

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2025.02.006

内蒙古自治区县级地质灾害危险性评价研究 ——以鄂尔多斯市东胜区为例

万小乐¹, 张 威¹, 杜 超^{2*}

WAN Xiao-Le¹, ZHANG Wei¹, DU Chao^{2*}

1. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 2. 内蒙古自治区地质调查研究院, 内蒙古 呼和浩特 010020

1. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China;

2. Institute of Inner Mongolia Geological Survey, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China

摘要: 内蒙古自治区矿产资源较为丰富, 区内强烈的矿业开发活动成为崩塌、滑坡、地面塌陷等地质灾害的重要诱发因素。为提升地质灾害危险性评价成果质量, 支撑内蒙古自治区防灾减灾工作, 本文以内蒙古自治区鄂尔多斯市东胜区为研究区, 开展县级尺度地质灾害危险性评价方法技术研究。首先通过 InSAR 和光学遥感技术开展了地质灾害隐患识别工作, 查清了研究区内地质灾害隐患点的分布和发育特征; 再针对崩塌、滑坡等突发型与地面塌陷等缓变型地质灾害形成机理和控制因素等方面的差异, 根据研究区孕灾地质环境特征, 分别建立了这两类灾害的评价指标体系; 之后利用信息量法完成了地质灾害的易发性评价; 最后基于易发性评价结果, 进一步以降雨和采矿活动为诱发因素, 分别构建评价模型完成了地质灾害的危险性评价。研究结果显示区内地质灾害极高、高、中和低危险等级区域面积占全区的 6.74%、22.02%、38.38% 和 32.86%, 其中极高和高危险区主要位于研究区的中部、东北部和南部, 与采矿活动的地区分布特征基本吻合, 表明本次风险评价模型具有较好的准确性。研究表明针对缓变型地质灾害和突发型地质灾害分别建立指标体系和评价模型可以得出较为可靠的评价结果, 研究形成的评价方法对内蒙古自治区其它类似地区的地质灾害危险性评价具有较好的示范推广价值。

关键词: 地质灾害; InSAR; 信息量; 易发性评价; 危险性评价; 内蒙古

中图分类号: P694

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2025)-02-0304-13

Wan X L, Zhang W and Du C. 2025. Research on Geological Hazard Assessment at County-Level in Inner Mongolia Autonomous Region: A Case Study of Dongsheng District, Ordos City. *South China Geology*, 41(2): 304–316.

Abstract: Inner Mongolia Autonomous Region has abundant mineral resources, and strong mining development activities within the region have become important triggering factors for geological disasters such as landslides, collapses, and ground subsidence. This paper takes Dongsheng District, Inner Mongolia Autonomous Region as the research area. First, it carried out the identification of geological hazards through InSAR and optical remote sensing technology, and found out the distribution and development characteristics of geological hazard points in the study area. Then, based on the disaster-prone geological environment of the study area, it is of great significance to construct an evaluation index system respectively of the two types of

收稿日期: 2024-12-03; 修回日期: 2025-01-01

基金项目: 中国地质环境监测院研发基金项目(中地环科项 [2023]07)

第一作者: 万小乐(1992—), 男, 高级工程师, 从事地质灾害风险评价方面的研究, E-mail: 1206587909@qq.com

通讯作者: 杜超(1987—), 男, 高级工程师, 从事地质灾害防灾减灾方面的研究, E-mail: 460062925@qq.com

hazard as the completely different formation mechanisms and control factors of collapses, landslides and ground subsidence, and then the susceptibility evaluation of geological disasters was completed using the information method. Finally, based on the susceptibility evaluation results, using rainfall and mining activities as the further inducing factors, evaluation models were constructed respectively to complete the risk assessment of geological hazards. The research results show that the areas with extremely high, high, medium and low risk levels of geological disasters account for 6.74%, 22.02%, 38.38% and 32.86% of the entire area. The extremely high and high hazard areas are mainly located in the central, northeastern and the southern region of the study area, which is basically consistent with the main distribution areas of mining, indicating that this risk assessment model is really accurate. The research has proposed a county-wide geological hazard risk assessment model suitable for mining disturbance areas. The assessment results have good reliability for the construction of different index systems and assessment models for the two types of hazard. The research results have good demonstration and promotion value for geological hazard risk assessment in other similar areas in the Inner Mongolia Autonomous Region.

Key words: geological disasters; InSAR; information value; susceptibility assessment; hazard assessment; Inner Mongolia

内蒙古自治区矿产资源较为丰富, 强烈的矿业开发活动在促进地区经济发展的同时也成为诱发崩塌(滑坡)、泥石流、地面塌陷等地质灾害的重要因素, 给当地人民的生命和财产安全造成了极大威胁。为了减轻地质灾害造成的损失, 提高地质灾害防范的科学化、定量化水平, 需要研发一套适用于内蒙古自治区的地质灾害危险性评价技术。

地质灾害危险性评价是在地质灾害易发性的基础上考虑特定时间内灾害发生的强度和可能性 (Varnes, 1984; 赖波等, 2023; 贾丽娜和陈世昌, 2024; 刘帅等, 2024; 张平等, 2024)。对于当前地质灾害易发性评价, 国内外常用的模型主要有经验推断模型、统计模型和物理模型。其中, 统计模型以其较高的计算效率和相对客观的评价结果而得到了广泛的应用, 常用的统计模型包括: 信息量模型 (王佳佳等, 2014; 林振等, 2024; 马敏等, 2024)、证据权模型 (张艳玲等, 2012)、逻辑回归模型 (李明等, 2023)、人工神经网络模型 (刘艺梁等, 2010)、支持向量机模型 (谭龙等, 2014) 和决策树模型 (赵建华等, 2004) 等。近年来随着 GIS 技术的不断进步, 当前国内外多采用统计模型和 GIS 技术相结合的方法进行区域性的地质灾害危险性评价研究 (张晓东, 2018)。殷坤龙和朱良峰

(2001) 基于 GIS 平台, 开展汉江流域旬阳区域的地质灾害风险分析, 形成了滑坡灾害的危险性、易损性以及风险评价结果。王芳等 (2018) 利用逻辑回归、支持向量机和决策树 3 种统计模型完成了重庆市万州区的滑坡易发性评价, 在此基础上计算了不同降雨工况下滑坡的发生概率, 进而得到了研究区的滑坡危险性评价结果。张向营等 (2018) 将层次分析法和随机森林模型相结合, 并在此基础上运用距离函数法对青海省贵德县北部区域开展了滑坡危险性评价, 结果表明该方法能够较好地揭示区域滑坡危险性的分布规律, 与实际滑坡灾害的分布情况较为吻合, 具有较好的准确性。Yacine and Hamid (2020) 等用随机森林、支持向量机和增强回归树三种模型评估某高速公路附近滑坡的易发性, 研究发现随机森林模型的预测准确度最高。

