

抗 SO₂ 绿化植物的初步筛选

刘楠¹ 温学¹ 孔国辉¹ 彭长连^{1*} 林桂珠¹
薛克娜² 吴芝扬² 陆耀东² 刘世忠¹

(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: 盆栽于广州市华南植物园内的 72 种城市绿化植物的叶片经模拟 SO₂ (20 mmol/L NaHSO₃ 浸泡) 处理后, 研究其叶绿素荧光参数的变化, 还比较了其中 31 种植物叶片的细胞液 pH 值和对碱缓冲能力的大小。通过对这些生理参数的分析, 初步筛选出了一批抗污能力较强的树种, 如: 傅园榕 (*Ficus microcarpa* var. *fuyuensis*)、红桂木 (*Artocarpus nitidus* ssp. *lingnanensis*)、幌伞枫 (*Heteropanax fragrans*)、石笔木 (*Tutcheria spectabilis*) 等, 和抗性较差的树种, 如: 印度第伦桃 (*Dillenia indica*)、灰木莲 (*Manglietia glauca*)、灰莉 (*Fagraea ceilanica*) 等。

关键词: 绿化植物; 抗污能力; 筛选; NaHSO₃

中图分类号: Q945.11

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2003)04-0364-08

Preliminary Selection of Plants with High Resistance to SO₂ for Urban Greening

LIU Nan¹ WEN Xue¹ KONG Guo-hui¹ PENG Chang-lian^{1*} LIN Gui-zhu¹
XUE Ke-na² WU Zhi-yang² LU Yao-dong² LIU Shi-zhong¹

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

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

Abstract: Seventy-two woody plant species of 1 to 2-year old seedlings were potted at non-polluted site in South China Botanical Garden in Guangzhou. One year later, mature leaves of every species from different individuals were used for experiment of simulation of SO₂ pollutant by immersing leaf discs in 20 mmol L⁻¹ NaHSO₃ solution at 25°C under 20 μmol m⁻²s⁻¹ light intensity for 20 h, and in distilled water as control. The treated leaves were conducted for chlorophyll fluorometric assay and for buffer capacity for alkali. The resistance of plants was evaluated comprehensively by decreasing amplitude of the values of Fv/Fm and Fv/Fo after the leaves were treated with NaHSO₃ compared to the control, and by pH value in cell saps and buffering capacity of leaves. Results indicate that the resistant species are *Ficus microcarpa* var. *fuyuensis*, *Artocarpus nitidus* ssp. *lingnanensis*, *Heteropanax fragrans*, *Tutcheria spectabilis*, *Ormosia pinnata*, *Artocarpus hypargyreus*, etc., the sensitive species being *Dillenia indica*, *Manglietia glauca*, *Fagraea ceilanica*, *Garcinia multiflora*, *Cassia siamea*, etc.

Key words: Plants for urban greening; Pollution-resistance; Selection; NaHSO₃

环境恶化是当今世界的焦点问题, 随着现代工业化和城市化进程的不断推进, 环境污染已经日趋严重。其中, 大气污染的危害居环境污染之首, 成为亟待解决的首要问题之一。在我国, 经济的高速

发展带来了城市大气质量的恶化, 例如, 广州市近 5 年大气的 SO₂ 年平均值、总悬浮颗粒平均值大大超过世界卫生组织(WHO)的标准^[1]; 广东省佛山市南海区 2001 年排放二氧化硫 42 185 t, 大气污染状况

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

十分严重^[2]。

治理大气污染首先要治理排污源头，减少污染物的排放量。植物对排放到大气中的污染物有一定的吸收和净化作用，是防治空气污染的一种有效补充工具^[3]，然而，不同的植物在抗污和吸污的能力上表现出很大的差异。因此有目的地选择栽种一些抵抗和忍耐大气污染能力强的绿化植物，从而使城市园林绿化发挥其应有的作用就显得尤为重要。已有一些筛选高抗性城市绿化植物的报道^[4-6]，但远不能满足现代城市发展的新要求。我们对72种植物一些生理生化指标进行了测定，以探讨在同一栽培条件、同一环境（华南植物园）下植物对大气中SO₂污染反应的敏感程度，为进一步筛选抗性高的绿化植物提供理论依据。

1 材料和方法

采样地点 植物材料盆栽于广州市近郊的华南植物园百草园实验点，该实验点周围的树木繁多，无工厂和人类活动的干扰，空气质量状况较好，可视为清洁区。

植物材料和测定方法 72种试验植物幼苗2002年3-4月盆栽，苗龄1-2年生。同年6月初-7月初先后从佛山市林业科学研究所（佛山市小塘镇）搬至华南植物园。每种植物5盆重复，常规水肥管理。本测试于2003年3-4月进行。取样时，每种植物尽量选取不同植株在同一叶位的成熟叶片，做分析测定和离体处理。以未经处理的材料为对照。

外加 NaHSO₃ 处理 在光照(20 μmol m⁻² s⁻¹)和温度 25℃条件下，以 20 mmol/L 的 NaHSO₃(pH 2.82)和蒸馏水浸泡各植物叶圆片 20 h。叶圆片面积 1.77 cm²，每种植物取 8 个重复。处理后，进行叶绿素荧光的测定。

