植物营养与肥料学报 2014,20(4):831 -844
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0405

机械化播栽对杂交稻氮素积累分配及碳氮比的影响

刘 利[1], 雷小龙[1], 黄光忠[2], 刘代银[3], 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 郫县农村发展局,四川郫县 611700; 3 四川省农业技术推广总站, 四川成都 610041)

摘要:【目的】氮素吸收与积累是水稻产量形成的重要基础。随着农村劳动力转移,我国水稻生产机械化的步伐随之加快, 机械化播栽使杂交籼稻的生长发育和各生育阶段所处环境发生了改变,但针对其氮素吸收利用特性的研究还较少。本文以杂交籼稻 F 优498 为材料,探讨机械化播栽条件下杂交稻的氮素积累、分配及碳氮比特点。**【方法】**采用二因素裂区设计,主因素为播栽方式,共3 个水平,分别为机械精量穴直播、机插和常规手插;副因素为穴苗数,设2 个水平,分别为低穴苗数和高穴苗数。研究播栽方式和穴苗数对杂交稻氮素积累、分配及碳氮比的影响。**【结果】**机械化播栽对杂交稻氮素吸收利用及碳氮比产生了明显影响,与常规手插相比,机械精量穴直播显著提高了水稻拔节期和成熟期植株含氮量,同时提高了成熟期植株氮素积累能力。机插植株含氮量在抽穗期显著高于手插,并能在拔节期保持较高的植株氮素积累量。不同播栽方式叶片和茎鞘氮素转运量、氮素表观转运率以及氮素转运贡献率、氮素干物质生产效率和氮素偏生力表现为常规手插 > 机插 > 机械精量穴直播,而穗部氮素增加量和百千克籽粒吸氮量则为机械精量穴直播 > 常规手插 > 机插,氮素稻谷生产效率和氮素收获指数表现为机插 > 常规手插 > 机械精量穴直播。水稻植株全碳含量及植株碳氮比在各主要生育时期内均受播栽方式显著或极显著影响。机械化播栽方式配合低穴苗数能加强成熟期各器官碳氮比,配合高穴苗数处理能显著提高杂交稻抽穗期穗碳氮比,并且能够促进碳素在植株内的转化和分配。**【结论】**机械化播栽方式虽降低了拔节期植株全碳含量及植株碳氮比,但可显著提高水稻拔节期和成熟期植株含氮量,提高成熟期植株氮素积累能力,有利于杂交稻氮素高效吸收利用和植株体内碳氮代谢的平衡,因而获得高产高效。

关键词: 水稻;机直播;机插;穴苗数;氮素;碳氮比
中图分类号: S233.71 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2014)04-0831-14

Influences of mechanical sowing and transplanting on nitrogen accumulation, distribution and C/N of hybrid rice cultivars

LIU Li[1], LEI Xiao-long[1], HUANG Guang-zhong[2], LIU Dai-yin[3], 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 Pixian Rural Development Bureau, Pixian 611700, China; 3 Sichuan General Popularization Centre of Agricultural Technology, Chengdu 610041, China*)

Abstract:【Objectives】The nitrogen uptake and accumulation are an important foundation for yield formation in rice. Along with the transfer of rural labor to the cities, the pace of rice production mechanization in China consequently grows rapidly. The growth, development, and the environment of each growth stage of hybrid rice have changed in the mechanical sowing and transplanting methods. However, less research has been done on how the mechanical sowing and transplanting methods influence the nitrogen absorption and utilization characterization. The hybrid indica rice (F you 498) is used in the experiments to explore the characteristics of nitrogen uptake,

收稿日期: 2013-07-22 **接受日期:** 2013-10-22
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); 四川农业大学优秀硕士论文培育基金资助。
作者简介: 刘利(1987—), 女, 四川南充人, 硕士研究生, 主要从事水稻高产栽培生理技术研究。E-mail: liuli20080622@163.com
* 通信作者 E-mail: rwjun@126.com

utilization and C/N. 【**Methods**】Two factorial split-plot designs with three replications were used in this experiment, the main plots consisted of three sowing and transplanting methods (mechanical direct seeding, mechanical transplanting, and artificial transplanting), the subplots were subjected two seeding number per hill (low seeding number per hill and high seeding number per hill). The effects of sowing and transplanting methods and seedling number per hill on nitrogen accumulation, distribution and C/N were investigated. 【**Results**】Mechanical sowing and transplanting methods had apparent effects on the nitrogen uptake, utilization, and C/N of hybrid rice. The mechanical direct seeding improved the nitrogen content at the jointing and maturity periods, and the capabilities of nitrogen accumulation in plants of rice at the maturity period. The nitrogen content at the heading period in the mechanical transplanting was higher than the artificial transplanting, the mechanical transplanting could keep high nitrogen accumulation of rice at the jointing period. The nitrogen translocation, apparent nitrogen translocation rate of rice leaves and stem-sheath, nitrogen transfer rate, nitrogen use efficiency for biomass and partial factor productivity of applied nitrogen in artificial transplanting were higher than those in mechanical transplanting and the lowest in mechanical direct seeding. However, the N increase in panicle and nitrogen uptake per 100 kg of grain under different sowing and transplanting methods were different, mechanical direct seeding was the highest, followed by artificial transplanting and mechanical transplanting. Furthermore, the nitrogen use efficiency for grain production and nitrogen harvest index in mechanical transplanting were higher than those in artificial transplanting, and the lowest in mechanical direct seeding. The carbohydrate content, C/N of plant in hybrid rice at the jointing, heading, and maturity periods were significantly influenced by different sowing and transplanting methods. The mechanical sowing and transplanting methods cooperate with low seedling number per hill could enhance the C/N of different organs at the maturity period. The C/N of panicles of hybrid rice cultivar is significantly increased under the mechanical sowing and transplanting methods cooperate with high seedling number per hill, subsequently improved the carbohydrate transformation and distribution in plant. 【**Conclusions**】The characteristics of nitrogen accumulation and utilization of hybrid rice under different mechanical sowing and transplanting methods are different. Mechanical direct sowing and transplanting methods plus lower seedling number per hill are effective way in control and regulation of the nitrogen uptake and transfer in rice, keeping a relative high N accumulation during the whole growing period of rice, thus leading to a high N requirement for 100 kg of grain production and high yield.

Key words: rice; mechanical direct sowing; mechanical transplanting; seedling number per hill; nitrogen; C/N

氮是影响水稻产量形成最敏感的元素,作物对氮的吸收和利用是农业生态系统中氮循环的重要过程,氮素吸收与积累是水稻产量形成的重要基础[1]。氮肥施用量及氮肥运筹方式对水稻生长发育影响很大[2-5]。前人研究认为不同基因型水稻品种对氮素的吸收利用存在着明显的差异[6-9],氮高效类型水稻的氮素积累量、转移量及转移率均大于低效类型[8]。高产基因型水稻在各个生育阶段的氮素积累量、抽穗前的氮素吸收速率及氮素利用效率均较高[1]。同时,不同基因型水稻品种对氮素的吸收利用特性亦受外界环境条件的影响[10-11],水稻植株含氮量、氮素积累量、氮素生产效率受到生态条件、栽植方式及其互作效应的显著影响[11],合理的氮肥运筹[12-13]、水分管理[14]、耕作方法[15]等栽培管理条件能有效地提高水稻氮素利用率。水稻种植方式是水稻栽培管理措施的重要环节[16],不同种植方式水稻由于植株个体和群体生长环境不同,对养分和温光等资源的利用不同,必然会对个体和群体生长产生一定的影响[17],栽插穴苗数是影响群体大小的主要因素[18-19]。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氮素利用特性影响的研究已较为深入,但有关机械化播栽方式对杂交籼稻氮素吸收利用特性的研究还较少。碳氮代谢为作物正常生长发育和高产提供物质基础,植物的碳氮含量及碳氮比是反映植株体内碳氮代谢状况的诊断指标[20]。为此,本研究以中籼迟熟杂交稻组合F优498为试验材料,研究了机械精量穴直播、机插和常规手插3种播栽方式及不同穴苗数对水稻氮素积累、分配、运转及碳氮比的影响,旨在明确播栽方式对杂交籼稻氮素利用与生产特性

