基于开采扰动和生态安全格局的矿业城市地质灾害风险评价*

龚高旭[1],陈勇[1,2,3],刘贤军[1],高湘楚[1],邓芷君[1]

(1.武汉科技大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081;
2.国家环境保护矿冶资源利用与污染控制重点实验室, 湖北 武汉 430081;
3.冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430081)

摘要:为全面评估矿山地质灾害对生态系统的影响,构建矿山开采扰动指数并将其纳入地质灾害危险性评价体系,同时将矿山地质灾害对区域生态安全格局的影响纳入易损性评价体系,表征矿业城市地质灾害诱发因素的特殊性,丰富矿业城市地质灾害易损性内涵。大冶市地质灾害风险评价结果表明:极高、高、中和低风险区面积分别为95.67 km^2、230.57 km^2、349.64 km^2和890.41 km^2,占比分别为6.11%、14.72%、22.32%和56.85%;极高和高风险区均主要分布在金湖、大箕铺、金山店、还地桥、罗桥、灵乡、陈贵、刘仁八等采矿工程活动频繁的区域;矿山废弃地和矿山开采扰动是地质灾害的主要诱因,须加强矿山废弃地的修复治理,并采取绿色开采方式。

关键词:开采扰动;生态安全格局;矿山地质灾害;矿业城市;风险评价

中图分类号:TD167 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)12-0153-09

Risk Assessment of Geological Hazard in Mining Cities Based on Mining Disturbance and Ecological Security Pattern

GONG Gaoxu[1], *CHEN Yong*[1,2,3], *LIU Xianjun*[1], *GAO Xiangchu*[1], *DENG Zhijun*[1]

(1.School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China;
2.State Environmental Protection Key Laboratory of Mineral Metallurgical Resources Utilization and Pollution Control, Wuhan, Hubei 430081, China;
3.Hubei Provincial Key Laboratory of Efficient Utilization and Blocking of Metallurgical Mineral Resources, Wuhan, Hubei 430081, China)

Abstract: In order to comprehensively evaluate the impact of mine geological hazard on the ecosystem, the mining disturbance index was constructed and incorporated into the risk assessment system of geological hazard. At the same time, the impact of mine geological hazard on the regional ecological security pattern was incorporated into the vulnerability assessment system to characterize the particularity of geological hazard inducing factors in mining cities and enrich the connotation of geological hazard vulnerability in mining cities. The results of risk assessment of geological hazard in Daye City show that the areas of extremely high, high, medium and low risk areas are 95.67 km^2, 230.57 km^2, 349.64 km^2 and 890.41 km^2, accounting for 6.11%, 14.72%, 22.32% and 56.85%, respectively. The extremely high and high risk areas are mainly distributed in the areas with frequent mining engineering activities such as Jinhu, Dajipu, Jinshandian, Huandiqiao, Luoqiao, Lingxiang, Chengui and Liurenba. Mine wasteland and mining disturbance are the main causes of geological hazard. It is necessary to strengthen the restoration and treatment of mine wasteland and adopt green mining methods.

Key words: Mining disturbance, Ecological security pattern, Mine geological hazard, Mining city, Risk assessment

0 引言

近年来,我国地质灾害防治工作逐渐由隐患管理向风险管理转变,区域地质灾害风险评价作为地质灾害风险管理的支撑和依据,越来越受到重视[1]。地质灾害风险评价包括危险性评价和易损性评价两

* **收稿日期**:2025-01-15
基金项目:国家自然科学基金项目(41971237)
作者简介:龚高旭(2000—),男,湖南张家界人,硕士研究生,主要从事矿业城市地质灾害风险研究。E-mail:1290687185@qq.com
通信作者:陈勇(1968—),男,湖北武汉人,博士,教授,主要从事矿区生态风险评估与预警、矿山生态修复与土地整治等方面的研究。E-mail:chenyong68@wust.edu.cn

个主要环节。危险性指地质灾害发生的可能性,往往由地质灾害发生的空间概率和时间概率两个因素综合确定。其中,空间概率也称地质灾害易发性,指一定区域内由孕灾地质条件控制的地质灾害发生的可能性,即静态地考察地质灾害在相对稳定的孕灾环境中发生的可能性大小[2];时间概率指地质灾害诱发因素在时间上发生的可能性。易损性则指承灾体受到地质灾害影响时可能遭受的损失或损害程度。目前,已有不少学者通过定性分析[3]、概率统计法[4-8]、确定性分析[9]等方法对区域地质灾害风险评价方法展开了研究,但仍存在如下问题:在危险性评价方面,时间概率主要考虑降雨量、地震烈度等自然诱发因素,对矿业城市这类人类活动诱发作用强烈的区域难以全面表征;在易损性评价方面,通常只考虑地质灾害对人口、建筑、道路等可能造成的损失,较少考虑生态损失[10-11]。

生态安全格局是维持区域生态系统健康稳定的基础[12]。其中,生态源地作为生物多样性保护的核心区域,对维持区域生态系统稳定健康、提供必要生态服务具有关键作用;生态廊道是连接生态源地的纽带,能为生物迁徙提供适宜路径,进而促进区域内物种、能量与信息的有效交换[13]。因此,生态源地和生态廊道除了自身一般具有较高的生态价值外,也是区域生态网络的骨架,具有量化区域生态价值的作用[14]。将生态安全格局纳入地质灾害风险评价体系,能够从区域整体角度出发,更全面地评估地质灾害对生态系统造成的影响。

