

文章编号: 1004-4051(2024)08-0085-07

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20241005

# 露天煤矿矿山地质环境因子提取与环境恢复治理分区综合评价研究

谢武平<sup>1</sup>, 何益君<sup>1</sup>, 曾蔚<sup>1</sup>, 张俊<sup>2</sup>, 罗忠行<sup>1</sup>, 刘斌<sup>2</sup>

(1. 湖南省生态地质调查监测所, 湖南长沙 410000;

2. 湖南中核建设工程有限公司, 湖南长沙 410000)

**摘要:** 为进一步探究露天煤矿矿山的现存风险因素, 以及后续的环境恢复治理路径, 以西南地区渝南煤矿废弃露天煤矿矿山为研究案例, 基于无人机倾斜摄影方法获取该矿山的基本影像信息, 建立矿山区域三维模型图, 综合应用 ArcGIS、FLAC<sup>3D</sup> 等软件对该矿山区域地质条件进行综合分析, 明确该矿山的坡度、坡高、边坡稳定性、土地压占损毁情况、危岩分布和边坡类型分布情况。通过专家访谈法建立露天煤矿环境恢复治理分区综合评价模型, 结合评价因子数据对恢复治理分区进行综合评价。结果显示: 矿区土地压占与损毁严重, 因此, 在后续的工作中, 应当对压占现有土壤的矿渣和岩石等材料进行转运, 而后结合土壤污染情况实施针对性土壤治理措施。该区域存在较严重的地质环境问题, 需要进行岩土工程治理。这主要是由于矿山开采放炮引起的震动, 导致了不稳定的高陡岩质边坡。

**关键词:** 露天煤矿; 地质环境; 因子提取; 综合评价

**中图分类号:** TD167; X322 **文献标识码:** A

## Research on the extraction of geological environmental factors and comprehensive evaluation of environmental restoration and management zoning in open-pit coal mines

XIE Wuping<sup>1</sup>, HE Yijun<sup>1</sup>, ZENG Wei<sup>1</sup>, ZHANG Jun<sup>2</sup>, LUO Zhonghang<sup>1</sup>, LIU Bin<sup>2</sup>

(1. Ecology Geological Survey and Monitoring Institute of Hunan Province, Changsha 410000, China;

2. Hunan CNNC Construction Engineering Co., Ltd., Changsha 410000, China)

**Abstract:** In order to further explore the existing risk factors of open-pit coal mine and the subsequent environmental restoration and management path, in the case of Yunan Coal Mine abandoned open-pit coal mine in southwest China, based on the basic image information of the mine drone tilt photography method of mine area, comprehensive application of ArcGIS software, FLAC<sup>3D</sup> software and other software comprehensive analysis of the mine regional geological conditions, clear the mine slope, slope height, slope stability, land occupation and damage, dangerous rock distribution and slope type distribution. In addition, the comprehensive evaluation model of open-pit coal mine is established through expert interview method, and the comprehensive evaluation of restoration and management is combined with the data of evaluation factors. The results show that although there is no geological disaster in the mining area, the land occupation and damage in the mining area is serious. Therefore, in

收稿日期: 2023-11-25 责任编辑: 刘硕

基金项目: 湖南省矿山生态修复智慧技术研究与应用项目资助(编号: 2021-51)

第一作者简介: 谢武平(1987—), 男, 汉族, 湖南益阳人, 高级工程师(注册岩土工程师), 研究方向为地质灾害防治研究、矿山生态修复研究。

引用格式: 谢武平, 何益君, 曾蔚, 等. 露天煤矿矿山地质环境因子提取与环境恢复治理分区综合评价研究[J]. 中国矿业, 2024, 33(8): 85-91.

XIE Wuping, HE Yijun, ZENG Wei, et al. Research on the extraction of geological environmental factors and comprehensive evaluation of environmental restoration and management zoning in open-pit coal mines[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(8): 85-91.

the subsequent work, the slag and rock materials occupying the existing soil should be transferred, and then targeted soil control measures should be carried out in combination with the soil pollution situation. There are serious geological environment problems in this area, which requires geotechnical engineering treatment. This is mainly due to the vibration caused by mining and blasting, which leads to the unstable high and steep rock slope.

