

基于信息量模型的灵宝市地质灾害易发性分析与评估

李浩龙

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2025年9月5日; 录用日期: 2025年10月14日; 发布日期: 2025年10月27日

摘 要

本研究以三门峡市灵宝地区为研究范围, 综合选取坡度、坡向、坡型、地形起伏度、工程地质岩性组合、距水系距离、降水量、植被覆盖率及距道路距离等九项主要控制因子, 作为区域地质灾害易发性分析与评估的指标体系。基于高分一号卫星遥感影像提取地质灾害相关的动态因子, 构建信息量模型评价框架, 并对各环境因子的单项信息量进行定量计算与综合分析, 进一步探讨其空间分布特征及相对贡献度。在此基础上, 划定不同危险等级的黄土崩塌易发性分区。结果表明, 高易发性区域的崩塌频率为6.39, 其次是中(0.93)、低(0.38)和极低(0.11), 与历史统计的崩塌点分布非常吻合, 说明分析模型生成的崩塌易发区合理, 具有较高的评价精度, 有助于制定该地区防灾减灾策略。

关键词

黄土崩塌, 易发性评价, 信息量模型, 动态影响因子

Susceptibility Assessment of Loess Slope Collapses in Lingbao City Using the Information Value Model

Haolong Li

School of Earth Science and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: Sep. 5th, 2025; accepted: Oct. 14th, 2025; published: Oct. 27th, 2025

Abstract

This study focuses on the susceptibility assessment of loess slope collapses in Lingbao City, Sanmenxia, a region characterized by extensive loess-covered terrain and highly erodible slopes. Nine

conditioning factors were selected, including slope gradient, slope aspect, slope morphology, terrain relief, engineering geological lithological assemblages, distance to drainage networks, precipitation, vegetation coverage, and proximity to roads. Dynamic variables were derived from Gaofen-1 high-resolution remote sensing imagery. An Information Value (IV) model was employed to quantitatively evaluate the contribution of each factor, followed by a comprehensive analysis of their spatial distribution patterns and relative weights. A susceptibility zoning map was subsequently produced, classifying areas into different hazard levels. The results indicate that high-susceptibility zones exhibit a collapse occurrence frequency of 6.39, followed by moderate (0.93), low (0.38), and very low (0.11) susceptibility classes. The predicted distribution of loess slope collapses shows strong agreement with the historical collapse inventory, validating the robustness and high predictive capability of the applied model. These findings provide a scientific basis for region-specific geo-hazard prevention and mitigation strategies in loess-dominated landscapes.

Keywords

Loess Slope Collapse, Susceptibility Assessment, Information Value Model, Dynamic Conditioning Factors

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

灵宝市隶属三门峡地区，位于秦岭山脉与黄土高原交汇过渡区，地质构造格局复杂，生态环境脆弱，且崩塌等地质灾害呈高频分布特征[1][2]。此类灾害不仅威胁居民生命财产安全，还对区域生态环境造成破坏，尤其是在交通线路密集、人口集中分布的区域，其潜在风险更为突出。因此，在该区域开展崩塌灾害易发性分析与评价具有重要的理论研究价值和实际应用意义。近年来，随着计算机科学与信息技术的快速发展，以遥感(RS)和地理信息系统(GIS)为代表的空间信息技术已被广泛应用于地质灾害易发性研究与区划工作中。现有地质灾害定量评价方法主要涵盖信息量模型(IVM)[3][4]、多元回归分析[5]及逻辑回归模型[6]等。其中，回归分析与信息量法在结果一致性和可操作性方面表现突出，尤其是信息量模型因理论框架清晰、参数计算简便、实现过程直观，已被广泛用于地质灾害易发区划分。阮沈勇和黄润秋[7]通过将GIS技术与信息量模型相结合，显著提升了灾害危险性区划的科学合理性与精度水平。相关研究成果为灵宝市区域崩塌灾害易发性评价提供了重要的理论基础和技术支撑。

本文以依托灵宝市城市周边崩塌地质灾害工程治理项目勘察报告为研究对象，以前期的地质勘察等资料为基础，采取改进的信息量模型[8]，将单体崩塌危险性评价方法拓展至区域尺度的地质灾害易发性综合评估。

2. 信息量法黄土崩塌易发性区划研究

2.1. 信息量模型

信息量模型基于信息论原理，其核心是在地灾形成过程中，通过系统熵值的变化来表征灾害发生的概率。该模型将影响灾害孕育与演化的环境因子作为评价变量，通过计算各控制因子的单项信息量，并结合单因子或加权叠加的方法构建完整的灾害易发性分析框架，从而实现对不同区域易发等级的定量划分。信息量的计算基于概率论原理，其公式如(1)所示。

$$I(y, x_1 x_2 \cdots x_n) = \log_2 \left(P(y | x_1 x_2 \cdots x_n) / P(y) \right) \quad (1)$$

在区域尺度的地质灾害研究中,影响灾害孕育与发生的因素通常较为复杂且数量众多。通过对各单一因子的计算结果进行信息量叠加,可获得研究区在多因子耦合作用下的综合信息量值。若以 I_i 表示因子 x_i 所对应的信息量,其计算关系可表示为式(2):

$$I(y, x_1 x_2 \cdots x_n) = \sum_{i=1}^n I_i \quad (2)$$

区域地质灾害易发性分析需首先将研究区划分为评价单元,即将各类影响因子网格化处理。若网格过大,可能导致信息细节丢失和空间泛化;若网格过小,则会显著降低计算效率。对于规则的方形网格,其单元尺寸可选取与栅格数据分辨率相同,也可通过经验公式确定。结合影响网格尺寸选择的主要因素,本文给出网格大小确定的经验公式(3):

$$G_s = 7.49 + 0.0006S - 2.0 \times 10^{-9} S^2 + 2.9 \times 10^{-15} S^3 \quad (3)$$

式中, G_s 为适宜网格的大小; S 为原始等高线数据精度的分母。

实际计算可用统计频率估计条件概率来估算式(4):

$$I(y, x_1 x_2 \cdots x_n) = \log_2 \left((N_0 | N) / (S_0 | S) \right) \quad (4)$$

式中, S 为研究区评价单元总面积; N 为研究区含有地质灾害点统计数; S_0 代表具有特定因子组合 $x_1 x_2 \cdots x_n$ 的单元总面积; N_0 为具有相同因子组合 $x_1 x_2 \cdots x_n$ 的特定类别内的地质灾害点总数。则得到式(5):

$$I = \sum_{i=1}^n I_i = \sum_{i=1}^n \log_2 \left((N_i | N) / (S_i | S) \right) \quad (5)$$

