

# 徽县洛坝铅锌矿废渣地植被及优势种竞争强度研究

谢 永, 张仁陟, 董 博, 赵建华, 徐华伟

(甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘 要:**通过对徽县洛坝铅锌矿废弃时间不同的废渣地化学分析表明,主要污染物类型为重金属 Pb、Zn,最高含量 Pb 为 6 298 mg·kg<sup>-1</sup>、Zn 为 480 800 mg·kg<sup>-1</sup>。重金属在废渣地含量随废弃时间增长而减少,对其自然恢复植被的物种调查发现废渣地 Pb、Zn 浓度是影响植物自然定居的限制因子。本文在现场踏查的基础上对洛坝废渣地进行了生态调查。结果表明,本次调查共记录的 35 种植物,隶属 16 个科 20 个属,多为 1~2 年生草本植物,优势植物是以野艾蒿为代表的菊科。11 年废渣地以野艾蒿+车前草、野艾蒿+小亚麻芥等稳定群落为主;6 年废渣地多以野艾蒿、马升塘、灰绿藜等单种群存在;3 年废渣地植物则表现为稀少的节节草+苍耳群落和一个不稳定植物斑块;11 年废渣地正形成良好的植被。对废渣地的优势植物竞争性分析表明,竞争植株盖度与竞争强度呈正相关;种内和种间竞争总强度分别为 4.063、3.031。优势植物的竞争强度来自种内,野艾蒿是可以作为在铅锌矿废渣地植物恢复的优势植物。

**关键词:**徽县;铅锌矿;废渣地;植被;竞争强度

**中图分类号:**X173 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)05-1764-05

## Vegetation and Competitive Intensity of Dominant Plants in Wasteland of Lead-Zinc Mine in HuiXian LuoBa

XIE Yong, ZHANG Ren-zhi, DONG Bo, ZHAO Jian-hua, XU Hua-wei

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

**Abstract:** The Chemical analysis on difference time of wasteland in lead-zinc mine in HuiXian LuoBa indicates that the main pollutant type is some heavy metals such as Pb、Zn and so on. The soils contained exceptionally high concentrations of Pb, Zn. The highest content of Zn=480 800 mg·kg<sup>-1</sup> and Pb=6 298 mg·kg<sup>-1</sup>. The heavy metal contains in wasteland are decreasing with the abandon time growing. Discove from the species investigate on plant instauration that the phytotoxicity of Pb、Zn may be the major obstacle factor for plants to object on the wasteland. In the investigation, Record 35 species plants found growing on the wasteland. They belong to 16 sections and 20 families. Many of them are annual plants or two-year plants. The dominant species is *Artemisia vulgaris* of compositae. There are mainly microcoenses such as *Artemisia vulgaris*+*Plantago asiatica* and *Artemisia vulgaris* community+*Camelina microcarpa* community in 11 a wasteland. But there are many microcoenses such as *Artemisia vulgaris*, *Digitaria sanguinalis*, *Chenopodium glaucum* single population in 6 a wasteland. 2 plants were composing of a community scarcely of *Equisetum ramosissimum*+*Xanthium sibiricum* and one unstable plaque of plants in 3 a wasteland. Better vegetation is forming on 11 a wasteland. The competition intensity of dominant species has a strong relativity to the coverage of competitors. Intra-specific competition intensity is 4.063. Inter-specific competition intensity is 3.031. Competitive intensity of dominant plants was coming from intra-specific competition. *Artemisia vulgaris* of dominant species that it is widespread used phytoremediation of wasteland in lead-zinc mine.

