

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2021.02.023

不同组合模型区域滑坡易发性及精度分析

王高峰^{1,2}, 郭宁^{1,2}, 邓兵^{1,2}, 田运涛^{1,2}, 叶振南^{1,2,3,*}, 陈宗良^{1,2},
吕凤兰^{1,2}, 高幼龙^{1,2}

(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051; 2. 自然资源部三峡库区地质灾害
监测预警野外科学观测基地, 重庆 404100; 3. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074)

摘要:为探索区域滑坡易发性评价模型的适用性和评价结果的合理性,以滑坡灾害高发的白龙江流域为研究区,首先选取坡度、地形起伏度、距断层距离、地层岩性、流域沟壑密度、植被指数等6项影响滑坡发生的孕灾因子作为易发性的评价指标,以研究区2 093处滑坡灾害点为样本数据,依据各指标条件下的信息量值、确定性系数值和证据权重值曲线突变规律,并结合滑坡面积及分级面积频率比曲线作为等级划分的临界值来确定因子分级状态;其次,基于指标因子状态分级和相关性分析结果,采用信息量法、确定性系数法、证据权法分别与逻辑回归组合的3种模型开展区域滑坡灾害易发性评价,并从模型结果、适用性和精度等方面采用多手段对3种组合模型进行比较和讨论。研究表明:在区域滑坡易发性评价方面,3组模型均表现较为理想,信息量和逻辑回归组合模型的预测精度为94.6%,其预测精度和准确性优于其他2种组合模型。笔者以白龙江流域中游及其岷江支流段为例,开展滑坡灾害易发性评价模型适用性、评价结果分析以及预测精度评价对比和研究等,成果可为该区地质灾害防灾减灾和国土空间用途管制规划决策提供参考。

关键词:滑坡易发性;精度分析;信息量模型;逻辑回归模型;白龙江流域

中图分类号:P642

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2021)02-0259-14

Analysis of Landslide Susceptibility and Accuracy in Different Combination Models

WANG Gaofeng^{1,2}, GUO Ning^{1,2}, DENG Bing^{1,2}, TIAN Yuntao^{1,2}, YE Zhennan^{1,2,3,*},
CHEN Zongliang^{1,2}, LÜ Fenglan^{1,2}, GAO Youlong^{1,2}

(1. Hydrogeological Environmental Center of China Geological Survey, China Geology Survey, Baoding 071051, Hebei, China; 2. Natural Resources Three Gorges Reservoir Area Geological Disaster Monitoring and Early Warning Field Science Observation Base, Chongqing 404100, China;
3. China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: This paper carried out the studies in Bailong river basin, where landslide incidences frequently occurred, to explore the applicability and the rationality of the landslide susceptibility evaluation model. Six indicators of slope, topographic relief, distance from fault, stratum lithology, watershed gully density and vegetation normalization index were selected as susceptibility e-

收稿日期:2020-06-10;修回日期:2020-08-31

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20160281、DD20190646)。

作者简介:王高峰(1984-),男,高级工程师,从事地质灾害调查与评价。E-mail:wgf_cgcs303@163.com。

* 通讯作者:叶振南(1989-),男,工程师,在读博士,从事地质灾害调查评价与监测预警工作。E-mail:591941864@qq.com。

valuation indication. The authors took 2 093 landslide disaster points in the study area as sample data and determined the factor classification status by using the information value, deterministic coefficient value and the mutation law of evidence weight value curve, combined with the frequency ratio curve of the landslide area and the graded area as the criticality of the grading division value. Based on the state grade of each index and correlation analysis, three combination models with logistic regression, of information value method, deterministic coefficient method and evidence weight method were used to evaluate the susceptibility of regional landslide hazard. The three combination models were compared and discussed from the aspects of the results, the applicability and the accuracy. Results show that in the evaluation of regional landslide susceptibility, all the three models are ideal. The prediction accuracy of the combination model of information value method with logistic regression is better than the other two combination models, with a prediction accuracy of 94.6%. The results provide reference for geological disaster prevention and land use in this area.

Keywords: landslide susceptibility; accuracy evaluation; information value model; logistic regression model; Bailong river basin

滑坡易发性是指一定区域内由孕灾地质条件控制的滑坡发生的可能性,而滑坡易发性不同于危险性,不考虑地震、降水等诱发因素。从研究区域分析,中国滑坡易发性评价研究主要分布在三峡库区、汶川地震区及西北黄土区等西部山区,并形成了较为详细的评价方法体系(许冲等,2010;唐亚明等,2011;张俊等,2016;张茂省等,2019)。有学者针对白龙江流域开展了滑坡、泥石流发育环境、危险性评价等方面的研究(张帆宇等,2012;陈冠等,2013;齐识等,2014;王高峰等,2019),研究对象多集中在白龙江干流或中游某一重要区段或国道 212 沿线。而关于整个流域尺度(甘肃段)的滑坡易发性评价研究甚少,目前仍然缺乏区域性国土空间用途管制规划必需的滑坡灾害易发性分区成果地图,特别是针对评价模型的适用性和精度评价方法的对比研究鲜有案例。

目前,区域滑坡灾害易发性评价主要依靠启发式推断法、数理统计分析法和非线性方法等,后 2 类评价方法具有运算效率高和因子权重客观获取的优势而被广泛运用(沈玲玲等,2016)。其中,数理统计分析法包括基于原始数据,对其规律进行基础处理的信息量模型、确定性系数模型、证据权法模型等(范强等,2014;樊芷吟等,2018;田春山等,2016;杨光等,2019);非线性方法包括基于人工智能学习的人工神经网络模型、决策树模型、支持向量机模型及逻辑回归模型等(冯杭建等,2016;刘坚等,2018;张茂省等,2019)。但由于单一的评价模型方法存在对

参评因子不能客观地确定其权重、模型运算过程中因主观干扰而无法消除评价因子之间的相关性等问题,难以客观、准确、定量地进行区域滑坡灾害易发性评价。为获得吻合实际的评价结果,有学者开展了多种模型组合对滑坡易发性进行评价,总结分析了模型的优劣(邱海军等,2014;张晓东等,2018)。此外,评价因子选取不当或彼此相关性强或个数较多,及评价因子状态分级方面客观性影响较高,没有科学合理的划分依据,评价过程不仅繁琐,而且会影响模型评价结果的合理性和准确性。然而在评价结果分析方面很少有人关注这些评价模型和方法评价精度的对比与检验,事实上评价结果的准确性、分析精度及与实际情况的吻合程度是使用者最关注的问题,在数据有限条件下的评价结果更需要对精度进行分析。

笔者在研究白龙江流域滑坡发育特征及孕灾环境的基础上,结合数据源的可获取性,选取了坡度、地形起伏度、距断层距离、地层岩性、流域沟壑密度、植被指数等 6 个影响滑坡灾害发生的致灾因素作为参评因子。首先,结合 2 093 处滑坡灾害及隐患点数据,并依据各指标条件下的信息量值、确定性系数值和证据权重值曲线突变规律、滑坡面积及分级面积频率比曲线对各评价因子的状态进行分级;然后通过应用信息量模型、确定性系数模型和证据权模型分别与逻辑回归模型进行滑坡易发性评价,最后采用 4 种不同方法进一步检验评价结果的合理性,

并开展研究区滑坡灾害易发性及结果精度评价分析。力求从模型适用性和预测精度 2 方面选择适合于该流域的最优滑坡易发性评价方法,真实地反映出滑坡易发性的空间分布特征,以期为地质灾害高发、多发的白龙江流域地质灾害防灾减灾预警决策提供参考。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

