

# 广东地区三种木本植物抗大气污染能力的比较

刘楠<sup>1</sup> 温学<sup>1</sup> 孔国辉<sup>1</sup> 彭长连<sup>1\*</sup> 林桂珠<sup>1</sup> 陆耀东<sup>2</sup> 吴芝扬<sup>2</sup>

(1. 中国科学院华南植物研究所, 广东 广州 510650 2. 广东省佛山市林业科学研究所, 广东 佛山 528000)

**摘要:** 研究了工业污染区(佛山市小塘镇五星 WX)和相对清洁区(广州华南植物园 BG)生长的3种木本植物光叶山矾(*Symplocos lancifolia*)、银柴(*Aporosa chinensis*)和窿缘桉(*Eucalyptus exserta*)叶片对酸碱缓冲能力的差别。工业污染区3种植物的细胞液pH均比相对清洁区的低,光叶山矾与银柴对酸和碱的缓冲能力强于窿缘桉。用外源NaHSO<sub>3</sub>处理,植物叶片的光合放氧、Fv/Fm、Fv/Fo和ΦPS II都有不同程度的下降。其中,窿缘桉下降的幅度最大,说明其抗大气污染的能力不如光叶山矾和银柴,同时也证明了用缓冲能力作为一种评价植物抗污能力的指标具有一定的科学性。

**关键词:** 木本植物;大气污染;抗污能力;缓冲能力

中图分类号:Q945.11

文献标识码:A

文章编号:1005-3395(2003)04-0358-06

## Comparison of the Resistance of Three Woody Plant Species to Air Pollution in Guangdong Province

LIU Nan<sup>1</sup> WEN Xue<sup>1</sup> KONG Guo-hui<sup>1</sup> PENG Chang-lian<sup>1\*</sup> LIN Gui-zhu<sup>1</sup>

LU Yao-dong<sup>2</sup> WU Zhi-yang<sup>2</sup>

(1. South China Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China;

2. Foshan Institute of Forest Science, Foshan 528000, China)

**Abstracts:** Response of three woody species (native *Symplocos lancifolia* and *Aporosa chinensis*, and exotic *Eucalyptus exserta*) to air pollution grown at two experimental sites, Wuxing with ceramic factories nearby at Foshan city (WX) and control site at South China Botanical Garden (BG), was examined physiologically. Buffering capacity of *S. lancifolia* and *A. chinensis* was higher than that of *E. exserta*. pH in cell sap of leaves of three species was lower in WX than that in BG. After the leaves were treated with 10 mmol L<sup>-1</sup> NaHSO<sub>3</sub> under 20.5 μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> light intensity for 10 h, the photosynthetic oxygen evolution, Fv/Fm, Fv/Fo and ΦPS II in all the three species decreased to some extent, most significant decrease in three parameters was found in *E. exserta*. The results demonstrated that there was less resistance to air pollution in *E. exserta* than in the other two, and it was consistent with different buffering capacity of cell sap in three species. It is suggested that the buffering capacity of cell sap in plant leaves can be a useful index in evaluating the resistance of plants to SO<sub>2</sub> pollution.

**Key words:** Woody plants; Air pollution; Pollutant-resistance; Buffering capacity

我国是世界上少数几个以煤炭为主要能源的国家之一,而且煤的含硫量较高。城市燃煤使二氧化硫和烟尘排放量占全部大气污染排放量的80%–90%,导致我国城市出现大气煤烟型污染<sup>[1]</sup>。二氧化硫气相氧化和液相氧化是造成我国酸性降雨的主

要原因,华南地区继欧洲、北美之后成为世界第三大酸雨区<sup>[2]</sup>。国家环保总局的最新统计数据指出,2002年全国471个城市中仍有262个城市的空气质量尚未达到国家二级标准,空气污染依然严重,尤其是人口超过100万的特大城市。全国大气污染

