

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.02-12

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 Shuiyun, ZHANG Zhongyuan, FU Hongliu, *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.

基于 CF 与 CF-LR 模型的地质灾害易发性评价

屠水云^{1,2}, 张钟远^{1,2}, 付弘流³, 徐世光^{1,2}, 邓明国², 何例春^{1,2}, 刘金宇^{1,2}

(1. 云南地矿工程勘察集团公司, 云南 昆明 650000; 2. 昆明理工大学国土资源工程学院,
云南 昆明 650000; 3. 铜仁市自然资源局, 贵州 铜仁 554300)

摘要: 区域地质灾害易发性评价对地质灾害防治具有重要意义。本文以贵州省沿河县为研究区, 考虑海拔、坡度、坡向、地形曲率、NDVI、工程地质岩组、断层、道路、水系 9 个因素, 通过相关性分析后作为评价因子。分别利用 CF 模型和 CF-LR 模型评价沿河县地质灾害易发性。结果表明: CF 模型比 CF-LR 模型地质灾害易发性等级的频率比值从低易发区到极高易发区明显增大, 均有效评价了沿河县地质灾害易发性; CF-LR 模型比 CF 模型 *AUC* 值提高了 0.096, CF-LR 模型具有更高的评价精度。

关键词: GIS; 确定性系数; 逻辑回归; 地质灾害易发性; 沿河县

中图分类号: P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2022)02-0096-09

Geological hazard susceptibility evaluation based on CF and CF-LR model

TU Shuiyun^{1,2}, ZHANG Zhongyuan^{1,2}, FU Hongliu³, XU Shiguang^{1,2}, DENG Mingguo²,
HE Lichun^{1,2}, LIU Jinyu^{1,2}

(1. Yunnan Geological and Mineral Engineering Exploration Group Company, Kunming, Yunnan 650000, China; 2. School
of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650000, China;
3. Natural Resources Bureau of Tongren City, Tongren, Guizhou 554300, China)

Abstract: The evaluation of regional geological disaster susceptibility is of great significance to the prevention and control of geological disasters. This paper takes Yanhe County in Guizhou Province as the research area, and considers 9 factors including altitude, slope, aspect, terrain curvature, NDVI, engineering geological rock formations, faults, roads, and water systems as evaluation factors. The CF model and the CF-LR model were used to evaluate the susceptibility of geological disasters in Yanhe County. The results show that the frequency ratio between the CF model and the CF-LR model of geological hazard susceptibility levels increases significantly from low-prone areas to extremely high-prone areas, which effectively evaluates the susceptibility of geological hazards in Yanhe County; the CF-LR model compares The *AUC* value of the CF model is increased by 0.096, and the CF-LR model has a higher evaluation accuracy.

Keywords: GIS; certainty coefficient; logistic regression; susceptibility to geological disasters; Yanhe County

0 引言

地质灾害易发性评价是以地质环境条件为基础,参考地质灾害现状的静态因素来预测一定区域内发生地质灾害的可能性^[1]。地质灾害易发性评价方法分为定性和定量两类。定性方法主要包括专家评分^[2]、层次分析^[3]等。随着数据获取的便利、计算能力的提升以及评估模型的日趋完善,定量评价方法应用更为广泛,定量方法主要有信息量^[4]、确定性系数^[5]、证据权^[6]、逻辑回归^[7]、支持向量机^[8]、决策树^[9]、随机森林^[10]、神经网络^[11]等。其中确定性系数方法计算严密,可以解决多源数据类型的合并问题和影响因子内部不同特征区间对地质灾害易发性的影响^[12],但单一的确定性系数评价法没有考虑每个评价因素对地质灾害易发性的影响差异。逻辑回归(Logistic Regression, LR)可以使用简单的线性回归来描述自然现象之间的复杂非线性关系,并根据影响因素与历史灾害点之间的关系确定影响因素的权重。文章基于地理信息系统,将研究区划分为栅格,选取海拔、坡度、坡向、地形曲率、归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、工程地质岩组、断层、道路、水系这 9 个孕灾、诱灾因素作为评价指标因子,采用频率比法(Frequency Ratio, FR)、确定性系数法(Certainty Factor, CF)量化评价指标因子,基于确定性系数法进行逻辑回归运算,计算研究区网格地质灾害发生的概率,得到地质灾害易发性分区图。

1 研究方法

1.1 频率比(FR)

频率比是建立在假设地质条件、孕育地质灾害的概率相似的地区。频率比重点考虑因子类别与地质灾害发生可能性的空间相关性,定量表示环境因子各属性区间对地质灾害发生的相对影响程度^[13-15],计算方法如式(1)。

$$FR_i = \frac{l_i/L}{s_i/S} \quad (1)$$

式中: FR_i ——频率比值;

l_i ——某个评价因子 i 类属性区间发生地质灾害的个数;

L ——研究区内的总数;

s_i ——某个评价因子 i 类区间的面积;

