

浙江典型铅锌矿废弃地优势植物调查及其重金属含量研究^①

毕 德^{1,2}, 吴龙华², 骆永明^{2*}, 周守标¹, 谭长银², 尹雪斌², 姚春霞², 李 娜²

(1 安徽师范大学生命科学学院, 安徽芜湖 241000;

2 中国科学院南京土壤研究所土壤与环境生物修复研究中心, 南京 210008)

摘 要: 对浙江境内 6 个典型的铅锌矿废弃地进行了优势植物调查和植物体重金属含量的定量分析。本次调查共记录到高等植物 36 种, 隶属 26 属 22 科, 共 42 个样品。植物中重金属含量高低顺序为 $\text{Cu} < \text{Cd} < \text{Pb} < \text{Zn}$, 其中 Cu 、 Zn 及 Cd 之间存在显著性差异 ($p < 0.05$); 土壤中重金属含量高低顺序为 $\text{Cd} < \text{Cu} < \text{Pb} < \text{Zn}$ 。其中只有 Pb 和 Cu 之间存在显著性差异 ($p < 0.05$); Pb 和 Cu 平均富集系数之间存在显著性差异 ($p < 0.05$), Pb 和 Zn 平均富集系数之间存在极显著性差异 ($p < 0.01$)。 Cu 、 Zn 和 Pb 在灌木植物中的富集系数 $<$ 草本植物中的富集系数; Cd 在草本植物中的富集系数 $<$ 灌木植物中富集系数。珠芽景天 (*Sedum bulbiferum*)、四芒景天 (*Sedum tetractinum*) 和东南景天 (*Sedum alfredii*) 对 Zn 、 Cd 有高富集能力, 其中珠芽景天对 Cd 的吸收达到超富集的水平, 四芒景天对 Zn 、 Cd 的吸收达到超富集的水平; 堇菜 (*Viola verecunda*)、苦苣菜 (*Ixeris polycephala*) 和葛藤 (*Pueraria lobata*) 对 Cd 有较高的富集能力; 鸭跖草 (*Commelina communis*)、白背叶野桐 (*Mallotus apeltus*)、一年蓬 (*Erigeron annuus*)、小根蒜 (*Allium macrostemon*) 和芒萁 (*Dicranopteris dichotoma*) 对 Pb 有较高的富集能力。

关键词: 铅锌矿; 重金属; 植物修复; 超积累植物; 富集系数

中图分类号: Q948.116

近年来, 植物修复以其具有绿色、廉价和潜在经济效益等优点, 并且更适应环境保护的要求而迅速成为国际环境修复学术界的研究热点。植物提取修复的关键是超积累植物的寻找、开发和应用。超积累植物具有很强的重金属吸收和忍耐能力, 尤其是植物的地上部分^[1-2], 这部分的重金属含量一般为普通植物的 10 ~ 500 倍^[3], 这也是利用植物作用降低土壤中重金属污染物的基础^[4-7]。一般情况下, 金属型植被对污染元素应具有较高的耐性^[8]。超积累植物大都以群落方式聚集于野外, 主要在矿山区、成矿作用带、富含金属元素岩石风化而成土壤上^[9]。因此, 对废弃的矿地或金属矿露头上自然生长的植物进行调查是寻找超积累植物的有效途径之一。

本研究对浙江境内 6 个典型的铅锌矿废弃地进行了植被和土壤调查, 通过采样分析了解植物对重金属 Cu 、 Zn 、 Pb 和 Cd 的吸收特点, 以期发现

新的超积累植物或耐性植物, 并对它们在土壤净化上的应用潜力作初步探讨。

1 材料与方法

1.1 植物和土壤样品的野外采集

材料分别采自浙江境内的 6 个典型铅锌矿区。在每个调查矿区根据实际情况设置 5 ~ 10 个 5 m × 5 m 的样方, 采集并记录样方内的优势植物。草本植物取地上部分, 灌木和乔木则采集其叶片带回实验室进行分析。每个植物样采集 3 个重复。土壤样品为附着在植物根系上的 0 ~ 15 cm 表层土壤, 约 400 g 混合土壤为 1 个样品。

在上台门铅锌矿尾矿堆上采集的植物样品有: 白背叶野桐 *Mallotus apeltus*, 葛藤 *Pueraria lobata*, 紫藤 *Wisteria sinensis*, 苎麻 *Boehmeria nivea*, 鸡矢藤 *Paederia scandes*, 高粱泡 *Rubus lambertianus*,

