

露天建筑骨料矿山地质环评价与恢复治理研究

吴 威 吴 迪

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450000

【摘 要】：文章立足于露天建筑骨料矿山地质环境特征与影响机制，围绕露天建筑骨料矿山地质环评价与恢复治理展开探讨。首先，系统分析了矿山地质环境核心特征与开采活动的多维度影响机制。在此基础上，构建了涵盖地质灾害风险、水文环境、地形地貌、生态恢复潜力的四级评价体系，并采用层次分析法与模糊综合评价法划分质量等级，建立“评价结果-技术选型-方案强度”的靶向关联逻辑。最后提出边坡稳定、水文修复、地形重塑、生态重建的综合治理技术体系，构建“精准评价-靶向治理-智能监测-动态优化”闭环体系。通过“生态-经济-社会”三维评估验证方案成效，旨在为矿山绿色可持续发展提供科学技术支撑。

【关键词】：露天建筑骨料矿山；地质环境评价；靶向治理；智能监测

DOI:10.12417/2705-0998.25.18.057

引言

在露天建筑骨料矿山开采中，地形破碎、岩土体失稳以及水文失衡这类问题较为常见，严重威胁着矿区生态安全。当前治理存在评价体系不精准、技术选型缺乏针对性、效果评估滞后等痛点，亟需建立科学完善的解决方案。本文立足矿山地质环境区域差异特征，构建精准评价体系与差异化治理技术框架，融合智能监测与动态优化机制，实现治理方案与地质环境动态适配。

1 露天建筑骨料矿山地质环境特征与影响机制

1.1 矿山地质环境核心特征

露天建筑骨料矿山因所在区域不同，地质环境特征差异较大。露天建筑骨料矿山多位于低山丘陵或平原阶地，地表坡度平缓至中等，自然完整性较好。地层岩性以花岗岩、片麻岩、砂岩、石灰岩等硬质岩性为主，花岗岩矿山节理密度普遍高于石灰岩矿山，直接影响开采边坡稳定性。水文地质受气候与构造控制，地下水以孔隙水、裂隙水为主，与地表水相互补给，华北地区矿山年平均地下水补给量普遍低于华南地区。岩土体稳定性依赖岩体结构、土体组成与植被覆盖，天然状态下整体稳定，开采后易发生应力失衡。这些特征决定了矿山对开采活动的响应规律，为评价与治理奠定基础。

1.2 开采活动对地质环境的影响机制

开采过程中对地质环境的破坏来自多个层面：地表剥离、废渣堆放及采坑开挖将直接改变地形地貌，形成挖损区域、深凹采坑、高陡边坡和人工堆积地貌，破坏自然地貌的完整性与连续性。开采破坏地下水含水层结构，阻碍补给路径，导致地下水位下降形成降落漏斗，废渣淋溶水还会污染地下水，采坑积水与拦水设施改变水文循环节奏。同时，开采打破岩土体原有应力平衡，诱发张拉裂隙与剪切面，易引发滑坡、崩塌等灾害，排土场废渣松散也会增加滑移风险。此外，开采直接摧毁地表植被，破坏生物栖息地，剥离压实土壤导致肥力下降，最终造成生态系统结构失衡、自我修复能力丧失，退化为生态脆弱区^[2]。

弱区^[2]。

2 露天建筑骨料矿山地质环境评价体系构建

2.1 评价指标体系构成

对地质环境的评价，主要通过以下四个指标进行：地质灾害风险指标涉及边坡稳定性、采空区塌陷风险与泥石流易发程度，分别通过相应参数表征、评估和确定；地形地貌破坏指标包含挖损面积、边坡高度与坡度、地貌破碎化程度，反映破坏范围、陡峭程度和破碎情况；水文环境影响指标涵盖地下水位变化幅度、地下水污染程度与地表径流扰动程度，依据监测数据、特征指标和变化参数开展评价；生态恢复潜力指标涉及土壤肥力、植被覆盖率与生态系统自我修复能力，通过土壤特征、覆盖现状和综合条件判断恢复潜力。

2.2 评价方法与等级划分

指标权重的确定，要用到层次分析法，结合真实的工程数据，校准权重尽可能降低主观性，建立层次结构模型，邀请专家两两比较指标重要性，计算得出权重。结合模糊综合评价法构建模型，将实测数据转化为评价矩阵，通过权重与矩阵合成得到综合结果。依据得分划分优（80-100分）、良（60-79分）、中（40-59分）、差（0-39分）四个等级，明确各等级核心特征，精准量化地质环境质量^[3]。

2.3 评价等级与治理技术靶向关联

建立“评价结果-技术选型-方案强度”的闭环关联逻辑，实现差异化施策，如表1所示：

表1 露天建筑骨料矿山地质环境评价等级与治理技术靶向关联表

评价等级	核心特征	靶向治理技术	方案强度
优	灾害风险低，水文稳定，地貌完整，生态潜力高	轻度生态防护、常规智能监测	低强度，自然恢复为主，人工辅助

良	灾害风险较低，水文扰动轻微，地貌破坏小，生态潜力中等	生态防护+简易工程治理、定期智能监测	中低强度，生态优先，局部工程加固
中	灾害风险中等，水文失衡，地貌破碎，生态潜力较低	工程治理+生态修复结合、常态化智能监测	中高强度，工程与生态并重，强化管控
差	灾害风险高，水文严重扰动，地貌彻底破坏，生态潜力低	高强度工程治理+生态重建、实时智能预警	高强度，工程先行，生态重建跟进，动态调整

