

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2022.04.14

引用格式: 黄艳琴,李为乐,许洲,等. 国道213 汶川—松潘段滑坡隐患遥感识别与易发性评价[J]. 中国地质调查,2022,9(4): 121–133. (Huang Y Q,Li W L,Xu Z,et al. Remote sensing identification and susceptibility evaluation of landslide hazards in Wenchuan – Songpan section of National Highway 213[J]. Geological Survey of China,2022,9(4): 121–133.)

国道213 汶川—松潘段滑坡隐患 遥感识别与易发性评价

黄艳琴^{1,2}, 李为乐¹, 许洲¹, 李鹏飞³, 铁永波⁴

(1. 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, 四川 成都 610059;

2. 四川峨眉山四零三建设工程有限公司, 四川 乐山 614200; 3. 中国

电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081;

4. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

摘要: 国道213 汶川—松潘段位于强震山区, 滑坡灾害频发, 每年都会因滑坡灾害导致交通中断, 迫切需要查明沿线滑坡隐患的空间分布, 并对其易发性进行评价。利用光学遥感和 InSAR 综合遥感技术对沿线滑坡隐患进行识别, 共识别滑坡隐患 288 处, 其中 InSAR 探测出有形变的滑坡隐患点 27 处。以识别出的滑坡隐患为评价样本, 选取高程、坡度、坡向、地表曲率、工程地质岩组、归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、距道路距离、距河流距离、距断层距离等 9 个影响因素作为评价因子, 采用 Logistic 回归模型评价该沿线滑坡隐患易发性, 评价结果可为国道213 汶川—松潘段滑坡灾害防治提供参考。

关键词: 国道213; 滑坡隐患; 遥感识别; Logistic 回归模型; 易发性评价

中图分类号: P694; T979

文献标志码: A

文章编号: 2095–8706(2022)04–0121–13

0 引言

目前,我国公路交通建设正处于快速发展阶段,山区公路建设的投入也在不断加大^[1]。山区地质环境复杂、山高坡陡、沟谷纵横,在地震或强降雨作用下滑坡灾害频发,严重威胁着山区公路的建设和运营安全。近年来,随着山区大量高速公路的建设和使用,每年都会出现公路滑坡灾害发生的情况,造成公路损毁、交通瘫痪甚至人员伤亡。例如:2014年7月17日,国道213线 K774+600 m处突发山体滑坡,塌方量达3 000 m³,造成国道213线约100 m的道路被掩埋阻断^[2];2018年7月26

日,国道213线 K852+600 m处发生山体滑坡,造成交通临时中断^[3]。

山区公路滑坡隐患一般具有高位、高隐蔽性、突发性强等特点^[4],传统地面调查手段无法进行大范围提前识别。利用光学遥感技术可大范围识别出形态特征和变形迹象显著的滑坡^[5]。而采用合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术可获取滑坡地表形变,对目前正在变形的活动滑坡进行识别。其中,差分干涉图叠加(Stacking-InSAR)技术相比于其他 InSAR 技术,能够有效抑制大气效应并减少 DEM 误差的影响,快速获取地表形变速率,被广泛应用于滑坡隐患的早期识别^[5]。光学遥感和 InSAR 技术的结

收稿日期: 2022–05–20; 修订日期: 2022–07–13。

基金项目: 中华人民共和国科学技术部国家重点研发计划课题“重大崩塌灾害危险源识别指标体系研究(编号: 2021YFC3000401)”、国家自然科学基金委员会川藏铁路专项“川藏铁路重大灾害风险识别与预测(编号: 41941019)”、中国电力建设股份有限公司科技项目“金沙江上游河段大型滑坡致灾机制与风险防控研究(编号: DJ-ZDXM-2020-03)”联合资助。

第一作者简介: 黄艳琴(1995—),女,硕士研究生,主要从事地质灾害隐患早期识别研究工作。Email: 1614296544@qq.com。

通信作者简介: 李为乐(1982—)男,教授,主要从事地质灾害隐患早期识别与监测研究工作。Email: liweile08@mail.cdut.edu.cn。

合可提高滑坡隐患识别的准确性。

滑坡易发性是对滑坡空间发生概率的定量评价^[6]。随着遥感技术的发展,国内外学者依托遥感技术对滑坡易发性评价开展了大量研究工作,评价方法也由定性评价转为定量评价。常见滑坡易发性定量评价模型有 Logistic 回归模型、随机森林模型、支持向量机模型、信息量模型、神经网络模型等^[7]。

国道 213 汶川—松潘段位于强震山区,构造活动强烈,滑坡灾害频发,造成公路被堵断或损毁,影响公路交通的正常运营。本文以国道 213 汶川—松潘段为研究区,结合光学遥感技术和 Stacking-InSAR 技术识别研究区滑坡隐患,并采用 Logistic 回归模型进行易发性评价,为提前预防研究区山体滑坡,保障国道 213 线安全运行,并为我国公路规划建设、防灾减灾提供理论参考和技术支撑。

1 研究区概况

国道 213 汶川—松潘段位于四川强震山区,自四川省汶川县映秀镇开始,途径茂县,向北延伸至松潘县川主寺镇,总长约 230 km(图 1)。研究区整

体地势北西高、南东低,海拔在 800 ~ 4 700 m 之间,相对高差 500 ~ 1 200 m,属于中 - 高山地貌。岷江是研究区内的主要水系,由南向北贯穿全境,受内部水动力和外部地质作用的影响,岷江河床不断向下深切,形成了如今的高山峡谷地貌。受高海拔西北风气流和印度洋西南季风的影响,研究区呈现青藏高原季风气候特点,冬季干冷,夏季湿润凉爽,日照量大,气温日差大、年差小。研究区内地质构造活动强烈,主要发育的断层有龙门山断裂带、岷江断裂带、虎牙断裂带、松坪沟断层、汶川—茂汶断层、较弧场构造等^[8],2008 年汶川 Ms 8.0 级地震和 2017 年九寨沟 Ms 7.0 级地震均造成研究区公路不同程度的损毁。区内出露地层有新元古界震旦系,古生界寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系,中生界三叠系以及新生界第四系,岩体质量较差、结构破碎。

2 滑坡隐患综合遥感识别

2.1 光学卫星遥感识别

利用 2022 年 2 月获取的高分 2 号卫星影像和 Google Earth 在线三维卫星影像数据,采用人工目视解译方法。光学遥感识别的滑坡隐患类型主要分为 2 类:已发生整体失稳的老(古)滑坡隐患和正在变形的潜在滑坡隐患^[9]。不同滑坡隐患类型的识别标志不同:对于已经发生过整体失稳的古(老)滑坡,主要基于形态特征进行识别,整体平面形态呈圈椅状或舌形,后缘可见滑坡壁,前缘可见滑坡舌挤压河流,滑坡体上有群居居民或耕地^[10](图 2);对于正在变形的潜在滑坡隐患,主要识别变形迹象特征明显的区域,识别标志是坡体裂缝的形成过程以及前缘是否出现局部垮塌现象,针对这一类型滑坡隐患的识别,相对快速有效的方法是充分收集多时相光学遥感影像,通过对比不同时期的遥感影像特征解译滑坡隐患,从而提高遥感识别滑坡隐患的准确性(图 3)。

