

地面苔藓对成都大气沉降重金属污染的监测

葛彦双, 曹弈璘, 曾春菡, 李志强, 王丽*

四川大学生命科学院, 四川 成都 610065

摘要:采用微波消解、ICP-AES 对成都市一环至三环区域内 15 个取样点处 5 种地面苔藓植物体内重金属质量分数进行测定和分析, 以监测和研究成都市大气沉降重金属污染状况及区域差异。结果表明: 苔藓植物对重金属的富集在种间及种内差异显著, 5 种苔藓对 Pb、Cd、Cu、Zn、Cr、As 及 Ni 有较强的吸收能力, 大小顺序为立碗藓(*Physcomitrium sphaericum* (Ludw.) Fuernr.)>地钱(*Marchantia polymorpha* L.)>鳞叶藓(*Taxiphyllum taxirameum*(Mitt.) Fleisch.)>柔叶青藓 (*Brachythecium moriense* Besch.)>尖叶美喙藓 (*Eurhynchium eustegium* (Besch.) Dix.)。对其中具有代表性的 3 种苔藓植物进行种内比较发现, 对于立碗藓, 人民公园的 Cd、Zn 质量分数最高, 三洞古桥公园有最高质量分数的 Cr、Ni、Cu 及较高的 Pb, 而塔子山公园的 Pb、Cd、Zn、Cr 及 As 质量分数最小; 地钱对 Pb、Cd、Cu、及 As 的积累量在人民公园达到最大, 大多数重金属质量分数的最小值出现在成都理工大学; 在鳞叶藓中, 新阵地高尔夫俱乐部的 Cd、Zn、Cr 及 Pb 质量分数高于其余样点, 东陂体育公园 As 质量分数最高, 相反三洞古桥公园处多数重金属质量分数最小。各样点以 Ni 污染最重, Pb、Cr、Cu、As 属污染中等, Cd 和 Zn 污染较轻, 且大气沉降重金属质量分数表现为中心城区、交通繁忙区及工业区高, 郊区较低的特点。与 2005 年相比, 成都市大气重金属污染依旧严峻, 重金属质量分数呈现新的空间分布, Ni、Cr 质量分数明显增加。因此, 立碗藓、地钱和鳞叶藓可作为良好的生物指示植物, 以此来监测成都市大气重金属污染状况。

关键词:地面苔藓; ICP-AES; 重金属; 大气污染; 监测

中图分类号: X835; X173

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2013) 05-0844-07

引用格式:葛彦双, 曹弈璘, 曾春菡, 李志强, 王丽. 地面苔藓对成都大气沉降重金属污染的监测[J]. 生态环境学报, 2013, 22(5): 844-850.

GE Yanshuang, CAO Yilin, ZENG Chunhan, LI Zhiqiang, WANG Li. Monitoring heavy metal pollutions in Chengdu atmosphere using terrestrial bryophytes [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(5): 844-850.

大气中的重金属如 Hg、Cd、Pb、As 等主要来自工业生产、车辆交通所产生的有害气体和粉尘等^[1], 可经呼吸及食物链系统对动物和人体产生毒害, 具有滞留时间长、明显的富集效应和迁移能力等特点^[2]。苔藓植物由于其独特的形态结构和生理特征, 长期以来被广泛用于监测重金属污染^[3-5], 尤其以苔藓为监测物质来研究重金属大气干湿沉降^[6-7]、污染物来源^[8]、迁移及时空分布^[9]等, 并建立了一些实用有效的监测方法和典型苔藓材料^[10]。但这些研究主要针对矿区和工业城市, 且多以移植苔藓为主^[11-12]。国内关于这方面的研究起步较晚, 但已有对上海、沈阳、重庆等城市进行环境监测的报道, 且多使用当地分布的苔藓物种^[11,13-14]。2005 年本研究室曾利用苔藓植物对成都市环境重金属污染状况进行了一些探讨^[15], 但调查样点和所选藓种有限。近年来成都市经济迅速发展, 城市规模不断扩大, 且地形及气候条件不利于污染物扩散, 使得大气重

