

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

# 考虑岩土体物理力学参数空间校准分区的滑坡危险性评价

殷玮民,李远耀,李 星,李 明,居 乐,谢 藕

Landslide assessment considering spatial calibration zoning of physical and mechanical parameters of rock and soil mass

YIN Weimin, LI Yuanyao, LI Xing, LI Ming, JU Le, and XIE Ou

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202311006

# 您可能感兴趣的其他文章

# Articles you may be interested in

# 加权信息量模型在云南澜沧县滑坡危险性评价中的应用

Hazard assessment of landslides in Lancang County, Yunnan Province based on weighted information value model 吴兴贵, 王宇栋, 王蓝婷, 丁梓逸 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(3): 119-128

# 基于人工神经网络模型的福建南平市滑坡危险性评价

Landslide risk assessment in Nanping City based on artificial neural networks model 陈水满, 赵辉龙, 许震, 谢伟, 刘亮, 李全悦 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(2): 133-140

# 基于I-CF模型的四川德格县滑坡危险性评价与区划

Landslide geological hazard assessment based on the I-CF model of Dege County in Sichuan Province 赵伯驹, 李宁, 幸夫诚, 向晗 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(5): 32-42

# 基于GDIV模型的大渡河中游地区滑坡危险性评价与区划

Landslide hazard assessment in the middle reach area of the Dadu River based on the GDIV model 阳清青, 余秋兵, 张廷斌, 易桂花, 张恺 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(5): 130–140

# 基于机器学习的区域滑坡危险性评价方法综述

A review of the methods of regional landslide hazard assessment based on machine learning 方然可, 刘艳辉, 黄志全 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 1-8

信息量法与随机森林耦合模型和临界月平均降雨阈值的区域滑坡危险性评价与区划

Regional landslide hazard assessment using the IV-RF coupling model and critical monthly average rainfall threshold: A case study from Fuling District, Chongqing

彭双庆, 刘朋飞, 陈刚, 王丽萍, 张伟, 罗文文, 景熙亮 中国地质灾害与防治学报. 2025, 36(1): 131-145



关注微信公众号,获得更多资讯信息

#### DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202311006

殷玮民,李远耀,李星,等.考虑岩土体物理力学参数空间校准分区的滑坡危险性评价[J].中国地质灾害与防治学报,2025,36(2): 162-174.

YIN Weimin, LI Yuanyao, LI Xing, et al. Landslide assessment considering spatial calibration zoning of physical and mechanical parameters of rock and soil mass[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(2): 162-174.

# 考虑岩土体物理力学参数空间校准分区的 滑坡危险性评价

般玮民1,李远耀1,李 星1,李 明2,居 乐1,谢 藕1

 (1. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院,湖北武汉 430074; 2. 中国地质调查局武汉地质 调查中心(中南地质科技创新中心),湖北武汉 430205)

摘要:滑坡危险性评价是区域滑坡灾害风险预警与管控的关键环节之一。分布式斜坡稳定性定量评估模型(stability index mapping, SINMAP)因能有效反映边坡稳定性的物理力学机制,广泛用于滑坡危险性评价中。但传统 SINMAP模型忽略了 岩土体特征随地质环境变化而产生的空间差异性,导致评价结果精确度偏低。针对上述不足,文章开展了基于不同空间 校准区域的改进 SINMAP模型研究。以重庆市万州区大周镇为例,经频率比和敏感性指数分析,从反映滑坡成因的 8 个 指标因子中确定岩土体类型、植被覆盖度和距道路距离作为关键指标因子。根据关键指标因子的空间分布差异,将研究 区划分为 6 个不同空间校准区域,赋予对应岩土体物理力学参数,开展传统 SINMAP 及其改进模型的滑坡危险性评价对 比研究。结果表明:(1)总体上,两种模型预测的高和极高滑坡危险区主要分布在研究区库岸、河流两侧以及工程活动强 烈的区域;(2)最危险工况下,改进 SINMAP模型的 AUC 值为 86.8%,高于传统 SINMAP模型的 AUC 值(73.9%),识别准确度 提高了 12.9%;(3)在滑坡灾害局部计算结果上,最危险工况下有 81.82% 的真实滑坡点落入中危险等级以上的区域,大于 传统 SINMAP模型的 72.73%。因而,改进 SINMAP模型具备识别效果更佳,识别结果空间分布较连续,计算结果更符合真 实滑坡实际发育特征的优势。

关键词:滑坡;危险性评价;频率比;SINMAP模型;地质灾害 中图分类号:P642.22 文献标志码:A 文章编号:1003-8035(2025)02-0162-13

# Landslide assessment considering spatial calibration zoning of physical and mechanical parameters of rock and soil mass

YIN Weimin<sup>1</sup>, LI Yuanyao<sup>1</sup>, LI Xing<sup>1</sup>, LI Ming<sup>2</sup>, JU Le<sup>1</sup>, XIE Ou<sup>1</sup>

 Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China; 2. Wuhan Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Central South China), Wuhan, Hubei 430205, China)

Abstract: Landslide hazard assessment is a crucial component of regional landslide disaster risk warning and control. The distributed slope stability quantitative evaluation model SINMAP (stability index mapping) is widely used in landslide hazard assessment because it effectively mirrors the physical and mechanical mechanisms underlying slope stability. However, traditional SINMAP models overlook the spatial differences in rock and soil characteristics due to geological environmental

基金项目:三峡后续工作地质灾害防治项目(0001212012A C50021)

