

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017.02.2016061707

刘佩琪, 陈奇伯, 邓志华, 等. 城市森林对大气中重金属的富集特征[J]. 环境化学, 2017, 36(2): 265-273.
LIU Peiqi, CHEN Qibo, DENG Zhihua, et al. Enrichment of atmospheric heavy metals by urban forest [J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(2): 265-273.

城市森林对大气中重金属的富集特征*

刘佩琪 陈奇伯** 邓志华 杨湫舟

(西南林业大学环境科学与工程学院, 昆明, 650224)

摘 要 为了探究城市森林不同树种对大气中重金属的富集能力和分析大气环境质量状况, 本文以昆明市东三环边坡的城市森林为试验区, 玉溪市磨盘山国家森林公园为对照区, 选取两地区分布最广泛的蓝桉、云南松、华山松、圆柏为实验对象, 通过测定植物叶片中的重金属含量, 对其季节变化规律及重金属元素含量间的相关性进行了分析, 结果表明: (1) 植物叶片中重金属 Zn、Cu、Pb、Cd 含量(由春到冬)呈先下降后持续上升的变化趋势; Zn 含量春季处于最高值(120.63 mg·kg⁻¹); 其余 3 种重金属元素含量冬季达到最高值。(2) 叶片中 Cu 和 Pb 含量相关性极显著、金属元素的总含量和 Zn、Cd 的含量也极显著相关, 其相关系数均达到 0.85 以上; Zn 和 Pb 含量的相关性不显著。大气中重金属 Pb 污染严重的地区可选择华山松作为城市主要绿化树种、Zn 污染严重的地区可选择蓝桉、Cu 污染严重的地区可选择圆柏、Cd 污染严重的地区 4 种植物均可选择; 试验区的空气污染等级达到了 II 级污染, 属于轻度污染区, 其中春季大气的综合污染指数最高。
关键词 城市森林, 重金属, 富集特征.

Enrichment of atmospheric heavy metals by urban forest

LIU Peiqi CHEN Qibo** DENG Zhihua YANG Haozhou

(School of Environmental Science and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming, 650224, China)

Abstract: The study was conducted with the objective to explore the atmospheric heavy metal enrichment capability of different urban tree species and analyze atmosphere circumstance. The study made in an urban forest that located in the east third ring road in Kunming whereas the Mopan mountain national forest Park in Yuxi was considered as the control area. The leaves of typical forest species of *Eucalyptus globulus*, *Yunnan pine*, *Pinus armandi* and *Sabina chinensis* were sampled and the content of heavy metal including Zn, Cu, Pb and Cd were tested. And finally, the seasonal changes and correlation of different kinds of heavy metal elements were analyzed. The results showed that: (1) Heavy metals content of Zn, Cu, Pb, Cd in plant leaves decreased firstly and then increased steadily from spring to winter. The Zn content in plant leaves varied seasonally with a maximum rate of 120.63 mg · kg⁻¹ observed in spring, and maximum content of Cu, Pb and Cd observed in winter. (2) Pb and Cu content in plant leaf is an extremely significant correlation, and

2016 年 6 月 17 日收稿(Received: June 17, 2016).

* 国家林业局林业公益性行业科研专项(201204101-10), 云南省高校优势特色重点学科(生态学)建设项目(05000511311), 西南林业大学科技创新基金(C15116)资助.

Supported by the Welfare Forestry Industry Scientific Research of The State Forestry Administration(201204101-10), Advantageous Key Discipline Construction Project(Ecology) in Yunnan Province Universities(05000511311) and the Technology and Innovation Foundation of the Southwest Forestry University(C15116).

** 通讯联系人, Tel: 13987183429, E-mail: chenqb05@163.com

Corresponding author, Tel: 13987183429, E-mail: chenqb05@163.com

no significant correlation between Pb and Zn, the total content of metal elements are significantly correlated to the content of Zn and Cd, both the correlation coefficients reached 0.85 above. From this study, it is possible to conclude that *Pinus armandi* can be used as remediation species in atmospheric Pb-polluted area, whereas *Eucalyptus globulus* and *Yunnan pine* can be selected as remediation species in Zn and Cu air polluted area. The four plants above mention have the significant capability in atmospheric Cd enrichment. The air pollution level of study area reached the pollution level of low-grade and the highest comprehensive atmospheric pollution index was observed in spring.

Keywords: urban forest, heavy metal pollution, enrichment characteristics.

随着我国城市大气环境日益恶化,大气污染已经严重影响我们的生产生活,其中大气重金属污染问题也受到越来越多人的关注.重金属污染在生态环境中可以通过多种形式进行转变,由于重金属具有不可降解性,所以环境中的重金属转变为永久性的潜在污染物^[1-4].重金属污染物主要包括 Zn、Cu、Pb、Cd 等元素^[5-6],重金属过多的积累会给生态环境带来负担,造成一定程度的环境污染.当大气中的重金属含量达到了一定浓度,城市绿色植被就会自发对其吸附消减^[7-8],绿色植被对大气中重金属污染的净化能力具有举足轻重的作用^[9-10].

