

30 种园林植物对短期大气污染的生理生态反应

温达志¹ 孔国辉¹ 张德强¹ 彭长连¹ 张瑞凤² 黎旭²

(1 中国科学院华南植物研究所, 广州 510650)

(2 广东省环境保护局, 广州 510045)

摘要 30 种 2~3 年生园林植物分别盆栽于不同污染强度的工业生产区、交通繁忙区和相对清洁区, 在第一生长季结束后对各试验区植物叶片气体交换特征参数进行测定, 评价了大气污染对不同植物种类的可能影响效果。结果表明: 工业污染区和交通繁忙区均有较高的 SO₂ 浓度, 交通繁忙区 NO_x 浓度明显高于其它试验区。根据综合污染指数, 3 个试验区污染强度为交通繁忙区 > 工业污染区 > 相对清洁区。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有较大差异。植物 P_n、E 与 g_s 之间存在显著线性相关关系, 表明多数植物能够感应污染胁迫和调节气孔开张度, 是植物对胁迫环境的一种适应策略。但是污染胁迫下 P_n、E 与 g_s 线性相关的显著程度被削弱, 表现出污染胁迫下不同植物种类 P_n 和 E 的变化与 g_s 变化的不协同性和复杂性。根据 P_n 下降程度可将植物分组为轻度敏感(11 种)、中度敏感(11 种) 和高度敏感植物(8 种)。

关键词 园林植物 大气污染 气体交换特征参数 敏感性分析

ECOPHYSIOLOGICAL RESPONSES OF 30 GARDENS PLANT SPECIES EXPOSED TO SHORT-TERM AIR POLLUTION

WEN Da-Zhi¹ KONG Guo-Hui¹ ZHANG De-Qiang¹ PENG Chang-Lian¹ ZHANG Rui-Feng² and LI Xu²

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

(2 Guangdong Environmental Protection Bureau, Guangzhou 510045, China)

Abstract Air pollution is a major environmental problem in cities. Much progress have been achieved in air monitoring and quality assessment at regional and national level based on emission inventories and measurements of ambient air concentrations taken by physical and chemical methods. The results of ambient air measurements make it possible to decide whether or not to limit the emission of certain pollutants. However, they do not permit direct conclusions on the effects of the measured pollutant concentrations on living organisms. The purpose of this study is to test the sensitivity of 30 2-3 year-old garden species transplanted into pots and exposed to differently polluted sites for 4 months during the growing season. Measurements on gas exchange parameters were made by using LCA-4 photosynthesis system. Based on these measurements, assessments of possible effects of air pollution on plants and their tolerance were also made. Monitoring data showed that the heavy traffic area received a much higher concentration of NO_x than the industrial site, and both sites had high concentrations of SO₂. The sites can be categorized from heavy to less pollution level in the order of heavy traffic area, industrial area, and relatively clean area by using an integrated pollution index. The P_n, E, g_s differed among species and decreased for most species under polluted area. The P_n and E were closely linearly correlated with the g_s under the relative clean site and polluted site, suggesting that most species had the ability to adapt to the pollution stress by adjusting stomatal operation. The evidence that the correlation of the P_n and E with g_s had been weakened under the pollution stress also showed the unparallel nature and complexity in changes of P_n, E and g_s. Based on the change in P_n, plants might be ranked as follows by their sensibility to air pollution: species that exhibited high sensitivity included *Michelia maudiae*, *Allemanda schottii*, *Cratogeomys trifoliata*, *Magnolia delavayi*, *Bischoffia jaccanica*, *Lysidice rhodostegia*, *Michelia macclurei* and *Hibiscus rosa-sinensis*. Species showing moderate sensitivity were *Tristania conferta*, *Bombax ceiba*, *Schefflera arboricola*, *Elaeocarpus hainanensis*, *Manglietia hainanensis*, *Elaeocarpus apiculatus*, *Swietenia mahagoni*, *Sterculia lanceolata*, *Fagraea ceilanica*, *Manifera persiciformis* and *Ficus macrocarpa*, and those showing low sensitivity included *Pittosporum tobira*, *Ficus altissima*, *Ficus microcarpa*, *Kigelia africana*, *Ficus benjamina*, *Mimusops elengi*, *Ormosia pinnata*, *Ficus elastica*, *Acmena acuminatissima*, *Nerium indicum* and *Ilex rotunda*.

收稿日期: 2002-02-04 接受日期: 2002-05-31

基金项目: 广东省环保局基金项目(1998, 200010) 和广东省自然科学基金项目(990762)

E-mail: dzwen@scib.ac.cn

Key words Gardens plants , Air pollution , Gas exchange measurements , Sensitivity analysis

