植物营养与肥料学报 2015,21(2): 277 -287 doi: 10.11674/zwyf.2015.0201
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

不同基因型机插稻植株氮素积累运转特性

赵 敏[1], 胡剑锋[1], 钟晓媛[1], 张 强[1], 周 虹[2], 任万军[1*]
(1 四川农业大学农学院, 农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室,四川温江 611130;
2 四川省农业技术推广总站, 四川成都 610041)

摘要:【目的】明确机械化育插秧条件下不同基因型水稻氮素吸收利用的特点,分析提高其氮素吸收利用的途径。**【方法】**以 3 个中籼中熟杂交稻、3 个中籼迟熟杂交稻、4 个粳稻共计 10 个品种为材料,采用随机区组大田试验设计,测定不同生育时期各器官干物重和氮素含量、产量等,研究了不同基因型机插稻植株氮素积累、分配和运转特性的差异及其原因。**【结果】**1)育插秧机械化条件下水稻植株氮素积累符合 Logistic 曲线增长规律。2)整个生育期机插稻植株含氮量呈下降趋势,粳稻植株的含氮量在生长中期(拔节期—抽穗期)高于杂交籼稻,而后逐渐降低,到成熟期极显著低于杂交籼稻,中籼中熟杂交稻因降低缓慢到成熟期植株含氮量最高。3)粳稻植株的终极氮素积累量最低,中籼中熟杂交稻和中籼迟熟杂交稻终极氮素积累量平均比粳稻高 23.0% 和 33.1%。4)中籼中熟杂交稻抽穗期—成熟期氮素积累量最大,在氮素积累上具有后发优势,且穗部分配率、叶片与茎鞘氮素表观转运率、氮素籽粒生产效率和氮素转运效率均较高,说明育插秧机械化条件下,中籼中熟杂交稻品种的氮素在转运和利用上具有高效性。其中,F 优 498 的终极氮素积累量高,且具有前期积累快,后期运转分配合理等优势。5)中籼迟熟杂交稻氮素积累出现最大增长速率较晚,平稳持续增长时间较长,终极积累量最大,但氮素积累对产量的贡献没有优势。6)粳稻中杂交粳稻 69 优 8 号相比其他粳稻品种,氮素积累量大且产量高,也具有氮素转运和利用的高效性。**【结论】**机插稻植株氮素积累转运特性受不同基因型的显著影响。本研究采用植株含氮量、终极氮素积累量、百千克籽粒吸氮量等反映机插稻氮素吸收转运特性的指标进行比较发现,在育插秧机械化条件下,中籼中熟杂交稻相比中籼迟熟杂交稻和粳稻氮素具有积累转运和利用高效性,其中 F 优 498 在氮素积累、分配并促进产量形成方面具有遗传上的优势。中籼迟熟杂交稻虽具有氮素积累量潜力,但氮素积累对水稻产量的贡献相对较低。机插粳稻氮素积累较低,但相比其他粳稻品种机插杂交粳稻 69 优 8 号具有氮素积累量大且产量高的潜力,较适合机插。

关键词: 水稻; 机插; 基因型; 氮素积累; 氮素利用
中图分类号: S511; S143.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)02-0277-11

Differences in N accumulation and translocation in the machine-transplanted rice genotypes

ZHAO Min[1], HU Jian-feng[1], ZHONG Xiao-yuan[1], ZHANG Qiang[1], ZHOU Hong[2], REN Wan-jun[1*]
(*1 College of Agronomy, Sichuan Agricultural University/Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology, and Cultivation in Southwest China, Wenjiang 611130, China; 2 Sichuan General Popularization Centre of Agricultural Technique, Chengdu 610041, China*)

Abstract:【Objectives】 The experimental objective is to investigate the differences in N uptake and utilization in the machine-transplanted rice genotypes and explore an effective pathway improving uptake and utilization of N in the machine-transplanted rice genotypes. **【Methods】** A field experiment was designed in randomized blocks to determine the N content, yields, the characteristics of N accumulation and dry matter weight, distribution and translocation of N in the different machine-transplanted rice genotypes at the growth stages of three medium-maturing varieties, three late-maturing varieties and four *japonica* rice cultivars, and explain the reasons causing the differences in the characteristics mentioned above. **【Results】** 1) The accumulation dynamics of N in the machine-

收稿日期: 2014-01-14 **接受日期:** 2014-09-16
基金项目: 农业部公益性行业科研专项(201303129); 国家粮食丰产科技工程项目(2011BAD16B05, 2013BAD07B13-2); 四川省育种攻关项目(2011NZ0098)资助。
作者简介: 赵敏(1990—),女,四川江油人,硕士研究生,主要从事水稻机械化栽培理论及技术研究。E-mail: 1184374736@qq.com
* 通信作者 Tel: 028-86290972,E-mail: rwjun@126.com

transplanted rice was exhibited by a logistic curve. 2) N content in the machine-transplanted rice decreased through the growth period. The content of N in *japonica* rice cultivars was higher than in *indica* hybrid rice cultivars during jointing-heading, then that was gradually decreased and became lower than in *indica* hybrid rice cultivars at maturity. The content of N in medium-maturing *indica* hybrid rice cultivars reached the highest value at maturity stage. 3) The ultimate N uptake in the *japonica* rice cultivars was 23.0% lower than in medium-maturing *indica* hybrid rice cultivars, and 33.1% lower than in late-maturing *indica* hybrid rice cultivars. 4) Medium-maturing *indica* hybrid rice cultivars exhibited the highest N accumulation during heading-maturity, and a highly N distribution ratio in the panicle, highly apparent N translocation rate in the leaf and stem-shead with a higher N grain production efficiency and N translocation efficiency, indicating that the accumulation and translocation efficiency of N in the medium-maturing *indica* hybrid rice cultivars were significantly higher than those in the late-maturing *indica* hybrid rice cultivars and *japonica* rice cultivars under the planting mechanization. Fyou498 from medium-maturing *indica* hybrid rice showed much higher N uptake than the others, and had an advantage of rapid N accumulation at the early growth stage and reasonable N distribution at the late growth stage. 5) Late-maturing *indica* hybrid rice cultivars demonstrated the biggest enhancement rate in N accumulation from 84 to 91 d, and a steady N accumulation during the whole growth period, and the highest N uptake, but which was not beneficial to yield formation. 6) Cultivar 69you8 has higher N uptakes and yield than the other *japonica* rice cultivars, and its N accumulation and translocation efficiency was significantly higher under the planting mechanization. **【Conclusions】** Different genotypes are significantly different in the characteristics of N accumulation and translocation under machine-transplanting condition. The accumulation and translocation efficiency of N in the medium-maturing *indica* hybrid rice cultivars is significantly higher than those in the late-maturing *indica* hybrid rice cultivars and *japonica* rice cultivars. Fyou498, a medium-maturing *indica* hybrid rice cultivar, demonstrates genetic advantages in the N accumulation, distribution and yield formation. Late-maturing *indica* hybrid rice cultivars have potential in high N accumulation, which, however, does not show good to yield formation. N accumulation in the *japonica* rice cultivars is relatively low. Among the *japonica* rice cultivars, 69you8 has significantly higher N accumulation and yield under the planting mechanization, showing better suitability for planting mechanization.

