

中国科技核心期刊 《中国科学引用文数据库》来源期刊 Caj-cd规范获奖期刊

THE CHINESE JOURNAL OF GEOLOGICAL HAZARD AND CONTROL

基于不同耦合模型的县域滑坡易发性评价对比分析

熊小辉,汪长林,白永健,铁永波,高延超,李光辉

Comparison of landslide susceptibility assessment based on multiple hybrid models at county level: A case study for Puge County, Sichuan Province

XIONG Xiaohui, WANG Changlin, BAI Yongjian, TIE Yongbo, GAO Yanchao, and LI Guanghui

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202202052

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

Landslide susceptibility assessment based on K-means cluster information model in Wenchuan and two neighboring counties, China 周天伦, 曾超, 范晨, 毕鸿基, 龚恩慧, 刘晓 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 137-150

基于RBF神经网络信息量耦合模型的滑坡易发性评价

Landslide susceptibility assessment by the coupling method of RBF neural network and information value: A case study in Min Xian, Gansu Province

黄立鑫,郝君明,李旺平,周兆叶,贾佩钱 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 116-126

机器学习模型在滑坡易发性评价中的应用

Application of machine learning model in landslide susceptibility evaluation 刘福臻, 王灵, 肖东升 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 98-106

基于GIS和信息量模型的安徽池州地质灾害易发性评价

\${suggestArticle.titleEn} 王雷,吴君平,赵冰雪,姚志强,张乐勤 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(3): 96-102

基于贡献率权重模型的川藏铁路沿线大型滑坡危险性区划

Hazard zonation of large-scale landslides along Sichuan—Tibet Railway based on contributing weights model 边江豪, 李秀珍, 徐瑞池, 王栋 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 84-93

渝东北典型盆缘山区高位崩滑灾害风险评价

Risk assessment of high-level collapse and landslide disasters in typical basin-edge mountainous areas in northeast Chongqing: A case study of the Ningqiao area in Wuxi

谭真艳, 罗晓龙, 陈怡, 周灏 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 70-78



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202202052

熊小辉, 汪长林, 白永健, 等. 基于不同耦合模型的县域滑坡易发性评价对比分析——以四川普格县为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(4): 114-124.

XIONG Xiaohui, WANG Changlin, BAI Yongjian, *et al.* Comparison of landslide susceptibility assessment based on multiple hybrid models at county level: A case study for Puge County, Sichuan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): 114-124.

基于不同耦合模型的县域滑坡易发性评价对比分析

——以四川普格县为例

熊小辉1.2, 汪长林3, 白永健1, 铁永波1, 高延超1, 李光辉4

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心,四川成都 610081; 2. 自然资源部沉积盆地与油气资源重点实验室,四川成都 610081; 3. 四川省西南大地工程物探有限公司,四川成都 610072; 4. 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院,湖北武汉 610059)

摘要:为有效预测县域滑坡发生的空间概率,探索不同统计学耦合模型滑坡易发性定量评价结果的合理性和精度,以四 川省普格县为研究对象。选取坡度、坡向、高程、工程地质岩组、断层和斜坡结构等6项孕灾因子作为评价指标体系,基 于信息量模型(I)、确定性系数模型(CF)、证据权模型(WF)、频率比模型(FR)分别与逻辑回归模型(LR)耦合开展滑坡 易发性评价。结果表明:各耦合模型评价结果和易发程度区划均是合理的,极高易发区主要分布于则木河、黑水河河谷 两侧斜坡带,面积介于129.04~183.43 km²(占比 6.77%~9.62%),各模型评价精度依次为 WF-LR 模型(*AUC*=0.869)>I-LR 模型 (*AUC*=0.868)>CF-LR 模型(*AUC*=0.866)>NFR-LR 模型(*AUC*=0.858)。研究成果可为川西南山区县域滑坡易发性定量评估提 供重要参考。

Comparison of landslide susceptibility assessment based on multiple hybrid models at county level: A case study for Puge County, Sichuan Province

XIONG Xiaohui^{1,2}, WANG Changlin³, BAI Yongjian¹, TIE Yongbo¹, GAO Yanchao¹, LI Guanghui⁴

 Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081, China; 2. Key Laboratory of Sedimentary Basin and Oil and Gas Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu, Sichuan 610081, China; 3. South-West Dadi Enginerring Exploration Co.Ltd., Chengdu, Sichuan 610072, China; 4. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: In order to effectively predict the spatial probability of landslide occurrence at county scale, the quantitative evaluation and comparative study of landslide susceptibility were carried out based on different statistical coupling models in Puge County, Southwest Sichuan. Six evaluation factors including slope, slope direction, elevation, engineering geological rock

· 115 ·

group, distance from fault and slope structure are selected to construct the evaluation index system. Information model (I), certainty factor model (CF), weight of evidence model (WF) and frequency ratio model (FR) are coupled with logistic regression model (LR) respectively to conduct landslide susceptibility evaluation. The results show that the evaluation results of each coupled model and the zoning of susceptibility are reasonable. The extremely high susceptibility areas with 129.04 –183.43 km² (accounting for 6.77% –9.62%) are mainly distributed in the slope zones on both sides of Zemu River and Heishui River Valley. The evaluation accuracy decreases from WF-LR model (AUC=0.869), I-LR model (AUC=0.868), CF-LR model (AUC=0.866), to NFR-LR model (AUC=0.858). The research results can provide an important reference for the quantitative evaluation of county landslide susceptibility in mountainous areas of Southwest Sichuan.

