

# 地表臭氧增加对黄花夹竹桃和芒果叶片膜脂过氧化程度和保护酶活性的影响

路光超<sup>1</sup>, 黄玉源<sup>2</sup>, 陈红跃<sup>3\*</sup>, 许炼烽<sup>4</sup>

1. 广州市金牛环保科技有限公司, 广东 广州 510663; 2. 仲恺农业工程学院生命科学院, 广东 广州 510225;  
3. 华南农业大学林学院, 广东 广州 510642; 4. 环境保护部华南环境科学研究所, 广东 广州 510655

**摘要:**以黄花夹竹桃(*Thevetia peruviana* (Pers.) k. Schum.)和芒果(*Mangifera indica* L.)苗木为材料, 研究4种臭氧(O<sub>3</sub>)体积分数[环境大气 NF,  $\varphi(\text{O}_3)=10\times 10^{-9}\sim 20\times 10^{-9}$ ; 低体积分数处理 E50,  $\varphi(\text{O}_3)=50\times 10^{-9}$ ; 中体积分数处理 E100,  $\varphi(\text{O}_3)=100\times 10^{-9}$ ; 高体积分数处理 E200,  $\varphi(\text{O}_3)=200\times 10^{-9}$ ]下两种植物叶片膜脂过氧化程度、可溶性蛋白质质量分数、可溶性糖质量分数和保护酶活性的变化情况, 旨在揭示地表臭氧体积分数升高条件下2种植物生理代谢活动变化机理及响应规律。结果表明: 随臭氧体积分数的增加, 2种植物丙二醛含量和膜透性均逐渐上升, 且与臭氧体积分数呈显著正相关关系, 说明两种植物膜脂过氧化程度加剧; 低体积分数 O<sub>3</sub> 处理时两种植物可溶性蛋白质质量分数均逐渐下降, 高  $\varphi(\text{O}_3)$  处理后小幅回升; 黄花夹竹桃可溶性糖质量分数逐渐下降, 芒果先上升后下降; 2种植物的 POD 活性均显著上升, 但上升幅度有较大差异; 2种植物的 CAT 活性均呈先升高再降低的趋势。研究表明, 不同体积分数的臭氧暴露下, 黄花夹竹桃和芒果均受到不同程度的伤害, 芒果对臭氧表现出较强的抗性, 黄花夹竹桃对臭氧较敏感。

**关键词:** 臭氧; 园林植物; 膜脂过氧化; 保护酶活性; 污染

**中图分类号:** Q945.79

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-5906 (2012) 07-1235-06

O<sub>3</sub> 是光化学烟雾的主要成分, 是一种强氧化剂, 几乎能够与所有的生物物质发生反应。珠江三角洲地区经济发达, 城市人口和工业非常密集, 臭氧污染较为严重。王雪梅等<sup>[1]</sup>1999年在广州监测的年平均 O<sub>3</sub> 体积分数为  $31\times 10^{-9}$  以上, 小时最大 O<sub>3</sub> 体积分数为  $92\times 10^{-9}$ 。香港特区政府环境保护署与广东省环境保护厅联合发布的粤港珠江三角洲区域空气监控网络主要空气污染物监测结果报告表明, 2009年珠三角区域年均 O<sub>3</sub> 体积分数介于  $18\times 10^{-9}$  和  $45\times 10^{-9}$  之间, 小时最大 O<sub>3</sub> 体积分数为  $215\times 10^{-9}$ 。2006—2009年, 珠三角地区 O<sub>3</sub> 体积分数上升了约10%。城市 O<sub>3</sub> 体积分数升高将对园林绿化植物产生一定危害。

O<sub>3</sub> 体积分数很低时能减缓植物生长, 体积分数超过  $50\times 10^{-9}$  时可对植物产生毒害作用<sup>[2]</sup>, 高体积分数可杀死叶片组织, 使叶片干枯, 最终引起植物死亡。目前, 国内外已有不少试验和报道, 研究 O<sub>3</sub> 体积分数升高对植物伤害的外部症状变化和生理生化的影响, 如对植物的外部症状的影响<sup>[3-5]</sup>, 对植物叶片叶绿体荧光特性和光合特性的影响<sup>[6-14]</sup>, 对农作物和蔬菜产量的影响<sup>[15-18]</sup>, 对植物膜脂过氧化和抗氧化系统的影响<sup>[19-24]</sup>等, 研究对象主要涉及蔬菜、农作物和少数几种树种。研究发现<sup>[4, 19-24]</sup>, 高

