

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

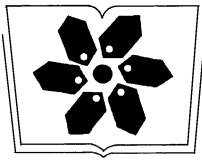
Acta Ecologica Sinica



第31卷 第24期 Vol.31 No.24 **2011**

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 31 卷 第 24 期

2011 年 12 月 (半月刊)

目 次

柑橘黄龙病株不同部位内生细菌群落结构的多样性	刘 波, 郑雪芳, 孙大光, 等 (7325)
小兴安岭红松径向生长对未来气候变化的响应	尹 红, 王 靖, 刘洪滨, 等 (7343)
污水地下渗透系统脱氮效果及动力学过程	李海波, 李英华, 孙铁珩, 等 (7351)
基于生态系统服务的海南岛自然保护区体系规划	肖 燧, 陈圣宾, 张 路, 等 (7357)
羌塘地区草食性野生动物的生态服务价值评估——以藏羚羊为例	鲁春霞, 刘 铭, 冯 跃, 等 (7370)
湖北省潜江市生态系统服务功能价值空间特征	许倍慎, 周 勇, 徐 理, 等 (7379)
滇西北纳帕海湿地景观格局变化及其对土壤碳库的影响	李宁云, 袁 华, 田 昆, 等 (7388)
基于连接性考虑的湿地生态系统保护多预案分析——以黄淮海地区为例	宋晓龙, 李晓文, 张明祥, 等 (7397)
青藏高原高寒草甸生态系统碳增汇潜力	韩道瑞, 曹广民, 郭小伟, 等 (7408)
影响黄土高原地物光谱反射率的非均匀因子及反照率参数化研究	张 杰, 张 强 (7418)
基于 GIS 的下辽河平原地下水生态敏感性评价	孙才志, 杨 磊, 胡冬玲 (7428)
厦门市土地利用变化下的生态敏感性	黄 静, 崔胜辉, 李方一, 等 (7441)
我国保护地生态旅游发展现状调查分析	钟林生, 王 婧 (7450)
黄腹山鹧鸪稳定的配偶关系限制雄性欺骗者	褚福印, 唐思贤, 潘虎君, 等 (7458)
食物蛋白含量和限食对雌性东方田鼠生理特性的影响	朱俊霞, 王 勇, 张美文, 等 (7464)
具有捕食正效应的捕食-食饵系统	祁 君, 苏志勇 (7471)
桑科中 4 种桑天牛寄主植物的挥发物成分研究	张 琳, WANG Baode, 许志春 (7479)
栗山天牛成虫羽化与温湿度的关系	杨忠岐, 王小艺, 王 宝, 等 (7486)
人工巢箱条件下杂色山雀的巢位选择及其对繁殖成功率的影响	李 乐, 万冬梅, 刘 鹤, 等 (7492)
鸭绿江口湿地鸕鹚类停歇地的生物生态研究	宋 伦, 杨国军, 李 爱, 等 (7500)
锡林郭勒草原区气温的时空变化特征	王海梅, 李政海, 乌 兰, 等 (7511)
UV-B 辐射胁迫对杨桐幼苗生长及光合生理的影响	兰春剑, 江 洪, 黄梅玲, 等 (7516)
小麦和玉米叶片光合-蒸腾日变化耦合机理	赵风华, 王秋凤, 王建林, 等 (7526)
利用稳定氢氧同位素定量区分白刺水分来源的方法比较	巩国丽, 陈 辉, 段德玉 (7533)
2010 年冬季寒冷天气对闽江口 3 种红树植物幼苗的影响	雍石泉, 仝 川, 庄晨辉, 等 (7542)
人参皂苷与生态因子的相关性	谢彩香, 索风梅, 贾光林, 等 (7551)
苈对黑麦草根茎几种低分子量有机分泌物的影响	谢晓梅, 廖 敏, 杨 静 (7564)
盐碱地柠条根围土中黑曲霉的分离鉴定及解磷能力测定	张丽珍, 樊晶晶, 牛 伟, 等 (7571)
不同近地表土壤水文条件下雨滴打击对黑土坡面养分流失的影响	安 娟, 郑粉莉, 李桂芳, 等 (7579)
煤电生产系统的能值分析及新指标体系的构建	楼 波, 徐 毅, 林振冠 (7591)
专论与综述	
东南亚高山森林植被变化对流域产水量的影响	张远东, 刘世荣, 顾峰雪 (7601)
干旱荒漠区斑块状植被空间格局及其防沙效应研究进展	胡广录, 赵文智, 王 岗 (7609)
利用农业生物多样性持续控制有害生物	高 东, 何霞红, 朱书生 (7617)
研究简报	
洪湖湿地生态系统土壤有机碳及养分含量特征	刘 刚, 沈守云, 闫文德, 等 (7625)
氯氰菊酯和溴氰菊酯对萼花臂尾轮虫生殖的影响	黄 林, 刘昌利, 韦传宝, 等 (7632)
学术信息与动态	
SCOPE-ZHONGYU 环境论坛(2011)暨环境科学与可持续发展国际会议成功举办	(7639)
《生态学报》3 篇文章入选 2010 年中国百篇最具影响国内学术论文 等	(I)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 316 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 36 * 2011-12	



封面图说: 泥炭藓大多生长在多水、寒冷和贫营养的生境, 同时有少数的草本、矮小灌木也生长在其中, 但优势植物仍然是泥炭藓属植物。泥炭藓植物植株死后逐渐堆积形成泥炭。经过若干年的生长演变, 形成了大片的泥炭藓沼泽。这种沼泽地有黑黑的泥炭, 绿绿的草甸和亮晶晶的斑块状水面相间相衬, 远远看去就像大地铺上了锦绣地毯一样美丽壮观。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

兰春剑, 江洪, 黄梅玲, 胡莉. UV-B 辐射胁迫对杨桐幼苗生长及光合生理的影响. 生态学报, 2011, 31(24): 7516-7525.

Lan C J, Jiang H, Huang M L, Hu L. The growth and photosynthetic responses of *Cleyera japonica* Thunb. seedlings to UV-B radiation stress. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(24): 7516-7525.

UV-B 辐射胁迫对杨桐幼苗生长及光合生理的影响

兰春剑¹, 江 洪^{1,2,*}, 黄梅玲², 胡 莉¹

(1. 浙江农林大学浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 杭州 311300; 2. 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093)

摘要:通过对 UV-B 辐射胁迫下亚热带典型木本杨桐幼苗的生长及光合生理的研究, 探讨植物对于 UV-B 辐射胁迫的生理响应及适应性机理, 进而揭示 UV-B 辐射变化对亚热带森林树种的影响。实验设置 UV-B 辐射滤光组、自然光对照组以及辐射增强组, 选择亚热带典型树种杨桐(*Cleyera japonica* Thunb.) 幼苗为实验材料。研究结果表明: (1) 增强 UV-B 辐射会降低杨桐幼苗的叶绿素含量, 而降低辐射则会显著促进叶绿素的增加, 且这种胁迫在时间上具有积累性。(2) 增强或降低辐射强度都会抑制杨桐地径的生长, 增强辐射会产生更显著的抑制; 降低辐射强度会对杨桐幼苗的株高生长产生促进作用, 反之, 则会抑制其生长。3 个测定期数据综合分析显示随着处理时间的加长, 这种胁迫作用有减小的趋势。(3) 对光响应曲线的分析表明相对于自然光条件下的 UV-B 辐射, 降低其强度对杨桐幼苗光合作用有显著的促进作用, 反之则会抑制, 不过抑制作用并不显著; 对于光合特征参数的分析表明增强或降低 UV-B 辐射会显著降低杨桐幼苗的光饱和点(*LSP*)和光补偿点(*LCP*), 而对最大净光合速率(*A_{max}*)、表观光合量子效率(*AQY*)、暗呼吸速率(*R_d*)影响均不显著, 表明辐射胁迫对杨桐幼苗利用光能的效率影响不大, 从而也并未对杨桐的光合作用产生显著性的伤害, 但是由于森林树种的多年生特性, 这种影响将是积累性的或延迟的, UV-B 所造成的光合作用或光能利用率的微小变化都可能会积累成长期影响。因此, 对森林树种进行长期研究是必要的。