根据甘肃省白龙江流域滑坡发育特征及现有滑坡灾害数据,选取白龙江流域受滑坡灾害影响最严重的白龙江中游及岷江支流段作为本文的研究区域。地理坐标为东经 103°42′55.1″~105°19′00.7″,北纬 33°01′17.5″~34°22′37.6″,面积约为 6 128 km²,图 1 为研究区地理概况及位置示意图。

该区位于青藏高原东部、秦岭山地西缘,中国纵

横向地震带在此交汇穿过,地质构造复杂,发育一系列活动的逆冲断裂和走滑断裂,且局部次级断裂和小型褶皱集中发育,新构造运动强烈和地震活动频繁。该区滑坡灾害密布于软弱浅变质岩地层区,尤其在志留系、泥盆系等软弱千枚岩区域最为突出,滑坡灾害密度达 0.48 个/km²,是区内滑坡灾害易发多发岩组。白龙江中游及其岷江支流贯穿整个区域,地貌类型复杂,属中深切切割中高山地貌区,地形海拔高度为 768~4 244 m,相对高差为 3 476 m。该区属于亚热带向北温带的过渡区,气候垂向上随海拔变化具有差异性,在时空分布上降水分布不均匀(王高峰等,2019)。受以上条件的影响使得该区地质灾害发生的频率高、规模大、种类多、范围广,且具有“群发性、突发性、隐蔽性、叠加性”的特点,每年造成的经济损失巨大,其中滑坡灾害的严重性亦是众所周知。例如,锁儿头滑坡、泄流坡滑坡、江顶崖滑坡等。

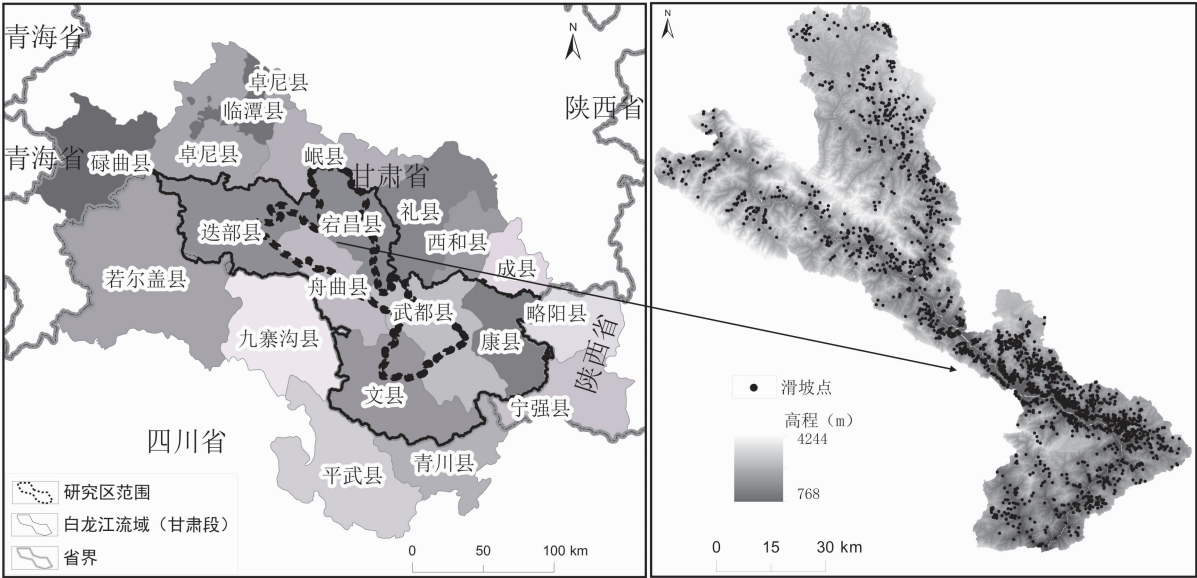


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Geographical location of the study area

1.2 数据源

本研究开展滑坡易发性评价的数据源(表 1)主要包括:①滑坡灾害点的基础数据主要来自陇南白龙江流域地质灾害调查成果数据。②研究区 1:50 000 地形图和 30m×30m 分辨率 DEM 数据,用于提取坡度、地形起伏度、流域沟壑密度等信息。③ 1:100 000 构造地质图,用于提取地层、距断层距离

等信息。④2016 年获取的精度为 0.5m 的 Pléiades 卫星遥感数据和 2014 年 30m×30m 的 landsat8 OLI,用于提取归一化植被指数。

研究区滑坡共 2 093 处,总面积 224.54km²,约占整个研究区面积的 3.66%。图 2 为根据野外调查和已有滑坡资料整理得到的白龙江中游段滑坡发育面积分布曲线图。可以看出,滑坡面积与滑坡分

布个数呈双峰曲线规律,整体上滑坡面积越大,分布个数越少。研究区最大滑坡面积为 4.36 km²,最小为 210 m²,在滑坡面积为 0.001~0.015 km² 和

0.035~0.153 km² 范围内滑坡共有 1 258 处,占研究区滑坡总数和滑坡总面积的比例分别为 60.11% 和 25.64%。

表 1 数据类型及数据来源表
Tab.1 Sources and types of data

基础数据	数据来源与制作	数据格式
DEM	地理空间数据,用于提取坡度、地形起伏度、流域沟壑密度等信息	国家地理信息中心;30 m×30 m 栅格数据
地质数据	用于提取地层、距断层距离等信息(甘肃省地质环境监测院)	1:100 000 区域地质图,矢量数据
遥感数据	用于提取归一化植被指数	栅格数据
滑坡灾害统计	根据《陇南白龙江流域地质灾害调查成果报告》《陇南市地质灾害防治规划(2011~2020 年)》、遥感影像解译	矢量数据

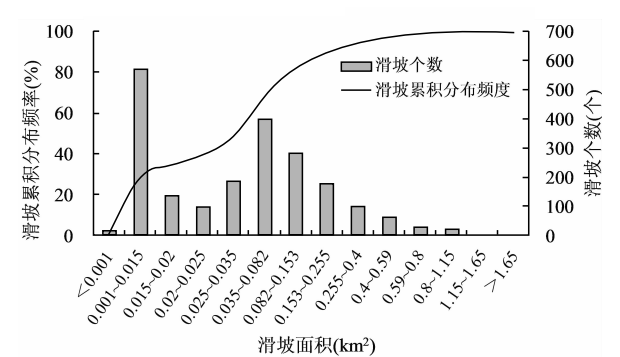


图 2 滑坡发育面积分布曲线图

Fig. 2 Distribution curve of landslide development area

1.3 研究方法

目前,较为常用的滑坡易发性评价模型均具有各自的优点和不足(表 2)。但滑坡灾害孕育过程是一个非线性系统,线性的数理统计很难精确地对其进行预测。为了提升评估成功率或准确性,可综合各自模型的优点对研究区的滑坡易发性进行建模,不仅能在 GIS 平台的支持下快速得出评价结果,而且较理想地解决采用单一模型在滑坡易发性评价中的不足,使评价结果更满足实践和应用需求。

采用表 2 中公式(1)、(2)、(3)信息量模型、确定性系数模型和证据权模型计算出的各个评价因子等级的 I 值、 C_F 值和 Wf 值作为逻辑回归模型中的指标值,构建不同组合回归方程,得出逻辑回归系数 β_i , 以此为依据开展研究区滑坡易发性评价。因此,本研究随机选取滑坡灾害点总样本的 80% 作为训练样本(即 1 680 个发生滑坡灾害点)进行建模分析,相应的随机选取 1 680 个未发生滑坡的样本点,共计得到 3 360 个具有独立属性的样本数据,并将其