叶绿素荧光的测定 根据彭长连等^[7]的方法，用脉冲调制荧光仪（Pulse Modulation Fluorometer, PAM, Walz, Germany）测定叶片叶绿素荧光诱导曲线，原初荧光(F₀)是用暗适应 15 min 的叶片在弱调制测量光(0.05 μmol m⁻² s⁻¹)诱导下产生的，最大荧光(F_m)是在原初荧光(F₀)之后用饱和脉冲(3 000 μmol m⁻² s⁻¹)激发。

植物叶片对碱的缓冲能力的测定 称取每种植物叶片鲜重 5 g，剪碎后加 100 ml 蒸馏水，沸水浴中煮 30 min 后过滤并定容，室温下测定其 pH。将滤液平分两份（每份 50 ml），用 0.1 mol/L 的 NaOH

分别滴定^[8]。以 0.2 个 pH 单位为间隔读取体积，再以 pH 为横轴，NaOH 体积为纵轴分别绘制缓冲曲线。通过严格的比较分析，我们以各植物叶片初始 pH(或其邻近 pH)为起点，以 4 个 pH 单位为区间，计算各种植物叶片的缓冲能力：

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

式中：M—NaOH 溶液的浓度(0.1 mol/L)；V₀—初始 pH 对应的 NaOH 的体积；V—初始 pH+4 对应的 NaOH 的体积；w—叶片重量(2.5 g FW)。

2 结果

2.1 叶绿素荧光参数的变化

Fv/Fm 和 Fv/Fo 是近年来常用的研究植物对抗性响应的重要生理参数^[9]。其中 Fv/Fm 反映了 PSII 的原初最大光能转换效率，Fv/Fo 则反映了光能从 Chl a/b 蛋白复合体 LHCP 到 PSII 的传能效率。经过 NaHSO₃ 处理后，所有植物的 Fv/Fm 和 Fv/Fo 都有不同幅度的下降。表 1 和表 2 按照 NaHSO₃ 处理的 Fv/Fm 和 Fv/Fo 占蒸馏水处理的百分比，分别进行排序。其结果基本一致。变化小的树种（处理后 Fv/Fm 为对照的 80% 以上，Fv/Fo 为 60% 以上）有：仪花、无患子、竹节树、格木、白木香、海南红豆和软荚红豆等。变化大的树种（处理后 Fv/Fm 为对照的 3% 以下，Fv/Fo 为 1% 以下）有：长芒杜英、铁刀木、多花山竹子、水石榕、粉花绝明、兰花楹、枫香和山玉兰等。其余树种下降的幅度居中。

2.2 细胞液 pH 的比较

通过对叶片细胞液 pH 的比较(表 3)可以大致衡量这些绿化植物对酸性气体的缓冲能力。不同绿化植物叶片细胞液 pH 差异非常大(表 3)。从最大的 pH 7.3(傅园榕)到最小的只有 pH 2.74(人面子)，pH 相差高达 4.56。多数植物细胞液 pH 在 3-6 之间。

2.3 对碱的缓冲能力的比较

不同植物对酸的缓冲能力比较接近，而对碱的缓冲能力差异较大^[8]。因此，根据滴定结果，我们绘制了各种植物的缓冲曲线，并把它们的缓冲能力数量化，比较了它们对碱(0.1 mol/L NaOH)的缓冲能力。从表 4 可见，傅园榕的缓冲能力较强，达到 0.126 mmol NaOH pH⁻¹g⁻¹，深山含笑也超过了 0.1 mmol NaOH pH⁻¹g⁻¹；相比之下，毛黄肉楠、刺果番荔枝、华润楠和灰莉的缓冲能力比较差，都小于 0.03 mmol NaOH pH⁻¹g⁻¹。

表 1 用 NaHSO_3 和蒸馏水浸泡的植物叶片 Fv/Fm 的比较
Table 1 A comparison on Fv/Fm in plant leaves treated with NaHSO_3 and distilled water

