

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2024.01.011

基于信息量法的湖北省秭归县滑坡易发性评价

林 振^{1,2}, 卢书强^{1,2*}, 梅 军^{1,2,3}

LIN Zhen^{1,2}, LU Shu-Qiang^{1,2*}, MEI Jun^{1,2,3}

1. 三峡大学 湖北长江三峡滑坡国家科学观测研究站, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002;
3. 湖南省工程地质矿山地质调查监测所, 湖南 长沙 410000

1. National Field Observation and Research Station of Landslides in Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River,
Yichang 443002, Hubei, China; 2. Three Gorges University School of Civil Engineering and Architecture,
Yichang 443002, Hubei, China; 3. Institute of Engineering Geology and Mine Geological Survey and Monitoring,
Changsha 410000, Hunan, China

摘要: 本文以湖北省秭归县为研究区, 选取高程、水系距离、道路距离、岩土体类型、坡向、坡度、土地覆盖类型、年降雨量等8个评价因子开展滑坡易发性评价工作, 依据 ArcGIS 软件数据分析工具完成各评价因子相关性分析。对评价因子相关性值 $|r| > 0.1$ 的高程、坡向因子剔除, 计算各因子信息量值。利用信息量模型进行滑坡易发性评价, 将研究区划分为四个区域: (1) 极高易发区, 面积 140.0864 km², 占研究区总面积 6.18%, 主要分布在长江及支流沿岸; (2) 高易发区, 面积 1002.445 km², 占研究区总面积 44.23%, 主要呈带状分布在极高易发区两侧, 部分位于两河口镇、磨坪乡周边区域; (3) 中易发区, 面积 833.8711 km², 占研究区总面积 36.79%, 呈带状分布在极高易发区两侧, 零散分布; (4) 低易发区, 面积 290.2564 km², 占研究区总面积 12.80%, 多分布在高山人稀区域。本文研究结果能够较好地反映研究区滑坡灾害分布规律, 可为秭归县防灾减灾工作提供依据。

关键词: 滑坡; 易发性评级; 信息量模型; 评价因子; 秭归县

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2024)01-0152-10

Lin Z, Lu S Q and Mei J. 2024. Evaluation of Landslide Susceptibility in Zigui County, Hubei Province Based on Information Quantity Method. *South China Geology*, 40(1): 152–161.

Abstract: In this paper, Zigui County, Hubei Province is taken as the research area, and eight evaluation factors such as elevation, water system, road, rock and soil type, aspect, slope, land cover type and annual rainfall are selected to carry out landslide susceptibility evaluation, and the correlation analysis of each evaluation factor is completed using ArcGIS software data analysis tool. The elevation and aspect factors with correlation value of evaluation factors $|r| > 0.1$ are eliminated, and the information value of each factor is calculated. The information model is used to evaluate the landslide susceptibility. The study area is divided into four regions: (1) Extremely high susceptibility area, with an area of 140.0864 km², accounting for 6.18% of the total area of the study area, are mainly distributed along the banks of Yangtze River and its tributaries. (2) High-prone areas, with an area of 1002.445 km², accounting for 44.23%, are mainly distributed on both sides of the extremely high-prone areas, and some are located in the surrounding areas of Lianghekou Town and

收稿日期: 2023-4-10; 修回日期: 2023-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42077234)

第一作者: 林 振 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事地质灾害监测预警及防治工作, E-mail: 1060379214@qq.com

通讯作者: 卢书强 (1973—), 男, 教授, 主要从事地质灾害监测预警及防治工作, E-mail: lsq2197@163.com

Moping Township; (3) The medium-prone area, with an area of 833.8711 km², accounting for 36.79 %, is distributed in strips on both sides of the extremely high-prone area and is scattered. (4) Low-prone areas, with an area of 290.2564 km², accounting for 12.80% of the total area, are mainly distributed in mountainous areas with sparse population. The results of this study are in good agreement with the actual situation in the study area, which can better reflect the distribution of landslide disasters in the study area and provide a basis for disaster prevention and mitigation in Zigui County.

Key words: landslide; susceptibility assessment; information value model; assessment factors; Zigui County

滑坡灾害的客观性及不确定性一直以来是困扰研究人员的难题(张梁和张建军,2000)。在上世纪80年代末,随着GIS和相关学科整合及快速发展,研究地质灾害的手段和方式得到了巨大的提高与改善(王佳佳等,2014;刘康等,2023)。目前常用的研究方法主要为:统计分析法,如层次分析法(赖波等,2023)、频率比法(Li L P et al., 2017)、逻辑回归法(杨顺等,2020)、证据加权法(蓝健宁,2021);数学模型,如信息量模型(连志鹏等,2022)、人工神经网络模型(田乃满等,2020)、模糊综合评价(孙文怀和王舟,2012)、支持向量机模型(王大林,2021)。以上研究方法中,信息量法因其对单元划分数量较大的研究区具有独特优势,且操作方便,结果可靠,被众多学者(邓辉等,2014;吕金林,2016;刘林通等,2017;马振等,2021;张钟远等,2022)使用。以白沙河流域为例,文静和吴彩燕(2017)通过综合考虑地形、地质、气象等多方面因素,利用信息量模型量化地质灾害发生的概率,为该流域的滑坡危险性提供了科学依据。

受三峡库水位调度及复杂地质环境影响,秭归县滑坡多发,如白水河滑坡、八字门滑坡、木鱼包滑坡等(黄润秋,2007;邓茂林等,2019;熊坤等,2019;冯谕等,2023)。秭归县滑坡的类型繁多,分布范围广泛,呈现出密集和离散分布共存的特点,滑坡体的岩土体类型、坡度、坡向、分布高程等在空间分布上存在一定差异,采用信息量法对其进行研究具有一定的可行性。本文选取研究区道路、坡度、坡向、水系距离、岩土体类型、年降雨量、土地覆盖类型、高程8类因子,分析各因子之间的相关性,计算各因子信息量值,叠加各因子信息量值获取总值,开展滑坡灾害易发性评价,以期为该地区滑坡防治

