

DOI: 10.20152/j.np.202404120056

补春兰, 苟小林, 蒋豪, 宋心强, 张远彬, 艾雨萱, 单婷倩, 邓钰竺, 黄一倪, 涂卫国. 大熊猫国家公园废弃石材矿山植被自然恢复及影响因素研究. 国家公园(中英文), 2024, 2(4): - .

Bu C L, Gou X L, Jiang H, Song X Q, Zhang Y B, Ai Y X, Shan T Q, Deng Y Z, Huang Y N, Tu W G. Study on revegetation and influencing factors in abandoned stone mines at Giant Panda National Park. National Park, 2024, 2(4): - .

大熊猫国家公园废弃石材矿山植被自然恢复及影响因素研究

补春兰¹, 苟小林¹, 蒋豪², 宋心强³, 张远彬², 艾雨萱², 单婷倩⁴, 邓钰竺², 黄一倪⁴, 涂卫国^{1, *}

1 四川省自然资源科学研究院, 成都 610015

2 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041

3 荣经县大相岭自然保护区管护中心, 雅安 625000

4 西南科技大学, 绵阳 621010

摘要: 植被恢复是大熊猫国家公园废弃矿山发挥“国家公园”生态功能的重要环节, 但当前对废弃石材矿山植被自然恢复的可能性及其影响因素的研究缺乏。研究选取大熊猫国家公园雅安片区典型石材废弃矿山为对象, 调查自然植被恢复下植物群落和环境因子, 分析植被自然恢复下的植物组成及其差异, 并根据环境因子分析植被自然恢复的主要影响因素。结果表明: 石材废弃矿山迹地自然恢复的植物类型主要为多年生草本和灌木, 共计 121 种, 分属 66 科 105 属, 主要为蔷薇科(Rosaceae)、菊科(Asteraceae)、禾本科(Poaceae)和杨柳科(Salicaceae)的乡土先锋植物; 自然条件下大熊猫国家公园雅安片区石材废弃矿山植被恢复困难, 废弃石材的粒径以及恢复时间是影响植被恢复的主要影响因素。在大熊猫国家公园生态功能提升的需求下, 该区域废弃石材矿山植被恢复需科学构建参照生态系统, 综合考虑影响植物群落恢复环境因素, 系统性构建恢复技术体系, 以促进国家公园生态恢复与生态功能的发挥。

关键词: 大熊猫国家公园; 矿山修复; 植物群落; 生态功能

Study on revegetation and influencing factors in abandoned stone mines at Giant Panda National Park

BU Chunlan¹, GOU Xiaolin¹, JIANG Hao², SONG Xinqiang³, ZHANG Yuanbin², AI Yuxuan², SHAN Tingqian⁴, DENG Yuzhu², HUANG Yini⁴, TU Weiguo^{1, *}

1 Sichuan Province Natural Resources Science Academy, Chengdu 610015, China

2 Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

3 Daxiangling Nature Reserve Management and protection center of Yingjing County, Ya'an 625000, China

4 Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China

Abstract: Vegetation restoration is a crucial component for abandoned mines in Giant Panda National Park to fulfill the ecological functions of a “national park”. However, more research is needed on the composition of plants and the factors that influence vegetation restoration in abandoned stone mines. Therefore, a typical stone abandoned mine in the Ya'an area of Giant Panda National Park was selected as the object to investigate the plant community and environmental factors under

基金项目: 四川省重点研发项目(2023YFS0367); 四川省重点研发项目(2021YFS0280)

收稿日期: 2024-04-12; 采用日期: 2024-04-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wgtu028@163.com

natural vegetation restoration, analyze the plant composition and differences between abandoned mines, and then the main influencing factors of natural revegetation according to environmental factors. The findings of this study reveal that perennial herbaceous and shrubs are the primary plant types for the natural restoration of abandoned stone mines. A comprehensive survey was conducted of 121 plant species, spanning 66 families and 105 genera. Notably, Rosaceae, Asteraceae, Poaceae, and Salicaceae emerged as the main native pioneer plants, widely distributed in most abandoned stone mines. These results underscore the challenges of natural restoration in such environments, with particle size and recovery time identified as the key influencing factors. In light of the pressing need to enhance the ecological function of the Giant Panda National Park, it is imperative to establish a restoration reference ecosystem. This ecosystem should guide soil reconstruction and vegetation community reconstruction based on the park's unique ecological functions. Furthermore, a technical system for systematic restoration must be constructed. This system will play a crucial role in promoting the ecological restoration of the park.

Key Words: Giant Panda National Park; mine restoration; plant community; ecological function

大熊猫国家公园是以大熊猫为旗舰种建立的保护地,其不仅庇护了大熊猫的重要栖息地,也伞护了国家公园内生物多样性和脆弱生态系统^[1-2]。但是受到人类早期经济活动影响,大熊猫栖息地内存在大量历史遗留废弃矿山^[3-4],废弃矿山不仅存在地质安全隐患,还严重阻隔了大熊猫栖息地连通,使栖息地斑块化和破碎化,极大影响了大熊猫国家公园生态功能发挥,亟需进行生态恢复。

