

# 高盐胁迫下芒硝盐岩弃渣场植被生态修复研究

孔维博<sup>1,2</sup>, 周军红<sup>3</sup>, 李迎阳<sup>3</sup>, 范春梅<sup>1</sup>, 王春彦<sup>1</sup>, 尹亚敏<sup>1</sup>, 彭尔瑞<sup>1\*</sup>

(1. 云南农业大学, 云南 昆明 650201; 2. 中国能源建设集团云南省电力设计院有限公司, 云南 昆明 650201; 3. 中铁十一局集团第五工程有限公司, 重庆 400037)

**摘要:**为加速高盐胁迫下芒硝盐岩弃渣场植被生态修复, 选取轿子山隧洞弃渣场及其周围环境区作为研究区, 采用样地抽样调查法, 从优势物种、群落结构、生物量、生物多样性等方面进行对比分析。结果表明: 弃渣场土壤 pH 值为 8.51 ~ 9.26, 可溶性盐质量比在 5.12 g/kg ~ 38.45 g/kg 之间, 属高盐弱碱性土壤环境; 弃渣场共发现植物 17 种, 隶属 9 科 16 属, 以草本植物为主, 占总物种数的 76.47%; 弃渣场区植被生态修复以豆科、禾本科、菊科植物为主, 占总物种数的 64.71%; 单位面积生物量和物种丰富度指数最大试验区均为有覆膜阻断客土区。试提出以构树 + 银合欢 + 草木樨 + 类芦 + 龙舌兰 + 葛为主的乔灌草植被配置模式进行植被生态修复。

**关键词:** 植被生态修复; 群落生态学; 高盐胁迫; 芒硝盐岩渣场

中图分类号: X171.4; TD88

文献标志码: B

文章编号: 1006-2009(2022)06-0021-05

## Study on Ecological Restoration of Vegetation in Glauber's Salt Slag Dump under High Salt Stress

KONG Wei-bo<sup>1,2</sup>, ZHOU Jun-hong<sup>3</sup>, LI Ying-yang<sup>3</sup>, FAN Chun-mei<sup>1</sup>, WANG Chun-yan<sup>1</sup>,  
YIN Ya-min<sup>1</sup>, PENG Er-rui<sup>1\*</sup>

(1. Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China; 2. China Energy Engineering Group Yunnan Electric Power Design Institute Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650201, China; 3. The Fifth Engineering Limited Company of China Railway 11th Bureau Group, Chongqing 400037, China)

**Abstract:** In order to accelerate the vegetation ecological restoration in a Glauber's salt slag dump under high salt stress, Jiaozishan tunnel waste dump and its surrounding environment area were selected as the study area, the dominant species, community structure, biomass and biodiversity were compared and analyzed by sampling survey. The results showed that the pH value of the soil in the slag dump was 8.51 ~ 9.26, the mass ratio of soluble salt was 5.12 g/kg ~ 38.45 g/kg, belonging to a high salt and weak alkaline environment. There were 17 species of plants found in the slag dump, belonging to 9 families and 16 genera, mainly herbaceous plants, accounting for 76.47% of the total species. The vegetation ecological restoration in the slag dump was dominated by Legumes, Gramineae and Compositae, accounting for 64.71% of the total species. The test area with the largest biomass per unit area and species richness index was the guest soil area blocked by mulching. This paper tries to put forward the arbor-shrub-grass vegetation configuration mode of *Broussonetia papyrifera* (Linnaeus) L'Heritier. + *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. + *Melilotus officinalis* (L.) Pall. + *Neyraudia reynaudiana* (Kunth) Keng. + *Agave americana* L. + *Pueraria lobata* (Willd.) Ohwi. for vegetation ecological restoration.

