

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2014.00154

光、氮及其互作对超级粳稻产量和物质生产特征的影响

王亚江 葛梦婕 颜希亭 魏海燕 张洪程* 戴其根 霍中洋 许 轲

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物质生产特征的影响。结果表明, 较之 L1, L2 不仅减少了有效穗数和每穗粒数, 导致总颖花量下降, 降幅达 24.81%~35.63%, 而且还显著降低了抽穗期茎蘖数和叶面积指数, 降幅达 2.90%~6.44%和 19.02%~27.17%, 导致抽穗至成熟阶段的光合势、干物质积累量显著下降, 最终产量显著下降, 降幅达 27.23%~35.26%。较之 L1, L3 主要影响了抽穗至成熟阶段的光合物质积累, 导致结实率和千粒重显著下降, 降幅达 1.49%~4.48%和 5.54%~9.17%, 最终产量显著下降, 降幅达 10.91%~18.47%。L2 条件下, 随着氮肥水平增加, 抽穗期茎蘖数与叶面积指数均显著增加, 导致抽穗至成熟阶段光合势、干物质积累显著增加, 最终有效穗数、每穗粒数、总颖花量以及产量显著提高。L3 条件下, 随着氮肥水平增加, 抽穗至成熟阶段的光合物质积累显著提高, 其中茎叶干物质向穗部转运量显著增加, 转运率和贡献率也进一步提高, 最终产量显著提高。由此可见氮肥施用能部分弥补因弱光逆境对超级粳稻物质生产及其产量的影响。

关键词: 超级粳稻; 遮光; 氮肥; 产量; 物质生产

Effects of Light, Nitrogen and Their Interaction on Grain Yield and Matter Production Characteristics of *Japonica* Super Rice

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

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: 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 matter production. Results showed that, compared with L1 treatment, L2 not only reduced the effective panicles and grains per panicle, resulting in the decline of total spikelets by 24.81% to 35.63%, but also significantly reduced the tiller number and leaf area index at heading by 2.90%–6.44% and 19.02%–27.17% respectively, causing photosynthetic potential, dry matter accumulation decreased significantly from heading to maturity, and at last the final yield decreased by 27.23%–35.26%. Compared with L1 treatment, L3 mainly affected photosynthate accumulation from heading to maturity, leading to seed setting rate and grain weight significantly decreased by 1.49%–4.48% and 5.54%–9.17%, respectively, and the final yield decreased by 10.91%–18.47%. Under L2 condition, with increasing nitrogen level, tiller number and leaf area index at heading increased significantly, resulting in photosynthetic potential, dry matter accumulation increased significantly from heading to maturity, and the ultimately effective panicles, number of grains per panicle, total number of spikelets and the yield improved significantly. Under L3 condition, with increasing nitrogen level, photosynthate accumulation from heading to maturity increased significantly, dry matter translocation from stems and leaves to the panicle increased significantly, meanwhile, translocation rate and contribution rate were further improved, and the

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): 张洪程, E-mail: hc Zhang@yzu.edu.cn, Tel: 0514-87979220

第一作者联系方式: E-mail: wyj19900120@163.com

Received(收稿日期): 2013-05-20; Accepted(接受日期): 2013-07-25; Published online(网络出版日期): 2013-09-29.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20130929.1538.013.html>

ultimate yield improved significantly. This indicated that nitrogen fertilizer could partially offset the impact of low light stress on the matter production and yield of japonica super rice.

Keywords: Japonica super rice; Shading; Nitrogen; Yield; Matter production

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、抗性较强的新型水稻品种^[1], 有着巨大的增产潜力^[2]。但超级稻在实际的推广应用常因栽培管理不当^[3]、生长于逆境^[4-5]等因素难以发挥超高产潜力。以往的研究表明, 氮肥是影响水稻高产的一个重要因素^[6]。而众多的环境因素中, 光照因其对水稻光合作用的效应也具重要作用^[7]。前人对不同光照和氮肥条件下水稻物质生产特性及产量形成规律的部分研究取得了较丰硕的成果。指出, 一定范围内随着施氮量增加, 产量增加, 干物质积累也增加^[8-9]; 较之常规尿素分施, 缓释尿素单施的产量及生育中后期干物质积累量显著增加^[10], 有机肥施用能够增加有效穗数, 提高产量^[11]; 根据不同的种植制度^[12-13]与种植方式^[14-15], 配套相适应的氮肥运筹模式, 使群体生长比较合理, 增加抽穗后物质积累与转运, 提高产量。强光使水稻干物质积累和产量增加, 但输出率和转运率低; 弱光使水稻光合受到抑制, 干物质积累和产量下降, 但输出率与转运率高^[16-17]; 蓝光显著抑制幼苗株高; 红光能够促进水稻幼苗茎的生长, 有利于干物质积累, 促进同化产物向营养器官的分配; 黄光显著提高株高和干物重^[18-19]。综上不难发现, 以往的研究绝大多数侧重于氮素、光照条件中单因素对水稻产量和物质生产特征的影响, 而关于光氮双因子及其互作对水稻尤其是超级粳稻产量和物质生产特征的研究较少。为此, 本研究在长江下游稻-麦两熟制条件下, 系统研究光氮双因子及其互作对超级粳稻产量和物质生产特征的影响, 以期充分利用光氮资源实现超级稻的超高产栽培提供理论依据。

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, 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, 后期熟相比较好, 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%。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。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。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 茎蘖动态 定点定时调查记载茎蘖的消长动态。从每个小区选长势比较一致的连续 15 穴, 拔节前每 5 d 调查 1 次, 拔节后每 7 d 调查 1 次直至成熟, 计算成穗率。

1.3.2 干物质与叶面积 分别于拔节、抽穗和成熟期, 按每小区茎蘖数的平均数取代表性植株 5 穴, 考察地上部性状后测定植株绿叶面积。抽穗期将叶面积分为总叶面积(所有茎蘖的叶面积)、有效叶面积(有效茎蘖的叶面积)和高效叶面积(有效茎蘖顶三叶的叶面积)分别测定。取植株样于 105℃杀青 30 min, 80℃烘干至恒重, 称取干物质重。

1.3.3 产量及其构成 于成熟期普查每小区 100 穴, 计算有效穗数, 取代表性 5 穴调查每穗粒数、结实率和测定千粒重, 计算理论产量, 每小区收割 50 穴测定实产。