提供依据。

1 研究区概况

湖北省秭归县位于三峡库区库首,地势西南高东北低,山峰耸立,河谷深切相对高差通常在500~1300 m之间。研究区三大类岩石(沉积岩、岩浆岩、变质岩)均有发育。前震旦系至第四系均有出露,前震旦系古生界、崆岭群和震旦系主要分布于东部、南部边缘,三叠系与侏罗系发育于中部、西北部一带,白垩系出露于仙女山一带,第四系常见于支流河谷、冲沟及长江附近。区内褶皱主要有香龙山背斜和五龙褶皱。区内断裂主要有北北东-近南北向、近东西向、北西向断裂。

秭归县由长江及其支流、沟溪共同构成复杂地表水文网,流域面积为1952.5 km²,占县域总面积的80.4%,香溪河是县域中最大的一条长江支流。根据赋存条件的不同,将该区地下水分为松散岩类孔隙水、碎屑岩类孔隙裂隙水和碳酸盐岩类岩溶水三类。根据2023年5月秭归县自然资源局发布的群测群防监测点信息,秭归县目前共有地质灾害专业监测点545处,其中滑坡灾害点有417个(2019~2022年),如图1所示。

2 数据来源及预处理

本研究数据来源:(1)滑坡灾害点位数据来源于1:5万秭归县地质灾害调查风险普查数据(何钰铭等,2023);(2)坡度、坡向、高程等数据提取于30 m DEM数据,来源于BIGMAP平台;(3)岩土体类型数据来源于秭归县1:5万区域地质图(杨少铭,

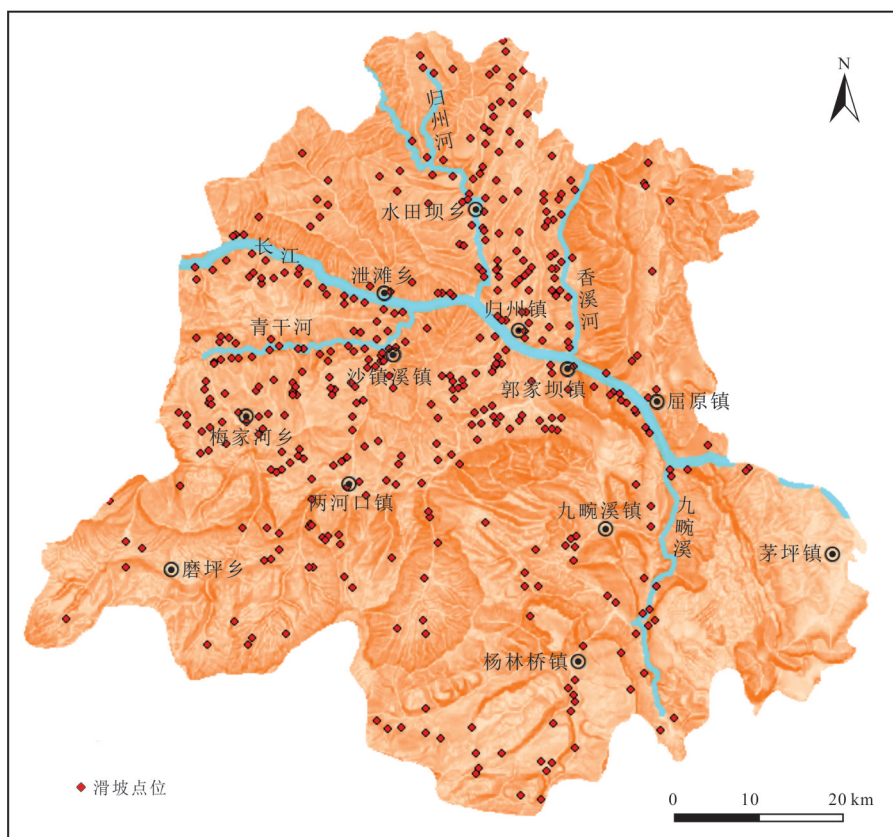


图1 研究区滑坡灾害点位置图

Fig. 1 Location map of landslide disaster points in the study area

1995); (4) 主要水系、道路、行政区划数据来源于研究区 1:5 万地理底图; (5) 降雨量空间分布图来自中国气象数据网。由于数据来源广泛, 数据之间差异性较大, 为便于空间分析工作, 将坐标系统一, 确保数据的一致性与空间分析的合理性。本文将坐标系基准面统一为 D_WGS_1984 坐标系, 投影坐标系统一为 WGS_1984_UTM_Zone_49N。

3 评价方法及模型构建

3.1 信息量法模型(IV)

滑坡灾害受多种因素影响, 通过收集研究区已发生滑坡灾害数及各评价因子数据, 将各种因素的实测值进行分级量化确定信息量值, 通过分析信息量值确定评价因子对滑坡灾害的影响程度(陶伟, 2021), 最后将所有分级量化值求和获取信息量总值来评判滑坡发生概率。

对于计算单因子 (X_i) 对地质灾害发生事件 (L) 提供的信息量 $I(X_i, L)$ 采用概率作为基础, 并在实际计算中采用了样本频率。公式如下:

$$I(X_i, L) = \ln \left(\frac{N_i/N}{S_i/S} \right) \quad (1)$$

式中: N_i 对应因子 X_i 、 L 条件下不同分级评价区灾害点数, N 为研究区灾害点总数, S_i 为对应因子 X_i 、 L 条件下不同分级评价区面积, S 为研究区总面积。

