



基于变形区识别的山区乡镇地质灾害易发性评价优化方法

强 林¹, 王 鲜¹, 郝 业¹, 李博文¹, 胡 鹏¹, 韩秀清¹, 杨伟光²

1. 陕西天地地质有限责任公司, 陕西 西安 710054;

2. 长安大学 地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054

摘 要: 西安市仁宗街道属典型的山区乡镇, 地质环境复杂, 人类工程活动频繁, 崩滑灾害多发频发。为合理预测山区乡镇地质灾害的空间分布特征, 以西安市仁宗街道为研究区, 开展了山区乡镇地质灾害易发性评价优化方法研究。在仁宗街道大比例尺地质灾害调查和孕灾条件分析的基础上, 以栅格为评价单元, 选取坡度、坡高、坡向、坡型、工程岩组、斜坡结构、距道路距离、切坡程度、植被覆盖度等 9 个影响因子, 采用综合指数法对研究区地质灾害易发性进行评价。将现场调查确定的变形区和地质灾害点范围栅格化和量化, 对综合指数法的评价结果进行优化, 并分别利用 ROC 曲线进行检验。结果显示: 评价结果精度从 81.7% 提高至 92.4%, 有效提高了乡镇地质灾害易发性评价的准确性, 可为地质灾害防灾减灾提供科学依据。

关键词: 地质灾害; 易发性评价; 综合指数法; 变形区识别; 山区乡镇

Optimization of geological hazard susceptibility assessment in mountainous townships based on identification of deformation zones

QIANG Lin¹, WANG Xian¹, HAO Ye¹, LI Bo-wen¹, HU Peng¹, HAN Xiu-qing¹, YANG Wei-guang²

1. Shaanxi Tiandi Geology Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

2. School of Geological Engineering and Geometry, Chang'an University, Xi'an 710054, China

Abstract: The Renzong Subdistrict in Xi'an City is a typical mountainous township characterized by complex geology, frequent human engineering activities, and recurrent landslide and collapse disasters. To reasonably predict the spatial distribution characteristics of geohazards in mountainous townships, this paper selects Renzong as the study area for the optimization methods of geohazard susceptibility assessment in mountainous townships. Based on the large-scale geohazard survey and analysis of disaster-pregnant conditions, taking grid cells as the evaluation units, nine impact factors, including slope gradient, slope height, slope aspect, slope type, engineering rock group, slope structure, distance from roads, slope cutting degree, and vegetation coverage, are selected for geohazard susceptibility assessment in the study area with composite index method. Besides, the deformation zones and geohazard sites identified by field survey are rasterized and quantified to optimize the evaluation results of composite index method, with validation by

收稿日期: 2024-03-22; 修回日期: 2024-04-18. 编辑: 张哲.

基金项目: 陕西省自然资源厅项目“陕西省西安市临潼区仁宗街道 1/1 万地质灾害风险调查评价”(陕自然资勘发[2022]13 号).

作者简介: 强林(1986—), 男, 高级工程师, 主要从事地质工程及岩土工程相关工作, 通信地址 陕西省西安市碑林区建东街 150 号, E-mail//303968815@qq.com

引用格式: 强林, 王鲜, 郝业, 李博文, 胡鹏, 韩秀清, 杨伟光. 基于变形区识别的山区乡镇地质灾害易发性评价优化方法[J]. 地质与资源, 2025, 34(3): 361-370, 394.

Qiang L, Wang X, Hao Y, Li B W, Hu P, Han X Q, Yang W G. Optimization of geological hazard susceptibility assessment in mountainous townships based on identification of deformation zones [J]. Geology and Resources, 2025, 34(3): 361-370, 394.

ROC curves. The results show that the evaluation precision has increased from 81.7% to 92.4%, effectively enhancing the accuracy of geohazard susceptibility assessment for townships. The method provides a scientific basis for geohazard prevention and mitigation.

Key words: geological hazard; susceptibility assessment; composite index method; identification of deformation zone; mountainous township

0 引言

随着国民经济的发展,山区城镇建设与日俱增,工程活动诱发了众多地质灾害。作为地质灾害防治的基础工作,地质灾害易发性评价是危险性评价和风险评价的前提,可为防灾减灾提供科学依据^[1-2]。

地质灾害易发性是由多种地质环境条件综合决定的地质灾害发生的可能性^[3-4]。经过多年研究实践,地质灾害易发性评价模型方法多种多样,主要可分为定性模型、半定量模型、定量模型 3 类^[5-6]。定性模型主要由研究者基于现场调查和经验判断得出研究区地质灾害易发性评价结果,例如专家打分法;半定量模型综合考虑了灾害形成的控制性因素与地质灾害发生之间的关系,通过多因子叠加或多模型耦合等方式预测地质灾害易发区域,例如综合指数法、模糊综合评判法等;定量模型运用现代数理统计理论,通过对现有地质灾害数据及其分布的统计分析进行区域地质灾害易发性预测评价,常用的有信息量法、支持向量机法、线性回归分析法等^[7-10]。近年来,随着计算机技术和“3S”技术的推广以及现代数理科学理论的进步,定量评价模型得以广泛应用。然而,限于山区乡镇等级低、区域面积小、地质灾害样本数据少,基于数理统计的定量模型往往因样本数据不足而造成评价结果与实际情况吻合度不高、代表性不强^[11]。因此,为合理预测山区乡镇地质灾害的空间分布特征,本文以西安市仁宗街道为研究区,开展山区乡镇尺度地质灾害易发性评价的探索性研究,以期形成适用于山区乡镇的地质灾害易发性评价方法。

1 研究区概况

1.1 地质环境条件

研究区位于陕西省西安市临潼区南部,骊山北麓与横岭塬接壤区域,地理坐标为 34°17'18"—34°23'06"N, 109°12'30"—109°20'50"E, 总面积 61.96 km²。总体地势西北高、东南低,海拔 520~1 302 m(图 1),属暖温