Keywords: landslides susceptibility; information model; certainty factor model; weights of evidence model; frequency ratio model; logistic regression model; Puge County

0 引言

滑坡易发性评价(landslide susceptibility assessment) 主要基于区域孕灾地质条件对滑坡发生的可能性进行 评估[1-2],经历了从早期定性评价(基于专家先验知识) 至目前定量评价(数据驱动)的过程^[2-3],随着信息化技 术在地质灾害评价中的深入应用,数据获取越来越便 利,大量滑坡易发性定量评价模型不断涌现并开展广泛 应用,包括二元统计分析模型,如信息量模型[4-6]、确定 性系数模型[7-8]、证据权模型[9-11]、频率比模型[12]等,多 元统计分析模型,如逻辑回归模型[13-15]、随机森林模 型[16-17]、判别分析模型[18-19]等。二元统计模型通过独 立比较各孕灾因子与滑坡分布的关系计算因子分级对 应权重值,但各孕灾因子之间对于滑坡相对重要性并不 明确;相反,多元统计模型则可以有效评估因变量(滑坡 分布)与一组自变量(孕灾因子)的相互关系。国内外学 者在针对滑坡易发性评价中已开展了大量单一模型及 耦合模型的应用与对比研究^[20-25],总体上,统计型数据 驱动模型较定性模型评价结果更客观且重复性更强, 多元统计模型较二元统计模型通常具有更好的评价结 果[26-28],通过二元统计模型与多元统计模型的耦合,综 合两者的优势,评价结果具有更高的预测精度。

四川省凉山州普格县地处云贵高原之横断山脉、 地质构造复杂,地质灾害发育。历史灾害统计表明,区 内地质灾害主要以滑坡为主,共发育 195 处,远超泥石 流(80 处)及崩塌(18 处)灾害数量,对当地居民的生 命、财产安全和县内重要设施构成巨大威胁。通过开 展普格县滑坡孕灾地质条件分析及灾害分布规律研究, 本文利用信息量模型、确定性系数模型、证据权模型、 频率比模型分别与逻辑回归模型进行耦合对普格县滑 坡易发性开展评价,对比分析了各耦合模型评价的有效 性和准确率,精准预测区内滑坡地质灾害的发生,为当 地政府和人民开展防灾减灾工作部署提供重要指导,同时也为川西南县域滑坡易发性定量评估模型与防灾减 灾工作提供理论指导和技术支持。

1 数据来源及方法

1.1 研究区概况

普格县地处四川省西南部,隶属凉山彝族自治州,南 北长 68 km,东西宽 41 km,面积 1 905.41 km²(图 1)。 地貌形态主要包括侵蚀堆积河谷平原、山间盆地,以及 侵蚀、剥蚀构造中高山区,地形表现为三山夹两谷,为 典型云贵高原横断山区地貌,海拔介于 1 080~4 340 m。

普格县地处则木河断裂和黑水河断裂交汇处,发育 一系列近南北向褶皱、断裂构造。县域内地层以侏罗 系和白垩系红层分布最广,缺失石炭系和泥盆系。岩性 包括砾岩、砂岩、泥岩、页岩等碎屑岩,灰岩、泥灰岩、 白云岩等碳酸盐岩,以及玄武岩火山岩等,则木河、西 洛河及其支流沿岸分布第四系松散堆积物。

滑坡是区内发育数量最多的一种地质灾害,共发 育 195 处,占地质灾害总数的 67%,其中小型滑坡 141 处,中型滑坡 45 处,大型滑坡 9 处,主要以小型为主。 县域中南部地区是滑坡灾害的高发区,包括普基镇、花 山镇、养窝镇、大槽乡等一带。

1.2 数据来源

文中用于滑坡易发性评价的灾点数据和基础地理 与地质数据主要包括:(1)历史滑坡数据:来自2005年 以来历年灾害调查、汛期排查、2015年地灾详查以及 2021年县域地灾风险评价野外资料^[29];(2)数值高程 模型(DEM):来自县域1:5万地形图,空间分辨率为 20 m×20 m,通过 DEM 提取了研究区坡度、坡向、高程 等数据;(3)工程地质岩组、断层及斜坡结构数据:源自 1:20 万西昌幅地质图;(4)行政区划等基础地理数据: 来源于三调数据。



图 1 研究区及滑坡点分布 Fig. 1 Geographical location of the study area and landslide distribution

1.3 评价模型

文中采用栅格单元法进行评价(20 m×20 m),通过 信息量模型、确定性系数模型、证据权模型、频率比模 型等分别与逻辑回归模型进行耦合计算,前者可以很好 地刻画评价因子不同特征值对易发性的敏感程度,而后 者可以较客观的确定影响因子之间的权重大小。选取 各评价因子分级的信息量值、确定性系数值、证据权值以 及归一化频率比值作为耦合模型自变量,通过逻辑回归 模型的回归运算得到各逻辑回归系数(β),再计算滑坡概 率,最终得到普格县4种耦合模型下滑坡易发性评价图。

(1)信息量模型(Information, I)

