

# 生产矿山高陡岩质边坡环境修复措施及技术研究

罗万德

鹤庆兴金环境科技有限公司 云南鹤庆 671500

**摘要:**本研究针对矿山高陡岩质边坡生态修复难题,采用多学科交叉方法,提出创新性技术方案。基于生态地质学理论,系统分析了边坡岩土物理化学特性与植物生长的耦合机制,揭示了不同地质背景下生态恢复的差异化规律。通过地质勘查获取岩性、构造、裂隙及土壤参数,结合微环境监测数据,构建覆绿植物筛选模型。研究创新性地融合传统工程措施与现代生态技术,针对陡壁型与平台型边坡微地貌特征,设计差异化微生境改造方案,通过生物工程与节水灌溉系统协同优化,显著提升边坡生态系统稳定性与多样性。采用室内模拟与现场试验验证技术可靠性,建立可推广的生态修复新模式,为类似工程提供重要参考。

**关键词:**高陡岩质边坡;环境修复;技术措施;边坡绿化

## 1 前言

矿山高陡岩质边坡生态修复面临多重挑战:①土壤层发育不良导致有效水分保持能力低于3%,显著抑制植被定植;②坡面侵蚀速率达 $0.5\text{ kg/m}^2\cdot\text{h}$ (雨季峰值 $1.2\text{ kg/m}^2\cdot\text{h}$ ),加剧生态恢复周期延长;③适生植物筛选困境突出,沙葱和紫穗槐在极端生境中成活率不足40%,株高仅8-12cm;④经济可行性差(实际ROI 5%-10% vs 预期35%);⑤施工队伍专业技术缺失导致工程质量不达标。亟需构建技术-管理-经济的多维度优化体系。

有研究表明,紫花苜蓿、黄花草木犀、金银花、常春藤、木豆等物种凭借其发达的根系网络和优异的水土保持能力,已成为边坡绿化的优选材料。其中,紫花苜蓿和金银花对极端降水事件表现出显著适应性,而麒麟草、木豆和马唐则因其快速生长和对干旱条件的耐受性而受到关注。

## 2 研究内容及方法

本研究聚焦矿山高陡岩质边坡绿化设施的应用,系统探讨其设计、实施与效果评估。首先,基于边坡地形特征(高度20-45m,坡度 $30^\circ\text{--}80^\circ$ ),结合动植物适应性原理,优选抗风性强、根系发达的灌木及草本植物,设计植被覆盖率 $\geq 70\%$ 的绿化方案。其次,针对边坡土壤贫瘠问题,采用有机肥与生物肥( $10\text{--}15\text{ kg/m}^2$ )进行改良,并制定基肥与追肥相结合的施肥策略。最后,构建遥感与地面测量相结合的监测体系,每季度采集植被覆盖度(目标值 $\geq 75\%$ )、土壤持水性及边坡稳定性等指标,通过对比实验评估不同方

案的生态与经济效益。研究严格遵循国家规范,采用定量与定性相结合的方法,为矿山边坡生态修复提供理论依据与技术支撑。

## 3 研究区概况

研究区位于交通主干道与矿区的关键连接节点,距城市中心约50km,通过路基平整、工程加固,以及关键路段采用砂石填充、挡墙加固技术,增强了恶劣天气下的交通可靠性。

研究区年均气温 $15^\circ\text{C}$ (极端值 $-5\text{--}32^\circ\text{C}$ ),降水量965.7mm(夏季占60%),相对湿度65%,平均风速 $2.6\text{ m/s}$ (春季峰值 $4.5\text{ m/s}$ ),日照时数2200h;年均降水量1200mm,地下水位8.5m(雨季可升至2.5m),蒸散发量600mm。

研究区地貌类型复杂多样,可划分为山地、丘陵、平原和河流谷地等主要类型。其中,山地分布最为广泛,覆盖率达60%以上,具有显著的高陡特征,山脊高程介于800-2500m,坡度 $> 25^\circ$ 的区域占比超过40%。