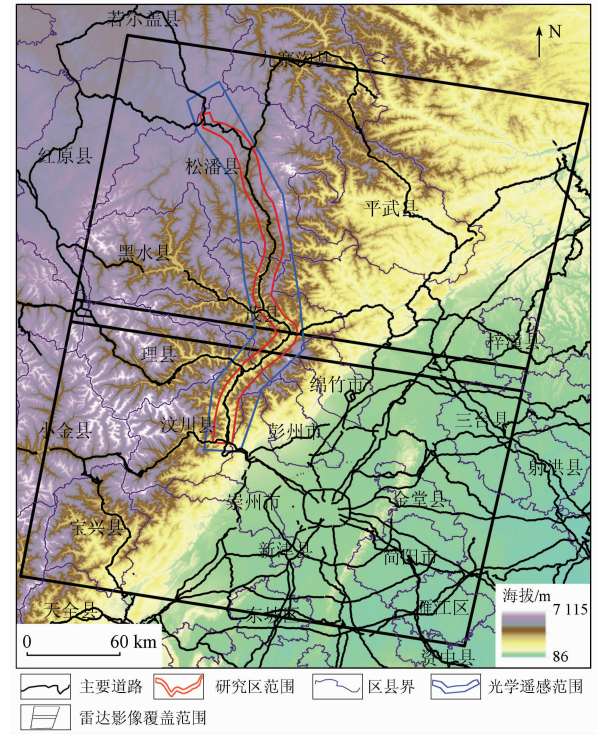


图 1 研究区位置和影像覆盖范围

Fig.1 Location of the study area and coverage of radar satellite images

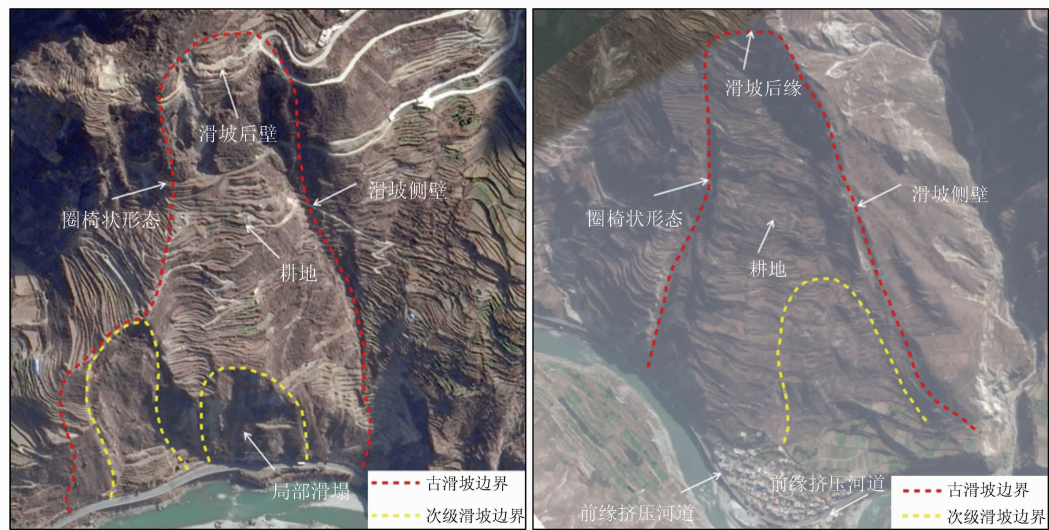


图 2 典型老(古)滑坡隐患卫星影像(左)与 Google Earth 卫星影像(右)

Fig. 2 Satellite images of typical old landslide hazard (left) and Google Earth satellite image (right)

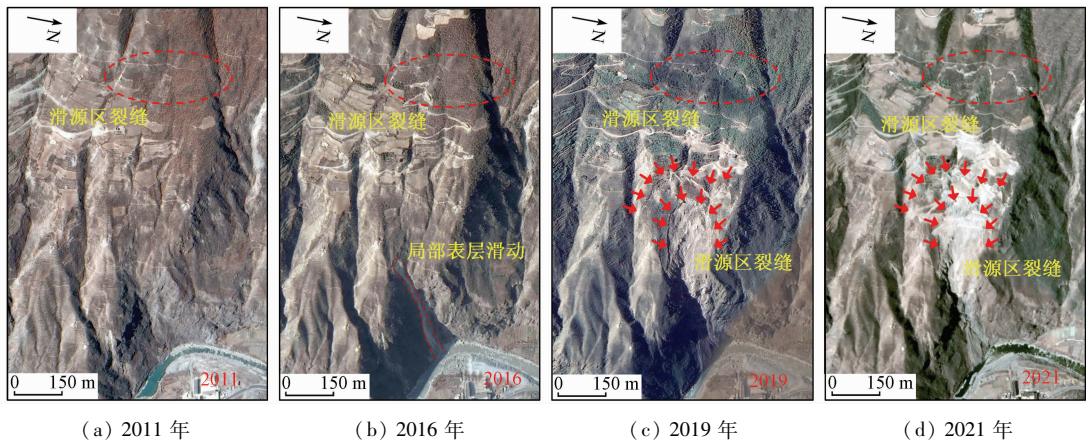


图 3 正在变形的滑坡隐患卫星影像

Fig. 3 Satellite images of landslide hazard under deformation

2.2 时序 InSAR 技术活动滑坡探测

InSAR 技术是一种监测地表缓慢形变的遥感技术^[11],具有全天候、全天时、精度高、周期性重复观测等优点。本文选取 2017 年 1 月至 2021 年 12 月覆盖研究区域的 288 景 Sentinel-1A 降轨数据,采用 Stacking-InSAR 技术对研究区活动滑坡进行探测。

2.2.1 Stacking-InSAR 技术原理

Stacking-InSAR 技术由 Price 等^[12]提出,其基本理论为:假设地形相位误差、大气延迟相位误差等具有随机性,联合多期解缠后的差分干涉相位图建立形变速率和干涉相位间的线性函数模型,从而监测时间段的线性形变速率。利用该技术可以削弱 InSAR 技术中存在的随机轨道误差、大气延迟相

位误差和地形误差等的影响,提高形变计算精度。Stacking-InSAR 技术的计算方法可表示为^[13]

$$V = -\frac{\lambda}{4\pi} \frac{\sum_{i=1}^M \varphi_i}{\sum_{i=1}^M t_i} \quad (1)$$

式中: V 为雷达卫星视线方向平均形变速率, mm/a; λ 为波长, m; φ_i 为第 i 个解缠后的差分干涉相位; M 为干涉图数量; t_i 为第 i 个差分干涉相位的时间间隔, d。

相应的误差传播公式为

$$\Delta V_{\text{disp}} = \frac{\lambda \cdot \sqrt{M} \cdot E}{4\pi \cdot \sum_{i=1}^M t_i} \quad (2)$$

式中： ΔV_{disp} 为雷达卫星视线方向形变速率误差值，mm/a； E 为假定的单幅干涉图相位误差； M 为干涉图数量； λ 为波长，m； t_i 为第 i 个差分干涉相位的时间间隔，d。

2.2.2 Stacking – InSAR 技术处理流程

通过 Stacking – InSAR 技术获取研究区地表形变速率图，可以大面积探测活动滑坡隐患。运用该技术首先对 SAR 影像数据进行处理，之后选取主从影像并配准生成干涉图。结合外部 DEM 与卫星成像参数，将 DEM 和 SAR 影像精确配准，并将 DEM 数据编码到 SAR 影像坐标系，生成差分干涉图。对差分干涉图进行空间滤波和相位解缠处理，解缠相位加权叠加后生成地表形变速率图。通过地表形变速率图筛选形变区域，从而确定滑坡隐患位置并识别滑坡隐患，数据处理流程见图 4。

