

武夷山市常见绿化树种修复重金属污染土壤的研究

李 灵¹,唐 辉²,张 玉³,孙梦阳¹

(1.福建省生态产业绿色技术重点实验室/武夷学院 生态与资源工程学院,福建 武夷山 354300;2.陕西理工学院 外国语学院,陕西 汉中 723003;3.武夷学院 土木工程与建筑学院,福建 武夷山 354300)

摘要:为了筛选出不同重金属污染条件下富集较强的乔木树种,对武夷山市道路两侧土壤重金属及 11 种绿化树种叶片富集能力进行测定分析。结果表明:武夷山市区公路两侧土壤重金属 Cu、Cr、Pb、Zn 和 Ni 单项潜在风险系数 E_r 从大到小的顺序为: Pb>Cr>Cu>Ni>Zn,土壤重金属处于轻微潜在生态风险;同一树种中 Cu、Cr、Pb、Zn 和 Ni 的含量差异较大,相同元素在不同树种中的含量也存在一定差异。香樟对 Pb、Ni 和 Zn 的吸收较多,栎树对 Pb、Cr 和 Cu 的吸收量较大,深山含笑对 Pb 和 Cu 的吸收较多,四季桂对 Cr 和 Cu 吸收较多;不同树种对 Cu 和 Zn 的富集能力较强,其次是 Cr,对 Pb 和 Ni 的富集能力较低。香樟对 Pb 和 Ni 的富集能力较强,深山含笑对 Pb 和 Cu 的富集能力较强,栎树对 Cr 和 Cu 的富集能力较强,四季桂对 Cr 的富集能力较强。武夷山市区公路两侧 Pb 和 Cr 的潜在生态风险较大,因此香樟、栎树、四季桂和深山含笑是重金属污染修复比较理想的绿化树种。

关键词:土壤;绿化树种;重金属;富集能力;植物修复;武夷山市

中图分类号:S731.8:X171.5:X53 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-2767(2015)12-0044-06 DOI:10.11942/j.issn1002-2767.2015.12.0044

随着我国城市化建设的加快,城市人口和机动车数量的迅速增加、交通运输、煤炭燃烧、废物废渣排放等使城市面临着土壤重金属污染严重,阻碍城市生态环境修复及改善的重大现实问题^[1-4],因此,城市土壤重金属污染已成为国内外学者研究的热点和难点问题之一。土壤重金属污染以其隐蔽性、长效性、表聚性和难降解及土壤-植物系统的复杂性等特点,不但威胁植物的生长,而且能通过食物链直接进入人体,威胁人类健康^[5-7]。土壤重金属可与土壤矿物质、有机物及微生物发生多种物理、化学和生物作用,从而使重金属在土壤中表现出不同的贮存状态,土壤重金属形态常被认为是决定土壤重金属生物有效性及其环境行为的关键^[8]。国内外学者对重金属污染物在植物-土壤系统内的迁移、富集及对重金属污染土壤的治理和植物修复技术等方面进行了大量的研究^[9]。美国科学家 Chaney 等^[10]于 1983 年提出了植物修复(phytoremediation)的概念,植物修

复也称绿色修复或生物修复^[11]。植物修复是污染治理的一种有巨大潜力的低成本、无二次污染、绿色环保型的环境净化技术^[11-13],植物修复引起次生环境问题的可能性小,并且可以回收污染物,具有潜在的社会、经济和生态效益,具有广阔的应用前景^[14]。本文以武夷山市 11 种常见的绿化树种为研究对象,测试和分析了不同树种对重金属的富集能力。研究结果为武夷山市筛选积累重金属的植物及选择绿化树种进一步提供理论依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

武夷山(N 27°27'31"~28°04'49",E117°37'22"~118°19'44")地处福建省西北部,于闽、赣两省交界处,市区规划面积 50 km²,区内工业污染较少。武夷山是首批国家级重点风景名胜区之一,属典型的中亚热带湿润季风气候,年降水量 1 960 mm,年均气温 19.7℃。武夷山保存了世界同纬度带最完整、最典型、面积最大的中亚热带原生性森林生态系统,土壤为花岗岩风化物组成的酸性砖红壤。

1.2 材料

2014 年 10 月沿武夷山市区百花路、环岛西路、兴夷路、迎宾路等道路两侧,以武夷山市常见的 11 种绿化树种丹桂(*Osmanthus fragrans* (Thunb.)

