植物营养与肥料学报 2011,17(6):1318 -1326
Plant Nutrition and Fertilizer Science

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

胡剑锋,张培培,赵中操,任万军*,杨文钰*
(四川农业大学农学院,四川温江 611130)

摘要:为弥补秧苗超龄对长秧龄机插稻生长产生的负效应,以杂交中稻品种冈优906为材料,设置施氮量和氮肥基、追配比两因素试验,研究了氮肥运筹对机插水稻产量及氮素利用率的影响。结果表明:长秧龄机插稻植株氮素积累动态符合Logistic曲线增长规律。随施氮量增加,植株氮素积累总量增加,稻谷生产效率、氮素收获指数、氮素农学效率和氮素生理利用率均减小,氮素当季利用率呈先增后减的趋势。同一施氮水平下提高穗肥比例,氮素运转效率、收获指数、农学效率、生理利用率和氮素当季利用率增加,稻谷生产效率降低。长秧龄机插稻产量随施氮量的增加而增加,施氮量对有效穗和每穗实粒数有显著影响,成穗率、每穗实粒数、充实率、充实度随后期施氮比例的增加而增加,施氮量为225 kg/hm^2,基:蘖:穗肥比为4:3:3的氮肥运筹方式下长秧龄机插稻产量最高。

关键词:水稻;机插秧;氮肥运筹;氮素利用效率;产量
中图分类号:S143.1;S511.06　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2011)06-1318-09

Effects of nitrogen fertilization on nitrogen use efficiency and yield of machine-transplanted long-age rice seedings

HU Jian-feng, ZHANG Pei-pei, ZHAO Zhong-cao, REN Wan-jun*, YANG Wen-yu*
(*Agronomy College of Sichuan Agricultural University, Wenjiang 611130, China*)

Abstract: Nitrogen management was used to remedy the negative impacts of the long-age seedlings on growth of rice after being transplanted by machine. The effects of nitrogen management on yield and nitrogen use efficiency (NUE) of machine-transplanted rice were studied with gangyou906 as test material, and with the amount of nitrogen application and the proportion of nitrogen as two factors. The results show that the nitrogen accumulation dynamics of the machine-transplanted rice is in a pattern of the Logistic curve, the total N accumulation amount of rice plants is increased with the increase of N application amount, while the nitrogen grain production efficiency (NGPE), N harvest index(NHI), N agronomic efficiency(NAE) and N physiological use efficiency(NPUE) are decreased, and the N use efficiency (NUE) is increased at first and then decreased. The NTE, NHI, NAE, NPUE and NUE are increased under higher panicle fertilization proportion at the same N application amount, while the NGPE is decreased. The yield of the machine-transplanted rice is increased with the increase of N application amount. The amount of N application has significant influence on the effective panicles and the filled grains of per panicle, and the rate of fertile tillers, seed-setting rate, percentage of filled grain and grain plumpness are increased with the postponing of N application proportion. The optimal N application amount for the machine-transplanted rice with long seedling age is 225 kg/ha with the basal N:tillering N:panicle N at 4:3:3.

Key words: rice; machine-transplanted rice; nitrogen fertilizer management; N use efficiency; yield

收稿日期:2011-01-01　　**接受日期**:2011-07-08
基金项目:国家科技支撑计划"粮食丰产科技工程"项目(2011BAD16B05);四川省育种攻关项目(2006YZGG-28)资助。
作者简介:胡剑锋(1979—),男,重庆市人,博士研究生,主要从事作物高产优质高效栽培新理论与新技术研究。
E-mail:hujianfeng77@163.com。　　* 通讯作者 Tel:028-86390972, E-mail:rwjun@126.com;wenyu.yang@263.net

水稻移栽是水稻生产过程中劳动强度最大的环节之一，随着农业产业、劳动力结构和农村经济的不断调整与优化，水稻栽培机械化势在必行。研究表明，秧龄是对机插水稻产量影响最大的因素，其次是施肥量，影响最小的是落谷密度[1]。机插秧秧龄弹性小，适宜插秧期为2.5～4叶期，老秧根活力和根冠比下降，叶面积大，蒸发量大，植伤变重，分蘖期延迟，分蘖减少，株矮穗少，产量下降[2]。前人对机插水稻的研究主要集中在小、中苗方面，而秧龄大于35 d的长秧龄机插稻的相关研究鲜有报道。由于我国南方大面积麦—稻、油—稻两熟区的小麦、油菜收割期较迟，正常播期的移栽秧龄往往都在40 d左右，不能保证在适宜时期移栽，造成超秧龄移栽，限制了水稻生产潜力的发挥，制约了水稻机插秧技术的发展。水稻需肥量大，氮肥施用量直接关系到水稻的生长发育和产量的高低以及最终稻米品质的优劣。前人研究结果表明，过多的施氮往往导致氮素利用率降低，造成肥料浪费，在适当增施氮肥的同时，调整氮肥前、中、后期施用比例，可促使水稻早发、早够苗，增加有效穗，提高成穗率、叶面积指数和粒叶比，促进中后期的物质积累，提高生物产量，进而增产[3-7]。因此针对长秧龄机插稻的特点，研究该条件下水稻的氮素积累和利用效率，通过氮肥合理施用来弥补秧苗超龄对其生长产生的负效应，对指导麦（油）—稻两熟区水稻机械化生产有重要的现实意义。本试验在以麦（油）—稻轮作制度为主体的水稻种植区，通过进行长秧龄机插秧的氮素积累、运转与吸收利用的相关研究，为麦（油）—稻机插秧配套的水肥管理措施提供理论依据和技术支持。

