

二球悬铃木不同器官对 空气中 Cu、Ni、Pb 和 Zn 的累积作用

王爱霞^{1,2,①}, 方炎明²

(1. 内蒙古工业大学建筑学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 南京林业大学生物与环境学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 以交通繁忙区(污染点)和相对清洁区(对照点)道路两侧的二球悬铃木 [*Platanus acerifolia* (Ait.) Willd.] 为研究对象,测定了不同器官(包括主干、老树皮、2年生枝条、1年生枝条、腋芽、叶片和果实)中 Cu、Ni、Pb 和 Zn 的含量,并对污染点二球悬铃木各器官中 4 种重金属元素的累积量和污染指数及二者的分布比例进行分析。结果表明:二球悬铃木体内重金属元素的含量因样点、器官及元素的不同而呈现不同的变化规律,污染点 4 种重金属元素的累积量及其分布比例、污染指数及其分布比例则因器官和元素的不同而有明显差异。总体上看,污染点各器官的 Cu、Ni、Pb 和 Zn 的含量均高于对照点且差异显著($P < 0.05$);4 种重金属元素相比较,均以 Zn 含量最高,Cu 含量次之,而 Ni 和 Pb 含量则较低;在不同器官中同一重金属元素的含量也有明显差异,其中,Cu、Ni 和 Zn 含量均在腋芽中最高,Pb 含量在 2 年生枝条中最高。4 种重金属元素的累积量及其分布比例均在叶片中最高,在老树皮中次之,在 1 年生枝条、2 年生枝条和腋芽中均较低;而 4 种重金属元素的污染指数及其分布比例则在老树皮中最高,在叶片中次之。研究结果显示:二球悬铃木各器官对空气中的重金属元素均有一定的吸滞能力,并且叶片和老树皮的吸滞能力明显优于其他器官。

关键词: 二球悬铃木; 器官; 空气污染; 重金属元素; 污染指数; 分布比例

中图分类号: Q946.91; X51 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2015)02-0067-06

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2015.02.10

Accumulation of different organs of *Platanus acerifolia* to Cu, Ni, Pb and Zn in air WANG Aixia^{1,2,①}, FANG Yanming² (1. College of Architecture, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 2. College of Biology and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2015, 24(2): 67-72

Abstract: Taking *Platanus acerifolia* (Ait.) Willd. on both sides of road in traffic busy area (pollution plot) and relatively clean area (the control plot) as research objects, contents of Cu, Ni, Pb and Zn in different organs including trunk, old bark, biennial branch, annual branch, axillary bud, leaf and fruit were determined, and cumulative amount and pollution index and their distribution proportion of four heavy metal elements in different organs of *P. acerifolia* at pollution plot were analyzed. The results show that heavy metal element contents in the body of *P. acerifolia* appear different change regulation because of differences in sampling plot, organ and element, and there are obvious differences in cumulative amount and its distribution proportion, pollution index and its distribution proportion of four heavy metal elements at pollution plot because of differences in organ and element. Overall, contents of Cu, Ni, Pb and Zn in each organ at pollution plot all are higher than those at the control plot with significant difference ($P < 0.05$). Compared among four heavy metal elements, Zn content is the highest, Cu content takes the second place, while Ni and Pb contents are lower. And the content of same heavy metal element in different organs also has obvious difference, in which, contents of Cu, Ni and Zn in axillary bud all are the highest, and Pb content in biennial branch is the highest. Cumulative amount and its distribution proportion of four heavy metal elements all are the highest in leaf, secondly in old bark, lower

收稿日期: 2015-01-01

基金项目: 内蒙古工业大学博士研究项目(117-841011); 江苏省林业科学研究院林业科技支撑计划专题(2006BAD03A1702)

作者简介: 王爱霞(1979—),女,内蒙古呼和浩特人,博士,讲师,主要从事环境生物学研究。

①通信作者 E-mail: 690236482@qq.com

in annual branch, biennial branch and axillary bud, while their pollution index and its distribution proportion are the highest in old bark, secondly in leaf. It is indicated that organs of *P. acerifolia* all have a certain absorption capacity to heavy metal elements in air, and absorption capacities of leaf and old bark both are obviously better than those of other organs.

