

田鹏,常玉巧,白仙富,等. 2023. 基于加权证据权模型的丽江—小金河断裂中南段滑坡易发性评价[J]. 地震研究, 46(3): 332–342, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0044.

Tian P, Chang Y Q, Bai X F, et al. 2023. Landslide susceptibility assessment based on weight-of-evidence modeling in the middle and south sections of the Lijiang-Xiaojinhe fault[J]. *Journal of Seismological Research*, 46(3): 332–342, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0044.

基于加权证据权模型的丽江—小金河断裂中南段 滑坡易发性评价*

田 鹏¹, 常玉巧^{1*}, 白仙富¹, 周青云¹, 孙 滨²

(1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 2. 昆明理工大学 国土资源学院, 云南 昆明 650093)

摘要: 丽江—小金河断裂全新世活动强烈、地震频发, 沿断裂带的滑坡地质灾害极为发育。以断裂带中南段两侧 10 km 为研究区, 根据地质地理环境和滑坡发育特征, 选取高程、坡度、坡向、距活动断裂距离、距河流水系距离、距道路距离、工程地质岩组、降雨量、土地利用类型以及地震动峰值加速度 10 个影响因子为评价指标, 运用加权证据权模型, 开展丽江—小金河断裂中南段滑坡易发性评价, 基于自然断点法将滑坡易发程度划分为高易发、中等易发、低易发和非易发 4 个级别, 评价结果 AUC 值为 0.81。结果显示: ①研究区内滑坡受坡度、断裂、水系、岩性因素的影响程度更高; ②高易发区和中等易发区主要沿断裂带和金沙江等主要河流水系两侧分布, 在玉龙县、松坪乡、大东乡等周边区域较集中; ③西川乡处于高易发区, 但目前滑坡灾害点较少, 应加强关注。

关键词: 丽江—小金河断裂; 滑坡; 加权证据权模型; 易发性评价

中图分类号: P315.94 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2023)03-0332-11

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0044

0 引言

滑坡是我国最显著的地质灾害类型之一, 它会对人类生命财产安全造成威胁, 对重大基础设施造成破坏, 严重制约社会经济发展。云南地处欧亚板块和印度板块的碰撞接触带, 受喜马拉雅造山运动的影响, 地质条件复杂, 滑坡地质灾害频发, 而滇西北地区又是云南滑坡灾害最严重地区之一。滑坡的形成机制较为复杂, 除与坡度、降雨等因素密切相关外, 活动断裂及地震亦是其重要影响因素。近年来, 诸多学者对活动断裂的滑坡地质灾害开展了相关研究。如黄小龙等

(2021) 分析了程海断裂古地震滑坡分布特征与断裂活动性的关系, 认为断裂的强烈活动引发区内强震, 强震进一步诱发古地震滑坡; 闫怡秋等(2021) 对巴塘断裂滑坡易发性进行了评价; 杨志华等(2021) 获得该断裂 50 年超越概率 10% 的潜在地震滑坡危险性区划; 郭长宝等(2015) 研究了鲜水河断裂带的活动习性、地质灾害发育特征、典型地质灾害实例和稳定性等, 认为鲜水河断裂对区内地质灾害有明显的控制作用。前人研究成果表明, 活动断裂的展布及活动性对滑坡灾害的形成与稳定性影响显著。目前, 对滇西北地区的滑坡地质灾害已有丰富的研究成果, 但对丽江—小金河断裂等活动断裂的地震高发区域滑坡易发

* 收稿日期: 2022-10-15.

基金项目: 云南省重点研发计划项目(202203AC100003); 云南省地震局青年基金项目(2020K10)。

第一作者简介: 田 鹏(1988-), 工程师, 主要从事地震地质、地质灾害研究. E-mail: 310235986@qq.com.

✱ 通讯作者简介: 常玉巧(1988-), 工程师, 主要从事活动构造、古地震及构造地貌研究。

E-mail: 349797655@qq.com.

性评价的研究仍需加强。

丽江—小金河断裂是滇西北地区内一条重要的活动断裂，也是川滇菱形块体内重要的次级边界断裂（邓起东等，2002）。沿断裂曾发生多次中强地震：1951年剑川6.2级地震、1976年和1998年宁蒗东北6.7级和6.4级地震、2022年宁蒗5.5级地震。断裂周边地区强震频发，最大为1996年丽江7.0级地震，这次地震诱发了至少420处中小型崩塌和30处大中型滑坡，主要集中在主震震中东南部（唐川等，1997）。因此，有必要对丽江—小金河断裂带及其周边地区的滑坡易发性进行评价研究。

本文整理滑坡地质灾害调查成果，建立云南境内丽江—小金河断裂两侧10 km区域内的滑坡数据库，选取高程、坡度、坡向、距活动断裂距离等10个因子为滑坡易发程度的主控因素（白仙富等，2022；吉日伍呷等，2022；凌晓等，2021；王丽丽，2016），采用加权证据权模型，对丽江—小金河断裂带中南段滑坡易发性进行研究，以期为区域滑坡灾害防治提供参考。

1 区域地质背景及灾害数据

1.1 地质构造

丽江—小金河断裂位于川滇菱形块体内部，NE向延伸将川滇菱形块体分为川西北和滇中2个次级块体，对川滇菱形块体区域地壳运动有重要影响（向宏发等，2002）。断裂全长360 km，倾向NW，倾角 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$ ，北起四川石棉西南，向西南经木里、响水河、宝地、宁蒗、丽江至剑川，云南境内长约260 km（安晓文等，2018）。断裂大致可分为3段：南段为丽江盆地以南，包含2条主要分支断裂，其间为小型地堑或半地堑小盆地（李安等，2016）；中段从丽江盆地至木里，断错地貌清晰；北段为木里以北，走向由NE转为NNE，受强烈侵蚀和切割，缺少第四系沉积（李环宇等，2020）。丽江—小金河断裂全新世以来活动强烈，其周边地区地震频发，一直受诸多学者关注。徐锡伟等（2003）通过位错地貌和年龄测试获得断裂中段全新世左旋滑动速率为 $(3.8 \pm 0.7) \text{ mm/a}$ ，垂直滑动速率为 $(0.65 \pm 0.14) \text{ mm/a}$ 。基于GPS资料，Shen等（2005）获得断裂左旋走滑速率为

