

# 基于斜坡单元与 SBAS-InSAR 地表形变速率的高山峡谷区滑坡危险性评价：以金沙江上游地巫乡段为例

袁新霞<sup>1,2</sup>, 郭长宝<sup>1,3\*</sup>, 闫怡秋<sup>1</sup>, 李彩虹<sup>1</sup>, 刘贵<sup>1,3</sup>, 简文星<sup>2</sup>

1) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2) 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 3. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081

**摘要:** 青藏高原东缘金沙江上游高山峡谷区构造活动活跃, 滑坡灾害频发, 现有滑坡危险性评价模型预测精度较低, 难以满足实际防灾减灾工作的准确性等需求。本文以金沙江上游地巫乡段为研究区, 基于遥感解译和野外地质调查, 结合区域滑坡发育特征, 通过改进水文分析法划分基于流域-地貌-斜坡结构的斜坡单元, 选取地形地貌(地面高程、地形坡度、地形坡向和地形起伏度)、地层岩性、活动断裂、降雨量、水系、人类工程活动、植被覆盖和 SBAS-InSAR 地表形变速率等 13 个影响因子, 采用随机森林-连续频率比(RF-OFR)模型开展了区域滑坡危险性评价研究。结果表明: 斜坡单元的评价精度(AUC=0.902)显著高于栅格单元(AUC=0.858), 划分出的高危险区与滑坡灾害分布高度一致; 在斜坡单元下, 升降轨联合地表形变速率结果的评价精度更高(AUC=0.902), 相比未结合、结合升轨形变速率、降轨形变速率的评价结果精度分别提升 6%、5%和 0.6%, 对隐蔽性蠕滑滑坡的识别能力显著增强。研究成果可为高山峡谷区滑坡危险性评价提供更为科学的技术支撑, 为区域地质灾害防治和风险管控提供参考依据。

**关键词:** 金沙江上游; 斜坡单元; 地表形变速率; 危险性评价; 随机森林

中图分类号: P694

收稿日期: 2025-05-17

## Landslide Hazard Assessment in Alpine Gorge Region Based on Slope Units and SBAS-InSAR Surface Deformation Velocity: A Case Study of the Diwu Township Section in the Upper Reaches of Jinsha River

YUAN Xinxia<sup>1,2</sup>, GUO Changbao<sup>1,3\*</sup>, YAN Yiqiu<sup>1</sup>, LI Caihong<sup>1</sup>, LIU Gui<sup>1,3</sup>, JIAN Wenxing<sup>2</sup>

1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China;

3. Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;

**Abstract:** The upper reaches of the Jinsha River, located on the eastern margin of Tibet Plateau, is characterized by intense tectonic activity and frequent landslide disasters in alpine gorge region. However, Current landslide hazard assessment models demonstrate limited predictive accuracy, failing to meet the precision requirements for practical disaster prevention and mitigation efforts. this study focuses on the Diwu Township section in the upper reaches of Jinsha River. Through the integration of remote sensing interpretation and field geological surveys, and based on the regional characteristics of landslide development, we refined the hydrological analysis method to delineate slope units guided by a watershed-geomorphology-slope structure framework. Thirteen evaluation factors were selected, including topographic and geomorphological indicators (elevation, slope, aspect, and terrain relief), lithology, active faults, rainfall, hydrographic network, anthropogenic engineering activities, vegetation coverage, and SBAS-InSAR surface deformation velocity. A novel

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 42372339), 中国地质调查局项目(No. DD20221816).

作者简介: 袁新霞(2002-), 女, 硕士研究生, 主要从事地质灾害调查评价研究。Email: yuanxinxia@cug.edu.cn, ORCID: 0009-0009-6612-8174。

通信作者: 郭长宝, 男, 博士, 研究员, 主要从事工程地质与地质灾害调查研究。Email: guochangbao@163.com, ORCID: 0000-0002-1764-9792。

Random Forest-Continuous Frequency Ratio (RF-OFR) model was employed to conduct regional landslide hazards assessment. Results demonstrate that slope unit-based evaluation achieves significantly higher accuracy (AUC=0.902) compared to grid unit analysis (AUC=0.858), with delineated high-risk zones showing strong spatial correspondence with documented landslide occurrences. Moreover, within the slope unit framework, the combined ascending and descending SBAS-InSAR deformation results yielded the highest predictive accuracy (AUC=0.902), representing improvements of 6%, 5%, and 0.6% over models using no deformation input, ascending-only, and descending-only data, while significantly improving detection capability for hidden creeping landslides. These findings provide enhanced scientific support for landslide hazard assessment in alpine gorge region and offer valuable references for regional geohazard prevention and risk management strategies.

**Keywords:** upper reaches of the Jinsha River; slope units; surface deformation velocity; risk assessment; random forest

## 引 言

金沙江上游地处青藏高原东部，是印度板块与欧亚板块碰撞带的重要组成部分，区域内发育有金沙江断裂带等多条活动断裂，构造运动频繁，地质环境复杂（彭建兵等，2004）。该区地形以高山峡谷为主，河流深切，地势起伏大，岩体风化破碎，为滑坡等地质灾害的孕育与演化提供了有利的地貌与物质基础（殷跃平等，2017）。例如，2018年西藏自治区江达县波罗乡白格村先后两次发生大型高位滑坡事件，在短时间内堵江成湖，造成的经济损失超过42亿元，表现出突发性强、规模大、影响范围广等典型特征（黄细超等，2021）；而四川巴塘茶树山滑坡则呈现持续缓慢的蠕滑变形特征，难以通过常规调查手段实现早期识别（任三绍等，2017; Zhang et al., 2023）。总体来看，该区域滑坡灾害具备突发性与演化性等特点，受区域构造活动、岩性组合、强降雨等多种因子耦合控制，风险识别难度较高。

近年来，针对地质灾害高易发、高危险等特征，众多学者在青藏高原及周边地区开展了滑坡危险性评价研究。其中，斜坡单元（Slope Unit）因更好地贴合地貌自然分区、能够反映坡体整体稳定性而被广泛应用于滑坡危险性评价中。已有研究提出多种划分方法，包括基于正反DEM水文分析的坡面分割法（Xie et al., 2004）、曲率分水岭法（颜阁等，2017）、R.slopeunits法（Alvioli et al., 2016）、MIA-HSU方法及多尺度分割策略（Wang et al., 2019）等，这些方法在提升单元内部地貌一致性与评价精度方面取得了显著进展。然而，在青藏高原等地形破碎、高差悬殊的高山峡谷地区，现有方法在单元细节表达与尺度适应性方面仍存在局限，亟需优化与改进。在评价方法方面，统计学模型与机器学习算法被广泛应用。信息量（杜军等，2010）、频率比、证据权法（闫怡秋等，2020）、逻辑回归（冯杭建等，2016）、支持向量机（牛瑞卿等，2012）、随机森林（郑迎凯等，2020）等方法被不断引入，以提升评价模型的拟合精度和泛化能力。但由于缺乏反映灾害孕育动态过程的时序指标，模型多数仍基于静态地质环境因子构建，难以识别处于演化阶段的滑坡隐患。合成孔径雷达干涉测量（Interferometry Synthetic Aperture Radar, InSAR）数据具有覆盖广、穿透强、精度高等优点（Fruneau et al., 1996），在斜坡地质灾害形变识别、监测等方面得到了广泛的应用（葛大庆等，2007; 张永双等，2020, 何佳阳等，2023）。在滑坡危险性评价中，已有研究多采用单一轨道的地表形变速率与评价模型耦合开展风险判识（喜文飞等，2024），或基于滑坡危险性评价结果与地表形变速率构建动态评价矩阵（Shan et al., 2023）。然而，上述方法普遍忽略了因植被覆盖、山地地形起伏而产生的叠掩阴影效应，尚缺乏对升降轨 InSAR 数据联合的系统分析。

地巫乡段位于金沙江上游，构造活动强烈，地貌破碎，地质灾害极为发育。区域内切割深度大，坡度陡峭，岩体破碎且节理裂隙发育，叠加强降雨、人类工程活动等因素，滑坡、崩塌、泥石流等灾害频发。其中包括乱石包滑坡、地巫村滑坡和贡伙村滑坡等典型滑坡体，部分滑坡已表现出明显的活动迹象，具有规模大、变形活跃、威胁对象多等特征。例如，乱石包滑坡体沿节理面剪切破坏，已出现持续位移，威胁下方道路与居民点（袁浩等，2024）；地巫乡滑坡则为蠕滑型滑坡，表层位移缓慢，滑坡地表 InSAR 最大形变速率达-80mm/a，具有隐蔽性强、演化周期长的特点，难以通过常规手段早期识别（郭长宝等，2025）。总体来看，地巫乡段的滑坡灾害具备典型的青藏高原东缘高山峡谷区地质灾害特征，对沿江交通、水电设施和村庄安全构成严重威胁。因此，本文选取青藏高原东部金沙江上游地巫乡段为研究区，在区域地质灾害调查、InSAR 遥感解译的基础上，构建以基于流域-地貌-斜坡结构的斜坡单元为基本评价单元的滑坡危险性评价框架，提出随机森林-连续频率比（RF-OFR）的区域滑坡危险性评价方法，并引入联合升降轨 InSAR 地表形变速率作为关键动态因子，为金沙江上游地巫乡段滑坡危险性分析研究，以及青藏高原构造活跃区蠕滑性滑坡的防灾减灾工作提供科学依据。

## 1 研究区概况

### 1.1 自然地理

本文的研究区位于金沙江上游的仁娘河、地巫河与热思拥流域（图 1b），其位于金沙江上游的典型高山峡谷区，属青藏高原东缘构造-地貌过渡带。区内地形起伏剧烈，山高谷深，河流深切发育，谷坡陡峻，常形成“V”字形峡谷。区内海拔一般为 2251-5174 m，海拔最高可达 5180 m，海拔最低点为金沙江，海拔约 2249 m，极为险峻的高山峡谷地貌为滑坡的形成提供有利的地形条件。研究区主要发育在断裂构造控制下，河谷沿构造线展布，受新构造运动影响显著，地貌类型以剥蚀构造中山、峡谷堆积地貌为主，坡面破碎物、崩塌体与滑坡堆积物广泛分布。研究区位于金沙江干热河谷气候区，年均降雨约为 400 mm，降雨主要集中在 6-9 月的汛期，暴雨集中、强度大，极易引发滑坡、泥石流等地质灾害。水文特征表现为季节性径流变化显著，暴雨径流过程短而急，山洪暴发频繁，对地貌演化与地质灾害的形成具有显著推动作用。

### 1.2 地质构造

研究区位于金沙江上游地巫乡段，地处青藏高原向扬子地块过渡的构造转换带，受金沙江断裂带等深大断裂的控制，构造活动呈现强烈的差异性隆升与走滑特征（李勇等，2000）。金沙江断裂带是青藏高原内部川滇菱形块体的西部边界断裂（常玉巧，2019），其总体走向为北西近南北向，总体宽 50~60km，主要由西界断裂（F<sub>5</sub>）、西支断裂（F<sub>4</sub>）、金沙江主断裂（F<sub>3</sub>）三条北西向主要断裂和字嘎寺-德钦断裂、巴塘断裂以及一些近南北向次级断裂组成（图 1a），右旋走滑特征显著，兼有垂直(逆)滑动速率（徐锡伟等，2005）。其中，金沙江西支断裂（F<sub>4</sub>）整体呈 NNE~近南北向沿金沙江两岸延展，主体西倾，产状较陡，为晚更新世活动断裂（夏金梧等，2022）。区域历史地震频发，高地应力环境下岩体破碎程度高，为滑坡发育提供了重要的构造基础。