**Key words:** Vegetation ecological restoration; Community ecology; High salt stress; Glauber's salt slag dump

收稿日期: 2021-11-15; 修订日期: 2022-08-26

基金项目: 云南省科技惠民专项计划基金资助项目 (2016RA024); 云南农业大学“芒硝盐岩弃渣场生态修复与植被重建关键技术研究”基金资助项目 (KX132021013)

作者简介: 孔维博 (1993—), 男, 云南宣威人, 硕士, 研究方向为工程扰动区生态修复与水土保持。

\* 通信作者: 彭尔瑞 E-mail: 1750272433@qq.com

铁路建设工程规模宏大,扰动呈点、线性分布,兼具占地广、弃渣多、生态环境破坏严重等特点<sup>[1]</sup>。为提升运营速度,桥隧比越来越高,弃渣量也越来越大<sup>[2]</sup>。弃渣不仅占用土地、破坏生态,还是泥石流形成的物质基础,未妥善处置,将威胁人们生产生活安全。对工程扰动区弃渣场进行生态修复,控制其对周边环境的污染和破坏是一项很有现实意义的课题。

骄子山隧洞弃渣的特点是富含石膏、芒硝、氯盐等岩盐,吸水或暴晒极易风化,短时间内岩石就会风化成粉末状岩土,盐分会随毛管水上升到地表,盐分析出大部分后风化物遇水又会重新凝结成块,初步鉴定为芒硝盐岩。芒硝盐岩主要以钙芒硝存在,钙芒硝( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4$ )属于复盐矿物<sup>[3]</sup>,由 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 和 $\text{CaSO}_4$ 组成,当其浸泡在水体中或吸收空气中水分会被溶蚀分解,生成次生芒硝和石膏。由钙芒硝次生变成芒硝是长期而反复进行的过程。另外,在芒硝盐岩中还含有大量的 $\text{NaCl}$ 和 $\text{KCl}$ ,从而形成土壤的盐渍化和次生盐渍化,这是一个世界性的难题<sup>[4]</sup>。针对岩盐弃渣场的研究大多集中于地质结构安全稳定方面<sup>[5]</sup>,对其生态修复的研究目前相对较少。弃渣场区可溶性盐含量高、大量营养元素(如 $\text{N}$ 、 $\text{P}$ 、 $\text{K}$ )缺乏,限制了植物在弃渣场上定居、生长<sup>[6]</sup>。今以骄子山隧洞的岩盐弃渣场区及其周围环境区为研究区进行植被生态修复试验,提出人工辅助措施,一方面对弃渣采用阻断处理(进行覆膜阻断并客土)后在土壤表层喷播植物;另一方面筛选出适应该环境生长的先锋物种,利用优势物种对弃渣场区进行修复,以达到稳定边坡、控制污染、改善景观的目的。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于云南省楚雄彝族自治州禄丰市黑井镇,属亚热带季风气候,年温差小、日温差大、干湿分明,海拔处于1 323 m~2 498 m之间,多年平均气温16.2℃,年平均降雨量950 mm,无霜期322 d左右,土壤多为红沙土,森林覆盖率低。该地区的地层富含石膏、芒硝、氯盐等岩盐。

弃渣场盐渍化<sup>[7]</sup>是指岩盐、土壤或地下水中盐分随毛管水上升到地表,水分蒸发后盐分积累在土地表层,质量比超过2.1 g/kg,也称为盐碱化。骄子山隧道工程共设置4个渣场,弃渣量为

226万 $\text{m}^3$ ,占地18.7 $\text{hm}^2$ 。勘察发现弃渣主要含 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 等离子,总质量比为43.8 g/kg。弃渣pH值为8.51~9.26,可溶性盐质量比为5.12 g/kg~38.45 g/kg,远高于盐碱地标准(2.1 g/kg),属高盐弱碱环境。弃渣中对植物危害最大的是 $\text{Na}$ 盐和 $\text{Ca}$ 盐<sup>[8]</sup>,影响植物光合作用、蛋白质合成、能量和脂类代谢<sup>[9]</sup>,胁迫整个生命历程。

### 1.2 试验分区与处理措施

弃渣场含盐量极高,原水保植物(刺槐、紫荆、紫穗槐、黑麦草、紫花苜蓿等)基本全部死亡。2019年5月开始植被生态修复试验:在弃渣场顶部先铺设一层土工布(600 $\text{g}/\text{m}^2$ ),在土工布上布设厚度为1 mm的高密度聚乙烯膜(HDPE膜),简称“一布一膜”,在隔断层上客土60 cm,坡面没有覆膜,可作为对照,在弃渣场边坡上种植水保措施植物。根据不同处理措施,将研究区分为4个试验分区:覆膜阻断客土区(Q1区),处理措施为用“一布一膜”阻断于膜上客土60 cm;无阻断客土区(Q2区),处理措施为直接客土60 cm;空白对照区(Q3区)指弃渣场外周围环境区;无处理区(Q4区)指不采取任何处理措施的区域。

