

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.10.003

# 锑矿区修复的不同植被类型植物多样性 及生物量特征

胡萧<sup>1,2</sup>, 王栋<sup>2,3</sup>, 张轩<sup>4</sup>, 刘书洪<sup>3</sup>, 谢伟东<sup>1</sup>

(1. 广西大学 林学院, 广西 南宁 530004; 2. 湖南省环境治理行业协会, 湖南 长沙 410003; 3. 湖南艾布鲁环保科技股份有限公司, 湖南 长沙 410004; 4. 湖南省林业科学院, 湖南 长沙 410004)

**摘要:**生物多样性和生物量指标是衡量矿山植被恢复力的重要指标之一,可探究矿区植被的恢复效果,为矿区的修复提供数据参考。文章对冷水江锑矿区的8年生人工林大叶女贞、8年生人工林楸树和自然恢复植被(对照)3种不同植被类型进行比较研究,分析不同植被类型的群落组成、多样性和生物量特征,从而阐明3种植被在改善重金属污染区生态环境的效果。结果表明:植物群落共统计14科23属23种,优势科包括木犀科、紫葳科、禾本科和菊科;大叶女贞林植物群落7科11属11种,楸树林植物群落5科8属8种,自然恢复植被林8科13属13种;3种植被类型中,乔木层和灌木层植物物种单一,草本层物种主要以禾本科和菊科植物为主,草本层植物物种差异性显著,且物种数从高到低依次为自然恢复植被、大叶女贞林、楸树林;不同植被类型的林下草本植物物种多样性存在显著差异,且自然恢复植被相较于另2种人工林植被的物种多样性更丰富,物种多样性同样表现为自然恢复植被高于大叶女贞林高于楸树林。

**关键词:**锑矿区;植被修复;植被类型;物种多样性

中图分类号:X171

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2023)10-1314-09

## Diversity and biomass characteristics of vegetation types in restoration area of an antimony mining area

HU Xiao<sup>1,2</sup>, WANG Dong<sup>2,3</sup>, ZHANG Xuan<sup>4</sup>, LIU Shuhong<sup>3</sup>, XIE Weidong<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Hunan Association of Environmental Pollution Control Industry, Changsha 410003, China; 3. Hunan Airbluer Environmental Protection Technology Co., Ltd., Changsha 410004, China; 4. Hunan Academy of Forestry, Changsha 410004, China)

**Abstract:** Biodiversity and biomass are the important indicators to measure the vegetation resilience in mines, which can explore the restoration effect of vegetation and provide data reference for the restoration of mining areas. This paper conducted a comparative study of three different types of vegetation in the Lengshuijiang antimony mining area, including eight-year-old *Ligustrum compactum* plantation, eight-year-old *Catalpa bungei* plantation and naturally restored vegetation (control). The community composition and diversity and biomass characteristics of the understory vegetation were analyzed to clarify the effect of the three vegetation types on the improvement of the ecological environment in heavy metal polluted areas. The results show that a total of 23 species and 23 genera in 14 families are counted in the plant community, with the dominant families including *Oleaceae*, *Bignoniaceae*, *Gramineae* and *Asteraceae*. Among them, there are 7 families, 11 genera and 11 species in the plant community in the *Ligustrum compactum* area, 5 families, 8 genera and 8 species in the *Catalpa*

收稿日期:2023-05-24;修回日期:2023-08-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(32201394);湖南省自然资源科技计划资助项目(2022-44)和湖南省林业科技计划资助项目(XLK202108-3)

作者简介:胡萧(1984—),女,湖南长沙人,广西大学硕士生;

谢伟东(1964—),男,广西南宁人,博士,广西大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:xiexiegx@163.com.

*bungei* area, and 8 families, 13 genera and 13 species in the naturally restored vegetation area. In the three vegetation types, the plant species in the arbor layer and the shrub layer are single, and the main plant species in the herbaceous layer are the *Gramineae* and *Asteraceae* plants. The plant species in the herbaceous layer are significantly different, and the number of species from high to low is naturally restored vegetation, *Ligustrum compactum* plantation and *Catalpa bungei* plantation. There are significant differences in species diversity of understory herbaceous plants among different vegetation types. The naturally restored vegetation has the highest species diversity, followed by *Ligustrum compactum* plantation and *Catalpa bungei* plantation.

**Key words:** antimony mining area; vegetation restoration; vegetation type; species diversity

## 0 引 言

矿山开采造成大规模生态环境破坏,废弃矿山的生态恢复技术和成效监测成为研究热点问题。恢复生态学的研究起始于 20 世纪上半叶对矿山生态问题的关注,采矿迹地一直是当前国际生态恢复关注的重要对象,主要关注矿山环境影响的缓解、生态功能的恢复等<sup>[1]</sup>。

我国矿山生态恢复经历了一个从关注耕地复垦利用到生态环境可持续性发展的过程<sup>[2]</sup>。然而,人工措施始终面临成本与效益的权衡,而且人工干预的效果并非始终优于自发修复<sup>[3-4]</sup>。

自然生态系统的恢复总是以植被重建为前提条件,因此植被重建是矿山生态恢复的重要环节之一。

目前,以工程措施为基础,结合植被重建是矿山生态修复的主要途径,植物可以促进土壤结构和肥力的恢复,增强土壤微生物的数量和活性,从而促进整个生态系统结构与功能的恢复和重建<sup>[5]</sup>。在矿山修复过程中,应该关注生态系统的物种多样性修复,物种多样性逐渐成为矿山修复目标之一<sup>[6]</sup>。