1.4 数据计算与统计分析

转运量(t hm⁻²) = 抽穗期茎叶干物质积累量 - 成熟期干物质积累量

转运率(%) = 转运量/抽穗期茎叶干物质积累量

贡献率(%) = 转运量/成熟期穗干物质积累量

光合势(m² d m⁻²) = 1/2(L₁+L₂)×(t₂-t₁), 式中, L₁和 L₂为前后 2 次测定的叶面积, t₁和 t₂为前后 2 次测定的时间。

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总体变异的影响

由表 1 可见, 品种间、氮肥水平间、光处理间、品种和光处理互作间、氮肥和光处理互作间差异均达极显著水平; 品种与氮肥及三因素互作间差异均

未达显著水平, 说明本试验设计合理, 具有一定的准确性和代表性, 能真实反映光、氮及其互作下超级粳稻的产量差异。

2.2 光、氮及其互作对超级粳稻产量及其构成因素的影响

由表 2 可知, 2 个超级粳稻品种在 2 种氮肥水平、不同光照处理的产量均呈现 $L1 > L3 > L2$, 差异显著。其中 N10 条件下 L1 比 L2 高 27.23%~35.26%; N20 条件下 L1 比 L2 高 30.71%~30.75%。不同光氮处理间的产量, 2 个品种均呈现 $N20L1 > N20L3 >$

表 1 光、氮及其互作 B 对超级稻品种籽粒产量影响的方差分析
Table 1 Analysis of variance for effects of light, nitrogen and their interaction on grain yield of super rice

变异来源 Source	自由度 df	平方和 SS	均方 MS	F 值 F-value
品种间 Varieties	1	2.03	2.03	239.48**
氮肥水平间 Nitrogen	1	43.47	43.47	5128.18**
光处理间 Light	2	20.69	10.34	1220.28**
品种×氮肥 Varieties × nitrogen	1	0.04	0.04	4.42
品种×光处理 Varieties × light	2	0.19	0.10	11.46**
氮肥×光处理 Nitrogen × light	2	0.80	0.40	47.11**
品种×氮肥×光处理 Varieties × nitrogen × light	2	0.06	0.03	3.32

**表示达到 1% 显著水平。 ** Significantly different at the 1% probability level.

表 2 光、氮及其互作对超级稻产量及其构成因素的影响
Table 2 Effects of light, nitrogen and their interaction on yield and yield components of super rice

氮肥水平 Nitrogen level	光处理 Light treatment	有效穗数 No. of panicles ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	每穗粒数 No. of spikelets per panicle	总颖花量 Total spikelets ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	千粒重 1000-grain weight (g)	结实率 Seed-setting rate (%)	实际产量 Actual yield (t hm^{-2})
南粳 44 Nanjing 44							
N10	L1	248.13 Cc	128.71 Bb	31937.23 Cc	27.25 Aa	93.56 Aa	7.57 Dd
	L2	237.19 Dd	105.25 Dd	24963.98 Dd	26.96 Aa	93.15 Aa	5.95 Ff
	L3	249.38 Cc	130.75 Bb	32605.78 Cc	25.30 Cc	89.55 Cc	6.79 Ee
N20	L1	308.75 Aa	149.00 Aa	46003.75 Aa	26.20 Bb	92.59 Bb	10.97 Aa
	L2	299.69 Bb	122.22 Cc	36628.47 Bb	25.95 Bb	92.43 Bb	8.39 Cc
	L3	307.66 Aa	148.57 Aa	45708.93 Aa	24.00 Dd	88.67 Dd	9.26 Bb
宁粳 3 号 Ningjing 3							
N10	L1	259.06 Cc	137.66 Bb	35661.80 Cc	27.31 Aa	92.06 Aa	8.44 Dd
	L2	249.06 Dd	105.57 Dd	26293.88 Dd	27.11 Aa	91.77 ABa	6.24 Ff
	L3	259.69 Cc	138.14 Bb	35873.97 Cc	25.45 Cc	90.71 Cc	7.61 Ee
N20	L1	313.91 Aa	154.75 Aa	48576.99 Aa	26.31 Bb	91.23 BCb	11.45 Aa
	L2	305.78 Bb	127.28 Cc	38921.58 Bb	26.12 Bb	90.96 Cbc	8.76 Cc
	L3	316.09 Aa	152.11 Aa	48081.37 Aa	24.93 Cd	88.97 Dd	9.92 Bb

同一品种的相同数据列标以不同大小写字母的数值分别在 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。

Values followed by different letters within the same column for a cultivar 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.

N20L2>N10L1>N10L3>N10L2, 差异显著。2个超级粳稻品种在2种氮肥水平、不同光照处理的总颖花量均呈现 L1和 L3极显著高于 L2, L1和 L3之间无显著差异。其中 N10条件下 L1比 L2高27.93%~ 35.63%; N20条件下 L1比 L2高24.81%~25.6%。不同光氮处理间的总颖花量, 2个品种均呈现 N20L1>N20L3>N20L2>N10L3>N10L1>N10L2, 差异显著。

2个超级粳稻品种在2种氮肥水平、不同光照处理的千粒重均呈现 L1和 L2极显著高于 L3, L1和 L2之间没有显著差异。其中 N10条件下 L1比 L3高 7.31%~7.71%; N20条件下 L1比 L3高5.54%~ 9.17%。不同光氮处理间的千粒重, 2个品种均呈现 N10L1>N10L2>N20L1>N20L2>N10L3>N20L3, 差异显著。

2个超级粳稻品种在 2种氮肥水平、不同光照处理的结实率均呈现 L1和 L2极显著高于 L3, L1和 L2之间没有显著差异。其中 N10条件下 L1比 L3高 1.49%~4.48%; N20条件下 L1比 L3高 2.52%~4.42%。不同光氮处理间的结实率, 2个品种均呈现 N10L1>N10L2>N20L1>N20L2>N10L3>N20L3, 差异显著。

再从颖花量的构成因素来看, 2个超级粳稻品种

在 2种氮肥水平、不同光照处理的单位面积穗数均呈现 L1和 L3极显著高于 L2, L1和 L3没有显著差异。其中 N10条件下 L1比 L2高 4.02%~4.61%; N20条件下 L1比 L2高 2.66%~3.02%。不同光氮处理间的穗数, 南粳 44 呈现 N20L1>N20L3>N20L2>N10L3>N10L1>N10L2; 宁粳 3 号呈现 N20L3>N20L1>N20L2>N10L3>N10L1>N10L2, 差异均显著。2个超级粳稻品种在 2种氮肥水平、不同光照处理的每穗粒数均呈现 L1和 L3极显著高于 L2, L1和 L3无显著差异。其中 N10条件下 L1比 L2高 22.29%~30.39%; N20条件下 L1比 L2高 21.58%~21.91%。不同光氮处理间的每穗粒数, 2个品种均呈现 N20L1>N20L3>N10L3>N10L1>N20L2>N10L2, 差异显著。

2.3 光、氮及其互作对超级粳稻单位面积茎蘖数及分蘖成穗率的影响

由表 3 可知, 拔节期, 同一氮肥水平不同光照处理的茎蘖数差异不显著。抽穗期, 2个超级粳稻品种在 2种氮肥水平、不同光照处理的茎蘖数均呈现 L1和 L3极显著高于 L2, L1和 L3之间没有显著差异。其中 N10条件下 L1比 L2高 4.06%~6.44% N20