### 1.3 样地设置与数据收集

2020年8月采集试验数据(每年8月植物群落物种数最丰富)。采用对比分析法,参照方精云等<sup>[10]</sup>采用的典型选样法,在具有代表性的弃渣场区和周围环境区分别布设10个5 m×5 m的灌木样方(乔木数量稀少,不单独设置乔木样方),并在每个样地的对角线上选取4个1 m×1 m的草本样方,共计80个。对灌木的物种、数量、树高、冠幅进行调查,对样方内草本植物的物种、盖度、株高和株数等指标进行调查统计,植物均鉴定到种。

### 1.4 生物量测定

研究区目前以草本为主,故采用“全株收获法”对生物量进行测定<sup>[11]</sup>。在各分区样地内随机选取4个具有代表性1 m×1 m的样方,将样方内全部草本挖出,称取鲜重后带回实验室,放置烘箱于105℃杀青30 min,然后将烘箱温度调至65℃进行烘干,待质量恒定,将草本植物干燥质量换算为 $\text{g}/\text{m}^2$ 。

### 1.5 物种多样性计算

重要值是表示某个种在群落中的地位和作用的综合数量指标。

频度 = 该种植物出现的样方数/所调查的样方总数 × 100% (1)

相对高度 = 某一种植物的高度/所有种高度总和 × 100% (2)

相对盖度 = 某一种植物的盖度/所有种盖度总和 × 100% (3)

相对频度 = 某一种植物的频度/所有种频度总和 × 100% (4)

乔、灌层重要值<sup>[12]</sup> = (相对高度 + 相对盖度 + 相对频度)/3 (5)

藤本、草本层重要值 = (相对频度 + 相对盖度)/2 (6)

采用 α 多样性测度方法<sup>[13]</sup>: Patrick 丰富度指数 (S)、Shannon-Wiener 多样性指数 (H)<sup>[14]</sup>、Pielou 均匀度指数 (J)、Simpson 优势度指数 (D)<sup>[15]</sup> 等 4 个指标对植物群落的物种多样性进行测评, 计算公式如下。

$$H = - \sum P_i \ln P_i \quad (7)$$

$$J = - \sum P_i \ln P_i / \ln S \quad (8)$$

$$D = \sum P_i^2 \quad (9)$$

式中:  $P_i$  为种  $i$  的相对重要值;  $S$  为种  $i$  所在样地的物种总数, 即物种丰富度指数。

## 1.6 数据处理

运用 Excel 2007、SPSS 22.0、Origin 7.5 统计软件对数据进行整理与统计分析, 采用单因素方差分析法 (one-way ANOVA) 分析不同处理措施下各植被生态修复区多样性指数、生物量间的差异, 运用相关分析计算物种多样性与生物量之间的相关性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 弃渣场土壤 pH 值和含盐量测定

通过电位法对弃渣场土壤 pH 值进行测定, 其 pH 值处于 8.51 ~ 9.26 之间。通过烘干残渣重量法对弃渣场土壤含盐量进行测定, 其可溶性盐质量比介于 5.12 g/kg ~ 38.45 g/kg 之间。表明, 弃渣场区属于高盐碱化土壤环境。土壤 (烘干土) 含盐量 > 2.0% 为盐土, 该土壤条件作物基本无法生存, 弃渣场区大部分土壤条件超过作物生存底线。

### 2.2 研究区植被物种组成

通过调查, 研究区共发现 29 种植物, 其中木本 5 种、草本 24 种; 弃渣场发现植物 17 种, 其中木本 4 种、草本 13 种, 生态修复过程中以草本植物为主, 占总物种数的 76.47%。表 1 为研究区主要植物种类及生活型。