种类 Species	Fv/Fm		
	蒸馏水 Distilled water (control)	NaHSO_3 (20 mmol/L)	百分比 (%) % of control
仪花 <i>Lysidice rhodostegia</i>	0.59±0.04	0.56±0.08	94.87
无患子 <i>Sapindus mukorossi</i>	0.63±0.05	0.57±0.02	91.18
竹节树 <i>Carallia brachiata</i>	0.69±0.30	0.62±0.04	90.76
格木 <i>Erythrophleum fordii</i>	0.60±0.05	0.51±0.07	85.20
土沉香 <i>Aquilaria sinensis</i>	0.43±0.04	0.36±0.04	82.20
海南红豆 <i>Ormosia pinnata</i>	0.70±0.04	0.57±0.09	81.33
软荚红豆 <i>Ormosia semicastrata</i>	0.72±0.03	0.58±0.08	81.09
肖蒲桃 <i>Acmena acuminatissima</i>	0.61±0.05	0.48±0.08	79.24
铁冬青 <i>Ilex rotunda</i>	0.66±0.07	0.49±0.08	74.92
红豆树 <i>Ormosia hosiei</i>	0.74±0.03	0.55±0.09	74.49
杨梅 <i>Myrica rubra</i>	0.72±0.02	0.52±0.10	72.53
刺果番荔枝 <i>Annona muricata</i>	0.57±0.07	0.37±0.06	65.95
华润楠 <i>Machilus chinensis</i>	0.70±0.02	0.46±0.09	65.36
环榕 <i>Ficus annulata</i>	0.24±0.05	0.16±0.01	65.10
蛋黄果 <i>Lucuma nervosa</i>	0.55±0.08	0.35±0.05	64.05
中国无忧树 <i>Saraca chinensis</i>	0.62±0.04	0.39±0.06	62.78
方枝蒲桃 <i>Syzygium tephrodes</i>	0.63±0.03	0.40±0.08	62.78
铁力木 <i>Mesua ferrea</i>	0.66±0.05	0.39±0.07	58.36
黄花夹竹桃 <i>Thevetia peruwiana</i>	0.70±0.03	0.37±0.07	52.36
艳榄仁 <i>Terminalia superba</i>	0.71±0.01	0.37±0.06	51.55
广宁油茶 <i>Camellia semiserrata</i>	0.55±0.06	0.28±0.05	51.09
傅园榕 <i>Ficus microcarpa</i> var. <i>fuyuensis</i>	0.59±0.08	0.29±0.04	48.54
海红豆 <i>Adenanthera pavonina</i>	0.66±0.01	0.27±0.05	41.48
腊肠树 <i>Cassia fistula</i>	0.75±0.04	0.28±0.01	36.85
毛黄肉楠 <i>Actinodaphne pilosa</i>	0.66±0.01	0.23±0.03	34.87
阿丁枫 <i>Altingia chinensis</i>	0.74±0.01	0.25±0.04	32.92
猫尾木 <i>Dolichandrone cauda-felina</i>	0.71±0.04	0.23±0.02	32.67
石笔木 <i>Tutcheria spectabilis</i>	0.36±0.04	0.12±0.02	32.43
桂花 <i>Osmanthus fragrans</i>	0.59±0.04	0.19±0.03	31.88
红桂木 <i>Artocarpus nitidus</i> ssp. <i>lingnanensis</i>	0.61±0.04	0.17±0.03	28.01
柳叶润楠 <i>Machilus salicina</i>	0.73±0.05	0.18±0.03	24.24
长柄银叶树 <i>Heritiera angustata</i>	0.67±0.03	0.15±0.02	22.65
密花树 <i>Rapanea nerifolia</i>	0.70±0.08	0.13±0.02	19.30
山茶 <i>Camellia japonica</i>	0.67±0.03	0.13±0.02	19.23
印度紫檀 <i>Pterocarpus indicus</i>	0.74±0.01	0.14±0.03	18.36
火焰树 <i>Spathodea nilotica</i>	0.65±0.05	0.11±0.00	16.58
幌伞枫 <i>Heteropanax fragrans</i>	0.66±0.02	0.11±0.01	16.29
小叶胭脂 <i>Artocarpus styracifolius</i>	0.47±0.09	0.07±0.02	15.94
红花木莲 <i>Manglietia insignis</i>	0.76±0.01	0.12±0.00	15.67
白桂木 <i>Artocarpus hypargyreus</i>	0.66±0.07	0.10±0.02	15.59
菩提树 <i>Ficus religiosa</i>	0.56±0.02	0.09±0.02	15.40
深山含笑 <i>Michelia maudiae</i>	0.66±0.05	0.09±0.01	13.62
乐昌含笑 <i>Michelia chapensis</i>	0.64±0.02	0.09±0.02	13.43
吊灯树 <i>Kigelia africana</i>	0.60±0.03	0.07±0.01	12.13
厚皮香 <i>Ternstroemia gymnanthera</i>	0.56±0.05	0.06±0.01	11.28
糖胶树 <i>Alstonia scholaris</i>	0.57±0.07	0.06±0.01	11.09
大头茶 <i>Gordonia axillaris</i>	0.69±0.07	0.06±0.02	8.92
山杜英 <i>Elaeocarpus sylvestris</i>	0.72±0.06	0.06±0.00	8.32

续表 1 (Continued Table 1)

种类 Species	Fv/Fm		
	蒸馏水 Distilled water (control)	NaHSO ₃ (20 mmol/L)	百分比 (%) % of control
大果安息香 <i>Styrax macrocarpus</i>	0.76±0.02	0.06±0.01	8.26
石楠 <i>Photinia serrulata</i>	0.72±0.04	0.06±0.01	8.06
蝴蝶树 <i>Heritiera parvifolia</i>	0.70±0.04	0.05±0.01	7.56
观光木 <i>Tsoongiodendron odorum</i>	0.70±0.06	0.05±0.05	6.81
灰莉 <i>Fagraea ceilanica</i>	0.56±0.03	0.04±0.01	6.25
香椿 <i>Toona sinensis</i>	0.59±0.07	0.03±0.00	5.88
灰木莲 <i>Manglietia glauca</i>	0.64±0.05	0.04±0.00	5.73
华杜英 <i>Elaeocarpus chinensis</i>	0.43±0.07	0.02±0.00	5.07
人面子 <i>Dracontomelon duperreanum</i>	0.50±0.03	0.02±0.01	4.74
复羽叶栎树 <i>Koelreuteria bipinnata</i>	0.74±0.06	0.03±0.00	4.67
南酸枣 <i>Choerospondias axillaris</i>	0.73±0.01	0.03±0.01	4.55
日本杜英 <i>Elaeocarpus japonicus</i>	0.75±0.02	0.03±0.00	4.50
海南木莲 <i>Manglietia hainanensis</i>	0.57±0.11	0.02±0.01	4.01
印度第伦桃 <i>Dillenia indica</i>	0.74±0.01	0.03±0.00	3.86
醉香含笑 <i>Michelia macclurei</i>	0.73±0.04	0.03±0.01	3.70
尖叶杜英 <i>Elaeocarpus apiculatus</i>	0.75±0.01	0.03±0.00	3.30
铁刀木 <i>Cassia siamea</i>	0.69±0.06	0.02±0.00	2.36
多花山竹子 <i>Garcinia multiflora</i>	0.72±0.02	0.02±0.00	2.21
细叶榕 <i>Ficus microcarpa</i>	0.36±0.01	0.01±0.00	2.16
水石榕 <i>Elaeocarpus hainanensis</i>	0.66±0.05	0.12±0.00	1.83
粉花绝明 <i>Cassia nodosa</i>	0.75±0.02	0.01±0.00	1.15
蓝花楹 <i>Jacaranda mimosifolia</i>	0.75±0.02	0.01±0.00	0.76
枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	0.76±0.02	0.01±0.00	0.70
山玉兰 <i>Magnolia delawayi</i>	0.60±0.04	0.00±0.00	0.42

