

DOI: 10.5846/stxb201403300592

唐丽清, 邱尔发, 韩玉丽, 王荣芬. 不同径级国槐行道树重金属富集效能比较. 生态学报, 2015, 35(16): 5353-5363.

Tang L Q, Qiu E F, Han Y L, Wang R F. Variation of heavy metal enrichment efficiency in roadside trees of *Sophora japonica* L. with different diameters at breast height. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(16): 5353-5363.

不同径级国槐行道树重金属富集效能比较

唐丽清, 邱尔发*, 韩玉丽, 王荣芬

中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局城市森林研究中心, 国家林业局森林培育重点实验室, 北京 100091

摘要: 采用 ICP-OES 测定北京市台基厂大街行道树国槐各器官中 7 种重金属 (Cd、Cr、Ni、Cu、Mn、Pb、Zn) 含量, 比较不同径级国槐重金属富集效能。结果表明: 国槐中重金属含量因胸径级、器官、元素种类不同而存在差异。各径级国槐重金属含量大小总体趋势为 Zn>Mn>Cu>Pb>Cr>Ni>Cd, 各器官中树皮和根对重金属的吸收能力最强, 其次是叶和枝, 树干对重金属的吸收能力最弱。不同径级国槐对重金属的富集能力存在差异, 表现为小径级>中径级>大径级。国槐各器官中重金属积累量大小顺序为根>干>枝>叶, 重金属积累量随着胸径级扩大和生物量的增加而增加。综合比较不同径级国槐重金属年均积累量、单位面积富集量和单位空间富集量, 小径级 (20≤DBH<30 cm) 国槐富集效能最高。

关键词: 径级; 国槐; 重金属; 属行道树; 富集效能

Variation of heavy metal enrichment efficiency in roadside trees of *Sophora japonica* L. with different diameters at breast height

TANG Liqing, QIU Erfa*, HAN Yuli, WANG Rongfen

Research Institute of Forestry of the Chinese Academy of Forestry, Urban Forest Research Center of the State Forestry Administration, Key Laboratory of Forest Silviculture of the State Forestry Administration, Beijing 100091, China

Abstract: The concentration of heavy metals (Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn) in roadside tree of *Sophora japonica* L. and their organs along Taijichang Street was measured by using the Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES) to compare the heavy metal enrichment capacity between different diameter classes. The results showed that the concentration of heavy metals in different diameter classes of *Sophora japonica* L., the concentration of the same element in different organs, and the concentration of different elements in the same organ were all different. In general, heavy metal concentration in *Sophora japonica* L. followed the order of Zn > Mn > Cu > Pb > Cr > Ni > Cd. The heavy metal absorption capacity in all organs followed the order of bark > root > leaf > branch > stem. Meanwhile, the study showed that the enrichment capacity of *Sophora japonica* L. in diameter at breast height (DBH) of small size was stronger than those of medium and large size. Heavy metal accumulation in different organs followed the order of root > trunk > branch > leaf, which also increased in *Sophora japonica* L. with the increase of DBH and biomass. By comparing the accumulation per year, the bioenrichment unit area as well as the bioenrichment unit space of heavy metals with medium and large DBH, *Sophora japonica* L. of smaller DBH (DBH less than 30 cm or more than 20 cm) had higher enrichment efficiency.

Key Words: diameter class; *Sophora japonica* L.; heavy metal; roadside tree; enrichment efficiency

基金项目: 国家“十二五”(2011BAD38B03)科技支撑计划项目

收稿日期: 2014-03-30; 网络出版日期: 2014-10-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: efqiu@163.com

随着城市化进程加快,城市生态系统的负荷日益加重,生态环境受到严重破坏。其中由机动车尾气排放、工业“三废”、人类生产活动等原因造成的重金属污染已成为当前社会不容忽视的环境问题^[1-2]。城市树木凭借巨大生物量、发达的根系吸收和富集土壤重金属,有效实现土壤重金属修复^[3-5]。在空间资源紧张、人口密集的城市中,绿化植物作为重金属污染的“天然净化器”,受到众多学者的广泛关注,但受地域差异国内外学者的关注内容略有不同。由于树叶和树皮中重金属含量与大气中相应元素含量有较高相关性,国外许多专家学者致力于乡土树木的树叶、树皮等对大气重金属物污染的指示研究,比如七叶树和椴树树叶可很好地指示南斯拉夫首都大气重金属污染状况^[6];根据锦绣杜鹃叶片与道路土壤重金属相关性研究以及同位素跟踪分析道路重金属污染主要来源^[7];相关研究认为阔叶树和针叶树的树皮指示效果也良好,尤其粗糙树皮对重金属富集能力高于光滑树皮,Tayel 等利用柏树树皮监测和评价约旦安曼城市大气重金属污染^[8];Ali 等^[9]认为树木细枝对空气重金属污染也有很好指示作用。在空间资源相对紧张的城市,狭隘的道路绿化空间,通过立体绿化方式,选择一些抗污吸污强的绿化植物,有助于提高对道路重金属污染物的吸收和净化作用,美国 Speak 等^[10]通过街道附近屋顶绿化植物对颗粒物净化试验发现部分屋顶绿化植物对大气重金属污染有较强滞留和吸收能力。而目前国内学者主要从不同树种对重金属吸收的差异性比较、公路防护林对重金属吸收和积累特征、林带对重金属污染的屏障作用以及树龄对乔木重金属吸收的影响等多方面展开调查研究,一般认为杨柳科树木重金属富集吸收的能力相对较强,速生树种生物量大、生长快对重金属富集能力高于慢生树种,如杨树、火炬松分别高于同龄级的落叶松、杉木;针叶树鳞形叶片表层有较厚的蜡质和松脂分泌物对大气重金属的吸附能力高于阔叶树种;毛白杨和枫香对重金属富集能力随着年龄增加而逐渐降低^[11-21]。但目前研究中还未涉及不同胸径大小的树木重金属富集差异性比较,对树木各器官重金属富集作用的研究仅局限于重金属含量的比较,而对单株树木及各器官重金属积累量的讨论甚少。国槐是北京市道路绿化的高频树种,因此本文选取北京市台基厂大街行道树国槐为研究对象,研究其不同径级、不同器官对重金属的富集作用,并结合土地和空间资源有效利用的角度,探讨不同径级国槐重金属富集效能,为今后城市行道树经营管理及树种选择提供理论依据。

