

铅锌矿区先锋植物野艾蒿对重金属的吸收与富集特征

徐华伟, 张仁陟, 谢 永

(甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:采用野外采样系统分析法,研究了不同年限废弃地野艾蒿对 Cu、Zn、Pb、Cd 的富集与分布。结果表明,不同年限废弃地土壤中重金属的含量随着废弃年限的增加而减少,野艾蒿对 Zn 和 Pb 的富集量较大,不同年限废弃地中野艾蒿和土壤 Cu、Zn 和 Pb 的含量之间呈极显著正相关,野艾蒿对重金属的吸收、富集有随土壤中重金属含量升高而增加的趋势。野艾蒿的不同部位在不同年限废弃地中累积不同重金属的能力不同,除 3 a 废弃地野艾蒿中 Pb 的含量地上部分小于地下部分外,其他环境中重金属含量都表现为地上部分大于地下部分。野艾蒿对 4 种重金属都有不同程度的转运能力,Cu 在不同年限废弃地的生物富集系数均为最大,野艾蒿对 Cu、Cd 转运能力较强。野艾蒿根系对 Pb 有弱的滞留效应为 36.59%,对 Cu、Cd、Zn 没有滞留效应。综合分析结果表明,野艾蒿能吸收富集多种重金属并且具有耐重金属的特性,基于其具有生物量较大、生长速度快的特点,作为重金属污染的修复植物具有较好的应用前景。

关键词:野艾蒿;植物修复;生物富集;耐性

中图分类号:X173 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)06-1136-06

Accumulation and Distribution of Heavy Metals in *Artemisia lavandulaefolia* at Lead-zinc Mining Area

XU Hua-wei, ZHANG Ren-zhi, XIE Yong

(College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The enrichment and distribution of Pb, Zn, Cu and Cd in *Artemisia lavandulaefolia* of different abandoned lead-zinc mine areas were studied. The results showed that the concentrations of heavy metals in soils decreased with abandoned time increasing. *Artemisia lavandulaefolia* had a better absorption capacity for zinc and lead. Correlation was significant at 0.01 level between concentrations of Cu, Zn and Pb in plants and soils. The percentage composition of heavy metals in plant increased with their amounts in soils. The metals accumulation by *Artemisia lavandulaefolia* differed with its parts and kinds of metals in different abandoned lead-zinc mine areas. The concentrations of heavy metals in shoot was higher than root of this species except lead of the first environment. Besides, the bio-concentration factor of copper was greater than other metals. The TF values of copper and cadmium was higher than lead. The Pb of weak retention rate was 36.59% in root of *Artemisia lavandulaefolia*, but it was not retention rate for Cu, Cd, Zn, respectively. Showing by comprehensive analysis that, *Artemisia lavandulaefolia* could concentrate different heavy metals and had the characteristics of a greater biomass, which had a better potential and practical use in phytoremediation.

Keywords: *Artemisia lavandulaefolia*; phytoremediation; bio-concentration; tolerance

矿山开采可为社会提供丰富的工业原料,带来一定的经济效益。但随着金属矿山开采规模日益扩大,矿渣废弃物占用农田、毁坏山林、污染水源、恶化环境,对生存环境与矿山利益引发的生态问题突显^[1-4]。基于重金属污染的危害性和广泛性,矿业开发后的废

弃地修复是环境保护工作中急需开展的紧迫任务之一,具有重要的理论价值和现实意义。

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^[5-7]。在植物修复的过程中,超富集植物的寻找、开发和应用是关键。野艾蒿(*Artemisia lavandulaefolia*)是菊科艾属多年生草本植物,其生物量较大,且能在铅锌矿区正常生长,在我国有广泛的分布。目前我国重金属耐性植物研究主要集中在气候环境适宜、物种资源丰富的南部矿区^[8-10],

收稿日期:2008-09-25

基金项目:国家科技支撑计划项目(2006BAD15B06)

