

罗平县崩滑易发性评价模型对比研究

杨得虎¹, 朱杰勇¹, 刘帅¹, 马博¹, 代旭升²

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093; 2. 云南省地质环境监测院, 昆明 650216)

摘要: 准确的地质灾害易发性分区评价结果, 可为建立地质灾害监测预警系统及处理机制提供参考。依据崩滑地质灾害形成条件选取 10 个评价因子构建评价指标体系, 基于共线性诊断和相关性分析检验评价因子以保证其相互独立。分别采用信息量模型(ICM)、归一化频率比模型(NFR)以及与逻辑回归(LR)耦合的信息量-逻辑回归(ICM-LR)耦合模型和归一化频率比-逻辑回归(NFR-LR)耦合模型对罗平县崩滑地质灾害进行易发性评价, 并将评价模型结果划分为低、中、高和极高 4 个等级。采用 ROC 曲线对评价结果进行精度检验, 其 AUC 值分别为 0.820、0.796、0.882 和 0.840。得出 ICM-LR 模型的精度最高, 且极高易发区主要分布在砂岩、碳酸盐岩组区域和水系延展区域。其低、中、高和极高的面积(分级比)分别为 771.1 km² (25.55%)、836.6 km² (27.73%)、864.36 km² (28.64%) 和 545.94 km² (18.08%)。易发性分区结果与研究区崩滑地质灾害分布情况相符合, 可为快速建立评价指标体系和区域崩滑易发性评价模型提供参考依据。

关键词: 崩滑地质灾害; 信息量模型; 归一化频率比模型; logistic 回归模型; 易发性评价
中图分类号: P694; P56 **文献标识码:** A

COMPARATIVE STUDY ON EVALUATION MODELS OF LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY IN LUOPING COUNTY, YUNNAN PROVINCE

YANG De-hu¹, ZHU Jie-yong¹, LIU Shuai¹, MA Bo¹, DAI Xu-sheng²

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
2. Yunnan Institute of Geological Environment Monitoring, Kunming 650216, China)

Abstract: Accurate regional evaluation results of geological hazard susceptibility can provide reference for the establishment of geological hazard monitoring and early warning system and treatment mechanism. According to the formation conditions of geological disasters, ten evaluation factors were selected to construct an evaluation index system, and the evaluation factors were tested based on collinearity diagnosis and correlation analysis to ensure their independence. The susceptibility of landslide geological disasters in Luoping County was evaluated by information information model (ICM), normalized frequency ratio model (NFR), information information-logistic regression (ICM-LR) coupled with logistic regression (LR) and normalized frequency ratio logistic regression (NFR-LR) coupled model, the results of the evaluation model were divided into four grades: low, medium, high and extremely high. ROC curve was used to test the accuracy of the evaluation results, and the AUC values were 0.820, 0.796, 0.882 and 0.840, respectively. The results show that the ICM-LR model has the highest accuracy, and the highly susceptible areas are mainly distributed in the sandstone, carbonate formation area and drainage extension area. The low,

middle, high and very high area (grading ratio) are 771.1 km, respectively² (25.55%), 836.6 km² (27.73%), 864.36 km² (28.64%) and 545.94 km² (18.08%). The results of susceptibility zoning are consistent with the distribution of landslide geological hazards in the study area, which can provide a reference for the rapid establishment of evaluation index system and regional landslide susceptibility evaluation model.

Key words: landslide geological disaster; information content method; normalized frequency ratio; logistic regression; susceptibility assessment

崩滑地质灾害的广泛发育威胁着人们的生命财产安全,其灾害的发生受自然因素和诱发因素影响^[1]。

随着地理信息系统(GIS)的不断发展,基于GIS技术的地质灾害易发性评价已成为评估的有效工具和研究领域的热点^[2]。本文选取罗平县作为研究区建立崩滑易发评估模型,对今后城市的发展和防灾减灾有重要意义^[3],也可为岩溶地区地质灾害易发性评价提供一定的依据。

目前,地质灾害易发性评价主要为定性、定量两种评价方法^[4]。随着技术的不断发展,机器评价方法也逐渐得到普遍运用。定性分析是通过对成因机制的全面认识,基于专家经验和知识确定评价因子权重,定量分析方法通过数学或数值算法估计滑坡易感性^[5]。定性分析方法主要有层次分析法^[6-8],定量分析方法主要有频率比法^[9,10]、信息量法^[11,12],机器学习方法有 logistic 回归法、随机森林法、K 近邻、支持向量机和神经网络等^[13-15]。通过对国内外学者研究进行分析,单一模型的评价结果精度较低,现多采用耦合模型和机器学习方法进行评价。吉日伍呷等^[15]通过 logistic 回归、K 近邻、朴素贝叶斯和随机森林算法对鲁甸地震进行地震滑坡易发性评价;樊芷吟等^[16]通过信息量模型和 Logistic 回归耦合模型对汶川地震进行易发性评价;张晓东^[17]通过层次分析法、支持向量机和地理加权回归等模型对宁夏盐池县地灾进行易发性评价。从以上研究可以发现,单一评价模型在因子分类级计算时主观因素较大,其评价结果存在一定的缺陷,现采用多种耦合模型和机器模型对地质灾害进行评价成为新的探索方法。基于耦合模型和机器模型的评价方法可以降低主观性因素的影响,解决评价因子之间的数据整合问题,使评价结果更加精确和可靠。

本文以罗平县作为研究区域,根据崩滑地质灾害的形成条件选取基础地质、地形地貌、地质构造、水文环境和外界触发等 5 类评价指标。采用定量评价方法信息量法和频率比法计算评价因子分类分级权重,再选取逻辑回归法对评价因子进行权重计算,

