding cultivars.

表 2 不同高产新品种吸氮强度的差异
Table 2. Differences with nitrogen absorption rate of different high yielding cultivars.

品 种	抽穗期	全生育期
Cultivar	Heading stage	Whole growth duration
A	159.01 ab	131.95 a
B	161.63 ab	135.45 a
C	165.01 a	130.52 a
D	158.81 ab	125.22 b
E	150.20 b	121.79 bc
F	159.20 ab	123.94 bc
G	154.85 ab	120.78 bc
H	159.45 ab	122.06 bc
CK	155.04 ab	119.48 c
r	0.448*	0.971*
F 值 F value	1.262	11.681**

线性正相关($r=0.971^{**}$)。这说明抽穗期、成熟期吸氮强度的增加均能提高成熟期吸氮量。

2.3.5 早熟晚粳高产新品种其他氮素利用效率的表现

由表 3 可知, 8 个高产新品种氮素干物质生产效率、氮素收获指数、氮肥吸收利用率(RE)、氮肥生理利用率(PE)、氮肥农学利用率(AE)、氮肥偏生产率(PEB)分别比对照宁粳 1 号增加 1.11%、4.53%、3.42%、4.14%、7.06%、7.88%, 其中, 氮素收获指数和氮素偏生产率品种间差异达到极显著水平($F=15.239^{**}$, $F_{\text{PEB}}=15.875^{*}$); 氮素收获指数($r=0.804^{**}$)、氮肥吸收利用率($r=0.776^{**}$)、氮肥农学利用率($r=0.738^{**}$)、氮肥偏生产率($r=0.909^{**}$)均与成熟期氮素吸收量达极显著相关, 说明增加这些指标有利于成熟期氮素吸收量的提高; 进一步分析表明, 氮素干物质生产效率($r=0.512^{*}$)、氮素收获指数

($r=0.520^{*}$)、氮肥生理利用率($r=0.754^{**}$)、氮肥农学利用率($r=0.766^{**}$)、氮肥偏生产率($r=0.720^{**}$)与成熟期氮素籽粒生产效率的相关达到显著或极显著水平, 说明增加这些指标同样有利于成熟期氮素籽粒生产效率的提高。

2.3.6 早熟晚粳高产新品种氮素分配与运转的基本特征

由表 4 可知, 8 个新品种抽穗期茎鞘叶、成熟期茎鞘叶氮素比例、抽穗期穗氮素比例分别比对照宁粳 1 号减少 0.33%、7.71%和 4.54%, 其中, 成熟期茎鞘叶氮素比例的品种间差异达到极显著水平($F=15.239^{**}$)。茎鞘叶氮素比例的下降值、成熟期穗氮素比例和穗比例的增加值分别比对照宁粳 1 号高 4.57%、4.54%和 5.99%, 品种间差异也均达到极显著水平($F_{\text{下降值}}=9.892^{**}$ 、 $F_{\text{成熟}}=15.239^{**}$ 和 $F_{\text{增加值}}=13.087^{**}$); 分析各指标与成熟期氮素吸收量、氮素籽粒生产效率的相关性表明, 茎鞘叶氮素比例的下降值($r_{\text{吸}}=0.790^{**}$ 、 $r_{\text{籽}}=0.556^{**}$)、成熟期穗氮素比例($r_{\text{吸}}=0.803^{**}$ 、 $r_{\text{籽}}=0.520^{**}$)和穗氮素比例的增加值($r=0.790^{**}$ 、 $r_{\text{籽}}=0.557^{**}$)与成熟期氮素吸收量、氮素籽粒生产效率均呈极显著线性正相关。成熟期茎鞘叶氮素比例($r_{\text{吸}}=-0.803^{**}$ 、 $r_{\text{籽}}=-0.520^{**}$)和抽穗期穗氮素比例($r_{\text{吸}}=-0.253$ 、 $r_{\text{籽}}=-0.368$)与成熟期氮素吸收量、氮素籽粒生产效率呈线性负相关, 说明增加成熟期茎鞘叶氮素比例的下降值、成熟期穗氮素比例和穗氮素比例的增加值均有利于成熟期氮素吸收量、氮素籽粒生产效率的提高, 而增加成熟期茎鞘叶氮素比例则产生消极影响。进一步分析表明, 各指标对成熟期氮素吸收量的影响程度要大于对成熟期氮素籽粒生产效率。