3 mm/a 。李宁等（2018）计算断层闭锁程度和滑动亏损速率特征，认为断裂南段、中段具有发生较大地震的潜在危险。刘晓霞和邵志刚（2020）分析认为断裂西南段的背景滑动速率明显高于东北段。李安等（2016）、丁锐等（2018）通过探槽开挖，已揭露断裂带南段、中段全新世发生过3次古地震事件。断裂的活动性和地震活动强度，将会加剧或诱发区域内滑坡地质灾害的发生。

1.2 地层岩性

研究区地层发育有古近系、三叠系、二叠系、石炭系、泥盆系、奥陶系、前寒武系。断裂带北东区域地层发育较全，厚度较大，以浅海相沉积为主；南西区域缺失较多，厚度逐渐变薄，以滨海相为主。古近系为宝相寺组砾岩、砂岩夹粉砂岩、泥岩；三叠系为松桂组粉砂岩、页岩；二叠系为黑泥哨组灰色含煤砂岩、页岩夹灰岩以及阳新组深色、浅色灰岩，含燧石条带或结核；石炭系主要为尖山营组上部灰岩和黄龙组浅灰色厚层灰岩、白云岩；志留系为青山组灰岩；泥盆系为破松冲组灰岩、底部泥页岩；奥陶系为向阳组页岩夹石英细砂岩，顶部夹含砾砂岩、细砂岩以及宝塔组灰色中厚层网纹灰岩；前寒武系灯影组为含燧石条带、团块白云岩夹灰岩，主要成窄条带状沿断裂分布。二叠纪、三叠纪时期玄武岩大量喷发，区内大量发育峨眉山玄武岩组地层（李环宇等，2020）。根据岩性硬度回弹值、类别及风化程度等指标，判断研究区内岩石主要为软岩类，有利于滑坡发育。

1.3 地质灾害数据

笔者收集整理1:5万地质灾害详查和年度地质灾害隐患核查、排查等数据，辅以遥感影像进行对比和修正，并选择部分滑坡点开展野外调查工作，获得丽江—小金河断裂两侧10 km区域内的滑坡地质灾害共214处，其中大型滑坡1处、中型滑坡8处，小型滑坡205处。研究区滑坡类型主要为降雨滑坡和地震滑坡，分布于河流水系两侧、断裂带及其交会部位（图1）。研究区内的滑坡点集中分布于1996年丽江7.0级地震Ⅸ、Ⅷ、Ⅶ度烈度区，Ⅵ度烈度区滑坡数量明显减少。研究区断裂上的许多滑坡体现今仍具有活动性，在多种因素诱发下极易再次活动。

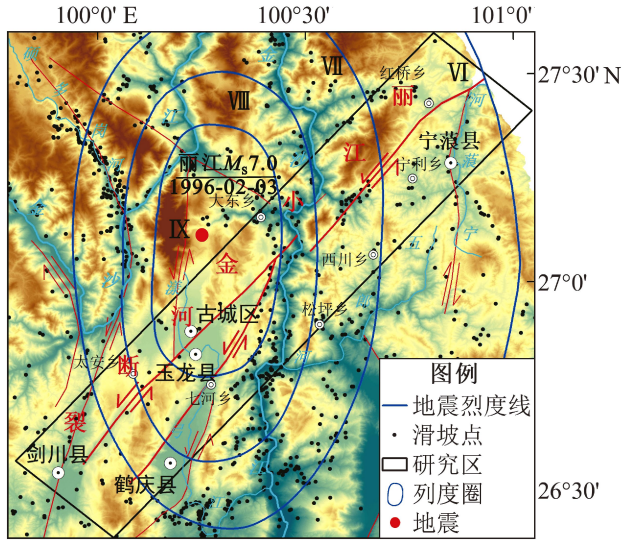


图1 丽江—小金河断裂中南段滑坡地质灾害分布图

Fig. 1 Geohazard distribution in the Lijiang-Xiaojinhe fault zone



(a) 九河乡新房组滑坡 (镜向 NW, 坐标: 26.67°N, 99.87°E)



(b) 拉市乡恩宗二组滑坡 (镜向 NW, 坐标: 26.89°N, 100.17°E)

图2 丽江—小金河断裂典型滑坡

Fig. 2 Field photos of typical landslides in the Lijiang-Xiaojinhe fault zone

2 加权证据权模型

滑坡易发性评价方法分为定性和定量两种方法。常用的定性方法有专家打分法 (石菊松等, 2007) 和层次分析法 (李学平, 2001)。定量方法是根据现有滑坡数据和其它相关信息, 运用数理统计模型, 分析滑坡与各个影响因子的相关性。主要方法模型包括运用逻辑回归模型 (Lee, Evangelista, 2006)、证据权模型 (范强等, 2014)、信息量模型 (杨志华等, 2017) 等。本文采用定性和定量相结合的方法, 建立集成层次分析法和加权证据权模型来评价研究区滑坡易发性。

2.1 证据权模型

证据权模型是基于 Bayes 统计分析模式, 通过对与滑坡形成相关的影响因素图层的加权叠加复合获得滑坡易发性, 其优势为方法简便、建模过程易懂, 已被广泛应用于地学研究 (张生元等, 2009)。本文采用基于滑坡面积概率法的证据权模型, 计算公式如下:

$$w_i^+ = \ln \left(\frac{P\{B/L\}}{P\{\bar{B}/L\}} \right) \quad (1)$$

$$w_i^- = \ln \left(\frac{P\{\bar{B}/L\}}{P\{B/L\}} \right) \quad (2)$$

式中: w_i^+ 为当前影响因子级别内滑坡形成的概率; w_i^- 为当前影响因子级别外滑坡发生的概率; P 为滑坡概率; B 为分级后该级别下的滑坡面积; \bar{B} 为分级后该级别下无滑坡覆盖面积; L 为研究区总滑坡面积; \bar{L} 为研究区无滑坡覆盖总面积。

