

北京七种常见经济林吸滞重金属的特征

李少宁^{1,2}, 田少强³, 赵云阁⁴, 刘 斌⁴, 陈 波¹, 鲁绍伟^{1,2}

(1. 北京市农林科学院 林业果树研究所, 北京 100093; 2. 北京林果业生态环境功能提升协同创新中心, 北京 100093;
3. 河北滦县林业局, 河北 唐山 063700; 4. 河北农业大学 林学院, 河北 保定 071000)

摘 要:以北京 7 种常见经济林树种为研究对象, 利用微波消解仪进行微波消解, 并用 ICP-MS 电感耦合等离子体质谱和电感耦合等离子发射光谱仪测定了植物叶片和土壤中重金属含量。结果表明:核桃、梨、苹果、桃和枣叶片中重金属元素含量大小排序一致为 $Zn > Cu > Cr > Ni > Pb > As > Cd$, 且各树种中 Zn 和 Cu 含量较其余各元素含量明显偏高, 范围值分别为 $12.57 \sim 23.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $4.52 \sim 10.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 7 种经济林吸滞重金属元素的能力差异显著, 其中, 桃对 $Cr(5.94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ 、 $Ni(5.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ 吸滞能力较强, 梨吸滞 $Cu(10.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ 能力较强, 而樱桃和枣则吸滞 Zn 元素的能力较强, 分别为 23.80 、 $23.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 不同季节各树种叶片吸滞 Zn、Cu、Ni、Cr 季节变化趋势存在明显差异, 部分树种在冬季吸滞量最高, 部分树种则在夏季最高, 但各树种叶片 Ni 含量最小值均在秋季, 对 Pb、As 和 Cd 的吸滞量变化特征呈完全一致的变化规律, 均在冬季吸滞量较高; 林木叶片中重金属含量与土壤中重金属含量大部分相关性不显著 ($P > 0.05$)。

关键词:经济林; 重金属; 吸滞量; 树种

中图分类号:S 727.31 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2017)01-0075-08

随着工业化和城市化进程的不断加快, 在经济得到巨大发展的同时, 重金属污染问题成为困扰世

界城市环境与发展的严重环境污染问题之一。重金属污染对人体健康具有极大危害, 甚至可以致癌, 因此, 重金属污染的防治一直是国内外研究关注的热点问题。其防治方法除必须在控制污染源方面采取有效的人工治理措施外, 还需要充分发挥自然净化作用。植物叶片长期生存在有一定浓度污染的环境内, 会对此污染环境具有一定的抵抗能力, 从而可以有效富集大气污染物、重金属等, 是极好的空气净化器和过滤器。叶片滞留的颗粒物、重金属等污染物可以通过气孔进入叶片内部, 富集在植物体内。因此, 森林植被对重金属污染的防治具有积极的意义^[1-2]。ALFANI 等^[3]研究表明, 植物叶片对大气重金属具有一定吸滞能力; 黄会一等^[4]的研究发现木

第一作者简介:李少宁(1975-), 男, 河北滦县人, 博士, 副研究员, 研究方向为城市森林生态功能。E-mail:lishaoning@126.com.

责任作者:鲁绍伟(1969-), 男, 河北秦皇岛人, 博士, 研究员, 现主要从事水土保持与森林生态服务功能等研究工作。E-mail:hbbsw8@163.com.

基金项目:北京主要造林树种优良品种选育与部分经济林树种生态功能研究资助项目(KJCX20150205); 林木生态功能监测与资源评价创新团队资助项目(TWKST 201609); 科技创新服务能力建设-协同创新中心-林果业生态环境功能提升协同创新中心(2011 协同创新中心)(市级)资助项目(PXM2016_014207_000038)。

收稿日期:2016-09-27

domestication and breeding cold cultivation. The results showed that the biological zero of rock's peony was 6.277°C and effectived accumulated temperature from germination to anthesis was 286.8°C . While the tree peony of Zhongyuan Group was 5.417°C and 311.2°C . The results showed by correlation analysis. There was not notable level with tree peony's blooming and atmosphere accumulated from germination to anthesis, $R^2 = 0.015$. There was notable level with tree peony's blooming and effective accumulated temperature from germination to anthesis, $R^2 = 0.869$, while there was more notable level with tree peony's blooming and effective accumulated temperature from leaf stage-flowering to anthesis, $R^2 = 0.978$.

Keywords:tree peony; effective accumulated temperature; florescence; correlation; the key duration of development

本植物叶片能够有效吸收积累大气中 Pb、Cd;潘海燕等^[5]研究梧桐对重金属的吸收作用,结果表明落叶对重金属溶液的吸附效率高于 60%;薛皎亮等^[6]、陈学泽等^[7]和任乃林等^[8]的研究也均表明,不同植物对不同重金属污染物的富集能力存在差异。以上研究均为园林绿化树种及其它生物吸滞重金属的研究成果,而较少涉及经济林树种吸滞重金属。因此,该研究在北京地区选取了 7 种常见经济林树种对其叶片吸滞重金属功能开展了相关研究,挖掘探讨经济林深层次的生态功能价值,以期为进一步完善植物净化重金属污染及为今后的经济林合理建设提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

