

江民锦,胡佳琴,司卫静. 江西德兴铜矿区内铜富集植物的调查及筛选[J]. 江苏农业科学,2013,41(7):357-361.

江西德兴铜矿区内铜富集植物的调查及筛选

江民锦¹, 胡佳琴², 司卫静²

(1. 江西财经大学旅游与城市管理学院, 江西南昌 330032; 2. 江西财经大学艺术学院, 江西南昌 330032)

摘要: 为了解江西德兴铜矿矿区土壤的 Cu 污染状况, 检测矿区优势植物中的重金属 Cu 含量, 筛选 Cu 富集植物, 探讨植物修复铜污染的可行性, 在矿区、尾矿堆积区周边及大圩河两岸调查植物 140 余种, 主要记录了 15 种植物。根据植物对矿区内重金属污染的富集作用和植物对铜的转运系数情况可以看出, 所筛选出的铜富集植物的优势物种大多是杂草, 分属 15 属 9 科, 主要为问荆 (*Equisetum arvense*)、博落回 (*Macleaya cordata*)、葛藤 (*Pueraria lobata*)、短穗铁苋菜 (*Acalypha brachystachya* Hornem) 和香蒲 (*Typha orientalis*)。其中, 问荆因为生长在矿区内, 所以对铜的富集能力较强, 而由于其植株矮小, 生物量较小, 所转运的铜含量相对较少, 但是由于其耐铜能力较强, 因此仍然可以作为铜污染修复的先锋植物。

关键词: 铜富集植物; 植被重建; 优势物种

中图分类号: X173; X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2013)07-0357-05

江西省德兴市位于亚热带湿润季风气候区, 地处 28°38'~29°16'N、117°22'~118°23'E, 是我国最大的铜矿所在地, 也是全国有色金属工业的重要生产基地, 同时具有亚洲第一大尾矿坝。自 1958 年对其进行露天开采以来, 已造成 5.76 km 的裸地和 207 km 的尾矿堆积区, 同时该地区每年还排放大量的含铜、铁等多种重金属离子的酸性废水, 仅 2002 年的铜矿工业用水总量就高达 11 659.31 万 t, 造成了下游大圩河、乐安河, 甚至鄱阳湖湖水的严重污染及生态的破坏, 也严重影响了沿河两岸人们的身心健康^[1]。铜是污染环境的主要重金属之一, 当其累积含量超过临界值时, 就会对土壤系统产生毒性。目前, 用植物修复重金属污染的环境是最为理想的方法, 因此探求或发现具有一定耐重金属污染或富集重金属的新型植物材料, 用于被重金属铜等污染土壤的修复和改良, 可以有效减轻因铜等重金属污染而造成的农业生态危机给当地带来的压力, 同时也将带来巨大的社会和经济效益。

1 材料与方法

2011 年夏季, 笔者所在的课题组成员对德兴铜矿矿区和尾矿坝周围的植被、土壤进行了一次较为详尽的调查, 并将试验所用的铜尾矿土壤、植物样品采集并带回实验室进行化学处理及样品分析。以期通过试验研究, 为解决德兴铜矿铜污染的治理提供具有可操作性、可应用性的铜富集植物信息。

1.1 植物种类调查与植物样品的采集、分析

由于铜矿核心开采区经长期露天开采, 已挖入地下百余米深, 无任何植物生长, 因此采集地点侧重调查铜矿脉地表露头区、废弃采坑口、矿洞塌陷区和铜矿石矿渣散落区等铜含量较高的生境。在这些生境的植物分布区内设置 20 个 2 m ×

2 m 的样方, 记录样方的生境特点和植物群落的种类组成。调查后, 采样的区域物种数由多到少依次为: 露天矿 (6 种) > 新尾砂库坝 (4 种) > 露天矿周边 (3 种) > 老尾砂库坝 (2 种)。目测估计植物的多度并分级; 采集优势植物和其对应的根际区土壤, 分别装入塑料样品袋中用于室内化学分析。

金属离子的测定采取 HNO₃-HClO₄ 湿法消化法: 先将植物幼苗根系用蒸馏水冲洗干净, 再在 20 mol/L 乙二胺四乙酸二钠 (EDTA-Na₂) 溶液中浸泡交换 30 min, 以除去植物根系表面黏附的金属离子; 然后将植物材料分成地上部 (叶、茎)、地下部 (根和根茎, 文后简称根), 用去离子水冲洗干净后用吸水纸吸干, 烘干至恒重后称量。将干样用研钵磨碎后准确称取 0.1~0.2 g, 用 HNO₃-HClO₄ (体积比 87:13) 混合液消煮提取, 消化至近干时加稀硝酸溶解, 用体积分数为 5% 的硝酸定容至 25 mL, 用 AAS990 火焰原子分光光度计测定植物材料中铜的含量^[1-2]。