以此构建信息量模型(ICM)、频率比模型(NFR)和以及与逻辑回归(LR)耦合的信息量-逻辑回归(ICM-LR)耦合模型和归一化频率比-逻辑回归(NFR-LR)耦合模型对罗平县崩滑地质灾害进行易发性评价,并对评价结果进行精度检验分析,得出精度最高的评价模型,可为快速建立评价指标体系和区域崩滑地质灾害监测预警系统及防灾减灾提供参考。

1 崩滑易发性评价模型

1.1 信息量模型(ICM)

信息量模型(information content method, ICM)是将崩滑历史数据进行统计分析,将影响崩滑的因子分类级得实测值转化为信息量值,来衡量崩滑的易发性^[18]。首先计算所选评价因子分类级的信息量值,再对各因子信息量值进行总和,作为崩滑易发性的综合指标^[19]。单因子信息量计算公式:

$$I = \ln \frac{N_j/N}{S_j/S} \quad (1)$$

式中, I 为评价因子 j 下的信息量; N_j 为评价因子 j 内发生的崩滑数; N 为研究区崩滑总数; S_j 为评价因子 j 下所占栅格数; S 为研究区栅格总数。

根据选取的评价因子进行分类级计算,各因子分类级的信息量值决定地质灾害发生的可能性,将各分类级因子叠加计算的总信息量计算公式为:

$$I_j = \sum_{i=1}^{i=n} \ln \frac{N_j/N}{S_j/S} \quad (2)$$

式中, I_j 为总信息量,为崩滑地质灾害易发性指数; I_j 值越大且为正值则表示该单元内有利于崩滑发生。

1.2 归一化频率比模型(NFR)

频率比模型(frequency ratio, FR)是将崩滑点分布情况与评价因子分类级的空间关系进行分析。推导出崩滑发生概率与评价因子之间的关系,从而反应出各分类级对崩滑发生的影响程度,FR 值越大则表示对崩滑发育的贡献越大^[20]。其频率比计

算公式如下:

$$FR(x_{ij}) = \frac{z_{ij}/Z}{s_{ij}/S} \quad (3)$$

式中, $FR(x_{ij})$ 为频率比值; z_{ij} 为第 i 个评价因子 j 类发生崩滑的个数; Z 为研究区内崩滑的总数; s_{ij} 为第 i 个评价因子 j 类区间的面积; S 为研究区总面积。

归一化频率比模型(normalized frequency ratio, NFR)是将各频率比值做归一化处理,其公式如下:

$$NFR(X_{ij}) = x_{ij} / \sum_{j=1}^{j=n} x_{ij} \quad (4)$$

式中, $NFR(X_{ij})$ 为归一化频率比值。

1.3 逻辑回归模型(LR)

逻辑回归模型(logistic regression, LR)是一种研究二分类因变量常用的统计方法^[21]。通过研究崩滑易发性与评价因子之间的关系,预测崩滑发生的概率。其中自变量为评价因子指标值(x_1, x_2, \dots, x_n),是否发生地质灾害作为因变量(1和0分别代表崩滑点和非崩滑点)。Logistic回归函数如下:

$$Z = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \quad (5)$$

$$P(y = 1) = \frac{1}{1 + e^{-Z}} \quad (6)$$

式中, α 为常数项; x_1, x_2, \dots, x_n 为自变量; $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ 为回归系数; Z 为崩滑发生的可能性与各评价因子之间的关系; P 为崩滑灾害发生的概率,范围 0~1。

1.4 耦合模型

将 ICM 模型和 NFR 模型分别与 LR 模型进行耦合,可解决单一模型因子分类级的数据整合问题和降低人为主观性因素影响问题。首先对所选因子进行共线性诊断分析,保证评价因子的独立性。将 ICM 模型和 NFR 模型计算得出的各评价因子分类级的值作为 LR 模型的自变量,建立回归方程,得出各评价因子的回归系数,再计算评价单元的崩滑概率,以此为依据分别建立 ICM-LR 模型和 NFR-LR 模型对研究区进行崩滑易发性评价。

2 研究区概况及数据来源

2.1 研究区概况

研究区(罗平县)位于云南省曲靖市东部。地理坐标为 $24^{\circ}31' \sim 25^{\circ}25' N$, $103^{\circ}57' \sim 104^{\circ}43' E$,东西最大横距 75 km,南北最大纵距 99 km,全县国土面积 3 018 km²(图 1)。研究区西部和北部属于岩溶盆地地貌和岩溶低中山地貌,中部属岩溶断陷湖

形盆地,东部和南部受九龙河和南盘江流域侵蚀切割,形成峰林洼地和岩溶中山地貌。区内地层出露主要有古生界泥盆系(D)浅灰、深灰色中厚层状灰岩、泥灰岩、泥质白云岩;石炭系(C)深灰、灰黑色块状灰岩、白云质灰岩、泥质灰岩;古生界二叠系(P)灰、深灰色厚层块状、生物碎屑灰岩,结晶灰岩夹虎斑状灰岩及白云岩;中生界三叠系(T)上统为黄褐色粉砂岩、泥质粉砂岩及细砂岩,中统为深灰色灰岩夹泥质灰岩,中上部为黄色白云岩,下统为紫红色含长石粉细砂夹泥灰岩页岩及含铜页岩;新生界第三系(N)褐黄紫红色砾岩、细砂岩及粉砂质泥岩,底部砾岩;新生界第四系(Q)细砂、砂砾石及砂质粘土。区内位于云南山字形构造的东翼。主要构造体系和构造型式有北东向构造、新华夏系构造、网状构造等。主要断裂有:金鸡山断裂、长家湾断裂和腊庄断裂等。其次为新华夏系构造,多发育在褶皱边缘,密集成束,规模大、延伸远,呈舒缓波状,主要分布在西部及南盘江两岸。主要断裂有:洒土革断裂、大水塘断裂、罗格断裂等。

