

矿山环境恢复及治理效果调查

——以云南昭通地区为例

赵滨滨, 尹红, 李唐燕, 杨丽敏

玉溪师范学院地理与国土工程学院, 云南 玉溪

收稿日期: 2026年3月13日; 录用日期: 2026年4月6日; 发布日期: 2026年4月13日

摘要

矿产资源露天开采易引发边坡失稳、植被退化等地质环境问题, 西南喀斯特山区生态脆弱, 矿山开发与生态保护矛盾突出, 科学开展恢复治理及效果评估是协同发展的关键。本文以昭通昆钢嘉华水泥建材有限公司大关寿山甘海石灰石矿为研究对象, 采用野外调查、资料收集与数理统计结合的方法, 梳理矿山开发概况与地质环境条件, 识别环境问题, 构建评价指标体系, 部署分区分阶段治理工程, 并定量验证成效。结果表明, 治理后矿山潜在不稳定边坡安全系数达标, 植被覆盖率从12.3%提升至47.6%, 水土流失量下降68.2%, 土地复垦率达72.5%, 综合环境风险降至低风险。本文的治理模式与评估方法, 可为西南喀斯特地区同类大型露天石灰石矿山环境修复提供实证参考。

关键词

矿山环境, 恢复治理, 效果评价, 石灰石矿, 云南昭通

Investigation on Mine Environmental Restoration and Governance Effect

—A Case Study of Zhaotong Region, Yunnan Province

Binbin Zhao, Hong Yin, Tangyan Li, Limin Yang

School of Geography and Land Engineering, Yuxi Normal University, Yuxi Yunnan

Received: March 13, 2026; accepted: April 6, 2026; published: April 13, 2026

Abstract

Open-pit mining of mineral resources is prone to cause geological environmental problems such as slope instability and vegetation degradation. The ecological environment in the southwestern karst mountainous area is fragile, and the contradiction between mining development and ecological

protection is prominent. Scientific restoration and evaluation of effects are the key to coordinated development. This paper takes the Dagan Shoushan Ganhai limestone mine of Zhaotong Kunsteel Jiahua Cement Building Materials Co., Ltd. as the research object. By using the methods of field investigation, data collection and mathematical statistics, it summarizes the overview of mining development and geological environmental conditions, identifies environmental problems, constructs an evaluation index system, deploys phased and segmented restoration projects, and quantitatively verifies the effectiveness. The results show that the safety factor of the potential unstable slopes of the mine has reached the standard, the vegetation coverage rate has increased from 12.3% to 47.6%, the amount of soil erosion has decreased by 68.2%, the land reclamation rate has reached 72.5%, and the comprehensive environmental risk has been reduced to a low risk. The restoration mode and evaluation method of this paper can provide empirical reference for the environmental restoration of similar large-scale open-pit limestone mines in the southwestern karst area.

Keywords

Mine Environment, Restoration and Governance, Effect Evaluation, Limestone Mine, Zhaotong, Yunnan

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 绪论

1.1. 研究背景与意义

我国西南地区是石灰岩矿产资源集中分布区，水泥用灰岩为区域基础设施建设提供核心原料支撑。大规模露天开采在满足经济发展需求的同时，持续改变地表形态、破坏岩土体结构与水文循环过程，诱发崩塌、滑坡、水土流失等地质灾害，造成生物栖息地破碎化与生态系统服务功能下降。云南省地处青藏高原东南缘，地质构造活跃、生态敏感度高，矿山地质环境保护与修复被纳入长江上游生态屏障建设总体布局。昭通市作为滇东北重要的建材原料生产基地，石灰石矿山数量多、分布广，部分矿山存在治理滞后、监测体系不完善、修复效果不稳固等问题，制约区域绿色发展。

开展矿山环境恢复治理及效果调查，能够精准识别地质环境损伤程度，为治理工程优化提供数据支撑。量化评估治理成效有助于建立“治理 - 监测 - 反馈 - 提升”的闭环管理机制，提升矿山企业环境保护主体责任落实效能。以大关寿山甘海石灰石矿为典型案例开展系统研究，可总结适用于喀斯特山区大型露天石灰石矿的治理技术体系与评价方法，为区域同类矿山提供可复制、可推广的实践范式，助力资源型地区实现生态效益、经济效益与社会效益协调统一。

1.2. 国内外研究现状

国外矿山环境治理起步较早，形成以立法约束、技术标准化、市场化运作为核心的管理体系。欧美发达国家建立完善的矿山环境恢复治理保证金制度，强调“边开采、边修复”，将生态修复纳入矿山生命周期全过程[1]。在技术层面，边坡稳定控制、土壤改良、乡土植物配置、水文系统修复等技术成熟度高，结合遥感与物联网技术实现长期动态监测，治理效果评估向量化、精细化方向发展。

国内矿山环境治理研究伴随生态文明建设推进快速发展，研究内容日益细化。在喀斯特地貌区矿山修复这一特定领域，已有研究揭示了岩溶区“土 - 水 - 植被”系统的高度耦合性与脆弱性，指出石漠化