1　材料与方法

1.1　供试材料

供试水稻品种为杂交中稻组合冈优906，氮肥用碳酸氢铵和尿素，碳酸氢铵作底肥，尿素作追肥。

1.2　试验设计

试验于2008年在成都市郫县古城镇二堰村实施，前作为小麦。试验田土壤主要理化性质：pH 5.58，有机质23.8 g/kg，全氮1.45 g/kg，速效氮138.6 mg/kg，全磷0.98 g/kg，速效磷25.68 mg/kg，全钾16.5 g/kg，速效钾26.24 mg/kg。二因素裂区设计，主因素为施氮量（N），设施纯氮75 kg/hm^2（N75）、150 kg/hm^2（N150）、225 kg/hm^2（N225）3个水平；副因素为氮肥基、追配比（R），按基追比（基肥∶分蘖肥∶穗肥）不同设10∶0∶0、7∶3∶0、6∶0∶4、4∶3∶3共4个处理，每处理重复3次，每区组设一个不施氮的空白区作为对照（CK），共39个小区，小区面积16.8 m^2。育秧方式采用标准化软盘旱育秧，4月9日播种，5月20日移栽，秧龄41 d，采用东洋PF4550手扶式插秧机进行插秧，行穴距30 cm×15 cm，栽插苗数为每穴3苗，小区之间做土埂，并用薄膜包埋。底肥于栽前1 d施入，分蘖肥于栽后9 d时追施，穗肥分两次施，倒四叶抽出期施促花肥，倒二叶抽出期施保花肥，比例为6∶4。磷肥全做底肥，施有效磷含量12%的过磷酸钙600 kg/hm^2；钾肥施氯化钾240 kg/hm^2，按底肥∶分蘖肥∶穗肥为3∶2∶5的比例施用，底肥和分蘖肥的施用时期同氮肥，穗肥同促花肥一起施入。

1.3　测定项目和方法

在分蘖期、拔节期、孕穗期、抽穗期、灌浆中期、成熟期按平均茎蘖数法取样，每小区取3穴，取出后去根，分为绿叶、黄叶、茎鞘和穗4部分烘干称重，样品粉碎，每个处理用万分之一电子天平称取0.2 g样品，加定氮催化剂1片，浓硫酸10 mL，经38℃消煮120 min，采用702型全自动凯氏定氮仪测定其氮含量[8]。氮素吸收和利用效率采用以下方法计算[9-11]：

氮素积累总量（Total N accumulation，TNA）＝成熟期单位面积植株（地上部）氮积累量的总和；

氮素产谷效率（N grain production efficiency，NGPE）＝单位面积子粒产量/单位面积植株氮积累量；

器官氮转运量（N translocation amount of organs）＝抽穗期器官氮积累量－成熟期器官氮积累量；

器官氮转运率（N translocation efficiency of organs）＝器官氮转运量/抽穗期器官氮积累量；

氮素运转效率（N translocation efficiency，NTE）＝（抽穗期茎叶氮积累总量－成熟期茎叶氮积累总量）/抽穗期茎叶氮积累总量；

氮素收获指数（N harvest index，NHI）＝子粒吸氮量/植株总吸氮量；

氮素当季利用率（N use efficiency，NUE）＝（施氮区植株总吸氮量－空白区植株总吸氮量）/施氮量；

氮肥农学效率（N agronomic efficiency，NAE）＝（施氮区产量－空白区产量）/施氮量；

氮肥生理利用率（N physiological use efficiency，

NPUE)=(施氮区产量-空白区产量)/(施氮区植株总吸氮量-空白区植株总吸氮量)。

数据采用 DPSv6.55 软件和 Excel 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 长秧龄机插稻氮素积累动态分析

2.1.1 不同施氮处理下水稻成熟期氮素积累总量 不同施氮处理对长秧龄机插稻氮素积累有显著影响。表1表明,各施氮量处理间差异显著,与CK相比,N75、N150、N225的氮素积累量分别增加了38.03%、118.98%、179.74%。不同氮肥基追配比中,氮素积累总量以后期施氮比例高的6:0:4和4:3:3处理较大,10:0:0和7:3:0较小,但各处理间差异均未达到显著水平。施氮量、氮肥基、追配比和两者的互作效应对氮素积累量的影响表现为施氮量($F=32.57^{**}$)>氮肥基追配比($F=2.08$)>两者互作($F=0.80$)。

表1 施氮处理对长秧龄机插稻氮素积累总量的影响(成熟期)(g/m^2)

Table 1 Effects of different N application treatments on the amount of N accumulation of the machine-transplanted rice (Maturing stage)

施氮量 N rate	基肥:分蘖肥:穗肥 Basal N:Tillering N:Panicle N				平均值 Average
	10:0:0	7:3:0	6:0:4	4:3:3	
CK					4.88
N75	6.76 aA	6.11 aA	7.52 aA	6.60 aA	6.75 cB
N150	8.98 aA	10.89 aA	11.78 aA	11.22 aA	10.72 bAB
N225	12.44 bA	12.46 bA	13.97 abA	15.87 aA	13.69 aA
平均 Average	9.40 aA	9.82 aA	11.09 aA	11.23 aA	

注(Note):除最后一列(平均值)外,同一行内不同大、小写字母分别表示差异达1%和5%显著水平,同行表示同一施肥量不同施氮比例之间的差异. 最后一列表示不同施氮量下氮素积累总量平均值之间差异 Except the last column, different capital and small letters within a row mean significant at 1% and 5% levels, respectively. The same row means the discrepancy among different proportions of nitrogen at the same level of nitrogen application. The last column means the differences among averages of the amount of N accumulation at different nitrogen managements.

