

海南省文昌市废弃钛矿区物种多样性特征与环境因子的关系

宿少锋^{1,2}, 薛杨^{1,2}, 林之盼^{1,2}, 王小燕^{1,2}

(1. 海南省林业科学研究院, 海南 海口 571100; 2. 海南文昌森林生态系统国家定位观测研究站, 海南 文昌 571300)

摘要: [目的] 研究钛矿开采对周边植被物种多样性和分布格局的影响, 为废弃钛矿区生物多样性保护和植被恢复提供基础数据。[方法] 以海南省文昌市废弃钛矿区为例, 利用方差分析、冗余分析(RDA)研究钛矿区土壤因子与乔木、灌木和草本物种多样性差异及分布格局影响。[结果] 文昌市废弃钛矿区辐射区域仅有植物 28 科 37 属 45 种, 其中乔木类 13 种, 灌木 11 种, 草本 21 种。钛矿开采不仅对矿区植被产生破坏, 同时对辐射区域 200 m 范围内的植被群落结构也有明显影响; 废弃钛矿区物种 α 多样性指数除 Pielou 均匀度指数外都以草本最高, 显著高于乔木和灌木。随着辐射区域距离的增加, 物种多样性指数逐渐递减; 通过土壤环境因子与物种多样性 RDA 排序得出, 土壤 pH 值、土壤含水率、有效磷、有机质和铵态氮是影响物种多样性差异的主要环境因子, 它们分别解释了废弃钛矿辐射区物种多样性 42.6%, 12.4%, 8.5%, 8.2% 和 7.9% 的差异。[结论] 钛矿周边植物物种多样性和分布格局受土壤 pH 值、土壤含水率等多个环境因子共同影响。矿区周边物种多样性是否受土壤重金属的影响, 尚待进一步研究。

关键词: 钛矿区; 多样性指数; 相似性指数; 冗余分析(RDA); 海南省文昌市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)04-0155-08

中图分类号: Q948, S181

文献参数: 宿少锋, 薛杨, 林之盼, 等. 海南省文昌市废弃钛矿区物种多样性特征与环境因子的关系[J]. 水土保持通报, 2020, 40(4):155-162. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.04.021; Su Shaofeng, Xue Yang, Lin Zhipan, et al. Relationship between species diversity characteristics and environmental factors of abandoned Titanium mine area in Wenchang City of Hainan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(4):155-162.

Relationship Between Species Diversity Characteristics and Environmental Factors of Abandoned Titanium Mine Area in Wenchang City of Hainan Province

Su Shaofeng^{1,2}, Xue Yang^{1,2}, Lin Zhipan^{1,2}, Wang Xiaoyan^{1,2}

(1. Hainan Academy of Forestry, Haikou, Hainan 571100, China;

2. Hainan Wenchang Forest Ecosystem Research Station, Wenchang, Hainan 571300, China)

Abstract: [Objective] The impacts of Titanium mining on the diversity and distribution pattern of surrounding vegetation were studied in order to provide basic data for biodiversity protection and vegetation restoration in abandoned Titanium mines. [Methods] The differences and distribution patterns of soil factors and tree, shrub and herbaceous species in the titanium mine area were investigated by using ANOVA and Redundancy analysis (RDA). [Results] There were only 45 species, 33 families and 37 genera in the study area, including 13 tree species, 11 shrub species, and 21 herb species. The activities of mining had destructive effects on the vegetation in the abandoned Titanium mining area, and obviously affected the vegetation communities structure within a 200 m buffer area. Except for Pielou evenness index, the diversity index of species in the abandoned Titanium mining area was herb, which was significantly higher than that of trees and shrubs. The species diversity index decreased gradually with the increase of the distance to the buffer zone. According to the Redundancy analysis (RDA), the soil pH value, soil water content, available phosphorus, organic matter, ammonium nitrogen and buffer distance were the main environmental factors affecting the difference

收稿日期: 2020-03-20

修回日期: 2020-05-06

资助项目: 海南省省属科研院所技术开发专项“文昌市废弃钛矿区植被恢复技术研究”(KYYS-2018-24); 海南省重点研发计划项目(ZDYF2019056)。

第一作者: 宿少锋(1985—), 男(汉族), 山西省长治市人, 硕士, 工程师, 主要从事森林生态监测方面的工作。Email: s396487005@163.com。

通讯作者: 薛杨(1963—), 男(汉族), 海南省文昌市人, 硕士, 研究员, 主要从事森林生态监测。Email: xue13307539989@163.com。

of species diversity, which explained 42.6%, 12.4%, 8.5%, 8.2%, 7.9% and 7.8% of the difference of species diversity in the abandoned Titanium ore buffer, respectively. [Conclusion] The plant species diversity and distribution pattern around the titanium mine were affected by multiple environmental factors such as soil pH value and soil water content. Whether the species diversity around the mining area is affected by soil heavy metals remains to be further studied.

