

# 大气 SO<sub>2</sub>、氟化物对植物生理生态指标的影响

胡羨聪<sup>2</sup> 张德强<sup>1\*</sup> 孔国辉<sup>1</sup> 郁梦德<sup>1</sup> 褚国伟<sup>1</sup> 薛克娜<sup>2</sup> 吴芝扬<sup>2</sup>

(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 528222)

**摘要:** 运用多元回归分析方法研究不同污染区生长的植物叶片的生理生态指标的变化与大气硫酸盐化速率及氟化物浓度的关系。结果表明 植物的叶面积(LA)、叶绿素总量(Chl)、细胞液 pH 值(pH)和细胞质膜透性(CML 电导率)等生理生态指标的变化幅度与大气污染物含量呈显著相关。与大气硫酸盐化速率关系式为:  $Y_S = 0.034X_{LA} - 0.011X_{Chl} + 0.017X_{pH} + 40.0003X_{CML} + 0.034$  ( $r=0.99, p<0.001$ ) ;与大气氟化物含量的关系式为:  $Y_F = 0.362X_{LA} + 0.329X_{Chl} + 0.814X_{pH} + 0.024X_{CML} - 4.596$  ( $r=0.947, p<0.03$ )。利用这些生理生态指标的变化幅度作为生物监测的指标来评价不同污染区的大气硫氧化物、氟化物的污染状况,与大气监测结果有很高的一致性,并且与实际环境污染状况相符。

**关键词:** 生物监测;生理生态指标;大气污染;硫酸盐化速率;氟化物

中图分类号: X835

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2003)04-0372-07

## The Effects of SO<sub>2</sub> and Fluoride on Physio-ecological Changes in Plant Leaves

HU Xian-cong<sup>2</sup> ZHANG De-qiang<sup>1\*</sup> KONG Guo-hui<sup>1</sup> YU Meng-de<sup>1</sup>

CHU Guo-wei<sup>1</sup> XUE Ke-na<sup>2</sup> WU Zhi-yang<sup>2</sup>

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

2. Foshan Institute of Forest Science, Foshan 528222, China)

**Abstracts:** Multiple regression analysis was used for the investigation of the influence of air pollutants (sulfate and fluorides) on the changes in physio-ecological characteristics in the leaves of 48 plant species distributed at 8 site in Foshan city and one site in Dinghushan Nature Reserve as control. The results showed that the changes in leaf area (LA), total chlorophyll contents (Chl), cell liquid pH values (pH) and cell membrane leakage (CML) (electronic conductance) exhibited significant correlation with pollutant contents in leaves. Linear regression equation between physio-ecological changes and pollutant content in the air was  $Y_S = 0.034X_{LA} - 0.011X_{Chl} + 0.017X_{pH} + 40.0003X_{CML} + 0.034$  ( $r=0.99, p<0.001$ ) for sulfation rate, and was  $Y_F = 0.362X_{LA} + 0.329X_{Chl} + 0.814X_{pH} + 0.024X_{CML} - 4.596$  ( $r=0.95, p<0.03$ ) for fluorides. The application of physio-ecological changes in plants as biological monitoring indicatoss of air pollution was consistent with actual environment condition.

**Key words:** Biomonitoring; Physio-ecological indicators; Air pollution; Sulfation rate; Fluoride

生长在污染环境里的植物,对大气污染的反应是多方面的,有对污染物累积性吸收,有外部形态的伤害,也有生理生态指标的变化。然而,目前的研究大多局限在某一指标的变化<sup>[1-4]</sup>,很少综合起来考

虑。由于地理、气象等环境因素的复杂性,单一指标很难全面反映植物对大气污染反应的所有信息。只有进行多指标的综合研究,才能做出全面而正确的评价。本文利用生长在不同污染区的植物作为研究

收稿日期: 2003-07-08 接受日期: 2003-08-28

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

\* 通讯作者: Corresponding author

对象,选取叶面积、叶片叶绿素含量、叶片细胞浸提液 pH 值及叶片细胞质膜透性(电导率)作为指标,与清洁区植物进行对比研究,探讨植物对大气污染的响应规律。同时结合大气硫酸盐化速率(主要是 SO<sub>2</sub>、硫酸雾等硫氧化物)、氟化物(主要是气态 HF 及其酸雾等)等监测资料,对不同污染区大气硫酸盐化、氟化物的污染状况进行评价。

