

湖北铜绿山古铜矿遗址区木本植物对 重金属富集能力的分析

康薇^{1,2}, 鲍建国^{1,①}, 郑进², 邹涛², 闵建华², 杨裕启²

[1. 中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430074;

2. 湖北理工学院矿区环境污染控制与修复湖北省重点实验室, 湖北黄石 435003]

摘要: 对湖北铜绿山古铜矿遗址区的木本植物种类组成及生长概况进行了调查, 并采用原子吸收光谱法测定了木本植物地上部和地下部及其根际土壤中重金属含量; 在此基础上, 分析了各树种对 Cu、Cd 和 Pb 的富集作用, 并对木本植物的生态修复意义进行了初步评价。结果表明: 在该古铜矿遗址区共有木本植物 13 科 14 属 14 种, 其中乔木 13 种、灌木 1 种; 木本植物的树龄 4~25 a、株高 3.7~22.6 m、胸径 5.3~29.0 cm, 长势均较好。木本植物根际土壤中 Cu、Cd、Pb、Cr、Mn 和 Zn 的平均含量分别为 3 166.73、3.66、137.06、31.32、1 774.43 和 208.32 mg·kg⁻¹, 其中, 土壤中 Cu、Cd 和 Pb 的含量达到重度污染等级。各树种地上部和地下部的 Cu、Cd 和 Pb 的含量差异明显, 且均为 Cu 含量最高、Cd 含量最低; 各树种的地上部和地下部对 Cu、Cd 和 Pb 的富集系数及综合富集系数也均有明显差异, 但对 Cd 的富集系数均最大。法国冬青 [*Viburnum odoratissimum* var. *awabuki* (K. Koch) Zabel ex Rumpf.]、梧桐 [*Firmiana platanifolia* (Linn. f.) Marsili]、桂花 [*Osmanthus fragrans* (Thunb.) Lour.] 和刺槐 (*Robinia pseudoacacia* Linn.) 地上部的综合富集系数较高, 苦楝 (*Melia azedarach* Linn.)、女贞 (*Ligustrum lucidum* Ait.)、法国冬青和樟树 [*Cinnamomum camphora* (Linn.) Presl] 地下部的综合富集系数较高; 总体上看, 法国冬青、苦楝、女贞、梧桐和桂花对 Cu、Cd 和 Pb 的平均综合富集系数均大于 1, 具有较高的重金属富集能力。根据研究结果, 建议在 Pb 污染区域可选择栽植二球悬铃木 [*Platanus × acerifolia* (Ait.) Willd.] 和构树 [*Broussonetia papyrifera* (Linn.) L' Hert. ex Vent.] 等树种, 在 Cd 污染区域可选择栽植法国冬青、梧桐、刺槐和苦楝等树种, 而在 Cu-Cd-Pb 复合污染区域应栽植法国冬青、苦楝、女贞、梧桐、桂花和刺槐等树种。

关键词: 古铜矿遗址; 重金属污染; 木本植物; 根际土壤; 富集能力; 生态修复

中图分类号: S736.1; X171.4; X53 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2014)01-0078-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2014.01.12

Analysis on heavy metal enrichment ability of woody plants at ancient copper mine site in Tonglushan of Hubei Province KANG Wei^{1,2}, BAO Jianguo^{1,①}, ZHENG Jin², ZOU Tao², MIN Jianhua², YANG Yuqi² (1. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Hubei Key Laboratory of Mine Environmental Pollution Control & Remediation, Hubei Polytechnic University, Huangshi 435003, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2014, 23(1): 78-84

Abstract: Species composition and growth status of woody plants at ancient copper mine site in Tonglushan of Hubei Province were surveyed and heavy metal contents in above- and under-ground parts of woody plants and in its rhizosphere soil were determined by atomic absorption spectrometry. On these bases, enrichment effect of all tree species on Cu, Cd and Pb was analyzed and significance of ecological restoration of woody plants was evaluated preliminarily. The results show that there are 14 species woody plants belonging to 14 genera in 13 families at ancient copper mine site in Tonglushan, in which includes

收稿日期: 2013-05-29

基金项目: 湖北省自然科学基金重点项目(2011CDA037); 湖北省科技支撑计划公益性科技研究类项目(2012DCA23); 湖北理工学院科研项目(12xjz38Q); 湖北省黄石市科技局科技计划项目(2010A1019-2); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队资助计划项目(T201223)