### 1.3 地层岩性

研究区地层岩性复杂，表层为第四系松散堆积物，主要由残坡积、崩坡积、冲洪积等组成，以粉质粘土、碎块石土为主；下覆基岩主要为三叠系上统甲丕拉组紫红色砾岩、砂岩、火山岩（T<sub>3j</sub>）、

三叠系中下统中心绒群灰绿色中-基性火山岩 ( $T_{1-2zh^2}$ )、三叠系中下统中心绒群黑色板岩 ( $T_{1-2zh^1}$ ) 和二叠系夏金雪山群下段石英岩、绢云石英片岩 ( $PGj^2$ ) (图 1b), 岩层总体产状为  $210^\circ \sim 240^\circ \angle 38^\circ \sim 45^\circ$ 。受构造影响大, 岩层挤压破碎, 节理裂隙发育, 岩体风化程度较高, 力学性质较差, 导致断裂带内多处滑坡发育。

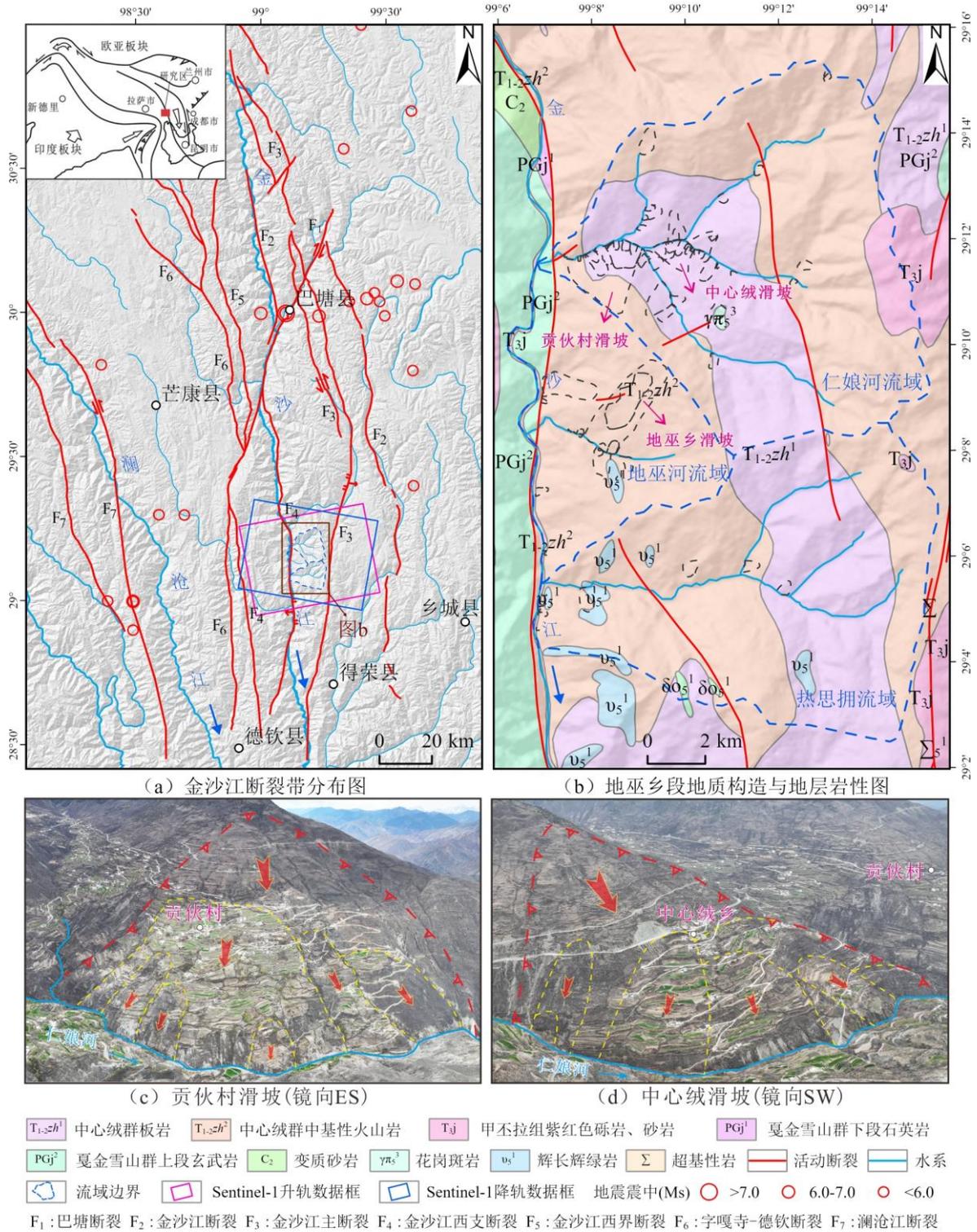


图 1 金沙江断裂带分布图与地巫乡段地质构造与地层岩性图

Fig. 1 Distribution map of Jinshajiang fault zone and geological structure map of Diwu Township section

## 1.4 滑坡灾害发育特征

金沙江上游地区地质地貌复杂，沿江两岸山高坡陡，岩体节理裂隙发育，滑坡广泛发育，具有“数量多、规模大、类型多样、演化复杂”的特点。该区域滑坡多发于深切河谷两岸的斜坡，一旦发生大规模滑坡极易滑入江中形成堰塞湖，可能诱发溃坝、泥石流等二次灾害，形成典型的滑坡灾害链，危害极大。

金沙江上游地巫乡段滑坡发育分布主要沿河流两岸及活动断裂带呈带状分布，受金沙江断裂等构造控制显著。滑坡多发于高陡岸坡、断层破碎带及风化强烈区域，尤其集中在地巫河、仁娘河等深切峡谷地段，常见深层蠕滑型滑坡。此类滑坡多发生在厚层残积、崩积物覆盖坡面，表现为缓慢变形与复活反复，部分受人类工程扰动诱发。研究区滑坡类型主要发育降雨诱发的滑坡和地震滑坡，沿仁娘河两岸和地巫河分布，调查发现斜坡主要变形时间（每年 6 月至 9 月）与强降雨时间一致或略有滞后，同时沿金沙江断裂带仍残留有历史地震形成的大量滑坡，这类滑坡具有形态特征明显，发育地形高陡，规模较大等特征，如贡伙村滑坡和中心绒滑坡（图 1c, d）。

## 2 研究方法 with 数据

### 2.1 滑坡调查与数据库建立

#### 2.1.1 遥感解译与现场调查

本文采用 Google Earth 光学遥感影像初步解译金沙江上游地巫乡段滑坡，并结合空间分辨率为 6m 的 SPOT6/7 高分辨率正射影像（DOM），对研究区开展精细化解译；在此基础上，针对典型滑坡地巫乡滑坡、贡伙村滑坡、中心绒滑坡开展了无人机搭载激光雷达（LiDAR）的实地测绘工作，获取了分辨率 0.2m×0.2m 的高精度滑坡影像和点云数据，为后续滑坡灾害的精细化分析与危险性评价提供了高质量的数据支撑。

#### 2.1.2 基于 SBAS-InSAR 的地表形变特征分析

本文采用 SBAS-InSAR 技术开展金沙江上游地巫乡段地表形变监测，获取了 2016 年 1 月至 2023 年 10 月金沙江上游地巫乡段沿雷达视线方向（Line-of-sight, LOS）地表形变速率（表 1），其中负值表示远离卫星视线方向的地表运动，正值表示朝向卫星视线方向的地表运动（闫怡秋，2022）。其中升轨数据最大形变速率为 147 mm/yr，降轨数据最大形变速率为-68 mm/yr。

表 1 研究区 SAR 影像数据基本参数信息

Table 1 Basic parameter information of SAR image data in the study area

SAR 传感器	Sentinel-1A	
轨道方向	升轨	降轨
轨道号	99	33
幅号	1275	492、497
所处波段	C	C
雷达波长(cm)	5.6	5.6
入射角(°)	36.99	38.71
影像间隔时间(d)	12	12

影像获取时间段	2016年1月至2023年10月	2016年1月至2023年10月
影像数量(景)	209	222

### 2.1.3 滑坡数据库

滑坡数据库影响区域评价结果，是滑坡危险性分析的基础。本文在高分辨率遥感影像解译与现场实地调查的基础上，构建了金沙江上游地巫乡段滑坡数据库，识别并记录滑坡灾害共计 83 处（图 1b），其中小型滑坡 51 处，中型滑坡 13 处，大型滑坡 19 处，滑坡总面积为 2.59 km<sup>2</sup>。其中，面积最大滑坡为地巫乡滑坡，面积为 1.05 km<sup>2</sup>。研究区地处金沙江高山峡谷段，地形起伏大，地质构造复杂，是地质灾害高发敏感区域。滑坡灾害在区域内主要沿金沙江干流及其支流仁娘河、地巫河的两侧发育，且与活动断裂带、国道和省道等地段呈明显相关性。

## 2.2 基于流域-地貌-斜坡结构的斜坡单元划分方法

评价单元的选取是滑坡危险性评价建模的基础，不同的评价单元会直接影响滑坡危险性评价的精度。基于水文分析（Hydrologic Analysis Method, HAM）的斜坡单元划分方法，是目前最为常用的斜坡单元划分方法。其划分过程是基于高精度 DEM 数据，利用软件 ArcGIS 的水文模块，通过填注、提取水流方向、生成河网等步骤后，提取斜坡单元。焦伟之（2022）基于传统的水文分析法划分斜坡单元，并进行边界拓扑检查与人工修正，开展了大新镇地质灾害易发性评价研究，但未考虑高山峡谷区复杂地貌结构的适应性。孟田（2021）在金沙江白格滑坡风险性研究中通过设置最佳填注阈值、集水面积阈值来消除斜坡单元的误差直线，结果显示有 80.95%的滑坡位于较高危险性和高危险性区内，但未考虑斜坡结构对斜坡单元划分的影响。本文在传统水文分析法划分斜坡单元的基础上，结合流域单元、地貌和斜坡结构人工修正，获取研究区基于流域-地貌-斜坡结构的斜坡单元。本方法充分考虑了高差悬殊、构造活动强烈的高山峡谷区的地貌特征及滑坡成因机制，能更精细地刻画潜在滑坡发生单元的空间边界，提升了滑坡易发性分区的准确性与物理基础。

为获取合理的斜坡单元划分结果，目前常采用设置不同阈值方式进行试算。本文采用覆盖研究区的 SPOT 数据，DEM 的栅格分辨率为 6m×6m，开展斜坡单元的划分。设置流量阈值系列：2000、5000、8000，对比不同阈值下的斜坡单元划分效果，并与高精度的 SPOT 光学遥感影像对比发现，当流量阈值为 5000 时，划分出的斜坡单元效果最佳。传统水文分析方法划分出 763 个斜坡单元，其中面积最大的单元为 1.368km<sup>2</sup>，面积最小的单元为 0.183km<sup>2</sup>。本文结合坡度、坡向等地质地貌信息进行人工修正，最终共划分出 1030 个斜坡单元（图 2），其中面积最大的单元为 1.298km<sup>2</sup>，面积最小的单元为 0.010km<sup>2</sup>。

## 2.3 滑坡危险性评价方法

### 2.3.1 频率比模型

频率比模型（Frequency Ratio Model, FR）以滑坡清单与滑坡诱发因素之间的量化关联为基础，获得每类致灾因素的频率比（FR），建立滑坡清单图和因素图的组合（Mondal et al., 2013）。

