植物营养与肥料学报 2014,20(2):259-270
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0201

长江中下游稻区粳型超级稻高产形成及氮素利用的研究

葛梦婕,王亚江,颜希亭,张洪程*,魏海燕,戴其根,霍中洋,许 轲,江 峰,朱聪聪
(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国家重点实验室,江苏扬州 225009)

摘要:选用长江中下游稻区7个粳型超级稻为试验材料,以普通粳稻为对照,在大田条件下设置7个氮肥水平(N0、150、187.5、225、262.5、300、337.5 kg/hm^2),研究不同氮肥条件下粳型超级稻高产形成及其氮素利用特性。结果表明,超级粳稻在300 kg/hm^{2}条件下产量最高,普通粳稻在262.5 kg/hm^{2}条件下产量最高。超级粳稻两年最高产量平均值较普通粳稻高8.50%。与普通粳稻相比,超级粳稻各生育时期茎蘖数消长平稳,最终成穗率高,平均达78.10%;拔节前叶面积指数和光合势较低,拔节后较高。超级粳稻拔节前干物质、氮素积累量与普通粳稻相当,而拔节至抽穗、抽穗至成熟阶段干物质和氮素积累量较普通粳稻分别高7.31%、6.55%和8.98%、9.66%;超级粳稻氮素表观利用率、农学利用率和生理利用率较普通粳稻分别高3.73%、11.63%和7.95%。超级粳稻较普通粳稻更耐肥,在高肥条件下增产优势明显,且对应的氮肥利用率也较高。

关键词:超级粳稻;氮肥;高产;氮素利用率
中图分类号:S945.3;S511.2+3 **文献标识码**:A **文章编号**:1008-505X(2014)02-0259-12

Research on the formation of high yield and the nitrogen use of *japonica* super rice in the middle and lower areas of the Yangtze River

GE Meng-jie, WANG Ya-jiang, YAN Xi-ting, ZHANG Hong-cheng*, WEI Hai-yan, DAI Qi-gen, HUO Zhong-yang, XU Ke, JIANG Feng, ZHU Cong-cong
(*Innovation Center of Rice Cultivation Technology in Yangtze Valley, Ministry of Agriculture/Key Laboratory of Crop Genetic and Physiology of Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China*)

Abstract: Using ordinary *japonica* rice as control, seven super *japonica* rice cultivars from the middle and lower areas of the Yangtze River were selected to investigate the effects of different nitrogen application levels (0, 150.0, 187.5, 225.0, 262.5, 300.0, 337.5 kg/ha) on their yield formation and the characters of nitrogen utilization under field conditions. Results showed that the highest yield is obtained with super *japonica* rice at nitrogen application level of 300.0 kg/ha and ordinary *japonica* rice at 262.5 kg/ha. The highest average grain yields of the seven super *japonica* rice cultivars was 8.5% higher than that of the ordinary *japonica* rice. Compared with ordinary *japonica* rice, the number of stems and tillers of super *japonica* rice are stable with higher percentage of productive tillers. The leaf area index and photosynthetic potential of super *japonica* rice was relatively low before jointing stage, and increased significantly after jointing stage. The dry matter and nitrogen accumulations in super *japonica* rice are similar to that of ordinary *japonica* rice before jointing, but 7.31% and 6.55% higher at jointing-heading stage, 8.98% and 9.66% higher at heading-maturity stage, respectively. The nitrogen use efficiency in super *japonica* rice is 3.73%, 11.63% and 7.95% higher than the ordinary *japonica* rice, respectively, suggesting that super *japonica* rice is adapted to high nitrogen fertilizer rate, and has relatively high nitrogen use efficiency under high fertility condition.

收稿日期:2013-05-23 **接受日期**:2013-11-12
基金项目:国家粮食丰产科技工程项目(2011BAD16B03);国家自然科学基金项目(30971732和31101102)资助。
作者简介:葛梦婕(1989—),女,江苏南通人,硕士研究生,主要从事水稻栽培、生理研究。E-mail:mengjie_ge89@163.com
* 通信作者 Tel:0514-87979220,E-mail:hczhang@yzu.edu.cn

Key words: super *japonica* rice; nitrogen fertilizer; high yield; nitrogen efficiency

中国是世界上水稻生产和消费的主要国家之一,高产一直是我国水稻工作的永恒主题[1-2]。超级稻品种是通过理想株型塑造与杂种优势利用相结合选育的单产大幅度提高、品质优良的新型水稻品种组合,可能成为我国继矮化育种和杂种优势利用两次突破后第三次育种革命[3]。我国水稻种植一直维持"北粳南籼"的格局,近年来由于粳稻产量、品质、效益方面的优势明显,粳稻种植面积逐渐扩大,特别是自"七五"、"八五"以来,我国的"籼改粳"取得长足进步,生产上也相继推出一些高产优质的常规粳型超级稻品种,这些品种主要集中分布在长江中下游稻区,至2013年我国审定通过的南方粳型常规超级稻品种达11个之多。

氮肥是水稻增产的重要措施之一,氮素营养状况与水稻产量形成、生理生态特性密切相关[4],前人对于籼型超级稻、粳型超级稻以及超级杂交稻和常规超级稻间产量形成、干物质积累和氮素利用率方面有较多研究,不同品种类型水稻间的生育特性及对氮肥响应各不相同。史鸿儒等[5]对两个北方超级粳稻品种的研究表明,增施氮肥促进了穗数、单位面积颖花数和实粒数,降低了穗重、结实率等。陈爱忠等[6]研究两个超级杂交籼稻表明,最适施氮量在180～232.5 kg/hm^{2}之间,此时干物质积累和氮素利用能达到相对较高水平。唐启源等[7]对超级杂交籼稻两优培九的研究表明,较高施氮量能保证超级稻较高的LAI,提高抽穗后光合产物的积累,防止早衰,促进光合产物转运。而纵观前人研究可以看出,以往研究者对于超级稻的研究多集中在超级杂交籼稻和北方粳稻中,而对于南方粳稻的研究较少或集中在单一的或者少数几个品种间[8-10],且多在手栽条件下进行研究。随着农村劳动力的大量转移,机插稻作为一种轻简栽培方式,已经成为稻作发展的主要方向,因此有必要研究超级粳稻在机插条件下的产量形成特征和对氮肥的响应情况等。针对上述问题,本研究选择长江中下游地区小麦(油菜)茬口种植的单季晚粳稻中有代表性的7个超级粳稻品种为试验材料,以普通粳稻为对照,模拟机插小苗移栽方式,从产量形成和氮素利用方面对这些品种进行系统的研究,以期为该地区超级粳稻品种高产栽培、合理施氮及品种选育改良提供理论与实践依据。