2.1.2 不同施氮处理下水稻群体氮素积累动态 对各处理全生育期氮素积累动态过程进行 logistic[12] 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2和图1表明,氮素积累最大增长速率 v_m 随施氮量的增加而增加,最大增长速率出现天数 t_0、渐增期天数 d_1 和快增期天数 d_2 都随施氮量的增加呈先增后减的趋势。同一施氮水平下不同氮肥基、追配比处理间 v_m 表现为6:0:4>4:3:3>7:3:0>10:0:0;最大增长速率出现的时间 t_0 以10:0:0和7:3:0处理最大,6:0:4和4:3:3最小;氮素积累的快增期天数 d_2 以10:0:0处理最大,7:3:0和4:3:3其次,6:0:4最小;缓增期天数 d_3 以6:0:4处理最大,4:3:3和7:3:0其次,10:0:0最小。以速度函数的第一个拐点 t_1 为界,第一个拐点之前,6:0:4和4:3:3处理的氮素积累量和积累速度小于10:0:0和7:3:0,但在移栽30 d后其氮素积累量和积累速度迅速增加并超过10:0:0和7:3:0处理,并且一直稳定在一个较高的水平直至整个生育期结束。

2.2 不同施氮处理下长秧龄机插水稻营养器官的氮素转运

2.2.1 对叶片氮素转运的影响 长秧龄机插稻叶片氮素转运量随着施氮量的增加而增加(表3),施氮量处理间差异极显著,与CK相比,N75、N150、N225的氮素转运量分别增加了70.45%、179.54%、264.77%,叶片氮素转运率随着施氮量的增加而减小,但差异未达到显著水平。施氮量对叶片氮素转运量的影响最大($F=167.86^{**}$),其次是氮肥基、追配比($F=60.67^{**}$),两者互作对叶片氮素转运量的影响也达到了显著水平($F=9.12^{**}$)。叶片氮素转运量和转运率在施氮比例间的差异也达到了极显著水平,其中,氮素转运率以6:0:4处理最大,4:3:3和7:3:0次之,10:0:0最小。

2.2.2 对茎鞘氮素转运的影响 茎鞘氮素转运量也随施氮量的增加而增加,3个施氮处理分别较对照高32.47%、44.16%和96.1%;茎鞘氮素转运率随着施氮量的增加而减小,N75、N150、N225与CK相比分别降低了5.98%、24.1%和28.65%。氮肥基、

表 2　不同处理氮素积累的 Logistic 方程回归分析

Table 2　Logistic equation analysis for the N accumulation of different N application treatments

处理 Treatment	回归方程 Regression equation	R^2	v_m	t_0	t_1	t_2	d_1	d_2	d_3
N75 (10∶0∶0)	$Y=6.5637/(1+9.81e^{-0.0466x})$	0.9503	0.077	49	21	77	21	56	37
N75 (7∶3∶0)	$Y=6.1018/(1+15.05e^{-0.0621x})$	0.9773	0.095	44	22	65	22	43	49
N75 (6∶0∶4)	$Y=7.7472/(1+31.30e^{-0.0668x})$	0.9944	0.129	52	32	71	32	39	43
N75 (4∶3∶3)	$Y=6.7666/(1+26.92e^{-0.0634x})$	0.9598	0.107	52	31	73	31	42	41
N150 (10∶0∶0)	$Y=9.9466/(1+12.19e^{-0.0372x})$	0.9592	0.093	67	32	103	32	71	11
N150 (7∶3∶0)	$Y=11.5937/(1+14.23e^{-0.0422x})$	0.9624	0.122	63	32	94	32	62	20
N150 (6∶0∶4)	$Y=11.2613/(1+101.91e^{-0.0973x})$	0.9943	0.274	48	34	61	34	27	53
N150 (4∶3∶3)	$Y=11.4904/(1+24.61e^{-0.0576x})$	0.9867	0.166	56	33	78	33	45	36
N225 (10∶0∶0)	$Y=12.5008/(1+9.417e^{-0.0394x})$	0.9535	0.123	57	23	90	23	67	24
N225 (7∶3∶0)	$Y=11.9921/(1+11.41e^{-0.0498x})$	0.9530	0.149	49	22	75	22	53	41
N225 (6∶0∶4)	$Y=14.1299/(1+117.99e^{-0.1039x})$	0.9965	0.367	46	33	59	33	26	55
N225 (4∶3∶3)	$Y=14.4593/(1+91.16e^{-0.1038x})$	0.9779	0.375	43	31	56	31	25	58
CK	$Y=5.7155/(1+24.47e^{-0.0486x})$	0.9812	0.069	66	39	93	39	54	21
N75	$Y=6.7973/(1+17.65e^{-0.0583x})$	0.9852	0.099	49	26	72	26	46	42
N150	$Y=10.9276/(1+18.77e^{-0.0525x})$	0.9767	0.143	56	31	81	31	50	33
N225	$Y=12.7730/(1+27.82e^{-0.0752x})$	0.9859	0.240	44	27	62	27	35	52
10∶0∶0	$Y=9.0400/(1+11.04e^{-0.0463x})$	0.9548	0.105	52	23	80	23	57	34
7∶3∶0	$Y=9.7084/(1+12.74e^{-0.0492x})$	0.9662	0.120	52	25	78	25	53	36
6∶0∶4	$Y=11.2389/(1+60.90e^{-0.085x})$	0.9963	0.239	48	33	64	33	31	50
4∶3∶3	$Y=10.8999/(1+39.99e^{-0.0767x})$	0.9929	0.209	48	31	65	31	32	49

