

# 钵苗机插水稻氮素吸收与利用特征

胡雅杰 吴培 朱明 邢志鹏 戴其根 霍中洋 许轲 魏海燕 郭保卫 张洪程\*

(扬州大学 农业农村部长江流域稻作技术创新中心/江苏省作物遗传生理国家重点实验室培育点/江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心, 江苏扬州 225009; \*通讯联系人: E-mail: hc Zhang@yzu.edu.cn)

## Characteristics of Nitrogen Uptake and Utilization of Mechanically-transplanted Pot-tray-nursed Rice Seedlings

HU Yajie, WU Pei, ZHU Ming, XING Zhipeng, DAI Qigen, HUO Zhongyang, XU Ke, WEI Haiyan, GUO Baowei, ZHANG Hongcheng\*

(Innovation Center of Rice Cultivation Technology in the Yangtze Valley, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/The Nurturing center of Jiangsu for National Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology/ Jiangsu Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Yangzhou University, Yangzhou, China, 225009; Corresponding author, E-mail: hc Zhang@yzu.edu.cn)

**Abstract:** 【Objective】 The objective is to illuminate the characteristics of nitrogen uptake and utilization of Mechanically-transplanted pot-tray-nursed rice seedlings. 【Method】 The experiment was conducted in Xinghua test site of Yangzhou University in 2013 and 2014. Three type rice cultivars including large panicle type (LPT, Yongyou 2640 and Yongyou 8), medium panicle type (MPT, Wuyunjing 24 and Ningjing 3) and small panicle type (SPT, Huaidao 5 and Huaidao 10) were field-grown. With mechanically-transplanted carpet-tray-nursed rice seedlings (CS) as control, the nitrogen accumulation, translocation and utilization of nitrogen in pot seedlings mechanically transplanted rice (PS) were measured. 【Result】 Compared to those of CS, nitrogen content and nitrogen uptake of PS at the mid-tillering, jointing, heading and maturity were higher. Nitrogen accumulation in a given stage and nitrogen uptake rate of PS during transplanting to the mid-tillering and jointing to heading and heading to maturity were greater than those of CS. Compared to CS, PS led to significantly higher nitrogen output, apparent nitrogen translocation rate and nitrogen translocation conversion rate in leaf, and lower apparent nitrogen translocation rate and nitrogen translocation conversion rate in stem and sheath for all rice cultivars. Partial factor productivity of applied nitrogen of PS was significantly greater for all rice cultivars than those of CS. Furthermore, PS gave rise to higher nitrogen harvest index than CS with significant difference in LPT. 【Conclusion】 Hence, compared to CS, PS was beneficial to nitrogen absorption during the middle and late growth periods, and higher nitrogen output and nitrogen translocation conversion rate in leaf. The total nitrogen accumulation and nitrogen use efficiency under PS increased significantly as compared with those of CS.

**Key words:** pot seedlings mechanically transplanted rice; panicle type; nitrogen uptake; nitrogen translocation; nitrogen use efficiency

**摘 要:** 【目的】旨在阐明钵苗机插水稻氮素吸收与利用特征。【方法】于 2013—2014 年在扬州大学兴化试验基地选用大穗型品种甬优 2640 和甬优 8 号, 中穗型品种武运粳 24 号和宁粳 3 号, 小穗型品种淮稻 5 号和淮稻 10 号为试验材料, 以毯苗机插为对照, 研究钵苗机插水稻氮素积累、转运与利用特性。【结果】不同穗型品种的钵苗机插较毯苗机插在水稻分蘖中期、拔节期、抽穗期和成熟期植株含氮率和吸氮量较高。在移栽至分蘖中期、拔节至抽穗期和抽穗至成熟期阶段, 不同穗型品种钵苗机插氮素积累量和氮素吸收速率较毯苗机插高。与毯苗机插相比, 不同穗型品种的钵苗机插水稻叶片的氮素输出量、氮素表观转运率和氮素转运贡献率显著提高, 而茎鞘的氮素表观转运率和氮素转运贡献率较低。对氮素利用率而言, 不同穗型品种的钵苗机插较毯苗机插氮肥偏生产力显著提高, 氮素收获指数增加, 其中大穗型品种差异显著。【结论】钵苗机插较毯苗机插生育中、后期氮素吸收能力强, 后期叶片氮素转运量大、贡献率高, 植株总氮素积累量和氮肥利用率显著提高。

**关键词:** 钵苗机插水稻; 穗型; 氮素吸收; 氮素转运; 氮素利用率

中图分类号: S143.1; S511.043

文献标志码: A

文章编号: 1001-7216(2018)03-0257-08

收稿日期: 2017-07-28; 修改稿收到日期: 2017-12-05。

**基金项目:** 国家重点研发计划资助项目(2016YFD0300503, 2017YFD0301205); 国家自然科学基金资助项目(31701350); 国家公益性行业(农业)科研专项(201303102); 江苏省农业科技自主创新资金资助项目(CX[15]1002); 江苏省重点研发计划资助项目(BE2016344)。

