

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2014.01235

光、氮及其互作对超级粳稻产量和氮、磷、钾吸收的影响

王亚江 魏海燕* 颜希亭 葛梦婕 孟天瑶 张洪程 戴其根
霍中洋 许轲 费新茹

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

摘 要: 大田条件下以超级粳稻南粳 44 和宁粳 3 号为材料, 设置 2 种氮肥水平(N10: 150 kg hm⁻², N20: 300 kg hm⁻²) 和 3 种遮光处理(L1: 不遮光, L2: 抽穗前遮光 20 d, L3: 抽穗后遮光 20 d), 研究光、氮及其互作对超级粳稻产量和氮、磷、钾吸收的影响。结果表明, 同一氮肥水平下产量呈现 L1>L3>L2。其中, L2 使植株在拔节至抽穗阶段及抽穗期的氮、磷、钾积累量显著下降, 主要由于 L2 显著降低了抽穗前期的根系 α -NA 氧化量及根干重, 导致根系吸收养分能力下降, 最终产量显著低于 L1, 达 30.58%~35.26%。L3 使植株在抽穗至成熟阶段及成熟期的氮、磷、钾积累量显著下降, 主要由于 L3 显著降低了抽穗后期的根系 α -NA 氧化量及根干重。尽管在抽穗后随着植株根系逐渐衰老及机能下降, L3 对根系、养分吸收及最终产量的影响要小于 L2, 但最终产量依然显著低于 L1, 达 10.91%~18.47%。L2 和 L3 条件下, 随着氮肥水平增加, 植株根系 α -NA 氧化量及根干重显著增加, 导致拔节至成熟期各阶段的氮、磷、钾积累量显著增加, 最终产量及氮肥利用率显著提高。由此可见氮肥施用能部分弥补弱光逆境对超级粳稻氮、磷、钾吸收及产量的影响。

关键词: 超级粳稻; 遮光; 氮肥; 产量; 养分吸收

Effects of Light, Nitrogen and Their Interaction on Grain Yield and Nitrogen, Phosphorus and Potassium Absorption in *Japonica* Super Rice

WANG Ya-Jiang, WEI Hai-Yan*, YAN Xi-Ting, GE Meng-Jie, MENG Tian-Yao, ZHANG Hong-Cheng, DAI Qi-Gen, HUO Zhong-Yang, XU Ke, and FEI Xin-Ru

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

Abstract: A field experiment was conducted using *japonica* super rice Nanjing 44 and Ningjing 3 with two nitrogen fertilization levels (N10: 150 kg ha⁻¹; N20: 300 kg ha⁻¹) and three shading treatments (L1: no shading; L2: shading 20 days before heading; L3: shading 20 days after heading) to study the effects of light, nitrogen and their interaction on grain yield and NPK absorption. Results showed that yield under the same level of nitrogen fertilizer was L1>L3>L2. Compared with L1, L2 significantly reduced NPK accumulation from jointing to heading and at whole heading stage, mainly due to the significant decrease of the root oxidation ability of α -NA and root dry weight before heading, resulting in decreased root nutrient uptake capacity and the final yield decrease of 30.58%–35.26%. L3 significantly reduced NPK accumulation from heading to maturity and at whole maturity stage, mainly due to the significant decrease of the root oxidation ability of α -NA and root dry weight after heading. Although the root was gradual aging with the function declining after heading, resulting in the reduced effect on root system, nutrient absorption and yield in L3 than in L2, the final yield was still 10.91%–18.47% lower in L3 than in L1. Under L2 and L3 conditions, with increasing nitrogen level, the root oxidation ability of α -NA and root dry weight increased significantly, resulting in that NPK accumulation increased significantly in various stages from jointing to maturity, then the final yield and nitrogen use efficiency improved significantly. This indicated that nitrogen fertilizer could partially offset the impact of low light stress on NPK nutrient absorption and grain yield in *japonica* super rice.

本研究由国家自然科学基金项目(31101102 和 30971732), 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20103250120003), 国家粮食丰产科技工程项目(2011BAD16B03)和江苏高校优势学科建设工程项目资助。

* 通讯作者(Corresponding author): 魏海燕, E-mail: wei_haiyan@163.com, Tel: 0514-87979220

第一作者联系方式: E-mail: wyj19900120@163.com

Received(收稿日期): 2014-02-05; Accepted(接受日期): 2014-04-16; Published online(网络出版日期): 2014-05-20.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20140524.2130.30.html>

Keywords: *Japonica* super rice; Shading; Nitrogen; Yield; Nutrient uptake

在超级稻高产形成过程中,光照时间及光照强度有重大影响^[1-2],氮肥用量、运筹方式以及氮肥种类也有重要意义^[3-5]。根据本课题组已有的研究表明^[9],超级稻生育过程中,不同时间段的遮光对水稻 LAI、光合势、干物质积累量均会造成一定的影响,导致最终的群体颖花量、结实率、千粒重及产量有显著的差异,氮肥施用能部分弥补弱光逆境对超级稻物质生产及产量的影响。而在产量的形成过程中,氮、磷、钾元素对器官建成^[7]、产量潜力发挥^[8-11]具有重要的作用,但不同生育阶段遮光及氮肥施用对水稻吸收氮、磷、钾元素有何影响尚不清楚,因此本文在前期研究的基础上,继续深入研究以探明不同光、氮处理下氮、磷、钾养分吸收特性及其与产量、根系形态生理的关系,为超级稻超高产栽培及养分管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点及供试材料

扬州大学农学院试验农场的土质为沙壤土,地力较好、营养平衡。前茬为小麦。土壤含全氮 0.13%、碱解氮 87.45 mg kg⁻¹、速效磷 32.8 mg kg⁻¹、速效钾 88.3 mg kg⁻¹。

供试品种为超级粳稻品种宁粳 3 号(生长前期分蘖强,长势旺,后期熟相较好,抗倒性较强,落粒性中等,全生育期 158 d 左右,株高 98 cm 左右)和南粳 44 (生长前期分蘖较强,株型紧凑,后期群体整齐度好,熟相好,穗型大,结实率高,全生育期 158 d 左右,株高 100 cm 左右)。

1.2 试验设计

2011—2012 年采用二因素随机区组设计,设置 2 种氮素水平,即 N10 (150 kg hm⁻²)和 N20 (300 kg hm⁻²); 3 种遮光处理,即 L1 (不遮光)、L2 (抽穗前遮光 20 d)和 L3 (抽穗后遮光 20 d),使用黑色遮阳网遮光,遮光率达 50%。于 5 月 17 日播种,6 月 14 日移栽,栽插密度为 27 万穴 hm⁻² (14.4 cm × 26.0 cm)。双本栽插。小区面积 15 m²,各处理重复 3 次。为保证单独排灌,作埂隔离各小区并用塑料薄膜覆盖埂体。为方便根系取样,移栽前在各小区打入长轴半径为 13.0 cm,短轴半径为 7.2 cm,深 30 cm 的椭圆形铁管,将管内泥土挖出,装入特制的圆形营养袋,再将袋紧贴管壁,然后抽出铁管,保留带土营养袋。

