

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3142.2014.02.016

高嵩, 廖文波, 张力. 藓袋法对深圳市痕量大气重金属污染物的监测[J]. 广西植物, 2014, 34(2):212-219

Gao S, Liao WB, Zhang L. Monitoring of airborne heavy metals by using moss-bags in Shenzhen[J]. *Guihaia*, 2014, 34(2):212-219

藓袋法对深圳市痕量大气重金属污染物的监测

高嵩^{1,2}, 廖文波², 张力^{1*}(1. 深圳市中国科学院仙湖植物园 深圳市南亚热带植物多样性重点实验室,
广东 深圳 518004; 2. 中山大学 生命科学学院, 广州 510275)

摘要: 通过在深圳市盐田、罗湖、福田、南山 4 个行政区 17 个不同地点布放藓袋, 并对其所吸附的 V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 等 10 种重金属元素的含量进行检测和比较研究, 发现 4 个行政区在不同程度上都受到了污染, 其中南山区的污染较轻, 罗湖区、福田区与盐田区较为严重。污染程度可能与水陆交通和工业状况、人口密度以及特殊的地理位置有关。对深圳市 17 个监测点的大气重金属富集含量进行聚类分析发现, 污染较为严重的地区均为工业区和交通密集区, 污染相对较轻的监测点都离工业及交通污染源相对较远。

关键词: 苔藓植物; 生物监测; 重金属污染; 藓袋法; 深圳

中图分类号: Q948.12 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2014)02-0212-08

Monitoring of airborne heavy metals by using moss-bags in Shenzhen

GAO Song^{1,2}, LIAO Wen-Bo², ZHANG Li^{1*}(1. *Shenzhen Key Laboratory of Southern Subtropical Plant Diversity, Fairy Lake Botanical Garden, Shenzhen & Chinese Academy of Sciences*, Shenzhen 518004, China; 2. *School of Life Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China*)

Abstract: This present study investigated airborne trace heavy metals of V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd and Pb in Shenzhen by using moss-bag technique plus ICP-AES analysis. Seventeen sites across four administrative regions, including Yantian, Luohu, Futian and Nanshan were selected for placing moss bags. The results showed that the trace heavy metals varied in these four districts. The pollution of Nanshan was less serious than that of the other three districts. The main reasons were probably related to the land and water traffic conditions, industrial development, population density and geographic location. Cluster analysis of heavy metal concentration contents showed in all monitored sites, the most polluted ones were of industrial and traffic heavy areas, and relative mild polluted were far from industry and highways to some extent. The above showed that the industry and highways played a crucial role in atmospheric pollution. The government must do more to alleviate the atmospheric heavy metal pollution in Shenzhen.

Key words: Bryophytes; biomonitoring; heavy metal pollution; moss-bag technique; Shenzhen

苔藓植物作为空气污染的指示植物近年来被广泛采用, 成为公认的对大气污染敏感的指示植物 (Asakawa, 2007; 吴鹏程, 1998; 孙守琴, 2004; 魏海英等, 2004)。藓袋法监测大气污染是随着城市发

展, 一些人口密集、工业发达的地区与城市的污染监测需要而兴起的。Goodman *et al.* (1971) 较早使用藓袋法来监测大气污染, 以灰藓为藓袋的材料, 测定威尔士西南区某工业区的 4 种重金属含量。Little *et al.*

收稿日期: 2013-08-06 修回日期: 2013-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(31070470); 深圳市城管科研项目(201202)。

作者简介: 高嵩(1988-), 女, 安徽合肥市庐江县人, 硕士, 研究方向为苔藓植物学, (E-mail)gsong0918@163.com。

*通讯作者: 张力, 博士, 研究员, 研究方向为苔藓植物学, (E-mail)zhangli@scib.ac.cn。

(1974)在实验材料上改良了藓袋法。Temple (1981)发表“藓袋监测大气沉降物”的综述。之后,由于其方便、实用、准确、直接以及其研究选择的地点不受环境约束等特点,藓袋法在许多国家的污染监测研究中得到广泛应用,包括英国(Goodman *et al.*, 1974, 1975, 1979; Cameron *et al.*, 1997)、荷兰(Wegener *et al.*, 1992)、德国(Thomas, 1983)、芬兰(Viskari *et al.*, 1997)、美国(Makhholm *et al.*, 2005)、意大利(Adamo *et al.*, 2007, 2008; Cesa *et al.*, 2006; Tretiach *et al.*, 2007)、罗马尼亚(Culicov *et al.*, 2005, 2006)、保加利亚(Culicov *et al.*, 2006)等。我国学者杜庆明等(1989)在藓袋法应用上也有研究;在藓袋法与城市污染监测相结合上,南京(梅娟, 2003)、吉首(姜业芳, 2005)、重庆(Sun *et al.*, 2009)、铜陵(吴明开等, 2008)、上海(Cao *et al.*, 2009)等地进行了藓袋法生物监测研究。与其它植物监测方法相比,藓袋法具有背景浓度明确,不受根吸收干扰的优点,适用于较大范围地区的监测以及长时间监测。