1.2 采样区的立地条件与土壤样品分析

土壤重金属污染一直是环境污染的问题之一, 而且土壤中的重金属污染具有严重性、长期性和广泛性的特点^[3-4]。常规的一些物理化学方法因费用过高、对土壤性质造成破坏等一系列问题而难以被广泛使用, 而植物修复则为治理重金属污染带来了新的希望^[5-6]。笔者通过调查露天矿、新尾砂库坝、老尾砂库坝周围的土壤环境发现, 矿区的铜污染极为严重, 土壤中铜含量平均为 184.73 mg/kg, 约是正常值的 10 倍, 铜矿矿床附近土壤中的铜含量明显比其他点高, 达 2 000 mg/kg, 而铜在正常环境中的浓度一般较低, 在非污染区土壤中为 10~30 mg/kg。

将取回的优势植物对应根际区的土壤自然风干, 磨碎, 过 100 目尼龙筛, 过筛后的样品经 HNO₃ 预处理以除去碳酸盐或有机质, 再用 HNO₃-HClO₄ (体积比 87:13) 混合液进行消煮提取, 用 AAS990 火焰原子分光光度计测定植物材料中铜的含量。

1.3 数据处理与作图

应用 Excel 和 SPSS 13.0 软件对试验数据进行统计和方

收稿日期: 2012-11-30

基金项目: 国家大学生创新性实验计划 (编号: 111042149)。

作者简介: 江民锦 (1964—), 男, 江西景德镇人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 从事森林生态与环境经济方面的研究。E-mail: jmj6408@163.com。

差分析 (ANOVA), 并采用邓肯氏新复极差法对数据进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 铜尾矿周边的植物调查

