

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

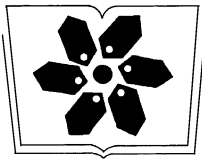
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 20 期 Vol.32 No.20 **2012**

中国生态学会
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 20 期

2012 年 10 月 (半月刊)

目 次

太湖流域源头溪流氧化亚氮(N_2O)释放特征.....	袁淑方, 王为东 (6279)
闽江河口湿地植物枯落物立枯和倒伏分解主要元素动态.....	曾从盛, 张林海, 王天鹅, 等 (6289)
宁夏荒漠草原小叶锦鸡儿可培养内生细菌多样性及其分布特征.....	代金霞, 王玉炯 (6300)
陕西省栎黄枯叶蛾蛹的空间分布.....	章一巧, 宗世祥, 刘永华, 等 (6308)
模拟喀斯特生境条件下干旱胁迫对青冈栎苗木的影响.....	张中峰, 尤业明, 黄玉清, 等 (6318)
中国井冈山生态系统多样性.....	陈宝明, 林真光, 李 贞, 等 (6326)
鄂西南木林子常绿落叶阔叶混交林恢复过程中优势树种生态位动态.....	汤景明, 艾训儒, 易咏梅, 等 (6334)
不同增温处理对夏蜡梅光合特性和叶绿素荧光参数的影响	徐兴利, 金则新, 何维明, 等 (6343)
模拟长期大风对木本猪毛菜表观特征的影响	南 江, 赵晓英, 余保峰 (6354)
雷竹林土壤和叶片 N、P 化学计量特征对林地覆盖的响应	郭子武, 陈双林, 杨清平, 等 (6361)
利用树木年轮重建赣南地区 1890 年以来 2—3 月份温度的变化	曹受金, 曹福祥, 项文化 (6369)
川西亚高山草甸土壤呼吸的昼夜变化及其季节动态.....	胡宗达, 刘世荣, 史作民, 等 (6376)
火干扰对小兴安岭白桦沼泽和落叶松-苔草沼泽凋落物和土壤碳储量的影响	周文昌, 牟长城, 刘 夏, 等 (6387)
黄土丘陵区三种典型退耕还林地土壤固碳效应差异.....	佟小刚, 韩新辉, 吴发启, 等 (6396)
岩质公路边坡生态恢复土壤特性与植物多样性	潘树林, 辜 彬, 李家祥 (6404)
坡位对东灵山辽东栎林土壤微生物量的影响.....	张 地, 张育新, 曲来叶, 等 (6412)
太湖流域典型入湖港口景观格局对河流水质的影响.....	王 瑛, 张建锋, 陈光才, 等 (6422)
基于多角度基尼系数的江西省资源环境公平性研究	黄和平 (6431)
中国土地利用空间格局动态变化模拟——以规划情景为例	孙晓芳, 岳天祥, 范泽孟 (6440)
世界主要国家耕地动态变化及其影响因素	赵文武 (6452)
不同氮源下好氧反硝化菌 <i>Deffluibacter lusatiensis</i> str. DN7 的脱氮特性	肖继波, 江惠霞, 褚淑祎 (6463)
基于生态足迹方法的南京可持续发展研究.....	周 静, 管卫华 (6471)
基于投入产出方法的甘肃省水足迹及虚拟水贸易研究.....	蔡振华, 沈来新, 刘俊国, 等 (6481)
浦江县土壤碱解氮的空间变异与农户 N 投入的关联分析	方 斌, 吴金凤, 倪绍祥 (6489)
长江河口潮间带盐沼植被分布区及邻近光滩鱼类组成特征	童春富 (6501)
深圳湾不同生境湿地大型底栖动物次级生产力的比较研究.....	周福芳, 史秀华, 邱国玉, 等 (6511)
灰斑古毒蛾口腔反吐物诱导沙冬青细胞 Ca^{2+} 内流及 H_2O_2 积累	高海波, 张淑静, 沈应柏 (6520)
濒危物种金斑喙凤蝶的行为特征及其对生境的适应性.....	曾菊平, 周善义, 丁 健, 等 (6527)
细叶榕榕小蜂群落结构及动态变化.....	吴文珊, 张彦杰, 李凤玉, 等 (6535)
专论与综述	
流域生态系统补偿机制研究进展	张志强, 程 莉, 尚海洋, 等 (6543)
可持续消费的内涵及研究进展——产业生态学视角	刘晶茹, 刘瑞权, 姚 亮 (6553)
工业水足迹评价与应用.....	贾 佳, 严 岩, 王辰星, 等 (6558)
矿区生态风险评价研究述评.....	潘雅婧, 王仰麟, 彭 建, 等 (6566)
研究简报	
围封条件下荒漠草原 4 种典型植物群落枯落物枯落量及其蓄积动态.....	李学斌, 陈 林, 张硕新, 等 (6575)
密度和种植方式对夏玉米酶活性和产量的影响.....	李洪岐, 蔺海明, 梁书荣, 等 (6584)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 312 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2012-10	

封面图说: 草丛中的朱鹮——朱鹮有着鸟中“东方宝石”之称。洁白的羽毛, 艳红的头冠和黑色的长嘴, 加上细长的双脚, 朱鹮历来被日本皇室视为圣鸟。20 世纪前朱鹮在中国东部、日本、俄罗斯、朝鲜等地曾有较广泛地分布, 由于环境恶化等因素导致种群数量急剧下降, 至 20 世纪 70 年代野外已认为无踪影。1981 年 5 月, 中国鸟类学家经多年考察, 在陕西省洋县重新发现朱鹮种群, 一共只有 7 只, 也是世界上仅存的种群。此后对朱鹮的保护和科学研究做了大量工作, 并于 1989 年在世界首次人工孵化成功。

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

DOI: 10.5846/stxb201201310129

徐兴利, 金则新, 何维明, 王兴龙, 车秀霞. 不同增温处理对夏蜡梅光合特性和叶绿素荧光参数的影响. 生态学报, 2012, 32(20): 6343-6353.

Xu X L, Jin Z X, He W M, Wang X L, Che X X. Effects of different day/night warming on the photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of *Sinocalycanthus chinensis* seedlings. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(20): 6343-6353.

不同增温处理对夏蜡梅光合特性和 叶绿素荧光参数的影响

徐兴利^{1,2}, 金则新^{2,*}, 何维明³, 王兴龙^{2,4}, 车秀霞^{2,5}

(1. 西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 台州学院生态研究所, 临海 317000;

3. 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093; 4. 杭州师范大学生命与环境科学学院, 杭州 310018;

5. 广西师范大学生命科学学院, 桂林 541004)

摘要: 利用红外线辐射器 (Electric radiant infrared heater) 设置 3 个不同增温处理: (1) 晚上增温 2 °C (18:00—翌日 6:00); (2) 白天增温 2 °C (6:00—18:00); (3) 全天增温 2 °C; 以不做增温处理作为对照, 模拟气候变暖对夏蜡梅 (*Sinocalycanthus chinensis*) 的光合特性和叶绿素荧光参数的影响。3 个季节中, 3 种增温处理下的夏蜡梅净光合速率 (A_{net}) 和最大净光合速率 (A_{max}) 均高于对照。表明 3 种增温处理均可以提高夏蜡梅的光合作用能力。增温处理提高了气孔导度 (G_s)、暗呼吸速率 (R_d), 降低了胞间 CO_2 浓度 (C_i)。3 种增温处理中, 夏蜡梅在 3 个生长季节的 A_{net} 和 A_{max} 均以白天增温最大, 表明白天增温下夏蜡梅具有最高的光合作用能力。白天增温处理下的表观量子效率 (AQY)、光饱和点 (LSP) 显著高于全天增温、晚上增温以及对照。白天增温和晚上增温使夏蜡梅的相对叶绿素含量显著增加, 且白天增温叶绿素相对含量显著高于晚上增温、全天增温及对照。白天增温、晚上增温与全天增温处理下的夏蜡梅的 PS II 最大光化学效率 (F_v/F_m) 均显著低于对照, 在 12:00 和 14:00 时, 三者之间存在显著性差异, 以白天增温最高, 晚上增温次之, 全天增温最低。总之, 3 种增温处理夏蜡梅的光合能力总体上均有不同程度的增强, 且在白天增温处理下, 夏蜡梅的 A_{net} 、 A_{max} 值最高, 表明白天增温下夏蜡梅具有最高的光合能力, 这与白天增温引起的相对叶绿素含量增高、叶片对强光的适应能力加强、较低程度的光胁迫等因素有关。本研究说明未来增温条件下, 将提高夏蜡梅的光合生理活性, 促进夏蜡梅的生长。