S ——研究区总面积。

FR_i 大于 1 表明该环境因子属性区间利于地质灾害发育,值越大表示对地质灾害发育的贡献也越大;反之,

FR_i 小于 1 表明该环境因子属性区间不利于地质灾害发育。

1.2 确定性系数模型(CF)

确定性系数模型假设将来发生地质灾害的条件和过去发生地质灾害的条件相同。CF 计算公式为:

$$CF = \begin{cases} \frac{PP_a - PP_s}{PP_s(1 - PP_s)} & (PP_a < PP_s) \\ \frac{PP_a - PP_s}{PP_s(1 - PP_s)} & (PP_a \geq PP_s) \end{cases} \quad (2)$$

式中: CF ——地质灾害发生的确定性系数;

PP_a ——地质灾害在因子分类数据 a 中发生的条件概率,研究中通常用因子分类 a 中的地质灾害个数与因子分类 a 的面积比值表示;

PP_s ——地质灾害在整个研究区中发生的先验概率,以研究区地质灾害总个数与研究区总面积比值表示。

由式(2)可知, CF 的变化区间为 $[-1, 1]$ 。正值表示地质灾害发生的确定性大,越接近 1 越易于发生地质灾害;负值表示地质灾害发生确定性小,越接近 -1 越不易于发生地质灾害;值为 0 时表示条件概率和先验概率相同,不确定是否会发生地质灾害^[5]。

1.3 基于确定性系数的逻辑回归模型(CF-LR)

逻辑回归模型是研究二分类因变量常用的多元统计分析方法。自变量 X_i 为控制灾害发生的影响因子。因变量 Y 属于二分类变量,通常 0 代表地质灾害不存在,1 代表地质灾害存在。用线性回归来描述自然现象之间复杂的非线性关系,揭示因变量和多个自变量之间的多元回归关系,将每个评价因子视为自变量,能很好解决滑坡易发性评价中出现的二分类变量问题^[16],逻辑回归函数如式(3):

$$\left. \begin{aligned} Z &= \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_n x_n \\ P(Y=1) &= \frac{1}{1 + e^{-Z}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: P ——地质灾害发生的概率;

Z ——地质灾害发生概率的目标函数,表达为各因素自变量 $x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n$ 的线性组合;

$\beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_n$ ——逻辑回归系数;

β_0 ——常数表示在不受任何有利或不利于地质灾害发生因素影响的条件下,地质灾害发生与不发生概率之比的对数值^[17]。

通过确定性系数模型计算得到各评价因子类别的值,将其结果作为逻辑回归模型中的自变量,建立回归方程,进行逻辑回归运算,得到各评价因子的逻辑回归

系数, 以此进行确定性系数-逻辑回归模型(CF-LR)进行地质灾害易发性评价。

2 实例分析

2.1 研究区概况

研究区沿河土家族自治县位于贵州省东北部, 隶属铜仁市, 南北长 98.28 km, 东西宽 53 km, 行政区域总面积 2 483.51km², 占贵州省总面积的 1.4%, 占铜仁市总面积的 13.7%。沿河县境内有乌江及其支流洪渡河、暗溪河、白泥河、坝坨河等 26 条河流, 河道长 548.7 km, 河网密度 0.23 km/km²。地貌轮廓明显受地质构造控制, 全县地貌“轴部成山, 翼部成谷”。区内出露地层从老到新有震旦系、寒武系、奥陶系、志留系、二叠系、三叠系及第四系。受乌江切割和地层、岩性、构造的影响, 在内外营力综合作用下, 形成山峦叠障、沟谷纵横、复杂多样的地形地貌景观。区内历史地质灾害以滑坡、崩塌为主, 共计 130 处, 滑坡、崩塌分别占全县地质灾害的 55.38%、33.85%。研究区地理位置及地质灾害分布如图 1 所示。

2.2 评价指标因子选取

结合研究区的地质背景、地质灾害形成条件及发育特征, 初步选取海拔、坡度、坡向、地形曲率、归一化植被指数(NDVI)、工程地质岩组、距断层距离、距道路距离、距水系距离 9 个影响因素作为评价指标因子。数据源为沿河县地质灾害数据库、地理空间数据云平台获取研究区 30 m×30 m 数字高程模型(Digital Eleva-

tion Model, DEM)、1 : 50 000 的地质图、Google 影像地图, 利用 ArcGIS 平台通过 DEM 数据提取分析得到研究区坡度、坡向、地形曲率、河流网评价因子图层, 通过 Google 影像地图矢量化得到道路数据, 利用 landsat8 影像获得该区的归一化植被指数(NDVI)专题图。