的作用机理，以期为杂交稻机械化生产技术的推广利用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

试验于2012年在四川省成都市郫县古城镇花牌村进行（30°52′N，103°55′E）。试验地前作为蔬菜，土壤质地为中壤土，pH 5.85，含有机质30.85 g/kg、全氮2.27 g/kg、碱解氮74.81 mg/kg、全磷1.08 g/kg、速效磷149.71 mg/kg、全钾39.41 g/kg、速效钾51.94 mg/kg。供试水稻品种为F优498，三系杂交籼稻（江育F32A×蜀恢498），由四川农业大学水稻研究所和江油市川江水稻研究所选育，全生育期约150 d。

1.2　试验设计

采用二因素裂区设计，主因素为播栽方式，共3个水平，即，A1 机械精量穴直播（以下简称机直播），A2 机插，A3 常规手插（以下简称手插）；副因素为穴苗数，共2个水平，即B1 低穴苗数（以下简称低苗），B2 高穴苗数（以下简称高苗）。共6个处理组合，重复3次，小区面积12.0 m×3.0 m=36.0 m^2。机直播于4月25日应用华南农业大学工学院研制的2BD-10精量穴直播机进行水直播，设定行穴距为25.0 cm×20.0 cm，低苗处理设播量为3.0粒/穴，高苗处理设播量为6.0粒/穴，三叶一心期进行间苗定苗确定穴苗数，低苗处理为1.9苗/穴，高苗处理为3.8苗/穴；机插于3月27日采用钵形塑料软盘旱育秧，落谷量为80.0 g/盘，于4月26日选用洋马六行插秧机移栽，移栽时叶龄3.5～4.5叶，秧龄30 d，设定行穴距为30.0 cm×16.0 cm，低苗处理设栽插苗数为2.0苗/穴，高苗处理设栽插苗数为4.0苗/穴，活棵后调查穴苗数，低苗处理为1.8苗/穴，高苗处理为3.9苗/穴；手插于3月27日播种，秧苗旱育，4月26日移栽，移栽时叶龄5.5～6.0叶，秧龄30 d，单株平均带分蘖2.0个，设定栽插行穴距为30.0 cm×17.0 cm，低苗处理设栽插苗数为1.0苗/穴，高苗处理设栽插苗数为2.0苗/穴。机直播与机插、手插小区间用塑料薄膜包埂隔离，保证可以进行单独肥水管理。施纯氮180 kg/hm^2，按基蘖肥∶穗肥=6∶4，其中基肥∶分蘖肥=2∶1，促花肥∶保花肥=5∶5的比例施用。按N∶P_2O_5∶K_2O=2∶1∶2确定磷、钾肥施用量，磷肥作基肥一次性施用，钾肥按基肥∶穗肥（促花肥）=5∶5的比例施用。水分管理及病虫草害防治等相关栽培措施均按照各自高产栽培要求实施。

1.3　测定项目与方法

每小区定点20穴分别于拔节期、抽穗期和成熟期调查茎蘖数。按平均茎蘖法取样5穴（小区边行不取），测定叶片、茎鞘和穗（抽穗后）干物重。使用CT410旋风式样品磨分器官进行粉样，过0.25 mm筛。采用FOSS8400全自动凯氏定氮仪测定各器官及籽粒全氮含量。使用$K_2Cr_2O_7$容量法[21]测定各器官及籽粒全碳含量。

植株全碳含量（g/kg）=（单位面积叶片干物重×叶片全碳含量+单位面积茎鞘干物重×茎鞘全碳含量+单位面积穗干物重×穗全碳含量）/单位面积全株地上部（茎、叶和穗）干物重。

碳氮比为全碳含量与全氮含量的比值。

1.4　氮素吸收与利用效率的计算

参照吴文革等[22]方法计算氮素吸收与利用效率。

植株含氮量（g/kg）=（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×1000

地上部氮素积累量（kg/hm^2）=各时期单位面积地上部各器官（叶片、茎鞘、穗）干物重×地上部各器官（叶片、茎鞘、穗）含氮量

地上部氮素积累总量（kg/hm^2）=成熟期单位面积地上部各器官（叶片、茎鞘、穗）氮素积累量之和

氮转运量（kg/hm^2）=抽穗期某器官氮积累量-成熟时该器官氮积累量

氮表观转运率（%）=叶片（茎鞘）氮转运量/抽穗期叶片（茎鞘）氮积累量×100

氮素转运贡献率（%）=（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（kg/kg）=成熟期单位面积全株地上部（茎、叶和穗）干物重/地上部氮素积累总量

氮素稻谷生产效率（kg/kg）=籽粒产量/地上部氮素积累总量

百千克籽粒吸氮量（kg）=植株地上部氮素积累总量/稻谷产量×100

氮素收获指数（%）=成熟期籽粒氮积累量/全株地上部分氮积累总量×100

氮肥偏生产力（kg/kg）=稻谷产量/施氮量

1.5 数据处理

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

2 结果与分析

2.1 播栽方式对杂交稻植株氮素积累及氮素生产效率的影响

由表1可见,播栽方式对植株含氮量、植株氮素积累量、氮素生产效率和氮素收获指数均产生极显著影响。不同播栽方式水稻植株含氮量均随生育进程逐渐降低,植株氮素积累量均随着生育进程不断增加,但不同生育时期水稻植株含氮量和氮素积累量在不同播栽方式间的表现不同。机直播和机插氮素干物质生产效率分别比手插低 6.62% 和 1.67%。播栽方式对氮素稻谷生产效率和氮素收获指数的差异表现为机直播 < 手插 < 机插。穴苗数对拔节期和抽穗期植株含氮量、拔节期植株氮素积累量、氮素稻谷生产效率以及氮素收获指数有显著或极显著影响,且播栽方式和穴苗数互作对各生育期植株含氮量、植株氮素积累量以及氮素生产效率和氮素收获指数均有极显著影响。机直播高苗处理在拔节期和成熟期具有较高的植株含氮量,机插高苗和低苗处理的植株含氮量在抽穗期高于其他栽培方式;手插低苗处理、机直播高苗处理在抽穗期和成熟期均有较高的植株氮素积累量。机直播和机插氮素干物质生产效率和氮素收获指数均随穴苗数增加而降低,手插高苗处理的氮素干物质生产效率和氮素稻谷生产效率均显著高于其低苗处理。

表1 播栽方式对植株氮素积累及氮素生产效率的影响

Table 1 Effect of sowing and transplanting methods on nitrogen accumulation and production efficiency of rice

