

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201404012

简敏菲,周雪玲,余厚平,等. 乐安河—鄱阳湖湿地植物群落特征及其优势植物对重金属 Cu、Pb、Cd 的富集[J]. 广西植物, 2015, 35(3):295-302
 Jian MF, Zhou XL, Yu HP, et al. Plant community characteristics and the enrichment of heavy metals copper, lead and cadmium in the dominant plant species grown in the wetland of Lean River and Poyang Lake[J]. *Guihaia*, 2015, 35(3):295-302

乐安河—鄱阳湖湿地植物群落特征及其优势植物对重金属 Cu、Pb、Cd 的富集

简敏菲^{1,2*}, 周雪玲¹, 余厚平¹, 朱咏梅³

(1. 江西师范大学 鄱阳湖生态与流域研究教育部重点实验室, 南昌 330022; 2. 江西师范大学 生命科学学院/江西省亚热带植物资源保护与利用重点实验室, 南昌 330022; 3. 江西师范大学 理化测试中心, 南昌 330022)

摘要: 选择乐安河—鄱阳湖湿地典型植物群落, 采用重要值方法评价各样点植物群落特征并筛选出典型优势植物, 通过室内理化测试分析不同生境中优势植物植株及其根区土壤中重金属 Cu、Pb、Cd 的含量; 采用生物富集系数(BCF)方法评价不同优势植物对重金属 Cu、Pb、Cd 的富集特性。结果表明: 研究区湿地植物以草本为主, 在各样点共发现 124 种植物, 包括蕨类植物 2 科 2 属 2 种, 种子植物 40 科 97 属 122 种, 并从中筛选出羊蹄、红蓼、鼠曲草、紫云英、苎麻等 5 种富集能力较强的优势植物; 植物根区土壤中的 Cu、Cd 含量均超过土壤环境质量三级标准, 而且 Cu、Cd 的最高含量分别为 824.03、5.03 mg·kg⁻¹; 不同优势植物对 Cu、Pb、Cd 等 3 种重金属元素中的 1 种或 2 种表现出较强的富集能力, 其中优势物种红蓼对 Cu 具有较强的富集能力, 含 Cu 量最高为 148.80 mg·kg⁻¹, 另一种优势物种鼠曲草对三种元素的生物富集系数均较高, 且对 Cd 的最高富集含量为 15.17 mg·kg⁻¹, 对 Cd 的生物富集系数最高值为 19.14, 高于其他植物 10 倍以上, 鼠曲草对重金属 Cd 具有富集植物的基本特征, 且对 Cu 和 Cd 具有共富集特征并具有较高的耐性, 紫云英、羊蹄等对 Cd 的富集能力也较强。上述 5 种优势植物种群对鄱阳湖湿地 Cu、Pb、Cd 等重金属污染物的生态修复具有一定参考价值, 可作为鄱阳湖湿地重金属污染修复植物的选择对象。

关键词: 鄱阳湖; 乐安河; 湿地植物群落; 优势种群; 重金属; 富集特性

中图分类号: Q948.15; X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2015)03-0295-08

Plant community characteristics and the enrichment of heavy metals copper, lead and cadmium in the dominant plant species grown in the wetland of Lean River and Poyang Lake

JIAN Min-Fei^{1,2*}, ZHOU Xue-Ling¹, YU Hou-Ping¹, ZHU Yong-Mei³

(1. Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China; 2. College of Life Sciences, Jiangxi Normal University, Jiangxi Provincial Key Lab of Protection and Utilization of Subtropical Plant Resources, Nanchang, 330022, China; 3. Centre of Physical and Chemical Inspection, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

Abstract: An investigation was conducted on the typical plant community and collected the soil and plant samples in different sampling sites in the wetland of Poyang Lake and Lean River. Plant community characteristics and the domi-

收稿日期: 2014-05-29 修回日期: 2014-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(41063003, 41161035); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAC13B02); 江西省科技支撑计划项目(20133BBG70005); 江西省亚热带植物资源保护与利用重点实验室开放基金(20131113)。

作者简介: 简敏菲(1969-), 女, 江西高安人, 博士, 教授, 研究方向为湿地生态过程与环境监测评价, (E-mail)jianminfei0914@163.com。

* 通讯作者

nant plant community in different regions of Lean River were evaluated by using important value method. The contents of the heavy metals copper, lead and cadmium in the dominant plants in different habitats and the root zone soils were determined in the laboratory by using physical and chemical analysis methods, and the enrichment characteristics of heavy metals included copper, lead and cadmium in the dominant plants were evaluated by using bio-concentration factor (BCF) method. The results indicated that the main wetland plants were dominated by herbaceous plants in the sampling sites and 124 species in total were found in the different sampling sites, including 2 families, 2 genera and 2 species of ferns, and 40 families, 97 genera and 122 species of seed plants. In the survey sampling sites, *Rumex japonicus*, *Polygonum orientale*, *Gnaphalium affine*, *Astragalus sinicus* and *Boehmeria nivea* were the typical dominant plants which had strong enrichment ability of heavy metals. The heavy metals determined results indicated that the contents of copper and cadmium in some dominant plants' root zone soils exceeded the third class of the soil environmental quality standards. The highest content of copper in plant root zone soils was $824.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and the highest content of cadmium in plant root zone soils was $5.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. And the five dominant species showed hyperaccumulation ability to one or two kinds of the heavy metal pollutants including copper, lead and cadmium. For example, *Polygonum orientale* had strong accumulation ability on copper and the highest content in *P. orientale* reached to $148.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; another kind of dominant plant is *Gnaphalium affine*, the bio-concentration factor values of the three heavy metal elements were much more than those of other plants; the maximum cadmium content in *G. affine* was $15.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and the maximal value of bio-concentration factor value was 19.14, which was more than 10 times higher than those of other plants, which showed that *G. affine* possessed basic characteristics of accumulation on cadmium, and which also showed that *G. affine* had the characteristics of co-accumulation on copper and cadmium with higher tolerance, *Astragalus sinicus* and *Rumex japonicus* also possessed copper and cadmium co-accumulation characteristics. The five dominant plant species had certain reference values on the ecological restoration of heavy metals copper, lead and cadmium pollution on the wetland of Poyang Lake and Lean River.