选取位于北京市西北五环内闵西桥附近的北京市农林科学院林业果树研究所(简称林果所)的种质资源圃为试验地。地理坐标北纬 39°59'35",东经 116°13'13",海拔 80 m 左右,为典型的暖温带半湿润大陆性季风气候,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,春、秋短促。林果所种质资源圃总面积约为 13 hm²,资源圃内果树种类繁多,主要分布有桃(*Prunus persica*)、杏(*Prunus armeniaca*)、李子(*Prunus salicina* Lindl.)、樱桃(*Prunus pseudocerasus*)、核桃(*Juglans regia*)、葡萄(*Vitis vinifera*)和板栗(*Castanea mollissima*)等。由于林果所临近北京西北五环的北辛庄路,且西面与西山森林公园毗邻,车流量较大,其大气污染程度主要受到交通状况、汽车尾气排放的影响。

1.2 试验材料

以北京常见栽培经济林树种调查为基础,依据北京地区主要栽植品种之一、面积大、群众认可等原则,在林果所种质资源圃内选取 7 种经济林树种,见表 1。

表 1 试验树种

Table 1	Experimental tree species	
树种	品种	拉丁学名
Species	Variety	Latin name
苹果	“红富士”	<i>Malus pumila</i> Mill.
梨	“黄金梨”	<i>Pyrus pyrifolia</i>
杏	“串枝红”	<i>Prunus armeniaca</i>
樱桃	“红灯”	<i>Prunus pseudocerasus</i>
核桃	“香薄壳”山核桃	<i>Juglans regia</i>
枣	“杂杂枣”	<i>Ziziphus jujuba</i> Mill.
桃	“晚蜜”	<i>Prunus persica</i> Linn.

1.3 试验方法

1.3.1 叶片采集

于 5、7、9、11 月分别代表春、夏、

秋、冬 4 个季节采集叶片。每个树种设置 3 次重复,采集时避免雨天前后 7 d,在树冠的东、南、西、北 4 个方向的上、中、下不同部位采集叶片 30~50 片,尽量采集成熟、完整且无病虫害的叶片(以避免其它因素对试验造成影响),封存与袋中带回实验室。

1.3.2 叶片处理 用去离子水冲洗后晾干,放于烘箱中,先 105 ℃杀青,后至于 75 ℃烘至恒重,粉碎,过筛后备用。

1.3.3 土壤样品采集 在选定的 3 株树的树冠东、西、南、北 4 个方位外缘垂直向内 50 cm 处分别用土钻采集 0~40 cm 层次的土壤,将土样混合均匀,弃去植物残体,风干,研磨,过筛后,将土样送实验室测定(将所金属元素全部列出)元素含量。由于土壤中的重金属含量动态变化较小,所以只在 9 月进行 1 次取样,与叶片样品同步分析其元素含量。

1.4 项目测定

采用微波消解仪进行微波消解,然后利用 ICP-MS 电感耦合等离子体质谱对植物叶片中的重金属含量进行测定,仪器型号为 Agilent 7700x;利用电感耦合等离子发射光谱仪(vanrian vista mpx)对土壤样品中的重金属含量进行测定^[9]。

1.5 数据分析

采用 Excel 软件对试验数据进行整理分析并制图,并运用 SPSS 软件对数据进行相关性检验。

2 结果与分析

2.1 同一树种吸滞重金属含量的对比分析

同种经济林叶片中各重金属元素含量对比分析如图 1 所示,整体来看,7 种经济林叶片中重金属元素含量最高的前 2 位基本上均为 Zn 和 Cu(樱桃除外),最小含量元素则为 Cd,其含量与前 2 位元素含量差距甚至达数百倍。其原因是这 2 种元素均为植物生理所必需的元素,是植物体内某些酶的组成成分,并且能够影响其光合作用。从树种中不同重金属元素含量角度来看,核桃、梨、苹果、桃、枣的叶片中各金属元素含量大小排序完全一致,其重金属含量分别介于(0.07±0.002)~(20.08±2.315)、(0.10±0.022)~(14.99±1.632)、(0.07±0.031)~(16.74±2.316)、(0.08±0.005)~(17.98±1.621)、(0.03±0.0006)~(23.90±3.266)mg·kg⁻¹范围内。其中,Zn 和 Cu 含量最高,Cr、Ni 和 Pb 含量居中,且相互间含量差距较小,而 As 和 Cd 含量则明显较低,均不足 Zn 和 Cu 含量的百分之一。杏与樱桃叶片金属

含量大小排序与其它树种不同,其排序分别为 Cu (8.66 ± 1.062) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ > Ni (5.16 ± 0.518) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ > Pb (3.60 ± 0.326) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ > Cr (3.24 ± 0.613) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ > As (0.32 ± 0.011) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ >

Cd (0.07 ± 0.011) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 Ni (4.94 ± 0.921) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ > Cu (4.52 ± 0.562) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ > Cr (3.57 ± 0.327) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ > Pb (2.54 ± 0.216) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ > As (0.35 ± 0.087) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