地质灾害的形成受多种因素影响,信息量模型^[4]主 要原理为特定评价单元内致灾因素作用下地质灾害发 生与区域地质灾害发生频率的函数比,反映一定地质环 境下致灾因素及其分级区间的组合。信息量计算公式:

$$I_{ij} = \ln \frac{N_j/N}{S_j/S} \tag{1}$$

式中: I_{ij}——致灾因素 i 在 j 状态下地质灾害发生的信息 量值;

- N_i——对应因素在 j 状态下地质灾害分布的单元数;
- N——调查区已有地质灾害分布的单元总数;
- S_j ——对应因素在j状态分布的单元数;
- S——调查区单元总数。

(2)确定性系数模型(Certainty Factor, CF)

确定性系数模型也是一种常用的滑坡易发性评价 模型^[6],基于滑坡发生的概率函数,计算评价因子的确 定性系数,其公式如下:

$$CF = \begin{cases} \frac{PP_{a} - PP_{s}}{PP_{s}(1 - PP_{a})} (PP_{a} < PP_{s}) \\ \frac{PP_{a} - PP_{s}}{PP_{a}(1 - PP_{s})} (PP_{a} \ge PP_{s}) \end{cases}$$
(2)

式中:CF——滑坡发生的确定性系数;

- PP_a——因子分级类别 a 中的滑坡数与 a 的面积比值,表示滑坡在因子分级类别 a 中发生的条件概率;
- PP_s——研究区滑坡总数与研究区总面积之比, 表示滑坡在整个研究区中发生的先验 概率。

*CF*的区间为[-1,1],正值表示滑坡发生的确定性 增加,越接近1越易于发生滑坡;负值表示滑坡发生的 确定性降低,越接近-1越不易于发生滑坡;值为0代表 条件概率与先验概率相同,不确定是否会发生滑坡⁶⁰。

(3)证据权模型(Weights-of-Evidence, WE)

证据权模型是一种以贝叶斯概率统计为基础的二 元统计模型,因该方法较直观、透明且符合地质问题解 决的常规思路而得到广泛应用^[10]。其计算公式如下:

$$W^{+} = \ln((A_{i}^{+}/B^{+})/(A_{i}^{-}/B^{-}))$$
(3)

$$W^{-} = \ln((a_{i}^{+}/B^{+})/(a_{i}^{-}/B^{-}))$$
(4)

$$Wf = W^+ - W^- \tag{5}$$

- 式中: W⁺、W⁻——分别表示影响因子分布区的正相关和 负相关权重值;
 - Wf——综合权重,指示特定因子等级对滑坡变形失 稳的权重;
 - A_i⁺、A_i⁻——分别表示特定因子等级中发生和未发生 滑坡的栅格数;
 - *a_i*, *a_i*——分别表示其他因子等级中发生和未发 生滑坡的栅格数;
 - B⁺、B⁻——分别表示所有发生和未发生滑坡的栅 格数。

(4)频率比模型(Frequency Ratio, FR)

该模型按照一定的规则分析滑坡分布与其影响因 子状态之间的空间关系^[12]。通过计算不同影响因子 (*F*)分级区间(*j*)内滑坡面积(*L*),频率比*F_jR*(Frequency Ratio)表示为:

$$F_{j}R = \frac{P(LFj)}{P(Fj)} = \frac{A_{LFj}/A_{L}}{A_{Fj}A} = \frac{A_{LFj}/A_{Fj}}{A_{L}/A} = \frac{P(L|Fj)}{P(L)} \quad (6)$$

式中: P(LFj)——滑坡分级区间 j 内滑坡的频率;

P(Fj)——研究区中各因子分级 j 的频率;

A_L——滑坡总面积;

A_{Fi}——因子分级区间 j 的总面积;

A——研究区总面积。

(5)逻辑回归模型(Logistic Regression, LR)

该模型能通过简单的线性回归描述滑坡各致灾因 子之间复杂的非线性关系^[13]。利用 Logit 变换, 对滑坡 发生的概率 *P* 和不发生的概率 1-*P* 的比值取自然对数, 建立线性回归方程:

$$Z = \ln(P/(1-P)) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad (7)$$

$$P = 1/(1 + e^{-z})$$
(8)

式中:P——地质灾害发生概率;

 β_0 ——常数项;

 β_1 、 β_2 、…、 β_n ——逻辑回归系数。

2 评价因子选取及分级

普格县滑坡地质灾害普遍发育于具有一定地形坡 度、断层破碎带影响范围内易崩易滑工程地质岩组区, 如区内则木河断裂破碎带、黑水河断裂破碎带以及侏 罗系-白垩系红层发育区等。通过分析区内滑坡地质灾 害分布特征、孕灾规律、形成条件和演化过程,结合高 精度 DEM 数据和遥感影像,建立了滑坡易发性指标体 系,提取高程、坡度、坡向、地势起伏度、曲率、斜坡结 构、工程地质岩组、距断层距离、距水系距离、距道路 距离等主要孕灾因子,根据各因子与滑坡发育关系、各 因子相关性,排除具有较大相关性因子,最终选取坡 度、坡向、高程、工程地质岩组、距断层距离和斜坡结 构等 6 个因子开展普格县滑坡易发性评价,各因子分级 如表 1 和图 2 所示。