作为因变量样本集。结合评价因子,分别采用信息量模型 I + 逻辑回归模型 LR (组合 1)、确定性系数模型 C_F + 逻辑回归模型 LR (组合 2)和证据权模型 Wf + 逻辑回归模型 LR (组合 3) 3 种组合模型评价研究区的滑坡灾害易发性并进行分区,分析 3 种组合模型得到的研究区滑坡易发性评价结果。利用 20% 的滑坡样本点,采用多种方法检验评价结果的合理性,结合滑坡实际分布规律及发育情况讨论并比较 3 种组合模型的适用性和准确性。

2 评价因子筛选与分级

2.1 因子筛选

滑坡的发生是孕灾环境因子和诱发环境条件共同作用的结果,其中孕灾环境因子是指斜坡自身的属性特征,在经过剥蚀或风化等作用逐渐使斜坡趋于变形失稳状态。诱发环境因子是指在降雨、地震、人类工程扰动等影响下导致斜坡失稳的外界条件。通常,滑坡易发性评价主要考虑对滑坡发生发展起控制性作用的孕灾环境因子,来揭示斜坡未受外界条件影响情况下的失稳概率。促使滑坡产生的孕灾环境因子主要包含:地形地貌、基础地质、地表覆被和水文环境因子等 4 大类。在评价因子的选取中既要合理灵活又要体现因子对滑坡的影响,同时要确保各因子之间互不影响且不具有强相关性。因此,基于野外实地调查及收集到的数据库与前人研究成果,选取地形起伏度、坡度、地层岩性、距断层距离、沟壑密度、植被指数($NDVI$)等 6 个孕灾环境因子,采用 30 m×30 m 分辨率的栅格单元作为研究区滑坡易发性的基本评价单元。在此基础上进行滑坡指

表 2 滑坡易发性研究方法表
Tab. 2 Sources and types of data

评价方法	评价模型	物理意义	优缺点
信息量法(吴常润等,2020)	$I(y, x_1 x_2 \cdots x_n) = I(y, x_1) + I_{x_1}(y, x_2) + \cdots + I_{x_1 x_2 \cdots x_{n-1}}(y, x_n) = \ln \frac{P(y, x_1 x_2 \cdots x_n)}{P(y)}$	式中, y 为滑坡事件; x_i 为不同影响因素, n 为影响因子个数; $I(y, x_1 x_2 \cdots x_n)$ 为影响因子组合 $(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ 对滑坡所起作用大小的信息量; $P(y, x_1 x_2 \cdots x_n)$ 为影响因子组合下滑坡发生的概率; $P(y)$ 为滑坡发生的概率	采用条件概率的统计分析方法获取评价因子的权重值,一定程度减小主观因素的影响,也是目前国内地质灾害易发性评价的通用模型,它不能反映不同评价因子对滑坡发生的贡献权重或影响程度的差异
确定性系数法(杨光等,2019)	$C_F = \begin{cases} (PP_a - PP_s) / (PP_a(1 - PP_s)), PP_a \geq PP_s \\ (PP_a - PP_s) / (PP_s(1 - PP_a)), PP_a < PP_s \end{cases}$	式中: C_F 为滑坡发生的确定性系数; PP_a 为滑影响因子分类 a 中包含的滑坡灾害个数与数据分类 a 面积的比值; PP_s 为整个研究区内滑坡发生个数与研究区总面积的比值	计算过程严密,既能解决多层数据类型的归并,又能较好地解决评价因子之间不同特征分级对滑坡易发性的影响,但未能体现各评价因子对滑坡易发性的差异性
证据权法(范强等,2014)	$\begin{aligned} W^+ &= \ln((A^+/B^+) / (A^-/B^-)) \\ W^- &= \ln((a^+/B^+) / (a^-/B^-)) \\ Wf &= W^+ - W^- \end{aligned}$	式中: W^+ 表示影响因子分布区的正相关权重值; W^- 表示影响因子分布区的负相关权重值,如果 $W^+ < 0$ 或 $W^- > 0$ 时,影响因子与滑坡事件呈负相关,如果 $W^+ > 0$ 或 $W^- < 0$ 时,影响因子与滑坡事件呈正相关,如果 $W^+ = 0$ 或 $W^- = 0$ 是,影响因子与滑坡事件不相关; Wf 为综合权重,来表示该影响因子等级对滑坡变形失稳的影响权重值; A^+ 表示某因子等级中发生滑坡的栅格数; a^+ 表示其它因子等级中发生滑坡的栅格数; a^- 表示其它因子等级中未发生滑坡的栅格数; B^+ 表示所有发生滑坡的栅格数; B^- 表示所有未发生滑坡的栅格数	证据权模型对评价因子个数无要求,但各评价因子之间需满足独立性检验,且要求滑坡样本数据足够多
逻辑回归法(邱维蓉等,2020)	$Y = Logit(P) = \ln \frac{P}{1-P} = e^{\beta_0} + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_n x_n$	式中: β_0 为截距, β_i 为回归系数,即反映的是滑坡不同影响因子的相对贡献大小。模型输出结果 P 的范围为 $[0, 1]$, 1 表示滑坡发生的概率为 100%, 0 表示滑坡发生的概率为 0%。 P 值反映了在影响因子 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 的共同作用下,滑坡的发生的可能性大小和敏感程度	逻辑回归模型能用简单的线性回归来描述滑坡致灾因子之间复杂的非线性关系,且计算便捷,对多层数据类型的合并却无法解决。本文获取的滑坡样本数据详实,评价因子基础数据易获得且精度较高,在基于数理统计进行易发性评价时可取得较理想的结果[18]

标因子的状态分级及易发性评价。

2.2 评价因子状态分级

影响指标因子状态分级是指数据类型为离散型和连续型的单因子指标遵循一定的划分标准分为多个不同范围的二级状态。其中,离散型数据主要根据野外调查滑坡孕灾工程地质条件类比制定划分标准。而连续型数据是以一定步长的因子信息与预测单元个数分布曲线和综合表 2 中式(1)、式(2)及式(3)计算各步长在各因子中的 I 值、 C_F 值、 Wf 值分布曲线为依据。对比 2 类曲线的分布规律,确定分布曲线的突变点为等级划分的界限值,突变点范围内的数值不仅体现了预测单元空间上的各等级之间的差异性,也体现了评价单元预测的相对集中性。

2.2.1 地形地貌因子

研究区地形地貌因子主要包括地形起伏度、坡度,均是应用 ArcGIS 的空间分析工具从 DEM 中提取的栅格数据。统计地形起伏度、坡度 2 个影响因子不同区间内的滑坡面积比和分级面积比(图 3),可以看出发生滑坡的坡度主要集中在 $[25^\circ, 45^\circ]$ 区间,研究区坡度从 $15^\circ \sim 40^\circ$ 内的面积最大,且在 $[10^\circ, 35^\circ]$ 区间滑坡面积比大于分级面积比,表明滑坡的相对面密度较大。地形起伏度在 100~200 m 时,滑坡发育较多,在 75~175 m 对滑坡影响较大。