**Keywords:** open-pit coal mine; geological environment; factor extraction; comprehensive evaluation

## 0 引言

矿产资源和环境是我国快速发展的基础条件之一,然而,对矿山资源大规模的开采作业必将破坏原有矿山的生态平衡状态,造成大面积的土地和岩质边坡裸露,产生视觉污染和各种环境地质问题。为了确保废弃矿山治理工作具有精准性,近年来,研究人员将侧重点放在矿山地质环境综合评价方面,如王娟等<sup>[1]</sup>采用 GIS 和 RS 对矿山地质环境进行质量评价,综合评价出甘肃省白银煤矿矿山地质环境质量;王伟等<sup>[2]</sup>利用层次分析法建立了矿山生态环境保护与恢复治理评价指标体系,得出影响矿山生态环境保护与恢复治理的首要条件为历史遗留沉陷裂缝;陈哲锋等<sup>[3]</sup>采用遥感技术提取矿山环境评价因子,利用层次分析法和综合模糊评价相结合,充分发挥了两种数学方法的优点,将动态与静态、定量与非定量等指标有机结合,使评价结果更符合实际。就研究现状而言,上述定量评价方法的应用,加之各类信息系统的引入,为矿山地质环境问题分析提供了强有力的支撑,传统模式下因主观因素而带来的误差问题已经被压缩至相对较小的水平。但既有研究大多数只是根据地质环境评价结果划分出地质环境的优良程度,给出合理的治理措施,使得地质环境问题的治理措施存在治理修复手段仍然在一定程度上表现出单一、片面和盲目的特征,因此,在后续的研究工作中,有必要提取更为细致和准确的矿山环境评价因子,构建一套针对矿山地质环境恢复治理的体系,这有助于进一步全面、准确、科学地指导矿山地质环境问题的治理恢复。

## 1 研究区概况

研究主要针对西南地区渝南煤矿矿山开展,其地质图如图 1 所示。渝南煤矿露天开采面积 2.162 km<sup>2</sup>,排土场占地面积 0.622 km<sup>2</sup>,工业场地占地面积 0.065 km<sup>2</sup>,合计 2.849 km<sup>2</sup>。渝南煤矿位于沙土镇,矿区范围内及周边乡村公路纵横交错,距 G56 杭瑞高速马蹄收费站运距 27 km,距 G75 兰海高速三合收费站运距 34 km,距高铁遵义南站(苟江镇)运距约 44 km,有多条交通干线与以上过来收费站相连。井田位于贵州高原北部,地处偏岩河支流花滩河与乌江上游鸭池

河之间的地表分水岭北坡,区内总体属侵蚀型中低山沟谷地,区域上地层由老到新依次为:寒武系中上统娄山关组( $\epsilon_{2,3ls}$ )、奥陶系下统湄潭组( $O_1m$ )、二叠系(P)、三叠系(T)、侏罗系(J),缺失志留系(S)、泥盆系(D)、石炭系(C)、白垩系(K)等大部分地层。矿区整体位于安底背斜南东翼。整体为一单斜构造,地层总体倾向为南东,倾角 6°~13°。矿区内褶皱不发育,断裂构造有 1 条北东向断层,规模较小。按断层性质描述如下:F1 断层发育于矿区西南部,呈北西南东向展布,区内长约 1.8 km,断层倾向南西,倾向一般为 150°~185°,倾角 70°,断层破碎带断 5~10 m,垂直断距 20 m,水平断距 650 m,为平移断层。矿区内未见规模较大构造,发育的断层整体规模较小,断层破坏程度不大,总体构造复杂程度属中等类型。

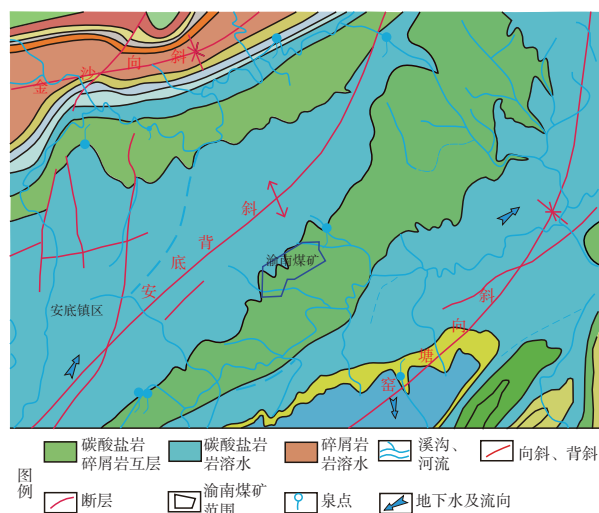


图 1 渝南煤矿矿山地质图

Fig. 1 Geological map of Yunan Coal Mine

该露天煤矿设计开采产能为 210 万 t/a,自 20 世纪 80 年代开始进行煤炭开采。近年来,因各种因素影响,该露天煤矿已关闭,但由于煤矿开采带来的矿山地质灾害风险通常具有滞后性,因此,近期该矿山地质灾害问题仍然频繁发生,主要表现在以下几个方面:①该矿山高陡边坡已经严重失稳;②主要生态环境问题为喀斯特石漠化严重;③开采过程中残余的煤矸石和渣土等造成土地压占问题,同样引发