Key words: *Platanus acerifolia* (Ait.) Willd.; organ; air pollution; heavy metal element; pollution index; distribution proportion

随着工业化进程的加快,环境污染尤其是空气污染已成为全球性的环境问题。用植物进行空气污染监测的优点主要是植物样本鉴定、采样和处理均相对容易,且很多树种分布较广,有利于进行大范围的监测,因而,目前已有研究者利用木本植物来监控空气污染状况,并取得较好的效果^[1-4]。然而,多数相关研究是以植物叶片作为空气污染的监测器^[5],仅通过分析叶片内的污染物含量判别污染程度^[6],而关于植物其他器官对污染空气中重金属污染物的吸收能力以及重金属污染物在植物不同器官中分配比例的研究则鲜有报道。目前研究者主要采用化学方法分析植物各器官中的重金属元素含量^[7-8],主要目的是确定各重金属元素的绝对含量,但关于植物不同器官对重金属元素的累积量缺乏系统的比较分析,无法真正揭示植物吸收和累积重金属元素的能力。

二球悬铃木 [*Platanus acerifolia* (Ait.) Willd.] 为悬铃木科 (Platanaceae) 落叶大乔木,分布范围广泛,是城市道路绿化的常用行道树种之一,其叶片对空气中的重金属污染物具有较强的累积能力^[9-11]。为了进一步明确二球悬铃木吸收和吸附污染空气中重金属元素的能力和吸收机制,作者对交通繁忙区(即污染点)和相对清洁区(即对照点)二球悬铃木主干、老树皮、2年生枝条、1年生枝条、腋芽、叶片和果实中的Cu、Ni、Pb和Zn含量进行测定,分析各器官中这4种重金属元素的累积量和污染指数及二者的分布比例,以探究二球悬铃木不同器官对空气中重金属污染物的吸收和累积规律,为进一步研究二球悬铃木对空气中重金属污染物的累积机制提供理论依据,也为科学选择吸污绿化树种奠定基础。

1 材料和方法

1.1 实验区域概况和样株选择

在江苏省南京市分别选择1个交通繁忙区(即污染点)和相对清洁区(即对照点)作为样点。污染点

为南京火车站至中央门汽车站之间的路段,地理坐标为东经118°34'、北纬32°12';该路段交通繁忙、车流量大,附近无大型工业区,除汽车尾气污染物和扬尘外无其他大气污染源。对照点为南京紫金山灵谷寺附近路段,地理坐标为东经118°51'、北纬32°03';该路段车辆稀少、绿化率高,附近无大气污染源,空气相对清洁。

在上述2个样点的道路两侧各随机选取10株二球悬铃木作为样株,样株主干中部直径30 cm、株高3 m,树龄10 a。

1.2 方法

1.2.1 样品采集及处理 在每个样株的东、南、西、北4个方向分别采集4或5支1年生和2年生枝条;在同一方向同龄枝条的相同部位分别采集叶片、腋芽和果实;在树干同一部位的表面剥取老树皮,并用生长锥取样株相同部位的主干。将不同样株同一器官的样品混匀,分别取400 g,用自来水冲洗干净后用蒸馏水进行漂洗,置于60℃烘箱中干燥至恒质量,冷却后粉碎并过筛(孔径1 mm);样品粉末置于清洁密封袋中保存、备用。

1.2.2 元素含量测定 采用硝酸-高氯酸法^[12]对所有样品进行消煮。分别称取0.500 g样品粉末,加入10 mL浓硝酸(质量分数65%)和浓高氯酸(质量分数70%)的混合液(体积比5:1),消煮至溶液澄清;然后加入2 mL稀硝酸(浓硝酸和水体积比1:1),消煮至无白烟;将消煮液用去离子水定容至25 mL,摇匀后置于塑料瓶中待测。每个样品重复3次。

采用4300DV型电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES,美国PerkinElmer公司)测定消煮液中Cu、Ni、Pb和Zn的含量,每个元素重复测定4次。所有元素的回收率均大于97.553%。