带半湿润气候区。近 20 余年平均降水量约 630 mm, 6~10 月是区内主要降水期。研究区是多条河流发源地,其中戏河为渭河一级支流,由区内多条支流汇集后自西南向东北流经研究区边界。除戏河外的其他河流在境内流经距离较短,且多为季节性溪流。区内西北部骊山山区出露岩性以太古宇太华群变质岩和燕山期花岗岩为主,东南部黄土丘陵区主要为古近系砂质泥岩和第四系中、上更新统黄土,大部分区域地表被黄土或薄层坡残积土覆盖,泥岩、砂质泥岩构成的红层和变质岩、花岗岩大面积出露。骊山地区断裂十分发育,主要有北东东与北北东两组断裂。区内中小断层发育,新构造运动强烈。

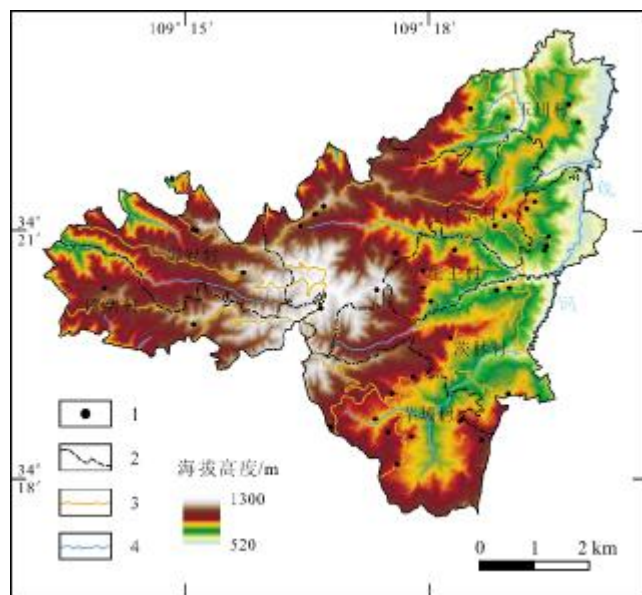


图 1 研究区地貌及地质灾害分布图

Fig. 1 Geomorphic map of the study area with distribution of geohazards

1—灾害点(hazard point); 2—村界(village boundary); 3—道路(road); 4—水系(water system)

1.2 地质灾害概况

研究区属典型的山区乡镇,限于特殊的自然地理和地质环境条件,区内切坡建房、修路等人类工程活动强

烈,崩塌、滑坡等地质灾害十分发育。截至2023年底,区内登记在册地质灾害隐患点40处,包括崩塌隐患点20处、滑坡隐患点20处,灾害点发育密度0.65处/km²。

2 研究区孕灾条件分析

2.1 孕灾地质环境背景

研究区地貌为骊山断块中低山区和黄土丘陵沟壑区,地势起伏,沟谷深切,沟壑密度大。自然斜坡多为陡坡地形,一般坡度在25~45°,加之人类活动切坡建房、修路等形成大量高陡边坡,为灾害形成提供了良好的临空条件。

区内易滑地层主要是黄土和残坡积层,此类岩土松散、具大孔隙,在连阴雨或强降雨作用下极易沿基覆界面或软弱结构面滑动,形成滑坡或斜坡坍滑变形(图

2a、b)。易崩地层主要是黄土和砂质泥岩,黄土垂直节理裂隙发育,在高陡边坡地段黄土崩塌密集;砂质泥岩因砂岩、泥岩差异风化后岩体内部拉张裂缝发育并持续发展,易于形成岩质崩塌(图2c、d)。

区内断层较为发育,新构造运动强烈,地质构造使岩土体破碎、裂隙发育、强度降低,为崩塌、滑坡形成提供了物质来源。此外,区内西部骊山断块在第四纪中更新世表现出强烈的掀斜式上升运动^[12],整体地势呈西北高、东南低的特征,使境内古近系砂岩和泥岩总体倾向90~180°。而因人们居住习惯“背高面低”,建房时往往在屋后切坡形成具有高陡临空条件的顺向坡或顺斜向坡,从而易于形成地质灾害。