体积分数臭氧暴露下, 植物膜脂过氧化程度加剧, 过氧化物酶活性增加, 但过氧化氢酶活性变化差异较大。

黄花夹竹桃(*Thevetia peruviana* (Pers.) k. Schum.)和芒果(*Mangifera indica* L.)是园林绿化上常用的树种, 探讨其抗臭氧污染能力对园林树种的筛选和应用有重要意义。本试验运用自行设计的开顶气室(open-top chambers, OTCs), 对两个树种进行不同体积分数的臭氧暴露处理, 研究剂量体积分数的 O<sub>3</sub> 对植物叶片可溶性蛋白、可溶性糖、膜脂过氧化程度和保护酶活性的影响, 探索在不同体积分数 O<sub>3</sub> 污染状态下植物体内主要生理代谢活动变化特点及抗性机制, 为城市园林绿化筛选抗性强的树种, 为科学全面地评价地表 O<sub>3</sub> 体积分数升高对园林植物的影响机制提供依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验设计

试验在广州华南农业大学(23°09'N, 113°21'E)校园进行。试验材料黄花夹竹桃(平均株高 45 cm, 冠幅 12 cm×15 cm)和芒果(平均株高 70 cm, 冠幅 30 cm×30 cm)为 2 a 生树苗, 均来源于广东省林木种苗示范基地。

臭氧熏气设备采用自行设计的开顶式、模拟自

**作者简介:** 路光超 (1983 年生), 男, 硕士, 主要研究方向为环境影响评价和森林培育。E-mail: gzlgc@foxmail.com

**\*通讯作者:** 陈红跃 (1964 年生), 男, 教授, 主要从事森林培育研究工作。E-mail: chenhongyuetz@126.com

**收稿日期:** 2012-03-23

然动态熏气室, 体积约  $1.5 \text{ m}^3$ 。臭氧由中山市聪明人环保科技有限公司生产的 YIDAB-8D 型号臭氧发生器产生, 采用美国 ECO 公司生产的 A-21ZX 便携式臭氧检测仪(量程为  $0 \sim 10 \times 10^{-6}$ , 灵敏度  $0.01 \times 10^{-6}$ )对气室中臭氧体积分数进行监控。

本试验设置的臭氧体积分数和熏气时间参考以往研究成果<sup>[3-4]</sup>, 并根据本试验材料和研究目的进行适当调整, 且在正式试验前进行了检验性试验, 最终确定以下试验设计方案:

试验设 4 个处理: E50 [ $\varphi(\text{O}_3)=50 \times 10^{-9}$ ]、E100 [ $\varphi(\text{O}_3)=100 \times 10^{-9}$ ]、E200 [ $\varphi(\text{O}_3)=200 \times 10^{-9}$ ] 和环境大气处理 NF [NF,  $\varphi(\text{O}_3)=10 \times 10^{-9} \sim 20 \times 10^{-9}$ ]。每个处理设 3 次重复, 每次重复熏气时间为 3 d, 参试苗木 10 株。

试验时分别将黄花夹竹桃和芒果各 10 盆放入熏气室, 关闭气室门, 留出补充新鲜空气的缝隙, 使气室内气体处于流动状态。调节好臭氧发生器产生体积分数和熏气室顶部开口大小, 开启气室内风扇以搅匀气体, 控制气室内的  $\text{O}_3$  体积分数稳定。2010 年 4 月 16 日起, 每天熏气 7 h (9:30—16:30), 每小时测定一次  $\text{O}_3$  体积分数, 监测气室内  $\text{O}_3$  体积分数是否保持稳定。4 月 19 日停止供气, 试验过程中光、温、水、肥、病虫害和杂草等非试验因素有一定影响, 但不是主要的影响因子。

## 1.2 测定指标和计算方法

4 月 19 日对 4 个处理的黄花夹竹桃和芒果取样, 选取植株第 2 与第 3 片成熟、全展、正常叶片, 用蒸馏水洗净, 滤纸吸干, 去除叶片中脉, 进行各项生理指标测定。

### 1.2.1 膜透性测定方法

取待测新鲜叶片, 用孔径为 0.6 cm 的打孔器将叶片打孔, 每支试管加入 10 个小圆片及蒸馏水 20 mL, 加塞, 用 DDS-11A 型电导率测定震荡 40 min 后叶片浸提液的电导率和沸水浴中加热 20 min 后的电导率, 二者比值的百分比即为膜透性。

### 1.2.2 丙二醛测定方法

取植物新鲜叶片, 加入 10% 三氯乙酸(TCA)研磨, 离心, 取上清液于带塞试管中, 加入 0.5% 硫代巴比妥酸(TBA), 于沸水浴上反应 20 min, 迅速冷却离心, 于 532、600 及 450 nm 波长下测 OD 值<sup>[25]</sup>, 代入公式计算, 单位为  $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