目前,废弃矿山生态恢复相关的研究丰富,针对不同地区^[5-6]、不同类型^[7-8]的废弃矿山相关研究表明恢复技术相对成熟,主要的恢复技术集中于人工重建^[9-10]和自然恢复^[11-12],其中植被恢复是矿山生态恢复的关键核心^[12],且恢复过程中植被组成有差异,限制因素不一。有研究表明露天煤矿自然恢复植物群落以禾本科为主^[12],恢复年限和坡向对物种多样性和群落稳定性具有显著影响^[13],且地形和土壤影响植被的恢复过程^[14],也有研究表明露天煤矿排土场人工植被恢复主要受到气候和人类活动的影响^[15],而关于废弃石材矿山的恢复研究表明木本植物能够在恢复过程中建立植物群落,庇护草本等物种^[16],并且自然恢复状态下形成的植物群落更加接近相邻的自然群落^[17]。以上研究针对了不同矿山进行植被恢复,并分析了植被恢复的影响要素,但是他们很少涉及到大熊猫国家公园内的栖息地修复,特别是解决植被恢复问题的同时还需要考虑栖息地连通性与生态系统功能,因此亟需开展深入研究。

雅安片区是大熊猫国家公园面积最大的区域,盛产优质石材,原有矿山企业和历史遗留矿山多达上百宗,造成大熊猫国家公园破碎化和斑块化,阻碍栖息地连通。前期少量研究探讨了矿山对大熊猫栖息地的影响^[18],探索了矿山修复模式^[19]。这些研究中:首先缺乏针对废弃石材矿山植被恢复的乡土物种系统性调查,未见乡土植物用于植被恢复发挥大熊猫国家公园生态功能的系统性报道;其次对于大熊猫国家公园植被恢复限制因素系统分析研究相对薄弱,综合的环境因素影响也未可知。因此,本研究以大熊猫国家公园内石材废弃矿山植被自然恢复为研究对象,通过自然调查与分析,研究大熊猫国家公园石材废弃矿山植被自然恢复下植物群落组成与限制因素,明确矿山恢复适生乡土物种与主要的限制因子,为大熊猫国家公园破损生态系统恢复提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于大熊猫国家公园雅安片区(28°51'—30°56' N, 101°56'—103°23' E),该区域是大熊猫国家公园重点区域,涉及区县数量最多,面积占全国大熊猫国家公园的 27%,是连接邛崃山—大相岭山系大熊猫栖息地的重要廊道,连接小相岭—凉山山系大熊猫栖息地的关键区域。该区域属于亚热带湿润季风气候,海拔范围为 471—5793 m,大多为中山地貌,气温分布呈明显的南北水平差异和随地势变化的垂直差异,北部年

均气温分别为 14—16℃,南部平均气温 17—18℃,年均降水量 1000 mm 以上。由于其成矿地质条件优越,矿产资源突出,形成了以优质石材矿产为主的资源基地。矿山主要类型为大理石矿、花岗石矿、石棉矿,主要分布区位于宝兴片区、荥经片区和石棉片区,面积达到 1274.27 hm²,面积大、跨度广的废弃矿山造成了大熊猫生态廊道破碎化,对大熊猫生存与种群交流具有严重隐患。

1.2 研究方法

2023 年 5 月至 6 月,在大熊猫国家公园雅安片区(荥经县、宝兴县及石棉县)对典型石材废弃矿山集中开展了自然恢复下植物及其环境条件调查。基于废弃石材矿山分布区域和分布类型,选择典型石材废弃矿山 10 个样地,样地面积不低于 1.5 hm²,在每个样地内,按照对角线划分 3 个植物样方,用于植被群落与环境因子详细调查,调查区域与样地见表 1。其中废石粒径基于废弃石材矿山的废石实测长度均值确定;水流冲击作用根据实地勘测地表径流形成冲刷的痕迹划分为具有冲击和无冲击作用。并且根据实地环境情况调查经纬度、海拔、坡度、成土情况、恢复时间、温度、降水、植物物种以及群落盖度等。

调查利用 GPS 测定各样地经纬度、海拔和坡度。利用获取的经纬度信息,运用 Arcgis 10.4 软件在世界气候数据“WordClim”(https://www. Worldclim. org)上提取对应样地的年均温及年降雨量数据。废石粒径利用结合软尺法进行测量。根据现场实际分布的灌草群落,参考蔡兴华的调查方法,植物调查样方面积统一设置为 25 m²(5 m×5 m)^[20],结合样线法和样方法调查植物物种和植被覆盖率,样地总物种数即为物种丰富度。参考《中国植物志》(中国科学院中国植物志编辑委员会,2004)获取物种科属和生活型信息。根据调查样地内各科/属物种占样地内总物种的百分比计算科/属占比^[21],主要科/属指的是样地内科/属占比排名前 5 且含有两种及以上物种的科/属。频度指的是某个物种在调查样地间出现的频率,按该物种出现的样地数占样地总数的百分比来计算。

表 1 调查样地自然环境条件
Table 1 Natural environmental conditions in the survey plots

地理位置 Location	调查样地 Survey plot	海拔 Elevation/m	坡度 Slope/(°)	废石粒径 Size of waste rock/cm	成土情况 Soil status	年均温 Mean annual temperature/℃	年降雨 Annual precipitation/ mm	水流冲击作用 Water flow impact	恢复时间 Revegetation time/a
荥经县牛背山镇	HN1	1921	35	150	无土	10.09	932	有	5
	HN2	1921	45	150	无土	10.09	932	无	5
	HN3	2000	50	6	砂石土	10.09	932	无	5
宝兴县蜂桶寨乡	DF1	2592.5	45	4	砂石土	2.02	798	无	5
	DF2	2592.5	46	150	无土	2.02	798	无	5
	DF3	2592.5	40	10	砂石土	2.02	798	有	5
宝兴县陇东镇	DL1	1637.3	40	50	砂石土	8.16	807	无	8
	DL2	1635.9	45	50	无土	8.16	807	无	8
石棉县回隆镇	SH1	1883	40	5	砂石土	10.54	962	无	20
石棉县新棉街道	SX1	1438	45	8	砂石土	13.66	1033	无	20