在国内外学者开展的大量研究基础上, 当前地质灾害危险性评价已形成了较为完整的评价体系, 但仍然存在局限性: 比如针对不同的地质灾害类型进行危险性评价时, 需要充分考虑不同类型灾害之间孕灾背景、形成机理和致灾因素的差异性, 分别建立指标体系和评价模型 (丘嘉荣等, 2024); 否则按照同一评价指标体系和评价模型进行统一评价将影响结果的精度和质量。

本文以内蒙古自治区鄂尔多斯市东胜区为研究区,在资料收集、遥感解译和野外核查的基础上构建了东胜区的地质灾害隐患点数据库。在此基础上针对不同类型灾害的成因机理特征,分别建立涵盖区域地质灾害特征、孕灾环境条件的危险性评价指标体系,研发适用于典型采矿区的县级尺度地质灾害危险性评价技术方法,为地质灾害的防治提供科学依据。

1 研究区地质环境条件

东胜区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市的中东部,总面积为 2160 km²,地理坐标为:东经 109°08'05"~110°23'00",北纬 39°39'04"~39°58'37"。该区属于温带大陆性气候,多年平均降雨量 396.11 mm,多集中在 7—9 月且年际变化大。东胜区地形波状起伏,总趋势北高南低,东高西低,区内的地质灾害均分布在高原丘陵地貌区。东胜区内出露地层主要有:中生界三叠系、侏罗系、白垩系,新生界新近系、第四系。地质灾害主要发育在中生界侏罗-白垩系-新生界新近系的泥质砂岩、泥岩、砂岩夹煤层等软质岩分布区。近年来,区内人类工程活动日益强烈,主要包括矿业开发、道路修建和城镇化建设。其中矿业开发对地质灾害影响最大,并采煤矿和历史小煤窑开采形成了大面积的采空区,引发了地面塌陷灾害。露采煤矿采区和排土场在开采和排土过程中形成一定的陡坡,可能会引发小型的滑坡和崩塌灾害。

2 地质灾害隐患识别和发育特征

2.1 数据来源

光学遥感采用 Google Earth 光学影像数据,影像清晰度级别主要为 16~19 级,空间分辨率为 4~0.54 m。InSAR 解译采用了基于 30 m 空间精度的哨兵(Sentinel-1 雷达数据)TOPS 雷达数据,数据时间从 2019 年 10 月 1 日—2021 年 7 月 1 日,期间共 69 景数据可用。

2.2 遥感解译工作流程

本次地质灾害隐患识别工作采用“InSAR 解

译—光学解译辅助解译—野外核查确认”的技术思路展开,充分利用区内崩塌、滑坡、地面塌陷等已知地质灾害隐患点数据、矿山矿区开采与分布等人类活动数据,最终圈定区内疑似地质灾害隐患点与变形区边界范围,形成遥感解译成果。

以 Sentinel-1 雷达数据基础,在自主自动/半自动干涉处理环境 pSAR 下,开展数据采集、干涉处理、噪声抑制,以及形变解译等一系列操作,其中主要包括:

(1)规划干涉相对组合,开展传统干涉处理。处理中,选择时间居中的时刻图像作为参考图像,所有其他时刻的数据统一配准到该时刻内。

(2)基于外部气象数据的噪声改正技术。大气效应是 InSAR 测量,尤其地形起伏较大的地区重要的噪声来源。借助外部大气产品是有效抑制大气信号的理想方式。

(3)优化网络实现解缠误差识别与纠正。InSAR 数据的处理过程较为复杂,其中解缠环节最容易产生误差,因此在解缠后期将开展以干涉序列网络为基础的解缠误差识别,并在最终形变解译之前完成误差的纠偏或剔除。

(4)开展基于相位闭合的网络分析技术,尝试分析连续形变区域,生成时间关联形变序列集。

研究区共识别出地质灾害隐患点 75 处,地质灾害现象点 11 处。地质灾害隐患点包括地面塌陷隐患点 57 处,崩塌、滑坡隐患点 18 处(图 1);地质灾害现象点为 11 处尚未有明显的变形迹象,但一定程度上具备诱发地质灾害的地形地貌、地层及人类活动条件的崩塌、滑坡孕灾调查点。研究区内地质灾害与人类工程活动关系密切,地面塌陷灾害主要分布于东胜区东北部的各煤矿区,规模以中小型为主,成因均为煤层采空,或者采煤活动引起的顶板塌落;滑坡、崩塌隐患点多分布在东胜区东北部地区,多为煤矿露天开采诱发,以小型、岩质崩塌滑坡为主。

3 东胜区地质灾害易发性评价

地质灾害的易发性评价是风险管理工作的重要前置环节,易发性在国外又称为敏感性或易感

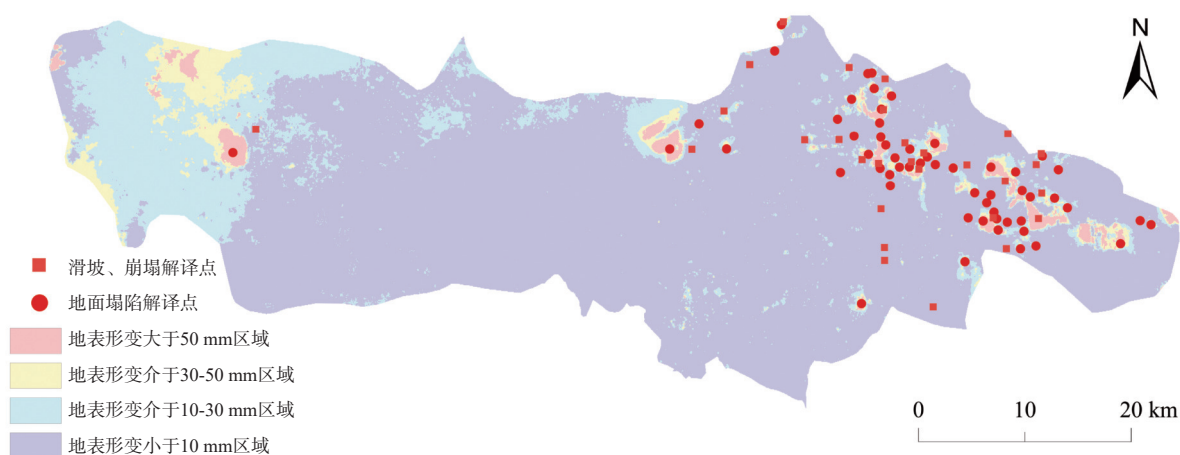


图 1 东胜区地质灾害 InSAR 遥感解译图

Fig. 1 InSAR remote sensing interpretation map of geological hazard in Dongsheng District