1 试验材料与研究方法

1.1 样地概况

试验样地位于北京市东城区台基厂大街(39°56'N,116°20'E),毗邻天安门广场,北起东长安街,南至前门东大街。道路长 600 m,宽 10 m,两侧以国槐作为行道树,树木平均胸径 32.93 cm,平均树高 12.8 m,株距 3 m。台基厂大街表层土壤重金属含量,见表 1。

表 1 台基厂大街土壤重金属元素含量

Table 1 The heavy metal concentration in soil along Taijichang Street

Cd/(mg/kg)	Cr/(mg/kg)	Cu/(mg/kg)	Mn/(mg/kg)	Ni/(mg/kg)	Pb/(mg/kg)	Zn/(mg/kg)
2.04±0.12	67.08±2.53	291.9±10.19	378.43±49.58	27.82±0.73	54.31±1.95	778.99±57.61

1.2 样品采集及处理

按胸径大小,将国槐分成 3 个径级:小径级($20 \leq \text{DBH} < 30$ cm),中径级($30 \leq \text{DBH} < 40$ cm),大径级($40 \leq \text{DBH} < 50$ cm)。根据每木调查结果,每径级各选取与该径级平均胸径、树高相近的样本 3—5 株,各径级国槐样本生长情况如表 2 所示。于 2013 年 8 月中旬对台基厂大街两侧国槐和路旁土壤进行样品采集。(1)植物样品:分不同方向采集样本根系、枝、叶、干、皮,树皮采自胸径部位,树干用生长锥在胸径部位采集;(2)土壤:采用混合取样法,用土钻采集样本根系周围表层土壤,每株样本下采集 2 个土样,一共收集 18 个土样,于室内将土壤样品均匀混合,四分法取 1 kg 作为该条道路的混合土样,自然风干后过 100 目筛,装袋保存。植物样品则用去离子水清洗,用吸水纸吸干表面水分后放入恒温烘箱中 105℃ 杀青,80℃ 烘干至恒重,用高速万能粉

碎机粉碎好放入纸袋干燥保存。

1.3 重金属元素测定方法

称取样品 0.5 g(精确至 0.0001),植物样品消煮采用浓 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ (4:1)消解法^[22];土壤样品消煮采用 HF-HClO_4 (1:1)消解法^[22]。使用 ICP-OES 电感耦合等离子体发射光谱仪测定重金属 Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn 含量。

表 2 不同径级国槐标准木生长情况

Table 2 The growth situation of sampled tree in different diameter class

大小 Size	径级 Diameter class/cm	胸径 DBH /cm	树高 Tree height/m	平均树龄 Tree age /a	冠幅(东西×南北) Crown/m
小 Small	20≤DBH<30	26.67±1.61	12.5±1.87	21	7.4×5.6
中 Medium	30≤DBH<40	36.23±1.97	14.8±0.77	29	12×8.6
大 Large	40≤DBH<50	44.9±1.45	15.1±2.46	48	11.3×9.8

* 表中数值为均值±标准差

1.4 植物重金属富集系数计算

重金属富集系数大小反映了植物对土壤中某一元素富集和吸收能力的强弱^[23]:

富集系数=植物各器官重金属元素含量/土壤重金属元素含量

1.5 植物各器官重金属积累量估算方法

植物通过各器官长期吸收而累积在体内的重金属量即植物各器官重金属元素积累量。各器官中某一元素积累量可根据各器官生物量与其对应吸收的该种重金属元素含量乘积估算,所有器官重金属元素积累量总和为单株重金属积累量^[24]。

通过伐倒木分层计算各器官干重求取单株乔木生物量是一种比较精确的生物量估算方法,但在城市园林中这种做法不切实际,而且园林上也没有适用于国槐的生物量估算方程,根据前人研究,计算树木生物量时对于无相关生物量方程可参考同属或同科的其他树木的生物量模型进行估算^[25],本研究中国槐的生物量估算参考毕君等人刺槐单株生物量动态研究,由于尚未找到合适国槐树皮的生物量估算模型,因此并未对树皮重金属积累量进行估算^[26]。其回归方程如下:

$$\ln W_{\text{干}} = -2.895531 + 0.86764 \ln(D^2 H) \quad R = 0.989$$

$$\ln W_{\text{枝}} = -3.71916 + 0.79079 \ln(D^2 H) \quad R = 0.932$$

$$\ln W_{\text{叶}} = -2.90872 + 0.45739 \ln(D^2 H) \quad R = 0.795$$

$$\ln W_{\text{根}} = -2.16746 + 0.63276 \ln(D^2 H) \quad R = 0.956$$

1.6 单株绿化覆盖面积及绿化空间辐射占有量估算方法

(1) 绿化覆盖面积

单株乔木绿化覆盖面积即树冠投影面积(不计树冠重叠部分),国槐树冠在地面的投影近似椭圆,其树冠投影面积公式为:

$$S = \pi ab$$

式中, S 为树冠投影面积(m^2); a, b 为分别为树冠南北和东西长的一半(m)。

(2) 绿化空间辐射占有量(ROGS)

绿化空间辐射占有量(ROGS)即树木正常生长的生存空间及发挥多种生态功能的范围,其计算方法参考郅光发等人的研究^[27],计算公式如下:

$$V = \pi R^2 H$$

式中, V 为单株绿化空间辐射占有量(m^3); R 为树冠半径(m); H 为树高(m)。

根据单株绿化覆盖面积、绿化空间辐射占有量和单株重金属积累量推算单位面积、单位空间重金属富集

量,更好反映树木在有限生存土地和空间里各器官对重金属的吸收和富集。

1.7 数据处理

用 Excel2007 和 SPSS19.0 统计软件对试验数据进行处理。

2 结果与分析

2.1 不同径级国槐重金属含量比较

重金属含量在国槐中因器官、元素种类不同而存在差异(表3),各元素含量大小顺序为 $Zn > Mn > Cu > Pb > Cr > Ni > Cd$,总体上各器官中树皮和树根中重金属含量较高,叶和枝次之,树干中则普遍较低,其中 Cd、Cr、Ni 和 Pb 4 种非必须营养元素在树皮中含量较高,而 Zn、Mn、Cu 3 种营养元素在树根中含量较高。

