

白永健,熊小辉,铁永波.川藏铁路雅砻江深切峡谷区滑坡早期识别研究[J].灾害学,2021,36(3):109-114.[BAI Yongjian, XIONG Xiaohui and TIE Yongbo. Research on Early Identification of Landslide in Deeply Incised Valley of Sichuan-Tibet Railway [J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(3): 109-114. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.03.020.]

川藏铁路雅砻江深切峡谷区滑坡早期识别研究^{*}

白永健,熊小辉,铁永波

(中国地质调查局成都地质调查中心,四川成都610081)

摘要:川藏铁路自东向西横穿雅砻江段高山峡谷区,沿线滑坡地质灾害频发,且具有强隐蔽性、高突发性、强链状性、强破坏性等特点,严重威胁川藏铁路的建设和运营安全。为了实现深切峡谷区重大滑坡地质灾害早发现早防范,采用孕灾环境条件分析、高精度遥感、InSAR监测技术、无人机航拍等“星-空-地”识别技术,对深切河谷滑坡进行早期识别。获取深切峡谷区滑坡包括孕灾环境、斜坡空间几何结构、斜坡灾变演化特征等指标,构建深切峡谷区滑坡早期识别方法及指标体系,并运用该识别方法对典型滑坡甲西滑坡进行识别验证。以期对深切峡谷区滑坡地质灾害早期识别和防灾减灾等工作提供参考。

关键词:川藏铁路;深切峡谷区;滑坡;早期识别

中图分类号:P624;X43;XP155 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-811X(2021)03-0109-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.03.020

川藏铁路在甘孜州雅江县横穿雅砻江段深切峡谷区,区内山高谷深,新构造运动强烈,气候多变,且该段深切峡谷区为铁路、公路、水电等重大工程建设项目集中区,同时也是崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害的易发区,灾害规模大、成因复杂且突发性强、变形破坏发展趋势难以预测且破坏性强^[1-3]。深切峡谷区滑坡多发育于高陡斜坡体上,具有高位启动、惯性加速、动力侵蚀、流通堆积,最终在下游河沟形成堵溃放大效应,破坏性极强^[4-6]。深切河谷滑坡在失稳下滑过程中常表现出高速远程巨大的滑坡-碎屑流现象,具有强隐蔽性、强链状性、强破坏性,长期以来给人们的生命财产安全造成了深远的影响^[7]。

近年来,许多学者采用空-天-地等多种技术和多学科交叉理论对深切河谷斜坡演化机制、动态变形破坏迹象、内外动力成因机制等角度采用不同方法研究了深切河谷滑坡早期识别^[8-9]。许强等^[10]提出三查体系对重大地质灾害隐患进行早期识别并进行专业监测,以此破解“隐患点在哪里”“什么时候可能发生”这一地质灾害防治难题。邓建辉等^[11]采用多学科交叉融合的方法对青藏高原东南三江流域滑坡进行研究,从成因机制角度破解其链生演化难题,提出早期识别与风险防控体系。张毅^[12]利用InSAR技术对复杂山区进行地表变形监测和滑坡早期识别,并构建了基于InSAR技术的滑坡识别方法和指标体系,梁京涛等^[13]利

用七期遥感卫星数据对西南深切峡谷区滑坡进行了早期识别、对斜坡微地貌动态演化特征、成因机制、运动模式等进行分析研究。本文以川藏铁路沿线雅砻江段深切峡谷为例,尝试采用遥感解译、InSAR探测、无人机航拍和现场调查等技术,对深切河谷滑坡早期识别和斜坡灾变过程进行系统的研究,提出深切河谷滑坡早期识别方法及指标体系,其研究结果为深切峡谷区地质灾害早期识别、风险评估、监测预警等研究提供参考。