处理 Treatment	植株含氮量 (g/kg) Plant N content			植株氮素积累量 (kg/hm²) N accumulation			氮素生产效率(kg/kg) N productivity		氮收获指数 N harvest index (%)
	拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity	拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity	干物质 Dry matter	稻谷 Grain	
机直播 MDS									
低苗 LSNH	24.16 b	14.77 a	11.68 b	73.42 b	159.91 b	211.32 a	85.61 a	32.49 b	62.04 a
高苗 HSNH	26.81 a	14.39 b	12.25 a	81.82 a	194.37 a	205.61 a	81.65 b	34.17 a	56.41 b
机插 MT									
低苗 LSNH	23.75 a	16.96 a	10.91 b	89.83 a	171.51 a	175.70 b	91.65 a	44.89 a	63.20 a
高苗 HSNH	22.72 b	16.83 a	11.84 a	91.51 a	171.39 a	197.51 a	84.47 b	44.79 a	62.07 a
手插 AT									
低苗 LSNH	23.33 a	16.57 a	11.79 a	76.07 b	216.41 a	216.97 a	84.83 b	34.76 b	61.98 a
高苗 HSNH	20.93 b	14.66 b	10.61 b	102.48 a	183.40 b	187.36 b	94.28 a	51.41 a	63.09 a
平均 Mean									
机直播 MDS	25.49 a	14.58 c	11.96 a	77.62 b	177.14 b	208.46 a	83.63 b	33.33 b	59.22 b
机插 MT	23.24 b	16.90 a	11.37 b	90.67 a	171.45 c	186.61 b	88.06 a	44.84 a	62.64 a
手插 AT	22.13 c	15.62 b	11.20 b	89.27 a	199.91 a	202.16 a	89.56 a	43.08 a	62.54 a
					F 值 *F*-value				
播栽方式 STM	394.99**	582.06**	84.49**	23.25**	130.08**	25.49**	84.91**	30.39**	13.17**
穴苗数 SNH	7.09*	211.21**	4.02	50.29**	0.08	3.07	2.15	21.89**	9.30*
STM × SNH	231.04**	100.56**	166.41**	18.52**	163.18**	33.33**	173.81**	16.73**	10.29**

注(Note): MDS—Mechanical direct seeding; MT—Mechanical transplanting; AT—Artifical transplanting; LSNH—Low seedling number per hill; HSNH—High seedling number per hill; STM—Sowing and transplanting methods; SNH—Seedling number per hill. 同列数据后不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著 Values followed by different small letters in a column are significantly different at $P<0.05$. * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著 Mean significantly differences at the 0.05 and 0.01 levels.

2.2　播栽方式对杂交稻各器官氮素积累的影响

不同生育时期水稻叶片、茎鞘和穗氮积累量受播栽方式影响极显著（表2）。各生育时期叶片和茎鞘氮素积累量在不同播栽方式间的差异不同，拔节期表现为机直播低于机插和手插，抽穗期则为机插＜机直播＜手插，成熟期表现为机直播显著高于机插和手插。穗氮素积累量在抽穗期和成熟期均表现为机直播和机插低于手插。穴苗数对杂交稻拔节期和抽穗期叶片、茎鞘氮素积累量及成熟期穗氮素积累量有极显著影响，穴苗数和播栽方式互作对各生育期各器官氮素积累量均有极显著影响，播栽方式配合穴苗数对各生育期不同器官氮素积累量产生的影响不同。机直播叶片和茎鞘氮素积累量在抽穗期和成熟期均随穴苗数增加而增加；机插成熟期高苗处理的叶片、茎鞘和穗氮素积累量均显著高于其低苗处理，同时机插高苗处理并能在拔节期保持较高的叶片氮素积累量；手插叶片、茎鞘和穗氮素积累量在成熟期均随穴苗数增加而显著降低。

表 2　播栽方式对水稻各器官氮素积累量的影响（kg/hm²）

Table 2　Effect of sowing and transplanting methods on nitrogen accumulation of rice

处理 Treatment	叶 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
机直播 MDS								
低苗 LSNH	44.06 b	80.90 b	43.17 b	29.37 a	62.38 b	37.05 a	16.62 b	131.10 a
高苗 HSNH	63.63 a	106.35 a	48.12 a	18.20 b	68.15 a	41.66 a	19.87 a	115.82 b
机插 MT								
低苗 LSNH	57.35 b	90.60 a	35.74 b	32.48 a	58.78 a	28.94 b	22.13 a	111.02 b
高苗 HSNH	70.50 a	87.27 a	40.84 a	21.01 b	60.65 a	33.94 a	23.47 a	122.74 a
手插 AT								
低苗 LSNH	44.46 b	97.59 a	41.39 a	31.61 b	86.67 a	41.18 a	32.15 a	134.39 a
高苗 HSNH	65.36 a	95.35 a	36.18 b	37.12 a	59.96 b	33.19 b	28.10 b	117.99 b
平均 Mean								
机直播 MDS	53.84 b	93.62 a	45.64 a	23.78 b	65.27 b	39.36 a	18.25 c	123.46 a
机插 MT	63.92 a	88.93 b	38.29 b	26.75 b	59.72 c	31.44 b	22.80 b	116.88 b
手插 AT	54.91 b	96.47 a	38.79 b	34.36 a	73.31 a	37.19 ab	30.13 a	126.19 a
F 值 *F*-value								
播栽方式 STM	46.19**	15.04**	39.69**	80.39**	205.06**	12.96**	274.10**	8.44**
穴苗数 SNH	360.84**	34.20**	4.59	65.93**	133.05**	0.17	0.18	12.24**
STM×SNH	6.45**	69.11**	20.51**	63.75**	344.75**	10.57**	27.38**	23.33**

注（Note）：MDS—Mechanical direct seeding；MT—Mechanical transplanting；AT—Artifical transplanting；LSNH—Low seedling number per hill；HSNH—High seedling number per hill；STM—Sowing and transplanting methods；SNH—Seedling number per hill. 同列数据后不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著 Values followed by different small letters in a column are significantly different at $P<0.05$. ＊和＊＊分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著 Mean significantly differences at the 0.05 and 0.01 levels.

2.3　播栽方式对杂交稻阶段氮素积累量和积累速率的影响

由表3可以看出，各处理拔节-抽穗阶段氮素积累速率最大，抽穗-成熟阶段氮素积累速率较小。播栽方式对水稻不同生育阶段的氮素积累量及积累速率存在极显著影响，机直播在播种-拔节阶段氮素积累量分别比机插和手插低 13.99% 和 13.06%，同时该阶段所占氮素积累总量的比例分别比机插和手插低 11.46 个百分点和 7.61 个百分点，因其少了移栽返青期，缩短了播种-拔节生育时间，因而其氮

素积累速率最高;机直播和机插在拔节-抽穗阶段氮素积累量和积累速率均显著低于手插,而在抽穗-成熟阶段的氮素积累量和积累速率反而显著高于手插。穴苗数及其与栽植方式互作对播种-拔节阶段和拔节-抽穗阶段氮素积累量和积累速率产生极显著影响。播种-拔节阶段各处理氮素积累量和积累速率均随穴苗数增加而增加;机直播高苗处理在拔节-抽穗阶段氮素积累量和积累速率均显著高于其低苗处理,机插和手插氮素积累量、积累速率及所占氮素积累总量的比例均随穴苗数增加而降低。抽穗-成熟阶段氮素积累量、积累速率受插栽方式和穴苗数互作极显著影响,机直播氮素积累量和积累速率随穴苗数增加而显著降低,而机插和手插氮素积累量、积累速率及所占氮素积累总量的比例均随穴苗数增加而增加。

表3 播栽方式对水稻不同生育阶段氮素积累量的影响

Table 3 Effect of sowing and transplanting methods on nitrogen accumulation in different growth periods of rice

