引文格式：夏洋德龙,罗伟奇,高俊华,等. 基于逻辑回归的择优耦合模型滑坡易发性评估[J]. 地理空间信息, 2025, 23(6):61-64. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2025.06.013

基于逻辑回归的择优耦合模型滑坡易发性评估

夏洋德龙[1]，罗伟奇[2,3*]，高俊华[2,3]，杨若君[2]
（1. 湖南科技大学地球科学与空间信息工程学院，湖南 湘潭 411100；2. 湖南省自然资源事务中心，湖南 长沙 410007；
3. 洞庭湖区生态环境遥感监测湖南省重点实验室，湖南 长沙 410007）

摘　要：以湖南省湘西土家族苗族自治州为例，首先，基于区域空间数据资料，选取高程、坡度、坡向等12类评估因子进行分析。其次，将频率比法、信息量法和证据加权法分别与逻辑回归模型相耦合，制作研究区滑坡易发性评估图进行对比。最后，根据最优耦合模型评估结果分析讨论。结果表明：①地质岩性和坡度是研究区影响滑坡发生的关键因子；②频率比-逻辑回归耦合模型拥有更高的预测性，其结果更适合为湘西州滑坡灾害预测预警提供参考；③研究区滑坡受人类活动影响较大，高易发区在道路与城镇边缘的交汇处分布明显，低易发区主要集中于高海拔山区。

关键词：滑坡；易发性评估；评估因子；逻辑回归模型；相关性分析
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）06-0061-04

Preferred Coupled Model Landslide Susceptibility Evaluation Based on Logistic Regression

XIA Yangdelong[1], LUO Weiqi[2,3], GAO Junhua[2,3], YANG Ruojun[2]
(1. School of Earth Sciences and Spatial Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411100, China;
2. Hunan Center of Natural Resources Affairs, Changsha 410007, China;
3. Hunan Key Laboratory of Remote Sensing, Monitoring of Ecological Environment in Dongting Lake Area, Changsha 410007, China)

Abstract: Taking the Tujia and Miao Autonomous Prefecture of Xiangxi, Hunan Province for example, based on regional spatial data, we selected 12 evaluation factors such as elevation, slope and slope direction to carry out analysis at first. Then, coupled the frequency ratio method, information volume method and evidence weighting method with logistic regression model respectively, and made the landslide susceptibility assessment map for comparison. Finally, we analyzed and discussed the evaluation results of optimal coupling model. The results show that ①geological lithology and slope are the key factors affecting the occurrence of landslide in the study area. ②The coupling model of frequency ratio and logistic regression has higher prediction precision, and its results are more suitable for providing reference for the prediction and early warning of landslide disaster in the Tujia and Miao Autonomous Prefecture of Xiangxi. ③Landslide in the study area is greatly affected by human activities. The high susceptibility areas are obvious at the intersection of roads and urban edges, while the low susceptibility areas are mainly concentrated in high-altitude mountainous areas.

Key words: landslide, susceptibility evaluation, evaluation factor, logistic regression model, correlation analysis

滑坡易发性评估可以有效地发现潜在滑坡风险，为滑坡灾害防治提供参考意见[1]。基于GIS技术，国内外众多学者开展了大量滑坡易发性评价研究。如：盛明强等[2]运用频率比和支持向量机（SVM）的模型方法对江西省上犹县进行了滑坡易发性预测；周晓亭等[3-5]基于信息量法研究，发现区域滑坡耦合模型具有较高的预测精度；胡杨等[6]运用证据权-逻辑回归耦合模型对新疆伊犁河谷地区滑坡的易发程度进行评估，指出该耦合模型更适合当地滑坡预测；郭子正等[7]以三峡库区为研究对象，发现WFR耦合模型灾害预测结果良好；Rui等[8]发现卷积神经网络（CNN）比传统机器学习模型表现出更优异的预测能力；Esteban等[9]通过多重人工神经网络（ANN MLP）对厄瓜多尔昆卡市进行滑坡灾害易发性评估等。上述研究表明，相比于单一模型的滑坡易发性评估，多模型耦合后的评估结果具备更优良的预测性能。