1 材料与方法

1.1 供试品种

供试品种为长江中下游地区普遍种植、生育期相近的7个超级粳稻品种(南粳44、武粳15、宁粳3号、扬粳4038、武运粳24、扬粳4227、镇稻11)和7个普通粳稻品种(武运粳7号、武香粳14、武香粳9号、武运粳23、武粳13、南粳42、镇稻10号)。所选品种均为早熟晚粳稻,全生育期在155～160天左右。

1.2 试验设计

试验于2011～2012年在扬州大学农学院实验农场进行。供试土壤为沙壤土,全氮含量为1.5 g/kg、碱解氮含量为88.29 mg/kg、速效磷含量34.7 mg/kg、速效钾含量为87.9 mg/kg。

试验采用裂区设计,以施氮(N)水平为主区,设N 0、150、187.5、225、262.5、300、337.5 kg/hm^2 7个水平。以品种为裂区,裂区面积为6 m^2,重复3次。主区间做埂隔离,并用塑料薄膜覆盖埂体,保证各主区单独排灌。试验采用机插软盘育秧,于5月23日播种,6月11日移栽,栽插规格为11.7 cm × 30.0 cm,每穴3苗。氮肥基蘖肥∶穗肥=6∶4,穗肥分别于倒四、倒二叶各施50%;P、K肥施用与高产田相同,施P_2O_5、K_2O各150 kg/hm^2,全部用作基肥。氮肥用尿素(含氮46.4%),磷肥用过磷酸钙(含$P_2O_5$12%),钾肥用氯化钾(含K_2O 60%)。其他管理措施按照常规高产栽培要求实施。

1.3 测定内容与方法

1.3.1 茎蘖动态 在各处理小区定点20穴作为观察点,于有效分蘖临界期、拔节期、抽穗期、成熟期观察茎蘖消长动态。

1.3.2 叶面积和干物质测定 于拔节、抽穗和成熟期取有代表性植株2穴,用Li-3000A型自动叶面积仪测量植株叶面积。105℃杀青,75℃烘干至恒重后称其重量。

1.3.3 植株全氮测定 植物样品粉碎后,用半微量凯氏定氮法测定全氮含量。

1.3.4 产量的测定 收获前每小区收割50穴,脱粒,晒干,测定实际产量;每小区取10株成熟稻穗,自然风干用于测定产量构成因素。

1.4　数据计算与分析方法

光合势 $=1/2(L_1+L_2)\times(t_1-t_2)$

式中: L_1、L_2 为前后两次测定的叶面积(m^2/hm^2); t_1、t_2 为前后两次测定时间(d)。

氮肥表观利用率(%) =(施氮区水稻吸氮量 - 氮空白区水稻吸氮量)/作物施氮量 ×100

农学利用率(kg/kg) =(施氮区水稻产量 - 氮空白区水稻产量)/施氮量

生理利用率(kg/kg) =(施氮区水稻产量 - 氮空白区水稻产量)/(施氮区水稻吸氮量 - 氮空白区水稻吸氮量)

使用 Microsoft Excel 2003 处理数据,唐启义的 DPS 软件进行统计分析。

2　结果与分析

2.1　不同氮肥水平下不同类型水稻品种产量及其构成因素的差异

2.1.1 产量总体差异　对两年内,两类品种不同氮肥水平下的籽粒产量和氮素利用率进行方差分析可知(表1),品种类型间、氮肥水平间、氮肥和品种类型互作都达到了显著或极显著水平;年度、年度与氮肥、年度与品种类型以及三因素互作间差异均未达到显著水平,说明本试验设计合理,具有一定的准确性和代表性,能真实反映两类水稻品种在各氮肥水平下的差异。

表1　不同氮肥水平不同品种类型水稻籽粒产量和氮素利用的方差分析

Table 1　Analysis of variance for grain yield and N recovery efficiency of different varieties under different nitrogen levels

变异来源 Source	自由度 DF	平方和 SS	均方 MS	*F* 值 *F*-value	$F_{0.05}$	$F_{0.01}$
			籽粒产量 Grain yield			
区组 Block	1	434784	434784	3.74	4.21	7.68
处理间 Threatment	27	97404900	3607589	31.02	1.91	2.51
年度 Year (A)	1	481302	481302.1	4.14	4.21	7.68
品种类型间 Variety (B)	1	7277067	7277067	62.58	4.21	7.68
氮肥水平 N level (C)	6	87791920	14631990	125.83	2.46	3.56
A×B	1	11493	11493.38	0.1	4.21	7.68
A×C	6	26082	4346.98	0.04	2.46	3.56
B×C	6	1800302	300050.3	2.58	2.46	3.56
A×B×C	6	16738.63	2789.77	0.02	2.46	3.56
误差 Error	27	3139752	116287.1			
总变异 Total variation	55	100979400				
			氮素利用率 N recovery efficiency			
区组 Block	1	79.57	79.57	380.3	4.28	7.88
处理 Threatment	23	185.73	8.08	38.6	2.01	2.72
年度 Year (A)	1	0.74	0.74	3.51	4.28	7.88
品种类型 Variety (B)	1	21.2	21.2	101.33	4.28	7.88
氮肥水平 N level (C)	5	153.98	30.8	147.19	2.64	3.94
A×B	1	0.21	0.21	1.01	4.28	7.88
A×C	5	0.32	0.06	0.31	2.64	3.94
B×C	5	8.98	1.8	8.59	2.64	3.94
A×B×C	5	0.31	0.06	0.29	2.64	3.94
误差 Error	23	4.81	0.21			
总变异 Total variation	47	270.11				

对两年内超级粳稻和普通粳稻在不同氮肥水平下产量总体分析(图1),随施氮量增加,超级粳稻和普通粳稻的籽粒产量均表现为先增后降的趋势。2011年由于稻曲病的发生,使得部分品种减产,平均产量较2012年低,但两年的产量变化趋势一致。超级粳稻品种在施氮量为300 kg/hm^{2}水平时达到最高产,最高产量平均为10588.74 kg/hm^2,普通粳稻在施氮量262.5 kg/hm^{2}水平时产量最高,平均为9801.64 kg/hm^2。分析图1还可知,同一氮肥水平下,超级粳稻两年平均产量较普通粳稻高5.31%~14.62%,超级粳稻的最高产量以及各氮肥水平对应产量平均值较普通粳稻分别高8.50%和8.43%,差异极显著。