2.2. 基于信息量模型的地质灾害易发性分析与评估

本文基于信息量模型的区域地质灾害易发性评价方法,流程如下(见图1):

- (1) 识别并提取研究区内对灾害孕育与发生具有控制作用的关键环境因子;
- (2) 依据既定方法计算各控制因子的单项信息量,并通过加权叠加生成研究区综合信息量图;
- (3) 通过统计与分类分析技术对综合信息量进行分级,划定不同等级的地质灾害易发区;
- (4) 利用地质灾害点对评价结果进行成果核验,分析其崩塌灾害发生的频率[8]。

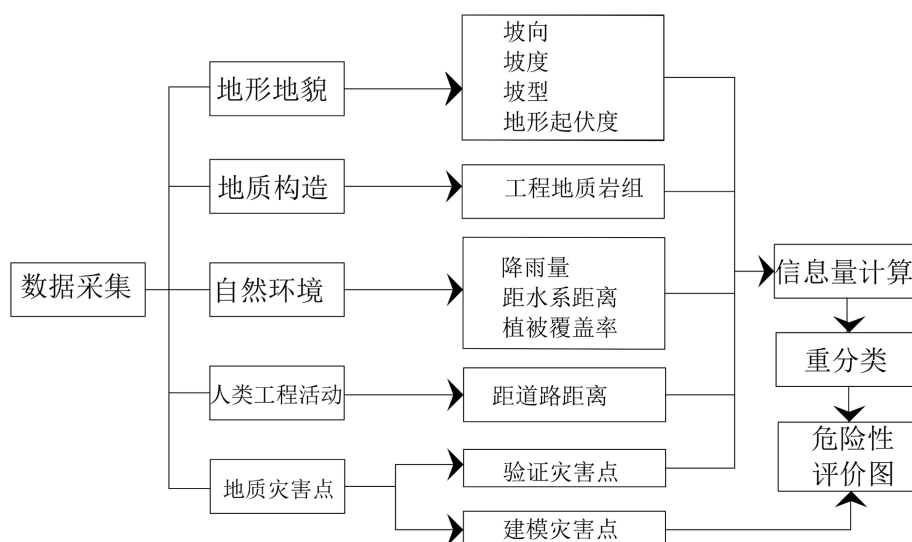


Figure 1. Geological hazard susceptibility evaluation process
图 1. 地质灾害易发性评价流程

3. 灵宝地区地质灾害易发性区域评价

研究区位于河南省西部，处于豫、陕、晋三省交界地带。西邻陕西省潼关和洛南县，南界小秦岭、崤山及卢氏县，东接河南省陕县和洛宁县，北隔黄河与山西省芮城、平陆相邻[9]。区域总面积约 3011 km² (见图 2)，东西向约 75.3 km，南北向约 65.7 km，地理坐标范围为东经 110°21'18"~111°11'35"、北纬 34°07'10"~34°44'21"。地势起伏明显，海拔最高点为 2386 m，最低为 292 m，大部分区域集中在 400~1200 m 之间，整体地形呈西南高东北低趋势。地貌类型以中低山和丘陵为主，间有河谷和平原分布。该区属暖温带大陆性季风气候，四季分明，日照条件较好，降水适中。

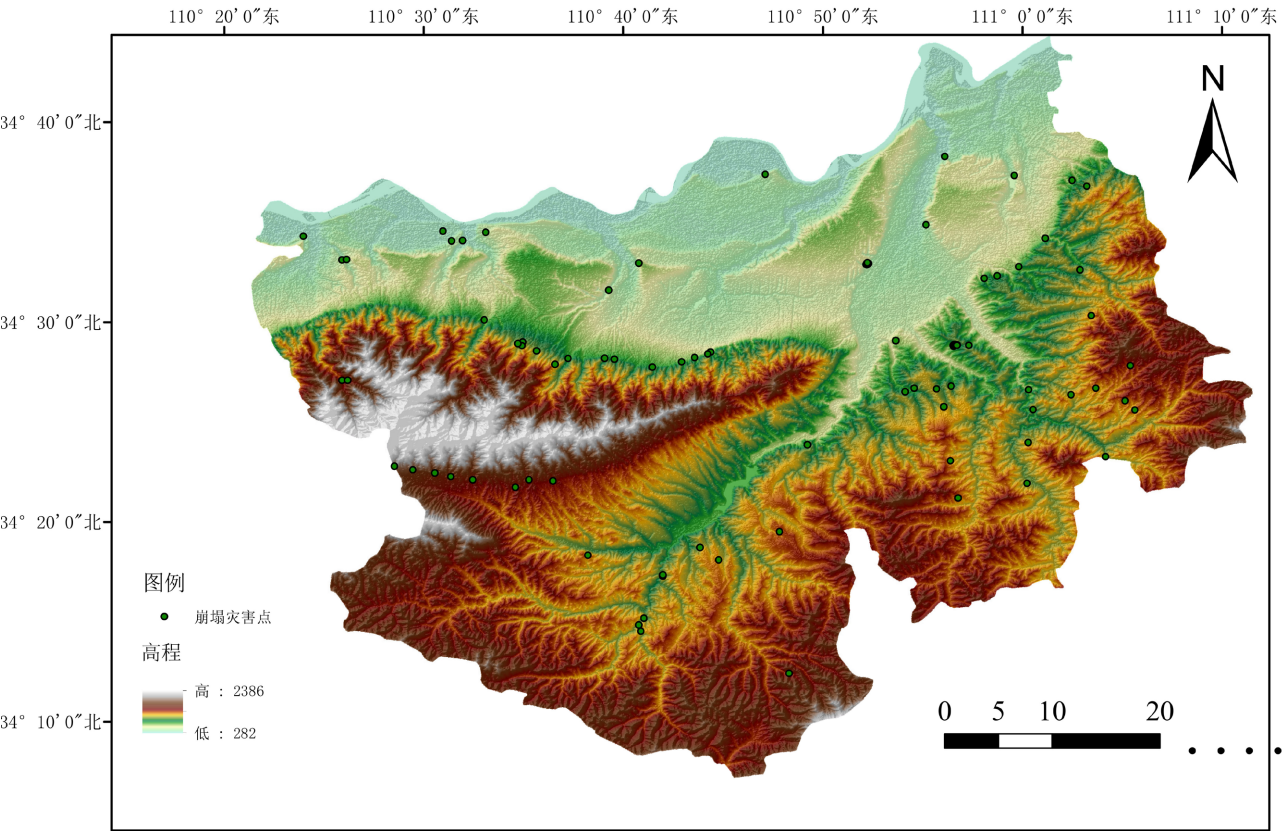


Figure 2. Location of the study area
图 2. 研究区位置

3.1. 地质灾害影响因子的提取计算

为构建区域地质灾害易发性分析的指标体系，本研究选取了九项主要控制因子，包括坡度、坡向、坡型、地形起伏度、工程地质岩性组合、植被覆盖指数(NDVI)、距水系距离、距道路距离及降水量等。这些因子是基于实地调查结果和对地质灾害点空间分布特征的系统研究。