与矿山开采的叠加效应会极大增加修复难度[2]。针对露天石灰石矿,学者们聚焦于其开采后形成的“石质陡坡面”这一特殊立地条件,开展了岩质边坡植被重建技术、限制性土壤改良、以及乡土耐旱耐瘠薄植物筛选等研究[3][4]。在效果评价方面,已有研究尝试构建了涵盖地质安全、生态质量和景观协调性的指标体系,并运用层次分析法、熵权-TOPSIS模型等开展量化评估[5]。然而,现有研究多集中于单一技术或短期成效的评价,针对西南喀斯特山区大型露天石灰石矿山,将系统性治理工程部署、长期动态监测与多指标综合成效评估进行深度融合的案例研究仍相对不足,特别是治理后生态系统自我维持能力和长期稳定性的跟踪研究亟待加强。

1.3. 研究内容与技术路线

本文以昭通昆钢嘉华大关寿山甘海石灰石矿为研究区,围绕环境恢复治理与效果评估展开系统研究。主要内容包括:查明矿山基本概况与开发历程,明确开采规模、范围与工艺参数;解析矿区地质环境条件,评价地质灾害、含水层、土地植被等要素受损程度;识别矿山开发引发的核心环境问题,划分治理分区;设计近期、中期、远期分阶段治理工程方案,配套监测预警体系;构建包含地质安全、生态环境、土地利用、水文条件的评价指标体系,结合实测数据开展治理效果定量评估;提出矿山可持续发展与绿色矿山建设优化路径。

研究采用资料收集、野外调查、室内试验、数理统计与模型分析相结合的技术路线。收集矿山地质资料、开采设计、环境方案等基础数据;开展野外地质填图、边坡测量、植被样方调查与水土样品采集;通过室内试验获取土壤、水质参数;运用数学方法构建评价模型,对治理前后数据进行对比分析;最终形成完整的治理效果调查报告与优化建议。

1.4. 数据来源与研究方法

基础数据来源于矿山地质环境保护与土地复垦方案、采矿权变更资料、矿山企业生产报告、野外实地调查数据及实验室检测结果。野外调查覆盖矿区全境,完成边坡测量点46个、土壤剖面12条、水质监测点8处、植被样方30个,获取连续12个月的动态监测数据。

研究方法包括:文献研究法,梳理矿山环境治理理论与技术进展;实地调查法,获取一手地质、环境、生态数据;统计分析法,对治理前后指标进行量化对比;模型评价法,构建综合评价模型开展效果评定[6];图表分析法,借助可视化手段直观呈现治理成效与空间分布特征。

2. 研究区概况

2.1. 矿区地理位置与交通

研究区为昭通昆钢嘉华水泥建材有限公司大关寿山甘海石灰石矿,位于大关县城正北方向,直线距离约10 km,行政区划隶属大关县寿山镇管辖。矿区地理坐标范围为东经 $103^{\circ}53'37''\sim 103^{\circ}54'07''$,北纬 $27^{\circ}54'53''\sim 27^{\circ}55'22''$,地处滇东北喀斯特山区中部,地形以中低山为主,地形起伏较大,地表切割较强。

矿区对外交通以公路为主,距离大关县城区公路里程约18 km,距离昭通市中心城区约70 km,区域交通条件可满足矿山生产物资运输与产品外运需求。矿区内部修建专用运输道路,连接采场、破碎站与排土场,道路体系基本覆盖生产作业区域,为环境治理工程实施提供交通保障。

2.2. 矿山开发概况

该矿山为水泥用石灰岩大型露天矿山,经历采矿权变更与生产规模调整。缩减后矿区面积为 0.3586 km^2 ,生产规模由原95万t/年提升至280万t/年,开采标高由原1400~1100 m调整为1384~1190 m,开采

方式为露天台阶式开采，开采境界明确，生产工艺成熟。

矿山开采流程包括穿孔、爆破、装载、运输、破碎等环节，配套建设排土场、截排水系统、工业场地等辅助设施。矿山开发以提供水泥原料为核心目标，服务于昭通及周边地区建材市场，对区域经济发展具有支撑作用。随着开采范围扩展与深度增加，地质环境承载压力持续上升，开展系统性恢复治理成为矿山可持续运营的必要条件。

2.3. 自然地理条件

矿区属亚热带季风气候，四季分明，雨热同期，年平均降水量约 900~1100 mm，降水集中于 5~9 月，强降雨过程易诱发边坡失稳与水土流失。区内海拔介于 1190~1384 m，相对高差约 194 m，地形坡度多在 15°~35°之间，局部地段坡度大于 40°，为地质灾害易发地形条件。

地表水系以季节性溪流为主，受降雨影响明显，枯水期流量较小，洪水期易形成短时径流。土壤类型以黄壤、石灰土为主，土层厚度较薄，保水保肥能力较弱，原生植被以亚热带常绿阔叶林与灌丛为主，受开采活动影响呈现退化趋势，生态自我修复能力有限。

2.4. 地质环境条件

矿区出露地层以三叠系石灰岩为主，岩性单一、质地坚硬，为优质水泥用灰岩资源。地质构造以单斜构造为主，节理裂隙发育，岩体完整性中等-较差，为边坡失稳提供结构条件。评估区地质环境条件复杂程度划分为复杂类型，地质环境重要程度为重要区，按照一级要求编制矿山地质环境保护与土地复垦方案符合现行规范。

