

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

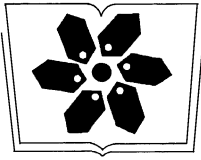
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第5期 Vol.32 No.5 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 5 期 2012 年 3 月 (半月刊)

目 次

淀山湖富营养化过程的统计学特征	程 曦, 李小平, 陈小华 (1355)
拟水狼蛛对食物中镉的吸收和排泄及生物学响应	张征田, 张光铎, 张虎成, 等 (1363)
接种后共培养时间对丛枝菌根喜树幼苗喜树碱含量的影响	于 洋, 于 涛, 王 洋, 等 (1370)
沙尘暴发生日数与空气湿度和植物物候的关系——以民勤荒漠区为例	常兆丰, 王耀琳, 韩福贵, 等 (1378)
西藏牦牛 mtDNA D-loop 区的遗传多样性及其遗传分化	张成福, 徐利娟, 姬秋梅, 等 (1387)
红松阔叶混交林林隙土壤水分分布格局的地统计学分析	李 猛, 段文标, 陈立新, 等 (1396)
黄土丘陵区子午岭不同植物群落下土壤氮素及相关酶活性的特征	邢肖毅, 黄懿梅, 黄海波, 等 (1403)
毛竹高速生长期土壤碳氮动态及其微生物特性	王雪芹, 张奇春, 姚槐应 (1412)
长期 N 添加对典型草原几个物种叶片性状的影响	黄菊莹, 余海龙, 袁志友, 等 (1419)
接种 AMF 对菌根植物和非菌根植物竞争的影响	张宇亭, 王文华, 申 鸿, 等 (1428)
福州大叶榕隐头果内的小蜂群落结构与多样性	吴文珊, 陈友铃, 蔡美满, 等 (1436)
不同生境朝鲜淫羊藿生长与光合特征	张永刚, 韩 梅, 韩忠明, 等 (1442)
基于日均温度的华山松径向生长敏感温度研究	封晓辉, 程瑞梅, 肖文发, 等 (1450)
长江三峡库区蝶类群落的等级多样性指数	马 琦, 李爱民, 邓合黎 (1458)
甜瓜幼苗叶片光合变化特性	韩瑞锋, 李建明, 胡晓辉, 等 (1471)
双季稻田种植不同冬季作物对甲烷和氧化亚氮排放的影响	唐海明, 肖小平, 帅细强, 等 (1481)
古尔班通古特沙漠西部地下水位和水质变化对植被的影响	曾晓玲, 刘 彤, 张卫宾, 等 (1490)
流溪河水库颗粒有机物及浮游动物碳、氮稳定同位素特征	宁加佳, 刘 辉, 古滨河, 等 (1502)
采用本土蔬菜种子替代水藓评价污泥有机肥腐熟度	刘颂颂, 许田芬, 吴启堂, 等 (1510)
人为营养物质输入对汉丰湖不同营养级生物的影响——稳定 C、N 同位素分析	李 斌, 王志坚, 金 丽, 等 (1519)
流沙湾海草床海域浮游植物的时空分布及其影响因素	张才学, 陈慧妍, 孙省利, 等 (1527)
福寿螺的过冷却研究	赵本良, 章家恩, 罗明珠, 等 (1538)
水稻生育期对褐飞虱和白背飞虱卵巢发育及起飞行为的影响	陈 宇, 傅 强, 赖凤香, 等 (1546)
绿盲蝽越冬卵的耐寒能力	卓德干, 李照会, 门兴元, 等 (1553)
陆桥岛屿环境下社鼠种群数量的估算方法	张 旭, 鲍毅新, 刘 军, 等 (1562)
北京市居民食物消费碳足迹	吴 燕, 王效科, 逯 非 (1570)
社会经济系统磷物质流分析——以安徽省含山县为例	傅银银, 袁增伟, 武慧君, 等 (1578)
内陆河流域试验拍卖水权定价影响因素——以黑河流域甘州区为例	邓晓红, 徐中民 (1587)
专论与综述	
台风对森林的影响	刘 斌, 潘 澜, 薛 立 (1596)
海洋酸化对珊瑚礁生态系统的影响研究进展	张成龙, 黄 晖, 黄良民, 等 (1606)
三种外来入侵斑潜蝇种间竞争研究进展	相君成, 雷仲仁, 王海鸿, 等 (1616)
沉积物生源要素对水体生态环境变化的指示意义	于 宇, 宋金明, 李学刚, 等 (1623)
异化 Fe(III) 还原微生物研究进展	黎慧娟, 彭静静 (1633)
问题讨论	
锡林郭勒盟生态脆弱性	徐广才, 康慕谊, Marc Metzger, 等 (1643)
研究简报	
哥斯达黎加外海夏季表层浮游动物种类组成及分布	刘必林, 陈新军, 贾 涛, 等 (1654)



封面图说: 气候变暖下的北极冰盖——自从 1978 年人类对北极冰盖进行遥感监测以来, 北极冰正以平均每年 8.5% 的速度持续缩小, 每年 1500 亿吨的速度在融化。这使科学家相信, 冰盖缩小的根本原因是全球变暖。北极的冰盖消失, 让更大面积的深色海水暴露出来, 使海水吸收更多太阳热辐射反过来又加剧冰盖融化。由于北极冰的加速融化, 北冰洋的通航已经成为 21 世纪初全球最重要的自然地理事件和生态事件。从这张航片可以看到北极冰缘正在消融、开裂崩塌的现状。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201101190103

韩瑞锋, 李建明, 胡晓辉, 达会广, 白润峰. 甜瓜幼苗叶片光合变化特性. 生态学报, 2012, 32(5): 1471-1480.

Han R F, Li J M, Hu X H, Da H G, Bai R F. Research on dynamic characteristics of photosynthesis in muskmelon seedling leaves. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(5): 1471-1480.

甜瓜幼苗叶片光合变化特性

韩瑞锋, 李建明*, 胡晓辉, 达会广, 白润峰

(西北农林科技大学园艺学院, 杨凌 712100)

摘要:为探讨甜瓜光响应变化特性与环境因子的关系,选择光响应曲线适宜测定的时段,以甜瓜幼苗为试材,将1 d分为3个时段:10:00—12:00,12:00—15:00和15:00—17:00,每个叶位叶片测定1 d,并采用直角双曲线修正模型拟合光响应曲线,研究不同时段下甜瓜叶片光响应曲线、光响应参数的变化趋势和不同叶位叶片光响应参数特性。结果表明:当环境中光合有效辐射增强,叶面温度(T_l)升高,空气相对湿度(RH)降低;当环境中光合有效辐射减弱, T_l 降低, RH 升高。10:00—12:00光响应曲线和12:00—15:00的第1—4叶光响应曲线呈双曲线,在强光下趋向饱和状况,12:00—15:00的第5叶光合速率和15:00—17:00光合速率在强光下出现明显的光抑制现象。1 d的不同时段均表现为10:00—12:00最大净光合速率(P_{max})和光饱和点(LSP)最高,12:00—17:00降低;12:00—15:00光补偿点(LCP)和暗呼吸速率(R_d)较高,其它两个时段较低,10:00—17:00光补偿点量子效率(ϕ_c)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)总体呈降低趋势,气孔限制值(L_s)升高。10:00—15:00相同时段测得的不同叶位叶片光响应参数,以第4—5叶光合性能较好,15:00—17:00以第3叶 P_{max} 最高,第5叶次之;10:00—17:00 G_s 和 C_i 以第5叶较低,第1叶较高, L_s 以第5叶较高,第1叶较低。 RH 为影响 P_{max} 的主要决策因子,测定时段、叶面饱和蒸汽压亏缺(Vpd)和 T_l 为主要限制因子。10:00—12:00适宜进行光响应曲线测定,气孔限制为不同时段光合作用不同的主要因素,非气孔限制为影响不同叶位叶片光合作用的主要因素。

关键词:甜瓜;光响应曲线;光响应参数;叶位;环境因子

Research on dynamic characteristics of photosynthesis in muskmelon seedling leaves

