

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2023.02.010

引用格式:韩帅,惠淑君,孙强,等.基于地质安全评价的废弃矿山高陡边坡生态修复技术研究[J].华东地质,2023,44(2):216-227.(HAN S, HUI S J, SUN Q, et al. Research on ecological restoration technology of high-steep slopes of abandoned mines based on geological safety evaluation[J]. East China Geology, 2023, 44(2):216-227.)

## 基于地质安全评价的废弃矿山高陡边坡生态修复技术研究

韩帅<sup>1</sup>, 惠淑君<sup>2</sup>, 孙强<sup>1</sup>, 张帅<sup>3</sup>, 时磊<sup>1</sup>, 张颖<sup>1</sup>, 朱庆伟<sup>4</sup>

(1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016;

2. 枣庄市城乡水务事业发展中心, 山东 枣庄 277800;

3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

4. 浙江省测绘科学技术研究院, 浙江 杭州 310012)

**摘要:**新一轮找矿突破战略行动需要关注生态环境保护, 废弃露天矿山生态修复则是矿地综合利用、生态环境保护的重要举措, 其中高陡边坡修复是废弃矿山生态修复的重点与难点。为此, 选择浙江省兰溪市灵洞乡洞源村废弃露天矿山开展了生态修复技术示范研究, 在实地勘察、工程地质测绘与工程钻探的基础上, 基于有限元方法, 对边坡进行安全性数值分析, 进而对高陡边坡实施生态修复。数值分析表明:边坡随着降雨的进行, 其安全系数从1.458降至0.851, 存在安全隐患;高陡边坡生态修复必须辅以削坡降低斜坡坡度、在边坡前缘实施挡土墙等工程手段才能达到安全性要求;合理排水可大大降低水对边坡安全性的影响, 增强边坡的稳定性。经过生态修复设计后, 暴雨条件下边坡安全系数显著提高且基本保持在1.7左右, 达到了安全性的设计要求。该技术示范可为其他废弃矿山生态修复提供参考。

**关键词:** 废弃露天矿山;生态修复;边坡稳定性;数值分析;浙江省兰溪市

**中图分类号:** X43;P694;P642

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-1871(2023)02-216-12

浙江省矿产资源以非金属矿产为优势, 多数以露天方式开采。虽然矿山开采与利用促进了地方经济建设的迅速发展, 但是矿产资源过度粗放型开采后遗留的大量高陡矿山边坡和废弃地, 不仅存在滑坡、崩塌等地质灾害隐患<sup>[1-4]</sup>, 而且还破坏地表植被, 污染土壤, 导致严重的水土流失, 浪费大量的土地资源<sup>[5-7]</sup>。在国家“双碳目标”背景下, 为深入践行“绿水青山就是金山银山”的理念, 废弃露天矿山生态修复势在必行<sup>[8]</sup>, 也是新一轮找矿突破战略行动中需给予高度关注的问题。基于生态理念下的矿山岩质边坡稳定性评价及地质灾害防治和生态修

复<sup>[9-12]</sup>, 是科学有效地消除矿山地质灾害隐患、改善生态环境、储备与利用土地资源、优化国土空间格局的良策<sup>[13-17]</sup>。对于废弃矿山的修复, 相关研究重点关注矿区的土壤改良方面, 如:采用化学方法, 通过粉煤灰、石灰石、CaCO<sub>3</sub>等减少土壤重金属污染、改善尾矿的pH值, 有效防止尾矿酸化, 从而改善土壤基质<sup>[18-20]</sup>;采用生物方法, 通过蚯蚓改良土壤的理化性质, 吸收降低土壤中的重金属含量, 使土壤达到可持续利用的效果<sup>[21]</sup>。对矿区高边坡的治理往往以粗犷的削方、喷锚为主<sup>[22-33]</sup>, 而不合理的削方、喷锚会扩大对生态环境的破坏。在保障高边坡

\* 收稿日期:2022-08-08 修订日期:2023-02-20 责任编辑:谭桂丽

**基金项目:**国家自然科学基金“台风-暴雨耦合作用下植被覆盖边坡稳定性响应与滑坡灾害触发机理研究(编号:42277126)”、国家重点研发计划“非显性滑坡隐患广域勘测与量化评价应用示范及技术标准(华东地区)(编号:2022YFC3003205)”和中国地质调查局“浙闽沿海台风暴雨型地质灾害精细调查与风险管控(编号:DD20221742)”项目联合资助。

**第一作者简介:**韩帅, 1994年生, 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事地质灾害、工程地质研究。Email:869086163@qq.com。

安全的前提下,尽可能避免扰动矿山边坡已成为高边坡修复的重点。

为此,作者等选择兰溪市灵洞乡洞源村废弃露天矿山开展了生态修复示范技术研究,在调查矿山生态环境问题的基础上,针对该废弃露天矿山高陡边坡地质灾害隐患问题及生态破坏现状,采用削坡清坡、截排水、废弃地平整覆土及植被养护等技术对该矿山进行生态修复,具有良好的经济效益、社会效益和生态效益,可为类似地区的生态修复和新一轮找矿行动提供参考与启示。

## 1 区域地质背景

矿区及邻区出露的地层为早白垩世黄尖组( $K_1h$ )安山质-英安质晶玻屑凝灰岩、角砾晶玻屑凝灰岩,寿昌组( $K_1s$ )浅灰色、灰白色凝灰岩,中戴组( $K_1z$ )砾岩、含砾砂岩、泥质粉砂岩和粉砂质泥岩及第四系(Q)粉质黏土、碎石等(图1)。区域上断裂较发育,断层走向以NE向为主,其次为NW向。研究区总体为倾向南西的单斜构造,地层稍有扭曲、起伏,岩层产状 $140^{\circ}\sim 220^{\circ}/15^{\circ}\sim 58^{\circ}$ 。