2.3 野外调查验证

结合现场调查与无人机航摄技术进行滑坡野外调查验证，主要工作包括判断室内解译的滑坡隐患是否为滑坡、滑坡边界的圈定是否正确并判定滑

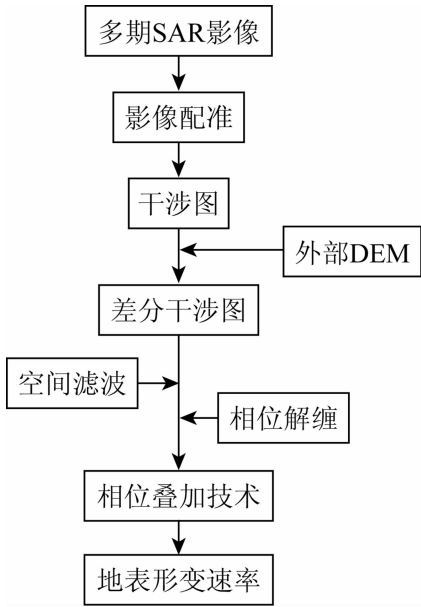


图 4 Stacking – InSAR 处理流程示意图
Fig. 4 Stacking – InSAR processing flow chart

坡类型；查明坡体裂缝的发育情况，如位置、方向、深度、宽度等（图 5）。研究区共验证滑坡点 185 处，占滑坡总数的 59.7%。其中有 163 处属于滑坡，排除滑坡 22 处，野外验证正确率为 88.1%。



(a) 滑坡隐患边界范围



(b) 坡体变形及裂缝发育调查

图 5 滑坡隐患野外验证
Fig. 5 Field verification of landslide hazard

2.4 滑坡隐患识别结果

利用光学卫星影像共识别滑坡隐患 308 处，基于 InSAR 技术共探测出活动滑坡隐患 27 处。活动滑坡主要集中分布于汶川—茂县段，其中 25 处为光学卫星遥感与 InSAR 技术共同识别，另外 2 处（B4、B16）为 InSAR 技术单独识别（图 6、图 7）。野

外验证排除滑坡隐患 22 处，最终研究区共识别滑坡隐患 288 处（图 8）。其中，汶川—茂县段滑坡隐患发育较多，分布较密集，该区域内地质构造活动强烈，地层岩性差异大，岩体结构较破碎，受公路或河流切割明显，临空条件较好。在地震或恶劣天气条件诱发作用下，发生滑坡的可能性增大。

