

CO₂ 浓度升高对三种地被类观赏竹生理特性的影响^{*}

庄明浩^{1,2} 陈双林¹ 李迎春¹ 郭子武¹ 杨清平¹

(¹中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江富阳 311400; ²中国林业科学研究院亚热带林业实验中心, 江西分宜 336600)

摘 要 运用开顶式气室(OTCs)模拟大气 CO₂ 浓度升高(500、700 μmol · mol⁻¹)情景,以环境背景大气为对照,研究 CO₂ 浓度升高对 3 种地被类观赏竹(美丽箬竹、黄条金刚竹和白编椎谷箬竹)叶片的膜脂过氧化和抗氧化系统的影响及其种间差异. 结果表明: 试验进行 103 d 后,500 μmol · mol⁻¹ CO₂ 浓度下,3 种地被类观赏竹的叶片超氧阴离子含量、丙二醛(MDA)含量、相对电导率和可溶性糖含量总体上没有发生明显的变化,但叶片超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性有一定程度的改变;700 μmol · mol⁻¹ CO₂ 浓度下,3 个竹种的叶片 MDA 含量和相对电导率没有发生明显变化,但对叶片超氧阴离子含量、可溶性糖含量和 SOD、POD、CAT、APX 活性的影响较为明显. 不同竹种对 CO₂ 浓度升高环境的适应能力为美丽箬竹>黄条金刚竹>白编椎谷箬竹.

关键词 美丽箬竹 黄条金刚竹 白编椎谷箬竹 CO₂ 浓度升高 膜脂过氧化 抗氧化系统
文章编号 1001-9332(2013)09-2408-07 **中图分类号** Q945.79 **文献标识码** A

Effects of elevated CO₂ concentration on physiological characters of three dwarf ornamental bamboo species. ZHUANG Ming-hao^{1,2}, CHEN Shuang-lin¹, LI Ying-chun¹, GUO Zi-wu¹, YANG Qing-ping¹ (¹Research institute of Subtropical Forestry, Chinese Forestry Academy, Fuyang 311400, Zhejiang, China; ²Experimental Centre of Subtropical Forestry, Chinese Forestry Academy, Fenyi 336600, Jiangxi, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(9): 2408-2414.

Abstract: By using open-top chambers (OTCs) to simulate the scenes of elevated CO₂ concentrations [500 μmol · mol⁻¹ (T₁) and 700 μmol · mol⁻¹ (T₂)], and taking ambient atmospheric CO₂ concentration as the control (CK), this paper studied the effects of elevated CO₂ concentration on the lipid peroxidation and anti-oxidation enzyme system in *Indocalamus decorus*, *Pleiblastus kongosanensis*, and *Sasa glabra* leaves. After 103 days treatment, the O₂⁻ and MDA contents, relative electron conduction, and soluble sugar content in the three dwarf ornamental bamboo species leaves in T₁ had no obvious change, but the activities of anti-oxidation enzymes (SOD, POD, CAT, and APX) changed to a certain extent. In T₂, the MDA content and relative electron conduction had no obvious change, but the O₂⁻ and soluble sugar contents and the anti-oxidation enzymes activities changed obviously. The adaptation capacity of the three bamboo species to elevated CO₂ concentration was in the order of *I. decorus* > *P. kongosanensis* > *S. glabra*.

Key words: *Indocalamus decorus*; *Pleiblastus kongosanensis*; *Sasa glabra*; elevated CO₂ concentration; lipid peroxidation; anti-oxidation enzyme system.

随着煤炭、石油等化石燃料的过度使用、森林大规模砍伐以及农业生产活动等的影响,大气 CO₂ 浓度急剧升高,预计到 21 世纪末,CO₂ 浓度将较目前提高一倍^[1-3]. CO₂ 作为绿色植物光合作用的底物,其浓度的变化直接影响到植物的生理生化过程和生长发育^[4-7]. 抗氧化系统是植物防御外界环境胁迫

^{*} 国家公益性行业(林业)科研专项(201004008)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(RISF6915)、浙江省省院合作项目(2010SY01)和浙江省农业科技成果转化项目(2012T201-01)资助.
^{**} 通讯作者. E-mail: cslbamboo@126.com
2012-11-14 收稿,2013-07-12 接受.