虽然耦合模型下的滑坡易发性评价已取得较多成果，但不同耦合模型间的对比研究仍相对较少。为此，本文以湘西土家族苗族自治州（简称：湘西州）为研究区，通过使用基于逻辑回归的频率比（FR）、信息量（IV）和证据加权（WE）耦合模型，分别评估研究区滑坡易发程度，并选择最合理的易发性评估

第一作者简介：夏洋德龙（1988—），硕士研究生，工程师，研究方向为滑坡灾害形成机理及致灾机制，E-mail：johnnyxydl@mail.hnust.edu.cn。
通信作者：罗伟奇（1967—），本科，研究员，从事水文地质、工程地质及环境地质勘查评价工作，E-mail：WQLUOSWZX@163.com。

模型分析讨论，以期评估结果可为湘西州防灾减灾工作提供有效参考建议与规划思路。

1 研究区概况

湘西州位于湘鄂渝黔四省市交界处，介于109°10′~110°23′E，27°44′~29°38′N之间，其北与恩施自治州相接壤，西与重庆市毗邻，西南搭界贵州铜仁市，共由8个市县组成，拥有国土面积15 476 km^2，是湖南省经济相对落后的少数民族自治州。该州地处武陵山脉南端，地形错综复杂，变化多样，地势自西北向东南逐阶降低（海拔60~1 707 m），区内碳酸盐岩分布广泛，属于典型的喀斯特地貌，可划分为2个工程地质区和3个工程地质亚区，坡体不稳是当地主要的工程地质问题[10-11]。加之区域地表水与地下水资源充沛，使得湘西州滑坡灾害频发。据不完全统计，湘西州历史发生地质灾害事件1 300余起，其中滑坡995起，约占研究区灾害总量的75%，是湖南省地质灾害监测预警与防治的重点与难点之一。

2 研究区与数据

2.1 数据来源

为提升湘西州滑坡灾害易发性评估准确性，本研究通过多种径获取研究区空间数据资料。使用的858处滑坡灾害点来源于湘西州历史地质灾害调查，湖南省1∶20万地质图来源于湖南省直属单位纸质扫描件存档，ALOS DEM（12.5 m分辨率）来源于91卫图，地层岩性及断裂构造层数据来源于地质科学数据出版系统（http://dcc.ngac.org.cn），湘西州土地利用数据来源于国土调查成果共享应用服务平台（https://gtdc.mnr.gov.cn），降雨数据来源于国家青藏高原科学数据中心（https://data.tpdc.ac.cn/home）。各数据源详细情况如表1所示。

表1 数据信息一览表

序号	数据名称	来源	数据说明
1	滑坡灾害点	湘西州历史地质灾害调查	含位置、面积等基础信息
2	地质图	纸质扫描件存档	比例尺1∶200 000
3	DEM	91卫图	ALOS DEM，分辨率12.5 m
4	地层岩性、断裂构造层	http://dcc.ngac.org.cn	全国1∶200 000数字地质图空间数据库
5	土地利用	https://gtdc.mnr.gov.cn	湖南省土地利用现状
6	降雨量	http://data.tpdc.ac.cn/home	中国1 km分辨率逐月降水量数据集（1901-2022）

2.2 数据预处理

基于ArcGIS软件，本研究对各项数据资料进行全面预处理。首先，从DEM中提取高程、坡度、坡向、剖面曲率、平面曲率、地面起伏度等地形信息；其次，参照土地分类标准，从土地利用数据中获取水系、道路及建成区范围；再次，使用栅格计算工具获得研究区多年平均降雨；最后，以12.5 m×12.5 m格网为评估单元，将研究区划分为98 975 231个栅格单元，构建湘西州滑坡灾害空间数据集。

3 模型方法

3.1 频率比法

频率比法（frequency ratio，FR）是近年来广泛运用于地质灾害易发性评估的一种定量模型算法，能快速判断各评估因子与灾害本身的相关性。该算法通过计算可能引发滑坡的评估因子在不同分级区间的概率，来确定评估因子对滑坡发生的贡献值。其计算公式为：

$$FR_{ij}=\frac{N_{ij}/N_r}{A_{ij}/A_r} \tag{1}$$

式中，FR_{ij}为第i类评估因子中第j分级的频率比值；N_{ij}为第i类评估因子中第j分级的滑坡面积；N_r为研究区的滑坡总面积；A_{ij}为第i类评估因子中第j分级的面积；A_r为研究区的总面积。