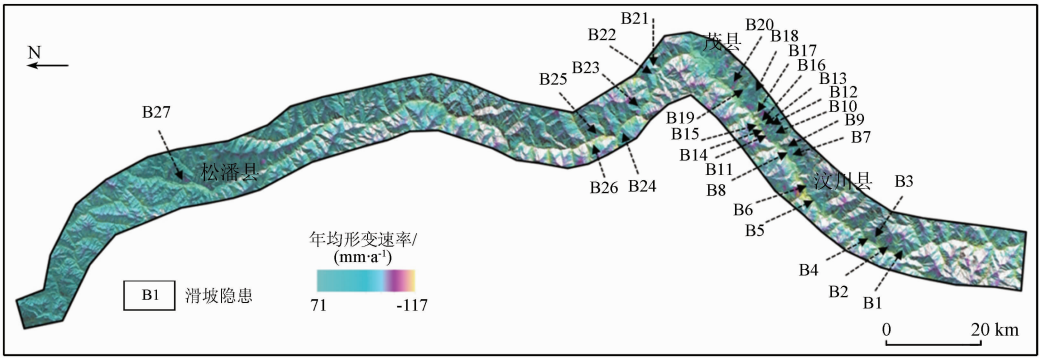


图 6 基于 Stacking – InSAR 技术的活动滑坡隐患形变探测

Fig.6 Landslide deformation detected by Stacking – InSAR technology

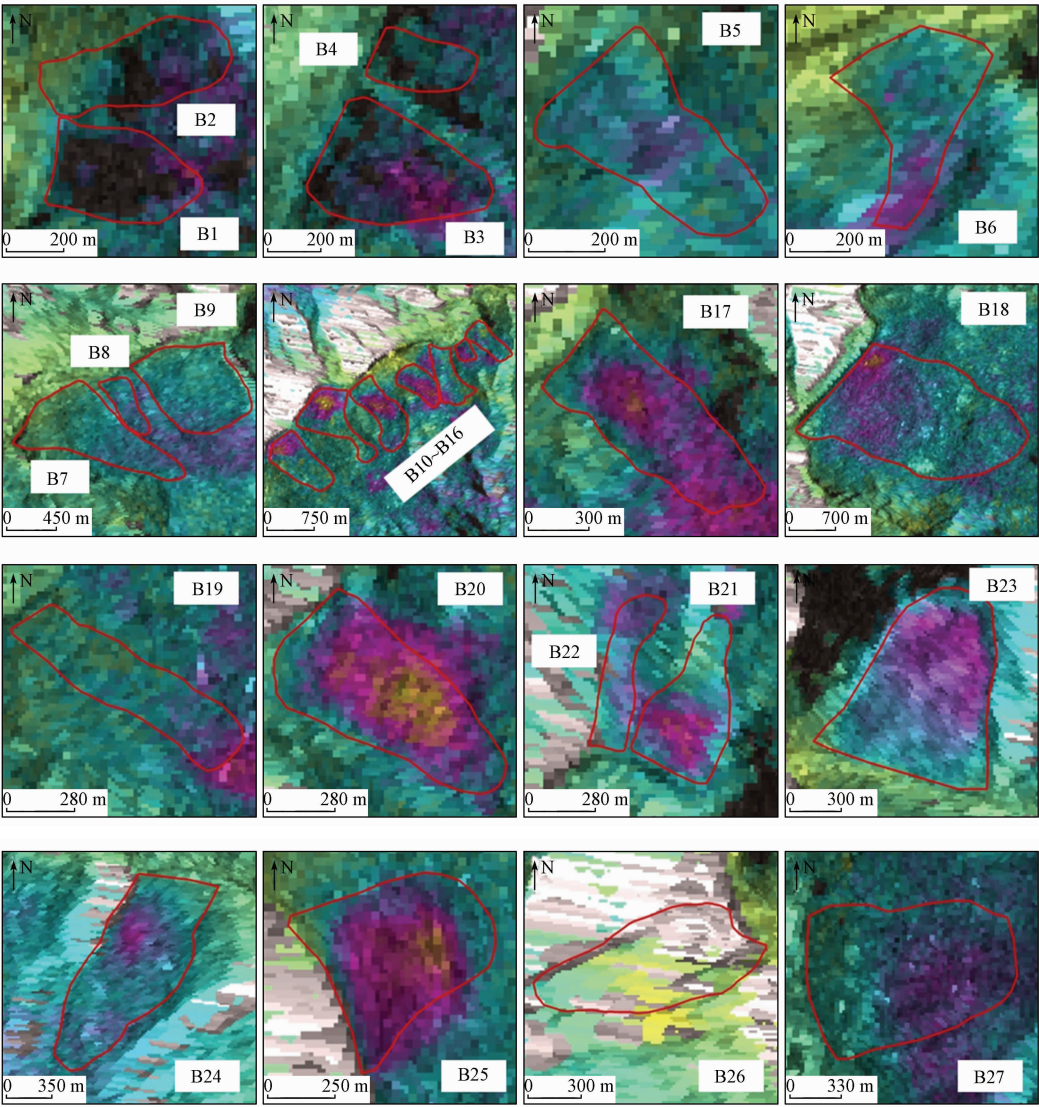


图 7 Stacking – InSAR 技术探测滑坡隐患放大效果图

Fig. 7 Landslide amplification effect map by Stacking – InSAR technology

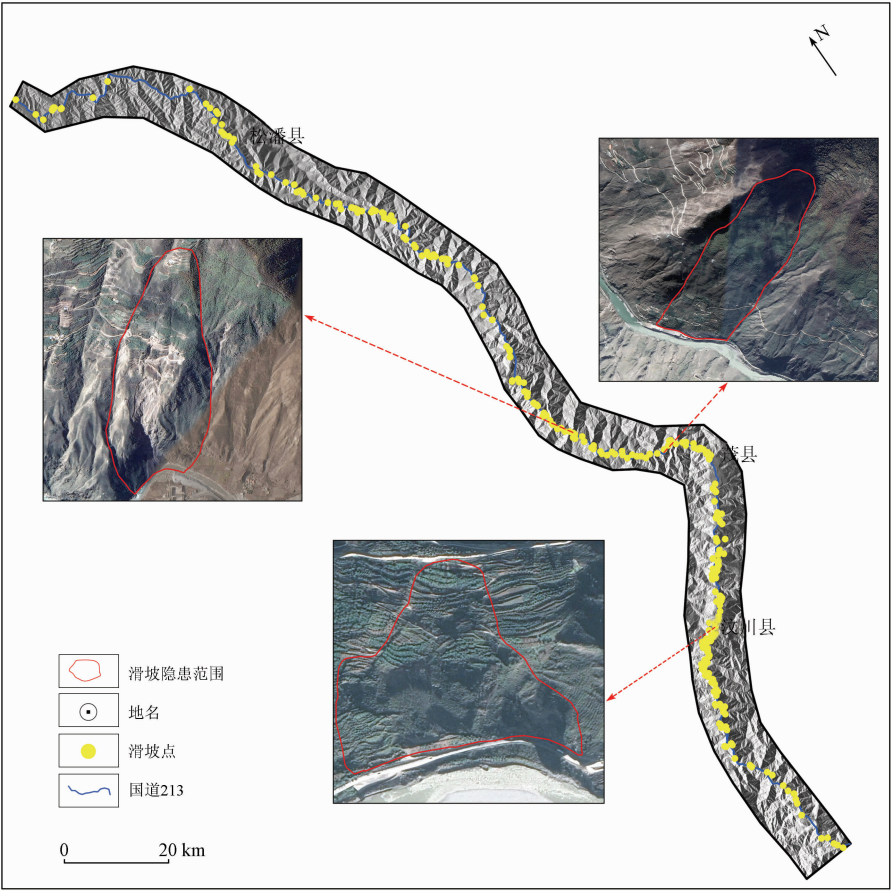


图 8 研究区滑坡隐患分布

Fig. 8 Distribution of landslide hazard in the study area

3 滑坡易发性评价

3.1 评价因子的选取

通常易发性评价因子体系主要由内在因素和外在因素两部分构成^[14]。内在因素一般侧重于斜坡本身的岩土体性质或地形地貌条件,其中地形地貌包括斜坡坡度、坡向和坡高等,岩土体性质包括地层岩性、斜坡及其周围环境的地质构造等。外在因素则被定义为除斜坡本身成灾环境条件之外诱发滑坡发生的因素,即外部环境条件对滑坡的影响,一种是自然环境的诱发因素,如地震或降雨;另一种是人类工程活动的诱发因素,如交通建设、城镇建设、水利水电工程建设等。

根据上述对易发性评价因子体系的分析以及对研究区滑坡特点、分布规律、影响因素等的研究,选取高程、坡度、坡向、地表曲率、工程地质岩组、归一化植被指数(normalized difference vegetation in-

dex, NDVI)、距道路距离、距河流距离以及距断层距离共计 9 个评价因子,对研究区进行了滑坡易发性评价。

3.2 评价因子数据来源

评价因子数据来源主要分为 4 类: DEM 数据来源于 30 m GDEM V2 数字高程数据(地理空间数据云),用于提取高程、坡度、坡向、地表曲率因子;地质数据来源于 1:20 万地质图,用于获取岩性与断层分布;水文数据来源于 1:20 万地质图,主要提取河流与道路矢量;NDVI 数据来源于 2020 年 12 月 2 日的全球植被覆盖 Landsat 8 卫星影像数据。

3.3 评价单元的确定

研究区采用的评价单元为栅格单元,栅格单元是滑坡易发性评价中应用最广泛的评价单元,把研究区按照一定尺寸划分为规则的网格,具有计算机处理方便、可操作性强等优点。栅格单元划分的大小由多种因素决定,常用专家经验公式求取^[15]。同时,需综合考虑研究区地貌特征以及归一化植被

指数栅格数据的空间分辨率,因此研究区采用的栅格单元大小为 30 m×30 m,共划分出 2 759 358 个栅格单元。公式为

$$G_s = 7.49 + 6 \times 10^{-4} \times S - 2.0 \times 10^{-6} + 2.9 \times 10^{-15} \times S^2。$$
 (3)

式中: G_s 为栅格单元建议大小; S 为高程数据的比例尺倒数,高程数据比例尺为 1:50 000。

3.4 评价因子分级

分析各评价因子对滑坡发育的影响,统计各评价因子类别中滑坡发育的数量(图 9),从而对各评价因子进行分级。

(1)高程。高程反映区域的宏观地貌特征,表现为岩土体特征和地下水性质的差异,从而间接影响滑坡的发育条件。研究区处于中—高山区,海拔

在 828~4 694 m 之间,将高程按 300 m 等间距分为 10 个区间,统计分析各区间内滑坡的分布。结果表明,滑坡在[1 300,1 600) m 区间分布比较集中,该区间内滑坡较发育,易发性贡献率大,而在高程<1 300 m 和≥3 400 m 区间滑坡发育相对最弱,易发性贡献率小。根据滑坡在研究区高程的发育程度,将研究区高程分为:<1 300 m、[1 300,1 600) m、[1 600,2 500) m、[2 500,2 800) m、[2 800,3 400) m 以及≥3 400 m 共 6 个区间。

(2)坡度。斜坡的应力分布受坡度的影响,坡度大小不同,则斜坡的应力与稳定性不同。研究区坡度在 0°~87°之间,为了更好地分析滑坡在不同坡度范围内的发育数量和分布情况,将研究区的坡度因子以等间距 5°划分为 11 个坡度区间。分析结果显示,滑坡在[35°,45°)区间内分布比较集中,该