2.2 地质灾害影响因素

受降雨影响,研究区内地质灾害具群发性和季节性的特征,其中80%的灾害发生在雨季,以7—9月份

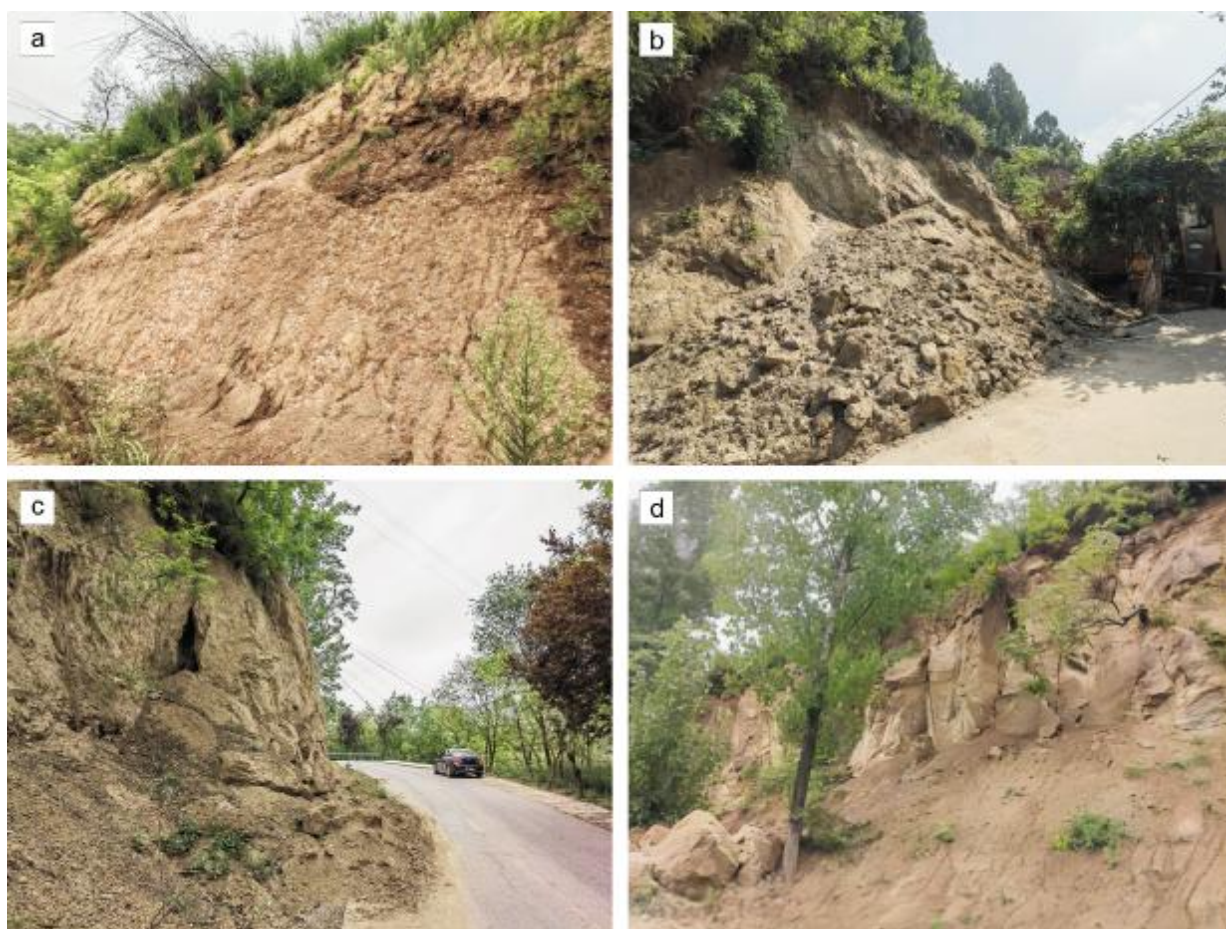


图2 研究区典型地质灾害

Fig. 2 Typical geohazards in the study area

a—上覆黄土沿基覆界面滑动(overlying loess sliding along the bedrock-loess interface); b—斜坡坍滑变形(slope collapse and deformation); c—黄土崩塌(loess collapse); d—砂泥岩差异风化后崩塌(collapse after differential weathering of sandy mudstone)

为主。降雨对斜坡起到加载和促进作用,雨水入渗弱化岩土体,软化软弱结构面,改变斜坡力学性能,对斜坡稳定性造成不利影响。

人类工程活动也是区内地质灾害形成的重要影响因素,经统计,有 75% 以上的地质灾害形成与不合理的切坡有关。研究区属中低山和黄土丘陵地貌,切坡建房和修路难以完全避免,但不规范的切坡活动和肆意“向山要地”形成了大量的高陡边坡,埋下地质灾害隐患。

2.3 地质灾害发育特点

研究区地质灾害受地形地貌和地层岩性等主要条件决定。区内不同区域人类工程活动类型、强度和斜坡结构等不同,地质灾害发育特点也不同。

受地形条件限制,区内西部骊山山区最主要的人类活动为切坡修路,其次为沿路切坡建房,切坡活动形成了大量高陡边坡。虽斜坡结构类型多为岩质斜坡,但在长期外部营力作用下斜坡表层多形成薄层残坡积覆盖层,在降雨等因素作用下常诱发浅层滑坡或斜坡坍滑变形(图 3a);其次,人们为满足居住需求,往往沿路切坡筑地建房,民房多紧靠斜坡,形成多处高陡崩塌隐患(图 3b)。经调查,西部山区的地质灾害类型主要为浅层残坡积层滑坡和崩塌隐患,规模以小型为主,主要沿主干道路沿线分布。

东南部黄土丘陵区因地形相对宽缓且更适宜开展农耕活动,属区内人口密集区,人类工程活动强烈,主要表现为切坡建房。斜坡结构类型主要为黄土斜坡和

上覆黄土、下伏砂质泥岩的岩土复合斜坡,在人工扰动和降雨等因素诱发下,常发生小型土质滑坡(图 4 a)和崩塌。此外,该区域因地面起伏、侵蚀强烈,在一些宽大沟谷两侧曾在历史时期极端降雨或地震等诱发下发生多处大中型滑坡(图 4 b)。总体而言,黄土丘陵区发育的地质灾害类型包括滑坡和崩塌两类。滑坡以黄土层内滑坡为主,其次为黄土-泥岩接触面滑坡;崩塌主要为黄土崩塌,少量残坡积层崩塌,规模以小型为主,但不乏中大型滑坡。灾害点主要分布于居民区周围。

3 地质灾害易发性评价

3.1 评价数据来源及单元划分

本研究地质灾害易发性评价数据主要来源于“西安市临潼区仁宗街道地质灾害风险调查评价”项目。项目数据通过资料收集、野外现场调查、遥感调查和解译、室内资料整理与综合研究等多种工作手段获取。

为便于量化计算,以研究区精度 5 m 的 DEM 数据为基础,按照 5 m × 5 m 栅格大小将研究区 DEM 数据离散为 2 478 400 个单元格,在此基础上进行评价因子计算。

3.2 评价方法

综合指数法是一种基于控制灾害形成的要素叠加确定地质灾害易发区域的半定量模型^[13-14]。根据研究区地质环境条件和地质灾害的发育特点、影响因素、分布规律等,选取与区内地质灾害的形成和发生关系密切的要素作为评价因子;将其按对地质灾害影响程度

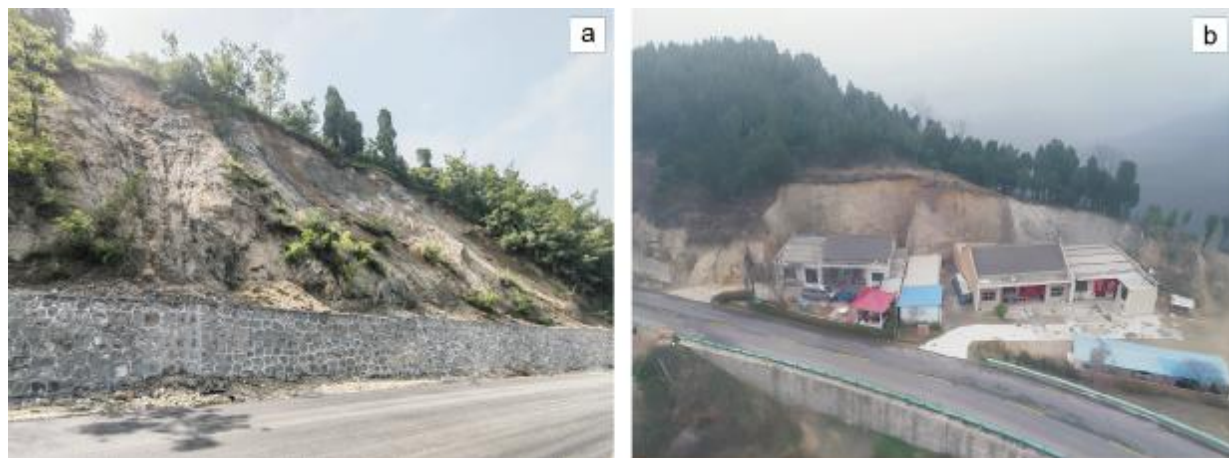


图3 骊山山区主要地质灾害类型

Fig. 3 Main types of geohazard in Lishan Mountain area

a—斜坡坍滑变形(slope collapse and deformation); b—崩塌隐患(potential collapse)