根据研究区内的滑坡点数据, 分别计算每个影响因子不同级别内的滑坡危险性权重。根据式 (1) 和 (2) 可得到:

$$w_i^+ = \ln \left(\frac{\frac{N_{p_{x_1}}}{N_{p_{x_1}} + N_{p_{x_2}}}}{\frac{N_{p_{x_3}}}{N_{p_{x_3}} + N_{p_{x_4}}}} \right) \quad (3)$$

$$w_i^- = \ln \left(\frac{\frac{N_{p_{x_2}}}{N_{p_{x_1}} + N_{p_{x_2}}}}{\frac{N_{p_{x_4}}}{N_{p_{x_3}} + N_{p_{x_4}}}} \right) \quad (4)$$

式中： w_i^+ 表示该影响因子级别内发生滑坡的正相关系数； w_i^- 表示该影响因子级别内发生滑坡的负相关系数； N_{p,x_1} 表示该影响因子级别内发生滑坡的栅格数； N_{p,x_2} 表示该影响因子级别外发生滑坡的栅格数； N_{p,x_3} 表示该影响因子级别内未发生滑坡的栅格数； N_{p,x_4} 表示该影响因子级别外未发生滑坡的栅格数。通过式（3）和（4）计算影响因子权重值的对数。两权重之差是权重对比度，代表该影响因子级别内滑坡发生的权重。

2.2 层次分析法

层次分析法（Analytic Hierarchy Process，简称AHP）是一种用于解决多因子决定目标的决策分析方法，对于复杂的决策思维，通过建立矩阵，每次只对两个因子进行评判，从而提高对因子重要程度的评价准确性，再通过排序计算、一致性检验，获得每个因子的权重值。在决策过程中定性和定量分析相结合，避免了人为因素导致经验判断与实际不符的情况出现，最终的决策结果更科学合理（蒲娉璠，2016；郭长宝等，2009；刘振军，2001）。

2.3 加权证据权模型

为充分考虑不同因子对滑坡灾害发生影响程度的差异，将层次分析法与证据权模型相结合进行赋权，其公式如下：

$$LSI = \sum_{i=1}^n a_i W_f = \sum_{i=1}^n a_i (w_i^+ - w_i^-) \quad (5)$$

式中： LSI 为发生滑坡的加权证据权值，即为滑坡易发性评价指数； a_i 为第*i*个因子的权重值； W_f 代表该影响因子级别内滑坡发生的权重（闫怡秋等，2021）。

3 滑坡易发性评价

滑坡的发生受各种地质地理环境因素影响，其形成是一个复杂的动力学过程，滑坡在不同地区呈现出不同的特征。本文研究区处于滇西北地区，地貌类型复杂、地形起伏大，地势整体从北到南逐渐降低。区域内活动断裂纵横交错，地层岩性类别多样，河流水系发育，湖泊广泛分布，交通道路密集（杨志华等，2021）。笔者根据研究

区地质条件、地形地貌和滑坡发育分布特征，选取10个因子作为评价指标开展滑坡易发性评价研究。

3.1 评价单元确定

网格单元在GIS技术中能快速赋值和运算，操作便捷（刘传正等，2007；赵晓燕，2018）。选择合适的评价单元对滑坡易发性评价结果至关重要。本文研究区内滑坡的影响因子数据量巨大，将研究区按25 m×25 m栅格大小进行划分，获得研究区评价单元网格。

3.2 评价指标因子

3.2.1 高程

本文使用ArcGIS软件对研究区12.5 m分辨率的DEM栅格数据做空间分析，得到研究区高程为1 225~4 216 m，将高程分为5级：小于2 000 m、2 000~2 500 m、2 500~3 000 m、3 000~3 500 m、大于3 500 m。研究区内滑坡主要发育在高程小于3 000 m区域内，占滑坡总数高达98%，3 000 m以上，滑坡数量明显变少（图3a、表1）。

3.2.2 坡度

滑坡主要发生在斜坡上，坡度的大小影响斜坡上岩土体的稳定性，同样对斜坡体地表水的径流、松散物质的运移、坡体应力分布、土地利用方式以及斜坡体的有效临空面等都有影响。对研究区DEM数据作坡度分析，坡度主要分布在0°~81°。将坡度分为5级：0°~10°、10°~20°、20°~30°、30°~40°以及大于40°。分析结果显示，研究区内滑坡主要分布在坡度为10°~30°区域内，占滑坡总数的73%（图3b、表1），坡度大于40°的区域滑坡灾害极少发育，这可能是因为在研究区内坡度超过40°易发生崩塌。

3.2.3 坡向

由于不同的坡向接收到的太阳辐射能量不同，影响斜坡上的植被覆盖率、岩石风化程度、降雨量和蒸发量的大小等，从而影响滑坡的发育。因此，坡向是滑坡易发性评价中非常重要的因素。将坡向分为9级，分别为平坦（无坡向）、北、北东、东、东南、南、西南、西、北西。研究区内34%的滑坡主要分布在东至东南向的斜坡上（图3c、表1），东和东南向斜坡日照时间长、风化作用强，容易导致斜坡失稳。

3.2.4 距活动断裂距离

断裂附近岩石较为破碎,受气候影响易形成风化壳,从而降低坡体的完整性;断裂的构造活动会引发地震,这些均直接或间接影响滑坡的形成或演化。丽江—小金河断裂是影响研究区滑坡类型和滑坡分布的重要因素。笔者对研究区断裂两侧 1 000 m、2 000 m、3 000 m、4 000 m、5 000 m、6 000 m 和大于 6 000 m 作缓冲分析。从图 3d 和表 1 可看出,研究区内的滑坡灾害点沿断裂延伸方向分布,其中 20% 的滑坡分布在距活动断裂 1 000 m 区域内。在 5 000 m 区域内,随距离增加,滑坡灾害发育减少;而大于 5 000 m 的区域,滑坡灾害仍较多,说明研究区的滑坡不只受活动断裂影响,还受到其它地质地理因素的综合影响。