Key words: rice; transplanting mechanization; genotype; N accumulation; N utilization

我国是世界上主要的产稻国之一,种植面积约占世界水稻种植面积的1/5[1]。氮素在营养器官和生殖器官中的积累、转化和吸收利用对水稻的生长发育、产量和品质形成起决定性作用[2-5]。明确不同基因型机插稻植株氮素的吸收、利用规律,不仅可以为生产上合理运筹氮肥提供重要依据[2,6],而且是水稻氮素营养性状改良的必要环节[7]。不同基因型水稻间的氮效率存在显著差异[8-11]。Singh等[8]研究发现,不同基因型水稻氮素利用效率及其构成因素随供氮水平的增加而降低的幅度是不同的。单玉华等[9]对籼稻和粳稻研究表明,籼稻植株的氮素利用效率明显高于粳稻,且籼稻和粳稻在氮素吸收利用上存在较大差异。陈明霞等[12]和徐阳春等[13]研究表明,不同基因型水稻地上部总干物质重、氮素积累量、氮素籽粒生产效率均存在基因型差异。董桂春等[14]研究表明,不同生育期类型水稻品种的氮素吸收利用存在差异,同一生育期的籼稻品种和粳稻品种在吸氮能力、氮素籽粒生产效率方面也不同。李敏等[15]研究表明,高生产力类型水稻品种较中、低生产力类型,具有够苗前氮素积累快,够苗至拔节期积累少,拔节至抽穗期积累稳,抽穗至成熟期积累多,且抽穗后氮素向籽粒转移量大但不过量的特点。国内有关水稻基因型氮素吸收、利用效率的差异虽有一定研究,但主要集中在手插和抛秧方面,有关育插秧机械化条件下,特别是以四川为典型代表的杂交中籼稻区,不同基因型水稻品种氮素积累和转化差异的研究尚鲜见报道。本文以4个粳稻品种和在西南地区推广面积较大的6个籼型杂交中稻品种为研究对象,分析不同基因型水稻在机械化育插秧条件下氮素积累特性,以期为生产上选择适于机械化育栽插的水稻品种,同时为不同基因型水稻品种制定相应的栽培技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点及条件

试验于 2012 年在成都郫县古城镇花牌村实施,试验田前作为青菜。土壤主要理化性质: pH 5.96,有机质 45.5 g/kg,全氮 0.87 g/kg,速效氮 147.2 mg/kg,速效磷 54.5 mg/kg,速效钾 65.5 mg/kg。

1.2 试验设计

供试品种包括中籼中熟杂交稻(MIHR)、中籼迟熟杂交稻(LIHR)、粳稻(JR)共计 10 个品种,具体见表 1。试验采用单因素随机区组设计,重复 3 次。4 月 13 日采用塑盘旱育秧,将已培肥的床土放入规格为 28 cm × 58 cm 的塑盘,采用四川川龙拖拉机制造有限公司生产的一鸣牌全自动播种流水线播种,田间苗床育秧,通过给流水线换条形播种器实现机器条播,机条播规格为每盘播种 24 行。播种前浸种 24 h,滤干,不进行催芽处理,每个品种育 6 盘,播量为 50 g/盘,秧龄 30 d,2 叶 1 心和移栽前 2 d 分别追施尿素 6 g/m^2。用洋马 VP6E 型插秧机移栽,栽插规格 14 cm × 30 cm,插秧机秧块取秧面积和送秧速度采用固定值,小区面积 24 m^2(10 m × 2.4 m),移栽后不补苗。施纯氮 180 kg/hm^2,各时期施氮比例为基蘖肥∶穗肥 = 6∶4,其中,基肥∶分蘖肥 = 7∶3,促花肥∶保花肥 = 6∶4。按 N∶P_2O_5∶K_2O 为 2∶1∶2 确定磷、钾肥使用量。磷肥全作基肥,按基肥∶穗肥(促花肥) = 5∶5 比例施钾肥。其他田间管理措施按大面积生产进行。

表 1　供试水稻组合

Table 1　Rice cultivar combinations

类型 Type	品种 Cultivar	生育期 (d) Growth day	亲本来源 Parental source	选育单位 Cultivar provider
中籼中熟杂交稻 Medium-maturing *indica* hybrid rice	川香优 3 号 CXY3	150	川香 29A/成恢 488	四川省农业科学院作物研究所/四川天宇种业有限公司
	F 优 498 FY498	152	江育 F32A/蜀恢 498	四川农业大学水稻研究所/四川省江油市川江水稻研究所
	宜香优 2168 YXY2168	152	宜香 1A/HR2168	四川农业大学农学院/宜宾市农业科学院
中籼迟熟杂交 Late-maturing *indica* hybrid rice	德香 4103 DX4103	153	德香 074A/泸恢 H103	四川省农业科学院水稻高粱研究所
	泰优 99 TY99	160	D62A/泸恢 1345	四川省农业科学院水稻高粱研究所
	Ⅱ优 498 ⅡY498	160	Ⅱ-32A/蜀恢 498	四川农业大学水稻研究所
粳稻 *Japonica* rice	69 优 8 号 69Y8	157	69A/R11238	徐州农业科学研究所
	徐稻 6 号 XD6	165	95-3/泸恢 1345	徐州农业科学研究所
	连粳 10 号 LJ10	165	连粳 321/浙 405	连云港市农业科学院
	W021	165	镇稻 88/连粳 4 号//W003	南京农业大学农学院

1.3 测定项目与方法

每小区定点 20 穴分别于分蘖盛期、拔节期、孕穗期、抽穗期、灌浆期、成熟期调查茎蘖数。按平均茎蘖数法取样,每小区取 3 穴,取回后去根,分叶片、茎鞘和穗(抽穗后)烘干称重。样品粉碎后,用万分之一电子天平称取 0.2 g 样品,加定氮催化片 1 片,浓硫酸 10 mL,经 380℃消煮 90 min,采用 FOSS8400 全自动凯氏定氮仪测定其含氮量[16]。