频率比法属于完全的数理统计方法，其结果FR_{ij}值以1为分界。若FR_{ij}值越大于1，则表明第i类评估因子中第j分级对发生滑坡的贡献越高；反之，则贡献越低。

3.2 证据加权法

证据权法（weight of evidence，WE）是加拿大数学-地质学家Agterberg基于贝叶斯模型提出的一种二元统计算法。其基本原理是将每一类评估因子用二态变量表示，通过检验各评估因子的条件独立性以计算权系数，从而得到相应灾害发生的后验概率。该算法将数理统计、图像分析、人工智能三者有机融合，能有效避免主观分配评估因子权重不当的问题[12]。

证据加权法是证据权法中的一种形式，计算公式为：

$$w_i^+=\ln\left(\frac{P\{B|L\}}{P\{B|\bar{L}\}}\right)=\ln\frac{\dfrac{N_{ij}}{N_r}}{\dfrac{A_{ij}-N_{ij}}{A_r-N_r}} \tag{2}$$

$$w_i^-=\ln\left(\frac{P\{\bar{B}|L\}}{P\{\bar{B}|\bar{L}\}}\right)=\ln\frac{\dfrac{N_r-N_{ij}}{N_r}}{\dfrac{A_r-N_r-A_{ij}+N_{ij}}{A_r-N_r}} \tag{3}$$

$$w_{ij}=w_i^++w_i^- \tag{4}$$

式中，w_i^+为第i类评估因子中第j分级引发滑坡的正相关系数；w_i^-为第i类评估因子中第j分级引发滑坡的负相关系数；w_{ij}为第i类评估因子中第j分级的权重。

3.3　信息量法

信息量模型（information value，IV）是广泛运用于地质灾害领域的一种定量分析统计模型[13]，其核心思想是通过计算各评估因子对灾害所贡献的信息量，来预测和划分研究区内地质灾害的敏感性与等级。若评估因子信息量越大，则该因子的影响程度越高；区域各评估因子叠加的总信息量越高，相应的滑坡发生概率也越高[14]。其计算公式为：

$$I_{ij}=\ln\frac{N_{ij}/N_r}{A_{ij}/A_r} \tag{5}$$

式中，I_{ij} 为第 i 类评估因子中，第 j 分级发生滑坡的可能性。

3.4　逻辑回归模型

逻辑回归模型（logistics regression，LR）是一种广义线性回归模型，常运用于多变量环境的二分类问题研究。在滑坡易发性评估中，该模型可以获取较为准确的灾害评估结果[15]。其计算公式为：

$$\mathrm{LogitP}=\mathrm{m}+a_1x_1+a_2x_2+\cdots+a_ix_i \tag{6}$$

$$P=\frac{e^{\left(\mathrm{m}+a_1x_1+a_2x_2+\cdots+a_ix_i\right)}}{1+e^{\left(\mathrm{m}+a_1x_1+a_2x_2+\cdots+a_ix_i\right)}} \tag{7}$$

式中，P 为滑坡灾害发生的概率；m 为逻辑回归模型的常量；a_i 为逻辑回归模型的回归系数；x_i 为评估因子（$i=1,2,3\cdots$）。

3.5　逻辑回归耦合模型

基于逻辑回归的耦合模型是指将定量统计算法下获得的滑坡灾害分级信息作为自变量进行二元回归分析，得到评估因子耦合后的回归系数，以重新构建逻辑回归方程和制作滑坡易发性评估图。耦合后的模型能解决单一模型无法在空间上体现各评估因子相互关系的问题，改善区域灾害评估模型精度。

4　滑坡灾害易发性评估

4.1　评估因子初选

区域滑坡灾害发育–形成–破坏是地形地貌、水文地质构造、气候降雨以及人类活动等多因素耦合作用的产物[16]。本文在充分考虑研究区地质背景与前人研究经验的前提下，初步从地形地貌、水文地质构造、气候降雨、人类活动等4类影响因素中选择高程、坡度、坡向、剖面曲率、平面曲率、起伏度、地质岩性、距断层距离、距水系距离、多年平均降雨、距道路距离和建成区影响等12类可能引发滑坡的因子进行分析。