3.2.5 距河流水系距离

河流水系对斜坡坡脚的冲蚀作用降低了坡体的稳定性,为滑坡的发生提供了水动力条件,是影响滑坡发育的重要因素。通常河流湖泊两侧,滑坡灾害频发。笔者对研究区河流两侧 1 000 m、2 000 m、3 000 m、4 000 m、5 000 m 以及大于 5 000 m 作缓冲分析,发现 59% 的滑坡分布在距离河流 1 000 m 区域内(图 3e)。从表 1 中可看出,随着与河流水系距离增加,滑坡分布越来越少,表明距离河流水系越近,坡脚受侵蚀作用的影响越大,斜坡失稳的概率越高。

3.2.6 距道路距离

道路建设易形成不稳定边坡,是滑坡灾害发育的重要诱发因素之一,因此本文选取道路为评价因子,对研究区内的道路作空间距离缓冲分析。按照距道路 500 m、1 000 m、2 000 m、4 000 m、8 000 m 以及大于 8 000 m,共分为 6 级。结果显示(图 3f、表 1),在 500 m 区域内分布的滑坡数量占 56%,距道路越远,滑坡数量越少,说明道路导致斜坡失稳的概率较高。

3.2.7 工程地质岩组

滑坡发育的物质基础是岩土体,不同的岩性具有不同的物理化学性质,对滑坡的稳定性和地表抗侵蚀能力影响显著。据研究区 1:20 万地质图资料,区域内岩性多样,根据地层岩性的工程地质特性,将研究区工程岩组划分为 5 大类:软岩

组、较软岩组、较坚硬岩组、坚硬岩组和极坚硬岩组。结果显示,研究区 63% 的滑坡发生在软岩组内(图 3g、表 1)。

3.2.8 降雨量

降雨量是滑坡地质灾害的诱发因素之一,大气降水渗入岩土体中,软化岩土体,降低摩擦力,坡体容易失稳发生滑动。研究区年平均降雨量 710~951.8 mm,因此将降雨量数据划分为 5 个等级:小于 750 mm、750~800 mm、800~850 mm、850~900 mm 以及大于 900 mm。结果显示,研究区内降雨量大于 900 mm 的区域分布的滑坡占比为 87%(图 3h、表 1),年均降雨量最大的区域,滑坡灾害点占比最高。滑坡灾害的发育与降雨量不等分级所占面积比有关,研究区内降雨量大于 900 mm 的区域面积最大,其滑坡灾害分布最多。降雨因素还包含雨季降雨量、累积降雨量、日最大降雨量等。研究区每年 6—9 月为雨季,雨季月平均降雨量为 111~133 mm,从北到南逐渐减小。统计 1948—2016 年研究区日最大降雨量数据作插值分析,获得日最大降雨量为 67~78 mm。月最大降雨量南部多、北部少,与年降雨量、雨季月均降雨量分布规律有所差异。综上认为,研究区滑坡分布受不同降雨特征综合影响。

3.2.9 土地利用类型

本文土地利用类型数据采用欧洲航天局(ESA)发布的 2020 年 10 m 分辨率的全球土地利用(WorldCover)数据。研究区主要包括林地、灌木、草地、耕地、建筑用地、裸地(稀疏植被区)、开阔水域及草本湿地 8 类,滑坡主要集中分布在林地、草地、耕地和裸地(稀疏植被区),占比 97%(图 3i、表 1)。

3.2.10 地震动峰值加速度

地震动作用于斜坡,引起斜坡变形和破坏,是诱发滑坡非常重要的一个因素。据《中国地震动峰值加速度区划图》(GB 18306—2015),研究区地震动峰值加速度(PGA)为 0.15、0.2、0.3。滑坡主要集中在 PGA 为 0.2 的区域内,占滑坡总量的 86%(图 3j、表 1)。