1 研究区概况

研究区地处青藏高原东缘雅砻江中游,属川西高原寒温带、亚热带大陆性季风气候,气温从低海拔到高海拔立体变化显著。多年平均降雨量分别为751.7 mm,主要集中于5-9月,降雨量542 mm,占全年降雨量的86.4%。大地构造属川滇菱形块体的一部分,为鲜水河断裂带、玉龙希断裂带、理塘-德巫断裂带及甘孜-理塘断裂带所围限。研究区三叠系和第四系地层广布,主要出露地层为三叠系巨厚浅变质海相复理石沉积,主要包括瓦多组(T_3w)、两河口组(T_3lh)和雅江组(T_3y)等,属海底浊积扇内扇、中扇、外扇及盆地平原等不同亚相^[14]。瓦多组(T_3w)以厚层-块状粉砂质板岩为主夹变质砂岩。两河口组(T_3lh)和雅

* 收稿日期:2020-11-24

修回日期:2021-03-12

基金项目:中国地质调查局项目(DD20190640);国家自然科学基金(41702374);支撑川藏科技攻坚战项目(20190505)

第一作者简介:白永健(1982-),男,汉族,四川巴中人,高级工程师,主要从事区域地质灾害调查与风险评价工作。

E-mail: byj209@126.com

江组(T_3y)以石英砂岩与绢云母板岩互层。研究区位于鲜水河地震带、盐源地震带和理塘地震带等三大地震带内,地震活动频繁,据史料记载和观测台网记录,自公元 1700 年以来至今 300 余年间,共发生强震 31 次,其中 6~6.9 级地震 22 次,7 级以上地震 9 次。地震动峰值加速度 0.15 g,地震动反应谱特征周期 0.40~0.45 s,对应地震基本烈度Ⅷ度。

2 深切峡谷区滑坡早期识别

2.1 地质环境识别滑坡

根据研究区地质灾害发育的主控地质环境要素,选取地形地貌、地质构造、岩土体类型、活动断裂、地震、河流水系、降雨等 7 类影响因素作为评价指标^[15-16]。采用信息量法,根据要素自身属性和空间分布特征,利用 ArcGIS 软件进行空间分析,获取研究区滑坡地质灾害易发性进行分区评价(图 1)。

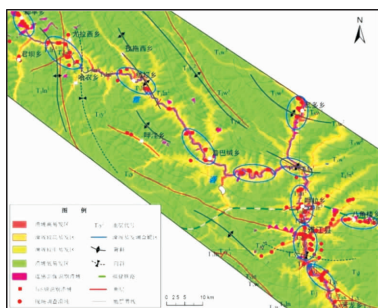


图 1 研究区地质条件与滑坡易发性分区及早期识别图

根据计算得到川藏铁路雅砻江段滑坡地质灾害易发性分布特征,经综合分析找出适宜的临界点作为易发程度分区界线值,从而将全区划分为高易发区、较高易发区、中易发区和低易发区四个不同等级的区域。高易发区面积约 440 km²,占研究区总面积的 21.14%。研究区新构造运动作用明显,深切峡谷区主要为构造侵蚀高山峡谷地区,山高、坡陡、谷深,斜坡坡度普遍 30°以上,局部地段可达 60°以上甚至呈悬崖^[17]。出露地层主要为三叠系上统两河口组、雅江组,局部有多期岩脉发育,岩性以灰、深灰色中、厚层块状石英砂岩、石英粉砂岩和绢云板岩呈不等厚互层状为主,沿江崩坡积、滑坡堆积及冰水堆积台地较为发育。地处甘孜-理塘断裂和鲜水河断裂带之间,有多次地震记录。根据高易发性分区圈定 11 个大比例尺调查靶区,进行高精度遥感解译,InSAR 探测和现场调查等识别工作。

2.2 遥感技术识别滑坡

随着光学卫星遥感技术数据源分辨率不断提高,其能高效率的获取大尺度、多期的遥感数据,能有效识别深切峡谷发育的滑坡。主要识别指标有,①斜坡前缘河道变窄且向外凸出。遥感影像上表现为河道曲率突变,河道明显变窄,有大块