植物叶片上的气孔和枝条上的皮孔是植物与大气污染物进行反应的主要通道,通过植物组织的呼吸作用吸收并将大气中的重金属元素氧化还原成无毒物质,因此植物对大气污染物具有一定的净化作用^[11].目前,国内外学者主要关注于绿色植被对大气中有毒有害气体含量影响的研究,如大气中的二氧化硫、氟化物和氮氧化物含量变化与绿色植被之间的关系,而对植被消减大气中重金属含量的能力研究较少.植物叶片对大气污染物具有滞留和去除的作用,通过截留吸附大气污染物并对其进行吸收、转化和同化,进而对大气进行净化^[12-14].已有大量研究表明,草本植物可以富集土壤中的重金属元素,如 Phieler^[15]和 Ali^[16]对农作物的研究,苏德纯^[17]对草本植物的研究,但这些草本植物的生长对立地条件、气候等环境因子的要求较高而且能富集的重金属元素种类也比较单一.王亚宇^[18]通过研究乌鲁木齐市行道树对重金属的富集特征,薛皎亮^[19]对城市空气中铅在国槐树体内的积累的研究都表明高大的乔木对大气中重金属元素也具有一定的富集作用,但都局限于城市乔木树种对重金属富集特征和机理的研究,对于影响植被对重金属的富集能力的因素,如富集能力随季节的动态变化和树种变化对富集能力的影响方面探讨较少.

本研究选取昆明市城市森林常见树种对大气中重金属的富集能力进行了相关分析,利用植物叶片中重金属的含量来判断大气污染程度,并为城市森林绿化树种的选择和相关研究提供一定的理论依据.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 研究区概况

昆明位于东经 102°10'—103°40',北纬 24°23'—26°22',中国西南云贵高原中部,平均海拔 1895 m,境内属北亚热带低纬高原山地季风气候,年平均气温 16.5 °C,年均降雨量 1450 mm,无霜期 278 d,气候宜人.昆明市东三环车流量大且集中,大气污染物主要来源于汽车尾气的排放以及周边城市建设施工所产生的粉尘,选择海拔高度在 2060—2200 m 的昆明市东三环环城路边坡的城市森林作为试验区进行采样,以玉溪市磨盘山国家森林公园为对照区,以在两个地区分布最广泛和最典型的蓝桉 (*Eucalyptus globulus*)、云南松 (*Pinus yunnanensis*)、华山松 (*Pinus armandii*)、圆柏 (*Sabinachinensis*) 为实验对象,树木的具体生长状况见表 1.

1.2 研究方法

1.2.1 样品的采集与处理

采样时间分别为 2014 年 12 月、2015 年 3 月、2015 年 7 月、2015 年 10 月.选择晴朗无风或者微风的天气条件下进入样区进行采样,不同树种林内各布设 3 个采样点,每个采样点选取 5 棵长势健康,树龄

一致的树木,在每棵树的四周均匀采取 30 片树叶,并且用环刀法对采样区的林内土壤进行取样,均放置在塑封袋中,拿回实验室进行处理分析.

表 1 植被基本生长指标
Table 1 Basic growth indices of trees

树种 Varities of trees	胸径 DBH/cm	高度 Height/m	林龄/年 Age of stand/a	郁闭度 Canopy density	冠幅 Crown width/(m×m)
蓝桉	35.20—35.75	27.15—28.34	26	0.90	2.9×4.1
云南松	25.63—26.11	25.85—26.04	25	0.75	2.3×3.6
华山松	24.55—24.74	24.20—26.40	25	0.73	1.8×2.7
圆柏	18.60—19.23	19.70—20.10	20	0.60	2.5×3.2

1.2.2 样品的测定方法

将叶片用超纯水清洗干净,自然风干,在适当温度下对其杀青,烘干后进行研磨粉碎,过 100 目筛备用.将土样在遮阴处自然风干后进行研磨过筛备用,准确称取备用样品 1.0 g,加入 HNO₃-HClO₄混合液 10 mL,进行消煮至冒白烟,过滤、定容至刻度线处.使用 ICP 电感耦合等离子体发射光谱仪测定样品中 Zn、Cu、Pb、Cd 的含量.

1.2.3 数据处理及分析

利用 Excel 软件进行数据的分类汇总和制图,利用 SPSS 21.0 软件对数据进行相关性分析.本研究运用污染指数计算法^[20]对研究区大气重金属污染进行评价,其中单项污染系数(*C*)计算公式如下: $C = C_m / C_k$,*C_m*和 *C_k*分别为各种植物叶片的重金属实测值和对照区相应植物叶片的重金属实测值;平均污染指数即综合污染指数(TW),大气质量污染等级评价如表 2 所示.