为表征研究区的地貌特征，本研究选取坡度、坡向、坡型和地形起伏度四个关键地形指标，作为影响区域地质灾害易发性的主要变量。基于 1:50,000 比例尺的等高线数据，借助 ArcMap 10.8 中的 Slope 和 Aspect 工具提取坡度与坡向信息，并通过高程差计算地形起伏度。依据“标准差较大且接近正态分布”的分级标准对各指标进行划分，最终生成坡度因子图(图 3)、坡向因子图(图 4)、坡型因子图(图 5)及地形起伏度因子图(图 6)。

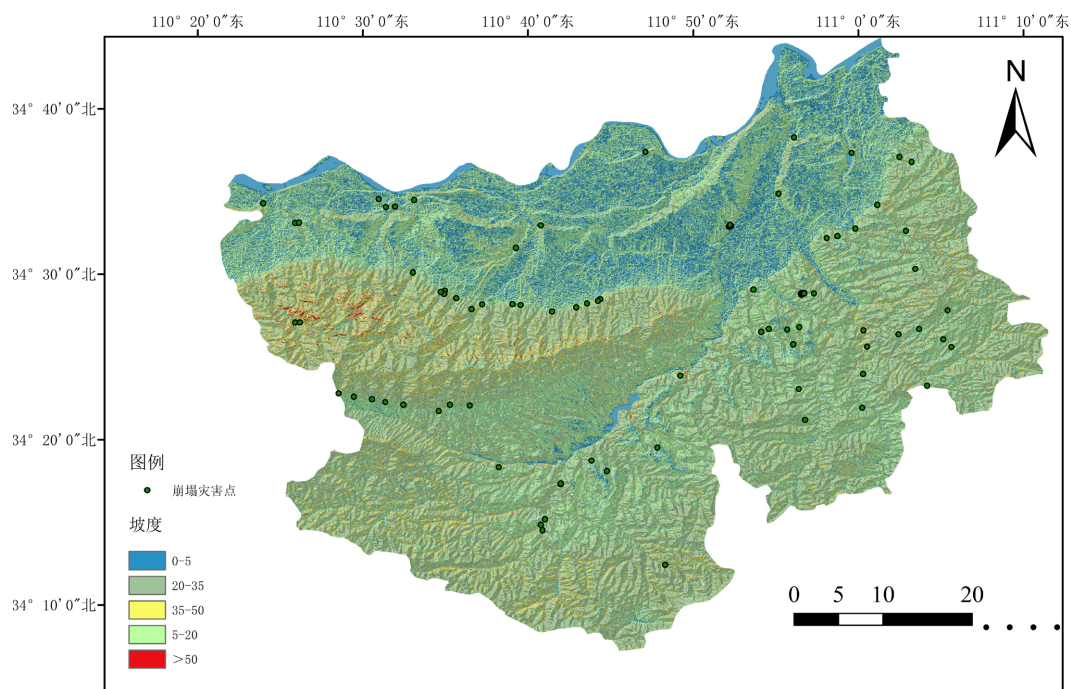


Figure 3. Slope factor map

图 3. 坡度因子图

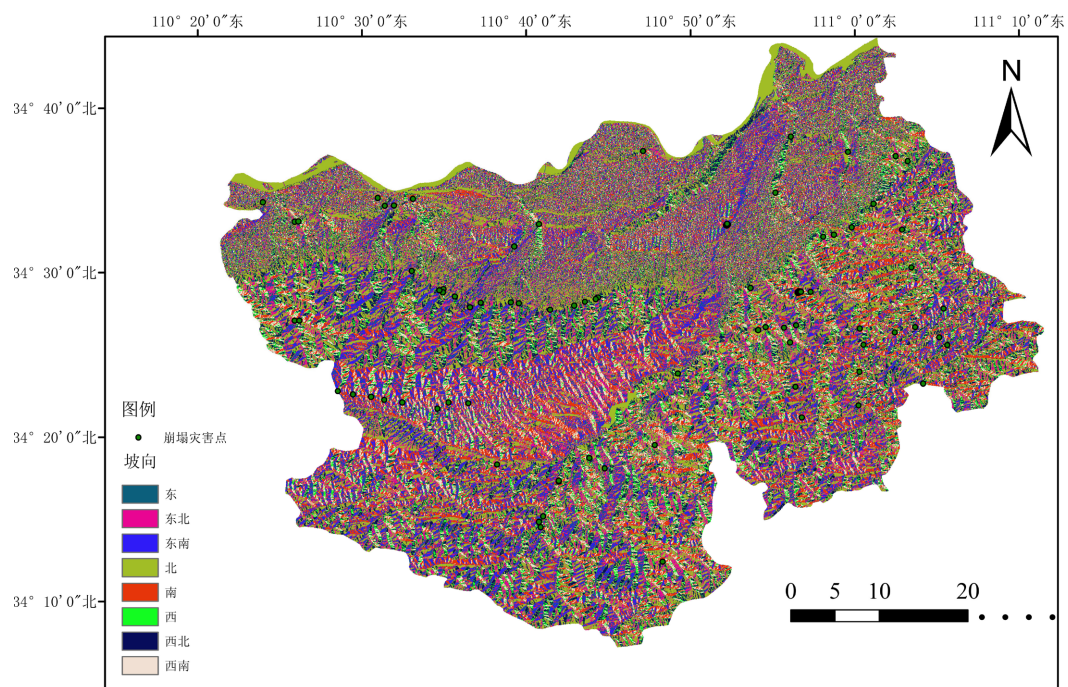


Figure 4. Aspect factor map

图 4. 坡向因子图

利用 ArcGIS 中的 Hydrology 工具集, 对降雨量数据按格网单元进行重分类, 生成降雨量因子图(图 7)。地层岩性信息则来源于 1:100,000 比例尺的灵宝市地质图, 并依据区域地质构造与岩性特征, 将地层岩性划分为八个工程地质岩组, 进而制备工程地质岩组因子图(图 8)。