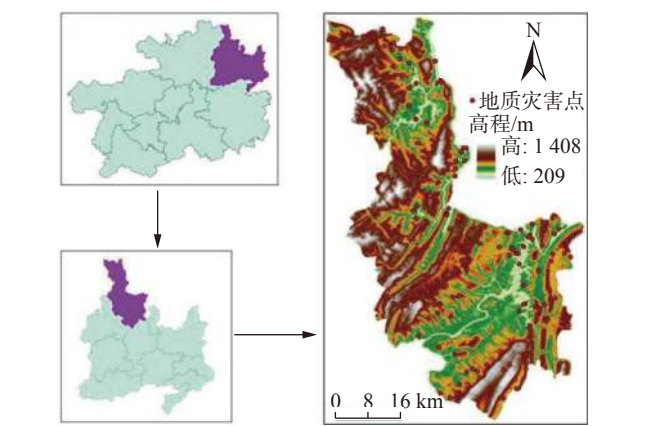


图 1 研究区地理位置及地质灾害点分布
Fig. 1 Geographical location and distribution of geological hazard in the study area

2.3 评价因子相关性分析

影响地质灾害发育的因素之间存在一定的关联, 当评价因子之间存在多重共线问题时, 会降低模型的预测精度, 因而需对评价因素进行相关性分析。利用 ArcGIS 计算相关矩阵如表 1 所示, 相关性系数绝对值最大为 0.324, 说明本文选取的 9 个评价指标因子之间相关性较弱, 均可纳入研究区评价模型^[18]。

表 1 评价指标因子相关性系数矩阵

Table 1 Correlation coefficient matrix of evaluation index factors

评价因子	海拔	坡度	坡向	地形曲率	NDVI	工程地质岩组	断层缓冲区	道路缓冲区	河流缓冲区
海拔	1								
坡度	-0.009	1							
坡向	0.009	0.059	1						
地形曲率	0.138	0.045	-0.004	1					
NDVI	0.154	0.094	-0.073	0.032	1				
工程地质岩组	-0.004	0.004	-0.016	-0.010	-0.006	1			
断层缓冲区	0.182	-0.002	0.002	0.004	0.024	0.104	1		
道路缓冲区	0.113	0.081	0.004	0.009	0.043	0.007	0.060	1	
河流缓冲区	0.324	-0.042	0.006	0.024	0.059	0.075	0.094	0.146	1

2.4 评价指标因子分析

工程地质岩组为离散型因子, 根据野外地质调查以及已有分类标准进行分类, 连续型指标因子分类根据地质灾害比例进行等距离划分, 各指标因子分级如图 2 所示, 利用式(1)进行频率比计算确定性系数计算, 利用式

(2)进行确定性系数计算, 结果见表 2。

海拔高度与降雨量、植被类型、植被覆盖等有着密切的关系, 影响着人类工程活动程度, 因此海拔间接影响着地质灾害的发育^[19], 海拔高度 209 ~ 1 408 m, 将其分为 6 个类别。