n = 6

3 分析和讨论

3.1 以外源 NaHSO₃ 处理模拟 SO₂ 污染

气态 SO₂ 从气孔进入植物体之后, 以 HSO₃⁻、SO₃²⁻、H₂SO₃ 和 SO₄²⁻ 的形式起作用。植物叶组织的生理酸度范围在 pH 3-8, 当 SO₂ 溶于浸润叶肉细胞的细胞壁的水膜中时, 在 pH 2-5 范围内主要以 HSO₃⁻ 形式存在, 其存在百分率曲线的高峰出现在 pH 3-4, 此时乙烷产生量最多, 差别透性和叶绿素的破坏也最强烈, 也就是说受害最严重^[9]。本实验中以 20 mmol/L 的 NaHSO₃ (pH 2.82) 模拟大气中的 SO₂ 污染在实验室处理 32 种绿化植物, 结果显示不同植物抗性强弱的顺序基本上与污染现场栽种植物抗性的高低相符^[10], 说明 NaHSO₃ 处理叶片可以作为初步筛选抗 SO₂ 大气污染植物的手段之一。

3.2 叶绿素荧光参数对模拟 SO₂ 污染的响应

叶片荧光诱导动力学曲线的方法可作为一个快速、灵敏的生理生化指标来反映 SO₂ 对植物的损

伤情况^[11]。Fv/Fm 代表开放的 PSII 反应中心捕获激发能的效率, Fv/Fo 反映通过 PSII 的电子传递效率, 二者都能有效地反映 PSII 的功能状态。SO₂ 的主要影响在于其酸化作用, 它使叶绿体内催化反应的最适 pH 大于 7 的酶类受到抑制, 并且伤害了 PSII 电子供体侧, 减缓了 QA⁻ 的还原, 从而降低了最大荧光的强度^[12]。林世青等^[13]用 8 μmol/mol SO₂ 处理五角槭和小檗, 它们的可变荧光(Fv)均完全消失, 说明 PSII 的功能已完全丧失, 而此时大叶黄杨还残留一点可变荧光。由此推测, 大叶黄杨比前两种植物有较强的抗 SO₂ 能力。在我们测定的 72 种植物中, 有一些绿化植物如仪花、竹节树和格木等, 经 NaHSO₃ 处理后, 其叶片的 Fv/Fm 和 Fv/Fo 下降的幅度较小, 为对照的 85.20% - 94.87% 和 74.88% - 85.43%, 说明其 PSII 依然能保持相对较高的活性。而另一些绿化植物如山玉兰、枫香、蓝花楹和粉花绝明等, 其叶片的 Fv/Fm 和 Fv/Fo 下降的幅度甚大, 仅为对照的 0.42% - 1.15% 和 0.16% - 0.29%, 显示其 PSII 受

表 2 NaHSO₃ 和蒸馏水浸泡的植物叶片 Fv/Fo 的比较
Table 2 Comparison on Fv/Fo in plant leaves treated with by NaHSO₃ and distilled water