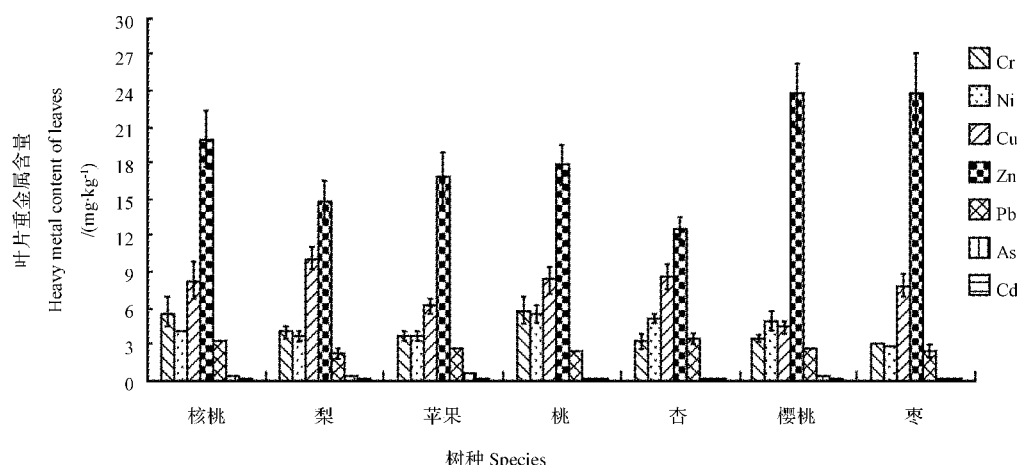


图1 同一树种中重金属元素含量

Fig. 1 Content of heavy metal elements in the same tree species

2.2 不同树种吸滞重金属能力的差异分析

由表2可知,7种元素在不同树种叶片中含量特征:1)Zn含量年均值大小排序为枣(23.90 ± 3.27) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ > 樱桃(23.80 ± 2.63) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ > 核桃(20.08 ± 2.32) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ > 桃(17.98 ± 1.62) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ > 苹果(16.74 ± 2.32) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ > 梨(14.99 ± 1.63) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ > 杏(12.57 ± 0.97) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;其中,枣和樱桃含量相近,均属于较高范围,吸滞能力是杏的1.91倍。2)Cu含量年均值大小排序与Zn不同,梨含量最高,为(10.25 ± 1.01) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,樱桃最低,与梨相差5.73 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;且各树种叶片Cu含量变化幅度较为平缓。3)Cr含量较高的树种为桃和核桃,吸附量分别为(5.94 ± 1.11)、(5.74 ± 1.23) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其次为梨(4.16 ± 0.53) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,最小含量为枣(2.97 ± 0.23) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而苹果、樱桃和杏三者含量极为接近,最大差值不超过0.5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。4)Ni与Cr含量最大的树种均为桃,最小的均为枣,其含量值相差近1倍,其余树种的含量值则均在3.60 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上。5)Pb元素在各经济林叶片中含量差异不明显,其中,杏和核桃含量略高,而其它树种叶片Pb含量值相差较小,说明各经济林树种对Pb的吸滞能力无显著差异。6)As在各树种叶片中含量相对前几个元素较低,其含量值均在1.00 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以

下;其中,苹果叶片中As的含量显著高于其余树种,其含量值高出最小值枣的3.44倍。7)Cd在各树种叶片中含量均为最低,含量值极小;供试树种中,除樱桃和枣叶片中Cd含量显著偏低外,其余树种叶片中Cd含量均在0.07 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,核桃、杏和苹果三者含量则完全一致,说明三者对Cd的吸滞能力基本一致。

综合上述分析可知,不同树种吸滞重金属的能力存在一定差异,其中,枣树总体对大部分重金属元素吸滞能力均较差;由经济林叶片中各元素含量可见,经济林树种对部分重金属污染元素具有较强的吸滞净化能力,因此,在进行园林绿化配置时,可以适当增加经济林树种。

2.3 不同季节叶片中重金属含量变化特征

图2为各经济林树种叶片吸滞7种重金属含量的季节变化,对同一树种吸滞不同重金属含量变化进行逐一分析如下。

由图2a可知,核桃叶片中7种元素含量的季节不同。其中,Cr、Ni、Cu和Zn含量季节变化趋势相同,均在春季含量最大,含量分别为10.22、7.10、11.00、22.71 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,在夏季含量下降,达到最低值,分别为3.71、1.92、6.25、17.10 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,之后秋、冬季节,其含量又逐渐增加;而Pb、Cd的含量变化随季节基本呈逐渐上升的趋势,即春季含量最低,分别为

表 2

不同树种叶片中重金属含量

树种	重金属 Heavy metal						
Species	Cr	Ni	Cu	Zn	Pb	As	Cd
核桃 <i>Juglans regia</i>	5.74±1.23	3.86±0.21	8.30±1.62	20.08±2.32	3.26±0.14	0.44±0.02	0.07±0.002
梨 <i>Pyrus pyrifolia</i>	4.16±0.53	3.68±0.41	10.25±1.01	14.99±1.63	2.24±0.36	0.43±0.05	0.10±0.020
苹果 <i>Malus pumila</i> Mill.	3.73±0.43	3.65±0.43	6.29±0.52	16.74±2.32	2.54±0.13	0.62±0.02	0.07±0.030
桃 <i>Amygdalus persica</i> Linn.	5.94±1.11	5.60±0.71	8.40±1.23	17.98±1.62	2.37±0.003	0.30±0.01	0.08±0.005
杏 <i>Prunus armeniaca</i>	3.24±0.61	5.16±0.52	8.66±1.06	12.57±0.97	3.60±0.33	0.32±0.01	0.07±0.010
樱桃 <i>Prunus pseudocerasus</i>	3.57±0.33	4.94±0.92	4.52±0.56	23.80±2.63	2.54±0.22	0.35±0.09	0.05±0.002
枣 <i>Ziziphus jujuba</i> Mill.	2.97±0.23	2.57±0.22	7.90±0.88	23.90±3.27	2.53±0.54	0.18±0.003	0.03±0.001