### 1.2.3 可溶性蛋白测定方法

称取新鲜植物叶片, 用磷酸缓冲液(pH 7.0)在冰浴中研磨, 离心, 上清液倒入 10 mL 容量瓶定容。取试管, 加入 0.1 mL 提取液、0.9 mL 蒸馏水和 5 mL 考马斯亮蓝 G-250 试剂, 放置 3 min, 在 595 nm 波长下比色测定<sup>[25]</sup>, 单位为  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

### 1.2.4 可溶性糖测定方法

先将待测叶片杀青、烘干、磨碎, 倒入试管内, 加入 80% 乙醇, 置于 80 °C 水浴中重复提取 3 次, 合并上清液和滤液, 在收集液中加入活性炭, 80 °C 水浴中脱色, 过滤。取滤液并加入蒽酮试剂(0.1 g 蒽酮溶于 80% 浓硫酸中), 置于沸水浴 10 min, 取出冷却, 在 620 nm 波长下, 用空白调零测定光密度, 单位为  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

### 1.2.5 过氧化氢酶测定方法

称取新鲜叶片 0.2 g 置于研钵中, 在 4 °C 预冷的 pH 7.8 磷酸缓冲液(含 1% 聚乙烯吡咯烷酮)和少量石英砂研磨, 转入 10 mL 容量瓶中定容, 离心。取 10 mL 试管, 逐管加入  $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的双氧水, 并迅速倒入石英比色杯中, 240 nm 下测定吸光度, 以每分钟  $D_{240}$  减少 0.01 定义为 1 个活力单位, 单位为  $\text{OD}_{240} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

### 1.2.6 过氧化物酶测定方法

称取新鲜植物叶片, 用磷酸缓冲液(pH 7.0)在冰浴中研磨, 离心, 取上清液待测。在 3 mL 反应体系中, 加入 0.3%  $\text{H}_2\text{O}_2$  1 mL、0.2% 愈创木酚 0.95 mL、pH 7.0 磷酸缓冲液 1 mL, 最后加入 0.05 mL 酶液启动反应, 记录 470 nm 处 OD 增加速度, 将每分钟 OD 增加 0.01 定义为 1 个活力单位, 单位为  $\text{OD}_{470} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

## 1.3 数据处理方法

试验数据分析应用 Microsoft Excel 2003 与 SAS 8.0 等软件分析程序。

## 2 结果与分析

### 2.1 $\text{O}_3$ 对膜脂过氧化程度的影响

由图 1 可知, 黄花夹竹桃和芒果叶片的 MDA 含量均随臭氧体积分数增加而上升, 两种植物的 MDA 含量与臭氧体积分数呈显著正相关关系 ( $R^2=0.814$  和  $R^2=0.998$ ), 同种植物不同体积分数处理之间差异显著 ( $P<0.05$ )。这表明臭氧加剧了黄花夹竹桃和芒果叶片的膜脂过氧化作用, 加速了叶片的衰老进程。

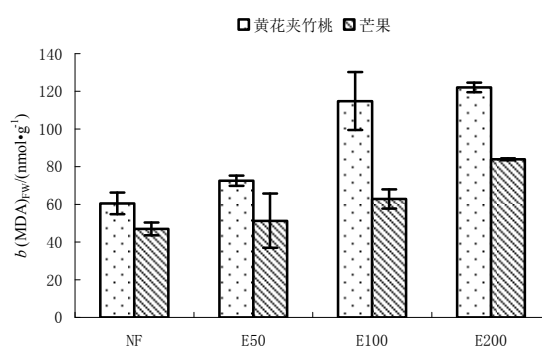


图 1  $\text{O}_3$  对黄花夹竹桃和芒果丙二醛含量的影响

Fig.1 Effects of ozone on the MDA content

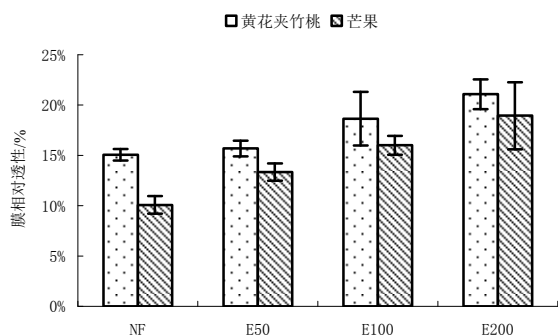
图2 O<sub>3</sub>对黄花夹竹桃和芒果膜透性的影响

Fig.2 Effects of ozone on the membrane permeability

由图2可知,黄花夹竹桃和芒果叶片的膜相对透性均随臭氧体积分数增加而上升,且两种植物的膜相对透性均与臭氧体积分数呈显著正相关关系( $R^2=0.961$ ,  $R^2=0.921$ )。同种植物不同体积分数处理间差异显著( $P<0.05$ )。这说明在高体积分数臭氧暴露下,黄花夹竹桃和芒果叶片的膜系统受到伤害。