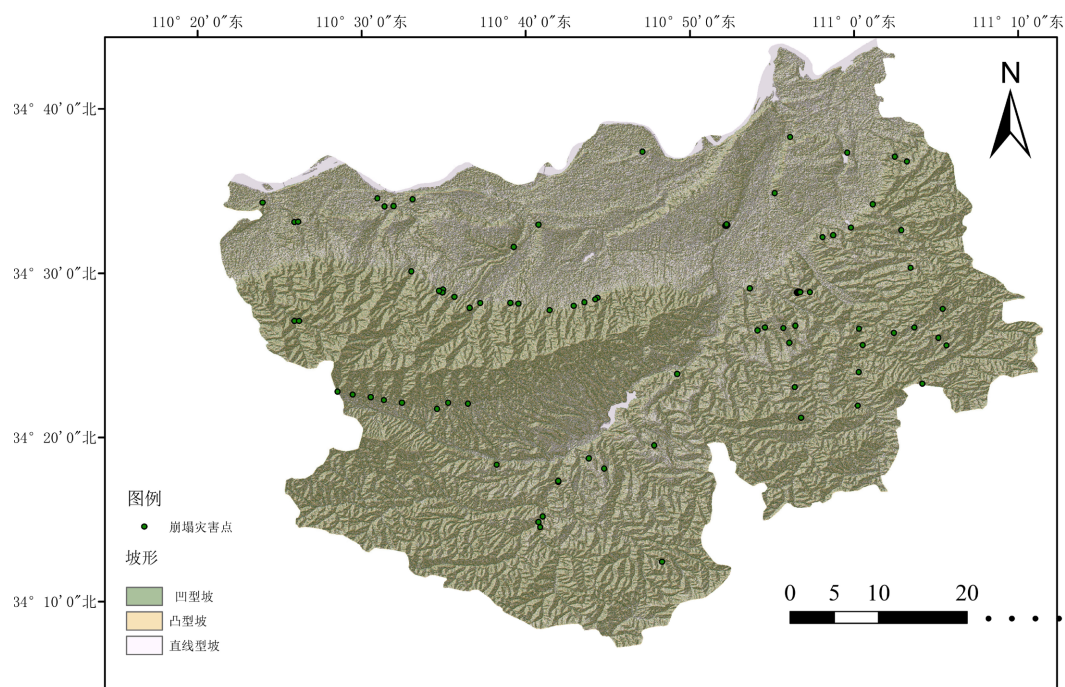


Figure 5. Slope type factor map
图 5. 坡型因子图

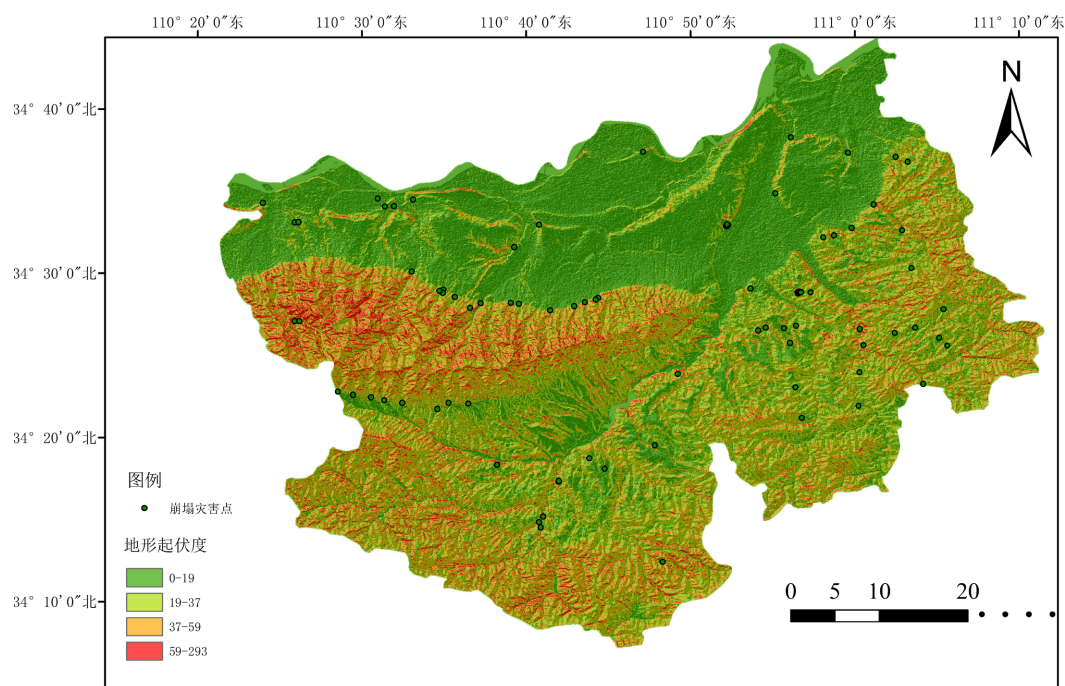


Figure 6. Terrain relief factor map
图 6. 地形起伏度因子图

水系和交通因子的提取基于 1:2000 比例尺地形图获取的水系单线河和双线河要素, 利用 Multiple Ring Buffer 工具结合水系分布生成多重缓冲区, 从而形成距水系距离图(图 9); 采用同样的方法绘制了距道路距离图(图 10)。

