

# 交通尾气污染对城市绿化乡土树种的影响:气孔、光合生理的响应

廖凌娟<sup>1,2</sup>, 曹洪麟<sup>1</sup>, 吴林芳<sup>3</sup>, 陈贻竹<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 东莞植物园, 广东 东莞 523620)

**摘要:**以生长在交通繁忙的东莞大道沿线的4种常见乡土绿化树种山杜英(*Elaeocarpus sylvestris*)、海南蒲桃(*Syzygium hainanense*)、小叶榕(*Ficus microcarpa* var. *pusillifolia*)和樟树(*Cinnamomum philippinense*)为材料,研究了城市交通尾气污染对植物的影响以及乡土植物在城市绿化中的适应特征。结果表明,4种植物的气孔形态没有明显差异,但污染环境中的气孔密度均显著增加,其中山杜英增加幅度最大。各树种的叶绿素和类胡萝卜素含量均发生了不同的适应性变化,但变化规律不一致。除樟树外,其它3种植物的最大净光合速率均提高,但气孔导度和胞间二氧化碳浓度的变化不一致。植物对大气污染的响应程度和方式存在种间差异。因此,4种植物通过形态和生理可塑性的改变以适应交通尾气污染环境。

**关键词:** 交通尾气污染; 乡土树种; 气孔; 光合作用

中图分类号: Q948.116

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2011)05-0446-08

doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2011.05.009

## Effects of Auto-exhaust Pollution on Four Native Ornamental Trees: Stomatal and Photosynthetic Responses

LIAO Ling-juan<sup>1,2</sup>, CAO Hong-lin<sup>1</sup>, WU Lin-fang<sup>3</sup>, CHEN Yi-zhu<sup>1\*</sup>

(1. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Dongguan Botanical Garden, Dongguan 523620, China)

**Abstract:** The stomatal and photosynthetic responses of four native ornamental species, such as *Elaeocarpus sylvestris*, *Syzygium hainanense*, *Ficus microcarpa* var. *pusillifolia*, and *Cinnamomum philippinense* grown in heavy traffic Dongguan Road were studied. The results showed that stomatal morphology had no difference among four species, while stomatal density of 4 species at Dongguan Road increased significantly, in which *Elaeocarpus sylvestris* increased most. The contents of chlorophyll and carotenoid of 4 species in Dongguan Road had different adaptive changes, but the variations were inconsistent. Except for *C. philippinense*, the maximum net photosynthesis rate ( $P_{max}$ ) increased at Dongguan Road, but the changes of stomatal conductance and intercellular  $CO_2$  concentration were inconsistent. The responses to auto-exhaust pollution were different among 4 species. Therefore, the 4 species adapted to traffic exhaust pollution by changing morphological characters and physiological properties.

**Key words:** Traffic exhaust pollution; Native trees; Stomata; Photosynthesis

城市交通的快速发展使机动车排放的尾气成为城市大气污染的主要来源之一<sup>[1-2]</sup>。汽车尾气的

成分非常复杂,主要有一氧化碳、氮氧化物、硫化物以及一些重金属离子和悬浮颗粒等<sup>[3]</sup>。20世纪90

收稿日期: 2010-12-31 接受日期: 2011-04-11

基金项目: 中山市科技计划项目(20083A227)资助

作者简介: 廖凌娟(1986~), 女, 主要研究方向为植物保育生态学, email: zhouxuelling@yahoo.com.cn

\* 通讯作者 Corresponding author, email: caohl@scib.ac.cn

年代后期,机动车增长引起的尾气型大气污染在许多城市逐渐取代煤烟型污染,如北京和广州 2001 年交通尾气一氧化碳和氮氧化物引起的气体污染分别占空气污染的 80% 和 40%<sup>[4]</sup>。在全球范围内,交通尾气排放的碳氧化物、氮氧化物、硫化物等分别占到了空气污染总量的 22%、60% 和 4%,而在一些国家,交通尾气排放的二氧化硫占空气二氧化硫总量的 17%<sup>[5]</sup>。

关于环境因子对植物气孔行为的影响已有较多研究,主要涉及干旱(水分控制)<sup>[6]</sup>、光<sup>[7]</sup>、盐分<sup>[8]</sup>和 CO<sub>2</sub> 浓度的升高<sup>[9-10]</sup>等方面。通过对气孔行为的了解可以较为方便地研究植物对污染气体的响应机制。有研究表明,短时间的二氧化硫处理能促进植物气孔的开放,处理时间延长则受到抑制<sup>[11-13]</sup>;低浓度的二氧化硫能促进植物气孔的开放,高浓度的二氧化硫则抑制气孔开放<sup>[14]</sup>。交通尾气中的二氧化硫对植物体内的叶绿素具有漂白作用,能使叶绿素降解为无光合活性的脱镁色素<sup>[15]</sup>,甚至引起叶片失绿或坏死<sup>[16]</sup>,从而影响植物正常的光合生理过程<sup>[17-18]</sup>。交通尾气中含有的重金属物质如铅、镉等能抑制植物叶绿素的合成,从而影响植物生物量的积累<sup>[19]</sup>。尾气排放的颗粒物还会导致气孔阻塞<sup>[20]</sup>,如用灰尘连续处理植物 40 d 后,植物气孔导度的抑制程度达 50%<sup>[21]</sup>。Pal 等研究了受交通尾气污染影响的 8 种行道树,结果表明,其中 2 种乔木植物叶子花(*Bougainvillea spectabilis*)和菩提树(*Ficus religiosa*)在污染区的气孔密度增加,气孔孔径变小,所有物种都不同程度地出现叶表皮附属物性状退化、表皮细胞细胞壁不规则化的现象<sup>[22]</sup>。