## 2.2 O<sub>3</sub>对可溶性蛋白和可溶性糖质量分数的影响

图3表明,臭氧胁迫下,黄花夹竹桃和芒果叶片的可溶性蛋白质量分数均低于对照。随臭氧体积分数升高,2种植物可溶性蛋白质量分数的变化趋势基本相同,先是随臭氧体积分数的增加而减小,在E100处理达到最低点,之后在E200处理时小幅上升。

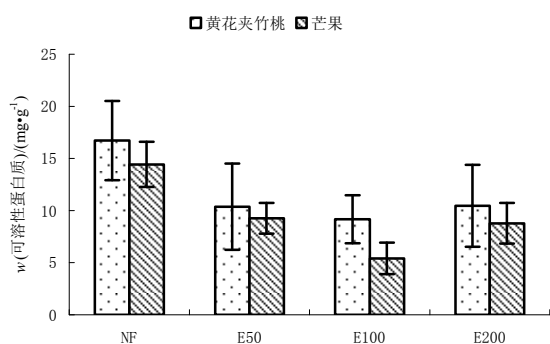
图3 O<sub>3</sub>对黄花夹竹桃和芒果可溶性蛋白质量分数的影响

Fig.3 Effects of ozone on the soluble protein content

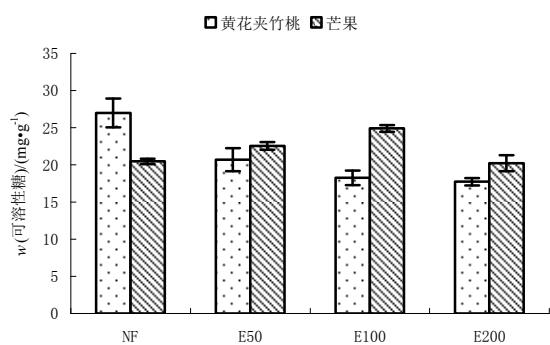
图4 O<sub>3</sub>对黄花夹竹桃和芒果可溶性糖质量分数的影响

Fig.4 Effects of ozone on the soluble sugar content

图4表明,随臭氧体积分数的增加,黄花夹竹桃和芒果叶片的可溶性糖质量分数变化呈相反的趋势。黄花夹竹桃随臭氧体积分数升高持续下降。而芒果在低体积分数臭氧胁迫时缓慢上升,在E100处理达峰值,后在E200处理时迅速下降。根据方差分析,不同体积分数的臭氧胁迫对2个树种的可溶性糖质量分数的影响均达到显著水平( $P<0.05$ )。

## 2.3 O<sub>3</sub>对保护酶活性的影响

由图5可知,黄花夹竹桃和芒果叶片POD活性均随臭氧体积分数增加而呈上升趋势。臭氧胁迫下黄花夹竹桃叶片POD活性与NF处理差异显著( $P<0.05$ ),分别较NF处理上升60.6%(E50)、83.0%(E100)、172.6%(E200)。芒果叶片POD活性在E50处理小幅升高(29.6%),在E100处理后急剧上升,较NF升高975.9%,E200处理后继续缓慢升高。

图6表明,在低、中体积分数臭氧胁迫下,黄花夹竹桃和芒果叶片CAT活性均不同程度的升高,随胁迫强度进一步增加,当高体积分数臭氧( $200\times 10^{-9}$ )胁迫时,两种植物CAT活性均迅速下降。