由表 5 可知, 8 个高产品种抽穗期茎鞘叶吸氮量、氮素转运量和转运率比对照宁粳 1 号分别增加 1.68%、6.30%和 4.46%, 而成熟期茎鞘叶氮素吸收量则比对照降低 3.26%, 其中, 茎鞘叶的氮素转运比例($F=3.616^{*}$)品种差异性达到显著水平。8 个高产品种抽穗期穗吸氮量、氮素转运量和转运比例比对照宁粳 1 号分别增加 9.79%、11.63%和 1.59%, 而成熟期穗吸氮量则比对照减少 1.57%, 其中成熟期穗吸氮量($F=27.359^{**}$)、穗氮素增加量($F=28.639^{**}$)和增加率($F=6.481^{**}$)的品种差异性均达到极显著水平; 统计分析表明, 抽穗期茎鞘叶吸氮量($r_{\text{吸}}=0.609^{**}$ 、 $r_{\text{籽}}=0.416^{*}$)、茎鞘叶氮素转运量($r_{\text{吸}}=0.667^{**}$ 、 $r_{\text{籽}}=0.577^{*}$)、茎鞘叶氮素转运率($r_{\text{吸}}=0.622^{**}$ 、 $r_{\text{籽}}=0.619^{*}$)、成熟期穗吸氮量($r_{\text{吸}}=0.959^{**}$ 、 $r_{\text{籽}}=0.463^{*}$)、穗氮素增加量($r_{\text{吸}}=0.946^{**}$ 、 $r_{\text{籽}}=0.478^{*}$)和穗氮素增

表 3 不同高产新品种成熟期其他氮素利用效率的差异

Table 3. Differences of nitrogen use efficiency of different high yielding cultivars.

品 种 Cultivar	氮素干物质生产效率 Dry matter production efficiency/(g·g ⁻¹)	氮收获指数 N harvest index/%	氮肥吸收利用率 NRE/%	氮肥生理利用率 NPE/(g·g ⁻¹)	氮肥农学利用率 NAE/(g·g ⁻¹)	氮肥偏生产力 NPFP/(g·g ⁻¹)
A	92.83	69.24 a	42.90 a	47.22	15.79 a	39.03 a
B	92.30	68.58 ab	42.73 a	47.68	15.77 a	38.81 ab
C	92.73	67.17 bc	41.67 ab	46.96	15.40 ab	37.26 bc
D	92.44	66.24 c	40.74 ab	46.43	14.92 ab	35.85 cd
E	92.99	65.34 cd	40.16 ab	46.35	14.65 ab	34.98 de
F	91.81	62.96 e	39.27 ab	46.77	14.30 a	34.90 de
G	91.76	62.98 e	39.05 ab	46.33	14.17 ab	34.15 de
H	91.20	63.89 de	38.01 b	46.99	14.05 b	33.62 e
CK	91.25	62.95 e	39.21 ab	44.98	13.90 b	33.44 e
<i>r</i> _吸	0.13	0.804**	0.776**	-0.02	0.738**	0.909**
<i>r</i> _籽	0.512*	0.520*	0.098	0.754**	0.766**	0.720**
<i>F</i> 值 <i>F</i> vaule	0.673	15.239**	2.001	0.143	2.205	15.875**

NRE, Nitrogen recovery efficiency; NPE, Nitrogen physiological efficiency; NAE, Nitrogen agronomy efficiency; NPFP, Nitrogen partial factor productivity.

表 4 不同高产新品种在不同器官中氮素分配比例的变化

Table 4. Differences of nitrogen absorption and distribution ratio of different high yielding cultivars.

%

品 种 Cultivar	茎鞘叶吸氮比例 N in stem and leaf			穗吸氮比例 N in panicle		
	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity	抽穗期到成熟期的下降值 Decline from heading to maturity	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity	抽穗期到成熟期的增加值 Added value from heading to maturity
A	90.51 a	30.76 e	59.75 a	9.49 b	69.24 a	59.75 a
B	90.14 b	31.42 de	58.72 ab	9.86 ab	68.58 ab	58.72 ab
C	89.98 ab	32.83 cd	57.15 bc	10.02 ab	67.17 bc	57.15 bc
D	90.17 ab	33.76 c	56.41 bc	9.83 ab	66.24 c	56.41 cd
E	89.77 ab	34.66 bc	55.11 cd	10.23 ab	65.34 cd	55.11 cde
F	90.51 a	37.04 a	53.47 de	9.49 b	62.96 e	53.48 ef
G	89.14 ab	37.02 a	52.12 e	10.86 a	62.98 e	52.12 f
H	90.31 a	36.11 ab	54.20 cd	9.69 b	63.89 de	54.20 f
CK	89.77 ab	37.05 a	47.72 de	10.23 ab	62.95 e	52.71 f
<i>r</i> _吸	0.242	-0.803**	0.790**	-0.253	0.803**	0.790**
<i>r</i> _籽	0.358	-0.520**	0.556**	-0.368	0.520**	0.557**
<i>F</i> 值 <i>F</i> vaule	1.787	15.239**	9.892**	1.802	15.239**	13.087**