笔者在德兴铜矿矿区、尾矿堆积区周边及大圹河两岸调查并了解到的植物约有 140 种, 同时进行了植物种类组成、分布及其优势度的调查, 常见的植物见表 1。

表 1 铜尾矿周边的主要植物

中文名	拉丁名	科	中文名	拉丁名	科	中文名	拉丁名	科
芦苇	<i>Phragmites australis</i>	禾本科	崖豆藤属	<i>Millettia</i> Wight et Arn.	豆科	梔子花	<i>Gardenia jasminoides</i>	茜草科
稗	<i>Echinochloa crusgalli</i> (L.) Beauv.	禾本科	葛藤	<i>Pueraria lobata</i>	豆科	无患子	<i>Sapindus</i>	无患子科
巴茅根	<i>Miscanthus floridulus</i>	禾本科	短穗铁苋菜	<i>Acalypha brachystachya</i> Hornem	豆科	楝树	<i>Melia azedarach</i>	楝科
大画眉草	<i>Eragrostis cilianensis</i> (All.) Link ex Vignolo – Lutati	禾本科	胡枝子	<i>Lespedeza bicolor</i> Turcz.	豆科	龙葵	<i>Solanum nigrum</i> L.	茄科
水稻	<i>Oryza sativa</i>	禾本科	白背叶	<i>Mallotus apelta</i> (Lour.) Muell. Arg.	大戟科	木通	<i>Akebia quinata</i> (Thunb.) Decne.	木通科
牛筋草	<i>Eleusine indica</i>	禾本科	青灰叶下珠	<i>Phyllanthus glaucus</i> Wall.	大戟科	芒萁	<i>Dicranopteris dichotoma</i> (Thunb.) Berhn.	里白科
金色狗尾草	<i>Setaria glauca</i> (L.) Beauv.	禾本科	乌柏	<i>Sapium sebiferum</i>	大戟科	山矾	<i>Symplocos caudata</i>	山矾科
千里光	<i>Senecio scandens</i>	菊科	油桐	<i>Vernicia fordii</i>	大戟科	女贞	<i>Ligustrum lucidum</i> Ait.	木犀科
茵陈蒿	<i>Artemisia capillaris</i>	菊科	三角槭	<i>Acer buergerianum</i> Miq.	槭树科	油茶	<i>Camellia oleifera</i> Abel.	山茶科
野艾蒿	<i>Artemisia lavandulaefolia</i>	菊科	樟叶槭	<i>Acer albopurpurascens</i> Hayata	槭树科	麻栎	<i>Quercus acutissima</i> Carruth.	壳斗科
鬼针草	<i>Bidens pilosa</i>	菊科	水竹	<i>Cyperus alternifolius</i>	莎草科	杉木	<i>Cunninghamia lanceolata</i>	杉科
飞蓬	<i>Erigeron acer</i> L.	菊科	莎草属	<i>Cyperus</i>	莎草科	土荆芥	<i>Chenopodium ambrosioides</i> L.	藜科
南酸枣	<i>Choerospondias axillaris</i> (Roxb.) Burt et Hill	漆树科	枸骨	<i>Ilex cornuta</i>	冬青科	香蒲	<i>Typha orientalis</i>	香蒲科
盐肤木	<i>Rhus chinensis</i>	漆树科	大叶冬青	<i>Ilex latifolia</i> Thunb.	冬青科	博落回	<i>Macleaya cordata</i>	罂粟科
樟	<i>Cinnamomum camphora</i> (L.) presl	樟科	马尾松	<i>Pinus massoniana</i>	松科	瓜馥木	<i>Fissistigma oldhamii</i>	番荔枝科
大叶新木姜子	<i>Neolitsea levinei</i> Merr.	樟科	黑松	<i>Pinus thunbergii</i> Parl.	松科	石楠	<i>Photinia serrulata</i>	蔷薇科
紫楠	<i>Phoebe sheareri</i> (Hemsl.) Gamble	樟科	问荆	<i>Equisetum arvense</i>	木贼科	狗脊	<i>Woodwardia japonica</i>	乌毛蕨科
构树	<i>Broussonetia papyrifera</i> (Linn.) L'Hér. ex Vent.	桑科	观光木	<i>Tsoongiodendron odorum</i>	木兰科	杜仲	<i>Eucommia ulmoides</i>	杜仲科
木荷	<i>Schima superba</i>	山茶科						
止血马唐	<i>Digitaria ischaemum</i> (Schreb.) Schreb. ex Muhl.	禾本科						

目前, 针对金属型植物的野外筛选已逐渐形成了 3 点经验: 生境筛查、群落筛查、种群筛查^[1-7]。笔者的调查主要综合了这 3 种经验, 在原矿区内采集植物样品, 矿区各个不同的位置所生长的植物各有差异, 就说明有一定的植物群落适合这种生长环境。经过调查, 笔者认为禾本科的稗、水稻, 香蒲科的香蒲, 豆科的短穗铁苋菜等可用于水体铜污染的植物修复, 其中水稻要注意收割后的工作, 防止牲畜误食; 木贼科的问荆, 罂粟科的博落回, 禾本科的巴茅根、大画眉草、金色狗尾草, 桑科的构树等可用于土壤铜污染的植物修复。

2.2 植物种类组成及群落特征

本研究采取在德兴铜尾矿矿库上进行大量调查的方法, 筛选出的铜积累植物或对铜耐性较强的植物多数是野生杂草, 较容易适应尾矿库恶劣的环境条件。筛选重金属富集植物是进行植物修复工作的前提, 众多学者对重金属富集植物进行了筛选研究, 并且取得了较好的成果。Lasat 等把铜含量超过 10 004 mg/kg 的植物定义为铜超富集植物^[8]。Monni 等

以株高为指标判断植物在重金属污染条件下的受害程度^[9]。从已报道的超积累植物来看, 杂草植物用于植物修复则更有潜力。

通过对德兴铜矿重金属含量较高的矿区及其尾矿库上生长的植物进行调查, 笔者共筛选出了 15 种在含重金属矿区上生长旺盛和分布频率高的植物, 主要有禾本科 (Poaceae) 植物 5 种、菊科 (Asteraceae) 植物 2 种、豆科 (Leguminosae) 植物 2 种及其他科植物共计 15 种, 它们大多属于杂草, 具体见表 2。

尾矿和自然植被交界处有在散落尾矿矿砂上生长的植物。从表 2 可以看出, 在南方重金属矿区生长的植物以禾本科和菊科植物偏多, 可能由于禾本科和菊科植物的种子具有较强的传播能力和较广的适应性^[10-11]。这些植物能在德兴重金属矿区设的 20 个取样点中生长, 说明它们对环境中的铜具有较大的耐性, 可能由于这些植物大多是杂草, 具有广泛的适应性和顽强的生命力^[12]。由于杂草具有耐不良环境、生长迅速、繁殖能力强、生长条件改善后生物量急剧提高等特点,