种类 Species	Fv/Fo		
	蒸馏水 Distilled water (control)	NaHSO ₃ (20 mmol/L)	百分比 (%) % of control
仪花 <i>Lysidice rhodostegia</i>	1.44±0.28	1.23±0.19	85.43
无患子 <i>Sapindus mukorossi</i>	1.61±0.23	1.34±0.11	83.18
竹节树 <i>Carallia brachiata</i>	2.21±0.29	1.67±0.28	75.80
柘木 <i>Erythrophleum fordii</i>	1.54±0.30	1.16±0.19	74.88
海南红豆 <i>Ormosia pinnata</i>	2.43±0.44	1.79±0.14	73.67
土沉香 <i>Aquilaria sinensis</i>	0.77±0.12	0.56±0.09	72.34
软荚红豆 <i>Ormosia semicastrata</i>	2.56±0.34	1.63±0.26	63.67
肖蒲桃 <i>Acmena acuminatissima</i>	1.58±0.31	0.90±0.12	57.05
红豆树 <i>Ormosia hosiei</i>	2.83±0.31	1.51±0.02	53.22
环榕 <i>Ficus annulata</i>	0.35±0.04	0.19±0.01	53.01
铁冬青 <i>Ilex rotunda</i>	2.27±0.41	1.09±0.17	48.01
杨梅 <i>Myrica rubra</i>	2.55±0.20	1.18±0.15	46.33
刺果番荔枝 <i>Annona muricata</i>	1.50±0.26	0.65±0.09	43.49
中国无忧树 <i>Saraca chinensis</i>	1.66±0.31	0.72±0.09	43.24
红花油茶 <i>Camellia semiserrata</i>	1.16±0.13	0.45±0.07	39.22
蛋黄果 <i>Lucuma nervosa</i>	1.35±0.24	0.53±0.10	38.80
方枝蒲桃 <i>Syzygium tephrodes</i>	1.72±0.20	0.56±0.10	32.45
华润楠 <i>Machilus chinensis</i>	2.39±0.25	0.75±0.08	31.39
傅园榕 <i>Ficus microcarpa</i> var. <i>fuyuenensis</i>	1.40±0.22	0.41±0.08	29.06
黄花夹竹桃 <i>Thevetia peruwiana</i>	2.36±0.32	0.66±0.07	28.10
铁力木 <i>Mesua ferrea</i>	2.22±0.33	0.54±0.09	25.45
艳榄仁 <i>Terminalia superba</i>	2.47±0.13	0.63±0.10	25.36
石笔木 <i>Tutcheria spectabilis</i>	0.57±0.70	0.13±0.02	23.36
海红豆 <i>Adenantha pawonina</i>	1.94±0.12	0.34±0.03	17.43
毛黄肉楠 <i>Actinodaphne pilosa</i>	1.90±0.10	0.30±0.04	15.61
红桂木 <i>Artocarpus nitidus</i> ssp. <i>lingnanensis</i>	1.56±0.27	0.21±0.04	13.64
桂花 <i>Osmanthus fragrans</i>	1.45±0.23	0.20±0.04	13.58
腊肠树 <i>Cassia fistula</i>	3.08±0.53	0.38±0.02	12.42
猫尾木 <i>Dolichandrone cauda-felina</i>	2.43±0.40	0.30±0.03	12.31
阿丁枫 <i>Altingia chinensis</i>	2.89±0.16	0.29±0.05	9.97
长柄银叶树 <i>Heritiera angustata</i>	2.00±0.22	0.19±0.03	9.31
小叶胭脂 <i>Artocarpus styracifolius</i>	0.97±0.16	0.09±0.02	9.20
菩提树 <i>Ficus religiosa</i>	1.29±0.13	0.10±0.02	7.35
山茶 <i>Camellia japonica</i>	2.07±0.28	0.15±0.03	7.19
柳叶润楠 <i>Machilus salicina</i>	2.89±0.23	0.20±0.03	6.74
火焰树 <i>Spathodea nilotica</i>	1.93±0.35	0.12±0.00	6.30
幌伞枫 <i>Heteropanax fragrans</i>	1.97±0.19	0.12±0.02	6.15
印度紫檀 <i>Pterocarpus indicus</i>	2.81±0.13	0.17±0.02	5.93
糖胶树 <i>Alstonia scholaris</i>	1.14±0.04	0.07±0.01	5.92
白桂木 <i>Artocarpus hypargyrea</i>	2.18±0.43	0.13±0.01	5.72
密花树 <i>Rapanea nerifolia</i>	3.09±0.21	0.17±0.01	5.61
厚皮香 <i>Ternstroemia gymnanthera</i>	1.21±0.16	0.07±0.01	5.56
乐昌含笑 <i>Michelia tsoi</i>	1.75±0.14	0.09±0.20	5.35
深山含笑 <i>Michelia maudiae</i>	2.03±0.40	0.10±0.02	4.92
吊灯树 <i>Kigelia africana</i>	1.48±0.16	0.07±0.01	4.68
红花木莲 <i>Manglietia insignis</i>	3.12±0.16	0.14±0.01	4.32
海南木莲 <i>Manglietia hainanensis</i>	0.87±0.02	0.03±0.01	3.37
华杜英 <i>Elaeocarpus chinensis</i>	0.76±0.19	0.02±0.00	2.90

续表 2(Continued Table 2)