收稿日期:2015-09-28

基金项目:南平市科技局资助项目(N2009Z10-3);武夷学院对接南平产业发展专项资助项目(2011DJ08);武夷山风景名胜区管理委员会资助项目(2008-03)

第一作者简介:李灵(1973-),女,河南省南阳市人,博士,副教授,从事土壤生态学研究。E-mail: haodou_025@126.com。

Lour.)、广玉兰 (*Magnolia grandiflora*)、合欢 (*Albizia julibrissin*)、杜英 (*Elaeocarpus decipiens*)、四季桂 (*Osmanthus fragrans* var. *semperflorens*)、深山含笑 (*Michelia maudiae*)、马褂木 (*Liriodendron chinese*)、香樟 (*Cinnamomum septentrionale*)、法国梧桐 (*Platanus orientalis*)、栎树 (*Koelreuteria paniculata*)、女贞 (*Ligustrum lucidum*) 为研究对象,分析常见绿化树种的叶片对重金属的富集能力。

1.3 方法

1.3.1 叶片采集与处理 2014 年 9 月份采集植物叶片。每个树种选取 3~5 棵样树(长势良好,树龄相近),在其东、西、南、北 4 个方向的上、中、下 3 个层次均匀采集 50 个叶片,用去离子水清洗,去除表面的污垢,晾干,在 105℃ 下杀青后,65℃ 烘干至恒重,粉碎后过 100 目的尼龙筛。用 HNO₃-HClO₄ 消化,采用火焰原子吸收法测定 Cu、Zn、Pb、Cr 和 Ni 的含量。

1.3.2 土壤样品采集与处理 2014 年 9 月份同步采集以代表样树附近的典型表层(0~15 cm)土壤,自然风干,去除沙砾、植物碎屑等杂质,研磨后过 100 目的尼龙筛。土壤重金属分析方法为国家土壤环境质量标准(GB15618-1995)规定的分析方法(Cu、Zn、Pb、Cr 和 Ni 均采用火焰原子吸收进行测定)。

1.3.3 土壤重金属形态的测定 土壤中重金属形态分析采用 Tessier 等^[15] 的五步连续提取法。

1.3.4 数据处理 采用 Excel 2007 进行数据处理,并利用 SPSS18.0 软件对数据进行显著性分析。

表 1 土壤重金属含量及污染特征

Table 1 Heavy metal content and pollution characteristics of soil

项目 Items	重金属含量/(mg·kg ⁻¹) Heavy metal content				
	Cu	Cr	Pb	Zn	Ni
含量范围	31.35~88.81	212.64~315.44	68.77~191.72	129.14~429.63	8.74~63.97
平均值	47.13	275.58	115.85	295.38	25.21
福建省元素背景值	21.6	41.3	34.9	82.7	13.5
单项污染系数 C _f ⁱ	2.18	6.67	3.32	3.57	1.86
潜在生态风险系数 E _r ⁱ	10.90	13.34	16.60	3.57	9.30
潜在生态风险指数 RI	53.71				

2.2 土壤重金属的不同形态含量

土壤重金属的环境效应、迁移和转化不仅与其总量有关,更大程度上取决于它们的化学形

2 结果与分析

2.1 土壤重金属的污染特征

依据福建省土壤元素背景值^[16] 作为评价标准,运用潜在生态风险指数法对研究区土壤重金属污染状况进行评价。

$$RI = \sum E_r^i \cdot C_f^i = \sum T_r^i \cdot C_s^i / C_n^i$$

式中:RI 为多种金属的潜在生态风险指数;E_rⁱ 为第 i 种重金属的潜在生态风险系数;C_fⁱ 为第 i 种重金属的富集系数(C_fⁱ = C_sⁱ / C_nⁱ);C_sⁱ 为第 i 种重金属的实测值,mg·kg⁻¹;C_nⁱ 为第 i 种重金属的背景值,mg·kg⁻¹;T_rⁱ 为第 i 种重金属的毒性系数,主要反映重金属的毒性水平和环境对重金属污染的敏感程度。Cu、Zn、Pb、Cr、Ni 毒性系数分别为:5、1、5、2、5^[16]。一般 E_rⁱ < 40 属于轻微污染程度,RI < 150 为轻微潜在生态风险。