^①基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2002CB410809/10)、中国科学院知识创新项目 (KZCX3-SW-429, CXTD-Z2005-4) 和国家自然科学基金项目 (20477048, 40432005) 共同资助。

* 通讯作者 (ymluo@issas.ac.cn)

作者简介: 毕德 (1980—), 男, 安徽淮北人, 硕士研究生, 主要从事植物分类与重金属积累研究。E-mail: bide@issas.ac.cn

金樱子 *Rosa laevigata*, 白茅 *Imperata cylindrica*, 东南景天 *Sedum alfredii*, 爪瓣景天 *Sedum onychopetalum*, 野艾蒿 *Artemisia lavandulaefolia*, 苦苣菜 *Ixeris polycephala*, 一年蓬 *Erigeron annuus*, 蕨 *Pteridium aquilinum*, 芥菜 *Capsella bursapastoris*, 鸭跖草 *Commelina communis*, 博落回 *Macleaya cordata*, 小果博落回 *Macleaya cordata*, 野雉尾金粉蕨 *Onychium japonicum* 和盐肤木 *Rhus chinensis*。

在大岭口铅锌银矿尾矿堆上采集的植物样品有: 杠板归 *Polygonum perfoliatum*, 木防己 *Cocculus trilobus*, 硕苞蔷薇 *Rosa bracteata*, 珠芽景天 *Sedum bulbiferum*, 旋复花 *Inula japonica* 和 芒 苣 *Dicranopteris dichotoma*。

在淳安潘家铅锌矿废弃尾矿堆下方小溪两边采集的植物样品有: 博落回, 垂盆草 *Sedum sarmentosum* 和 四芒景天 *Sedum tetractinum*。

在导岭铅锌矿垂直矿口附近的菜地上采集的植物样品有: 香青 *Anaphalis sinica*, 商陆 *Phytolacca americana*, 小根蒜 *Allium macrostemon*, 插田炮 *Rubus coreanus*, 白背叶野桐, 藓状景天 *Sedum polyticoides*, 东南景天和葛藤。

姚王铅锌矿尾矿堆上采集的样品为 五节芒 *Miscanthus floridulus* 和 珠芽景天。

在龙泉铅锌矿采集的植物样品有: 鸭跖草, 狗脊 *Woodwardia japonica* 和 奇蒿 *Artemisia anomala*。

1.1.1 植物样分析 植物样品用蒸馏水洗净, 先在 105℃ 杀青 30 min, 80℃ 下烘干, 用不锈钢植物粉碎机磨碎, 备用。重金属含量采用 HNO₃: HClO₄ (4:1 v/v) 消煮, 同时设置试剂空白, 用内插的植物标样作为质量控制。溶液 Cu、Zn、Pb、Cd 含量用原子吸收光谱仪 (Varian SpectrAA 220FS) 测定^[10]。

1.1.2 土壤样分析 土壤样先置于室内自然风干, 过 2 mm 筛, 后研磨, 过 100 目筛, 备用。重金属含量采用 HCl:HNO₃ (4:1, V/V) 消解, 原子吸收光谱仪 (Varian SpectrAA 220FS) 测定^[10]。

1.1.3 数据统计分析 植物对重金属的富集系数 BCF (Bioconcentration factor) = 地上部重金属含量/土壤中重金属含量。试验数据用 SPSS 软件进行方差分析 (ANOVA) 和 LSD 检验。

2 结果与分析

2.1 土壤和植物中重金属含量及植物富集系数

植物体内金属的平均含量最高的为 Zn (1091 mg/kg ± 457 mg/kg), 其他依次为 Pb (47.0 mg/kg ± 16.5 mg/kg), Cd (26.4 mg/kg ± 15.6 mg/kg), Cu (16.1 mg/kg ± 2.1 mg/kg); 土壤中金属平均含量最高的为 Zn (7780 mg/kg ± 1359 mg/kg), 其他依次为 Pb (7482 mg/kg ± 1243 mg/kg), Cu (374 mg/kg ± 55 mg/kg), Cd (182 mg/kg ± 113 mg/kg), 各植物间富集系数均无显著差异 (表1)。