2.2.2 水文环境和地表覆被因子

(1)水文环境因子。流域沟壑在一定程度上反映了该地区地形切割程度、起伏程度和岩土体松散程度,亦能反映土壤侵蚀的严重程度,同时也能反映地貌的演化阶段。水系发育程度和分布密度越高对地表侵蚀能力就越强,就越易于发生地质灾害。在对区域滑坡易发性评价研究中,很难揭示地下水对斜坡稳定性的影响。因此,笔者以任一单元内沟壑密度大小来表达水系对区域滑坡发育的影响。根据研究区 DEM 数据提取出的水系分布图,采用 ArcGIS 的空间分析工具,制作研究区流域沟壑密度栅格图层,分别对其影响范围内的滑坡频率进行统计(图 3)。结果显示随着流域沟壑密度的增大,滑坡面积及滑坡灾害点密度呈现先增大后急剧降低,最后以微弱趋势递减。滑坡面积在 $0.8 \sim 1.6 \text{ km}^2$ 范围内相对较大,在 $([0.8, 2.2], [2.4, 3.2]) \text{ km}^2$ 区间对滑坡影响较大。根据曲线规律将流域沟壑密度分为 $< 0.8 \text{ km}^2/\text{km}^2$ 、 $0.8 \sim 1.2 \text{ km}^2/\text{km}^2$ 、 $1.2 \sim 2.4 \text{ km}^2/\text{km}^2$ 、 $2.4 \sim 3.2 \text{ km}^2/\text{km}^2$ 、 $3.2 \sim$

$3.489 \text{ km}^2/\text{km}^2$ 等 5 个状态。

(2)地表覆被因子。植被覆盖度的变化主要影响地表水对岩土体的入渗侵蚀程度,造成斜坡稳定性降低,进而导致滑坡变形失稳概率增加,因此笔者采用植被指数(NDVI)来表征地表覆被。

从图 3 中滑坡面积比和分级面积比曲线可以看出,发生滑坡的 NDVI 主要集中在 $[0.25, 0.40]$ 区间,研究区 NDVI 从 $0.18 \sim 0.45$ 内的面积最大,且在 $[0.10, 0.35]$ 区间滑坡面积比大于分级面积比。根据图 3 模型频率值曲线分析可知,随着 NDVI 的增大,滑坡面积呈现先急剧增大后逐渐较小的趋势,NDVI 在 $[0.1, 0.3]$ 区间对滑坡影响最大。根据曲线规律,将 NDVI 分为 < 0.1 、 $0.1 \sim 0.3$ 、 $0.3 \sim 0.45$ 、 $0.45 \sim 0.5$ 、 > 0.5 等 5 个状态。

2.2.3 基础地质因子

通常认为地层岩性与断裂构造是影响滑坡孕育的 2 个重要基础地质因子。以往研究成果认为,白龙江流域滑坡主要沿断裂带成群成带分布,在区域性活动断裂带一般发育大型或巨型滑坡,据统计 70.6% 的滑坡分布在距断裂 2.5 km 范围内,在距离断层小于 5.0 km 范围分布有 90% 以上的大型滑坡(孟兴民等, 2013; 杨为民等, 2014; 李淑贞等, 2015)。而在地层岩性软弱区或软硬相间岩层区内滑坡成片发育,此次调查共有 1 132 处滑坡发育于软弱岩层区,441 处滑坡发育于软硬相间岩层区,占滑坡总数的 75.2%。故选取岩性与构造活动作为滑坡易发性评价的基础地质条件。

(1)地层岩性。地层岩性对滑坡孕育起着重要的影响作用,主要是通过影响堆积体和基岩的物理力学性质及其渗透性来促使滑坡变形失稳。同时,它决定了滑坡发育的规模、类型特征。研究区地层岩性极为复杂,属西秦岭地层区,从前震旦系到第四系均有出露,共出露 30 套地层。

图 3 显示古近系 E^a 、白垩系 $K_1 d_2$ 、二叠系 $P_1 sh$ 、泥盆系 $[(D_{2-3}^2)^a, D_1^2 s_{1+2}, D_1]$ 、震旦系和侵入岩地层区滑坡极不发育。从滑坡面积比曲线图可以看出该区段内滑坡发育面积积极少,而泥盆系 $(D_2^2 g_2, D_1^2 s_6, D_1^2 s_7)$ 和志留系 $(S_{2+3} bl_1)$ 中滑坡面积较大,共发育滑坡 983 处,面积为 106.63 km^2 ,滑坡总面积增加了 65.8%。其他区段按照滑坡面积比曲线的变化情况可分为 3 区段,即:第四系 (Q_4^a, Q_{2-3}) 、古近系 (E^b) 、石炭系 $(C_2 mn, C_1 l)$ 、泥盆系

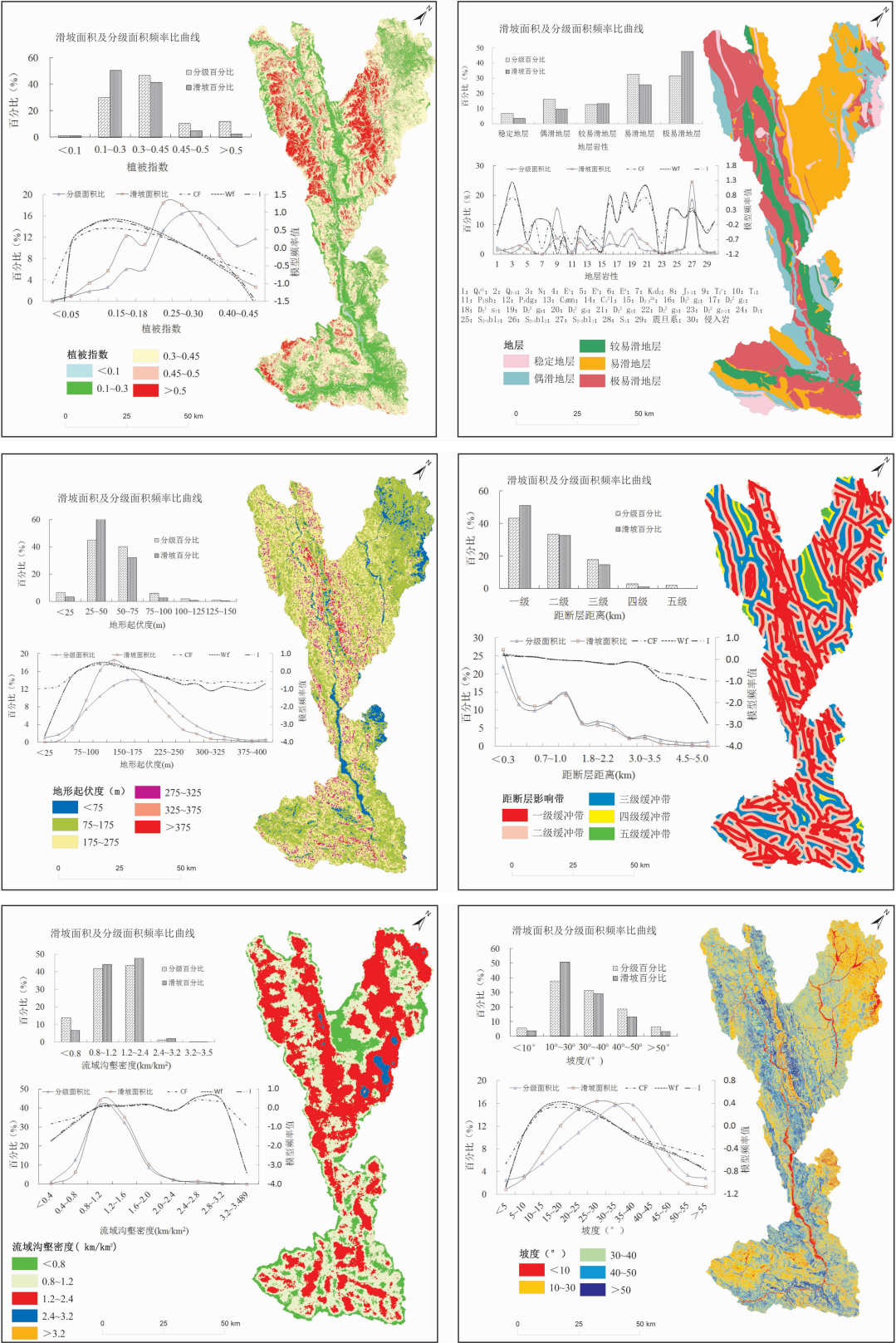


图 3 因子状态分级图

Fig. 3 Statistical map of factors classification

($D_2^1s_3$)及志留系($S_{2+3}bl_3$);新近系(N)、侏罗系(J_{1-2})、泥盆系($D_2^2g_1$)、志留系($S_{2+3}bl_2$ 、 S_1);古近系(E^c)、三叠系(T_2^c 、 T_1)、二叠系(P_1dg)、泥盆系($D_2^1s^5$ 、 $D_2^1s^4$)。故根据滑坡发育的情况将地层岩性分为 5 级(表 3)。