由于2011、2012年两年不同处理间产量变化趋势基本一致,本文仅以2012年的数据进行分析说明。

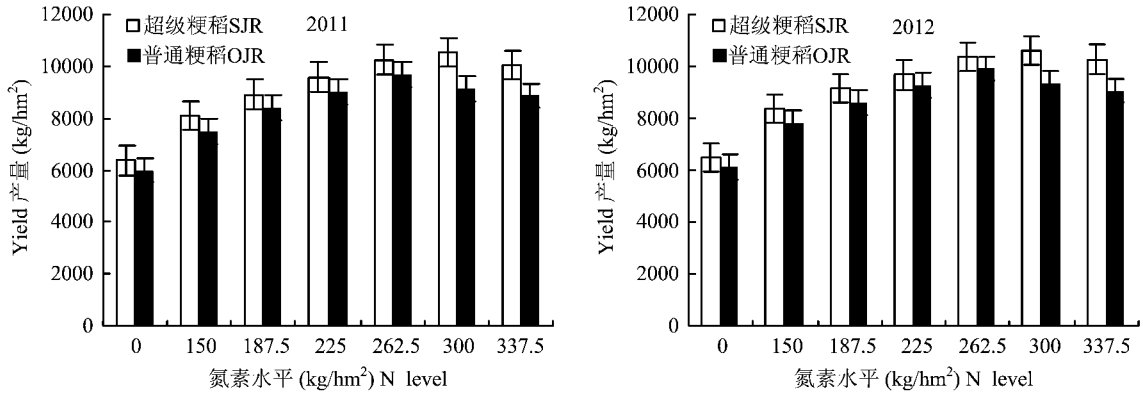

图1 不同氮肥水平下不同类型品种水稻的籽粒产量

Fig.1 Grain yield of different variety type rice under different N level

[注(Note): SJR—Super *japonica* rice; OJR— Ordinary *japonica* rice.]

2.1.2 产量构成因素的差异 由表2可见,随施氮量的增加,各品种穗粒数逐渐增加,结实率和千粒重逐渐下降,总颖花量先增后降。超级粳稻有效穗数略低于普通粳稻,但差异不显著,穗粒数、总颖花量优势明显,平均每穗150粒,最高达到164粒,平均比普通粳稻高13.66%。与普通粳稻相比,超级粳稻千粒重略高,但结实率偏低,平均只有90.10%,尤其高氮条件下,结实率更低,最低只有88.37%。因此,生产中超级粳稻高产实现的途径应在稳定适宜穗数基础上培育大穗,提高群体总颖花量,减少颖花退化,保持相对稳定的结实率和千粒重。

2.2 不同氮肥水平下不同类型品种水稻的群体特征

2.2.1 茎蘖动态 由表3可知,随施氮量增加,有效分蘖临界叶龄期、拔节期超级粳稻和普通粳稻群体茎蘖数均呈增加趋势,抽穗期超级粳稻茎蘖数呈上升趋势,而普通粳稻呈先升后降趋势,成熟期2种类型粳稻茎蘖数均呈先升后降趋势,超级粳稻在施氮量为300 kg/hm^{2}水平后下降,普通粳稻在N 262.5 kg/hm^{2}水平后下降。与普通粳稻相比,超级粳稻各生育时期的茎蘖数和最终穗数较普通粳稻少,除成熟期外,其余各生育期两者差异达极显著水平;拔节后超级粳稻茎蘖下降较平缓,最终有效穗数稳定,成穗率高,变化幅度为71.47%~84.29%,平均达78.10%,较普通粳稻高1.85%~10.65%,平均高4.62%。

2.2.2 叶面积指数和光合势 不同处理的叶面积指数(表4)变化趋势与茎蘖动态相似。随施氮量增加,不品种水稻拔节期叶面积指数均表现为增加的趋势,抽穗期叶面积指数也呈上升趋势,但普通粳稻在施氮量达300 kg/hm^{2}水平后叶面积指数有所下降,成熟期均表现为先增后降的趋势,超级粳稻在N 300 kg/hm^{2}水平条件下叶面积指数最大(LAI为7.85),普通粳稻在N 262.5 kg/hm^{2}水平下最大(LAI为7.59)。相对于普通粳稻,超级粳稻在拔节期叶面积指数略低,差异不显著;抽穗期较普通粳稻高1.59%~5.03%(除在N 262.5 kg/hm^{2}水平下,两者叶面积指数相同),平均高2.17%;成熟期比普通粳稻高16.56%~40.67%,平均高30.08%,差异均达极显著水平。

表 2　不同氮肥水平下不同类型品种水稻产量及其构成因素

Table 2　Yield and its components in different variety type rice under different N levels

品种类型 Variety type	施氮水平 N level (kg/hm²)	穗数 Panicle (×10⁴/hm²)	每穗粒数 Spikelets per panicle	总颖花量 Total spikelets (×10⁴/hm²)	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	实际产量 Actual yield (kg/hm²)
超级粳稻 SJR	0	203.16 De	131.45 Ee	26704 Ee	91.77 Aa	27.71 Aa	6496 De
	150	245.88 Cd	139.69 DEd	34347 Dd	91.18 ABab	27.25 Bb	8361 Cd
	187.5	264.18 Bc	145.67 CDd	38483 Cc	90.65 ABCabc	26.71 BCc	9138 Bc
	225	275.37 ABbc	152.72 BCc	42054 Bb	90.12 ABCDbcd	26.22 CDd	9672 Ab
	262.5	292.09 Aa	158.55 ABbc	46309 Aa	89.56 BCDcde	25.68 DEe	10385 aA
	300	296.63 Aa	162.42 Aab	48178 Aa	89.07 CDde	25.29 EFf	10628 Aa
	337.5	289.65 Aab	164.56 Aa	47664 Aa	88.37 De	24.89 Ff	10268 Aa
	平均 Mean	266.71	150.72**	40534**	90.10**	26.23**	9278**
普通粳稻 OJR	0	216.86 Dd	113.11 Ef	24528 De	94.09 Aa	27.33 Aa	6144 Ee
	150	267.85 Cc	119.84 DEef	32099 Cd	93.68 ABab	26.64 ABb	7799 Dd
	187.5	281.16 BCbc	127.50 CDde	35847 Bc	93.21 ABCab	26.22 BCb	8588 CDc
	225	295.62 ABab	135.17 BCcd	39960 Ab	92.65 BCDbc	25.71 CDc	9269 ABab
	262.5	308.14 Aa	141.23 ABbc	43519 Aa	92.06 CDcd	25.33 DEc	9910 Aa
	300	290.37 ABab	144.40 Aab	41930 Aab	91.67 DEd	24.90 EFd	9337 ABab
	337.5	281.07 BCbc	147.01 Aa	41320 Aab	91.18 Ee	24.58 Fd	9054 BCbc
	平均 Mean	277.30	132.61	37029	92.65	25.82	8586

注(Note): SJR—Super *japonica* rice; OJR— Ordinary *japonica* rice. 不同大小写字母表示氮肥水平间差异达 1% 和 5% 显著水平 The different capital and small letters represent significant difference between nitrogen levels at the 1% and 5% levels, respectively; ** 表示不同品种类型平均值之间差异达 1% 显著水平 Indicate the average value between different varieties were significantly different at the 1% level.