从表 1 可以看出,武夷山市区公路两侧土壤重金属 Cu、Cr、Pb、Zn 和 Ni 的平均含量分别是福建省元素背景值的 2.18、6.67、3.32、3.57 和 1.86 倍,5 种重金属均已受到污染,污染程度由大到小的顺序为 Cr > Zn > Pb > Cu > Ni。

5 种重金属元素的单项潜在风险系数 E_rⁱ (3.57~16.60) 均小于 40,属于轻微污染程度。E_rⁱ 从大到小的顺序为:Pb > Cr > Cu > Ni > Zn,Pb 的潜在生态风险程度最大,Zn 的潜在生态风险程度最小。

5 种重金属元素 RI 值为 53.71(见表 1),小于 150,表明武夷山市公路两侧土壤重金属处于轻微潜在生态风险,其中 Pb 对 RI 值的贡献最大。

态^[8]。不同取样点土壤重金属 Cu、Cr、Pb 和 Zn 各形态含量如图 1(Ni 在土壤中的含量较低,未测试其不同形态的含量)。从图 1 可以看出,Cu 和

Cr 各形态含量整体上表现为残渣态>有机结合态>铁锰氧化态>碳酸盐结合态>可交换态,Pb 各形态含量整体上表现为残渣态>铁锰氧化态>有机结合态>可交换态>碳酸盐结合态,Zn 各形态含量整体上表现为残渣态>铁锰氧化态>有机结合态>碳酸盐结合态>可交换态。残渣态重金属等难为植物所吸收,不易迁移转化。本文以非

残渣态(可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化态和有机结合态)作为易于被植物吸收的活性态,结果表明,Cu 活性态占其总量的 26.26%~57.80%,Pb 活性态占其总量的 9.24%~30.13%,Cr 活性态占其总量的 5.68%~20.86%,Zn 活性态占其总量的 7.59%~16.82%。在 4 种重金属元素中以 Cu 的活性最高,Pb 和 Cr 次之,Zn 最低。

