

# 污染区域大气环境质量生物监测的数学模式

张德强<sup>1</sup> 郁梦德<sup>1</sup> 林志红<sup>2</sup> 陈军<sup>2</sup> 卢云鹤<sup>2</sup> 葛宁春<sup>2</sup>

(1. 中国科学院华南植物研究所, 广东 广州 510650; 2. 深圳南山环境监测站, 广东 深圳 518000)

**摘要:** 以常规标准取样法、静态挂片吸收取样法分别测定了深圳南山区范围内大气二氧化硫、硫酸盐化速率和氟化物的含量, 并同步测定了植物叶片的污染物含量。利用回归方法分析了3种测定结果的相互关系, 并以植物叶片污染物含量为基础建立大气环境质量生物监测的数学模型, 其中以叶片含硫量评价大气硫酸盐化速率的模型为夏季  $y = 0.781x - 0.754$ , 冬季  $y = 1.88x - 2.283$ ; 以叶片含氟量评价大气氟化物的模型为夏季  $y = 0.363x - 7.511$ , 冬季  $y = 0.175x - 3.461$ , 这些模型均有很高的可信度 ( $p < 0.001$ )。

**关键词:** 大气环境质量; 二氧化硫; 硫酸盐化速率; 氟化物; 生物监测模型

中图分类号: X835

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2003)04-0393-07

## Mathematical Models of Biological Monitoring of Atmospheric Environment Quality in Polluted Area

ZHANG De-qiang<sup>1</sup> YU Meng-de<sup>1</sup> LIN Zhi-hong<sup>2</sup> CHEN Jun<sup>2</sup> LU Yun-he<sup>2</sup> GE Ning-chun<sup>2</sup>

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

2. Shenzhen Nanshan Environment Monitoring Station, Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** Sulfur dioxide concentration, sulfation rate and fluoride contents in atmosphere around the Nanshan district in Shenzhen were measured in summer and winter of 2000 using two different sampling methods (i.e. conventional standard sampling and static suspending piece absorption). At the same time, sulfur and fluorine contents in plant leaves were also measured. Regression analysis showed that pollutant concentrations in atmosphere were significantly correlated with the pollutant contents ( $x$ ) in plant leaves. On the basis of these correlations, biomonitoring mathematical models for evaluation on air sulfation rate ( $y$ ) were developed as  $y = 0.781x - 0.754$  for summer and  $y = 1.88x - 2.283$  for winter, whereas on air fluoride ( $y$ ),  $y = 0.363x - 7.511$  for summer and  $y = 0.175x - 3.461$  for winter. It is suggested that the models are reliable.

**Key words:** Atmospheric environment quality; Sulfur dioxide; Sulfation rate; Fluoride; Biomonitoring model

植物具有吸收大气污染物的能力。不同植物对污染物吸收能力受气象、环境条件、污染物浓度、接触时间等因素的影响, 影响的程度与植物形态、叶面积、叶量、气孔开放度等因素密切相关, 即使生物量相同吸收污染物的量也有差异。张维平等<sup>[1]</sup>认为阔叶树吸收污染物的能力大于农作物, 农作物大于针叶树。鲁敏等<sup>[2,3]</sup>通过人工熏气研究测定了部分园林绿化植物对主要大气污染物  $SO_2$ 、 $Cl_2$  和 HF 的吸收能力, 结果表明, 依据污染物和树种的不同, 其吸

收能力存在明显的差异。

植物对污染物的吸收积累能力, 在植物本身能够忍受的程度下, 与大气污染物的浓度、接触时间成正比。利用植物的某些营养器官(叶、枝、皮)中污染物的含量来评价污染物的污染水平, 这便是生物监测的范畴。随着实验方法、技术手段等的不断完善, 生物监测涵盖了从宏观的生态系统到微观的分子水平。据报道, 在欧洲, 尤其是在原西德已建立了比较完善的大气  $SO_2$  污染生物监测网络<sup>[4]</sup>, 我国

在这方面的研究起步较晚,二十世纪 70 年代末才有这方面的报道,并且大多是以植物叶片含硫量进行监测和评价的<sup>[5-8]</sup>。陈小勇等<sup>[9]</sup>用蚕豆通过熏气和暴露实验,以 SOD 活性、抗坏血酸(AsA)、游离氨基酸(AAA)、过氧化酶(POD)活性和叶绿素含量等 5 个指标进行综合评价,与 SO<sub>2</sub> 浓度拟合极佳。但对于野外生长的植物,因植物年龄、营养状况、水分条件等因素的影响,其可靠性还有待检验。