表 3 光、氮及其互作对超级稻单位面积(m²)茎蘖数及成穗率的影响
Table 3 Effects of light, nitrogen and their interaction on number and percentage of productive tillers per unit ground area of super rice

氮肥水平 Nitrogen level	光处理 Light treatment	成穗数 Number of productive tillers			成穗率
		拔节 EG	抽穗 HD	成熟 MA	Percentage of productive tillers (%)
南粳 44 Nanjing 44					
N10	L1	302.19 Bb	255.53 Cc	248.13 Cc	82.11 Aa
	L2	302.75 Bb	240.07 Dd	237.19 Dd	78.34 Cc
	L3	303.04 Bb	256.37 Cc	249.38 Cc	82.29 Aa
N20	L1	383.63 Aa	316.25 Aa	308.75 Aa	80.48 Bb
	L2	383.99 Aa	305.85 Bb	299.69 Bb	78.04 Cc
	L3	384.22 Aa	314.28 Aa	307.66 Aa	80.07 Bb
宁粳 3 号 Ningjing 3					
N10	L1	314.24 Bb	266.49 Cc	259.06 Cc	82.44 Aa
	L2	314.64 Bb	256.09 Dd	249.06 Dd	79.16 Cc
	L3	314.42 Bb	267.62 Cc	259.69 Cc	82.59 Aa
N20	L1	387.93 Aa	319.06 Aa	313.91 Aa	80.92 Bb
	L2	388.49 Aa	310.06 Bb	305.78 Bb	78.71 Cc
	L3	390.18 Aa	321.87 Aa	316.09 Aa	81.01 Bb

同一品种的相同数据列标以不同大小写字母的数值分别在 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。

Values followed by different letters within the same column for a cultivar 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. EG: elongation; HD: heading; MA: maturing.

条件下 L1 比 L2 高 2.9%~3.4%。不同光氮处理间的茎蘖数, 南粳 44 呈现 N20L1>N20L3>N20L2>N10L3>N10L1>N10L2; 宁粳 3 号呈现 N20L3>N20L1>N20L2>N10L3>N10L1>N10L2, 差异均显著。成熟期, 2 个超级粳稻品种在 2 种氮肥水平、不同光照处理的茎蘖数均呈现 L1 和 L3 极显著高于 L2, L1 和 L3 之间没有显著差异。其中 N10 条件下 L1 比 L2 高 4.02%~4.61%; N20 条件下 L1 比 L2 高 2.66%~3.02%。不同光氮处理间的茎蘖数, 南粳 44 呈现 N20L1>N20L3>N20L2>N10L3>N10L1>N10L2; 宁粳 3 号呈现 N20L3>N20L1>N20L2>N10L3>N10L1>N10L2, 差异均显著。

2 个超级粳稻品种在 2 种氮肥水平、不同光照处理的分蘖成穗率均呈现 L1 和 L3 极显著高于 L2, L1 和 L3 之间没有显著差异。其中 N10 条件下 L1 比 L2 高 4.15%~4.81%; N20 条件下 L1 比 L2 高 2.81%~3.12%。不同光氮处理间的分蘖成穗率, 南粳 44 呈现 N10L3>N10L1>N20L1>N20L3>N10L2>N20L2; 宁粳 3 号呈现 N10L3>N10L1>N20L3>N20L1>N10L2>N20L2, 差异均显著。

2.4 光、氮及其互作对超级粳稻叶面积指数的影响

由表 4 可知, 拔节期, 同一氮肥水平不同光照处理的叶面积指数差异不显著。抽穗期, 2 个超级粳稻品种在 2 种氮肥水平、不同光照处理的叶面积指数均呈现 L1 和 L3 极显著高于 L2, L1 和 L3 之间没有显著差异。其中 N10 条件下 L1 比 L2 高 19.02%~20.12%; N20 条件下 L1 比 L2 高 25.48%~27.17%。不同光氮处理间的叶面积指数, 南粳 44 呈现 N20L1>N20L3>N20L2>N10L3>N10L1>N10L2; 宁粳 3 号呈现 N20L3>N20L1>N20L2>N10L3>N10L1>N10L2, 差异均显著。成熟期, 2 个超级粳稻品种在 2 种氮肥水平、不同光照处理的叶面积指数均呈现 L1 和 L2 极显著高于 L3, L1 和 L2 之间没有显著差异。其中 N10 条件下 L1 比 L3 高 35.46%~38.75%; N20 条件下 L1 比 L3 高 27.41%~29.09%。不同光氮处理间的叶面积指数, 2 个品种均呈现 N20L2>N20L1>N10L2>N10L1>N20L3>N10L3, 差异显著。

2 个超级粳稻品种在 2 种氮肥水平、不同光照处理的有效叶面积率为 94.33%~95.69%, 不同光氮

表 4 光、氮及其互作对超级稻群体叶面积指数和抽穗期叶面积组成的影响
Table 4 Effects of light, nitrogen and their interaction on population leaf area index and leaf area composition at heading of super rice

氮肥水平 Nitrogen level	光处理 Light treatment	叶面积指数 Leaf area index			有效叶面积率 LARPTH (%)	高效叶面积率 LARFTH (%)
		拔节 EG	抽穗 HD	成熟 MA		
南粳 44 Nanjing 44						
N10	L1	4.48 Bb	5.50 Cc	2.18 Bb	95.22 a	67.74 Bb
	L2	4.48 Bb	4.58 Dd	2.22 Bb	95.69 a	64.76 Cc
	L3	4.47 Bb	5.53 Cc	1.61 Cd	94.89 a	67.77 Bb
N20	L1	5.06 Aa	7.97 Aa	2.50 Aa	95.45 a	70.37 Aa
	L2	5.03 Aa	6.35 Bb	2.58 Aa	95.34 a	67.37 Bb
	L3	5.04 Aa	7.96 Aa	1.96 Bc	95.32 a	70.69 Aa
宁粳 3 号 Ningjing 3						
N10	L1	4.37 Bb	5.34 Cc	2.08 Bb	94.98 a	67.18 Bb
	L2	4.39 Bb	4.49 Dd	2.14 Bb	94.33 a	64.67 Cc
	L3	4.37 Bb	5.38 Cc	1.50 Cd	94.85 a	67.21 Bb
N20	L1	4.91 Aa	7.82 Aa	2.37 Aa	95.12 a	69.93 Aa
	L2	4.92 Aa	6.15 Bb	2.46 Aa	95.09 a	66.92 Bb
	L3	4.90 Aa	7.83 Aa	1.84 Bc	95.22 a	70.14 Aa

同一品种的相同数据列标以不同大小写字母的数值分别在 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。

Values followed by different letters within the same column for a cultivar 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. EG: elongation; HD: heading; MA: maturing. LARPTH: leaf area rate of productive tillers at heading; LARFTH: leaf area rate from flag leaf to 3rd leaf at heading.