植株含氮量(N content of rice,%) = (单位面积叶片干物重 × 叶片含氮量 + 单位面积茎鞘干物重 × 茎鞘含氮量 + 单位面积穗干物重 × 穗含氮量)/单位面积全株地上部(茎、叶和穗)干物重 × 100;

叶片(茎鞘、穗)氮素积累量(N accumulation, kg/hm^2) = 各时期单位面积叶片(茎鞘、穗)干物重 × 叶片(茎鞘、穗)含氮量;

氮素积累总量(Total N accumulation, kg/hm^2) = 单位面积地上部各器官(叶片、茎鞘、穗)氮素积累量之和;

叶片(茎鞘)氮素转运量(N transferred from leaves, kg/m^2) = 抽穗期叶片(茎鞘)氮积累量 - 成熟期叶片(茎鞘)氮积累量;

叶片(茎鞘)氮素表观转运效率(Apparent N

translocation rate of leaves,%) =叶片(茎鞘)氮转运量/抽穗期叶片(茎鞘)氮积累量×100;

叶片(茎鞘)氮素转运贡献率(N translocation contribution rate,%) = 氮素转运量/成熟期穗部氮素积累总量×100;

氮素干物质生产效率(N dry matter production efficiency, kg/kg) = 成熟期单位面积全株地上部(茎、叶和穗)干物重/成熟期氮素积累总量;

氮素籽粒生产效率(N grain production efficiency, kg/kg) = 稻谷产量/成熟期氮素积累总量;

氮素转运效率(N translocation efficiency,%) = (抽穗期茎叶氮素积累总量 - 成熟期茎叶氮素积累总量)/抽穗期茎叶氮素积累总量×100;

百千克籽粒吸氮量(N uptake per 100 kg of grain, kg) = 成熟期氮素积累总量/稻谷产量×100。

1.4 统计分析

运用 Microsoft Excel 处理数据。用 DPS V 7.05 系统软件分析数据,用 LSD (least significant difference test)进行样本平均数的差异显著性比较。

2.1 不同基因型机插稻植株含氮量的比较

由表2可得出,随生育进程推进,水稻植株含氮量呈下降趋势,且下降趋势呈先快后慢。在拔节期、孕穗期、抽穗期这三个生育时期,三种水稻类型的氮素含量表现为,粳稻 > 中籼中熟杂交稻 > 中籼迟熟杂交稻,且三者之间差异达到显著或极显著水平;分蘖期、灌浆期、成熟期中籼中熟杂交稻植株含氮量均最高,粳稻最低且成熟期显著低于中籼中熟杂交稻和中籼迟熟杂交稻;整个生育期中籼中熟杂交稻氮素含量均高于中籼迟熟杂交稻,且拔节期、抽穗期和灌浆期分别高 4.50%、11.28% 和 5.93%。除拔节期和灌浆期较低外,其他时期中籼中熟杂交稻中宜香优2168的氮素含量均最高,且孕穗期、抽穗期和成熟期极显著或显著高于 F 优 498 和川香优3号。中籼迟熟杂交稻中德香4103的氮素含量除分蘖期和拔节期较低外均最高,且极显著高于泰优99和Ⅱ优498。在粳稻品种中,69优8号的氮素含量在分蘖期、拔节期、孕穗期、抽穗期4个生育时期均最低,且极显著或显著低于连粳10号、W021和徐稻6号这3个品种。

2 结果与分析

表2 不同水稻品种的植株含氮量(%)

Table 2 Nitrogen content in different rice cultivars

类型 Type	品种 Cultivar	分蘖期 Tillering	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	抽穗期 Heading	灌浆期 Filling	成熟期 Maturity
中籼中熟杂交稻 Medium-maturing *indica* hybrid rice	YXY2168	3.80 aA	2.34 bB	1.94 aA	1.66 aA	1.21 bB	1.19 aA
	FY498	3.71 aAB	2.39 aA	1.66 bB	1.33 cC	1.24 bB	1.11 bAB
	CXY3	3.61 bB	2.22 cC	1.66 bB	1.44 bB	1.30 aA	1.08 bB
	平均 Mean	3.70 aA	2.32 bB	1.76 bB	1.48 bB	1.25 aA	1.13 aA
中籼迟熟杂交稻 Late-maturing *indica* hybrid rice	DX4103	3.66 abA	2.37 bB	1.87 aA	1.47 aA	1.27 aA	1.13 aA
	TY99	3.62 bA	2.51 aA	1.69 bB	1.19 cC	1.10 cC	1.09 bB
	ⅡY498	3.77 aA	1.77 cC	1.61 cC	1.32 bB	1.16 bB	1.10 bB
	平均 Mean	3.68 aA	2.22 cC	1.73 cB	1.33 cC	1.18 bB	1.11 aA
粳稻 *Japonica* rice	69Y8	3.71 bA	2.40 cC	1.73 dD	1.38 cB	1.24 bA	1.06 aA
	LJ10	3.81 aA	2.79 bB	2.00 cC	1.67 aA	1.26 abA	1.06 aA
	W021	3.80 aA	2.75 bB	2.03 bB	1.52 bcAB	1.19 cB	1.00 bB
	XD6	3.80 aA	3.00 aA	2.10 aA	1.59 abAB	1.28 aA	1.08 aA
	平均 Mean	3.68 aA	2.74 aA	1.97 aA	1.54 aA	1.24 aA	1.05 bB

注(Note):同一列不同小、大写字母表示同一品种类型下各品种间差异达到5%和1%显著水平,平均值后不同小、大字母表示不同品种类型间差异达到5%和1%显著水平 Values followed by different lowercase and capital letters in a column are significantly different among cultivars, and means followed with different lowercase and capital letters are significantly different among cultivar types at the 5% and 1% levels, respectively.

2.2　不同基因型机插稻植株氮素积累动态分析

2.2.1 不同基因型机插稻植株群体氮素积累动态　对不同基因型全生育期氮素积累动态过程进行 logistic 曲线拟合,其中决定系数 R^2 均大于 0.95,表明氮素积累动态较好地符合"S"型曲线。表 3 和图 1表明,不同水稻类型间表现为中籼迟熟杂交稻的平均终极积累量(210.54 kg/hm^2) > 中籼中熟杂交稻的平均终极积累量(194.57 kg/hm^2) > 粳稻的平均终极积累量(158.21 kg/hm^2),虽然中籼迟熟杂交稻的平均最大速率 V_m 最小,但出现最大增长速率较晚,平稳持续增高时间较长导致平均终极积累量最大。F 优 498 的终极积累量(213.57 kg/hm^2)在中籼中熟杂交稻中最大,比三种类型的平均终极积累量分别高出 1.44%、9.77% 和 34.99%,且具有前期积累较快的特点;粳稻中 69 优 8 号和连粳 10 号的终极积累量较大,其出现最大增长速率也较迟。

