

大气污染对 38 种木本植物的伤害特征

孔国辉¹ 陆耀东² 刘世忠¹ 张倩媚¹ 胡羨聪² 薛克娜² 褚国伟¹

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

摘要: 38 种苗龄 1-2 a 生的木本植物盆栽于相对清洁区 (华南植物园和 2 个污染点: 佛山市南海区五星和佛山市禅城区东村)。1 a 后, 根据叶片伤害程度、新叶增长率、种个体长势、翌春植株恢复状况等综合评价植物对氟化物、硫化物和酸雨组成的大气复合污染的敏感性反应。根据试验结果将供试植物对大气污染的敏感性反应分为 3 种类型: (1) 低敏感性 (抗性强), 有茶花、红花油茶、傅园榕、小叶榕、桂花、环榕、菩提榕、石笔木、毛黄肉楠、幌伞枫 10 种。(2) 中等敏感性 (抗性中等), 有仪花、格木、吊瓜树、腊肠树、海南红豆、猫尾木、红桂木、灰莉、铁冬青、密花树、白桂木、小叶胭脂、大头茶、复羽叶栎、灰木莲、火焰木、华润楠 17 种。(3) 高度敏感 (抗性弱), 有铁刀木、观光木、白木香、日本杜英、蓝花楹、蝴蝶树、印度紫檀、柳叶楠、无忧树、海南木莲、乐昌含笑 11 种。研究结果可为热带、南亚热带地区有类似大气污染的环境进行园林绿化, 生态公益林营造提供参考。

关键词: 敏感性; 大气污染; 抗性植物; 生长; 伤害

中图分类号: X503.235

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395 (2003) 04-0319-10

Injury Symptoms of 38 Woody Species Exposed to Air Pollutants

KONG Guo-hui¹ LU Yao-dong² LIU Shi-zhong¹ Zhang Qian-mei¹

HU Xian-cong² XUE Ke-na² CHU Guo-wei¹

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

2. Forestry Institute of Foshan, Foshan 528000, China)

Abstract: One- to two-year-old seedlings of 38 woody species were potted in Wuxing (WX) and Dongcun (DC) villages near ceramic industry area in Foshan city, Guangdong Province, and in Botanical Garden in Guangzhou as control site. The experiments were carried out from June 2002 to May 2003. Injury symptoms of the leaves, leaf cast and the increment of the number of leaves, as well as the growth vigour of these species grown under air pollutants of fluoride, sulfide and acid rain were measured and compared. The results obtained from the sensitivity of plants to the pollutants exhibited three categories of plant species. (1) Most tolerant species include *Camellia japonica*, *Camellia semiserrata*, *Ficus microcarpa* var. *fuyuensis*, *Ficus microcarpa*, *Osmanthus fragrans*, *Ficus annulata*, *Ficus religiosa*, *Tutcheria spectabilis*, *Actinodaphne pilosa*, *Heteropanax fragrans*. (2) Less tolerant species are *Lysidice rhodostegia*, *Erythrophloeum fordii*, *Kigelia africana*, *Cassia fistula*, *Ormosia pinnata*, *Manchamia cauda-felina*, *Artocarpus nitidus* subsp. *lingnamensis*, *Fagraea ceilanica*, *Ilex rotunda*, *Rapanea neriifolia*, *Artocarpus hypargyreus*, *Artocarpus styracifolius*, *Gordonia axillaris*, *Koelrcuteria bipinnata*, *Manglietia glauca*, *Machilus chinensis*, *Spathodea nilotica*. (3) Most sensitive species include *Mesua ferrea*, *Tsoongiodendron odorum*, *Aquilaria sinensis*, *Elaeocarpus japonicus*, *Jacaranda mimosifolia*, *Heritiera parvifolia*, *Pterocarpus indicus*, *Machilus salicina*, *Saraca chinensis*, *Manglietia hainanensis*, *Michelia*

收稿日期: 2003-07-31 接受日期: 2003-09-19

基金项目: 佛山市科学技术局科技发展专项资金 (0102007A); 广东省环保局基金 (1998-09); CERN 鼎湖山森林生态系统定位研究站联合资助。

chapensis. The results could provide scientific basis for selection of plant species for urban forestry in the environments with similar air pollution in tropical and subtropical regions .

Key words: Sensitivity; Air pollution; Resistant plant; Plant growth; Injury

植物是大气污染的受害者,同时亦是大气污染的直接指示者。植物在大气污染环境如果所接受的污染物剂量(浓度×时间)超过其受害阈值,即可出现伤害症状^[1]。叶片是植物与大气环境进行气体交换的场所,是大气污染物最先进入植物体的门户。因此,叶片上伤斑的出现部位、形状和色泽可指示大气污染物的化学性质^[2],并有助对大气污染源的追踪^[3]。植物对大气污染的响应和机理是多方面的,有生理生态的反应^[4,5],也有叶片形态结构机能性的影响^[6]。然而,叶片伤害症状,叶、芽和枝条等的生长状况是植物对大气污染敏感性反应最直观的指示,可为植物对大气污染敏感性(或抗性、耐受性)反应的分级提供可靠依据。

人类社会经济的发展,大量能源的消耗导致生态环境随之改变。大气环境质量的变化无边界约束地影响着全球各种生态系统的发展,有着全球影响意义的酸雨污染对我国的经济已造成严重损失,如 1995 年酸雨污染给森林和农作物造成的直接经济损失就达几百亿元。酸性降水中硫酸根与硝酸根的当量浓度之比大约为 64:1,这表明大量 SO₂ 排放是降水呈酸性的主要原因之一^[7]。SO₂ 主要来源于煤的燃烧。据报导,我国一次性能源以煤炭为主,1995 年我国煤炭消耗量为 1.38 Gt,居世界第一位^[8],另据国家的煤炭规划,预测在一定时间内 SO₂ 绝对量仍将增加。因此 SO₂ 污染将会继续加重,酸雨污染范围及污染强度会进一步扩大和加重^[7]。

大气污染和酸雨是世界重大的环境问题之一。它对生态系统直接或间接地起到极大的破坏作用^[9-11]。酸雨导致土壤酸化,提高土壤铝离子浓度,抑制根系生长和对磷、钙离子的吸收等,破坏土壤元素化学平衡^[12,13],使植物生长受到极大的限制,最终破坏化学元素在自然界的正常循环和生态系统平衡。

燃煤除排出 SO₂,形成酸雨之外,还相伴排放出大量氟,其含量在 40-300 μmol mol⁻¹^[12],这种情况一般被人们所忽视。此外,炼铝厂、炼钢厂、玻璃厂、磷肥厂、水泥厂、陶瓷厂、砖瓦厂和生产中使用冰晶石、含氟磷矿石或萤石的工业都会有氟化氢排放。氟化氢污染范围虽不及 SO₂ 普遍,但其对植物的毒