3.3 权重值计算

根据层次分析法计算原理,对本文中选取的 10 个评价指标因子建立层次分析结构(表 2)。对

各评价因子建立判断矩阵，对其两两比较，判断各因子对滑坡灾害点分布的重要程度，进行标度打分，计算出各因子的权重值，并进行一致性检

验。最终计算出矩阵的最大特征值为 10.368，一致性比例 CR 值为 0.027，小于 0.1，说明判断矩阵满足一致性检验，计算所得权重具有一致性。

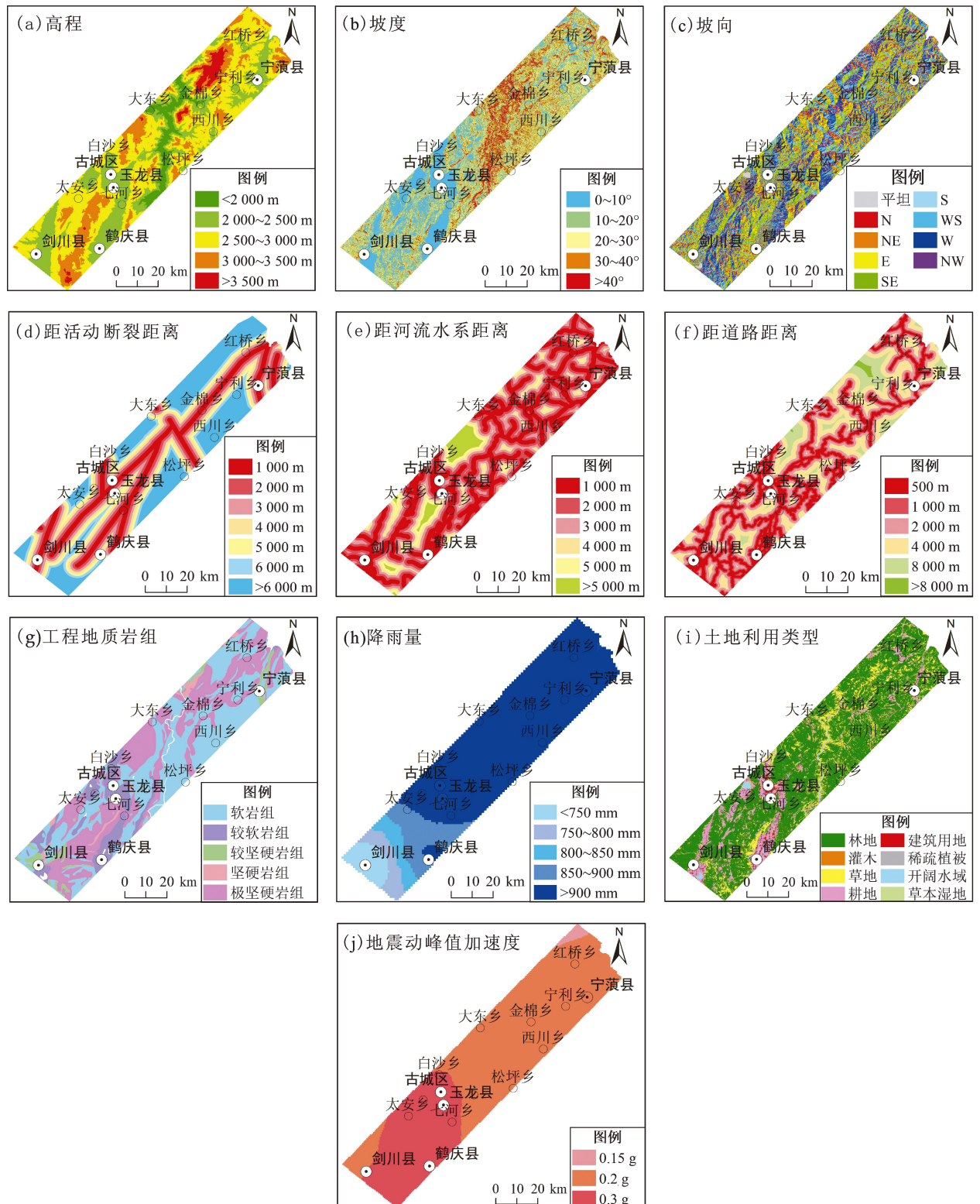


图3 研究区各评价因子状态分级图

Fig. 3 State classification of the factors in the study area

表 1 丽江—小金河断裂中南段滑坡易发性评价证据权模型计算结果

Tab. 1 Assessed landslide susceptibility in the middle and southern part of the Lijiang-Xiaojinhe fault zone by WOE model

评价因子	分级	滑坡灾害点个数	滑坡灾害点比例	w_i^+ 值	w_i^- 值	W_f
高程	<2 000 m	43	20%	1.289 6	-0.167 4	1.457 0
	2 000 ~2 500 m	125	58%	0.704 1	-0.536 4	1.240 5
	2 500 ~3 000 m	42	20%	-0.854 3	0.399 8	-1.254 1
	3 000 ~3 500 m	4	2%	-2.343 0	0.197 6	-2.540 6
	>3 500 m	0	0	—	—	—
坡度	0° ~10°	24	11%	-0.759 5	0.155 1	-0.914 5
	10° ~20°	95	44%	0.501 4	-0.273 7	0.775 1
	20° ~30°	61	29%	0.100 1	-0.037 3	0.137 3
	30° ~40°	26	12%	-0.289 3	0.047 5	-0.336 8
	>40°	8	4%	-0.645 5	0.035 9	-0.681 3
坡向	平坦 (无坡向)	0	0	—	—	—
	北	28	13%	0.150 2	-0.020 8	0.171 0
	东北	20	9%	-0.142 3	0.015 9	-0.158 2
	东	36	17%	0.222 4	-0.039 5	0.261 9
	东南	36	17%	0.196 0	-0.035 4	0.231 4
	南	25	12%	-0.008 1	0.001 1	-0.009 2
	西南	21	10%	-0.176 0	0.021 2	-0.197 2
	西	27	13%	-0.097 7	0.014 9	-0.112 7
	西北	21	10%	-0.262 9	0.033 3	-0.296 2
距活动断裂距离	<1 000 m	43	20%	0.300 8	-0.063 3	0.364 1
	1 000 ~2 000 m	29	14%	-0.049 2	0.007 9	-0.057 2
	3 000 m	12	6%	-0.850 9	0.083 1	-0.934 0
	4 000 m	15	7%	-0.473 9	0.046 8	-0.520 6
	5 000 m	14	7%	-0.382 7	0.033 2	-0.415 9
	6 000 m	27	13%	0.443 0	-0.050 4	0.493 3
	>6 000 m	74	35%	0.182 6	-0.084 5	0.267 1
距河流水系距离	<1 000 m	127	59%	0.472 8	-0.438 3	0.911 1
	2 000 m	51	24%	-0.171 9	0.060 5	-0.232 4
	3 000 m	25	12%	-0.421 3	0.071 8	-0.493 1
	4 000 m	7	3%	-1.019 8	0.061 8	-1.081 6
	5 000 m	3	1%	-0.943 3	0.022 6	-0.965 8
	>5 000 m	1	0	-2.205 3	0.038 6	-2.244 0
距道路距离	<500 m	120	56%	0.795 2	-0.530 8	1.326 0
	1 000 m	33	15%	-0.086 0	0.016 5	-0.102 6
	2 000 m	27	13%	-0.665 1	0.146 6	-0.811 7
	4 000 m	27	13%	-0.641 4	0.139 1	-0.780 5
	8 000 m	1	0	-2.884 9	0.082 7	-2.967 6
	>8 000 m	6	3%	1.015 8	-0.018 2	1.034 0
工程地质岩组	软岩组	134	63%	0.334 8	-0.389 7	0.724 5
	较软岩组	23	11%	-0.036 8	0.004 5	-0.954 2
	较坚硬岩组	12	6%	0.511 5	-0.023 5	-0.300 5
	坚硬岩组	3	1%	-0.295 6	0.004 9	0.535 0
	极坚硬岩组	42	20%	-0.681 6	0.272 6	-0.041 3