深圳市位于珠江三角洲东岸,是广东省第二大城市,是中国的第一个经济特区。深圳市在改革开放 30 a 以来,在经济高速发展的带动下,城市及工业都得到前所未有的高速发展,人口增多、市区面积扩大、建筑倍增、工业迅猛发展,环境也发生了很大的变化,在这样的情形下,深圳市大气重金属污染的情况也日趋严重,但目前深圳市的环境空气质量标准中对重金属元素只有对 Pb 元素做了明确的污染监测要求(深圳市人居环境网, 2012),而关于深圳市的大气重金属污染状况的研究文章却未查证到。2011 年,深圳市制定了《重金属污染企业专项整治工作方案》,重点防控 Pb、Hg、Cd、Cr 和类金属 As 等,同时兼顾 Ni、Cu、Ni 等其他重金属污染物。

本研究是以藓袋法来监测深圳市大气中 10 种痕量重金属的含量及分布,并使用多种数据分析方法对实验数据进行分析,目的在于对整个深圳市大气中的痕量重金属污染物的种类、含量以及分布情况有一个初步了解并给予评价,研究结果可为日后深圳市环境质量监测、评价和治理提供基础材料。

1 材料与方 法

1.1 实验材料

苔藓材料采自于江西井冈山的荆竹山山坡上,

种名为暖地泥炭藓(*Sphagnum junghuhnianum*)。暖地泥炭藓为分布最广而习见种,常见于山地湿润地区或沼泽中,多成大面积垫状单一的植物群落。苔藓采样品回后,摘取鲜活部分,清洗干净,用 1% 硝酸溶液浸泡,再用去离子水清洗 3 次,然后在清洁的干燥架上自然风干,用尼龙筛网(网眼 2.0 mm × 2.0 mm)做成 15.5 cm × 5.5 cm 的矩形袋子,连同苔藓一起在硝酸溶液中浸泡并清洗干净,一端开口,装入 3.0 g 左右的风干的苔藓,封袋口。制作每一步戴乳胶手套,以避免污染。

1.2 实验设计

深圳市目前共设 6 个市辖行政区,即盐田区、罗湖区、福田区、南山区、宝安区、龙岗区。本研究的范围为前四区。这四个行政区的基本情况如下表 1。针对深圳市这四个行政区的地理位置,按工业区、居民区、风景区、公园等不同城市功能区为选择标准,以平均分布为原则在深圳市四个市区内设置监测点 16 个,同时在东郊远离市中心区的大鹏半岛七娘山设置对照点,共设置 17 个监测点。监测点情况如表 2。

表 1 研究区域的基本情况
Table 1 Basic data of survey regions

地区 Region	常住人口 (人) Resident population (people)	总面积 (平方公里) Total land area (km ²)	人口密度 (人/平方公里) Population density (people/km ²)	建制 Established time
盐田区 Yantian	208861	72.36	2798	1997 年 10 月
罗湖区 Luohu	923423	78.36	11726	1990 年 1 月
福田区 Futian	1318055	78.8	16756	1990 年 1 月
南山区 Nanshan	1087936	182.1	5877	1990 年 1 月

注:数据来自于深圳市第六次人口普查(深圳统计局网站, 2012)

Note: Data from the sixth census of Shenzhen(Website of Shenzhen Statistics Bureau, 2012)

在样点悬挂藓袋,藓袋因地制宜的选择悬挂物,但都必须挂在完全暴露于空气的地方,充分接触空气,不能有遮盖物,离地面高 4~8 m,每点 3 袋(含对照)。悬挂 3 个月后取回,每 1 藓袋内的苔藓装入 1 个封口袋,贴上标签,做好标记。

1.3 实验方法

除去藓袋中的明显杂质(如枯叶),放到 60~80 °C 的烘箱中干燥 8~10 h,干燥至恒重,之后再在陶瓷研钵内研磨呈碎末状,洁净密封保存。准确称取苔藓样品 1.000 g,用优级纯的 HClO₄ 和 HNO₃ (比例为 1 : 4) 配置的混合酸 15 mL 浸泡过夜(12 h 左

表 2 深圳市藓袋法监测点
Table 2 Moss-bag monitored sites in Shenzhen

监测点编号 Monitoring No.	区域 Region	监测点名称 Monitoring site	具体位置 Location	环境 Environment	挂袋时间 Hung bag time	取袋时间 Took bag time
1	盐田区	海山公园	建筑物顶	公园	2011年7月19日	2011年10月17日
2	盐田区	大华兴寺	建筑物顶	风景区	2011年7月20日	2011年10月18日
3	盐田区	鹏湾花园	管理处楼顶平台	居民区	2011年7月19日	2011年10月17日
4	罗湖区	仙湖植物园	苏铁园楼顶平台	风景区	2011年7月21日	2011年10月20日
5	罗湖区	莲塘工业区	楼顶平台	工业区	2011年7月21日	2011年10月20日
6	罗湖区	东门商业区	太阳百货楼顶平台	商业区	2011年7月22日	2011年10月22日
7	罗湖区	洪湖公园	管理处楼顶平台	公园	2011年7月23日	2011年10月25日
8	福田区	安华工业区	4号楼楼顶平台	工业区	2011年7月25日	2011年10月26日
9	福田区	福民居民区	11#楼顶平台	居民区	2011年7月24日	2011年10月25日
10	福田区	华强北商业区	华强电子楼顶平台	商业区	2011年7月22日	2011年10月22日
11	福田区	莲花山公园	建筑物顶	公园	2011年7月24日	2011年10月25日
12	福田区	红树林	楼顶平台	风景区	2011年7月25日	2011年10月26日
13	南山区	大南山	空旷处的枯树上	风景区	2011年7月28日	2011年10月27日
14	南山区	生态广场	酒吧楼顶平台	公园	2011年7月27日	2011年10月26日
15	南山区	深圳大学	生科院楼顶平台	居民区	2011年7月27日	2011年10月26日
16	南山区	凯宾斯基酒店	楼顶平台	商业区	2011年7月28日	2011年10月27日
17	对照	七娘山	空旷处的枯树上	风景区	2011年8月1日	2011年11月1日

