

多源遥感数据融合调查的复杂山区滑坡 易发性评价方法研究

彭志忠¹,袁飞云¹,肖锋¹,何阳²

(1. 四川泸石高速公路有限责任公司,成都 610041;

2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,成都 610059)

摘要: 我国山区地质灾害频发,其中滑坡占比超过1/3,但传统的、单一的技术手段对于高山地、高植被覆盖的复杂山区滑坡调查来说显得力不从心,这极大影响了滑坡易发性结果的可靠性。本文选取九寨沟部分区域作为研究区,将光学遥感、合成孔径雷达(InSAR)、机载LiDAR等技术融合应用于滑坡的调查,对研究区典型滑坡进行分类,编录了滑坡样本库,筛选了地形地貌、地质条件、水文条件、人类工程活动4类等作为易发性因子,并引入Maxent模型进行滑坡易发性评价研究,它结合了机器学习和统计模型被认为是一种强大的建模方法。应用受试者工作特征曲线下面积(ROC-AUC)对模拟结果进行检验,结果显示平均ROC-AUC值达到0.855,预测效果优秀,Maxent模型适用于滑坡易发性评价。该研究对山区防灾减灾具有支持意义。

关键词: 多源遥感数据;机载LiDAR;滑坡易发性评价;Maxent模型

中图分类号: P642.22;X87;X141 **文献标识码:** A

STUDY ON THE EVALUATION METHOD OF LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY IN COMPLEX MOUNTAINOUS AREAS BASED ON MULTI-SOURCE REMOTE SENSING DATA FUSION SURVEY

PENG Zhi-zhong¹, YUAN Fei-yun¹, XIAO Feng¹, HE Yang²

(1. Sichuan Lushi Expressway Co., Ltd, Chengdu 610041, China;

2. State Key Laboratory of Geological Hazard Prevention and Geoenvironmental Protection,
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Geological disasters in China's mountainous areas are frequent, of which landslides account for more than one-third, but the traditional, single technical means are not sufficient for the investigation of complex mountain landslides with high vegetation cover, which greatly affects the reliability of landslide susceptibility results. In this paper, some areas of Jiuzhaigou are selected as the research area, and optical remote sensing, synthetic aperture radar (InSAR), airborne LiDAR and other technologies are integrated into the investigation of landslides, the typical landslides in the research area are classified, the landslide sample bank is cataloged, the topographic landform, geological conditions, hydrological conditions, and human engineering activities are screened as the susceptibility factors, and the Maxent model is introduced to evaluate the susceptibility of landslides.

which combines machine learning and statistical models to be considered a powerful modeling method. The simulated results were tested by applying the area under the working characteristic curve (ROC-AUC) of the subjects, and the results showed that the ROC-AUC value reached 0.851, and the prediction effect was excellent, and the Maxent model was suitable for landslide susceptibility evaluation. The study is of supportive significance for disaster prevention and mitigation in mountainous areas.

Key words: Multi-source remote sensing data; airborne LiDAR; landslide susceptibility evaluation; Maxent model

我国山区面积占比大,地质条件复杂构造活动频繁致使灾害频发,自20世纪90年代起,我国组织了多轮地质灾害详细调查和隐患排查,共计地质灾害隐患点30万余处,但调查发现,近年来发生的灾难性地质灾害事件超过一半都不在已发现的隐患点范围内^[1]。因而有效精确地预测滑坡易发性对区域性防灾减灾具有重要的现实意义,而要使滑坡易发性结果可靠,准确的滑坡样本和适宜的易发性模型是必不可少的^[2]。

传统的遥感滑坡识别利用光学卫星影像,但易受山区气候和云雾遮挡影响,且分辨率相对较低,对于规模较小的滑坡灾害不易识别。InSAR技术具有高灵敏度、高空间分辨率、宽覆盖率、全天候等特点^[3],但会受茂密植被影响导致差分干涉失相干扰或受到人类工程活动干扰造成形变区域误判。机载激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)通过多次回波技术可“穿透”地面植被,通过滤波算法有效去除地表植被,获取真实地面信息,为植被覆盖茂密的山区地质灾害隐患识别提供了新的解决方案^[4]。近年来众多学者关注到多源遥感数据针对灾害早期识别的重要性,比如许强等^[5]提出通过构建“天-空-地一体化”的“三查”体系进行重大地质灾害隐患的早期识别。孙永彬等^[6]利用升降轨时序InSAR-光学遥感综合识别方法,有效识别出隐蔽性滑坡隐患。沈永林等^[7]将高分辨率航空影像和机载LiDAR数据相结合,识别海地地震诱发的滑坡,取得了良好的效果。实践证明多源遥感数据针对复杂山区的滑坡调查准确率较高,确保了滑坡样本的可靠性。