2.2.2 不同基因型机插稻群体氮素阶段积累量　由表 4 可得,不同水稻类型间,分蘖期前和拔节期—抽穗期的氮素阶段积累量表现为中籼迟熟杂交稻 > 中籼中熟杂交稻 > 粳稻,且中籼迟熟杂交稻极显著高于粳稻,抽穗期—成熟期的氮素阶段积累量表现为中籼中熟杂交稻 > 中籼迟熟杂交稻 > 粳稻,分蘖期—拔节期的氮素阶段积累量表现为粳稻 > 中籼迟熟杂交稻 > 中籼中熟杂交稻。除拔节期—抽穗期外,其他阶段中籼中熟杂交稻中 F 优 498 的氮素阶段积累量均最高,且分别比宜香优 2168 和川香优 3 号高 27.67%、81.69%、121.17% 和 20.87%、54.36%、186.45%。除拔节期—抽穗期外,其他阶段中籼迟熟杂交稻中泰优 99 的氮素阶段积累量均

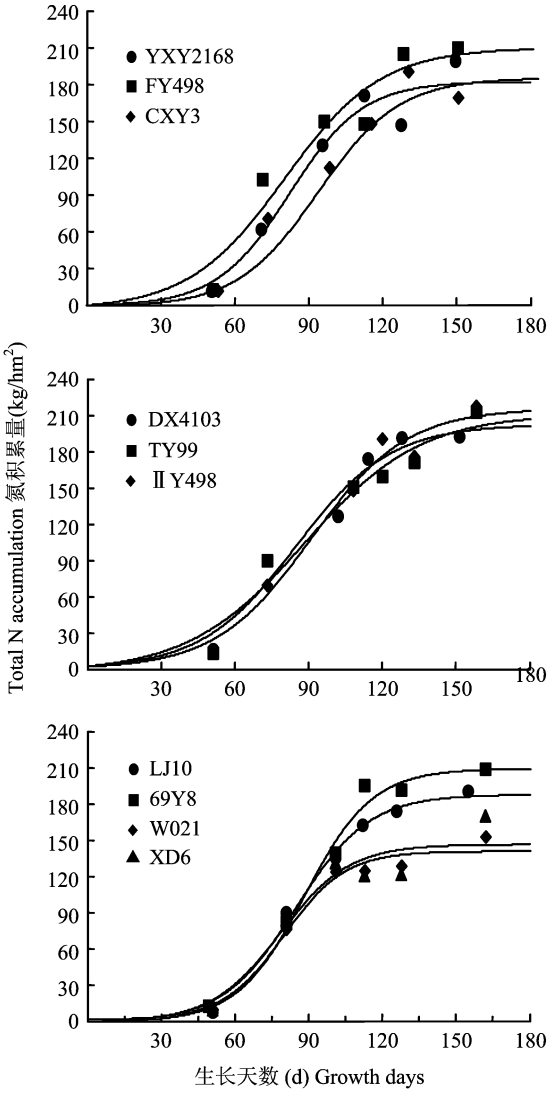

图 1　不同基因型机插秧氮素积累的 Logistic 回归方程曲线

Fig. 1　Logistic equations expressing the days dependent nitrogen accumulation in different rice cultivars

表 3　不同水稻品种的植株氮素积累的 Logistic 模型参数估值[$y = a/(1 + be^{-cx})$]

Table 3　The parameters of the Logistic equation expressing the nitrogen accumulation in different rice cultivars

品种类型 Cultivar type	品种 Cultivar	参数 Parameters a	b	c	R^2	V_m	D
中籼中熟杂交稻 Medium-maturing *indica* hybrid rice	YXY2168	183.14	255.81	0.0674	0.9745	3.09	82
	FY498	213.57	60.69	0.0515	0.9614	2.75	80
	CXY3	187.00	126.62	0.0571	0.9793	2.67	85
中籼迟熟杂交稻 Late-maturing *indica* hybrid rice	DX4103	202.33	80.61	0.0520	0.9797	2.63	84
	TY99	213.89	41.18	0.0423	0.9771	2.26	88
	ⅡY498	215.40	107.69	0.0516	0.9879	2.78	91
粳稻 *Japonica* rice	69Y8	188.47	295.00	0.0673	0.9957	3.17	85
	LJ10	157.51	609.24	0.0728	0.9930	2.87	88
	W021	139.57	597.93	0.0803	0.9880	2.80	80
	XD6	147.28	260.12	0.0710	0.9535	2.61	78

注(Note): R^2—决定系数 Decisive coefficients; V_m—氮素积累最快增长速率 The rapidest increase rate in N accumulation[g/(m^2 · d)]; D—氮素积累量最快增长速率出现的天数 Days needed for reaching the rapidest increase rate in N accumulation (d).

表4 不同水稻品种的氮素阶段积累量（kg/hm²）

Table 4 Nitrogen accumulation in different rice cultivars at growth stages

类型 Type	品种 Cultivar	分蘖期前 Before tillering	分蘖期—拔节期 Tillering-Jointing	拔节期—抽穗期 Jointing-Heading	抽穗期—成熟期 Heading-Maturity
中籼中熟杂交稻 Medium-maturing *indica* hybrid rice	YXY2168	12.43 aA	49.70 bB	109.63 aA	27.73 bB
	FY498	15.87 aA	90.30 aA	45.70 cB	61.33 aA
	CXY3	13.13 aA	58.50 bAB	78.20 bAB	21.43 bB
	平均 Mean	13.83 bA	66.17 bA	77.83 aAB	36.80 aA
中籼迟熟杂交稻 Late-maturing *indica* hybrid rice	DX4103	15.96 abA	73.67 aA	83.97 bB	18.83 bA
	TY99	16.33 aA	76.43 aA	69.53 bB	52.57 aA
	Ⅱ Y498	14.50 bA	54.73 bB	120.47 aA	27.27 bA
	平均 Mean	15.60 aA	68.27 abA	91.33 aA	32.90 aA
粳稻 *Japonica* rice	69Y8	8.63 abA	82.13 aA	72.13 aA	27.83 aA
	LJ10	8.40 bA	53.53 cB	84.83 aA	10.30 aA
	W021	8.70 abA	66.33 bAB	48.57 aA	27.63 aA
	XD6	10.10 aA	75.07 abA	36.80 aA	48.63 aA
	平均 Mean	8.97 cB	69.30 aA	60.60 bB	28.62 aA

注(Note)：同一列不同小、大写字母表示同一品种类型下各品种间差异达到5%和1%显著水平，平均值后不同小、大字母表示不同品种类型间差异达到5%和1%显著水平 Values followed by different lowercase and capital letters in a column are significantly different among cultivars, and means followed with different lowercase and capital letters are significantly different among cultivar types at the 5% and 1% levels.

