

哈尔滨市常见绿化树种对土壤重金属污染的修复效应

王春光, 张思冲, 任伟, 崔可瑜, 张丽会

(哈尔滨师范大学 地理科学学院, 黑龙江省高校地理资源与环境遥感重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:以哈尔滨市常见的 19 种绿化植被为主要研究对象, 经过野外调查和室内分析对 19 种植物的根、枝、叶内重金属元素(Cu、Zn、Pb、Cd)总量进行分析测定。结果表明:植被对重金属的富集和转运因植物种类、部位及重金属种类而不同。依据植被对重金属的富集和转移能力不同, 进行聚类分析得出, 榆叶梅和蒙古栎对土壤中重金属元素 Zn、Cd 的富集和转移能力都很强; 垂柳、旱柳、银中杨、梨树、山荆子、山槐对土壤中重金属元素 Cu、Pb 的富集和转移能力都较强; 榆树、紫丁香、黄菠萝对土壤中重金属元素 Cu 的富集和转移能力较强; 云杉、山杨、红松、色木槭、暴马丁香、白桦、大果榆、山里红对土壤中重金属元素 Cu、Zn、Cd 的富集和转移能力较强, 对土壤中重金属元素的 Pb 富集能力也比较强, 但转移能力弱。

关键词:重金属; 植被修复; 富集; 转移

中图分类号: TU 985.12⁺7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0009(2011)11-0153-04

城市土壤是城市绿色植物生长的介质和养分的供应者, 是城市污染物的汇和源, 它关系到城市生态环境质量和人类健康^[1-2]。随着工业发展和城市化推进, 城市污染加重, 污染物种类增多。其中, 城市土壤污染, 尤其是重金属污染, 已成为影响全球城市居民健康的重大生态问题之一, 污染土壤的修复正逐渐成为保障城市生态安全的重要措施之一。自从美国科学家 Channy^[3]提出利用超富集植物清除重金属污染以来, 重金属污染土壤的植物修复研究已成为环境科学的热点和前沿领域^[4-5]。植物修复技术又称绿色修复, 是指利用植物提取、吸收、分解、转化或固定土壤、沉积物、污泥或地表、地下水中有毒有害污染物技术的总称^[6]。植物修复技术优势是费用低廉、不破坏场地结构、不造成地下水二次污染、能起到美化环境的作用, 易于为社会所接受。因此, 采集了哈尔滨市常见的 19 种绿化植被, 进行测定以便筛选出对重金属富集和转移能力强的植被, 为修复城市土壤重金属污染提供一定的数据和基础材料。

1 材料与方法

1.1 样品的采集与制备

于 2009 年 5 月采集植物样品及根部的土壤。采样点分别布置在哈尔滨市北郊的团结镇白菜村、哈尔滨师范大学南校区、哈尔滨松北利民开发区正阳河酱油厂附近。试验共采集植物样品 19 种, 其中乔木 13 种, 含 11 种落叶乔木和 2 种常绿乔木; 灌木 6 种。植物样品先用自来水冲洗, 去除表面污垢, 再用蒸馏水、去离子水冲洗 3 遍, 分根、枝、叶三部分, 先在 105℃ 下杀青 30 min, 然后在 60℃ 下烘干至恒重, 将烘干的样品用磨碎机磨碎, 过 0.25 mm(60 目)尼龙网筛, 用于重金属元素分析。

1.2 数据分析

植被对重金属的修复能力, 主要通过富集系数和转移系数 2 项指标来进行评价。富集系数也称吸收系数^[7], 是指植物中某元素含量与土壤中该元素含量之比, 富集系数表征土壤-植物体系中元素迁移的难易程度, 是反映植物将重金属吸收转移到体内能力大小的评价指标。富集系数越高, 表明植物对重金属富集质量分数越大。转移系数是指地上部元素的含量与地下部同种元素含量的比值^[8], 用来评价植物将重金属从地下向地上运输和富集的能力。转移系数越大, 则重金属从根系向地上部器官转运的能力越强。

植物地上部重金属含量($M_{\text{地上部}}$)计算公式为: $M_{\text{地上部}}$ = 地上部各部分重金含量之和/地上部重量。因此, 其转移系数(TF)和富集系数(EC)的计算公式分别如下^[9]: $TF = M_{\text{地上部}} / M_{\text{根}}$; $EC = M_{\text{地上部}} / M_{\text{土壤}}$ 。