表 1 矿区优势植物及土壤中重金属含量 (mg/kg) 及优势植物富集系数

Table 1 Concentrations and bioconcentration factors of Cu, Pb, Zn and Cd in 42 dominant-plants and soils in six abandoned lead-zinc mine areas

矿区	植物名称	Cu		富集 系数	Zn		富集 系数	Pb		富集 系数	Cd		富集 系数
		植物	土壤		植物	土壤		植物	土壤		植物	土壤	
上台门	白背叶野桐	10.4	184	0.06	108	3557	0.03	146	8196	0.02	2.68	33.4	0.08
	葛藤	8.60	192	0.04	111	9417	0.01	10.3	9222	0.00	0.54	83.0	0.01
	紫藤	9.00	104	0.09	99.0	1577	0.06	4.30	1036	0.00	0.69	12.2	0.06
	苎麻	11.0	322	0.03	120	25854	0.00	8.30	24524	0.00	0.34	270	0.00
	鸡矢藤	9.90	74.0	0.13	164	605	0.27	6.90	720	0.01	0.48	2.10	0.23
	高粱泡	11.5	565	0.02	137	19015	0.01	6.50	12748	0.00	3.18	185	0.02
	金樱子	16.7	136	0.12	75.0	3674	0.02	3.80	3048	0.00	0.41	41.8	0.01
	白茅	7.10	354	0.02	73.0	34347	0.00	7.90	32749	0.00	1.41	361	0.00
	东南景天	15.8	759	0.02	4423	16610	0.27	167	17305	0.01	14.9	172	0.09
	爪瓣景天	18.3	749	0.02	3351	27162	0.12	135	18030	0.01	5.05	256	0.02
	野艾蒿	10.6	75.0	0.14	67.0	248	0.27	3.50	144	0.02	1.52	1.90	0.80
	苦苣菜	8.50	778	0.01	105	10957	0.01	27.0	21383	0.00	13.8	83.2	0.17

续表 1

	一年蓬	9.00	320	0.03	148	4699	0.03	52.0	22645	0.00	7.34	21.8	0.34
	蕨	10.7	409	0.03	104	11810	0.01	9.60	8773	0.00	2.81	96.1	0.03
	荠菜	7.30	95.0	0.08	126	4756	0.03	7.90	4839	0.00	3.75	45.1	0.08
	鸭跖草	18.3	273	0.07	655	16370	0.04	308	15749	0.02	5.58	149	0.04
	博落回	4.90	358	0.01	266	21729	0.01	14.7	16565	0.00	2.94	202	0.01
	小果博落回	6.40	79.0	0.08	138	906	0.15	1.50	907	0.00	0.03	8.10	0.00
	野雉尾金蕨	16.4	315	0.05	137	25972	0.01	2.00	12851	0.00	8.72	281	0.03
	盐肤木	6.10	171	0.04	44	5174	0.01	2.70	1951	0.00	0.96	39.0	0.02
大岭口	杠板归	28.4	555	0.05	1512	3456	0.44	24.6	4053	0.01	1.94	6.93	0.28
	木防己	8.90	365	0.02	177	2342	0.08	15.2	3352	0.00	0.20	3.57	0.06
	硕苞蔷薇	10.1	190	0.05	64	1656	0.04	4.20	2109	0.00	0.05	2.35	0.02
	珠芽景天	19.0	1491	0.01	1066	6216	0.17	16.6	12326	0.00	2.59	9.07	0.29
	旋复花	25.6	641	0.04	1330	2871	0.46	7.20	4562	0.00	4.36	5.45	0.80
	芒萁	7.00	1310	0.01	120	5054	0.02	59.6	8020	0.01	0.88	7.57	0.12
淳安潘家	博落回	35.9	437	0.08	219	4018	0.05	17.5	1972	0.01	0.70	59.9	0.01
	垂盆草	13.9	159	0.09	117	759	0.15	5.80	121	0.05	3.70	4.40	0.83
	四芒景天	10.5	1421	0.01	13665	663	20.60	9.10	139	0.07	568	2.90	194
导岭	香青	6.50	76.0	0.09	146	530	0.28	12.5	328	0.04	0.60	3.10	0.19
	商陆	14.4	82.7	0.17	144	249	0.58	22.9	163	0.14	0.10	0.20	0.50
	小根蒜	18.4	37.7	0.49	268	4589	0.06	33.5	4340	0.01	2.80	29.8	0.09
	插田炮	7.70	78.1	0.10	125	4352	0.03	10.0	2275	0.00	2.50	6.60	0.38
	白背叶野桐	33.5	53.2	0.63	489	1002	0.49	24.7	680	0.04	1.40	3.20	0.44
	藓状景天	24.8	50.2	0.49	837	1512	0.55	58.7	784	0.07	1.30	3.50	0.37
	东南景天	81.1	290	0.28	1099	16484	0.07	62.8	13977	0.00	43.5	159	0.27
	葛藤	24.8	116	0.21	86.9	9787	0.01	25.8	9257	0.00	46.4	16.7	2.78
姚王	五节芒	4.40	264	0.02	155	3290	0.05	13.7	2610	0.01	2.06	73.9	0.03
	珠芽景天	37.3	659	0.06	13568	9894	1.37	614	5987	0.10	349	4789	0.07
龙泉	鸭跖草	20.1	264	0.08	117	660	0.18	4.90	798	0.01	0.70	22.6	0.03
	狗脊	16.7	390	0.04	35.8	2159	0.02	4.70	1798	0.00	0.20	53.9	0.00
	奇蒿	10.2	457	0.02	36.8	790	0.05	0.90	1229	0.00	0.10	19.6	0.01
	平均值	16.1	374	0.10	1091	7780	0.65	47.0	7482	0.02	26.4	182	4.84
	标准差	2.1	55	0.02	457	1359	0.49	16.5	1243	0.00	15.6	113	4.61
	最小值	4.4	37.7	0.01	35.8	249.0	0.01	0.9	121.3	0.00	0.03	0.20	0.00
	最大值	35.9	1491	0.63	13665	27162	20.6	614	32749	0.14	568	4789	194