除了滑坡样本可靠性外,易发性模型的适宜性同样对滑坡易发性评价有着重要影响。国内外对于滑坡易发性的研究,早期主要应用了专家调查权重法、层次分析法^[8]、模糊综合评判法^[9]等方法,此类方法主观性强,评价精度较依赖于专家经验,不同操作者评价结果偏差较大。随着地理信息系统技术(geographic information system, GIS)和计算机的

发展,证据权重法^[10]、信息量模型^[11]、逻辑回归模型^[12]、频率比^[13]、判别分析^[14]等概率统计模型评价方法在滑坡易发性评价被广泛应用,此类方法在一定程度上降低了评价的主观性,但对数据精度要求较高。MaxEnt模型以最大熵理论为基础,它结合了机器学习和统计模型,将样本出现数据与对应的环境数据集相结合,根据已知的样本存在信息,从符合条件的分布中选择熵最大的分布作为最优分布,建立预测模型,进而预测样本的地理分布^[15-18]。

2017年8月8日四川省九寨沟县发生7.0级地震,强烈的构造活动造成山体“损伤”易发生滑坡等次生灾害,已有学者基于光学遥感技术和野外调查对九寨沟山区的同震地质灾害展开了诸多研究^[19-22],但对于高山地、高植被覆盖度的隐蔽性滑坡涉及较少。本文以九寨沟核心景区部分区域为研究区,将光学遥感、合成孔径雷达(InSAR)、机载LiDAR等技术融合应用于滑坡的调查,编录了滑坡样本库,确立了地形地貌、地质条件、水文条件、人类工程活动等4类评价指标因子,利用ArcGIS平台和MaxEnt模型对研究区滑坡进行易发性评价,以期九寨沟景区防灾减灾工作提供参考。

1 研究区概况

研究区为九寨沟核心景区部分区域以及漳扎镇境内部分区域,地理位置介于东经 $103^{\circ}44'$ ~ $104^{\circ}01'$,北纬 $32^{\circ}59'$ ~ $33^{\circ}20'$ 之间,总面积约为 357 km^2 ,其中核心景区部分范围为景区沟口至扎如寺、熊猫海、天鹅海、五彩池、长海沿线,漳扎镇部分区域为甘海子至丛牙社区沿线,图1为研究区地理位置概况图。九寨沟地震核心区地处川西高原四川盆地与青藏高原过渡地带,地貌发育正处强烈侵蚀切割阶段,高山峡谷地貌发育,地势上呈现南高北低的特征。九寨沟景区地处我国北亚热带半湿润区,表现出气候温和、降水适中、冷凉干燥的季风气候特征。年平均气温约 $12.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。沟内出露地层为一套由中

泥盆系(D₂)到中三叠系(T₂)的海相碳酸盐岩层,岩性主要为质纯层厚的灰岩、白云岩、生物碎屑灰岩等,总厚度为4 000 m左右。在人口集中的河(沟)