Key words: Poyang Lake; Lean River; wetland plant community; heavy metals; enrichment characteristics

鄱阳湖上承赣江、修水、饶河、信江、抚河等五河之水,下接长江,是中国第一大淡水湖,中国第二大湖。因此,鄱阳湖及其水系的生态安全问题有着举足轻重的地位。五大水系之一的饶河是鄱阳湖东部的乐安河与东北部的昌江汇合后的通称,其干流全长仅 40 km,而乐安河发源于婺源县东北部的五龙山脉西南麓,全长 279 km,流域面积 $8\,456 \text{ km}^2$ (张本,1998)。位于乐安河-鄱阳湖区的德兴铜矿是我国最大的铜矿,也是亚洲第一大露天铜矿,铜矿开采过程中产生的大量酸性废水和尾矿水是造成矿区及鄱阳湖-乐安河段局部区域湿地生态系统重金属污染的主要来源(曾凡萍等,2007)。因此,乐安河-鄱阳湖段的重金属污染问题一直是鄱阳湖流域较突出的环境污染问题(简敏菲等,2013)。

重金属在水土环境中不易降解,易在植物体内富集而发生迁移、转化,并具有长期性、隐蔽性和不可逆性等特点,对生态环境的潜在危害性极大(陈怀满,2002; Bonanno *et al.*, 2010),重金属污染的治理问题也一直是国内外学者研究的热点和难点(Sarret *et al.*, 2002; Nicoletta *et al.*, 2011; Mery *et al.*, 2011)。重金属污染物在水体-土壤-植物系统内

的迁移转化问题也始终成为人们关注的研究热点(闫妍等,2008; 潘攀等,2011)。许多研究结果表明,受重金属污染的水土环境中自然生长的植物,对重金属污染物具有一定的富集能力(姜理英等,2002; 李鸣等,2008)。因此,可利用植物对重金属的富集作用从水土环境中去除或转移重金属污染物,以改善生态系统的环境质量,为重金属污染的治理提供一定的途径(廖晓勇等,2007; 孙约兵等,2007; Saifullah *et al.*, 2009)。本文在鄱阳湖的春季(平水期)对乐安河-鄱阳湖研究区各样点湿地植被调查的基础上,筛选出各样点分布的典型优势植物,并对优势植物及其水土环境进行采样及监测分析,探讨优势植物对重金属污染物的富集能力,筛选并评价不同重金属污染物的指示植物,为湿地土壤重金属污染的生态修复提供一定的科学参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

自乐安河上游及至昌江与乐安河交汇后的饶河入鄱阳湖区的龙口段等区域,地理坐标为 $28^{\circ}55'$

41°~29°1'21" N, 116°29'35"~117°48'24" E, 流域海拔12~57 m。乐安河流域在德兴县以上为上游,乐平县境内为中游,鄱阳县境内以下为下游;上游流经山区,两岸多金、银、铜、铝、锌、硫磺等矿产,中、下游水质污染严重,主要支流有番溪水、安殷河、槎溪河、建节水、铁罗山水、泊水河、大坞河等,其中大坞河位于江西省德兴市泗洲镇铜矿区,是一条人工开凿的排污河,流经矿区腹地,全长14 km,在矿区北部经流沽口村,汇入乐安河(王永志等,2008)。

研究区属亚热带大陆性季风气候区,气候温暖湿润,春夏多雨,年均气温16.2~19.7℃,极端最高气温44.9℃,极端最低气温-18.9℃;全区无霜期较长,平均246~304 d。年均日照时间1760~2105 h;年均降水量1570 mm。区内主要发育的土壤有红壤(棕红壤)、黄褐土、水稻土、冲积土和潮土(湿潮土)等5种类型,其分布与高程、微地形等有关,由湖岸向湖心构成带状分异的镶嵌分布,研究区的土壤类型以典型的湿地潮土为主。土壤质地多为壤质土,河漫滩地上多为砂质土(张本,1998)。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集 植物调查及其样品采集、根区土壤或底泥样品采集分别于2013年5月获得,采集各样点自然生长的、具有代表性、生长旺盛、数量较多的优势水生植物全株,记录各样地植物种类、高度、盖度,并分析各样点植物群落的优势度和重要值。土壤或底泥样品为湿地植物根区表面(0~20 cm)土壤。植物、土壤或底泥样品的采集均为3个重复。

样点选自乐安河上、中、下游各段及大坞河段,自最上游未受污染的区域开始至上游受矿山开采排放的重金属酸性废水污染区域,经中、下游污染衰减后的各段区域,直至乐安河交汇昌江后汇集成饶河并入鄱阳湖区的龙口段,共选择15个典型样点。乐安河各样点分别为T1(婺源县海口镇)、T2(婺源县太白镇)、T3(德兴市上沽口)、T4(两河交汇后的沽口村)、T5(德兴市下沽口)、T6(德兴市香屯镇)、T7(乐平市接渡镇)、T8(乐平市乐平镇)、T9(鄱阳县蔡家湾)、T10(鄱阳县清家湾)、T11(鄱阳县昌河红旗村)、T12(饶河段鄱阳县龙口入湖区);大坞河样点分别为D1(铜矿生产区)、D2(铜矿生活区)、D3(汇入乐安河前的大坞河段末端沽口村)。研究区样点位置示意图如图1所示。

1.2.2 样品制备及分析 植物样品均为全株,自来水冲洗干净,纯水漂洗,自然风干后用枝剪切碎,于75

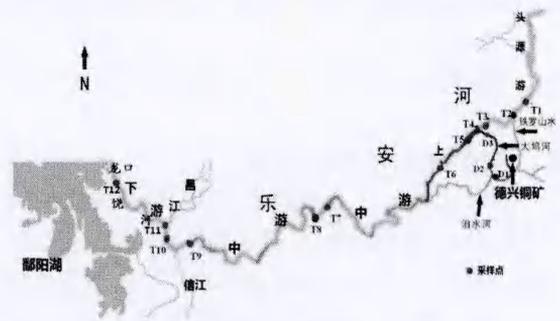


图1 研究区地理位置示意图
Fig. 1 Location of the sampling sites in the study area

℃电热干燥箱中恒温烘制恒重后,将烘干后的植物磨细过筛,然后称取每个样品1.0 g置于瓷坩锅中,加入2 mL浓硝酸静置12 h后,置于马福炉中加热至450℃灰化5 h,待马福炉自然冷却至室温后取出坩锅,向坩锅中加入2 mL 20%的盐酸溶液溶解样品中的无机盐,溶样转入50 mL容量瓶中加2%硝酸定容,过滤后备用(简敏菲等,2004)。

土壤或底泥样品自然风干磨碎,过60目筛,供消解使用。准确称取土壤样品0.3 g,置于聚四氟乙烯消解罐中。用HNO₃-HCl-H₂O₂溶解消化,于微波化学消解工作站(上海新仪MDS-8G)高温消解,冷却后过滤并用超纯水定容(简敏菲等,2013)。