矿山环境治理与恢复的方式有多种,但植物修复是最根本、最经济、最可行的途径。此外,对矿山植被进行调查和规划是实现矿山环境恢复的关键<sup>[7]</sup>。因此,植被重建对于废弃矿山的生态修复具有重要的意义,这就需要根据不同的生态修复方式、方法和不同植物的生物特性来合理规划和设计修复地的植物群落,最终建立一个稳定的生态环境<sup>[8]</sup>。

植物种类是否符合当地立地条件、植物配置关系是否合理对于生态修复的成功至关重要。如果选择的植物种类没有适应当地的立地条件或者配置关系不合理,就会影响植物的生长和成活,从而影响生态修复的效果<sup>[9]</sup>。

因此,对于矿山的生态修复,研究植被生物量和物种多样性的变化具有非常重要的现实意义,并能为更加科学地制定修复方案提供理论基础。

冷水江锑矿山在长期开采锑矿的过程中,造成了诸多环境问题<sup>[10]</sup>。文献<sup>[11]</sup>研究表明,选取耐受性植物,采用多种修复方案,对锑矿区进行生态环境修复,不仅能获得良好的修复效果,更能产生良好的经济效益。

另外,文献<sup>[8]</sup>对锑矿区的植被恢复和可持续景观营造进行研究,提出了结合生态学构建自然群落,以增强物种多样性的理念。然而,锑矿修复区不同植被类型下的物种多样性和生物量仍需进行探索和研究<sup>[12]</sup>。

本文对比分析了冷水江矿山修复区大叶女贞林、楸树林和自然恢复植被(对照)类型的生物量以及林下植被的物种多样性特征,从而为矿山修复时生态环境的恢复提供一定的理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 样地概况

研究区域位于冷水江锑矿区(27°45′13″N, 111°29′54″E),地处锡矿山街道境内,离市区较近,相隔 10 km 左右。

矿区地貌类型属剥蚀构造,低山丘陵沟谷地貌,原始的地形起伏比较大。矿区最高海拔 1 072 m,最低海拔 162 m,地势高差 910 m。矿区以山坡地为主,且山坡较陡,陡坡坡度一般在 25°~45°之间,坡底与坡顶相对高差在 50 m 左右。

研究区域各种金属元素质量比见表 1 所列,试验区布局图如图 1 所示。

表 1 研究区域各种金属元素质量比 单位:mg/kg

元素	Sb	Zn	Pb	Cu	As	Cd
质量比	111.378	88.679	27.546	23.063	18.214	1.897

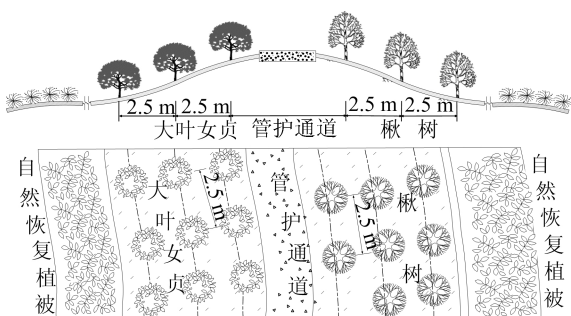


图1 试验区布局图

## 1.2 样地调查与样品采集

2022年7月中旬对冷水江锑矿修复区进行全面调查,在林分因子(海拔、坡向、坡度和土壤特性等)基本一致、造林年限相同的前提下,以不同的2种人工植被和1种自然恢复植被作为研究对

象,2种人工植被分别为8年生大叶女贞林(C1)和8年生楸树林(C2),并设置1个多年生五节芒自然恢复植被作为对照(CK)。在上、中、下3个坡位各设置3个标准样地,并将每个标准样地分为4个10 m×10 m乔木样方;在每个标准样地内按对角线法布设5个5 m×5 m灌木样方和5个1 m×1 m的草本样方,共布设乔木样方36个,灌木样方和草本样方各45个。对样方内的林木进行逐一检尺,记录乔灌木的高度、枝下高度、胸径(地径)以及冠幅,同时测量灌木层、草本层植物的株高、数量、盖度和分布状况等重要指标,并对每块样地进行经纬度、海拔和坡位等地形参数的记录。样地林木平均胸径、平均树高、平均枝下高与平均冠幅见表2所列。

表2 样地林木基本情况

样地编号	样地类型	平均胸径/cm	平均树高/m	平均枝下高/m	平均冠幅/m
C1	大叶女贞林	5.21±1.26 <sup>a</sup>	2.85±0.68 <sup>a</sup>	1.17±0.37 <sup>a</sup>	2.62±0.89 <sup>a</sup>
C2	楸树林	10.45±3.15 <sup>b</sup>	5.89±1.54 <sup>b</sup>	1.29±0.29 <sup>a</sup>	3.61±0.68 <sup>b</sup>
CK	自然恢复植被		0.96±0.15 <sup>c</sup>		

注:同列数值后的不同字母表示不同植被类型的差异显著, $P<0.05$ 。

为了准确测量乔木层、灌木层和草本层植物的生物量,在每种植被类型中,根据2种人工植被的每木检尺结果计算乔木的平均高和平均胸径;在每个标准样地中选取3株平均标准木,伐倒后分别收集根、干、皮、枝、叶,称重后分别采集250 g样品用于生物量测定和计算;在3种植被类型每个调查样方内的灌木层和草本层采用全株收获法称重,并各按地上、地下部分各取250 g(不足250 g则全部

收集)用于测定地上、地下生物量;在草本样方内按对角线设置5个2 m×2 m的小样方,在每个样地内按对角线交叉点确定3个土壤采样点,每个采样点用10 cm土钻钻取3个0~20 cm的表土层样品并混合为1个样品,带回实验室经风干、去杂、碾碎,过100筛后用四分法缩为100 g左右的样品备用,测得3种植被类型土壤样品化学性质,结果见表3所列。