性要比 SO₂ 厉害 10-100 倍^[2],大气中的氟化物随雨水到达土壤,增加了金属 Al 的溶解性,导致 F、Al 对植物的双重危害^[14]。

佛山市是广东的第三大城市,经济发达,能源消耗大,据佛山市环保局 2002 年环境质量年报资料^[15],工业废气排放量为 13.83 Mm³,比上年增加了 28.77%,废气中 SO₂ 排放量 110 kt,比上年增加 11.53%,随着能源消耗增大,对大气质量的影响从酸雨酸度和频率即可显示出来,pH 年平均值 4.48 (pH<5.6 为酸雨),比上年降低了 0.07pH 单位,频率 76.3%,比上年上升 3.8%;南海区 pH 为 4.51,比上年降低了 0.04pH 单位,频率 88.2%,比上年上升了 6.5%^[16]。禅城区的石湾镇和南海区的南庄镇是全国有名的陶都,这些地方大气污染除酸雨、SO₂ 外,还增加了来自陶瓷工业的废气和燃煤废气中的氟化物污染。这种复合污染更加重了对植物和生态系统的伤害。据南海区 2002 年环境质量年报资料^[16],2001 年煤炭消耗量为 1.01 Mt,若以煤中氟含量为 40-300 μmol mol⁻¹ 计算,则所消耗的煤中含氟可达 40.49-303.72 t,这是相当大的积累性毒害的污染源,不可忽视。

我们选择在经济高速发展中有代表性的环境进行试验,希望能筛选出能耐酸雨、硫氧化物、氟化物污染的园林绿化植物,包括生态公益林应用的木本植物种质资源,利用植物对大气污染物的吸附、吸收、转化、同化、降解等功能对大气污染进行植物净化^[17],以满足经济和城市化高速发展的需要,为珠江三角洲以及南亚热带地区和城市林业发展作出贡献。

1 试验地环境

试验地位于佛山市南海区的五星(WX),其附近有多家大型陶瓷厂,污染源主要来自试验地的北面 and 东面(图版 I: 1),在秋冬季受污染比夏季严重;另一试验点位于佛山市禅城区的东村(DC),远近陶瓷厂众多,污染源来自试验地四向的面上污染源(图版 I: 2),植物常年随风向受到污染;对照点在广州华南植物园(BG),周围是树木、草地(图版 I: 3),空气相对清洁。据试验期间的监测(2002 年 6-10 月),WX、

DC 和 BG 点的硫酸盐化速率分别为: 2.160、9.978 和 0.142 mg 100 cm²d⁻¹; 氟化物分别为 44.131、54.368 和 2.532 μg 100 cm²d⁻¹; 降尘分别为: 20.090、9.013 和 7.265 mg m⁻³month⁻¹。酸雨酸度和频率^[15,16]年平均分别为 4.48–4.51, 76.3%–88.2%。WX 和 DC 的硫酸盐化速率为对照点 BG 的 15.21 倍和 70.27 倍, 分别高出国家大气环境二级标准的 8.64 倍和 39.91 倍。氟化物含量分别高出 BG 点 17.43 倍和 21.47 倍, 超过国家大气环境二级标准的 14.71 倍和 18.12 倍。降尘则分别超过国家大气环境二级标准的 2.51 倍和 1.13 倍^[18]。

2 试验植物种类和方法

2.1 试验植物

试验植物 38 种(表 1), 其中乔木 32 种, 小乔木或灌木 6 种(表 1 中的 9、10、11、32、33、34 号)。每个试验点每种植物 3–5 个重复。苗木年龄 1–2 a 生, 个别种为无性繁殖。参试植物于 2002 年 3–4 月上盆, 栽培土壤、施用肥料一致, 置于佛山市林业科学研究所(南海区小塘镇)内统一管理, 待苗生长正常后于同年 6 月 3–6 日先后将试验苗木送至 WX、DC 和 BG 试验地, 每种植株呈梅花型分散放置。试验期间各试验点进行一致的肥水管理。另外, 个别种在 WX 和 DC 生长 18 周后搬至 BG, 使苗木在相同环境和管理条件下生长, 观察植株的恢复情况。

2.2 观测内容、时间和方法

植物进场后第 1、3、18 周进行详细的观察和记录, 保持每个月一次一般性观察和记录, 并随时收集叶片、植株伤害症状影像资料。

观测内容和方法: 记录叶片出现伤害的时间和症状、估测叶数受害百分率, 统计受害植株百分率、新叶增加百分率, 落叶率目测估算。盆苗放置试验场地之前, 每株选 5 条末级枝条, 在叶芽下方已有展开叶的叶柄上套上系有小牌的尼龙丝作固定标记, 为便于以后观察和统计植物在进入试验地后新叶增长比率(及其他需保持样品叶龄一致的测试项目的需要)。新叶增长率(IR_L)以 BG 点叶片增长数(BG_L)为 100% 计算。

$$IR_L = WX_L(\text{或 } DC_L) / BG_L \times 100$$

WX_L 和 DC_L 分别为五星点和东村点叶片增长数。

生长势是指植株生长期间某一时间内的生长

状况, 以盛、中、衰 3 种级别表示:

盛(Vigorous, V): 植株顶端优势明显, 受污染伤害后仍可发新枝叶及形成树冠, 叶片大小及叶色正常或较正常。受害叶数小于全株叶数 20%。

中(Medium, M): 植株顶端优势不明显, 生长受到抑制, 受污染伤害后仍能发新枝叶, 但树冠较稀疏, 叶色偏黄, 叶面出现明显伤斑, 受害叶数为全株叶数的 20%–50%。