加比例($r_{\text{吸}}=0.692^{**}$ 、 $r_{\text{籽}}=0.470^{*}$)与成熟期氮素吸收量、籽粒生产效率均呈显著或极显著相关,说明增加这些指标均有利于成熟期氮素吸收量、氮素籽粒生产效率的提高。而成熟期茎鞘叶吸氮量($r_{\text{吸}}=-0.317$ 、 $r_{\text{籽}}=-0.488^{*}$)、抽穗期穗吸氮量($r_{\text{吸}}=-0.06$ 、 $r_{\text{籽}}=-0.174$)与成熟期氮素吸收量、氮素籽粒生产效率呈负相关,其中,除成熟期茎鞘叶氮素吸收量与氮素籽粒生产效率的相关达显著水平外,其余各指标与两因素的相关均不显著。

2.4 高产新品种吸氮量的构成因子对成熟期总吸氮量的通径分析

进一步对影响这 8 个高产新品种成熟期两年平

均吸氮量的因素进行通径分析(表 6),发现抽穗后吸氮量、成熟期干物质生产量、成熟期单穗吸氮量、成熟期吸氮强度对成熟期吸氮量的影响分别比抽穗期吸氮量、成熟期全株含氮率、单位面积穗数和全生育期大。

3 讨论

3.1 早熟晚粳高产新品种氮素吸收、氮素利用的基本特征

氮是影响水稻生长发育最敏感的元素,氮素吸收与利用是水稻产量形成的重要营养基础。一般认

表 5 不同高产新品种结实期氮素转运的差异
Table 5. Difference of nitrogen translocation at maturity in different high yielding cultivars.

品 种 Cultivar	茎鞘叶吸氮量 N in stem and leaf/(g·m ⁻²)				穗吸氮量 N in panicle/(g·m ⁻²)			
	抽穗期	成熟期	氮素转运量	转运率	抽穗期	成熟期	氮素增加量	增加率
	Heading	Maturity	Nitrogen translocation	Nitrogen translocation ratio/%	Heading	Maturity	Nitrogen translocation	Nitrogen translocation ratio/%
A	15.23	6.50 c	8.74 a	57.36 a	14.64 ab	1.60 a	13.04 a	89.10 a
B	15.25	6.61 bc	8.64 ab	56.65 ab	14.50 ab	1.66 a	12.84 a	88.58 ab
C	15.07	6.75 abc	8.31 abc	55.18 abc	13.81 ab	1.68 b	12.13 b	87.82 abc
D	14.82	6.71 abc	8.10 abc	54.69 abcd	13.19 ab	1.62 c	11.57 c	87.70 abc
E	14.55	6.77 abc	7.79 abc	53.51 abcd	12.74 ab	1.67 cd	11.07 cd	86.89 cd
F	14.68	7.17 a	7.51 bc	51.16 cd	12.26 b	1.56 e	10.69 de	87.25 bcd
G	14.39	7.09 ab	7.30 abc	50.72 d	12.06 a	1.78 de	10.28 de	85.27 e
H	14.47	6.83 abc	7.64 c	52.79 bcd	12.15 b	1.58 e	10.57 e	87.02 cd
CK	14.56	7.03 ab	7.53 bc	51.70 cd	11.99 ab	1.67 de	10.32 e	86.08 e
<i>r</i> _吸	0.609**	−0.317	0.667**	0.622**	−0.060	0.959**	0.946**	0.692**
<i>r</i> _籽	0.416*	−0.488*	0.577**	0.619**	−0.174	0.463*	0.478*	0.470*
<i>F</i> 值 <i>F</i> value	0.823	2.031	2.261	3.616*	1.275	27.359**	28.639**	6.481**

表 6 不同高产新品种吸氮量构成因子对成熟期吸氮量的通径分析
Table 6. Path analysis for the components determining nitrogen absorption at maturity of different high yielding cultivars.

y	x	直接通径系数	x 与 y 的相关系数
		Indirect path coefficient	Correlation coefficient of x and y
成熟期吸氮量	抽穗期吸氮量 N absorption at heading stage	0.703	0.592**
N absorption at maturity	抽穗后吸氮量 N absorption during grain-filling period	0.813	0.718**
	成熟期干物质生产量 Dry matter productions at maturity	1.089	0.964**
	成熟期全株含氮率 Nitrogen content of whole plant at maturity	0.320	−0.183
	成熟期单穗吸氮量 N absorption per panicle at maturity	1.640	0.807**
	穗数 Panicle number	1.016	−0.331
	成熟期群体吸氮强度 N absorption rate at maturity	1.024	0.971**
	全生育期天数 Days from sowing to maturity	0.244	0.022

为，在一定范围内，水稻产量与氮素吸收量存在明显的伴随关系，氮高效吸收型水稻产量相对高^[2-4]。也有一些研究表明，水稻产量与总吸氮量并不是直线关系，而是呈先增后减的抛物线型变化趋势^[6-11]。尽管如此，结实期穗部氮素增加量大被证明为有利于产量的提高。本研究表明，8 个早熟晚粳新品种理论产量与实收产量均比对照宁粳 1 号有不同程度的增加，它们抽穗期、抽穗后、成熟期吸氮量绝大多数均高于对照，结实期茎鞘叶氮素转运量大，结实期穗部氮素增加量大，产量表现出随着吸氮量的增加而呈明显增加趋势，说明早熟晚粳新品种主要生育期吸氮能力强是其产量高的主要原因。