第一作者简介:王春光(1984-), 女, 吉林四平人, 在读硕士, 现主要从事生态环境研究工作。E-mail: wang chunguang22@163.com。

责任作者:张思冲(1962-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 教授, 现主要从事生态环境研究工作。E-mail: zsc1108@yahoo.com.cn。

基金项目:哈尔滨市科技局科技创新人才专项资金资助项目(2008RFXXS011); 黑龙江省科技厅科技攻关计划资助项目(GC07C212); 哈尔滨师范大学科技发展预研资助项目(08xky06)。

收稿日期:2011-03-28

2 结果与分析

2.1 样地土壤的重金属含量

由表1可知,样地土壤重金属Cu的含量为16.773~34.902 mg/kg, Zn为31.897~99.842 mg/kg, Pb为15.983~38.369 mg/kg, Cd为0.099~0.181 mg/kg;4种元素的均值分别为25.975、58.877、28.046、0.143 mg/kg。

4种元素的标准差Cd最小,说明这种元素分布比较均匀。而其它3种元素标准差都比较大,尤其是Zn标准差为20.884,说明该种元素分布极不均匀。4种元素的变异系数都比较大,说明可能受到人为的干扰。

表1 土壤重金属含量的统计特征值

元素	范围值 /mg·kg ⁻¹	均值 /mg·kg ⁻¹	标准差	变异系数
Cu 铜	16.773~34.902	25.975	4.961	0.191
Zn 锌	31.897~99.842	58.877	20.884	0.354
Pb 铅	15.983~38.369	28.046	7.013	0.251
Cd 镉	0.099~0.181	0.143	0.031	0.216

2.2 植被体内重金属含量的分析

由表2可看出,各树种对重金属元素的吸收量及同一树种不同部位都表现出明显差异,具体表现在以下几个方面。

2.2.1 不同树种对同一重金属元素的吸收差异显著

对于重金属Cu,吸收量大的植物有黄菠萝和垂柳,吸收量最少的为白桦和蒙古栎;对于重金属Zn,吸收量大的植物有旱柳、山里红、红松,吸收量最少的植物为暴马丁香;对于重金属Pb,吸收量大的植物为旱柳和银中杨,吸收量少的植物为黄菠萝和紫丁香;对于重金属Cd,吸收量多的植物为红松和山槐,吸收量少的为榆树。

2.2.2 同一树种不同器官内同一重金属元素的含量差异显著 对重金属元素的综合富集吸收能力基本上表现为:根>叶>枝。如大果榆根内Cu含量为18.964 mg/kg,而其枝内含量为7 mg/kg,叶内含量为9.969 mg/kg;山杨根内Zn含量为69.944 mg/kg,而其枝内含量为39.904 mg/kg,叶内含量为48 mg/kg。

2.2.3 同一树种各器官对不同重金属元素的富集能力差异显著 旱柳根内Zn含量为89.96 mg/kg,而根内的Cd仅为0.023 mg/kg;银中杨的枝内Pb含量为37.878 mg/kg,而其枝内Cu为8.982 mg/kg;大果榆叶内Zn含量为72.856 mg/kg,而其叶内Pb含量为19.944 mg/kg。

2.3 植被体内重金属含量与土壤中重金属含量的相关性分析

由表3可知,植被体内重金属含量与重金属总量之间的相关性如下,植被体内Cu与土壤中的Cu存在显著正相关关系,相关系数为0.518;植被体内Zn与土壤中的Zn和Pb均存在显著正相关关系,相关系数分别为0.469和0.641;植被体内Pb与土壤中的4种元素均不存在任何关系;植物体内Cd与土壤中的Zn和Cd分别

