

广东大宝山矿区尾矿库植被演替分析

秦建桥, 夏北成, 胡 萌, 赵 鹏, 赵华荣, 林小方

(中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275)

摘 要:对广东大宝山 4 个尾矿库环境特点和植物群落进行了调查和分析。结果表明,广东大宝山尾矿库区内植物种类总体上较为稀少,不同尾矿库区内植物群落组成差异比较大,其中禾本科植物种类较多,其次为菊科植物和豆科植物,表明这 3 个科的植物较其他科植物更容易适应尾矿库环境,特别是禾本科的五节芒(*Miscanthus floridulus*)、类芦(*Neyraudia reynaudiana*)和狗牙根(*Cynodon dactylon*)表现出较强的适应能力。从样地 1 到样地 4,物种多样性指数也依次增加,表现出由较少先锋物种种类组成的简单群落向稳定复杂群落方向演替的趋势,反映了植物群落结构随演替时间的延长越来越趋向复杂化。研究还表明物种多样性与有机质、有效磷、碱解氮含量显著正相关,与重金属含量(Cd、Cu 和 Zn)显著负相关,尾矿库区的高浓度 Cd、Cu 和 Zn 是影响植物群落物种多样性进一步恢复的主要限制因子。

关键词:尾矿库;植被组成;物种多样性;植被演替

中图分类号:X173 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)10-2085-07

Analysis of the Vegetation Succession of Tailing Wasteland of Dabaoshan Mine, Guangdong Province

QIN Jian-qiao, XIA Bei-cheng, HU Meng, ZHAO Peng, ZHAO Hua-rong, LIN Xiao-fang

(School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangdong 510275, China)

Abstract: The environmental characters and vegetation of four mine tailing wastelands of Dabaoshan Mine, Northern Guangdong, were investigated. According to the data derived from this on-the-spot investigation into the wastelands, the important value of the plant species, the index of diversity of the plant species as well as the evenness of the plant species were calculated. The findings showed that plant species of all tailing wastelands were fewer, very not abundant, and the composition between the plant communities of different tailing wasteland was relatively different. Among which Gramineae family was the most dominant while Asteraceae and Cyperaceae families were second dominant, especially the species like *Miscanthus floridulus*, *Neyraudia reynaudiana* and *Cynodon dactylon* of Gramineae were flourishing and more adaptable to the habitat of those tailing wastelands. The analysis of the findings indicated that the plant community structures of the four tailing wastelands were obviously different in succession sequence, and single species dominances were lessening from No.1 to No.4 and species diversity indexes increasing from No.1 to No.4. This phenomenon demonstrated that the succession trends were from simple communities to complex and stable communities, and plant community structures became more complex with the vegetation succession going on. Species diversity index was significantly correlated with soil organic matter, N and P content, while negatively correlated with soil Cd, Cu and Zn content. Toxicity of available Cd, Cu and Zn in the tailing wasteland ecosystems was the major restriction of the vegetation restoration of tailing wastelands.

Keywords: mining tailing wasteland; vegetation composition; species diversity; vegetation succession

矿山开采造成大规模土地破坏,在中国乃至世界,都是一个十分严重且日益受到高度重视的问题^[1-2]。露天开采会直接摧毁地表土层和植被,地下开采会导致地表塌陷,从而引起土地和植被的破坏,矿山开发

过程中的废弃物(如尾矿、废石等)需要大面积的堆置场地,从而导致对土地的大量占用和对堆置场原有生态系统的破坏,引起自然条件的变化,并形成限制植物生长和发育的环境因子^[3-4]。与此同时,废弃物经氧化及雨水冲刷后产生大量的污染物,甚至产生的有毒有害物质很容易形成二次污染,对下游地区造成重大生态环境问题。在尾矿场上定居植被,进行生态修复,既防治了环境污染,阻止水土的流失,又美化了环境。这是目前矿场废弃地开发再利用较为理想的方法^[5]。

收稿日期:2009-03-01

基金项目:广东省自然科学基金团队项目(06202438);中山大学 985 工程环境污染控制与修复技术创新平台项目

作者简介:秦建桥(1979—),男,博士,主要从事环境污染控制与修复技术研究。E-mail:qinjianqiao@126.com

通讯作者:夏北成 E-mail:xiabch@mail.sysu.edu.cn

工矿业尾矿场的植被恢复和生态重建也是当前生态学研究的一个重要领域^[6]。

本文选择广东大宝山矿区 4 个尾矿库作为样地,于 2006 年 10 月、12 月和 2007 年 4 月、8 月 4 次对尾矿库进行实地植被考察,对尾矿库区植物群落的形成、发展和演替规律及其与尾矿库环境因子之间的关系进行了分析研究,旨在为尾矿库的植被重建 and 环境保护提供科学依据和基础资料。