收稿日期: 2023-11-07; 修订日期: 2024-01-10 投稿网址: https://www.zgdzzhyfzxb.com/

**第一作者:**殷玮民(1997—),男,硕士研究生,主要从事工程地质、地质灾害分析与防治的研究。E-mail: 1499413681@qq.com 通讯作者:李远耀(1978—),男,副教授,主要从事工程地质与地质灾害方面的教学研究工作。E-mail: yuanyaoli2007@126.com

changes, resulting in low accuracy in assessment results. To address these deficiencies, this paper explored an enhanced SINMAP model tailored to various spatial calibration zones. Using Dazhou Town, Wanzhou District, Chongqing as a case study and employing frequency ratio and sensitivity index analysis, the key indicator factors are determined as rock and soil type, vegetation coverage, and proximity to roads from the eight indicator factors reflecting the cause of landslides. Based on the spatial distribution differences of key indicators, the study area was segmented into 6 different spatial calibration zones, and each assigned corresponding physical and mechanical parameters of the rock and soil. A comparative study of landslide hazard assessment using both traditional SINMAP and its improved models was conducted. The results indicate that: (1) Overall, the high and extremely high-risk landslide zones predicted by the two models are mainly distributed along the reservoir bank, adjacent to the river, and areas with strong engineering activities in the study area. (2) Under the most dangerous working conditions, the improved SINMAP model achieved an *AUC* value of 86.8%, surpassing the traditional model's *AUC* of 73.9%, and enhancing the accuracy of landslide recognition by 12.9%. (3) In the local calculation results of landslide disasters, 81.82% of the actual landslide points were in areas above the medium risk level under the most dangerous working conditions, compared to 72.73% in the traditional SINMAP model. Therefore, the improved SINMAP model offers superior detection capabilities, a more continuous spatial distribution of detection results, and more accurate alignment with the real-world characteristics of landslide development.

Keywords: landslide; hazard assessment; frequency ratio; SINMAP model; geo-harzard

# 0 引言

近年来,受强烈人类工程活动和极端气象事件影 响,全球滑坡灾害处于多发频发态势,给社会经济和生 态环境造成巨大破坏和损失<sup>[1-3]</sup>。开展区域滑坡灾害气 象预警或风险管控工作,已成为一种有效的滑坡防灾减 灾手段<sup>[4-6]</sup>。大量实践表明,滑坡危险性评价是区域滑 坡灾害风险预警与管控的关键技术环节,其精度决定了 滑坡风险结果的可靠度和适用性。

滑坡危险性是指研究区特定时间内一定规模或强 度的滑坡灾害发生的时空概率[7]。目前,区域滑坡危险 性评价方法主要有两类:一类是基于历史数据统计或非 线性模型的数理统计模型,另一类是基于水文-力学模 型的物理模型<sup>[8]</sup>。前者主要是对研究区的环境因子与 滑坡成因间的相关性进行统计分析,进而利用统计模型 进行危险性指标的计算<sup>[9]</sup>。后者通过分析降雨入渗诱 发滑坡的物理过程,开展区域滑坡危险性定量评价分 析<sup>[10]</sup>,这类方法近年来越来越受到重视。常用的评价模 型包括分布式斜坡稳定性定量评估模型(stability index mapping, SINMAP<sup>[11]</sup>)、三维斜坡稳定性计算软件(software to analyze three-dimensional slope stability throughout a digital landscape, SCOOPS 3D<sup>[12]</sup>)、浅层滑 坡快速评价模型(fast shallow landslide assessment model, FSLAM<sup>[13]</sup>)、基于网格的瞬态降雨入渗边坡稳定性模型 (the transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability model, TRIGRS<sup>[14]</sup>)等。

在物理模型中, SINMAP 模型是以 Taylor<sup>[15]</sup>提出的 一维无限斜坡模型为基础,将无限斜坡稳定模型和坡面 水文模型有效耦合后<sup>[16]</sup>,结合稳定态水文学理论的一种 分布式斜坡稳定性评价模型<sup>[17]</sup>。近年来,各国学者对 SINMAP 模型不断改进,广泛应用于区域滑坡灾害的危 险性评估<sup>[18]</sup>。然而,部分学者的研究表明<sup>[19]</sup>, SINMAP 模型的评价精度主要取决于边坡岩土体参数赋值的准 确性以及空间校准区域的划分。传统 SINMAP 模型只 能对特定研究区域进行整体统一赋值,无法反映研究区 岩土体物理力学参数空间分布的差异,导致评价结果不 够合理和精确。为提高 SINMAP 模型评估精度,部分 学者集成遥感信息、土地利用、土壤、植被、水文等数 据划分地理上的校准区<sup>[20]</sup>,或选取一定影响因子进行相 关性评价,进而实现研究区的合理分区<sup>[21]</sup>。

综上,本文以万州区大周镇为例,开展了 SINMAP 模型的改进研究,对影响研究区域的指标因子进行频 率比与敏感性指数分析,确定影响滑坡灾害发育的关 键因子,根据关键因子的空间分布差异,实现研究区 的合理分区,根据分区结果对岩土体物理力学参数进行 分区标记,以期得到相对可靠和精度更高的危险性评价 结果。

#### 1 滑坡灾害发育特征

#### 1.1 滑坡孕灾地质条件

重庆市万州区位于四川盆地东部,地处三峡库区腹 心地带。大周镇位于万州区的东北部,长江自西向东流 经本区(图1)。区域属于构造-剥蚀低山丘陵地貌,地形 整体北西高、南东低,地貌形态多呈台阶状。区内降雨 充沛,多年平均降雨量1191.3 mm,年最大降雨量可达 1 635.7 mm(1987年),降雨集中在每年的 5—9月,且强 度较大,最大月降水量达 711.8 mm(1987年 8月),最长 连续降水 16日。



图 1 大周镇地貌及区域位置图 Fig. 1 Topographic and regional location map of Dazhou Town

大周镇地处万州向斜北西翼,区域内无次级褶皱和 断层构造发育。岩层一般呈单斜产出,岩层倾向160°~ 210°,岩层倾角为5°~30°,岩体中主要发育两组陡倾构 造节理。区内地层岩性主要为第四系堆积层、侏罗系 上统遂宁组砂泥岩互层和侏罗系中统上沙溪庙组紫红 色泥质粉砂岩。根据现场调查,可将工程地质岩组按照 堆积层、软岩、硬岩和软硬相间岩层进行细分,侏罗系 中统上沙溪庙组在研究区内出露16层,侏罗系上统遂 宁组出露2层(图2)。地下水按赋存条件可分为松散 岩类孔隙水以及红层裂隙水两大类型,主要受大气降雨 补给,长江为最低排泄基准面。