植被覆盖状况通过在 ENVI 5.1 中对遥感影像进行辐射归一化处理后提取的归一化植被指数(NDVI)来表示(图 11)。

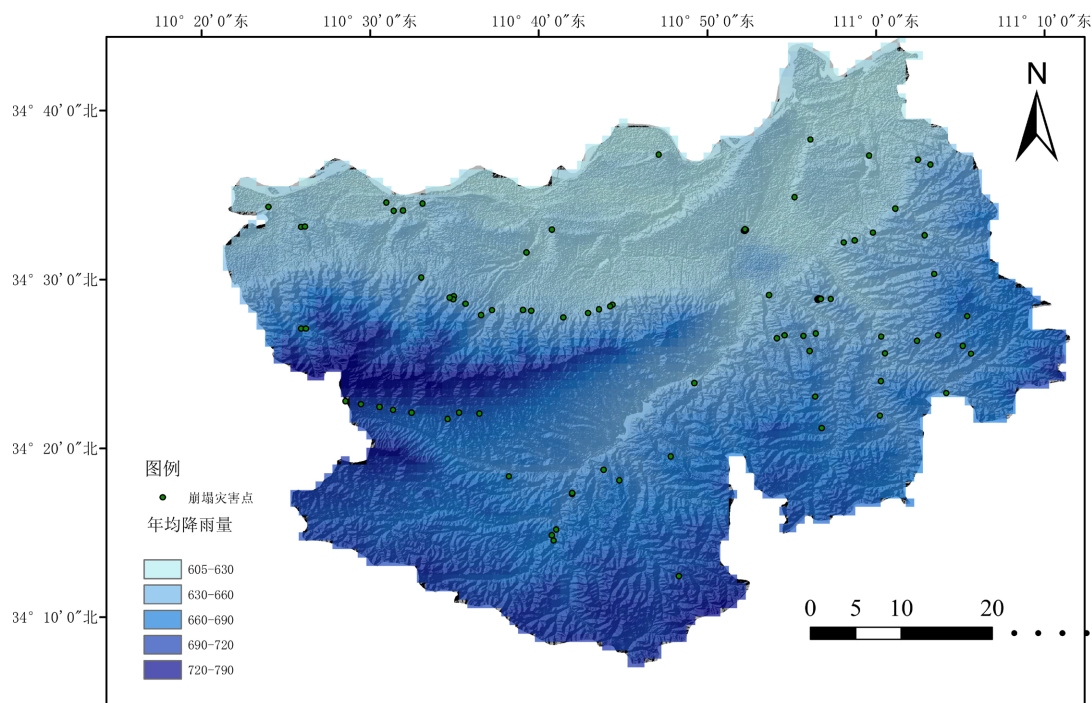


Figure 7. Rainfall factor map
图 7. 降雨量因子图

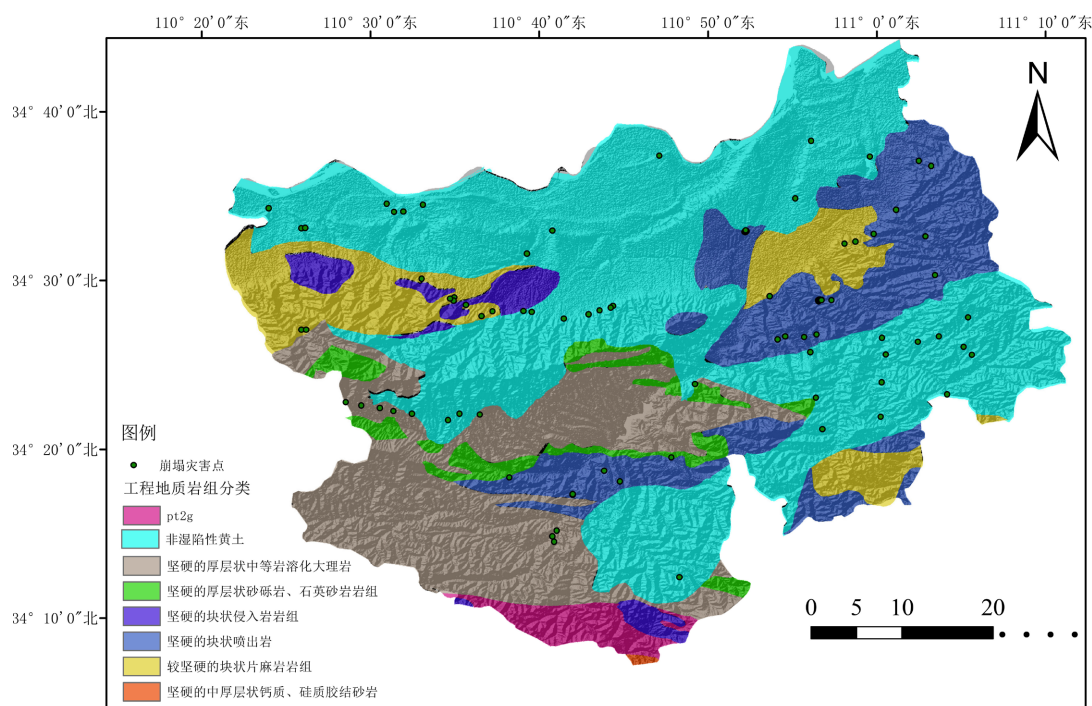


Figure 8. Engineering geological lithological map
图 8. 工程地质岩组因子图

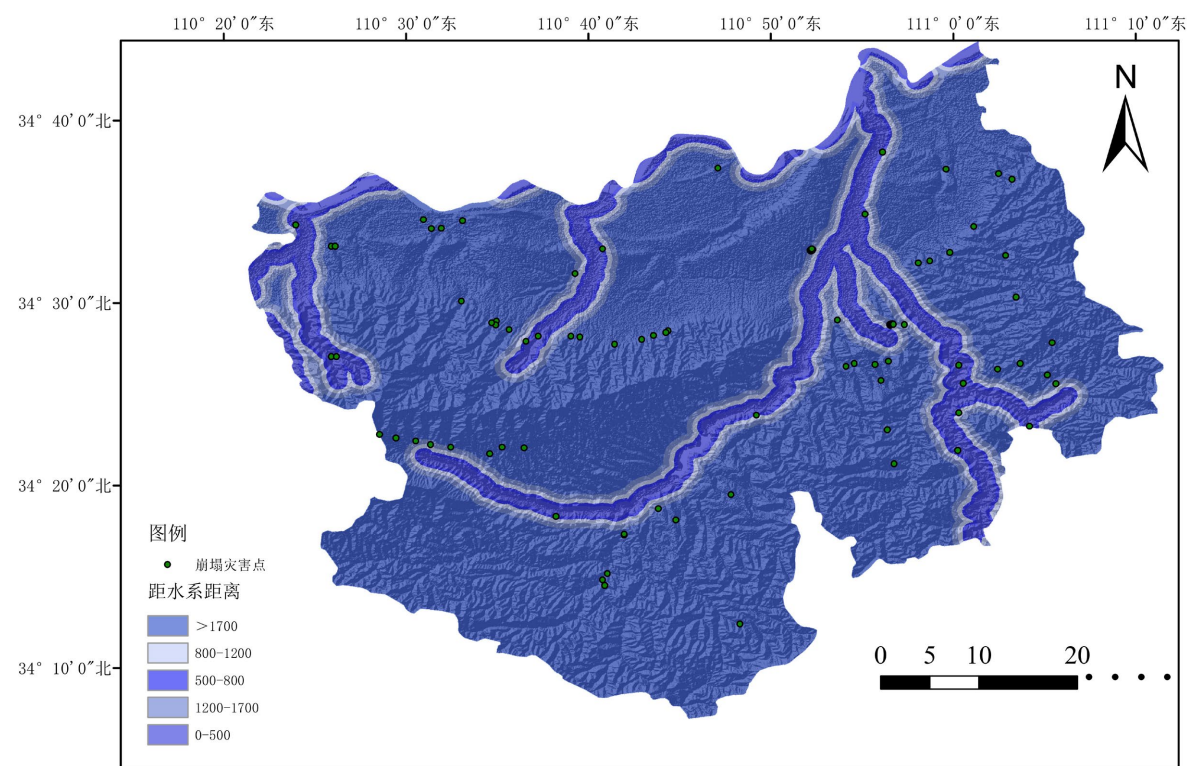


Figure 9. Distance to river network map
图 9. 距水系距离图

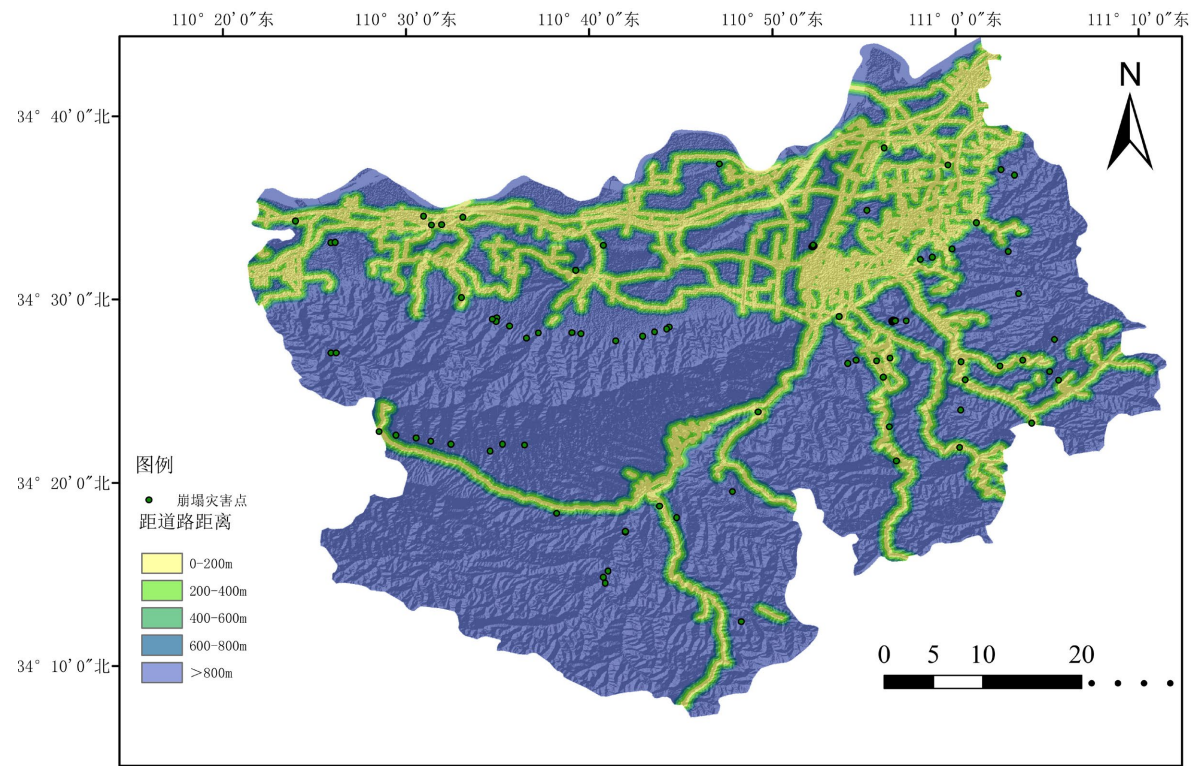


Figure 10. Distance to road map
图 10. 距道路距离图

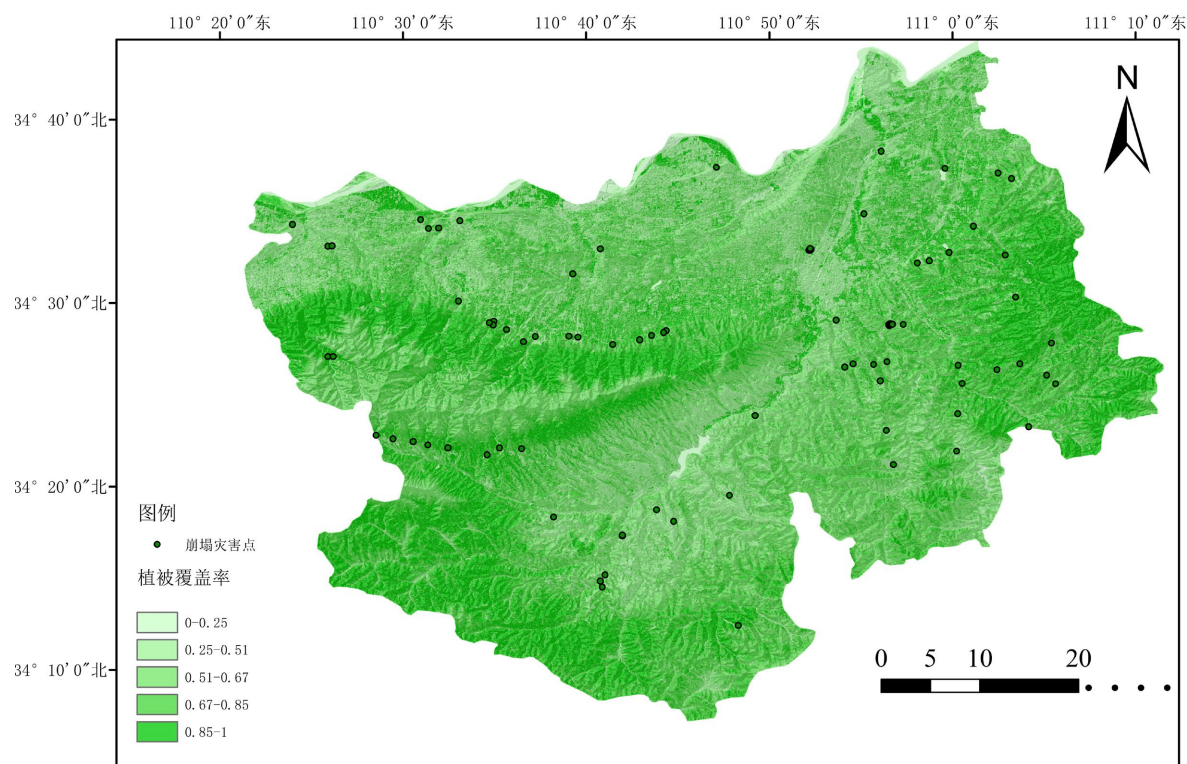


Figure 11. Vegetation factor map

图 11. 植被因子图

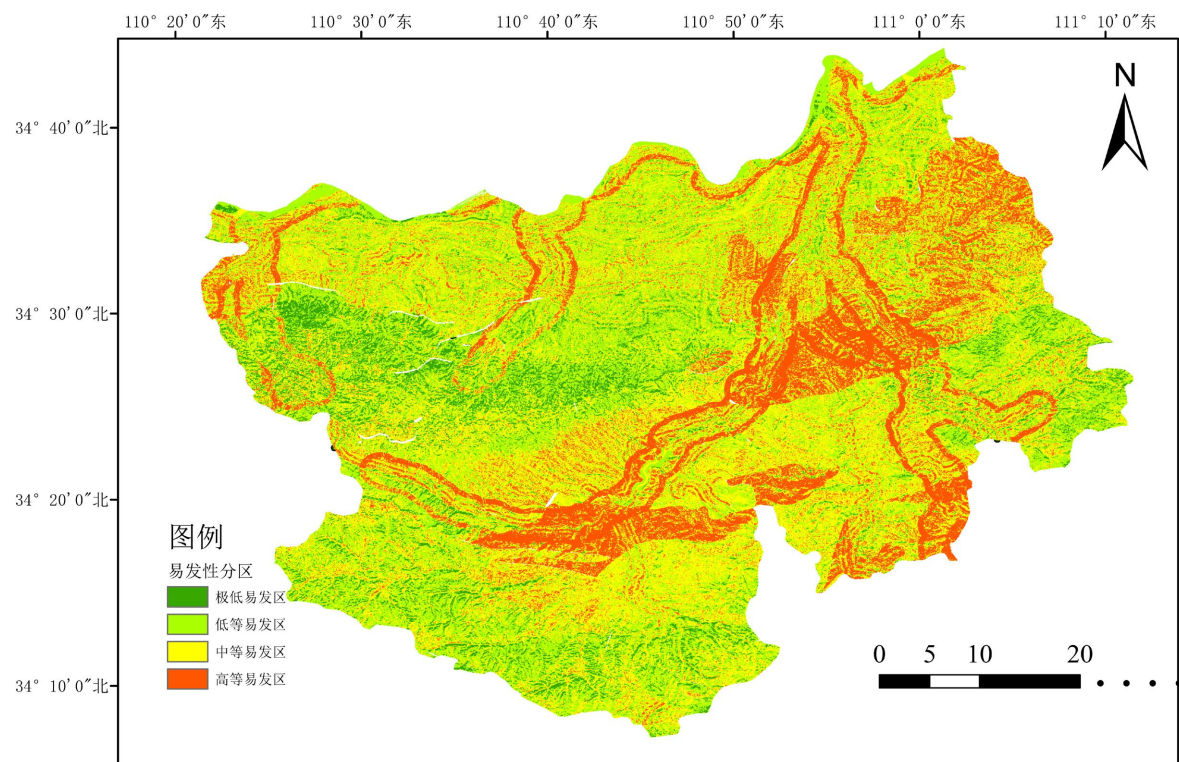


Figure 12. Zoning map of geological hazard susceptibility evaluation

图 12. 地质灾害易发性评价分区图

3.2. 各因子信息量计算及危险性分区

本研究共获取灵宝市崩塌灾害样点 113 处。在确定基于信息量模型的易发性评价方案后，利用 ArcMap 10.8 分别计算各控制因子的单项信息量，结果见表 1，并生成相应的信息量因子图。随后对各因子进行叠加运算，得到研究区信息量分布图。采用自然断点分级法，并借助 ArcMap 10.8 的 Reclassify 工具，将综合图划分为极低、低、中、高四个易发性等级，形成黄土崩塌地质灾害易发性分区图(图 12)。

Table 1. Causative factors of landslides in Lingbao city and their information values