和维持生长发育的基础,CO₂ 浓度升高将影响植物光合作用过程,进而影响到植物的活性氧和抗氧化系统.有研究表明,高浓度 CO₂ 会造成叶绿体内 CO₂ 与 O₂ 体积比升高,活性氧产生几率减少,诱导植物叶片的抗氧化酶活性下降^[8];也有研究认为,CO₂ 浓度升高激活了光反应过程,促使更多的还原力合成,诱导植物抗氧化酶活性上升^[9].物种和基因型的差异会导致植物活性氧代谢和抗氧化系统对高浓度 CO₂ 响应上的不一致.因此,有必要深入开展多类型植物在 CO₂ 浓度升高条件下的活性氧代谢研究.

竹子是陆地生态系统中的重要植物资源,也是中国园林建设中应用最广泛的重要植物类型.其中,地被类竹种常用于草坪、绿篱和复层绿化,是理想的庭院观赏和园林绿化植物.研究表明,短期 CO₂ 浓度倍增可促使厚壁毛竹 (*Phyllostachys edulis* cv. *pachyloen*) 的最大净光合速率、净光合速率和水分利用率升高^[10].CO₂ 浓度升高能增强毛竹 (*Phyllostachys edulis*) 的抗氧化能力^[11],具有提高毛竹净光合速率的“施肥效应”^[12].目前有关 CO₂ 浓度升高对竹子生理生态的影响研究报道还较少.本文以箬竹属的美丽箬竹 (*Indocalamus decorus*)、大明竹属的黄条金刚竹 (*Pleioblastus kongosanensis*) 和赤竹属的白锦椎谷箬竹 (*Sasa glabra*) 3 种地被类观赏竹为试材,运用开顶式气室 (OTCs) 模拟大气 CO₂ 浓度升高情景,分析不同竹种的叶片膜脂过氧化和抗氧化系统相关指标的变化,旨在为气候变化背景下园林观赏竹种的筛选和适应性栽培提供理论参考.

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验在浙江省临安市 (29°56′—30°23′ N, 118°51′—119°72′ E) 太湖源观赏竹种园中进行.2011 年 3 月,将美丽箬竹、黄条金刚竹和白锦椎谷箬竹进行不带宿土盆栽,每个竹种盆栽 60 盆,栽植盆为上端直径 20 cm、下端直径 12 cm、高 10 cm 的黑色塑料盆.盆栽基质为红壤与细沙体积比例 3:1 均匀混合而成,pH 值 5.8,水解氮 198.47 mg·kg⁻¹,速效磷 67.25 mg·kg⁻¹,速效钾 74.16 mg·kg⁻¹.每竹种每盆中栽植鞭段繁育的成丛的生长正常、叶色浓绿的 1 年生植株 15 株.美丽箬竹、黄条金刚竹和白锦椎谷箬竹植株的地径分别为 (4.54±0.08)、(4.28±0.29) 和 (3.23±0.03) mm,高度分别为 (37.28±0.15)、(36.23±0.88) 和 (35.86±0.26) cm.试验竹苗定期人工补水,及时去除笋芽和杂草

等,2011 年 7 月开始进行 CO₂ 浓度处理试验.

1.2 试验设计

运用开顶式气室 (open-top chambers, OTCs) 模拟大气 CO₂ 浓度升高情景.OTCs 的结构和规格参照文献[11].CO₂ 为钢瓶装纯 CO₂,环境大气经活性炭过滤后,再添加钢瓶中的 CO₂ 气体,添加量通过流量计来调节,用 750 W 功率的轴流风机通入 OTCs 内.气室顶部装有自动喷灌系统,对试验竹苗定期供应水分.每个气室内放置每个竹种盆栽试验苗 20 盆.

试验共设置 3 个 CO₂ 浓度处理:CK (环境背景大气,360 ~ 380 μmol·mol⁻¹)、T₁ (475 ~ 530 μmol·mol⁻¹,平均值 500 μmol·mol⁻¹)、T₂ (685 ~ 730 μmol·mol⁻¹,平均值 700 μmol·mol⁻¹).每个处理重复 3 次.OTCs 内的 CO₂ 浓度采用上海兴卓环保仪器有限公司生产的 CO₂ 红外传感器进行监测,每隔 3 d 在气室的上、中、下部各测定一次.

2011 年 7 月 10 日开始熏气,每天熏气 24 h,2011 年 10 月 20 日停止熏气.分别于熏气处理 55 和 103 d,在每个气室内随机选取美丽箬竹成熟叶样品 8 ~ 10 片、黄条金刚竹和白锦椎谷箬竹成熟叶样品各 15 ~ 18 片,测定叶片的膜脂过氧化和抗氧化系统等主要生理生化指标.