图4 黄土丘陵区主要地质灾害类型

Fig. 4 Main types of geohazard in loess hilly area

a—小型黄土滑坡(small loess landslide); b—大型黄土滑坡(large loess landslide)

进行分级并分别赋值,采用权重来衡量各因子对区内地质灾害易发性的影响程度;将多个因子按权重叠加计算后得到研究区地质灾害易发性综合指数,综合指数越高代表地质灾害易发程度越高,其模型方法为:

$$Y_i = \sum_{j=1}^n F_j \times S_j$$

式中: Y_i 代表第 i 个评价单元综合指数; F_j 代表第 i 个评价单元第 j 类指标因子权重; S_j 代表第 i 个评价单元第 j 类指标因子赋值。

3.3 评价体系建立及量化

基于研究区孕灾条件分析,区内地质灾害主要受地形地貌、人类工程活动、岩土体性质和斜坡结构等条件决定。因此,综合考虑各类评价数据精度及其与地质灾害发生的相关性,选取坡高、坡型、坡向、坡度、岩土体性质、斜坡结构、切坡程度、距道路距离和植被覆盖率等9个因子作为研究区地质灾害易发性评价指标(图5)。为验证因子选择的合理性,采用 ArcGIS 空间分析工具中的多元分析模块对上述因子进行相关性分析,结果显示各因子之间的相关性系数 $|r|$ 均小于 0.5,表明此模型评价因子选取合理。运用层次分析法(AHP)根据各评价因子内在关系结合研究区地质灾害发育的影响程度,对评价因子两两比较建立判断矩阵,采用方根法计算判断矩阵的最大特征值及其对应的特征向量,将该特征向量归一化处理得到各指标因子的权重^[15-17]。根据确定的评价因子及其权重,按各因子对地质灾害影响程度进行分级并分别赋值,

建立研究区地质灾害易发性评价指标体系及量化分值表(表1)。

3.4 评价结果

运用综合指数法在 GIS 平台中对评价单元内各因子影响指数进行叠加,形成研究区地质灾害易发性指数图(图6a),区内各评价单元地质灾害易发性综合指数介于 1.65~4.60。利用 ROC 曲线(受试者工作特征曲线)对评价结果精度进行检验^[18],ROC 曲线的 AUC 值(ROC 曲线下与坐标轴围成的面积;AUC 越接近 1.0,检测方法真实性越高)为 0.817(图6b)。

4 评价结果优化与分析

4.1 斜坡变形区识别

斜坡变形情况可直观反映斜坡稳定性状况,并可通过区域遥感解译和野外现场调查等手段获得^[19-20]。2021年,研究区遭遇了60年一遇的强降雨,在区内诱发了众多地质灾害及斜坡变形,这些变形破坏迹象可为地质灾害易发性评价提供重要依据。

因此,项目调查前首先综合运用了卫星遥感、无人机航测等技术对区内具有明显斜坡变形破坏的区域进行了遥感解译并圈定,随后在现场调查中逐一进行了核实,并开展了地毯式逐坡调查,识别圈定了新的斜坡变形破坏区域,最终确认明显变形区224处,变形区面积合计349 880.15 m²。利用 ArcGIS 中核密度分析功能将确认的变形区进行处理(图7),可直观看到:野外调查确认的变形区分布基本与区内地质灾害发育情况