1.2 滑坡发育特征及成因机制

根据资料分析和现场调查,大周镇共发育滑坡灾 害 44 处。从物质组成看,主要为堆积层滑坡,潜在滑 面类型均为土岩接触面,共33处;岩质滑坡发育较少, 共11处。从规模分析,大周镇以中-大型滑坡为主,占 总滑坡数的86.4%,且主要为中-浅层滑坡。滑坡平面形 态以横长形和箕形为主,多分布在高程300m以下区域 (图2)。据滑坡灾害点的地层分布可知,滑坡滑床基岩 主要发育在侏罗纪中统上沙溪庙组(J<sub>2</sub>s),滑坡数量33 处,占比75%;侏罗纪上统遂宁组(J<sub>3</sub>s),滑坡数量11处, 占比25%。

八角树滑坡是位于大周镇铺垭村的一处典型堆积 层滑坡,滑坡形态整体呈上陡下缓,后部坡度约 30°,中 前部约为 15°(图 3)。滑体主要由紫红色泥岩、灰色砂 岩风化及崩坡堆积形成的第四系崩滑堆积层组成,下伏 基岩为侏罗系中统沙溪庙组砂岩、砂质泥岩。滑面形 态呈弧形,类型为土岩接触界面。滑坡的变形模式表现



图 2 大周镇滑坡灾害点分布图

Fig. 2 Distribution map of landslide disaster point in Dazhou Town



Fig. 3 Bajiaoshu landslide profile diagram

为后部向前部推移变形,主要成因是由于万州汛期雨量 充沛,持续性的强降雨不能及时排泄从而入渗坡体,导 致滑带处形成饱和渗流区,降低了滑带土的抗剪强度。 加之前缘受库水位影响,以及中后部坡体农田灌溉和建 房切坡,造成滑坡持续变形。

综上,降水、库水位波动和人类活动等因素共同作 用,影响并改变着研究区斜坡的长期稳定状态,是区内 滑坡灾害的主要成因机制。

#### 2 SINMAP 模型原理与改进方法

#### 2.1 SINMAP 模型原理

SINMAP 模型的基本思想是将水文模型与无限斜 坡稳定性模型耦合,平衡重力的不稳定成分与平面上摩 擦力及黏聚力的稳定成分,忽略边缘效应的影响。该模 型较为全面地考虑了地形地貌和土壤岩性等各种孕灾 因素的影响,并与 GIS 系统能有效集成。无限斜坡模型 的稳定性系数( $F_s$ )由下式计算:

$$F_{\rm s} = \frac{c_{\rm r} + c_{\rm s} + \left[\rho_{\rm s}g(D - D_{\rm W}) + (\rho_{\rm s}g - \rho_{\rm w}g)D_{\rm W}\right]\tan\varphi}{D\rho_{\rm s}g\sin\theta\cos\theta} \quad (1)$$

式中:  $F_s$ ——无限斜坡模型的稳定性系数;  $c_r$ ——植物根系产生的黏聚力/(N·m<sup>-2</sup>);  $c_s$ ——土体自身黏聚力/(N·m<sup>-2</sup>);  $\theta$ ——地形坡度/(°);  $\rho_s$ ——湿土密度/(kg·m<sup>-3</sup>);  $\rho_w$ ——水的密度/(kg·m<sup>-3</sup>); g——重力加速度/(9.8 m·s<sup>-2</sup>); D——土层垂直厚度/m;  $D_w$ ——地下水位埋深/m;  $\varphi$ ——土的内摩擦角/(°)。 图 4 为式(1)的几何图解。



图 4 无限边坡稳定性模型图解 Fig. 4 Infinite slope stability model diagram

随着深度的变化,无限斜坡稳定性系数可进一步表 达为无量纲形式:

$$F_{\rm s} = \frac{c + \cos\theta [1 - wr] \tan\phi}{\sin\theta} \tag{2}$$

式中: c——无量纲黏聚力系数;

r——水和土壤的相对密度比;

w——地形湿度指数。

其中,无量纲黏聚力系数:

$$c = (c_{\rm r} + c_{\rm s})/h\rho_{\rm s}g \tag{3}$$

水和土壤的相对密度比:

$$r = \rho_{\rm w} / \rho_{\rm s} \tag{4}$$

地形湿度指数:

$$w = \min\left(\frac{Ra}{T\sin\theta}, 1\right) \tag{5}$$

式中: R——汇水区域稳态补给/(mm·d<sup>-1</sup>);

a——单位汇水面积/m<sup>2</sup>。

为了定义斜坡的稳定性系数,将地形湿度指数纳入 无量纲稳定性系数中,得到:

$$F_{s} = \frac{c + \cos\theta \left[1 - \min\left(\frac{R}{T}\frac{a}{\sin\theta}, 1\right)r\right]\tan\phi}{\sin\theta}$$
(6)

将密度比(*r*)视为恒定值 0.5,通过规定下限和上限 来界定其他三个量的不确定性。如果对均匀分布定义 *R/T=x*, tanθ= *t*,则得到显示下限和上限的关系式如下:

$$c \sim U(c_1, c_2) \tag{7}$$

$$x \sim U(x_1, x_2) \tag{8}$$

$$\sim U(t_1, t_2) \tag{9}$$

根据斜坡稳定性系数,定义斜坡稳定性指数(SI)为 地表斜坡稳定的概率,该值介于0(最不稳定)和1(临界 稳定)之间。

t

当 c 和 t 最小, x 最大时, 不利于滑坡发生。在这种 情况下, F<sub>s</sub>>1 的区域是无条件稳定的。此时稳定性指 数(*SI*)定义为:

$$SI = F_{\text{smax}} = \frac{c_1 + \cos\theta \left[1 - \min\left(x_2 \frac{a}{\sin\theta}, 1\right)r\right]t_1}{\sin\theta} \quad (10)$$

对于最小稳定性系数小于1的区域,有可能发生滑坡。在这些地区( $F_{smin} < 1$ )定义如下:

$$SI = Prob(>1) \tag{11}$$

当 c 和 t 最大, x 最小时:

$$F_{\rm smax} = \frac{c_2 + \cos\theta \left[1 - \min\left(x_1 \frac{a}{\sin\theta}, 1\right)r\right]t_2}{\sin\theta}$$
(12)

