

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

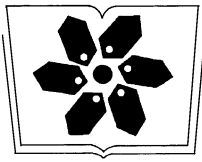
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第8期 Vol.32 No.8 **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 8 期

2012 年 4 月 (半月刊)

目 次

东北地区 5 种阔叶树苗木对火烧的生理响应.....	王 荣, 胡海清 (2303)
梭梭木虱发生规律及其影响因素.....	李粉莲, 吴雪海, 王佩玲, 等 (2311)
基于遥感降尺度估算中国森林生物量的空间分布.....	刘双娜, 周 涛, 舒 阳, 等 (2320)
流域景观格局与河流水质的多变量相关分析.....	赵 鹏, 夏北成, 秦建桥, 等 (2331)
内蒙古达赉湖地区赤狐生境选择及生境景观特征分析.....	张洪海, 李成涛, 窦华山, 等 (2342)
雅鲁藏布江流域底栖动物多样性及生态评价.....	徐梦珍, 王兆印, 潘保柱, 等 (2351)
用组合模型综合比较的方法分析气候变化对朱鹮潜在生境的影响.....	翟天庆, 李欣海 (2361)
2010 年牧区 2 代草地螟成虫迁飞的虫源分析	张 丽, 张云慧, 曾 娟, 等 (2371)
基于细胞色素 b 基因的中国岩羊不同地理种群遗传差异分析.....	李楠楠, 刘振生, 王正寰, 等 (2381)
喀斯特峰丛洼地不同退耕还林还草模式的土壤微生物特性.....	鹿士杨, 彭晚霞, 宋同清, 等 (2390)
永定河沿河沙地杨树人工林生态系统呼吸特征.....	方显瑞, 张志强, 查同刚, 等 (2400)
基于湿地植物光谱的水体总氮估测.....	刘 克, 赵文吉, 郭逍宇, 等 (2410)
背瘤丽蚌 F 型线粒体基因组全序列分析	陈 玲, 汪桂玲, 李家乐 (2420)
流域“源-汇”景观格局变化及其对磷污染负荷的影响——以天津于桥水库流域为例	李崇巍, 胡 婕, 王 飒, 等 (2430)
线虫群落对抚顺煤矸石山周边土壤可溶性盐污染的响应.....	张伟东, 吕 莹, 肖 莹, 等 (2439)
地上竞争对林下红松生物量分配的影响.....	汪金松, 范秀华, 范 娟, 等 (2447)
湿地松和马尾松人工林土壤甲烷代谢微生物群落的结构特征.....	王 芸, 郑 华, 陈法霖, 等 (2458)
马尾松和杉木树干韧皮部水溶性糖 $\delta^{13}\text{C}$ 值对气象因子的响应	卢钰茜, 王振兴, 郑怀舟, 等 (2466)
沙坡头人工植被演替过程的土壤呼吸特征.....	高艳红, 刘立超, 贾荣亮, 等 (2474)
豫西刺槐能源林的热值动态.....	谭晓红, 刘诗琦, 马履一, 等 (2483)
铁皮石斛种子的室内共生萌发	吴慧凤, 宋希强, 刘红霞 (2491)
红光与远红光比值对温室切花菊形态指标、叶面积及干物质分配的影响	杨再强, 张继波, 李永秀, 等 (2498)
扑草净对远志幼苗根系活力及氧化胁迫的影响.....	温银元, 郭平毅, 尹美强, 等 (2506)
地表臭氧浓度增加和 UV-B 辐射增强及其复合处理对大豆光合特性的影响	郑有飞, 徐卫民, 吴荣军, 等 (2515)
AMF 对喀斯特土壤枯落物分解和对宿主植物的养分传递	何跃军, 钟章成, 董 鸣 (2525)
传统豆酱发酵过程中细菌多样性动态.....	葛菁萍, 柴洋洋, 陈 丽, 等 (2532)
定位施肥对紫色菜园土磷素状况的影响.....	孙倩倩, 王正银, 赵 欢, 等 (2539)
基于生态需水保障的农业生态补偿标准.....	庞爱萍, 孙 涛 (2550)
保障粮食安全造成的生态价值损失评估模型及应用.....	芦蔚叶, 姜志德, 张应龙, 等 (2561)
专论与综述	
疏浚泥用于滨海湿地生态工程现状及在我国应用潜力.....	黄华梅, 高 杨, 王银霞, 等 (2571)
问题讨论	
厌氧氨氧化菌群体感应系统研究.....	丁 爽, 郑 平, 张 萌, 等 (2581)
基于形态结构特征的洞庭湖湖泊健康评价.....	帅 红, 李景保, 夏北成, 等 (2588)
研究简报	
黄土高原不同树种枯落叶混合分解效应.....	刘增文, 杜良贞, 张晓曦, 等 (2596)
不同经营类型毛竹林土壤活性有机碳的差异.....	马少杰, 李正才, 王 斌, 等 (2603)
干旱对辣椒光合作用及相关生理特性的影响	欧立军, 陈 波, 邹学校 (2612)
硅和干旱胁迫对水稻叶片光合特性和矿质养分吸收的影响	陈 伟, 蔡昆争, 陈基宁 (2620)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 326 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 36 * 2012-04



封面图说: 红树林粗大的气生根——红树林是热带、亚热带海湾及河口泥滩上特有的常绿灌木或乔木群落。由于海水环境条件特殊,红树林植物具有一系列特殊的生态和生理特征。其中之一就是气根,红树从根部长出许多指状的气生根露出海滩地面,以便在退潮时甚至潮水淹没时用以通气,故称呼吸根。在中国,红树林主要分布在海南、广西、广东和福建省沿海,它一般分布于高潮线与低潮线之间的潮间带,往往潮差越大,红树的呼吸根就长得越高越粗大。

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

DOI: 10.5846/stxb201103090284

郑有飞,徐卫民,吴荣军,张金恩,刘瑞娜,姚娟,胡会芳.地表臭氧浓度增加和 UV-B 辐射增强及其复合处理对大豆光合特性的影响.生态学报, 2012,32(8):2515-2524.

Zheng Y F, Xu W M, Wu R J, Zhang J E, Liu R N, Yao J, Hu H F. Combined effects of elevated O_3 concentration and UV-B radiation on photosynthetic characteristics of soybean. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(8): 2515-2524.

地表臭氧浓度增加和 UV-B 辐射增强及其复合处理 对大豆光合特性的影响

郑有飞^{1,2,3}, 徐卫民^{2,*}, 吴荣军³, 张金恩³, 刘瑞娜³, 姚娟³, 胡会芳³

(1. 江苏省大气环境监测与污染控制高新技术研究重点实验室, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044;

3. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044)

摘要:基于开顶式气室(OTC),系统开展了地表 O_3 增加和 UV-B 增强及其复合处理下(自然空气,CK;10% UV-B 增强,T1;100 nmol/mol O_3 ,T2;100 nmol/mol O_3 +10% UV-B 增强,T3)大豆光合气体交换、光响应、光合色素和类黄酮含量等参数的观测与分析研究。结果表明,与对照相比,T1 和 T2 单因子处理组的如下指标有相似变化:气孔导度、气孔限制值下降,胞间二氧化碳浓度上升,净光合速率、最大净光合速率、半饱和光强显著降低,表观量子效率和暗呼吸速率先升后降。T1 的叶绿素含量降低不显著,类胡萝卜素含量先降后升,类黄酮含量上升,而 T2 的叶绿素和类胡萝卜素含量显著降低,类黄酮含量先降后升。复合处理下,与 CK 相比各指标的变化和单因子相似,影响程度均强于两单因子组。因此,100 nmol/mol O_3 浓度增加和 10% UV-B 辐射增强复合处理对大豆叶绿素含量的影响存在协同作用,且 O_3 胁迫起了主导作用。光合作用下降的主要原因均是非气孔因素,复合处理对大豆光合作用的影响比两因子单独胁迫有所加深,是 O_3 和 UV-B 共同作用的结果。

关键词:臭氧;UV-B;光合作用;气体交换;光合色素

Combined effects of elevated O_3 concentration and UV-B radiation on photosynthetic characteristics of soybean

ZHENG Youfei^{1,2,3}, XU Weimin^{2,*}, WU Rongjun³, ZHANG Jin'en³, LIU Ruina³, YAO Juan³, HU Huifang³

