

# 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻根系生长及氮素利用特征的影响

李应洪 孙永健\* 李玥 吕腾飞 蒋明金 严奉君 马均\*

(四川农业大学 水稻研究所/农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 四川 温江 611130; \*通讯联系人, E-mail: yongjians1980@163.com)

## Effects of Mechanical-transplanted Modes and Density on Root Growth and Characteristics of Nitrogen Utilization in Hybrid Rice at Different Seedling-ages

LI Yinghong, SUN Yongjian\*, LI Yue, LÜ Tengfei, JIANG Mingjin, YAN Fengjun, MA Jun\*

(Rice Research Institute, Sichuan Agricultural University / Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology, and Cultivation in Southwest, Ministry of Agriculture, Wenjiang 611130, China; \*Corresponding author, E-mail: yongjians1980@163.com)

**Abstract:** 【Objective】 Mechanical transplanting is the main development direction of the rice planting in China, and it has important significance for increasing rice yield, nitrogen (N) use efficiency and accelerating integration of high yield and efficient cultivation techniques of rice mechanization by researching the effects of mechanical-transplanted modes and density on root growth and characteristics of N utilization in hybrid rice at different seedling-ages. 【Method】 A split plot design was used with the super hybrid rice F you 498 as material to analyze the effects of six mechanical-transplanted modes and density combined treatments of “bowl mechanical-transplanting with high density, bowl mechanical-transplanting with middle density, bowl mechanical-transplanting with low density, carpet mechanical-transplanting with high density carpet mechanical-transplanting with middle density, and carpet mechanical-transplanting with low density” on characteristics of N utilization, root growth, and to recover the relationship between root growth with N utilization and yield at different seedling-ages. 【Result】 The N uptake of main growth period, N accumulation at growth and development stage, N absorption rate, N translocation amount of stem and leaf from full-heading to maturity, N increase in panicle, N partial factor productivity and root dry weight after jointing stage, and yield of 25-day-old seedlings have an obvious advantage over that of 40-day-old seedlings. Compared with carpet mechanical-transplanting, the bowl mechanical-transplanting can improve the root growth at different growth stages, enhance N accumulation and uptake rate, increase the amount of N translocation to various organs during grain filling stage, so as to increase the grain yield. Especially the best treatment, the bowl mechanical-transplanting with a plant spacing of 15.5 and 25-day-old seedlings has obvious advantages than other treatments. And carpet mechanical-transplanting can also help get a higher yield with the plant spacing of 12 cm and 25-day-old seedlings, but the yield will be reduced when density decreased even though it improved the root to shoot ratio, transport rate of leaf and stem, but decreased N accumulation of each period, absorption rate, and the leaf and stem translocation amount during grain filling stage. Correlation analysis showed that grain yield and N uptake and utilization were significantly correlated with root dry weight of main growth period ( $r=0.47^{**}\sim 0.83^{**}$ ), but significantly negatively correlated with root-shoot-ratio of full-heading and maturity period ( $r=-0.52^{**}\sim -0.79^{**}$ ). 【Conclusion】 For root growth and N uptake and utilization characteristics, 25-day-old seedlings were better than 40-day-old seedlings and bowl mechanical-transplanting can optimize the relationship between individuals and population, but seedling density should be moderate, the most suitable spacing is 33 cm × 15.5 cm. It can promote the absorption and utilization of N and grain yield. Furthermore, the findings suggested that attention should be paid to the root growth from jointing stage and maturity stage, because of its significant effect on yield. The result laid a technical and practical basis for the high yield and high efficiency cultivation technology of bowl mechanical-transplanting.

**Key words:** rice; seedling-age; mechanical-transplanting mode; density; nitrogen; root

**摘 要:** 【目的】机插秧是当前我国水稻种植发展的主要方向, 探索不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻根系生

收稿日期: 2017-02-13; 修改稿收到日期: 2017-03-22。

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2013BAD07B13); 四川省教育厅重点项目(16ZA0044); 农业部作物生理生态与耕作重点实验室开放课题(201303); 四川省科技支撑计划资助项目(2014NZ0041, 2014NZ0047)。

长及氮素利用特征的影响,对提高水稻产量和氮肥利用率,加快水稻机械化高产高效栽培技术的集成具有重要意义。【方法】以超级杂交稻F优498为材料,采用两因素裂区试验设计,在25 d和40 d秧龄下,通过“钵苗机插+高密度”、“钵苗机插+中密度”、“钵苗机插+低密度”、“毯苗机插+高密度”、“毯苗机插+中密度”、“毯苗机插+低密度”6种机插方式与密度配合的处理,研究其对氮素利用特征、根系生长特性的影响,并探讨根系生长与氮素利用及产量的关系。【结果】各生育时期氮素吸收与各阶段氮素积累量,齐穗至成熟期氮素吸收速率、茎和叶的氮素转运量、穗部氮素增加量、氮素偏生产力、拔节后根系干质量以及产量,25 d秧龄均较40 d秧龄优势明显。在相同秧龄下,与毯苗机插相比,钵苗机插可促进杂交稻各生育时期根系生长,提高氮素积累及吸收速率,增加结实期各器官氮素的转运量,从而提高稻谷产量;尤其在秧龄25 d、钵苗机插株距为15.5 cm时,较其他处理优势明显,为本研究最优处理。毯苗机插在25 d秧龄与株距为12 cm时,也能够获得较高产量;密度降低,提高了根冠比及茎叶转运率,但降低了各时期的氮素积累量、吸收速率以及结实期茎叶的转运量,产量较低。相关性分析表明,不同秧龄机插方式与密度配合下,主要生育时期根干质量与产量及氮素吸收利用均存在极显著正相关( $r=0.47^{**}\sim 0.83^{**}$ ),齐穗和成熟期根冠比与产量及氮素吸收利用均极显著负相关( $r=-0.52^{**}$ 和 $-0.79^{**}$ )。【结论】机插杂交稻25 d秧龄根系生长及氮素利用特性均优于40 d秧龄,且钵苗较毯苗机插能优化水稻个体与群体关系,但其机插密度不宜过高或过低,行距与株距以33 cm×15.5 cm为宜,可促进氮素吸收利用及产量同步提高;且拔节与成熟期根系的生长对产量影响显著。研究结果可为水稻钵苗机插秧高产高效栽培技术集成及应用提供技术和实践依据。

**关键词:** 水稻; 秧龄; 机插方式; 密度; 氮; 根系

**中图分类号:** S143.1; S511.01

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-7216(2017)06-0599-12

水稻生产机械化是实现水稻高效种植的重要途径,推进以机插秧为主的水稻机械化高产种植技术,对稳定我国水稻种植面积,提高水稻单产,保障粮食安全具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。在机插关键技术中,培育高质量、适时机插的秧苗,是夺取机插稻高产的前提<sup>[1]</sup>。水稻钵苗机插技术相对现有的毯苗机插技术,具备秧苗素质高、秧龄弹性大、无植伤、精确移栽等技术优势<sup>[3-5]</sup>。此外,我国水稻持续增产主要依靠增施氮肥,导致了环境面源污染和氮肥利用效率下降等系列问题<sup>[6-7]</sup>,如何通过配套的栽培措施提高水稻氮肥利用效率是目前研究的热点<sup>[8-15]</sup>。尤其在机插条件下,明确不同秧龄下钵苗和毯苗机插与密度配合对水稻氮素吸收利用与转运特征、根系生长的影响及其增产生理机理具有重要意义,对水稻高产栽培、氮肥高效利用及机插秧技术的推广具有重要的生产价值。已有研究表明品种特性<sup>[8-9]</sup>、水分管理<sup>[10-11]</sup>、栽培方式<sup>[12-13]</sup>和移栽密度<sup>[14-15]</sup>显著影响氮肥利用效率。适宜的移栽密度能够保证水稻个体及群体有效地发挥潜能,从而获得高产。孙永健等<sup>[16]</sup>对机插杂交籼稻的研究表明,当施氮量为105 kg/hm<sup>2</sup>时,氮素积累量随机插密度的增加而增加,当施氮量为195 kg/hm<sup>2</sup>时,氮素积累量随机插密度的增加而出现先增加后降低的趋势。吴文革<sup>[17]</sup>对不同穗型杂交中籼稻的机插研究表明,钵苗机插干物质积累能力强,群体质量显著提高,产量均显著或极显著高于毯苗机插。而刘利等<sup>[18]</sup>对杂交籼稻的研究表明,不同机械化播栽方式下杂交籼稻具有不同的氮素积累和利用特性。而赵敏等<sup>[19]</sup>对不同基因型

的毯苗机插水稻研究表明,植株氮素积累和转运特性以及产量同样存在显著差异。可见,前人关于不同密度下水稻氮素利用特征结论并不一致;而关于移栽秧龄对氮肥利用效率的研究更是甚少;且前人的研究大多为人工移栽或毯苗机插,而钵苗机插的研究也多集中在品种或技术方面,关于根系的生长、氮素吸收利用特征关系的研究报道较少;尤其在在不同秧龄条件下,机插方式与不同密度对水稻氮素吸收利用与转运规律及其与产量的关系尚不十分清楚,钵苗机插相对毯苗机插能否进一步提高杂交稻氮素利用效率以及根系生长亟待深入研究。本研究以超级杂交稻F优498为试材,在不同秧龄条件下,设置钵苗和毯苗2种机插方式分别与不同机插密度配合,比较研究对氮素利用特征、根系生长及产量的影响,并探讨杂交稻根系生长与氮肥吸收利用及产量的关系,从氮素和根系角度阐明新型钵苗机插增产机理,以期为进一步优化超高产栽培技术、提高种植效率、实现水稻氮素高效利用提供技术依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验于2015年在四川成都崇州四川农业大学基地(N 30°33', E 103°38')进行。供试品种为该研究区域广泛应用且具有代表性的超级稻品种F优498(中籼迟熟型杂交稻,生育期145~152 d)。耕层土壤质地为砂壤土,含有机质12.62 g/kg,速效氮103.21 mg/kg,速效磷25.61 mg/kg,速效钾132.46

表 1 本研究中水稻生育期进程

Table 1. Growth stage of rice under different treatments in the study(Month-Day).