衰(Weak, W): 植株生长明显受到抑制, 大量落叶, 有时虽仍可发新枝叶, 但树冠十分稀疏或不形成树冠, 大量落叶, 受害叶数多于全株叶数的 50%。

表 1 38 种参试植物

Table 1 Plant species for experiment

序号 No.	植物 Species	科名 Family
1	灰木莲 <i>Manglietia glauca</i>	木兰科
2	海南木莲 <i>M. hainanensis</i>	木兰科
3	乐昌含笑 <i>Michelia chapensis</i>	木兰科
4	观光木 <i>Tsoongiodendron odorum</i>	木兰科
5	毛黄肉楠 <i>Actinodaphne pilosa</i>	樟科
6	华润楠 <i>Machilus chinensis</i>	樟科
7	柳叶楠 <i>M. salicina</i>	樟科
8	白木香 <i>Aquilaria sinensis</i>	瑞香科
9	茶花 <i>Camellia japonica</i>	山茶科
10	红花油茶 <i>C. semiserrata</i>	山茶科
11	大头茶 <i>Gordonia axillaris</i>	山茶科
12	石笔木 <i>Tutcheria spectabilis</i>	山茶科
13	铁力木 <i>Mesua ferrea</i>	藤黄科
14	日本杜英 <i>Elaeocarpus japonicus</i>	杜英科
15	蝴蝶树 <i>Heritiera parvifolia</i>	梧桐科
16	腊肠树 <i>Cassia fistula</i>	苏木科
17	格木 <i>Erythrophloeum fordii</i>	苏木科
18	仪花 <i>Lysidice rhodostegia</i>	苏木科
19	海南红豆 <i>Ormosia pinnata</i>	蝶形花科
20	印度紫檀 <i>Pterocarpus indicus</i>	蝶形花科
21	无忧树 <i>Saraca chinensis</i>	蝶形花科
22	白桂木 <i>Artocarpus hypargyreus</i>	桑科
23	红桂木 <i>A. nitidus</i> subsp. <i>lingnanensis</i>	桑科
24	小叶胭脂 <i>A. styracifolius</i>	桑科
25	环榕 <i>Ficus annulata</i>	桑科
26	小叶榕 <i>F. microcarpa</i>	桑科
27	傅园榕 <i>F. microcarpa</i> var. <i>fuyuensis</i>	桑科
28	菩提榕 <i>F. religiosa</i>	桑科
29	铁冬青 <i>Ilex rotunda</i>	冬青科
30	复羽叶栲树 <i>Koelreuteria bipinnata</i>	无患子科
31	幌伞枫 <i>Heteropanax fragrans</i>	五加科
32	密花树 <i>Rapanea nerifolia</i>	紫金牛科
33	灰莉 <i>Fagraea ceilanica</i>	马钱科
34	桂花 <i>Osmanthus fragrans</i>	木犀科
35	猫尾木 <i>Manchamia cauda-felina</i>	紫葳科
36	吊瓜树 <i>Kigelia africana</i>	紫葳科
37	篮花楸 <i>Jacaranda mimosifolia</i>	紫葳科
38	火焰木 <i>Spathodea campanulata</i>	紫葳科

3 结果

3.1 叶片伤害特征

叶片是植物与大气环境进行气体交换的主要场所,是大气污染物最先进入植物体的门户。因此,植物的伤害症状最早出现在叶片上。根据对 WX 和 DC 植物叶片伤害症状的观察,伤害症状基本分为 4 种类型:叶尖先出现症状,然后向两侧叶缘发展(图版 I: 4, 5),这种症状与氟化氢的伤害症状相似。第二种类型是以脉间块状伤害为主(图版 II: 6),这与 SO₂ 伤害症状相似;第三种是既有叶尖叶缘的伤害,亦有脉间的伤斑出现(图版 II: 7),类似 HF 和 SO₂ 两者的伤害症状;第四种是脉间的伤斑干后脱落,使叶面残留下许多穿孔(图版 II: 8, 9),这是由第二种类型的伤害症状发展而成。但此种穿孔现象仅出现于少数种类,如复羽叶栎树、仪花。第一至第三种类型的伤害症状有时可同时出现在同一种植物叶片上,但最先出现的伤害症状普遍是第一种类型,即在叶尖和叶缘,可见试验地的大气复合污染中以氟化物的伤害最为严重。

3.2 不同植物种对大气污染反应的敏感性比较

植物对大气污染物的敏感性反应因种类而异。据一周后观察最早出现伤害症状的情况见表 2。华润楠、密花树、铁刀木、日本杜英在 DC 和 WX 均出

现叶片伤害,只在 DC 点出现叶片伤害的种有柳叶楠、石笔木、腊肠树、复羽叶栎树、仪花、印度紫檀、格木、观光木 8 种;只在 WX 点出现伤害症状的仅有蓝花楹一种。参试的其余 24 种植物未出现伤害症状。

随着植物在污染区生活时间的延长,植物受害程度加重。经过 3 周、18 周后,植物的受害情况见表 3。经 3 周试验除白木香、幌伞枫有较多落叶,格木、菩提榕、火焰木、腊肠树有个别株少量落叶或伤害外,其他种均未见落叶。但经过 18 周处理,除茶花、红花油茶、大头茶、傅园榕、桂花(后两种只经 16 周试验)在两污染点均未有落叶外,其余 32 种均有不同程度的落叶现象。其中在对照点有 14 种植株其下部老叶变为黄绿色或有少量叶自然脱落,这些种包括:环榕、小叶榕、柳叶楠、白桂木、红桂木、吊瓜树、华润楠、小叶胭脂、蝴蝶树、复羽叶栎树、火焰木、腊肠树、白木香、蓝花楹。但在 DC 和 WX 点,除环榕、小叶榕较低的落叶率(平均落叶率分别为 7.5%和 12.0%)外,其余 12 种的平均落叶率 >70%。可见大气污染明显加速叶片的衰老脱落。经 18 和 16 周试验叶片仍无伤害或仅轻微伤害的有茶花、红花油茶、大头茶、环榕、小叶榕、傅园榕和桂花(后 2 种只经过 16 周试验)等 7 种。

表 2 植物在五星和东村 1 周后叶片的伤害症状
Table 2 Injury symptoms of leaves one week after the potted plants were exposed at air polluted sites

序号 No.	植物种 Species*	叶片受害情况Symtoms of leaves	
		DC site	WX site
6	华润楠	全部(5 株)植株嫩叶尖普遍出现干枯,叶缘块状干焦,现棕色斑块	少数嫩叶、老叶先端干
7	柳叶楠	全部植株少数嫩叶先端约有长 0.5 cm 的干焦、伤斑棕色	未见伤害
32	密花树	3 株刚开展的嫩叶叶尖干、伤斑棕色,其中一株老叶现块状伤斑	4 株未展幼叶叶尖有长约 1 cm 的干焦,伤斑棕色
13	铁力木	4 株顶端第 1-2 对嫩叶块状干卷或全干	3 株顶端第 1-2 对嫩叶叶尖、叶缘干
14	日本杜英	全部植株刚开展的第 2-3 片嫩叶大块棕斑或干枯,老叶尖或叶缘干枯	2 株少数叶尖、叶缘现大块状棕色伤斑
12	石笔木	未见伤害	个别植株、叶缘现块状棕斑
16	腊肠树	1 株个别刚展叶干枯	未见伤害
30	复羽叶栎树	1 株个别小叶叶尖干	未见伤害
18	仪花	1 株个别已开展叶的叶尖、叶缘及叶中部现棕色斑块	未见伤害
20	印度紫檀	1 株的老叶叶缘现块状棕斑	未见伤害
17	格木	1 株 1 片老叶全部小叶先端干	未见伤害
4	观光木	1 株 2 片老叶叶尖、叶缘现大块伤斑	未见伤害
36	蓝花楹	未见伤害	1 株 5 片复叶先端干

* 植物拉丁文见表 1, 表 3-5 同。 The name for each species is listed in Table 1. The same for Table 3-5