## 1 研究地点概况

研究地点是地处珠江三角洲腹地的佛山市城区,东距广州近 30 km,水陆交通发达,历来是广东省乃至华南地区的工业和商业重镇。改革开放以来,社会经济得到了高速发展,城市化程度接近 50%。二十世纪九十年代以来,进一步调整工业结构,在发挥传统优势工业的同时大力发展建材工业,取得巨大的经济效益。但不容置疑的是在取得巨大经济效益的同时却付出了沉重的环境代价,尤其是陶瓷工业三废(废气、废渣、废水)的污染,使汾江河水的污染到了无以复加的地步,市委市政府不得不下决心计划在未来五年投入 40 亿元巨资整治汾江河。大气环境不断恶化,市区酸雨的发生频率高达 86%。进行植物对大气污染的响应研究并对佛山市大气环境质量进行评价,有助于全面了解佛山市的大气环境质量状况,为广东省第三大城市—佛山市的环境规划、城市工业布局和城市林业的优化配置提供科学的决策依据。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置

针对佛山市工业布局、污染源的种类分布,着重对城区的大气 SO<sub>2</sub> 和氟化物的污染水平进行调查和监测。监测样点基于污染源的种类分布特点,同时也考虑风向等气象因素,具体设置如下:城区的有佛山化纤厂(HQC 北面)、古灶小学(GUZ 西南面)、石湾大帽岗(DMG 南面)、石湾公园(SW 南面)、深村小学(SC 东面),雾庄(WZ 南面),南海区有西樵山(XQS),佛山市林科所(LKS)森林公园,清洁区则设在鼎湖山国家自然保护区(DHS)。部分样点分布见图 1。

### 2.2 试验设计与材料选择

2000 年 11 月 25 日—2001 年 1 月 10 日分别在上述地点,采用静态取样法进行大气环境质量的连续监测,其中 2000 年 12 月 21 日和 2001 年 1 月 10

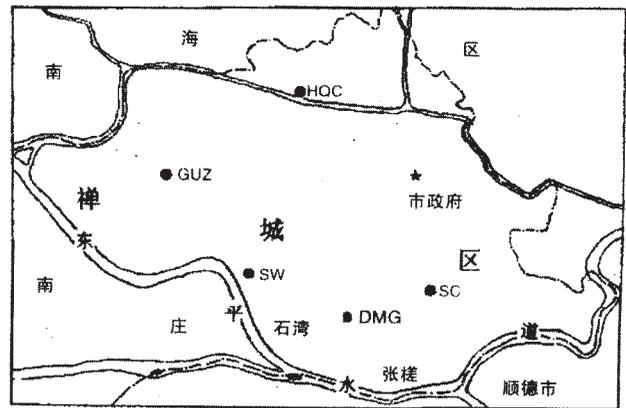


图 1 部分采样点分布示意图

Fig.1 Sampling sites in Foshan city

● 采样地点 Sampling sites

日各取样一次。监测大气硫酸盐化速率和氟化物含量。2001 年 1 月对上述样地的植物生长状况进行调查,同时采集植物成熟叶片,5-8℃保存。每个样点选取 5-10 个种,每个样点选取的种类不一定相同,但所选的植物均可以在对照点鼎湖山自然保护区找到相同种类(表 1)。所采样品的生理生态指标测定当天处理或测试完毕,测定项目包括叶面积、叶绿素 a、b 含量、细胞浸提液 pH 值和膜透性(电导率)等。由于选取的指标是多个树种测定结果的平均值,比单一树种更具代表性。