HN1—3 代表荥经县牛背山镇调查样地 1—3;DF1—3 代表宝兴县蜂桶寨乡调查样地 1—3;DL1—2 代表宝兴县陇东镇调查样地 1—2;SH1 代表石棉县回隆镇调查样地;SX1 代表石棉县新棉街道调查样地

1.3 统计分析

采用单因素方差分析(ANOVA)进行各废弃矿山样地植被覆盖度显著性检验,数据结果以“平均值±标准误”表示。将成土情况和水流冲击作用等定性数据转变为哑变量,采用皮尔逊相关进行所有自然环境因子与植被恢复情况之间的相关性分析。数据采用 SPSS 24.0(Chicago Illinois,USA)进行统计分析,显著性水平设定为 0.05,采用 OriginPro 2021(OriginLab Corporation,USA)绘图。

2 结果与分析

2.1 废弃矿山各调查样地植物种类多样性

调查结果发现,废弃矿山自然恢复下不同样地植物物种较丰富但异质性较大,平均物种数为 21.2 种,范围为 4—33 种,其中 DF3 和 DL2 的物种数最少,分别只有 13 种和 4 种;而 DL1 的物种数最多,有 33 种。废弃矿山不同样地生活型组成相似,以多年生草本植物最多(平均占比 57.80%),其次是灌木植物(平均占比 32.75%),一年生草本及藤本植物极少或无(图 1)。

2.2 废弃矿山各调查样地植物科属分布

本次共调查到 66 科 105 属植物(表 2)。各废弃矿山调查样地间科数与属数异质性较大,DL2 总科数和总属数最低,分别为 3 种和 4 种;DL1 总科数和总属数最高,分别为 21 种和 32 种。各废弃矿山调查样地主要科集中在蔷薇科、菊科、禾本科、杨柳科;主要属极少或无。

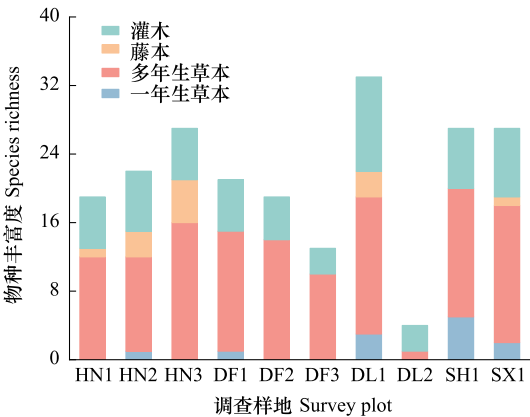


图 1 调查样地植物种类多样性
Fig.1 Plant diversity in the survey plots

表 2 调查样地植物科属分布

Table 2 Distribution of plant families and genera in the survey plots				
调查样地 Survey plot	科数 Number of family	主要科及占比 Main families and the proportion	属数 Number of genus	主要属及占比 Main genera and the proportion
HN1	13	蔷薇科(21.05%)、菊科(10.53%)、禾本科(10.53%)、蹄盖蕨科(10.53%)	19	—
HN2	17	蔷薇科(18.18%)、菊科(9.09%)、禾本科(9.09%)、铁角蕨科(9.09%)	21	铁角蕨属(9.09%)
HN3	17	蔷薇科(14.81%)、菊科(14.81%)、禾本科(7.41%)、虎耳草科(7.41%)、五味子科(7.41%)	24	悬钩子属(7.41%)、五味子属(7.41%)、蹄盖蕨属(7.41%)
DF1	11	菊科(31.58%)、杨柳科(15.79%)、蔷薇科(10.53%)、莎草科(10.53%)	18	蒿属(8.70%)、柳属(8.70%)、藁草属(8.70%)
DF2	16	菊科(15.79%)、蔷薇科(10.53%)	19	—
DF3	12	蔷薇科(15.38%)	13	—
DL1	21	菊科(29.41%)、蔷薇科(11.76%)、杨柳科(5.88%)、荨麻科(5.88%)	32	悬钩子属(5.88%)
DL2	3	杨柳科(50%)	4	—
SH1	18	菊科(22.22%)、禾本科(11.11%)、蔷薇科(7.41%)、石竹科(7.41%)	27	—
SX1	15	菊科(18.52%)、蓼科(11.11%)、禾本科(7.41%)、蔷薇科(7.41%)、毛茛科(7.41%)	26	凤尾蕨属(7.41%)
总计 Total	66	—	105	—

2.3 废弃矿山植物分布频度

本次共调查有 121 种植物,一些植物在自然恢复条件下的废弃矿山分布较广(表 3)。分布频度排名前 10 的植物隶属于醉鱼草科、蔷薇科、蓼科、菊科、蔷薇科、禾本科和杨柳科植物,包括灌木醉鱼草(*B. lindleyana*)、皂柳(*S. wallichiana*)、绣线菊(*S. salicifolia*)、川莓(*R. setchuenensis*),多年生草本植物为野草莓(*F. vesca*)、酸模(*R. acetosa*)、艾(*A. argyi*)、藁草(*C. spp.*)、珠光香青(*A. margaritacea*)、毛裂蜂斗菜(*P. tricholobus*)。