右),然后在通风橱内的调温电热板上加热,烧至 1~2 mL 无色液体,定容于 25 mL 容量瓶,每组样品硝化过程配置空白试剂作为对比。将样品处理后的检验试液进行分析检测。

本研究的数据测定于中山大学测试中心,采用电感耦合等离子体原子发射光谱(Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy, 缩写 ICP-AES)对其进行分析检测,每样品测定钒(V)、铬(Cr)、锰(Mn)、铁(Fe)、钴(Co)、镍(Ni)、铜(Cu)、锌(Zn)、砷(As)、镉(Cd)、铅(Pb)等 10 种重金属。

1.4 分析方法

实验通过平行测定苔藓样品 3 次所得的均值来计算苔藓样品中重金属含量。本研究通过对实验的苔藓样品 Excel 软件进行均值、相对累积因子、Nemerow 综合指数的计算以及用 SPSS 软件来进行聚类分析。

(1)相对累积因子分析(RAF)是一种于藓袋法监测大气环境的一种数据评价方法,其计算公式为 $RAF = (C_e - C_i) / C_i$ 。式中, C_e 和 C_i 分别为藓袋暴露后和初始元素含量。根据 RAF 值可评价空气重金属沉降量,RAF 值越大,代表污染越严重,同时也可以反映不同的元素富集量的差别(方炎明,2010)。RAF 值可划分为若干区间,如 Anicic *et al.* (2009) 曾用白齿泥炭藓做成藓袋来监测塞尔维亚、贝尔德莱德地区的大气重金属污染情况。

(2)Nemerow 综合指数是一种兼顾最大值和平均值的极权型多因子环境质量指数,其计算公式为

$$I = \sqrt{\frac{(\text{Max}I_i)^2 + (\text{Ave}I_i)^2}{2}}。式中, \text{Max}I_i 为各单$$

因子环境质量指数中最大值, $\text{Ave}I_i$ 为各单因子环境质量指数的平均值。

(3)聚类分析是多元统计学中应用极为广泛的一种重要方法,它将一批样本(或者变量)数据根据其诸多特征,按照在性质上的亲疏程度在没有先验知识的情况下进行自动分类,产生多个分类结果。同类内部个体特征之间具相似性,不同类间个体特征的差异性较大。

2 结果与分析

2.1 深圳市藓袋法监测大气重金属污染情况

2011年7—10月,在深圳市的各个监测点悬挂藓袋进行大气重金属的分析监测。藓袋中 V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 等 10 种重金属元素的平均含量以及见表 3。

扣除苔藓植物背景浓度之后,可对深圳市 4 个行政区以及对照点的 10 种重金属 3 个月内的平均富集含量进行比较(以下数据均扣除苔藓植物的背景值)。由表 3 可知,17 个监测点处的藓袋内的苔藓植物样品各项重金属含量各不相同,但很明显藓

表 3 深圳市区藓袋内重金属的平均含量 (mg/kg)
Table 3 Average content(mg · kg⁻¹) of each heavy metal in moss bags in Shenzhen

区域 Region	地点 Monitoring site	As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	V	Zn
背景值 Background value		2.675	0.100	0.525	2.750	5.875	8.35	2.275	5.5	0.675	71.6
罗湖区 Luohu	莲塘工业区	5.000	0.800	0.725	5.100	21.150	21.075	8.150	20.125	2.250	172.350
	仙湖植物园	3.625	0.450	0.600	3.900	6.975	15.163	2.900	8.000	1.625	117.188
	东门商业区	4.25	0.525	0.725	7.475	10.688	25.738	3.238	12.250	1.625	216.063
福田区 Futian	洪湖公园	3.500	0.375	0.688	3.788	7.925	18.400	2.613	7.250	1.250	144.050
	安华工业区	4.375	0.513	1.175	10.65	14.888	26.075	4.175	16.500	2.250	179.688
	福民居民区	4.125	0.475	1.225	9.038	9.913	20.575	3.438	11.125	1.750	184.763
	华强北商业区	4.575	0.513	0.813	9.250	12.475	26.988	3.813	12.000	1.750	203.538
南山区 Nanshan	莲花山公园	3.375	0.338	0.763	5.175	8.513	24.488	2.475	6.875	1.125	120.388
	红树林	4.250	0.300	0.613	6.050	8.875	20.163	2.975	7.750	1.125	174.625
	大南山	5.750	0.150	0.550	5.538	9.725	8.490	2.450	5.625	1.250	158.525
	生态公园	4.750	0.288	0.600	5.025	8.813	18.450	2.650	7.500	1.125	166.763
	深圳大学	4.500	0.263	0.650	6.650	10.613	14.738	2.525	9.625	1.250	259.038
盐田区 Yantian	凯宾斯基酒店	4.375	0.275	0.713	6.163	10.463	13.475	2.925	8.250	1.000	181.713
	海山公园	5.250	0.238	1.375	7.850	18.350	21.713	3.163	14.375	2.625	150.763
	大华寺风景区	4.250	0.413	0.788	9.250	14.588	33.563	4.450	19.875	2.625	121.038
	鹏湾花园	4.250	0.300	0.625	5.900	9.138	15.925	5.563	18.500	1.875	100.450
	七娘山	3.250	0.138	0.538	3.600	6.925	31.250	2.363	7.000	1.500	156.250