(1)坡度

对滑坡而言,斜坡坡度是极为重要的影响因素。利用调查区 20 m 分辨率 DEM 数据提取坡度数据,得到各

滑坡灾害点坡度信息,统计表明:大部分滑坡发育在坡度 40°内的斜坡,随着斜坡坡度的增加,滑坡发育的数量 呈现出先增后减的趋势,在 10°~30°间的发育的滑坡数 量最多(155 处),占总数的 79.49%。

(2)坡向

斜坡的不同坡向代表了不同的日照辐射强度,影响 着坡体表面地下水的蒸发并导致植被覆盖率的差异,这 些差异进一步影响着斜坡岩土体物理力学性质,不同程 度地影响着区内滑坡的易发性。基于 ArcGIS 坡向分析 工具,将斜坡坡向分为北、北东、东、东南、南、西南、 西以及北西等 8 个方向。

(3)高程

普格县地处云贵高原横断山区,全县最高点位于西 北边界的螺髻山,海拔4340m;最低点位于南部的黑水 河河谷一带,海拔1080m,最大相对高差达3260m。 海拔高程差异影响着坡体内含水量、坡内应力大小,同 时不同高差人口密度、人类工程活动的强弱、坡体表面 的植被分布情况也不尽相同。

区内高程1080~1700m范围主要为河谷及两侧 斜坡人类工程活动强烈区域,河谷地貌演化的应力最大 释放区,这一高程区间内岩体更为破碎,应力更为集中, 所以相应地更易发育滑坡。

(4)工程地质岩组

工程地质岩组对滑坡的发育有着极为重要的影响, 区内工程地质岩组主要包括软硬相间砂泥岩岩组、坚 硬玄武岩岩组、坚硬层状灰岩岩组、坚硬-半坚硬砂岩 岩组、第四系松散岩组、软硬相间凝灰岩岩组、半胶结 岩组等7大岩组。统计表明:区内软硬相间砂泥岩岩组 发育的滑坡数量最多,如区内侏罗系和白垩系砂岩、泥 岩及页岩地层,发育滑坡137处,占总数的70.25%,其 次坚硬玄武岩岩组内发育滑坡20处,约占总数的 10.26%。从滑坡灾害密度分布来看,也是软硬相间砂泥 岩岩组、坚硬玄武岩岩组及第四系松散岩组分布密度 最大。

(5)距断层距离

断裂是内动力地质作用的表现, 普格县南北向呈 "Y"字形分布则木河和黑水河两条主断裂带, 其次级断 层极为发育。控制着县域地层分布、河流展布和地貌 演化。断裂带及其影响区岩体普遍较破碎, 在具备良好 地形条件下滑坡灾害发生概率明显增大。

区域强活动性发震大断裂影响范围可达 20 km 以 上,活动性弱、规模较小的断层及主要褶皱其影响范围 仅1 km。为从宏观上揭示地质构造内生动力地质作用对

	Table 1 Calculation results of 1, C		VI'N Value		ication level of ea	ch evaluation	
评价因子	分级	分级面积/km ²	滑坡点/个	信息量值(I)	确定性系数值(CF)	证据权值(WF)	归一化评率比值(NFR)
坡度/(°)	0 ~ 10	190.90	17	-0.263 4	-0.231 6	-0.288 8	0.183 7
	10 ~ 20	497.15	78	0.388 9	0.322 2	0.572 4	0.352 7
	20 ~ 30	620.30	77	0.232 1	0.207 1	0.366 7	0.301 5
	30 ~ 40	438.61	20	-0.689 8	-0.498 3	-0.828 6	0.119 9
	40 ~ 50	138.49	3	-1.734 2	-0.823 5	-1.796 7	0.042 2
	>50	21.54	0	-1.734 2	-1.000 0	-1.611 8	0.000 0
	크ヒ	237.61	17	-0.770 0	-0.537 0	-0.843 6	0.058 2
	北东	229.75	17	-0.225 5	-0.201 9	-0.252 8	0.100 3
	东	264.22	29	-0.077 6	-0.074 7	-0.089 5	0.116 3
	东南	223.00	23	0.092 0	0.087 9	0.104 8	0.137 8
双回	南	213.81	23	0.082 8	0.079 5	0.093 8	0.136 5
	西南	228.02	22	0.118 5	0.111 8	0.135 8	0.141 5
	西	269.04	42	0.405 1	0.333 1	0.490 7	0.188 5
	北西	241.54	22	-0.039 2	-0.038 4	-0.044 7	0.120 9
	1 080 ~ 1 250	18.04	8	1.556 6	0.789 2	1.593 2	0.248 1
	1 250 ~ 1 500	73.97	60	2.028 4	0.868 5	2.338 5	0.397 7
	1 500 ~ 1 750	127.88	39	1.053 6	0.651 3	1.197 8	0.150 0
高程/m	1 750 ~ 2 000	181.76	38	0.797 3	0.549 5	0.934 8	0.116 1
	2 000 ~ 2 250	260.21	31	0.237 8	0.211 6	0.281 2	0.066 4
	2 250 ~ 2 500	277.74	10	-1.043 8	-0.647 9	-1.148 6	0.018 4
	>2 500	967.41	9	-2.761 8	-0.936 8	-3.437 0	0.003 3
	软硬相间砂泥岩岩组	1 012.50	137	0.292 8	0.253 8	0.779 0	0.285 2
	坚硬玄武岩岩组	244.86	20	-0.224 7	-0.201 2	-0.253 8	0.170 0
	坚硬层状灰岩岩组岩、白云质灰岩岩组	195.97	8	-0.695 1	-0.501 0	-0.750 9	0.106 2
工程地质岩组	坚硬-半坚硬砂岩组	324.87	14	-1.200 6	-0.699 0	-1.334 7	0.064 1
	松软岩组	90.32	16	0.565 0	0.431 6	0.603 5	0.374 5
	软硬相间凝灰岩	38.21	0	-1.200 6	-1.000 0	-0.984 8	0.000 0
	半胶结岩组	0.27	0	-1.200 6	-1.000 0	-0.984 8	0.000 0
距断层距离/km	0 ~ 0.5	577.04	108	0.576 3	0.438 1	0.989 2	0.409 2
	0.5 ~ 1	372.13	44	0.110 5	0.104 7	0.139 3	0.256 8
	1~1.5	272.36	20	-0.213 3	-0.192 1	-0.244 8	0.185 8
	1.5 ~ 3	476.60	19	-0.890 7	-0.589 6	-1.070 0	0.094 4
	>3	208.88	4	-1.452 0	-0.765 9	-1.542 1	0.053 8
斜坡结构	顺向坡	284.78	49	0.489 3	0.387 0	0.606 8	0.239 8
	斜向坡	513.76	46	-0.127 4	-0.119 6	-0.170 6	0.129 4
	横向坡	521.17	43	-0.197 3	-0.179 1	-0.262 4	0.120 7
	逆向坡	252.00	22	-0.135 6	-0.126 8	-0.154 7	0.128 4
	块状结构斜坡	240.57	16	-0.414 6	-0.339 4	-0.462 5	0.097 1
	松散土质斜坡	94.72	19	0.660 5	0.483 4	0.710 7	0.284 6