**Keywords:** Huixian; Lead-zinc mine; wasteland; vegetation; competitive intensity

矿产资源开采规模日益扩大,尽管利用矿山开发推动了本地经济发展,但矿渣废弃物占用农田、毁坏山林、污染水源、造成环境恶化,生存环境与矿山利益

引发生态问题突显<sup>[1,2]</sup>。铅锌矿业是徽县支柱产业,柳林河谷随处可见废渣场。铅锌矿的坑口废渣台地是一类重金属含量极高、对植物生长产生毒害的生境<sup>[3]</sup>。为缓解生态压力、减少危害,必须对此加以治理。

寻找废渣地优势植物,对重金属污染渣地重建植被和植被恢复起决定性的作用<sup>[4,5]</sup>。矿山区、成矿作用带、富含金属元素岩石风化而成的土壤上,超积累植物大都以群落方式聚集生长。这些植物对重金属具有

收稿日期:2007-10-19

基金项目:甘肃省环保世纪行基金资助

作者简介:谢 永(1973—),男,安徽灵璧人,硕士生,从事环境生态学  
与生态恢复研究。E-mail:szxieyong@126.com

通讯作者:张仁陟 E-mail:zhangrz@gsau.edu.cn

很强的吸收和忍耐能力,尤其其地上部分,这也是利用植物作用降低土壤中重金属污染物的基础<sup>[4]</sup>。禾本科多年生草本植物被发现在铅锌矿尾矿上抗性强,对贫瘠、寸草不生的恶劣生境都能生存,甚至正常生长<sup>[6]</sup>。优势植物表现为对环境资源和空间的争夺优势,这不仅决定于其本身的生物学特性,也受到其他生物和非生物因素的影响。竞争的结果不仅影响个体的生存、生长和繁殖,而且影响空间分布、动态和群落的物种多样性<sup>[7]</sup>。竞争指数被广泛应用并被证明能够很好地解释植物竞争的强度、作用和竞争结果,但多用于森林乔灌木研究<sup>[8-10]</sup>,用于废渣地优势草本的个体生长与生存空间的竞争性探讨不多。本文通过对洛坝废渣台地自然生长的植被调查,分析了其组成和结构特征,并研究了优势植物的竞争性,为废渣地植被恢复选取优势植物提供参考依据。

# 1 研究地区及研究方法

## 1.1 自然地理概况

徽县处于甘肃省东南部,地处秦巴山地中的徽成盆地,素有“陇上江南”之美誉;位于 106°17′~106°34′E,33°30′~33°43′N,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。洛坝铅锌矿场位于徽县柳林镇洛坝村,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 11 年、6 年和 3 年废弃的渣台地,在半山坡上,面积达 10 hm<sup>2</sup>,人为干扰较少,风蚀较严重,与周围郁葱的丛林形成鲜明的对比。

## 1.2 植被调查方法

2007 年 6 月对洛坝废渣台地首先进行踏查,掌握地形基本情况后进行了生态调查。拍照和记录了所有自然定居于该废渣地的高等植物。在植被区有代表性的设置了 20 个 1 m×1 m 面积为 1 m<sup>2</sup> 的样方,记录样方内植物种类、株数、植株高度、总投影盖度和各植物分盖度并随机取土样。通过统计各样方植物出现频率和植物盖度高的、目测地上生物量大的植物,确定其为优势植物。对样方内盖度≥5 cm 的所有植物定位,选取确定的优势植物为对象植物,以该对象植物为中心,将半径 0.56 m 样圆内的所有盖度≥5 cm 的植物定义为竞争植物,测量其与对象植物的距离并记录竞争植物种名<sup>[9,10]</sup>。

## 1.3 数据处理

### 1.3.1 样方各植物物种的测定物种优势度

用综合优势比测定。物种多样性测定用 Simpson 指数。物种分布均匀度的测定用 Shannon-Weiner 指数<sup>[11,12]</sup>。公式如下:

综合优势比:  $SDR_3 = (\text{高度比} + \text{盖度比} + \text{频度比}) / 3 \times 100\%$

多样性指数:  $D = 1 - \sum P_i^2$

均匀度指数:  $E = H / H_{\max}, H = - \sum P_i \log_2 P_i, H_{\max} = \log_2 S$

式中:  $P_i$  是第  $i$  个种的个数  $N_i$  占总个体数  $N$  的比例;  $S$  是群落中的总种数;  $H$  是实际观察的种类多样性;  $H_{\max}$  是最大的种类多样性。