Keywords: Titanium mining area; diversity index; similarity index; RDA; Wenchang City of Hainan Province

矿产资源开采所引发的环境污染和生态破坏问题,是当前人们十分关注的环境保护重要内容之一^[1]。随着人口的增加、工业化的发展及城市化进程的加快,人类对自然资源的过度利用,致使许多类型的生态系统出现严重退化,产生了大量的工业废弃地,进而引发了一系列诸如森林减少,水土流失,土地荒漠化,石漠化,水体和空气污染,生物多样性锐减,淡水资源短缺,生态平衡失调等生态环境和社会经济问题^[2],对区域生态环境安全和生物多样性保护带来巨大损失^[3]。海南省是中国钛矿资源储量最为丰富的省份之一,尤其文昌市。据调查海南省钛矿区开发废弃地已达到 5 000 hm² 以上,仅文昌地区已达到 3 586 hm²^[2]。钛矿主要以地表开采为主,将表面植被去除,用高压水枪冲射含钛土壤,形成泥浆。泥浆经挡水设备收集后,采用溜槽重力自流至选矿生产车间的长沟型槽中,并加入清水,利用钛矿比重大,泥沙比重较轻的特点,使其在重力作用下分层,含钛较多的部份沉淀在槽底,由泥浆泵抽吸至粗毛钛矿槽中,其它泥浆水则排至外围^[4]。钛矿的开采不仅影响了区域景观,同时也造成森林植被大面积的破坏、区域环境安全、水土流失加剧、物种多样性锐减等一系列问题,废弃钛矿区植被恢复及生态重建成为海南区域发展迫在眉睫的问题。

植物生长和分布除了受扩散能力、种群密度、个体大小等影响因素外,还会受到气候、地形、土壤因子的影响^[5-8],矿产开采正是通过改变局部环境因子从而对物种的分布产生影响。矿产的开发破坏了生态系统的稳定性,对原有生态系统造成破碎化,对周边生态系统完整性造成分割,从而形成不同独立的小型生态系统,矿区的开发利用成为生物资源破坏重要干扰源^[9]。目前,国内外研究的重点是废弃矿区植被的恢复,国外早在 20 世纪初期就已经开展矿区植被生态恢复,通过土地复垦、矿区土壤改良和适地适树等方面的研究,现已形成系统的研究方法^[10]。中国对矿山废弃地生态恢复研究开始较晚,于 20 世纪 80 年代才开始,近年来才得到迅速发展,很多生态学家针对不同矿种的废弃矿区从矿区植被调查、矿区植被恢复、植物群落特征及生物多样性保护方面开展了一些研究^[11-13],形成了初步的研究理论。矿区周边植被

调查对于矿区植被恢复起到至关重要的作用,通过调查可以充分了解矿区周边现有植被类型、分布状况、环境因子及生物多样性等情况,可为该区域植被恢复提供基础性资料,对于矿区生态恢复具有重要的研究意义。目前,废弃钛矿区周边植被调查和生态恢复研究还属空白,系统性研究资料和案例还欠缺。本研究以海南省文昌市典型废弃钛矿区为中心向四周作辐射,通过对辐射区域 2 km 范围内植被调查,研究废弃钛矿不同距离辐射区植物多样性及其与环境因子的关系,以期为废弃钛矿区植被恢复树种选择提供基础性资料,对废弃钛矿区生态系统的植被恢复和重建具有重要的指导意义,为废弃钛矿地及类似矿山生态修复与植被恢复提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于海南省文昌市,属于低丘台地平原地带,平均海拔高度 42.55 m,地处热带北缘,属热带海洋性季风气候,年平均气温 22~27 ℃,大于或等于 10 ℃ 的积温为 8 200 ℃,最冷的月份温度仍达 10~14 ℃,年光照为 1 750~2 650 h,光照率为 50%~60%,光温充足,雨量充沛,光合辐射高。年平均日照时数均在 1 800 h 以上;年平均降雨量 1 886.2 mm,但分布不均匀,雨季多在 5 月至 10 月,降雨量占全年的 80%左右,旱季多在 11 月至翌年的 4 月,降雨量占全年的 20%左右;年平均湿度相对在 80%之间,最小湿度为 34%;年平均蒸发量为 1 892.4 mm,以 5—8 月蒸发量最大,约占全年蒸发量的 45%;太阳辐射能力以 7 月最多(54.42~58.60 kJ/m²),2 月最少(20.93~25.11 kJ/m²),钛矿区周边主要土壤类型为滨海风沙土。植被类型为以木麻黄为主的沿海防护林和向内陆延伸的杂树短灌疏草群落,主要树种包括:木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)、椰子(*Cocos nucifera* L.)、红厚壳(*Calophyllum inophyllum* L.)、苦楝(*Melia azedarach* L.)、大叶相思(*Acacia auriculiformis*)等,主要灌木有桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)、大青(*Clerodendrum cyrtophyllum*)、草海桐(*Scaevola taccada*)、野牡丹(*Melastoma malabathricum*)、露兜树(*Pandanus tectorius*)等。

2 研究方法

2.1 样点设置与调查

于2018年3月采用典型样地调查法,从文昌市17个乡镇中选择出钛矿开采面积最大的4个乡镇,包括昌洒镇(CS)、锦山镇(JS)、翁田镇(WT)和铺前镇(PQ),每个乡镇分别选择3个废弃钛矿点采样(见表1)。把废弃钛矿区为中心作辐射,以辐射2 km范围内森林植被作为调查对象,按照中心与辐射区距离 A_1 (100 m), A_2 (200 m), A_3 (500 m), A_4 (1 000 m), A_5 (2 000 m)范围内随机布设样点,每个样点设立1个