信息量总值计算公式:

$$I_{\text{总}} = \sum_{i=1}^n I(X_i, L) = \sum_{i=1}^n \ln \left(\frac{N_i/N}{S_i/S} \right) \quad (2)$$

式中: n 为参与评价体系因子总数, $I_{\text{总}}$ 为评价单元总信息量。 $I_{\text{总}}$ 值越大, 表明发生灾害可能性越大(李文彦和王喜乐, 2020)。

3.2 评价指标选取及分析

选用研究区 417 个滑坡灾害点, 基于 DEM 栅

表 1 各评价因子指标分级表

Table 1 Grading table of each evaluation factor index

评价因子 分级	水系距离 (m)	道路距离 (m)	坡度 (°)	坡向	岩土体类型	年降雨量 (mm)	土地覆盖类型	高程 (m)
评价因子 分级	< 100	< 500	< 10	平面	酸性深成岩	< 980	林地	< 150
	[100, 300)	[500, 1000)	[10, 20)	北	中性深成岩	[980, 1000)	灌木	[150, 450)
	[300, 600)	[1000, 1500)	[20, 30)	东北	基性深成岩	[1000, 1020)	草地	[450, 650)
	[600, 1000)	[1500, 2000)	[30, 40)	东	碳酸盐岩	[1020, 1040)	开阔水域	[650, 850)
	≥ 1000	[2000, 2500)	[40, 50)	东南	混合沉积岩	[1040, 1060)	建筑	[850, 1050)
		[2500, 3000)	≥ 50	南	碎屑沉积岩	[1060, 1080)	草本湿地	[1050, 1200)
		≥ 3000		西南	松散沉积物	[1080, 1100)		[1200, 1350)
				西	变质岩			[1350, 1500)
				西北				≥ 1500

格数据,利用 ArcGIS 将其划分为 30 m×30 m 栅格作为评价单元,并将研究区划分为 3234725 个单元格。在开展滑坡易发性评价之前需选取对滑坡灾害有影响的评价因子,并进行量化分级(林淑珍,2013)。选取高程、坡度、坡向、道路、水系距离、岩土体类型、降雨、土地覆盖类型 8 个因素,划分为 57 个分级(表 1)。人类工程活动包括城镇建设、道路修筑、航道疏通等伴随有填挖作业,不合理的施工会破坏原有坡体稳定性,因此选取水系和道路进行缓冲区分析(王志旺等,2007)。

(1)高程:高程对地质灾害的控制作用实际上是人类活动对地质灾害的影响,在某一范围内,人口密度、工程活动改变着周边地质环境,进而增加发生灾害的可能(吴森等,2015)。使用 GIS 空间连接工具统计不同高程区间灾害点分布情况(图 2a、图 3a)。灾害点主要分布在高程[150~450) m、[450~650) m、[650~850) m、[850~1050) m 范围内,滑坡占比分别为:41.97%、23.26%、16.79%、11.35%,总占比达到 91.37%。

(2)坡向:坡向影响光照、太阳辐射、水分蒸发、地表岩土体风化等,进而导致坡体物理力学特性的差异(刘康等,2023)。通过 GIS 叠加工具获取不同坡向间滑坡灾害数量(图 2b、图 3b)。除平地外,滑坡灾害在其他坡向均有发生,南方向滑坡最多,最少的为东北方向,其他方向相对均匀分布。

(3)坡度:坡度是斜坡稳定性的一个重要影响因素,斜坡失稳发生在特定坡度范围内,但其超过一

定限度时,取而代之的是崩塌(凌炳和余敏,2015)。通过 GIS 叠加工具获取不同坡度间滑坡灾害数量(图 2c、图 3c)。研究区滑坡主要分布在[10°~30°)坡度范围,占比 88.01%,研究区 94.01%的滑坡灾害发生在坡度小于 30°的地区。

(4)道路距离:由于研究区地质环境条件较复杂,以及城乡建设、道路施工等人类工程活动,难以避免开挖边坡、破坏坡脚,造成边坡内应力重分布,降低原始斜坡的稳定性,进而引起滑坡灾害的发生(李明等,2023)。结合前人研究,利用 ArcGIS 欧氏距离建立缓冲区,通过重分类工具将道路因子划分 6 级缓冲区,使用 ArcGIS 多值点提取工具计算研究区道路不同范围内滑坡灾害点数量(图 2d、图 3d),距道路小于 3000 m 的滑坡占比达 95.2%。

(5)岩土体类型:岩土体类型在滑坡灾害发生中扮演着关键角色,母岩的特性直接影响着滑坡灾害的规模(罗昌谟,2009)。通过 ArcGIS 多值点提取工具,我们计算了研究区不同岩土体类型中滑坡灾害点的数量(图 2e、图 3e)。岩土体类型以碳酸盐沉积岩和混合沉积岩为主。碳酸盐沉积岩主要分布在研究区东部、南部,混合沉积岩主要分布在研究区中部、北部。混合沉积岩是由多种岩石碎屑混合而成,包括砂岩、泥岩、千枚岩等,其具有较复杂的岩性结构,因而在岩石力学上表现出多样性,这类岩石在不同区域可能存在不同的稳定性和抗滑性能。滑坡灾害主要集中在碎屑沉积岩和混合沉积岩发育区域,占比为 88.01%,表明这两种岩土体类型对