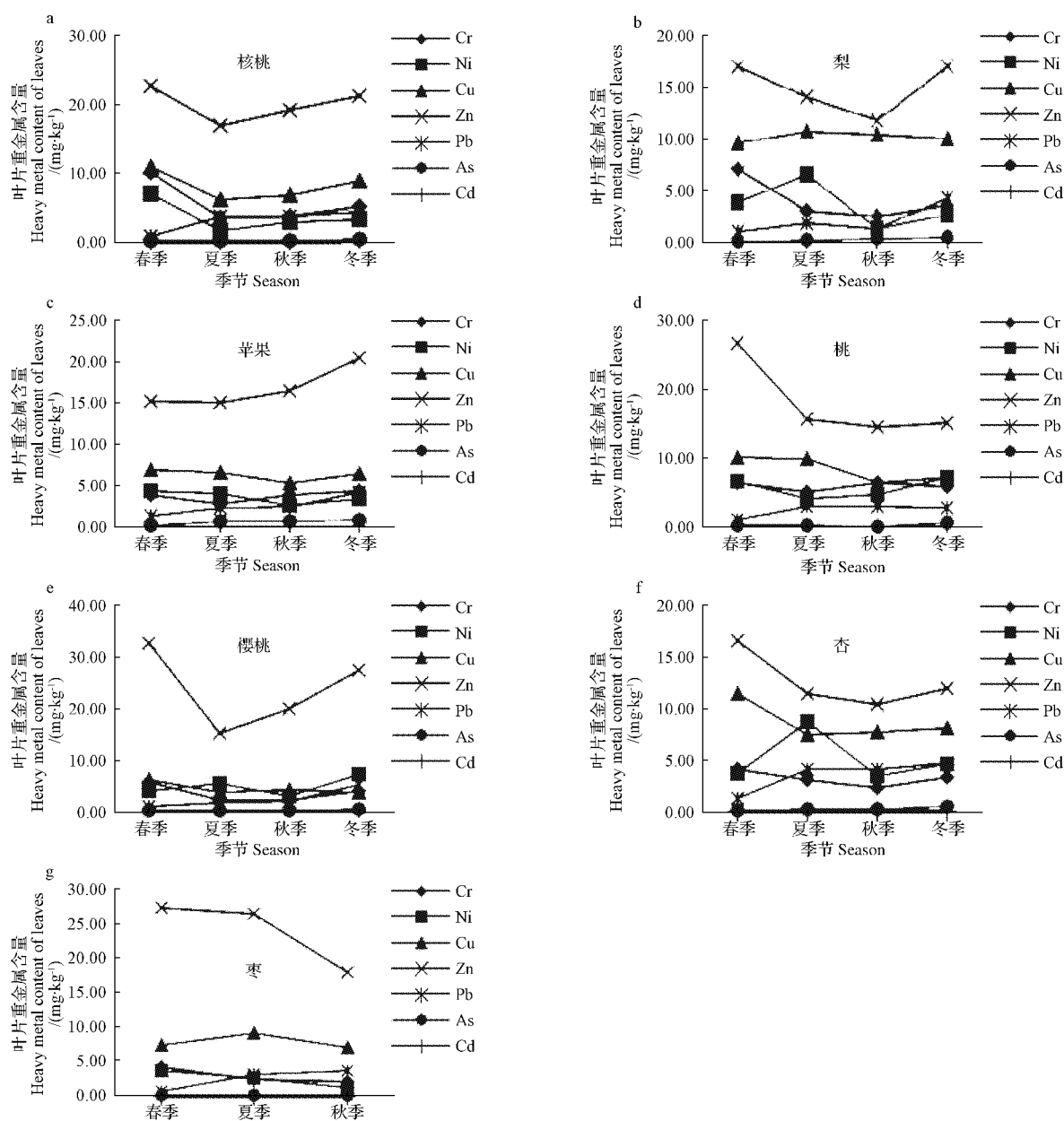
mg · kg⁻¹

图 2 不同季节树种叶片中重金属含量

Fig. 2 Contents of heavy metals in leaves of tree species in different seasons

0.97、0.05 mg·kg⁻¹, 冬季达到最大值, 分别为 4.41、0.12 mg·kg⁻¹, 且这 2 个元素含量变动幅度较为平缓; As 含量的季节变化则为先上升后下降再上升的趋势, 且含量变动差异不明显。