秧龄 Seedling-age	机插方式 Transplanting -method	分蘖盛期 Tillering	拔节期 Jointing	齐穗期 Full-heading	成熟期 Maturity	全生育期天数 DTG/d	移栽-拔节天数 DTJ/d	拔节-齐穗天数 DJF/d	齐穗-成熟天数 DFM/d
T <sub>1</sub>	M <sub>1</sub>	05-27	06-13	07-21	08-29	149	47	38	39
	M <sub>2</sub>	05-28	06-14	07-22	08-31	151	48	38	40
T <sub>2</sub>	M <sub>1</sub>	06-10	06-21	07-27	09-07	158	40	36	42
	M <sub>2</sub>	06-11	06-23	07-28	09-09	160	42	35	43

DTG—全生育期天数; DTJ—移栽至拔节期天数; DJF—拔节至齐穗期天数; DFM—齐穗至成熟期天数。

DTG, Days of total growth duration; DTJ, Days from transplanting to jointing; DJF, Days from jointing to full-heading; DFM, Days from full-heading to maturity.

mg/kg, pH 值 5.56。4 月 2 日播种, 育秧方式分别为钵苗和毯苗育秧。两因素裂区设计, 秧龄为主区, 机插秧方式和密度配合为副区, 小区面积 50 m<sup>2</sup>, 重复 3 次。

主区为不同机插秧龄, 设 2 个处理: 25 d(T<sub>1</sub>)、40 d(T<sub>2</sub>), 分别于 4 月 27 日和 5 月 12 日移栽。

副区为不同育插秧方式与密度的组合, 共设 6 个处理: M<sub>1</sub>D<sub>1</sub>、M<sub>1</sub>D<sub>2</sub>、M<sub>1</sub>D<sub>3</sub>、M<sub>2</sub>D<sub>4</sub>、M<sub>2</sub>D<sub>5</sub>、M<sub>2</sub>D<sub>6</sub>, 其中, M<sub>1</sub> 代表钵苗育插秧, 行株距 33 cm×14.5 cm(高密度)、33 cm×15.5 cm(中密度)、33 cm×16.5 cm(低密度); M<sub>2</sub> 代表毯苗育插秧, D<sub>4</sub>、D<sub>5</sub>、D<sub>6</sub> 分别表示 30 cm×12 cm(高密度)、30 cm×14 cm(中密度)、30 cm×18 cm(低密度)。钵苗每盘播种 40 g, 育秧和插秧(M<sub>1</sub>)机型分别为 2BD-600 和 2ZB-6A; 毯苗每盘播种 75 g, 育秧和插秧(M<sub>2</sub>)机型分别为 2BZP-800 和 VP6G。

施 N 量(尿素)为 180 kg/hm<sup>2</sup>, 分别在移栽前、移栽后 7 d、幼穗分化期(倒 4 叶)和抽穗前(倒 2 叶)施用, 其用量分别为施氮总量的 30%、30%、20%、20%, 磷肥(过磷酸钙)施用量折合 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg/hm<sup>2</sup>, 钾肥(氯化钾)施用量折合 K<sub>2</sub>O 150 kg/hm<sup>2</sup>, 磷、钾肥全部作基肥, 其他田间管理按大面积生产田进行。各处理下水稻生育进程及生育期情况见表 1, 不同密度间无显著差异, 不同秧龄处理间生育期 T<sub>1</sub> 比 T<sub>2</sub> 早 6~10 d, 同秧龄下相同机插方式钵苗比毯苗早 1~2 d。

1.2 测定项目及方法

移栽后调查各小区栽植基本苗数, 并分别于移栽期、拔节期、齐穗及成熟期按各小区平均茎蘖数取 5 穴具有代表性的稻株(以稻株为中心, 以行距为长、窝距为宽、深 30 cm 土柱取根), 置于 0.4 mm 孔径尼龙网袋中用流水冲净, 获得完整根系, 分根、茎鞘、叶、穗(齐穗及成熟期)4 部分, 烘干至恒重并粉碎, 用浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 和定氮催化剂消煮, 并用 FOSS-8400 凯氏定氮仪测定氮含量; 成熟期各小区

单收, 按实收穴数计产。氮积累量=某生育时期单位面积植株氮的积累量; 氮素阶段吸收量(kg/hm<sup>2</sup>)=后一生育时期单位面积氮素吸收量—前一生育时期单位面积氮素吸收量; 氮素阶段吸收速率(kg/hm<sup>2</sup>·d)=某生育阶段单位面积单位时间内的氮素吸收量; 氮素偏生产力(kg/kg)=施氮区产量/氮肥施用量; 氮素收获指数(%)=成熟期单位面积植株籽粒氮素积累量/植株氮素积累量; 氮素转运量(kg/hm<sup>2</sup>)=齐穗时某器官氮素吸收量—成熟时该器官氮素滞留量; 氮素转运率(%)=[单位面积植株齐穗后叶(茎鞘)氮素输出量/齐穗期该器官氮素积累量]×100%; 氮素转运贡献率(%)=(氮转运量/齐穗至成熟期穗部氮素积累量)×100%。

1.3 数据分析

采用 Microsoft Excel 和 DPS 7.05 处理系统分析数据。

2 结果与分析

2.1 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻氮积累量及产量的影响

由表 2 可见, 除基本苗数外, 秧龄对各生育时期氮吸收量、阶段氮吸收量、氮素偏生产力、氮收获指数及产量的影响达显著或极显著水平, 而机插方式与密度对各指标的影响均达极显著水平, 二者对齐穗和成熟期氮吸收量, 以及最终氮素偏生产力、产量的影响存在极显著的互作效应。从不同秧龄来看, 25 d 秧龄各指标整体高于 40 d 秧龄; 且除基本苗数外, 各指标钵苗机插均优于毯苗。25 d 秧龄下, 拔节期氮吸收量及收获指数在同一机插方式下均随密度的降低而降低; 从拔节至齐穗、齐穗至成熟氮吸收量来看, M<sub>1</sub>D<sub>2</sub> 相对其他处理均利于氮素吸收, 进而显著提高了氮素偏生产力及最终产量, 为本研究最优组合, 且产量较毯苗机插最高的 M<sub>2</sub>D<sub>4</sub> 处理高 14.87%。40 d 秧龄下, 各生育时期的氮吸收

表 2 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻主要生育时期氮素吸收及产量的影响  
Table 2. Effects of mechanical-transplanting modes and density on N uptake and yield at main growth stages under different seedling-ages.