大气 SO<sub>2</sub> 浓度监测的标准方法有全自动法和常规法,前者设备造价昂贵,一般地区难于普及;后者采样设备简单,但采样点必须有动力电源,且为人工采样,两种方法的大气 SO<sub>2</sub> 浓度的单位均为 mg SO<sub>2</sub> m<sup>-3</sup>。大气 HF 浓度的监测并非规定的必测项目。国家标准方法是常规法,用人工采样,单位为 μg F m<sup>-3</sup>。标准方法由于受设备、电源、人力、采样时间及天气状况等诸多条件的限制,许多环境监测部门已越来越多采用静态挂片取样法<sup>[10]</sup>(简称挂片法)这种方法设备简单,可以大大节省人力物力的投入,不受时间和天气条件的限制,而且可以多点同步进行,适用于大范围的环境质量评价,这尤其在多风雨的南方地区更具实用价值。挂片法监测的结果是硫酸盐化速率和氟化物含量,硫酸盐化速率代表大气中以 SO<sub>2</sub> 为主的硫氧化物(包括硫化物和酸雾等)的总和,单位为 mg SO<sub>3</sub> 100 cm<sup>2</sup> d<sup>-1</sup>;氟化物含量是大气中含 F 化合物的总和(包括气态 F 和尘 F 等),单位为 μg F 100 cm<sup>2</sup> d<sup>-1</sup>。两种测定结果所表达的是大气污染物含量的平均水平。

生物监测是利用生物器官(如植物叶片、树皮等)的污染物含量间接表征大气污染物的污染水平。本项研究通过对大气 SO<sub>2</sub>、硫酸盐化速率、氟化物和植物叶片含硫量(或含氟量)的野外同步测定,并对结果进行相关分析,建立适合野外自然条件下的生物监测模型,为区域或地方环境质量的监测和评价提供参考。

## 1 研究方法

### 1.1 样点设置和样品采集

在深圳市南山区范围内选定 8 个点,各采样点的位置见图 1。其中华侨小学、荔香中学、南油小学 3 个点是深圳市大气 SO<sub>2</sub> 全自动监测点,西丽疗养院、青青世界、外语学校和监测站 4 个点为大气 SO<sub>2</sub> 和 HF 监测常规法<sup>[10]</sup>的人工采样点,所有 8 个采样点均进行静态挂片<sup>[10]</sup>取样以监测大气硫酸盐化速率

和氟化物(前海点只有挂片取样)。在夏季(9月12日-25日)和冬季(12月19日-30日)每天采集大气 SO<sub>2</sub> 和 HF 样品一次,每次 24 h,夏季连续 14 d,冬季 12 d。每个点同时用挂片法进行大气硫酸盐化速率和氟化物的监测,每月取样一次,连续一年。每次人工采样结束后,在各采样点分别采集叶龄相同的小叶榕(*Ficus microcarpa* L. f.)成熟叶片测定其含硫量和含氟量。由于 3 个自动监测点(只监测 SO<sub>2</sub>)所测定的是大跨度(约 100 m)断面含 S 化合物的平均浓度,与常规法的点状取样无论是测定原理还是测定方法均有很大差异,因此在数据处理和分析过程中没有将自动监测的结果列入在内。