处理 Treatment	播种-拔节 Sowing-jointing			拔节-抽穗 Jointing-heading			抽穗-成熟 Heading-maturity		
	积累量 NA (kg/hm^2)	积累速率 NAR [$kg/(hm^2 \cdot d)$]	比例 RTNA (%)	积累量 NA (kg/hm^2)	积累速率 NAR [$kg/(hm^2 \cdot d)$]	比例 RTNA (%)	积累量 NA (kg/hm^2)	积累速率 NAR [$kg/(hm^2 \cdot d)$]	比例 RTNA (%)
机直播 MDS									
低苗 LSNH	73.42 b	1.27 b	34.74	86.49 b	2.06 b	40.93	51.42 a	1.43 a	24.33
高苗 HSNH	81.82 a	1.41 a	39.80	112.54 a	2.68 a	54.74	11.24 b	0.31 b	5.47
机插 MT									
低苗 LSNH	89.83 a	1.20 a	51.13	81.68 a	1.94 a	46.49	4.19 b	0.11 b	2.39
高苗 HSNH	90.67 a	1.22 a	46.33	79.88 a	1.90 a	40.44	26.12 a	0.71 a	13.23
手插 AT									
低苗 LSNH	76.07 b	1.06 b	35.06	140.34 a	3.51 a	64.68	0.56 a	0.01 a	0.26
高苗 HSNH	102.48 a	1.42 a	54.70	80.93 b	2.02 b	43.19	3.96 a	0.10 a	2.11
平均 Mean									
机直播 MDS	77.62 b	1.34 a	37.27	99.52 b	2.37 b	47.84	31.33 a	0.87 a	14.89
机插 MT	90.25 a	1.21 b	48.73	80.78 c	1.92 c	43.47	15.16 b	0.41 b	7.81
手插 AT	89.28 a	1.24 b	44.88	110.64 a	2.77 a	53.94	2.26 c	0.06 c	1.18
				F 值 *F*-value					
播栽方式 STM	23.25**	9.99**		55.39**	70.47**		28.29**	31.67**	
穴苗数 SNH	50.29**	52.01**		25.05**	27.25**		2.45	3.02	
STM×SNH	18.52**	16.67**		115.58**	114.93**		33.89**	36.76**	

注(Note): MDS—Mechanical direct seeding; MT—Mechanical transplanting; AT—Artifical transplanting; LSNH—Low seedling number per hill; HSNH—High seedling number per hill; STM—Sowing and transplanting methods; SNH—Seedling number per hill; NA—Nitrogen accumulation; NAR—Nitrogen accumulation rate; RTNA—Ratio to total nitrogen accumulation. 同列数据后不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著 Values followed by different small letters in a column are significantly different at $P<0.05$. *和**分别表示在0.05和0.01水平上差异显著 Mean significantly differences at the 0.05 and 0.01 levels.

2.4 播栽方式对杂交稻氮素分配与转运特性的影响

2.4.1 水稻氮素分配 不同播栽方式对氮素在水稻植株不同器官中的分配特性有明显影响(表4)。整体来看,随生育进程推进,水稻叶片氮素分配比例呈逐渐下降的趋势,抽穗前各器官氮素分配比例表现为叶片>茎鞘,抽穗后则为叶片>穗>茎鞘。机直播抽穗期和成熟期叶片、拔节期和成熟期茎鞘的氮

素分配比例均高于手插,机插拔节期叶片、抽穗期穗及成熟期茎鞘的氮素分配比例均显著高于手插,但机直播和机插成熟期氮素向穗的分配能力显著低于手插,分别比手插低 4.28% 和 2.04%。穴苗数及其与播栽方式互作对各器官氮素分配比例有显著或极显著影响。机直播高苗处理抽穗期叶片和成熟期茎鞘氮素分配比例均高于其他处理,机插高苗处理能显著提高拔节期叶片氮素分配比例,并在抽穗期和成熟期保持较高的穗氮素分配比例。手插高苗处理在各生育时期保持较高叶片氮素分配比例的同时,提高了成熟期氮素向穗的分配能力。由此可见,通过播栽方式和穴苗数互作能有效调控氮素在各器官的分配比例。

表 4　播栽方式对水稻植株氮素分配的影响(%)

Table 4　Effect of sowing and transplanting methods on nitrogen distribution of rice

处理 Treatment	叶 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
机直播 MDS								
低苗 LSNH	67.01 b	53.02 b	41.47 b	32.99 a	20.51 a	20.41 b	26.47 a	38.12 a
高苗 HSNH	68.11 a	55.15 a	42.46 a	31.89 b	18.77 b	22.29 a	26.08 a	35.25 b
机插 MT								
低苗 LSNH	70.17 b	50.76 a	43.10 a	29.83 a	19.30 b	19.49 b	29.95 a	37.41 b
高苗 HSNH	72.25 a	50.61 b	40.36 b	27.75 b	20.07 a	21.96 a	29.32 b	37.68 a
手插 AT								
低苗 LSNH	68.25 b	49.13 b	41.42 b	31.75 a	22.03 a	21.01 a	28.84 b	37.57 b
高苗 HSNH	70.99 a	53.32 a	42.11 a	29.01 b	17.39 b	18.82 b	29.29 a	39.08 a
平均 Mean								
机直播 MDS	67.56 c	54.08 a	41.97 a	32.44 a	19.64 a	21.35 a	26.27 c	36.68 c
机插 MT	71.21 a	50.68 c	41.73 a	28.79 c	19.69 a	20.72 b	29.63 a	37.54 b
手插 AT	69.62 b	51.23 b	41.76 a	30.38 b	19.71 a	19.91 c	29.06 b	38.32 a
				F 值 *F*-value				
播栽方式 STM	509.56**	928.91**	1.96	511.42**	0.46	118.26**	776.64**	66.13**
穴苗数 SN	443.67**	884.52**	11.26**	445.29**	1000.88**	88.15**	6.63*	9.64*
STM × SNH	26.20**	326.84**	127.25**	26.30**	702.60**	367.61**	19.43**	124.86**

注(Note): MDS—Mechanical direct seeding; MT—Mechanical transplanting; AT—Artifical transplanting; LSNH—Low seedling number per hill; HSNH—High seedling number per hill; STM—Sowing and transplanting methods; SNH—Seedling number per hill. 同列数据后不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著 Values followed by different small letters in a column are significantly different at $P<0.05$. * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著 Mean significantly differences at the 0.05 and 0.01 levels.

2.4.2 水稻氮素转运　由表 5 可知,水稻叶片氮素转运量和表观转运率均明显高于茎鞘。叶片和茎鞘氮素的运转均受播栽方式极显著影响,不同播栽方式水稻植株叶片和茎鞘氮素转运量、氮素表观转运率以及氮素转运贡献率均表现为: 机直播 < 机插 < 手插。同时播栽方式与穴苗数互作对杂交稻叶片和茎鞘氮素的运转产生明显的影响。机直播配合高穴苗数以及机插配合低穴苗数处理能显著提高叶片氮素转运量和氮素表观转运率,从而提高氮素转运贡献率;手插配合低穴苗数处理能提高杂交稻氮素转运贡献率,促进穗部氮增加。因而合理选择播栽方式并配套适宜的农艺技术措施对提高叶片和茎鞘氮素转运量及氮素表观转运率,促进穗部氮的增加具有重要作用。不同播栽方式及不同穴苗数处理对氮

素偏生产力和百千克籽粒吸氮量存在极显著影响，且存在极显著互作效应。不同播栽方式氮素偏生产力表现为机直播 < 机插 < 手插，且氮素偏生产力有随穴苗数增加而增加的趋势，机插和手插高苗处理在各栽培方式中表现较高的氮素偏生产力。不同播栽方式百千克籽粒吸氮量表现为机直播 > 手插 > 机插。

表5 播栽方式对水稻植株氮素运转的影响

Table 5 Effect of sowing and transplanting methods on nitrogen translocation of rice

