

## 华北地区石灰岩质高陡边坡修复先锋植物遴选

张 燕, 陈洪年, 王小兵, 葛江琨, 李洪亮, 赵建涛, 戴振芬, 余 洋

### Selection of pioneer plants for repairing limestone high and steep slopes in North China

ZHANG Yan, CHEN Hongnian, WANG Xiaobing, GE Jiangkun, LI Hongliang, ZHAO Jiantao, DAI Zhenfen, and YU Yang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202110012>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 秦望山隧道南口高陡岩质边坡稳定性分析及治理效果评价

§{suggestArticle.titleEn}

郝社锋, 蒋波, 喻永祥, 宋京雷, 徐昊, 孙少锐 中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(2): 89-97

#### 破碎岩质边坡锚墩式主动防护网设计方法

Design method of anchor pier type active protective net on fractured rock slopes

吴兵, 梁瑶, 赵晓彦, 唐晓波, 吴晓春, 罗天成 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 101-108

#### 云南鲁甸地震红石岩堰塞湖右岸特高边坡综合监测及变形特征分析

Comprehensive monitoring and deformation analysis of extra high slope on the right bank of Hongshiyan Dammed Lake in Ludian Earthquake

郭延辉, 杨溢, 高才坤, 杨志全 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 30-37

#### 基于指标变权重复合云模型的岩质边坡稳定性评价初探

A preliminary study on evaluation of rock slope stability based on index variable weight compound cloud model

陈忠源, 戴自航 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 9-17

#### 地震作用下顺倾多弱层岩质边坡动力响应

Dynamic response of down-dip multi-weak-layer rock slope under earthquake

王来贵, 向丽, 赵娜, 刘向峰 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 18-25

#### 基于层次分析法的北京市地质环境质量综合评价

Comprehensive evaluation method of geological environment quality in Beijing based on AHP

郭学飞, 王志一, 焦润成, 曹颖 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 70-76



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202110012

张燕, 陈洪年, 王小兵, 等. 华北地区石灰岩质高陡边坡修复先锋植物遴选 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(5): 109-118.

ZHANG Yan, CHEN Hongnian, WANG Xiaobing, *et al.* Selection of pioneer plants for repairing limestone high and steep slopes in North China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(5): 109-118.

## 华北地区石灰岩质高陡边坡修复先锋植物遴选

张 燕<sup>1</sup>, 陈洪年<sup>1</sup>, 王小兵<sup>2,3</sup>, 葛江琨<sup>1</sup>, 李洪亮<sup>1</sup>, 赵建涛<sup>1</sup>, 戴振芬<sup>1</sup>, 余 洋<sup>4,5,6,7</sup>

(1. 山东省鲁南地质工程勘察院(山东省地质矿产勘查开发局第二地质大队), 山东 济宁 272100;  
2. 中钢集团马鞍山矿山研究总院股份有限公司, 安徽 马鞍山 243000; 3. 金属矿山安全与健康国家重点实验室, 安徽 马鞍山 243000; 4. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 5. 矿山生态效应与系统修复重点实验室, 北京 100081; 6. 自然资源部矿山时空信息与生态修复重点实验室, 河南 焦作 454000; 7. 自然资源部矿区生态修复工程技术创新中心, 北京 100083)

**摘要:** 为了遴选出适合于华北地区高陡岩质边坡生态修复的先锋植物, 采用地境再造技术在济南石灰岩地区建立了 2 个高陡边坡生态修复试验场, 试验栽植落叶、常绿及藤本类植物共 14 种, 并对 2 个试验场植物的成活率和生长状况进行长期监测。在对长期监测数据分析的基础上采用综合评价指数法建立植物适宜性评价模型, 并以此为依据遴选出适合于高陡岩质边坡修复的先锋植物。研究表明: 常绿植物优选侧柏、圆柏及大叶扶芳藤作为先锋植物; 落叶植物优选刺槐、黄栌、连翘为先锋植物; 藤本类植物爬山虎因其成活率高且生长速率快, 可在短期对高陡岩壁有效覆盖, 优选作为先锋植物。

**关键词:** 高陡岩质边坡; 先锋植物; 地境再造技术; 增长率; 成活率; 综合评价指数法; 矿山生态修复

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)05-0109-10

## Selection of pioneer plants for repairing limestone high and steep slopes in North China

ZHANG Yan<sup>1</sup>, CHEN Hongnian<sup>1</sup>, WANG Xiaobing<sup>2,3</sup>, GE Jiangkun<sup>1</sup>, LI Hongliang<sup>1</sup>, ZHAO Jiantao<sup>1</sup>,  
DAI Zhenfen<sup>1</sup>, YU Yang<sup>4,5,6,7</sup>

(1. Shandong Provincial Lunan Geology and Exploration Institute (Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources No.2 Geological Brigade), Jining, Shandong 272100, China; 2. Sinosteel Maanshan General Institute of Mining Research Co. Ltd., Maanshan, Anhui 243000, China; 3. State Key Laboratory of Safety and Health for Metal Mines, Maanshan, Anhui 243000, China; 4. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China; 5. Key Laboratory of Mine Ecological Effects and System Restoration, Beijing 100081, China; 6. Key Laboratory of Mine Spatial Information and Technology, Ministry of Natural Resources, Jiaozuo, Henan 454000, China; 7. Technology Innovation Center for Ecological Restoration Engineering in Mining Area, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to select pioneer plants suitable for ecological restoration of high and steep rock slopes in North China, two high-and-steep slope ecological restoration test sites were established in the limestone area of Jinan by using the technology of

收稿日期: 2021-10-19; 修订日期: 2022-03-22

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20221781; DD20221726); 山东省重点研发计划(重大科技创新工程)(2020CXGC011403); 济南市国土资源局科研项目(JNCZ(HZJS)-GK-2016-0003)

第一作者: 张 燕(1987-), 女, 宁夏固原人, 工程师, 主要从事工程地质、矿山生态修复方面的研究。E-mail: 964880784@qq.com

通讯作者: 余 洋(1987-), 男, 河北唐山人, 博士, 高级工程师, 主要从事矿山生态修复方面的研究。E-mail: yuyang2005@139.com

landscape reconstruction. The sites planted a total of 14 kinds of deciduous plants, evergreens and lianas, whose survival rate and growth status were monitored for a long period of time. The data collected was analyzed by the plant suitability evaluation model and the result is displayed in the form of the comprehensive evaluation index. According to the result, in the group of evergreens, *Platycladus orientalis*, juniper and fufangteng are the preferred pioneer plants; in the group of deciduous plants, *Robinia pseudoacacia*, *Cotinus japonicus* and *Forsythia suspensa* are the preferred ones; the vine creeper has a high survival rate and fast growth rate which can effectively cover high-and-steep rock walls in a short time. It is the preferred pioneer plant in the group of lianas.