1.3 测定方法

叶片超氧阴离子自由基 (O₂⁻) 含量采用改良后的羟胺氧化法测定^[13].丙二醛 (MDA) 含量采用硫代巴比妥酸法测定;相对电导率用初始电导率与煮沸后电导率的比值表示,采用 DDSJ-308A 型电导仪测定;超氧化物歧化酶 (SOD) 活性采用氮蓝四唑 (NBT) 光化还原法测定;过氧化物酶 (POD) 活性采用愈创木酚氧化法测定;过氧化氢酶 (CAT) 活性采用紫外吸收法测定;可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定^[14].抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性按照 Nakamo 和 Asada 的方法测定^[15].

1.4 数据处理

利用 Excel 2003 软件对试验数据进行整理和图表制作,在 SPSS 17.0 统计软件中进行单因素方差分析和 0.05 水平的 LSD 多重比较.所用数据均为平均值±标准差.

2 结果与分析

2.1 CO₂ 浓度升高对观赏竹叶片超氧阴离子含量的影响

由表 1 可以看出,随 CO₂ 浓度的升高,美丽箬

竹和黄条金刚竹叶片的 O_2^- 含量降低,而白编椎谷箬竹呈相反的变化趋势. 与对照(CK)相比,处理 55 d 时,仅美丽箬竹叶片 O_2^- 含量在 T_2 处理下显著降低,其他竹种和其余处理均无显著变化;处理 103 d 时,3 竹种叶片 O_2^- 含量在 T_1 处理下均无显著变化,在 T_2 处理下,美丽箬竹和黄条金刚竹叶片 O_2^- 含量均显著下降,而白编椎谷箬竹显著升高. 在同一处理时间点上,相同 CO_2 浓度处理的美丽箬竹叶片 O_2^- 含量的降幅大于黄条金刚竹. 这表明随着处理时间的延长,3 竹种叶片 O_2^- 含量会发生明显变化,为美丽箬竹>黄条金刚竹>白编椎谷箬竹.

2.2 CO_2 浓度升高对观赏竹叶片丙二醛含量和相对电导率的影响

由表 2 可以看出,美丽箬竹和黄条金刚竹叶片 MDA 含量和相对电导率均随 CO_2 浓度的升高而降低,而白编椎谷箬竹呈相反的变化趋势. 与 CK 相比,处理 55 d 时,除 T_2 处理的美丽箬竹叶片 MDA 含量显著降低外,其余处理均无显著变化;处理 103

d 时, T_2 处理的美丽箬竹和黄条金刚竹叶片 MDA 含量均显著降低,而白编椎谷箬竹无显著变化. 3 竹种的相对电导率在处理期间均无明显变化. 这说明 CO_2 浓度升高对不同竹种叶片膜脂过氧化程度的影响存在种间差异,其中美丽箬竹>黄条金刚竹>白编椎谷箬竹.

2.3 CO_2 浓度升高对观赏竹叶片抗氧化酶活性的影响

随 CO_2 浓度的升高,美丽箬竹、黄条金刚竹叶片的 SOD、POD 活性均呈下降趋势,而白编椎谷箬竹叶片 SOD 活性先升高后下降,POD 活性则呈上升趋势;3 竹种叶片 CAT、APX 活性均呈下降趋势(表 3). 与 CK 相比,处理 55 和 103 d 时,美丽箬竹叶片 SOD 和 POD 活性仅 T_2 处理显著下降,CAT 和 APX 活性在 T_1 和 T_2 处理均显著下降;黄条金刚竹叶片 SOD 活性在 T_2 处理下显著下降,CAT 和 APX 活性在 T_1 、 T_2 处理下均显著下降,POD 活性在 T_1 、 T_2 处理 55 d 时均无显著变化,而在处理 103 d 时均显著

表 1 不同 CO_2 浓度下观赏竹叶片的超氧阴离子含量
Table 1 Content of O_2^- in leaves of dwarf ornamental bamboos treated with different CO_2 concentrations (nmol · g⁻¹FM)

竹种 Bamboo species	处理时间 Treatment time (d)	处 理 Treatment		
		CK	T_1	T_2
A	55	1026.67±24.31a	949.45±57.68ab	887.13±30.79b
	103	1960.64±103.28a	1788.59±96.15ab	1672.68±111.02b
B	55	1040.71±96.50a	998.59±21.06a	935.41±55.71a
	103	1778.06±112.14a	1702.79±68.90ab	1535.91±58.25b
C	55	991.57±38.88a	1012.77±30.82a	1082.33±21.06a
	103	1999.24±31.61b	2131.08±134.43ab	2263.07±215.19a

