

超高产杂交稻的光响应曲线及其模型拟合

方宝华¹ 滕振宁^{1,2,3} 刘洋^{1,2} 张玉烛^{3*}

(¹ 湖南省水稻研究所, 长沙 410125; ² 湖南农业大学农学院, 长沙 410128; ³ 湖南杂交水稻研究中心, 长沙 410125;

第一作者: fangrock@163.com; * 通讯作者: yuzhuzhang@hotmail.com)

摘 要:以超级杂交一季中稻高产攻关第一、二、三、四期标志性品种两优培九、Y 两优 1 号、Y 两优 2 号、Y 两优 900 及第五期攻关品种超优千号为试验材料, 采用 4 种典型的光合模型对参试品种齐穗期剑叶光合光响应曲线进行了拟合, 并对各品种气孔导度和水分利用效率的光响应曲线进行了比较。结果表明, 直角双曲线模型、非直角双曲线模型、直角双曲线修正模型及指数函数模型对参试 5 个品种的光合光响应曲线都可以拟合, 决定系数 R^2 均大于 0.99; 直角双曲线修正模型拟合得到的光合参数与实测值最接近; 光能利用率以超优千号和 Y 两优 900 最高, 剑叶净光合速率(光合能力)以 Y 两优 900 最强, 光饱和点以 Y 两优 900 和 Y 两优 1 号最高, 暗呼吸速率即光合产物消耗以 Y 两优 900 和两优培九最大; 气孔导度除 Y 两优 2 号随光强增加增长缓慢外, 其他 4 个品种均增长较快, 但未出现气孔关闭现象, 对强光表现出良好适应性; 参试品种水分利用率 WUE 在光照强度小于 $800 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, 随光照强度增加而表现为直线升高, 当光照强度继续增加, WUE 增长缓慢并逐渐趋于稳定, 但 Y 两优 900 的 WUE 仍表现出增长态势。因此, Y 两优 900 在光照强度大、日照时数长的地区种植, 仍有较大的增产潜力。

关键词:超级稻; 光响应曲线; 模型; 气孔导度; 水分利用率

中图分类号:S511 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-8082(2017)04-0001-06

水稻是我国乃至全世界上主要的粮食作物, 有 50% 以上人口以稻米为主食, 依靠科技水平继续提高水稻单产, 是解决全球粮食安全问题的选择^[1-2]。1996 年农业部正式立项“中国超级稻育种计划”。其中, 一季中稻设置的 10.5、12.0、13.5 和 $15.0 \text{ t}/\text{hm}^2$ 的产量目标相继在 2000 年、2004 年、2011 年和 2014 年完成^[3], 并开始了 $16.0 \text{ t}/\text{hm}^2$ 产量目标的第五期攻关。

光合作用是作物产量形成的基础^[4-5], 当前对于超高产超级稻的研究工作大多数集中在杂种优势利用及株叶形态特征方面^[6-11], 对超高产杂交稻光合光响应研究较少。因此, 本文选择了超级杂交一季中稻高产攻关第一、二、三、四期标志性品种两优培九、Y 两优 1 号、Y 两优 2 号、Y 两优 900 及第五期攻关品种超优千号为试验材料, 研究了超级杂交稻齐穗期剑叶光合能力, 探索超高产杂交稻的光合特性, 并对不同光合光响应曲线模型进行了比较, 以期为超高产杂交稻育种及其光合特性研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于 2016 年在湖南省水稻研究所网室进行。供试品种为超级杂交稻长江流域一季中稻高产攻关第

一、二、三、四期标志性品种两优培九、Y 两优 1 号、Y 两优 2 号、Y 两优 900 和第五期攻关品种超优千号。经浸种催芽后, Y 两优 900 和超优千号于 5 月 1 日播种, 其他品种于 5 月 7 日播种。4 叶期移栽。

1.2 光响应曲线采集方法^[12]