环境污染和土地资源破坏;④受到扰动影响,部分岩体稳定性转差,崩塌等风险激增。针对以上几类问题,研究人员决定对该矿山区域进行较为全面且准确的矿山地质环境因子提取,以实现对该矿山现状的分析,并对当前的环境恢复治理分区进行综合评价,以指导后续作业。

## 2 数据采集与处理

为实现对该矿山地质环境因子要素的全面准确提取,结合已有经验,并查阅相关文献资料后,确定采用照片最大分辨率 4 000×3 000 大疆精灵 4 无人机倾斜摄影测量技术进行数据采集,选取在天气良好、光线充足且无云雾干扰的情况下进行采集,具体采集参数见表 1。

表 1 采集参数

Table 1 Collection parameters

采集次序	飞行高度/m	飞行时间/s	飞行面积/m	相机倾角/(°)	相片采集数/张
1	120	2 418	218×639	90	120
2	220	3 535	426×688	90	160
3	285	9 06s	270×563	90	60

基于表 1 中的参数进行数据采集后,再应用 Agisoft PhotoScan 建模软件导入采集的影像数据,经过处理后,得到煤矿矿山三维模型如图 2 所示。

## 3 矿山地质环境因子提取与分析

### 3.1 矿山坡度和坡高的提取与分析

基于图 2 三维模型,首先对矿山坡度和坡高这两类基础信息进行提取和分析<sup>[4]</sup>。在坡度提取分析过程中,应用 ArcMap 软件导入三维模型,将坡度按 10° 分级分析统计;在坡高分析中,则由软件自动处理,

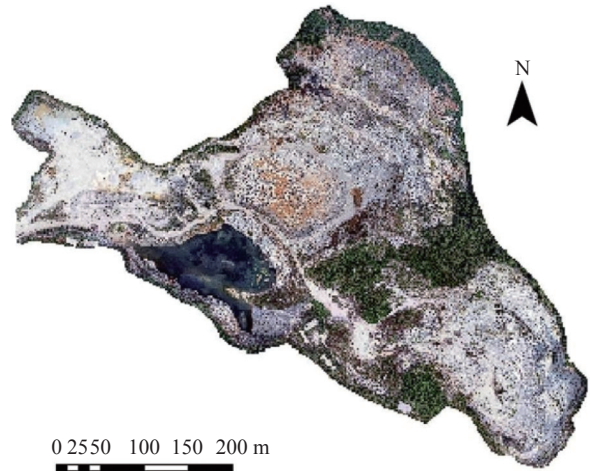


图 2 煤矿矿山三维模型  
Fig. 2 3D model of coal mine

以 17 m 进行分级分析统计,由此得到矿山坡度与坡高的提取分析结果,如图 3 所示。

由图 3 可知,就矿山坡度这一指标而言,坡度越高,则该坡度所占面积比例也就越低<sup>[6]</sup>。大部分区域的坡度值都集中在 0°~30°,且呈现出在矿山底部成片分布的特点,对应的地物包括矿区内部道路、矿坑、开采平台等,占比达到 61.48%。另外,坡度为 30°~60°的区域也呈现出连片分布,主要对应的地物是矿渣堆积区域,占比较少,为 27.33%;而坡度在 60°以上的区域则主要呈线条状零散分布在矿区的高陡边坡位置,占比相对较低,仅为 11.19%。就矿山坡高这一指标而言,该矿山坡高分布不均,表现为西部和中部低、东部和北部偏高的特点。根据测量结果可知,矿山多个高陡边坡的坡顶与坡角之间的标高差值都较为明显,特别是矿山北部边坡的差异更为突出,达到