现状评估显示，矿区内发育 3 处潜在不稳定边坡(BW1~BW3)，现状危害性与危险性等级为中等，对矿山地质环境影响程度较严重。采矿活动对地下含水层结构破坏程度较严重，水土环境污染现状影响较轻。矿山建设适宜性评价结果为适宜性差，需采取高强度工程治理与生态修复措施。预测评估表明，矿业活动诱发崩塌、滑坡、掉块的可能性大，危害性与危险性等级高，含水层破坏与地貌景观破坏程度较严重，需实施全过程监测与动态治理。

3. 矿山环境问题识别与评价

3.1. 地质灾害问题

露天开采形成高陡边坡，破坏原始山体应力平衡，节理裂隙与风化作用共同导致边坡稳定性下降。矿区内 3 处潜在不稳定边坡分布于采场周边，边坡高度介于 20~45 m，坡度多在 50°~65°，局部近直立。强降雨条件下，雨水入渗降低岩土体抗剪强度，易引发崩塌、掉块与小型滑坡，直接威胁作业人员与设备安全。

地质灾害危险性评价采用半定量方法，选取边坡高度、坡度、岩体完整性、降雨量、破坏规模等指标进行分级赋值。结果显示，采场东侧 BW1 边坡危险性最高，北侧 BW2 与西侧 BW3 边坡危险性中等，整体地质灾害风险处于中高水平，为矿区最突出的环境安全问题(见表 1)。

Table 1. Basic parameters of potential unstable slopes in mines

表 1. 矿山潜在不稳定边坡基本参数表

边坡编号	位置	边坡高度(m)	坡度(°)	岩体完整性	危险性等级	影响范围(m ²)
BW1	采场东侧	42	62	较差	高	1260
BW2	采场北侧	35	58	中等	中等	980
BW3	采场西侧	28	55	中等	中等	720

3.2. 含水层与水环境问题

矿区石灰岩含水层为主要供水层，岩体裂隙为地下水运移通道。露天开采揭露含水层，疏排地下水导致地下水位下降，形成降落漏斗，改变区域地下水流场。开采活动破坏含水层连续性，导致裂隙堵塞与径流路径改变，对周边居民饮水与生态用水产生潜在影响。

地表水环境受矿山废水、扬尘沉降与水土流失影响，生产废水经处理后回用，未直接外排，水质总体保持达标。但雨季径流携带泥沙与少量悬浮物进入周边沟渠，造成短时水体浑浊。地下水监测显示，水位降幅在开采初期较为明显，随治理工程推进逐渐趋于稳定，含水层破坏得到有效遏制。

3.3. 土地资源与植被破坏问题

矿山开采直接占用与破坏土地资源，采场、工业场地、运输道路、排土场等设施累计占地规模较大，土地利用类型由林地、草地转变为建设用地与裸岩地，土地生产力完全丧失。矿区土层浅薄，岩石裸露率高，复垦难度高于平原地区矿山。

植被破坏呈现片状分布，开采作业区植被完全清除，周边区域受扬尘、土壤干燥化影响出现退化，植被覆盖率由原生状态的 65%以上下降至治理前的 12.3%。植物群落结构简化，物种丰富度降低，生物多样性受损，生态系统固碳、保土、涵养水源等功能显著下降。

3.4. 矿山环境问题综合评价

采用多指标综合评价法，将矿山环境问题划分为地质灾害、水环境、土地植被、生态系统四大类，选取 12 项指标构建评价体系，运用熵权法确定权重，计算综合损伤指数。评价结果显示，矿山环境综合损伤指数为 0.72，损伤等级为重度损伤，其中地质灾害与土地植被破坏为主要贡献因子。

综合评价表明，矿山开发对地质环境与生态系统造成显著扰动，若不实施系统治理，将导致灾害风险加剧、生态持续退化，影响矿山长期安全生产与区域生态安全。实施针对性工程治理与生态修复，可有效降低环境损伤，推动矿山向绿色可持续方向转型。

4. 矿山环境恢复治理方案

4.1. 治理原则与目标

治理遵循“预防为主、防治结合、边开采边治理”的基本原则，统筹地质安全、生态修复、土地复垦与可持续发展，坚持工程措施与生物措施相结合、短期治理与长期维护相结合、企业主体与政府监管相结合。以消除地质灾害隐患、修复水文系统、恢复植被与土地功能、构建监测体系为核心目标，实现资源开发与环境保护协同发展。

总体目标为：全面消除高风险地质灾害隐患，边坡稳定性达到规范要求；控制含水层破坏，保障水环境安全；恢复矿区植被与土地功能，提升生态系统质量；建立全覆盖监测预警体系，实现环境动态管控；打造矿山生态示范区，达成资源、环境、经济、社会综合效益最优[7]。

4.2. 治理分区划分

依据矿山地质环境问题类型、分布特征、影响程度与开发布局，将矿区划分为重点治理区、一般治理区、生态修复区与监测管控区。重点治理区包括高陡边坡与地质灾害隐患点，以工程加固与灾害防控为主；一般治理区包括工业场地与道路周边，以土地整治与植被恢复为主；生态修复区包括非开采区与外围缓冲带，以自然恢复与人工辅助修复为主；监测管控区覆盖全矿区，以数据采集与预警为主[8]。

