

39 种木本植物对大气污染的生理生态反应与敏感性

温达志¹ 陆耀东² 旷远文¹ 胡羨聪² 张德强¹ 薛克娜² 孔国辉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 528222)

摘要: 39 种 1-2 a 生盆栽木本植物在生长季前期放置在污染区 (佛山南海区小塘镇五星) 和清洁区 (广州华南植物园), 5 个月后进行植物叶片和叶绿素荧光特征参数的测定。大气监测结果表明, 污染区有相当高的酸性硫酸盐化速率、氟化物浓度和降尘量, 分别是清洁区的 15.4、17.5 和 2.8 倍, 明显高于国家排放标准。生长在污染区的大多数植物的净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (E) 和气孔导度 (g_s) 均出现不同程度的下降, 下降幅度因植物种类不同而存在较大差异。 P_n 、 E 与 g_s 之间存在一定程度的线性相关关系, 但污染胁迫下 P_n 与 g_s 线性相关的显著程度被削弱, 而 E 与 g_s 的相关性则得到提高, 表现出不同植物种类 P_n 和 E 的变化与 g_s 变化的不协同性、复杂性以及适应策略的多样性。根据 P_n 、 E 和水分利用效率 (WUE) 的变化, 将植物对大气污染响应的敏感程度划分为: (1) 高度敏感组, 包括仪花、灰木莲、格木、阿丁枫、白桂木、海南木莲、白木香和海南红豆; (2) 中度敏感组, 包括幌伞枫、无忧树、红花木莲、小叶胭脂、蝴蝶树、山玉兰、灰莉、柳叶楠、刺果番荔枝、厚皮香、猫尾木、红桂木、竹节树、红花油茶、观光木、桂花、铁冬青、日本杜英、火焰木、铁力木和密花树; (3) 轻度敏感组, 包括毛黄肉楠、华润楠、吊瓜木、大头茶、茶花、傅园榕、小叶榕、环榕、菩提榕和石笔木。

关键词: 木本植物; 大气污染; 气体交换; 敏感性

中图分类号: Q948.116

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2003)04-0341-07

Ecophysiological Responses and Sensitivity of 39 Woody Species Exposed to Air Pollution

WEN Da-zhi¹ LU Yao-dong² KUANG Yuan-wen¹ HU Xian-cong²

ZHANG De-qiang¹ XUE Ke-na² KONG Guo-hui¹

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

2. Forestry Institute of Foshan, Foshan 512800, China)

Abstract: This study aims to test the sensitivity of thirty-nine 1 to 2-year-old woody species planted in pots and exposed to heavily polluted and relatively clean sites for 5 months during growing season in Nanhai, Foshan, Guangdong Province. Evaluation on possible effects of air pollution on plants and their acclimation strategies were made on the basis of gas exchange measurements using LCA-4 photosynthesis system. Air monitoring data showed that the polluted area received remarkably higher sulfation rate, fluoride concentration and total suspended particles than the clean site, which significantly exceed the emission limit of National Standard. Net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (E), stomatal conductance (g_s) differed among species and decreased for most species in the polluted area. Pooled data showed that P_n and E were linearly correlated with g_s to some extent at the relative clean site and polluted area, suggesting that most species showed possibility to adapt the pollution stress by simultaneously controlling photosynthesis and transpiration. The correlation of the P_n with g_s (or E with g_s) had been weakened (or enhanced) under pollution stress, which demonstrated the unparallel and complexity in changes of P_n and E with g_s , and the diversity of acclimation strategies among different species. Based on the change in P_n ,

收稿日期: 2003-06-26 接受日期: 2003-09-10

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, 200010) 和国家自然科学基金 (30370283) 联合资助

E and water use efficiency (WUE), plants can be ranked as follows by their sensibilities to air pollution; species that exhibited high sensibility included *Lysidice rhodostegia*, *Manglietia glauca*, *Erythrophloeum fordii*, *Altingia chinensis*, *Artocarpus hypargyreus*, *Manglietia hainannensis*, *Aquilaria sinensis* and *Ormosia pinnata*; species showing moderate sensitivity were *Lieritiera parvifolia*, *Magnolia delawayi*, *Fagraea ceilanica*, *Manglietia insignis*, *Artocarpus styracifolius*, *Heteropanax fragrans*, *Saraca chinensis*, *Machilus salicina*, *Annona muricata*, *Ternstroemia gymnanthera*, *Dolichandrone cauda-felina*, *Artocarpus nitidus* subsp. *lingnanensis*, *Cassia fistula*, *Camellia semiserrata*, *Tsoongiodendron odorum*, *Osmanthus fragrans*, *Ilex rotunda*, *Elaeocarpus japonicus*, *Spathodea campanulata*, *Mesua ferrea*, *Myrsine seguinii*; and those showing low sensibility were *Actinodaphne pilosa*, *Machilus chinensis*, *Kigelia africana*, *Gordonia axillaries*, *Camellia japonica*, *Ficus microcarpa* var. *fuyuensis*, *Ficus microcarpa*, *F. annulata*, *F. religiosa* and *Tutcheria spectabilis*.