大气污染已经成为城市的一个主要环境问题。随着经济的高速发展和工业化进程的加快,对石油、天然气等能源的需求不断增大,导致近地高空大气SO₂、NO_x和悬浮颗粒物等污染成分的浓度不断升高,从而威胁人类健康,损害动植物类群(Jones, 1983)。这些负面影响尤其在大都市高频率发生(黄清风等,1999),污染造成的损失更加严重。以检测大气污染物排放种类、通过物理和化学方法监测大气污染物浓度为基础的大气环境质量评估系统无论在地方还是国家层次上都日趋完善,并积累了丰富的数据,为环保部门决策是否控制或限制某种污染物排放提供了指南。然而,大气监测结果尝不能直接给出或推论被测定污染物对生物的影响效果。因此,通过合理的实验设计和测定,了解大气污染对生物的影响是十分重要的。有研究者曾经借助模拟实验来探讨大气污染(刘燕云等,1989;孔国辉,1988;陈树元等,1997),或其后续产物酸雨对植物的伤害(高绪平等,1987;陈树元等,1997)。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和程度等级划分,有些研究也涉及叶片叶绿素含量、细胞膜透性等生理指标的测定(樊后保等,2000)。自然环境中污染物通常不是以单一气体,而是以复合形式出现,且污染物组分常常发生变化。有证据表明,人工熏气阈值浓度下表现出严重伤害症状的植物在工业污染区却表现出很强的抗性(孔国辉,1988)。这就给我们一个重要的启示即人工模拟实验所取得的结果并不一定完全准确可靠,通过野外污染现场的定位观测和比较研究来检验模拟结果是非常必要的。

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响应。这种响应能够反映大气污染引起植物维持其生物学过程中的重要变化。而且其突出的优点是这些生理变化在明显的伤害症状如叶组织损伤出现之前就可以被检测到。本项目选择在绿化中已经推广应用但缺乏抗污染证据的园林植物或具有开发潜力的乡土常绿阔叶植物,在不同污染现场进行盆栽,定期进行生物学特性和生理学参数的测定,为不同植物种类抗污染能力的差异以及污染胁迫下植物抗污染的机理及其适应性提供证据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

根据广州市大气环境监测资料(图1)和主要大气污染物浓度分布在广州市区的状况,选择3个地点进行苗木盆栽实验,即工业污染区(广雅中学)、交通繁忙区(越秀区公安分局)和相对洁净区(麓湖公园)。各试验点大气环境资料来自广州市环境质量报告书。

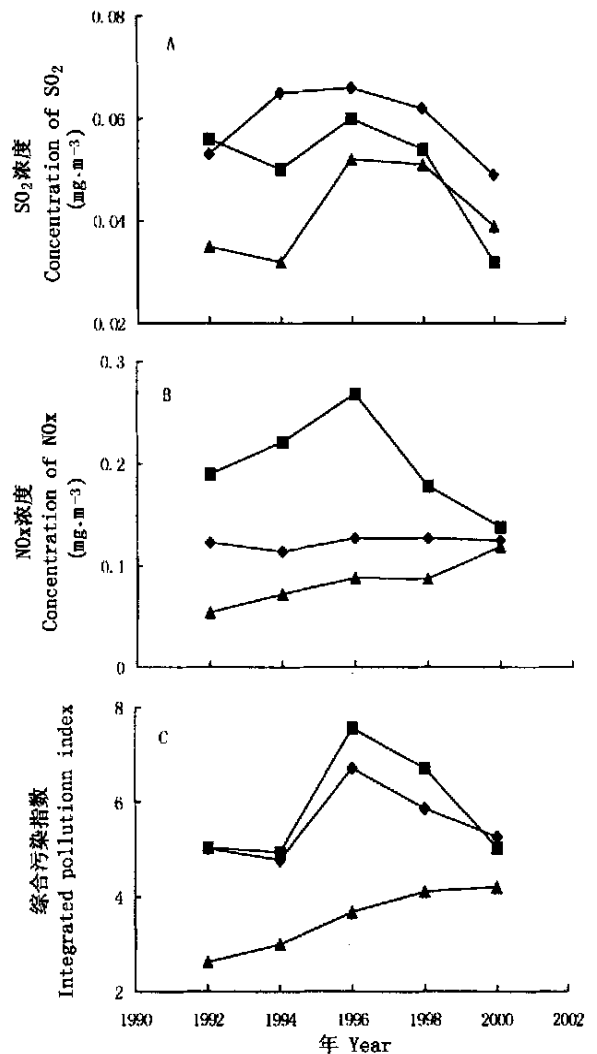


图1 广州市相对清洁区(○)、工业污染区(■)、交通繁忙区(▲) 1992~2000年间大气SO₂(A)浓度、NO_x(B)浓度和综合污染指数(C) Fig.1 The concentration of atmospheric SO₂(A), NO_x(B) and integrated pollution index (C) in sites of relatively clean area (○), heavy traffic area (■) and industrial area (▲) in Guangzhou city

广州环境监测中心. 2001. 广州市环境质量技术报告(1992~2000).