谷沟口、坡脚及半山斜坡地带,第四系松散堆积物十分丰富,特别容易产生滑坡、崩塌和不稳定斜坡等地质灾害。

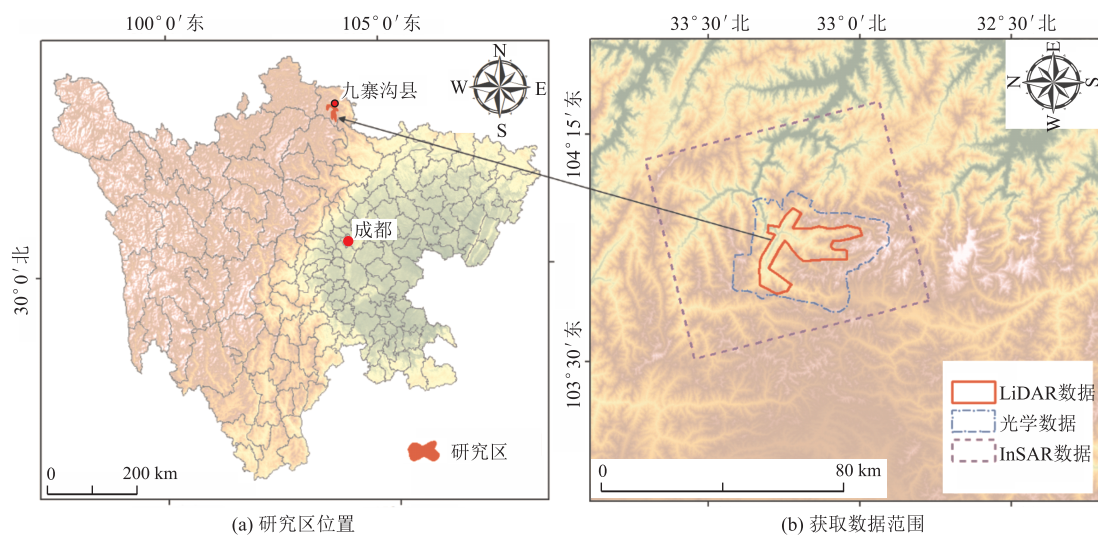


图1 研究区地理位置及数据源概况

2 数据源与研究方法

2.1 数据来源

数据源主要包括机载 LiDAR 数据、光学影像数据和 InSAR 数据。机载 LiDAR 数据由四川省测绘局通过 Leica Terra Mapper、Leica ALS-80 两款长测距、高性能有人机载 LiDAR 设备采集,获取研究区高精度激光点云数据并生成分辨率为 0.5 m 的 DEM。光学影像数据以 2016 年谷歌卫星的光学影像数据(分辨率 4 m)作为震前数据,以 2018 年谷歌卫星影像数据(分辨率 4 m)和 2018 年机载 LiDAR 同轴光学影像数据(分辨率 0.2 m)作为震后数据。InSAR 数据来自 ALOS-2 卫星,最小分辨率为 3 m(距离向)×1 m(方位向),数据源概况见表 1。

表 1 影像数据概况

数据类型	获取时间	数据源	分辨率/m
光学影像数据	2016.07	Google Earth	4 m
	2018.07	Google Earth	4 m
	2018.10	四川省测绘局	0.2 m
InSAR 数据	2018.09~2019.03	ALOS-2 卫星	3 m×1 m
机载 LiDAR 数据 (DEM)	2018.10	四川省测绘局	0.5 m

2.2 编录滑坡数据库

首先在光学影像上,通过人机交互判别解译对比震前震后影像获得灾害的形态和几何要素特征确定同震滑坡;接着在 InSAR 干涉图上识别出色彩突变区域即可能的地表形变区域,结合高精度 DEM 山体阴影反应出的真实地貌确定是否为潜在滑坡隐

患;最后在高精度 DEM 山体阴影上通过识别滑坡特征,如滑坡壁、滑坡鼓丘、滑坡舌等圈定滑坡范围。在解译过程中为防误判把 3 种技术综合运用进行相互对照,比如 InSAR 干涉图上显示出有明显的色彩突变区域而在光学影像上显示为施工现场,在光学影像上只能看到茂密的植被而在滤除植被的高精度 DEM 山体阴影上却可以清晰看见滑坡的特征。根据遥感影像解译的滑坡活动形态特征将研究区滑坡大致分为 4 类(图 2),即阶梯滑移、塑流滑移、扩展蠕滑、坍塌滑移。在震前震后数据对比解译之下可以得出坍塌滑移是明显的同震滑坡,其余 3 种类型具有隐蔽性的滑坡为非同震滑坡的结论,故研究将滑坡分为非同震滑坡和同震滑坡讨论,进行易发性模拟。

研究区解译非同震滑坡 332 处(图 3),将滑坡数据随机分为两组,3/4 的数据用做训练样本进行建模,剩余的 1/4 的数据作为测试样本对模型进行验证。设模型迭代次数为 500 次,取 500 次模拟结果的平均值作为最终模拟结果。解译同震滑坡 734 处,进行与非同震滑坡相同步骤处理。

2.3 指标因子构建及处理

本研究选取了地形地貌、地质条件、水文条件、人类工程活动作为易发性评价因子,各因子来源如下:

(1) 地形地貌因子使用由机载 lidar 数据得到的数字高程模型 DEM 栅格数据,并从中提取地形因子:高程、坡度、坡向、剖面曲率、地形粗糙度、地形

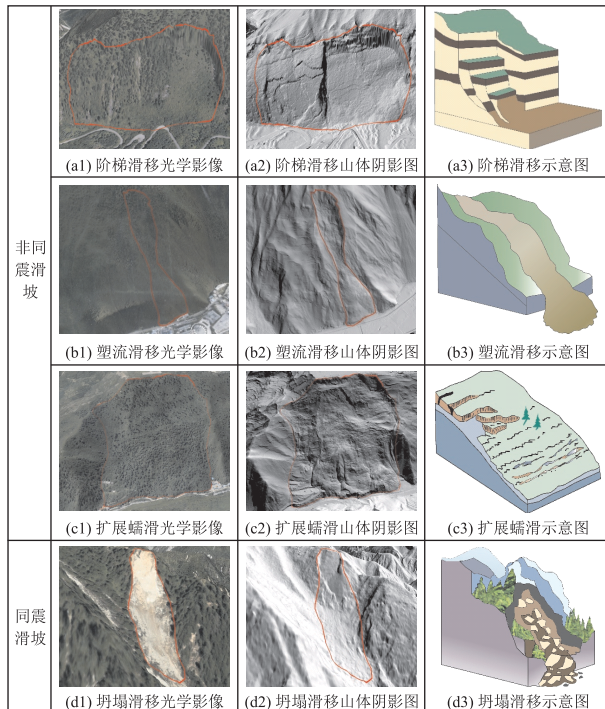


图2 研究区典型滑坡类型

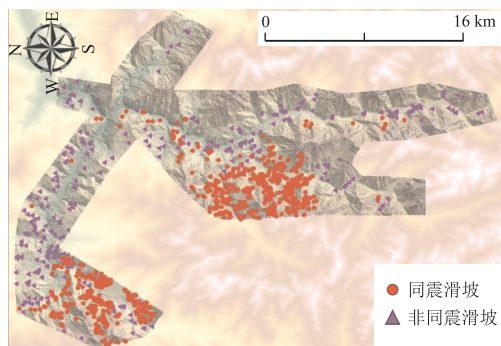


图3 研究区滑坡分布图

湿度指数(TWI)。

(2) 地质因子包括断层、岩性。断层数据在三维解译环境中高精度高程模型 DEM 上解译获得。发震断层数据来源已有研究推测^[19]。岩性数据由区域地质资料和 1:5 万地质图数字化获得,主要包括:泥盆系雪宝顶组(DC_x)、石炭系西沟组(C_x)、二叠系三道桥组(Ps)、三叠系扎尕山组(Tzg)、三叠系杂谷脑组(T_{2z})、三叠系侏倭组(T_{3zh})、特殊地层塔藏组(PTt)、第四系覆盖层(Q)。

(3) 地面峰值加速度(PGA)是反映地震时地表震动强度的重要参数,来自美国地质调查局(USGS)公布数据(矢量文件),通过 ArcGIS10.3 转换为 5 m 栅格数据。

(4) 与道路、水系、断层、发震断层距离 4 个指标在 ArcGIS10.3 中通过欧式距离计算得到。

所有易发性因子均利用 ArcGIS10.3 处理,将所有的易发性因子数据统一坐标系及数据范围之后转换为 ASC 格式。在 MaxEnt3.4.4 软件中导入滑坡数据和易发性因子,采用 jack-knife 刀切法进行初步计算各环境因子置换重要性,剔除了重要性过低的因子,筛选出高程、坡度、坡向、剖面曲率、地形粗糙度、地形湿度指数(TWI)、地震动峰值加速度(PGA)、地层岩性、与断层距离、与发震断层距离、与道路距离、与水系距离共 12 种易发性因子。考虑到非同震滑坡和同震滑坡发生的主控因素不同,故非同震滑坡易发性因子为高程、坡度、坡向、剖面曲率、地形粗糙度、地形湿度指数(TWI)、地层岩性、与断层距离、与道路距离、与水系距离共 10 个;同震滑坡易发性因子为高程、坡度、坡向、剖面曲率、地形粗糙度、地形湿度指数(TWI)、地震动峰值加速度(PGA)、地层岩性、与发震断层距离、与道路距离、与水系距离共 11 个。

2.4 MaxEnt 模型

最大信息熵模型 Maxent 软件 V3.4.4 是美国哥伦比亚大学 Steven J. Phillips 基于 Java 平台设计的一款用于预测样本潜在分布软件。模型原理是基于已知的地质环境条件和滑坡灾害分布数据,通过特定算法求出区域内在特定位置上发生滑坡灾害的可能分布,从而进行未知区域的滑坡分布概率预测。

为了保证模型模拟的精度,引入受试者工作特征曲线下的面积(ROC-AUC)分析法。该分析方法以灵敏度(sensitivity)为纵坐标,以特异度(specificity)为横坐标,绘制而成的曲线为 ROC 曲线。AUC-ROC 值越大,表示指标因子与预测结果之间相关性越大,预测效果也就越优秀。当 AUC-ROC 的值为 0.8~0.9 则预测效果优秀,当值为 0.9~1.0 则预测效果非常好^[23]。