### 2.3 测定方法

大气硫酸盐化速率 静态碱片法取样,硫酸钡比浊测定<sup>[5,6]</sup>。

大气氟化物 静态取样,石灰滤纸—氟离子选择电极法测定<sup>[6]</sup>。

植物叶片细胞质膜透性(电导率) 用水洗净叶片,擦干后,以口径面积为 1 cm<sup>2</sup> 打孔器钻取 30 个园片,放入 50 ml 烧杯中,加去离子水 20 ml 搅拌,25℃恒温 2.5 h,用江苏电分析仪器厂生产的 DDS-11D 型数字式电导仪测定。

叶绿素 同上方法钻取 15 个园片,称重后剪为两半,置于有刻度的磨口塞试管中,加 80% 丙酮液,定容 10 ml,用黑布盖好并放置冰箱内,每天取出振荡,待叶片全变白色后进行比色测定;

叶片浸出液 pH 值 同上方法钻取 30 片园片,放于 50 ml 烧杯中,加去离子水 20 ml,搅拌,在 25℃中恒温 2.5 h,用 pH 计测定。

叶面积测定方法 随机取成熟叶片 30-50 片,取样量根据植物叶片面积大小而定,叶片大的,

相对变异小,取样少些;叶片小的,相对变异大,取样多些,用水洗净叶片,擦干后用美国 LI-3000 面积仪测定。

2.4 数据处理

数据的回归分析工作在 Microsoft Excel 数据分析软件工具包里进行,这个工具包可以从 Office

表 1 各试验点调查取样的植物种类  
Table 1 Species sampled at different sites

种类 Species	取样地点 Sampling sites									
	生活型 Life form	石湾 SW	深村 SC	古灶 GUZ	雾庄 WZ	西樵山 XQS	化纤厂 HQC	林科所 LKS	大帽冈 DMG	鼎湖山 DHS
鸭脚木 <i>Schefflera octophylla</i>	T	/	/	/	+	+	/	/	/	+
幌伞枫 <i>Heteropanax fragrans</i>	T	/	/	/	/	/	/	+	/	+
亮叶冬青 <i>Ilex viridis</i>	T	/	/	/	/	+	/	/	/	+
铁冬青 <i>I. rotunda</i>	T	/	/	/	/	+	/	/	/	+
大叶紫薇 <i>Lagerstroemia speciosa</i>	T	/	/	+	/	/	+	+	/	+
宽叶合欢 <i>Albizzia lebbbeck</i>	T	+	/	/	/	/	/	/	/	+
银柴 <i>Aporosa chinensis</i>	T	/	/	/	+	/	/	/	/	+
土密树 <i>Bridelia tomentosa</i>	T	/	/	/	/	/	/	+	/	+
糖胶树 <i>Alstonia scholaris</i>	T	/	+	+	/	/	+	/	+	+
人心果 <i>Manilkara zapota</i>	T	/	/	/	/	/	+	/	/	+
光叶山矾 <i>Syplocos lancifolia</i>	T	/	/	/	/	+	/	/	/	+
油茶 <i>Camellia oleifera</i>	T	+	/	/	/	/	/	+	/	+
山茶花 <i>C. japonica</i>	T	/	/	/	/	/	/	+	/	+
荷木 <i>Schima superba</i>	T	/	/	/	/	+	/	/	/	+
大头茶 <i>Gordonia axillaris</i>	T	/	/	/	/	/	/	+	/	+
红花油茶 <i>Camellia semiserrata</i>	T	+	/	/	/	/	/	/	/	+
珊瑚树 <i>Viburnum odoratissimum</i>	V	/	/	/	+	+	/	/	/	+
金银花 <i>Lonicera japonica</i>	V	/	/	+	+	/	/	/	/	+
白兰 <i>Michelia alba</i>	T	+	+	+	/	+	+	+	/	+
扭肚藤 <i>Jasminum amplexicaule</i>	V	/	/	/	+	/	/	/	/	+
山指甲 <i>Ligustrum sinense</i>	S	/	/	/	/	/	+	+	+	+
鹅掌藤 <i>Stauntonia chinensis</i>	V	/	+	/	/	/	/	/	/	+
尖叶杜英 <i>Elaeocarpus apiculatus</i>	T	/	/	/	/	/	/	+	/	+
日本杜英 <i>E. japonicus</i>	T	/	/	/	+	/	/	/	/	/
红车 <i>Syzygium rehderianum</i>	T	/	/	/	+	+	/	/	/	+
小叶榕 <i>Ficus microcarpa</i>	T	+	+	+	+	+	+	+	+	+
垂枝榕 <i>F. benjamina</i>	T	/	/	/	/	/	/	/	+	+
高山榕 <i>F. altissima</i>	T	/	/	/	/	/	/	+	+	+
印度榕 <i>F. elastica</i>	T	/	/	/	+	+	+	/	+	+
傅园榕 <i>Ficus microcarpa</i> var. <i>fuyuensis</i>	T	/	/	/	/	/	/	+	/	/
非洲楝 <i>Khaya senegalensis</i>	T	+	/	/	/	/	/	/	/	+
山黄麻 <i>Trema orientalis</i>	T	/	/	/	/	/	/	/	+	+
假柿叶木姜子 <i>Litsea monopetala</i>	T	/	/	/	/	/	/	/	+	+
樟树 <i>Cinnamomum camphora</i>	T	+	/	/	/	/	/	/	+	+
阴香 <i>C. burmanii</i>	T	/	/	/	+	+	/	+	/	+
华润楠 <i>Machilus chinensis</i>	T	/	/	/	/	+	/	/	/	+
海桐花 <i>Pittosporum tobira</i>	S	/	+	+	/	+	/	/	/	+
扁桃 <i>Mangifera persiciformis</i>	T	/	/	/	/	/	+	/	/	+
芒果 <i>M. indica</i>	T	/	+	/	/	/	+	/	/	+
猫尾木 <i>Dolichandrone cauda-felina</i>	T	+	/	/	/	/	/	/	/	+
吊瓜树 <i>Kigelia africana</i>	T	+	/	/	/	/	/	+	/	+
朱砂根 <i>Ardisia crenata</i>	S	/	/	/	/	+	/	/	/	+
格木 <i>Erythrophloeum fordii</i>	T	/	/	/	/	+	/	/	/	+
春花 <i>Rhaphiolepis indica</i>	T	/	/	/	+	/	/	/	/	+
腺叶野樱 <i>Prunus phaeosticta</i>	T	/	/	/	+	/	/	/	/	/
多花山竹子 <i>Garcinia multiflora</i>	T	/	/	/	+	/	/	/	/	+
灰莉 <i>Fagraea ceilanica</i>	S	/	+	/	/	/	/	/	/	+
山牡荊 <i>Vitex quinata</i>	T	/	/	/	+	/	/	/	/	+