作者简介: 康薇(1983—), 女, 湖北荆门人, 博士研究生, 讲师, 主要从事矿区污染环境生物修复的研究。

①通信作者 E-mail: bjianguo888@126.com

13 arbors and 1 shrub, and they grow better with tree age 4–25 a, height 3.7–22.6 m and diameter at breast height 5.3–29.0 cm. Average contents of Cu, Cd, Pb, Cr, Mn and Zn in rhizosphere soil of woody plants are 3 166.73, 3.66, 137.06, 31.32, 1 774.43 and 208.32 mg · kg⁻¹, respectively, in which, Cu, Cd and Pb contents in soil reach the heavy pollution level. There are obvious differences in Cu, Cd and Pb contents in above- and under-ground parts of all tree species, and in all tree species, Cu content is the highest and Cd content is the lowest. Also, there are obvious differences in enrichment coefficients and complex enrichment coefficients of Cu, Cd and Pb in above- and under-ground parts of all tree species but enrichment coefficient of Cd is the highest. Complex enrichment coefficient of above-ground part of *Viburnum odoratissimum* var. *awabuki* (K. Koch) Zabel ex Ruml., *Firmiana platanifolia* (Linn. f.) Marsili, *Osmanthus fragrans* (Thunb.) Lour. and *Robinia pseudoacacia* Linn. is higher, and that of under-ground part of *Melia azedarach* Linn., *Ligustrum lucidum* Ait., *V. odoratissimum* var. *awabuki* and *Cinnamomum camphora* (Linn.) Presl is higher. Generally, averages of complex enrichment coefficient of *V. odoratissimum* var. *awabuki*, *M. azedarach*, *L. lucidum*, *F. platanifolia* and *O. fragrans* on Cu, Cd and Pb all are more than 1, and they possess strong enrichment ability to heavy metals. According to these research results, it is suggested that *Platanus × acerifolia* (Ait.) Willd. and *Broussonetia papyrifera* (Linn.) L' Hert. ex Vent. can be planted in Pb pollution area, *V. odoratissimum* var. *awabuki*, *F. platanifolia*, *R. pseudoacacia* and *M. azedarach* can be planted in Cd pollution area, and *V. odoratissimum* var. *awabuki*, *M. azedarach*, *L. lucidum*, *F. platanifolia*, *O. fragrans* and *R. pseudoacacia* should be planted in Cu-Cd-Pb complex pollution area.

Key words: ancient copper mine site; heavy metal pollution; woody plants; rhizosphere soil; enrichment ability; ecological restoration

自20世纪80年代科学家提出用植物修复污染环境的构想以来,植物修复技术以其原位修复、费用低廉、不破坏环境结构以及大规模治污等优势,被视为比较具有应用前途的土壤重金属污染治理技术^[1]。近年来,随着可富集Ni、Zn、Co、Mn、Pb、Cd和Cu等多种重金属的超富集植物的相继发现和各种先进理化分析测试技术的应用,植物修复已成为重金属污染土壤修复研究的热点,取得了一批有关超富集植物对重金属的吸收、转运和体内解毒机制等方面的研究成果^[2-7]。然而,在国内外已经报道的700多种重金属超富集植物中,大多数还处在实验摸索阶段,较少用于大规模的环境治理工程。究其原因,除土壤中重金属的有效性差、难以被植物吸收外^[8],另一个重要的制约因素是这些超富集植物大多数为草本植物。草本植物资源丰富、生长快、适应性强,但在重金属毒害作用下,通常植株矮小、生物量低,难以获得理想的修复效果。因此,人们把植物修复的研究重点转向对重金属耐性强、生长快、生物量大并具有一定重金属富集能力的植物种类的筛选,而木本植物在这些方面的优势引起了相关研究者的关注^[9-12]。

湖北铜绿山古铜矿遗址是中国古代重要的采铜和冶铜基地,距今已有3 000多年的历史;该遗址区地面堆积的古炉渣超过40×10⁴ t,分布范围约2 km²。经过长期的风化和自然选择,在这种重金属含量极高的

土地上形成了较为丰富的植被构成。束文胜等^[13]2001年的调查结果显示:在铜绿山古铜矿冶炼渣堆上共有高等植物15科25属28种,其中草本植物27种,木本植物仅女贞(*Ligustrum lucidum* Ait.)1种;在8种优势植物中,鸭跖草(*Commelina communis* Linn.)达到Cu超富集植物标准,海州香薷(*Elsholtzia splendens* Nakai ex F. Maekawa)、蝇子草(*Silene gallica* Linn.)、头花蓼(*Polygonum capitatum* Buch.-Ham. ex D. Don)和狗尾草[*Setaria viridis* (Linn.) Beauv.]等种类为Cu耐性植物。此外,该古矿遗址还分布有10多种木本植物,且普遍长势较好。

为探讨重金属元素在木本植物体内的转移和累积规律,筛选出对重金属富集或耐受性强的树种,作者对铜绿山古铜矿遗址区木本植物种类的构成进行了调查分析,并研究了这些木本植物对重金属元素的富集与分布特征,以期为木本植物在重金属污染土壤工程治理中的应用提供研究依据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