消解处理后的植物、土壤样品均采用美国Varian公司的AA-240Z型原子石墨炉分光光度计测定样品中重金属元素Cu、Pb、Cd的含量。

根区土壤或底泥pH值的测定根据电位法的原理(鲍士旦,2000),采用上海虹益仪器仪表有限公司的pHS-2C精密pH计进行测定。

1.2.3 数据处理方法 采用重要值(IV)评价湿地植物在各群落中的优势地位及其相对重要性,植物在群落中的重要值反映出植物与环境的关系,本文计算草本重要值的公式为IV(草本)=(相对高度+相对盖度+相对频度)/3。

采用生物富集系数评价植物对重金属污染物的富集能力,计算公式为生物富集系数(BCF)=植物地上部(或根部)重金属含量/土壤(或底泥)中该重金属含量(潘义宏,2010)。

数据采用软件SPSS19.3计算出均值及标准差,并进行单因素方差分析(One-Way ANOVA),用Tukey's HSD法进行多重比较,做显著性检验,显著性水平P取0.05,极显著水平P取0.01,采用

Origin 软件作图。

2 结果与分析

2.1 植物群落的物种组成特征

在所调查的 15 个样地中,共发现湿地植物 124 种,主要以草本植物为主,且多数植物种的区系性质属于亚热带,少数属于温带或热带。其中,蕨类植物 2 科 2 属 2 种,未见裸子植物,种子植物 40 科 97 属 122 种。种子植物中单子叶植物 3 科 14 属 21 种,双子叶植物 35 科 81 属 101 种。所调查的湿地植物的生态型多以湿生或中生植物为主,仅有极少数浮叶植物、沉水植物,其中浮叶植物仅 1 科 1 属 1 种(荇菜 *Nymphaoides peltatum*)、沉水植物也仅 1 科 1 属 1 种(金鱼藻 *Ceratophyllum demersum*)。种子植物中,以菊科(Compositae)种类最多,共 18 属 24 种,占全部调查植物种类的 19.35%;其次为十字花科(Cruciferae)8 属 11 种;禾本科(Gramineae)共 8 属 10 种;依次为莎草科(Cyperaceae)5 属 10 种、蓼科(Polygonaceae)2 属 9 种、唇形科(Lamiaceae)7 属 7 种、石竹科(Caryophyllaceae)4 属 4 种、伞形科(Umbelliferae)4 属 4 种、玄参科(Scrophulariaceae)3 属 4 种、蔷薇科(Rosaceae)3 属 3 种、柳叶菜科(Onagraceae)1 属 3 种、苋科(Amaranthaceae)2 属 2 种、豆科(Leguminosae)2 属 2 种、天南星科(Araceae)2 属 2 种、茜草科(Rubiaceae)2 属 2 种、罂粟科(Papaveraceae)2 属 2 种、堇菜科(Violaceae)1 属 2 种等。区系组成中仅含 1 属 1 种植物的科有 23 个,占科总数的 72%,说明研究区湿地水生植被不是以某一个或几个科植物占主导,而是具有较高的科、属、种的多样性(表 1)。

根据 15 个样地中各植物种类的高度、盖度及频度数值分别计算各样地植物的重要值(表 2)。从表 2 可以看出,沿乐安河—鄱阳湖段各样地湿地植物群落中物种的组成及各物种重要性的表现既存在一定差异,同时也存在一些相似性。在流域中所调查的全部 15 个样地中,重要值排在前 5 位的物种累计有 16 种,而且大多为湿生性物种或中生性物种,其中藨草(*Phalaris arundinacea*)、羊蹄(*Rumex japonicus*)、红蓼(*Polygonum orientale*)、鼠曲草(*Gnaphalium affine*)、紫云英(*Astragalus sinicus*)、苕麻(*Boehmeria nivea*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、牛鞭草(*Hemarthria altissima*)、蓼子草

表 1 乐安河—鄱阳湖湿地植物主要物种的科属组成
Table 1 Families and genera compositions of the main aquatic plants in the wetland of Lean River and Poyang Lake

科组成 Family	种数 No. of species	属数 No. of genus	占总种数的 % Percentage of total species (%)	占总属数的 % Percentage of total genus (%)
菊科 Compositae	24	18	19.35	18.56
十字花科 Cruciferae	11	8	8.87	8.25
禾本科 Gramineae	10	8	8.06	8.25
莎草科 Cyperaceae	10	5	8.06	5.16
蓼科 Polygonaceae	9	2	7.26	2.06
唇形科 Lamiaceae	7	7	5.65	7.22
石竹科 Caryophyllaceae	4	4	3.23	4.12
伞形科 Umbelliferae	4	4	3.23	4.12
玄参科 Scrophulariaceae	4	3	3.23	3.09
蔷薇科 Rosaceae	3	3	2.42	3.09
柳叶菜科 Onagraceae	3	1	2.42	1.03
苋科 Amaranthaceae	2	2	1.61	2.06
豆科 Leguminosae	2	2	1.61	2.06
天南星科 Araceae	2	2	1.61	2.06
茜草科 Rubiaceae	2	2	1.61	2.06
罂粟科 Papaveraceae	2	2	1.61	2.06
堇菜科 Violaceae	2	1	1.61	1.03
其他 Others	23	23	18.55	23.71
总计 Total	124	97	100	100

(*Polygonum criopolitanum*)、灰化苔草(*Carex cinerascens*)等湿生性的物种出现的频度较高,均在 3 个以上的样地中作为重要性较高的优势物种出现;而芒(*Miscanthus sinensis*)、五节芒(*Miscanthus floridulu*)、稗草(*Echinochloa crusgalli*)、飘拂草(*Fimbristylis dichotoma*)、半边莲(*Lobelia chinensis*)、簇生卷耳(*Cerastium fontanum*)等更多的湿生性物种仅在一个样地中作为重要值较高的优势物种,且有个别物种如稗草、飘拂草等,仅在大坞河与乐安河交汇区的沽口样地中出现,且重要值较高,体现出稗草对生境及环境污染的适应性。

2.2 研究区水生植物根区土壤重金属污染特征

从表 3 可以看出,调查区域内三种重金属元素 Cu、Pb、Cd 分别在植物根区土壤的重金属含量变化差异较明显,其中 Pb 变化范围为 2.89~9.51 mg·kg⁻¹,Cu 变化范围为 3.39~824.03 mg·kg⁻¹,Cd 变化范围为 0.09~5.03 mg·kg⁻¹。与土壤环境质量国家三级标准(夏家洪,1996)(为保障农林生产和植物正常生长的土壤临界值)相比,Cu、Cd 的最高含量分别为国家三级标准的 2.06 倍、5.03 倍,Pb 的含量相对较低,并未超出国家三级标准。

表 2 研究区各样地重要值前 5 位的植物种类及其重要值

Table 2 Top five dominant plants species by important values and the values in each site of study areas