HAN Ruifeng, LI Jianming*, HU Xiaohui, DA Huiguang, BAI Runfeng

College of Horticulture, Northwest A & F University, Yangling 712100, China

Abstract: Plant light response curves reflect dynamic characteristics of photosynthesis with the photosynthetic active radiation (PAR). The data collection for the curves is time-consuming and the photosynthesis is sensitively affected by surrounding environmental factors, so it is vital to establish suitable time interval for data determination in one day. Muskmelon is top ten most popular fruit in the world. However, researches on dynamic characteristics of photosynthesis in muskmelon seedling leaves were rarely reported. In order to probe into the relationships between characteristics of muskmelon photosynthesis in light response and environmental factors, suitable time intervals for measuring light response curves were optimized with potted muskmelon seedlings as test material, and the light response curves and several parameters of photosynthesis for different position leaves and environmental factors were measured by LI-6400 portable photosynthesis system from 18 October to 23 October, 2009. Each leaf position was measured at 3 intervals of time: 10:00—12:00, 12:00—15:00 and 15:00—17:00 in one day. All of light response curves were fitted with the modified rectangular hyperbola model, which was widely applied and could fit light response curves that photosynthesis rate decreased

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAD12B03)

收稿日期:2011-01-19; 修订日期:2011-06-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lijianming66@163.com

obviously under intensive irradiation. Maximum net photosynthetic rate (P_{\max}) was selected as an indicator of photosynthetic capacity. Direct and indirect effects of environmental factors on P_{\max} were calculated through the path analysis. The results show that when photosynthetic active radiation in environment increased, leaf temperature (Tl) rose, and air relative humidity (RH) decreased; photosynthetic active radiation in environment decreased, Tl decreased, and RH increased. Light response curves between 10:00—12:00 and light response curves of leaf 1—4 between 12:00—15:00 were characterized by hyperbolic curves and the photosynthetic capability approached saturation under intensive irradiation, while photosynthesis rate of leaf 5 between 12:00—15:00 and photosynthesis rate between 15:00—17:00 decreased obviously under intensive irradiation. P_{\max} and light saturation point (LSP) were the highest between 10:00—12:00 and declined between 12:00—17:00 during one day. Light compensation point (LCP) and dark respiration (R_d) were higher between 12:00—15:00 than that under the other two time intervals. Quantum efficiency at light compensation point (φ_c), stomatal conductance (G_s), and intercellular CO_2 concentration (C_i) all generally displayed a declining trend, however, stomatal limitation value (L_s) increased from 10:00 to 17:00. Stomatal limitation was the key factor for different time intervals influencing photosynthesis. Light responsive parameters of leaf 4—5 were positive at the same time interval between 10:00—15:00, the P_{\max} of leaf 3 was the highest, leaf 5 was the second between 15:00—17:00. G_s and C_i of leaf 5 were lower than that of leaf 1, while L_s of leaf 5 was higher than that of leaf 1 between 10:00—17:00. Non-stomatal limitation was the major factor of influencing photosynthesis for different position leaves. RH was the primary determining factor that influenced P_{\max} ; measuring time (Time), vapor pressure deficit at the leaf surface ($Vpdl$) and Tl were main limiting factors, so it was helpful to improve P_{\max} by increasing RH , limiting Time, $Vpdl$, and Tl . The suitable time period for measuring light response curves was between 10:00—12:00.

Key Words: muskmelon; light response curve; light responsive parameters; leaf position; environmental factors

光合作用是作物生长发育和产量形成的基础^[1],很容易受到外界环境因素的影响^[2]。植物光响应曲线反映了光合速率随光照强度的变化特性^[3],但其测定费时较长,因而选择合适的测定时段很关键。目前,有关不同时间光响应特性变化的研究内容,涉及日光温室茄子^[4]光补偿点和表观量子效率日变化,华南8号木薯^[5]光合参数日变化和云锦杜鹃^[6]一天中8:00与12:00光响应参数的比较。甜瓜(*Cucumis melo* L.)是一种重要的葫芦科蔓性植物,是世界十大水果之一,乃夏季消暑珍品^[7],有关甜瓜叶片光合速率日变化曲线研究报道:陈年来等^[7]认为呈双峰型;李建斌等^[8]认为晴天光合速率为双峰型曲线,阴天为单峰型曲线,但甜瓜一天中不同时段光响应特性的变化鲜有报道。本试验通过对一天中3个时段:10:00—12:00、12:00—15:00和15:00—17:00甜瓜不同叶位叶片的光响应曲线的分析,应用直角双曲线修正模型^[9-13]拟合得到光响应参数,以探明不同时段甜瓜叶片光响应曲线、光响应参数的变化趋势及其与环境因子的关系和甜瓜不同叶位叶片光响应参数特性,以期为甜瓜光响应特性的科学测定提供参考,为制定合理的栽培技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试甜瓜品种为一品天下208(*Cucumis melo* L.),由陕西杨凌千普农业开发有限公司提供。试验于2009年8—10月在西北农林科技大学园艺学院大棚内进行。用9 cm×9 cm塑料营养钵进行常规育苗,当幼苗长至4叶1心时,挑选长势一致的健壮植株盆栽定植40株,盆高48 cm,直径40 cm。盆栽基质用土、腐熟牛粪以体积比2:1配制而成,每盆装基质16 kg。当植株长至6叶1心时,选生长健康一致的植株,选择连续2 d以上的晴好天气测定第1、2、3、4、5叶(从基部向上数)光响应曲线。

1.2 测定方法

使用LI-6400便携式光合仪(美国LI-COR公司)测定各叶位叶片光合作用,设定气体流速500 $\mu\text{mol}/\text{s}$,叶温25 $^{\circ}\text{C}$,光合有效辐射强度(PAR , $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)从高到低设定为2000、1800、1600、1400、1200、1000、800、

600、400、200、100、50、0 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 每个 PAR 下控制测定时间 120—200 s, 由仪器“Light-curve”程序自动测定叶片的净光合速率(P_n , $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、气孔导度(G_s , $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)和胞间 CO_2 浓度(C_i , $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)等光合指标及环境中光合有效辐射(PAR_o , $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、叶面温度(T_l , $^{\circ}\text{C}$)、空气相对湿度(RH , $\%$)、叶面饱和蒸汽压亏缺(Vpd_l , kPa)和空气中的 CO_2 浓度(C_a , $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)等环境因子, 气孔限制值(L_s , $\%$)用下式计算: $L_s = 1 - C_i/C_a$ [14]。每个叶位测定 1 d, 10:00—17:00 连续测定: 10:00—12:00、12:00—15:00 和 15:00—17:00 每个时段观测 3—4 株。

1.3 数据处理

采用光合作用对光响应的直角双曲线修正模型 [9-13] 拟合净光合速率光响应曲线, 表达式为:

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

式中, α 是光响应曲线的初始斜率, β 为修正系数, γ 为一个与 PAR 无关的系数, R_d 为暗呼吸速率 ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)。如果 $\beta=0$, 且 $\gamma = \alpha/P_{\max}$, (1) 式可表示为直角双曲线 (2) 式 [15]。因此, 被称为直角双曲线修正模型。由直角双曲线修正模型可以确定最大净光合速率 (P_{\max} , $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、光补偿点量子效率 (φ_c , mol/mol)、光补偿点 (LCP , $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 和光饱和点 (LSP , $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 等光响应参数。

$$P_n = \frac{\alpha PAR \cdot P_{\max}}{\alpha PAR + P_{\max}} - R_d \quad (2)$$

$$P_{\max} = \alpha \left(\frac{\sqrt{\beta + \gamma} - \sqrt{\beta}}{\gamma} \right)^2 - R_d \quad (3)$$

$$\varphi_c = \alpha \frac{1 - 2\beta LCP - \beta\gamma LCP^2}{(1 + \gamma LCP)^2} \quad (4)$$

$$LCP = \frac{\alpha - \gamma R_d - \sqrt{(\gamma R_d - \alpha)^2 - 4\alpha\beta R_d}}{2\alpha\beta} \quad (5)$$

$$LSP = \frac{\sqrt{(\beta + \gamma)/\beta} - 1}{\gamma} \quad (6)$$

用 Microsoft Excel 2003 软件对数据进行处理和绘图, 图中为各 PAR 下 P_n 平均值, 表中结果以平均值 \pm 标准偏差 (mean \pm SD) 表示。运用 DPS 分析软件 (Marquardt 算法) 拟合光响应曲线得到相关参数、对环境因子与 P_{\max} 进行相关分析和通径分析。