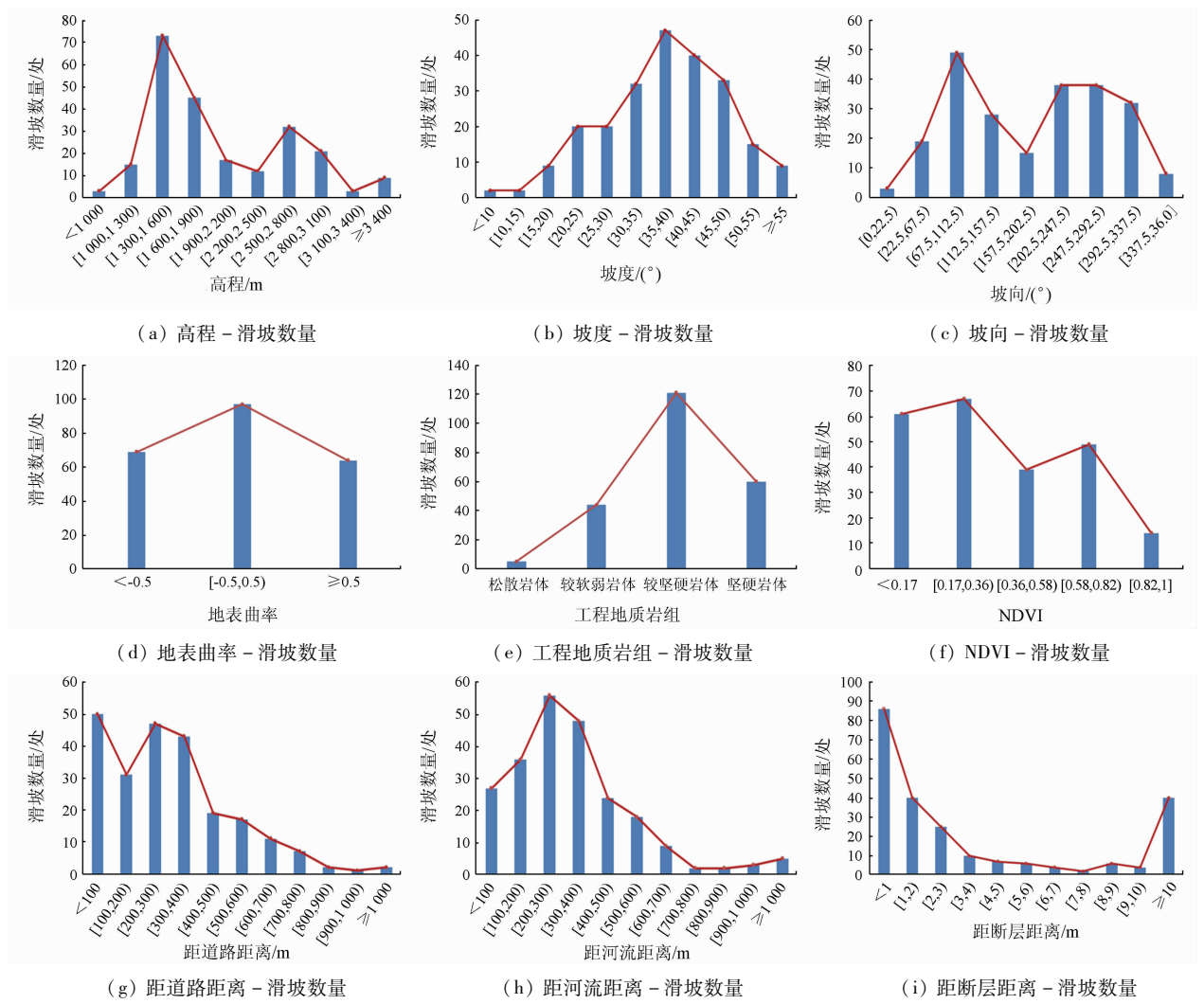


图 9 评价因子与滑坡数量关系

Fig. 9 Relationship between evaluation factors and landslide quantity

坡度区间滑坡较发育,易发性贡献率大,而坡度在 $<20^\circ$ 和 $\geq 50^\circ$ 区间内滑坡分布较稀疏,滑坡不发育,易发性贡献率小。根据滑坡在研究区坡度的分布情况,将研究区坡度分为 $<20^\circ$ 、 $[20^\circ, 30^\circ)$ 、 $[30^\circ, 40^\circ)$ 、 $[40^\circ, 50^\circ)$ 以及 $\geq 50^\circ$ 共 5 个区间。

(3) 坡向。坡向是日照时数和太阳照射强弱的客观反映^[16]。研究区坡向在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间,将其按方位划分为 8 个方位向,并统计滑坡在各方位向的数量和分布情况。分析统计结果可知,研究区东朝向 $[67.5^\circ, 112.5^\circ)$ 、西南向 $[202.5^\circ, 247.5^\circ)$ 以及南朝向 $[247.5^\circ, 292.5^\circ)$ 滑坡分布较为密集,易发性贡献率较大,而坡向 $[0, 22.5^\circ)$ 与 $[337^\circ, 360^\circ)$ 区间的滑坡分布少,易发性贡献率相对最低。根据滑坡在各朝向的分布情况,将研究区坡向划分为 $[0^\circ, 67.5^\circ)$ 、 $[67.5^\circ, 112.5^\circ)$ 、 $[112.5^\circ, 202.5^\circ)$ 、 $[202.5^\circ, 247.5^\circ)$ 、 $[247.5^\circ, 337.5^\circ)$ 以及 $\geq 337.5^\circ$ 共 6 个区间。

(4) 地表曲率。地表曲率的大小指示了斜坡的形态特征。在不同斜坡形态条件下,滑坡的发生具有一定的差异性。根据滑坡发育形态特征进行分类:地表曲率 < -0.5 为凹型坡,地表曲率 $[-0.5, 0.5)$ 的为直线型坡,地表曲率 ≥ 0.5 为凸型坡。

(5) 工程地质岩组。斜坡稳定性受自身物质组成的影响,物质组成不同,岩土体的物理参数不同,则岩土体的物理性质不同。研究区岩组的分类标准参考《GB 50218—2014 工程岩体分级标准》^[17],共分为 4 个等级,分别为松散岩体、较软弱岩体、较坚硬岩体和坚硬岩体。统计分析各类岩组中的滑坡发育数量,可知松散岩体中滑坡数量最少,相对最不发育;较坚硬岩体和坚硬岩体中滑坡发育最多,可能与岩体遭受风化剥蚀有关,风化越严重,岩体破碎程度越明显,斜坡越不稳定,发生滑坡灾害的可能性越大。

(6) 归一化植被指数。植被对滑坡发生的影响主要表现为植被的根茎深入地底,可以起到根固的作用,还可以缓冲坡面水流流速,从而极大程度地减少山体水流对坡面的破坏,减少滑坡灾害的发生。NDVI 能反映某一区域内植被的覆盖程度,利用 Landsat8 遥感影像求取 NDVI,计算公式为^[18]

$$NDVI = (IR - R) / (IR + R) \quad (4)$$

式中: IR 为近红外波段; R 为红外波段。NDVI 的取值区间为 $[-1, 1]$, 其值越大表示植被覆盖程度越高,生长状况良好。结合研究植被分布规律,本研究采用自然间断法,将 NDVI 划分为 <0.17 、 $[0.17, 0.36)$ 、 $[0.36, 0.58)$ 、 $[0.58, 0.82)$ 以及 $[0.82, 1]$ 共 5 个区间。

(7) 距道路距离。在道路建设过程中,坡脚开挖、坡顶荷载等人类工程活动会不同程度地破坏岩土体完整性和天然状态下的自然结构。按照 100 m 间距划分出 11 个区间,得出距道路距离与滑坡数量的关系。在距道路 100 m 范围内滑坡分布最多,道路对滑坡发生的影响最大。根据滑坡在不同距道路距离的分布情况,将研究区划分为 <100 m、 $[100, 200)$ m、 $[200, 300)$ m、 $[300, 500)$ m 以及 ≥ 500 m 共 5 个区间。

(8) 距河流距离。河流掏蚀作用会使岩体产生裂缝,越靠近河流的岩土体含水率越大,抗剪强度降低,斜坡稳定性随之降低。以 100 m 为间隔将距河流距离划分为 11 个区间,统计各区间的滑坡发育情况。分析表明,滑坡主要集中分布在距河流距离 300 m 的范围内,而距离河流大于 800 m 的区域滑坡总体发育较少。通过分析滑坡发育数量及分布与河流距离的关系,将研究区距河流距离划分为 <100 m、 $[100, 300)$ m、 $[300, 500)$ m、 $[500, 800)$ m 以及 ≥ 800 m 共 5 个区间。

(9) 距断层距离。区域构造活动的强烈程度会影响节理裂隙发育和岩土体结构,可直接或间接影响滑坡的形成和破坏。以 1 km 为缓冲间隔将研究区的距断层距离划分为 11 个区间,统计分析各缓冲区域内滑坡的发育数量。结果表明,在 $[0, 1)$ km 区间内滑坡相对最发育,而在 $[2, 8)$ km 区间滑坡发育数量呈现逐步降低趋势,当距断层距离 ≥ 10 km 时,滑坡发育数量呈增长模式,由于研究区区域的形状较长,断层分布跨度大,在此区间内断层相对集中,滑坡发育数量增多。统计不同断层缓冲区内滑坡的数量,将研究区断层缓冲区划分为 <1 km、 $[1, 2)$ km、 $[2, 4)$ km、 $[4, 10)$ km 以及 ≥ 10 km 共 5 个区间。