铜绿山古铜矿遗址位于铜绿山铜矿境内,地处湖北省大冶市金湖街道办事处,东北距黄石市区30 km;坐标为北纬29°40′~30°15′、东经114°30′~115°20′。

属典型的亚热带东亚大陆性气候,冬冷夏热、四季分明、光照充足、雨量充沛;年平均气温 16.9 °C,年平均无霜期 261 d,年平均降雨量 1 385.8 mm。出露的地层主要有第四系松散地层、燕山期岩浆岩和中下三迭系灰岩。境内气候温和、湿润,冬寒期短,水热条件优越。矿区植被种类繁多,共记录有裸子植物 7 科 18 属 30 多种、被子植物 150 多科 300 余属 2 000 余种、蕨类植物 18 科 30 多属 60 余种,还有藻类、菌类、地衣和苔藓等不同等级的植物^[14]。目前,铜绿山古铜矿遗址由铜绿山古铜矿遗址博物馆管理,遗址区的植树造林活动始于 20 世纪 80 年代中期并一直持续至今,部分木本植物种类已经形成了一定规模的人工植被群落。

1.2 方法

1.2.1 植物样品采集与处理 于 2012 年 9 月,采用踏查的方式对铜绿山古铜矿遗址上生长的所有成年木本植物进行调查记录。每种植物随机选取 5 株标准木(不足 5 株的全部取样),分别记录胸径和株高,并按地上部(2 年生侧枝及其上的叶片)和地下部(根系)各随机取样 5 个,每个样品 3 个重复。样品用去离子水冲洗干净,并经 80 °C 烘干至恒质量,粉碎后过 2 mm 筛,置于塑料袋中密封待测。

1.2.2 土壤样品采集与处理 在每种植物的 5 株标准木树冠垂直投影中心点向外 2/3 处开挖土壤剖面^[12],取土壤混合样(土壤深度 0~60 cm),每个样品 3 个重复。土样在室内自然风干后充分研磨,过 2 mm 尼龙筛,置于自封袋中待测。

1.2.3 样品测试 参照文献^[15]的方法对土壤和植物样品进行消解,用原子吸收分光光度计(美国 Varian 公司)测定植物样品中的 Cu、Pb 和 Cd 含量以及土壤样品中的 Cu、Cd、Pb、Cr、Mn 和 Zn 含量。每个样品重复测定 3 次,结果取平均值。

1.3 数据计算及分析

采用 EXCEL 2003 和 SPSS 12.0 统计软件进行数据分析。采用 LSD 方法进行多重比较($P < 0.05$);参照文献^[12]的方法计算土壤污染指数、富集系数和综合富集系数。

2 结果和分析

2.1 木本植物根际土壤重金属含量及污染等级分析

湖北铜绿山古铜矿遗址区木本植物根际土壤中 Cu、Cd、Pb、Cr、Mn 和 Zn 的含量以及污染指数见表 1。由表 1 可以看出:铜绿山古铜矿遗址木本植物根际土壤中 Cu、Cd、Pb、Mn 和 Zn 的含量均高于湖北省土壤背景值^[16],仅 Cr 含量低于湖北省土壤背景值。其中,Cu 含量为 430.32~14 644.63 mg·kg⁻¹,平均值为 3 166.73 mg·kg⁻¹;Cd 含量为 2.50~6.39 mg·kg⁻¹,平均值为 3.66 mg·kg⁻¹;Pb 含量为 64.59~280.85 mg·kg⁻¹,平均值为 137.06 mg·kg⁻¹;Cr 含量为 13.06~81.07 mg·kg⁻¹,平均值为 31.32 mg·kg⁻¹;Mn 含量为 187.54~2 760.32 mg·kg⁻¹,平均值为 1 774.43 mg·kg⁻¹;Zn 含量为 104.96~278.66 mg·kg⁻¹,平均值为 208.32 mg·kg⁻¹。对照土壤重金属污染等级标准^[17],铜绿山古铜矿遗址区土壤 Cu 污染指数高达 103.15,Cd 和 Pb 的污染指数也分别达到 21.53 和 5.13,均属重度污染;Zn 和 Mn 的污染指数均为 2.49,均属中度污染;Cr 污染指数仅 0.36,未造成污染。

研究结果表明:铜绿山古铜矿遗址木本植物根际土壤存在 Cu、Cd、Pb、Mn 和 Zn 等重金属元素的复合污染,其中主要污染元素为 Cu、Cd 和 Pb,Mn 和 Zn 污染次之。据此,本研究将着重分析木本植物对土壤中 Cu、Cd 和 Pb 的富集特征。

表 1 湖北铜绿山古铜矿遗址区木本植物根际土壤重金属含量及污染指数

Table 1 Heavy metal content and pollution index in rhizosphere soil of woody plants growing at ancient copper mine site in Tonglushan of Hubei Province