2.2 不同类型优势植物、土壤重金属含量及富集系数

草本植物重金属富集能力高于灌木，与 Landberg 和 Greger^[11]报道一致。本次调查的草本植物重金属含量最高的为 Zn (1486 mg/kg $\pm$ 628 mg/kg)，其次为 Pb (57.8 mg/kg $\pm$ 22.4 mg/kg)，接着为 Cd (35.6 mg/kg $\pm$ 21.7 mg/kg)，最低的为 Cu (18.1 mg/kg $\pm$ 2.7 mg/kg)，其中 Zn 和 Cu、Zn 和 Pb、Zn 和 Cd 之间有显著性差异 ($p < 0.05$)；灌

木重金属含量最高的也为 Zn (117 mg/kg $\pm$ 12 mg/kg)，其次为 Pb (22.8 mg/kg $\pm$ 15.4 mg/kg)，再次为 Cu (10.7 mg/kg $\pm$ 0.8 mg/kg)，最低为 Cd (0.95 mg/kg $\pm$ 0.38 mg/kg)，其中 Zn 与 Cu、Zn 与 Pb、Zn 与 Cd 之间有显著性差异 ($p < 0.05$)；草本植物对应的土壤重金属 Cu 和 Cd 含量大于灌木对应的土壤重金属含量，而 Zn 和 Pb 则相反；富集系数之间均无显著差异 (表 2)。

表 2 不同类型优势植物和土壤中重金属含量 (mg/kg) 及富集系数

Table 2 Concentrations and bioconcentration factors of heavy metals in 42 dominant-plants of different types and soils

植物类型	重金属种类	植物中平均浓度	土壤中平均浓度	富集系数
草本	Cu	18.1 ± 2.7 (4.00 ~ 81.1)	431 ± 74 (35.8 ~ 13665)	0.11 ± 0.03 (0.01 ~ 0.63)
	Zn	1486 ± 628 (35.8 ~ 13665)	6992 ± 1438 (248 ~ 27162)	0.89 ± 0.68 (0.01 ~ 20.6)
	Pb	57.8 ± 22.4 (0.90 ~ 614)	6845 ± 1315 (121 ~ 22645)	0.02 ± 0.01 (0 ~ 0.14)
	Cd	35.6 ± 21.7 (0.03 ~ 568)	219 ± 158 (0.20 ~ 4789)	0.29 ± 0.54 (0 ~ 2.85)*
灌木	Cu	10.7 ± 0.8 (8.60 ~ 16.7)	237 ± 51.7 (74.0 ~ 565)	0.06 ± 0.01 (0.02 ~ 0.13)
	Zn	117 ± 12 (64.0 ~ 177)	7523 ± 2997 (605 ~ 25854)	0.06 ± 0.03 (0 ~ 0.27)
	Pb	22.8 ± 15.4 (3.80 ~ 146)	7217 ± 2566 (720 ~ 24524)	0.005 ± 0.002 (0 ~ 0.02)
	Cd	0.95 ± 0.38 (0.05 ~ 3.18)	70.4 ± 31.7 (2.10 ~ 270)	0.33 ± 0.86 (0 ~ 0.23)

