

# 美丽箬竹对模拟大气 O<sub>3</sub> 浓度倍增胁迫的生理响应

庄明浩<sup>1</sup>, 李迎春<sup>1</sup>, 郭子武<sup>1</sup>, 杨清平<sup>1</sup>, 顾李俭<sup>2</sup>, 陈双林<sup>1,①</sup>

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 富阳 311400; 2. 杭州临安太湖源观赏竹种园有限责任公司, 浙江 临安 311306)

**摘要:** 运用开顶式气室(OTCs)模拟当前环境大气 O<sub>3</sub> 浓度(对照, 40~45 nL·L<sup>-1</sup>)、O<sub>3</sub> 浓度倍增 1 倍(TR-1, 92~106 nL·L<sup>-1</sup>)和 O<sub>3</sub> 浓度倍增 2 倍(TR-2, 142~160 nL·L<sup>-1</sup>)胁迫, 以叶片光合色素、MDA、可溶性蛋白质和可溶性糖含量及 SOD 和 POD 活性和相对电导率为指标, 分析了美丽箬竹(*Indocalamus decorus* Q. H. Dai)对 O<sub>3</sub> 胁迫的生理响应规律。结果显示: 随 O<sub>3</sub> 浓度的提高, 叶片叶绿素 a(Chla)、叶绿素 b(Chlb)、总叶绿素和类胡萝卜素含量, SOD 和 POD 活性, 可溶性蛋白质和可溶性糖含量及二者的比值(SPC/SSC)均呈下降趋势; 叶绿素 a 与 b 的比值(Chla/Chlb)、MDA 含量和相对电导率均呈增加趋势。TR-1 条件下叶片 POD 活性和可溶性糖含量分别比对照下降 38.86% 和 10.37%, 差异显著; Chla/Chlb 比值显著高于对照, 其余指标均与对照无显著差异。而在 TR-2 条件下叶片 Chla、Chlb、总叶绿素和类胡萝卜素含量显著低于对照, 降幅分别为 26.89%、40.91%、30.47% 和 20.37%; SOD 和 POD 活性、可溶性蛋白质和可溶性糖含量以及 PC/SSC 比值也均显著低于对照, 降幅分别为 42.03%、46.62%、45.09%、11.52% 和 40.15%; Chla/Chlb 比值、MDA 含量和相对电导率均显著高于对照。另外, TR-1 与 TR-2 处理组间光合色素含量和 POD 活性差异不显著, TR-2 处理组 MDA 含量和相对电导率显著高于 TR-1 处理组, SOD 活性显著低于后者。研究结果表明: 美丽箬竹对 O<sub>3</sub> 胁迫具有强耐受性, 可种植于 O<sub>3</sub> 浓度较高的环境中。

**关键词:** 美丽箬竹; 臭氧胁迫; 生理响应; 光合色素; 抗氧化酶; 渗透调节物质

中图分类号: X17; Q945.78 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2012)02-0068-05

## Physiological response of *Indocalamus decorus* to simulated atmospheric ozone stress with multiply-increasing concentrations

ZHUANG Ming-hao<sup>1</sup>, LI Ying-chun<sup>1</sup>, GUO Zi-wu<sup>1</sup>, YANG Qing-ping<sup>1</sup>, GU Li-jian<sup>2</sup>, CHEN Shuang-lin<sup>1,①</sup> (1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, China; 2. Hangzhou Lin'an Taihuyuan Ornamental Bamboo Planting Garden, Lin'an 311306, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2012, 21(2): 68-72, 88

**Abstract:** The method of open-top chambers (OTCs) was used to simulate ozone stress with atmospheric O<sub>3</sub> concentration (control, 40-45 nL·L<sup>-1</sup>), one time O<sub>3</sub> concentration (TR-1, 92-106 nL·L<sup>-1</sup>) and two times O<sub>3</sub> concentration (TR-2, 142-160 nL·L<sup>-1</sup>), and taking contents of photosynthetic pigment, MDA, soluble protein and soluble sugar, activities of SOD and POD and relative electric conductivity as indexes, physiological response of *Indocalamus decorus* Q. H. Dai to O<sub>3</sub> stress was researched. The results show that with rising of O<sub>3</sub> concentration, contents of chlorophylla (Chla), chlorophyllb (Chlb), total chlorophyll and carotenoid, activities of SOD and POD, soluble protein content (SPC) and soluble sugar content (SSC) and SPC/SSC value in leaves of *I. decorus* appear the reducing trend, while Chla/Chlb value, MDA content and relative electric conductivity appear the enhancing trend. In TR-1 group, POD activity and SSC decrease respectively 38.86% and 10.37% comparing to the control with the significant difference, Chla/Chlb value is significantly higher than that of the control, but the other indexes have no significant difference with the control. In TR-2 group, contents of Chla, Chlb, total chlorophyll and carotenoid are significantly lower than those of the control with decreasing ranges of 26.89%, 40.91%, 30.47% and 20.37%, respectively, activities of SOD and POD, SPC and SSC and