元素 Element	含量/mg·kg ⁻¹ Content			污染指数 Pollution index	污染等级 Pollution grade
	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Average		
Cu	430.32	14 644.63	3 166.73	103.15	重度污染 Heavy pollution
Cd	2.50	6.39	3.66	21.53	重度污染 Heavy pollution
Pb	64.59	280.85	137.06	5.13	重度污染 Heavy pollution
Cr	13.06	81.07	31.32	0.36	无污染 No pollution
Mn	187.54	2 760.32	1 774.43	2.49	中度污染 Moderate pollution
Zn	104.96	278.66	208.32	2.49	中度污染 Moderate pollution

2.2 木本植物种类组成及生长情况

在湖北铜绿山古铜矿遗址区共有木本植物 13 科 14 属 14 种, 这些树种的基本概况见表 2。其中, 刺槐 (*Robinia pseudoacacia* Linn.)、苦楝 (*Melia azedarach* Linn.)、夹竹桃 (*Nerium indicum* Mill.)、二球悬铃木 [*Platanus × acerifolia* (Ait.) Willd.]、意杨 (*Populus × euramericana* 'I-214')、樟树 [*Cinnamomum camphora* (Linn.) Presl]、构树 [*Broussonetia papyrifera* (Linn.) L' Hert. ex Vent.]、青冈栎 [*Cyclobalanopsis glauca* (Thunb.) Oerst.]、桂花 [*Osmanthus fragrans* (Thunb.) Lour.]、梧桐 [*Firmiana platanifolia* (Linn. f.) Marsili.]、毛泡桐 [*Paulownia tomentosa* (Thunb.) Steud.]、法国冬青 [*Viburnum odoratissimum* var. *awabuki* (K. Koch) Zabel ex Ruml.] 和杉木 [*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.] 为该矿区新记录种; 刺槐、苦楝、构树、毛泡桐和女贞为自然定居, 其他树种为人工栽植; 在

生活型上以乔木为主, 灌木仅夹竹桃 1 种; 二球悬铃木树龄最长 (25 a), 意杨的树龄最短 (仅 4 a), 其他树种的树龄为 10 ~ 16 a。刺槐、夹竹桃、樟树和意杨等树种均集中成片生长, 而女贞、桂花、法国冬青、构树、青冈栎、毛泡桐和杉木呈零散分布, 二球悬铃木、苦楝和梧桐则孤立生长。从平均株高看, 刺槐、樟树、意杨、毛泡桐、杉木、二球悬铃木和梧桐的株高均在 6 m 以上, 其中二球悬铃木最高, 达 22.6 m; 夹竹桃为灌木, 其平均株高也最小, 为 3.7 m。从平均胸径看, 二球悬铃木的平均胸径达到 29.0 cm, 樟树、意杨、法国冬青、构树、青冈栎、毛泡桐和梧桐的胸径也在 9 cm 以上, 夹竹桃和杉木的平均胸径最小, 均为 5.3 cm。分析结果表明: 上述这些树种在铜绿山古铜矿遗址普遍长势良好, 基本适应古铜矿遗址土壤重金属复合污染的环境。

表 2 湖北铜绿山古铜矿遗址区木本植物的基本概况

Table 2 Basic situation of woody plants growing at ancient copper mine site in Tonglushan of Hubei Province

科 Family	种类 Species	生活型 ¹⁾ Life-form ¹⁾	树龄/a ²⁾ Tree age ²⁾	株数 Number	株高/m Height		胸径/cm DBH	
					范围 Range	平均值 Average	范围 Range	平均值 Average
豆科 Leguminosae	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	A	-	247	5.5-9.0	6.2	5.5-23.6	8.6
夹竹桃科 Apocynaceae	夹竹桃 <i>Nerium indicum</i>	S	8-12	323	3.5-4.0	3.7	3.5-7.2	5.3
樟科 Lauraceae	樟树 <i>Cinnamomum camphora</i>	A	16	203	12.6-13.5	12.6	7.3-41.8	12.5
杨柳科 Salicaceae	意杨 <i>Populus × euramericana</i> 'I-214'	A	4-10	117	6.6-7.0	6.4	3.6-18.8	9.6
木犀科 Oleaceae	女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	A	-	58	4.5-5.3	4.8	3.5-7.6	5.7
	桂花 <i>Osmanthus fragrans</i>	A	12	21	2.7-4.5	4.1	5.2-10.4	7.8
忍冬科 Caprifoliaceae	法国冬青 <i>Viburnum odoratissimum</i> var. <i>awabuki</i>	A	12	48	4.5-6.4	5.3	6.6-11.8	9.1
桑科 Moraceae	构树 <i>Broussonetia papyrifera</i>	A	-	42	2.5-10.6	5.9	4.5-22.4	9.4
壳斗科 Fagaceae	青冈栎 <i>Cyclobalanopsis glauca</i>	A	10	35	4.0-6.5	5.2	9.6-20.3	13.5
玄参科 Scrophulariaceae	毛泡桐 <i>Paulownia tomentosa</i>	A	-	17	7.3-16.5	13.2	6.7-68.2	15.6
杉科 Taxodiaceae	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	A	12	13	6.2-8.5	7.2	3.5-6.5	5.3
悬铃木科 Platanaceae	二球悬铃木 <i>Platanus × acerifolia</i>	A	25	4	20.5-24.6	22.6	28.3-33.0	29.0
楝科 Meliaceae	苦楝 <i>Melia azedarach</i>	A	-	3	3.5-4.8	4.1	6.8-9.5	7.8
梧桐科 Sterculiaceae	梧桐 <i>Firmiana platanifolia</i>	A	10	3	12.2-15.1	13.5	11.7-17.3	14.2