注：括号内数值为变化范围（最小值~最大值）。*：除去一异常点 193.8。

2.3 超积累植物的选择

一般认为，植物（超积累植物除外）Cu、Zn、Pb、Cd 的正常含量分别为：10、100、5 mg/kg 和 1 mg/kg^[12]，本次调查发现矿区 47.6% 的植物中重金属含量超过植物正常值 10 倍以上，其中 Zn 含量超过 10 倍以上的植物有 19.0%，Pb 16.7%，Cd 11.9%。根据普遍认为重金属含量超过一般植物 100 倍的植物属于超积累植物，即 Cu、Pb 含量应在 1000 mg/kg 以上，Zn 含量应在 10000 mg/kg 以上，Cd 含量应在 100 mg/kg 以上^[13]，则四芒景天、珠芽景天达到超积累植物含量标准（表2，表3）。但一直以来，超积累植物的定义存在着争议，目前已知的超积累植物虽然体内重金属的含量高，但绝大多数生长慢、生物量小，且大多数为莲座生长，很难进行机械操作，因而一些学者对植物修复技术提出质疑，认为这些小型超积累植物不适宜大面积污染土壤的修复^[14]。最近有学者提出，生物富集系数=（地上部植物中元素质量分数 × 地上部植物生物量）/ 土壤中元素质量分数^[15]，具有一定的意义。进一步思考把公式中土壤中元素质量分数改为土壤中有效态元素质量分数可能会更有意义。此外，应当把地下部分金属含量很高，而且又易于收获（如一些百合科植物具有块根、块茎）的植物，作为用于土壤修复的潜在资源。

2.4 植物和土壤中重金属含量及其富集系数的关系

植物中 Pb 和 Zn、Pb 和 Cd、Cd 和 Zn 含量之间均有极显著性差异（ $p < 0.01$ ）（表4），这与 Zu 等^[12]的报道相同；而土壤中只有 Pb 和 Zn 之间有极显著差异（ $p < 0.01$ ），富集系数只有 Cd 和

Zn 之间有极显著性差异（ $p < 0.01$ ），富集系数 Pb 和 Zn 之间有显著性差异（ $p < 0.05$ ）（表4），这又与 Zn 等^[12]的报道不同。原因可能与土壤的性质以及不同地点土壤有效金属离子活性不同有关。提取

表 3 重金属含量超过植物正常值 10 倍以上的植物及富集系数

Table 3 Plants with metal concentrations by 10 times of common plant and their bioconcentration factors

重金属	植物名称	倍数	富集系数
Zn	东南景天	44.2	0.27
	爪瓣景天	33.5	0.12
	杠板归	15.1	0.44
	珠芽景天	10.7	0.17
	旋复花	13.3	0.46
	珠芽景天	136	0.37
	东南景天	11	0.07
	四芒景天	137	20.6
Pb	白背叶野桐	29.2	0.02
	东南景天	23.5	0.01
	爪瓣景天	27.1	0.01
	一年蓬	10.4	0.00
	芒萁	11.9	0.01
	珠芽景天	127	0.10
	鲜状景天	13.7	0.07
	东南景天	172	0.09
Cd	苦蕒菜	13.8	0.17
	东南景天	43.5	0.27
	葛藤	46.4	2.78
	四芒景天	567.8	196

表4 植物和土壤中不同重金属含量及其富集系数的关系

Table 4 Relationships between concentrations of heavy metals in plants and soils, and between bioconcentration factors of metals