3.5 评价模型

3.5.1 Logistic 回归模型

Logistic 回归模型是一种预测性建模技术,其

基本原理为利用回归分析方法研究因变量(目标)与自变量(预测器)之间的关系,由一个或多个滑坡影响因素(自变量)来判定一个滑坡(自变量)是否发生(0 或 1)的概率^[19-20]。Logistic 回归函数表达式为

$$Y = \text{Logit}(P) = \ln [P/(1 - P)] = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \cdots B_nX_n \quad (5)$$

$$P = 1/(1 - \exp(-Y)) \quad (6)$$

式中: Y 为二元值(0 或 1),表示滑坡发生与否,发生 $Y = 1$,不发生 $Y = 0$; P 为滑坡发生概率; $X_1, X_2, \cdots, X_n$ 为各评价因子; B_0 为常量,取值 -10.756 ; $B_1, B_2, \cdots, B_n$ 为各评价因子回归系数。

本文选取 Ayalew^[21]提出的评价因子量纲归一化方法获取归一化值。计算公式为

$$W_{ij} = S_{ij}^z/S_{ij} \quad (7)$$

$$M_{ij} = W_{ij}/\sum_{j=1}^m W_{ij} \quad (8)$$

式中: S_{ij} 和 S_{ij}^z 分别为评价因子下的分级区间面积和滑坡面积; W_{ij} 为 S_{ij}^z 和 S_{ij} 的比值; M_{ij} 为评价因子的归一化值。各评价因子的归一化结果见表 1。

表 1 评价因子分级和因子归一化值

Tab. 1 Grading and normalization of evaluation factor					
评价因子	因子分级	S_{ij}^z/km^2	S_{ij}/km^2	W_{ij}	M_{ij}
高程	< 1 300 m	1.464	61.506	0.024	0.211
	[1 300, 1 600) m	7.381	143.005	0.052	0.457
	[1 600, 2 500) m	14.538	710.411	0.020	0.181
	[2 500, 2 800) m	3.313	286.770	0.012	0.102
	[2 800, 3 400) m	3.846	755.989	0.005	0.045
	$\geq 3\ 400$ m	0.086	525.738	0.000	0.001
坡度	< 20°	5.385	401.807	0.013	0.220
	[20°, 30°)	9.120	682.284	0.013	0.220
	[30°, 40°)	9.671	837.629	0.012	0.190
	[40°, 50°)	5.158	443.041	0.012	0.191
	$\geq 55^\circ$	1.293	118.661	0.011	0.179
坡向	[0°, 22.5°)	4.698	418.685	0.011	0.156
	[22.5°, 112.5°)	4.427	313.880	0.014	0.196
	[112.5°, 202.5°)	3.750	626.467	0.006	0.083
	[202.5°, 247.5°)	4.339	320.897	0.014	0.188
	[247.5°, 337.5°)	12.098	655.020	0.018	0.257
	$\geq 337^\circ$	1.284	143.555	0.009	0.124
地表 曲率	< -0.5	7.675	693.828	0.011	0.299
	[-0.5, 0.5)	14.173	1 071.537	0.013	0.357
	≥ 0.5	8.779	718.057	0.012	0.330

(续表)					
评价因子	因子分级	S_{ij}^z/km^2	S_{ij}/km^2	W_{ij}	M_{ij}
工程地质岩组	松散岩体	0.471	29.797	0.016	0.304
	较软弱岩体	6.080	421.116	0.014	0.278
	较坚硬岩体	19.101	1 464.630	0.013	0.251
	坚硬岩体	4.968	569.552	0.009	0.168
NDVI	< 0.17	6.593	802.214	0.008	0.125
	[0.17, 0.36)	7.145	587.581	0.012	0.181
	[0.36, 0.58)	7.097	407.890	0.017	0.264
	[0.58, 0.82)	6.287	348.445	0.018	0.273
	[0.82, 1]	3.506	325.593	0.011	0.163
距道路距离	< 100 m	3.181	60.353	0.053	0.205
	[100, 200) m	4.112	60.273	0.068	0.265
	[200, 300) m	4.189	62.168	0.067	0.262
	[300, 500) m	7.102	111.732	0.064	0.247
	≥ 500 m	12.044	2 188.875	0.006	0.021
距河流距离	< 100 m	3.399	104.659	0.032	0.233
	[100, 300) m	8.058	196.316	0.041	0.294
	[300, 500) m	7.838	194.169	0.040	0.289
	[500, 800) m	6.030	265.799	0.023	0.162
	≥ 800 m	5.302	1 722.458	0.003	0.022
距断层距离	< 1 km	8.554	486.823	0.018	0.293
	[1, 2) km	4.309	342.610	0.013	0.210
	[2, 4) km	3.584	374.387	0.010	0.160
	[4, 10) km	3.302	455.369	0.007	0.121
	≥ 10 km	10.878	824.212	0.013	0.220

3.5.2 Logistic 回归模型的构建

建立逻辑回归模型的步骤如下:

(1) 将研究区矢量滑坡分布图转为栅格图层,发生滑坡的区域赋值为 1,未发生滑坡的区域赋值为 0。

(2) 根据所求的归一化值,分别将 9 个评价因子图栅格化。

(3) 在研究区域范围内,随机选取 230 个滑坡点(占总滑坡点的 80%),将剩余的 58 个滑坡点(占总滑坡点的 20%)作为本次评价的检验点。同时,借助 ArcGIS 软件中的随机点生成工具,在研究区范围内,排除滑坡点以相同的点间距 500 m 生成随机点,创建与滑坡点数量相同的 230 个非滑坡点,共 460 个点作为本次评价的总样本点。

(4) 将步骤(1)和步骤(2)中的值赋在 460 个样本点上,得到样本点属性表,将其导入 SPSS 软件中,利用回归分析工具进行总样本点的逻辑回归分析,得出回归分析结果(表 2)。

表 2 Logistic 回归分析结果

Tab. 2 Logistic regression analysis results

评价因子	回归系数	标准误差	Wals 值	显著性
高程	5.423	0.764	10.013	0.007
坡度	8.153	1.029	37.521	0.000
坡向	5.624	1.328	15.097	0.003
地表曲率	3.334	1.202	5.305	0.016
工程地质岩组	6.603	1.354	13.482	0.001
归一化植被指数	1.621	1.805	2.135	0.032
距道路距离	5.025	1.530	9.522	0.009
距河流距离	2.329	0.407	4.229	0.021
距断层距离	4.069	1.018	6.128	0.013
常数项	-10.756	0.786	48.763	0.000

将各因子回归系数代入式(5)和式(6),建立 Logistic 回归模型为

$$P = 1 / [\exp(-10.756 + 5.423a + 8.153b + 5.624c + 3.334d + 6.603e + 1.621f + 5.025g + 2.329h + 4.069i)]$$
 (7)

式中: P 为滑坡发生概率,取值范围为 $0 \sim 1$; a 为高程因子归一化值; b 为坡度因子归一化值; c 为坡向因子归一化值; d 为地表曲率因子归一化值; e 为工程地质岩组因子归一化值; f 为 NDVI 因子归一化值; g 为距道路距离因子归一化值; h 为距河流距离因子归一化值; i 为距断层距离因子归一化值。

3.6 评价结果与分析

建立逻辑回归模型后,利用 ArcGIS 的栅格计算器工具,将各评价因子回归系数的栅格图层进行叠加运算,得到研究区滑坡灾害易发性概率,概率区间为 $[0.008, 0.963]$,采用自然断点法^[22],按照易发性程度将易发性概率进行分级,可分为极低易发区 $[0.008, 0.176)$ 、低易发区 $[0.176, 0.323)$ 、中等易发区 $[0.323, 0.481)$ 、高易发区 $[0.481, 0.688)$ 、极高易发区 $[0.688, 0.963]$ 共 5 级,采用重分类生成研究区滑坡易发性等级分区,结果如图 10 所示。