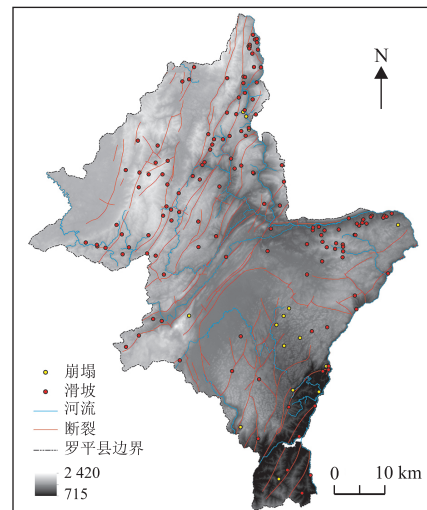


图1 罗平县崩滑分布图

2.2 数据来源

本研究数据主要包括:(1)12.5 m 分辨率数字高程模型(DEM),用于提取坡度、坡向、起伏度、曲率等评价因子;(2)1:5万地质图,用于提取岩性、断裂等因子;(3)1:5万全国基础地理数据库,用于提取水系、道路等评价因子;(4)历史崩滑数据:主要来自1:5万全区调查和1:1万重点区罗平县地质灾害详细调查资料以及野外补充资料;(5)地质灾害点的基础数据来自于地矿眉山工程勘察院的详细调查结果,共包含154个崩滑灾害点的数据,滑坡136处,崩塌18处。

3 评价因子分析

本文在研究区资料收集和野外调查的基础上,选取基础地质(工程岩组、断层缓冲距)、地形地貌(坡度、坡向、高程、起伏度、曲率、地貌类型)、水文环境(河流缓冲距)、外界触发(降雨量)等 5 大类中的 10 个评价因子进行分析。根据 12.5 m×12.5 m 栅格单元作为易发性评价的制图单元,通过对研究区评价因子进行归纳分析,将崩滑灾害点与各评价因子进行空间关联分析,通过重分类得到各崩滑点在各评价因子的分布情况。对各评价因子的分类级处理如图 2 和表 1 所示。

3.1 基础地质因子

选取工程地质岩组、断裂缓冲距作为崩滑易发性评价的地质类因子。工程地质岩组是崩滑发育形成的重要内因,不同岩组的力学参数存在较大差异,从而影响坡体的稳定性^[22]。区域内崩滑点主要分布在层状结构坚硬长石石英砂岩岩组,中厚层状坚硬灰岩、白云岩岩组,其 FR 值大于 1,在层状结构坚硬长石石英砂岩岩组中崩滑点分布相对密集。地质构造中的断裂多发育在褶皱边缘,且密集度、规模大、延伸远,对两侧岩层强烈挤压扭曲牵引,对地质灾害的发育起控制作用。将研究区断裂按 600 m 等距离分为 6 类缓冲区,断裂缓冲距小于 600 m 以