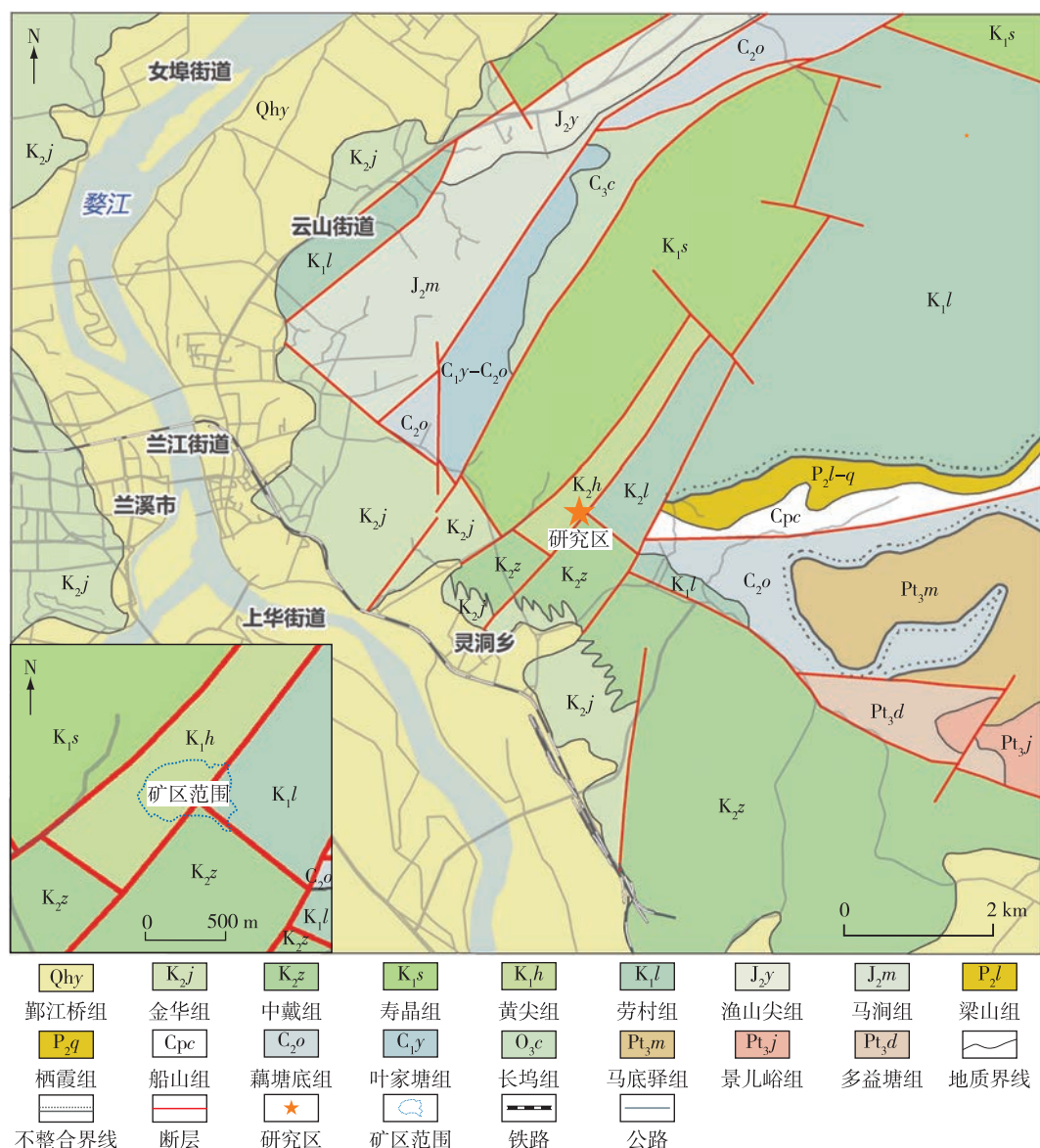


图 1 矿区及邻区区域地质图

Fig. 1 Regional geological map of the mine area and adjacent area



处设置截面规格为 0.4 m(上宽)×0.7 m(底宽)×0.4 m(高)的排水沟,并汇入复垦项目截排水系统。为确保回填区地下水顺排,设置宽度为 2.8 m、高度为 2.6 m 的渗沟。

(4)挡墙工程。为确保坡脚稳定、防止治理区水土流失、缓冲坡面崩落物、改善治理区景观环境,坡脚采用 M10 浆砌块石结构设置挡土墙。

(5)生物工程。为消除视觉污染,改善生态环境,开挖边坡采用喷播绿化防护,平台处及回填区覆厚耕植土 0.4 m,种植小灌木(小叶女贞或美丽胡枝子),坡面撒播草籽。

(6)其他工程。在醒目位置设置安全警示牌。边坡顶设置安全围栏,挡墙顶安装立柱。根据现场情况适当设置监测桩。

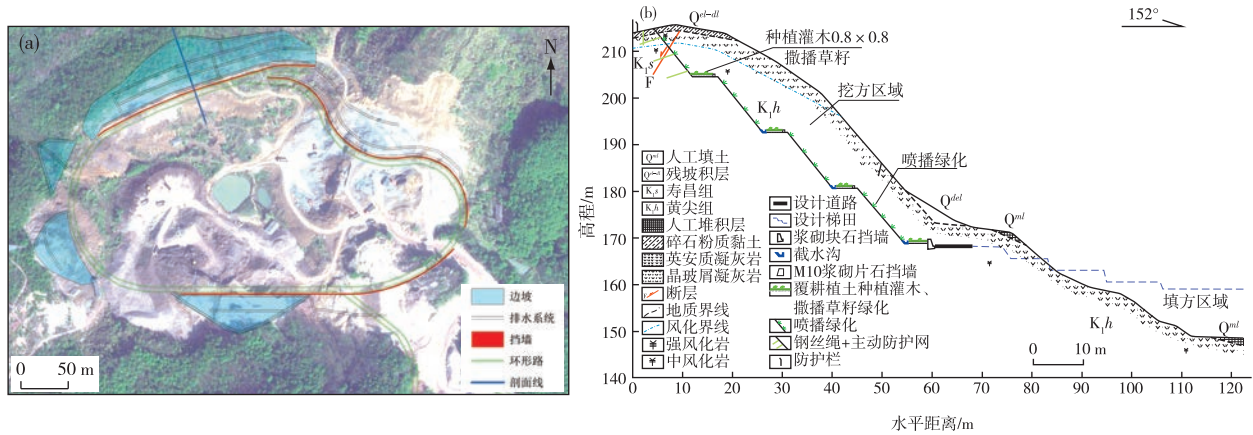


图 3 洞源村矿山生态修复工程布置平面图(a)和剖面图(b)

Fig. 3 Floorplan (a) and section(b) of mine ecological restoration project in Dongyuan Village

## 4 边坡稳定性分析

### 4.1 降雨量分析

研究区属亚热带季风气候区,具有明显的盆地气候特点:四季分明,气候温和,光照充足,雨量充沛,空气湿润。气候垂直差异显著,时空分布不均,受灾害性天气影响较大。根据兰溪市各水文站及雨量站 1980—2014 年统计资料<sup>[34]</sup>,兰溪市多年降雨量空间分布不均匀(表 1),市域西部与龙游县交界一带丘陵区 and 南东与金华、兰溪交界的大盘山一带年均降雨量最大,可达 1 500 mm 以上。2002 年,洋港水文站最大年降雨量达 2 369.4 mm,从北侧向