许多研究表明^[12-14]，水稻产量既受成熟期总吸氮量显著影响，也与吸收到植株内单位氮素形成的籽粒产量的能力即氮素籽粒生产效率有密切的关系。最近，董桂春等^[9]认为，水稻产量与氮素籽粒生产效率存在明显线性正相关，氮素籽粒生产效率

高的水稻具有产量高的特点，其他一些报道也显示提高氮素籽粒生产效率可促进水稻产量的提高。可见，水稻产量提高不仅取决于氮素吸收，还取决于氮素的分配与利用。本研究表明，8 个早熟晚粳高产新品种氮素籽粒生产效率均高于对照，虽然品种间差异不显著，但氮素籽粒生产效率与产量呈极显著线性正相关。可见，氮素籽粒生产效率高是这几个新品种重要的氮素利用特征。

此外，评价水稻氮素利用效率还包括氮素干物质生产效率、氮收获指数、氮肥吸收利用率、氮肥生理利用率、氮肥农学利用率、氮肥偏生产力等指标。Singh 等^[16-17]报道，水稻 75% 的产量差异是吸收效率造成的，氮高效品种始终保持着较高的吸收利用效率。殷春渊等则认为^[18]，高产品种在各个生育阶段氮素积累量和多数氮素利用效率（氮肥收获指数、吸收利用率、农学利用率、偏生产率等）指标均高，但氮素生理利用效率对产量的贡献因不同

处理方式而不同, 王伟妮等^[17]也验证了这一观点。本研究表明, 8 个早熟晚粳高产品种的氮素干物质生产效率、氮肥生理利用率、氮素收获指数、氮肥农学利用率、氮肥偏生产力、氮肥吸收利用率均高于对照宁粳 1 号, 后四个指标均与产量关系密切, 说明本研究的高产新品种这些指标同样具有较

3.2 吸氮量、氮素籽粒生产效率对氮素其他利用效率的影响

虽然评价氮肥(氮素)吸收利用率的指标较多, 但在相同试验条件下, 从植株角度讲, 水稻氮素吸收利用效率可以简化为两个指标, 即(成熟期)总吸氮量与(成熟期)氮素籽粒生产效率。有研究认为, 成熟期吸氮量大, 其氮肥农学利用率、氮素生理利用率、氮肥吸收利用效率也高, 而氮素干物质生产效率、氮素收获指数则较小^[19]; 而氮素籽粒生产效率高的水稻品种主要特征是氮素的吸收利用率、氮生理利用效率、氮素农学利用率、氮收获指数、氮素干物质生产效率较高。本研究表明, 8 个早熟晚粳品种成熟期吸氮量大对氮素收获指数、氮肥吸收利用率、氮肥农学利用率、氮肥偏生产力的同步提高, 氮素籽粒生产效率大对氮素干物质生产率、氮素收获指数、氮肥农学利用率、氮素生理利用率、氮素偏生产力同步提高具有显著的促进作用。可见, 吸氮量、氮素籽粒生产效率是氮素吸收利用效率最重要的特征指标。

3.3 影响吸氮量、氮素籽粒生产效率的因素分析

水稻氮素吸收、氮素利用受栽培方式、施氮水平、年份等外部因素的影响, 更受到品种自身因素的影响。不同基因型水稻氮素吸收、氮素利用差异极大。前人从品种研究氮素吸收利用, 有的试验规模较大, 但多为遗传群体或是不同熟期类型的水稻品种, 而采用相同生育类型进行试验还不多, 对它们产量水平、氮素吸收利用特征及原因分析尚不清楚, 通过本研究有助于分析它们构成要素的差别。

水稻成熟期吸氮量是由抽穗前吸氮量和抽穗后吸氮量所组成。水稻氮素吸收具有明显的阶段性。一般而言, 水稻生长前、中期(或抽穗前)氮素吸收量要占总量的70%~80%, 甚至更高, 而抽穗后吸收比例较小, 前期较高的吸收比例有利于形成高产群体, 后期较小的比例有利于水稻从氮代谢向碳代谢转变, 促进抽穗后光合产物向籽粒输送, 有利于产量的形成。在籼稻品种中, 总吸收量大的品种抽穗前吸氮量大, 抽穗后吸氮量也大, 抽穗后吸氮比例高^[10], 但粳稻中高产品种(高吸氮量)抽穗后氮素积

累量反而低于低产品种, 总吸氮量主要受到抽穗期吸氮量的显著影响^[18]。本研究表明, 所有品种包括对照抽穗前吸氮量均大于抽穗后吸氮量, 抽穗前比例明显高于抽穗后比例。新品种中有7个品种抽穗前吸氮量高于对照, 但增幅很小, 而所有新品种抽穗期后均明显高于对照, 有的甚至高达50%, 可见新品种成熟期吸氮量明显高于对照, 主要与抽穗后吸氮量大幅增加有密切的关系, 相关分析与途径分析的结果也可很好地验证这一点, 这与前人研究结果有所不同。