收稿日期 2003-06-09 接受日期 2003-09-04

基金项目:佛山市科学技术局科技发展专项资金(0102007A);广东省环境保护局科技开发项目(1998-09)资助

\* 通讯作者 Corresponding author

重点防治城市中就有广东省的广州市等 6 个城市<sup>[3]</sup>。

改善城市大气环境质量和人居环境的重要手段之一就是大力发展城市绿化。城市绿化植物主要通过固定大气中的 CO<sub>2</sub>、释放 O<sub>2</sub>、滞尘、杀菌、吸收多种有害气体和调节微气候等方式,实现改善环境的生态服务功能,使得城市空气清新,以营造适宜的人居环境。然而,植物对大气污染的耐受能力与适应性千差万别,有的植物在大气污染环境下能长期生长旺盛,有些则在短期内死亡<sup>[4]</sup>。因此,在城市园林绿化中选用抗性强、净化能力高而又对人体健康无害的绿化植物显得尤为重要。而传统的筛选措施是在不同的城市污染环境条件下进行现场栽种、定期观测,再根据其表现受害情况判断各植物的抗性强弱,从而做出选择。这些方法需要大量的人力、物力和时间,一次实验被筛选的植物种类有限。为此,我们通过一些生理生化手段,探讨绿化植物对大气污染的耐受性机理,并试图建立快速有效的判别植物对大气污染的敏感程度和耐受能力差别的方法,为城市园林和道路绿化树种的选择提供科学依据。

## 1 材料和方法

**采样地点** (1)工业污染区(WX)位于佛山市小塘镇五星实验点,该实验点靠近陶瓷厂,SO<sub>2</sub>及粉尘污染较为严重。(2)相对清洁区(BG)位于广州市城郊的华南植物园百草园实验点,该实验点周围无污染性工厂而且人类活动较少,空气质量较好。

**植物材料和测定方法** 试验于 2003 年 3 月进行。在污染区和对照清洁区分别选取 3 种树龄基本一致的多年生野生乡土种光叶山矾(*Symplocos lancifolia*)、银柴(*Aporosa chinensis*)和引种绿化树种窿缘桉(*Eucalyptus exserta*)。污染区的 3 个树种中,前两种胸径可达 10–20 cm,枝叶茂盛,后者胸径约 10 cm,枯枝多,枝叶稀疏。取当年的成熟叶片做各项分析测定或离体处理。

**植物叶片缓冲能力的测定** 称取被测植物叶片鲜重 5 g,加入 100 ml 蒸馏水,在沸水浴中煮 30 min,然后过滤并定容,测定其 pH 并将滤液等分成两份,分别用 0.1 mol/L 的 HCl 和 0.1 mol/L 的 NaOH 滴定以 0.2 个 pH 单位为间隔读取体积值,再以 pH 为横轴, HCl 和 NaOH 体积为纵轴绘制缓冲曲线<sup>[5]</sup>。对曲线经过比较分析后,得出计算植物叶片缓冲能力的公式(见讨论):

$$\text{对酸的缓冲能力} (\text{mmol HCl pH}^{-1} \text{ g}^{-1}) = M(V-V_0)/w/1.6 \quad (1)$$

式中 M—HCl 溶液的浓度(0.1 mol/L);  
V<sub>0</sub>—初始(或邻近点)pH 对应的滴定体积;  
V—初始 pH-1.6 对应的滴定体积;  
w—叶片质量(2.5g FW)。

$$\text{对碱的缓冲能力} (\text{mmol NaOH pH}^{-1} \text{ g}^{-1}) = M(V-V_0)/w/4 \quad (2)$$

式中 M—NaOH 溶液的浓度(0.1 mol/L);  
V<sub>0</sub>—初始(或邻近点)pH 对应的滴定体积;  
V—初始 pH+4 对应的滴定体积;  
w—叶片质量(2.5g FW)。