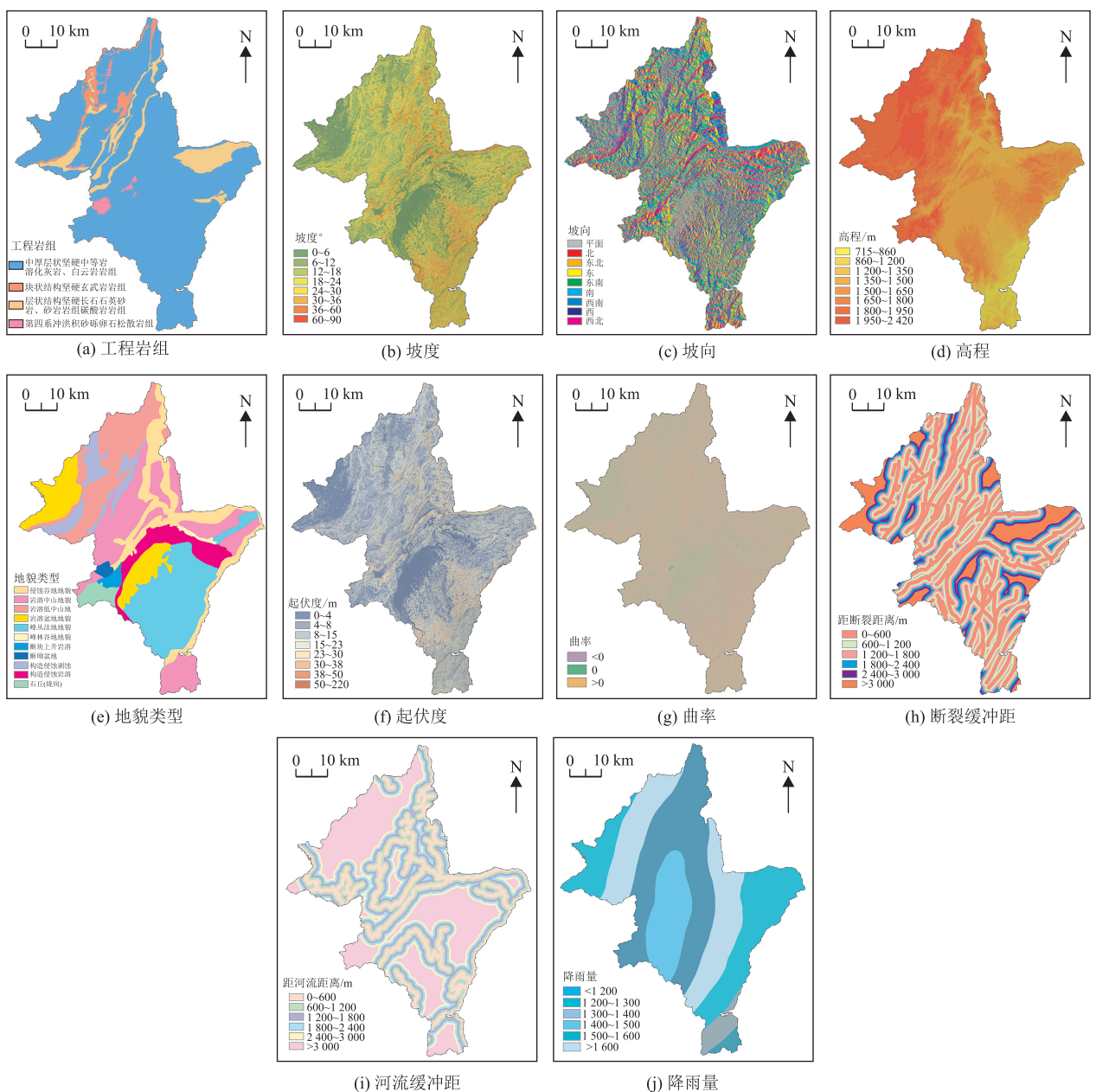


图 2 评价因子分类级图

表 1 评价因子分类级计算表

| 评价因子 | 因子分级 | 崩滑数量/处 | 栅格数量/个 | ICM | FR | NFR |
|---------|----------------|-----------|------------|-----------|-------|------|
| 工程岩组 | 第四系冲洪积砂砾卵石松散岩组 | 2 | 205 041 | 0.13 | 1.14 | 0.19 |
| | 层状结构坚硬长石英砂岩岩组 | 50 | 1 817 099 | 1.17 | 3.23 | 0.54 |
| | 中厚层状坚硬灰岩、白云岩岩组 | 97 | 15 380 267 | -0.30 | 1.74 | 0.12 |
| | 块状结构坚硬玄武岩岩组 | 5 | 661 729 | -0.12 | 0.89 | 0.15 |
| 坡度/° | 0~6 | 7 | 3 162 705 | -1.35 | 0.26 | 0.04 |
| | 6~12 | 33 | 3 790 902 | 0.02 | 1.02 | 0.15 |
| | 12~18 | 50 | 3 707 425 | 0.46 | 1.58 | 0.24 |
| | 18~24 | 31 | 3 008 341 | 0.19 | 1.21 | 0.18 |
| | 24~30 | 17 | 2 054 943 | -0.03 | 0.97 | 0.14 |
| | 30~36 | 5 | 1 186 737 | -0.71 | 0.49 | 0.07 |
| | 36~60 | 11 | 1 091 533 | 0.17 | 1.18 | 0.18 |
| | 60~90 | 0 | 33 429 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 坡向 | 北 | 16 | 2 219 489 | -0.17 | 0.84 | 0.11 |
| | 东北 | 15 | 1 920 437 | -0.09 | 0.91 | 0.12 |
| | 东 | 22 | 2 493 207 | 0.03 | 1.03 | 0.13 |
| | 东南 | 31 | 2 704 414 | 0.29 | 1.34 | 0.17 |
| | 南 | 20 | 2 304 895 | 0.02 | 1.02 | 0.13 |
| | 西南 | 13 | 1 974 899 | -0.26 | 0.77 | 0.10 |
| | 西 | 17 | 2 138 397 | -0.07 | 0.93 | 0.12 |
| | 西北 | 20 | 2 280 277 | 0.03 | 1.03 | 0.13 |
| 高程,m | 715~860 | 8 | 350 496 | 0.98 | 2.68 | 0.27 |
| | 860~1 200 | 8 | 1 149 066 | -0.20 | 0.82 | 0.08 |
| | 1 200~1 350 | 14 | 1 312 775 | 0.22 | 1.25 | 0.13 |
| | 1 350~1 500 | 26 | 3 226 787 | -0.06 | 0.95 | 0.09 |
| | 1 500~1 650 | 26 | 3 079 467 | -0.01 | 0.99 | 0.10 |
| | 1 650~1 800 | 29 | 2 366 839 | 0.36 | 1.44 | 0.14 |
| | 1 800~1 950 | 30 | 4 047 954 | -0.14 | 0.87 | 0.09 |
| | 1 950~2 420 | 13 | 2 530 843 | -0.51 | 0.60 | 0.06 |
| 地貌类型 | 岩溶低中山地貌 | 22 | 2 824 754 | -0.09 | 0.91 | 0.10 |
| | 构造侵蚀剥蚀地貌 | 18 | 1 200 919 | 0.56 | 1.76 | 0.19 |
| | 岩溶中山地貌 | 40 | 3 833 292 | 0.20 | 1.22 | 0.13 |
| | 岩溶盆地地貌 | 0 | 1 948 623 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | 峰林谷地地貌 | 0 | 91 609 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | 峰丛洼地地貌 | 16 | 3 752 094 | -0.69 | 0.50 | 0.05 |
| | 断块上升岩溶地貌 | 1 | 177 099 | -0.41 | 0.66 | 0.07 |
| | 断拗盆地 | 1 | 116 724 | 0.00 | 1.00 | 0.11 |
| | 石丘(垅岗) | 2 | 390 319 | -0.51 | 0.60 | 0.07 |
| | 侵蚀谷地地貌 | 52 | 2 561 268 | 0.87 | 2.38 | 0.26 |
| | 构造侵蚀岩溶地貌 | 2 | 1 167 462 | -1.60 | 0.20 | 0.02 |
| | 起伏度/m | 0~4 | 13 | 4 183 395 | -1.01 | 0.37 |
| 4~8 | | 40 | 4 306 129 | 0.09 | 1.09 | 0.12 |
| 8~15 | | 74 | 5 697 380 | 0.42 | 1.53 | 0.17 |
| 15~23 | | 17 | 2 685 735 | -0.30 | 0.74 | 0.08 |
| 23~30 | | 2 | 750 479 | -1.16 | 0.31 | 0.04 |
| 30~38 | | 7 | 294 073 | 1.03 | 2.80 | 0.32 |
| 38~50 | | 0 | 128 414 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 曲率 | 50~220 | 1 | 57 698 | 0.71 | 2.04 | 0.23 |
| | <0 | 70 | 7 431 512 | 0.10 | 1.10 | 0.39 |
| | 0 | 20 | 3 330 755 | -0.35 | 0.70 | 0.25 |
| 断裂缓冲距/m | >0 | 64 | 7 301 960 | 0.03 | 1.03 | 0.36 |
| | 0~600 | 70 | 6 123 046 | 0.29 | 1.34 | 0.24 |
| | 600~1 200 | 26 | 4 659 019 | -0.42 | 0.65 | 0.12 |
| | 1 200~1 800 | 20 | 2 742 459 | -0.16 | 0.86 | 0.15 |
| | 1 800~2 400 | 8 | 1 599 989 | -0.53 | 0.59 | 0.11 |
| | 2 400~3 000 | 5 | 1 028 561 | -0.56 | 0.57 | 0.10 |
| 河流缓冲距/m | >3 000 | 25 | 1 911 080 | 0.43 | 1.53 | 0.28 |
| | 0~600 | 57 | 3 404 716 | 0.67 | 1.96 | 0.32 |
| | 600~1 200 | 32 | 2 816 455 | 0.29 | 1.33 | 0.22 |
| | 1 200~1 800 | 21 | 2 280 631 | 0.08 | 1.08 | 0.18 |
| | 1 800~2 400 | 14 | 1 898 512 | -0.15 | 0.87 | 0.14 |
| | 2 400~3 000 | 6 | 1 564 553 | -0.80 | 0.45 | 0.07 |
| 降雨量/mm | >3 000 | 24 | 6 099 326 | -0.77 | 0.46 | 0.08 |
| | <1 200 | 2 | 217 210 | 0.08 | 1.33 | 0.24 |
| | 1 200~1 300 | 4 | 559 488 | -0.18 | 0.81 | 0.15 |
| | 1 300~1 400 | 44 | 4 431 940 | 0.15 | 1.16 | 0.21 |
| | 1 400~1 500 | 32 | 4 658 554 | -0.22 | 0.29 | 0.05 |
| | 1 500~1 600 | 66 | 5 809 823 | 0.29 | 0.84 | 0.15 |
| >1 600 | 6 | 2 387 148 | -1.22 | 1.08 | 0.20 | |