处理间没有显著差异；高效叶面积率均呈现 L1 和 L3 极显著高于 L2, L1 和 L3 之间没有显著差异。其中 N10 条件下 L1 比 L2 高 3.89%~4.60%；N20 条件下 L1 比 L2 高 4.47%~4.51%。不同光氮处理间的高效叶面积率, 2 个品种均呈现 N20L3>N20L1>N10L3>N10L1>N20L2>N10L2, 差异显著。

2.5 光、氮及其互作对超级粳稻群体光合势的影响

由表5可知, 播种至拔节阶段, 同一氮肥水平不同光照处理的光合势差异不显著。拔节至抽穗阶段, 2个超级粳稻品种在2种氮肥水平、不同光照处理的光合势均呈现 L1和 L3极显著高于 L2, L1和 L3之间

没有显著差异。其中 N10 条件下 L1 比 L2 高 2.06%~2.75%；N20 条件下 L1 比 L2 高 3.35%~4.21%。不同光氮处理间的光合势, 2个品种均呈现 N20L1>N20L3>N20L2>N10L3>N10L1>N10L2, 差异显著。抽穗至成熟阶段, 2个超级粳稻品种在2种氮肥水平、不同光照处理的光合势均呈现 L1> L3> L2, 差异显著。其中 N10 条件下 L1 比 L2 高 15.68%~16.73%；N20 条件下 L1 比 L2 高 23.24%~24.54%。不同光氮处理间的光合势, 2个品种均呈现 N20L1>N20L3>N20L2>N10L1>N10L3>N10L2, 差异显著。

表 5 光、氮及其互作对超级稻群体光合势的影响
Table 5 Effects of light, nitrogen and their interaction on population photosynthetic potential of super rice

氮肥水平 Nitrogen level	光处理 Light treatment	光合势 Photosynthetic potential (m ² d m ⁻²)		
		播种–拔节 SO–EG	拔节–抽穗 EG–HD	抽穗–成熟 HD–MA
南粳 44 Nanjing 44				
N10	L1	149.95 Bb	139.68 Cc	234.27 Dd
	L2	150.18 Bb	135.93 Dd	200.69 Ff
	L3	149.68 Bb	139.92 Cc	217.64 Ee
N20	L1	169.37 Aa	182.37 Aa	319.30 Aa
	L2	168.58 Aa	176.46 Bb	259.08 Cc
	L3	168.72 Aa	181.92 Aa	302.51 Bb
宁粳 3 号 Ningjing 3				
N10	L1	146.44 Bb	135.99 Cc	226.32 Dd
	L2	147.21 Bb	133.24 Dd	195.65 Ff
	L3	146.52 Bb	136.50 Cc	209.65 Ee
N20	L1	164.49 Aa	184.68 Aa	305.85 Aa
	L2	164.91 Aa	177.22 Bb	245.59 Cc
	L3	164.11 Aa	184.50 aA	289.81 Bb

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。

Values followed by different letters within the same column for a cultivar 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.

2.6 光、氮及其互作对超级粳稻干物质积累量的影响

由表 6 可知, 拔节期, 同一氮肥水平不同光照处理的干物质积累量差异不显著。抽穗期, 2 个超级粳稻品种在 2 种氮肥水平、不同光照处理的干物质积累量均呈现 L1 和 L3 极显著高于 L2, L1 和 L3 之间没有显著差异。其中 N10 条件下 L1 比 L2 高 15.00%~23.16%；N20 条件下 L1 比 L2 高 16.12%~19.54%。不同光氮处理间的干物质积累量, 南粳 44 呈现 N20L1>N20L3>N20L2>N10L3> N10L1>N10L2; 宁粳 3 号 呈 现 N20L3>N20L1>N20L2>N10L3>

N10L1>N10L2, 差异均显著。成熟期, 2 个超级粳稻品种在 2 种氮肥水平、不同光照处理的干物质积累量均呈现 L1>L3>L2, 差异显著。其中 N10 条件下 L1 比 L2 高 14.80%~23.01%；N20 条件下 L1 比 L2 高 15.88%~18.13%。不同光氮处理间的干物质积累量, 2 个品种均呈现 N20L1>N20L3>N20L2>N10L1>N10L3>N10L2, 差异显著。

2.7 光、氮及其互作对超级粳稻干物质阶段积累量的影响

由表 7 可知, 拔节前, 同一氮肥水平不同光照处理的干物质积累量差异不显著。拔节至抽穗阶段,

表 6 光、氮及其互作对超级稻干物质积累量的影响
Table 6 Effects of light, nitrogen, and their interaction on dry matter accumulation amount of super rice (t hm^{-2})

氮肥水平 Nitrogen level	光处理 Light treatment	拔节 EG	抽穗 HD	成熟 MA
南粳 44 Nanjing 44				
N10	L1	3.26 Bb	8.30 Cc	14.50 Dd
	L2	3.29 Bb	7.22 Dd	12.63 Ff
	L3	3.27 Bb	8.43 Cc	13.77 Ee
N20	L1	4.19 Aa	12.69 Aa	21.18 Aa
	L2	4.14 Aa	10.62 Bb	17.93 Cc
	L3	4.14 Aa	12.42 Aa	18.90 Bb
宁粳 3 号 Ningjing 3				
N10	L1	3.49 Bb	9.50 Cc	16.26 Dd
	L2	3.51 Bb	7.72 Dd	13.22 Ff
	L3	3.51 Bb	9.72 Cc	15.16 Ee
N20	L1	4.74 Aa	13.09 Aa	21.64 Aa
	L2	4.72 Aa	11.27 Bb	18.68 Cc
	L3	4.72 Aa	13.21 Aa	20.08 Bb

同一品种的相同数据列标以不同大小写字母的数值分别在 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。

Values followed by different letters within the same column for a cultivar 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. EG: elongation; HD: heading; MA: maturing.

表 7 光、氮及其互作对超级稻干物质阶段积累量的影响
Table 7 Effects of light, nitrogen, and their interaction on periodical dry matter accumulation of super rice (t hm^{-2})

氮肥水平 Nitrogen level	光处理 Light treatment	拔节前 TR-EG	拔节-抽穗 EG-HD	抽穗-成熟 HD-MA
南粳 44 Nanjing 44				
N10	L1	3.26 Bb	5.05 Cc	6.20 Cd
	L2	3.29 Bb	3.94 Dd	5.41 De
	L3	3.27 Bb	5.16 Cc	5.34 De
N20	L1	4.19 Aa	8.50 Aa	8.49 Aa
	L2	4.14 Aa	6.48 Bb	7.31 Bb
	L3	4.14 Aa	8.28 Aa	6.47 Cc
宁粳 3 号 Ningjing 3				
N10	L1	3.49 Bb	6.02 Cc	6.76 Cd
	L2	3.51 Bb	4.21 Dd	5.50 De
	L3	3.51 Bb	6.21 Cc	5.44 De
N20	L1	4.74 Aa	8.35 Aa	8.56 Aa
	L2	4.72 Aa	6.55 Bb	7.41 Bb
	L3	4.72 Aa	8.49 Aa	6.87 Cc

同一品种的相同数据列标以不同大小写字母的数值分别在 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。

Values followed by different letters within the same column for a cultivar 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. TR: transplanting; EG: elongation; HD: heading; MA: maturing.