用叶片相关参数作为评价空气污染的指标也有较多研究,但大多集中在 1 年生的草本植物,对多年生的乔木树种的研究较少<sup>[23]</sup>。长期生长在交通污染区的乔木树种发生表型可塑性的可能性是非常大的,尤其是气孔参数。单一成分的模拟实验能提供深入研究和解释的基础,城市交通尾气作为复合污染气体,对植物的影响比单一有害气体更为复杂<sup>[24]</sup>。

由于管理方便和对地域环境适应性强的原因,乡土树种通常用来作为城市的行道树种。因而,这些植物对于目前城区日益增加的空气污染,特别是交通工具排放的尾气会有什么反应受到越来越多的关注。目前对乡土树种在城市交通尾气集中区的适应机制研究较少。东莞市是广东省中心城市

之一,地处北纬 22°39' ~ 23°09',东经 113°31' ~ 114°15'。东莞大道作为东莞市区纵轴线,是东莞市主要的交通干道,也是东莞市交通尾气排放的集中区域,以东莞大道种植的乡土绿化树种作为研究对象具有典型代表性。本研究通过对在东莞市交通最繁忙处生长的 4 种植物的叶片气孔形态特征以及气体交换等生理指标进行测定,探讨交通尾气污染对城市绿化植物的气孔参数和气体交换特征的影响和种间差异;以揭示乡土植物在城市交通尾气环境下的适应机制,为提高城市绿化效率提供科学参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

在东莞大道交通繁忙区(以下简称污染区,记为 DD)选取 4 种常见植物作为在污染环境生长的样树,以离东莞大道直线距离 5 km 外的东莞植物园(以下简称对照区,记为 DZ)内东向山坡生长的同种植物作为对照,研究乡土植物在城市交通尾气环境下的适应机制。4 种植物的树龄均为 8 ~ 10 年,污染区与对照区植物的管理模式类似。山杜英(*E. sylvestris*)为杜英科(Elaeocarpaceae)的常绿乔木,为华南地区的广布种,其耐荫,根系发达,叶纸质,倒卵形;海南蒲桃(*S. hainanense*)为桃金娘科(Myrtaceae)的常绿乔木,分布于福建、广东、云南等地,其生长快,叶革质,阔椭圆形;小叶榕(*F. microcarpa* var. *pusillifolia*)为桑科(Moraceae)的常绿乔木,分布于中国南部,具有气生根,叶革质,椭圆至倒卵形;樟树(*C. philippinense*)为樟科(Lauraceae)的常绿乔木,为亚热带常绿阔叶林代表树种,叶薄革质。

### 1.2 叶片的形态解剖

同时在污染区和对照区采集向阳、生长良好的成熟叶片,每种植物选择 3 ~ 5 棵树,每棵树分别取 5 ~ 10 片叶,放入有湿润纸巾的密封塑料袋内,带回实验室立即清洗叶片上的污染物并轻轻擦干。在叶片中脉和叶缘中间位置剪取 5 mm × 5 mm 大小的小块,经戊二醛溶液固定后,用酒精梯度(30%、50%、70%、80%、90%、100%)脱水和叔丁醇脱水干燥后装台、喷金,在 JSM-6360LV(JEOL, Japan)扫描电镜下观察并拍照,计录气孔数量、形状、大小、表皮附属物,气孔密度(SD)以单位面积(mm<sup>2</sup>)的气孔数量(N)表示,取随机选择的至少 5 个视野中的气

孔密度的平均值。

1.3 叶绿素含量

每种树种的叶片用直径为 1 cm 的打孔器分别取 5 个小叶圆片放入小瓶中,用 5 mL 80% 丙酮溶液于黑暗下放置 72 h,待其完全脱绿后用 UV-3802 型分光光度计 (UNICO, 上海) 在波长 663 nm、646 nm 下测定光密度值,计算叶绿素和类胡萝卜素含量<sup>[25]</sup>。每物种重复 5 次。

1.4 光合作用和气孔导度

2010 年 7 月选择晴朗天气,用 Licor-6400 便携式光合测定仪 (LI-COR, 美国) 在上午 9:00 ~ 11:00 测定 4 种植物叶片的光响应曲线。每种树在两地分别选 3 ~ 5 株树,选择树冠上层向阳、生长良好的成熟连体叶片,测量它们的净光合速率 ( $P_n$ )、气孔导度 ( $G_s$ ) 和胞间  $CO_2$  浓度 ( $C_i$ )。设定二氧化碳浓度为  $350\ \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ,光照强度范围为  $1800 \sim 200\ \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ,分 6 个梯度,设置最大和最小等待时间。

1.5 数据分析

数据以平均值  $\pm$  标准差表示,用 Excel 对数据进行处理、做图,用 SAS 8.1 软件 (美国 SAS 研究所,美国) 对数据进行  $t$ -test 差异显著性分析。