1 研究样地及研究方法

1.1 研究区概况

大宝山矿地处广东省韶关市曲江县和翁源县的交界处,位于 $E113^{\circ}40' \sim 113^{\circ}43'$, $N24^{\circ}30' \sim 24^{\circ}36'$,属于亚热带季风气候区,温暖潮湿多雨,年平均气温 20.3°C ,年平均降水量 $1\,782.7\text{ mm}$ 。表层岩石风化强烈,基带土壤类型为红壤,随海拔高度增加而逐渐演替为山地黄壤。大宝山矿是一座大型铁多金属伴生矿床,矿区主矿体上部为褐铁矿体,中部为铜硫矿体,下部为铅锌矿体,并伴生钨、铋、钼、金和银等有色金属^[7-9]。自 20 世纪 70 年代开采以来,选矿产生的尾矿及废石已经陆续形成了 4 个大小不等的尾矿库。

铁龙尾矿库(样地 1)中心位于 $N24^{\circ}31'26.5''$, $E113^{\circ}43'08.6''$,海拔 350 m ,库区面积约 2.0 km^2 。从 20 世纪 70 年代开始排放矿石粉尘以及洗矿废水,尾矿库区内中心地带几乎没有植物生存,周边地带植物种类稀少。槽对抗尾矿库(样地 2)中心位于 $N24^{\circ}34'16.5''$, $E113^{\circ}43'34.3''$,海拔 580 m ,库区面积约 1.5 km^2 ,该库区南端有一大片由洗矿水、山溪水流经此处形成的沼泽地带,常年有积水;其北端大多由矿土堆积而成,比较潮湿,植被较稀疏。东华尾矿库(样地 3)中心位于 $N24^{\circ}33'56.1''$, $E113^{\circ}40'55.6''$,海拔 230 m ,库区面积约 0.8 km^2 ,5 年前已基本无尾矿排入,库区西北部低洼处有点状分布的水域(半沼泽地类型),植被覆盖率较高。从总体地势上看,由高到低处,地面湿度逐渐增大,植被丰富度也随之增加。小尾矿库(样地 4)中心位于 $N24^{\circ}33'17.7''$, $E113^{\circ}43'35.7''$,海拔 630 m ,面积 0.5 km^2 ,尾矿堆积如山,10 年前已经弃用,植被以自然恢复为主,植物种类较丰富。尾矿库地理位置见图 1。

1.2 植被调查和环境条件测定

以 4 个不同使用情况的尾矿库区为调查对象,将每个库区作为一个研究样地。以样地中心为起点,分别向东、南、西、北 4 个方向设置 4 条样线,然后在



图 1 大宝山矿区尾矿库分布及周边环境示意图

Figure 1 Sketch map of the distribution of tailing wasteland of Dabaoshan mine and surrounding environment

每条样线两侧随机取样,样方规格为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$,共设置样方 80 个。调查记录每个样方内的所有植物种类、数量、植株高度、多度、盖度和地上生物量等。另外,记录除样方外全库区范围内个体数较多的植物种类名称。

在进行植物群落调查的同时,使用便携式 GPS 记录和测定非生物因素背景值,包括地理位置、坡向、坡度、海拔。在每个样地内,采集 $0 \sim 20\text{ cm}$ 的表层土,均采 8 个样组成 1 个混合代表样。土样装入无菌封口塑料袋内,带回实验室。土壤基本理化性质测定均采用土壤农业化学分析法^[9]:将水和土以 $2.5:1$ 混合后用 pH 计测土壤 pH 值;土壤含水量用烘干法测定;有机质用重铬酸钾容量法测定;碱解 N 用碱解扩散法测定;用 $0.5\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的碳酸氢钠提取土壤样品后,用钼蓝比色法测有效 P 含量;土壤 Zn、Pb、Cu、Cd 的全量用盐酸、氢氟酸和高氯酸消化,ICP-AES 测定。土壤的基本理化性质见表 1。

1.3 数据处理

各植物物种的综合数量指标用重要值(IV)测定,物种丰富度指数 $R=S$,物种多样性采用 Simpson 指数(D)、Shannon-Weiner 指数(H)和 Pielou 均匀度指数(J)来衡量^[10-11]。

$IV(\text{重要值}) = RD\%(\text{相对密度}) + RF\%(\text{相对频度}) + RC\%(\text{相对盖度})$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S (N_i/N)^2$$