1.2 材料与方法

被试验的植物种类见表 1。1999 年春季从华南植物园苗圃地选择 2~3 年生带土袋苗,进行盆栽。盆中央内径为 30 cm、盆内土层厚度 25 cm。盆苗经过两周相同土壤基质、光照和水管理适应后,于 5 月底分别放置在每个试验区,每种植物 3~4 盆,同种植物苗龄、高度、基径和长势情况基本相同,水分

表 1 试验用植物种类
Table 1 Plant species for experiment

种名 Species	
肖蒲桃 <i>Acmena accuminatissima</i>	扁桃 <i>Magifera persiciformis</i>
黄蝉 <i>Allemanda schottii</i>	深山含笑 <i>Michelia maudiae</i>
秋枫 <i>Bischoffia jacanica</i>	红花夹竹桃 <i>Nerium indicum</i>
木棉 <i>Bombax ceiba</i>	海南红豆 <i>Ormosia pinnata</i>
尖叶杜英 <i>Elaeocarpus apiculatus</i>	海桐 <i>Pittosporum tobira</i>
水石榕 <i>Elaeocarpus hainanensis</i>	假苹婆 <i>Sterculia lanceolata</i>
灰莉 <i>Fagraea ceilanica</i>	桃花心木 <i>Swietenia mahagoni</i>
高山榕 <i>Ficus altissima</i>	海南木莲 <i>Manglietia hainanensis</i>
垂枝榕 <i>Ficus benjamina</i>	黄榕 <i>Ficus macrocarpa</i> L. f. cv. Golden Leaves
印度榕 <i>Ficus elastica</i>	火力楠 <i>Michelia macclurei</i>
小叶榕 <i>Ficus microcarpa</i>	红胶木 <i>Tristania confera</i>
大红花 <i>Hibiscus rosa-sinensis</i>	牛乳树 <i>Mimusops elengi</i>
铁冬青 <i>Ilex rotunda</i>	鹅掌藤 <i>Schefflera arboricola</i>
吊瓜树 <i>Kigelia africana</i>	山木兰 <i>Magnolia delavayi</i>
仪花 <i>Lysidice rhodostegia</i>	赤果鱼木 <i>Crateva trifoliata</i>

管理措施一致。本实验没有进行追肥,因施肥可能补偿污染胁迫对植物的影响效应,从而掩盖其真实作用结果。9 月底进行生物学特性的观测和生理生态学指标的测定。

1.3 叶片气体交换参数的测定

使用便携式 LCA₄ 光合-蒸腾系统(ADC, 英国)测定叶片气体交换参数,叶室进气口与离地 3 m 的气杆连接。每个试验区上植物的测定在 9:00~11:00 内完成,这一时段内叶面入射光强和叶面温度相对较稳定一致。3 个试验区上的测定在一周内几个连续晴朗的天气内完成。测定参数包括净光合速率(P_n)、蒸腾速率(E)、气孔导度(g_s),连同叶室光强(Q_{ch})、叶面入射光强(Q_{leaf}),叶室(T_{ch})、叶面温度(T_{leaf})等环境因子同时测定记录。每个试验区上的每个树种共测定 6 片叶,即 6 次重复。

2 实验结果

2.1 试验点大气质量状况

从图 1(A、B)可见,无论是工业污染区还是交通繁忙区,SO₂ 和 NO_x 的浓度都维持较高的水平,在 1994~1996 年间呈上升趋势,且差异尤其明显。而且,交通繁忙区由于机动车燃烧排放大量尾气使

NO_x 浓度明显高于 SO₂ 浓度,是形成污染的主要贡献因子。从综合污染指数看(图 1C),工业区和交通繁忙区受污染程度基本一致,但远比相对洁净区麓湖公园严重。

2.2 植物净光合速率(P_n)与气孔导度(g_s)的变化

在相对洁净区,高山榕(*Ficus altissima*)至仪花(*Lysidice rhodostegia*)的 17 个树种有较高的 P_n ,变化范围为 8.35~13.08 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,对应的 g_s 介于 0.065~0.126 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间;其次是扁桃(*Magifera persiciformis*)至肖蒲桃(*Acmena accuminatissima*)的 8 个种, P_n 和 g_s 分别介于 5.21~7.39 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 0.035~0.079 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间;其余 6 种的 P_n 相对较小,在 5 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,对应的 g_s 介于 0.022~0.045 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间(表 2)。

表 3 为污染条件下植物 P_n 和 g_s 变化的相对差异。在交通繁忙区,深山含笑(*Michelia maudiae*)至秋枫(*Bischoffia jacanica*)的 5 个树种的 P_n 下降最明显,约减少 50% 以上, g_s 下降 41%~78%;其次是仪化至大红花的 14 个树种, P_n 下降约 20.0%~40.0%, g_s 减少 22.2%~44.0%(尖叶杜英(*Elaeocarpus apiculatus*)除外);其余的 11 种下降的幅度较小, P_n 减少 2.1%~16.0%, g_s 减少 5.5%~16.9%,其中少数树种的 P_n 维持相对稳定如肖蒲桃、红花夹竹桃(*Nerium indicum*)和铁冬青(*Ilex rotunda*)。