表 3 调查样地植物分布频度
Table 3 Distribution frequency of plants in the survey plots

序号 Sequence number	植物物种 Plant species	科 Family	分布样地 Distribution plot	频度 Frequency/%
1	醉鱼草(<i>Buddleja lindleyana</i>)	醉鱼草科	HNI—3、DF1—3、DL1—2	80.00
2	野草莓(<i>Fragaria vesca</i>)	蔷薇科	HNI—3、DF1—3、DL1	70.00
3	酸模(<i>Rumex acetosa</i>)	蓼科	HNI、HN3、DF1—3、SH1、SX1	70.00
4	艾(<i>Artemisia argyi</i>)	菊科	HN3、DF1—2、DL1、SX1	50.00
5	皂柳(<i>Salix wallichiana</i>)	杨柳科	DF1—3、DL1—2	50.00
6	毛裂蜂斗菜(<i>Petasites tricholobus</i>)	菊科	HNI—3、DF1、DL1	50.00
7	绣线菊(<i>Spiraea salicifolia</i>)	菊科	HNI—2、DF1—3	50.00
8	珠光香青(<i>Anaphalis margaritacea</i>)	菊科	HN3、DF1—3、DL1	50.00
9	薹草(<i>Carex</i> spp.)	禾本科	HN3、DF1、DL1、SH1	40.00
10	川莓(<i>Rubus setchuenensis</i>)	蔷薇科	HNI—3、DL1	40.00

2.4 废弃矿山各调查样地植被盖度

由表 4 可知,废弃矿山样地间自然恢复植被盖度异质性较大,总盖度范围为 0.02%—55.67%,灌木盖度范围为 0.00%—32.00%,草本盖度范围为 0.01%—48.33%。其中,SX1 的总盖度(55.67%)和灌木盖度(32.00%)最高,DF1 的草本盖度(48.33%)最高,而 HN1、HN2、DF2、DF3、DL2 的覆盖率均接近 0.00%,地面裸露程度高。

表 4 调查样地植被盖度
Table 4 Plant coverage in the survey plots

调查样地 Survey plot	总盖度/% Total coverage	灌木盖度/% Shrub coverage	草本盖度/% Herb coverage	调查样地 Survey plot	总盖度/% Total coverage	灌木盖度/% Shrub coverage	草本盖度/% Herb coverage
HN1	0.20±0.00f	0.10±0.00d	0.10±0.00e	DF3	0.04±0.03f	0.00±0.00d	0.04±0.03e
HN2	0.37±0.03f	0.17±0.03d	0.20±0.00e	DL1	19.67±0.88d	17.67±1.45b	4.67±0.33d
HN3	4.33±0.33e	2.33±0.33cd	3.33±0.33de	DL2	0.02±0.00f	0.01±0.00d	0.01±0.00e
DF1	48.67±1.20b	1.00±0.00d	48.33±0.88a	SH1	41.67±2.03c	4.33±0.67c	39.00±2.08b
DF2	0.20±0.00f	0.10±0.00d	0.10±0.00e	SX1	55.67±1.20a	32.00±2.00a	28.67±3.18c

2.5 自然环境因子与植被恢复情况的相关性分析

皮尔逊相关性分析结果表明(图 2),总盖度与年降雨量(0.375)、恢复时间(0.716)呈显著正相关,与水流冲击作用(−0.391)、废石粒径(−0.735)呈显著负相关;灌木盖度与成土情况(0.454)、年降雨量(0.473)、年均温(0.523)以及恢复时间(0.657)呈显著正相关,与海拔(−0.614)呈显著负相关;草本盖度与恢复时间(0.559)呈显著正相关,与废石粒径(−0.717)呈显著负相关;物种丰富度与年均温(0.379)呈显著正相关。

2.6 植被自然恢复主要影响因子分析

DCA 分析梯度长度为 1.7,因此采用 RDA 用于分析自然环境条件对整体植被恢复的影响。结果显示第一轴和第二轴的解释比例分别为 85.61%和 11.53%,累积解释量为 97.14%,表明自然环境条件对植被恢复具有高的解释性,其中植被恢复主要受到恢复时间和废石粒径的影响(图 3)。

3 讨论

3.1 大熊猫国家公园废弃石材矿山自然恢复植被现状

大熊猫国家公园废弃石材矿山自然植被恢复植物类型主要为多年生草本和灌木,极少分布一年生草本和藤本。在石材矿山相关的研究中,发现长期自然恢复后多年生蔷薇科植物是植物群落中分布较多的植物物种^[22],并且发现群落主要以灌木作为主要建群种^[23],也有研究表明自然演替出现的乔木、灌木等木本植物更