内时,FR 值大于 1,表明区域内距断裂越近,越有利崩滑地质灾害的发生。

3.2 地形地貌因子

地形地貌因子是滑坡发育敏感性程度的重要因素^[23]。研究区地形地貌因子均从 12.5 m×12.5 m 分辨率的 DEM 中提取,分别提取了高程、坡度、坡向、曲率、起伏度等评价因子。将研究区高程分成 8 个区间,崩滑点主要分布在 715~860 m、1 200~1 350 m、1 650~1 800 m 区间内,其 FR 值均大于 1,其最高值为 1.44。坡度和坡向的组合与土层厚度、土壤湿度、光照强度存在密切关系^[24],将研究区坡度和坡向分成 8 个区间,崩滑主要分布在坡度 6°~24°之间,坡向朝东、东南、南、西北时,FR 值均大于 1。表明该区间内有利于崩滑的发生。地形起伏度反映地形的起伏情况,地形起伏度较大的地区为崩滑灾害的发生提供了物质条件和地形条件^[25]。将起伏度因子分为 8 个区间,起伏度为 8~15 m、30~38 m 易发生,FR 值分别为 1.53、2.80。地形曲率在微观尺度上反映了地表形态^[26]。曲率的数值可以反映斜坡的形态,将其分为 3 个区间,值小于 0 代表凹形坡,值为 0 为平形坡,值大于 0 为凸形坡。其中凹形坡的 FR 值更大,说明其比其它两种坡形更易发生崩滑地质灾害。

3.3 水文环境因子

地表水系的侵蚀和切割为滑坡灾害提供了重要的诱因^[27]。将区域内河流按 600 m 等距离分为 6 类缓冲区,河流缓冲距 1 800 m 以内时,FR 值均大于 1,当河流缓冲距在 600 m 以内时,FR 值为 1.96。表明区域内距河流越近越有利于崩滑灾害的发生。

3.4 外界触发因子

地形地貌、地质构造、工程岩组等是地质灾害形成的主要控制因素,降雨作为诱发因素,其强度大小与地质灾害的发生密切相关。将研究区降雨量值分为 6 个区间,当降雨量值大于 1 300 mm 时,崩滑灾害分布较多,其值为 1 300~1 400 mm 时 FR 值为 1.16。

4 罗平县崩滑易发性评价

4.1 评价因子信息量值和频率比值的计算

根据研究区已有的 154 个崩滑点,通过对各因子进行分级并统计灾点比和面积比,利用公式(1)和(3)计算得到各因子分级区间的信息量值和频率比值,根据不同方法计算得出的结果,从而分析不同因子区间的重要性。各因子分类级的信息量值和频率比值如图 2 和表 1 所示。

4.2 评价因子共线性诊断

崩滑地质灾害易发性评价指标体系中,需要保证自变量相互独立,相关性高会出现多重共线性^[21],将影响模型的准确性。因此采用容忍度(Tolerance, TOL)和方差膨胀因子(Variance Inflation Factor, VIF)对自变量进行多重共线性诊断:

$$VIF = \frac{1}{1 - R^2} \quad (7)$$

其中, R^2 是以 x_i 为因变量时对其他自变量回归的复测定系数。TOL 为 VIF 的倒数,当 $TOL > 0.1$ 且 $VIF < 10$ 时,说明自变量不存在多重共线性。通过 SPSS 软件进行多重共线性诊断,结果如表 2 所示。结果显示对所选 10 个评价因子其 VIF 值在 1~1.5。其 $VIF < 5$,表明各因子之间相互独立,不存在共线性。