最高，且极显著或显著高于Ⅱ优498，而拔节期—抽穗期阶段Ⅱ优498的氮素积累量最高，且极显著高于德香4103和泰优99，分别比德香4103和泰优99高43.47%和73.26%。粳稻中连粳10号的氮素阶段积累量除拔节期—抽穗期最高外均最低，且分蘖期前显著低于徐稻6号，分蘖期—拔节期阶段显著低于其他三个品种。

2.3 不同基因型机插稻营养器官的氮素分配特性

由表5可得，随生育进程，植株总吸氮量在叶片、茎鞘和穗中的分配比例变化幅度均较大，中籼中熟杂交稻、中籼迟熟杂交稻和粳稻的叶片分配比例由拔节期到成熟期分别下降50.87个百分点、46.24个百分点和46.46个百分点，茎鞘分配比例分别下降14.32个百分点、12.48个百分点和14.28个百分点，而粳稻由于抽穗期的穗部氮素分配比例只有15.01%，因此其穗部氮素分配比例由抽穗期至成熟期上升幅度最大为45.73个百分点。茎鞘氮素分配率在拔节期、抽穗期和成熟期均表现为中籼迟熟杂交稻极显著或显著高于中籼中熟杂交稻和粳稻，中籼中熟杂交稻和粳稻之间差异不显著；穗部氮素分配率在抽穗期和成熟期均表现为中籼中熟杂交稻极显著或显著高于中籼迟熟杂交稻和粳稻，中籼迟熟杂交稻和粳稻差异不显著。中籼中熟杂交稻中宜香优2168茎鞘氮素分配率在拔节期极显著低于川香优3号和F优498，抽穗期极显著高于川香优3号和F优498，成熟期差异不显著；而F优498茎鞘氮素分配率在拔节期和成熟期均最高，穗部氮素分配率在抽穗期最高且显著高于宜香优2168，成熟期差异不显著。中籼迟熟杂交稻中Ⅱ优498茎鞘氮素分配率在拔节期、抽穗期和成熟期均极显著或显著高于泰优99，而德香4103的茎鞘氮素分配率表现为先增大后降低，到成熟期降到最低，但穗部氮素分配率在成熟期最高且显著高于泰优99和Ⅱ优498。粳稻中69优8号的叶片氮素分配率在拔节期、成熟期极显著或显著高于连粳10号、徐稻6号和W021，且连粳10号和徐稻6号在拔节期极显著高于W021，连粳10号和徐稻6号之间差异不显著；69优8号穗部氮素分配率在抽穗期和成熟期均最高，且抽穗期极显著或显著高于连粳10号。

2.4 不同基因型机插稻营养器官的氮素转运

由表6可得出，不同品种的叶片氮素转运量、氮素表观转运率及氮素转运贡献率均高于茎鞘氮素转运量、氮素表观转运率及氮素转运贡献率。不同水稻类型叶片氮素转运量、茎鞘氮素转运量和转运贡

表 5　不同水稻品种间植株氮素分配的差异（%）

Table 5　Differences in nitrogen distribution among different rice cultivars

品种类型 Cultivar type	品种 Cultivar	叶片 Leaf			茎鞘 Stem-sheath			穗 Panicle	
		拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity	拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity
中籼中熟杂交稻	YXY2168	71.09 aA	47.61 aA	14.92 aA	28.91 bB	37.40 aA	19.00 aA	14.97 bA	66.07 aA
Medium-maturing	FY498	64.38 bB	44.30 aA	15.72 aA	35.62 aA	28.81 cB	19.62 aA	26.77 aA	64.64 aA
indica hybrid rice	CXY3	64.47 bB	48.38 aA	16.69 aA	35.53 aA	31.99 bB	18.45 aA	19.61 abA	64.86 aA
	平均 Mean	66.65 aA	46.77 bB	15.78 bB	33.35 bB	32.74 bB	19.03 bA	20.48 aA	65.19 aA
中籼迟熟杂交稻	DX4103	67.27 aA	48.20 aA	15.97 bB	32.73 cB	35.65 aA	19.44 cC	16.14 aA	64.58 aA
Late-maturing	TY99	65.46 bB	49.72 aA	19.92 aAB	34.54 bA	32.89 bB	21.85 bB	17.38 aA	58.22 bB
indica hybrid rice	Ⅱ Y498	64.21 cB	48.23 aA	22.30 aA	35.79 aA	35.49 aAB	24.34 aA	16.28 aA	53.35 cB
	平均 Mean	65.64 bB	48.72 bB	19.40 aA	34.36 aA	34.68 aA	21.88 aA	16.60 bB	58.72 bA
粳稻	69Y8	69.36 aA	51.51 aA	22.91 aA	30.64 cC	30.69 aA	15.21 cB	17.79 aA	61.87 aA
Japonica rice	LJ10	66.25 bB	57.53 aA	18.71 bA	33.75 bB	30.68 aA	22.30 aA	11.69 bB	58.96 aA
	W021	63.88 cC	51.90 aA	19.59 bA	36.12 aA	32.16 aA	18.64 bAB	15.88 aAB	61.74 aA
	XD6	66.40 bB	50.99 aA	18.76 bA	33.60 bB	34.41 aA	20.81 abA	14.59 abAB	60.42 aA
	平均 Mean	66.47 aA	52.97 aA	20.01 aA	33.53 bB	32.01 bB	19.25 bA	15.01 bB	60.74 bA

注(Note)：同一列不同小、大写字母表示同一品种类型下各品种间差异达到 5% 和 1% 显著水平,平均值后不同小、大字母表示不同品种类型间差异达到 5% 和 1% 显著水平 Values followed by different lowercase and capital letters in a column are significantly different among cultivars, and means followed with different lowercase and capital letters are significantly different among cultivar types at the 5% and 1% levels, respectively.