3 结果与分析

3.1 易发性分区

MaxEnt 模型模拟的非同震滑坡易发性指数值为 0~1,其分级标准为:极低(0~0.12)、低(0.12~0.31)、中(0.31~0.51)、高(0.51~0.72)和极高(0.72~1)。根据 MaxEnt 模型结果进行易发性区划图绘制(图 4)和各分级面积统计,极低易发区 155 km²,面积占比 43.4%;低易发区 66.3 km²,面积占比 18.6%;中易发区 59.4 km²,面积占比 16.6%;高易发区 48.4 km²,面积占比 13.6%;极高易发区 27.9 km²,面积占比 7.8%。

同震滑坡易发性模拟结果为极低易发区 229.7

km²,面积占比 64.3%;低易发区 50.6 km²,面积占比 14.1%;中易发区 29.1 km²,面积占比 8.2%;高

易发区 26.1 km²,面积占比 7.3%;极高易发区 21.5 km²,面积占比 6.1%。

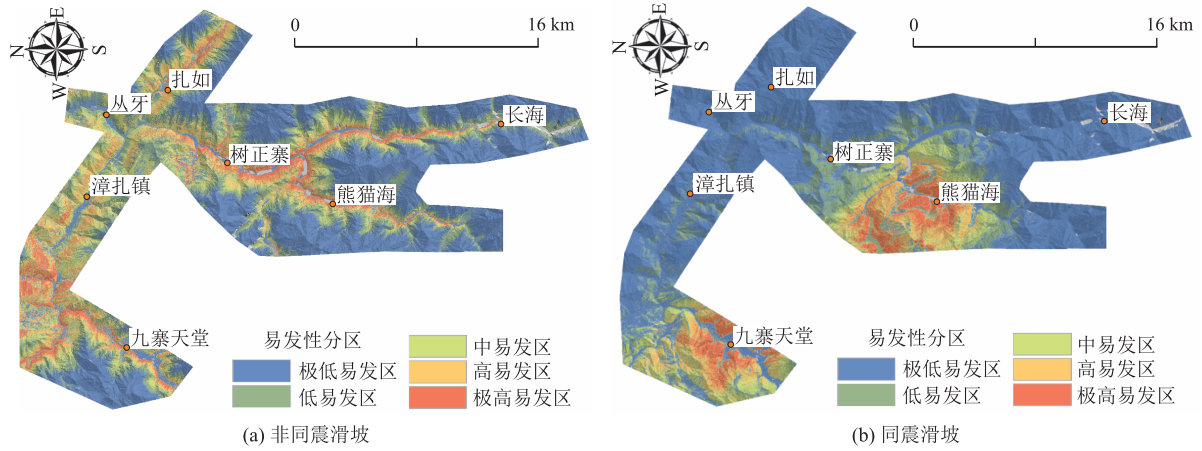


图 4 研究区滑坡易发性分区图

3.2 模型精度检验

易发性模拟结果的 ROC 曲线如图 5 所示,非同震滑坡模型训练样本下的 ROC-AUC 值达 0.836,验证样本下的 ROC-AUC 值达 0.806;同震滑坡模

型训练样本下的 ROC-AUC 值达 0.897,验证样本下的 ROC-AUC 值达 0.881。两类滑坡的值均大于 0.8,根据分类标准,MaxEnt 模型在滑坡易发性中的预测精度达到优秀水平,表明模拟结果可靠。