其基本思路是通过计算环境因子各子区间对滑坡发育的影响程度来间接实现模型输入变量的确定（Silalahi et al., 2019）。频率比 FR 是滑坡发生地区在整个区域内的平均值，表征环境因子各区间对滑坡发生的相对影响程度（式 1）。FR>1 时表明该环境因子区间与滑坡相关性较强，滑坡发生概率较大；反之，则越小；

$$FR_j = \frac{A_j / A}{B_j / B} \quad (\text{式 1})$$

其中,  $A_j$  为环境因子在区间内出现滑坡的栅格数;  $A$  为研究区内已知滑坡所分布栅格的总数;  $B_j$  为环境因子的单元数;  $B$  为研究区栅格总数。

考虑不同的影响因子  $FR_j$ , 对于特定的空间位置, 假设其所属的区间为  $FR_{ij}$ , 通过不同因子的频率比相加, 进而得到该空间位置滑坡灾害的危险性指数  $LHI$  (式 2, Shano et al., 2020), 绘制滑坡危险性分区图。

$$LHI = \sum_{i=1}^m FR_{ij} \quad (\text{式 2})$$

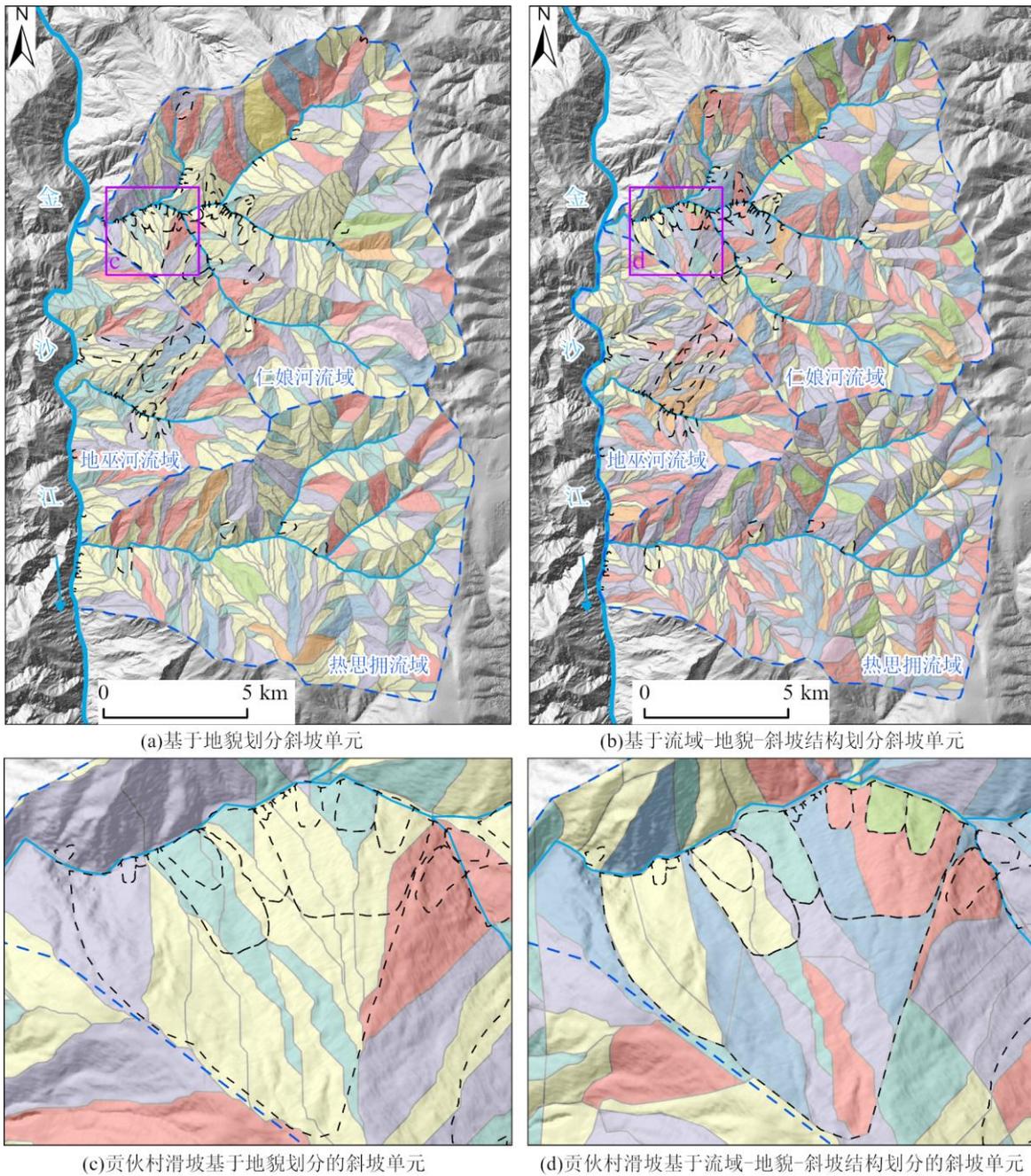


图 2 基于不同方法的斜坡单元划分结果

Fig. 2 Results of slope unit delineation based on different methods

### 2.3.2 连续频率比模型

由于传统频率比方法首先需要对地质灾害影响因子进行分类或分级，因子分级个数与分级界限的确定存在较大主观性并且会导致频率比值得不连续。Li et al. (2017, 2023) 对传统频率比方法进行了改进，提出通过计算每个二进制归一化因子值的频率比，不同因素的频率比计算仅受两个统一参数（精度和箱宽）的约束，从根本上提高了频率比值的连续性，增强了各地质灾害影响因子敏感性的区分度，降低了因子分级的主观性。连续频率比模型的权重和危险性指数如式 3 和式 4：

$$OFR_{i,j} = \frac{P(L|F_{i,j})}{P(L|F_i)} \quad (\text{式 } 3)$$

$$LHI_{OFR} = \sum_{i=1}^n OFR_{i,j} \quad (\text{式 } 4)$$

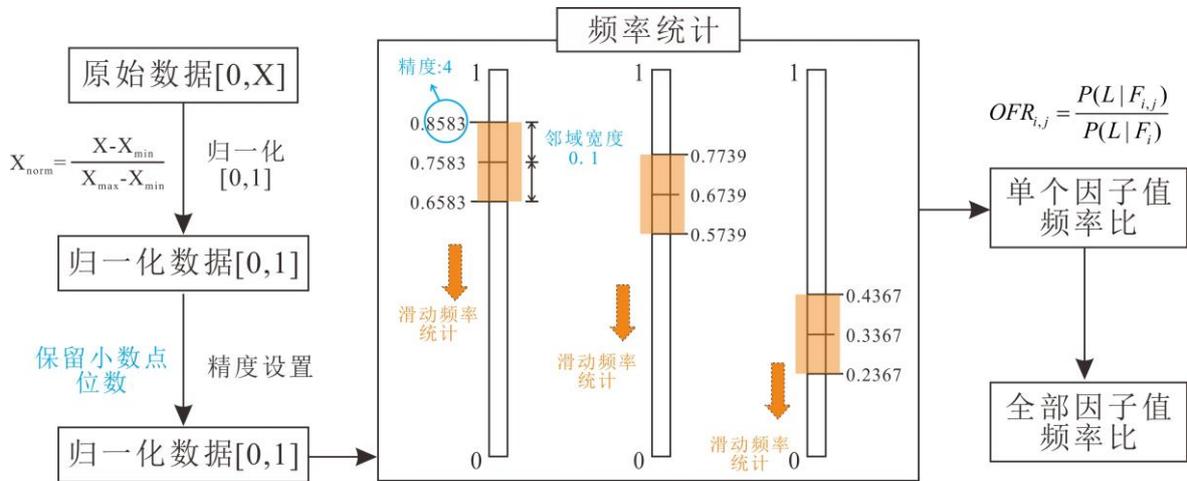


图 3 优化连续频率比原理图（据 Li et al., 2017 修订）

Fig. 3 Continuous frequency ratio method schematic diagram

### 2.3.3 随机森林模型

随机森林（RF）模型是一种基于决策树的集成学习算法，主要通过多颗决策树中每棵树的投票结果获取最优分类结果。基本思想是采用 Bagging 技术对原始训练集进行抽样，使各样本的特征数量与初始训练集合的特征数量一致。然后，用 K 个样本构建一个决策树模型，获得 K 个不同的分类结果。假设训练集的特征数为 m，在每次抽样过程中，随机选取 n (n ≤ m) 项特征，并选取最佳的特征展开节点。最后，通过对 K 种的分类结果进行投票，确定其最终的分类以形成随机森林。RF 模型通过随机取样的方式降低了模型的方差，从而不容易受过拟合影响，并且具有很好的可解释性。

### 2.3.4 随机森林-连续频率比模型

频率比模型在处理多维度因子时，可能难以有效捕捉因子之间的非线性关系。随机森林模型通过生成大量决策树并基于其集成结果进行预测，能够更好地识别和量化复杂因子之间的非线性关系（Chen et al., 2020）。因此，将随机森林模型与频率比或连续频率比模型相结合（RF-FR, RF-OFR），引入随机森林的非线性处理能力，通过线性加权的方式综合多个因子的贡献（式 5, 式 6），以实现目标区域的滑坡危险性进行更为精确的评估（Bui et al., 2016）。

$$LHI_{RF-FR} = \sum_{i=1}^n W_i FR_{ij} \quad (\text{式 } 5)$$

$$LHI_{RF-OFR} = \sum_{i=1}^n W_i OFR_{ij} \quad (\text{式 } 6)$$

其中,  $W_i$  表示由随机森林模型评估得到的第  $i$  个因子的权重,  $FR_{ij}$  和  $OFR_{ij}$  表示第  $i$  个因子在  $j$  区间内的频率比值,  $n$  为总的因子数目。

## 2.4 滑坡危险性评价流程

滑坡是动态过程, 随着时间的流逝, 它们的危险水平会波动。将 InSAR 形变速率作为时间概率因素纳入滑坡危险评估可以有效地减少时间变化对评估结果的干扰。目前, 区域滑坡危险评估主要基于历史记录的数据, 该数据忽略了动态滑坡的变化, 这种方法可能导致区域滑坡危险评估过时和不准确的结果。结合 InSAR 形变信息与滑坡危险性评价, 可实现滑坡危害的动态评估。基于栅格单元的评价因子数据导入已经划分好的斜坡单元中, 然后利用 ArcGIS 软件中分区统计工具输出基于斜坡单元的评价因子图。其中, 对于连续型评价因子, 一般分区统计其平均值; 对于离散型评价因子, 则分区统计其出现频率最高的类别 (众数)。