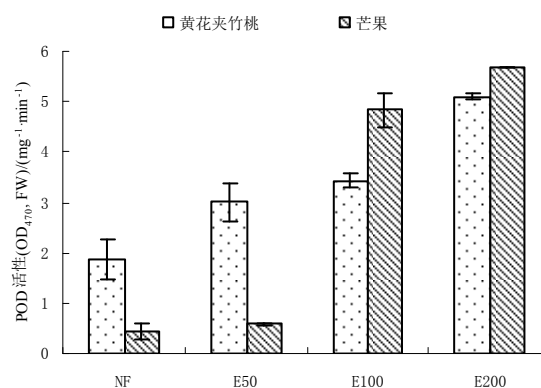
图5 O<sub>3</sub>对黄花夹竹桃和芒果过氧化物酶活性的影响

Fig.5 Effects of ozone on the POD activity

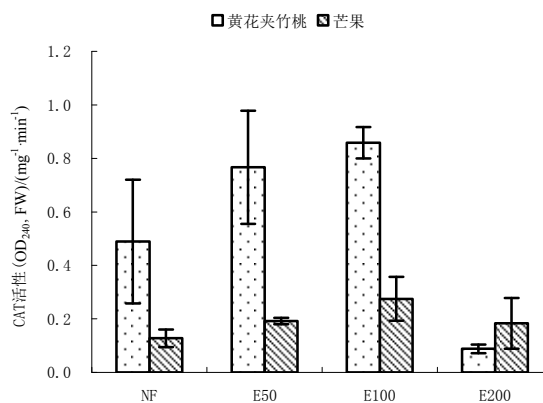
图6 O<sub>3</sub>对黄花夹竹桃和芒果过氧化氢酶活性的影响

Fig.6 Effects of ozone on the CAT activity

### 3 讨论

MDA 含量和膜相对透性都是膜脂过氧化和膜受伤害程度的重要指标。MDA 含量的高低说明了膜脂氧化的程度和植物对逆境条件反应的强弱,是叶片衰老程度的重要指标;植物细胞膜透性的大小反映质膜受伤害的程度,数值越大质膜受伤害程度越大,外渗电导率的变化可以反映出质膜的伤害程度和试验材料抗逆性的大小。在本试验中,随着臭氧体积分数的增加,黄花夹竹桃和芒果叶片MDA 含量均显著增加( $P<0.05$ ),膜相对透性也均显著上升( $P<0.05$ )。试验条件下,臭氧体积分数越高,MDA 含量和膜相对透性越高。这可能是在臭氧胁迫下,黄花夹竹桃和芒果叶片内产生和积累了大量的活性氧产物,对生物膜系统造成伤害,加剧了膜脂过氧化。另外,芒果叶片内MDA 含量的最高升幅(78.9%)小于黄花夹竹桃的最高升幅(92.6%),说明了芒果对臭氧的抗性比黄花夹竹桃强。

叶片受臭氧胁迫发生衰老时,蛋白质合成能力减弱,分解加快,总的表现是蛋白质质量分数显著下降,而叶片中可溶性蛋白质主要是 Rubisco 的降解<sup>[28]</sup>。据以往研究<sup>[4]</sup>,臭氧胁迫下植物较多表现为可溶性蛋白质质量分数下降的情况,但也有出现蛋白质质量分数上升的情况。在本研究中,黄花夹竹桃和芒果在低体积分数臭氧胁迫时,叶片可溶性蛋白质质量分数显著降低,但在高体积分数( $200\times 10^{-9}$ )臭氧胁迫时,叶片可溶性蛋白质质量分数出现小幅回升。这可能是由于臭氧胁迫造成叶片衰老,可溶性蛋白质合成能力下降,分解加快,导致质量分数下降。叶片可溶性蛋白质质量分数小幅回升可能是植物自身产生了逆境蛋白,提高了自身的抗性,是植物对臭氧胁迫下一种自我保护的适应性反应。

可溶性糖质量分数是植物体内碳营养状况的重要指标。通过对臭氧胁迫下芒果可溶性糖质量分数变化分析,认为在低体积分数臭氧胁迫下,芒果为适应渗透胁迫主动积累一些可溶性糖,降低渗透势,以适应外界环境变化<sup>[26]</sup>;而在高体积分数( $200\times 10^{-9}$ )臭氧胁迫下,可能是由于分解糖的酶类在叶部累积增加,加速了糖分的分解。黄花夹竹桃可溶性糖质量分数随臭氧体积分数升高而下降,可能是由于臭氧使各种酶和叶绿素遭到破坏<sup>[6-14]</sup>,导致叶片中叶绿素质量分数下降所致。

CAT、POD 是构成植物体内保护酶体系的重要组成部分,是植物体内清除自由基的重要酶类,它们与其他酶类相互协调,能够在逆境胁迫和衰老过程中清除植物体内过量的活性氧和膜脂过氧化所产生的有毒物,维持活性氧的代谢平衡,保护膜结构,增强植物对臭氧危害的抗性<sup>[29]</sup>。本试验中,黄