在水稻齐穗期(8 月 19-21 日), 分别选择晴天 9:00-11:30 对叶片光合速率进行测定, 每个品种选取 3 片生长一致、叶色正常、无病虫害剑叶, 测定结果取平均值。用 LI-6400 便携式光合测量系统(美国 Li-cor 公司生产)、6400-02B LED 红蓝光源叶室进行连体叶片瞬时净光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)及气孔导度(G_s)测定。具体操作方法: 利用 LI-6400 自动“light-curve”曲线测定功能, 光合光通量密度(photosynthetic photo flux density, PPFD)设定 15 个梯度, 即 0、25、50、100、150、200、300、400、600、800、1 000、1 200、1 400、1 600 和 $2 000 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 测定一系列叶片净光合速率(net photosynthetic rates, P_n)。测定时样本室 CO_2 浓度为 $400 \pm 1 \mu\text{mol}/\text{mol}$, 叶片温度 $30^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$, 空气相对湿度 $75\% \pm 1\%$ 。

收稿日期: 2017-05-23

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0300507)

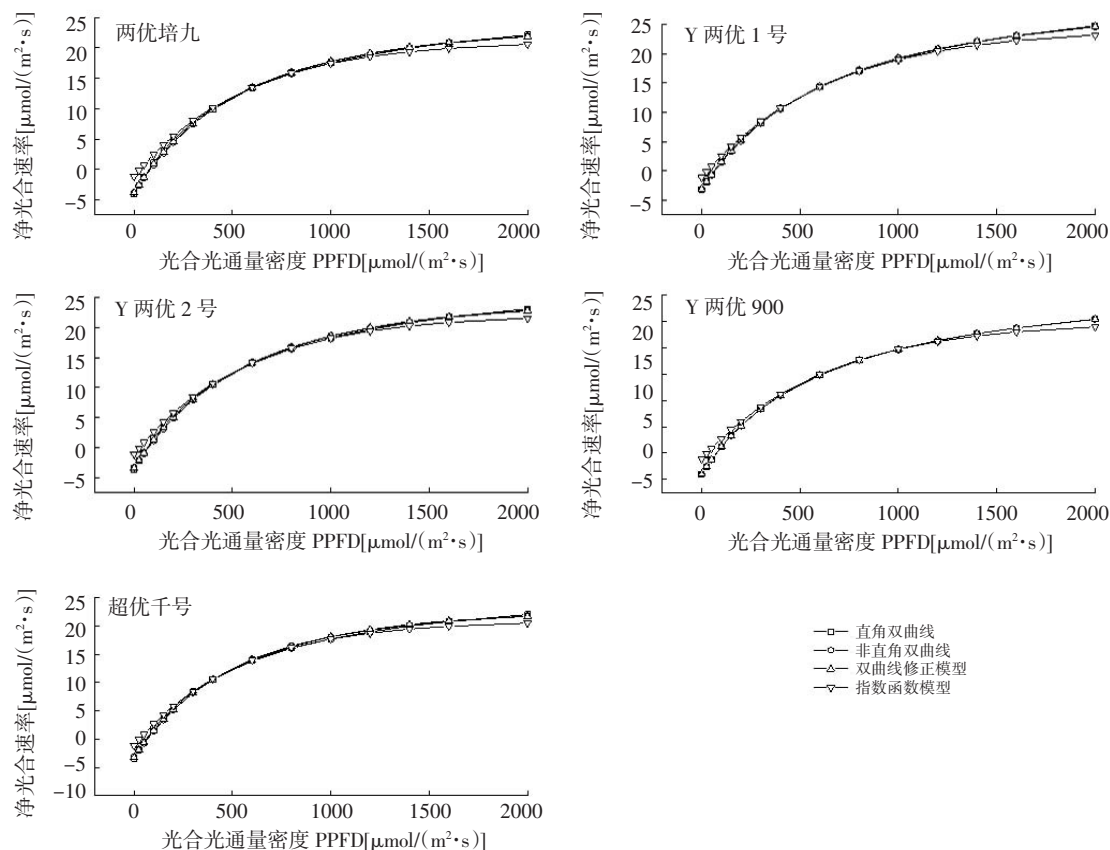


图1 4种模型拟合的5个超级稻品种的光响应曲线

1.3 光响应曲线模型

1.3.1 光响应模型及参数拟定

采用4种典型植物光合作用光响应曲线模型,包括直角双曲线模型、非直角双曲线模型、双曲线修正模型及指数函数模型,各模型公式分别为:

$$P_n(I) = \frac{\alpha I P_{\max}}{\alpha I + P_{\max}} - R_d \quad (1)$$

$$P_n(I) = \frac{\alpha I + P_{\max} - \sqrt{(\alpha I + P_{\max})^2 - 4\theta \alpha I P_{\max}}}{2\theta} - R_d \quad (2)$$

$$P_n(I) = \alpha I \frac{1 - \beta I}{1 + \gamma I} - R_d \quad (3)$$

$$P_n(I) = P_{\max} \left(1 - \frac{-\alpha I}{e P_{\max}}\right) - R_d \quad (4)$$

式中, P_n 为净光合速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]; α 为表观量子效率 AQY ($\mu\text{mol}/\mu\text{mol}$); P_{\max} 为最大净光合速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]; I 为光量子通量密度 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]; R_d 为暗呼吸速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]; θ 为光响应曲线凸度; β 和 γ 为系数。

1.3.2 光响应曲线特征参数计算

不同品种水稻叶片最大净光合速率(P_{\max})、表观量子效率(AQY)、暗呼吸速率(R_d)均可通过模型拟合得到。通过对光通量密度在 0~200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的净光合

速率进行线性回归,回归直线与净光合为 0(x 轴)和净光合为 P_{\max} 两条水平线的交点分别为光补偿点(LCP)和光饱和点(LSP)。而对于直角双曲线修正模型,则需要通过式(5)计算 LSP,然后将 LSP 代入式(3)即可求得对应的 P_{\max} 。指数函数模型要估算光饱和点,需假设光合速率为 0.9 P_{\max} 或 0.99 P_{\max} 所对应的光强为饱和光强^[13-14]。

$$\text{LSP} = \frac{\sqrt{(\beta + \gamma)/\beta - 1}}{\gamma} \quad (5)$$

1.4 水分利用率(WUE)计算

$$\text{WUE} = \frac{P_n}{T_r} \quad (6)$$

式中, WUE 为水分利用效率 ($\mu\text{mol CO}_2 / \text{mmol H}_2\text{O}$), P_n 为净光合速率 [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$], T_r 为蒸腾速率 [$\text{mmol H}_2\text{O}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$].

1.5 数据处理

采用 Excel 软件对数据进行统计分析,曲线拟合及作图使用 Origin8.0 软件。

2 结果与分析

2.1 光响应曲线的拟合及其比较

表 1 5 个不同超级稻品种的光合光响应曲线特征参数

品种	模型	表观量子效率 ($\mu\text{mol}/\mu\text{mol}$)	最大净光合速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]	光饱和点 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]	光补偿点 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]	暗呼吸速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]	决定系数
两优培九	直角双曲线	0.061	33.32	831.09	74.98	4.02	0.999
	非直角双曲线	0.049	30.37	827.81	82.51	3.76	0.999
	双曲线修正模型	0.054	22.50	2 872.88/619.29	78.80	3.84	0.999
	指数函数	0.040	22.38	1 706.45	29.94	1.16	0.999
	实测值	—	—	>2000	≈70	≈3.69	—
Y 两优 1 号	直角双曲线	0.055	37.39	951.5	62.36	3.13	0.999
	非直角双曲线	0.050	35.18	929.46	65.14	3.03	0.999
	双曲线修正模型	0.053	27.47	3 786.95/728.40	63.40	3.09	0.999
	指数函数	0.040	25.39	1 832.82	28.52	1.11	0.999
	实测值	—	—	>2000	≈60	≈3.03	—
Y 两优 2 号	直角双曲线	0.061	34.47	841.1	68.40	3.73	0.999
	非直角双曲线	0.049	31.26	832.11	72.88	3.37	0.999
	双曲线修正模型	0.054	23.38	2 747.42/628.86	70.60	3.48	0.999
	指数函数	0.041	23.44	1 687.50	28.26	1.14	0.999
	实测值	—	—	>2000	≈70	≈3.36	—
Y 两优 900	直角双曲线	0.061	38.85	919.10	73.68	4.02	0.999
	非直角双曲线	0.059	38.08	914.23	75.10	3.98	0.999
	双曲线修正模型	0.060	30.34	4 348.68/741.41	74.25	4.00	0.999
	指数函数	0.042	26.17	1 802.30	27.96	1.14	0.999
	实测值	—	—	>2000	≈70	≈4.06	—
超优千号	直角双曲线	0.062	31.97	782.79	60.91	3.40	0.999
	非直角双曲线	0.05	29.01	768.24	67.09	3.14	1.000
	双曲线修正模型	0.055	22.04	2544.69/590.95	64.42	3.23	0.999
	指数函数	0.042	22.18	1 590.06	27.71	1.14	0.999
	实测值	—	—	>2000	≈60	≈3.15	—