表 1 研究区主要植物种类及生活型

Table 1 Main plant species and life forms in the study area

种名	学名	植物生活型	弃渣场区种数 n/种	周围对照区种数 n/种
龙舌兰	<i>Agave americana</i> L.	多年生草本	1	1
紫茎泽兰	<i>Ageratina adenophora</i> (Spreng.) R. M. King.	多年生草本	1	1
银合欢	<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit.	灌木或小乔	1	1
鬼针草	<i>Bidens pilosa</i> L.	一年生草本	1	1
戟叶酸模	<i>Rumex hastatus</i> D. Don.	灌木	1	1
类芦	<i>Neyraudia reynaudiana</i> (Kunth) Keng.	多年生草本	1	1
曼陀罗	<i>Datura stramonium</i> L.	一年生草本	1	1
假酸浆	<i>Nicandra physalodes</i> (Linn.) Gaertn.	一年生草本	1	1
构树	<i>Broussonetia papyrifera</i> (Linnaeus) L'Heritier.	乔木	1	1
牛筋草	<i>Eleusine indica</i> (L.) Gaertn.	一年生草本	1	1
草木樨	<i>Melilotus officinalis</i> (L.) Pall.	一年生草本	1	1
芒	<i>Miscanthus sinensis</i> Anderss.	多年生草本	1	1

### 2.3 研究区植物功能群组成

根据 Hector 对植物功能群的划分<sup>[16]</sup>, 将研究区植物分为菊科、豆科、禾本科、非禾杂类 4 大功能群。图 1 为研究区不同植物功能群占比。

弃渣场区发现 17 种植物, 隶属 9 科 16 属。由图 1 可见, 在弃渣场区植物中豆科占主导地

位, 占总物种数的 29.42%。弃渣场植被生态修复中, 以常规 3 大科 (豆科、菊科、禾本科) 植被为主, 占总物种数的 64.71%。禾本科具有生长快、成坪迅速、覆盖率高的特点, 易凸显为先锋物种; 豆科植物具有固氮、根深和耐旱的特点, 能改变土壤理化性质; 菊科具有较强的适应性和侵入

性,能快速提升群落结构的复杂性和增加生态系统的稳定性。

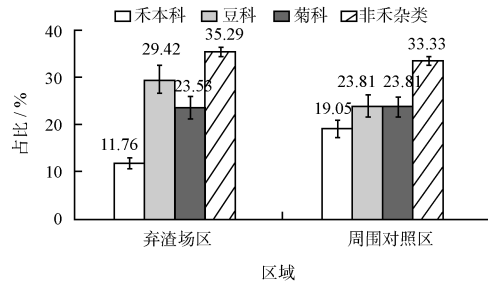


图 1 研究区不同植物功能群占比  
Fig. 1 Proportion of different plant functional groups in the study area

### 2.4 弃渣场区优势物种

优势物种是指具有高度生态适应性,能对群落产生重大影响的种类<sup>[17]</sup>,其能决定植物群落结构和功能。优势物种适应性强,能迅速成长为先锋物种,改善其立地条件和周围环境<sup>[18]</sup>。

表 2 为弃渣场区优势物种的分布频度和重要值。由表 2 可知,弃渣场区优势物种有 8 种,木本是构树、银合欢、车桑子和戟叶酸模;草本是草木樨、类芦、葛和龙舌兰。优势物种是弃渣场生态修复的重要突破口,对弃渣场区进行人工辅助生态修复时,应优先考虑研究区优势物种。分布频度草木樨最高,为 67%;重要值从高到低依次为草木樨 > 戟叶酸模 > 龙舌兰 > 类芦 > 银合欢 > 葛 > 车桑子 > 构树。

表 2 弃渣场区优势物种的分布频度和重要值

Table 2 Distribution frequency and important value of dominant species in the slag dump

优势物种	学名	科	分布频度/%	重要值
构树	<i>Broussonetia papyrifera</i> (Linnaeus) L'Heritier.	桑科	14	0.129
银合欢	<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit.	豆科	31	0.279
车桑子	<i>Dodonaea viscosa</i> (L.) Jacq.	无患子科	22	0.216
戟叶酸模	<i>Rumex hastatus</i> D. Don.	蓼科	61	0.326
类芦	<i>Neyraudia reynaudiana</i> (Kunth) Keng.	禾本科	54	0.296
龙舌兰	<i>Agave americana</i> L.	天门冬科	37	0.318
葛	<i>Pueraria lobata</i> (Willd.) Ohwi.	豆科	11	0.268
草木樨	<i>Melilotus officinalis</i> (L.) Pall.	豆科	67	0.372