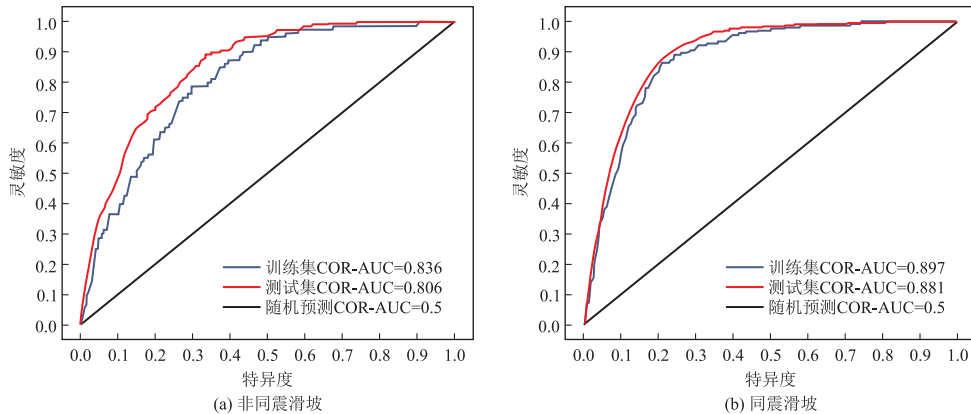


图 5 模型精度检验 ROC 曲线

3.3 易发性因子分析

表 2 为滑坡的各易发性因子的百分贡献度,百分贡献度是 MaxEnt 模型在训练过程中给出的各易发性因子对滑坡地理分布的贡献程度。非同震滑坡的易发性因子中,高程的贡献度为 35.5%,与其他易发性因子相比具有显著优势。与之相比贡献度略低的因子是与水系距离、与道路距离、地形粗糙度、地层岩性,贡献度分别为 17.5%、10.9%、10.8%、9.8%,其余易发性因子坡向、坡度、地形湿度、与断层距离、剖面曲率的贡献度分别为 4.9%、4.2%、3.4%、1.8%、1.2%。对于非同震滑坡来说,地形地貌是主控因素同时受到水文条件和人类工程活动的一定影响。

表 2 各易发性因子的百分贡献度表

非同震滑坡		同震滑坡	
易发性因子	贡献度%	易发性因子	贡献度%
高程	35.5	高程	4.1
坡度	4.2	坡度	0.2
坡向	4.9	坡向	0.3
剖面曲率	1.2	剖面曲率	1.0
地形粗糙度	10.8	地形粗糙度	4.4
地形湿度(TWI)	3.4	地形湿度(TWI)	0.7
地层岩性	9.8	地层岩性	1.4
与断层距离	1.8	与发震断层距离	69.7
与道路距离	10.9	与道路距离	0.6
与水系距离	17.5	与水系距离	0.6
		地震动峰值加速度(PGA)	17.1

同震滑坡易发性贡献度最大的因子是与发震断层距

离,贡献度为 69.7%;其次是地震动峰值加速度,贡献度为 17.1%;更低贡献度的因子是地形粗糙度、高程、地层岩性、剖面曲率,分别为 4.4%、4.1%、1.4%、1.0%;其余贡献度极低的因子是地形湿度、与道路距离、与水系距离、坡向、坡度,分别为 0.7%、0.6%、0.6%、0.3%、0.2%。可见,同震滑坡的发生主要是受到发震断层影响,同震滑坡分布与 PGA 呈显著相关,随着 PGA 增大同震滑坡发生率明显提升。

为进一步分析各易发性因子与滑坡地理分布的关系,研究根据 MaxEnt 模型模拟结果得到研究区滑坡易发概率与各易发性因子的响应曲线关系图(图 6)以表征滑坡易发概率对应的各易发性因子的阈值,大于 0.5 的阈值为高易发。下表 3 统计了滑坡高易发性概率对应的各因子的阈值。根据各因子响应曲线和高易发阈值统计表显示,同震滑坡、非同震滑坡在各坡向皆为高易发概率。同震滑坡高易发

性所处高程更高,坡度更陡,剖面曲率、地形粗糙度、地形湿度、与断层、道路、水系距离阈值皆高于非同震滑坡。同震滑坡高易发性所处岩性更为集中。

表 3 滑坡高易发性概率对应因子阈值表

非同震滑坡		同震滑坡	
易发性因子	阈值	易发性因子	阈值
高程	2 100~2 900 m	高程	2 600~3 600 m
坡度	25°~60°	坡度	32°~75°
坡向	全向	坡向	全向
剖面曲率	-180~220	剖面曲率	-180~310
地形粗糙度	1~2	地形粗糙度	1~4
地形湿度(TWI)	0.2~12.2	地形湿度(TWI)	-1~9
地层岩性	DCx、Cx、Tb、T ₂ zg、T ₃ zh、P ₃ T ₃ 、T、Q	地层岩性	Cx、Tb、T ₂ zg、T ₃ zh
与断层距离	0~1 000 m	与发震断层距离	0~3 000 m
与道路距离	0~800 m	与道路距离	0~5 000 m
与水系距离	0~900 m	与水系距离	0~6 000 m
		地震动峰值加速度(PGA)	0.2~0.28