1 Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, Nanjing 210044, China

2 College of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

3 College of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

Abstract: During the last several decades, significant reductions in the concentrations of stratospheric ozone (O_3) have been reported. This reduced ozone concentration causes an increment in ultraviolet-B radiation approaching to the surface earth. The elevated UV-B radiation and increased tropospheric O_3 concentrations maybe occur together and cause reductions in physiological and biochemical characteristics of crops and economic plants. The effects of UV-B and O_3 on plant growth and productivity have been reported separately for a large number of species by field experiment, but only few experiments have focused on their interaction, it is not clear whether UV-B and O_3 induced damages are brought about with similar mechanisms. This uncertainty has largely been due to the lack of an experimental approach to investigate the responses of a single species exposed to UV-B and O_3 under well-defined experimental conditions. Studies were conducted under the open-top-chambers conditions so as to assess photosynthesis changes of soybean (*Glycine max*, Bayuehuang) with supplemental

基金项目:国家自然科学基金项目(40775072,41075114);江苏省高校自然科学研究重大项目(09KJA170004);中国气象局农业气象保障与应用技术重点开放实验室开放基金项目(AMF200904);南京信息工程大学科研基金项目(90215)

收稿日期:2011-03-09; 修订日期:2011-08-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xuweimina2002@163.com

UV-B radiation (10%—10.9% higher than control group, T1) and enhanced ozone [(100 ± 9) nmol/mol, T2], separately and in combination (combination treatment, T3), by investigating photosynthetic pigment, flavonoid content and gas exchange parameters with application of LCpro + Portable Photosynthesis System. Results indicate that net photosynthetic rate (P_n), maximum photosynthetic rate (P_{max}), stomatal conductance (G_s), half-saturation light intensity (I_k) and stomatal limitation (L_s) of T1 treatment decreased significantly compared with CK (control group, natural air and UV-B radiant intensity condition). With same references, inter-cellular CO_2 concentration (C_i) and flavonoid content increased, the apparent quantum yield (AQY) and the dark respiration rate (R_d) raised first and then decreased, and the carotenoid content decreased first and then raised while the content of chlorophyll had faint decrease if compared with CK. The change pattern of P_n , P_{max} , I_k , G_s , C_i and L_s of T2 treatment was similar to those of T1 treatment while the content of chlorophyll and carotenoid decreased significantly compared with CK; flavonoid content of T2 showed slightly decrease at early stages, but sharp increase at latter stages. The change pattern of P_n , P_{max} , I_k , G_s , L_s , C_i and R_d of T3 treatment was also similar to those of T1 treatment while the content of carotenoid and chlorophyll decreased obviously compared with CK with lower chlorophyll content than that of T1 and T2. Obviously, enhanced ozone caused significant decrease in chlorophyll content, but supplemental UV-B radiation had no impressive effect on it. Compared with UV-B and O_3 alone, UV-B and O_3 in combination enhanced the negative effects on soybean chlorophyll content, and ozone stress dominated the combination stress effect of O_3 and UV-B. The decrease of photosynthesis was mainly due to non-stomatal factors. UV-B and O_3 in combination enhanced the negative effects on soybean compared with UV-B and O_3 alone.

Key Words: O_3 ; UV-B radiation; photosynthesis; gas exchange; photosynthetic pigment

光化学反应产生的二次污染物臭氧(O_3),是一种对植物有很强毒害作用的气态污染物^[1]。近年来,由于 NO_x 、VOCs等 O_3 前体物人为排放量的显著增加,目前全球近四分之一的地区夏季 O_3 浓度已超过60 nL/L^[2]。高浓度 O_3 可以增加气孔阻力^[3]、影响光合色素合成^[4]、抑制叶片 CO_2 吸收^[5]、降低光合速率^[6],从而影响植物的光合作用。同时,由于大气污染物特别是氯氟烃类化合物(CFCs)的大量排放,使得大气臭氧层衰减,导致到达地面的UV-B辐射(280—315 nm)增加,北半球中纬度地区UV-B辐射强度以每年1.2%—1.6%的速率不断递增^[7]。大多数的植物都会受到增强UV-B不同程度的影响,如气孔导度降低^[8]、叶片的化学成分和结构改变^[9]、光合系统的伤害^[10-11]等。关于地表 O_3 浓度增加和UV-B辐射增强的复合作用影响国外已经有了部分研究。Miller等^[12]研究表明,UV-B和 O_3 的联合相较于单因子显著增强了对植物光合作用的抑制。Zeuthen等^[13]指出,UV-B增加和 O_3 浓度升高以及它们的复合作用都降低了植物的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s),这种降低的程度为:CK<UV-B< O_3 <UV-B+ O_3 。Ambasht等^[14]研究了UV-B辐射增强和 O_3 浓度升高单独和复合作用对小麦的光合速率、叶绿素、类胡萝卜素等的影响,结果发现两者复合作用时比单独作用时的影响有所加深,但是小于两者单独作用时的影响的简单累加。而类似的研究国内则鲜见报道,复合作用对植物光合作用影响的具体机理仍然不十分清楚。

作为重要的油料作物,我国大豆的产区集中在东北平原、黄淮平原、长江三角洲和江汉平原,夏大豆生长季正处于UV-B和 O_3 的高发期,易同时受UV-B和 O_3 伤害。因此,本试验利用开顶式气室(OTC)及平方波系统,开展了大田条件下的夏大豆 O_3 浓度增加及UV-B辐射增强复合试验,通过光合色素、气体交换、光响应和类黄酮含量等参数的变化,分析两者复合对大豆光合作用的影响,为准确评价对流层和平流层 O_3 浓度变化对粮食生产的影响提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

试验场地设于南京信息工程大学农业气象试验站(32°03'N, 118°51'E),耕作层土壤质地为壤质黏土,肥力中等,黏粒含量为26.1%,pH值为7.26,0—30 cm土层有机质含量为12.1 g/kg,速效氮57.9 mg/kg,有效

磷 70.9 mg/kg,有效钾 50.4 mg/kg。供试作物大豆“八月黄”为当地普播品种,2010 年 7 月 6 日播种,2010 年 10 月 26 号收获。水肥管理与气室外大田保持一致。

1.2 试验设计

于 2010 年 7 月 28 号分枝初期开始对气室内夏大豆进行 O_3 熏蒸和模拟 UV-B 辐射增强处理,每天 8 h (09:00—17:00),雨天中止,10 月 5 号结束,共计处理 52 d。试验用 O_3 经由 WJ-H-Y10 型高频 O_3 发生器生成,与背景大气混合后,借助轴流风机(沈力牌 SF2-2 型)经由 PVC 管和“米”字形不锈钢布气盘输入气室内,并利用玻璃转子流量计调节气室内 O_3 浓度。模拟 UV-B 辐射增强所用紫外灯管(上海华德光电源厂,峰值波长 313 nm,功率 40 W)悬挂于气室内作物冠层上方 75 cm 处,每气室 3 根,随作物生长定期调节灯架高度。采用 S200 型手持式 O_3 检测仪(新西兰 AeroQual 公司)和 UV-B 型紫外辐照计(北京师范大学光电仪器厂)对夏大豆冠层上方的 O_3 浓度和 UV-B 辐射强度进行即时检测和调节,每 3 d 对气室内 O_3 浓度和 UV-B 辐射水平进行一次检测,使其在预设范围内浮动。

试验在 4 个完全相同的开顶式气室(OTC)内进行,设置 4 组处理:CK(对照组,冠层上方 75 cm 处悬挂 3 根功率 40W 上海华德光电源厂生产的植物生长灯,除紫外波段外可见光波段与紫外灯相近),T1(UV-B 辐射强度增加 17.4—18.9 $\mu W/cm^2$,相当于晴空条件下对照组气室内 09:00—17:00 平均 UV-B 辐射强度的 10%—10.9%),T2(调控 O_3 浓度为 (100 ± 9) nmol/mol),T3(O_3 浓度为 (100 ± 9) nmol/mol 与 UV-B 增强 10%—10.9%的复合处理组)。4 个开顶式气室均配备流量相同的轴流风机和设计相同的布气系统,以使气室内温度、湿度等环境条件一致。