表3 样地土壤化学成分

土壤标识	单位:mg/kg										
	全氮	总磷	有机质	钾	镉	铜	锌	砷	锑	铅	汞
C1	0.811E+3	0.276E+3	16.010E+3	2.830E+4	1.664	24.089	85.333	16.289	97.911	28.889	0.508
C2	0.890E+3	0.317E+3	18.918E+3	2.884E+4	1.132	22.478	69.333	17.167	156.544	26.111	0.537
CK	0.400E+3	0.360E+3	8.490E+3	3.450E+4	0.140	20.300	55.000	17.400	30.300	22.000	0.359

## 1.3 植被群落物种多样性测定方法

两树种林下无灌木,草本层仅有3种灌木,灌木层多样性差异较小,因此,本文着重分析草本层的多样性,通过公式计算不同群落草本层物种丰富度 $S$ 、Simpson多样性指数 $D$ 、Shannon-Wiener多样性指数 $H'$ 和Pielou均匀度指数 $E$ 来表征林下植被的多样性特征,并计算林下植被的生物量。计算公式<sup>[13-15]</sup>如下:

$$\text{相对多度} = \frac{\text{某物种的个体数}}{\text{全部物种的个体数}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{相对频度} = \frac{\text{某物种的频度}}{\text{全部物种的频度之和}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{单个物种重要值} = \frac{\text{相对多度} + \text{相对频度}}{2} \quad (3)$$

$$\text{物种丰富度} = \text{样方中的物种总数} \quad (4)$$

Shannon-Wiener指数 $H'$ 为:

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (5)$$

其中,  $P_i$  为该物种个体数占总物种个体数之比。

Simpson 指数  $D$  为:

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (6)$$

Pielou 均匀度指数  $E$  为:

$$E = \frac{H'}{H_{\max}} \quad (7)$$

其中:  $H'$  为实际观察的 Shannon-Wiener 物种多样性指数;  $H_{\max}$  为最大的 Shannon-Wiener 物种多

样性指数,  $H_{\max} = \ln S$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同植被类型物种组成及重要值分析

3 种植被类型的主要物种组成见表 4 所列。

大叶女贞林和楸树林均无灌木层植物, 自然恢复植被无乔木层; 3 种植被类型的总盖度分别为 56.33%、65.57%、85.96%。

大叶女贞林乔木层有 2 个种, 分别为大叶女贞和棕榈, 分属 2 科 2 属; 草本层共有 9 种, 隶属 6 科 9 属。

表 4 不同植被类型植物物种组成

类型	种	属	科	株数(丛数)	数量占比/%	盖度/%	总盖度/%	
大叶女贞林	大叶女贞	<i>Ligustrum compactum</i>	女贞属	木犀科	17	47.85	50.70	56.33
	棕榈	<i>Trachycarpus fortunei</i>	棕榈属	棕榈科	3	1.12	4.00	
	五节芒	<i>Miscanthus sinensis</i>	芒属	禾本科	72	80.60	59.30	
	蒲公英	<i>Taraxacum mongolicum</i>	蒲公英属	菊科	4	1.49	10.00	
	一年蓬	<i>Erigeron annuus</i>	飞蓬属	菊科	3	1.12	10.00	
	前胡	<i>Peucedanum praeruptorum</i>	前胡属	伞形科	9	7.09	9.50	
	狗牙根	<i>Cynodon dactylon</i>	狗牙根属	禾本科	4	2.99	8.50	
	地榆	<i>Sanguisorba officinalis</i>	地榆属	蔷薇科	5	1.87	5.00	
	艾蒿	<i>Artemisia argyi</i>	蒿属	菊科	4	1.49	5.00	
	马唐	<i>Digitaria sanguinalis</i>	马唐属	禾本科	3	1.12	5.00	
	车前草	<i>Plantago asiatica</i>	车前属	车前科	3	1.12	2.00	
楸树林	楸树	<i>Catalpa bungei</i>	梓树属	紫葳科	11	51.23	60.70	65.57
	五节芒	<i>Miscanthus sinensis</i>	芒属	禾本科	138	87.74	74.30	
	鸭跖草	<i>Commelina communis</i>	鸭跖草属	鸭跖草科	6	3.59	4.70	
	车前草	<i>Plantago asiatica</i>	车前属	车前科	4	0.85	5.00	
	一年蓬	<i>Erigeron annuus</i>	飞蓬属	菊科	6	3.59	3.30	
	小蓬草	<i>Conyza canadensis</i>	白酒草属	菊科	2	0.85	3.00	
	蒲公英	<i>Taraxacum mongolicum</i>	蒲公英属	菊科	1	0.21	2.00	
	狗牙根	<i>Cynodon dactylon</i>	狗牙根属	禾本科	15	3.17	2.00	
自然恢复植被	胡颓子	<i>Elaeagnus pungens</i>	胡颓子属	胡颓子科	5	1.64	7.00	85.96
	扁担杆	<i>Grewia biloba</i>	扁担杆属	椴树科	1	0.33	1.00	
	五节芒	<i>Miscanthus sinensis</i>	芒属	禾本科	67	66.45	50.00	
	黄茅	<i>Heteropogon contortus</i>	黄茅属	禾本科	27	8.87	50.00	
	艾蒿	<i>Artemisia argyi</i>	蒿属	菊科	10	10.20	10.30	
	一年蓬	<i>Erigeron annuus</i>	飞蓬属	菊科	7	2.96	8.00	
	地榆	<i>Sanguisorba officinalis</i>	地榆属	蔷薇科	3	0.99	6.00	
	乌荻莓	<i>Cayratia japonica</i>	乌荻莓属	葡萄科	2	1.97	3.00	
	苎麻	<i>Boehmeria nivea</i>	苎麻属	荨麻科	2	1.64	3.00	
	苦苣菜	<i>Sonchus oleraceus</i>	苦苣菜属	菊科	2	0.66	3.00	
	毛蕨	<i>Pteridium aquilinum</i>	毛蕨	金星蕨科	3	0.99	2.00	
	薇甘菊	<i>Mikania micrantha</i>	假泽兰属	菊科	1	0.33	2.00	
	小蓬草	<i>Conyza canadensis</i>	白酒草属	菊科	1	0.33	1.00	