+ : 采样种类 Sampling species ; T : 乔木 Tree; S : 灌木 Shrub; V : 藤本 Vine

2000 光盘中加载。数据通过相关系数矩阵转换后进行多元回归分析。

### 3 结果和分析

#### 3.1 植物与大气污染的关系

植物对大气污染的响应是多方面的,即使没有明显的伤害症状,也会在植物的生理生化特性上表现出不同程度的变化。如 O<sub>3</sub> 和 SO<sub>2</sub> 使细胞的脂类过氧化,导致细胞膜透性的增加<sup>[7]</sup>。彭长连等<sup>[8]</sup>利用盆栽试验研究 19 种园林绿化植物对大气污染的响应结果显示,植物的叶绿素含量、叶绿素荧光参数 Fv/Fm 值的下降幅度和细胞膜渗透率(相对电导率)的增加幅度与试验点大气污染程度相一致。

不同污染区植物生理生态指标测定结果表明,植物的叶面积、叶绿素含量、叶片细胞液 pH 值和叶片细胞质膜透性(电导率)等指标的变化规律与大气污染物浓度密切相关。表 2 是各试验点大气污染物浓度和植物生理生态指标相对清洁区的变化幅度,相对变化幅度由下式计算得来: $P_{ij}=(I_{ij}-I_{ic})/I_{ic} \times 100\%$ ,式中的  $P_{ij}$  是第  $i$  个指标在  $j$  点环境的相对变化幅度, $I_{ij}$  是第  $i$  个指标在  $j$  环境下的实测值, $I_{ic}$  是第  $i$  个指标在清洁区的实测值。 $P_{ij}$  值取绝对值,但在叙述时指标前冠以上升或下降予以区别。对表 2 的结果通过相关矩阵转换并进行多元回归,结果显示,不同污染浓度下生长的植物,其生理生态指标的变化幅度与大气硫酸盐化速率和氟化物浓度呈