收稿日期: 2011-07-23

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(RISF6915); 国家林业公益性行业科研专项(201004008); 浙江省省院合作资助项目(2010SY01)

作者简介: 庄明浩(1985—), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要从事竹林生理生态的研究。

①通信作者 E-mail: eslbamboo@126.com

SPC/SSC value also are significantly lower than those of the control with decreasing ranges of 42.03% , 46.62% , 45.09% , 11.52% and 40.15% , respectively, but Chla/Chlb value, MDA content and relative electric conductivity are significantly higher than those of the control. Moreover, photosynthetic pigment content and POD activity have no significant differences between TR-1 and TR-2 groups, but MDA content and relative electric conductivity in TR-2 group are significantly higher and SOD activity in TR-2 group is significantly lower than those in TR-1 group. It is revealed that *I. decorus* possesses a strong resistance to O<sub>3</sub> stress, and can be cultivated in high O<sub>3</sub> concentration environment.

**Key words:** *Indocalamus decorus* Q. H. Dai; ozone stress; physiological response; photosynthetic pigment; anti-oxidation enzyme; osmotic adjusting substance

对流层中臭氧(O<sub>3</sub>)不仅是引起气候变化的温室气体,还是可以引起植物损伤的二次空气污染物。目前全球约有 1/4 的国家和地区在夏季面临大气中 60 nL · L<sup>-1</sup>以上 O<sub>3</sub>污染的威胁<sup>[1]</sup>。而在中国,随工农业和交通运输业的发展,大气中氮氧化物(NO<sub>x</sub>)和氯氟碳化合物等 O<sub>3</sub>前体物的排放量越来越大,导致近地层 O<sub>3</sub>浓度不断增加,尤其是在人口密集和经济比较发达的北京、天津、长江三角洲和珠江三角洲等地区,对流层中 O<sub>3</sub>浓度瞬时可达 100 ~ 200 nL · L<sup>-1</sup>,远超大气中 40 nL · L<sup>-1</sup>的 O<sub>3</sub>正常浓度水平<sup>[2]</sup>。

大气对流层中 O<sub>3</sub>浓度变化对植物生长发育的影响已引起国内外研究者及公众的密切关注。研究结果证实:O<sub>3</sub>浓度提高对植物生长发育有不利影响,O<sub>3</sub>作为一种强氧化剂通过气孔进入植物叶片后能迅速与细胞壁和细胞膜组分发生反应,产生各种各样的活性氧自由基 ROS,进而启动或介导一系列生化反应。当进入细胞的 O<sub>3</sub>浓度超过一定阈值时,过多的活性氧将破坏植物的防御系统,改变与膜结构稳定有关的 pH 值和 K<sup>+</sup>含量,破坏膜蛋白巯基,使膜透性增加,细胞液和细胞质外渗,出现失水、干枯和叶片色斑等可见症状<sup>[3-5]</sup>;并影响植物叶片气孔开放,使光合色素含量降低,阻碍光合电子传递速率,导致光合速率下降等<sup>[6-8]</sup>。当然,植物可通过忍耐、适应等一系列生理生化机制抵御一定浓度 O<sub>3</sub>的伤害<sup>[9]</sup>。

竹子是集经济、生态和社会效益于一体的优良林种,具有种类多、分布广、价值高、繁殖易、成林快及可持续经营等特点,是森林资源的重要组成部分,也是区域经济社会发展和生态环境保护的重要资源。通过长期研究,中国的竹林培育与加工利用技术已成体系,并得到大规模推广应用,但关于气候变化背景下竹林生态自适应性和应对经营策略的研究鲜有涉及。