表 3 试验植物受害状况
Table 3 Injury symptoms of experimental plants

序号 No.	植物种 Species	落叶率(%) Leaf cast %					伤害症状 Injury symptoms
		A*		B**		平均 Mean	
		DC	WX	DC	WX		
9	茶花	0	0	0	0	0	18 周植株均未见伤害
10	红花油茶	0	0	0	0	0	18 周植株均未见伤害
27	傅园榕 [△]	-	-	0	0	0	B. 16 周植株均未见伤害
34	桂花 [△]	-	-	0	0	0	B. 16 周植株均未见伤害
11	大头茶	0	0	0	0	0	个别叶出现大块棕斑, 其余叶无伤害
25	环榕	0	0	7	8	7.5	B. 个别叶叶尖、边缘干, 下部少数老叶自然脱落
26	小叶榕	0	0	13	11	12	B. 下部少数老叶自然脱落, 无伤害症状
12	石笔木	0	0	15	13	14	B. 90%嫩叶出现棕斑, 嫩叶脱落
5	毛黄肉楠	0	0	37	16	26.5	DC; B. 90%嫩叶出现棕斑, 部分芽干, WX; B. 嫩叶受害
19	海南红豆	0	0	90	0	45	DC; B. 受害叶 20%-60%, WX; B. 受害叶 10%-20%, 均以嫩叶为重, 叶尖、叶缘干
18	仪花	0	0	90	5	47.5	DC; B. 90%小叶受害, 树冠稀疏; WX; B. 10%-30%受害
29	铁冬青	0	0	98	5	51.5	DC; A. 少数叶先端出现棕斑块; B. 大量落叶, 芽多干; WX; A. 少数叶先端出现棕斑块; B. 嫩叶多脱落
33	灰莉	0	0	100	9	54.5	DC; B. 叶、芽全干; WX; B. 芽经多次受害后萌生, 植株生长茂密;
2	海南木莲	0	0	100	14	57	DC; A. 嫩叶多干, B. 全株叶、芽、枝均干; WX; A. 老、嫩叶出现水渍斑以至大块棕斑; B. 个别株新叶全落, 芽、枝干
17	格木	+	+	95	30	62.5	DC; A. 嫩叶先端干, 个别顶芽干, B. 全株干或仅留叶数片; WX; A. 老叶尖出现棕斑块, 嫩叶尖干, B. 个别株嫩叶全落
3	乐昌含笑	0	0	100	31	65.5	DC; A. 个别嫩叶变干; B. 叶全落, 芽枝干; WX; A. 少数叶现水渍状斑点, B. 少数叶先端干, 个别株全落叶
7	柳叶楠	0	0	100	40	70	A. 叶均无伤害。DC; B. 芽干, 甚至全株干; WX; B. 98%叶受害, 个别株全落叶
32	密花树	0	0	95	48	71.5	DC; A. 个别叶先端干, 叶面微皱, B. 叶全受害; WX; A. 个别叶尖干, B. 少数芽, 嫩叶尖、枝干
35	猫尾木	0	0	90	59	74.5	DC; A. 有较多老、嫩叶受害, B. 全部落叶, 芽多已干; WX; A. 少数嫩叶受害, B. 叶普遍受害, 大块棕斑背卷
22	白桂木	0	0	90	60	75	A. 少数老叶出现棕斑, DC; B. 叶普遍出现棕斑, 部分枝芽干; WX; B. 较多叶片受害, 嫩叶多脱落
23	红桂木	0	0	100	50	75	A. 大量发新枝叶, 无伤害症状; DC; B. 芽、叶全干; WX; B. 少数嫩叶脱落
36	吊瓜木	0	0	100	51	75.5	A. 未见伤害; DC; B. 嫩叶全落, 或叶缘干卷, 芽多干; WX; B. 少数嫩叶脱落
28	菩提榕	+	+	93	60	76.5	A. 下部老叶少数脱落; B. 嫩叶普遍脱落
6	华润楠	0	0	95	70	82.5	A. 较多叶片出现大块, 块状棕斑; DC; B. 多数植株叶全干; WX; B. 芽多为受害后萌生, 很多新叶受害
24	小叶胭脂	0	0	100	70	85	A. 未见伤害; DC; B. 芽、叶全干; WX; B. 嫩叶多脱落, 新发叶多, 仍存绿色树冠
15	蝴蝶树	0	0	100	70	85	DC; A. 少数嫩叶叶面不平, 背卷, B. 全部叶受害, 芽干; WX; A. 无伤害, B. 叶普遍受害, 嫩叶全落, 仍存绿树冠
30	复羽叶栎树	0	0	100	70	85	A. 少数嫩叶先端干; DC; B. 枝、叶芽全干; WX; B. 大部分小叶脱落, 芽经多次萌生
31	幌伞枫	40	20	90	80	85	DC; A. 嫩叶先端干, 少数嫩叶脱落; B. 叶大部分脱落; WX; A. 个别老叶脱落, B. 受害叶多为嫩叶, 仍存绿树冠
13	铁力木	0	0	100	75	87.5	DC; A. 较多叶出现大块棕斑; B. 叶、枝、芽全干; WX; A. 少数叶出现棕斑, B. 80%叶出现大块棕斑, 芽干、叶卷
21	无忧树	0	0	98	80	89	DC; A. 少数嫩叶干卷, B. 大量落叶, 芽叶多干; WX; A. 无伤害症状, B. 80%叶出现棕斑, 大量落叶
38	火焰木	0	+	98	80	89	A. 个别幼叶出现水渍斑; DC; B. 较多叶片受害, 枝、叶、芽干; WX; B. 大部分落叶
4	观光木	0	0	100	80	90	A. 个别老叶出现块状棕斑, DC; B. 叶、芽全干; WX; B. 新叶全落, 个别枝芽干
1	灰木莲	0	0	95	95	95	A. 个别嫩叶干, 或出现水渍状斑点; DC; B. 大部分枝干; WX; B. 大部分芽干, 存少量新叶
16	腊肠树	+	0	100	94	97	DC; A. 少数老叶先端干, B. 叶、芽、嫩枝全干; WX; A. 无伤害症状, B. 大部分枝芽脱落
14	日本杜英	0	0	100	95	97.5	A. 叶尖普遍干, DC; B. 全部干; WX; B. 多数叶全落, 芽继续生长
8	白木香	50	30	100	96	98	DC; A. 多数嫩叶叶尖叶缘干, B. 全株干; WX; A. 较多叶尖叶缘干, B. 叶普遍脱落, 90%枝芽干
20	印度紫檀	0	0	100	98	99	A. 个别嫩叶先端干; DC; B. 全株枝、芽干, WX; B. 多数植株全干, 全部叶受害
37	蓝花楹	0	0	100	100	100	A. 少数嫩叶先端干; B. 全株干

+; 少数个体少量落叶 Leaf cast appeared slightly and only in some individuals; -; 缺数据 No data

*, ** 代表植物暴露在空气污染点 3 周和 18 周(观察日期分别为: 2002 年 6 月 27-29 日和 2002 年 10 月 15 日)

Represent the plants exposed at air pollution sites for 3 weeks on June 27-29 and for 18 weeks on October 15, 2002, respectively.

△植物暴露在污染点 16 周。The plants exposed at polluted site for 16 weeks.