兰江河谷平原区依次降低。全年降雨主要集中在 3—6 月,属春雨期—梅雨期,尤以 6 月的梅雨期降雨强度大,持续时间长,平均降雨量达 250 mm 以上,其中 1994 年 6 月,诸葛雨量站监测最大月降雨量达 605.1 mm;7—9 月为台风雨期,2004 年以来该市台风过程雨量一般均在 50 mm 以下(个别可达 100 mm 以上),但降雨时间短,强度大,往往暴雨倾盆,1993 年 9 月马涧雨量站记录最大 1 小时降雨量达 115.9 mm。上述两个降雨季节常常山洪暴发,从而引发山体崩塌、滑坡和泥石流等地质灾害<sup>[35]</sup>。因此,该区降雨的不均一性和降雨的突发性对地质灾害的发生和发展具有明显的控制作用<sup>[36]</sup>。

表 1 兰溪市降雨量情况统计结果(据兰溪市水文站)

Table 1 Precipitation statistics of Lanxi City (after Hydrological Station of Lanxi City)

项目	降雨量/mm	站点	时间
多年平均降雨量	1 507.0	/	/
最大年降雨量	2 369.4	洋港水文站	2002 年
最小年降雨量	1 061.1	兰溪水文站	2004 年
最大月降雨量	605.1	诸葛雨量站	1994 年 6 月
最大日降雨量	174.5	兰溪上包雨量站	2011 年 6 月 15 日
最大 1 小时降雨量	115.9	马涧雨量站	1993 年 9 月
最大 10 分钟降雨量	35.0	兰溪雨量站	1987 年 10 月

## 4.2 边坡稳定性数值分析

基于野外地质调查、工程地质钻探及室内岩土力学测试结果(表 2),选取矿区范围内边坡危险区段作为计算剖面,该处边坡高陡,有滑坡隐患。为探究矿山边坡生态修复设计前后降雨作用下边坡内部水分运移规律及其对边坡稳定性的影响,采用 Geostudio 有限元数值分析软件的 SLOPE/W 模块和 SEEP/W 模块耦合计算分析,具体计算过程参照文献<sup>[37-38]</sup>。

将地下水位作为既定条件,通过摩根斯坦-普拉斯法<sup>[37-39]</sup>,在暴雨极端降雨条件下对矿山边坡及生态修复设计边坡稳定性进行数值分析,并对设计后的边坡进行稳定性验算。矿山边坡剖面剖分网格平均尺寸 3 m,包含 706 个节点,1 288 个单元;生态修复设计边坡剖面剖分网格平均尺寸 3 m,包含 690 个节点,1 241 个单元。计算模型如图 4 所示,该边坡的生态修复设计主要是削坡为阶梯状坡以及挡土墙、锚索等工程措施。

表 2 洞源村矿山岩土体物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of the geotechnical body of the Dongyuan Village mine

材料	饱和体积 含水率/%	天然密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ $^{\circ}$	饱和渗透 系数/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
残坡积层	28	1.73	15.0	18.0	$6\text{e-}5$
强风化凝灰岩	26	2.20	23.0	18.0	$3\text{e-}5$
中风化凝灰岩	24	2.90	50	30	$1\text{e-}5$
抗滑桩	0	2.80	100	40	0

测试单位:浙江省浙中地质工程勘察院

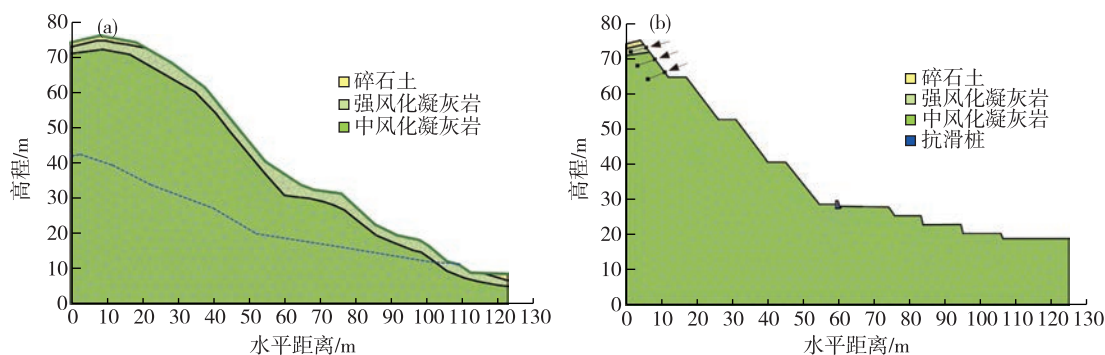


图 4 洞源村矿山边坡(a)与生态修复设计边坡(b)计算模型

Fig. 4 Calculation model of mine slope (a) and ecological designed slope(b) in Dongyuan Village

通过室内岩土基本物性试验获取岩土饱和体积含水率、天然密度、饱和渗透系数等参数,通过三轴压缩试验获取岩土体抗压强度参数(表 2),表明岩土物理力学性质受风化程度影响,越靠近坡表,岩石风化程度越强,岩土体强度越弱。