滑坡易发性具有显著影响。

(6) 水系距离: 水流是诱发滑坡的重要影响因素。研究区河网密布, 水流对岸坡的侧蚀、冲刷、浮托、动水压力都会影响斜坡稳定性(王林, 2021)。利用 ArcGIS 欧氏距离建立缓冲区, 通过重分类工具将水系因子划分为 5 级缓冲区, 使用 ArcGIS 多值点提取工具计算研究区河流不同范围内滑坡灾害点数量(图 2f、图 3f)。水系距离小于 1000 m 范围内灾害点数占比达 93.29%。距水系距离越近, 滑坡灾害发生的频率越大。

(7) 年降雨量: 降雨量及降雨强度不同程度地

对滑坡灾害发生具有促进作用, 体现在降雨入渗岩土体改变其力学性质及稳定性, 特别是汇集水对坡体的冲蚀(林孝松 2001)。利用克里金插值计算得到降雨区间, 然后叠加滑坡灾害点数据, 通过 ArcGIS 多值点提取工具得到不同年降雨量下滑坡灾害点数量(图 2g、图 3g)。年降雨量 < 980 mm 的地区滑坡灾害 110 处, 占比 26.38%; 年降雨量 [980, 1000) mm 的地区滑坡灾害 115 处, 占比 27.58%; 年降雨量 [1000, 1020) mm 的地区滑坡灾害为 99 处, 占比为 23.74%; 年降雨量 [1020, 1040) mm 地区滑坡灾害为 12 处, 占比 2.88%; 年降雨量 [1040, 1060) mm

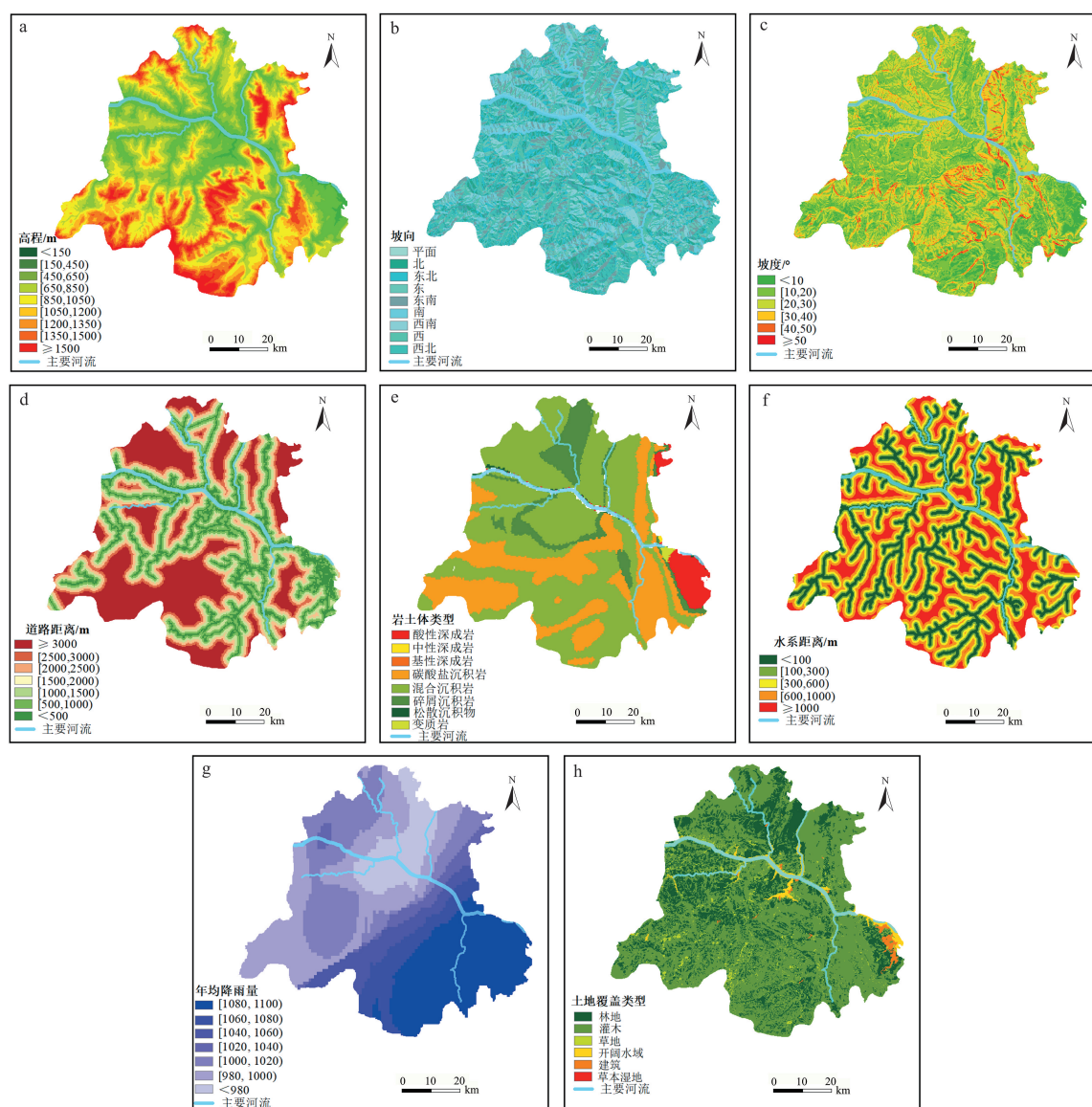


图2 研究区滑坡灾害评价因子分级图

Fig. 2 Classification of landslide hazard evaluation factors in the study area

的地区滑坡灾害为17处,占比4.08%;年降雨量[1060, 1080) mm的地区滑坡灾害为15处,占比3.6%;年降雨量[1080, 1100) mm的地区滑坡灾害为49处,占比11.75%。