性,通常用来衡量地形受未来斜坡运动影响的程度,它是对可能发生滑坡的“位置”的估计(Yacine and Hamid, 2020)。地质灾害易发性评价的主要流程包括划分评价单元、选取评价指标、构建评价模型和形成易发性评价结果 4 个环节。

3.1 评价模型构建

针对县级尺度的地质灾害易发性评价模型众多,根据评价区面积、数据基础和评价精度需求的不同,评价模型主要包括定性分析和定量评价两类。

本次易发性评价采用了信息量法开展以定量计算为主的统计分析,利用信息量模型计算各个单要素影响因子与崩塌、滑坡、地面塌陷分布的统计关系,并在计算各单要素信息量的基础上,通过叠加分析得到总的信息量结果,即综合信息量结果。

利用如下公式能够计算各个影响因子下的信息量:

$$I(x_i) = \ln \frac{S_i/A_i}{S/A} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

上述公式中, S_i 为影响因子 X 第 i 类中滑坡数量总和, A_i 为影响因子 X 类第 i 类的总面积, S 为研究区滑坡总面积; A 为研究区总面积。

3.2 评价指标选取

由于研究区内突发型地质灾害(崩塌、滑坡)与缓变型地质灾害(地面塌陷)的形成机理和主控因素完全不同,因此需要针对两种类型地质灾害的特征,分别构建评价指标体系。

在东胜区地质灾害详细调查、地形地貌、基础地质、气候气象和人口经济等资料的基础上,充

分研究区内地质灾害的孕灾环境、发育特征和成灾机理,选取坡度、坡向、地形曲率、地层岩性、距水系的距离、年均降水量、距道路距离和土地利用类型作为崩塌、滑坡灾害的影响因子;同时选取坡度、坡向、地形曲率、地层岩性、距水系的距离、年均降雨量、距道路距离、土地利用类型、矿山开采时间、矿区面积、矿山累计开采量和累计固体废弃物总量作为地面塌陷的影响因子。其中坡度、坡向、地形曲率属地形类因子,距水系距离和降水量属于气象水文类因子,地层岩性属于地质条件类因子,距道路距离、土地利用类型、矿山开采时间、矿区面积、矿山累计开采量和累计固体废弃物总量为人类工程活动因子。

在地质灾害易发性评价过程中,影响灾害发生的因子很多,每一种影响因子对灾害的发生都有着不同的效果,并不是选取的影响因子越多,则灾害易发性评价效果越好。甚至某些因子反而会对模型的评价效果起到负面作用,降低模型的评价精度。因此,需要对影响因子进行进一步的筛选,将预测能力低的影响因子去掉,从而提高最终模型的评价效果。

本次选择评价因子的具体做法如下:将上述初步选择的因子进行穷举式排列组合形成一个评价因子集合,对集合内每个评价因子组合基于信息量模型分别计算其对灾害点数据的工作特征曲线(ROC)和曲线下面积值(AUC),AUC 值越大,说明该因子组合的重要性越大,最终选择 AUC 值

最大的因子组合作为最终的评价因子体系。根据计算成果,对于崩塌、滑坡地质灾害,坡度、坡向、曲率、距道路距离、地层岩性、用地类别、年平均降雨量这 7 个因子组合的 AUC 值最大,为 0.9243 (图 2a 中黄色区域面积),因此选取这 7 个因子开展易发性评价。对于地面塌陷地质灾害,坡度、坡向、曲率、距道路距离、地层岩性、用地类别、年平均降雨量、矿山开采时间、累计开采量和累计固体废弃物总量这 10 个因子组合的 AUC 值最大,为 0.8863 (图 2b 中黄色区域面积),因此选取这 10 个因子开展易发性评价(图 3)。

3.3 易发性评价单元

评价单元是进行地质灾害易发性评价时所采用的最小空间图元。在实际运用中常见的评价单元有栅格单元、斜坡单元、均一条件单元和行政单元四类。由于本次评价选取的评价指标的原始数据多是在 DEM 数据和遥感数据的基础上经过处理获取的,出于评价精度和计算效率两个方面的综合考虑,并经过多次提取、试验,最终选用 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$ 的栅格单元作为评价单元开展工作。

利用 ArcGIS 软件将研究区数据进行栅格化后,得到研究区内的栅格单元共有 2806792 个;将区域内的地质灾害隐患点和现象点数据转化为栅格单元后,共得到 86 个栅格单元。

3.4 易发性评价结果

本次评价针对缓变型地质灾害(地面塌陷)和突变型地质灾害(崩塌、滑坡)分别开展易发性评估,并将基于各子样本得到的易发性评价指数进

行叠加求和,从而得到综合易发性评价指数。

基于 GIS 栅格数据模型的信息量计算方法,计算针对两种不同类型灾害样本的各指标要素信息量值,结果见表 1 和表 2。

为了便于分析,将各图层的信息量值归一化处理成 $[0,1]$,再基于 ArcGIS 对赋予了信息量值的栅格图层进行叠加计算,生成总信息量值,计算结果显示,各评价单元总信息量值为 $0.0339116\sim 0.964899$ 。根据信息量法的原理,信息量数值越大,则代表滑坡发生的可能性就越大,即滑坡越易发。再基于 ArcGIS 平台,运用自然断点法并结合综合分析,将工作区划分为地质灾害高、中、低、非易发性四级,从而得到了研究区内崩塌、滑坡灾害(图 4)与地面塌陷灾害(图 5)的易发性评价图。在崩塌、滑坡和地面塌陷易发性评价结果的基础上,根据 1:1 的权重关系,将上述两个易发性结果进行综合叠加,进而得到综合易发性评价结果(图 6)。

为验证评价结果的合理性,将计算出的易发性等级与实际灾害情况进行对比分析,分析结果见表 3。由表 3 可知,随易发性等级的逐步提高,各个易发区内包含的实际灾害数量(包括隐患点和现象点)也相应增加,充分说明本次计算得到的易发性分区和实际地质灾害分布特征较为一致,评价结果较为合理。易发性评价成果图中,易发性高、中的区域包含了约 85% 的灾害隐患点和存在一定变形迹象的地质灾害现象点。工作区内灾害高、中易发区面积占全区面积的 43.6%,主要分