1.3 数据处理

根据污染点和对照点不同器官中各元素的含量计算各元素在不同器官中的累积量及污染指数,计算公式如下:某器官中某元素的累积量=污染点该器官

同元素的含量-对照点该器官同元素的含量;某器官某元素的污染指数=[(污染点该器官同元素的含量-对照点该器官同元素的含量)/对照点该器官同元素的含量]×100%。

采用SPSS 11.5 统计分析软件对污染点和对照点各器官中的4种重金属元素含量分别进行方差分析,采用EXCEL 2003 软件进行数据处理和表格绘制。

2 结果和分析

2.1 二球悬铃木不同器官中Cu、Ni、Pb和Zn含量的比较分析

交通繁忙区(污染点)和相对清洁区(对照点)二球悬铃木不同器官(包括主干、老树皮、2年生枝条、1年生枝条、腋芽、叶片和果实)中Cu、Ni、Pb和Zn的含量见表1。

由表1可见:同一样点二球悬铃木同一器官中不同重金属元素的含量有明显差异,均以Zn含量最高,

多数器官中的Cu含量也较高,而Ni和Pb含量则较低。

由表1还可见:同一样点二球悬铃木不同器官中同一重金属元素的含量也有明显差异。不论是污染点还是对照点,从Cu含量看,腋芽中的Cu含量均最高,且2年生枝条和1年生枝条中的Cu含量也较高,这3个器官的Cu含量明显高于其他器官;从Ni含量看,腋芽中的Ni含量也最高,且叶片、果实、1年生枝条和主干中的Ni含量也较高,但老树皮和2年生枝条中的Ni含量却很低,明显低于其他器官;从Pb含量看,2年生枝条中的Pb含量最高且明显高于其他器官,叶片、主干和老树皮中的Pb含量也较高;从Zn含量看,腋芽中的Zn含量最高,老树皮中的Zn含量最低,其他器官的Zn含量均较高。

此外,污染点与对照点相比,同一器官各重金属元素的含量差异明显,污染点二球悬铃木各器官中Cu、Ni、Pb和Zn的含量均显著高于对照点。

表1 不同样点二球悬铃木不同器官中Cu、Ni、Pb和Zn含量的比较($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 1 Comparison on contents of Cu, Ni, Pb and Zn in different organs of *Platanus acerifolia* (Ait.) Willd. at different sampling plots ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

元素 Element	样点 ²⁾ Sampling plot ²⁾	不同器官中的重金属元素含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ Content of heavy metal element in different organs						
		T	OB	BB	AnB	AxB	L	F
Cu	CK	2.23±0.11b	3.23±0.12b	12.31±1.22b	12.07±1.11b	25.67±1.57b	3.63±0.75b	6.77±0.78b
	P	4.06±0.98a	7.03±1.04a	13.72±1.38a	13.57±1.01a	26.07±1.35a	7.70±0.95a	9.55±0.94a
Ni	CK	1.00±0.06b	0.30±0.15b	0.39±0.06b	1.03±0.56b	3.32±0.71b	1.12±0.25b	1.02±0.06b
	P	1.38±0.11a	0.77±0.06a	0.53±0.12a	1.24±0.35a	3.63±0.55a	1.84±0.12a	1.30±0.22a
Pb	CK	3.47±0.24b	1.02±0.08b	11.28±0.57b	0.51±0.12b	0.62±0.47b	3.58±0.52b	0.75±0.04b
	P	5.37±0.56a	4.22±0.52a	11.68±1.78a	1.12±0.12a	1.07±0.07a	9.32±0.66a	1.38±0.07a
Zn	CK	15.57±2.34b	4.97±0.52b	22.77±2.45b	19.74±1.63b	33.08±2.01b	19.68±1.00b	14.17±1.32b
	P	19.43±0.47a	9.31±0.98a	23.50±2.05a	23.74±1.44a	33.42±1.34a	30.38±1.33a	17.52±1.33a

¹⁾T: 主干 Trunk; OB: 老树皮 Old bark; BB: 2年生枝条 Biennial branch; AnB: 1年生枝条 Annual branch; AxB: 腋芽 Axillary bud; L: 叶片 Leaf; F: 果实 Fruit. 同列中不同的小写字母表示相同器官中同一重金属元素含量在2个样点间差异显著($P<0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference in content of the same heavy metal element in the same organ between two sampling plots ($P<0.05$).

