

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2012.01908

## 不同种植方式下水稻氮素吸收利用的特性

霍中洋 李 杰 张洪程\* 戴其根 许 轲 魏海燕 龚金龙

扬州大学农业部长江流域稻作技术创新中心 / 江苏省作物遗传生理重点实验室, 江苏扬州 225009

**摘 要:** 以早熟晚粳、迟熟中粳和中熟中粳 3 种生育类型水稻品种(含常规粳稻和杂交粳稻)为材料, 比较研究了早育中苗壮秧精量手栽、小苗机插、直播 3 种植方式下水稻的氮素吸收利用特性。结果表明, 拔节期植株含氮率和吸氮量为直播>机插>手栽, 抽穗期和成熟期为手栽>机插>直播, 手栽成熟期总吸氮量较机插和直播分别高 11.68% 和 39.03%, 机插较直播高 24.49%; 氮素吸收速率, 拔节前为直播>机插>手栽, 拔节至抽穗期和抽穗至成熟期为手栽>机插>直播, 手栽和机插拔节至抽穗期的吸收速率最大, 直播中熟中粳拔节至抽穗期最大, 早熟晚粳和迟熟中粳拔节前最大; 拔节至抽穗期和抽穗至成熟期的氮素积累量为手栽>机插>直播, 不同种植方式间差异均达显著或极显著水平; 氮素吸收利用率, 手栽、机插和直播分别为 44.49%、39.00% 和 31.41%, 且手栽和机插为早熟晚粳>迟熟中粳>中熟中粳, 直播为中熟中粳>迟熟中粳>早熟晚粳, 同一生育类型常规粳稻大于杂交粳稻; 百千克籽粒需氮量, 手栽、机插和直播分别为 1.959 (1.900~2.009)、1.842 (1.681~1.914) 和 1.638 (1.540~1.721) kg, 常规粳稻手栽与机插间差异不显著, 但都显著高于直播, 杂交粳稻不同种植方式间差异均显著, 直播稻为中熟中粳>迟熟中粳>早熟晚粳, 手栽和机插在不同生育类型品种间没有明显变化规律。科学选择种植方式并配套适宜的品种类型对实现水稻氮素高效吸收和利用具有重要意义。

**关键词:** 种植方式; 水稻; 生育类型; 氮素吸收利用特性

## Characterization of Nitrogen Uptake and Utilization in Rice under Different Planting Methods

HUO Zhong-Yang, LI Jie, ZHANG Hong-Cheng\*, DAI Qi-Gen, XU Ke, WEI Hai-Yan, and GONG Jin-Long

Innovation Center of Rice Cultivation Technology in Yangtze Rive Valley, Ministry of Agriculture / Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China

**Abstract:** A field experiment was conducted with three planting methods including precision artificial transplanting with dry nursery middle and strong seedlings (AT), mechanical transplanting with small seedlings (MT) and direct seeding (DS) using early-maturing late *japonica* rice (EMLJ), late-maturing medium *japonica* rice (LMMJ) and medium-maturing medium *japonica* rice (MMMJ) (including conventional rice and hybrid rice). The results showed that the N content and uptake in plants were DS>MT>AT at jointing and AT>MT>DS at heading and maturity. Total N uptake at maturity with AT was 11.68% and 39.03% higher than that with MT and DS and that with MT was 24.49% higher than that with DS. N uptake rate was DS>MT>AT before jointing and AT>MT>DS from jointing to heading and from heading to maturity. Maximum N uptake rate of AT and MT appeared in the period from jointing to heading, and that of DS with MMMJ appeared from jointing to heading while that with EMLJ and LMMJ appeared before jointing. N periodic accumulation from jointing to heading and from heading to maturity were AT>MT>DS and the difference among different planting methods all reached significant or very significant level. N recovery efficiency of AT, MT and DS were 44.49%, 39.00%, and 31.41%, respectively. N recovery efficiencies among different varieties with AT and MT were EMLJ>LMMJ>MMMJ, and that with DS was MMMJ>LMMJ>EMLJ, and in the case for the same type of variety, that of conventional *japonica* rice was higher than that of hybrid *japonica* rice. N requirement for 100 kg grain of AT, MT, and DS were 1.959 (1.900–2.009), 1.842 (1.681–1.914), and 1.638 (1.540–1.721) kg, respectively. It was no significant difference

本研究由国家“十二五”科技支撑计划重大项目(2010BAD02A03), 国家自然科学基金项目(30971732), 超级稻配套栽培技术开发项目(农业部专项), 江苏省科技支撑和农业科技自主创新重大项目(BE2009425, CX(12)1003)和江苏高校优势学科建设工程项目资助。

\* 通讯作者(Corresponding author): 张洪程, E-mail: hc Zhang@yzu.edu.cn, Tel: 0514-87979220

第一作者联系方式: E-mail: huozy69@163.com, Tel: 0514-87979220

Received(收稿日期): 2012-02-20; Accepted(接受日期): 2012-05-20; Published online(网络出版日期): 2012-07-27.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20120727.0841.002.html>

between AT and MT while both were significantly higher than that of DS for conventional *japonica* rice. For hybrid *japonica* rice, the differences among different planting methods were all significant. N requirement for 100 kg grain among different growth type of varieties with DS was MMMJ>LMMJ>EMLJ while that with AT and MT was not significantly different. It is important to select scientific planting method and suitable variety type for achieving effective nitrogen uptake and utilization.

**Keywords:** Planting method; Rice; Growth type; Nitrogen uptake and utilization properties

氮素是水稻生长必不可少的营养元素之一,在水稻产量形成中具有非常重要的作用。增加氮肥施用量是提高水稻单产的重要措施,为了获得高产,生产上往往施用过量的氮肥。据统计,中国稻田单季氮肥用量平均为  $180 \text{ kg hm}^{-2}$ ,比世界平均用量高 75% 左右<sup>[1]</sup>,江淮下游大面积高产粳稻氮肥用量一般为  $270\sim 300 \text{ kg hm}^{-2}$ ,高的已达  $350 \text{ kg hm}^{-2}$ <sup>[1-2]</sup>。过高的氮肥投入不仅增加农业生产成本,降低氮肥利用效率,造成水稻倒伏、后期贪青迟熟、病虫害加重、稻米品质变劣,而且直接或间接地导致一系列环境问题,严重制约农业的可持续发展<sup>[1,3-6]</sup>。探明水稻对氮素的吸收利用特性,不仅可为水稻高产栽培中氮肥的合理运筹提供依据,也是水稻氮素营养性状改良的重要环节。前人研究认为水稻品种对氮素的吸收利用存在着明显的基因型差异<sup>[7-10]</sup>,根据水稻在不同供氮水平下产量差异将其分为双高效型、低氮高效型、双低效型和高氮高效型 4 个类型<sup>[10]</sup>,并对各水稻的氮素吸收利用特性进行了比较研究<sup>[11-12]</sup>。同时,水稻品种对氮素的吸收利用特性亦受氮肥运筹、水分管理、耕作方法等栽培管理条件的影响<sup>[13-17]</sup>。殷春渊等<sup>[18-19]</sup>研究表明不同生育类型水稻品种在植株含氮率、吸氮量、百千克籽粒需氮量以及氮素利用效率等方面均存在较大差异。水稻种植方式是水稻栽培管理措施的重要环节,近年来随着农村经济的发展和产业结构的调整,呈现出手栽、抛栽、机插、直播等多元化发展的趋势<sup>[17,20]</sup>。但前人有关不同基因型水稻品种氮素吸收利用以及栽培管理措施对水稻品种氮素吸收利用影响的研究多是在某一特定的种植方式下进行的,关于不同种植方式下水稻品种氮素吸收利用特性的研究较少,更缺乏高产栽培条件下系统的比较研究。为此,本研究对不同种植方式水稻植株含氮率、吸氮量、氮素利用效率等进行比较研究,以明确其氮素吸收利用特性,为其的高产栽培及氮肥精确高效运筹提供理论和实践依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点及供试品种