本试验所使用开顶式气室^[15],主体为不锈钢框架构成的圆柱体,直径 2 m、高 1.5 m;顶部为倾角 45°的锥形收口,收缩口高 0.4 m,上台面为下台面面积的 30%,以减少外界的风从顶部灌入;整个气室体积为 5.3 m³,室壁采用聚乙烯塑料膜,并向下埋深 0.5 m 作防渗处理;气室间距离 2.5 m。OTC 布气系统在郑启伟等^[4]设计的基础上加以改进,8 根水平布气管垂直相接于主供气管,呈“米”字形,“米”字形布气盘的直径为 180 cm,单根管长 80 cm,内径 30 mm,外径 32 mm,管下侧面有两排气孔,气孔与水平面呈 45°夹角,气孔密度从中心向四周由稀向密分布,以使整个气室空间单位面积的气孔数量基本相等,同时考虑气压的平衡等因素,最终使室内 O_3 分布均匀。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 气体交换参数

从分枝期(分枝期-开花期-结荚期-鼓粒期-成熟期)开始每生育期,于 09:00 开始用 LC pro+ 光合仪原位测定大豆叶片的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)等参数。测量条件如下:到达叶片表面的 PAR 为 1056 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ (红/蓝 LED),叶室温度为 $(25 \pm 1.3)^\circ C$, CO_2 浓度为 400 $\mu L/L$,相对空气湿度为 $(65 \pm 5)\%$ 。叶片在叶室中适应 10 min 后记录数据 5 次,每种处理水平按照 CK₁、T1₁、T2₁、T3₁,CK₂、T1₂、T2₂、T3₂,CK₃,…的顺序测量 4 次。并根据 C_i 及空气 CO_2 浓度(C_a)计算气孔限制值, $L_s = 1 - C_i/C_a$ (Stomatal Limitation)^[14]。

选择晴好天气和有代表性的植株叶片测定光响应曲线,每生育期各 1 次(分枝期—开花期—结荚期—鼓粒期—成熟期)。光强序列设置为 1760、1320、880、616、440、176、132、88、44、18、0 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,气体流速为 200 mL/min,温湿度、 CO_2 浓度为自然条件,每处理测量 4—6 片。采用 Michaelis-Menten 方程^[16]对曲线进行拟合:

$$P_n = \frac{AQY \cdot PAR \cdot P_{max}}{AQY \cdot PAR + P_{max}} - R_d$$

式中, P_{max} 为最大净光合速率,AQY 为表观量子效率, R_d 为暗呼吸速率,PAR 为入射到叶片上的光量子通量密度,并计算半饱和光强 $I_k = P_{max}/AQY$ 。

1.3.2 生理指标测定

a) 叶绿素和类胡萝卜素含量的测定

从进入分枝期起,每生育期(分枝期-开花期-结荚期-鼓粒期-成熟期)各取样1次。采样时间在08:00左右,选取植株上部完全展开的叶片进行叶绿素和类胡萝卜素含量的测定,不同处理的每个水平重复测定3次,测定方法详见文献^[17]。

b) 类黄酮含量的测定

从进入分枝期起,每生育期(分枝期-开花期-结荚期-鼓粒期-成熟期)取样1次。采样时间在08:00左右,选取植株上部完全展开的叶片进行类黄酮含量的测定,每个水平重复测定3次。根据Caldwell测定类黄酮的甲醇提取液的吸收方法^[18],并作适当改进,使用离心机(3000 r/min)分离提取液10 min,取上层清液,定量稀释,用7530G紫外-可见光栅分光光度计(安捷伦)测定,测定计算波长300 nm处类黄酮的相对含量(O.D._{300nm})。

1.4 数据分析

运用单因素方差分析法(one-way ANOVA)进行平均数的差异显著性检验, $P < 0.05$ 为差异显著,LSD法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 大豆叶片光合气体交换参数

图1给出了UV-B和O₃胁迫单因子及其复合处理组大豆气体交换参数净光合速率 P_n 、气孔导度 G_s 、胞间CO₂浓度 C_i 和气孔限制值 L_s 随生育期进程的变化。

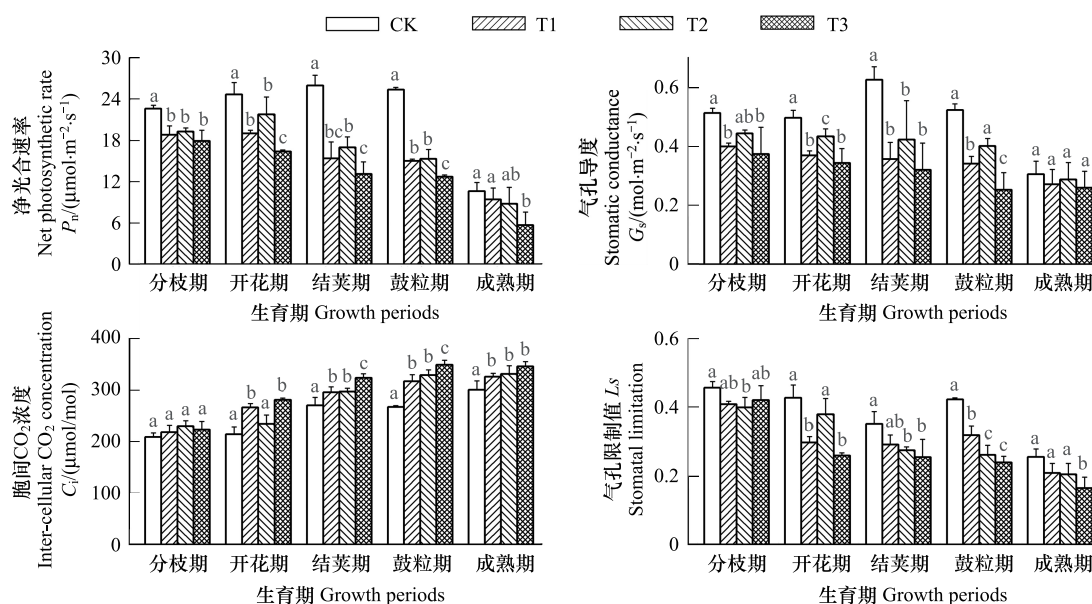


图1 O₃浓度增加和UV-B辐射增强及其复合作用对大豆不同生育期 P_n 、 G_s 、 C_i 和 L_s 的影响

Fig. 1 Effects of elevated ozone concentration and increased UV-B radiation on the P_n , G_s , C_i and L_s of soybean leaves

图中误差线为SD($n=3,4$),同生育期的不同处理用LSD法进行差异显著性检验,其上方字母不同表示差异显著($P < 0.05$);CK为对照组;T1为平均UV-B辐射强度相对CK增加10.0%—10.9%;T2为调控O₃浓度为(100±9) nmol/mol;T3为T1和T2的复合

不同处理均使得净光合速率 P_n 显著降低,与CK相比,T1、T2和T3处理组 P_n 降幅分别为11.50%—40.82%、11.83%—39.60%和20.78%—49.85%。T1前4个生育期 P_n 均低于T2处理组,T1处理只在成熟期比T2高,经显著性检验发现,整个生育期T1与T2组之间 P_n 都无显著差异($P > 0.05$)。前4个生育期3个处理组与CK的差异都达显著($P < 0.05$),成熟期只有T3组与CK达显著($P < 0.05$)。分枝期复合处理T3与两单因子处理组之间差异均不显著($P > 0.05$),结荚和成熟期T2与T3之间差异不显著,其它时期T3与两单因子处理之间差异显著($P < 0.05$)。

气孔导度 G_s 的变化如图 1 所示,整体趋势表现为 $CK > T2 > T1 > T3$ 。与 CK 组相比, $T1$ 、 $T2$ 和 $T3$ 组的气孔导度 G_s 降幅分别为 11.11%—42.96%、5.66%—32.48% 和 14.81%—51.75%,最大降幅为 $T3$ 组,达 51.75% (鼓粒期)。处理时间越长,大豆叶片 G_s 的值就越低,除成熟期以外, $T1$ 、 $T3$ 组与 CK 的差异均显著 ($P < 0.05$); $T2$ 组只在开花与鼓粒期与 CK 差异显著 ($P < 0.05$)。 $T1$ 组的 G_s 始终低于 $T2$ 组,并在开花和鼓粒期达显著 ($P < 0.05$), $T3$ 组只在鼓粒期与两单因子处理组差异均显著 ($P < 0.05$)。