关键词:UV-B 辐射胁迫; 木本植物; 相对叶绿素含量; 生长量; 光合特征

The growth and photosynthetic responses of *Cleyera japonica* Thunb. seedlings to UV-B radiation stress

LAN Chunjian¹, JIANG Hong^{1,2,*}, HUANG Meiling², HU Li¹

¹ Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou 311300, China

² International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract: In order to reveal the impact of the UV-B radiation on the woody plants in subtropical regions of China, the paper researches the effects of UV-B radiation stress on photosynthetic and physiological characters of typical woody plant *Cleyera japonica* Thunb. seedlings. Blocked UV-B group (BU), Solar UV group (CK) and enhanced UV-B group (EU) were set for field experiment in which *C. japonica* seedlings were selected as experimental material. Measurements were carried out from August 2007 to July 2009 (base data was from August 2007). Results showed a great variety of UV-B effects on photosynthesis, morphology and growth, which are that: (1) The decreased UV-B radiation significantly increased the amount of the chlorophyll of *C. japonica* ($P < 0.05$), while the enhanced UV-B radiation reduced the chlorophyll content. Furthermore, the parameter comparison of three growth seasons revealed that more and more significant reduction of the chlorophyll content occurred under enhanced UV-B radiation over time, which could be interpreted as a cumulative UV-B

基金项目:科技部重大国际合作项目(20073819); 国家高技术研究发展计划项目(2009AA122001 & 2009AA122005); 科技部重大基础性项目(2007FY110300-08); 国家重点基础研究发展规划项目(2010CB950702, 2010CB428503); 国家自然科学基金项目(40671132); 浙江省重大科技专项(2008C13G2100010)的部分支持

收稿日期: 2010-12-31; 修订日期: 2011-10-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jianghong_china@hotmail.com

effect on the seedlings and would likely bring a negative effect on the photosynthesis of the seedlings in the long term treatment. (2) Plant height and main stem diameter were measured at the full bloom stage. Both the enhanced and decreased UV-B radiation could inhibited the stem diameter of *C. japonica* seedlings and the former inhibition proved to be more effective than the latter one. The height could be promoted under decreased UV-B radiation, inhibited under enhanced one. The different responses between plant height and stem diameter to UV-B radiation treatment suggests that not only the growth rate but also the internal growth mechanism of *C. japonica* seedlings was changing under the UV-B radiation stress. The parameter comparison of three growth seasons exhibited a tendency to decreased stress on the growth of *C. japonica* seedlings as the treat time went by. UV-B-absorbing compounds, which accumulate to shield plants against harmful UV-B radiation by absorbing UV-B radiation, were the best explanation and most effective self-protective responses of plants to UV-B radiation. (3) Significantly promoted photosynthesis was observed in *C. japonica* seedlings in response to decreased UV-B radiation according to the analysis of light response curves, while the inhibited effect was observed under enhanced UV-B radiation, the inhibition was not significant yet. Analysis of photosynthetic characteristic parameter demonstrated that both the enhanced and decreased UV-B radiation could induced significantly reduction in light saturation point (LSP) and light compensation point (LCP) during the 3-year study period, nevertheless, the scarcely significant changes of the maximum net photosynthetic rate (A_{max}), apparent quantum yield (AQY) and dark respiration rate (R_d) were observed, indicating that UV-B radiation exerted no significant influence on the light use efficiency of the seedlings. In brief, large increases in UV-B radiation were unlikely to have a significant negative effect on the photosynthesis of *C. japonica* seedlings in the short term. As UV-B effects may be cumulative or delayed, and woody plants are long-lived, the relatively small changes in photosynthesis or the light use efficiency which were observed in our study may result in some long-term effects. Therefore, the long-term and multiple-season field study on woody plants is necessary in the future.

Key Words: UV-B radiation stress; woody plant; SPADR; growth; photosynthetic characteristics

20 世纪以来,大气中氟氯烃以及其它氮化物如(N_2O 等)的急剧增加,引起臭氧层的破坏。臭氧层变薄及臭氧空洞的出现,导致到达地面的太阳紫外线辐射增强。研究表明平流层中 O_3 每减少 1%,到达地面的太阳紫外线辐射(UV)就会增加 2%^[1]。其中 UV-B (ultraviolet-B, 280—320 nm) 波段对植物有强烈的生物化学效应^[2],严重影响人类的健康^[3]和各种水生、陆生生态系统的生物过程^[4-5]。

近 30a 来,科学家对太阳辐射中 UV-B 波段对植物生长的影响表现出越来越大的兴趣^[6]。大量基于物种水平的研究表明 UV-B 辐射的增加会造成植物生长、发育、形态结构以及光合能力和 CO_2 同化能力的降低等后果^[7-12]。关于 UV-B 辐射对于细胞结构的影响包括对 DNA、蛋白质和细胞膜结构的破坏以及叶绿体、线粒体数目的降低等^[5, 8, 13]。此外,UV-B 辐射量的变化还可能影响植物的群落演替^[14],UV-B 辐射变化所引起的植物光合和土壤微生物环境的变化还可能影响土壤-植物系统的碳循环进程^[15]。以上结论多来自于对草本植物(多为农作物)和各种隐花植物的研究,对更具有生态意义的多年生木本植物的研究还很少^[16]。

森林生态系统的生产力占到了全球净初级生产力(net primary production, NPP)的 2/3 左右,而农业生态系统只占 11%^[17-18]。从二者的 NPP 全球贡献来说,UV-B 辐射所引起的森林生态系统生产力的变化更有可能对全球生态进程和碳收支产生影响^[19]。因此,确定森林树种对于 UV-B 辐射的响应及其敏感性对于可能引起的陆地生态系统碳收支的变化至关重要。Sullivan 和 Teramura 早在 1992 年就从经济重要性和全球贡献角度指出,在 UV-B 辐射胁迫下对于森林树种进行多季节研究的必要性^[20]。因为不同生长状况和季节植物对 UV-B 辐射胁迫响应是不同的,长期研究可以降低不同生长季和年际变化的影响^[21]。Li Furong 等^[22]对国内外相关研究做了 meta-分析后指出,增补 UV-B 处理后,木本植物的地上部生物量和光合效率都变化不大,UV-B 吸收物质含量显著增加,而这只是少量对木本植物短期研究的结果。关于 UV-B 对森林树种危害的程度和范围的大小需要更多的长期研究来证实。

基于以上分析,本文选取亚热带典型树种杨桐(*Cleyera japonica* Thunb.)作为实验材料,设置 UV-B 辐射滤光、对照、UV-B 辐射增强 3 个处理组,为期 2a(2007 年 8 月到 2009 年 7 月),测定杨桐幼苗的叶绿素含量、生长量、光合生理指标的变化,试图揭示 UV-B 辐射对亚热带典型木本杨桐幼苗的影响。