**光合放氧速率的测定** 根据 Delien 和 Walker<sup>[6]</sup>的方法,用叶圆片氧电极(Leaf disc oxygen electrode, Hasatech, King's Lynn, UK)测定叶片在 CO<sub>2</sub> 饱和条件下的放氧速率。叶室内温度由水浴循环控制在 25℃,向室内呼气可使 CO<sub>2</sub> 浓度达 3%–5%,光照强度 845 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>。

**叶绿素荧光的测定** 根据彭长连等<sup>[7]</sup>的方法,用脉冲调制荧光仪(Pulse Modulation Fluorometer, PAM, Walz, Germany)测定叶片的叶绿素荧光诱导曲线。原初荧光(F<sub>0</sub>)是用暗适应 15 min 的叶片在弱调制测量光(0.05 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)诱导下产生的,最大荧光(F<sub>m</sub>)则是在 F<sub>0</sub> 之后用强饱和脉冲(3 000 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)激发。当荧光从最大值降低到接近 F<sub>0</sub> 水平时,用光强为 300 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> 的光化光诱导荧光动力学。根据 Schreiber 等<sup>[8]</sup>、Genty 等<sup>[9]</sup>和 Foyer 等<sup>[10]</sup>的方法计算不同的荧光参数 F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>, F<sub>v</sub>/F<sub>0</sub> 和 ΦPS II。

**外加 HSO<sub>3</sub><sup>-</sup> 处理** 以 10 mmol/L NaHSO<sub>3</sub> 溶液浸泡光叶山矾、银柴和窿缘桉叶圆片,置于室温(25℃)下照光(20.5 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)10 h,对照用蒸馏水浸泡处理。

## 2 结果

### 2.1 叶片细胞液 pH 缓冲能力的比较

SO<sub>2</sub> 伤害植物的一部分原因在于其酸性作用。Gill 指出细胞的 pH 缓冲能力对抗性起一定作用<sup>[11]</sup>。无论是污染点(WX),还是清洁对照点(BG),3 种绿化植物的叶片细胞液 pH 缓冲能力曲线显示出相同的趋势(图 1)。通过计算并进行种间和实验点间的差异显著性分析(表 1–2),3 种植物对酸的缓冲能力比较接近,光叶山矾和银柴略高于窿缘桉,而

对碱的缓冲能力则显示出明显的差异,光叶山矾的缓冲能力最强,窿缘桉最差。与 BG 点相比,同一种植物的缓冲能力在污染点有的种上升,有的种不变,还有的种下降,没有一定的规律性。方差分析表明,实验点对细胞液 pH 影响最显著,对碱的缓冲力影响较显著,对酸的缓冲力无影响。3 种植物的细胞液 pH 均为清洁对照点(BG)略高于污染点(WX),表明大气中的 SO<sub>2</sub> 已进入在污染点生长的 3 种植物的细胞中,通过水合反应产生酸性 HSO<sub>3</sub><sup>-</sup> 或

SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>,使细胞液酸化。

### 2.2 外源 NaHSO<sub>3</sub> 对叶片光合放氧、叶绿体光系统 II 功能的影响

气态 SO<sub>2</sub> 从气孔进入植物体后,以 HSO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的形式起作用。因此,NaHSO<sub>3</sub> 处理可以作为植物对大气污染气体 SO<sub>2</sub> 的模式反应加以研究。本试验以 10 mmol/L NaHSO<sub>3</sub> 作为模拟系统研究 SO<sub>2</sub> 的植物毒性及植物种间耐受力的差别<sup>[12]</sup>。