金属污染问题变得日趋严重。因此, 对成都市大气环境中的重金属污染程度重新进行全面监测有着重要意义。

本研究通过对成都市 15 个取样点处 5 种地面苔藓中 7 种重金属 (Pb、Cd、Cu、Zn、Cr、As、Ni) 进行定性和定量分析, 探讨不同苔藓植物对大气重金属累积能力的差异及成都地区大气沉降物中特征重金属元素的污染程度, 从中筛选适用于本地区的高敏感型苔藓植物, 并对成都市的空气质量进行评价, 为地面苔藓植物能更好地运用于城市大气重金属污染检测、评估等提供科学依据。

1 实验方法

1.1 研究地区概况

成都市地处四川盆地西部的成都平原上, 介于东经 102°54' ~ 104°53' 和北纬 30°05' ~ 31°26', 平均海拔 506 m, 面积 12 390.6 km², 市区人口 570 万人 (2010 年)。属亚热带湿润季风气候区, 气候温和、

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40971057)

作者简介: 葛彦双 (1986 年生), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为园林植物。E-mail: gysbobo@163.com

*通信作者

收稿日期: 2013-03-27

四季分明、雨量充沛, 地势由西北向东南微微倾斜, 多静风, 主导风向为NNE和N。

取样点分布于成都主城区各个方向。

1.2 样品的采集与保存

主城区内共选取15个样点, 主要为公园、学校绿地(图1), 各样点基本情况详见表1。取样方法参照欧洲重金属调查(UNECE 2003), 每一样点均用GPS进行定位, 并记录样点周围的生境。取样点远离主干道至少300 m, 次干道或建筑物至少100 m, 与邻近树木相隔至少5 m, 每个样点选5~10个样方(样方5 m×5 m), 截取高出地面或岩石表面的上端绿色部分。标本鉴定由中科院成都生物所完成, 凭证标本保存于四川大学生命科学学院。

1.3 重金属含量的化学分析

选取研究区域内分布较广, 且生物量较大的鳞叶藓(*Taxiphyllum taxirameum*(Mitt.) Fleisch.)、柔

叶青藓(*Brachythecium moriense* Besch.)、尖叶美喙藓(*Eurhynchium eustegium* (Besch.) Dix.)、立碗藓(*Physcomitrium sphaericum* (Ludw.) Fuernr.)和地钱(*Marchantia polymorpha* L.)为供试材料, 样品重金属质量分数的测定采用微波消解, ICP-AES(德国斯派克公司的电感耦合等离子体发射光谱仪)测定^[16], 检测的元素包括Pb、Cd、Cu、Zn、Cr、As和Ni。每组平行设置空白样和内标样用于质量控制, 重复测试的相对标准误差在9.4%左右, 均小于40%的允许限, 各元素的加标回收率为85.4%~103.5%。

1.4 数据分析

采用EXCEL、SPSS 19.0统计软件对不同取样点的5种苔藓植物体内重金属富集量进行非参数检验和相关分析, Ward最小方差法对所调查样点的重金属质量分数进行聚类分析。