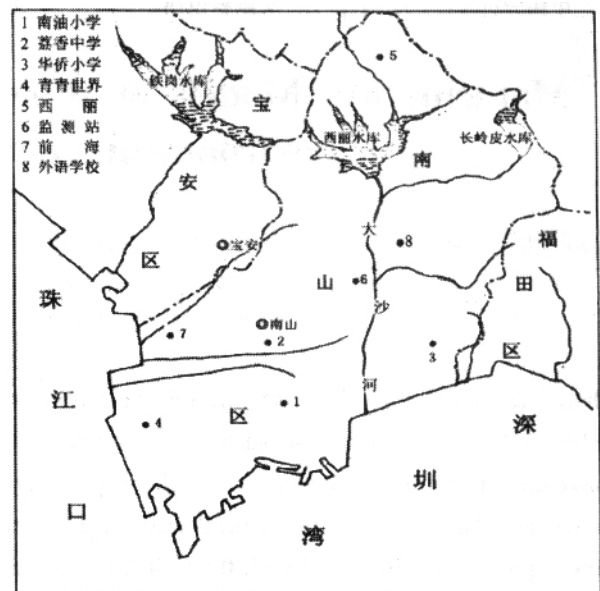


图 1 样点分布示意图

Fig. 1 Sketch map of sampling sites

### 1.2 分析方法

大气 SO<sub>2</sub> 用盐酸付玫瑰苯胺比色法测定<sup>[10]</sup>;硫酸盐化速率用硫酸钡比浊法测定<sup>[10]</sup>;大气氟化物用离子选择电极法<sup>[10]</sup>;叶片含硫量用氧瓶燃烧,硫酸钡比浊法测定<sup>[11]</sup>;叶片含氟量用氧瓶燃烧,离子选择电极法<sup>[11]</sup>。

## 2 结果和分析

### 2.1 利用生物监测评价大气环境质量的理论依据

植物的营养器官(叶、嫩枝、皮等)或生殖器官(花、果等)在生长发育过程中必须进行不断的气体交换,同时能吸收和积累空气污染物(SO<sub>2</sub>、HF等),在植物能够忍受的范围内,其吸收和积累的量

与污染物浓度和接触时间成正相关。因此,利用植物营养器官污染物的含量(即生物监测法)来评价空气中污染物的污染程度,其可靠性已被许多研究所证实,并且被广泛应用于实践中<sup>[6-8,11-13]</sup>。

2.2 生物监测的数学模型

2.2.1 植物叶片含硫量与大气 SO<sub>2</sub> 浓度的关系

植物叶片含硫量是叶片在生长过程中对大气 SO<sub>2</sub> 吸收累积的结果,也是植物生长过程中对大气 SO<sub>2</sub> 污染程度的真实反映。表 1 是叶片含硫量与大气 SO<sub>2</sub> 监测结果(常规法)。

从表 1 的数据可以看出,大气 SO<sub>2</sub> 浓度与叶片含硫量具有线性关系,可以拟合成方程表示:

$$\text{夏季: } y=0.36x-0.453 \quad (n=4, r=0.97, ) \quad (1)$$

冬季:  $y=0.5001x-0.647 \quad (n=4, r=0.999, ) \quad (2)$   
 式中的  $y$  表示大气 SO<sub>2</sub> 浓度,  $x$  表示叶片含硫量。从方程(1)、(2)可以看出,尽管因自动采样设备的原因,大气采样点位偏少(仅 4 个点),但回归分析显示,夏季和冬季的大气 SO<sub>2</sub> 浓度和植物叶片含硫量之间仍呈显著相关,模型测验结果(表 2)和回归系数测验结果(表 3)也表明,夏季达显著水平,冬季达极显著水平。冬季的相关性较夏季更为显著,这主要是受气象条件如风向、降雨和污染源的方位等因素影响所致。在夏季,因台风、雨水天气较多,污染物扩散不规律,影响植物叶片对大气污染物的吸收;在冬季,台风、雨水较少,气候条件较稳定,污染物扩散较有规律,因而两者的相关性较夏季的

表 1 植物叶片含硫量 (g S kg<sup>-1</sup>)与大气 SO<sub>2</sub> 监测浓度(mg SO<sub>2</sub> m<sup>-3</sup>)  
 Table 1 Sulfur content in leaves (g S kg<sup>-1</sup>) and atmospheric sulfur dioxide concentration (mg SO<sub>2</sub> m<sup>-3</sup>)

			地点 Sampling sites			
			监测站 Monitoring Station	青青世界 Youth World	外语学校 F. Language School	西丽 Xili
夏季 Summer	SO <sub>2</sub> 浓度	实测值 Measured	0.0527±0.005	0.0075±0.001	0.005±0.001	0.005±0.001
		理论值 Estimated*	0.0506	0.0139	0.0064	0.0008
	叶片含硫量 S in leaves		1.399±0.12	1.297±0.09	1.276±0.07	1.256±0.10
冬季 Winter	SO <sub>2</sub> 浓度	实测值 Measured	0.118±0.06	0.055±0.008	0.025±0.005	0.005±0.001
		理论值 Estimated*	0.1164	0.0588	0.0233	0.0043
	叶片含硫量 S in leaves		1.527±0.11	1.412±0.06	1.341±0.08	1.303±0.05