扬州大学农学院校外试验基地江苏省兴化市钓

鱼镇位于江苏里下河腹部,属北亚热带湿润气候区,雨量充沛,日照充足。年平均温度  $15^{\circ}\text{C}$  左右,降水量  $1\,024.8 \text{ mm}$ ,日照  $2\,305.6 \text{ h}$ ,无霜期较长。试验地前茬为小麦(产量  $6\,750 \text{ kg hm}^{-2}$ ),土壤类型黏泥土,质地黏性。0~20 cm 土层含有有机质  $28.21 \text{ g kg}^{-1}$ 、全氮  $1.85 \text{ g kg}^{-1}$ 、速效磷  $13.9 \text{ mg kg}^{-1}$ 、速效钾  $162.8 \text{ mg kg}^{-1}$ 。

供试品种为宁粳 3 号、南粳 44 (早熟晚粳);盐粳 9 号、淮稻 9 号、9 优 418、III 优 98 (迟熟中粳,其中,9 优 418 和 III 优 98 为杂交粳稻);连粳 6 号、徐稻 3 号(中熟中粳)。

### 1.2 试验设计

2008—2009 年,在长江下游稻-麦两熟制条件下,根据小麦常年收获让茬时间,以及水稻及时抢栽抢播的要求,对各种种植方式分别设计与当地大面积生产有代表性的适中播栽期,并根据高产栽培要求,配套能充分发挥其产量潜力的密、肥、水等高产栽培管理技术措施。

**1.2.1 育秧标准与栽插规格** 旱育中苗壮秧精量手栽于 5 月 11 日播种,6 月 15 日移栽,移栽叶龄  $6.2\sim 7.0$  叶,单株平均带分蘖  $1.5\sim 2.9$  个,栽插行株距为  $30 \text{ cm}\times 13 \text{ cm}$ ,常规粳稻二本栽插,杂交粳稻单本栽插;小苗机插秧苗于 5 月 26 日播种,塑料软盘旱育,每盘落谷量折干种子  $110 \text{ g}$ ,6 月 15 日移栽,秧龄 20 d,移栽叶龄  $3.2\sim 3.7$  叶,行株距为  $30 \text{ cm}\times 13 \text{ cm}$ ,常规粳稻三本栽插,杂交粳稻二本栽插,栽插后及时查漏补缺,确保插足基本苗数;6 月 13 日旱直播,行距为  $30 \text{ cm}$ ,一叶一心期进行间苗定苗,基本苗数常规粳稻为  $9\times 10^5 \text{ 株 hm}^{-2}$ ,杂交粳稻为  $6\times 10^5 \text{ 株 hm}^{-2}$ 。

**1.2.2 田间管理** 总施纯氮量  $270 \text{ kg hm}^{-2}$ ,基肥、分蘖肥与穗肥运筹比例按照各自栽培方式高产要求实施。其中,手栽为  $3:2:5$ ,分蘖肥于移栽后 7 d 一次性施用,穗肥于倒四叶期和倒二叶期分 2 次施用;机插为  $2:4:4$ ,分蘖肥于栽后 7 d 和 15 d 分 2 次施用,穗肥于倒四叶期和倒三叶期分 2 次施用;直播为  $2:4:4$ ,分蘖肥于三叶一心期施用,穗肥在叶龄余数  $3.5\sim 3.0$  和  $1.5\sim 1.0$  时分 2 次施用。氮:磷:钾比例为  $2:1:1$ ,磷肥一次性基施,钾肥分别于耕

翻前、拔节期等量施入。

试验同时设置无氮空白区,磷、钾肥施用量均为 135 kg hm<sup>-2</sup>。

水分管理及病虫害防治等相关的栽培措施均按照各自的高产栽培要求实施。

1.2.3 小区设置 采取裂区设计,种植方式为主区,品种为裂区。空白区与施肥区间以及各不同种植方式间均用塑料薄膜包埂隔离,保证可以进行单

独肥水管理。每小区面积 25 m<sup>2</sup>,重复 3 次。

1.3 测定内容与方法

1.3.1 植株全氮的测定 分别于拔节期、抽穗期、成熟期(表 1),按每小区茎蘖数的平均数取代表性植株 5 穴,105℃下杀青 30 min,80℃下烘干至恒重后称重,并折算成每公顷干重,之后粉碎混匀,采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消化,以半微量凯氏定氮法测定植株全氮含量<sup>[21]</sup>。

表 1 不同种植方式水稻主要生育期  
Table 1 Main growth stages of rice under different planting methods

品种 Variety	种植方式 Planting method	生育期 Growth stage (month/day)		
		拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity
宁粳 3 号 Ningjing 3	手栽 AT	7/28	9/5	10/25
	机插 MT	8/4	9/7	10/26
	直播 DS	8/10	9/12	10/28
南粳 44 Nanjing 44	手栽 AT	7/28	9/2	10/25
	机插 MT	8/3	9/5	10/26
	直播 DS	8/9	9/12	10/29
盐粳 9 号 Yanjing 9	手栽 AT	7/24	8/31	10/20
	机插 MT	8/1	9/3	10/22
	直播 DS	8/6	9/8	10/24
淮稻 9 号 Huaidao 9	手栽 AT	7/26	8/26	10/21
	机插 MT	8/2	8/29	10/23
	直播 DS	8/7	9/5	10/25
9 优 418 9 you 418	手栽 AT	7/25	8/27	10/21
	机插 MT	8/2	8/31	10/23
	直播 DS	8/7	9/8	10/25
III 优 98 III you 98	手栽 AT	7/25	8/30	10/23
	机插 MT	8/2	9/2	10/25
	直播 DS	8/7	9/9	10/27
连粳 6 号 Lianjing 6	手栽 AT	7/22	8/22	10/15
	机插 MT	7/30	8/25	10/17
	直播 DS	8/4	8/31	10/19
徐稻 3 号 Xudao 3	手栽 AT	7/23	8/21	10/15
	机插 MT	8/1	8/25	10/17
	直播 DS	8/5	9/1	10/20

AT: artificial transplanting; MT: mechanical transplanting; DS: direct seeding.

1.3.2 计产 随机普查成熟期每小区 90 穴,计算有效穗数,取 5 穴调查每穗粒数、结实率和测定千粒重,测理论产量,并实收核产。

1.4 数据计算与统计分析

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

氮素总吸收量(kg hm<sup>-2</sup>) =成熟期地上部干物重×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/前后两时期间隔的天数

氮素偏生产力(kg kg<sup>-1</sup>) =施氮区产量/氮肥施用量

氮素农学利用率(kg kg<sup>-1</sup>) =(施氮区产量-无氮区产量)/氮肥施用量

氮素生理利用率( $\text{kg kg}^{-1}$ ) = (施氮区产量 - 无氮区产量) / (施氮区植株总吸氮量 - 无氮区植株总吸氮量)

氮素吸收利用率(%) = (施氮区植株总吸氮量 - 无氮区植株总吸氮量) / 氮肥施用量  $\times 100$

百千克籽粒吸氮量( $\text{kg}$ ) = 总吸氮量 / 稻谷产量  $\times 100$

使用 Microsoft Excel 2003 处理数据, DPS 软件进行其他统计分析。两年试验结果趋势一致, 本文取 2009 年的数据。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同种植方式水稻群体干物质积累的差异

2.1.1 主要生育期群体干物重 不同种植方式水稻主要生育期群体干物重因生育期不同而有所差异(表 2)。拔节期的干物重除因品种不同互有高低外, 不同种植方式间差异不显著; 抽穗期与成熟期所有品种的干物重均表现为手栽稻最高, 机插稻次之, 直播稻最低, 且不同种植方式间的差异均达到显著或极显著水平, 并随生育进程, 干物重的差异增大。

表 2 不同种植方式水稻群体干物重积累量的差异  
Table 2 Difference in dry matter accumulation of rice population with different planting methods