样地编号 Site code	种名(重要值) Species (IV)	种名(重要值) Species (IV)	种名(重要值) Species (IV)	种名(重要值) Species (IV)	种名(重要值) Species (IV)
T1	羊蹄 <i>Rumex japonicus</i> (0.222)	红蓼 <i>Polygonum orientale</i> (0.212)	鼠曲草 <i>Gnaphalium affine</i> (0.100)	紫云英 <i>Astragalus sinicus</i> (0.041)	苕麻 <i>Boehmeria nivea</i> (0.028)
T2	藨草 <i>Phalaris arundinacea</i> (0.456)	羊蹄 <i>Rumex japonicus</i> (0.072)	紫云英 <i>Astragalus sinicus</i> (0.054)	鼠曲草 <i>Gnaphalium affine</i> (0.043)	苕麻 <i>B. nivea</i> (0.037)
T3	藨草 <i>P. arundinacea</i> (0.414)	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i> (0.081)	牛鞭草 <i>Hemarthria altissima</i> (0.058)	鼠曲草 <i>G. affine</i> (0.056)	苕麻 <i>B. nivea</i> (0.034)
T4	芒 <i>Miscanthus sinensis</i> (0.442)	红蓼 <i>Polygonum orientale</i> (0.083)	羊蹄 <i>Rumex japonicus</i> (0.053)	鼠曲草 <i>G. affine</i> (0.026)	紫云英 <i>Astragalus sinicus</i> (0.026)
T5	飘拂草 <i>Fimbristylis dichotoma</i> (0.440)	稗草 <i>Echinochloa crusgalli</i> (0.143)	鼠曲草 <i>Gnaphalium affine</i> (0.053)	羊蹄 <i>Rumex japonicus</i> (0.065)	—
T6	藨草 <i>Phalaris arundinacea</i> (0.186)	五节芒 <i>Miscanthus floridulu</i> (0.146)	羊蹄 <i>Rumex japonicus</i> (0.048)	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i> (0.042)	苕麻 <i>Boehmeria nivea</i> (0.042)
T7	牛鞭草 <i>Hemarthria altissima</i> (0.182)	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i> (0.100)	半边莲 <i>Lobelia chinensis</i> (0.074)	蓼子草 <i>Polygonum criopolitanum</i> (0.070)	羊蹄 <i>Rumex japonicus</i> (0.044)
T8	牛鞭草 <i>H. altissima</i> (0.081)	羊蹄 <i>Rumex japonicus</i> (0.064)	紫云英 <i>Astragalus sinicus</i> (0.048)	鼠曲草 <i>Gnaphalium affine</i> (0.048)	红蓼 <i>Polygonum orientale</i> (0.047)
T9	羊蹄 <i>Rumex japonicus</i> (0.102)	牛鞭草 <i>Hemarthria altissima</i> (0.095)	蓼子草 <i>Polygonum criopolitanum</i> (0.086)	鼠曲草 <i>G. affine</i> (0.075)	紫云英 <i>Astragalus sinicus</i> (0.056)
T10	羊蹄 <i>R. japonicus</i> (0.181)	紫云英 <i>Astragalus sinicus</i> (0.094)	鼠曲草 <i>Gnaphalium affine</i> (0.071)	藨草 <i>Phalaris arundinacea</i> (0.064)	蓼子草 <i>Polygonum criopolitanum</i> (0.061)
T11	羊蹄 <i>Rumex japonicus</i> (0.215)	鼠曲草 <i>Gnaphalium affine</i> (0.105)	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i> (0.053)	紫云英 <i>Astragalus sinicus</i> (0.050)	灰化苔草 <i>Carex cinerascens</i> (0.048)
T12	灰化苔草 <i>Carex cinerascens</i> (0.273)	藨草 <i>Phalaris arundinacea</i> (0.141)	羊蹄 <i>Rumex japonicus</i> (0.081)	鼠曲草 <i>Gnaphalium affine</i> (0.071)	紫云英 <i>Astragalus sinicus</i> (0.069)
D1	红蓼 <i>Polygonum orientale</i> (0.110)	紫花地丁 <i>Viola philippica</i> (0.100)	羊蹄 <i>R. japonicus</i> (0.091)	鼠曲草 <i>G. affine</i> (0.084)	苕麻 <i>Boehmeria nivea</i> (0.074)
D2	羊蹄 <i>Rumex japonicus</i> (0.159)	紫花地丁 <i>V. philippica</i> (0.073)	红蓼 <i>Polygonum orientale</i> (0.071)	鼠曲草 <i>G. affine</i> (0.051)	紫云英 <i>Astragalus sinicus</i> (0.038)
D3	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i> (0.094)	簇生卷耳 <i>Cerastium fontanum</i> (0.081)	红蓼 <i>P. orientale</i> (0.054)	鼠曲草 <i>G. affine</i> (0.052)	苕麻 <i>Boehmeria nivea</i> (0.046)

土壤环境质量三级标准分别为 Cu 400 mg · kg⁻¹; Pb 500 mg · kg⁻¹; Cd 1.00 mg · kg⁻¹。研究区根区土壤 pH 值的范围变化较大,为 5.22~7.25, D1、T10 样点的 pH 值呈强酸性,其他样点 pH 多呈酸性及中性。D2、D3、T3 的 Cu 含量为所有样点中高值区,其原因是受 Cu 矿酸性重金属污、废水排放所致。而位于乐安河中游 T7、T8、T9、T10 各样点的土壤中 Cd 含量则较高,可能是受乐安河沿岸的采砂活动及其它活动的影响造成的。

2.3 研究区典型优势植物植株内的重金属含量

从研究区 15 个样点中重要值较高的 16 种优势植物中筛选出频度较高、生物量较高的红蓼、鼠曲

草、羊蹄、苕麻、紫云英等 5 种优势植物进行重金属含量分析(表 4)。表 4 显示,不同植物对土壤重金属的吸收差异性比较显著。三种重金属元素中,植物植株内的 Cu 和 Cd 含量值差异值较大,Pb 含量的差异值较小。其中植株内 Cu 含量最高的是红蓼,为 148.80 mg · kg⁻¹,其次为羊蹄和鼠曲草,其含量分别为 145.42 和 137.17 mg · kg⁻¹。而植株内 Cd 含量最高的也是鼠曲草,为 15.17 mg · kg⁻¹。

综合分析表 3 与表 4,其结果表明大坞河段各样点 D1、D2、D3 等植物根区土壤的 Cu 含量最高,对应优势植物红蓼的吸收富集效应也最强,表明红蓼对 Cu 具有较高的富集特性,而鼠曲草在 D1 土壤

表 3 研究区植物根区土壤重金属含量及其 pH 值
Table 3 Contents of heavy metals (Mean \pm SD) and the pH values in the plant root zone soils of the study areas