²⁾CK: 对照点 The control plot; P: 污染点 Pollution plot.

2.2 污染点二球悬铃木不同器官中Cu、Ni、Pb和Zn的累积量及其分布比例的比较分析

污染点二球悬铃木不同器官(包括主干、老树皮、2年生枝条、1年生枝条、腋芽、叶片和果实)中Cu、Ni、Pb和Zn的累积量及其分布比例见表2。

由表2可见:总体来看,污染点二球悬铃木同一器官中Cu、Ni、Pb和Zn的累积量多存在较大差异,仅腋芽中各重金属元素的累积量差异较小。在主干和

叶片中各重金属元素的累积量从高到低均依次排序为Zn、Pb、Cu、Ni;在老树皮、1年生枝条和果实中各重金属元素的累积量从高到低则依次排序为Zn、Cu、Pb、Ni;在2年生枝条中各重金属元素的累积量从高到低依次排序为Cu、Zn、Pb、Ni;在腋芽中各重金属元素的累积量从高到低则依次排序为Pb、Cu、Zn、Ni。

由表2还可见:同一重金属元素在二球悬铃木各器官中的累积量也存在显著差异。其中,Cu累积量

表2 污染点二球悬铃木各器官中 Cu、Ni、Pb 和 Zn 的累积量及其分布比例分析

Table 2 Analyses on cumulative amount and its distribution proportion of Cu, Ni, Pb and Zn in different organs of *Platanus acerifolia* (Ait.) Willd. at pollution plot

器官 ¹⁾ Organ ¹⁾	各重金属元素的累积量/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$				各重金属元素累积量的分布比例/%			
	Cumulative amount of different heavy metal elements				Distribution proportion of cumulative amount of different heavy metal elements			
	Cu	Ni	Pb	Zn	Cu	Ni	Pb	Zn
T	1.83	0.38	1.90	3.86	10.20	14.51	13.15	12.54
OB	3.80	0.47	3.20	4.34	21.18	17.94	22.15	14.10
BB	1.40	0.14	0.40	0.74	7.81	5.34	2.77	2.40
AnB	1.50	0.20	0.62	4.00	8.36	7.63	4.29	13.00
AxB	0.40	0.31	0.45	0.34	2.23	11.83	3.11	1.10
L	4.08	0.72	5.74	10.70	22.74	27.48	39.72	34.76
F	2.79	0.28	0.63	3.36	15.55	10.69	4.36	10.92
总计 Total	17.94	2.62	14.45	30.78	100.00	100.00	100.00	100.00

¹⁾ T: 主干 Trunk; OB: 老树皮 Old bark; BB: 2年生枝条 Biennial branch; AnB: 1年生枝条 Annual branch; AxB: 腋芽 Axillary bud; L: 叶片 Leaf; F: 果实 Fruit.

在不同器官中从高到低依次排序为叶片、老树皮、果实、主干、1年生枝条、2年生枝条、腋芽, Ni 累积量在不同器官中从高到低依次排序为叶片、老树皮、主干、腋芽、果实、1年生枝条、2年生枝条, Pb 累积量在不同器官中从高到低依次排序为叶片、老树皮、主干、果实、1年生枝条、腋芽、2年生枝条, Zn 累积量在不同器官中从高到低依次排序为叶片、老树皮、1年生枝条、主干、果实、2年生枝条、腋芽。总体上看, 污染点二球悬铃木植株叶片中 Cu、Ni、Pb 和 Zn 的累积量均最高。