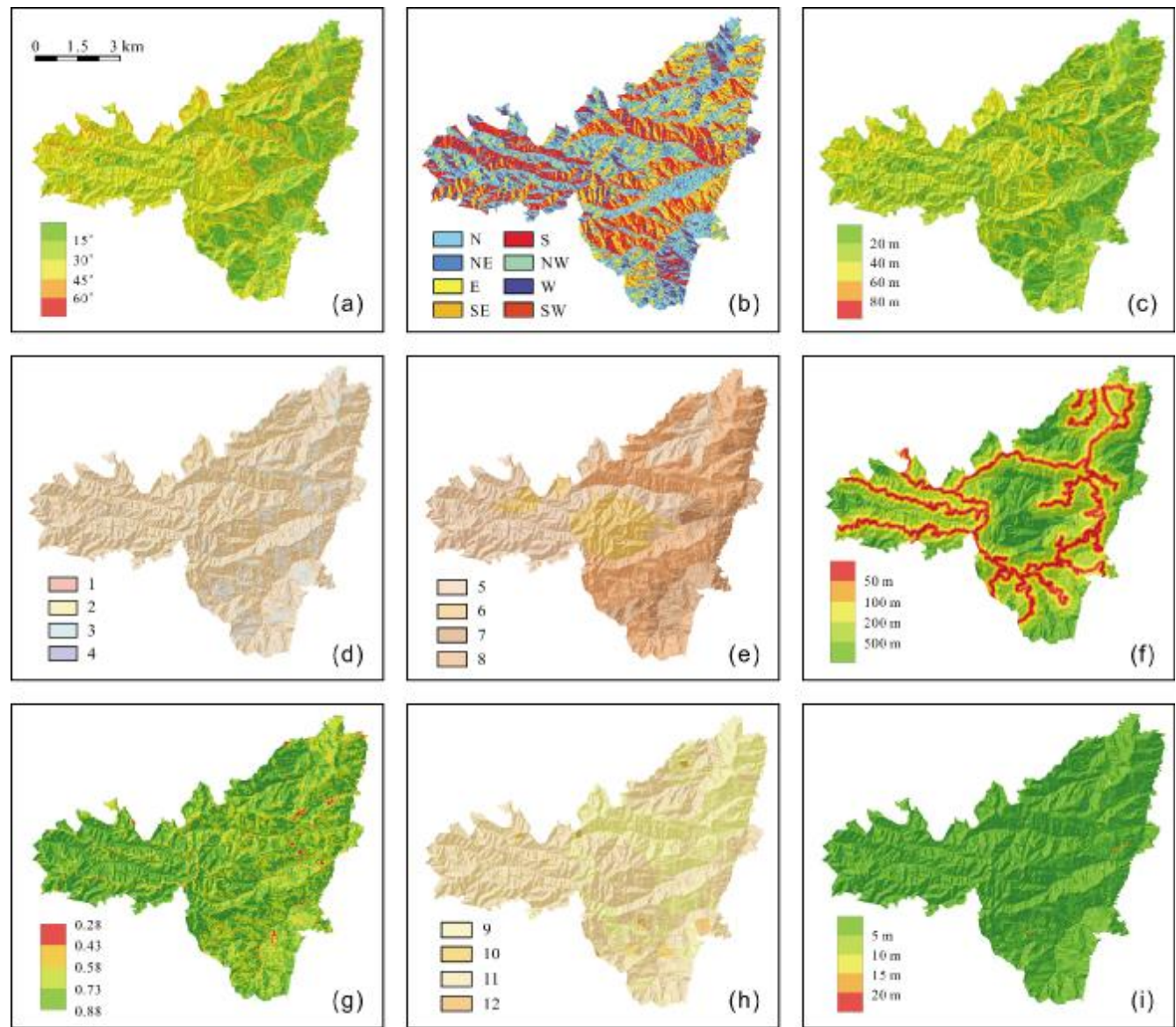


图 5 地质灾害易发性评价因子分级图

Fig. 5 Classification diagrams of geohazard susceptibility assessment factors

a—坡度(slope); b—坡向(slope aspect); c—坡高(slope height); d—坡型(slope type); e—岩土体(rock-soil mass); f—距道路距离(distance from roads); g—归一化植被指数(NDVI); h—斜坡结构(slope structure); i—切坡程度(slope cutting degree); 1—凹形坡(concave slope); 2—阶梯形坡(stepped slope); 3—直线型坡(straight slope); 4—凸形坡(convex slope); 5—块状坚硬变质岩类(blocky hard metamorphic rock); 6—块状坚硬花岗岩类(blocky hard granitoids); 7—层状软弱碎屑岩类(layered weak clastic rocks); 8—黄土及黄土状土(loess and loess-like soil); 9—土质斜坡(soil slope); 10—岩质斜坡(rock slope); 11—岩土复合斜坡(rock-soil composite slope); 12—崩滑堆积体斜坡(landslide accumulation slope)

相符,并与综合指数法评价结果趋势基本一致.

4.2 评价结果优化

如前所述,综合指数法运算过程并未考虑地质灾害点发育情况,完全依据研究区孕灾地质环境条件叠加计算.为了补充已有地质灾害及隐患点在区域地质灾害易发性评价中的作用,将调查确认的224处变形区及已有40处地质灾害点范围在GIS中进行栅格化

和定量化处理,与综合指数法评价结果进行叠加,并对其结果进行优化.具体步骤为:利用GIS软件将变形区和地质灾害点范围离散为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 的栅格单元,并统计研究区内每个栅格及其相邻4个栅格中变形栅格的数量,按照每个统计单元中变形栅格数量给中间栅格赋值,栅格赋值最高为5,最低为0.为避免叠加后变形栅格形成噪点,对变形栅格赋值归一化后与综合

表 1 评价指标体系及量化分值表
Table 1 Evaluation index system and quantitative scores

评价指标	权重	指标分类	赋值	评价指标	权重	指标分类	赋值
坡度/(°)	0.184	<15	1	岩土体	0.173	块状坚硬花岗岩类	2
		15~30	2			块状坚硬变质岩类	3
		30~45	3			层状软弱碎屑岩类	4
		45~60	4			黄土及黄土状土类	5
		>60	5	距道路距离/m	0.131	<50	5
坡向/(°)	0.048	北(337.5~22.5)	1			50~100	4
		北东(22.5~67.5)	2			100~200	3
		东(67.5~112.5)	3			200~500	2
		南东(112.5~157.5)	5			>500	1
		南(157.5~202.5)	4	NDVI	0.071	0.28~0.43	5
		南西(202.5~247.5)	3			0.43~0.58	4
		西(247.5~292.5)	2			0.58~0.73	3
		北西(292.5~337.5)	1			0.73~0.88	2
坡高/m	0.131	<20	1	斜坡结构	0.091	岩质斜坡	2
		20~40	2			崩滑堆积体斜坡	3
		40~60	3			岩土复合斜坡	4
		60~80	4			土质斜坡	5
		>80	5	切坡程度/m	0.131	<5	1
坡型	0.040	凸形	3			5~10	2
		凹形	2			10~15	3
		直坡	5			15~20	4
		阶梯	4			>20	5