水稻成熟期吸氮量可以理解为单位面积穗数与单穗吸氮量的乘积。一些研究表明, 成熟期氮素累积量与单位面积穗数线性正相关, 氮素累积量大的籼稻品种单位面积穗数较多^[21], 在栽培试验中也发现高氮素累积量与多穗有明显的相关性^[22-24]。但也有一些研究认为^[25-27], 目前高产品种主要是大穗型品种, 单穗重量大, 要使这类品种单穗重充分地表达, 并实现高产, 不仅要有高的群体吸氮量, 还要有较大的单穗吸氮量作支撑。本研究表明, 8 个高产新品种与对照相比单位面积穗数有增有减, 总吸氮量处于前 2 位品种穗数还明显小于对照, 单位面积穗数与吸氮量负相关, 但相关不显著, 说明增穗对提高吸氮量没有促进作用。而 8 个高新品种虽有少量品种的单穗吸氮量低于对照, 但总吸氮量处于前 2 位品种明显大于对照, 单穗吸氮量与群体吸氮量关系非常密切。途径分析也表明, 单穗吸氮量对成熟期吸氮量的贡献要大于单位面积穗数对总吸氮量的贡献, 说明高产粳稻新品种成熟期总吸氮量的增加是通过(稳定穗数基础上)提高单穗吸氮量来实现的, 这与董桂春等研究结果相似。

水稻吸氮量受到品种生育期的影响, 也受到单位时间内吸收的氮素量(吸氮强度或吸氮速率)的影响。一般认为, 生育期长的品种吸氮量较大^[28-29], 无论籼稻品种还是粳稻品种均有相同的趋势。但生育期仅是影响吸氮能力的部分因素, 更多的是受到品种吸氮强度或氮素吸收速率的影响。本研究表明, 所有品种包括对照均属于早熟晚粳新品种, 生育期相对集中, 抽穗期天数<8 d, 全生育期天数相差<5 d, 与对照相比有长有短, 吸氮量大的品种生育期有长的, 也有短的, 吸氮量小的品种有短的, 也有长的, 没有明显的规律, 可见吸氮量与生育期关系并不密切。而反映单位时间吸氮强度或吸氮速率品种间差异较大, 8 个新品种虽有少量品种的吸氮强度低于对照, 但总吸氮量处于前 3 位的品种的吸氮强度明显大于对照, 抽穗期、全生育期吸氮强度与成熟期

吸氮量关系均非常密切,吸氮强度对吸氮量的直接途径系数比全生育期天数对吸氮量的直接途径系数要高 4 倍以上。说明吸氮强度大成熟期吸氮量增加的主要因素之一。

水稻吸氮量也与植株含氮率和干物质生产量有密切的关系。一些研究认为,氮素累积量大的水稻品种成熟期植株含氮率较高,但也有研究^[30-32]表明氮素累积量大的品种植株含氮率较低或吸氮能力不同的品种植株含氮率差异较小;若干研究均表明,在相同的氮肥处理下,氮素累积量大的品种干物质生产能力强,抽穗前、后干物质生产量及生物产量均有相同的表现^[33-35]。本研究表明,8 个早熟晚粳高产品种抽穗前、抽穗后植株含氮率差异<2%,而成熟期干物质生产量差异在 12% 左右,这些品种总吸氮量的差异主要是由于其干物质生产能力的差异,干物质生产量对吸氮量的直接途径系数比含氮率对吸氮量的直接途径系数要高 2.4 倍。说明这些新品种氮素吸收量高于对照主要是由于干物质生产能力强、生产量大所引起的。

水稻各个器官的吸氮量及其分配、运转也对氮素吸收利用产生明显的影响。一般认为,高产品种穗部氮素比例明显大于低产品种,茎鞘叶氮素比例小于低产品种,但张岳芳等^[21]研究表明,吸氮量大的籼稻品种氮素抽穗期、成熟期分配到穗的比例小,分配到茎鞘叶的比例相对较高,在粳稻上也有相似的结论^[18],但吸氮量越高的品种,成熟期根、茎鞘叶吸氮量越大,穗吸氮量并不是直线变化,而呈现抛物线的变化趋势。

本研究表明,高产品种抽穗期茎鞘叶、穗氮累积量大,结实期茎鞘叶氮素转运量大,转运率大,穗氮素增加量大,成熟期茎鞘叶积累量减少、比例下降,穗氮积累量大、比例提高。进一步分析表明,抽穗期茎叶吸氮量大、结实期茎鞘叶氮转运量大,转运率高,抽穗期穗氮积累量大,结实期穗氮增加量大既有利于成熟期氮素吸收量的增加,也有利于氮素籽粒生产效率的提高,但与总吸收量的相关程度要明显大于与氮素籽粒生产效率。