样地编号 Sites code	pH	Cu (mg \cdot kg ⁻¹)	Pb (mg \cdot kg ⁻¹)	Cd (mg \cdot kg ⁻¹)
T1	5.97	45.49 \pm 3.80a	5.63 \pm 0.56ab	0.09 \pm 0.01b
T2	6.85	74.90 \pm 5.30b	5.73 \pm 0.74f	0.25 \pm 0.06ef
T3	6.53	802.86 \pm 30.39c	6.26 \pm 0.81b	0.09 \pm 0.01a
T4	6.38	30.64 \pm 3.10cd	4.12 \pm 0.32f	0.16 \pm 0.01e
T5	6.55	188.18 \pm 7.06d	2.89 \pm 0.31de	0.19 \pm 0.04f
T6	6.64	313.75 \pm 7.55cd	6.26 \pm 0.71h	0.41 \pm 0.04a
T7	6.33	243.33 \pm 2.54e	7.86 \pm 0.52fg	5.03 \pm 0.40b
T8	6.34	61.96 \pm 3.83bc	6.62 \pm 0.55g	0.96 \pm 0.04f
T9	5.64	3.39 \pm 0.99bc	9.51 \pm 0.83f	4.76 \pm 0.08b
T10	5.42	68.58 \pm 0.14ab	9.34 \pm 0.97eg	1.56 \pm 0.73e
T11	6.05	31.18 \pm 2.68c	7.10 \pm 0.18de	0.46 \pm 0.05bc
T12	5.76	22.42 \pm 2.15ef	6.10 \pm 0.86fg	0.25 \pm 0.02cd
D1	5.22	220.49 \pm 0.55b	7.39 \pm 0.68cd	0.20 \pm 0.02a
D2	6.96	824.03 \pm 10.90fg	5.50 \pm 0.59f	0.23 \pm 0.04a
D3	7.25	822.99 \pm 2.53ab	6.78 \pm 0.91g	0.31 \pm 0.03a

注: 字母表示不同样点之间的差异; 字母相同表示差异不显著 ($P > 0.05$), 字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: Letters represent the differences among different sampling sites, the same letters represent no significant differences ($P > 0.05$) and the different letters represent the significant differences ($P < 0.05$). The same below.

Cu 含量较低时, 吸收值最大, 但是当土壤 Cu 含量在 D2、D3 达到 824.03 和 822.99 mg \cdot kg⁻¹ 时, 鼠曲草对 Cu 的吸收值有所下降, 结果表明鼠曲草对 Cu 的高浓度耐受性可能较低。从 D1、D2 可见, 羊蹄对 Cu 的耐受性也较强。在 T8、T9、T10 等受 Cd 污染较高的区域, 鼠曲草植株富集重金属含量也较高, 鼠曲草在 T8 时, 其吸收 Cd 的含量最高, T10 时次之, 但当 T9 的根区土壤 Cd 含量达到 4.76 mg \cdot kg⁻¹ 时, 其吸收值有所下降, 在 Cd 污染最严重的 T7 区域, 鼠曲草的分布量较少, 不足分析量。由此可见, 鼠曲草对 Cd 具有一定的耐性, 土壤 Cd 含量较高时, 其吸收富集效应有所下降, 甚至会出现毒害作用, 导致生物量减少。本文调查的 15 个样点中, 鼠曲草和羊蹄分别在其中的 13 个样点中有分布, 且生物量较大, 优势度较高。

2.4 优势植物对根区土壤重金属的富集分析

各样点优势植物种群中, 鼠曲草、羊蹄、紫云英等物种在 T1、T2、T4、T8、T9、T10、T11、T12、D2 等 9 个样点中均同时出现且为优势种, 而且不同样点不同物种对 Cu、Pb、Cd 等不同重金属的富集差异较明显。分别选择对重金属富集较低的样点作为显著性差异检验的对照点, 9 个样点在横坐标轴上依次

排序为 T9、T1、D2、T4、T11、T12、T10、T2、T8, 绘制各样点中 3 种优势植物鼠曲草、羊蹄、紫云英等对 Cu、Pb、Cd 的富集作用(图 2, 图 3, 图 4)。其中, 图 2 中的 T8 样点为 Cu 富集的显著性差异检验对照点; 图 3、图 4 中的 T9 样点分别为 Pb、Cd 富集较低的样点, 为 Pb、Cd 富集的显著性差异检验对照点。

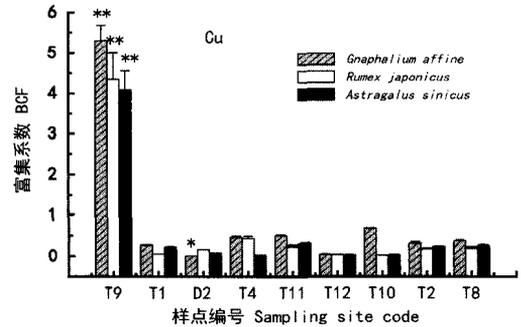


图 2 各样点不同优势植物对 Cu 的富集 * 表示显著性差异 $P < 0.05$; ** 表示极显著差异 $P < 0.01$ 。下同。
Fig. 2 Bio-concentration factors of copper in different dominant plants in different sampling sites * represents significant difference ($P < 0.05$); ** represents very significant difference ($P < 0.01$). The same below.

图 2 中除大坞河样点 D2 外, 其他 8 个样点中对 Cu 富集能力最强的植物几乎都是鼠曲草。在 T9 样点中, 3 种植物对 Cu 的富集系数均为最高值, 其富集系数均超过 4; 而其他各样点中, 3 种不同植物对 Cu 的富集能力表现出基本一致性, 其富集系数均较低, 均在 1 以下。由此不能完全说明 3 种植物对 Cu 均具有较强的富集能力, 样点 T9 中富集系数偏高的原因可能与样点 T9 中根区土壤的含 Cu 量偏低有一定的关系。由于 Cu 也是植物生长需要的重要元素, 因此, 不能完全确定鼠曲草、羊蹄、紫云英均为 Cu 的超富集植物。

图 3 中 Pb 富集系数最高的植物是鼠曲草, 富集系数为 1.31, 但在其他样点中鼠曲草对 Pb 的富集系数较低, 羊蹄和紫云英对 Pb 的富集系数均低于 1, 可能与 9 个样点中根区土壤的 Pb 含量偏低均具有一定的相关性。

由图 4 看出, 鼠曲草、羊蹄、紫云英对 Cd 的富集能力较强。9 个样点中, 鼠曲草和羊蹄对 Cd 的富集系数均大于 1。鼠曲草对 Cd 的富集系数最高值达到 19.14, 最低值为 1.63。羊蹄和紫云英对 Cd 的富集系数的最高值分别为 6.87 和 11.03, 两者对 Cd 的富集系数的最低值分别为 1.00 和 0.24。三种植