追求水稻高产对保障我国粮食安全具有重要作用<sup>[1]</sup>。氮素是影响水稻生长发育、产量形成和稻米品质形成的重要因子。生产上获得水稻高产,往往通过增加施肥量来实现,特别是增施氮肥,但增施不当将造成水稻结实率低、植株倒伏、稻米品质变劣、贪青晚熟、病虫害加重和氮肥利用率低等问题<sup>[2-4]</sup>。如何在高产条件下提高水稻氮肥吸收与利用?前人从品种筛选<sup>[5-6]</sup>、种植方式<sup>[7-8]</sup>、栽插密度<sup>[9-10]</sup>、肥水运筹<sup>[11-15]</sup>、缓控释肥<sup>[16-17]</sup>等方面做了大量研究。如魏海燕等<sup>[6]</sup>通过筛选不同氮素利用效率水稻品种,认为氮高效基因型水稻抽穗期及抽穗后具有较强的氮素积累量。Singh等<sup>[12]</sup>研究认为在稻麦两熟制下优化氮肥管理能增加水稻氮素吸收积累量,进而提高氮素利用效率。Deng等<sup>[17]</sup>研究指出定量施用缓控释肥能促进水稻需氮量与供氮量平衡,减少氮量投入,提高氮素利用效率。综合前人研究发现,关于水稻氮素吸收利用的研究多数在传统大苗手栽和毯状小苗机插条件下进行,且研究品种类型或穗型较为单一。而以不同穗型品种为试验材料,研究钵苗机插水稻氮素积累、转运与利用特征鲜有报道。钵苗机插水稻是通过特定硬盘培育30~35 d壮秧,将钵育壮秧按一定的行距和株距均匀地、几乎无植伤地移植于大田的先进栽培技术。本课题组自2010年以来开展钵苗机插栽培研究,经多地多年试验证明,钵苗机插水稻较毯苗机插具有秧龄弹性大、秧苗素质高、栽后分蘖早生快发、低位分蘖成穗多、生育中后期干物质积累多等优势,平均增产5.3%~11.1%,同时还兼有毯苗机插水稻轻简化、省工省力等特点<sup>[18-20]</sup>。本研究选用3种穗型水稻品种,采用钵苗机插和毯苗机插,测定分析植株含氮率、吸氮量、阶段氮素积累量和吸氮速率、氮素转运和氮素利用率等指标,阐明不同机插方式水稻氮素吸收与利用特性差异,以期为大面积机插水稻高产氮高效提供理论依据和技术参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

试验于2013年和2014年在扬州大学农学院校外试验基地江苏省兴化市钓鱼镇(33°05'N, 119°58'E)进行。该区位于江苏里下河腹地,属北亚热带湿润气候区,年平均温度15℃左右,年降水量1024.8 mm左右,全年日照时数2305.6 h左右,无霜期227 d左右。试验地前茬为小麦(产量约6.7 t/hm<sup>2</sup>),土壤类型黏泥土,质地黏性。两年0—20 cm

土层有机质含量分别为24.8 g/kg和24.9 g/kg、全氮1.6 g/kg和1.6 g/kg、速效磷12.8 mg/kg和13.1 mg/kg、速效钾141.5 mg/kg和136.8 mg/kg。

### 1.2 供试材料

选取具有不同穗重的24个品种或组合进行预备试验,在统一高产栽培管理条件下,充分发挥其产量潜力,成熟期按平均单穗重进行聚类分析,即按欧式距离划分为大穗型(平均单穗重≥5 g)、中穗型(3 g<平均单穗重<5 g)和小穗型(平均单穗重≤3 g)三类。每穗型各选取2个代表性品种或组合进行正式试验,大穗型品种为甬优2640和甬优8号,中穗型品种为武运粳24号和宁粳3号,小穗型品种为准稻5号和淮稻10号。

### 1.3 试验设计

采用裂区设计,品种为主区,机插方式为裂区,重复3次,共36个小区,小区面积20 m<sup>2</sup>。试验设置水稻钵苗机插和水稻毯苗机插2种机插方式,栽插密度相同。2013年和2014年,钵苗机插采用塑料钵体硬盘早育秧,5月18日和5月20日播种,6月17日和6月19日模拟机插,秧龄均为30 d;毯苗机插采用塑料软盘早育秧,5月30日和6月2日播种,6月17日和6月19日模拟机插,秧龄均为18 d。根据钱银飞等<sup>[21]</sup>关于不同穗型水稻品种每穴适宜苗数的研究结果,确定大穗型品种每穴栽插2苗,中穗型品种每穴栽插3苗,小穗型品种每穴栽插4苗(表1)。

前茬麦秆机械粉碎全量还田(秸秆还田量约为6200 kg/hm<sup>2</sup>),翻耕后灌水泡田2 d,再次翻耕,小区间筑埂包膜,保证水肥独立排灌。总施纯氮300 kg/hm<sup>2</sup>,  $m_{\text{基肥}}:m_{\text{穗肥}}=6:4$ ,其中,基肥和分蘖肥各占50%,穗肥分两次等量施用;氮磷钾配比为 $m_{\text{N}}:m_{\text{P}_{2}\text{O}_5}:m_{\text{K}_2\text{O}}=5:2:3$ ,磷肥全作基肥一次施用,钾肥分两次施用,其中,基肥和促花肥各占50%。薄水移栽活棵,分蘖期稳定的浅水层灌溉;在有效分蘖临界叶龄的前一个叶龄( $N-n-1$ ),茎蘖数达到预期穗数的80%时,开始排水搁田;拔节至成熟期实行湿润灌溉,干干湿湿,直至收获前5~7 d。病虫草害防治,按当地大面积生产统一实施。

### 1.4 测定内容与方法

#### 1.4.1 干物质量测定

分别于分蘖中期(栽后20 d)、拔节期、抽穗期和成熟期,按小区茎蘖数的平均数取代表性植株3穴,105℃下杀青30 min,80℃下烘干至恒重,测定各器官干物质量。

表 1 不同机插方式水稻基本苗构成情况

Table 1. Basic seedlings of rice under different mechanical transplanting patterns.

机插方式 Mechanical transplanting method	行株距 Row-plant spacing/cm	密度 Density ( $\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$ )	大穗型 Large-panicle type		中穗型 Medium-panicle type		小穗型 Small-panicle type	
			每穴苗数 Seedling number per hill	基本苗 Basic seedling number/( $\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$ )	每穴苗数 Seedling number per hill	基本苗 Basic seedling number/( $\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$ )	每穴苗数 Seedling number per hill	基本苗 Basic seedling number/( $\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$ )
钵苗机插 PS	33×12.0	25.5	2	51.0	3	76.5	4	102.0
毯苗机插 CS	30×13.3	25.5	2	51.0	3	76.5	4	102.0

表中基本苗不计分蘖苗。PS—钵苗机插；CS—毯苗机插。下同。

Tillers are not included in basic seedlings. PS, Mechanical transplanting of pot tray grown seedlings; CS, Mechanical transplanting of carpet tray grown seedlings. The same as below.