楸树林乔木层仅有楸树 1 种; 草本层植物共有 7 种, 隶属 5 科 7 属。自然恢复植被的灌木层有 2 种, 分属 2 科 2 属, 分别为胡颓子和扁担杆, 呈零星分布; 草本层共有 11 种, 隶属 7 科 12 属。3 种植被类型表现出群落结构简单, 物种数量较少, 均以草本层的五节芒占绝对优势。

在 3 种植被类型的草本层中, 大叶女贞的禾本科占数量优势, 有 3 属 3 种, 数量占比为 73.83%, 其次是菊科 3 属 3 种, 数量占比为 10.28%; 楸树林同样以禾本科占数量优势, 有 2 属 2 种, 数量占比为 83.61%, 其次是菊科 3 属 3 种, 呈零散分布, 数量占比为 4.92%; 自然恢复植被的禾本科占数

量优势,分属 2 属 2 种,数量占比为 75.20%,而菊科占种类优势,有 5 属 5 种,数量占比为 16.80%。

大叶女贞林植被物种重要值见表 5 所列。大叶女贞为该植被类型的林乔木层优势种,重要值为 43.76%,无灌木层。

楸树林植被物种重要值见表 6 所列。楸树为

该植被类型的林乔木层优势种,重要值为 48.16%,也无灌木层。

自然恢复植被物种重要值见表 7 所列。自然恢复植被的优势种为五节芒,重要值为 51.01%;其次是艾蒿、乌菟莓,重要值分别为 11.62%、7.51%;其灌木层较为单一,优势种为胡颓子和扁担杆,重要值分别为 3.00%、2.34%,无乔木层。

表 5 大叶女贞林植被物种重要值

类型	种	属	科	重要值/%
大叶女贞	<i>Ligustrum compactum</i>	木犀科	女贞属	43.76
棕榈	<i>Trachycarpus fortunei</i>	棕榈属	棕榈科	4.13
五节芒	<i>Miscanthus sinensis</i>	芒属	禾本科	51.01
前胡	<i>Peucedanum praeruptorum</i>	前胡属	伞形科	10.69
狗牙根	<i>Cynodon dactylon</i>	狗牙根属	禾本科	8.64
地榆	<i>Sanguisorba officinalis</i>	地榆属	蔷薇科	4.50
艾蒿	<i>Artemisia argyi</i>	蒿属	菊科	4.32
蒲公英	<i>Taraxacum mongolicum</i>	蒲公英属	菊科	4.32
一年蓬	<i>Erigeron annuus</i>	飞蓬属	菊科	4.13
马唐	<i>Digitaria sanguinalis</i>	马唐属	禾本科	4.13
车前草	<i>Plantago asiatica</i>	车前属	车前科	4.13

表 6 楸树林植被物种重要值

类型	种	属	科	重要值/%
楸树	<i>Catalpa bungei</i>	紫葳科	梓树属	48.16
五节芒	<i>Miscanthus sinensis</i>	芒属	禾本科	54.58
一年蓬	<i>Erigeron annuus</i>	飞蓬属	菊科	12.51
鸭跖草	<i>Commelina communis</i>	鸭跖草属	鸭跖草科	12.47
小蓬草	<i>Conyza canadensis</i>	白酒草属	菊科	7.57
狗牙根	<i>Cynodon dactylon</i>	狗牙根属	禾本科	5.16
车前草	<i>Plantago asiatica</i>	车前属	车前科	3.99
蒲公英	<i>Taraxacum mongolicum</i>	蒲公英属	菊科	3.68

表 7 自然恢复植被物种重要值

类型	种	属	科	重要值/%
扁担杆	<i>Grewia biloba</i>	扁担杆属	椴树科	3.00
胡颓子	<i>Elaeagnus pungens</i>	胡颓子属	胡颓子科	2.34
五节芒	<i>Miscanthus sinensis</i>	芒属	禾本科	39.75
艾蒿	<i>Artemisia argyi</i>	蒿属	菊科	11.62
乌菟莓	<i>Cayratia japonica</i>	乌菟莓属	葡萄科	7.51
黄茅	<i>Heteropogon contortus</i>	黄茅属	禾本科	6.61
一年蓬	<i>Erigeron annuus</i>	飞蓬属	菊科	5.83
苎麻	<i>Boehmeria nivea</i>	苎麻属	荨麻科	5.17
地榆	<i>Sanguisorba officinalis</i>	地榆属	蔷薇科	2.67
毛蕨	<i>Pteridium aquilinum</i>	毛蕨	金星蕨科	2.67
苦苣菜	<i>Sonchus oleraceus</i>	苦苣菜属	菊科	2.50
薇甘菊	<i>Mikania micrantha</i>	假泽兰属	菊科	2.34
小蓬草	<i>Conyza canadensis</i>	白酒草属	菊科	2.34