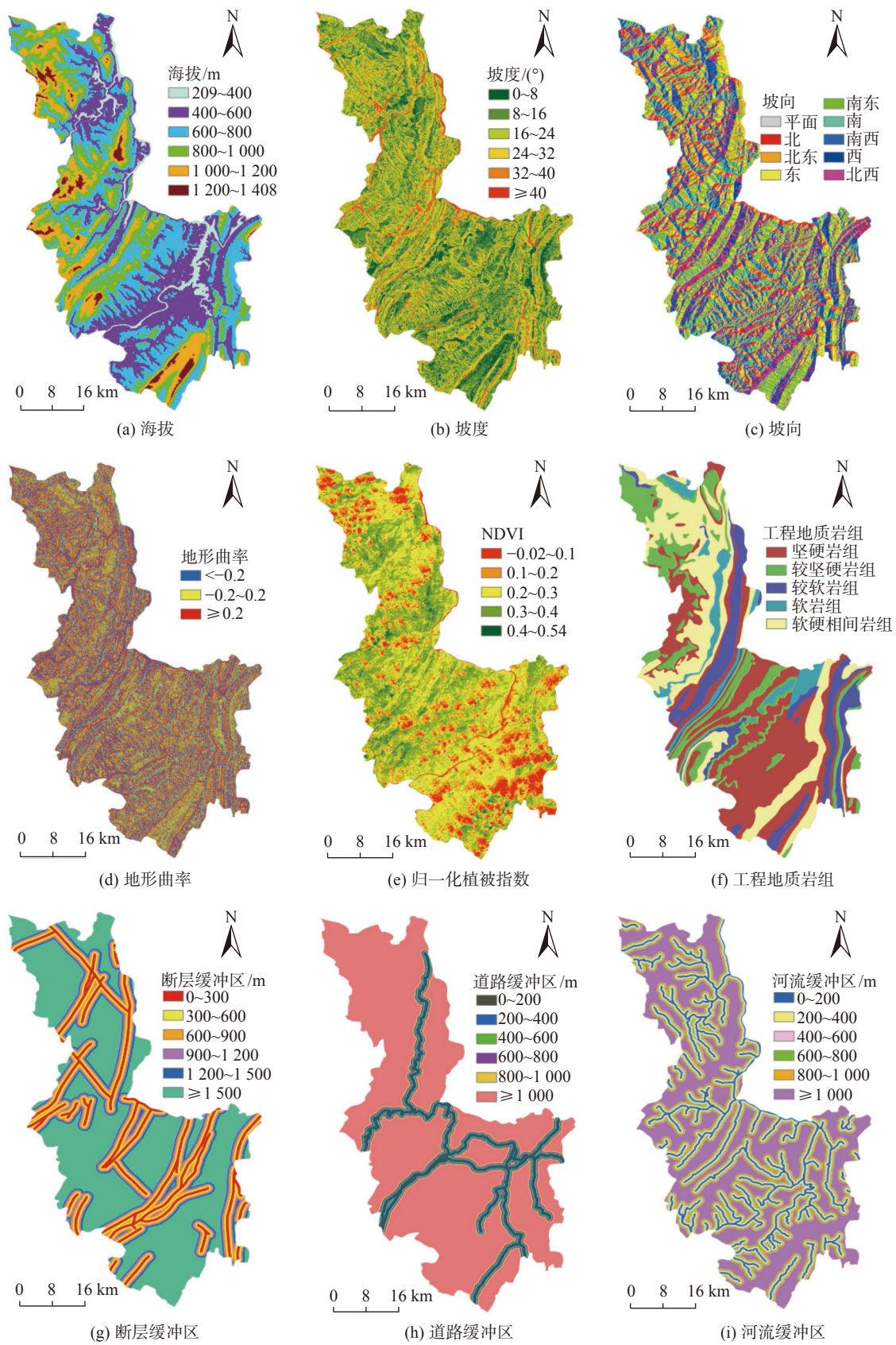


图 2 评价指标因子分级图

Fig. 2 Grading of evaluation index factors

表 2 评价指标因子分级、频率比、确定性系数
Table 2 Evaluation index factor classification, frequency ratio and certainty coefficient

评价指标因子	分级	地质灾害频数	分级面积/km ²	频率比	CF	评价指标因子	分级	地质灾害频数	分级面积/km ²	频率比	CF
工程地质岩组	坚硬岩组	19	908.650	0.399	-0.374	地形曲率	<-0.2	54	842.320	1.225	0.194
	较坚硬岩组	12	433.841	0.528	-0.485		-0.2 ~ 0.2	41	804.509	0.974	-0.028
	较软岩组	24	354.624	1.293	0.239		≥0.2	35	836.681	0.799	-0.210
	软岩组	24	156.908	2.922	0.694	道路缓冲区/m	0 ~ 200	10	121.608	1.571	0.384
	软硬相间岩组	51	629.487	1.548	0.373		200 ~ 400	7	110.030	1.215	0.187
海拔/m	209 ~ 400	19	125.528	2.892	0.690		400 ~ 600	8	102.096	1.497	0.350
	400 ~ 600	35	630.016	1.061	0.061		600 ~ 800	8	96.148	1.590	0.391
	600 ~ 800	46	781.436	1.125	0.117		800 ~ 1 000	4	91.358	0.836	-0.206
	800 ~ 1 000	23	557.591	0.788	-0.221		≥1 000	93	1 962.270	0.905	-0.099
	1 000 ~ 1 200	5	329.869	0.290	-0.721	河流缓冲区/m	0 ~ 200	18	292.050	1.177	0.159
	1 200 ~ 1 408	2	59.068	0.647	-0.366		200 ~ 400	20	270.762	1.411	0.307
坡度/(°)	0 ~ 8	8	360.777	0.424	-0.589		400 ~ 600	16	276.547	1.105	0.112
	8 ~ 16	44	774.534	1.085	0.083		600 ~ 800	15	263.664	1.087	0.084
	16 ~ 24	47	726.415	1.236	0.202		800 ~ 1 000	13	249.447	0.996	-0.005
	24 ~ 32	24	407.503	1.125	0.117		≥1 000	48	1 131.039	0.811	-0.198
	32 ~ 40	5	150.886	0.633	-0.380	断层缓冲区/m	0 ~ 300	15	263.922	1.086	0.083
	≥40	2	63.395	0.603	-0.410		300 ~ 600	13	246.968	1.006	0.006
坡向	平面	0	9.052	0.000	-1.000		600 ~ 900	13	230.345	1.078	0.077
	北	17	249.994	1.299	0.243		900 ~ 1 200	10	202.012	0.946	-0.057
	东北	19	325.920	1.114	0.108		1 200 ~ 1 500	8	176.901	0.864	-0.143
	东	32	390.819	1.564	0.381		≥1 500	71	1 363.363	0.995	-0.005
	东南	14	338.893	0.789	-0.220	NDVI	-0.02 ~ 0.1	9	219.331	0.784	-0.225
	南	9	253.127	0.679	-0.333		0.1 ~ 0.2	25	459.478	1.039	0.040
	西南	21	287.807	1.394	0.298		0.2 ~ 0.3	61	1 008.861	1.155	0.142
	西	7	326.164	0.410	-0.603		0.3 ~ 0.4	34	757.656	0.857	-0.149
	西北	11	301.734	0.696	-0.315		0.4 ~ 0.54	1	38.183	0.500	-0.513