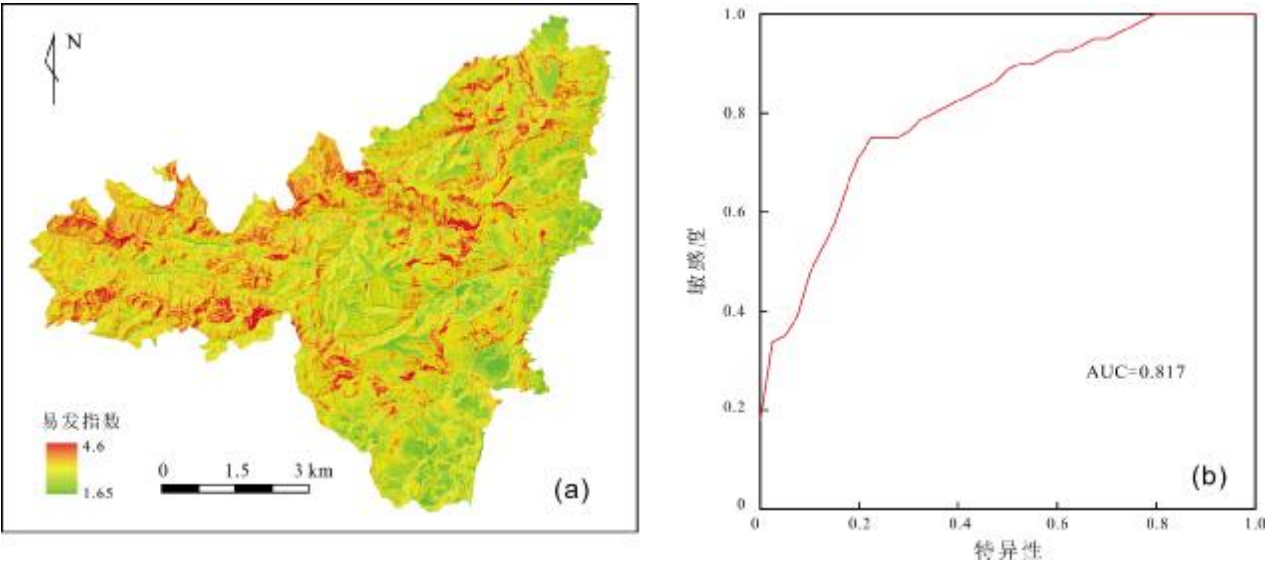


图 6 综合指数法评价结果图
Fig. 6 Evaluation results of composite index method
a—地质灾害易发性综合指数(composite index of geohazard susceptibility); b— ROC 曲线检验结果(ROC curve test result)

指数法评价结果结合形成综合评价指数图. 运用 ROC 曲线对评价结果精度进行检验, 结果显示 AUC 值为 0.924(图 8),较综合指数法评价结果精度明显提高.

4.3 评价结果分析

采用自然断点法将研究区内评价单元地质灾害易发性划分为极高易发区、高易发区、中易发区、低易发

区 4 个等级, 得到研究区地质灾害易发性综合评价图(图 9). 对地质灾害易发性综合评价结果进行统计(表 2)可看出,随着易发性等级的提高,各易发区中包含的灾害点的数量和比率也逐步增加,极高、高易发性等级区域中包含了 97.5%的已知地质灾害隐患点, 表明评价结果与实际基本相符.

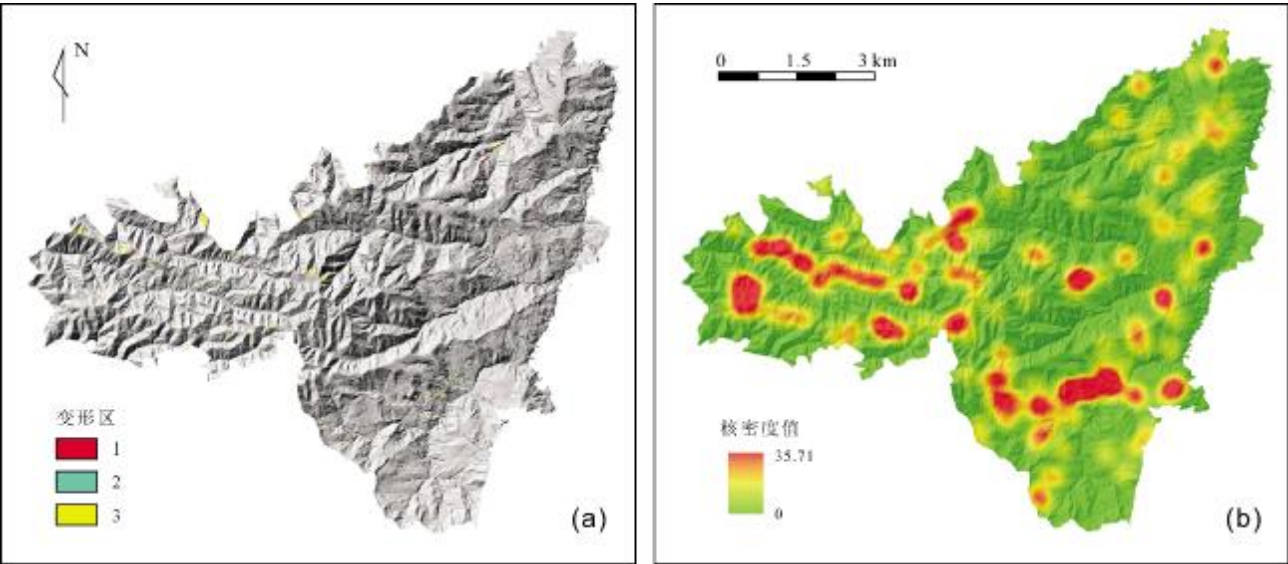


图 7 斜坡变形区分布图

Fig. 7 Distribution map of slope deformation zone

a—现场调查变形区分布(distribution of deformation zone by field survey); b—变形区核密度效果(kernel density effect of deformation zone); 1—崩塌隐患区(potential collapse area); 2—滑坡隐患区(potential landslide area); 3—斜坡变形区(slope deformation zone)