2 结果和分析

2.1 叶片气孔形态和指数

4 种植物叶片的上下表皮都有不同类型的附属物 (图 1),气孔均分布在下表皮。污染区和对照区中 4 种植物的气孔形态和表皮附属物没有明显差别。山杜英的叶片下表皮有稀疏毛状体和不规则纹饰分布,气孔外露 (图 1: a,A);樟树叶片下表皮有较厚的角质层,气孔下陷于周围表皮细胞中 (图 1: b,B);海南蒲桃叶片的下表皮表面有不规则的条索状纹饰分布,气孔凸出于周围表皮细胞,且没有角质层覆盖,完全暴露于叶片表面 (图 1: c,C);小叶榕叶片的下表皮表面极少或没有纹饰,气孔均下陷于表皮细胞中 (图 1: d,D)。

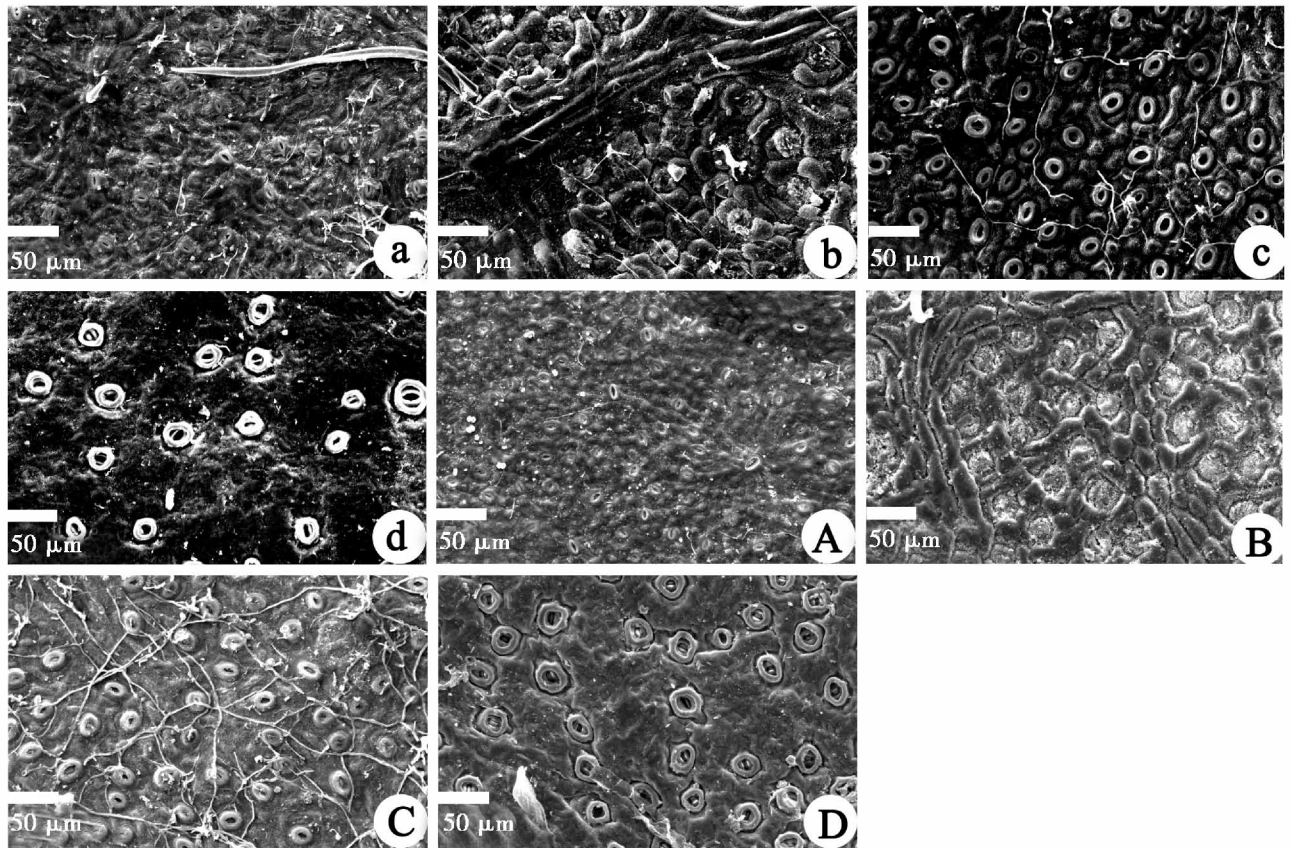


图 1 扫描电镜下 4 种植物的气孔形态。a,b,c,d: 对照区; A,B,C,D: 污染区; a,A: 山杜英; b,B: 樟树; c,C: 海南蒲桃; d,D: 小叶榕。  
Fig. 1 Stomatal morphology of four species under SEM. a,b,c,d: Control area; A,B,C,D: Contaminated area; a,A: *E. sylvestris*; b,B: *C. philippinense*; c,C: *S. hainanense*; d,D: *F. microcarpa* var. *pusillifolia*.