表 2 德兴铜矿区植物样品种类

中文名称	拉丁文名称	科	属
稗	<i>Echinochloa crusgalli</i> (L.) Beauv.	禾本科	稗属
金色狗尾草	<i>Setaria glauca</i> (L.) Beauv.	禾本科	狗尾草属
巴茅根	<i>Rhizoma Miscanthi Sacchariflori</i>	禾本科	芒属
大画眉草	<i>Eragrostis cilianensis</i> (All.) Link ex Vignolo – Lutati	禾本科	画眉草属
水稻	<i>Oryza sativa</i>	禾本科	稻属
鬼针草	<i>Bidens pilosa</i>	菊科	鬼针草属
飞蓬	<i>Erigeron acer</i> L.	菊科	飞蓬属
葛藤	<i>Pueraria lobata</i>	豆科	葛属
短穗铁苋菜	<i>Acalypha brachystachya</i> Hornem	豆科	鸡眼草属
香蒲	<i>Typha orientalis</i>	香蒲科	香蒲属
博落回	<i>Macleaya cordata</i>	罂粟科	博落回属
问荆	<i>Equisetum arvense</i>	木贼科	木贼属
构树	<i>Broussonetia papyrifera</i> (Linn.) L'Hér. ex Vent.	桑科	构属
木荷	<i>Schima superba</i>	山茶科	木荷属
止血马唐	<i>Digitaria ischaemum</i> (Schreb.) Schreb. ex Muhl.	禾本科	马唐属

可以弥补现有修复植物的某些缺点。而且杂草具有某些栽培性状,在修复实践中容易管理,因此杂草对于植物修复来说是一类较理想的植物资源。

2.3 不同植物体内铜含量的测定与分析

笔者在德兴铜矿区、尾矿堆积区共采集各种植物 15 种,调查了植物的种类组成、分布及其优势度,并测定了植物体内铜含量。结果说明,在铜胁迫条件下,不同植物对铜的吸收积累特征存在明显差异。大部分植物地上部分铜含量均明显低于地下部分,不同植物对铜的吸收积累有较大的差异,特

别是从茎/根的铜含量比值看,波动较大,说明选取的植物对铜的吸收转运能力存在种间差异。

从图 1 可以看出,在 15 种植物中,水稻在限制铜从地下部分向地上部分转移方面表现最为明显,说明水稻对铜的耐性主要是通过限制铜向地上部分转移实现的。从博落回的地上、地下部分之间的铜转移过程可以看出,其铜转移率均比其他植物高,说明这种植物可能会采取将铜聚集到茎叶的适应策略来应付铜毒害。

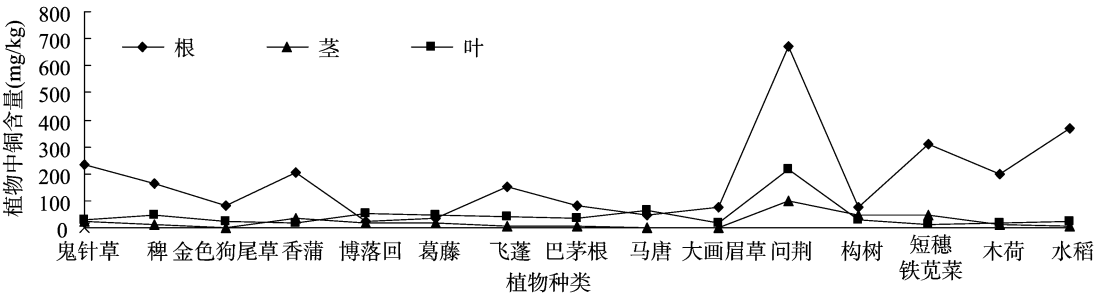


图1 植物体内重金属铜的含量

从图 1 中还可以看出,15 种植物地上部分的铜含量存在较大差异,其中叶中铜含量最高的为问荆,高达 213.34 mg/kg。15 种植物地下部分的铜含量也存在较大差异,其中根中铜含量也以问荆最高,达到 674.04 mg/kg;根中铜含量最低的为博落回,只有 21.03 mg/kg;15 种植物地下部分铜含量较多的几种植物排序为:问荆>水稻>短穗铁苋菜>鬼针草>香蒲,说明铜更容易在这些植物的根中积累,这与相关研究结果类似^[13]。但马唐、博落回、葛藤的根中铜含量就没有地上部分高,根茎中铜含量变化悬殊,说明不同植物对铜吸收的能力之间存在种间差异性。