本文以湖北省大冶市为例,一方面构建开采扰动指数,将其作为地质灾害的人类活动诱发因素,并结合降雨量这一自然诱发因素,共同作为地质灾害危险性评价的时间概率分级指标,体现了矿业城市地质灾害诱发因素的特殊性;另一方面,从社会损失和生态损失两个维度评价地质灾害易损性,以人口密度、建筑物密度、道路密度表征社会损失,以对生态源地和生态廊道的影响表征生态损失,从而丰富了地质灾害易损性的内涵。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

大冶市是湖北省辖县级市,总面积为 1 566.28 km^2,下辖 5 个街道、10 个镇和 1 个乡。大冶市属于典型亚热带大陆性季风型湿润气候,雨量充沛,光照充足,年平均气温为 16.9 ℃,地貌包括平畈、丘陵和山地,地势南高北低,主要湖泊有大冶湖、保安湖和三山湖,水资源条件优越。大冶市矿产资源丰富,作为我国中南部典型的矿业城市,矿产资源开发在支撑当地经济发展的同时,也导致地质灾害较为频发。据地质灾害风险调查结果显示,大冶市地质灾害类型主要有崩塌、滑坡、地面塌陷和泥石流,目前共有地质灾害点 122 个(见表 1),这些灾害对人民生命健康和财产安全构成了严重威胁。

表 1 大冶市地质灾害区域分布

Table 1 Regional distribution of geological disastertpes in Daye city

乡镇	地质灾害点数量/个				合计/个
	地面塌陷	滑坡	崩塌	泥石流	
罗家桥街办	6	1	—	—	7
还地桥镇	13	1	—	—	14
保安镇	6	1	—	—	7
金山店镇	6	2	—	—	8
陈贵镇	10	2	—	—	12
灵乡镇	3	1	—	1	5
金牛镇	1	2	—	—	3
刘仁八镇	1	7	1	—	9
殷祖镇	—	6	7	—	13
大箕铺镇	9	1	2	—	12
金湖街办	25	4	1	2	32
茗山乡	—	—	1	—	1
合计	79	28	12	3	122

1.2 数据来源及处理

遥感影像数据来源于地理空间数据云陆地卫星 8 号(Landsat-8)高分影像。数字高程模型(DEM)来源于地理空间数据云平台,空间分辨率为 30 m。土地利用数据来源于中国科学院数据共享服务系统网站,空间分辨率为 30 m,划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 种地类。降雨量数据来源于国家地球系统科学数据中心,空间分辨率为 1 km。矿山废弃地、地质灾害点和矿山分布图由大冶市自然资源局提供。由于基础数据来源不同,使用地理信息系统(ArcGIS 10.2)将所有数据进行投影,统一坐标为 WGS_1984_UTM_Zone_50N,并对栅格数据进行重采样,统一为 30 m×30 m 的栅格单元。

2 研究方法

2.1 生态安全格局识别

2.1.1 生态源地

采用直接拾取法和形态学景观空间格局分析法(MSPA)综合识别生态源地。直接拾取法用于蓝色生态源地识别,依据《大冶市水资源综合规划(2019

年)》和《大冶市"十四五"水安全保障规划(2020 年)》,拾取对区域水资源保护和水安全保障起重要作用的湖泊、水库作为蓝色生态源地。MSPA 法[15]用于绿色生态源地识别,将林地作为 MSPA 分析的前景值,赋值 2,其他地类作为背景值,赋值 1,借助 Guidos 2.6 软件进行 MSPA 分析。由于研究区零星斑块较多,为保证核心区斑块面积保持不减少的状态,设置边缘宽度为 1,邻域参数为 8。以大于 1 km^2 的核心区作为绿色生态源地识别标准,在林地资源稀缺的区域,考虑该区域较小林地斑块对整体景观起到的连通性作用,选择 1～2 块核心区作为补充源地[16]。

2.1.2 生态廊道

采用直接拾取法和电路理论法综合识别生态廊道。直接拾取法用于蓝色生态廊道的识别,依据《大冶市水资源综合规划(2019 年)》和《大冶市"十四五"水安全保障规划(2020 年)》,将河流及河岸植被和相关生态要素作为河流蓝色生态廊道,以实现流域水系的连通[17]。电路理论法用于绿色生态廊道识别,通过咨询专家和参考相关研究成果,选择土地利用类型、高程、植被指数(NDVI)、坡角作为阻力因子(见表 2)[18],利用 ArcGIS 软件中 Linkage Mapper 工具包中的 Build Network and Map Linkages 功能,完善生态廊道的识别。

遵循"蓝色生态廊道为主,绿色生态廊道为辅"的原则,当生态源地间同时存在蓝色生态廊道和绿色生态廊道时,剔除绿色生态廊道。

表 2 生态阻力因子指标体系

Table 2 Index system of ecological resistance factors

阻力因子	权重	阻力分级	阻力值	阻力因子	权重	阻力分级	阻力值
土地利用类型	0.35	林地、水域	1	NDVI	0.25	>0.3	1
		草地	3			0.2～0.3	3
		耕地	5			0.1～0.2	5
		未利用地、矿山废弃地	7			0～0.1	7
		建设用地	9			<0	9
高程	0.10	455～841 m	1	坡角	0.10	<8°	1
		292～455 m	3			8°～15°	3
		157～292 m	5			15°～25°	5
		59～157 m	7			25°～35°	7
		−117～59 m	9			>35°	9