表 1 评价因子分级及 I 值、CF 值、WF 值和 NFR 值

 Table 1
 Calculation results of I, CF, WF and NFR values for classification level of each evaluation factor

滑坡的影响,在普格县现有地质构造的基础上,创建断裂的多环缓冲区,统计离断层不同距离内的滑坡发育特征。其缓冲距离可分为:0~0.5 km、0.5~1 km、1.5~3 km及>3 km。随着距断裂带距离的增大,滑坡的发育数量和发育密度均逐渐减少。

(6)斜坡结构

斜坡岩土体结构类型往往影响着滑坡、崩塌等主

要地质灾害的失稳破坏方式,理论和实践均表明,岩土 体类型与成灾模式之间存在着强烈的成生联系。通常, 对于滑坡灾害来说,顺向斜坡最易发生基岩顺层滑动, 逆向坡及横向坡发生失稳滑动的可能性较低。统计结 果表明,区内顺向坡发育的滑坡数量最多,而松散土质 斜坡发育的滑坡点密度是最多的,斜向坡次之,块状结 构坡最低。



Fig. 2 Grading of evaluation factors

3 评价结果与讨论

3.1 易发性评价结果

随机抽取普格县滑坡总数的 80% 与相同数量的随 机非灾害点作为训练样本数据,共计 312 个样本点。通 过各单一模型与逻辑回归模型耦合开展滑坡易发性评 价,样本赋值"1"表示滑坡点,"0"表示非滑坡点,作为 逻辑回归模型的因变量,自变量为坡度、坡向、高程、 工程地质岩组、距断层距离和斜坡结构等 6 项评价因 子的信息量值(*I*)、确定性系数值(*CF*)、证据权值(*WF*) 和归一化频率比值(*NFR*)。利用 SPSS 软件开展二元逻 辑回归分析,为确保各因子具有数理统计意义,其显著 性水平均小于 0.05。基于逻辑回归计算各因子系数值 后可得耦合模型滑坡易发性评价公式分布如下:

$$P_{I-LR} = 1/1 + \exp[-(-0.101 + 0.686I_{1j} + 1.355I_{2j} + 0.874I_{3j} + 0.154I_{4j} + 0.586I_{5j} + 0.303I_{6j})]; \quad (9)$$

$$P_{CF-LR} = 1/1 + \exp[-(-0.405 + 1.055CF_{1j} + 1.722CF_{2j} + 1.890CF_{3j} + 0.354CF_{4j} + 0.994CF_{5j} + 0.464CF_{6j})]$$
(10)

$$P_{WF-LR} = 1/1 + \exp[-(-0.287 + 0.558WF_{1j} + 1.198WF_{2j} + 0.722WF_{3j} + 0.27WF_{4j} + 0.507WF_{5j} + 0.25WF_{6j})];$$
(11)

$$P_{\text{NFR-LR}} = 1/1 + \exp[-(-5.588 + 4.320NFR_{1j} + 10.762NFR_{2j} + 10.188NFR_{3j} + 4.301NFR_{4j} + 3.564NFR_{5j} - 0.612NFR_{6j})];$$
(12)

式中: P_{I-LR}、P_{CF-LR}、P_{WF-LR}、P_{NFR-LR}——I-LR 模型、CF-LR 模型、WF-LR 模型、NFR-LR 模型下滑坡 发生的概率值;