袋内 10 种重金属的含量都要高于苔藓背景值(即泥炭藓材料在藓袋暴露前的重金属含量),这说明这些监测点悬挂的藓袋内的泥炭藓在 3 个月的悬挂期间都不同程度上受到了污染。同时,我们也发现对照点七娘山的藓袋检测出的重金属含量有 7 种重金属(As、Cd、Co、Cr、Cu、Ni、Pb)含量均低于市区各监测点,而 Mn、V、Zn 元素的含量则高于市区部分监测点,其中, Mn 元素的含量高于市区大部分监测点以及总平均值。这说明七娘山这一监测点的藓袋也都受到了一定的污染,但污染程度较小,而七娘山的 Mn、V、Zn 元素的含量则高于市区部分点,这与七娘山的地理位置与周边环境有着一定的关系。七娘山是位于深圳市的大亚湾与大鹏湾之间的大鹏半岛南岛的主要山峰,海拔 869 m,所以藓袋受到来自海洋环境的远距离大气传输的一定影响,且大鹏半岛已建设或正在建设大亚湾岭澳核电站二期、大鹏迭福深圳东部发电厂、大鹏迭福 LNG 天然气接收站、上洞光汇油气库等,这些都某种程度上影响着七娘山的大气重金属分布情况。

2.2 深圳市区域小环境的大气重金属污染评价

另外,观察罗湖区的莲塘工业区与仙湖植物园这两个监测点可发现,这两个相距不到 1 公里的区域的藓袋富集的大气重金属含量有着很大的差异,这些可表明相距不到 1 公里的区域大气中重金属污染情况有着明显的不同,这与一般所认为的短距离

的大气环境相差不多有所出入。造成这种现象的原因主要是与监测点的小环境、地形以及风向都有关。莲塘工业区是一个集中有很多类型工厂的工业区,长期受到工业生产以及废弃物的影响,而仙湖植物园是依山傍水的旅游风景区,两者直线距离很近,但在地理环境上由小梧桐山及仙湖植物园的山峰隔开,莲塘工业区位于山峰的南面,仙湖植物园位于山峰的北面,另外,这区域主要以东南风为主,在大气沉降过程中,位于南面的莲塘工业区的大气重金属污染物比较难运输到仙湖植物园,对后者的大气环境产生的影响比较小。所以,区域小环境、地理环境以及风向等多项原因,距离很近的两点也可能有着不同程度的大气污染状况。

2.3 深圳市 4 个行政区的大气重金属污染评价

根据表 3 的数据可作出深圳市四个行政区 10 种重金属平均富集含量的对照比较图(图 1),从图 1 可以得出总体来说据均值比较而言,福田区、罗湖区、盐田区的富集含量比较高,而南山区与对照点七娘山的富集含量比较低。

根据表 3、图 1,观察南山区 4 个监测点的 10 种重金属的富集含量,除去 As 与 Zn 元素外,其它 8 种重金属元素的平均富集含量均低于其它三个地区,其中差距最大的是 Ni 元素,盐田区 Ni 元素的平均富集含量是南山区的 6.6 倍;而南山区各个监测点 As 元素的富集含量与其它三个地区的各个监测

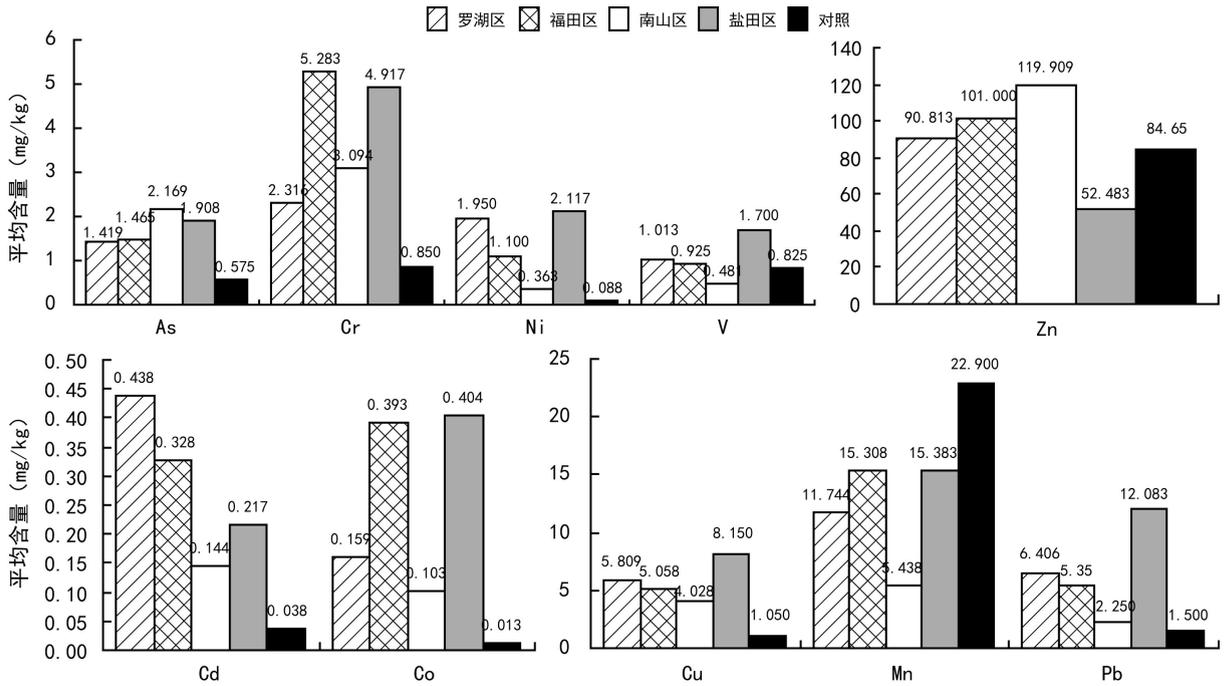


图 1 深圳市 4 个行政区 10 种重金属平均富集含量对照比较图 X-轴表示不同的重金属

Fig. 1 Comparison of heavy metals' concentrations in four survey regions X-axis indicates different metals