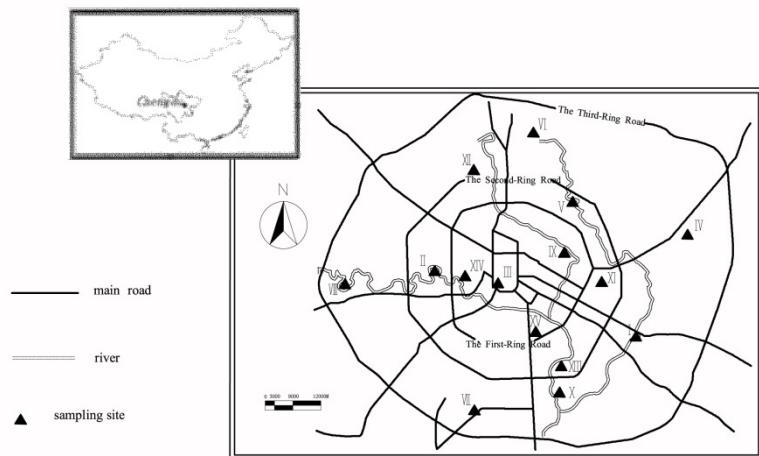


图1 成都市苔藓样品采集示意图

Fig. 1 Sketch map showing the sampling sites of bryophytes in Chengdu

表1 成都市15个取样点的基本情况

Table 1 The complexion of fifteen investigated sites in Chengdu

序号	样点名称	位置	面积/hm ²	始建年份	方位
I	塔子山公园	锦江区(30°38'N, 104°8'E)	27.3	1956	市东南部, 二、三环之间
II	浣花溪公园	青羊区(30°39'N, 104°1'E)	32.3	2002	市西部, 一、二环之间
III	人民公园	青羊区(30°39'N, 104°3'E)	11.3	1911	市中心, 一环内
IV	成都理工大学	成华区(30°40'N, 104°8'E)	183.0	1956	市东部, 二、三环之间
V	三洞古桥公园	成华区(30°41'N, 104°5'E)	5.3	2004	市东北部, 一、二环之间
VI	沙河公园	成华区(30°43'N, 104°3'E)	140.0	2006	市北部, 临三环
VII	新阵地高尔夫俱乐部	武侯区(30°36'N, 104°2'E)	53.0	2003	市南部, 近三环
VIII	东坡体育公园	青羊区(30°39'N, 103°59'E)	8.67		市西部, 临三环
IX	活水公园	锦江区(30°40'N, 104°5'E)	2.80	1998	市东部, 一环内
X	东湖公园	锦江区(30°37'N, 104°5'E)	28.0	2008	市南部, 二、三环之间
XI	新华公园	成华区(30°39'N, 104°6'E)	10.0	1990	市东部, 一、二环之间
XII	西南交通大学	金牛区(30°41'N, 104°3'E)	360.0	1972	市北部, 二、三环之间
XIII	望江公园	武侯区(30°37'N, 104°5'E)	12.5	1889	市南部, 一、二环之间
XIV	文化公园	青羊区(30°39'N, 104°2'E)	10.0	1951	市西部, 一环内
XV	四川大学华西校区	武侯区(30°38'N, 104°3'E)	73.3	1910	市南部, 一环内

表3 苔藓植物体内元素之间相关分析
Table 3 Correlation analysis between heavy metals in bryophytes

	Pb	Cd	Cu	Zn	Cr	As
Cd	0.598**					
Cu	0.051	0.214*				
Zn	0.608**	0.761**	0.195*			
Cr	0.294**	0.587**	0.667**	0.453**		
As	0.588**	0.573**	0.547**	0.478**	0.628**	
Ni	-0.058	0.416**	0.772**	0.285**	0.816**	0.471**

*在0.01水平上达到显著相关; *在0.05水平上达到显著相关

极显著正相关。

2.2 种间重金属质量分数的比较

为探讨不同苔藓对同种重金属富集能力的差异, 对5种苔藓体内重金属质量分数进行统计检验, 发现除Pb元素以外, 5种苔藓对其余几种重金属的累积能力存在显著性差异($P<0.05$)。从表2可以看出, 对于Cd、Cr元素, 不同苔藓的富集能力差异显著, 吸附力的强弱顺序为: 立碗藓>地钱>鳞叶藓>柔叶青藓>尖叶美喙藓, 其中立碗藓体内Cd、Cr的质量分数分别是尖叶美喙藓的3.5倍和3.7倍。对Cu、

Ni及Zn富集能力最强的为立碗藓, 其次为地钱, 它们与其余苔藓都存在显著性差异, 但鳞叶藓、柔叶青藓、尖叶美喙藓两两之间的差异不显著。As元素在5种苔藓中的质量分数范围为 $2.36\sim 5.16\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 富集能力最强的是立碗藓, 其质量分数是其他种类的1.2~2.2倍。

2.3 种内重金属质量分数的比较

由于这5种苔藓在成都市15个样点的分布情况并不一致, 故选取分布最为广泛的鳞叶藓、立碗藓和地钱为代表进行种内重金属质量分数的比较, 以此探讨采样点间大气沉降重金属污染程度的差异(图2)。可以看出, 在不同取样点处苔藓植物内同一元素的质量分数不同。不同环境下立碗藓中As的质量分数相差不大, 但其余6种元素的质量分数均具有显著性差异($P<0.05$)。其中取样地III的Cd、Zn质量分数最高, 分别是其他各处的3~20、8~12倍。样地V有最高质量分数的Cr、Ni、Cu及较高的Pb, 其中Ni质量分数达到 $1451.13\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 是其他各处的2~5倍。取样地I处Pb($11.22\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)