1 研究材料与方法

1.1 研究地概况

实验地设在浙江省临安市浙江农林大学东湖校区平山实验大棚内,地理位置为 119°44'E,30°16'N,该区属亚热带季风气候,年平均气温 16℃,极端最高气温 41.7℃,极端最低气温-13.3℃,年有效积温 5774℃,年降水量 1350—1500 mm,年日照时数 1774 h,无霜期 235 d。海拔高度在 90 m,土壤为发育于凝灰岩的红壤土类。

1.2 植物材料

杨桐,暖温性树种,常绿灌木或小乔木,隶属山茶科(Theaceae)红淡比属(*Cleyera*)杨桐种,阴性树种,喜潮湿环境,在光合生理特性上,杨桐具有明显的光午休现象^[23]。据吴家胜等人研究,杨桐光补偿点大约在光合有效辐射 $37\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右^[24],表明杨桐苗期具有耐荫特性。杨桐是重要的防火树种之一,同时出口量较大,具有较高的经济价值^[25]。

1.3 实验设计

本实验分为 UV-B 辐射滤光组(Blocked UV-B, BU)、自然光对照组(Solar UV, CK)以及 UV-B 辐射增强组(Enhanced UV-B, EU)3 个处理梯度,选取长势基本一致的 2 年生杨桐幼苗 30 株随机分配到 3 个处理组,每个处理组 10 株,直接栽植于大田(不采用盆栽,以防影响根系生长,导致植株矮化),占地面积约 5 m²,采用大田管理方法进行常规管理,保证水分、养分供应,将除 UV 辐射之外的其它环境因子对 3 个处理组的影响降到最低水平。

BU 组在室外条件下使用 0.125 mm 的聚酯塑料薄膜过滤自然光中的 UV-B 辐射,达到降低 UV-B 辐射强度的目的,雨、雪天除掉薄膜(防止薄膜对自然降水过程造成阻挡)。该处理组 UV-B 辐射强度为对照组的 20%(剂量参考文献^[26]),CK 组幼苗不做特殊处理,使其在自然光照条件下正常生长。

EU 组通过紫外灯管来加大 UV-B 辐射剂量,辐射强度比对照组增加 10%。具体操作是在幼苗上方搭设可调高度的钢架,将紫外灯管悬挂于距幼苗上方 40 cm 处进行照射(钢架和灯管很细,对光照和自然降水的影响可忽略不计)。实验使用上海华德电光源厂生产的 UV-B 灯管(40 W,峰值为 313 nm)。UV-B 灯管光谱大部分属于 UV-B 波段,同时含有少量 UV-A 与 PAR。紫外灯管表面敷有 0.125 mm 醋酸纤维素薄膜,用以滤除 UV-C,透过 UV-B 和 UV-A。每只灯管都配有灯罩(0.15 m × 1.5 m)用以防雨和提供电源。在整个实验过程中,定期调整紫外灯管高度,使灯管与每一株植物顶层高度维持在 40 cm 左右,以保证植株接受相对恒定剂量的 UV-B 辐射。该方法应用广泛^[27],其优点在于设备简单,成本较低,易于维护,克服了室内增强实验中 PAR 和 UV-A 不足的缺点。

EU 组 UV-B 辐射强度用紫外辐射照度计测定(北京师范大学生产,波长峰值 310 nm),每天紫外辐射增强处理的时间段为 8:00—16:00,阴、雨、雪天停止紫外辐射增强处理。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 叶绿素相对含量测定

于 2007 年 8 月(本底实验)、2008 年 7 月、2009 年 5 月和 7 月 4 个时间,选择晴好天气利用便携式叶绿素测定仪 SPAD-502 测定叶片的 SPAD 值,该值代表叶绿素相对含量。3 个处理组分别随机选取 5 株幼苗,每株取 3 片叶子,选取植株的中上部当年生的成熟叶片进行测定。为保证读数的可靠性,对每片叶子等间距读取 10 个 SPAD 数值,取平均值作为该叶片的叶绿素相对含量值加以记录。

1.4.2 生长量指标测定

生长量指标主要包括株高和地径,测量工具为游标卡尺和卷尺(5 m),测定时间为 2007 年 8 月(本底实

验)、2008 年 7 月、2009 年 5 月和 7 月。

1.4.3 光合生理指标测定

在测定时间内选择晴朗天气,利用便携式红外气体分析仪 Li-6400 (Li-cor, USA) 测定光合作用特征参数和光响应曲线,时间为 7:00—11:00,3 个处理梯度下分别随机选择 5 株幼苗,所测叶片的位置与叶绿素含量的测定位置基本相同,共需选择 15 株植物(1 物种×3 处理×5 重复)。

利用便携式红外气体分析仪 Li-6400 (Li-cor, USA) 开路系统在光合有效辐射 (PAR) 为 1000 μmol 光子 $\cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下,测定净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i) 和蒸腾速率 (Tr)。

测定 PAR 范围在 0—2000 μmol 光子 $\cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的叶片净光合速率的光响应曲线,从最高光强 (Photosynthetic photon quanta flux density, PPFD) 开始测定,设置光强梯度:2000、1500、1000、600、300、200、100、80、50、20、0 μmol 光子 $\cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。光强由高到低的设置有助于减少气孔开放和光合诱导所需的平衡时间,每个光强下植物照射 3 min,测定每个光强下的净光合速率。测定时使用仪器自带的红蓝光源,设定叶室温度为 25 $^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 60%。

1.5 数据分析方法

通过光合小助手 Photosyn Assistant 1.12 (英国 Dundee Scientific 公司开发,下载网址: <http://www.scientific.force9.co.uk/>) 进行最大净光合速率 ($A_{\max}$)、光饱和点 (LSP)、光补偿点 (LCP)、表观量子效率 (AQY) 和暗呼吸速率 (R_d) 的拟合,此软件中计算采用的曲线拟合方程为:

$$A = \frac{\phi \cdot Q + A_{\max} - \sqrt{(\phi \cdot A + A_{\max})^2 - 4 \cdot \phi \cdot Q \cdot K \cdot A_{\max}}}{2K} - R_d$$

式中, A 代表光合速率; Q 代表的是光照强度; ϕ 代表表观光合量子效率; K 代表的是光合曲线的曲率,其大小介于 (0,1) 之间。

利用 Excel 软件进行数据的分类汇总,利用 Spss13.0 软件进行数据分析, Sigmaplot10.0 辅助制图,采用单因素方差分析 (One-Way ANOVA) 和 LSD 多重比较方法,分析 UV-B 辐射胁迫下杨桐幼苗相关光合生理指标差异的显著性。在数据分析前,对所有数据进行正态性与齐性检验。

2 实验结果与分析

2.1 UV-B 辐射胁迫对杨桐幼苗叶绿素相对含量的影响

叶绿素相对含量 (SPAD Readings, SPADR) 也称叶色值,无量纲,通过数值的大小来定量描述叶片的绿色度^[28]。姜丽芬^[29], 艾天成^[30]等的研究表明,SPAD 值与叶绿素含量具有显著的相关性,能较好的反映叶绿素含量的变化。从图 1 中可以看出,2008 年 7 月到 2009 年 7 月的 3a 数据,总的规律是 $\text{BU} > \text{CK} > \text{EU}$ 。2008 年 7 月各处理组之间叶绿素含量差异不大,但是随着时间的推移,这种差异在不断增大,到 2009 年 7 月,已到达显著水平,说明 UV-B 辐射胁迫对叶绿素含量的影响在时间上具有积累性。此外,植物的生长发育是一个复杂的系统过程,各个时期对 UVB 的敏感性不同^[31]。至于 2009 年 7 月的叶绿素含量的绝对值偏高这一现象可能是由于夏季是植物生长的高峰期,生理活动和各种代谢活动都比较旺盛,相应的支持高强度的光合作用所需要的叶绿素含量也应很高的缘故。