30×30 m乔木样方,4个调查区共计20个样方,在每个乔木样方中沿对角线设置5 m×5 m灌木样方3个,在每个灌木样方沿对角线设置1 m×1 m草本样方3个,4个调查区共计灌木样方60个,草本样方180个。乔木调查测定郁闭度、树种、树高、胸径、盖度等指标,灌木草本调查测定种类、高度、盖度及数量,分别记录,草本调查包括物种、株数、高度、盖度。同时,在每个乔木样方内挖掘一个20 cm深的土壤剖面,然后用铝盒采取土样,测定含水量,在调查样方内按S形曲线选任意5点取0—20 cm的表层土壤,混合约1 kg土样带回实验室自然风干,测试土壤化学特性。

表1 研究区域基本概况

区域	样点位置	地理位置	土壤类型	平均海拔/m	坡度/(°)	植被类型
CS	昌洒镇	110°57'04"E,19°51'31"N	滨海风沙土	30	<3	人工林
JS	锦山镇	110°42'28"E,20°02'12"N	滨海风沙土	45	<3	人工林
WT	翁田镇	110°52'12"E,19°58'27"N	滨海风沙土	50	<3	人工林
PQ	铺前镇	110°57'04"E,19°51'31"N	滨海风沙土	50	<3	人工林

2.2 物种多样性指数测定方法^[14]

(1) 丰富度指数 R : 样方中物种数量;

(2) Shannon-Wiener 多样性指数(H'):

$$H' = -\sum(P_i \cdot \ln P_i) \quad (1)$$

(3) Simpson 多样性指数(D):

$$D = 1 - \sum N_i(N_i - 1) / [N(N - 1)] \quad (2)$$

(4) Pielou 均匀度指数(J_{sw}):

$$J_{sw} = -\sum(P_i \ln P_i) / \ln s \quad (3)$$

式中: $P_i = N_i/N$; N 为样方中各物种多度指标总和; N_i 为第 i 个种的多度。

(5) 重要值计算公式为:

$$\text{乔木层及灌木层重要值} = (\text{相对多度} + \text{相对频度} + \text{相对优势度}) / 3 \quad (4)$$

$$\text{草本层重要值} = (\text{相对多度} + \text{相对频度} + \text{相对盖度}) / 3 \quad (5)$$

(6) Sorenson 群落相似性指数(C_j)^[15]:

$$C_j = 2j / (a + b) \quad (6)$$

式中: j 为两个群落共有的物种数; a, b 分别为研究区 A 和 B 的物种数。

2.3 土壤含水率及化学特性测定

测定土壤因子包括土壤含水率(SWC)、土壤 pH 值、有机质(SOM)、土壤含水量(SWC)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、有效磷(AP)、速效钾(AK)、铵态氮(NN)、硝态氮(AN)等10个指标。土壤含水率(SWC)采用烘干法,在野外先装入铝盒称湿重后带回实验室 105 ℃烘至恒重;土壤 pH 采用电位法测定;有机质采用铬酸氧还滴定法测定;全氮采用半微

量开氏法测定;全磷采用酸溶—钼锑抗比色法测定;全钾采用碱溶—火焰光度法进行测定;有效磷采用 Bray I 提取—钼锑抗吸光光度法测定;速效钾采用乙酸铵浸提—火焰光度法测定;硝态氮采用 1 mol/L KCl 浸提—流动分析仪测定;铵态氮采用 1 mol/L KCl 浸提—流动分析仪测定。

2.4 数据处理

采用 Excel 2007 计算物种多样性指数,利用 SPSS 18.0 软件进行方差分析和多重检验比较,数据可视化在 Origin 9.0 完成,运用 Canoco 5.0 软件进行物种多样性和土壤理化特征进行冗余分析(RDA)。

3 结果与分析

3.1 废弃钛矿辐射区植被组成

通过对文昌市典型废弃钛矿辐射区 2 km 范围内植被调查发现,废弃钛矿辐射区主要物种共计 33 科 44 属 45 种(表 2),其中乔木 9 科 13 属 13 种,占总物种数 28.89%,按科种类分最多的是楝科 3 种,其次桑科、棕榈科各 2 种,樟科、木麻黄科、藤黄科、锦葵科、豆科、山榄科各 1 种。辐射区共计灌木 10 科 11 属 11 种,占总物种数 24.44%,按科种类计大戟科 2 种、桃金娘科、茜草科、芸香科、马鞭草科、露兜树科、野牡丹科、苦木科、草海桐科、棕榈科各 1 种。研究区共计草本 14 科 20 属 21 种,占总物种数 46.67%,其中菊科 4 种,禾本科 3 种,苋科、大戟科各 2 种,莎草科、百合科、锦葵科、海金沙科、竹桃科、猪笼草科、景天科、马鞭草科、西番莲科各 1 种。