秧龄 Seedling- age	处理 Treatment	基本苗数 Basic seedling number /(×10 <sup>4</sup> hm <sup>-2</sup> )	主要生育时期氮吸收量 N uptake at main growth stage/(kg·hm <sup>-2</sup> )				阶段氮吸收量 N uptake at growth and development stage/(kg·hm <sup>-2</sup> )		氮素偏生产力 N partial factor productivity /(kg·kg <sup>-1</sup> )	氮收获指数 N harvest index /%	稻谷产量 Grain yield /(t·hm <sup>-2</sup> )
			拔节期 Jointing	齐穗期 Full-heading	成熟期 Maturity	拔节-齐穗期 Jointing to full-heading	齐穗-成熟期 Full-heading to maturity				
T <sub>1</sub>	M <sub>1</sub> D <sub>1</sub>	58.52±2.65 cd	87.35±1.28 a	174.27±1.03 b	203.92±0.21 b	86.92±1.85 a	29.65±1.24 a	68.11±1.88 b	61.55±1.25 a	12.26±0.32 b	
	M <sub>1</sub> D <sub>2</sub>	54.74±2.65 de	87.05±0.64 a	177.79±2.40 a	208.43±0.97 a	90.74±1.77 a	30.64±1.60 a	70.79±0.68 a	61.36±2.56 a	12.74±0.11 a	
	M <sub>1</sub> D <sub>3</sub>	51.42±3.89 e	82.42±0.71 b	169.16±3.61 c	197.76±1.50 c	86.74±4.06 a	28.59±4.96 a	64.48±1.25 c	61.02±1.44a	11.61±0.22 c	
	M <sub>2</sub> D <sub>4</sub>	90.56±5.51 a	79.87±1.19 b	162.45±2.39 d	189.80±1.64 d	82.57±3.05 b	27.35±1.73 a	61.63±2.22 d	60.16±1.46 b	11.09±0.40 d	
	M <sub>2</sub> D <sub>5</sub>	77.62±4.82 b	70.30±1.23 c	148.07±0.33 e	171.50±1.90 e	77.77±1.53 c	23.43±1.82 b	56.12±2.37 e	59.84±3.22 b	10.10±0.43 e	
	M <sub>2</sub> D <sub>6</sub>	60.37±2.65 c	68.49±0.74 c	146.08±0.75 e	167.38±0.57 f	77.60±0.94 c	21.29±0.47 b	55.31±1.47 e	59.55±2.49 b	9.96±0.26 e	
	平均 Average	65.54	79.25	162.97	189.80	83.72	26.83	62.74	60.58	11.29	
T <sub>2</sub>	M <sub>1</sub> D <sub>1</sub>	56.01±2.65 cd	81.32±5.79 a	164.10±2.42 a	191.95±3.07 a	82.78±5.98 a	27.85±4.85 a	62.66±0.94 a	60.33±0.91 a	11.28±0.17 a	
	M <sub>1</sub> D <sub>2</sub>	52.40±2.65 de	77.24±1.08 b	159.05±1.95 b	185.83±3.63 b	81.80±1.93 ab	26.79±1.87 ab	60.45±1.13 a	60.30±0.85 a	10.88±0.20 a	
	M <sub>1</sub> D <sub>3</sub>	49.22±0.77 e	72.08±0.75 c	150.26±1.83 d	173.46±2.12 d	78.18±1.17 bc	23.20±1.65 bc	57.40±1.33 b	59.86±1.44 ab	10.33±0.24 b	
	M <sub>2</sub> D <sub>4</sub>	85.00±2.27 a	75.25±1.96 b	153.72±3.82 c	179.52±0.35 c	78.47±3.09 abc	25.80±3.92 ab	57.93±0.92 b	60.29±5.22 a	10.43±0.17 b	
	M <sub>2</sub> D <sub>5</sub>	72.86±2.65 b	66.01±1.78 d	143.06±0.89 e	165.31±0.39 e	77.05±1.01 cd	22.24±0.86 cd	53.35±1.38 c	59.84±2.79 ab	9.60±0.25 c	
	M <sub>2</sub> D <sub>6</sub>	56.67±2.65 c	61.22±1.54 e	135.77±1.16 f	154.94±1.26 f	74.55±2.70 d	19.17±1.52 d	47.60±1.01 d	59.41±2.01 b	8.57±0.18 d	
	平均 Average	62.03	72.19	150.99	175.17	78.81	24.18	56.56	60.01	10.18	
F 值	T	6.86	327.62**	354.09**	682.04**	648.27**	39.24*	578.38**	23.94*	580.32**	
F value	MD	122.43**	77.73**	157.65**	387.52**	10.78**	9.21**	81.70**	7.32**	81.63**	
	T×MD	0.28	2.17	9.26**	22.37**	1.71	0.54	4.90**	2.32	4.90**	

T<sub>1</sub>—25 d 秧龄; T<sub>2</sub>—40 d 秧龄; M<sub>1</sub>D<sub>1</sub>—钵苗机插+高密度; M<sub>1</sub>D<sub>2</sub>—钵苗机插+中密度; M<sub>1</sub>D<sub>3</sub>—钵苗机插+低密度 M<sub>2</sub>D<sub>4</sub>—毯苗机插+高密度; M<sub>2</sub>D<sub>5</sub>—毯苗机插+中密度; M<sub>2</sub>D<sub>6</sub>—毯苗机插+低密度; T—秧龄处理; MD—机插方式×密度; T×MD—秧龄处理与机插方式和密度互作。同秧龄处理下数据(平均值±标准差)后不同字母表示在 5%水平上差异显著(n=3, 最小显著差数法)。\*, \*\* 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。下同。

T<sub>1</sub>, 25 day-old seedling; T<sub>2</sub>, 40 day-old seedling; M<sub>1</sub>D<sub>1</sub>, Bowl mechanical-transplanting and high density; M<sub>1</sub>D<sub>2</sub>, Bowl mechanical-transplanting and middle density; M<sub>1</sub>D<sub>3</sub>, Bowl mechanical-transplanting and low density; M<sub>2</sub>D<sub>4</sub>, Carpet mechanical-transplanting and high density; M<sub>2</sub>D<sub>5</sub>, Carpet mechanical-transplanting and middle density; M<sub>2</sub>D<sub>6</sub>, Carpet mechanical-transplanting and low density; T, Seedling-age; MD, Mechanical-transplanting×density; T×MD, Interaction of Seedling-age with mechanical-transplanting and density. Values(mean±SD) under the same seedling-age treatments followed by different letters are significantly different at P<0.05 (n=3, LSD). \* Significant at P < 0.05; \*\* Significant at P < 0.01, respectively. The same as below.

量,各阶段氮吸收量、氮素偏生产力、氮收获指数,以及稻谷产量,不同机插方式下表现为高密度(D<sub>1</sub>和 D<sub>4</sub>)处理较高,且钵苗相对毯苗机插优势明显,但两种机插方式均要通过提高机插密度来稳定产量。  
2.2 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻氮素吸收速率的影响

秧龄、机插方式与密度对拔节前、拔节至齐穗期各阶段吸氮比例,以及拔节前的氮吸收速率均有显著或极显著的影响(表 3)。25 d 秧龄下,拔节前的吸氮比例及吸收速率在同一机插方式下随密度的降低而降低,在拔节至齐穗期、齐穗至成熟期氮素吸收速率不同机插方式下不太一致,钵苗机插以 M<sub>1</sub>D<sub>2</sub> 处理最高,毯苗机插以 M<sub>2</sub>D<sub>4</sub> 处理最高。40 d 秧龄下,除拔节至齐穗期的吸氮比例外,各生育时期吸氮比例、吸氮速率均与 25 d 秧龄规律相同,且移栽至拔节及拔节至齐穗期阶段氮素吸收速率均

在 M<sub>1</sub>D<sub>1</sub> 时表现最佳,而拔节至齐穗期氮素吸收速率则表现为毯苗(M<sub>2</sub>)>钵苗(M<sub>1</sub>)。

2.3 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻齐穗期各器官氮素积累量及其比例的影响

由表 4 可见,秧龄、机插方式与密度对齐穗期各器官的氮素积累量,以及叶和穗的吸氮比例的影响均达到极显著水平,且对茎鞘的氮素积累量产生了极显著的互作效应。相对于 40 d 秧龄,25 d 秧龄下齐穗期茎、叶、穗的氮素积累量明显增加,且钵苗机插茎鞘和叶片的氮素积累量均以 M<sub>1</sub>D<sub>2</sub> 处理最高,且均显著高于 M<sub>1</sub>D<sub>3</sub> 处理。毯苗机插各器官的氮素积累量均随密度的降低而减少,其中 M<sub>2</sub>D<sub>4</sub> 处理显著高于其余两个处理。茎鞘和叶片的氮素分配比例在相同机插方式下均随密度的降低而升高,穗部则表现相反。40 d 秧龄下,各器官的氮素积累量以及穗部氮素比例均表现为 M<sub>1</sub>>M<sub>2</sub>,且在同一机

表 3 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻主要生育阶段氮素吸收速率的影响

Table 3. Effects of mechanical-transplanting modes and density on N uptake rate of main growth and development stage under different seedling-ages.

秧龄 Seedling-age	处理 Treatment	阶段氮吸收量占总吸收量的比例 Ratio of N uptake at growth and development stage to total/%			氮素吸收速率 N uptake rate/(kg·hm <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )		
		移栽-拔节 Before jointing	拔节-齐穗期 Jointing to full-heading	齐穗-成熟期 Full-heading to maturity	移栽-拔节 Before jointing	拔节-齐穗期 Jointing to full-heading	齐穗-成熟期 Full-heading to maturity
T <sub>1</sub>	M <sub>1</sub> D <sub>1</sub>	42.84±0.61 a	42.62±0.95 c	14.54±0.59 ab	1.859±0.027 a	1.959±0.027 ab	0.774±0.041 a
	M <sub>1</sub> D <sub>2</sub>	41.76±0.16 ab	43.53±0.67 bc	14.70±0.82 a	1.852±0.013 a	2.059±0.039 a	0.797±0.062 a
	M <sub>1</sub> D <sub>3</sub>	41.68±0.15 ab	43.87±2.36 abc	14.45±2.40 ab	1.754±0.007 b	1.951±0.056 b	0.719±0.093 a
	M <sub>2</sub> D <sub>4</sub>	42.08±0.58 ab	43.50±1.50 bc	14.41±0.92 ab	1.664±0.025 c	1.895±0.081 bc	0.787±0.066 a
	M <sub>2</sub> D <sub>5</sub>	40.99±0.79 b	45.35±1.05 ab	13.66±0.91 abc	1.465±0.026 d	1.833±0.054 c	0.769±0.028 a
	M <sub>2</sub> D <sub>6</sub>	40.92±0.34 b	46.36±0.58 a	12.72±0.29 ac	1.427±0.015 d	1.832±0.024 c	0.714±0.012 a
	平均 Average	41.71	44.21	14.08	1.670	1.921	0.760
T <sub>2</sub>	M <sub>1</sub> D <sub>1</sub>	42.35±2.54 a	43.17±3.75 c	14.49±2.31 a	2.033±0.133 a	1.986±0.139 a	0.770±0.110 a
	M <sub>1</sub> D <sub>2</sub>	41.57±0.67 a	44.02±0.82 bc	14.40±0.75 a	1.931±0.027 b	1.984±0.068 a	0.732±0.067 a
	M <sub>1</sub> D <sub>3</sub>	41.55±0.23 a	45.07±0.65 bc	13.37±0.87 ab	1.802±0.019 c	1.947±0.010 a	0.720±0.027 a
	M <sub>2</sub> D <sub>4</sub>	41.91±1.04 a	43.71±1.78 c	14.37±2.18 a	1.792±0.074 c	1.993±0.093 a	0.767±0.065 a
	M <sub>2</sub> D <sub>5</sub>	39.93±1.02 b	46.61±0.71 ab	13.46±0.52 ab	1.572±0.042 d	1.980±0.048 a	0.603±0.105 b
	M <sub>2</sub> D <sub>6</sub>	39.52±1.08 b	48.12±1.72 a	12.37±0.91 b	1.458±0.037 e	1.971±0.064 a	0.589±0.006 b
	平均 Average	41.14	45.12	13.74	1.765	1.977	0.697
F 值	T	18.69*	20.64*	2.85	99.18**	34.15*	16.88
F value	MD	5.12**	5.10**	1.90	88.32**	2.51	3.44*
	T×MD	0.44	0.16	0.12	1.54	2.43	1.54

表 4 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻齐穗期各器官氮素积累量及其比例的影响

Table 4. Effects of mechanical-transplanting modes and density on N accumulation and its ratio to total N uptake at full heading stage under different seedling-ages.