品种 Variety	种植方式 Planting method	群体干物重 DMWP ( $\text{t hm}^{-2}$ )			干物质积累量及其比例 Dry matter accumulation and its ratio to total					
		拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity	播种期-拔节期		拔节期-抽穗期		抽穗期-成熟期	
					From sowing to jointing		From jointing to heading		From heading to maturity	
					( $\text{t hm}^{-2}$ )	(%)	( $\text{t hm}^{-2}$ )	(%)	( $\text{t hm}^{-2}$ )	(%)
宁粳 3 号 Ningjing 3	手栽 AT	3.89 a	11.55 Aa	18.95 Aa	3.89 a	20.52	7.66 Aa	40.39	7.41 Aa	39.09
	机插 MT	3.96 a	11.08 Bb	17.66 Bb	3.96 a	22.40	7.12 Bb	40.34	6.58 Bb	37.26
	直播 DS	3.88 a	10.33 Cc	15.82 Cc	3.88 a	24.54	6.44 Cc	40.72	5.50 Cc	34.73
南粳 44 Nanjing 44	手栽 AT	4.12 a	11.76 Aa	19.33 Aa	4.12 a	21.30	7.64 Aa	39.55	7.57 Aa	39.14
	机插 MT	4.14 a	11.35 Bb	18.06 Bb	4.14 a	22.95	7.20 Bb	39.87	6.72 Bb	37.18
	直播 DS	4.02 a	10.53 Cc	16.10 Cc	4.02 a	24.98	6.51 Cc	40.41	5.57 Cc	34.61
盐粳 9 号 Yanjing 9	手栽 AT	4.01 a	11.21 Aa	18.49 Aa	4.01 a	21.68	7.20 Aa	38.94	7.28 Aa	39.38
	机插 MT	3.98 a	10.63 Bb	17.20 Bb	3.98 a	23.15	6.65 Bb	38.63	6.58 Bb	38.22
	直播 DS	4.03 a	10.22 Cc	15.67 Cc	4.03 a	25.72	6.19 Cc	39.50	5.45 Cc	34.78
淮稻 9 号 Huaidao 9	手栽 AT	4.05 a	11.46 Aa	18.80 Aa	4.05 a	21.55	7.41 Aa	39.42	7.34 Aa	39.03
	机插 MT	3.99 a	10.82 Bb	17.45 Bb	3.99 a	22.89	6.83 Bb	39.16	6.62 Bb	37.95
	直播 DS	3.97 a	10.44 Cc	16.20 Cc	3.97 a	24.49	6.47 Cc	39.95	5.76 Cc	35.57
9 优 418 9 you 418	手栽 AT	4.10 a	11.24 Aa	18.51 Aa	4.10 a	22.14	7.14 Aa	38.58	7.27 Aa	39.28
	机插 MT	4.06 a	10.85 Bb	17.46 Bb	4.06 a	23.26	6.79 Bb	38.86	6.61 Bb	37.88
	直播 DS	4.07 a	10.49 Cc	16.18 Cc	4.07 a	25.16	6.42 Cc	39.66	5.69 Cc	35.18
III 优 98 III you 98	手栽 AT	3.96 a	11.45 Aa	18.79 Aa	3.96 a	21.08	7.49 Aa	39.86	7.34 Aa	39.06
	机插 MT	3.94 a	10.95 Bb	17.67 Bb	3.94 a	22.31	7.00 Bb	39.62	6.73 Bb	38.07
	直播 DS	3.98 a	10.61 Cc	16.45 Cc	3.98 a	24.17	6.63 Cc	40.32	5.84 Cc	35.51
连粳 6 号 Lianjing 6	手栽 AT	3.87 a	11.16 Aa	18.34 Aa	3.87 a	21.08	7.30 Aa	39.79	7.18 Aa	39.13
	机插 MT	3.80 a	10.63 Bb	17.16 Bb	3.80 a	22.15	6.83 Bb	39.81	6.53 Bb	38.04
	直播 DS	3.81 a	10.15 Cc	15.70 Cc	3.81 a	24.28	6.34 Cc	40.35	5.55 Cc	35.37
徐稻 3 号 Xudao 3	手栽 AT	3.89 a	11.14 Aa	18.40 Aa	3.89 a	21.13	7.26 Aa	39.44	7.25 Aa	39.43
	机插 MT	3.86 a	10.70 Bb	17.11 Bb	3.86 a	22.59	6.84 Bb	39.96	6.41 Bb	37.45
	直播 DS	3.86 a	10.25 Cc	15.75 Cc	3.86 a	24.48	6.40 Cc	40.62	5.50 Cc	34.91
平均 Mean	手栽 AT	3.99	11.37	18.70	3.99	21.31	7.39	39.50	7.33	39.19
	机插 MT	3.97	10.88	17.47	3.97	22.71	6.91	39.53	6.60	37.76
	直播 DS	3.95	10.38	15.98	3.95	24.73	6.43	40.19	5.61	35.08

大、小写字母分别表示在 1% 和 5% 水平上差异显著。

DMWP: dry matter weight of population; AT: artificial transplanting; MT: mechanical transplanting; DS: direct seeding. Values followed by different letters are significantly different at 1% (capital letter) and 5% (small letter) probability levels, respectively.

至成熟期,手栽稻、机插稻和直播稻群体总干物质重分别为 18.34~19.33、17.11~18.06 和 15.67~16.45 t hm<sup>-2</sup>,手栽稻较机插稻和直播稻平均高 7.04% 和 17.00%,机插稻较直播稻平均高 9.31%。

#### 2.1.2 主要生育阶段群体干物质积累量及其比例

将水稻生长期分为播种期至拔节期、拔节期至抽穗期和抽穗期至成熟期 3 个生育阶段,对各生育阶段群体干物质积累量及其占成熟期总干物质积累量的比例进行比较分析。由表 2 可知,播种期至拔节期,不同种植方式间群体干物质积累量基本相当,平均分别为 3.99、3.97、3.95 t hm<sup>-2</sup>;但此阶段的干物质积累量占成熟期总干物质积累量的比例明显表现为手栽稻<机插稻<直播稻。

拔节期至抽穗期群体干物质积累量以手栽稻最高,机插稻次之,直播稻最低,差异极显著,手栽稻较机插稻和直播稻平均分别高 6.95%、14.98%,机插稻较直播稻平均高 7.51%;此阶段的干物质积累量占总干物质积累量的比例为 38.58%~40.72%,手栽稻、机插稻和直播稻平均分别为 39.50%、39.53% 和 40.19%,其间差异较小。

抽穗期至成熟期群体干物质积累量也表现为手栽稻最高,机插稻次之,直播稻最低,差异极显著,此阶段是不同种植方式水稻群体物质积累量全生育期中该差异最大的时期,其中手栽稻较机插稻和直播稻平均高 11.10% 和 30.72%,机插稻较直播稻平均高 17.65%;此阶段的干物质积累量占总干物质积累量的比例表现为手栽稻>机插稻>直播稻,平均分别为 39.19%、37.76% 和 35.08%。

### 2.2 不同种植方式水稻主要生育期植株含氮率和吸氮量的差异

2.2.1 植株含氮率的差异 由表 3 可以看出,不同种植方式水稻植株含氮率均随生育进程逐渐降低,拔节期最高,成熟期最低。但不同生育时期水稻植株含氮率在不同种植方式间的差异不同。拔节期表现为直播>机插>手栽,且直播与手栽间的差异均达显著水平,而直播与机插间以及机插与手栽间的差异一般不显著;抽穗期和成熟期均是手栽>机插>直播,手栽与机插间差异不显著,但均极显著高于直播。不同生育类型水稻拔节期的植株含氮率有随品种生育期延长而增加的趋势,抽穗期和成熟期随品种生育期延长呈下降的趋势。各主要生育时期植株含氮率在不同种植方式下的变异系数均表现为早熟晚粳>迟熟中粳>中熟中粳。

2.2.2 植株吸氮量的差异 由表 3 可以看出,不同种植方式水稻植株吸氮量均随着生育进程不断增加,至成熟期达最大值。但不同生育时期水稻植株吸氮量在不同种植方式间的差异不同。其中,拔节期的植株吸氮量表现为直播>机插>手栽,直播与手栽间差异显著,直播与机插间以及机插与手栽间的差异一般不显著;抽穗期的植株吸氮量表现为手栽>机插>直播,手栽与机插间差异一般不显著,但均极显著高于直播;成熟期也表现为手栽>机插>直播,且手栽显著高于机插,机插又极显著高于直播。不同生育类型水稻植株吸氮量表现为,手栽和机插随品种生育期延长而增加,直播稻在拔节期随品种生育期延长呈增加趋势,抽穗期和成熟期则随品种生育期延长呈下降趋势。各主要生育时期植株吸氮量在不同种植方式下的变异系数也均表现为早熟晚粳>迟熟中粳>中熟中粳。