表 2 文昌市钛矿辐射区植被组成及重要值

生活型	种名	科名	属名	昌洒镇	翁田镇	锦山镇	铺前镇
1	潺槁木姜子	樟科	木姜子属	6.36	3.29	5.67	4.45
1	木麻黄	木麻黄科	木麻黄属	28.64	24.79	13.52	27.66
1	椰子	棕榈科	椰子属	—	2.36	3.07	3.41
1	鱼尾葵(<i>Caryota ochlandra</i>)	棕榈科	鱼尾葵属	0.35	—	—	—
1	红厚壳	藤黄科	红厚壳属	3.32	1.67	0.69	—
1	黄槿(<i>Hibiscus tiliaceus</i>)	锦葵科	木槿属	1.30	0.77	—	1.12
1	苦楝	楝科	楝属	17.65	5.69	6.87	18.09
1	麻楝(<i>Chukrasia tabularis</i>)	楝科	麻楝属	—	—	5.98	0.14
1	非洲楝(<i>Khaya senegalensis</i>)	楝科	非洲楝属	—	—	2.23	—
1	大叶相思	豆科	金合欢属	6.25	3.89	13.88	8.54
1	对叶榕(<i>Ficus hispida</i>)	桑科	榕属	—	0.25	0.73	—
1	鹊肾树(<i>Streblus asper</i>)	桑科	鹊肾树属	—	—	0.52	—
1	伊朗紫硬胶(<i>Mimusops elengi</i>)	山榄科	香榄属	0.33	—	—	2.28
2	银柴(<i>Aporosa dioica</i>)	大戟科	银柴属	0.76	1.89	—	—
2	桃金娘	桃金娘科	桃金娘属	2.75	0.62	1.26	—
2	九节(<i>Psychotria rubra</i>)	茜草科	九节木属	3.65	2.17	5.27	—
2	酒饼筋(<i>Atalantia buxifolia</i>)	芸香科	芸香属	2.54	8.38	—	—
2	大青	马鞭草科	大青属	7.89	5.34	11.99	8.58
2	露兜树	露兜树科	露兜树属	11.17	4.29	—	—
2	散尾葵(<i>Chrysalidocarpus lutescens</i>)	棕榈科	散尾葵属	—	—	2.46	1.12
2	野牡丹	野牡丹科	野牡丹属	3.68	—	8.60	—
2	鸦胆子(<i>Brucea javanica</i>)	苦木科	鸦胆子属	—	—	3.68	—
2	草海桐	草海桐科	草海桐属	—	7.16	1.55	2.17
2	蔓马樱丹	马鞭草科	马樱丹属	5.89	8.50	6.51	3.77
3	莎草(<i>Cyperus rotundus</i>)	莎草科	莎草属	3.75	2.36	3.42	3.36
3	藿香蓟	菊科	胜红蓟属	8.97	11.23	10.58	12.96
3	鬼针草	菊科	鬼针草属	24.28	16.75	16.23	—
3	一点红(<i>Emilia sonchi folia</i>)	菊科	一点红属	—	—	5.24	—
3	小飞蓬草(<i>Erigeron acer</i>)	菊科	白酒草属	—	—	4.32	3.21
3	地毯草(<i>Panicum repens</i>)	禾本科	黍属	—	0.86	6.63	—
3	短叶黍(<i>Panicum brevi folium</i>)	禾本科	黍属	—	4.32	1.89	—
3	牛筋草(<i>Eleusine indica</i>)	禾本科	稃属	—	5.71	—	—
3	光叶菝葜(<i>Smilax corbularia</i>)	百合科	菝葜属	1.05	—	—	—
3	叶下珠(<i>Phyllanthus urinaria</i>)	大戟科	叶下珠亚属	—	—	1.14	—
3	猩猩草(<i>Euphorbia cyathophora</i>)	大戟科	大戟属	—	—	—	1.06
3	牛膝	苋科	牛膝属	9.74	—	7.88	14.58
3	青葙(<i>Celosia argentea</i>)	苋科	青葙属	—	—	5.23	—
3	海金沙(<i>Lygodium japonicum</i>)	海金沙科	海金沙属	1.35	—	—	—
3	长春花	夹竹桃科	长春花属	6.23	7.57	—	5.63
3	飞机草	菊科	泽兰属	5.22	4.95	6.59	—
3	猪笼草(<i>Nepenthes mirabilis</i>)	猪笼草科	猪笼草属	—	—	0.26	—
3	落地生根(<i>Bryophyllum pinnatum</i>)	景天科	落地生根属	—	—	0.41	—
3	龙珠果(<i>Passiflora foetida</i>)	西番莲科	西番莲属	—	—	—	1.38
3	蔓菁	马鞭草科	牡荆属	8.21	—	3.25	—
3	地桃花(<i>Urena lobata</i>)	锦葵科	梵天花属	—	7.45	—	—