处理 Treatment	氮素转运量 NT (kg/hm²)		氮素表观转运率 ANTR (%)		氮转运贡献率 NTCR (%)	穗部氮增加量 N increase in panicle (kg/hm²)	氮偏生产力 PFPAN (kg/kg)	百公斤籽粒吸氮量 100 kg-NU (kg)
	叶片 Leaf	茎鞘 Stem-sheath	叶片 Leaf	茎鞘 Stem-sheath				
机直播 MDS								
低苗 LSNH	37.73 b	25.33 a	46.64 b	40.61 a	48.15 b	114.48 a	38.12 b	3.08 a
高苗 HSNH	58.23 a	26.49 a	54.81 a	38.99 a	73.24 a	95.95 b	38.96 a	2.93 a
机插 MT								
低苗 LSNH	54.86 a	29.84 a	60.47 a	50.83 a	76.26 a	88.90 a	43.79 b	2.23 a
高苗 HSNH	46.43 b	26.71 b	53.21 b	44.08 b	59.97 b	99.27 a	49.08 a	2.23 a
手插 AT								
低苗 LSNH	56.19 a	45.48 a	57.52 b	52.69 a	75.70 a	102.23 a	41.75 b	2.89 a
高苗 HSNH	59.16 a	26.77 b	62.09 a	44.95 b	73.28 a	89.89 b	52.96 a	1.98 b
平均 Mean								
机直播 MDS	47.98 b	25.91 b	50.72 b	39.80 b	60.69 c	105.22 a	38.54 b	3.00 a
机插 MT	50.64 b	28.27 b	56.84 a	47.45 a	68.11 b	94.08 b	46.44 a	2.23 b
手插 AT	57.67 a	36.12 a	59.80 a	48.82 a	74.49 a	96.06 b	47.35 a	2.43 b
				F 值 *F*-value				
播栽方式 STM	13.64**	37.12**	26.37**	10.91**	14.19**	9.93**	37.04**	83.18**
穴苗数 SNH	10.23**	46.30**	3.08	9.97*	1.01	9.85*	39.54**	48.09**
STM × SNH	28.83**	35.48**	20.01**	1.24	33.00**	16.28**	10.69**	31.15**

注(Note)：MDS—Mechanical direct seeding；MT—Mechanical transplanting；AT—Artifical transplanting；LSNH—Low seedling number per hill；HSNH—High seedling number per hill；STM—Sowing and transplanting methods；SNH—Seedling number per hill；NT—Nitrogen translocation；ANTR—Apparent nitrogen translocation rate；NTCR—N translocate contribution rate；PFPN—Partial factor productivity of N；NU—N uptake. 同列数据后不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著 Values followed by different small letters in a column are significantly different at $P<0.05$. * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著 Mean significantly differences at the 0.05 and 0.01 levels.

2.5 播栽方式对杂交稻全碳含量及碳氮比的影响

2.5.1 植株全碳含量及碳氮比 由表6可知，水稻植株全碳含量均随生育进程逐渐降低，拔节期最高，成熟期最低。各处理均在抽穗期保持较高的植株碳氮比。各生育时期水稻植株全碳含量及植株碳氮比均受播栽方式显著或极显著影响。拔节期植株全碳含量及植株碳氮比均表现为机直播 < 机插 < 手插，抽穗期表现为机直播高于机插和手插，成熟期反而表现为机插明显低于机直播和手插。穴苗数及其与播栽方式互作对拔节期和抽穗期植株全碳含量及植株碳氮比产生显著或极显著影响。机直播高苗处理能有效提高抽穗期和成熟期植株全碳含量，且抽穗期植株碳氮比高于其他处理。机插低苗处理植株全碳含量在各生育期内均高于其高苗处理；手插低苗处理的植株全碳含量在各生育期内均高于其高苗处理，但协调植株体内碳氮比的能力显著低于其高苗处理。因而通过选择合理的播栽方式，并配合与之相适应的穴苗数能有效提高植株全碳含量，协调植

表 6　播栽方式对水稻植株全碳含量和碳氮比的影响

Table 6　Effect of sowing and transplanting methods on carbohydrate content and C/N of rice

处理 Treatment	植株全碳含量 Plant C content (g/kg)			植株碳氮比 Plant C/N		
	拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity	拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity
机直播 MDS						
低苗 LSNH	443.42 a	384.24 b	192.22 a	18.35 a	26.01 b	16.45 a
高苗 HSNH	427.08 b	391.50 a	198.74 a	15.93 b	27.20 a	16.23 a
机插 MT						
低苗 LSNH	447.13 a	393.46 a	187.32 a	18.82 a	23.20 a	17.17 a
高苗 HSNH	426.79 b	377.11 b	176.78 a	18.78 a	22.40 b	14.93 b
手插 AT						
低苗 LSNH	449.09 a	374.16 a	195.04 a	19.25 b	22.58 b	16.55 b
高苗 HSNH	435.94 b	370.66 a	191.25 a	20.83 a	25.28 a	18.04 a
平均 Mean						
机直播 MDS	435.25 b	387.87 a	195.48 a	17.14 c	26.61 a	16.34 ab
机插 MT	436.96 b	385.28 a	182.05 b	18.80 b	22.80 c	16.05 b
手插 AT	442.52 a	372.41 b	193.15 a	20.04 a	23.93 b	17.29 a
			F 值 *F*-value			
播栽方式 STM	18.67**	34.79**	10.82**	1208.43**	716.53**	6.87*
穴苗数 SNH	267.79**	6.70*	1.07	36.87**	149.82**	1.29
STM × SNH	4.20*	17.72**	3.88	581.48**	144.30**	14.12**

注(Note): MDS—Mechanical direct seeding; MT—Mechanical transplanting; AT—Artifical transplanting; LSNH—Low seedling number per hill; HSNH—High seedling number per hill; STM—Sowing and transplanting methods; SNH—Seedling number per hill. 同列数据后不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著 Values followed by different small letters in a column are significantly different at $P<0.05$. * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著 Mean significantly differences at the 0.05 and 0.01 levels.

株碳氮比。

2.5.2 各器官全碳含量　由表 7 可知,不同播栽方式对杂交稻叶片、茎鞘和穗全碳含量有明显影响。除成熟期叶片全碳含量受播栽方式影响不显著外,其它时期杂交稻叶片、茎鞘和穗全碳含量受播栽方式显著或极显著影响。机直播叶片全碳含量在拔节期和抽穗期显著低于机插和手插,机插茎鞘全碳含量在拔节期和成熟期显著低于机直播和手插,手插茎鞘全碳含量在抽穗期分别比机直播和机插低 1.67% 和 1.92%。机直播和机插显著提高了成熟期穗部全碳含量,比手插分别高 7.13% 和 2.05%。杂交稻叶片、茎鞘和穗全碳含量受穴苗数及其与播栽方式互作效应显著或极显著影响。机直播和手插高苗处理的叶片和茎鞘全碳含量在拔节期和成熟期均显著低于低苗处理;机插高苗处理叶片和茎鞘含碳量在各生育期内均显著低于低苗处理,机插高苗处理反而提高了抽穗期和成熟期穗部全碳含量,分别比其低苗处理高 3.79% 和 0.06%。同时水稻不同器官积累碳素的能力存在差异,在抽穗前表现为叶片 > 茎鞘,抽穗后则表现为茎鞘全碳含量低于叶片和穗全碳含量。

2.5.3 各器官碳氮比　从图 1 中可以看出,不同播栽方式杂交稻体内叶片碳氮比随生育进程的推进而呈逐渐上升的趋势,叶片碳氮比表现为: 机直播 < 机插 < 手插,高低穴苗数叶片碳氮比变化趋势一致,机直播和机插高苗处理的叶片碳氮比在成熟期显著