点相差不多,平均含量更是四个区中的最高值。南山区深圳大学监测点的 Zn 元素与其他各个监测点相比明显偏高,为最高值,推测是由于监测点设在深圳大学实验楼的顶楼平台,其藓袋中 Zn 等重金属元素的含量可能遭受实验室排放废气的影。

盐田区是人口密集度比较低的一个行政区,但观察发现其各监测点富集的 10 种重金属含量总体上却比同样人口密集度比较低的南山区要高,例如,重金属 Cu、Mn、Ni、Pb 元素在盐田区的平均值分别为 8.15、15.385、2.117、12.083 mg/kg,在南山区的平均值分别为 4.028、0.363、2.25 mg/kg。

另外,比较福田区与罗湖区的几个监测点可发现,总体而言,工业区与商业区的藓袋的重金属含量要比公园、风景区以及居民区的高。例如,在福田区,安华工业区与华强北商业区 As、Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、V 的含量比其他地方要高,其中 Mn 的含量在安华工业区与华强北商业区分别达到 26.075 和 26.988 mg/kg,而福民居民区、莲花山公园与红树林分别只有 20.575、24.488、20.168 mg/kg;Pb 的含量在安华工业区与华强北商业区分别达到 16.5 和 12.0 mg/kg,而福民居民区、莲花山公园与红树林分别只有 11.125、6.875、7.75 mg/kg。在罗湖区,莲塘工业区与东门商业区 10 种重金属含量全部都

要高于其他两个样点,其中 Mn 的含量在莲塘工业区与东门商业区分别达 21.075 和 25.738 mg/kg,而洪湖公园与仙湖植物园分别只有 18.4、15.163 mg/kg;Pb 的含量在莲塘工业区与东门商业区分别达到 20.125 和 12.25 mg/kg,而洪湖公园与仙湖植物园分别只有 7.25、8.0 mg/kg,最高值是最低值的 3 倍。分析原因可知,环境中重金属 Mn、Pb 主要来自于金属冶炼、汽车尾气排放,安华工业区与华强北商业区的交通及工业发达,由汽车尾气排放带来的 Mn、Pb 污染相对严重。

根据各监测点区和对照点重金属的富集含量以及泥炭藓的背景值,计算各行政区和对照点的重金属相对累积因子(RAF),见表 4。

计算各行政区和对照点的重金属相对累积因子(RAF)及 Nemerow 综合指数(表 5)。由表 5 得出深圳市四个行政区的藓袋中富集的重金属的含量变化为福田区>罗湖区>盐田区>南山区>七娘山。

根据表 3 中的 4 个行政区 10 种重金属的相对累积因子(RAF),利用 SPSS18.0 软件进行最短距离法聚类分析(Nearest neighbor Cluster Method),再结合以上的分析,我们初步可将深圳市四个行政区以及对照点按照污染程度分为三类:第一类是相对清洁区,对照点七娘山属于此类;第二类是相对污

表 4 深圳市各监测以及对照点的 10 种重金属相对累积因子 (RAF)
Table 4 RAF of heavy metals in moss-bags of monitored sites in Shenzhen

区域 Region	地点 Monitoring site	As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	V	Zn
罗湖区 Luohu	莲塘工业区	0.869	7.000	0.381	0.855	2.600	1.524	2.582	2.659	2.334	1.407
	仙湖植物园	0.355	3.500	0.143	0.055	0.187	0.816	0.275	0.455	1.407	0.637
	东门商业区	0.589	4.250	0.381	1.718	0.819	2.082	0.423	1.227	1.407	2.018
	洪湖公园	0.308	2.750	0.340	0.268	0.349	1.204	0.148	0.318	0.852	1.012
均值 Average value		0.530	4.375	0.311	0.724	0.989	1.407	0.857	1.165	1.500	1.269
福田区 Futian	安华工业区	0.636	4.125	1.238	2.873	1.534	2.123	0.835	2.000	2.334	1.510
	福民居民区	0.542	3.750	1.333	2.286	0.687	1.464	0.511	1.023	1.593	1.580
	华强北商业区	0.710	4.125	0.548	2.364	1.123	2.232	0.676	1.182	1.593	1.843
	莲花山公园	0.262	2.375	0.452	0.882	0.449	1.933	0.088	0.250	0.667	0.681
均值 Average value		0.548	3.275	0.748	1.921	0.861	1.833	0.484	0.973	1.371	1.411
南山区 Nanshan	大南山	1.150	0.500	0.048	1.014	0.656	0.017	0.077	0.023	0.852	1.214
	生态公园	0.776	1.875	0.143	0.827	0.500	1.210	0.165	0.364	0.667	1.330
	深圳大学	0.682	1.625	0.238	1.418	0.806	0.765	0.110	0.750	0.852	2.618
	凯宾斯基酒店	0.636	1.750	0.357	1.241	0.781	0.614	0.286	0.500	0.482	1.538
均值 Average value		0.811	1.438	0.197	1.125	0.686	0.652	0.160	0.409	0.713	1.675
盐田区 Yantian	海山公园	0.963	1.375	1.619	1.855	2.123	1.600	0.390	1.614	2.889	1.106
	大华寺风景区	0.589	3.125	0.500	2.364	1.483	3.019	0.956	2.614	2.889	0.690
	鹏湾花园	0.589	2.000	0.190	1.145	0.555	0.907	1.445	2.364	1.778	0.403
均值 Average value		0.714	2.167	0.770	1.788	1.387	1.842	0.930	2.197	2.519	0.733
对照 Control	七娘山	0.214	0.375	0.024	0.309	0.179	2.743	0.038	0.273	1.222	1.182