由图 2b 可知, 梨叶片中不同元素含量随季节变化存在明显差异。其中 Ni 和 Pb 的变化趋势相同, 均在夏季和秋季分别出现一个峰值和一个低谷值, 峰值和低谷值分别为 6.63、2.02 mg·kg⁻¹ 和 1.42、1.37 mg·kg⁻¹, 且 Ni 的峰值也是最大值; Zn 与 Cr 的含量季节变化相似, 均为先下降再上升的趋势, 在秋季降到最低值(11.88、2.63 mg·kg⁻¹)后, 冬季含量再次大幅度上升, 且 Zn 在冬季含量达到最大值(17.02 mg·kg⁻¹), 是最小值的 1.4 倍; Cu 和 Cd 季节含量差异均不显著, 最大差值分别为 1.19 mg·kg⁻¹ 和 0.04 mg·kg⁻¹, 但二者变化趋势却有差异, Cu 的变化基本呈单峰趋势, 最大值即为峰值(10.81 mg·kg⁻¹)出现在夏季, 而 Cd 则刚好与 Cu 相反, 在夏季出现低谷值, 也是最低值(0.08 mg·kg⁻¹); As 的变化呈逐渐上升趋势, 但含量差异较小, 最小值仅为最大值的 44%。

由图 2c 可知, 苹果叶片中各重金属元素含量变化不同。其中 Ni 和 Cu 的变化规律相同, 由春季到秋季逐渐下降到最低值(2.64、5.27 mg·kg⁻¹), 冬季含量再次回升, 春季最大值分别是秋季最小值的 1.67 倍和 1.30 倍; Zn 和 Cr 的变化规律相似, 均在夏季出现最低值(14.96、2.72 mg·kg⁻¹), 之后含量逐渐上升, 到冬季出现最大值(20.39、4.41 mg·kg⁻¹); Cd 和 Pb 均随季节呈逐渐上升的趋势, 冬季最大值是春季最小值的 2.75 倍和 3.32 倍; As 含量季节变化呈波浪式, 夏季和秋季分别为峰值和低谷值, 但夏季的峰值并非 As 含量的最大值, 其最大值出现在冬季, 含量为 0.84 mg·kg⁻¹。

由图 2d 可知, 桃的叶片中 7 种重金属含量随季节变化存在一定差异。其中, Cu、Zn 的季节变化规律相同, 均为由春季到秋季含量逐渐下降, 到秋季降到最低值后, 冬季含量再次回升, 且 2 个元素含量最大值分别是最小值的 1.58 倍和 1.84 倍; Ni 和 Cd 的变化规律相近, 均在冬季含量值最大, 分别为 7.11、0.12 mg·kg⁻¹, 夏季和秋季含量值相近, 变化趋于平缓; As 和 Cr 的变化规律刚好相反, 即 As 的峰值和低谷值与 Cr 的低谷值和峰值出现的季节相同, 分别为夏季和秋季, 且这 2 个元素的最大值分

别在冬季(0.62 mg·kg⁻¹)和秋季(6.47 mg·kg⁻¹); Pb 含量季节变化为先逐渐上升, 到秋季达最大值 2.91 mg·kg⁻¹, 之后进入冬季含量为 2.74 mg·kg⁻¹, 但仍高出春季最低值 1.83 mg·kg⁻¹。

由图 2e 可知, 樱桃叶片中重金属含量随季节变化存在显著不同。其中, Ni 的季节变化在夏季出现一个明显高峰值, 为 5.53 mg·kg⁻¹, 但非最大值(冬季值为 7.17 mg·kg⁻¹), 在秋季则为低谷值, 即最低值(2.93 mg·kg⁻¹), 其大小仅为最大值的 41%; Cd 整体变化趋势与 Ni 相近, 但 Cd 的含量值变化在夏季到冬季的变化浮动较小, 3 个季节含量最大差值不超过 0.01 mg·kg⁻¹; Cu 的变化趋势整体与 Ni 和 Cd 元素相反, 其高峰值与低谷值分别出现在秋季和夏季, 最低值在冬季, 含量仅 3.71 mg·kg⁻¹, 明显低于春季最大值(6.33 mg·kg⁻¹), 却与夏季含量相近; Zn 与 Cr 变化极其相似, 基本呈先下降再上升的趋势, 但 Zn 的最小值在夏季, 为 15.13 mg·kg⁻¹, 而 Cr 最小值在秋季, 为 2.28 mg·kg⁻¹; Pb 和 As 的变化完全相同, 均呈逐渐上升的变化规律, 冬季的最大值分别为春季最小值 4.5 倍和 1.9 倍。

由图 2f 可知, 杏叶片中重金属含量的季节变化显著。其中, Ni 与 Pb 变化趋势类似, 但 Pb 由夏季到冬季含量变动差值较小; Cu 和 Cd 变化规律相同, 在夏季出现最低值, 之后随季节变化含量逐渐增加, Cu 最大值在春季(11.38 mg·kg⁻¹), Cd 最大值在冬季(0.09 mg·kg⁻¹); Zn 与 Cr 含量均为由春季到秋季逐渐下降至最低值, 其含量分别为 10.38、2.32 mg·kg⁻¹, 仅为最大含量的 62.4% 和 56.3%, 而冬季含量值再次上升至最大值的 71.5% 和 82.3%; As 含量值随季节变化呈逐渐递增趋势, 最大值比最小值多 0.37 mg·kg⁻¹。