光饱和点:“/”前的数据根据式(5)计算得到,“/”后的数据利用曲线 0~200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 数据进行线性回归确定。

以直角双曲线模型、非直角双曲线模型、直角双曲线修正模型及指数模型对 5 个超高产杂交稻品种齐穗期剑叶的光合光响应曲线进行拟合,如图 1 所示。4 种模型在各个数据点下的拟合效果均较好,决定系数 R^2 均大于 0.99。因此,直观上来看,采用以上 4 种模型都可以很好的拟合光响应曲线。各品种的光合光响应曲线拟合图中,直角双曲线模型、非直角双曲线模型、直角双曲线修正模型 3 种模型的拟合曲线在 0~2 000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 光照强度下基本一致,但与指数函数模型拟合曲线存在一定偏差,总体表现为在 0~200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 光照强度下,指数函数模型拟合的净光合速率高于其他模型,且在 1 400~2 000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 光照强度下低于其他模型拟合值。

2.2 不同超级稻品种光响应特征参数比较

不同超级稻品种在不同模型拟合得到的光合光响应特征参数存在差异,如表 1 所示。

表观量子效率(AQY)是植物对 CO_2 同化的效率,反映了植物光合作用的光能利用效率,AQY 的高低代表着光能转化效率的高低。不同品种的 AQY 均在

0.04~0.062 $\mu\text{mol}/\mu\text{mol}$ 之间,其中以超优千号直角双曲线模型拟合值最大,为 0.062 $\mu\text{mol}/\mu\text{mol}$,品种间 AQY 大小差异总体表现为超优千号≈Y 两优 900>Y 两优 2 号>两优培九>Y 两优 1 号。可见,超优千号和 Y 两优 900 的剑叶对光能的利用率较高。

最大净光合速率(P_{max})是植物潜在的最大光合能力的表征。不同模型拟合得到的 P_{max} 值均表现为 Y 两优 900 最高,潜在的光合能力最大,直角双曲线拟合的 P_{max} 值达到 38.85 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,较最低的超优千号在相同模型的拟合值高 21.5%。同一品种不同模型拟合的 P_{max} 值差异较大,直角双曲线和非直角双曲线拟合的 P_{max} 值远高于其他 2 种模型的拟合值。

光饱和点(LSP)是判定植物利用强光能力的指标,其大小代表了植物利用强光能力的强弱。直角双曲线、非直角双曲线及直角双曲线修正模型 LSP 通过不同方程求解得到,指数函数模型则是假设 P_n 为 0.9 P_{max} 所对应的光强为光饱和和光强计算得到。5 个超级稻品种 LSP 实测值均大于 2000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,但直角双曲线和非直角双曲线模型拟合下计算得到的 LSP 低于实测值的