\* 由相关方程的推导得出(下同) Estimated values are obtained from regression equation (model) (the same for Tables 4-6)

表 2 模型 (1)、(2) 测验结果  
 Table 2 Results tested by models (1) and (2)

		自由度 Df	平方和 SS	均方差 MSE	F	P	r <sup>2</sup>
夏季 Summer	回归分析 Regression	1	0.00157	0.00157	38.572	0.024959	0.951
	残差 Residual	2	8.14E-05	4.07E-05			
	总计 Total	3	0.001652				
冬季 Winter	回归分析 Regression	1	0.007276	0.007276	703.43	0.001419	0.997
	残差 Residual	2	2.07E-05	1.03E-05			
	总计 Total	3	0.007297				

Df=Degree of freedom; SS=Sum of square; MSE=Mean squared error

表 3 回归系数的测验结果  
 Table 3 Results tested by regression coefficients

		系数 Coefficients	标准误差 SE	t statistic	P value
夏季 Summer	切距 Intercept	-0.453	0.076	-5.974	0.027
	自变量 X Variable	0.360	0.058	6.211	0.025
冬季 Winter	切距 Intercept	-0.647	0.026	-24.548	0.002
	自变量 X Variable	0.500	0.019	26.522	0.001

高。蒋高明<sup>[14]</sup>利用植物多部位(叶、枝、皮)的 S 含量与大气 SO<sub>2</sub> 浓度进行多元回归来评价大气 SO<sub>2</sub> 的污染状况,得到的监测模型灵敏度更高。许多研究证实,植物的营养器官(叶、枝、皮)甚至生殖器官(花、果)的 S 含量与大气 SO<sub>2</sub> 的浓度成正相关,多元回归其实是一元回归的叠加,灵敏度会有所提高。只要严格控制采样时间和部位(叶龄),一元回归模型仍有很高的灵敏度。因此,用植物叶片含硫量评价大气 SO<sub>2</sub> 污染水平是可行的。

2.2.2 植物叶片含硫量与大气硫酸盐化速率的关系

植物叶片含硫量和大气硫酸盐化速率是反映测定前某一时期大气 SO<sub>2</sub> 及硫化物污染的平均水平,因此,以植物叶片含硫量评价取样前一段时间大气硫酸盐化速率水平是合适的。从测定结果(表 4)来看,两者之间有很好的相关性,可以拟合成方程来表示:

$$\text{夏季 } y = 0.781x - 0.754 \quad (r = 0.93, n=8) \quad (3)$$

$$\text{冬季 } y = 1.88x - 2.283 \quad (r = 0.94, n=8) \quad (4)$$

式中的  $x$  表示植物叶片含硫量,  $y$  表示大气硫酸盐化速率。方程(3)、(4)表明,无论是夏季还是冬季,植物叶片含硫量与大气硫酸盐化速率均有很好的线性关系,模型和回归系数测验结果(表 7)也显示,两者的线性相关达极显著水平(夏季和冬季均为  $p < 0.001$ )。说明用植物叶片含硫量来判断大气

硫酸盐化速率水平有很高的灵敏度。

2.2.3 植物叶片含氟量与大气氟化物浓度(常规法)的关系

植物叶片含氟量与含硫量一样,与大气氟化物浓度和接触时间成正比。表 5 是用常规法在夏季和冬季两次取样测定荔枝叶片含氟量和大气氟化物浓度的结果,两者可拟合成方程来表示:

$$\text{夏季 } y = 0.023x + 0.6685 \quad (r = 0.92, n=4) \quad (5)$$

$$\text{冬季 } y = 0.1998x + 3.711 \quad (r = 0.98, n=4) \quad (6)$$

式中  $x$  表示叶片含硫量,  $y$  表示大气氟化物含量。对模型(5)、(6)及其回归系数测验结果(表 7)可知,监测模型(6)的两个变量呈显著相关( $p = 0.024$ ),模型(5)变量的线性关系并不显著( $p = 0.078$ )。由于大气中的氟化物较 SO<sub>2</sub> 更容易扩散,而且夏季的气候比冬季变化更大,台风、降雨等因素均可影响大气氟化物浓度的检测结果和植物对氟化物的吸收能力,导致监测模型灵敏度的下降。许皖箐等<sup>[15]</sup>对桑叶表面吸氟能力的研究证实,降雨对氟吸收量有一定的负效应,而且高温也表现为负效应。