降雨强度作为滑坡灾害的重要影响因素,在不同降雨量区间内的体现可以通过分析滑坡灾害的数量和面积两个方面来进行解读,这有助于更全面地理解降雨强度与滑坡发生之间的关系。降雨量较低区间内(<980 mm),滑坡灾害数量较多,占比较高,而随着降雨量逐渐增加,灾害数量呈下降趋势。这暗示降雨强度对滑坡的影响不仅仅在于数量,还与滑坡的规模有关。高的降雨强度可能导致局部地质体的饱和,但由于发生滑坡的面积较小,整体滑

坡的概率相对较低。针对降雨对滑坡的影响,除了简单地考虑降雨量外,更需要综合考虑降雨强度、时间依赖性以及滑坡规模与概率的关系,建立更为细致的指标体系,能够更全面、深刻地解释降雨对滑坡灾害的影响机制,为科学防灾减灾工作提供实质性的支持。

(8)土地覆盖类型:植被类型及其根系改变土壤物理性质,显著提高土壤含水性,改变土体孔隙结构,进而改变土体水文及力学结构,影响地质灾害易发性(赵美龄等,2022)。利用土地类型数据叠加滑坡灾害点数据,通过ArcGIS多值点提取工具得到不同土地类型滑坡灾害数量(图2h、图3h)。滑坡灾害多集中在林地和灌木中,占比92.59%。其中,发育

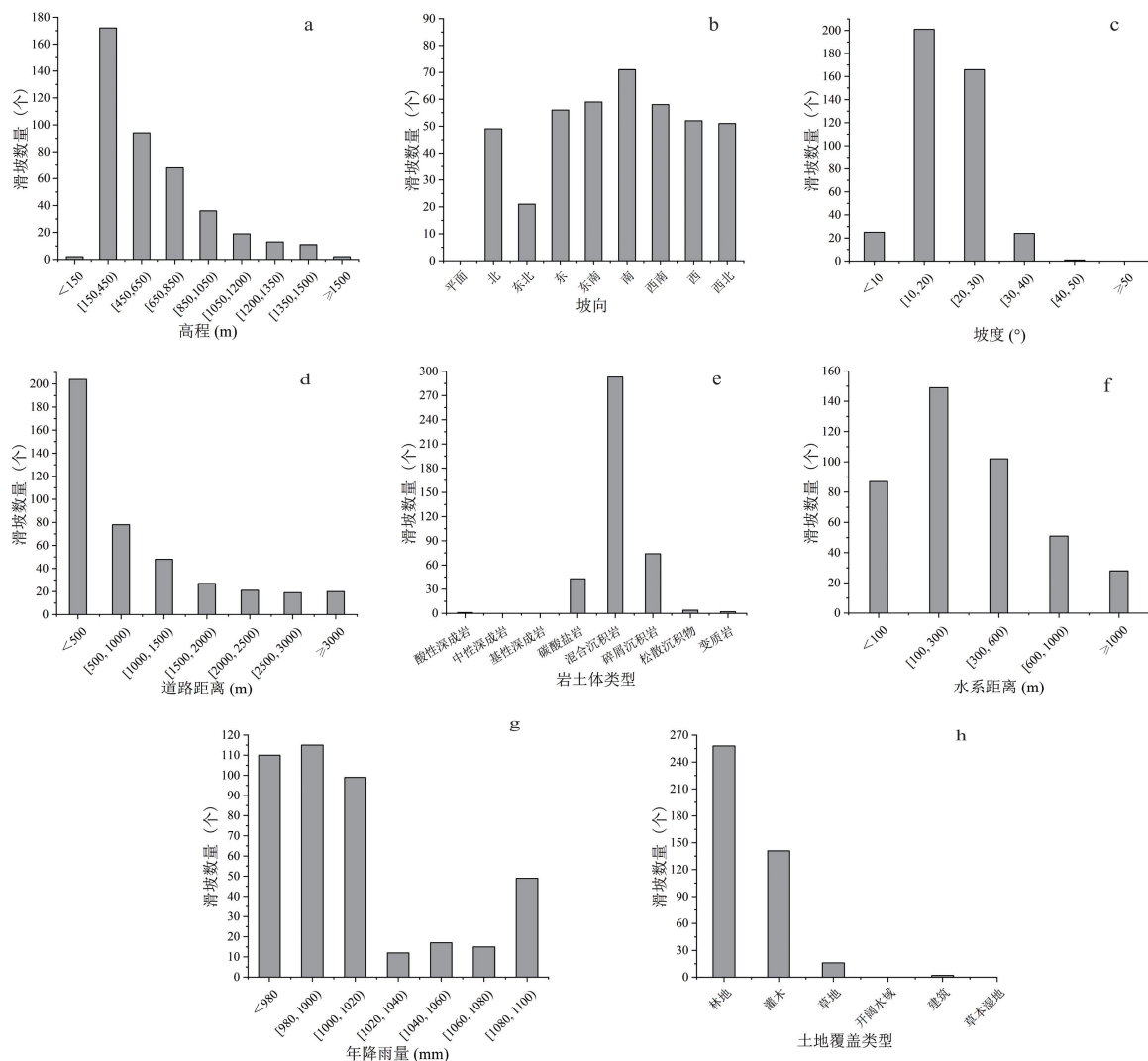


图3 研究区滑坡灾害评价因子滑坡数量直方图

Fig. 3 Histogram of landslide hazard evaluation factors and number of landslides in the study area