### 1.3.2 Hegyi 的单株竞争指数

该竞争指数在形式上反映的是个体生长与生存空间的关系,实质反映了植物对环境质量的需求与现实生境下植物对环境资源占有量之间的关系<sup>[13-15]</sup>。且野外调查方法相对简单易行,获得数据准确。本研究采用 Hegyi 提出的单株植物竞争指数( $CI$ )计算方法如下:

单株植物竞争指数:  $CI_i = \sum_{j=1}^N D_j D_i^{-1} L_{ij}^{-1}, CI = \sum CI_i$

式中:  $i$  为对象植株的数量;  $j$  为竞争植株的数量;  $CI_i$  为第  $i$  株对象植株的竞争指数;  $D_i$  为对象植株的盖度, cm;  $D_j$  为竞争植株  $j$  的盖度, cm;  $L_{ij}$  为对象植株  $i$  与竞争植株  $j$  之间的距离, cm;  $N$  为第  $i$  株对象植物的竞争植株的数量;  $CI$  为种群的竞争指数。

### 1.3.3 废渣地中的重金属含量

采自洛坝铅锌矿坑口废渣台地的样品,用 ICP<sup>[16]</sup>分析得到的渣地中重金属含量见表 1。可以看出此废渣地的污染物类型是 Zn 和 Pb,在不同废弃年份的土样中 6 年的 Zn 高达 480 800 mg·kg<sup>-1</sup>、3 年的 Pb 高达 6 298 mg·kg<sup>-1</sup>。从数据的总趋势上看,渣地废弃年限越长重金属含量逐渐降低,但 10 年后各重金属含量依然远高于周边山地。

表 1 洛坝铅锌矿废渣地土壤的基本化学性质

Table 1 Chemical properties of surface(0~20 cm)soil of in

Lead-Zinc Mine wasteland in Luoba

| 废弃年限 | Zn/mg·kg <sup>-1</sup> | Pb/mg·kg <sup>-1</sup> | Cu/mg·kg <sup>-1</sup> | Cd/mg·kg <sup>-1</sup> |
|------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 3 a  | 13 420                 | 6 298                  | 105.5                  | 2.078                  |
| 6 a  | 480 800                | 1 761                  | 30.02                  | 1.937                  |
| 10 a | 4 015                  | 704.1                  | 33.9                   | 1.729                  |
| CK   | 205.6                  | 95.16                  | 25.92                  | 0.428                  |

注:对照为山坡耕地(CK; Hill slope's Cultivated Land)。

2 结果与讨论

2.1 废渣地植被组成及特征

洛坝铅锌矿废渣地在柳林河山谷深处,三面环山的北坡上。周围山体植被覆盖度 100%,且植被结构层次分明,分布着乔木、灌木和大量草本植物。而废渣台地植被总覆盖度较小,平均不足 20%,共有 35 种植物,隶属于 16 个科 20 个属,绝大部分为广见种,对不同生境条件具有较强的适应能力,只是在 3 年废渣地有鬼针草(*Bidens pilosa*),在周围非矿区植被中没有出现。废渣地植被组成以菊科蒿属最多,禾本科次之。蒿属 5 种植物,占总种数的 14.28%。禾本科 4 种植物,占总种数的 11.42%。其他科植物多为单种科,个体数也相对较少。其植被组成以 1~2 年生草本为主,有 32 种占总物种的 91.42%,在渣地周围优势灌木紫薇(*Lagerstroemia indica*)、乔木臭椿(*Ailanthus altissima*),出现在 10 年废渣地上,但极其矮小稀少。这一现象从(表 1)废渣地重金属含量值的变化可以解释,长时间的 自然作用重金属流失和草本定居使重金属毒性逐步降解到植物能忍受的毒性阈值,废渣地植物逐渐变多。洛坝废渣地植被中(表 2)可以看出废渣地生态系统恢复系列上,伴随植被发育和群落演替过程物种丰富度逐渐增加,种群优势度在各群落中有起伏,但总体上种群优势度明显,少数物种贡献了群落生态功能的大部分。综合优势比最大的植物是野艾蒿(*Artemisia vulgaris*),其次是桃叶蓼(*polygonum persicaria*)、车前草(*Plantago asiatica*)、升马塘(*Digitaria sanguinalis*)和灰绿藜(*Chenopodium glaucum*)等,如 6 年和 3 年废渣地显示出单种优势度较高的反枝苋(*Amaranthus retroflexus*)和节节草(*Equisetum ramosissimum*)、鬼针草。综合优势比大的植物在铅锌矿废渣地的植被构成担当先锋和建群植物,说明它们对早期严酷环境有较强适应能力,在生态恢复中起着至关重要的作用,这在 10 年废渣台地的植被结构和生物量上表现更为明显。从表 2 可以看出在废渣地上植物自然定居过程极其缓慢,要达到良好的植被是要几十年,甚至更长时间。植物生长过程也是其立地基质的缓慢改良和耐性植物逐渐形成的过程<sup>[17,18]</sup>。调查中发现废渣地植物多为草本,在周围山坡广为分布,其种子小轻,易借助风媒传播。柳林溪水和周围茂密植被多有泉水流出使得该地区环境湿润,水分不应成为植物分布的重要制约因子。适应严酷的废渣台地生境应该是这些植物生存的充分必要的条件。