在 $F_{smax} < 1$ 的情况下:

$$SI = Prob(F_s > 1) = 0 \tag{13}$$

根据 SI 分级分类, 定义滑坡危险性分区见表 1。

#### 表 1 滑坡危险性分区表 Table 1 Landslide hazard zoning table

条件	类别	预测状态
<i>SI</i> ≥1.5	1	极稳定区
1.5> <i>SI</i> ≥1.25	2	稳定区
$1.25 > SI \ge 1.0$	3	基本稳定区
$1.0 > SI \ge 0.5$	4	潜在不稳定区
$0.5 > SI \ge 0$	5	不稳定区

# 2.2 SINMAP 模型改进方法

# 2.2.1 SINMAP 模型改进思路

SINMAP模型的精度主要取决于边坡岩土体物理 力学参数赋值准确性和空间校准区域的划分精度。传统 SINMAP模型对整个评价区域统一进行赋值,不能 详细的划分评价区域,无法反映研究区岩土物理力学参 数空间不均匀造成的差异,在较大评价区域常常不符合 滑坡灾害发育的基本规律,使得评价结果不够合理,影 响了 SINMAP 模型的评价精度。本文提出如下改进。

首先,考虑大周镇孕灾条件和滑坡灾害发育特征等 因素,参照前人经验,全面选取滑坡灾害的影响因子,使 用频率比法计算因子敏感性指数,对该区域的滑坡灾害 影响因子进行重要程度分级,确定其中关键影响因子; 进而根据关键因子指标的不同区间 FR 值,以及不同关 键因子的相互组合关系,结合其空间分布差异,将研究 区划分不同的空间校准区。最后,基于空间校准区域的 划分,对每个区域分别采用 SINMAP 模型开展滑坡危 险评价,将评价结果叠加合并为区域整体的评价结果 (图 5)。本文将得到的两种模型结果进行了比较分析, 并用区域历史滑坡的实际发育分布特征进行验证,以评 价改进模型的适用性与准确性。



图 5 SINMAP 模型改进流程图 Fig. 5 SINMAP model improvement technology flowchart

## 2.2.2 校准区域划分方法

研究区内地质条件存在较大差异,滑坡内部地质控制因子在空间分布不均匀,因此应根据影响因素的特点 科学合理地划分空间标定区域。

频率比法能够对滑坡分布及其影响因子状态之间 的空间关系进行分析,它与信息量法、确定性系数法、 逻辑回归模型等是滑坡风险评价常用的概率统计模 型<sup>[22-23]</sup>。计算公式如下:

$$F_{j}R = \frac{P(LF_{j})}{P(F_{j})} = \frac{P(L|F_{j})}{P(L)} = \frac{l/L}{s/S} - 1$$
(14)

式中:L——滑坡面积;

F——影响因子;

 $F_j$ R——影响因子(F)的第j个区间的频率比;

 $P(F_i)$ ——研究区中 $F_i$ 的频率;

1——单个因子某一属性区间内的滑坡栅格数;

L——研究区内的滑坡总栅格数;

s——该属性子区间的栅格数;

S——研究区总栅格数。

式(14)中滑坡面积 L 已知, 故 P(L) 恒定, 即 P(L|F<sub>j</sub>) 越大, 说明在第 j 区间的滑坡发生的概率就越大。因 此, 频率比值的大小反映出该指标因子对滑坡发生起有 利或不利影响。根据式(14), 在频率比大于 0 的情况 下, 该指标因子对滑坡的发生起促进作用, 在频率比小 于 0 的情况下, 表示该分级状态对滑坡发生不利。

鉴于频率比值只能反映特定影响因子不同分级区间内的影响程度,无法整体上确定某类影响因子对滑坡稳定性的影响程度,参考前人<sup>[24-25]</sup>使用敏感性指数 *E*,来刻画影响因子对滑坡稳定性的影响程度。其计算公式为:

$$E_i = FR_{(i,\max)} - FR_{(i,\min)}$$
(15)

式中: E<sub>i</sub>——指标因子 i 对灾害响应的影响指数;

FR<sub>(i,max)</sub>、FR<sub>(i,min)</sub>——指标因子 i 中 FR 的最大值、 最小值。

采用该方法,可从整体上反映各类致灾因子对滑坡 稳定性的影响。

## 3 大周镇滑坡危险性评价

**3.1** 传统 SINMAP 模型评价

3.1.1 确定滑坡危险性降雨工况

采用万州区 1991—2021 年历史降雨资料, 计算研 究区降雨极值。将降雨时间假设为降雨强度(*i*)、持续 时长(*T*)和降雨总量(*Q*)的函数, 分别定义*Q*、*T*、*i*为A、B、 C事件, 假设这些事件均为两两独立的随机变量。利 用 Gumbel 函数进行拟合, 得到万州区不同降雨重现期 的累计降雨量(图 6)。

根据不同重现期降雨量值,分别统计多年平均单 日最大降雨量值、20 a、50 a 及 100 a 一遇的单日最大降 雨量值,并据此设计 4 种降雨工况(表 2)。为了方便获 · 168 ·



Fig. 6 Wanzhou District rainfall amount map foruvarious return periods

取数据,模型将 T/R 作为单个指标进行计算,在 T/R 满 足上限 3 000 时,水系分布接近研究区的真实水系。已 知 T/R 上限后,可以根据万州区多年平均日降雨量的 平均值(55.7 mm)推算出土体导水系数(T=167.1 m<sup>2</sup>/d)。 具体工况如表 2 所示。

表 2 4 种降雨工况下的降雨量值和 T/R 的上下限 Table 2 Rainfall values and upper and lower limits of T/R under four rainfall conditions

类别	<b>改</b> 雨工刀	降雨量值	模型参数T/R		
	P年1月11月1	/mm	下限	上限	
1	多年平均单日最大降雨量	91	1836	3 000	
2	20年一遇单日最大降雨量	161	1 038	3 000	
3	50年一遇单日最大降雨量	188	889	3 000	
4	100年一遇单日最大降雨量	208	803	3 000	

3.1.2 模型参数设置

传统 SINMAP 模型分析时,需要输入岩土体密度 (ρ)、内摩擦角(φ)、黏聚力(c)、比集水面积(a)、地 形坡度(θ)和坡向参数。岩土体参数ρ、φ和 c 可由工 程地质类比法及室内试验综合确定, a 基于 1:1 万 DEM 图在 SINMAP 模型中计算得到, 坡度和坡向可通 过 ArcGIS 分析得出。传统 SINMAP 模型计算参数如 表 3 所示。