关键词: 夏蜡梅; 增温; 光合特性; 叶绿素相对含量; 叶绿素荧光参数

Effects of different day/night warming on the photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of *Sinocalycanthus chinensis* seedlings

XU Xingli^{1,2}, JIN Zexin^{2,*}, HE Weiming³, WANG Xinglong^{2,4}, CHE Xiuxia^{2,5}

1 Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education School of Life Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

2 Institute of Ecology, Taizhou College, Linhai 317000, China

3 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

4 College of Life and Environmental Sciences, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310018, China

5 College of Life Sciences, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China

Abstract: Global temperatures are now predicted to be 1—6 °C warmer than today by the year 2100. Environmental warming is likely to have significant effects on plant carbon relations, particularly through its effects on photosynthesis and respiration. In terrestrial environments, the nighttime daily minimum air temperatures in recent decades have increased

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30870392); 浙江省自然科学基金项目 (Y3080460)

收稿日期: 2012-01-31; **修订日期:** 2012-07-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jzx@tzc.edu.cn

more than the daytime maximum air temperatures. Understanding how plants respond to differential day/night warming may help scientists to predict the responses of plants to global warming. Most published studies of the effects of warming on plant growth have focused on either dominant species or invasive species. Little attention has been paid to endangered plants, but understanding how such species adapt in the context of global warming may be critical to their survival. *Sinocalycanthus chinensis* is an endangered plant belonging to the family Calycanthaceae. Here, we analyzed the effects of differential simulated day/night warming on the photosynthesis characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of *S. chinensis* seedlings. Three different simulated day/night warming treatments were included in the experiment: 1) warming of 2 °C above ambient temperature at daytime; 2) warming of 2 °C at nighttime; 3) warming of 2 °C at both day- and nighttime. Seedlings exposed to ambient temperatures without warming were used as the control treatment. In three seasons, the net photosynthetic rate (A_{net}) and the maximum net photosynthetic rate (A_{max}) in all three warming treatments were higher than in the control, indicating that simulated warming could increase the photosynthetic ability of *S. chinensis*. Simulated warming also increased the daily mean stomatal conductance (G_s) and the dark respiration rate (R_d), while it decreased the daily mean intercellular concentrations of CO_2 . In three different seasons, A_{net} and A_{max} of *S. chinensis* seedlings subjected to daytime warming were the highest, indicating that *S. chinensis* seedlings with daytime warming had the highest photosynthetic ability. The apparent quantum yield, light saturation point, and relative chlorophyll content of *S. chinensis* seedlings subjected to daytime warming were significantly higher than plants in the other warming treatments and the control. Simulated warming significantly decreased the F_v/F_m value of *S. chinensis* seedlings. During the period from 12:00 pm to 2:00 pm, the F_v/F_m value of *S. chinensis* seedlings treated with daytime warming was the highest, followed by those treated with nighttime warming and all-day warming, with significant statistical differences among the treatments. In conclusion, the different warming treatments increased the photosynthetic ability of *S. chinensis* to different degrees. The maximum values of A_{net} and A_{max} of *S. chinensis* seedlings subjected to daytime warming suggested that the highest photosynthetic ability of *S. chinensis* seedlings occurred under daytime warming. This might be due to the increase in relative chlorophyll content, the enhancement of the light adaptation ability, and the lower levels of light stress in the leaves of *S. chinensis* seedlings under daytime warming. The results of this study suggested that warming conditions in the future will improve the photosynthetic physiological activity and promote the growth of *S. chinensis*, perhaps benefiting this endangered species.

Key Words: *Sinocalycanthus chinensis*; warming; photosynthetic characteristics; relative chlorophyll content; chlorophyll fluorescence parameters

近年来,气候变暖对陆地生态系统的影响已成为当今国内外植物生态学家最为关注的热点之一^[1]。科学家们预测,到 21 世纪末全球地表平均温度还将上升 1.1—6.4 °C^[2]。全球变暖会通过影响植物的生理生态特性,进而对植物的种群、群落、生态系统乃至整个生物圈产生巨大影响^[3]。全球变暖存在明显的昼夜不同步性,晚上增温幅度大于白天^[4-5]。因此,探讨不同情境的昼夜增温对植物生长及生理的影响将更能真实反映全球变暖的实际效应。

目前对植物响应全球变暖的研究多集中于群落优势物种^[6-7]或是入侵植物种^[8],而对于濒危植物的研究不多见。濒危植物由于生境破碎化或是人为破坏,常具有较低的遗传多样性,从而对环境的适应能力变弱。了解濒危植物对全球变暖的响应及机制对于濒危植物的保护及复壮具有重要的意义及应用价值。

夏蜡梅(*Sinocalycanthus chinensis*)为蜡梅科(Calycanthaceae)夏蜡梅属(*Sinocalycanthus*)的落叶灌木。夏蜡梅作为第三纪孑遗物种,现存资源极少,目前主要分布于浙江临安市西部狭小的范围内、天台县大雷山和安徽绩溪龙须山,已列为国家 2 级重点保护植物^[9]。目前已对夏蜡梅进行了较多的研究,内容涉及群落生态学^[10]、开花物候^[11]、光合生理^[12]和遗传多样性^[13]等多个领域,对其濒危机制有了一定的了解。生境破碎化

导致夏蜡梅现有居群变小,个体数减少,居群内的遗传多样性降低,对环境的适应能力减弱。而有关全球变化对夏蜡梅的生长和生理影响的研究尚未见报道。

本文以夏蜡梅 1 年生幼苗为研究对象,采用红外线辐射器(Electric radiant infrared heater, Model MR-2420)模拟气候变暖,分别于春、夏、秋三个季节研究不同增温处理对夏蜡梅光合日进程、光响应、叶绿素含量、叶绿素荧光、生物量等参数的影响,旨在阐明夏蜡梅叶片的光合特性和叶绿素荧光参数对不同增温处理的响应,以期了解夏蜡梅对全球变暖的适应能力,为全球变化背景下濒危植物夏蜡梅的繁衍和保护提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料

2009 年 10 月,于浙江省大雷山(28°59'N;120°46'E)采集夏蜡梅种子。夏蜡梅位于山谷灌丛中,主要伴生物种为尖连蕊茶(*Camellia cuspidata*)、绣线菊(*Spiraea salicifolia*)、蜡瓣花(*Corylopsis sinensis*)、映山红(*Rhododendron simsii*)、猕猴桃(*Actinidia chinensis*)、大血藤(*Sargentodoxa cuneata*)等,夏蜡梅大部分位于冠层,但一部分植株被猕猴桃和大血藤等藤本所覆盖。2010 年 3 月于大雷山夏蜡梅群落,去除地表枯枝落叶,采集 0—15 cm 表层土壤,带回实验室,过 2 mm 筛后与砂 2:1 混匀,置于直径 10 cm、高 10 cm 的塑料圆盆中备用。选取形态完整、大小一致的种子播种,每盆播 30 粒种子,待出苗后,将幼苗移栽至直径 20 cm、高 15 cm 的塑料圆盆中,每盆一株。2011 年 3 月上旬,选取长势一致的夏蜡梅 1 年生幼苗,在台州学院生态园内进行增温处理。

1.2 研究方法

1.2.1 增温处理

增温装置采用美国 Kalglo Electronics 公司生产的红外线辐射器(Electric radiant infrared heater, Model MR-2420)^[14]。灯管悬挂按南北方向在样地上方,离地面高度为 2.25 m,可以使花盆土壤表面温度升高 2 ℃。采用自动定时器增温情境控制为 3 种:晚上增温(night-warming)(18:00—翌日 6:00)、白天增温(day-warming)(6:00—18:00)、全天增温(daily-warming)(24 h),增温幅度为 2 ℃;以不增温处理为对照(CK)。对照按相同方向悬挂相同大小的木板来模拟辐射器阴影的影响。所有实验材上覆盖一层遮阴网遮阴,相对光照强度为 37% 全光照。类似的增温处理方法已对水稻^[14]、小麦^[15]进行了研究。

1.2.2 光合参数的测量

于 2011 年 4、7、10 月中旬晴朗天气,从 6:00—18:00,用 LI-6400XT(LI-COR, Inc., Lincoln, USA)便携式光合作用测定系统测定光合参数,每 2 h 测定 1 次,不同增温处理及对照均测 3 株,每株选取 3 片叶子,每片叶子记录 3 组数据,取平均值。测定的参数有:净光合速率 A_{net} (Net photosynthetic rate)、气孔导度 G_s (Stomatal conductance)、胞间 CO_2 浓度 C_i (Intercellular CO_2 concentration)、蒸腾速率 T_r (Transpiration rate)等。