2.4 植物中其他重金属的分布

不同植物体内重金属铅在不同部位的含量分布见图 2。由图 2 可以看出,对铅富集效果较好的是问荆、金色狗尾草,其中问荆对铅的吸收尤为强烈,其根中的铅含量大于叶、茎。其他植物根、茎、叶中铅的含量差异不大。

由图 3 可以看出,植物体内重金属锌含量最高的是鬼针草。通过分析植物对锌的吸收可知,叶的吸收作用比根的大,其中植物鬼针草的叶中锌含量最高。其他 14 种植物中根、茎、叶锌含量最高的分别为:问荆的根部锌含量最高,为 103.85 mg/kg;水稻的茎部锌含量最高,为 62.23 mg/kg;金色狗尾草的叶部锌含量最高,为 174.13 mg/kg。

由植物体内不同部位的镉含量(图 4)看出:对镉富集效果最好的作用是问荆。各植物间不同部位对镉的吸收量差异不大,较为稳定,仅问荆的吸收量较为突出。因此只能以植物各部位的镉含量来作比较,其中问荆根的镉含量最高,为 13.46 mg/kg;构树茎的镉含量最高,为 2.46 mg/kg;金色狗尾草叶的镉含量最高,为 2.88 mg/kg。

综合分析可以看出,在 15 种植物中,植物地下部分铅含量超过 100 mg/kg 的植物只有问荆,达到 659.62 mg/kg。从矿区植物对几种重金属的吸收来看,以对铜的吸收最高,植物