表 3　不同氮肥水平下不同类型水稻品种茎蘖数及成穗率

Table 3　Number of stems and tillers and percentage of productive tillers in different variety type rice under different N levels

品种类型 Variety type	施氮水平 N level (kg/hm²)	茎蘖数 Number of stems and tillers (×10⁴/hm²)				成穗率 Percentage of productive tillers (%)
		有效分蘖临界期 Critical stage of productive tillering	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Mature stage	
超级粳稻 SJR	0	195.65 Ee	241.03 Ee	225.13 De	203.16 Ee	84.29 Aa
	150	238.96 Dd	299.16 Dd	273.32 Cd	245.88 Dd	82.19 Bbc
	187.5	259.14 CDcd	331.89 Cc	301.87 Bc	264.18 CDc	79.60 Cc
	225	272.82 BCbc	356.37 BCb	320.45 Bb	275.37 BCbc	77.27 Dd
	262.5	291.30 ABab	383.64 ABa	345.59 Aa	292.09 ABa	76.14 Ee
	300	298.84 ABa	391.49 Aa	350.81 Aa	296.63 Aa	75.77 Ee
	337.5	304.15 Aa	400.28 Aa	354.12 Aa	289.65 ABab	71.47 Ff
	平均 Mean	265.84**	343.41**	310.18**	266.71	78.10**
普通粳稻 OJR	0	198.81 De	264.91 Ed	238.87 Ee	216.86 Dd	81.86 Aa
	150	240.44 Cd	336.57 Dc	300.52 Dd	267.85 Cc	79.58 Bb
	187.5	263.02 BCc	362.98 Cb	322.14 CDc	281.16 BCbc	77.46 Cc
	225	284.92 ABbc	389.67 BCb	343.60 BCb	295.62 ABab	75.86 Cd
	262.5	300.67 Aab	418.64 ABa	367.25 Aa	308.14 Aa	73.60 De
	300	309.31 Aa	424.03 Aa	370.31 Aa	290.37 ABb	68.48 Ef
	337.5	313.45 Aa	427.92 Aa	365.09 ABa	281.07 BCbc	65.68 Fg
	平均 Mean	272.95	374.96	329.68	277.30	74.65

注(Note): SJR—Super *japonica* rice; OJR— Ordinary *japonica* rice. 不同大小写字母表示氮肥水平间差异达 1% 和 5% 显著水平 The different capital and small letters represent significant difference between nitrogen levels at the 1% and 5% levels, respectively; ** 表示不同品种类型平均值之间差异达 1% 显著水平 Indicate the average value between different varieties were significantly different at the 1% level.

光合势随叶面积指数的变化而改变，两者变化趋势基本一致。表5中，拔节前，普通粳稻光合势比超级粳稻略高，差异未达显著水平；拔节后超级粳稻光合势较普通粳稻高，拔节－抽穗阶段较普通粳稻高1.91%～6.97%，平均高3.5%；抽穗－成熟阶段超级粳稻较普通粳稻高5.06%～19.00%，平均高8.64%；在施氮量300 kg/hm^{2}水平下，超级粳稻光合势仍有增加，而普通粳稻光合势与施氮量262.5 kg/hm^{2}水平相当，这两阶段差异都达到极显著水平。

2.2.3 干物质积累及其比例　随施氮量增加，各品种类型水稻抽穗前干物质积累量表现为增加趋势，抽穗后表现为先增后降趋势（表6）。拔节前，超级粳稻干物质积累量与普通粳稻相当，差异不显著；拔节至抽穗阶段，超级粳稻干物质积累量增加较普通粳稻高4.11%～9.15%，平均高7.31%，这一阶段超级粳稻干物质积累在施氮量为262.5 kg/hm^{2}水平后仍有增加，而普通粳稻则增加较少；抽穗－成熟阶段，超级粳稻依然保持较高的干物质积累，较普通粳稻高3.99%～14.00%，在施氮量300 kg/hm^{2}水平后差值较大，平均高8.98%，差异达极显著水平；超级粳稻总干物质积累量较普通粳稻高3.04%～8.67%，平均高6.27%，差异极显著。说明超级粳稻生育中、后期光合物质积累优势较普通粳稻明显，且在高氮条件下仍保持较高的干物质积累量。

各阶段的干物质积累比例变化趋势（表7），随施氮量的增加，拔节前干物质积累比例表现为先降后增的趋势，拔节后与干物质积累量变化趋势一致。施氮量过高时，干物质积累比例在生育前期较大，容易造成群体荫庇，从而生育后期干物质积累比例相对减少。与普通粳稻相比，超级粳稻在拔节前干物质积累比例较低，拔节后尤其是抽穗至成熟阶段干物质积累比例较高，两者差异极显著。

表4　不同氮肥水平下不同类型品种水稻各生育期的叶面积指数

Table 4　Leaf area indices at each growth stage in different variety type rice under different N levels

品种类型 Variety type	施氮水平 N level (kg/hm^2)	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Mature stage
超级粳稻 SJR	0	2.31 Df	3.55 De	1.76 Dd
	150	3.98 Ce	6.14 Cd	2.94 Cc
	187.5	4.27 Bd	6.71 Bc	3.13 Cbc
	225	4.59 ABc	7.02 ABbc	3.28 BCb
	262.5	4.81 ABb	7.55 Aa	3.39 ABb
	300	5.02 Aa	7.73 Aa	3.51 Aa
	337.5	5.14 Aa	7.85 Aa	3.48 Aab
	平均 Mean	4.30	6.65**	3.07**
普通粳稻 OJR	0	2.52 De	3.38 Ee	1.51 Ee
	150	3.11 Cd	6.01 Dd	2.09 Dd
	187.5	4.43 Bcd	6.59 CDc	2.35 CDc
	225	4.79 ABbc	6.91 BCb	2.52 BCb
	262.5	5.01 Aab	7.55 Aa	2.73 Aa
	300	5.22 Aa	7.59 Aa	2.70 Aa
	337.5	5.39 Aa	7.53 Aa	2.62 ABab
	平均 Mean	4.35	6.51	2.36

注（Note）：SJR—Super *japonica* rice；OJR— Ordinary *japonica* rice. 不同大小写字母表示氮肥水平间差异达1%和5%显著水平 The different capital and small letters represent significant difference between nitrogen levels at the 1% and 5% levels, respectively；** 表示不同品种类型平均值之间差异达1%显著水平 Indicate the average value between different varieties were significantly different at the 1% level.