表 5 深圳市 4 个行政区 10 种重金属的 RAF 及 Nemerow 综合指数
Table 5 RAF and Nemerow indices of 10 kinds of heavy metals in four survey regions

区域 Region	As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	V	Zn	Nemerow
罗湖区 Luohu	0.530	4.375	0.303	0.842	0.989	1.407	0.857	1.164	1.500	1.269	9.406
福田区 Futian	0.548	3.275	0.748	1.921	0.861	1.833	0.484	0.973	1.371	1.411	9.540
南山区 Nanshan	0.811	1.438	0.197	1.125	0.686	0.652	0.160	0.409	0.713	1.675	5.589
盐田区 Yantian	0.714	2.167	0.77	1.788	1.387	1.842	0.930	2.197	2.519	0.733	9.193
七娘山 Qiniang Mountain	0.214	0.375	0.024	0.309	0.179	2.743	0.038	0.273	1.222	1.182	4.661

染区,仅包括南山区;第三类是相对明显污染区,包括盐田区、福田区、罗湖区。

根据以上的初步观测分析,4 个行政区都在不定程度上受到了污染,其中罗湖区、福田区与盐田区的污染比较严重,这主要与其水陆交通状况、工业状况、人口密度以及特殊的地理位置有关。罗湖区与福田区是深圳市最繁华,交通最为拥堵的地方,人口密度大,电子产业发达,这些都造成了大气中重金属的污染越来越严重;而盐田区的大气重金属污染分析原因可知,盐田区凭山傍海,地势北高南低,属滨海丘陵地形,常年主导风向为东南风,这些导致来自海洋的远距离大气传输对盐田区影响很大,而且盐田区还有一个深水大港—盐田港,繁忙的水上的交通运输大大加深了盐田区的大气重金属污染情况。

南山区由于跨越面积广,人口密度较小,相对而言交通状况稍好,且主导发展高新技术产业,所以大气重金属污染状况稍好一些。

2.4 深圳市 4 个行政区各监测地点的大气重金属污染评价

本研究使用多元统计方法进行大气重金属污染的综合评价,利用 SPSS18.0 软件,以深圳市藓袋内 10 种重金属元素的相对累积因子(RAF)(表 5)为依据,对深圳市 16 个监测点进行离差平方和聚类分析(Ward's method Cluster Method),结果见图 2。

根据图 3 结果可将深圳市 4 个行政区的 16 个监测点按照大气重金属污染程度分为三类。

第一类:相对轻度污染点,包括红树林、生态公园、凯宾斯基酒店、深圳大学、大南山、洪湖公园、莲

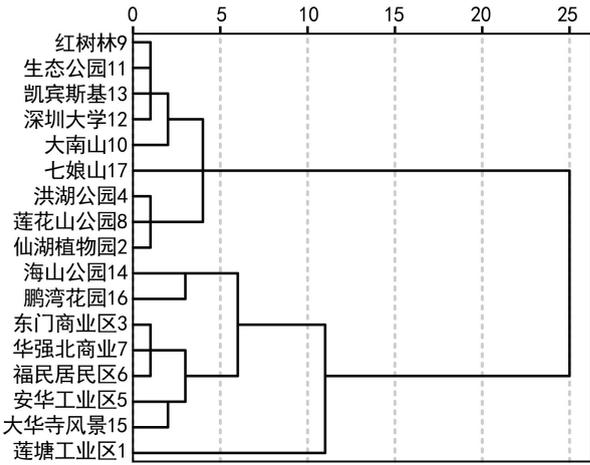


图2 深圳市区17个藓袋内重金属含量的聚类树形图

Fig. 2 Dendrogram of 17 moss-bags' heavy metals concentrations in Shenzhen

花山公园、仙湖植物园9个监测点。这9个样点中,红树林、仙湖植物园与大南山都是深圳市的风景区,周边环境很好,树木成荫;莲花山公园、生态公园、洪湖公园都是深圳市的公园,占地面积都不小,环境也很不错;凯宾斯基酒店与深圳大学是位于南山区的监测点。这些监测点的As、Cd、Mn、Ni、Zn的含量只有污染严重地区的1/2,Co、Cr、Cu、Pb、V的含量几乎只有污染严重地区的1/3或更少;这些监测点都相对而言离工业及交通重金属污染源较远,相应的藓袋内富集的重金属含量也略低。