营养袋材料为黑色耐氧化聚乙烯膜,口径 21 cm,高 30 cm,袋底和侧面设 8 个口径为 0.5 cm 的滤水透气孔。每小区以 S 形填埋 12 个带土营养袋,然后整地、覆水,施用基肥,在每个营养袋中央按照要求栽插水稻秧苗。基肥 蘖肥 穗肥=2.5 2.5 5.0,其中穗肥分别于倒四叶和倒二叶叶龄期等量施入。每公顷分别以过磷酸钙和氯化钾的形式基施 P₂O₅ 150 kg 和 K₂O 150 kg。其他管理措施按常规栽培要求实施。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 植株氮、磷、钾的测定 分别于拔节、抽穗和成熟期从每小区取有代表性植株 4 穴,105 杀青,80 烘至恒重后测定各器官(茎鞘、叶片和穗)及全株的干物质重。植株经粉碎后,用半微量凯氏定氮法测定氮素含量,钒钼黄比色法测定磷素含量,火焰光度计法测定钾素含量。

氮(磷、钾)素积累量(kg hm⁻²) = 该时期地上部干物重×含氮(磷、钾)率

氮(磷、钾)素阶段积累量(kg hm⁻²) = 后一时期的氮(磷、钾)素积累量-前一时期的氮(磷、钾)素积累量

氮肥吸收利用率(%) = (施氮区植株吸氮量-氮空白区植株吸氮量)/施氮量

氮(磷、钾)籽粒生产效率(kg kg⁻¹) = 水稻稻谷产量/水稻吸氮(磷、钾)量

1.3.2 根系相关性状及活性测定 于拔节期、抽穗前 10 d、抽穗期、抽穗后 10 d 和成熟期各取埋入土中的 4 个营养袋,剥去袋体,置 40 目尼龙网袋中用流水冲洗获得完整根系,其中两穴用于地上部及根干重测定,将鲜根及地上部 105 杀青 30 min,80 烘干至恒重,计算根冠比。用 α-NA 氧化法测定另外两穴根系对 α-NA 的氧化量。

1.3.3 数据计算和统计分析 两年试验的重复性较好,处理间各指标值变化趋势一致,因此,本文取 2012 年数据。以 Microsoft Excel 2003 处理数据, DPS 软件进行其他统计分析。

2 结果与分析

2.1 光、氮及其互作对超级粳稻产量的影响

由图 1 可知,2 个超级粳稻品种年度间产量差异均不大($F = 0.20$, $F = 3.24$)。以 2012 年为例,2 个超级粳稻品种在 2 种氮肥水平的产量均呈现 L1>L3>

L2, 差异显著。其中 N10 条件下 L1 比 L2 高 30.58%~35.26%, L1 比 L3 高 10.91%~14.43%; N20 条件下 L1 比 L2 高 30.71%~30.75%, L1 比 L3 高 15.42%~18.47%。不同光氮处理的产量, 两个品种均呈现 N20L1>N20L3>N20L2>N10L1>N10L3>N10L2, 差异显著。

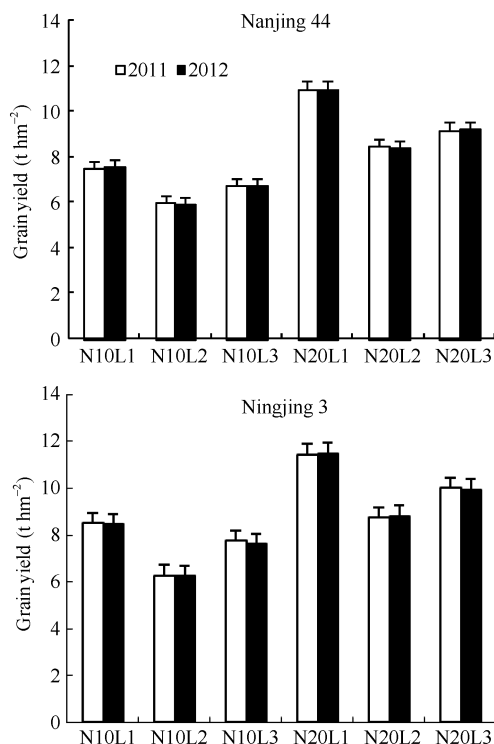


图1 光、氮及其互作下超级粳稻的产量

Fig. 1 Yield of super rice under effects of light, nitrogen and their interaction

N10: 150 kg hm⁻² 纯氮; N20: 300 kg hm⁻² 纯氮; L1: 不遮光; L2: 抽穗前遮光 20 d; L3: 抽穗后遮光 20 d。

N10: 150 kg hm⁻² N applied; N20: 300 kg hm⁻² N applied; L1: no shading; L2: shading 20 days before heading; L3: shading 20 days after heading.

2.2 光、氮及其互作对超级粳稻氮、磷、钾吸收利用的影响

2.2.1 对氮素阶段积累量及比例的影响 由表1可知, 较之L1, L2使2个超级粳稻品种在拔节至抽穗阶段及抽穗至成熟阶段的氮素积累量显著下降; L3则使2个超级粳稻品种在抽穗至成熟阶段的氮素积累量显著下降。L2和L3条件下, 随着氮肥水平增加, 各生育阶段的氮素积累量均显著增加。

对于氮素阶段积累比例, 较之L1, L2使2个超级粳稻品种在拔节至抽穗阶段显著下降, 而拔节前则显著增加; L3使2个超级粳稻品种在抽穗至成熟阶段显著下降, 而拔节前及拔节至抽穗阶段则显著

增加。L2和L3条件下, 随着氮肥水平增加, 拔节至抽穗阶段的氮素积累比例呈增加趋势, 而拔节前及抽穗至成熟阶段呈下降趋势。

2.2.2 对氮素籽粒生产效率及氮肥利用率的影响

图2表明, 2个超级粳稻品种在2种氮肥水平下的氮素籽粒生产效率及氮肥利用率均呈现 L1>L3>L2, 差异显著。其中氮素籽粒生产效率方面, N10 条件下 L1 比 L2 高 13.17%~18.27%; N20 条件下 L1 比 L2 高 16.10%~17.93%。2个品种的氮素籽粒生产效率均呈现 N10L1>N20L1>N10L3>N20L3>N10L2>N20L2, 差异均显著。氮肥吸收利用率方面, N10 条件下 L1 比 L2 高 39.41%~41.96%; N20 条件下 L1 比 L2 高 20.01%~21.49%。2个品种的氮肥吸收利用率均呈现 N10L1>N20L1>N20L3>N10L3>N20L2>N10L2, 差异均显著。