4 结论

在同一栽培条件下,8 个早熟晚粳新品种中,产量较高的品种其氮素吸收利用能力也具有较强的优势,且品种间的差异性也比较显著。进一步分析表明,随着品种产量潜力的提高,总吸氮量也呈现增加的趋势。品种的总吸氮量与成熟期干物质生

产量、穗后吸氮量、单穗吸氮量、群体吸氮强度、品种的氮素吸收利用效率等因素线性正相关。

参考文献:

- [1] 张洪程,马群,杨雄,李敏,葛梦婕,李国业,戴其根,霍中洋,许轲,魏海燕,高辉,刘艳阳.水稻品种氮肥群体最高生产力及其增长规律.作物学报,2012,38(1): 86-98.
Zhang H C, Ma Q, Yang X, Li M, Ge M J, Li G Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Gao H, Liu Y Y. The highest population productivity of nitrogen fertilization and its variation rules in rice cultivars. *Acta Agron Sin*, 2012, 38(1): 86-98. (in Chinese with English abstract)
- [2] 董桂春,王余龙,张岳芳,陈培峰,杨连新,黄建晔.籼稻品种间氮素吸收利用的差异及其对产量的影响.作物学报,2007,33(1): 43-49.
Dong G C, Wang Y L, Zhang Y F, Chen P F, Yang L X, Huang J Y. Main index of source and sink in nitrogen use efficiency for grain output in conventional indica rice cultivars. *Acta Agron Sin*, 2007, 33(1): 43-49. (in Chinese with English abstract)
- [3] 陈琛,王熠,羊彬,朱正康,曹文雅,罗刚,周娟,王祥菊,于小凤,袁秋梅,仲军,姚友礼,黄建晔,王余龙,董桂春.株高对遗传群体水稻株系氮素吸收利用的影响.中国农业科学,2015,48(22): 4450-4459.
Chen C, Wang Y, Yang B, Zhu Z K, Cao W Y, Luo G, Zhou J, Wang X J, Yu X F, Yuan Q M, Zhong J, Yao Y L, Huang J Y, Wang Y L, Dong G C. Plant height affects nitrogen absorption and utilization in rice with similar genetic background. *Sci Agric Sin*, 2015, 48(22): 4450-4459 (in Chinese with English abstract).
- [4] 董桂春,王余龙,张岳芳,陈培峰,杨连新,黄建晔.影响常规籼稻品种氮素籽粒生产效率的主要源库指标.作物学报,2006,32(10): 1511-1518.
Dong G C, Wang Y L, Zhang Y F, Chen P F, Yang L X, Huang J Y. Study on the fundamental traits of yield and yield components in conventional indica rice cultivars with different nitrogen use efficiency for grain output. *Acta Agron Sin*, 2006, 32(10): 1511-1518 (in Chinese with English abstract).
- [5] 薛亚光.水稻高产与养分高效利用栽培技术及其生理基础研究.扬州:扬州大学,2013.
Xue Y G. Cultivation Techniques for High Yielding and High Nutrient Use Efficiency in Rice and Their Physiological Bases. Yangzhou: Yangzhou University, 2013.
- [6] 郎有忠,窦永秀,王美娥,王美娥,张祖建,朱庆森等.水稻生育期对籽粒产量及品质的影响.作物学报,2012,38(3): 528-534.
Lang Y Z, Dou Y X, Wang M E, Zhang Z J, Zhu Q S. Effects of growth duration on grain yield and quality in rice (*Oryza sativa* L.). *Acta Agron Sin*, 2012, 38(3): 528-534. (in Chinese with English abstract)