3 露天建筑骨料矿山地质环境恢复治理技术体系

3.1 边坡稳定性治理技术

3.1.1 工程治理技术

工程治理基于力学平衡原理，达到强化边坡稳定性的目的。锚杆锚索支护将坡体与稳定岩体固定，增强抗滑移能力，适用于节理发育边坡，确保植入深度与锚固力达标。削坡减载通过降低高度、放缓坡度减少坡体自重与应力集中，适用于高陡边坡初步治理，施工中严控范围与坡度。挡土墙砌筑在坡脚修建重力式或悬臂式墙体，阻挡坡体下滑，适用于坡脚不稳定区域，保证墙体强度与整体性。

格构防护构建混凝土框架覆盖边坡，限制岩土体位移，为植被生长提供支撑，适用于中等坡度边坡。

3.1.2 生态防护技术

生态防护即在 NbS 技术的支撑下，结合生态修复和生态防护的方法，实现双重目标。选用固土能力强、耐旱性好的乡土植物，如紫穗槐、狗牙根、爬山虎，匹配矿山环境功能需求。植被混凝土喷播将水泥、腐殖土、乡土植物种子混合喷播至边坡，形成兼具强度与透气性的防护层，适用于岩质边坡，喷播后加强养护。客土喷播将种子与客土、肥料、专用菌剂混合喷播，专用菌剂针对土壤退化类型筛选，如固氮菌适配氮缺乏土壤，适用于土壤贫瘠边坡，根据坡度调整厚度与方式。藤蔓植物护坡种植生长迅速、根系发达的藤蔓植物，通过攀爬覆盖边坡、固持岩土体，适用于缓坡或中等坡度边坡，后期加强抚育管理，同时提升碳汇效益，每亩每年可增加碳汇 0.8t。

3.2 水文地质修复技术

3.2.1 地下水恢复技术

地下水恢复要通过改善水质和补充储量的方式。防渗帷幕使用地下连续墙或高压喷射注浆技术，在污染源周边修建屏障，阻止污染物扩散，确保帷幕连续性与防渗效果。污染原位修复采用化学氧化或生物降解技术，分解地下污染物，修复过程中通过无线传感器实时监测水质，动态调整参数。人工补给通过渗渠、渗井将优质地表水引入含水层，补充地下水量，补

给水源需净化处理。

3.2.2 地表水资源调控

为实现对地表水的合理利用且达到防控灾害的效果，需合理调控地表水资源。将矿坑积水引入蓄水池，净化后用于生产灌溉，蓄水池需防渗处理。地表径流疏导修建截水沟、排水沟，引导径流有序排放，避免内涝或边坡冲刷，沟渠布置结合地形确保顺畅。蓄水池修建在径流汇集处，储存雨水与径流，干旱时为植被供水，同时调蓄洪水，容量根据降水与用水需求设计[4]。

3.3 地形重塑与土壤改良技术

3.3.1 地形重塑方案

基于数字孪生技术，建立地形数字模型，重塑地形，直至恢复自然形态。采坑回填选取废渣、建筑废料分层压实回填，控制压实度避免沉陷，回填后平整地表。平台修整在边坡设置水平平台，降低坡度增加稳定性，宽度与间距根据边坡参数确定。地貌再造结合区域自然特征，塑造缓坡、洼地等形态，模拟自然景观，注重与周边地貌衔接。

3.3.2 土壤改良技术

土壤改良要用到物理、生物以及化学方法，提升土壤质量。酸碱度调节根据检测结果施加改良剂，将 pH 值调整至适宜范围，精确计算用量避免二次污染。有机质添加施加腐熟有机肥或秸秆，增加有机质含量，改善土壤结构，提升保水保肥能力，物料需无害化处理。微生物改良接种针对性有益菌剂，如解磷菌适配磷缺乏土壤，促进养分转化，增强植物吸收能力，创造适宜生长环境。

3.4 生态重建技术

3.4.1 植被重建技术

植被重建必须严格遵循“适地适树、乡土优先”原则，基于 NbS 筛选乡土物种并匹配功能性状。优先选择适应性强、抗逆性好、碳汇能力强的乡土树种与草本植物，如侧柏、刺槐、白羊草，成活率高且促进本地生态恢复。采用乔灌草复合配置，构建多层次群落，乔木提供遮荫支撑，灌木覆盖地表，草本快速固土，提升群落稳定性、生态功能与碳汇效益，混交林每亩每年可提升碳汇 1.2t。根据植物类型与地形选择种植方式，春季或秋季种植，后期加强浇水、施肥、病虫害防治等养护管理。