表 2 评价因子 VIF 计算结果表

| 评价因子 | TOL | VIF |
|---------|------|------|
| 工程岩组 | 0.82 | 1.22 |
| 坡度/° | 0.66 | 1.52 |
| 坡向 | 0.95 | 1.05 |
| 高程/m | 0.90 | 1.11 |
| 地貌类型 | 0.71 | 1.40 |
| 起伏度/m | 0.67 | 1.50 |
| 曲率 | 0.97 | 1.03 |
| 断裂缓冲距/m | 0.95 | 1.06 |
| 河流缓冲距/m | 0.72 | 1.40 |
| 降雨量/mm | 0.95 | 1.05 |

4.3 评价因子相关性分析

崩滑的易发性与评价因子之间存在一定的相关性。为了保证各评价因子间的相互独立性和结果的可靠性,进行因子相关性检验^[28],结果如表 3 所示。结果显示各评价因子之间的相关系数均 < 0.3 ,评价因子之间的相关性较小,所以 10 个评价因子均可以进入模型。

4.4 评价因子逻辑回归分析

根据研究区已有的 154 个崩滑点,并随机选取等量的非崩滑点,共计有 308 个独立属性的统计样本。提取每个样本的各类级信息量值和频率比值作为自变量,是否发生地质灾害作为因变量(1 和 0 分别代表崩滑点和非崩滑点)。分别导入 SPSS 软件中进行二项逻辑回归运算,当选取的评价因子显著性均 ≤ 0.05 时具有统计意义^[21]。在 I-IR 模型中,曲率的显著性为 0.54,计算时应剔除。NFR-IR 模型中,坡向和曲率的显著性为 0.36 和 0.25,计算时剔除,其余评价因子的显著性均 < 0.05 。其 I-LR 和 NFR-LR 的回归运算公式为:

表 3 评价因子之间的相关系数矩阵

| 评价因子 | 工程岩组 | 坡度 | 坡向 | 高程 | 地貌类型 | 起伏度 | 曲率 | 断裂缓冲距 | 河流缓冲距 | 降雨量 |
|---------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|-------|-------|-----|
| 工程岩组 | 1 | | | | | | | | | |
| 坡度/° | 0.07 | 1 | | | | | | | | |
| 坡向 | -0.09 | 0.07 | 1 | | | | | | | |
| 高程/m | 0.03 | -0.08 | 0.08 | 1 | | | | | | |
| 地貌类型 | 0.02 | 0.11 | 0.03 | 0.01 | 1 | | | | | |
| 起伏度/m | 0.11 | 0.03 | 0.04 | 0.00 | 0.01 | 1 | | | | |
| 曲率 | 0.07 | -0.07 | 0.08 | 0.03 | 0.06 | 0.04 | 1 | | | |
| 断裂缓冲距/m | 0.09 | -0.03 | -0.04 | 0.06 | 0.09 | -0.05 | 0.08 | 1 | | |
| 河流缓冲距/m | 0.01 | 0.04 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.06 | 0.06 | 0.07 | 1 | |
| 降雨量/mm | 0.06 | -0.02 | -0.01 | 0.03 | 0.08 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | 0.08 | 1 |

$$P_{ICM-LR} = 1 / \left\{ 1 + \text{Exp} \left[- \left(\begin{aligned} &-0.165 + 0.698I_{x1} + 0.031I_{x2} + 0.761I_{x3} \\ &+ 0.309I_{x4} + 0.171I_{x5} + 0.641I_{x6} \\ &+ 0.528I_{x8} + 0.459I_{x9} + 0.628I_{x10} \end{aligned} \right) \right] \right\} \quad (8)$$

$$P_{NFR-LR} = 1 / \left\{ 1 + \text{Exp} \left[- \left(\begin{aligned} &-0.264 + 0.621R_{x1} + 0.725NFR_{x2} \\ &+ 0.247NFR_{x4} + 0.495NFR_{x5} + 0.255NFR_{x6} \\ &+ 0.587NFR_{x8} + 0.441NFR_{x9} + 0.351NFR_{x10} \end{aligned} \right) \right] \right\} \quad (9)$$

式中, $x_1 \sim x_{10}$ 分别为工程岩组、坡度、坡向、高程、地貌类型、起伏度、曲率、断裂缓冲距、河流缓冲距、降雨量的 ICM 值和 NFR 值。

5 崩滑易发性评价结果与精度评价

5.1 单一模型评价结果

根据表 1 所求出各评价因子分类级的 NFR 值和 ICM 值,进行叠加分析,分别得到罗平县崩滑地质灾害的易发性分布图,利用 ARCGIS 的自然断点法将其分为极高、高、中、低 4 个区间。结果如图 3(a~b)和表 4 所示。其中 ICM 模型中,低-极高易发区的面积(频率比)分别为 529.96 km²(0.33)、943.72 km²(0.46)、979.64 km²(0.96)、564.67 km²(2.60)。在极高易发区内,崩滑点占总灾点的 48.7%。NFR 模型中,低-极高易发区的面积(频率比)分别为 562.54 km²(0.28)、908.48 km²(0.8)、950.81 km²(1.13)、596.17 km²(1.97)。在极高易发区内,崩滑点占总灾点的 38.96%。两种单一评价模型中,从低-极高易发区崩滑易发性的频率比逐渐增大。且低-中易发区间内,频率比值都小于 1,说明两种单一模型均可以有效对罗平县崩滑易发性进行评价。

5.2 耦合模型评价结果

利用 GIS 的栅格计算器功能,将 ICM-LR 耦合模型和 NFR-LR 耦合模型按照公式(8~9)进行逻辑回归分析计算,得到相应评价模型的崩滑易发性分布图,利用 ARCGIS 的自然断点法将其分为极高、高、中、低 4 个区间。结果如图 3(c~d)和表 4 所示。在 ICM-LR 耦合模型中,低-极高易发区的面积