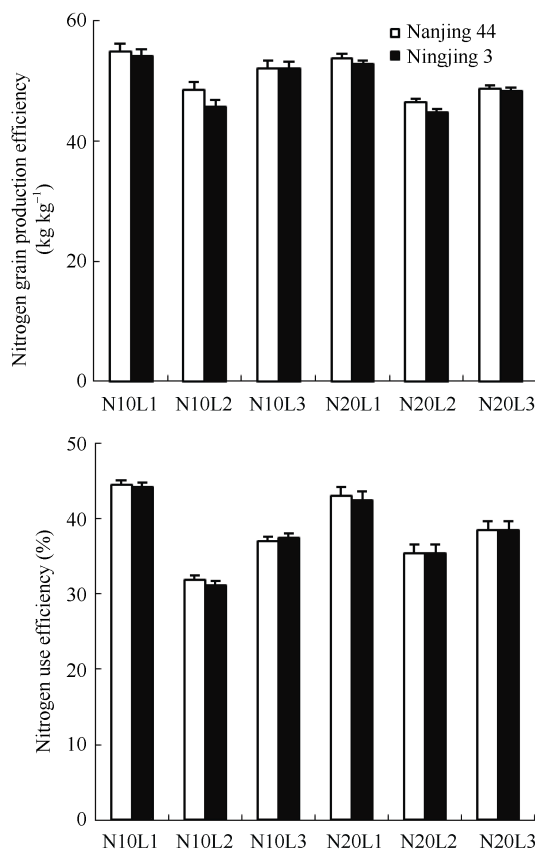


图2 光、氮及其互作下超级粳稻的氮素籽粒生产效率及氮肥利用率

Fig. 2 Nitrogen grain production efficiency and nitrogen use efficiency of super rice under effects of light, nitrogen and their interaction

N10: 150 kg hm⁻² 纯氮; N20: 300 kg hm⁻² 纯氮; L1: 不遮光; L2: 抽穗前遮光 20 d; L3: 抽穗后遮光 20 d。

N10: 150 kg hm⁻² N applied; N20: 300 kg hm⁻² N applied; L1: no shading; L2: shading 20 days before heading; L3: shading 20 days after heading.

表 1 光、氮及其互作对超级粳稻氮素阶段积累量及比例的影响
Table 1 Effects of light, nitrogen and their interaction on periodical nitrogen accumulation and its ratio in super rice

品种 Cultivar	氮肥水平 Nitrogen level	光处理 Light treatment	拔节前 SO-EG		拔节至抽穗 EG-HD		抽穗至成熟 HD-MA	
			N 积累量 Nitrogen accumulation (kg hm ⁻²)	比例 Ratio (%)	N 积累量 Nitrogen accumulation (kg hm ⁻²)	比例 Ratio (%)	N 积累量 Nitrogen accumulation (kg hm ⁻²)	比例 Ratio (%)
南粳 44 Nanjing 44	N10	L1	48.73 Bb	34.49 Dd	64.34 Cc	45.53 Cc	28.23 Cc	19.98 Aa
		L2	48.43 Bb	39.55 Aa	50.13 Dd	40.94 Dd	23.89 Dd	19.51 Aa
		L3	48.36 Bb	37.15 Bb	65.15 Cc	50.04 Bb	16.68 Ff	12.81 Cc
	N20	L1	66.32 Aa	32.57 Ee	101.75 Aa	49.97 Bb	35.55 Aa	17.46 Bb
		L2	66.61 Aa	36.84 Bb	82.86 Bb	45.83 Cc	31.35 Bb	17.34 Bb
		L3	66.98 Aa	35.29 Cc	101.51 Aa	53.48 Aa	21.31 Ee	11.23 Dd
	<i>F</i> 值 <i>F</i> -value	Nitrogen (N)	503.11**	440.15**	6137.75**	626.29**	621.69**	347.96**
		Light (L)	0.01	687.58**	603.26**	808.62**	854.46**	1522.38**
		N × L	0.14	7.05*	9.79*	6.35*	12.59*	5.99*
宁粳 3 号 Ningjing 3	N10	L1	51.41 Bb	33.02 Dd	72.91 Cc	46.82 Cd	31.40 Cc	20.17 Aa
		L2	51.42 Bb	37.76 Aa	57.38 Dd	42.14 Df	27.36 Dd	20.11 Aa
		L3	51.94 Bb	35.64 BCc	73.67 Cc	50.54 Bb	20.15 Ff	13.82 Cc
	N20	L1	71.47 Aa	32.99 Dd	106.62 Aa	49.21 Bc	38.58 Aa	17.80 Bb
		L2	71.41 Aa	36.53 Bb	89.39 Bb	45.73 Ce	34.68 Bb	17.74 Bb
		L3	71.94 Aa	35.13 Cc	107.08 Aa	52.29 Aa	25.77 Ee	12.58 Dd
	<i>F</i> 值 <i>F</i> -value	Nitrogen (N)	550.87**	23.79**	29263.49**	179.27**	974.93**	181.38**
		Light (L)	0.16	393.34**	3317.82**	504.98**	1085.91**	673.69**
		N × L	0.01	8.31*	7.41*	7.85*	6.43*	6.44*

同一品种的相同数据列, 标以不同大小写字母的数字分别在 1% 和 5% 水平差异显著。N10: 150 kg hm⁻² 纯氮; N20: 300 kg hm⁻² 纯氮; L1: 不遮光; L2: 抽穗前遮光 20 d; L3: 抽穗后遮光 20 d。* 和 ** 分别表示在 5% 和 1% 水平上差异显著。

Values within the same column for a cultivar followed by different letters are significantly different at 1% (capital) and 5% (lowercase) probability levels, respectively. N10: 150 kg hm⁻² N applied; N20: 300 kg hm⁻² N applied; L1: no shading; L2: shading 20 days before heading; L3: shading 20 days after heading. SO: sowing; EG: elongation; HD: heading; MA: maturing. * and ** denote significant difference at 5% and 1% probability levels, respectively.

2.2.3 对磷素阶段积累量及比例的影响 由表 2 可知, 较之 L1, L2 使 2 个超级粳稻品种在拔节至抽穗阶段及抽穗至成熟阶段的磷素积累量显著下降; L3 则得 2 个超级粳稻品种在抽穗至成熟阶段的磷素积累量显著下降。L2 和 L3 条件下, 随着氮肥水平增加, 各生育阶段的磷素积累量均显著增加。

对于磷素阶段积累比例, 较之 L1, L2 使 2 个超级粳稻品种在拔节至抽穗阶段显著下降, 而拔节前显著增加; L3 使 2 个超级粳稻品种在抽穗至成熟阶段显著下降, 而拔节前及拔节至抽穗阶段显著增加。L2 和 L3 条件下, 随着氮肥水平增加, 拔节至成熟阶段的磷素积累比例呈增加趋势, 而抽穗至成熟阶段呈下降趋势。

2.2.4 对磷素籽粒生产效率的影响 图 3 表明, 2 个超级粳稻品种在 2 种氮肥水平下的磷素籽粒生产效率均呈现 L1>L3>L2, 差异显著。其中 N10 条件下 L1 比 L2 高 15.46%~17.32%; N20 条件下 L1 比 L2 高 15.45%~16.15%。对于磷素籽粒生产效率, 南粳 44 呈现 N10L1>N20L1>N10L3>N10L2>N20L3>N20L2; 宁粳 3 号呈现 N10L1>N10L3>N20L1>N20L3>N10L2>N20L2, 差异均显著。

2.2.5 对钾素阶段积累量及比例的影响 由表 3 可知, 较之 L1, L2 使 2 个超级粳稻品种在拔节至抽穗阶段及抽穗至成熟阶段的钾素积累量显著下降; L3 则使 2 个超级粳稻品种在抽穗至成熟阶段的钾素积累量显著下降。L2 和 L3 条件下, 随着氮肥水平增加, 各生育阶段的钾素积累量均显著增加。