坡度定量描述地面的倾斜程度,它的大小对斜坡表面径流量、斜坡表体土层剩余下滑力等都影响巨大,一定程度上影响着地质灾害发育的规模与强度^[20],研究区坡度最高达 75°,以 8°等间距分为 5 类,大于 40°为 1 类,共计 6 个类别。

不同坡向与岩体结构面的组合关系差异导致地质灾害发育的程度不同^[21],将研究区坡向分为 9 个类别。

地形曲率是局部地形曲面在各个截面方向上形状、凹凸变化的反映,其值为正时表明边坡是凸面坡,为 0 时表明为平面坡,为负时表明边坡为凹面坡^[22],由于研究区平面坡(曲率等于 0)面积极小,所以用曲率为 -0.2 ~ 0.2 代表近似平面坡,将其分为凹坡(<-0.2),近似平面坡(-0.2 ~ 0.2),凸坡(≥0.2)3 类。

归一化植被指数(NDVI)是遥感影像中近红外波段(NIR)的反射值和红光波段(R)的反射值的差与两者之和的比值,NDVI 值的范围为 [-1, 1],负值表示对可见光高反射,地面为江、河、湖泊等水体或有雪覆盖,

0 表示 NIR 和 R 近似相等,为岩石或裸地等,正值表示有植被覆盖,数值越大表示植被覆盖率越高^[23],研究区 NDVI 在 -0.02 ~ 0.54 之间,将其分为 5 个类别。

岩土体是地质灾害发生的物质来源基础,岩石类型、坚硬程度决定岩土体的力学强度、抗风化能力和抗侵蚀能力^[19],研究区工程地质岩组分为 5 类,分别为坚硬岩组、较坚硬岩组、较软岩组、软岩组和软硬相间岩组。

地质构造影响着岩体结构及其组合特征,对山区地质灾害发育起着重要的控制作用^[24],利用 ArcGIS 领域分析功能将研究区断层以 300 m 等距离提取缓冲区,得到 6 个类别。

道路修建开挖坡体改变原有地质环境,破坏岩土体结构^[25],以 200 m 等距离提取道路缓冲区,得到 6 个类别。

河流的侵蚀、侧蚀作用影响地质灾害的发育、且河流是控制坡面侵蚀的重要原因^[26],将研究区河流 200 m

等距离提取缓冲区,得到 6 个类别。

通过对因子类别进行分类后,利用式(1)对各评价因子类别进行频率比计算,当频率比大于 1 时,说明该因子类别对地质灾害发育具有促进作用,如表 3 所示。

表 3 频率比大于 1 的属性区间

Table 3 Attribute intervals with frequency ratio greater than 1

评价因子	海拔/m	坡度/(°)	坡向	地形曲率	NDVI	工程地质岩组	断层缓冲区/m	道路缓冲区/m	河流缓冲区/m
频率比大于 1 类别	209 ~ 400	8 ~ 16	北	<-0.2	0.1 ~ 0.2	较软质岩	0 ~ 300	0 ~ 200	0 ~ 200
	400 ~ 600	16 ~ 24	东北		0.2 ~ 0.3	软质岩	300 ~ 600	200 ~ 400	200 ~ 400
	600 ~ 800	24 ~ 32	东			软硬相间质岩	600 ~ 900	400 ~ 600	400 ~ 600
			西南					600 ~ 800	600 ~ 800

2.5 逻辑回归分析

利用 ArcGIS 以 500 m 距离制作灾点缓冲区,在 500 m 以外提取随机点 130 个非地质灾害点,与灾害训练样本组成训练集共计 260 个点。将 9 个评价指标因子的属性提取至训练集样本,导出后替换成评价因子的 CF 值导入 SPSS 软件中进行逻辑回归运算,各评价因子分类级别的 CF 值作为自变量,是否发生滑坡灾害

作为因变量(0 表示未发生地质灾害,1 值表示已发生地质灾害),LR-CF 模型的逻辑回归运算结果如表 4 所示,其计算得到的所有评价指标因子的逻辑回归系数均为正数,表明所有评价指标因子对模型均起正向作用。在逻辑回归计算过程中,显著性 $sig \leq 0.05$ 则该回归系数有效,评价指标因子具有统计意义^[22]。

表 4 逻辑回归系数和显著性

Table 4 Logistic regression coefficient and significance

评价因子	海拔	坡度	坡向	地形曲率	NDVI	工程地质岩组	断层缓冲区	道路缓冲区	河流缓冲区	常量
β	3.844	2.495	3.418	4.085	1.198	4.377	3.218	0.734	2.728	2.604
sig	0.000	0.003	0.000	0.019	0.023	0.000	0.027	0.036	0.130	0.000