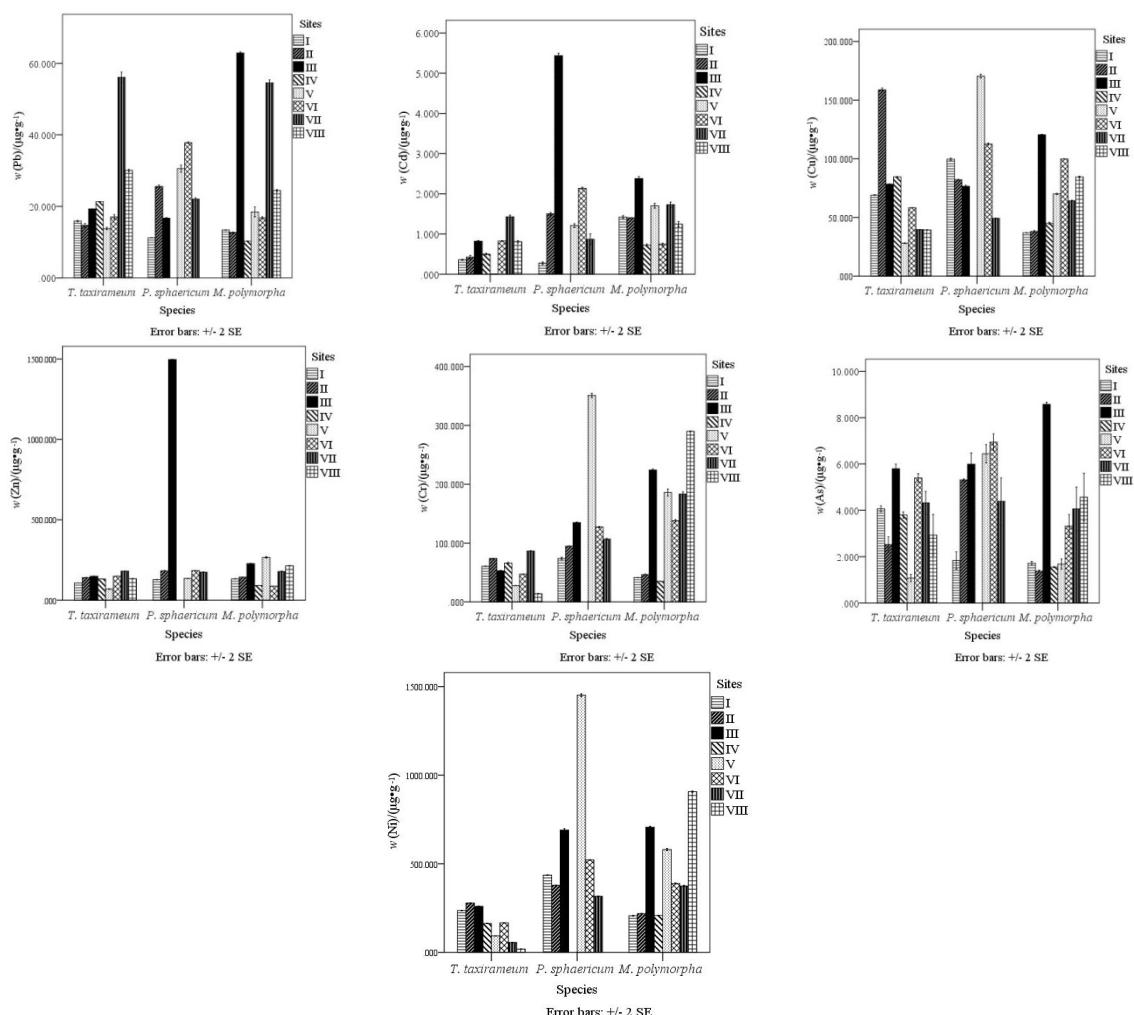


图2 8个取样地处鳞叶藓、立碗藓和地钱对重金属的吸收量差异

Fig. 2 Uptake amounts of heavy metals by *T. taxirameum*, *P. sphaericum*, *M. polymorpha* and their changes with concentrations of 8 sampling sites

$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)、Cd($0.28 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)、Zn($127.64 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)、Cr($73.98 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)及As($1.83 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)的质量分数最小。

地钱对Pb($62.9 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)、Cd($2.38 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)、Cu($120.55 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)、及As($8.58 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)的积累量在取样地III达到最大,这4种元素的质量分数是其他各处的 $1\sim6$ 倍,而Cr、Ni质量分数仅次于取样地VIII,分别为 224.18 、 $705.90 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。大多数重金属质量分数的最小值出现在取样地IV。