表 5　不同氮肥水平下不同类型品种水稻各生育阶段的光合势(m^2/d)

Table 5　Photosynthetic potential of the two variety types of rice in each growth stage under different N levels

品种类型 Variety type	施氮水平 N level (kg/hm^2)	移栽 – 拔节期 Transplanting – Jointing	拔节 – 抽穗期 Jointing – Heading	抽穗 – 成熟期 Heading – Maturity
超级粳稻 SJR	0	56.3 Gg	172.77 Ff	209.35 Ee
	150	67.26 Ff	205.60 Ee	243.45 Dd
	187.5	73.13 De	217.46 Dd	269.13 Cc
	225	78.45 CDd	230.15 Cc	293.02 Bb
	262.5	83.46 BCc	242.46 Bb	306.56 ABa
	300	87.61 ABb	253.36 Aa	312.32 Aa
	337.5	92.36 Aa	260.89 Aa	303.38 Aa
	平均 Mean	76.94	226.10**	276.74**
普通粳稻 OJR	0	53.02 Ff	161.52 Ff	175.92 Ee
	150	63.76 Ee	197.15 Ee	223.83 Dd
	187.5	71.45 Dd	213.39 Dd	250.22 Cc
	225	80.46 Cc	221.14 Cc	278.90 Bb
	262.5	88.72 Bb	235.94 Bb	291.62 Aa
	300	93.09 Aab	247.73 Aa	292.03 Aa
	337.5	95.27 Aa	252.28 Aa	270.59 Bb
	平均 Mean	77.97	218.45	254.73

注(Note): SJR—Super *japonica* rice; OJR— Ordinary *japonica* rice. 不同大小写字母表示氮肥水平间差异达 1% 和 5% 显著水平 The different capital and small letters represent significant difference between nitrogen levels at the 1% and 5% levels, respectively; ** 表示不同品种类型平均值之间差异达 1% 显著水平 Indicate the average value between different varieties were significantly different at the 1% level.

表 6　不同氮肥水平下不同类型品种阶段干物质积累量(kg/hm^2)

Table 6　Dry matter accumulation at each growth stage in different variety type rice under different N levels

品种类型 Variety type	施氮水平 N level (kg/hm^2)	移栽 – 拔节期 Transplanting – Jointing	拔节 – 抽穗期 Jointing – Heading	抽穗 – 成熟期 Heading – Maturity	总积累量 Total accumulation
超级粳稻 SJR	0	3338.73 De	5267.28 Ee	4102.51 Ef	12708.53 Ef
	150	3987.82 Cd	6909.80 Dd	5601.43 De	16499.05 De
	187.5	4243.50 Bc	7597.90 Cc	6193.02 Cd	18034.42 Cd
	225	4390.05 ABb	8165.62 Bb	6707.40 Bc	19263.07 Bc
	262.5	4540.86 Aa	8739.56 Aa	7331.75 Ab	20612.17 Ab
	300	4567.33 Aa	8936.63 Aa	7563.06 Aa	21067.02 Aa
	337.5	4600.11 Aa	8956.01 Aa	7315.50 Ab	20871.62 Aab
	平均 Mean	4238.34	7796.11**	6402.10**	18436.55**
普通粳稻 OJR	0	3345.24 Dd	4841.36 Dd	3820.73 Ef	12007.34 Ee
	150	3863.88 Cc	6360.62 Cc	5102.29 De	15326.79 Dd
	187.5	4211.70 Bb	7214.14 Bb	5849.40 Cd	17275.24 Cc
	225	4402.77 Aab	7842.73 ABab	6449.92 Bc	18695.42 Bb
	262.5	4503.15 Aa	8190.18 Aa	6826.16 Aa	19519.49 Aa
	300	4553.24 Aa	8200.11 Aa	6655.19 ABb	19408.54 Aa
	337.5	4584.63 Aa	8205.08 Aa	6416.94 Bc	19206.65 ABa
	平均 Mean	4209.23	7264.89	5874.38	17348.50

注(Note): SJR—Super *japonica* rice; OJR— Ordinary *japonica* rice. 不同大小写字母表示氮肥水平间差异达 1% 和 5% 显著水平 The different capital and small letters represent significant difference between nitrogen levels at the 1% and 5% levels, respectively; ** 表示不同品种类型平均值之间差异达 1% 显著水平 Indicate the average value between different varieties were significantly different at the 1% level.

表7 不同氮肥水平下不同类型品种阶段干物质积累比例(%)

Table 7 Dry matter accumulation ratio at each growth stage in different variety type rice under different N levels

品种类型 Variety type	施氮水平 N level (kg/hm²)	移栽－拔节期 Transplanting－Jointing	拔节－抽穗期 Jointing－Heading	抽穗－成熟期 Heading－Maturity
超级粳稻 SJR	0	26.27 Aa	41.45 Bc	32.28 Dd
	150	24.17 Ab	41.88 Bc	33.95 Cc
	187.5	23.53 Bc	42.13 Ab	34.34 Cc
	225	22.79 Bc	42.39 Ab	34.82 BCbc
	262.5	22.03 Ccd	42.40 Ab	35.57 ABab
	300	21.68 Dd	42.42 Ab	35.90 Aa
	337.5	22.04 De	42.91 Aa	35.05 ABab
	平均 Mean	23.22**	42.23*	34.56**
普通粳稻 OJR	0	27.86 Aa	40.32 Dd	31.82 Ee
	150	25.21 Bb	41.50 Cc	33.29 Dd
	187.5	24.38 Cc	41.76 BCc	33.86 Cc
	225	23.55 Cc	41.95 Bc	34.50 ABab
	262.5	23.07 Cc	41.96 Bc	34.97 Aa
	300	23.46 Cc	42.25 ABb	34.29 BCbc
	337.5	23.87 Cd	42.72 Aa	33.41 ABab
	平均 Mean	24.49	41.78	33.73

注(Note): SJR—Super *japonica* rice; OJR— Ordinary *japonica* rice. 不同大小写字母表示氮肥水平间差异达1%和5%显著水平 The different capital and small letters represent significant difference between nitrogen levels at the 1% and 5% levels, respectively; ** 表示不同品种类型平均值之间差异达1%显著水平 Indicate the average value between different varieties were significantly different at the 1% level.