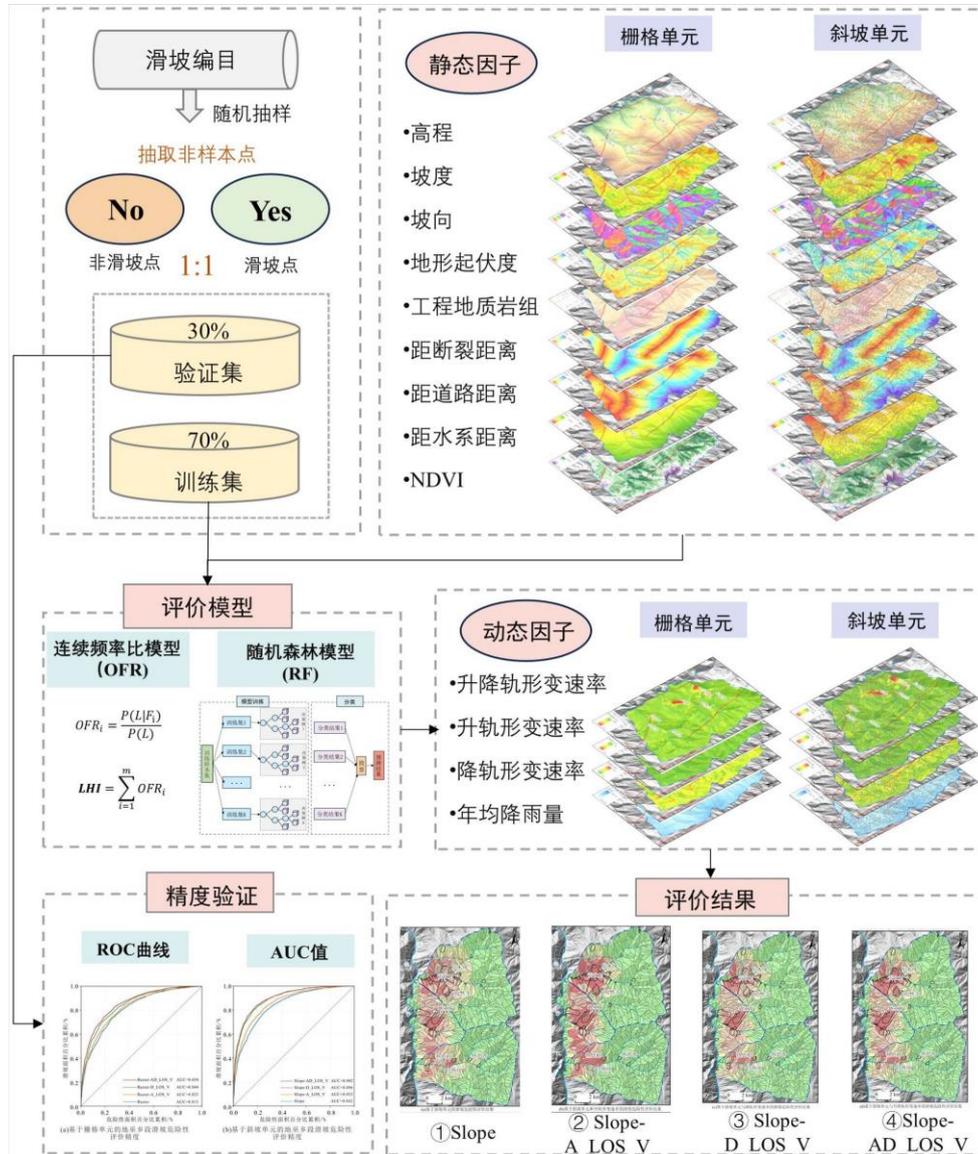


图 4 地巫乡段滑坡危险性评价流程图

Fig. 4 Flowchart of landslide hazard assessment in Diwu Township Section

本研究构建了一套系统的滑坡危险性评价技术流程，涵盖样本构建、评价单元划分、模型建立与精度验证等关键环节（图 4）。首先，基于已编目的滑坡灾害数据，利用 ArcGIS 中在每个滑坡点生成一个 1km 缓冲区，通过 ArcGIS 的随机点生成工具，按 1:1 比例在缓冲区范围外随机生成 83 个非滑坡点。最后，将滑坡点和非滑坡点合并建立样本数据集。并进一步划分为 70% 的训练集与 30% 的验证集，以确保模型训练的充分性和后续评估的客观性。在评价单元构建方面，分别采用栅格单元和基于流域-地貌-斜坡结构的斜坡单元，以探讨不同空间单元划分方式对滑坡危险性识别效果的影响。模型构建方面，引入随机森林-连续频率比模型（RF-OFR）进行滑坡危险性建模。OFR 模型在传统频率比方法的基础上对因子进行“滑动频率统计”，增强了对不同因子贡献差异的表达能力；RF 模型则作为一种典型的集成学习方法，能够有效捕捉因子间的非线性关系，表现出较好的分类性能与泛化能力。模型最终输出滑坡危险性指数（LHI），用于量化各评价单元的滑坡发生概率。为综合评价不同模型与单元划分方式的适用性与精度，采用受试者工作特征曲线（ROC）及其曲线下面积（AUC）指标进行精度验证与对比分析。最终，结合空间制图手段，将危险性评价结果进行可视化表达，揭示区域内滑坡高易发区的空间分布特征。

### 3 滑坡危险性评价影响因素分析

#### 3.1 地形影响因素分析

##### 3.1.1 地面高程

金沙江上游地巫乡段在地貌上属于高山、中高山区以及高山峡谷地貌，地势总体东高西低，地面高程分布在 2251-5174 m 之间（图 6a, b），河流深切，形成了纵横交错的河谷地貌。通过统计分析 LAP（Landslide Area Percentage）和 LND（Landslide Number Density）的大小衡量不同因子内部滑坡的易发区间。86.28% 的滑坡灾害分布在 2500~4000 m 高程范围内，LAP 随高程的增加先增大后减小（图 5a），其中，在 2500-3000m 的范围内 LND 较高，表明该高程范围内有利于滑坡发生。

##### 3.1.2 地形坡度

滑坡的发生与地形坡度有着直接的关系，滑坡发生的关键在于斜坡体是否具备有效临空面（徐志文等，2002）。随着坡度的增加，重力沿斜坡方向的分量增加，斜坡易失稳变形。统计结果显示，坡度在 20-35° 的坡度范围内 LAP 为 48.97%，LND 较高为 32（个/km<sup>2</sup>），即金沙江上游地巫乡段沿线坡度在 20~35° 的范围内最有利于地质灾害的形成，当坡度小于 10° 和大于 50° 时，地质灾害发育的数量相对较少（图 5b；图 6c, d）。

##### 3.1.3 地形坡向

坡向是滑坡危险性评价中非常重要的因素，坡向会影响风化作用、气候状态、土地覆盖和土壤渗透能力等，因此地表的植被覆盖程度、地表风化程度和地表的蒸发程度等不同，从而影响地质灾害的发生。由计算的坡向因子各级灾害数量占比表明，坡向 SW 为优势坡向（图 5c），产生地质灾害的数量较多，其它坡向的地质灾害数量和地质灾害点密度差异较小。

##### 3.1.4 地形起伏度

地形起伏度可以反映区域地形的起伏状况，同时也一定程度地反映了地表的破碎程度。因此，地形起伏大的区域一方面为灾害发生提供了物质条件，同时也为滑坡发生提供了地形条件。本次评价使用的搜索邻域为 1 km×1 km 的矩形统计地形起伏度，研究区的地形起伏最高达到 218m/km<sup>2</sup>（图

6g, h)。地形起伏度较大的区域主要集中在金沙江及支流仁娘河、地巫河两岸区域。

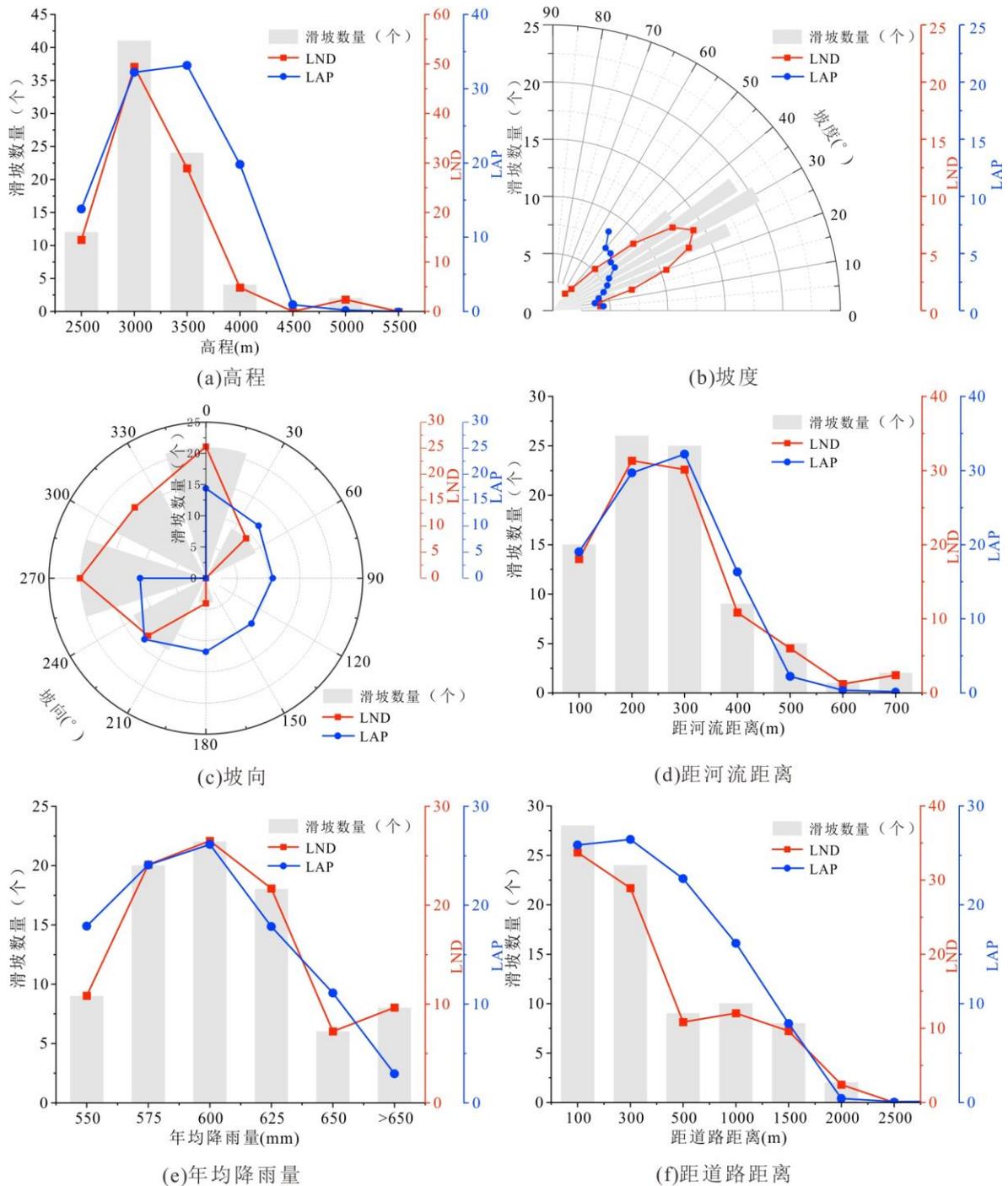


图 5 地巫乡段滑坡危险性评价影响因子统计图

Fig. 5 Statistical chart of influencing factors of landslide hazard assessment in Diwu Township Section

### 3.2 活动断裂影响分析

在构造带的断层区域，岩土体结构破碎，风化强烈，对滑坡灾害的发生有一定的影响。金沙江上游地巫乡段地质构造复杂，活动断裂发育。本次评价采用 1：20 万比例尺地质图的断裂数据，根据距断裂的不同距离分析对滑坡的影响程度（图 6k, l）。统计结果显示距断裂距离在<2km 范围内 LAP 为 26.78%，LND 高达 15.3（个/km<sup>2</sup>）（图 5h）。LAP 和 LND 都随距断裂距离的增加而降低，这表明距离断裂越近，地质灾害发育越多，活动断裂对地质灾害的发育分布影响显著。