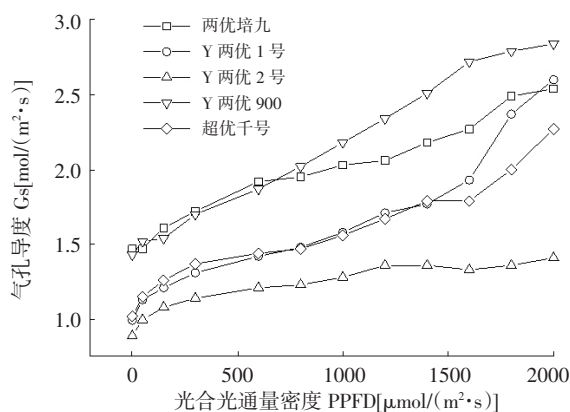


图 2 5 个超级稻品种气孔导度的光响应曲线

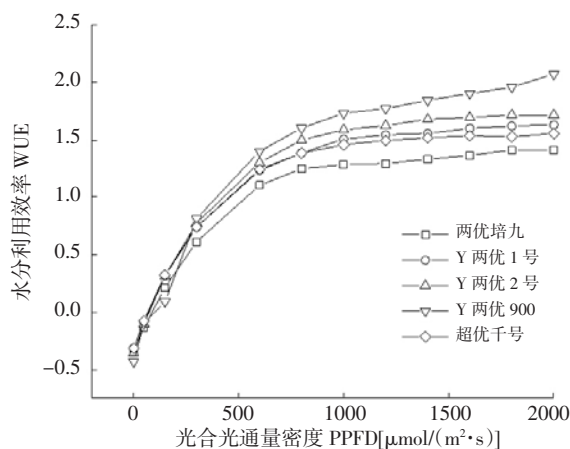


图 3 5 个超级稻品种水分利用效率的光响应曲线

1/2。指数函数模型计算得到的 LSP 也低于实测值,且以 $0.9 P_{max}$ 所对应的光强计算 LSP 人为因素较多。5 个模型比较而言,以直角双曲线修正模型求得的 LSP 最能反应实际情况。5 个品种中以 Y 两优 900 和 Y 两优 1 号对强光的利用能力较高,在高光照辐射地区种植能进一步提高该品种产量。

光补偿点(LCP)是判定植物利用弱光能力强弱的重要指标,该值越小表示利用弱光的能力越强。直角双曲线、非直角双曲线及直角双曲线修正模型拟合得到的 LCP 与实测值基本一致,指数函数模型拟合下的 LCP 约为实测值的 1/2,偏差较大。5 个超级稻品种 LCP 差异不大,均在 $60\sim 70 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 之间。

暗呼吸速率(R_d)是指植物在黑暗条件下进行的有氧呼吸的呼吸速率。5 个超级稻品种 R_d 在 $3.03\sim 4.06 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 之间,以 Y 两优 900 和两优培九的暗呼吸速率最大。不同模型拟合得到的 R_d 与对 LCP 的拟合效果基本一致,直角双曲线、非直角双曲线及直角双曲线修正模型拟合 R_d 值与实测值基本相符,但指数函数模

型拟合的 R_d 值约为实测值的 1/3。

5 个超级稻品种在 5 个不同模型拟合求得的 R^2 均大于 0.99,说明拟合效果较好,能较好反映不同光照强度下叶片的光合速率变化趋势。但不同模型拟合得到的光响应特征参数与实测值存在一定的差异。因此, R^2 在一定情况下只能反映模型拟合程度,并不能保证拟合结果与实际情况的吻合性。

2.3 不同超级稻品种气孔导度(Gs)和水分利用效率(WUE)的光响应曲线比较

Gs 和 WUE 是反映植物对环境适应好坏的重要指标。5 个超级稻品种 Gs 和 WUE 随光通量密度变化曲线如图 2、图 3 所示。Gs 随光照强度增加而增大,未出现气孔关闭的现象,各品种均表现出较好的适应性。5 个超级稻品种按气孔导度的变化可分为两类,一类为急剧增长型,包括 Y 两优 900、两优培九、Y 两优 1 号、超优千号,该类品种气孔导度随光照强度升高而急剧增加,对不同光照强度适应性极好;另一类为增长缓慢型,如 Y 两优 2 号,当光照强度达到 $1200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 后,气孔导度随光照强度增加而缓慢增加。

WUE 常用来衡量植物水分消耗和二氧化碳固定能力的关系,是评价植物生长适应程度的综合生理生态指标。5 个超级稻品种的 WUE 在光照强度小于 $800 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时,随光照强度增加而表现为直线升高;当光照强度继续增加,大于 $800 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时,Y 两优 900 的 WUE 随光照强度增加仍表现出增长态势,其余品种 WUE 增长缓慢并逐渐趋于稳定,表明 Y 两优 900 在强光条件下仍表现出较好适应性。