3 易发性分区与评价

3.1 CF、CF-LR 分区结果

基于 GIS 平台,将评价指标因子图层自定义添加属性字段,对应输入计算的确定性系数,利用栅格叠加得到确定性系数模型评价图,利用自然断点法将沿河县地质灾害易发性区划为低易发区、中易发区、高易发区、极高易发区,其面积(频率比)分别为 361.265 km²(0.159)、784.269 km²(0.414)、895.197 km²(1.003)、442.779 km²(2.718),如图 3(a)和表 5 所示。利用栅格计算器按照公式(3)计算得到 CF-LR 模型地质灾害发生概率图,利用自然断点法将其分为低易发区、中易发区、高易发区、极高易发区,其面积(频率比)分别为 671.252 km²(0.142)、467.758 km²(0.327)、927.527 km²(0.741)、507.145 km²(3.051),如图 3(b)和表 5 所示。CF 模型和 CF-LR 模型地质灾害易发性等级的频率比值均从极低易发区到极高易发区明显增大,表明有效评价了研究区地质灾害易发性。CF 模型和 CF-LR 模型计算的极高易发区频率比值分别占总频率比值为 63.3% 和 71.6%。说明 CF-LR 模型比单一 CF 模型评价

精度更高。

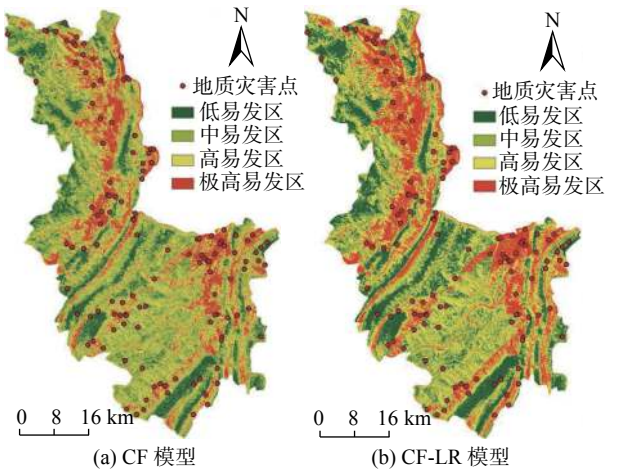


图 3 地质灾害易发性区划

Fig. 3 Division of geological hazard susceptibility

3.2 精度验证

本文使用 ROC 曲线来表示拟合数据和实测数据之间的关系,评价成功率或有效性以 AUC 值来表示(图 4)。曲线中纵轴为敏感度,即实际地质灾害数量百分比累加

表 5 地质灾害易发性评价频率比值

Table 5 Frequency ratio of geological hazard susceptibility evaluation

评价模型	易发性等级	分级面积 /km ²	面积占比	灾害点频数	灾害占比	频率比
CF	低易发区	361.265	0.145	3	0.023	0.159
	中易发区	784.269	0.316	17	0.131	0.414
	高易发区	895.197	0.360	47	0.362	1.003
	极高易发区	442.779	0.178	63	0.485	2.718
CF-LR	低易发区	671.252	0.270	5	0.038	0.142
	中易发区	467.758	0.188	8	0.062	0.327
	高易发区	927.527	0.373	36	0.277	0.741
	极高易发区	507.145	0.204	81	0.623	3.051

量,横轴为特异性,即易发性面积百分比累积量,ROC 曲线下面积 *AUC* 值越大表明模型评估效果越好^[27-28]。CF 模型和 CF-LR 模型 *AUC* 值分别为 0.722 和 0.818,说明 CF 和 CF-LR 评价模型均能够较为客观准确地对沿河县地质灾害易发性进行评价,且 CF 法进行逻辑回归后的 CF-LR 模型评价精度更高。

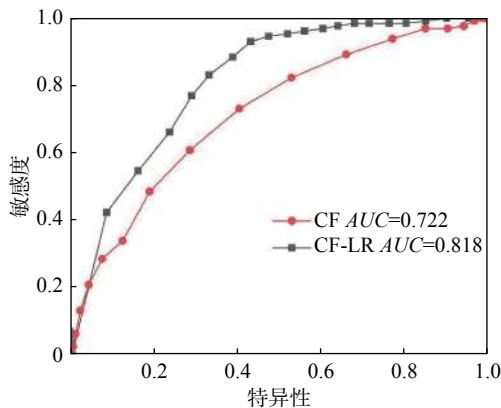


图 4 ROC 曲线

Fig. 4 ROC curve

4 结论

(1)文中从选取的 9 个地质灾害影响因素的各类别的频率比值可以看出,在海拔 209~800 m,坡度 8°~32°,坡向朝向北、东北、东、西南,地形曲率小于-0.2,NDVI 为 0.1~0.3,较软质岩、软质岩、软硬相间质岩,距断层 900 m、道路和河流 800 m 以内对沿河县地质灾害发育具有促进作用。

(2)CF 模型评价低易发区、中易发区、高易发区、极高易发区,其面积(频率比)分别为 361.265 km²(0.159)、784.269 km²(0.414)、895.197 km²(1.003)、442.779 km²(2.718);CF-LR 模型评价低易发区、中易发