表 2 不同机插方式下不同穗型水稻品种植株含氮率

Table 2. Nitrogen content of different panicle type rice under different mechanical transplanting patterns.

品种 Cultivar	机插方式 Mechanical transplanting method	分蘖中期 Mid-tillering	拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity
甬优 2640	钵苗机插 PS	2.23±0.02 a	1.96±0.03 a	1.45±0.02 a	1.05±0.01 a
Yongyou 2640	毯苗机插 CS	2.19±0.03 a	1.96±0.02 a	1.44±0.03 a	1.03±0.01 a
甬优 8 号	钵苗机插 PS	2.27±0.01 a	1.98±0.03 a	1.46±0.02 a	1.03±0.02 a
Yongyou 8	毯苗机插 CS	2.22±0.03 a	1.95±0.02 a	1.41±0.01 a	1.02±0.01 a
武运粳 24 号	钵苗机插 PS	2.41±0.02 a	2.04±0.04 a	1.51±0.03 a	1.10±0.03 a
Wuyunjing 24	毯苗机插 CS	2.38±0.05 a	2.02±0.02 a	1.46±0.02 a	1.08±0.01 a
宁粳 3 号	钵苗机插 PS	2.38±0.02 a	2.02±0.02 a	1.53±0.04 a	1.12±0.02 a
Ningjing 3	毯苗机插 CS	2.35±0.02 a	1.99±0.01 a	1.51±0.02 a	1.08±0.02 a
淮稻 5 号	钵苗机插 PS	2.31±0.03 a	2.07±0.04 a	1.53±0.01 a	1.13±0.01 a
Huaidao 5	毯苗机插 CS	2.27±0.01 a	2.03±0.02 a	1.50±0.03 a	1.11±0.01 a
淮稻 10 号	钵苗机插 PS	2.29±0.04 a	2.03±0.02 a	1.52±0.04 a	1.11±0.01 a
Huaidao 10	毯苗机插 CS	2.24±0.03 a	1.97±0.02 a	1.48±0.02 a	1.08±0.02 a

同列中不同字母表示在同品种处理间在 0.05 水平上差异显著。下同。

Values followed by different lowercase letters are significantly different at 0.05 level. The same as below.

1.4.2 植株全氮的测定

将分蘖中期、拔节期、抽穗期、成熟期各器官(茎鞘、叶片和穗)烘干后粉碎,采用浓H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>碳化,H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>高温消煮,以半微量凯氏定氮法测定各器官含氮率,并计算植株全氮量。

1.5 数据计算与统计分析

氮素吸收量(kg/hm<sup>2</sup>)=该时期地上部干物质质量×含氮率;

氮素阶段吸收量(kg/hm<sup>2</sup>)=后一时期氮素吸收量-前一时期氮素吸收量;

氮素阶段积累比例(%)=氮素阶段积累量/成熟期氮素积累量×100;

氮素阶段吸收速率(kg hm<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>)=氮素阶段吸收量/前后两时期间隔天数;

叶(茎鞘)氮素输出量(kg/hm<sup>2</sup>)=抽穗期叶(茎鞘)含氮量-成熟期叶(茎鞘)含氮量;

氮素表观转运率(%)=叶(茎鞘)氮素输出量/抽穗期叶(茎鞘)含氮量×100;

氮素表观贡献率(%)=叶(茎鞘)氮素输出量/成熟期籽粒含氮量×100;

氮肥偏生产力(kg/kg)=水稻产量/施氮量;

氮素收获指数=成熟期籽粒含氮量/成熟期植株地上部氮素积累量。

使用Microsoft Excel 2003处理数据,SPSS 16.0软件进行数据统计分析。两年结果趋势一致,以2013年数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 植株含氮率

由表 2 可知,不同机插方式下 3 种穗型水稻品种植株含氮率随着生育进程推移而递减。不同穗型品种的钵苗机插分蘖中期、拔节期、抽穗期和成熟期植株含氮率略高于毯苗机插,但差异不显著。

2.2 植株吸氮量

由表 3 可知,不同穗型品种分蘖中期和拔节期

表 3 不同机插方式下不同穗型水稻品种植株吸氮量

Table 3. Nitrogen uptake of different panicle type rice under different mechanical transplanting patterns. <span>kg/hm<sup>2</sup></span>					
品种 Cultivar	机插方式 Mechanical transplanting method	分蘖中期 Mid-tillering	拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity
甬优 2640	钵苗机插 PS	47.91±3.25 a	85.57±2.56 a	188.38±4.86 a	224.15±9.86 a
Yongyou 2640	毯苗机插 CS	43.34±2.18 a	84.04±3.02 a	173.24±4.29 b	202.96±4.95 b
甬优 8 号	钵苗机插 PS	44.80±2.64 a	89.74±2.91 a	188.01±5.12 a	217.35±7.49 a
Yongyou 8	毯苗机插 CS	40.12±4.28 a	85.87±4.35 a	171.67±3.06 b	200.45±5.11 b
武运粳 24 号	钵苗机插 PS	45.31±1.83 a	84.17±2.16 a	181.72±4.97 a	217.61±5.93 a
Wuyunjing 24	毯苗机插 CS	41.54±4.02 a	81.29±1.29a	167.87±5.01 b	202.13±2.18 b
宁粳 3 号	钵苗机插 PS	43.39±3.34 a	80.44±3.83 a	179.99±4.13 a	216.07±6.94 a
Ningjing 3	毯苗机插 CS	39.10±2.49 a	77.48±2.17 a	168.10±1.82 b	196.17±1.81 b
淮稻 5 号	钵苗机插 PS	38.44±2.76 a	73.24±3.07 a	157.40±3.37 a	190.17±9.14 a
Huaidao 5	毯苗机插 CS	34.95±3.14 a	72.30±0.91 a	148.31±0.64 b	176.74±3.82 b
淮稻 10 号	钵苗机插 PS	39.73±3.81 a	73.20±2.22 a	155.50±3.87 a	186.37±6.41 a
Huaidao 10	毯苗机插 CS	35.89±2.01 a	70.31±3.11 a	144.34±3.03 b	171.65±1.23 b