2个超级粳稻品种在2种氮肥水平、不同光照处理的干物质积累量均呈现 L1和 L3极显著高于 L2, L1和 L3没有显著差异。其中 N10条件下 L1比 L2高28.2%~42.95%; N20条件下 L1比 L2高27.41%~31.26%。不同光氮处理间的干物质积累量, 南粳44呈现 N20L1>N20L3>N20L2>N10L3>N10L1>N10L2; 宁粳3号呈现 N20L3>N20L1>N20L2>N10L3>N10L1>N10L2, 差异均显著。抽穗至成熟阶段, 2个超级粳稻品种 N10水平、不同光照处理的干物质积累量均呈现 L1极显著高于 L2和 L3, L2和 L3之间没有显著差异。其中 L1比 L3高16.09%~24.35%; 2个超级粳稻品种 N20水平、不同光照处理的干物质积累量均呈现 L1>L2>L3, 差异显著。其中 L1比 L3高24.5%~31.07%。不同光氮处理间的干物质积累量, 2个品种均呈现 N20L1>N20L2>N20L3>N10L1>N10L2>N10L3, 差异显著。

2.8 光、氮及其互作对超级粳稻干物质阶段积累比例的影响

对于干物质阶段积累率(表8), 拔节前, 2个超级粳稻品种在2种氮肥水平、不同光照处理下为 L2>L3>L1, 差异显著。其中 N10条件下 L2比 L1高15.75%~23.76%; N20条件下 L2比 L1高15.39%~

16.72%。不同光氮处理间的干物质积累率, 南粳44呈现 N10L2>N10L3>N20L2>N10L1> N20L3>N20L1; 宁粳3号呈现 N10L2>N20L2>N20L3>N10L3>N20L1>N10L1, 差异均显著。拔节至抽穗阶段, 2个超级粳稻品种在2种氮肥水平、不同光照处理的干物质积累率均呈现 L3>L1>L2, 差异显著。其中 N10条件下 L3比 L2高20.27%~28.68%; N20条件下 L3比 L2高20.51%~21.30%。不同光氮处理间的干物质积累率, 南粳44呈现 N20L3> N20L1>N10L3>N20L2>N10L1>N10L2; 宁粳3号呈现 N20L3>N10L3>N20L1>N10L1>N20L2>N10L2, 差异均显著。抽穗至成熟阶段, 2个超级粳稻品种在2种氮肥水平、不同光照处理的干物质积累率均呈现 L1和 L2极显著高于 L3, L1和 L2之间没有显著差异。其中 N10条件下 L1比 L3高10.25%~15.92%; N20条件下 L1比 L3高15.50%~16.96%。不同光氮处理间的干物质积累率, 2个品种均呈现 N10L2>N10L1>N20L2>N20L1>N10L3>N20L3, 差异显著。

2.9 光、氮及其互作对超级粳稻干物质转运的影响

由表9可知, 抽穗期, 2个超级粳稻品种在2种氮肥水平、不同光照处理的茎叶和穗干重均呈现 L2极显著低于 L1和 L3, L1和 L3之间没有显著差异。

表 8 光、氮及其互作对超级稻干物质阶段积累率的影响

Table 8 Effects of light, nitrogen and their interaction on percentage of periodical dry matter accumulation rate of super rice (%)

氮肥水平 Nitrogen level	光处理 Light treatment	拔节前 TR-EG	拔节-抽穗 EG-HD	抽穗-成熟 HD-MA
南粳 44 Nanjing 44				
N10	L1	22.47 CDd	34.80 Ee	42.73 Aa
	L2	26.01 Aa	31.16 Ff	42.83 Aa
	L3	23.77 Bb	37.47 Cc	38.76 Bc
N20	L1	19.79 Ef	40.13 Bb	40.07 Bbc
	L2	23.10 BCc	36.12 Dd	40.78 ABb
	L3	21.93 De	43.81 Aa	34.26 Cd
宁粳 3 号 Ningjing 3				
N10	L1	21.43 De	37.00 Dd	41.57 Aa
	L2	26.53 Aa	31.84 Ff	41.64 Aa
	L3	23.18 Cc	40.97 Bb	35.86 Cc
N20	L1	21.89 Dd	38.57 Cc	39.54 Bb
	L2	25.26 Bb	35.08 Ee	39.66 Bb
	L3	23.49 Cc	42.28 Aa	34.23 Dd

同一品种的相同数据列标以不同大小写字母的数值分别在 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。

Values followed by different letters within the same column for a cultivar 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. TR: transplanting; EG: elongation; HD: heading; MA: maturing.

表 9 光、氮及其互作对超级稻干物质转运特性的影响
Table 9 Effects of light, nitrogen, and their interaction on dry matter translocation of super rice

氮肥水平	光处理	抽穗期 HD (t hm ⁻²)		成熟期 MA (t hm ⁻²)		转运量	转运率	贡献率
Nitrogen level	Light treatment	茎叶	穗	茎叶	穗	Translocation amount (t hm ⁻²)	Translocation rate(%)	Contribution rate (%)
		Stem and leaf	Panicle	Stem and leaf	Panicle			
南粳 44 Nanjing 44								
N10	L1	7.35 Cc	0.95 Bb	6.40 Dd	8.10 Dd	0.95 Dd	12.98 Dd	11.77 Ee
	L2	6.69 Dd	0.53 Dd	5.97 Ff	6.67 Ff	0.72 Ee	10.86 Ee	10.90 Ff
	L3	7.55 Cc	0.89 Bb	6.22 Ee	7.56 Ee	1.33 Cc	17.64 Bb	17.62 Bb
N20	L1	11.32 Aa	1.37 Aa	9.61 Aa	11.57 Aa	1.71 Bb	15.13 Cc	14.82 Cc
	L2	9.96 Bb	0.66 Cc	8.70 Cc	9.23 Cc	1.26 Cc	12.63 Dd	13.63 Dd
	L3	11.16 Aa	1.26 Aa	8.94 Bb	9.95 Bb	2.22 Aa	19.86 Aa	22.27 Aa
宁粳 3 号 Ningjing 3								
N10	L1	8.33 Cc	1.17 Bb	7.11 Dd	9.15 Dd	1.22 De	14.58 Dd	13.28 Ee
	L2	7.08 Dd	0.63 Dd	6.30 Ff	6.92 Ff	0.78 Ef	11.06 Ff	11.32 Ff
	L3	8.64 Cc	1.08 Bb	6.92 Ee	8.24 Ee	1.72 Bc	19.91 Bb	20.88 Bb
N20	L1	11.58 Aa	1.51 Aa	9.77 Aa	11.87 Aa	1.80 Bb	15.58 Cc	15.19 Cc
	L2	10.46 Bb	0.81 Cc	9.11 Cc	9.57 Cc	1.35 Cd	12.95 Ee	14.16 Dd
	L3	11.79 Aa	1.42 Aa	9.32 Bb	10.77 Bb	2.47 Aa	20.96 Aa	22.95 Aa

同一品种的相同数据列标以不同大小写字母的数值分别在 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。

Values followed by different letters within the same column for a cultivar 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. HD: heading; MA: maturing.