显著相关(表 3),复相关系数分别为 0.987 和 0.952,多元回归方程如(1)、(2)式。

$$Y_S = 0.034X_{LA} - 0.011X_{Chl} + 0.017X_{pH} + 0.0003X_{CML} + 0.034 \quad (r=0.99, p<0.001) \quad (1)$$

$$Y_F = 0.362X_{LA} + 0.329X_{Chl} + 0.814X_{pH} + 0.024X_{CML} - 4.596 \quad (r=0.95, p<0.03) \quad (2)$$

其中  $Y_S$  为大气硫酸盐化速率, $Y_F$  为大气氟化物含量, $X_{LA}$ 、 $X_{Chl}$ 、 $X_{pH}$  分别表示植物叶面积、叶绿素、叶片细胞液 pH 值相对清洁区的下降百分率, $X_{CML}$  是细胞渗透率(电导率)相对清洁区的上升百分率。

方程(1)、(2)式表明,植物生理生态指标随大气污染程度不同而变化,大气污染物的浓度越大,生理生态指标变化幅度越大,反之越小。

从各指标变化幅度与大气污染物浓度相关分析结果(表 3)来看,植物叶面积的降低幅度与大气硫酸盐化速率关系密切,但其他三个指标的变化幅度与大气氟化物含量有更直接的关系,这一现象表明,氟化物污染对植物的影响更大,或者说当地氟化物的污染较硫氧化物(SO<sub>2</sub>等)污染更为严重。但有的地点如西樵山,其大气污染物含量较林科所低,而植物的一些生理生态指标如叶绿素、电导率等的变化却较小。这主要是因为大气监测点设于西樵山的边缘,由于种类的缘故,植物采样点不得不离开大气监测点,因此,植物生长环境与大气监测点的环境是有差异的,这种差异在森林里可能表现得更为突出。

表 2 各试验点的大气污染物含量及植物生理生态指标的变化幅度

Table 2 Air pollutants and the relative changes of physio-ecological indicators of plants at different sites compared to the control

地 点 Sites	硫酸盐化速率 Sulfation rate (mg SO <sub>3</sub> 100cm <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	氟化物 Fluoride (μg F 100cm <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	叶面积降低% Reduction of leaf area (%)	叶绿素降低 Reduction of Chlorophyll content (%)	pH 下降 pH decrease (%)	电导率增加 Increase in conductance (%)
大帽岗 DMG	1.518±0.43	47.47±10.3	43.93±25.3	34.41±10.3	16.61±3.89	147.38±86.3
务庄 WZ*	1.234±0.42	38.97±13.1	34.81±19.6	34.47±15.6	16.56±4.12	177.05±92.7
化纤厂 HQC	0.947±0.38	33.50±12.8	29.72±21.7	37.72±12.7	18.55±5.33	183.69±85.6
古灶小学 GZ	1.028±0.41	34.34±11.4	29.07±22.4	30.81±8.61	15.29±4.15	89.36±65.2
西樵山 XQS	1.111±0.36	21.92±9.32	28.62±18.6	15.92±9.25	16.62±3.86	72.19±53.0
林科所 LKS	0.685±0.27	17.31±6.76	23.65±15.7	27.12±7.57	9.92±3.78	89.52±32.3
深村小学 SC	0.901±0.35	8.13±4.68	29.50±20.2	13.11±10.23	1.41±2.79	41.33±25.9
石湾公园 SW*	0.782±0.28	13.05±5.79	24.31±16.3	15.53±8.94	3.02±3.58	62.93±23.6
鼎湖 Control	0.067±0.04	0.73±0.42	0.00	0.00	0.00	0.00
国家标准 Standard**1)	0.250	3.00				

\* 大气污染物为理论值(即估计值) The air pollutant contents were estimated values.