2 结果分析

2.1 不同时段温光湿环境因子的变化

光响应曲线测定期间, PAR_o 、 T_l 、 RH 和 Vpd_l 的变化范围如表 1 所示。依据测定将一天划分为 3 个时段: 10:00—12:00、12:00—15:00 和 15:00—17:00。从表中可以看出, 一天中不同时段 PAR_o 表现为先上升后下降, 除 10 月 18 日 ($758.15 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 和 10 月 22 日 ($1134.80 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 最大值出现在 10:00—12:00 外, 其它日期 PAR_o 最大值均出现在 12:00—15:00。 T_l 总体先升高, 15:00—17:00 降低, 除 10 月 23 日外, T_l 最高值均出现在 12:00—15:00。 Vpd_l 和 T_l 变化基本一致, RH 变化趋势与 T_l 和 Vpd_l 相反, 不同时段表现为先降低后有轻微升高。即不同时段当 PAR_o 增强时, T_l 升高, RH 降低, Vpd_l 增大; 当 PAR_o 减弱时, T_l 降低, RH 升高, Vpd_l 减小。

2.2 不同时段甜瓜不同叶位叶片净光合速率光响应曲线

不同时段测定的甜瓜不同叶位叶片 P_n 光响应曲线发生明显改变 (图 1)。10:00—12:00 测定的光响应曲线, 当 $PAR > 1000 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, P_n 随 PAR 的增强呈略微升高, 逐渐趋于饱和状况。12:00—15:00 测定的第 1—4 叶光响应曲线与 10:00—12:00 变化趋势相似; 第 5 叶光响应曲线随 PAR 增强, P_n 升高到一定值后降低。15:00—17:00 测定的光响应曲线, P_n 随 PAR 增强升高到最高值后, 随 PAR 的进一步上升出现不同程度

的降低,第5叶 P_n 下降幅度最大,强光下表现明显的抑制现象。

当 PAR 为 $1000 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,相同叶位叶片 10:00—17:00 P_n 总体呈下降趋势,10:00—12:00 P_n 明显高于 12:00—17:00 P_n ;第1、3叶 P_n 从 12:00—15:00 ($10.31 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $14.08 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 到 15:00—17:00 ($10.95 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $15.48 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 略微升高。另外,相同测定时段,不同叶位叶片 P_n 差异明显:10:00—12:00 第4、5叶 P_n 最高,12:00—15:00 第5叶 P_n 最高,15:00—17:00 第3叶 P_n 最高,5叶次之。由此可见,不同时段测定不同叶位叶片得到的 P_n 高低不同。

表1 光合测定时不同时段环境中光合有效辐射(PAR_0)、叶面温度(TL)、空气相对湿度(RH)和叶面饱和蒸汽压亏缺($Vpdl$)的变化

Table 1 Change of PAR_0 , TL , RH and $Vpdl$ in greenhouse at different time intervals during photosynthesis measurement

叶位 Leaf position	日期 Date	测定时间 Time	光合有效辐射 PAR_0 / $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	叶面温度 $TL/^\circ\text{C}$	空气相对湿度 $RH/\%$	叶面饱和蒸汽压亏缺 $Vpdl/\text{kPa}$
1	10-18	10:00—12:00	234.61—758.15	26.18—29.31	66.63—32.21	1.23—2.97
		12:00—15:00	619.70—386.60	28.27—31.40	44.58—27.18	2.16—3.13
		15:00—17:00	570.68—85.13	29.67—26.01	31.84—39.78	3.09—2.16
2	10-21	10:00—12:00	292.20—635.41	20.10—24.61	76.40—50.41	0.57—1.55
		12:00—15:00	706.26—457.23	23.23—30.65	50.38—34.61	1.49—2.75
		15:00—17:00	558.62—91.78	29.94—25.35	34.64—42.96	2.65—1.92
3	10-19	10:00—12:00	365.57—663.09	22.45—23.38	61.39—49.44	1.08—1.44
		12:00—15:00	707.75—217.98	23.32—26.24	51.77—32.69	1.42—1.88
		15:00—17:00	255.27—103.85	25.95—23.25	46.69—50.88	1.83—1.45
4	10-22	10:00—12:00	521.15—1134.80	22.79—29.80	60.22—45.28	1.21—2.25
		12:00—15:00	913.90—460.23	29.72—34.40	45.51—29.01	2.36—3.69
		15:00—17:00	857.15—253.66	33.61—29.14	29.06—40.07	3.70—2.62
5	10-23	10:00—12:00	458.20—850.15	23.41—28.71	72.39—41.95	0.91—2.31
		12:00—15:00	906.48—740.48	27.72—30.73	46.08—31.43	2.28—2.88
		15:00—17:00	710.58—137.40	31.52—28.07	29.18—29.87	3.11—2.34

2.3 不同时段甜瓜不同叶位叶片光响应参数

不同时段测得的光响应参数存在明显差异(表2),相同叶位叶片的 P_{max} 在一天的不同时段,均表现为 10:00—12:00 P_{max} 最高,其中第4叶 10:00—12:00 P_{max} 分别比 12:00—15:00 和 15:00—17:00 升高了 70.75% 和 79.69%,第2、4、5叶 P_{max} 从 12:00—15:00 至 15:00—17:00 呈降低趋势,第1、3叶 P_{max} 从 12:00—

表2 不同时段甜瓜不同叶位叶片光响应参数

Table 2 Parameters of light response curves for different position leaves of muskmelon at different time intervals

叶位 Leaf position	日期 Date	测定时间 Time	最大净光合速率 P_{max} / $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	光补偿点量子效率 φ_c / (mol/mol)	光补偿点 LCP / $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	光饱和点 LSP / $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	暗呼吸速率 R_d / $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$
1	10-18	10:00—12:00	15.52±0.14	0.0577±0.0024	41.98±6.50	1571.69±163.23	2.73±0.62
		12:00—15:00	10.44±2.47	0.0491±0.0030	53.69±4.19	1205.63±111.81	3.19±0.30
		15:00—17:00	10.98±2.33	0.0485±0.0104	41.70±10.84	1033.79±112.34	2.18±0.15
2	10-21	10:00—12:00	15.00±6.41	0.0595±0.0040	31.42±5.04	1533.01±262.17	2.07±0.33
		12:00—15:00	12.16±1.48	0.0570±0.0100	43.76±22.14	1222.33±169.32	2.76±1.07
		15:00—17:00	12.15±2.52	0.0554±0.0042	42.06±8.58	926.39±134.97	2.60±0.43
3	10-19	10:00—12:00	17.34±0.26	0.0661±0.0043	29.69±9.22	1516.48±54.09	2.11±0.57
		12:00—15:00	14.15±2.58	0.0635±0.0063	32.78±1.55	1213.14±182.01	2.31±0.25
		15:00—17:00	15.36±1.28	0.0597±0.0049	29.61±8.77	1013.98±55.70	1.93±0.77
4	10-22	10:00—12:00	22.30±6.12	0.0640±0.0056	44.27±14.03	2588.91±345.15	3.06±0.75
		12:00—15:00	13.06±6.20	0.0506±0.0030	73.95±2.01	1264.87±134.88	4.74±0.33
		15:00—17:00	12.41±2.49	0.0610±0.0074	50.13±15.49	861.89±90.49	3.46±0.78
5	10-23	10:00—12:00	21.45±3.19	0.0676±0.0035	46.73±20.06	1788.32±523.80	3.47±1.46
		12:00—15:00	17.08±3.88	0.0590±0.0048	68.85±20.12	1182.97±301.86	4.36±1.01
		15:00—17:00	13.76±2.90	0.0523±0.0084	56.96±6.85	838.23±38.52	3.25±0.19