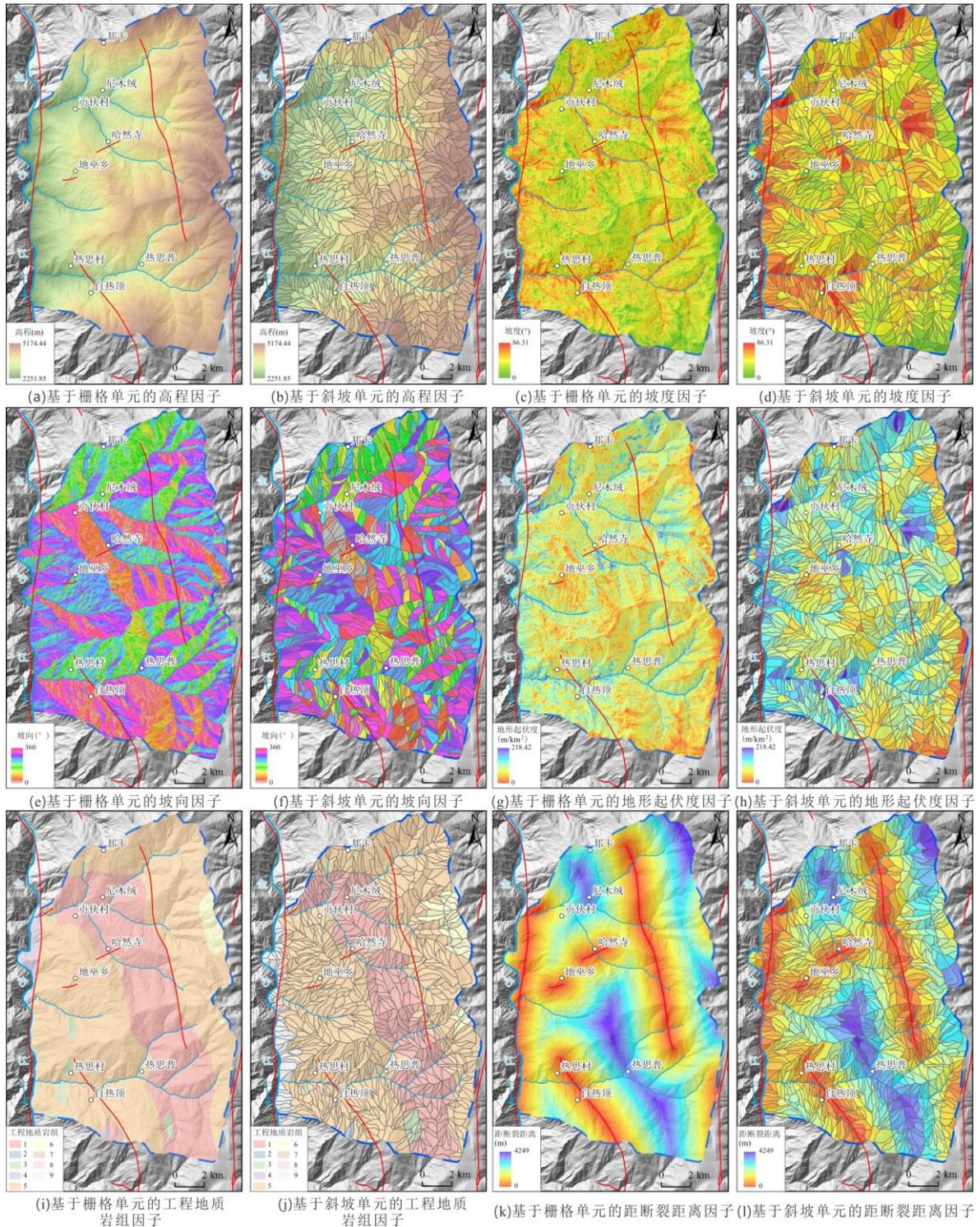


图 6 地巫乡段滑坡危险性评价影响因子图

Fig. 6 Landslide hazard assessment factor map of the Diwu Township Section

### 3.3 工程地质岩组分析

滑坡的发育受岩性及其力学特性的控制，不同岩组的抗剪强度、风化特性和结构特征直接影响滑坡的易发性（刘春玲等，2010）。例如，泥岩、页岩等软弱岩层易风化破碎，抗剪强度低，常作为滑移面诱发顺层滑坡；砂岩与泥岩互层结构易在软硬交界处形成剪切破坏，引发牵引式滑坡。根据岩性组合和工程地质力学特性，将金沙江上游地巫乡段的地层岩性划分为9类工程地质岩组（图 6i，

j)。通过地层岩性与滑坡灾害的空间分析，以及野外调查发现，研究区内工程地质岩组 8（较坚硬—坚硬薄—中厚层状板岩、千枚岩与变质砂岩互层岩组）是极易发生滑坡灾害的岩组。另外，研究区内大型滑坡灾害沿金沙江构造混杂岩带成密集发育，如地巫乡滑坡发育于金沙江构造混杂岩带内。

### 3.4 降雨因素分析

降雨是滑坡的直接触发因素之一，它通过增加坡体的水分含量、降低岩土体的抗剪强度以及改变坡面和地下水的动态平衡，从而显著提高了滑坡发生的概率。本次研究通过国家数据科学中心获取了 2018-2022 年五年的平均年降雨量（图 7q, r），降雨量的分布受地形和高山等因素的影响，金沙江上游地巫乡段的降雨分布较高的地区主要集中在金沙江两岸，区内多年平均降雨量为 503mm，多集中于 6-9 月，此时段集中降雨引发各类地质灾害。在降雨量 550~600mm 范围内，LAP 最大为 55.61%（图 5e），随着降雨量的增加，滑坡百分比没有显著增加的趋势，这表明在该区短时间降雨就能打破斜坡体临界平衡，从而造成斜坡失稳。

### 3.5 距河流的距离

河流是控制坡面侵蚀过程的主要因素之一，流水侵蚀直接影响坡脚冲蚀和河流下切。地质灾害的发生与地表水关系密切，离水系较近的区域，汇水面积一般较大，也易诱发地质灾害，同时河流可以不断地对斜坡的坡脚进行冲蚀和掏空，从而导致斜坡失稳。距河流距离在小于 600m 范围内 LAP 为 24.07%，LND 为 48.16（个/km<sup>2</sup>）（图 5d），随距离河流距离越远，地质灾害发育越少。表明距离河流越近，河流的冲蚀作用对斜坡影响越大，斜坡失稳的概率越高，对地质灾害的产生影响越大。

### 3.6 距道路的距离

在人类工程活动越来越频繁的情况下，筑路或者道路运行期间会进行人工开挖坡脚、爆破等一系列活动，这些活动会改变原有的岩土体结构，影响岩土体稳定性，进而为滑坡地质灾害的发生埋下了隐患。距道路离在小于 500 范围内 LAP 为 17.17%，LND 为 19.33（个/km<sup>2</sup>）（图 5f），随着距离道路越近，地质灾害发育越多，道路对地质灾害的发育分布影响显著。

### 3.7 植被覆盖因素分析

地表的植被覆盖同样影响滑坡的发育和分布。归一化植被指数（NDVI）是对 ETM+遥感影像经过处理，增强植被信号，消弱噪音组合而成，是植被生长状态及植被覆盖度最佳指示因子。计算时，可采用近红外波段反射值与红光波段反射值之差与两者之和的比值（式 7），即：

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R} \quad (\text{式 7})$$

式中， $IR$  为近红外波段的反射值； $R$  为红光波段的反射值。

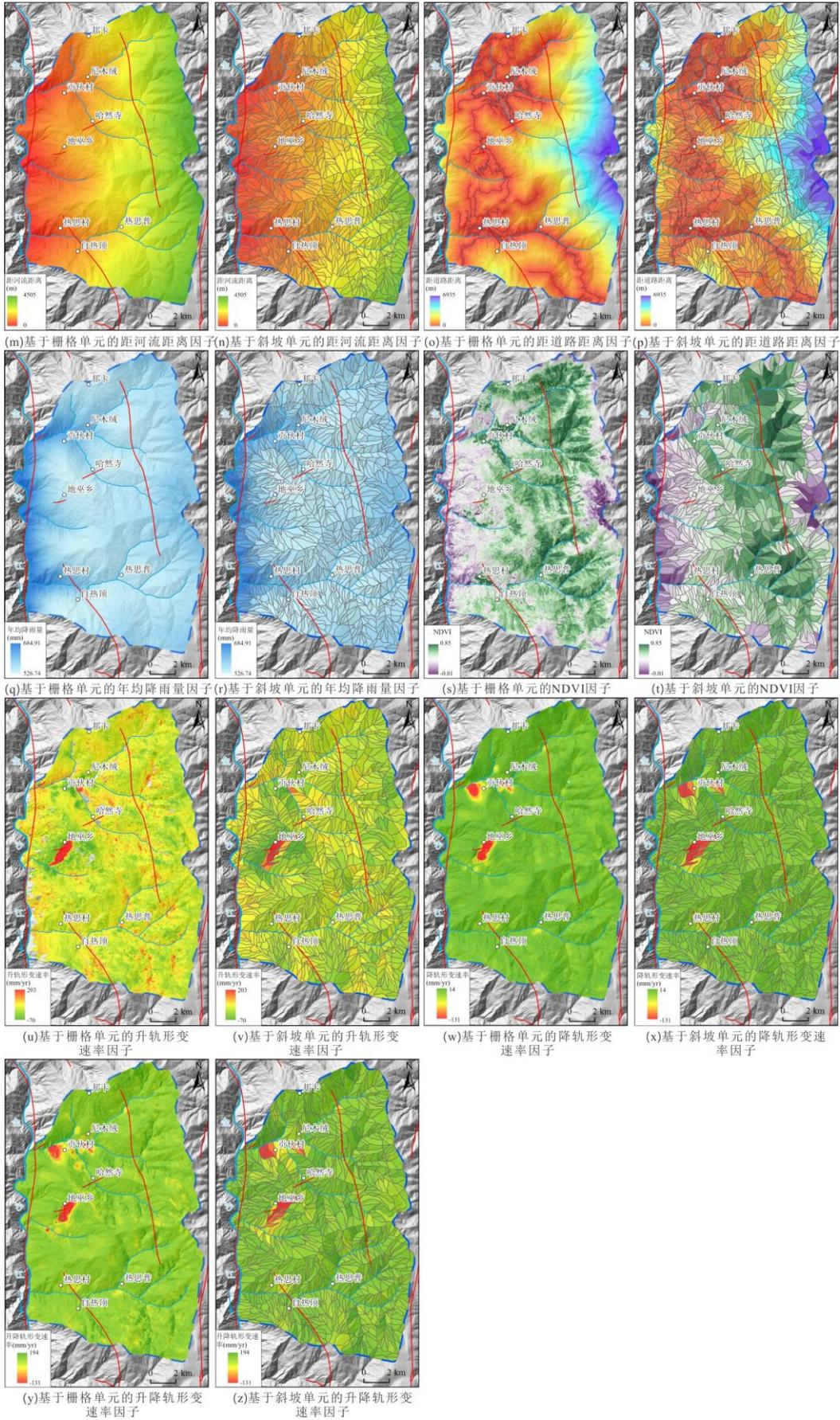


图 7 地巫乡段滑坡危险性评价影响因子图

Fig. 7 Landslide hazard assessment factor map of the Diwu Township Section

### 3.8 地表形变速率

地表形变速率是反映地表形变强度和空间分布特征的重要参数，广泛应用于滑坡等地质灾害的识别与演化过程分析。利用 SBAS-InSAR 技术可以获取地表形变速率，由于不同卫星轨道对不同方向的形变敏感程度不同，单一轨道的形变信息可能不完整，从而导致不同轨道的形变结果存在差异。针对该问题，本文引入 Notti 等提出的 R 指数几何畸变算法(式 8, Notti et al., 2010; Notti et al., 2014)，对研究区内 Sentinel-1 升轨与降轨数据的适宜性进行量化评价，筛选出在不同斜坡单元中最优的 InSAR 数据源。使用 ArcGIS 的空间分析功能联合升降轨均适宜区域 ( $R>0.6$ ) 的地表形变速率，构建升降轨联合形变速率场。具体的计算公式为：

$$R = \sin[\theta - \beta \sin(A)] \quad (\text{式 } 8)$$

式中， $\theta$  为视线向入射角； $\alpha$  为坡向； $\beta$  为坡度； $\varepsilon$  为卫星飞行方向与正北方向的夹角， $A$  为坡向校正系数；对于升轨影像  $A = \alpha + \varepsilon + 180$ ，对于降轨影像  $A = \alpha - \varepsilon$ 。