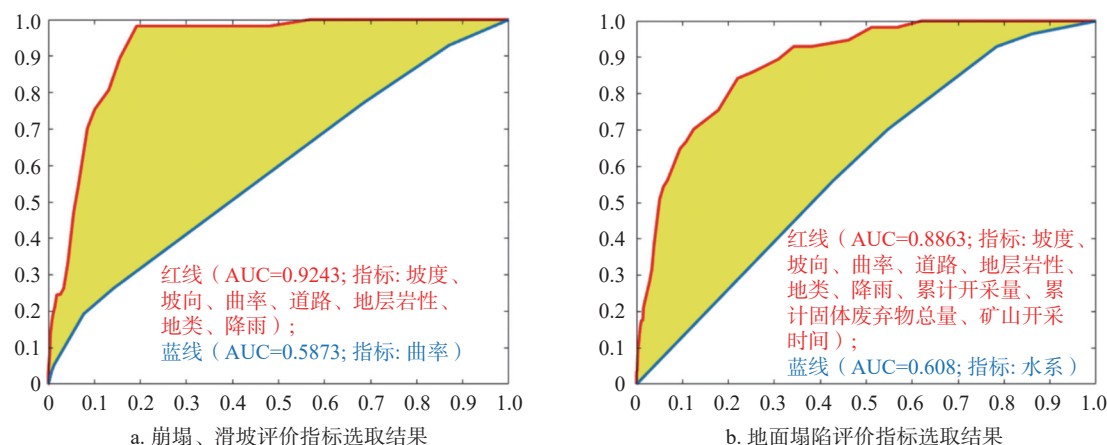


图 2 基于 ROC 曲线统计分析结果的评价指标体系

Fig. 2 Evaluation index system of ROC curve statistical analysis results

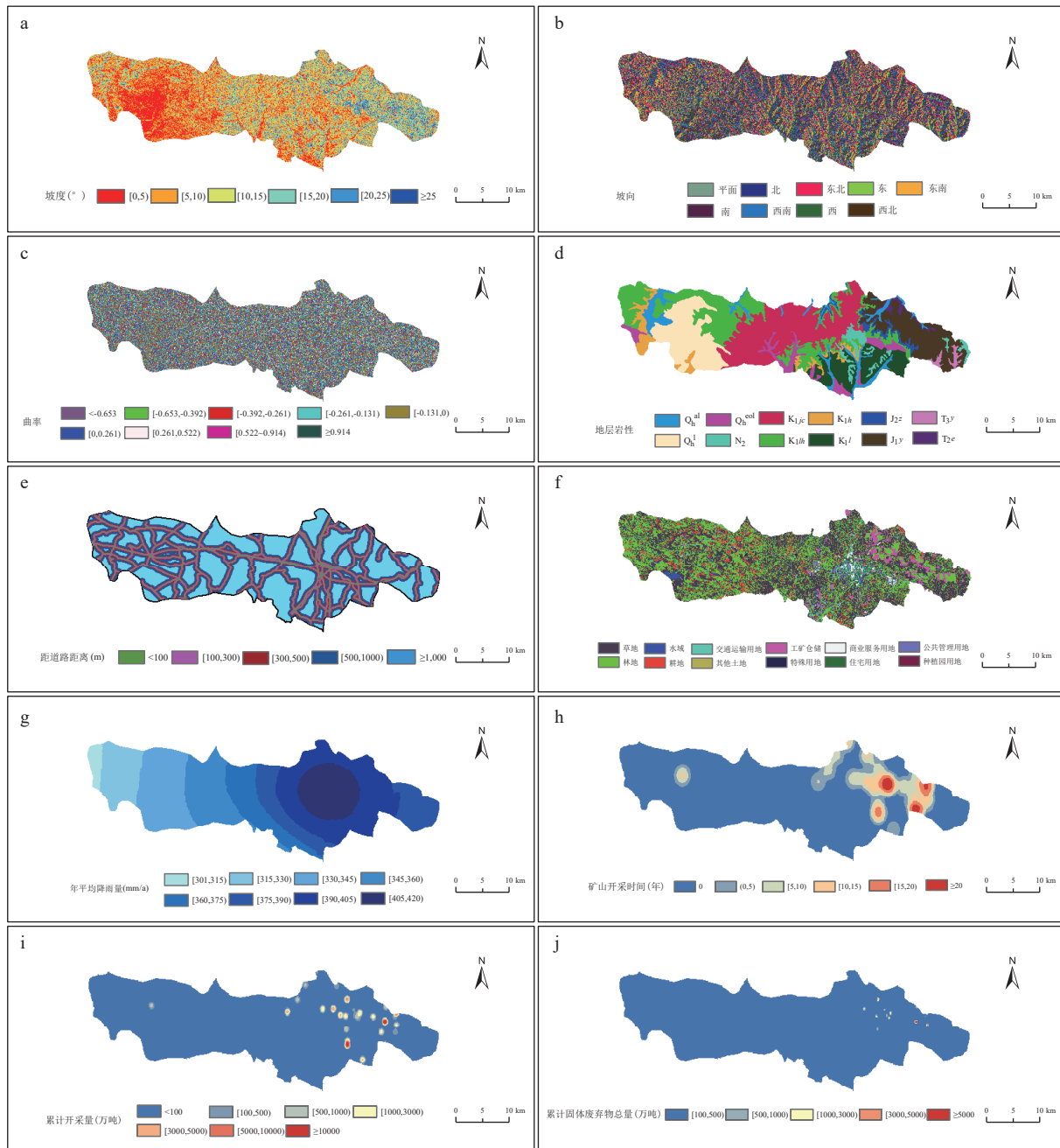


图 3 东胜区地质灾害易发性评价因子分级图

Fig. 3 Classification map of evaluation factors for geological hazard susceptibility in the Dongsheng District

布于区域的东部及东北部地区。

4 东胜区地质灾害危险性评价

4.1 诱发因子确定

地质灾害的形成是本底因素和外部诱发因素共同作用的结果(孙滨等, 2022)。对外部诱发因素的确定, 是危险性评价中的前提, 也是选取危险性评价模型的重要依据。

降雨通常是引起研究区内崩塌、滑坡灾害形成的主要诱发因素。降雨对崩塌、滑坡灾害的诱发作用主要表现在: 首先, 降雨进入岩土体增加了坡体的自重; 其次, 降雨渗入坡体, 浸泡软化滑动面, 增大孔隙水压力, 加大下滑力并降低抗剪强度, 打破了坡体的极限平衡状态, 致使坡体产生滑动; 最后, 坡体反复的干湿变化产生大量的节理裂隙, 使得雨水更易于渗入岩土体。

研究区内的采矿活动也是区内诱发崩塌、滑

表 1 东胜区地面塌陷易发性评价模型因子信息量值
Table 1 The Information values of factors in the susceptibility evaluation model of ground collapse in the Dongsheng District