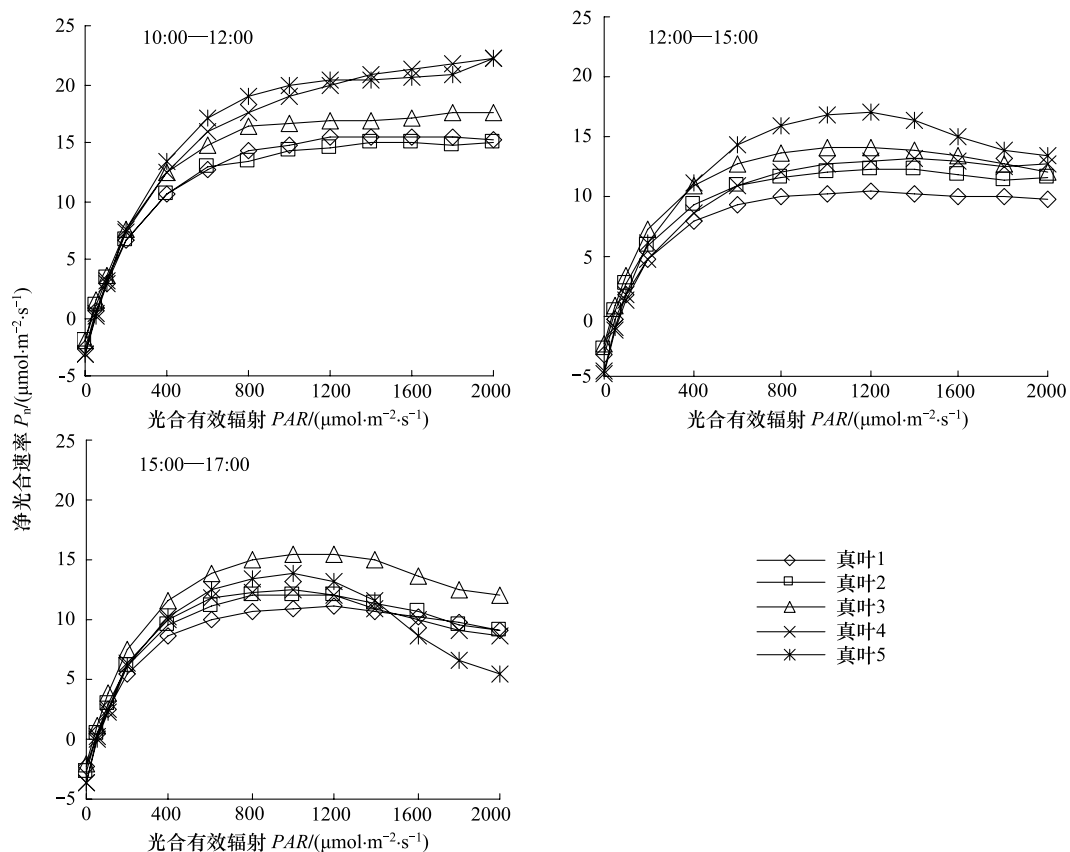


图1 不同时段甜瓜不同叶位叶片净光合作用光响应曲线

Fig. 1 Light response curves of net photosynthetic rate for different position leaves of muskmelon at different time intervals

15:00 至 15:00—17:00 升高,但幅度不大; φ_c 在一天的不同时段一直降低(第4叶除外); LSP 变化呈现 10:00—12:00 最高,15:00—17:00 最低; LCP 和 R_d 变化趋势一致:12:00—15:00 先升高,15:00—17:00 降低。

相同时段不同叶位叶片,10:00—12:00 随叶位增加, P_{max} 总体呈升高趋势,其中以第4叶和第5叶较高,分别比第1叶升高了43.69%和38.21%; φ_c 随叶位增加亦上升,以第5叶最高;随叶位增加,第1—3叶的 LCP 、 LSP 和 R_d 均降低,第4、5叶 LCP 、 LSP 和 R_d 均升高。12:00—15:00 随叶位增加, P_{max} 升高,以第5叶最高,第3叶次之,第5叶 P_{max} 比第1叶升高了63.60%; φ_c 升高,以第3叶最高;第1—3叶随叶位增加, LCP 和 R_d 均降低,第4—5叶 LCP 和 R_d 升高, LSP 变化规律不明显。15:00—17:00 以第3叶 P_{max} 最高,第5叶次之,第3叶 P_{max} 比第1叶升高了39.89%; φ_c 随叶位增加呈先升高后降低趋势,以第4叶最高; LSP 总体呈下降趋势, LCP 和 R_d 变化不规律。同一叶位叶片不同时段测得的光响应参数差异很大,相同时段测得的不同叶位叶片光响应参数亦表现明显不同。

2.4 不同时段甜瓜不同叶位叶片气孔导度、胞间 CO_2 浓度和气孔限制值光响应曲线

图2表明不同时段甜瓜叶片 G_s 、 C_i 和 L_s 光响应曲线呈现明显差异。当 $PAR \geq 200 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 时,随 PAR 的增强,10:00—12:00 所测 G_s 呈持续上升趋势,未出现饱和现象;12:00—15:00 G_s 总体呈缓慢增加(第2叶 PAR 为 1600—2000 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 较快上升);15:00—17:00 G_s 总体呈先上升后出现不同程度的降低(第1叶除外),以第4、5叶表现较为明显。随 PAR 的增强,不同时段 C_i 呈先降低后升高趋势,以 10:00—12:00 第2叶升高幅度最大。 L_s 表现为先升高后降低趋势,10:00—12:00、12:00—15:00 和 15:00—17:00 各个时段分别当 $PAR \geq 800 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 、 $PAR \geq 1200 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 和 $PAR \geq 1400 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, L_s 出现明显降低。

当 PAR 为 1000 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 时,相同叶位叶片 10:00—17:00 G_s 和 C_i 总体呈降低趋势, L_s 呈升高趋势。

10:00—12:00 G_s 和 C_i 明显高于 12:00—17:00, L_s 明显低于 12:00—17:00; 第 1, 3 叶 G_s 和 C_i 从 12:00—15:00 ($0.208 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $0.162 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; $270.47 \text{ } \mu\text{mol/mol}$, $224.73 \text{ } \mu\text{mol/mol}$) 到 15:00—17:00 ($0.209 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $0.194 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; $271.43 \text{ } \mu\text{mol/mol}$, $244.36 \text{ } \mu\text{mol/mol}$) 略微升高。另外, 相同测定时段, 不同叶位叶片: 10:00—12:00 以第 1 叶 G_s 和 C_i 最高, L_s 最低; 第 3, 5 叶 G_s 和 C_i 较低, L_s 较高。12:00—15:00 以第 1 叶 G_s 和 C_i 最高, L_s 最低; 第 5 叶 G_s 和 C_i 最低, L_s 最高。15:00—17:00 以第 1 叶 G_s 和 C_i 最高, L_s 最低; 第 4, 5 叶 G_s 和 C_i 最低, L_s 最高。

2.5 P_{max} 与环境因子的相关分析和通径分析

相关分析(各时段内环境因子取平均值)结果表明(表 3), P_{max} 与 RH 呈极显著正相关, 与 PAR_0 呈显著正相关, 与测定时段(Time)和 V_{pdl} 呈极显著和显著负相关, 与 TI 呈负相关。 RH 与 V_{pdl} 、 TI 和 Time 呈极显著负相关。对环境因子与 P_{max} 进行线性回归分析, 得到回归方程:

$P_{\text{max}} = -39.562 + 1.121\text{Time} + 0.0134\text{PAR}_0 + 1.812\text{TI} + 0.162\text{RH} - 11.381\text{V}_{\text{pdl}}$ ($R = 0.8725$, $F = 5.7412$), F 值达到显著水平。Time、 PAR_0 、 TI 和 RH 的系数为正值, TI 系数较大, Time 系数次之, V_{pdl} 系数为负值且较大, 说明影响 P_{max} 变化的主要因子是 V_{pdl} 、 TI 和 Time。

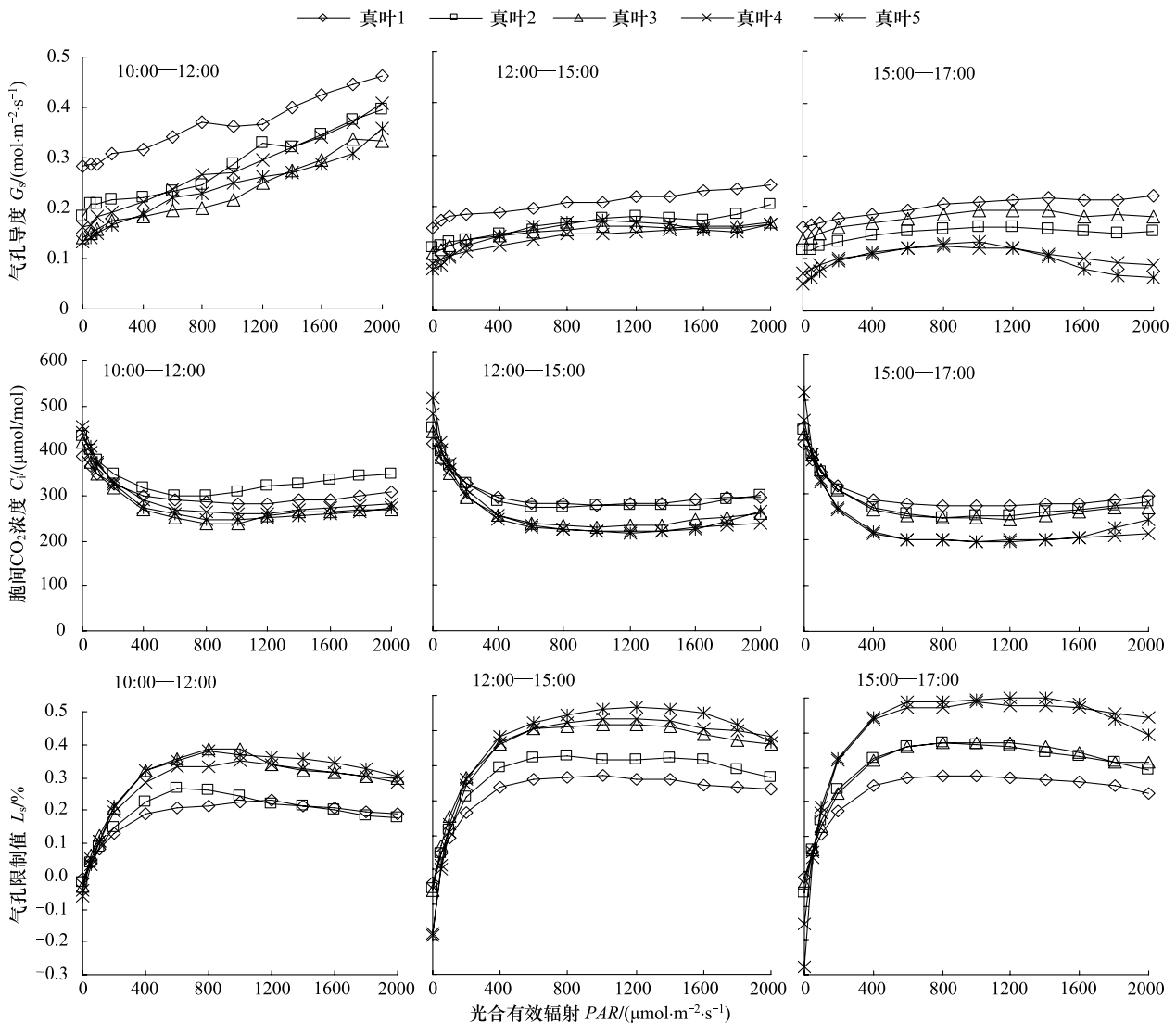


图 2 不同时段甜瓜不同叶位叶片气孔导度、胞间 CO_2 浓度和气孔限制值光响应曲线

Fig. 2 Light response curves of stomatal conductance, intercellular CO_2 concentration and stomatal limitation value for different position leaves of muskmelon at different time intervals

表 3 P_{\max} 与环境因子间的相关分析Table 3 Correlation analysis between P_{\max} and environmental factors

相关系数 Relative correlation	Time	PAR_0	TI	RH	$Vpdl$	P_{\max}
Time	1					
PAR_0	-0.54 *	1				
TI	0.47	0.27	1			
RH	-0.78 **	0.11	-0.81 **	1		
$Vpdl$	0.62 *	0.12	0.97 **	-0.89 **	1	
P_{\max}	-0.65 **	0.53 *	-0.4	0.66 **	-0.54 *	1

* 表示 0.05 显著水平, ** 表示 0.01 显著水平

表 4 环境因子对甜瓜 P_{\max} 的通径分析Table 4 Path analysis about the impact of environmental factors on P_{\max} of muskmelon

变量 Variables	直接作用 Direct path coefficient	间接作用 Indirect path coefficient					决策系数 $R^2(i)$
		Time	PAR_0	TI	RH	$Vpdl$	
Time	0.6783		-0.3795	0.6963	-0.3556	-1.2918	-1.3450
PAR_0	0.6995	-0.368		0.4009	0.0486	-0.2555	0.2459
TI	1.4949	0.3159	0.1876		-0.3683	-2.033	-3.4393
RH	0.4549	-0.5302	0.0747	-1.2102		1.8688	0.3917
$Vpdl$	-2.0936	0.4186	0.0854	1.4517	-0.4061		-2.1053

相关系数仅表示在其它环境因子都变化的情况下某一因子与 P_{\max} 关系密切程度,而不能正确地说明因子间的真正关系。为进一步分析环境因子对 P_{\max} 影响效应的大小,对 P_{\max} 与环境因子进行了通径分析(表 4)。从表中数据看出:对 P_{\max} 直接影响的大小排序为 $Vpdl > TI > PAR_0 > Time > RH$,且 $Vpdl$ 对 P_{\max} 的直接影响为负,为限制 P_{\max} 升高的因子;其它因子对 P_{\max} 的直接影响均为正, TI 对 P_{\max} 的直接影响较大,但通过 $Vpdl$ 对 P_{\max} 的间接影响为负且较大,因此, P_{\max} 与 TI 相关系数最小。决策系数 $R^2(i) = 2P_i r_{iy} - P_i^2$ (P_i 为自变量 i 对因变量的直接通径系数, r_{iy} 为自变量 i 与因变量的 Pearson 相关系数)是通径分析中的决策指标,用它可以把环境因子对 P_{\max} 的综合作用进行排序,以确定主要决策变量和限制变量^[16]。各环境因子对 P_{\max} 的决策系数,其排序为: $R^2(RH) > R^2(PAR_0) > R^2(Time) > R^2(Vpdl) > R^2(TI)$,其中 $R^2(Time)$, $R^2(Vpdl)$ 和 $R^2(TI)$ 都小于 0,则 RH 为主要决策变量,Time、 $Vpdl$ 和 TI 为主要限制变量。因此,要提高 P_{\max} ,须提高 RH ,限制 Time、 $Vpdl$ 和 TI ,基本保持 PAR_0 。