在鳞叶藓中,取样地VII的Cd、Zn、Cr及Pb质量分数最高,依次比取样地III高出 0.61 、 30.76 、 33.61 、 $36.76 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。As在VIII处的质量分数最高($5.80 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$),Cu、Ni的质量分数在取样地II达到最高(分别为 $158.83 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $278.60 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$),而V中多数重金属的质量分数最低。

3 讨论

苔藓是植物界中一个特殊的独立类群,作为化学元素最有效的积累者,苔藓植物在研究环境重金属污染问题上具有广阔的应用价值^[17]。本研究中5种苔藓植物能有效地富集Pb、Cu、Zn、Cr等重金属,且它们对重金属的富集量存在显著性的种间及种内差异。在立碗藓中,除Pb外,其余6种元素的质量分数均高于其他苔藓植物,如Ni的平均质量分数高出鳞叶藓 $570.39 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。地钱除Cu、Zn的质量分数低于总平均质量分数外,其余几种重金属质量分数均比较高。而尖叶美喙藓中除Cu、Zn外多数重金属元素质量分数都是最小的。5种苔藓植物累积重金属能力的顺序为立碗藓>地钱>鳞叶藓>柔叶青藓>尖叶美喙藓。在排除生长环境影响的条件下,这种差异主要与苔藓植物的结构、生物特性有关^[18-19]。本研究中地钱的叶状体交织成片生长,鳞叶藓植株扁平呈垫状,这些特征使得二者易于从环境中吸收化学元素。值得注意的是立碗藓,其植株细小,却表现出比地钱更优越的重金属积蓄能力,如对Ni的积累最高可达 $1451.13 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,这可能与立碗藓叶片柔薄、细胞壁薄,孢蒴直立、对称、近于圆球形有关^[20]。但其对重金属的耐受能力及富集机理还需进一步的探讨。

苔藓体内重金属元素的主要来源是大气沉降,且大气颗粒越小,重金属质量分数越高^[21]。有研究表明附生苔藓植物更适用于研究空气重金属污染^[22]。但近年来,土生和石生苔藓也在国内得到应用,并筛选出一些适于当地空气监测的物种^[23]。种内重金属质量分数的比较发现,7种元素的质量分数在鳞叶藓中的分布顺序为Ni>Zn>Cu>Cr>Pb>As>Cd,立碗藓和地钱中均为Ni>Zn>Cr>Cu>Pb>As>Cd。大量研究表明苔藓植物对重金属种类及浓度的敏感度和富集能力均具有差异^[3,24]。在8个取样地,

三种苔藓中Ni的质量分数范围是 $132.54\sim607.98 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,是其各自体内Cd质量分数的 $167\sim334$ 倍,其它重金属元素也有类似的情形。种内重金属富集能力的差异可能与重金属的特性(种类、形态、浓度等)、沉积率等有关^[25]。冯茜丹等^[26],Correira等^[27]认为重金属在颗粒物中的赋存状态极大的影响着元素的环境行为迁移能力和对生物有效性,例如Zn化学性质活泼、生物有效性系数高,Cu在细粒子中均匀分布在4种有效态中,而Pb主要以不溶态存在^[26,28],使得Zn、Cu比Pb等更易被植物所吸收。此外,苔藓体内重金属富集量还受其生长环境的影响^[20],如李进猛等人的研究指出工业园区苔藓中重金属的质量分数较高^[13]。从图2也可看出地钱体内重金属Pb、Cd、Cu的质量分数在市中心地段较高,立碗藓中Ni、Cr、Cu质量分数较高的点是位于工业区的三洞古桥公园。

