



基于CF-LR模型的河南省信阳市地质灾害易发性评价

申玉松^{1,2}, 张宸^{1,2}, 王艺杰^{1,2}, 张迪^{1,2}

1. 河南省第三地质矿产调查院有限公司, 河南 信阳 450000;

2. 河南省自然资源科技创新中心(信息感知技术应用研究), 河南 郑州 450000

摘要: 河南省信阳市位于我国地理南北分界线、气候分界线,是地质灾害多发市,地质灾害易发性评价对防灾减灾有重要的指导意义。基于资料分析,选取坡度、坡向、地形曲率、到水系距离、到断层距离、夜间灯光指数和植被指数共7个指标,采用CF-LR模型,对信阳市地质灾害易发性进行了评价。结果表明,信阳市地质灾害易发性程度划分为4类:极高易发区(占全区面积11.39%)、高易发区(19.51%)、中易发区(14.20%)和低易发区(54.90%)。经合理性和准确性检验,评价结果符合要求,说明采用的CF-LR模型能够较为客观准确地评价信阳市地质灾害易发性。

关键词: 地质灾害;易发性评价;CF-LR模型;河南省

GEOHAZARD SUSCEPTIBILITY ASSESSMENT BASED ON CF-LR MODEL FOR XINYANG CITY, HENAN PROVINCE

SHEN Yu-song^{1,2}, ZHANG Chen^{1,2}, WANG Yi-jie^{1,2}, ZHANG Di^{1,2}

1. Henan No. 3 Institute of Geology and Mineral Resources Survey Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China; 2. Henan Science and Technology Innovation Center of Natural Resources (Application Research of Information Perception Technology), Zhengzhou 450000, China

Abstract: Xinyang City of Henan Province, located on the north-south boundary of both geography and climate of China, is prone to geological disasters. The assessment of geohazard susceptibility is of great guiding significance for disaster prevention and reduction. Based on the data analysis, 7 indexes including slope gradient, aspect, terrain curvature, distance to water system, distance to faults, nighttime light index and vegetation index are selected and the CF-LR model is used to assess the geohazard susceptibility in Xinyang City. The results show that the geohazard susceptibility in the area can be divided into four categories: extremely high-risk area (accounting for 11.39% of the total area), high-risk area (19.51%), medium-risk area (14.20%) and low-risk area (54.90%). The results are verified to meet the requirements of rationality and accuracy, indicating that the CF-LR model can objectively and accurately assess the geohazard susceptibility in Xinyang City.

Key words: geohazard; susceptibility assessment; CF-LR model; Henan Province

0 引言

地质灾害易发性评价是在对以往地质灾害调查基

础上,通过对其发育的地质环境条件分析和判断,总结有利于地质灾害发育的地质环境条件组合,推断相同

收稿日期:2022-09-27;修回日期:2023-01-29. 编辑:张哲.

基金项目:河南省自然资源厅项目“河南省商城县1:5万地质灾害风险调查(普查)评价”(豫财地灾合字[2021]第39号);信阳市自然资源和规划局项目“信阳市地质灾害防治‘十四五’规划编制”(ZPZB-HNXY-2021004).

作者简介:申玉松(1989—),男,硕士,工程师,主要从事地质灾害调查、评价、防治等工作,通信地址 河南省郑州市黄河路姚寨路天一大厦, E-mail//770643354@qq.com

条件下地质灾害发育的可能性^[1],为防灾减灾工作提供目标靶区。常用的地质灾害易发性评价方法可分为定性评价、定量评价两种,具体包括专家打分法、层次分析法、信息量法、证据权法、确定性系数法、支持向量机、决策树、神经网络等。这些方法经广泛应用和验证,取得了很好的效果^[2-4],但各方法均存在一定的缺陷,如人为因素影响大、无法比较不同指标间的相对重要性、偏离实际等。而多方法、多模型的相互耦合,由于能相互验证、相互补充且评价精度和合理性更高,在近年来被广泛应用^[5-10]。

传统确定性系数(Certainty Factor, CF)模型^[11]能客观反映指标内部不同分级对地质灾害易发性的影响值,解决多源数据类型的合并问题,但是忽略了不同指标间的差异性;而逻辑回归(Logistic Regression, LR)模型基于对大量数据的统计分析,能够较为精确地反映指标间的相对权重。两种方法结合使用^[12],即 CF-LR 模型,由传统确定性系数模型提供地质灾害与评价指标关系的数据,经逻辑回归计算得到指标相对权重,能够大大提高评价的精度和合理性。

信阳市地质灾害数量多年保持在 250~350 处,尤其是南部山区的县区,地质灾害密度达 3~6 处/100 km²,是地质灾害多发市,地质灾害防治任务艰巨。本研究通过以往地质灾害资料收集和分析,选取研究区内地质灾害影响指标,构建评价指标体系,基于 ArcGIS 平台,采用 CF-LR 模型,对地质灾害易发性进行评价,以期为宜阳市防灾减灾、国土空间规划等工作提供参考。

1 研究区概况

信阳市位于河南省东南部,豫皖鄂三省交界,地处中国地理南北分界线、气候分界线。整体地势西南高、东北低,海拔高度 19~1 570 m。气候温暖湿润,年均气温 6~15 ℃,年均降雨量 1 000~1 400 mm。受大别山造山运动和淮河冲积共同作用,地貌类型自南向北依次为低山、丘陵、岗地和平原,岩性由南部的混合岩、花岗岩,逐渐向北变化为泥岩、砂岩和第四系冲洪积层。复杂的造山运动对区内岩土体挤压、抬升和错断,形成网格状构造格局,龟梅断裂、桐商断裂和定远-八里贩断裂等区域断层纵贯全区。区内地质灾害主要为崩塌、滑坡,多受降雨诱发失稳。