续表 1						
评价因子	分级	滑坡灾害点个数	滑坡灾害点比例	w_i^+ 值	w_i^- 值	W_f
降雨量	<750 mm	6	3%	-0.642 4	0.026 9	-0.669 3
	750 ~800 mm	7	3%	-0.358 5	0.015 0	-0.373 4
	800 ~850 mm	8	4%	-0.155 2	0.006 7	-0.161 9
	850 ~900 mm	7	3%	-1.186 5	0.081 7	-1.268 2
	>900 mm	186	87%	0.173 9	-0.805 3	0.979 2
土地利用类型	林地	84	39%	-0.518 1	0.577 3	-1.095 4
	灌木	0	0	—	—	—
	草地	56	26%	0.457 6	-0.122 4	0.580 0
	耕地	40	19%	0.582 3	-0.096 6	0.678 9
	建筑用地	7	3%	0.497 5	-0.013 2	0.510 7
	稀疏植被区	27	13%	1.249 0	-0.098 0	1.347 1
	开阔水域	0	0	—	—	—
	草本湿地	0	0	—	—	—
地震动峰值加速度	0.15 g	1	0%	-0.947 9	0.007 4	-0.955 4
	0.2 g	185	86%	0.276 7	-0.933 0	1.209 8
	0.3 g	28	13%	-0.932 5	0.263 9	-1.196 4

表2 层次分析法判断矩阵与因子权重值
Tab.2 AHP judgment matrix and weighted value of landslide factors

评价因子	高程	坡度	坡向	距活动的距离	距河流的距离	距道路的距离	岩性	降雨	土地利用类型	峰值加速度	权重值(a_i)
高程	1	1/3	1/2	1/3	1/3	1/3	1/3	1/2	2	1/2	4.63%
坡度	3	1	3	1	2	2	2	3	3	3	18.85%
坡向	2	1/3	1	1/3	1/3	1/3	1/3	1/2	1	1/2	4.83%
距活动断裂距离	3	1	3	1	2	2	2	3	3	2	18.09%
距河流水系距离	3	1/2	3	1/2	1	1	1	2	2	2	11.35%
距道路距离	3	1/2	3	1/2	1	1	1	2	2	2	11.35%
工程土地岩组	3	1/2	3	1/2	1	1	1	2	3	3	12.74%
降雨量	2	1/3	2	1/3	1/2	1/2	1/2	1	2	2	7.37%
土地利用类型	1/2	1/3	1	1/3	1/2	1/2	1/3	1/2	1	1	4.64%
地震动峰值加速度	2	1/3	2	1/2	1/2	1/2	1/3	1/2	1	1	6.16%

运用滑坡因子权重值（表2）和证据权值（表1），按照式（5），对10个评价因子的证据权值作加权计算，并进行空间叠加分析，获得研究区滑坡易发性评价指数（ LSI ）为-1.25~0.87， LSI 值越大，滑坡易发程度越高。

4 滑坡易发性结果分析

4.1 滑坡易发性结果检验

本文采用评价模型接收者操作特征（ROC）曲线对评价结果的合理性和准确性进行检验。图4中曲线下面积（ AUC ）表示易发性预测成功率，其值越接近1，代表准确率越高（Hoyer，Kuss，

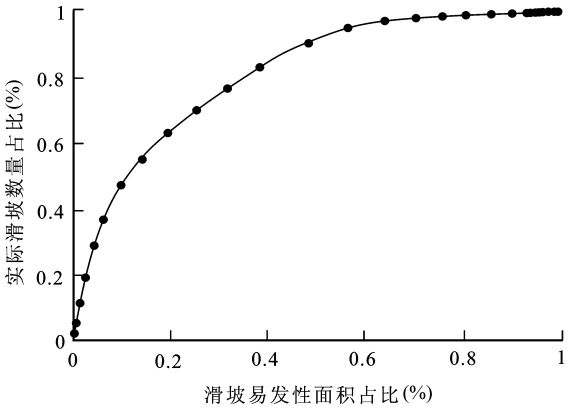


图4 研究区接收者操作特征（ROC）曲线
Fig.4 The curve of receiver operating characteristic in the study area

2020; Walker, 2019)。结果表明, 丽江—小金河断裂中南段滑坡易发性评价结果的 AUC 值为 0.81, 表明评价结果准确度较高。

4.2 滑坡易发性评价结果

根据滑坡易发性评价指数, 并按照《地质灾害风险调查评价技术要求》(FXPC/ZRZYB-01), 使用自然间断法将研究区滑坡易发程度划分为 4 个等级: 高易发区 ($0.34 \leq LSI \leq 0.87$)、中等易发区 ($-0.11 \leq LSI \leq 0.34$)、低易发区 ($-0.45 \leq LSI \leq -0.11$) 和非易发区 ($-1.25 \leq LSI \leq -0.45$), 分别占研究区总面积的 11%、27%、35% 和 27%。研究区内的滑坡高易发区和中等易发区主要沿丽江—小金河断裂以及区域内金沙江等主要河流两侧分布, 具体集中于玉龙县、松坪乡、大东乡等周边区域。其中十二栏杆大型滑坡以及跃进、拉八课、阿金华等中型滑坡均位于滑坡高易发区, 研究区滑坡易发性评价结果与实际滑坡灾害点吻合度较好。

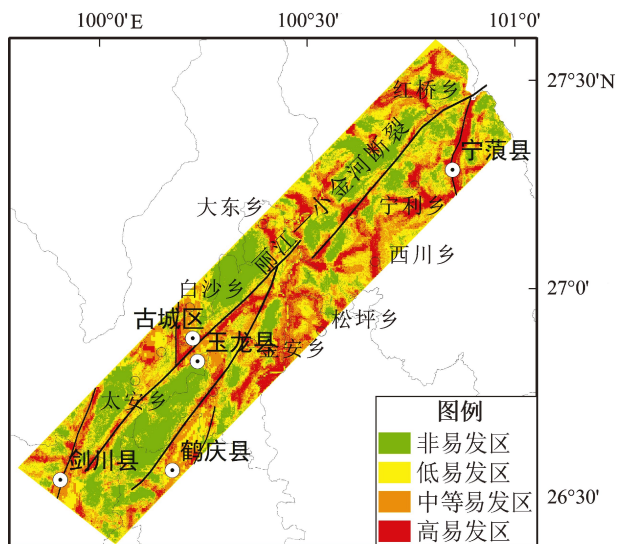


图5 丽江—小金河断裂中南段滑坡易发性评价分区

Fig. 5 Landslide susceptibility map of the Middle and South Sections of the Lijiang-Xiaojinhe fault