因子	分类	信息量	因子	分类	信息量
坡度(°)	[0, 5)	-0.579 25	坡向	平面	/
	[5, 10)	0.658 587		北	0.591 1
	[10, 15)	1.462 49		东北	0.208 982
	[15, 20)	/		东	0.569 757
	[20, 25)	/		东南	0.309 125
	≥25	/		南	-1.339 5
曲率	<-0.653	1.194 18		西南	-0.358 45
	[-0.653, -0.392)	0.775 704		西	-0.270 18
	[-0.392, -0.261)	-0.613 23		西北	-1.073 67
	[-0.261, -0.131)	-0.161 67	地层岩性	Q_h^{al}	-1.258 75
	[-0.131, 0)	-0.031 84		Q_h^l	-2.041 75
	[0, 0.261)	-0.091 02		Q_h^{col}	/
	[0.261, 0.522)	0.081 223		N_2	-0.623 11
	[0.522, 0.914)	1.616 3		$K_{1j}c$	-1.897 42
	≥0.914	/		K_{1lh}	-1.383 25
距道路距离(m)	[0, 100)	-0.792 52		K_{1h}	/
	[100, 300)	-1.373 66		K_{1l}	-1.578 53
	[300, 500)	0.170 279		J_2z	2.143 05
	[500, 1 000)	-0.038 05		J_{1y}	1.683 58
	≥1 000	0.269 884		T_{3y}	/
降雨量(mm/a)	[301, 315)	/		T_{2e}	1.348 81
	[315, 330)	/	用地类别	草地	-0.132 71
	[330, 345)	-2.220 26		林地	-0.089 41
	[345, 360)	/		水域及水利设施用地	-0.061 97
	[360, 375)	/		耕地	/
	[375, 390)	-0.134 22		交通运输用地	/
	[390, 405)	0.938 195		其他土地	/
	[405, 420)	0.780 957		工矿用地	2.053 41
累计开采量(×10 ⁴ t)	<100	1.462 49		特殊用地	/
	[100, 500)	0.780 957		商业服务用地	/
	[500, 1 000)	-0.132 71		住宅用地	/
	[1 000, 3 000)	-0.089 41		公共管理与服务用地	/
	[3 000, 5 000)	-2.041 75		种植园	/
	[5 000, 10 000)	0.591 1	持续矿山开采时间(a)	≥20	-1.897 42
	≥10 000	0.208 982		[20, 15)	-1.383 25
累计固体废弃物总量(×10 ⁴ t)	[100, 500)	0.269 884		[15, 10)	2.143 05
	[500, 1 000)	-1.897 42		[5, 10)	-1.258 75
	[1 000, 3 000)	-1.383 25		[0, 5)	/
	[3 000, 5 000)	-2.220 26		0	1.683 58
	≥5 000	0.780 957			

坡和地面塌陷地质灾害的重要诱发因素。研究区内矿山数量多,长期大规模地下开采已经形成一定规模的地下采空区,极易引发地面塌陷。另外,采矿活动排弃的大量废石、废渣堆积在采坑周围或沟内,形成高陡边坡,易引发崩塌、滑坡等地质灾害,威胁人民群众的生命财产安全。

4.2 评价模型构建

地质灾害易发性评价考虑了对地质灾害发生

有影响的本底因素,但缺少对某一时间段内诱发地质灾害动态因子的考虑。在地质灾害易发性评价的基础上,考虑降雨和采矿活动为主的外界动态因子,实现工作区地质灾害危险性评价。

(1)降雨诱发因素

基于极值降雨假设,计算各评价单元不同降雨工况下的失稳概率,开展地质灾害危险性评价,计算公式如下:

表 2 东胜区崩塌、滑坡易发性评价模型因子信息量值

Table 2 The Information values of factors in the susceptibility evaluation model of collapse and landslide in the Dongsheng District

因子	分类	信息量	因子	分类	信息量
坡向	平面	/	坡度(°)	[0, 5)	0.043 26
	北	-1.266 86		[5, 10)	0.388 424
	东北	-0.884 74		[10, 15)	-1.732 78
	东	-0.457 05		[15, 20)	/
	东南	1.094 562		[20, 25)	/
	南	/		≥25	/
	西南	/	地层岩性	Q_h^{al}	-0.810 22
	西	/		Q_h^l	0.889 075
	西北	/		Q_h^{col}	-0.900 75
距道路距离(m)	[0, 100)	-0.822 79		N_2	-0.935 03
	[100, 300)	-0.934 79		K_{ijc}	1.437 887
	[300, 500)	0.006 177		K_{ilh}	0.923 721
	[500, 1000)	0.006 866		K_{ilh}	-0.709 28
	≥1000	1.292 867		K_{il}	1.119
				J_2z	-1.909 44
曲率	<-0.653	-1.869 93		J_{iy}	0.341 799
	[-0.653, -0.392)	-1.451 46		T_{3y}	-1.206 42
	[-0.392, -0.261)	1.323 764		T_2e	-2.501 49
	[-0.261, -0.131)	-0.108 62	用地类别	草地	/
	[-0.131, 0)	0.534 744		林地	1.664 949
	[0, 0.261)	0.578 416		水域及水利设施用地	/
	[0.261, 0.522)	-0.063 83		耕地	-0.357 63
	[0.522, 0.914)	-2.292 06		交通运输用地	-1.307 72
	≥0.914	/		其他土地	-1.178 93
降雨量(mm/a)	[301, 315)	-2.108 76		工矿用地	0.043 427
	[315, 330)	0.124 893		特殊用地	-4.422 66
	[330, 345)	-0.724 18		商业服务用地	-2.079 95
	[345, 360)	-0.240 54		住宅用地	-1.274 48
	[360, 375)	0.165 682		公共管理与服务用地	-2.682 01
	[375, 390)	0.521 984		种植园	-5.956 2
	[390, 405)	1.030 021			
	[405, 420)	/			