秧龄 Seedling-age	处理 Treatment	茎鞘 Stem-sheath		叶片 Leaf		穗 Panicle	
		氮素积累量 N uptake	比例 Ratio to total	氮素积累量 N uptake	比例 Ratio to total	氮素积累量 N uptake	比例 Ratio to total
		/(kg·hm <sup>-2</sup> )	/%	/(kg·hm <sup>-2</sup> )	/%	/(kg·hm <sup>-2</sup> )	/%
T <sub>1</sub>	M <sub>1</sub> D <sub>1</sub>	55.06±0.68 ab	31.59±0.2 ab	88.13±1.16 b	50.57±0.87 c	31.09±1.42 a	17.84±0.75 a
	M <sub>1</sub> D <sub>2</sub>	56.79±1.39 a	31.94±0.40 a	90.76±1.02 a	51.05±0.42 bc	30.25±0.33 a	17.01±0.13 ab
	M <sub>1</sub> D <sub>3</sub>	54.14±3.17 b	31.99±1.21 a	87.41±0.96 b	51.68±1.20 b	27.62±0.61 b	16.33±0.30 bc
	M <sub>2</sub> D <sub>4</sub>	49.72±0.45 c	30.61±0.18 c	86.26±2.13 b	53.10±0.64 a	26.46±0.86 b	16.29±0.59 bc
	M <sub>2</sub> D <sub>5</sub>	45.69±0.99 d	30.85±0.61 bc	79.32±0.52 c	53.57±0.24 a	23.06±1.13 c	15.58±0.79 cd
	M <sub>2</sub> D <sub>6</sub>	45.25±0.55 d	30.97±0.46 bc	78.31±1.09 c	53.60±0.50 a	22.53±0.19 c	15.42±0.18 d
	平均 Average	51.11	31.32	85.03	52.26	26.84	16.41
T <sub>2</sub>	M <sub>1</sub> D <sub>1</sub>	50.49±1.29 a	30.76±0.51 a	86.03±2.30 a	52.42±0.64 c	27.58±0.99 a	16.81±0.83 a
	M <sub>1</sub> D <sub>2</sub>	49.03±0.17 a	30.83±0.34 a	84.06±1.99 ab	52.85±0.60 bc	25.96±0.12 ab	16.32±0.27 ab
	M <sub>1</sub> D <sub>3</sub>	46.43±0.42 b	30.90±0.65 a	80.49±0.96 c	53.57±0.15 ab	23.34±1.30 c	15.53±0.68 b
	M <sub>2</sub> D <sub>4</sub>	47.05±1.30 b	30.61±0.44 a	81.75±2.57 bc	53.17±0.69 bc	24.92±0.46 b	16.22±0.28 ab
	M <sub>2</sub> D <sub>5</sub>	44.20±1.35 c	30.90±0.78 a	76.64±0.46 d	53.57±0.62 ab	22.22±0.86 c	15.53±0.60 b
	M <sub>2</sub> D <sub>6</sub>	42.29±1.05 d	31.16±0.98 a	73.83±1.74 e	54.38±0.89 a	19.64±1.50 d	14.47±1.08 c
	平均 Average	46.58	30.86	80.47	53.33	23.94	15.81
F 值	T	319.27**	11.88	635.54**	153.72**	1176.46**	128.52**
F value	MD	53.18**	1.43	45.96**	10.86**	58.37**	9.74**
	T×MD	6.32**	1.31	2.04	2.38	3.06*	0.65

表 5 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻成熟期各器官氮素积累量及其比例的影响  
Table 5. Effects of mechanical-transplanting modes and density on N accumulation and its ratio to total N uptake at maturity stage under different seedling-ages.

秧龄 Seedling-age	处理 Treatment	茎鞘 Stem-sheath		叶片 Leaf		穗 Panicle	
		氮素积累量	比例	氮素积累量	比例	氮素积累量	比例
		N uptake /(kg·hm <sup>-2</sup> )	Ratio to total /%	N uptake /(kg·hm <sup>-2</sup> )	Ratio to total /%	N uptake /(kg·hm <sup>-2</sup> )	Ratio to total /%
T <sub>1</sub>	M <sub>1</sub> D <sub>1</sub>	36.43±0.63 ab	17.87±0.33 b	41.98±0.39 ab	20.59±0.17 c	125.50±0.47 b	61.55±0.16 a
	M <sub>1</sub> D <sub>2</sub>	37.40±0.62 a	17.94±0.24 b	43.13±0.46 a	20.69±0.31 bc	127.90±0.90 a	61.36±0.16 a
	M <sub>1</sub> D <sub>3</sub>	35.69±1.13 bc	18.05±0.45 b	41.39±1.23 bc	20.93±0.73 abc	120.67±1.28 c	61.02±0.34 a
	M <sub>2</sub> D <sub>4</sub>	35.23±0.60 c	18.56±0.36 a	40.39±1.85 c	21.28±0.80 ab	114.18±1.32 d	60.16±0.88 b
	M <sub>2</sub> D <sub>5</sub>	32.16±0.49 d	18.76±0.48 a	36.70±0.55 d	21.40±0.17 a	102.63±1.95 e	59.84±0.52 b
	M <sub>2</sub> D <sub>6</sub>	31.85±0.61 d	19.03±0.40 a	35.86±0.77 d	21.42±0.43 a	99.68±0.39 f	59.55±0.06 b
	平均 Average	34.79	18.37	39.91	21.27	115.10	60.58
T <sub>2</sub>	M <sub>1</sub> D <sub>1</sub>	35.60±1.16 a	18.54±0.37 b	40.61±1.09 a	21.16±0.22 a	115.74±1.12 a	60.30±0.54 a
	M <sub>1</sub> D <sub>2</sub>	34.56±1.16 a	18.60±0.28 ab	39.15±0.41 ab	21.07±0.23 a	112.11±2.16 b	60.33±0.23 a
	M <sub>1</sub> D <sub>3</sub>	32.41±0.98 b	18.69±0.61 ab	37.22±0.86 c	21.46±0.26 a	103.83±1.49 d	59.86±0.42 ab
	M <sub>2</sub> D <sub>4</sub>	33.24±0.20 b	18.52±0.07 b	38.05±0.60 bc	21.19±0.31 a	108.23±0.51 c	60.29±0.36 a
	M <sub>2</sub> D <sub>5</sub>	31.21±0.49 c	18.88±0.34 ab	35.16±0.46 d	21.27±0.32 a	98.93±1.28 e	59.85±0.63 ab
	M <sub>2</sub> D <sub>6</sub>	29.58±0.31 d	19.09±0.16 a	33.31±1.72 e	21.50±0.93 a	92.05±0.64 f	59.41±0.90 b
	平均 Average	32.77	18.72	37.25	21.05	105.15	60.01
F 值	T	122.80**	45.02*	87.73*	6.79	583.88**	22.60*
F value	MD	48.60**	4.88**	46.98**	1.45	327.92**	7.34**
	T×MD	2.47	1.25	2.19	0.59	23.08**	2.34

插方式下随密度的降低而降低，而茎鞘和叶片的吸氮所占比例则增大。

2.4 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻成熟期各器官氮素积累量及其比例的影响

由表 5 可见，秧龄仅对茎鞘和穗部氮素积累量的影响达极显著水平，机插方式与密度对成熟期各器官的氮素积累量，以及茎鞘和穗的氮素分配比例的影响均达到极显著水平，而秧龄、机插方式与密度对穗部的氮素积累量产生了极显著的互作效应。茎鞘氮素积累量、叶片及穗氮素积累量及比例均表现为 T<sub>1</sub>>T<sub>2</sub>。相对于 40 d 秧龄，25 d 秧龄下钵苗机插各处理的茎鞘、叶片氮素积累量和穗部氮素积累量及比例优于毯苗机插，钵苗机插各器官的吸氮量均以 M<sub>1</sub>D<sub>2</sub> 处理最高，且均显著高于 M<sub>1</sub>D<sub>3</sub> 处理。毯苗机插各器官的氮素积累量及吸氮所占比例与齐穗期变化趋势一致。40 d 秧龄下，各器官的氮素积累量在相同机插方式下均随密度的降低而降低，仅茎鞘吸氮所占比例增加。