2.2 地质灾害风险评价

2.2.1 危险性评价

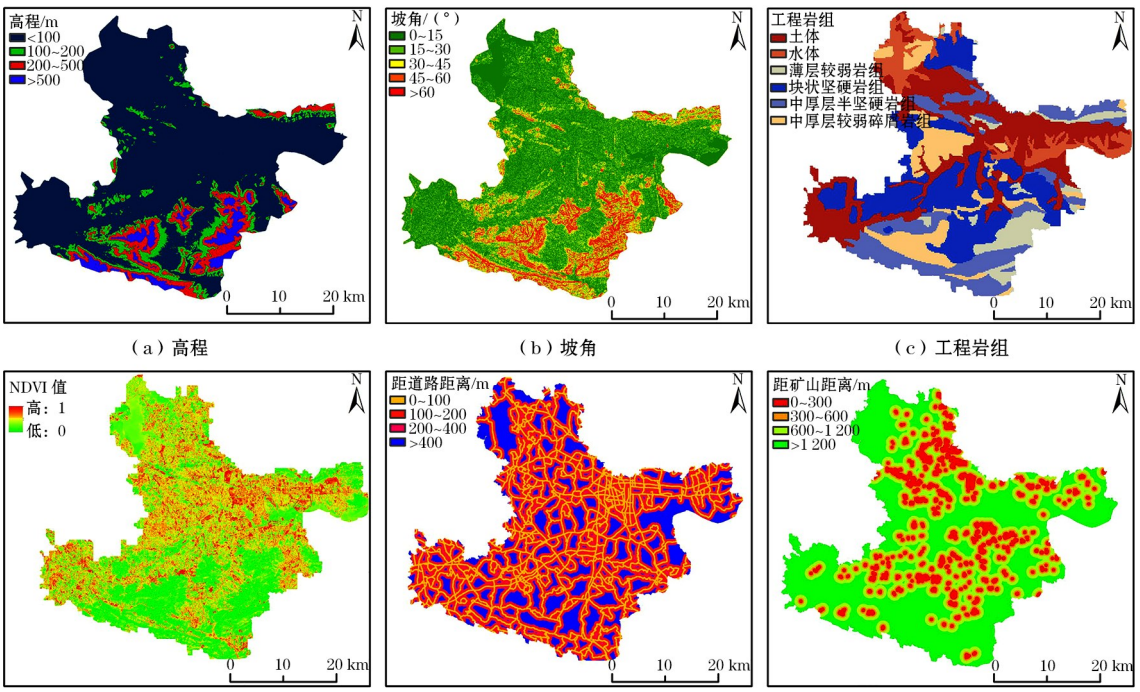
(1) 空间概率确定方法。

根据《地质灾害风险调查评价规范(1∶50 000)》(DZ/T 0438—2023)的相关规定,按崩塌滑坡、地面塌陷、泥石流 3 种类型分别计算地质灾害发生的空间概率。

崩塌滑坡、地面塌陷的空间概率采用多层感知器(MLP)[7]进行推测。根据大冶市地质环境特征、文献[19]及数据可获性,选择高程、坡角、植被指数、工程岩组、距道路距离、距矿山距离 6 个因子作为孕灾因子(见图 1)。正负样本数据按照 7∶3 的分割比例随机划分为训练集和验证集,灾害点(正样本)的标签设置为 1,非灾害点(负样本)的标签设置为 0。采用 python3.8 构建多层感知器模型,激活函数采用 S 型生长曲线(sigmoid),输出函数采用归一化指数函数(softmax),优化器采用随机梯度下降(SGD),损失函数选用交叉熵函数。设置迭代次数为 100 次,对评价结果采用接受者操作特征曲线(ROC)进行检验。本研究地面塌陷、崩塌滑坡的 ROC 曲线检验结果显示,曲线下面积(AUC)分别为 75.9%和 72.3%,说明该推测结果满足精度要求。

大冶市泥石流主要是由尾矿库溃坝引起,泥石流地质灾害的空间概率主要由尾矿库安全状况决定。本文选取高程、坡角、尾矿库设计等作为评价指标,按权重 0.2,0.3 和 0.5 对所有尾矿库进行安全状况评价,由自然断点法将尾矿库划分为 4 个安全等级,分别赋值 1～4,采用克里金插值并经标准化处理得到大冶市泥石流灾害空间概率。

地质灾害综合空间概率由以上 3 类灾害的空间概率经加权求和得到,权重由现有地质灾害点数量比例关系决定,崩塌滑坡∶地面塌陷∶泥石流=57∶62∶3,说明现有某类地质灾害点越多,发生此类地质灾害的空间概率越大。



（a）高程 （b）坡角 （c）工程岩组

（d）NDVI （e）距道路距离 （f）距矿山距离

图 1 空间概率孕灾因子

Fig.1 Spatial probabilistic catastrophe factors

（2）时间概率确定方法。

矿业城市地质灾害的诱发因素不同于一般城市，除了降雨、地震等自然诱发因素外，采矿活动也是矿业城市主要的地质灾害诱发因素。本文构建开采扰动指数表征矿业城市采矿活动对地质灾害的诱发作用，与降雨量这一自然诱发因素共同确定时间概率。