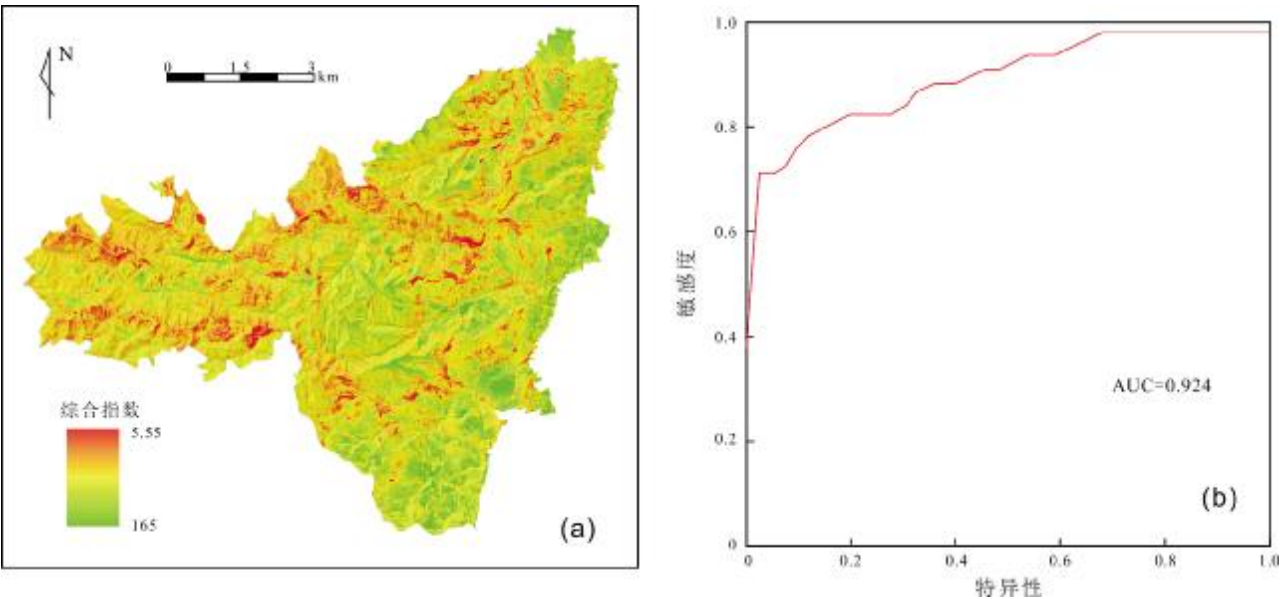


图 8 综合评价结果图

Fig. 8 Comprehensive assessment results

a—地质灾害易发性综合指数(composite index of geohazard susceptibility); b— ROC 曲线检验结果(ROC curve test result)

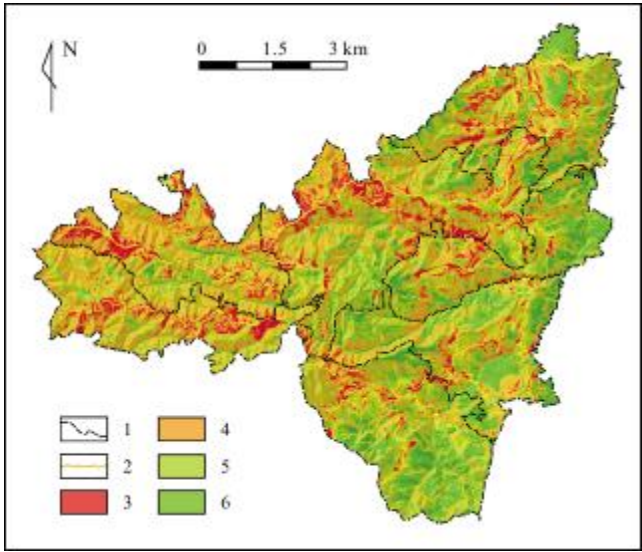


图 9 地质灾害易发性综合评价图

Fig. 9 Comprehensive assessment map of geohazard susceptibility

1—村界(village boundary); 2—道路(road); 3—极高易发区(extremely high risk area); 4—高易发区(high risk area); 5—中易发区(medium risk area); 6—低易发区(low risk area)

表 2 地质灾害易发性综合评价结果统计表

Table 2 Statistics of comprehensive assessment results of geohazard susceptibility

易发性等级	综合评价指数	栅格单元数	面积占例(a)/%	地质灾害点数量/个	灾害点占比(b)/%	b/a
极高易发区	$3.50 < Y_i \leq 5.55$	224226	9.05	34	85	9.39
高易发区	$3.04 < Y_i \leq 3.50$	798390	32.21	5	12.5	0.39
中易发区	$2.60 < Y_i \leq 3.04$	877436	35.4	1	2.5	0.07
低易发区	$1.65 \leq Y_i \leq 2.60$	578348	23.34			
总计		2478400	100	40	100	

从易发性综合评价结果整体来看,最显著的特点就是地质灾害易发性与人类工程活动密切相关,地质灾害极高易发区主要集中在区内灞临路、斜仁路、代仁路等主要交通线路沿线,而居民也主要沿道路居住.此类区域切坡修路、建房等人类工程活动强烈,普遍存在大量高陡人工边坡,地质灾害易发性高是人类工程活动与地质环境条件综合作用的结果.

研究区近 80%的区域属于地质灾害极高、高、中易发区,这与研究区全境属骊山断块中低山区和黄土丘陵沟壑区、地形起伏变化强烈、地质构造复杂、地质环境脆弱等有关,也与区内地质灾害实际发育情况基本相符.区内自然地形高陡,斜坡结构主要为岩土复

合斜坡和土质斜坡,岩土体主要为块状坚硬片麻岩类、层状软弱碎屑岩类、黄土及黄土状土类.斜坡表层受人类工程活动及风化作用影响,岩土体完整性差、松散破碎,易发生浅表层滑塌;层状软弱碎屑岩类受地质构造影响,多为顺向坡或顺斜向坡,受人类工程活动改造,坡脚多形成临空面,加之砂岩与泥岩差异风化作用影响,易发生崩滑灾害;黄土及黄土状土类力学强度低,加之人类工程活动强烈,造成地质灾害易发.

区内地质灾害低易发区仅占研究区总面积的 23.34%,主要分布于研究区中部骊山最高峰周围和东南部区域.中部骊山最高峰除四周因有道路通过、有一定程度人类工程活动外,其中心区域因山高坡陡,绝大部分区域人迹罕至,因而自然环境保持良好,地质灾害易发性低.东南部属黄土丘陵区深部,人类工程活动少,总体地质灾害易发性较低.

5 结论

(1)基于 GIS 平台,以栅格单元为基础评价单元,选取了与研究区地质灾害发育紧密联系的 9 个影响因子,通过权重分析和赋值建立了西安市仁宗街道地质灾害易发性评价体系,采用综合指数法模型对研究区地质灾害易发性进行了评价.通过对调查确定的变形区及已有地质灾害点范围栅格化和定量化进而对综合指数法评价结果进行优化,有效提高了地质灾害易发性评价的可靠度.

(2)综合评价结果表明,研究区极高易发区面积 5.60 km²,占仁宗街道总面积的 9.05%;高易发区面积 19.96 km²,占总面积的 32.21%;中易发区面积 21.94 km²,占总面积的 35.4%;低易发区面积 14.46 km²,占总面积的 23.34%.研究区近 80%的区域属于地质灾害极高、高、中易发区,低易发区主要分布于研究区中部骊山最高峰周围和东南部黄土丘陵区深部.

(3)对研究区地质灾害形成影响最为直接的因素为人类工程活动,主要表现为切坡建房和修路.山区乡镇此类工程活动难以完全避免,但若规划和建设不加规范,极易埋下地质灾害隐患.