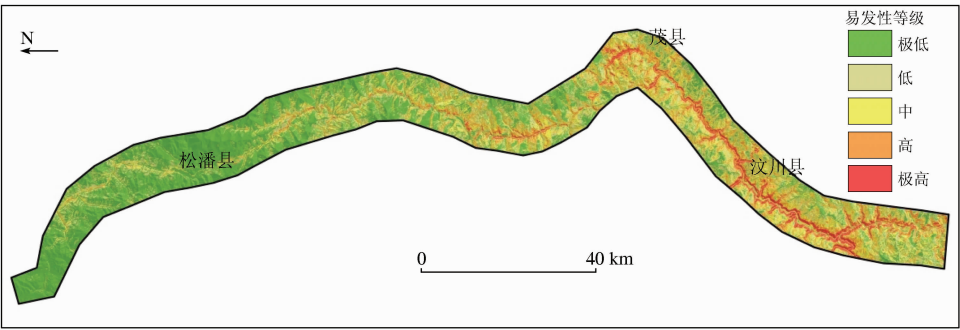


图 10 研究区滑坡易发性等级分区

Fig. 10 Vulnerability level partition of landslides in the study area

由图 11 可知,国道 213 汶川—松潘段滑坡分布特征如下: ①极高易发区和高易发区主要集中分布在汶川县映秀镇至茂县石大关乡一带,该区域地势陡峭,斜坡坡度较大,岩体破碎,易发生滑坡灾害。其中,极高易发区面积约 106.75 km^2 ,占研究区总面积的 4.31% ,发育滑坡 92 处,滑坡点密度为 0.862 处/km^2 ; 高易发区面积约 505.25 km^2 ,占研究区总面积的 12.15% ,发育滑坡 54 处,滑坡点密度为 0.179 处/km^2 ; ②滑坡的中易发区面积约 492.54 km^2 ,占研究区总面积的 19.83% ,发育滑坡 37 处,滑坡点密度约为 0.075 处/km^2 ; ③低易发区和极低易发区主要集中在茂县石大关乡以北至松潘县城一带。其中,低易发区面积约 505.25 km^2 ,占研究区总面积的 20.34% ,发育滑坡 25 处,滑坡点密度为 0.049 处/km^2 ; 极低易发区面积约 $1\,077.23 \text{ km}^2$,占研究区总面积的 43.38% ,发育滑坡 22 处,滑坡点

密度为 0.021 处/km^2 。低易发区和极低易发区范围内地势相对平缓,斜坡坡度较小,坡度大部分约 20° ,发生滑坡的可能性较小。

由分析结果可知: 随着滑坡易发性等级的升高,易发性面积占研究区总面积的比例减少,发育滑坡数量增加,因而滑坡点密度不断增大,说明易发性分区是合理的。

3.7 评价结果检验

3.7.1 显著性检验

Logistic 回归模型显著性检验指的是因变量与自变量之间相关关系的检验。采用 Wald 检验法^[23],若各评价因子的显著性均小于 0.05 ,表示自变量通过 95% 的显著水平检验,即逻辑回归模型的检验效果好^[20-22]。从表 2 可知,各评价因子显著性均小于 0.05 ,自变量通过了 95% 的显著水平检验,模型显著性较高。

3.7.2 精度检验

易发性评价结果精度可以采用受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve,ROC)进行检验^[24]。ROC 曲线是依据多种不同种类的二分类方式,以敏感度为纵坐标,以 1 - 特异度为横坐标绘制的曲线,表示敏感度和特异的相互关系。ROC 曲线利用曲线下面积(the area under the ROC curve,AUC)来评定评价结果的精度,AUC 的取值范围为[0.5,1],其值越大,检验越具有价值,评价结果的精度越高。检验结果得出 AUC 值为 0.837,表明评价结果的精度较高,说明采用逻辑回归模型对国道 213 汶川—松潘段滑坡易发性进行评价是较为客观准确的(图 11)。

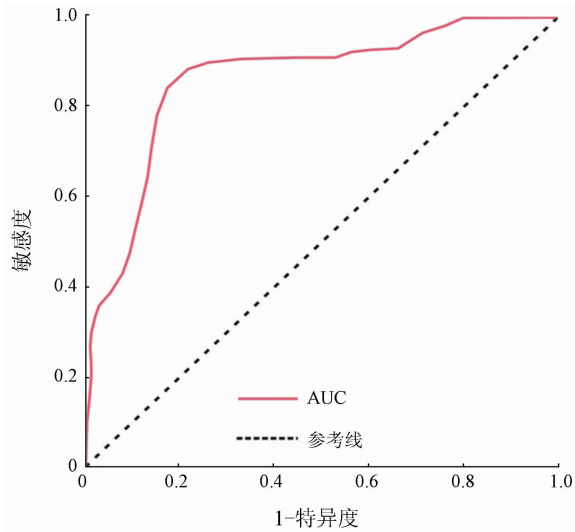


图 11 Logistic 回归模型的 ROC 曲线
Fig. 11 ROC curve of logistic regression model

5 结论

本文以国道 213 汶川—松潘段为研究区,综合运用光学卫星遥感与 InSAR 变形探测技术,结合统计分析 with 逻辑回归评价方法,开展研究区滑坡隐患综合遥感识别和易发性评价研究,得出以下结论:

(1)采用光学遥感和 InSAR 变形观测技术对研究区进行滑坡隐患识别,共识别出滑坡隐患 288 处,其中 InSAR 技术探测出活动滑坡 27 处,说明综合遥感识别技术在该研究区具有较好的识别效果。

(2)极高易发区和高易发区主要集中分布在汶川—茂县一带,总面积约 612 km²; 极低易发区和低易发区主要集中在茂县以北至松潘一带,总面积

约 1 582 km²。同时,采用 ROC 曲线进行易发性结果精度分析,AUC 值为 0.837,表明评价结果的精度较高,说明采用 Logistic 回归模型对国道 213 汶川—松潘段滑坡隐患进行易发性评价是较为客观准确的。

(3)分析 9 个评价因子的逻辑回归系数,结果表明坡度、高程、坡向、距道路距离 4 个评价因子对国道 213 汶川—松潘段滑坡易发程度的贡献相对较大,其中坡度[35°,45°)、高程[1 300,1 600) m、坡向[67.5°,112.5°)、距道路距离 < 100 m 是滑坡最容易发生的地区。

参考文献 (References):

[1] 郝大力,王海燕,刘蕾蕾,等. 我国农村公路网合理发展规模研究[J]. 交通运输研究,2022,8(1):2-11.
Hao D L, Wang H Y, Liu L L, et al. Rational development scale of rural highway network in China[J]. Transport Res, 2022, 8(1): 2-11.

[2] 中新网. 四川茂县石大关乡发生山体塌方 已致 4 死 7 伤[EB/OL]. (2014-07-17) [2022-04-10]. <https://www.chinanews.com.cn/gn/2014/07-17/6398701.shtml>.
China News Service Website. 4 dead and 7 injured in landslide in Shidaguan Township, Maoxian County, Sichuan[EB/OL]. (2014-07-17) [2022-04-10]. <https://www.chinanews.com.cn/gn/2014/07-17/6398701.shtml>.

[3] 搜狐新闻. 突发! 国道 213 汶川段塌方 过往车辆需绕行汶川城区[EB/OL]. (2018-07-26) [2022-04-10]. https://www.sohu.com/a/243448949_100034295.
Sohu News. Burst! National Highway 213 Wenchuan Section collapsed vehicles need to detour Wenchuan City[EB/OL]. (2018-07-26) [2022-04-10]. https://www.sohu.com/a/243448949_100034295.

[4] 姚林强. 基于 SBAS-InSAR 技术的兰州地区地表面变特征分析与地质灾害易发性评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
Yao L Q. Analysing Surface Deformation Characteristics and Evaluating Susceptibility of Geological Hazards in Lanzhou Area Based on SBAS-InSAR Technology[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.