由图 2g 可知, 枣树叶片落叶较早, 因此未测得冬季叶片中各金属元素含量值。其叶片中 7 种重金属含量季节变化曲线不尽相同。其中, Ni、Zn 和 Cr 3 种元素均呈逐渐递减的趋势, 且 Ni、Zn 和 Cr 的最大值与最小值的差值分别为 2.39、9.27、2.13 mg·kg⁻¹; Cu 的变化曲线呈单峰趋势, 峰值即为最大值(9.14 mg·kg⁻¹), 出现在夏季, 秋季含量值最低, 但其值与春季含量值相近, 均在 7.00 mg·kg⁻¹ 左右; Pb、Cd 和 As 的变化曲线与 Ni、Zn 和 Cr 等三元素变化相反, 呈逐渐上升的趋势,

Pb、Cd 和 As 秋季最大值是春季最小值的近 4.7、5.0 倍和 2.5 倍。

由此可见,不同季节叶片吸滞不同重金属能力差异显著。7 种经济林叶片吸滞 Zn、Cu、Ni、Cr 季节变化趋势存在一定差异,部分树种在冬季吸滞量最高,而部分树种则在夏季最高,但各树种叶片 Ni 含量最小值均出现在秋季,这是由于进入秋季秋高气爽、晴朗多风,空气环境较为良好,导致空气重金属污染物浓度较低,从而致使各树种在秋季吸滞 Ni 元素含量均较低;各经济林树种叶片对 Pb、As 和 Cd 吸滞量的季节变化特征完全一致,均在冬季吸滞量较高,其中,Pb 最低含量均为春季,这主要是因为春季各树种处于生长期,生理功能还未完善,对于有极大危害的 Pb 元素吸滞能力较差,随着时间的推移,各树种的生长进入旺盛时期,生理功能逐渐成熟、完善,对 Pb 的危害能够产生一定的抗性,因此树种吸

滞 Pb 能力逐渐增强。此外,进入冬季汽车尾气排放的增加在无形之中增加了空气中 Pb 的含量,从而导致大气中污染源浓度增加,致使植物体内 Pb 含量急剧增加。

2.4 土壤中重金属与叶片重金属相关性

利用 SPSS 分析所测叶片中重金属含量与土壤重金属含量的相关性,如表 3 所示,土壤中部分元素间存在一定相关性,如 Cd 与 Ni、As 均具有显著相关性($P < 0.05$);Cr 与 Pb 呈显著负相关;Ni 与 As 则具极显著正相关性($P < 0.01$)。而土壤中各元素含量与叶片中各元素含量,林木 Cr 与土壤 Ni、As 和 Cd 以及林木 Zn 与土壤 Pb、Cu 呈显著或极显著正相关,林木 Cd 与土壤 Zn 呈显著负相关。由此推测,测试的 7 种经济林叶片中重金属元素来自土壤的可能性较小,其来源主要来自大气污染的概率相对较大。

表 3 叶片与土壤中重金属含量相关分析

Table 3 Correlation analysis of heavy metal content in leaves and soil

	林木 Cr	土壤 Cr	林木 Zn	土壤 Zn	林木 Pb	土壤 Pb	林木 Ni	土壤 Ni	林木 Cu	土壤 Cu	林木 As	土壤 As	林木 Cd	土壤 Cd
林木 Cr	1	-0.255	0.524	-0.501	-0.344	0.191	0.273	0.838 *	-0.081	0.594	0.530	0.807 *	0.563	0.883 * *
土壤 Cr		1	-0.719	-0.058	-0.048	-0.809 *	0.374	-0.230	0.270	-0.375	0.173	-0.399	0.494	-0.447
林木 Zn			1	-0.383	-0.240	0.846 *	-0.109	0.446	0.134	0.770 *	-0.120	0.642	0.001	0.659
土壤 Zn				1	-0.321	0.155	-0.331	-0.245	-0.577	-0.299	-0.386	-0.244	-0.755 *	-0.609
林木 Pb					1	-0.385	0.215	-0.303	0.087	-0.508	-0.033	-0.346	-0.098	-0.074
土壤 Pb						1	-0.370	0.241	-0.143	0.640	-0.368	0.470	-0.469	0.315
林木 Ni							1	0.583	-0.129	-0.084	-0.030	0.434	0.349	0.189
土壤 Ni								1	-0.439	0.554	0.280	0.962 * *	0.251	0.757 *
林木 Cu									1	-0.108	-0.150	-0.418	0.573	-0.145
土壤 Cu										1	0.318	0.728	0.123	0.729
林木 As											1	0.216	0.515	0.580
土壤 As												1	0.130	0.808 *
林木 Cd													1	0.377
土壤 Cd														1

注: * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关; * * 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

Note: * significant correlation at 0.05 level (bilateral); * * significant correlation at 0.01 level (bilateral).