3.3 不同植物种在污染环境中的生长状况

植物在 WX、DC 点试验 3 周, 植株的新叶增长及生长势状况见表 4。

在 WX 点, 新叶增长率 $\geq 100\%$ 的种有: 无忧树、灰木莲、铁冬青、腊肠树、复羽叶栾树、密花树、仪花、吊瓜树、白木香、柳叶楠、华润楠 11 种植物。 $\geq 80\% - 100\%$ 的种有海南红豆、日本杜英、菩提榕、格木、红桂木、印度紫檀、环榕、乐昌含笑、幌伞枫 9 种, $\geq 50\% - 80\%$ 的有毛黄肉楠至白桂木等 11 种植

物; $< 50\%$ 的有观光木、铁刀木、红花油茶 3 种; 茶花无新增叶。

在 DC 点, 新叶增长比率 $\geq 100\%$ 的有红花油茶、无忧树; $> 80\%$ 的有观光木、猫尾木; $\geq 50\% - 80\%$ 的有: 印度紫檀、环榕、仪花、铁冬青、腊肠树、小叶榕、灰木莲、复羽叶栾树、海南木莲、幌伞枫、华润楠、乐昌含笑、观光木、灰莉、白木香、猫尾木 16 种植物; $< 50\%$ 的有日本杜英、毛黄肉楠、吊瓜木、密花树、格木、红桂木、毛黄肉楠、蓝花楹、海南红豆、柳

表 4 3 个试验点 3 周内植物长势和新叶增长情况
Table 4 Growth vigour and new leaves increment during 3 weeks at 3 experimental sites

序号 No.	植物种 Species	BG			WX			DC			生长势 Growth vigour*		
		新叶增长数 No. of new leaves increased	新叶增长数 No. of new leaves increased	增长比率 Increment (%)	新叶增长数 No. of new leaves increased	增长比率 Increment (%)	新叶增长数 No. of new leaves increased	增长比率 Increment (%)	BG	WX	DC		
21	无忧树	0.4±0.89	1.0±1.00	250.00	0.4±0.89	100.00	0.4±0.89	100.00	V	V	V		
1	灰木莲	5.0±0.71	5.8±1.10	116.00	3.4±1.52	68.00	3.4±1.52	68.00	V	V	V		
29	铁冬青	7.6±1.52	8.8±2.49	115.79	5.8±3.35	76.32	5.8±3.35	76.32	V	V	M		
16	腊肠树	3.8±1.79	4.0±0.71	105.26	2.6±2.7	68.42	2.6±2.7	68.42	V	V	V		
30	复羽叶栾树	4.6±1.52	4.8±0.84	104.35	3.0±2.8	65.22	3.0±2.8	65.22	V	V	V		
32	密花树	6.2±1.79	6.4±2.07	103.23	2.8±1.64	45.16	2.8±1.64	45.16	V	V	V		
18	仪花	3.0±1.00	3.0±1.00	100.00	2.3±0.58	76.67	2.3±0.58	76.67	V	V	V		
36	吊瓜树	3.8±0.84	3.8±0.84	100.00	1.8±1.48	47.37	1.8±1.48	47.37	V	V	V		
8	白木香	3.6±2.07	3.6±1.14	100.00	1.8±1.64	50.00	1.8±1.64	50.00	V	V	V		
7	柳叶楠	7.2±3.56	7.2±2.59	100.00	2.6±3.71	36.11	2.6±3.71	36.11	V	V	V		
6	华润楠	6.8±3.03	6.8±1.1	100.00	4.0±1.00	58.82	4.0±1.00	58.82	V	V	M		
19	海南红豆	4.2±0.45	4.0±1.73	95.24	1.6±2.3	38.10	1.6±2.3	38.10	V	V	V		
14	日本杜英	5.8±5.36	5.4±3.05	93.10	2.8±3.83	48.28	2.8±3.83	48.28	V	V	V		
28	菩提榕	5.6±3.21	5.2±1.3	92.86	0.8±1.3	14.29	0.8±1.3	14.29	V	V	V		
17	格木	2.0±0.71	1.8±0.8	90.00	0.8±0.45	40.00	0.8±0.45	40.00	V	V	M		
23	红桂木	4.4±0.55	3.8±0.84	86.36	1.4±1.95	31.82	1.4±1.95	31.82	V	V	V		
20	印度紫檀	4.4±0.89	3.8±0.84	86.36	3.4±0.55	77.27	3.4±0.55	77.27	V	V	V		
25	环榕	7.0±1.00	5.8±1.3	82.86	5.4±3.03	77.14	5.4±3.03	77.14	V	V	V		
3	乐昌含笑	3.4±0.55	2.8±0.45	82.35	2.0±1.22	58.82	2.0±1.22	58.82	V	V	V		
31	幌伞枫	2.0±1.22	1.6±1.14	80.00	1.2±0.84	60.00	1.2±0.84	60.00	V	V	V		
5	毛黄肉楠	4.6±2.61	3.4±2.7	73.91	2.2±1.92	47.83	2.2±1.92	47.83	V	V	V		
24	小叶胭脂	6.8±0.84	5.0±1.22	73.53	1.4±1.95	20.59	1.4±1.95	20.59	V	V	V		
38	火焰木	4.2±0.45	2.8±0.45	66.67	0	0.00	0	0.00	V	V	V		
37	蓝花楹	5.2±0.84	3.2±0.84	61.54	2.0±2.12	38.46	2.0±2.12	38.46	V	V	V		
15	蝴蝶树	3.4±0.89	2.0±1.00	58.82	1.0±1.00	29.41	1.0±1.00	29.41	V	V	M		
33	灰莉	2.8±0.45	1.6±0.55	57.14	1.4±0.89	50.00	1.4±0.89	50.00	V	V	V		
26	小叶榕	5.0±1.00	2.8±1.92	56.00	3.4±2.07	68.00	3.4±2.07	68.00	V	V	V		
2	海南木莲	5.6±1.82	2.8±2.77	50.00	3.4±2.61	60.71	3.4±2.61	60.71	V	V	M		
35	猫尾木	3.2±0.45	1.6±0.55	50.00	2.8±1.64	87.50	2.8±1.64	87.50	V	V	V		
11	大头茶	3.2±1.64	1.6±0.89	50.00	1.00±1.73	31.25	1.00±1.73	31.25	V	V	V		
22	白桂木	6.4±0.55	1.6±0.89	50.00	1.00±1.73	15.63	1.00±1.73	15.63	V	V	V		
4	观光木	2.5±0.58	1.2±1.1	48.00	2.2±1.3	88.00	2.2±1.3	88.00	V	V	V		
13	铁力木	1.8±0.45	0.4±0.89	22.22	0	0.00	0	0.00	V	M	M		
10	红花油茶	1.4±1.95	0.2±0.45	14.28	2.4±3.29	171.46	2.4±3.29	171.46	V	V	V		
9	茶花	0	0	0.00	0	0.00	0	0.00	V	V	V		
27	傅园榕	-	-	-	-	-	-	-	V	V	V		
34	桂花	-	-	-	-	-	-	-	V	V	V		
12	石笔木	-	-	-	-	-	-	-	V	V	V		

* V: 盛 Vigorous; M: 中 Moderate; W: 衰 Weak;

-: 缺数据 No data

叶楠、蝴蝶树、小叶胭脂、白桂木、菩提榕 14 种植物；铁刀木、茶花和火焰木未有发新叶。

DC 点与 WX 点比较，新叶增长比率 <50% 的前者有 17 种，后者只有 4 种植物，而 ≥100% 的前者只有 2 种植物，后者则有 11 种，表明 DC 点植物受害情况比 WX 点严重。