植株吸氮量为植株含氮率与干物质重的乘积。进一步分析不同生育期不同种植方式间水稻植株吸氮量的差异原因可知,拔节期不同种植方式水稻植株吸氮量高主要与植株含氮率高有关(干物质重在不同种植方式间差异不显著);抽穗期与成熟期植株吸氮量高则与植株含氮率及干物质重协同增高有关。

### 2.3 不同种植方式水稻氮素阶段吸收量和吸收速率的差异

#### 2.3.1 氮素阶段吸收量及其占总吸收量比例的差异

不同种植方式水稻氮素阶段吸收量及其占总吸收量的比例存在明显差异(表 4)。拔节期前表现为直播>机插>手栽,吸收量在直播与手栽间具有显著差异,直播与机插间以及机插与手栽间差异一般不显著,占总吸收量的比例在不同种植方式间均有极显著差异;拔节至抽穗期表现为手栽>机插>直播,吸收量在不同种植方式间差异极显著,占总吸收量的比例在手栽与机插间差异一般不显著,但均极显著高于直播;抽穗至成熟期也是手栽>机插>直播,吸收量在手栽与机插以及机插与直播间差异显著,在手栽与直播间差异极显著,占总吸收量的比例除两个杂交晚粳外,机插与直播间差异不显著,但一般都显著低于手栽。由表 4 还可以看出,不同种植方式水稻氮素阶段吸收量及其占总吸收量的比例均以抽穗至成熟期最小,但最大值所处的生育阶段因种植方式及品种类型而不同。手栽在拔节至抽穗期最大,直播在拔节期前最大,机插早熟晚粳和迟熟中粳在

表 3 不同种植方式水稻主要生育期植株含氮率和吸氮量的差异  
Table 3 Difference in N content and uptake in plant of rice at main growth stage under different planting methods

品种 Variety	种植方式 Planting method	含氮率 N content (%)			吸氮量 N uptake (kg hm <sup>-2</sup> )		
		拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity	拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity
早熟晚粳 EMLJ							
宁粳 3 号 Ningjing 3	手栽 AT	2.09 Bb	1.53 Aa	1.16 Aa	81.47 Bb	176.20 Aa	219.20 Aa
	机插 MT	2.26 ABa	1.51 Aa	1.12 Aa	89.50 ABa	167.23 Aa	197.44 Ab
	直播 DS	2.38 Aa	1.29 Bb	0.99 Bb	92.25 Aa	133.17 Bb	156.55 Bc
南粳 44 Nanjing 44	手栽 AT	2.11 Ab	1.53 Aa	1.18 Aa	87.05 Ab	179.51 Aa	227.32 Aa
	机插 MT	2.24 Aab	1.50 Aa	1.13 Aa	92.91 Aab	170.15 Aa	204.41 Ab
	直播 DS	2.34 Aa	1.23 Bb	0.95 Bb	93.98 Aa	129.22 Bb	153.05 Bc
变异系数 CV (%)		5.04	9.07	8.38	5.16	13.35	15.43
迟熟中粳 LMMJ							
盐粳 9 号 Yanjing 9	手栽 AT	2.05 Ab	1.56 Aa	1.19 Aa	82.06 Ab	175.44 Aa	220.36 Aa
	机插 MT	2.16 Aab	1.54 Aa	1.15 Aa	85.95 Aab	163.40 Aa	198.29 Ab
	直播 DS	2.25 Aa	1.30 Bb	1.01 Bb	90.57 Aa	132.61 Bb	159.00 Bc
淮稻 9 号 Huaidao 9	手栽 AT	2.06 Ab	1.53 Aa	1.16 Aa	83.65 Ab	175.44 Aa	218.88 Aa
	机插 MT	2.23 Aa	1.52 Aa	1.13 Aa	89.03 Aab	164.19 Aa	196.47 Ab
	直播 DS	2.29 Aa	1.29 Bb	0.98 Bb	91.03 Aa	135.05 Bb	159.32 Bc
9 优 418 9 you 418	手栽 AT	2.10 Ab	1.52 Aa	1.15 Aa	85.94 Ab	170.75 Aa	211.97 Aa
	机插 MT	2.24 Aab	1.50 Aa	1.10 Aa	91.06 Aab	162.58 Aa	192.24 Ab
	直播 DS	2.29 Aa	1.30 Bb	0.94 Bb	93.05 Aa	136.66 Bb	152.45 Bc
III 优 98 III you 98	手栽 AT	2.07 Bb	1.47 Aa	1.14 Aa	82.10 Bb	168.87 Aa	213.32 Aa
	机插 MT	2.24 ABab	1.38 ABa	1.04 ABb	88.13 ABb	151.22 Bb	183.65 Bb
	直播 DS	2.38 Aa	1.24 Bb	0.93 Bc	94.75 Aa	131.62 Cc	153.64 Cc
变异系数 CV (%)		4.86	8.21	8.33	4.77	10.96	13.68
中熟中粳 MMMJ							
连粳 6 号 Lianjing 6	手栽 AT	2.01 Ab	1.57 Aa	1.19 Aa	77.90 Ab	175.06 Aa	218.33 Aa
	机插 MT	2.12 Aab	1.54 Aa	1.16 Aa	80.49 Aab	163.78 Aa	195.29 Ab
	直播 DS	2.21 Aa	1.37 Bb	1.03 Bb	84.45 Aa	139.27 Bb	161.43 Bc
徐稻 3 号 Xudao 3	手栽 AT	1.98 Ab	1.56 Aa	1.18 Aa	77.03 Ab	173.69 Aa	217.53 Aa
	机插 MT	2.09 Aab	1.53 Aa	1.15 Aa	80.91 Aab	163.52 Aa	196.42 Ab
	直播 DS	2.17 Aa	1.35 Bb	1.02 Bb	83.80 Aa	137.97 Bb	161.07 Bc
变异系数 CV (%)		4.48	6.88	7.02	4.00	10.20	13.02
平均 Mean							
手栽 AT		2.06	1.54	1.17	72.15	174.37	218.36
机插 MT		2.20	1.50	1.12	87.25	163.26	195.53
直播 DS		2.29	1.30	0.98	90.49	134.45	157.06
变异系数 CV (%)		5.31	8.89	9.04	11.75	13.09	16.28

大、小写字母分别表示在 1%和 5%水平上差异显著。

EMLJ: early-maturing late japonica rice; LMMJ: late -maturing medium japonica rice; MMMJ: medium-maturing medium japonica rice; AT: artificial transplanting; MT: mechanical transplanting; DS: direct seeding. Values followed by different letters are significantly different at 1% (capital letter) and 5% (small letter) probability levels, respectively.

拔节期前最大，而中熟中粳在拔节至抽穗期最大。各生育阶段的氮素吸收量及其比例在不同种植方式下的变异系数均是早熟晚粳>迟熟中粳>中熟中粳。

进一步分析可知，水稻氮素阶段吸氮量与阶段

干物质积累量呈显著或极显著正相关。拔节前、拔节至抽穗期和抽穗至成熟期的氮素阶段吸氮量与干物质积累量的关系分别为  $y = 28.797x - 27.647$  ( $r = 0.5269^*$ )、 $y = 26.137x - 211.71$  ( $r = 0.6143^*$ )和  $y =$

$7.3557x - 94.884$  ( $r = 0.9346^{**}$ )。

2.3.2 氮素阶段吸收速率的差异 由表 4 可以看出, 不同种植方式水稻在不同生育阶段的氮素吸收速率有着较大的差异。拔节前表现为直播>机插>手栽, 并且不同种植方式间的差异均达极显著水平; 拔节至抽穗期表现为手栽>机插>直播, 其中手栽与机插间差异不显著, 但均极显著高于直播; 抽穗至成熟期也表现为手栽>机插>直播, 并且手栽与机插

及机插与直播间差异显著, 手栽与直播间差异极显著。由表 4 还可看出, 各种植方式水稻氮素阶段吸收速率均是抽穗至成熟期最小, 但最大值所处的生育阶段不同。手栽和机插均是拔节至抽穗期最大, 中熟中粳直播在拔节至抽穗期最大, 早熟晚粳和迟熟中粳直播在拔节期前最大。不同生育类型间氮素吸收速率在拔节前是中熟中粳小于早熟晚粳和迟熟中粳, 拔节至抽穗期随品种生育期延长呈降低趋势,

表 4 不同种植方式水稻氮素阶段吸收量和吸收速率的差异

Table 4 Difference in N accumulation and uptake rate in different periods of rice under different planting methods