## 4 滑坡危险性评价结果

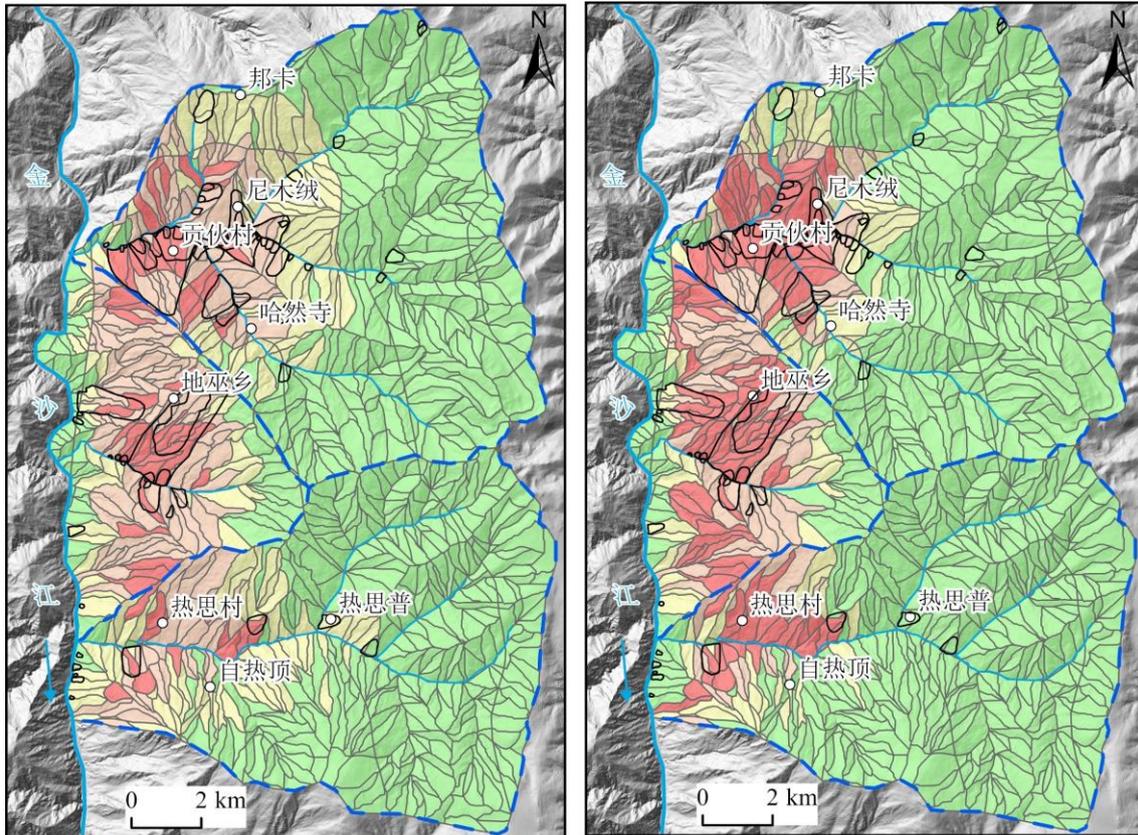
### 4.1 权重计算

选取地面高程、地形坡度、坡向、地形起伏度、工程地质岩组、距断裂距离、距河流距离、距道路距离、地表植被覆盖率 (NDVI) 9 个静态因子指标，基于 SBAS-InSAR 技术处理获取的滑坡升轨形变速率、降轨形变速率、升降轨联合形变速率和降雨量 4 个动态因子指标。选用 RF-OFR 模型进行地巫乡段滑坡危险性评价。各影响因子的频率比通过连续频率比模型计算，使用的输出栅格分辨率、精度和邻域窗口宽度等参数分别为 6m、4 和 0.1。采用 Python 的 Scikit-learn 库中通过随机森林模型计算出各因子的特征重要性，将 13 个因子归一化后进行重要性排序，获得各影响因子权重 {0.28768、0.25687、0.18324、0.15637、0.12367、0.08046、0.07891、0.05378、0.04643、0.03768、0.02586、0.024761、0.02179}。结果显示滑坡易发性受河流、地形起伏度、道路等因素的影响较高。最后，采用公式 5 和公式 6 将连续频率比和随机森林模型相结合，分析地巫乡段滑坡危险性评价。

### 4.2 危险性分区

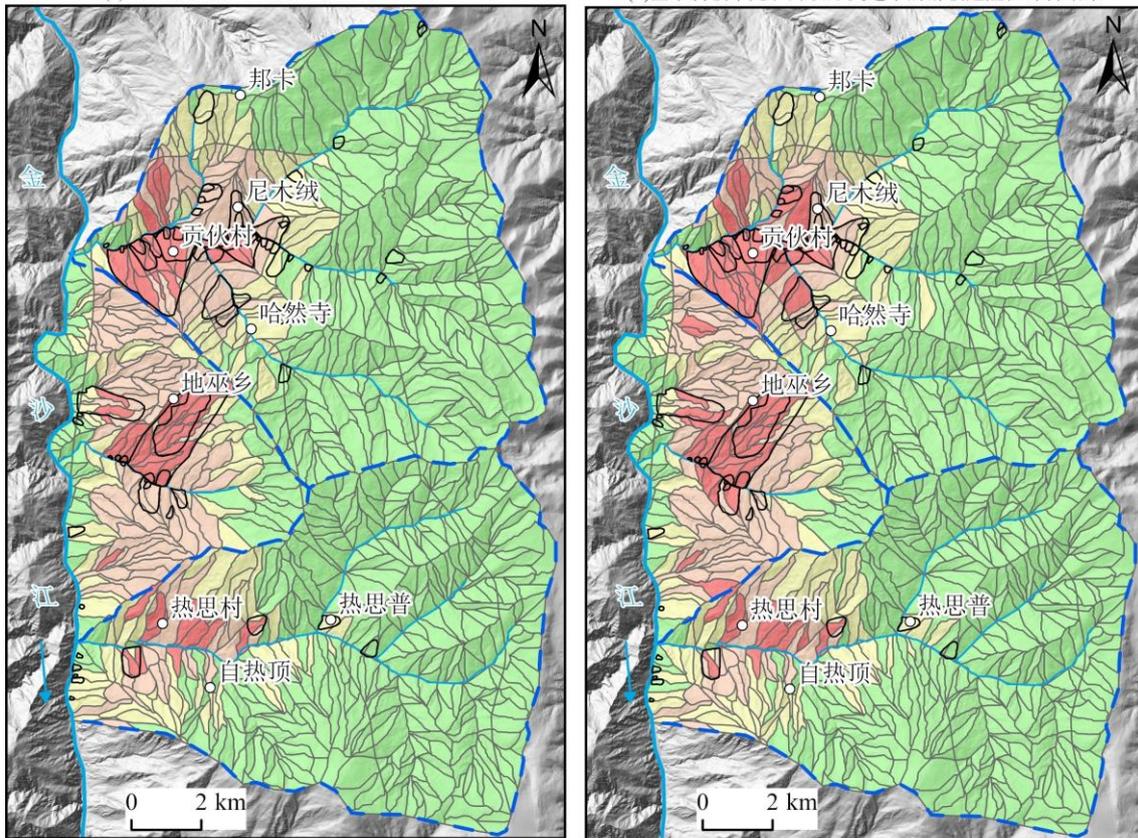
采用连续频率比-随机森林耦合模型，对比分析栅格单元和斜坡单元分别与升轨形变速率、降轨形变速率和升降轨联合形变速率结合计算的 8 类危险性评价结果，分析单元划分方法与数据源选择对地巫乡研究区段滑坡危险性评价的影响机制。基于随机森林特征重要性加权的多元数据叠加分析，最终生成研究区滑坡危险性指数空间分布图，并依据自然断点法将灾害危险性程度划分为极高、高、中等、低四个等级，绘制研究区的滑坡危险性分区 (图 8)。

通过统计栅格单元和斜坡单元 8 种类别在各个危险性等级区间内频率比-随机森林模型的滑坡数量占比和分区面积占比。分析发现斜坡单元在低、中、高和极高易发区的滑坡数量占比分别为：16.87%、16.87%、16.87%、49.39%，分区面积占比分别为：65.15%、14.80%、12.48%、7.57%。分析发现斜坡单元的危险性分区滑坡数量占比和分区面积占比结果表现较好 (表 2)，其中 4 种类别结合滑坡形变速率的滑坡危险性评价分区中升降轨联合数据表现出了较好的分区效果，可进行后续精度检验。



(a) 基于斜坡单元的滑坡危险性评价结果

(b) 基于斜坡单元和升轨形变速率的滑坡危险性评价结果



(c) 基于斜坡单元与沉降形变速率的滑坡危险性评价结果

(d) 基于斜坡单元与升降形变速率的滑坡危险性评价结果

○ 乡村名    水系    ◻ 滑坡    危险性评价分区    极高风险区    高风险区    中高风险区    低风险区

图 8 基于不同数据源的地巫乡段滑坡危险性评价分区

Fig. 8 Landslide hazard assessment zoning in Diwu Township Section based on different data sources

表 2 地巫乡段滑坡危险性分区统计表

Table 2 Statistical table of landslide hazard zoning in Diwu Township

评价单元	InSAR 数据源	滑坡灾害易发性分级	分级面积 (km <sup>2</sup> )	分级面积占比 (%)	滑坡数量 (处)	滑坡数量占比 (%)
斜坡单元	无	极高易发	12.66	4.87	23	27.71
		高易发	42.48	16.34	35	42.17
		中等易发	43.95	16.9	14	16.87
		低易发	160.91	61.89	11	13.25
斜坡单元	升轨数据	极高易发	33.60	12.92	38	45.78
		高易发	24.39	9.38	19	22.89
		中等易发	21.88	8.42	7	8.43
		低易发	180.13	69.28	19	22.9
斜坡单元	降轨数据	极高易发	14.38	5.53	30	36.14
		高易发	36.60	14.08	25	30.12
		中等易发	34.86	13.41	14	16.87
		低易发	174.15	66.98	14	16.87
斜坡单元	升降轨联合数据	极高易发	19.69	7.57	41	49.39
		高易发	32.45	12.48	14	16.87
		中等易发	38.47	14.8	14	16.87
		低易发	169.39	65.15	14	16.87
栅格单元	无	极高易发	26.87	10.33	21	25.30
		高易发	34.76	13.36	22	26.51
		中等易发	46.31	17.81	32	38.55
		低易发	152.08	58.50	8	9.64
栅格单元	升轨数据	极高易发	19.78	7.61	27	32.53
		高易发	25.17	9.68	19	22.89
		中等易发	68.76	26.44	22	26.51
		低易发	146.31	56.27	15	18.07
栅格单元	降轨数据	极高易发	17.32	6.66	30	36.14
		高易发	40.87	15.72	21	25.30
		中等易发	36.29	13.95	18	21.68
		低易发	165.54	63.67	14	16.88
栅格单元	升降轨联合数据	极高易发	21.36	8.21	32	38.55
		高易发	37.29	14.34	20	24.09
		中等易发	34.96	13.44	17	20.48
		低易发	166.41	64.01	14	16.88