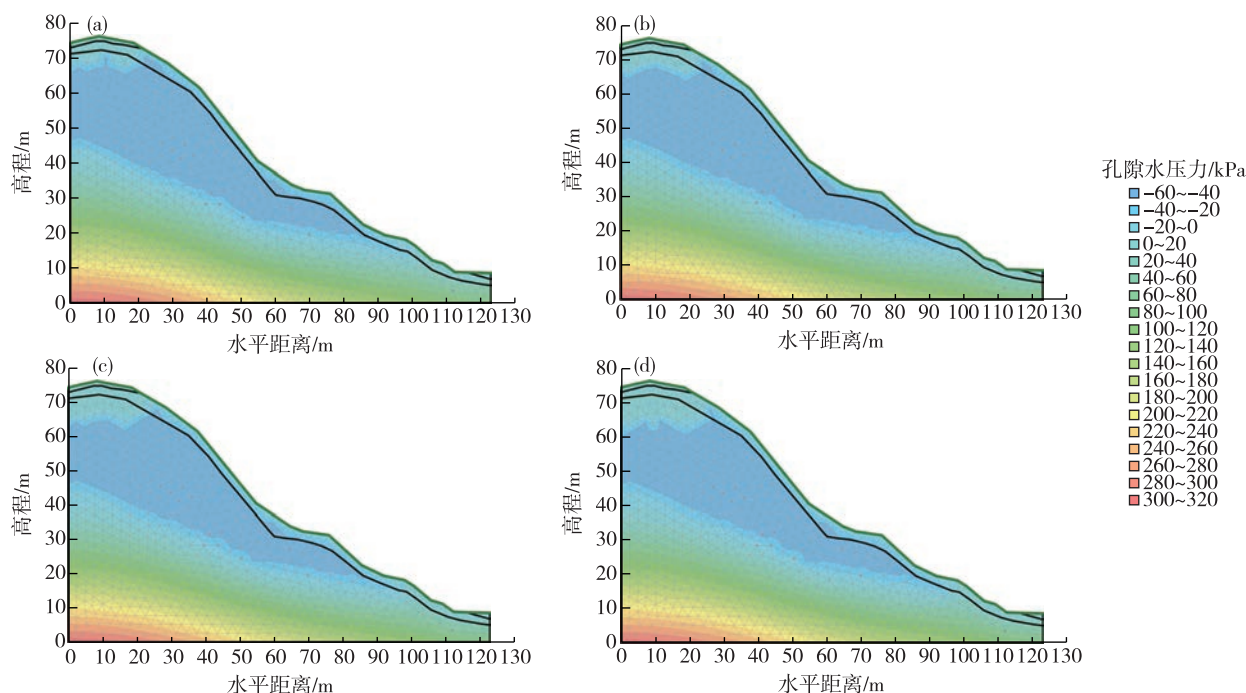
### 4.2.1 矿山边坡稳定性数值分析

东南沿海地区汛期、梅雨期降雨强度大且集中,在强降雨作用下可诱发大量的滑坡灾害。洞源村矿山边坡为开采形成,坡顶有风化壳松散土体覆盖,受工程开采方式及断层带影响,坡表岩土体破碎,节理、裂隙发育。为深入分析强降雨对矿山边

坡稳定性的影响,本文开展了暴雨条件下降雨时间 24 小时的边坡渗流分析。图 5 分别展示了矿山边坡剖面降雨 6 h、12 h、18 h、24 h 边坡内部孔隙水压力的变化情况,可知随着降雨作用的进行,雨水沿边坡表面下渗,在坡肩位置孔隙水压力明显增大,坡体表面孔隙水压力变化基本与坡面平行。降雨对矿山边坡的作用主要表现为 3 个方面:一是该边坡坡顶覆盖松散层,受工程扰动,坡面有破碎松散堆积物,降雨增加了坡表松散层的容重增加了下滑力;二是在水的浸润作用下,表层松散岩土体抗剪强度明显降低,减小了抗滑力;三是坡体表面因工

程采掘扰动形成大量裂隙,加之岩石发育大量的微裂隙,成为雨水下渗的优势通道,裂隙被雨水充满,产生孔隙水压力,导致裂隙进一步扩展并逐渐贯

通,进而形成局部潜在滑移面,众多潜在滑移面发展成为滑面,发生滑坡。



(a).降雨 6 h 边坡内部孔隙水压力云图;(b).降雨 12 h 边坡内部孔隙水压力云图;(c).降雨 18 h 边坡内部孔隙水压力云图;(d).降雨 24 h 边坡内部孔隙水压力云图

图 5 暴雨条件下不同时刻洞源村矿山边坡孔隙水压力云图

Fig. 5 Cloud map of pore water pressure of mine slope in Dongyuan Village at different times under rainstorm conditions

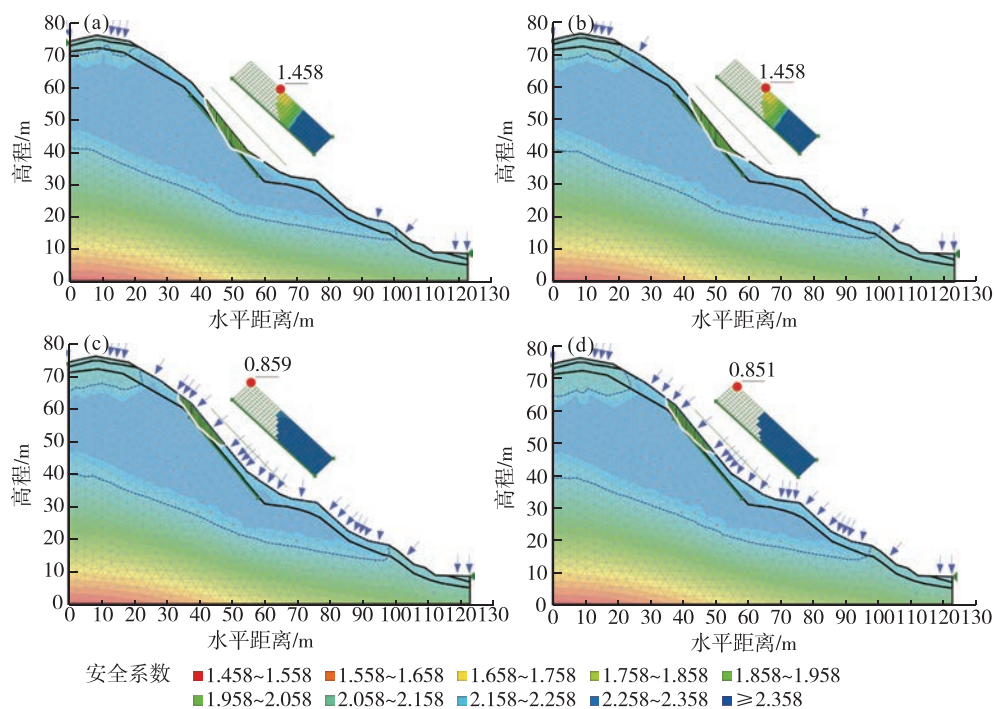
基于降水的渗流分析,将不同时刻的渗流场作为边坡稳定性分析的前提条件,利用有限元方法通过自动搜索滑动面分别计算了降雨 6 h、12 h、18 h、24 h 边坡的安全系数,计算过程参照文献<sup>[36-37]</sup>。结果表明,在暴雨条件下随着降雨过程的进行,边坡安全系数逐渐降低,边坡初始时刻最危险滑动面的安全系数为 1.458,潜在滑面显示,边坡的破坏位于高陡区域,破坏以浅表层强风化松散岩体的滑动为主(图 6)。随着降雨的进行,孔隙水压力对边坡稳定性的影响作用逐渐加大,边坡的安全系数逐渐降低,由于坡肩位置(图 6 中滑动后缘位置)对降雨作用的响应最明显,坡肩位置也成为边坡破坏的最危险区段,其破坏方式仍以浅表层强风化岩体碎屑的滑动为主。