注(Note): R^2—决定系数 Decisive coefficients; v_m—氮素积累最大增长速率 The biggest rate growth of nitrogen accumulation [g/(m² · d)]; t_0—氮素积累最大增长速率出现的天数 Days of the biggest rate growth of nitrogen accumulation (d); t_1—速度函数的第一个拐点 The first inflection point of speed function; t_2—速度函数的第二个拐点 The second inflection point of speed function; d_1—氮素积累的渐增期天数 Incremental period of nitrogen accumulation(d); d_2—氮素积累的快增期天数 Fast increase period of nitrogen accumulation(d); d_3—氮素积累的缓增期天数 Slow increase period of nitrogen accumulation (d).

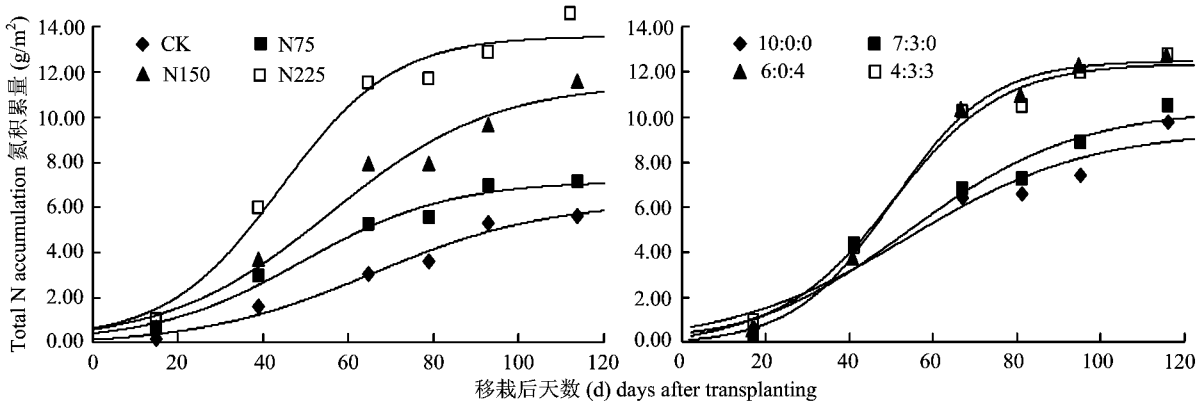

图 1　不同施氮处理下氮素积累的 Logistic 回归方程曲线

Fig. 1　Logistic equations for the N accumulation of different N application treatments

表3 不同处理下叶、茎氮素转运量和转运率

Table 3 Effects of different N application treatments on the amounts of nitrogen translocation from leaves and stems and their translocation percentage

处理 Treatment		氮转运量(g/m²) Nitrogen translocation amount		氮转运率(%) Nitrogen translocation percentage	
		叶片 Leaf	茎鞘 Stem	叶片 Leaf	茎鞘 Stem
N75	10:0:0	1.21 cC	0.76 aA	61.2 bB	37.67 bA
	7:3:0	1.60 bB	1.31 aA	71.1 aA	55.46 aA
	6:0:4	2.01 aA	1.22 aA	74.3 aA	52.73 aA
	4:3:3	1.36 bcBC	0.86 aA	70.27 aA	48.41 abA
N150	10:0:0	1.42 cC	0.56 bA	60.52 bA	28.60 bA
	7:3:0	2.06 bB	1.02 abA	63.8 abA	34.72 abA
	6:0:4	3.50 aA	2.00 aA	71.85 aA	51.15 aA
	4:3:3	2.44 bB	1.29 abA	64.11 abA	41.99 abA
N225	10:0:0	1.90 cC	0.63 cC	56.92 cB	20.13 bB
	7:3:0	2.54 bB	1.16 bcBC	60.84 bcAB	34.97 abAB
	6:0:4	4.44 aA	2.89 aA	73.37 aA	52.93 aA
	4:3:3	4.01 aA	1.92 bAB	68.24 abAB	38.60 aAB
CK		0.88	0.77	65.11	51.73
N75		1.50 cC	1.04 bB	69.35 aA	48.53 aA
N150		2.46 bB	1.22 bB	65.13 aA	38.95 bAB
N225		3.21 aA	1.65 aA	64.98 aA	36.22 bB
10:0:0		1.52 dD	0.65 cC	59.57 cB	28.52 bB
7:3:0		2.05 cC	1.16 bBC	65.31 bcAB	41.6 aAB
6:0:4		3.48 aA	2.04 aA	73.18 aA	52.27 aA
4:3:3		2.51 bB	1.36 bB	67.57 abAB	42.98 aAB
		F 值 *F* value			
施氮量 N rate(N)		167.86**	30.60**	2.31ns	17.91**
基、追配比 Rate of Basal and top dressing(R)		60.67**	13.20**	6.73**	5.79**
N×R		9.12**	2.72*	0.47ns	0.6ns

注(Note):ns—不显著 No significant; **—$P<0.01$, *—$P<0.05$. 不同大、小写字母分别表示差异达1%和5%显著水平 Different capital and small letters mean significant at the 1% and 5% levels, respectively.