- [7] 董明辉, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 孟立明. 植物养分利用效率研究综述. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 2002, 23(4): 43-46.
Dong M H, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Meng L M. Research on the nitrogen absorption and utilization of different rice varieties. *J Yangzhou Univ: Agric & Life Sci Edn*, 2002, 23(4): 43-46 (in Chinese with English abstract)
- [8] 朴钟泽, 韩龙植, 高熙宗. 水稻不同基因型氮素利用效率差异. 中国水稻科学, 2003, 17 (3): 233-238.
Piao Z Z, Han L Z, Koh H J. Variations of nitrogen use efficiency by rice genotype. *Chin J Rice Sci*, 2003, 17(3): 233-238(in Chinese with English abstract)
- [9] 董桂春. 不同氮素籽粒生产效率类型籼稻品种的基本特点. 扬州: 扬州大学, 2007.
Dong G C. Basic characteristics of Indica rice cultivars with different types of nitrogen use efficiency for grain output. Yangzhou: Yangzhou University, 2007.
- [10] Inthapanya P, Sihavong P, Sihathap V, Chanhphengsay M, Fukai S, Basnayake J. Genotype differences in nutrient uptake and utilization for grain yield production of rain fed lowland rice under fertilized and non fertilized conditions. *Field Crops Res*, 2000, 65: 57-68
- [11] 张岳芳, 王余龙, 张传胜, 董桂春, 杨连新, 黄建晔, 龙银成. 水稻的源库关系及碳、氮代谢的研究进展. 作物学报, 2006, 32(8): 1121-1129.
Zhang Y F, Wang Y L, Zhang C S, Dong G C, Yang L X, Huang J Y, Long Y C. Relationship between N accumulation and root traits in conventional Indica rice varieties (*Oryza sativa* L.). *Acta Agron Sin*, 2006, 32(8): 1121-1129(in Chinese with English abstract).
- [12] Isfan D, Csemi I, Tabi M. Genetic variation of the physiological efficiency index of nitrogen in triticale. *J Plant Nutr*, 1991, 14(12):1381-1390.
- [13] Tirol-Padre A, Ladha J K, Singh U, Laureles E, Punzalan G.. Grain yield performance of rice genotypes at suboptimal levels of soil N as affected by N uptake and utilization efficiency. *Field Crops Res*, 1996, 46:127-143.
- [14] 单玉华, 王余龙, 山本由德, 黄建晔, 董桂春, 杨连新, 张传胜, 居静. 不同水稻基因型对氮肥反应的差异及氮素利用效率的研究. 江苏农业研究, 2001, 22(1): 12-15.
Shan Y H, Wang Y L, Yamamoto Y, Huang J Y, Dong G C, Yang L X, Zhang C S, Ju J. Genotypic differences of nitrogen use efficiency in various types of indica rice (*Oryza sativa* L.). *J Jiangsu Agric Res*, 2001, 22(1): 12-15(in Chinese with English abstract)
- [15] 单玉华, 王余龙, 山本由德, 黄建晔, 杨连新, 张传胜. 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): 42-45.
Shan Y H, Wang Y L, Yamamoto Y, Huang J Y, Yang L X, Zhang C S. Study on the differences of nitrogen uptake and use efficiency in different types of rice. *J Yangzhou Univ: Nat Sci Edn*, 2001, 4(3): 42-45(in Chinese with English abstract).
- [16] Singh U, Ladha J K, Castillo E G, Punzalan G, Tirol-Padre A, Duqueza M. Genotypic variation in nitrogen use efficiency in medium- and long-duration rice. *Field Crops Res*, 1998, 58: 35-53.
- [17] 董桂春, 李进前, 张彪, 周娟, 张传胜, 张岳芳, 杨连新, 黄建晔, 王余龙. 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(03): 289-296.
Dong G C, Li J Q, Zhang B, Zhou J, Zhang C S, Zhang Y F, Yang L X, Huang J Y, Wang Y L. Some related traits in conventional Indica rice cultivars with high nitrogen use efficiency for grain yield. *Chin J Rice Sci*, 2009, 23(03): 289-296(in Chinese with English abstract).
- [18] 殷春渊, 张庆, 魏海燕, 张洪成, 戴其根, 霍中洋, 许珂, 马群, 杭杰, 张胜飞. 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.
Yin C Y, Zhang Q, Wei H Y, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Ma Q, Hang J, Zhang S F. Differences in nitrogen absorption and use efficiency in rice genotypes with different yield performance. *Sci Agric Sin*, 2010, 43(01): 39-50(in Chinese with English abstract).
- [19] 王伟妮, 鲁剑巍, 鲁明星, 李小坤, 李云春, 李慧. 早、中、晚稻施氮增产效应及氮肥利用率研究. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 545-553.
Wang W N, Luo J W, Luo M X, Li X K, Li Y C, Li H. Study on effect of nitrogen fertilizer and nitrogen use efficiency of early, mid and late season rice. *Plant Nut Fert Sci*, 2011, 17(3): 545-553(in Chinese with English abstract)
- [20] 于小凤. 氮素高效吸收型水稻的基本特点. 扬州: 扬州大学, 2012.
Yu X F. Fundamental characteristics of conventional Japonica rice cultivars with high nitrogen uptake efficiency. Yangzhou: Yangzhou University, 2012.
- [21] 张岳芳. 不同氮素累积量类型籼稻品种的基本特点及其对供氮浓度的响应. 扬州: 扬州大学, 2006.
Zhang Y F. Fundamental Traits of Indica Rice Varieties (*Oryza sativa* L.) with Different Nitrogen Accumulation Capacity and Its Responses to Nitrogen Supplying Levels. Yangzhou: Yangzhou University, 2006.
- [22] 江立庚, 戴廷波, 韦善清, 甘秀芹, 徐建云, 曹卫星. 南方水稻氮素吸收与利用效率的基因型差异及评价. 植物生态学报, 2003, 27(4): 466-471.
Jiang L G, Dai T B, Wei S Q, Gan X Q, Xu J Y, Cao W X. Genotypic differences and valuation in nitrogen uptake and utilization efficiency in rice. *Acta Phytoecol Sin*, 2003, 27(4):466-471(in Chinese with English abstract)
- [23] 陈琛, 羊彬, 朱正康, 曹文雅, 罗刚, 周娟, 王祥菊, 于小凤, 袁秋梅, 仲军, 王熠, 黄建晔, 王余龙, 董桂春. 影响水稻遗传群体株系氮素高效吸收的主要根系性状. 中国水稻科学, 2015, 29(4): 390-398.
Chen C, Yang B, Zhu Z K, Cao W Y, Luo G, Zhou J, Wang X J, Yu X F, Yuan Q M, Zhong J, Wang Y, Huang J Y, Wang Y L, Dong G C. Root traits affecting nitrogen efficient absorption in rice genetic populations. *China J Rice Sci*, 2015, 29(4):390-398 (in Chinese with English abstract)