作者简介:徐华伟(1984—),男,河南汝南人,硕士生,主要从事污染土壤植物修复研究。E-mail: xuhuawei2008@yahoo.cn

通讯作者:张仁陟 E-mail: zhangrz@gsau.edu.cn

对于西北地区的耐性植物研究较少,同时有关野艾蒿对重金属的富集方式和耐性机制研究很少^[1]。本文研究了在甘肃陇南某铅锌矿不同年限废弃地上自然生长的野艾蒿对重金属的富集和耐性机制。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于甘肃省东南部,地处秦巴山地中的徽成盆地,南北为山地、中部为浅山丘陵,海拔 1 500~2 600 m,属于温带向亚热带过渡地区。季节特征分明,夏季较短,气候温和,雨量充沛。年均气温 12.4℃,无霜期 237 d,平均降雨量 499.6 mm。该矿体是西成铅锌矿带的西秦岭小陇山中延伸带。由于矿坑中铅锌矿石被采尽,形成了停产时间 10、6 和 3 a 废弃的渣台地,在半山坡上,面积达 10 hm²,人为干扰较少,风蚀较严重,与周围的丛林形成鲜明对比。

1.2 植物样品的采集

本文受试野艾蒿取自不同废弃年限的铅锌矿坑口废渣台地。按照铅锌矿坑口废渣台地废弃年限的不同,分为 3、6 和 10 a 废弃地,并选取周边山坡耕地为对照。各废弃地均采集 5 株,测其野艾蒿生物量的平均值,不同年限废弃地野艾蒿的生物量见表 1。将采集的野艾蒿样品分根、茎、叶 3 部分,洗净,晾干,放在 105℃鼓风干燥箱中烘干 2 h,放置待用。

表 1 不同年限废弃地野艾蒿的生物量

Table 1 Biomass of *Artemisia lavandulaefolia* in different abandoned lead-zinc mine areas

废弃年限 Wasteland age	生物量(平均值)		
	高/cm·株 ⁻¹	直径/cm·株 ⁻¹	干质量/g·株 ⁻¹
3 a	185	50	540
6 a	140	35	464
10 a	86	28	285
CK	58	17	206

注:对照为山坡耕地(CK; hill slope's cultivated land)。

1.3 植物样品分析

将野外采集回来的渣土样品,按分析方法要求进行处理,把各废弃年限废渣地的渣土样品风干,剔除植物残体、石块和其他杂物,混合四分法再取样,样品通过玛瑙碾钵碾细,过 100 目尼龙筛,供分析测定用。植物采集回来,用蒸馏水洗净,风干,杀青后,分别分离各样品的叶、茎和根。由于野艾蒿根部木质坚硬和叶片纤维柔韧而将 80℃烘干改为 105℃烘干,反复

用玛瑙碾钵粉碎碾细,过 100 目尼龙筛,放入干燥箱备用。渣土重金属元素(Cu、Zn、Pb、Cd)的测定采用碳酸钠碱熔法,用 HP3 510 原子吸收分光光度计测定;植物重金属元素(Cu、Zn、Pb、Cd)的测定采用灰分法,用 HP3 510 原子吸收分光光度计测定。

2 结果与讨论

2.1 不同年限废弃地野艾蒿的富集能力

从表 2 可知,野艾蒿在铅锌矿废弃地上可自然生长,在不同年限废弃地上均能正常生长,显示出较强的适应能力和重金属耐性。本次调查的不同年限废弃地土壤中 Pb 的含量之间存在显著性差异($P<0.05$);3 a 废弃地与 6 a 和 10 a 废弃地土壤中 Zn 的含量之间存在显著性差异($P<0.05$);3 a 废弃地与 6 a 和 10 a 废弃地土壤中 Cu 的含量之间存在显著性差异($P<0.05$);不同年限废弃地土壤中 Cd 的含量之间无显著性差异。不同年限废弃地土壤中重金属的含量有随废弃年限增加而降低的趋势,3 a 废弃地土壤中重金属的含量均为最高。