表 2 光、氮及其互作对超级粳稻磷素阶段积累量及比例的影响
Table 2 Effects of light, nitrogen and their interaction on periodical phosphorus accumulation and its ratio in super rice

品种 Cultivar	氮肥水平 Nitrogen level	光处理 Light treatment	拔节前 SO-EG		拔节至抽穗 EG-HD		抽穗至成熟 HD-MA	
			P 积累量 Phosphorus accumulation (kg hm ⁻²)	比例 Ratio (%)	P 积累量 Phosphorus accumulation (kg hm ⁻²)	比例 Ratio (%)	P 积累量 Phosphorus accumulation (kg hm ⁻²)	比例 Ratio (%)
南粳 44 Nanjing 44	N10	L1	12.75 Bb	23.93 CDcd	25.18 Cc	47.27 Dd	15.34 Cc	28.80 Aa
		L2	12.75 Bb	27.07 Aa	20.93 Dd	44.44 Ee	13.42 De	28.49 Aa
		L3	13.05 Bb	25.89 Bb	25.97 Cc	51.51 Bb	11.40 Ef	22.60 Cc
	N20	L1	18.24 Aa	23.40 Dd	40.09 Aa	51.43 Bb	19.62 Aa	25.17 Bb
		L2	18.13 Aa	26.35 ABb	33.51 Bb	48.68 Cc	17.19 Bb	24.97 Bb
		L3	17.89 Aa	24.35 Cc	40.62 Aa	55.29 Aa	14.96 Cd	20.37 Dd
	F 值	Nitrogen (N)	133.55**	60.21**	3507.50**	5619.88**	2292.27**	356.35**
	F-value	Light (L)	0.01	215.30**	263.93**	5377.13**	943.36**	468.41**
		N × L	0.20	6.69*	9.75*	6.86*	6.99*	7.36*
宁粳 3 号 Ningjing 3	N10	L1	13.03 Bb	22.28 De	28.61 Cc	48.91 Cd	16.85 Cc	28.81 Aa
		L2	13.20 Bb	26.01 Ab	22.97 Dd	45.29 De	14.56 Ee	28.70 Aa
		L3	12.83 Bb	23.33 Cd	29.63 Cc	53.85 Bb	12.55 Ff	22.82 Cc
	N20	L1	19.14 Aa	23.09 Cd	43.42 Aa	52.39 Bc	20.32 Aa	24.52 Bb
		L2	19.47 Aa	26.44 Aa	36.39 Bb	49.40 Cd	17.79 Bb	24.16 Bb
		L3	19.42 Aa	24.50 Bc	44.07 Aa	55.60 Aa	15.78 Dd	19.90 Dd
	F 值	Nitrogen (N)	194.73**	88.73**	6995.17**	179.05**	10611.45**	440.67**
	F-value	Light (L)	0.12	592.17**	708.01**	336.58**	6324.49**	344.10**
		N × L	0.10	6.28*	6.04*	9.19*	6.20*	7.28*

同一品种的相同数据列，标以不同大小写字母的数字分别在 1%和 5%水平差异显著。N10: 150 kg hm⁻² 纯氮; N20: 300 kg hm⁻² 纯氮; L1: 不遮光; L2: 抽穗前遮光 20 d; L3: 抽穗后遮光 20 d。*和**分别表示在 5%和 1%水平上差异显著。

Values within the same column for a cultivar followed by different letters are significantly different at 1% (capital) and 5% (lowercase) probability levels, respectively. N10: 150 kg hm⁻² N applied; N20: 300 kg hm⁻² N applied; L1: no shading; L2: shading 20 days before heading; L3: shading 20 days after heading. SO: sowing; EG: elongation; HD: heading; MA: maturing. * and ** denote significant difference at 5% and 1% probability levels, respectively.

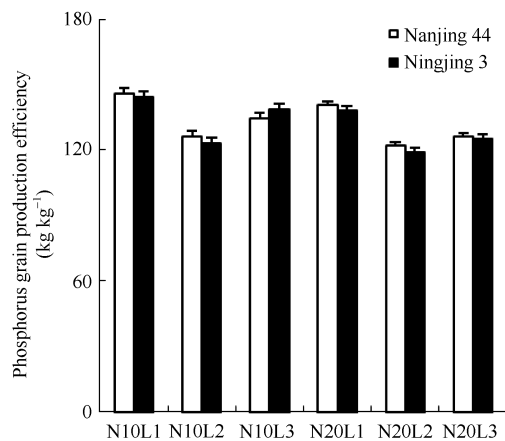


图 3 光、氮及其互作下超级粳稻的磷素籽粒生产效率
Fig. 3 Phosphorus grain production efficiency of super rice under effects of light, nitrogen and their interaction
N10: 150 kg hm⁻² 纯氮; N20: 300 kg hm⁻² 纯氮; L1: 不遮光;
L2: 抽穗前遮光 20 d; L3: 抽穗后遮光 20 d。
N10: 150 kg hm⁻² N applied; N20: 300 kg hm⁻² N applied; L1: no shading; L2: shading 20 days before heading; L3: shading 20 days after heading.

对于钾素阶段积累比例，较之 L1, L2 使 2 个超级粳稻品种在拔节至抽穗阶段显著下降，而拔节前显著增加; L3 使 2 个超级粳稻品种在抽穗至成熟阶段显著下降，而拔节前及拔节至抽穗阶段显著增加。L2 和 L3 条件下，随着氮肥水平增加，拔节至成熟阶段的钾素积累比例呈增加趋势，而拔节前及抽穗至成熟阶段呈下降趋势。

2.2.6 对钾素籽粒生产效率的影响 图 4 表明，2 个超级粳稻品种在 2 种氮肥水平下的钾素籽粒生产效率均呈现 L1>L3>L2，差异显著。其中 N10 条件下 L1 比 L2 高 21.09%~21.14%; N20 条件下 L1 比 L2 高 21.46%~21.57%。2 个品种的钾素籽粒生产效率均呈现 N10L1>N20L1>N10L3>N10L2>N20L3>N20L2，差异均显著。

2.3 光、氮及其互作对超级粳稻根系形态生理的影响

2.3.1 对根系 α-NA 氧化量的影响 由表 4 可知，

表 3 光、氮及其互作对超级粳稻钾素阶段积累量及比例的影响
Table 3 Effects of light, nitrogen and their interaction on periodical potassium accumulation and its ratio in super rice