UV-B 和 O_3 单因子胁迫及其复合处理均导致了胞间 CO_2 浓度 C_i 不同程度的升高 (图 1), $T1$ 、 $T2$ 和 $T3$ 升幅分别为 4.16%—19.60%、8.46%—18.89%、6.28%—23.74%,并且整个生育过程,整体的 C_i 都在升高。分枝期以后, $T1$ 、 $T3$ 组与 CK 的差异均达显著 ($P < 0.05$);前两个生育期 $T2$ 组与 CK 的差异不显著 ($P > 0.05$);除开花期外,两单因子处理组的 C_i 差异不显著 ($P > 0.05$)。

UV-B 和 O_3 单因子胁迫及其复合处理对气孔限制值 L_s 总体呈抑制状态 (图 1)。除开花期 $T2$ 组 L_s 显著大于 $T1$ 组 ($P < 0.05$) 之外,其余生育期 $T1$ 与 $T2$ 组的 L_s 无显著差异 ($P > 0.05$);分枝期 $T3$ 复合处理组 L_s 相较于 $T1$ 、 $T2$ 单因子处理组有较小幅度上升,但差异不显著 ($P > 0.05$)。

2.2 大豆叶片光响应参数

试验测定了不同处理的光响应曲线,拟合计算得到了不同生育期不同处理的表观量子效率 AQY 、最大净光合速率 P_{max} 、暗呼吸速率 R_d 和半饱和光强 I_k (图 2)。其中,分枝和开花期 $T1$ 和 $T2$ 组的 AQY 较 CK 都有所上升,其它生育期较 CK 则降低,而且在结荚和鼓粒期都达显著水平 ($P < 0.05$); $T3$ 复合处理与 CK 相比,各生育期的 AQY 都有不同程度的下降,降幅为 10.19%—22.15%,分枝期降幅最大,除成熟期由于较大的偏差导致差异不显著,其它生育期都达极显著水平 ($P < 0.01$)。 $T3$ 除高于结荚期 $T1$ 和成熟期 $T2$ 外,都低于两单因子组,但后期与两单因子组的差异并不显著 ($P > 0.05$)。

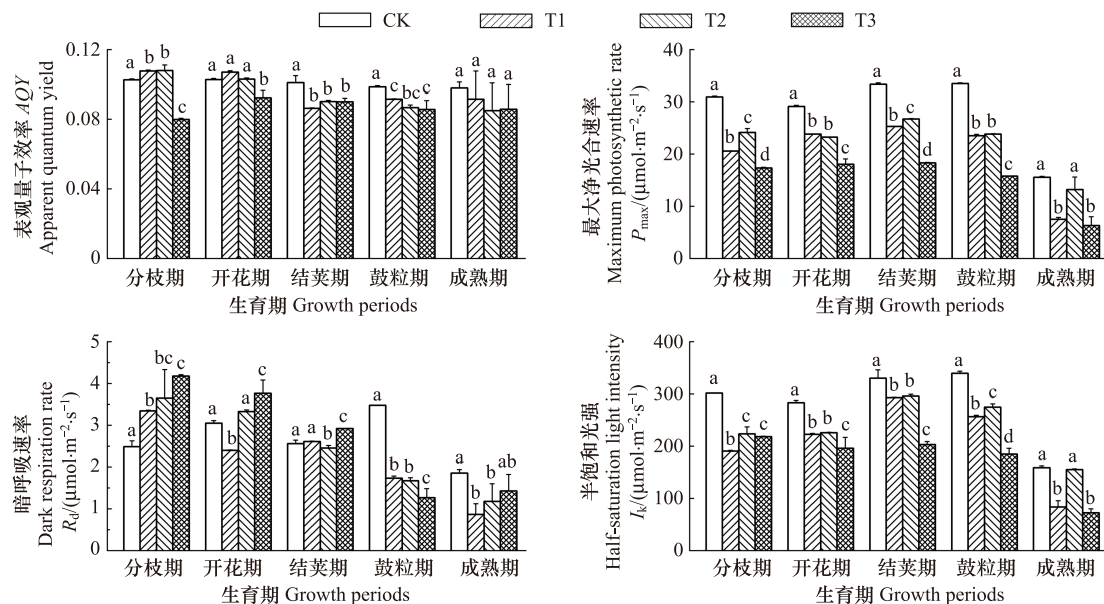


图 2 O_3 浓度增加和 UV-B 辐射增强及其复合作用对大豆不同生育期光响应相关参数的影响

Fig. 2 Effects of elevated ozone concentration and increased UV-B radiation on the photo-response parameters of soybean leaves

地表 O_3 浓度增加和 UV-B 辐射增强及其复合处理都导致大豆最大净光合速率 P_{max} 的降低 (图 2), 与 CK 相比, $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ 组的降幅分别为 18.15%—51.60%、15.29%—28.94%、37.99%—59.53%。除成熟期 $T2$ 与 CK 差异不显著以外,其它生育期的不同处理与 CK 的差异均达显著 ($P < 0.05$),其中 $T3$ 与 CK 更达极显著水平 ($P < 0.01$)。而两单因子处理的 P_{max} 差异不是很明显,开花和鼓粒期差异不显著 ($P > 0.05$)。说明 $T3$ 处理对大豆最大净光合速率的影响过程中, O_3 和 UV-B 因子都起了重要作用。

前三生育期 T1、T2 和 T3 组的暗呼吸速率 R_d 都有不同程度的升高,分枝期升幅最大,分别为 34.37%、46.69% 和 68.00%,出现这样的原因可能是 O_3 和 UV-B 胁迫引发植株修复代谢消耗的增加。鼓粒和成熟期 R_d 均受到了不同程度的抑制。

不同处理各生育期的半饱和光强 I_k 都受到了不同程度的抑制(图 2)。T1 较 CK 下降了 11.40%—47.25% (成熟期降幅最大),差异都达显著($P<0.05$)。T2 较 CK 降低了 2.22%—25.85%,除成熟期以外差异都显著。T3 较 CK 则下降了 27.59%—54.25%,除分枝期外都显著低于 T1 和 T2,复合处理进一步降低了大豆对强光的耐受能力。

2.3 大豆叶片叶绿素含量

大豆叶片叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和叶绿素 a/b 值随大豆生育期进程的变化如图 3 所示。结果表明:整个生育期各个处理组的叶绿素 a 和总叶绿素含量变化趋势基本相同。与 CK 相比,叶绿素 a 的降幅分别为-0.13%—17.96%、1.14%—42.28%、5.85%—49.71%,最大值均出现在鼓粒期;总叶绿素的降幅分别为-1.16%—14.58%、1.92%—38.33%、7.34%—44.64%;叶绿素 b 的降幅分别为-1.16%—14.58%、1.92%—38.33%、7.34%—44.64%,最大降幅亦都出现在鼓粒期;叶绿素 a/b 值变化则较为复杂。T1 组叶绿素 a 和总叶绿素含量分枝期基本无变化,随着处理时间的增加有所下降,但也只在开花和鼓粒期与 CK 差异显著($P<0.05$)。叶绿素 b 整个生育期与 CK 差异均不显著($P>0.05$),成熟期略有上升。叶绿素 a/b 值分枝期略有上升,其它生育期都降低,并且在开花与鼓粒期与 CK 差异显著($P<0.05$);T2 组叶绿素 a 和总叶绿素含量与 CK 相比都降低,分枝和成熟期差异不显著($P>0.05$)。叶绿素 b 整个生育期都降低,与 CK 均差异显著($P<0.05$)。叶绿素 a/b 值分枝期略有上升,其它生育期都降低,除成熟期以外差异均达显著($P<0.05$);T3 组叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量与 CK 相比都降低,并且整个生育期差异均显著($P<0.05$)。叶绿素 a/b 值分枝期略有上升,其它生育期都降低,并且差异均达显著($P<0.05$)。