2.5 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻结实期氮素转运特征的影响

如表 6 所示，秧龄、机插方式与密度对茎鞘、叶片、地上部的氮素转运量，以及穗部氮素增加量的影响均达显著或极显著水平，且两因素对穗部氮

素增加量存在极显著的互作效应。25 d 秧龄下各处理茎鞘、叶、地上部分的氮素转运量，以及穗部氮素增加量显著高于 40 d 秧龄，且钵苗机插均以 M<sub>1</sub>D<sub>2</sub> 处理最高，该处理穗部氮素增加量比毯苗最优组合高 11.33%；毯苗机插以上指标均随密度的降低而降低。从不同营养器官氮素转运来看，地上部、叶片的氮素转运率，以及齐穗至成熟期氮转运贡献率则在同一机插方式下均随密度的降低而不同程度升高。40 d 秧龄下，同一机插方式茎鞘、叶、地上部分的氮素转运量，以及穗部氮素增加量均随密度的降低而降低，以 M<sub>1</sub>D<sub>1</sub> 处理最高。叶片、茎鞘以及地上部分的氮素转运率则在同一机插方式下均随密度的降低而升高。

2.6 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻根系生长的影响

如表 7 所示，秧龄对移栽和成熟期的根干质量和移栽期的根冠比产生了极显著的影响，机插方式与密度对移栽、拔节和成熟期根干质量以及各时期根冠比均产生了极显著的影响，但二者的互作仅对移栽期的根干质量和根冠比产生了极显著的影响。其中，拔节至成熟期的根系干质量 25 d 秧龄均大于 40 d 秧龄。就根系干质量而言，在相同秧龄和机插方式下，均随着移栽密度的降低而降低，但在拔节

表 6 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻结实期氮素转运特征的影响  
Table 6. Effects of mechanical-transplanting modes and density on N translocation characteristics of stem-sheath and leaf at filling stage under different seedling-ages

秧龄 Seedling-age	处理 Treatment	地上部分 Above ground		茎鞘 Stem-sheath		叶片 Leaf		穗部氮素增加量	抽穗至成熟期
		氮素转运量 NT	氮素转运率	氮素转运量 NT	氮素转运率	氮素转运量 NT	氮素转运率	N increase in	氮转运贡献率
		/(kg·hm <sup>-2</sup> )	NTE/%	/(kg·hm <sup>-2</sup> )	NTE/%	/(kg·hm <sup>-2</sup> )	NTE/%	panicle/(kg·hm <sup>-2</sup> )	NTCRV/%
T <sub>1</sub>	M <sub>1</sub> D <sub>1</sub>	64.77±0.93 a	37.17±0.61 a	18.62±0.15 a	33.83±0.39 a	46.15±1.07 a	52.36±0.62 b	94.42±1.65 b	68.60±0.01 a
	M <sub>1</sub> D <sub>2</sub>	67.01±2.17 a	37.69±0.72 a	19.38±1.05 a	34.13±1.13 a	47.63±1.12 a	52.47±0.73 ab	97.66±0.60 a	68.62±0.02 a
	M <sub>1</sub> D <sub>3</sub>	64.46±3.86 a	38.08±1.49 a	18.44±3.87 a	33.87±5.42 a	46.01±0.28 a	52.65±0.89 ab	93.05±1.23 b	69.31±0.05 a
	M <sub>2</sub> D <sub>4</sub>	60.36±0.64 b	37.16±0.50 a	14.49±0.52 b	29.15±1.03 b	45.87±0.29 a	53.19±0.97 ab	87.72±1.98 c	68.83±0.01 a
	M <sub>2</sub> D <sub>5</sub>	56.14±1.86 c	37.91±1.18 a	13.52±1.46 b	29.57±2.57 b	42.61±0.89 b	53.72±0.85 ab	79.57±2.92 d	70.57±0.02 a
	M <sub>2</sub> D <sub>6</sub>	55.85±0.64 c	38.23±0.25 a	13.40±0.38 b	29.62±0.85 b	42.45±0.32 b	54.21±0.35 a	77.15±0.58 e	72.40±0.01 a
	平均 Average	61.43	37.71	16.31	31.69	45.12	53.10	88.26	69.72
T <sub>2</sub>	M <sub>1</sub> D <sub>1</sub>	60.30±4.31 a	36.73±2.11 b	14.88±1.18 a	29.48±1.99 a	45.42±3.13 a	52.76±2.28 b	88.16±0.97 a	68.43±0.05 b
	M <sub>1</sub> D <sub>2</sub>	59.38±0.51 a	37.33±0.15 b	14.47±1.10 ab	29.51±2.27 a	44.91±1.58 a	53.41±0.62 ab	86.16±2.26 a	68.94±0.01 b
	M <sub>1</sub> D <sub>3</sub>	57.28±1.30 ab	38.12±0.79 ab	14.01±0.61 ab	30.19±1.55 a	43.27±0.71 ab	53.76±0.79 ab	80.49±0.42 c	71.18±0.02 ab
	M <sub>2</sub> D <sub>4</sub>	57.51±4.08 a	37.39±1.70 b	13.81±1.44 ab	29.32±2.26 a	43.70±3.00 a	53.41±0.89 ab	83.31±0.26 b	69.02±0.05 b
	M <sub>2</sub> D <sub>5</sub>	54.47±2.09 bc	38.07±1.33 ab	12.99±1.71 ab	29.34±3.01 a	41.47±0.56 bc	54.11±0.59 ab	76.71±2.07 d	71.00±0.01 ab
	M <sub>2</sub> D <sub>6</sub>	53.23±0.59 c	39.21±0.32 a	12.71±0.74 b	30.04±1.03 a	40.52±1.33 c	54.89±1.76 a	72.40±0.94 e	73.54±0.02 a
	平均 Average	57.03	37.81	13.81	29.65	43.22	53.72	81.21	70.35
F 值	T	235.18**	0.21	419.42**	104.05**	36.25*	3.54	1197.28**	1.73
F value	MD	13.83**	1.95	9.35**	2.10	9.11**	2.13	102.53**	2.08
	T×MD	1.62	0.30	3.20*	1.81	0.40	0.12	8.54**	0.10

NT—氮素转运量; NTE—氮素转运率; NTCRV—齐穗至成熟期氮转运贡献率。  
NT, N translocation; NTE, N translocation efficiency; NTCRV, N translocation conversion rate of vegetative organ from full heading to maturity.

表 7 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻主要生育时期根干质量和根冠比的影响  
Table 7. Effects of mechanical-transplanting modes and density on root dry weight and root-shoot ratio at main growth stages under different seedling-ages.

秧龄 Seedling-age	处理 Treatment	根干质量 Root dry weight/(kg·hm <sup>2</sup> )				根冠比 Root-shoot ratio			
		移栽	拔节	抽穗	成熟	移栽	拔节	抽穗	成熟
		Transplanting	Jointing	Heading	Maturity	Transplanting	Jointing	Heading	Maturity
T <sub>1</sub>	M <sub>1</sub> D <sub>1</sub>	11.14±0.50 ab	695.96±22.27 a	1267.18±68.85 a	720.58±14.56 a	0.475±0.012 a	0.177±0.010 a	0.098±0.005 b	0.034±0.001 b
	M <sub>1</sub> D <sub>2</sub>	10.42±0.50 b	686.77±19.78 a	1261.26±46.09 a	719.96±16.59 a	0.475±0.012 a	0.181±0.015 a	0.099±0.003 b	0.034±0.001 b
	M <sub>1</sub> D <sub>3</sub>	9.79±0.74 b	680.93±42.11 a	1223.60±77.79 ab	711.53±23.70 a	0.475±0.012 a	0.182±0.023 a	0.100±0.006 b	0.035±0.001 b
	M <sub>2</sub> D <sub>4</sub>	14.46±0.88 a	606.32±55.46 b	1222.27±57.05 ab	702.69±19.54 ab	0.487±0.046 a	0.164±0.007 b	0.107±0.006 a	0.036±0.001 ab
	M <sub>2</sub> D <sub>5</sub>	12.39±0.77 ab	591.64±17.47 b	1211.74±24.08 b	692.24±23.80 b	0.487±0.046 a	0.165±0.008 b	0.108±0.003 a	0.037±0.001 a
	M <sub>2</sub> D <sub>6</sub>	9.64±0.42 b	571.19±42.55 b	1199.94±14.31 b	686.85±19.29 b	0.487±0.046 a	0.166±0.013 b	0.108±0.002 a	0.037±0.001 a
	平均 Average	11.31	638.80	1231.00	705.64	0.481	0.172	0.103	0.035
T <sub>2</sub>	M <sub>1</sub> D <sub>1</sub>	58.91±2.78 a	625.91±48.94 a	1182.42±49.68 a	672.03±24.92 a	0.741±0.006 a	0.188±0.019 a	0.103±0.004 a	0.034±0.001 c
	M <sub>1</sub> D <sub>2</sub>	55.11±2.78 ab	619.48±32.63 a	1161.72±45.91 a	669.99±25.82 a	0.741±0.006 a	0.191±0.009 a	0.103±0.003 a	0.035±0.001 bc
	M <sub>1</sub> D <sub>3</sub>	51.77±0.81 b	609.94±32.18 a	1156.29±57.43 a	665.17±23.37 a	0.741±0.006 a	0.191±0.016 a	0.104±0.006 a	0.035±0.001 bc
	M <sub>2</sub> D <sub>4</sub>	45.29±1.21 c	528.43±41.99 b	1152.50±36.47 a	669.01±16.17 a	0.592±0.006 b	0.181±0.010 a	0.106±0.002 a	0.036±0.001 ab
	M <sub>2</sub> D <sub>5</sub>	38.82±1.41 d	521.88±11.41 b	1132.23±29.93 ab	652.55±30.45 a	0.592±0.006 b	0.182±0.019 a	0.106±0.002 a	0.036±0.002 ab
	M <sub>2</sub> D <sub>6</sub>	30.19±1.41 e	501.31±13.77 b	1089.30±19.49 b	630.40±16.30 b	0.592±0.006 b	0.185±0.004 a	0.107±0.001 a	0.037±0.001 a
	平均 Average	46.68	567.83	1145.74	659.86	0.667	0.186	0.105	0.036
F 值	T	701.63**	192.56*	37.32*	143.62**	174.90**	23.61*	1.50	5.69
F value	MD	30.63**	18.92**	3.67*	5.75**	26.63**	4.39**	7.19**	10.16**
	T×MD	31.19**	0.02	0.33	0.44	36.13**	0.56	1.41	1.13

表 8 不同秧龄下机插方式与密度杂交稻根系生长与氮素利用特征及产量的相关关系  
Table 8. Correlation coefficients between root growth and yields, N utilization characteristics of mechanical-transplanting modes and density of hybrid rice under different seedling-ages.