表2 19种植物体内重金属元素的含量及分布 mg/kg

种类	部位	Cu 铜	Zn 锌	Pb 铅	Cd 镉
云杉 <i>Picea asperata</i> Mast.	根	18.947	55.844	19.944	0.030
	枝	16.953	57.838	15.955	0.026
	叶	20.975	29.964	5.993	0.018
山杨 <i>Populus davidiana</i> Dode.	根	20.983	69.944	23.981	0.036
	枝	10.974	39.904	9.976	0.028
榆树 <i>Ulmus pumila</i> L.	叶	23.228	48.000	8.000	0.019
	根	10.974	51.875	9.976	0.020
	枝	12.963	21.938	1.994	0.019
垂柳 <i>Salix babylonica</i> Linn.	叶	14.357	30.231	5.634	0.014
	根	21.000	58.000	21.612	0.037
紫丁香 <i>Syringa oblata</i>	枝	18.985	43.965	13.988	0.022
	叶	22.342	53.895	19.952	0.018
黄菠萝 <i>Phellodendron amurense</i> Rupr.	根	12.169	45.944	3.452	0.029
	枝	8.996	25.989	1.224	0.019
旱柳 <i>Salix matsudana</i> Koidz.	叶	13.652	31.993	2.053	0.039
	根	21.724	59.972	3.665	0.039
银中杨 <i>Salix alba</i> var. <i>Tristis</i>	枝	15.000	50.000	1.321	0.040
	叶	26.918	45.963	2.763	0.026
梨树 <i>Pyrus sorotina</i>	根	10.996	89.964	29.988	0.023
	枝	9.000	78.000	38.000	0.018
山荆子 <i>Malus baccata</i> Linn.	叶	14.976	61.933	41.933	0.017
	根	15.000	58.000	36.000	0.025
色木槭 <i>Acer mono</i> Maxim.	枝	8.982	31.932	37.878	0.019
	叶	16.993	39.986	25.906	0.012
山槐 <i>Albizia kalkora</i> Roxb.	根	16.985	63.949	17.986	0.055
	枝	19.989	25.989	10.999	0.047
蒙古栎 <i>Quercus mongolica</i> Fisch.	叶	22.934	41.9166	13.992	0.051
	根	18.985	41.966	29.976	0.070
白桦 <i>Betula platyphylla</i> Suk.	枝	14.994	27.988	5.998	0.063
	叶	8.986	25.958	25.958	0.034
榆叶梅 <i>Amygdalus triloba</i> Lindl.	根	19.000	29.765	21.000	0.051
	枝	14.958	25.927	5.994	0.047
红松 <i>Pinus koraiensis</i> Siebold.	叶	10.982	45.927	10.997	0.039
	根	10.978	35.928	25.948	0.079
大果榆 <i>Ulmus macrocarpa</i> Hance.	枝	12.984	25.957	15.981	0.069
	叶	16.973	31.997	20.256	0.056
山里红 <i>Crataegus pinnatifida</i> Bge.	根	18.992	17.993	5.997	0.056
	枝	16.946	11.962	1.222	0.068
暴马丁香 <i>Syringa amurensis</i>	叶	14.952	33.891	7.974	0.039
	根	12.959	23.923	10.993	0.058
黄菠萝 <i>Phellodendron amurense</i>	枝	4.982	33.878	9.964	0.059
	叶	7.988	53.870	3.990	0.047
白桦 <i>Betula platyphylla</i> Suk.	根	8.971	67.783	17.942	0.059
	枝	4.986	39.888	10.994	0.058
榆叶梅 <i>Amygdalus triloba</i> Lindl.	叶	14.963	65.895	15.974	0.049
	根	16.972	37.849	7.9685	0.059
红松 <i>Pinus koraiensis</i> Siebold.	枝	22.917	67.756	5.978	0.062
	叶	18.955	55.866	3.9903	0.048
大果榆 <i>Ulmus macrocarpa</i> Hance.	根	14.971	69.860	27.944	0.071
	枝	6.977	59.809	23.923	0.066
山里红 <i>Crataegus pinnatifida</i> Bge.	叶	22.927	79.745	17.943	0.058
	根	18.964	55.799	25.938	0.069
暴马丁香 <i>Syringa amurensis</i>	枝	7.000	59.856	22.000	0.068
	叶	10.969	72.856	19.944	0.043
黄菠萝 <i>Phellodendron amurense</i>	根	16.982	81.771	21.939	0.072
	枝	6.981	79.776	15.955	0.069
白桦 <i>Betula platyphylla</i> Suk.	叶	20.924	61.827	17.949	0.046

存在显著负相关关系和极显著负相关关系,相关系数分别为-0.509和-0.871。说明,随着土壤中重金属元素浓度的增加,植被对土壤中重金属元素的吸收,可能受到促进作用,也可能受到抑制。