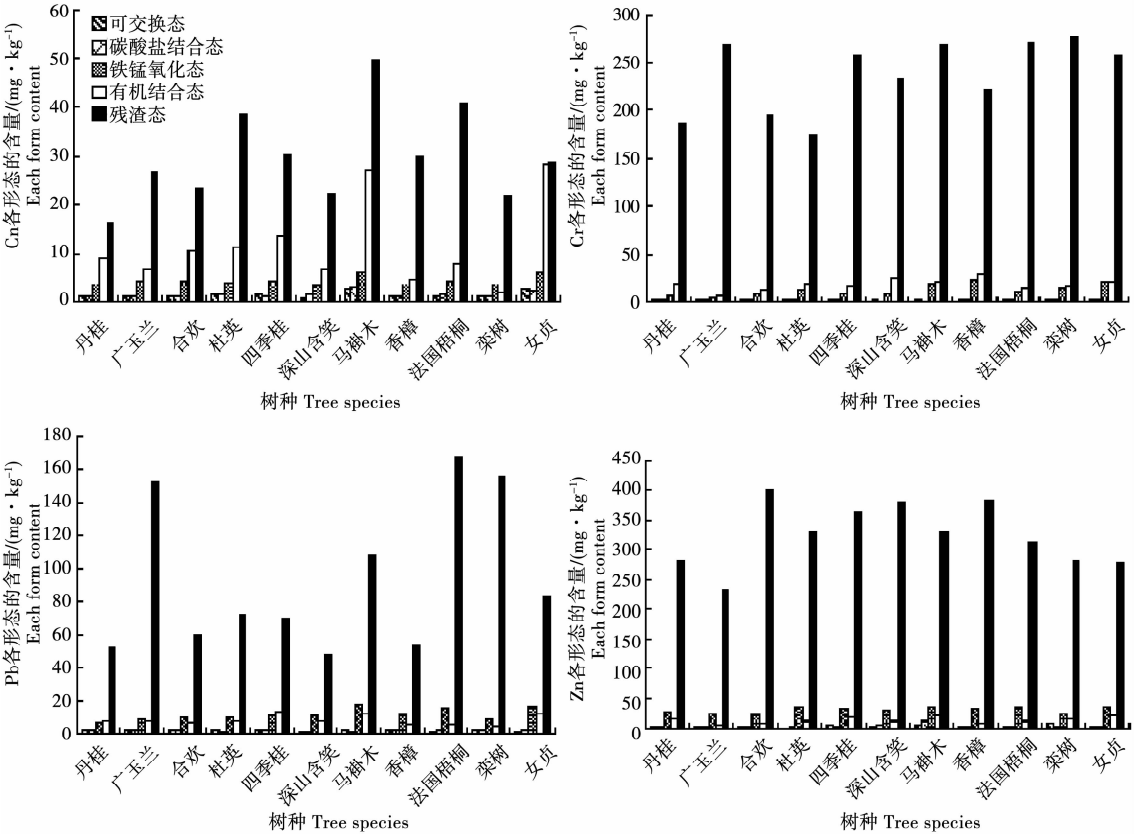


图 1 土壤重金属 Cu、Cr、Pb 和 Zn 各形态含量

Fig. 1 Each form content of Cu、Cr、Pb and Zn of soil

2.3 不同树种叶片对重金属的积累

由于各树木生理生长特性及吸收、积累重金属的能力不同,从而导致不同树木叶片的重金属含量也不尽相同。由表 2 可知,不同树种叶片对同一重金属元素的吸收量和同一树种叶片对不同重金属元素的富集程度各不相同。11 种绿化树种叶片中 Cu、Cr、Pb、Zn 和 Ni 的含量存在较大差异(见表 2)。土壤中 Zn 的活性虽然较低,但土壤中 Zn 的含量较高及植物对 Zn 需求量较大,使不同树种叶片中整体上以 Zn 的积累量最大,其次是 Cr 和 Cu,Pb 和 Ni 最小。由于不同元素的活性及植物有效性不同,使同一元素在不同树种叶片中的含量也存在一定差异(见表 2)。对 Cu 的

吸收较多的是栎树(11.47 mg·kg⁻¹)、广玉兰(10.77 mg·kg⁻¹)、四季桂(10.29 mg·kg⁻¹),女贞、杜英和马褂木对 Cu 的吸收较少,分别为 6.72、5.32 和 6.65 mg·kg⁻¹。栎树和四季桂对 Cr 的吸收量较大,分别达 65.07 和 49.15 mg·kg⁻¹,对 Cr 的吸收量较小的是合欢、广玉兰和丹桂,分别为 9.76、11.31 和 12.30 mg·kg⁻¹,对 Cr 吸收量最大的栎树是最小的合欢的 6.67 倍。香樟、栎树和深山含笑对 Pb 的吸收较多,分别达 4.65、3.68 和 3.36 mg·kg⁻¹,丹桂、法国梧桐和广玉兰对 Pb 的吸收较少,分别为 0.60、0.76 和 0.44 mg·kg⁻¹,吸收量最小的广玉兰仅占最大的香樟的 9.46%。对 Zn 吸收较多的为香樟(52.29 mg·kg⁻¹)、合

欢($50.86\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、杜英($47.34\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、丹桂($42.54\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和女贞($41.68\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),吸收较少的为深山含笑($18.26\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和法国梧桐($15.56\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。对 Ni 吸收量最大为广玉兰($2.36\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),最小的为四季桂($0.29\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),广玉兰对 Ni 的吸收量是四季桂的 8.14 倍。