(频率比)分别为 771.1 km²(0.25)、836.6 km²(0.73)、864.36 km²(0.88)、545.94 km²(2.66)。在极高易发区内,崩滑点占总灾点的 48.05%。NFR-LR 模型中,低-极高易发区的面积(频率比)分别为 548.52 km²(0.25)、940.12 km²(0.71)、989.08 km²(0.95)、540.28 km²(2.36)。在极高易发区内,崩滑点占总灾点的 42.21%。两种耦合模型评价结果比较一致,从低-极高易发区崩滑易发性的频率比逐渐增大。且低-中易发区间内,频率比值都小于 1,ICM-LR 耦合模型低易发区的面积较单一模型相对增大,且两种耦合模型各分区面积相对一致,说明耦合模型更能准确对罗平县崩滑易发性进行评价。

表 4 罗平县崩滑易发性评价频率比

| 评价模型 | 易发性等级 | 分级面积 /km ² | 分级面积比 (B/%) | 崩滑比 (A/%) | 频率比 (A/B) |
|--------|-------|-----------------------|-------------|-----------|-----------|
| ICM | 低 | 529.96 | 17.56 | 5.84 | 0.33 |
| | 中 | 943.72 | 31.27 | 14.29 | 0.46 |
| | 高 | 979.64 | 32.46 | 31.17 | 0.96 |
| | 极高 | 564.67 | 18.71 | 48.70 | 2.60 |
| NFR | 低 | 562.54 | 18.64 | 5.19 | 0.28 |
| | 中 | 908.48 | 30.10 | 24.03 | 0.80 |
| | 高 | 950.81 | 31.50 | 35.71 | 1.13 |
| | 极高 | 596.17 | 19.75 | 38.96 | 1.97 |
| ICM-LR | 低 | 771.1 | 25.55 | 6.49 | 0.25 |
| | 中 | 836.6 | 27.73 | 20.13 | 0.73 |
| | 高 | 864.36 | 28.64 | 25.32 | 0.88 |
| | 极高 | 545.94 | 18.09 | 48.05 | 2.66 |
| NFR-LR | 低 | 548.52 | 18.17 | 4.55 | 0.25 |
| | 中 | 940.12 | 31.15 | 22.08 | 0.71 |
| | 高 | 989.08 | 32.77 | 31.17 | 0.95 |
| | 极高 | 540.28 | 17.90 | 42.21 | 2.36 |

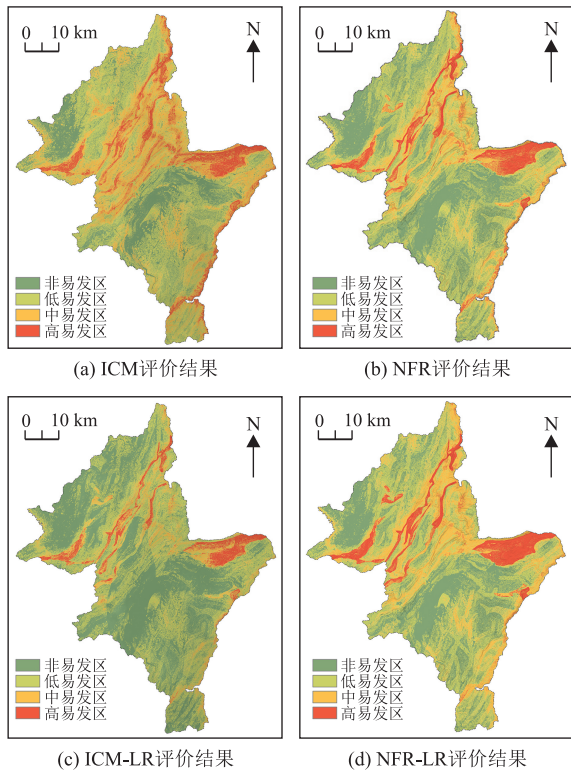


图3 罗平县崩滑易发性评价结果

5.3 评价精度对比分析

本文采用 ROC (receiver operating characteristic) 曲线对 ICM 模型、NFR 模型、ICM-LR 耦合模型和 NFR-LR 耦合模型的易发性评价结果进行精度检验。ROC 曲线又称接收者工作特征曲线,其横轴为假阳性率(1-特异性),纵轴为真阳性率(敏感度),根据其线下的面积大小作为评价方法准确性评价的指标。ROC 曲线的线下面积用 AUC 值来表示,值越大,实验的准确率越高,模型的预测效果越好^[29]。4 种评价模型 ROC 曲线如图 4 所示。AUC 值分别为 0.820、0.796、0.882 及 0.840,耦合模型的精度较单一模型的精度高,其中 ICM-LR 耦合模型的精度最高,该模型更能准确对罗平县崩滑地质灾害易发性评价研究。

6 结论

(1) 以罗平县为研究对象,选取工程岩组、坡度、坡向、高程、地貌类型、起伏度、曲率、断裂缓冲距、河流缓冲距、降雨量等 10 个评价因子,对因子进行独立性检验,选取信息量模型(ICM)、频率比模型(NFR)以及与逻辑回归(LR)耦合模型对罗平县崩滑地质灾害进行易发性评价。

(2) 通过对评价因子的分类级处理,计算信息量值和频率比值,通过信息量正值和频率比值得出

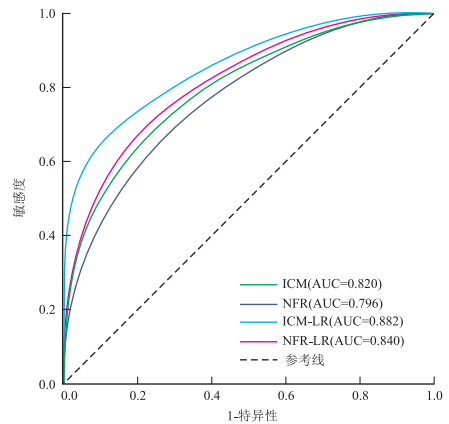


图4 ROC 曲线

影响较大的因子类级分别是:工程岩组中的层状结构坚硬长石石英砂岩岩组、地貌类型中的岩溶中山地貌和侵蚀谷地地貌、坡度主要分布在 $6^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 度之间、高程集中在 1 350~1 950 m 之间、起伏度在 23 m 以下、断裂缓冲距和河流缓冲距 1 800 m 之内、降雨量集中在 1 300~1 600 mm 之间,对崩滑发育具有促进作用。