从表 1 可见,污染区的 4 种植物的气孔密度比对照区显著增加,其中山杜英的气孔密度增加幅度最大,从 300 个  $\text{mm}^{-2}$  增加到近 700 个  $\text{mm}^{-2}$ 。小叶榕的气孔密度在污染区和对照区均最小,樟树其次。污染对气孔大小的影响没有气孔密度明显,4 种植物中只有山杜英和樟树的气孔大小发生显著变化,小叶榕和海南蒲桃的变化并不显著,山杜英和樟树的气孔大小均下降,两地间的差异显著,且樟树气孔大小的下降幅度更大。4 种植物中山杜英的气孔最小(16~18  $\mu\text{m}$ ),几乎是其它 3 种植物的一半。

表 1 4 种植物叶片下表皮的气孔密度和大小

Table 1 Stomatal density and size in lower epidermis of leaves of four plant species

植物 Species	气孔密度 Density (个 $\text{mm}^{-2}$ )		气孔大小 Size ( $\mu\text{m}$ )	
	对照区	污染区	对照区	污染区
	Control area	Contaminated area	Control area	Contaminated area
山杜英 <i>E. sylvestris</i>	320 ± 14	694 ± 73**	17.90 ± 0.56*	16.00 ± 0.72
海南蒲桃 <i>S. hainanense</i>	344 ± 14	381 ± 17*	26.72 ± 1.18	26.09 ± 0.53
小叶榕 <i>F. microcarpa</i> var. <i>pusillifolia</i>	152 ± 8	217 ± 22*	27.90 ± 0.95	29.64 ± 2.12
樟树 <i>C. philippinense</i>	197 ± 16	281 ± 47*	29.34 ± 1.49*	24.81 ± 1.18

\* 和\*\* 分别表示同一树种同一参数差异显著( $P<0.05$ )和极显著( $P<0.01$ )。  
\* and \*\* present significant difference at 0.05 and 0.01 levels within the same species and parameter, respectively.

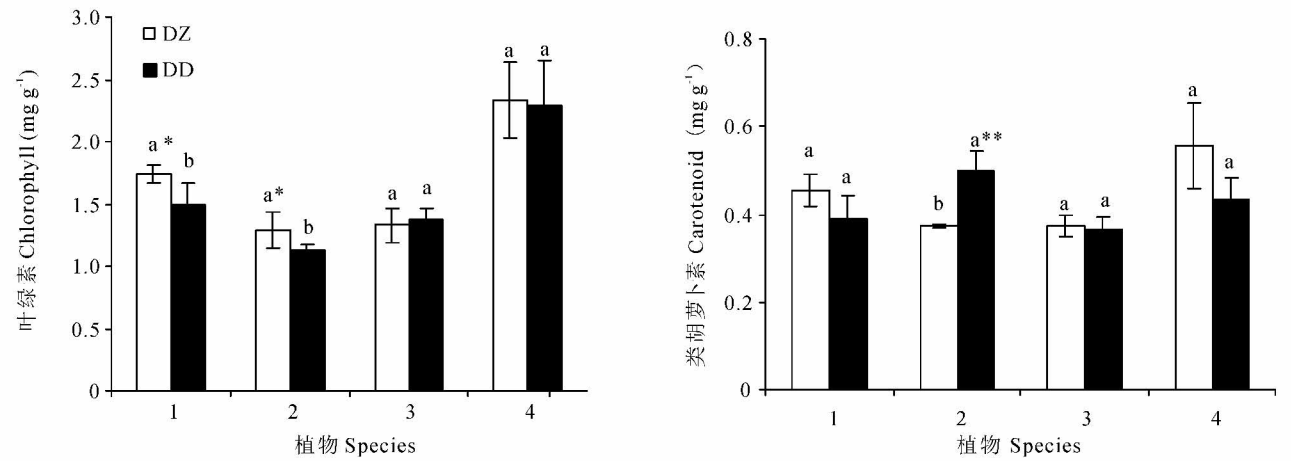


图 2 4 种植物的叶绿素和类胡萝卜素含量。DZ: 对照区; DD: 污染区; 1. 山杜英; 2. 海南蒲桃; 3. 小叶榕; 4. 樟树。  
Fig. 2 Chlorophyll and carotenoid contents in four plant species. DZ: Control area; DD: Contaminated area; 1. *E. sylvestris*; 2. *S. hainanense*; 3. *F. microcarpa* var. *pusillifolia*; 4. *C. philippinense*.

2.3 最大净光合速率

从 4 种植物光合作用的光响应曲线可看出,除樟树外,其他 3 种植物在光强大于 500  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  时光合作用能力都为污染区大于对照区,表现之一是最大净光合速率( $P_{\text{max}}$ )的增加。对照区樟树的最大净光合速率( $P_{\text{max}}$ )最大,达 12  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ,而

2.2 叶绿素与类胡萝卜素含量

图 2 表明,4 种植物成熟叶片的叶绿素含量在污染区和对照区的变化不一致。污染区的山杜英和海南蒲桃的叶绿素含量显著低于对照区的,而小叶榕和樟树的在两地间无显著差异。樟树的叶绿素含量最大,几乎比其它种高近 1 倍。污染区的海南蒲桃的类胡萝卜素含量显著高于对照区的(高近 20%),而其它 3 种植物的类胡萝卜素含量则无显著差异。

山杜英、海南蒲桃和小叶榕的  $P_{\text{max}}$  都比较低,分别为 6.0、5.0 和 6.0  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (图 3)。在污染区,山杜英和小叶榕的  $P_{\text{max}}$  有明显的变化,分别从 6.0 提高到 10  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$  和 9  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ,约有 20%~30% 的增幅。