植被对废弃地环境的影响和对重金属吸收积累是其土壤环境改善的重要因素。不同年限废弃地生长的野艾蒿叶中 Pb 的含量之间存在显著性差异($P<0.05$);茎中 Cu 的含量之间存在显著性差异($P<0.05$);茎中 Zn 的含量之间存在显著性差异($P<0.05$);根中 Pb 的含量之间存在显著性差异($P<0.05$)。其中 3 a 废弃地野艾蒿的叶中重金属 Cu、Pb、Cd 含量最高,分别是对照地野艾蒿叶中各重金属含量的 3.15、15.07 和 8.72 倍;3 a 废弃地中野艾蒿茎和根中所含的重金属 Cu、Zn、Pb、Cd 的量,在所有检测样品中也是最高的。这种表现可能与 3 a 废弃地中土壤重金属含量紧密相关,非常重要的一点,3 a 废弃地各重金属含量都比另外两个废弃地高,这恰好和 3 a 废弃地的野艾蒿中重金属含量表现一致。可见野艾蒿重金属耐性是非常强的,表现为铅锌矿废渣地的优势植物。

2.2 野艾蒿不同部位中重金属分布的特点

重金属在野艾蒿器官内的积累与分布见图 1。野艾蒿的不同部位在不同年限废弃地中累积不同重金属的能力不同。在不同年限废弃地生长的野艾蒿,Cu 的含量除 6 a 废弃地是叶>茎>根外,其他环境顺序为叶>根>茎;Zn 的含量在 3 a 和 6 a 废弃地顺序为叶>根>茎,10 a 废弃地为叶>茎>根,对照地为根>叶>茎;Pb 的含量在 3 a 废弃地和对照地顺序为根>叶>茎,6 a 废弃地为叶>根>茎,10 a 废弃地为茎>

表 2 不同年限废弃地野艾蒿对重金属的富集与分布

Table 2 Accumulation and distribution of heavy metals in *Artemisia lavandulaefolia* of different abandoned lead-zinc mine areas

重金属种类 Heavy metals	废弃年限 Wasteland age	重金属质量分数/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$			
		叶	茎	根	土壤
Cu	3 a	108.49±1.91a	46.18±0.11a	105.48±15.22a	105.50±1.86a
	6 a	28.49±1.93c	25.07±1.15b	12.70±0.34b	30.02±3.44b
	10 a	30.01±3.37bc	12.73±1.15c	15.55±2.79b	33.90±3.66bc
	CK	34.42±3.84b	10.15±1.39d	22.52±3.74b	25.92±5.66c
Zn	3 a	4 033.64±12.06b	3 419.95±23.39a	3 830.77±24.53a	13 420±1 792a
	6 a	5 406±378a	1 355.80±76.16b	2 132±256b	4 808±782b
	10 a	596.90±23.62c	329.30±30.83c	324.76±18.48c	4 015±327b
	CK	170.62±14.16c	45.60±4.03d	187.54±31.16c	205.62±18.16c
Pb	3 a	1 056.76±18.74a	103.09±10.22a	1 829.37±291.11a	6 298±224a
	6 a	661.51±37.25b	101.52±1.28a	376.60±74.14b	1 761±433b
	10 a	15.39±2.75d	56.63±8.04b	50.98±8.22d	704.10±47.23c
	CK	70.11±3.57c	37.29±4.77c	106.60±8.03bc	95.16±6.39d
Cd	3 a	2.97±0.61a	0.58±0.12a	0.43±0.04a	2.08±0.12a
	6 a	0.15±0.03b	0.43±0.06b	0.33±0.03a	1.94±0.57a
	10 a	0.25±0.04b	0.41±0.02b	0.35±0.06a	1.73±0.17a
	CK	0.34±0.03b	0.33±0.05b	0.40±0.09a	0.43±0.07b