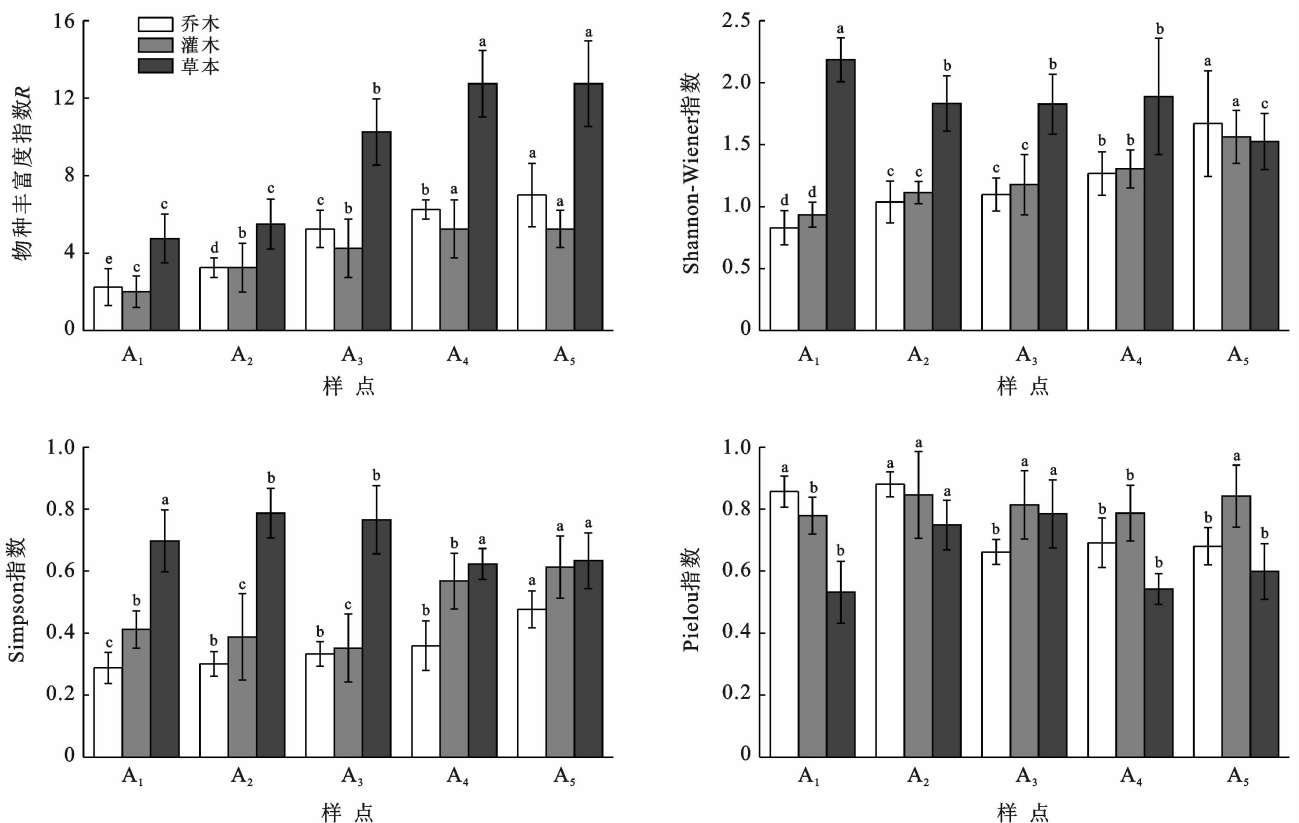
注:生活中 1 代表乔木类,2 代表灌木类,3 代表草本类。

从各研究区域内物种重要值(见表 2)可以看出,该区乔木类以木麻黄、苦楝、大叶相思、潺槁木姜子(*Litsea glutinosa*)为优势种;灌木类植物以露兜树(*Pandanus tectorius*)、东风桔(*Atalantia buxifolia*)、大青、野牡丹、蔓马樱丹(*Common Lantana*)、草海桐为优势种;草本以藎香蓟(*Ageratum conyzoides*)、鬼针草(*Bidens pilosa*)、牛膝(*Achyranthes bidentata*)、长春花(*Catharanthus roseus*)、蔓菁(*Vitex trifolia*)、飞机草(*Chromolaena odorata*)为优势种。

3.2 废弃钛矿辐射区物种多样性特征

3.2.1 各样点 α 多样性特征 物种丰富度指数 R 的大小能真实且客观地反映生境中物种数目的多少。由图 1 可以看出,各生活型物种丰富度指数 R 大小排序为:草本 > 乔木 > 灌木,草本丰富度最高(12.75),乔木(7)、灌木(5.25)物种丰富度水平相对较低。各采样点间物种丰富度指数 R 大小排序为: $A_5 > A_4 > A_3 > A_2 > A_1$ 。除灌木丰富度 R 在 A_4, A_5 间和 A_2, A_3 间,草本丰富度 R 在 A_4, A_5 间和 A_1, A_2 间差异性不显著外,各采样点间物种丰富度指数 R 总体均表现为显著性差异,且随着矿区距离的增加,物种丰富度呈增大趋势,草本物种丰富度指数最为明显,表明钛矿的开采对各生活型物种丰富度指数均有较大的影

响,尤其对一年生或多年生的草本植物。Shannon-Wiener 指数是衡量一个生态系统结构和功能稳定性的重要指标。废弃钛矿地各样点 Shannon-Wiener 指数与丰富度指数趋势相同,也表现出草本最大(2.185),但灌木(1.305)的多样性指数略大于乔木(1.268)。各采样点间乔木和灌木 Shannon-Wiener 指数大小排序为: $A_5 > A_4 > A_3 > A_2 > A_1$,而草本 Shannon-Wiener 指数大小排序为: $A_1 > A_2 > A_3 > A_4 > A_5$,同一生活型在各采样点间物种 Shannon-Wiener 总体呈显著性差异。与物种丰富度指数 R 不同的是,随着缓冲区距离的增加,乔木与灌木 Shannon-Wiener 指数显著性增加,而草本 Shannon-Wiener 指数呈递减趋势。这主要是由于钛矿的开采,造成地表植被的大面积破坏,尤其是乔木、灌木,造成 A_1 样点区域乔木数量较少,灌木、草本由于更新快,数量相对较多。废弃钛矿区周边植被 Simpson 指数均表现为:草本层 > 灌木层 > 乔木层。其中乔木 Simpson 指数介于 0.228~0.477 之间,在 A_1 样点最小, A_5 样点最大,灌木 Simpson 指数介于 0.352~0.613 之间,在 A_3 区最小, A_5 区最大,草本 Simpson 指数介于 0.623~0.787 之间,在 A_4 区最小, A_2 区最大。同一生活型物种 Simpson 指数在部分样点间存在显著性差异。