3 种植被类型重要值大于 5% 的植物种类较少,反映出在矿山植被修复初期,不管是人工植被还是自然恢复植被,五节芒、黄茅、小蓬草、一年蓬

等禾本科和菊科草本植物作为土著先锋植物首先进入裸露的地表并快速生长,但由于五节芒占绝对优势,草本层的植物种类和数量基本差别不大。

根据表 4 统计,大叶女贞、楸树、自然植被的草本层种类数分别为 9、7、11 种,数量分别为 107、183、131 株(丛),其中从高到低依次为自然恢复植被的草本种类、大叶女贞林、楸树林。在不同植被类型中,除五节芒外其他草本植物重要值较高的植物各不相同,大叶女贞林的前胡和狗牙根的重要值相对较高,分别为 8.64% 和 10.69%;楸树林的一年蓬、鸭拓草、小蓬草的重要值分别为 12.51%、12.47%、7.57%;自然恢复植物的艾蒿、乌菟莓、一年蓬、苕麻的重要值分别为 11.62%、7.51%、5.83%、5.17%。

由重要值大小可知,3 种植被类型组成的群系分别为:① 大叶女贞-五节芒+前胡+狗牙根;② 楸树-五节芒+一年蓬+鸭拓草;③ 五节芒+艾蒿+乌菟莓。

## 2.2 不同植被类型物种多样性分析

不同植被类型的物种多样性见表 8 所列。从表 8 可以看出,大叶女贞林、楸树林无灌木层,自然恢复植被无乔木层。在 3 种植被类型中,乔木层多样性指数均表现为大叶女贞林高于楸树林高于自然恢复植被;灌木层多样性指数均表现为自然恢复植被高于大叶女贞林和楸树林,且后两者相同,草本层多样性指数在 3 种植被类型中表现为最高。

表 8 不同植被类型的物种多样性

类型	层次	物种多样性指数			
		S	$H'$	D	E
大叶女贞林	乔木层	2	0.32 <sup>Aa</sup>	0.23 <sup>Aa</sup>	0.55 <sup>Aa</sup>
	灌木层	0	0	0	0
	草本层	9	0.87 <sup>Ab</sup>	0.34 <sup>Ab</sup>	0.39 <sup>Ab</sup>
楸树林	乔木层	1	0.11 <sup>Ba</sup>	0.06 <sup>Ba</sup>	0.19 <sup>Bab</sup>
	灌木层	0	0	0	0
	草本层	7	0.56 <sup>Bb</sup>	0.23 <sup>Bb</sup>	0.29 <sup>ABb</sup>
自然恢复植被	乔木层	0	0	0	0
	灌木层	2	0.55 <sup>a</sup>	0.36 <sup>a</sup>	0.79 <sup>a</sup>
	草本层	11	1.33 <sup>Cb</sup>	0.54 <sup>Cb</sup>	0.52 <sup>Cb</sup>

注:不同小写字母表示同一类型不同层次间差异显著  $P < 0.05$ ;  
不同大写字母表示同一层次不同类型间差异显著  $P < 0.05$ 。

大叶女贞林乔木层的物种多样性指数  $H'$ 、 $D$ 、 $E$  分别为 0.32、0.23、0.55;其次是楸树林乔木层,其多样性指数分别为 0.11、0.06、0.19;自然恢复植被区无乔木层。自然恢复植被草本层的物种多样性指数  $S$ 、 $H'$ 、 $D$ 、 $E$  分别为 11、1.33、0.54、0.52;其次是大叶女贞林草本层,其 Shannon-Wiener 指数为 0.87, Simpson 指数为 0.34;物种

多样性指数最低的为楸树林草本层,其 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数分别为 0.56、0.23。Pielou 均匀度指数除自然恢复植被较高以外,其余大叶女贞林和楸树林均比较低。不同植被类型草本植物的物种多样性指数存在显著差异,其中,大叶女贞林、楸树林和自然恢复植被之间的 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数均存在显著性差异 ( $P < 0.05$ );楸树林和自然恢复植被之间的 Pielou 均匀度指数存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。由此可见,人工林的引入会使群落物种单一化。

## 2.3 不同植被类型生物量

不同植被类型生物量如图 2 所示,其中不同小写字母表示总生物量与不同类型间差异显著,  $P < 0.05$ 。

由图 2 可知:各类型样地之间乔木层的总生物量表现为楸树林 ( $582.16 \text{ g/m}^2$ ) 高于大叶女贞林 ( $239.93 \text{ g/m}^2$ ),且存在显著性差异 ( $P < 0.05$ );各类型样地间草本层植物的总生物量表现为楸树林 ( $1342.7 \text{ g/m}^2$ ) 高于自然恢复植被 ( $1314.90 \text{ g/m}^2$ ) 高于大叶女贞林 ( $969.00 \text{ g/m}^2$ );草本层地上生物量表现为自然恢复植被 ( $594.47 \text{ g/m}^2$ ) 高于楸树林 ( $429.66 \text{ g/m}^2$ ) 高于大叶女贞林 ( $300.39 \text{ g/m}^2$ );草本层地下生物量表现为楸树林 ( $913.04 \text{ g/m}^2$ ) 高于自然恢复植被 ( $720.43 \text{ g/m}^2$ ) 高于大叶女贞林 ( $668.61 \text{ g/m}^2$ );对于总生物量,大叶女贞林与自然恢复植被、楸树林与自然恢复植被均存在显著性差异,且  $P < 0.05$ ,而楸树林与自然恢复植被不存在显著性差异。相较于自然恢复植被,大叶女贞和楸树人工林的引入改变了林下植被生物量的空间分布。