¹⁾ A: 乔木 Arbor; S: 灌木 Shrub.

²⁾ -: 不详 Unclear.

2.3 木本植物不同部位重金属的分布特征

湖北铜绿山古铜矿遗址区木本植物不同部位 Cu、Pb 和 Cd 含量的分析结果见表 3。由表 3 可以看出: 生长在铜绿山古铜矿遗址上的木本植物地上部和地下部均以 Cu 含量最高、Cd 含量最低, 与这 3 种元素在植物根际土壤中含量的高低基本一致。通常情

况下, 在体内重金属含量达到临界值时植物会出现中毒症状, 植物体内 Cu、Pb 和 Cd 的临界值分别为 40、10 和 3 mg · kg⁻¹^[18]。通过比较可见: 青冈栎、毛泡桐和杉木体内 Cu、Pb 和 Cd 的总含量均低于中毒临界值, 这 3 个树种地上部均未检出 Pb 和 Cd; 意杨地上部也未检出 Pb 和 Cd, 其体内 Pb 和 Cd 的总含量均低

于中毒临界值;二球悬铃木、构树、樟树和夹竹桃体内 Cd 总含量均低于中毒临界值;而其他树种体内 Cu、Pb 和 Cd 的总含量均远高于中毒临界值。

从地上部看,苦楝中 Cu 含量最高,达到 $126.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,桂花、二球悬铃木、构树、刺槐和法国冬青 Cu 含量次之,为 $106.30 \sim 113.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均值为 $109.47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;二球悬铃木、构树和夹竹桃中 Pb 含量较高,分别为 110.50 、 116.00 和 $64.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;法国冬青中 Cd 含量最高,为 $17.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,梧桐、刺槐和苦楝 Cd 含量次之,分别为 7.28 、 5.58 和 $5.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;此外,在意杨、青冈栎、毛泡桐和杉木的地上部未检出 Pb 和 Cd。从地下部看,Cu 含量最高的

是梧桐、最低的是杉木和夹竹桃,前者的 Cu 含量是后者的 319.4 倍;Pb 含量最高的是女贞、最低的是刺槐,前者是后者的 206.0 倍,在青冈栎地下部未检出 Pb;Cd 含量最高的是苦楝、最低的是意杨,前者是后者的 24.9 倍,在夹竹桃、青冈栎和杉木地下部未检出 Cd。从全株总含量看,梧桐、苦楝和女贞全株 Cu 总含量较高,分别为 972.25 、 684.40 和 $660.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;二球悬铃木、构树和女贞全株 Pb 总含量较高,分别为 119.90 、 117.40 和 $95.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;法国冬青和苦楝全株 Cd 总含量较高,分别为 20.90 和 $16.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;此外,青冈栎全株不含 Pb 和 Cd,杉木全株不含 Cd。

表 3 湖北铜绿山古铜矿遗址区木本植物不同部位 Cu、Pb 和 Cd 含量¹⁾

Table 3 Contents of Cu, Pb and Cd in different parts of woody plants growing at ancient copper mine site in Tonglushan of Hubei Province¹⁾