### 2.5 不同试验区植物群落生物量分布

弃渣场区立地条件差、恢复时间短,植物种类较少且以草本植被为主,故绝大多数区域生物量地下部分高于地上部分,仅有覆膜阻断的客土区(Q1)地上生物量大于地下生物量。这应该与大部分是草本植物且为肉质根,植物根系发达有关<sup>[19]</sup>,如戟叶酸模和铁线蕨均有粗壮的根状茎,黑蒿等植被皆有发达的根系。

图 2 为不同试验区植物群落生物量分布。由图 2 可见,不同试验区植物群落生物量从高到低为 Q1 区 > Q3 区 > Q2 区 > Q4 区。Q1 区的生物量最高,说明有覆膜阻断的客土处理措施对当前环境下的植被生态修复效果最好。Q2 区的生物量低于 Q1 区,这主要是由于岩盐风化产生的盐分随毛管水上升到地表,水分蒸发后,客土层盐分含量增加而胁迫植被恢复,从而影响植被生态修复,进一步验证了覆膜阻断处理措施对弃渣场区立地条件下的植被恢复具有十分重要的作用。

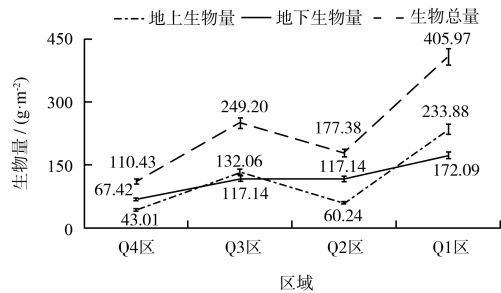


图 2 不同试验区植物群落生物量分布  
Fig. 2 Biomass distribution of plant community in different test areas

### 2.6 不同试验区植物群落多样性分析

表 3 为不同试验区植物群落 α 多样性指标值。由表 3 可知,不同试验区植物群落 α 多样性表现出明显差异,丰富度指数(S)最大为 15,从大到小依次为 Q1 区 > Q3 区 > Q2 区 > Q4 区,且 Q2 区和 Q4 区的 S 值明显偏低。不同试验区 Shannon-Wiener 指数(H)与 Simpon 优势度指数(D)变化趋

势基本保持一致,  $H$  值越高, 说明生态系统物种越丰富, 结构稳定性和保护物种多样性的能力越强, Q1 区  $S$  值、 $H$  值和  $D$  值均最大, 表明该区域生态修复效果相对较好, 该处理措施较适用于弃渣场生态修复。Pielou 均匀度指数 ( $J$ ) 与其他 3 个指数呈现相反规律, 即  $H$  值和  $S$  值均最大的 Q1 区, 其  $J$  值反而最小, 说明种间重要值差距大, 分布不均匀, 这主要是由群落结构太过单一所导致的。

表3 不同试验区植物群落的  $\alpha$  多样性指标值Table 3  $\alpha$  diversity index value of vegetation community in different test areas

试验区	$S$	$H$	$J$	$D$
Q1 区	15	2.085	0.769	0.863
Q2 区	9	1.935	0.881	0.706
Q3 区	11	2.052	0.856	0.832
Q4 区	6	1.831	1.021	0.699

### 3 结论

(1) 弃渣场土壤 pH 值为 8.51 ~ 9.26, 可溶性盐质量比介于 5.12 g/kg ~ 38.45 g/kg 之间, 属于高盐碱化土壤环境。弃渣场区共发现植物 17 种, 以草本植物为主, 占总物种数的 76.47%; 隶属 9 科 16 属, 以常规 3 大科 (豆科、禾本科、菊科) 植物为主, 占总物种数的 64.71%。

(2) 弃渣场区物种单一, 优势物种木本主要有构树、银合欢、车桑子、戟叶酸模, 草本植物以龙舌兰、类芦、葛、草木樨为主, 其中类芦和龙舌兰的耐旱耐盐性最强。

(3) 不同试验区单位面积生物量最大是有覆膜阻断客土区 (Q1 区), 该区植物多样性最高, 丰富度指数、Shannon-Wiener 指数、Simpon 优势度指数与单位面积生物量呈现出相同的规律。