品种 Variety	种植方式 Planting method	阶段吸收量及其占总吸收量比例 Periodic accumulation and its ratio to total						阶段吸收速率 N uptake rate (kg hm <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )		
		拔节前		拔节—抽穗		抽穗—成熟		拔节前	拔节—抽穗	抽穗—成熟
		Before jointing (kg hm <sup>-2</sup> )	(%)	Jointing to heading (kg hm <sup>-2</sup> )	(%)	Heading to maturity (kg hm <sup>-2</sup> )	(%)			
早熟晚粳 EMLJ										
宁粳 3 号 Ningjing 3	手栽 AT	81.47 Bb	37.17 Cc	94.73 Aa	43.22 Aa	43.00 Aa	19.62 Aa	1.044 Cc	2.429 Aa	0.860 Aa
	机插 MT	89.50 ABa	45.33 Bb	77.73 Bb	39.37 Aa	30.21 ABb	15.30 Ab	1.279 Bb	2.286 Aa	0.617 ABb
	直播 DS	92.25 Aa	58.93 Aa	40.92 Cc	26.14 Bb	23.38 Bc	14.94 Ab	1.591 Aa	1.240 Bb	0.508 Bb
南粳 44 Nanjing 44	手栽 AT	87.05 Ab	38.30 Cc	92.45 Aa	40.67 Aa	47.81 Aa	21.03 Aa	1.116 Cc	2.568 Aa	0.902 Aa
	机插 MT	92.91 Aab	45.46 Bb	77.24 Bb	37.79 Aa	34.25 Bb	16.76 ABb	1.347 Bb	2.341 Aa	0.672 ABb
	直播 DS	93.98 Aa	61.40 Aa	35.24 Cc	23.03 Bb	23.83 Bc	15.57 Bb	1.649 Aa	1.101 Bb	0.486 Bc
变异系数 CV (%)		5.16	20.66	33.21	21.19	30.83	17.64	17.50	29.13	25.59
迟熟中粳 LMMJ										
盐粳 9 号 Yanjing 9	手栽 AT	82.06 Ab	37.24 Cc	93.38 Aa	42.38 Aa	44.92 Aa	20.38 Aa	1.109 Cc	2.557 Aa	0.838 Aa
	机插 MT	85.95 Aab	43.35 Bb	77.45 Bb	39.06 Aa	34.89 ABb	17.59 Aab	1.302 Bb	2.378 Aa	0.652 ABb
	直播 DS	90.57 Aa	56.96 Aa	42.04 Cc	26.44 Bb	26.39 Bc	16.60 Ab	1.677 Aa	1.274 Bb	0.494 Bc
淮稻 9 号 Huaidao 9	手栽 AT	83.65 Ab	38.22 Cc	91.79 Aa	41.94 Aa	43.44 Aa	19.85 Aa	1.101 Cc	2.961 Aa	0.806 Aa
	机插 MT	89.03 Aab	45.31 Bb	75.17 Bb	38.26 Aa	32.28 ABb	16.43 Ab	1.309 Bb	2.685 Aa	0.628 ABb
	直播 DS	91.03 Aa	57.14 Aa	44.02 Cc	27.63 Bb	24.27 Bc	15.23 Ab	1.635 Aa	1.630 Bb	0.476 Bc
9 优 418 9 you 418	手栽 AT	85.94 Ab	40.55 Cc	86.81 Aa	40.96 Aa	42.15 Aa	19.80 Aa	1.146 Cc	2.570 Aa	0.750 Aa
	机插 MT	91.06 Aab	47.37 Bb	71.52 Bb	37.20 ABa	29.66 Ab	15.43 Ab	1.339 Bb	2.466 Aa	0.560 ABb
	直播 DS	93.05 Aa	61.04 Aa	43.60 Cc	28.60 Bb	15.79 Bc	10.36 Bc	1.662 Aa	1.557 Bb	0.316 Bc
III 优 98 III you 98	手栽 AT	82.10 Bb	38.48 Cc	86.77 Aa	40.68 Aa	44.45 Aa	20.84 Aa	1.095 Cc	2.410 Aa	0.823 Aa
	机插 MT	88.13 ABb	47.99 Bb	63.09 Bb	34.35 Ab	32.43 ABb	17.66 ABb	1.296 Bb	2.035 Ab	0.612 ABb
	直播 DS	94.75 Aa	61.67 Aa	36.86 Cc	23.99 Bc	22.03 Bc	14.34 Bc	1.692 Aa	1.229 Bc	0.441 Bc
变异系数 CV (%)		4.77	18.62	28.56	16.76	28.81	17.50	17.19	24.69	24.74
中熟中粳 MMMJ										
连粳 6 号 Lianjing 6	手栽 AT	77.90 Ab	35.68 Cc	97.16 Aa	44.50 Aa	43.27 Aa	19.82 Aa	1.082 Cc	3.134 Aa	0.801 Aa
	机插 MT	80.49 Aab	41.22 Bb	83.29 Bb	42.65 ABa	31.52 ABb	16.14 ABb	1.238 Bb	3.085 Aa	0.606 ABb
	直播 DS	84.45 Aa	52.32 Aa	54.81 Cc	33.96 Bb	22.16 Bc	13.73 Bb	1.593 Aa	2.108 Bb	0.452 Bc
徐稻 3 号 Xudao 3	手栽 AT	77.03 Ab	35.41 Cc	96.66 Aa	44.43 Aa	43.84 Aa	20.15 Aa	1.055 Cc	3.333 Aa	0.787 Aa
	机插 MT	80.91 Aab	41.19 Bb	82.61 Bb	42.06 ABa	32.90 ABb	16.75 ABb	1.226 Bb	3.060 Aa	0.615 ABb
	直播 DS	83.80 Aa	52.03 Aa	54.17 Cc	33.63 Bb	23.10 Bc	14.34 Bb	1.552 Aa	2.083 Bb	0.461 Bc
变异系数 CV (%)		4.00	16.92	24.30	14.47	27.74	15.58	17.15	17.73	21.50

大、小写字母分别表示在 1% 和 5% 水平上差异显著。

EMLJ: early-maturing late japonica rice; LMMJ: late-maturing medium japonica rice; MMMJ: medium-maturing medium japonica rice; AT: artificial transplanting; MT: mechanical transplanting; DS: direct seeding. Values followed by different letters are significantly different at 1% (capital letter) and 5% (small letter) probability levels, respectively.

抽穗至成熟期随品种生育期延长呈增加趋势。各生育阶段的氮素吸收速率在不同种植方式下的变异系数均是早熟晚粳>迟熟中粳>中熟中粳。

2.4 不同种植方式水稻氮素利用效率和百千克籽粒需氮量的差异

2.4.1 氮素利用效率的差异 由表 5 可以看出,不同种植方式水稻氮素吸收利用率和偏生产力表现为手栽>机插>直播,生理利用率表现为直播>机插>手栽,农学利用率的变化趋势不明显。其中,氮素吸收利用率除宁粳 3 号外,其他品种均表现为手栽显

著高于机插,极显著高于直播,机插均显著或极显著高于直播;偏生产力在不同种植方式间的差异也均达极显著水平;生理利用率在两个杂交粳稻不同种植方式间的差异达显著或极显著水平,其他类型品种手栽与机插间的差异不显著,但均极显著低于直播。

氮素吸收利用率是生产上最常用来衡量氮素利用效率的指标。由表 5 可知,手栽、机插、直播水稻氮素吸收利用率平均分别为 44.49%、39.00%、31.41%,手栽较机插和直播平均分别高 14.08%和

表 5 不同种植方式水稻氮素利用效率和百千克籽粒需氮量的差异  
Table 5 Difference in N use efficiency and N requirement for 100 kg grain of rice under different planting methods