表 4 不同机插方式下不同穗型水稻品种氮素阶段吸收量及其比例

Table 4. Nitrogen uptake at a specific stage and its ratio of different panicle type rice under different mechanical transplanting patterns.									
品种 Cultivar	机插方式 Mechanical	移栽至分蘖中期 T-MT		分蘖中期至拔节 MT-J		拔节至抽穗期 J-H		抽穗至成熟期 H-M	
	transplanting method	吸收量	比例	吸收量	比例	吸收量	比例	吸收量	比例
		Uptake/(kg hm <sup>-2</sup> )	Ratio/%	Uptake/(kg hm <sup>-2</sup> )	Ratio/%	Uptake/(kg hm <sup>-2</sup> )	Ratio/%	Uptake/(kg hm <sup>-2</sup> )	Ratio/%
甬优 2640	钵苗机插 PS	46.04±1.65 a	20.54±0.89 a	37.66±1.03 b	16.80±0.43 b	102.81±6.34 a	45.87±1.03 a	35.77±2.33 a	15.96±0.78 a
Yongyou 2640	毯苗机插 CS	42.91±1.64 b	21.14±1.12 a	40.69±1.86 a	20.05±0.67 a	89.20±2.37 b	43.95±0.38 b	29.72 ±1.24 b	14.65±0.28 a
甬优 8 号	钵苗机插 PS	43.14±2.01 a	19.85±1.36 a	44.94±0.89 a	20.68±0.68 b	98.26±7.16 a	45.21±1.67 a	29.35±2.11 a	13.50±0.95 a
Yongyou 8	毯苗机插 CS	39.72±0.89 b	19.82±2.41 a	45.75±1.35 a	22.82±1.01 a	85.80±3.19 b	42.80±0.84 b	28.79±1.02 a	14.36±0.32 a
武运粳 24 号	钵苗机插 PS	43.18±0.93 a	19.84±3.24 a	38.86±2.64 a	17.86±1.67 a	97.55±2.68 a	44.83±0.20 a	35.89±1.68 a	16.49±1.01 a
Wuyunjing 24	毯苗机插 CS	41.02±1.08 b	20.29±2.64 a	39.75±1.98 a	19.66±1.16 a	86.58±4.69 b	42.83±0.35 b	34.26±3.87 a	16.95±2.17 a
宁粳 3 号	钵苗机插 PS	41.41±2.11 a	19.16±1.15 a	37.05±2.57 a	17.15±2.14 a	99.55±5.11 a	46.07±2.43 a	36.08±2.69 a	16.70±1.14 a
Ningjing 3	毯苗机插 CS	38.61±0.37 b	19.68±0.67 a	38.38±1.69 a	19.57±1.09 a	90.62±1.25 b	46.19±0.68 a	28.08±3.01 b	14.31±1.86 a
淮稻 5 号	钵苗机插 PS	36.05±0.54 a	18.95±1.36 a	34.79±1.20 b	18.30±0.98 b	84.16±0.67 a	44.26±0.09 a	32.77±0.64 a	17.23±0.51 a
Huaidao 5	毯苗机插 CS	34.29±1.06 b	19.40±0.41 a	37.35±1.03 a	21.13±1.34 a	76.01±2.64 b	43.01±0.37 b	28.44±1.22 b	16.09±0.96 a
淮稻 10 号	钵苗机插 PS	37.20±0.86 a	19.96±0.82 a	33.47±1.25 a	17.96±1.04 b	82.30±3.11 a	44.16±0.41 a	30.87±0.09 a	16.56±0.24 a
Huaidao 10	毯苗机插 CS	35.21±0.49 b	20.51±0.94 a	34.42±0.63 a	20.05±0.86 a	74.03±1.03 b	43.13±0.15 b	27.31±1.14 b	15.91±1.43 a

T-MT, Transplanting to mid-tillering stage; MT-J, Mid-tillering to jointing stage; J-H, Jointing to heading stage; H-M, Heading to maturity stage. The same as below.

植株吸氮量钵苗机插高于毯苗机插，但差异不显著。抽穗期和成熟期，钵苗机插水稻植株吸氮量较毯苗机插分别高出 6.13%~9.52%和 7.60%~10.44%，机插方式间差异达显著水平。就不同穗型品种而言，成熟期植株吸氮量表现为大穗型>中穗型>小穗型。

2.3 氮素阶段吸收量及其比例

由表 4 可知，移栽至分蘖中期，钵苗机插氮素吸收量较毯苗机插高出 5.13%~8.61%，机插方式间差异显著；此阶段氮素积累比例钵苗机插低于毯苗机插。分蘖中期至拔节期，钵苗机插吸氮量及其比

例均低于毯苗机插。拔节至抽穗期，吸氮量钵苗机插较毯苗机插高出 9.85%~15.26%，差异达显著水平；此阶段氮素积累比例亦高。抽穗至成熟期，钵苗机插吸氮量及其比例高于毯苗机插，除甬优 8 号和武运粳 24 号外氮素吸收量机插方式间差异达显著水平。就不同穗型品种而言，生育中期氮素吸收量表现为大穗型>中穗型>小穗型。

2.4 氮素吸收速率

由表 5 可知，不同穗型水稻品种移栽至分蘖中期钵苗机插氮素吸收速率较毯苗机插高出 5.26%~8.54%，差异达显著水平。分蘖中期至拔节

表 5 不同机插方式下不同穗型水稻品种氮素吸收速率

Table 5. Nitrogen uptake rate of different panicle type rice under different mechanical transplanting patterns. kg/(hm<sup>2</sup> d)