X	Y	方程	R ²	F 值
植物				
Cu	Zn	$Y=45.082X+365.819$	0.041	1.699
Pb	Cu	$Y=0.036X+14.389$	0.085	3.697
Pb	Zn	$Y=17.062X+288.997$	0.378**	24.268
Pb	Cd	$Y=0.381X+8.514$	0.162**	7.705
Cd	Cu	$Y=0.017X+15.634$	0.017	0.702
Cd	Zn	$Y=27.27X+370.508$	0.867**	260.527
土壤				
Cu	Zn	$Y=3.974X+6295.018$	0.026	1.075
Pb	Cu	$Y=0.012X+287.187$	0.068	2.900
Pb	Zn	$Y=0.932X+804.735$	0.728**	106.822
Pb	Cd	$Y=0.006X+133.458$	0.005	0.201
Cd	Cu	$Y=0.066X+361.668$	0.019	0.754
Cd	Zn	$Y=1.913X+7432.796$	0.025	1.044
富集系数				
Cu	Zn	$Y=-1.942X+0.837$	0.007	0.284
Pb	Cu	$Y=1.319X+0.077$	0.082	3.578
Pb	Zn	$Y=34.154X+0.094$	0.103*	4.589
Pb	Cd	$Y=266.852X+0.535$	0.071	3.034
Cd	Cu	$Y=-0.0005X+0.101$	0.010	0.415
Cd	Zn	$Y=0.106X+0.134$	0.994**	6291.793

**极显著性差异 $p<0.01$, *显著性差异 $p<0.05$, $n=42$ 。

土壤不同重金属形态也是找出影响植物吸收重金属因素的关键^[16-17]

3 讨论

本次进行的 6 个重金属污染地区的植物调查表明, 相同地区不同植物对重金属的吸收有明显的差异性, 即使是相同的植物, 不同的部位也表现不同, 基本上是地下部分高于地上部分。不同植物或同种植物不同生态型吸收和转运重金属的能力也不同^[18]。植物在自然界复杂多样, 长期受客观环境的驯化与诱导, 表现出遗传变异, 从而对土壤重金属的吸收累积表现出质的差异。在矿山和冶炼厂污染区出现抗重金属生态型, 这种抗重金属生态型形成是重金属污染胁迫下植物种群发生进化的结果^[19]。虽然对超积累植物的定义有不同的看法, 但普遍接受的还是 Brooks 和 Baker 等关于超积累植物的 3 个标准: ①在自然条件下生长的植物, 地上部重金属含量达到人为确定的含量标准 (Zn、Mn、As 等元素 10000 mg/kg; Cu、Ni、Pb、Co 等元素 1000

mg/kg; Cd 等元素 100 mg/kg); ②地上部重金属含量/土壤重金属含量 >1 ; ③地上部重金属含量/根系重金属含量 >1 。本次调查也发现在姚王采集的珠芽景天地上部 Cd 含量为 349 mg/kg, 达到超富集含量标准, 而在大岭口矿区采集的珠芽景天地上部 Cd 含量仅为 2.59 mg/kg, 达不到超富集含量标准。

从植物分类学角度看, 本次调查的重金属含量超过植物正常值 10 倍以上的优势植物共有 20 种, 其中有 60.5% 分布在景天科景天属。景天属为一年生或多年生肉质植物, 根多分枝, 株芽多, 无性繁殖速度快且生长快速, 环境适宜时短时期可形成良好的地面覆盖, 稍加以管理一年内便可收获 3 ~ 4 茬。因此, 景天属植物具有良好的修复 Zn 和 Cd 的潜力。

参考文献:

- [1] Brooks RR, Morrison RS, Reeves RD, Dudley TR, Akman Y. Hyperaccumulation of nickel by *Alyssum Linnaeus* (Cruciferae) Proc. R. Soc. Lond., 1979, 203:

- 387-403
- [2] Jaffré T, Schmid M. Accumulation du nickel par une rubiacée de Nouvelle Calédonie: *Psychotria douarrei* (G. Beauvisage) Däniker. CR Acad Sci., 1974, 278: 1727-1730
- [3] Shen ZG, Liu YL. Progress in the study on the plants that hyperaccumulate heavy metal. Plant Physiol Commun., 1998, 34: 133-139
- [4] Baker AJM, McGrath SP, Sidoli CMD, Reeves RD. The possibility of in situ heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants. Resources Conserv. Recycling., 1994, 11: 41-49
- [5] McGrath SP. Phytoextraction for soil remediation// Brooks RR. Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals. Wallingford: CAB International, Oxon, UK, 1998: 261-287
- [6] McGrath SP, Sidoli CMD, Baker AJM, Reeves RD. The potential for the use of metal-accumulating plants for the *in situ* decontamination of metal-polluted soils // Eijssackers HJP, Hamers T. Integrated Soil and Sediment Research: A Basis for Proper Protection. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993
- [7] Schwartz C, Morel JL. How can agronomical practices improve phytoremediation of heavy metal contaminated soils? // Proceedings of the 6th Int FZK/TNO Conference on Contaminated Soil, ConSoil'98. London: Thomas Telford, 1998: 609-617
- [8] Ernst WHO. Mine vegetation in Europe // Shaw AJ. Heavy Metal Tolerance in Plants: Evolutionary Aspects. Boca Raton Florida: CRC press, 1989: 21-38
- [9] Brooks RR. Geobotany and hyperaccumulators// Brooks RR. Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals. Wallingford: CAB International, 1998: 55-94
- [10] Zhao FJ, McGrath SP, Crosland AR. Comparison of three wet digestion methods for the determination of plant sulphur by inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-AES). Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1994, 25: 407-418
- [11] Landberg T, Greger M. Differences in uptake and tolerance to heavy metals in *Salix* from polluted and unpolluted areas. Appl. Geochem., 1996, 11: 175-180
- [12] Zu YQ, Li Y, Christian S, Laurent L, Liu F. Accumulation of Pb, Cd, Cu and Zn in plants and hyperaccumulator choice in Lanping lead-zinc mine area, China. Environment International, 2004, 30: 567-576
- [13] Brooks RR, Lee J, Reeves RD, Jaffré T. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants. Journal of Geochemical Exploration, 1977, 7: 49-57
- [14] 龙新宪, 杨肖娥, 倪吾钟. 重金属污染土壤修复技术研究现状与展望. 应用生态学报, 2002, 13(6): 757-762
- [15] 聂发辉. 关于超富集植物的新理解. 生态环境, 2005, 14(1): 136-138
- [16] Calvet R, Bourgeois S, Msaky JJ. Some experiments on extraction of heavy metals present in soil. Int J Environ Anal Chem., 1990, 39: 31-45
- [17] Ramos L, Hernandez L, Gonzalez MJ. Sequential fractionation of copper, lead, cadmium and zinc in soils from or near Donana National Park. J Environ Qual., 1994, 23: 50-57
- [18] Pence NS, Larsen PB, Ebbs SD, Letham DLD, Lasat MM, Garvin DF, Eide D, Kochian LV. The molecular physiology of heavy metal transport in the Zn/Cd hyperaccumulator of *Thlaspi caerulescens*. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, 2000, 97: 4956-4960
- [19] Wu L. Colonization and establishment of plants in contaminated environments // Shaw AJ. Heavy Metal Tolerance in Plants: Evolutionary Aspects. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1990: 269-284

Dominant Plants and Their Heavy Metal Contents in Six Abandoned Lead-Zinc Mine Areas in Zhejiang Province

BI De^{1,2}, WU Long-hua², LUO Yong-ming², ZHOU Shou-biao¹,
TAN Chang-yin², YIN Xue-bin², YAO Chun-xia², LI Na²

(1 College of life Sciences, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241000, China; 2 Soil and Environment Bioremediation Research Centre, Institute of Soil Science Chinese Academy of Sciences Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: The dominant plants in six abandoned lead-zinc mine areas in Zhejiang Province were investigated and their heavy metal levels were analyzed. Based on this investigation, 36 species belonging to 26 genera and 22 families, in total 42 samples of higher plants were found growing on the abandoned lead-zinc mine areas. Bioconcentration factors of Cu, Zn and Pb were bush > herbaceous, and that of Cd was herbaceous > bush. It was found that the plants had different abilities of uptake and accumulation of Cu, Zn, Pb, Cd. *Sedum bulbiferum*, *Sedum tetractinum* and *Sedum alfredii* had high accumulation to Zn and Cd. And the *Sedum bulbiferum* had a hyper-accumulation level for Cd, *Sedum tetractinum* for Zn and Cd. In addition, *Viola verecunda*, *Ixeris polycephala*, *Pueraria lobata* had high accumulation abilities to Cd. *Commelina communis*, *Mallotus apeltus*, *Erigeron annuus*, *Allium macrostemon* and *Dicranopteris dichotoma* to Pb.

Key words: Lead-zinc mine, Heavy metal, Phytoremediation, Hyperaccumulator, Bioconcentration factor