孤石、漂石堆积于河漫滩或坡脚缓坡处。②斜坡体上植被高低(疏密)界限或疏密界限围成圈椅状,在深切峡谷区缓坡斜坡体上植被发育,斜坡体发生变形下错,坡体植被也跟着下错,导致沿着坡体变形边界的植被在遥感图上产生由高变低的界线。典型滑坡普巴绒滑坡边界可见明显的植被分界和疏密程度分界,高 50~80 m 的高陡滑坡壁上可见基岩出露。滑坡前缘岸坡凸出挤压河道,导致河道由 110 m 变窄为 60 m(图 2a)。③斜坡上产生拉陷槽或洼地,拉陷槽和洼地均为斜坡体上的负地形,在遥感影像图上具有明显和有效的识别特征。斜坡体产生变形后,坡体岩土体下沉形成局部相对较低的凹槽。拉陷槽和洼地为斜坡变形提供良好的储水条件,强降雨导致地表水迅速灌入拉陷槽内,槽内水头迅速上升,产生静水压与扬压力,并软化下覆软弱夹层,斜坡失稳发生大规模变形^[18]。深切峡谷区的斜坡体上冲沟通常沿着植被由密变疏的界线发育,冲沟和陡崖为斜坡体的变形启动提供了优越的临空条件。当疏密界线围成圈椅状时,也代表着斜坡体已经具备了三面临空的条件,在坡体内部作用和降雨诱发作用下,斜坡土体容易向着临空方向发生蠕变,并最终形成滑坡^[19]。④阶梯型斜坡易发生浅表层土质滑坡,浅表层土质滑坡在遥感图上的平面形态有弧形、圈椅形、马蹄形、舌形等形状。典型滑坡西地滑坡后缘可见多条断续发育的拉陷槽和裂缝,延伸 3~8 m,宽 0.2~0.8 m,羽列状,无充填。原始斜坡经过多期次滑动破坏形成弧形多级阶梯状微地貌(图 2b)。

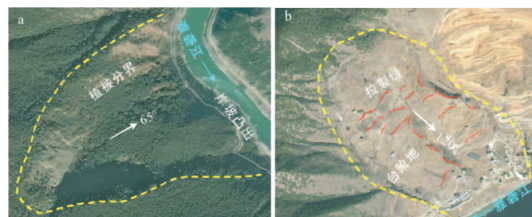


图 2 高精度遥感识别深切峡谷滑坡隐患识别

2.2 InSAR 技术识别滑坡

InSAR 是将传统的 SAR 遥感技术与射电天文干涉技术相结合而发展起来的一种空间对地观测技术。采用小基线集时间序列方法(SBAS-InSAR),利用 2018 年 1 月至 2019 年 12 月 C 波段 Sentinel-1 升轨卫星数据,在数据处理过程中还使用了欧洲空间局精密轨道数据对轨道信息进行纠正,同时采用日本宇航局制作的 ALOS 3D 30 m 空间分辨率的数字高程模型 DEM,以消除或减弱地形相位的影响^[20-21]。对研究区深切峡谷段开展 InSAR 早期识别,并对形变异常区域中心下滑速率大于 60 mm/a 的位置点进行聚类提取,共识别出 32 个滑坡隐患点,变形较为明显的有子拖西滑坡、西地滑坡、甲西滑坡等。

如图 3a 所示的 InSAR 识别的子拖西滑坡中圆点代表监测有效相干点,其中绿色点代表较弱的年平均形变速率,黄色和红色代表显著的远离卫

星视线运动,具体量级如图中颜色条所示^[22]。子拖西滑坡发育于雅砻江左岸凸形斜坡上,高程 2 850 ~ 3 400 m,斜坡上陡下缓,植被不发育,相干性较好(图 3b)。D-InSAR 干涉图上出形变异常干涉条纹,形变结果显示主要形变区位于前缘的左侧,SBAS-InSAR 时序监测形变曲线显示斜坡中部监测点 P1 点,自 2019 年 6 月变形较小,2019 年 12 月有显著的形变,累积形变量达到 28 mm,存在大规模滑动失稳堵塞雅砻江的风险。结合遥感影像分析,滑坡变形边界明显、浅表层变形迹象显著,识别出核心变形区横向宽 600 m,纵向长约 800 m,最大视线向形变量达 60 mm/a(图 3c)。