矿产资源开采规模、开采方式不同，诱发地质灾害的可能性不同。一般来说，开采规模越大，对区域地质环境的扰动越大；不同开采方式对区域地质环境的破坏程度也存在差异。

开采扰动指数公式为：

$$T=\sum_{i=1}^{n} w_i x_i,(i=1,2,\cdots,n) \qquad (1)$$

式中：T 为开采扰动指数；n 为诱发因素数量；w_i 为诱发因素权重；x_i 为诱发因素的作用分值。

开采规模（x_1）按大型、中型、小型和微型企业分别赋值作用分 5，4，3 和 1。由于大冶市目前主要以地下开采为主，露天开采忽略不计，开采方式（x_2）按崩落法、空场法和充填法分别赋值作用分 5，3 和 1。根据层次分析法确定开采规模和开采方式的权重分别为 $w_1=0.35$ 和 $w_2=0.65$。采用反距离权重插值得到大冶市每个栅格的开采扰动指数，将栅格的开采扰动指数进行标准化处理，其值作为采矿活动诱发因素的时间概率值。

降雨量作为地质灾害的自然诱发因素。对近 5 年累计降雨量按栅格进行标准化处理，其值作为降雨量因素的时间概率值。采用加权求和法得到综合时间概率，其中采矿活动诱发因素和降雨量诱发因素的权重分别为 0.6 和 0.4。

（3）危险性评价方法。

危险性评价结果通常是在空间概率（易发性）的基础上叠加时间概率得到，根据空间概率和时间概率，构建大冶市地质灾害危险性评价模型[5]：

$$LHI=P_k^{\alpha}\times P_s^{\beta} \qquad (2)$$

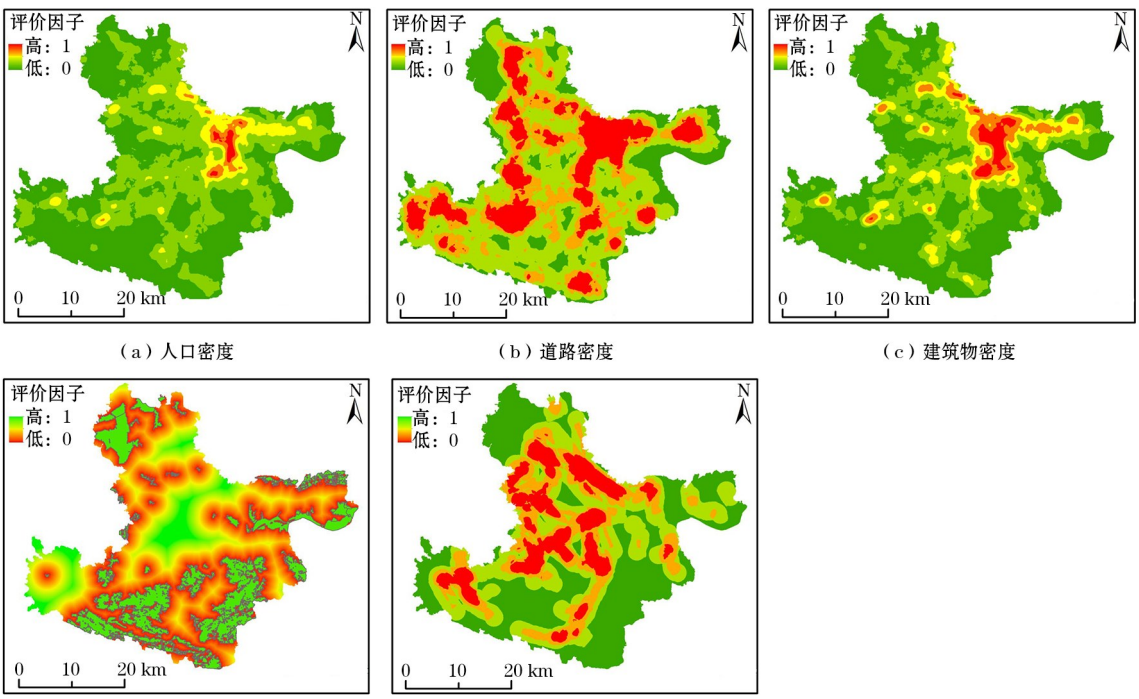
式中：LHI 表示地质灾害危险性指数；α 和 β 表示权重，由于空间概率代表孕灾地质条件对地质灾害发生可能性的影响，对地质灾害发生起着主导作用，取 $\alpha=2$、$\beta=1$；P_k 表示第 i 个评价单元发生地质灾害的空间概率值；P_s 表示第 i 个评价单元发生地质灾害的时间概率值。计算结果采用自然断点法划分为极高、高、中、低 4 个危险性等级。

2.2.2 易损性评价

易损性评价综合考虑社会损失和生态损失两个维度。其中，社会损失指地质灾害发生后可能产生的人、财、物损失，因此，以人口密度、道路密度和建

筑物密度 3 个因子作为评价指标[19]；生态损失指地质灾害发生后可能产生的生态价值损失，本文以地质灾害对区域生态安全格局的影响作为判断依据，构建距生态源地距离、生态廊道密度 2 个因子作为评价指标。