3 结论与讨论

相关研究认为:经充分光诱导的叶片光合作用的光响应曲线基本上是一条直角双曲线^[17],当 $PAR > 1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, P_n 随 PAR 增强几乎不再升高,达到饱和水平。也有研究^[18]认为 PAR 超过 LSP 后,出现光抑制从而导致 P_n 下降,但 LI-6400 光合测量系统自动“light-curve”曲线测定功能中,在可控光源的条件下,设定 1—3 min 的等待时间内并没有实际观测到 P_n 很快下降。卜令铎等^[19]认为水分胁迫加剧情况下,玉米叶片光响应曲线出现严重的光抑制现象。段爱国等^[10]对光响应曲线的研究,认为山合欢光响应曲线为饱和趋近型,车桑子为弱度抑制型,木豆为强度抑制型。许大全等^[20]认为中午可能发生光合作用“午休”现象影响测定结果的可比性,10:00—12:00 和 14:00—16:00 之间进行光合作用测定时间较为适宜。本研究中 10:00—12:00 测定的光响应曲线为双曲线没有在强光下产生抑制,12:00—15:00 第 5 叶在强光下产生光抑制,15:00—17:00 不同叶位叶片在强光下产生不同程度的光抑制。因此,甜瓜光响应曲线形状是变化的,适宜在上午 10:00—12:00 进行测定,但是不同季节环境因子差异很大,应该在测定前进行预备测定。

目前,对植物光合作用—光响应进行拟合的模型有很多^[9-13,15,21-25],其中非直角双曲线模型应用较为广泛,但其无法描述植物 P_n 随 PAR 增强而降低这一段曲线。有学者^[9]通过比较直角双曲线修正模型和非直角

双曲线模型,认为直角双曲线修正模型可以很好地拟合 P_n 随 PAR 增强而降低、几乎不变和略有升高的光响应曲线,适用范围广泛,拟合结果接近实测值,可用于不同环境条件下植物光响应特性研究。本研究中测定的光响应曲线出现 P_n 随 PAR 增强而降低现象,采用直角双曲线修正模型拟合不同时段光响应曲线,拟合较好。

影响光合作用的因素大致分为气孔限制和非气孔限制两种。Farquhar 和 Sharkey^[26] 提出用 C_i 和 L_s 的变化方向来判定光合作用的限制因素: P_n 降低, C_i 降低, L_s 升高,气孔因素为主要限制因素; P_n 降低, C_i 升高, L_s 降低,非气孔因素为主要限制因素。本研究中,10:00—17:00 P_n 和 C_i 总体呈降低趋势, L_s 升高,可见不同时段气孔因素为影响光合作用的主要限制因素。相同时段不同叶位叶片 P_n 和 L_s 以第 5 叶较高,第 1 叶较低; C_i 以第 5 叶较低,第 1 叶较高,说明非气孔因素为影响不同叶位叶片光合作用的主要限制因素。

表观量子效率(α)反映了植物光合作用对弱光的吸收和转换利用效率^[27],有研究^[28]表明晴天中午叶片 α 明显低于光照微弱的早晨和傍晚,对日光温室茄子的光响应特性研究^[4]也表明 α 日变化呈单谷型曲线。 φ_c 为光补偿点处的量子效率,有研究^[13]认为用 φ_c 表示植物对光能的利用率比用 α 更能反映植物利用光能的效率。本试验一天中的不同时段第 4 叶 φ_c 表现为先降低后升高,其它叶位 φ_c 一直减小,没有出现明显的谷值,可能与选择测定的时段有关,一天中多次测定和光响应参数变化趋势,有待进一步研究。

较高的库源比有利于提高叶片的光合速率^[29],甜瓜的光合产物主要以水苏糖和蔗糖的形式通过韧皮部向库器官运输^[30],经过前一天夜间的物质运输与消耗,可能由于植株库强度变大,叶片“源”几乎无光合产物,因此,10:00—12:00 光合能力较高。而上午叶片进行光合作用后,光合产物积累,下午光合作用降低。华南 8 号木薯光合参数日变化规律的研究^[5]表明, P_{max} 日变化呈单峰曲线,峰值出现在 9:00 左右。在云锦杜鹃上的研究结果^[6],也表明与 12:00 相比,8:00 时 P_{max} 较高。另外,15:00—17:00 时段甜瓜第 3 叶 P_{max} 最高,第 5 叶较低可能与光合产物的积累有关。

LCP 为植物光合作用吸收的 CO_2 和呼吸作用释放的 CO_2 相等,表观光合作用速率为零时的光照强度。当温度升高时,叶片呼吸作用加强, LCP 提高^[31]。本研究中,12:00—15:00 LCP 和 R_d 较高,10:00—12:00 和 15:00—17:00 较低,变化趋势一致,也证明了这一点。

许多研究表明,中部叶片处于最佳光合功能期,具有发育完善的细胞结构和组织结构^[32],基部叶片生长时期长,可能已逐渐进入衰老阶段,光合速率较低,而顶生叶片结构和生理功能尚未完善,光合作用较弱。相同时段,甜瓜以第 4、5 叶 P_{max} 、 φ_c 较高,下部叶较低。这与艾希珍等^[33]在日光温室黄瓜上的研究结果一致,与官玲亮等^[34]对红花不同叶位叶光合特性的研究结果基本一致。

夏季中午喷雾能增加空气湿度,提高甜菜和小麦^[28]叶片的 G_s 和 P_n ;在高温和低湿下增加空气湿度也可促进番茄^[35]叶片的蒸腾速率和 P_n ,并且减轻或消除光合“午休”。本研究中, RH 为影响 P_{max} 的主要决策变量, V_{pdl} 为限制变量,可以于 12:00—17:00 时段通过喷雾加湿,增加 RH ,降低 V_{pdl} ,增加 G_s 从而提高 P_{max} 。另外,Time 也是限制变量之一,不同时段光响应参数的变化可能与甜瓜植物的“生物钟”内生节奏的调节有关,对于控制 12:00—17:00 与 10:00—12:00 相同环境条件下,探讨光响应参数的变化有待进一步研究。

综上所述,甜瓜幼苗叶片光响应曲线适宜在 10:00—12:00 进行测定,气孔因素为不同时段光合作用不同的主要限制因素。中上部叶片光合能力较好,非气孔因素为影响不同叶位叶片光合作用的主要限制因素。空气相对湿度(RH)为主要决策因子,测定时段(Time)、叶面饱和蒸汽压亏缺(V_{pdl})和叶面温度(TI)为主要限制因子,可以采取加湿措施来提高甜瓜叶片的光合性能。

References:

- [1] Guo J, Guo X Y, Wang J H, Zhang F L. Characteristic parameters of light responses of corn varieties with different plant shapes. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2005, 25(8): 1612-1617.
- [2] Xu D Q. Some noteworthy problems in measurement and investigation of photosynthesis. Plant Physiology Communications, 2006, 42(6): 1163-1167.
- [3] Jiang G M, He W M. A quick new method for determining light response curves of photosynthesis under field light conditions. Chinese Bulletin of