于天气晴朗的上午(8:00—12:00),使用 LI-6400XT 便携式光合作用测定系统测定光响应曲线。在光合有效辐射 PAR(Photosynthetic active radiation)波动较大时,使用人工光源进行光诱导和光响应测定,诱导光强约为 $2000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,诱导时间 < 30 min。测定时,光强从 $2000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 开始,依次降为 1800、1500、1200、1000、800、500、300、200、150、100、50、20、10 和 $0 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,测定时每一光强下等待时间为 1—4 min^[16-17]。仪器记录净光合速率(A_{net}),根据非直角双曲线模型拟合光响应曲线,并据此用 Photosyn Assistant 软件计算最大净光合速率 A_{max} (Maximum net photosynthetic rate)、光饱和点 LSP(Light saturation point)、光补偿点 LCP(Light compensation point)、表观量子效率 AQY(Apparent quantum yield)以及暗呼吸速率 R_d (Dark respiration)。

1.2.3 叶绿素相对含量和叶绿素荧光日进程的测定

叶绿素相对含量 SPADR(Chlorophyll relative content)也称绿色度,用数值大小定量描述叶片的绿色度,与叶绿素含量有显著相关性^[18]。叶绿素含量直接影响植物光合作用和光合产物形成^[19]。不同增温处理及对

照叶片 4 月、7 月、10 月中旬的叶绿素相对含量用 CCM-200 手持式叶绿素测定仪 (OPTI-SCIENCES, USA) 测定, 不同处理均测 5 个叶片, 在每个叶片中脉两侧选 3 个点, 15 个点的平均值为该处理的相对叶绿素含量。OS30P 便携式叶绿素荧光仪 (OPTI-SCIENCES, USA) 测定叶绿素荧光日进程 (监测时刻点同光合日进程), 在叶片自然生长角度不变的情况下测定叶绿素荧光基本参数: 初始荧光 (F_0)、最大荧光 (F_m) 和光系统 II 最大光化学效率 (F_v/F_m), 以上数据均重复 5 次, 取平均值。

1.2.4 幼苗形态及生物量测定

于 2011 年 10 月收获全部个体, 利用卷尺和游标卡尺进行株高和基径等生长指标的测定。然后于 105 °C 杀青 20 min, 在 75 °C 下烘干至恒重, 用精度为 0.0001 g 的电子天平称量得到植株生物量。

1.3 统计分析

用 SPSS13.0 对实验数据进行统计分析, 采用单因素方差分析 (One-Way ANOVA) 分析夏蜡梅不同增温处理及对照光合参数、光响应曲线参数、叶绿素含量的差异、生理指标差异, 用 LSD 多重比较检验不同增温处理和对照的差异显著性。利用 Photosyn Assistant 软件进行光响应曲线拟合。

2 结果与分析

2.1 环境因子日变化

图 1 表明, 在三个季节中, 从 6:00 到 18:00, 光合有效辐射 PAR、大气温度 T_a 的变化为“单峰”曲线。PAR 和 T_a 的值在早晚较低, 中午较高, 12:00 达到一天中的最大值, 且表现为 7 月 > 10 月 > 4 月。大气相对湿度 RH 的值在早晚较高, 中午较低, 表现为 4 月 > 10 月 > 7 月。大气 CO_2 浓度 C_a 在一天中变化幅度不大, 在 12:00 出现最低值。

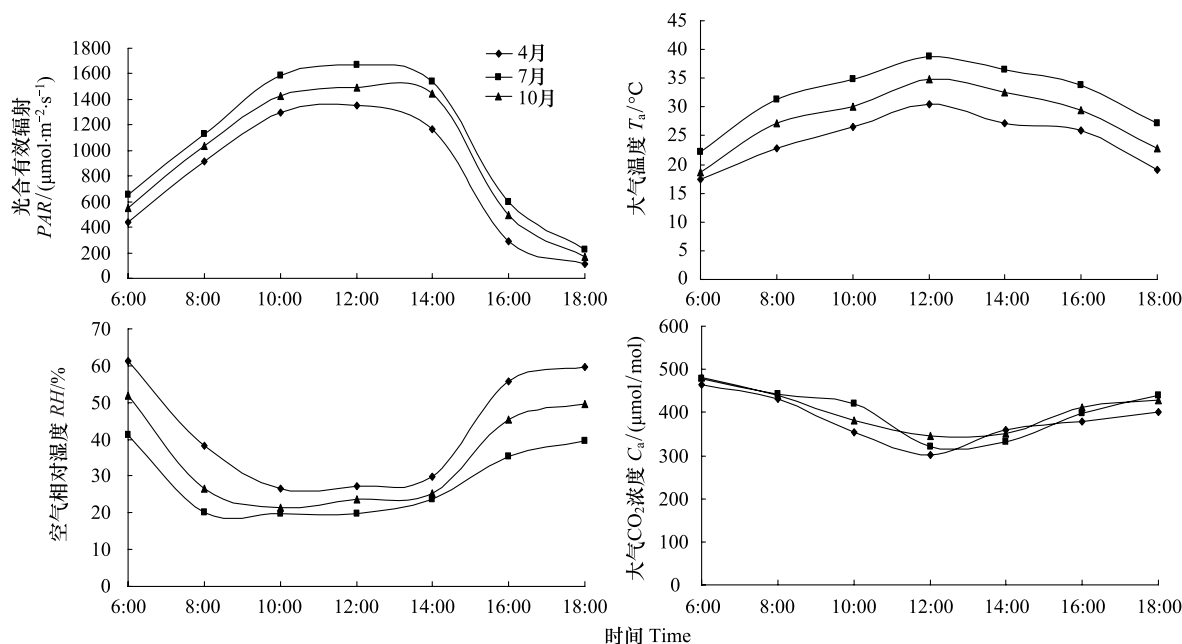


图 1 光合有效辐射 (PAR)、大气温度 (T_a)、大气相对湿度 (RH)、大气 CO_2 浓度 (C_a) 日变化

Fig. 1 The daily variation of photosynthetic active radiation (PAR), air temperature (T_a), air relative humidity (RH) and atmospheric CO_2 concentration (C_a)

2.2 不同增温处理对夏蜡梅光合作用参数的影响

不同增温处理的夏蜡梅的净光合速率 (A_{net}) 日变化如图 2 所示, 在 3 个季节中, 晚上增温除 4 月的 14:00、18:00, 10 月的 14:00 外, 其它时间段均显著高于对照 ($P < 0.05$); 白天增温、全天增温在各时间段均显著高于对照 ($P < 0.05$)。3 种增温处理下, 在 4 月的 6:00、8:00、14:00、16:00、18:00, 10 月的 6:00、14:00、

16:00 表现为白天增温、全天增温显著高于晚上增温 ($P<0.05$); 其它时间均表现为白天增温>全天增温>晚上增温, 它们之间差异显著 ($P<0.05$)。总体上, 不同增温处理后夏蜡梅的 A_{net} 均高于对照, 白天增温的 A_{net} 最高。

在 3 个季节中, 3 种增温处理的夏蜡梅气孔导度 (G_s) 日变化见图 2, 晚上增温除 7 月的 16:00、18:00, 10 月的 18:00 外, 其它时间段均显著高于对照 ($P<0.05$); 白天增温在各时间段均显著高于对照 ($P<0.05$); 全天增温除 7 月的 6:00、14:00 外, 其它时间段均显著高于对照 ($P<0.05$)。一般情况下, 3 种增温处理后的 G_s 也比对照高, 其中以白天增温最高。