表 1. 灵宝市崩塌致灾因子及信息量值

地灾因子	分类	灾害点个数	灾害比	面积比	信息量值
地形起伏度	0~19	41	0.3980	0.4356	-0.090183415
	19~37	43	0.4174	0.3066	0.308400186
	37~59	18	0.1747	0.1962	-0.115972636
	59~293	1	0.0097	0.0614	-1.845069255
坡型	凹形坡	39	0.3786	0.3487	0.082106634
	凸形坡	33	0.3203	0.3059	0.046177386
	直线型坡	31	0.3009	0.3452	-0.137330659
坡度	0°~5°	7	0.06796	0.1586	-0.847750279
	5°~20°	65	0.6310	0.4386	0.363623744
	20°~35°	27	0.2621	0.3129	-0.177024198
	35°~50°	3	0.02914	0.0859	-1.081602681
	>50°	1	0.0097	0.0038	0.923007241
降雨	605~630	23	0.2233	0.29213	-0.268688834
	630~660	46	0.4466	0.2177	0.718197373
	660~690	24	0.2330	0.2471	-0.058910431
	690~720	7	0.0679	0.2291	-1.215462583
	720~790	3	0.02912	0.0137	0.747959517
植被 (NDVI)	0~0.25	0	0	0.0196	/
	0.25~0.51	21	0.2039	0.1756	0.14943445
	0.51~0.67	45	0.4369	0.3132	0.33282709
	0.67~0.85	28	0.2718	0.2970	-0.088411667
	0.85~1	9	0.0874	0.2142	-0.896832147
坡向	北	14	0.1359	0.2202	-0.482313457
	东北	11	0.1068	0.1184	-0.103187639