分析可知,丹桂、女贞、合欢和杜英除对 Zn 的积累量较多外,对其它 4 种重金属积累量比较少,法国梧桐对 5 种重金属积累量均较少。除了香樟 Pb 的积累量大于栎树外,栎树对 Cu、Cr 和 Pb 的积累量均最大,除对 Cu 的积累量与广玉兰无显著差异($P>0.05$)外,与其它树种叶片中

Cu、Cr 和 Pb 的积累量均存在显著差异($P<0.05$)说明栎树对 Cu、Cr 和 Pb 有较强的富集能力。除了四季桂与栎树对 Cr 的积累量及广玉兰对 Ni 的积累量大于香樟外,香樟对 Cr、Pb、Zn 和 Ni 的积累量均较大,因此香樟对 Cr、Pb、Zn 和 Ni 的富集能力较强,尤其对 Pb 的富集能力最强。四季桂对 Cr 和 Cu 的富集能力相对较强。

不同植物叶片重金属含量与土壤重金属含量变化呈一定正相关,但未达显著水平($P>0.05$),说明植物叶片中重金属的积累量随土壤中重金属含量的增加呈增大的趋势。

表 2 不同树种叶片的重金属含量

Table 2 Heavy metal content of different tree species leaves

树种 Tree species	重金属含量/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) Heavy metal content				
	Cu	Cr	Pb	Zn	Ni
丹桂	$7.33\pm0.026\text{ bc}$	$12.30\pm0.78\text{ abc}$	$0.60\pm0.056\text{ ab}$	$42.54\pm1.96\text{ d}$	$1.23\pm0.067\text{ d}$
栎树	$11.47\pm1.08\text{ f}$	$65.07\pm4.33\text{ g}$	$3.68\pm0.17\text{ h}$	$26.68\pm1.31\text{ b}$	$1.07\pm0.088\text{ d}$
女贞	$6.72\pm0.49\text{ b}$	$15.88\pm0.93\text{ c}$	$2.06\pm0.076\text{ e}$	$41.68\pm1.38\text{ d}$	$0.84\pm0.061\text{ c}$
法国梧桐	$7.90\pm0.62\text{ c}$	$19.19\pm0.87\text{ d}$	$0.76\pm0.053\text{ b}$	$15.56\pm0.90\text{ a}$	$1.09\pm0.074\text{ d}$
四季桂	$10.29\pm0.55\text{ e}$	$49.15\pm2.14\text{ f}$	$1.09\pm0.031\text{ c}$	$27.68\pm2.09\text{ b}$	$0.29\pm0.021\text{ a}$
合欢	$8.16\pm0.47\text{ c}$	$9.76\pm0.33\text{ a}$	$1.73\pm0.11\text{ d}$	$50.86\pm2.73\text{ ef}$	$0.60\pm0.050\text{ b}$
马褂木	$6.65\pm0.71\text{ b}$	$14.40\pm1.12\text{ bc}$	$2.55\pm0.14\text{ f}$	$34.62\pm1.95\text{ c}$	$1.69\pm0.092\text{ e}$
广玉兰	$10.77\pm0.83\text{ ef}$	$11.31\pm1.05\text{ ab}$	$0.44\pm0.037\text{ a}$	$27.93\pm1.57\text{ b}$	$2.36\pm0.16\text{ f}$
深山含笑	$9.42\pm0.64\text{ d}$	$27.70\pm2.08\text{ e}$	$3.36\pm0.12\text{ g}$	$18.26\pm1.11\text{ a}$	$1.14\pm0.052\text{ d}$
杜英	$5.32\pm0.34\text{ a}$	$20.10\pm1.66\text{ d}$	$2.22\pm0.099\text{ e}$	$47.34\pm2.48\text{ e}$	$0.65\pm0.043\text{ b}$
香樟	$7.74\pm0.67\text{ bc}$	$28.47\pm1.53\text{ e}$	$4.65\pm0.22\text{ i}$	$52.29\pm4.23\text{ f}$	$1.72\pm0.080\text{ e}$

同一列不同字母表示有显著差异($P<0.05$)。

Different letters in the same column mean significant difference at 0.05 level.