用Word最小方差法对15个取样点的重金属含量进行聚类分析发现,15个取样地可划分为2个大组。一类属重金属质量分数较高区域,所含样点均分布在一环内或临近二环,尤其是地处市中心(如人民公园和文化公园)或工业区(如三洞古桥公园)的样点污染严重。二类属重金属质量分数较低区域,所含样点多数与市区隔离,附近也没工业源干扰,故重金属污染有下降的趋势,其中塔子山公园、成都理工大学和东湖公园位于城市东郊,绿化面积大,且地域广阔,受污染程度最轻。就单个重金属而言,Ni污染最严重,在15个取样点的质量分数范围是 $543.99\sim144.68 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,其中三洞古桥公园污染最重,文化公园($463.32 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)次之,有报道指出重金属Ni主要来自石油、煤炭等化石燃料的燃烧^[29]。Ni污染会损伤人体的呼吸道、肺等器官,甚至引发癌变^[30]。Pb、Cr、Cu、As这四种元素属污染中等,所调查苔藓中Pb质量分数是一般苔藓植物的 $4.1\sim9.2$ 倍^[31],交通繁忙区受污染较重,以四川大学华西校区和人民公园的Pb质量分数最高,Pb主要来自燃煤飞灰、工业生产及汽车尾气等^[32-33]。苔藓植物Cr元素的质量分数一般为 $2 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ^[31],而取样点Cr的质量分数范围是 $144.76\sim39.41 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,质量分数最高处是三洞古桥公园,四川大学华西校区次之,Cr可能来源有冶炼和交通运输等^[34]。Cu在15个样点的质量分数范围 $121.75\sim43.41 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,是普通苔藓植物的 $0.7\sim1.9$ 倍^[31],四川大学华西校区和文化公园的Cu污染较重,主要来源有汽车轮胎磨损及杀菌剂^[34-35]。五种苔藓植物都累积了较高质量分数的As,最高可达 $5.65 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,而多数植物的As质量分数不会超过 $1 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ^[31],相关性分析表明As与其他重金属的污染来源可能相同^[36]。除人民公园

外, 其余取样点的 Cd 质量分数基本正常^[31], 而所有样点 Zn 的质量分数仅是一般苔藓植物的 0.1~0.8 倍^[32]。整体而言, Cd 和 Zn 在成都市污染较轻, 而 Ni、Pb、Cr、Cu 和 As 在市中心、交通密集区和工业区污染严重, 说明车辆交通、冶炼工业和化石燃料燃烧是造成重金属污染的主要原因; 与 2005 的调查结果相比^[15], Ni、Cr 含量明显上升, 有些元素(如 Cu、Cr)含量甚至高于沈阳、上海。

4 结论

5 种苔藓植物对 Pb、Cd、Cu、Zn、Cr、As 和 Ni 的富集量存在显著性的种间及种内差异, 其中立碗藓、地钱和鳞叶藓对重金属元素具有高敏感性, 可充分发挥其在监测大气沉降重金属污染方面的应用。各样点以 Ni 污染最重, Pb、Cr、Cu、As 属污染中等, Cd 和 Zn 污染较轻, 大气沉降重金属质量分数表现为中心城区、交通繁忙区及工业区高, 郊区较低的特点。随着机动车保有量和道路长度及面积的增加, 道路交通逐渐成为城市大气重金属污染的又一主要来源。利用苔藓作为大气监测指示器, 将在揭示大气重金属的时空变化格局、评估区域环境状况等方面具有特殊的应用价值。

参考文献:

- [1] 郑喜坤, 鲁安怀, 高翔, 等. 土壤中重金属污染现状与防治方法[J]. 土壤与环境, 2002, 11(1): 79-84.
- [2] JAMALI M K, KAZI T G, ARAIN M B, et al. A multivariate study: variation in uptake of trace and toxic elements by various varieties of Sorghum bicolor L[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, (158): 644-651.
- [3] MENDIL D, ÇELIK F, TUZEN M, et al. Assessment of trace metal levels in some moss and lichen samples collected from near the motorway in Turkey[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 166: 1344-1350.
- [4] UYAR G, AVCİL E, ÖREN M, et al. Determination of heavy metal pollution in Zonguldak (Turkey) by moss analysis (*Hypnum cupressiforme*) [J]. Environmental Engineering Science, 2009, 26: 183-194.
- [5] RIVERA M, ZECHMEISTER H, MEDINA-RAMÓN M, et al. Monitoring of heavy metal concentrations in home outdoor air using moss bags[J]. Environmental Pollution, 2011, 159: 954-962.
- [6] FERNÁNDEZ J A, CARBALLEIRA A. A comparison of indigenous mosses and topsoils for use in monitoring atmospheric heavy metal deposition in Galicia (northwest Spain) [J]. Environmental Pollution, 2001, 114: 431-441.
- [7] BARANDOVSKI L, CEKOVA M, FRONTASYEVA M V, et al. Atmospheric deposition of trace element pollutants in Macedonia studied by the moss biomonitoring technique[J]. Environ Monit Assess, 2008, 138: 107-118.
- [8] DRAGOVIĆ S, MIHAJOVIĆ N. Analysis of mosses and topsoils for detecting sources of heavy metal pollution: multivariate and enrichment factor analysis [J]. Environmental monitoring and assessment, 2009, 157: 383-390.
- [9] CAO Tong, AN Li, WANG Min, et al. Spatial and temporal changes of heavy metal concentrations in mosses and its indication to the environments in the past 40 years in the city of Shanghai, China [J]. Atmospheric Environmet, 2008, 42: 5390-5402.
- [10] MAKINEN A. Use of *hylocomium splendens* for regional and local heavy metal monitoring around a coal-fired power plant in southern Finland [J]. Symposia Biologica Hungarica, 1987, 35: 777-794.
- [11] 陈龙, 吴玉环, 李微, 等. 苔藓植物对沈阳市大气质量的指示作用 [J]. 生态学杂志, 2009, 28(12): 2460-2465.
- [12] RIVERA M, ZECHMEISTER H, MEDINA-RAMÓN M, et al. Monitoring of heavy metal concentrations in home outdoor air using moss bags [J]. Environmental Pollution, 2011, 159: 954-962.
- [13] 李进猛, 王定勇, 陈益, 等. 重庆市不同功能区苔藓植物重金属质量分数及吸附特性研究[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2012, 37(9): 68-73.
- [14] CAO Tong, WANG Min, AN Li, et al. Air quality for metals and sulfur in Shanghai, China, determined with moss bags[J]. Environmental Pollution, 2009, 157: 1270-1278.
- [15] CHEN Yanger, YUAN Shu, SU Y Q, et al. Comparison of heavy metal accumulation capacity of some indigenous bryophytes in Southwest China cities: a case study in Chengdu city[J]. Plant Soil Environ, 2010, 56(2): 60-66.
- [16] 陈洋尔, 王丽, 翁周. ICP—AES 和 AAS 法在苔藓植物重金属含量测定中的应用[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2007, 44(1): 195-198.
- [17] 吴虹玥, 包维楷, 王安. 苔藓植物的化学元素质量分数及其特点[J]. 生态学杂志, 2005, 24(1): 58-64.
- [18] SHAW J E, JULES S, BEER S C. Effects of metals on growth Morphology and reproduction of *Cetatodon purpureus*[J]. Bryologist, 1991, 94(3): 270-279.
- [19] STEINNES E, RAMBAEK J P, HANSSEN J E. Large scale multi-element survey of atmospheric deposition using naturally growing moss as biomonitor[J]. Chemosphere, 1992, 25: 735-752.
- [20] OLAJIRE A A. A surey of heavy metal deposition in Nigeria using the moss monitoring method[J]. Environment International, 1998, 24(8): 951-960.
- [21] MOHANRAJ R, AZEEZ P A, PRISCILLA T. Heavy metals in airborne particulate matter of urban coimbatore[J]. Environmental Contamination and Toxicology, 2004, 47: 162-167.
- [22] 崔明昆. 附生苔藓植物对城市大气环境的生态监测[J]. 云南师范大学学报: 自然科学版, 2001, 21(3): 54-57.
- [23] 安丽, 曹同, 俞膺浩. 不同苔藓植物对重金属富集能力的比较[J]. 上海师范大学学报: 自然科学版, 2006, 35(6): 64-70.
- [24] BARGAGLI R, MONACI F, BORGHINI F, et al. Mosses and lichens as biomonitor of trace metals. A comparison study on *Hypnum cupressiforme* and *Parmelia caperata* in a former mining district in Italy[J]. Environmental pollution, 2002, 116: 279-287.
- [25] ACETO M, ABOLLINO O, CONCA R, et al. The use of mosses as environmental metal pollution indicators[J]. Chemosphere, 2003, 50: 333-352.
- [26] 冯茜丹, 党志, 吕玄文, 等. 大气 PM_{2.5} 中重金属的化学形态分布[J]. 生态环境学报, 2011, 20(6): 1048-1052.
- [27] CORREIRA J, AIKIN A C, GREBOWSKY J M. Metal Concentrations in the upper atmosphere during meteor showers[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, 10(3): 909-917.
- [28] HEAL M R, HIBBS L R, AGIUS R M, et al. Total and water-soluble trace metal content of urban background PM₁₀, PM_{2.5} and black smoke in Edinburgh, UK [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(8): 1417-1430.
- [29] 乔卓, 张安琪. 沈阳市机动车尾气的污染影响和控制对策[J]. 环境