	东	9	0.0874	0.0797	0.091753504
	东南	19	0.1845	0.1076	0.539003073
	南	24	0.2330	0.1643	0.349195434
	西南	11	0.1068	0.1049	0.018140866
	西	9	0.0874	0.0781	0.112720843
	西北	6	0.0583	0.1268	-0.778074463

续表

工程地质岩组	坚硬的厚层状中等岩溶化大理岩	8	0.0777	0.1863	-0.874715325
	坚硬的块状侵入岩岩组	1	0.0097	0.0247	-0.935526817
	坚硬的厚层状砂砾岩、石英砂岩岩组	2	0.0194	0.0348	-0.582188192
	坚硬的中厚层状钙质、硅质胶结砂岩	0	0.0000	0.0008	/
	pt2g	0	0.0000	0.0203	/
	较坚硬的块状片麻岩岩组	11	0.1068	0.0951	0.116442466
	坚硬的块状喷出岩	44	0.4272	0.1559	1.007700367
	非湿陷性黄土	37	0.3592	0.4821	-0.294244229
	坚硬的厚层状中等岩溶化大理岩	0	0.0000	0.0000	/
距离水系	0~500 m	8	0.0777	0.0794	-0.021482838
	500~800 m	5	0.0485	0.0435	0.109040912
	800~1200 m	6	0.0583	0.0559	0.041868626
	1200~1700 m	30	0.2913	0.0650	1.499554076
	>1700 m	54	0.5243	0.7562	-0.36633849
距离道路	0~200 m	21	0.2039	0.1544	0.277967055
	200~400 m	5	0.0485	0.0978	-0.700486549
	400~600 m	13	0.1262	0.0730	0.54710806
	600~800 m	3	0.0291	0.0596	-0.71570582
	>800 m	61	0.5922	0.6152	-0.038016009