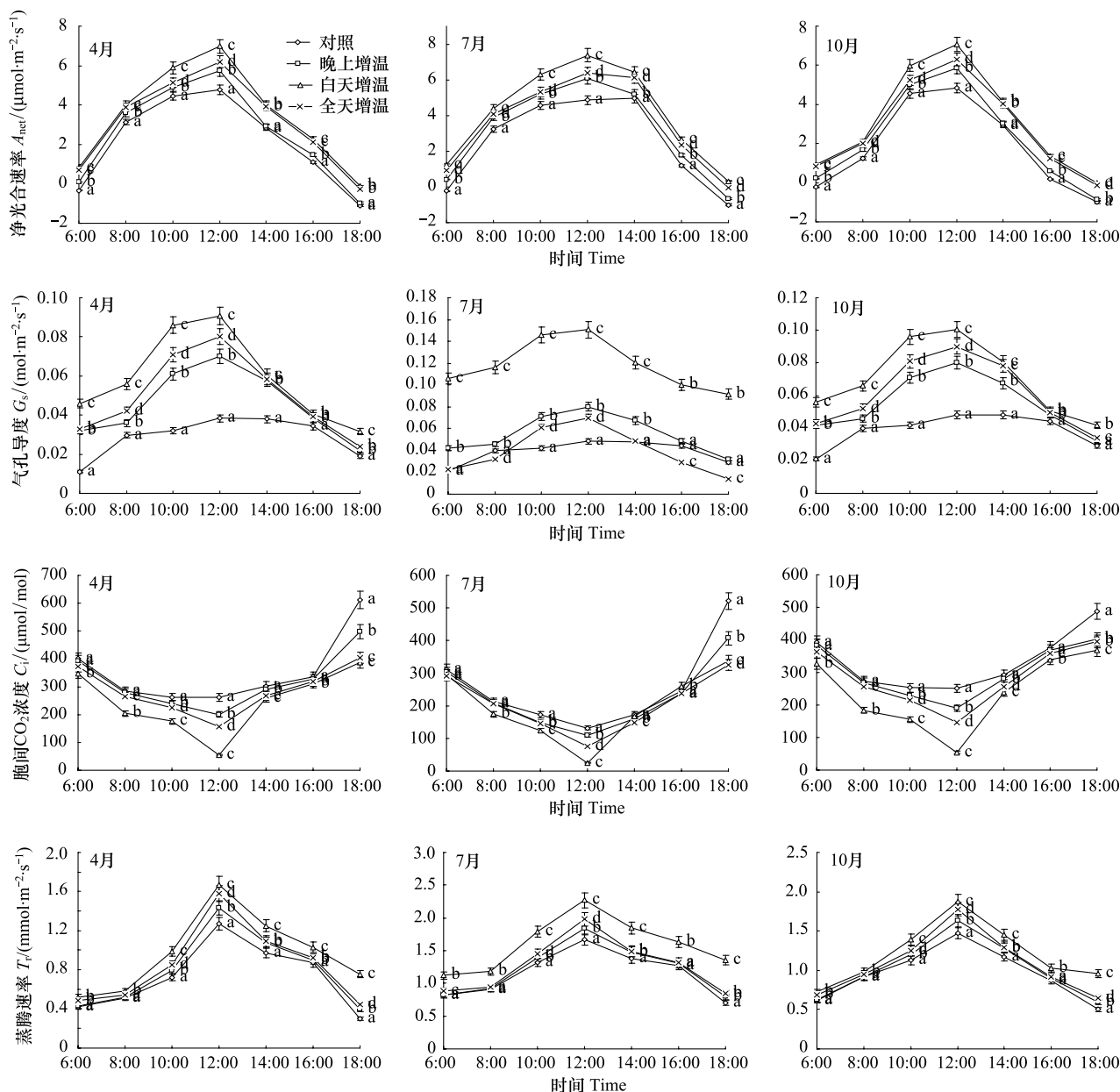


图 2 净光合速率 (A_{net})、气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i)、蒸腾速率 (T_r) 日进程

Fig. 2 The daily process of the net photosynthetic rate (A_{net}), stomatal conductance (G_s), intercellular CO_2 concentration (C_i) and transpiration rate (T_r)

数据为平均数±标准误差, 不同字母表示差异达 5% 显著水平

由图 2 可知, 在 3 个季节中, 晚上增温的胞间 CO_2 浓度 (C_i) 除 6:00、8:00、16:00 外, 其它时间段均显著低

于对照 ($P<0.05$); 白天增温除 7 月的 6:00、14:00 外, 其它时间段均显著低于对照 ($P<0.05$); 全天增温除 7 月的 6:00、8:00、16:00 外, 其它时间段均显著低于对照 ($P<0.05$)。3 种增温处理的 C_i 通常均比对照低, 尤其是白天增温的最低。

在 3 个季节中, 3 种增温处理的夏蜡梅蒸腾速率 (T_r) 通常均高于对照, 其中以白天增温的 T_r 最高 (图 2)。

由表 1 可知, 3 个季节中, 增温处理的最大净光合速率 ($A_{\max}$) 均高于对照, 其中白天增温、全天增温与对照差异显著 ($P<0.05$), 晚上增温与对照差异不显著 ($P>0.05$); 3 种增温处理中, 3 个季节均以白天增温最高, 全天增温次之, 晚上增温最低, 白天增温与其它 2 种处理差异显著 ($P<0.05$); 4 月、10 月全天增温显著高于晚上增温 ($P<0.05$), 7 月全天增温与晚上增温差异不显著 ($P>0.05$)。增温处理的光饱和点 (LSP) 在 3 个生长季节均显著高于对照 ($P<0.05$); 3 个季节中, 不同增温处理的 LSP 大小均为白天增温>全天增温>晚上增温, 它们之间均差异显著 ($P<0.05$)。4 月、10 月白天增温和全天增温的光补偿点 (LCP) 显著高于对照 ($P<0.05$), 7 月白天增温显著高于对照 ($P<0.05$); 3 种增温处理在 3 个季节均以白天增温最高, 与晚上增温差异显著 ($P<0.05$); 4 月、10 月全天增温次之, 与白天增温差异不显著 ($P>0.05$), 与晚上增温差异显著 ($P<0.05$); 7 月全天增温与晚上增温差异不显著 ($P>0.05$)。表观量子效率 (AQY) 4 月、10 月 3 种增温处理显著高于对照 ($P<0.05$); 7 月白天增温的 AQY 显著高于对照 ($P<0.05$), 对照显著高于晚上增温和全天增温 ($P<0.05$)。3 种增温处理的 AQY 在 3 个季节中均以白天增温最高, 与晚上增温、全天增温差异显著 ($P<0.05$); 晚上增温与全天增温差异不显著 ($P>0.05$)。3 种增温处理的暗呼吸速率 (R_d) 在 3 个季节均高于对照, 4 月、10 月 3 种增温

表 1 不同增温处理夏蜡梅光合参数

Table 1 Photosynthetic characteristics of *Sinocalycanthus chinensis* seedlings in differential simulating warming treatments

处理 Treatment		最大净光合速率 ($A_{\max}$)	光饱和点 (LSP)	光补偿点 (LCP)	表观量子效率 (AQY)	暗呼吸速率(R_d)
		Maximum net photosynthetic rate / $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	Light saturation point / $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	Light compensation point / $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	Apparent quantum yield / $(\mu\text{mol}\cdot\mu\text{mol}^{-1})$	Dark respiration / $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$
4 月 April	对照 (CK) comparison	4.1033±0.0923a	349.4579±0.9483a	2.9995±0.0498a	0.0689±0.0007a	0.1596±0.0086a
	晚上增温 night-warming	4.1697±0.0834a	362.4736±0.8546b	3.0009±0.0671a	0.0845±0.0008b	0.3000±0.0075b
	白天增温 day-warming	4.8967±0.0352b	410.5569±0.4657c	5.9995±0.0669b	0.1011±0.0005c	0.5100±0.0093c
	全天增温 daily-warming	4.4017±0.0628c	391.8387±0.6765d	5.1298±0.0448b	0.0834±0.0005b	0.2987±0.0089b
7 月 July	对照 (CK) comparison	4.3320±0.0660a	336.0274±0.578a	4.0004±0.0577a	0.0750±0.0006a	0.1827±0.0064a
	晚上增温 night-warming	4.5086±0.0584ab	339.2716±0.6380b	4.0004±0.0577a	0.0630±0.0006b	0.3000±0.0058b
	白天增温 day-warming	5.0238±0.0624c	420.0413±0.5788c	8.0006±0.0577b	0.0870±0.0006c	0.5500±0.0058c
	全天增温 daily-warming	4.6002±0.0577b	348.0330±0.5783d	3.9326±0.0663a	0.0630±0.0006b	0.2000±0.0058a
10 月 October	对照 (CK) comparison	4.2583±0.0457a	350.8548±0.4323a	3.8764±0.0564a	0.0696±0.0005a	0.2011±0.0046a
	晚上增温 night-warming	4.3437±0.0238a	371.4635±0.7645b	3.4532±0.0786a	0.0792±0.0005b	0.3121±0.0076b
	白天增温 day-warming	4.9334±0.0723b	425.2042±0.6098c	6.9973±0.0678b	0.0912±0.0006c	0.6000±0.0058c
	全天增温 daily-warming	4.6067±0.0518c	400.8387±0.6322d	6.5342±0.0887b	0.0723±0.0006b	0.3421±0.0064b