- Botany, 1999, 16(6): 712-718.
- [4] Gao Z K, Gao R F, He J P, Zhao T, Wang H Y. Studies on response characteristics of photosynthetic available radiation on photosynthesis in greenhouse eggplant. Journal of Agricultural University of Hebei, 2005, 28(3): 26-30.
- [5] Zuo Y M, Chen H J, Yang C F, Deng Q Q, Tang J. The diurnal variation of light parameters and the main impact factors of Cassava South China 8. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(13): 371-375.
- [6] Ke S S. The limited types of photosynthesis of rhododendron fortunei under soil drought stress. Journal of Yunnan Agricultural University, 2008, 23(3): 387-391.
- [7] Chen N L, Li T H, Wang G, An L. Studies on photosynthetic properties of muskmelon I. leaf area dynamics and photosynthetic characteristics of individual leaves. Journal of Lanzhou University: Natural Science Edition, 2001, 37(2): 105-111.
- [8] Li J B, Li J M, Zou Z R, Huang Z. Study on change rule of photosynthetic rate, photo respiration rate and dark respiration rate of muskmelon leaves during seedling. Journal of Northwest A and F University: Natural Science Edition, 2008, 36(7): 57-63.
- [9] Ye Z P, Li J S. Comparative investigation light response of photosynthesis on non-rectangular hyperbola model and modified model of rectangular hyperbola. Journal of Jinggangshan University: Natural Science Edition, 2010, 31(3): 38-44.
- [10] Duan A G, Zhang J G. Selection of models of photosynthesis in response to irradiance and definition of attribute of weak light. Forest Research, 2009, 22(6): 765-771.
- [11] Ye Z P, Yu Q. Comparison of a new model of light response of photosynthesis with traditional models. Journal of Shenyang Agricultural University, 2007, 38(6): 771-775.
- [12] Ye Z P. A new model for relationship between irradiance and the rate of photosynthesis in *Oryza sativa*. Photosynthetica, 2007, 45(4): 637-640.
- [13] Ye Z P. A new model of light-response of photosynthesis and its application. Journal of Biomathematics, 2008, 23(4): 710-716.
- [14] Berry J A, Downton W J S. Environmental regulation of photosynthesis//Govindjee, ed. Photosynthesis, Development, Carbon Metabolism, and Plant Productivity, vol. 2. New York: Academic Press, 1982: 263-343.
- [15] Kyei-Boahen S, Lada R, Astatkie T, Gordon R, Caldwell C. Photosynthetic response of carrots to varying irradiance. Photosynthetica, 2003, 41(2): 1-5.
- [16] Liu Y H, Shi J A, Jia Z K, Han Q F. Diurnal dynamics of photosynthetic and transpiration rates of alfalfa under dry farming and their relationships with environmental factors. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(10): 1811-1814.
- [17] Chen G Y, Yu G L, Chen Y, Xu D Q. Exploring the observation methods of photosynthetic responses to light and carbon dioxide. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology, 2006, 32(6): 691-696.
- [18] Liu Y F, Xiao L T, Tong J H, Li X B. Primary application on the non-rectangular hyperbola model for photosynthetic light-response curve. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(8): 76-79.
- [19] Bo L D, Zhang R H, Chang Y, Xue J Q, Han M M. Response of photosynthetic characteristics to water stress of maize leaf in seedling. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(5): 1184-1191.
- [20] Xu D Q, Shen Y K. External and internal factors responsible for midday depression of photosynthesis // Pessarakli M, ed. Handbook of Photosynthesis. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2005: 287-297.
- [21] Thornley J H M. Mathematical Models in Plant Physiology. London: Academic Press, 1976: 86-110.
- [22] Zhang M, Wu J B, Guan D X, Shi T T, Chen P S, Ji R P. Light response curve of dominant tree species photosynthesis in broadleaved Korean pine forest of Changbai Mountain. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(9): 1575-1578.
- [23] Evans J R, Jakobsen I, Ögren E. Photosynthetic light-response curves 2. Gradients of light absorption and photosynthetic capacity. Planta, 1993, 189(2): 191-200.
- [24] Graham D F, von Caemmerer S, Berry J A. Models of photosynthesis. Plant Physiology, 2001, 125(1): 42-45.
- [25] Liu Y M, Wang Y C, Yu X C, Li Y S. Mathematic models of cucumber net photosynthesis rate responding to CO₂ concentration, temperature, and illumination intensity. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(4): 883-887.
- [26] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33: 317-345.
- [27] Yan X F, Wang Y J, Wang Y, Sun H Q, Zu Y G. Gas exchange of *Rhodiola sachalinensis* on Changbai Mountain. Bulletin of Botanical Research, 1999, 19(3): 273-278.
- [28] Xu D Q. Photosynthetic Efficiency. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2002: 73-73, 108-108.
- [29] Pan X H, Wang Y R. Influences of sink-source ratio alteration on photosynthesis assimilate translocation and partitioning and leaf senescence of rice. Acta Agronomica Sinica, 1998, 24(6): 821-827.
- [30] Liao M M, Cao B S, Xue L B, Xu Q. Effect of pistillate flower removing on sugar content and relative enzyme activities in mature leaves of *Cucumis melo*. Plant Physiology Communications, 2003, 39(2): 131-133.

- [31] Xiao L T, Wang S G. *Plant Physiology*. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2004: 158-158.
- [32] Wang Q Y, Hu C H. Study on the structure and photosynthetic properties of leaf blades on different levels in maize. *Acta Agronomica Sinica*, 1986, 12(4): 273-280.
- [33] Ai X Z, Zhang Z X, He Q W, Sun X L, Xing Y X. Study on photosynthesis of leaves at different positions of cucumber in solar greenhouse. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(12): 1519-1524.
- [34] Guan L L, Wu W, Zheng Y L, Wang T. Correlation analysis between photosynthesis and yield of the leaves at different positions of safflower. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(8): 1352-1359.
- [35] Xue Y X, Li Y L, Wen X Z. Effects of air humidity on the photosynthesis and fruit-set of tomato under high temperature. *Acta Horticulturae Sinica*, 2010, 37(3): 397-404.

参考文献:

- [1] 郭江, 郭新宇, 王纪华, 张凤路. 不同株型玉米光响应曲线的特征参数研究. *西北植物学报*, 2005, 25(8): 1612-1617.
- [2] 许大全. 光合作用测定及研究中一些值得注意的问题. *植物生理学通讯*, 2006, 42(6): 1163-1167.
- [3] 蒋高明, 何维明. 一种在野外自然光照条件下快速测定光合作用—光响应曲线的新方法. *植物学通报*, 1999, 16(6): 712-718.
- [4] 高志奎, 高荣孚, 何俊萍, 赵毅, 王会英. 日光温室茄子光合的光强响应特性研究. *河北农业大学学报*, 2005, 28(3): 26-30.
- [5] 左应梅, 陈惠娟, 杨重法, 邓权权, 唐建. 华南8号木薯光响应参数日变化及其主要影响因子. *中国农学通报*, 2010, 26(13): 371-375.
- [6] 柯世省. 土壤干旱下云锦杜鹃光合作用的限制形式. *云南农业大学学报*, 2008, 23(3): 387-391.
- [7] 陈年来, 李庭红, 王刚, 安力. 甜瓜光合特性研究 I 单叶面积动态与光合性能. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2001, 37(2): 105-111.
- [8] 李建斌, 李建明, 邹志荣, 黄志. 厚皮甜瓜苗期叶片光合、光呼吸及暗呼吸速率的变化. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2008, 36(7): 57-63.
- [9] 叶子飘, 李进省. 光合作用对光响应的直角双曲线修正模型和非直角双曲线模型的对比研究. *井冈山大学学报: 自然科学版*, 2010, 31(3): 38-44.
- [10] 段爱国, 张建国. 光合作用光响应曲线模型选择及低光强属性界定. *林业科学研究*, 2009, 22(6): 765-771.
- [11] 叶子飘, 于强. 一个光合作用光响应新模型与传统模型比较. *沈阳农业大学学报*, 2007, 38(6): 771-775.
- [13] 叶子飘. 光合作用对光响应新模型及其应用. *生物数学学报*, 2008, 23(4): 710-716.
- [16] 刘玉华, 史纪安, 贾志宽, 韩清芳. 旱作条件下紫花苜蓿光合蒸腾日变化与环境因子的关系. *应用生态学报*, 2006, 17(10): 1811-1814.
- [17] 陈根云, 俞冠路, 陈悦, 许大全. 光合作用对光和二氧化碳响应的观测方法探讨. *植物生理与分子生物学学报*, 2006, 32(6): 691-696.
- [18] 刘宇锋, 萧浪涛, 童建华, 李晓波. 非直线双曲线模型在光合光响应曲线数据分析中的应用. *中国农学通报*, 2005, 21(8): 76-79.
- [19] 卜令铎, 张仁和, 常宇, 薛吉全, 韩苗苗. 苗期玉米叶片光合特性对水分胁迫的响应. *生态学报*, 2010, 30(5): 1184-1191.
- [22] 张弥, 吴家兵, 关德新, 施婷婷, 陈鹏狮, 纪瑞鹏. 长白山阔叶红松林主要树种光合作用的光响应曲线. *应用生态学报*, 2006, 17(9): 1575-1578.
- [25] 刘玉梅, 王云诚, 于贤昌, 李衍素. 黄瓜单叶净光合速率对二氧化碳浓度、温度和光照强度响应模型. *应用生态学报*, 2007, 18(4): 883-887.
- [27] 阎秀峰, 王玉杰, 王洋, 孙海芹, 祖元刚. 长白山高山红景天的气体交换特性. *木本植物研究*, 1999, 19(3): 273-280.
- [28] 许大全. 光合作用效率. 上海: 上海科学技术出版社, 2002: 73-73, 108-108.
- [29] 潘晓华, 王永锐. 水稻库/源比对叶片光合作用、同化物运输和分配及叶片衰老的影响. *作物学报*, 1998, 24(6): 821-827.
- [30] 缪旻珉, 曹碚生, 薛林宝, 徐强. 摘除雌花对甜瓜成熟叶片中糖及相关酶活性的影响. *植物生理学通讯*, 2003, 39(2): 131-133.
- [31] 萧浪涛, 王三根. *植物生理学*. 北京: 中国农业出版社, 2004: 158-158.
- [32] 王群瑛, 胡昌浩. 玉米不同叶位叶片的初步研究. *作物学报*, 1986, 12(4): 273-278.
- [33] 艾希珍, 张振贤, 何启伟, 孙小镭, 邢禹贤. 日光温室黄瓜不同叶位叶片光合作用研究. *中国农业科学*, 2002, 35(12): 1519-1524.
- [34] 官玲亮, 吴卫, 郑有良, 王涛. 红花蕾期不同叶位叶的光合特性及与产量的相关性. *作物学报*, 2007, 33(8): 1352-1359.
- [35] 薛义霞, 李亚灵, 温祥珍. 空气湿度对高温下番茄光合作用及坐果率的影响. *园艺学报*, 2010, 37(3): 397-404.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 5 March, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