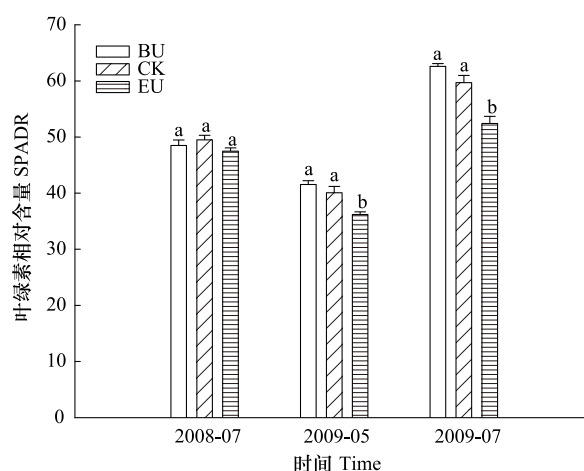


图 1 不同光照条件下杨桐幼苗的叶绿素相对含量 (均值±标准误差)

Fig.1 SPADR of *C. japonica* seedlings under different lighting conditions (mean±SE)

2.2 UV-B 辐射胁迫对杨桐幼苗生长量的影响

图 2 给出了 3 个测量期杨桐幼苗的地径差值与株高差值。由图中可以看出杨桐 3 个测量期地径生长量在 3 个处理梯度间差异显著 ($P < 0.05$), 这表明相对于自然条件下的 UV-B 辐射, 增强或降低其强度都会抑制杨桐地径的生长。至于第 3 期数据 3 个处理间差异的减小可以认为在长期的辐射处理下杨桐幼苗已经产生了一定的抗性。

相对于 UV-B 辐射对地径生长量的影响, 对株高的影响方式则略有差异, 3 个时间段的差值大小排序的总规律为 $BU > CK > EU$, 表明相对于自然光条件下的 UV-B 辐射, 降低其强度会对杨桐幼苗的株高生长产生促进作用, 反之, 则会抑制其生长。

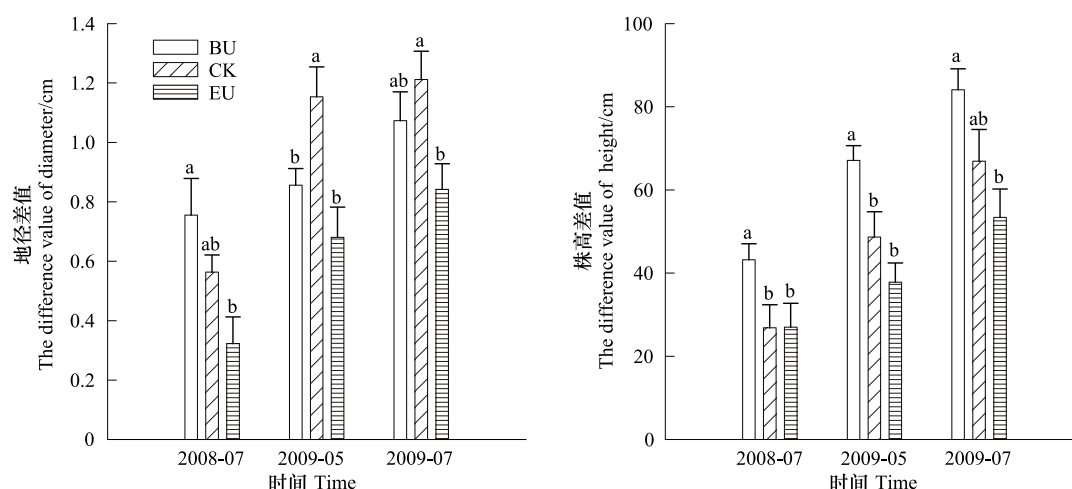


图 2 不同光照条件下杨桐幼苗的地径差值与株高差值(与本底实验)(均值±标准误差)

Fig. 2 The difference value of height and diameter in *C. japonica* seedlings under different lighting conditions (mean±SE)

地径差(株高差)=各测量期测得地径(株高)-2007 年 8 月本底实验测得地径(株高)

2.3 杨桐幼苗对于 UV-B 辐射胁迫的光响应曲线

图 3 给出了杨桐幼苗在 3 个测量期 3 个处理梯度下的光合作用-光响应曲线。由图可以得出, 当光合有效辐射小于 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 区间内, 3 个处理梯度间净光合速率相差不大, 当光合有效辐射大于 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 3 组间净光合速率开始表现出差异, 从大到小为: $BU > CK > EU$, 对照组与增强组差异不显著, 而滤光组则与其他 2 个处理组表现出显著性差异, 表明相对于自然光条件下的 UV-B 辐射, 降低其强度对杨桐幼苗光合作用有显著的促进作用。

2.4 杨桐幼苗光合特征参数对于 UV-B 辐射胁迫的响应

综合 3 个测定期的光合特征参数(表 1)可知, 随着 UV-B 辐射的增加, 杨桐幼苗的最大净光合速率 A_{max} 有下降的趋势, 但是 3 个测定期 A_{max} 在各处理梯度下无显著性差异。同样, 3 个测定期的表观光合量子效率 (AQY) 和暗呼吸速率 (R_d) 在各处理梯度间差异也不显著。但是 3 个测定期的数据都显示, 相对于自然光条件, 加大 UV-B 辐射剂量会降低杨桐幼苗的暗呼吸速率 (R_d)。光补偿点 (LCP) 在各处理梯度间却存在显著性差异, 从大到小为: $BU > CK > EU$ 。光饱和点 (LSP) 在各处理梯度间也存在差异, 但规律不一。

3 讨论

植物的产量和生物量积累在很大程度上取决于叶面积的变化、冠层光合强度和叶绿素水平^[32]。研究结果表明, 增强 UV-B 辐射会降低杨桐幼苗的叶绿素含量, 此结果与侯扶江等增加田间 UV-B 辐射测得结果、师生波等研究不同海拔植物适应性中测得的叶绿素下降结果相似, 但与师生波的另一项对于高山植物麻花艽光合色素的研究相反^[33-35]。植物对外界环境变化的响应是其内部生理生化发生相应变化的结果^[36]。UV-B 辐