2 研究方法

2.1 确定性系数模型

确定性系数模型(CF)以确定性系数来表征地质灾害发育的可能性,主要通过衡量现状条件下地质灾害发育情况确定^[13]。通过式(1)可以获得无量纲的 C_F 值,其以比值形式将不同地质环境条件统一。通常 C_F 取值为 $[-1, 1]$,值越大表示地质灾害发生的确定性越大。

$$C_F = \begin{cases} \frac{P_a - P_s}{P_a(1 - P_s)}, & P_a \geq P_s \\ \frac{P_a - P_s}{P_s(1 - P_a)}, & P_a < P_s \end{cases} \quad (1)$$

式中, C_F —确定性系数,地质灾害发育的概率; P_a —地质灾害在地质环境条件 a 中发生的概率,通常用地质环境条件 a 中的地灾数量与地质环境条件 a 总面积的比值表示,其取值范围为 $[0, 1]$; P_s —地质灾害发育的概率,通常用地质灾害总数与研究区面积比值表示,同一研究区内为定值。

2.2 逻辑回归模型

逻辑回归模型(LR)是探索众多数据特征关系的一种常用的统计方法,计算公式见式(2)。在地质灾害易发性评价中,地质灾害是否发生为因变量(0 为否,1 为是),各地质环境条件为自变量,通过自变量与因变量之间关系分析,得到不同自变量组合下的地质灾害发生概率。

$$\begin{cases} Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_n x_n \\ P = \frac{1}{1 + e^{-Y}} \end{cases} \quad (2)$$

式中, P —地质灾害发生的概率; Y —地质灾害与地质环境条件的关系方程; $\beta_1, \cdots, \beta_n$ —逻辑回归系数,为各地质环境条件对地质灾害的作用强度; β_0 —常数,表示在不受任何因素影响条件下,地质灾害发生与不发生概率之比的对数值^[14]; $x_1, x_2, \cdots, x_n$ —各地质环境条件对应的 C_F 值。

3 数据来源和评价指标

3.1 数据来源

信阳市地质灾害数据主要来自 2012~2021 年各县区统计和公布的 2022 年地质灾害隐患点核查数据,共收集 933 处地质灾害点(见图 1),其中崩塌、滑坡地质灾害点 914 处,占比 98%,其他为泥石流和地面塌陷。

由于泥石流和地面塌陷地质灾害占比小,且发育分布受单个因素控制明显,本次研究选取 914 处崩塌、滑坡作为研究对象。

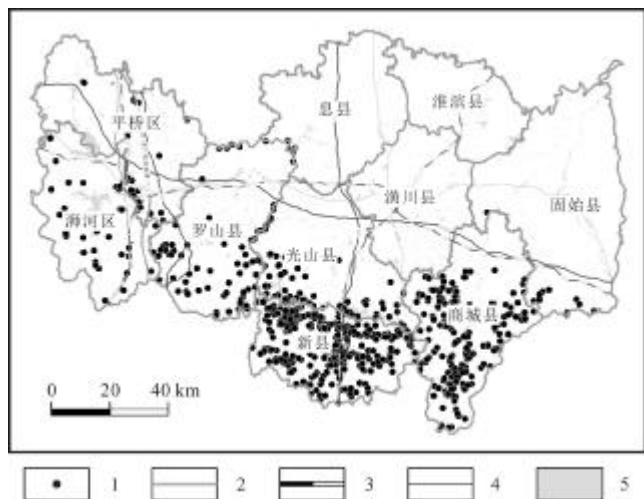


图 1 信阳市地质灾害分布图

Fig. 1 Distribution map of geohazards in Xinyang City

1—地灾点(geohazard site); 2—县区界线(boundary of county); 3—铁路(railway); 4—公路(highway); 5—水库(reservoir)

研究采用 DEM 数据为地理空间数据云平台获取的 ASTER GDEM 数据,夜间灯光数据源为 2021 年 NPP/VIIRS 年均夜光遥感数据,植被数据为 Landsat8 影像波段叠加计算得到的归一化植被指数(Normalized Differential Vegetation Index, NDVI),地质数据源为 1:20 万地质图。

3.2 评价指标的选择与分级

影响地质灾害发育分布的因素十分复杂^[15],各因素的作用方式、强度在不同区域存在差异。通过对研究区资料分析,选择坡度、坡向、地形曲率、到水系距离、到断层距离、夜间灯光指数和 NDVI 共 7 项指标进行地质灾害易发性评价。地质灾害点在各指标图层中的分布见图 2—8。

坡度:斜坡岩土体是在各种力相互作用下保持平衡的,其中坡度的大小直接影响重力沿斜坡向下的分力,是影响斜坡稳定性的重要因素。坡度的大小还决定地质灾害发生的类型和破坏机制。通过 ArcGIS 中坡度工具,基于 DEM,提取得到地形坡度数据,并分类成 8 级: $\leq 5^\circ$, $5\sim 10^\circ$, $10\sim 15^\circ$, $15\sim 20^\circ$, $20\sim 25^\circ$, $25\sim 30^\circ$, $30\sim 35^\circ$, $>35^\circ$ (图 2)。