3.4.2 生物多样性与碳汇协同恢复

注重生物多样性，构建完整的生态体系链条。通过乔灌草复合配置增加植被层次与物种丰富度，为动物提供食物与栖息地，促进食物链完善。设置饮水池、觅食区、隐蔽林等设施，模拟自然栖息地，饮水池定期补水，觅食区种植蜜源与食源植物，隐蔽林用茂密灌木构建。加强监测与保护，禁止非法捕猎破坏，推动生物多样性自然提升，同步提升生态系统服务价

值与碳汇效益。

4 恢复治理方案优化与效果评估

4.1 恢复治理方案优化原则

为优化恢复治理方案,必须严格遵循生态优先、因地制宜、长期稳定以及经济可行原则。首先,生态优先以生态系统恢复与保护为核心目标,优先采用 NbS 生态友好型治理技术,最大限度减少对原生生态的扰动。因地制宜要求结合地质环境评价结果,充分考量区域地形地貌、土壤条件、气候特征等实际情况,科学选择适配的治理技术与方案,避免盲目照搬。长期稳定性原则要求注重方案长效性,结合数字孪生技术模拟预演,建立动态调整机制,确保治理效果持续稳定^[5]。

经济可行强调在保障治理效果达标的前提下,合理筛选治理技术与材料,严格控制施工成本,确保方案在经济层面具备可实施性。

4.2 不同治理技术效果对比分析

如表 2 所示,建立涵盖成本、工期、稳定性、生态效益、碳汇效益的评价体系,对比不同技术表现:

表 2 露天建筑骨料矿山不同恢复治理技术效果对比表

治理技术	成本投入	工期长短	稳定性	生态效益	碳汇效益 (t/亩·年)
锚杆锚索 支护	高	长	强	一般	0.2
格构防护	中偏高	中	较强	较好	0.5
植被混凝土 喷播	中	中	中等	好	0.8
客土喷播	中偏低	中短	中等	好	1.0
采坑回填	中	长	强	一般	0.3
土壤有机 质添加	低	短	一般	较好	0.4

工程技术稳定性突出,但成本高、工期长,生态与碳汇效益一般;生态防护技术生态与碳汇效益显著,成本与工期适中,

稳定性随植被生长提升;地形重塑与土壤改良技术成本、工期差异大,效果影响后续生态恢复。综合对比可选择单一或组合技术方案,平衡效果与成本。

4.3 长期监测与动态评估

4.3.1 智能监测指标与方法

结合无线传感器网络、物联网以及 AI 智能预警等先进技术,构建实时在线监测体系。边坡位移通过 GPS 定位仪、测斜仪进行实时自动化监测,数据传输至云端平台, AI 算法分析异常趋势并自动预警;地下水位通过监测井内无线水位传感器实时记录,数据每 10 分钟更新一次;植被覆盖率采用无人机遥感与地面传感器结合监测,兼顾范围与精度;水质指标通过原位水质传感器实时监测 pH 值、悬浮物等参数,异常时自动报警。

4.3.2 动态评估机制与数字孪生应用

基于监测数据与数字孪生技术,建立治理效果动态评估模型,并构建集“生态-经济-社会”于一体的三维评估体系。生态维度涵盖地质灾害风险降低程度、水文环境恢复状况、植被覆盖率、生物多样性增量、水土保持量、碳汇效益;经济维度包括治理成本、资源回收利用率、后期维护成本;社会维度涉及周边居民满意度、安全保障水平、景观改善效果。构建矿山地质环境数字模型,模拟治理方案实施效果,优化参数设置,预判长期成效。评估周期根据矿山恢复阶段灵活调整,治理初期每季度评估一次,稳定后每半年至一年评估一次。结合前期构建的地质环境评价体系,计算综合评估得分,判断治理效果是否达到预期目标。若评估结果显示治理效果未达预期,通过数字孪生模型模拟调整方案,针对性优化治理措施,确保恢复治理方案始终适配矿山地质环境的动态变化。

5 结语

露天建筑骨料矿山地质环境评价与恢复治理需构建“精准评价-靶向治理-智能监测-动态优化”的闭环体系。本文结合案例数据与前沿技术,完善评价与治理关联逻辑,融合物联网、数字孪生、NbS 技术,构建三维评估体系,形成科学可行的技术路径,为矿山绿色可持续发展提供更有有力支撑,推动行业高质量转型。

参考文献:

- [1] 宋一鸣.基于重构理念的矿山开发可持续设计及评价方法研究[D].湖南大学,2023.
- [2] 付志鹏.米东区废弃矿山生态环境风险识别及治理方案[D].新疆大学,2023.
- [3] 周毅.露天矿山开发与环境效应遥感大数据时空监测与评价[D].中国地质大学(北京),2023.
- [4] 孙春晓,张广山,马群.浅谈矿山地质环境保护与恢复治理措施——以某水泥企业水泥用灰岩矿为例[J].中国非金属矿工业导刊,2022,(04):73-76.
- [5] 张楚.露天矿山生态修复技术及效果评价研究[D].西南交通大学,2021.