2.4 植物叶片的重金属富集系数

由表 3 可以看出,不同树种叶片对同一重金属的富集系数差异较大,不同树种对 Cu 的富集系数最大,这可能与土壤中 Cu 的活性较高有关,Zn 的富集系数也较大,因为 Cu 和 Zn 为植物生长所必需的微量元素,因此,植物体内对这两种元素的积累能力较强;Cr 不易被植物吸收并转运到植株地上部分,植物吸收的 Cr 绝大部分保留在根部,因此 Cr 在土壤中的含量虽然大于其它 4 种重金属的,但植物叶片对 Cr 的富集系数小于 Cu 和 Zn 的。Pb 是一种有毒元素,Ni 是植物非必需的微量元素,可能是植物叶片对 Pb 和 Ni 的富集系数较低的原因。

由表 3 可知,栎树对 Cu 和 Cr 的富集能力最

强,富集系数分别为 0.381 和 0.207,广玉兰和深山含笑对 Cu 的富集能力也较强,富集系数分别为 0.265 和 0.272,四季桂对 Cr 的富集能力也较强,富集系数为 0.169;Zn 富集系数最大的是丹桂,为 0.221,其次为女贞(0.192)和马褂木(0.161);香樟对 Pb 和 Ni 的富集能力最强,富集系数分别为 0.063 和 0.159,深山含笑对 Pb 和 Ni 的富集能力也比较强,富集系数分别为 0.049 和 0.130。说明不同植物对重金属的吸收和富集都有很强的选择性。

植物叶片对 Cu、Pb、Zn 和 Ni 的富集系数与土壤中的含量呈一定的负相关,对 Cr 的富集系数与土壤中的含量呈一定的正相关。说明植物叶片对 Cu、Pb、Zn 和 Ni 的富集能力越强,可以有效的

修复 Cu、Pb、Zn 和 Ni 污染的土壤。栎树对 Cu 和 Cr 的富集系数最大,可以作为修复植物来降低土壤中 Cu 和 Cr 的污染;丹桂对 Zn 的富集能力最强,可以作为 Zn 污染区的主要树种来改善重金属的污染状况;Pb 和 Ni 的富集系数最大的是香樟,因此香樟可用于 Pb 和 Ni 复合污染的土壤修复。

表 3 不同植物叶片对重金属的富集系数
Table 3 Enrichment coefficient of heavy metal of different tree species leaves

树种 Tree species	富集系数 Enrichment coefficient				
	Cu	Cr	Pb	Zn	Ni
丹桂	0.234	0.056	0.009	0.221	0.055
栎树	0.381	0.207	0.021	0.107	0.021
女贞	0.098	0.052	0.018	0.192	0.042
法国梧桐	0.215	0.063	0.017	0.058	0.022
四季桂	0.202	0.169	0.011	0.067	0.021
合欢	0.197	0.044	0.022	0.118	0.056
马褂木	0.140	0.109	0.032	0.161	0.085
广玉兰	0.265	0.039	0.003	0.111	0.045
深山含笑	0.272	0.101	0.049	0.141	0.130
杜英	0.093	0.095	0.024	0.148	0.041
香樟	0.192	0.101	0.063	0.124	0.159

3 结论

武夷山市区公路两侧土壤重金属 Cu、Cr、Pb、Zn 和 Ni 的含量均超出福建省元素背景值,5 种重金属均已受到污染,污染程度由大到小的顺序为 Cr>Zn>Pb>Cu>Ni。5 种重金属元素的单项潜在风险系数 E_r^i (3.57~16.60) 均小于 40,潜在生态风险指数 RI(53.7) 小于 150,武夷山市公路两侧土壤重金属处于轻微潜在生态风险。 E_r^i 从大到小的顺序为:Pb>Cr>Cu>Ni>Zn,Pb 的潜在生态风险程度最大,Zn 的潜在生态风险程度最小。

对武夷山市 11 种绿化树种的重金属积累特征进行分析表明,不同树种叶片中整体上以 Zn 的积累量最大,其次是 Cr 和 Cu,Pb 和 Ni 最小。其中栎树、四季桂和广玉兰对 Cu 的吸收较多,栎树和四季桂对 Cr 的吸收量较大,香樟、栎树和深山含笑对 Pb 的吸收较多,对 Zn 吸收较多的为香樟、合欢、杜英、丹桂和女贞,对 Ni 吸收量较大的为广玉兰、香樟和马褂木。