第二类:相对中度污染点,有7个监测点。这7个样点中,东门商业区、华强北商业区是深圳市传统的两大商业旺地,受到人流与车流带来的重金属干扰较严重;福民居民区与安华工业区都是位于福田区,交通与产业等原因是带来重金属污染的重要原因;海山公园、鹏湾花园、大华寺风景区都位于盐田区,由于特殊的地理位置与强大的水上交通港—盐田港的存在,使得大气重金属污染比较严重。

第三类:较严重污染点,只有莲塘工业区1个监测点。莲塘工业区位于罗湖区,主要集中在有鹏基工业区、第一工业区、第七工业区等几个大型工业区,工业区内五金厂、塑料厂、印刷厂与电子厂较多,在工业区外还有国威和斯比泰两个大型电子厂,此监测点长期受到工业生产及废弃物影响,藓袋内富集的10种重金属含量较其他点而言都明显偏高。

据以上分析发现,在各个监测点,污染严重的为工业区和交通密集区,相对轻度污染的监测点都相对离工业及交通重金属污染源较远。莲塘工业区长

期受到工业生产及废弃物影响使得其污染程度最为严重;华强北与东门商业区也由于受到人流与车流带来的重金属干扰,重金属污染也很严重;而仙湖植物园等风景区及几个公园监测点因工业与交通带来的影响较小,重金属污染程度也相对较轻。这些表明工业与交通运输对大气环境影响已日趋严重,大气重金属的污染状况也日渐突出。

3 结论

在人口密集的城市及工业区,藓袋法监测大气环境污染这一方法得到广泛应用。该方法起源于英国,目前国内也有不少研究。本研究利用藓袋法对深圳市市内四个行政区进行重金属污染状况研究,结果表明随着城市化发展,大气重金属环境污染已日趋严重,污染程度可能与水陆交通状况、工业状况、人口密度以及特殊的地理位置有关。对于工业污染源与交通污染源政府需要采取更多有效措施应对此情况的进一步恶化,在调整产业结构中减排,走绿色发展之路。本文目前的研究不具全面代表性,选择的观测点不多,时间跨度不够长,实验设计也有不完善的地方,因此还有很多后续的研究工作。

致谢 深圳市中国科学院仙湖植物园苔藓课题组的毛俐慧、周兰平、梁阿喜和张展在苔藓植物样品采集、处理、鉴定及藓袋悬挂等给予帮助;中山大学生命科学学院的田丽霞及中山大学测试中心的赖志辉和管艳艳老师在苔藓植物样品的消化处理及重金属测定上给予帮助,在此一并致谢。

参考文献:

- 深圳市人居环境网. 2012. http://www.szhec.gov.cn/xxgk/xxgkml/xxgk_4/xxgk_4_5/xxgk_4_51/200906/t20090606_59363.html
- 深圳市统计局. 2012. <http://www.szjtj.com/main/xxgk/tjsj/tjgb/pcgb/201105127231.shtml>
- Adamo P, Bargagli R, Giordano S, et al. 2008. Natural and pre-treatments induced variability in the chemical composition and morphology of lichens and mosses selected for active monitoring of airborne elements[J]. *Environ Poll*, **152**:11-19
- Adamo P, Crisafulli P, Giordano S, et al. 2007. Lichen and moss bag as monitoring devices in the urban areas. Part. II. Trace elements in living and dead biomonitors and comparison with synthetic materials[J]. *Environ Poll*, **146**:392-399
- Anicic M, Tasic M, Frontasyeva V, et al. 2009. Active biomonitoring with wet and dry moss: a case study in an urban area[J]. *Environ Chem Lett*, **7**:55-60
- Asakawa Y. 2007. Biologically active compounds from bryophytes [J]. *Pure Appl Chem*, **79**(4):557-580