\*\* 国家推荐二级标准 Recommended National Standard II

1)见国家环保局 1991 年《环境质量报告编写技术规定》的硫酸盐化速率推荐标准,氟化物标准见 GB3095-95

3.2 污染状况的植物学评价

生物监测作为环境监测和环境评价的重要辅助手段,因其快速、经济、实用等特点而越来越广泛应用于实践中<sup>[9-13]</sup>。利用植物生物监测法指示或评价大气污染状况,国内外已有不少报道,但大多是单项污染指标的评价<sup>[12,14-16]</sup>。本研究利用多指标的变化情况与大气硫酸盐化速率、氟化物等污染物浓度进行拟合,对大气硫氧化物、氟化物等的污染状况进行综合评价,能更准确地反映大气污染的实际情况,这对开展大气环境质量生物监测有重要的现实意义和应用价值。

对大气污染状况进行评价的最直观的方法是

污染指数法,单项污染指数(single air pollution index, SAPI)由如下公式求得:

$$SAPI = C_i / C_o$$

其中  $C_i$  为污染区污染物浓度或污染区植物生理生态指标变化幅度,  $C_o$  为污染物浓度国家允许的标准值或清洁区植物生理生态指标变化幅度。表 4 中生物监测指标评价系统的单项污染指数(SAPI),清洁区(DHS)设值为 1(无变化),为使污染地区的取值大于 1,不管生理生态指标的变化幅度是正向还是负向的,均取它的绝对值再加上 1。复合污染指数(multiple(or mixed) air pollution index, MAPI)由各单项污染指数相加求得(表 4)。根据

表 3 指标变化幅度与大气污染物浓度的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between the changes of indicators and air pollutant contents

污染物含量 Air pollutant	叶面积降低 % Reduction of leaf area	叶绿素降低 % Reduction of Chlorophyll content	pH 下降 % pH decrease	电导率增加 % Increase in Conductance
硫酸盐化速率 Sulfation rate (mg SO <sub>3</sub> 100cm <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	0.977**	0.735*	0.735*	0.708*
氟化物 Fluoride (μg F 100cm <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	0.817**	0.900**	0.882**	0.873**

\* p<0.05, \*\* p<0.01

表 4 不同区域污染指数及大气污染状况

Table 4 Air pollution index and pollution status at different sites

		取 样 地 点 Sampling sites								
		DMG	WZ	HQC	GZ	XQS	LKS	SC	SW	DHS
大气污染指数评价 Estimation by air pollution index	硫酸盐化速率 Sulfation rate	6.07	4.93	3.79	4.11	4.44	2.74	3.60	3.13	0.27
	氟化物 Fluoride	15.82	12.99	11.50	10.78	7.31	5.77	2.71	4.35	0.24
	复合污染指数 MAPI	21.89	17.92	15.28	14.89	11.75	8.51	6.31	7.48	0.51
	评价结果 Estimated results	III	III	III	III	III	III	II	II	Io
生物监测指标评价 Estimation by physio-ecology index	叶面积 Leaf area	1.44	1.35	1.30	1.29	1.29	1.24	1.29	1.24	1.00
	叶绿素 Chlorophyll	1.34	1.34	1.38	1.31	1.16	1.26	1.13	1.16	1.00
	pH 值 pH value	1.17	1.17	1.19	1.15	1.17	1.10	1.01	1.03	1.00
	电导率 Conductance	2.47	2.77	2.84	1.89	1.72	1.90	1.41	1.63	1.00
	复合污染指数 MAPI	6.42	6.63	6.70	5.65	5.33	5.49	4.85	5.06	4.00
	评价结果 Estimated results	III	III	III	III	II	II	I	II	Io

III: 重污染区 Heavily polluted area ;II: 中度污染区 Polluted area ;I: 轻污染区 Slightly polluted area ;Io: 清洁区 Clean area

MAPI= multiple air pollution index

复合污染指数的大小对大气污染程度进行综合评价。污染程度的划分为：

- 大气污染物指数法：MAPI < 2.5, 清洁区  
 2.5 < MAPI < 5.0, 轻度污染  
 5.0 < MAPI < 7.5, 中度污染  
 MAPI > 7.5, 重污染区
- 生物监测指标法：MAPI < 4.5, 清洁区  
 4.5 < MAPI < 5.0, 轻度污染  
 5.0 < MAPI < 5.5, 中度污染  
 MAPI > 5.5, 重污染区