A:美丽箬竹 *I. decorus*; B:黄条金刚竹 *P. kongosanensis*; C: 白编椎谷箬竹 *S. glabra*. CK: 360 ~ 380 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$; T_1 : 475 ~ 530 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$; T_2 : 685 ~ 730 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$. 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$) Different small letters in the same treatment time denoted significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

表 2 不同 CO_2 浓度下观赏竹叶片的丙二醛含量和相对电导率
Table 2 Content of MDA and relative electron conductivity in leaves of dwarf ornamental bamboos treated with different CO_2 concentrations

测定指标 Determination index	竹种 Bamboo species	处理时间 Treatment time (d)	处 理 Treatment		
			CK	T_1	T_2
丙二醛	A	55	1.02±0.1a	0.86±0.08ab	0.72±0.04b
MDA		103	0.68±0.05a	0.54±0.03ab	0.45±0.04b
(mg · g ⁻¹ FM)	B	55	0.44±0.04a	0.41±0.04a	0.39±0.01a
		103	0.51±0.03a	0.45±0.02ab	0.38±0.03b
	C	55	0.40±0.02a	0.41±0.01a	0.42±0.01a
		103	0.40±0.01a	0.42±0.01a	0.44±0.02a
相对电导率	A	55	17.9±0.5a	17.4±0.6a	16.3±0.3a
Relative electron		103	18.7±0.6 a	17.1±0.4 a	16.0±0.6 a
conductivity	B	55	20.5±0.3a	19.4±0.6a	18.5±0.4a
		103	23.7±1.0a	22.3±1.1a	20.4±0.9a
	C	55	17.8±1.3a	18.1±0.9a	18.9±1.7a
		103	16.9±0.8a	18.3±0.9a	19.5±1.3a

表 3 不同 CO₂ 浓度下观赏竹叶片的 SOD、POD、CAT 和 APX 活性
Table 3 Activities of SOD, POD, CAT and APX in leaves of dwarf ornamental bamboos treated with different CO₂ concentrations (U · g⁻¹FM)

指标 Index	竹种 Bamboo species	处理时间 Treatment time (d)	处 理 Treatment		
			CK	T ₁	T ₂
超氧化物歧化酶 SOD	A	55	1259.11±44.58a	1051.55±82.16ab	918.38±102.53b
		103	771.67±39.23a	693.57±31.74ab	569.05±24.98b
	B	55	1342.96±177.38a	1190.03±149.67ab	916.84±80.63b
		103	1198.81±64.34a	1027.38±95.85ab	736.48±34.44b
	C	55	762.89±67.51b	953.95±8.58a	1033.68±53.66a
		103	1050.00±69.53a	861.19±61.48b	848.81±58.94b
过氧化物酶 POD	A	55	44580.00±1265.38a	40713.33±2152.58ab	36066.67±1477.66b
		103	31406.67±1444.48a	29226.67±1260.42ab	26400.00±1460.24b
	B	55	17220.00±606.96a	15586.67±231.81a	14973.33±671.22a
		103	11666.67±1182.87a	7480.62±58.75b	7280.00±860.70b
	C	55	7986.67±340.78b	10380.00±563.01a	11523.33±326.55a
		103	7346.67±667.63b	8860.00±100.00a	9380.00±884.76a
过氧化氢酶 CAT	A	55	7666.67±368.99a	3741.67±225.67b	3091.76±192.33b
		103	3700.00±62.05a	2966.67±75.83b	2341.67±90.69b
	B	55	10216.67±873.69a	8625.00±291.97b	7308.33±298.26b
		103	9150.00±395.75a	5608.33±290.04b	4425.00±476.97b
	C	55	9983.33±490.11a	8500.00±195.26a	8341.67±790.39a
		103	8675.00±862.50a	7058.33±487.518b	6775.00±611.09b
抗坏血酸酶 APX	A	55	3.82±0.33a	3.10±0.05b	2.80±0.22b
		103	3.20±0.25a	2.68±0.30b	2.42±0.06b
	B	55	5.02±0.54a	3.65±0.23b	3.03±0.18b
		103	4.67±0.50a	2.60±0.37b	2.55±0.29b
	C	55	3.10±0.23a	2.43±0.20b	2.17±0.31b
		103	2.70±0.29a	1.87±0.17b	1.65±0.12b

下降;白锦椎谷箬竹叶片 POD 活性在 T₁、T₂ 处理下显著升高,而 CAT、APX 活性均显著下降,SOD 活性在 T₁、T₂ 处理 55 d 时显著升高,而在处理 103 d 时显著下降. 这表明随着 CO₂ 浓度升高,对 3 竹种叶片抗氧化酶活性的影响越来越明显,且影响程度为美丽箬竹>黄条金刚竹>白锦椎谷箬竹.