距生态源地距离利用 ArcGIS 中的欧氏距离功能得到，并运用模糊隶属度功能对其进行标准化处理，分类值类型设置为线性函数，最小值为 0，最大值为 7 050。生态廊道密度采用线密度算法得到，在 ArcGIS 中输入廊道要素，设置搜索半径为 1 500 m，并对廊道密度结果进行标准化处理。各评价因子指标如图 2 所示。



（a）人口密度　（b）道路密度　（c）建筑物密度

（d）距生态源地距离　（e）生态廊道密度

图 2　易损性评价因子

Fig.2　Vulnerability evaluation factors

由层次分析法确定易损性评价因子权重，研究得到人口密度、道路密度、建筑物密度、距生态源地距离、生态廊道密度的权重分别为 0.350，0.185，0.185，0.180，0.100。评价结果按自然间断点法划分为极高、高、中、低 4 个等级。

2.2.3　地质灾害风险评价

地质灾害风险由地质灾害危险性和易损性综合决定。采用矩阵分析法[20]将地质灾害风险划分为极高、高、中和低 4 个等级，见表 3。

表 3　大冶市地质灾害风险性等级

Table 3　Risk classification of geological hazards in Daye city

易损性	极高危险性	高危险性	中危险性	低危险性
极高易损性	极高风险性	极高风险性	高风险性	中风险性
高易损性	极高风险性	高风险性	高风险性	中风险性
中易损性	高风险性	高风险性	中风险性	低风险性
低易损性	中风险性	中风险性	低风险性	低风险性

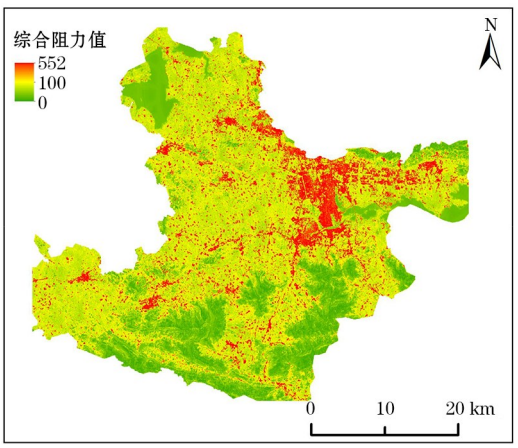
3　结果分析

3.1　生态安全格局状况

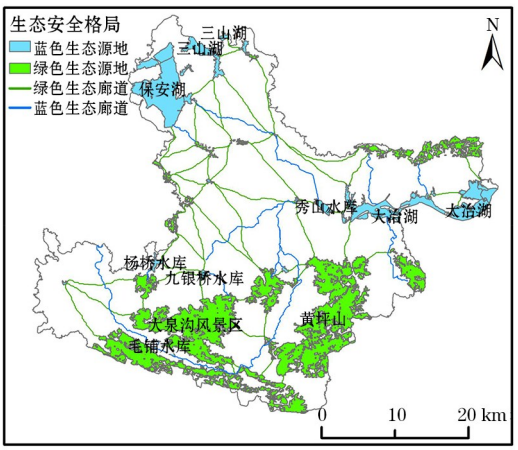
阻力面及生态安全格局识别结果如图 3 所示。由图 3 可知，阻力值较高的区域主要集中在大冶市东北部的主城区及其周边区域，主城区南部的金湖和大箕铺西部区域为大冶市 3 大矿集区之一，铜绿山矿、大红山矿、兴红矿业均分布于此，对生物迁徙和生态流通产生了较大阻力；阻力值较低的区域主要集中在大冶市南部的殷祖、刘仁八和灵乡，以及大冶市西北部的保安，其中，殷祖、刘仁八和灵乡以低山丘陵为主，保安则多湖泊湿地，为生物迁徙和生态流通提供了良好的环境保障。

大冶市生态源地包括保安湖、三山湖、大冶湖等 7 个湖泊，秀山水库、九眼桥水库等 8 座水库和 19 块林地斑块，总面积为 335.03 km^2。生态源地的分布呈现南多北少、四周多中间少的特点，这与自然地理条

件有关,同时也受到了人类活动的强烈影响。矿产资源开发和城市建设对自然生境破坏较大,导致蓝色生态源地污染和绿色生态源地斑驳破碎较为严重。据2022年大冶市环境质量公报显示,作为蓝色生态源地的保安湖和大冶湖的水质均为Ⅳ类,未达到规划的Ⅲ类水质标准。一些看似完整的绿色生态源地,也因为矿产资源开发而导致其内部斑驳破碎。大冶市生态廊道包括28条蓝色生态廊道和44条绿色生态廊道,总长度为454.77 km。生态廊道与生态源地面临着同样的问题,28条蓝色生态廊道中,Ⅴ类和劣Ⅴ类河流占比达30%。由此可知,矿产资源开发及其引发的地质灾害导致生态廊道中存在较多障碍点。



(a)综合阻力面



(b)生态安全格局

图3 阻力面及生态安全格局识别结果

Fig.3 Identification results of resistance surface and ecological security pattern