表 3 传统 SINMAP 模型计算参数 Table 3 Calculation parameters of traditional SINMAP model

g	泪庄/ơ	黏聚力/kPa		内摩擦角/(°)		岩土体密度	
$/(m \cdot s^{-2})$	山山支/%	下限	上限	下限	上限	$/(kg \cdot m^{-3})$	
9.8	10	5	25	10	25	1 900	

3.1.3 评价结果分析

为与当前滑坡危险性评价标准规范分级一致,便于

比较不同评价方法的精度,参照前人经验对模型计算的 稳定性状态分类进行修正。将表1中"极稳定区、稳定 区"这两个等级合并为滑坡灾害低危险区,将"基本稳 定区、潜在不稳定区、不稳定区"分别定义为"中危险 区、高危险区和极高危险区"<sup>[19]</sup>。将表2和表3的相关 参数,输入 SINMAP模型中,计算得到4种降雨工况下 研究区滑坡灾害的危险性结果(图7)。

通过表 4 中不同降雨工况下大周镇内不同危险等 级面积占比可以发现,极高危险区和高危险区主要分布 在大周镇交通主干道两侧、库岸区域和河流河道两 侧。当降雨量较小时,高-极高危险区小范围集中在砂 岩坡度较陡的区域。随着降雨量的增加,高-极高危险 区的面积快速增长,逐渐向山脊、道路两侧以及库岸、 河流河道两侧等坡度较缓的地区扩展。

3.2 改进 SINMAP 评价滑坡危险性

#### 3.2.1 校准区划分

根据式(11),计算各指标因子频率比及敏感性指数 值见表 5。敏感性指数 E 的计算结果显示,岩土体类 型、植被覆盖度和与距道路距离的值最高。大量研究 表明<sup>[26]</sup>,地层岩性与滑坡发生的关系极为密切,岩土体 的力学强度是由岩石的类型、软硬程度以及层间结构 决定,最终影响到坡体的稳定性和地表侵蚀的难易程 度。从斜坡水文学角度分析,诱发植被发育斜坡失稳的 并非降雨本身,而是降雨转化的地下水,因此植被覆盖 率直接影响到降雨对滑坡的影响,植被极大地优化了地 下水的补给环境<sup>[27]</sup>。此外,在各种滑坡诱发因素中,人 类活动加速了对斜坡环境的破坏,如修建道路的过程 中,由于过度的开挖,形成有效临空面,造成斜坡失稳。 综上可知,岩土体类型、植被覆盖度和距道路距离是影 响大周镇滑坡灾害的关键因子。

根据表 5 的 FR 值计算结果与分区内的滑坡统计, 滑坡主要分布在距道路距离为 0~100 m 的区间范围 内,150~200 m 的区域范围次之,因此将距道路距离分 为≤100 m、100~200 m、>200 m 共三级。在植被覆盖 度区间划分中,滑坡主要分布在 NDVI 值为 0.2~0.3 区 间的区域上,最终将植被覆盖度分为≤0.2、0.2~0.3、 >0.3 共三级。结合岩土体类型、植被覆盖度和与道路 距离这 3 个关键因素在大周镇的空间分布差异,利用 ArcGIS 软件将研究区划分为不同空间校准区,具体结 果为:①第四系堆积层-高植被覆盖度-路网分布密集、 ②泥岩-高植被覆盖度-路网分布中等、③泥砂互层-中 等植被覆盖度-路网分布稀疏、⑤砂岩-中等植被覆盖度-路网分布





图 7 传统 SINMAP 模型 4 种工况下滑坡灾害危险分区图

Fig. 7 Traditional SINMAP model hazard zoning map of landslide disasters under four working conditions

Table 4Traditional SINMAP model landslide hazard zoning statistical table under four working conditions								
	An	滑坡数	各危险等级	占总滑坡	占总面积			

表 4 传统 SINMAP 模型 4 种工况下滑坡灾害危险分区统计表

工况	危险性分级	滑坡数 /个	各危险等级 面积/m <sup>2</sup>	占总滑坡 比例/%	占总面积 比例/%
	低危险区	25	15 235 400	56.82	62.57
工炉一	高危险区	3	1 145 600	6.82	4.70
工76	中危险区	16	7 671 880	36.36	31.51
	极高危险区	0	297 200	0.00	1.22
	低危险区	16	9 764 400	36.36	40.10
工况二	中危险区	22	12 463 400	50.00	51.18
	高危险区	6	1 825 100	13.64	7.50
	极高危险区	0	297 200	0.00	1.22
	低危险区	11	7 047 230	25.00	28.94
工况三	中危险区	17	9 985 030	38.64	41.00
10L_	高危险区	13	5 878 900	29.55	24.14
	极高危险区	3	1 438 930	6.82	5.91
	低危险区	9	7 047 230	20.45	28.94
ᅮᄱᄪ	中危险区	16	9 724 080	36.36	39.93
工化的	高危险区	13	4 685 400	29.55	19.24
	极高危险区	6	2 893 380	13.64	11.88

密集、⑥砂岩-中等植被覆盖度-路网分布稀疏,共6个 不同的校准区域(图8)。 3.2.2 模型参数设置

基于空间标定区域的划分,对每个区域分别采用 SINMAP模型进行滑坡危险性评价。根据研究区的野 外调查和相关室内土工试验结果,并结合各个校准区的 特性确定各子区域岩土体密度、内摩擦角、黏聚力等物 理力学参数,并完成参数标定。比集水面积、地形坡 度、坡向、*T/R*参数值的获得和传统 SINMAP模型计算 方法一致。

3.2.3 评价结果分析

将表 6 的模型参数输入到改进后的 SINMAP 模型 中,计算得到四种降雨工况下研究区滑坡灾害的危险性 结果(图 9)。

通过对比不同降雨工况下不同滑坡危险等级面积占比可以发现,随着降雨强度的增大,研究区危险性等级面积同样不断扩大。工况一下,极高危险区和高危险区面积占研究区百分比为 5.06%,工况二下极高危险区和高危险区面积占研究区百分比为 9.22%,增长了4.16%,工况三比工况二增加了 18.74%,工况四比工况三增加了 8.3%。随着降雨量的不断增长,高-极高危险区逐步从易汇集雨水的沟谷地区、砂岩坡度较陡的区