(2)地质构造条件。滑坡发育和发生与断裂构造活动有着密切的关系,距断层的距离是滑坡易发性分析的一个重要影响因子(陈明等,2018)。研究区滑坡的发育主要受到活动断裂控制,最为典型的是坪定-化马活动断裂(带),沿该断裂破碎带发育一系列特大型滑坡,呈现出滑坡后壁至分水岭的长条状、“背滑”、“对滑”相间线状分布特征,其物质结构、成分、成因复杂,次级断裂发育。

研究区内滑坡沿断裂呈带状分布的特征非常明显,通过对区内滑坡的分布随距断层的距离统计表明:滑坡灾害的分布随其距断层距离呈急剧衰减的趋势,滑坡灾害个数与断裂的地表破裂面的垂直距离满足以下关系式(5)。式(5)中 N 为滑坡个数(处); Dr 为距断层距离(km)。

$$N = 1\,062e^{-0.365Dr} \quad (R^2 = 0.883\,9) \quad (5)$$

图 4 与式(5)说明研究区内滑坡分布与断层有着显著的关系,即:距断层越近,断层活动对斜

坡的作用越强烈,就越容易诱发滑坡;反之,随着距断层距离增大,断层活动对斜坡作用迅速减弱。在统计的 2 093 处滑坡中有 1 220 个分布在距断层距离小于 1.0 km 范围内,约占滑坡总数的 58.29%。

通过对区内 498 条断层利用距断层的欧氏距离来表示地质构造活动对滑坡的影响,分别对各缓冲区内的滑坡进行频率统计,结果如图 3 所示,可以得出在距断层[0,1.0 km]区间滑坡面积比大于分级面积比,且滑坡主要发育在距断层距离小于 2.2 km 范围内。利用与地层岩性影响因子相同的分级方法将研究区断层影响带划分为 4 个级别,因为在这 4 个构造影响带之外仍有滑坡发育,故将该范围定义为第 5 级影响带,分级结果见表 4。

2.3 评价因子 I 值、 C_F 值和 Wf 值计算及其共线性诊断

首先,根据 2 093 个滑坡样本点在各评价因子分级状态中的分布情况,分别采用表 2 中公式(1)—公式(3)计算各分类级别在各评价因子中的 I 值、 C_F 值和 Wf 值(表 5)。上述数值不仅可以进行各个评价因子的分类级别之间比较,而且可揭示同一评价因子内各分类级别的相对重要性。

表 3 地层岩性分级表
Tab. 3 Classification of stratum lithology

岩性分级	地层代号
极易滑地层	$D_2^2g_2$ 、 $D_2^1s_6$ 、 $D_2^1s_7$ 、 $S_{2+3}bl_1$
易滑地层	Q_{2-3} 、 E^c 、 T_2^c 、 T_1 、 P_1dg 、 $D_2^1s^5$ 、 $D_2^1s^4$
较易滑地层	N 、 J_{1-2} 、 $D_2^2g_1$ 、 $S_{2+3}bl_2$ 、 S_1
偶滑地层	Q_4^l 、 E^b 、 C_2mn 、 C_3^1l 、 $D_2^1s_3$ 、 $S_{2+3}bl_3$
稳定地层	E^a 、 K_1d_2 、 P_1sh 、 $(D_2^2-3)^a$ 、 $D_2^1s_{1+2}$ 、 D 、震旦系、侵入岩

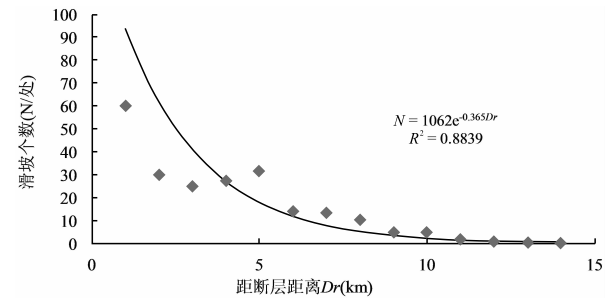


图 4 研究区滑坡个数与断层距离关系图

Fig. 4 The relation map of landslides amount and fault distance

同时为了确保各参评因子互不影响和达到评价模型输入参数准确性的要求,需对所选各指标因子进行筛选。笔者首先选取滑坡灾害点总样本的 80% (即 1 680 个发生滑坡点)和 1 680 个未发生滑坡的样本点作为训练样本。然后提取每个样本的各分级后因子等级值,采用 SPSS 软件中进行多重共线性诊断,获取其方差膨胀系数 VIF 和相关性系数 R 。计算结果显示分级后确定的 6 个指标因子 VIF 值基本接近,其中信息量模型 VIF 值范围为[1.033,1.188],确定性系数模型 VIF 值范围为[1.067,1.139],证据权

表 4 研究区地质构造带滑坡影响距离表

Tab. 4 The distances of geologic structure and landslide in the study area

构造级别	缓冲区影响距离(km)				
	一级带	二级带	三级带	四级带	五级带
1	0.5	1.0	1.5	2.0	>2.0
2	0.7	1.5	2.2	2.7	>2.7
3	1.0	2.2	2.7	4.0	>4.0
4	1.5	2.7	3.0	4.5	>4.5

表 5 各评价因子分类级别 I 值、 C_F 值和 Wf 值计算结果表

Tab. 5 Calculation Results of I Value, C_F Value and Wf Value for Classification Level of each evaluation factor