品种 Cultivar	机插方式 Mechanical transplanting method	移栽至分蘖中期 T-MT	分蘖中期至拔节期 MT-J	拔节至抽穗期 J-H	抽穗至成熟期 H-M
甬优 2640	钵苗机插 PS	2.30±0.03 a	2.51±0.05 a	3.21±0.05 a	0.60±0.01 a
Yongyou 2640	毯苗机插 CS	2.15±0.04 b	2.26±0.03 b	2.70±0.03 b	0.49±0.02 b
甬优 8 号	钵苗机插 PS	2.16±0.02 a	1.95±0.04 a	2.34±0.07 a	0.54±0.01 a
Yongyou 8	毯苗机插 CS	1.99±0.05 b	1.76±0.04 b	2.04±0.02 b	0.52±0.01 a
武运粳 24 号	钵苗机插 PS	2.16±0.01 a	1.69±0.03 a	2.96±0.04 a	0.70±0.03 a
Wuyunjing 24	毯苗机插 CS	2.05±0.04 b	1.59±0.05 b	2.55±0.06 b	0.65±0.02 b
宁粳 3 号	钵苗机插 PS	2.07±0.05 a	1.37±0.04 a	3.02±0.03 a	0.67±0.02 a
Ningjing 3	毯苗机插 CS	1.93±0.03 b	1.28±0.01 b	2.67±0.01 b	0.51±0.03 b
淮稻 5 号	钵苗机插 PS	1.80±0.02 a	1.51±0.03 a	2.71±0.04 a	0.60±0.01 a
Huaidao 5	毯苗机插 CS	1.71±0.01 b	1.49±0.04 a	2.24±0.02 b	0.52±0.01 b
淮稻 10 号	钵苗机插 PS	1.86±0.06 a	1.46±0.02 a	2.65±0.05 a	0.57±0.03 a
Huaidao 10	毯苗机插 CS	1.76±0.03 b	1.38±0.06 b	2.24±0.03 b	0.49±0.02 b

表 6 不同机插方式和密度下大穗型水稻品种抽穗后氮素输出与转运

Table 6. Nitrogen output and translocation after heading for different panicle type rice under different mechanical transplanting patterns.

品种 Cultivar	机插方式 Mechanical transplanting method	氮素输出量 Nitrogen output /(kg hm <sup>-2</sup> )		氮素表观转运率 Apparent nitrogen translocation rate/%		氮素转运贡献率 Nitrogen translocation conversion rate/%	
		叶	茎鞘	叶	茎鞘	叶	茎鞘
		Leaf	Shoot	Leaf	Shoot	Leaf	Shoot
甬优 2640	钵苗机插 PS	62.01±4.21 a	31.07±1.79 a	65.88±1.60 a	41.87±1.71 a	40.95±0.69 a	20.51±0.39 a
Yongyou 2640	毯苗机插 CS	52.81±3.05 b	29.56±1.63 a	61.19±2.10 b	43.70±2.10 a	39.18±0.37 a	21.93±1.16 a
甬优 8 号	钵苗机插 PS	57.77±3.17 a	28.48±0.50 a	61.46±2.11 a	39.14±1.51 a	42.50±0.57 a	20.95±1.12 b
Yongyou 8	毯苗机插 CS	48.54±2.11 b	27.95±1.16 a	56.35±1.24 b	41.69±1.83 a	40.34±0.61 b	23.22±0.55 a
武运粳 24 号	钵苗机插 PS	57.07±4.12 a	22.29±0.58 a	62.46±3.44 a	30.67±2.68 a	42.82±0.11 a	16.72±1.41 b
Wuyunjing 24	毯苗机插 CS	47.10±1.59 b	23.67±1.04 a	56.05±0.38 b	34.97±3.94 a	38.13±0.31 b	19.17±0.87 a
宁粳 3 号	钵苗机插 PS	54.48±3.98 a	23.81±1.69 a	60.32±1.22 a	33.41±1.85 b	41.52±0.84 a	18.15±2.41 b
Ningjing 3	毯苗机插 CS	47.97±2.67 b	26.88±3.57 a	57.09±0.95 b	40.73±3.11 a	42.25±0.62 a	23.68±1.35 a
淮稻 5 号	钵苗机插 PS	47.05±4.53 a	20.21±0.73 a	59.80±2.57 a	31.82±1.68 b	41.75±1.22 a	17.93±0.76 b
Huaidao 5	毯苗机插 CS	39.91±2.57 b	21.77±1.49 a	53.73±1.22 b	36.31±2.10 a	38.23±0.68 b	20.85±1.04 a
淮稻 10 号	钵苗机插 PS	46.86±2.67 a	20.03±0.88 a	60.57±1.59 a	32.16±2.38 a	42.70±0.78 a	18.25±0.49 b
Huaidao 10	毯苗机插 CS	39.69±1.38 b	21.54±0.43 a	55.60±1.67 b	36.97±3.11 a	39.33±1.02 b	21.34±0.67 a

期，钵苗机插氮素吸收速率较毯苗机插高出 1.34%~11.06%，除淮稻 5 号外差异达显著水平。拔节至抽穗期，钵苗机插氮素吸收速率较毯苗机插高出 13.11%~20.98%，差异达显著水平。抽穗至成熟期，钵苗机插氮素吸收速率较毯苗机插高出 3.85%~31.37%，除甬优 8 号外差异达显著水平。

2.5 氮素输出与转运

由表 6 可知，不同穗型品种叶的氮素输出量钵苗机插显著高于毯苗机插，而茎鞘氮素输出量机插方式间互有高低，但差异未达显著水平。对氮素表观转运率而言，钵苗机插水稻叶片氮素表观转运率

显著高于毯苗机插，而茎鞘氮素表观转运率钵苗机插低于毯苗机插。氮素转运贡献率，叶片表现为钵苗机插高于毯苗机插，而茎鞘呈相反趋势。

2.6 氮素利用效率

图 1 显示，不同穗型品种钵苗机插水稻氮肥偏生产力显著高于毯苗机插，大穗型品种高出 9.92%~10.52%，中穗型品种高出 6.95%~8.35%，小穗型品种高出 5.49%~6.03%。对氮素收获指数而言(图 2)，大穗型品种钵苗机插水稻氮素收获指数显著高于毯苗机插，而中小穗型品种氮素收获指数钵苗机插高于或相当于毯苗机插。