表 2 大气质量污染等级评价^[20]
Table 2 The quality of atmospheric pollution grade evaluation^[20]

综合污染指数 The comprehensive pollution index	污染等级 Pollution levels	评价等级 Rating
≤1.2	无污染	I
1.3—2.2	轻度污染	II
2.3—3.2	重度污染	III
3.3—4.2	重度污染	IV
≥4.3	严重污染	V

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 土壤中重金属元素含量的季节变化

通过对土壤中的重金属含量进行分析,得到表 3.夏季土壤中的重金属含量最低,冬季土壤中的重金属含量最高,但是差异不显著(*P*>0.05).说明在土壤采样的 4 个季节中,土壤中的各个重金属元素的含量不存在明显差异.有研究表明,生长在受重金属污染土壤中的植物,不同部位重金属含量不同,其中大部分的重金属滞留在根部,少量向地上部分迁移^[21].这就可以保证在土壤特性相同的条件下,植物叶片中的重金属来自于大气中.

2.2 植物叶片富集重金属能力的季节变化

2.2.1 植物叶片中 Zn 含量的季节变化

由图 1 可知,同一地区不同树种叶片中 Zn 元素含量差异显著;同一树种不同季节叶片中 Zn 元素含量差异显著.从整体来看,试验区的蓝桉、云南松、华山松叶片中 Zn 元素含量变化(由春到冬),呈先下降后持续上升的趋势,而圆柏叶片中 Zn 元素含量变化呈先下降后上升再下降的趋势,4 种植物都是春季叶片中 Zn 含量最高.对照区的蓝桉和云南松植物叶片中 Zn 元素含量变化(由春到冬),呈先上升后下降

再上升的趋势,华山松呈先持续下降后上升的趋势,圆柏呈先下降后持续上升的趋势.

表 3 土壤的重金属含量

Table 3 The heavy metals content of the natural soil

重金属含量/ (mg·kg ⁻¹)	试验区/对照区 Test area/The control area			
	3 月 March	7 月 July	9 月 September	12 月 December
Zn	(138.1±21.5)/ (91.62±12.4)	(136.5±23.4)/ (88.7±16.52)	(140.4±22.6)/ (90.8±13.28)	(141.6±20.62)/ (90.2±13.4)
Cu	(49.75±10.53)/ (20.17±1.5)	(47.86±12.6)/ (18.96±2.13)	(49.86±11.2)/ (19.38±1.58)	(50.11±9.81)/ (20.23±1.46)
Pb	(40.21±9.4)/ (16.63±3.26)	(39.27±8.90)/ (16.55±3.78)	(41.13±8.7)/ (15.78±3.94)	(41.43±7.9)/ (16.11±4.02)
Cd	(0.38±0.19)/ (0.17±0.04)	(0.37±0.21)/ (0.15±0.06)	(0.38±0.23)/ (0.16±0.08)	(0.40±0.12)/ (0.18±0.07)

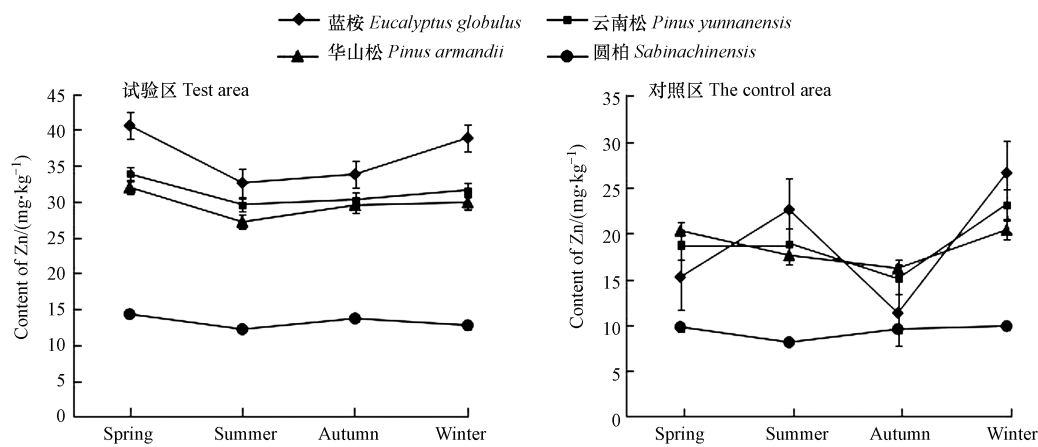


图 1 植物叶片中 Zn 含量季节变化

Fig.1 Seasonal variations of Zn concentration in leaves

对叶片中 Zn 含量全年平均值作比较;试验区的植物叶片中 Zn 元素含量由高到低依次为:蓝桉(36.44 mg·kg⁻¹) > 云南松(31.30 mg·kg⁻¹) > 华山松(29.61 mg·kg⁻¹) > 圆柏(13.23 mg·kg⁻¹),最高值时最低值的 2.75 倍;对照区的植物叶片中 Zn 元素含量由高到低依次为:蓝桉(18.97 mg·kg⁻¹) > 云南松(18.93 mg·kg⁻¹) > 华山松(18.62 mg·kg⁻¹) > 圆柏(9.32 mg·kg⁻¹),最高值是最低值的 2.03 倍.这 4 种植物中 Zn 元素含量在不同季节的积累总量依次为:春季(120.63 mg·kg⁻¹) > 冬季(113.02 mg·kg⁻¹) > 秋季(107.18 mg·kg⁻¹) > 夏季(101.48 mg·kg⁻¹).试验区的蓝桉、云南松、华山松、圆柏的植物叶片 Zn 元素含量(全年平均值)分别是对照区的 1.92 倍、1.65 倍、1.59 倍和 1.42 倍,说明由于大气污染,试验区植物叶片的重金属含量远高于对照区.