区、高易发区、极高易发区,其面积(频率比)分别为 671.252 km²(0.142)、467.758 km²(0.327)、927.527 km²(0.741)、507.145 km²(3.051)。CF 模型和 CF-LR 模型地质灾害易发性等级的频率比值从极低易发区到极高易发区明显增大,均有效评价了研究区地质灾害易发性。CF 模型和 CF-LR 模型计算的极高易发区频率比值分别占总频率比值为 63.3% 和 71.6%。

(3)CF 模型和 CF-LR 模型 *AUC* 值分别为 0.722 和 0.818,均能够较为客观准确地对沿河县地质灾害易发性进行评价。但单一 CF 法没有考虑评价因素对地质灾害易发性的影响差异,在此基础上,LR 法用线性回归来表示评价因子之间复杂非线性关系,考虑了评价因子的权重,使得 *AUC* 值提高了 0.096,CF-LR 模型具有更高的评价精度。

由于研究区的地质灾害研究样本偏少,不为理想研究实验区,将影响评价效果和精度,对地质灾害易发性评价的精度还需进一步探索。

参考文献 (References) :

[1] 倪化勇,王德伟,陈绪钰,等.四川雅江县城地质灾害发育特征与稳定性评价[J].现代地质,2015,29(2):474-480. [NI Huayong, WANG Dewei, CHEN Xuyu, et al. Formation characteristics and stability assessment of geological hazards in Yajiang City, Sichuan Province[J]. Geoscience, 2015,29(2):474-480. (in Chinese with English abstract)]

[2] 牛全福.基于GIS的地质灾害风险评估方法研究:以“4·14”玉树地震为例[D].兰州:兰州大学,2011. [NIU Quanfu. Study on the method of geological disaster risk assessment based on GIS: A case study in “4.14” Yushu earthquake[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011. (in Chinese with English abstract)]

[3] 王哲,易发成.基于层次分析法的绵阳市地质灾害易发性评价[J].水文地质工程地质,2007,34(3):93-98. [WANG Zhe, YI Facheng. Evaluation of geological hazard probability of occurrence based on analytical hierarchy process in Mianyang City[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007,34(3):93-98. (in Chinese with English abstract)]

[4] 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 Lei, WU Junping, ZHAO Bingxue, 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. (in Chinese with English abstract)]

[5] 李益敏,李驭豪,赵志芳.基于确定性系数模型的泸水市泥

- 石流易发性评价[J]. 水土保持研究, 2019, 26(4): 336–342. [LI Yimin, LI Yuhao, ZHAO Zhifang. Assessment on susceptibility of debris flow in Lushui based on the certain factor model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(4): 336–342. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 胡燕,李德营,孟颂颂,等.基于证据权法的巴东县城滑坡灾害易发性评价[J]. 地质科技通报, 2020, 39(3): 187–194. [HU Yan, LI Deying, MENG Songsong, et al. Landslide susceptibility evaluation in Badong County based on weights of evidence method[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(3): 187–194. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 任敬,范宣梅,赵程,等.贵州省都匀市滑坡易发性评价研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(5): 165–172. [REN Jing, FAN Xuanmei, ZHAO Cheng, et al. Evaluation of the landslide vulnerability in Duyun of Guizhou Province[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(5): 165–172. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 牛瑞卿,彭令,叶润青,等.基于粗糙集的支持向量机滑坡易发性评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(2): 430–439. [NIU Ruiqing, PENG Ling, YE Runqing, et al. Landslide susceptibility assessment based on rough sets and support vector machine[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(2): 430–439. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 杨永刚,殷坤龙,赵海燕,等.基于C5.0决策树-快速聚类模型的万州区库岸段乡镇滑坡易发性区划[J]. 地质科技情报, 2019, 38(6): 189–197. [YANG Yonggang, YIN Kunlong, ZHAO Haiyan, et al. Landslide susceptibility evaluation for township units of bank section in Wanzhou district based on C5.0 decision tree and K-means cluster model[J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(6): 189–197. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 刘睿,施妮嫻,孙德亮,等.基于GIS与随机森林的巫山县滑坡易发性区划[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2020, 37(3): 86–96. [LIU Rui, SHI Shuxian, SUN Deliang, et al. Based on GIS and random forest model for landslide susceptibility mapping in Wushan County[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2020, 37(3): 86–96. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 周超,殷坤龙,曹颖,等.基于集成学习与径向基神经网络耦合模型的三峡库区滑坡易发性评价[J]. 地球科学, 2020, 45(6): 1865–1876. [ZHOU Chao, YIN Kunlong, CAO Ying, et al. Landslide susceptibility assessment by applying the coupling method of radial basis neural network and adaboost: a case study from the Three Gorges reservoir area[J]. Earth Science, 2020, 45(6): 1865–1876. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 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 Guang, XU Peihua, CAO Chen, 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. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 李文彦,王喜乐.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, 2020, 29(4): 213–220. [LI Wenyan, WANG Xile. Application and comparison of frequency ratio and information value model for evaluating landslide susceptibility of loess gully region[J]. Journal of Natural Disasters, 2020, 29(4): 213–220. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 黄发明,叶舟,姚池,等.滑坡易发性预测不确定性:环境因子不同属性区间划分和不同数据驱动模型的影响[J]. 地球科学, 2020, 45(12): 4535–4549. [HUANG Faming, YE Zhou, YAO Chi, et al. Uncertainties of landslide susceptibility prediction: Different attribute interval divisions of environmental factors and different data-based models[J]. Earth Science, 2020, 45(12): 4535–4549. (in Chinese with English abstract)]
- [15] MERSHA T, METEN M. GIS-based landslide susceptibility mapping and assessment using bivariate statistical methods in Simada area, northwestern Ethiopia[J]. [Geoenvironmental Disasters](#), 2020, 7: 20.
- [16] 马思远,许冲,田颖颖,等.基于逻辑回归模型的九寨沟地震滑坡危险性评估[J]. 地震地质, 2019, 41(1): 162–177. [MA Siyuan, XU Chong, TIAN Yingying, et al. Application of logistic regression model for hazard assessment of earthquake-triggered landslides: A case study of 2017 Jiuzhaigou(China) $M_s 7.0$ event[J]. [Seismology and Geology](#), 2019, 41(1): 162–177. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 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 Jin, GUO Jing, WANG Weidong, 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. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 邓念东,石辉,文强,等.信息量支持下的随机森林模型的崩塌易发性评价[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(6): 2210–2217. [DENG Niandong, SHI Hui, WEN Qiang, et al. Collapse susceptibility evaluation of random forest model supported by information value model[J]. [Science Technology and Engineering](#), 2021, 21(6): 2210–2217. (in Chinese with English abstract)]