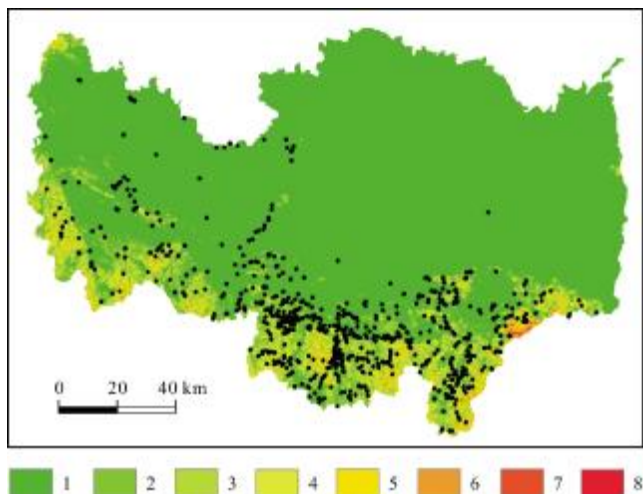


图 2 地质灾害点在坡度图层中的分布

Fig. 2 Distribution of geohazard sites by slope gradient

1~8: ≤ 5 ; $5\sim 10$; $10\sim 15$; $15\sim 20$; $20\sim 25$; $25\sim 30$; $30\sim 35$; >35

坡向:不同坡向在接受阳光照射、降雨等方面存在差异,从而间接影响植被覆盖、风化速率和人口分布等,进而影响地质灾害的发育分布。通常在相同岩土体条件下,阳坡面接受了较多的阳光照射和降雨,岩石风化速率更快,坡表松散的覆盖层更厚,人类对地质环境条件的改造也更多。将坡向数据分成东、西、南、北和平地共 5 个方向(图 3)。

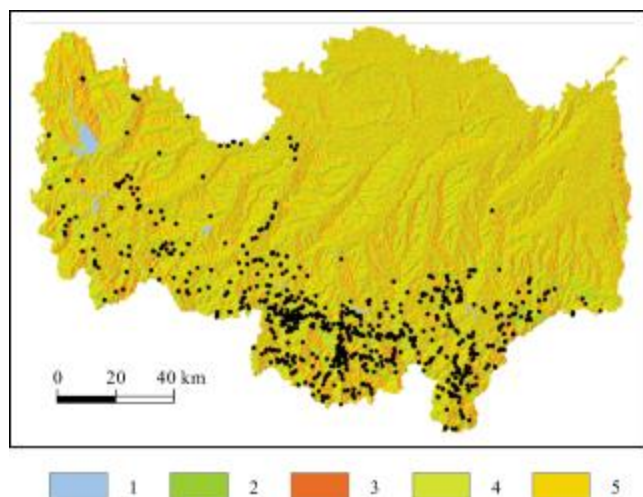


图 3 地质灾害点在坡向图层中的分布

Fig. 3 Distribution of geohazard sites by slope aspect

1—平地、水域(flat ground, water area); 2—北(northward); 3—南(southward); 4—东(eastward); 5—西(westward)

地形曲率:斜坡剖面形态影响了岩土体内的应力分布,凸型坡在坡体前缘形成应力集中,更容易发生失

稳。地形曲率是斜坡剖面形态的定量度量指标,正值表示凸型坡,负值表示凹型坡,曲率越接近 0 表示坡面越平坦。研究区地形曲率为 $-0.84\sim 0.45$,将其分成 6 级: <-0.5 , $-0.5\sim -0.2$, $-0.2\sim -0.05$, $-0.05\sim +0.05$, $0.05\sim 0.2$, >0.2 (图 4)。

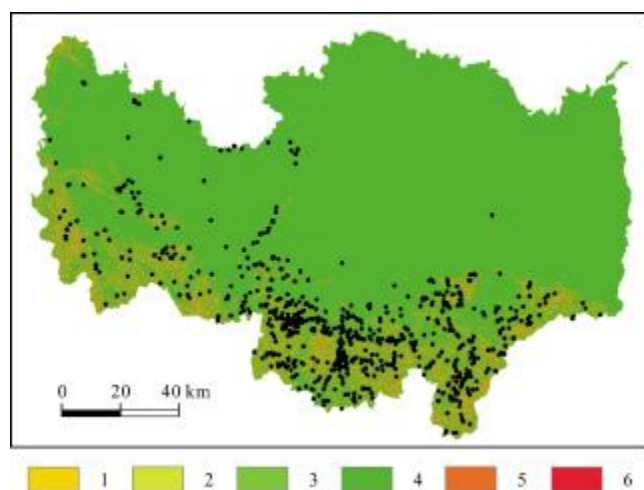


图 4 地质灾害点在地形曲率图层中的分布

Fig. 4 Distribution of geohazard sites by terrain curvature

1~6: ≤ -0.5 ; $-0.5\sim -0.2$; $-0.2\sim -0.05$; $-0.05\sim +0.05$; $0.05\sim 0.2$; >0.2

到水系距离:河流对地质灾害的影响主要在于水流对河道两侧岸坡的侵蚀作用,不断增加的岸坡高度和坡度,为岩土体失稳提供了临空条件。区内水系主要为淮河二级及以下支流,结合现场实际,将河流影响划分成 6 级: <100 m, $100\sim 200$ m, $200\sim 300$ m, $300\sim 400$ m, $400\sim 500$ m, >500 m(图 5)。

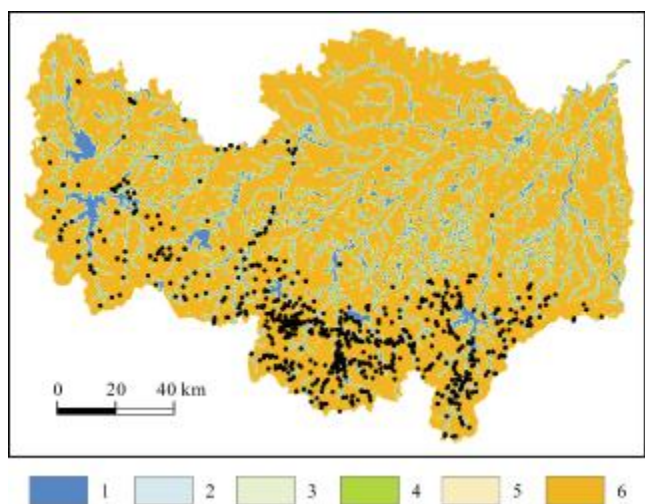


图 5 地质灾害点在到水系距离图层中的分布

Fig. 5 Distribution of geohazard sites by distance to water system

1~6: ≤ 100 ; $100\sim 200$; $200\sim 300$; $300\sim 400$; $400\sim 500$; >500 m

到断层距离:断层破坏岩土体的完整性,控制地质灾害边缘,为雨水入渗提供通道。一般到断层距离越近,岩土体结构面越发育,结构越破碎,地质灾害发育也越集中。选择 1 km 间隔作断层缓冲区,研究区共分为 6 级: <0.5 km, $0.5\sim 1.5$ km, $1.5\sim 3$ km, $3\sim 5$ km, $5\sim 8$ km, >8 km(图 6)。