生育时期 Growth stage	指标 Indexe	阶段氮吸收量			总氮积 累量 Total Nitrogen	齐穗至成熟期氮素转运量			穗部氮素 增加量 N increase in panicle /(kg·hm <sup>-2</sup> )	氮收获指数 N harvest index /%	产量 Grain yield
		N uptake at growth and development stage/(kg·hm <sup>-2</sup> )				NT from full heading to maturity/(kg·hm <sup>-2</sup> )					
		拔节前	拔节-齐穗	齐穗-成熟		地上部分	茎鞘	叶片			
		Before jointing	Jointing- full heading	Full heading- maturity		Above ground	Stem sheath	Leaf			
拔节	根干质量 RDW	0.81**	0.75**	0.64**	0.82**	0.80**	0.76**	0.72**	0.83**	0.74**	0.83**
Jointing	根冠比 RSR	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	-0.02	0.06	0.02	0.08	-0.03
齐穗	根干质量 RDW	0.66**	0.65**	0.55**	0.69**	0.62**	0.67**	0.47**	0.67**	0.57**	0.78**
Full-heading	根冠比 RSR	-0.65**	-0.58**	-0.52**	-0.65**	-0.64**	-0.57**	-0.62**	-0.67**	-0.57**	-0.57**
成熟	根干质量 RDW	0.76**	0.65**	0.64**	0.76**	0.68**	0.68**	0.57**	0.75**	0.61**	0.82**
Maturity	根冠比 RSR	-0.76**	-0.65**	-0.66**	-0.79**	-0.77**	-0.66**	-0.66**	-0.56**	-0.75**	-0.76**

RDW—根干质量; RSR—根冠比; NT—氮素转运。  
RDW, Root dry weight; RSR, Root to shoot ratio; NT, N translocation.

之后相邻密度之间的差异不显著,且两个秧龄均以M<sub>1</sub>D<sub>1</sub>处理最高;根冠比方面,在相同秧龄和机插方式下,随着移栽密度的降低有上升的趋势。密度越高时,虽有利于群体根系干质量的增加,但稻株根冠比反而会下降。

2.7 杂交稻根系生长与氮素利用特征及产量的关系

根系是植物从土壤中获取氮的主要器官,与养分协同吸收、物质生产和产量关系密切。由表8可见,氮素积累、氮素转运均与主要生育时期根干质量极显著正相关( $r=0.55^{**}\sim 0.82^{**}$ ,  $r=0.47^{**}\sim 0.83^{**}$ );同时氮收获指数和产量与各生育时期根干质量呈极显著正相关( $r=0.57^{**}\sim 0.83^{**}$ )。氮素积累、转运和产量各指标与根干质量的相关性,以齐穗期相关性最低,成熟期次之,拔节期最高,但与拔节期的根冠比相关不显著,与齐穗和成熟期的根冠比存在极显著负相关( $r=-0.57^{**}\sim -0.79^{**}$ )。同时,随生育期进程,各时期的根冠比与产量的负相关程度明显加大。

3 讨论

3.1 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻氮素吸收利用的影响

氮素是影响水稻生长和产量形成的重要因素。关于不同种植方式、氮肥运筹、水分管理及密度对杂交稻氮素吸收特性的影响已有较多报道<sup>[11-13,20-21]</sup>,但关于不同秧龄对机插稻氮素吸收积累特性的研究鲜见报道。本研究结果表明,移栽到拔节期、拔节到齐穗期氮素吸收速率40 d大于25 d秧龄,这

是由于40 d秧龄两生育阶段相对25 d秧龄缩短。可见不同移栽秧龄能够改变机插稻的生育进程,从而改变对氮素的吸收速率。除此之外,各生育时期与各生育阶段氮素积累量、齐穗至成熟期的氮素吸收速率与各器官的氮吸收量、齐穗至成熟期茎叶氮素转运量,以及穗部氮素增加量均以25 d秧龄优势明显。这可能是由于25 d秧龄的秧苗本身根系活力更强,加上移栽之后其尽可能地减小了由于四川盆地低温、寡照条件等带来的不利影响。徐新朋等<sup>[22]</sup>报道,在手插条件下,施氮量为180 kg/hm<sup>2</sup>时密度越大越有利于氮素的积累、氮素偏生产力及氮收获指数的有效提高。本研究结果表明,两个秧龄的秧苗在相同机插方式下,氮收获指数同样随密度的增加而增加;不同插秧方式间有明显差异,毯苗机插氮素积累量、氮素偏生产力及产量均以密度最大的处理最高,与前人研究结果<sup>[16]</sup>有所不同,主要原因是本研究所选品种穗型小、每穗粒数少、千粒重小,且毯苗较钵苗机插植伤严重,返青活棵迟,在同一施氮水平的高密度处理下,基本苗数大,形成的有效穗多,氮素的吸收速率快,氮素的积累量增加,结实期氮素的转运量增加,而钵苗在25 d秧龄以中密度处理最高,40 d秧龄则以高密度处理最高。在阶段氮吸收速率方面,许轲等<sup>[14]</sup>对不同类型钵苗进行研究,认为拔节前的氮素吸收速率随密度的减小而减小,而拔节至抽穗期、抽穗至成熟期的氮吸收速率呈先增加后减小的规律;在本研究中,25 d秧龄的钵苗机插在拔节至齐穗期、齐穗至成熟期则出现了先增高后降低的趋势,除此之外,相同秧龄和机插方式下,各处理拔节前的氮素吸收速率均随密度的降低而降低,拔节至齐穗期、齐穗至成熟期毯



苗机插亦是如此;同时,齐穗至成熟期茎鞘和叶片氮素转运量,以及穗部氮素增加量同样具有氮吸收速率变化的规律;钵苗机插出现此规律可能是个体和群体之间协调较好形成的,因此,机插杂交稻应尽可能选择小秧龄移栽,对于钵苗机插来说,机插时密度不宜过大,应充分发挥个体优势,达到个体与群体之间的平衡,更有利于提高氮素吸收速率,增加茎叶转运量,从而增加氮素积累量,形成壮秆大穗,进而增产;而毯苗机插在移栽时,相对来说可以适当增加移栽密度,在氮素吸收速率不高的前提下,通过群体的优势来弥补个体所带来的缺陷。

### 3.2 不同秧龄下机插方式与密度对杂交稻根系生长的影响

本研究结果表明,秧龄、机插方式与密度对水稻根系生长均具有显著影响。在移栽期,秧龄对根系干质量产生了极显著的影响,25 d 秧龄各处理根系干质量均小于 40 d 秧龄,这与郭翔<sup>[23]</sup>在手插稻中研究结果一致,而群体根系干质量在本研究中随着移栽密度的降低而降低,即高密度大于低密度。从本研究来看,毯苗因用种量大,根系在秧盘中混乱交错,机插植伤重,但钵苗单位面积的秧苗比毯苗更少,根系生长具有较大空间,单株根系发达,且秧龄越大钵苗与毯苗之间的差距显著增加。但在拔节期,25 d 秧龄各处理根系干质量大于 40 d 秧龄,这其中同秧龄的钵苗均极显著高于毯苗,而齐穗和成熟期同秧龄和机插方式下群体根系干质量均随密度降低而降低,本研究则在机插条件下进一步补充完善了前人的结论<sup>[25-26]</sup>。

根冠比方面,秧龄仅对移栽前的根冠比有极显著的影响,移栽期、拔节期根冠比均为 40 d 秧龄各处理大于 25 d 秧龄,这与吴文革等<sup>[26]</sup>的研究结果基本一致,但与张祖建等<sup>[27]</sup>的研究结果存在差异,分析其原因,在移栽至拔节期,40 d 秧龄在 25 d 的基础上,大秧龄秧苗地上部生长相对地下部慢。而同一秧龄下,25 d 秧龄毯苗根冠比均高于钵苗,40 d 秧龄则相反,主要由于 25 d 秧龄的秧苗,虽然钵苗的根系优于毯苗,但地上部分钵苗同样优于毯苗,且优势更明显;而 40 d 秧龄下,无论钵苗还是毯苗,地上部分的生长均变缓,但地下部分,钵苗的生长强于毯苗,毯苗根系会因为秧龄过大而较早停止伸长<sup>[4]</sup>。而在拔节之后,同秧龄下,钵苗机插根冠比均大于毯苗机插,这是因为毯苗机插移栽时根系损伤严重,之后返青时间较钵苗更长,根系无法迅速恢复生长。因此,本研究结果表明,秧龄越大对机插秧根系的生长越不利;而钵苗机插本身秧苗素质