2.3 不同类型品种水稻氮素积累特性

2.3.1 氮素阶段积累量及其比例 对氮素阶段性积累量的分析(表8),随施氮量增加,不同类型品种水稻移栽－拔节、拔节－抽穗阶段及总的氮素积累量均表现为增加的趋势,超过一定施氮量后增幅减小,说明施氮可以促进植株对氮素吸收,但过高的氮肥投入促进作用不明显。抽穗－成熟阶段的氮素积累量随施氮量的增加表现为先增后降的趋势,在高氮条件下,氮素积累量开始下降,超级粳稻在施N 300 kg/hm²水平下达到最大值,普通粳稻在N 262.5 kg/hm²条件下达到最大值。不同类型品种间相比,拔节前,超级粳稻与普通粳稻的氮素积累量相当;拔节至抽穗期,超级粳稻氮素积累量迅速增加,较普通粳稻高5.91%～10.30%,平均高6.55%,差异极显著;抽穗－成熟期超级粳稻较普通粳稻高5.41%～14.03%,在N 300 kg/hm²水平差异更明显,平均高9.66%;超级粳稻总的氮素积累量较普通粳稻高2.76%～5.74%,平均高4.58%,差异极显著。说明超级粳稻氮素积累量在抽穗到成熟阶段增幅最大,且在高氮条件下优势更明显。

对各生育阶段氮素积累比例进行分析(表9),随施氮量的增加,各水稻品种移栽－拔节期氮素积累比例表现为减小的趋势,拔节－抽穗期表现为增加的趋势,而抽穗－成熟期表现为先增后降的趋势。不同品种类型间相比较,拔节前,普通粳稻氮素积累比例较超级粳稻高,而拔节后尤其是抽穗－成熟期超级粳稻的氮素积累比例更高。

2.3.2 氮素利用率的差异 表10表明,氮素利用率的三个参数均随着施氮量增加表现为先增后降的趋势,氮肥投入越高,氮素利用率越小。不同类型品种间相比较,氮素表观利用率超级粳稻在施N 225 kg/hm²水平下最高,普通粳稻在N 187.5 kg/hm²水平下最高,各氮肥水平下超级粳稻较普通粳稻高0.16%～5.51%,平均高3.73%,差异极显著;氮素农学利用率超级粳稻和普通粳稻都在施N 225 kg/hm²

表 8　不同氮肥水平下不同类型品种水稻阶段氮素积累量(kg/hm²)

Table 8　N accumulation at each growth stage in different variety type rice under different N levels

品种类型 Variety type	施氮水平 N level (kg/hm²)	移栽－拔节期 Transplanting – Jointing	拔节－抽穗期 Jointing – Heading	抽穗－成熟期 Heading – Maturity	总积累量 Total accumulation
超级粳稻 SJR	0	39.29 Ff	28.02 Fg	16.64 Ef	83.96 Ff
	150	62.31 Ee	54.98 Ef	27.58 De	144.86 Ee
	187.5	68.67 Dd	63.19 De	30.54 Cd	162.40 Dd
	225	74.09 Cc	71.75 Cd	33.46 Bc	179.30 Cc
	262.5	78.26 Bb	78.90 Bc	35.42 Ab	192.58 Bb
	300	82.83 Aa	86.15 Ab	36.49 Aa	205.46 Aa
	337.5	84.06 Aa	89.64 Aa	36.36 Aab	210.06 Aa
	平均 Mean	69.93	67.52**	30.93**	168.37**
普通粳稻 OJR	0	37.60 Ff	26.46 Gg	15.67 Df	79.73 Ef
	150	61.63 Ee	49.84 Ff	25.99 Ce	137.46 De
	187.5	69.20 Dd	59.87 Ee	28.98 Bd	158.04 Cd
	225	73.91 Cc	67.18 Dd	30.42 Ac	171.51 Bc
	262.5	78.86 Bb	74.45 Cc	32.33 Aa	185.64 Ab
	300	81.40 ABab	80.76 Bb	32.14 Aab	194.30 Aab
	337.5	83.38 Aa	85.01 Aa	31.88 Ab	200.27 Aa
	平均 Mean	69.42	63.37	28.20	160.99

注(Note):SJR—Super *japonica* rice; OJR— Ordinary *japonica* rice. 不同大小写字母表示氮肥水平间差异达 1% 和 5% 显著水平 The different capital and small letters represent significant difference between nitrogen levels at the 1% and 5% levels, respectively; ** 表示不同品种类型平均值之间差异达 1% 显著水平 Indicate the average value between different varieties were significantly different at the 1% level.

表 9　不同氮肥水平下不同品种类型水稻阶段氮素积累比例(%)

Table 9　N accumulation ratio at each growth stage in different variety type rice under different N levels

品种类型 Variety type	施氮水平 N level (kg/hm²)	移栽－拔节期 Transplanting – Jointing	拔节－抽穗期 Jointing – Heading	抽穗－成熟期 Heading – Maturity
超级粳稻 SJR	0	46.80 Aa	33.38 Ff	19.82 Aa
	150	43.01 Bb	37.95 Ee	19.04 ABb
	187.5	42.28 Cc	38.91 Dd	18.81 Bb
	225	41.32 Dd	40.02 Cc	18.66 Bb
	262.5	40.64 Dde	40.97 Bb	18.39 BCbc
	300	40.31 De	41.93 ABa	17.76 Cc
	337.5	40.02 De	42.67 Aa	17.31 Cc
	平均 Mean	42.05**	39.40**	18.54**
普通粳稻 OJR	0	47.16 Aa	33.19 Fg	19.66 Aa
	150	44.83 Bb	36.26 Ef	18.91 ABab
	187.5	43.79 Cc	37.88 De	18.33 BCbc
	225	43.09 Ccd	39.17 Cd	17.74 Cc
	262.5	42.48 CDde	40.10 Cc	17.42 CDc
	300	41.89 De	41.57 Bb	16.54 Dd
	337.5	41.63 De	42.45 Aa	15.92 Dd
	平均 Mean	43.55	38.66	17.79

注(Note):SJR—Super *japonica* rice; OJR— Ordinary *japonica* rice. 不同大小写字母表示氮肥水平间差异达 1% 和 5% 显著水平 The different capital and small letters represent significant difference between nitrogen levels at the 1% and 5% levels, respectively; ** 表示不同品种类型平均值之间差异达 1% 显著水平 Indicate the average value between different varieties were significantly different at the 1% level.

表10 不同氮肥水平下不同品种类型水稻氮素利用率

Table 10 N utilization efficiencies in different variety type rice under different N levels

品种 Variety	施氮水平 N level (kg/hm^2)	表观利用率 RE (%)	农学利用率 AE (kg/kg)	生理利用率 PE (kg/kg)
超级粳稻 SJR	150	40.61 Cc	15.43 Ab	38.01 Aa
	187.5	41.84 ABab	16.49 Aa	39.41 Aa
	225	42.37 Aa	16.78 Aa	39.60 Aa
	262.5	41.38 BCbc	16.42 Aa	39.67 Aa
	300	40.50 Cc	15.32 Ab	37.83 Aa
	337.5	37.36 Dd	12.51 Bc	33.48 Bb
	平均 Mean	40.68**	15.49*	38.00*
普通粳稻 OJR	150	38.48 Cc	13.93 Bb	36.20 Bb
	187.5	41.77 Aa	15.35 Aa	36.76 ABb
	225	40.79 Bb	16.09 Aa	39.44 Aa
	262.5	40.35 Bb	15.89 Aa	39.38 Aa
	300	38.19 Cc	12.09 Cc	31.67 Cc
	337.5	35.71 Dd	9.91 Dd	27.75 Dd
	平均 Mean	39.21	13.88	35.20

注(Note): RE— Recovery efficiency; AE—Agronomic efficiency; PE—Physiological efficiency. 不同大小写字母表示氮肥水平间差异达1%和5%显著水平 The different capital and small letters represent significant difference between nitrogen level was significant at the 1% and 5% levels, respectively; *、**表示不同品种类型平均值之间差异达5%和1%显著水平 Indicate the average value between different varieties were significantly different at 5% and 1% levels, respectively.