不同径级国槐相同器官对同一元素的吸收存在差异(表3),除树皮、树根外,其余器官中 Cd 含量在不同径级间差异不显著($P > 0.05$);Cr、Zn、Mn 在各器官中含量因径级不同存在极显著差异($P < 0.01$),其中小径级树枝中 Cr 含量、树皮中 Mn 含量分别是中径级相应器官 3.01、1.45 倍,大径级树干中 Zn 含量是小径级相应器官 4 倍;Cu、Pb、Ni 在部分器官中含量也因径级不同存在极显著差异($P < 0.01$),尤其是树皮器官,Cu 在小径级中含量比中径级多了 2.18 倍,中径级 Pb 含量则是大径级 3.86 倍,树枝中小径级 Ni 含量是中径级 2.22 倍;树干中 Pb 含量和树根中 Ni 含量在各径级差异不显著($P > 0.05$)。总体上,重金属含量在各径级国槐中大小顺序为:中径级>小径级>大径级,尤其是中径级国槐树根对 Mn、Zn,树皮对 Cr、Pb,树叶对 Zn 的吸收都高于其他径级相应器官。

表 3 不同径级国槐各器官重金属元素含量

Table 3 Heavy metal concentration in *Sophora japonica* L. organs in different diameter class

径级 Diameter class	重金属 Heavy metal	枝 Branch	叶 Leaf	干 Stem	根 Root	皮 Bark
小 Small	Cd/(mg/kg)	0.123±0.058Ab	0.179±0.040Ab	0.136±0.032Ab	0.921±0.077Aa	1.021±0.061Aa
	Cr/(mg/kg)	6.711±0.306Ac	3.903±0.231Cd	1.974±0.036Ce	11.107±0.586Ab	25.486±0.590Ba
	Cu/(mg/kg)	7.568±0.194Ac	8.098±0.300Bc	2.596±0.330Ad	180.149±1.649Aa	84.199±0.639Ab
	Mn/(mg/kg)	17.059±0.184Ad	59.427±0.597Cc	3.028±0.006Ae	125.877±0.579Ba	73.549±0.192Ab
	Ni/(mg/kg)	5.398±0.100Ab	0.943±0.169Cd	1.183±0.155Bd	4.694±0.409Ac	13.365±0.166Aa
	Pb/(mg/kg)	2.468±0.341Ac	5.713±0.286Bb	0.858±0.812Ad	6.058±0.585Bb	34.006±1.163Ba
	Zn/(mg/kg)	25.733±0.183Bd	32.344±0.593Cc	5.179±0.0090Ce	172.459±0.882Ba	105.415±0.399Ab
中 Medium	Cd/(mg/kg)	0.120±0.053Ac	0.163±0.0230Ac	0.173±0.031Ac	0.733±0.100Ba	0.672±0.110Bb
	Cr/(mg/kg)	2.231±0.231Cd	4.904±0.060Bc	4.626±0.063Ac	7.511±0.367Bb	32.694±0.128Aa
	Cu/(mg/kg)	4.395±0.012Cd	6.779±0.347Cc	2.629±0.050Ae	164.489±0.568Ba	26.468±0.951Cb
	Mn/(mg/kg)	15.447±0.051Bd	68.654±0.410Bb	2.925±0.036Be	165.567±0.921Aa	50.573±0.290Cc
	Ni/(mg/kg)	2.427±0.074Bc	1.533±0.070Bd	0.922±0.045Ce	4.644±0.184Ab	7.078±0.090Ba
	Pb/(mg/kg)	1.739±0.086Bc	7.518±0.767Ab	0.739±0.751Ac	9.096±0.378Ab	54.847±1.789Aa
	Zn/(mg/kg)	29.689±0.234Ad	76.458±1.009Ac	14.417±0.020Be	190.378±1.018Aa	87.175±0.106Cb
大 Large	Cd/(mg/kg)	0.090±0.010Ad	0.199±0.034Ac	0.140±0.029Acd	0.349±0.031Cb	0.513±0.110Ba
	Cr/(mg/kg)	3.427±0.182Bd	9.904±0.147Ab	2.654±0.135Be	7.183±0.297Bc	20.179±0.321Ca
	Cu/(mg/kg)	7.198±0.168Bd	9.218±0.170Ac	2.053±0.062Be	125.208±0.447Ca	77.296±0.271Bb
	Mn/(mg/kg)	17.193±0.445Ad	73.963±0.316Ab	2.587±0.006Ce	117.609±0.948Ca	52.019±0.457Bc
	Ni/(mg/kg)	2.445±0.095Bc	1.989±0.071Ad	1.538±0.058Ae	4.572±0.485Ab	6.930±0.161Ba
	Pb/(mg/kg)	1.256±0.168Bd	7.878±0.440Ab	0.498±0.208Ae	3.381±0.506Cc	14.194±0.354Ca
	Zn/(mg/kg)	21.483±1.094Cd	57.442±0.115Bc	20.733±0.670Ad	107.482±1.119Ca	91.377±0.117Bb

* 表中数值为均值±标准差;小写字母表示同一径级不同器官相同重金属差异达到显著水平($P < 0.05$);大写字母表示不同径级同一器官相同重金属差异达到显著水平($P < 0.05$)

2.2 不同径级国槐对重金属的富集能力比较

各径级国槐对 7 种重金属元素的富集系数计算结果(表 4)表明不同器官对不同重金属元素的富集能力存在差异,选择性吸收明显,总体上富集能力依次为树皮>树根>树叶>树枝>树干。各器官对重金属的富集系数分布范围为:树枝 0.015—0.194,对 Ni 的吸收能力最强,而对 Cu 的吸收较弱(大径级国槐除外);树叶 0.023—0.195,对 Mn 的吸收能力最强,而对 Cu 的吸收能力最弱;树干 0.007—0.085,对 Cd 的吸收最强,对 Mn 较弱(小径级除外);树根 0.070—0.617,对 Cu 的吸收强,对 Pb 的吸收弱(中径级除外);树皮 0.112—1.010,树皮对 Pb 的吸收能力较高,尤其是中径级国槐树皮对 Pb 的富集系数大于 1,表现出高富集的特征。有研究表明树皮是营养元素吸收和转化比较活跃的器官,在参与养分循环和营养代谢过程中起着重要的作用^[28-29],此外,大气沉降的重金属颗粒物能直接吸附在树皮表面,通过皮层吸收和运输进入树体内^[30],因此树皮对重金属有较高的吸收和富集作用,很多研究也得到了类似结果^[31-32]。但由于树皮结构复杂,理化性质特殊,对重金属吸收机制的研究还不是很完善,因此树皮吸收重金属来源以及中径级国槐树皮对 Pb 的高富集特征是否还受大气沉降影响还有待深入研究^[30]。

表 4 不同径级国槐重金属富集系数比较

Table 4 Comparison of heavy metal enrichment coefficient of *Sophora japonica* L. in different diameter class