评价因子	类型分级	分级面积(km ²)	滑坡面积(km ²)	I	C_F	Wf
坡度(°)	<10	351.26	8.37	-0.428 0	-0.356 7	-0.449 0
	10~30	2 324.43	113.88	0.292 2	0.263 0	0.524 8
	30~40	1 922.07	65.33	-0.073 4	-0.073 3	-0.105 3
	40~50	1 148.75	29.37	-0.358 1	-0.308 9	-0.425 3
	>50	380.72	7.17	-0.664 2	-0.494 6	-0.695 8
地形起伏度(m)	<75	394.19	7.21	-0.692 8	-0.509 2	-0.726 7
	75~175	2 732.64	136.61	0.312 4	0.278 4	0.662 0
	175~275	2 459.26	71.77	-0.225 9	-0.208 3	-0.353 1
	275~325	360.30	5.78	-0.824 4	-0.570 7	-0.859 0
	325~375	118.06	1.78	-0.885 2	-0.596 4	-0.896 7
	>375	62.78	1.00	-0.835 9	-0.575 7	-0.841 8
距断层距离(km)	一级缓冲带	2 665.37	114.66	0.162 2	0.155 4	0.307 7
	二级缓冲带	2 051.22	73.22	-0.024 5	-0.025 1	-0.036 7
	三级缓冲带	1 093.93	33.24	-0.185 4	-0.174 5	-0.221 6
	四级缓冲带	185.87	2.55	-0.981 1	-0.633 8	-1.000 5
	五级缓冲带	130.83	0.47	-2.315 4	-0.904 5	-2.334 9
地层岩性	稳定地层	419.17	8.13	-0.634 4	-0.479 5	-0.669 3
	偶滑地层	997.00	21.82	-0.513 4	-0.411 1	-0.589 6
	较易滑地层	779.39	29.73	0.042 2	0.042 0	0.047 5
	易滑地层	1 988.37	57.84	-0.229 1	-0.211 7	-0.324 3
	极易滑地层	1 943.29	106.63	0.407 8	0.347 0	0.671 8
沟壑密度(km/km ²)	<0.8	846.09	14.72	-0.742 9	-0.533 5	-0.823 6
	0.8~1.2	2 556.66	98.83	0.055 2	0.055 8	0.096 6
	1.2~2.4	2 659.14	106.57	0.091 4	0.090 6	0.167 4
	2.4~3.2	64.54	4.01	0.530 8	0.427 5	0.538 2
	3.2~3.489	0.79	0.00	-3.425 1	-0.968 6	-3.425 3
植被指数	<0.1	69.54	2.36	-0.076 2	-0.076 0	-0.077 2
	0.1~0.3	1 833.87	112.67	0.519 4	0.420 5	0.862 9
	0.3~0.45	2 861.94	92.65	-0.121 8	-0.118 5	-0.217 9
	0.45~0.5	640.82	10.49	-0.801 1	-0.560 4	-0.863 4
	>0.5	721.05	5.80	-1.513 0	-0.786 1	-1.612 0

模型 VIF 值范围为 $[1.035, 1.168]$,表明因子之间存在共线性的可能性较小。同时各因子之间的相关矩阵 $R \leq 0.3$,可以认为所选各因子之间相关性微弱或不相关。因此,这 6 个指标因子满足相互独立的要求,均可参与模型评价。

2.4 评价因子权重值计算

通过 GIS 分析计算工具中的栅格计算器将所得的各评价因子 I 值、 C_F 值和 W_f 值赋予各图层,获得 18 张新评价因子的模型值图。然后提取 3 360 个训练样本各赋值后因子等级值作为自变量,是否发生滑坡灾害作为因变量(0 代表未发生滑坡灾害,1 代表滑坡灾害点),分别输入 SPSS 软件中进行多项逻辑回归分析。把分析结果得到的各因子的回归系数 B 作为该因子的权重,各个变量在方程中的重要程度通过 sig 值(或 $wals$ 值)来体现, sig 值小者(或 $wals$ 值大者)变量的显著性就越高,在方程中贡献就越大,当 sig 值小于 0.05 时才具有统计意义。

回归结果显示,3 种组合模型计算出的各因子 sig 值均小于 0.05,说明选取的 6 个因子都是有效的,同时各因子之间的相关系数都小于 0.3,表明所选因子是合理的。组合 1 模型计算出的因子权重大小依次为植被指数、地层岩性、地形起伏度、流域沟壑密度、坡度、距断层距离,其相应的回归系数 B 为(1.021、0.989、0.878、0.864、0.808、0.891)。组合 2 模型计算出的因子权重大小依次为植被指数、地层岩性、地形起伏度、坡度、流域沟壑密度、距断层距离,其相应的回归系数 B 为(1.088、1.001、0.961、0.715、0.744、1.312)。组合 3 模型计算出的因子权重大小依次为植被指数、地层岩性、地形起伏度、流域沟壑密度、坡度、距断层距离,其相应的回归系数 B 为(0.85、0.871、0.768、0.666、0.683、0.924)。可见 3 种组合模型中各因子对模型贡献大小变化很小。

3 评价结果分析及精度评价

3.1 易发性评价分区与评价结果

从各因子的回归系数与不同组合模型得到的各分类级别的 I 值、 C_F 值和 W_f 值乘积可以看出,结果均表现是在以千枚岩、碳质板岩为主的浅变质岩区,距离断层 1.5 km 内,流域沟壑密度在 2.4~3.2 km/km² 区段,坡度 10°~30°和地形起伏度为 75~175 m 范围内,植被裸露区即 $NDVI$ 为 0.1~0.3

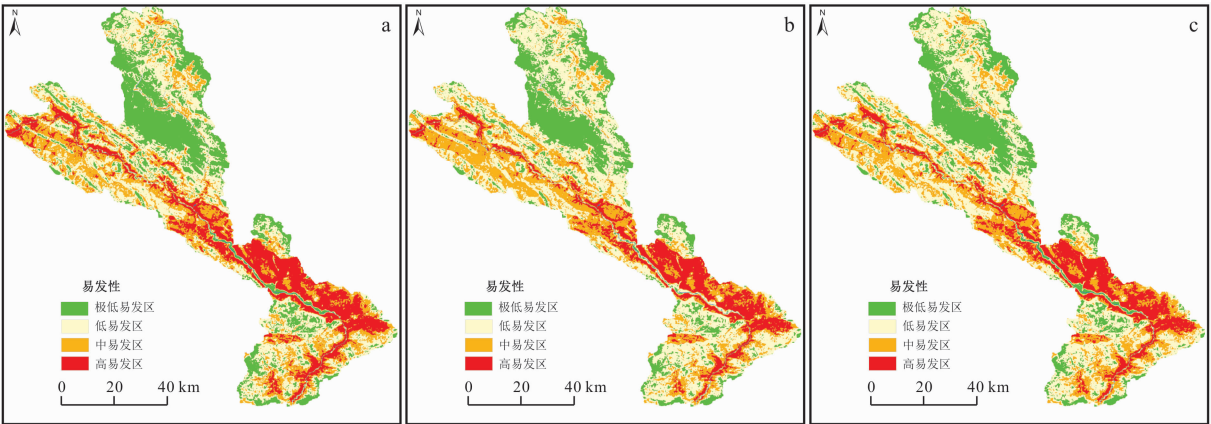
分布区是最容易发生滑坡灾害的地方。

在 ArcGIS 软件中,根据 3 种组合得到的各因子回归系数结合表 2 中公式(4)计算出研究区滑坡灾害发生的概率 P ,生成研究区滑坡发生概率分布图。在此基础上采用似然比模型对滑坡易发性概率结果按 P 值大小分为 4 类:极低易发区(0~0.25)、低易发区(0.25~0.45)、中易发区(0.45~0.65)和高易发区(0.65~1),最终得到研究区滑坡易发性评价分区图(图 5)。结合滑坡训练样本数据,统计各易发性等级区域内滑坡灾害点个数(表 6)显示:组合 1 模型中 76.07%的滑坡灾害落入中易发区和高易发区,落入低易发以上的滑坡占滑坡总数的 93.69%;而组合 2 模型和组合 3 模型滑坡灾害点划分到中易发以上区域的滑坡比例分别为 73.33%、74.76%。大量的滑坡灾害点集中发育在易发性较高的区域内,而易发性较低的区段滑坡发育相对较少,表明采用 3 种组合方法所得到的评价结果与实际滑坡灾害点的分布情况基本吻合。

从图 5 不同组合模型易发等级图分布状况来看,研究区滑坡高易发区主要分布白龙江两岸,尤其分布在两河口—桔柑乡段白龙江左岸区域。易发性高的区域滑坡分布有以下特征:①沿活动性断裂呈线状分布,组合 1 模型较明显地揭示坪定—化马断裂对滑坡发育的控制作用,而在研究区南部滑坡集中分布在次级断裂和小型褶皱密集区。②受易滑地层控制明显,易发程度极高的区域主要是由软弱千枚岩、碳质板岩组成志留系 1 段地层及由灰岩、千枚岩互层构成泥盆系 6、7 段易滑地层区,该类岩组受内外营力影响强烈,在断裂带沿线或新构造运动活跃区域常形成具有塑性流特性且厚度小于 5 m 的浅层残坡积堆积物斜坡,在降水作用下易发生中小型滑坡。③在流域沟壑密集区呈串珠状连片分布。④地表为基岩出露与裸土地带且坡面侵蚀程度强的区域,滑坡集中分块、分区发育。