表 6　不同水稻品种间器官氮素转运的差异

Table 6　Differences in nitrogen translocation among different rice cultivars

类型 Type	品种 Cultivar	氮素转运量（kg/hm²） Nitrogen translocation		氮素表观转运率（%） Apparent N translocation rate		对穗氮贡献率（%） Contribution to N in spike	
		叶片 Leaf	茎鞘 Stem-sheath	叶片 Leaf	茎鞘 Stem-sheath	叶片 Leaf	茎鞘 Stem-sheath
中籼中熟杂交稻	XY2168	51.80 aA	26.47 aA	63.49 aA	39.85 aA	39.29 aA	19.50 aA
Medium-maturing	FY498	33.43 bA	1.77 bA	49.85 bA	3.96 bB	24.28 bA	1.25 bB
indica hybrid rice	CXY3	43.80 abA	16.37 abA	60.22 aA	32.87 aA	39.47 aA	14.38 aAB
	平均 Mean	43.01	14.87	57.84	25.62	34.40	11.84
中籼迟熟杂交稻	DX4103	52.87 aA	24.50 aA	63.01 aA	39.11 aA	42.35 aA	19.51 aA
Late-maturing	TY99	38.13 aA	6.30 aA	45.13 aA	8.74 bA	29.74 aA	3.84 bA
indica hybrid rice	Ⅱ Y498	43.13 aA	14.53 aA	46.83 aA	20.01 abA	37.68 aA	12.13 abA
	平均 Mean	44.71	15.13	51.70	23.36	36.81	12.41
粳稻	LJ10	57.93 aA	7.73 bA	60.45 aA	13.43 bA	52.38 aA	17.45 aA
Japonica rice	69Y8	40.23 aA	21.03 aA	47.27 aA	40.60 aA	43.71 aA	6.55 aA
	W021	34.43 aA	11.47 abA	53.26 aA	28.46 abA	37.00 aA	12.16 aA
	XD6	30.13 aA	6.43 bA	48.42 aA	13.63 bA	29.22 aA	5.50 aA
	平均 Mean	40.67	11.67	52.21	24.90	39.66	11.02

注(Note)：同一列不同小、大写字母表示同一品种类型下各品种间差异达到 5% 和 1% 显著水平 Values followed by different lowercase and capital letters in a column are significantly different among cultivars at the 5% and 1% levels, respectively.

献率表现为,中籼迟熟杂交稻 > 中籼中熟杂交稻 > 粳稻;叶片、茎鞘氮素表观转运率表现为,中籼中熟杂交稻 > 粳稻 > 中籼迟熟杂交稻。中籼中熟杂交稻中 F 优 498 的茎鞘、叶片氮素转运量、转运率以及转运贡献率均最低,且显著或极显著低于宜香优 2168。中籼迟熟杂交稻中的茎鞘、叶片氮素转运量、转运率以及转运贡献率表现为德香 4103 > Ⅱ优 498 > 泰优 99,但德香 4103 和Ⅱ优 498 之间均差异不显著。在粳稻中,杂交粳稻 69 优 8 号的茎鞘氮素转运量和茎鞘氮素表观转运率显著高于连粳 10 号和徐稻 6 号,其他均差异不显著。

2.5 不同基因型水稻稻氮素吸收利用效率

由表 7 可得出,粳稻植株氮素干物质生产率极显著高于中籼中熟杂交稻和中籼迟熟杂交稻,而氮素籽粒生产效率和产量最低,且极显著低于中籼中熟杂交稻和中籼迟熟杂交稻;中籼中熟杂交稻的氮素籽粒生产效率、氮素转运效率和产量均最高,分别比中籼迟熟杂交稻和粳稻高 3.69%、14.00%、0.74% 和 17.33%、7.05%、23.79%,而氮素干物质生产率和百千克籽粒吸氮量均最低,且显著或极显著低于中籼迟熟杂交稻和粳稻。中籼中熟杂交稻中 F 优 498 的产量显著高于宜香优 2168 和川香优 3 号,氮素干物质生产率、氮素籽粒生产效率和百千克籽粒吸氮量也较高,但氮素转运效率没有优势;川香优 3 号的氮素干物质生产率和氮素籽粒生产效率均最高,且显著高于宜香优 2168,而百千克籽粒吸氮量和产量最低,且百千克籽粒吸氮量极显著低于 F 优 498 和宜香优 2168。中籼迟熟杂交稻中德香 4103 的氮素籽粒生产效率和氮素转运效率均高于泰优 99 和Ⅱ优 498,且德香 4103 的氮素干物质生产率和百千克籽粒吸氮量极显著低于泰优 99 和Ⅱ优 498。在粳稻中,W021 的氮素干物质生产率极显著高于连粳 10 号、69 优 8 号和徐稻 6 号,连粳 10 号、69 优 8 号和徐稻 6 号之间差异不显著,且 W021 的氮素籽粒生产效率显著高于连粳 10 号,而百千克籽粒吸氮量显著或极显著低于连粳 10 号、69 优 8 号和徐稻 6 号;69 优 8 号的氮素转运效率、百千克籽粒吸氮量和产量均最高,且百千克籽粒吸氮量显著或极显著高于其他三个品种。

表 7 不同水稻品种的氮素利用效率及产量

Table 7 Nitrogen utilization efficiency and yield of different rice cultivars

类型 Type	品种 Cultivar	氮素干物质生产率 N dry matter productivity (kg/kg)	氮素籽粒生产效率 N grain productivity (kg/kg)	氮素转运效率 N translocation efficiency (%)	百千克籽粒吸氮量 N uptake of 100 kg grain (kg)	产量 Yield (kg/hm^2)
中籼中熟杂交稻 Medium-maturing *indica* hybrid rice	YXY2168	84.23 bB	46.03 bA	53.34 aA	2.17 aA	9195.10 bA
	FY498	89.81 aAB	52.14 abA	31.66 bB	2.16 aA	9861.95 aA
	CXY3	92.49 aA	55.19 aA	49.33 aA	1.87 bB	9141.45 bA
	平均 Mean	88.70 cB	50.92 aA	46.33 aA	2.07 bA	9399.50 aA
中籼迟熟杂交稻 Late-maturing *indica* hybrid rice	DX4103	88.78 bB	53.48 aA	53.01 aA	2.07 cC	9299.50 aA
	TY99	91.49 aA	48.14 abA	31.23 bA	2.27 bB	9472.80 aA
	Ⅱ Y498	91.32 aA	46.22 bA	35.55 abA	2.35 aA	9217.70 aA
	平均 Mean	90.60 bB	49.11 aA	40.64 aA	2.23 aA	9330.00 aA
粳稻 *Japonica* rice	69Y8	94.32 bB	43.97 abA	44.95 aA	2.40 aA	7970.80 aA
	LJ10	94.38 bB	38.49 bA	44.41 aA	2.18 bBC	7216.60 aA
	W021	100.32 aA	47.31 aA	43.97 aA	2.00 cC	7579.15 aA
	XD6	92.50 bB	44.05 abA	34.58 aA	2.24 bAB	7606.15 aA
	平均 Mean	95.22 aA	43.40 bB	43.28 aA	2.20 aA	7593.18 bB

注(Note):同一列不同小、大写字母表示同一品种类型下各品种间差异达到 5% 和 1% 显著水平,平均值后不同小、大字母表示不同品种类型间差异达到 5% 和 1% 显著水平 Values followed by different lowercase and capital letters in a column are significantly different among cultivars, and means followed with different lowercase and capital letters are significantly different among cultivar types at the 5% and 1% levels, respectively.