Key words: Woody plants; Air pollution; Gas exchange; Sensitivity

大气污染是全球许多国家和地区面临的最重要的环境问题之一,也是全球变化研究的重要课题。以检测大气污染物排放种类、借助物理或化学方法监测污染物浓度以及以此为基础的大气环境质量评价方法日趋完善,积累了丰富的数据和经验,为环保部门决策提供了指南。然而,大气监测结果并不能直接给出或推论被测定污染物对生物的影响效果,难于为污染地区环境修复提供依据。不同植物种类在组织结构、功能、稳定性以及抵御大气污染胁迫的能力方面都存在差异,曾经有研究者借助模拟实验来探讨大气污染^[1,2]或酸雨对植物的伤害^[3,4],但这些研究多数侧重于污染胁迫下植物可见受害症状的描述。近年来,与植物生理反应相关的研究越来越受到重视,借助叶绿素组分与含量、细胞膜透性^[5]以及叶片气体交换、光系统 II 功能和酶活性变化来研究植物受害机理或比较不同种类植物的抗耐性^[6-9]。但是,多数实验是在控制环境下(如人工熏气、喷洒或浸蘸模拟酸雨)进行的,实验结果缺乏现实污染环境的检验。污染现场盆栽实验的测定结果虽然不能区分并给出单一污染对植物伤害的影响,但能反映复合污染物对植物伤害的真实状况,在抗性植物的筛选中更具现实意义。本实验借助植物叶片气体交换测定技术来研究植物对大气污染的反应。在污染现场和清洁区进行苗木盆栽实验,比较不同种类抗污染能力的差异及适应策略,为类似地理气候条件下重度酸污染地区退化生态系统植被恢复之树种选择提供科学依据。

1 材料和方法

试验地概况 选择广州市华南植物园为清洁区,陶瓷工业密集的佛山市南海区小塘镇五星为

污染区进行苗木盆栽实验。污染区位于陶瓷工业区的南面偏东方向,冬季污染严重、植物受害显著。两个试验点的地理位置接近,属亚热带季风气候,且气温、降水差异甚微。

植物材料 2002 年 6 月上旬在 2 个试验点上分别放置盆栽树苗,每个试验点上每种植物 3-5 盆,同种植物为同年生,且地茎、高和冠幅基本一致。试验前,每盆植物根际周围施入等量的长效肥料,水分管理措施一致,之后定期进行生物学特性的观测和生理学指标的测定。

大气成分测定 大气硫酸盐化速率和氟化物测定采用静态挂片取样法取样,每月取样 1 次,每次放置挂片时间为 20 d。硫酸盐化速率采用挂片-硫酸钡比浊法、氟化物含量采用碱片-氟离子选择电极测定^[10]。

叶片气体交换测定 2002 年 10 月下旬,用便携式 LCA4 光合-蒸腾仪开放气路系统(ADC,英国)测定,叶室入气口与离地 3 m 的气杆连接。净光合速率 P_n 、蒸腾速率 E 、气孔导度 g_s 、胞间 CO_2 浓度 C_i 、叶面光强 Q_{leaf} 、叶面温度 T_{leaf} 、大气 CO_2 浓度 C_a 等环境因子同时测定记录,每个试验点的每种植物测定 4-6 片叶。

2 结果和分析

2.1 大气质量状况

表 1 为 2 个试验点上植物生长季内(6-10 月)大气成分的监测结果。五星污染区硫酸盐化速率、氟化物含量和降尘 4 个月测定的平均值分别为 $2.16 \text{ mg SO}_3 \text{ 100 cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 、 $44.13 \text{ } \mu\text{g F 100 cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 和 $20.09 \text{ mg m}^{-3} \text{ month}^{-1}$,分别是清洁区广州华南植物园的 15.4、17.5 和 2.8 倍。而且,括号内的标准差表

明, 污染区硫酸盐化速率月变化差异相对较小, 氟化物和降尘则显示出明显的月动态变化。污染区硫酸盐化速率和氟化物含量明显高于清洁区, 且远超过国家二级标准 ($0.25 \text{ mg SO}_3 \text{ 100 cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $3.0 \mu \text{g F 100 cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $8.0 \text{ mg m}^{-3} \text{ month}^{-1}$)^①, 而清洁区的3项测定指标都低于该标准, 尤以硫酸盐化速率明显。

表1 污染区与清洁区大气监测结果的比较

Table 1 A comparison of air monitoring data measured at polluted and clean sites

试验点 Site	硫酸盐化速率 Sulfation rate ($\text{mg SO}_3 \text{ 100m}^{-2}\text{d}^{-1}$)	氟化物 Fluoride ($\mu \text{g F 100m}^{-2}\text{d}^{-1}$)	降尘 Dustfall ($\text{mg m}^{-3}\text{month}^{-1}$)
污染区 Polluted site	2.16 (0.52)	44.13 (16.46)	20.09 (9.34)
清洁区 Clean site	0.14 (0.10)	2.53 (0.82)	7.27 (3.79)

数据为2002年6-10月的平均值, 括号内数字为标准差。

Values are expressed as the mean from June to October, 2002, with standard deviation in brackets.