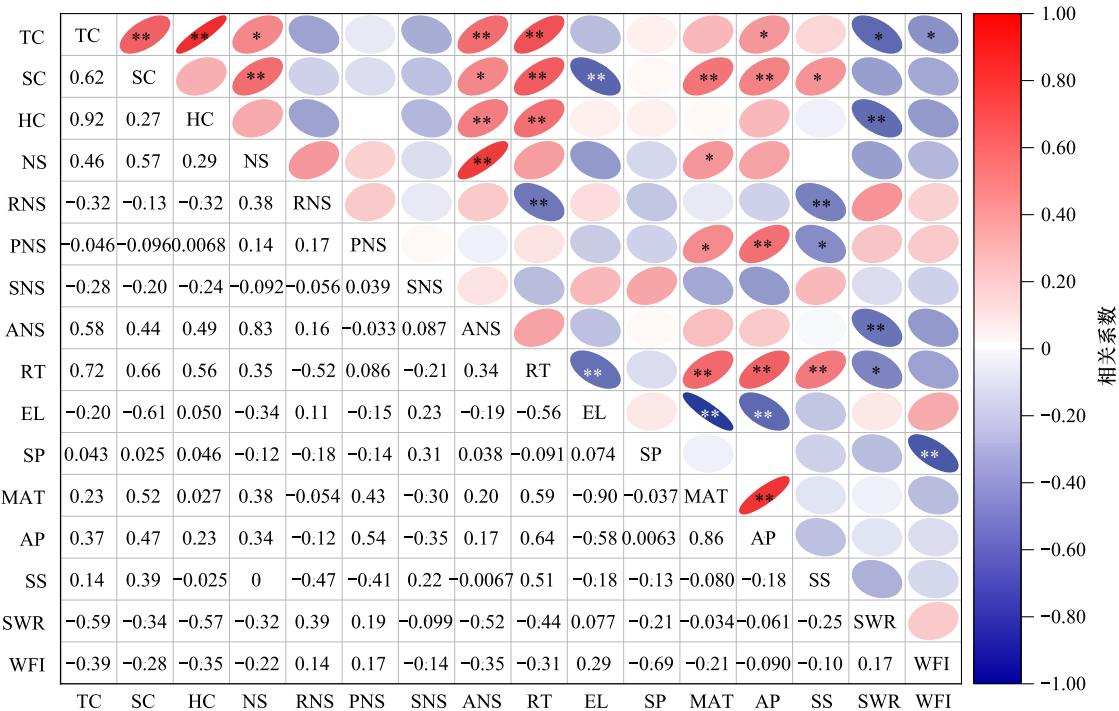


图 2 自然环境条件与植被恢复的相关性分析

Fig.2 Correlation analysis between natural environmental properties and vegetation restoration

* 表示 $P<0.05$ 相关性; * * 表示 $P<0.01$ 相关性很强; EL:海拔 Elevation; SP:坡度 Slope; SWR:废石粒径 Size of waste rock; SS:成土情况 Soil status; MAT:年均温 Mean annual temperature; AP:年降雨 Annual precipitation; WFI:水流冲击作用 Water flow impact; RT:恢复时间 Revegetation time; TC:总盖度 Total coverage; SC:灌木盖度 Shrub coverage; HC:草本盖度 Herb coverage; NS:物种数 Number of species; RNS: 蔷薇科物种数 Number of Rosaceae species; PNS:禾本科物种数 Number of Poaceae species; SNS:杨柳科物种数 Number of Salicaceae species; ANS: 菊科物种数 Number of Asteraceae species

加适应矿山的恢复^[24],这些结果与本研究的结果相似。但是部分研究认为自然恢复过程中外来入侵植物更加适应矿山恢复过程^[25],并且在矿山的恢复过程中需要严格控制外来生物以保护原始生态系统^[26],这些研究结果与本研究存在一定差异,这可能与研究区域地理差异和人工引导的自然恢复过程差异有关,相关内容还需要更深入的研究。

本研究中自然恢复植物的物种有 66 科 105 属 121 种,物种较丰富,且主要的优势科植物包括蔷薇科、菊科、禾本科、杨柳科。研究表明多数菊科、禾本科以及杨柳科植物可以产生质量轻、数量大的种子,借助冠毛结构可以利用风媒传播,具有数量和传播效率方面的优势^[27-29],可能优先占据石材废弃矿山生态位,这与本研究中菊科和禾本科植物占据重要植物类群的结果相似。菊科、禾本科、蔷薇科植物主要是草本和灌木,具有生长快速或季节性休眠的特点^[30-31],杨柳科植物具有耐寒、耐旱等特征^[32],促进了对石材废弃矿山恶劣生存环境的适应,这可能也是本研究中蔷薇科、禾本科、杨柳科、菊科与不同环境要素具有相关性的原因。因此,大熊猫国家公园石材废弃矿山植被恢复时选用乡土分布的菊科、禾本科、杨柳科、蔷薇科进行群落构建可能具备更大的优势。

矿山植被恢复可以利用乡土植被或优势物种形成相对完整的植物群落,促进生态系统利向演替或稳定发挥植物群落功能^[33-34]。但是对大熊猫国家公园进行生态恢复,植被修复过程不仅仅需要完成生态恢复基础,还需要考虑大熊猫国家公园生态功能发挥,特别是廊道连通性和系统完整性^[35-36],当前石材废弃矿山形成的灌草群落植株矮小且稀疏,仅仅利用乡土植被构建生态恢复的植物群落无法提升大熊猫国家公园生态功能,如植被恢复生态系统缺少大熊猫主食竹、对大熊猫的庇护功能薄弱、无法发挥生态廊道功能,废弃矿山植被恢