**Keywords:** high-and-steep rock slope; pioneer plants; land environment reconstruction technology; growth rate; survival rate; comprehensive evaluation index method; mine ecological restoration

## 0 引言

作为城市发展、道路交通、港口码头等工程建设的主要材料,石灰岩在社会经济发展中占据重要地位,为现代化建设做出了重大贡献<sup>[1-2]</sup>。然而,石灰岩矿山开采不但会破坏山体原有的地形地貌景观和生态环境<sup>[3-4]</sup>,还会形成大量高陡裸露岩质边坡<sup>[5-6]</sup>。而矿山开采形成的高陡岩质边坡自我恢复是一个十分艰难且漫长的过程,为了能尽快恢复岩质边坡的生态景观,对其进行生态修复与景观重建就十分必要<sup>[7-10]</sup>。传统的岩质边坡修复技术(如水泥抹面、捶面、喷混凝土以及浆砌片石护坡等)绿化效果和生态环境效益较差<sup>[11-15]</sup>。基于以上问题有研究人员先后提出了挂网喷播法、生态袋法、飘台法、爆破台阶法<sup>[15-16]</sup>等技术方法,均是通过工程技术手段对边坡基质进行重塑从而提高生态修复效果。

在山体生态修复问题中,石灰岩高陡边坡属于硬岩坡面,相较于土质边坡和软岩边坡,因其缺少植物生长所必需的水土生境条件及与岩面牢固攀附的力学条件,所以历来是矿山生态修复工作的难点和重点<sup>[17]</sup>。众所周知,在高陡边坡生态修复中技术方法固然重要,然而给人直观映像的是植物对坡面的覆盖度<sup>[18]</sup>,因此,高陡边坡生态修复中植物的科学选择和合理配置至关重要<sup>[19-20]</sup>。在高陡岩质边坡修复中先锋植物的应用是坡面修复成功的第一步,有助于坡面生态系统的构建、有机质的积累及微生物群落的多样性<sup>[21-23]</sup>。先锋植物是指具有耐干旱、耐贫瘠、根系发达、生长快速、生命周期长及改土作用强等特点的植物<sup>[24]</sup>。在高陡岩质边坡生态修复中由于其生长环境恶劣,遴选合适的先锋植物十分关键。依据地境再造理论<sup>[25]</sup>,采用地境再造复绿技术在济南地区的石灰岩质高陡边坡上先后建立了 2 个试验场,栽植了十余种植物并对其进行长期监测,研究在石灰岩质高陡边坡修复中不同植物对恶劣环境的适应

性,并最终遴选出适合石灰岩质高陡边坡生态修复的先锋植物。

## 1 研究区概况

济南位于华东北地区南段,山东省中部。属暖温带大陆性季风气候,四季分明,雨量集中。年平均气温 13~14 °C,年降水量 600~700 mm。研究区地貌类型以低山丘陵为主,试验场分别位于济南市章丘区和平阴县(图 1),均是早期采石形成的高陡边坡,2 个试验场条件基本相似,地层岩性以中厚层—厚层石灰岩为主,坡面高度 20~70 m,坡度 65°~85°,总面积近 4 000 m<sup>2</sup>。

在我国华北地区植物类型主要有常绿阔叶树、藤本类等<sup>[23]</sup>。据不完全统计济南地区常用的绿化树种有 79 种,生长和绿化观赏效果较好的品种约有 49 种,其中落叶乔木类 18 种,常绿乔木类 9 种,花灌木类 18 种,藤木类 4 种<sup>[25-26]</sup>。根据王荷生等<sup>[27]</sup>的研究可知,分布较广的乡土物种有荆条、酸枣、沙棘、虎榛子等<sup>[28]</sup>,常见的造林树种有杨树、柳树、柏树、黄榆等乔木类。

## 2 植物监测

### 2.1 监测方法

2015 年 5 月与 2017 年 4 月,在济南章丘区、平阴县采石形成的高陡岩壁上采用地境再造技术分别建立了 2 个试验场<sup>[29]</sup>,同一试验场内岩质边坡坡度、地层产状及裂隙发育情况等基本相似,植物品种采用随机性栽植(图 2),栽植方法如图 3 所示<sup>[30]</sup>。考虑到构建生态系统的完整性,试验场共栽植落叶植物、常绿植物及藤本类植物 14 种,总数 3 316 株,株行距 1 m×1 m。植物栽植后养护期 3 个月左右,进入雨季(8 月份)后停止养护,植物生长回归自然,所需养分及水分主要靠植物根系从岩壁裂隙内汲取。试验场建成后,研究团队定期对场内栽植的植物进行监测,监测频率为 2 次/年(春秋各一次),监测指标为植物成活率和植物生长状况,生长状