2.2.4 植物叶片含氟量与大气氟化物含量(挂片法)的关系

表 6 是用挂片法对植物叶片含氟量与大气氟化物的测定结果,从表中的数据可以导出两者的相

表 4 植物叶片含硫量 (g kg<sup>-1</sup>)与大气硫酸盐化速率 (mg SO<sub>3</sub> 100cm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>)  
Table 4 Sulfur content in leaves (g kg<sup>-1</sup>) and atmospheric sulfation rate (mg SO<sub>3</sub>100cm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>)

		地 点 Sampling sites								
		前海 Qianhai	监测站 Monitor Station	荔香中学 Lixiang School	南油小学 Nanyou School	青青世界 Youth World	外语学校 F. Language School	西丽 Xili	华侨小学 Huaqiao School	
夏季 Summer	叶硫 S in leaves	1.448±	1.399±	1.385±	1.325±	1.297±	1.276±	1.256±	1.168±	
		0.10	0.06	0.08	0.07	0.08	0.09	0.08	0.07	
	盐化速率 Sulfation rate	实测值 Measured	0.363±	0.358±	0.347±	0.282±	0.217±	0.278±	0.191±	0.176±
		理论值 Estimated	0.02	0.03	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.03
冬季 Winter	叶硫 S in leaves	1.442±	1.459±	1.385±	1.37±	1.341±	1.412±	1.303±	1.282±	
		0.08	0.05	0.06	0.09	0.08	0.10	0.06	0.08	
	盐化速率 Sulfation rate	实测值 Measured	0.51±	0.394±	0.329±	0.254±	0.2520±	0.377±	0.174±	0.1210±
		理论值 Estimated	0.01	0.016	0.01	0.006	0.008	0.01	0.005	0.006
		0.428	0.460	0.321	0.293	0.238	0.372	0.167	0.127	

表 5 常规法测定的植物叶片含氟量 (mg kg<sup>-1</sup>)与大气氟化物监测浓度(μg m<sup>-3</sup>)

Table 5 Fluorine content in plant leaves (mg F kg<sup>-1</sup>) and fluoride concentration in atmosphere(μg F m<sup>-3</sup>) tested by conventional method

		监测 Monitoring Station	青青世界 Youth World	外语学校 F. Language School	西丽 Xili
夏季 Summer	叶 F F in leaves	35.97±2.35	26.28±2.86	25.81±3.68	24.85±2.25
	大气氟化物 Atmospheric fluoride	实测值 Measured 1.5±0.15	1.32±0.20	1.31±0.12	1.18±0.11
		理论值 Estimated 1.496	1.273	1.262	1.240
		偏差 SE % 0.27	3.56	3.66	-5.08
冬季 Winter	叶 F F in leaves	30.42±4.32	34.36±3.23	28.15±2.56	30.9±3.12
	大气氟化物 Atmospheric fluoride	实测值 Measured 2.2±0.23	3.2±0.13	2.0±0.11	2.5±0.14
		理论值 Estimated 2.44	2.13	2.62	2.40
		偏差 SE % 26.06	-6.50	-13.91	-20.0

表 6 挂片法测定的植物叶片含氟量 (mg F kg<sup>-1</sup>)与大气氟化物含量 (μg F 100cm<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>)

Table 6 Fluorine contents in plant leaves (mg F kg<sup>-1</sup>) and fluoride in atmosphere (μg F 100cm<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>) tested by method of static suspending absorption

		地 点 Sampling sites							
		监测站 Monitoring Station	前海 Qianhai	外语学校 F. Language School	荔香中学 Lixiang School	南油小学 Nanyou School	西丽 Xili	青青世界 Youth World	华侨小学 Huaqiao School
夏季 Summer	叶 F 含量 F in leaves	35.97±	30.06±	26.28±	26.98±	27.2±	24.85±	25.81±	25.57±
		2.12	3.25	2.56	2.34	3.66	1.25	1.36	2.33
	大气氟化物 Atmospheric fluoride	实测值 5.35±	3.92±	2.7±	2.29±	2.09±	1.86±	1.575±	0.98±
		0.22	0.29	0.13	0.11	0.16	0.22	0.18	0.12
		理论值 5.55	3.40	2.03	2.28	2.36	1.51	1.86	1.77
		偏差 SE % -3.74	13.26	24.81	0.44	-12.92	18.82	-18.10	-80.61
冬季 Winter	叶 F 含量 F in leaves	30.42±	41.78±	34.36±	33.86±	30.86±	30.90±	28.15±	27.46±
		3.21	5.24	3.33	3.45	3.56	1.23	3.12	2.43
	大气氟化物 Atmospheric fluoride	实测值 2.13±	3.81±	2.35±	2.673±	2.283±	2.20±	1.42±	1.003±
		0.15	0.13	0.19	0.12	0.18	0.15	0.11	0.21
		理论值 1.91	3.89	2.60	2.51	1.98	1.99	1.51	1.39
		偏差 SE % 10.33	-2.10	-10.64	6.10	13.27	9.54	-6.34	-38.58