复需要更多参照类型,以完善生态修复和生态功能重建。

3.2 大熊猫国家公园废弃石材矿山植被恢复影响因素

本研究中,影响大熊猫国家公园废弃石材矿山植被自然恢复主要因素为废石粒径和恢复年限。废石粒径直接关系土壤形成与质量,首先废石粒径大小通过影响土壤形成和存留影响植被恢复过程,石材废弃矿山形成的坡度较大,大粒径废石加上长陡峭的山势可能因为地震活动、降雨等外界因素引起山体滑坡,破坏已有植物定植。而随着恢复年限增加,废石堆积形成的山体结构稳固性提高,次生灾害频率减少,将有利于植物群落自然演替。本调查结果发现恢复年限 5 年及 8 年的矿山植被总盖度波动仍然较大,而恢复年限 20 年矿山植被盖度率可以达到 41.67% 和 55.67%,这表明在长时间的恢复下,植物群落适应了矿山环境,植物群落盖度增加,这与长期铁矿植被恢复的结果相似^[37];其次废石粒径大小通过影响土壤质量来影响植被恢复过程,这是由于石材矿山采矿作业后往往裸露不同粒径大小的废弃石料,山体表面缺乏土壤,并且废弃石材矿山存在的土壤为砂石土,其营养含量低、水分和热量储存能力差,容易受到外界气候影响,不适宜植物生存,因此废石粒径通过影响土壤发育过程限制了植被自然恢复,部分研究结果也具有相似过程^[38—39]。

年降雨量和水流冲击作用也对大熊猫国家公园废弃石材矿山的植被自然恢复产生了重要影响。水分对植被恢复具有重要的积极作用,有助于促进植被的生长、根系的发育和生态系统的健康;在植被恢复过程中,充足的水分是维持植被健康和生态平衡的关键因素。本研究中水流冲击作用与矿山迹地植被恢复负相关,水流沿矿山山势汇集而下可能形成冲击作用,导致废石矿山山体结构不稳定,造成滑坡泥石流、土壤和营养流失,土壤侵蚀严重^[40],从而不利于植被生长和更新,抑制植被恢复。值得注意的是,本研究中海拔条件并不是影响植被自然恢复的主要因素,这与以往的研究有一定差异,前期研究发现海拔变化可引起温度和降水的巨大变化,海拔越高可能伴随温度降低、降雨量相应减少^[41—42],这不利于废弃矿山迹地植被的自然恢复。本研究区域海拔分布于 1500—2600 m,在此区域内自然植被主要以亚热带常绿阔叶林、落叶阔叶林和针阔混交林为主,均是植物生长旺盛的海拔范围,因此海拔因子不会严重干扰矿山迹地的植被恢复。

总体来看,大熊猫国家公园雅安片区废弃矿山迹地自然植被恢复影响因素多,土壤、恢复时间的影响较水分和立地条件和等因素更强。因此,在大熊猫国家公园废弃矿山迹地植被自然恢复受限、生境重建困难情况下,亟需人为介导废弃矿山植被恢复。同时,基于大熊猫国家公园生态系统完整性需要保持生境多样化,植被恢复时应参照原生境完整生态系统。

3.3 大熊猫国家公园废弃石材矿山恢复措施及建议

废弃石材矿山修复主要受到废石粒径和修复时间的限制,在进行修复过程中,可以通过人工构建修复技术进而促进修复地基质稳定和植被结构合理,包括:通过开展稳固边坡、开沟引水等人工辅助修复技术,消除矿山地质灾害隐患;基于土壤—植被互作关系理论,系统上集成土壤修复—植物恢复耦合技术,加速矿山生态恢复过程。

为提升大熊猫国家公园生态功能,建议在矿山生态恢复基础上,以大熊猫国家公园内相应的标准生态系统为目标,建立参照生态系统(Reference Ecosystem),作为矿山生态恢复与功能提升的目标与基准^[43],这不仅

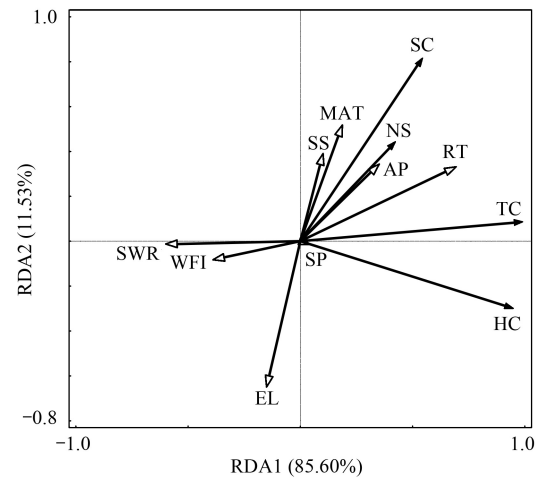


图3 自然环境条件与植被恢复的 RDA 和相关性分析

Fig.3 Redundancy analysis between vegetation restoration and natural environmental properties

自然环境条件与植被恢复的 RDA 分析;DCA:去趋势对应分析 Detrended correspondence analysis;RDA:冗余分析 Redundancy analysis;RDA 排序图中实心箭头代表响应变量,空心箭头代表解释变量;RDA1:第一轴解释变量;RDA2:第二轴解释变量

仅是利用乡土植物对废弃矿山生态恢复的过程,也是系统考虑大熊猫国家公园生境连通、协调性和完整性,发挥“国家公园”作用,实现大熊猫种群稳定繁衍,并且加强大熊猫对其伞护的生物多样性和典型生态脆弱区的整体保护。参照生态系统不仅仅是对标准生态系统的一个参考,还需要从大熊猫国家公园长期发展与空间延伸的角度,深入结合大熊猫适宜栖息地生态系统构建,指标可涵盖生物多样性、关键物种、景观格局、生态系统稳定性、生态系统质量、生物庇护效应等。