2.2.2 植物叶片中 Cu 含量的季节变化

由图 2 可知,同一地区不同树种叶片中 Cu 元素含量差异显著;同一树种不同季节叶片中 Cu 元素含量差异显著.从整体来看,试验区的蓝桉、云南松、华山松、圆柏叶片中 Cu 元素含量变化(由春到冬),呈先下降后持续上升的趋势,4 种植物都是冬季叶片中 Cu 含量最高.对照区的蓝桉、云南松、华山松植物叶片中 Cu 元素含量变化(由春到冬),呈先下降后持续上升的趋势,圆柏呈先上升后下降再上升的趋势.

对叶片中 Cu 含量全年平均值作比较;试验区的植物叶片中 Cu 元素含量由高到低依次为:蓝桉(8.10 mg·kg⁻¹) > 圆柏(6.76 mg·kg⁻¹) > 华山松(5.75 mg·kg⁻¹) > 云南松(5.70 mg·kg⁻¹),最高值是最低值的 1.42 倍;对照区的植物叶片中 Cu 元素含量(全年平均值)由高到低依次为:蓝桉(5.24 mg·kg⁻¹) > 圆柏(3.59 mg·kg⁻¹) > 华山松(3.24 mg·kg⁻¹) > 云南松(3.05 mg·kg⁻¹),最高值是最低值的 1.72 倍.试验区的蓝桉、云南松、华山松、圆柏的植物叶片 Cu 元素含量(全年平均值)分别是对照区的 1.54 倍、1.87 倍、1.77 倍和 1.88 倍.

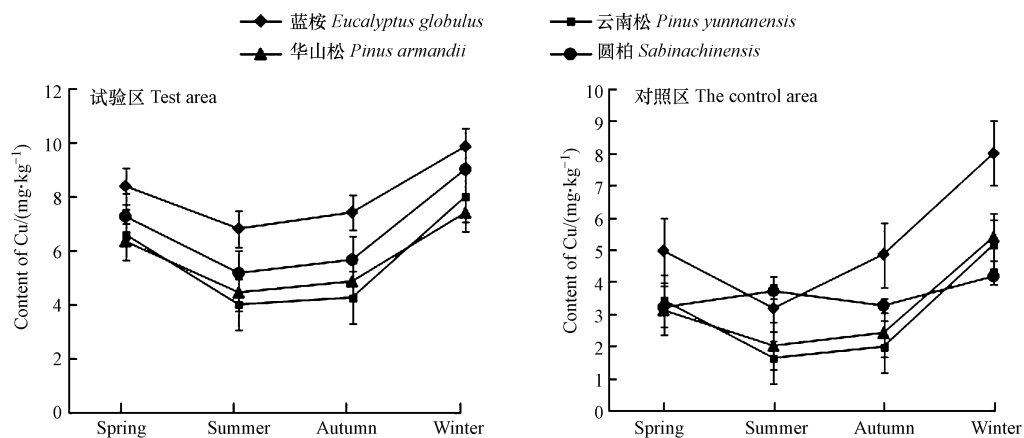


图 2 植物叶片中 Cu 含量季节变化
Fig.2 Seasonal variations of Cu concentration in leaves

2.2.3 植物叶片中 Pb 含量的季节变化

由图 3 可知,同一地区不同树种叶片中 Pb 元素含量差异显著;同一树种不同季节叶片中 Pb 元素含量差异显著.从整体来看,试验区的蓝桉、云南松、华山松、圆柏叶片中 Pb 元素含量变化(由春到冬),均呈先下降后持续上升的趋势,4 种植物都是冬季叶片中 Pb 含量最高.对照区的蓝桉和云南松植物叶片中 Pb 元素含量变化(由春到冬),呈先持续下降后上升的趋势,华山松呈先上升后下降再上升的趋势,圆柏呈持续上升的趋势,蓝桉春季叶片中 Pb 含量最高,华山松夏季叶片中 Pb 含量最高,云南松和圆柏冬季叶片中 Pb 含量最高.