- 保护科学, 2003, 29(116): 8-9.
- [30] THOMAS L D K, HODGSON S, NIEUWENHUISEN M, et al. Early kidney damage in a population exposed to cadmium and other heavy metals[J]. Environ Health Perspect, 2009, 117: 181-184.
- [31] 廖自基. 微量元素的环境化学及生物效应[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992: 131, 226-227, 248-249, 274-275, 299, 365-366.
- [32] YU Ruilian, HU Gongren, YUAN Xing, et al. Development in research on pollution source of heavy metals from atmospheric dust-recognition and analysis[J]. Earth and Environment, 2009, 37(1):73-79.
- [33] KEMP K. Trends and sources for heavy metals in urban atmosphere[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B:
- Beam Interactions with Materials and Atoms, 2002, 189 (124): 227-232.
- [34] ÖTVÖS E, PÁZMÁNDI T, TUBA Z. First national survey of atmospheric heavy metal deposition in Hungary by the analysis of mosses[J]. The Science of the Total Environment, 2003, 309: 151-160.
- [35] SPAGNUOLO V, TERRACCIANO S, GIORDANO S. Trace element content and molecular biodiversity in the epiphytic moss *Leptodon smithii*: Two independent tracers of human disturbance[J]. Chemosphere, 2009, 74: 1158-1164.
- [36] 朱建军, 崔保山, 杨志峰, 等. 纵向岭谷区公路沿线土壤表层重金属空间分异特征[J]. 生态学报, 2006, 26(1): 146-153.

Monitoring heavy metal pollutions in Chengdu atmosphere using terrestrial bryophytes

GE Yanshuang, CAO Yilin, ZENG Chunhan, LI Zhiqiang, WANG Li*

College of Life Sciences, Sichuan University, Chengdu 610065, China

Abstract: Terrestrial bryophytes were used as biomonitoring plants to investigate the status and spatial distribution pattern of heavy metal pollutions in Chengdu atmosphere in the present study. Five species of terrestrial bryophytes were collected evenly at 15 sites within the third-ring road of Chengdu, and concentrations of seven different heavy metals were determined by ICP-AES after microwave digestion. It was showed five bryophytes had strong adsorptive ability to Pb, Cd, Cu, Zn, Cr, As and Ni. However, different terrestrial bryophytes concentrated heavy metals significantly differently among interspecies and intraspecies, with an order of *Physcomitrium sphaericum* (Ludw.) Fuernr. > *Marchantia polymorpha* L. > *Taxiphyllum taxirameum* (Mitt.) Fleisch. > *Brachythecium moriense* Besch. > *Eurhynchium eustegium* (Besch.) Dix. The growth environment, the structure and biological characteristics of bryophytes were probably contributed to the difference in their absorptive capacities. Intraspecies comparison showed that *P. sphaericum* collected in Renmin Park had the strongest absorptive ability to Cd, Zn. *P. sphaericum* collected in Three Holesbridge Park had the strongest absorptive ability to Cr, Ni, Cu. *P. sphaericum* collected in Ta Zishan Park had the weakest absorptive ability to Pb, Cd, Zn, Cr. The concentrations of Pb, Cd, Cu in *M. polymorpha* were the highest in Renmin Park., and the lowest in Chengdu University of Technology. *T. taxirameum*, collected from Xin Zhengdi Golf Club had higher concentrations of Cd, Zn, Cr, Pb than that from other sites. While the concentration of As were the highest in Dongpo Sports Park, and the lowest in Three Holesbridge Park. Our results indicated that environment had significant influences on the absorptive ability of bryophytes to heavy metals. With respect to the pollutions of different heavy metals, Ni pollution was the most serious, Pb, Cr, Cu and As were medium, and Cd and Zn were the lightest in Chengdu. Moreover, pollutions of all heavy metals showed more seriously in central city, heavy traffic areas and industrial zones than that in suburban districts indicating that the heavy metal pollutions were mainly caused by vehicular traffic, smelting industry and fossil fuel combustion. The present work indicated that the pollutions of heavy metals in Chengdu atmosphere was still serious compared with a previous survey in 2005. In conclusion, our results demonstrated that *P. sphaericum*, *M. polymorpha* and *T. taxirameum* could be treated as efficient biomonitoring plants for monitoring the degree and district diversity of heavy metal pollutions in atmosphere.

Key words: terrestrial bryophyte; ICP-AES; heavy metals; atmospheric pollution; monitoring