2.2 植物净光合速率与气孔导度的变化

从表2可见, 植物净光合速率 (P_n) 因植物种类不同存在较大的差异。根据 P_n 值的相对大小可分为3个水平: 较高水平 P_n , 变幅为 $7.6 - 9.6 \mu \text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 有柳叶楠、晃伞枫、白桂木、山玉兰、海南红豆、红花木莲和华润楠7个种, 对应的气孔导度 (g_s) 介于 $0.044 - 0.098 \text{ mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$; 中等水平 P_n , 变幅为 $4.6 - 6.7 \mu \text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 有刺果番荔枝至猫尾木之间的21种植物, 对应的 g_s 介于 $0.027 - 0.079 \text{ mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$; 低水平 P_n , 变幅在 $2.6 - 4.2 \mu \text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 之间, 有灰莉之后的11种植物, 对应的 g_s 为 $0.015 - 0.038 \text{ mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。

污染环境多数植物种类的 P_n 和 g_s 表现出不同程度的下降(表2)。 P_n 下降最明显的种类包括仪花、灰木莲、晃伞枫、无忧树、格木、阿丁枫、红花木莲和小叶胭脂, 降幅在70%左右或以上, g_s 也出现较大幅度的下降(灰木莲除外); 其次是蝴蝶树、山玉兰、灰莉、白桂木、柳叶楠、刺果番荔枝、厚皮香、海南木莲、猫尾木、红桂木、白木香、海南红豆、竹节树、红花油茶、观光木、桂花和铁冬青, P_n 降幅在40%至70%之间; 其余13种植物的 P_n 降幅相对较小, 在35%或以下, 其中以榕树类和茶属类种类尤其明显, 有些种类如菩提榕、石笔木的 P_n 甚至高于

清洁区的对应值。

2.3 植物蒸腾速率与水分利用效率

表3可见, 即使在清洁区, 植物蒸腾速率 (E) 也因种类的不同而有明显差异。根据 E 值大小可将植物分成以下几个不同的组: 小叶胭脂、火焰木和华润楠的 E 最大, 其值在 $2.60 - 2.77 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 之间; 红桂木至厚叶榕的12种植物次之, 介于 $1.51 - 2.19 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$; 厚皮香至石笔木的21个种介于 $1.05 - 1.47 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$; 其余3种最小, 蒸腾速率在 $1.0 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以下。

和清洁区相比, 污染区植物 E 下降最明显的种类有红桂木、密花树、小叶榕、无忧树、柳叶楠、灰莉、火焰木和仪花, 减少了55%以上, 红桂木尤其明显; 其次是铁冬青、红花木莲、观光木、小叶胭脂、茶花、华润楠、刺果番荔枝、山玉兰、晃伞枫、大头茶、猫尾木和蝴蝶树, 降幅在30%-50%之间; 傅园榕、厚皮香、红花油茶、桂花、竹节树、阿丁枫、格木中等, 减少了10%-30%; 其余12个种减少幅度在10%以下, 少许种类出现增加(表3)。

生理学上将叶片净光合速率 (P_n) 与蒸腾速率 (E) 的比值 (P_n/E) 定义为瞬时蒸腾效率又称水分利用效率 $WUE^{[1]}$, 表征为 $\mu \text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$, 它能准确反映植物叶片瞬间或短期反应行为。表3可见, 在污染胁迫下少数种类如红桂木、密花树、小叶榕、火焰木、铁冬青、观光木、茶花、华润楠、大头茶、傅园榕、菩提榕、石笔木和环榕的 WUE 表现为增加, 增幅为4%-124%, 且因种类不同存在较大的差异; 仪花、铁冬青、幌伞枫、白木香、海南木莲、白桂木、厚皮香、铁力木、日本杜英、灰木莲、吊瓜木、阿丁枫均表现为明显下降, 降幅在50%或以上, 其次是无忧树、红花木莲、小叶胭脂、山玉兰、猫尾木、红花油茶、桂花、竹节树、海南红豆、毛黄肉楠等种类, 柳叶楠、灰莉、刺果番荔枝、环榕的降幅最小, 在25%左右。

2.4 净光合速率、蒸腾速率与气孔导度的协同响应

植物通过气孔吸收同化 CO_2 的同时也不断向外扩散水分, 在调节碳收获和水分散失过程中起中枢作用^[12], 因此在理论上植物 P_n 、 E 与 g_s 之间存在密切关系。图1显示, 无论在清洁区还是污染区, 植物 P_n 、 E 与 g_s 之间均存在一定程度的线性关系, 表明多数植物都能够通过感应环境变化来调节气孔的开

① 硫酸盐化速率见国家环保局1991年《环境质量报告编写技术规范》推荐的标准; 氟化物见 GB3095-96

张,是植物对胁迫环境的一种适应策略,但污染胁迫使 P_n - g_s 数据点的离散程度增加,线性显著程度被削弱,而 E - g_s 相关关系则得到提高,体现了不同种类植物对污染胁迫响应的复杂性以及适应策略的多样性。具体地说,污染胁迫导致灰木莲、阿丁枫、

蝴蝶树、白桂木、厚皮香、格木、白木香、海南木莲、铁力木、毛黄肉楠等种类的 P_n 大幅度下降,伴随的 g_s 下降的幅度则低得多,其中有些种类的 g_s 甚至表现为轻度增加。这一结果暗示,在试验区当前污染浓度下气孔可能不是调节这类植物 P_n 的主导因子,

表 2 污染区与清洁区盆栽植物净光合速率(P_n , $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、气孔导度(g_s , $\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)及其相对差异(ΔP_n , Δg_s , %)

Table 2 Net photosynthesis (P_n , $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), stomatal conductance (g_s , $\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) in leaves of plants growing at clean and polluted sites and their relative differences (ΔP_n , Δg_s , %)