根据上述划分原则和复合污染指数的计算结果,可以得到不同区域大气污染状况(表 4)。从两种评价方法得到的结果(或复合污染指数)的趋势是一致的,与环境的实际污染状况也基本相符。

尽管两种方法评价结果的趋势基本一致,但从表 4 的评价结果看到,在西樵山、林科所、深村小学三个点的生物监测指标法的评价结果较大气污染指数法的偏低。有报道认为,目前大气硫酸盐化速

率的标准(二级 0.25 mg SO<sub>3</sub> 100 cm<sup>2</sup>d<sup>-1</sup>)偏严,并且通过试验证明,以 0.60 mg SO<sub>3</sub> 100 cm<sup>2</sup>d<sup>-1</sup> 代替现有的标准更符合实际<sup>[7]</sup>。如果以后者作为标准,则两个方法的评价结果几乎完全一致。用两种评价方法得到的复合污染指数(表 4)进行回归分析的结果表明,两者呈极显著相关( $r=0.918$ ,  $P<0.0005$ )。用生物监测模型的评价结果与大气硫酸盐化速率和氟化物的实际监测值进行线性拟合的结果(图 2)可见,大气硫酸盐化速率(图 2a)和氟化物(图 2b)的变化由生理生态指标变量线性说明的部分分别是 98.7% 和 90.4%,说明用生物检测模型的评价结果有很高的可信度。从具体的污染区域来看,佛山市禅城区大帽岗以西(含南庄,图 1)大部分地区,由于受石湾、南庄等地陶瓷工业废气的污染,环境污染明显比东部地区严重,生物监测评价结果与污染源分布情况和实际大气环境质量状况基本相符。利用植物生理生态指标的变化幅度作为生物监测的指标来评价佛山市城区大气污染状况是可行的。

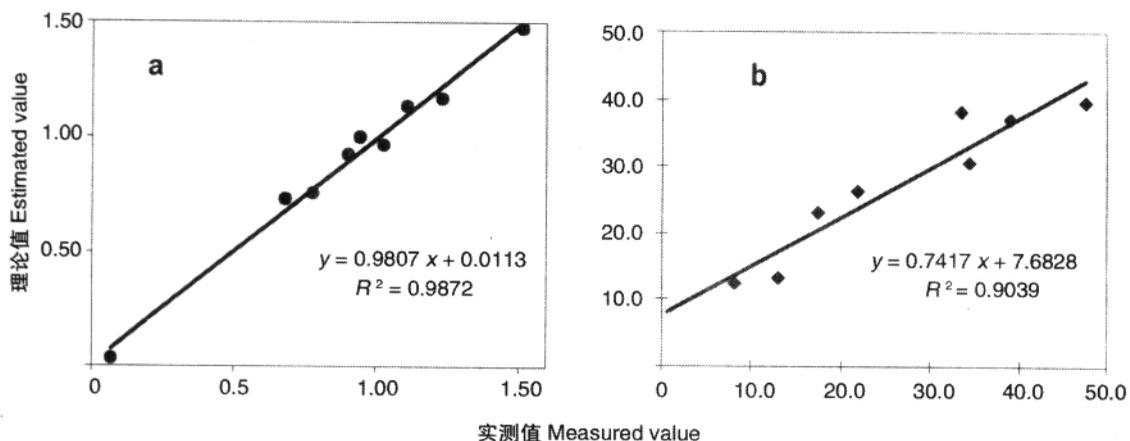


图 2 大气污染物实测值与生物监测指标评价体系理论推导值的线性拟合

Fig. 2 The fitting line between measured sulfation rate (a), fluoride (b) and estimated by bio-monitoring model with physio-ecological indicators