注:同一重金属废弃年限间的不同小写字母表明 Duncan's 多重比较差异显著($P<0.05$)。

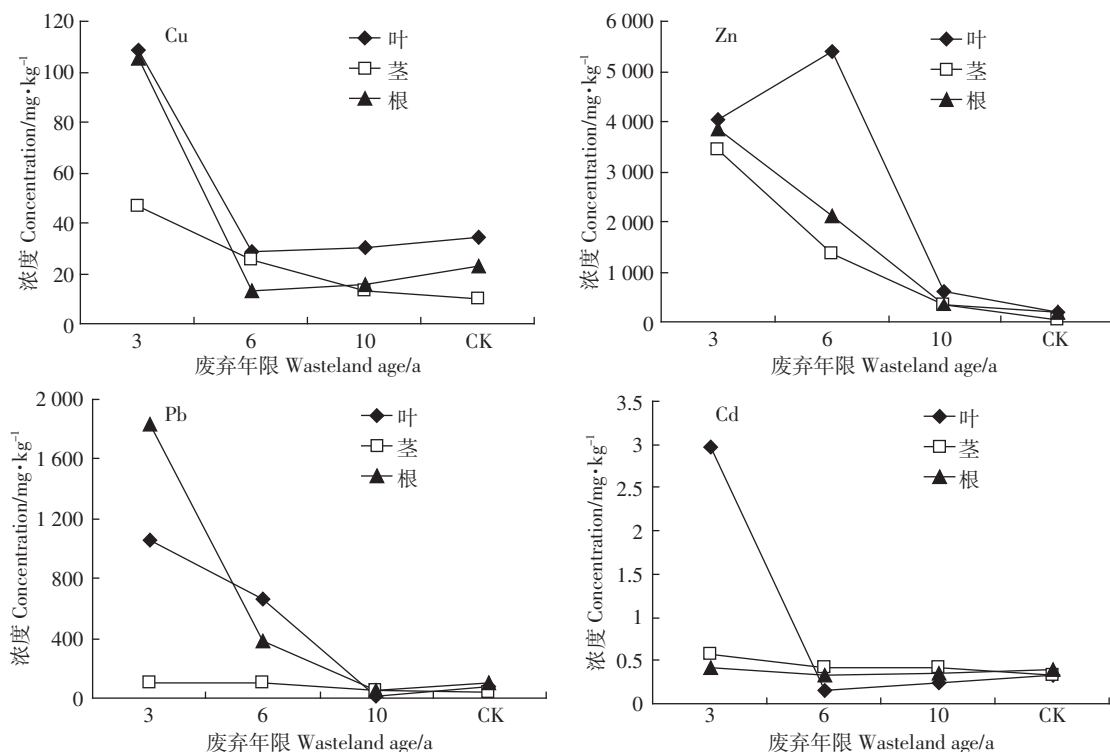


图 1 野艾蒿不同部位的重金属含量

Figure 1 Content of heavy metals in different parts of *Artemisia lavandulaefolia*

叶>根;Cd 的含量在 6 a 和 10 a 废弃地顺序为茎>根>叶, 3 a 废弃地为叶>茎>根, 对照地为根>叶>茎。比较 4 种金属, Zn 的地上部富集量最大, 其次为 Pb

和 Cu, 最小为 Cd。

植物体中重金属含量差异一方面是土壤污染状况的直接表征, 另一方面也反映了不同条件下相同植

物对各种重金属吸收积累差异与特点。由表 2 可知,不同年限废弃地土壤重金属含量最高的为 Zn($13\,420\pm 1\,792$) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其次为 Pb($6\,298\pm 224$) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,接着为 Cu(105.50 ± 1.86) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,最低为 Cd(2.08 ± 0.12) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,这与野艾蒿中重金属含量表现一致。不同年限废弃地除 3 a 废弃地野艾蒿中 Pb 的含量地上部分小于地下部分外,其他环境下重金属含量都表现为地上部分大于地下部分。这与其他矿区植物的重金属含量根部大都高于地上部分相反^[12-14]。从植物生理角度看,叶子中的重金属含量一般高于茎,这可能是植物重金属耐性的一种对策,因为可以通过落叶将重金属排出体外^[15]。本次调查研究表明野艾蒿是绿化铅锌矿废渣地的优势植物之一,但同时从表 2 中也要注意,在废渣地上生长的野艾蒿的根、叶和茎中重金属含量之和都远高于普通植物重金属最大含量;对照地的野艾蒿也不例外,它的植物体内重金属含量也高于普通植物重金属最大含量。重金属污染要加强治理,废渣地上植被也要保护,禁止家禽、家畜取食破坏,为的是一方面保护植被恢复,另一方面也减少重金属进入食物链,危害人类健康。