花夹竹桃 POD 活性随臭氧体积分数逐渐升高,说明其在低体积分数臭氧时体内已产生较多活性氧,并激发 POD 活性以清除体内过量的活性氧等有害物质。芒果在 E100 处理时,POD 活性才表现出明显的升高趋势,说明低体积分数臭氧并不会使芒果产生明显的伤害,即不会使芒果体内产生较多的活性氧或其他有毒物质,也就不会激发 POD 活性升高。POD 活性的变化也反映了芒果比黄花夹竹桃的抗性要强。本研究中黄花夹竹桃叶片 CAT 活性在低体积分数时升高,表明低体积分数臭氧对黄花夹竹桃产生一定伤害,激发其体内 CAT 活性的增加;但在高体积分数臭氧胁迫下 CAT 活性急剧下降,说明黄花夹竹桃体内的保护酶体系可能已经遭到破坏。芒果 CAT 活性虽然在整个试验过程中表现出与黄花夹竹桃相似趋势,但其变化幅度较小,因此,芒果有可能在臭氧胁迫下受到一定的伤害,但其保护酶体系并未遭到破坏,其变化趋势只是适应环境的表现。

关于臭氧污染状态下植物体内主要生理代谢活动变化特点及抗性机制可能是:在臭氧胁迫下,植物体内的活性氧产物,如超氧自由基( $O_2^-$ )、氢氧自由基( $\cdot OH$ )、过氧化氢( $H_2O_2$ )等会显著地增加和积累<sup>[27]</sup>,这些自由基十分活跃,能危害生物体膜系统,当植物体内的抗氧化体系无法尽快清除或抑制它们时,就会导致和加剧膜脂过氧化,使植物细胞膜系统受到伤害。植物体内活性氧的增加会诱导 CAT、POD 等抗氧化酶的合成,提高这些保护酶的活性,另一方面,由于 POD 具有 IAA 氧化酶的性质,在臭氧胁迫下 CAT 活性的降低和 POD 活性的增加都不利于活性氧的清除,会造成植物体内活性氧持续增加<sup>[29]</sup>,最终导致植物保护酶体系和细胞半透膜遭到破坏,细胞液渗出于细胞间隙中,细胞因发生质壁分离而收缩,外观上就表现出漂白点或水渍受害症状<sup>[3]</sup>。

综上所述,在不同体积分数的臭氧暴露下,黄花夹竹桃和芒果均受到了不同程度的伤害。根据对 2 种植物叶片膜脂过氧化程度和保护酶活性的研究结果来看,低体积分数时黄花夹竹桃已受到较明显的伤害,而芒果在较高体积分数时才表现出伤害。因此黄花夹竹桃比芒果对臭氧反应敏感,即芒果对臭氧的抗性较强。

### 参考文献:

- [1] 王雪梅, 韩志伟, 雷孝恩. 广州地区臭氧浓度变化规律研究[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2003, 42(4): 06-109.  
WANG Xuemei, HAN Zhiwei, LEI Xiaoen. Study on ozone concentration change of Guangzhou district[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2003, 42(4): 106-109.