种类 Species	Fv/Fo		
	蒸馏水 Distilled wate (control)	NaHSO ₃ (20 mmol/L)	百分比(%) % of control
灰莉 <i>Fagraea ceilanica</i>	1.26±0.14	0.04±0.01	2.86
香椿 <i>Toona sinensis</i>	1.35±0.24	0.04±0.01	2.65
人面子 <i>Dracontomelon duperreanum</i>	1.00±0.13	0.03±0.00	2.62
大头茶 <i>Gordonia axillaris</i>	2.64±0.42	0.07±0.02	2.50
石楠 <i>Photinia serrulata</i>	2.58±0.41	0.06±0.01	2.38
日本杜英 <i>Elaeocarpus japonicus</i>	2.81±0.31	0.06±0.00	2.25
大果安息香 <i>Styrax macrocarpus</i>	3.11±0.26	0.07±0.01	2.14
灰木莲 <i>Manglietia glauca</i>	1.80±0.35	0.04±0.00	2.11
观光木 <i>Tsoongiodendron odorum</i>	2.71±0.44	0.06±0.01	2.05
蝴蝶树 <i>Heritiera parvifolia</i>	2.36±0.42	0.05±0.00	2.00
细叶榕 <i>Ficus microcarpa</i>	0.57±0.02	0.01±0.00	1.39
南酸枣 <i>Choerospondias axillaris</i>	2.70±0.18	0.03±0.01	1.27
华杜英 <i>Elaeocarpus chinensis</i>	3.01±0.29	0.04±0.00	1.16
印度第伦桃 <i>Dillenia indica</i>	2.73±0.16	0.03±0.00	1.07
醉香含笑 <i>Michelia macclurei</i>	2.71±0.49	0.03±0.01	1.02
复羽叶栎树 <i>Koelreuteria bipinnata</i>	3.71±0.23	0.04±0.00	0.96
尖叶杜英 <i>Elaeocarpus apiculatus</i>	2.99±0.16	0.03±0.00	0.85
水石榕 <i>Elaeocarpus hainanensis</i>	1.80±0.35	0.01±0.00	0.68
铁刀木 <i>Cassia siamea</i>	2.47±0.23	0.02±0.00	0.67
多花山竹子 <i>Garcinia multiflora</i>	2.59±0.22	0.02±0.00	0.63
粉花绝明 <i>Cassia nodosa</i>	3.03±0.33	0.01±0.00	0.29
蓝花楹 <i>Jacaranda mimosifolia</i>	3.00±0.25	0.01±0.00	0.19
枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	3.12±0.41	0.01±0.00	0.17
山玉兰 <i>Magnolia delawayi</i>	1.54±0.26	0.00±0.00	0.16

n=6

到严重的伤害，属于抗性弱的树种。大部分树种 Fv/Fm 和 Fv/Fo 下降的幅度介于这两种类型之间，其抗性属于中间类型。

3.3 叶片细胞液 pH 与植物抗性

SO₂ 是酸性污染气体，植物叶片吸收 SO₂ 后通过水合作用生成酸性 HSO₃⁻ 或 SO₃²⁻，使叶片组织 pH 降低，进而影响细胞正常的生命代谢活动。这是 SO₂ 伤害植物的机理之一，也可以部分说明为什么叶片组织 pH 较低的植物对 SO₂ 的抗性较弱^[9]。有报道指出，植物对 SO₂ 的抗性与叶组织的 pH 有关，凡是液汁偏酸的，容易受到 SO₂ 伤害，而接近中性或偏碱性的则抗性强，因此，提出以叶组织的 pH 作为抗性指标^[14]。

我们测定的 31 种植物的细胞液 pH 有明显的差异。傅园榕细胞液 pH 最高(pH 7.30)，其对酸性污染气体的抗性应该很强，这与 NaHSO₃ 处理后 Fv/Fm 和 Fv/Fo 变化的结果是一致的，与佛山市污染现场实地观测的情况也是吻合的^[10]。但是，经过对

31 种植物不同参数的相关性分析后得出，绿化植物细胞液 pH 的大小与其在 NaHSO₃ 处理后 Fv/Fm 变化之间的相关系数只是 0.23，与 Fv/Fo 改变值之间的相关系数更低，仅为 0.02。说明它们之间不存在明显的一致性。例如，同属于桑科的傅园榕、白桂木、菩提树、小叶胭脂、红桂木、环榕和细叶榕的细胞液 pH 都很高，可是 Fv/Fm 和 Fv/Fo 的变化却相差很大。同为茶科的大头茶和山茶，其细胞液 pH 很低，但从 Fv/Fm 和 Fv/Fo 的变化来看属于抗性中等，污染地区的实地观测也看到两者的长势正常，可能与这两种植物叶片的表皮较厚而角质化有关，由此，我们认为，单以植物细胞液的 pH 来评价植物的 SO₂ 抗性，其科学依据仍不够全面。

3.4 缓冲能力与植物的抗性

由于被测的植物种类较多，很难在同一个图中用绘制缓冲曲线的方法^[8]进行定性分析，所以我们参照有关资料中关于缓冲剂缓冲范围的阐述^[15]和化学工业中关于缓冲容量的定义^[16]，分别选取了初始