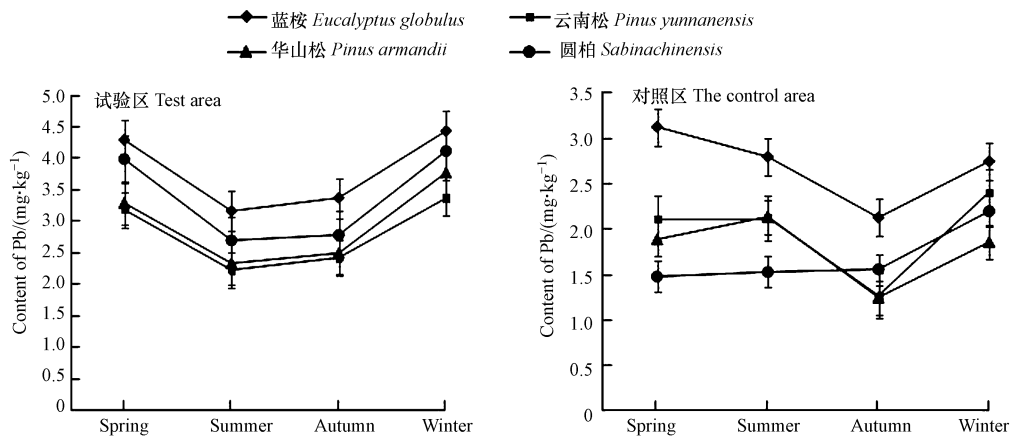


图 3 植物叶片中 Pb 含量季节变化
Fig.3 Seasonal variations of Pb concentration in leaves

对叶片中 Pb 含量全年平均值作比较:试验区的植物叶片中 Pb 元素含量由高到低依次为:蓝桉(3.80 mg·kg⁻¹) > 圆柏(3.39 mg·kg⁻¹) > 华山松(2.96 mg·kg⁻¹) > 云南松(2.79 mg·kg⁻¹),最高值是最低值的 1.36 倍;对照区的植物叶片中 Pb 元素含量(全年平均值)由高到低依次为:蓝桉(2.69 mg·kg⁻¹) > 云南松(1.97 mg·kg⁻¹) > 华山松(1.78 mg·kg⁻¹) > 圆柏(1.68 mg·kg⁻¹),最高值是最低值的 1.60 倍.试验区的蓝桉、云南松、华山松、圆柏的植物叶片 Pb 元素含量(全年平均值)分别是对照区的 1.41 倍、1.42 倍、1.66 倍和 2.02 倍.

2.2.4 植物叶片中 Cd 含量的季节变化

由图 4 可知,同一地区不同树种叶片中 Cd 素含量差异显著;同一树种不同季节叶片中 Cd 元素含量差异显著.从整体来看,试验区的蓝桉、云南松、华山松、圆柏叶片中 Cd 元素含量变化(由春到冬),均呈先下降后持续上升的趋势,4 种植物都是冬季叶片中 Cd 含量最高.对照区的 4 种植物叶片中 Cd 元素含量变化(由春到冬),也呈先下降后持续上升的趋势,也都是冬季叶片中 Cd 含量最高.

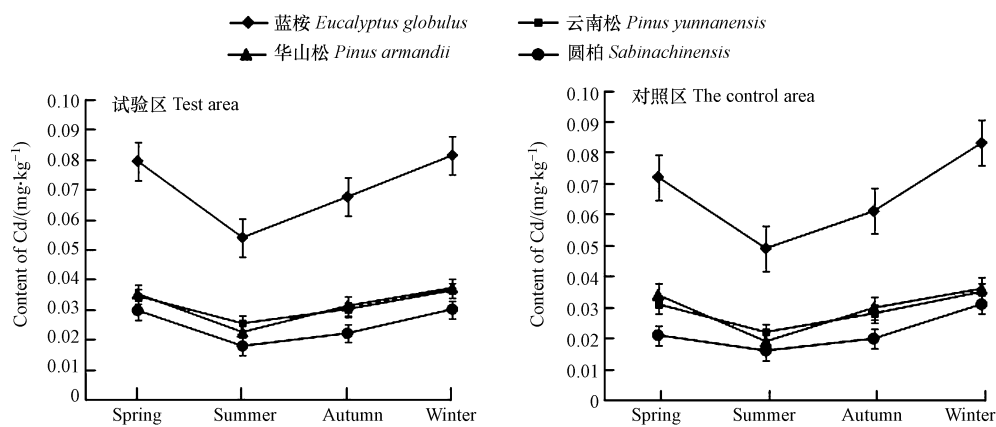


图 4 植物叶片中 Cd 含量季节变化

Fig.4 Seasonal variations of Cd concentration in leaves

对叶片中 Cd 含量全年平均值作比较:试验区的植物叶片中 Cd 元素含量由高到低依次为:蓝桉($0.07\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 云南松($0.03\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 华山松($0.03\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 圆柏($0.02\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),最高值是最低值的 3.5 倍;对照区的植物叶片中 Cd 元素含量(全年平均值)由高到低依次为:蓝桉($0.07\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 华山松($0.03\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 云南松($0.03\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 圆柏($0.02\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),最高值是最低值的 3.5 倍.试验区的蓝桉、云南松、华山松、圆柏的植物叶片 Cd 元素含量(全年平均值)均是对照区的 1 倍.