2.4 CO₂ 浓度升高对观赏竹叶片可溶性糖含量的影响

随着 CO₂ 浓度的升高,美丽箬竹叶片中可溶性

糖含量呈升高趋势,白锦椎谷箬竹呈下降趋势,黄条金刚竹在处理 55 d 时下降,而在处理 103 d 时升高(表 4). 与 CK 相比,美丽箬竹叶片的可溶性糖含量在处理 55 d 时均无显著变化,仅在 T₂ 处理 103 d 时显著升高;白锦椎谷箬竹叶片的可溶性糖含量在处理 55 d 时仅 T₂ 处理显著下降,处理 103 d 时 T₁、T₂ 处理均显著下降;黄条金刚竹叶片的可溶性糖含量在处理期间均无明显变化. 可见,高浓度 CO₂ 处理对 3 竹种叶片可溶性糖含量会产生一定程度的影响,而且对白锦椎谷箬竹的影响最为明显,其次为美丽箬竹.

3 讨 论

3.1 大气 CO₂ 浓度升高环境下 3 种地被类观赏竹膜脂过氧化的变化

CO₂ 浓度升高不仅影响到植物的光合作用,而且可以调节活性氧的代谢状态^[16]. 本研究表明,当 CO₂ 浓度升至 500 μmol · mol⁻¹ 时,对 3 种地被类观赏竹的活性氧代谢和膜脂过氧化程度的影响并不明显,说明其对高浓度 CO₂ 环境有较强的适应性;当

表 4 不同 CO₂ 浓度下观赏竹叶片的可溶性糖含量
Table 4 Content of soluble sugar in leaves of dwarf ornamental bamboos treated with different CO₂ concentrations (mg · g⁻¹)

竹种 Bamboo species	处理时间 Treatment time (d)	处 理 Treatment		
		CK	T ₁	T ₂
A	55	2.96±0.31a	3.10±0.23a	3.27±0.11a
	103	3.17±0.39b	3.48±0.01ab	4.02±0.35a
B	55	4.65±0.19a	4.44±0.52a	4.12±0.43a
	103	4.55±0.36a	4.60±0.22a	5.27±0.31a
C	55	2.81±0.19a	2.46±0.29ab	2.26±0.12b
	103	3.17±0.35a	2.59±0.28b	1.74±0.12c

CO₂ 浓度升高到 700 μmol · mol⁻¹ 时,美丽箬竹、黄条金刚竹叶片的超氧阴离子含量明显下降,说明高浓度 CO₂ 在一定程度上减少了美丽箬竹、黄条金刚竹叶片活性氧的产生,降低了膜脂过氧化程度,对竹子的氧化损伤起到了保护效应. 这与 Polle 等^[17] 对 CO₂ 浓度升高处理下欧洲山毛榉 (*Fagus sylvatica*) 和 Vurro 等^[18] 对百里香 (*Thymus vulgaris*) 的研究结果一致. 究其原因,可能是 CO₂ 浓度升高造成叶绿体内 CO₂/O₂ 升高,活性氧产生几率减少,从而降低了植物细胞内的氧化损伤;另一方面,可能使叶片光合电子传递过程中 O₂⁻ 的毒害作用减弱^[19]. 而白缙榉谷箬竹叶片的超氧阴离子含量在处理一定时间后显著升高,说明高浓度 CO₂ 明显促进了白缙榉谷箬竹叶片活性氧的产生,可能与其抗氧化系统对活性氧自由基的清除作用有关. 同时说明白缙榉谷箬竹对高浓度 CO₂ 环境的适应能力弱于美丽箬竹和黄条金刚竹.