种类 Species	地上部重金属含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Heavy metal content in above-ground part			地下部重金属含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Heavy metal content in under-ground part			全株重金属总含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Total content of heavy metal in whole plant		
	Cu	Pb	Cd	Cu	Pb	Cd	Cu	Pb	Cd
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	106.34	22.61	5.58	3.09	0.30	1.64	109.43	22.91	7.22
夹竹桃 <i>Nerium indicum</i>	63.24	64.40	1.88	2.78	0.75	-	66.02	65.15	1.88
樟树 <i>Cinnamomum camphora</i>	97.20	22.70	0.46	49.50	0.58	1.60	146.70	23.28	2.06
意杨 <i>Populus × euramericana</i> 'I-214'	2.04	-	-	74.50	1.60	0.45	76.54	1.60	0.45
女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	92.70	33.30	1.87	568.00	61.80	6.60	660.70	95.10	8.47
桂花 <i>Osmanthus fragrans</i>	113.90	29.40	3.60	14.00	1.60	1.90	127.90	31.00	5.50
法国冬青 <i>Viburnum odoratissimum</i> var. <i>awabuki</i>	106.30	12.90	17.00	196.00	10.20	3.90	302.30	23.10	20.90
构树 <i>Broussonetia papyrifera</i>	109.50	116.00	0.75	201.70	1.40	1.20	311.20	117.40	1.95
青冈栎 <i>Cyclobalanopsis glauca</i>	3.96	-	-	5.30	-	-	9.26	-	-
毛泡桐 <i>Paulownia tomentosa</i>	1.71	-	-	18.10	4.90	1.40	19.81	4.90	1.40
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	1.41	-	-	2.78	0.55	-	4.19	0.55	-
二球悬铃木 <i>Platanus × acerifolia</i>	111.30	110.50	0.82	63.10	9.40	1.50	174.40	119.90	2.32
苦楝 <i>Melia azedarach</i>	126.40	3.12	5.33	558.00	6.00	11.20	684.40	9.12	16.53
梧桐 <i>Firmiana platanifolia</i>	84.25	11.83	7.28	888.00	6.40	1.60	972.25	18.23	7.88

¹⁾ -: 未检出 Undetected.

2.4 木本植物不同部位对重金属的富集特征

湖北铜绿山古铜矿遗址区木本植物不同部位对 Cu、Pb 和 Cd 的富集系数见表 4。从地上部看,各树种对 Cd 的富集系数普遍较高,法国冬青、梧桐、刺槐、苦楝和桂花地上部对 Cd 的富集系数均大于 1,依次为 4.620、2.092、1.358、1.300 和 1.290;构树和二球悬铃木地上部对 Pb 的富集系数相对较高,分别为 0.946 和 0.502;各树种地上部对 Cu 的富集系数普遍较低,最高的为樟树,仅 0.231;此外,意杨、青冈栎、毛泡桐和杉木地上部对 Pb 和 Cd 的富集系数均为 0.000。从地下部看,各树种对 Cd 的富集系数同样较高,其中,

女贞、法国冬青和苦楝地下部对 Cd 的富集系数均大于 1,而青冈栎地下部对 Pb 和 Cd 的富集系数以及夹竹桃和杉木地下部对 Cd 的富集系数均为 0.000。表明各树种地上部和地下部对 Cu、Pb 和 Cd 的富集系数差异明显。

从综合富集系数可见:法国冬青地上部的综合富集系数最高,达到 5.703;梧桐、桂花、刺槐、苦楝和构树地上部的综合富集系数也较高,分别为 2.261、1.621、1.572、1.367 和 1.149,这些树种中仅苦楝地上部综合富集系数小于地下部,其他几个树种地上部的综合富集系数均明显大于地下部分。对地上部和

地下部综合富集系数的平均值进行比较,法国冬青的平均综合富集系数最高,达到3.492;苦楝、女贞、梧桐和桂花平均综合富集系数次之,分别为2.167、1.872、

1.435和1.159。结果表明:铜绿山古铜矿遗址区木本植物不仅对土壤中重金属具有较强的耐受性,部分树种还对Cu、Cd和Pb表现出较强的综合富集能力。

表4 湖北铜绿山古铜矿遗址区木本植物根际土壤中Cu、Pb和Cd含量及不同部位对Cu、Pb和Cd的富集系数

Table 4 Contents of Cu, Pb and Cd in rhizosphere soil and enrichment coefficients of Cu, Pb and Cd in different parts of woody plants growing at ancient copper mine site in Tonglushan of Hubei Province