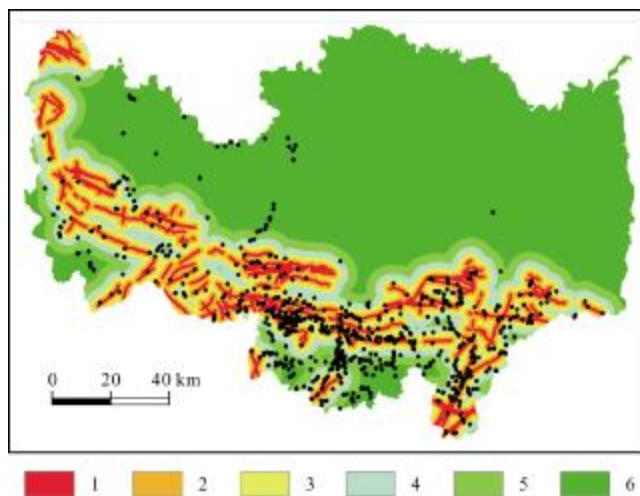


图 6 地质灾害点在到断层距离图层中的分布

Fig. 6 Distribution of geohazard sites by distance to faults

1~6: ≤ 0.5 ; $0.5\sim 1.5$; $1.5\sim 3$; $3\sim 5$; $5\sim 8$; >8 km

夜间灯光指数:为人类活动的一种有效表征形势,对国民生产总值、人口数量有一定的指示意义。研究区夜间灯光指数分布相对集中,其中大值主要分布在市区、县城、经济活跃乡镇以及重要道路周边,其余位置夜间灯光指数为小值。将夜间灯光指数划分成 6 级:0, $0\sim 10$, $10\sim 20$, $20\sim 30$, $30\sim 40$, >40 (图 7)。

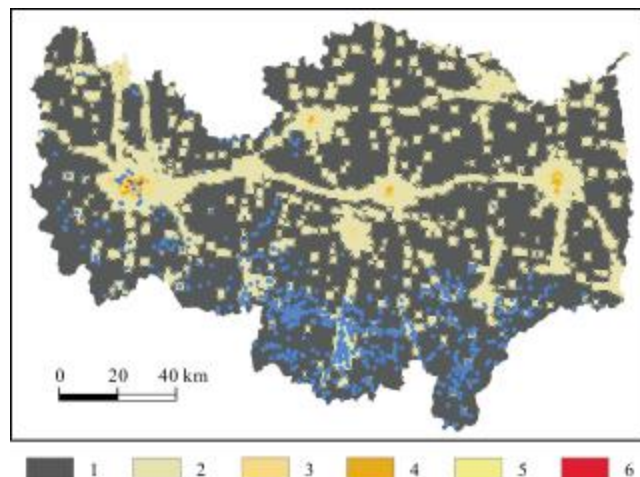


图 7 地质灾害点在夜间灯光指数图层中的分布

Fig. 7 Distribution of geohazard sites by nighttime light index

1~6: 0; $0\sim 10$; $10\sim 20$; $20\sim 30$; $30\sim 40$; >40

NDVI:植被能减少雨水冲刷,减缓水流入渗,对自然斜坡具有一定保护作用,但植被的自重加载和根劈作用又破坏着坡体的稳定性.研究区 NDVI 值在-0.56~+0.79 之间,将其分成 6 级:水域(<-0.1)、裸地(-0.1~0)、荒地(0~0.1)、草地(0.1~0.2)、林地(0.2~0.3,>0.3)(图 8).

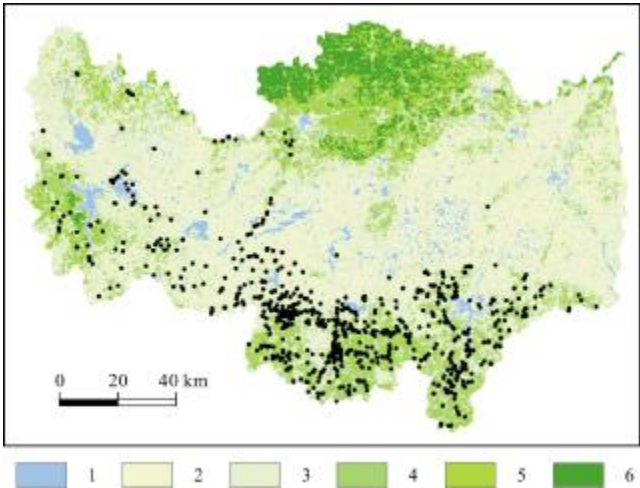


图 8 地质灾害点在 NDVI 图层中的分布
Fig. 8 Distribution of geohazard sites by NDVI
1~6: ≤-0.1; -0.1~0; 0~0.1; 0.1~0.2; 0.2~0.3; >0.3

4 地质灾害易发性评价

为保证各评价指标栅格单元的一致性,首先需要对各评价指标图层进行统一.各评价指标图层按照 100 m×100 m 进行重采样,共计 1 892 722 个栅格单元.