数据为平均数±标准误差, 不同字母表示差异达 5% 显著水平

处理均与对照差异显著 ($P < 0.05$); 7 月 R_d 白天增温、晚上增温显著高于对照 ($P < 0.05$), 全天增温与对照差异不显著 ($P > 0.05$)。3 种增温处理中, R_d 均以白天增温最高, 与其它 2 种增温差异显著 ($P < 0.05$); 7 月晚上增温次之, 与全天增温差异显著 ($P < 0.05$); 4 月、10 月晚上增温与全天增温差异不显著 ($P > 0.05$)。

2.3 不同增温处理对夏蜡梅叶绿素相对含量的影响

3 个季节中, 白天增温、晚上增温处理的夏蜡梅叶片的叶绿素相对含量 (SPADR) 均显著高于对照 ($P < 0.05$), 全天增温与对照之间差异不显著 ($P > 0.05$); 3 种增温处理在 3 个季节的 SPADR 均以白天增温最高, 晚上增温次之, 全天增温最低, 它们之间均差异显著 ($P < 0.05$) (图 3)。

2.4 不同增温处理对夏蜡梅叶绿素荧光的影响

3 种增温处理的夏蜡梅叶片 F_o 日变化如图 4 所示, 在 3 个季节中, 全天增温、白天增温的 F_o 均显著高于对照 ($P < 0.05$); 晚上增温与对照的 F_o 在各个时间段各有高低, 但 3 个季节均表现出在 6:00 与 18:00 时, 晚

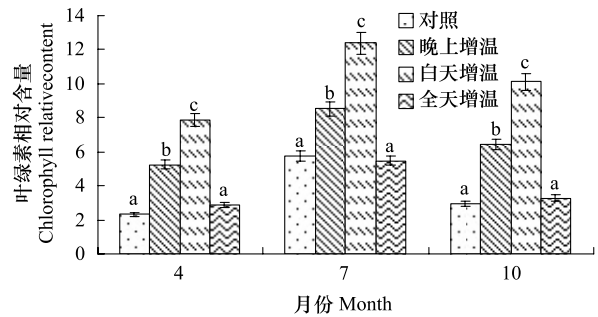


图 3 不同增温处理夏蜡梅叶片叶绿素相对含量

Fig. 3 Relative content of chlorophyll in the leaves of *Sinocalycanthus chinensis* seedlings in differential simulating warming treatments

数据为平均数±标准误差, 不同字母表示差异达 5% 显著水平

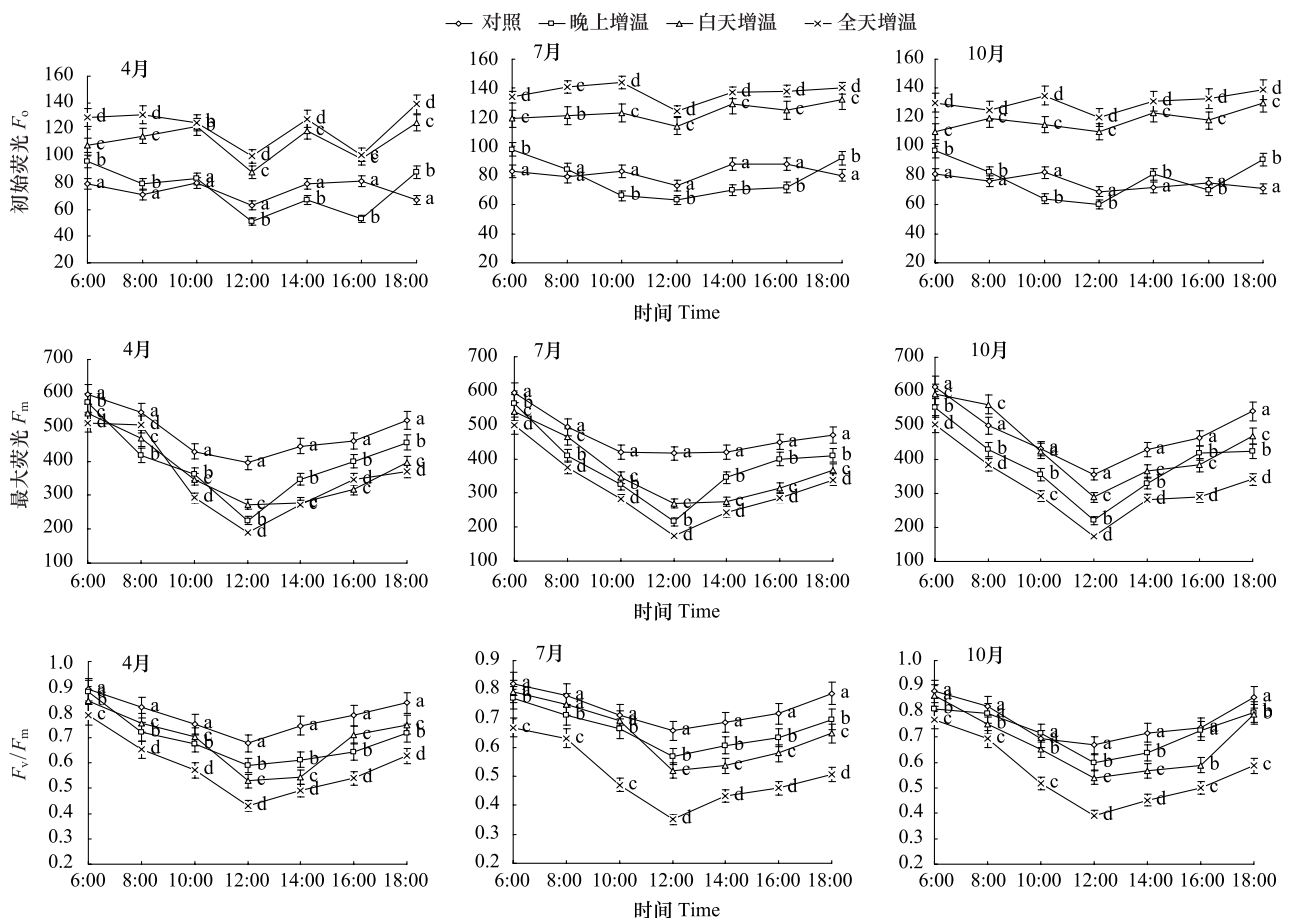


图 4 不同增温处理夏蜡梅叶绿素荧光参数 F_o 、 F_m 和 F_v/F_m 日变化

Fig. 4 The diurnal variations of F_o , F_m and F_v/F_m in the leaves of *Sinocalycanthus chinensis* seedlings in differential simulating warming treatments

数据为平均数±标准误差, 不同字母表示差异达 5% 显著水平

上增温显著高于对照 ($P<0.05$);而在 10:00 则对照显著高于晚上增温 ($P<0.05$)。3 种增温处理的 F_v 在各个时间段均以全天增温最高、白天增温次之、晚上增温最低,除 4 月的 10:00 与 16:00 全天增温与白天增温差异不显著 ($P>0.05$) 外,其他各时间段 3 种增温处理间均存在显著差异 ($P<0.05$)。总体上不同增温处理及对照的 F_v 日变化在 3 个季节均在 12:00 出现最低值。

3 种增温处理的夏蜡梅叶片 F_m 日变化见图 4,在 3 个季节中,晚上增温、全天增温各时间段的 F_m 均显著低于对照 ($P<0.05$);白天增温的 F_m 除 10 月的 8:00 与显著高于对照 ($P<0.05$)、10 月的 10:00 与对照差异不显著外,其它各时间段也显著低于对照 ($P<0.05$)。3 种增温处理中,晚上增温和白天增温之间各有高低,除 4 月 8:00、14:00、16:00 外,两者均显著高于全天增温 ($P<0.05$); F_m 日变化均成“V”字形,在 12:00 达到最小值,其中对照变化较为平缓,全天增温变化幅度较大。

3 种增温处理的夏蜡梅叶片的 F_v/F_m 变化趋势见图 4,在 3 个季节中,均以对照的 F_v/F_m 最高,其中全天增温的 F_v/F_m 在各个时间段均显著低于对照 ($P<0.05$);白天增温除 7 月的 6:00、8:00、10:00、10 月的 6:00 与对照差异不显著 ($P>0.05$) 外,其它时间段均显著低于对照 ($P<0.05$);晚上增温除 4 月的 6:00、10 月的 8:00、10:00、16:00 与对照差异不显著 ($P>0.05$) 外,其它时间段均显著低于对照 ($P<0.05$)。3 种增温处理中晚上增温和白天增温之间各有高低,但两者均显著高于全天增温 ($P<0.05$)。3 个季节 F_v/F_m 日变化趋势呈“V”字形,在 12:00 降到最低点。全天增温的 F_v/F_m 值均在 0.8 以下(图 4)。