水平下达到最高,各氮肥水平下超级粳稻比普通粳稻高3.32%～26.69%,平均高11.63%,差异显著,在施N 300 kg/hm^{2}水平后差距较大;氮素生理利用率超级粳稻在N 262.5 kg/hm^{2}水平下最高,普通粳稻在N 225 kg/hm^{2}水平下最高,各氮肥水平下超级粳稻比普通粳稻高0.41%～20.63%,平均高7.95%,差异显著,在N 300 kg/hm^{2}水平后差距较大。从表9中也可以看出,普通粳稻在高氮水平下氮素利用率下降幅度较大,而超级粳稻则下降平稳,表明超级粳稻对氮肥的适应范围较广,高氮条件下仍表现出一定优势。

3 讨论

3.1 粳型超级稻高产形成及氮素利用的分析

与普通粳稻相比,超级粳稻在各氮肥水平下的产量均具有绝对优势。超级粳稻高产的形成,主要是在适宜穗数的基础上,通过争取大穗,提高群体颖花量[11]来提高群体的产量,尽管超级粳稻的结实率可能由于弱势粒结实不稳定[12,13]等原因要略低于普通粳稻,但超级粳稻每穗粒数多、粒重高,最终的产量要显著高于普通粳稻。为了获得上述高产,与普通粳稻相比,超级粳稻在物质生产方面具有以下特征:在有效分蘖临界叶龄期及时够苗,分蘖增长平稳,拔节期高峰苗相对较小,拔节后茎蘖消亡相对平缓,抽穗期达到预期穗数,成穗率高;个体生长健壮,冠层上部叶面积较大,高效叶片数多[14,15],在拔节后叶面积指数和光合势极显著提高,光合物质生产逐渐增加;抽穗后群体不早衰,绿叶面积仍较多,光合功能维持时间长,干物质积累多。因此超级粳稻总生物量大,为高产奠定基础。除此以外,较高的吸氮量和氮素利用率也是超级粳稻获得高产的重要因素。超级粳稻氮素吸收利用有如下特点:拔节前吸氮量与普通粳稻相当,拔节后氮素积累量和积累比例提高,尤其在抽穗至成熟阶段优势更明显,从而促进了氮素向籽粒中转移,有利于籽粒灌浆;氮素利用率在各氮肥水平下都较普通粳稻高,对氮肥的适应范围广,在施氮量为150～300 kg/hm^{2}水平下均能保持较高的氮素生理利用率。因此,在产量提高

的同时能保证肥料的高效利用。因此,在当今土壤背景氮越来越高的情况下[16],超级粳稻具有更强的适应性和增产潜力。

3.2 粳型超级稻高产栽培途径的探讨

当前超级粳稻生产中依旧沿用人们所习惯的普通粳稻栽培管理模式,限制了超级粳稻品种高产和超高产潜力的发挥[17],只有良种良法配套才能实现水稻增产。超级粳稻主要依靠健壮的个体来提高群体质量,大田机械化生产中通过培育壮秧、插足基本苗数来建立合理的群体高光效结构,保证有效穗数提高成穗率。超级稻的适宜施肥量因品种、地力、栽培管理方式等不同而存在差异[7,9,10]。本研究中,超级粳稻在施氮量 300 kg/hm^2 水平下产量最高,产量能够达到 10.5 t/hm^2 以上,表明超级粳稻适宜用作机插。相对于普通粳稻,超级粳稻获得高产所需的氮肥量大,而且在高氮条件下有高的生物量和氮素积累,因此在生产中须保证氮肥的足量投入。除此之外,超级粳稻由于穗型较普通粳稻大,应针对其干物质和氮素积累特点,严格控制基肥和分蘖肥施用时间和用量,保证超级粳稻生育前期氮素适度积累[18],控制群体稳步增长;将穗肥施用时期提前,施肥比例增加,能协调拔节至抽穗阶段营养生长和生殖生长,培育粗壮的茎秆和挺拔的株型,提高光合物质生产,从而保证在抽穗后能有更多的同化物输出,而且在生育后期能维持叶片不早衰,进一步提高光合产物积累促进大穗形成;同时通过施用钾肥增加茎秆强度[19],为大穗提供强有力的支撑,提高抗倒能力。超级粳稻地上部分生长优势与根系发育密切相关[20,21],利用轻搁田与结实期干湿交替灌溉技术能有效提高根系活力[22],增强生育后期根系吸氮能力,提高水稻氮素利用效率。保证氮肥投入是增产的有效措施,氮肥过量施用会降低肥料利用率,目前生产上选用的缓释氮肥以及采用实地氮肥管理技术(SSNM)、水稻精确施肥技术[23,24]并结合水分管理,均能在提高超级粳稻产量的同时提高氮素利用效率。

4 结论

与常规普通粳稻相比,超级粳稻产量构成表现为穗数稳、粒数多、总颖花量高;群体特征表现为茎蘖消长平稳,叶面积指数和光合势较高,拔节后干物质积累量和积累比例较高;氮素吸收和利用表现为拔节后氮素积累量和积累比例高,氮素利用效率较高,且在高氮条件下比普通粳稻更能发挥优势。

参 考 文 献:

[1] 王志敏, 王树安. 发展超高产技术, 确保中国未来 16 亿人口的粮食安全[J]. 中国农业科技导报, 2000, 2(7): 8-11.
Wang Z M, Wang S A. Develop super high yield techniques of grain crops for feeding 1.6 billion people in future[J]. Rev. China Agric. Sci. Technol., 2000, 2(7): 8-11.

[2] 凌启鸿, 张洪程, 丁艳锋, 等. 水稻高产技术的新发展—精确定量栽培[J]. 中国稻米, 2005, 1: 3-7.
Ling Q H, Zhang H C, Ding Y F *et al*. The new development of the technique for high yield rice _ precise and quantitative cultivation[J]. China Rice, 2005, 1: 3-7.