3 小结与讨论

3.1 光合光响应曲线模型比较

光合光响应曲线模型主要包括直角双曲线模型、非直角双曲线模型、直角双曲线修正模型和指数函数模型 4 种常用模型,不同模型拟合效果比较研究已有较多报道。与实测值相比,直角双曲线和非直角双曲线模型光饱和点偏低、最大净光合速率偏高,指数函数模型拟合的光补偿点和暗呼吸速率较实测值偏低^[12,15-18],直角双曲线修正模型其各项拟合参数与实测值具有较好的吻合性而得到大家认可和广泛应用^[19-21]。本研究也证实了这一点,虽然试验光通量密度设计最高为 $2000 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,未能达到超级稻的饱和光强,最大净光合速率也未能准确测定,但根据 $2000 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时的光反应也能得出一致结果。总体上,以直角双曲线修正模型拟合效果最佳。

3.2 不同超级稻品种光合特性比较

供试的 5 个超级稻品种为超级杂交一季中稻高产攻关第一、二、三、四期标志性品种两优培九、Y 两优 1 号、Y 两优 2 号、Y 两优 900, 通过杂种优势利用、株叶形态优化和光能利用率的提高, 使水稻单产有了不断提升^[11,22], 第五期攻关品种超优千号预测将突破 16.0 t/hm² 产量目标。从本研究来看, 光能利用率的提高不仅是水稻株叶形态优化导致的, 水稻叶片本身净光合速率的提高, 高光强下品种的适应性提高等因素都是光能利用率提高的重要因素。从表观量子效率来看, 各品种光能利用率表现为超优千号 \approx Y 两优 900>Y 两优 2 号>两优培九>Y 两优 1 号。从剑叶净光合速率来看, 以 Y 两优 900 光合能力最高。从光饱和点分析, 5 个超级稻品种以 Y 两优 900 和 Y 两优 1 号对强光的利用能力最高。暗呼吸速率方面, 以 Y 两优 900 和两优培九的暗呼吸速率最大, 光合产物消耗最多。

气孔是植物叶片与外界环境进行气体交换的通道。植物进行光合作用, 经由气孔吸收 CO₂, 同时不可避免发生蒸腾作用, 气孔可以根据环境条件变化而调节开度大小来保证获取最多 CO₂ 的同时减少水分损失, 通常用气孔导度表示。此外, 水分利用率也被用来评价植物对环境的适应性^[16]。本研究中除 Y 两优 2 号 Gs 均随光强增加缓慢增长外, 其他 4 个品种均增长较快, 且未出现气孔关闭现象, 对强光表现出良好适应性; 在水分利用率方面, 光照强度小于 800 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, 随光照强度增加而表现为直线升高, 当光照强度继续增加, 大于 800 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, Y 两优 900 的 WUE 随光照强度增加仍表现出增长态势, 其余品种 WUE 增长缓慢并逐渐趋于稳定, 表明 Y 两优 900 在强光条件下仍表现出较好适应性。

单从光合指标来看, 5 个品种光合能力随产量增加而有所提高, 主要表现在强光下仍保持气孔张开, 且光能及水分利用率仍保持增加趋势。因此, 在光照强度大, 日照时数长的地区种植, 仍有较大的增产潜力。品种上以 Y 两优 900 表现最优, 虽然暗呼吸速率较大, 但光能及水分利用率仍较高, 且随光强增加有增加趋势, 选取昼夜温差大的地点种植, 更有增产潜力。

参考文献

- [1] 谢华安, 张建福, 王乌齐, 等. 超级稻育种实践和前景[J]. 分子植物育种, 2006, 4(3): 4-10.
- [2] 谢华安. 华南型超级稻育种及其技术研究进展[J]. 沈阳农业大学

学报, 2007, 38(5): 714-718.