成熟期则呈 L1>L3>L2, 差异显著。2 个品种均呈现 N20L1>N20L3>N20L2>N10L1>N10L3>N10L2, 差异显著。

2 个超级粳稻品种在 2 种氮肥水平、不同光照处理的干物质转运量均呈现 L3>L1>L2, 差异显著; 其中 N10 条件下 L3 比 L2 高 83.23%~119.57%; N20 条件下 L3 比 L2 高 76.22%~82.32%。不同光氮处理间的干物质转运量, 2 个品种均呈现 N20L3>N20L1>N10L3>N20L2>N10L1>N10L2, 差异显著。2 个超级粳稻品种在 2 种氮肥水平、不同光照处理的干物质转运率均呈现 L3>L1>L2, 差异显著; 其中 N10 条件下 L3 比 L2 高 62.5%~79.95%; N20 条件下 L3 比 L2 高 57.20%~61.84%; 不同光氮处理间的干物质转运率, 2 个品种均呈现 N20L3>N10L3>N20L1>N10L1>N20L2>N10L2, 差异显著。2 个超级粳稻品种在 2 种氮肥水平、不同光照处理的干物质贡献率均呈现 L3>L1>L2, 差异显著; 其中 N10 条件下 L3 比 L2 高 61.63%~84.47%; N20 条件下 L3 比 L2 高 62.08%~63.39%; 不同光氮处理间的干物质贡献率, 2 个品种均呈现 N20L3>N10L3>N20L1>N20L2>N10L1>N10L2, 差异显著。

3 讨论

3.1 光、氮及其互作对超级粳稻产量和物质生产特征的影响

光、氮及其互作对超级粳稻产量和物质生产特征有显著的影响。抽穗前遮光 20 d 不仅减少了每穗分化的颖花数^[20], 使每穗粒数降低, 同时还显著降低植株抽穗期茎蘖数和叶面积指数, 导致抽穗至成熟阶段的光合势、干物质积累量显著低于不遮光处理, 最终产量显著下降; 而抽穗后遮光 20 d 主要影响抽穗至成熟阶段的光合物质积累, 使中后期的籽粒灌浆更多依靠茎鞘储藏物质的转运, 导致结实率和千粒重显著低于不遮光处理, 最终产量显著下降^[21]。本研究表明, 氮肥施用能够部分弥补因弱光逆境对超级粳稻物质生产及其产量的影响。抽穗前遮光 20 d, 随着氮肥水平增加, 抽穗期茎蘖数和叶面积指数均显著增加, 导致抽穗至成熟阶段的光合势、干物质积累显著增加, 最终有效穗数、每穗粒数、总颖花量以及产量显著提高。抽穗后遮光 20 d, 随着氮肥水平增加, 虽然结实率与千粒重下降, 但抽穗至成熟阶段的光合物质积累显著提高, 其中

茎叶干物质向穗部转运量显著增加, 转运率和贡献率也进一步提高, 最终产量显著提高。

3.2 超级稻超高产抗逆栽培的途径

已有研究表明^[22-25], 超级稻实现超高产不仅需要安全成熟的高颖花量、正常的结实率与千粒重, 同时在物质生产方面, 还需生育中期干物质积累大、叶面积指数高, 生育后期光合物质积累高、物质输出与转运协调等。弱光是水稻生产过程中可能遇到的问题, 它会影响超级稻的正常生长发育, 阻碍超级稻超高产潜力的发挥。而根据本文及前人已有的研究结果, 在超级稻超高产栽培中遭遇弱光等逆境时, 可根据不同时期弱光对超级稻生长发育的影响, 采取针对性的措施, 适当弥补产量的损失。如抽穗前弱光主要引起群体颖花量少, LAI 小。那么生产上可以施用适宜的氮素穗肥来促进颖花分化, 提高每穗颖花分化量^[26], 有条件的地区甚至可以适当早播以增加颖花的分化量^[27]。针对弱光逆境造成 LAI 偏小的问题, 除合理施用氮肥, 增加叶面积指数、提高群体有效叶面积率和高效叶面积率外, 可施用钾肥以增加群体叶面积和改善群体受光条件, 提高单叶透光率和剑叶光合速率^[28]。此外, 弱光逆境解除后, 还可以通过喷施生长调节剂^[29-30]延缓光合器官的衰老, 增加有效光合物质的积累以提高产量。抽穗后弱光主要影响水稻中后期的光合生产能力, 使籽粒灌浆更多依靠茎鞘储藏物质的转运, 导致水稻结实率和千粒重显著下降。因此, 生产上除在施用适宜穗肥的基础上增施一定量的粒肥以促进籽粒灌浆结实外, 还可以通过在灌浆初期对稻穗喷施亚精胺和精胺以提高籽粒灌浆速率及最终结实率和粒重^[31]。另外, 合理的水分管理, 如结实期适度干旱或轻-干湿交替灌溉, 也可以显著提高籽粒灌浆速率和粒重^[32-33], 以部分弥补逆境后超级稻产量的损失。

4 结论

光、氮及其互作对超级粳稻产量和物质生产特征有显著的影响。抽穗前遮光 20 d, 使得抽穗期的茎蘖数和叶面积指数显著低于不遮光处理, 抽穗至成熟阶段的光合势、干物质积累量低, 最终的有效穗数、每穗粒数、总颖花量以及产量显著下降。抽穗后遮光 20 d 主要影响抽穗至成熟阶段的光合物质积累, 导致结实率和千粒重显著下降, 最终产量降低。氮肥施用能够部分弥补因弱光逆境对超级粳稻物质生产及其产量的影响。对于抽穗前弱光, 增施氮肥可显著增加抽穗期茎蘖数与叶面积指数, 提高

抽穗至成熟阶段光合物质积累以增加产量。对于抽穗后弱光, 增施氮肥则可以增加抽穗至成熟阶段的光合物质积累, 提高该阶段茎叶中的储藏物质向穗部的转运, 使产量有所提高。