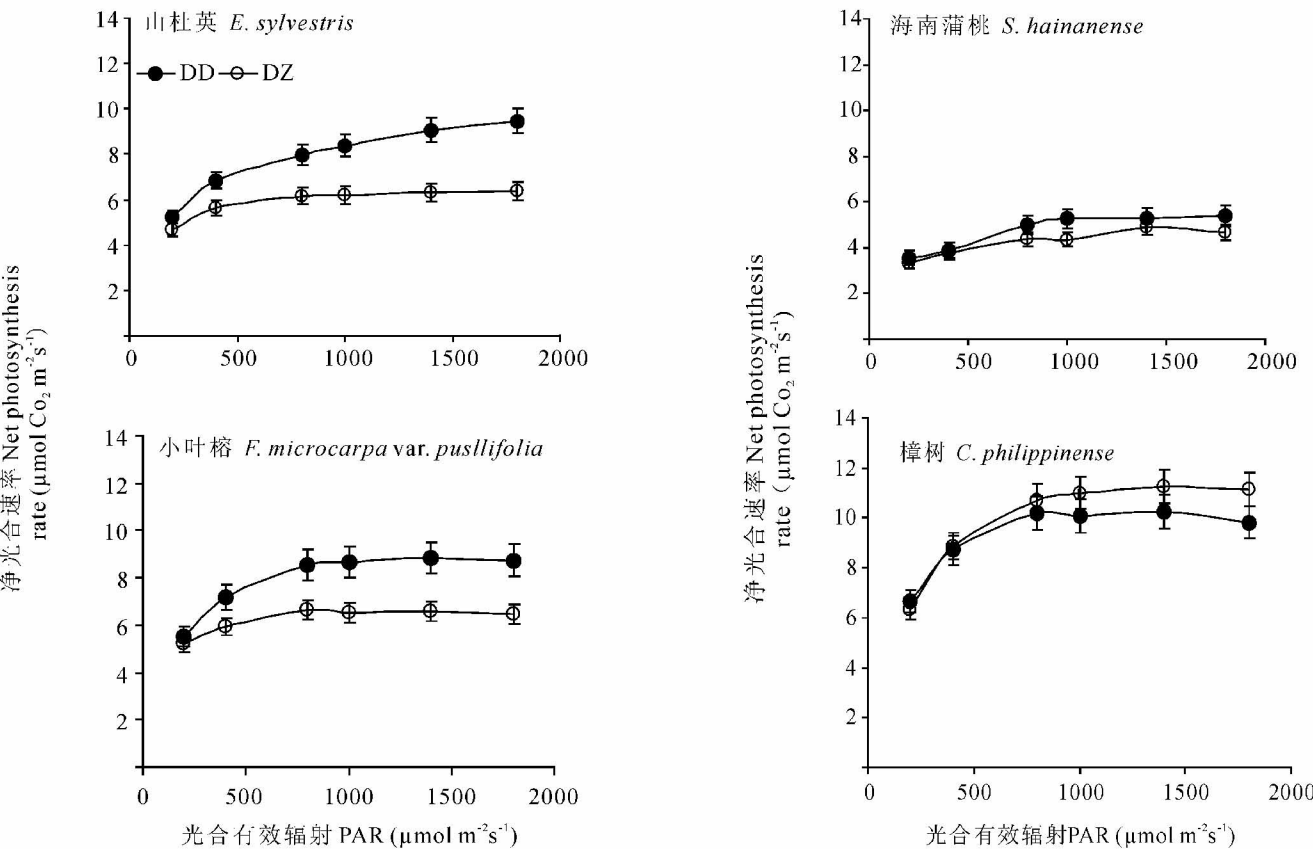


图3 4种植物的光合作用光响应曲线。DZ: 对照区; DD: 污染区。

Fig. 3 Light response curves of photosynthesis in four species. DZ: Control area; DD: Contaminated area.

2.4 气孔导度 ( $G_s$ ) 和胞间二氧化碳浓度 ( $C_i$ )

从4种植物的胞间二氧化碳浓度( $C_i$ )对气孔导度( $G_s$ )响应关系(图4)可以看出,在污染区,山杜英的  $G_s$  提高导致了  $C_i$  提高的幅度最大。对照区和污染区山杜英的  $G_s$  和  $C_i$  之间成正相关关系,且污染区山杜英的  $P_{max}$  升高,这可能是气孔数量的增加使叶片气孔导度提高,从而提高了叶片的光合作用能力。在污染区,海南蒲桃气孔导度比对照区大,而较大的气孔导度可能使进入细胞内的二氧化碳浓度增加,使光合作用增大。小叶榕  $G_s$  的变化与海南蒲桃相似,即在污染区的  $G_s$  增大,但其  $C_i$  变化相反,这可能是对照区的光合速率较小,而污染区光合作用能力的增加消耗了更多的  $C_i$  所致。在污染区樟树的  $C_i$  比对照增加,  $G_s$  也相应提高(图4),但它的光合作用能力却降低。樟树作为常见的绿化树种,其气孔数量的增加并不是为了吸收更多的二氧化碳进行光合作用以补偿污染造成的伤害,而只是通过增加气孔数量和减少气孔大小来快速应对环境变化<sup>[28]</sup>,另外,植物光合作用受到胞内二氧化碳浓度和叶片羧化能力的共同影响,樟树是否