2.3 不同树种叶片中重金属的含量特征及其相关性分析

4 种树种叶片中 4 种金属元素含量之间也具有一定的相关性,分析如表 4($n=16$).从 4 种树种叶片中的金属元素含量相关性来看,除了叶片中 Zn 和 Cu、Pb 两个元素的相关性不显著之外,其余元素含量两两之间关系均是极显著相关,其中 Cu 和 Pb 元素含量相关性最大,相关系数是 0.953.说明对 Cu 吸收能力较强的树种对 Pb 的吸收能力也较好,反之亦然;叶片中重金属元素的总含量和 Zn、Cd 元素含量的相关性最大,显著性达到 0.85 以上,说明这 4 种金属元素的污染物中,Zn 和 Cd 的含量占了较大比重.

表 4 4 个树种叶片中金属元素含量间的相关系数

Table 4 Correlation coefficients among the metal contents in the leaves of 4 tree species

	Zn	Cu	Pb	Cd	总含量 Total content
Zn	1				
Cu	0.202	1			
Pb	0.158	0.953 **	1		
Cd	0.704 **	0.677 **	0.652 **	1	
总含量 Total content	0.853 **	0.664 **	0.620 *	0.850 **	1

注: ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关. Note: **, correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

本文选取的试验区位于昆明市,对照区位于玉溪市,两个地区的地理位置相隔一定距离,并且存在着降雨、光照、温湿度、风力等一系列的环境因子影响.由于玉溪市只是作为对照,所以着重分析污染区的植物叶片吸滞重金属的季节变化.纵观整体结果,这 4 种植物叶片中重金属元素 Zn、Cu、Pb、Cd 含量在春、冬两季含量较高,而在夏季和秋季含量较低.而李少宁^[7]通过对不同植被类型对不同的重金属污染物的富集能力季节动态变化研究表明:植物对 Zn、Cu 和 Pb 的吸滞作用在春、秋两季中相对较强;孙淑萍^[22]研究发现植物叶片对 Zn 和 Cr 的吸滞能力表现出春、夏两季吸滞能力较强,而对 Cu 则表现出逐渐降低的趋势,对 Pb 则表现出逐渐升高的趋势.

2.4 植物叶片重金属污染指数分析及大气质量评价

根据某地区植物叶片中重金属含量来计算植物的大气污染指数,并进行大气质量等级评价.以玉溪市磨盘山国家森林公园作为对照点来研究,即玉溪市磨盘山国家森林公园的植物综合污染指数均为 1,大气污染等级为 I 级,属于无污染区.单项污染系数即为试验区各种植物叶片的重金属实测值与对照区相应植物叶片的重金属实测值两者的比值;综合污染指数的计算即为同一树种所含几种重金属元素单

项污染指数的平均值,计算结果与表 2 的评价等级进行对比,即可得到该区域的污染等级.

由表 5 可以看出,试验区 4 个季节的综合污染指数范围是 1.321—1.960,说明试验区的空气污染等级达到了Ⅱ级污染,属于轻度污染区;4 种植物在春、夏、秋、冬 4 个季节的综合污染指数之和分别为 6.848、5.953、6.824、5.707,春季大气的综合污染指数最高,说明试验区春季大气污染较为严重.

表 5 植物叶片中重金属污染指数及评价等级
Table 5 The level of heavy metal pollution index and evaluation in plant leaves

采样季节 Sampling season	树种 Tree species	单项污染指数 Single pollution index				综合污染指数 The comprehensive pollution index	评价等级 Rating
		Zn	Cu	Pb	Cd		
春季	蓝桉	2.666	1.687	1.372	1.101	1.707	Ⅱ
	云南松	1.804	1.920	1.504	1.113	1.585	Ⅱ
	华山松	1.575	2.028	1.745	1.035	1.596	Ⅱ
	圆柏	1.463	2.258	2.705	1.414	1.960	Ⅱ
夏季	蓝桉	1.442	2.137	1.130	1.100	1.452	Ⅱ
	云南松	1.564	2.437	1.047	1.155	1.551	Ⅱ
	华山松	1.542	2.200	1.091	1.184	1.504	Ⅱ
	圆柏	1.505	1.390	1.768	1.119	1.446	Ⅱ
秋季	蓝桉	2.992	1.525	1.586	1.105	1.802	Ⅱ
	云南松	2.010	2.138	1.915	1.075	1.785	Ⅱ
	华山松	1.821	2.005	2.005	1.047	1.720	Ⅱ
	圆柏	1.434	1.733	1.790	1.111	1.517	Ⅱ
冬季	蓝桉	1.460	1.232	1.614	0.978	1.321	Ⅱ
	云南松	1.362	1.549	1.399	1.040	1.338	Ⅱ
	华山松	1.464	1.370	2.034	1.033	1.475	Ⅱ
	圆柏	1.291	2.155	1.874	0.971	1.573	Ⅱ

笔者认为造成差异的原因可能是由于试验地区地理位置的差异性(纬度与海拔)、树种选择不同、环境因子对试验对象的影响不同,导致实验结果的不同,变化规律也不一致.不同的重金属元素污染程度不同,植被对其的吸滞、富集能力也有所不同.Rossini^[23]通过研究发现不同污染程度的区域,夹竹桃(*Nerium oleander* L.)叶片中重金属含量差异显著,污染程度较高的地区叶片中重金属含量较高;曹学慧^[24]研究发现北京西直门大气达到Ⅳ级污染,由于西直门立交桥交通流量大,空气污染严重,植被滞留吸收大气污染物较多,与本研究的结果一致,污染区比对照区的植物叶片中金属元素含量高.