- Statistical characteristics of eutrophication process in Dianshan Lake CHENG Xi, LI Xiaoping, CHEN Xiaohua (1355)
- Cadmium assimilation and elimination and biological response in *Pirata subpiraticus* (Araneae: Lycosidae) fed on Cadmium diets ZHANG Zhengtian, ZHANG Guangduo, ZHANG Hucheng, et al (1363)
- Effect of co-cultivation time on camptothecin content in *Camptotheca acuminata* seedlings after inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi YU Yang, YU Tao, WANG Yang, et al (1370)
- Relationship between frequency of sandstorms and air humidity as well as plant phenology: a case study from the Minqin desert area CHANG Zhaofeng, WANG Yaolin, HAN Fugui, et al (1378)
- Genetic diversity and evolution relationship on mtDNA D-loop in Tibetan yaks ZHANG Chengfu, XU Lijuan, JI Qiumei, et al (1387)
- Geostatistical analysis on spatiotemporal distribution pattern of soil water content of forest gap in *Pinus koraiensis* dominated broadleaved mixed forest LI Meng, DUAN Wenbiao, CHEN Lixin, et al (1396)
- Soil nitrogen and enzymes involved in nitrogen metabolism under different vegetation in Ziwuling mountain in the Loess Plateau, China XING Xiaoyi, HUANG Yimei, HUANG Haibo, et al (1403)
- Soil carbon, nitrogen and microbiological characteristics during bamboo high-speed growth WANG Xueqin, ZHANG Qichun, YAO Huaiying (1412)
- Effects of long-term increased soil N on leaf traits of several species in typical Inner Mongolian grassland HUANG Juying, YU Hailong, YUAN Zhiyou, et al (1419)
- Influence of arbuscular mycorrhizal associations on the interspecific competition between mycorrhizal and non-mycorrhizal plants ZHANG Yuting, WANG Wenhua, SHEN Hong, et al (1428)
- Structure and biodiversity of fig wasp community inside syconia of *Ficus virens* Ait. var. *sublanceolata* (Miq.) Corner in Fuzhou WU Wenshan, CHEN Youling, CAI Meiman, et al (1436)
- Growth and photosynthetic characteristics of *Epimedium koreanum* Nakai in different habitats ZHANG Yonggang, HAN Mei, HAN Zhongming, et al (1442)
- The critical temperature to Huashan Pine (*Pinus armandi*) radial growth based on the daily mean temperature FENG Xiaohui, CHENG Ruimei, XIAO Wenfa, et al (1450)
- The analysis of grade diversity indices of butterfly community in the Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River MA Qi, LI Aimin, DENG Heli (1458)
- Research on dynamic characteristics of photosynthesis in muskmelon seedling leaves HAN Ruifeng, LI Jianming, HU Xiaohui, et al (1471)
- Effects of different winter covering crops cultivation on methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) emission fluxes from double-cropping paddy field TANG Haiming, XIAO Xiaoping, SHUAI Xiqiang, et al (1481)
- Variations in groundwater levels and quality and their effects on vegetation in the western Grubantonggut Desert ZENG Xiaoling, LIU Tong, ZHANG Weibin, et al (1490)
- Carbon and nitrogen stable isotope characteristics of particulate organic matter and zooplankton in Liuxihe Reservoir NING Jiajia, LIU Hui, GU Binhe, et al (1502)
- Selection of vegetable seeds native in China instead of the cress seed for evaluating the maturity of biosolids LIU Songsong, XU Tianfen, WU Qitang, et al (1510)
- Effects of anthropogenic nutrient input on organisms from different trophic levels in Hanfeng Lake: evidence from stable carbon and nitrogen isotope analysis LI Bin, WANG Zhijian, JIN Li, et al (1519)
- Temporal and spatial distribution of phytoplankton in Liusha Bay ZHANG Caixue, CHEN Huiyan, SUN Xingli, et al (1527)
- Study on the supercooling of golden apple snail (*Pomacea canaliculata*) ZHAO Benliang, ZHANG Jia'en, LUO Mingzhu, et al (1538)
- The effects of rice growth stages on the ovarian development and take-off of *Nilaparvata lugens* and *Sogatella furcifera* CHEN Yu, FU Qiang, LAI Fengxiang, et al (1546)
- Cold tolerance of the overwintering egg of *Apolygus lucorum* Meyer-Dür (Hemiptera: Miridae) ZHUO Degan, LI Zhaohui, MEN Xingyuan, et al (1553)
- A suggestion on the estimation method of population sizes of *Niviventer confucianus* in Land-bridge island ZHANG Xu, BAO Yixin, LIU Jun, et al (1562)
- The carbon footprint of food consumption in Beijing WU Yan, WANG Xiaoke, LU Fei (1570)
- Anthropogenic phosphorus flow analysis of Hanshan County in Anhui Province FU Yinyin, YUAN Zengwei, WU Huijun, et al (1578)
- A laboratory study of auctions for water rights transactions in inland river basin: a case study of irrigation areas of Heihe river basin DENG Xiaohong, XU Zhongmin (1587)
- Review and Monograph**
- A review of the effect of typhoon on forests LIU Bin, PAN Lan, XUE Li (1596)
- Research progress on the effects of ocean acidification on coral reef ecosystems ZHANG Chenglong, HUANG Hui, HUANG Liangmin, et al (1606)
- Interspecific competition among three invasive *Liriomyza* species XIANG Juncheng, LEI Zhongren, WANG Haihong, et al (1616)
- Indicative significance of biogenic elements to eco-environmental changes in waters YU Yu, SONG Jinming, LI Xuegang, et al (1623)
- Recent advances in studies on dissimilatory Fe(III)-reducing microorganisms LI Huijuan, PENG Jingjing (1633)
- Discussion**
- Ecological vulnerability research for Xilingol League, Northern China XU Guangcai, KANG Muye, Marc Metzger, et al (1643)
- Scientific Note**
- Spatial distribution and species composition of zooplanktons in the eastern tropical Pacific Ocean off Costa Rica LIU Bilin, CHEN Xinjun, JIA Tao, et al (1654)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 5 期 (2012 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 5 2012

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071 电话:(010)64034563 E-mail: journal@espg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@espg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元