4 结论与展望

本研究对大熊猫国家公园雅安片区石材废弃矿山植被自然恢复现状及影响因素进行了调查与分析,结果表明自然恢复下不同废弃矿山样地间植物种类多样性、科属分布及植被覆盖度差异较大,地表面裸露程度较高,植被自然恢复较难。植被自然恢复主要受到废石粒径和恢复时间的影响作用。为促使废弃矿山恢复并发挥大熊猫国家公园生态功能,需要建立修复参照生态系统,并基于参照生态系统构建恢复技术体系。研究结果对探索“国家公园”生态修复模式具有重要意义。

参考文献(References):

- [1] Huang Q Y, Fei Y X, Yang H B, Gu X D, Songer M. Giant Panda National Park, a step towards streamlining protected areas and cohesive conservation management in China. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 22: e00947.
- [2] Xu Y, Yang B, Dai Q, Pan H, Zhong X, Ran J H, Yang X Y, Gu X D, Yang Z S, Qi D W, Hou R, Zhang Z J. Landscape-scale giant panda conservation based on metapopulations within China's National Park system. *Science Advances*, 2022, 8(30): eabl8637.
- [3] 张进德, 郝富瑞. 我国废弃矿山生态修复研究. *生态学报*, 2020, 40(21): 7921-7930.
- [4] 张小琼. 大熊猫国家公园(四川雅安片区)矿山生态修复机制研究. *黑龙江环境通报*, 2023, 36(8): 126-128.
- [5] Hou H P, Ding Z Y, Zhang S L, Guo S C, Yang Y J, Chen Z X, Mi J X, Wang X. Spatial estimate of ecological and environmental damage in an underground coal mining area on the Loess Plateau: implications for planning restoration interventions. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 287: 125061.
- [6] Zhou H K, Yang X Y, Zhou C Y, Shao X Q, Shi Z C, Li H L, Su H Y, Qin R M, Chang T, Hu X, Yuan F, Li S, Zhang Z H, Ma L. Alpine grassland degradation and its restoration in the qinghai - tibet plateau. *Grasses*, 2023, 2(1): 31-46.
- [7] Xu D L, Li X F, Chen J, Li J H. Research progress of soil and vegetation restoration technology in open-pit coal mine: a review. *Agriculture*, 2023, 13(2): 226.
- [8] Sarathchandra S S, Rengel Z, Solaiman Z M. Remediation of heavy metal-contaminated iron ore tailings by applying compost and growing perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Chemosphere*, 2022, 288(Pt 2): 132573.
- [9] Li T, Wu M H, Duan C Q, Li S Y, Liu C E. The effect of different restoration approaches on vegetation development in metal mines. *Science of the Total Environment*, 2022, 806: 150626.
- [10] Liu Y, Lei S G, Chen X Y, Chen M, Zhang X Y, Long L L. Study of plant configuration pattern in guided vegetation restoration: a case study of semiarid underground mining areas in Western China. *Ecological Engineering*, 2021, 170: 106334.
- [11] Ahirwal J, Maiti S K. Restoring coal mine degraded lands in India for achieving the United Nations - sustainable development goals. *Restoration Ecology*, 2022, 30(5): e13606.
- [12] Fois M, Murgia L, Bacchetta G. Plant diversity and species composition of the abandoned mines of the Iglesias mining district (Sardinia, Italy): a restoration perspective. *Ecological Engineering*, 2023, 188: 106879.
- [13] 张琳, 陆兆华, 唐思易, 张萌, 张润廷, 黄玉凯, 尚志. 露天煤矿排土场边坡植被组成特征及其群落稳定性评价. *生态学报*, 2021, 41(14): 5764-5774.
- [14] Wang S F, Cao Y G, Pietrzykowski M, Zhou W, Bai Z K. Research on the influence of vegetation restoration in loess open-pit coal mines of China: influencing factors and mechanism. *Ecological Engineering*, 2022, 177: 106549.
- [15] Zhang C, Li F, Li J, Zhang K, Ran W, Du M, Guo J, Hou G. Assessing the effect, attribution, and potential of vegetation restoration in open-pit coal mines' dumping sites during 2003-2020 utilizing remote sensing. *Ecological Indicators*, 2023, 155: 111003.
- [16] Řehounková K, Vítovcová K, Prach K. Threatened vascular plant species in spontaneously revegetated post-mining sites. *Restoration Ecology*, 2020, 28(3): 679-686.
- [17] Stephan K, Hubbart J A. Plant community, soil and microclimate attributes after 70 years of natural recovery of an abandoned limestone quarry.