### 4.3 精度检验

为全面评估模型的预测性能，本文采用接受者操作特性曲线（Receiver Operating Characteristic Curve, ROC）及其下的面积（Area Under the Curve, AUC）等常用指标。其中，AUC 值范围通常在 0.5 至 1 之间，AUC 越接近 1，表示模型区分正负样本的能力越强，模型性能越优。本文将数据集按 70%训练集与 30%测试集进行划分，并基于 30%测试集绘制 ROC 曲线（图 9），对栅格单元、斜坡单元两种单元类型的精度与准确性进行检验。结果发现，斜坡单元的 AUC 平均值达 0.873，栅

格单元的预测精度 AUC 平均值为 0.834，栅格单元在随机森林-连续频率比模型（RF-OFR）中的预测精度比斜坡单元低（图 9），分析认为斜坡单元更适合作为研究区滑坡危险性评价的评价单元。

综合对比基于随机森林-连续频率比模型（RF-OFR）分别开展的栅格单元和斜坡单元在研究区的滑坡危险性评价的评价结果和精度检验结果，发现两种不同评价单元的评价结果均表现出了较好的危险性分区效果，但结合 ROC 精度检验结果发现，栅格单元在评价因子赋值时，会造成部分数据损失，但斜坡单元相较于栅格单元能更好体现滑坡灾害的地形空间属性，以斜坡单元为最小评价单元的滑坡危险性精度更高。此外，斜坡单元-升降轨联合数据的结果的评价精度更高（AUC=0.902），相比未结合、结合升轨形变速率、降轨形变速率的评价结果精度分别提升 6%、5%和 0.6%，研究进一步证明了结合升降轨联合地表形变速率在研究区滑坡危险性制图中的精度更高。

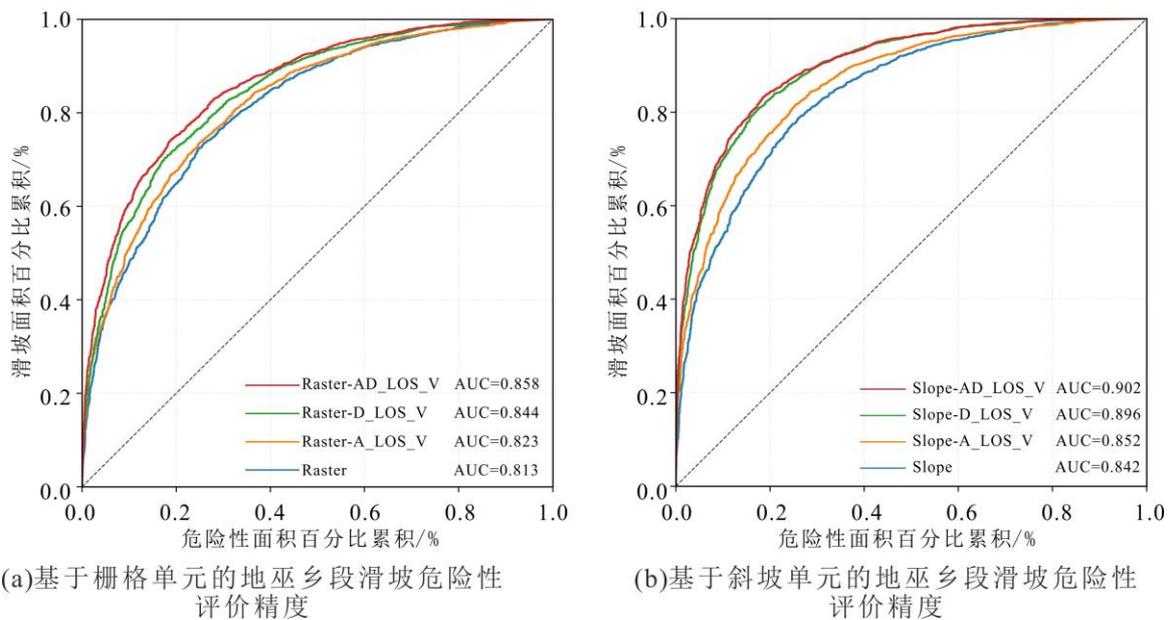


图 9 基于不同评价单元的 ROC 精度验证结果

Fig. 9 ROC accuracy verification results based on different evaluation units

## 5 结论

本文以青藏高原东部金沙江上游地巫乡段为研究区，结合 InSAR 遥感解译与区域地质灾害调查，构建基于流域-地貌-斜坡结构的斜坡单元的滑坡危险性评价框架，提出融合随机森林与连续频率比模型的区域滑坡危险性评价方法，得到如下主要结论和认识：

(1) 针对高山峡谷区地形起伏大、传统单元划分适应性差等问题，本文在水文分水岭法的基础上，划分了基于流域-地貌-斜坡结构的斜坡单元。与传统栅格单元相比，优化后的斜坡单元在滑坡危险性评价中的精度和空间适配性得到了显著提升。通过 ROC 曲线验证，斜坡单元的平均 AUC 值为 0.873，比栅格单元（AUC=0.834）提高了 3.9%。此外，斜坡单元在危险性分区中的合理性也大幅增强，极高危险区的面积占比为 7.57%，空间分布与滑坡实际发育特征吻合。

(2) 本文提出的随机森林-连续频率比（RF-OFR）模型，结合了连续频率比法的统计分析 with 随机森林算法的非线性建模能力。模型通过随机森林量化因子权重，结合连续频率比计算，克服了传统频率比模型因子分级的主观性和信息损失问题。验证结果显示，RF-OFR 模型的精度较高，优于其他模型的评价结果，划分出的高危险区与灾害密度高度匹配，进一步提升了滑坡危险性评价的可靠性与实用性。

(3) 通过 R 指数联合升降轨的地表形变速率, 有效消减了单一轨道 SAR 影像的几何畸变和阴影区的影响, 能够有效减少由于几何畸变无法进行有效观测的区域, 增加了卫星数据对斜坡变形信息的有效探测率。引入地表形变速率作为评价因子, 有效的避免了传统实验静态因子的危险性评价的时效性低的问题。

(4) 在传统区域滑坡危险性评价因子的基础上, 引入地表形变速率作为重要的动态因子, 显著提高了模型的识别准确性与敏感性。研究结果显示, 升降轨联合形变速率数据在极高危险区的滑坡数量占比达到了 49.39%, 模型 AUC 值提升至 0.902, 比未引入地表形变速率因子的评价结果提高了 6%。相较于单一轨道数据 (升轨 AUC=0.852, 降轨 AUC=0.896), 联合升降轨数据有效改善了单一传感器监测视角的局限性, 显著增强了对隐蔽性蠕滑滑坡 (如地巫村滑坡) 的早期识别能力。

## 致谢

感谢审稿专家和编辑老师对本文提出的宝贵意见, 中国地质科学院地质力学研究所邱振东博士研究生、张亚楠硕士研究生和中国地质大学 (北京) 陈文凯硕士研究生在数据处理和论文写作方面提供相关的帮助和指导, 在此一并表示感谢。

## 参考文献

- Alvioli, M., Marchesini, I., Reichenbach, P., et al. 2016. Automatic Delineation of Geomorphological Slope Units with R.Slopeunits V1.0 and Their Optimization for Landslide Susceptibility Modeling. *Geoscientific Model Development*, 9: 3975-3991. doi: 10.5194/gmd-9-3975-2016.
- Bui, D.T., Tuan, T.A., Klempe, H., et al. 2016. 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. *Landslides*, 13: 361-378. doi: 10.1007/s10346-015-0557-6.
- Chen, Z., Ye, F., Fu, W.X., et al. 2020. The Influence of DEM Spatial Resolution On Landslide Susceptibility Mapping In The Baxie River Basin, NW China. *Natural Hazards*, 101: 853-877. doi: 10.1007/s11069-020-03899-9.
- Fruneau, B., Achache, J., Delacourt, C., 1996. Observation and Modelling of the Saint-Étienne-de-Tinée Landslide Using SAR Interferometry. *Tectonophysics*, 265(3): 181-190. doi: 10.1016/S0040-1951(96)00047-9.
- Li, L.P., Lan, H.X., Guo, C.B., et al. 2017. A Modified Frequency Ratio Method for Landslide Susceptibility Assessment. *Landslides*, 14(2): 727-741. doi: 10.1007/s10346-016-0771-x.
- Li, L.P., Lan, H.X., 2023. Bivariate Landslide Susceptibility Analysis: Clarification, Optimization, Open Software, and Preliminary Comparison. *Remote Sensing*, 15(5): 1418. doi: 10.3390/rs15051418.
- Mondal, S., Maiti, R., 2013. Integrating the Analytical Hierarchy Process (AHP) and the Frequency Ratio (FR) Model in Landslide Susceptibility Mapping of Shiv-khola Watershed, Darjeeling Himalaya. *International Journal of Disaster Risk Science*, 4: 200-212. doi: 10.1007/s13753-013-0021-y.
- Notti, D., Davalillo, J.C., Herrera, G., et al. 2010. Assessment of the Performance of X-band Satellite Radar Data for Landslide Mapping and Monitoring: Upper Tena Valley Case Study. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(9): 1865-1875. doi: 10.5194/nhess-10-1865-2010.
- Notti, D., Galve, J.P., Mateos, R.M., et al. 2015. Human-induced Coastal Landslide Reactivation. Monitoring by PSInSAR Techniques and Urban Damage Survey (SE Spain). *Landslides*, 12: 1007-1014. doi: 10.1007/s10346-015-0612-3.
- Shano, L., Raghuvanshi, T.K., Meten, M. 2020. Landslide Susceptibility Evaluation and Hazard Zonation Techniques—A Review. *Geoenvironmental Disasters*, 7: 1-19. doi: 10.1186/s40677-020-00152-0.
- Shan, Y.F., Xu, Z., Zhou, S.S., et al. 2023. Landslide Hazard Assessment Combined with InSAR Deformation: A Case Study in the Zagunao River Basin, Sichuan Province, Southwestern China. *Remote Sensing*, 16(1): 99. doi: 10.3390/rs16010099
- Silalahi, F.E.S., Pamela, Arifianti, Y., et al. 2019. Landslide Susceptibility Assessment Using Frequency Ratio Model in