表 2 洛坝铅锌矿废渣地植被的物种组成及综合优势比  
Table 2 Vegetation composition and synthesized dominance ratio in Lead-Zinc Mine wasteland in Luoba

| 种名                                       | 综合优势比  |       |       |
|------------------------------------------|--------|-------|-------|
|                                          | 11年废渣地 | 6年废渣地 | 3年废渣地 |
| 野艾蒿 <i>Artemisia vulgaris</i>            | 35.38  | 24.26 | 10.51 |
| 铁杆蒿 <i>Arysanthemum carinatum</i>        | 28.40  | 18.56 | 9.98  |
| 菊蒿 <i>Tanacetum vulgare</i>              | 8.64   | 5.92  | 2.78  |
| 臭蒿 <i>Descurainia Sophia</i>             | 6.76   | 4.21  | 2.32  |
| 苦卖菜 <i>Lxeris sonchifolia</i>            | 0.36   | 1.23  | —     |
| 青蒿 <i>Artemisia apiacea</i>              | 5.48   | 8.26  | —     |
| 仓耳 <i>Xanthium sibiricum</i>             | 0.38   | —     | 6.63  |
| 蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>          | 0.12   | 1.08  | —     |
| 一年蓬 <i>Erigeron annuus</i>               | 1.68   | 0.53  | —     |
| 刺儿菜 <i>Cephalanoplos segetum</i>         | 0.16   | 1.05  | —     |
| 苘麻 <i>Abutilon theophrasti</i>           | 5.32   | —     | —     |
| 反枝苋 <i>Amaranthus retroflexus</i>        | 4.26   | 12.58 | —     |
| 车前草 <i>Plantago asiatica</i>             | 10.63  | 3.85  | 1.38  |
| 升马塘 <i>Digitaria sanguinalis</i>         | 4.66   | 10.54 | 1.05  |
| 短芒大麦草 <i>Hordeum brevisubulatum</i>      | 0.26   | 8.72  | 0.84  |
| 节节草 <i>Equisetum ramosissimum</i>        | 0.14   | 0.56  | 8.26  |
| 狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>              | 0.18   | 2.14  | 4.28  |
| 锋芒草 <i>Tragus bertesonianus</i>          | —      | 2.51  | —     |
| 牛筋草 <i>Eleusine indica</i>               | 0.34   | 1.56  | —     |
| 灰绿藜 <i>Chenopodium glaucum</i>           | 1.26   | 10.25 | —     |
| 小藜 <i>Chenopodium serotinum</i>          | 0.21   | 6.86  | —     |
| 铁苋菜 <i>Acalypha australis</i>            | 0.35   | 8.42  | —     |
| 蛇莓 <i>Duchesnea indica</i>               | 2.15   | —     | —     |
| 紫花地丁 <i>Viola philippica subsp.munda</i> | 1.32   | —     | —     |
| 鹅肠菜 <i>Myosoton aquaticum</i>            | 0.68   | —     | —     |
| 酸模 <i>Polygonum lapathifolium</i>        | 0.24   | 0.85  | —     |
| 龙葵 <i>Solanum nigrum</i>                 | 0.16   | —     | —     |
| 狗尾草 <i>Setaria faberii</i>               | 0.13   | 1.27  | —     |
| 毛茛 <i>Ranunculus sceleratus</i>          | 0.21   | —     | —     |
| 小果亚麻芥 <i>Camelina microcarpa</i>         | 0.56   | 0.38  | —     |
| 鬼针草 <i>Bidens parviflora Willd</i>       | —      | —     | 0.27  |
| 桃叶蓼 <i>polygonum persicaria</i>          | 1.05   | —     | —     |
| 紫薇 <i>Lagerstroemia indica</i>           | 0.13   | —     | —     |
| 臭椿 <i>Ailanthus altissima</i>            | 0.11   | —     | —     |