在工业污染区, P_n 下降约 50% 以上的树种有深山含笑、山木兰(*Magnolia delavayi*)、秋枫、仪化和大红花(*Hibiscus rosa-sinensis*),其 g_s 减少了 37.1%~77.6%; P_n 减少约 20.0%~45.0% 的树种包括黄蝉(*Allemanda schottii*)、赤果鱼木(*Crateva trifoliata*)、鹅掌藤(*Schefflera arboricola*)、水石榕(*Elaeocarpus hainanensis*)、海南木莲(*Manglietia hainanensis*)、灰莉(*Fagraea ceilanica*)、扁桃、火力楠(*Michelia macclurei*)、黄榕(*Ficus macrocarpa*)和牛乳树(*Mimusops elengi*),对应的 g_s 下降了 20.0%~48.8%;大红花、黄蝉(*Bombax ceiba*)、火力楠、秋枫、赤果鱼木和仪花, P_n 减少约 50%;扁桃、海南木莲、蝴蝶果、黄榕、灰莉、假苹婆(*Sterculia lanceolata*)、尖叶杜英、红胶木(*Tristania confera*)、木棉、牛乳树、鹅掌藤、水石榕、桃花心木(*Swietenia mahagoni*)的 P_n 下降 20.0%~40.0% 之间;木棉、尖叶杜英、桃花心木、假苹婆、海桐(*Pittosporum tobira*)、高山榕(*Ficus altissima*)、小叶榕(*Ficus microcarpa*)、吊瓜树(*Kigelia africana*)、海南红豆(*Ormosia pinnata*)、印度榕(*Ficus elastica*)、肖蒲桃、红

表 2 不同污染条件下植物净光合速率(P_n)与气孔导度(g_s)的比较Table 2 The comparison of net photosynthetic rate (P_n) and stomatal conductance (g_s) in leaves of plants growing under different polluted sites

种名 Species *	相对洁净区 Relatively clean area		交通繁忙区 Heavy traffic area		工业污染区 Industrial area	
	净光合速率 P_n^{**}	气孔导度 g_s^{**}	净光合速率 P_n^{**}	气孔导度 g_s^{**}	净光合速率 P_n^{**}	气孔导度 g_s^{**}
	($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
高山榕	13.08(1.37)	0.098(0.00)	11.04(1.26)	0.083(0.02)	11.25(1.24)	0.087(0.02)
赤果鱼木	12.60(0.89)	0.126(0.03)	5.87(0.65)	0.057(0.02)	8.76(0.86)	0.089(0.02)
海桐	11.89(1.45)	0.098(0.08)	9.99(2.10)	0.089(0.02)	10.87(1.64)	0.95(0.02)
灰莉	11.48(1.07)	0.090(0.08)	8.92(1.33)	0.070(0.02)	8.23(1.61)	0.064(0.01)
水石榕	11.05(1.12)	0.090(0.01)	7.68(2.07)	0.066(0.01)	6.56(1.42)	0.064(0.01)
深山含笑	10.27(0.47)	0.098(0.02)	3.27(0.89)	0.024(0.00)	2.87(0.78)	0.022(0.01)
红花夹竹桃	10.02(1.43)	0.098(0.01)	10.08(1.61)	0.092(0.02)	8.48(3.25)	0.095(0.02)
海南红豆	9.84(0.85)	0.086(0.01)	9.02(3.01)	0.078(0.04)	8.57(1.81)	0.071(0.12)
木棉	9.70(2.51)	0.077(0.01)	6.52(2.65)	0.047(0.03)	8.05(1.86)	0.059(0.01)
黄榕	9.57(1.00)	0.084(0.03)	7.70(2.37)	0.052(0.01)	5.93(0.78)	0.043(0.00)
印度榕	9.14(1.28)	0.065(0.01)	8.75(1.13)	0.054(0.01)	8.52(2.19)	0.048(0.01)
山木兰	8.88(2.07)	0.089(0.01)	4.56(1.25)	0.041(0.01)	2.53(1.14)	0.022(0.01)
秋枫	8.84(3.42)	0.073(0.03)	4.54(1.12)	0.043(0.02)	4.11(1.08)	0.035(0.01)
牛乳树	8.73(1.53)	0.072(0.01)	7.92(2.51)	0.077(0.01)	6.38(1.62)	0.044(0.01)
吊瓜树	8.52(1.31)	0.071(0.01)	7.46(2.32)	0.066(0.02)	7.15(1.30)	0.062(0.01)
黄蝉	8.39(0.45)	0.093(0.02)	3.45(0.57)	0.046(0.01)	5.99(1.01)	0.055(0.01)
仪花	8.35(2.68)	0.072(0.01)	5.08(1.09)	0.053(0.02)	4.09(1.25)	0.042(0.02)
扁桃	7.39(0.67)	0.079(0.02)	5.78(0.71)	0.052(0.003)	5.22(0.74)	0.049(0.01)
海南木莲	7.25(0.63)	0.078(0.04)	5.35(0.57)	0.052(0.01)	4.90(0.71)	0.044(0.01)
尖叶杜英	6.92(1.83)	0.055(0.02)	5.22(1.60)	0.049(0.02)	6.16(1.87)	0.051(0.02)
红胶木	6.85(2.02)	0.075(0.02)	4.50(1.23)	0.042(0.02)	6.40(2.43)	0.070(0.03)
假苹婆	6.80(0.31)	0.058(0.01)	5.24(1.71)	0.038(0.01)	6.36(1.32)	0.055(0.01)
小叶榕	6.66(0.74)	0.035(0.01)	5.66(0.36)	0.04(0.00)	5.89(0.38)	0.043(0.01)
垂枝榕	6.12(0.99)	0.066(0.01)	5.45(0.09)	0.057(0.01)	6.15(1.82)	0.079(0.02)
肖蒲桃	5.21(0.46)	0.055(0.01)	5.10(0.11)	0.052(0.01)	4.40(0.50)	0.048(0.01)
铁冬青	4.83(0.83)	0.052(0.01)	4.87(0.07)	0.051(0.00)	4.31(0.28)	0.045(0.01)
鹅掌藤	4.38(1.21)	0.04(0.01)	2.97(0.37)	0.030(0.01)	3.22(0.23)	0.032(0.01)
大红花	4.06(0.77)	0.035(0.00)	3.29(0.75)	0.026(0.01)	1.70(0.73)	0.022(0.00)
桃花心木	3.90(1.72)	0.043(0.02)	2.97(0.93)	0.03(0.01)	3.54(1.67)	0.035(0.01)
火力楠	2.52(0.58)	0.028(0.00)	1.97(1.40)	0.02(0.01)	1.39(0.30)	0.021(0.00)