根据上述滑坡概率模型,通过 GIS 分析得到研究区 滑坡概率分布,将滑坡易发性划分为:低易发(P:0~ 0.25)、中易发(P: 0.25~0.5)、高易发(P: 0.5~0.75)和 极高易发(P:0.75~1),研究区各耦合模型滑坡易发性 评价分区如图 3。统计各易发等级内训练集滑坡点数 量、占比及密度(表 2),各耦合模型主要灾害点近半数 落入极高易发区,其中 I-LR、CF-LR 和 WF-LR 耦合模 型极高易发区滑坡数量占比分别达 51.28%、51.28% 和 50%, NFR-LR 耦合模型为 43.59%; 落入中易发以上的滑 坡占比介于 94.87%~96.15%; 滑坡灾害点密度自极高 易发区至低易发区呈现明显降低的趋势。同时,四种耦合 模型低易发区面积均超过 50%, 达到 52.92%~63.22%, 极高易发区面积占比均低于10%。绝大部分滑坡灾害 点集中发育在面积较小的极高-高易发区,而中-低易发 区滑坡数量显著减小,与县域实际滑坡灾害点分布情况 较吻合,表明四种耦合模型均有效评价了普格县滑坡易 发性。

从滑坡易发性评价分区图可以看出(图 3),四种耦 合模型计算结果具有一定的相似性,结合区域孕灾地质 条件与滑坡灾害点发育分布规律分析,四种耦合模型滑 坡易发性评价分区图具有以下特点:

(1)县域内滑坡极高、高易发区主要发育于则木河 和黑水河河谷一带,多种有利因素使得滑坡在该带较为 发育,包括水对河岸斜坡带的冲刷、软化和动水压力, 可大幅降低坡岸岩土体强度,同时山区河谷两岸是人类 活动最为活跃区,建房修路切坡较普遍,人为扰动进一 步增加了滑坡的易发性。

(2) 普格县城周边是滑坡极高、高易发主要集中 区, 区内则木河断裂带与黑水河断裂带在此汇聚, 岩土 体受众多断层切割、挤压拉裂作用, 变得松散破碎, 力 学强度显著降低, 在河岸斜坡的有利地形条件下, 滑坡 易发性较其他区域明显增大。

(3)中低易发区多位于远离河谷的高海拔地区,此 外在五道箐镇等局部较为平坦的河谷区也有发育。

3.2 评价精度对比分析

为了检验评价结果精确性和合理性,有必要针对四种耦合模型开展评价精度对比分析,首先统计分析了未参与评价的测试样本滑坡点在各易发性分级下的灾害点数量占比情况,其次,通过常用的受试者特征曲线法(Receiver Operating Characteristic curve, ROC)^[30]、Sridevi Jadi 经验概率法^[31]等对模型评价的精度进行多维度检验。

(1)合理性检验

为了检验模型稳定性,选择没有参与模型训练的 39个灾害点(占滑坡总样本数的20%,详见表1),测试 灾害点在各易发等级内的分布状况,同时可以评估地质 灾害易发程度区划结果的合理性。

从检验结果可以看出(表 3),测试灾害点在各易发 区的分布与训练集样本分布特征较相似,各模型测试组 灾害点落在极高易发区的百分比均最大,其中 WF-LR 耦合模型极高易发区灾害点占比甚至达到 51.28%。 计算测试样本落在各等级区的比例(*G*_{ei})与各等级区面 积百分比(*S*_{ai})的比值(*R*_{ei}),各耦合模型均满足 *R*_{ei}值自 极高易发区至低易发区急剧降低的趋势,说明各耦合模 型地质灾害易发性评价及易发程度区划均是合理的。

(2)精度对比

采用 Sridevi Jadi 经验概率法^[31]评估各模型滑坡易 发性预测的准确性,其表达式为:

$$P = \frac{Ks}{S} (1 - (K - Ks)/(N - S))^{1/3}$$
(13)

式中: P——预测精度值;

N——评价单元总数;

S——存在滑坡的单元总数;

K——滑坡易发性为中、高和极高的单元总数;

Ks——存在滑坡的中、高、极高易发性单元总数。

评价计算结果显示,4种耦合模型的预测精度P值 分别为80%(I-LR)、80%(CF-LR)、80%(WF-LR)、76% (NFR-LR),前三种耦合模型预测精度几乎相同,NFR-LR 耦合模型预测精度稍差。

此外,ROC曲线也是目前检验滑坡易发性评价准确性最常用的手段之一^[30],其作为一种二元分类模型,通过计算样本真阳性率(灵敏度)和假阳性率(1-特异度)并分别作为纵坐标和横坐标绘制 ROC 曲线。ROC 曲线下的面积(Area Under Curve, *AUC*),作为数值可以直观的呈现评价结果的精准度,具有很好的客观性和有效性,其值越大,预测精度越高。