2.2 废渣地主要植被类型及结构特征

洛坝矿废渣地植被在调查分析基础上,根据植被组成及各物种的优势比、生境群集度,其植被可分为 6 种相对稳定的小群落(表 3)和一些单种植物组成的生境斑块。其中以野艾蒿(*Artemisia vulgaris*)+小亚麻芥(*Camelina microcarpa*)和野艾蒿(*Artemisia vulgaris*)+车前草(*Plantago asiatica*)群落分布广,显示出较大的优势,其盖度平均达 35%,这在 6 年和 11 年废渣地均有表现。更多植物以小面积、集群和零散分布,局部植物聚集区盖度达 80%~90%,如小藜(*Chenopodi-*

um serotinum)、青蒿(*Artemisia apiacea*)、节节草(*Equisetum ramosissimum*)、苍耳(*Xanthium sibiricum*)群落及单种升马塘种群,这在 3 年废渣地表现的更为普遍。说明 3 年废渣地局部生境适应植物生存,对植物致命的有害物质由于暴露在自然界时间短还没有向周围释放扩散,使得这些物种生长且组成少而盖度较高,而大部分斑块区域达不到植物立地条件。11 年废渣地自然生境改善,野艾蒿(*Artemisia vulgaris*)+小亚麻芥(*Camelina microcarpa*)、野艾蒿(*Artemisia vulgaris*)+车前草(*Plantago asiatica*)群落种数分别是 4 和 8,它们盖度和 3 年、6 年的比不是太高是 60%、40%,但它们均匀度指数较高分别达 0.528、0.635,这说明废渣地基质正在良性改变,大部分区域适宜优势植物生长。3 年废渣地野艾蒿(*Artemisia vulgaris*)+狗牙根(*Cynodon dactylon*)群落多样性指数和均匀度指数分别达到 0.825 和 0.652,这可能是取样时,该地植物稀少,但聚集生长,2 个样地就囊括里绝大部分植物,物种多样性作为群落的基本特征,既表征群落的组成结构,也是对环境状况的指示,从表 1 的重金属含量更能说明该区域生境更恶劣。

2.3 废渣地优势种竞争性

竞争是植物种内和种间关系的主要形式之一。通过对洛坝铅锌矿废渣地植被分析,野艾蒿是优势植物并选取它为对象植株,在样品数据处理(表 4)中,从竞争指数看种群受到的竞争压力不仅受竞争植株大小的影响,而且与竞争植株数量直接相关,这可能是立地条件的营养资源有限造成的。竞争植物株数和盖度不均匀,多分布在 8~15 cm 范围内,10~15 cm 盖度植物,不管种内、种间平均竞争指数都最大是 0.205 和 0.221,随着竞争植株盖度增大,有对对象植株的竞

争强度也增大的趋势,说明在此生境里生存延续下去压力之大。在种内竞争中,7 株盖度在 10~15 cm 的竞争植株竞争指数为 1.432;在种间竞争中,5 株盖度在 10~15 cm 的竞争植株竞争指数为 1.105;植物盖度表现为其对环境资源和空间的争夺激烈程度的指标。植物盖度在 8~10 cm 的株数最多,竞争指数种内最大为 1.661、种间为 0.936,可以预测未来植物的生长竞争将使植物的格局不稳定。种内总竞争强度 4.063 高于种间总竞争强度 3.031,占总竞争强度的 57.3%。进一步反映野艾蒿是优势种群,竞争强度多来自种内。