#### 4.2.2 生态修复设计边坡稳定性验算

为了研究生态修复工程对边坡稳定性的影响,检验生态修复工程的安全效应,本文开展了生态修

复设计边坡的渗流和稳定性数值计算,具体过程参照文献<sup>[36-37]</sup>,生态修复设计边坡降雨 6 h、12 h、18 h、24 h 的渗流场如图 7 所示,在降雨 6 h 时,边坡表面几乎无雨水入渗,仅在坡顶有雨水入渗,随着降雨依次至 12 h、18 h、24 h,坡顶雨水入渗逐渐增多,边坡表面雨水几乎无渗入,内部孔隙水压力云图变化不大。计算结果表明,在边坡设计合理排水情况下,坡表雨水主要顺坡面排水系统流出,对边坡内部渗流场影响不明显;仅坡肩位置有少许渗入,坡面雨水无法渗入,对岩土体的力学参数的影响也将变小。

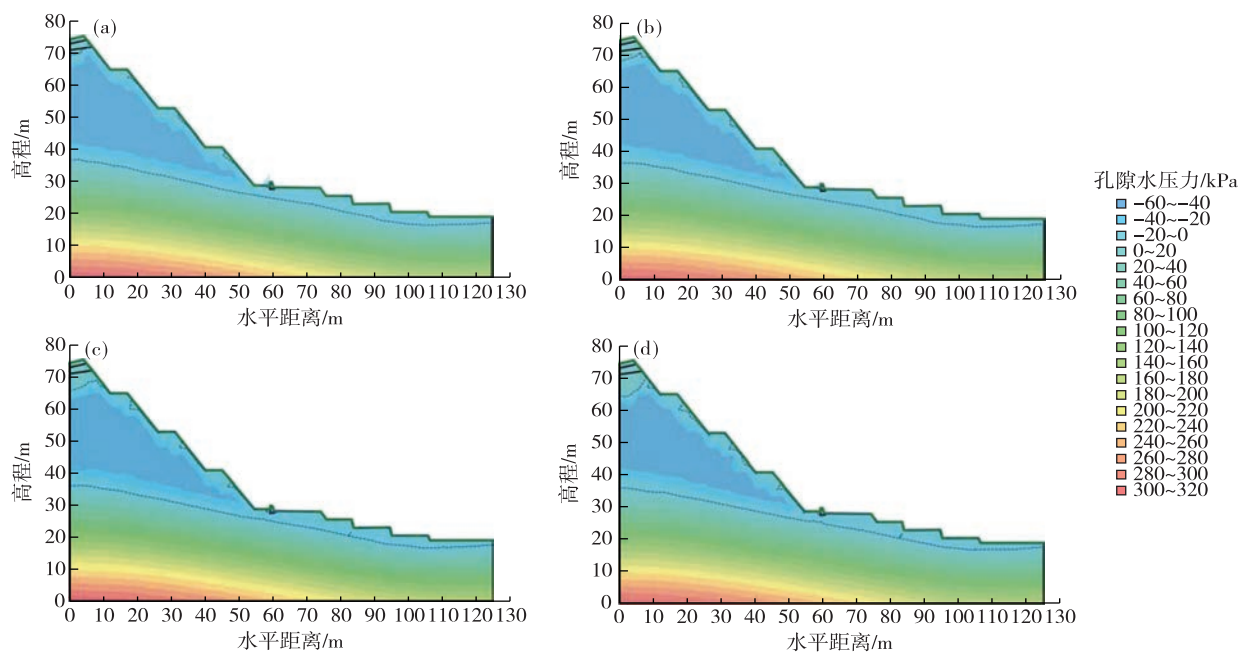
地质安全是评价矿山生态修复效果的重要指标,为了评价生态修复方案设计的合理性,并与原边坡进行对比分析,本文开展了生态修复设计边坡的稳定性数值验算(图 8),具体计算过程参照文献<sup>[36-37]</sup>。结果显示,暴雨条件下在 6 h、12 h、18 h、24 h 最危险滑面均为第三级台阶,且边坡安全系数



(a). 降雨 6 h 边坡潜在滑移面及安全系数;(b).降雨 12 h 边坡潜在滑移面及安全系数;(c).降雨 18 h 边坡潜在滑移面及安全系数;(d).降雨 24 h 边坡潜在滑移面及安全系数

图 6 不同时刻洞源村矿山边坡潜在滑移面及安全系数

Fig. 6 Potential slip surface and safety factor of mine slope in Dongyuan Village at different times



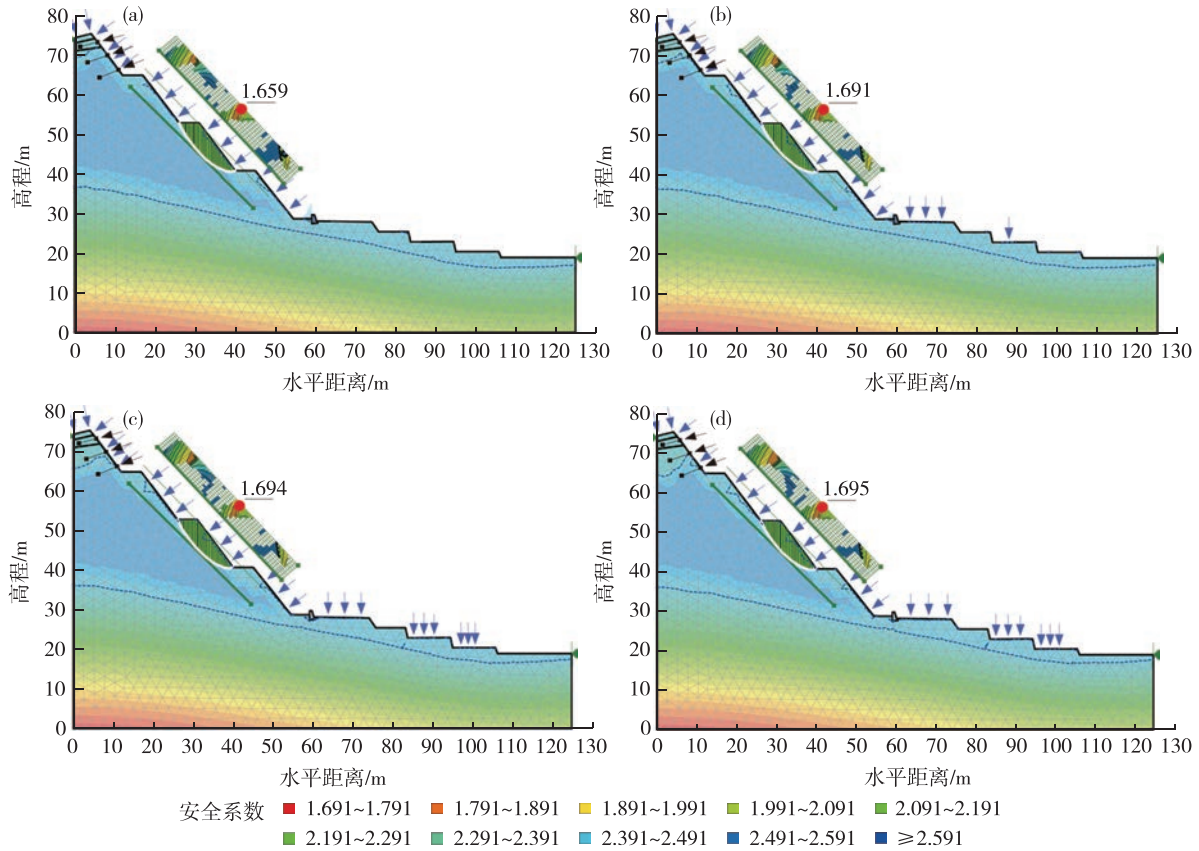
(a). 降雨 6 h 边坡内部孔隙水压力云图;(b).降雨 12 h 边坡内部孔隙水压力云图;(c).降雨 18 h 边坡内部孔隙水压力云图;(d).降雨 24 h 边坡内部孔隙水压力云图