种类 Species	土壤中重金属含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Content of heavy metals in soil			地上部富集系数 Enrichment coefficient of above-ground part			地下部富集系数 Enrichment coefficient of under-ground part			综合富集系数 ¹⁾ Complex enrichment coefficient ¹⁾	
	Cu	Pb	Cd	Cu	Pb	Cd	Cu	Pb	Cd	A	U
	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	2 405.99	103.62	4.11	0.044	0.170	1.358	0.001	0.003	0.399	1.572
夹竹桃 <i>Nerium indicum</i>	1 679.95	132.90	4.45	0.038	0.485	0.422	0.002	0.006	0.000	0.945	0.008
樟树 <i>Cinnamomum camphora</i>	420.32	118.04	2.51	0.231	0.192	0.183	0.118	0.005	0.638	0.606	0.761
意杨 <i>Populus × euramericana</i> 'I-214'	2 549.56	64.59	2.50	0.001	0.000	0.000	0.030	0.025	0.180	0.001	0.235
女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	2 768.24	125.20	3.05	0.034	0.266	0.613	0.205	0.494	2.164	0.880	2.863
桂花 <i>Osmanthus fragrans</i>	1 936.33	108.30	2.79	0.059	0.272	1.290	0.001	0.015	0.681	1.621	0.697
法国冬青 <i>Viburnum odoratissimum</i> var. <i>awabuki</i>	1 864.12	88.34	3.68	0.057	0.146	4.620	0.105	0.116	1.060	5.703	1.281
构树 <i>Broussonetia papyrifera</i>	3 805.90	122.67	4.31	0.029	0.946	0.174	0.053	0.011	0.278	1.149	0.342
青冈栎 <i>Cyclobalanopsis glauca</i>	1 869.54	126.90	3.24	0.002	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.002	0.003
毛泡桐 <i>Paulownia tomentosa</i>	1 588.74	280.85	6.39	0.001	0.000	0.000	0.011	0.017	0.219	0.001	0.247
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	2 173.68	257.35	3.14	0.001	0.000	0.000	0.001	0.002	0.000	0.001	0.003
二球悬铃木 <i>Platanus × acerifolia</i>	2 968.60	220.30	3.54	0.038	0.502	0.232	0.021	0.043	0.424	0.772	0.487
苦楝 <i>Melia azedarach</i>	3 658.55	97.32	4.07	0.035	0.032	1.300	0.153	0.062	2.752	1.367	2.967
梧桐 <i>Firmiana platanifolia</i>	14 644.63	72.51	3.48	0.006	0.163	2.092	0.061	0.088	0.460	2.261	0.609

¹⁾ A: 地上部 Above-ground part; U: 地下部 Under-ground part.

3 讨论和结论

3.1 铜绿山古铜矿遗址区土壤重金属污染状况分析

在铜绿山古铜矿遗址上堆积着大量的古冶炼渣,重金属含量极高。研究结果表明:在该炼渣堆上木本植物根际土壤受多种重金属元素(Cu、Cd、Pb、Mn和Zn)复合污染,其中Cu、Pb和Cd为主要污染元素,平均含量分别达到3 166.73、3.66和137.06 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,污染指数依次为103.15、21.53和5.13,属重度污染。与束文胜等^[13]对该遗址的研究结果相比,作者测定的土壤中Cu和Cd含量相对较低而Pb含量却相对较高,产生这种差异的主要原因与供试植物生活型的差异有关。本研究以木本植物为研究对象,树木为深根系植物,选取0~60 cm土壤剖面的混合样进行测试分析较为合适;而束文胜等^[13]主要研究的是草本植物,所取土样位于0~20 cm剖面。铜矿古代冶炼渣呈薄片状分布在地表10~15 cm土层上,因此土壤取样深度差异对测试结果的影响较大。关于木本植物

与根际土壤Cu和Cd含量减少之间的因果关系则有待进一步研究证实。

3.2 铜绿山古铜矿遗址区木本植物的种类构成

本研究共调查记录了铜绿山古铜矿遗址区木本植物13科14属14种,包括女贞、刺槐、苦楝、夹竹桃、二球悬铃木、意杨、樟树、法国冬青、桂花、构树、青冈栎、毛泡桐、杉木和梧桐。其中,刺槐、构树、毛泡桐、苦楝和女贞等树种均为自然定居,其余树种为人工栽植;树龄最短仅为4 a(意杨),树龄最长的为25 a(二球悬铃木),其他树种的树龄为10~16 a。这些树木普遍长势较好,能够适应古铜矿遗址区重金属复合污染的土壤环境,对土壤中的Cu、Cd和Pb污染等具有较强的耐受性,表现出较强的重金属富集作用和生态适应性。

3.3 铜绿山古铜矿遗址区木本植物的生态修复意义

从树木生长状况来看,在本研究涉及的14种木本植物中,树龄最长的二球悬铃木的株高和胸径分别为22.6 m和29.0 cm,而桂花、法国冬青、构树、杉木和梧桐等树种的株高和胸径也分别为3.9~13.5 m

和 5.3 ~ 14.2 cm, 树龄最短的意杨的株高和胸径则分别达到 6.6 m 和 3.8 cm, 生物量较大。从重金属富集特性看, 法国冬青、梧桐、刺槐、苦楝和桂花等树种的地上部对 Cd 的富集系数较高; 构树和二球悬铃木地上部对 Pb 的富集系数较高; 法国冬青、梧桐、桂花、刺槐、苦楝和构树地上部对 Cu、Pb 和 Cd 的综合富集系数较高, 说明这些树种对 Cu、Pb 和 Cd 具有较强的富集能力。从树木构成来看, 既有樟树、苦楝、女贞和桂花等乡土树种, 又有意杨、二球悬铃木和法国冬青等外来树种; 既有桂花、法国冬青和夹竹桃等绿化植物, 又有毛泡桐、意杨和梧桐等速生经济树种, 能够适应古铜矿遗址区的重金属复合污染土壤环境。因而, 在 Pb 污染区域可选择栽植二球悬铃木和构树, 在 Cd 污染区域可选择栽植法国冬青、梧桐、刺槐和苦楝等树种; 而对于 Cu、Pb 和 Cd 等重金属复合污染区域, 适宜栽植法国冬青、苦楝、女贞、梧桐、桂花和刺槐等树种。