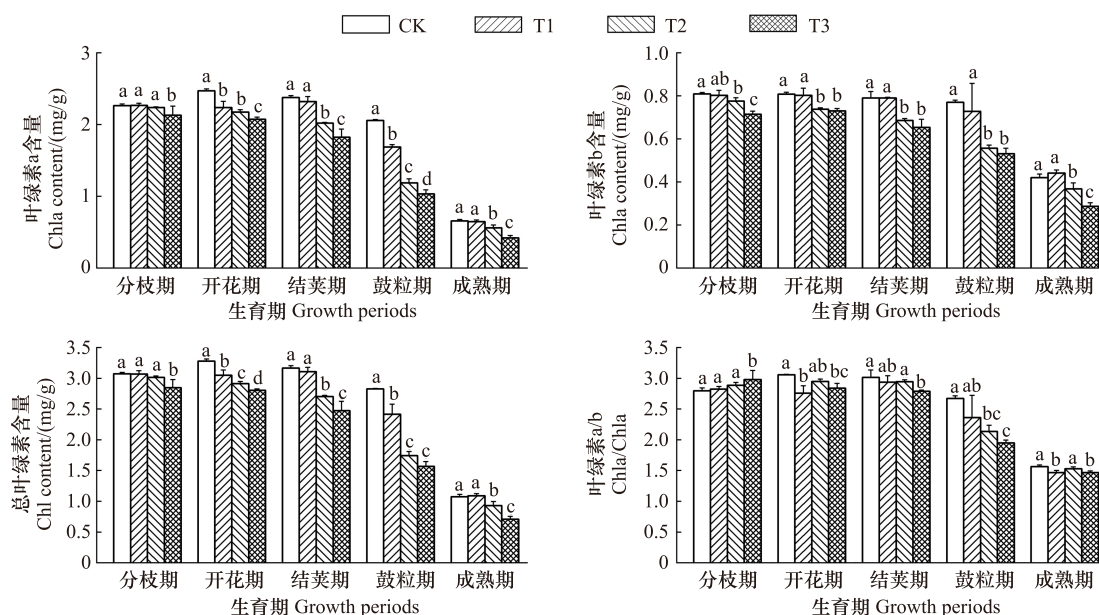


图3 O_3 浓度增加和 UV-B 辐射增强及其复合作用对大豆不同生育期叶绿素的影响

Fig. 3 Effects of elevated ozone concentration and increased UV-B radiation on the chlorophyll contents of soybean leaves

T1 与 T2 两单因子处理之间,叶绿素 a(T1>T2)前两生育期差异不显著($P>0.05$),叶绿素 b(T1>T2)和总叶绿素(T1>T2)除分枝期以外差异均显著($P<0.05$),叶绿素 a/b 值在分枝、结荚和鼓粒期差异不显著($P>0.05$),开花和成熟期达显著差异($P<0.05$);T3 复合处理组的叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和叶绿素 a/b 值均低于两单因子处理组,叶绿素 a 与两单因子处理组差异均显著($P<0.05$),总叶绿素只在鼓粒期与 T2 组差

异不显著($P>0.05$)。叶绿素 b 含量只在开花、结荚和鼓粒期与 T2 差异不显著($P>0.05$),其它时期与两单因子的差异均达显著($P<0.05$)。T3 组的叶绿素 a/b 值与 T1 和 T2 相比变化则较为复杂,无规律。

2.4 类胡萝卜素和类黄酮含量

图 4 给出了不同处理和对照组叶片类胡萝卜素随大豆生育进程的变化,总体上呈先升后降的单峰变化趋势。其中,前三生育期 UV-B 处理 T1 组类胡萝卜素与对照 CK 组相比,降幅分别为分枝期-0.013%、开花期 9.26%、结荚期 2.14%,下降幅度呈单峰趋势,但差异不显著($P>0.05$);而在鼓粒期和成熟期与 CK 组相比则是增加的,鼓粒期增幅为 3.35% ($P>0.05$),成熟期增幅为 8.11% ($P<0.05$),但这并不能作为后期 UV-B 处理对类胡萝卜素有促进作用的依据。开花期以后 T1 组的类胡萝卜素含量始终是降低的,但 CK 组的降幅更大,导致了 T1 组的类胡萝卜素含量的相对升高。 O_3 处理的 T2 组类胡萝卜素含量始终低于 CK 与 T1 组,T2 组只在开花期与 T1 处理差异不显著($P>0.05$),说明 O_3 对大豆叶片类胡萝卜素有更强的抑制作用。除分枝期的 T3 复合处理组类胡萝卜素含量相对于 O_3 处理 T2 组略有增加外,其它生育期 T3 组的类胡萝卜素含量始终低于同时期的两单因子和对照组,且差异性随生育进程逐渐加大(分枝期都无显著差异;开花期 T3 与 CK 组差异显著;结荚期 T3 与 CK、T1 组差异都显著;后两个生育期 T3 组与 CK、T1、T2 组差异都显著)。与 CK 组相比,鼓粒期 T3 复合处理组降幅最大达 27.50%,差异极显著($P<0.01$)。

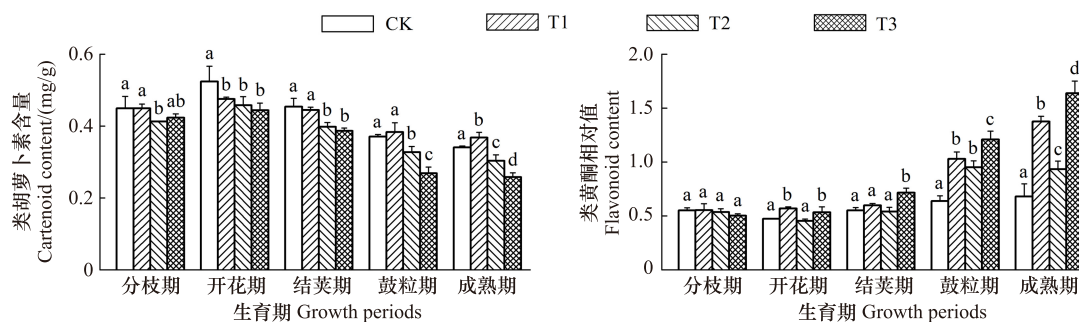


图 4 O_3 浓度增加和 UV-B 辐射增强及其复合作用对大豆不同生育期类胡萝卜素和类黄酮的影响

Fig. 4 Effects of elevated ozone concentration and increased UV-B radiation on the Carotenoid and Flavonoid contents of soybean leaves

不同处理和对照组叶片类黄酮相对值随大豆生育进程的变化如图 4 所示。T1 和 T3 处理组都促进了大豆叶片类黄酮含量的增加,随着处理时间的增加,这种促进作用越明显。UV-B 辐射对大豆类黄酮有促进作用,成熟期增幅最大,T1 组为 89.40%,T2 组为 140.56%,与 CK 组差异均达极显著($P<0.01$);前三生育期 O_3 处理的 T2 组类黄酮含量基本无变化,而到后两个生育期增加显著,对于大豆的类黄酮来说可能存在一个 O_3 吸收累积阈值,超过这个阈值叶片体内类黄酮含量显著增加;分枝期类黄酮含量 $T3<CK<T2<T1$,但差异均不显著($P>0.05$)。开花期类黄酮含量 $T2<CK<T3<T1$,有 UV-B 处理的 T1、T3 组与无 UV-B 处理的 CK、T2 组差异达显著($P<0.05$),而 T1 与 T3 组、CK 与 T2 组之间差异则不显著($P>0.05$)。后三个生育期复合处理 T3 组与两单因子处理组及对照组的差异均达极显著($P<0.01$),T1、T3 组最大增幅均在成熟期,分别为 102.11%、140.56%,鼓粒期 T2 组增幅最大,为 48.97%,后期 O_3 和 UV-B 表现出一定的复合效应。

3 讨论

3.1 臭氧浓度增加和 UV-B 辐射增强及其复合处理对大豆叶绿素的影响

叶绿素是植物进行光合作用的主要色素,叶绿素含量在一定程度上能反映植物光合作用强弱,对环境胁迫十分敏感^[10]。叶绿素含量的降低是叶绿素合成受阻,或降解增加,或是二者共同作用的结果。 O_3 胁迫处理会导致作物叶绿体结构发生改变,叶绿体数目减少,类囊体膜膨胀,叶片叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素以及类胡萝卜素含量出现显著下降^[1,19-20]。100 nmol/mol O_3 浓度增加显著降低了大豆的叶绿素含量,这与李彩虹等人^[21]的研究结果基本一致。同时,色素亦是色素蛋白的复合物,蛋白质对 UV-B 辐射的强烈吸收决定了光合色素对 UV-B 辐射的敏感性。UV-B 辐射增强降低大多数植物叶绿素含量(包括叶绿素 a、b、总叶绿素和类