追配比对茎鞘的氮素转运量($F=13.20^{**}$)和氮素转运率($F=5.79^{**}$)均有极显著影响,各处理间具体表现为6:0:4>4:3:3>7:3:0>10:0:0。施氮量、氮肥基、追配比和两者互作效应对茎鞘氮素转运量和氮素转运率的影响差异均表现为:施氮量>氮肥基、追配比>两者互作。

2.3 不同施氮处理下长秧龄机插稻的氮素吸收利用效率

表4可以看出,不同施氮处理对长秧龄机插稻氮素吸收利用效率有显著影响。氮素稻谷生产效率(NGPE)、氮素运转效率(NTE)、氮素收获指数(NHI)、氮素农学效率(NAE)、氮素生理利用率(NPUE)都随施氮量的增加而降低,氮素当季利用率(NUE)随施氮量的增加呈先增后减的趋势。相同施氮水平,不同氮肥基、追配比处理之间的氮素利用效率也有差异,其中氮素运转效率、氮素农学效率、氮素生理利用率、氮素当季利用率均表现为6:0:4>4:3:3>7:3:0>10:0:0处理;氮素收获指数以4:3:3处理最大,6:0:4次之,10:0:0最小;氮素稻谷生产效率随后期氮肥比例的增大而降低,处理间差异表现为10:0:0>7:3:0>4:3:3>6:0:4。

表 4　不同处理下成熟期的氮素吸收与利用效率

Table 4　Nitrogen uptake, utilization efficiency of different N application treatments

处理 Treatment		氮素稻谷生产效率 NGPE (g/g)	氮素运转效率 NTE (%)	氮素收获指数 NHI	氮素农艺效率 NAE (g/g)	氮素当季利用率 NUE (%)	氮素生理利用率 NPUE (g/g)
N75	10:0:0	99.36 aA	50.01 bB	0.706 cB	21.63 aA	47.60 aA	45.70 bB
	7:3:0	96.28 aA	65.79 aA	0.730 bB	24.39 aA	29.91 cB	62.09 aAB
	6:0:4	95.65 aA	64.48 aA	0.763 aA	30.20 aA	46.49 aA	68.68 aA
	4:3:3	99.81 aA	60.44 aAB	0.775 aA	26.13 aA	34.77 bB	71.70 aA
N150	10:0:0	87.32 aA	43.01 cB	0.738 aA	13.26 cC	29.09 cC	46.76 aA
	7:3:0	85.67 aA	49.36 bcAB	0.733 aA	17.43 bBC	51.13 bAB	34.11 aA
	6:0:4	74.57 bB	63.35 aA	0.720 aA	24.10 aA	61.84 aA	55.64 aA
	4:3:3	76.20 bB	55.07 abAB	0.724 aA	23.02 bAB	46.84 bB	48.87 aA
N225	10:0:0	79.00 aA	39.16 cB	0.696 aA	14.67 aA	34.57 bA	39.95 aA
	7:3:0	80.70 aA	49.32 bcAB	0.696 aA	14.14 aA	36.78 abA	38.90 aA
	6:0:4	66.76 bB	63.98 aA	0.698 aA	16.91 aA	43.50 aA	42.69 aA
	4:3:3	69.09 bB	54.93 abA	0.692 aA	17.40 aA	41.98 aA	41.45 aA
CK		114.72	56.03	0.752			
N75		97.87 aA	60.18 aA	0.743 aA	25.68 aA	39.69 bAB	62.04 aA
N150		81.06 bB	52.70 bAB	0.729 aA	19.52 abA	47.25 aA	46.35 bB
N225		74.09 cB	51.85 bB	0.696 bA	15.83 bA	39.21 bB	40.75 bB
10:0:0		88.63 aA	44.06 cB	0.713 aA	16.56 bC	37.09 bB	44.14 aA
7:3:0		87.95 aA	54.82 bA	0.720 aA	18.73 bBC	39.27 bB	45.03 aA
6:0:4		78.95 bB	63.94 aA	0.727 aA	23.82 aA	50.61 aA	55.67 aA
4:3:3		81.83 bB	56.81 abA	0.730 aA	22.25 aAB	41.19 bB	54.01 aA
				F 值 *F* value			
施氮量 N rate(N)		65.79**	14.87*	9.83*	7.52*	14.43**	6.24ns
基、追配比 Rate of basal and top dressing(R)		18.38**	10.03**	1.21ns	10.07**	12.74**	2.15ns
N×R		4.58**	0.77ns	3.17*	1.36ns	10.56**	1.12ns

注(Note): NGPE—N grain production efficiency; NTE—N translocation efficiency; NHI—N harvest index; NAE—N agronomic efficiency; NUE—N use efficiency; NPUE—N physiological use efficiency. **—$P<0.01$, *—$P<0.05$. 不同大、小写字母分别表示差异达 1% 和 5% 显著水平 Different capital and small letters mean significant at the 1% and 5% levels, respectively. ns—不显著 No significant.