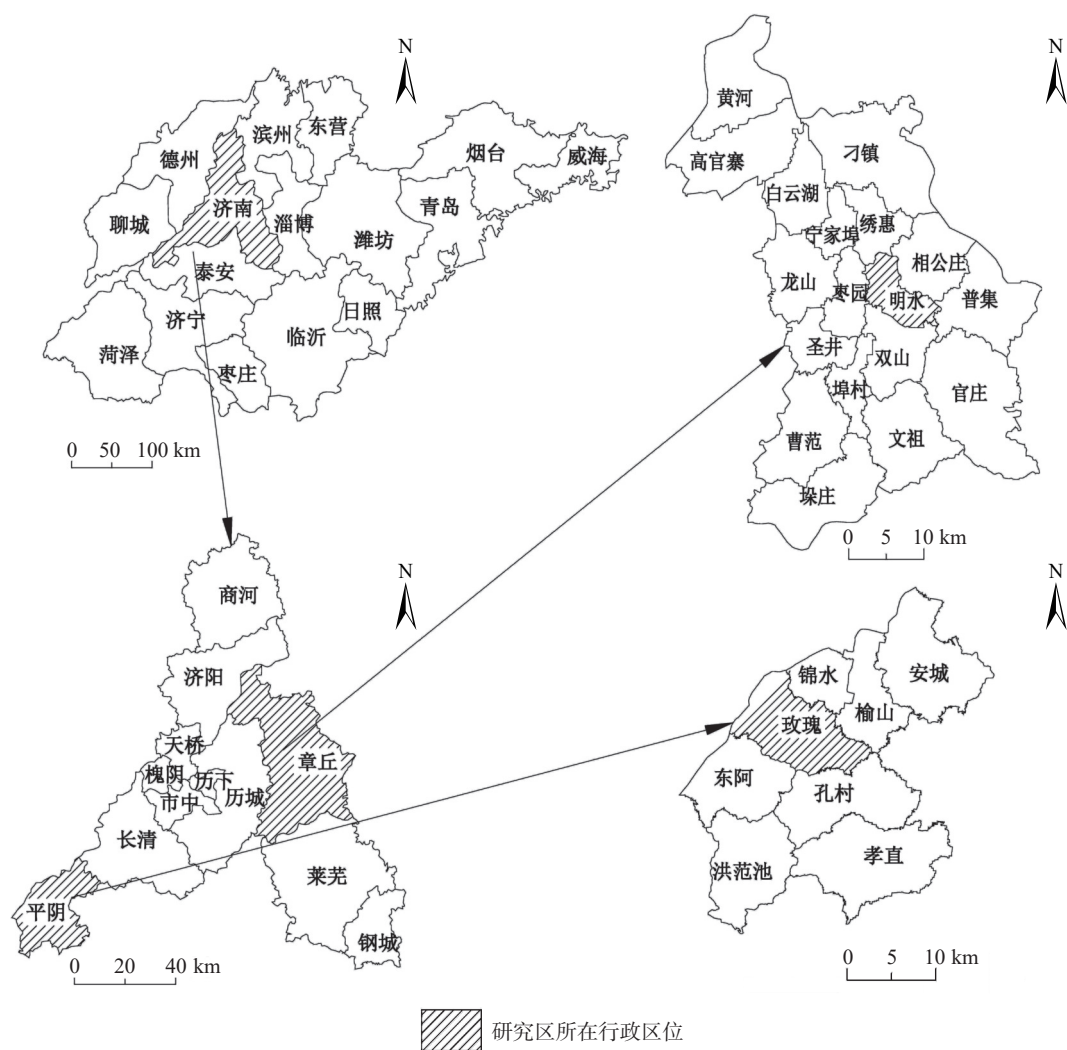


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location of the study area



图 2 典型试验场修复前后照片(平阴)

Fig. 2 Typical test site before and after restoration (Pingyin)

况包括植物高度、基径和冠幅。

考虑到研究区岩质边坡高度大且陡峭,人工监测植物成活率难度大,成活率监测采用无人机航拍的方法展

开,人工清点航拍的高清照片上植物数量,统计植物的成活率。植物生长状况监测主要对距离坡脚 2 m 范围及固定梯子两侧 2 m 宽范围内的植物监测;2 个试验场

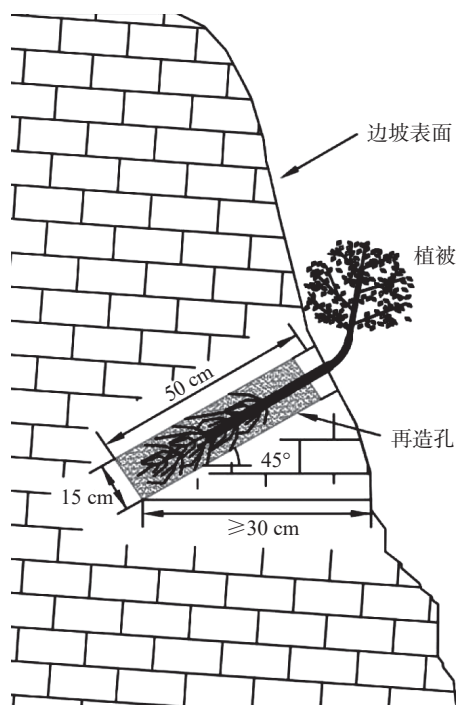


图 3 地境再造技术栽植方法

Fig. 3 Planting method of Landscape Reconstruction Technology

共监测生长状况的植物 371 株,截至 2020 年 9 月成活植物 319 株,均参与本次植物生长状况的数据统计。监测过程中,对长期监测的植物进行编号,并对每株植物建立“数据档案”。由于 2 个试验场建成时间不一致,起始数据均选取植物栽植时的数据,最后一次数据均为 2020 年 9 月份监测的数据,期间数据以 2 个试验场每年秋季监测数据为依据进行分析。

## 2.2 植物成活率监测与计算

植物的成活率不但影响岩壁的覆盖度,还影响到整体的修复效果,因此植物的成活状况至关重要。植物成活率( $P$ )的计算公式:

$$P = \frac{D_i}{D} \quad (1)$$

式中: $P$ ——植物成活率;

$D_i$ ——某种植物成活株数;

$D$ ——该种植物种植株数。

对多年监测的植物进行数据统计,计算每种植物每年的成活率并绘制极坐标图,其中半径代表成活率,圆弧代表时间,2 个试验场各类植物成活率见图 4、图 5。

## 2.3 植物生长状况监测与计算

植物生长情况监测采用折尺、游标卡尺和钢卷尺分别测量每株监测植物的高度、基径和冠幅,然后统计每种植物的平均值。每种植物的高度、基径和冠幅平均值采用算术平均法<sup>[31-32]</sup>,计算公式如下:

$$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \quad (2)$$

式中: $\bar{R}$ ——某种植物的高度、基径和冠幅的平均值;

$R_i$ ——第  $i$  株植物的高度、基径和冠幅的数值;

$n$ ——植株数。

根据测量的植物的平均高度、基径和冠幅,计算植物的年平均增长率  $K_{\text{增}}$ 。

$$K_{\text{增}} = \frac{M_n - M}{M \times a} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $K_{\text{增}}$ ——植物的年平均增长率;

$M_n$ ——监测期最后一次监测数据;

$M$ ——初次监测数据;

$a$ ——时间/a。

根据式(2)、式(3)计算不同植物每年的年均增长率,将每种植物的增长率计算结果绘制成极坐标图,如图 4、图 5 所示。

## 2.4 监测结果

### 2.4.1 植物成活率监测结果

由图 4、图 5 可知,截至 2020 年 9 月,章丘试验场植物的综合成活率 81.2%,平阴试验场植物的综合成活率 86.8%,随着时间的推移,2 个试验场的植物成活率整体呈下降趋势。

植物栽植 3~5 a 后,常绿植物中侧柏、圆柏、白皮松、大叶扶芳藤成活率高达 85%~93%;落叶植物中黄栌、刺槐、连翘等植物成活率 81%~89%,而丁香、金银花等植物成活率偏低,只有 63% 左右;藤本类植物中爬山虎的成活率 72%~82%,紫藤、凌霄等植物成活率仅 50%~60%。

### 2.4.2 植物增长率监测结果

(1)高度:高度是衡量植物生长速度的重要因子。由图 4、图 5 可知,藤本类植物中爬山虎的高度年均增长率最大(110%~120%),其适应能力强,具有较强的抗逆性,对岩壁的覆盖效果好;常绿植物中大叶扶芳藤的高度年均增长率(50%~55%)大于侧柏、圆柏、白皮松(15%~20%),松柏类植物相对较慢,与其本身的生长特性有关;落叶植物中黄栌、刺槐、连翘等高度增长速度相近,年均增长率在 15%~30%,火炬树高度生长速度较慢,年均增长率仅 10% 左右,说明火炬树不适合在高陡岩壁上生长。