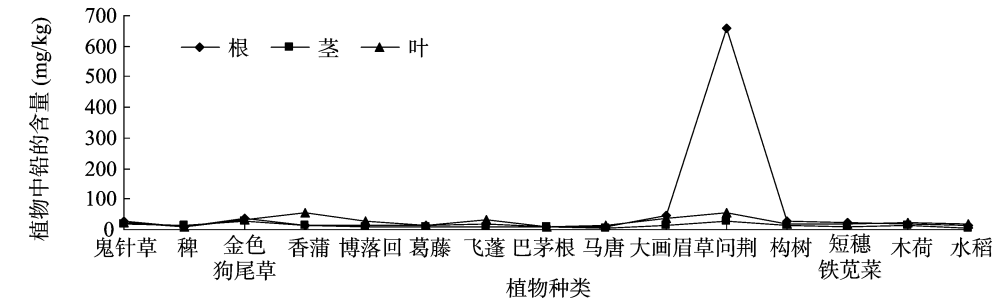


图2 植物体内重金属铅的含量

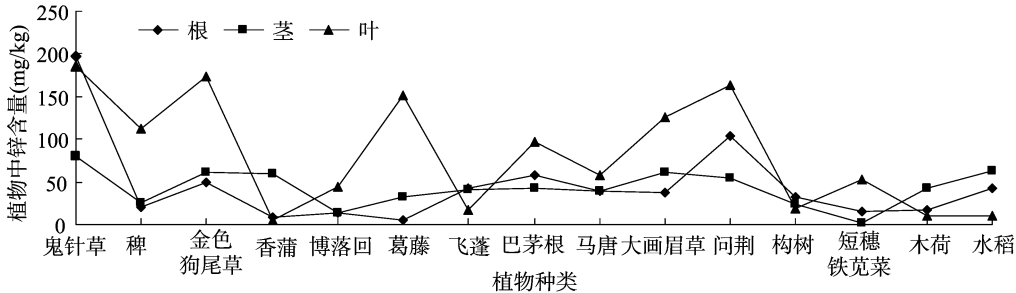


图3 植物体内重金属锌的含量

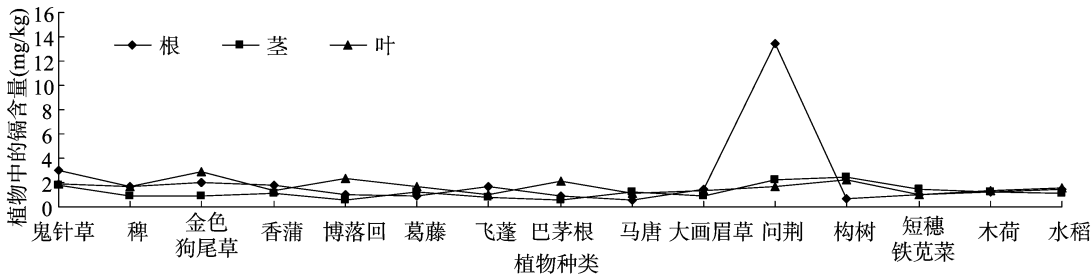


图4 植物体内重金属镉的含量

地下部铜的平均含量为 181.47 mg/kg,植物地上部铜的平均含量为 33.28 mg/kg。从这些数据可以看出,笔者所筛选出的优势物种主要为问荆、水稻、短穗铁苋菜、香蒲,其中问荆的地上部叶、地下部根中的铜含量是所有植物中最高的,分别为 213.34、674.04 mg/kg。这些植物不仅对重金属铜有着很好的富集作用,对其他重金属也具有良好的富集作用。由于土壤里含有很多大量元素与微量元素,重金属的污染会破坏植物对生长所需物质的吸收,因此研究这些植物中重金属的含量是必要的。

3 讨论

按照富集植物的标准,吸收系数和转运系数大的植物是能够修复重金属污染土壤的。但实际上,如果在约定时期内植物地上部分的生物量小,植物从地下部分向地上部分实际转运的总量较小的情况下,植物带走的污染重金属就少。此外,如果植物的吸收转运系数较小,就不能达到超富集植物的标准。而如果某种植物的生物量较大,带走的污染重金属就多,该植物对重金属的富集能力就较强,就可用于污染土壤的修复。因此,富集植物的筛选标准除了考虑植物的吸收转运能力外,还要考虑植物的生长量和生物量。

重金属在植物体内的分布除了与重金属本身的活动差异

有关外,还与各种植物的适应(对重金属的耐性)机制有关。在植物对重金属的适应机制中,植物可能是通过根部的一定结构或生理特性限制有害重金属离子由根部向地上部转移的。因此,需要保持地上部分较低的重金属含量,使植物地上部分具有较高的生理活性,或是采取将有害重金属积累到植物上容易脱落的部分,通过这些部分的脱落,使有害重金属离开植物体^[14]。在筛选的 15 种自然定居植物中,大部分植物采用了限制地下部分的重金属向地上部分转移的策略,但是不同植物之间的转移能力有差异。由表 3 可以看出,这些植物中对铜的运转系数最高的是博落回;在对铅的运转系数分析中,茎/根最高的为巴茅根,叶/根最高的为香蒲;在对锌的运转系数分析中,茎/根、叶/根部分最高的分别为香蒲、葛藤;而植物对镉转运系数最高的为构树。

从表 3 中的转运系数还可以看出,在铜的转运系数中除博落回、葛藤、马唐外,其他植物的转运系数均小于 1,其中博落回的叶/根转运系数最高,达到了 2.459。因为转运系数反映了植物对铜从地下部分向地上部分转移的能力,所以可以认为博落回、葛藤、马唐对铜的转运能力要强于其他植物,达到铜富集植物的标准。因此,可以利用这 3 种植物进行铜污染土壤的修复。虽然其他植物铜的转运系数小于 1,未达到铜富集植物的标准,但它们在生长过程中都表现出了较强的

表 3 铜、铅、锌和镉等重金属离子转运系数

植物名称	铜的转运系数		铅的转运系数		锌的转运系数		镉的转运系数	
	茎/根	叶/根	茎/根	叶/根	茎/根	叶/根	茎/根	叶/根
鬼针草	0.089	0.117	0.793	0.855	0.404	0.932	0.592	0.650
稗	0.069	0.287	1.088	0.962	1.286	5.677	0.532	1.036
金色狗尾草	0.013	0.304	0.754	0.841	1.246	3.506	0.481	1.475
香蒲	0.166	0.083	1.026	4.128	7.530	0.631	0.636	0.709
博落回	0.771	2.459	0.866	2.285	1.087	3.485	0.507	2.340
葛藤	0.570	1.470	0.542	1.061	6.537	30.370	1.380	1.930
飞蓬	0.026	0.261	0.416	1.584	0.946	0.399	0.479	0.577
巴茅根	0.061	0.409	1.414	1.201	0.715	1.655	0.611	2.231
马唐	0.011	1.339	0.432	1.222	0.969	1.454	2.061	1.938
大画眉草	0.032	0.266	0.261	0.787	1.606	3.290	0.631	0.980
问荆	0.147	0.317	0.043	0.080	0.531	1.574	0.164	0.125
构树	0.576	0.416	0.571	0.725	0.703	0.590	3.830	3.524
短穗铁苋菜	0.144	0.042	0.439	0.964	0.167	3.623	1.522	1.075
木荷	0.071	0.102	0.643	1.076	2.398	0.594	0.941	1.034
水稻	0.023	0.056	0.452	1.565	1.449	0.250	0.742	1.056