- Land, 2022, 12(1): 117.
- [18] 李川北. 大理石矿开发利用项目对大熊猫活动及栖息地的影响. 区域治理, 2020(3): 111-113.
- [19] 周盼, 王佩, 武荣华, 梁晓琪, 苏杭. 四川雅安生态敏感区废弃矿山生态修复模式研究. 现代矿业, 2023, 39(11): 226-230.
- [20] 蔡兴华, 何丙辉, 李旭光, 王亮. 矿山渣场植物与植被现状调查研究. 西南大学学报: 自然科学版, 2010, 32(7): 101-106.
- [21] 杨婵, 陈鹏英, 罗建. 南迦巴瓦峰地区野生药用植物多样性特征分析. 中药材, 2023, 46(7): 1624-1631.
- [22] Ender M, Beyza S G, Meric K. Natural plant revegetation on reclaimed coal mine landscapes in Agacli-Istanbul. African Journal of Biotechnology, 2011, 10(16): 3248-3259.
- [23] Soendjoto M A, Dharmono D, Mahrudin M, Riefani M K, Triwibowo D. Plant species richness after revegetation on the reclaimed coal mine land of PT adaro Indonesia, South Kalimantan. Jurnal Manajemen Hutan Tropika: Journal of Tropical Forest Management, 2014, 20(3): 150-158.
- [24] Kondratenko L, Gura D, Shaidullina V, Rogulin R, Kondrashev S. Restoration of vegetation around mining enterprises. Saudi Journal of Biological Sciences, 2022, 29(3): 1881-1886.
- [25] Gastauer M, Ramos S J, Caldeira C F, Siqueira J O. Reintroduction of native plants indicates the return of ecosystem services after iron mining at the Urucum Massif. Ecosphere, 2021, 12(11): e03762.
- [26] Gastauer M, Silva J R, Caldeira C F Jr, Ramos S J, Souza Filho P W M, Furtini Neto A E, Siqueira J O. Mine land rehabilitation: modern ecological approaches for more sustainable mining. Journal of Cleaner Production, 2018, 172: 1409-1422.
- [27] 廖峰, 郑江坤, 赵廷宁, 史常青, 郎登潇, 王文武, 付滢, 任雨之. 柏木次生林震后滑坡迹地物种多样性变化特征. 应用与环境生物学报, 2018, 24(6): 1404-1410.
- [28] Chen F Q, Wang C H, Jia G M. Ecology of *Salix variegata* seed germination: implications for species distribution and conservation in the Three Gorges region. South African Journal of Botany, 2013, 88: 243-246.
- [29] Bourgeois B, González E. Pulses of seed release in riparian Salicaceae coincide with high atmospheric temperature. River Research and Applications, 2019, 35(9): 1590-1596.
- [30] 周涛, 苏正安, 何周窈, 杨鸿琨, 王晓艺. 不同恢复年限矿山排土场植物群落特征. 草业科学, 2019, 36(6): 1508-1517.
- [31] 补欢欢, 石福孙, 李梦玮, 陈晓霞, 廖礼彬, 李婧怡. 伴生杂草提取液对花椒根腐病菌的抑菌活性. 应用与环境生物学报, 2023, 29(2): 460-465.
- [32] Zhang Z S, Zeng Q Y, Liu Y J. Frequent ploidy changes in Salicaceae indicates widespread sharing of the salicoid whole genome duplication by the relatives of Populus L. and Salix L. BMC Plant Biology, 2021, 21(1): 535.
- [33] 王友生, 吴鹏飞, 侯晓龙, 岳辉, 彭绍云, 马祥庆. 稀土矿废弃地不同植被恢复模式对土壤肥力的影响. 生态环境学报, 2015, 24(11): 1831-1836.
- [34] Zhang L, Liu W, Liu S H, Zhang P, Ye C J, Liang H. Revegetation of a barren rare earth mine using native plant species in reciprocal plantation: effect of phytoremediation on soil microbiological communities. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(2): 2107-2119.
- [35] 秦青, 刘晶茹, 于强, 马奔, 谭宏利, 解林红, 温亚利. 四川省大熊猫保护地生态安全及其时空演变. 生态学报, 2020, 40(20): 7255-7266.
- [36] 庄鸿飞, 陈君帜, 史建忠, 王伟, 黄璐, 叶菁, 栾晓峰. 大熊猫国家公园四川片区自然保护区空间关系对大熊猫分布的影响. 生态学报, 2020, 40(7): 2347-2359.
- [37] Juge C, Cossette N, Jeanne T, Hogue R. Long-term revegetation on iron mine tailings in northern Québec and Labrador and its effect on arbuscular mycorrhizal fungi. Applied Soil Ecology, 2021, 168: 104145.
- [38] Iskandar I, Suryaningtyas D T, Baskoro D P T, Budi S W, Gozali I, Saridi S, Masyhuri M, Dultz S. The regulatory role of mine soil properties in the growth of revegetation plants in the post-mine landscape of East Kalimantan. Ecological Indicators, 2022, 139: 108877.
- [39] Iskandar I, Suryaningtyas D T, Baskoro D P T, Budi S W, Gozali I, Suryanto A, Kirimi H, Dultz S. Revegetation as a driver of chemical and physical soil property changes in a post-mining landscape of East Kalimantan: a chronosequence study. CATENA, 2022, 215: 106355.
- [40] 王金牛, 孙庚, 石福孙, 许积层, 吴彦, 吴宁. 汶川地震对典型亚热带森林地表径流和土壤侵蚀的影响. 应用与环境生物学报, 2013, 19(5): 766-773.
- [41] Yang J W, Cooper D J, Zhang X, Song W Q, Li Z S, Zhang Y D, Zhao H Y, Han S J, Wang X C. Climatic controls of Pinus pumila radial growth along an altitude gradient. New Forests, 2022, 53(2): 319-335.
- [42] 冯相艳, 赵文智, 蔺鹏飞, 王川. 祁连山北坡主要木本植物功能性状及其海拔分异. 生态学报, 2022, 42(23): 9726-9735.
- [43] 白中科, 师学义, 周伟, 王金满, 赵中秋, 曹银贵. 人工如何支持引导生态系统自然修复. 中国土地科学, 2020, 34(9): 1-9.