2.3 生物的富集系数和转运能力

一般根据 Brooks 对超富集植物的定义^[16],应用时满足以下 3 个标准:(1)植物地上部分富集的某种元素含量达到生长在同一介质系统超富集植物地上部分含量的 100 倍以上,其临界含量标准(以干重计)是 Pb、Cu、Ni、Mn、Co 等多数重金属为 $1\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Zn 为 $10\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Au 为 $1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Cd 为 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。(2)地上部重金属含量大于根部,植物的生长没有受到明显的伤害。(3)理想的超富集植物还应具有生长期短、抗病能力强、地上部生物量大,能同时富集 2 种或 2 种以上重金属特点。从表 2 中可以看出,在各废渣地的野艾蒿检测的重金属数据不符合超富集植物第一个条件的是 Cu、Zn、Cd,所以它对这些重金属来说,不属于超富集植物,是富集植物。在复合污染条件下,野艾蒿对 Pb 的吸收超过 $1\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,具备超富集植物的特征和潜能。

富集系数(EC)是植物体内的重金属含量与相应的土壤重金属含量之比,它表示植物对土壤重金属吸收能力的强弱。从表 3 中,野艾蒿对各种重金属的富集系数看,3 a 废弃地野艾蒿对各金属富集能力表现为 $\text{Cu}>\text{Cd}>\text{Zn}>\text{Pb}$;在 6 a 和 10 a 废弃地中野艾蒿对各重金属富集能力表现为 $\text{Cu}>\text{Pb}>\text{Cd}>\text{Zn}$;对照地野艾蒿对重金属的富集系数表现为 $\text{Cu}>\text{Cd}>\text{Pb}>\text{Zn}$ 。

在 4 种条件下野艾蒿对 Cu 的富集系数都为最大,这说明和其他金属相比野艾蒿对 Cu 的富集是有优势的。

转移系数(TF)是植物地上部分重金属含量与其根部对应重金属含量的比值,反映了重金属在植物不同器官中的分配情况。从表 3 野艾蒿对各重金属的转移系数值上看,在 3 a 废弃地中野艾蒿对各重金属的转移能力顺序为 $\text{Cd}>\text{Zn}>\text{Cu}>\text{Pb}$;6 a 废弃地野艾蒿对金属的转移能力为 $\text{Cu}>\text{Zn}>\text{Pb}>\text{Cd}$;10 a 废弃地野艾蒿对重金属的转移能力为 $\text{Zn}>\text{Cu}>\text{Cd}>\text{Pb}$;对照地野艾蒿对重金属转移能力为 $\text{Cu}>\text{Cd}>\text{Zn}>\text{Pb}$ 。其中 3 a 废弃地中野艾蒿对 Cd 的转移系数最高为 8.302,6 a 废弃地野艾蒿对 Cu 的转移系数次之为 4.217。

表 3 植物的富集系数(EC)和转移系数(TF)

Table 3 Enrichment coefficient (EC) and translocation factors (TF) of plant to heavy metals

废弃年限 Wasteland age	Cu		Zn		Pb		Cd	
	EC	TF	EC	TF	EC	TF	EC	TF
3 a	2.466	1.466	0.841	1.946	0.475	0.634	1.911	8.302
6 a	2.215	4.217	0.185	3.172	0.647	2.026	0.472	1.748
10 a	1.719	2.749	0.312	2.852	0.175	1.413	0.586	1.864
CK	2.588	1.980	1.964	1.153	2.249	1.008	2.502	1.711

2.4 野艾蒿根部滞留效应的胁迫反应分析

根系对重金属的滞留率是根部重金属含量与地上部重金属含量之差与根部重金属含量的比值,它的大小体现植物对重金属耐性能力高低。植物根部对重金属的滞留效应是一种生存策略,一种保护性反应。研究发现野艾蒿体内 Cu、Zn、Pb、Cd 含量都随着污染物浓度的增加而升高,除 3 a 废渣地的 Pb 的含量植物地下根部分高于地上部分,其他各重金属在植物中的含量都是地上部分高于地下根部分。所以 3 a 废弃地中野艾蒿根系对 Pb 有弱的滞留效应为 36.59%;其他时间里野艾蒿对 Cu、Zn、Pb、Cd 没有滞留效应;对照地的野艾蒿对 Cu、Zn、Pb、Cd 都没有滞留效应(见表 4)。植物对重金属在根部的吸收均有滞留效应,将有害离子积累于根部是植物阻止其对光合作用及新陈代谢活性毒害的一种策略^[17]。野艾蒿在废渣地上对重金属毒性的胁迫反应就是把根部吸收富集的重金属转移到地上部分,在根部留有足够储存重金属空间来应对土壤中重金属的高浓度。由此看来,能阻止野艾蒿进行光合作用和新陈代谢的地上部重金属毒害阈值相当高。野艾蒿对 Cu、Zn、Pb、