好,机插质量高,使整个生育期根系干质量均明显优于毯苗机插;稀植利于单株根系的生长,因为稀植单株根系生长的空间更大,就能够提高根冠比,但是不利于群体根系的生长。

### 3.3 杂交稻根系生长与氮素吸收利用和产量的关系

根系生长与水稻养分吸收、物质生产和产量关系密切<sup>[28]</sup>。前人关于根干质量和根冠比与水稻氮素积累量间的关系研究存在差异。任万军<sup>[24]</sup>的研究表明,拔节期、齐穗和成熟期氮积累量与同时期根质量的相关系数为  $r=0.88^*$ 、 $0.70^*$ 、 $0.62$ ,即生育时期越靠前,相关系数值越大,根系生长对全株氮积累量影响越大。华晶晶<sup>[29]</sup>的研究结果则表明,水、旱稻成熟期根质量与吸氮量关系不显著,而根冠比与吸氮量分别呈显著的负相关( $r=-0.914^*$ )。而严奉君等<sup>[13]</sup>的研究表明,水稻栽后各时期的根干质量与总氮积累量呈显著或极显著正相关,而成熟期的根冠比与总氮积累量呈极显著正相关( $r=0.38^*$ )。对照本研究结果,拔节期、齐穗和成熟期的根干质量与氮素的吸收转运均呈极显著正相关,而拔节期的根冠比与氮素的吸收转运无显著相关性。此外,齐穗和成熟期的根冠比与氮素吸收利用各指标呈显著或极显著的负相关,这与前人的结果存在部分差异。这可能是由气候及栽培管理方式导致的。若齐穗期和成熟期温度较高、光照不强,地上部分生长加快、对氮素的吸收利用增强,向下输送的光合产物减少,影响根系生长,致使地下部分基本处于停滞时期,此外,若齐穗及成熟期土壤水分含量高、氧气含量减少,不利于水稻根系的生长,避免了根系生长冗余而导致的自身消耗,改善了地上部分生长,根冠比降低,进一步提高了氮素吸收及同化,提高氮肥利用率。

关于主要生育时期根干质量、根冠比与产量的关系,前人研究结果也不尽一致,李杰等<sup>[30]</sup>认为拔节期根干质量与产量呈极显著负相关( $r=-0.56^*$ ),而徐国伟等<sup>[31]</sup>的研究则表明,分蘖中期根干质量与产量呈正相关( $r=0.78$ ),在穗分化始期与产量呈极显著正相关( $r=0.83^*$ )。对照本研究结果,移栽期的根干质量与产量呈负相关,这可能因为移栽时毯苗机插群体量较大导致的;而拔节期根干质量与产量呈极显著的正相关( $r=0.82^{**}$ ),与前人研究存在不同,由于移栽后毯苗返青期更长,且钵苗秧苗素质好,根系恢复生长更快而形成的。但齐穗后的根系干质量与产量的关系多数研究认为呈极显著的正相关<sup>[13,32]</sup>。本研究结果表明,齐穗和成熟期的根干

质量与产量呈正相关( $r=0.78^{**}$ 和 $r=0.87^{**}$ ),也进一步证实和补充了前人的观点<sup>[13,32]</sup>。根冠比与产量关系方面,严奉君等<sup>[13]</sup>的研究结果表明,移栽后20 d和30 d的根冠比与产量分别呈负相关( $r=-0.20$ )和显著负相关( $r=-0.43^{*}$ );徐国伟等<sup>[31]</sup>的研究表明,分蘖中期和穗分化始期根冠比与产量分别呈正相关( $r=0.65$ )和负相关( $r=-0.33$ );而李杰等<sup>[30]</sup>认为拔节期根冠比与产量呈极显著负相关( $r=-0.72^{**}$ )。在本研究结果中,拔节期的根冠比均与产量呈负相关。而齐穗和成熟期的根冠比与产量出现了显著负相关,这与李杰等<sup>[30]</sup>和徐国伟等<sup>[31]</sup>的研究结果一致,但与严奉君等<sup>[13]</sup>和彭玉等<sup>[32]</sup>人工栽插的研究结果存在差异,这也可能由于杂交稻根系生长旺盛,根系存在冗余,且根系的生长需要消耗比地上部更多的光合产物,则使地上部生长受到一定影响,随之不利于产量的提高<sup>[33]</sup>。此外,四川稻区存在稻麦(油)两熟周年高产的茬口矛盾,因此,在秧龄和品种的选择上还应进一步加强研究,以此来加快机插稻技术的集成与推广。

#### 4 结论

钵苗机插在根系生长以及氮素的吸收利用方面较毯苗机插优势明显,钵苗机插杂交水稻不宜过密,25 d秧龄下,机插行株距为33.0 cm×15.5 cm时,根系生长适宜,拔节后氮素吸收速率以及各器官的氮素转运率表现最好,最终氮素积累量及偏生产力最高,从而产量最高。而机插大秧龄钵苗(40 d)可以适当缩减机插株距,行株距以33.0 cm×14.5 cm~15.5 cm为宜,有利于根系生长以及增加群体对氮素吸收能力,增加穗部氮素积累量,进而提高产量。而毯苗机插氮素的吸收利用以及水稻产量均随着密度的增加而增加,毯苗移栽时可以适当增加移栽密度,本研究条件下以30.0 cm×12.0 cm,进而构建较大群体来弥补个体所带来的缺陷,提高对氮素的吸收利用,从而保证较高产量。

#### 参考文献:

- [1] 朱德峰,陈惠哲.水稻机插秧发展与粮食安全.中国稻米,2009,(6):4-7.  
Zhu D F, Chen H Z. Development of mechanical-transplanting rice and food safety. *China Rice*, 2009(6): 4-7 (in Chinese)
- [2] 朱德峰,程式华,张玉屏,林贤青,陈惠哲.全球水稻生产现状与制约因素分析.中国农业科学,2010,43(3):474-479.  
Zhu D F, Cheng S H, Zhang Y P, Lin X Q, Chen H Z. Analysis of status and constraints of rice production in the world. *Sci Agric Sin*, 2010, 43(3): 474-479 (in Chinese with English abstract)
- [3] 张洪程.水稻钵苗精确机插高产栽培新技术.北京:中国农业出版社,2014:1-8.  
Zhang H C. High yield cultivation technology of rice bowl mechanical-transplanting. Beijing: China Agriculture Press, 2014: 1-8(in Chinese)
- [4] 张洪程,龚金龙.中国水稻种植机械化高产农艺研究现状及发展探讨.中国农业科学,2014,47(7):1273-1289.  
Zhang H C, Gong J L. Research status and development discussion on high-yielding agronomy of mechanized planting rice in china. *Sci Agric Sin*, 2014, 47(7): 1273-1289. (in Chinese with English abstract)
- [5] 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, Jang 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. *Trans CSAE*, 2013, 29 (21): 50-59 (in Chinese with English abstract)
- [6] 陈琨,赵小蓉,王昌全,曾祥忠,赵燮京.成都平原不同施肥水平下稻田地表径流氮、磷流失初探.西南农业学报,2009,22(3):685-689.  
Chen K, Zhao X R, Wang C Q, Zeng X Z, Zhao X J. Nitrogen and phosphorus loss by surface run off in different fertilization levels in Chengdu plain. *Southwest Chin J Agric Sci*, 2009, 22(3): 685-689. (in Chinese with English abstract)
- [7] Xu F X, Xiong H, Zhang L. Variation of nitrogen uptake and utilization efficiency of mid-season hybrid rice at different ecological sites under different nitrogen application levels. *Agric Sci & Technol Hunan*, 2011, 12(7): 1001-1009, 1012.
- [8] 龚金龙,邢志鹏,胡雅杰,张洪程,戴其根,霍中洋,许轲,魏海燕,高辉.粳、籼超级稻氮素吸收利用与转运差异研究.植物营养与肥料学报,2014,20(4):796-810.  
Gong J L, Xing Z P, Hu Y J, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Gao H. Differences of nitrogen uptake, utilization and translocation between Indica and Japonica super rice. *Plant Nutr Fert Sci*, 2014, 20(4): 796-810. (in Chinese with English abstract)
- [9] 赵敏,胡剑锋,钟晓媛,张强,周虹,任万军.不同基因型机插稻植株氮素积累运转特性.植物营养与肥料