表 4 研究区 5 种优势植物植株重金属含量 (mg · kg⁻¹)

Table 4 Contents of heavy metals in the five dominant plants in the sampling sites (Mean ± SD)

样地编号 Site code	红蓼 <i>Polygonum orientale</i>			鼠曲草 <i>Gnaphalium affine</i>			羊蹄 <i>Rumex japonicus</i>			苈麻 <i>Boehmeria nivea</i>			紫云英 <i>Astragalus sinicus</i>		
	Cu	Pb	Cd	Cu	Pb	Cd	Cu	Pb	Cd	Cu	Pb	Cd	Cu	Pb	Cd
T1	6.95 ±0.78c	1.20 ±0.03a	0.82 ±0.02f	11.98 ±1.19ed	7.35 ±0.56c	1.38 ±0.24ef	2.47 ±0.25bc	0.47 ±0.03a	0.15 ±0.01a	1.20 ±0.08a	0.69 ±0.15ef	0.09 ±0.01a	9.71 ±0.20a	2.42 ±0.48ac	0.95 ±0.13b
T2				22.58 ±3.36fg	0.97 ±0.29b	3.25 ±0.25a	13.69 ±0.63cd	2.48 ±0.23b	1.16 ±0.13a	7.39 ±0.68af	1.32 ±0.31b	0.08 ±0.02a	17.20 ±2.06	1.86 ±0.10b	1.02 ±0.18c
T3				52.05 ±2.67ef	22.35 ±1.32e	1.10 ±0.04a				13.80 ±1.74ef	2.35 ±0.45c	0.14 ±0.01a			
T4	0.71 ±0.08a	0.39 ±0.03a	1.16 ±0.24e	13.95 ±0.56b	0.74 ±0.16b	1.32 ±0.24b	12.98 ±1.04d	2.14 ±0.41b	1.09 ±0.09b				0.84 ±0.07	0.84 ±0.42ab	0.79 ±0.17c
T5				14.69 ±0.94cd	1.05 ±0.09a	1.48 ±0.30b	4.42 ±0.75ac	0.54 ±0.06a	0.35 ±0.04a						
T6							7.03 ±0.96ae	1.22 ±0.42e	1.62 ±0.12c	12.19 ±1.00ac	2.48 ±0.16ef	0.42 ±0.09c			
T7							15.78 ±1.19b	2.43 ±0.07a	1.84 ±0.02a						
T8	1.50 ±0.27b	3.45 ±0.41b	0.25 ±0.04a	22.80 ±2.68ef	3.59 ±4.73g	15.17 ±1.31g	12.53 ±1.46cd	2.08 ±0.60f	4.67 ±0.04a				15.54 ±1.16	2.09 ±0.44ac	1.32 ±0.15c
T9				15.54 ±1.30ac	0.69 ±0.10a	1.57 ±0.07a	7.23 ±0.12c	1.35 ±0.34d	1.40 ±0.01a				9.31 ±1.16	2.73 ±0.44ac	1.05 ±0.16c
T10				17.94 ±1.11ab	0.58 ±0.12	7.75 ±0.31b	14.66 ±1.76	1.47 ±0.04a	4.76 ±0.35ef				13.82 ±1.65	0.96 ±0.32bc	1.14 ±0.09b
T11				46.50 ±1.41df	2.54 ±0.09a	14.76 ±0.62c	1.53 ±0.21a	1.85 ±0.54f	2.71 ±0.09c				2.34 ±0.21	0.86 ±0.07b	0.86 ±0.03a
T12				1.70 ±0.37c	0.74 ±0.09a	4.86 ±0.94e	0.86 ±0.19a	1.45 ±0.16d	1.01 ±0.30d				0.73 ±0.28	0.54 ±0.13c	0.53 ±0.14c
D1	134.64 ±5.47f	5.48 ±0.78e	4.09 ±0.11c	137.17 ±11.7fg	3.32 ±0.13b	5.26 ±1.98g	10.3 ±0.30a	0.20 ±0.02a	0.19 ±0.12c	4.62 ±0.34cd	0.49 ±0.04a	0.04 ±0.01a			
D2	148.80 ±1.96d	1.09 ±0.14b	0.66 ±0.04a	62.9 ±0.20a	1.21 ±0.14b	1.03 ±0.00a	145.42 ±2.34cf	5.34 ±2.13g	0.54 ±0.08b				69.64 ±4.00d	3.31 ±0.16c	0.96 ±0.10b
D3	103.08 ±0.53c	13.88 ±0.44c	0.68 ±0.02a	93.02 ±1.40c	5.91 ±0.51c	1.18 ±0.00a				24.90 ±2.00fg	1.66 ±0.12ac	0.08 ±0.03a			

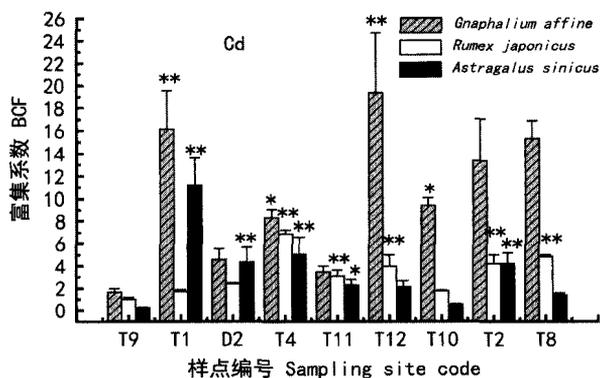
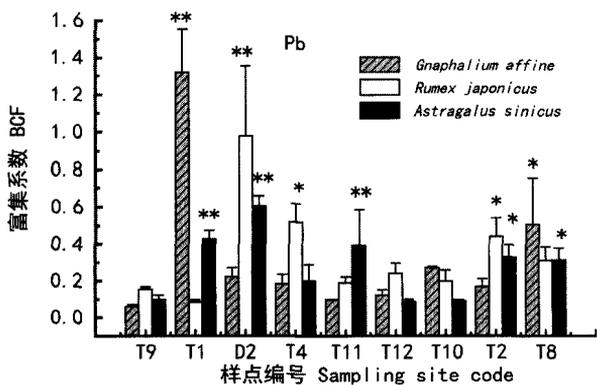


图 3 各样点不同优势植物对 Pb 的富集

Fig. 3 Bio-concentration factors of Pb in different dominant plants in different sampling sites

图 4 各样点不同优势植物对 Cd 的富集

Fig. 4 Bio-concentration factors of Cd in different dominant plants in different sampling sites