表 7 模型及其回归系数的测验结果

Table 7 Tested results of models and regression coefficients

模型 Models	观测点 No. of sites	模型测验 Model test		回归系数测验 Regression coefficient test		P	r <sup>2</sup>
		均方差 MSE	F	标准误差 SE	t		
1	4	0.0016	38.57	0.058	6.21	0.025	0.95
2	4	0.007	703.44	0.019	26.52	0.001	0.99
3	8	0.035	37.19	0.128	6.10	0.0009	0.86
4	8	0.099	45.93	0.277	6.78	0.0005	0.88
5	4	0.044	11.41	0.007	3.38	0.078	0.85
6	4	0.788	40.60	0.031	6.37	0.024	0.95
7	8	12.23	44.17	0.055	6.65	0.0006	0.88
8	8	4.445	61.53	0.022	7.84	0.0002	0.91

关方程：

$$\text{夏季 } \hat{y} = 0.363x - 7.511 \quad (r=0.94, n=8) \quad (7)$$

$$\text{冬季 } \hat{y} = 0.175x - 3.416 \quad (r=0.95, n=8) \quad (8)$$

式中的  $y$  表示大气氟化物含量,  $x$  表示植物叶片含氟量。对模型(7)、(8)及其回归系数的测验结果(表7)表明,植物叶片含氟量与大气氟化物含量之间呈极显著的线性相关( $p < 0.001$ )。因此,用模型(7)、(8)即植物叶片 F 含量来评价大气氟化物污染水平,具有很高的灵敏度和可靠性。

### 3 讨论

#### 3.1 方程的相关性讨论

任何具有线性关系的两个变量,其相关程度可用两者之间的决定系数即相关系数的平方值( $r^2$ )来表示, $r^2$ 值越大表示具线性关系的两个变量所占的比例就越高,反之则越低。而两者的相关系数( $r$ )更能直观反映两个变量之间相关是否显著。对以上各个方程(模型)及其回归系数的测验结果(表7)可以看出,方程(2)、(3)、(4)、(7)、(8)变量之间的线性关系达极显著水平( $p < 0.01$ ),方程(1)、(6)变量之间的线性关系达显著水平( $p < 0.05$ ),只有方程(5)两个变量间的线性关系没有达到显著水平。由此可见,植物叶片含硫量和含氟量与静态取样法测得的大气硫酸盐化速率和氟化物具有极好的线性相关,以它们之间建立的线性关系方程可以用作来评价大气硫酸盐化速率、大气氟化物(挂片法)污染水平的生物监测模型,而且具有很高的灵敏度和可靠性。而用植物叶片含硫量来评价大气  $\text{SO}_2$  浓度水平,尽管大气采样受气象条件影响较大,使得监测模型的灵敏度有所降低,但仍有较高的可靠性。

#### 3.2 方程的适用性分析

由以上方程有关变量的相关的显著性水平表明,以植物含污量(生物监测法)来评价大气污染物的污染水平,随评价对象结果表示方法的不同,可靠性有所差异。由植物含污量与静态取样法测定的结果所导出的生物监测模型(方程(3)、(4)、(7)、(8)等),由于两者都是表示累积浓度,而且监测过程受气象条件等因素影响极小而有更高的灵敏度和可靠性。而与常规取样法测定的结果所导出的监测模型(方程(1)、(2)、(5)、(6)等),因植物含污量是反映取样前一段时间(从植物叶片展开直至采样)大气污染物的平均水平,而常规法的测