植物中的重金属主要来自土壤,植物对土壤

重金属的修复能力,可以用富集系数(bioaccumulation factor,BF)来进行评价^[17]。富集系数通常用重金属在植物体的含量与土壤的含量之比来表示,反映植物从土壤中富集重金属的能力。从单项富集系数来看,不同树种对 Cu 和 Zn 的富集能力较强,因此,植物体内对这两种元素的积累能力较强,这一结论与鲁绍伟等^[18]的研究结果一致。其次是 Cr,对 Pb 和 Ni 的富集能力较低。Cr、Pb、Ni 为难溶重金属元素^[19],与 Cu、Zn 相比,在土壤溶液中 Cr、Pb 和 Ni 的含量低,难于被植物吸收。大多数高等植物属于 Cr 累积低和累积中等的类型,土壤中 Cr 有累积,但栽种其上的植物中 Cr 的累积并不明显^[20];其中栎树、广玉兰和深山含笑对 Cu 的富集能力较强,栎树和四季桂对 Cr 的富集能力较强,香樟和深山含笑对 Pb 和 Ni 的富集能力较强,丹桂、女贞和马褂木对 Zn 的富集能力较强。

综上所述,没有一种植物对 5 种重金属元素均表现出最强的富集能力和最大的积累量。栎树对 Cu 和 Cr 的富集能力最强,积累量最大,四季桂对 Cu 和 Cr 的富集能力和积累量也比较大;香樟对 Pb 的富集能力最强,积累量最大,深山含笑对 Pb 的富集能力和积累量也较大;丹桂和女贞对 Zn 的富集能力强,但香樟和合欢对 Zn 的积累量大;香樟和深山含笑对 Ni 的富集能力较强,但广玉兰和香樟对 Ni 吸收量较大。武夷山市区公路两侧 Pb 和 Cr 的潜在生态风险较大,因此香樟、栎树、四季桂和深山含笑是重金属污染修复比较理想的绿化树种。

本研究只考虑了乔木树种叶片对重金属的富集和积累,今后还需进一步加强植物地上部分的枝条及地下部分的根系对重金属的富集和积累、树种的生长状况的调查(确定富集型或为指示型树种)、综合乔木-灌木-草本植物相结合的立体综合修复模式的研究,为美化城市环境、重金属污染的修复与治理进行城市绿化树种的选择提供更加坚实的理论基础。

参考文献:

[1] 庞静.北京耐土壤重金属污染城市绿化植物的筛选与评价[D].北京:北京林业大学,2008.
[2] 杨学军,唐东芹,许东新,等.上海地区绿化树种重金属污染防治特性的研究[J].应用生态学报,2004,15(4):B687-690.
[3] 杨启良,武振中,陈金陵,等.植物修复重金属污染土壤的研究现状及其水肥调控技术展望[J].生态环境学报,2015,