各耦合模型 ROC 曲线 AUC 值总体差异不大(图 4), 均大于 0.85, 表明 4 种耦合模型均能够客观准确的对普



图 3 不同耦合模型滑坡易发性评价分区图



注: (a)I-LR; (b)CF-LR; (c)WF-LR; (d)NFR-LR

	易发性等级			训练集滑坡点(156个)			
评价模型		面积/km²	面积占比/% —	滑坡数量/个	占比/%	点密度/个/km ²	
	极高易发	169.89	8.91	80	51.28	0.47	
LID	高易发	303.28	15.90	50	32.05	0.16	
I-LK	中易发	269.10	14.11	20	12.82	0.07	
	低易发	1 164.73	61.08	6	3.85	0.01	
	极高易发	183.43	9.62	80	51.28	0.44	
CE L D	高易发	284.62	14.92	47	30.13	0.17	
CF-LK	中易发	233.42	12.24	21	13.46	0.09	
	低易发	1 205.53	63.22	8	5.13	0.01	
	极高易发	168.77	8.85	78	50.00	0.46	
	高易发	302.78	15.88	51	32.69	0.17	
WF-LK	中易发	278.71	14.62	21	13.46	0.08	
	低易发	1 156.74	60.66	6	3.85	0.01	
	极高易发	129.04	6.77	68	43.59	0.53	
	高易发	248.98	13.06	50	32.05	0.20	
NFK-LK	中易发	519.76	27.26	31	19.87	0.06	
	低易发	1 009.23	52.92	7	4.49	0.01	

表 2 普格县滑坡易发性不同模型评价结果对比 (训练集) Table 2 Comparison of landslide susceptibility evaluation results of different models

表 3 普格县滑坡易发性评价模型结果对比(测试样本)

Table 3 Comparison of landslide susceptibility evaluation results of different models

	易发性等级	面积/km	面积占比S _{ai} /% -	测试样本滑:		
评饥候型				滑坡数量/个	占比G _{ei} /%	$K_{\rm ei} = G_{\rm ei}/S_{\rm ai}$
	极高易发	169.89	8.91	19	48.72	5.47
LID	高易发	303.28	15.90	12	30.77	1.93
I-LK	中易发	269.10	14.11	3	7.69	0.55
	低易发	1 164.73	61.08	5	12.82	0.21
	极高易发	183.43	9.62	19	48.72	5.06
CE L D	高易发	284.62	14.92	13	33.33	2.23
CF-LK	中易发	233.42	12.24	2	5.13	0.42
	低易发	1 205.53	63.22	5	12.82	0.20
	极高易发	168.77	8.85	20	51.28	5.79
	高易发	302.78	15.88	12	30.77	1.94
WF-LK	中易发	278.71	14.62	2	5.13	0.35
	低易发	1 156.74	60.66	5	12.82	0.21
	极高易发	129.04	6.77	19	48.72	7.20
	高易发	248.98	13.06	10	25.64	1.96
NFK-LK	中易发	519.76	27.26	5	12.82	0.47
	低易发	1 009.23	52.92	5	12.82	0.24

格县滑坡灾害易发性进行分级评价,且预测结果准确率 由高到低依次为 WF-LR 模型(AUC=0.869)>I-LR 模型 (AUC=0.868)>CF-LR 模型(AUC=0.866)>NFR-LR 模型 (AUC=0.858)。

4 结论

(1)基于信息量模型(I)、确定性系数模型(CF)、证

据权模型(WF)、频率比模型(FR)分别与逻辑回归模型 (LR)进行耦合,选取坡度、坡向、高程、工程地质岩组、 距断层距离和斜坡结构等 6 项孕灾因子,开展普格县滑 坡易发性评价,各耦合模型获取的极高易发区面积(占 比)分别为 169.89 km²(8.9%, I-LR)、183.43 km²(9.62%, CF-LR)、168.77 km²(8.85%, WF-LR)和 129.04 km²(6.77%, NFR-LR),4 种耦合模型评价结果和易发程度区划均是



Fig. 4 The ROC curves of landslide susceptibility assessment of the four models

合理的。

(2) 普格县滑坡发育的极高、高易发区主要位于则 木河和黑水河河谷区,尤其是普格县城-普基镇-花山镇 一带,滑坡主要分布在坡度10°~30°,坡向西、西南,海拔 1250~1500 m,软硬相间碎屑岩岩组,距断层距离1km 内,斜坡结构为顺向坡和松散土质斜坡等因子类别内。

(3)4种耦合模型均能够客观准确的对普格县滑坡 易发性进行分级评价,预测结果准确率由高到低依次 为WF-LR模型(AUC=0.869)>I-LR模型(AUC=0.868)> CF-LR模型(AUC=0.866)>NFR-LR模型(AUC=0.858)。

参考文献(References):

- [1] BRABB E, PAMPEYAN E, BONILLA M. Landslide susceptibility in San Mateo County [R]. fornia. 1972. https://pubs.er.usgs.gov/publication/mf360
- [2] COROMINAS J, VAN WESTEN C, FRATTINI P, et al. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2014, 73(2): 209 – 263.
- FELL R, COROMINAS J, BONNARD C, et al. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning [J]. Engineering Geology, 2008, 102(3/4): 85 – 98.
- [4] YIN K L, YAN T Z. Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks [J]. Landslides Proc 5th Symposium, Lausanne, 1988 (2): 1269 – 1272. https://www. mendeley.com/research/statistical-prediction-models-slopeinstability-metamorphosed-rocks/
- [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 Tianlun, ZENG

Chao, FAN Chen, 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. (in Chinese with English abstract)]