2.4　不同施氮处理下长秧龄机插稻产量及产量构成

从表 5 可以看出,不同施氮处理对长秧龄机插稻产量及其产量构成因素有显著影响。长秧龄机插稻产量随施氮量的增加而增加,各主处理间差异极显著。相同施氮水平不同氮肥基、追配比处理下,各处理间产量差异表现为 6:0:4 >4:3:3 >7:3:0 >10:0:0,其中 6:0:4 和 4:3:3 处理与 7:3:0 和 10:0:0处理间差异达到极显著水平,但 6:0:4 和 4:3:3处理之间、7:3:0 和 10:0:0 处理之间差异并不显著。

有效穗有随施氮量的增加而呈显著增加的趋

势,每穗实粒数随施氮量增加有先增后减的趋势,施氮量对成穗率、结实率、充实率、充实度、千粒重的影响却不显著。氮肥基、追配比处理对有效穗和千粒重影响不显著,但对其余因素有显著影响。各处理间成穗率、每穗实粒数、充实率、充实度都表现为6:0:4 >4:3:3 >10:0:0 >7:3:0,成穗率、充实率、充实度中6:0:4和7:3:0两个处理间差异显著,其余各处理间差异不显著;6:0:4和4:3:3处理与7:3:0和10:0:0处理间每穗实粒数的差异都分别达到极显著水平。结实率随后期施氮量的增加而降低,其中6:0:4和7:3:0、10:0:0处理之间差异显著。

表5 施氮处理对产量构成因素的影响

Table 5 Effects of different N application treatments on the grain yield and its component

处理 Treatment		有效穗 Effective panicle ($\times10^4$/hm^2)	成穗率 Productive tiller percentage (%)	每穗实粒数 Filled spikelets per panicle	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	充实率 Filled grain percentage (%)	充实度 Grain plumpness (%)	产量 Yield (kg/hm^2)
N75	10:0:0	258.4 aA	58.7 aA	87.1 bA	78.8 aA	25.65 abA	93.0 aAB	96.5 aA	7040.4 cB
	7:3:0	244.4 aA	58.6 aA	84.8 bA	78.5 aAB	25.34 acA	90.5 bAC	95.0 bB	7270.0 bcAB
	6:0:4	242.0 aA	62.6 aA	111.3 aA	72.0 bAC	25.55 abcA	93.2 aAB	96.5 aA	7754.7 aA
	4:3:3	237.0 aA	62.7 aA	103.2 aA	73.1 bABC	25.67 aA	93.9 aA	97.1 aA	7415.4 abAB
N150	10:0:0	274.0 aA	59.7 aA	98.6 cB	77.6 aA	25.32 aA	91.1 aA	95.7 aA	7447.5 cC
	7:3:0	293.0 aA	57.3 aA	104.5 bcB	75.8 abA	25.69 aA	91.8 aA	96.1 aA	8142.7 bB
	6:0:4	284.8 aA	62.8 aA	141.3 aA	71.7 bA	25.64 aA	92.7 aA	96.7 aA	9254.2 aA
	4:3:3	289.7 aA	62.3 aA	125.0 abAB	74.6 abA	25.60 aA	91.0 aA	95.6 aA	9075.4 aA
N225	10:0:0	321.0 aA	57.2 aA	114.0 abAB	74.7 aA	25.41 aA	92.1 abA	96.4 abA	8904.2 bcAB
	7:3:0	321.0 aA	58.3 aA	92.7 bB	76.5 aA	25.46 aA	90.0 aA	95.3 bA	8772.4 cB
	6:0:4	329.2 aA	62.1 aA	120.9 aAB	73.3 aA	25.65 aA	93.1 aA	96.8 aA	9464.3 abA
	4:3:3	327.6 aA	59.4 aA	131.1 aA	76.1 aA	25.58 aA	91.4 abA	95.9 abA	9587.4 aA
CK		210.7	75.9	84.7	75.8	25.3	93.2	96.8	5237.9
N75		245.5 cB	60.7 aA	96.6 bA	75.6 aA	25.55 aA	92.6 aA	96.2 aA	7370.1 cC
N150		285.4 bAB	60.5 aA	117.3 aA	74.9 aA	25.56 aA	91.6 aA	96.0 aA	8480.0 bB
N225		324.7 aA	59.2 aA	114.7 abA	75.2 aA	25.53 aA	91.7 aA	96.1 aA	9182.1 aA
10:0:0		284.5 aA	58.5 abA	99.9 bB	77.0 aA	25.46 aA	92.1 abA	96.2 abAB	7797.4 bB
7:3:0		286.2 aA	58.1 bA	94.0 bB	76.9 aA	25.50 aA	90.7 bA	95.5 bB	8061.7 bB
6:0:4		285.32 aA	62.5 aA	124.5 aA	72.3 bA	25.61 aA	93.0 aA	96.7 aA	8824.4 aA
4:3:3		284.8 aA	61.5 abA	119.8 aA	74.6 abA	25.62 aA	92.1 abA	96.2 abAB	8692.7 aA

注(Note):不同大、小写字母分别表示差异达1%和5%显著水平 Different capital and small letters mean significant at the 1% and 5% levels, respectively.