- [3] 袁隆平. 中国杂交水稻的研究与发展 [J]. 科技导报, 2016, 34(20): 64-65.
- [4] 王志琴, 杨建昌, 朱庆森. 土壤水分对水稻光合速率与物质运转的影响[J]. 中国水稻科学, 1996, 10(4): 235-240.
- [5] 杨建昌, 朱庆森, 曹显祖. 水稻群体冠层结构与光合特性对产量形成作用的研究[J]. 中国农业科学, 1992, 25(4): 7-14.
- [6] 邓启云. 广适性水稻光温敏不育系 Y58S 的选育 [J]. 杂交水稻, 2005, 20(2): 15-18.
- [7] 邓启云, 袁隆平, 蔡义东, 等. 超级杂交稻模式株型的光合优势 [J]. 作物学报, 2006, 32(9): 1 287-1 293.
- [8] 袁隆平. 选育超高产杂交水稻的进一步设想 [J]. 杂交水稻, 2012, 27(6): 1-2.
- [9] 吕川根, 邹江石. 两个超级杂交稻与汕优 63 光合株型的比较分析[J]. 中国农业科学, 2003, 36(6): 633-639.
- [10] 程式华. 我国超级稻育种的理论与实践[J]. 中国农技推广, 2005(4): 27-29.
- [11] Chang S, Chang T, Song Q, et al. Photosynthetic and Agronomic Traits of an Elite Hybrid Rice Y-liang-you 900 with a Record-high Yield[J]. *Field Crop Res*, 2016, 187: 49-57.
- [12] 滕振宁, 方宝华, 刘洋, 等. 辐对不同品种水稻光合作用的影响 [J]. 中国农业气象, 2016, 37(5): 538-544.
- [13] 王满莲, 冯玉龙, 李新. 紫茎泽兰和飞机草的形态和光合特性对磷营养的响应[J]. 应用生态学报, 2006, 17(4): 602-606.
- [14] 黄红英, 窦新永, 孙蓓育, 等. 两种不同生态型麻疯树夏季光合特性的比较[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 2 861-2 867.
- [15] 陈卫英, 陈真勇, 罗辅燕, 等. 光响应曲线的指数改进模型与常用模型比较[J]. 植物生态学报, 2012, 36(12): 1 277-1 285.
- [16] 邓云鹏, 雷静品, 潘磊, 等. 不同种源栓皮栎光响应曲线的模型拟合及参数比较[J]. 生态学杂志, 2016, 35(2): 387-394.
- [17] 王海珍, 韩路, 徐雅丽, 等. 干旱胁迫下胡杨光合光响应过程模拟与模型比较[J]. 生态学报, 2017, 37(7): 2 315-2 324.
- [18] 叶子飘, 于强. 光合作用光响应模型的比较[J]. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1 356-1 361.
- [19] Xu Z, Hu T, Zhang Y. Effects of Experimental Warming on Phenology, Growth and Gas Exchange of Treeline Birch (*Betula utilis*) Saplings, Eastern Tibetan Plateau, China [J]. *Eur J For Res*, 2012, 131(3): 811-819.
- [20] Wargent J J, Elfadly E M, Moore J P, et al. Increased Exposure to Uv - b Radiation During Early Development Leads to Enhanced Photo-protection and Improved Long - term Performance in *Lactuca sativa* [J]. *Plant, Cell Environ*, 2011, 34(8): 1 401-1 413.
- [21] Zu Y, Wei X, Yu J, et al. Responses in the Physiology and Biochemistry of Korean Pine (*Pinus koraiensis*) Under Supplementary Uv-b Radiation[J]. *Photosynthetica*, 2011, 49(3): 448-458.
- [22] 庄文, 李诚, 常硕其, 等. 超级杂交稻冠层形态结构与干物质生产特性研究[J]. 杂交水稻, 2016, 31(4): 67-70.

(下转第 13 页)

Techn, 2013, 5(1): 1 313-1 320.

[18] Singh B, Singh Y, Sodhi G S, et al. Chlorophyll meter-based N management for rice grown in soils amended with organic manure [J]. *Int Rice Res Notes*, 2011, 28(1): 63-65.

[19] 周莉华, 李维炯, 倪永珍. 长期施用 EM 生物有机肥对冬小麦生产的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(S1): 221-224.

[20] 沈德龙, 曹凤明, 李力. 我国生物有机肥的发展现状及展望[J]. 中国土壤与肥料, 2007(6): 1-4.

[21] 王昌全, 谢德体, 李冰, 等. 不同有机肥种类及用量对芹菜产量和品质的影响[J]. 中国农学通报, 2005, 21(1): 192-195.