- [6] 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)]
- [7] DEVKOTA K C, REGMI A D, POURGHASEMI H R, et al. Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entropy and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling-Narayanghat Road section in Nepal Himalaya [J]. Natural Hazards, 2013, 65(1): 135 – 165.
- [8] 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)]
- [9] LEE S, CHOI J. Landslide susceptibility mapping using GIS and the weight-of-evidence model [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2004, 18(8): 789 – 814.
- [10] 张艳玲,南征兵,周平根.利用证据权法实现滑坡易发性区划[J].水文地质工程地质,2012,39(2):121-125.
 [ZHANG Yanling, NAN Zhengbing, ZHOU Pinggen. Division of landslide susceptibility based on weights of evidence model [J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2012, 39(2):121-125. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 范强,巨能攀,向喜琼,等.证据权法在区域滑坡危险性 评价中的应用——以贵州省为例[J].工程地质学报, 2014, 22(3): 474-481. [FAN Qiang, JU Nengpan, XIANG Xiqiong, et al. Landslides hazards assessment with weights of evidence: A case study in Guizhou, China [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(3): 474-481. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 吴常润,角媛梅,王金亮,等.基于频率比-逻辑回归耦合 模型的双柏县滑坡易发性评价[J].自然灾害学报, 2021,30(4):213-224. [WU Changrun, JIAO Yuanmei, WANG Jinliang, et al. Frequency ratio and logistic regression models based coupling analysis for susceptibility of landslide in Shuangbai County [J]. Journal of Natural Disasters, 2021, 30(4):213-224. (in Chinese with English abstract)]
- [13] GUZZETTI F, CARRARA A, CARDINALI M, et al. Landslide hazard evaluation: A review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy [J]. Geomorphology, 1999, 31(1-4): 181-216.

- [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 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)]
- [15] 许冲,戴福初,徐素宁,等.基于逻辑回归模型的汶川地 震滑坡危险性评价与检验[J].水文地质工程地质,2013, 40(3):98-104. [XU Chong, DAI Fuchu, XU Suning, et al. Application of logistic regression model on the Wenchuan earthquake triggered landslide hazard mapping and its validation [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(3):98-104. (in Chinese with English abstract)]
- [16] VORPAHL P, ELSENBEER H, MÄRKER M, et al. How can statistical models help to determine driving factors of landslides? [J]. Ecological Modelling, 2012, 239: 27 – 39.
- [17] 何书,鲜木斯艳·阿布迪克依木,胡萌,等.基于自组织特征映射网络-随机森林模型的滑坡易发性评价——以江西大余县为例[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(1): 132-140.[HE Shu, ABUDIKEYIMU XMSY, HU Meng, et al. Evaluation on landslide susceptibility based on self-organizing feature map network and random forest model: a case study of Dayu County of Jiangxi ProvinceFull text replacement [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(1): 132-140. (in Chinese with English abstract)]
- [18] GUZZETTI F, GALLI M, REICHENBACH P, et al. Landslide hazard assessment in the Collazzone area, Umbria, Central Italy [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2006, 6(1): 115 - 131.
- [19] LEE C T, HUANG C C, LEE J F, et al. Statistical approach to earthquake-induced landslide susceptibility [J]. Engineering Geology, 2008, 100(1/2): 43 - 58.
- [20] 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. [FAN Zhiyin, GOU Xiaofeng, QIN Mingyue, et al. Information and logistic regression models based coupling analysis for susceptibility of geological hazards [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(2): 340-347. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 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)]
- [22] 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 Luguang, PEI Xiangjun, HUANG Runqiu, 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. (in Chinese with English abstract)]

- [23] 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 Zhongyuan, DENG Mingguo, XU Shiguang, 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. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 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. [DU Guoliang, YANG Zhihua, YUAN Ying, et al. Landslide susceptibility mapping in the Sichuan-Tibet traffic corridor using logistic regression-information value method [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5):102-111. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 沈迪,郭进京,陈俊合.甘肃定西地区地质灾害危险性 评价[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(4):134-142.[SHEN Di, GUO Jinjing, CHEN Junhe. Risk assessment of geological hazards in Dingxi region of Gansu Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2021, 32(4):134-142.(in Chinese with English abstract)]
- [26] SÜZEN M L, DOYURAN V. A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate [J]. Environmental Geology, 2004, 45(5): 665 – 679.
- [27] FELICÍSIMO Á M, CUARTERO A, REMONDO J, et al. Mapping landslide susceptibility with logistic regression, multiple adaptive regression splines, classification and regression trees, and maximum entropy methods: a comparative study [J]. Landslides, 2013, 10(2): 175 – 189.
- [28] GOETZ J N, BRENNING A, PETSCHKO H, et al. Evaluating machine learning and statistical prediction techniques for landslide susceptibility modeling [J]. Computers & Geosciences, 2015, 81: 1 – 11.
- [29] 凌飞,杨东,王双,等.四川省普格县地质灾害风险调查 评价(1:50000)成果报告[R].四川:四川志德岩土工 程有限责任公司,2021.[LING Fei, YANG Dong, WANG Shuang, et al. Report on the results of geological disaster risk investigation and evaluation (1:50000) in Puge County, Sichuan Province [R]. Sichuan: Sichuan Zhide Geotechnical Engineering Co. Ltd., 2021. (in Chinese)]
- [30] FAWCETT T. An introduction to ROC analysis [J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(8): 861 – 874.
- [31] SRIDEVI JADI, S. SARKAR,杨健.斜坡不稳定性分类的统 计模型[J].世界地质,1997,16(1):83-88.[SRIDEVI JADI, SARKAR S, YANG J. Statistical model of slope instability classification [J]. World Geology, 1997, 16(1):83-88. (in Chinese with English abstract)]