表 5 各因子频率比及敏感性指数值									
I able 5         Frequency ratios and sensitivity index values of           each factor									
		each factor							
指标因子	$E_i$	分级	滑坡数/个	FR					
		0 ~ 10	9	-0.139 740					
		10~15	11	0.503 245					
		15 ~ 20	6	0.157 018					
坡度/(°)	1 503 245	20 ~ 25	7	0.407 057					
	1.505 245	25 ~ 30	4	-0.118 700					
		30 ~ 35	5	0.145 126					
		35 ~ 50	2	-0.768 240					
		50 ~ 75	0	-1					
		115 ~ 215	19	0.501 409					
		215 ~ 315	12	0.293 254					
高程/m	1.211 059	315 ~ 415	6	-0.441 150					
		415 ~ 515	5	-0.345 820					
		515 ~ 660	2	-0.709 650					
		凹形坡	24	0.255 287					
斜坡形态	0.471 677	直线形	4	-0.091 880					
		凸形坡	16	-0.216 390					
		0~3.38	2	-0.829 100					
		3.38 ~ 4.62	8	-0.244 240					
		4.62 ~ 5.77	12	0.011 489					
山形泪南北岩	2.034 442	5.77 ~ 7.00	12	0.887 885					
地形湿度指数		7.00 ~ 8.42	7	1.034 442					
		8.42 ~ 10.18	1	-1					
		10.18 ~ 12.92	0	-1					
		12.92 ~ 23.08	1	0.198 803					
		>200	19	-0.132 430					
距水系距离/m	1.467 326	<100	12	1.234 746					
		100 ~ 200	14	-0.232 580					
		$0 \sim 0.05$	0	-1					
		0.05 ~ 0.1	1	-0.263 940					
		0.1 ~ 0.15	2	-0.165 240					
		0.15 ~ 0.2	2	-0.307 280					
枯被覆美度	2 026 048	0.2 ~ 0.25	5	0.341 520					
但以後血反	5.020 946	0.25 ~ 0.3	13	2.026 948					
		0.3 ~ 0.35	1	-0.812 460					
		$0.35 \sim 0.4$	5	-0.240 920					
		$0.4 \sim 0.45$	8	0.624 582					
		$0.45 \sim 0.54$	1	-0.419 160					
		第四系堆积层	32	2.366 056					
些土体米刑	2 151 110	硬岩岩组	5	-0.510 910					
石工仲关堂	3.131 116	软岩岩组	3	-0.748 480					
		软硬互层	4	-0.785 060					
		顺向坡	9	0.988 524					
A1474+44	1 101 (0)	逆向坡	4	-0.095 070					
洲圾珀构	1.191 694	斜交坡	25	-0.203 170					
		水平坡	6	0.743 289					
		0 ~ 50	22	0.727 403					
		50 ~ 100	9	1.631 703					
距道路距离/m	2.492 95	100 ~ 150	2	-0.640 560					
		150 ~ 200	7	0.437 250					
		200 ~ 250	3	-0.091.470					



Fig. 8 Calibration area division result diagram

#### 表 6 改进 SINMAP 模型计算参数

#### Table 6 Improved SINMAP model calculation parameters

标准区域	$a/(m \cdot a^{-2})$	含水率	含水率 c/kPa		$\varphi/($	(°)	$-1(1 - m^{-3})$
仅他区域	g/(m·s )	/%	下限	上限	下限	上限	·ρ/(kg·m )
①第四系堆积层- 高植被覆盖度- 路网分布密集	9.79	10	10	20	16	28	1 990
②泥岩-高植被 覆盖度-路网 分布中等	9.79	10	14	22	22	30	2 190
③泥砂互层- 中等植被覆盖度- 路网分布密集	9.79	10	15	24	15	30	2 280
④泥砂互层- 低植被覆盖度- 路网分布稀疏	9.79	10	15	26	15	40	2 280
⑤砂岩-中等 植被覆盖度- 路网分布密集	9.79	10	18	30	26	30	2 460
⑥砂岩-中等 植被覆盖度- 路网分布稀疏	9.79	10	18	35	26	35	2 460

域向山脊、道路以及库岸、河流河道两侧等坡度较缓的 地区延伸。

#### 3.3 两种模型对比分析

从整体评价结果看,两种不同 SINMAP 模型结果中,高-极高危险区主要分布在研究区库岸区域、河流河







道两侧以及人类工程活动强烈的区域,具有较强的一致 性,往往表现为主要交通干道两侧或者建造房屋造成的 高陡边坡。

ROC曲线目前被广泛用于滑坡危险性结果的检 验。通过最危险工况下评价结果的 ROC 曲线分析 可知,改进 SINMAP模型的 AUC(area under curve)= 86.8% 高于传统 SINMAP 模型的 AUC=73.9%(图 10), 识别准确度提高了 17.46%。表明改进 SINMAP 模型比 传统 SINMAP 模型在整体上有更可靠的评价结果。

在滑坡的局部计算结果上,改进后的 SINMAP 模 型结果具备识别效果好,空间分布较连续,计算结果更 符合真实滑坡的实际发育特征的优势(图 11)。

由表7可知,工况四中改进 SINMAP 模型有 81.82% 的滑坡点落入模拟结果为中危险等级以上的区域,大于 传统 SINMAP 模型的 72.73%;在改进 SINMAP 模型的 最危险工况结果中,八角树滑坡和王家院子滑坡范围内 有 81.33% 和 92.27% 的区域被识别为中危险区及以上, 大于传统 SINMAP 模型的 66.10% 和 77.91%, 表明改进 后的 SINMAP 模型能对滑坡发生的区域进行更有效的 识别。