品种 Variety	种植方式 Planting method	氮素利用效率 N use efficiency				百千克籽粒	
		吸收利用率 Recovery efficiency (%)	农学利用率 Agronomic efficiency (kg kg <sup>-1</sup> )	生理利用率 Physiological efficiency (kg kg <sup>-1</sup> )	偏生产力 Partial factor productivity (kg kg <sup>-1</sup> )	需氮量 N requirement for 100 kg grain (kg)	稻谷产量 Grain yield (kg hm <sup>-2</sup> )
早熟晚粳 EMLJ							
宁粳 3 号 Ningjing 3	手栽 AT	45.85 Aa	16.40 Aa	35.77 Bb	42.01 Aa	1.93 Aa	11341.5 Aa
	机插 MT	41.36 Aa	15.93 Aa	38.52 Bb	39.61 Bb	1.85 ABa	10693.5 Bb
	直播 DS	30.88 Bb	16.56 Aa	53.62 Aa	35.05 Cc	1.65 Bb	9463.5 Cc
南粳 44 Nanjing 44	手栽 AT	47.61 Aa	16.84 Aab	35.38 Bb	42.25 Aa	1.99 Aa	11407.5 Aa
	机插 MT	41.36 Ab	16.30 Ab	39.42 Bb	39.79 Bb	1.90 Aa	10743.0 Bb
	直播 DS	30.69 Bc	17.17 Aa	55.95 Aa	35.34 Cc	1.60 Bb	9543.0 Cc
变异系数 CV (%)		17.41	12.83	20.26	7.71	8.19	7.71
迟熟中粳 LMMJ							
盐粳 9 号 Yanjing 9	手栽 AT	46.37 Aa	16.24 Aab	35.02 Bb	40.62 Aa	2.01 Aa	10968.0 Aa
	机插 MT	40.76 Ab	15.74 Ab	38.62 Bb	38.37 Bb	1.91 Aa	10360.5 Bb
	直播 DS	32.80 Bc	16.77 Aa	51.14 Aa	34.70 Cc	1.70 Bb	9369.0 Cc
淮稻 9 号 Huaidao 9	手栽 AT	45.70 Aa	16.93 Ab	37.04 Bb	42.02 Aa	1.93 Aa	11345.1 Aa
	机插 MT	41.11 Ab	16.66 Ab	40.54 Bb	39.75 Bb	1.83 ABa	10731.5 Bb
	直播 DS	33.25 Bc	17.83 Aa	53.62 Aa	35.98 Cc	1.64 Bb	9714.7 Cc
9 优 418 9 you 418	手栽 AT	40.46 Aa	12.07 Aa	29.84 Bc	41.19 Aa	1.91 Aa	11122.5 Aa
	机插 MT	35.71 Ab	12.76 Aa	35.55 Bb	40.13 Bb	1.77 ABb	10834.5 Bb
	直播 DS	27.64 Bc	13.68 Aa	49.49 Aa	36.13 Cc	1.56 Bc	9756.0 Cc
III 优 98 III you 98	手栽 AT	40.89 Aa	12.10 Ab	29.59 Cc	41.59 Aa	1.90 Aa	11229.0 Aa
	机插 MT	33.37 ABb	13.70 Aa	41.05 Bb	40.47 Bb	1.68 Bb	10927.5 Bb
	直播 DS	28.46 Bc	14.26 Aa	50.11 Aa	36.95 Cc	1.54 Bc	9976.5 Cc
变异系数 CV (%)		16.53	18.84	19.96	6.23	8.66	6.23
中熟中粳 MMMJ							
连粳 6 号 Lianjing 6	手栽 AT	44.72 Aa	15.91 Ab	35.58 Bb	40.31 Aa	2.01 Aa	10884.0 Aa
	机插 MT	39.73 ABb	15.75 Ab	40.95 Bb	38.57 Bb	1.91 ABa	10413.0 Bb
	直播 DS	34.05 Bc	16.98 Aa	49.85 Aa	34.74 Cc	1.72 Bb	9379.5 Cc
徐稻 3 号 Xudao 3	手栽 AT	44.30 Aa	16.47 Ab	37.17 Bb	40.55 Aa	1.99 Aa	10947.4 Aa
	机插 MT	38.57 ABb	15.98 Ab	41.43 Bb	38.66 Bb	1.88 ABa	10437.2 Bb
	直播 DS	33.51 Bc	17.50 Aa	52.23 Aa	35.36 Cc	1.69 Bb	9546.8 Cc
变异系数 CV (%)		12.80	13.02	15.81	6.18	7.35	6.18

大、小写字母分别表示在 1%和 5%水平上差异显著。

EMLJ: early-maturing late japonica rice; LMMJ: late-maturing medium japonica rice; MMMJ: medium-maturing medium japonica rice; AT: artificial transplanting; MT: mechanical transplanting; DS: direct seeding. Values followed by different letters are significantly different at 1% (capital letter) and 5% (small letter) probability levels, respectively.



41.63%，机插较直播平均高 24.15%。不同生育类型水稻品种氮素吸收利用率因种植方式的不同也有所差异。其中，手栽和机插表现为早熟晚粳>迟熟中粳>中熟中粳，直播表现为中熟中粳>迟熟中粳>早熟晚粳；并且同一生育类型杂交粳稻的氮素吸收利用率明显小于常规粳稻。

**2.4.2 百千克籽粒需氮量的差异** 由表 5 可以看出，不同种植方式水稻百千克籽粒需氮量表现为手栽>机插>直播，其中 2 个杂交粳稻不同种植方式间的差异达显著或极显著水平，其他品种手栽与机插间差异不显著，但均显著或极显著高于直播。手栽、机插、直播的百千克籽粒需氮量分别为 1.96 (1.90~2.01) kg、1.84 (1.68~1.91) kg、1.64 (1.54~1.72) kg。由表 5 还可看出，同一生育类型品种百千克籽粒需氮量以杂交粳稻小于常规粳稻。直播方式的百千克籽粒需氮量表现为中熟中粳>迟熟中粳>早熟晚粳，在手栽和机插方式下没有明显变化规律。

### 3 讨论

#### 3.1 不同种植方式水稻氮素吸收积累特性差异

氮素是影响水稻生长和产量形成的重要因素。关于不同基因型水稻品种氮素吸收积累的差异及氮肥运筹、水分管理等栽培条件对水稻氮素吸收积累特性影响的研究目前已有较多的报道<sup>[13-16,22-30]</sup>，但关于不同种植方式水稻氮素吸收积累特性的研究较少，结果也不尽一致。徐国伟等<sup>[17]</sup>研究认为直播稻植株的含氮率在分蘖中期与成熟期较高，植株吸氮量在生育前期(分蘖期与穗分化期)低于移栽期，抽穗期差异不大，成熟期则高于移栽稻。任万军等<sup>[27]</sup>研究认为，自移栽至孕穗期氮素积累量以常耕手栽最高，常耕抛秧其次，免耕高留茬抛秧最低；孕穗后免耕高留茬抛秧各器官含氮量最高，氮素积累量也逐渐超过常耕抛秧。

本研究表明，不同种植方式水稻拔节期植株含氮率及氮素积累量为直播>机插>手栽，抽穗期和成熟期为手栽>机插>直播，且拔节后差异越来越大，抽穗期手栽较机插和直播平均分别高 6.81%和 29.69%，机插较直播平均高 21.43%，成熟期手栽较机插和直播平均分别高 11.68%和 39.03%，机插较直播平均高 24.49%。分析其原因，可能与不同种植方式水稻的施肥方式有关。本研究从不同种植方式水稻高产生实际要求出发，依不同种植方式设计了相应的氮肥运筹模式，即施氮总量相同，手插稻

基肥、分蘖肥与穗肥运筹比例为 3:2:5，机插稻与直播稻分别为 2:4:4。相对而言，直播稻出苗后无移栽植伤过程，个体小，加之氮肥施用量大，土壤氮浓度高，拔节前氮素吸收速率也高，因而拔节期植株含氮率高，同时由于直播稻基本主茎苗数多，一定程度上可弥补个体小的劣势，最终直播稻拔节期干物重与手插稻及机插稻相当，因此直播稻拔节期吸氮总量较高；拔节后，直播稻穗肥施用量比手插稻少，个体质量又不及施用相同穗肥量的机插稻，成穗率低，光合效率差，植株含氮率与阶段吸收速率不高，且相对较多的群体茎蘖数不能弥补个体小的劣势，最终干物质重不及手插稻与机插稻，机插稻也低于手插稻，抽穗期及成熟期的氮吸收量也以直播稻群体最小，其次依次是机插稻和手插稻。