低于其低苗处理,而手插高苗处理的叶片碳氮比在成熟期则高于其低苗处理,差异达到显著水平。除机直播高苗处理茎鞘碳氮比在成熟期略低于抽穗期外,其余各处理表现为随生育进程的推进,茎鞘碳氮比呈逐渐上升的趋势,机直播和机插高苗处理的茎鞘碳氮比在成熟期显著低于其低苗处理,而手插高苗处理的茎鞘碳氮比在各生育期内均显著高于其低苗处理。播栽方式对杂交稻穗部碳氮比的分配有明显影响,在抽穗期不同播栽方式穗部碳氮比表现为:高苗处理 > 低苗处理;机直播和机插高苗处理穗部碳氮比在成熟期显著低于其低苗处理,而手插高苗处理穗部碳氮比则显著高于其低苗处理。

表7 播栽方式对水稻各器官全碳含量的影响(%)

Table 7 Effect of sowing and transplanting methods on carbohydrate content of rice

处理 Treatment	叶 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
机直播 MDS								
低苗 LSNH	460.29 a	459.50 b	441.97 a	431.01 a	425.45 b	413.24 a	443.56 b	507.76 a
高苗 HSNH	437.99 b	473.64 a	435.63 b	409.13 b	429.75 a	405.57 b	461.72 a	489.31 b
机插 MT								
低苗 LSNH	471.00 a	484.01 a	451.09 a	429.21 a	435.68 a	414.65 a	456.28 b	474.76 a
高苗 HSNH	459.47 b	474.10 b	424.51 b	384.44 b	421.63 b	386.39 b	473.56 a	475.06 a
手插 AT								
低苗 LSNH	479.63 a	493.24 a	450.94 a	429.03 a	420.05 a	421.71 a	464.69 a	469.92 a
高苗 HSNH	457.53 b	472.78 b	428.79 b	420.43 a	420.82 a	405.33 b	455.20 a	460.80 b
平均 Mean								
机直播 MDS	449.14 b	466.57 b	438.80 a	420.07 b	427.60 a	409.40 b	452.64 c	498.53 a
机插 MT	465.24 a	479.05 a	437.80 a	406.83 c	428.65 a	400.52 c	464.92 a	474.91 b
手插 AT	468.58 a	483.01 a	439.86 a	424.73 a	420.44 b	413.52 a	459.94 b	465.36 c
				F 值 *F*-value				
播栽方式 STM	73.22**	18.65**	0.87	109.47**	51.45**	64.93**	16.03**	375.95**
穴苗数 SNH	176.72**	5.56*	204.76**	599.00**	17.25**	335.31**	23.59**	76.86**
STM × SNH	6.43*	19.93**	22.91**	106.25**	60.92**	39.28**	25.95**	28.32**

注(Note): MDS—Mechanical direct seeding; MT—Mechanical transplanting; AT—Artifical transplanting; LSNH—Low seedling number per hill; HSNH—High seedling number per hill; STM—Sowing and transplanting methods; SNH—Seedling number per hill. 同列数据后不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著 Values followed by different small letters in a column are significantly different at $P<0.05$. * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著 Mean significantly differences at the 0.05 and 0.01 levels.

3 讨论

3.1 播栽方式对杂交籼稻氮素积累及生产利用效率的影响

氮素是影响作物产量形成的关键营养元素,不同种植方式水稻氮素吸收利用有各自鲜明的特征[16]。梁天锋等[23]研究表明,水稻植株吸收的氮肥数量及其体内的分配与土壤耕作方式密切相关。水稻不同器官氮素积累量受栽培密度的影响[24],氮素积累总量随种植密度的增加而增加[25]。王绍华等[26]研究表明,适当增加穴苗数是提高水稻氮素利用效率、减少施氮量的有效方法。本研究结果表明,播栽方式及其与穴苗数互作对各生育期植株含氮量、植株氮素积累量以及氮素生产效率和氮素收获指数有极显著影响。杂交稻在不同机械化播栽方式下具有不同的氮素积累和利用特性。机直播显著

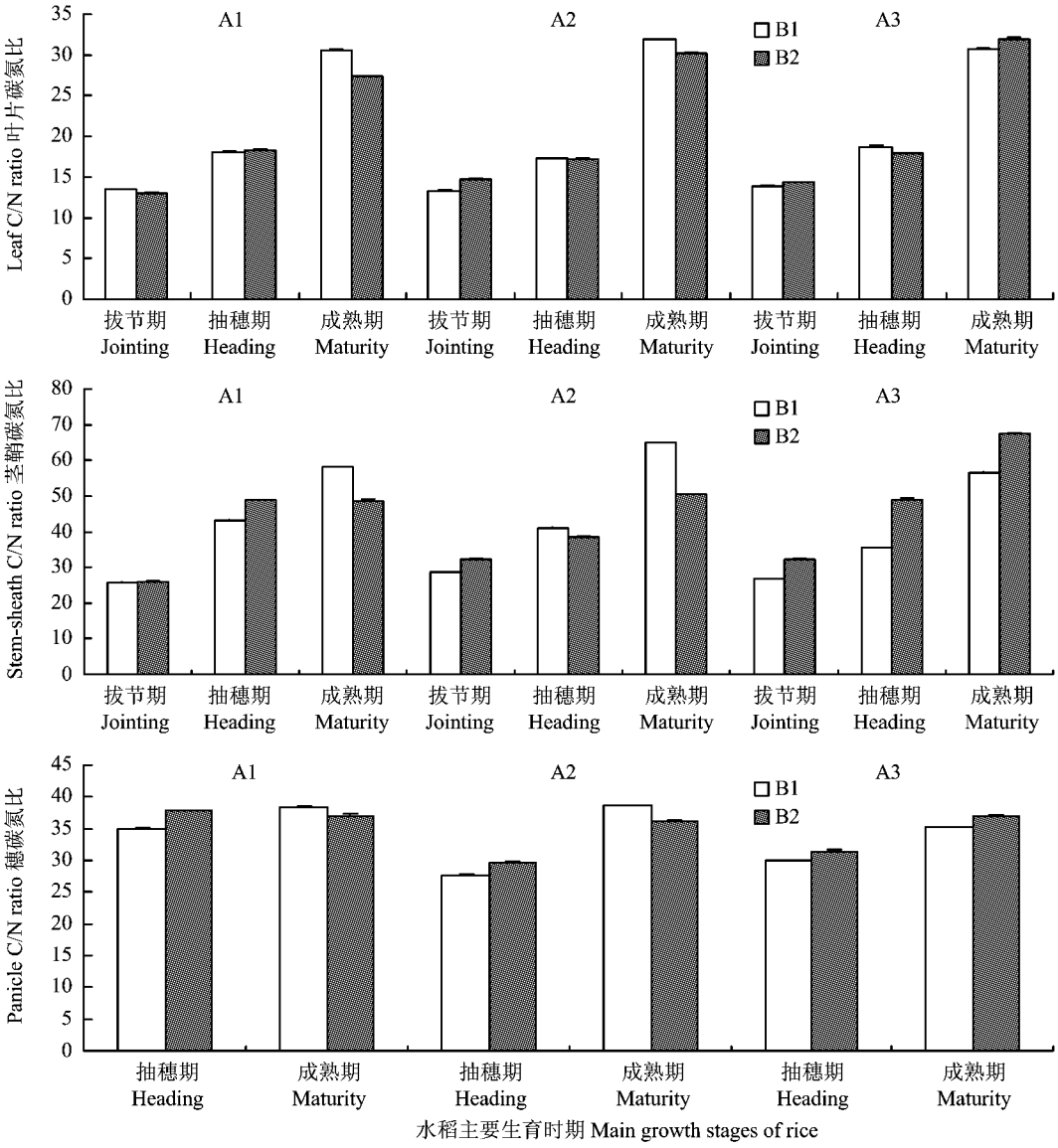

图 1　播栽方式对水稻各器官碳氮比的影响

Fig. 1　Effect of sowing and transplanting methods on C/N of rice organs

[注(Note)：A1—机直播 Mechanical direct seeding；A2—机插 Mechanical transplanting；A3—手插 Artificial transplanting；B1—低穴苗数 Low seedling number per hill；B2—高穴苗数 High seedling number per hill.]