值得注意的是, 虽然这些树种的地上部对 Cu、Pb 和 Cd 的积累量远不如超积累植物, 例如, Cu 含量最高的苦楝仅为 $126.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Pb 含量最高的构树仅为 $116.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Cd 含量最高的法国冬青仅为 $17.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 但对于生物量为草本植物的几十乃至数百倍的成年木本植物而言, 所积累的重金属总量远远高于一般超富集草本植物, 因此, 木本植物对矿业废弃地的植被恢复和景观美化具有重要的生态意义。

参考文献:

- [1] KUMAR P B A N, DUSHENKOV V, MOTTO H, et al. Phytoextraction; the use of plant to remove heavy metals from soils[J]. *Environmental Science and Technology*, 1995, 29: 1232-1238.
- [2] EBBS S, LAN I, AHNER B, et al. Phytochelatin synthesis is not responsible for Cd tolerance in the Zn/Cd hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* (J. & C. Presl)[J]. *Planta*, 2002, 214: 635-640.
- [3] KÜPPER H, GÖTZ B, MIJOVILOVICH A, et al. Complexation and toxicity of copper in higher plants. I. Characterization of copper accumulation, speciation, and toxicity in *Crassula helmsii* as a new copper accumulator[J]. *Plant Physiology*, 2009, 151: 702-714.
- [4] KRÄMER U. Metal hyperaccumulation in plants[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2010, 61: 517-534.
- [5] KACHENKO A G, SINGH B, BHATIA N. The role of low molecular weight ligands in nickel hyperaccumulation in *Hybanthus floribundus* subspecies *floribundus* [J]. *Functional Plant Biology*, 2010, 37: 1143-1150.
- [6] CASTILLO O S, DASGUPTA-SCHUBERT N, ALVARADO C J, et al. The effect of the symbiosis between *Tagetes erecta* L. (marigold) and *Glomus intraradices* in the uptake of copper (II) and its implications for phytoremediation[J]. *New Biotechnology*, 2011, 29 (1): 156-164.
- [7] De SOUZA COSTA E T, GUIHERME L R, De MELO E E, et al. Assessing the tolerance of castor bean to Cd and Pb for phytoremediation purposes [J]. *Biological Trace Element Research*, 2012, 145: 93-100.
- [8] BRYAN G W, LANGSTON W J. Bioavailability, accumulation and effects of heavy metals in sediments with special reference to United Kingdom estuaries; a review[J]. *Environmental Pollution*, 1992, 76 (2): 89-131.
- [9] DENG H, LI M S, YANG S X. Manganese uptake and accumulation in a woody hyperaccumulator, *Schima superba* [J]. *Plant, Soil and Environment*, 2008, 54(10): 441-446.
- [10] PAULSON M, BARDOS P, HARMSEN J, et al. The practical use of short rotation coppice in land restoration[J]. *Land Contamination and Reclamation*, 2003, 11: 323-338.
- [11] STRYCHARZ S, NEWMAN L. Use of native plants for remediation trichloroethylene: I. Deciduous trees[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2009, 11: 150-170.
- [12] 栾以玲, 姜志林, 吴永刚. 栖霞山矿区植物对重金属元素富集能力的探讨[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2008, 32 (6): 69-72.
- [13] 束文胜, 杨开颜, 张志权, 等. 湖北铜绿山古铜矿冶炼渣植被与优势植物的重金属含量研究[J]. *应用与环境生物学报*, 2001, 7(1): 7-12.
- [14] 武汉化工学院. 铜绿山铜铁矿深部开采项目环境影响报告书[R]. [出版地不详]: 武汉化工学院, 2005.
- [15] 郑进, 康薇. 湖北铜绿山古铜矿野生蓖麻重金属含量研究[J]. *黄石理工学院学报*, 2009, 25(1): 36-40.
- [16] 中国环境监测站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 25-40.
- [17] 罗亚平, 吴晓葵, 李明顺, 等. 桂北锰矿废弃地主要植物种类调查及土壤重金属污染评价[J]. *生态环境*, 2007, 16(4): 1149-1153.
- [18] 唐世荣. 污染环境植物修复的原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 40-45.

(责任编辑: 张明霞)