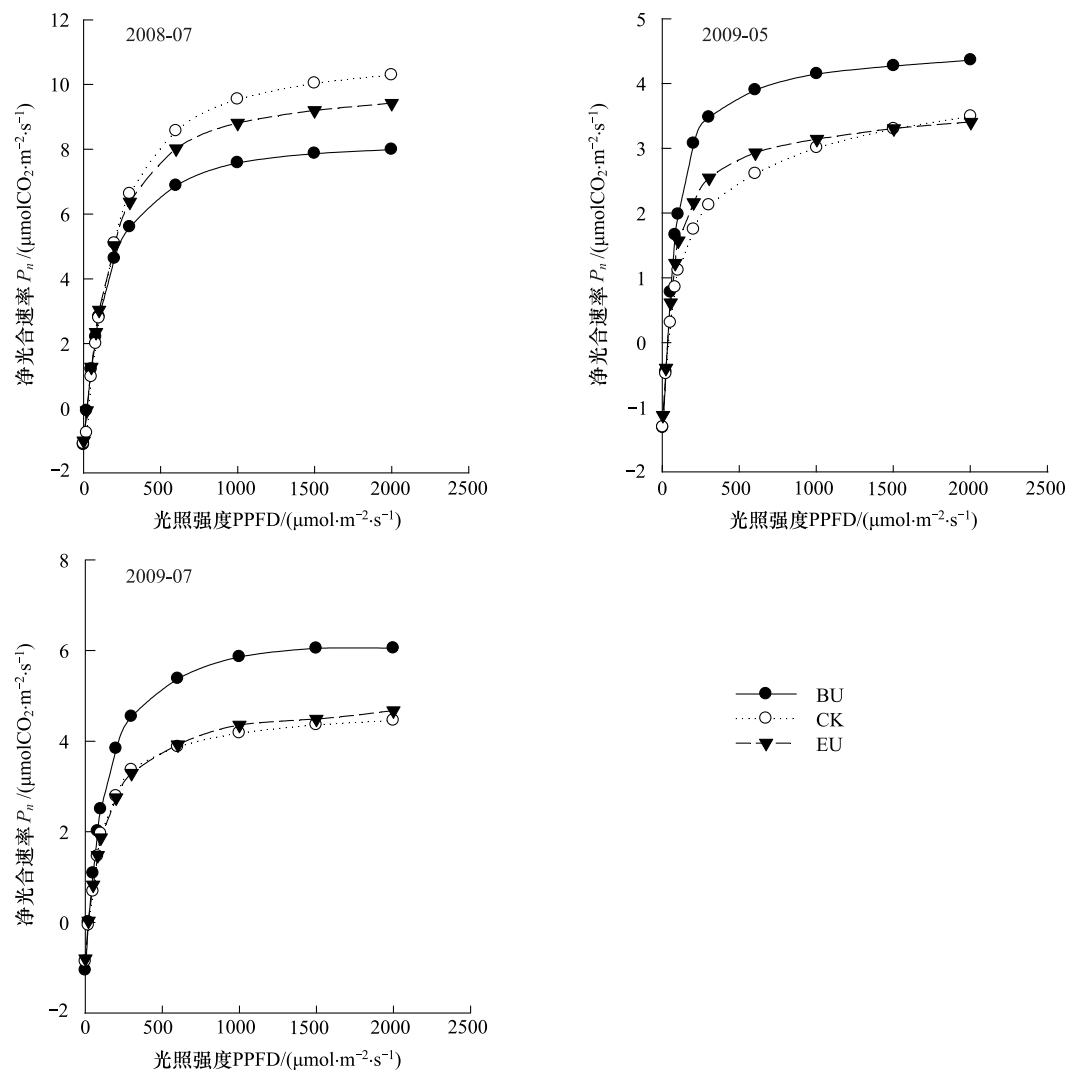


图 3 不同光照条件下杨桐幼苗的光响应曲线

Fig. 3 Light response curves of *C. japonica* seedlings under different lighting conditions

表 1 不同光照条件下杨桐幼苗的光合作用特征参数值(平均值±标准误)

Table 1 Photosynthetic characteristic parameter values of <i>C. japonica</i> seedlings under different lighting conditions (mean±SE)						
测定时间 Time	处理 Treatment	光补偿点 LCP $/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	光饱和点 LSP $/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	最大净光合速率 A_{max} $/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	表观光合量子效率 $AQY/(\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$	暗呼吸速率 $R_d/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$
2008-07	BU	20.75±1.31b	195.00±15.58b	9.72±1.15a	0.0552±0.0023a	-1.15±0.09a
	CK	25.96±2.03a	283.40±17.61a	12.37±1.26a	0.0512±0.0021a	-1.32±0.11a
	EU	20.02±0.48b	226.40±12.20b	11.15±0.65a	0.0541±0.0019a	-1.08±0.05a
2009-05	BU	25.68±1.41b	134.60±8.55ab	5.81±0.36a	0.0535±0.0013a	-1.37±0.08a
	CK	35.12±3.34a	173.00±25.72a	5.78±0.84a	0.0444±0.0060a	-1.53±0.23a
	EU	23.00±2.94b	111.18±6.15b	4.69±0.25a	0.0534±0.0037a	-1.21±0.15a
2009-07	BU	19.54±3.20a	153.58±16.99a	7.58±0.81a	0.0571±0.0025a	-1.09±0.13a
	CK	20.03±1.61a	145.75±5.33a	5.55±0.17a	0.0445±0.0026b	-0.90±0.12a
	EU	18.34±2.20a	148.60±12.21a	5.67±0.78a	0.0433±0.0047b	-0.78±0.11a

同列数据后不同字母表示处理间差异显著

射可诱导毒性氧自由基的产生,并降低 SOD、CAT 和 POD 的活性,使植物细胞防御系统失去平衡而导致膜脂质过氧化^[37],破坏叶绿素膜相,从而导致叶绿素分解^[1]。而降低辐射则会显著促进色素的增加,说明自然条

件下的 UV-B 辐射量已经处于偏高的水平,对杨桐叶片的叶绿素含量已经产生了负面影响,进而抑制幼苗的光合作用。而且随着辐射的增强,这种胁迫效应还有加剧的趋势,这与董铭等^[38]对水稻的研究结果一致。

研究结果还表明 UV-B 辐射胁迫对叶绿素含量的影响在时间上具有积累性,这与侯扶江,贾桂英等研究得出的大豆生长受抑程度随人工 UV 光源照射时间和强度增加而增强的结论类似^[33],而且测定结果受测定时间(或季节)影响很大,说明 UV-B 的胁迫作用还与植物在不同的生长季生理活动的旺盛程度有关。这与蒋馥蔚等关于季节对黑壳楠光合能力的影响的研究所给出的结论一致^[39]。

植物总生物量积累是衡量 UV-B 辐射对植物生长影响的重要指标。总生物量代表着所有生理、生化和生长因子的长期响应的整合结果^[40]。总生物量最直观的体现便是株高和地径的变化。研究表明,UV-B 辐射对杨桐幼苗地径和株高生长的影响略有差异,对地径的测定显示增强或降低辐射强度都会抑制杨桐地径的生长,其中增强辐射会对杨桐幼苗的地径生长产生更显著的抑制。这可能是因为 UV-B 辐射会引起植物激素代谢改变,影响细胞分裂和细胞伸长,导致生长速率降低^[40]。3 个测定期数据综合分析显示随着处理时间的加长,这种胁迫作用有减小的趋势。这表明植物在受到长期的辐射处理的情况下,会对 UV 辐射产生抗性。Kakani V G 等的研究表明植物在受到长期的辐射处理下,体内会产生大量的 UV-B 吸收物质,这种吸收物质可以增加 10%—300%^[32],从而产生对 UV 辐射的抗性^[41]。王红星等^[42]对芦荟叶片蒽醌类物质含量的研究也证实,UV-B 辐射能引起植物体内次生代谢产物的积累,在一定程度上抵挡 UV-B 辐射对植物造成的伤害。

对株高的测定表明降低辐射强度会对杨桐幼苗的株高生长产生促进作用,反之,则会抑制其生长。这可能是因为 UV-B 辐射能改变植物的生长形态,落叶增加,节间长度变短等^[40],这与董铭^[38]关于 UV-B 辐射增强可以矮化植株,降低其生物量的结论一致。此外对株高和地径不同的响应也表明 UV-B 辐射并不是简单地延缓植物的生长速度,更确切地说,是与某些内在生长特性有关^[43]。