在叶片羧化能力上发生了变化,还有待于进一步的研究。

3 讨论

对于交通尾气单因子气体影响的研究有较多报道, Dhiri 对不同年龄阶段的草本苦苣苔 (*Cichorium intybus*)进行  $SO_2$  熏蒸处理,结果表明气孔密度均显著降低<sup>[17]</sup>。在自然状态下植物形态对空气污染的响应也有一些研究报道,Pal 等研究了受交通尾气污染影响的8种乔木行道植物,结果表明叶子花 (*Bougainvillea spectabilis*)和菩提树 (*Ficus religiosa*)在污染区出现气孔密度增加、孔径变小、叶表皮附属物性状退化的现象<sup>[22]</sup>。Kulshreshtha 对林荫道种植的印楝 (*Azadirachta indica*)和垂枝暗罗 (*Polyalthia longifolia*)的研究表明,高交通尾气污染区的植物气孔密度比低尾气区增加<sup>[26]</sup>。

对东莞大道生长的4种乡土植物的研究表明,不同物种对污染的响应存在种间差异。山杜英的气孔密度(SD)比东莞植物园的有明显增加,而气孔大小减小。植物气孔密度和气孔导度存在正相关关



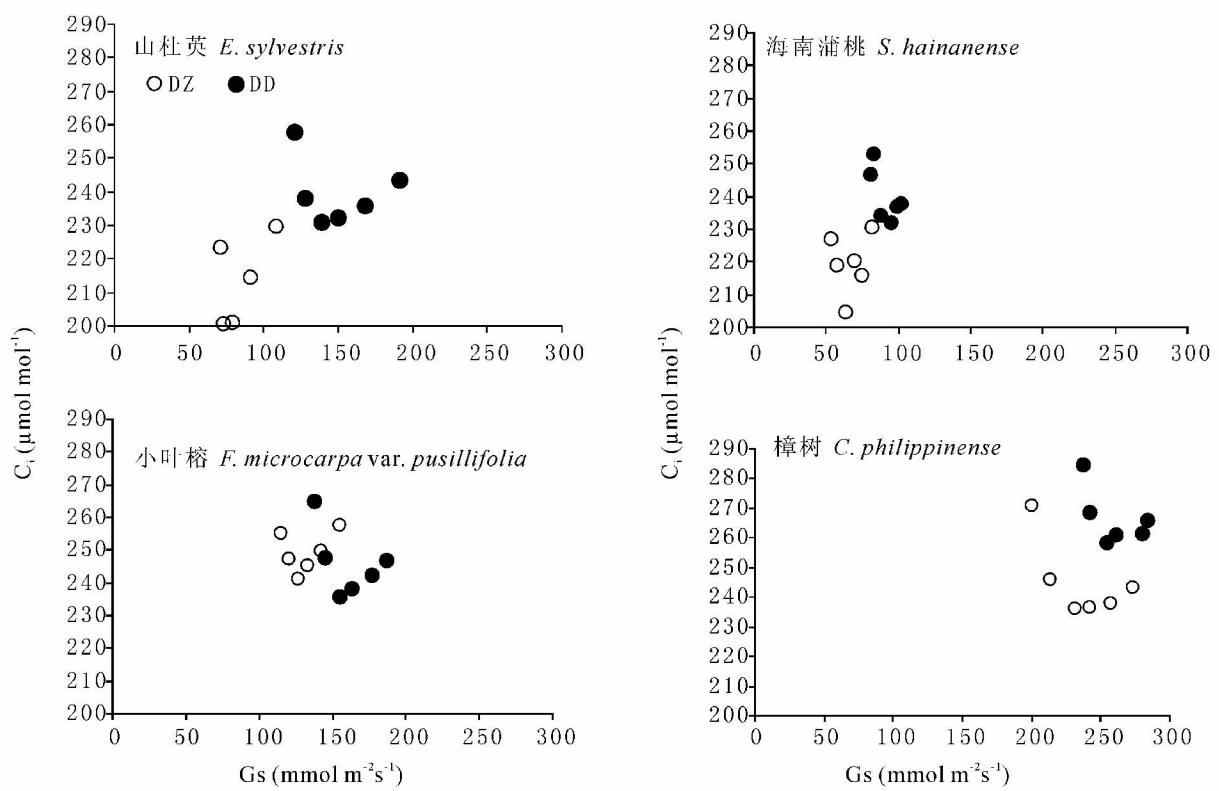


图 4 4 种植物叶片气孔导度( $G_s$ )和胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )的关系。DZ: 对照区; DD: 污染区。

Fig. 4 The relationship between stomatal conductance ( $G_s$ ) and intercellular  $CO_2$  concentration ( $C_i$ ) of 4 species. DZ: Control area; DD: Contaminated area.