(2)基径:藤本类植物的基径生长速度最慢,年均增长率在 10%~20% 不等;常绿植物中侧柏、圆柏的基径生长速度较快,年均增长率 25%~40%,在现场监测中可以看出柏树类根茎粗壮,抵御外部不利环境的能力

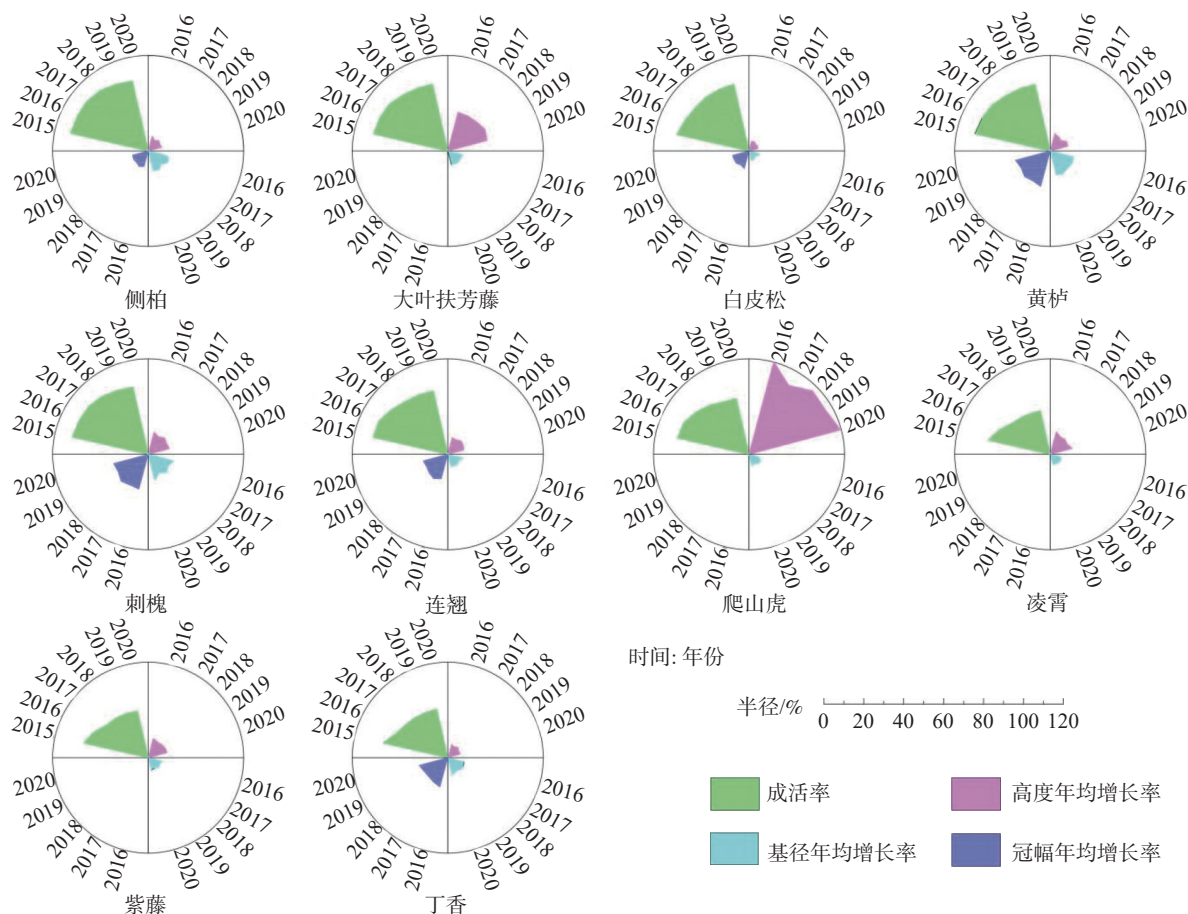


图 4 章丘试验场监测数据统计图

Fig. 4 Statistical chart of monitoring data at Zhangqiu test site

强;落叶植物中黄栌、刺槐等小乔木类植物基径生长速度快,年均增长率可达 30%~50%,均已木质化,抗逆性强。其余植物基径生长速度相对于同类植物偏慢,这与植物生长环境条件恶劣有关<sup>[33]</sup>。

(3)冠幅:高陡边坡复绿主要靠植物的枝叶遮挡,冠幅是体现植物对岩壁遮挡效果最重要的指标。由图 4、图 5 可知,常绿植物中冠幅增长率 20%~30%,相对而言,圆柏的冠幅增长率较侧柏大;落叶植物中黄栌、刺槐冠幅较大,年均增长率 30%~50%,遮挡效果好,岩壁覆盖率高,而火炬树的冠幅年均增长率在 15%左右,较其他落叶植物生长较慢。数据统计中藤本类植物不统计冠幅。

综上,不同植物生长速度不同,水分、养分、温度等因素均制约着植物的生长,从长期监测数据可以看出,植物的成活率随时间的推移有降低的趋势,说明试验场中植物的持续生长主要依靠发达的根系从岩壁裂隙中吸收供自身生长的养分,随着植物不断长大,种植孔内土壤养分逐渐减少,对植物的生长产生了“胁迫”作用<sup>[34]</sup>。

### 3 先锋植物遴选

#### 3.1 先锋植物遴选方法

植物适宜性与高陡岩质边坡生态修复效果密切相关,为了遴选出适宜于高陡岩质边坡生长的先锋物种,采用综合评价指数法对植物适宜性进行评价<sup>[35]</sup>,最终获得不同植物的质量分数,此方法可直观的反映出各种植物的优劣状况,并以此作为先锋植物遴选的标准。

#### 3.2 先锋植物遴选评价体系构建

##### (1)评价因子

评价因子在资料查询和邀请相关专家评审的基础上确定,从植物种类、生长状况、景观效果、层次结构等方面综合考量,确立了植物成活率、高度年均增长率、基径年均增长率和冠幅年均增长率 4 项指标作为评价因子<sup>[36]</sup>,建立高陡岩质边坡先锋植物遴选评价体系。