表 3 植被体内重金属含量与土壤中重金属总量之间的相关性

植物中的元素	土壤中的元素			
	Cu 铜	Zn 锌	Pb 铅	Cd 镉
Cu 铜	0.518*	-0.003	-0.137	-0.021
Zn 锌	0.219	0.469*	0.641*	0.046
Pb 铅	-0.049	0.257	-0.002	0.328
Cd 镉	0.252	-0.509*	0.225	-0.871**

注：* 为 0.05 水平上的显著相关；** 为 0.01 水平上的极显著相关。

2.4 植被修复重金属能力的聚类分析

由表 4 可知,不同植被对土壤中重金属元素的富集和转移能力均存在一定程度的差异。

为了综合全面地评价不同种类的绿化植物耐重金属污染的能力,依据富集能力和转移能力 2 项指标对植被进行了聚类分析,将哈尔滨市 19 种常见的绿化植被分为 4 类。根据图 1 的聚类结果,将 19 种植物分为 4 类,I 类为 16 号榆叶梅和 14 号蒙古栎;II 类为 4 号垂柳、7 号早柳、8 号银中杨、9 号梨树、10 号山荆子、12 号山槐;

表 4 植被对重金属的富集系数和转移系数

种类	铜 Cu		锌 Zn		铅 Pb		镉 Cd	
	富集系数 EC	转移系数 TF	富集系数 EC	转移系数 TF	富集系数 EC	转移系数 TF	富集系数 EC	转移系数 TF
云杉 <i>Picea asperata</i> Mast.	0.614	1.002	1.297	0.787	0.394	0.551	0.076	0.741
山杨 <i>Populus davidiana</i> Dode.	0.634	0.815	1.000	0.628	0.251	0.375	0.073	0.652
榆树 <i>Ulmus pumila</i> L.	0.724	1.245	0.336	0.503	0.16	0.382	0.036	0.824
垂柳 <i>Salix babylonica</i> Linn.	0.769	0.982	0.572	0.842	0.853	0.784	0.064	0.540
紫丁香 <i>Syringa oblata</i>	0.651	0.930	0.399	0.630	0.062	0.474	0.143	0.998
黄菠萝 <i>Phellodendron amurense</i> Rupr	0.602	0.967	0.561	0.802	0.057	0.558	0.147	0.860
早柳 <i>Salix matsudana</i> Koidz.	0.715	1.090	0.701	0.777	1.335	1.332	0.040	0.773
银中杨 <i>Salix alba</i> var <i>Tristis</i> .	0.521	0.864	0.440	0.619	1.231	0.884	0.042	0.645
梨树 <i>Pyrus sorotina</i>	0.862	1.263	0.741	0.531	0.783	0.694	0.247	0.894
山荆子 <i>Malus baccata</i> Linn.	0.421	0.631	0.848	0.643	0.897	0.533	0.209	0.699
色木槭 <i>Acer mono</i> Maxim.	0.567	0.681	1.062	1.204	0.388	0.404	0.182	0.844
山槐 <i>Albizia kalkora</i> Roxb.	0.714	1.366	0.727	0.807	0.698	0.699	0.349	0.796
暴马丁香 <i>Syringa amurensis</i>	0.644	0.837	0.676	1.271	0.194	0.765	0.269	0.967
蒙古栎 <i>Quercus mongolica</i> Fisch.	0.240	0.501	1.045	1.834	0.218	0.635	0.293	0.924
白桦 <i>Betula platyphylla</i> Suk.	0.532	1.113	1.000	0.781	0.398	0.752	0.278	0.900
榆叶梅 <i>Amygdalus triloba</i> Lindl.	0.614	1.235	1.188	1.635	0.138	0.626	0.288	0.926
红松 <i>Pinus koraiensis</i> Siebold.	0.538	0.998	1.046	0.998	0.544	0.748	0.377	0.872
大果榆 <i>Ulmus macrocarpa</i> Hance	0.283	0.474	1.213	1.189	0.583	0.808	0.194	0.804
山里红 <i>Crataegus pinnatifida</i> Bge.	0.439	0.822	0.995	0.866	0.467	0.773	0.327	0.798

2.5 植物贮存重金属的影响因素

有些植物在重金属污染的土壤环境中的仍能正常生长,表明在长期进化过程中植物对重金属产生了抗性。例如,云杉、山杨、红松、色木槭等对土壤中重金属元素 Zn、Cd 的富集能力较强,表现出很强的耐土壤重金属污染的能力,而梨树、山荆子、山槐等对金属元素 Zn、Cd 的富集能力不太强。说明在污染的环境下植物对重金属污染的耐受策略是不同的,云杉、山杨、红松、色木槭等选择将重金属元素吸收到体内,而梨树、山荆子、山槐等不吸收或吸收后通过其它方式排除体外。