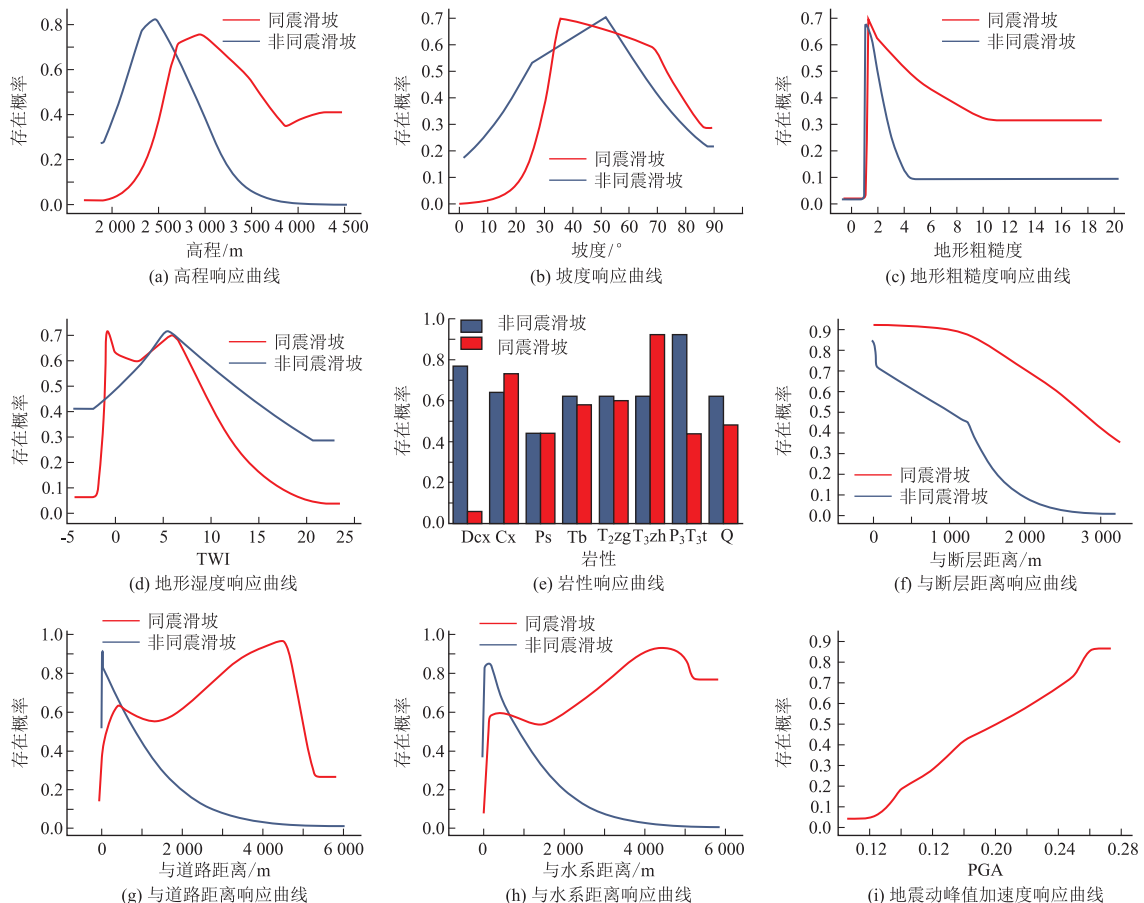


图 6 部分易发性因子响应曲线

4 结论

(1) 利用多源遥感数据融合的方法,可以有效地识别复杂山区滑坡,将复杂山区滑坡分为同震和

非同震滑坡讨论,填补了研究区非同震滑坡易发性评价空白,提升了研究区滑坡易发性评价可靠性。目前已有较多研究者将光学遥感与 InSAR 技术与机载 LiDAR 技术相结合,但少有将 3 种技术同时

利用的案例,多种遥感手段的综合利用势必将显著提高滑坡隐患的识别效率和准确性。多源遥感数据融合作为未来地质灾害早期遥感调查的发展方向具有巨大潜力。

(2) 以332个非同震滑坡点、734个同震滑坡点为样本数据,随机选取75%用于训练模型,余下25%用于验证模型,考虑两类滑坡的主控因素不同从而进行不同易发性因子分类模拟。模型运算结果表明非同震滑坡训练样本下的ROC-AUC值达0.836,验证样本下的ROC-AUC值达0.806;同震滑坡模型训练样本下的ROC-AUC值达0.897,验证样本下的ROC-AUC值达0.881,两者值均大于0.8。根据分类标准,MaxEnt模型在研究区同震和非同震滑坡易发性方面适用性等级均为优秀,模型预测可信度高。