分区结果与治理方向相匹配，实现精准施策、分区管控，提升治理工程针对性与投入产出效率，避

免全域同质化治理造成资源浪费。

4.3. 分阶段治理工程部署

治理工程分为近期、中期、远期三个阶段，与矿山开采进度同步推进。近期工程以地质灾害防控为核心，完成高风险边坡加固、截排水系统建设、灾害点应急处置，构建基础监测网络，保障开采安全。中期工程结合开采进程推进土地复垦、植被重建、含水层保护与土壤改良，扩大生态修复范围，完善监测体系。远期工程实现全域生态修复与土地高效利用，形成稳定生态系统，建立长效运维机制，打造矿山生态园。

分阶段部署符合矿山开发时序，实现治理与生产并行，降低环境累积损伤，保障治理效果稳步提升。

4.4. 主要治理措施

4.4.1. 地质灾害治理工程

针对 3 处潜在不稳定边坡，采用锚杆框架梁、挂网喷混、削坡减载与截排水联合措施。BW1 高风险边坡实施锚杆框架梁加固，设置排水孔降低孔隙水压力；BW2、BW3 边坡采用挂网喷混与削坡相结合，优化边坡形态，提高整体稳定性。边坡平台设置截水沟与排水沟，形成完整地表排水系统，减少雨水入渗[9]。

4.4.2. 含水层与水环境治理

划定含水层保护范围，禁止在保护范围内开展高强度疏干排水。采场与排土场设置防渗层与沉淀池，生产废水与雨水径流经沉淀处理后回用或达标排放[10]。开展地下水水位动态监测，及时掌握含水层变化趋势，采取回灌与补水措施，维持地下水位稳定。

4.4.3. 土地复垦与植被恢复

对闭坑区域、废弃场地与排土场平台进行土地平整，覆土厚度不低于 50 cm，改良土壤结构，提升肥力。选择适生乡土树种与草本植物，采用乔灌草结合模式进行植被重建，提高植被覆盖率与物种多样性。土地复垦优先布局生态林地与草地，兼顾少量经济林地，提升生态与经济双重效益。

4.4.4. 监测预警体系建设

建立地质灾害、水环境、植被覆盖、土地利用一体化监测系统，布设边坡位移监测点、地下水位监测孔、水质监测点、植被遥感监测单元。采用人工监测与自动化监测相结合，数据实时传输至管控平台，设定预警阈值，实现异常情况及时预警、快速处置。监测工作贯穿矿山开发全过程，保障治理效果长期稳定。

5. 治理效果定量评价

5.1. 评价指标体系构建

遵循科学性、系统性、可操作性原则，构建包含目标层、准则层、指标层的三级评价体系。目标层为矿山环境恢复治理综合效果；准则层包括地质安全、水环境、土地植被、生态功能 4 项；指标层选取边坡安全系数、灾害发生率、地下水位变幅、水质达标率、土地复垦率、植被覆盖率、土壤有机质含量、水土流失模数等 12 项定量指标，全面反映治理成效。

5.2. 评价方法与标准

采用熵权 - TOPSIS 模型进行综合评价，利用熵权法客观确定指标权重，避免主观偏差，通过 TOPSIS 模型计算各评价单元与理想解的贴近度，贴近度越高表示治理效果越好[6]。评价标准分为优秀、良好、中等、较差四个等级，结合行业规范与区域背景确定阈值，实现治理效果定量分级。

边坡安全系数计算公式

$$F_s = \frac{cL + (W \cos \theta - U \sin \theta) \tan \varphi}{W \sin \theta + U \cos \theta} \quad (5-1)$$

式中： F_s 为边坡安全系数； c 为黏聚力； φ 为内摩擦角； W 为边坡体重； U 为孔隙水压力； θ 为边坡倾角； L 为滑动面长度。

植被覆盖率计算模型

$$VC = \frac{A_v}{A_t} \times 100\% \quad (5-2)$$

式中： VC 为植被覆盖率； A_v 为植被面积； A_t 为评价区总面积。

水土流失模数计算式

$$M = \frac{\sum W}{A \times T} \quad (5-3)$$

式中： M 为水土流失模数； W 为水土流失量； A 为监测区面积； T 为监测时间。

熵权法指标权重计算

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (5-4)$$

式中： w_j 为第 j 项指标权重； e_j 为信息熵。

TOPSIS 理想解贴近度

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (5-5)$$

式中： C_i 为贴近度； D_i^+ 为与正理想解距离； D_i^- 为与负理想解距离。

综合效果指数

$$S = \sum_{j=1}^n w_j \times x_{j'} \quad (5-6)$$

式中： S 为综合指数； $x_{j'}$ 为标准化指标值。

5.3. 治理前后指标对比分析

5.3.1. 地质安全效果

治理前边坡安全系数均值为 1.05，低于规范允许值，地质灾害发生率高(见图 1)；治理后边坡安全系数提升至 1.32，满足露天矿山边坡安全要求，潜在不稳定边坡得到有效控制，灾害风险由高等级降至低等级(见表 2)。