美丽箬竹(*Indocalamus decorus* Q. H. Dai)隶属于箬竹属(*Indocalamus* Nakai),地下茎复轴混生型,

叶大色绿,持绿期长,繁殖和抗寒能力较强,景观和叶用价值高<sup>[10]</sup>。作者以美丽箬竹为实验材料,模拟大气 O<sub>3</sub>浓度倍增环境,分析叶片生理生化指标的变化规律,探讨美丽箬竹耐受 O<sub>3</sub>胁迫的能力,以期气候变化背景下美丽箬竹的观赏应用提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

实验在浙江省临安市太湖源观赏竹种园中进行。于 2010 年 3 月用黑色塑料盆(上端直径 20 cm、下端直径 12 cm、高 10 cm)进行盆栽。每盆栽植成丛且生长正常一致的不带宿土的 1 年生美丽箬竹 10 株,株高为(27.28±0.13) cm、地径为(4.24±0.08) cm,每个处理 20 盆,重复 3 次。

盆栽基质为按体积比 3:1 配制的红壤和细沙混合基质(pH 5.8),基质中水解氮、速效磷和速效钾含量分别为 198.47、67.25 和 74.16 mg · kg<sup>-1</sup>。实验期间采取定期补充水分、及时去除杂草等管理措施。

### 1.2 方法

1.2.1 实验设计和 O<sub>3</sub>处理 在开顶式气室(OTCs)中模拟大气 O<sub>3</sub>浓度倍增环境进行胁迫处理,OTCs 的结构和规格参见文献[11-12]。OTCs 内 O<sub>3</sub>的浓度水平通过气室体积和轴流风机流速进行计算,然后通过流量计进行调节,并确定 OTCs 内 O<sub>3</sub>添加量;环境大气经活性炭过滤后,添加由 CFG-20 型臭氧发生器(济南三康环保科技有限公司生产)产生的 O<sub>3</sub>,用功率 750 W 的轴流风机输入 OTCs 内。用 Model 205 双光束紫外 O<sub>3</sub>分析仪(上海康卓自动化系统工程服务有限公司)对 OTCs 内的 O<sub>3</sub>浓度进行监测。

实验共设 3 个 O<sub>3</sub>浓度水平,分别为 CK(大气背景值,O<sub>3</sub>浓度 40 ~ 45 nL · L<sup>-1</sup>)、TR-1(倍增 1 倍,O<sub>3</sub>浓度 92 ~ 106 nL · L<sup>-1</sup>)和 TR-2(倍增 2 倍,O<sub>3</sub>浓度

142 ~ 160 nL · L<sup>-1</sup>), 每个处理设 3 次重复。

于 2010 年 8 月 6 日开始熏气, 每天熏气时间为 7:00 至 17:00, 于 2010 年 10 月 28 日停止熏气。熏气期间, 在气室的上、中、下部位, 每隔 3 d 在 7:00 至 17:00 时段每隔 2 h 测定 1 次 O<sub>3</sub> 浓度。熏气 82 d 时, 分别从各处理的各重复中随机采集成熟叶片 5 ~ 6 片, 用于生理生化指标测定。

**1.2.2 生理生化指标测定** 叶片叶绿素 *a*、叶绿素 *b* 和类胡萝卜素含量采用改良光合色素浸提法<sup>[13]</sup> 进行测定。参照文献<sup>[14]</sup> 的方法测定以下指标: 用硫代巴比妥酸法测定叶片 MDA 含量; 用 DDSJ-308A 型电导仪(上海精密科学仪器有限公司生产)测定叶片相对电导率, 以叶片初始电导率与失活电导率的比值表示相对电导率; 用 NBT 光化还原法测定叶片 SOD 活性, 以 1 g 鲜叶 1 min 内抑制 NBT 光化还原 50% 为 1 个酶活性单位(U); 采用愈创木酚氧化法测定叶片 POD 活性, 以 1 min 内 OD<sub>470</sub> 升高 0.01 为 1 个酶活性单位(U); 采用蒽酮比色法测定叶片可溶性糖含量; 采用考马斯亮蓝法测定叶片可溶性蛋白质含量。