从表2还可以看出: Cu、Ni、Pb 和 Zn 的累积量在叶片中的分布比例均最高, 在老树皮中的分布比例次之, Cu、Ni、Pb 和 Zn 累积量在叶片中的分布比例分别为最小值的 10.3、5.1、14.3 和 31.6 倍, 在老树皮中分别为最小值的 9.6、3.3、8.0 和 12.8 倍; 这2个器官

中各重金属元素累积量的分布比例均明显高于其他器官, 且二者间差异较小。总体而言, 污染点二球悬铃木 1年生枝条、2年生枝条和腋芽中各重金属元素累积量的分布比例均较低。

2.3 污染点二球悬铃木不同器官中 Cu、Ni、Pb 和 Zn 的污染指数及其分布比例的比较分析

污染点二球悬铃木不同器官(包括主干、老树皮、2年生枝条、1年生枝条、腋芽、叶片和果实)中 Cu、Ni、Pb 和 Zn 的污染指数及其分布比例见表3。

由表3可见: 总体来看, 污染点二球悬铃木同一器官中 Cu、Ni、Pb 和 Zn 的污染指数差异很大。主干中各重金属元素的污染指数从高到低依次排序为 Cu、Pb、Ni、Zn; 老树皮和腋芽中各重金属元素的污染指数从高到低依次排序为 Pb、Ni、Cu、Zn; 2年生枝条中各重金属元素的污染指数从高到低依次排序为 Ni、

表3 污染点二球悬铃木各器官中 Cu、Ni、Pb 和 Zn 的污染指数及其分布比例分析

Table 3 Analyses on pollution index and its distribution proportion of Cu, Ni, Pb and Zn in different organs of *Platanus acerifolia* (Ait.) Willd. at pollution plot

器官 ¹⁾ Organ ¹⁾	各重金属元素的污染指数/%				各重金属元素污染指数的分布比例/%			
	Pollution index of different heavy metal elements				Distribution proportion of pollution index of different heavy metal elements			
	Cu	Ni	Pb	Zn	Cu	Ni	Pb	Zn
T	81.80	37.49	54.68	24.76	18.43	10.40	6.50	9.95
OB	117.48	158.00	314.26	87.30	26.47	43.81	37.38	35.08
BB	11.40	36.36	3.55	3.23	2.57	10.08	0.42	1.30
AnB	12.44	19.63	121.23	20.27	2.80	5.44	14.42	8.14
AxB	1.54	9.17	72.17	1.04	0.35	2.54	8.59	0.42
L	112.33	64.44	160.42	54.34	25.31	17.87	19.08	21.83
F	41.17	26.93	83.53	23.70	9.28	7.47	9.94	9.52
总计 Total	443.81	360.60	840.69	248.89	100.00	100.00	100.00	100.00

¹⁾ T: 主干 Trunk; OB: 老树皮 Old bark; BB: 2年生枝条 Biennial branch; AnB: 1年生枝条 Annual branch; AxB: 腋芽 Axillary bud; L: 叶片 Leaf; F: 果实 Fruit.

Cu、Pb、Zn;1年生枝条中各重金属元素的污染指数从高到低依次排序为Pb、Zn、Ni、Cu;叶片和果实中各重金属元素的污染指数从高到低依次排序为Pb、Cu、Ni、Zn。总体上看,污染点二球悬铃木大多数器官的Pb污染指数均较高。

由表3还可见:同一重金属元素在二球悬铃木不同器官中的污染指数差异也很大。Cu、Ni、Pb和Zn 4种重金属元素的污染指数均以老树皮中最高,分别为117.48%、158.00%、314.26%和87.30%;它们在叶片中的污染指数仅次于老树皮,分别为112.33%、64.44%、160.42%和54.34%。Cu、Ni和Zn的污染指数均在腋芽中最小,分别为1.54%、9.17%和1.04%;而Pb的污染指数则在2年生枝条中最小,仅为3.55%。

由表3还可以看出:污染点二球悬铃木老树皮中Cu、Ni、Pb和Zn污染指数的分布比例均最高,分别为最小值的75.6、17.3、89.0和83.5倍;叶片中Cu、Ni、Pb和Zn污染指数的分布比例仅次于老树皮,分别为最小值的72.3、7.0、45.4和52.0倍;而主干、2年生枝条、1年生枝条、腋芽和果实中各重金属元素污染指数的分布比例差异较大。