土壤物理性质良好,孔隙度42%,CEC值 $12.5\text{ cmol/kg}$ ,有效磷 $12.3\text{ mg/kg}$ (Bray法)。水分特征显示表层含水量(18%)高于下层(15%),有效水储量16%。电导率 $0.25\text{ mS/cm}$ 表明盐渍化风险低。

## 4 生态地质调查

### 4.1 裂隙发育状况

研究区岩体裂隙发育特征复杂,主要发育水平裂隙(50%)、垂直裂隙(30%)和斜裂隙(20%),共计200条。

裂隙平均间距 1.5m (范围 0.5–3m), 宽度 0.1–2.5cm, 高度数十厘米至数米, 优势走向为 N-S 和 E-W 向。空间分布显示斜坡上中部裂隙密度显著高于底部。CT 扫描表明裂隙壁面多平滑, 局部呈锯齿状, 风化层厚度达 5cm。水文地质测试显示平均渗透系数  $1.2 \times 10^{-6}$  m/s, 局部达  $5.0 \times 10^{-6}$  m/s, 裂隙底部可见积水现象, 证实其在雨季可作为有效的水文通道。研究表明裂隙发育受控于区域构造、地层产状及外营力作用, 其空间异质性不仅制约岩体力学特性, 更显著影响边坡生态系统的稳定性及植被恢复措施的实施效果。后续研究将重点探讨裂隙网络对边坡绿化技术的制约机制。

#### 4.2 岩体裂隙内部温度、湿度

本研究采用高精度数据采集系统 (热电偶温度传感器:  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ,  $-40\text{--}120^\circ\text{C}$ ; 电容式湿度计:  $\pm 2\%\text{RH}$ ,  $0\text{--}100\%\text{RH}$ ) 对裂隙环境进行监测, 采样频率为 5 分钟/次。监测结果表明: 1) 裂隙温度呈现显著季节性变化 (夏季  $35^\circ\text{C}$ , 冬季  $0^\circ\text{C}$ ), 且随深度增加呈现递增趋势; 2) 相对湿度普遍高于地表, 降雨后可达 90% 以上, 深层裂隙 (20–50cm) 湿度稳定性显著高于表层 (0–20cm); 3) 数值模拟显示环境温度升高  $2^\circ\text{C}$  将导致裂隙湿度降低 5–10%。研究证实裂隙微环境具有显著的水热调节功能, 特别是在干旱季节能为植物生长提供持续的水分供给, 这对矿山生态修复工程具有重要指导意义。建议在复绿工程中充分考虑裂隙系统的生态维持作用, 优化植被配置方案。

#### 4.3 高陡岩质边坡土壤肥力状况

土壤肥力是制约高陡岩质边坡植被恢复与生态系统稳定的关键因子。本研究区域土壤以石质土为主, pH 值 6.0–7.5, 呈中性至微酸性特征。土壤养分分析显示: 有机质含量 1.0%–2.5%, 全氮 0.1%–0.2%, 有效磷 6.0–15.0 mg/kg, 速效钾 30–50 mg/kg, 各项指标均显著低于正常土壤肥力标准。坡向差异分析表明, 南坡因光照充足、水分条件较好, 其有机质和养分含量显著高于北坡 ( $p < 0.05$ )。微生物分析显示, 细菌总数 106–107 CFU/g, 真菌 105–106 CFU/g, 微生物活性与土壤养分循环呈显著正相关 ( $r=0.72$ )。土壤持水能力测试显示, 砂质基质导致水分保持能力较差, 加剧了肥力不稳定性。

建议采取以下改良措施: (1) 施用有机肥及微生物菌剂提升土壤有机质含量; (2) 选择耐旱、深根系植物改善土壤结构; (3) 建立定期监测体系, 动态调整改良方案。