### 1.3 数据处理与分析

用 Excel 2003 软件整理数据; 用 SPSS 17.0 软件

进行单因素方差分析和 LSD 多重比较( $P=0.05$ )。

## 2 结果和分析

### 2.1 对叶片光合色素含量及组成的影响

在开顶式气室(OTCs)中模拟大气 O<sub>3</sub> 浓度倍增环境胁迫处理 82 d, 美丽箬竹叶片中叶绿素和类胡萝卜素的含量见表 1。随 O<sub>3</sub> 体积浓度的提高, 美丽箬竹叶片中叶绿素 *a*、叶绿素 *b*、总叶绿素和类胡萝卜素含量均呈下降趋势。其中, TR-1(O<sub>3</sub> 浓度倍增 1 倍)处理组叶片光合色素含量下降幅度较小, 与对照相比无显著差异; 而 TR-2(O<sub>3</sub> 浓度倍增 2 倍)处理组叶片叶绿素 *a*、叶绿素 *b*、总叶绿素和类胡萝卜素含量显著低于对照, 分别比对照减少 26.89%、40.91%、30.47% 和 20.37%。另外, TR-1 与 TR-2 处理组间叶绿素 *a*、叶绿素 *b*、总叶绿素和类胡萝卜素含量以及叶绿素 *a/b* 比值差异不显著, 但 2 个处理组叶片叶绿素 *a/b* 比值均显著高于对照组。说明在 O<sub>3</sub> 浓度倍增 1 倍条件下, 美丽箬竹叶片的光合色素含量相对稳定; 而在 O<sub>3</sub> 浓度倍增 2 倍条件下, 叶片光合色素合成受阻, 导致光合色素的降解加速。

表 1 不同浓度 O<sub>3</sub> 胁迫处理 82 d 美丽箬竹叶片叶绿素和类胡萝卜素含量的比较( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 1 Comparison of contents of chlorophyll and carotenoid in leaf of *Indocalamus decorus* Q. H. Dai stressed for 82 d by O<sub>3</sub> with different concentrations ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

处理 Treatment	O <sub>3</sub> 浓度/nL · L <sup>-1</sup> O <sub>3</sub> concentration	含量/mg · g <sup>-1</sup> Content				Chla/Chlb
		叶绿素 <i>a</i> Chlorophylla	叶绿素 <i>b</i> Chlorophyllb	总叶绿素 Total chlorophyll	类胡萝卜素 Carotenoid	
CK	40-45	2.12 ± 0.18a	0.66 ± 0.11a	2.79 ± 0.32a	0.54 ± 0.05a	3.21 ± 0.24b
TR-1	92-106	1.76 ± 0.14ab	0.46 ± 0.02ab	2.22 ± 0.20ab	0.49 ± 0.4ab	3.83 ± 0.21a
TR-2	142-160	1.55 ± 0.09b	0.39 ± 0.03b	1.94 ± 0.12b	0.43 ± 0.02b	3.97 ± 0.35a

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示差异显著( $P \leq 0.05$ ) Different small letters in the same column indicate the significant difference ( $P \leq 0.05$ ).

### 2.2 对叶片丙二醛含量和相对电导率的影响

在开顶式气室(OTCs)中模拟大气 O<sub>3</sub> 浓度倍增环境胁迫处理 82 d, 美丽箬竹叶片的丙二醛(MDA)含量和相对电导率见表 2。随 O<sub>3</sub> 体积浓度提高, 美丽箬竹叶片中 MDA 含量和相对电导率均呈增加趋势。其中, TR-1(O<sub>3</sub> 浓度倍增 1 倍)处理组叶片 MDA 含量和相对电导率均高于对照但无显著差异; 而 TR-2(O<sub>3</sub> 浓度倍增 2 倍)处理组叶片 MDA 含量和相对电导率均显著高于对照和 TR-1 处理组, 较对照分别增加 70.48% 和 20.39%, 较 TR-2 处理组分别增加 37.38% 和 17.80%。说明在 O<sub>3</sub> 浓度倍增 1 倍的条件

表 2 不同浓度 O<sub>3</sub> 胁迫处理 82 d 美丽箬竹叶片 MDA 含量和相对电导率的比较( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 2 Comparison of MDA content and relative electric conductivity in leaf of *Indocalamus decorus* Q. H. Dai stressed for 82 d by O<sub>3</sub> with different concentrations ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

处理 Treatment	O <sub>3</sub> 浓度/nL · L <sup>-1</sup> O <sub>3</sub> concentration	MDA	相对电导率/% Relative electric conductivity
		含量/mg · g <sup>-1</sup> MDA content	
CK	40-45	1.66 ± 0.04b	24.13 ± 0.63b
TR-1	92-106	2.06 ± 0.08b	24.66 ± 1.04b
TR-2	142-160	2.83 ± 0.22a	29.05 ± 0.39a

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示差异显著( $P \leq 0.05$ ) Different small letters in the same column indicate the significant difference ( $P \leq 0.05$ ).