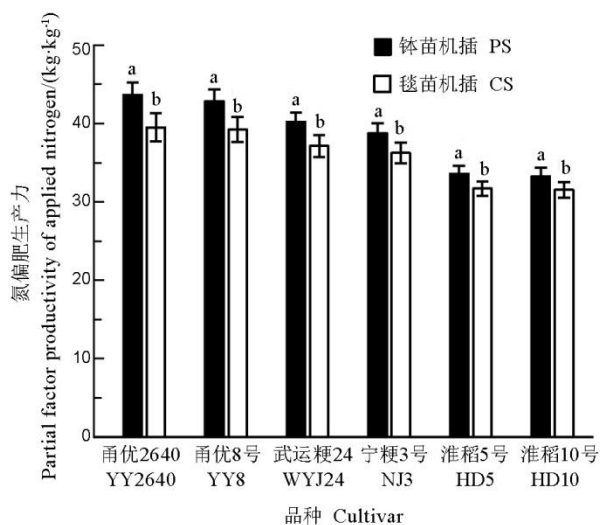


图1 不同机插方式下不同穗型水稻品种氮素利用效率  
Fig.1. Nitrogen use efficiency of different panicle type rice under different mechanical transplanting patterns.

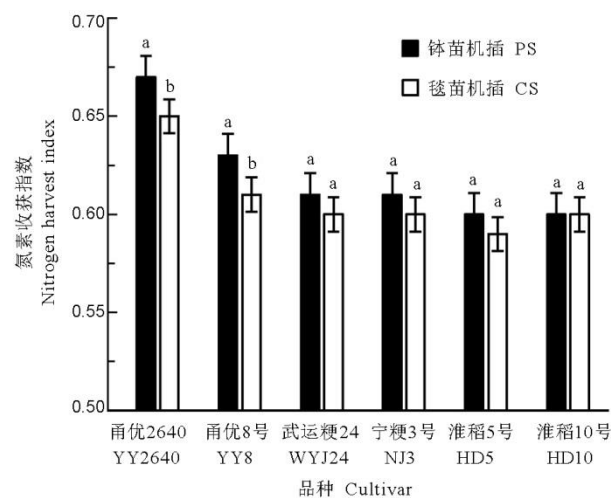


图2 不同机插方式下不同穗型水稻品种氮素收获指数  
Fig.2. Nitrogen harvest index of different panicle type rice under different mechanical transplanting patterns.

### 3 讨论

氮素吸收与积累是水稻产量形成重要的生理过程,籽粒氮素来自抽穗前贮藏于植株的氮素转运和穗后的氮素吸收。氮素吸收积累主要受水稻自身遗传基因调控,而种植方式、栽插密度、氮肥运筹、水分管理等栽培措施也是影响水稻氮素吸收与积累的重要因素。霍中洋等<sup>[7]</sup>研究认为抽穗期和成熟期吸氮量、拔节至抽穗期和抽穗至成熟期的氮素积累量和氮素吸收速率均表现为手栽稻>机插稻>直播稻。本研究结果表明,与毯苗机插相比,钵苗机插水稻抽穗期和成熟期吸氮量显著提高,移栽至分蘖中期、拔节至抽穗期和抽穗至成熟期的氮素积累量和氮素吸收速率较高。这与霍中洋等<sup>[7]</sup>研究手栽稻氮素吸收积累的部分结果一致。钵苗机插水稻栽后几乎无植伤、无缓苗期,根系和分蘖发生快,移栽至分蘖中期吸氮能力强,从而提高栽后20 d内的氮素积累量,这是钵苗机插氮素吸收积累区别于毯苗机插和手栽稻的重要特征。钵苗机插水稻和手栽稻两者在秧龄大小、播栽期、生育时期相近,均能培育带蘖壮秧,利于形成壮秆大穗和生育中后期高光效群体,从而使得钵苗机插类似于手栽稻在生育中、后期具有较强的氮素吸收积累能力。许轲等<sup>[22]</sup>研究认为水稻抽穗至成熟期叶片、茎鞘的氮素转运量与产量呈显著或极显著正相关,且不同生育期叶片的氮素吸收量与产量的相关系数高于对应时期茎鞘的相关系数。本研究结果表明,钵苗机插水

稻叶片氮素输出量、叶片氮素表观转运率和叶片氮素转运贡献率显著高于毯苗机插,而茎鞘氮素表观转运率和茎鞘氮素转运贡献率低于毯苗机插。说明钵苗机插水稻生育后期叶片氮素转运量大,对籽粒氮素积累贡献率高,而茎鞘氮素转运量小,籽粒氮素贡献率低。这与钵苗机插水稻叶片和茎鞘干物质转运密切相关。

水稻氮素利用效率的评价指标包括氮素农学利用率、氮素吸收利用率、氮素生理利用率、氮素偏肥生产力、氮素干物质生产效率、氮素籽粒生产效率和氮收获指数等<sup>[22]</sup>。关于提高水稻氮素利用率的栽培措施,前人侧重于氮肥用量和氮肥运筹等方面研究<sup>[23-24]</sup>,而关于栽培方式提高水稻氮素利用率的研究也逐渐增多<sup>[7, 25-26]</sup>。霍中洋等<sup>[7]</sup>研究认为手栽稻、机插稻与直播稻的氮素利用率平均分别为44.49%、39.00%、31.41%,手栽稻较机插稻和直播稻分别高14.08%和41.63%。而Liu等<sup>[25]</sup>研究认为,与移栽稻相比,早直播水稻籽粒氮利用效率提高了11.2%~20.3%。本研究结果表明,不同穗型品种的水稻氮肥偏生产力钵苗机插(33.26~43.66 kg/kg)显著高于毯苗机插(31.53~39.50 kg/kg),氮素收获指数钵苗机插(0.60~0.67)略高于毯苗机插(0.59~0.65)。说明在相同栽插密度条件下水稻钵苗机插较毯苗机插在氮素利用效率方面具有一定优势,这与钵苗机插生育中、后期具有较强光合物质生产能力和较强的氮素吸收能力密切相关。李敏等<sup>[27]</sup>研究认为氮肥偏生产力、氮素生理利用率、氮素农学利用率随着氮肥群体生产力提高而显著增加,说明相同氮肥投