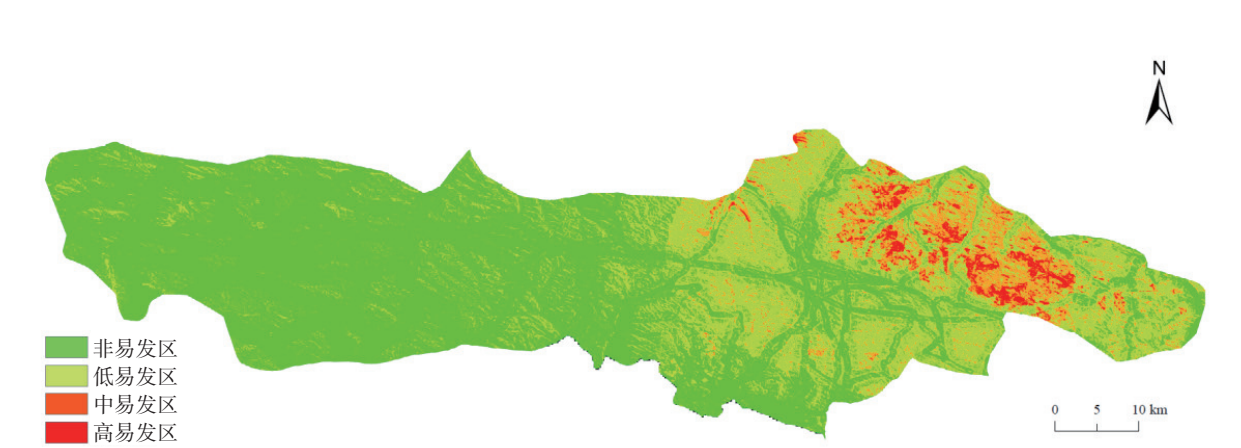


图 4 东胜区崩塌、滑坡易发性评价图

Fig. 4 Susceptibility evaluation map of collapse and landslide in the Dongsheng District

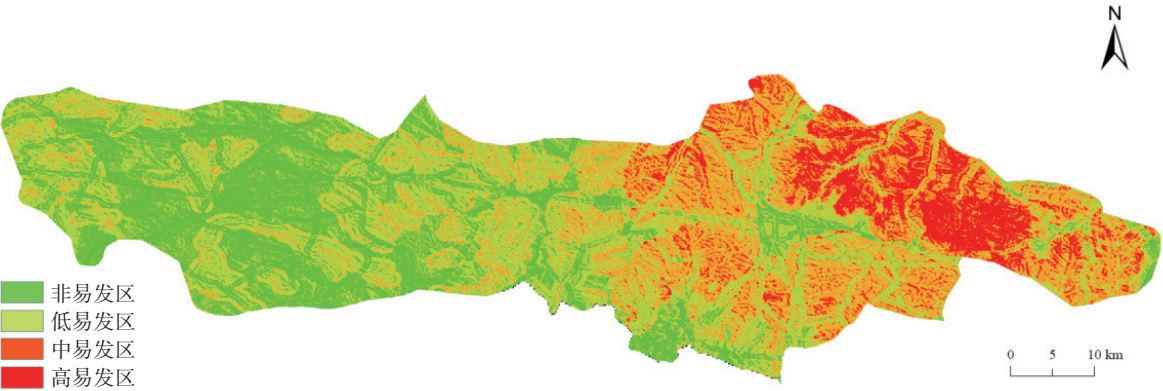


图 5 东胜区地面塌陷易发性评价图

Fig. 5 Susceptibility evaluation map of ground collapse in the Dongsheng District

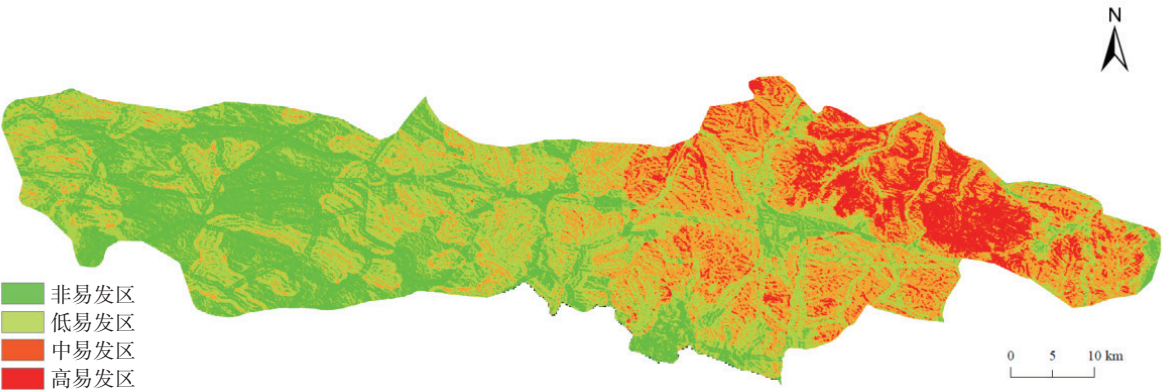


图 6 东胜区地质灾害易发性评价图

Fig. 6 Susceptibility evaluation map of geological hazard in the Dongsheng District.

表 3 东胜区地质灾害易发性等级及其与实际灾害点分布的对比

Table 3 Comparison between susceptibility classes and actual geological hazard distribution in the Dongsheng District

易发性等级	面积(km ²)	面积占比(%)	灾害点数量(处)	灾害点占比(%)	灾害点密度(处/km ²)
非	483.5	22.3	5	5.8	0.010
低	736.8	34.1	9	10.5	0.012
中	640.2	29.7	11	12.8	0.017
高	299.8	13.9	61	70.9	0.203
总计	2160	100	86	100	

$$H = S \times \left(\frac{L_p}{L_{max}} \right)$$

式中, H 为地质灾害危险性指数, S 为地质灾害易发性指数, L_{max} 为研究区年最大日降雨量, L_p 为 P 频率下研究区年最大日降雨量。

根据收集的降雨资料, 研究区年最大日降雨量为 163.5 mm。为获取研究区内不同时期极值降雨量, 参考《城市暴雨强度公式编制技术规范》(DB15/T 2040-2020)(内蒙古自治区市场监督管理局, 2020)中的相关计算公式, 根据工作区内可

获取的降雨数据情况, 计算得出研究区在 10 年、30 年、50 年、100 年的最大日降雨量值分别为 396.6 mm、470.4 mm、516.3 mm、578.4 mm。

(2) 采矿活动诱发因素

研究区地表形变特征分布与采矿点分布具有较好的相关性, 因此可进一步简化采用地表形变变化特征作为描述采矿活动对地质环境的影响程度, 即: 地表形变越强烈, 变形越大, 采矿活动对地质环境和地形地貌的影响扰动强度和范围越大。

采用 InSAR 获取的地表形变量来表征采矿活动的强弱, 由采矿活动引发的地质灾害危险性指数的计算公式(夏靖禹等, 2023)为:

$$H = \sqrt{(a \times S)^2 + (b \times D)^2}$$

式中: H 为评价单元地质灾害危险性指数; S 、 D 分别为易发性指数和地表形变量值; a 、 b 为权重系数, 均取值为 0.5, 即地质灾害易发性和地表形变

对于危险性的重要性相同。

4.3 危险性评价结果

(1) 降雨诱发工况下的危险性评价

基于上述计算流程, 完成了对研究区在不同重现期降雨工况条件下的危险性评价, 评价结果如图 7 展示。可以看出, 随着降雨重现期的不断延长, 危险性极高和高的区域面积同步扩大, 主要集中在