(3) MaxEnt模型显示研究区非同震滑坡易发性与地形地貌、水文条件、人类工程活动相关性高,高易发区和极高易发区主要在2100~2900m高程沿公路呈条带状分布,研究区高程2000~3000m为高山河谷向高山山地过渡地貌,地形变得逐渐陡峭,大部分河流、湖泊也位于此高程有利于地质灾害形成,同时在此高程范围内沿水系修建有多条公路,人类工程活动也对边坡灾害形成起到一定影响。同震滑坡易发性主要受到发震断层控制,3000m范围内皆为高易发性区,同时与地震动峰值加速度(PGA)有较大相关性,PGA越大同震滑坡易发性越高。集中区域为熊猫海及九寨天堂附近。

参考文献

- [1] 许强,董秀军,李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019,44(7):957-966.
- [2] 王佳佳,殷坤龙,肖莉丽. 基于GIS和信息量的滑坡灾害易发性评价——以三峡库区万州区为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2014,33(4):797-808.
- [3] 朱建军,李志伟,胡俊. InSAR变形监测方法与研究进展[J]. 测绘学报, 2017,46(10):1717-1733.
- [4] 王绚,范宣梅,杨帆,等. 植被茂密山区地质灾害遥感解译方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020,45(11):1771-1781.
- [5] 许强,陆会燕,李为乐,等. 滑坡隐患类型与对应识别方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022,47(3):377-387.
- [6] 孙永彬,张恩,李启亮,等. 金沙江下游永善段隐蔽性滑坡隐患综合遥感识别[J/OL]. 工程科学与技术, 2022;1-14.
- [7] 沈永林,李晓静,吴立新. 基于航空影像和LiDAR数据的海地震滑坡识别研究[J]. 地理与地理信息科学, 2011,27(1):16-20+115.
- [8] 铁永波,唐川,周春花. 层次分析法在城市灾害应急能力评价中的应用[J]. 地质灾害与环境保护, 2005,16(4):433-437.
- [9] Lu J, Hu S, Niu Z, et al. The Application of Fuzzy Comprehensive Evaluation Model in Landslide Prediction[C]// International Conference on Information Management. IEEE, 2010.
- [10] Regmi N R, Giardino J R, Vitek J D. Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA[J]. Geomorphology, 2010,115(1-2):172-187.
- [11] 朱良峰,吴信才,殷坤龙,等. 基于信息量模型的中国滑坡灾害风险区划研究[J]. 地球科学与环境学报, 2004,26(3):52-56.
- [12] Pradhan B, Lee S, Buchroithner M F. GIS application on spatial landslide analysis using statistical based models[J]. Proc Spie, 2009,7478(7478):74781B.
- [13] Zare N, Hosseini S A, Hafizi M K, et al. Landslide Hazard Zonation with Frequency Ratio Method(Case Study: Forest of Mazandaran Wood and Paper Industry) [J]. Journal of Watershed Management Research, 2019,10(20):62-71.
- [14] Guzzetti F, Reichenbach P, Ardizzone F, et al. Estimating the quality of landslide susceptibility models[J]. Geomorphology, 2006,81(1/2):166-184.
- [15] O'Banion M S, Olsen M J. Predictive seismically-induced landslide hazard mapping in Oregon using a maximum entropy model (MaxEnt)[C]//2014.
- [16] Kim H, Lee D K, Mo Y, et al. Prediction of Landslides Occurrence Probability under Climate Change using MaxEnt Model [J]. Journal of Environmental Impact Assessment, 2013,22(1):39-50.
- [17] Saleem R, Ahmed S R, Qmar F M, et al. Poster Landsliding Zonation of Gilgit district using Remote Sensing and GIS techniques [C]// 1st International Conference on Global Environmental Changes, 2013.
- [18] 屈新星,李道安,何云玲,等. 基于MaxEnt模型的滑坡易发性评价——以攀枝花市为例[J]. 水土保持研究, 2021,28(2):224-229.
- [19] 戴岚欣,许强,范宣梅,等. 2017年8月8日四川九寨沟地震诱发地质灾害空间分布规律及易发性评价初步研究[J]. 工程地质学报, 2017,25(4):1151-1164.
- [20] 刘果,张友谊,张珊珊,等. 九寨沟地震前后次生地质灾害分布特征分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2018,29(3):1-4.
- [21] 程强,胡朝旭,杨绪波. 九寨沟地震区公路沿线地质灾害发育规律及防治对策[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018,29(4):114-120.
- [22] 罗路广,裴向军,崔圣华,等. 九寨沟地震滑坡易发性评价因子组合选取研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021,40(11):2306-2319.
- [23] 赵冬梅,角媛梅,邱应美,等. 基于maxEnt模型的哈尼梯田核心区滑坡易发性评价[J]. 水土保持研究, 2020,27(4):392-399+407.