注:①A₁, A₂, A₃, A₄, A₅ 分别代表距离钛矿区 100, 200, 500, 1 000, 2 000 m 的样点; ②相同生活型不同字母代表差异性显著 (p < 0.05)。

图 1 废弃钛矿辐射区群落 α 多样性特征

随着矿区距离的增加,各生活型 Simpson 指数表现不一,乔木 Simpson 指数呈逐渐递增趋势,而灌木呈现先递减再增高的趋势,草本呈先增加后递减趋势。废弃钛矿区周边植被 Pielou 指数在 A_1, A_2 区域表现为:乔木>灌木>草本,其余区域均表现为:灌木>乔木>草本。乔木 Pielou 指数近矿区均匀度较大,说明矿区周边乔木物种相对单一,离散度较高。同一生活型物种 Pielou 指数在部分样点间存在显著性差异。随着矿区距离的增加,乔木 Pielou 指数呈逐渐递减,灌木 Pielou 指数趋势平稳,而草本 Pielou 指数随着矿区距离的增加呈“单峰”型趋势,在 A_3 样点达到最大。

3.2.2 各样点 β 多样性特征 废弃钛矿辐射区不同距离乔木物种相似性分析结果详见表 3。其中 A_1 与 A_2 区乔木物种相似性指数最大,相似度达到 68%, A_2 与 A_4 区样方乔木物种相似性指数最小(0.28),随着矿区距离的增加,乔木物种相似性指数 C_j 呈逐渐变小。这种格局主要是由于钛矿区开采对地表植被造成覆灭性破坏,在矿区恢复过程中,目前主要采用木麻黄纯林进行植被恢复,局部采用木麻黄与椰子、大叶相思等少树种混交模式进行恢复。

表 3 不同样点乔木层物种相似性指数(C_j)

样方	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
A_1	1.00	0.68	0.49	0.45	0.41
A_2	—	1.00	0.61	0.28	0.46
A_3	—	—	1.00	0.33	0.39
A_4	—	—	—	1.00	0.35
A_5	—	—	—	—	1.00

表 4 为不同距离样点灌木层物种相似性分析。由表 4 可见,灌木层物种相似性指数 C_j 与乔木层相同,均随着矿区距离的增加,相似性逐渐减小,其中 A_1 与 A_2 区样点灌木相似性指数最大(0.71), A_2 与 A_5 区样点相似度最低(0.20)。矿区周边灌木相似性指数相对较高,主要是由于各样点灌木种类较少,灌木群落物种分布较集中,差异性小,侧面反映出矿区周边物种结构单一,多样性较差。

表 4 不同样点灌木层物种相似性指数(C_j)

样方	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
A_1	1.00	0.71	0.66	0.37	0.21
A_2	—	1.00	0.58	0.41	0.20
A_3	—	—	1.00	0.36	0.40
A_4	—	—	—	1.00	0.54
A_5	—	—	—	—	1.00

表 5 为不同距离样点草本层物种相似性分析。由表 5 可见,草本层物种相似性指数 C_j 与乔木层、灌木层相同,随着矿区距离的增加,相似性逐渐减小,不同的是草本层相似性指数 C_j 比乔木层、灌木层小。其中 A_1 与 A_2 区样点草本相似性指数最大(0.48), A_1 与 A_5 区样点相似度最低(0.15)。矿区周边草本相似性指数相对较低,主要是由于各样点草本种类较多,草本群落物种分布较集中,差异性大,侧面反映出矿区周边草本群落物种结构复杂,草本多样性较高。

表 5 不同样点草本层物种相似性指数(C_j)

样方	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
A_1	1.00	0.48	0.42	0.36	0.15
A_2	—	1.00	0.37	0.35	0.29
A_3	—	—	1.00	0.33	0.39
A_4	—	—	—	1.00	0.35
A_5	—	—	—	—	1.00

3.3 不同样方物种多样性系数 RDA 排序

环境特征与植被物种多样性的分布具有重要的关系。将物种多样性指数作为响应变量,把矿区土壤环境因子作为解释变量,从辐射区物种多样性系数与环境因子的 RDA 排序(表 6 和图 2)可知,第 1,2 个排序轴解释度达 61.02% 和 24.53%,能够很好地解释排序信息。土壤 pH 值、土壤有效磷、土壤含水率(SMC)与排序轴 1 呈正相关,辐射区距离(Distance)、土壤有机质、铵态氮与排序轴 1 呈负相关。

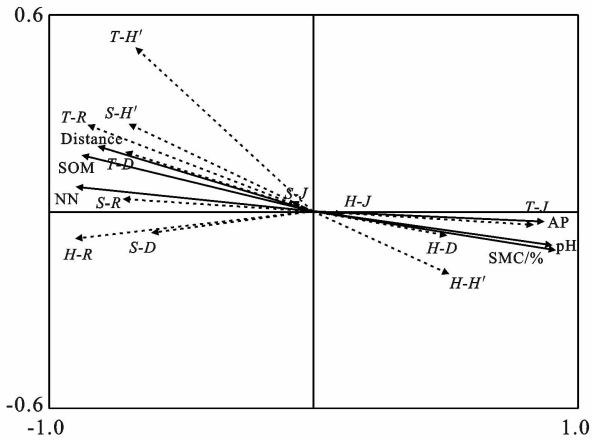
表 6 冗余分析(RDA)环境因子与物种多样性指数解释率

环境因子	解释率/%	F
土壤 pH 值	42.6	12.8**
土壤含水率(SMC)	12.4	5.9**
有效磷(AP)	8.5	4.7**
有机质(SOM)	8.2	4.4**
铵态氮(NN)	7.9	3.6*
全磷(TP)	3.0	1.6
全氮(TN)	1.4	1.2
硝态氮(AN)	0.6	0.5
全钾(TK)	0.4	0.3
速效钾(AK)	0.3	0.2