品种 Cultivar	氮肥水平 Nitrogen level	光处理 Light treatment	拔节前 SO-EG		拔节至抽穗 EG-HD		抽穗至成熟 HD-MA	
			K 积累量 Potassium accumulation (kg hm ⁻²)	比例 Ratio (%)	K 积累量 Potassium accumulation (kg hm ⁻²)	比例 Ratio (%)	K 积累量 Potassium accumulation (kg hm ⁻²)	比例 Ratio (%)
南粳 44 Nanjing 44	N10	L1	100.13 Bb	47.05 Cc	103.32 Cc	48.55 De	9.35 Cc	4.40 Aa
		L2	100.82 Bb	51.07 Aa	88.29 Dd	44.73 Ef	8.30 Dd	4.20 Aa
		L3	101.01 Bb	48.53 Bb	104.22 Cc	50.08 Cc	2.88 Ff	1.39 Cc
	N20	L1	145.50 Aa	43.82 Ee	174.77 Aa	52.63 Bb	11.79 Aa	3.55 Bb
		L2	145.48 Aa	47.17 Cc	152.74 Bb	49.52 Cd	10.23 Bb	3.32 Bb
		L3	144.40 Aa	44.84 Dd	174.33 Aa	54.02 Aa	4.01 Ee	1.14 Cc
	F 值	Nitrogen (N)	2472.61**	2514.77**	7696.90**	1873.39**	415.84**	66.67**
	F-value	Light (L)	0.09	905.23**	252.22**	876.63**	2386.05**	463.10**
		N × L	0.41	7.57*	7.51*	7.11*	18.34**	6.44*
宁粳 3 号 Ningjing 3	N10	L1	112.71 Bb	45.28 BCc	126.05 Cc	50.64 Cc	10.18 Cc	4.09 Aa
		L2	112.83 Bb	50.63 Aa	101.30 Dd	45.45 Dd	8.74 Dd	3.92 Aa
		L3	112.83 Bb	46.43 Bb	127.06 Cc	52.28 Bb	3.14 Ff	1.29 Cc
	N20	L1	158.68 Aa	43.51 Dd	192.85 Aa	52.88 ABb	13.14 Aa	3.60 Bb
		L2	158.85 Aa	46.83 Bb	168.78 Bb	49.76 Cc	11.54 Bb	3.40 Bb
		L3	158.11 Aa	44.58 CDc	192.80 Aa	54.31 Aa	4.12 Ee	1.11 Cc
	F 值	Nitrogen (N)	2899.39**	132.60**	100580.90**	151.10**	344.89**	80.36**
	F-value	Light (L)	0.06	146.56**	6112.04**	213.45**	1657.67**	1484.78**
		N × L	0.08	9.55*	5.80*	9.78*	27.55**	6.03*

同一品种的相同数据列, 标以不同大小写字母的数字值分别在 1% 和 5% 水平差异显著。N10: 150 kg hm⁻² 纯氮; N20: 300 kg hm⁻² 纯氮; L1: 不遮光; L2: 抽穗前遮光 20 d; L3: 抽穗后遮光 20 d。* 和 ** 分别表示在 5% 和 1% 水平上差异显著。

Values within the same column for a cultivar followed by different letters are significantly different at 1% (capital) and 5% (lowercase) probability levels, respectively. N10: 150 kg hm⁻² N applied; N20: 300 kg hm⁻² N applied; L1: no shading; L2: shading 20 days before heading; L3: shading 20 days after heading. SO: sowing; EG: elongation; HD: heading; MA: maturing. * and ** denote significant difference at 5% and 1% probability levels, respectively.

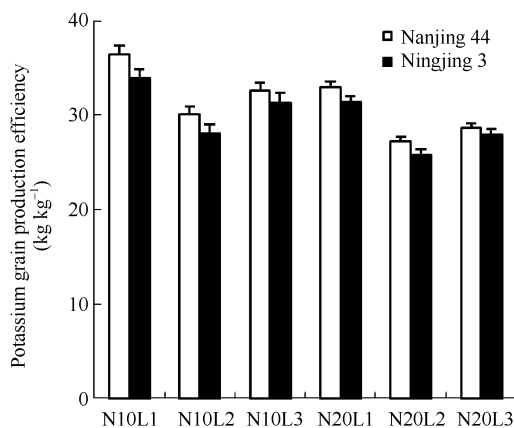


图 4 光、氮及其互作下超级粳稻的钾素籽粒生产效率
Fig. 4 Potassium grain production efficiency of super rice under effects of light, nitrogen and their interaction

N10: 150 kg hm⁻² 纯氮; N20: 300 kg hm⁻² 纯氮; L1: 不遮光; L2: 抽穗前遮光 20 d; L3: 抽穗后遮光 20 d。
N10: 150 kg hm⁻² N applied; N20: 300 kg hm⁻² N applied; L1: no shading; L2: shading 20 days before heading; L3: shading 20 days after heading.

较之 L1, L2 使 2 个超级粳稻品种在抽穗前期的根系 α-NA 氧化量显著下降, 但遮光解除后水稻根系 α-NA 氧化量则显著增加; L3 使 2 个超级粳稻品种在抽穗后期根系 α-NA 氧化量显著下降, 但遮光解除后水稻根系 α-NA 氧化量也显著增加。L2 和 L3 条件下, 随着氮肥水平增加, 各生育期的根系 α-NA 氧化量均显著增加。

2.3.2 对根干重的影响 由表 5 可知, 较之 L1, L2 使 2 个超级粳稻品种在抽穗期及成熟期的根干重显著下降; L3 使 2 个超级粳稻品种在成熟期的根干重显著下降。L2 和 L3 条件下, 随着氮肥水平增加, 各生育期的根干重均显著增加。

2.3.3 对根冠比的影响 由表 6 可知, 较之 L1, L2 使 2 个超级粳稻品种在抽穗期及成熟期的根冠比显著增加; L3 使 2 个超级粳稻品种在成熟期的根冠比显著增加, 而根冠比显著增加的主要原因是遮光

表 4 光、氮及其互作对超级粳稻根系 α -NA 氧化量的影响
Table 4 Effects of light, nitrogen and their interaction on root oxidation ability of α -NA of super rice ($\mu\text{g h}^{-1} \text{g}^{-1}$)

品种 Cultivar	氮肥水平 Nitrogen level	光处理 Light treatment	拔节 Elongation	抽穗前 10 d Ten days before heading	抽穗 Heading	抽穗后 10 d Ten days after heading	成熟 Maturing
南粳 44 Nanjing 44	N10	L1	85.12 Bb	57.36 Cc	48.48 Dd	35.96 Dd	12.22 Ee
		L2	85.09 Bb	51.15 Dd	55.28 Cc	42.51 Cc	17.12 Cc
		L3	85.14 Bb	57.42 Cc	48.52 Dd	30.25 Ee	15.44 Dd
	N20	L1	104.18 Aa	74.66 Aa	65.24 Bb	50.22 Bb	16.24 CDd
		L2	104.16 Aa	65.86 Bb	73.32 Aa	58.17 Aa	23.12 Aa
		L3	104.16 Aa	74.72 Aa	65.34 Bb	41.06 Cc	20.07 Bb
	<i>F</i> 值	Nitrogen (N)	3701.06**	2755.38**	10792.60**	1275.23**	615.02**
	<i>F</i> -value	Light (L)	0.01	257.37**	888.44**	497.34**	302.10**
		N \times L	0.01	7.60*	6.34*	14.37**	8.84*
宁粳 3 号 Ningjing 3	N10	L1	87.97 Bb	59.55 Cc	50.75 Dd	38.54 Dd	14.01 Ee
		L2	87.99 Bb	53.05 Dd	57.28 Cc	45.02 Cc	19.08 Cc
		L3	88.01 Bb	59.61 Cc	50.79 Dd	32.56 Ee	17.18 Dd
	N20	L1	108.25 Aa	76.59 Aa	67.58 Bb	53.81 Bb	18.55 Cc
		L2	108.23 Aa	67.76 Bb	75.39 Aa	61.51 Aa	25.14 Aa
		L3	108.24 Aa	76.84 Aa	67.46 Bb	44.48 Cc	22.25 Bb
	<i>F</i> 值	Nitrogen (N)	4182.20**	2938.80**	12009.82**	1883.53**	1177.36**
	<i>F</i> -value	Light (L)	0.01	293.82**	949.07**	644.21**	494.10**
		N \times L	0.01	7.24*	7.27*	16.58**	8.56*