植物种类 Species	净光合速率 P_n^*		气孔导度 g_s^*		相对差异 Relative differences	
	清洁区 Clean site	污染区 Polluted site	清洁区 Clean site	污染区 Polluted site	ΔP_n^{**}	Δg_s^{**}
柳叶楠 <i>Machilus salicina</i>	9.5(1.1)	3.6(0.8)	0.053(0.012)	0.025(0.015)	-62.2	-52.8
幌伞枫 <i>Heteropanax fragrans</i>	8.9(0.5)	2.1(0.2)	0.047(0.016)	0.016(0.001)	-76.2	-66.0
白桂木 <i>Artocarpus hypargyreus</i>	8.6(0.3)	3.2(0.6)	0.044(0.003)	0.046(0.005)	-63.0	4.5
山玉兰 <i>Magnolia delavayi</i>	8.3(1.5)	2.8(0.6)	0.098(0.029)	0.042(0.003)	-66.2	-57.1
海南红豆 <i>Ormosia pinnata</i>	8.0(0.9)	3.6(0.6)	0.051(0.020)	0.039(0.009)	-55.6	-23.5
红花木莲 <i>Manglietia insignis</i>	7.6(0.2)	2.0(0.8)	0.064(0.014)	0.020(0.003)	-70.9	-68.8
华润楠 <i>Machilus chinensis</i>	7.0(0.8)	5.0(2.7)	0.068(0.021)	0.037(0.024)	-28.3	-45.6
刺果番荔枝 <i>Annona muricata</i>	6.7(1.3)	2.5(0.2)	0.063(0.013)	0.022(0.005)	-62.0	-65.1
红桂木 <i>Artocarpus nitidus</i> subsp. <i>lingnanensis</i>	6.7(1.2)	2.9(0.8)	0.057(0.015)	0.008(0.001)	-56.4	-86.0
傅园榕 <i>Ficus microcarpa</i> var. <i>fuyuenensis</i>	6.6(1.4)	5.8(1.3)	0.079(0.019)	0.035(0.011)	-12.4	-55.7
桂花 <i>Osmanthus fragrans</i>	6.3(1.0)	3.6(0.1)	0.063(0.012)	0.034(0.007)	-43.6	-46.0
厚皮香 <i>Ternstroemia gymnanthera</i>	6.3(0.9)	2.4(0.7)	0.024(0.010)	0.027(0.006)	-61.2	12.5
仪花 <i>Lysidice rhodostegia</i>	6.2(1.4)	0.3(0.2)	0.028(0.006)	0.014(0.004)	-95.2	-50.0
铁冬青 <i>Ilex rotunda</i>	6.0(1.2)	3.6(1.1)	0.034(0.008)	0.021(0.004)	-39.7	-38.2
火焰木 <i>Spathodea campanulata</i>	6.0(1.2)	3.9(0.2)	0.061(0.011)	0.031(0.003)	-35.1	-49.2
竹节树 <i>Carallia branchiate</i>	6.0(1.7)	2.8(0.3)	0.055(0.010)	0.030(0.010)	-53.0	-45.5
毛黄肉楠 <i>Actinodaphne pilosa</i>	5.6(1.4)	3.9(0.8)	0.033(0.011)	0.030(0.008)	-29.9	-9.1
小叶榕 <i>Ficus microcarpa</i>	5.5(0.7)	4.9(1.2)	0.031(0.013)	0.015(0.003)	-12.1	-51.6
灰木莲 <i>Manglietia glauca</i>	5.5(0.9)	1.2(0.3)	0.040(0.008)	0.037(0.014)	-77.6	-7.5
阿丁枫 <i>Altingia chinensis</i>	5.4(0.6)	1.5(0.4)	0.039(0.012)	0.032(0.020)	-72.2	-17.9
格木 <i>Erythrophloeum fordii</i>	5.3(1.4)	1.4(0.2)	0.045(0.003)	0.027(0.006)	-72.8	-40.0
大头茶 <i>Gordonia axillaries</i>	5.3(1.1)	3.9(0.4)	0.049(0.017)	0.027(0.004)	-25.7	-44.9
红花油茶 <i>Camellia semiserrata</i>	5.1(0.4)	2.5(0.5)	0.033(0.008)	0.017(0.019)	-51.4	-48.5
日本杜英 <i>Elaeocarpus japonicus</i>	5.0(0.6)	3.3(0.7)	0.035(0.011)	0.027(0.002)	-35.1	-22.9
吊瓜木 <i>Kigelia africana</i>	4.9(1.1)	3.6(1.1)	0.039(0.011)	0.028(0.009)	-27.8	-28.0
小叶胭脂 <i>Artocarpus styracifolius</i>	4.9(0.7)	1.5(0.3)	0.064(0.008)	0.037(0.006)	-69.1	-42.2
密花树 <i>Rapanea nerifolia</i>	4.8(0.6)	3.2(0.3)	0.041(0.007)	0.020(0.003)	-33.8	-51.2
猫尾木 <i>Dolichadrone cauda-felina</i>	4.6(0.8)	2.0(0.3)	0.027(0.008)	0.016(0.003)	-57.0	-40.7
灰莉 <i>Fagraea ceilanica</i>	4.2(0.7)	1.5(0.3)	0.015(0.009)	0.010(0.001)	-64.4	-33.3
观光木 <i>Tsoongiodendron odorum</i>	4.0(1.1)	2.1(0.4)	0.034(0.009)	0.020(0.001)	-46.1	-41.2
白木香 <i>Artocarpus hypargyreus</i>	3.9(0.7)	1.7(0.1)	0.038(0.010)	0.033(0.009)	-56.4	-13.2
铁力木 <i>Mesua ferrea</i>	3.8(1.0)	2.5(0.6)	0.034(0.013)	0.038(0.004)	-33.9	11.8
海南木莲 <i>Manglietia hainanensis</i>	3.5(0.5)	1.5(0.3)	0.021(0.007)	0.016(0.006)	-58.1	-23.8
茶花 <i>Camellia japonica</i>	3.5(0.8)	3.0(0.3)	0.025(0.009)	0.020(0.003)	-13.6	-20.0
蝴蝶树 <i>Heritiera parvifolia</i>	3.3(1.1)	1.1(0.4)	0.021(0.005)	0.020(0.009)	-66.8	-4.8
无忧树 <i>Saraca chinensis</i>	3.2(1.0)	0.9(0.3)	0.038(0.015)	0.015(0.002)	-73.4	-60.5
环榕 <i>Ficus annulata</i>	3.1(0.9)	2.8(0.3)	0.035(0.005)	0.029(0.003)	-9.7	-17.0
菩提榕 <i>Ficus religiosa</i>	3.0(0.0)	4.0(0.9)	0.027(0.008)	0.034(0.006)	31.2	25.9
石笔木 <i>Tutcheria spectabilis</i>	2.6(0.4)	3.9(0.6)	0.019(0.002)	0.034(0.005)	51.0	78.9