4.1 计算评价指标的 C_F 值

根据 914 处地质灾害点在各指标分类级别中的分布数量和对应面积,利用 CF 模型,得到各分类级别对应的 C_F 值,结果见表 1.

4.2 评价指标的独立性检验

相关性过大的指标可导致计算结果偏离实际,为保证计算结果的合理性,需要对指标的独立性进行检验.采用相关性分析法对 7 个指标的独立性进行检验,在 SPSS 19.0 中得到相关系数矩阵(见表 2).表 2 中 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 、 x_6 、 x_7 分别代表坡度、坡向、地形曲率、到水系距离、到断层距离、夜间灯光指数、NDVI.

结果显示:评价指标之间的相关性系数绝对值最大为 0.177,小于 0.3,表明所选取的因子之间的相关性小,7 个指标全部可纳入分析.

表 1 各评价指标确定性系数 C_F 计算结果表
Table 1 Deterministic coefficient calculation results of each evaluation factor

评价因子	分类级别	类别面积/km ²	灾害点/处	CF
坡度/(°)	<5	15171.04	444	-0.3972
	5~10	1578.6	295	0.7406
	10~15	1039.5	113	0.5538
	15~20	615.02	43	0.3059
	20~25	282.99	13	-0.0536
	25~30	108.3	4	-0.2392
	30~35	30.78	2	0.2531
	>35	4.35	0	-1.0000
坡向	平坦	543.99	4	-0.8486
	北	4288.99	199	-0.0441
	东	5092.53	273	0.0946
	南	4341.31	192	-0.0889
	西	4563.76	246	0.0996
地形曲率	<-0.5	2.01	0	-1.0000
	-0.5~-0.2	130.68	15	0.5774
	-0.2~-0.05	1046.05	157	0.6769
	-0.05~0.05	16315.26	545	-0.3119
	0.05~0.2	130.639	194	0.6735
	>0.2	30.19	3	0.5118
到水系距离/m	<100	1476.81	102	0.3010
	100~200	1048.49	82	0.3827
	200~300	1060.21	85	0.3979
	300~400	1071.59	76	0.3193
	400~500	1045.36	55	0.0822
	>500	13225.06	514	-0.1952
到断层距离/km	<0.5	1232.50	181	0.6715
	0.5~1.5	1964.07	226	0.5806
	1.5~3	1928.48	175	0.4681
	3~5	1597.28	119	0.3520
	5~8	1581.46	134	0.4303
	>8	10623.43	79	-0.8461
夜间灯光指数	<0	13541.75	594	-0.0917
	0~10	5188.53	306	0.1813
	10~20	135.09	11	0.4072
	20~30	44.83	3	0.2785
	30~40	13.36	0	-1.0000
	>40	4.00	0	-1.0000
NDVI	<-0.1	1042.77	34	-0.3249
	-0.1~0	6183.60	157	-0.4743
	0~0.1	6105.38	433	0.3193
	0.1~0.2	3139.82	242	0.3736
	0.2~0.3	1319.34	40	-0.3723
	>0.3	1136.31	8	-0.8543

表 2 评价指标间的相关性系数矩阵

Table 2 Correlation coefficient matrix of evaluation indexes

	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇
X ₁	1.000	-0.008	-0.144	0.123	-0.128	0.120	-0.078
X ₂		1.000	-0.004	0.001	0.019	-0.019	0.066
X ₃			1.000	0.083	-0.123	0.026	-0.123
X ₄				1.000	0.177	-0.097	0.144
X ₅					1.000	-0.056	-0.002
X ₆						1.000	0.086
X ₇							1.000

4.3 计算评价指标的权重

采用 LR 模型计算回归系数,首先需要选择训练样本,确定训练样本集.样本选择的合理与否直接影响计算结果的准确性.本次计算采用随机选取的方式确定,其中地质灾害点随机选取总数的 80%左右,非地质灾害点在地质灾害点 200 m 缓冲区以外的区域内随机生成.共选取 714 处地质灾害点和 714 处非地质灾害点,形成包含 1 428 点的训练集.通过点提取,确定各样本对应的评价指标分类,并替换成各 C_F 值.将 C_F 值作为自变量,是否发生地质灾害作为因变量(0 为否,1 为是),导入 SPSS 软件进行逻辑回归,计算结果见表 3.由结果可知,评价指标的显著性均小于 0.05,回归系数有效,具有统计意义.回归系数均为正数表示所有评价指标对模型均起正向作用.

表 3 逻辑回归结果汇总表

Table 3 Results of logistic regression

项目	回归系数	标准误差	自由度	显著性
坡度	0.975	0.147	1	0.000
坡向	1.333	0.824	1	0.037
地形曲率	0.719	0.165	1	0.000
到水系距离	1.971	0.286	1	0.000
到断层距离	1.759	0.127	1	0.000
夜间灯光指数	1.253	0.521	1	0.016
NDVI	0.847	0.184	1	0.000
常量	-0.176	0.079	1	0.026

4.4 地质灾害易发性计算

将计算得到的各指标回归系数代入 LR 模型,可

得逻辑回归方程,见式(3).

$$Y=-0.176+0.975x_1+1.333x_2+0.719x_3+1.971x_4+1.759x_5+1.253x_6+0.847x_7$$
$$P=\frac{1}{1+e^{-Y}}$$

(3)

式中: P —地质灾害发生的概率,值为 $[0,1]$; x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 、 x_6 、 x_7 —坡度、坡向、地形曲率、到水系距离、到断层距离、夜间灯光指数、NDVI 各分类等级的 C_F 值.