系<sup>[27-28]</sup>,生长在污染环境的山杜英气孔导度的提高很可能是由于气孔数量增加引起,而增加的气孔密度也使植物对外界环境变化的响应更为迅速<sup>[28]</sup>。海南蒲桃的气孔导度( $50 \sim 70 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )和光合速率均较低,污染对气孔密度增加的影响没有山杜英显著,可能是导致其在污染区光合作用能力增加程度没有山杜英大的原因之一。污染区小叶榕的气孔密度比对照区的提高了 40%,而胞间二氧化碳浓度减少,推测小叶榕气孔密度的提高导致气孔导度的升高,同时增加的光合作用能力消耗的胞间二氧化碳量大于增加的气孔导度引起的胞间二氧化碳增加量。这 4 种植物中樟树的气孔导度(对照区)( $200 \sim 270 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )最大,几乎是海南蒲桃的 3~4 倍,因此它的最大净光合速率( $P_{\text{max}}$ )较高,约为  $11 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。樟树在污染区的气孔密度比对照区的高出 43%,而且气孔孔径变小,但它的气孔导度却没有改变,光合作用能力甚至低于对照。同时,樟树在污染胁迫下是否通过提高气孔数量来维持它的原初同化力,以补偿其它生理过程中可能散失的能力还有待进一步的研究。另外,污染区山杜英和海南蒲桃的叶绿素含量显著低于对照区的,

而光合作用能力仍然高于对照区,可能是气孔密度的增加导致了  $CO_2$  吸收的增加,补偿了叶绿素含量的损失。可见,乡土植物是通过气孔密度增加的生长策略使其适应污染区的环境,而不是采取通过减少气孔密度以减少尾气的吸收量的生存方式。

在东莞大道种植近 10 年的行道树,受到了逐渐增加的交通尾气污染的影响,这种影响能通过成熟叶获得环境信号对后代或者正在发育的叶片施加作用。物种对于空气污染的种间响应差异可能与植物的生物学特征和生理生态特性相关。空气污染物对植物的作用是复杂的,还取决于其它的因素,如暴露时间、树种、年龄和污染物浓度及其它污染物的相互作用<sup>[29]</sup>。这 4 种行道树,山杜英、海南蒲桃、小叶榕和樟树都是常绿乔木,除山杜英叶片是纸质外,其它 3 种都是革质或薄革质。叶片革质会影响或阻碍气孔发育的程度<sup>[30]</sup>,而且革质叶片表层导度低,因此绝大部分的气体扩散是通过气孔进行的。但是本研究中,在污染区的这 3 种植物的气孔导度并没有降低,这与草本单子叶植物春小麦的气孔对低浓度的  $SO_2$  和  $NO_2$  响应相似<sup>[31]</sup>。而山杜英的气孔导度明显提高是由于气孔密度的提高,

这可能与植物叶片的纸质结构有关。在空气污染物刺激下植物通过增加气孔数目提高同化能力以增加抵抗胁迫的能力,这种提高代谢水平的方式对于多年生植物来说它的代价可能是缩短寿命,或者这种植物采取的策略不同于具有角质蜡质层的植物。另外,虽然有研究指出交通尾气中的二氧化硫对植物体内的叶绿素具有漂白作用,使叶绿素降解为无光合活性的脱镁色素<sup>[15]</sup>,但本研究中小叶榕和樟树的叶片并没有表现出明显的叶绿素降解的现象,这也为不同植物的相异的适应策略提供了例证。

# 4 小结

城区的空气污染是多种成分的混合体,与单一成分,如 SO<sub>2</sub> 或 O<sub>3</sub> 对植物的影响是不同的,本研究为这个观点提供了佐证。植物不同的生活型和叶片的结构对环境因子变化的响应是不相同的。本研究结果表明,植物对空气污染存在明显的种间差异,而气孔密度的增加使同化能力提高,可能是植物对空气污染的一种响应,如山杜英和樟树气孔密度增加的同时气孔孔径减小,通过提高植物代谢水平来抵御伤害。

本文研究了乡土植物对污染环境的响应,植物后代在这种环境下会有什么响应,有待进一步研究。但是从当代植物的适应情况来看,4 种乡土植物在受交通尾气污染的地段能正常生长,通过调整自身形态(气孔)和生理(光合作用)来适应城市环境,同时也为乡土树种作为城市绿化树种以提高城市绿化效率提供参考。

# 参考文献

- [1] Lu S G, Bai S Q, Cai J B, et al. Magnetic properties and heavy metal contents of automobile emission particulates [J]. J Zhejiang Univ, 2005, 6B(8): 731–735.
- [2] Guo H, Zhang Q Y, Shi Y, et al. Characterization of on-road CO, HC, and NO emissions for petrol vehicle fleet in China city [J]. J Zhejiang Univ, 2006, 7(7): 532–541.
- [3] Ho Y B, Tai K M. Elevated levels of lead and other metals in road side soil and grass and their use to monitor aerial metal depositions in Hong Kong [J]. Environ Pollut, 1988, 49(1): 37–51.
- [4] Goyal S K, Ghatge S V, Nema P, et al. Understanding urban vehicular pollution problem VIS-À-VIS ambient air quality-case study of a megacity [J]. Environ Monit Assess, 2006, 119: 557–569.
- [5] Basnister D. Transport Policy and the Environment[M]. London: E & FN SPON, 1998: 1–360.