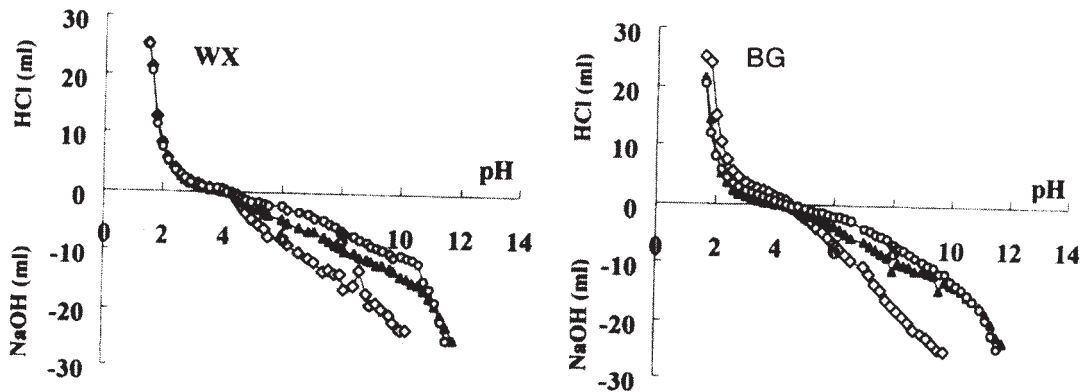


图 1 不同实验点植物叶片的缓冲能力

Fig.1 Buffering capacity of plant leaves at air polluted site (WX) and control site (BG)

—◇— 光叶山矾 *Symplocos lancifolia*; —▲— 银柴 *Aporosa chinensis*; —○— 窿缘桉 *Eucalyptus exserta*

表 1 不同实验点植物叶片细胞液的 pH 和缓冲能力的比较

Table 1 Comparison of pH and buffering capacity in cell sap of plant leaves at different experimental sites

种类 Species	实验点 Experimental sites	细胞液 pH pH in plant cells	对酸的缓冲能力 (mmol pH <sup>-1</sup> g <sup>-1</sup> ) Buffering capacity for HCl	对碱的缓冲能力 (mmol pH <sup>-1</sup> g <sup>-1</sup> ) Buffering capacity for NaOH
窿缘桉 <i>Eucalyptus exserta</i>	WX	4.16±0.08	0.0656 ±0.0044	0.0695 ±0.0021
	BG	4.32±0.06	0.0775 ±0.0010	0.0763 ±0.0025
银柴 <i>Aporosa chinensis</i>	WX	3.88±0.05	0.1375 ±0.0283	0.1015 ±0.0035
	BG	3.98±0.02	0.0988 ±0.0053	0.1005 ±0.0018
光叶山矾 <i>Symplocos lancifolia</i>	WX	4.10±0.07	0.0906 ±0.0080	0.1535 ±0.0134
	BG	4.39±0.06	0.0875 ±0.0053	0.2010±0.0014

HCl 0.1mol/L, NaOH 0.1mol/L; WX: Polluted site, BG: Control site.

表 2 不同物种、不同实验点对各参数影响的 F 值及其显著性水平

Table 2 F values and their significance for the effects of different species and experimental sites on pH in plant cell and buffering capacity

	实验点 Sites (Df=1)	物种 Species (Df=2)
细胞液 pH pH in plant cell	10.69*	13.81*
对酸的缓冲能力 Buffering capacity for HCl	0.44	3.28
对碱的缓冲能力 Buffering capacity for NaOH	1.40	17.19*

\* P<0.1

### 2.2.1 对植物叶片光合放氧的影响

通过叶片光合放氧的测定可以初步考察污染物对光合作用的破坏程度。从图 2 可见，经过 NaHSO<sub>3</sub> 的浸泡处理 10 h，3 种植物的光合放氧均有不同程度的下降，光叶山矾和银柴分别降至对照的 85.0%和 97.3%。而窿缘桉的光合系统受损较严重，已经不能测到叶片的净光合放氧，只能测到少量的吸氧。

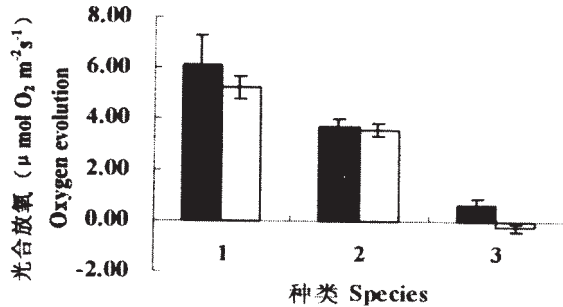


图 2 NaHSO<sub>3</sub> 处理对 3 种植物光合放氧的影响

Fig.2 Effects of NaHSO<sub>3</sub> on photosynthetic oxygen evolution in three species