利用 ArcGIS 中栅格计算器将各指标图层的栅格值赋为对应的 C_F ,通过加权叠加计算,得到栅格单元的地质灾害发生的概率 P .

由计算可知,研究区发生地质灾害的概率 P 位于 0.0043~0.9753 之间.

5 评价结果及检验

对得到的概率 P 栅格图按照等间距法确定地质灾害易发程度等级(见图 9),共分成 4 类:低易发区(<0.25)、中易发区($0.25\sim0.5$)、高易发区($0.5\sim0.75$)、极高易发区(>0.75).其面积及占比分别为 10 337.73 km² (54.90%)、2 674.38 km² (14.20%)、3 673.03 km² (19.51%)和 2 145.30 km² (11.39%).

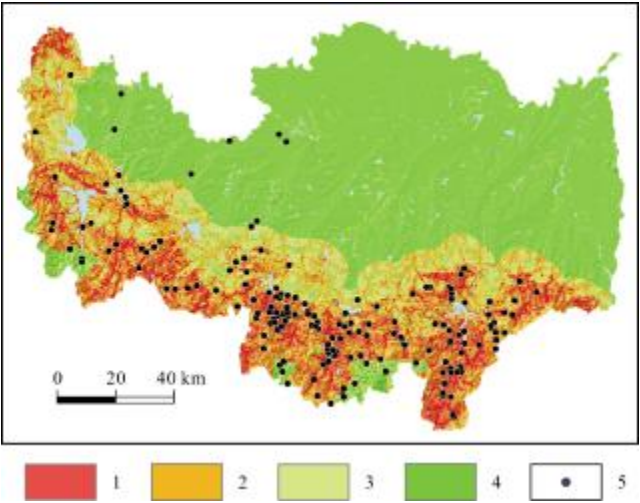


图 9 地质灾害易发程度区划与检验样本分布

Fig. 9 Susceptibility zoning and distribution of geohazard test samples

1—极高易发区 (extremely high-risk area); 2—高易发区 (high-risk area); 3—中易发区 (medium-risk area); 4—低易发区 (low-risk area); 5—地灾点 (geohazard site)

从易发程度分区结果可知:信阳市地质灾害易发程度以低为主,分布在东北部,主要为淮河冲积平原,

地势较为平坦,地层岩性为冲洪积粉土、粉砂,构造不发育;其次为中—高易发区,合计占比 33.71%,分布在中部,呈带状展布,为丘陵地貌区;极高易发区主要分布在南部、西北部,沟道深切,地势起伏较大,岩性复杂多变,构造发育。

评价结果是否有效,通常进行两个方面的检验,即合理性检验和准确性检验。

5.1 合理性检验

为保持评价模型的稳定性,减少检验样本选择中的人为影响,本研究选取未参与逻辑回归计算的 200 处地质灾害点进行合理性检验。由检验结果(表 4)可知,随着地质灾害易发等级的提高,地质灾害在数量、密度上均呈增多的趋势,占总面积 30.9%的极高、高易发区,分布了 77.5%的检验点地质灾害,说明易发程度越高,越易发育地质灾害,区划结果是合理的。

表 4 地质灾害易发性评价合理性检验统计表

Table 4 Rationality test results of geohazard susceptibility evaluation

易发性等级	面积/km ²	面积比例/%	灾点数量/个	灾害占比/%	灾点密度/(个/100 km ²)
极高	2145.30	11.39	84	42.0	3.92
高	3673.03	19.51	71	35.5	1.93
中等	2674.38	14.20	30	15.0	1.12
低	10337.73	54.90	15	7.5	0.15

5.2 准确性检验

ROC 曲线^[16]是一种不受临界约束的结果评价方法,能有效地对评价结果的准确性进行检验^[17]。其以假阳性率(未发生地质灾害的单元被正确预测的比例)为横坐标,真阳性率(发生地质灾害的单元被正确预测的比例)为纵坐标绘制的曲线,用于描述敏感性和特异性之间的关系。曲线下的面积为 AUC (Area Under Curve)值,是衡量模型准确性指标^[18],取值区间为 [0.5, 1],值越大表示模型准确性越好。

将 914 处地质灾害点和 714 处随机生成的非地质灾害点全部作为样本,通过 SPSS 19.0 进行 ROC 曲线分析(图 10)。结果显示,本次评价 AUC 值为 0.828,易发性评价结果准确性较高,表明 CF-LR 模型可以较为准确地对信阳市的地质灾害易发程度进行评价。

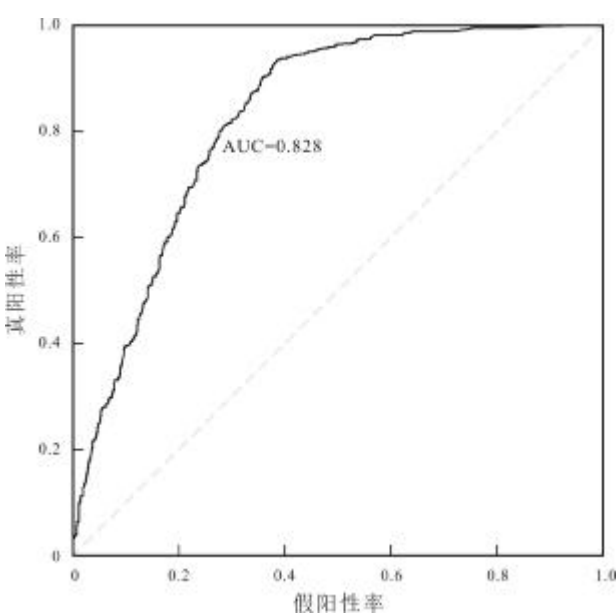


图 10 评价模型 ROC 曲线

Fig. 10 ROC curve of evaluation model

6 讨论

1)在诸多前人研究中,指标体系的构建均根据经验人为选定,带有一定的主观性^[19]。本研究在指标选取时,断层、岩性、高程等相关性较大,进行了取舍,存在一定的片面性。