对于典型单体滑坡,如: 檬子树滑坡在 2007 年滑 坡后缘出现横向宽 20~30 cm,长约 50 m 的张拉裂缝, 坡体中部房屋受变形影响均有不同程度开裂。传统 SINMAP 的高危险区结果集中在檬子树滑坡后缘,整体 结果较稳定。改进 SINMAP 的滑坡后缘和中部均出现 高危险区,滑坡整体处于较不稳定状态,与实际调查结



Fig. 11 Comparison diagram of simulation results for working condition four

Tab	le 7	Improved	I SINMAI	P mod	el land	slide l	1azarc	l zoning	g
Tab	le 7	Improved	I SINMA	P mod	el land	slide l	iazarc	l zoning	g
表 7	仪过	<u>t</u> SINMAP	′	₽⊥沈	ト 常 坂	火害元	回应分	区统计	秐

工况	危险性分级	滑坡数 /个	各危险等级 面积/m <sup>2</sup>	占总滑坡 比例/%	占总面积 比例/%
	低危险区	14	13 078 258	31.82	53.71
工坦 .	高危险区	21	10 039 697	47.73	41.23
工101-	中危险区	3	1 142 031	6.82	4.69
	极高危险区	1	90 843	2.27	0.37
工况二	低危险区	11	8 676 595	25.00	35.63
	中危险区	23	13 428 910	52.27	55.15
	高危险区	9	1 940 453	20.45	7.97
	极高危险区	1	304 871	2.27	1.25
	低危险区	6	6 139 994	13.64	25.21
工炉二	中危险区	22	11 401 591	50.00	46.82
工优二	高危险区	12	5 628 730	27.27	23.12
	极高危险区	4	1 180 514	9.09	4.85
тиш	低危险区	4	5 579 180	9.09	22.91
	中危险区	21	9 941 706	47.73	40.83
106	高危险区	10	6 363 600	22.73	26.13
	极高危险区	9	2 466 343	20.45	10.13

果相符。据野外实地调查,王大田滑坡中部道路鼓胀, 房屋不同程度开裂,近几年来呈变形加重趋势。传统 SINMAP结果的高危险区集中在王大田滑坡左右两侧, 中部以中低危险区为主。而改进 SINMAP的滑坡中部 和左右两侧均出现高危险区,与实际调查结果接近,表 明改进 SINMAP 模型的计算结果更加符合真实滑坡的 实际发育趋势。

值得指出,传统 SINMAP 模型和改进 SINMAP 模型均对大周镇部分临江涉水滑坡的危险性评价结果偏低。原因为库水位变动引起涉水滑坡地下渗流场变化,降低了滑坡岩土体物理力学强度,减轻了岩体的有效重力,在 SINMAP 模型参数设置上未考虑涉水滑坡受库水位波动的动态影响,造成危险性评价结果偏低,部分涉水滑坡未能有效识别。

# 4 结论

(1)统计分析表明,最危险工况下改进 SINMAP 模型的 AUC=86.8% 高于传统 SINMAP 模型的 AUC=73.9%, 识别准确度提高了 12.9%,表明改进 SINMAP 模型在整体上评价可靠性更强。

(2)在滑坡灾害区域模拟分析结果上,最危险工况 下改进 SINMAP 模型有 81.82%的滑坡点落入模拟结 果为中危险等级以上的区域,大于传统 SINMAP 模型 的 72.73%,同时对典型灾害点的识别效果更好;改进 SINMAP 模型的高-极高危险区空间分布位置结果与实 际滑坡变形发育区域情况更加符合,可见改进 SINMAP 模型对滑坡灾害局部区域模拟精度更高。

(3)总体而言,两种模型预测的高和极高滑坡危险

区分布均呈现沿水系、道路线状分布和人类工程活动 强烈地段点状分布的特点。

#### 参考文献(References):

- [1] 阳清青, 余秋兵, 张廷斌, 等. 基于 GDIV 模型的大渡河 中游地区滑坡危险性评价与区划[J].中国地质灾害 与防治学报, 2023, 34(5): 130 - 140. [YANG Qingqing, YU Qiubing, ZHANG Tingbin, et al. Landslide hazard assessment in the middle reach area of the Dadu River based on the GDIV model [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(5): 130 - 140. (in Chinese with English abstract)]
- HUANG Ziyan, PENG Li, LI Sainan, et al. GIS-based landslide susceptibility mapping in the Longmen Mountain area (China) using three different machine learning algorithms and their comparison [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(38): 88612 – 88626.
- [3] 曲雪妍,李媛,房浩,等.基于时空维度耦合的地质灾害 发育程度评价研究[J].水文地质工程地质,2022,49(1): 137-145. [QU Xueyan, LI Yuan, FANG Hao, et al. A study of the evaluation of geo-hazards development degree based on time-space coupling [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 137 - 145. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 周苏华,付字航,邢静康,等.基于不同统计模型的肯尼亚滑坡危险性评价[J].中国地质灾害与防治学报,2023,34(4):114-124.[ZHOU Suhua, FU Yuhang, XING Jingkang, et al. Assessment of landslide hazard risk in Kenya based on different statistical models [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(4): 114-124. (in Chinese with English abstract)]
- GAUTAM P, KUBOTA T, SAPKOTA L M, et al. Landslide susceptibility mapping with GIS in high mountain area of Nepal: A comparison of four methods [J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80(9): 359.
- [6] 李星,杨赛,李远耀,等.面向区域滑坡易发性精细化评价的改进斜坡单元法[J].地质科技通报,2023,42(3): 81-92. [LI Xing, YANG Sai, LI Yuanyao, et al. An improved slope element method for fine-grained evaluation of regional landslide susceptibility [J] Geological Science and Technology Bulletin, 2023, 42 (3): 81 - 92. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 谢家龙,李远耀,王宁涛,等.考虑库水位及降雨联合作用的云阳县区域滑坡危险性评价[J].长江科学院院报,2021,38(12):72-81. [XIE Jialong, LI Yuanyao, WANG Ningtao, et al. Assessment of regional landslide hazard in Yunyang County considering the combined effect of reservoir water level and rainfall[J]. Journal of Yangtze River

Scientific Research Institute, 2021, 38(12): 72 – 81. (in Chinese with English abstract) ]