径级 Diameter class	器官 Organ	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
小 Small	枝	0.060	0.100	0.026	0.045	0.194	0.045	0.033
	叶	0.088	0.058	0.028	0.157	0.034	0.105	0.042
	干	0.067	0.029	0.009	0.008	0.043	0.016	0.007
	根	0.452	0.166	0.617	0.333	0.169	0.112	0.221
	皮	0.497	0.380	0.288	0.194	0.480	0.626	0.135
中 Medium	枝	0.059	0.033	0.015	0.041	0.087	0.032	0.038
	叶	0.080	0.073	0.023	0.181	0.055	0.138	0.098
	干	0.085	0.069	0.009	0.008	0.033	0.014	0.019
	根	0.360	0.112	0.564	0.438	0.167	0.167	0.244
	皮	0.330	0.487	0.091	0.134	0.254	1.010	0.112
大 Large	枝	0.044	0.051	0.025	0.045	0.088	0.023	0.028
	叶	0.098	0.148	0.032	0.195	0.071	0.145	0.074
	干	0.069	0.040	0.007	0.007	0.055	0.009	0.027
	根	0.171	0.107	0.429	0.311	0.164	0.070	0.138
	皮	0.252	0.301	0.265	0.137	0.249	0.261	0.117

不同径级国槐对不同重金属元素表现出不同的富集能力(表 4),小径级国槐中表现为 Cd>Cu>Ni>Pb>Mn>Cr>Zn;中径级:Pb>Cd>Mn>Cr>Cu>Ni>Zn;大径级:Cu>Mn>Cr>Cd>Ni>Pb>Zn;这与各重金属元素在国槐中含量大小顺序(Zn>Mn>Cu>Cr>Pb>Ni>Cd)差异很大,该结果反映出国槐对 Zn 的高吸收低富集,对 Cd 低吸收但富集能力较强的特征,间接说明国槐对重金属元素的富集能力并不同体内相应元素的含量值呈正比,可能受到自身吸收特性和外界环境等多方面因素影响。随着胸径不断扩大,国槐对 Cr、Mn、Pb、Zn 的富集能力先增强后减弱,对 Cd 的富集能力逐渐减弱,而对 Cu、Ni 的富集能力随胸径扩大先减弱后增强。从重金属富集系数均值来看,各径级国槐对重金属的富集能力大小为小径级(0.168)>中径级(0.162)>大径级(0.122),总体上随着胸径不断扩大,国槐对重金属的富集能力呈下降趋势。

2.3 不同径级国槐各器官重金属元素积累量估算

各径级国槐单株重金属积累量为 22777.65—47263.70 mg/株(表 5),随着胸径级扩大而增加。由于未找到适合国槐树皮的生物量方程,因此本文中并未对树皮重金属积累量进行估算。从不同重金属元素积累量来看,单株国槐中 Zn、Mn、Cu 积累量最高,Cr、Ni、Pb 其次,Cd 最低。

为了说明重金属在单株国槐各器官中分配情况以及与生物量的关系,根据表 5 数据作出相应图 1。图 1

显示国槐各器官中重金属积累量与相应器官生物量不成正比,树根生物量仅占总生物量 13.13%—16.46%,但其重金属积累量最大,占 60.93%—79.43%;树干生物量最大,占总生物 67.27%—71.63%,但重金属积累量却不到单株国槐总积累量 1/3;树冠枝叶生物量为 14.42%—16.27%,其重金属积累量却低于 15%。

随着胸径级扩大,国槐的生物量也相应增加,尤其是树干生物量占总生物量的比重逐渐增大,而其余器官呈减小趋势,因此相应器官中的重金属积累量也随之发生增大或减小的变化,其中大径级国槐树干重金属积累量(12958.77 mg)占总积累量百分比(27.42%)几乎比小径级国槐(2205.66 mg,9.68%)增长了两倍,而树根同比却减少了 18.5%。各径级国槐单株重金属积累量随着胸径级扩大不呈线性增加(类似抛物线状),其中中径级国槐重金属积累量同小径级国槐相比增加了 92.99%,而大径级同比中径级仅增加 7.52%,研究表明树木生物量随着树龄增大呈抛物线增长^[33],因而单株国槐重金属总积累量的增长随着胸径扩大可能受生物量增长率大小影响。

表 5 不同径级国槐单株各器官生物量及重金属积累量

Table 5 Biomass and heavy metal current capacity of *Sophora japonica* L. in different diameter class

径级 Diameter class	器官 Organ	生物量 Biomass/kg	各重金属元素积累量 Heavy Metal current capacity/mg							合计 Total/mg
			Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	
小 Small	枝	32.18	3.96	215.94	243.52	548.95	173.72	79.43	828.07	2093.58
	叶	3.49	0.63	13.62	28.27	207.47	3.29	19.94	112.92	386.14
	干	147.49	20.10	291.21	382.89	446.62	174.53	126.49	763.82	2205.66
	根	36.09	33.24	400.90	6502.14	4543.29	169.41	218.67	6224.60	18092.26
	合计	219.25	57.92	921.68	7156.83	5746.33	520.95	444.53	7929.40	22777.65
中 Medium	枝	59.71	7.15	133.19	262.42	922.24	144.91	103.82	1772.61	3346.33
	叶	4.99	0.81	24.48	33.84	342.69	7.65	37.53	381.64	828.63
	干	290.58	50.29	1344.23	763.98	850.05	267.88	214.69	4189.34	7680.46
	根	59.18	43.40	444.54	9735.26	9799.05	274.88	538.37	11267.49	32103.00
	合计	414.47	101.65	1946.44	10795.50	11914.03	695.32	894.40	17611.09	43958.42
大 Large	枝	85.17	7.66	291.89	613.00	1464.27	208.21	106.94	1829.63	4521.60
	叶	6.13	1.22	60.71	56.50	453.39	12.18	48.29	352.12	984.41
	干	429.07	60.02	1138.65	880.71	1110.15	659.82	213.76	8895.67	12958.77
	根	78.64	27.46	564.89	9846.36	9248.78	359.54	299.44	8452.44	28798.92
	合计	599.00	96.36	2056.14	11396.57	12276.59	1239.75	668.44	19529.86	47263.70

2.4 不同径级国槐重金属富集效能比较

根据单株国槐重金属积累量和树龄估算各径级国槐重金属年均积累量,比较不同径级国槐对重金属的年均累积能力,从土地和空间资源有效利用角度出发,比较不同径级国槐在单位绿化面积和单位空间里对重金属的富集量,根据这 3 个指标的估算结果,采样隶属函数法^[34]对不同径级国槐重金属富集效能进行综合评价。