对光响应曲线的分析表明在自然条件下,杨桐幼苗的净光合速率随着季节的变化而变化,夏季高于春季,这与李万超^[44]的结果相类似。而表观光合量子效率(AQY)、光补偿点(LCP)与光饱和点(LSP)在不同的季节里无明显变化。相对于自然光条件下的 UV-B 辐射,降低其强度对杨桐幼苗光合作用有显著的促进作用,反之则会抑制其光合作用,但是这种抑制也并不明显。这可能与植物受高强度的 UV 辐射体内会产生大量 UV 吸收物质有关^[41]。对于各种光合特征参数的分析表明除 LCP 和 LSP 两个参数以外,3 个处理组内的 A_{max} 、 AQY 、 R_d 差异都不显著,表明辐射胁迫对植物利用光能的效率影响不大。增强或降低 UV-B 辐射会显著降低杨桐幼苗的光饱和点和光补偿点,表明处理后的杨桐幼苗光适应范围变窄,而利用弱光的能力则显著增强^[45]。总之,植物对外界胁迫的响应,例如植物幼苗生长和光合能力的下降可以使植物避免或减轻 UV 辐射的进一步伤害,对植物适应 UV 辐射有利^[33]。

4 结论

1) UV-B 辐射会影响杨桐幼苗的叶绿素合成机制,使叶绿体含量降低,从而在一定程度上影响光合作用,而且随着时间的推移,这种效应具有积累性。

2) 自然条件下的 UV-B 辐射已处于偏高水平,对杨桐叶片的叶绿素含量产生有害影响,而且随着辐射强度增大,这种胁迫有加剧的趋势。

3) UV-B 的胁迫作用与杨桐在不同的生长季生理活动的旺盛程度有关,不同测定时间测定结果差异很大,因此为了降低不同生长季和年际变化的影响,对森林树种进行长期的跨生长季的研究是有必要的。

4) UV-B 辐射对杨桐生物量的影响并不是简单地延缓植株的生长速度,而是改变其内在的生长特性,这种影响在实验后期所表现出来的减小的趋势与杨桐的自我保护机制有关。

5) 综合各项光合参数,增强或降低 UV-B 辐射会显著降低杨桐幼苗的光饱和点(LSP)和光补偿点(LCP),而对最大净光合速率(A_{max})、表观光合量子效率(AQY)、暗呼吸速率(R_d)影响均不显著,表明 UV-B 并未对杨桐的光合作用、光能利用率、碳同化能力产生显著性的伤害,但是由于森林树种的多年生特性,这种积累性的或延迟的影响将会随着时间而显现出来。

致谢: 金清参加有关实验工作, 特此致谢。

References:

- [1] Zhou D W, Han F, Teng Z H, Zhu W Y, Shi S B. Advance of plant response and adaptation under enhanced UV-B radiation and the effect of enhanced UV-B on plant photosynthesis. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2002, 22(4): 1004-1010.
- [2] He Y M, Li Y, Zu Y Q. Responses and countermeasures of crops to enhanced UV-B radiation and regulation. *Yunnan Environmental Science*, 2004, 23(A1): 19-22.
- [3] Gallagher R P, Lee T K. Adverse effects of ultraviolet radiation: a brief review. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 2006, 92(1): 119-131.
- [4] Robakowski P, Laitat E. Effects of an enhanced ultraviolet-B irradiation on photosynthetic apparatus of several forest coniferous tree species from different locations. *Acta Physiologiae Plantarum*, 1999, 21(3): 283-296.
- [5] Rozema J, Björn L O, Bornman J F, Gaberščik A, Häder D P, Trošt T, Germ M, Klisch M, Gröniger A, Sinha R P, Lebert M, He Y Y, Buffoni-Hall R, de Bakker N V J, van de Staaij J, Meijkamp B B. The role of UV-B radiation in aquatic and terrestrial ecosystems-an experimental and functional analysis of the evolution of UV-absorbing compounds. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2002, 66(1): 2-12.
- [6] Xu C P, Sullivan J H. Reviewing the technical designs for experiments with ultraviolet-B radiation and impact on photosynthesis, DNA and secondary metabolism. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2010, 52(4): 377-387.
- [7] Björn L O, Callaghan T V, Gehrke C, Johanson U, Sonesson M. Ozone depletion, ultraviolet radiation and plant life. *Chemosphere-Global Change Science*, 1999, 1(4): 449-454.
- [8] Björn L O. Stratospheric ozone, ultraviolet radiation, and cryptogams. *Biological Conservation*, 2007, 135(3): 326-333.
- [9] Caldwell M M, Ballaré C L, Bornman J F, Flint S D, Björn L O, Teramura A H, Kulandaivelu G, Tevini M. Terrestrial ecosystems, increased solar ultraviolet radiation and interactions with other climatic change factors. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 2003, 2: 29-38.
- [10] Haapala J K, Mörsky S K, Saarnio S, Suokanerva H, Kyrö E, Silvola J, Holopainen T. Long-term effects of elevated UV-B radiation on photosynthesis and ultrastructure of *Eriophorum russeolum* and *Warnstorfia exannulata*. *Science of the Total Environment*, 2010, 409(2): 370-377.
- [11] Reddy K R, Kakani V G, Zhao D, Mohammed A R, Gao W. Cotton responses to ultraviolet-B radiation: experimentation and algorithm development. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 120(1/4): 249-265.
- [12] Xu K, Qiu B S. Responses of superhigh-yield hybrid rice Liangyoupeijiu to enhancement of ultraviolet-B radiation. *Plant Science*, 2007, 172(1): 139-149.
- [13] Fagerberg W R, Bornman J F. Modification of leaf cytology and anatomy in *Brassica napus* grown under above ambient levels of supplemental UV-B radiation. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 2005, 4(3): 275-279.
- [14] Cai X A, Peng S L, Xia H P, Zhao P, Mason F. Responses of four succession tree species in low subtropics to enhanced UV-B radiation in the field. *Photosynthetica*, 2008, 46(4): 490-500.
- [15] Chen S T, Hu Z H, Li H M, Ji Y H, Yang Y P. Effects of elevated UV-B radiation on ecosystem and soil respiration in a winter wheat farmland. *European Journal of Soil Biology*, 2011, 47(1): 16-23.
- [16] Chen Z H, Zhu S Q, Li S S, Guo Z H, Zhang D M. Effects of UV-B radiation on seedling growth of several woody species in the Southern subtropical forest. *Acta Botanica Yunnanica*, 2000, 22(4): 467-474.
- [17] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, Falkowski P. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 1998, 281(5374): 237-240.
- [18] Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, Moore B III, Vorosmarty C J, Schloss A L. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, 1993, 363(6426): 234-240.
- [19] Schuur E A G. Productivity and global climate revisited: the sensitivity of tropical forest growth to precipitation. *Ecology*, 2003, 84(5): 1165-1170.
- [20] Sullivan J H, Teramura A H. The effects of ultraviolet-B radiation on loblolly pine. *Trees-Structure and Function*, 1992, 6(3): 115-120.
- [21] Trošt Sedej T, Gaberščik A. The effects of enhanced UV-B radiation on physiological activity and growth of Norway spruce planted outdoors over 5 years. *Trees-Structure and Function*, 2008, 22(4): 423-435.
- [22] Li F R, Peng S L, Chen B M, Hou Y P. A meta-analysis of the responses of woody and herbaceous plants to elevated ultraviolet-B radiation. *Acta Oecologica*, 2010, 36(1): 1-9.
- [23] Ye C J. A study on photosynthetic characteristics of *Cleyera japonica* Thunb. *Wenzhou Agricultural Science and Technology*, 2004, (3): 25-28.