4.2　评估因子选定

运用 ArcGIS 中 Multivariate Analysis 工具，使用 Pearson 相关系数法分析上述 12 类评估因子，通过获取相关性系数 R 来表征两两因子的关联程度。当 $|R|$ 值不超过0.3时，则认为两两因子存在弱相关性或不存在相关性，可作为滑坡易发性评估因子；反之，则认为不能作为滑坡易发性评估因子。结果表明，起伏度、剖面曲率、多年平均降雨以及距水系距离与其他评估因子存在较强相关性（$|R|\geqslant 0.3$），需将这四类因子进行剔除。最终保留高程、坡度、坡向、平面曲率、地质岩性、距断层距离、距道路距离、建成区影响作为湘西州滑坡易发性评估因子。

4.3　评估因子权重确定

基于文献[17]、[18]经验，本研究从距离滑坡灾害点2 km的缓冲区外随机选取非滑坡点，与滑坡灾害点共同构建样本数据集。通过将是否发生滑坡的信息作为因变量，将根据频率比法、证据加权法和信息量法得到的 FR 值、W_f 值以及 IV 值分别作为自变量，输入SPSS Statistic软件进行二元Logistic回归分析，得到FR–Logistic、WE–Logistic和IV–Logistic耦合模型回归系数，并构建下述逻辑回归方程：

1）FR–Logistic耦合模型。

$$\mathrm{LogitP}_1=-6.818+1.429x_1+1.130x_2+0.160x_3+0.790x_4+0.533x_5+1.388x_6+0.737x_7+0.375x_8 \tag{8}$$

2）IV–Logistic耦合模型。

$$\mathrm{LogitP}_2=0.097+0.842x_1+1.049x_2+0.186x_3+0.740x_4+0.466x_5+1.431x_6+1.001x_7+1.349x_8 \tag{9}$$

3）WE–Logistic耦合模型。

$$\mathrm{LogitP}_3=-0.054+1.056x_1+1.420x_2+0.413x_3+3.151x_4+0.599x_5+3.224x_6+1.317x_7+0.002x_8 \tag{10}$$

回归分析结果表明，在上述耦合模型中，地质岩性与坡度具有较高的权重，其对湘西州滑坡发生影响较大，属于该区域引发滑坡的关键因素；而坡向权重较低，对研究区滑坡发生的影响较小，属于该区域引发滑坡的非关键因素。

4.4　评估结果

根据各耦合模型逻辑回归系数及其评估因子分级定量信息，本研究使用ArcGIS软件的栅格计算工具对各评估因子进行重新赋值与归一化处理，得到研究区不同耦合模型下的滑坡易发性评估图，并通过自然断点分级法（Natural Breaks）将滑坡易发性由低至高划分为低、较低、中、较高、高5个级别（如图1~3所示）。

4.5　结果检验

1）模型合理性分析。将滑坡灾害点与滑坡易发性评估图叠加分析，得到滑坡灾害点分布结果（如表1所示）。结果表明，在上述评估模型中，累计超过80%的滑坡灾害点落于中–较高–高易发区，且高易发

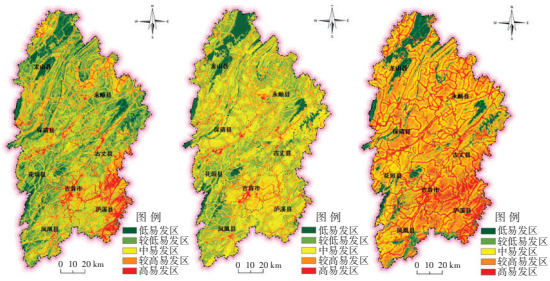


图1 FR-Logistic耦合模型　图2 IV-Logistic耦合模型　图3 WE-Logistic耦合模型

区内滑坡点占比最大，符合实际滑坡分布规律[19]，各耦合模型满足合理性要求。FR-Logistic耦合模型中-较高-高易发区灾害点占比达到88.29%，且高易发区滑坡点占比为50.68%，相比于IV-Logistic耦合模型（87.35%，49.16%）、WE-Logistic耦合模型（82.96%，47.98%），该模型评估结果更合理。

表1 滑坡灾害易发性分析结果

易发性分级	滑坡灾害点分布/%		
	FR-Logistic	IV-Logistic	WE-Logistic
低易发区	2.00	1.40	6.52
较低易发区	9.71	11.25	10.52
中易发区	14.39	12.60	13.06
较高易发区	23.22	25.59	21.92
高易发区	50.68	49.16	47.98