*. 树种拉丁名见表 1 The Latin name for each species is listed in Table 1 ** P_n 和 g_s 分别为每种植物对应处理下 6 片叶的平均值, 括号内的数值为标准差 P_n and g_s are indicated by the mean of six leaves for each species under each corresponding treatment with standard error in parenthesis, respectively

花夹竹桃和铁冬青的 P_n 下降幅度较小, 减少约 15% 以下。

2.3 植物蒸腾速率(E)与水分利用效率(WUE)比较

表 4 可见, 在相对洁净区, 根据 E 值大小将植物分成以下几个不同的组: 海桐、红花夹竹桃和赤果鱼木的 E 最大, 其值在 $3.67 \sim 3.84 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 之间; 深山含笑至高山榕的 12 个树种次之, 介于 $2.52 \sim 3.27 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 之间; 黄榕至尖叶杜英的 9 种介于 $1.98 \sim 2.35 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 之间; 其余的 7 种最小, 在 $1.0 \sim 1.72 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 之间。

在交通繁忙区, 深山含笑、山木兰的 E 下降最为明显, 在 50% 以上; 其次是假苹婆至海南木莲的 7 个树种, E 减少了 25.9% ~ 38.5%; 秋枫至火力楠的

11 种下降幅度为中等, 减少了 11.0% ~ 22.8%; 其余 10 种减少的幅度最小, 在 10.0% 以下, 其中少数种类如大红花、蝴蝶果出现轻微上升。

在工业污染区, E 下降最明显的也是深山含笑和山木兰, 减少了 60% 以上; 红花夹竹桃、红胶木、海南木莲、秋枫、灰莉、扁桃、火力楠次之, 降幅在 22.7% ~ 43.5% 之间; 木棉、黄蝉、水石榕、鹅掌藤、铁冬青、肖蒲桃、牛乳树、大红花降幅中等, 减少 10.3% ~ 20.4%; 其余 13 个树种减少幅度在 10.0% 以下。

生理学意义上定义叶片净光合速率(P_n)与蒸腾速率(E)的比值(P_n/E)为瞬时蒸腾效率又称水分利用效率 WUE (Eamus, 1991), 表征为

表 3 污染环境下与相对洁净区植物净光合速率、气孔导度变化的相对差异

Table 3 The relative differences in P_n and g_s of plants growing under polluted sites and those under relatively clean sites

种名 Species *	交通繁忙区 Heavy traffic area		工业污染区 Industrial area		种名 Species *	交通繁忙区 Heavy traffic area		工业污染区 Industrial area	
	变化百分率 Percent in changes					变化百分率 Percent in changes			
	P_n **	g_s **	P_n **	g_s **		P_n **	g_s **	P_n **	g_s **
深山含笑	- 68.2 %	- 75.5 %	- 72.1 %	- 77.6 %	扁桃	- 21.8 %	- 34.2 %	- 29.4 %	- 38.0 %
黄蝉	- 58.9 %	- 50.5 %	- 28.6 %	- 40.9 %	火力楠	- 21.8 %	- 28.6 %	- 44.8 %	- 25.0 %
赤果鱼木	- 53.4 %	- 54.8 %	- 30.5 %	- 29.4 %	黄榕	- 19.5 %	- 38.1 %	- 38.0 %	- 48.8 %
山木兰	- 48.6 %	- 53.9 %	- 71.5 %	- 75.3 %	大红花	- 19.0 %	- 25.7 %	- 58.1 %	- 37.1 %
秋枫	- 48.6 %	- 41.1 %	- 53.5 %	- 52.1 %	海桐	- 16.0 %	- 9.2 %	- 8.6 %	- 3.1 %
仪花	- 39.2 %	- 26.4 %	- 51.0 %	- 41.7 %	高山榕	- 15.6 %	- 15.3 %	- 14.0 %	- 11.2 %
红胶木	- 34.3 %	- 44.0 %	- 6.6 %	- 6.7 %	小叶榕	- 15.0 %	14.3 %	- 11.6 %	22.9 %
木棉	- 32.8 %	- 39.0 %	- 17.0 %	- 23.4 %	吊瓜树	- 12.4 %	- 7.1 %	- 16.1 %	- 12.7 %
鹅掌藤	- 32.2 %	- 25.0 %	- 26.5 %	- 20.0 %	垂枝榕	- 10.9 %	- 13.6 %	0.5 %	19.7 %
水石榕	- 30.5 %	- 26.7 %	- 40.6 %	- 28.9 %	牛乳树	- 9.3 %	6.9 %	- 26.9 %	- 38.9 %
海南木莲	- 26.2 %	- 33.3 %	- 32.4 %	- 43.6 %	海南红豆	- 8.3 %	- 9.3 %	- 12.9 %	- 17.4 %
尖叶杜英	- 24.6 %	- 10.9 %	- 11.0 %	- 7.3 %	印度榕	- 4.3 %	- 16.9 %	- 6.8 %	- 26.2 %
桃花心木	- 23.8 %	- 30.2 %	- 9.2 %	- 18.6 %	肖蒲桃	- 2.1 %	- 5.5 %	- 15.5 %	- 12.7 %
假苹婆	- 22.9 %	- 34.5 %	- 6.5 %	- 5.2 %	红花棧	0.6 %	- 6.1 %	- 15.4 %	- 3.1 %
灰莉	- 22.3 %	- 22.2 %	- 28.3 %	- 28.9 %	铁冬青	0.8 %	- 1.9 %	- 10.8 %	- 13.5 %