注: * 表示显著相关($p < 0.05$); ** 表示极显著相关($p < 0.01$)。

由图 2 可以看出,乔木 Pielou 指数、草本 Pielou 指数、草本 Simpson 指数、草本 Shannon-Wiener 指数与土壤 pH 值、有效磷呈极显著正相关关系,而与废弃钛矿区土壤含水率、辐射区距离、有机质、铵态氮呈显著负相关关系。乔木 Shannon-Wiener 指数、灌木

Shannon-Wiener 指数、乔木 Simpson 指数和灌木 Simpson 指数恰好相反,表现为与土壤 pH、有效磷呈极显著负相关关系,而与废弃钛矿区土壤含水率、有机质、铵态氮呈显著正相关关系。RDA 排序第一轴、第二轴从土壤环境角度和地理区位角度反映了钛矿区土壤因子对乔木、灌木物种分布和物种多样性特征影响。



注:①虚线箭头代表环境因子(仅显示具有显著性差异的环境因子),实线箭头代表物种多样性特征;②T-R, S-R, H-R 分别代表乔木丰富度指数、灌木丰富度指数、草本丰富度指数;③T-H', S-H', H-H' 分别代表乔木 Shannon-Wiener 指数、灌木 Shannon-Wiener 指数、草本 Shannon-Wiener 指数;④T-D, S-D, H-D 分别代表乔木 Simpson 指数、灌木 Simpson 指数、草本 Simpson 指数;⑤T-J, S-J, H-J 分别代表乔木 Pielou 指数、灌木 Pielou 指数、草本 Pielou 指数;⑥Distance 代表离矿区距离, SMC(%)代表样方土壤含水率。

图 2 废弃钛矿区物种多样性指数与环境因素 RDA 排序

4 讨论与结论

矿产开采不仅对开采区植被造成毁灭性破坏,也对矿区周边植被产生干扰^[16]。通过对文昌废弃钛矿辐射区 2 km 范围植被调查发现,钛矿开采不仅造成钛矿区内植被无法正常生长,而且对辐射区域 200 m 范围内的植被群落结构也有明显影响,废弃钛矿区辐射区 200 m 范围内仅有乔木 3 种、灌木 2 种,显著低于其它辐射区域,现有乔灌木种均为木麻黄、苦楝等耐干旱耐盐碱高抗性树种,这是因为钛矿开采造成辐射区域水肥的流失,造成 200 m 辐射区域土壤水分下降,土壤 pH 偏碱性,不宜其他树种正常生长。因此,在矿区植被恢复过程中,需要覆土掩埋矿坑,降低辐射区水肥的流失,并对土壤进行改良,以便植被恢复。

物种丰富度指数、多样性指数、均匀度指数是衡量群落结构的常用指标,能准确反映群落结构功能和群落稳定性,对于评价森林的群落特征和演替具有重要意义^[17]。废弃钛矿辐射区物种 α 多样性指数除

Pielou 均匀度指数外均以草本最高,显著高于乔木和灌木。随着钛矿辐射区距离的增加,物种乔灌木丰富度指数 R, Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数均呈显著增加趋势,说明钛矿开采亦对辐射区物种多样性产生影响,这主要是由于矿山开采改变了矿区土壤的结构以及土壤肥力以及土壤水分的变化,导致地表植被难以恢复。废弃钛矿区物种 β 多样性指数也呈现相同的趋势。随着钛矿辐射区距离的增加,物种乔木、灌木、草本相似性指数均呈递减趋势,表明矿区物种的生长与生境有较大关系。由于矿区的开采破坏植被生境,使生态系统功能结构产生差异,表现出破碎化,影响植被生长。另外,矿区的开造成林地光照、温度、土壤肥力、土壤水分等植物赖以生存的环境因子,形成局部环境差异,也一定程度制约植被生长^[18-19]。

物种多样性差异与气候环境、土壤环境、地形条件等多因素交互影响的结果^[20-22],不同研究尺度差异表现出不同的研究结论。本研究立地条件均为低海拔的滨海台地,气候、地形基本一致,通过对废弃钛矿 2 km 辐射区物种多样性指数与土壤环境因子的冗余分析(RDA),结果表明土壤 pH 值、土壤含水率、有效磷、有机质和铵态氮是影响废弃钛矿区物种多样性的最主要的因素。土壤全氮、全磷、全钾等土壤因子对植被多样性特征影响较小。由于钛矿开采造成辐射区 100—200 m 范围内土壤含水率急剧下降,同时造成土壤中碳酸盐大量迁移,致使土壤偏碱性,抑制了部分植物,特别是乔木、灌木树种的生长。反之,植物的正向演替,也提高土壤含水率,增加土壤肥力,改善土壤碱性,更有利于植物的生存和发展。本试验过程中未考虑土壤重金属情况,在后续的研究中有待继续补充。

[参 考 文 献]