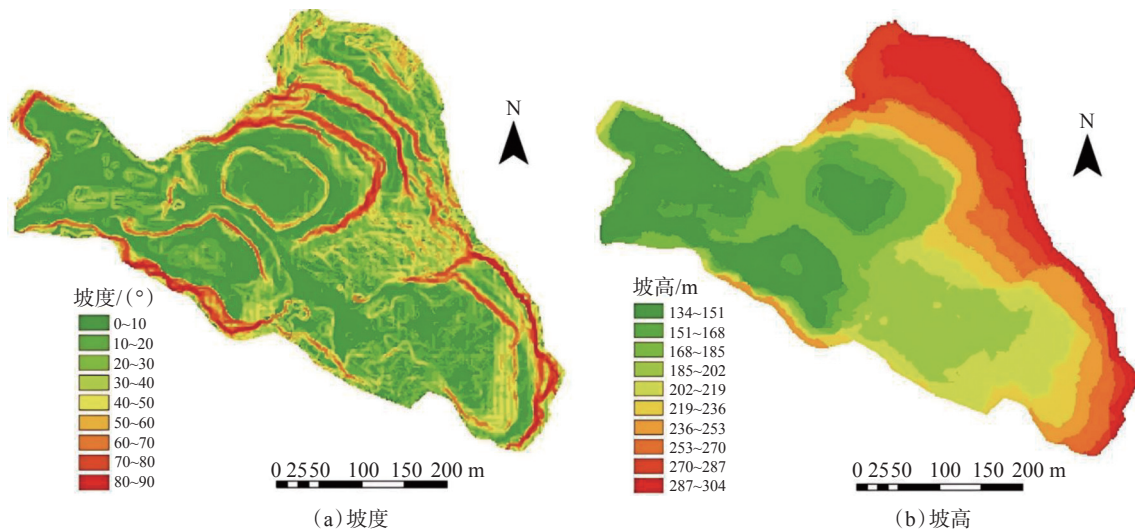


图 3 矿山坡度与坡高分析结果  
Fig. 3 Analysis results of slope and slope height of mine

了 141.5 m。

### 3.2 矿山边坡稳定性提取与分析

为实现对矿山边坡稳定性的分析,应用 FLAC<sup>3D</sup> 软件进行模拟分析,将已建立的三维模型导入到 FLAC<sup>3D</sup> 软件得到仿真模型,如图 4 所示。



图 4 仿真模型

Fig. 4 Simulation model

结合前期勘查资料,对该模型的材料进行定义<sup>[6]</sup>。由于该矿山煤炭资源已经枯竭,因此,对残留的煤炭材料忽略不计,该模型仅包括石灰岩层,查阅资料后,可知石灰岩的重度为 25.8 kN/m<sup>3</sup>、黏聚力为 350 kPa,内摩擦角为 26°,杨氏模量为 10<sup>7</sup> kPa<sup>[7]</sup>。至此,应用 FLAC<sup>3D</sup> 软件中的强度折减法对矿山模型进行仿真分析,得到仿真分析结果如图 5 所示。

根据图 5 中的仿真分析结果可得到以下几点推论:其一,从塑性区分布情况来看,该矿山存在着大面积的塑性区,具有易受破坏的特点,同时在图 4(a)中,浅色区域虽然表示破坏后稳定区域,但该区域内存在高陡边坡,因此,稳定性仍然不足,表明该矿山整体稳定性不足;其二,结合塑性区分布特征绘制稳定性分析结果后发现,该矿山区域的东部和北部仍然存在着大面积且连片的不稳定区和欠稳定区,初

步推断该矿山仍然存在着一定的变形和破坏特征。

### 3.3 矿山土地压占与损毁情况提取与分析

根据前期勘查得知,该矿山区域的土地压占问题主要为碎石和矿渣堆积所引起。对此,基于这一特征,应用 ArcGIS 软件对压占土地进行圈定,并对其占地面积进行测量<sup>[8]</sup>。在进行圈定的过程中,使用的数据为清晰的正射影像,以达到最佳的圈定精度。经过圈定,共圈定了 43 处压占和损毁的区域,得到结果如图 6 所示。

图 6 中所有曲线围合成的区域为矿山中已出现压占或损毁的区域。据此可知,该矿山区域目前已经出现了 43 处压占或损毁的区域,且各个区域在占地面积上存在一定差异,最大值为 3 077.5 m<sup>2</sup>,最小值为 17.36 m<sup>2</sup>,总面积约为 17 847.85 m<sup>2</sup>。在此基础上,对上述 43 处区域占地面积做进一步归纳分析,结果显示,其单处占地面积与占地总面积相比所在区域基本分布在 0.02% 以下、0.02%~0.06% 和 0.06% 以上三个区间,在 0.02% 以下的有 31 处,在 0.02%~0.06% 之间的有 8 处,大于 0.06% 的有 4 处。

### 3.4 矿山危岩提取与分析

由于该矿山除煤炭外主要为石灰岩,而由于石灰岩自身力学性质所限,在开采过程中经常转变为危岩,这些危岩也通常成为地质灾害隐患因素<sup>[9]</sup>。结合前期勘查资料可知,其分布形式主要表现为单块危岩、危岩群和浮石,因此,以这些特征为基础,利用清晰的正射影像数据,使用 ArcGIS 软件对危岩进行圈定,以达到最佳的圈定精度。经过圈定,共圈定了 23 处危岩区域,如图 7 所示。

由图 7 可知,在当前矿山区域中,危岩集中分布于高陡边坡坡面之上,主要是单块危岩或危岩群,以及浮石等,区域有 5 处单块危岩区、7 处危岩群区,以及 11 处浮石区。危岩主要分布在矿山北部和矿山南