a. 大气硫酸盐化速率 Air sulfation rate; b. 大气氟化物 Air fluoride

## 参考文献

- [1] Liu R K (刘荣坤). Sulfur dioxide injury and mechanism of plants [J]. China Envir Sci (中国环境科学), 1982, (6): 75-78. (in Chinese)
- [2] Yu S W (余叔文). Sulfur dioxide injury and plant resistance [J]. Plant Physiol Commun (植物生理学通讯), 1983, (3): 7-14. (in Chinese)
- [3] Wu L Y (吴丽英), Wang X X (王晓霞), Chen J D (陈金德), et al. Effect of sulfur dioxide on photosynthetic and respiration intensity in crops [J]. Agro-envir Prot (农业环境保护), 1989, 8 (2): 9-12. (in Chinese)
- [4] Chen X Y (陈小勇), Song Y C (宋永昌). The feasibility of SOD activity as bio-indicator of SO<sub>2</sub> pollution [J]. Acta Phytoecol Sin (植物生态学报), 1995, 1: 23-28. (in Chinese)
- [5] Ministry of Urban and Rural Construction and Environmental Protection (城乡建设环境保护部环境保护局编). Analytical Method for Environmental Monitoring [M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1986. 201-205, 221-222. (in Chinese)
- [6] Yu S W (余叔文), Yan L Y (颜丽英). Methods for Bio-monitoring of Air Pollution [M]. Guangzhou: Press of Zhongshan University, 1993. 11. (in Chinese)

- [7] Liu Y J (刘艳菊), Ding H (丁辉). Responses of plants to air pollution and their significance in urban greening [J]. Chin Bull of Bot (植物学通报), 2001, 18(5): 577-58. (in Chinese)
- [8] 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 pollution [J]. J Trop Subtrop Bot (热带亚热带植物学报), 2002, 10(4): 321-327. (in Chinese)
- [9] Shu J H (舒家豪). Reviews, evolution and expectation of bio-monitoring in China [J]. Labor Medic (劳动医学), 1994, 11(1): 1-2. (in Chinese)
- [10] Huang J X (黄金祥). Suggestions to sanitation standard of bio-monitoring in China [J]. Labor Medic (劳动医学), 1994, 11(1): 2-4. (in Chinese)
- [11] Fang Y M (方炎明), Wei Y (魏勇), Zhang X P (张晓平), et al. Advance in moss bio-monitoring of atmospheric heavy metal pollution [J]. J Nanjing For Univ (南京林业大学学报), 2000, 24(5): 64-68. (in Chinese)
- [12] Jiang G M (蒋高明). Application of *Pinus tabulaeformis* Carr. needles in bio-monitoring atmospheric sulphur dioxide pollution in Chengde city [J]. Urban Envir Urban Ecol (城市环境与城市生态), 1995, 8(1): 19-22. (in Chinese)
- [13] Zhang D Q (张德强), Yu M D (郁梦德), Kong G H (孔国辉), et al. Evaluation of pollution effects of atmospheric SO<sub>2</sub> and HF on plants and environment in Humen district [J]. Agro-envir Prot (农业环境保护), 1997, 16(5): 204-208. (in Chinese)
- [14] Farooq M, Saxena R P, Beg M U. Sulphur dioxide resistance of Indian trees. I. Experiment evaluation of visible symptoms and SO<sub>2</sub> sorption [J]. Water Air Soil Pollut, 1988, 40: 301-216.
- [15] Chen C H (陈春焕), Yan L Y (颜丽瑛). Using sulfur content in plants to predict the air SO<sub>2</sub> concentration in Guangzhou city [J]. Envir Pollut Prev, 1987, 9(1): 10-14. (in Chinese)
- [16] Zhang X P (张西萍), Li M (李敏), Luo Z M (罗钟梅). Selections of tree species for monitoring air SO<sub>2</sub> and their applications [J]. China Envir Sci (中国环境科学), 1988, 8(4): 17-22. (in Chinese)
- [17] Zou W N (邹万年), Xu J H (许建华), Tang Y P (唐雅萍). Drafting local air standard of oxidation rate from sulfur dioxide to sulphate for Nanjing urban area [J]. Envir Monit China (中国环境监测), 1996, 12(3): 39-42. (in Chinese)