Table 2. Comparison table of slope treatment effects

表 2. 边坡治理效果对比表

边坡编号	治理前安全系数	治理后安全系数	提升幅度	危险性等级变化
BW1	1.02	1.35	32.3%	高→低
BW2	1.06	1.31	23.6%	中等→低
BW3	1.08	1.30	20.4%	中等→低

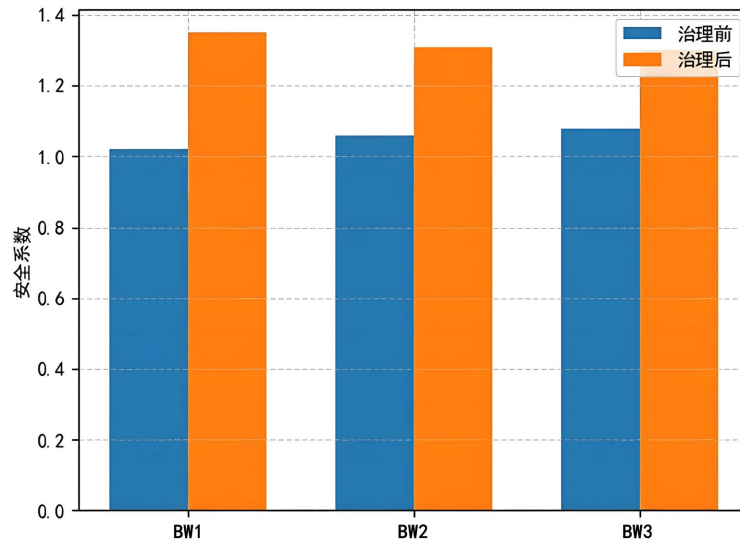


Figure 1. Bar chart of slope safety factor changes
图 1. 边坡安全系数变化柱状图

5.3.2. 水环境效果

治理前地下水位最大降幅达 12.6 m，含水层扰动明显；治理后水位变幅控制在 2.8 m 以内，趋于稳定(见图 2)。地表水水质达标率由 82.5%提升至 100%，悬浮物浓度下降 71.3%，水环境安全得到保障(见表 3)。

Table 3. Effect of water environment governance

表 3. 水环境治理效果表

监测指标	治理前	治理后	变化率
地下水位最大降幅(m)	12.6	2.8	-77.8%
地表水达标率(%)	82.5	100	+21.2%
悬浮物浓度(mg/L)	126	36.2	-71.3%

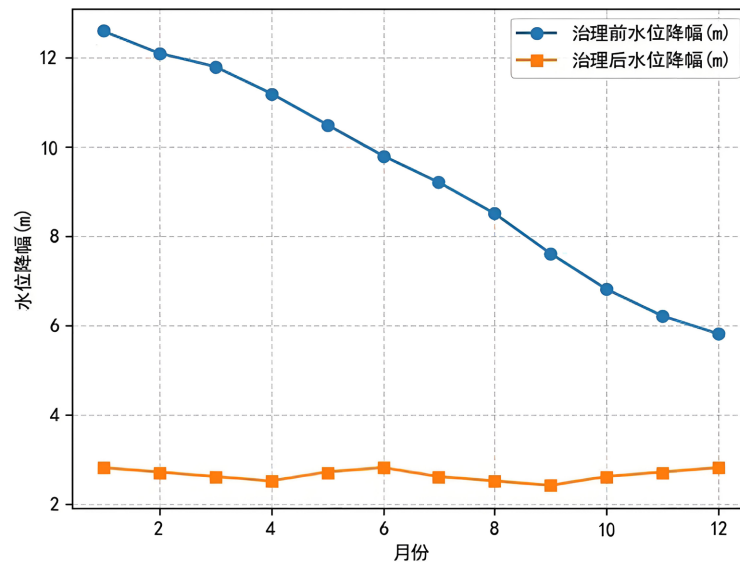


Figure 2. Trend chart of groundwater level changes
图 2. 地下水位变化趋势图

5.3.3. 土地与植被效果

治理前土地复垦率仅 12.5%，植被覆盖率 12.3%，土壤有机质含量 0.92%；治理后土地复垦率提升至 72.5%，植被覆盖率达到 47.6%，土壤有机质含量提升至 1.85%，土地生产力与生态功能显著恢复(见表 4 和图 3)。

Table 4. Land and vegetation management effect table

表 4. 土地植被治理效果表

指标	治理前	治理后	提升幅度
土地复垦率(%)	12.5	72.5	+60.0%
植被覆盖率(%)	12.3	47.6	+35.3%
土壤有机质(%)	0.92	1.85	+101.1%