1 光叶山矾 *S. lancifolia*; 2 银柴 *A. chinensis*; 3 窿缘桉 *E. exserta*  
 —■—对照 Control; —□—NaHSO<sub>3</sub>

### 2.2.2 对叶绿素光系统 II 功能的影响

Fv/Fm 是叶绿体光系统 II 光化学效率的一种度量<sup>[8]</sup>。从图 3 可以看出 NaHSO<sub>3</sub> 处理的 3 种植物叶片 Fv/Fm (PS II 光化学效率)与对照相比有不同程度的下降，污染点光叶山矾、银柴和窿缘桉的 Fv/Fm 分别降为清洁对照点的 97.6%、87.3%和 66.1%，窿缘桉的下降幅度最大。

Fv/Fo 代表从 Chl a/b 蛋白复合体 LHCP 到 PS II 的光能传递能力<sup>[12]</sup>，它也是常用的研究植物对逆境响应的重要生理参数。图 3 反映了 3 种植物 Fv/Fo 受 NaHSO<sub>3</sub> 的影响程度，其中光叶山矾的 Fv/Fo 影响最小，处理后为对照的 85.8%，窿缘桉变化最大，降低到对照的 35.3%，银柴介于二者之间，为 79.9%。

叶绿体的开放 PS II 反应中心的光化学量子效率 Φ PS II 为 Δ Fv/Fm'，正比例于非循环电子传递速率，反映 PS II 的活性。3 种植物经 NaHSO<sub>3</sub> 处理后 Φ PS II 的变化与 Fv/Fm 相似 (图 3)，仍以窿缘桉的变化最明显。

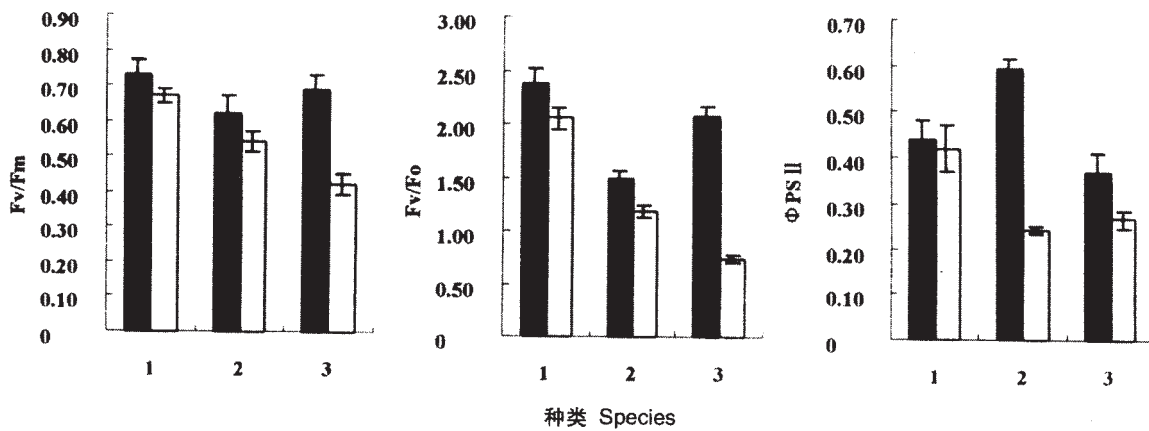


图 3 NaHSO<sub>3</sub> 处理对 3 种植物叶绿素荧光特性的影响

Fig.3 Effects of NaHSO<sub>3</sub> on chlorophyll fluorescence in three species

1 光叶山矾 *S. lancifolia*; 2 银柴 *A. chinensis*; 3 窿缘桉 *E. exserta*  
 —■—对照 Control; —□—NaHSO<sub>3</sub>