3.2 精度评价

模型精度评价是检验评价结果精准性和合理性的重要手段。笔者采用 4 种方法对不同组合模型进行精度评价:一是根据实际发生的滑坡灾害点在各易发等级区间内的分布情况来检验其合理性;二是通过 Sridevi Jadi(1997)经验概率法、Cohen's Kappa (1968)系数法、ROC 成功概率法对模型评价的精度进行检验。



a. 组合 1 模型;b. 组合 2 模型;c. 组合 3 模型

图 5 不同模型的易发性评价结果图

Fig. 5 Susceptibility assessment results of different models

表 6 不同模型易发性分区内滑坡点个数表

Tab . 6 The number of landslide in the prone zones of different models

易发区分类	组合 1 模型		组合 2 模型		组合 3 模型	
	分区内滑坡点数(个)	滑坡比例(%)	分区内滑坡点数(个)	滑坡比例(%)	分区内滑坡点数(个)	滑坡比例(%)
高易发区	930	55.36	834	49.64	858	51.07
中易发区	348	20.71	398	23.69	398	23.69
低易发区	296	17.62	365	21.73	330	19.64
极低易发区	106	6.31	83	4.94	94	5.60

(1)为了避免主观因素影响,使得构建的不同组合模型具备良好的稳定性,选取未参与模型训练的 415 个滑坡灾害点(约占样本总数的 20%)作为预测样本进行预测率检验。滑坡灾害易发性评价结果的合理性需满足 2 个检验准则:一是检验样本点落在高易发区的百分比应最大和不易发区占整个研究区面积的百分比应该最小;二是检验样本点落在各易发等级区的百分比和各等级区的面积占整个研究区的总面积的百分比的比值,即频率比应该随易发区等级的增高而增大。从表 7 可以看出,3 种组合模型计算结果都完全满足上述 2 个准则,说明滑坡易发性程度划分结果是合理的。

(2)Sridevi Jadi 经验概率法是 1997 年由 Sridevi Jadi 提出的以经验概率形式来表达精度评估的方法,属于受临界值约束的准确性统计方法,其临界值不唯一,表达式如下。

$$P = \frac{K_s}{S} [1 - (K - K_s)/(N - S)]^{1/3} \quad (6)$$

式中: N 为评价单元总数; S 为存在滑坡的单

元总数; K 是斜坡易发性为中等和高的单元总数; K_s 为存在滑坡的斜坡易发性为中、高的单元总数。

(3)Cohen's Kappa 系数法属于典型的受临界值约束的准确性统计方法且计算方法便捷,但临界值的选取具有较大的随意性和主观性,定义式为:

$$\begin{cases} K = (tp + tn - E)/(T - E) \\ E = [(tp + fn)(tp + fp) + (tn + fn)(tn + fp)]/T \end{cases} \quad (7)$$

式中: T 为评价单元总数,其他各参数见表 8。其中,当 $K > 0.61$ 为精度较好的评价模型; $0.41 \leq K \leq 0.60$ 为中等评价模型; $K < 0.41$ 为精度较差的评价模型(张茂省等,2019)。

(4)ROC 成功概率曲线法是区域地质灾害易发性评价精度检验且不受临界值约束的图形化方法。可直观准确地反映易发性从低到高落在不同易发性区间内的滑坡数量(滑坡面积)的变化情况,其曲线下的面积 AUC 越大,表明模型成功率越高、预测效果越准确,具有很好的客观性和有效性。

3 种评价结果检验显示(表 8),组合 1 模型预测

精度和准确性要优于其他 2 组模型,主要是因为信息量模型能较好地处理多因子组合带来的复杂性和解决海量数据的差异性,再者研究区滑坡灾害点信息资料详细,能很好地适用自变量,即可是连续的亦可是离散的逻辑回归模型,二者组合的模型评价结果与实际吻合度较高。

表 7 不同模型易发性检验结果对比表
Tab . 7 Comparison of susceptibility test results of different models

易发级别	组合 1 模型			组合 2 模型			组合 3 模型		
	面积百分比 (%)	检验点百分比 (%)	频率比	面积百分比 (%)	检验点百分比 (%)	频率比	面积百分比 (%)	检验点百分比 (%)	频率比
高易发区	18.22	60.00	3.29	14.09	53.49	3.80	14.64	55.18	3.77
中易发区	23.59	15.90	0.67	25.39	18.55	0.73	24.75	18.80	0.76
低易发区	33.86	17.59	0.52	40.08	22.89	0.57	38.31	20.72	0.54
极低易发区	24.33	6.51	0.27	20.45	5.06	0.25	22.30	5.30	0.24

表 8 不同模型易发性检验结果对比表
Tab . 8 Comparison of susceptibility test results of different models

组合模型	Sridevi Jadi 经验概率法	Kappa 系数法	ROC 成功概率曲线法
组合 1 模型	0.431	57.39%	0.946
组合 2 模型	0.416	54.07%	0.826
组合 3 模型	0.424	56.11%	0.897

4 结论

(1)以白龙江中游及其岷江支流段为研究对象,通过对指标因子共线性诊断相关性分析和因子权重计算,选取坡度、地形起伏度、距断层距离、地层岩性、流域沟壑密度、植被指数等 6 项指标因子,建立易发性评价指标体系;采用信息量模型 I + 逻辑回归模型 LR (组合 1)、确定性系数模型 C_F + 逻辑回归模型 LR (组合 2)和证据权模型 Wf + 逻辑回归模型 LR (组合 3)等 3 种组合模型开展区域滑坡灾害易发性评价;3 种模型获取的中易发区以上面积占研究区总面积百分比分别为 41.82%、39.47%、39.39%,主要分布在斜坡坡度在 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 、地层岩性为志留系一段 ($S_{2+3}bl_1$) 和泥盆系六、七段 ($D_2^1s_6$ 、 $D_2^1s_7$) 等软弱岩组和软硬相间岩组、距离断层 1.5km 内的区域。

(2)在评价指标状态分级划分过程中,根据各指标条件下的 I 值、 C_F 值和 Wf 值曲线突变点,同时结合滑坡面积及分级面积频率曲线作为等级划分的临界值来确定因子分级状态。该方法同时适用于连续型和离散型 2 类指标,其本质是将对滑坡易发性

相近区间进行组合,即充分考虑各因子状态对滑坡的差异性影响,又避免了对状态分级的主观性划分,体现了指标状态分级的多样性和合理性。

(3)通过对比 3 种模型在不同易发区内滑坡频率比,利用 Sridevi Jadi 经验概率法、Cohen's Kappa 系数法和 ROC 成功预测概率曲线法比较,发现组合 1 模型预测精度和准确性要优于其他 2 组模型,说明采用信息量和逻辑回归组合模型能够较为客观准确地对白龙江流域滑坡灾害易发性进行评价。

参考文献(References):

张俊,殷坤龙,王佳佳,等. 三峡库区万州区滑坡灾害易发性评价研究[J]. 岩石力学与工程报, 2016, 35(2): 284-296.

ZHANG Jun, YIN Kunlong, WANG JiaJia, et al. Evaluation of landslide susceptibility forWanzhou district of Three Gorges reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(2):284-296.