2)对地质灾害评价目前趋于风险评价,是在易发性、危险性、易损性基础上开展的^[20],将地质灾害发生概率、承载对象易损程度综合考虑,更客观、合理。研究区的风险性将在其他论文中进行阐述。

7 结论

1)信阳市地质灾害易发性影响大小依次是:到水系距离>到断层距离>坡向>夜间灯光指数>坡度>NDVI>地形曲率。

2)信阳市地质灾害易发性以低易发为主,面积 10 337.73 km²,占比 54.90%,主要分布在东北部淮河冲积平原区,地形起伏较小;极高易发区面积 2 145.30 km²,占比 11.39%,主要分布在南部、西北部,地势起伏较大,岩性复杂多变,结构破碎。中—高易发区分布在中部,带状分布。

3)将逻辑回归模型进行合理性检验,地质灾害易发程度越高,地质灾害分布则越多,评价结果较为合理。用 ROC 曲线对模型的准确性进行检验,其 AUC 值

为 0.828,精度较高,说明 CF-LR 模型能够较为客观准确地对信阳市地质灾害进行评价。

参考文献(References):

- [1]田春山,刘希林,汪佳.基于 CF 和 Logistic 回归模型的广东省地质灾害易发性评价[J].水文地质工程地质,2016,43(6):154-161,170.
Tian C S, Liu X L, Wang J. Geohazard susceptibility assessment based on CF model and Logistic Regression models in Guangdong[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(6): 154-161, 170.
- [2]吴常润,赵冬梅,刘澄静,等.基于 GIS 和信息量模型的陇川县滑坡易发性评价[J].西北地质,2020,53(2):308-320.
Wu C R, Zhao D M, Liu C J, et al. Landslide susceptibility assessment of Longchuan County based on GIS and information value model[J]. Northwestern Geology, 2020, 53(2): 308-320.
- [3]王雷,吴君平,赵冰雪,等.基于 GIS 和信息量模型的安徽池州地质灾害易发性评价[J].中国地质灾害与防治学报,2020,31(3):96-103.
Wang L, Wu J P, Zhao B X, et al. Susceptibility assessment of geohazards in Chizhou City of Anhui Province based on GIS and informative model[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(3): 96-103.
- [4]许冲,戴福初,姚鑫,等.基于 GIS 与确定性系数分析方法的汶川地震滑坡易发性评价[J].工程地质学报,2010,18(1):15-26.
Xu C, Dai F C, Yao X, et al. GIS platform and certainty factor analysis method based Wenchuan earthquake-induced landslide susceptibility evaluation[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(1): 15-26.
- [5]周天伦,曾超,范晨,等.基于快速聚类-信息量模型的汶川及周边两县滑坡易发性评价[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(5):137-150.
Zhou T L, Zeng C, Fan C, et al. Landslide susceptibility assessment based on K-means cluster information model in Wenchuan and two neighboring counties, China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(5): 137-150.
- [6]杨光,徐佩华,曹琛,等.基于确定性系数组合模型的区域滑坡敏感性评价[J].工程地质学报,2019,27(5):1153-1163.
Yang G, Xu P H, Cao C, et al. Assessment of regional landslide susceptibility based on combined model of certainty factor method[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(5): 1153-1163.
- [7]付树林,梁丽萍,刘延国.基于 CF-Logistic 模型的雅砻江新龙段地质灾害易发性评价[J].水土保持研究,2021,28(4):404-410.
Fu S L, Liang L P, Liu Y G. Assessment on geohazard susceptibility in Xinlong section of Yalong River based on CF-logistic model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(4): 404-410.
- [8]张钟远,邓明国,徐世光,等.镇康县滑坡易发性评价模型对比研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(1):157-171.
Zhang Z Y, Deng M G, Xu S G, et al. Comparison of landslide susceptibility assessment models in Zhenkang County, Yunnan Province, China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(1): 157-171.
- [9]武雪玲,杨经宇,牛瑞卿.一种结合 SMOTE 和卷积神经网络的滑坡易发性评价方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(8):1223-1232.
Wu X L, Yang J Y, Niu R Q. A landslide susceptibility assessment method using SMOTE and convolutional neural network[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(8): 1223-1232.
- [10]朱进守,邓辉,苑泉,等.藏东高山峡谷地带地质灾害危险性评价——以西藏贡觉县为例[J].地质与资源,2018,27(3):272-278.
Zhu J S, Deng H, Yuan Q, et al. Risk assessment on the geohazards in alpine and gorge region of Eastern Tibet: A case study of Gonjo County[J]. Geology and Resources, 2018, 27(3): 272-278.
- [11]张纪恺,凌斯祥,李晓宁,等.九寨沟县滑坡灾害易发性快速评估模型对比研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(8):1595-1610.
Zhang Q K, Ling S X, Li X N, et al. Comparison of landslide susceptibility mapping rapid assessment models in Jiuzhaigou County, Sichuan Province, China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(8): 1595-1610.
- [12]覃乙根,杨根兰,江兴元,等.基于确定性系数模型与逻辑回归模型耦合的地质灾害易发性评价——以贵州省开阳县为例[J].科学技术与工程,2020,20(1):96-103.
Qin Y G, Yang G L, Jiang X Y, et al. Geohazard susceptibility assessment based on integrated certainty factor model and logistic regression model for Kaiyang, China[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(1): 96-103.
- [13]Shortliffe E H, Buchanan B G. A model of inexact reasoning in medicine[J]. Mathematical Biosciences, 1975, 23(3/4): 351-379.
- [14]王进,郭靖,王卫东,等.权重线性组合与逻辑回归模型在滑坡易发性区划中的应用与比较[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(5):1932-1939.
Wang J, Guo J, Wang W D, et al. Application and comparison of weighted linear combination model and logistic regression model in landslide susceptibility mapping[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(5): 1932-1939.
- [15]刘振辉.天津市蓟县山区突发性地质灾害特征及其形成机理研究[D].北京:中国地质大学,2014.
Liu Z H. Research on characteristics and formation mechanism of sudden geological disasters in Tianjin Jixian mountain area[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014.