同一品种的相同数据列, 标以不同大小写字母的数字分别在 1%和 5%水平差异显著。N10: 150 kg hm^{-2} 纯氮; N20: 300 kg hm^{-2} 纯氮; L1: 不遮光; L2: 抽穗前遮光 20 d; L3: 抽穗后遮光 20 d。*和**分别表示在 5%和 1%水平上差异显著。

Values within the same column for a cultivar followed by different letters are significantly different at 1% (capital) and 5% (lowercase) probability levels, respectively. N10: 150 kg hm^{-2} N applied; N20: 300 kg hm^{-2} N applied; L1: no shading; L2: shading 20 days before heading; L3: shading 20 days after heading. * and ** denote significant difference at 5% and 1% probability levels, respectively.

表 5 光、氮及其互作对超级粳稻根干重的影响
Table 5 Effects of light, nitrogen and their interaction on root dry weight of super rice (t hm^{-2})

品种 Cultivar	氮肥水平 Nitrogen level	光处理 Light treatment	拔节 Elongation	抽穗 Heading	成熟 Maturing
南粳 44 Nanjing 44	N10	L1	0.707 Bb	1.027 Cc	0.889 Dd
		L2	0.711 Bb	0.970 Dd	0.806 Ff
		L3	0.709 Bb	1.035 Cc	0.837 Ee
	N20	L1	0.789 Aa	1.296 Aa	1.003 Aa
		L2	0.785 Aa	1.234 Bb	0.954 Cc
		L3	0.786 Aa	1.290 Aa	0.980 Bb
	<i>F</i> 值	Nitrogen (N)	202.27**	12223.53**	2356.72**
	<i>F</i> -value	Light (L)	0.32	339.54**	188.93**
		N \times L	0.32	6.03*	14.53**
宁粳 3 号 Ningjing 3	N10	L1	0.787 Bb	1.208 Cc	0.980 Dd
		L2	0.792 Bb	1.117 Dd	0.857 Ff
		L3	0.789 Bb	1.217 Cc	0.941 Ee
	N20	L1	0.909 Aa	1.466 Aa	1.116 Aa
		L2	0.906 Aa	1.408 Bb	1.070 Cc
		L3	0.906 Aa	1.471 Aa	1.098 Bb
	<i>F</i> 值	Nitrogen (N)	412.77**	4252.78**	1788.00**
	<i>F</i> -value	Light (L)	0.34	160.15**	154.87**
		N \times L	0.34	8.64*	33.19**

同一品种的相同数据列, 标以不同大小写字母的数字分别在 1%和 5%水平差异显著。N10: 150 kg hm^{-2} 纯氮; N20: 300 kg hm^{-2} 纯氮; L1: 不遮光; L2: 抽穗前遮光 20 d; L3: 抽穗后遮光 20 d。*和**分别表示在 5%和 1%水平上差异显著。

Values within the same column for a cultivar followed by different letters are significantly different at 1% (capital) and 5% (lowercase) probability levels, respectively. N10: 150 kg hm^{-2} N applied; N20: 300 kg hm^{-2} N applied; L1: no shading; L2: shading 20 days before heading; L3: shading 20 days after heading. * and ** denote significant difference at 5% and 1% probability levels, respectively.

表 6 光、氮及其互作对超级粳稻根冠比的影响
Table 6 Effects of light, nitrogen and their interaction on ratio of root to shoot of super rice

品种	氮肥水平	光处理	拔节	抽穗	成熟
Cultivar	Nitrogen level	Light treatment	Elongation	Heading	Maturing
南粳 44 Nanjing44	N10	L1	0.2171 Aa	0.1236 Bb	0.0596 Cc
		L2	0.2165 Aa	0.1343 Aa	0.0638 Aa
		L3	0.2167 Aa	0.1227 BCb	0.0621 Bb
	N20	L1	0.1881 Bb	0.1021 Dd	0.0474 Ff
		L2	0.1894 Bb	0.1163 Cc	0.0532 Dd
		L3	0.1896 Bb	0.1038 Dd	0.0513 Ee
	<i>F</i> 值	Nitrogen (N)	189.77**	2270.66**	3367.26**
	<i>F</i> -value	Light (L)	0.03	399.94**	229.55**
		N × L	0.09	6.59*	6.81*
	宁粳 3 号 Ningjing 3	N10	L1	0.2259 Aa	0.1271 Bb
L2			0.2258 Aa	0.1448 Aa	0.0648 Aa
L3			0.2245 Aa	0.1251 Bb	0.0621 Bb
N20		L1	0.1918 Bb	0.1121 Cc	0.0516 Ff
		L2	0.1919 Bb	0.1249 Bb	0.0573 Dd
		L3	0.1920 Bb	0.1113 Cc	0.0547 Ee
<i>F</i> 值		Nitrogen (N)	243.26**	585.22**	2656.70**
<i>F</i> -value		Light (L)	0.03	250.49**	382.90**
		N × L	0.05	7.51*	6.38*

同一品种的相同数据列, 标以不同大小写字母的数字分别在 1%和 5%水平差异显著。N10: 150 kg hm⁻² 纯氮; N20: 300 kg hm⁻² 纯氮; L1: 不遮光; L2: 抽穗前遮光 20 d; L3: 抽穗后遮光 20 d。*和**分别表示在 5%和 1%水平上差异显著。

Values within the same column for a cultivar followed by different letters are significantly different at 1% (capital) and 5% (lowercase) probability levels, respectively. N10: 150 kg hm⁻² N applied; N20: 300 kg hm⁻² N applied; L1: no shading; L2: shading 20 days before heading; L3: shading 20 days after heading. * and ** denote significant difference at 5% and 1% probability levels, respectively.

条件下植株地上部干物重降低的幅度远远大于根部干物重降低的幅度。L2 和 L3 条件下, 随着氮肥水平增加, 各生育期的根冠比均显著下降。

2.4 超级粳稻氮、磷、钾积累量、根系形态生理指标与产量的相关

相关分析表明(表7), 不同光、氮条件下, 产量与主要生育期的氮、磷、钾元素积累量、根系干重和根系 α -NA 氧化量均呈正相关, 除与抽穗后 10 d 及

成熟期的根系 α -NA 氧化量相关性不显著外, 其余都达到显著或极显著水平。而与根冠比呈极显著负相关。

3 讨论

3.1 光、氮及其互作对超级粳稻产量及氮、磷、钾养分吸收特性的影响

前人研究表明, 不同光照条件对水稻产量有显

表 7 超级粳稻氮、磷、钾积累量、根系形态生理指标与产量的相关系数
Table 7 Correlation coefficients of nitrogen, phosphorus and potassium accumulation, root characteristics with yield of super rice

	拔节 EG	抽穗前 10 d Ten days before HD	抽穗 HD	抽穗后 10 d Ten days after HD	成熟 MA
氮素积累量 Nitrogen accumulation	0.812**	—	0.914**	—	0.937**
磷素积累量 Phosphorus accumulation	0.798**	—	0.906**	—	0.938**
钾素积累量 Potassium accumulation	0.811**	—	0.884**	—	0.891**
根系干重 Root dry weight	0.666*	—	0.837**	—	0.881**
根冠比 Ratio of root to shoot	-0.755**	—	-0.827**	—	-0.900**
根系 α -NA 氧化量 Root oxidation ability of α -NA	0.798**	0.938**	0.591*	0.470	0.215

*和**表示在 5%和 1%水平上差异显著。“—”表示未计算。

EG: elongation; HD: heading; MA: maturing. * and ** denote significant difference at 5% and 1% probability levels, respectively. “—” represents without calculation.