胡萝卜素)^[11],但也有研究表明,UV-B 辐射增强对叶绿素含量没有影响,甚至是提高叶绿素含量^[8-9,22-23]。UV-B 辐射胁迫下叶绿素生物合成与辐射强度有直接关系,强度越高抑制作用越大^[10]。10% UV-B 辐射增强对大豆叶绿素含量的影响不显著,可能和处理的 UV-B 辐射水平有关,而且 10% UV-B 辐射显著促进了大豆叶片中类黄酮含量的增加,对类胡萝卜素的伤害也弱于单因子 O₃ 处理。增加的类黄酮可以吸收部分的 UV-B 辐射^[24],类胡萝卜素也可以保护受光激发的叶绿体免遭光氧化的破坏^[25],从而在一定程度上缓和 UV-B 辐射对大豆叶绿素的伤害,这可能正是 10% UV-B 辐射增强处理大豆叶绿素含量降低不显著的重要原因。100 nmol/mol O₃ 和 10% UV-B 辐射增强两者复合显著降低了大豆的叶绿素和类胡萝卜素含量,这与 Zeuthan^[13]等人的研究结果一致。虽然复合处理也显著促进了类黄酮含量的增加,但这一调节能力未能缓和 O₃ 和 UV-B 对大豆叶绿素的破坏。综上所述,100 nmol/mol O₃ 浓度增加对大豆叶绿素含量产生了显著影响,而 10% UV-B 辐射强度增强对大豆叶绿素含量的影响不显著,复合处理对大豆叶绿素含量的影响不仅存在协同作用,且 O₃ 因子在复合作用过程中起了主导作用。

3.2 臭氧浓度增加和 UV-B 辐射增强及其复合处理对大豆光合作用的影响

地表 O₃ 浓度增加和 UV-B 辐射增强均会对植物的光合作用产生不利影响^[26-27]。国内外大量研究表明,引起植物光合作用降低的因素很多,如叶绿体结构发生改变^[19]、叶绿素和可溶性蛋白质分解^[28]、细胞膜透性增加^[29]、膜脂过氧化加剧^[30]、活性氧清除酶和与碳素固定有关的酶活性降低^[28]、叶片衰老加快^[31]、有机物向外运输而导致的反馈抑制等^[14]。但叶绿素含量的变化并不一定导致光合速率对应的波动变化,T1 的叶绿素含量一直较 T2 组高,T2 的净光合速率 P_n 基本都高于 T1。这说明了引起大豆光合速率的降低的主要原因并不仅是叶绿素含量的减少,而可能是叶片单位面积活性变化、气孔导度降低以及叶绿素含量减少等因素共同作用的结果。

叶片净光合速率 P_n 与光合气体交换参数 G_s 和 C_i 有密切的关系,环境胁迫因子对 P_n 的影响是通过 G_s 和 C_i 等的响应实现的^[32]。 P_n 的变化既可能是气孔因素也可能是非气孔因素,但气孔导度 G_s 与净光合速率 P_n 的正相关不能作为判断是气孔因素还是非气孔因素的可靠依据^[33]。根据 Farquhar 和 Sharkey 的观点^[34],导致光合速率降低的因素有气孔限制和非气孔限制,如果胁迫使 G_s 减小而叶肉细胞仍在活跃地进行光合作用, C_i 明显下降, L_s 升高,这种情况是典型的气孔限制所致;反之,如果叶肉细胞本身光合能力显著下降,使其利用 CO₂ 的能力降低,从而 C_i 升高, G_s 、 L_s 下降,则为典型的非气孔因素所致。

100 nmol/mol 地表 O₃ 浓度增加和 10% UV-B 辐射增强都导致大豆的净光合速率 P_n 、气孔导度 G_s 、气孔限制值 L_s 降低,胞间 CO₂ 浓度 C_i 上升,说明此时大豆光合速率下降主要是由非气孔因素引起的。O₃ 和 UV-B 两者复合处理对大豆光合作用的影响与两单因子处理的情况基本相同。综上所述,说明 100 nmol/mol 浓度的 O₃ 和 10% UV-B 辐射增强及其复合处理下,造成大豆光合作用下降的主要原因都是非气孔因素。

有研究表明,O₃ 经气孔进入植物组织后,首先与脂膜上的不饱和脂肪酸发生反应,损伤膜的一定部位并抑制细胞膜上的 K⁺-ATPase 离子泵,导致保卫细胞的膨压下降,使气孔呈关闭趋势^[1],增加叶片气孔阻力,降低气孔传导,抑制 CO₂ 吸收和水汽交换,提高叶温,最终导致光合速率降低^[35]。此外,进入叶片的 O₃ 会降低光合酶的数量和活性,加快叶绿素降解、导致光合有效叶面积的减少以及叶片的早衰,还会与非质体的组成物质发生反应,生成一系列的活性氧自由基,超过一定值还会破坏植物的抗氧化系统,导致活性氧自由基累积,进而破坏光合系统的蛋白质和色素分子乃至整个植物细胞^[1,36-37]。UV-B 辐射增强的环境下,许多植物都会表现出光合速率降低。UV-B 辐射会造成植物光反应中心蛋白 D1、D2 的降解和外周集光天线蛋白的减少^[38],光系统 II 相关的电子传递受抑制^[39],RuBPCase 羧化酶活性降低和类囊体被破坏^[40]等,这些都可能成为限制光合作用的非气孔因素。表观量子效率(AQY)一般可以表征植物对光能的利用效率,而较低的半饱和光强(I_k)则意味着叶片在较低的光强下即可达到饱和,从而更易产生过剩光能,本文研究得到的表观量子效率和半饱和光强的变化验证了这一观点。

在分析 O₃ 浓度增加及 UV-B 辐射增强条件下大豆净光合速率与不同处理水平的关系时还发现:T1、T2、

T3 三个处理与 CK 相比, P_n 降幅分别为 11.50%—40.82%、11.83%—39.60% 和 20.78%—49.85%。UV-B 和 O_3 处理的大豆净光合速率 P_n , 不同的处理组与对照间差异均显著, 但两单因子处理组(T1、T2)与复合处理组(T3)之间并无显著差异, 两者复合处理时比单独作用时的影响有所加深, 但是小于两者单独作用时的影响的简单累加, 最大净光合速率 P_{max} 也印证了这点。这与 Ambasht 等人的研究基本一致^[14]。可能原因是: 由于 UV-B 对大豆气孔表现出更强的抑制作用, 导致气孔关闭, 限制了复合处理的 O_3 吸收通量。还有可能是由于 O_3 刺激了类黄酮的生成, 缓解了 UV-B 对大豆光合作用过程的影响。

4 结论

(1) 100 nmol/mol O_3 浓度增加和 10% UV-B 辐射增强复合处理导致大豆叶绿素含量的降低, 两者存在协同作用, 且 O_3 胁迫因子起了主导作用。

(2) 100 nmol/mol O_3 浓度增加和 10% UV-B 辐射增强复合处理对大豆光合作用的影响比两因子单独作用时有所加深, 是 O_3 和 UV-B 共同作用的结果, 并且导致大豆光合作用下降的主要原因都是非气孔因素。

References:

- [1] Wang C Y, Bai Y M. Research into the Impacts of Variation of Ozone and Aerosols on Crops. Beijing: Meteorological Press, 2007, 1-59.
- [2] Liu F, Wang X K, Zhu Y G. Assessing current and future ozone-induced yield reductions for rice and winter wheat in Chongqing and the Yangtze River Delta of China. *Environmental Pollution*, 2009, 157(2): 707-709.
- [3] Keller F, Bassin S, Ammann C, Fuhrer J. High-resolution modelling of AOT₄₀ and stomatal ozone uptake in wheat and grassland: a comparison between 2000 and the hot summer of 2003 in Switzerland. *Environmental Pollution*, 2007, 146(3): 671-677.
- [4] Zheng Q W, Wang X K, Feng Z Z, Song W Z, Feng Z W. Ozone effects on chlorophyll content and lipid peroxidation in the in situ leaves of winter wheat. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2005, 25(11): 2240-2244.
- [5] Guo J P, Wang C Y, Wen M, Bai Y M, Huo Z G. The experimental study on the impact of atmospheric O_3 variation on rice. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(6): 822-826.
- [6] Calatayud A, Iglesias D J, Talón M, Barreno E. Effects of 2-month ozone exposure in spinach leaves on photosynthesis, antioxidant systems and lipid peroxidation. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2003, 41(9): 839-845.
- [7] Neale P J, Hayes D R, Goodrich V R. Biologically effective UV-B in the mid-Atlantic region 1975—1997 // Abstract 27th Annual Meeting of Am Soc Photobiol Photochem Photobiol. Am Soc Photobiol Photochem Photobiol, 1999: 69-79.
- [8] 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 Phytocologica Sinica*, 2001, 25(5): 520-524.
- [9] Liu M, Li R G, Fan H, Du G C. Effects of enhanced UV-B radiation on photosynthetic pigments and some enzymes in tobacco. *Acta Botanica Boreal-Occident Sinica*, 2007, 27(2): 291-296.
- [10] Peng Q, Zhou Q. Effects of La on leaf chlorophyll biosynthesis and degradation of soybean (*Glycine max*) under ultraviolet-B stress. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2007, 28(3): 285-288.
- [11] Zhong C, Wang Y, Chen Z Y. Effects of ultraviolet-B radiation on plant photosynthetic apparatus and processes of photosynthesis. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2009, 24(6): 895-903.
- [12] Miller J E, Booker F L, Fiscus E L, Heagle A S, Pursely W A, Vozzo S F, Heck W W. Ultraviolet-B radiation and ozone effects on growth, yield and photosynthesis of soybean. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23: 83-91.
- [13] Zeuthan J, Mikkelsen T N, Paludan-Müller G, Ro-Poulsen H. Effects of increased UV-B radiation and elevated levels of tropospheric ozone on physiological processes in European beech (*Fagus sylvatica*). *Physiologia Plantarum*, 1997, 100(2): 281-290.
- [14] Ambasht N K, Agrawal M. Effects of enhanced UV-B radiation and tropospheric ozone on physiological and biochemical characteristics of field grown wheat. *Biologia Plantarum*, 2003, 47(4): 625-628.
- [15] Wu R J, Zheng Y F, Zhao Z, Hu C D, Wang L X. Assessment of loss of accumulated dry matter in winter wheat based on stomatal conductance and ozone uptake model. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(11): 2799-2808.
- [16] Thornley J H M. Mathematical Models in Plant Physiology. Beijing: Academic Press, 1983: 107-129.
- [17] Zhang Z L, Qu W J. The Guidance of Plant Physiology Experiments. Beijing: Higher Education Press, 2003: 67-70.
- [18] Caldwell M M. The effects of solar UV-B radiation (280—315nm) on higher plants: implications of stratospheric ozone reduction. // Caseellan A. Research in Photobiology, New York: Plenum Press, 1977:335.
- [19] Kivimäenpää M, Sellden G, Sutinen S. Ozone-induced changes in the chloroplast structure of conifer needles, and their use in ozone diagnostics. *Environmental Pollution*, 2005, 137(3): 466-475.
- [20] Anil S, Grantz D A. Ozone impacts on competition between tomato and yellow nutsedge: above and below ground affects. *Crop Science*, 2005, 45(4): 1587-1595.
- [21] Li C H, Li Y, Wuyun T N, Wu G L, Jiang G M. Effects of high concentration ozone on soybean growth and grain yield. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(9): 2347-2352.

- [22] Rech M, Mouget J L, Morant-Manceau A, Rosa P, Tremblin G. Long-term acclimation to UV radiation: effects on growth, photosynthesis and carbonic anhydrase activity in marine diatoms. *Botanica Marina*, 2005, 48(5): 407-420.
- [23] Ruhland C T, Xiong F S, Clark W D, Day T A. The influence of ultraviolet-B radiation on growth, hydroxycinnamic acids and flavonoids of *Deschampsia antarctica* during spring time ozone depletion in Antarctica. *Photochemistry and Photobiology*, 2005, 81(5): 1086-1093.
- [24] Wang X J, Pan R C. Influence of UV-B on growth, yield and some metabolic processes in higher plants. *Plant Physiology Communications*, 1995, 31(5): 385-389.
- [25] Zhang Q D, Lu C M, Liu L N, Bai K Z, Kuang T Y. Effects of doubled CO₂ on contents of photosynthetic and on kinetic parameters of fluorescence induction in different genotypes of soybean. *Acta Botanica Sinica*, 1997, 39(10): 946-950.
- [26] Zhang J, Wang J, Tian L P. Advance in research on effect of enhanced UV-B radiation on plants. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(22): 104-108.
- [27] Xu H, Yang J C, Chen S B, Jiang G M, Li Y G. Review of plant responses to ozone pollution. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(6): 1205-1213.
- [28] Reichenauer T G, Goodman B A. Stable free radicals in ozone-damaged wheat leaves. *Free Radical Research*, 2001, 35(2): 93-101.
- [29] Heath R L. The biochemistry of ozone attack on the plasma membrane of the plant cells//Saunders J A, Kosak-Channing L, Conn E E, eds. *Recent Advances in Phytochemistry: Phytochemical Effects of Environmental Compounds*. New York: Plenum Press, 1987.
- [30] Alscher R G, Erturk N, Heath L S. Role of superoxide dismutases (SODs) in controlling oxidative stress in plants. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53(372): 1331-1341.
- [31] Gelang J, Pleijel H, Sild E, Danielsson H, Younis S, Selldén G. Rate and duration of grain filling in relation to flag leaf senescence and grain yield in spring wheat (*Triticum aestivum*) exposed to different concentrations of ozone. *Physiologia Plantarum*, 2000, 110(3): 366-375.
- [32] Ke S S. Photosynthetic stomatal and nonstomatal limit of *Calycanthus chinensis* under water stress. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2006, 26(6): 1-5.
- [33] Xu D Q. Some problems in stomatal limitation analysis of photosynthesis. *Plant Physiology Communications*, 1997, 33(4): 241-244.
- [34] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, 33: 317-345.
- [35] Bai Y M, Wang C Y, Wen M, Guo J P. Influences of different ozone concentrations and fumigation days on spinach growth and yield. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(12): 1971-1975.
- [36] Wang Y J, Ye J Y. The protective effects of pyocyanine against photoinhibition in spinach chloroplasts. *Acta Phytophysiological Sinica*, 1996, 22(2): 123-129.
- [37] Reichenauer T G, Goodman B A, Kostecki P, Soja G. Ozone sensitivity in *Triticum durum* and *T. aestivum* with respect to leaf injury, photosynthetic activity and free radical content. *Physiologia Plantarum*, 1998, 104(4): 681-686.
- [38] Ihle C. Degradation and release from the thylakoid membrane of photosystem II subunits after UV-B irradiation of the liverwort *Conocephalum conicum*. *Photosynthesis Research*, 1997, 54(1): 73-78.
- [39] Brandle J R, Campbell W F, Sisson W B, Caldwell M M. Net photosynthesis, electron transport capacity, and ultrastructure of *Pisum sativum* L. exposed to ultraviolet-B radiation. *Plant Physiology*, 1977, 60(1): 165-169.
- [40] Vu C V, Allen L H, Garrard L A. Effects of supplemental UV-B radiation on primary photosynthetic carboxylating enzymes and soluble proteins in leaves of C₃ and C₄ crop plants. *Physiologia Plantarum*, 1982, 55(1): 11-16.