- Bogor, West Java, Indonesia. *Geoscience Letters*, 6(1): 10. doi: 10.1186/s40562-019-0140-4.
- Wang, K., Zhang, S., Delgadotellez, R., et al. 2019. A New Slope Unit Extraction Method for Regional Landslide Analysis Based on Morphological Image Analysis. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 78(6): 4139-4151. doi: 10.1007/s10064-018-1389-0.
- Xie, M., Esaki, T., Zhou, G. 2004. GIS-based Probabilistic Mapping of Landslide Hazard Using A Three-Dimensional Deterministic Mode. *Natural Hazards*, 33(2): 265-282. doi: 10.1023/B:NHAZ.0000037036.01850.0d.
- Zhang, Y.S., Ren, S.S., Liu, X.Y., et al. 2023. Reactivation Mechanism of Old Landslide Triggered by Coupling of Fault Creep and Water Infiltration: A Case Study From the East Tibetan Plateau. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(8): 291. doi: 10.1007/s10064-023-03290-5.
- 常玉巧, 陈立春, 张琦. 2019. 金沙江断裂带构造地貌与断裂活动特征研究. *国际地震动态*, (08): 142-143.
- Chang, Y.J., Chen, L.C., Zhang, Q., 2019. Study on the Structural Geomorphology and Fault Activity Characteristics of the Jinshajiang Fault Zone. *Recent Developments in World Seismology*, (08): 142-143(in Chinese).
- 杜军, 杨青华, 严嘉, 等. 2010. 基于 GIS 与信息量模型的汶川次生地质灾害危险性评价. *地球科学*, 35(2): 324-330.
- Du, J., Yang, Q.H., Yan, J., et al., 2010. Hazard Evaluation of Secondary Geological Disaster Based on GIS and Information Value Method. *Earth Science*, 35(2): 324-330(in Chinese with English abstract).
- 冯杭建, 周爱国, 俞剑君, 等. 2016. 浙西梅雨滑坡易发性评价模型对比. *地球科学*, 41(3): 403-415.
- Feng, H.J., Zhou, A.G., Yu, J.J., et al., 2016. A Comparative Study on Plum-Rain-Triggered Landslide Susceptibility Assessment Models in West Zhejiang Province. *Earth Science*, 41(3): 403-415(in Chinese with English abstract).
- 葛大庆, 王艳, 范景辉, 等. 2007. 地表形变 D-InSAR 监测方法及关键问题分析. *国土资源遥感*, (04): 14-22.
- Ge, D.Q., Wang, Y., Fan, J.H., et al. 2007. A Study of Surface Deformation Monitoring Using Differential Sar Interferometry Technique and An Analysis of Its Key Problems, *Remote Sensing for Land & Resources*, (04): 14-22(in Chinese with English abstract).
- 郭长宝, 邱振东, 闫怡秋, 等. 2025. 基于高密度电法与微动探测的大型深层滑坡空间结构特征研究-以巴塘县地巫乡滑坡为例. *武汉大学学报(信息科学版)*, 1-20.
- Guo, C.B., Qiu, Z.D., Yan, Y.Q., et al., 2025. Research on Spatial Structural Characteristics of Large Deep-seated Landslide Based on High-density Electrical Resistivity and Microtremor Detection: A Case Study of the Diwuxiang Landslide in Batang County, Tibetan Plateau, China. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 1-20(in Chinese with English abstract).
- 何佳阳, 巨能攀, 解明礼, 等, 2023. 高山峡谷地区地质灾害隐患 InSAR 识别技术对比. *地球科学*, 48(11): 4295-4310.
- He, J.Y., Ju, N.P., Xie, M.L., et al., 2023. Comparison of InSAR Technology for Identification of Hidden Dangers of Geological Hazards in Alpine and Canyon Areas. *Earth Science*, 48(11): 4295-4310(in Chinese with English abstract).
- 黄细超, 余天彬, 王猛, 等. 2021. 金沙江结合带高位远程滑坡灾害链式特征遥感动态分析-以白格滑坡为例. *中国地质灾害与防治学报*, 32(05): 40-51.
- Huang, X.C., Yu, T.B., Wang, M., et al., 2021. Remote sensing dynamic analysis of chain characteristics of long range and high position landslide in Jinsha River junction zone: A case study of Baige landslide. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 32(05): 40-51(in Chinese with English abstract).
- 焦伟之, 张明, 谢鑫鹏, 等. 2022. 基于 GIS 与加权信息量模型的城镇地质灾害易发性评价—以大新镇为例. *安全与环境工程*, 29(04): 119-128.
- Jiao, W.Z., Zhang, M., Xie, X.P., et al., 2022. Susceptibility Evaluation of Urban Geological Disaster Based on GIS and Weighted Information Value Model—A Case Study of Daxin Town. *Safety and Environmental Engineering*, 29(04): 119-128(in Chinese with English abstract).
- 李勇, 吴瑞忠, 朱利东, 等. 2000. 西藏金沙江断裂带西段晚古生代牙形石的发现及其地质意义. *地球科学*, 25(6): 586-586.
- Li, Y., Wu, R.Z., Zhu, L.D., et al., 2000. Discovery of Late Paleozoic Conodonts in the Western Section of the Jinshajiang Fault Zone in Tibet and Its Geological Significance. *Earth Science*, 25(6): 586-586(in Chinese).

- 刘春玲, 祁生文, 童立强, 等. 2010. 喜马拉雅山地区重大滑坡灾害及其与地层岩性的关系研究. *工程地质学报*, 18(05): 669-676.
- Liu, C.L., Qi, S.W., Tong, L.Q., et al. 2010. Great Landslides in Himalaya Mountain Area and Their Occurrence with Lithology. *Journal of Engineering Geology*, 18(05): 669-676(in Chinese with English abstract).
- 孟田, 许晓露, 刘汉湖. 2021. 基于斜坡单元优化的高海拔地区滑坡危险性评价—以金沙江白格滑坡为例. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 40(01): 65-73.
- Meng, T., Xu, X.L., Liu, H.H., 2021. Landslide Risk Assessment in High Altitude Areas Based on Slope Unit Optimization: Taking the Baige Landslide in Jinsha River as An Example. *Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science)*, 40(01): 65-73(in Chinese with English abstract).
- 牛瑞卿, 彭令, 叶润青, 等. 2012. 基于粗糙集的支持向量机滑坡易发性评价. *吉林大学学报(地球科学版)*, 42(2): 430-439.
- Niu, R.Q., Peng, L., Ye, R.Q., et al., 2012. Landslide Susceptibility Assessment Based on Rough Sets and Support Vector Machine. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 42(2): 430-439(in Chinese with English abstract).
- 彭建兵, 马润勇, 卢全中, 等. 2004. 青藏高原隆升的地质灾害效应. *地球科学进展*, 19(3): 457-466.
- Peng, J.J., Ma, R.Y., Lu, Q.Z., et al., 2004. Geological Hazards Effects of Uplift of Qinghai-Tibet Plateau. *Advances in Earth Science*, 19(3): 457-466(in Chinese with English abstract).
- 任三绍, 郭长宝, 张永双, 等. 2017. 川西巴塘茶树山滑坡发育特征及形成机理. *现代地质*, 31(05): 978-989.
- Ren, S.S., Guo, C.B., Zhang, Y.S., et al., 2017. Development Characteristics and Formation Mechanism of Chashushan Landslide in Batang, Western Sichuan. *Geoscience*. 31(05): 978-989(in Chinese with English abstract).
- 徐志文, 罗永忠. 2002. 三峡库区重庆市奉节县花乐村滑坡成因机制及稳定性分析. *地质灾害与环境保护*, (01): 29-32+47.
- Xu, Z.W., Luo, Y.Z., 2002. The Forming Cause and the Stability Analyze of the Landslide in Huale Village, Fengjie County, the City of Chongqing. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, (01): 29-32+47(in Chinese with English abstract).
- 徐锡伟, 张培震, 闻学泽, 等. 2005. 川西及其邻近地区活动构造基本特征与强震复发模型. *地震地质*, (03): 446-461.
- Xu, X.W., Zhang, P.Z., Wen, X.Z., et al., 2005. Basic Characteristics of Active Structures and Strong Earthquake Recurrence Model in Western Sichuan and Its Adjacent Areas. *Seismology and Geology*, (03): 446-461(in Chinese).
- 夏金梧, 朱萌. 2020. 金沙江主断裂带中段构造特征与活动性研究. *人民长江*, 51(05): 131-137+159.
- Xia, J.W., Zhu, M., 2020. Study on Tectonic Characteristics and Activity of Middle Section of Jinshajiang Main Fault Zone. *Yangtze River*, 51(05): 131-137+159(in Chinese with English abstract).
- 喜文飞, 成鑫, 杨志全, 等. 2024. 基于 SBAS-InSAR 技术和 BP 神经网络的高位远程滑坡危险性分析研究. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 49(03): 65-74.
- Xi, W.F., Cheng, X., Yang, Z.Q., et al., 2024. Research on High-Altitude and Long-Distance Landslide Risk Analysis Based on the Combination of SBAS-InSAR Technology and BP Neural Network. *Journal of Kunming University of Science and Technology(Natural Science)*, 49(03): 65-74(in Chinese with English abstract).
- 闫怡秋, 郭长宝, 钟宁, 等. 2022. 基于 InSAR 形变监测的四川甲居古滑坡变形特征. *地球科学*, 47(12): 4681-4697.
- Yan, Y.Q. Guo, C.B., Zhong, N., et al., 2022. Deformation Characteristics of Jiayu Ancient Landslide Based on InSAR Monitoring Method, Sichuan, China. *Earth Science*, 47(12): 4681-4697(in Chinese with English abstract).
- 闫怡秋, 杨志华, 张绪教, 等. 2021. 基于加权证据权模型的青藏高原东部巴塘断裂带滑坡易发性评价. *现代地质*, 35(01): 26-37.
- Yan, Y.Q., Yang, Z.H., Zhang, X.J., et al., 2021. Landslide Susceptibility Assessment Based on Weight-of-Evidence Modeling of the Batang Fault Zone, Eastern Tibetan Plateau. *Geoscience*, 35(01): 26-37(in Chinese with English abstract).
- 颜阁, 梁收运, 赵红亮, 2017. 基于 GIS 的斜坡单元划分方法改进与实现. *地理科学*, 37(11): 7.
- Yan, G., Liang, S.Y., Zhao, H.L., 2017. An Approach to Improving Slope Unit Division Using GIS Technique. *Geographical Science*, 37(11): 7(in Chinese).

- 殷跃平, 王文沛, 张楠, 等. 2017. 强震区高位滑坡远程灾害特征研究-以四川茂县新磨滑坡为例. *中国地质*, 44(5): 827-841.
- Yin, Y.P., Wang, W.P., Zhang, N., et al., 2017. Long Runout Geological Disaster Initiated by the Ridge-Top Rockslide in A Strong Earthquake Area: A case Study of the Xinmo Landslide in Maoxian County, Sichuan Province. *Geology in China*, 44(5): 827-841(in Chinese with English abstract).
- 袁浩, 郭长宝, 吴瑞安, 等. 2024. 四川理塘乱石包滑坡滑带土环剪强度特性与高位远程滑动机制. *地球科学*, 49(12): 4659-4672.
- Yuan, H., Guo, C.B., Wu, R.A., et al., 2024. Shear Strength Characteristics of Sliding Zone Soils and Mechanisms of Luanshibao Long Runout Landslide in Litang County, Sichuan Province, China. *Earth Science*. 49(12): 4659-4672(in Chinese with English abstract).
- 张永双, 刘筱怡, 姚鑫. 2020. 基于 InSAR 技术的古滑坡复活早期识别方法研究-以大渡河流域为例. *水利学报*, 51(05): 545-555.
- Zhang, Y.S., Liu, X.Y., Yao, X., 2020. InSAR-based Method for Early Recognition of Ancient Landslide Reactivation in Dadu River, China. *Journal of Hydraulic Engineering*, 51(05): 545-555(in Chinese with English abstract).
- 郑迎凯, 陈建国, 王成彬, 等. 2020. 确定性系数与随机森林模型在云南芒市滑坡易发性评价中的应用. *地质科技通报*, 39(6): 131-144.
- Zheng, Y.K., Chen, J.G., Wang, C.B., et al., 2020. Application of Certainty Factor and Random Forests Model in Landslide Susceptibility Evaluation in Mangshi City, Yunnan Province. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 39(6): 131-144(in Chinese with English abstract).