3 讨论

3.1 树种吸滞重金属元素差异

环境重金属污染危害性大,不仅破坏生态平衡,还对人类生存健康产生极大威胁,且关于大气重金属污染的治理难度较大、成本较高,而林木由于其对大气重金属污染物具有一定的吸收积累作用成为国内外学者争相研究的热点。林治庆等^[10]在 1989 年木本植物对汞耐性的研究中发现,加拿大杨等木本植物对土壤中的 Hg 具有较强的吸收累积作用和较高的耐性。陈荣华等^[11]的研究显示,热带、亚热带海

岸木本植物红树林对重金属有一定的净化作用。以上研究结果充分说明林木对重金属污染具有一定的吸收能力,这与该研究中得到经济林树种能够吸收积累一定量重金属元素的结果一致。且研究发现不同经济林树种对重金属的吸收积累量存在显著差异。鲁敏等^[12]在绿化树种对大气重金属污染物吸收净化能力的研究中表明,不同绿化树种对大气污染物铅、镉具有一定的吸收能力,且因树种不同而具有明显的差异,这与该试验结果一致。这充分说明树木对重金属的吸收受自身形态结构、树种特性、生长

季节、树龄等多方面因素影响,且植物叶表面结构、粗糙度和分泌物影响重金属颗粒物的附着吸收^[13-15]。该研究还发现不同季节经济林树种叶片吸滞不同重金属能力差异显著。供试的经济林叶片吸滞 Zn、Cu、Ni、Cr 季节变化趋势存在明显差异,部分树种在冬季吸滞能力较高,部分树种则在夏季最高;对 Pb、As 和 Cd 的吸滞能力均在冬季较强,吸滞量范围分别在 2.74~5.32、0.54~0.84 mg·kg⁻¹ 和 0.07~0.12 mg·kg⁻¹。这一结果与魏丽婧^[16]提到的植物在春季和秋季吸收污染的能力较强的说法有所出入,这可能是由于不同地域在相同季节时段的光照等其它气候条件不同,导致植物吸收重金属的季节特征具有差异性,造成该研究的结果与前人研究结果存在差异。因此,在不同地域结合树种的季节净化重金属能力特征来选取合适树种有利于提高树种吸滞重金属能力,也是取得重金属污染防治的关键环节。

3.2 叶片重金属含量与土壤中重金属含量关系

林木叶片具有吸收累积大气环境中的重金属的能力,可被用作重金属污染监测^[17-19]。目前,国内外许多专家均验证应用绿化树种可对大气重金属污染进行监测和评价,尽管其对环境污染的监测敏感度低于地衣和苔藓,但仍为一种经济且环保的监测手段,受到人们的高度关注^[20]。如 TOMAŠEVIĆ 等^[21]发现七叶树(*Aesculus chinensis* Bunge)和椴树(*Tilia tuan*)叶片可以较好的指示贝尔格莱德城市大气重金属污染状况。林木叶片中的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^[22]。王焕校^[23]的研究显示叶片对重金属的迁移吸收能力较弱,植物通过根系吸收的土壤重金属主要滞留在根部;王爱霞等^[24]则发现树叶中重金属浓度与大气中相应元素浓度有很强的相关性。这些结果均与该研究中得到的叶片中重金属含量来自土壤的概率较小($P<0.05$),其来源主要为大气污染浓度的概率相对较大的结论极为接近。这充分说明叶片中重金属含量主要来源极有可能是大气污染(如颗粒物浓度等)。此外,前人多是对绿化树种叶片吸滞重金属的研究,而该研究针对经济林树种定量分析了经济林的净化重金属污染的能力,展现出经济林树种潜藏的巨大生态价值,明确经济林在维持和促进社会经济可持续发展以及其在环境保护中不可忽视的巨大作用,更为今后经济林

生态价值的评估提供了科学合理的理论依据。

4 结论

研究选取北京市 7 种常见经济林树种,在生长季内对其进行吸滞重金属功能的研究,得到不同经济林树种吸滞不同重金属元素的能力差异显著。从不同元素来看,核桃、梨、苹果、桃和枣的叶片中各金属元素含量大小排序完全一致,均表现为 Zn>Cu>Cr>Ni>Pb>As>Cd,且各树种叶片中 Zn 与 Cu 的含量远大于其它元素;从树种的吸滞能力来看,枣对大部分重金属元素吸滞能力均较差,桃吸滞 Cr、Ni 能力较强,梨和樱桃分别吸滞 Cu 和 Zn 的能力最强;从季节变化来看,各树种叶片吸滞 Pb、As 和 Cd 的规律完全一致,均在冬季吸滞量较高,吸滞 Zn、Cu、Ni、Cr 季节变化趋势各不相同,部分树种在冬季吸滞量最高,而部分树种则在夏季最高。这些结果表明经济林树种与绿化树种一样,可以对净化环境重金属污染起到一定作用,在进行园林绿化配置时,可以适当增加经济林树种。

(致谢:感谢北京市农林科学院林业果树研究所各经济林研究课题组对该研究中树种品种选择提供的帮助!)

参考文献

- [1] 王成,鄧光发,杨颖,等. 高速路林带对车辆尾气重金属污染的屏障作用[J]. 林业科学,2007,43(3):1-7.
- [2] 曹秀春,孟庆繁. 城市绿化带对大气污染的防护效能[J]. 东北林业大学学报,2007,35(10):20-21.
- [3] ALFANI A, MAISTO G, IOVIENO P, et al. Leaf contamination by atmospheric pollutants as assessed by elemental analysis of leaf tissue, leaf surface deposit and soil[J]. Journal of Plant Physiology, 1996, 148(s1-2):243-248.
- [4] 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[J]. 林业科学,1982,18(1):93-97.
- [5] 潘海燕,冀兰涛,丁清波. 梧桐落叶对重金属吸附的初步研究[J]. 黑龙江环境通报,2002,26(1):91-92.
- [6] 薛皎亮,刘红霞,谢映平. 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.
- [7] 陈学泽,谢耀坚,彭重华. 城市植物叶片金属元素含量与大气污染关系[J]. 城市环境与城市生态,1997,10(1):45-47.
- [8] 任乃林,陈伟彬,黄俊生,等. 用植物叶片中重金属元素含量指示大气污染的研究[J]. 广东微量元素科学,2004,11(10):41-45.
- [9] 董鸣. 中国生态系统研究网络观测与分析标准方法:陆地生物群落调查观测与分析[M]. 北京:中国标准出版社,1996.
- [10] 林治庆,黄会一. 木本植物对汞耐性的研究[J]. 生态学报,1989(4):315-319.
- [11] 陈荣华,林鹏. 红树幼苗对汞的吸收和净化[J]. 环境科学学报,1989(2):218-224.