- Province[J]. *Geology in China*, 2017, 44(5): 1031–1032.
- [11] 孙岐发, 田辉, 郭晓东, 等. 长春莲花山发现锶富集区[J]. *中国地质*, 2019, 46(2): 430–431.
- Sun Q F, Tian H, Guo X D, et al. Strontium-enriched areas discovered in Lianhuashan, Changchun[J]. *Geology in China*, 2019, 46(2): 430–431.
- [12] 李莉莉, 王莉. 安徽省和县香泉镇老山双泉 1 号泉饮用天然矿泉水成因分析[J]. *地下水*, 2016, 38(5): 16–18.
- Li L L, Wang L. Analysis of formation causes of natural mineral water no1 springs between Anhui Province and Laoshan double spring of Xianxiang County[J]. *Ground Water*, 2016, 38(5): 16–18.
- [13] 黄树春, 赵帅军, 夏友, 等. 湖南省饮用天然矿泉水资源潜力评价与开发利用区划[J]. *地质与资源*, 2017, 26(1): 67–72.
- Huang S C, Zhao S J, Xia Y, et al. Potential evaluation and exploitation division of the drinking mineral water resources in Hunan Province[J]. *Geology and Resources*, 2017, 26(1): 67–72.

(上接第 81 页/Continued from Page 81)

- [16] 秦红富, 谈树成, 施旖奇, 等. 基于 CF-LR 组合模型的地质灾害易发性评价——以云南省宁洱哈尼族彝族自治县为例[J]. *人民长江*, 2022, 53(7): 119–127.
- Qin H F, Tan S C, Shi Y Q, et al. Geological hazard susceptibility assessment based on CF&LR combined model: Case of Ning'er Hani and Yi Autonomous County, Yunnan Province[J]. *Yangtze River*, 2022, 53(7): 119–127.
- [17] 罗路广, 裴向军, 黄润秋, 等. GIS 支持下 CF 与 Logistic 回归模型耦合的九寨沟景区滑坡易发性评价[J]. *工程地质学报*, 2021, 29(2): 526–535.
- Luo L G, Pei X J, Huang R Q, et al. Landslide susceptibility assessment in Jiuzhaigou scenic area with GIS based on certainty factor and logistic regression model[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(2): 526–535.
- [18] 屠水云, 张钟远, 付弘流, 等. 基于 CF 与 CF-LR 模型的地质灾害易发性评价[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(2): 96–104.
- Tu S Y, Zhang Z Y, Fu H L, et al. Geological hazard susceptibility evaluation based on CF and CF-LR model[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(2): 96–104.
- [19] 黄敬军, 甘义群, 缪世贤, 等. 江苏省地质环境区划评价指标体系初步研究[J]. *中国地质*, 2011, 38(6): 1599–1606.
- Huang J J, Gan Y Q, Miao S X, et al. A preliminary study of the evaluation index system for geo-environment regionalization in Jiangsu[J]. *Geology in China*, 2011, 38(6): 1599–1606.
- [20] 郭邦梅, 权开兄. 基于 ArcGIS 的青海隆务河流域灾害风险性评价[J]. *地质与资源*, 2019, 28(3): 289–292.
- Guo B M, Quan K X. ArcGIS-based disaster risk assessment of Longwu river basin in Qinghai Province[J]. *Geology and Resources*, 2019, 28(3): 289–292.

(上接第 114 页/Continued from Page 114)

- [32] 孙红丽, 王贵玲, 蒯文静. 西宁盆地地下热水的 TDS 分布特征及富集机理[J]. *地质科技通报*, 2022, 41(1): 278–287, 299.
- Sun H L, Wang G L, Lin W J. Distribution characteristics and enrichment mechanism of TDS geothermal water in Xining Basin[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(1): 278–287, 299.
- [33] 邢一飞, 王慧群, 李捷, 等. 雄安新区地热水的化学场特征及影响因素分析[J]. *中国地质*, 2022, 49(6): 1711–1722.
- Xing Y F, Wang H Q, Li J, et al. Chemical field of geothermal water in Xiong'an New Area and analysis of influencing factors[J]. *Geology in China*, 2022, 49(6): 1711–1722.
- [34] 张萌, 蒯文静, 刘昭, 等. 西藏谷露高温地热系统水文地球化学特征及成因模式[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2014, 41(3): 382–392.
- Zhang M, Lin W J, Liu Z, et al. Hydrogeochemical characteristics and genetic model of Gulu high-temperature geothermal system in Tibet, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2014, 41(3): 382–392.
- [35] 郭宁, 刘昭, 男达瓦, 等. 西藏昌都觉拥温泉水化学特征及热储温度估算[J]. *地质论评*, 2020, 66(2): 499–509.
- Guo N, Liu Z, Nan D W, et al. The characteristics and reservoir temperatures of hot springs in Jueyong, Chamdo, Xizang (Tibet) [J]. *Geological Review*, 2020, 66(2): 499–509.
- [36] 龚晓洁, 田良河, 袁锡泰. 河南平原区天然地热流体同位素特征对其成生环境的揭示[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(25): 33–37.
- Gong X J, Tian L H, Yuan X T. Isotopic characteristics and forming environment of natural geothermal fluids in the plain area of Henan Province[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(25): 33–37.