- Cameron A J, Nickless G. 1997. Use of mosses as collectors of air-born heavy metals near a smelting complex[J]. *Wat Air Soil Poll*, **7**(1): 117-125
- Cao T, Wang M, An L, et al. 2009. Air quality for metals and sulfur in Shanghai, China, determined with moss bags[J]. *Environ Poll*, **157**: 1 270-1 278
- Cesa M, Bizzotto A, Ferraro C, et al. 2006. Assessment of intermittent trace element pollution by moss bags[J]. *Environ Poll*, **144**: 886-892
- Culicov OA, Mocanu R, Frontasyeva MV, et al. 2005. Active moss biomonitoring applied to an industrial site in Romania: relative accumulation of 36 elements in moss-bags[J]. *Environ Monit Assess*, **108**(1-3): 269-240
- Culicov OA, Yurukova L. 2006. Comparison of element accumulation of different moss and lichen-bags exposed in the city of Sofia (Bulgaria)[J]. *J Atmos Chem*, **55**: 1-12
- Du QM(杜庆民), Zheng XH(郑学海), Cai HY(蔡海洋), et al. 1989. The method research of with moss-bags monitoring air pollution particles and other pollutants(用苔袋监测大气污染颗粒及其它污染物的方法研究)[J]. *J Ecol*(生态学杂志), **8**(1): 56-60
- Fang YM(方炎明). 2010. Mosses and metropolis airborne heavy metal contamination; methods for monitoring and assessment and recent utilization(苔藓与城市空气重金属污染: 监测评价方法与新近应用)[J]. *J Guizhou Norm Univ: Nat Sci Edit*(贵州师范大学学报·自然科学版), **28**(4): 69-74
- Goodman GT, Roberts TM. 1971. Plants and soil as indicators of metal in the air[J]. *Nature*, **231**: 287-292
- Goodman GT, Smith S, Parry GDR, et al. 1974. The use of moss bag as deposition gauges for airborn metals[J]. *Nat Soc Clean Air Ann Conf(Proc)*, **41**(1): 8-11
- Goodman GT, Smith S, Inskip MJ, et al. 1975. Trace metals as pollutants: monitoring aerial burdens[J]. *Intern Conf Heavy Met Environ(Symp Proc)* 1st, **2**(2): 623-642
- Goodman GT, Inskip MJ, Smith S, et al. 1979. The use of moss-bag in aerosol monitoring[J]. *Scope(Rep)*, **14**: 211-232
- Jiang YF(姜业芳). 2005. Pollution monitor of heavy metals by using moss-bag in Jishou(苔袋法监测吉首市大气重金属污染)[J]. *Life Sci Res*(生命科学研究), **9**(4): 132-134
- Little P, Martin XH. 1974. Biological monitoring of heavy metal pollution[J]. *Environ Pollut*, **6**: 1-19
- Makhholm MM, Mladenoff DJ. 2005. Efficacy of a biomonitoring (moss bag) technique for determining element deposition trends on a mid-range(375km) scale[J]. *Environ Poll*, **104**: 1-18
- Mei J(梅娟), Zhang YL(张银龙), Fang YM(方炎明). 2003. A study of monitoring heavy metals and SO₂ in using moss-bags as biomonitors(苔袋法监测大气重金属和 SO₂ 污染)[J]. *J Univ Sci Technol Suzhou*(苏州科技学院学报), **16**(2): 18-23
- Sun SQ, Wang DY, He M, et al. 2009. Monitoring of atmospheric heavy metal deposition in Chongqing, China based on moss bag technique[J]. *Environ Monit Assess*, **148**: 1-9
- Sun SQ(孙守琴), Wang DY(王定勇). 2004. Advance in indication function of bryophyte to air pollution(苔藓植物对大气污染指示作用的研究进展)[J]. *Sichuan Environ*(四川环境), **23**(5): 31-35
- Temple PJ. 1981. Moss bag as monitors of atmospheric deposition [J]. *J Air Pollut Contr Assoc*, **31**: 668-669
- Thomas W. 1983. Using plants in spatial trace substance analysis for emission monitoring[J]. *Staub-Reinhalt Luft*, **43**(4): 141-148
- Tretiac M, Adamo P, Bargagli R, et al. 2007. Lichen and moss bag as monitoring devices in the urban areas. Part I. Influence of exposure on sample vitality[J]. *Environ Poll*, **146**: 380-391
- Viskari EL, Rekil R, Lehto O, et al. 1997. Airborne pollutants along a roadside: assessment using snow analysis and moss bags [J]. *Environ Poll*, **97**(1-2): 153-160
- Wegener JWM, Schaik MJM, van Aiking H. 1992. Active biomonitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons by means of mosses [J]. *Environ Poll*, **76**: 1-15
- Wei HY(魏海英), Fang YM(方炎明). 2004. Review on bryophyte and airborne heavy metal pollution biomonitoring(苔藓植物与环境重金属污染监测研究进展)[J]. *J Nanjing For Univ*(南京林业大学学报), **28**(6): 77-81
- Wu MK(吴明开), Cao T(曹同), Zhang XP(张小平). 2008. Bio-monitoring pollution of atmospheric heavy metal by moss bag in Tongling city, Anhui Province(藓袋法监测铜陵市大气重金属污染的研究)[J]. *Acta Las Biol Sin*(激光生物学报), **17**(4): 554-558
- Wu PC(吴鹏程). 1998. Bryophyte Biology(苔藓植物生物学)[M]. Beijing(北京): Science Press(科学出版社): 215-223

(上接第 280 页 Continue from page 280)

- Spelta J M, Riba M, Retana J. 1995. Patters of seeding recruitment in West-Mediterranean Quercus ilex fordsts influenced by canopy by canopy development[J]. *J Veg Sci*, **6**: 465-472
- Wang JJ(王晶晶), Yu XY(俞筱桢), Zhou T(周涛), et al. 2009. Preliminarily exploring the characteristics of *Neolitsea homilantha* in Shilin vegetation restoration area(石林植被恢复地团花新木姜子种群特征初探)[J]. *Territ & Nat Res Study*(国土与自然资源研究), (2): 92-93
- Wang JX(王家祥), Xia P(夏萍), LIU SHQ(刘盛全). 2011. Studies on variation of poplar I-69 tree-ring width and tree-ring density(I-69 杨年轮宽度和密度变异规律)[J]. *For Res*(林业科学研究), **24**(5): 641-645
- Xu RZ(徐瑞珍). 1989. Relationships between tree-ring and climate in Changji region of the middle of the Tianshan(天山中部昌吉地区树木年轮与气候要素的关系)[J]. *J Appl Meteorol Sci*(应用气象学报), (1): 75-81
- Yu XY(俞筱桢), Li YH(李玉辉), Ma ZP(马遵平). 2007. A preliminary study on flora diversity of karst microhabitat in Shilin park, Yunnan, China(云南石林喀斯特小生境木本植物多样性特征)[J]. *J MT Sci*(山地学报), **25**: 438-447
- Zhang BK(张邦琨), Zhang P(张萍), Zhao YL(赵玉龙). 2000. A study of microclimate characters of different succession stages on krast landform(喀斯特地貌不同演替阶段植被小气候特征研究)[J]. *J Guizhou Meteorol*(贵州气象), (1): 18-22