2.5 不同增温处理对夏蜡梅生长的影响

3 种增温处理的夏蜡梅在 10 月的形态及生物量如表 2 所示,增温处理后的株高、基径、植株生物量均显著高于对照 ($P<0.05$)。3 种增温处理之间,株高、植株生物量表现为白天增温>全天增温>晚上增温,它们之间差异显著 ($P<0.05$);基径在增温处理之间无显著差异 ($P>0.05$)。

表 2 不同增温处理夏蜡梅形态及生物量

Table 2 The morphology and biomass of *S. chinensis* by different warming treatment

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	基径 Basal diameter/cm	植株生物量 Plant biomass per hill/g
对照 (CK) comparison	17.20±0.34a	0.412±0.0075a	3.3133±0.0525a
晚上增温 Night-warming	20.20±0.73b	0.612±0.0055b	3.8634±0.0272b
白天增温 Day-warming	26.98±0.49c	0.623±0.0061b	5.3464±0.0808c
全天增温 Daily-warming	23.90±0.24d	0.616±0.0059b	4.6131±0.0402d

数据为平均数±标准误差,不同字母表示差异达 5% 显著水平

3 讨论

温度是影响植物光合生理生态最重要的环境因子之一,温度的变化不仅影响植物的光合作用,而且还通过其他的生理过程来改变光合作用^[20]。通常增温会促进植物的生理活动和表现^[21]。本研究也发现类似的结果,在不同增温情境下,夏蜡梅具有相似的光合生理响应:即在 3 个生长季节中,晚上、白天、全天增温的夏蜡梅净光合速率(A_{net})、最大净光合速率(A_{max})、气孔导度(G_s)、暗呼吸速率(R_d)均高于对照,而胞间 CO_2 浓度(C_i)却低于对照。因光合作用属酶促反应,当环境温度低于植物光合的最适温度时,白天增温提高了光合作用相关酶的活性,增强了叶肉细胞的光合作用能力,使得 C_i 降低,进而促进了气孔的开放, G_s 提高,有利于 CO_2 扩散到叶片内,为光合作用提供更多的原料,使夏蜡梅的光合速率加快。而晚上增温对夏蜡梅光合速率的影响与晚上增温导致 R_d 增加有关。Turnbull 等^[22] 证明美洲黑杨(*Populus deltoids*) 叶片晚上增温白天的光合能力会升高。晚上温度升高可以提高叶片的暗呼吸速率,从而导致叶片的碳水化合物含量下降,从而驱动白天叶片有更高的光合速率。赵平等^[23] 也发现晚上增温对荫香(*Cinnamomum burmanni*) 叶片白天的光合速率有显著影响。而全天温度升高导致叶片光合作用能力的增高与白天增温导致的光合速率与晚上增温导致的呼吸速率的提高均有关,即全天温度升高可能同时提高光合速率和呼吸速率,二者又可以相互促进^[24]。本研究还发现在 3 个季节中,白天增温、晚上增温与全天增温 3 种情境下,夏蜡梅的 A_{net} 、 A_{max} 均以白天增温最

高。白天由于光照充足,温度升高可增加 Rubisco 酶的含量和活性,且为其光合作用提供更为优越的环境条件^[24],因此其 A_{net} 、 A_{max} 比其它二种增温方式要高。当然,光合作用是复杂的生理过程,3 种增温情境下光合能力的不同与叶片对光的适应、利用和响应能力的不同有关。

植物的光响应曲线不仅能反映出植物对光强的不同需求特性,也能间接地体现植物在不同时段光合能力上的差异。光饱和点(LSP)代表了植物光合作用对光辐射强度所要求的上限,反映了对强光的利用能力。本研究中,不同增温处理的 LSP 在 3 个生长季节均显著高于对照,温度是决定光合作用暗反应的因素之一,温度升高时,暗反应产生的三碳化合物增多,需要的光反应中由水的光解产生的还原性氢多,所以光饱和点升高。在 3 种增温处理中,白天增温的光饱和点最高,说明白天增温处理夏蜡梅对强光的利用能力最强,提高了叶片光能利用率以及净光合速率。AQY 是植物光合作用对光的利用效率^[25]。本实验中,在 3 个生长季节里白天增温处理下的 AQY 显著高于对照,4 月、10 月全天增温、晚上增温的 AQY 也显著高于对照,总体上增温处理下,夏蜡梅捕获光子用于光合作用的能力得到了增强。其他类似的研究也有相同的报道^[24,26]。温度升高往往能增加植物的光补偿点(LCP)^[27-28],本试验得出的结果是白天增温能增加夏蜡梅的光补偿点,说明在白天增温处理下,夏蜡梅对弱光的利用能力减弱。

植物进行光合作用的能量来源主要是光合色素捕获的光能,所以叶绿素含量的高低与植物的光合功能关系密切^[20]。已有的研究表明,增温通过增加叶片的光合色素含量,促进幼苗的光合过程和生长^[29]。Aiken 和 Smucker^[30]研究指出,植物根系在更适宜的温度条件下将合成并转移更多的细胞分裂素到叶片中,以促进植物光合色素的合成。在本研究中,白天增温和晚上增温使夏蜡梅的相对叶绿素含量显著增加,且白天增温叶绿素相对含量显著高于晚上增温、全天增温及对照,表明白天增温处理给夏蜡梅光合色素合成提供了一个更优化的环境温度,从而促进了植物的光合作用能力的提高。

叶绿素荧光与光合作用效率密切相关,任何环境因素对光合作用的影响都可以通过叶绿素荧光反映出来。 F_v/F_m 是 PS II 最大光化学量子产量,反映 PS II 反应中心内禀光能转换效率或最大 PS II 的光能转换效率,它是研究植物对逆境响应的重要生理指标,用来度量 PS II 原初光能转换效率,常被作为判断植物是否发生抑制的标准之一,是研究植物受胁迫的理想参数^[31]。在没有环境胁迫的条件下,植物暗适应后的 F_v/F_m 通常在 0.8 以上^[32-33]。本研究中,不同处理下的夏蜡梅的 F_v/F_m 日变化均呈“V”字型,表明在强光、高温的中午, F_v/F_m 下降,而下午随光强减弱, F_v/F_m 的值逐渐回升到接近或略高于早晨水平。这种 PS II 的功能的暂时下调是避免中午过大光强伤害的一种适应方式。其中,对照组的夏蜡梅的 F_v/F_m 在 0.8 附近,且在下午回升至 0.8 左右;而白天增温、晚上增温与全天增温处理下的夏蜡梅的 F_v/F_m 均显著低于对照,在 12:00 和 14:00 时,三者之间存在显著性差异,以白天增温最高,晚上增温次之,全天增温最低。这表明增温促进植物通过热耗散的光能也随之增加,从而能在一定程度上提高植物防御光破坏的能力^[34]。全天增温处理下,夏蜡梅受高温胁迫程度比较严重, F_o 值均显著上升, F_m 和 F_v/F_m 值显著下降, F_v/F_m 值在 18:00 时不可回复到 0.8,这表明夏蜡梅的 PS II 反应中心受到了不可逆的伤害。

从以往的研究可看出,对大多数温带和北方针叶树种而言,在水分和养分充足的情况下,增温通常都会促进植物的生长和生物量的累积^[35]。本研究表明,增温处理下夏蜡梅株高、基径、植株生物量均显著高于对照,进一步说明温度升高促进了植物的光合作用,增加了光合产物的积累,加快了植物的生长。3 种增温处理下,株高、植株生物量以白天增温最高,这是由于白天温度升高,光合速率增大;而晚上温度下降,呼吸速率降低,因而有利于物质的积累,促进了夏蜡梅生长。

4 结论

温度作为重要的生态因子之一,对植物的生长和发育起着至关重要的作用。在 3 个生长季节中,不同增温处理均提高了夏蜡梅的光合作用能力,促进了有机物的积累,其株高、基径、植株生物量均显著高于对照。3 种增温处理中,夏蜡梅在 3 个生长季节的 A_{net} 、 A_{max} 、株高、植株生物量均以白天增温最大,表明白天增温下夏蜡梅的光合作用能力最强,有机物积累最多,植物生长最快。这与白天增温下夏蜡梅具有较高的叶绿素含量、