3　讨论与结论

3.1　机插稻植株氮素积累转运特性

机插稻与传统手插秧相比,移栽秧龄小,茎基部较细,根系活力较弱,加上栽插时机械对秧苗的损伤和田间水层较薄或无水层,因而栽插植株伤较重,活棵慢,缓苗期长[17-18]。本试验中,机插稻植株氮素积累过程能较好的拟合 Logistic 曲线,前期氮素积累缓慢,后逐渐加快,生长 80 ～91 d 是机插稻植株生育过程中出现氮素积累增长最快的时期,这与前人研究结果一致[19-20]。较快进行氮素积累的基因型水稻品种有利于提高整个生育期氮素的总积累量,从而有利于后期产量的形成。不同基因型水稻品种含氮量与植株氮素积累量、植株干物质积累量之间呈极显著负相关[21]。有效穗与播种—拔节阶段氮素积累量呈显著正相关,颖花数与成熟期植株氮素积累量呈显著正相关,与氮素干物质生产效率则呈显著负相关[22]。本试验中,随生育进程,机插稻植株含氮量呈下降趋势,且下降趋势呈先快后慢。此外,机插稻氮素积累转运特性存在明显的基因型差异。生产上可根据不同基因型机插稻氮素积累转运特性,通过合理施肥调控机插稻植株含氮量与干物质积累量,从而提高机插稻氮素积累量与产量。

3.2　机插稻植株氮素积累的品种间差异

Tirol-Padre 等[23]研究表明,不同基因型籼稻品种的总氮素积累量不同,且生育期长的品种总氮素积累量明显大于生长期短的品种; Singh 等[8]也认为生育期长的品种氮素积累总量大于生育期中等品种。本试验调查的 10 个不同类型水稻品种中,粳稻在灌浆前期的平均植株含氮量均较高,但在成熟期极显著低于中籼中熟杂交稻和中籼迟熟杂交稻。分析其原因,可能与施氮总量及粳稻在特定生态区的生长发育特性有关。按杂交籼稻栽培实际出发,本试验统一施氮 180 kg/hm^2,可能造成粳稻后期氮积累量不足,且粳稻作为引进品种,其平均生育期较杂交稻长,含氮量降低时间持续长,降低幅度更大。因此在成熟期粳稻植株含氮量极显著低于中籼中熟杂交稻和中籼迟熟杂交稻。中籼迟熟杂交稻与中籼中熟杂交稻的终极氮素积累量比粳稻分别高 33.08% 和 22.98%,分蘖期前和拔节期—抽穗期,中籼迟熟杂交稻氮积累量比中籼中熟杂交稻分别高 13.04% 和 17.35%,比粳稻高 73.33% 和 50.66%,这与殷春渊等[24]研究结果一致。中籼中熟杂交稻终极氮素积累量较大,氮素籽粒生产效率和氮素转运效率也较高,百千克籽粒吸氮量和氮素干物质生产率低,这与 Ying 等[25]研究的氮素利用率也是影响水稻氮素积累的重要原因一致。并且中籼中熟杂交稻叶片、茎鞘氮素表观转运率和穗部分配率均较高,其高的转运率对水稻植株氮素积累有重要的作用,氮素在穗部的分配率为高产提供了有利条件,中籼中熟杂交稻抽穗期—成熟期氮素积累量最大,在氮素积累上具有后发优势,生产上应注重后期氮肥的施用,提高其氮素在各器官的转化利用,还有利于其产量形成。中籼迟熟杂交稻的氮素终极积累量均高于 200 kg/hm^2,主要由于生长日数多,前期(分蘖期前)和中期(拔节期—抽穗期)氮素积累量大,总体氮素积累平稳持续增高时间较长,但百千克籽粒吸氮量最高,氮素积累对水稻产量的贡献相对较低。因此,通过提高氮素积累量来促进其产量的形成优势不明显,施肥上适当注重前期和中后期的氮肥施用比例,从而提高氮素积累量和利用率。粳稻氮素终极积累量最低,茎鞘氮素分配率、氮素籽粒生产效率和氮素转运效率也低,含氮量和干物质生产率高,这与董桂春等[14]研究的粳稻品种氮素干物质生产率高一致。中籼中熟杂交稻中 F 优 498 的终极氮素积累量比三种类型的平均终极生长量分别高出 1.44%、9.77% 和 34.99%,达到 213.57 kg/hm^2,拔节前和抽穗后的氮素积累量都显著高于其他中籼中熟杂交稻,整个生育期虽无含氮量优势,但其返青分蘖快增加生物量的积累和后期营养器官较好的进行氮素的转运对植株终极氮素积累具有巨大的贡献,并且其穗部器官抽穗期的氮素分配率高,氮素籽粒生产效率也较高,对产量的形成具有遗传上的优势。粳稻中杂交粳稻 69 优 8 号 80 d 以后的生长速率的不同导致植株氮素终极积累量远远高于另外三个品种,且 69 优 8 号的穗部积累量在粳稻中也最高。因此,杂交粳稻 69 优 8 号相比其他粳稻品种具有氮素积累量大且产量高的潜力,在施肥上利用其机插的爆发性生长点对其氮素转化利用具有重要意义。

参 考 文 献:

[1] 俞巧钢, 叶静, 杨梢娜, 等. 不同施氮量对单季稻养分吸收及氨挥发损失的影响[J]. 中国水稻科学, 2012, 26(4): 487-494.
Yu Q G, Ye J, Yang S N *et al*. Effects of different nitrogen application levels on rice nutrient uptake and ammonium volatilization[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2012, 26(4): 487-494.

[2] 凌启鸿, 张洪程, 戴其根, 等. 水稻精确定量施氮研究[J].

中国农业科学, 2005, 38(12): 2457-2467.
Ling Q H, Zhang H C, Dai Q G *et al*. Study on precise and quantitative N application in rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(12): 2457-2467.

[3] Mawaki M, Morita S, Suga T *et al*. Effect of shading on root system morphology and grain yield of rice plants Ⅰ. An analysis on root length density[J]. Japanese Journal of Crop Science, 1990, 59(1): 89-94.

[4] 唐拴虎, 徐培智, 张发宝, 等. 一次性全层施用控释肥对水稻根系形态发育及抗倒伏能力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1): 63-69.
Tang S H, Xu P Z, Zhang F B *et al*. Influence of single basal application controlled-release fertilizer on morphologic development of root system and lodging resistance of rice[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(1): 63-69.