2.4 多技术耦合识别滑坡

通过高精度遥感解译、InSAR 识别及现场调查等技术手段,研究区共发育滑坡 216 处(见图 1),规模以小型为主。大型 12 处、中型 38 处、小型 166 处,分别占滑坡总数的 5.56%、17.59%、76.85%。主要沿断裂带、雅砻江及其支流深切峡谷成带状密集发育、沿雅江县至新龙县公路呈线状密集分布。滑坡形态多呈半圆形、舌形或矩形,滑坡发育地形坡度一般为 20°~40°。主要为土质滑坡,滑坡体物质主要为第四系崩坡积、残坡积堆积碎石土。孕灾地层主要为三叠系弱变质砂板岩互层^[14]。

3 深切河谷滑坡早期识别方法

3.1 深切河谷滑坡早期识别指标体系

深切峡谷区滑坡早期识别可分为三个层次,在对区域孕灾地质环境进行易发性区划,结合河谷形态、坡体结构、灾变迹象,借助多期次不同精度遥感影像、InSAR 监测等技术手段,采用“孕

灾地质条件分析+空天识别”技术从区域上对深切河谷滑坡进行早期快速识别^[23](图 4)。

(1)孕灾地质环境指标。①地形地貌,主要表现为斜坡形态出现异常,如顺直斜坡平面形态出现圈椅状、环谷状、双沟同源、爪型细沟等地形标志^[20]。台阶地平面形态产生菱形转折、台地后部发育拉陷槽、非阶地夷平面形成异常台地、基岩陡坡区发育局部缓坡、反坡地形和坡面台坎、坡面裂缝等标志;深切河谷岸坡异常凸出、河流凹岸中局部凸出、河流阶地变位等标志^[24]。②地质构造,重点识别滑坡与地质构造相对位置,如发育在地质构造破碎带内、转折、交叉、凸出山体等部位的岩土体变形破坏^[25]。③地层岩性,深切河谷局部区域地层及地层产状异常、与周围不连续,出现飞来地层或老地层覆盖新地层,孤立岩体混杂于滑坡中,变位岩土体上游出现新近湖相沉积而下游无等识别标志。④水文地质,斜坡后缘产生反倾台地或贯通性拉裂缝等汇水地形;斜坡前缘突然泉水出露,坡脚出现渗水层或近水平成排水水,坡面或台坎下出现呈排状分布的出水点或泉水,喜水植物成水平带状分布等^[26]。⑤地物指标,坡面建筑物出现裂缝、歪斜,树木歪斜、马刀树,古树木、古建筑被掩埋等。

(2)斜坡空间结构指标。①坡度,斜坡体上松散堆积体发育分布、岩体的风化卸荷带的划分,斜坡岩土体应力分布等都与斜坡坡度密切相关,可根据斜坡坡度变化结合斜坡纵向和平面曲率识别滑坡判定其稳定性。②高程,深切河谷斜坡受历史河谷演化过程的影响,河谷经历“下切-停歇”循环渐进演变,伴随着斜坡演化滑坡的发生。③斜坡形态主要有凹形、直线形、阶梯形和凸形等