提高了水稻拔节期和成熟期植株含氮量，同时提高了成熟期各器官及植株氮素积累能力；机插植株含氮量在抽穗期显著高于手插，并能在拔节期保持较高的植株氮素积累量；同时通过播栽方式和穴苗数互作能有效调控氮素在各器官的分配比例。霍中洋等[16]研究指出，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。本研究结果表明，与手插相比，机直播显著降低了杂交稻氮素干物质生产效率、氮素稻谷生产效率及氮素偏生产力，而机插氮素稻谷生产效率和氮素收获指数略有增加。不同播栽方式百千克籽粒吸氮量表现为机直播 > 手插 > 机插。

3.2　播栽方式对杂交籼稻全碳含量和碳氮比的影响

植物体内碳含量的高低受植物种类、生长期、器官以及生长环境条件等多因素的影响[27]。碳氮代谢是植物生长发育必不可少的代谢之一，而碳氮比则反映了植株碳氮代谢的相对强弱，对调节植株生长有着极其重要的作用[20]。碳氮代谢的协调程度不仅影响其生长发育进度，而且关系到产量的高低和品质的优劣[27-29]。本研究结果表明，不同生育

时期水稻植株全碳含量及植株碳氮比均受播栽方式显著或极显著影响。机械化播栽方式显著降低了拔节期植株全碳含量及植株碳氮比,机插在成熟期具有较低的植株碳素积累能力,但机直播在抽穗期和成熟期保持较高的植株全碳含量和植株碳氮比。不同机械化播栽方式碳素积累能力的差异可能与不同器官积累碳素的能力有关,有研究指出,水稻不同器官积累碳素的能力存在差异,主要与水稻不同器官的功能差异有关[27]。王勋等[30]研究认为,穗数和颖花数对水稻营养器官中非结构性碳含量有明显的调控作用,增加穗数可降低非结构性碳含量。本研究结果表明,机直播高苗处理能有效提高抽穗期和成熟期植株全碳含量,且抽穗期植株碳氮比明显高于其他处理。机插低苗处理植株全碳含量在各生育期内均高于其高苗处理。通过选择合理的播栽方式,并配合与之相适应的穴苗数能有效提高植株全碳含量,协调植株碳氮比。

3.3 机械化播栽技术氮素转运的特点及协调碳氮比的途径

机械化播栽技术能确保水稻稳产,并以较少的投入和较高的工效,适当提高水稻产量,是农田作业机械化的重要环节[31]。胡剑锋等[32]研究指出,增加氮肥用量能提高长秧龄机插稻的氮素积累速率和氮素积累总量,对其氮肥利用效率有先促后抑的作用。机直播和机插作为未来机械化发展的方向,其氮素积累和分配有各自的特点。本研究结果表明,机直播和机插显著提高了抽穗到成熟期水稻氮素积累量和积累速率,而机直播和机插成熟期氮素向穗部分配比例显著低于手插。氮素的转运是成熟期穗部氮素积累量的重要来源[11],机直播和机插叶片和茎鞘氮素转运量、氮素表观转运率以及氮素转运贡献率均低于手插。有研究认为,水稻产量的高低与氮素的吸收利用关系密切[33-34],碳氮代谢作为作物最基本的代谢途径,为作物生长发育提供物质基础[27],在很大程度上决定水稻产量[35]。本研究结果表明,机直播和机插成熟期高苗处理叶片、茎鞘和穗碳氮比均低于其低苗处理,表明机械化播栽方式与相应的农艺措施相配合,有利于杂交稻体内碳氮代谢的协调。氮肥运筹方式对水稻植株体的氮素代谢有着重要影响,将会改变 C /N 比值,从而影响植株的生理代谢[36],因而对于采用机械化播栽方式的杂交稻,氮肥要适期和适量施用,从而实现水稻的稳产高产。

4 结论

机械化播栽对杂交稻氮素吸收利用及碳氮比产生明显的影响,并在不同播栽方式下具有不同的氮素积累和利用特性。机直播显著提高了水稻拔节期和成熟期植株含氮量,同时提高了成熟期各器官及植株氮素积累能力,并在抽穗期和成熟期保持较高的植株全碳含量和植株碳氮比。机插植株含氮量在抽穗期显著高于手插,并能在拔节期保持较高的植株氮素积累量。同时通过播栽方式和穴苗数互作能有效调控氮素在各器官的分配比例。机直播和机插叶片和茎鞘氮素转运量、氮素表观转运率以及氮素转运贡献率均低于手插,机直播显著降低了杂交稻氮素干物质生产效率、氮素稻谷生产效率及氮素偏生产力,而机插氮素稻谷生产效率和氮素收获指数略有增加。不同播栽方式百千克籽粒吸氮量表现为机直播 > 手插 > 机插。机械化播栽方式与相应的农艺措施相配合,有利于杂交稻体内碳氮代谢的协调。

参 考 文 献:

[1] 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.

[2] Ohnishi M, Horie T, Homma K *et al*. Nitrogen management and cultivar effects on rice yield and nitrogen use efficiency in Northeast Thailand[J]. Field Crops Research, 1999, 64: 109-120.

[3] 李旭毅, 孙永健, 程洪彪, 等. 两种生态条件下氮素调控对不同栽培方式水稻干物质积累和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 773-781.
Li X Y, Sun Y J, Cheng H B *et al*. Effects of nitrogen regulation on dry matter accumulation and grain yield of rice under different cultivation models and two kinds of ecological conditions[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(4): 773-781.

[4] Liu L J, Sang D Z, Liu C L *et al*. Effects of real-time and site-specific nitrogen managements on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. Agricultural Sciences in China, 2003, 36(12): 1456-1461.

[5] 李旭毅, 孙永健, 程宏彪, 等. 氮肥运筹和栽培方式对杂交籼稻Ⅱ优498结实期群体光合特性的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(9): 1650-1659.
Li X Y, Sun Y J, Cheng H B *et al*. Effects of nitrogen application strategy and cultivation model on the performances of canopy apparent photosynthesis of indica hybrid rice Eryou 498 during

filling stage[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(9): 1650-1659.

[6] 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[J]. Pedosphere, 2009, 19: 681-691.

[7] Koutroubads S D, Ntanos D A. Genotypic differences for grain yield and nitrogen utilization in indica and japonica rice under mediterranean conditions[J]. Field Crops Research, 2003, 83: 251-260.

[8] 魏海燕, 张洪程, 杭杰, 等. 不同氮素利用效率基因型水稻氮素积累与转移的特性[J]. 作物学报, 2008, 34(1): 119-125.
Wei H Y, Zhang H C, Hang J *et al*. Characteristics of N accumulation and translocation in rice genotypes with different N use efficiencies[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(1): 119-125.

[9] Inthapanya P, Sipaseuth, Sihavong P *et al*. Genotype differences in nutrient uptake and utilisation for grain yield production of rainfed lowland rice under fertilised and non-fertilised conditions [J]. Field Crops Research, 2000, 65: 57-68.

[10] Cheng W G, Sakai H, Yagi K, Hasegawa T. Combined effects of elevated [CO_2] and high night temperature on carbon assimilation, nitrogen absorption, and the allocations of C and N by rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(9): 1174-1181.

[11] 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 you 498 under different ecological conditions [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(20): 4310-4325.

[12] 张自常, 李鸿伟, 曹转勤, 等. 施氮量和灌溉方式的交互作用对水稻产量和品质的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(1): 84-92.
Zhang Z C, Li H W, Cao Z Q *et al*. Effects of interaction between nitrogen rate and irrigation regime on grain yield and quality of rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(1): 84-92.