图 7 暴雨条件下不同时刻设计边坡孔隙水压力云图

Fig. 7 Cloud map of pore water pressure of the designed slope at different times under rainstorm conditions

均保持 1.7 左右,因此降雨对设计边坡稳定性的影响不大。坡肩部位岩体较为破碎,在锚索的作用下,表现为稳定状态;坡脚部位设置挡土墙有效增

强了边坡整体的稳定性;通过削坡填方,将边坡表层的破碎岩体清理,内部岩体完整性好,强度高,不易发生滑坡等地质灾害。



(a).降雨 6 h 边坡潜在滑移面及安全系数;(b).降雨 12 h 边坡潜在滑移面及安全系数;(c).降雨 18 h 边坡潜在滑移面及安全系数;(d).降雨 24 h 边坡潜在滑移面及安全系数

图 8 设计边坡不同时刻潜在滑移面及安全系数

Fig. 8 Potential slip surface and safety factor of designed slope at different times

#### 4.2.3 对比结果

通过对比矿山边坡与生态修复设计边坡的安全系数随时间变化曲线(图 9)可知,降雨对矿山边坡稳定性影响明显,且随着降雨过程进行,雨水不断入渗边坡内部,在增加岩土体容重的同时,大大降低了岩土体抗剪强度参数。水的作用还促进了裂隙的生成、扩展、贯通,大大降低了边坡的安全系数。但对于生态修复设计的边坡,排水系统的设置使得雨水无法下渗,大量雨水沿坡表排水系统排出,同时阶梯状的斜坡结构,锚索及挡土墙等工程大大增加了边坡的安全性。因此,在降雨作用下,生态修复设计边坡是安全的。

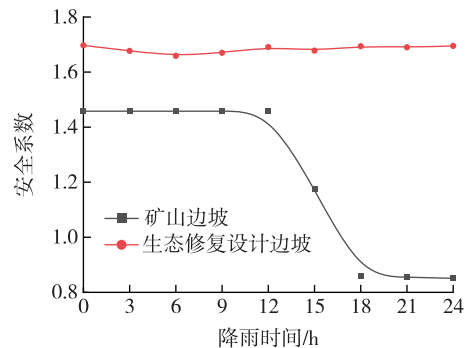


图 9 洞源村矿山边坡安全系数随时间变化曲线

Fig. 9 Curves of mine slope safety factor changing with time of Dongyuan Village

## 5 结论

(1)洞源村矿山工程开采边坡生态修复设计方案为剥离表层松散岩土体,降低坡降比至1:0.75以下,采取挡土墙等工程措施提高边坡稳定性;并采用适合气候的植物固土,防止水土流失。

(2)表层松散岩土是水分入渗的载体,清除表层松散土,削坡降低坡降比,采取排水措施,有效减少了水分入渗量,孔隙水压力变化区域影响范围仅为坡表以下2~5 m,减小了边坡内部孔隙水压力变化。

(3)矿山边坡在持续强降雨作用下,经过锚索格构设计、设置挡土墙、削坡等措施后,边坡安全系数从0.851提高至1.7,且随降雨持续恒定在1.7上下,验证了边坡设计达到了安全性要求。

## 参考文献

- [1] 程宝成,陈震.我国矿山环境治理现状及措施研究[J].资源与产业,2014,16(4):95-99.  
CHENG B C, CHEN Z. Research on the current situation and measures of mine environmental governance in my country[J]. Resources and Industry, 2014, 16(4): 95-99.
- [2] 李雄峰,陈鹏宇,师华鹏.焦作市龙寺废弃矿山边坡危岩体稳定性及其稳定可靠度研究[J].地质灾害与环境,2015,26(3):92-97.  
LI X F, CHEN P Y, SHI H P. Research on the stability and reliability of the dangerous rock mass on the slope of the abandoned Longsi mine in Jiaozuo City[J]. Geological Hazards and Environmental Protection, 2015, 26(3): 92-97.
- [3] 朱鹏,张轶群,陈建昌,等.某废弃矿山生态破坏与环境修复研究[J].东华理工大学学报(自然科学版),2016,39(4):341-346.  
ZHU P, ZHANG Y Q, CHEN J C, et al. Research on ecological damage and environmental restoration of an abandoned mine[J]. Journal of Donghua University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 39(4): 341-346.
- [4] 欧哲,王铁,杨家富,等.废弃矿山破碎岩质边坡地质环境治理[J].金属矿山,2017(7):178-185.  
OU Z, WANG T, YANG J F, et al. Geological environmental management of broken rock slopes in abandoned mine[J]. Metal Mines, 2017(7):178-185.
- [5] 李永庚,蒋高明.矿山废弃地生态重建研究进展[J].生态学报,2004,24(1):95-100.  
LI Y G, JIANG G M. Research progress on ecological reconstruction of mine wasteland[J]. Journal of Ecology, 2004, 24(1): 95-100.
- [6] 魏远,顾红波,薛亮,等.矿山废弃地土地复垦与生态恢复研究进展[J].中国水土保持科学,2012,10(2):107-114.  
WEI Y, GU H B, XUE L, et al. Research progress on land reclamation and ecological restoration of mine wasteland[J]. China Soil and Water Conservation Science, 2012, 10(2): 107-114.
- [7] 关军洪,郝培尧,董丽,等.矿山废弃地生态修复研究进展[J].生态科学,2017,36(2):193-200.  
GUAN J H, HAO P Y, DONG L, et al. Research progress on ecological restoration of mine wasteland[J]. Ecological Science, 2017, 36(2): 193-200.
- [8] 姜霞,王坤,郑朔方,等.山水林田湖草生态保护修复的系统思想——践行“绿水青山就是金山银山”[J].环境工程技术学报,2019,9(5):475-481.  
JIANG X, WANG K, ZHENG S F, et al. Systematic thinking on ecological protection and restoration of mountains, rivers, forests, fields, lakes and grasses—Practice “Lucid waters and lush mountains are invaluable assets”[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2019, 9(5): 475-481.
- [9] 张立博,付厚利,秦哲,等.露天矿坑岩质边坡浸润线及稳定性研究分析[J].地质与勘探,2017,53(6):1174-1180.  
ZHANG L B, FU H L, QIN Z, et al. Research and analysis on infiltration line and stability of rock slope in open pit mines[J]. Geology and Exploration, 2017, 53(6): 1174-1180.
- [10] 方前程,商丽.基于博弈论-云模型的露天矿岩质边坡稳定性分析[J].安全与环境学报,2019,19(1):8-13.  
FANG Q C, SHANG L. Stability analysis of rock slopes in open pit mines based on game theory-cloud model[J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(1): 8-13.
- [11] 袁颖,李佳玉.岩质边坡稳定性评价的尖点突变理论模型[J].地质与勘探,2021,57(1):183-189.  
YUAN Y, LI J Y. A cusp catastrophe theoretical model for rock slope stability evaluation[J]. Geology and Exploration, 2021, 57(1): 183-189.
- [12] 李文新,刘艳红,蒋京名,等.露天矿山不同岩质边坡稳定性安全分析[J].采矿技术,2022,22(3):68-72.  
LI W X, LIU Y H, JIANG J M, et al. Stability and