References

- [1] 龚金龙, 张洪程, 李杰, 常勇, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 李德剑, 李邴维, 沙安勤, 周有炎, 罗学超, 刘国林. 超级稻生态育种及超高产栽培特征与途径的研究进展. 中国农业科技导报, 2011, 13(1): 25-33
Gong J L, Zhang H C, Li J, Chang Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Li D J, Li B W, Sha A Q, Zhou Y Y, Luo X C, Liu G L. Research progress on ecological breeding and cultivation characteristics of super rice and approaches of super high yield. *J Agric Sci Technol*, 2011, 13(1): 25-33 (in Chinese with English abstract)
- [2] Zhang Y, Tang Q, Zou Y, Li D, Qin J, Yang S, Chen L, Xia B, Peng S. Yield potential and radiation use efficiency of "super" hybrid rice grown under subtropical conditions. *Field Crops Res*, 2009, 114: 91-98
- [3] 洪彬艺. 超级稻推广的主要制约因素和对策措施. 福建农业科技, 2010, (4): 1-2
Hong B Y. The main constraints and countermeasures of the super rice promotion. *Fujian Agric Sci Technol*, 2010, (4): 1-2 (in Chinese)
- [4] 张卫星, 朱德峰, 林贤青, 张玉屏, 陈惠哲, 朱智伟. 干旱胁迫对不同穗型超级稻品种产量及穗部性状的影响. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1): 255-260
Zhang W X, Zhu D F, Lin X Q, Zhang Y P, Chen H Z, Zhu Z W. The effect of drought stress on yield and panicle traits of different type super rice varieties during panicle initiation to grain filling stage. *Agric Res in Arid*, 2010, 28(1): 255-260 (in Chinese with English abstract)
- [5] 徐海波, 王光明, 隗溟, 周文彪. 高温胁迫下水稻花粉粒性状与结实率的相关分析. 西南农业大学学报, 2001, 23: 205-207
Xu H B, Wang G M, Kui M, Zhou W B. Correlation analysis of the characters of pollen grains and seed-setting of rice under high temperature stress. *J Southwest Agric Univ*, 2001, 23: 205-207 (in Chinese with English abstract)
- [6] 张洪程, 马群, 杨雄, 李敏, 葛梦婕, 李国业, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 高辉, 刘艳阳. 水稻品种氮肥群体最高生产力及其增长规律. 作物学报, 2012, 38: 86-98
Zhang H C, Ma Q, Yang X, Li M, Ge M J, Li G Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Gao H, Liu Y Y. The highest population productivity of nitrogen fertilization and its variation rules in rice cultivars. *Acta Agron Sin*, 2012, 38: 86-98 (in Chinese with English abstract)
- [7] Setter T L, Laureles E V, Mazaredo A M. Lodging reduces yield of rice by self-shading and reductions in canopy photosynthesis. *Field Crops Res*, 1997, 49: 95-106
- [8] 杨益花, 张亚洁, 苏祖芳. 施氮量对杂交水稻产量构成因素和干物质积累的影响. 天津农学院学报, 2005, 12(1): 5-8
Yang Y H, Zhang Y J, Su Z F. Effects of amount of N-fertilizer on yield constitution and dry matter accumulation of hybrid rice. *J Tianjin Agric Coll*, 2005, 12(1): 5-8 (in Chinese with English ab-

- stract)
- [9] 马群, 杨雄, 李敏, 李国业, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 高辉. 不同氮肥群体最高生产力水稻品种的物质生产积累. 中国农业科学, 2011, 44: 4159–4169
Ma Q, Yang X, Li M, Li G Y, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Gao H. Studies on the characteristics of dry matter production and accumulation of rice varieties with different productivity levels. *Sci Agric Sin*, 2011, 44: 4159–4169 (in Chinese with English abstract)
 - [10] 张小翠, 戴其根, 胡星星, 朱德建, 丁秀文, 马克强, 张洪程, 朱聪聪. 不同质地土壤下缓释尿素与常规尿素配施对水稻产量及其生长发育的影响. 作物学报, 2012, 38: 1494–1503
Zhang X C, Dai Q G, Hu X X, Zhu D J, Ding X W, Ma K Q, Zhang H C, Zhu C C. Effects of slow-release urea combined with conventional urea on rice output and growth in soils of different textures. *Acta Agron Sin*, 2012, 38: 1494–1503 (in Chinese with English abstract)
 - [11] 李先, 刘强, 荣湘民, 谢桂先, 张玉平, 彭建伟, 宋海星. 有机肥对水稻产量及产量构成因素的影响. 湖南农业科学, 2010, (5): 64–66
Li X, Liu Q, Rong X M, Xie G X, Zhang Y P, Peng J W, Song H X. Effects of organic fertilizer on yield and yield composition factors of rice. *Hunan Agric Sci*, 2010, (5): 64–66 (in Chinese with English abstract)
 - [12] 吴文革, 张四海, 赵决建, 吴桂成, 李泽福, 夏加发. 氮肥运筹模式对双季稻北缘水稻氮素吸收利用及产量的影响. 植物营养与肥料学报, 2007, 13: 757–764
Wu W G, Zhang S H, Zhao J J, Wu G C, Li Z F, Xia J F. Nitrogen uptake, utilization and rice yield in the north rimland of double-cropping rice region as affected by different nitrogen management strategies. *Plant Nutr Fert Sci*, 2007, 13: 757–764 (in Chinese with English abstract)
 - [13] 刘立军, 王志琴, 桑大志, 杨建昌. 氮肥运筹对水稻产量及稻米品质的影响. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2002, 23(3): 46–50
Liu L J, Wang Z Q, Sang D Z, Yang J C. Effect of nitrogen management on rice yield and grain quality. *J Yangzhou Univ (Agric & Life Sci)*, 2002, 23(3): 46–50 (in Chinese with English abstract)
 - [14] 张祖建, 谢成林, 谢仁康, 郎有忠, 杨岚, 张菊芳, 朱庆森. 苏中地区直播水稻的群体生产力及氮肥运筹的效应. 作物学报, 2011, 37: 677–685
Zhang Z J, Xie C L, Xie R K, Lang Y Z, Yang L, Zhang J F, Zhu Q S. Population production capacity of direct-seeding rice in central Jiangsu region and effects of nitrogen application. *Acta Agron Sin*, 2011, 37: 677–685 (in Chinese with English abstract)
 - [15] 吴文革, 张玉海, 张健美, 许有尊, 何超波, 李霞红, 徐长斌, 李福军, 陈学英. 氮肥运筹对机插杂交中籼水稻群体质量及产量形成的影响. 安徽农业大学学报, 2011, 38: 1–5
Wu W G, Zhang Y H, Zhang J M, Xu Y Z, He C B, Li X H, Xu C B, Li F J, Chen X Y. Effects of nitrogen management on mass quality and yield formation of machine transplanted middle-season *indica* hybrid rice. *J Anhui Agric Univ*, 2011, 38: 1–5 (in Chinese with English abstract)
 - [16] 董平, 杨世民, 马均, 吴合洲, 傅泰露, 李敏, 王明田. 不同水稻品种在不同光照条件下的光合特性及干物质积累. 应用生态学报, 2008, 19: 505–511
Tong P, Yang S M, Ma J, Wu H Z, Fu T L, Li M, Wang M T. Photosynthetic characteristics and dry matter accumulation of hybrid rice varieties under different light conditions. *Chin J Appl Ecol*, 2008, 19: 505–511 (in Chinese with English abstract)
 - [17] 任万军, 杨文钰, 樊高琼, 朱雪梅, 马周华, 徐精文. 始穗后弱光对水稻干物质积累与产量的影响. 四川农业大学学报, 2003, 21: 292–296
Ren W J, Yang W Y, Fan G Q, Zhu X M, Ma Z H, Xu J W. Effect of low light on dry matter accumulation and yield of rice. *J Sichuan Agric Univ*, 2003, 21: 292–296 (in Chinese with English abstract)
 - [18] 郭银生, 谷艾素, 崔瑾. 光质对水稻幼苗生长及生理特性的影响. 应用生态学报, 2011, 22: 1485–1492
Guo Y S, Gu A S, Cui J. Effects of light quality on rice seedlings growth and physiological characteristics. *Chin J App Ecol*, 2011, 22: 1485–1492 (in Chinese with English abstract)
 - [19] 付传明, 黄宁珍, 赵志国, 唐凤鸾, 黄志民. 光质与补光对水稻幼苗生长及光合速率的影响. 广西植物, 2007, 27: 255–259
Fu C M, Huang N Z, Zhao Z G, Tang F L, Huang Z M. Effects of different light qualities and illumination supplement on growth and photosynthetic rate of rice seedling. *Guihaia*, 2007, 27: 255–259 (in Chinese with English abstract)
 - [20] 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 App Ecol*, 1999, 10: 193–196 (in Chinese with English abstract)
 - [21] 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)
 - [22] 杨建昌, 杜永, 吴长付, 刘立军, 王志琴, 朱庆森. 超高产粳型水稻生长发育特性的研究. 中国农业科学, 2006, 39: 1336–1345
Yang J C, Du Y, Wu C F, Liu L J, Wang Z Q, Zhu Q S. Growth and development characteristics of super-high-yielding mid-season *japonica* rice. *Sci Agric Sin*, 2006, 39: 1336–1345 (in Chinese with English abstract)
 - [23] 吴桂成, 张洪程, 钱银飞, 李德剑, 周有炎, 徐军, 吴文革, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 高辉, 徐宗进, 钱宗华, 孙菊英, 赵品恒. 粳型超级稻产量构成因素协同规律及超高产特征的研究. 中国农业科学, 2010, 43: 266–276
Wu G C, Zhang H C, Qian Y F, Li D J, Zhou Y Y, Xu J, Wu W G, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Gao H, Xu Z J, Qian Z H, Sun J Y, Zhao P H. Rule of grain yield components from high yield to super high yield and the characters of super-high yielding *japonica* super rice. *Sci Agric Sin*, 2010, 43: 266–276 (in Chinese with English abstract)
 - [24] 吴桂成, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 高辉, 魏海燕, 沙安勤, 徐宗进, 钱宗华, 孙菊英. 南方粳型超级稻物质生产积累及超高产特征的研究. 作物学报, 2010, 36: 1921–1930
Wu G C, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Gao H, Wei H Y, Sha A Q, Xu Z J, Qian Z H, Sun J Y. Characteristics of dry matter