重金属年积累量、单位面积富集量、单位空间富集量因胸径级、重金属种类不同而差异明显(表 6)。总体上各元素年积累量和富集量大小趋势为 $Zn > Mn > Cu > Cr > Ni > Pb > Cd$,同各重金属在单株国槐中积累量大小顺序相同。从年均积累量看,中径级>小径级>大径级,而且中径级国槐年均重金属积累量是大径级国槐的 1.54 倍;从单位面积和单位空间富集量看,小径级>大径级>中径级,但大径级与中径级的国槐之间差异不大。根据隶属函数法计算,结果表明不同径级国槐重金属富集效能大小依次为:小径级>中径级>大径级。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 国槐对重金属元素的吸收因胸径级、器官、重金属种类不同而存在差异,这是国槐对各重金属元素选

择性吸收的结果。

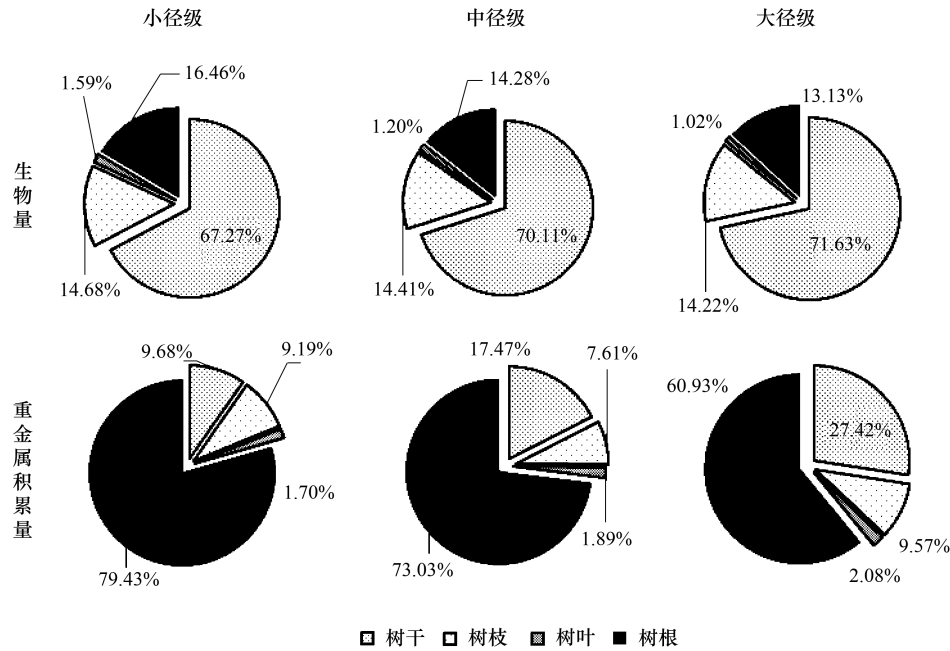


图 1 不同径级国槐重金属积累量分配规律

Fig.1 Distribution of biomass and heavy metal current capacity of *Sophora japonica* L. trees in different diameter class

表 6 不同径级国槐单株重金属富集效能比较

Table 6 The comparison of heavy metal enrichment efficiency of *Sophora japonica* L. trees in different diameter class

径级 Diameter class	绿化覆盖面积 Green coverage area/m ²	空间辐射 占有量 ROGS/m ³	指标 Index	重金属 Heavy Metal							合计 Total
				Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	
小 Small	32.53	414.78	年均积累量/(mg/a)	2.76	43.89	340.80	273.63	24.81	21.17	377.59	1084.65
			单位面积富集量/(mg/m ²)	1.78	28.33	220.00	176.64	16.01	13.67	243.75	700.20
			单位空间富集量/(mg/m ³)	0.14	2.22	17.26	13.86	1.26	1.07	19.13	54.94
中 Medium	81.01	1233.14	年均积累量/(mg/a)	3.51	67.12	372.26	410.83	23.98	30.84	607.28	1515.81
			单位面积富集量/(mg/m ²)	1.25	24.03	133.26	147.06	8.58	11.04	217.39	542.62
			单位空间富集量/(mg/m ³)	0.08	1.58	8.76	9.67	0.56	0.73	14.29	35.66
大 Large	86.93	1319.95	年均积累量/(mg/a)	2.01	42.84	237.43	255.76	25.83	13.93	406.87	984.66
			单位面积富集量/(mg/m ²)	1.11	23.65	131.10	141.22	14.26	7.69	224.66	543.69
			单位空间富集量/(mg/m ³)	0.07	1.56	8.64	9.31	0.94	0.51	14.80	35.82

(2) 国槐各器官中重金属含量在树皮、树根中较高,树叶和树枝次之,树干中最低;各器官对重金属富集能力强弱依次为树皮>树根>树叶>树枝>树干。

(3) 各重金属元素在国槐中含量大小总体趋势为 Zn>Mn>Cu>Pb>Cr>Ni>Cd,而富集能力却与之差异较大,其中小径级国槐: Cd>Cu>Ni>Pb>Mn>Cr>Zn;中径级: Pb>Cd>Mn>Cr>Cu>Ni>Zn;大径级: Cu>Mn>Cr>Cd>Ni>Pb>Zn;该结果反映出 7 种元素的富集吸收中,国槐对 Zn 高吸收低富集,而对 Cd 低吸收但富集较高的特征。各径级国槐对重金属富集能力为小径级>中径级>大径级。

(4) 单株国槐各器官重金属积累量大小为树根>树干>树枝>树叶,随着径级扩大,单株国槐重金属积累量因生物量增加而逐渐增加。

(5) 从重金属年积累量、单位绿化面积和单位空间重金属富集量 3 个方面对不同径级国槐重金属富集效能进行评价,综合比较结果表明:小径级>中径级>大径级。

3.2 讨论

3.2.1 植物各器官对重金属的吸收

植物吸收重金属的途径主要有两个:一是通过根系吸收土壤中重金属,输送到地上部分各器官,二是通过地上枝、叶、皮部分接触、吸附、吸收大气中重金属颗粒物。

(1)树皮 前人在绿化树木重金属吸收及分布的研究中对树皮重金属吸收方面的讨论甚少。树皮长期暴露在空气中,其吸收的重金属主要来源于根系输送以及外界环境中重金属颗粒物接触、附着吸收^[30],本次研究结果表明树皮对重金属富集能力最强,尤其对 Cr、Ni 和 Pb 3 种有害重金属的吸收均高于其他器官,蒋高明等人^[32]在对木本植物不同器官吸收污染物研究中也得到了类似结论。树皮对重金属元素的吸收能力高于树根,间接表明通过根系输送重金属并不是树皮吸收重金属的唯一途径,更多可能来自对大气沉降的重金属颗粒物的吸附。有研究表明树皮对污水中的重金属具有良好的净化作用,尤其是阔叶树树皮能有效去除 Cu、Pb 和 Zn。树皮对重金属的积累受树皮本身的理化性质、环境中污染物含量、降水等影响,因此树皮对重金属污染物净化作用应得到重视,其积累机制有待深入研究^[30]。