## 3 讨论

### 3.1 模拟 SO<sub>2</sub> 污染对植物的影响及其机理

以 NaHSO<sub>3</sub> 处理离体组织，方法简便，实验条件易于控制。用 NaHSO<sub>3</sub> 处理小麦幼苗切段，结果与整株植株受 SO<sub>2</sub> 伤害的反应基本相同<sup>[13]</sup>。植物叶组织的生理酸度范围在 pH 3-8，当 SO<sub>2</sub> 溶于湿润叶肉细胞的细胞壁的水膜中时，在 pH 2-5 的范围内主要成为 HSO<sub>3</sub><sup>-</sup> 形式，pH 3-4 范围内对膜的差别透性和

叶绿素的破坏最大<sup>[14]</sup>。本实验采用 NaHSO<sub>3</sub> 10 mmol/L 的 pH 恰好在此范围。这也正说明以 NaHSO<sub>3</sub> 浸泡模拟 SO<sub>2</sub> 对植物处理具有一定的科学性。

植物受 SO<sub>2</sub> 危害后，叶绿素和类胡萝卜素部分遭受破坏，其含量减少，便会影响到植物对光能的吸收和利用，从而降低植物的光合作用速率<sup>[15]</sup>。据报道，用 500 μmol mol<sup>-1</sup> 液相 SO<sub>2</sub> 处理时，细胞超亚显微结构出现明显的变化，如类囊体膨胀，叶绿体内膜解体等<sup>[16]</sup>，从处理松针组织的离体叶绿体进行



的希尔反应来看,放氧速度显著受抑<sup>[17]</sup>。3种木本植物叶片经模拟 SO<sub>2</sub> 处理后,其 Fv/Fm、Fv/Fo 和 Φ PSII 都有不同程度的下降,说明光系统 II 受到了伤害,而且伤害程度由大至小为:窿缘桉,银柴,光叶山矾。进一步的结果表明 NaHSO<sub>3</sub> 处理后光叶山矾和银柴的光合放氧速率略有下降,而窿缘桉则受害严重,光合系统受损较大,失去了光合放氧的功能。光叶山矾和银柴在 SO<sub>2</sub> 污染条件下能保持较高的 PSII 活性以及较为完整的光合作用功能,是其抗 SO<sub>2</sub> 污染能力强的机理之一。

### 3.2 以叶片缓冲能力为指标探讨植物对大气污染的响应

叶片缓冲能力的大小与其对 SO<sub>2</sub> 毒性忍耐力呈正相关<sup>[18]</sup>。Priebe 等指出,植物接触 SO<sub>2</sub> 后产生多胺,它能与 H<sup>+</sup> 结合而清除之。也有人推测清蛋白等蛋白质能起一定的缓冲作用<sup>[11]</sup>。樊后保曾经对树皮的浸提液进行滴定,并绘制了缓冲曲线<sup>[5]</sup>,从曲线上基本能够得出不同树种的树皮对酸和碱缓冲能力的差异。这种方法对于分析少量的或缓冲能力差距较大的材料可能比较适用,而对于考察多个植物种类或者缓冲能力较为接近的植物材料就会出现困难(如图 1 中 3 种植物对酸的缓冲能力的比较)。因此,在这一方法的基础上,我们将植物叶片的缓冲能力数量化。从缓冲曲线上可以看出各种植物叶片细胞液的滴定曲线都是在 pH 2 到 pH 10 区间比较平缓,具有可比性。有研究表明:超过了滴定终点的部分(pH<2 或 pH>10)反映的不是被滴定溶液而是 HCl 或 NaOH 的缓冲能力, pH<2 的 HCl 和 pH>12 的 NaOH 都是强缓冲剂<sup>[19]</sup>。因此我们对每种植物分别选取了初始 pH (pHo) 和 pHo+4 (<10) 或 pHo 和 pHo-1.6 (>2) 两个区间,做统一比较,同时参照化学工业中关于缓冲容量(capacity of buffer)的定义和计算公式( $\beta = db/dpH = -da/dpH$ )<sup>[20]</sup>,计算单位质量(鲜重)的各种植物叶片细胞液(定容后体积为 50/2.5=20 ml)在初始 pH 基础上每上升或下降 1 个 pH 单位时所消耗的 NaOH 或 HCl 的物质的量(大致与这一区间缓冲曲线趋势线的斜率成正比),并以此作为衡量植物抵抗外来酸性污染气体能力的一个新指标。SO<sub>2</sub>、氟化物和粉尘污染严重的佛山市小塘镇五星实验点,其大气中硫酸盐化速率和氟化物含量在一年中的不同时段分别达到国家二级标准的 11-60 倍和 17-19 倍(该实验点的大气状况另文发表)。从实地观察来看,光叶山矾和银柴的叶片边缘或叶尖