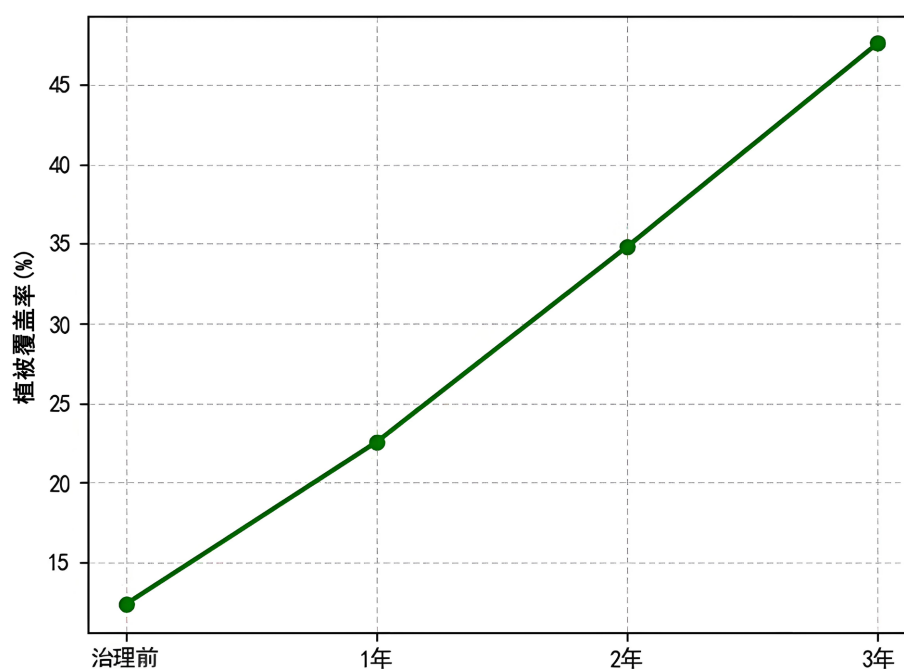


Figure 3. Line graph showing changes in vegetation coverage

图 3. 植被覆盖率变化折线图

5.3.4. 生态功能效果

治理前水土流失模数为 4860 t/(km²·a)，属强度侵蚀；治理后下降至 1546 t/(km²·a)，降至轻度侵蚀等级(见图 4)。生物多样性指数由 1.26 提升至 2.38，生态系统结构趋于稳定，保土、固碳、涵养水源功能显著增强(见表 5)。

Table 5. Effectiveness table of ecological function governance

表 5. 生态功能治理效果表

指标	治理前	治理后	下降/提升率
水土流失模数(t/(km ² ·a))	4860	1546	-68.2%
生物多样性指数	1.26	2.38	+88.9%

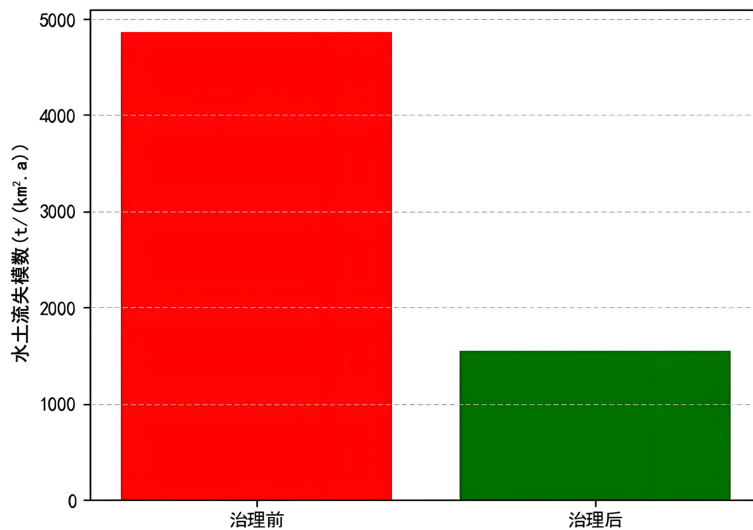


Figure 4. Bar chart showing changes in soil erosion index
图 4. 水土流失模数变化柱状图

5.4. 综合评价评价

基于熵权 - TOPSIS 模型计算, 治理前综合贴近度为 0.21, 等级为较差; 治理后综合贴近度提升至 0.78, 等级为良好, 治理效果显著(见表 6)。图 5 的综合评价指数雷达图直观呈现了各维度改善的不均衡性: 地质安全和水环境维度在治理后接近理想值, 形成“外凸”形态; 而土地植被和生态功能维度虽有显著提升, 但与理想值仍存在差距, 形成“内收”形态。这表明工程治理措施见效快, 而生态系统的自我修复则需要更长的时间尺度(见图 5)。