- safety analysis of slopes with different rock qualities in open pit mines[J]. Mining Technology, 2022, 22(3): 68-72.
- [13] 唐国强,靳贝贝,李远心.矿山生态环境治理工程设计方案[J].工程技术研究,2020(21):197-198.  
TANG G Q, JIN B B, LI Y X. Design scheme of mine ecological environment governance engineering[J]. Engineering Technology Research, 2020(21):197-198.
- [14] 张生祥,寇正中,崔可可.浅析矿山生态环境恢复治理存在的问题及改进措施[J].资源节约与环保,2020(7):32.  
ZHANG S X, KOU Z Z, CUI K K. Analysis on the existing problems and improvement measures of mine ecological environment restoration and management [J]. Resource Conservation and Environmental Protection, 2020(7):32.
- [15] 赵丽琼.某铜矿山生态环境修复治理对策研究与实施[J].清洗世界,2022,38(6):132-134.  
ZHAO L Q. Research and implementation of ecological environment restoration and governance countermeasures in a copper mine[J]. Cleaning World, 2022, 38(6): 132-134.
- [16] 郭冬艳,杨繁,高兵,等.矿山生态修复助力碳中和的政策建议[J].中国国土资源经济,2021,34(10):50-54.  
GUO D Y, YANG F, GAO B, et al. Policy suggestions for mine ecological restoration to help carbon Neutrality [J]. China Land and Resources Economy, 2021, 34(10): 50-54.
- [17] 李海东,胡国长,燕守广.矿区生态修复目标与模式研究[J].生态与农村环境学报,2022,38(8):963-971.  
LI H D, HU G C, YAN S G. Research on goals and models of ecological restoration in mining areas [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(8):963-971.
- [18] 刘延滨,王承义.采矿迹地生态恢复的探索与实践——大兴安岭古利库砂金矿废弃地生态修复为例[J].中国林副特产,2018(5):75-83.  
LIU Y B, WANG C Y. Exploration and practice of ecological restoration in mined land: A case study on ecological restoration of Guliku abandoned mine land in Daxing'an Mountain[J]. Forest By-Product and Speciality in China, 2018(5):75-83.
- [19] 王婧静.金属矿山废弃地生态修复与可持续发展研究[J].安徽农业科学,2010,38(15):8082-8084.  
WANG J J. Research on ecological restoration and sustainable development of metal mine waste land [J]. Anhui Agricultural Science, 2010, 38(15): 8082-8084
- [20] 周航,曾敏,刘俊.施用碳酸钙对土壤铅、镉、锌交换态含量及在大豆中累积分布的影响[J].水土保持学报,2010,24(4):123-126.  
ZHOU H, ZENG M, LIU J. Effects of calcium carbonate application on exchangeable content of lead, cadmium and zinc in soil and their cumulative distribution in soybean [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(4): 123-126
- [21] BOYER S, WRATTEN S D. The potential of earthworms to restore ecosystem services after opencast mining-A review [J]. Basic and Applied Ecology, 2010, 11(3): 196-203.
- [22] 高骏.矿山地质环境治理中坚硬岩石削坡方法比较和优化[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(12):79-85.  
GAO J. Comparison and optimization of hard rock slope cutting methods in mine geological environment management[J]. Prospecting Engineering (Geotechnical Drilling Engineering), 2020,47(12):79-85.
- [23] 全强,孙立新,成格尔,等.林西关沟废弃矿山地质环境及生态修复治理技术研究[J].中国矿业,2022,31(5):63-68.  
QUAN Q, SUN L X, CHENG G E, et al. Research on geological environment and ecological restoration technology of abandoned mine in Linxiguangou [J]. China Mining Industry, 2022, 31(5): 63-68.
- [24] 何照,张小刚,白玉珍,等.河北承德某高陡边坡治理及植被恢复研究[J].西部探矿工程,2021,33(2):7-9,12.  
HE Z, ZHANG X G, BAI Y Z, et al. Research on the governance and vegetation restoration of a high and steep slope in Chengde, Hebei [J]. Western Prospecting Engineering, 2021, 33(2): 7-9, 12.
- [25] 卞正富,于昊辰,韩晓彤.碳中和目标背景下矿山生态修复的路径选择[J].煤炭学报,2022,47(1):449-459.  
BIAN Z F, YU H C, HAN X T. Path selection of mine ecological restoration under the background of carbon neutrality target [J]. Journal of Coal Science, 2022, 47(1): 449-459.
- [26] 穆嘉琳,赵健,高琦.京张高铁昌平段废弃石灰矿矿山生态修复治理技术实践[J].现代矿业,2021,37(2):161-166,172.  
MU J L, ZHAO J, GAO Q. Practice of ecological restoration and management technology of abandoned lime mines in Changping section of Beijing-Zhangjiakou high-speed railway[J]. Modern Mining, 2021, 37(2): 161-166, 172.
- [27] 贾斌,宋少秋.废弃矿山生态修复治理技术应用——以