[5] 郑圣先, 聂军, 戴平安, 郑颖俊. 控释氮肥对杂交水稻生育后期根系形态生理特征和衰老的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(2): 188-194.
Zheng S X, Nie J, Dai P A, Zheng Y J. Effect of controlled release nitrogen fertilizer on the morphological and physiological characteristics and senescence of root system during late growth stages of hybrid rice[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(2): 188-194.

[6] 王余龙, 姚友礼, 蒋军民, 蔡建中. 高产水稻养分吸收规律及氮素调控机理研究[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995. 118-130.
Wang Y L, Yao Y L, Jiang J M, Cai J Z. Study on nitrogen regulation mechanism and nutrient assimilate in high yield rice [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995. 118-130.

[7] 吴平, 罗安程, 倪俊建, 章永松. 植物营养分子与遗传研究进展. 植物营养与肥料学报, 1996, 2(1): 1-6.
Wu P, Luo A C, Ni J J, Zhang Y S. Plant nutrition molecule and genetic study advance[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1996, 2(1): 1-6.

[8] Singh U, Ladha J K, Castillo E G *et al*. Genotypic variation in nitrogen use efficiency in medium and long duration rice[J]. Field Crops Research, 1998, 58: 35-53.

[9] 单玉华, 王余龙, 山本由德, 等. 常规籼稻与杂交籼稻氮素利用效率的差异[J]. 江苏农业研究, 2001, 22(1): 12-15.
Shan Y H, Wang Y L, YAMAMOTO Y *et al*. Genotypic differences of nitrogen use efficiency in various types of indica rice [J]. Jiangsu Agricultural Research, 2001, 22(1): 12-15.

[10] 程建峰, 戴延波, 曹卫星, 等. 不同类型水稻种质氮素营养效率的变异分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(2): 175-183.
Cheng J F, Dai T B, Cao W X *et al*. Variations of nitrogen nutrition efficiency in different rice germplasm types[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(2): 175-183.

[11] 张亚丽, 樊剑波, 段英华, 等. 不同基因型水稻氮利用效率的差异及评价[J]. 土壤学报, 2008, 45(2): 267-273.
Zhang Y L, Fan J B, Duan Y H *et al*. Variation of nitrogen use efficiency of rice different in genotype and its evaluation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(2): 267-273.

[12] 陈明霞, 黄见良, 崔克辉, 等. 不同氮效率基因型水稻植株氨挥发速率及其与氮效率的关系[J]. 作物学报, 2010, 36(5): 879-884.
Chen M X, Huang J L, Cui K H *et al*. Genotypic variation in ammonia volatilization rate of rice shoots and its relationship with nitrogen use efficiency[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(5): 879-884.

[13] 徐阳春, 吴小庆, 郭世伟, 沈其荣. 水稻生育后期地上部氨挥发与氮素利用效率的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(2): 207-212.
Xu Y C, Wu X Q, Guo S W, Shen Q R. Nitrogen use efficiency and ammonia volatilization from rice shoot in late growth stages [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(2): 207-212.

[14] 董桂春, 王熠, 于小凤, 等. 不同生育期水稻品种氮素吸收利用的差异[J]. 中国农业科学, 2011, 44(22): 4570-4582.
Dong G C, Wang Y, Yu X F *et al*. Differences of nitrogen uptake and utilization of conventional rice varieties with different growth duration [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(22): 4570-4582.

[15] 李敏, 张洪程, 马群, 等. 不同氮肥群体最高生产力类型粳稻品种的氮素吸收利用特性[J]. 中国水稻科学, 2012, 26(2): 197-204.
Li M, Zhang H C, Ma Q *et al*. Nitrogen absorption and utilization characteristics of japonica rice cultivars with different productivities at their optimum nitrogen levels [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2012, 26(2): 197-204.

[16] 鲍士旦, 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 44-49.
Bao S D. Soil and agro-chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. 44-49.

[17] 胡本泉. 机插水稻的生育特点及其大田管理技术[J]. 农技服务, 2008, 25(4): 6-10.
Hu B Q. Growth characteristics and field management technology of machine-transplanted rice [J]. Agricultural Technical Services, 2008, 25(4): 6-10.

[18] 于林惠. 对机插水稻生育特点及管理对策的初步探讨[J]. 中国农机化, 2002(1): 29-31.
Yu L H. Preliminary investigation on growth characteristics of machine-transplanted rice and its management countermeasure [J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2002(1): 29-31.

[19] 茅弼华, 王和平, 王志林. 机插水稻的生育特性和有关农艺技术[J]. 江苏农业科学, 2006(3): 27-30.
Mao B H, Wang H P, Wang Z L. Growth characteristics of machine-transplanted rice and related agronomic technology[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2006(3): 27-30.

[20] 胡剑锋, 张培培, 赵中操, 等. 麦茬长秧龄条件下氮肥对机插水稻氮素利用效率及产量影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(6): 1318-1326.
Hu J F, Zhang P P, Zhao Z C *et al*. Effects of nitrogen fertilization on nitrogen use efficiency and yield of machine-

transplanted long-age rice seedings[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(6): 1318-1326.

[21] 宋智勇, 吕凯, 罗凤, 练兴明. 施氮量对不同基因型水稻品种氮素吸收利用的影响[J]. 华中农业大学学报, 2012, 31(2): 165-170.
Song Z Y, Lv K, Luo F, Lian X M. Effect of nitrogen application on nitrogen uptaking and utilization in ten different rice varieties[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2012, 31(2): 165-170.

[22] 邓飞, 王丽, 任万军, 等. 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[J]. 中国农业科学, 2012, 45(20): 4310-4325.
Deng F, Wang L, Ren W J *et al*. Effects of planting methods on nitrogen accumulation and distribution of mid-late indica hybrid rice combination Ⅱ You498 under different ecological conditions [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(20): 4310-4325.

[23] Tirol-Padre A, Ladha J K, Singh U *et al*. Grain yield performance of rice genotypes at suboptimal levels of soil N as affected by N uptake and utilization efficiency[J]. Field Crops Research, 1996, 46: 127-143.

[24] 殷春渊, 张庆, 魏海燕, 等. 不同产量类型水稻基因型氮素吸收、利用效率的差异[J]. 中国农业科学, 2010, 43(1): 39-50.
Yin C Y, Zhang Q, Wei H Y *et al*. Differences in nitrogen absorption and use efficiency in rice genotypes with different yield performance[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(1): 39-50.

[25] Ying J F, Peng S B, Yang G Q *et al*. Comparison of high-yield rice in tropical and subtropical environments Ⅱ. Nitrogen accumulation and utilization efficiency [J]. Field Crops Research, 1998, 57(1): 85-93.