下,美丽箬竹叶片细胞膜有轻微的膜脂过氧化现象,但对细胞膜渗透性的损害不严重;在O<sub>3</sub>浓度倍增2倍条件下,美丽箬竹叶片细胞膜脂过氧化现象严重,电解质外渗率显著提高,膜结构受到破坏。

### 2.3 对叶片SOD和POD活性的影响

在开顶式气室(OTCs)中模拟大气O<sub>3</sub>浓度倍增环境胁迫处理82 d,美丽箬竹叶片中SOD和POD活性见表3。随O<sub>3</sub>体积浓度的提高,美丽箬竹叶片中SOD和POD活性均呈下降趋势。其中,TR-1(O<sub>3</sub>浓度倍增1倍)处理组叶片SOD活性仅较对照下降

表3 不同浓度O<sub>3</sub>胁迫处理82 d美丽箬竹叶片SOD和POD活性的比较( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 3 Comparison of SOD and POD activities in leaf of *Indocalamus decorus* Q. H. Dai stressed for 82 d by O<sub>3</sub> with different concentrations ( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

处理 Treatment	O <sub>3</sub> 浓度/nL·L <sup>-1</sup> O <sub>3</sub> concentration	活性/U·g <sup>-1</sup> Activity	
		SOD	POD
CK	40-45	964.05±36.83a	18 046.67±2 640.06a
TR-1	92-106	866.01±17.29a	11 033.33±650.78b
TR-2	142-160	558.82±79.24b	9 633.33±774.11b

<sup>1)</sup>同列中不同的小写字母表示差异显著( $P\leq 0.05$ ) Different small letters in the same column indicate the significant difference ( $P\leq 0.05$ ).

表4 不同浓度O<sub>3</sub>胁迫处理82 d美丽箬竹叶片可溶性蛋白质含量(SPC)和可溶性糖含量(SSC)的比较( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 4 Comparison of soluble protein content (SPC) and soluble sugar content (SSC) in leaf of *Indocalamus decorus* Q. H. Dai stressed for 82 d by O<sub>3</sub> with different concentrations ( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

处理 Treatment	O <sub>3</sub> 浓度/nL·L <sup>-1</sup> O <sub>3</sub> concentration	含量/mg·g <sup>-1</sup> Content		SPC/SSC
		可溶性蛋白质 Soluble protein	可溶性糖 Soluble sugar	
CK	40-45	23.20±3.53a	4.34±0.02a	5.48±0.70a
TR-1	92-106	18.05±1.88ab	3.89±0.04b	4.74±0.61ab
TR-2	142-160	12.74±1.18b	3.84±0.17b	3.28±0.33b

<sup>1)</sup>同列中不同的小写字母表示差异显著( $P\leq 0.05$ ) Different small letters in the same column indicate the significant difference ( $P\leq 0.05$ ).

下,细胞中渗透调节物质对美丽箬竹叶片能起到一定的保护性作用;而在O<sub>3</sub>浓度倍增2倍条件下,叶片细胞膜结构已严重破坏,渗透调节功能明显降低丧失。

## 3 讨 论

一般来说,作为高等植物叶绿体内的重要光合色素,叶绿素对大气O<sub>3</sub>浓度变化十分敏感,O<sub>3</sub>进入植物细胞破坏叶绿体结构,导致叶绿素含量下降<sup>[15]</sup>。本研究中,在O<sub>3</sub>浓度倍增条件下美丽箬竹叶片光合色素含量呈下降趋势,尤其是在O<sub>3</sub>浓度倍增2倍条件下降幅更大,而叶片Chla/Chlb值则呈增大的变化趋