- [6] Lecoer J, Wery J, Turc O, et al. Expansion of pea leaves subjected to short water-deficit: Cell number and cell-size are sensitive to stress at different periods of leaf development [J]. J Exp Bot, 1995, 46: 1093–1101.
- [7] Lee S H, Tewari R K, Hahn E J, et al. Photon flux density and light quality induce changes in growth, stomatal development, photosynthesis and transpiration of *Withania somnifera* (L.) Dunal, plantlets [J]. Plant Cell Tiss Org, 2007, 90(2): 141–151.
- [8] Parida A K, Das A B, Mittra B. Effects of salt on growth, ion accumulation, photosynthesis and leaf anatomy of the mangrove, *Bruguiera parviflora* [J]. Trees, 2004, 18(2): 167–174.
- [9] Bettarini I, Vaccari F P, Miglietta F. Elevated CO<sub>2</sub> concentrations and stomatal density: Observations from 17 plant species growing in a CO<sub>2</sub> spring in central Italy [J]. Global Change Biol, 1998, 4: 17–22.
- [10] Woodward F I. Stomatal numbers are sensitive to increases in CO<sub>2</sub> from pre-industrial levels [J]. Nature, 1987, 327: 617–618.
- [11] Gao J X(高吉喜). Effects of SO<sub>2</sub> on Plant Metabolism (I): Effects on stomata, membrane and enzyme [J]. Res Environ Sci(环境科学研究), 1997, 10(2): 36–39.(in Chinese)
- [12] Wells A E. Results of recent investigation of the smelter smoke problem [J]. J Ind Eng Chem, 1917, 9(7): 640–646.
- [13] Black C R, Black V J. The effects of low concentrations of sulphur dioxide on stomatal conductance and epidermal cell survival in field beans (*Vicia faba* L.) [J]. J Exp Bot, 1979, 30 (2): 291–298.
- [14] Barnes J, Wellburn A, Air pollution combinations [C]// Dekok L J, Stulen I. Responses of Plant Metabolism to Air Pollution and Global Change. Hague: SPB Academic Publishers, 1998: 147–164.
- [15] Lian Y W(连玉武), Ji R H(际荣华), Huang D Y(黄道营). Correlation of chlorophyll in leaves and SO<sub>2</sub> in air [J]. J Appl Ecol(应用生态学报), 1990, 1(4): 344–348.(in Chinese)
- [16] Rakwal R, Agrawal G K, Kubo A. Defense stress responses elicited in rice seedlings exposed to the gaseous air pollutant sulfur dioxide [J]. Environ Exp Bot, 2003, 49(3): 223–235.
- [17] Dhir B, Mahmooduzzafar, Siddiqi T O, et al. Stomatal and photosynthetic responses of *Cichorium intybus* leaves to sulfur dioxide treatment at different stages of plant development [J]. J Plant Biol, 2001, 44(2): 97–102.
- [18] Robinson M F, Heath J, Mansfield T A. Disturbances in stomatal behavior caused by air pollutants [J]. J Exp Bot, 1998, 49: 461–469.
- [19] Singh S N, Rao D N. Certain responses of wheat plants to cement dust pollution [J]. Environ pollut, 1981, 24(1): 75–81.
- [20] Naidoo G, Chirkoot D. The effects of coal dust on photosynthetic performance of the mangrove, *Avicennia marina* in Richards Bay, South Africa [J]. Environ Pollut, 2004, 127(3): 359–366.
- [21] Wang H W(黄宏伟), Cao Q H(曹琼辉), Huang F(黄峰), et al. Ecological and physiological effects of dusting pollution on vegetation [J]. Guihaia(广西植物), 2009, 29(5): 621–626.(in

- Chinese)
- [22] Pal A, Kulshreshtha K, Ahmad K J, et al. Do leaf surface characters play a role in plant resistance to auto-exhaust pollution [J]. *Flora*, 2002, 197: 47–55.
- [23] Gratani L, Crescente M F, Petruzzi M. Relationship between leaf life-span and photosynthetic activity of *Quercus ilex* in polluted urban areas (Rome) [J]. *Environ Pollut*, 2000, 110(1): 19–28.
- [24] Dann M S, Pell E J. Decline of activity and quantity of ribulose biphosphate carboxylase/oxygenase and net photosynthesis in ozone-treated potato foliage [J]. *Plant Physiol*, 1989, 91: 427–432.
- [25] Lin H H(林宏辉), Zhao Y(赵云), Wang M L(王茂林), et al. *Modern Biological Experiment Instruction* [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 2003: 15–18.(in Chinese)
- [26] Pal A, Kulshreshtha K, Ahmad K J, et al. Changes in leaf surface structures of two avenue tree species caused by auto-exhaust pollution [J]. *J Environ Biol*, 2000, 21(1): 15–21.
- [27] Reich P B. Leaf stomatal density and diffusive conductance in three amphistomatous hybrid poplar cultivars [J]. *New Phytol*, 1984, 98(2): 231–239.
- [28] Xu Z Z, Zhou G S. Responses of leaf stomatal density to water status and its relationship with photosynthesis in a grass [J]. *J Exp Bot*, 2008, 59(12): 3317–3325.
- [29] McAinsh M R, Evans N H, Montgomery L T, et al. Calcium signalling in stomatal responses to pollutants [J]. *New Phytol*, 2001, 153(3): 441–447.
- [30] Nikolopoulos D, Liakopoulos G, Drossopoulos I, et al. The relationship between anatomy and photosynthetic performance of heterobaric leaves [J]. *Plant Physiol*, 2002, 129: 235–243.
- [31] Atkinson C J, Wookey P A, Mansfield T A. Atmospheric pollution and the sensitivity of stomata on barley leaves to abscisic acid and carbon dioxide [J]. *New Phytol*, 1991, 117(4): 535–541.