[3] 徐庆国. 超级稻的研究现状与发展对策探讨[J]. 作物研究, 2006(1): 13-16, 25.
Xu Q G. Discussion on the research and development countermeasures of super rice[J]. Crop Res., 2006(1): 13-16, 25.

[4] 凌启鸿. 水稻群体质量理论与实践[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995: 34-44.
Ling Q H. Theory and practice of rice population quality[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995: 34-44.

[5] 史鸿儒, 张文忠, 解文孝, 等. 不同氮肥施用模式下北方粳型超级稻物质生产特性分析[J]. 作物学报, 2008, 34(11): 1985-1993.
Shi H R, Zhang W Z, Xie W X *et al*. Analysis of matter production characteristics under different nitrogen application patterns of *japonica* super rice in North China[J]. Acta Agron. Sin, 2008, 34(11): 1985-1993.

[6] 陈爱忠, 潘晓华, 吴建富, 等. 施氮量对双季超级稻产量、干物质生产及氮素吸收利用的影响[J]. 杂交水稻, 2011, 26(2): 58-63.
Chen A Z, Pan X H, Wu J F *et al*. Effects of nitrogen application amount on yield, dry matter production and N-uptake and utilization of double-cropping super rice[J]. Hybrid Rice, 2011, 26(2): 58-63.

[7] 唐启源, 邹应斌, 米湘成, 等. 不同施氮条件下超级杂交稻的产量形成特点与氮肥利用[J]. 杂交水稻, 2003, 18(1): 44-48.
Tang Q Y, Zou Y B, Mi X C *et al*. Grain yield construction and N fertilizer efficiency of super hybrid rice under different N applications[J]. Hybrid Rice, 2003, 18(1): 44-48.

[8] 吴桂成, 张洪程, 戴其根, 等. 南方粳型超级稻物质生产积累及超高产特征的研究[J]. 作物学报, 2010, 36 (11): 1921-1930.
Wu G C, Zhang H C, Dai Q G *et al*. Characteristics of dry matter production and accumulation and super-high yield of *japonica* super rice in South China[J]. Acta Agron. Sin, 2010, 36 (11): 1921-1930.

[9] 李国业, 张洪程, 李敏, 等. 超级杂交早稻氮肥群体最高生产力及其增长特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 786-795.
Li G Y, Zhang H C, Li M *et al*. Population productivity and properties of early super hybrid cultivars under nitrogen fertilization

[J]. Plant Nutr. Fert. Sci. 2012, 18(4): 786-795.

[10] 张军, 张洪程, 戴其根, 等. 淮北不同地力水平麦茬田上施氮量对超级稻产量形成的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(10): 2297-2305.
Zhang J, Zhang H C, Dai Q G *et al*. Effects of nitrogen application rate on the yield and yield formation of super rice in rice-wheat double cropping system under different levels of soil fertility in Huaibei region[J]. Chin. J. Ecol., 2011, 30(10): 2297-2305.

[11] 吴桂成, 张洪程, 钱银飞, 等. 粳型超级稻产量构成因素协同规律及超高产特征的研究[J]. 中国农业科学, 2010, 43(2): 266-276.
Wu G C, Zhang H C, Qian Y F *et al*. Rule of grain yield components from high yield to super high yield and the characters of super-high yielding *japonica* super rice[J]. Sci. Agric. Sin., 2010, 43(2): 266-276.

[12] Kato T, Shinmura D, Taniguchi A. Activities of enzymes for sucrose-starch conversion in developing endosperm of rice and their association with grain filling in extra-heavy panicle types [J]. Plant Prod Sci, 2007, 10: 442-450.

[13] Yang J, Zhang J. Grain filling problem in "super" rice[J]. J Exp Bot, 2010, 61: 1-5

[14] 刘建丰, 袁隆平, 邓启云, 等. 超高产杂交稻的光合特性研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38: 258-264.
Liu J F, Yuan L P, Deng Q Y *et al*. A study on characteristics of photosynthesis in super high-yielding hybrid rice[J]. Sci Agric Sin., 2005, 38: 258-264.

[15] 翟虎渠, 曹树青, 万建民, 等. 超高产杂交稻灌浆期光合功能与产量的关系[J]. 中国科学(C辑), 2002, 32(3): 211-217.
Zhai H Q, Cao S Q, Wan J M *et al*. Relation between photosynthetic functions at grain-filling stage and yield of super high-yielding hybrid rice[J]. Sci. China (Ser. C), 2002, 32(3): 211-217.

[16] Novoa R, Loomis R S. Nitrogen and plant production[J]. Plant Soil, 1981, 58: 177-204.

[17] Peng S B, Tang Q Y, Zou Y B. Current status and challenges of rice production in China[J]. Plant Prod. Sci., 2009, 12: 3-8.

[18] 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 geno-types with different N use efficiencies[J]. Acta Agron. Sin., 2008, 34(1): 119-125.

[19] 宋桂云, 徐正进, 陈温福, 等. 田间低钾对不同穗型水稻钾的吸收和利用效率的影响[J]. 华北农学报, 2006, 21(6): 89-94.
Song G Y, Xu Z J, Chen W F *et al*. Influences of low potash on K absorption and use efficiency of different panicle rice variety [J]. Acta Agric. Boreali-Sin., 2006, 21(6): 89-94.

[20] 许明, 贾德涛, 马殿荣, 等. 北方超级粳稻根系生理、叶片光合性能特点及其相互关系[J]. 作物学报, 2010, 36(6): 1030-1036.
Xu M, Jia D T, Ma D R *et al*. Correlation of root physiology and leaf photosynthesis characteristics in northern Chinese *japonica* super rice[J]. Acta Agron. Sin., 2010, 36(6): 1030-1036.

[21] 袁小乐, 潘晓华, 石庆华, 等. 超级早、晚稻的养分吸收和根系分布特性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 27-32.
Yuan X L, Pan X H, Shi Q H *et al*. Characteristics of nutrient uptake and root system distribution in super early and super late rice[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(1): 27-32.

[22] 杨建昌, 杜永, 吴长付, 等. 超高产粳型水稻生长发育特性的研究[J]. 中国农业科学, 2006,39(7): 1336-1345.
Yang J C, Du Y, Wu C F *et al*. Growth and development characteristics of super-high-yielding mid-season *japonica* rice [J]. Sci. Agric. Sin., 2006, 39(7): 1336-1345.

[23] 张福锁, 马文奇, 陈新平. 养分资源综合管理理论与技术概论[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006. 48-58.
Zhang F S, Ma W Q, Chen X P. Introduction to nutrient resource integration management theory and technology [M]. Beijing: China Agricultural University press, 2006. 48-58.

[24] Peng S B, Buresh R J, Huang J L *et al*. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China[J]. Field Crops Res., 2006, 96: 37-47.