3 讨论

3.1 麦茬长秧龄机插稻氮素吸收利用特点

本研究表明,长秧龄机插稻植株氮素积累量随着生育期的推进,呈不可逆增长趋势;氮素积累过程能较好地拟合Logistic曲线,移栽后30 d至80 d是长秧龄机插稻生育过程中氮素积累增长最快的时期。增施氮肥和提高穗肥比例均能提高氮素积累速率;提高穗肥比例能使氮素积累的最大增长速率出现时间显著提前,氮素积累快增期缩短。随施氮量的增加,叶和茎的氮素转运量增加,氮素转运率降低,植株氮素积累总量增加,而稻谷生产效率,氮素

收获指数，氮素农学效率和氮素生理利用率都呈减小的趋势，这与前人[13-16]研究结果相似。本试验中，氮素当季利用率随施氮量的增加呈先增后减的趋势，回归分析发现长秧龄机插稻的施氮量与氮素当季利用率呈现二次抛物线关系，可以用方程 $y = -0.0021x^2 + 0.644x + 0.8303$（$R^2 = 0.9899$）表示，根据方程求出施氮量为 158.1 kg/hm^2 时氮素当季利用率达到最大值。

3.2　麦茬长秧龄机插稻高效氮肥管理途径

有研究表明，氮素在植株体内的转运和再分配能力是水稻高效利用氮素的重要生理机制，氮素转运和再分配能力对子粒产量的贡献也较大[17-21]。本研究结果表明，氮肥基、追配比处理对植株营养器官的氮素转运有显著影响，叶和茎的氮素转运量和氮素转运率随着后期施氮量的增加而提高。对氮素当季利用率影响较大的因素是施氮量（$F = 14.43^{**}$）和氮肥基、追配比（$F = 12.74^{**}$），影响最小的是氮肥基、追配比与施氮量的交互作用（$F = 10.56^{**}$），因此可以通过对氮肥基、追配比的调控来达到提高氮素当季利用率的目的。试验中后期施氮比例较重的 6∶0∶4 和 4∶3∶3 两种处理模式均可显著提高营养器官的氮素转运效率，改善生育中后期茎、叶氮素积累向穗部转移的能力，减少后期氮素在植株营养器官的滞留，提高氮肥利用率。

3.3　麦茬长秧龄机插稻氮肥的产量效应分析

本试验中产量随施氮量的增加而增加，氮肥后移处理对产量有显著促进作用，施氮量与氮肥基、追配比互作对产量有较大的影响，施 N 75 和 150 kg/hm^2 水平下，6∶0∶4 处理产量最高，施 N 225 kg/hm^2 水平下，4∶3∶3 处理产量最高，分析原因是机插稻分蘖节位多，爆发性强，6∶0∶4 处理虽然没追施分蘖肥，但是基肥较多，其氮素营养能够满足秧苗分蘖所需；同时因为秧苗移栽时秧龄较大，无效分蘖相对较少，穗肥（促花肥）施用较早（倒四叶期），肥力补给及时，因此成穗率较高，6∶0∶4 处理的穗肥比例最大，灌浆结实期间肥力充足，充实率和充实度都最高。而在施 N 225 kg/hm^2 水平下，由于施氮总量增加，底肥充足，分蘖肥到位，后期穗肥及时，4∶3∶3 处理每穗实粒数和结实率的优势得以显现，产量最高，较对照增产 83.4%。

4　结论

本试验结果表明，增加氮肥用量能提高长秧龄机插稻的氮素累积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，但能通过对有效穗的极显著促进作用达到增产的目的。增加后期施氮比例能显著提高长秧龄机插稻的氮肥利用效率，对成穗率和每穗实粒数有显著的调控作用，能起到增产增效的作用。本试验中，通过对施氮量、氮肥利用率和产量的综合分析得出，施氮（纯氮）量为 225 kg/hm^2，基、蘖、穗肥按 4∶3∶3 的运筹方式可使长秧龄机插稻高产高效得到较好的统一。

参 考 文 献：

[1] 沈建辉，邵文娟，张祖建，等. 苗床落谷密度、施肥量和秧龄对机插稻苗质及大田产量的影响[J]. 作物学报，2006，32(3)：402-409.
Shen J H，Shao W J，Zhang Z J *et al*. Effects of sowing density，fertilizer amount in seedbed and seedling age on seedling quality and grain yield in paddy field for mechanical transplanting rice [J]. Acta Agron. Sin. 2006，32(3)：402-409.

[2] 张祖建，王君，郎有忠，等. 机插稻超秧龄秧苗的生长特点研究[J]. 作物学报. 2008，34(2)：297-304.
Zhang Z J，Wang J，Lang Y Z *et al*. Growing characteristics of rice seedlings of over-optimum age for mechanical transplanting [J]. Acta Agron. Sin.. 2008，34(2)：297-304.

[3] 于林惠，丁艳锋，薛艳凤，等. 水稻机插稻田间育秧秧苗素质影响因子研究[J]. 农业工程学报. 2006，22(3)：73-78.
Yu L H，Ding Y F，Xue Y F *et al*. Factors effecting rice seedling quality of mechanical transplanting rice[J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng. 2006，22(3)：73-78.

[4] Wopereis-Pura M M，Watanabe H，Moreira J，Wopereis M C S. Effect of late nitrogen application on rice yield，grain quality and profitability in the Senegal River valley[J]. Eur. J. Agron.，2002，17：191-198.

[5] 邹应斌，敖和军，夏冰，等. 不同氮肥施用对杂交稻产量及其氮素利用效率的影响[J]. 作物研究，2008，22(4)：214-219.
Zou Y B，Ao H J，Xia B *et al*. Effects of different nitrogen application on the yield and nitrogen use efficiency in hybrid rice[J]. Crop Res.，2008，22(4)：214-219.