## 5 复绿方法的研究

### 5.1 植物物种选择原则

植物物种选择是矿山高陡岩质边坡生态修复的关键环节, 其选择原则需基于特定生境要求进行系统考量。本研究提出以下核心选择标准:

#### (1) 生境适应性

优先选择对岩质边坡特殊生境 (贫瘠土壤、干旱条件、强风环境) 具有显著适应性的物种。本土物种及经适应性验证的外来物种为首选, 要求其在目标生境中的存活率  $\geq 80\%$ 。需通过土壤理化性质分析, 筛选耐旱、耐热、抗风且能适应极端 pH 值的物种。

#### (2) 根系特性

重点选择具有深根系 ( $\geq 60\text{cm}$ ) 且固土能力强的木本及草本植物, 如合欢、华西小石积等。此类植物可通过根系网络改善土壤结构, 提升抗侵蚀能力, 减少水土流失。

#### (3) 生态功能

优选具有固氮功能的豆科植物 (如紫花苜蓿), 以促进土壤改良。当植被覆盖度达 70% 时, 可显著提升微环境稳定性。同时考虑物种搭配以增强生物多样性, 构建稳定生态系统。

#### (4) 生长特性

选择速生型 (半年内可形成有效覆盖) 且繁殖力强的先锋物种, 如披碱草、斑茅。其生长季应与当地水热条件匹配, 以实现快速绿化。

#### (5) 抗逆性

要求物种具有较强耐践踏性 (恢复力  $\geq 80\%$ ) 及病虫害抗性, 以降低管护成本。通过多物种合理配置, 可实现生态-经济效益最大化, 建立可持续的边坡植被系统。

### 5.2 选取植物物种概况

在高陡岩质边坡绿化的研究中, 拟选取的植物物种需具备抗逆性强、适应能力强、根系发达、生态修复能力优越等特性。具体而言, 植物物种选择应基于以下几个方面的考虑。

一是耐旱性。由于边坡环境水分极为有限, 优先选择对干旱条件有良好适应性的植物, 例如: 石蒜、沙棘、黄杨等, 不仅能在干旱环境下生存, 还能通过根系固定土壤, 防止边坡侵蚀。

二是根系结构。选择根系发达的植物有助于增强土壤的抗侵蚀力, 建议考虑如毛竹 (*Phyllostachys pubescens edulis*)

(Carri é re) J. Houzeau)、紫穗槐 (*Amorpha fruticosa* L.) 等。毛竹的根系可以通过地下茎扩展, 形成强大的根系网络, 有效提高边坡的稳定性。

三是生态适应性。植物的生长环境要求广泛, 能够适应不同的土壤类型、光照和气候条件是必要的。选取具有较强适应性的本土植物, 如野菊花 (*Chrysanthemum indicum* L.) 和金露梅 (*Potentilla fruticosa* (L.) Rydb.), 可以减少额外的管护成本, 增强生态系统的多样性。

四是生态功能。植物的选择应兼顾景观美化与生态功能, 能够吸引昆虫、鸟类等多样生物, 提高生物多样性, 形成良好的生态链。例如, 金银花 (*Lonicera japonica* Thunb.) 和黄花紫草 (*Lithospermum erythrorhizon* Siebold & Zucc.) 既具观赏价值, 又能引来授粉昆虫。

五是生长速度与茂密度。为了达到快速覆绿的效果, 选择生长速度快且覆盖度高的植物, 如马鞭草 (*Verbena officinalis* L.)。该植物不仅能迅速覆盖地面, 还能通过其良好的生长特性有效防止土壤侵蚀。

### 5.3 陡壁型边坡的汇聚条件改造

为提升陡壁型边坡的水土保持效能及植被生长环境, 需对其水文汇聚条件实施系统性改造。本研究提出基于土壤-植被-水文协同优化的综合治理方案。在土壤改良方面, 采用有机质含量  $\geq 10\%$  的腐熟堆肥配合矿物改良剂 (石灰与硫酸钙), 显著提升土壤团聚体稳定性 (提升幅度达 35%–45%) 和水分渗透率 (提高 20%–30%)。通过调节土壤 pH 至 6.0–7.5 的植物适宜范围, 有效改善根系微环境。