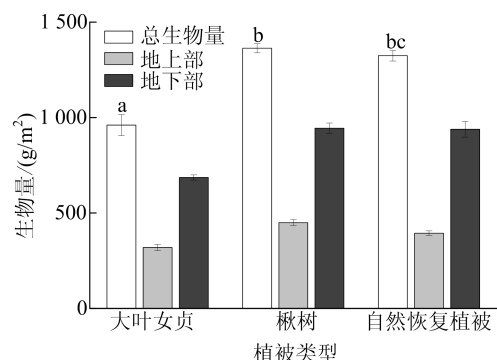


图 2 不同植被类型生物量

## 3 讨 论

### 3.1 不同植被类型的物种组成与重要值

矿区生态系统中的物种多样性遭到破坏,将

会影响生态系统的结构、功能和过程。相反,物种多样性得到保护和提高,则对生态系统的平衡和发展有利<sup>[16-17]</sup>。植物物种多样性变化反映了环境变化和人类活动对植被修复的影响<sup>[18]</sup>。研究发现,不同植被类型对植物物种组成和物种多样性有显著影响,本文 2 种人工植被及自然恢复植被的群落结构均比较单一,在植物种类和数量上均以草本层占优势;草本层植物共有 18 种,隶属 9 科 18 属,以禾本科和菊科植物为主,说明在矿区植被修复中,禾本科和菊科等耐旱、耐贫瘠和对重金属抗性强的植物成为先锋植物。物种数对比表现为自然恢复植被高于大叶女贞林高于楸树林,与文献<sup>[19]</sup>的研究一致。草本类植物可以在矿山修复初期引入,从而改善土壤的重金属污染,这与文献<sup>[20]</sup>的研究结果基本相同。

### 3.2 不同植被类型的多样性特征

不同植被类型的乔木层和灌木层多样性均较低,林下草本层的多样性相对较高。草本层的物种组成与多样性存在显著差异,自然恢复植被、大叶女贞林下植被物种数量和多样性均高于楸树林。总体上,本文 2 种人工林分的林下植被物种数量、多样性均低于自然恢复植被,这与文献<sup>[21]</sup>的研究结果一致。也有研究表明,矿山的植被修复过程中,人工恢复植被的物种多样性会高于自然恢复植被<sup>[22]</sup>,可能与矿山类型和地域、人工恢复的植物配置、乔木层的郁闭度等因素有关。自然恢复植被与大叶女贞林、楸树林相比,自然恢复植被显著提高了矿山群落的物种多样性。文献<sup>[23]</sup>的研究也证实了以上结论,矿渣堆优势草本植物种群中,生态位宽度较大的多为禾本科植物,表明禾本科植物在矿渣堆这一特殊生境中具有较强的环境适应能力。禾本科和艾蒿等菊科植物在铅锌矿区分布相对广泛且具有较强的适应能力,在土壤修复及生态恢复中具有明显优势<sup>[24]</sup>。因此,草本植物在提高镉矿山群落生物多样性方面具有更大的优势。禾本科和菊科植物均能适应镉矿区恶劣的生长环境,说明该物种具有较强的重金属迁移能力,这与文献<sup>[25-26]</sup>的研究结果一致。五节芒虽不是典型的超富集植物,但作为重金属土壤污染的修复植物具有较好的应用前景<sup>[27]</sup>。此外,2 种植被类型下的林下植被物种多样性和物种丰富度均低于自然恢复植被,可能是由于人工植被乔木层的遮荫作用限制了阳性灌木、草本植物的迁入和生长,从而降低了林下物种的丰富程度<sup>[28-29]</sup>。植物群落存在竞争和促进等

复杂关系,对植物类型和层次关系研究,不仅是探讨植物对环境适应能力的多样性评价,而且有助于认识植物群落特征、结构以及植物与环境之间的关系;同时,也能表征群落发育过程中种群之间的关系和优势种的地位<sup>[30-31]</sup>。因此,在冷水江梯矿山植被修复的过程中,为缓解种间和种内竞争,应采用合理的抚育措施,并且选取正联结较强的树种。

综合考虑乔木树种对环境的适应性和林下植被的多样性,可以根据矿山的土壤、气候等特点采用乔、灌、草的本地物种综合配置的模式或采用撒播草种促进自然恢复的模式进行矿山修复,快速提高矿山修复植被的多样性和覆盖率,减缓水土流失,并通过自然演替有效地对矿山的生态环境进行修复。

### 3.3 不同植被类型的生物量特征

在不同植被类型下,乔木层中大叶女贞和楸树的生长情况表现出显著差异,主要表现在生物量、适应性和生长速度等方面。关于生物量方面,楸树的地上和地下的生物量明显高于大叶女贞,这与文献<sup>[32]</sup>的研究结果一致,表明楸树在相同的生态环境下能够更好地利用生态资源,同时对生态环境有更好的影响力。在冷水江梯矿区的恶劣环境下,楸树更能够适应这种环境,生长速度更加稳定,而大叶女贞的生长速度可能受到一定的限制<sup>[33]</sup>。在不同植被类型中,草本层的菊科与禾本科呈优势种特征,文献<sup>[34-36]</sup>的研究表明,菊科、禾本科植物是矿山植被恢复的先锋物种的较好选择,具有很强的适应性。因此草本层的菊科和禾本科能为今后开展矿区植被物种选配、确定限制性因子、改良土壤理化性质以及生态效益评价等研究工作提供一定的对比和参考。

在林分结构优化与调控上,人工林对现有植被群落存在一定的干扰,加之研究区域内 3 种不同植被恢复模式时间不长,植被覆盖度不高,生态系统稳定性较低,物种多样性相对单一。要营造异龄复层混交林,在垂直结构上形成乔木、灌木和草本的多层次组合,加强区域抚育,对维持研究区退化生境养分与生态系统稳定性有重要作用。因此,在冷水江的矿山修复过程中,选择生长适应性好的树种与本土先锋植物混合栽植作为矿山修复的主要植物将会更加有利。