于灌木中的滑坡灾害占比达 64.97%。这是由于研究区灌木多为种植灌木,一定程度上受人类活动的影响。

3.3 评价因子相关性分析

影响滑坡灾害因素众多,不同因素之间存在联系,互相影响。为保证各评价因子之间独立性与滑坡灾害评价准确性,在开展易发性评价之前有必要对各评价因子进行筛选。采用 ArcGIS 多元分析中“波段集统计”工具中计算协方差模块对各评价因子进行相关性分析,相关性系数为 r ,将 $|r| < 0.1$ 视为不相关,计算结果见表 2。坡向与水系距离、土地类型、岩土体类型和高程 4 组评价因子相关性较高,高程与坡向、水系距离和土地类型 3 组评价因子相关性较高。为避免相关评价因子的互相干扰,进而影响评价准确性,剔除坡向与高程两项评价因子。选取水系距离、土地类型、坡度、岩土体类型、道路距离、降雨 6 项评价因子进行后续评价研究。

4 信息量模型构建与分析

利用 ArcGIS 生成各评价因子图,通过多值点提取工具,统计各因子实际信息值。根据公式(1)计算单因子信息量值,将各因子信息量值带入公式(2)中叠加获取总信息量值(表 3)。分析各因子信息量值,发现水系距离[100~300) m、距道路 < 500 m、坡度[20°~30°)、年降雨量 ≤ 980 mm、林地、松散沉积物为各因子信息量值的最大分级。从各因子信息量值可以看出,滑坡灾害占比与信息量值近似成正比,信息量值增大,滑坡灾害占比亦增大。水系距

离[100, 300) m 分级下滑坡灾害数量占比较高,为 35.73%,信息量值为 0.6529;在道路距离 ≥ 3000 m 时,其面积占比达 50.62%,而在 < 500 m 时滑坡灾害数量占比最大;坡度处于[10°, 30°)时,滑坡面积占比达 69.76%;当土地覆盖类型为林地和灌木时滑坡面积占比与数量占比均超过 90%。在坡度 ≥ 50°,以及草本湿地环境中未有滑坡灾害发生,信息量值均为零。年降雨量为 < 980 mm、[980, 1000) mm、[1000, 1020) mm 区间时,滑坡灾害数量占比和面积占比均分别达到 10%以上。但随着年降雨量增大,如[1020~1040) mm、[1040~1060) mm、[1060~1080) mm 分级区间内滑坡灾害数量占比和面积占比减小,每个级别均不到 8%,而当年降雨量在[1080, 1100) mm 时,滑坡灾害数量占比为 11.75%;碎屑沉积岩和混合沉积岩两种岩土体类型对滑坡易发性具有显著影响,信息量值分别为 0.8591、0.3328。

各因子信息量总值由大到小排序依次为:道路、水系距离、年降雨量、土地覆盖类型、岩土体类型、坡度(表 3)。各因子灾害占比与信息量值近似成正比。使用 ArcGIS 栅格计算器工具生成研究区的滑坡灾害易发性评估栅格图(图 4)。为进一步细化评估结果,我们使用栅格重划分技术工具,采用自然断点法将研究区分为极高易发区、高易发区、中易发区和低易发区 4 个滑坡易发性级别(表 4,章昱等, 2023)。结合图 4 得出如下结果:(1)滑坡极高易发区面积为 140.0864 km²,占比 6.18%,滑坡灾害点 180 个,占比 43.17%,频率比为 6.98,主要分布在长江及其支流沿岸,岩性以碎屑沉积岩、混合沉积岩为主,临空面良好,人类

表 2 研究区各评价因子相关系数(r)

Table 2 Correlation coefficients between evaluation factors in the study area

评价因子	坡向	水系距离	土地类型	坡度	岩土体类型	高程	道路距离	降雨
坡向	1.0							
水系距离	0.1532	1.0						
土地类型	-0.11892	-0.0959	1.0					
坡度	0.02958	-0.00027	0.00395	1.0				
岩土体类型	-0.10637	0.02867	-0.09004	-0.03726	1.0			
高程	0.41664	0.40009	-0.1738	0.06356	-0.0615	1.0		
道路距离	0.07157	-0.00015	-0.07686	0.02326	-0.00762	0.06813	1.0	
降雨	-0.05155	0.02763	0.05582	0.01837	-0.07544	0.0634	-0.03726	1.0

表 3 研究区各评价因子信息量计算结果表

Table 3 Results of calculating the amount of information for each evaluation factor in the study area

评价因子	分级	S_i	S_j/S	N_i	N_j/N	信息量值(I)
水系距离(m)	< 100	462.0854	20.34%	87	20.86%	0.0253
	[100, 300)	422.4919	18.60%	149	35.73%	0.6529
	[300, 600)	499.0617	21.97%	102	24.46%	0.1074
	[600, 1000)	493.4746	21.72%	51	12.23%	-0.5745
	≥ 1000	394.4721	17.37%	28	6.71%	-0.9502
道路距离(m)	< 500	340.1792	14.99%	204	48.92%	0.4892
	[500, 1000)	213.8072	9.42%	78	18.71%	0.1871
	[1000, 1500)	171.6529	7.56%	48	11.51%	0.1151
	[1500, 2000)	152.7980	6.73%	27	6.47%	0.0647
	[2000, 2500)	130.3789	5.74%	21	5.04%	0.0504
	[2500, 3000)	111.9632	4.93%	19	4.56%	0.0456
	≥ 3000	1148.9960	50.62%	20	4.80%	0.0480
坡度(°)	< 10	309.1077	13.64%	25	6.00%	-0.8218
	[10, 20)	878.9004	38.78%	201	48.20%	0.2176
	[20, 30)	702.1152	30.98%	166	39.81%	0.2509
	[30, 40)	282.3012	12.45%	24	5.76%	-0.7720
	[40, 50)	87.5826	3.86%	1	0.24%	-2.7796
	≥ 50	6.6393	0.29%	0	0.00%	—
土地覆盖类型	林地	628.5618	27.62%	258	61.87%	0.8065
	灌木	1478.4939	64.97%	141	33.81%	-0.6531
	草地	65.6631	2.89%	16	3.84%	0.2850
	开阔水域	84.6216	3.72%	0	0.00%	—
	建筑	18.3105	0.80%	2	0.48%	-2.0481
	草本湿地	0.0018	0.00%	0	0.00%	—
年降雨量(mm)	< 980	234.2767	10.32%	110	26.38%	0.9382
	[980, 1000)	559.6821	24.66%	115	27.58%	0.1118
	[1000, 1020)	481.3752	21.21%	99	23.74%	0.1127
	[1020, 1040)	95.1879	4.19%	12	2.88%	-0.3767
	[1040, 1060)	156.4726	6.89%	17	4.08%	-0.5254
	[1060, 1080)	175.5415	7.73%	15	3.60%	-0.7656
	[1080, 1100)	567.0268	24.98%	49	11.75%	-0.7543
岩土体类型	酸性深成岩	206.3348	9.09%	1	0.24%	-3.6354
	中性深成岩	11.5636	0.51%	0	0.00%	—
	基性深成岩	9.8066	0.43%	0	0.00%	—
	碳酸盐岩	684.2580	30.16%	43	10.31%	-1.0731
	混合沉积岩	1143.0579	50.37%	293	70.26%	0.3328
	碎屑沉积岩	170.5509	7.52%	74	17.75%	0.8591
	松散沉积物	5.4564	0.24%	4	0.96%	1.3836
	变质岩	38.0807	1.68%	2	0.48%	-1.2525