(2)树根 植物根系是养分吸收的主要器官,根系吸收土壤中水分及各种矿质营养元素的同时附带吸收土壤中有毒重金属元素,因此根系中重金属含量一般较其他器官高^[33],这在很多研究结果中都得到了证实^[13-14]。Zn、Mn、Cu 是植物生长必需营养元素,对植物生理生长及代谢活动中发挥着重要作用,而 Cd、Cr、Ni、Pb 是非必需营养元素,虽然低含量对植物代谢有一定促进作用,但在植物体内富集过量会对其生长造成毒害,本次研究表明树根中 Zn、Mn、Cu 3 种元素含量均高于其他器官,而对 Cd、Cr、Ni、Pb 的吸收低于树皮,说明国槐树根对不同重金属元素存在选择性吸收,能很好地避免有害重金属过量累积。

(3)树叶 树叶中重金属一部分来自根系蒸腾拉力作用下水分矿质营养的输送,一部分来自对大气颗粒物的吸收^[14],本次研究结果显示各径级国槐树叶对重金属元素的吸收普遍低于树根(除了大径级国槐树叶对 Cr、Pb 的吸收),而且小、中、大各径级国槐树叶中重金属含量均值分别仅是树根中的 24.7%、31.6%、54.8%,可见树叶对各重金属元素的转运能力比较弱,国槐通过根系吸收的土壤重金属主要滞留在根部^[35]。一些研究认为植物叶片中的重金属主要来自对空气污染物的吸收附着,黄会一等人试验研究也证实木本植物叶片对大气重金属污染物有很强吸收能力^[36],部分研究认为植物叶片中累积的重金属与其生长土壤中重金属含量无相关性,而与大气中重金属含量成正比^[37-38],因此树叶中累积吸收的重金属来源还有待进一步研究分析;徐学华等人^[20]对河道公路毛白杨重金属分布研究以及方晰等^[24]人对樟树重金属积累量空间分布研究结果均表明树叶对重金属的吸收能力高于树根及其他器官,这与本试验研究结果不同,说明树木对重金属的吸收可能存在种间差异^[39],但受测定方法、区域环境、元素种类不同等影响,研究结果也可能存在一定差异。

(4)树干 虽然树干中重金属含量比较低,对各元素吸收弱于其他器官,但凭借其巨大的生物量,仍是累积重金属的主要“库”。植物体内不同器官间重金属积累量的差异主要是因不同组分间生物量以及各组分重金属含量的差异所致^[40]。树木生物量随着树木生长而逐渐增加,而且树干生物量在树木总生物量中的比例会随着林龄的增加逐年增大^[33,41],因此随着胸径级扩大,国槐树干中重金属积累量也会逐渐增大,重金属污染物通过树干富集作用得到长期稳固,能有效避免重金属重新回归到环境中再次造成污染^[24]。

(5)树枝 目前对树枝重金属富集作用单方面的研究不多,但现有研究表明树枝也具有一定重金属累积能力,树枝表面皮层多孔,能吸滞和累积空气中重金属颗粒物,累积在表皮层的重金属颗粒可通过表皮进入皮层,而且随着枝条年龄增加具有累积效应,尤其是悬铃木树枝表皮多皮孔,且表皮蜡质覆有毛茸,对空气重金属的吸附能力更强,其一年生的枝条可作为很好的空气污染监测材料。蒋高明分析承德木本植物不同部位的重金属含量,结果显示当年生枝条重金属含量高于叶片,而树枝吸收能力大小可能还受根部吸收的影响^[30,42-43]。

3.2.2 植物吸收重金属可能存在的影响因素

植物对重金属的吸收不仅受自身遗传基因调控,同时还与生理代谢活动、细胞形态结构以及外界区域环

境中重金属存在形式等诸多方面因素影响^[44-45]。

(1) 植物生理活动可能对重金属吸收造成一定影响。植物在蒸腾作用下通过根系向地上运输水分和营养物质的同时也携带部分重金属,本次研究中大径级国槐生长已近成熟,而小、中径级国槐仍处于生长阶段,对养分和水分的需求更大,因此蒸腾作用更强,在蒸腾拉力作用下间接带动对重金属的吸收^[14,46]。此外,大树体内大量积累重金属等有毒物质,对各项生理代谢的正常发挥可能造成一定的影响,从而对营养物质,以及有害金属元素的吸收和运输造成阻碍^[47],这可能是导致大径级国槐对重金属富集能力下降的原因之一,但具体影响因素还有待进一步详细研究。

(2) 土壤中重金属可能影响了国槐对各重金属元素的选择吸收。台基厂大街土壤重金属除 Mn 外,其余 6 种重金属含量均超出了北京市土壤背景值,其中 Cd、Cu、Zn 最为显著,分别是北京市土壤背景值^[48]相应元素 17、15.61、13.55 倍,采用单因子评价法与内梅罗综合评价法评价该条道路土壤重金属污染^[49];单项污染指数大小顺序为 Cd(10.2)>Zn(8.66)>Cu(8.34)>Pb(1.55)>Cr(0.75)>Ni(0.70)>Mn(0.65),内梅罗污染指数(PN)为 8.04(PN>3),可见台基厂大街路旁土壤已受到严重重金属污染,尤其是 Cd、Cu、Zn 污染严重。土壤重金属含量大小顺序为 Zn>Mn>Cu>Cr>Pb>Ni>Cd(表 1),与行道树国槐中重金属含量大小排序相似。有研究表明植物对重金属的吸收与环境中重金属含量呈正相关^[38,50],本次研究中的国槐对重金属的吸收可能受土壤中重金属含量影响。此外,智颖飙等人研究发现土壤重金属中有效态含量与植物对其吸收和利用有很大关系,有效态所占比越大越利于重金属的吸收富集,土壤理化性质(PH 值、离子强度、有机质含量等)也会影响国槐对重金属的吸收^[44]。