3.2 风险评估结果

3.2.1 危险性评价

空间概率计算结果如图4(a)所示。崩塌滑坡的空间概率主要由高程、坡角和距矿山距离决定,地面塌陷的空间概率主要由距矿山距离、高程决定,而泥石流的空间概率则由尾矿库的安全状况决定,说明大冶市地质灾害的空间概率虽然与自然环境条件有关,但主要是受到采矿活动的影响。时间概率计算结果如图4(b)所示。开采扰动是大冶市地质灾害的主要诱发因素,大冶市3大矿集区是时间概率较高的区域。需要指出的是,采矿活动对大冶市地质灾害发生的空间概率和时间概率均有显著影响,但又具有不同的影响特征。一方面,对于采矿活动频繁而目前已基本闭矿的区域,如还地桥和灵乡等区域,其空间概率较高但时间概率较低,这是因为历史遗留的大量矿山废弃地仍容易诱发地面塌陷、崩塌和滑坡等地质灾害,因此,此类矿山废弃地的修复治理需要得到重视;另一方面,一些仍在大规模开采的区域,比如金湖、大箕铺、金山店、陈贵、刘仁八等区域,由于历史遗留废弃地较多且开采扰动指数较高,其空间概率和时间概率均较高,因此,应采用绿色开采方式进行采矿活动。

危险性分级结果如图4(c)所示。大冶市极高、高、中和低危险区的面积分别为96.93 km^2、308.45 km^2、391.14 km^2和769.76 km^2,占比分别为6.19%、19.69%、24.97%和49.15%。极高危险区主要分布在金湖、大箕铺、金山店、陈贵和刘仁八交界处,属于大冶市3大矿集区域,高危险区大致环绕于极高危险区周边,在还地桥、灵乡、殷祖、罗桥、金湖、大箕铺、金山店、陈贵和刘仁八均有分布。金牛、茗山、保安、金山和汪仁则主要为中、低危险区。

3.2.2 易损性评价

易损性分级结果如图4(d)所示,大冶市极高、高、中和低易损区面积分别为82.98 km^2、199.51 km^2、526.25 km^2和757.54 km^2,占比分别为5.30%、12.74%、33.60%和48.37%。极高易损区主要分布在罗桥、东岳路和金湖,这是大冶市主城区,人口和建筑密集,且地质灾害对生态源地和生态廊道可能造成的影响也较大。高易损区主要分布在极高易损区外围,以及还地桥、金山店、灵乡、金山、汪仁等区域,这些区域虽然人口和建筑不如主城区密集,但均为矿山开采或工业园区建设较为集中的区域,且生态源地或生态廊道较为丰富。除乡镇政府所在地区域外,其他乡镇主要为中、低易损区。

3.2.3 风险性评价

地质灾害风险分级结果如图4(e)所示。大冶

市极高、高、中和低风险区面积分别为 95.67 km^2、230.57 km^2、349.64 km^2 和 890.41 km^2,占比分别为 6.11%、14.72%、22.32%和 56.85%。极高风险区主要分布在金湖、大箕铺、金山店、还地桥、罗桥、灵乡、陈贵和刘仁八交界处,这些区域是大冶市的传统矿区,长期的采矿活动导致地质环境遭受严重破坏,区域内现有地质灾害点 35 处,且人口和建筑密集。高风险区主要围绕极高风险区向外扩散,金湖、罗桥、还地桥、金山店、陈贵、灵乡和金山占比较大,其余乡镇仅有零星分布。中风险区的分布并未呈现出明显的集中趋势,在各个乡镇均有分布。需要指出的是,刘仁八和殷祖虽然现存较多的地质灾害点,但由于地处低山丘陵,人口和建筑密度相对较低,且多数矿山已闭矿,开采扰动小,因而风险级别并不高。低风险区占比大、分布广,金牛和保安因地势平坦且矿业不发达,以低风险为主。