表 3 植物叶片细胞液 pH 的比较

Table 3 A comparison of pH in cell sap of plant leaves

种类 Species	叶片细胞液 pH in cell sap
傅园榕 <i>Ficus microcarpa</i> var. <i>fuyuensis</i>	7.30±0.36
细叶榕 <i>Ficus microcarpa</i>	6.64±0.07
印度紫檀 <i>Pterocarpus indicus</i>	6.20±0.19
菩提树 <i>Ficus religiosa</i>	5.91±0.18
吊灯树 <i>Kigelia africana</i>	5.75±0.09
竹节树 <i>Carallia brachiata</i>	5.71±0.25
刺果番荔枝 <i>Annona muricata</i>	5.62±0.11
红桂木 <i>Artocarpus nitidus</i> ssp. <i>lingnanensis</i>	5.61±0.22
深山含笑 <i>Michelia maudiae</i>	5.61±0.19
环榕 <i>Ficus annulata</i>	5.60±0.18
黄花夹竹桃 <i>Thevetia peruviana</i>	5.59±0.29
小叶胭脂 <i>Artocarpus styracifolius</i>	5.54±0.07
白桂木 <i>Artocarpus hypargyreus</i>	5.52±0.31
印度第伦桃 <i>Dillenia indica</i>	5.46±0.19
腊肠树 <i>Cassia fistula</i>	5.35±0.09
桂花 <i>Osmanthus fragrans</i>	5.31±0.17
幌伞枫 <i>Heteropanax fragrans</i>	5.31±0.06
海南红豆 <i>Ormosia pinnata</i>	5.28±0.15
灰木莲 <i>Manglietia glauca</i>	5.16±0.09
铁刀木 <i>Cassia siamea</i>	4.86±0.18
石笔木 <i>Tutcheria spectabilis</i>	4.82±0.06
糖胶树 <i>Alstonia scholaris</i>	4.78±0.08
灰莉 <i>Fagraea ceilanica</i>	4.62±0.25
毛黄肉楠 <i>Actinodaphne pilosa</i>	4.37±0.17
香椿 <i>Toona sinensis</i>	4.36±0.09
山茶 <i>Camellia japonica</i>	4.30±0.30
复羽叶栎树 <i>Koelreuteria bipinnata</i>	3.70±0.21
大头茶 <i>Gordonia axillaris</i>	3.67±0.35
华润楠 <i>Machilus chinensis</i>	3.63±0.18
日本杜英 <i>Elaeocarpus japonicus</i>	3.25±0.20
人面子 <i>Dracontomelon duperreanum</i>	2.74±0.12

n=4

表 4 植物叶片对碱的缓冲能力的比较

Table 4 A comparison of buffer capacities for alkali in plant leaves

种类 Species	缓冲能力 Buffering capacities (mmol NaOH pH ⁻¹ g ⁻¹)
傅园榕 <i>Ficus microcarpa</i> var. <i>fuyuensis</i>	0.13±0.00
深山含笑 <i>Michelia maudiae</i>	0.10±0.00
日本杜英 <i>Elaeocarpus japonicus</i>	0.09±0.02
白桂木 <i>Artocarpus hypargyreus</i>	0.08±0.00
幌伞枫 <i>Heteropanax fragrans</i>	0.08±0.01
人面子 <i>Dracontomelon duperreanum</i>	0.08±0.00
细叶榕 <i>Ficus microcarpa</i>	0.08±0.00
复羽叶栎树 <i>Koelreuteria bipinnata</i>	0.07±0.00
印度紫檀 <i>Pterocarpus indicus</i>	0.07±0.00
腊肠树 <i>Cassia fistula</i>	0.07±0.01
菩提树 <i>Ficus religiosa</i>	0.07±0.00
小叶胭脂 <i>Artocarpus styracifolius</i>	0.07±0.00
大头茶 <i>Gordonia axillaris</i>	0.06±0.00
红桂木 <i>Artocarpus nitidus</i> ssp. <i>lingnanensis</i>	0.06±0.01
香椿 <i>Toona sinensis</i>	0.05±0.01
石笔木 <i>Tutcheria spectabilis</i>	0.05±0.01
灰木莲 <i>Manglietia glauca</i>	0.05±0.00
吊灯树 <i>Kigelia africana</i>	0.05±0.00
黄花夹竹桃 <i>Thevetia peruviana</i>	0.04±0.00
海南红豆 <i>Ormosia pinnata</i>	0.04±0.00
糖胶树 <i>Alstonia scholaris</i>	0.04±0.00
桂花 <i>Osmanthus fragrans</i>	0.04±0.00
铁刀木 <i>Cassia siamea</i>	0.04±0.00
印度第伦桃 <i>Dillenia indica</i>	0.04±0.00
竹节树 <i>Carallia brachiata</i>	0.03±0.01
环榕 <i>Ficus annulata</i>	0.03±0.00
山茶 <i>Camellia japonica</i>	0.03±0.00
华润楠 <i>Machilus chinensis</i>	0.03±0.00
毛黄肉楠 <i>Actinodaphne pilosa</i>	0.03±0.00
刺果番荔枝 <i>Annona muricata</i>	0.03±0.00
灰莉 <i>Fagraea ceilanica</i>	0.02±0.00

n=4

pH(pH₀)和 pH₀+4(<12)这个区间,计算各种植物的缓冲能力(mmol NaOH pH⁻¹g⁻¹),即单位质量的叶片,其细胞液(定容后体积为 50/2.5=20 ml)在初始 pH 的基础上,每上升 1 个 pH 单位时所消耗的 NaOH 的量,它大致与这一区间缓冲曲线趋势线的斜率呈正比^[17]。

31 种植物对碱的缓冲能力与其 Fv/Fm 的改变值之间没有明显的规律性。其中,趋势上比较一致的只有傅园榕、印度第伦桃和灰莉等,而另一些树种如竹节树、环榕、复羽叶栎树等却大致呈现相反的趋势。这可能是由于两个参数是由植物在不同

方面的抗性机理所决定的。叶绿素荧光参数的变化反映叶绿体 PS II 光化学效率的稳定性,由于光系统 II 随 SO₂ 浓度增加受损程度增加,引起光化学活性降低^[11]。而缓冲能力反映的是细胞液中和外来的 H⁺ 或 OH⁻ 维持细胞内相对固定的 pH 和细胞代谢活动的的能力,它是细胞中缓冲成分的总浓度,相应弱酸的解离常数 and pH 值的函数^[12]。而且,有证据指出,植物细胞中的叶绿体,质外体,胞质溶胶和液泡等细胞器对酸和碱的缓冲能力各不相同,对外来刺激的反应也不同^[18]。我们测定的只是上述细胞器缓冲能力的综合结果,并不能确切得出叶绿体等细胞器