研究结果显示,大叶女贞和楸树人工林的引入会使林下植被生物量的空间分布发生改变,相较于自然恢复植被,人工林的林下植被生物量更

倾向于地下部分。这是因为人工林通常采用高密度造林技术,使得树木之间的空地较少,导致林下植被缺乏生长空间,进而影响其生长和生物量的积累<sup>[37]</sup>。研究结果还显示,人工林的引入会导致林下植被物种多样性减少,从而使其生物量分布更加集中。然而,人工林也可以为林下植被提供一定的保护和支撑,如减少恶劣环境的影响,增加土壤水分和养分等。总之,这些因素均会改善林下植被的生长和生物量积累,因此人工林的引入会改变林下植被生物量的空间分布。

矿山植被恢复中,植被物种的选配和对应的种植技术是矿山植被恢复的研究重点和难点。不同立地条件对应适宜植物种类选配已有很多研究,但修复后的效果效益评价体系尚未有统一标准,同时缺乏协同性。本文的数据收集可为矿区植被恢复提供研究基础,为今后相关工作的开展提高理论基础和工程实践的契合度。

#### 4 结 论

为研究不同植被类型的生物量与物种多样性特征,以期对矿山的生态环境修复提供参考,本文调查了冷水江锑矿区的大叶女贞、楸树和自然恢复植被样地,得到的主要结论如下:

1) 3种植被类型的乔木层和灌木层的物种组成和多样性均较低。草本层植被物种组成与多样性存在显著差异,大叶女贞林草本层的物种数量和多样性均高于楸树林,但 2 种人工植被的草本层物种数量、多样性均低于自然恢复植被。在研究区域中自然恢复植被对生态环境修复的贡献较大。

2) 大叶女贞林与楸树林的乔木层和灌木层生物量差异不显著,草本层植物生物量与自然恢复植被之间存在显著差异;乔木层生物量表现为楸树林高于大叶女贞林,而草本层生物量则表现为楸树林高于自然恢复植被高于大叶女贞林,并且人工植被的乔木树种的引入会改变林下植被生物量的空间分布。

3) 单一树种的引进可能对锑矿山生态环境的恢复作用有限,适当采用乔、灌、草的配置模式,在保证林木生长的同时,提高植被覆盖率,增加林下植被的物种多样性以及植被总体的生物量水平。

#### [参 考 文 献]

[1] 杨永均. 矿山土地生态系统恢复力及其测度与调控研究

- [D]. 徐州:中国矿业大学,2017.
- [2] 李树志. 中国煤矿山土地复垦与生态修复现状与发展趋势[C]//2010 全国“三下”采煤与土地复垦学术会议论文集. 张家界:中国煤炭学会矿山测量专业委员会,2010:115-119.
- [3] SULLIVAN J, AMACHER G S. Private and social costs of surface mine reforestation performance criteria[J]. *Environmental Management*, 2010, 45(2): 311.
- [4] TROPEK R, KADLEC T, HEJDA M, et al. Technical reclamations are wasting the conservation potential of post-mining sites: a case study of black coal spoil dumps[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 43(3): 13-18.
- [5] 邹旭, 邓穆坤, 李丹雄, 等. 浅谈矿山生态修复中的植物选择与配置:以湖南娄底市冷水江锑煤矿生态修复为例[J]. *中国水土保持*, 2021, 472(7): 39-42.
- [6] 胡治远, 刘俊, 田宇, 等. 不同矿山修复模式植被多样性研究:以冷水江锡矿山为例[J]. *湖南城市学院学报(自然科学版)*, 2022, 31(4): 57-64.
- [7] 张彬, 陈新雅, 施卫省. 湖南冷水江市锑矿区植物调查与植物规划研究[J]. *园林*, 2021, 38(6): 88-95.
- [8] 李斌, 陈月华, 童方平, 等. 采矿废弃地植被恢复与可持续景观营造研究:以湖南冷水江锑矿区为例[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(9): 273-276.
- [9] 王艳, 王敏超, 代保清. 东北煤矸石矿山生态恢复的植物选择探析[J]. *沈阳师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 35(2): 170-174.
- [10] 刘桢, 易敏, 廖秀英, 邢宏霖. 2005—2010 年湖南锡矿山矿区生态系统空间格局变化分析[J]. *矿产勘查*, 2016, 7(2): 364-368.
- [11] 张彬. 基于生态修复理念下的矿业棕地植被选择与利用研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2021.
- [12] 翟正江, 杨汉宏, 张勇, 等. 矿山自然恢复中植物多样性与生物量关系研究[J]. *人民黄河*, 2018, 40(3): 93-97.
- [13] 许再富, 朱华, 王应祥, 等. 澜沧江下游/湄公河上游片断热带雨林物种多样性动态[J]. *植物生态学报*, 2004, 28(5): 585-593.
- [14] 项华均, 安树青, 王中生, 等. 热带森林植物多样性及其维持机制[J]. *生物多样性*, 2004, 12(2): 290-300.
- [15] 刘雨晖. 细叶青冈与杉木混交林生物量与林下植物多样性[D]. 福州:福建农林大学, 2018.
- [16] SIMARMATA M M. Diversity of vegetation in the natural forests of londut samosir regency[J]. *Journal of Environmental and Agricultural Studies*, 2021, 2(2): 87-96.
- [17] 张步翀, 李凤民, 黄高宝. 生物多样性对生态系统功能及其稳定性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2006, 14(4): 12-15.
- [18] 陈小雪, 李红丽, 董智, 等. 不同植被类型下火烧迹地的土壤修复效果及植物多样性变化[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(3): 332-339.
- [19] 孙双红, 朱宾宾, 鲁海涛, 等. 林窗对呼伦贝尔沙地樟子松人工林物种多样性的影响[J]. *森林工程*, 2023, 39(2): 47-56.