植物经 18 周试验后观察，结果如表 5 所示。

WX 点尚存可供观察叶片增长情况的植物共有 29 种，其中新叶增长率 >100% 的有：茶花、仪花、格木、吊瓜树、腊肠树、无忧树、海南红豆、桂花、猫尾木 9 种；≥80%–100% 的有：红花油茶、菩提榕、石笔木、印度紫檀、红桂木 5 种；>50%–80% 的有：灰莉、傅园榕、环榕、蝴蝶树、乐昌含笑、毛黄肉楠、铁冬青、柳叶楠 8 种；<50% 的有：密花树、白桂木、铁刀木、白木

表 5 3 个试验点 18 周内植物长势和新叶增长情况
Table 5 Growth vigour and new leaves increment during 18 weeks at 3 experimental sites

序号 No.	植物种 Species	BG	WX		DC		生长势 Growth vigour **		
		新叶增长数 No. of new leaves increased	新叶增长数 No. of new leaves increased	增长率 Increment (%)	新叶增长数 No. of new leaves increased	增长率 Increment (%)	BG	WX	DC
9	茶花	13.6±8.08	24.25±29.51	177.40	18.5±25.09	135.33	V	V	V
18	仪花	30±16.09	48.33±16.26	161.10	Sd		V	M	W
17	格木	6.67±2.08	9.00±7.45	134.93	Sd		V	M	W
36	吊瓜树	10.67±0.58	14.25±6.55	133.55	Lf		V	V	W
16	腊肠树	21.5±10.61	25.00±14.14	119.05	Sd		V	W	W
21	无忧树	5.33±2.89	6.33±0.57	118.76	Sd		V	W	W
23	桂花 *	9.00±3.00	10.33±4.73	114.78	7.5±2.74	83.33	V	V	M
19	海南红豆	20.5±5.00	23.50±7.59	114.63	Sd		V	M	M
35	猫尾木	10.33±3.06	11.33±1.53	109.68	Sd		V	M	W
10	红花油茶	34.67±12.06	32.20±11.82	92.88	33.33±14.29	96.13	V	V	V
28	菩提榕	41.0±10.13	92.68±8.49	92.68	Lf		V	M	M
12	石笔木	22±5.57	19.6±2.97	89.09	-	-	V	M	M
20	印度紫檀	61.00±19.29	53.00±18.38	86.89	Sd		V	W	W
23	红桂木	15.00±15.72	12.00±4.24	80.00	Sd		V	M	W
33	灰莉	43.33±6.03	34.25±11.24	79.04	Sd		V	M	W
27	傅园榕 *	53.00±3.61	40.00±7.00	75.47	38.00±10.58	71.7	V	V	V
25	环榕	64.67±41.86	47.20±12.56	73.00	84.33±44.00	* 130.4	V	V	V
15	蝴蝶树	53.33±2.52	36.33±16.50	68.12	Sd		V	W	W
3	乐昌含笑	61.00±2.00	34.75±6.6	56.97	Sd		V	M	W
5	毛黄肉楠	65.67±31.88	36.50±21.79	55.58	23.5±7.33	35.78	V	M	M
29	铁冬青	95.00±12.99	52.33±24.58	55.08	Lf		V	M	W
7	柳叶楠	113.5±17.68	61.5±49.29	54.19	Sd		V	W	W
32	密花树	76.33±12.42	37.75±17.50	49.46	49.67±38.18	65.07	V	M	W
22	白桂木	80.25±5.32	38.00±27.70	47.35	16.50±6.61	20.56	V	M	W
13	铁力木	23.5±5.32	10.5±5.20	44.68	Sd		V	W	W
8	白木香	77.67±11.24	30.00±14.14	38.62	Sd		V	W	W
26	小叶榕	95.33±31.90	34.4±7.3	36.09	43.00±32.59	45.11	V	V	V
24	小叶胭脂	93.33±13.32	16±1.00	17.14	Sd		V	M	W
11	大头茶	20.75±14.41	2.6±4.34	12.53	6.0±5.79	28.92	V	M	M
30	复羽叶栾树	20.67±8.50	Lc		Sd		V	W	W
37	蓝花楹	Lc	Lc		Lc		V	W	W
38	火焰木	Lc	Lc		Lc		V	W	W
31	幌伞枫	8.67±1.53	Lc		Lc		V	M	M
1	灰木莲	Lc	Lc		Sd		V	W	W
14	日本杜英	Lc	Lc		Sd		V	W	W
4	观光木	Lc	Lc		Lc		M	W	W
2	海南木莲	Lc	Lc		Sd		V	W	W
6	华润楠	Lc	Sd		Sd		V	W	W

* 试验持续 16 周。 Duration of the experiment was 16 weeks.

** V: 壮健的 Vigorous; M: 中等的 Moderate; W: 弱的 Weak.

Sd: 枝条干 Shoots dried; Lc: 落叶 Leaf cast

香、小叶榕、小叶胭脂、大头茶 7 种。其余 9 种处于叶片多脱落、干或枝干状态,这些种有:复羽叶栾树、蓝花楹、火焰木、幌伞枫、灰木莲、日本杜英、观光木、海南木莲、华润楠 9 种。

DC 点参试植物此时有 27 种枝干或株干或少数种叶片大量脱落,只有 10 种植物可供观察叶片增长情况,如茶花、环榕、红花油茶、桂花、傅园榕、密花树、小叶榕、毛黄肉楠、大头茶、白桂木。其中除前 5 种的叶增长比率 >70% 外,其余 5 种的新叶增长比率均较低,在 20%–66% 之间。

3.4 翌春植物生长状况

2003 年 3–4 月观察经过近一年污染环境 and 冬季的参试植物,对种的生存能力基本可作出初步的判断。DC 点已死亡的种有:铁刀木、观光木、白木香、日本杜英、蓝花楹、蝴蝶树、印度紫檀、柳叶楠、无忧树、海南木莲、乐昌含笑 11 种;WX 点死亡种只有上述的前 4 种。在 DC 和 WX 两处植株能大量长出新枝、叶,形成新树冠的种有:环榕、红花油茶、茶花、傅园榕、小叶榕、菩提榕、石笔木、幌伞枫、毛黄肉楠、桂花 10 种。其余 17 种(DC)或 23 种(WX)不同程度地抽出新枝叶。

另外,需提及的是植物虽只在污染区生活了短暂的 18 周,以后再转回清洁区生活,即可看出前期污染环境对其造成的影响是长久的。如经在 DC 和 WX 生活了 18 周的大头茶送回到清洁区与对照植物同样管理,经过 7 个月后,植株高度、长势仍有明显差异(图版 II:9),DC、WX、BG 三点的植株高度分别为 45、65、105 cm,DC 点的植株基本无分枝,冠幅相差明显。

4 结论

植物叶片伤害症状是植物对大气污染敏感性反应的直观指示。从伤害症状的特征判明本试验的大气污染物主要是氟化物和硫氧化物。叶片是植物与外界进行气体交换的器官,所以大气污染物对植物的伤害首先在叶片上表现出来。因此,叶片伤害症状可指示污染物的化学性质,是判明植物对大气污染的敏感性的重要依据之一。