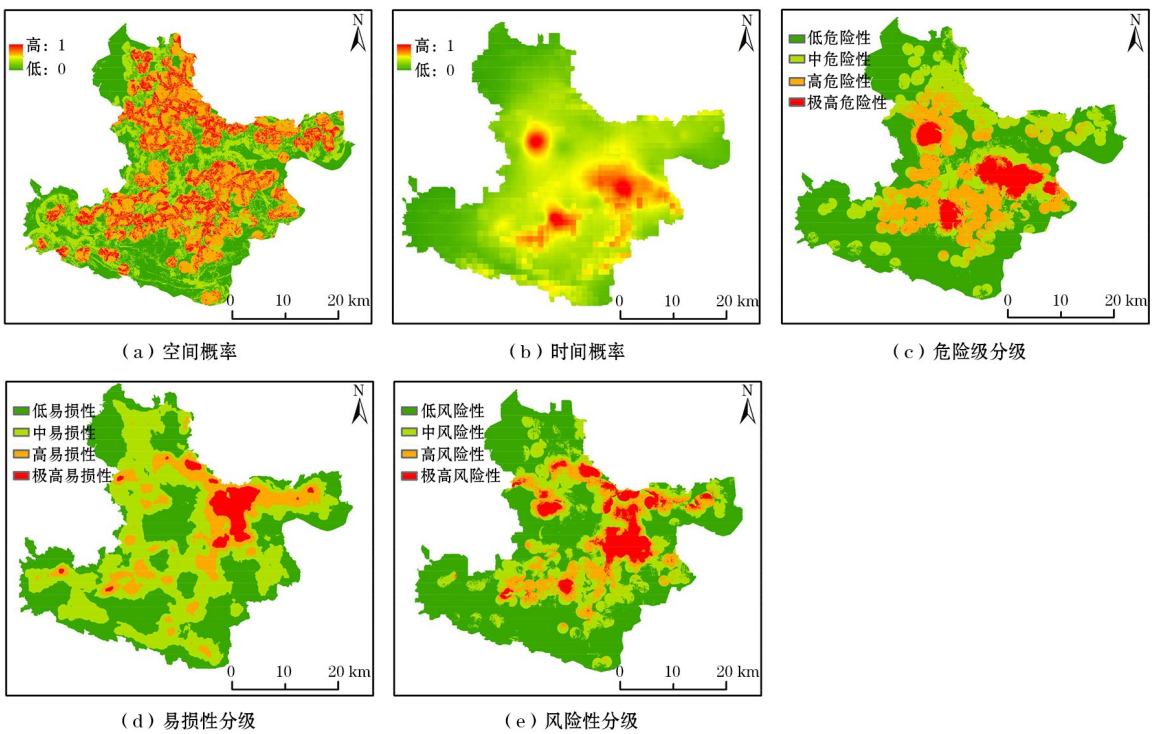


图 4 空间概率、时间概率、危险性、易损性、风险性分级结果

Fig.4 Classification results of spatial probability, temporal probability, hazard, vulnerability and risk

4 结论

(1) 矿业城市作为矿产资源开采扰动频繁的区域,其地质灾害与采矿工程活动之间有着密切的联系,矿业城市地质灾害主要是由自然环境和采矿活动共同作用所致。因此,关注开采扰动对地质灾害的影响非常必要。此外,矿业城市也是生态破坏较为严重的区域,生态价值稀缺导致其在进行地质灾害风险评价时有必要考虑生态损失。

(2) 开采扰动指数可表征采矿活动对地质灾害发生的诱发作用,将开采扰动指数与传统的降雨量因子共同纳入地质灾害危险性评价体系,较好地体现了矿业城市地质灾害诱发因素的特殊性。生态安全格局是区域生态网络的骨架,将地质灾害对生态源地、生态廊道的影响纳入地质灾害易损性评价体系,可以丰富地质灾害易损性的内涵。

(3) 大冶市地质灾害风险评价结果显示,极高、高风险区的占比分别为 6.11%和 14.72%,主要分布在金湖、大箕铺、金山店、还地桥、罗桥、灵乡、陈贵、刘仁八等采矿工程活动频繁的区域。对于历史上采矿活动频繁且目前已基本闭矿的还地桥、灵乡等区域,大量遗留的矿山废弃地容易诱发地质灾害,亟待修复治理。仍在开采的金湖、大箕铺、金山店、陈贵、刘仁八等区域,遗留废弃地较多且开采扰动较大,在修复治理的基础上,应同时采用绿色开采方式。

参考文献(References):

[1] 马晓峰,朱浩濛,张义顺,等.省级地质灾害风险评价技术方法研究:以浙江省为例[J].浙江国土资源,2021(增刊 1):57-65.

MA Xiaofeng, ZHU Haomeng, ZHANG Yishun, et al. Study on the provincial risk assessment of geological disasters:a case of Zhejiang province[J]. Zhejiang Land & Resources,2021(Suppl.1):57-65.

[2] 王华锋,陈洪海,贾琛,等.基于GIS分析的鲁中南低山丘陵区地质灾害风险评价[J].山东国土资源,2024,40(10):66-72.
WANG Huafeng, CHEN Honghai, JIA Chen, et al. Geological hazard risk assessment of low mountain and hilly areas of central and southern Shandong province based on GIS[J]. Shandong Land and Resources,2024,40(10):66-72.

[3] 吴树仁,石菊松,张春山,等.地质灾害风险评估技术指南初论[J].地质通报,2009,28(8):995-1005.
WU Shuren, SHI Jusong, ZHANG Chunshan, et al. Preliminary discussion on technical guideline for geohazard risk assessment[J]. Geological Bulletin of China,2009,28(8):995-1005.

[4] 范文涛.某矿山地质灾害模糊综合评价研究[J].矿业研究与开发,2019,39(6):76-78.
FAN Wentao. Study on fuzzy comprehensive evaluation of geological hazard in a mine[J]. Mining Research and Development,2019,39(6):76-78.

[5] 张磊.四川青川县地质灾害风险评价[D].绵阳:西南科技大学,2023.
ZHANG Lei. Geological hazard risk evaluation in Qingchuan county, Sichuan[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology,2023.

[6] 田尤,陈龙,黄海,等.藏东察雅县城地质灾害风险评价及源头管控对策建议[J].中国地质灾害与防治学报,2024,35(2):146-154.
TIAN You, CHEN Long, HUANG Hai, et al. Geological hazard risk assessment and suggestions for risk control in Chaya county, eastern Xizang[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2024,35(2):146-154.