定结果尽管是连续测定,但在本试验也仅有 14 d(夏季)和 12 d(冬季),由于时间的并不完全同步导致监测模型的灵敏度偏低,如果点位(现参与统计样点仅 4 个)适当增加,大气采样时间适当延长甚至与植物生长期同步,两者的相关性将显著提高。因此,用生物监测法评价大气某些污染物在取样前一段时期的污染水平,有其合理性,也具有很高的灵敏度和可信性。以上方程可作为本地区或同类型地区生物监测的数学模型,尤其是方程(3)、(4)、(7)和(8),有很高的可靠性。

生物监测法作为大气环境质量常规监测的重要补充手段,具有经济实用的特点,能大范围同步进行,而且不受气象因素的影响,在仪器设备和人力物力不足的市县或乡镇地区具有广泛的应用前景。

#### 参考文献

- [1] Zhang W P(张维平), Shen Y W(沈英娃), Xin G H(邢冠华). A study on elimination capacity of crops and trees for  $\text{SO}_2$  in North China [J]. Chin Envir Sci(中国环境科学), 1988, 8(4): 11-16. (in Chinese)
- [2] LU M(鲁敏), Li Y J(李英杰), Lu J P(鲁金鹏). Absorption and purification of main Air pollutants by tree species [J]. Urban Envir Urban Ecol(城市环境与城市生态), 2002, 15(2):7-9. (in Chinese)
- [3] Lu M(鲁敏), Li Y J(李英杰). Research on atmospheric pollutant absorption and purgation ability of some garden plants [J]. J Shandong Inst Arch Eng(山东建筑工程学院学报), 2002, 17(2):45-49. (in Chinese)
- [4] Zhen S Y(郑淑颖). Evolution of the effect of  $\text{SO}_2$  pollution on vegetation [J]. Ecol Sci(生态科学), 2000, 19(1):59-64. (in Chinese)
- [5] Wang J X(汪嘉熙), Li Z F(李正方), Qian D F(钱大复). Plant monitoring of air pollution [J]. Envir Sci(环境科学), 1978, (5):7-12. (in Chinese)
- [6] Li Z F(李正方), Qian D F(钱大复), Pan R G(潘如圭). Evaluation of air environmental quality by plants [J]. China Envir Sci(中国环境科学), 1982, (2):29-32. (in Chinese)
- [7] Yan L Y(颜丽英), Zhu T J(朱天玑). Using plants to monitor and evaluate atmospheric sulfur dioxide pollution in Guangzhou city [J]. Acta Phytoecol Geobot Sin(植物生态学与地植物学丛刊), 1983, 7(4):265-272. (in Chinese)
- [8] Jiang G M(蒋高明). Application of *Pinus tabulaeformis* 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)
- [9] Chen X Y(陈小勇), Song Y C(宋永昌). *Vicia faba* used as a bio-indicator for monitoring atmospheric  $\text{SO}_2$  pollution [J]. Chin J Appl Ecol(应用生态学报), 1994, 5(3):303-308. (in Chinese)
- [10] Ministry of Urban and Rural Construction and Environmental

- Protection (城乡建设环境保护部环境保护局). Analytical Method for Environmental Monitoring [M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1986. 201–205, 221–223. (in Chinese)
- [11] Yu S W (余叔文), Yan L Y (颜丽英). Bio-monitoring Methods in Air Pollution [M]. Guangzhou: Press of Zhongshan University, 1993. 11. (in Chinese)
- [12] Yu M D (郁梦德), Zhang D Q (张德强), Yu Q F (余清发). Changes in SO<sub>2</sub> in polluted ambient air by plant monitoring [J]. *Envir Sci (环境科学)*, 1987, (6) 25–29. (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 effects of atmospheric SO<sub>2</sub> and HF pollution on plants and environment in Humen district [J]. *Agro-environ Prot(农业环境保护)*, 1997, (5) 204–208. (in Chinese)
- [14] Jiang G M (蒋高明). Research on quantitative models for bio-monitoring and bio-assessing air pollution with method of measuring the sulfur content in plants [J]. *China Envir Sci(中国环境科学)*, 1995, 15(3) 208–214. (in Chinese)
- [15] Xu W Q (许皖箐), Yan Y M (颜贻明), Wu F Z (吴方正). A statistical study of fluoride accumulation rule in mulberry leaves [J]. *Envir Poll Prev(环境污染与防治)*, 1998, 20(3):19–21. (in Chinese)