植物对重金属的吸收能力大小与植物根系有着一定的相关性。植物根系具有特殊和选择性吸收的能力,同时通过整个植株能够转移、累积和贮藏所吸收的物质。在重金属等环境胁迫下,植物根系分泌的有机酸显著增加。如在铅胁迫下,早柳、银中杨富集 Pb 的能力很强,它们通过分泌有机酸,以缓解铅的毒害。在营养胁迫条件下植物根系分泌的有机酸具有活化土壤微量元

Ⅲ类为 3 号榆树、5 号紫丁香、6 号黄菠萝;Ⅳ类为 1 号云杉、2 号山杨、17 号红松、11 号色木槭、13 号暴马丁香、15 号白桦、18 号大果榆、19 号山里红。

I 类植被为榆叶梅和蒙古栎,它们对土壤中重金属元素 Zn、Cd 的富集和转移能力都很强,对土壤中重金属元素 Pb 的富集能力强,榆叶梅对土壤中重金属元素 Cu 的富集和转移能力都很强。II 类植被包括垂柳、早柳、银中杨、梨树、山荆子、山槐,它们对土壤中重金属元素 Cu、Pb 的富集和转移能力都较强;对土壤中重金属元素 Zn、Cd 的富集能力和转移能力均不太强。III 类植被为榆树、紫丁香、黄菠萝,它们对土壤中重金属元素 Cu 的富集和转移能力较强;对土壤中其它重金属元的富集和转移能力均不太强。IV 类植物有云杉、山杨、红松、色木槭、暴马丁香、白桦、大果榆、山里红,它们对土壤中重金属元素 Cu、Zn、Cd 的富集和转移能力较强,对土壤中重金属元素的 Pb 富集能力也比较强,但转移能力弱。

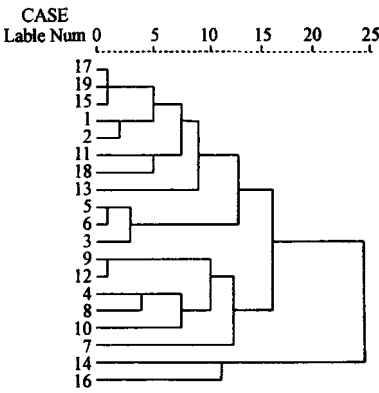


图 1 植被聚类分析

素和缓解毒的功能^[10]。许多研究发现,矿物营养元素的缺乏会刺激根系向环境中释放大量有机物和无机物,进一步增强对土壤中该缺乏元素的活化^[11]。例如植物缺 Zn 时,根系分泌出大量无机离子和低分子有机化合物如

氨基酸、碳水化合物和酚类能增强土壤中的 Zn 的活化,促进植物吸收土壤中的 Zn。例如,云杉、山杨、红松等对于植物生长所需的 Cu、Zn 富集能力很强,对于重金属 Pb 的富集能力不是很强。

此外,影响根系分泌物活化土壤重金属的因素很多,如根际环境的透气性、湿度、pH、土壤颗粒大小和土壤松紧度等理化性质,土壤微生物、光照、温度、植物类型等。这也表明,植物对不同重金属的吸收及同种植物对不同重金属元素吸收能力存在一定的差异性。

3 结论

所采集的哈尔滨市 19 种常见绿化树种对各重金属元素吸收能力不同;同一树种的不同器官对重金属元素的富集量差异显著,对重金属元素富集能力总体上表现为:根>叶>枝;植被的各部分器官对每种重金属元素的吸收量也不同。

植被体内重金属元素含量 Cu、Zn 分别与土壤中的 Cu、Zn 存在显著正相关关系;植被体内重金属元素 Cd 与土壤中的 Cd 存在显著负相关关系;植被体内重金属元素 Pb 与土壤中的 Pb 没有任何关系。

应用聚类分析,将 19 种植被按富集和转移能力的差异进行分类,分析表明,榆叶梅和蒙古栎对土壤中重金属元素 Zn、Cd 的富集和转移能力都很强,对土壤中重金属元素 Pb 的富集能力强,榆叶梅对土壤中重金属元素 Cu 的富集和转移能力都很强;垂柳、旱柳、银中杨、梨树、山荆子、山槐对土壤中重金属元素 Cu、Pb 的富集和转移能力都较强;榆树、紫丁香、黄菠萝对土壤中重金属元素 Cu 的富集和转移能力较强;对土壤中其它重金属元素的富集和转移能力均不太强;云杉、山杨、红松、色木