入, 高产类型品种产量越高, 氮素利用效率亦高。本研究结果表明, 在钵苗机插或毯苗机插栽培条件下, 不同穗型水稻品种的氮肥偏生产力和氮素收获指数表现为大穗型>中穗型>小穗型。可见, 随着水稻品种穗型增大、产量的增加, 水稻的氮素利用率得到协同提高。

## 参考文献:

- [1] 朱德峰, 张玉屏, 陈惠哲, 向 镜, 张义凯. 中国水稻高产栽培技术创新与实践. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3404-3414.  
Zhu D F, Zhang Y P, Chen H Z, Xiang J, Zhang Y K. Innovation and practice of high-yield rice cultivation technology in China. *Sci Agric Sin*, 2015, 48(17): 3404-3414. (in Chinese with English abstract)
- [2] Zhao X, Zhou Y, Min J, Wang S Q, Shi W M, Xing G X. Nitrogen run off dominates water nitrogen pollution from rice-wheat rotation in the Taihu Lake region of China. *Agric Ecosys & Environ*, 2012, 156: 1-11.
- [3] Jing Q, Bouman B A M, Hengsdijk H, Van K H, Cao W. Exploring options to combine high yield with high nitrogen use efficiencies in irrigated rice in China. *Europ J Agron*, 2007, 26(2): 166-177
- [4] Wei D, Cui K H, Pan J F, Ye G Y, Xiang J, Nie L X, Huang, J L. Genetic dissection of grain nitrogen use efficiency and grain yield and their relationship in rice. *Field Crops Res*, 2011, 124(3): 340-346.
- [5] 殷春渊, 张庆, 魏海燕, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 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(1): 39-50. (in Chinese with English abstract)
- [6] 魏海燕, 张洪程, 杭杰, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 张胜飞, 马群, 张庆, 张 军. 不同氮素利用效率基因型水稻氮素积累与转移的特性. 作物学报, 2008, 34(1): 119-125.  
Wei H Y, Zhang H C, Hang J, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Zhang S F, Ma Q, Zhang Q, Zhang J. Characteristics of N accumulation and translocation in rice genotypes with different N use efficiencies. *Acta Agron Sin*, 2008, 34(1): 119-125. (in Chinese with English abstract)
- [7] 霍中洋, 李杰, 张洪程, 戴其根, 许轲, 魏海燕, 龚金龙. 不同种植方式下水稻氮素吸收利用的特性. 作物学报, 2012, 38(10): 1-12.  
Huo Z Y, Li J, Zhang H C, Dai Q G, Xu K, Wei H Y, Gong J L. Characterization of nitrogen uptake and utilization in rice under different planting methods. *Acta Agron Sin*, 2012, 38(10): 1-12. (in Chinese with English abstract)
- [8] 郭保卫. 水稻有序摆抛栽超高产形成及其生理生态特征的研究. 扬州: 扬州大学, 2013.  
Guo B W. Studied on super high yield formation and its eco-physiological characteristics of ordered transplanting and optimized broadcasting rice. Yangzhou: Yangzhou University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [9] 许轲, 周兴涛, 曹利强, 张洪程, 郭保卫, 陈厚存, 吴中华, 朱聪聪, 杨岩. 不同类型钵苗及摆栽密度对梗型超级稻氮素吸收利用与转运特征的影响. 中国农业科学, 2013, 46(23): 4876-4892.  
Xu K, Zhou X T, Cao L Q, Zhang H C, Guo B W, Chen H C, Wu Z H, Zhu C C, Yang Y. Effects of different types of bowl seedlings and densities on characteristics of nitrogen uptake, utilization and translocation of bowl transplanted japonica super rice. *Sci Agric Sin*, 2013, 46(23): 4876-4892. (in Chinese with English abstract)
- [10] Lin X Q, Zhu D F, Chen H Z, Zhang Y P. Effects of plant density and nitrogen application rate on grain yield and nitrogen uptake of super hybrid rice. *Rice Sci*, 2009, 16(2): 138-142.
- [11] Zhao G M, Miao Y X, Wang H Y, Su M M, Fan M S, Zhang F S, Jiang R F, Zhang Z J, Liu C, Liu, P H. A preliminary precision rice management system for increasing both grain yield and nitrogen use efficiency. *Field Crops Res*, 2013, 154: 23-30.
- [12] Singh V K, Dwivedi B S, Tiwari, K N, Majumdar K, Rani M, Singh S K, Timsina J. Optimizing nutrient management strategies for rice-wheat system in the Indo-Gangetic Plains of India and adjacent region for higher productivity, nutrient use efficiency and profits. *Field Crops Res*, 2014, 164: 30-44.
- [13] 安宁, 范明生, 张福锁. 水稻最佳作物管理技术的增产增效作用. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 846-852.  
An N, Fan M S, Zhang F S. Best crop management practices increase rice yield and nitrogen use efficiency. *J Plant Nutr Fer*, 2015, 21(4): 846-852. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王绍华, 曹卫星, 丁艳锋, 田永超, 姜东. 水氮互作对水稻氮吸收与利用的影响. 中国农业科学, 2004, 37(4): 497-501.  
Wang S H, Cao W X, Ding Y F, Tian Y C, Jiang D. Interactions of water management and nitrogen fertilizer on nitrogen absorption and utilization in rice. *Sci Agric Sin*, 2004, 37(4): 497-501. (in Chinese with English abstract)
- [15] 孙永健, 孙园园, 徐徽, 李玥, 严奉君, 蒋明金, 马均. 水氮管理模式对不同氮效率水稻氮素利用特性及产量的影响. 作物学报, 2014, 40(9): 1639-1649.  
Sun Y J, Sun Y Y, Xu H, Li Y, Yan F J, Jiang M J, Ma J. Effects of water-nitrogen management patterns on nitrogen utilization characteristics and yield in rice cultivars with different nitrogen use efficiencies. *Acta Agron Sin*, 2014, 40(9): 1639-1649. (in Chinese with English abstract)
- [16] 张小翠, 戴其根, 胡星星, 朱德建, 丁秀文, 马克强, 张洪程, 朱聪聪. 不同质地土壤下缓释尿素与常规尿