(3) 根据构建的 ICM、NFR、ICM-LR 和 NFR-LR 模型进行对比研究,通过 ROC 曲线对 4 种模型的精度进行检验,AUC 值分别为 0.820、0.796、0.882 和 0.840,耦合模型的精度较单一模型的精度高,其中 ICM-LR 耦合模型的精度最高,表明该模型更能准确对罗平县崩滑地质灾害易发性评价研究。

(4) 基于 ICM-LR 耦合模型的评价结果得出,极高易发区主要分布在砂岩、碳酸盐岩组区域和水系延展区域。

参考文献

- [1] 陈涛,钟子颖,牛瑞卿,等.利用深度信念网络进行滑坡易发性评价[J].武汉大学学报:信息科学版,2020,45(11):1809-1817.
- [2] Nahayo L, Kalisa E, Maniragaba A, et al.. Comparison of analytical hierarchy process and certain factor models in landslide susceptibility mapping in Rwanda[J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2019, 5(3):885-895.
- [3] 汪民.关于地质灾害防治需要关注的几个问题[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(1):1-5.
- [4] Nahayo L, Kalisa E, Maniragaba A, et al.. Comparison of analytical hierarchy process and certain factor models in landslide susceptibility mapping in Rwanda[J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2019, 5(3):885-895.
- [5] Yu C L, Chen J P. Application of a GIS-Based Slope Unit Method for Landslide Susceptibility Mapping in Helong City:

- Comparative Assessment of ICM, AHP, and RF Model [J]. *Symmetry*, 2020, 12(11): 1-21.
- [6] 杨峰, 薛桂澄, 柳长柱, 等. 基于层次分析法的地质灾害易发性评估——以文昌木兰湾新区建设项目为例[J]. *资源环境与工程*, 2021, 35(01): 72-75.
- [7] 辛存林, 施紫越, 任文秀, 等. 甘肃天水市北山地质灾害易发度区划[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2020, 56(1): 16-24.
- [8] 段顺荣, 李延福, 李春阳. 基于 GIS 和层次分析法的青海甘德县地质灾害易发性评价[J]. *矿产勘查*, 2021, 12(2): 453-460.
- [9] 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.
- [10] 邓念东, 崔阳阳, 郭有金. 基于频率比-随机森林模型的滑坡易发性评价[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(34): 13990-13996.
- [11] 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(05): 137-150.
- [12] 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(01): 235-245.
- [13] 刘璐瑶, 高惠瑛, 李照. 基于 CF 与 Logistic 回归模型耦合的永嘉县滑坡易发性评价[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(10): 121-129.
- [14] 蒋万钰, 陈冠, 孟兴民, 等. 基于卷积神经网络模型的区域滑坡敏感性评价——以川藏铁路沿线为例[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2022, 58(2): 203-211.
- [15] 吉日伍呷, 田宏岭, 韩继冲. 基于不同机器学习算法的地震滑坡易发性评价——以鲁甸地震为例[J/OL]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*: 1-13 [2022-04-21]. <https://doi.org/10.16112/j.cnki.53-1223/n.2022.02.132>
- [16] 樊芷吟, 苟晓峰, 秦明月, 等. 基于信息量模型与 Logistic 回归模型耦合的地质灾害易发性评价[J]. *工程地质学报*, 2018, 26(2): 340-347.
- [17] 张晓东. 基于遥感和 GIS 的宁夏盐池县地质灾害风险评估研究[D]. 中国地质大学(北京), 2018.
- [18] 陈立华, 李立丰, 吴福, 等. 基于 GIS 与信息量法的北流市地质灾害易发性评价[J]. *地球与环境*, 2020, 48(4): 471-479.
- [19] 杨盼盼, 王念秦, 郭有金, 等. 基于加权信息量模型的临潼区滑坡易发性评价[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(9): 50-56.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 孙长明, 马润勇, 尚合欣, 等. 基于滑坡分类的西宁市滑坡易发性评价[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(3): 173-181.
- [23] 汪旭涛, 谢昭宇, 胡凯锋. 中高山地区滑坡发育地形地貌因子敏感性研究[J]. *地震工程学报*, 2013, 35(3): 597-603.
- [24] 王锐. 基于 GIS 和 Logistic 回归模型的降雨型滑坡易发性研究[D]. 浙江大学, 2018.
- [25] 李郎平, 兰恒星, 郭长宝, 等. 基于改进频率比法的川藏铁路沿线及邻区地质灾害易发性分区评价[J]. *现代地质*, 2017, 31(5): 911-929.
- [26] 田乃满, 兰恒星, 伍宇明, 等. 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*, 2020, 22(12): 2304-2316.
- [27] 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.
- [28] 杜国梁, 杨志华, 袁颖, 等. 基于逻辑回归-信息量的川藏交通廊道滑坡易发性评价[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(5): 102-111.
- [29] 刘璐瑶, 高惠瑛. 基于证据权与 Logistic 回归模型耦合的滑坡易发性评价[J/OL]. *工程地质学报*: 1-11 [2022-04-15]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2020-482>

作者简介: 杨得虎(1998—), 男, 云南曲靖人, 硕士研究生. 主要研究方向为工程地质与水文地质. E-mail: 2389245896@qq.com

通信作者: 朱杰勇(1961—), 男, 云南昆明人, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为矿产普查与勘探、地质灾害、工程地质与水文地质. E-mail: zhujieyong@km.ust.edu.cn