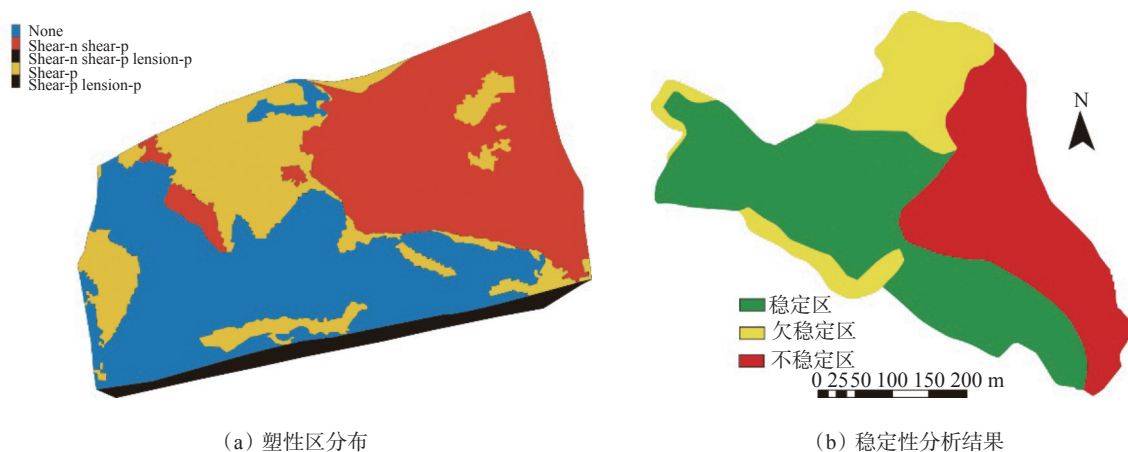


图 5 矿山模型仿真分析结果

Fig. 5 Simulation analysis results of mine model

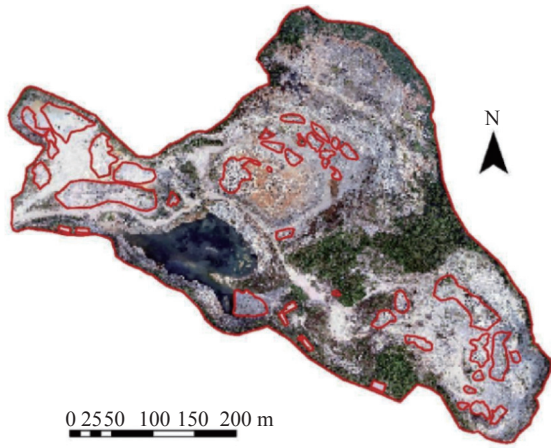


图 6 矿山区域土地压占情况分布  
Fig. 6 Distribution of land occupation in mining areas

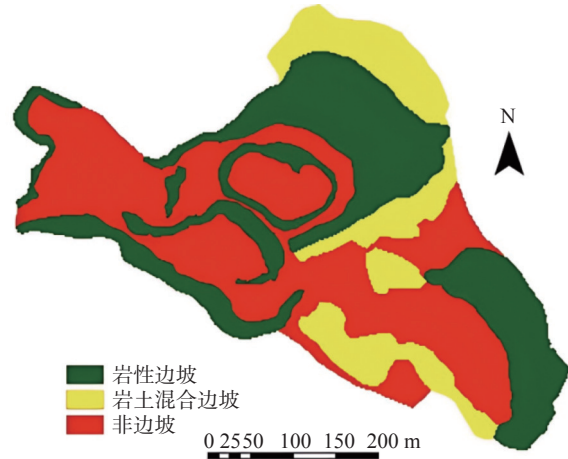


图 8 矿山边坡类型提取结果  
Fig. 8 Extraction results of slope types in the mine

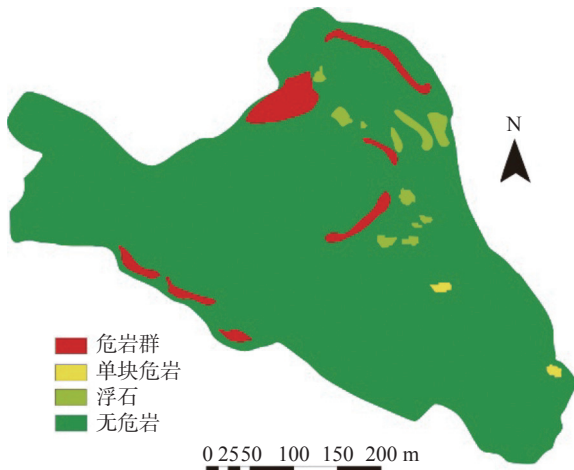


图 7 矿山危岩提取结果  
Fig. 7 Extraction results of dangerous rock in the mine

部的高陡岩质边坡上,其对应高陡岩质边坡的不稳定特征,也是后期治理工作需要重点探究的内容。

### 3.5 矿山边坡类型提取与分析

根据前期勘查资料可知,当前该矿山区域主要存在岩质边坡和岩土混合边坡两类,其中,前者主要表现为缺乏防护的高陡岩石边坡,后者主要因采掘扰动而形成。基于上述特征,利用清晰的正射影像数据,并使用 ArcGIS 软件进行划分<sup>[10]</sup>,得到岩质边坡、岩土混合边坡和非边坡三种区域,具体提取结果如图 8 所示。