[13] 徐国伟, 杨立年, 王志琴, 等. 麦秸还田与实地氮肥管理对水稻氮磷钾吸收利用的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(8): 1424-1434.
Xu G W, Yang L N, Wang Z Q *et al*. Effects of wheat-residue application and site-specific nitrogen management on absorption and utilization of nitrogen, phosphorus, and potassium in rice plants[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(8): 1424-1434.

[14] 刘立军, 薛亚光, 孙小淋, 等. 水分管理方式对水稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 中国水稻科学, 2009, 23(3): 282-288.
Liu L J, Xue Y G, Sun X L *et al*. Effects of water management methods on grain yield and fertilizer-nitrogen use efficiency in rice [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2009, 23(3): 282-288.

[15] 梁天锋, 徐世宏, 刘开强, 等. 耕作方式对还田稻草氮素释放及水稻氮素利用的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(10): 3564-3570.
Liang T F, Xu S H, Liu K Q *et al*. Influence of tillage patterns on incorporated straw nitrogen release and nitrogen utilization of rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(10): 3564-3570.

[16] 霍中洋, 李杰, 张洪程, 等. 不同种植方式下水稻氮素吸收利用的特性[J]. 作物学报, 2012, 38(10): 1908-1919.
Huo Z Y, Li J, Zhang H C *et al*. Characterization of nitrogen uptake and utilization in rice under different planting methods [J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(10): 1908-1919.

[17] 李杰, 张洪程, 常勇, 等. 不同种植方式水稻高产栽培条件下的光合物质生产特征研究[J]. 作物学报, 2011, 37(7): 1235-1248.
Li J, Zhang H C, Chang Y *et al*. Characteristics of photosynthesis and matter production of rice with different planting methods under high-yielding cultivation condition[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(7): 1235-1248.

[18] San-oh Y, Mano Y, Ookawa T *et al*. Comparison of dry matter production and associated characteristics between direct-sown and transplanted rice plants in a submerged paddy field and relationships to planting patterns[J]. Field Crops Research, 2004, 87: 43-58.

[19] 刘利, 雷小龙, 王丽, 等. 种植方式对杂交稻枝梗及颖花分化及退化的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(8): 1434-1444.
Liu L, Lei X L, Wang L *et al*. Effect of planting methods on differentiation and retrogression of branches and spikelets of hybrid rice cultivar[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(8): 1434-1444.

[20] 薛利红, 杨林章, 范小晖. 基于碳氮代谢的水稻氮含量及碳氮比光谱估测[J]. 作物学报, 2006, 32(3): 430-435.
Xue L H, Yang L Z, Fan X H. Estimation of nitrogen content and C/N in rice leaves and plant with canopy reflectance spectra [J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(3): 430-435.

[21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 30-34.
Bao S D. Soil agrochemistry analysis [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000. 30-34.

[22] 吴文革, 张洪程, 陈烨, 等. 超级中籼杂交水稻氮素积累利用特性与物质生产[J]. 作物学报, 2008, 34(6): 1060-1068.
Wu W G, Zhang H C, Chen Y *et al*. Dry-matter accumulation and nitrogen absorption and utilization in middle-season indica super hybrid rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(6): 1060-1068.

[23] 梁天锋, 徐世宏, 刘开强, 等. 栽培方式对水稻氮素吸收利用与分配特性影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 20-26.
Liang T F, Xu S H, Liu K Q *et al*. Studies on influence of cultivation patterns on characteristics of nitrogen utilization and

distribution in rice[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(1): 20-26.

[24] 苏祖芳, 周培南, 许乃霞, 张亚洁. 密肥条件对水稻氮素吸收和产量形成的影响[J]. 中国水稻科学, 2001, 15(2): 281-286.
Su Z F, Zhou P N, Xu N X, Zhang Y J. Effects of nitrogen and planting density on N-absorption and yield of rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2001, 15(2): 281-286.

[25] 徐春梅, 周昌南, 郑根深, 等. 施氮量和栽培密度对超级早稻不同器官氮素积累与转运及其吸收利用率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2011, 1: 15-20.
Xu C M, Zhou C N, Zheng G S *et al*. Nitrogen accumulation and translocation in different organs and their absorption and utilization of nitrogen under different nitrogen fertilizer rates and densities of super early rice[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2011, 1: 15-20.

[26] 王绍华, 曹卫星, 丁艳锋, 等. 基本苗数和施氮量对水稻氮吸收与利用的影响[J]. 南京农业大学学报, 2003, 26(4): 1-4.
Wang S H, Cao W X, Ding Y F *et al*. Effects of planting density and nitrogen application rate on absorption and utilization of nitrogen in rice[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2003, 26(4): 1-4.

[27] 林瑞余, 蔡碧琼, 柯庆明, 等. 不同水稻品种产量形成过程的固碳特性研究[J]. 中国农业科学, 2006, 39(12): 2441-2448.
Lin R Y, Cai B Q, Ke Q M *et al*. Characteristics of carbon fixation in different rice cultivars during yield formation process [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(12): 2441-2448.

[28] 许德海, 宋祥甫. 早籼茎鞘和叶片碳氮含量与产量相关性的初步研究[J]. 中国水稻科学, 1986, 1(1): 71-73.
Xu D H, Song X F. Corelationship between the total sugar and nitrogen contents in sheaths plus and leaf blades, and the yields in early indica rice varieties [J]. Chinese Journal of Rice Science, 1986, 1(1): 71-73.

[29] 林贤青, 王雅芬, 朱德峰, 罗玉坤. 水稻茎鞘非结构性碳水化合物与穗部性状关系的研究[J]. 中国水稻科学, 2001, 15(2): 155-157.
Lin X Q, Wang Y F, Zhu D F, Luo Y K. The non-structural carbohydrate of the stem and sheath in relation to the panicle characteristics in rice [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2001, 15(2): 155-157.

[30] 王勋, 朱练峰, 戴廷波, 等. 不同环境和基因型条件下水稻植株的糖氮比变化及其与产量形成的关系[J]. 中国稻米, 2008, (6): 11-15.
Wang X, Zhu L F, Dai T B *et al*. Changes of plant C/N ratio during filling and their relationships with grain yield formation in rice genotypes under two environments[J]. China Rice, 2008, (6): 11-15.

[31] 罗锡文, 谢方平, 区颖刚, 等. 水稻生产不同栽植方式的比较试验[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 136-139.
Luo X W, Xie F P, Ou Y G *et al*. Experimental investigation of differernt transplanting methods in paddy production [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(1): 136-139.

[32] 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.

[33] Li G H, Xue L H, Gu W *et al*. Comparison of yield components and plant type characteristics of high-yield rice between Taoyuan, a 'special eco-site' and Nanjing, China [J]. Field Crops Research, 2009, 112: 214-221.

[34] Camargo F A O, Gianello C, Tedesco M J. Soil nitrogen availability evaluated by kinetic mineralization parameters [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2004, 35: 1293-1307.

[35] 阳剑, 时亚文, 李宙炜, 等. 水稻碳氮代谢研究进展[J]. 作物研究, 2011, 25(4): 383-387.
Yang J, Shi Y W, Li Z W *et al*. The recent progress of research on carbon and nitrogen metabolism in rice[J]. Crop Research, 2011, 25(4): 383-387.

[36] 林忠成, 李土明, 吴福观, 等. 基蘖肥与穗肥氮比例对双季稻产量和碳氮比的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2): 269-275.
Lin Z C, Li T M, Wu F G *et al*. Effects of nitrogen application on yield and C/N of double-cropping rice[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(2): 269-275.