* P_n (或 g_s) 为 4-5 片叶的平均值, 括号内的数值为标准差. Values of P_n (or g_s) represent means with standard error in brackets ($n=4-5$).

** ΔP_n (或 Δg_s) 是根据 $\Delta Y(\%) = (Y_p - Y_c) / Y_c \times 100\%$ 计算得到. 其中 ΔY 代表净光合速率(或气孔导度)变化的相对百分数, Y_p 和 Y_c 分别为污染区和清洁区同种植物的 P_n (或 g_s). ΔP_n (or Δg_s) is calculated by $\Delta Y(\%) = (Y_p - Y_c) / Y_c \times 100\%$. ΔY represents the relative change of P_n (or g_s); Y_p and Y_c represent values of P_n (or g_s) from the polluted and clean sites for the same species, respectively.

表 3 污染区与清洁区盆栽植物蒸腾速率(E, mmol m⁻²s⁻¹)、水分利用效率(WUE, μmol CO₂ mmol⁻¹H₂O) 及其相对差异(ΔE, ΔWUE, %) Table 3 Transpiration (E, mmol m⁻²s⁻¹) and water use efficiency (WUE, μmol CO₂ mmol⁻¹H₂O) in leaves of plants growing at clean and polluted sites and their relative differences (ΔE, ΔWUE, %)