- [8] TIEN BUI D, TUAN T A, KLEMPE H, et al. Spatial prediction models for shallow landslide hazards: A comparative assessment of the efficacy of support vector machines, artificial neural networks, kernel logistic regression, and logistic model tree [J]. Landslides, 2016, 13(2): 361 – 378.
- [9] 石爱红,李国庆,丁德民,等.考虑非饱和土基质吸力 的丁家坡滑坡变形机制及稳定性评价[J].水文地 质工程地质,2022,49(6):141-151.[SHI Aihong, LI Guoqing, DING Demin, et al. Deformation mechanism and stability evaluation of Dingjiapo landslide considering the matric suction of unsaturated soil [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6): 141 - 151. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 高波, 王晓勇. 基于 SINMAP 模型的延安市滑坡危险性 区划[J].水土保持通报, 2019, 39(3): 211-216. [GAO Bo, WANG Xiaoyong. Risk zoning of landslide based on SINMAP model in Yan'an City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(3): 211-216. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 李艳杰, 唐亚明, 邓亚虹, 等. 降雨型浅层黄土滑坡危险 性评价与区划——以山西柳林县为例 [J]. 中国地质 灾害与防治学报, 2022, 33(2): 105 - 114. [LI Yanjie, TANG Yaming, DENG Yahong, et al. Hazard assessment of shallow loess landslides induced by rainfall: A case study of Liulin County of Shanxi Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(2): 105 - 114. (in Chinese with English abstract)]
- [12] HE Jianyin, QIU Haijun, QU Feihang, et al. Prediction of spatiotemporal stability and rainfall threshold of shallow landslides using the TRIGRS and Scoops3D models [J]. Catena, 2021, 197: 104999.
- [13] 郭子正,何俊,黄达,等.降雨诱发浅层滑坡危险性的快速评估模型及应用[J].岩石力学与工程学报,2023,42(5):1188-1201.[GUO Zizheng, HE Jun, HUANG Da, et al. Fast assessment model for rainfall-induced shallow landslide hazard and application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(5): 1188 1201. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 李婧,卢玲,唐泽.基于 TRIGRS 模型的区域降雨型浅层 滑坡危险性评价[J].甘肃水利水电技术,2022,58(1): 24-27. [LI Jing, LU Ling, TANG Ze. Risk assessment of regional rainfall induced shallow landslides based on TRIGRS model [J] Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2022, 58 (1): 24-27 (in Chinese with English abstract)]
- [15] TAYLOR D W. Fundamentals of soil mechanics [J]. Soil

Science, 66(2): 161.

- [16] MONTGOMERY D R, DIETRICH W E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding [J].
   Water Resources Research, 1994, 30(4): 1153 – 1171.
- [17] PACK R T, TARBOTON D G, GOODWIN C N. The SINMAP approach to terrain stability mapping[J]. Congress of the International Association of Engineering Geology, 1998: 21 – 25.
- [18] NERY T D, VIEIRA B C. Susceptibility to shallow landslides in a drainage basin in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil, predicted using the SINMAP mathematical model [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2015, 74(2): 369-378.
- [19] LIN Wei, YIN Kunlong, WANG Ningtao, et al. Landslide hazard assessment of rainfall-induced landslide based on the CF-SINMAP model: A case study from Wuling Mountain in Hunan Province, China [J]. Natural Hazards, 2021, 106(1): 679 – 700.
- [20] 武利.基于 SINMAP 模型的区域滑坡危险性定量评估及 模型验证[J].地理与地理信息科学,2012,28(2):35-39. [WU Li. A SINMAP-based quantitative assessment and model verification of regional landslide hazard [J]. Geography and Geo-Information Science, 2012, 28(2):35 - 39. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 刘凡,邓亚虹,慕焕东,等.基于最大熵-无限边坡模型的降雨诱发浅层黄土滑坡稳定性评价方法研究[J].水文地质工程地质,2023:1-13. [LIU Fan, DENG Yahong, MU Huandong, et al. Research on the stability evaluation method of shallow loess landslides induced by rainfall based on the maximum entropy infinite slope model [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023:1-13. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 汪莹.不同模型的滑坡易发性评价精度讨论[J].贵州 地质, 2022, 39(2):144-151. [WANG Ying. Discussion on the accuracy of landslide susceptibility evaluation of different models [J]. Guizhou Geology, 2022, 39(2):144-151. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 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. [GUO Zizheng, YIN Kunlong, HUANG Faming, et al. Evaluation of landslide susceptibility based on landslide classification and weighted frequency ratio model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(2): 287 - 300. (in Chinese with English abstract)]

- [24] 王志恒, 胡卓玮, 赵文吉, 等. 基于确定性系数概率模型的降雨型滑坡孕灾环境因子敏感性分析——以四川省低山丘陵区为例[J].灾害学, 2014, 29(2): 109-115.
  [WANG Zhiheng, HU Zhuowei, ZHAO Wenji, et al. Susceptibility analysis of precipitation-induced landslide disaster-pregnant environmental factors based on the certainty factor probability model: Taking the hilly area in Sichuan as example [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(2): 109-115. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 邵山,汤明高,聂兵其,等.宣汉地区降雨型滑坡空间发育规律及敏感性分析[J].长江科学院院报,2018,35(5):41-46.[SHAO Shan, TANG Minggao, NIE Bingqi, et al. Spatial development law and sensitivity analysis of rainfall-induced landslide in Xuanhan County [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(5):41-46.(in Chinese with English abstract)]
- [26] 刘文,余天彬,王猛,等.四川宜宾市地质灾害隐患与地层岩性-地质构造关系分析[J].中国地质灾害与防治学报,2023,34(3):118-126.[LIU Wen,YU Tianbin,WANG Meng, et al. Analysis on the relationship between geological hazard and lithology, geological structure in Yibin City of Sichuan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(3):118-126.(in Chinese with English abstract)]
- [27] 豆红强,简文彬,王浩,等.高植被覆盖区台风暴雨型滑坡成灾机制及预警模型研究综述[J].自然灾害学报,2023,32(2):1-15.[DOU Hongqiang,JIAN Wenbin,WANG Hao, et al Summary of research on disaster mechanism and early warning model of typhoon rain landslide in high vegetation coverage area [J] Journal of Natural Disasters,2023,32(2):1-15.(in Chinese with English abstract)]