注: N_i 为对应因子 X_i 条件下不同分级评价区灾害点数, N 为研究区灾害点总数, S_i 为对应因子 X_i 条件下不同分级评价区面积, S 为研究区总面积, I 为评价单元总信息量。

工程活动频繁;降雨及库水位升降对坡体的冲刷、软化浮托、动水压力等破坏坡体稳定性,进一步增加灾害发生的可能性;(2)滑坡高易发区面积为 1002.445 km², 占比 44.23%, 滑坡灾害点 156 个, 占比 37.40%, 频率比为 0.85, 主要分布在极高易发区两侧区域;(3)滑坡中易发区面积为 833.8711 km², 占比 36.79%, 滑坡灾害点 72 个, 占比 17.27%, 频率比为 0.47;(4)滑坡低易发区面积

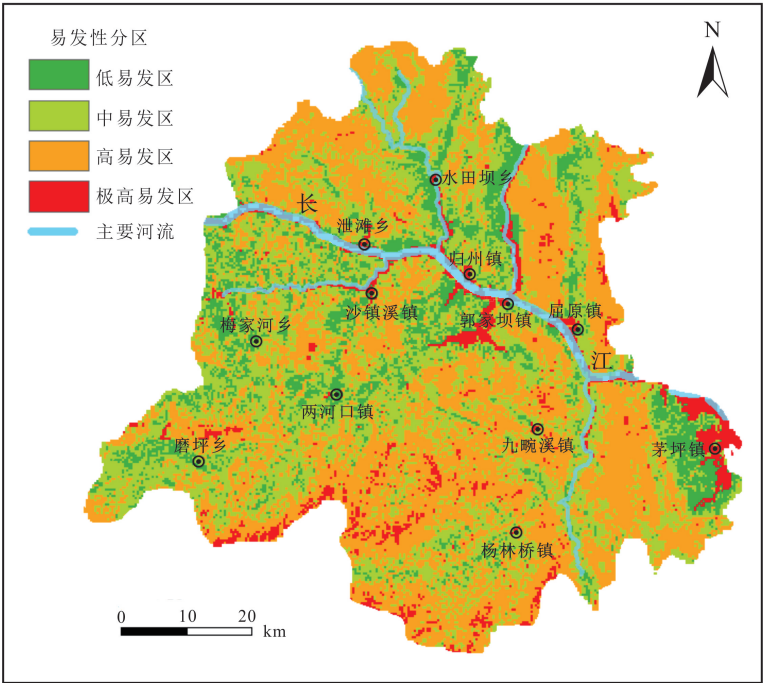


图4 研究区滑坡易发性分区图

Fig. 4 Landslide susceptibility zone map in the study area

表 4 研究区滑坡易发性分区表

Table 4 Landslide prone partition table in the study area

易发性分区	面积(km ²)	面积占比(A)	灾害数量(个)	数量占比(B)	频率比(B/A)
低	290.2564	12.80%	9	2.16%	0.17
中	833.8711	36.79%	72	17.27%	0.47
高	1002.445	44.23%	156	37.40%	0.85
极高	140.0864	6.18%	180	43.17%	6.98

为 290.2564 km², 占研究区总面积 12.80%, 滑坡灾害点 9 个, 占比 2.16%, 频率比为 0.17, 多分布在高山人稀区域。

5 结论

本文结合前人研究成果及滑坡灾害分布规律, 选取水系距离、土地类型、坡度、岩土体类型、道路距离、年降雨量 6 个因素为滑坡易发性评价因子, 利用信息量法开展秭归县滑坡易发性评价, 得出以下结论:

(1) 秭归县滑坡灾害与道路距离和水系距离具有较强的相关性, 距道路、水系越近, 滑坡灾害表现出逐渐增加的趋势; 滑坡灾害主要分布在坡度 30°

以下、林地和灌木覆盖、碎屑沉积岩和混合沉积岩发育区域。

(2) 水系距离[100~300) m、距道路 < 500 m、坡度[20°~30°)、年降雨量 < 980 mm、林地、松散沉积物及碎屑岩为各因子信息量的最大分级。各评价因子信息量总值从大到小排序为: 道路距离、水系距离、年降雨量、土地覆盖类型、岩土体类型、坡度。各评价因子灾害占比与信息量值近似成正比。