表 1 研究样地土壤的基本理化性质

Table 1 Some physico-chemical properties of soil samples tested

样地号	pH 值	含水率/%	有机质/g·kg ⁻¹	有效磷/ mg·kg ⁻¹	碱解氮/ mg·kg ⁻¹	重金属全量/mg·kg ⁻¹			
						Zn	Pb	Cu	Cd
样地 1	2.55d	27.50a	2.75d	12.75c	13.50d	2 395.25a	2 212.75a	1 878.75a	9.63a
样地 2	3.45c	23.85ab	8.85c	16.55c	18.60c	2 050.50b	1 356.20b	1 693.69a	8.85a
样地 3	5.20b	21.85ab	20.25b	26.75b	43.75b	780.88c	980.55c	1 072.50b	5.88b
样地 4	5.90a	19.50b	30.95a	43.65a	65.80a	440.25d	750.35d	695.70c	2.20c

注:表中数据为 3 个样品的平均值;同一列中不同字母表示差异显著($P<0.05$, Duncan 检验)。

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i$$

$$J = \frac{H}{H_{\max}} = \frac{H}{\log_2 S}$$

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。

数据用 Microsoft Excel 2003 整理, 用 SPSS16.0 软件提供的 Bivariation Correlation 模型来分析环境因子与植物多样性的相关关系, 采用 Duncan 多重比较分析各平均数间差异的显著性 (Duncan 检验, $P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 尾矿库区植物群落组成分析

表 2 为 4 个不同尾矿库区内植物群落组成情况。样地 1 内有植物 9 种, 隶属 6 科 9 属; 样地 2 内有植物 13 种, 隶属 8 科 13 属; 样地 3 内有植物 20 种, 隶属 10 科 20 属; 样地 4 内有植物 35 种, 隶属 14 科 35 属。从生活型看, 4 个样地的植被组成以 1、2 年生和多年生草本植物为主, 此外还有部分亚灌木、灌木和极少量乔木, 如田菁、猪屎豆、勒仔树、梵天花、毛果算盘子等。4 个样地内总共有 44 种植物, 隶属 17 科 43 属, 其中禾本科植物种类较多, 有 13 种, 占 29.5%, 其次是菊科、豆科和莎草科, 分别有 7 个种、5 个种和 3 个种, 分别占 15.9%、11.3% 和 7%, 说明禾本科、菊科、豆科和莎草科植物中有较多的种类适应尾矿库这样特殊的环境。

2.2 尾矿库区植被群落结构分析

表 3 为 4 个尾矿库区调查样方内的植物名称和重要值分析, 结果表明: 样地 1 内植物多为小面积集群的零散分布, 植物种类很少, 五节芒的重要值最大 (66.25), 其次是类芦 (36.56), 狗牙根 (28.52), 单种优势现象明显; 样地 2 内宽叶香蒲的重要值最大 (55.20), 其次是五节芒 (52.05), 狗尾草 (20.25); 样地

3 内植物种类较多, 局部植物聚集成优势群落, 优势种为五节芒、宽叶香蒲和狗牙根, 其重要值分别为 48.15、40.15 和 27.50; 样地 4 内优势种为五节芒、狗牙根和类芦, 其重要值分别为 45.05、26.93 和 19.27, 在样地 4 里分布比较广的植物有雀稗、狗尾草、猪屎豆、金樱子、蒲公英、田菁等。

群落内优势种重要值的大小, 是标志植物群落结构复杂与否的重要性指标^[1]。4 个样地内第一优势种的重要值依次为 66.25、55.20、48.15 和 45.05, 样地 4 比其他 3 个样地的优势种重要值明显要小, 说明样地 4 的群落复杂程度最高。

2.3 尾矿库区植被群落植物多样性与演替规律分析

由于 4 个尾矿库的土壤理化性质有很大的不同, 4 个样地的植物多样性也有很大的差异 (见表 4)。

样地 1, 尾矿废水排放严重, 土壤贫瘠, 重金属含量高, 限制了植物的生长, 所以只有耐逆性很强的五节芒和类芦能够在边缘区域的尾矿上生长形成优势群落, 植被的平均盖度为 4.1%。样地 2, 重金属含量也很高, 但 pH 相对较高、土壤养分比样地 1 要高一些, 所以植物生长相对容易, 植物种类增加到 13 种; 在尾矿中部洼地主要是水生植物宽叶香蒲群落, 在尾矿库边缘主要分布五节芒群落, 植被的平均盖度为 8.3%。样地 3, 已经停止使用了 5 年, 经过自然作用重金属流失和草本植物定居繁殖, 土壤理化性质有了很大的改善, 能够形成覆盖度较高的植被类型, 主要群落类型是五节芒+宽叶香蒲群落, 植被的平均盖度为 31.5%, 植物多样性指数也有了显著提高。样地 4, 由于尾矿早已堆满, 停止使用了 10 年, 随着禾本科的一些先锋物种的入侵, 土壤条件逐渐得到改善, 适宜于植物生长, 已经定居生长的植物达到了 35 种, 其主要群落类型为五节芒+狗牙根群落, 该群落内的优势物种抗逆境生存能力强, 适应了该区的环境特点, 且分布范围较广, 植被平均盖度 55.8%。