植物对大气污染的敏感性反应的可靠判断需从生长过程连续考察。植物不同生长阶段如发叶、落叶期等都会影响其对大气污染反应的敏感程度。如果能进行多年的重复观察,依据将更为可靠。

对 38 种植物的叶片伤害症状、受害落叶、植株

生长状况(包括新叶增长、生势)和翌春植株恢复等的观测,测定结果的排序上并不完全一致,据此,着重在各项中选取较为一致的敏感性反应表现作为综合判定抗性的依据,尤其应重视翌春植株的恢复状况,因这是经一年考验后的最终表现。把 38 种植物对大气污染的敏感性反应分为如下 3 级:

低敏感性(抗性强):茶花、红花油茶、傅园榕、小叶榕、桂花、环榕、菩提榕、石笔木、毛黄肉楠、幌伞枫 10 种。

中等敏感(抗性中等):仪花、格木、吊瓜树、腊肠树、海南红豆、猫尾木、红桂木、灰莉、铁冬青、密花树、白桂木、小叶胭脂、大头茶、复羽叶栾、灰木莲、火焰木、华润楠 17 种。

高度敏感(抗性弱):铁刀木、观光木、白木香、日本杜英、蓝花楹、蝴蝶树、印度紫檀、柳叶楠、无忧树、海南木莲、乐昌含笑 11 种。

5 讨论

5.1 叶片伤害症状特征反映出两试验点大气污染物相同的化学性质

大气污染物化学性质不同,所产生的伤害症状也不一样。大气 HF 进入叶子后随蒸腾流转移到叶子先端和边缘,积累达到一定浓度时使细胞死亡,在叶子死、活组织间形成一明显界线,因此常在叶尖或先端、叶缘形成一环带状棕色伤斑。氟化物累积浓度高时,伤害会向叶子中部、基部发展,继而使整片叶子焦枯脱落。另外,HF 常常使幼芽及未开展的幼叶首先受到伤害。

DC 和 WX 试验点的植物伤害症状与上述典型的 HF 伤害症状一致,可以认为,植物伤害主要由大气氟化物所致。此外,还有少数种类其叶片伤害症状与上述有些不同,如桂花、仪花、复羽叶栾树的叶子在叶肉脉间出现大小分散的棕色伤斑,后两种的伤斑坏死组织易干枯脱落,使叶片上形成很多穿孔,毛黄肉楠的叶子兼有叶尖、叶缘先出现伤害症状以及出现脉间伤斑。这与 SO₂ 对叶子的典型伤害症状:伤斑多出现在叶脉间,成点状或块状(双子叶植物),嫩叶易受害,未充分开展的幼叶不易受害等症十分相似。据此,可认为:可能有些植物对 HF 特别敏感,如华润楠、柳叶楠、密花树等,而有些种对 SO₂ 更敏感如仪花、复羽叶栾,有些对 SO₂、HF 都同样敏感,如大头茶、毛黄肉楠。而另外一类植物,如傅园榕、环榕、小叶榕、茶花对两种污染物反应不敏感,叶片未出现明显的伤害症状。

5.2 DC点植物比WX点的受害严重

植物是大气污染的受害者,同时亦是大气污染的指示者,从DC点植物受害程度比WX点的严重,亦可指示DC点大气污染重于WX点,DC和WX的硫酸盐化速率分别高于国家大气环境标准二级标准的39.91和8.64倍,氟化物分别高出国家二级标准的18.12和14.71倍。植物的受伤害程度与大气污染程度是一致的。

无论是植物的落叶率、受害的程度及死亡种数,DC点均高于WX点;新叶增长率亦低于WX点。由于DC点污染物浓度明显高出WX点和国家标准,因此,在DC点最后能存活下来的27种植物显示出对大气污染具一定抗性。其中10种为抗性强的种类:环榕、红花油茶、茶花、傅园榕、小叶榕、菩提榕、石笔木、幌伞枫、毛黄肉楠、桂花。另外17种植物是:仪花、格木、吊瓜树、腊肠树、海南红豆、猫尾木、红桂木、灰莉、铁冬青、密花树、白桂木、小叶胭脂、大头茶、火焰木、复羽叶栎、灰木莲、华润楠。

5.3 植物对大气污染反应的多样性

不同种植物对大气污染的敏感性差异很大,这与植物种本身的生物学特性、生态学习性和生理生态特性均有密切关系。

新叶增长率高,说明在某一时期内植物处于生长期且受污染影响较小,但并不能说明植物最终具有强的抗性。如表4 DC点排在前面的15种植物,前期新叶增长率均 $\geq 90\%$ 。WX点的茶花、仪花、格木、吊瓜树、腊肠树、无忧树、桂花、海南红豆、猫尾木9种在后期的新叶增长率均 $>100\%$ (表5),但这些种的抗性不如翌春生长恢复得好的10种植物,如环榕、红花油茶等。可见,新叶增长率高的植物不一定表现抗性强。相反,前期新叶增长率低的如茶花、红花油茶、小叶榕或前后期均属中等($\leq 80\%$)的环榕、毛黄肉楠、火焰木、傅园榕(表4、表5)等,到翌春生长季节却能保持或重新形成新的树冠。另外,火焰木、幌伞枫前期新叶增长率中等(66.6%和80%),后期早落叶,到翌春发叶快,早形成新树冠;而同样为早落叶的灰木莲、日本杜英前期新叶增长率高(分别为116%和93.1%),但到翌春发叶少而迟,迟迟未形成新树冠。这可能是由于前一年植物早发叶、多发叶增加了受大气污染的危害,叶片经多次伤害、多次脱落增加了植株养分的消耗而降低了植株的生活力之故。前面提到的大头茶在DC、

WX点经受了18周大气污染转回到清洁区后,植株的生长状况始终与对照植株差异甚大,可见,植物前期受到污染,其危害深深影响到植株后来的生长。

5.4 大气污染促进植株的衰老

由表5可见,到了10月中旬(试验18周)在BG(对照区)生长的蓝花楹、火焰木、幌伞枫、灰木莲、日本杜英、观光木、海南木莲、华润楠8种植物出现不同程度的落叶现象,而与此同时,这些种在WX、DC点已是大量落叶,甚至芽、枝干枯。显示大气污染有明显促进植物衰老的作用。

5.5 新叶增长数标准差数值偏大的原因分析

有多种因素可引起新叶增长数标准差数值的偏大,如:同种植株个体间生长势差异、苗木个体管理水平上差异、同种5个重复所处小生境的差异等等。从表4、5所示,DC、WX分别与BG点的数值比较,DC和WX点植株新叶增长数的标准差数值多大于对照点,尤以DC点明显,说明可能由于小生境(特别是气体浓度和受污染机率)的差异,影响植株生长、发叶的差异。