此外，在江苏稻麦(油)两熟制条件下，不同种植方式对水稻生育进程与温光资源利用差异较大，与手栽相比，机插和直播的播种、拔节、抽穗、成熟期相应推迟，全生育期明显缩短，主要生育阶段(尤其是播种至拔节阶段)的生育天数也相应减少，全生育期积温和光照时数均表现为直播<机插<手栽，尤其是水稻拔节之前营养生长期对温光资源利用效率差异更大<sup>[31]</sup>，并进而降低了植株含氮率与氮素阶段吸收速率，减少了物质生产及氮素积累。

#### 3.2 不同种植方式水稻的氮素利用效率及其提高途径

氮素利用效率通用指标有氮素吸收利用率、农学利用率、生理利用率和偏生产力，这些指标从不同侧面描述了作物对氮素的利用情况<sup>[32]</sup>。本研究结果表明，不同氮素利用效率指标在不同种植方式下的变化趋势并不一致。氮素吸收利用率和偏生产力手栽>机插>直播，生理利用率直播>机插>手栽，农学利用率没有明显规律。生产上常用氮素吸收利用率来衡量氮素利用效率，简称氮素利用率，是氮肥精确施用必须确定的 3 个参数之一<sup>[33]</sup>。本研究结果表明，手栽、机插与直播的氮素利用率平均分别为 44.49%、39.00%、31.41%，手栽较机插和直播分别高 14.08%和 41.63%，机插较直播高 24.15%。提高氮素利用率的途径主要是氮肥的运筹管理和品种的遗传改良<sup>[1,34]</sup>。本研究结果表明，氮素利用率不仅在不同种植方式间存在差异，而且同一方式下不同类型品种间也存在差异。手栽和机插的氮素利用率为早熟晚粳>迟熟中粳>中熟中粳，直播为中熟中粳>迟熟中粳>早熟晚粳；并且同一生育类型杂交粳稻

的氮素利用率小于常规粳稻。因此, 我们认为选择合适的种植方式并配套适宜的品种类型是提高氮素利用率的有效途径之一。

### 3.3 不同种植方式水稻氮肥精确定量施用的确定

精确施肥是水稻精确定量栽培技术的核心技术之一, 而氮素的精确定量施用又是精确施肥的核心。精确施氮必须准确确定目标产量需氮量、土壤供氮量和氮肥的当季利用率 3 个参数可供应用的稳定值<sup>[31]</sup>。目标产量需氮量=目标产量 $\times$ 100 kg 稻谷需氮量/100。凌启鸿等<sup>[33]</sup>通过连续多年多点多品种的试验认为, 江苏现有 17 (16~18) 叶左右的粳稻品种的 100 kg 稻谷需氮量当产量为 7.5 t hm<sup>-2</sup> 时为 1.85 (1.80~1.90) kg 左右, 当产量为 9.0 t hm<sup>-2</sup> 时为 2.0 (1.9~2.1) kg 左右, 当产量为 10.5 t hm<sup>-2</sup> 时为 2.1 kg 左右。本研究结果表明, 百千克籽粒需氮量为手栽>机插>直播, 其值分别为 1.959 (1.900~2.009)、1.842 (1.681~1.914) 和 1.638 (1.540~1.721) kg; 不同种植方式间氮肥的当季利用率亦存在差异。这些将为精确施氮参数的确定提供重要的参考依据。当然, 精确施氮参数的求取是十分艰难而复杂的过程, 要准确求得不同种植方式水稻可供生产上应用的稳定的参数值还需要大量系统深入的试验和研究。

## 4 结论

不同种植方式水稻氮素吸收利用有各自鲜明的特征, 并受品种生育类型的影响。与手栽和机插相比, 直播拔节期前氮素吸收能力较强, 植株含氮率、吸氮量和氮素吸收速率高, 但拔节以后吸氮能力逐渐减弱, 植株含氮率、吸氮量和氮素吸收速率明显小, 氮素吸收利用率和百千克籽粒需氮量也明显小; 手栽和机插间植株含氮率和百千克籽粒需氮量差异不明显, 但手栽拔节以后的阶段吸氮量、成熟期总吸氮量、抽穗后氮素吸收速率和氮素吸收利用率都明显高于机插。手栽、机插、直播成熟期总吸氮量平均分别为 218.36、195.53 和 157.06 kg hm<sup>-2</sup>, 氮素吸收利用率平均分别为 44.49%、39.00% 和 31.41%, 百千克籽粒需氮量平均分别为 1.959 (1.900~2.009)、1.842 (1.681~1.914) 和 1.638 (1.540~1.721) kg。同一方式不同类型品种间氮素利用率也不尽相同, 手栽和机插氮素利用率为早熟晚粳>迟熟中粳>中熟中粳, 直播为中熟中粳>迟熟中粳>早熟晚粳; 同一生育类型杂交粳稻的氮素利用率小于常规粳稻。选择科学

的种植方式并配套适宜的品种类型对实现水稻氮素高效吸收和利用具有十分重要的意义。

## References

- [1] Peng S-B(彭少兵), Huang J-L(黄见良), Zhong X-H(钟旭华), Yang J-C(杨建昌), Wang G-H(王光火), Zou Y-B(邹应斌), Zhang F-S(张福锁), Zhu Q-S(朱庆森), Buresh R, Witt C. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2002, 35(9): 1095-1103 (in Chinese with English abstract)
- [2] Li R-G(李荣刚), Yang L-Z(杨林章), Pi J-H(皮家欢). Soil fertility evolution, nutrient balance and reasonable fertilization in paddy field in southern area of Jiangsu province. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2003, 14(11): 1889-1892 (in Chinese with English abstract)
- [3] Cui Y-T(崔玉亭), Cheng X(程序), Han C-R(韩纯儒), Li R-G(李荣刚). The economic and ecological satisfactory amount of nitrogen fertilizer using on rice in Tai Lake Watershed. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2000, 20(4): 659-662 (in Chinese with English abstract)
- [4] Witt C, Dobermann A, Abdulrachman S. Internal nutrient efficiencies of irrigated lowland rice in tropical and subtropical Asia. *Field Crops Res*, 1999, 63: 113-118
- [5] Liu L-J(刘立军), Xu W(徐伟), Sang D-Z(桑大志), Liu C-L(刘翠莲), Zhou J-L(周家麟), Yang J-C(杨建昌). Site-specific nitrogen management increases fertilizer-nitrogen use efficiency in rice. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2006, 32(7): 987-984 (in Chinese with English abstract)
- [6] Dobermann A, Witt C, Dawe D, Gines H C, Nagarajan R, Satawathananont S, Son T T, Tan P S, Wang G H, Chien N V, Thoa V T K, Phung C V, Stalin P, Muthukrishna P, Ravi V, Babu M, Chatuporn S, Kongchum M, Sun Q, Fu R, Simbaha G C, Adviento M A A. Site-specific nutrient management for intensive rice cropping systems in Asia. *Field Crops Res*, 2002, 74: 37-66
- [7] Yin C-Y(殷春渊), Zhang Q(张庆), Wei H-Y(魏海燕), Zhang H-C(张洪程), Dai Q-G(戴其根), Huo Z-Y(霍中洋), Xu K(许珂), Ma Q(马群), Hang J(杭杰), Zhang S-F(张胜飞). Differences in nitrogen absorption and use efficiency in rice genotypes with different yield performance. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2010, 43(1): 39-50 (in Chinese with English abstract)
- [8] Singh U, Ladha J K, Castillo E G, Punzalan G, Tirol-Padre A, Duqueza M. Genotypic variation in nitrogen use efficiency in medium- and long-duration rice. *Field Crops Res*, 1998, 58: 35-53