(3) 不同树种以及不同区域环境下植物富集吸收重金属的能力略有差异。虽然该研究中国槐部分器官对一些重金属元素的富集作用较高(树皮、树根),但各径级国槐对重金属元素的平均富集系数在 0.121—0.168 之间,属于中度吸收范围($0.1 < CF < 1$)^[51],远低于超富集植物的标准值($CF > 1$),与徐学华等人^[20]研究的河道公路上的毛白杨(平均富集系数为 0.104)相比,该道路上国槐对重金属的富集吸收能力更强,但低于部分矿区植被或公路沿线的绿化乔木^[14-15,52-53]。除受种间差异影响外,植物体内重金属含量通常与环境中重金属污染程度相关。矿区重金属污染程度一般高于公路高于道路及其他功能区,此外交通带来汽车尾气、车胎磨损等也会加重环境中重金属污染,尤其车流量大的道路重金属污染更为严重^[54],因此植物对重金属富集吸收受诸多因素影响,关于这方面问题研究在今后仍有待深入。

3.2.3 不同径级国槐重金属富集效能评价

在土地利用以及空间资源紧张的城市环境中,对所选择的绿化树木限制因素太多,如树种选择、树木大小、植株高度等,小径级国槐对土地和空间的利用率高,而且其重金属富集能力强,因而从综合利用角度出发小径级国槐重金属富集效能高于中、大径级。大径级国槐体内已大量累积重金属,体内过高的重金属含量对正常生理活动可能造成一定负面影响,对外界污染环境的抵抗能力差,对空间资源和养分的竞争激烈,加之绿地空间有限,大树截枝、截干等措施频繁,与潜在空间绿化占有量相比,现有的绿化空间就缩小很多。在恶劣的生长环境中大径级国槐更容易出现病害现象,个体健康水平会低于小、中径级国槐。因而,今后针对重金属污染严重区进行绿化时可选择生长旺盛的小、中径级树木,对于土地和空间资源利用要求高的地方,可选择小径级树木,对于生长不良、出现病害严重的大径级的树木,无论从富集重金属能力还是交通环境的安全角度,可考虑适当进行更新。

由于城市树木生长与林分中存在差异,加之刺槐和国槐仅同科不同种,因而本文采用刺槐林分中单株刺槐生物量估算不同径级国槐单株重金属积累量与实际值可能存在些差异,但至少能反映出不同径级国槐单株重金属积累量在树木生长过程中随着胸径级扩大各器官中重金属分布以及重金属总量增长的变化趋势。在今后研究工作中,可开展城市树木生物量的调查研究,从而更好服务于城市绿化树木及城市森林的生态功能评价及生态效益精确估算。

参考文献 (References):

- [1] 赵其国, 骆永明, 滕应, 曹伟, 吴绍华. 当前国内外环境保护形势及其研究进展. 土壤学报, 2009, 46(6): 1146-1154.
- [2] 王宏镔, 束文圣, 蓝崇钰. 重金属污染生态学研究现状与展望. 生态学报, 2005, 25(3): 596-605.
- [3] 韦秀文, 姚斌, 刘慧文, 白莉萍, 周玲莉. 重金属及有机物污染土壤的树木修复研究进展. 林业科学, 2011, 47(5): 124-130.
- [4] 骆永明, 查宏光, 宋静, 李华. 大气污染的植物修复. 土壤, 2002, 34(3): 113-119.
- [5] 张翠萍, 温琰茂. 大气污染植物修复的机理和影响因素研究. 云南地理环境研究, 2005, 17(6): 82-86.
- [6] Tomašević M, Rajšić S, Dorđević D, Tasić M, Krstić J, Novaković V. Heavy metals accumulation in tree leaves from urban areas. Environmental Chemistry Letters, 2004, 2(3): 151-154.
- [7] Suzuki K, Yabuki T, Ono Y. Roadside *Rhododendron pulchrum* leaves as bioindicators of heavy metal pollution in traffic areas of Okayama, Japan. Environmental Monitoring and Assess, 2009, 149(1/4): 133-141.
- [8] El-Hasana T, Al-Omaria H, Jiries A, Al-Nasir F. Cypress tree (*Cupressus sempervirens* L.) bark as an indicator for heavy metal pollution in the atmosphere of Amman City, Jordan. Environment International, 2002, 28(6): 513-519.
- [9] Demirayak A, Kutbay H G, Kilic D, Bilgin A, Hüseyinova R. Heavy metal accumulation in some natural and exotic plants in Samsun City. Ekoloji, 2011, 20(79): 1-11.
- [10] Barnes D, Hammadah M A, Ottaway J M. The lead, copper, and zinc contents of tree rings and barks A measurement of local metallic pollution. Science of the Total Environment, 1976, 5(1): 63-67.
- [11] Unterbrunner R, Puschenreiter M, Sommer P, Wieshammer G, Tlustoš P, Zupan M, Wenzel W W. Heavy metal accumulation in trees growing on contaminated sites in Central Europe. Environmental Pollution, 2007, 148(1): 107-114.
- [11] 杨志敏, 陈玉成. 重庆市主要绿化植物对重金属的富集与净化研究. 西南农业大学学报: 自然科学版, 2006, 28(3): 393-395, 401-401.
- [12] Speak A F, Rothwell J J, Lindley S J, Smith C L. Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in a UK city. Atmospheric Environment, 2012, 61: 283-293.
- [12] 宋芬芳, 杨世勇. 基于重金属积累特征的城市绿化树种配置模式研究. 安徽师范大学学报: 自然科学版, 2011, 34(4): 365-369.
- [13] 万坚, 徐程扬, 周睿智, 段永宏. 北京市主要路旁绿化灌木中重金属元素分布特征. 东北林业大学学报, 2008, 36(3): 22-23, 30-30.
- [14] 刘维涛, 张银龙, 陈喆敏, 周启星, 罗红艳. 矿区绿化树木对镉和锌的吸收与分布. 应用生态学报, 2008, 19(4): 752-756.
- [15] 孙龙, 韩丽君, 何东坡, 穆立蕾, 曹军, 姜利. 绥满公路两侧森林区土壤——植被重金属的分布特征及污染评价. 林业科学, 2009, 45(9): 72-78.
- [16] 阮宏华, 姜志林. 城郊公路两侧主要森林类型铅含量及分布规律. 应用生态学报, 1999, 10(3): 362-364.
- [17] 梁以玲, 叶镜中, 蔡志全, 夏洁. 城市近郊火炬松林重金属元素的分布及其季节变化. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2002, 26(6): 37-40.
- [18] 王成, 郅光发, 杨颖, 任启文. 高速路林带对车辆尾气重金属污染的屏障作用. 林业科学, 2007, 43(3): 1-7.
- [19] 徐永荣, 冯宗炜, 王春夏, 周志翔. 绿带对公路两侧土壤重金属含量的影响研究. 湖北农业科学, 2002, (5): 75-77.
- [20] 徐学华, 黄大庄, 王秀彦, 王圣杰, 李玉灵. 河道公路绿化植物毛白杨对重金属元素的吸收与分布. 水土保持学报, 2009, 23(3): 78-81, 106-106.
- [21] 吉启轩, 薛建辉, 沈雪梅. 不同年龄枫香对土壤中重金属污染物吸收能力比较. 山东林业科技, 2013, (1): 1-7.
- [22] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [23] 郭水良, 黄朝表, 边媛, 林国平. 金华市郊杂草对土壤重金属元素的吸收与富集作用(I)——6种重金属元素在杂草和土壤中的含量分析. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2002, 20(1): 22-29.
- [24] 方晰, 田大伦, 陈骏超, 姬瑞华. 重金属元素在樟树人工林中的累积与迁移. 安全与环境学报, 2006, 1(6): 64-68.
- [25] 王迪生. 基于生物量计测的北京城区园林绿地净碳储量研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [26] 毕君, 黄则舟, 王振亮. 刺槐单株生物量动态研究. 河北林学院学报, 1993, 8(4): 278-282.
- [27] 郅光发, 王成. 北京单位区树木三维结构与绿化空间辐射占有量研究. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(9): 60-65.
- [28] 刘广全, 土小宁, 史玲芳. 华北落叶松树干主要营养元素的空间分布. 生态科学, 2000, 19(4): 16-22.
- [29] 任继凯, 陈灵芝, 缪有贵, 孔繁志. 矿质元素在油松树干中分布的研究. 植物学报, 1985, 27(2): 196-202.
- [30] 王爱霞. 南京市空气重金属污染的藓类和树木监测[D]. 南京: 南京林业大学, 2010.
- [31] 李寒娥, 李秉滔, 蓝盛芳. 城市行道树对交通环境的响应. 生态学报, 2005, 25(9): 2180-2187.
- [32] 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. 应用生态学报, 1996, 7(3): 310-314.
- [33] 周群英, 陈少雄, 韩斐扬, 陈文平, 吴志华. 不同林龄尾细桉人工林的生物量和能量分配. 应用生态学报, 2010, 21(1): 16-22.