3 结论(Conclusion)

- (1)通过对植物叶片的重金属富集能力的季节变化进行分析,结果表明,同一地区不同树种叶片中重金属含量差异显著;同一树种不同季节叶片中重金属含量差异也显著.从植物叶片富集重金属的含量(全年平均值)上来讲,这 4 种金属元素污染严重的地区可优先选择蓝桉;与对照区相比,从试验区植物吸收重金属的能力上来看 Pb 元素污染严重的地区可选择华山松、Zn 元素污染严重的地区可选择蓝桉、Cu 元素污染严重的地区可选择圆柏、Cd 元素污染严重的地区 4 种植物均可选择.
- (2)从 4 个树种叶片中 4 种金属元素含量的相关性分析来看,对 Cu 吸收能力较强的树种对 Pb 的吸收也可能较好,反之亦然;叶片中重金属元素的总含量和 Zn、Cd 元素含量的相关性最大,显著性达到 0.85 以上,说明这 4 种金属元素的污染物中,Zn 和 Cd 的含量占了较大比重.
- (3)利用对植物叶片中重金属含量的分析,评价试验区大气的环境质量,试验区的空气污染等级达到了Ⅱ级污染,属于轻度污染区;春季大气的综合污染指数最高,说明试验区春季大气环境污染较为严重.

参考文献 (References)

- [1] 常旭, 马迎群, 杨晨晨, 等. 大辽河主要污染源重金属特征及污染评价[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(5): 32-38.
CHANG X, MA Y Q, YANG C C, et al. Characteristic and pollution assessment of heavy metals pollution in the primary pollution source of the Daliao River[J]. Environmental Pollution and Control, 2015, 37(5): 32-38(in Chinese).
- [2] 韦丽丽, 周琼, 谢从新, 等. 三峡库区重金属的生物富集, 生物放大及其生物因子的影响[J]. 环境科学, 2016, 40(1): 325-334.
WEI L L, ZHOU Q, XIE C X, et al. Bioaccumulation and biomagnification of heavy metals in three gorges reservoir and effect of biological factors[J]. Environmental Science, 2016(1): 325-334(in Chinese).
- [3] EDISIO P, JOSE A B N, BEMARD J S, et al. The contribution of heavy metal pollution derived from highway runoff to Guanabara Bay sediments-Rio de Janeiro Brazil[J]. Annals of the Brazilian Academy of Sciences, 2007, 79(2): 739-750.
- [4] 赖营帅, 马媛媛, 王卫, 等. 新疆“金三角”地区重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 环境化学, 2016, 35(7): 1381-1389.
LAI Y S, MA Y Y, WANG W, et al. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of soils in the “Golden Triangle” region, Xinjiang[J]. Environment Chemistry, 2016, 35(7): 1381-1389(in Chinese).
- [5] 唐丽清, 邱尔发, 韩玉丽, 等. 不同径级国槐行道树重金属富集效能比较[J]. 生态学报, 2015, 35(16): 5353-5363.
TANG L Q, QIU E F, HAN Y L, et al. Variation of heavy metal enrichment efficiency in roadside trees of *Sophora japonica* L. with different diameters at breast height[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(16): 5353-5363(in Chinese).
- [6] 高雯媛, 邹霖, 邢宏霖, 等. 邵阳市城区大气降尘中的 Pb, Cd 的污染及环境风险评价[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(6): 34-40.
GAO W Y, ZOU L, XING H L, et al. Study on the pollution and environmental risk assessment of Pb, Cd in atmospheric deposition in urban area of Shaoyang[J]. Environmental Pollution and Control, 2015, 37(6): 34-40(in Chinese).
- [7] 李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 等. 北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究[J]. 环境科学, 2014, 35(5): 1891-1900.
LI S N, KONG L W, LU S W, et al. Beijing common green tree leaves' accumulation capacity for heavy metals[J]. Environmental Science, 2014, 35(5): 1891-1900(in Chinese).
- [8] 王丹丹, 孙峰, 周春玲, 等. 城市道路植物圆柏叶片重金属含量及其与滞尘的关系[J]. 生态环境学报, 2012, 21(5): 947-951.
WANG D D, SU F, ZHOU C L, et al. Contents of heavy metal and its relationship with dust detention in leaves of *Sabina chinensis* in urban road[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(5): 947-951(in Chinese).
- [9] 孙向武, 朱磊, 王国锋, 等. 常见绿化树种对大气中二氧化硫的净化能力研究[J]. 湖北农业科学, 2008, 47(3): 293-295.
SUN X W, ZHU L, WANG G F, et al. Study on sulfur dioxide elimination capacity of common green tree[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2008, 47(3): 293-295(in Chinese).
- [10] 赵松婷, 李新宇, 李延明. 北京市 29 种园林植物滞留大气细颗粒物能力研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(6): 1004-1012.
ZHAO S T, LI X Y, LI Y M. Fine particle-retaining capability of twenty-nine landscape plant species in Beijing[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(6): 1004-1012(in Chinese).
- [11] 李超群, 钟梦莹, 武瑞鑫, 等. 常见地被植物叶片特征及滞尘效应研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(12): 2050-2055.
LI C Q, ZHONG M Y, WU R X, et al. Study on leaf characteristics and dust-capturing capability of common ground cover plants[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(12): 2050-2055(in Chinese).
- [12] 陶雪琴, 卢桂宁, 周康群, 等. 大气化学污染的植物净化研究进展[J]. 生态环境学报, 2007, 16(5): 1549-1550.
TAO X Q, LU G N, ZHOU K Q, et al. Phytodecontamination of atmosphere chemical pollution: a review[J]. Ecology and Environment, 2007, 16(5): 1546-1550(in Chinese).
- [13] 魏丽婧. 延安城市绿化树种对大气重金属污染物吸存能力研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2013.
WEI L J. Absorption and accumulation capacity of afforestation plants to atmosphere heavy metal pollutants in Yan'an City[D]. Xi'an: North West Agriculture and Forestry University, 2013(in Chinese).
- [14] 钱鹏, 董艳, 戴兵. 高校室内降尘粒度、磁学特征与重金属污染垂直分布特征[J]. 环境化学, 2015, 34(11): 2067—2076.
QIAN P, DONG Y, DAI B. Vertical distribution of grain size, magnetic properties and heavy metal contents of indoor fall in college campus[J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(11): 2067—2076(in Chinese).
- [15] PHIELER R, MERTEN D, ROTH M, et al. Phytoremediation using microbially mediated metal accumulation in *Sorghum bicolor*[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(24): 19408-19416.
- [16] ALI H, KHAN E, SAJAD M A. Phytoremediation of heavy metals—concepts and applications[J]. Chemosphere, 2013, 91(7): 869-881.
- [17] 苏德纯, 黄焕忠. 油菜作为超累积植物修复镉污染土壤的潜力[J]. 中国环境科学, 2002, 22(1): 48-51.
SU D C, HUANG H Z. The phytoremediation potential of oilseed rape as a hyperaccumulator for cadmium contaminated soil[J]. China Environmental Science, 2002, 22(1): 48-51(in Chinese).
- [18] 王亚宇. 乌鲁木齐市土壤重金属空间分布及行道树对重金属的富集特征[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2008.
WANG Y Y. Space distribution and accumulations in roadside trees of heavy metal in urban soil of Urumqi City[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2008(in Chinese).
- [19] 薛皎亮, 刘红霞. 城市空气中铅在国槐树体内的积累[J]. 中国环境科学, 2000, 20(6): 536-539.