[22] 陈星峰, 陈朝阳, 陈巧萍, 等. 配施不同种类有机肥对烤烟若干生理指标的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(22): 178-181.

[23] 周启发, 王人潮. 水稻氮素营养水平与光谱特性的关系[J]. 浙江农业大学学报, 1993, 19(S1): 40-45.

[24] 潘星哲. 基于不同施氮量水平下水稻高光谱特征分析[D]. 南昌: 江西农业大学, 2013.

Research of Canopy Spectral Characteristics of the Late Rice Populations with Organic Manure and Chemical Fertilizers

ZHENG Huabin, CHEN Can, FU Zhiqiang, HUANG Huang

(College of Agronomy, Hunan Agricultural University / Observation station of Crop Cultivation Science in Central China, Ministry of agriculture, Changsha 410128, China; 1st author: hbzheng@hunau.edu.cn; *Corresponding author: hh863@126.com)

Abstract: Based on different fertilization patterns, the canopy spectral reflectance, the first derivative spectra and normalized spectral characteristics of late rice, and a correlation among leaf nitrogen content, nitrogen accumulation, yield, leaf area index and leaf dry matter accumulation were analyzed. Then the rice nitrogen nutrition diagnosis model with high spectral characteristic parameters as independent variables was constructed. The results showed that: there has a great relevance between leaf nitrogen content with canopy spectral reflectance at 665 nm ($p < 0.001$), the same with the first derivative spectra at 554 nm and 672 nm ($p < 0.001$); There has an exponential function by λ : $y = 684.91e^{0.028x}$, the coefficient of determination (R^2) was 0.90, and an exponential function by $(SD_r - SD_b) / (SD_r + SD_b)$: $y = 0.66e^{0.11x}$, the coefficient of determination (R^2) was 0.88, these two model could diagnose the late rice nitrogen nutrition well under the conditions of organic manure and chemical fertilizers.

Key words: rice; organic manure; chemical fertilizers; nitrogen nutrition; canopy reflectance spectroscopy; high spectral parameters; diagnostic model

(上接第 5 页)

Photosynthesis Light Response Curves of Super High-yielding Hybrid Rice and Model Fitting

FANG Baohua¹, TENG Zhenning^{1,2,3}, LIU Yang^{1,2}, ZHANG Yuzhu^{3*}

(¹ Hunan Rice Research Institute, Changsha 410125, China; ² Hunan Agriculture University, Changsha 410128, China; ³ Hunan Hybride Rice Research Center, Changsha 410125, China; 1st author: fangrock@163.com; *Corresponding author: yuzhuzhang@hotmail.com)

Abstract: The typical varieties (Liangyoupeijiu, Y Liangyou 1, Y Liangyou 2, Y Liangyou 900, Chaoyouqianhao) of the super hybrid rice program in different phase were used in this study. Four typical models of photosynthesis light response curve (rectangular hyperbolic model, non-rectangular hyperbolic model, modified rectangular hyperbolic model, and exponential function) were adopted to fit the photosynthesis light response curve of five rice varieties. The results showed that, all the four models could well fit the photosynthesis light response curves of the five rice varieties ($R^2 > 0.99$); modified rectangular hyperbolic model had better fitting results in terms of conformity with measured values; the light use efficiency of Y Liangyou 900 and Chaoyouqianhao were highest, Y Liangyou 900 had the highest net photosynthesis rate, the light saturation point of Y Liangyou 900 and Y Liangyou 1 were highest, the dark respiration rate of Y Liangyou 900 and Liangyoupeijiu were highest, and the photosynthetic products were the most consumed. Except Y Liangyou 2, the stomatal conductance of other four varieties were grown faster, and not found stomatal; the water use efficiency of the tested varieties showed a straight line increasement with the increasement of light intensity when the light intensity was less than 800 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. When the light intensity continued to increase, the WUE grew slowly and gradually became stable, but Y Liangyou 900 showed still growth. Therefore, in the bright light intensity and long sunshine hours planting areas, there is still a greater yield potential for Y Liangyou 900.

Key words: super rice; light response curve; model; stomatal conductance; water utilization efficiency