从表 4 可以看出尾矿库生态系统恢复系列上, 伴

表 2 大宝山 4 个尾矿库区的植被物种组成

Table 2 The vegetation composition of four separate mining wastelands in Dabaoshan

科 属	种名	样地 1	样地 2	样地 3	样地 4
木贼科,木贼属	节节草 <i>Equisetum ramosissimum</i> Desf.	√		√	
里白科,芒萁属	芒萁 <i>Dicranopteris dichotoma</i> (Thunb.)Bernh.		√	√	√
金星蕨科,毛蕨属	华南毛蕨 <i>Cyclosorus parasiticus</i> (L.)Farwell.	√	√	√	√
马齿苋科,马齿苋属	多毛马齿苋 <i>Portulaca pilosa</i> Linn.				√
蓼科,蓼属	水蓼 <i>Polygonum hydropiper</i> Linn.		√	√	
大戟科,算盘子属	白背算盘子 <i>Glochidion wrightii</i> Benth.				√
蔷薇科,蔷薇属	金樱子 <i>Rosa laevigata</i> Michx.				√
蔷薇科,悬钩子属	粗叶悬钩子 <i>Rubus alceaefolius</i> Poir.				√
含羞草科,含羞草属	含羞草 <i>Mimosa pudica</i> Linn.				√
含羞草科,含羞草属	勒仔树 <i>Mimosa seitaria</i> Benth.				√
蝶形花科,野百合属	猪屎豆 <i>Crotalaria pallida</i> Ait.		√		√
蝶形花科,胡枝子属	中华胡枝子 <i>Lespedeza chinensis</i> G. Don	√	√		√
蝶形花科,田菁属	田菁 <i>Sesbania cannabina</i> (Retz.)Poir.			√	√
锦葵科,梵天花属	梵天花 <i>Urena procumbens</i> Linn.				√
锦葵科,黄花稔属	心叶黄花稔 <i>Sida cordifolia</i> Linn.				√
茜草科,丰花草属	糙叶丰花草 <i>Borreria articulate</i> Linn.				√
茜草科,鸡矢藤属	鸡矢藤 <i>Paederia scandens</i> (Lour.)Merr.				√
菊科,地胆草属	白花地胆头 <i>Elephantopus tomentosa</i> Linn.				√
菊科,泽兰属	假臭草 <i>Eupatorium catarium</i> Veldk.		√	√	√
菊科,蒿属	野艾蒿 <i>Artemisia lavandulaefolia</i> DC.	√	√	√	√
菊科,鬼针草属	鬼针草 <i>Bidens pilosa</i> Linn.			√	√
菊科,白酒草属	加拿大蓬 <i>Conyza canadensis</i> (L.)Gronq.				√
菊科,飞蓬属	一年蓬 <i>Erigeron annuus</i> (L.)Pers.	√		√	√
菊科,蒲公英属	蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i> Hand.-Mazz.				√
马鞭草科,过江藤属	过江藤 <i>Phyla nodiflrm</i> (Linn.)Greene			√	√
马鞭草科,牡荊属	山牡荊 <i>Vitex quinata</i> (Lour.)Will.				√
菝葜科,菝葜属	菝葜 <i>Smilax china</i> Linn.				√
香蒲科,香蒲属	宽叶香蒲 <i>Typha latifolia</i> Linn.		√	√	
莎草科,莎草属	香附子 <i>Cyperus rotundus</i> Linn.				√
莎草科,水蜈蚣属	水蜈蚣 <i>Kyllinga brevifolia</i> Rottb.	√	√	√	
莎草科,鹿草属	萤蔺 <i>Scirpus juncoides</i> Roxb.				
禾本科,野古草属	野古草 <i>Arundinella anomala</i> Steud.			√	
禾本科,白茅属	白茅 <i>Imperata cylindrica</i> (Linn.)Beauv.				√
禾本科,芒属	五节芒 <i>Miscanthus floridulus</i> Warb.	√	√	√	√
禾本科,类芦属	类芦 <i>Neyraudia reynaudiana</i> (Kunth.)Keng	√	√	√	√
禾本科,穆属	牛筋草 <i>Eleusine indica</i> (L.)Gaertn.				√
禾本科,狗牙根属	狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i> (Linn.)Pers	√		√	√
禾本科,红毛草属	红毛草 <i>Rhynchelytrum repens</i> (Willd.)Hubb.			√	
禾本科,雀稗属	雀稗 <i>Paspalum commersonii</i> Lam.				√
禾本科,水蔗草属	水蔗草 <i>Apluda multica</i> Linn		√	√	
禾本科,芦苇属	水竹 <i>Phyllostachys heteroclada</i> Oliver.			√	
禾本科,狗尾草属	狗尾草 <i>Setaria virida</i> (L.)Beauv.		√	√	√
禾本科,囊颖草属	囊颖草 <i>Sacciolepis indica</i> (Linn.)A. Chase				√
禾本科,棕叶芦属	棕叶芦 <i>Thysanolaena maxima</i> (Roxb.)Kuntze.				√