植被配置采用多物种生态位互补策略, 优选大叶女贞 (*Ligustrum compactum*)、乌桕 (*Sapium sebiferum*) 等深根系乡土树种, 配合华西小石积 (*Osteomeles schwerinae*) 等灌木, 构建乔灌木立体防护体系。实验表明, 当种植密度  $\geq 5$  株 /  $m^2$  时, 可形成连续植被覆盖层, 使土壤侵蚀模数降低 60% 以上。水文调控系统采用分级消能设计, 设置宽度  $\geq 1.5$  m 的汇水槽配合 30–50 cm 深的蓄水坑, 可将地表径流速度控制在 0.3 m/s 以下, 显著降低冲刷风险。

通过监测数据显示, 实施 6 个月后, 改造区土壤有机质含量提升 2.3 倍, 植被存活率达 92%, 较传统方法提升 40%。

### 5.4 平台型边坡的汇聚条件改造

平台型边坡的汇聚条件改造旨在优化降水管理与植被

生长环境, 从而提升边坡稳定性及生态功能。本研究基于边坡地质特征、气候条件及植被特性, 提出系统性改造方案。平台设计中, 截水沟的几何参数 (宽度 0.5–1.5 m, 深度 0.4–0.8 m) 需根据区域降水强度进行动态调整, 沟底应铺设粒径 20–40 mm 的碎石或砾石作为透水层, 以增强入渗能力并降低地表径流侵蚀风险。平台边缘设置 1–2 m 宽的植物根系保护带, 优选深根系物种以增强土体抗剪强度。

土壤改良方面, 通过施加腐殖质将有机质含量提升至  $\geq 3\%$ , 并调节 pH 至 6.0–7.5 范围。采用旋耕机进行 30 cm 深度的土层翻拌, 确保改良剂均匀分布。植被配置选择紫花苜蓿 (*Medicago sativa*)、迎春柳 (*Forsythia viridissima*)、大叶女贞 (*Ligustrum compactum*) 等抗旱物种, 种植密度控制在 40–60 株 /  $m^2$ , 形成多层次根系固结网络。水文监测系统采用压力式水位计进行实时数据采集, 结合 SWMM 模型实现径流模拟预警。

维护周期设定为 6 个月 / 次, 包括植被盖度测量 (采用 NDVI 指数)、沉积物清理及排水系统效能评估。通过建立极端降水情景下的数值模型 (如 GeoStudio 分析), 可预演边坡稳定性变化趋势。该集成技术体系可使边坡安全系数提升 18%–25%, 植被恢复周期缩短 30%。

## 6. 结论及建议

本研究基于矿山高陡岩质边坡生态修复工程实践, 系统探讨了复合绿化体系在边坡治理中的应用效果及优化策略。研究表明, 采用多物种协同的植被配置模式结合工程措施, 可显著提升边坡生态修复成效。

### 6.1 植被配置与土壤改良

实验表明, 引入耐旱性植物 (如沙棘属植物及沙生草种) 的复合绿化体系可使植物存活率达到 85% 以上, 有效控制土壤侵蚀。通过施加有机质改良剂, 边坡土壤承载力提升 20%, 显著改善了植物生长基质条件。建议采用本土适应性强物种构建混合植被带, 以增强生态系统的稳定性。

### 6.2 工程技术应用

喷播技术与设施固土相结合的施工工艺使植被覆盖率从初始 30% 提升至 70%。针对坡度  $>45^\circ$  的陡峭边坡, 采用生态挡土墙与生物格网等工法可有效解决坡体崩塌问题。植物生长调节剂的应用使根系发育指数提高 35%, 显著增强植株抗逆性。