* 树种拉丁名见表 1 The Latin name for each species is listed in Table 1 ** P_n (或 g_s) 根据 $Y_i(\%) = (Y_i - Y_0) / Y_0 \times 100\%$ 计算得到, 其中 Y_i 代表第 i 种植物净光合速率 P_n (或气孔导度 g_s) 变化的相对百分数, Y_i, Y_0 为污染条件下和相对洁净区的 P_n (或 g_s) P_n (或 g_s) is calculated by $Y_i(\%) = (Y_i - Y_0) / Y_0 \times 100\%$. Y_i, Y_0 represent the relative change of P_n (or g_s), the P_n (or g_s) obtained from polluted sites and relatively clean site for the i species, respectively

表 4 不同污染环境下植物蒸腾速率 (E) 与水分利用效率 (WUE) 的比较

Table 4 The comparison of transpiration rate (E) and transpiration efficiency (WUE) among plants growing under different polluted sites

树种 Species *	相对洁净区 Relatively clean area		交通繁忙区 Heavy traffic area		工业污染区 Industrial area	
	蒸腾速率 E ** (mmol · m ⁻² s ⁻¹)	水分利用效率 WUE ** (μmol CO ₂ · mmol ⁻¹ H ₂ O)	蒸腾速率 E ** (mmol · m ⁻² s ⁻¹)	水分利用效率 WUE ** (μmol CO ₂ · mmol ⁻¹ H ₂ O)	蒸腾速率 E ** (mmol · m ⁻² s ⁻¹)	水分利用效率 WUE ** (μmol CO ₂ · mmol ⁻¹ H ₂ O)
	海桐	3.84(0.36)	3.10(0.36)	3.16(0.22)	3.16(0.63)	3.53(0.38)
红花夹竹桃	3.72(0.19)	2.69(0.34)	2.33(0.37)	4.33(0.51)	2.15(0.51)	3.94(0.89)
赤果鱼木	3.67(0.45)	3.43(0.49)	2.45(0.34)	3.11(0.21)	2.92(0.37)	3.00(0.42)
深山含笑	3.27(0.53)	3.14(0.52)	1.28(0.41)	2.56(0.95)	1.25(0.45)	2.30(0.49)
水石榕	3.20(0.22)	3.45(0.53)	2.58(0.34)	2.98(0.55)	2.55(0.34)	2.57(0.35)
海南红豆	3.12(0.30)	3.15(0.56)	2.67(0.73)	3.38(0.57)	2.44(0.36)	3.51(0.58)
黄蝉	3.02(0.56)	2.78(0.42)	2.42(0.28)	1.43(0.32)	2.49(0.28)	2.41(0.38)
海南木莲	3.01(0.66)	2.41(0.38)	2.23(0.43)	2.40(0.34)	1.70(0.14)	2.88(0.57)
山木兰	3.01(0.33)	2.95(0.47)	1.32(0.79)	3.45(1.52)	1.08(0.28)	2.34(1.00)
灰莉	2.92(0.30)	3.93(0.82)	2.33(0.49)	3.83(0.36)	2.03(0.30)	4.05(0.59)
木棉	2.86(0.35)	3.39(0.83)	1.78(0.71)	3.67(0.14)	2.21(0.40)	3.64(0.43)
红胶木	2.74(0.59)	2.50(0.52)	1.76(0.45)	2.56(0.08)	1.73(0.25)	3.70(0.80)
扁桃	2.55(0.40)	2.90(0.67)	2.12(0.09)	2.73(0.40)	1.72(0.25)	3.04(0.16)
秋枫	2.54(0.66)	3.48(0.86)	1.96(0.56)	2.32(0.34)	1.65(0.39)	2.49(0.24)
高山榕	2.52(0.11)	5.19(0.50)	2.33(0.75)	4.74(0.85)	2.36(0.55)	4.77(0.53)
黄榕	2.35(0.43)	4.07(0.54)	2.20(0.27)	3.50(0.85)	2.29(0.41)	2.59(0.59)
吊瓜树	2.33(0.62)	3.66(0.44)	2.15(0.42)	3.47(0.66)	2.32(0.18)	3.08(0.55)
仪花	2.32(0.52)	3.60(0.05)	1.69(0.74)	3.01(0.69)	2.18(0.25)	1.88(0.85)
垂枝榕	2.31(0.28)	2.65(0.44)	2.19(0.79)	2.49(0.79)	2.38(0.45)	2.58(0.34)
假苹婆	2.31(0.28)	2.94(0.22)	1.42(0.25)	3.69(0.64)	2.37(0.40)	2.68(0.08)
肖蒲桃	2.23(0.31)	2.34(0.35)	2.09(0.32)	2.44(0.40)	1.95(0.23)	2.26(0.28)
铁冬青	2.11(0.24)	2.29(0.47)	1.93(0.10)	2.52(0.17)	1.82(0.21)	2.37(0.63)
牛乳树	2.07(0.35)	4.22(0.65)	2.00(0.18)	3.96(0.42)	1.84(0.21)	3.47(0.73)
尖叶杜英	1.98(0.45)	3.49(0.38)	1.71(0.38)	3.05(0.42)	2.12(0.55)	2.91(0.44)
桃花心木	1.72(0.48)	2.27(0.42)	1.40(0.34)	2.12(0.45)	1.60(1.03)	2.21(0.66)
小叶榕	1.57(0.17)	4.24(0.33)	1.49(0.26)	3.80(0.44)	1.70(0.31)	3.46(0.42)
鹅掌藤	1.52(0.18)	2.88(0.56)	1.30(0.21)	2.28(0.80)	1.25(0.17)	2.58(0.21)
印度榕	1.51(0.50)	6.05(0.59)	1.56(0.26)	5.61(0.57)	1.41(0.47)	6.04(0.72)
大红花	1.17(0.18)	3.47(0.83)	1.19(0.29)	2.76(0.57)	1.45(0.20)	1.62(0.63)
火力楠	1.00(0.16)	2.52(0.24)	0.89(0.54)	2.21(0.55)	0.76(0.03)	1.83(0.42)