2）ROC曲线检验。受试者工作特征曲线（receiver operating characteristic curve，ROC）又称感受性曲线（sensitivity curve），是反映和揭示敏感性与特异性连续变量相互关系的综合指标，被广泛应用于地质灾害易发性评估检验中[20-22]。当评估模型所对应的ROC曲线下方面积（area under ROC，AUC）大于0.5时，表明该模型具备预测功能；反之，则不具备预测功能。通常AUC值越大，模型的预测性能越高。

本研究FR-Logistic、WE-Logistic、IV-Logistic耦合模型的AUC值分别为0.725、0.689、0.668，各耦合模型均具备滑坡灾害易发性预测功能。其中，FR-Logistic耦合模型的AUC值最高，其预测结果更准确。

4.6 分析与讨论

综合上述检验结果可知，FR-Logistic耦合模型更适合湘西州滑坡易发性评估，其评估结果对湘西州防灾减灾工作更具参考价值。本研究以FR-Logistic耦合模型评估结果进行统计分析（如表2所示）。

分析结果表明：①湘西州滑坡低、较低、中、较高和高易发区面积分别占全州面积的11.44%、31.42%、33.07%、18.60%和5.46%，研究区以滑坡较低-中易发区为主，高易发区虽然面积最少，但滑坡发生密度是其他分区的数倍甚至数十倍，易引发滑坡风险；②区域内，滑坡高易发区相对集中于道路与城镇边缘的交汇处，且随距离增加，易发程度相应降低，西南侧高易发区可能受地质岩性数据准确性影响，使滑坡易发性评估结果偏高；③湘西州高海拔山区是整个研究区发生滑坡概率最低的地区之一，该区域受人类活动影响较少，自然环境相对稳定。

表2 FR-Logistic耦合模型滑坡灾害易发性分析表

灾害区	低易发区	较低易发区	中易发区	较高易发区	高易发区
区域面积/km²	1 769.44	4 859.15	5 114.65	2 876.89	844.75
占比/%	11.44	31.42	33.07	18.60	5.46
滑坡密度/（个/100 m²）	0.73	3.56	5.28	8.52	18.59

5 结 语

本文以湖南省湘西州为研究区，利用GIS软件和3种耦合模型（FR-Logistic、IV-Logistic、WE-Logistic）对滑坡灾害易发性进行评估分析。研究结果表明，地质岩性和坡度是影响滑坡发生的关键因素，而坡向贡献较小。通过合理性分析和ROC曲线检验，FR-Logistic耦合模型表现最优，其高易发区灾害点占比达88.29%，AUC值为0.725，具有较高的预测预警参考价值。

参考文献

[1] 常志璐. 基于数据驱动和成因机制的区域降雨型滑坡危险性评价方法[D]. 南昌:南昌大学,2023

[2] 盛明强,刘梓轩,张晓晴,等. 基于频率比联接法和支持向量机的滑坡易发性预测[J]. 科学技术与工程,2021,21(25):10 620-10 628

[3] 周晓亭,黄发明,吴伟成,等. 基于耦合信息量法选择负样本的区域滑坡易发性预测[J]. 工程科学与技术,2022,54(3):25-35

[4] 谢维安,谷士飞,向星多,等. 基于信息量与多模型耦合的碎屑岩区滑坡易发性分区评价[J]. 自然灾害学报,2023,32(1):236-244

[5] 毕结昂,徐佩华,宋盛渊,等. 基于信息量-逻辑回归耦合模型的玛纳斯河流域地质灾害易发性评价[J]. 工程地质学报,2022,30(5):1 549-1 560

[6] 胡杨,张紫昭,林世河. 基于证据权与逻辑回归耦合的新疆伊犁河谷地区滑坡易发性评价[J]. 工程地质学报,2023,31(4):1 350-1 363

[7] 郭子正,殷坤龙,黄发明,等. 基于滑坡分类和加权频率比模型的滑坡易发性评价[J]. 岩石力学与工程学报. 2019,38(2):287-300

[8] Rui L,Xin Y,Chong X,et al. Comparative Study of Convolutional Neural Network and Conventional Machine Learning Methods for Landslide Susceptibility Mapping[J]. Remote Sensing,2022,14(2):321

（下转第78页）