##### (2)权值确定

权值确定采用专家打分法,邀请了生态修复领域专家、绿化人员和景观设计人员等共 12 人,结合高陡岩



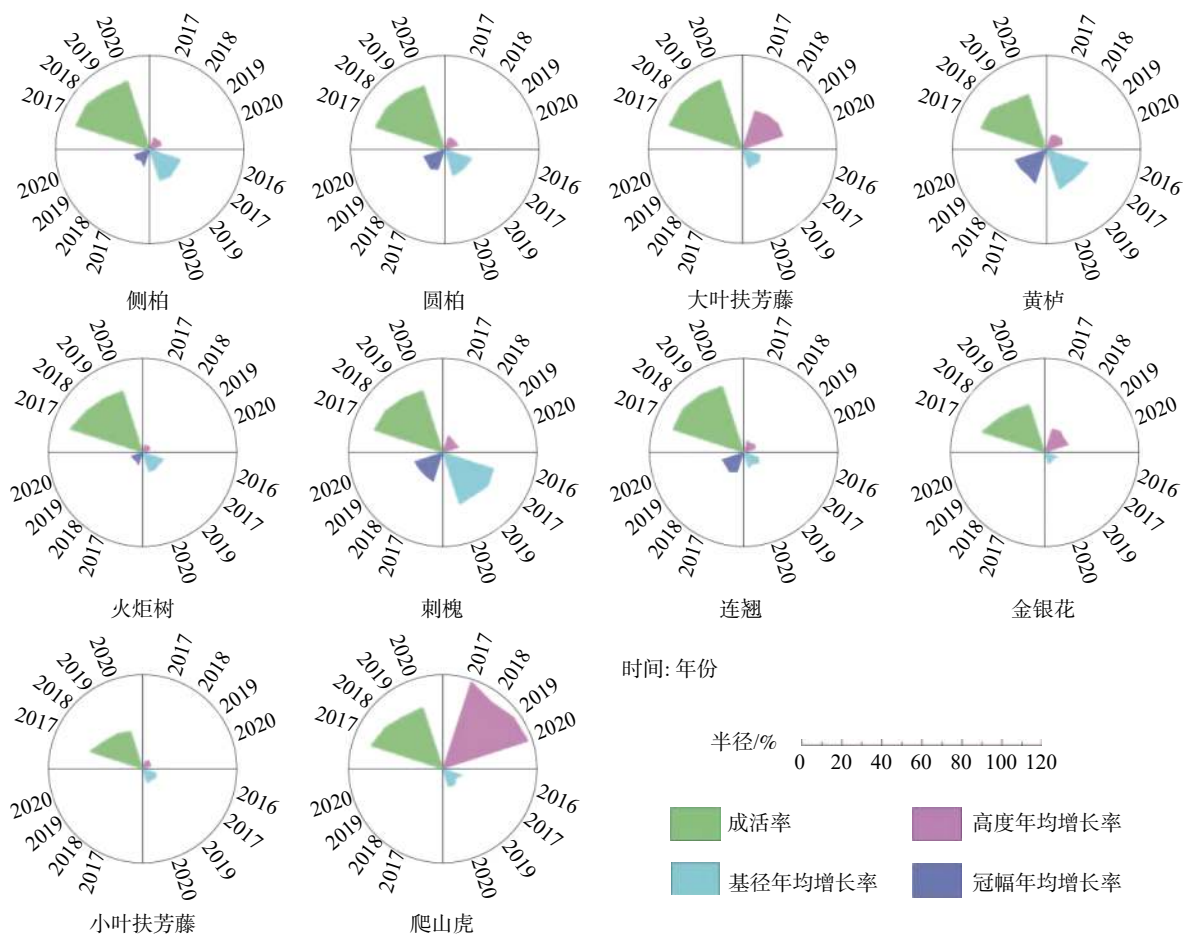


图 5 平阴试验场监测数据统计图  
Fig. 5 Statistical chart of monitoring data at Pingyin test site

质边坡生态修复的实际情况,得出权值见表 1。

表 1 评价因子、权值及分级指标

Table 1 Evaluation factors, weights and grading indicators

| 评价因子    | 权值          | 分级指标                |
|---------|-------------|---------------------|
| 成活率     | $X_1=0.375$ | 优(5),良(4),中(3),差(1) |
| 高度年均增长率 | $X_2=0.250$ | 优(5),良(4),中(3),差(1) |
| 基径年均增长率 | $X_3=0.125$ | 优(5),良(4),中(3),差(1) |
| 冠幅年均增长率 | $X_4=0.250$ | 优(5),良(4),中(3),差(1) |

(3)评价因子及分级指标

根据调查结果,把确定的评价因子分为 4 个评分级别,按植物生长优劣,最大值为 5 分,最小值为 1 分,划分标准见表 2。同时,根据监测数据对每种植物的各项评价因子进行打分,并计算出平均分。

(4)数据处理

本次研究采用综合评价指数法,其计算公式:

$$B = \sum X_i F_i \quad (4)$$

式中:  $B$ ——植物的综合评价指数;

$X_i$ ——某一评价因子的权值;

$F_i$ ——植物在某评价因子下的分值。

植物质量分数计算公式为:

$$M = \frac{B}{B'} \times 100\% \quad (5)$$

式中:  $M$ ——植物质量分数;

$B$ ——植物的综合评价指数;

$B'$ ——理想的植物综合评价指数(即 5 分)。

植物适宜性质量分级标准如下: I 级 ( $75\% < M \leq 100\%$ )——植物成活率高,生长速度快,坡面覆盖度高; II 级 ( $65\% < M \leq 75\%$ )——植物成活率较高,生长速度较快,对坡面有一定的遮挡效果; III 级 ( $55\% < M \leq 65\%$ )——植物成活率较低,生长速度慢,植物长势较差; IV 级 ( $M \leq 55\%$ )——植物成活率低,生长速度慢,岩壁大面积裸露。

3.3 植物适宜性质量评价及结果

按照综合指数评价法,对监测植物的每个评价因子进行打分,参与打分的植物以 2020 年 9 月监测数据

表 2 评价因子取值表  
Table 2 Values of evaluation factors

| 评价因子                      | 植物分类  | 优(5)              | 良(4)                     | 中(3)                     | 差(1)                  |
|---------------------------|-------|-------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 成活率 $P/\%$                | —     | $P>85$            | $70<P\leq 85$            | $60<P\leq 70$            | $P\leq 60$            |
| 高度年均增长率 $K_{\text{高}}/\%$ | 常绿植物  | $K_{\text{高}}>15$ | $12<K_{\text{高}}\leq 15$ | $10<K_{\text{高}}\leq 12$ | $K_{\text{高}}\leq 10$ |
|                           | 落叶植物  | $K_{\text{高}}>25$ | $20<K_{\text{高}}\leq 25$ | $15<K_{\text{高}}\leq 20$ | $K_{\text{高}}\leq 15$ |
|                           | 藤本类植物 | $K_{\text{高}}>20$ | $15<K_{\text{高}}\leq 20$ | $10<K_{\text{高}}\leq 15$ | $K_{\text{高}}\leq 10$ |
| 基径年均增长率 $K_{\text{基}}/\%$ | 常绿植物  | $K_{\text{基}}>35$ | $30<K_{\text{基}}\leq 35$ | $25<K_{\text{基}}\leq 30$ | $K_{\text{基}}\leq 25$ |
|                           | 落叶植物  | $K_{\text{基}}>30$ | $25<K_{\text{基}}\leq 30$ | $20<K_{\text{基}}\leq 25$ | $K_{\text{基}}\leq 20$ |
|                           | 藤本类植物 | $K_{\text{基}}>15$ | $12<K_{\text{基}}\leq 15$ | $10<K_{\text{基}}\leq 12$ | $K_{\text{基}}\leq 10$ |
| 冠幅年均增长率 $K_{\text{冠}}/\%$ | 常绿植物  | $K_{\text{冠}}>25$ | $20<K_{\text{冠}}\leq 25$ | $15<K_{\text{冠}}\leq 20$ | $K_{\text{冠}}\leq 15$ |
|                           | 落叶植物  | $K_{\text{冠}}>40$ | $35<K_{\text{冠}}\leq 40$ | $30<K_{\text{冠}}\leq 35$ | $K_{\text{冠}}\leq 30$ |
|                           | 藤本类植物 | —                 | —                        | —                        | —                     |