注:铜的转运系数 = 地上部分的铜含量/地下部分的铜含量。

耐铜能力,因此也可将这些植物种植于受铜污染的尾矿库中,或用于修复受铜污染较轻的土壤。

4 结论

笔者在江西德兴铜矿区采集的植物分布 9 科 15 属,所筛选出对重金属铜富集最好的植物是问荆,它是多年生草本植物,属于木贼科木贼属。从植物各部位富集铜的含量来分析,根部富集作用最好的植物有问荆、水稻、短穗铁苋菜、鬼针草等;茎部富集作用最好的植物有问荆、构树、短穗铁苋菜、香蒲等;叶部富集作用最好的植物是问荆、马唐、博落回等。研究发现,问荆和水稻的生物量相对比较大,而且能够耐受高浓度的铜污染,在一定时间内可带走较多的铜,完全可以应用在修复铜污染土壤的实际中。在采样中还发现,问荆在尾矿库中铜浓度极高的地方都能够良好生长,虽然其体内铜含量较高,但因其植株矮小、单株生物量低,所以其转运系数也较小,说明它们在吸收转运铜的能力方面没有其他植物强,因此单位面积植物的铜富集量较小,但它们的突出优势是耐铜能力较强;相反,香蒲、博落回、构树、葛藤这几种植物的抗性强、植物富集量大,可作为铜污染环境的修复植物,因此它们也可以栽培在受到铜污染的土壤中,通过定期收割来达到修复铜污染土壤的目的。

参考文献:

[1] 黄长干,张莉,余丽萍,等. 德兴铜矿铜污染状况调查及植物修复研究[J]. 江西农业大学学报,2004,26(4):629-632.
[2] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.
[3] 陈怀满. 土壤-植物系统中的重金属污染[M]. 北京:科学出版

社,1996.
[4] Adriano D C. Trace elements in the terrestrial environment[M]. New York:Springer-Verlag,1986.
[5] 姜理英,石伟勇,杨肖娥,等. 铜矿区超积累 Cu 植物的研究[J]. 应用生态学报,2002,13(7):906-908.
[6] Kumar P B A N,Dushenkov V,Motto H,et al. Phytoextraction;The use of plants to remove heavy metals from soils[J]. Environmental Science & Technology,1995,29(5):1232-1238.
[7] 张军,陈功锡,杨兵,等. 麻阳铜矿植被组成特征及优势种植物铜含量[J]. 生态学杂志,2010,29(12):2358-2364.
[8] Lasat M M,Fuhrmann M,Ebbs S D,et al. Phytoremediation of a radiocesium-contaminated soil:Evaluation of cesium-137 bioaccumulation in the shoots of three plant species[J]. Journal of Environmental Quality,1998,27(1):165-169.
[9] Monni S,Salemaa M,White C,et al. Copper resistance of *Calluna vulgaris* originating from the pollution gradient of a Cu-Ni smelter,in southwest Finland[J]. Environmental Pollution,2000,109(2):211-219.
[10] Gemmell R P. Colonization of industrial wasteland[M]. London:Edward Arnold,1977.
[11] Morel J L. Assessment of phytoavailability of trace elements in soils: Dossier: Soil, a sponge for pollutants[J]. Analysis,1997,25(9/10):70-72.
[12] 郭水良,李扬汉. 杂草的基本特点及其在丰富栽培地生物多样性中的作用[J]. 自然资源,1996(3):48-52.
[13] 赵立新. 杂草对重金属的生物积累特性的研究[J]. 环境保护科学,2004,30(5):43-45,55.
[14] 孙庆业,刘付程. 铜废铜矿尾矿理化性质的变化对植被重建的影响[J]. 农村生态环境,1998,14(1):21-23,60.