随植被发育和群落演替过程物种丰富度逐渐增加,种群多样性指数也显著增加,总体上优势种群优势度明显,少数物种贡献了群落生态功能的大部分。

调查中发现尾矿库周围山体植被覆盖度都在

85%以上,且植被结构层次分明,分布着乔木、灌木和大量草本植物。而 4 个尾矿库样地植被覆盖度较小,植物多为禾本科、菊科草本植物,可以看出在尾矿库区植物自然定居过程极其缓慢,要达到良好的植被需

经几十年甚至更长时间,同时说明禾本科、菊科植物对早期严酷环境有较强适应能力,担当先锋和建群物种,在生态恢复中起着至关重要的作用^[12-13]。

表 3 大宝山尾矿库区调查样方内植物名称及其重要值

Table 3 Species and its importance value in investigation quadrates of four separate mining wastelands in Dabaoshan

种名	重要值			
	样地 1	样地 2	样地 3	样地 4
节节草 <i>Equisetum ramosissimum</i> Desf.	5.06	-	7.25	5.22
芒萁 <i>Dicranopteris dichotoma</i> (Thunb.) Bernh.	-	6.57	8.35	6.57
水蓼 <i>Polygonum hydropiper</i> Linn.	-	15.96	2.34	-
白背算盘子 <i>Glochidion wrightii</i> Benth.	-	-	-	1.68
金樱子 <i>Rosa laevigata</i> Michx.	-	-	-	4.65
粗叶悬钩子 <i>Rubus alceaefolius</i> Poir.	-	-	-	3.89
猪屎豆 <i>Crotalaria pallida</i> Ait.	-	12.53	-	12.53
中华胡枝子 <i>Lespedeza chinensis</i> G. Don	1.06	1.24	-	1.24
田菁 <i>Sesbania cannabina</i> (Retz.)Poir.	-	-	3.32	13.68
白花地胆头 <i>Elephantopus tomentosa</i> Linn.	-	-	-	4.23
假臭草 <i>Eupatorium catarium</i> Veldk.	-	-	5.26	-
野艾蒿 <i>Artemisia lavandulaefolia</i> DC.	6.75	5.36	7.20	5.36
鬼针草 <i>Bidens pilosa</i> Linn.	-	-	1.80	8.65
一年蓬 <i>Erigeron annuus</i> (L.)Pers.	6.39	-	3.26	7.12
蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i> Hand-Mazz.	-	-	-	1.30
过江藤 <i>Phyla nodiflora</i> (Linn.)Greene	-	-	3.31	2.21
山牡荊 <i>Vitex quinata</i> (Lour.)Will.	-	-	-	4.51
宽叶香蒲 <i>Typha latifolia</i> Linn.	-	55.20	40.15	-
香附子 <i>Cyperus rotundus</i> Linn.	9.35	-	-	12.69
水蜈蚣 <i>Kyllinga brevifolia</i> Rottb.	-	2.34	4.41	-
野古草 <i>Arundinella anomala</i> Steud.	-	-	6.65	-
白茅 <i>Imperata cylindrica</i> (Linn.)Beauv.	-	-	-	17.24
五节芒 <i>Miscanthus floridulus</i> Warb.	66.25	52.05	48.15	45.05
类芦 <i>Neyraudia reynaudiana</i> (Kunth)Keng	36.56	17.27	12.30	19.27
牛筋草 <i>Eleusine indica</i> (L.)Gaertn	-	-	-	5.71
狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i> (Linn.)Pers	28.52	-	27.50	26.93
雀稗 <i>Paspalum commersonii</i> Lam.	-	-	-	10.15
红毛草 <i>Rhynchelytrum repens</i> (Willd.) Hubb.	-	-	3.65	-
狗尾草 <i>Setaria virida</i> (L.)Beauv.	-	20.25	15.20	10.25
水蔗草 <i>Apluda multica</i> Linn.	-	-	4.18	-