实际的抗污能力。另外,用碱(0.1 mol/L NaOH)滴定的过程中,可能还会发生除中和细胞缓冲液中H⁺以外的复杂化学变化。所以,只通过细胞液的缓冲能力来判断植物抗性同样是片面的。

3.5 在抗性植物筛选中使用多指标综合评定的必要性

31种植物的各个抗性指标在排序上并不一致,甚至出现了矛盾。不过,如果把所测定的绿化植物的生理指标与污染现场栽种的同一种植物生长的情况^[10]比较就会发现一定的规律性。在污染点生长比较好的一些树种,如傅园榕、细叶榕、幌伞枫、白桂木的细胞液缓冲能力都很强。污染点长势不好的植物包括山玉兰、枫香、蓝花楹、粉花绝明、水石榕等经过NaHSO₃处理后,Fv几乎等于零,即Fv/Fm的变化很大。而另一些长势较差的人面子、日本杜英、华润楠、复羽叶栎树的细胞液pH都小于3.70。通过对上述3个指标的检测结果分析,我们初步筛选出了一些抗性强的树种,如:傅园榕、幌伞枫、红桂木和石笔木等;抗性较强的树种有:海南红豆、白桂木、竹节树、大头茶等;同时也初步确定了一些对污染物敏感的树种,如:灰木莲、灰莉、印度第伦桃,以及山玉兰、枫香、水石榕、多花山竹子、铁刀木等。

植物对大气污染物的耐受能力千差万别,其抗性也必然不同。而我们所考察的每一个生理指标,只能反映植物体在某一方面对污染的反应敏感程度。另外,植物及其组织的结构与功能是相适应的(有关植物抗性与叶片形态结构的关系将另文发表)。因此,有必要进一步增加更多、更合理的检测指标,在不同学科的相关方面综合考查植物的抗污能力,从而更有效地筛选出适宜的城市绿化植物。

参考文献

- [1] Yin J S(殷京生), Sun Y(孙曰). Environmental modernization: An issue on city development which should not be ignored [J]. Environment (环境), 1998, (10):6-7. (in Chinese)
- [2] <http://huanbao.nanhai.gov.cn> [EB/OL]
- [3] Shan Y F(单运峰). Acid Rain, Air Pollution and Plants [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1994. 1-185. (in Chinese)
- [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. 1-333. (in Chinese)
- [5] Su X(苏行), Hu D Q(胡迪琴), Lin Z F(林植芳), et al. Effect of air pollution on the chlorophyll fluorescence characters of two afforestation plants in Guangzhou [J]. Acta Phytoecol Sin (植物生态学报), 2002, 26 (5):599-604. (in Chinese)
- [6] 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)
- [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] 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)
- [9] 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 SO₂ [J]. Acta Phytophysiol Sin (植物生理学报), 1980, 6: 345-351. (in Chinese).
- [10] Kong G H(孔国辉), Chen H T(陈宏通), Liu S Z(刘世忠), et al. Responses of garden greening plants to air pollution in Guangdong Province and the accumulation of pollutants in leaves [J]. J Trop Subtrop Bot (热带亚热带植物学报), 2003, 11(4): 297-315. (in Chinese)
- [11] Xu C H(许春辉), Jiang D H(蒋德洪), Zhao F H(赵福洪), et al. The effects of SO₂ on fluorescence induction curves in leaves [J]. Chin Bull Bot (植物学通报), 1985, 3(4):28-30. (in Chinese)
- [12] Schmidt W, Neubauer C, Kolbowski J, et al. Comparison of effects of air pollutants (SO₂, O₃, NO₂) on intact leaves by measurement of chlorophyll fluorescence and P700 absorption changes [J]. Photosyn Res, 1990, 25:241-248.
- [13] Lin S Q(林世青), Xu C H(许春辉), Zhang Q D(张其德), et al. Some application of chlorophyll fluorescence kinetics to plant stress physiology, ecology and agricultural modernization [J]. Chin Bull Bot (植物学通报), 1992, 9(1):1-16. (in Chinese)
- [14] Wu Z Q(吴宗庆), Xu X Y(徐献元), Li Y(李屹), et al. Basic research on common rules of tree's resistance to toxic smokes and toxic gases [J]. For Sci Tech (林业科技通讯), 1975,(7) :18-20. (in Chinese)
- [15] Tindall G W, Dolan J W. Mobile phase buffers, Part II—Buffer selection and capacity [J]. LC GC Eur, 2003, 16(1):2-4.
- [16] Wang Z(王箴). Chemical Industry Dictionary[M]. 3rd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 1992. 828 (in Chinese).
- [17] Liu N(刘楠), Wen X(温学), Kong G H(孔国辉), et al. Comparison of the resistance of three woody plant species to air pollution in Guangdong province [J]. J Trop Subtrop Bot (热带亚热带植物学报), 2003, 11(4): 358-363. (in Chinese)
- [18] Oja V, Savchenko G, Jakob B, et al. pH and buffer capacities of apoplasmic and cytoplasmic cell compartments in leaves [J]. Planta, 1999, 209:239-249.