参考文献:

- [1] 王春乙, 白月明. 臭氧和气溶胶浓度变化对农作物的影响研究. 北京: 气象出版社, 2007: 1-59.
- [4] 郑启伟, 王效科, 冯兆忠, 宋文质, 冯宗炜. 臭氧对原位条件下冬小麦叶片光合色素、脂质过氧化的影响. *西北植物学报*, 2005, 25(11): 2240-2244.
- [5] 郭建平, 王春乙, 温民, 白月明, 霍治国. 大气中 O₃ 浓度变化对水稻影响的试验研究. *生态学报*, 2001, 27(6): 822-826.
- [8] 师生波, 黄桂英, 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.
- [9] 刘敏, 李荣贵, 范海, 杜桂彩. UV-B 辐射对烟草光合色素和几种酶的影响. *西北植物学报*, 2007, 27(2): 291-296.
- [10] 彭倩, 周青. La(III) 对 UV-B 辐射胁迫下大豆叶绿素合成与降解影响的机理. *中国农业气象*, 2007, 28(3): 285-288.
- [11] 钟楚, 王毅, 陈宗瑜. UV-B 辐射对植物光合器官和光合作用过程的影响. *云南农业大学学报*, 2009, 24(6): 896-903.
- [15] 吴荣军, 郑有飞, 赵泽, 胡程达, 王连喜. 基于气孔导度和臭氧吸收模型的冬小麦干物质累积损失评估. *生态学报*, 2010, 30(11): 2799-2808.
- [17] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学试验指导. 北京: 高等教育出版社, 2003: 67-70.
- [21] 李彩虹, 李勇, 乌云塔娜, 吴光磊, 蒋高明. 高浓度臭氧对大豆生长发育及产量的影响. *应用生态学报*, 2010, 21(9): 2347-2352.
- [24] 王小菁, 潘瑞炽. UV-B 对高等植物生长和产量及某些生理代谢过程的影响. *植物生理学通讯*, 1995, 31(5): 385-389.
- [25] 张其德, 卢从明, 刘丽娜, 白克智, 匡廷云. CO₂ 倍增对不同基因型大豆光合色素含量和荧光诱导动力学参数的影响. *植物学报*, 1997, 39(10): 946-950.
- [26] 张静, 王进, 田丽萍. 紫外线 (UV-B) 辐射增强对植物生长的研究进展. *中国农学通报*, 2009, 25(22): 104-108.
- [27] 许宏, 杨景成, 陈圣宾, 蒋高明, 李永庚. 植物的臭氧污染胁迫效应研究进展. *植物生态学报*, 2007, 31(6): 1205-1213.
- [33] 许大全. 光合作用气孔限制分析中的一些问题. *植物生理学通讯*, 1997, 33(4): 241-244.
- [35] 白月明, 王春乙, 温民, 郭建平. 臭氧浓度和熏气时间对菠菜生长和产量的影响. *中国农业科学*, 2004, 37(12): 1971-1975.
- [36] 王颖君, 叶寄宇. 腺苷素对光抑制条件下菠菜叶绿体的保护作用. *植物生理学报*, 1996, 22(2): 123-129.

CONTENTS

Physiological responses of five deciduous broad-leaved tree seedlings in the Northeast Area of China to burning	WANG Rong, HU Haiqing (2303)
The occurrence regularity of psyllid in <i>Haloxylon</i> spp and its influencing factors	LI Fenlian, WU Xuehai, WANG Peiling, et al (2311)
The estimating of the spatial distribution of forest biomass in China based on remote sensing and downscaling techniques	LIU Shuangna, ZHOU Tao, SHU Yang, et al (2320)
Multivariate correlation analysis between landscape pattern and water quality	ZHAO Peng, XIA Beicheng, QIN Jianqiao, et al (2331)
Red fox habitat selection and landscape feature analysis in the Dalai Lake Natural Reserve in Inner Mongolia	ZHANG Honghai, LI Chengtao, DOU Huashan, et al (2342)
Research on assemblage characteristics of macroinvertebrates in the Yalu Tsangpo River Basin	XU Mengzhen, WANG Zhaoyin, PAN Baozhu, et al (2351)
Climate change induced potential range shift of the crested ibis based on ensemble models	ZHAI Tianqing, LI Xinhai (2361)
Analysis of the sources of second generation meadow moth populations that immigrated into Chinese pastoral areas in 2010	ZHANG Li, ZHANG Yunhui, ZENG Juan, et al (2371)
Genetic diversity based on cytochrome <i>b</i> gene analysis of different geographic populations of blue sheep in China	LI Nannan, LIU Zhensheng, WANG Zhenghuan, et al (2381)
Soil microbial properties under different grain-for-green patterns in depressions between karst hills	LU Shiyang, PENG Wanxia, SONG Tongqing, et al (2390)
Ecosystem and soil respiration of a poplar plantation on a sandy floodplain in Northern China	FANG Xianrui, ZHANG Zhiqiang, ZHA Tonggang, et al (2400)
Estimating total nitrogen content in water body based on reflectance from wetland vegetation	LIU Ke, ZHAO Wenji, GUO Xiaoyu, et al (2410)
Analysis on complete F type of mitochondrial genome in <i>Lamprotula lei</i>	CHEN Ling, WANG Guiling, LI Jiale (2420)
The source-sink landscape pattern change and its effect on phosphorus pollution in Yuqiao watershed	LI Chongwei, HU Jie, WANG Sa, et al (2430)
Responses of soil nematode communities to soluble salt contamination around Gangue hill in Fushun	ZHANG Weidong, LV Ying, XIAO Ying, et al (2439)
Effect of aboveground competition on biomass partitioning of understory Korean pine (<i>Pinus koraiensis</i>)	WANG Jinsong, FAN Xiuhua, FAN Juan, et al (2447)
Research of methane metabolic microbial community in soils of slash pine plantation and Masson pine plantation	WANG Yun, ZHENG Hua, CHEN Falin, et al (2458)
$\delta^{13}\text{C}$ values of stem phloem water soluble sugars of <i>Pinus massoniana</i> and <i>Cunninghamia lanceolata</i> response to meteorological factors	LU Yuxi, WANG Zhenxing, ZHENG Huaizhou, et al (2466)
Soil respiration patterns during restoration of vegetation in the Shapotou area, Northern China	GAO Yanhong, LIU Lichao, JIA Rongliang, et al (2474)
Dynamics of caloric value of <i>Robinia pseudoacacia</i> L. energy forest in the west of Henan Province	TAN Xiaohong, LIU Shiqi, MA Luyi, et al (2483)
<i>Ex-situ</i> symbiotic seed germination of <i>Dendrobium catenatum</i>	WU Huifeng, SONG Xiqiang, LIU Hongxia (2491)
Effects of red/far red ratio on morphological index, leaf area and dry matter partitioning of cut chrysanthemum flower	YANG Zaiqiang, ZHANG Jibo, LI Yongxiu, et al (2498)
Effect of prometryne on root activity and oxidative stress of <i>Polygala tenuifolia</i> Willd. seedling roots	WEN Yinyuan, GUO Pingyi, YIN Meiqiang, et al (2506)
Combined effects of elevated O_3 concentration and UV-B radiation on photosynthetic characteristics of soybean	ZHENG Youfei, XU Weimin, WU Rongjun, et al (2515)
Nutrients transfer for host plant and litter decomposition by AMF in Karst soil	HE Yuejun, ZHONG Zhangcheng, DONG Ming (2525)
The dynamics of bacteria community diversity during the fermentation process of traditional soybean paste	GE Jingping, CHAI Yangyang, CHEN Li, et al (2532)
Effect of site-specific fertilization on soil phosphorus in purple garden soil	SUN Qianqian, WANG Zhengyin, ZHAO Huan, et al (2539)
A method of determining standards for ecological compensation in agricultural areas, giving priority to environmental flows in water allocation	PANG Aiping, SUN Tao (2550)
The loss of ecosystem services value caused by food security assessment model and its application	LU Weiye, JIANG Zhide, ZHANG Yinglong, et al (2561)
Review and Monograph	
Review of the current situation of coastal ecological engineering using dredged marine sediments and prospects for potential application in China	HUANG Huamei, GAO Yang, WANG Yinxia, et al (2571)
Discussion	
Quorum sensing in anaerobic ammonium oxidation bacteria	DING Shuang, ZHENG Ping, ZHANG Meng, et al (2581)
Health evaluation of Dongting Lake based on morphological characters	SHUAI Hong, LI Jingbao, XIA Beicheng, et al (2588)
Scientific Note	
Effects of mix-leaf litter decomposition of different trees in the Loess Plateau	LIU Zengwen, DU Liangzhen, ZHANG Xiaoxi, et al (2596)
Changes in soil active organic carbon under different management types of bamboo stands	MA Shaojie, LI Zhengcai, WANG Bin, et al (2603)
Effects of drought stress on photosynthesis and associated physiological characters of pepper	OU Lijun, CHEN Bo, ZOU Xuexiao (2612)
Effects of silicon application and drought stress on photosynthetic traits and mineral nutrient absorption of rice leaves	CHEN Wei, CAI Kunzheng, CHEN Jining (2620)

《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 8 期 (2012 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 8 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: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