- [34] 杨秀艳, 雷海清, 李发勇, 闫田力, 吴志钢, 何家骅. 砷矿废弃地生态修复植物种的筛选. 林业科学, 2009, 45(4): 14-18.
- [35] 王焕校. 污染生态学(第三版). 北京: 高等教育出版社, 2002: 7-15.
- [36] 黄会一, 张春兴, 张有标. 木本植物对大气重金属污染物铅、镉吸收积累作用的初步研究. 林业科学, 1982, 18(1): 93-97.
- [37] 庄树宏, 王克明. 城市大气重金属(Pb, Cd, Cu, Zn)污染及其在植物中的富积. 烟台大学学报: 自然科学与工程版, 2000, 13(1): 31-37.
- [38] 王爱霞, 张敏, 方炎明, 贾恒, 周楠楠. 行道树对重金属污染的响应及其功能型分组. 北京林业大学学报, 2010, 32(2): 177-183.
- [39] 蒋德明, 黄会一, 张春兴, 王育英. 木本植物对土壤镉污染物吸收蓄积能力及其种间差异. 城市环境与城市生态, 1992, 5(1): 26-30.
- [40] 莫江明, Brown S, 孔国辉, 张佑昌, Lenart M. 鼎湖山马尾松林营养元素的分布和生物循环特征. 生态学报, 1999, 19(5): 635-640.
- [41] 项文化, 田大伦. 不同年龄阶段马尾松人工林养分循环的研究. 植物生态学报, 2002, 26(1): 89-95.
- [42] Baes C F, McLaughlin S B. Trace metal uptake and accumulation in trees as affected by environmental pollution //Hutchinson T C, Meema K M, eds. Effects of Atmospheric Pollutants on Forests, Wetlands and Agricultural Ecosystems. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1987: 307-319.
- [43] Schulz H, Popp P, Huhn G, Stärk H J, Schüttmann G. Biomonitoring of airborne inorganic and organic pollutants by means of pine tree barks. I. Temporal and spatial variations. Science of the Total Environment, 1999, 232(1/2): 49-58.
- [44] 智颖飙, 王再岚, 王中生, 马中, 姚一萍, 李红丽, 崔艳, 刘建平. 公路绿化植物油松(*Pinus tabulaeformis*)和小叶杨(*Populus simonii*)对重金属元素的吸收与积累. 生态学报, 2007, 27(5): 1863-1872.
- [45] 余国营, 吴燕玉, 王新. 杨树落叶前后重金属元素内外迁移循环规律研究. 应用生态学报, 1996, 7(2): 201-206.
- [46] 陈怀满, 陈能杨, 陈英旭. 土壤——植物系统中的重金属污染. 北京: 科学出版社. 1996: 210-247, 314-317.
- [47] 刘彤, 常醉, 王洋, 周志强. 树龄和性别对天然东北红豆杉中紫杉醇及三尖杉宁碱质量分数的影响. 东北林业大学学报, 2011, 39(12): 51-53, 76-76.
- [48] 陈同斌, 郑袁明, 陈煌, 郑国砥. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究. 环境科学, 2004, 25(1): 117-122.
- [49] 陈江, 张海燕, 何小峰, 曹水华, 杨国祥. 湖州市土壤重金属元素分布及潜在生态风险评价. 土壤, 2010, 42(4): 595-599.
- [51] Perleman A L. Landscape Geochemistry. Moscow: Department of the Secretary of State, CAO, 1972.
- [52] 邹梦瑶, 胡钧杰, 邓桂友, 邓金川, 陈惠阳, 童英林, 刘洁萍. 江西德兴矿区3种乔木对重金属的富集和转移特性. 仲恺农业工程学院学报, 2013, 26(3): 5-12, 23-23.
- [53] 陈益泰, 施翔, 王树凤, 李江川, 孙宇剑. 铅锌尾矿区15种植物的生长及对重金属的吸收积累. 林业科学, 2012, 48(12): 22-30.
- [54] 戴斯迪, 马克明, 宝乐. 北京城区行道树国槐叶面尘分布及重金属污染特征. 生态学报, 2012, 32(16): 5095-5102.