- [19] 蒋德明, 李益敏, 鲍华姝. 泸水县滑坡孕灾环境因素敏感性研究 [J]. 自然灾害学报, 2016, 25(4): 109–119. [JIANG Deming, LI Yimin, BAO Huashu. Study on sensitivity in disaster-pregnant environmental factors of landslide in Lushui County [J]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25(4): 109–119. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 吴森, 李虎杰, 陈国辉, 等. 基于贡献率权重法的区域滑坡影响因子敏感性分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(1): 26–31. [WU Sen, LI Hujie, CHEN Guohui, et al. Regional landslides influence factors sensitivity analysis based on contributing weight method [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(1): 26–31. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 王佳佳, 殷坤龙, 肖莉丽. 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, 2014, 33(4): 797–808. [WANG Jiajia, YIN Kunlong, XIAO Lili. Landslide susceptibility assessment based on GIS and weighted information value: A case study of Wanzhou district, Three Gorges Reservoir [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(4): 797–808. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 张圻恺, 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 Qikai, LING Sixiang, LI Xiaoning, 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. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 孙小凡, 张鹏, 党超. 基于GIS的城市滑坡灾害易发性评价: 以湖北省宜昌市城区为例 [J]. 水土保持通报, 2018, 38(6): 304–309. [SUN Xiaofan, ZHANG Peng, DANG Chao. Landslide proneness evaluation based on GIS platform in urban area of Yichang City, Hubei Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6): 304–309. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 倪树斌, 马超, 杨海龙, 等. 北京山区崩塌、滑坡、泥石流灾害空间分布及其敏感性分析 [J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(6): 81–91. [NI Shubin, MA Chao, YANG Hailong, et al. Spatial distribution and susceptibility analysis of avalanche, landslide and debris flow in Beijing Mountain region [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(6): 81–91. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 杜晓晨, 陈莉, 陈廷芳. 基于GIS的凉山州德昌县滑坡危险性评价 [J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(5): 1206–1215. [DU Xiaochen, CHEN Li, CHEN Tingfang. Hazard assessment of landslide in Dechang County of Liangshan state based on GIS [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(5): 1206–1215. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 梁丽萍, 刘延国, 唐自豪, 等. 基于加权信息量的地质灾害易发性评价——以四川省泸定县为例 [J]. 水土保持通报, 2019, 39(6): 176–182. [LIANG Liping, LIU Yanguo, TANG Zihao, et al. Geologic hazards susceptibility assessment based on weighted information value: A case study in Luding County, Sichuan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(6): 176–182. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 杜谦, 范文, 李凯, 等. 二元Logistic回归和信息量模型在地质灾害分区中的应用 [J]. 灾害学, 2017, 32(2): 220–226. [DU Qian, FAN Wen, LI Kai, et al. Geohazard susceptibility assessment by using binary logical regression and information value model [J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(2): 220–226. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 栗泽桐, 王涛, 周杨, 等. 基于信息量、逻辑回归及其耦合模型的滑坡易发性评估研究——以青海沙塘川流域为例 [J]. 现代地质, 2019, 33(1): 235–245. [LI Zetong, WANG Tao, ZHOU Yang, et al. Landslide susceptibility assessment based on information value model, logistic regression model and their integrated model: A case in Shatang River Basin, Qinghai Province [J]. Geoscience, 2019, 33(1): 235–245. (in Chinese with English abstract)]