* 树种拉丁名见表 1 The Latin name for each species is listed in Table 1 ** E 和 WUE 为每种植物种对应处理下 6 片叶的平均值, 括号内的数值为标准差 E and WUE are indicated by the mean of six leaves for each species under each corresponding treatment with standard error in parenthesis, respectively

表5 污染环境下与相对洁净区植物蒸腾速率和水分利用效率变化的相对差异
Table 5 The relative differences in E and WUE of plants growing under polluted sites and those under relatively clean sites

Table with 10 columns: Species, Heavy traffic area (E, WUE), Industrial area (E, WUE), Species, Heavy traffic area (E, WUE), Industrial area (E, WUE). Rows list various plant species like 深山含笑, 山木兰, etc.

*. 树种拉丁名见表1 The Latin name for each species is listed in Table 1 **. E (or WUE) 根据 Yi (%) = (Yi - Y0) / Y0 x 100% 计算得到...

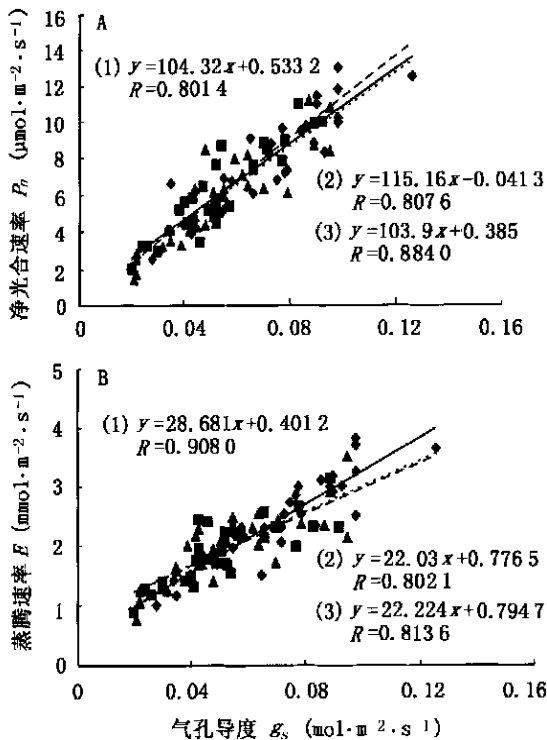


图2 相对洁净区(), 交通繁忙区(- - - -), 工业污染区() 植物净光合速率 Pn(A)、蒸腾速率 E(B) 与气孔导度 gs 之间的相关关系

Fig. 2 The relationship of net photosynthetic rate Pn(A) and transpiration E (B) with stomatal conductance gs under relatively clean area(), heavy traffic area(- - - -) and industrial area() respectively

μmol CO2 mmol-1 H2O, 它能准确反映植物叶片瞬间或短期反应行为。表4可见, 在污染胁迫下少数种

类如红花夹竹桃、红胶木、海南红豆、铁冬青的 WUE 表现为增加, 增幅为 3.5% ~ 61.0%; 深山含笑、仪化、秋枫、黄蝉、水石榕、鹅掌藤、火力楠、黄榕、大红花均表现为明显下降...