(3) 研究区滑坡灾害极高易发区面积 140.08 64 km², 占比 6.18%、高易发区面积 1002.445 km², 占比 44.23%、中易发区面积 833.8711 km², 占比 36.79%、低易发区面积 290.2654 km², 占比 12.80%。研究区滑坡灾害极高易发区、高易发区主要集中于长江及其支流沿岸等人类工程活动频繁的区域。

参考文献:

- 邓辉,何政伟,陈晔,蔡宏,李璇琼.2014.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,23(2):67-76.
- 邓茂林,易庆林,韩蓓,周剑,李卓俊,张富灵.2019.长江三峡库区木鱼包滑坡地表变形规律分析[J].岩土力学,40(8):3145-3152+3166.
- 冯谕,涂鹏飞,曾怀恩.2023.降雨及库水位共同作用下滑坡阶跃位移临界界面的识别方法[J].岩石力学与工程学报,42(11):2789-2805.
- 何钰铭,聂邦亮,侯时平,王金波.2023.秭归县1:5万地质灾害调查风险普查报告[R].湖北省水文地质工程地质大队.
- 黄润秋.2007.20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J].岩石力学与工程学报,(3):433-454.
- 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.
- 蓝健宁.2021.基于证据加权法的广西西大明山地区内生金属矿床成矿预测研究[D].桂林理工大学硕士学位论文.
- 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.
- 李文彦,王喜乐.2020.频率比与信息量模型在黄土沟壑区滑坡易发性评价中的应用与比较[J].自然灾害学报,29(4):213-220.
- 连志鹏,厉一宁,刘磊,王宁涛.2022.基于ArcGIS的湖北省远安县地质灾害风险定量评价[J].华南地质,38(4):680-688.
- 林淑珍.2013.RS与三维GIS在地质灾害调查中的应用[D].中国地质大学硕士学位论文.
- 林孝松.2001.滑坡与降雨研究[J].地质灾害与环境保护,(3):1-7.
- 凌炳,余敏.2015.滑坡灾害坡度坡向敏感性分析研究——以云南大关县为例[J].城市地质,10(3):66-68.
- 刘康,田臣龙,徐风琳.2023.基于信息量-层次分析耦合模型的泗水县地质灾害易发性评价[J].中国地质调查,10(2):77-86.
- 刘林通,孟兴民,郭鹏,赵岩,熊木齐.2017.基于流域单元和信息量法的白龙江流域泥石流危险性评价[J].兰州大学学报(自然科学版),53(3):292-298+308.
- 罗昌谟.2009.地质灾害与岩土体类型的关系探讨[J].福建地质,28(4):341-345.
- 吕金林.2016.基于GIS的隆乌古曲地质灾害危险性评价[D].西南科技大学硕士学位论文.
- 马振,谭光超,季璇.2021.基于GIS的信息量法在九畹溪流域地质灾害易发性评价中的应用[J].资源环境与工程,35(5):667-673+680.
- 孙文怀,王舟.2012.滑坡稳定性的模糊综合评价[J].华北水利水电学院学报,33(4):86-89.
- 陶伟.2021.基于RS和ArcGIS赣州寻乌滑坡地质灾害易发性评价[D].东华理工大学硕士学位论文.
- 田乃满,兰恒星,伍宇明,李朗平.2020.人工神经网络和决策树模型在滑坡易发性分析中的性能对比[J].地球信息科学学报,22(12):2304-2316.
- 王林.2021.白水江流域道路沿线落石灾害特征及风险分析[D].西南科技大学硕士学位论文.
- 王大林.2021.基于改进支持向量机的山体滑坡预测算法研究[D].西南交通大学硕士学位论文.
- 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.
- 王志旺,李端有,王湘桂.2007.证据权法在滑坡危险度区划研究中的应用[J].岩土工程学报,(8):1268-1273.
- 文静,吴彩燕.2017.基于GIS的信息量模型的白沙河流域滑坡危险性评价[J].西南科技大学学报,32(2):61-65.
- 吴森,李虎杰,张魁,陈国辉.2015.高程因素对平昌县滑坡灾害发育的敏感性分析[J].三峡大学学报(自然科学版),37(4):62-66.
- 熊坤,易武,王力,余庆,邓永煌.2019.三峡库区八字门滑坡变形破坏机理分析[J].中国地质灾害与防治学报,30(5):9-18.
- 杨顺,常晁瑜,李孝波,韩昕.2020.基于Logistic回归模型的黄土斜坡地震稳定性快速评判方法[J].地震工程学报,42(2):512-516.
- 杨少铭.1995.秭归县幅H-49-42-A1/5万区域地质图说明书[R].湖北地矿局区调所.
- 张梁,张建军.2000.地质灾害风险区划理论与方法[J].地质灾害与环境保护,(4):323-328.
- 张钟远,徐世光,李超,管晓琪,李微,邓胜,郑笑秋.2022.基于GIS和加权信息量模型的绿春县城地质灾害易发性评价[J].地质灾害与环境保护,33(1):37-43.
- 章昱,王磊,伏永朋,刘亚磊,黄皓.2023.基于斜坡单元与信息量法的丹江口库区典型流域地质灾害易发性评价[J].华南地质,39(3):512-522.
- 赵美龄,郝利娜,许晓露,陈辰,许强.2022.土地利用/覆被变化对地质灾害发育的影响研究[J].遥感技术与应用,37(2):399-407.
- Li L P, Lan H K, Guo C B, Zhang Y S, Li Q W, Wu Y M. 2017. A modified frequency ratio method for landslide susceptibility assessment[J]. Landslides, 14(2):727-741.