植物种类 Species	蒸腾速率 E*		水分利用效率 WUE*		相对差异 Relative difference(%)	
	清洁区 Clean site	污染区 Polluted site	清洁区 Clean site	污染区 Polluted site	ΔE**	ΔWUE**
小叶胭脂 <i>Artocarpus styracifolius</i>	2.77(0.23)	1.75(0.16)	1.41(0.17)	1.06(0.41)	-49.1	-39.4
火焰木 <i>Spathodea campanulata</i>	2.77(0.14)	2.16(0.48)	1.24(0.09)	3.15(0.40)	-55.2	45.8
华润楠 <i>Machilus chinensis</i>	2.60(0.69)	2.83(0.70)	1.36(0.74)	3.17(0.92)	-47.7	12.0
红桂木 <i>Artocarpus nitidus</i> subsp. <i>lingnanensis</i>	2.19(0.40)	3.06(0.27)	0.42(0.08)	6.85(0.53)	-80.8	123.9
柳叶楠 <i>Machilus salicina</i>	2.09(0.29)	4.55(0.26)	0.93(0.40)	3.62(0.76)	-55.5	-20.4
密花树 <i>Rapanea nerifolia</i>	2.04(0.22)	2.38(0.23)	0.73(0.08)	4.45(0.72)	-64.2	87.0
大头茶 <i>Gordonia axillaries</i>	1.79(0.47)	2.99(0.43)	1.07(0.15)	3.74(0.80)	-40.2	25.1
吊瓜木 <i>Kigelia africana</i>	1.78(0.33)	2.75(0.45)	1.52(0.54)	2.37(0.38)	-14.6	-13.8
山玉兰 <i>Magnolia delavayi</i>	1.68(0.32)	4.96(0.32)	0.89(0.20)	3.19(0.35)	-47.0	-35.7
海南红豆 <i>Ormosia pinnata</i>	1.64(0.34)	4.88(0.32)	1.48(0.25)	2.67(0.30)	-9.8	-45.3
铁冬青 <i>Ilex rotunda</i>	1.63(0.22)	3.69(0.51)	0.80(0.16)	4.63(1.58)	-50.9	25.5
无忧树 <i>Saraca chinensis</i>	1.56(0.65)	2.17(0.57)	0.67(0.14)	1.25(0.26)	-57.1	-42.4
白桂木 <i>Artocarpus hypargyreus</i>	1.54(0.08)	5.63(1.13)	1.63(0.28)	2.02(0.63)	5.8	-64.1
小叶榕 <i>Ficus microcarpa</i>	1.54(0.37)	3.68(0.55)	0.56(0.14)	8.81(1.68)	-63.6	139.4
傅园榕 <i>Ficus microcarpa</i> var. <i>fuyuensis</i>	1.51(0.25)	4.41(0.68)	1.09(0.26)	5.38(0.50)	-27.8	22.0
厚皮香 <i>Ternstroemia gymnathera</i>	1.47(0.58)	5.03(3.00)	1.07(0.16)	2.24(0.56)	-27.2	-55.5
观光木 <i>Tsoongiodendron odorum</i>	1.45(0.61)	2.70(0.32)	0.72(0.05)	3.00(0.81)	-50.3	11.1
刺果番荔枝 <i>Annona muricata</i>	1.42(0.28)	4.72(0.11)	0.75(0.15)	3.55(0.98)	-47.2	-24.8
桂花 <i>Osmanthus fragrans</i>	1.40(0.14)	4.47(0.41)	1.10(0.21)	3.23(0.55)	-21.4	-27.7
红花木莲 <i>Manglietia insignis</i>	1.37(0.19)	5.56(0.62)	0.68(0.09)	3.10(1.50)	-50.4	-44.2
茶花 <i>Camellia japonica</i>	1.35(0.44)	2.65(0.51)	0.70(0.15)	4.52(1.22)	-48.1	70.6
格木 <i>Erythrophloeum fordii</i>	1.29(0.07)	4.12(1.23)	1.12(0.19)	1.30(0.24)	-13.2	-68.4
红花油茶 <i>Camellia semiserrata</i>	1.27(0.23)	4.12(0.75)	0.97(0.53)	2.55(0.18)	-23.6	-38.1
白木香 <i>Aquilaria sinensis</i>	1.26(0.45)	3.29(0.95)	1.22(0.29)	1.43(0.32)	-3.2	-56.5
菩提榕 <i>Ficus religiosa</i>	1.25(0.27)	2.49(0.59)	1.32(0.23)	3.05(0.87)	5.6	22.5
环榕 <i>Ficus annulata</i>	1.25(0.45)	2.48(0.70)	1.08(0.08)	2.59(0.56)	-13.6	4.4
阿丁枫 <i>Altingia chinensis</i>	1.22(0.18)	4.44(0.20)	1.04(0.55)	1.69(0.90)	-14.8	-61.9
竹节树 <i>Carallia branchiata</i>	1.21(0.20)	4.87(0.73)	1.02(0.25)	2.90(0.93)	-15.7	-40.5
毛黄肉楠 <i>Actinodaphne pilosa</i>	1.20(0.40)	4.87(1.54)	1.12(0.14)	3.47(0.33)	-6.7	-28.7
铁力木 <i>Mesua ferra</i>	1.19(0.34)	3.27(0.57)	1.52(0.11)	1.65(0.29)	27.7	-49.5
仪花 <i>Lysidice rhodostegia</i>	1.19(0.50)	5.62(1.57)	0.54(0.17)	0.56(0.34)	-54.6	-90.0
猫尾木 <i>Dolichandrone cauda-felina</i>	1.19(0.21)	3.87(0.07)	0.74(0.14)	2.69(0.10)	-37.8	-30.5
幌伞枫 <i>Heterocarpus hypargyreus</i>	1.16(0.29)	8.12(2.49)	0.64(0.04)	3.33(0.46)	-44.8	-59.0
灰木莲 <i>Manglietia glauca</i>	1.09(0.73)	6.52(2.89)	1.63(0.61)	0.83(0.33)	49.5	-87.3
蝴蝶树 <i>Heritiera parvifolia</i>	1.08(0.27)	3.04(0.27)	0.70(0.19)	1.56(0.14)	-35.2	-48.3
石笔木 <i>Tutcheria spectabilis</i>	1.05(0.12)	2.44(0.25)	1.29(0.19)	3.03(0.23)	22.9	24.2
灰莉 <i>Fagraea ceilanica</i>	0.92(0.21)	4.75(1.50)	0.41(0.17)	3.47(0.87)	-55.4	-26.9
日本杜英 <i>Elaeocarpus japonicus</i>	0.80(0.03)	6.32(0.65)	1.10(0.11)	2.96(0.34)	37.5	-54.7
海南木莲 <i>Manglietia hainanensis</i>	0.63(0.22)	5.85(1.25)	0.66(0.17)	2.37(0.81)	4.8	-59.5

*E (或 WUE) 为 4-5 片叶的平均值, 括号内的数值为标准差。Values of E (or WUE) represent means with standard errors in brackets(n=4-5).

**ΔE (或 ΔWUE) 是根据 $\Delta Y(\%) = (Y_p - Y_c) / Y_c \times 100\%$ 计算得到。其中 ΔY 代表植物蒸腾速率 E (或蒸腾效率 WUE) 变化的相对百分数, Y_p 和 Y_c 分别为污染区和清洁区同种植物的 E (或 WUE)。ΔE (或 ΔWUE) is calculated by $\Delta Y(\%) = (Y_p - Y_c) / Y_c \times 100\%$. ΔY represents the relative change of E (or WUE); Y_p and Y_c represent values of E (or WUE) from the polluted and clean sites for the same species, respectively.