出现棕色或灰色的伤斑,表现出了一定的受害症状。相比之下,多数窿缘桉的树枝上已经见不到或仅留有少量干枯的树叶,而活的叶片就更少,受害情况十分严重。另外,各生理指标比较的结果也普遍表明光叶山矾和银柴的抗性强于窿缘桉。这些与我们对 3 种植物叶片缓冲能力的检测结果基本一致。光叶山矾和银柴叶片具有较大的缓冲能力,我们推测当受 SO<sub>2</sub> 等大气污染伤害时,其细胞能维持相对稳定的 pH 环境,有利于新陈代谢的正常进行,这可能是它们抗性强的另外一个原因。因此,计算和比较植物叶片的缓冲能力也为筛选高抗污能力的绿化树种提供了一条新思路。

### 3.3 外来种在城市绿化中的正确运用

广东省新绿化造林面积中,有一半以上是外来的桉树(*Eucalyptus*)、相思树(*Acacia*)或湿地松(*Pinus*)的纯林<sup>[21]</sup>,有些引种桉树、湿地松导致土壤理化性质的恶化和生物多样性的下降<sup>[22, 23]</sup>。在实验中,窿缘桉作为外来种,其抗大气污染的能力明显低于本地种光叶山矾和银柴。我们在陶瓷生产地附近实地调查也发现所栽种的桉树幼树已出现明显的伤害症状,大树多枯死,或长势明显衰退。而同时生长在一起的乡土树种光叶山矾和银柴长势基本正常。因此,在进行外来种引种之前要对外来种的生物学及生态学特征进行研究,选取一些对生态环境破坏较小,抗性较强以及美观实用的树种,减少不必要的浪费和损失,达到城市绿化的预期目的。

### 参考文献

- [1] Zhang H Q (张慧勤), Zhao X D (赵晓东), Wang Q L (王秋玲). Energy structure and air pollution in China [J]. Res Envir Sci (环境科学研究), 1991, 4 (6): 50-54. (in Chinese)
- [2] Peng C L (彭长连), Wen D Z (温达志), Sun Z J (孙梓健), et al. Response of some plants for municipal greening to air pollutants [J]. J Trop Subtrop Bot (热带亚热带植物学报), 2002, 10 (4): 321-327. (in Chinese)
- [3] <http://www.zhb.gov.cn> [EB/OL]
- [4] Kong G H (孔国辉), Wang J X (汪嘉熙), Chen Q C (陈庆诚). Air Pollution and Plants [M]. Beijing: China Forestry Press, 1988. 28-83 (in Chinese)
- [5] Fan H B (樊后保). Tree bark: An indicator of air pollution and precipitation acidity [J]. J Zhejiang For Coll (浙江林学院学报), 1996, 13(2): 136-140. (in Chinese)
- [6] Delien R J, Walker D A. Simultaneous measurement of oxygen evolution and chlorophyll fluorescence from leaf pieces [J]. Plant Physiol, 1983, 73: 534-541.
- [7] Peng C L (彭长连), Lin Z F (林植芳), Lin G Z (林桂珠), et al. Effect of tourism and industrialization on the atmospheric quality