由图 8 可知,该矿山区域内标记为岩性边坡和岩土混合边坡的区域与前文中的不稳定区域存在着较高的重合度,因此,上述边坡也是后期治理过程中需要关注的内容。

基于上述矿山地质环境因子进行全面分析与确定,能够为矿山地质环境恢复治理分区综合评价提供充足的数据支撑。

## 4 矿山地质环境恢复治理分区综合评价

### 4.1 评价体系与评价因子的确定

为实现针对该矿山的较为科学合理的矿山治理分区综合评价体系的设计,首先进行评价因子的选取,该过程应用专家访谈方法予以确定,在得到评价因子后,按照各个评价因子之间的逻辑关系,建立矿山治理分区评价体系见表 2。

表 2 矿山治理分区评价体系

Table 2 Evaluation system for mining management zoning

评价层	指标层	要素层
矿山治理 分区评价 A	矿山地质环境 条件 B1	边坡类型 C1
		坡度 C2
		坡高 C3
	矿山地质灾害及 生态破坏 B2	危岩 C4
		边坡稳定性 C5
		土地压占与损毁 C6

在确定上述评价因子后,参考相关文献资料,对各个评价因子采用三级评价模式,其等级划分结果见表 3。

### 4.2 评价权重的确定

基于表 2 中的评价体系,为实现对各个指标的求解,按照 AHP 层次分析法的一般方法,通过以下几个步骤对评价权重予以确定<sup>[11]</sup>。

1) 采用 A.L.Saaty 的 1~9 标度法,确定判断矩阵标度及其含义,具体见表 4。

2) 基于指标的判断矩阵,对判断矩阵中的每一列向量均进行归一化处理<sup>[12]</sup>,得到归一化处理后的矩阵表达式,见式(1)。

$$w_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (1)$$

表3 各评价因子等级划分结果

评价因子	赋值		
	1	2	3
坡高/m	< 10	10~30	> 30
坡度/(°)	< 30	30~50	> 60
边坡类型	非边坡	岩土混合边坡	岩质边坡
危岩	无危岩	边坡浮石	较大裂隙
边坡稳定性	稳定	欠稳定	不稳定
土地压占与损毁比例/%	< 0.02	0.02~0.06	> 0.06

表4 判断矩阵标度及含义

尺度 $a_{ij}$	含义
1	$i$ 和 $j$ 两因素重要性相同
3	$i$ 因素重要性略高于 $j$
5	$i$ 因素重要性显著高于 $j$
7	$i$ 因素重要性强烈高于 $j$
9	$i$ 因素重要性绝对高于 $j$
2、4、6、8	介于上述两种判断状态之间
倒数	$j$ 与 $i$ 两因素比较的判断值

式中:  $a_{ij}$  为判断矩阵中第  $i$  行第  $j$  列的元素;  $w_{ij}$  为向量归一化处理后的值;  $i, j$  为判断矩阵的行数和列数。

3) 对归一化后的各行做累计相加处理, 得到一个新的向量  $Aw_{ij}$ , 其计算公式见式(2)。

$$Aw_{ij} = \sum_{j=1}^n w_{ij} \quad (2)$$

4) 对新的向量做归一化处理, 由此即可得到权重值, 其主要通过对向量中的元素进行转置计算获得<sup>[3]</sup>, 计算公式见式(3)。

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T \quad (3)$$

式中,  $T$  为转置运算。

基于上述步骤, 即可计算表2中指标层和要素层的权重向量, 计算结果见表5。

#### 4.3 评价结果与讨论

基于上述已确定的权重值, 进一步结合研究区各评价因子特点与矿山自然条件等因素, 以  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  的栅格对矿山区域进行划分, 共划分出 165 700 个栅格, 由此在 ArcGIS 软件中, 通过空间加权叠合方法, 对矿山治理分区评价结果  $Q$  进行计算<sup>[4]</sup>, 计算公式见式(4)。

$$Q = \sum_{i=1}^6 w_i x_i \quad (4)$$

式中:  $w_i$  为第  $i$  个评价因子的权重值;  $x_i$  为第  $i$  个评价因子要素对应的分值(具体分值通过表3获取)。

表5 指标权重数据

评价层	指标层	要素层
矿山治理 分区评价 $A$ (1.000 0)	矿山地质环境 条件 $B_1$ (0.500 0)	边坡类型 $C_1$ (0.130 0)
		坡度 $C_2$ (0.206 3)
	矿山地质灾害及 生态破坏 $B_2$ (0.500 0)	坡高 $C_3$ (0.163 7)
		危岩 $C_4$ (0.206 3)
		边坡稳定性 $C_5$ (0.163 7)
		土地压占与损毁 $C_6$ (0.130 0)