- 素配施对水稻产量及其生长发育的影响. 作物学报, 2012, 38(8): 1494-1503.
- Zhang X C, Dai Q G, Hu X X, Zhu D J, Ding X W, Ma K Q, Zhang H C, Zhu C C. Effects of slow-release urea combined with conventional urea on rice output and growth in soils of different textures. *Acta Agron Sin*, 2012, 38(8): 1494-1503. (in Chinese with English abstract)
- [17] Deng F, Wang L, Ren W J, Mei X F. Enhancing nitrogen utilization and soil nitrogen balance in paddy fields by optimizing nitrogen management and using polyaspartic acid urea. *Field Crops Res*, 2014, 169: 30-38.
- [18] 胡雅杰, 邢志鹏, 龚金龙, 刘国涛, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 郭保卫, 沙安勤, 周有炎, 罗学超, 刘国林. 钵苗机插水稻群体动态特征及高产形成机制的探讨. 中国农业科学, 2014, 47(5): 865-879
- Hu Y J, Xing Z P, Gong J L, Liu G T, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Guo B W, Sha A Q, Zhou Y Y, Luo X C, Liu G L. Study on population characteristics and formation mechanisms for high yield of pot-seedling mechanical transplanting rice. *Sci Agric Sin*, 2014, 47(5): 865-879. (in Chinese with English abstract)
- [19] 胡雅杰, 曹伟伟, 钱海军, 邢志鹏, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 郭保卫, 高辉, 沙安勤, 周有炎, 刘国林. 钵苗机插密度对不同穗型水稻品种产量、株型和抗倒伏能力的影响. 作物学报, 2015, 41(5): 743-757
- Hu Y J, Cao W W, Qian H J, Xing Z P, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Guo B W, Gao H, Sha A Q, Zhou Y Y, Liu G L. Effect of planting density of mechanically transplanted pot seedlings on yield, plant type and lodging resistance in rice with different panicle types. *Acta Agron Sin*, 2015, 41(5): 743-757. (in Chinese with English abstract)
- [20] 张洪程, 朱聪聪, 霍中洋, 许轲, 蒋晓鸿, 陈厚存, 高尚勤, 李德剑, 赵成美, 戴其根, 魏海燕, 郭保卫. 钵苗机插水稻产量形成优势及主要生理生态特点. 农业工程学报, 2013, 29(21): 50-59.
- Zhang H C, Zhu C C, Huo Z Y, Xu K, Jiang X H, Chen H C, Gao S Q, Li D J, Zhao C M, Dai Q G, Wei H Y, Guo B W. Advantages of yield formation and main characteristics of physiological and ecological in rice with nutrition bowl mechanical transplanting. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(21): 50-59. (in Chinese with English abstract)
- [21] 钱银飞, 张洪程, 吴文革, 陈烨, 李杰, 郭振华, 张强, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕. 机插穴苗数对不同穗型粳稻品种产量及品质的影响. 作物学报, 2009, 35(9): 1698-1707.
- Qian Y F, Zhang H C, Wu W G, Chen Y, Li J, Guo Z H, Zhang Q, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y. Effects of seedlings number per hill on grain yield and quality in different panicle types of mechanical transplanted japonica rice. *Acta Agron Sin*, 2009, 35(9): 1698-1707. (in Chinese with English abstract)
- [22] 李敏, 张洪程, 李国业, 魏海燕, 殷春渊, 马群, 杨雄. 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.
- Li M, Zhang H C, Li G Y, Wei H Y, Yin C Y, MA Q, Yang X. Genotypic difference of nitrogen use efficiency in rice its morphological and physiological mechanisms. *J Nuc Agric Sci*, 2011, 25(5): 1057-1063. (in Chinese with English abstract)
- [23] 韩宝吉, 曾祥明, 卓光毅, 徐芳森, 姚忠清, 肖习明, 石磊. 氮肥施用措施对湖北中稻产量、品质和氮肥利用率的影响. 中国农业科学, 2011, 44(4): 842-850
- Han B J, Zeng X M, Zhuo G Y, Xu F S, Yao Z Q, Xiao X M, Shi L. Effects of fertilization measures of nitrogen on grain yield, grain quality and N-use efficiency of midseason rice in Hubei Province. *Sci Agric Sin*, 2011, 44(4): 842-850. (in Chinese with English abstract)
- [24] Chen Y T, Peng J, Wang J, Fu P H, Hou Y, Zhang C D, Fahad S, Peng S B, Cui K H, Nie L X. Crop management based on multi-split topdressing enhances grain yield and nitrogen use efficiency in irrigated rice in China. *Field Crops Res*, 2015, 184: 50-57.
- [25] Liu H Y, Hussain S, Zheng M M, Peng S B, Huang J L, Cui K H, Nie L X. Dry direct-seeded rice as an alternative to transplanted-flooded rice in Central China. *Agron Sustain Dev*, 2015, 35: 285-294.
- [26] 梁天锋, 徐世宏, 刘开强, 王殿君, 梁和, 董登峰, 韦善清, 周佳民, 胡钧铭, 江立庚. 栽培方式对水稻氮素吸收利用与分配特性影响的研究. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 20-26.
- Liang T F, Xu S H, Liu K Q, Wang D J, Liang H, Dong D F, Wei S Q, Zhou J M, Hu J M, Jiang L G. Studies on influence of cultivation patterns on characteristics of nitrogen utilization and distribution in rice. *Plant Nutr Fer Sci*, 2010, 16(1): 20-26. (in Chinese with English abstract)
- [27] 李敏, 张洪程, 马群, 杨雄, 李国业, 魏海燕, 戴其根, 霍中洋, 许轲. 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.
- Li M, Zhang H C, Ma Q, Yang X, Li G Y, Wei H Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K. 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. (in Chinese with English abstract)