- [9] Koutroubas S D, Ntanos D A. Genotypic differences for grain yield and nitrogen utilization in *indica* and *japonica* rice under Mediterranean conditions. *Field Crops Res*, 2003, 83: 251–260
- [10] Zhang Y-L(张亚丽), Fan J-B(樊剑波), Duan Y-H(段英华), Wang D-S(王东升), Ye L-T(叶利庭), Shen Q-R(沈其荣). Variation of nitrogen use efficiency of rice different in genotype and its evaluation. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), 2008, 45(2): 267–273 (in Chinese with English abstract)
- [11] Wei H-Y(魏海燕), Zhang H-C(张洪程), Hang J(杭杰), Dai Q-G(戴其根), Huo Z-Y(霍中洋), Xu K(许轲), Zhang S-F(张胜飞), Ma Q(马群), Zhang Q(张庆), Zhang J(张军). Characteristics of N accumulation and translocation in rice genotypes with different N use efficiencies. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2008, 34(1): 119–125 (in Chinese with English abstract)
- [12] Zhang Y L, Fan J B, Wang D S, Shen Q R. Genotypic differences in grain yield and physiological nitrogen use efficiency among rice cultivars. *Pedosphere*, 2009, 19: 681–691
- [13] Wan L-J(万靓军), Zhang H-C(张洪程), Huo Z-Y(霍中洋), Lin Z-C(林志成), Dai Q-G(戴其根), Xu K(许轲), Zhang J(张军). Effects of nitrogen application regimes on yield, quality, and nitrogen use efficiency of super *japonica* hybrid rice. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2007, 33(2): 175–182 (in Chinese with English abstract)
- [14] Liu L J, Sang D Z, Liu C L, Wang Z Q, Yang J C, Zhu Q S. Effects of real-time and site-specific nitrogen managements on rice yield and nitrogen use efficiency. *Agric Sci China*, 2004, 3(4): 262–268
- [15] Liu L-J(刘立军), Xue Y-G(薛亚光), Sun X-L(孙小淋), Wang Z-Q(王志琴), Yang J-C(杨建昌). Effects of water management methods on grain yield and fertilizer-nitrogen use efficiency in rice. *Chin J Rice Sci* (中国水稻科学), 2009, 23(3): 282–288 (in Chinese with English abstract)
- [16] Liang T-F(梁天锋), Xu S-H(徐世宏), Liu K-Q(刘开强), Wang D-J(王殿君), Liang H(梁和), Dong D-F(董登峰), Wei S-Q(韦善清), Zhou J-M(周佳民), Hu J-M(胡钧铭), Jiang L-G(江立庚). Studies on influence of cultivation patterns on characteristics of nitrogen utilization and distribution in rice. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), 2010, 16(1): 20–26 (in Chinese with English abstract)
- [17] Xu G-W(徐国伟), Yang L-N(杨立年), Wang Z-Q(王志琴), Liu L-J(刘立军), Yang J-C(杨建昌). Effects of wheat-residue application and site-specific nitrogen management on absorption and utilization of nitrogen, phosphorus, and potassium in rice plants. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2008, 34(8): 1424–1434 (in Chinese with English abstract)
- [18] Yin C-Y(殷春渊), Zhang Q(张庆), Wei H-Y(魏海燕), Zhang H-C(张洪程), Dai Q-G(戴其根), Huo Z-Y(霍中洋), Xu K(许轲), Ma Q(马群), Hang J(杭杰), Zhang S-F(张圣飞). Response of different growth duration type rice to the paddy field soil basal nitrogen supply. *J Soil & Water Conser* (水土保持学报), 2009, 23(6): 90–94 (in Chinese with English abstract)
- [19] Yin C-Y(殷春渊), Zhang H-C(张洪程), Zhang Q(张庆), Wei H-Y(魏海燕), Dai Q-G(戴其根), Huo Z-Y(霍中洋), Xu K(许轲), Ma Q(马群), Li M(李敏), Li G-Y(李国业). Preliminary study on parameters of precise and quantitative nitrogen application in rice varieties with different growth period durations. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2010, 36(8): 1342–1354 (in Chinese with English abstract)
- [20] Ling Q-H(凌启鸿). Discussion on problem of rice simplified cultivation. *China Rice* (中国稻米), 1997, (5): 3–9 (in Chinese)
- [21] Bao S-D(鲍士旦). *Agricultural Chemistry Analysis in Soil* (土壤农化分析). Beijing: China Agriculture Press, 2000. pp 44–49 (in Chinese)
- [22] Wu W-G(吴文革), Zhang H-C(张洪程), Chen Y(陈烨), Li J(李杰), Qian Y-F(钱银飞), Wu G-C(吴桂成), Zhai C-Q(翟超群). Dry-matter accumulation and nitrogen absorption and utilization in middle-season *indica* super hybrid rice. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2008, 34(6): 1060–1068 (in Chinese with English abstract)
- [23] Dong G-C(董桂春), Yu X-F(于小凤), Zhao J-N(赵江宁), Ju J(居静), Tian H(田昊), Li J-Q(李进前), Zhang Y(张燕), Wang Y-L(王余龙). General characteristics of nitrogen uptake and utilization in conventional *indica* rice cultivars with different panicle weight types. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2009, 35(11): 2091–2100 (in Chinese with English abstract)
- [24] De Datta S K, Broadbent F E. Nitrogen use efficiency of 24 rice genotypes in N-deficient soil. *Field Crops Res*, 1990, 23: 81–92
- [25] Jing J, Yamamoto Y, Wang Y L, Shan Y H, Dong G C, Yoshida T, Miyazaki A. Genotypic differences in grain yield, and nitrogen absorption and utilization in recombinant inbred lines of rice under hydroponic culture. *Soil Sci Plant Nutr*, 2006, 52: 321–330
- [26] Zhang Y-J(张亚洁), Lin Q-S(林强森), Sun B(孙斌), Diao G-H(刁广华), Yang J-C(杨建昌). Effects of cultivation methods on nitrogen absorption and use efficiency of upland and paddy rice. *Chin J Rice Sci* (中国水稻科学), 2005, 19(6): 539–544 (in Chinese with English abstract)
- [27] Ren W-J(任万军), Yang W-Y(杨文钰), Wu J-X(伍菊仙), Fan G-Q(樊高琼), Yang Z-H(杨振华). Characteristics of nitrogen accumulation and its relationship with root growth of rice after transplanting. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), 2007,

- 13(5): 765–771 (in Chinese with English abstract)
- [28] Shi Q-H(石庆华), Xu Y-Q(徐益群), Zhang P-L(张佩莲), Zeng X-J(曾宪江), Pan X-H(潘晓华), Zhong X-H(钟旭华). Effects of N uptake on sink and source of *indica-japonica* F<sub>1</sub> rice. *Acta Agric Univ Jiangxiensis* (江西农业大学学报), 1994, 16(4): 333–339 (in Chinese with English abstract)
- [29] Zhang Y-F(张岳芳), Wang Y-L(王余龙), Zhang C-S(张传胜), Dong G-C(董桂春), Yang L-X(杨连新), Huang J-Y(黄建晔), Long Y-C(龙银成). Relationship between N accumulation and root traits in conventional *indica* rice varieties (*Oryza sativa* L.). *Acta Agron Sin* (作物学报), 2006, 32(8): 1121–1129 (in Chinese with English abstract)
- [30] Wei H-Y(魏海燕), Zhang H-C(张洪程), Dai Q-G(戴其根), Huo Z-Y(霍中洋), Xu K(许轲), Hang J(杭杰), Ma Q(马群), Zhang S-F(张胜飞), Zhang Q(张庆), Liu Y-Y(刘艳阳). Characteristics of matter production and accumulation in rice genotypes with different N use efficiency. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2007, 33(11): 1802–1809 (in Chinese with English abstract)
- [31] Li J(李杰), Z-C(张洪程), Dong Y-Y(董洋洋), Ni X-C(倪晓诚), Yang B(杨波), Gong J-L(龚金龙), Chang Y(常勇), Dai Q-G(戴其根), Huo Z-Y(霍中洋), Xu K(许轲), Wei H-Y(魏海燕). Effects of cultivation methods on yield, growth stage and utilization of temperature and illumination of rice in different ecological regions. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2011, 44 (13): 2661–2672 (in Chinese with English abstract)
- [32] Novoa R, Loomis R S. Nitrogen and plant production. *Plant Soil*, 1981, 58: 177–204
- [33] Ling Q-H(凌启鸿), Zhang H-C(张洪程), Dai Q-G(戴其根), Ding Y-F(丁艳锋), Ling L(凌励), Su Z-F(苏祖芳), Xu M(徐茂), Que J-H(阙金华), Wang S-H(王绍华). Study on precise and quantitative N application in rice. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2005, 38(12): 2457–2467 (in Chinese with English abstract)
- [34] Ladha J K, Kirk G J D, Bennett J, Peng S, Reddy C K, Reddy P M, Singh U. Opportunities for increased nitrogen-use efficiency from improved lowland rice germplasm. *Field Crops Res*, 1998, 56: 41–71