3.2 大气 CO₂ 浓度升高环境下 3 种地被类观赏竹叶片抗氧化酶活性的变化

有研究表明,高浓度 CO₂ 能使冬青栎 (*Quercus ilex*) 和柔毛栎 (*Quercus pubescens*) 叶片抗氧化酶 (SOD、CAT 和 APX) 活性^[20],大麦^[21]、百里香^[18] 叶片 SOD 活性,欧洲山毛榉^[17] 和云杉 (*Picea abies*)^[22] 叶片 CAT 活性显著降低. 本试验结果显示,CO₂ 浓度升高条件下 3 种地被类观赏竹抗氧化酶活性均发生了不同程度的适应性变化. 除白缙榉谷箬竹叶片 SOD、POD 活性在个别处理时间点上显著升高外,其余叶片抗氧化酶活性均显著降低. 可能是 CO₂ 浓度升高提高了叶绿体作为 PS I 电子受体 NADP⁺ 的利用率,限制了电子传给分子氧的流量,Mehler 反应被抑制,O₂⁻ 产生率减小,从而使活性氧和细胞抗氧化需求量减少,抗氧化酶活性降低^[8,23-24]. 处理期间,白缙榉谷箬竹叶片 POD 活性显著升高是否与 CO₂ 浓度升高加速了光合 C 同化,反馈激活光反应过程,促使更多的还原力合成,诱导植物抗氧化酶活性上升^[9] 有关,还是与 POD 用于清除 H₂O₂ 而使活性升高,或 POD 表现出 IAA 氧化酶性质,加速 O₂⁻、H₂O₂ 等向毒性更强的 ·OH 转化^[25-26] 等有关,有待于进一步研究. 本研究表明,3 种地被类观赏竹抗氧化酶对高浓度 CO₂ 的响应存在一定的种间差异,与鸭茅 (*Dactylis glomerata*) 和白三叶草 (*Trifolium repens*)^[27]、糖枫 (*Acer saccharum*)^[28] 叶片抗氧化酶活性在高 CO₂ 浓度条件下未发生明显变化的结论不

一致,说明植物抗氧化酶对高浓度 CO₂ 环境的响应存在着较大的不确定性,需要针对不同类型植物进行深入研究.

3.3 大气 CO₂ 浓度升高环境下 3 种地被类观赏竹叶片可溶性糖含量的变化

本研究结果表明,3 竹种对 CO₂ 浓度为 500 μmol · mol⁻¹ 环境具有较强的适应能力;当 CO₂ 浓度升高至 700 μmol · mol⁻¹,3 竹种叶片可溶性糖含量的变化表现出一定的差异,美丽箬竹和黄条金刚竹有所提高,与王美玉等^[29] 对油松 (*Pinus tabulaeformis*) 的研究结果相一致,可能是一定时间的高浓度 CO₂ 处理能提高细胞间隙 CO₂ 浓度,增强叶片光合磷酸化,促使 Rubisco 位点 [CO₂]/[O₂] 增大,有利于提高 Rubisco 羧化酶的羧化效率,从而促进了光合作用,使碳水化合物含量提高^[30];而白缙榉谷箬竹叶片可溶性糖含量显著降低,反映出其对高浓度 CO₂ 环境的适应能力较美丽箬竹、黄条金刚竹弱.

3.4 大气 CO₂ 浓度升高环境下 3 种地被类观赏竹适应性的种间差异

本研究表明,美丽箬竹、黄条金刚竹和白缙榉谷箬竹对 CO₂ 浓度升高环境的适应性及生长潜力存在着种间差异. 3 竹种叶片的膜质过氧化和电解质外渗率的减轻程度为美丽箬竹>黄条金刚竹>白缙榉谷箬竹;抗氧化酶系统的保护调节功能的强弱为美丽箬竹>黄条金刚竹>白缙榉谷箬竹. 从叶片可溶性糖含量的变化分析,在 CO₂ 浓度升高条件下,美丽箬竹更有利于光合产物的积累,其次是黄条金刚竹. 综合分析,3 竹种对高浓度 CO₂ 环境的适应性较强,其中,美丽箬竹的适应能力和生长潜能最强,其次是黄条金刚竹,白缙榉谷箬竹相对较差.

4 结 论

3 种地被类观赏竹对高浓度 CO₂ 环境的适应性较强,CO₂ 浓度升高能有效地减轻或维持 3 竹种叶片膜质过氧化程度,保持相对较高的抗氧化酶活性和细胞结构的稳定性及膜透性,有利于竹子的生长发育. 但不同竹种对 CO₂ 浓度升高条件下的适应性存在种间差异,其适应能力为美丽箬竹>黄条金刚竹>白缙榉谷箬竹.