著影响,如各生育阶段遮光均导致水稻产量显著下降^[9,15]。氮、磷、钾是水稻正常生长发育必不可少的三大营养元素,对水稻产量潜力的发挥起着重要作用,然而不同时期遮光对超级粳稻氮、磷、钾养分吸收又有怎样的影响呢?本研究表明,L2使植株拔节至抽穗阶段及抽穗期的氮、磷、钾元素积累量显著下降,最终产量显著下降,同时氮肥利用率及氮、磷、钾元素籽粒生产效率也显著下降;L3使植株抽穗至成熟阶段及成熟期的氮、磷、钾元素积累量显著下降,最终产量显著下降,同时氮肥利用率及氮、磷、钾元素籽粒生产效率也显著下降,但下降幅度均低于L2,主要因为拔节至抽穗阶段是水稻一生中氮、磷、钾元素积累的高峰期,该阶段的养分积累与群体叶面积发展、颖花分化及最终产量密切相关^[13]。L2和L3条件下,随着氮肥水平增加,拔节至抽穗阶段、抽穗期及抽穗至成熟阶段、成熟期的氮、磷、钾元素积累量均显著增加,最终产量及氮肥利用率显著提高,这说明氮肥施用能部分弥补因弱光逆境对超级粳稻氮、磷、钾元素吸收特性及产量的影响。同时,不同光、氮条件下的氮、磷、钾养分吸收还具有协同性。

3.2 光、氮及其互作对超级粳稻根系形态生理及氮、磷、钾养分吸收特性的影响

根系不仅是水稻的支持器官,水分、养分的吸收器官,同时也是植株地下部与地上部物质交换和代谢的重要器官。水稻根系与植株氮^[14-16]、磷^[17-18]、钾^[19-20]元素的吸收效率有密切的关系。本研究表明,L2显著降低了植株抽穗前期的根系活力及根干重,导致抽穗前期的氮、磷、钾元素积累量显著下降,最终氮肥利用率及氮、磷、钾元素籽粒生产效率显著下降。L3显著降低了植株抽穗后期的根系活力及根干重,导致抽穗后期的氮、磷、钾元素积累量显著下降,最终氮肥利用率及氮、磷、钾元素籽粒生产效率显著下降,但下降幅度均低于L2,主要由于抽穗后植株根系逐渐衰老及机能下降^[21]。此外,弱光逆境解除后,水稻根系活力得以适当恢复,表现为抽穗期及成熟期根系 α -NA氧化量高于不遮光处理。L2和L3条件下,通过增施氮肥可促进根系生长,提高根系活力,延缓后期根系衰老,进而促进生育中后期水稻根系对氮、磷、钾养分的吸收以提高最终产量。这说明氮肥施用能部分弥补因弱光逆境对超级粳稻根系形态生理及氮、磷、钾养分吸收特性的影响。

4 结论

光、氮及其互作对超级粳稻产量及氮、磷、钾养分吸收特性有显著的影响。L2显著降低了植株抽穗前期的根干重及根系活力,导致该阶段的氮、磷、钾元素积累量显著下降,最终产量显著低于L1。L3显著降低了植株抽穗后期的根干重及根系活力,导致该阶段的氮、磷、钾元素积累量显著下降,尽管抽穗后植株根系逐渐衰老及机能下降,L3对根系、养分吸收及最终产量的影响小于L2,但最终产量依然显著低于L1。L2和L3条件下,随着氮肥水平增加,植株根干重及根系活力显著增加,导致植株生育中后期的养分吸收能力提高,最终产量及氮肥利用率显著提高。由此可见氮肥施用能部分弥补弱光逆境下超级粳稻对氮、磷、钾养分吸收能力,使产量有所提高。

References

- [1] 池再香,龙先菊,杨桂兰,史勋凤.黔东南州生态气候条件对两优527超级稻产量的影响.中国农业气象,2009,30: 219-222
Chi Z X, Long X J, Yang G L, Shi X F. Effects of ecological and climatic conditions on super rice yields of Zhunliangyou 527 in Southeast Guizhou. *Chin J Agrometeorol*, 2009, 30: 219-222 (in Chinese with English abstract)
- [2] 朱萍,杨世民,马均,李树杏,陈宇.遮光对杂交水稻组合生育后期光合特性和产量的影响.作物学报,2008,34: 2003-2009
Zhu P, Yang S M, Ma J, Li S X, Chen Y. Effect of shading on the photosynthetic characteristics and yield at later growth stage of hybrid rice combination. *Acta Agron Sin*, 2008, 34: 2003-2009 (in Chinese with English abstract)
- [3] 张洪程,王秀芹,戴其根,霍中洋,许轲.施氮量对杂交稻两优培九产量、品质及吸氮特性的影响.中国农业科学,2003,36: 800-806
Zhang H C, Wang X Q, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K. Effects of N-application rate on yield, quality and characters of nitrogen uptake of hybrid rice variety Liangyoupei9. *Sci Agric Sin*, 2003, 36: 800-806 (in Chinese with English abstract)
- [4] 李世峰,刘蓉蓉,朱从海,吴九林,陈慧.氮肥运筹对超级稻生长和产量的影响.安徽农业科学,2009,37(2): 705-707
Li S F, Liu R R, Zhu C H, Wu J L, Chen H. Effects of nitrogen application on growth and yield of super rice. *J Anhui Agric Sci*, 2009, 37(2): 705-707 (in Chinese with English abstract)
- [5] 罗连光,田昌,颜应成,刘朝晖.无机肥配施生物有机肥对超级稻Y两优1号产量及碳氮代谢的影响.杂交水稻,2011,26(1): 61-64
Luo L G, Tian C, Yan Y C, Liu C H. Effects of combined application of inorganic fertilizers with bio-organic fertilizers on grain yield and carbon and nitrogen metabolism of super hybrid rice Y Liangyou 1. *Hybrid Rice*, 2011, 26(1): 61-64 (in Chinese with English abstract)