[5] 董继红, 马志刚, 梁京涛, 等. 基于时序 InSAR 技术的滑坡隐患识别对比研究[J/OL]. 自然资源遥感, 2022; 1-9. (2022-05-13) [2022-06-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1759.P.20220512.1437.008.html>.
Dong J H, Ma Z G, Liang J T, et al. Comparative study of landslide hidden danger identification based on time-series InSAR technology[J/OL]. Remote Sens Nat Resour, 2022; 1-9. (2022-05-13) [2022-06-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1759.P.20220512.1437.008.html>.

[6] 周超. 集成时间序列 InSAR 技术的滑坡早期识别与预测研

- 究[D]. 武汉:中国地质大学,2018.
- Zhou C. Landslide Identification and Prediction with the Application of Time Series InSAR[D]. Wuhan:China University of Geosciences,2018.
- [7] 陶伟,孙岳. 基于 GIS 滑坡地质灾害易发性评价方法综述[J]. 世界有色金属,2020(21):157-159.
- Tao W, Sun Y. Review on the evaluation methods of landslide geological hazards based on GIS[J]. World Nonferrous Metals, 2020(21):157-159.
- [8] 韩蓓. 基于 GIS 的岷江上游汶川-叠溪河段滑坡灾害危险性评价[D]. 成都:成都理工大学,2014.
- Han B. Landslide Geological Disaster Hazard Assessment in Minjiang River from Wenchuan to Diexi Based on GIS[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology,2014.
- [9] 陆会燕,李为乐,许强,等. 光学遥感与 InSAR 结合的金沙江白格滑坡上下游滑坡隐患早期识别[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2019,44(9):1342-1354.
- Lu H Y, Li W L, Xu Q, et al. Early Detection of landslides in the upstream and downstream areas of the Baige landslide, the Jinsha River based on optical remote sensing and InSAR technologies[J]. Geomatics Inf Sci Wuhan Univ, 2019, 44(9):1342-1354.
- [10] 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.
- Xu Q, Lu H Y, Li W L, et al. Types of potential landslide and corresponding identification technologies[J]. Geomatics Inf Sci Wuhan Univ, 2022, 47(3):377-387.
- [11] 唐尧,王立娟,廖军,等. 基于 InSAR 技术的川西高山峡谷区地质灾害早期识别研究——以小金川河流域为例[J]. 中国地质调查,2022,9(2):119-128.
- Tang Y, Wang L J, Liao J, et al. Research on early identification of geological hazards in high mountain and valley areas of western Sichuan Province based on InSAR technology: A case study of Xiaojinchuan River Basin[J]. Geol Surv China, 2022, 9(2):119-128.
- [12] Price E J, Sandwell D T. Small-scale deformations associated with the 1992 Landers, California, earthquake mapped by synthetic aperture radar interferometry phase gradients[J]. J Geophys Res Solid Earth, 1998, 103(B11):27001-27016.
- [13] Strozzi T, Wegmuller U, Werner C, et al. Measurement of slow uniform surface displacement with mm/year accuracy[C]//IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet; The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Honolulu:IEEE, 2000:2239-2241.
- [14] 廖小平,徐风光,蔡旭东,等. 香丽高速公路边坡地质灾害发育特征与易发性区划[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(5):121-129.
- Liao X P, Xu F G, Cai X D, et al. Development characteristics and susceptibility zoning of slope geological hazards in Xiangli expressway[J]. Chin J Geol Hazard Control, 2021, 32(5):121-129.
- [15] Huo A D, Zhang H X, Zhang L, et al. A Sampled method of classification of susceptibility evaluation unit for geological hazards based on GIS[J]. Appl Math Inf Sci, 2012, 6(1S):19S-23S.
- [16] 李云杰. 藏中联网工程八宿段滑坡灾害风险动态评价[D]. 成都:成都理工大学,2018.
- Li Y J. Landslide Risk Dynamic Evaluation of the Basu Segment of the State Grid in Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50218—2014 工程岩体分级标准[S]. 北京:中国计划出版社,2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB/T 50218—2014 Standard for Engineering Classification of Rock Mass[S]. Beijing: China Planning Press, 2015.
- [18] 吴艳. 基于 NDVI 像元二分模型的汶川县植被覆盖度估算[J]. 科学技术创新, 2020(25):50-52.
- Wu Y. Estimation of vegetation coverage in Wenchuan County based on NDVI pixel bipartite model[J]. Sci Technol Innovation, 2020(25):50-52.
- [19] 孟兆兴. 基于 GIS 的川藏公路鲁朗-通麦段滑坡易发性评价[D]. 邯郸:河北工程大学,2020.
- Meng Z X. Landslide Susceptibility Evaluation of Lulang-Tongmai Section in Sichuan Tibet Highway Based on GIS[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2020.
- [20] 罗路广,裴向军,黄润秋,等. GIS 支持下 CF 与 Logistic 回归模型耦合的九寨沟景区滑坡易发性评价[J]. 工程地质学报, 2021, 29(2):526-535.
- Luo L G, Pei X J, Huang R Q, et al. Landslide susceptibility assessment in Jiuzhaigou scenic area with GIS based on certainty factor and logistic regression model[J]. J Eng Geol, 2021, 29(2):526-535.
- [21] 王荐霖. 岷江上游汶川-松潘河段大型滑坡发育特征及危险性评价[D]. 成都:成都理工大学,2019.
- Wang J L. Research on Development Characteristics and Hazard Assessment of Large-scale Landslide in Minjiang River from Wenchuan to Songpan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.
- [22] Meten M, Bhandary N P, Yatabe R. GIS-based frequency ratio and logistic regression modelling for landslide susceptibility mapping of Debre Sina Area in Central Ethiopia[J]. J Mt Sci, 2015, 12(6):1355-1372.
- [23] Pradhan B. Remote sensing and GIS-based landslide hazard analysis and cross-validation using multivariate logistic regression model on three test areas in Malaysia[J]. Adv Space Res, 2010, 45(10):1244-1256.
- [24] Li W L, Huang R Q, Tang C, et al. Co-seismic landslide inventory and susceptibility mapping in the 2008 Wenchuan earthquake disaster area, China[J]. J Mt Sci, 2013, 10(3):339-354.

Remote sensing identification and susceptibility evaluation of landslide hazards in Wenchuan – Songpan section of National Highway 213

HUANG Yanqin^{1,2}, LI Weile¹, XU Zhou¹, LI Pengfei³, TIE Yongbo⁴

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Sichuan Chengdu 610059, China; 2. Sichuan Emei Mountain 403 Construction Engineering Limited Liability Company, Sichuan Leshan, 614200, China; 3. Guiyang Engineering Corporation Limited of Power China, Guizhou Guiyang 550081, China; 4. Chengdu Geological Survey Center, China Geological Survey, Sichuan Chengdu 610081, China)

Abstract: The Wenchuan – Songpan section of National Highway 213 is located in a mountainous area with strong earthquakes, where the landslide disasters occurred frequently. The traffic in this area is interrupted every year due to landslide disasters, so it is urgent to identify the space distribution of landslide hazards along the line and evaluate the susceptibility. A total of 288 landslide hazards were identified by the optical remote sensing and InSAR integrated remote sensing technology, of which 27 deformation landslide hazards were detected by InSAR. The identified landslide hazards were set as evaluation samples, and 9 influences including elevation, slope, slope aspect, surface curvature, engineering geological rock group, normalized vegetation index (NDVI), distance from road, distance from river, and distance from fault were selected. Besides, the logistic regression model is used to evaluate the susceptibility of landslide hazards in highway corridors. The evaluation results can provide a reference for the prevention and control of landslide disasters in the Wenchuan – Songpan section of National Highway 213.

Keywords: National Highway 213; landslide hazard; remote sensing recognition; logistic regression model; susceptibility assessment

(责任编辑：魏昊明)