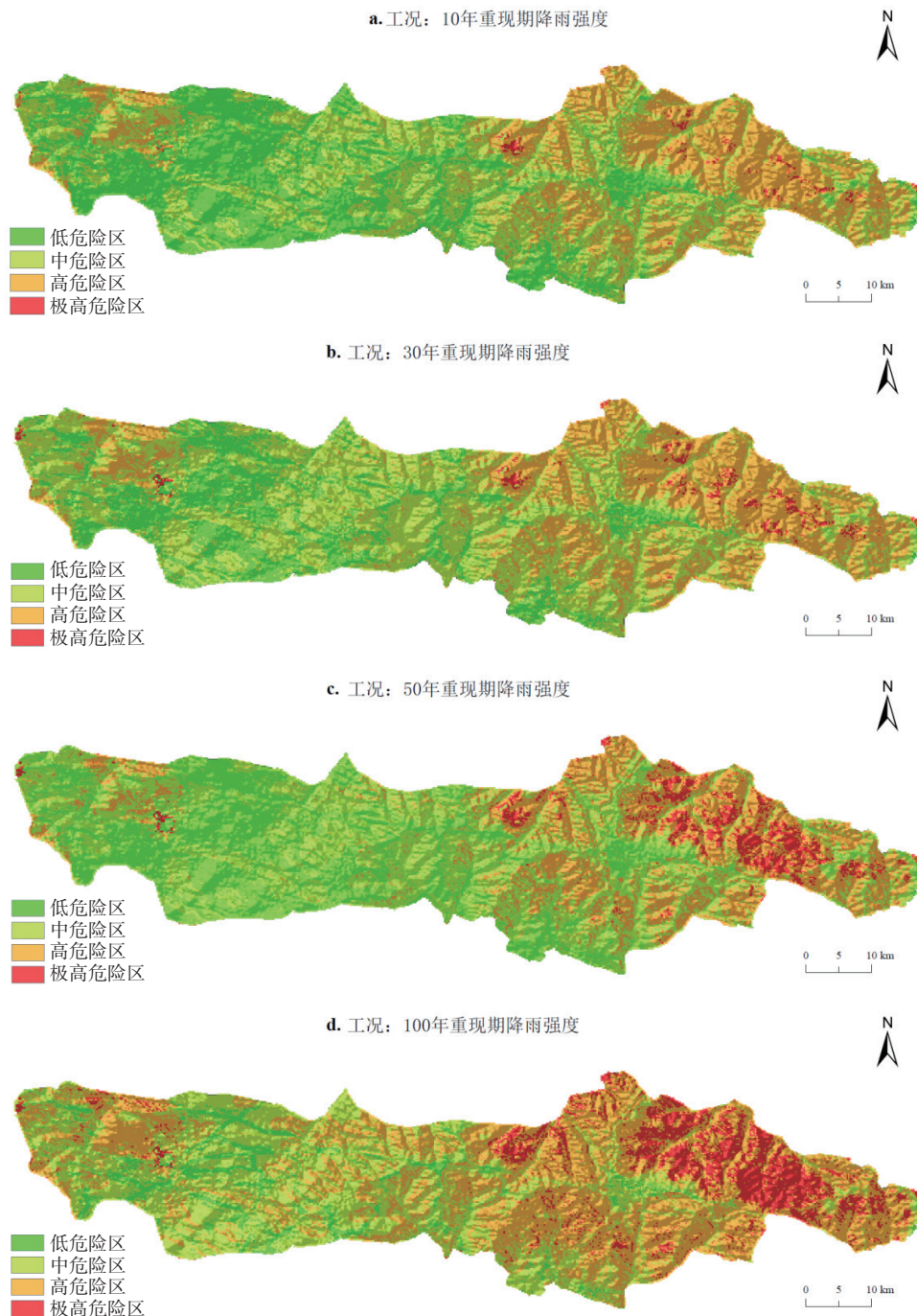


图 7 不同重现期东胜区极值降雨工况下危险性评价结果

Fig. 7 Results of hazard assessment under extreme rainfall conditions with different return period in the Dongsheng District

研究区的东北部和南部地区,与当前灾害点分布相对密集和矿山开采活动相对较强烈的区域相吻合。

(2)采矿活动诱发下的危险性评价

基于上述计算流程,完成了对工作区在当前人为开采活动强度和规模影响下的地质灾害危险性评价(图 8)。可以看到,在当前开采强度和规模影响下,地质灾害极高和高危险区主要集中于研究区的东北部和南部地区,与当前灾害点分布相对密集和矿山开采活动相对较强烈的区域较为吻合。

(3)综合危险性评价

在得到上述暴雨条件下和人为采矿条件下的地质灾害危险性评价结果基础上,按照 1 : 1 的权重关系,通过指数叠加从而得到综合的危险性评价结果。按照当前开展地质灾害危险性评价最为常见的 10 年一遇极值降雨强度工况为例进行叠加计算。通过上述分析计算得到综合危险性评估结果(图 9),根据评估结果可知(表 4),区域地质灾害极高、高、中、低危险区面积分别占全区面



图 8 人为采矿活动影响下东胜区地质灾害危险性评价结果

Fig. 8 Results of geological hazard assessment under the influence of mining activities in the Dongsheng District



图 9 东胜区地质灾害综合危险性评价结果

Fig. 9 Comprehensive risk assessment results of geological disasters in the Dongsheng District

工况条件: 10 年一遇暴雨工况+人为采矿活动影响

表 4 东胜区地质灾害危险性等级及其与实际灾害点分布的对比

Table 4 Comparison between hazard classes and actual geological hazard distribution in Dongsheng District					
危险性等级	面积(km ²)	面积占比(%)	灾害点数量(处)	灾害点占比(%)	灾害点密度(处/km ²)
低	709.829	32.86	4	4.65	0.006
中	828.9968	38.38	11	12.79	0.013
高	475.5246	22.02	32	37.21	0.067
极高	145.6496	6.74	39	45.35	0.268
总计	2160	100	86	100	0.040

积 6.74%、22.02%、38.38% 和 32.86%, 其中极高和高危险区主要分布于工作区的东部、东北部及南部部分地区, 与区内煤炭开采的主要分布地区较为吻合。