Table 6. Comprehensive evaluation result table
表 6. 综合评价结果表

评价阶段	综合贴近度	评价等级	治理效果
治理前	0.21	较差	未达标
治理后	0.78	良好	达标

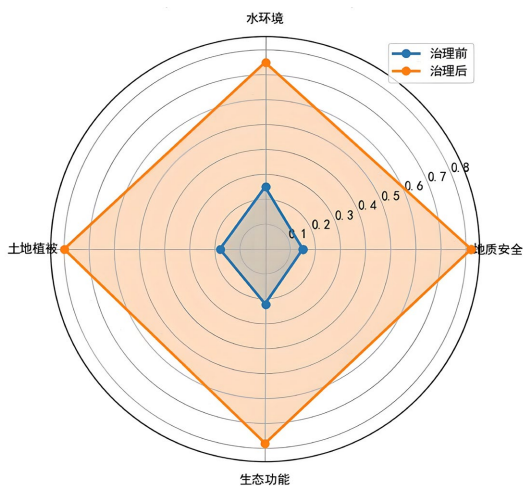


Figure 5. Radar chart of comprehensive evaluation index
图 5. 综合评价指数雷达图

5.5. 治理效果综合讨论与横向对比

本研究案例的治理成效显示, 经过系统治理, 矿区地质安全、水环境、土地植被与生态功能均实现显著改善。为进一步客观评价本案例的治理水平, 并提炼更具普适性的结论, 将本研究的核心指标与国内外其他喀斯特地区矿山修复案例进行横向对比分析(见表 7)。在植被恢复速度方面, 本研究案例经过治理后植被覆盖率从 12.3% 提升至 47.6%, 年均提升约 8.8%, 与贵州喀斯特煤矿区(年均提升约 7.5%)和广西石灰石矿山(年均提升约 6.5%)的同类研究相比, 恢复速度较快, 这可能得益于本研究所采用的“乔-灌-草”立体配置模式与乡土先锋植物的有效筛选。在土壤改良效果方面, 治理后土壤有机质含量提升 101.1%, 显著高于部分西南金属矿山治理案例(提升率约 40%~70%), 表明本案例中采用的覆土与有机肥配施措施对快速提升土壤肥力效果明显。然而, 治理后土壤有机质含量(1.85%)仍低于区域原生林地土壤背景值(>3.0%), 说明土壤生态功能的完全恢复需要更长的演替周期。

在生态功能恢复方面, 治理后水土流失模数下降 68.2%, 降至轻度侵蚀等级, 与广西岩溶区石漠化治理项目的成效(下降率 60%~75%)相当, 表明工程与生物措施结合有效控制了地表径流与土壤侵蚀。但值得注意的是, 尽管综合效果良好, 各维度改善并不均衡。结合图 5 的综合评价指数雷达图可以看出, 地质安全和水环境指标提升最为显著, 而代表生态质量的“植被群落结构稳定性”和“生物多样性”维度得分相对较低。这反映了当前治理中“重工程、轻生态”或“先稳定、后提升”的阶段特征。

结合实地调查数据深入剖析治理后依然存在的问题: 植被群落结构单一的具体表现为, 在恢复区占主导地位的为狗牙根、车桑子、常春藤等少数几种耐性极强的先锋物种, 而原生植被中的优势种如青冈、滇石栎等乔木树种恢复缓慢, 林下草本层和凋落物层尚未形成完整结构, 导致生态系统食物网简单, 自我调节与抗逆能力较弱。此外, 在局部坡度大于 40° 的陡坡区, 由于覆土困难, 仍存在岩石裸露度高、植被斑块化分布的现象, 水土保持功能尚不稳定。未来需针对性地补充种植深根性、长寿型乡土树种, 并引入固氮植物以促进群落演替, 同时加强土壤微生物群落的定向培育, 以加速生态系统的正向演替与自我维持能力的提升。

Table 7. Comparison of key indicators between this study and domestic and foreign karst mine restoration cases

表 7. 本研究与国内外喀斯特矿山修复案例关键指标对比

研究案例	矿山类型	年均植被恢复率(%)	土壤有机质提升率(%)	水土流失下降率(%)	数据来源
本研究案例	露天石灰石矿	8.8	101.1	68.2	本文
贵州某喀斯特煤矿区	露天煤矿	7.5	-	54.3	[2]
广西某石灰石矿山	露天石灰石矿	6.5	65.0	71.0	[3]
西南某金属矿区	露天金属矿	-	58.0	-	[5]
广西岩溶区石漠化治理	非矿区生态修复	-	-	70.0	[7]

5.6. 存在问题与优化建议

图 6 的矿山治理效果空间分布图进一步揭示了治理成效的空间分异规律: 采场平台和排土场等经过大规模土地整治的区域, 植被恢复与土地复垦效果最好, 呈现连片高值区; 而采场高陡边坡区域, 受限于地形与覆土条件, 效果表现为不连续的斑块状中低值区; 矿区外围缓冲带则以自然恢复为主, 效果呈现出由近及远的梯度扩散特征。这种空间分布规律为后续精准施策提供了直接依据, 未来治理应将高陡边坡作为攻坚重点, 并加强外围缓冲带的生态廊道连接。