[6] 龚振恺，万靓军，李刚，等. 移栽秧龄和中期氮肥运筹对机插水稻宁粳1号生产力的影响[J]. 江苏农业科学，2006，(3)：16-19.
Gong Z K，Wang L J，Li G *et al*. Effects of seedling age at transplanting and fertilizer application on productivity of machine-transplanted rice NingJing No. 1[J]. Jiangsu Agric. Sci.，2006，(3)：16-19.

[7] 闫湘，金继运，何萍，梁鸣早. 提高肥料利用率技术研究进展[J]. 中国农业科学，2008，41(2)：450-459.
Yan X，Jin J Y，He P，Liang M Z. Recent advances in technology of increasing fertilizer use efficiency[J]. Sci. Agric. Sin.，2008，41(2)：450-459.

[8] 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. Analysis of agricultural soil [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. 44-49.

[9] 叶全宝, 张洪程, 魏海燕, 等. 不同土壤及氮肥条件下水稻氮利用效率和增产效应研究[J]. 作物学报, 2005, 31(11): 1422-1428.
Ye Q B, Zhang H C, Wei H Y *et al*. Effect of nitrogen fertilizer on nitrogen use efficiency and yield of rice under different soil conditions[J]. Acta Agron. Sin.. 2005, 31(11): 1422-1428.

[10] 伍菊仙, 任万军, 杨文钰, 氮肥运筹对水稻免耕高桩抛秧生长发育和产量的影响[J]. 杂交水稻, 2006, 21(4): 74-77.
Wu J X, Ren W J, Yang W Y. Effects of nitrogen management on the growth and yield of rice by broadcasting seedlings among high standing-stubbles under no-tillage conditions [J]. Hyb. Rice. 2006, 21(4): 74-77.

[11] 尤小涛, 荆奇, 姜东, 等. 节水灌溉条件下氮肥对粳稻稻米产量和品质及氮素利用的影响[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(2): 199-204.
You X T, Jing Q, Jiang D *et al*. Effects of nitrogen application on nitrogen utilization and grain yield and quality in rice under water saving irrigation[J]. Chin. J. Rice Sci. 2006, 20(2): 199-204.

[12] 崔党群. Logistic 曲线方程的解析与拟合优度测验[J]. 数理统计与管理, 2005, 24(1): 112-115.
Cui D Q. Analysis and making good fitting degree test for logistic curve regression equation[J]. Appl. Stat. Manag., 2005, 24(1): 112-115.

[13] 王绍华, 曹卫星, 丁艳锋, 等. 基本苗数和施氮量对水稻氮素吸收与利用的影响[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]. J. Nanjing Agric. Univ., 2003, 26(4): 1-4.

[14] 丁艳锋, 刘胜怀, 王绍华, 等. 氮素基蘖肥用量对水稻氮素吸收与利用的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(8): 762-767.
Ding Y F, Liu S H, Wang S H *et al*. Effect of the amount of basic and tillering nitrogen applied on absorption and utilization of nitrogen in rice[J]. Acta Agron. Sin., 2004, 30(8): 762-767.

[15] 江立庚, 曹卫星, 甘秀芹, 等. 不同施氮水平对南方早稻氮素吸收利用及其产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(4): 490-496.
Jiang L G, Cao W X, Gan X Q *et al*. Nitrogen uptake and utilization under different nitrogen management and influence on grain yield and quality in rice[J]. Sci. Agric. Sin., 2004, 37(4): 490-496.

[16] 曾勇军, 石庆华, 潘晓华, 韩涛. 施氮量对高产早稻氮素利用特性及产量形成的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(12): 2457-2467.
Zeng Y J, Shi Q H, Pan X H, Han T. Effect of nitrogen application amount on characteristics of nitrogen utilization and yield formation in high yield early hybrid rice[J]. Sci. Agric. Sin., 2008, 34(8): 1409-1416.

[17] 江立庚, 曹卫星. 水稻高效利用氮素的生理机制及有效途径[J]. 中国水稻科学, 2002, 16(3): 261-264.
Jiang L G, Chao W X. Physiological mechanism and approaches for efficient nitrogen utilization in rice[J]. Chin. J. Rice Sci. 2002. 16(3): 261-264.

[18] Wang H, McCaig T N, Depauw R M *et al*. Physiological characteristics of recent Canada Western Red Spring wheat cultivars: components of grain nitrogen yield [J]. Can. J. Plant Sci. 2003, 84(4): 699-707.

[19] 贺帆, 黄见良, 崔克辉, 等. 实时实地氮肥管理对不同杂交水稻氮肥利用的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(2): 470-479.
He F, Huang J L, Cui K Q *et al*. Effect of real-time and site-specific nitrogen management on various hybrid rice[J]. Sci. Agric. Sin., 2008, 41(2): 470-479.

[20] 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]. Sci. Agric. Sin., 2005, 38(12): 2457-2467.

[21] 李华, 徐长青, 李世峰, 等. 不同氮肥管理对机插水稻产量及氮肥利用的影响[J]. 贵州农业科学, 2008, 36(5): 39-41.
Li H, Xu C Q, Li S F *et al*. Effect of different nitrogen management on yield and nitrogen utilization of machine-transplanted rice [J]. Guizhou Agric. Sci., 2008, 36(5): 39-41.