物 Cd 的富集系数最低值均出现在样点 T9, 其根区土壤含 Cd 量为 4.76 mg · kg⁻¹, 属重度污染区域。说明三种植物对 Cd 均具有一定的富集能力, 并对重金属 Cd 具有较高的耐性, 而鼠曲草对 Cd 的富集能力高于羊蹄和紫云英。

综合分析图 1-3, 鼠曲草、羊蹄、紫云英均对 Cu、

Pb、Cd 有一定的富集能力。值得注意的是, 三种植物中, 鼠曲草对三种不同元素的富集系数均达到了最高值, 富集系数均接近于 1 或远大于 1, 且对 Cd 的富集系数达到最高值, 表明鼠曲草具有重金属 Cd 富集植物的基本特征, 且与相关研究报道具有一致性(李鸣等, 2008)。因此, 针对鼠曲草对土壤中重金

属污染物的富集特性可进行更深入的相关研究。

3 讨论与结论

鄱阳湖—乐安河段研究区平水期 15 个样地的植物群落调查中共发现湿地植物有 124 种,主要以草本植物为主,且多数植物种的区系性质属于亚热带,少数属于温带或热带。其中,蕨类植物 2 科 2 属 2 种,未见裸子植物,种子植物 40 科 97 属 122 种。种子植物中单子叶植物 3 科 14 属 21 种,双子叶植物 35 科 81 属 101 种。

采用重要值对乐安河—鄱阳湖段各样点的植物群落特征及其优势植物进行评价,发现各样点优势植物既存在一定差异性,也表现出一致性。15 个样点中,重要值排在前 5 位的物种累计有 16 种,而羊蹄、红蓼、鼠曲草、紫云英、苎麻等 5 种植物至少在 6 个样点群落中的重要值均排在前 5 位,可作为评价研究区重金属富集植物的优势物种。

乐安河流域湿地土壤或底泥中重金属 Cu 含量的高值区出现在乐安河上游铜矿区重金属酸性污水排放流经的区域或是受纳重金属酸性污水后的乐安河交汇区;重金属 Cd 含量的高值区出现在乐安河中游,主要受乐安河流域两岸工业活动污染影响;在所有样点中重金属 Pb 含量较低,调查中未发现典型的 Pb 污染区域。

植物植株内的重金属含量与其根区土壤间的重金属含量具有直接的相关性(刘惠娜等,2012)。富集系数是评价植物对重金属富集能力的重要指标(魏树和等,2003),富集系数越大,表明植物对该种重金属的吸收能力越强。富集系数大于 1 是超富集植物区别于普通植物的重要特征(Mattina *et al.*, 2003)。综合分析植物植株内的重金属含量及其生物富集系数,结果表明,优势植物红蓼对 Cu 具有一定的富集效应,植株内最高含量达 $148.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,且具有较高的耐性。而鼠曲草、羊蹄、紫云英等对 Cd 的富集能力均较强且富集系数均大于 1,植株内重金属 Cd 的含量高,在重金属 Cd 污染较严重的区域长势良好,且生物量较大,表明对 Cd 具有较高的耐性。

所调查的 15 个样点中,鼠曲草在 12 个样点中均有分布且重要值较高,生物量最大,且在 11 个样点的 Cd 富集系数均大于 1,其最高值为 19.14,植株体内重金属 Cd 的最高含量为 $15.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,高于

一般植物 10 倍以上,具有较高的富集特征。在 Cu 污染严重的区域,鼠曲草的重要值也较高,且植株体内重金属 Cu 的含量最高值达为 $137.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,在土壤 Cu 污染较轻的区域,其富集系数大于 1。所有植物中,鼠曲草植株体内 Pb 的重金属含量最高,其值达 $22.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,富集系数有大于 1 的情况。由此可见,鼠曲草不仅对 Cd 具有较高的富集特性,而且对重金属 Cu 和 Pb 也有一定的耐性及富集能力,对重金属的复合污染的修复具有一定的潜力,值得进一步的深入研究。

参考文献:

- Bao SD(鲍士旦). 2000. Agricultural and Chemistry Analysis of Soil(土壤农化分析)[M]. Beijing(北京): Chinese Agriculture Press(中国农业出版社): 19—27
- Chen HM(陈怀满). 2002. Behavior of Chemicals in Soils and Its Relation to Environmental Quality(土壤中化学物质的行为与环境质量)[M]. Beijing(北京): Science Press(科学出版社): 601—603
- Bonanno G, Lo Giudice R. 2010. Heavy metal bioaccumulation by the organs of phragmites australis(common reed) and their potential use as contamination indicators[J]. *Ecol Indic*, **10**(3): 639—645
- Jian MF(简敏非), Gong XF(弓晓峰), You H(游海), *et al.* 2004. Assessment of pollution of heavy metals in water sediments and aquatic plants in Poyang Lake Basins(鄱阳湖水环境及其水生维管束植物重金属污染)[J]. *Res & Environ Yangtze Basin*(长江流域资源与环境), **13**(6): 589—593
- Jian MF(简敏非), Xu P(徐鹏飞), Xiong JQ(熊建秋), *et al.* 2013. Risk of heavy metal pollution in surface soils and diversity of aquatic plant communities in the Le'an River-Poyang Lake Wetland(鄱阳湖—乐安河段湿地底质重金属污染风险及其水生植物群落多样性的评价)[J]. *J Ecol & Rur Environ*(生态与农村环境学报), **28**(4): 415—421
- Jian MF(简敏非), Li LY(李玲玉), Xu PF(徐鹏飞), *et al.* 2014. Spatiotemporal variation characteristics of heavy metals pollution on the water, soil and sediments environment of the Wetland of Lean River in Poyang Lake(鄱阳湖—乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征)[J]. *Environ Sci*(环境科学), **35**(5): 138—144
- Jiang LY(姜理英), Shi WY(石伟勇), Yang XE(杨肖娥). 2002. Cu-hyperaccumulators in mining area(铜矿区超积累 Cu 植物的研究)[J]. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **13**(7): 906—908
- Li M(李鸣), Wu JC(吴结春), Li LQ(李丽琴). 2008. Absorption and accumulation of heavy metals by plants in Poyang Lake Wetland(鄱阳湖湿地 22 种植物重金属富集能力分析)[J]. *J Agro-Environ Sci*(农业环境科学学报), **27**(6): 2 413—2 418
- Liao XY(廖晓勇), Chen TB(陈同斌), Yan XL(阎秀兰), *et al.* 2007. Enhancement of heavy metal removal in phytoremediation of soils contaminated with heavy metals(提高植物修复效率的技术途径与强化措施)[J]. *Acta Sci Circums*(环境科学学报), **27**(6): 881—893
- Liu HN(刘惠娜), Yang QH(杨期和), Yang HS(杨和生), *et al.* 2012. Characteristics of absorption and accumulation of heavy (下转第 324 页 Continue on page 324)