当前治理仍存在局部边坡稳定性不足、植被群落结构单一、土壤改良深度有限、监测数据应用度不

高等问题。建议持续强化边坡动态监测，优化植物配置提升群落稳定性，加深土壤改良厚度，完善智慧监测平台，提高数据可视化与预警精度。

建立长效运维机制，保障治理工程长期稳定运行，推动矿山向绿色矿山、生态矿山转型，实现资源开发与生态保护高水平协同[11]。

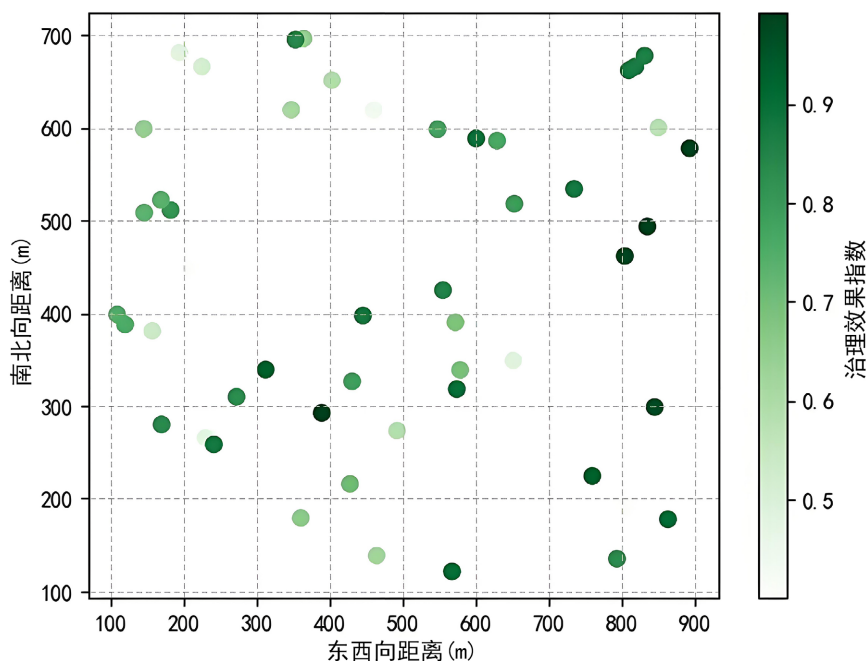


Figure 6. Spatial distribution map of mine governance effects
图 6. 矿山治理效果空间分布图

6. 结论与展望

6.1. 主要结论

昭通大关寿山甘海石灰石矿为大型露天水泥用灰岩矿，地质环境条件复杂，主要环境问题为潜在不稳定边坡、含水层扰动、土地占用与植被退化，综合环境损伤等级为重度。采用分区治理与分阶段实施模式，以边坡加固、水文保护、土地复垦、植被重建与监测预警为核心的治理方案，技术可行、针对性强，符合矿山实际条件。治理后边坡安全系数达标，灾害风险显著降低；水环境稳定达标；土地复垦率与植被覆盖率大幅提升；水土流失得到有效控制，综合治理效果等级由较差提升至良好，各项指标满足规范与生态安全要求。构建的熵权-TOPSIS 评价体系可客观量化矿山治理效果，适用于西南喀斯特地区同类露天石灰石矿山环境修复效果评估[12]。

6.2. 展望

未来可结合遥感、无人机、物联网技术构建全域智慧监测系统，实现治理效果全天候、高精度跟踪。深化适生植物筛选与土壤改良技术研究，提升生态系统自我维持能力。探索矿山生态旅游、林下经济等转型路径，延伸生态产品价值，为资源型山区绿色发展提供新路径。

致 谢

首先，我们由衷感谢我们的指导老师吕伟老师从项目的选题立意、野外调研方案的设计，到数据的

严谨分析与论文的反复修改，吕伟老师倾注了大量心血。您的悉心指导与严谨学风，让我们初窥科研门径，受益终生。

感谢母校玉溪师范学院为项目提供了坚实的平台与经费支持，让我们能将理论知识与实践探索相结合。感谢昭通市自然资源与规划局、生态环境局等单位，为我们的实地调查慷慨提供了宝贵的基础数据与档案资料，使研究工作得以顺利开展。

同时，要特别感谢项目团队的每一位成员，在这个过程中，我们肩并肩、取长补短，这段共同奋斗的经历是我们大学生活中最宝贵的记忆。

在此呈交论文的最后，谨向所有在“云南昭通矿山环境恢复及治理效果调查”这一大学生创新创业训练计划项目中给予我们支持与帮助的师长、伙伴与单位，致以最诚挚的谢意。

基金项目

本文系玉溪师范学院大学生创新创业训练校级项目“矿山环境恢复及治理效果调查——以云南昭通地区为例”(项目编号：2024A024)。

参考文献

- [1] 曹运江. 矿山(地质)环境保护和恢复治理理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [2] 廖红为, 马俊飞, 黄奇波, 李腾芳, 吴华英, 邹昌霖, 刘朋雨. 岩溶区矿山修复新思路: 人与自然和谐发展[J]. 中国矿业, 2025, 34(S2): 843-846.
- [3] 李鸿一. 浅谈矿山安全生产管理体系构建与实践[J]. 中国设备工程, 2024(12): 83-86.
- [4] 徐华清, 黄中元, 程路明. 矿山地质环境保护与恢复治理措施——以湖南旺华萤石矿业有限公司双江口萤石矿矿山为例[J]. 南华大学学报, 2020(6): 50-54.
- [5] 陈玉民, 孙新波, 张汉阔. 未来矿山治理之道[M]. 北京: 机械工业出版社, 2022.
- [6] 吴启红. 矿山复杂采空区稳定性分析、治理及生态修复研究[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2022.
- [7] 顾清华, 汪朝. 采矿系统工程[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2021.
- [8] 中国工程院矿产资源强国战略研究项目组. 矿产资源强国战略研究[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [9] 熊敬超, 宋自新, 侯浩波, 邵雁. 矿山废弃地生态修复研究与实践[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2021.
- [10] 王国法, 郭永存, 王家臣. 智慧矿山概论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2023.
- [11] 黄正川. 在挑战中探寻绿色矿山建设路径多维度对策助力“绿色转型”[J]. 中国商界, 2025(20): 128-129.
- [12] 余书俊. 矿山地质环境保护与恢复治理技术研究[J]. 节能, 2025, 44(1): 142-146.