- abstract).
- [24] 王海候. 水稻氮素吸收利用与稻株重要农艺性状的关系. 扬州: 扬州大学, 2005.
Wang H H. Relationship between nitrogen uptake & utilization and important agronomic characters in rice(*Oryza Sativa* L.) Yangzhou: Yangzhou University, 2005.
- [25] 董桂春, 于小凤, 赵江宁, 居静, 田昊, 李进前, 张燕, 王余龙. 不同穗型常规籼稻品种氮素吸收利用的基本特点. 作物学报, 2009, 35(11): 2091-2100.
Dong G C, Yu X F, Zhao J N, Ju J, Tian H, Li J Q, Zhang Y, Wang Y L. General Characteristics of Nitrogen Uptake and Utilization in Conventional Indica Rice Cultivars with Different Panicle Weight Types. *Acta Agron Sin*, 2009, 35(11): 2091-2100.
- [26] 周娟, 李进前, 张彪, 张传胜, 张岳芳, 王余龙, 董桂春. 不同氮素籽粒生产效率类型籼稻品种氮素吸收利用的差异. 安徽农业科学, 2008, 36(36): 15805-15808.
Zhou J, Li J Q, Zhang B, Zhang C S, Zhang Y F, Wang Y L, Dong G C. Difference of nitrogen uptake and utilization in indica rice cultivars with different nitrogen use efficiency types for grain output. *J Anhui Agric Sci*, 2008, 36(36): 15805-15808 (in Chinese with English abstract).
- [27] 王志琴, 李国生, 杨建昌, 刘立军, 郎有忠, 朱庆森. 江苏现用主要粳稻品种对氮素的反应. 江苏农业研究, 2000, 21(4): 22-26.
Wang Z Q, Li G S, Yang J C, Liu L J, Lang Y Z, Zhu Q S. Responses of the main mid season japonica rice cultivars currently cultivated in Jiangsu to nitrogen applications. *J Jiangsu Agric Res*, 2000, 21(4): 22-26 (in Chinese with English abstract).
- [28] 严小龙, 张福锁. 植物营养遗传学. 北京: 中国农业出版社, 1997: 30-44.
- Yan X L, Zhang F S. Plant Nutrient Genetic. Beijing: China Agriculture Press, 1997: 30-44 (in Chinese)
- [29] Broadbent F E, De Datta S K, Laureles E V. Measurement of nitrogen utilization efficiency in rice genotypes. *Agron J*, 1987, 79: 786-791.
- [30] De Datta S K, Broadbent F E. Nitrogen use efficiency of 24 rice genotypes on N-deficient soil. *Field Crops Res*, 1990, 23: 81-92.
- [31] Ladha J K, Gid K, Bennett J, Peng S, Reddy C K, Reddy P M. Opportunities for increased nitrogen-use efficiency from improved lowland rice germplasm. *Field Crops Res*, 1998, 56: 4-11.
- [32] Heffer P. Assessment of Fertilizer Use by Crop at the Global Level: 2006/07-2007/08. Paris: International Fertilizer Industry Association. 2009. <http://www.fertilizer.org/ifa/content/view/full/4050/offset/470>.
- [33] Ntanos D A, Koutroubas S D. Dry matter and N accumulation and translocation for indica and japonica rice under Mediterranean conditions. *Field Crops Res*, 2002, 74(1): 93-101.
- [34] Jiang L G, Dai T B, Jiang D, Cao W X, Gan X Q, Wei S Q. Characterizing physiological N-use efficiency as influenced by nitrogen management in three rice cultivars. *Field Crops Res*, 2004, 88(2/3): 239-250.
- [35] 董桂春, 于小凤, 董燕萍, 李进前, 田昊, 周娟, 王云霞, 杨连新, 黄建晔, 王余龙. 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.
Dong G C, Yu X F, Dong Y P, Li J Q, Tian H, Zhou J, Wang Y X, Yang L X, Huang J Y, Wang Y L. A Difference in Nitrogen Uptake and Distribution in Conventional Indica Rice Cultivars with Different Sink Potentials. *Sci Agric Sin*, 2009, 42(10): 3432-3441 (in Chinese with English abstract).