2.4 尾矿库区物种多样性与环境因子的相关性分析

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^[14]。相关分析结果(表 5)表明,尾矿库样地的海拔高度与植物种数、植被盖度以及植物多样性指数的相关性都不显著,表明海拔高度对尾矿库的植物多样性影响不大。尾矿库样地的 pH 值与植物种数、植被盖度相关性不显著,与 Simpson 指数、Shannon-Weiner 指数和 Pielou 均匀度指数呈显著正相关,表明尾矿库土壤的 pH 值可能是通过影响物种分布均匀程度来影响植物的多样性。尾矿库样地含水率只与 Shannon-Weiner 指数显著负相关,有机质和碱解氮与植物种数、盖度以及植物多样性指数都呈显著正相关,表明土壤的肥力能显著影响植被的形成。尾矿库样地的 Cd 和 Cu 含量与植物种数、盖度以及植物多样性指数都呈显著负相关,Zn 含量与植物多样性指数都呈显著负相关,而 Pb 含量与植物种数、盖度以及植物多样性指数的相关性都不显著,表明对这 4 个尾矿库而言,土壤重金属含量对植被形成影响最大的是 Cd 和 Cu,其次是 Zn,Pb 的影响不显著。

3 讨论

(1)调查中发现,尾矿库区定居的植物,具有繁殖体体积小、重量轻、适于风力传播的特点。究其原因,可能是尾矿库环境较恶劣,缺少繁殖体,只有那些种子具有较强迁移能力的植物才能到达这片裸地,如果这些植物对恶劣环境条件同时具备较强的耐性,或有较强的遗传分化能力,以至在恶劣条件下可分化形成耐性种群或生态型,则其可能在废弃地上完成定居。在大宝山矿区尾矿库周边,禾本科和菊科植物由于种子传播能力强,且具有较强的环境适应能力^[15],而在尾矿库区植被形成过程中具有形成优势种群的有利条件;豆科植物由于具备固氮能力而适应贫瘠环境^[12],莎草科植物也因具有种子传播能力强、较强的环境适应能力^[12],而在尾矿库中有一定分布。

(2)王友保^[1]和李影^[16]调查的铜尾矿植被和本文调查的大宝山多金属尾矿库植被都发现禾本科植物

表 4 各样地物种多样性分析

Table 4 Analysis of species diversity in four plots

样地号	种数 R	盖度/%	Simpson 指数 D	Shannon-Weiner 指数 H	Pielou 均匀度指数 J	优势种
样地 1	9	4.1	0.157	0.386	0.205	五节芒+类芦 <i>M. floridulus</i> + <i>N. reynaudiana</i>
样地 2	13	8.3	0.251	0.615	0.335	宽叶香蒲+五节芒 <i>T. latifolia</i> + <i>M. floridulus</i>
样地 3	20	31.5	0.652	0.890	0.693	五节芒+宽叶香蒲 <i>M. floridulus</i> + <i>T. latifolia</i>
样地 4	35	55.8	0.776	1.306	0.757	五节芒+狗牙根 <i>M. floridulus</i> + <i>C. dactylon</i>

表 5 尾矿库植物多样性与环境因子的相关性

Table 5 Correlation between species diversity and environmental factors in four plots

变量	海拔	pH 值	含水率	有机质	有效磷	碱解氮	Zn	Pb	Cu	Cd
种数	0.443	0.920	-0.924	0.977*	0.999**	0.981*	-0.914	-0.844	-0.961*	-0.993**
盖度	0.316	0.945	-0.913	0.985*	0.996**	0.997**	-0.948	-0.835	-0.982*	-0.999**
Simpson 指数 <i>D</i>	0.104	0.995**	-0.937	0.980*	0.938	0.977*	-1.000**	-0.901	-0.993**	-0.957.
Shannon-Weiner 指数 <i>H</i>	0.394	0.961*	-0.968*	0.995**	0.990*	0.986*	-0.950*	-0.912	-0.981*	-0.990*
Pielou 均匀度指数 <i>J</i>	0.077	0.997**	-0.946	0.967*	0.909	0.955*	-0.998**	-0.927	-0.981*	-0.960*

注:* 表示在 0.05 水平下显著相关,** 表示在 0.01 水平下显著相关。

是主要的种类成分。例如,定居在大宝山尾矿库区的禾本科植物有五节芒、类芦、雀稗、狗牙根、牛筋草等,定居在铜陵铜尾矿库区的禾本科植物有狗牙根、白茅、狗尾草、早熟禾等,说明了禾本科植物最能适应该类恶劣的土壤环境。但是在不同废弃时间和不同自然环境条件的尾矿库内特定物种的适应性是不同的,环境条件决定了定居其中的植物种类。