- Xiang WS(向万胜), Huang M(黄敏), Li XY(李学垣). 2004. Progress on fractioning of soil phosphorous and availability of various phosphorous fractions to crops in soil(土壤磷素的化学组分及其植物有效性)[J]. *Plant Nutr Fert Sci*(植物营养与肥料学报), **10**(6):663-670
- Xie ZB(谢祖彬), Liu Q(刘琦), Xu YP(许燕萍), et al. 2011. Advances and perspectives of biochar research(生物炭研究进展及其研究方向)[J]. *Soils*(土壤), **43**(6):857-861
- Xu RK, Zhao AZ, Yuan JH, et al. 2012. pH buffering capacity of acid soils from tropical and subtropical regions of China as influenced by incorporation of crop straw biochars[J]. *J Soils & Sed*, **12**(4):494-502
- Yang H, Zhang L, Cao J. 2010. Effects of different land use types on soil organic carbon and carbon management index in Karst area[J]. *Agric Sci & Technol*, **11**(9-10):136-139
- Yao Y, Gao B, Zhang M, et al. 2012. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil[J]. *Chemosphere*, **89**(11):1467-1471
- Yuan JH(袁金华), Xu RK(徐仁扣). 2011. Progress of the research on the properties of biochars and their influence on soil environmental functions(生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展)[J]. *Ecol Environ Sci*(生态环境学报), **20**(4):779-785
- Yuan JH, Xu RK, Zhang H. 2011. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures [J]. *Bioresour Technol*, **102**(3):3488-3497
- Zhang A, Cui L, Pan G, et al. 2010. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China [J]. *Agric Ecosyst & Environ*, **139**(4):469-475
- Zhang A, Liu Y, Pan G, et al. 2012. Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain [J]. *Plant & Soil*, **351**(1-2):263-275
- Zhang MK(章明奎), Bayou WD, Tang HJ(唐红娟). 2012. Effects of biochar's application on active organic carbon fractions in soil(生物质炭对土壤有机质活性的影响)[J]. *J Soil Water Conserv*(水土保持学报), **26**(2):127-132
- Zhang X(张祥), Wang D(王典), Jiang CC(姜存仓), et al. 2013. Effect of biochar on physicochemical properties of red and yellow brown soils in the South China Region(生物炭对我国南方红壤和黄棕壤理化性质的影响)[J]. *Chin J Eco-Agric*(中国生态农业学报), **21**(08):979-984
- Zhao L, Cao X, Mašek O, et al. 2013. Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures[J]. *J Hazard Mat*, **256**(15):1-9
- Zheng H, Wang Z, Deng X, et al. 2013. Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil [J]. *Geoderma*, **206**:32-39

(上接第 302 页 Continue from page 302)

- metals for three dominant plants in Pb-Zn mine tailings eastern Guangdong(粤东铅锌尾矿三种优势植物对重金属的吸收和富集特性研究)[J]. *Guihaia*(广西植物), **32**(6):743-749
- Mattina MJI, Lannucci BW, Musante C, et al. 2003. Concurrent plant uptake of heavy metals and persistent organic pollutants form soil[J]. *Environ Poll*, **124**(3):375-378
- Malandrino M, Abollino O, Buoso S, et al. 2011. Accumulation of heavy metals from contaminated soil to plants and evaluation of soil remediation by vermiculite[J]. *Chemosphere*, **82**(2):169-178
- Pan P(潘攀), Yang JC(杨俊诚), Deng SH(邓仕槐), et al. 2011. Proceedings and prospects of pesticides and heavy metals contamination in soil-plant system(土壤-植物体系中农药和重金属污染研究现状及展望)[J]. *J Agro-Environ Sci*(农业环境科学学报), **30**(12):2389-2398
- Pan YH(潘义宏), Wang HB(王宏宾), Gu ZP(谷兆萍), et al. 2010. Accumulation and translocation of heavy metals by macrophytes(大型水生植物对重金属的富集与转移)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **30**(23):6430-6441
- Rascio N, Navari-izzo F. 2011. Heavy metal hyper-accumulating plants; How and why do they do it? And what makes them so interesting[J]. *Plant Sci*, **180**(2):169-181
- Saifullah, Meers E, Qadir M, et al. 2009. EDTA-assisted Pb phyto-extraction[J]. *Chemosphere*, **74**(10):1279-1291
- Sarret G, Saumitou-Laprade P, Bert V, et al. 2002. Fronds of Zinc accumulated in the hyperaccumulator *Arabidopsis halleri* [J]. *Plant Physiol*, **130**(4):1815-1826
- Sun YB(孙约兵), Zhou QX(周启星), Guo GL(郭观林). 2007. Phytoremediation and strengthening measures for soil contaminated by heavy metals(植物修复重金属污染土壤的强化措施)[J]. *Chin J Environ Eng*(环境工程学报), **1**(3):103-110
- Wang YZ(王永志), Yang YH(杨毅恒), Chu N(初娜), et al. 2008. Clustering analysis for speciation of Cu in soil samples of Dawu River in dexing copper mine(德兴铜矿大坞河流域土壤 Cu 元素形态的聚类分析)[J]. *Progr Geophys*(地球物理学进展), **23**(1):233-236
- Wei SH(魏树和), Zhou QX(周启星), Wang X(王新). 2003. Characteristics of 18 species of weed hyperaccumulating heavy metals in contaminated soils(18种杂草对重金属的超积累特性研究)[J]. *J Basic Sci & Eng*(应用基础与工程科学学报), **11**(2):152-160
- Xia JQ(夏家淇). 1996. Detailed Explanation of Soil Environmental Quality Standards(土壤环境质量标准详解)[M]. Beijing(北京):China Environmental Sciences Press(中国环境科学出版社):53
- Yan Y(闫妍), Li JP(李建平), Zhao ZG(赵志国), et al. 2008. Advances in the mechanisms of heavy metal tolerance and accumulation in hyper accumulators(超富集植物对重金属耐受和富集机制的研究进展)[J]. *Guihaia*(广西植物), **28**(4):505-510
- Zhang B(张本). 1988. Studies on Poyang Lake(鄱阳湖研究)[M]. Shanghai(上海):Shanghai Science and Technology Press(上海科学技术出版社):5-10
- Zeng FP(曾凡萍), Xiao HY(肖化云), Zhou WB(周文斌). 2007. Spatial and temporal variations and their source analysis of copper, lead and zinc in riverwaters and sediments of the Le'an River(乐安江河水和沉积物中 Cu, Pb, Zn 的时空变化特征及来源分析)[J]. *Res Environ Sci*(环境科学研究), **20**(6):14-20