- 金属形态变化的影响[J]. 环境工程, 2019, 37(3): 29-34.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 农用污泥污染物控制标准: GB 4284—2018[S]. [出版地不详: 出版者不详], 2018: 2.
- [20] PANAHI H K S, DEHHAGHI M, OK Y S, et al. A comprehensive review of engineered biochar: production, characteristics, and environmental applications[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 270: 122462.
- [21] ZHANG Y, TANG J Y, ZHANG W J, et al. Preparation of ultrahigh-surface-area sludge biopolymers-based carbon using alkali treatment for organic matters recovery coupled to catalytic pyrolysis[J]. Journal of Environmental Sciences, 2021, 106: 83-96.
- [22] CUI X Q, FANG S Y, YAO Y Q, et al. Potential mechanisms of cadmium removal from aqueous solution by *Canna indica* derived biochar[J]. Science of the Total Environment, 2016, 562: 517-525.
- [23] HUANG M J, ZHANG Y, XIANG W, et al. Efficient adsorption of Mn(II) by layered double hydroxides intercalated with diethylenetriaminepentaacetic acid and the mechanistic study[J]. Journal of Environmental Sciences, 2019, 85: 56-65.
- [24] AMRAN F, ZAINI M A A. Sodium hydroxide-activated *Casuarina* empty fruit, isotherm, kinetics and thermodynamics of methylene blue and congo red adsorption[J]. Environmental Technology & Innovation, 2021, 23: 101727.
- [25] 潘紫倩, 黄华军, 何小武, 等. 污泥液化生物炭对亚甲基蓝的吸附特性及机理[J]. 中国环境科学, 2020, 40(1): 217-226.
- [26] KAZAK O, TOR A. In situ preparation of magnetic hydrochar by co-hydrothermal treatment of waste vinasse with red mud and its adsorption property for Pb(II) in aqueous solution[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 393: 122391.
- [27] 速朝锋. 污泥快速热解特性及技术经济性评价[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [28] 姜志翔. 生物炭技术缓解温室气体排放的潜力评估[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [29] ZHANG R Y, ZHENG X X, CHEN B H, et al. Enhanced adsorption of sulfamethoxazole from aqueous solution by Fe-impregnated graphited biochar[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 256: 120662.
- [30] PAP S, RADONIC J, TRIFUNOVIC S, et al. Evaluation of the adsorption potential of eco-friendly activated carbon prepared from cherry kernels for the removal of Pb<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup> and Ni<sup>2+</sup> from aqueous wastes[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 184: 297-306.

(责任编辑 张淑艳)

## (上接第 1321 页)

- [20] 黄成燕, 王佐成, 胡荣, 等. 草在深圳水径大型矿山群水土生态修复中的应用[J]. 中国水土保持, 2021(12): 14-23.
- [21] 杜忠毓, 王剑武, 邢文黎, 等. 喀斯特锑矿植被恢复区植物多样性及群落稳定性[J]. 环境科学研究, 2023, 36(1): 188-197.
- [22] WOCH M W, STEFANOWICZ A M, STANEK M. Waste heaps left by historical Zn-Pb ore mining are hotspots of species diversity of beech forest understory vegetation[J]. Science of the Total Environment, 2017, 599/600: 32-41.
- [23] 宋红艳, 孙彩丽, 柴宗政. 黔西北铅锌矿废渣场优势草本植物种群生态位及种间关系[J]. 草地学报, 2022, 30(10): 2764-2771.
- [24] 沈佳怡, 高铭晶, 刘钰, 等. 典型草本植物对镉锌铜污染河道底泥的修复[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2022, 28(1): 40-48.
- [25] 邢丹, 刘鸿雁, 于萍萍, 等. 黔西北铅锌矿区植物群落分布及其对重金属的迁移特征[J]. 生态学报, 2012, 32(3): 796-804.
- [26] 吴胜兰. 苎麻种质对贫瘠土壤适应性评价及其机制[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2021.
- [27] 徐晓莹, 谢泯生, 卞杰松, 等. 尾矿区优势植物五节芒对重金属的吸收效能研究[J]. 宝鸡文理学院学报(自然科学版), 2019, 39(4): 55-60.
- [28] 王磊, 温远光, 周晓果, 等. 尾巨桉与红锥混交对林下植被和土壤性质的影响[J]. 生态环境学报, 2022, 31(7): 1340-1349.
- [29] 王依瑞, 王彦辉, 段文标, 等. 黄土高原刺槐人工林郁闭度对林下植物多样性特征的影响[J]. 应用生态学报, 2023, 34(2): 305-314.
- [30] 马丰丰, 潘高, 李锡泉, 等. 桂西南喀斯特山地木本植物群落种间关系及 CCA 排序[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(6): 32-44.
- [31] 张明霞, 王得祥, 康冰, 等. 秦岭华山松天然次生林优势种群的种间联结性[J]. 林业科学, 2015, 51(1): 12-21.
- [32] 关追追, 赵江宁, 邱权, 等. 楸树人工林生长规律及其最优生长模型研究: 以河南省洛宁县楸树为例[J]. 森林工程, 2021, 37(2): 1-10.
- [33] 江上喜. 造林密度对 6 年生杉木幼林生长及林下光环境的影响[J]. 亚热带农业研究, 2022, 18(4): 223-228.
- [34] 徐芳, 张亚红, 刘敏, 等. 废弃采石场生态修复植物的抗旱性评价[J]. 江西农业学报, 2019, 31(10): 57-62.
- [35] 高丽霞. 矿山植被生态恢复技术及植被生态稳定性跟踪评估研究[R]. 广州: 仲恺农业工程学院, 2008.
- [36] 关军洪, 曹钰, 吴天煜, 等. 北京首云铁矿废弃地植被修复调查研究[J]. 中国园林, 2017, 33(11): 13-18.
- [37] 唐佳, 陈芝兰, 方江平. 女贞属植物在西藏林芝的生态适应性研究[J]. 西藏科技, 2018(8): 69-72.

(责任编辑 胡亚敏)