注：信息量越大说明该因素有利于崩塌的发生；而越小则表示该因素有降低崩塌风险的作用。

4. 黄土崩塌易发性评价

4.1. 权重确定

根据现有各种影响崩塌的因子及历史崩塌数据进行空间分析，从而用于预测未来崩塌易发性空间分布。本次研究共收集到的 103 个灵宝市崩塌灾害点，针对 9 个基本因素对崩塌的影响程度，采用层次分析法(AHP)建立相对应的影响因子向量，即参考大量与本研究类似的文献，获取相关的经验值和分配方式，进行数据分析，具体操作包括一致性检验，以确保一致性满足 AHP 的要求。同时，根据因子之间对崩塌影响的易发性及重要性两两对比，如表 2、表 3 所示，得出判断矩阵并计算每个因子的指标权重。

Table 2. Judgment matrix of evaluation factors based on analytic hierarchy process
表 2. 层次分析法评价因子判断矩阵

	坡向	坡度	坡型	地形起伏度	工程地质岩组	降雨量	据水系距离	NDVI	距道路距离
坡向	1	2	3	4	4	4	3	4	2
坡度	0.5	1	2	3	4	5	0.5	3	0.33
坡型	0.33	0.5	1	0.5	2	3	0.33	3	0.5
地形起伏度	0.25	0.33	2	1	3	4	0.33	4	1
工程地质岩组	0.25	0.25	0.5	0.33	1	0.5	0.25	1	0.25

续表

降雨量	0.25	0.2	0.33	0.25	2	1	0.25	1	0.33
据水系距离	0.33	2	3	3	4	4	1	4	2
NDVI	0.25	0.33	0.33	0.25	1	1	0.25	1	0.25
距道路距离	0.5	3	2	1	4	3	0.5	4	1

Table 3. Weights of Analytic Hierarchy Process (AHP) evaluation indicators

表 3. 层次分析指标权重

指标	坡向	坡度	坡型	地形起伏度	工程地质岩组	降雨量	据水系距离	NDVI	距道路距离
权重	0.2444	0.1338	0.0761	0.1042	0.0362	0.0414	0.181	0.0373	0.1457

并对判断矩阵进行一致性检验，确定其有效性，矩阵 A 一致性指标 CR，判断矩阵计算公式为式(6) (7)

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} \tag{6}$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{7}$$

式中，判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ ； $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T$ 为所求的权重向量； n 为判断矩阵阶数。若一致性指标 $CR = CI/RI < 0.1$ ，则判断矩阵满足一致性，否则调整判断矩阵内的元素再进行验证。

Table 4. Consistency test results

表 4. 一致性检验结果

一致性检验结果				
最大特征根	CI 值	RI 值	CR 值	检验结果
9.6607	0.082	1.46	0.057	通过

矩阵 A 为 $n = 9$ 阶方阵，层次分析法的计算结果如表 4 所示， $CR = CI/RI = 0.057 < 0.1$ ，通过一致性检验。

4.2. 黄土崩塌易发性评价

依据自然断点分级法，将研究区崩塌易发性划分为极低、低、中和高四个等级(见图 12)。其中，极低、低、中和高易发区分别占灵宝市总面积的 8.5%，31.4%、40.72%和 19.39%。对崩塌灾害点统计结果表明，54.36%的灾害点位于高易发区，29.12%分布于中易发区，15.53%集中在低易发区，而极低易发区仅占 0.9%。

Table 5. Frequency ratio of landslide-prone areas in Lingbao city

表 5. 灵宝市区域崩塌易发区域频率对比

易发性分区	灾害比/(%)	面积比/(%)	频率比
高	54.36	19.39	6.39
中	29.12	31.4	0.93
低	15.53	40.72	0.38
极低	0.9	8.5	0.11

5. 结论

采用加权信息量模型绘制灵宝市区域崩塌易发性分区, 总结灵宝市崩塌发育规律和影响因素的空间分异性, 得到以下结论。

(1) 结合灵宝市区域空间特点, 确定 9 个影响因素作为该区域崩塌易发性分析评价因子, 分别为: 选取坡度、坡向、坡型、地形起伏度、工程地质岩性组合、距水系距离、降水量、植被覆盖率以及距道路的距离。

(2) 结合上述 9 个影响因素, 根据加权信息量模型绘制崩塌易发性分布, 54.36%位于高崩塌易发区, 29.12%位于中崩塌易发区, 且大部分崩塌均位于高易发区, 其频率比分别为 6.39, 表明利用加权信息量模型对崩塌易发性评价分析具有较高的预测精度。

(3) 以坡度、坡向、坡型、地形起伏度、岩组、降雨、NDVI、距水系与距道路等九因子构建的信息量模型, 能够有效揭示灵宝市崩塌的复合控制模式: 中等起伏、中缓坡($5^{\circ}\sim 20^{\circ}$)、南或东南向、凹形坡、中等植被、630~650 年雨量、距主水系 1.2~1.7 km、近路/中近路带为高敏感的典型组合。

(4) 高易发区与历史崩塌点呈较好空间一致性, 频率比 6.39 显著高于其他等级, 验证了模型的区分能力与应用价值, 适合用于山前丘陵-沟谷密集区的精细化管控与隐患排查优先级排序。

参考文献

- [1] 王维升. 陕北宅基边坡伤亡性黄土崩塌的形成机制与防治方案[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西北大学, 2001.
- [2] 唐亚明, 薛强, 毕俊攀, 等. 陕北黄土崩塌灾害风险评价指标体系构建[J]. 地质通报, 2012, 31(6): 979-988.
- [3] 邓辉, 何政伟, 陈晔, 等. 信息量模型在山地环境地质灾害危险性评价中的应用——以四川泸定县为例[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(2): 67-76.
- [4] 范林峰, 胡瑞林, 曾逢春, 等. 加权信息量模型在滑坡易发性评价中的应用——以湖北省恩施市为例[J]. 工程地质学报, 2012, 20(4): 508-513.
- [5] 王惠文, 孟洁. 多元线性回归的预测建模方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2007(4): 500-504.
- [6] 邢秋菊, 赵纯勇, 高克昌, 等. 基于 GIS 的滑坡危险性逻辑回归评价研究[J]. 地理与地理信息科学, 2004(3): 49-51.
- [7] 阮沈勇, 黄润秋. 基于 GIS 的信息量法模型在地质灾害危险性区划中的应用[J]. 成都理工学院学报, 2001(1): 89-92.
- [8] 刘希林, 尚志海. 中国自然灾害风险综合分类体系构建[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(6): 1-7.
- [9] 汪洋, 施强, 王江瑞, 等. 豫西山区地质灾害孕灾地质条件及成灾模式[J]. 能源与环保, 2023, 45(6): 172-180.