Cd 重金属在根部几乎没有滞留效应。说明其对 Cu、Zn、Pb、Cd 的耐性很强,非常适合作为铅锌矿废渣地植物恢复的优势植物。

表 4 野艾蒿对废弃地重金属的滞留率
Table 4 Retention rate of heavy metals in *Artemisia lavandulaefolia* on wasteland

废弃年限 Wasteland age	野艾蒿根系重金属滞留率/%			
	Cu	Zn	Pb	Cd
3 a	-46.63	-94.57	+36.59	-730.21
6 a	-321.73	-217.16	-102.61	-74.77
10 a	-174.85	-185.19	-41.27	-86.44
CK	-97.91	-15.30	-80.00	-71.13

2.5 植物和土壤中重金属含量的关系

从表 5 可知,不同年限废弃地野艾蒿和土壤中 Cu、Zn 和 Pb 的含量之间存在极显著正相关。从 10 a 废弃地到 3 a 废弃地,随着土壤中 Cu、Zn 和 Pb 的含量增加,野艾蒿 Cu、Zn 和 Pb 的含量显著增加。这种表现与 3 a 废弃地的野艾蒿中 Cu、Zn 和 Pb 的含量均为最高表现一致。说明野艾蒿对重金属的吸收除植物本身生理条件限制外,还受环境中土壤重金属含量的影响。

表 5 植物和土壤中不同重金属含量的关系
Table 5 Relationships between concentrations of heavy metals in plants and soils

重金属种类 Heavy metals	X	Y	方程	R ²
Cu	土壤	植物	Y=2.565 2X-12.323	0.979 9**
Zn	土壤	植物	Y=0.804 4X+943.74	0.695 4**
Pb	土壤	植物	Y=0.467 4X+81.322	0.966**
Cd	土壤	植物	Y=0.818 6X+0.477 8	0.185 2

注:**表示显著相关达到 0.01 水平。

3 结论

- (1)不同年限废弃地土壤中重金属的含量有随废弃年限增加而降低的趋势,3 a 废弃地土壤重金属的含量均为最高。
- (2)野艾蒿对 Zn 和 Pb 的富集量较大,不同年限废弃地中野艾蒿和土壤 Cu、Zn 和 Pb 的含量之间呈极显著正相关,野艾蒿对重金属的吸收、富集有随土壤中重金属含量升高而增加的趋势。
- (3)野艾蒿的不同部位在不同年限废弃地中累积不同重金属的能力不同。除 3 a 废渣地野艾蒿中 Pb 的含量地上部分小于地下部分外,其他环境下重金属

- 含量都表现为地上部分大于地下部分。
- (4)野艾蒿对 4 种重金属都有不同程度的转运能力,Cu 在不同年限废弃地的生物富集系数均为最大,野艾蒿对 Cu、Cd 的转移系数较大。
- (5)野艾蒿根系对 Pb 有弱的滞留效应,对 Cu、Cd、Zn 没有滞留效应,它能吸收富集多种重金属并且具有耐重金属的特性。

(6)野艾蒿对重金属 Cu、Zn、Pb、Cd 的吸收积累的数据分析比较表明,它不属于超富集植物,是富集植物。但在复合污染条件下,野艾蒿对 Pb 的吸收超过1 000 mg·kg⁻¹,具备超富集植物的特征和潜能,且生物量较大,生长速度快,作为重金属污染的修复植物具有较好的应用前景。

参考文献:

[1] Gregurek D, Reimann C, stump E F. Trace elements and precious metals in snow samples from the immediate vicinity of nickel processing plants, Kola Peninsula, northwest Russia[J]. *Environmental Pollution*, 1998, 102: 221-232.