3 讨论

3.1 不同树种叶片气体交换参数的比较

植物叶片的 Pn、gs 和 E 因种类不同存在较大差异。在相对清洁区, 高山榕、赤果鱼木、海桐、灰莉、水石榕、深山含笑、红花夹竹桃、海南红豆、木棉、黄榕、印度榕、山木兰、秋枫、牛乳树、吊瓜树和黄蝉有较高的 Pn 和 gs...

3.2 污染环境植物叶片气体参数的变化

和相对洁净区比较,污染环境大多数树种的 P_n 和 g_s 是下降的,下降幅度与植物种类和污染环境的不同而异(表 2,表 3)。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 。然而,事实并不完全如此,因为胁迫环境下气孔开放程度越大导致水分过度蒸腾以致植物失水过多而受到伤害外(Farquhar *et al.*, 1980),同时污染气体浓度高的环境下使更多的污染物通过气孔进入植物体,更易增加植物受伤害的风险。因此,作者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,以减少吸入污染物,同时维持 CO_2 的吸收和固定,以适应于胁迫生境,如本实验中的海桐、高山榕等 11 个树种表现出较强的适应能力。

3.3 植物净光合速率、蒸腾速率与气孔导度的相关关系

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(Farquhar *et al.*, 1980)。因此,理论上植物 P_n 、 E 与 g_s 之间存在密切关系。就本实验结果而言,无论是相对洁净区,还是污染环境下,植物 P_n 、 E 与 g_s 之间均存在良好的线性关系(图 2A、B),表明多数植物都能够通过环境变化来调节气孔的开张度,是植物对胁迫环境的一种适应策略。但是,图 2 中方程(2)和(3)相关系数的下降表明污染胁迫使数据点离散程度增加,两组线性关系的显著程度被削弱。这可能是不同植物种类在胁迫环境下其 P_n 、 E 的变化与 g_s 变化的不协同性所致,如垂枝榕、牛乳树、小叶榕等少数植物在污染环境下 P_n 下降的同时, g_s 则出现不同程度的增加(表 3),红花夹竹桃、铁冬青的 P_n 维持相对稳定,而 g_s 则下降,表现出不同植物种类对污染胁迫的复杂性。

3.4 植物对大气污染的敏感性分析

污染胁迫影响下植物 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。按照这一设想,可以将植物对大气污染响应的敏感程度分为 1)轻度敏感种类,包括表 3 中海桐至铁冬青的 11 个树种,2)中度敏感组包括表 3 中红胶木至扁桃的 10 个种和黄榕,3)高度敏感种类包括表 3 中深山含笑至仪花的 6 种和火力楠、大红花。同时,也表明第三组植物对污染胁迫十分敏感,自身防御能力差,适宜用作大气 SO_2 、 NO_x 污染监测的指示植物;第一组和第二组植物在污染地区植被修复和林分改造方面具有较大的潜力和前景。

参 考 文 献

- Chen, S. Y. (陈树元), H. B. Xu (徐和宝), J. W. Shi (史建文), M. Y. Xie (谢明云), Z. W. Feng (冯宗伟), H. Miao (苗鸿) & H. R. Zhang (张宏瑞). 1997. Responses of 110 species trees to simulated acid rain sulfuric dioxide exposure alone and in combination. *Chinese Journal of Applied Environmental Biology*(应用与环境生物学报), 3:199 ~ 203. (in Chinese with English abstract)
- Eamus, D. 1991. The interaction of rising CO_2 and temperatures with water use efficiency. *Plant, Cell and Environment*, 14:843 ~ 852
- Fan, H. B. (樊后保), R. G. Zang (臧润国) & W. Kosuke. 2000. Responses of seeds and seedlings of *Ligustrum lucidum* to simulated acid rain. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 36(6):89 ~ 94. (in Chinese with English abstract)
- Farquhar, G., E.D. Schulze & M. Koppers. 1980. 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. *Australian Journal of Plant Physiology*, 7:315 ~ 327
- Gao, X. P. (高绪平), H. F. Cao (曹洪法) & J. M. Shu (舒剑民). 1987. Responses of 105 species of plant to simulated sulfuric acid rain. *China Environmental Science* (中国环境科学), 7(2):16 ~ 20. (in Chinese with English abstract)
- Huang, Q. F. (黄清风) & Y. H. Chen (陈煜辉). 1999. Variation of acid rain pollution in Guangzhou area. *Guangzhou Environmental Sciences*(广州环境科学), 14(2):19 ~ 22. (in Chinese)
- Jiang, G.M. (蒋高明). 1995. Research on quantitative models for bio-monitoring and bioassessing air pollution by plant sulfur content methods. *China Environmental Science*(中国环境科学), 15:208 ~ 214. (in Chinese with English abstract)
- Jones, H. 1983. *Plants and microclimate*. Cambridge: Cambridge University Press. 1 ~ 323
- Kong, G. H. (孔国辉). 1988. *Air pollution and plant*. Beijing: China Forestry Publishing House. (in Chinese)
- Liu, Y. Y. (刘燕云), H. F. Cao (曹洪法), J. M. Shu (舒剑民) & Y. X. Gao (高映新). 1989. CO_2 dose-response of five species of crops and their acute injury threshold. *China Environmental Science* (中国环境科学), 9:183 ~ 190. (in Chinese with English abstract)

责任编辑:周广胜 责任编辑:姜联合