- [24] Wu J S, Ying Y Q, Li Z J. A study on photosynthetic characteristics of *Cleyera japonica* Thunb. at its seedling stage. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2004, 26(6): 896-900.
- [25] Qian Y H, Sun L H. Preliminary investigation report on *Cleyera japonica* in Zhejiang. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 1994, 14(1): 42-46.
- [26] McKenzie R L, Björn L O, Bais A, Ilyas M. Changes in biologically active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface. *Photochemical and Photobiological Science*, 2003, 2(1): 5-15.
- [27] Nithia S M J, Shanthi N, Kulandaivelu G. Different responses to UV-B enhanced solar radiation in radish and carrot. *Photosynthetica*, 2005, 43(2): 307-311.
- [28] 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.
- [29] Jiang L F, Shi F C, Wang H T, Zu Y G. Application tryout of chlorophyll meter SPAD-502 in forestry. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(12): 1543-1548.
- [30] Ai T C, Li F M, Zhou Z A, Zhang M, Wu H R. Relationship between chlorophyll meter readings (SPAD Readings) and chlorophyll content of crop leaves. *Journal of Hubei Agricultural College*, 2000, 20(1): 6-8.
- [31] Wu, R J, Zheng Y F, Liu J J. A dynamic simulation study of the impacts of enhanced UV-B radiation on winter wheat photosynthetic production and dry matter accumulation. *Agroforestry Systems*, 2009, 77(2): 123-130.
- [32] Kakani V G, Reddy K R, Zhao D, Sailaja K. Field crop responses to ultraviolet-B radiation: a review. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 120(1/4): 191-218.
- [33] Hou F J, Ben G Y, Yan J Y, Han F, Shi S B, Wei J. Effects of supplemental ultraviolet (UV) radiation on the growth and photosynthesis of soybean growing in the field. *Acta Phytoecologica Sinica*, 1998, 22(3): 256-261.
- [34] Shi S B, Ben G Y, Zhao X Q, Han F. Effects of supplementary UV-B radiation on net photosynthetic rate in the alpine plant *Gentiana straminea*. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2001, 25(5): 520-524.
- [35] Shi S B, Ben G Y, Han F. Analysis of the solar UV-B radiation and plant UV-B-absorbing compounds in different regions. *Acta Phytoecologica Sinica*, 1999, 23(6): 529-535.
- [36] Wu X C, Lin W X, Guo Y C, Liang Y Y, Chen F Y. Advance in research on the response of plants to the increased Ultraviolet-B radiation. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2001, 9(3): 52-55.
- [37] Lin W X, Liang Y Y, Jin J X. Genetics of resistance of *Oryza sativa* to increased UV-B radiation and its physiobiochemical characteristics. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(1): 31-34.
- [38] Dong M, Li H T, Liao Y C, Liang T, Lu C F. Influences of reduced UV-B radiation on growth and endogenesis hormone contents of rice (*Oryza sativa* L.) under field conditions. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(3): 122-125.
- [39] Jiang F W, Jiang H, Li W, Yu S Q, Lu M J, Li J, Jin Q, Wang Y H, Cao Q. Effects of acid rain stress on physiological characters of *Lindera megaphylla* Hemsl. seedlings in summer and autumn. *Ecology and Environment*, 2008, 17(6): 2374-2380.
- [40] Cai X A, Xia H P, Peng S L. Effects of enhanced UV-B radiation on plants. *Ecology and Environment*, 2007, 16(3): 1044-1052.
- [41] Zuo Y Y, Liu Q, Lin B, He H. Physiological responses of 2-year-old *Acer davidii* seedlings to short-term enhanced UV-B radiation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(9): 1682-1686.
- [42] Wang H X, Yang T W, Li J Y. Effects of enhanced UV-B radiation on leaf anthraquinones content and cell ultrastructure of *Aloe vera* L. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(1): 260-264.
- [43] Ji M J, Feng H Y, An L Z, Wang X L. Present status and prospects in research on effect of enhanced UV-B radiation on plants. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(3): 359-364.
- [44] Li W C, Jiang H, Zeng B, Yu S Q, Jin J, Zhang Y. Effects of simulated acid rain on photosynthesis in *Schima superb* and *Quercus glauca*. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2008, 30(7): 98-103.
- [45] Wu J S, Song F Q, Chen R, Lu W M. Comparison of leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters in three species of *Aesculus* Linn. *Bulletin of Botanical Research*, 2008, 28(4): 438-441.

参考文献:

- [1] 周党卫, 韩发, 滕中华, 朱文琰, 师生波. UV-B 辐射增强对植物光合作用的影响及植物的相关适应性研究. *西北植物学报*, 2002, 22(4): 1004-1010.
- [2] 何永美, 李元, 祖艳群. 作物对增强 UV-B 辐射的响应及调控对策. *云南环境科学*, 2004, 23(Z2): 19-22.
- [16] 陈章和, 朱素琴, 李韶山, 郭志华, 张德明. UV-B 辐射对南亚热带森林木本植物幼苗生长的影响. *云南植物研究*, 2000, 22(4):

467-474.

- [23] 叶朝军. 杨桐的光合特性的研究. 温州农业科技, 2004, (3): 25-28.
- [24] 吴家胜, 应叶青, 黎章矩. 杨桐苗期光合特性的研究. 江西农业大学学报, 2004, 26(6): 896-900.
- [25] 钱玉红, 孙丽华. 浙江杨桐考察. 浙江林业科技, 1994, 14(1): 42-46.
- [28] 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.
- [29] 姜丽芬, 石福臣, 王化田, 祖元刚. 叶绿素计 SPAD-502 在林业上应用. 生态学杂志, 2005, 24(12): 1543-1548.
- [30] 艾天成, 李方敏, 周治安, 张敏, 吴海荣. 作物叶片叶绿素含量与 SPAD 值相关性研究. 湖北农学院学报, 2000, 20(1): 6-8.
- [33] 侯扶江, 贲桂英, 颜景义, 韩发, 师生波, 魏捷. 田间增加紫外线(UV)辐射对大豆幼苗生长和光合作用的影响. 植物生态学报, 1998, 22(3): 256-261.
- [34] 师生波, 贲桂英, 赵新全, 韩发. 增强 UV-B 辐射对高山植物麻花苣净光合速率的影响. 植物生态学报, 2001, 25(5): 520-524.
- [35] 师生波, 贲桂英, 韩发. 不同海拔地区紫外线 B 辐射状况及植物叶片紫外线吸收物质含量的分析. 植物生态学报, 1999, 23(6): 529-535.
- [36] 吴杏春, 林文雄, 郭玉春, 梁义元, 陈芳育. 植物对 UV-B 辐射增强响应的研究进展. 中国生态农业学报, 2001, 9(3): 52-55.
- [37] 林文雄, 梁义元, 金吉雄. 水稻对 UV-B 辐射增强的抗性遗传及其生理生化特性研究. 应用生态学报, 1999, 10(1): 31-34.
- [38] 董铭, 李海涛, 廖迎春, 梁涛, 卢存福. 大田条件下模拟 UV-B 辐射滤减对水稻生长及内源激素含量的影响. 中国生态农业学报, 2006, 14(3): 122-125.
- [39] 蒋馥蔚, 江洪, 李巍, 余树全, 鲁美娟, 李佳, 金清, 王艳红, 曹全. 酸雨胁迫下黑壳楠 *Lindera megaphylla* Hemsl. 幼苗在夏季和秋季的生理生态特性. 生态环境, 2008, 17(6): 2374-2380.
- [40] 蔡锡安, 夏汉平, 彭少麟. 增强 UV-B 辐射对植物的影响. 生态环境, 2007, 16(3): 1044-1052.
- [41] 左园园, 刘庆, 林波, 何海. 短期增强 UV-B 辐射对青榨槭幼苗生理特性的影响. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1682-1686.
- [42] 王红星, 杨同文, 李景原. 增强 UV-B 辐射对芦荟蒽醌类物质含量和超微结构的影响. 应用生态学报, 2010, 21(1): 260-264.
- [43] 祭美菊, 冯虎元, 安黎哲, 王勋陵. 增强的 UV-B 辐射对植物影响的研究. 应用生态学报, 2002, 13(3): 359-364.
- [44] 李万超, 江洪, 曾波, 余树全, 金静, 张英. 模拟酸雨对青冈和木荷幼苗光合响应特性的影响. 西南大学学报(自然科学版), 2008, 30(7): 98-103.
- [45] 吴家森, 宋福强, 陈荣, 卢伟民. 3 种七叶树属植物叶片气体交换特征和叶绿素荧光特性比较. 植物研究, 2008, 28(4): 438-441.