其它非气孔因素如光合器、细胞膜和光系统 II 活性等生物化学调节可能更重要。例如, 苏行等报道了污染胁迫可导致膜系统完整性、叶绿素含量以及光系统 II 活性的下降^[8]。相反, 红桂木、火焰木、密花

树、华润楠、大头茶、傅园榕、小叶榕和环榕则以 g_s 下降的幅度明显高于其 P_n 下降的幅度。其它种类 (石笔木除外) 的 P_n 和 g_s 变化幅度基本一致, 体现出二者对污染胁迫的协同响应特征。

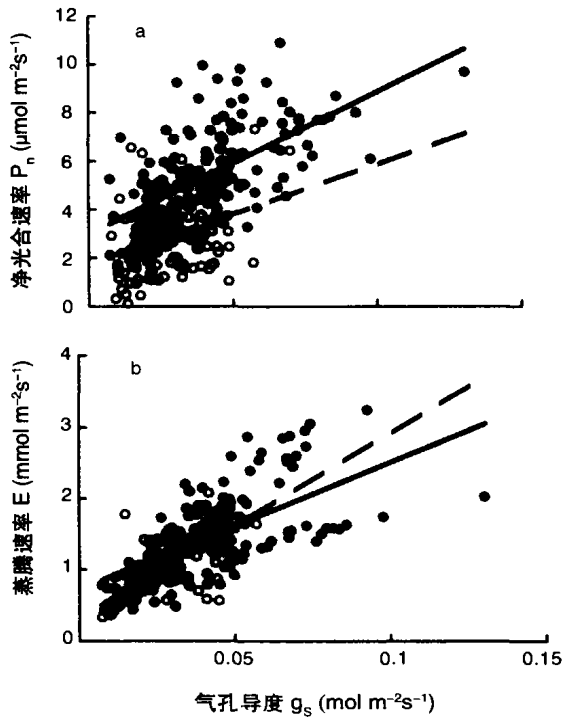


图 1 清洁区(—●—)和污染区(—○—)植物净光合速率 P_n (a)、蒸腾速率 E (b) 与气孔导度之间的相关关系。

Fig. 1 Relationships of net photosynthetic rate (P_n) (a) and transpiration rate (E) (b) with stomatal conductance (g_s) at the clean (—●—) and the polluted site (—○—).

清洁区对应方程分别为: $P_n=58.67g_s+2.97$ ($R^2=0.374$, $n=286$), $E=17.87g_s+0.72$ ($R^2=0.390$, $n=286$); 污染区分别为 $P_n=41.82g_s+1.70$ ($R^2=0.13$, $n=286$), $E=26.36g_s+0.295$ ($R^2=0.569$, $n=286$) Equations are $P_n=58.67g_s+2.97$ ($R^2=0.374$, $n=286$), $E=17.87g_s+0.72$ ($R^2=0.390$, $n=286$) for clean site, and $P_n=41.82g_s+1.70$ ($R^2=0.13$, $n=286$), $E=26.36g_s+0.295$ ($R^2=0.569$, $n=286$) for polluted site

3 讨论

3.1 不同植物种类叶气体交换特征的差异

植物叶片 P_n 、 g_s 和 E 因种类不同存在较大差异。在清洁区, 柳叶楠、幌伞枫、山玉兰、海南红豆、红花木莲、华润楠、刺果番荔枝、大头茶、小叶胭脂、红桂木、傅园榕、桂花、火焰木和竹节树比其它种类有较高的气孔导度和相对较高的光合速率, 提示气孔从大气中吸收更多的 CO_2 的同时, 也吸收了大量的 SO_2 和 HF 等气体污染物, 受污染伤害的风险更大。虽然有报道指出叶片气孔开张度越大, SO_2 等污染气体越容易进入到植物体, 对植物造成更大的危害, 蒋高明也从叶片 S 含量与大气 SO_2 浓度、气孔阻力的模型中证实气体污染物主要通过气孔进入植物^[13]。然而, 傅园榕、火焰木、华润楠等种类虽有较高的 g_s , 但仍然表现出相对较高的耐受能力, 并

不意味着其受损害的程度更大, 温达志等^[7]也曾报道类似的结果。

3.2 大气污染胁迫下不同植物叶气体交换特征参数的变化

和相对洁净区比较, 污染胁迫下大多数种类的 P_n 和 g_s 是下降的, 下降幅度因植物种类的不同而异。理论上, 在环境良好条件下植物必须最大程度地开放气孔, 以最大程度地通过光合作用固定最大数量的 CO_2 ^[12, 14]。然而, 事实并不完全如此, 因为胁迫环境下气孔开放程度大除导致水分过度蒸腾以致植物失水过多而受到伤害外^[12], 污染气体浓度高的环境下更多的污染物通过气孔进入植物体, 增加植物受到伤害的风险。因此, 认为植物可以通过不间断地感应环境和调节气孔至适当的开度, 来减少吸入污染物以及避免水分过度蒸腾的同时, 维持 CO_2 的吸收和固定, 以适应于胁迫生境, 如本实验中的多数植物种类均表现出在 g_s 下降的同时伴随着 P_n 和 E 的下降, 表现出较强的适应能力, 尤其以红桂木、密花树、无忧树、刺果番荔枝、山玉兰、柳叶楠和幌伞枫等种类明显(表 2、表 3)。