参考文献

- [1] Carnol M, Hogenboom L, Jach ME, et al. Elevated atmospheric CO₂ in open top chambers increases net nitrification and potential denitrification. *Global Change Bi-*

- ology, 2002, **8**: 590–598
- [2] Ruan Y-N (阮亚男), He X-Y (何兴元), Chen W (陈 玮), *et al.* Effects of elevated CO₂ on lipid peroxidation and activities of antioxidant enzymes in *Ginkgo biloba*. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27** (3): 1106–1112 (in Chinese)
- [3] Wang J-L (王建林), Wen X-F (温学发), Zhao F-H (赵风华), *et al.* Effects of doubled CO₂ concentration on leaf photosynthesis, transpiration and water use efficiency of eight crop species. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2012, **36** (5): 438–446 (in Chinese)
- [4] Long SP. Modification of the response of photosynthetic productivity to rising temperature by atmospheric CO₂ concentrations: Has its importance been underestimated? *Plant, Cell and Environment*, 1991, **14**: 729–739
- [5] Kudeyarov VN, Biel K, Blagodatsky SA, *et al.* Fertilizing effect of increasing CO₂ concentration in the atmosphere. *Eurasian Soil Science*, 2006, **39**: 6–14
- [6] Jiang Y-L (蒋跃林), Zhang Q-G (张庆国), Yang S-Y (杨书运), *et al.* Ecophysiological responses of 28 species of garden plants to atmospheric CO₂ enrichment. *Journal of Plant Resources and Environment* (植物资源与环境学报), 2006, **15** (2): 1–6 (in Chinese)
- [7] Donnelly A, Craigan J, Black CR, *et al.* Does elevated CO₂ ameliorate the impact of O₃ on chlorophyll content and photosynthesis in potato (*Solanum tuberosum*)? *Physiologia Plantarum*, 2001, **111**: 501–511
- [8] Karnosky DF. Impact of elevated atmospheric CO₂ on forest trees and forest ecosystems: Knowledge gaps. *Environment International*, 2003, **29**: 161–169
- [9] Rao MV, Hale BA, Ormrod DP. Amelioration of ozone induced oxidative damage in wheat plants grown under high carbon dioxide-Role of antioxidant enzymes. *Plant Physiology*, 1995, **109**: 421–432
- [10] Shi J-M (施建敏), Yang G-Y (杨光耀), Yang Q-P (杨清培), *et al.* Photosynthetic responses of *Phyllostachys edulis* ‘Pachyloen’ to doubled CO₂ concentration. *Guihaia* (广西植物), 2010, **30** (5): 636–640 (in Chinese)
- [11] Zhuang M-H (庄明浩), Li Y-C (李迎春), Guo Z-W (郭子武), *et al.* Effects of elevated CO₂ on lipid peroxidation and anti-oxidation system in *Phyllostachys edulis*. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2012, **31** (5): 1064–1069 (in Chinese)
- [12] Zhang L-Y (张利阳), Wen G-S (温国胜), Zhang R-M (张汝民), *et al.* Climate change response using a simulation study of photosynthetic physiology on *Phyllostachys pubescens*. *Jouanal of Zhengjiang A&F University* (浙江农林大学学报), 2011, **28** (4): 555–561 (in Chinese)
- [13] Li Z-G (李忠光), Gong M (龚 明). Improvement of measurement method for superoxide anion radical in plant. *Acta Botanica Yunnanica* (云南植物研究), 2005, **27** (2): 211–216 (in Chinese)
- [14] Chen J-X (陈建勋), Wang X-F (王晓峰). Experiment Instruction of Plant Phyciology. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2006: 54–124 (in Chinese)
- [15] Shen W-Y (沈文庵), Xu L-L (徐朗莱), Ye M-B (叶茂炳), *et al.* Dstudy on determination of ASP activity. *Plant Physiological Journal* (植物生理学报), 1996, **32** (3): 203–205 (in Chinese)
- [16] Zhuang M-H (庄明浩), Chen S-L (陈双林), Li Y-C (李迎春), *et al.* Effects of elevated O₃ and CO₂ on the membrane lipid peroxidation and anti-oxidation system of *Oligostachyum lubricum* leaves. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2012, **31** (9): 2184–2190 (in Chinese)
- [17] Polle A, Eiblmeier M, Sheppard L, *et al.* Response of antioxidative enzymes to elevated CO₂ in leaves of beech (*Fagus sylvatica* L.) seedlings grown under a range of nutrient regimes. *Plant, Cell and Environment*, 1997, **20**: 1317–1321
- [18] Vurro E, Bruni R, Bianchi A, *et al.* Elevated atmospheric CO₂ decreases oxidative stress and increases essential oil yield in leaves of *Thymus vulgaris* grown in a mini-FACE system. *Environmental and Experimental Botany*, 2009, **65**: 99–106
- [19] Peng C-L (彭长连), Lin Z-F (林植芳), Lin G-Z (林桂珠). Effects of elevated CO₂ concentration on lipid peroxidation and activities of antioxidative enzymes in rice leaves. *Chinese Journal of Rice Science* (中国水稻科学), 1999, **13** (1): 41–45 (in Chinese)
- [20] Schwanz P, Polle A. Antioxidative enzymes, pigment and protein contents in leaves of adult Mediterranean oak species (*Quercus pubescens* and *Q. ilex*) with lifetime exposure to elevated CO₂. *New phytologist*, 1998, **140**: 411–423
- [21] Azevedo RA, Alsa RM, Smith RJ, *et al.* Response of antioxidant enzymes to transfer from elevated carbon dioxide to air and ozone fumigation, in the leaves and roots of wild-type and a catalase-deficient mutant of barley. *Physiologia Plantarum*, 1998, **104**: 280–292
- [22] Polle A, Pfirrmann T, Chakrabarti S, *et al.* The effects of enhanced ozone and enhanced carbon dioxide concentrations on biomass, pigments and antioxidative enzymes in spruce needles (*Picea abies* L.). *Plant, Cell and Environment*, 1993, **16**: 311–316
- [23] Manderscheid R, Burkart S, Bamm A, *et al.* Effect of