- of subtropical forests and on chlorophyll fluorescence of two species of woody plants [J]. *Acta Bot Sin* (植物学报), 1998, 40: 270–276. (in Chinese)
- [8] Schreiber U, Schliwa U, Bilger W. Continuous recording of photochemical and nonphotochemical chlorophyll fluorescence quenching with a new type of modulation fluorometer [J]. *Photosyn Res*, 1986, 10: 51–62.
- [9] Genty B, Briants J M, Baker N R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence [J]. *Biochim Biophys Acta*, 1989, 990: 87–92.
- [10] Foyer C H, Furbank R, Harbinson J. The mechanisms contributing to photosynthetic control of electron transport carbon assimilation in leaves [J]. *Photosyn Res*, 1990, 25: 83–100.
- [11] Yu S W (余叔文). Sulfur dioxide injury and plant resistance [J]. *Plant Physiol Commun* (植物生理学通讯), 1983, (3): 7–14. (in Chinese)
- [12] Maxwell K, Johnson G N. Chlorophyll fluorescence—a practical guide [J]. *J Exp Bot*, 2000, 345(51): 659–668.
- [13] Li Z G (李振国), Liu Y (刘愚), Wu Y M (吴有梅), et al. Studies on the response and resistance of plants to sulfur dioxide IV. Tissue injury and production of ethane in segments of wheat seedlings exposed to HSO<sub>3</sub> [J]. *Acta Phytophysiol Sin* (植物生理学报), 1980, 6: 307–312. (in Chinese)
- [14] Yu S W (余叔文), Liu Y (刘愚), Li Z G (李振国), et al. Studies on the response and resistance of plants to sulfur dioxide V. The correlation between pH and the resistance of plants to SO<sub>2</sub> [J]. *Acta Phytophysiol Sin* (植物生理学报), 1980, 6: 345–351. (in Chinese)
- [15] Zhang Q D (张其德). Effects of SO<sub>2</sub> acute treatment on pigmental content and spectral characteristics of some plants in gardens [J]. *Chin Bull Bot* (植物学通报), 1986, 4 (1–2): 46–49. (in Chinese)
- [16] Tuula S, Painen T H. Needle and root responses of small *Pinus sylvestris* seedlings exposed to sulfur dioxide and simulated acid rain [J]. *Scand J For Res*, 1989, 4(3): 273–284.
- [17] Malhotra S S, Hocking D. Biochemical and cytological effects of sulfur dioxide on plant metabolism [J]. *New Phytol*, 1976: 227–237.
- [18] Chauhan A, Promila M. Effect of sulfur dioxide on leaf buffering capacity in some crop plants [J]. *Ind J Exp Bio*, 1989, 27(11): 992–995.
- [19] Tindall G W, Dolan J W. Mobile phase buffers, Part II—Buffer selection and capacity [J]. *LC·GC Eur*, 2003, 16 (1): 2–4.
- [20] Wang Z (王箴). *Chemical Industry Dictionary* [M]. 3rd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 1992. 828. (in Chinese)
- [21] Peng S L (彭少麟), Xiang Y C (向言词). The invasion of exotic plants and effects of ecosystems [J]. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 1999, 19(4): 560–566. (in Chinese)
- [22] Peng S L (彭少麟). Rehabilitation of the degraded ecosystem and its ecological effect in South China's subtropical region [J]. *Chin J Appl Envir Biol* (应用与环境生物学报), 1995, 1 (4): 403–414. (in Chinese)
- [23] Peng S L (彭少麟). Restoration ecology theories and their application in low-subtropics [J]. *J Trop Subtrop Bot* (热带亚热带植物学报), 1996, 4 (3): 36–44. (in Chinese)