为准,按照式(4)求出每种植物的综合评价指数  $B$ ,进而按照质量分级标准得出每种植物的质量级别(表 3、表 4)。

通过表 3、表 4 的评价结果可以看出,在高陡岩质边坡生态修复栽植的 14 种植物中,属于 I 级的植物有 4 种,占比 28.5%,分别有侧柏、圆柏、黄栌和刺槐;属

表 3 章丘试验场植物综合评价指数表  
Table 3 Comprehensive evaluation index of plants in Zhangqiu experimental field

| 植物分类  | 植物名称  | 评价因子  |       |       |       | $B$   | 质量分数 $M$ | 所属级别 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|------|
|       |       | $B_1$ | $B_2$ | $B_3$ | $B_4$ |       |          |      |
| 常绿植物  | 侧柏    | 1.875 | 1.25  | 0.625 | 1.00  | 4.750 | 95.0     | I    |
|       | 大叶扶芳藤 | 1.875 | 1.25  | 0.375 | 0.00  | 3.500 | 70.0     | II   |
|       | 白皮松   | 1.875 | 0.75  | 0.125 | 1.00  | 3.750 | 75.0     | III  |
| 落叶植物  | 黄栌    | 1.875 | 1.00  | 0.625 | 1.25  | 4.750 | 95.0     | I    |
|       | 刺槐    | 1.875 | 1.25  | 0.625 | 1.25  | 5.000 | 100.0    | I    |
|       | 连翘    | 1.500 | 1.00  | 0.125 | 0.75  | 3.375 | 67.5     | II   |
|       | 丁香    | 1.125 | 0.75  | 0.375 | 1.00  | 3.250 | 65.0     | III  |
| 藤本类植物 | 爬山虎   | 1.500 | 1.25  | 0.625 | 0.00  | 3.375 | 67.5     | II   |
|       | 凌霄    | 0.375 | 1.25  | 0.500 | 0.00  | 2.125 | 42.5     | IV   |
|       | 紫藤    | 0.375 | 1.25  | 0.625 | 0.00  | 2.250 | 45.0     | IV   |

注:  $B_1$ 成活率分值;  $B_2$ 高度年均增长率分值;  $B_3$ 基径年均增长率分值;  $B_4$ 冠幅年均增长率分值。

表 4 平阴试验场植物综合评价指数表  
Table 4 Comprehensive evaluation index of plants in Pingyin experimental field

| 植物分类  | 植物名称  | 评价因子  |       |       |       | $B$   | 质量分数 $M$ | 所属级别 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|------|
|       |       | $B_1$ | $B_2$ | $B_3$ | $B_4$ |       |          |      |
| 常绿植物  | 侧柏    | 1.875 | 1.25  | 0.625 | 1.00  | 4.750 | 95.0     | I    |
|       | 圆柏    | 1.875 | 1.25  | 0.625 | 1.25  | 5.000 | 100.0    | I    |
|       | 大叶扶芳藤 | 1.875 | 1.25  | 0.625 | 0.00  | 3.750 | 75.0     | II   |
| 落叶植物  | 黄栌    | 1.500 | 1.00  | 0.625 | 1.25  | 4.375 | 87.5     | I    |
|       | 火炬树   | 1.500 | 0.25  | 0.500 | 0.25  | 2.500 | 50.0     | IV   |
|       | 刺槐    | 1.500 | 1.00  | 0.625 | 1.00  | 4.125 | 82.5     | I    |
|       | 连翘    | 1.875 | 0.75  | 0.375 | 0.50  | 3.500 | 70.0     | II   |
| 藤本类植物 | 金银花   | 1.125 | 1.25  | 0.625 | 0.00  | 3.000 | 60.0     | III  |
|       | 小叶扶芳藤 | 0.375 | 0.75  | 0.625 | 0.00  | 1.750 | 35.0     | IV   |
|       | 爬山虎   | 1.500 | 1.25  | 0.625 | 0.00  | 3.375 | 67.5     | II   |

注:  $B_1$ 成活率分值;  $B_2$ 高度年均增长率分值;  $B_3$ 基径年均增长率分值;  $B_4$ 冠幅年均增长率分值。



于 II 级的植物有 3 种, 占比 21.5%, 分别是大叶扶芳藤、连翘和爬山虎; 属于 III 级的植物有 3 种, 占比 21.5%, 分别有白皮松、丁香和金银花; 属于 IV 级的植物有 4 种, 占比 28.5%, 分别是凌霄、紫藤、小叶扶芳藤和火炬树。

本次统计中藤本类植物未统计冠幅, 导致质量分级偏低, 因此藤本类植物的综合评价指数较其他类植物偏小, 在先锋植物遴选中需考虑实际调查情况。

结合 2 个试验场的现场调查、监测情况和评价结果得出, 常绿植物中优选侧柏、圆柏、大叶扶芳藤为先锋植物; 落叶植物中优选刺槐、黄栌、连翘为先锋植物; 藤本类植物中优选爬山虎为先锋植物。

#### 4 结论

通过对济南地区 2 个石灰岩质高陡边坡生态修复试验场种植的 14 种植物的成活率和生长状况监测的数据分析, 表明:

(1) 高陡边坡生态修复效果与绿化植物的科学选择及合理配置至关重要, 为了提高生态系统的完整性, 苗木选择要综合考虑常绿植物、落叶植物及藤本类植物。

(2) 采用地境再造技术开展高陡岩质边坡生态修复时, 植物主要依靠发达的根系从岩壁裂隙中吸收可供自身生长的养分, 随着植物不断长大其增长率逐渐降低的主要原因是岩质边坡对植物生长产生了“胁迫”作用。