- 学报, 2015, 21(2): 277-287.
- Zhao M, Hu J F, Zhong X Y, Zhang Q, Zhou H, Ren W J. Differences in N accumulation and translocation in the machine-transplanted rice genotypes. *Plant Nutr Fert Sci*, 2015, 21(2): 277-287. (in Chinese with English abstract)
- [10] 彭玉, 孙永健, 蒋明金, 徐徽, 秦俭, 杨志远, 马均. 不同水分条件下缓/控释氮肥对水稻干物质质量和氮素吸收、运转及分配的影响. 作物学报, 2014, 19(5): 859-870.
- Peng Y, Sun Y J, Jiang M J, Xu H, Qin J, Yang Z Y, Ma J. Effects of slow-controlled release fertilizers on root morphological and physiological characteristics of rice. *Acta Agron Sin*, 2014, 19(5): 859-870. (in Chinese with English abstract)
- [11] 孙永健, 孙园园, 徐徽, 杨志远, 秦俭, 彭玉, 马均. 水氮管理模式与磷钾肥配施对杂交水稻冈优 725 养分吸收的影响. 中国农业科学, 2013, 46(7): 1335-1346.
- Sun Y J, Sun Y Y, Xu H, Yang Z Y, Qin J, Peng Y, Ma J. Effects of water-nitrogen management patterns and combined application of phosphorus and potassium fertilizers on nutrient absorption of hybrid rice Gangyou 725. *Sci Agric Sin*, 2013, 46(7): 1335-1346. (in Chinese with English abstract)
- [12] 邓飞, 王丽, 任万军, 刘代银, 杨文钰. 不同生态条件下栽植方式对中籼迟熟杂交稻组合 II 优 498 氮素积累与分配的影响. 中国农业科学, 2012, 45(20): 4310-4325.
- Deng F, Wang L, Ren W J, Liu D Y, Yang W Y. Effects of planting methods on nitrogen accumulation and distribution of mid-late indica hybrid rice combination II You 498 under different ecological conditions. *Sci Agric Sin*, 2012, 45(20): 4310-4325. (in Chinese with English abstract)
- [13] 严奉君, 孙永健, 马均, 徐徽, 李玥, 杨志远, 蒋明金, 吕腾飞. 秸秆覆盖与氮肥运筹对杂交稻根系生长及氮素利用的影响. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 23-35.
- Yan F J, Sun Y J, Ma J, Xu H, Li Y, Yang Z Y, Jiang M J, Lv T F. Effects of straw mulch and nitrogen management on root growth and nitrogen utilization characteristics of hybrid rice. *Plant Nutr Fert Sci*, 2015, 21(1): 23-35. (in Chinese with English abstract)
- [14] 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)
- [15] 陈健晓, 林朝上, 胡春花, 符研. 不同栽培密度对博优 225 产量与氮利用效率的影响. 广东农业科学, 2012, (7): 34-37.
- Chen J X, Lin C S, Hu C H, Fu Y. Effects of different cultured density on yield and nitrogen utilization efficiency of Boyou 225. *Guangdong Agric Sci*, 2012, (7): 34-37. (in Chinese with English abstract)
- [16] 孙永健, 马均, 孙园园, 杨志远, 徐徽, 熊洪, 徐富贤. 施氮量和株距对机插杂交稻结实期养分转运和产量的影响. 核农学报, 2014, 28(8): 1510-1520.
- Sun Y J, Ma J, Sun Y Y, Yang Z Y, Xu H, Xiong H, Xu F X. Effects of nitrogen application rates and plant spacing on nutrient translocation during filling stage and yield of mechanical-transplanted hybrid rice. *J Nuc Agric Sci*, 2014, 28(8): 1510-1520. (in Chinese with English abstract)
- [17] 吴文革, 周永进, 张健美, 陈刚, 许有尊, 李胜群, 左庆, 叶为发, 余友玲, 杨成林, 孙雪原. 杂交中籼稻钵苗机插群体特征及产量形成优势分析. 核农学报, 2016, 30(7): 1427-1434.
- Wu W G, Zhou Y J, Zhang J M, Cheng G, Xu Y Z, Li S Q, Zuo Q, Ye W F, Yu Y L, Yang C L, Sun X Y. Analysis on population characteristics and yield formation advantages of pot-seedling mechanical transplanting middle-season indica hybrid rice. *J Nucl Agric Sci*, 2016, 30(7): 1472-1434. (in Chinese with English abstract)
- [18] 刘利, 雷小龙, 黄光忠, 刘代银, 任万军. 机械化播栽对杂交稻氮素积累分配及碳氮比的影响. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 831-844.
- Liu L, Lei X L, Huang G Z, Liu D Y, Ren W J. Influences of mechanical sowing and transplanting on nitrogen accumulation, distribution and C/N of hybrid rice cultivars. *Plant Nutr Fert Sci*, 2014, 20(4): 831-844. (in Chinese with English abstract)
- [19] 赵敏, 胡剑锋, 钟晓媛, 张强, 周虹, 任万军. 不同基因型机插稻植株氮素积累运转特性. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 277-287.
- Zhao M, Hu J F, Zhong X Y, Zhang Q, Zhou H, Ren W J. Differences in N accumulation and translocation in the machine-transplanted rice genotypes. *Plant Nutr Fert Sci*, 2015, 21(2): 277-287. (in Chinese with English abstract)
- [20] 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 R, 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 Fert Sci*, 2010, 16(1): 20-26. (in Chinese with English abstract)
- [21] 周江明, 赵琳, 董越勇, 徐进, 边武英, 毛杨仓, 章秀

- 福. 氮肥和栽植密度对水稻产量及氮肥利用率的影响. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 274-281.
- Zhou J M, Zhao L, Dong Y Y, Xu J, Bian W Y, Mao Y C, Zhang X F. Nitrogen and transplanting density interactions on the rice yield and N use rate. *Plant Nutr Fert Sci*, 2010, 16(2): 274-281. (in Chinese with English abstract)
- [22] 徐新朋, 周卫, 梁国庆, 孙静文, 王秀斌, 何萍, 徐芳森, 余喜初. 氮肥用量和密度对双季稻产量及氮肥利用率的影响. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3): 763-772.
- Xu X P, Zhou W, Liang G Q, Sun J W, Wang X B, He P, Xu F S, Yu X C. Effects of nitrogen and density interactions on grain yield and nitrogen use efficiency of double-rice systems. *Plant Nutr Fert Sci*, 2015, 21(3): 763-772. (in Chinese with English abstract)
- [23] 郭翔. 水稻强化栽培适宜秧龄及早育秧临界移栽秧龄研究. 成都: 四川农业大学, 2010.
- Guo X. The research on the proper transplanting seedling age in the system of rice intensification and the critical transplanting seedling age of dry nursery. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [24] 任万军. 水稻栽后根系发生和生长机制研究. 雅安: 四川农业大学, 2005.
- Ren W J. Study on mechanism of seedling rooting and root growth of rice after transplanting. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [25] 李静. 生态条件和栽培密度对水稻群体特征、产量和品质的影响. 成都: 四川农业大学, 2013.
- Li J. Effects of ecological conditions and transplanting density on the rice population characteristics yield and quality, Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [26] 吴文革, 张健美, 周永进, 陈刚, 许有尊, 李胜群, 严文学, 高尚勤. 江淮水稻钵苗机插生育特性与高产栽培关键技术研究. 中国稻米, 2015, 21(4): 118-124.
- Wu W G, Zhang J M, Zhou Y J, Chen G, Xu Y Z, Li S Q, Yan W X, Gao S Q. Study on growth and development characteristics and high-yielding cultivation techniques of rice with nutrition bowl mechanical transplanting in Jianghuai area. *China Rice*, 2015, 21(4): 118-124. (in Chinese with English abstract)
- [27] 张祖建, 王君, 郎有忠, 于林惠, 薛艳凤, 朱庆森. 机插稻超秧龄秧苗的生长特点研究. 作物学报, 2008, 34(2): 297-304.
- Zhang Z J, Wang J, Lang Y Z, Yu L H, Xue Y F, Zhu Q S. Growing characteristics of rice seedlings of over-optimum age for mechanical transplanting. *Acta Agron Sin*, 2008, 34(2): 297-304. (in Chinese with English abstract)
- [28] 杨建昌. 水稻根系形态生理与产量、品质形成及养分吸收利用的关系. 中国农业科学, 2011, 44(1): 36-46.
- Yang J C. Relationships of rice root morphology and physiology with the formation of grain yield and quality and the nutrient absorption and utilization. *Sci Agric Sin*, 2011, 44(1): 36-46. (in Chinese with English abstract)
- [29] 华晶晶. 水、旱稻根系生长与氮素吸收利用差异的研究. 扬州: 扬州大学, 2013.
- Hua J J. A study of the different absorption and utilization of nitrogen between paddy rice and upland rice. Yangzhou: Yangzhou University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [30] 李杰, 张洪程, 常勇, 龚金龙, 胡雅杰, 龙厚元, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 高辉. 高产栽培条件下种植方式对超级稻根系形态生理特征的影响. 作物学报, 2011, 37(12): 2208-2220.
- Li J, Zhang H C, Chang Y, Gong J L, Hu Y J, Long H Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Gao H. Influence of planting methods on root System morphological and physiological characteristics of super rice under high-yielding cultivation condition. *Acta Agron Sin*, 2011, 37(12): 2208-2220. (in Chinese with English abstract)
- [31] 徐国伟, 王贺正, 翟志华, 孙梦, 李友军. 不同水氮耦合对水稻根系形态生理、产量与氮素利用的影响. 农业工程学报, 2015, 31(10): 132-141.
- Xu G W, Wang H Z, Zhai Z H, Sun M, Li Y J. Effect of water and nitrogen coupling on root morphology and physiology, yield and nutrition utilization for rice. *Trans CSAE*, 2015, 31(10): 132-141. (in Chinese with English abstract)
- [32] 彭玉, 马均, 蒋明金, 严奉君, 孙永健, 杨志远. 缓/控释肥对杂交水稻根系形态、生理特性和产量的影响. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5): 1048-1057.
- Peng Y, Ma J, Jiang M J, Yan F J, Sun Y J, Yang Z Y. Effects of slow-controlled release fertilizers on root morphological and physiological characteristics of rice. *Plant Nutr Fert Sci*, 2013, 19(5): 1048-1057. (in Chinese with English abstract)
- [33] 蔡昆争. 水稻栽培群体根系的生长冗余和结构优化. 广州: 华南农业大学, 2001.
- Cai K Z. Growth redundancy and structure optimization of root system in a cultivated rice community. Guangzhou: South China Agricultural University, 2001. (in Chinese with English abstract)