4.3 评价结果讨论

本文滑坡易发性评价结果显示, 研究区内滑坡分布受坡度、距活动断裂距离、距河流水系距离、工程地质岩组因素的影响程度更高, 滑坡高易发区和中等易发区主要沿活动断裂和河流水系分布, 其区域地质环境特征为: ①活动断裂发育。

研究区内丽江—小金河断裂和附近其它活动断裂所在区域均为滑坡高易发区或中等易发区。距离断裂越近, 滑坡易发性越高, 这是因为断裂活动在滇西北地区易形成峡谷地貌, 断裂使岩性破碎, 为滑坡发育提供有利条件。②河流水系发育。研究区内有金沙江、漾濞江、漾弓江和宁蒗河穿过, 沿河流两侧多为滑坡易发性较高区域, 如松坪乡西部的滑坡均沿金沙江分布, 宁蒗县附近的滑坡沿宁蒗河发育。③岩性主要为软岩组。研究区软岩组岩性分布面积北部大于南部, 滑坡高易发区多集中于北部。如西川乡滑坡高易发区面积大于玉龙县西南区域的滑坡易发面积, 虽然玉龙县西南区域距离断裂更近, 且有漾濞江穿过, 由于软岩组岩性分布较少, 滑坡易发性更弱。

研究区内滑坡诱发因素主要为降雨量和地震。降雨型滑坡的发育与日最大降雨量、累积降雨量、年均降雨量等降雨特征密切相关。研究区年平均降雨量丰富, 河流的冲蚀作用明显, 影响地形地貌坡度, 为滑坡发生提供了有利条件, 年均降雨量呈现从北东至南西逐渐减少的特征。日降雨量影响群发型滑坡的发生, 一场大的降雨可能会诱发当日或后几日发生滑坡, 研究区日最大降雨量为 67~78 mm, 南、北区域差异不明显。累积降雨量主要对大、中型滑坡和基岩类滑坡影响更大, 研究区内雨季降雨量占年降雨量的约 60%, 北东区域雨季月均降雨量大于西南区域。研究区降雨型滑坡受多种降雨特征的综合影响, 滑坡分布呈现出北部比南部更稠密的特征。

地震型滑坡是由于地震产生地震动引起斜坡失稳从而诱发滑坡, 滑坡特征为规模大、地貌明显、滑体滑移距离较远。地震型滑坡受震源深度、发震构造性质、地震区地质地貌和地形条件等因素影响。一般来说, 距发震断裂越近, 滑坡密度越大, 滑坡规模也越大(张永双等, 2016)。研究区内 40% 的滑坡分布在丽江—小金河断裂两侧 3 km 区域内, 主要沿活动断裂走向分布。断层破碎带风化作用强烈, 多呈碎石土状, 受断裂左旋运动或滑坡上部载体压力作用后, 易塑性流动, 为滑坡的形成、发育提供了初始条件。断裂带上的滑坡体受地震影响后, 其应变水平会增加, 地震对滑坡体变形失稳起促进作用, 滑坡体变形量增大, 极易发生同震滑坡和震后滑坡。研究区地

震型滑坡多为密集成群分布,发育在斜坡中上部,破坏程度高、危害性更大,易中断交通、堰塞河道。

基于以上研究结果,研究区滑坡灾害防治工作应注意以下几点:若发生重大降雨事件,应重点做好研究区北部及距离河流水系较近的滑坡高易发区和中等易发区的滑坡监测、评估等工作;若发生地震,应及时关注活动断裂附近的高易发区和中等易发区的滑坡地质灾害发展情况。

5 结论

本文采用加权证据权模型对云南境内丽江—小金河断裂中南段两侧 10 km 区域内的滑坡易发性评价进行研究,主要结论如下:

(1) 研究区内共收集滑坡点 214 处,这些滑坡点均受丽江—小金河断裂影响显著,其中 20% 的滑坡分布在距离断裂带两侧 1 km 区域内,40% 的滑坡分布在距离断裂带两侧 3 km 区域内。

(2) 选取 10 个影响因子,采用加权证据权模型作滑坡易发性评价。滑坡高易发区、中等易发区、低易发区和非易发区分别占研究区总面积的 11%、27%、35% 和 27%。ROC 曲线检验模型的 $AUC = 0.81$,评价结果较好。本文选取的评价因子和模型方法适用于丽江—小金河断裂中南段滑坡易发性研究。

(3) 研究区内滑坡发育主要受坡度、距活动断裂距离、距河流水系距离、工程地质岩组因素的影响,滑坡高易发区和中等易发区主要沿断裂带和金沙江等主要河流水系两侧呈条带状分布,在玉龙县、松坪乡、大东乡等周边区域较为集中。本文模型的计算结果与实际滑坡灾害点吻合度较高,较好地揭示了研究区滑坡易发性特征。

(4) 西川乡周边区域处于高易发区和中等易发区,但实际滑坡灾害点较少,若降雨增加或发生地震,应加强监测此区域的滑坡灾害发展情况。

参考文献:

安晓文,常祖峰,陈守军,等.2018.云南第四纪活动断裂[M].北京:地震出版社.

白仙富,戴雨芾,叶燎原,等.2022.基于GIS和专家知识的滇西南地区滑坡敏感性模糊逻辑推理方法[J].地震研究,45(1):

118-131.

邓起东,张培震,冉永康,等.2002.中国活动构造基本特征[J].中国科学:地球科学,32(12):1020-1030.

丁锐,任俊杰,张世民,等.2018.丽江—小金河断裂中段晚第四纪古地震历史[J].地震地质,40(3):622-640.

范强,巨能攀,向喜琼,等.2014.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,22(3):474-481.

郭长宝,杜宇本,张永双,等.2015.川西鲜水河断裂带地质灾害发育特征与典型滑坡形成机理[J].地质通报,34(1):121-134.