- [12] 鲁敏,李成.绿化树种对大气重金属污染物吸收净化能力的研究[J].山东林业科技,2006(3):31-32.
- [13] 张翠萍,温琰茂.大气污染植物修复的机理和影响因素研究[J].云南地理环境研究,2005,17(6):82-86.
- [14] 方颖,张金池,王玉华.南京市主要绿化树种对大气固体悬浮物净化能力及规律研究[J].生态与农村环境学报,2007,23(2):36-40.
- [15] 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集[J].烟台大学学报(自然科学与工程版),2000,13(1):31-37.
- [16] 魏丽婧.延安城市绿化树种对大气重金属污染物吸收能力研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [17] UZU G,SOBANSKA S,SARRET G,et al. Foliar lead uptake by lettuce exposed to atmospheric fallouts[J]. Environmental Science and Technology,2010,44:1036-1042.
- [18] GONZÁLEZ-MIQUEO L,ELUSTONDO D,LASHERAS E,et al. Use of native mosses as biomonitors of heavy metals and nitrogen deposition in the surroundings of two steel works[J]. Chemosphere,2010,78:965-971.
- [19] BERMUDEZ G M A,RODRIGUEZ J H,PIGNATA M L. Comparison of the air pollution biomonitoring ability of three *Tillandsia* species and the lichen *Ramalina celastri* in Argentina[J]. Environmental Research,2009,109:6-14.
- [20] EL-HASANA T,AL-OMARIA H,JIRIES A,et al. Cypress tree(*Cupressus semervirens* L.) bark as an indicator for heavy metal pollution in the atmosphere of Amman city,Jordan[J]. Environment International,2002,28:513-519.
- [21] TOMAŠEVIĆ M,RAJŠIĆ S,DORĐEVIĆ D,et al. Heavy metals accumulation in tree leaves from urban areas[J]. Environmental Chemistry Letters,2004,2(3):151-154.
- [22] 刘维涛,张银龙,陈喆敏,等.矿区绿化树木对镉和锌的吸收与分布[J].应用生态学报,2008,19(4):752-756.
- [23] 王焕校.污染生态学[M].北京:高等教育出版社,2002:7-15.
- [24] 王爱霞,张敏,方炎明,等.行道树对重金属污染的响应及其功能型分组[J].北京林业大学学报,2010,32(2):177-183.

Characteristics of Heavy Metals in Seven Common Economic Forest of Beijing

LI Shaoning^{1,2}, TIAN Shaoqiang³, ZHAO Yunge⁴, LIU Bin⁴, CHEN Bo¹, LU Shaowei^{1,2}

(1. Forestry and Pomology Institute, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Beijing 100093; 2. Beijing Collaborative Innovation Center for Eco-environmental Improvement with Forestry and Fruit Trees, Beijing 100093; 3. Luanxian Forestry Bureau of Hebei, Tangshan, Hebei 063700; 4. College of Forestry, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071000)

Abstract: Seven kinds of common economic forest tree of Beijing were used as research object, through microwave digestion method, the heavy metal content in plant leaves and soil were measured by using ICP-MS inductively coupled plasma mass spectrometry and inductively coupled plasma emission spectrometry. The results showed that the contents of metal elements in the leaves of *Juglans regia*, *Pyrus pyrifolia*, *Malus pumila* Mill., *Prunus persica* and *Ziziphus jujuba* Mill. were in the same order as $Zn > Cu > Cr > Ni > Pb > As > Cd$, and the contents of Zn and Cu were obviously higher than those of other elements, and the range was between $12.57 - 23.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $4.52 - 10.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; seven kinds of economic forest absorption of heavy metal elements of the ability difference was remarkable, among them, *Prunus persica* to Cr ($5.94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), Ni ($5.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) absorption capacity was stronger, *Pyrus pyrifolia* to Cu ($10.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) ability was stronger, *Prunus pseudocerasus* and *Ziziphus jujuba* Mill. to Zn absorption ability were stronger, respectively $23.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $23.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; characteristics of heavy metal content in leaves in different seasons, leaf absorption of Zn, Cu, Ni, Cr seasonal trend of different tree species were significant difference. Some of the species in the winter absorption or in summer was the highest, but the tree leaves of Ni content minimum values were in the autumn, the variation characteristics of Pb, As and Cd were completely consistent with the variation of the absorption, both of which were higher in the winter; most of correlation between heavy metal content of leaves and heavy metal content in the soil were not significant difference ($P > 0.05$).

Keywords: economic forest; heavy metal; absorption; tress species