对强光具有较强的适应能力以及较低程度的光胁迫等因素有关。植物的光合作用与植物的生长发育及后代的适应性密切相关,有关不同增温情境对夏蜡梅生长影响的研究正在进行中,以进一步探讨全球变暖背景下濒危植物夏蜡梅的响应机制。

References:

- [1] Usami T, Lee J, Oikawa T. Interactive effects of increased temperature and CO₂ on the growth of *Quercus myrsinaefolia* saplings. *Plant, Cell and Environment*, 2001, 24(10): 1007-1019.
- [2] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). *Climate Change 2007: Synthesis Report. Summary for Policymakers*. [2010-1-29]. <http://www.ipcc.ch>.
- [3] Usami T, Lee J, Oikawa T. Interactive effects of increased temperature and CO₂ on the growth of *Quercus myrsinaefolia* saplings. *Plant, Cell and Environment*, 2001, 24, 1007-1019.
- [4] Harvey L D D. Warm days, hot nights. *Nature*, 1995, 377(6544): 15-16.
- [5] Easterling D R, Horton B, Jones P D, Peterson T C, Karl T R, Parker D E, Salinger M J, Razuvayev V, Plummer N, Jamason P, Folland C K. Maximum and minimum temperature trends for globe. *Science*, 1997, 277(5324): 364-367.
- [6] Niu S L, Wan S Q. Warming changes plant competitive hierarchy in a temperate steppe in northern China. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 1(2): 103-110.
- [7] Williams A L, Wills K E, Janes J K, Vander School J K, Newton P C D, Hovenden M J. Warming and free-air CO₂ enrichment alter demographics in four co-occurring grassland species. *New Phytologist*, 2007, 176(2): 365-374.
- [8] Verlinden M, Nijs I. Alien plant species favoured over congeneric natives under experimental climate warming in temperate Belgian climate. *Biological Invasions*, 2010, 12(8): 2777-2787.
- [9] Fu L G, Jin J M. *Chinese protection plant red book*. Beijing: Science Press, 1992: 196-197.
- [10] Zhang H W, Weng D M, Xu R Z. Study on ecological biological properties of *Sinocalycanthus chinensis*. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 1997, 17(1): 15-17.
- [11] Zhang W B, Jin Z X. Flowering phenology and pollination success of an endangered plant *Sinocalycanthus chinensis*. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 4037-4046.
- [12] Ma J E, Jin Z X, Zhang W B. The diurnal changes of photosynthesis in the endangered plant *Sinocalycanthus chinensis* and its accompanying plants. *Bulletin of Botanical Research*, 2007, 27(6): 708-714.
- [13] Li J M, Jin Z X. High genetic differentiation revealed by RAPD analysis of narrowly endemic *Sinocalycanthus chinensis* Cheng et S. Y. Chang, an endangered species of China. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2006, 34(10): 725-735.
- [14] Dong W J, Deng A X, Zhang B, Tian Y L, Chen J, Yang F, Zhang W J. An experimental study on the effects of different diurnal warming regimes on single cropping rice with Free Air Temperature Increased (FATI) facility. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(8): 2169-2177.
- [15] Tian Y L, Chen J, Deng A X, Zheng J C, Zhang W J. Effects of asymmetric warming on the growth characteristics and yield components of winter wheat under free air temperature increased. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(3): 681-686.
- [16] Huo C F, Sun H L, Wang Z Q, Fan Z Q, Zhao X M. Effects of light intensity and nitrogen supply on photosynthetic characters of *Fraxinus mandshurica* seedlings. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(8): 1255-1261.
- [17] Li P P, Chen X, Fu W G, Wu Y Y, Wu C D. Diurnal change of *Phalaris arundinacea* photosynthetic characteristics and its relations with environmental factors. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(10): 1157-1160.
- [18] Liu H, Yu S Q, Jiang H, Fang J B. Chlorophyll fluorescence of *Carya cathayensis* with simulated acid rain. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2009, 26(1): 32-37.
- [19] Zhong Q L, Cheng D L, Hu S Z, He L Z, Tang C C, Wen Y X, Qiu J F, Li X H. Chlorophyll content and net photosynthetic rate of *Machilus pauhoi* and *M. leptophylla*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(2): 271-276.
- [20] Li H J, Wu Y H, Zhang Z X, Liu P, Zhang D, Zheng C H, Huang B W, Liu J L, Zhang J Y. Effect of temperature stress on photosynthetic physioecological characteristic of wood plants. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2009, 37(9): 39-42.
- [21] Havranek W M, Tranquillini W. Physiological processes during winter dormancy and their ecological significance // Smith W K, Hinckley T M, eds. *Ecophysiology of Coniferous Forests*. San Diego: Academic Press, 1995: 95-124.
- [22] Turnbull M H, Murthy R, Griffin K L. The relative impacts of daytime and night-time warming on photosynthetic capacity in *Populus deltoides*. *Plant, Cell and Environment*, 2002, 25(12): 1729-1737.
- [23] Zhao P, Sun G C, Cai X A, Rao X Q, Zeng X P. Night-time warming increases photosynthetic capacity of sapling leaf of *Cinnamomum burmanni*

- grown with different nitrogen supplies. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(10): 2703-2708.
- [24] Xu Z F, Hu T X, Zhang L, Zhang Y B, Xian J R, Wang K Y. Short-term gas exchange responses of *Betula utilis* to simulated global warming in a timberline ecotone, eastern Tibetan Plateau, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(3): 263-270.
- [25] Farquhar G D, Von Caemmerer S, Berry J A. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta*, 1980, 149(1): 78-90.
- [26] Saxe H, Cannell M G R, Johnsen Ø, Ryan M G, Vourlitis G. Tree and forest functioning in response to global warming. *New Phytologist*, 2001, 149(3): 369-399.
- [27] Wang K Y, Kellomäki S, Laitinen M. Effects of needle age, long-term temperature and CO₂ treatments on the photosynthesis of *Scots pine*. *Tree Physiology*, 1995, 15(4): 211-218.
- [28] Zhao C Z, Liu Q. Growth and photosynthetic responses of two coniferous species to experimental warming and nitrogen fertilization. *Canadian Journal of Forest Research*, 2008, 39(1): 1-11.
- [29] Yin H J, Lai T, Cheng X Y, Jiang X M, Liu Q. Warming effects on growth and physiology of seedlings of *Betula albo-sinensis* and *Abies faxoniana* under two contrasting light conditions in subalpine coniferous forest of western Sichuan, China. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(5): 1072-1083.
- [30] Aiken R M, Smucker A J M. Root system regulation of whole plant growth. *Annual Review of Phytopathology*, 1996, 34: 325-346.
- [31] Maxwell K, Johnson G N. Chlorophyll fluorescence-a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51(345): 659-668.
- [32] Johnson G N, Young A J, Scholes J D, Horton P. The dissipation of excess excitation energy in British plant species. *Plant, Cell and Environment*, 1993, 16(6): 673-679.
- [33] Maxwell K, Johnson G N. Chlorophyll fluorescence-a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51(345): 659-668.
- [34] Shi F S, Wu N, Wu Y, Wang Q. Effect of simulated temperature enhancement on growth and photosynthesis of *Deschampsia caespitosa* and *Thlaspi arvense* in northwestern Sichuan, China. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2009, 15(6): 750-755.
- [35] Danby R K, Hik D S. Responses of white spruce (*Picea glauca*) to experimental warming at a subarctic alpine treeline. *Global Change Biology*, 2007, 13(2): 437-451.