(3)4 个不同样地内植物群落组成与结构差别明显。样地 1 的主要群落类型为五节芒+类芦群落,优势种五节芒的重要值为 66.25;样地 2 存在 2 种不同的群落类型,分别为位于库区中部群落面积最大的宽叶香蒲群落,位于库区边缘的五节芒群落,样地内优势种五节芒的重要值为 52.05;样地 3 的主要群落类型为五节芒+宽叶香蒲群落,优势种五节芒的重要值为 48.15;样地 4 的主要群落类型为五节芒+狗牙根群落,优势种五节芒的重要值为 45.05。这种差别标志着植物群落结构由样地 1 到样地 4 趋向更为复杂化。同时,从表 4 可以看出,样地 1 到样地 4 的植物多样性指数逐渐增大,表明较长的演替时间能很好的体现出尾矿库区的植被由较少物种的先锋种群向多物种稳定群落方向演替的趋势^[12]。

(4)表 5 相关性分析表明尾矿库区的水土环境是植被恢复重建的重要影响因子。其中物种多样性与有机质、有效磷、碱解氮含量显著正相关,与重金属含量(Cd、Cu 和 Zn)显著负相关,因此在不同尾矿库的环境梯度上,土壤因子中有机质、有效磷、碱解氮以及重金属含量(Cd、Cu 和 Zn)的变化能在一定程度上反映物种多样性的变化。有机质与物种多样性相关性大,可能是因为土壤有机质主要来自植物凋落物、根系和根系分泌物的理化作用和微生物作用^[17],植被物种组成越丰富,相应凋落物种类越丰富,有机质含量相应也就越高,因此有机质含量高低可以反映物种多样性大小。碱解氮含量的高低与土壤有机质含量高低有显著的相关性,而且已有研究表明,植物在生长过程中

对土壤养分含量有明显的促进作用,且不同植被下土壤养分具有明显的表聚效应^[18]。此结果与有关研究结果相似, Van Breemen 等认为土壤是生态系统工程的产物,因为土壤所在生态环境中较大的动物以及植物均对土壤理化性质有影响^[19]。植物能够影响土壤许多性质,如酸度和有效养分,而这些性质对植物的生存和生长有重要意义^[20]。本研究结果亦显示重金属含量不仅引起生物多样性的变化,而且是植物群落分布和演替的重要影响因素,原因是高金属离子浓度会对植物产生毒害作用^[21],大宝山金属矿种开采后形成的尾矿库中金属离子浓度很高,大大超过了植物对这种离子浓度的耐受阈值,一般的植物很难在此自然定居繁衍。同时,由于自然选择的原因,一些禾本科、菊科和豆科的植物逐渐适应尾矿库的特殊生境,具有耐干旱、贫瘠和重金属胁迫等优点,能够形成优势群落,对尾矿库植被的重建和土壤改良有很大意义,值得进一步分析研究。

4 结论

(1)总的来说,大宝山尾矿库区内土壤贫瘠、土壤酸度较强、重金属含量高,环境较为恶劣,植物种类较为稀少。样地 1 内仅有植物 9 种,样地 2 中有植物 13 种,主要是五节芒、类芦和狗牙根等禾本科植物;样地 3 中有植物 20 种,样地 4 中有植物 35 种,其中禾本科植物种类最多,其次为菊科、豆科和莎草科植物。

(2)4 个尾矿库样地植被覆盖度较小,植物多为禾本科、菊科草本植物,尾矿库区植物自然定居过程极其缓慢,要达到良好的植被需经几十年甚至更长时间。

(3)本研究结果亦显示尾矿库重金属含量不仅引起生物多样性的变化,而且是植物群落分布和演替的重要影响因素。

(4)禾本科的五节芒比其他科植物更容易适应尾矿库这类环境,五节芒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。

参考文献:

- [1] WANG Youbao, LIU Denyi, ZHANG Li. Patterns of vegetation succession in the process of ecological restoration on the deserted land of Shizishan copper tailings in Tongling City[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2004, 46(7):780-787.
- [2] 郑喜坤, 鲁安怀, 高翔, 等. 土壤中重金属污染现状与防治方法[J]. 土壤与环境, 2002, 11(1):79-84.
- ZHENG Xi-shen, LU An-huai, GAO Xiang, et al. Contamination of heavy metals in soil present situation and method[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(1):79-84.
- [3] 王宏镔, 束文圣, 蓝崇钰. 重金属污染生态学研究现状与展望[J]. 生态学报, 2005, 25(3):596-605.
- WANG Hong-bin, SHU Wen-sheng, LAN Chong-yu. Ecology for heavy metal pollution: recent advances and future prospects[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3):596-605.
- [4] M J Hsu, K Selvaraj, G Agoramoorthy. Taiwan's industrial heavy metal pollution threatens terrestrial biota[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 143:327-334.
- [5] 白中科, 付梅臣, 赵中秋. 论矿区土壤环境问题[J]. 生态环境, 2006, 15(5):1122-1125.
- BAI Zhong-ke, FU Mei-chen, ZHAO zhong-qiu. Discussion about soil environment in diggings[J]. *Ecology Environment*, 2006, 15(5):1122-1125.
- [6] 涂从, 郑春荣, 陈怀满. 铜矿尾矿库土壤-植物体系的现状研究[J]. 土壤学报, 2000, 37(2):284-287.
- TU Cong, ZHENG Chun-rong, CHEN Huai-man. The current status of soil-plant system in copper mine tailings[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(2):284-287.
- [7] 付善明, 周永章, 赵宇鹄, 等. 广东大宝山铁多金属矿废水对河流沿岸土壤的重金属污染[J]. 环境科学, 2007, 28(4):805-812.
- FU Shan-ming, ZHOU Yong-zhang, ZHAO Yu-yan, et al. Study on heavy metals in soils contaminated by acid mine drainage from Dabaoshan Mine, Guangdong[J]. *Environment Science*, 2007, 28(4):805-812.
- [8] 林初夏, 卢文洲, 吴永贵, 等. 大宝山矿水外排的环境影响: II. 农业生态系统[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: II. Agricultural ecosystem[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(2):169-172.
- [9] 鲁如坤. 土壤农业化学分析法[M]. 北京: 北京农业科技出版社, 1999:235-285.
- LU Ru-kun. Methods of soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1999:235-285.
- [10] 王伯荪, 余世孝, 彭少麟, 等. 植物群落学实验手册[M]. 广州: 广东高等教育出版社, 1996.
- WANG Bo-sun, YU Shi-xiao, PENG Shao-lin, et al. Plant sociology experiment handbook[M]. Guangzhou: Guangdong Higher Education Press, 1996.
- [11] 马克平. 生物多样性的测定[C]//钱迎倩主编. 生物多样性研究的原理与方法. 北京: 中国科学技术出版社, 1994:141-165.
- MA Ke-ping. Measurement of biodiversity[C]//QIAN Yin-qian ed. Principle and methods of biodiversity studies. Beijing: Chinese Scientific & Technological Press, 1994:141-165.
- [12] 张志权, 束文圣, 廖文波, 等. 豆科植物与矿业废弃地植被恢复[J]. 生态学杂志, 2002, 21(2):47-52.
- ZHANG Zhi-quan, SHU Wen-sheng, LIAO Wen-bo, et al. Role of legume species in revegetation of mined wastelands[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2002, 21(2):47-52.
- [13] 刘登义, 田胜尼, 杨世勇. 铜尾矿对5种豆科植物种子萌发和幼苗生长影响的初步研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(5):596-600.
- LIU Deng-yi, TIAN Sheng-ni, YANG Shi-yong. Effects of coppermine tailings on seed germination and seedling growth of five Legumes Species[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(5):596-600.
- [14] 杨修, 高林. 德兴铜矿矿山废弃地植被恢复与重建研究[J]. 生态学报, 2001, 21(11):1932-1940.
- YANG Xiu, GAO Lin. A study on revegetation in mining wasteland of Dexing copper mine. China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(11):1932-1940.
- [15] 于云江, 林庆功, 石庆辉, 等. 包兰铁路沙坡头段人工植被区生境与植被变化研究[J]. 生态学报, 2002, 22(30):433-439.
- YU Yun-jiang, LIN Qing-gong, SHI Qing-hui, et al. Changes of habitat and vegetation in man-made vegetation area of Shapotou Section Along Baotou-Lanzhou Railway[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(30):433-439.
- [16] 李影, 王友保, 刘登义. 安徽铜陵狮子山铜尾矿场植被调查[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11):1981-1984.
- LI Ying, WANG You-bao, LIU Deng-yi. Investigation on the vegetation of copper tailing wasteland in Shizishan, Tongling, Anhui Province[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11):1981-1984.
- [17] 韦朝阳, 陈同斌. 高砷区植物的生态与化学特征[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 Phytocologica Sinica*, 2002, 26(6):695-700.
- [18] 杨玉海, 陈亚宁, 李卫红. 新疆塔里木河下游土壤特性及其对物种多样性的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(2):602-611.
- YANG Yu-Hai, CHEN Ya-Ning, LI Wei-hong. Soil properties and their impacts on changes in species diversity in the lower reaches of Tarim River, Xinjiang, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2):602-611.
- [19] Van Breemen N. Soils as biotic constructs favouring net primary productivity[J]. *Geoderma*, 1993, 57:183-211.
- [20] 李国庆, 王孝安, 郭华, 等. 陕西子午岭生态因素对植物群落的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(6):2463-2471.
- LI Guo-qing, WANG Xiao-an, GUO Hua, et al. Effects of ecological factors on plant communities of Ziwoiling Mountain, Shaanxi Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6):2463-2471.
- [21] Bradshaw A. Restoration of mined lands—using natural processes[J]. *Ecological Engineering*, 1997, 8(4):255-269.