10.17%,无显著差异;而TR-2(O<sub>3</sub>浓度倍增2倍)处理组叶片SOD活性较对照和TR-1处理组均显著下降,降幅分别为42.03%和35.47%。TR-1处理组叶片POD活性低于TR-2处理组但无显著差异,TR-1和TR-2处理组叶片POD活性均显著低于对照,分别较对照下降38.86%和46.62%。说明在O<sub>3</sub>浓度倍增2倍条件下,美丽箬竹叶片细胞的抗氧化保护系统受到严重伤害。

### 2.4 对叶片可溶性蛋白质和可溶性糖含量的影响

在开顶式气室(OTCs)中模拟大气O<sub>3</sub>浓度倍增环境胁迫处理82 d,美丽箬竹叶片中可溶性蛋白质和可溶性糖含量见表4。随O<sub>3</sub>体积浓度的提高,美丽箬竹叶片中可溶性蛋白质和可溶性糖含量及二者的比值(SPC/SSC)均逐渐降低。其中,TR-1(O<sub>3</sub>浓度倍增1倍)处理组叶片的可溶性蛋白质含量及SPC/SSC比值略低于对照但差异不显著,而可溶性糖含量显著低于对照且降幅达10.37%。TR-2(O<sub>3</sub>浓度倍增2倍)处理组叶片可溶性蛋白质和可溶性糖含量以及SPC/SSC比值均显著低于对照,分别比对照降低45.09%、11.52%和40.15%。说明在O<sub>3</sub>浓度倍增1倍条件

势,说明在O<sub>3</sub>浓度倍增条件下,Chlb较Chla更易降解或合成速率更慢。Chlb是捕光色素蛋白复合体的重要组成部分,相对较低的Chlb含量不利于植物更有效地利用漫射光中的蓝紫光,减少了叶绿体对光能的吸收,使光合利用率降低。类胡萝卜素是重要的辅助色素,可以猝灭激发态叶绿素,避免多余的吸收能量对光合系统造成伤害。在O<sub>3</sub>浓度倍增条件下美丽箬竹叶片类胡萝卜素含量下降在一定程度上说明类胡萝卜素对光合系统的保护作用降低。

在逆境条件下,植物细胞内活性氧产生-清除平衡被打破,导致活性氧积累,细胞膜脂发生过氧化伤害,细胞膜的选择渗透功能减弱或丧失,细胞内原生

质外渗,相对电导率升高。MDA 是膜脂中不饱和脂肪酸被活性氧过氧化的产物,其含量高低与细胞原生质膜的过氧化损伤程度成正比,目前已被广泛用于指示逆境胁迫下植物细胞膜的过氧化损伤程度<sup>[16]</sup>。在本研究中, $O_3$ 浓度倍增使美丽箬竹叶片 MDA 含量和相对电导率提高,且在倍增 1 倍条件下增幅不明显,而在倍增 2 倍条件下则显著提高。说明  $O_3$  浓度倍增 1 倍并未对美丽箬竹造成伤害,显示美丽箬竹对  $O_3$  胁迫具有较强的耐受能力;而在  $O_3$  浓度倍增 2 倍条件下,高浓度  $O_3$  导致叶片细胞膜脂过氧化程度加剧和电解质大量外渗,膜损伤严重。这一结果与他人的相关研究结果<sup>[17-18]</sup>一致。

SOD 和 POD 是细胞中清除活性氧的主要酶类<sup>[19]</sup>。SOD 可将超氧阴离子自由基转化为氧气和过氧化氢,而 POD 则可把过氧化氢分解为分子氧和水,解除活性氧的伤害<sup>[20-21]</sup>。在  $O_3$  浓度倍增条件下美丽箬竹叶片 SOD 和 POD 活性均表现出下降的趋势,结合叶片光合色素含量、MDA 含量和相对电导率的变化,分析  $O_3$  浓度倍增 1 倍条件下叶片 POD 活性显著下降是缘于体内大量  $H_2O_2$  被清除,这一过程在保护美丽箬竹免受  $O_3$  胁迫伤害中发挥着重要作用。而在  $O_3$  浓度倍增 2 倍条件下 SOD 和 POD 活性显著下降,说明高浓度  $O_3$  胁迫导致美丽箬竹细胞中活性氧的积累量超出了抗氧化酶的清除能力,使美丽箬竹叶片抗氧化酶活性降低<sup>[3]</sup>。