郭长宝,张永双,蒋良文,等.2009.基于GIS的滇藏铁路丽江—香格里拉段工程地质条件分区研究[J].现代地质,23(3):545-552.

黄小龙,吴中海,刘锋,等.2021.滇西北程海断裂带主要古地震滑坡及其分布特征的构造解释[J].地学前缘,28(2):125-139.

吉日伍呷,田宏岭,韩继冲,等.2022.基于不同机器学习算法的地震滑坡易发性评价——以鲁甸地震为例[J].昆明理工大学学报(自然科学版),17(2):47-56.

李安,张世民,丁锐,等.2016.丽江—小金河断裂南段全新世古地震研究[C]//中国地震局地壳应力研究所.地壳构造与地壳应力论文集·27.北京:地震出版社,1-9.

李环宇,丁锐,张世民.2020.丽江—小金河断裂南、中段地貌特征及构造指示意义[J].震灾防御技术,15(2):380-391.

李宁,朱良玉,刘雷.2018.丽江—小金河断裂带现今闭锁程度与地震危险性分析[J].地震研究,41(2):244-250.

李学平.2001.用层次分析法求指标权重的标度方法的探讨[J].北京邮电大学学报(社会科学版),3(1):25-27.

凌晓,刘甲美,王涛,等.2021.基于致灾因子对称法分级的信息量模型在地震滑坡危险性评价中的应用[J].国土资源遥感,33(2):172-181.

刘传正,刘艳辉,温铭生,等.2007.长江三峡库区地质灾害成因与评价研究[M].北京:地质出版社.

刘晓霞,邵志刚.2020.丽江—小金河断裂带现今断层运动特征[J].地球物理学报,63(3):1117-1126.

刘振军.2001.层次分析法在青藏高原中西部航磁异常分类及找矿预测中的应用[J].物探与化探,25(3):161-168.

蒲娉璠.2016.重庆市滑坡灾害时空分布特征与易发性评价研究[D].上海:华东师范大学.

石菊松,徐瑞春,石玲,等.2007.基于RS和GIS技术的清江隔河岩库区滑坡易发性评价与制图[J].地学前缘,14(6):119-128.

唐川,黄楚兴,万晔.1997.云南省丽江大地震及其诱发的崩塌滑坡灾害特征[J].自然灾害学报,6(3):76-84.

王丽丽.2016.降雨型滑坡地质灾善易发性评价中的特征处理方法[D].杭州:浙江大学.

向宏发,徐锡伟,虢顺民,等.2002.丽江—小金河断裂第四纪以来的左旋逆推运动及其构造地质意义——陆内活动地块横向构造的屏蔽作用[J].地震地质,24(2):190-198.

徐锡伟,闻学泽,郑荣章,等.2003.川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源[J].中国科学:地球科学,33(S1):151-162.

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[J]. 现代地质, 35(1): 26–37.
- 杨志华, 郭长宝, 吴瑞安, 等. 2021. 青藏高原巴塘断裂带地震滑坡危险性预测研究[J]. 水文地质工程地质, 48(5): 91–101.
- 杨志华, 郭长宝, 姚鑫, 等. 2017. 考虑地震后效应的青藏高原东缘地质灾害易发性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 28(4): 103–112.
- 张生元, 成秋明, 张素萍, 等. 2009. 加权证据权模型和逐步证据权模型及其在个旧锡铜矿产资源预测中的应用[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 34(2): 281–286.
- 张永双, 姚鑫, 郭长宝, 等. 2016. 地震扰动区重大滑坡泥石流灾害防治理论与实践[M]. 北京: 科学出版社.
- 赵晓燕. 2018. 滇东北地区滑坡地质灾害危险性评价研究[D]. 昆明: 云南大学.
- Hoyer A, Kuss O. 2020. Meta-analysis of full ROC curves with flexible parametric distributions of diagnostic test values[J]. Research Synthesis Methods, 11(2): 301–313.
- Lee S, Evangelista D G. 2006. Earthquake-induced landslide-susceptibility mapping using an artificial neural network[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 6(5): 687–695.
- Shen Z K, Lü J, Wang M, *et al.* 2005. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geo-physical Research; Solid Earth, 110(B11409).
- Walker S P. 2019. The ROC curve redefined—optimizing sensitivity (and specificity) to the lived reality of cancer[J]. The New England Journal of Medicine, 380(17): 1594–1595.
- FXPC/ZRZY B–01, 地质灾害风险调查评价技术要求[S].
- GB 18306—2015, 中国地震动参数区划图[S].

Landslide Susceptibility Assessment Based on Weight-of-Evidence Modeling in the Middle and South Sections of the Lijiang-Xiaojinhe Fault

TIAN Peng¹, CHANG Yuqiao¹, BAI Xianfu¹, ZHOU Qingyun¹, SUN Bin²

(1. Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

(2. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China)

Abstract

The Lijiang-Xiaojinhe fault has intense Holocene activity and frequent earthquakes; the geological disaster, landslide along the fault zone is incredibly developed. In this paper, places 10 km away from both sides of the middle and south sections of the fault zone are taken as the study areas. According to the geological and geographical environment and landslide development characteristics, 10 factors are selected. They are topography (elevation, slope, aspect), lithology, distance of faults, roads, rivers, average annual precipitation, land use type, and peak ground acceleration. The weight of evidence method is used to establish the landslide vulnerability evaluation model to evaluate landslide vulnerability of the Lijiang-Xiaojinhe fault. Based on the natural breakpoints' method, landslide susceptibility is labeled as “high”, “medium”, “low” and “none”. The assessed *AUC*-value is 0.809. The landslide in the study area is mainly affected by slope, fault, river system and lithology. The high- and medium-prone regions are distributed along the fault zone and the both sides of the Jinsha River and other major river systems. The high-prone areas are concentrated in the surrounding areas such as Yulong County, Songping Township and Dadong Township. Xichuan Village is located in the high-prone areas too. However, there are few landslide points.

Keywords: the Lijiang-Xiaojinhe fault; landslide; WOE model; susceptibility assessment