[2] Dudka S, Adriano D C. Environmental impacts of metal ore mining and processing:a review [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26: 590-602.

[3] Liao X Y, Chen T B, Xie H, et al. Soil as contamination and its risk asesment in areas near the industrial districts of Chenzhou city, southern China[J]. *Environment International*, 2005, 31: 791-798.

[4] 林初夏, 卢文洲, 吴永贵, 等. 大宝山矿水外排的环境影响[J]. *生态环境*, 2005, 14(2): 169-172.

LIN Chu-xia, LU Wen-zhou, WU Yong-gui, et al. Environmental impacts of acid mine drainage from the Dabaoshan mine[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(2): 169-172.

[5] Robert R D, Marrs R H, Skeffington R A, et al. Ecosystem development on naturally colonized China clay wastes I. vegetation changes and over-all accumulation of organical matter and nutrients[J]. *Ecol*, 1981, 69: 153-161.

[6] 夏汉平, 束文胜. 香根草和百喜草对铅锌尾矿重金属的抗性与吸收差异研究[J]. *生态学报*, 2001, 21(7): 1121-1129.

XIA Han-ping, SHU Wen-sheng. Resistance to and uptake of heavy metals by *Vetiveria zizanioides* and *Paspalum notatum* from lead-zinc mine tailing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(7): 1121-1129.

[7] 毕德, 吴龙华, 骆永明, 等. 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[J]. *土壤*, 2006, 38(5): 591-597.

BI De, WU Long-hua, LUO Yong-ming, et al. Dominant plants and their heavy metal contents in six abandoned lead-zinc mine areas in Zhejiang Province[J]. *Soils*, 2006, 38(5): 591-597.

[8] 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 等. 神超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征[J]. *科学通报*, 2002, 47(3): 207-210.

CHEN Tong-bin, WEI Chao-yang, HUANG Ze-chun, et al. Arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and its arsenic accumulation[J]. *Chi-*

- nese Science Bulletin, 2002, 47(3):207-210.
- [9] 韦朝阳, 陈同斌. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展[J]. 生态学报, 2001, 21(7):1196-1203.
- WEI Chao-yang, CHEN Tong-bin. Hyperaccumulators and phytoremediation of heavy metal contaminated soil: a review of studies in China and abroad[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(7):1196-1203.
- [10] 韦朝阳, 陈同斌. 高砷区植物的生态与化学特性[J]. 植物生态学报, 2002, 26(6):695-700.
- WEI Chao-yang, CHEN Tong-bin. The ecological and chemical characteristics of plants in the areas of high arsenic levels[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 26(6):695-700.
- [11] 甄 泉, 严 密, 杨红飞, 等. 铜污染对野艾蒿生长发育的胁迫及伤害[J]. 应用生态学报, 2006, 17(8):1505-1510.
- ZHEN Quan, YAN Mi, YANG Hong-fei, et al. Coercion and damage of Cu pollution on *Artemisia lavandulaefolia* growth[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(8):1505-1510.
- [12] Ye Z H, Wong J W C, Wong M H. Lime and pig manure as ameliorants for revegetating lead/zinc mine tailings: a greenhouse study[J]. *Biores Tech*, 1999, 69:35-43.
- [13] Ye Z H, Yang Z Y, Chan G Y. Growth response of *Sesbania rostrata* and *Scannabina* to sludgeamend lead/zinc mine tailings: a greenhouse study [J]. *Environmental Geology*, 2001, 26:449-455.
- [14] 束文圣, 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.
- SHU Wen-sheng, YANG Kai-yan, ZHANG Zhi-quan, et al. Flora and heavy metals in dominate plants growing on an ancient copper spoil heap on Tonglùshan in Hubei Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2001, 7(1):7-12.
- [15] Kabata-pendias A, Pendias H. Trace elements in soils and plants[M]. 2nd edition. London: CRC Press, 1992:67-68.
- [16] Brooks R R, Lee J, Reeves R D. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants[J]. *Plant and Soil*, 1977(7):49-57.
- [17] Zurayk R, Sukkariyah B, Baalbaki R. Common hydrophytes as bioindicators of nickel chromium and cadmium pollution[J]. *Water Air Soil Pollut*, 2001, 127:373-388.