美丽箬竹叶片可溶性蛋白质和可溶性糖含量及其比值均随  $O_3$  浓度的提高而降低,且在倍增 2 倍条件下显著降低。一方面表明叶片中部分可溶性糖和可溶性蛋白质被用于缓解  $O_3$  胁迫造成的渗透伤害所引起的消耗,这与  $O_3$  对大多数植物渗透调节物质含量的影响结果基本一致,如水稻 (*Oryza sativa* L.)<sup>[22]</sup>、米仔兰 (*Aglaia odorata* Lour.) 和马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.)<sup>[23]</sup> 等。另一方面,在  $O_3$  浓度倍增条件下可溶性蛋白质和可溶性糖含量比值降低,可能与膜脂过氧化产生的与蛋白质复合体反应并使之失活的有毒物质对蛋白质合成的抑制作用有关,或者与膜蛋白在过氧化过程中受到伤害、进而使蛋白质含量进一步减少有关<sup>[24]</sup>。

综上所述,美丽箬竹对  $O_3$  胁迫具有很强的耐受性, $O_3$  浓度倍增 1 倍对美丽箬竹并未造成明显伤害;而在  $O_3$  浓度倍增 2 倍条件下,美丽箬竹抗氧化能力和渗透调节作用下降,细胞内活性氧的产生-清除平

衡被打破,使细胞膜结构及其功能遭到破坏,加剧了膜脂过氧化程度,加速叶片衰老进程,对叶片产生了严重的损伤。因此,在高浓度  $O_3$  环境中,根据适地适竹原则,可应用美丽箬竹进行区域性园林绿化。

#### 参考文献:

- [1] SOLOMON S, QIN D, MANNING M, et al. Climate Change, 2007: The Physical Science Basis—Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007 [M]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2008: 944.
- [2] 周秀骥. 长江三角洲地区近地层大气和生态系统的互作研究 [M]. 北京: 气象科学出版社, 2004: 175-185.
- [3] 王春乙, 白月明, 温 民, 等.  $CO_2$  和  $O_3$  浓度倍增及复合效应对大豆生长和产量的影响 [J]. 环境科学, 2004, 25(6): 6-10.
- [4] 金明红, 冯宗炜. 臭氧对冬小麦叶片膜保护系统的影响 [J]. 生态学报, 2000, 20(3): 444-447.
- [5] 张巍巍. 臭氧浓度升高对银杏与油松活性氧及抗氧化系统的影响 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学农学院, 2007: 10-15.
- [6] XU H, CHEN S B, BISWAS D K, et al. Photosynthetic and yield responses of an old and a modern winter wheat cultivars to short-term ozone exposure [J]. Photosynthetica, 2009, 47: 247-254.
- [7] 金明红, 冯宗炜, 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.
- [8] REICH P B. Effects of low concentration of  $O_3$  on net photosynthesis, dark respiration, and chlorophyll contents in aging hybrid poplar leaves [J]. Plant Physiology, 1983, 73: 291-296.
- [9] TAUSZ M, GRULKE N E, WIESER A. Defense and avoidance of ozone under global change [J]. Environment Pollution, 2007, 147: 525-531.
- [10] 田海涛, 高培军, 温国胜. 7 种箬竹抗寒性比较 [J]. 浙江林学院学报, 2006, 23(6): 641-646.
- [11] 庄明浩, 李迎春, 李 应, 等. 毛竹对大气臭氧浓度倍增的生理响应 [J]. 植物分类与资源学报, 2012, 34(1): 69-75.
- [12] 庄明浩, 李迎春, 李 应, 等. 3 种地被类观赏竹对大气臭氧浓度倍增的生理响应 [J]. 西北植物学报, 2011, 31(10): 2014-2020.
- [13] 张宪政, 陈凤玉. 植物生理学试验技术 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1994: 164-165.
- [14] 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: 115-124.
- [15] ALISON D, JIM C, COLIN R B, et al. Does elevated  $CO_2$  ameliorate the impact of  $O_3$  on chlorophyll content and photosynthesis in potato (*Solanum tuberosum*)? [J]. Physiologia Plantarum, 2001, 111: 501-511.
- [16] RANIERI A, NALI C, LORENZINI G, et al. Ozone stimulates apoplastic antioxidant system in pumpkin leaves [J]. Physiologia Plantarum, 1996, 97: 381-387.