CO₂ enrichment on growth and daily radiation use efficiency of wheat relation to temperature and growth stage. *European Journal of Agronomy*, 2003, **19**: 411–425

[24] Yu J (于 娟), Tang X-X (唐学玺), Zhang P-Y (张培玉), *et al.* Effects of CO₂ enrichment on photosynthesis, lipid peroxidation and activities of antioxidative enzymes of *Platymonas subcordiform* subjected to UV-B radiation stress. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 2004, **46**(6): 682–690 (in Chinese)

[25] Asada K. Ascorbate peroxidase: A hydrogen peroxide-scavenging enzyme in plant. *Physiologia Plantarum*, 1992, **85**: 235–241

[26] Zhuang M-H (庄明浩), Chen S-L (陈双林), Li Y-C (李迎春). Differences of O₃ stress tolerance between *Phyllostachys edulis* and *Oligostachyum lubricum*. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2011, **30**(10): 2191–2196 (in Chinese)

[27] di Toppi LS, Marabottini R, Badiani M, *et al.* Antioxidant status in herbaceous plants growing under elevated CO₂ in mini-FACE rings. *Journal of Plant Pyhsiology*, 2002, **158**: 1005–1013

[28] Niewiadomska E, Gaucher-Veilleux C, Chevrier N, *et al.* Elevated CO₂ does not provide protection against ozone considering the activity of several antioxidant enzymes in the leaves of sugar maple. *Journal of Plant Pyhsiology*, 1999, **155**: 70–77

[29] Wang M-Y (王美玉), Zhao T-H (赵天宏), Zhang W-W (张巍巍), *et al.* Effects of elevated CO₂ concentration on photosynthetic characteristics of two urban forest species in Shenyang City. *Chinese Bulletin of Botany* (植物学通报), 2007, **24**(4): 470–476 (in Chinese)

[30] Handa IT, Körner C, Hiittenschwller S. A test of the treeline carbon limitation hypothesis by *in situ* CO₂ enrichment and defoliation. *Ecology*, 2005, **86**: 1288–1300

作者简介 庄明浩,男,1985年生,硕士研究生.主要从事竹林生理生态研究. E-mail: zhuangminghao3@163.com

责任编辑 李凤琴

封面图片说明

封面图片由广东省气候中心刘尉工程师提供. 图中为四川海子山国家级自然保护区海子山主峰雅拉雪山及其脚下的姊妹湖. 该保护区位于四川省甘孜藏族自治州境内 (29°06′36″—30°06′00″ N, 99°33′00″—100°31′48″ E, 平均海拔 4000 m). 保护区内分布着由青藏高原古冰川地貌发育形成的最典型、保存最完好、面积最大的高寒湿地, 物种丰富, 自然景观独特, 是金沙江和雅砻江的水源涵养地和水源补给地.