(3) 在华北地区石灰岩质高陡边坡生态修复中, 为了在冬季有一定的绿化效果, 常绿植物优选侧柏、圆柏及大叶扶芳藤作为先锋植物; 因成活率高, 生长速度快, 坡面覆盖度高, 落叶植物建议优选刺槐、黄栌和连翘为先锋植物; 藤本类植物爬山虎因其成活率高且生长速率快, 可在短期对高陡岩壁有效覆盖, 优选作为先锋植物。

#### 参考文献(References):

- [1] 张进德, 郝富瑞. 我国废弃矿山生态修复研究 [J]. 生态学报, 2020, 40(21): 7921–7930. [ZHANG Jinde, XI Furui. Study on ecological restoration of abandoned mines in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(21): 7921–7930. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 李富平, 贾滢斐, 夏冬, 等. 石矿迹地生态修复技术研究现状与发展趋势 [J]. 金属矿山, 2021(1): 168–184. [LI Fuping, JIA Yufei, XIA Dong, et al. Study status and development trends of ecological restoration techniques in abandoned quarry [J]. Metal Mine, 2021(1): 168–184. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 张进德, 田磊, 裴圣良. 矿山水土污染与防治对策研究 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(2): 157–163. [ZHANG Jinde, TIAN Lei, PEI Shengliang. A discussion of soil and water pollution and control countermeasures in mining area of China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(2): 157–163. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 成少平, 谷海红, 宋文, 等. 基于遥感信息的矿区生态扰动监测研究——以迁安市为例 [J]. 金属矿山, 2021(5): 182–189. [CHENG Shaoping, GU Haihong, SONG Wen, et al. Study on the ecological disturbance monitoring in mining area based on remote sensing information: taking Qian'an City as an example [J]. Metal Mine, 2021(5): 182–189. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 张海珍, 王琳, 聂清莉. 基于干扰理论的重庆市关闭煤矿废弃地生态修复策略与方法研究 [J]. 矿业安全与环保, 2020, 47(4): 122–126. [ZHANG Haizhen, WANG Lin, NIE Qingli. Study on the ecological restoration strategy and method of closed coal mine wasteland in Chongqing based on interference theory [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2020, 47(4): 122–126. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 王娜, 田磊, 文可戈, 等. 基于遥感技术的矿山生态修复调查研究——以冀东铁矿为例 [J]. 金属矿山, 2021(10): 192–198. [WANG Na, TIAN Lei, WEN Kege, et al. Mine environment investigation and research based on remote sensing technology: A case study of the Jidong iron mine [J]. Metal Mine, 2021(10): 192–198. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 李建中. 经济下行压力下的生态修复产业化问题研究 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(1): 181–184. [LI Jianzhong. Study on the industrialization of ecological restoration under the downward pressure of economy [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(1): 181–184. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 刘育平, 关凤峻. 论矿山生态修复的投融资模式 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(3): 194–197. [LIU Yuping, GUAN Fengjun. Discussion on the investment and financing mode of mine ecological restoration [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(3): 194–197. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 顾晓薇, 张延年, 张伟峰, 等. 大宗工业固废高值建材化利用研究现状与展望 [J]. 金属矿山, 2022(1): 2–13. [GU Xiaowei, ZHANG Yannian, ZHANG Weifeng, et al. Research status and prospect of high value building materials utilization of bulk industrial solid waste [J]. Metal Mine, 2022(1): 2–13. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 喻永祥, 何伟, 李勇, 等. 雪浪山横山寺西侧顺层岩质高边坡变形破坏机理与治理方案分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(2): 33–43. [YU Yongxiang, HE

- Wei, LI Yong, et al. Stability evaluation and treatment measure study of high bedding rock slope on the west side of Hengshan Temple in Xuelang Mountain [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(2): 33–43. (in Chinese with English abstract)
- [11] 张家明, 陈积普, 杨继清, 等. 中国岩质边坡植被护坡技术研究进展 [J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 1–7. [ZHANG Jiaming, CHEN Jipu, YANG Jiqing, et al. Advances in biological protection of rock slopes in China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(5): 1–7. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 喻永祥, 郝社锋, 蒋波, 等. 基于聚氨酯复合基材的岩质边坡客土生态修复试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(2): 174–181. [YU Yongxiang, HAO Shefeng, JIANG Bo, et al. An experimental study of the ecological restoration of rock slope based on polyurethane composite-based materials [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(2): 174–181. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 叶珊珊, 张进德, 潘莉, 等. 基于“绿色矿山”的矿区生态环境成本核算——以华北平原某矿区为例 [J]. 金属矿山, 2019(4): 168–174. [YE Shanshan, ZHANG Jinde, PAN Li, et al. Ecological environmental cost accounting of mining area based on the green mine: A case from a mining area in the North China plain [J]. Metal Mine, 2019(4): 168–174. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 刘建, 彭府华, 王春毅, 等. 多级框架锚索与微型抗滑桩群组合加固边坡技术 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(2): 87–93. [LIU Jian, PENG Fuhua, WANG Chunyi, et al. Application of slope reinforcement technology of combination of multi-level lattice beams with pre-stressed anchor cable and anti-slide micropiles [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(2): 87–93. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 范明明, 裴向军, 杜杰, 等. 改性糯米灰浆的室内研究及在九寨沟钙华地质裂缝修复中的应用 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 183–190. [FAN Mingming, PEI Xiangjun, DU Jie, et al. A laboratory study of modified glutinous rice mortar and its application to repair travertine geological cracks in Jiuzhaigou [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 183–190. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 宋建伟, 刘硕, 袁运许, 等. 铁尾矿植被混凝土配制及其植物适宜性研究 [J]. 金属矿山, 2021(8): 170–177. [SONG Jianwei, LIU Shuo, YUAN Yunxu, et al. Study on the preparation of iron tailings vegetation concrete and its plant suitability [J]. Metal Mine, 2021(8): 170–177. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 宋京雷, 何伟, 郝社锋, 等. 岩质边坡表层黏性客土抗裂特性试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(3): 144–149. [SONG Jinglei, HE Wei, HAO Shefeng, et al. An experimental study of the anti-cracking characteristics of foreign-clay based on rock slope [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(3): 144–149. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 贺军亮, 韦锐, 李丽, 等. 基于时间序列植被指数资料的承德市植被覆盖时空演变分析 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(6): 91–98. [HE Junliang, WEI Rui, LI Li, et al. Temporal and spatial evolution of vegetation cover in Chengde based on time series NDVI data [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(6): 91–98. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 汪芳琳, 宋火保, 王风芹. 升金湖湿地生物多样性及其保护对策研究 [J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2020, 22(4): 120–124. [WANG Fanglin, SONG Huobao, WANG Fengqin. Study on biodiversity characteristics of Shengjin Lake wetland and its conservation strategies [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2020, 22(4): 120–124. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 迟晓杰, 谷海红, 李富平, 等. 重金属污染土壤植物修复效果评价方法——高光谱遥感 [J]. 金属矿山, 2019(1): 16–23. [CHI Xiaojie, GU Haihong, LI Fuping, et al. Evaluation method for phytoremediation effect of heavy metal contaminated soil: Hyperspectral remote sensing [J]. Metal Mine, 2019(1): 16–23. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 祝琨. 矿山土地复垦不同压实密度土壤中菌根作用机理及生态效应研究 [J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(4): 28–32. [ZHU Kun. Study on mycorrhizal mechanism and ecological effect of different compaction density soil in mine land reclamation [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2021, 48(4): 28–32. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 张沛沛, 余洋. 采煤沉陷对土壤团聚体及其有机碳的影响 [J]. 金属矿山, 2020(12): 203–209. [ZHANG Peipei, YU Yang. Effects of coal mining subsidence on soil aggregates and organic carbon [J]. Metal Mine, 2020(12): 203–209. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 唐志尧, 刘鸿雁. 华北地区植物群落的分布格局及构建机制 [J]. 植物生态学报, 2019, 43(9): 729–731. [TANG Zhiyao, LIU Hongyan. Distribution patterns and assembly mechanisms of plant communities in North China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2019, 43(9): 729–731. (in Chinese)]
- [24] 徐恒力, 孙自永, 马瑞. 植物地境及物种地境稳定层 [J]. 地球科学, 2004, 29(2): 239–246. [XU Hengli, SUN Ziyong, MA Rui. Plant below-ground habitat and stable layer of plant species in habitat [J]. Earth Science, 2004, 29(2): 239–

246. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 25 ] 尚红, 梁彩彤, 任姿洁, 等. 3种耐逆植物在济南山体生态修复中的应用 [ J ]. *安徽农业科学*, 2018, 46(35): 188 – 190. [ SHANG Hong, LIANG Caitong, REN Zijie, et al. Application of three kinds of adverse-resistant plants in mountain ecological restoration in Jinan [ J ]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(35): 188 – 190. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 26 ] 武朝菊, 李建东. 浅析济南地区破损山体治理规划设计中植物配置的应用原则 [ J ]. *山东林业科技*, 2008, 38(2): 94 – 95. [ WU Zhaoju, LI Jiandong. Analysis on the application principles of plant configuration in the treatment planning and design of damaged mountain in Jinan area [ J ]. *Journal of Shandong Forestry Science and Technology*, 2008, 38(2): 94 – 95. (in Chinese) ]
- [ 27 ] 王荷生. 华北植物区系的演变和来源 [ J ]. *地理学报*, 1999, 54(3): 213 – 223. [ WANG Hesheng. The evolution and sources of North China's flora [ J ]. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(3): 213 – 223. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 28 ] 柴永福, 许金石, 刘鸿雁, 等. 华北地区主要灌丛群落物种组成及系统发育结构特征 [ J ]. *植物生态学报*, 2019, 43(9): 793 – 805. [ CHAI Yongfu, XU Jinshi, LIU Hongyan, et al. Species composition and phylogenetic structure of major shrublands in North China [ J ]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2019, 43(9): 793 – 805. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 29 ] 张杨, 冯文新, 董宏炳, 等. 高陡岩质边坡覆绿植物生态需水量计算 [ J ]. *安全与环境工程*, 2019, 26(6): 23 – 28. [ ZHANG Yang, FENG Wenxin, DONG Hongbing, et al. Calculation of ecological water demand of reforestation plants in high-steep rock slopes [ J ]. *Safety and Environmental Engineering*, 2019, 26(6): 23 – 28. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 30 ] 白冰珂, 赵国红, 尹峰, 等. 高陡岩质边坡覆绿植物成活的生态因子分析——以安庆市大龙山集贤关为例 [ J ]. *安全与环境工程*, 2019, 26(5): 33 – 39. [ BAI Bingke, ZHAO Guohong, YIN Feng, et al. Ecological factor analysis of vegetation restoration on the high and steep rock slope: Taking jixianguan, Dalongshan, Anqing City as an example [ J ]. *Safety and Environmental Engineering*, 2019, 26(5): 33 – 39. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 31 ] 周华健, 冯文新, 赵国红, 等. 黄栌在高陡岩质边坡覆绿中的环境适应特征 [ J ]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2019, 42(5): 60 – 64. [ ZHOU Huajian, FENG Wenxin, ZHAO Guohong, et al. Environmental adaptation characteristics of cotinus coggygia in high and steep rock slopes greening [ J ]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2019, 42(5): 60 – 64. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 32 ] 许由才. 47年生红豆树人工林生长量与林下植物多样性研究 [ J ]. *林业勘察设计*, 2016, 36(3): 86 – 89. [ XU Youcai. Study on the growth of 47-year-old red bean plantation and the diversity of underforest plants [ J ]. *Forestry Prospect and Design*, 2016, 36(3): 86 – 89. (in Chinese) ]
- [ 33 ] 刘大川, 周磊, 武建军. 干旱对华北地区植被变化的影响 [ J ]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(2): 222 – 228. [ LIU Dachuan, ZHOU Lei, WU Jianjun. Drought impacts on vegetation changes in North China [ J ]. *Journal of Beijing Normal University ( Natural Science )*, 2017, 53(2): 222 – 228. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 34 ] 李金航, 徐程扬, 朱济友, 等. 黄栌幼苗在持续干旱胁迫环境中的表型适应对策 [ J ]. *西北林学院学报*, 2019, 34(2): 28 – 34. [ LI Jinhang, XU Chengyang, ZHU Jiyou, et al. Phenotypic adaptation strategy of cotinus coggygia seedlings in continuous drought environments [ J ]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34(2): 28 – 34. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 35 ] 黄安文, 林立, 秦坤蓉, 等. 基于综合评价指数法的城市道路植物配置模式评价及优化研究——以自贡市城市建成区为例 [ J ]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2021, 43(3): 156 – 166. [ HUANG Anwen, LIN Li, QIN Kunrong, et al. Research on evaluation and optimization of the allocation model of urban road plants based on the comprehensive evaluation index method: A case study of the urban built-up area of Zigong City [ J ]. *Journal of Southwest University ( Natural Science Edition )*, 2021, 43(3): 156 – 166. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 36 ] 韩轶华, 刘艳红. 基于综合评价指数法的城市道路绿化植物景观配置评价研究——以运城市盐湖区为例 [ J ]. *林业调查规划*, 2019, 44(3): 213 – 219. [ HAN Yihua, LIU Yanhong. Evaluation for plant landscape configuration of urban road based on comprehensive evaluation index method: A case study of Yanhu District in Yuncheng City [ J ]. *Forest Inventory and Planning*, 2019, 44(3): 213 – 219. (in Chinese with English abstract) ]