- XUE J L, LIU H X. Lead in city air accumulated by the green tree, *Sophora japonica* [J]. China Environmental Science, 2000, 20(6): 536-539 (in Chinese).
- [20] 丁桑岚. 环境评价概论 [M]. 北京: 化学工业出版社教材出版中心, 2001: 27-40.
- DING S L. Introduction to environmental assessment [M]. BEIJING: Chemical Industry Press Publications Center, 2001: 27-40 (in Chinese).
- [21] 陈慧茹, 董亚玲, 王琦, 等. 重金属污染土壤中 Cd、Cr、Pb 元素向水稻的迁移累积研究 [J]. 中国农学通报, 2015, 31(12): 236-241.
- CHEN H R, DONG Y L, WANG Qi, et al. Distribution and transportation of Cd, Cr, Pb in rice with contamination in soil [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(12): 236-241 (in Chinese).
- [22] 孙淑萍. 3 种垂直绿化植物对污染物的富集及生理响应 [D]. 南京: 南京林业大学博士学位论文, 2011.
- SUN S P. Absorption and physiological response of three vertical greening plant species to pollutants [D]. Nanjing: The Doctoral Dissertation of Nanjing Forestry University, 2011 (in Chinese).
- [23] ROSSINI Oliva S, MINGORANCE M D. Assessment of airborne heavy metal pollution by aboveground plant parts [J]. Chemosphere, 2006, 65(2): 177-182.
- [24] 曹学慧, 安海龙, 刘超, 等. 北京市主要绿化树种叶片中重金属的积累特性及其大气污染评价 // 中国环境科学学会. 2015 年中国环境科学学会学术年会论文集 (第一卷) [C]. 中国环境科学学会, 2015.
- CAO X H, AN H L, LIU C, et al. The main greening tree species accumulation characteristics of heavy metals in leaf blade and its atmospheric pollution evaluation in Beijing // Chinese Society For Environmental Sciences. The Chinese society for environment sciences academic conference proceedings in 2015 (The first volume) [C]. Chinese Society For Environmental Sciences, 2015 (in Chinese).