槭、暴马丁香、白桦、大果榆、山里红对土壤中重金属元素 Cu、Zn、Cd 的富集和转移能力较强,对土壤中重金属元素 Pb 的富集能力也比较强,但转移能力弱。可根据每种植被的修复能力,在不同的重金属元素污染地区进行种植,以达到修复效果。

参考文献

- [1] Paterson E, Sanka M, Clark L. Urban soils as pollutant sinks—a case study from Aberdeen, Scotland[J]. Applied Geochemistry, 1996, 11(1-2): 129-131.
- [2] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖. 城市土壤的特性及其管理[J]. 土壤与环境, 2002, 11(2): 206-209.
- [3] Albare N, Cottenie A. Heavy metal contamination near major highways, industrial and urban areas in Belgian grassland[J]. Water, Air and Soil Pollution, 1985, 24: 103-109.
- [4] Ritter C J, Rinefield S M. Natural background and pollution levels of some heavy metals in soils from the area of Dayton, Ohio[J]. Environmental Geology, 1983(5): 73-78.
- [5] 蔡苇, 何正浩, 刘红瑛. 黄石市郊主要蔬菜地土壤重金属污染状况分析[J]. 黄石理工学院学报, 2006, 22(3): 69-76.
- [6] USEPA. Introduction to Phytoremediation [R]. Washington D C: USEPA, 2000.
- [7] 周启星, 宋玉芳. 污染土壤修复的原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [8] Fayiga A. Arsenic Uptake by Two Hyperaccumulator Ferns from Four Arsenic Contaminated Soils[J]. Water, Air and Soil Pollution, 2005, 168(1/4): 71-89.
- [9] Cui S, Zhou Q X, Chao L. Accumulation of Pb, Zn, Cu and Cd in endurant weed plants distributed in an old smelter, northeast China. Environmental Geology, 2006, 51: 1043-1048.
- [10] 陆文龙, 曹一平, 张福锁. 根分泌的有机酸对土壤磷和微量元素的活化作用[J]. 应用生态学报, 1999(10): 379-382.
- [11] 洪常青, 袁艳丽. 根系分泌物及其在植物营养中的作用[J]. 生态环境, 2003, 12(4): 508-511.

Remediation Effect of Pollution of Heavy Metals in Soil by Common Afforestation Plants of Harbin

WANG Chun-guang, ZHANG Si-chong, REN Wei, CUI Ke-yu, ZHANG Li-hui
(College of Geographical Sciences, Harbin Normal University, Geographic Resources and
Environmental Remote Sensing Laboratory, Harbin, Heilongjiang 150080)

Abstract: In this paper, the total content of heavy metals (Cu, Zn, Pb, Cd) in the root, branch and leaf of 19 species of common plants of Harbin was investigated and determined by field investigation and laboratory analysis. The results showed that heavy metals enrichment and translocation by plants differed with plant species, their parts, and kinds of metals. According to the different enrichment coefficient and translocation factors of heavy metals by plants and showed by clustering analysis, *Amygdalus triloba* Lindl. and *Quercus mongolica* Fisch. had a higher capability of accumulating and shifting Zn, Cd; *Salix babylonica* Linn, *Salix matsudana* Koidz., *Salix alba* var. *Tristis*, *Pyrus sorotina*, *Malus baccata* Linn. and *Albizia kalkora* Roxb. had a higher capability of accumulating and shifting Cu, Pb; *Ulmus pumila* L., *Syringa oblata* and *Phellodendron amurense* Rupr had a higher capability of accumulating and shifting Cu, Cd; *Picea asperata* Mast., *Populus davidiana* Dode., *Pinus koraiensis* Siebold., *Acer mono* Maxim., *Syringa amurensis*, *Betula platyphylla* Suk., *Ulmus macrocarpa* Hance. and *Crataegus pinnatifida* Bge. had a higher capability of accumulating and shifting Cu, Zn, Cd and a higher capability of accumulating Pb, but they had a lower capability of shifting Pb.

Key words: heavy metal; phytoremediation; enrichment; translocation