- [2] 孔国辉, 汪嘉熙. 大气污染与植物[M]. 北京: 中国林业出版社, 1985.  
KONG Guohui, WANG Jiayi. Atmosphere Pollution and Plant[M]. Beijing: China Forestry Press, 1985.
- [3] 王勋陵, 陈庆诚, 陈国仓, 等. 臭氧对双子叶植物叶片伤害的形态解剖观察[J]. 兰州大学学报, 1979, 3: 117-128.  
WANG Xunling, CHEN Qingcheng, CHEN Guocang, et al. An observation on the morphology and anatomy of the ozone damage to Dicotyledon plant leaves[J]. Journal of Lanzhou University, 1979, (3): 117-128.
- [4] 黄玉源, 黄益宗, 李秋霞, 等. 臭氧对南方 3 种木本植物的急性伤害症状及其生理指标变化[J]. 生态环境, 2006, 15(4): 674-681.  
HUANG Yuyuan, HUANG Yizong, LI Qiuxia, et al. Physiological and foliar symptom response of *Pinus massoniana*, *Eucalyptus urophylla* and *Aglaia odorata* to ozone in southern China[J]. Ecology and Environment, 2006, 15(4): 674-681.
- [5] GEROSA G, MARZUOLI R, ROSSINI M, et al. A flux-based assessment of the effects of ozone on foliar injury, photosynthesis, and yield of bean (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Borlotto Nano Lingua di Fuoco) in open-top chambers[J]. Environmental Pollution, 2009, 157(5): 1727-1736.
- [6] 张巍巍, 赵天宏, 王美玉, 等. O<sub>3</sub> 浓度升高对油松光合作用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 1024-1028.  
ZHANG Weiwei, ZHAO Tianhong, WANG Meiyu, et al. Effect of elevated ozone concentration on photosynthesis of *Pinus tabulaeformis* Carr[J]. Journal of Agro-Environment Science, 26(3): 1024-1028.
- [7] 王勋陵, 黄颖珠. 臭氧对辣椒不同发育时期光合作用的影响[J]. 西北植物学报, 1990, 10(3): 190-196.  
WANG Xunling, HUANG Yunzhu. Effects of ozone on photosynthesis of hot pepper (*Capsium annuum* L.) in different stages of development[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 1990, 10(3): 190-196.
- [8] 白月明, 郭建平, 刘玲, 等. 臭氧对水稻叶片伤害, 光合作用及产量的影响[J]. 气象, 2001, 27(6): 17-21.  
BAI Yueming, GUO Jianping, LIU Ling, et al. Influences of O<sub>3</sub> on the leaf injury, photosynthesis and yield of rice[J]. Meteorological Monthly, 2001, 27(6): 17-21.
- [9] 金东艳, 赵天宏, 付宇, 等. 臭氧浓度升高对大豆光合作用及产量的影响[J]. 大豆科学, 2009, 28(4): 632-635.  
JIN Dongyan, ZHAO Tianhong, FU Yu, et al. Effects of elevated ozone concentration on soybean photosynthesis and yield[J]. Soybean Science, 2009, 28(4): 632-635.
- [10] 胡莹莹, 赵天宏, 徐玲, 等. 臭氧浓度升高对小麦光合作用和产量构成的影响[J]. 农业现代化研究, 2008, 29(4): 498-502.  
Hu Yingying, Zhao Tianhong, Xu Ling, et al. Effects of elevated O<sub>3</sub> exposure on photosynthesis and yield in wheat[J]. Research of Agricultural Modernization, 2008, 29(4): 498-502.
- [11] SINGH E, TIWARI S, AGRAWAL M. Effects of elevated ozone on photosynthesis and stomatal conductance of two soybean varieties: a case study to assess impacts of one component of predicted global climate change[J]. Plant Biology, 2009, 11: 101-108.
- [12] CALATAYUD V, CERVERO J, SANZ MJ. Foliar, physiological and growth responses of four maple species exposed to ozone[J]. Water Air and Soil Pollution, 2007, 185(1/4): 239-254.
- [13] HAIKIO E, FREIWALD V, SILFVER T, et al. Impacts of elevated ozone and nitrogen on growth and photosynthesis of European aspen (*Populus tremula*) and hybrid aspen (P-tremula x *Populus tremuloides*) clones[J]. Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere, 2007, 37(11): 2326-2336.
- [14] HE XY, FU SL, CHEN W, et al. Changes in effects of ozone exposure on growth, photosynthesis, and respiration of Ginkgo biloba in Shenyang urban area[J]. Photosynthetica, 2007, 45(4): 555-561.
- [15] 金明红, 黄益宗. 臭氧污染胁迫农作物生长与产量的影响[J]. 生态环境, 2003, 12(4): 482-486.  
JIN Minghong, HUANG Yizong. Review of crop damaged and yield loss by ozone stress[J]. Ecology and Environment, 2003, 12(4): 482-486.
- [16] 郑有飞, 刘瑞娜, 吴荣军, 等. 臭氧胁迫对冬小麦干物质生产和产量构成的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(3): 409-417.  
ZHENG Youfei, LIU Ruina, WU Rongjun, et al. Effects of ozone stress on dry matter production and yield components in winter wheat[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(3): 409-417.
- [17] AKHTAR N, YAMAGUCHI M, INADA H, et al. Effects of ozone on growth, yield and leaf gas exchange rates of two Bangladeshi cultivars of wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. Environmental Pollution, 2010, 158(5): 1763-1767.
- [18] RODONI L, CASADEI N, CONCELLON A, et al. Effect on short-time ozone treatments on tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit quality and cell wall degradation[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(1): 594-599.
- [19] 金明红, 冯宗伟, 张福珠. 臭氧对水稻叶片膜脂过氧化和抗氧化系统的影响[J]. 环境科学, 2000, 21(3): 1-5.  
JIN Minghong, FENG Zongwei, ZHANG Fuzhu. Effects of ozone on membrane lipid peroxidation and antioxidant system of rice leaves[J]. Environmental Science, 2000, 21(3): 1-5.
- [20] 郑启伟, 王效科, 冯兆忠, 等. 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[J]. 西北植物学报, 2005, 25(11): 2240-2244.  
ZHENG Qiwei, WANG Xiaoke, FENG Zhaozhong, et al. Ozone effects on chlorophyll content and lipid peroxidation in the in situ leaves of winter wheat[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2005, 25(11): 2240-2244.
- [21] 孙加伟, 赵天宏, 付宇, 等. 臭氧浓度升高对玉米活性氧代谢及抗氧化酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(5): 1929-1934.  
SUN Jiawei, ZHAO Tianhong, FU Yu, et al. Effects of elevated O<sub>3</sub> concentration on maize active oxygen species metabolism and antioxidative enzymes activities[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(5): 1929-1934.
- [22] RYANG SZ, WOO SY, KWON SY, et al. Changes of net photosynthesis, antioxidant enzyme activities, and antioxidant contents of *Liriodendron tulipifera* under elevated ozone[J]. Photosynthetica, 2009, 47(3): 19-25.
- [23] RYANG Soo Zin, WOO Su Young, JE Sun Mi. Antioxidant enzyme, chlorophyll contents and stomatal changes of five tree species under ozone stress[J]. Journal of Korean Forestry Society, 2007, 96(4): 470-476.
- [24] NOGUES I, LORETO F. Ozone effects on the metabolism and the antioxidant system in Poplar leaves at different stages of development[J]. Photosynthesis Research, 2007, 91(2-3): 292-297.
- [25] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2006: 54-74.  
CHEN Jianxun, WANG Xiaofeng. Experimental Guide of Plant physiology[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2006: 54-74.
- [26] 梁淑英. 部分城市绿化树种的生理特性及其对大气污染的响应[D]. 南京: 南京林业大学, 2008: 71.  
LIANG Shuying. Physio-biochemical characteristics and the response