参考文献(References):

[1]张茂省,薛强,贾俊,等.山区城镇地质灾害调查与风险评价方法及实践[J].西北地质,2019,52(2):125-135.

Zhang M S, Xue Q, Jia J, et al. Methods and practices for the

- investigation and risk assessment of geo-hazards in mountainous towns [J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(2): 125–135.
- [2] 齐信, 唐川, 陈州丰, 等. 地质灾害风险评价研究[J]. *自然灾害学报*, 2012, 21(5): 33–40.
- Qi X, Tang C, Chen Z F, et al. Research of geohazards risk assessment[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2012, 21(5): 33–40.
- [3] 兰盈盈, 郭昶成, 朱云福. 地质灾害易发性评价方法综述[J]. *地质与资源*, 2024, 33(1): 65–73.
- Lan Y Y, Guo C C, Zhu Y F. Review on the evaluation methods of geological hazard susceptibility[J]. *Geology and Resources*, 2024, 33(1): 65–73.
- [4] 陈玉, 蔺启忠, 王钦军. 区域地质灾害评价模型综述[J]. *防灾科技学院学报*, 2010, 12(4): 42–45.
- Chen Y, Lin Q Z, Wang Q J. Summary of regional geological hazard assessment model [J]. *Journal of Institute of Disaster Prevention*, 2010, 12(4): 42–45.
- [5] 徐继维, 张茂省, 范文. 地质灾害风险评估综述[J]. *灾害学*, 2015, 30(4): 130–134.
- Xu J W, Zhang M S, Fan W. An overview of geological disaster risk assessment[J]. *Journal of Catastrophology*, 2015, 30(4): 130–134.
- [6] 万飞鹏, 杨为民, 邱占林, 等. 甘肃岷县纳古呢沟滑坡-泥石流灾害链成灾机制及其演化[J]. *中国地质*, 2023, 50(3): 911–925.
- Wang F P, Yang W M, Qiu Z L, et al. Disaster mechanism and evolution of Nagune Gully landslide-debris flow disaster chain in Minxian County, Gansu Province[J]. *Geology in China*, 2023, 50(3): 911–925.
- [7] 申玉松, 张宸, 王艺杰, 等. 基于 CF-LR 模型的河南省信阳市地质灾害易发性评价[J]. *地质与资源*, 2024, 33(1): 74–81, 134.
- Shen Y S, Zhang C, Wang Y J, et al. Geohazard susceptibility assessment based on CF-LR model for Xinyang city, Henan province [J]. *Geology and Resources*, 2024, 33(1): 74–81, 134.
- [8] 陈绪钰, 倪化勇, 李明辉, 等. 基于加权信息量和迭代自组织聚类的地质灾害易发性评价[J]. *灾害学*, 2021, 36(2): 71–78.
- Chen X Y, Ni H Y, Li M H, et al. Geo-hazard susceptibility evaluation based on weighted information value model and ISODATA cluster[J]. *Journal of Catastrophology*, 2021, 36(2): 71–78.
- [9] 乔德京, 王念秦, 郭有金, 等. 加权确定性系数模型的滑坡易发性评价[J]. *西安科技大学学报*, 2020, 40(2): 259–267.
- Qiao D J, Wang N Q, Guo Y J, et al. Landslide susceptibility assessment based on weighted certainty factor model[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2020, 40(2): 259–267.
- [10] 李雨柯, 赵院冬, 陈伟涛, 等. 基于深度学习的岩体遥感智能解译模型研究——以黑龙江省苇河镇、亚布力镇、绥阳镇地区为例[J]. *地质与资源*, 2022, 31(6): 790–797.
- Li Y K, Zhao Y D, Chen W T, et al. Remote sensing intelligent interpretation model for rock mass based on deep learning: a case study of Weihe Town, Yabuli Town And Suiyang Town in Heilongjiang Province[J]. *Geology and Resources*, 2022, 31(6): 790–797.
- [11] 王鑫, 王鲜, 郝业, 等. 基于加权信息量法与综合指数法的西安市蒋村街道地质灾害易发性评价对比[J]. *世界地质*, 2023, 42(2): 399–408.
- Wang X, Wang X, Hao Y, et al. Comparison between weighted information and comprehensive index methods on geological disaster susceptibility evaluation at Jiangcun Street, Xi'an City [J]. *Global Geology*, 2023, 42(2): 399–408.
- [12] 秦关民. 临潼县古地理环境与地质地貌的演变[J]. *陕西师大学报(自然科学版)*, 1983(2): 138–142.
- Qin G M. The evolution of palaeogeographic environment geology and landform in Lintong County[J]. *Journal of Shaanxi Teachers University*, 1983(2): 138–142.
- [13] 王念秦, 姚勇, 周自强, 等. 农村乡镇地质灾害易发性综合评价方法研究[J]. *西安科技大学学报*, 2008, 28(4): 657–661, 679.
- Wang N Q, Yao Y, Zhou Z Q, et al. Comprehensive evaluation method for geological disasters-prone of rural township[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2008, 28(4): 657–661, 679.
- [14] 周超, 常鸣, 徐璐, 等. 贵州省典型城镇矿山地质灾害风险评价[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2020, 45(11): 1782–1791.
- Zhou C, Chang M, Xu L, et al. Risk assessment of typical urban mine geological disasters in Guizhou Province [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1782–1791.
- [15] 周秀全, 黄海波, 郑宁, 等. 基于层次分析法的水库蓄水后滑坡易发性评价[J]. *地质与资源*, 2022, 31(6): 804–810.
- Zhou X Q, Huang H B, Zheng N, et al. Susceptibility assessment of landslide after reservoir impoundment based on analytic hierarchy process[J]. *Geology and Resources*, 2022, 31(6): 804–810.
- [16] 鲁霞, 兰安军, 母浩江, 等. 基于信息量模型的盘州市地质灾害易发性评价[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(14): 5544–5551.
- Lu X, Lan A J, Mu H J, et al. Geological hazard risk assessment based on information quantity model in Panzhou City [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(14): 5544–5551.
- [17] 王俊德, 杜晓阳, 黄天浩, 等. 河南省嵩县地质灾害风险评价[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2023, 34(4): 86–96.
- Wagn J D, Du X Y, Huang T H, et al. Risk assessment of geological hazards in Song County, Henan Province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2023, 34(4): 86–96.