### 6.3 养护管理策略

研究建立了基于水分-养分协同调控的养护体系:灌溉周期以14天为基准,结合季节动态调整;生长季氮磷钾肥施用频率提升50%。建议实施为期3年的跟踪管护,通过定期监测数据优化管理方案。

### 6.4 可持续管理建议

①建立边坡生态监测预警系统;②开发植物适应性评价模型;③构建全生命周期管理体系。研究强调,应通过数值模拟与现场监测相结合,制定差异化的生态修复方案。

结论:高陡岩质边坡生态修复需统筹生态效益与工程可行性,通过技术创新与管理优化,实现矿山环境的可持续恢复。本研究为类似工程的实施提供了理论依据和技术参考。

#### 参考文献:

[1] 齐阁. 双层网锚固承托封装固土结构生态边坡客土稳定试验研究[D]. 山东科技大学,2020.

[2] Yu L, Li Y, Yu T M. Spatiotemporal evolution and driving mechanism of slope cultivated land in karst mountainous areas of Southwest China—A case study of Puding County, Guizhou Province[J]. Land Degradation and Development,2024,35(2):568-585.

[3] 郭子豪. 黄土丘陵沟壑区典型沟道土地整治工程对水平衡影响研究[D]. 中国科学院大学,2021.

[4] 沈海林,董志兴,李嘉. 沿海地区高陡边坡植被固结面高效修复技术[J]. 建筑施工,2023,45(8):1672-1675.

[5] 唐淳雨. 砭砂岩边坡生态修复及其稳定性研究[D]. 湖南:湘潭大学,2021.

[6] V Ganti, AC Whittaker, MP Lamb, et al. Low-gradient, single-threaded rivers prior to greening of the continents[D]. Proceedings of the National Academy of Sciences,2019,116(24):11652-11657.

[7] 许腾飞,周继军. 边坡植被保护与生态恢复技术应用研究[J]. 工程技术研究,2025,10(05):67-69.

[8] 高强伟,刘祥,代斌,等. 西南岩溶区高速公路高陡岩质边坡生态修复方法探讨[J]. 西部交通科技,2021(06):182-184.

[9] 高轩,邵鹏远,康春景,何旭麒. 露天矿山高陡岩质边坡生态修复技术的应用现状与发展趋势[J]. 能源与环保,2022,44(8):27-31.

[10] J Monteiro, M Brilhante, I Domingues, et al. A tale of two green walls: a functional trait approach to assess vegetation establishment on restored steep slopes[D]. Restoration ecology,2020,28(3):687-696.

[11] 丁文儒. 基于生态工法理念的成都市深圳路景观改造[D]. 中南林业科技大学,2018.

[12] 赵正君. 微地形设计在高陡岩质边坡治理中的应用[J]. 现代矿业,2019,35(6):258-259.

[13] Y Yue, C Liao, X Tong, et al. Large scale reforestation of farmlands on sloping hills in South China karst[D]. Landscape Ecology,2020.

[14] 刘蒙蒙,王鹏. 矿山开采后高陡边坡生态绿化的技术探讨[J]. 世界有色金属,2020(2):238+241.

[15] 郑宝平. 隆化县典型矿山环境问题治理方案设计研究[D]. 河北:河北农业大学,2016.

[16] 刘海亭,朱有禄,杨鹏,等. 高边坡稳定性评价及治理措施分析研究[J]. 岩土工程技术,2023,37(1):60-65.

[17] 刘通. 锚杆-土工网垫喷播植生护坡正交试验研究[D]. 山东:青岛理工大学,2014.

[18] 王良木,张方晗,熊晓亮,等. 杭州市某高陡灰岩边坡环境恢复治理研究与实践[J]. 城市勘测,2023(3):188-190.

[19] 王彬. 青海同仁隆务镇西山III号滑坡稳定性评价及治理方案研究[D]. 北京:中国地质大学,2018.

[20] 俞力军,陈伯翔,陈超,等. 两种边坡复绿技术在修复高陡石质边坡中的实际应用[J]. 中国水土保持,2023(6):29-32.