表 4 野艾蒿的种内和种间竞争强度  
Table 4 The intraspecific and interspecific competition intensity of *Artemisia vulgaris*

| 竞争植株<br>盖度/cm | 种内竞争 |       |        | 种间竞争 |       |        |
|---------------|------|-------|--------|------|-------|--------|
|               | 株数   | 竞争指数  | 平均竞争指数 | 株数   | 竞争指数  | 平均竞争指数 |
| 5~8           | 4    | 0.564 | 0.141  | 6    | 0.738 | 0.123  |
| 8~10          | 12   | 1.661 | 0.138  | 9    | 0.936 | 0.104  |
| 10~15         | 7    | 1.432 | 0.205  | 5    | 1.105 | 0.221  |
| 15~20         | 3    | 0.406 | 0.135  | 2    | 0.252 | 0.126  |
| 总计            | 23   | 4.063 | —      | 22   | 3.031 | —      |

3 结论

- (1)洛坝铅锌矿废渣地自然植被只有 35 种,隶属 16 个科 20 个属。其中以菊科蒿属草本植物为耐重金属 Pb、Zn 的优势者,禾本科和车前科也占据重要位置。
- (2)11 年废渣地较 6 年和 3 年的废渣地植被丰富,分布相对均匀。6 年和 3 年废渣地植物多以单种斑块和小群落稳定存在,结构简单,物种多样性水平低。
- (3)废渣地废弃年限与植物种数有正相关的趋

表 3 洛坝铅锌矿废渣地植物群落类型及特征  
Table 3 Patterns and characteristics of plant communities in Lead-zinc mine in Luoba

| 样地      | 群落类型                                                             | 种数 | 盖度/% | 多样性指数 | 均匀度指数 | 优势植物                                                                                         |
|---------|------------------------------------------------------------------|----|------|-------|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 11 年废渣地 | 野艾蒿+小亚麻芥 <i>Artemisia vulgaris</i> + <i>Camelina microcarpa</i>  | 4  | 60   | 0.366 | 0.528 | 野艾蒿 <i>Artemisia vulgaris</i><br>小亚麻芥 <i>Camelina microcarpa</i>                             |
|         | 野艾蒿+车前草 <i>Artemisia vulgaris</i> + <i>Plantago asiatica</i>     | 8  | 40   | 0.732 | 0.635 | 野艾蒿 <i>Artemisia vulgaris</i><br>车前草 <i>Plantago asiatica</i><br>青蒿 <i>Artemisia apiacea</i> |
| 6 年废渣地  | 马升塘 <i>Digitaria sanguinalis</i>                                 | 1  | 80   | —     | 0.324 | 升马塘 <i>Digitaria sanguinalis</i>                                                             |
|         | 小藜+青蒿 <i>Chenopodium serotinum</i> + <i>Artemisia apiacea</i>    | 5  | 90   | 0.379 | 0.306 | 小藜 <i>Chenopodium serotinum</i><br>青蒿 <i>Artemisia apiacea</i>                               |
| 3 年废渣地  | 野艾蒿+狗牙根 <i>Artemisia vulgaris</i> + <i>Cynodon dactylon</i>      | 13 | 50   | 0.825 | 0.652 | 野艾蒿 <i>Artemisia vulgaris</i><br>狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>                                 |
|         | 节节草+苍耳 <i>Equisetum ramosissimum</i> + <i>Xanthium sibiricum</i> | 5  | 85   | 0.372 | 0.607 | 节节草 <i>Equisetum amosissimum</i><br>苍耳 <i>Xanthium sibiricum</i>                             |

势,优势植物综合优势比计算最高。竞争强度来自种内也证明植物的优势地位。

(4)野艾蒿的优势表现可以作为重金属污染矿区最初植被恢复的先锋种、建群种、优势种的目标植物。蒿类能使其迅速覆盖,以减少对大气污染和周围环境、土地污染,并对土壤有一定的改良效果。

参考文献:

[1] 蓝崇钰,等. 采矿地的复垦[C]//陈昌笃主编. 持续发展与生态学. 北京:中国科技出版社, 1993. 132–138.