3.3 植物对大气污染的敏感性分析

污染胁迫下植物 P_n 下降的幅度越大表明通过光合作用固定 CO_2 的量越少, 从而影响叶生物量以及光合产物供应到其它组织器官的速率和数量。当污染胁迫使整株植物呼吸消耗大于叶片光合生产的碳总量时, 植物面临衰退, 甚至死亡。另一方面, 在大气污染达到毒害浓度水平下, 田间生长的植物常常表现出水分胁迫症状^[15]。Godzik 和 Piskornik 发现位于工业 SO_2 污染源附近生长的七叶树 (*Aesculus hippocastanum*) 的离体叶比在未受污染条件下生长的树木萎焉速度快得多^[16]。Black 报道暴露在 17 ppb SO_2 下的植物气孔导度提高了 20%–25%, 并给出了机理性解释—气孔开度的提高与气孔周围上表皮保卫细胞的损害及气孔阻力降低有关, 这一结果随后得到 Neighbour 等实验的支持^[17]。因此, 按照 P_n 以及 E 和 WUE 的变化, 可以将植物对大气污染响应的敏感程度分为: (1) 高度敏感组, 包括仪花、灰木莲、格木、阿丁枫、白桂木、海南木莲、白木香和海南红豆 8 种, 其共同特点是污染胁迫导致 P_n 下降显著、且程度远高于 E 下降的幅度, 甚至有些种类 E 表现为增加, 从而导致水分利用效率的明显下降。这类植物面临 C 固定与积累的下降导致生长衰退以及蒸腾引起水分过度散失的

双重胁迫,表现为自我调节和防御能力差,对污染十分敏感。(2)中度敏感组,包括幌伞枫、无忧树、红花木莲、小叶胭脂、蝴蝶树、山玉兰、灰莉、柳叶楠、刺果番荔枝、厚皮香、猫尾木、红桂木、竹节树、红花油茶、观光木、桂花、铁冬青、日本杜英、火焰木、铁力木和密花树 21 个种,这组植物总体上表现为 P_n 下降幅度中等,且伴随不同程度的 E 下降,比高度敏感组植物有较好协同适应策略。(3)轻度敏感组,包括毛黄肉楠、华润楠、吊瓜木、大头茶、茶花、傅园榕、小叶榕、环榕、菩提榕和石笔木 10 个种,其特点是污染胁迫下 P_n 降幅较小以及 E 不同程度的下降。其中,菩提榕和石笔木在污染环境下 E 表现为增加,但 P_n 增幅更大,因此仍然认为其对污染胁迫有较强的适应能力而归于轻度敏感组。

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 Plant [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1988. (in Chinese)
- [2] Liu Y Y (刘燕云), Cao H F (曹洪法), Shu J M (舒剑民), et al. CO₂ dose-response of five species of crops and their acute injury threshold[J]. China Envir Sci (中国环境科学), 1989, 9 (3): 183-190. (in Chinese)
- [3] Gao X P (高绪平), Cao H F (曹洪法), Shu J M (舒剑民). Responses of 105 plant species to simulated sulfuric acid rain [J]. China Envir Sci (中国环境科学), 1987, 7 (2): 16-20. (in Chinese)
- [4] Chen, S Y (陈树元), Xu H B (徐和宝), Shi J W (史建文), et al. Responses of 110 tree species to simulated acid rain sulfuric dioxide exposure alone and in combination[J]. Chin J Appl Envir Biol (应用与环境生物学报), 1997, 3 (3): 199-203. (in Chinese)
- [5] Fan H B (樊后保), Zang R G (藏润国), Kosuke W. Responses of seeds and seedlings of *Ligustrum lucidum* to simulated acid rain [J]. Sci Silv Sin (林业科学), 2000, 36(6):89-94. (in Chinese)
- [6] Wen D Z (温达志), Zhu J Y (朱剑云), Cao H L (曹洪麟), et al. Responses of seedlings of three *Acacia* species exposed to short-term air pollution[J]. Ecol Sci (生态科学), 2002, 21 (4): 306-309. (in Chinese)
- [7] Wen D Z (温达志), Kong G H (孔国辉), Zhang D Q (张德强), et al. Ecophysiological responses of 30 gardens 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)
- [8] 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)
- [9] Peng C L (彭长连), Wen D Z (温达志), Sun Z J (孙梓健), et al. Responses 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)
- [10] Ministry of Urban and Rural Construction and Environmental Protection. Analytical Method for Environmental Monitoring [M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1986, 201-205, 221-223.
- [11] Eamus D. The interaction of rising CO₂ and temperatures with water use efficiency [J]. Plant Cell Envir, 1991, 14:843-852.
- [12] Farquhar G, Schulze E D, Koppers M. Responses to humidity by stomata of *Nicotiana glauca* and *Corylus avellana* are consistent with the optimization of carbon dioxide uptake with respect to water loss [J]. Aust J Plant Physiol, 1980, 7:315-327.
- [13] Jiang G M (蒋高明). 1995. Research on quantitative models for bio-monitoring and bioassessing air pollution by sulfur content in plants [J]. China Envir Sci (中国环境科学), 1995, 15 (3): 208-214. (in Chinese)
- [14] Buckley T N, Farquhar G D, Mott K A. Carbon-water balance and patchy stomatal conductance [J]. Oecologia, 1999, 118:132-143.
- [15] Mansfield T A. Stomatal and plant water relations: does air pollution create problems? [J] Envir Pollut, 1998, 101:1-11.
- [16] Godzik S, Piskornik Z. Transpiration of *Aesculus hippocastanum* L. leaves from areas of various air pollution [J]. Bull Polish Acad Sci (Series B), 1966, 14:181-184.
- [17] Neighbour E A, Cottam D A, Mansfield T A. Effects of sulphur dioxide and nitrogen dioxide on the control of water loss by birch (*Betula* spp.) [J]. New Phytol, 1988, 108:149-157.