- 24(6):1075-1084.
- [4] 万欣,关庆伟,邱靖,等. 3 种垂直绿化植物叶片对 Zn、Cu、Pb 的富集能力[J]. 城市环境与城市生态,2010,23(2): 33-35.
- [5] LI Daolin, He Fang, Ma Chengze, et al. Effects of Arsenic on biological activity of soils and its toxicity to selected-vegetables[J]. Agro-Environmental Protection, 2000, 19(3): 148-151.
- [6] Finzgar N, Lestan D. The two-phase leaching of Pb, Zn and Cd contaminated soil using EDTA and electrochemical treatment of the washing solution[J]. Chemosphere, 2008, 73(9): 1484-1491.
- [7] Puschenreiter M, Stöger G, Lombi E, et al. Phytoextraction of heavy metal contaminated soils with *Thlaspi goesingense* and *Amaranthus hybridus*: rhizosphere manipulation using EDTA and ammonium sulfate[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2001, 164(6): 615-621.
- [8] 尚爱安,刘玉荣,梁重山. 土壤中重金属的生物有效性研究进展[J]. 土壤,2000(6):294-300,314.
- [9] 顾继光,林秋奇,胡韧,等. 土壤-植物系统中重金属污染的治理途径及其研究展望[J]. 土壤通报,2005,36(1): 128-133.
- [10] Chaney R L. Plant uptake of inorganic waste constituents[C]// PARR J F. Land Treatment of Hazardous Wastes. Noyes Data Corporation, New Jersey: Park Ridge, 1983: 50-76.
- [11] 顾继光,周启星,王新. 土壤重金属污染的治理途径及其研究进展[J]. 应用基础与工程科学学报,2003,11(2): 143-151.
- [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[J]. 安徽师范大学学报:自然科学版,2011,34(4):365-369.
- [13] Rascio N, Navari-izzo F. Heavy metal hyperaccumulating plants: how and why do they do it? And what makes them so interesting? [J]. Plant Science, 2011, 180(2): 169-181.
- [14] 王庆仁,崔岩山,董艺婷. 植物修复-重金属污染土壤整治有效途径[J]. 生态学报,2001,21(2):326-330.
- [15] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. Analytical Chemistry, 1979, 51(7): 844-851.
- [16] 李灵,梁彦兰,张玉,等. 武夷岩茶核心种植区土壤重金属污染特征及土壤质量评价[J]. 土壤通报,2013,44(3): 730-736.
- [17] 吴迪,邓琴,耿丹,等. 贵州废弃铅锌矿区优势植物中铅、锌、铬含量及富集特征[J]. 湖北农业科学,2015,54(10): 2363-2366,2371.
- [18] 鲁绍伟,高琛,杨新兵,等. 北京市不同污染区主要绿化树种对土壤重金属的富集能力[J]. 东北林业大学学报,2014,42(5):22-26.
- [19] 唐力. 包头市常见绿化树种体内与生境土壤中重金属元素含量的相关分析研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2011.
- [20] 王云,魏复盛. 土壤环境元素化学[M]. 北京:中国环境科学出版社,1995.

Research on Phytoremediation of Heavy Metals Contaminated Soil of Main Greening Tree Species in Wuyishan City

LI Ling¹, TANG Hui², ZHANG Yu³, SUN Meng-yang¹

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Eco-Industrial Green Technology, College of Ecology and Resources Engineering, Wuyi University, Wuyishan, Fujian 354300; 2. School of Foreign Studies, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723003; 3. College of Architecture and Civil Engineering, Wuyi University, Wuyishan, Fujian 354300)

Abstract: The concentration of heavy metals (Cu, Cr, Pb, Zn and Ni) and the concentration capacity of plant leaves to these metals from 11 species of greening tree species in Wuyishan city were studied to figure out the arbor species with strong concentration capacity to heavy metals. The results showed that the individual Potential Ecological Risk Factor E_r^i of 5 kinds of heavy metals was described as follows: $Pb > Cr > Cu > Ni > Zn$. These heavy metals in roadside soils of Wuyishan city belonged to a light potential ecological risk. The concentrations of Cu, Cr, Pb, Zn and Ni in the same tree species have larger difference. The accumulation amounts of the same element in different tree species had certain difference. The accumulation amounts of *Cinnamomum* to Pb, Ni and Zn, *Koeleruteria* to Pb, Cr and Cu, *Michelia* to Pb and Cu, *Osmanthus* to Cr and Cu were relatively larger. The enrichment capability of heavy metals in most of the tree species was $Cu > Zn > Cr > Ni > Pb$. The enrichment capability of *Cinnamomum* to Pb and Ni, *Michelia* to Pb and Cu, *Koeleruteria* to Cr and Cu, *Osmanthus* to Cr were relatively stronger. The potential ecological risk of Pb and Cr behaves stronger in roadside pavement soil of Wuyishan city. *Cinnamomum*, *Koeleruteria*, *Osmanthus* and *Michelia* were ideal greening tree species for phytoextraction from polluted soil in Wuyishan city.

Keywords: soil; greening tree species; heavy metal; concentration capacity; phytoremediation; Wuyishan city