通过开展受试者特征曲线, 发现上述结果的危险性评估精度 AUC 值达到 0.84(图 10), 表明评价结果能够较好地反应研究区地质灾害的危险性空间分布特征。

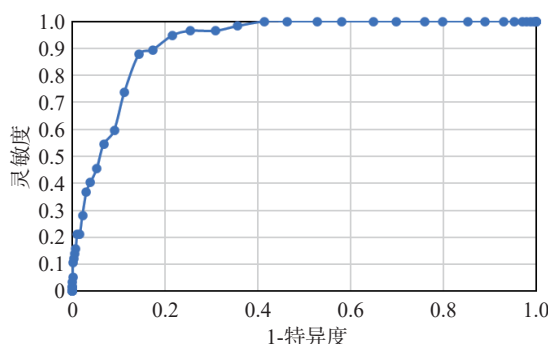


图 10 受试者测试特征曲线

Fig. 10 ROC curves of geological hazard assessment

5 结论

(1) 针对地面塌陷和崩塌、滑坡等突变型地质灾害分别构建评价指标体系, 基于信息量法开展易发性评估, 得到了两类灾害的易发性程度评价结果, 在此基础上叠加得到了综合易发性程度评价结果。评价结果表明, 研究区 56.4% 的区域为地质灾害低易发和非易发性区域, 而 43.6% 的区域为地质灾害高易发性、中易发性区域, 包含了约 85% 的灾害隐患点和地质灾害现象点。此外, 随着易发性等级的提升, 灾害点密度也相应增加, 反映评价结果与灾害分布情况较为吻合。

(2) 在易发性评价的基础上, 考虑降雨和采矿活动作为诱发因素对东胜区地质灾害的危险性分别进行了评估, 在此基础上综合形成了地质灾害危险性评价成果图。利用 ROC 曲线对评价结果进行评估, AUC 值达到 0.84, 此外, 危险性为极高、高的区域仅占据研究区总面积的 28.76%, 却包含了约 82.56% 的灾害点和地质灾害现象点; 并随着危险性等级的提升, 灾害点密度也相应增加, 表明评价结果能够较好地反映研究区地质灾害的

危险性空间分布特征。

(3) 通过在东胜区开展的以上研究, 形成了适用于采矿扰动区的县级尺度地质灾害危险性评价技术方法, 评价结果与实际情况灾害点分布较为吻合, 能够较好地反映研究区地质灾害易发性和危险性的空间分布特征, 表明针对缓变型地质灾害和突发型地质灾害分别建立指标体系和评价模型具有良好的实践效果, 该技术方法将为类似地区的地质灾害危险性评价工作提供参考。

参考文献:

- 贾丽娜, 陈世昌. 2024. 基于 AHP 和 GIS 的舟曲地质灾害易发性评价 [J]. 西北地质, 57(1): 23-33.
- 赖波, 赵风顺, 江金进, 江山, 江宁, 李俊生. 2023. 基于 AHP-信息量法的珠海市地质灾害风险评价 [J]. 华南地质, 39(1): 147-156.
- 李明, 蒋委君, 董佳慧, 金少锋, 张宸伟, 牛瑞卿. 2023. 基于机器学习的滑坡灾害易发性评价——以三峡库区为例 [J]. 华南地质, 39(3): 413-427.
- 林振, 卢书强, 梅军. 2024. 基于信息量法的湖北省秭归县滑坡易发性评价 [J]. 华南地质, 40(1): 152-161.
- 刘帅, 朱杰勇, 杨得虎, 马博. 2024. 不同降雨工况条件下的崩滑地质灾害危险性评价 [J]. 地质科技通报, 43(2): 253-267.
- 刘艺梁, 殷坤龙, 刘斌. 2010. 逻辑回归和人工神经网络模型在滑坡灾害空间预测中的应用 [J]. 水文地质工程地质, 37(5): 92-96.
- 马敏, 王江立, 陈琦, 李景富. 2024. 基于随机森林赋权信息量的区域滑坡易发性评价——以三峡库区秭归至巴东段为例 [J]. 华南地质, 40(4): 749-763.
- 内蒙古自治区市场监督管理局. 2020. 城市暴雨强度公式编制技术规范 DB15/T 2040—2020[S].
- 丘嘉荣, 黄利兵, 王金秋. 2024. 不同降雨工况条件下东江上游城镇崩滑灾害危险性评价——以广东省龙川县四都镇为例 [J]. 华南地质, 40(4): 773-782.
- 孙滨, 祝传兵, 康晓波, 叶雷, 刘益. 2022. 基于信息量模型的云南东川泥石流易发性评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 33(5): 119-127.
- 谭龙, 陈冠, 王思源, 孟兴民. 2014. 逻辑回归与支持向量机模型在滑坡敏感性评价中的应用 [J]. 工程地质学报, 22(1): 56-63.
- 王芳, 殷坤龙, 桂蕾, 陈丽霞. 2018. 不同日降雨工况下万州

- 区滑坡灾害危险性分析 [J]. 地质科技情报, 37(1):190-195+203.
- 王佳佳, 殷坤龙, 肖莉丽. 2014. 基于 GIS 和信息量的滑坡灾害易发性评价——以三峡库区万州区为例 [J]. 岩石力学与工程学报, 33(4):797-808.
- 夏靖禹, 仲 朔, 纪鑫霖, 许方党, 张兴晨, 孙晨昊, 陈丽霞. 2023. 基于 InSAR 技术的西宁北山地质灾害危险性评价 [J]. 安全与环境工程, 30(4):182-191.
- 殷坤龙, 朱良峰. 2001. 滑坡灾害空间区划及 GIS 应用研究 [J]. 地学前缘, 2001(2):279-284.
- 张平平, 何 书, 李 滨. 2024. 江西丘陵山区公路地质灾害危险性评价多耦合模型对比研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 35(4):135-145.
- 张向营, 张春山, 孟华君, 王雪冰, 赵伟康, 郑满城. 2018. 基于 Random Forest 和 AHP 的贵德县北部山区滑坡危险性评价 [J]. 水文地质工程地质, 45(4):142-149.
- 张晓东. 2018. 基于遥感和 GIS 的宁夏盐池县地质灾害风险评价研究 [D]. 中国地质大学 (北京) 博士学位论文.
- 张艳玲, 南征兵, 周平根. 2012. 利用证据权法实现滑坡易发性区划 [J]. 水文地质工程地质, 39(2):121-125.
- 赵建华, 陈汉林, 杨树锋, 马志江. 2004. 基于决策树算法的滑坡危险性区划评价 [J]. 浙江大学学报 (理学版), 31(4):465-470.
- Varnes D J. 1984. IAEG Commission on Landslides and other Mass-Movements. Landslide hazard zonation: A review of principles and practice[M]. Paris: The UNESCO Press.
- Yacine A, Hamid R P. 2020. How do machine learning techniques help in increasing accuracy of landslide susceptibility maps?[J]. Geoscience Frontiers, 11(3): 871-883.