参考文献:

- [9] 傅立国, 金鉴明. 中国保护植物红皮书. 北京: 科学出版社, 1992: 196-197.
- [10] 张宏伟, 翁东明, 徐荣章. 夏蜡梅生态生物学特性的研究. *浙江林业科技*, 1997, 17(1): 15-17.
- [11] 张文标, 金则新. 濒危植物夏蜡梅(*Sinocalycanthus chinensis*)的开花物候与传粉成功. *生态学报*, 2008, 28(8): 4037-4046.
- [12] 马金娥, 金则新, 张文标. 濒危植物夏蜡梅及其伴生植物的光合日进程. *植物研究*, 2007, 27(6): 708-714.
- [14] 董文军, 邓艾兴, 张彬, 田云录, 陈金, 杨飞, 张卫建. 开放式昼夜不同增温对单季稻影响的试验研究. *生态学报*, 2011, 31(8): 2169-2177.
- [15] 田云录, 陈金, 邓艾兴, 郑建初, 张卫健. 开放式增温下非对称性增温对冬小麦生长特征及产量构成的影响. *应用生态学报*, 2011, 22(3): 681-686.
- [16] 霍常富, 孙海龙, 王政权, 范志强, 赵晓敏. 光照和氮营养对水曲柳苗木光合特性的影响. *生态学杂志*, 2008, 27(8): 1255-1261.
- [17] 李萍萍, 陈歆, 付为国, 吴沿友, 吴春笃. 藜草光合作用日变化及其与环境因子的关系. *生态学杂志*, 2006, 25(10): 1157-1160.
- [18] 刘昊, 余树全, 江洪, 方江保. 模拟酸雨对山核桃叶绿素荧光参数、叶绿素和生长的影响. *浙江林学院学报*, 2009, 26(1): 32-37.
- [19] 钟全林, 程栋梁, 胡松竹, 贺利中, 唐承财, 文雅香, 邱剑飞, 李秀花. 刨花楠和华东润楠叶绿素含量分异特征及与净光合速率的关系. *应用生态学报*, 2009, 20(2): 271-276.
- [20] 李洪军, 吴玉环, 张志祥, 刘鹏, 张丹, 郑春浩, 黄帮文, 刘菊莲, 张家银. 温度变化对木本植物光合生理生态的影响. *贵州农业科学*, 2009, 37(9): 39-42.
- [23] 赵平, 孙谷畴, 蔡锡安, 饶兴权, 曾小平. 夜间变暖提高荫香叶片的光合能力. *生态学报*, 2005, 25(10): 2703-2708.
- [24] 徐振锋, 胡庭兴, 张力, 张远彬, 鲜骏仁, 王开运. 青藏高原东缘林线交错带糙皮桦幼苗光合特性对模拟增温的短期响应. *植物生态学报*, 2010, 34(3): 263-270.
- [29] 尹华军, 赖挺, 程新颖, 蒋先敏, 刘庆. 增温对川西亚高山针叶林内不同光环境下红桦和岷江冷杉幼苗生长和生理的影响. *植物生态学报*, 2008, 32(5): 1072-1083.
- [34] 石福孙, 吴宁, 吴彦, 王乾. 模拟增温对川西北高寒草甸两种典型植物生长和光合特征的影响. *应用与环境生物学报*. 2009, 15(6): 750-755.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 20 October, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Characteristics of nitrous oxide (N ₂ O) emission from a headstream in the upper Taihu Lake Basin	YUAN Shufang, WANG Weidong (6279)
Nutrient dynamics of the litters during standing and sediment surface decay in the Min River estuarine marsh	ZENG Congsheng, ZHANG Linhai, WANG Tian'e, et al (6289)
Diversity and distribution of endophytic bacteria isolated from <i>Caragana microphylla</i> grown in desert grassland in Ningxia	DAI Jinxia, WANG Yujiong (6300)
Spatial distribution of <i>Trabala vishnou gigantina</i> Yang pupae in Shaanxi Province, China	ZHANG Yiqiao, ZONG Shixiang, LIU Yonghua, et al (6308)
Effects of drought stress on <i>Cyclobalanopsis glauca</i> seedlings under simulating karst environment condition	ZHANG Zhongfeng, YOU Yeming, HUANG Yuqing, et al (6318)
Ecosystem diversity in Jinggangshan area, China	CHEN Baoming, LIN Zhengguang, LI Zhen, et al (6326)
Niche dynamics during restoration process for the dominant tree species in montane mixed evergreen and deciduous broadleaved forests at Mulinzi of southwest Hubei	TANG Jingming, AI Xuenru, YI Yongmei, et al (6334)
Effects of different day/night warming on the photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of <i>Sinocalycanthus chinensis</i> seedlings	XU Xingli, JIN Zexin, HE Weiming, et al (6343)
The effect of simulated chronic high wind on the phenotype of <i>Salsola arbuscula</i>	NAN Jiang, ZHAO Xiaoying, YU Baofeng (6354)
Responses of N and P stoichiometry on mulching management in the stand of <i>Phyllostachys praecox</i>	GUO Ziwu, CHEN Shuanglin, YANG Qingping, et al (6361)
Tree-ring-based reconstruction of the temperature variations in February and March since 1890 AD in southern Jiangxi Province, China	CAO Shoujin, CAO Fuxiang, XIANG Wenhua (6369)
Diel variations and seasonal dynamics of soil respirations in subalpine meadow in western Sichuan Province, China	HU Zongda, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al (6376)
Effects of fire disturbance on litter mass and soil carbon storage of <i>Betula platyphylla</i> and <i>Larix gmelinii</i> - <i>Carex schmidtii</i> swamps in the Xiaoxing'an Mountains of Northeast China	ZHOU Wenchang, MU Changcheng, LIU Xia, et al (6387)
Variance analysis of soil carbon sequestration under three typical forest lands converted from farmland in a Loess Hilly Area	TONG Xiaogang, HAN Xinhui, WU Faqi, et al (6396)
Soil-property and plant diversity of highway rocky slopes	PAN Shulin, GU Bin, LI Jiaxiang (6404)
Effects of slope position on soil microbial biomass of <i>Quercus liaotungensis</i> forest in Dongling Mountain	ZHANG Di, ZHANG Yuxin, QU Laiye, et al (6412)
Responses of water quality to landscape pattern in Taihu watershed: case study of 3 typical streams in Yixing	WANG Ying, ZHANG Jianfeng, CHEN Guangcai, et al (6422)
Study on the fairness of resource-environment system of Jiangxi Province based on different methods of Gini coefficient	HUANG Heping (6431)
Simulation of the spatial pattern of land use change in China: the case of planned development scenario	SUN Xiaofang, YUE Tianxiang, FAN Zemeng (6440)
Arable land change dynamics and their driving forces for the major countries of the world	ZHAO Wenwu (6452)
Denitrification characteristics of an aerobic denitrifying bacterium <i>Deffluibacter lusatiensis</i> str. DN7 using different sources of nitrogen	XIAO Jibo, JIANG Huixia, CHU Shuyi (6463)
Study on sustainable development in nanjing based on ecological footprint model	ZHOU Jing, GUAN Weihua (6471)
Applying input-output analysis method for calculation of water footprint and virtual water trade in Gansu Province	CAI Zhenhua, SHEN Laixin, LIU Junguo, et al (6481)
Correlation analysis of spatial variability of Soil available nitrogen and household nitrogen inputs at Pujiang County	FANG Bin, WU Jinfeng, NI Shaoxiang (6489)
Characteristics of the fish assemblages in the intertidal salt marsh zone and adjacent mudflat in the Yangtze Estuary	TONG Chunfu (6501)
A comparison study on the secondary production of macrobenthos in different wetland habitats in Shenzhen Bay	ZHOU Fufang, SHI Xiuhua, QIU Guoyu, et al (6511)
Regurgitant from <i>Orgyia ericae</i> Germar induces calcium influx and accumulation of hydrogen peroxide in <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> (Maxim. ex Kom.) Cheng f. cells	GAO Haibo, ZHANG Shujing, SHEN Yingbai (6520)
Behavior characteristics and habitat adaptabilities of the endangered butterfly <i>Teinopalpus aureus</i> in Mount Dayao	ZENG Juping, ZHOU Shanyi, DING Jian, et al (6527)
Community structure and dynamics of fig wasps in syconia of <i>Ficus microcarpa</i> Linn. f. in Fuzhou	WU Wenshan, ZHANG Yanjie, LI Fengyu, et al (6535)
Review and Monograph	
Review and trend of eco-compensation mechanism on river basin	ZHANG Zhiqiang, CHENG Li, SHANG Haiyang, et al (6543)
Definition and research progress of sustainable consumption: from industrial ecology view	LIU Jingru, LIU Ruiquan, YAO Liang (6553)
The estimation and application of the water footprint in industrial processes	JIA Jia, YAN Yan, WANG Chenxing, et al (6558)
Research progress in ecological risk assessment of mining area	PAN Yajing, WANG Yanglin, PENG Jian, et al (6566)
Scientific Note	
Litter amount and its dynamic change of four typical plant community under the fenced condition in desert steppe	LI Xuebin, CHEN Lin, ZHANG Shuoxin, et al (6575)
Effects of planting densities and modes on activities of some enzymes and yield in summer maize	LI Hongqi, LIN Haiming, LIANG Shurong, et al (6584)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,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,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 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 20 期 (2012 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 20 (October, 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:1000717	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:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.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