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 Chong, DAI Fuchu, YAO Xin, 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.
- 唐亚明, 张茂省, 李林, 等. 滑坡易发性危险性风险评价例析[J]. 水文地质工程地质, 2011,38(2):125-129.
- TANG Yaming, ZHANG Maosheng, LI Lin, et al. Discrimination to the landslide susceptibility, hazard and risk assessment[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011,38(2):125-129.
- 张茂省, 薛强, 贾俊, 等. 山区城镇地质灾害调查与风险评价方法及实践[J]. 西北地质, 2019,52(2):125-135.
- ZHANG Maosheng, XUE Qiang, JIA Jun, et al. Methods and practices for the investigation and risk assessment of Ge0-hazards in Mountainous towns[J]. Northwest-ern Geology, 2019,52(2):125-135.
- 张帆宇, 刘高, 湛文武, 等. 基于多变量统计分析的大型滑坡敏感性评价:以汶川地震影响的陇南地区为例[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012. 43(9):3595-3600.
- ZHANG Fanyu, LIU Gao, CHEN Wenwu, et al. Large landslide susceptibility assessment by multivariate statistical analysis in the Longnan area affected by the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012. 43(9):3595-3600.
- 陈冠, 孟兴民, 乔良, 等. “7.22”岷县漳县地震地质灾害分布、特征及与影响因子关系分析[J]. 工程地质学报, 2013,21(5):750-760.
- CHEN Guan, MENG Xingmin, QIAO Lang, et al. Distribution, characteristics, and associated influential factors of the geohazards induced by Minxian-Zhangxian earthquake on 22 July, 2013, Gansu, China[J]. Journal of Engineering Geology, 2013,21(5):750-760.
- 齐识, 张雅莉, 张鹏, 等. 白龙江流域滑坡危险性评价指标体系的构建[J]. 长江科学院院报, 2014,31(1):23-28.
- QI Si, ZHANG Yali, ZHANG Peng, et al. An assessment index system for landslide risk in Bailong River basin[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014,31(1):23-28.
- 王高峰, 叶振南, 李刚, 等. 白龙江流域舟曲县城区地质灾害危险性评价[J]. 灾害学, 2019,34(3):128-133.
- WANG Gaofeng, YE Zhennan, LI Gang, et al. Geological hazard risk assessment of Zhouqu county in Bailong river basin[J]. Journal of Catastrophology, 2019,34(3):128-133.
- 沈玲玲, 刘连友, 许冲, 等. 基于多模型的滑坡易发性评价—以甘肃岷县地震滑坡为例[J]. 工程地质学报, 2016,24(1):19-28.
- SHEN Lingling, LIU Lianyou, XU Chong, et al. Multi-model based landslide susceptibility evaluation—illustrated with landslides triggered by Minxian earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2016,24(1):19-28.
- 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.
- 樊芷苒, 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 Zhiyan, 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.
- 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):154-170.
- TIAN Chunshan, LIU Xilin, WANG Jia. Geohazard susceptibility assessment based on CF model and Logistic regression models in Guangdong[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016,43(6):154-170.
- 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.
- 冯杭建, 周爱国, 俞剑君, 等. 浙西梅雨滑坡易发性评价模型对比[J]. 地球科学, 2016,41(3):403-415.
- FENG Hangjian, ZHOU Aiguo, YU Jianjun, et al. A comparative study on plum-rain-triggered landslide susceptibility assessment models in West Zhejiang Province[J]. Earth Science, 2016,41(3):403-415.
- 刘坚, 李树林, 陈涛. 基于优化随机森林模型的滑坡易发性评价[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018,43(7):1085-1091.
- LIU Jian, LI Shulin, CHEN Tao. Landslide susceptibility assessment based on optimized random forest model[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University

- ty, 2018, 43(7):1085-1091.
- 张茂省, 贾俊, 王毅, 等. 基于人工智能(AI)的地质灾害防控体系建设[J]. 西北地质, 2019, 52(2):103-116.
- ZHANG Maosheng, JIA Jun, WANG Yi, et al. Construction of geological disaster prevention and control system based on AI[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(2): 103-116.
- 邱海军, 曹明明, 刘闻, 等. 基于三种不同模型的区域滑坡灾害敏感性评价及结果检验研究[J]. 地理科学, 2014, 34(1):110-115.
- QIU Haijun CAO Mingming, LIU Wen, et al. The susceptibility assessment of landslide and its calibration of the models based on three different models [J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(1):110-115.
- 张晓东, 刘湘南, 赵志鹏, 等. 信息量模型、确定性系数模型与逻辑回归模型组合评价地质灾害敏感性的对比研究[J]. 现代地质, 2018, 32(3):602-610.
- ZHANG Xiaodong, LIU Xiangnan, ZHAO Zhipeng, et al. Comparative study of geological hazards susceptibility assessment; Constraints from the information Value+ Logistic regression model and the CF+ Logistic regression model[J]. Geoscience, 2018, 32(3):602-610.
- 王高峰, 杨强, 田运涛, 等. 泥石流易发性评价模型的构建—以白龙江流域石门乡羊汤河段为例[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3):761-770.
- WANG Gaofeng, YANG Qiang, TIAN Yuntao, et al. Establishment of assessment model for debris flow susceptibility: a case study from Shimen township to Yangtang river in the Bailong River Basin [J]. Arid Zone Research, 2019, 36(3):761-770.
- 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 Changrun, ZHAO Dongmei, LIU Dengjing, et al. Landslide susceptibility assessment of Longchuan County based on GIS and information value model [J]. Northwestern Geology, 2020, 53(2):308-320.
- 邱维蓉, 吴帮玉, 潘学树, 等. 几种聚类优化的机器学习方法在灵台县滑坡易发性评价中的应用[J]. 西北地质, 2020, 53(1):222-233.
- QIU Weirong, WU Bangyu, PAN Xueshu, et al. Application of several cluster-optimization-based machine learning methods in evaluation of landslide susceptibility in Lingtai county [J]. Northwestern Geology, 2020, 53(1):222-233.
- 孟兴民, 陈冠, 郭鹏, 等. 白龙江流域滑坡泥石流灾害研究进展与展望[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(4): 1-15.
- MENG Xingmin, CHEN Guan, GUO Peng, et al. Research of landslides and debris flow in Bailong river basin: progress and prospect [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2013, 33(4): 1-15.
- 杨为民, 黄晓, 张春山, 等. 白龙江流域坪定-化马断裂带滑坡特征及其形成演化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(2): 574-583.
- YANG Weimin, HUANG Xiao, ZHANG Chunshan, et al. Deformation behavior of landslides and their formation mechanism along Pingding-Huama active fault in Bailongjiang River Region [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44(2): 574-583.
- 李淑贞, 戴霜, 王华伟, 等. 白龙江地区断裂构造与滑坡分布及发生关系[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2015, 51(2): 145-152.
- LI Shuzhen, DAI Shuang, WANG Huawei, et al. Fault features and their implication on distribution and formation of landslides in Bailongjiang Region [J]. Journal of Lanzhou University, 2015, 51(2): 145-152.
- 陈明, 王运生, 梁瑞锋, 等. 白龙江流域大型滑坡发育分布规律研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(2):325-333.
- CHEN Ming, WANG Yunsheng, LIANG Ruifeng, et al. Research on development and distribution rules of largescale landslides in Bailongjiang river basin [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(2):325-333.
- Sridevi Jadi. 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. Statistical model of slope instability classification [J]. World Geology, 1997, 16(1):83-88.
- Cohen J. Weighted Kappa: nominal scale agreement with provision for scaled disagreement or partial credit [J]. Psychological Bulletin, 1968, 70(4):213-220.