CONTENTS

The community structure of endophytic bacteria in different parts of huanglongbing-affected citrus plants	LIU Bo, ZHENG Xuefang, SUN Daguang, et al (7325)
A research on the response of the radial growth of <i>Pinus koraiensis</i> to future climate change in the XiaoXing'AnLing	YIN Hong, WANG Jing, LIU Hongbin, et al (7343)
Efficiency and kinetic process of nitrogen removal in a subsurface wastewater infiltration system (SWIS)	LI Haibo, LI Yinghua, SUN Tieheng, et al (7351)
Designing nature reserve systems based on ecosystem services in Hainan Island	XIAO Yi, CHEN Shengbin, ZHANG Lu, et al (7357)
Assessing ecological services value of herbivorous wild animals in Changtang grassland: a case study of Tibetan antelope	LU Chunxia, LIU Ming, FENG Yue, et al (7370)
Spatial characteristics analysis of ecological system service value in QianJiang City of Hubei Province	XU Beishen, ZHOU Yong, XU Li, et al (7379)
Landscape pattern change and its influence on soil carbon pool in Napahai wetland of Northwestern Yunnan	LI Ningyun, YUAN Hua, TIAN Kun, et al (7388)
Multi-scenarios analysis for wetlands ecosystem conservation based on connectivity: a case study on HuangHuaiHai Region, China ...	SONG Xiaolong, LI Xiaowen, ZHANG Mingxiang, et al (7397)
The potential of carbon sink in alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau	HAN Daorui, CAO Guangmin, GUO Xiaowei, et al (7408)
The relations of spectrum reflectance with inhomogeneous factors and albedo parameterization ...	ZHANG Jie, ZHANG Qiang (7418)
Groundwater ecological sensitivity assessment in the lower Liaohe River Plain based on GIS technique	SUN Caizhi, YANG Lei, HU Dongling (7428)
Ecological sensitivity of Xiamen City to land use changes	HUANG Jing, CUI Shenghui, LI Fangyi, et al (7441)
Investigation and analysis on situation of ecotourism development in protected areas of China	ZHONG Linsheng, WANG Jing (7450)
Handicapping male-cheaters by stable mate relationship in yellow-bellied prinia, <i>Prinia flaviiventris</i>	CHU Fuyin, TANG Sixian, PAN Hujun, et al (7458)
Effects of dietary protein content and food restriction on the physiological characteristics of female <i>Microtus fortis</i>	ZHU Junxia, WANG Yong, ZHANG Meiwen, et al (7464)
Predator-prey system with positive effect for prey	QI Jun, SU Zhiyong (7471)
Volatile constituents of four moraceous host plants of <i>Apriona germari</i>	ZHANG Lin, WANG Baode, XU Zhichun (7479)
Relationship between adult emergence of <i>Massicus raddei</i> (Coleoptera: Cerambycidae) and temperature and relative humidity	YANG Zhongqi, WANG Xiaoyi, WANG Bao, et al (7486)
Nest site selection and reproductive success of <i>Parus varius</i> in man-made nest boxes	LI Le, WAN Dongmei, LIU He, et al (7492)
A study on bio-ecology of the stopover site of waders within China's Yalu River estuary wetlands	SONG Lun, YANG Guojun, LI Ai, et al (7500)
The spatial-temporal change variations of temperature in Xilinguole steppe zone	WANG Haimei, LI Zhenghai, WU Lan, et al (7511)
The growth and photosynthetic responses of <i>Cleyera japonica</i> Thunb. seedlings to UV-B radiation stress	LAN Chunjian, JIANG Hong, HUANG Meiling, et al (7516)
Photosynthesis-transpiration coupling mechanism of wheat and maize during daily variation	ZHAO Fenghua, WANG Qiufeng, WANG Jianlin, et al (7526)
Comparison of the methods using stable hydrogen and oxygen isotope to distinguish the water source of <i>Nitratia Tangutorum</i>	GONG Guoli, CHEN Hui, DUAN Deyu (7533)
Effects of cold weather on seedlings of three mangrove species planted in the Min River estuary during the 2010 winter	YONG Shiquan, TONG Chuan, ZHUANG Chenhui, et al (7542)
Correlation between ecological factors and ginsenosides	XIE Caixiang, SUO Fengmei, JIA Guanglin, et al (7551)
Effects of pyrene on low molecule weight organic compounds in the root exudates of ryegrass (<i>Lolium perenne</i> L.)	XIE Xiaomei, LIAO Min, YANG Jing (7564)
Isolation of phosphate solubilizing fungus (<i>Aspergillus niger</i>) from <i>Caragana</i> rhizosphere and its potential for phosphate solubili- zation	ZHANG Lizhen, FAN Jingjing, NIU Wei, et al (7571)
Effect of raindrop impact on nutrient losses under different near -surface soil hydraulic conditions on black soil slope	AN Juan, ZHENG Fenli, LI Guifang, et al (7579)
Emergy analysis of coal-fired power generation system and construction of new emergy indices	LOU Bo, XU Yi, LIN Zhenguan (7591)
Review and Monograph	
The impact of forest vegetation change on water yield in the subalpine region of southwestern China	ZHANG Yuandong, LIU Shirong, et al (7601)
Reviews on spatial pattern and sand-binding effect of patch vegetation in arid desert area	HU Guanglu, ZHAO Wenzhi, WANG Gang (7609)
Sustainable management on pests by agro-biodiversity	GAO Dong, HE Xiahong, ZHU Shusheng (7617)
Scientific Note	
Characteristics of organic carbon and nutrient content in five soil types in Honghu wetland ecosystems	LIU Gang, SHEN Shouyun, YAN Wende, et al (7625)
Effects of cypermethrin and deltamethrin on reproduction of <i>Brachionus calyciflorus</i>	HUANG Lin, LIU Changli, WEI Chuanbao, et al (7632)

《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 31 卷 第 24 期 (2011 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 24 2011

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:100717	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