- [1] 林彰文, 王凌, 关学彬, 等. 文昌铅钛矿区生态格局变迁分析[J]. 生态科学, 2014, 33(4): 802-808.
- [2] 齐文涛, 陈智伟. 海南岛矿山废石资源特征及综合利用研究[J]. 中国矿业, 2019, 28(2): 40-44.
- [3] 张亦扬, 强于鲜, 李萌津, 等. 榆神府矿区采煤塌陷地植被群落恢复演替特征[J]. 绿色科技, 2019(6): 65-66, 71.
- [4] 张丕义, 张进祥. 钛矿开采的环境问题及其治理[J]. 云南环境科学, 2003(1): 16-17, 5.
- [5] Shen Zhangjun, Wang Yupeng, Sun Qingye, et al. Effect of vegetation succession on organic carbon, carbon of humus acids and dissolved organic carbon in soils of copper mine tailings sites [J]. Pedosphere, 2014, 24(2): 271-279.
- [6] Emma S F, Mulualem T, Mutale N, et al. Progresses in

- restoration of post-mining landscape in Africa [J]. *Journal of Forest Research*, 2019,30(2):381-396.
- [7] Kai Y, Sailesh R, Deli Z, et al. Current revegetation patterns and restoration issues in degraded geological phosphorus-rich mountain areas: A synthetic analysis of Central Yunnan, SW China [J]. *Plant Diversity*, 2017, 39(3):140-148.
- [8] Lei Huang, Peng Zhang, Yi Ganghu, et al. Soil water deficit and vegetation restoration in the refuse dumps of the Heidaigou open-pit coal mine, Inner Mongolia, China [J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2016,8(1): 22-35.
- [9] 黄元仿,张世文,张立平,等.露天煤矿土地复垦生物多样性保护与恢复研究进展[J].*农业机械学报*,2015,46(8):72-82.
- [10] 张军红,徐义萍.不同植被恢复模式对矿区土壤性质的影响[J].*南方农业*,2019,13(7):22-25.
- [11] 李贵,童方平,刘振华,等.衡阳水口山铅锌矿区植被调查及物种多样性分析[J].*中国农学通报*,2014,30(13): 66-70.
- [12] 郭涛,杨小波,廖香俊,等.海南昌江石碌铁矿尾矿库区植被调查[J].*生态学报*,2007,27(2):755-762.
- [13] 关炳昌,刘家豪,朱宇恩,等.矿区恢复植被配置模式对土壤碳库与生物多样性的影响[J].*山西大学学报(自然科学版)*:2020,43(1):196-205.
- [14] 吴安驰,邓湘雯,任小丽,等.中国典型森林生态系统乔木层群落物种多样性的空间分布格局及其影响因素[J].*生态学报*,2018,38(21):7727-7738.
- [15] Kumar Pk S D. Similarity index of doctoral theses submitted to universities in Kerala; An investigation [J]. *Library Philosophy and Practice*, 2019,3(32):1-10.
- [16] 尚洁.内蒙古大兴安岭林区矿产资源开发对植被的影响[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2015.
- [17] 张建宇,王文杰,杜红居,等.大兴安岭呼中地区3种林分的群落特征、物种多样性差异及其耦合关系[J].*生态学报*,2018,38(13):4684-4693.
- [18] 赵娜,鲁绍伟,李少宁,等.北京松山自然保护区典型植物群落物种多样性研究[J].*西北植物学报*,2018,38(11):2120-2128.
- [19] 黄小荣,何峰,庞世龙,等.广西石山人工林灌草多样性与环境因子的关系[J].*生态学杂志*,2015,34(11): 3024-3033.
- [20] 宋绍鹏,董治宝,陈颢,等.榆靖沙漠高速公路沿线植被特征及其多样性[J].*生态学杂志*,2017,36(2): 468-475.
- [21] 刘欢,李文君,陈杰,等.陕西米仓山自然保护区6种典型天然林群落的物种多样性[J].*西北农林科技大学学报(自然科学版)*,2017,45(7):29-39.
- [22] 刘建荣.云顶山自然保护区植物群落物种多样性研究[J].*中南林业科技大学学报*,2018,38(10):79-85.

(上接第 154 页)

- [20] Koleff P, Gaston K J, Lennon J J. Measuring beta diversity for presence-absence data [J]. *Journal of Animal Ecology*, 2003,72(3):367-382.
- [21] 王凯博,陈美玲,秦娟,等.子午岭植被自然演替中植物多样性变化及其与土壤理化性质的关系[J].*西北植物学报*,2007,27(10):2089-2096.
- [22] 王世雄,王孝安,李国庆,等.陕西子午岭植物群落演替过程中物种多样性变化与环境解释[J].*生态学报*, 2010,30(6):1638-1647.
- [23] 王世雄,王孝安,郭华.黄土高原植物群落演替过程中的 β 多样性变化[J].*生态学杂志*,2013,32(5):1135-1140.
- [24] Qian H. Beta diversity in relation to dispersal ability for vascular plants in North America [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2009,18(3):327-332.
- [25] Lindo Z, Neville N. Spatial and environmental factors contributing to patterns in arboreal and terrestrial oribatid mite diversity across spatial scales [J]. *Oecologia*, 2009,160(4):817-825.
- [26] 白琰.高寒草甸植物群落 α 多样性和 β 多样性形成的机制:是生态位还是中性理论[D].甘肃兰州:兰州大学,2009.