LAN C Y, et al. Reclamation of mining lands[C]//CHEN C D. et al, Sustainable development and ecology. Beijing:Science and Technology Press of China, 1993, 132–138.

[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] Cemmell R P. Natural Colonization of Industrial Wasteland[M]. London: Edward Arnold, 1977.

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

XIA H P, SHU W S. Resistance to and uptake of heavy metals by *Vetiveria zizanioides* and *Paspalum notatum* from Lead–zinc Mine. Tailing[J]. *Acta Ecol Sin*, 2001, 21(7): 1121–1129.

[5] 龙健, 黄昌勇, 滕应, 等. 天台铅锌矿区香根草 (*Vetiveria zizanioides*) 等几种草本植物的重金属耐性[J]. 应用与环境生物学报, 2003, 9(3): 226–229.

LONG Jian, HUANG Chang–yong, TENG Ying, et al. Tolerance to heavy metals of (*Vetiveria zizanioides*) and some (*Herbages*) in TianTai Lead–Zinc Mine[J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2003, 9(3): 226–229.

[6] 毕德, 吴龙华, 骆永明, 等. 浙江典型铅锌矿废渣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.

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

[8] 蒋高明, Putwains P D, Bradshaw A D. 英国圣·海伦斯 Bold Moss Tip

煤矿废弃地植被恢复实验研究[J]. 植物学报, 1993, 35(12): 951–962.

JiANG G–M, et al. An experimental study on the revegetation of collier spoils of Bold Moss Tip, St. Helens, England [J]. *Acta Bot Sinica*, 1993, 35(12): 951–962.

[9] Weiner J. Asymmetric competition in plant populations[J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 1990, 5(11): 360–364.

[10] 刘彤, 等. 天然东北红豆杉 (*Taxus cuspidata*) 种内和种间竞争[J]. 生态学报, 2007, 27(3): 0924–0929.

LIU Tong, et al. Intraspecific and interspecific competition of Japanese yew (*Taxus cuspidata*)[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (3): 924–929.

[11] 李尤, 苏智生, 张素兰, 等. 珙桐群落种内与种间竞争研究[J]. 云南植物研究, 2006, 28(6): 625–630.

LI Y, SU Zh–X, ZHANG S–L, et al. Intraspecific and interspecific competition in *Davidia involucrata* (*Davidiaceae*) Community[J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 2006, 28(6): 625–630.

[12] 李博. 普通生态学[M]. 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 1993, 111–114.

LI B. The Common Ecology[M]. Huhehaote: Neimenggu University Press, 1993. 111–114.

[13] 马克平, 等. 生物多样性的测度方法 Ia 多样性测度方法(下)[J]. 生物多样性, 1994, 2(4): 231–239.

MA K–P, et al. Measurement of biotic community diversity I. a diversity (Part II) [J]. *Biodiversity*, 1994, 2(4): 231–239.

[14] Miina J, Pukkala T. Application of ecological field theory in distance dependent growth modeling[J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, 161: 101–107.

[15] Weigelt A, Jolliffe P. Indices of plant competition[J]. *Journal of Ecology*, 2003, 91: 701–720.

[16] 张池, 黄忠良, 等. 黄果厚壳桂种内与种间竞争的数量关系[J]. 应用生态学报, 2006, 17(1): 22–26.

ZHANG C, HUANG Z L, et al. Quantitative relationships of intra and interspecific competition in *Cryptocarya concinna*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(1): 22–26.

[17] Allen S E. Chemical Analysis of Ecological Materials. 2nd edn[M]. Oxford: Blackwell Science Publishers, 1989.

[18] Kimmerer R W. Natural revegetation of abandoned lead and zincs (Wisconsin)[J]. *Restoration and Management Notes*, 1981, 1: 20.