基于上述评价方法进行自动计算后, 最终得到矿山地质环境恢复治理分区评价结果, 如图9所示。由图9可知, 根据环境恢复治理分区的角度, 该矿山区域可被划分为三个恢复治理分区, 具体如下: 首先是场地平整绿化区, 占地面积为  $8.47 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 约占整个矿山面积的 51.15%。该区域主要包括矿山的工业广场、开采后留下的矿坑和运输道路。地形平坦, 工业广场用于堆积开采完的石料, 土地受到了较大压力和损害, 但不存在矿山地质灾害。其次是边坡修复绿化区, 占地面积为  $3.21 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 约占整个矿山面积的 19.36%, 为面积最小的区域。该区域主要包括矿山开采形成的低陡边坡和高缓的开采台阶, 边坡状态相对稳定。最后是矿山边坡协同治理绿化区, 占地面积为  $4.89 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 约占整个矿山面积的 29.49%。该区域存在较严重的地质环境问题, 需要进行岩土工程治理。这主要是由于矿山开开放炮引起的震动, 导致了不稳定的高陡岩质边坡<sup>[5]</sup>。此外, 边坡上的岩石出现裂缝和松动, 坡体上还残留较多浮石, 在后续工作中仍需要进一步处理。

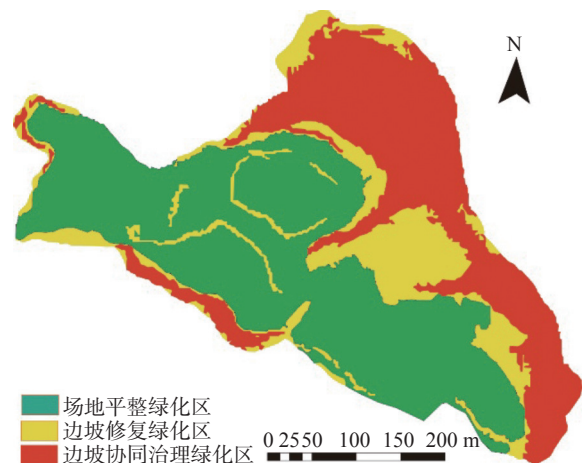


图9 矿山地质环境恢复治理分区评价结果

Fig. 9 Evaluation results of mine geological environment restoration and management zones

## 5 结语

本研究为进一步探究露天煤矿矿山地质环境

问题,以西南地区渝南煤矿为研究案例,基于当地无人机倾斜摄影测量得到的影像数据进行处理,明确了矿山的相关参数,以及当前存在的不稳定因素。在此基础上,应用层次分析法进行矿山地质环境恢复治理分区评价,划分了三个恢复治理分区,分别为:场地平整绿化区占地面积为 $8.47 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,约占整个矿山面积的51.15%,是所占面积最广的区域;边坡修复绿化区占地面积为 $3.21 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,约占整个矿山面积的19.36%;边坡协同治理绿化区占地面积为 $4.89 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,约占整个矿山面积的29.49%。上述内容可为后续的地质环境恢复治理提供参考。当然,本次研究也难免存在一定不足之处,因此,在后续的研究工作中,将考虑应用多变量遗传算法研究地质环境恢复治理的技术参数优化等内容,以进一步提升研究的实用价值。