- to atmospheric pollution of some urban greenizing tree species in Nanjing area[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2008: 71.
- [27] KANGASJARVI J, TALVINE J, UTRIAINEN M, et al. Plant defense systems induced by ozone[J]. *Plant Cell Environ*, 1994, 17: 783-794.
- [28] 李合生. 现代植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 379.
- LI Hesheng. *Modern Plant Physiology*[M]. Beijing: China Higher Education Press, 2006: 379.
- [29] 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[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 56-57.
- WANG Chunyi, BAI Yueming. *Study on The Influence of Ozone and Aerosol Concentration on Crops*[M]. Beijing: Meteorological Press, 2007: 56-57.

## Effects of ozone on membrane lipid peroxidation and protective enzyme activities of *Thevetia peruviana* and *Mangifera* leaves

LU Guangchao<sup>1</sup>, HUANG Yuyuan<sup>2</sup>, CHEN Hongyue<sup>1\*</sup>, XU Lianfeng<sup>3</sup>

1. College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

2. College of Life Sciences, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China;

3. South China Institute of Environmental Sciences, Guangzhou 510655, China

**Abstract:** Seedlings of *Thevetia peruviana* and *Mangifera indica* were applied as test materials. The seedlings were exposed to four ozone concentrations: NF (non-filtered air,  $\phi(O_3)=10\times 10^{-9}\sim 20\times 10^{-9}$ ), E50 ( $\phi(O_3)=50\times 10^{-9}$ ), E100 ( $\phi(O_3)=100\times 10^{-9}$ ) and E200 ( $\phi(O_3)=200\times 10^{-9}$ ). Contents of malonaldehyde (MDA), membrane permeability, contents of soluble protein and soluble sugar, activities of catalase (CAT) and peroxidase (POD) of them were determined. Reveal the physiological metabolism activities change mechanism and response pattern of the four plants under the ground surface ozone concentration rose up. The results were as followed: With concentration increasing, membrane permeability and the level of malonaldehyde (MDA) content in *T. peruviana* and *M. indica* leaves were all gradually increased and were significantly positive correlated with the concentration of  $O_3$ , which indicated that the level of membrane lipid peroxidation were aggravated in the two plants. The contents of soluble protein in the two plants were all gradually declined when they exposed to low concentration of  $O_3$ , while low amplitude risen when exposed to high concentration of  $O_3$  ( $\phi(O_3)=200\times 10^{-9}$ ). The contents of soluble sugar were gradually declined in *T. peruviana* leaves, while the content of soluble sugar increased first and then declined in *M. indica* leaves. Activities of peroxidase (POD) in the two plants were all significantly increased, but the increase amplitude were different. Activities of catalase (CAT) in the two plants tended to increase first and then decline. The research shows: under different ozone concentration exposed, the two plants were both received varying degrees hurt. *M. indica* showed relatively strong resistance, while *T. peruviana* showed obviously sensitive to ozone.

**Key words:** ozone; garden plant, membrane lipid peroxidation; protective enzyme activities; pollution