- production and accumulation and super-high yield of *japonica* super rice in South China. *Acta Agron Sin*, 2010, 36: 1921–1930 (in Chinese with English abstract)
- [25] 李杰, 张洪程, 钱银飞, 郭振华, 陈烨, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 李德剑, 华正雄, 沙安勤, 周有炎, 刘国林. 两个杂交粳稻组合超高产生长特性的研究. *中国水稻科学*, 2009, 23: 179–185
Li J, Zhang H C, Qian Y F, Guo Z H, Chen Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Li D J, Hua Z X, Sha A Q, Zhou Y Y, Liu G L. Growth characteristics of two super-high-yielding *japonica* hybrid rice combinations. *Chin J Rice Sci*, 2009, 23: 179–185 (in Chinese with English abstract)
- [26] 王夏雯, 王绍华, 李刚华, 王强盛, 刘正辉, 余翔, 丁艳锋. 氮素穗肥对水稻幼穗细胞分裂素和生长素浓度的影响及其与颖花发育的关系. *作物学报*, 2008, 34: 2184–2189
Wang X W, Wang S H, Li G H, Wang Q S, Liu Z H, Yu X, Ding Y F. Effect of panicle nitrogen fertilizer on concentrations of cytokinin and auxin in young panicles of *japonica* rice and its relation with spikelet development. *Acta Agron Sin*, 2008, 34: 2184–2189 (in Chinese with English abstract)
- [27] 柳新伟, 孟亚利, 周治国, 曹卫星. 水稻颖花分化与退化的动态特征. *作物学报*, 2005, 31: 451–455
Liu X W, Meng Y L, Zhou Z G, Cao W X. Dynamic characteristics of floret differentiation and degeneration in rice. *Acta Agron Sin*, 2005, 31: 451–455 (in Chinese with English abstract)
- [28] 蒋德安, 薛建明, 陆庆, 饶立华, 李安华. 钾对水稻叶面积和透光率效应的研究. *江苏农业学报*, 1990, (6): 24–30
Jiang D A, Xue J M, Lu Q, Rao L H, Li A H. A study on the effects of potassium on leaf area and transmittance in rice. *Jiangsu J Agric Sci*, 1990, (6): 24–30 (in Chinese with English abstract)
- [29] 王熹, 陶龙兴, 黄效林, 俞美玉. 粒粒饱对水稻灌浆期间衰老的延缓作用. *中国水稻科学*, 2000, 14: 253–255
Wang X, Tao L X, Huang X L, Yu M Y. The delay function on senescence of Lilibao during rice grain filling stage. *Chin J Rice Sci*, 2000, 14: 253–255 (in Chinese with English abstract)
- [30] 汤日圣, 刘晓忠, 陈以峰, 吴光南. 4PU-30 延缓杂交水稻叶片衰老的效果与作用. *作物学报*, 1998, 24: 231–236
Tang R S, Liu X Z, Chen Y F, Wu G N. Effect of 4PU-30 on delaying senescence of hybrid rice leaves. *Acta Agron Sin*, 1998, 24: 231–236 (in Chinese with English abstract)
- [31] 谈桂露, 张耗, 付景, 王志琴, 刘立军, 杨建昌. 超级稻花后强、弱势粒多胺浓度变化及其与籽粒灌浆的关系. *作物学报*, 2009, 35: 2225–2233
Tan G L, Zhang H, Fu J, Wang Z Q, Liu L J, Yang J C. Post-anthesis changes in concentrations of polyamines in superior and inferior spikelets and their relation with grain filling of super rice. *Acta Agron Sin*, 2009, 35: 2225–2233 (in Chinese with English abstract)
- [32] Yang J, Zhang J. Grain filling of cereals under soil drying. *New Phytol*, 2006, 169: 223–236
- [33] Yang J, Zhang J, Wang Z, Zhu Q, Wang W. Hormonal changes in the grains of rice subjected to water stress during grain filling. *Plant Physiol*, 2001, 127: 315–323