- 北京房山区废弃矿山为例[J].矿产勘查,2019,10(11):2831-2834.
- JIA B, SONG S Q. Application of ecological restoration and governance technology in abandoned mines: Taking abandoned mines in Fangshan District, Beijing as an example[J]. Mineral Exploration, 2019, 10(11): 2831-2834.
- [28] 付天池,叶小舟,何宝林.某废弃矿山地质环境治理及生态修复技术研究[J].现代矿业,2020,36(12):230-233.
- FU T C, YE X Z, HE B L. Research on geological environment management and ecological restoration technology of an abandoned mine[J]. Modern Mining, 2020, 36(12): 230-233.
- [29] 游晓清.废弃矿山生态复绿技术的应用研究[J].中国集体经济,2022,725(33):160-162.
- YOU X Q. Application research on ecological restoration technology of abandoned mine [J]. China Collective Economy, 2022, 725(33): 160-162.
- [30] 李钦韬,彭涛,杨健,等.京津冀地区废弃矿山地质环境治理及生态修复方案研究[J].现代矿业,2020,36(6):205-208.
- LI Q T, PENG T, YANG J, et al. Research on geological environment management and ecological restoration plan of abandoned mines in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Modern Mining, 2020, 36(6): 205-208.
- [31] 王冲,陈国光,张景,等.福建省南安市废弃矿山修复时序安排[J].华东地质,2022,43(1):102-112.
- WANG C, CHEN G G, ZHANG J, et al. Sequence arrangement for the restoration of abandoned mines in Nan'an City, Fujian Province[J]. East China Geology, 2022, 43(1): 102-112.
- [32] 武翼飞,陈国光.基于 InVEST 模型的矿区土壤保持功能评估——以银顶格矿区为例[J].华东地质,2022,43(2):184-195.
- WU Y F, CHEN G G. Evaluation of soil conservation function in mining areas based on InVEST model—Taking Yindingge mining area as an example[J]. East China Geology, 2022, 43(2): 184-195.
- [33] 朱晓勇,胡国长.花岗岩露天关闭矿山生态修复技术应用[J].地质与勘探,2022,58(1):168-175.
- ZHU X Y, HU G C. Application of ecological restoration technology in granite open-pit closed mines [J]. Geology and Exploration, 2022, 58(1): 168-175.
- [34] 项素清,杨旺文,叶妍婷.基于常规及区域站的金华市暴雨气候特征分析[J].浙江气象,2022,43(3):29-36.
- XIANG S Q, YANG W W, YE Y T. Analysis of the heavy rain climate characteristics based on conventional and regional stations [J]. Zhejiang Meteorological, 2022, 43(3): 29-36.
- [35] 张泰丽,孙强,李绍鹏,等.浙江飞云江流域玄武岩残积土滑坡降雨入渗柱状实验研究[J].华东地质,2021,42(4):367-372.
- ZHANG T L, SUN Q, LI S P, et al. Columnar experimental study on rainfall infiltration of basalt residual soil landslides in Feiyun River Basin, Zhejiang [J]. East China Geology, 2021, 42(4): 367-372.
- [36] 雷梦茹,徐光黎,张泰丽,等.金华市某岩质滑坡成因机制分析及发展趋势预测[J].华东地质,2021,42(4):398-408.
- LEI M R, XU G L, ZHANG T L, et al. Genetic mechanism analysis and development trend prediction of a rock landslide in Jinhua City[J]. East China Geology, 2021, 42(4): 398-408.
- [37] 唐学民.摩根斯坦-普瑞斯法对露天矿边坡稳定性的评价应用[J].西部资源,2012(5):118-119.
- TANG X M. Morgenstern-Price method to evaluate the stability of open-pit mine slopes[J]. Western Resources, 2012(5):118-119.
- [38] 陈浩,黄静,林锋.GeoStudio 软件在土坡饱和-非饱和渗流分析中的应用[J].四川建筑,2008,28(6):67-68.
- CHEN H, HUANG J, LIN F. Application of GeoStudio software in saturated-unsaturated seepage analysis of soil slopes [J]. Sichuan Architecture, 2008, 28(6): 67-68.
- [39] 郝亚勋,秦鹏飞,潘鹏飞,等.岩土工程数值分析与其应用研究[J].金属矿山,2021,546(12):89-95.
- HAO Y X, QIN P F, PAN P F, et al. The analysis of the values of geotechnical engineering and its application research [J]. Metal Mine, 2021, 546(12): 89-95.

## Research on ecological restoration technology of high-steep slopes of abandoned mines based on geological safety evaluation

HAN Shuai<sup>1</sup>, HUI Shujun<sup>2</sup>, SUN Qiang<sup>1</sup>, ZHANG Shuai<sup>3</sup>, SHI Lei<sup>1</sup>, ZHANG Ying<sup>1</sup>, ZHU Qingwei<sup>4</sup>

(1. *Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China;*

2. *Zaozhuang Urban and Rural Water Affairs Development Center, Zaozhuang 277800, Shandong, China;*

3. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

4. *Zhejiang Institute of Surveying and Mapping Science and Technology, Hangzhou 310012, Zhejiang, China)*

**Abstract:** The new round of national strategic mineral prospecting requires to pay attention to ecological protection. The ecological restoration of abandoned open-pits is an important step in the comprehensive use of mine land and ecological environmental protection, among which the restoration of high-steep slopes is the focus and difficulty. To this end, an ecological restoration technology pilot study was carried out at the abandoned open pit mine in Dongyuan Village, Lingdong Township, Lanxi City, Zhejiang Province. Through field surveys, engineering geological mapping and engineering drilling, a numerical analysis of slope safety based on the finite element method was conducted for the ecological restoration of high-steep slopes. The analysis results show that the safety factor of the slope reduced from 1.458 to 0.851 with the rainfall, which makes it a safety hazard. Ecological restoration of high-steep slopes shall be complemented by engineering measures, including slope cutting to reduce the slope gradient and the construction of retaining walls at the leading edge of the slope, to meet safety requirements; Adequate drainage can greatly reduce the impact of water on slope safety and improve slope stability. With the ecological restoration design, the safety factor of the slope under heavy rainfall conditions significantly increased and almost maintained at around 1.7, which meets the safety design requirements. This technology demonstration can provide a reference for the ecological restoration of other abandoned mines.

**Key words:** abandoned open-pit mine; ecological restoration; slope stability; numerical analysis; Lanxi, Zhejiang Province