- [6] 王亚江, 葛梦婕, 颜希亭, 魏海燕, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲. 光、氮及其互作对超级粳稻产量和物质生产特征的影响. 作物学报, 2014, 40: 154–165
Wang Y J, Ge M J, Yan X T, Wei H Y, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K. Effects of light, nitrogen and their interaction on grain yield and matter production characteristics of japonica super rice. *Acta Agron Sin*, 2014, 40: 154–165 (in Chinese with English abstract)
- [7] 王忠. 植物生理学. 北京: 中国农业出版社, 2000. pp 84–86
Wang Z. Plant Physiology. Beijing: China Agriculture Press, 2000. pp 84–86 (in Chinese)
- [8] 敖和军, 王淑红, 邹应斌, 彭少兵, 程兆伟, 刘武, 唐启源. 不同施肥水平下超级杂交稻对氮、磷、钾的吸收累积. 中国农业科学, 2008, 41: 3123–3132
Ao H J, Wang S H, Zou Y B, Peng S B, Cheng Z W, Liu W, Tang Q Y. Characteristics of nutrient uptake and utilization of super hybrid rice under different fertilizer application rates. *Sci Agric Sin*, 2008, 41: 3123–3132 (in Chinese with English abstract)
- [9] 周江明, 余华波, 周海鹏, 俞乒乓, 王晓东, 章秀福. 不同地力条件下不同养分水平对超级稻产量及养分利用率的影响. 华北农学报, 2008, 23: 267–273
Zhou J M, Yu H B, Zhou H P, Yu P P, Wang X D, Zhang X F. Effects of different nutrient levels in different fertility soils on super rice yields and nutrient use efficiency. *Acta Agric Boreali-Sin*, 2008, 23: 267–273 (in Chinese with English abstract)
- [10] 邹长明, 秦道珠, 徐明岗, 申华平, 王伯仁. 水稻的氮磷钾养分吸收特性及其与产量的关系. 南京农业大学学报, 2002, 25(4): 6–10
Zou C M, Qin D Z, Xu M G, Shen H P, Wang B R. Nitrogen, phosphorous and potassium uptake characteristics of rice and its relationship with grain yield. *J Nanjing Agric Univ*, 2002, 25(4): 6–10 (in Chinese with English abstract)
- [11] 徐富贤, 熊洪, 张林, 郭晓艺, 朱永川, 周兴兵, 刘茂. 西南稻区不同地域和施氮水平对杂交中稻氮、磷、钾吸收累积的影响. 作物学报, 2011, 37: 882–894
Xu F X, Xiong H, Zhang L, Guo X Y, Zhu Y C, Zhou X B, Liu M. Characteristics of nutrient uptake and utilization of mid-season hybrid rice under different nitrogen application rates in different locations of Southwest China. *Acta Agron Sin*, 2011, 37: 882–894 (in Chinese with English abstract)
- [12] 蔡昆争, 骆世明. 不同生育期遮光对水稻生长发育和产量形成的影响. 应用生态学报, 1999, 10: 193–196
Cai K Z, Luo S M. Effect of shading on growth, development and yield formation of rice. *Chin J Appl Ecol*, 1999, 10: 193–196 (in Chinese with English abstract)
- [13] 凌启鸿, 张洪程, 苏祖芳, 郭文善, 陈德华, 陆卫平, 冷锁虎, 凌励, 杨建昌, 丁艳锋, 吴云康, 曹显祖, 朱庆森, 朱耕如. 作物群体质量. 上海科学技术出版社, 2000. pp 154–196
Ling Q H, Zhang H C, Su Z F, Guo W S, Chen D H, Lu W P, Leng S H, Ling L, Yang J C, Ding Y F, Wu Y K, Cao X Z, Zhu Q S, Zhu G R. Quality of Crop Population. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publisher, 2000. pp 154–196 (in Chinese)
- [14] 李敏, 张洪程, 杨雄, 葛梦婕, 马群, 魏海燕, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 曹利强, 吴浩. 水稻高产氮高效型品种的根系形态生理特征. 作物学报, 2012, 38: 648–656
Li M, Zhang H C, Yang X, Ge M J, Ma Q, Wei H Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Cao L Q, Wu H. Root morphological and physiological characteristics of rice cultivars with high yield and high nitrogen use efficiency. *Acta Agron Sin*, 2012, 38: 648–656 (in Chinese with English abstract)
- [15] 魏海燕, 张洪程, 张胜飞, 杭杰, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 马群, 张庆, 刘艳阳. 不同氮利用效率水稻基因型的根系形态与生理指标的研究. 作物学报, 2008, 34: 429–436
Wei H Y, Zhang H C, Zhang S F, Hang J, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Ma Q, Zhang Q, Liu Y Y. Root morphological and physiological characteristics in rice genotypes with different N use efficiencies. *Acta Agron Sin*, 2008, 34: 429–436 (in Chinese with English abstract)
- [16] 戴林, 李廷轩, 张锡洲, 余海英. 氮高效利用基因型水稻根系形态和活力特征. 中国农业科学, 2012, 45: 4770–4781
Ji L, Li T X, Zhang X Z, Yu H Y. Root morphological and activity characteristics of rice genotype with high nitrogen utilization efficiency. *Sci Agric Sin*, 2012, 45: 4770–4781 (in Chinese with English abstract)
- [17] 李锋, 曲雪艳, 潘晓华, 姚锋先, 杨福孙. 不同水稻品种对难溶性磷利用能力的初步研究. 植物营养与肥料学报, 2003, 9: 420–424
Li F, Qu X Y, Pan X H, Yao F X, Yang F S. Preliminary study on the utilization ability of insoluble phosphate in various rice cultivars. *Plant Nutr Fert Sci*, 2003, 9: 420–424 (in Chinese with English abstract)
- [18] 郭玉春, 林文雄, 石秋梅, 梁义元, 何华勤, 陈芳育. 低磷胁迫下不同磷效率水稻苗期根系的生理适应性研究. 应用生态学报, 2003, 14: 61–65
Guo Y C, Lin W X, Shi Q M, Liang Y Y, He H Q, Chen F Y. Physiological adaptability of seeding rice genotypes with different P uptake efficiency under low P-deficient stress. *Chin J Appl Ecol*, 2003, 14: 61–65 (in Chinese with English abstract)
- [19] 刘建祥, 杨肖娥, 杨玉爱, 吴良欢. 低钾胁迫下水稻钾高效基因型若干生长特性和营养特性的研究. 植物营养与肥料学报, 2003, 9: 190–195
Liu J X, Yang X E, Yang Y A, Wu L H. Some agronomic and nutritional characteristics for potassium efficient rice genotypes under low potassium stress. *Plant Nutr Fert Sci*, 2003, 9: 190–195 (in Chinese with English abstract)
- [20] 台德卫, 张效忠, 苏泽胜, 王元垒, 罗彦长, 夏家发. 全球水稻分子育种核心种质资源耐低钾品种的苗期筛选. 植物遗传资源学报, 2004, 5: 356–359
Tai D W, Zhang X Z, Su Z S, Wang Y L, Luo Y C, Xia J F. Screening for low-kalium tolerance varieties at seedling stage from the core germplasm of integrated international rice. *J Plant Genet Resour*, 2004, 5: 356–359 (in Chinese with English abstract)
- [21] 褚光, 杨凯鹏, 王静超, 张耗. 水稻根系形态与生理研究进展. 安徽农业科学, 2012, 40: 5097–5101
Zhu G, Yang K P, Wang J C, Zhang H. Research progress on root morphology and physiology of rice. *J Anhui Agric Sci*, 2012, 40: 5097–5101 (in Chinese with English abstract)