[7] 杨锐,于春勇,汪洋.基于加权信息量和GIS方法的地质灾害易发性评价:以榆社县为例[J].矿业研究与开发,2023,43(2):163-170.
YANG Rui, YU Chunyong, WANG Yang. Susceptibility evaluation of geological disaster based on weighted information and GIS method: a case study of Yushe county[J]. Mining Research and Development,2023,43(2):163-170.

[8] 黄军朋,张紫昭.基于机器学习的高寒山区矿山地质灾害易发性研究[J].中国矿业大学学报,2024,53(5):960-976.
HUANG Junpeng, ZHANG Zizhao. Study on the mining geological hazard susceptibility assessment in alpine areas using machine learning models[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2024,53(5):960-976.

[9] 张先林,张继,刘桃,等.基于三维数值模拟的单体崩塌风险评价:以西藏樟木口岸扎美拉山为例[J].自然灾害学报,2023,32(4):61-69.
ZHANG Xianlin, ZHANG Ji, LIU Tao, et al. Risk assessment of monomer rockfall based on 3D numerical simulation:a case study of Zhameila mountain at Zhangmu port, Tibet[J]. Journal of Natural Disasters,2023,32(4):61-69.

[10] 冯博,程旭,范芳,等.基于信息量模型的云南禄丰地质灾害风险性评价[J].世界核地质科学,2024,41(5):1260-1274.
FENG Bo, CHENG Xu, FAN Fang, et al. Geological hazard risk assessment based on information model:a case study of Lufeng city in Yunnan province[J]. World Nuclear Geoscience,2024,41(5):1260-1274.

[11] 王慧芳,林子雁,肖燚,等.基于生态系统服务潜在损失的滑坡灾害生态风险评价[J].应用生态学报,2019,30(10):3553-3562.
WANG Huifang, LIN Ziyan, XIAO Yan, et al. Ecological risk assessment of landslide disasters based on potential loss of ecosystem services[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2019,30(10):3553-3562.

[12] 杨艳萍,干晓宇,吴潇.基于电路理论的岷江流域生态安全格局构建研究[J].水土保持研究,2025,32(2):263-275.
YANG Yanping, GAN Xiaoyu, WU Xiao. Study on the construction of ecological security pattern in Minjiang River Basin based on circuit theory[J]. Research of Soil and Water Conservation,2025,32(2):263-275.

[13] 赵华,周舒恬,徐嘉兴,等.基于生态安全格局的资源枯竭型城市生态保护修复关键区识别:以徐州市贾汪区为例[J].中国矿业,2024,33(10):119-130.
ZHAO Hua, ZHOU Shutian, XU Jiaxing, et al. Identifying of key areas for ecosystem protection and restoration for resource-exhausted cities based on ecological security pattern:a case study of Jiawang district, Xuzhou city[J]. China Mining Magazine,2024,33(10):119-130.

[14] 彭建,赵会娟,刘焱序,等.区域生态安全格局构建研究进展与展望[J].地理研究,2017,36(3):407-419.
PENG Jian, ZHAO Huijuan, LIU Yanxu, et al. Research progress and prospect on region ecological security pattern construction[J]. Geographical Research, 2017, 36(3):407-419.

[15] 杨金凤,陈勇,杨梅,等.生态功能异质性视角下矿业城市生态网络识别及其鲁棒性研究:以大冶市为例[J].化工矿物与加工,2023,52(7):55-63.
YANG Jinfeng, CHEN Yong, YANG Mei, et al. Study on identification of ecological network and its robustness in mining-based cities from the perspective of ecological function heterogeneity: a case study of Daye city[J]. Industrial Minerals & Processing,2023,52(7):55-63.

[16] 李倩瑜,唐立娜,邱全毅,等.基于形态学空间格局分析和最小累积阻力模型的城市生态安全格局构建:以厦门市为例[J].生态学报,2024,44(6):2284-2294.

LI Qianyu, TANG Lina, QIU Quanyi, et al. Construction of urban ecological security pattern based on MSPA and MCR model: a case study of Xiamen[J]. Acta Ecologica Sinica,2024,44(6):2284-2294.

[17] 张盼月,丁依冉,蔡雅静,等.河流生态廊道提取方法研究及其应用思路[J].生态学报,2022,42(5):2010-2021.
ZHANG Panyue, DING Yiran, CAI Yajing, et al. Research progress on methods of river ecological corridor extraction and their application[J]. Acta Ecologica Sinica,2022,42(5):2010-2021.

[18] 张美丽.基于MSPA模型的阜平县土地生态节点识别研究[D].保定:河北农业大学,2021.
ZHANG Meili. Research on the identification of land ecological nodes in Fuping county based on MSPA model[D]. Baoding:Hebei Agricultural University,2021.

[19] 史少斌.基于叠加赋权与信息量模型的地质灾害风险评估[D].西安:长安大学,2022.
SHI Shaobin. Geological hazard risk assessment based on superposition weighting and information model:a case study of Longde county, Ningxia [D]. Xi'an: Chang'an University, 2022.

[20] 国务院第一次全国自然灾害综合风险普查领导小组办公室.地质灾害风险调查评价技术要求(1∶50000)[R].北京:地质出版社,2023.
The Office of the Leading Group for the First National Comprehensive Risk Survey of Natural Disasters of the State Council. Technical requirements for geological hazard risk investigation and evaluation (1 ∶ 50000) [R]. Beijing: Geological Press,2023.