3 讨论和结论

本实验的测定结果表明:交通繁忙区(污染点)二球悬铃木各器官中的Cu、Ni、Pb和Zn含量均显著高于相对清洁区(对照点),推测这可能与“生长在污染区域的植物对空气中的重金属污染物具有吸收和吸附能力^[1]”有关。但是,二球悬铃木不同器官中的Cu、Ni、Pb和Zn含量却存在较大差异,推测这可能与各重金属元素在植物体内的转运机制及其离子性质等因素的差异有关^[13]。

植物的器官和组织可以直接吸收空气中的重金属污染物,或通过根系吸收沉积在土壤中的重金属粉尘颗粒,并经过一系列复杂的生理代谢活动将重金属累积在植物体的各器官中。根据污染点二球悬铃木不同器官中Cu、Ni、Pb和Zn的累积量和污染指数及这2个指标在各器官中的分布比例可以看出:二球悬铃木不同器官对这4种重金属元素均有一定的吸滞能力,各重金属元素的累积量及其分布比例均以叶片最高、老树皮次之,而各重金属元素的污染指数及其分布比例则以老树皮最高、叶片次之。可见,Cu、Ni、

Pb和Zn均在二球悬铃木的叶片和老树皮中积累较多,具有明显的器官分布特征,说明二球悬铃木的叶片和老树皮具有较强的累积重金属的能力。这一结果与殷云龙等^[14]对小麦(*Triticum aestivum* Linn.)的相关研究结果一致。

城市绿化树种的叶片是优良的大气粉尘累积器^[15-16]。本研究结果表明:作为南京市的主要道路绿化树种,二球悬铃木叶片具有较强的累积重金属的能力。结合作者前期的研究结果^[17],认为二球悬铃木叶片这种较强的重金属累积能力可能与该种类叶片具有下表皮气孔分布多、海绵组织细胞排列稀疏、胞间隙及液泡较大等结构特征有关,而液泡是植物存储重金属元素的“库”。

幼嫩树皮是由覆盖在茎部最外面的木栓组织组成的,其表皮上具有许多皮孔,是植物吸收金属离子的重要通道;其内部的木栓细胞紧密排列,并且细胞内充满亲脂性聚合物——软木脂,这些聚合物表面分布着能够结合金属离子的基团,当空气中的金属离子与植物的树皮表皮接触后通过基团结合即可滞留在树皮中^[18]。随着树木的生长,细胞迅速死亡,形成1层非原生质亲脂性表层并覆盖在有生命活性的组织上,通过物理化学作用继续吸收空气中的金属元素。因此,树皮具有监测和指示空气污染的特性^[19-20]。Odukoya等^[21]的研究结果表明:树皮内的金属元素含量与空气中的金属元素含量呈显著正相关,但与土壤中的金属元素含量却无显著相关性。因此,一些学者建议并使用树皮作为城市大气重金属污染的生物监测器^[22-23]。扫描电镜观察结果(另文发表)表明:二球悬铃木老树皮表面由排列规则的凹槽组成,推测这些凹槽可能具有吸滞空气中重金属元素的能力;另外,由于老树皮常年与污染空气接触,可连续累积污染空气中的重金属元素,因此其吸滞重金属元素的时间明显大于其他器官,推测这也可能是老树皮具有较强吸滞重金属污染物能力的主要原因之一。总之,二球悬铃木老树皮对空气中重金属元素具有一定的吸收及累积能力,但其作用机制有待深入研究。

综上所述,二球悬铃木的不同器官对空气中的重金属元素均有一定的累积能力,并且叶片和老树皮累积重金属元素的能力均明显高于其他器官,说明叶片和老树皮是二球悬铃木吸收和检测重金属污染物的主要器官。

参考文献:

- [1] GOODMAN G T, ROBERTS T M. Plants and soils as indicators of metals in the air[J]. *Nature*, 1971, 231: 287-292.
- [2] REIMANN C, KOLLER F, KASHULINA G, et al. Influence of extreme pollution on the inorganic chemical composition of some plants[J]. *Environmental Pollution*, 2001, 115: 239-252.
- [3] ÇELİK A, KARTAL A A, AKDOĞAN A, et al. Determining the heavy metal pollution in Denizli (Turkey) by using *Robinia pseudo-acacia* L.[J]. *Environmental International*, 2005, 31: 105-112.
- [4] AL-KHLAIFAT A L, AL-KHASHMAN O A. Atmospheric heavy metal pollution in Aqaba City, Jordan, using *Phoenix dactylifera* L. leaves [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41: 8891-8897.
- [5] MORENO E, SAGNOTTI L, DINARÈS-TURELL J, et al. Bio-monitoring of traffic air pollution in Rome using magnetic properties of tree leaves [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37: 2967-2977.
- [6] URBAT M, LEHNDORFF E, SCHWARK L. Biomonitoring of air quality in the Cologne conurbation using pine needles as a passive sampler—Part I: magnetic properties [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38: 3781-3792.
- [7] 黄会一, 张有标, 张春兴, 等. 木本植物对大气气态污染物吸收净化作用的研究[J]. *生态学报*, 1981, 4(4): 335-344.
- [8] 蒋高明. 承德木本植物不同部位S及重金属含量特征的PCA分析[J]. *应用生态学报*, 1996, 7(3): 310-314.
- [9] 王爱霞, 张敏, 方炎明, 等. 树叶中重金属含量及其指示大气污染的研究[J]. *林业科技开发*, 2008, 22(4): 113-117.
- [10] 王爱霞, 张敏, 黄利斌, 等. 南京市14种绿化树种对空气中重金属的累积能力[J]. *植物研究*, 2009, 29(3): 368-374.
- [11] 王爱霞, 张敏, 方炎明, 等. 行道树对重金属污染的反应及其功能型分组[J]. *北京林业大学学报*, 2010, 32(2): 187-193.
- [12] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [13] 王焕校. 污染生态学[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [14] 殷云龙, 李晓明, 华建峰, 等. 土壤和叶面Pb污染对小麦生长及体内Pb分布和积累的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2010, 19(2): 28-33.
- [15] ERIKSSON G, JENSEN S, KYLIN H, et al. The pine needle as a monitor of atmospheric pollution[J]. *Nature*, 1989, 341: 42-44.
- [16] ONDER S, DURSUN S. Air borne heavy metal pollution of *Cedrus libani* (A. Rich.) in the city center of Konya (Turkey) [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40: 1122-1133.
- [17] 王爱霞, 方炎明. 6种交通重金属污染物在悬铃木叶、枝条组织中的分布研究[J]. *植物研究*, 2011, 31(4): 478-488.
- [18] HARJU L, SAARELA K E, RAJANDER J, et al. Environmental monitoring of trace elements in bark of Scots pine by thick-target PIXE[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2002, 189: 163-167.
- [19] PACHECO A M, BARROS L I, FREITAS M C, et al. An evaluation of olive-tree bark for the biological monitoring of airborne trace-elements at ground level[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 120: 79-86.
- [20] MINGORANCE M D, VALDÉS B, ROSSINI O S. Distribución de metales en suelos y plantas que crecen en un área sujeta a emisiones industriales [C] // Abstracts of 6th Iberian and 3rd Iberoamerican Congress of Environmental Contamination and Toxicology Cádiz. Puerto Real: Encuademaciones Martínez, 2005: 41.
- [21] ODUKOYA O O, AROWOLO T A, BAMGBOSE O. Pb, Zn and Cu levels in tree barks as indicator of atmospheric pollution [J]. *Environmental International*, 2000, 26: 11-16.
- [22] KUIK P, WOLTERBEEK H T. Factor-analysis of trace-element data from tree-bark samples in the Netherlands [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1994, 32: 207-226.
- [23] POIKOLAINEN J. Sulphur and heavy metal concentrations in Scots pine bark in northern Finland and the Kola peninsula [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1997, 93: 395-408.

(责任编辑: 佟金凤)