(4) 通过对研究区植物群落特征和优势物种的调查研究, 结合弃渣土壤特点, 试提出以构树 + 银合欢 + 草木樨 + 类芦 + 龙舌兰 + 葛为主的乔灌草植被修复配置模式, 其充分利用了豆科植物固氮功能和禾本科植被迅速成坪、增加植被覆盖的特征<sup>[20]</sup>。该模式既遵循因地制宜的原则, 又以当地优势物种为主、乔灌草相结合, 可为相似类型的弃渣场和尾库矿生态修复植物配置提供参考。

#### [参考文献]

[1] 杜林涛. 21 世纪中国高速铁路客运站外部造型“成因”及“手

- 法”研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [2] 赵泽亚. 铁路建设项目弃渣场管理存在的问题和解决方案研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2019.
- [3] 周其健, 郭永春, 屈智辉, 等. 水热综合作用下钙芒硝盐岩强度等参数的衰减规律研究[J]. 工程地质学报, 2022, 30(4): 1019 - 1027.
- [4] YU Y M, LIANG W G, LIU J S. Influence of solution concentration and temperature on the dissolution process and the internal structure of glauberite [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2018, 25(11): 1246 - 1255.
- [5] LIANG W G. Experimental study of mechanical properties of gypsum soaked in brine [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 53: 142 - 150.
- [6] 林晓燕, 许闯, 龚亚龙, 等. 不同植物物种及其组合对铅锌尾矿库修复效果研究[J]. 环境工程, 2016, 34(S1): 983 - 987.
- [7] 陈琳, 费良军, 傅渝亮, 等. 不同土壤温度和容重下微咸水上升毛管水运动特性 HYDRUS 模拟及验证[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 87 - 96.
- [8] 阿曼古丽·买买提阿力, 拉扎提·努尔布拉提, 高丽丽, 等. 盐胁迫对海岛棉和陆地棉幼苗生长及生理特性的影响[J]. 植物学报, 2017, 52(4): 465 - 473.
- [9] 王伟, 王志, 于亮, 等. 沧州市滨海盐碱区土壤盐渍化特征[J]. 环境监测管理与技术, 2021, 33(6): 68 - 71.
- [10] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 等. 植物群落清查的主要内容和规范[J]. 生物多样性, 2009, 17(6): 533 - 548.
- [11] 赵梦颖, 孙威, 罗永开, 等. 内蒙古 26 种常见温带灌木的生物量模型[J]. 干旱区研究, 2019, 36(5): 1219 - 1228.
- [12] 孔维博, 尹亚敏, 彭尔瑞, 等. 山区河道工程扰动边坡植物群落恢复动态研究[J]. 环境监测管理与技术, 2021, 33(6): 19 - 23.
- [13] 马淑琴, 薛正伟, 杨丽丽, 等. 塔里木荒漠河岸林异质生境物种多样性比较与其测度指标筛选及评价[J]. 植物研究, 2017, 37(6): 961 - 969.
- [14] 齐代华, 贺丽, 周旭, 等. 三峡水库消落带植物物种组成及群落物种多样性研究[J]. 草地学报, 2014, 22(5): 966 - 970.
- [15] 温培才, 盛茂银, 王霖娇, 等. 西南喀斯特高原盆地石漠化环境植物群落结构与物种多样性时空动态[J]. 广西植物, 2018, 38(1): 11 - 23.
- [16] 赵娜, 赵新全, 赵亮, 等. 植物功能性状对放牧干扰的响应[J]. 生态学杂志, 2016, 35(7): 1916 - 1926.
- [17] 刘润红, 陈乐, 涂洪润, 等. 桂林岩溶石山青冈群落灌木层主要物种生态位与种间联结[J]. 生态学报, 2020, 40(6): 2057 - 2071.
- [18] 赵冰清. 半干旱黄土区大型露天煤矿植被演替规律研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- [19] 李建明, 王志刚, 张长伟, 等. 生产建设项目弃土弃渣特性及资源化利用潜力评价[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2): 1 - 8.
- [20] 孔维博, 尹亚敏, 彭尔瑞, 等. 山区河流生态河道治理工程扰动区植被群落恢复的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(3): 31 - 35.