#### 参考文献(References):

- [1] 王娟,张普斌,张建国,等.基于RS和GIS的矿山环境综合评价:以甘肃省白银煤矿区为例[J].矿产勘查,2012,3(6):873-882.  
WANG Juan, ZHANG Pubin, ZHANG Jianguo, et al. Comprehensive evaluation of mine environment based on RS and GIS techniques: a case study on Baiyin Coal Mining Area in Gansu Province[J]. Mineral Exploration, 2012, 3(6): 873-882.
- [2] 王伟,王海芳.矿山生态环境保护与恢复治理评价指标体系的构建[J].山西化工,2014,34(2):55-58.  
WANG Wei, WANG Haifang. Construction of evaluation index system for mining ecological environment protection and restoration governance[J]. Shanxi Chemical Industry, 2014, 34(2): 55-58.
- [3] 陈哲锋,吴静,郭玉斌,等.层次分析与模糊数学综合评价法在矿山环境评价中的应用[J].华东地质,2018,39(4):305-310.  
CHEN Zhefeng, WU Jing, GUO Yubin, et al. Application of AHP and fuzzy mathematics in comprehensive assessment of mine environment[J]. East China Geology, 2018, 39(4): 305-310.
- [4] 武宏贵.露天煤矿开采现状及生态环境影响分析[J].矿业装备,2023(1):72-74.  
WU Honggui. Analysis on the mining status and ecological environment impact of open-pit coal mine[J]. Mining Equipment, 2023(1): 72-74.
- [5] 高俊华,刘莎莎,杨金中,等.基于遥感的露天煤矿集中区地质环境灰关联评价:以准格尔煤田为例[J].国土资源遥感,2021,33(1):183-190.  
GAO Junhua, LIU Shasha, YANG Jinzhong, et al. Gray correlation evaluation of geological environment in the open-pit coal mine concentration area based on remote sensing: a case study of the Zhungeer Coalfield[J]. Remote Sensing of Land and Resources, 2021, 33(1): 183-190.
- [6] 刘文荣,李思扬,张波,等.草原区露天煤矿开发对草地植被NPP的影响研究[J].煤炭工程,2023,55(10):23-28.  
LIU Wenrong, LI Siyang, ZHANG Bo, et al. Impact of open-pit coal mining in grassland areas on grassland vegetation NPP[J]. Coal Engineering, 2023, 55(10): 23-28.
- [7] 何辉,穆文平,张晓,等.锡林郭勒盟大型露天煤矿区地质环境时空演化评价[J].地学前缘,2024,31(3):443-457.  
HE Hui, MU Wenping, ZHANG Xiao, et al. Spatio-temporal evolution evaluation of geological environment of large open pit coal mine areas in Xilingol League[J]. Earth Science Frontiers, 2024, 31(3): 443-457.
- [8] 邹兰兰.灵泉露天煤矿生态环境遥感监测与修复效果评价[D].徐州:中国矿业大学,2023.
- [9] 马立明,胡立国,殷红亮.唐山露天煤矿集中区地质环境质量评价体系构建[J].能源与环保,2023,45(4):49-54.  
MA Liming, HU Ligu, YIN Hongliang. Construction of geological environment quality evaluation system in Tangshan Open-pit Coal Mine[J]. Energy and Environmental Protection, 2023, 45(4): 49-54.
- [10] 翁海蛟,郝晓飞,张韶华,等.基于GIS的多元信息成矿预测研究:以通辽地区北部砂岩型铀矿为例[J].东华理工大学学报(自然科学版),2021,44(3):224-231.  
WENG Haijiao, HAO Xiaofei, ZHANG Shaohua, et al. Synthetic informational mineral resource prediction using GIS: a case study of sandstone type uranium deposits in North of Tongliao Region[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 44(3): 224-231.
- [11] 伍敏婷,孙岳,周子腾.基于层次分析-信息量法的滑坡易发性评价:以江西省浮梁县为例[J].东华理工大学学报(自然科学版),2023,46(2):157-166.  
WU Minting, SUN Yue, ZHOU Ziteng. Susceptibility evaluation of landslide disaster based on AHP-information method: a case of Fuliang County in Jiangxi Province[J]. Journal of East China University of Technology(Natural Science Edition), 2023, 46(2): 157-166.
- [12] 曹梦,郭孝理,赵云泽,等.复垦年限及植被模式对矿区土壤质量的影响[J].中国矿业,2020,29(2):72-76,93.  
CAO Meng, GUO Xiaoli, ZHAO Yunze, et al. Effect of reclamation years and vegetation pattern on soil quality in mining areas[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(2): 72-76, 93.
- [13] 王党朝,申莹莹,杨震.胜利一号露天煤矿开发建设对生态环境的影响评价[J].中国煤炭,2020,46(1):58-66.  
WANG Dangchao, SHEN Yingying, YANG Zhen. Evaluation of the impact of development and construction of Shengli No. 1 Open-pit Coal Mine[J]. China Coal, 2020, 46(1): 58-66.
- [14] 秦红正.干旱草原区露天煤矿环境影响后评价探讨[J].煤炭工程,2019,51(11):18-22.  
QIN Hongzheng. Environment impact post-assessment for open-pit coal mine in arid grassland[J]. Coal Engineering, 2019, 51(11): 18-22.
- [15] 宋子岭,赵东洋,张宇航,等.露天煤矿绿色开采生态环境评价体系模糊评判研究[J].煤炭科学技术,2019,47(10):58-66.  
SONG Ziling, ZHAO Dongyang, ZHANG Yuhang, et al. Study on evaluation model and application of green mining ecological environment evaluation system in open-pit coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 58-66.