参考文献

- [1] 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 Publishing House, 1988. 1-8. (in Chinese).
- [2] Yu S W (余叔文), Wang J X (汪嘉熙), Zhu C L (朱成璐), et al. An Atlas of Air Pollution Injured Symptoms of Plants [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Publishing House, 1980. 1-15, 34-35. (in Chinese)
- [3] Malhotra S S, Blauel R A. Diagnosis of Air Pollutant and Natural Stress Symptoms on Forest Vegetation in Western Canada [M]. Canada: Northern Forest Research Centre, Canadian Forestry Service Environment, 1980. 18-41.
- [4] Wen D Z (温达志), Kong G H (孔国辉), Zhang D Q (张德强), et al. Ecophysiological responses of 30 garden plant species exposed to short-term air pollution [J]. Acta Phytoecol Sin (植物生态学报), 2003, 27(3): 311-317. (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] Xu D Q (许大全). Non-uniform stomatal closure and non-stomatal limitation of photosynthesis [J]. Plant Physiol Commun (植物生理学通讯), 1995, 31(4): 246-252. (in Chinese)
- [7] Liu B J (刘炳江), Hao J M (郝吉明), He K B (贺克斌), et al. Study on designation of acid rain and SO₂ pollution control areas and policy implementation [J]. Chin Envir Sci (中国环境科学),

- 1998, 18(1):1-7. (in Chinese)
- [8] Wang Q C (王起超), Shen W G (沈文国), Ma Z W (麻壮伟). The estimation of mercury emission from coal combustion in China [J]. *Chin Environ Sci (中国环境科学)*, 1999, 19(4): 318-321. (in Chinese)
- [9] Wen D Z (温达志), Zhou G Y (周国逸), Kong G H (孔国辉), et al. A status report of the effects of acid rain on plants, soils and surface waters in three selected terrestrial ecosystems in lower subtropical China [J]. *Chin J Ecol (生态学杂志)*, 2000, 19(5): 11-18. (in Chinese)
- [10] Huang L F (黄连芬), Weng J H (翁建华), Liu X R (刘晓茹), et al. The characteristics of the acidification of soils under pine trees [J]. *China Envir Sci (中国环境科学)*, 1998, 18(1):60-63. (in Chinese)
- [11] Xie Y J (谢耀坚), Cao F X (曹福祥), Xing W Y (邢伟一), et al. The harm of air pollution to the plant cover in Shifeng Park [J]. *J Central-south For Coll (中南林学院学报)*, 1994, 14(2):169-176. (in Chinese)
- [12] Meng F P (孟范平), Li G F (李桂芳). The effect of acid rain on chemical activities of elements in soil [J]. *J Central-south For Coll (中南林学院学报)*, 1998, 18(1):27-34. (in Chinese)
- [13] Kong F X (孔繁翔), Sang W L (桑伟莲), Jiang X (蒋新), et al. Aluminum toxicity and tolerance in plants [J]. *Acta Ecol Sin (生态学报)*, 2000, 20(5):855-862. (in Chinese)
- [14] Jiao Y (焦有), Yang Z P (杨占平). Fluorine harm and control [J]. *Chin J Ecol (生态学杂志)*, 2000, 19(5):67-70. (in Chinese)
- [15] [Http://www.fsonline.com.cn](http://www.fsonline.com.cn) [EB/OL]
- [16] [Http://www.huanbao.nanhai.gov.cn/](http://www.huanbao.nanhai.gov.cn/)[EB/OL]
- [17] Luo Y M (骆永明), Cha H G (查宏光), Song J (宋静), et al. Phytoremediation of air pollution [J]. *Soil(土壤)*, 2002, (3): 113-119. (in Chinese)
- [18] Zhang D Q (张德强), Chu G W (褚国伟), Yu Q F (余清发), et al. Decontamination ability of garden plants to absorb sulfur dioxide and fluoride [J]. *J Trop Subtrop Bot (热带亚热带植物学报)*, 2003, 11(4):336-340 (in Chinese)

图版说明

在酸雨、氟化物、硫化物复合污染环境中,叶片出现的伤害症状
Injury symptoms of leaves in complexly polluted environment under acid rain, fluoride and sulfide.

图版 I

3 个试验点的周围环境(照片摄于试验开始后 6 个月)

1. 五星试验点(WX) 污染源主要来自北面和东面;
2. 东村试验点(DC) 污染源来自四面污染源;
3. 华南植物园(BG) 周围是树木、草地,空气相对清洁;
4. 在 WX 试验点,经 10 个月茶叶出现类似受 HF 污染的伤害症状;
5. 叶龄相同的两吊瓜树复叶,左方的长在 DC 试验点经 4 个月后,

出现似 HF 污染的伤害症状,右方的长在华南植物园;

图版 II

6. 在 DC 试验点,经 2 个月后,腊肠树嫩叶出现似 SO₂ 污染的伤害症状;
7. 在 DC 试验点,经 2 个月后的毛黄肉楠叶出现似 HF、SO₂ 复合污染的伤害症状;
8. 经污染物复合污染后,叶片枯斑破坏后形成小孔的伤害症状,复羽叶栎树的复叶,在 DC 试验点经 3 个月的污染;
9. 经污染物复合污染后,叶片枯斑破坏后形成小孔的伤害症状,年龄相同的两个仪花枝条上的复叶,左方的长在 DC 试验点,经 3 个月污染,右方的在华南植物园;
10. 左方两盆大头茶,分别在 DC 和 WX 试验点生长 18 周后,送回华南植物园(对照区)生长,经过 28 周后,植株生长势与右方一盆一直在华南植物园生长的比较,仍差异显著。

Explanation of plates

Plate I

Surrounding environments of the experimental sites (pictures were taken after 6 months of the experiment)

1. Wuxing site (WX): air pollution from the north and the east;
2. Dongcun site (DC): pollution source from all aspects;
3. South China Botanical Garden (BG): relatively clean site;
4. Leaf injury symptoms of *Camellia japonica* at WX site suffered for 10 months. The symptoms are similar to those polluted by hydrogen fluoride (HF);
5. Two compound leaves of *Kigelia africana* with the same age from DC site (left) and BG site (right) suffered for 10 months. Injury symptoms are similar to those polluted by HF.

Plate II

6. Young leaflet injury symptoms of *Cassia fistula* suffered at DC site for 2 months, symptoms are similar to those polluted by sulfur dioxide (SO₂);
7. Leaf injury symptoms of *Actinodaphne pilosa* suffered at DC site for 2 months, with symptoms of complex pollution by HF and SO₂;
8. Injury symptoms were small holes induced by damage of necrosis after exposure to complex pollutants. The compound leaves of *Koeleruteria bipinnata* after 3 months at polluted DC site;
9. Injury symptoms were small holes induced by damage of necrosis after exposure to complex pollutants. Two shoots with compound leaves of the same age of *Lysidice rhodostegia* exposed under polluted atmosphere for 3 months at DC site (left) and BG site (right);
10. Two potted *Gordonia axillaries* exposed at DC and WX sites for 18 weeks, and then transferred to BG site for continuous growth (the left two). The right one grown at BG site for control. The pictures were taken after 28 weeks of the growth.