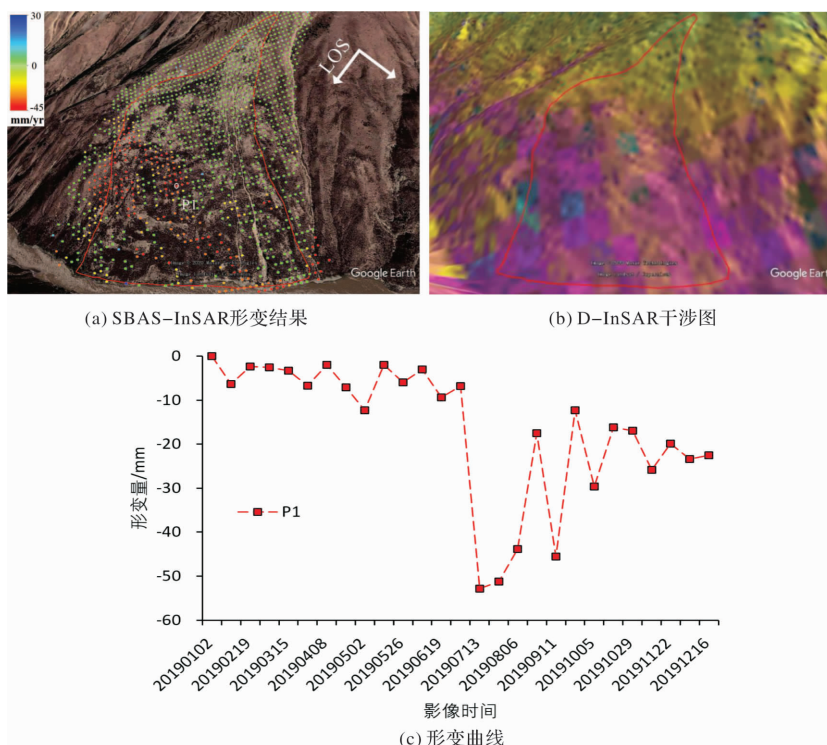
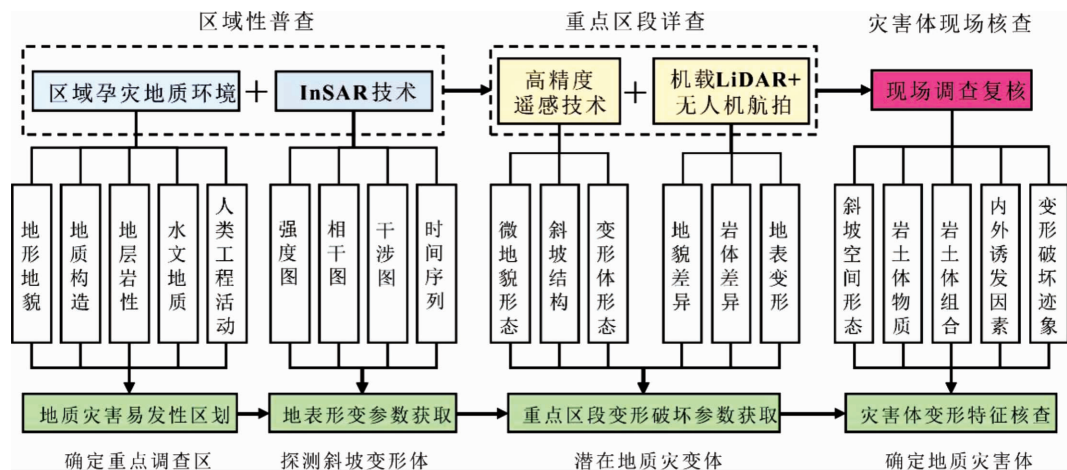


图3 InSAR 探测技术识别深切峡谷区子拖西滑坡隐患识别

图4 深切河谷滑坡早期识别方法及指标体系^[20]

四种,适宜的坡形更易产生滑坡。凹形坡多出现在老滑坡或古滑坡体上,滑坡滑动后滑坡体后缘及两侧边界与原始斜坡割裂开并产生一定的位移变形,坡度较低,形成凹地形。凸形斜坡整体呈前缘和后缘陡中部缓的地形,前缘临空条件好,且势能大,有利于斜坡产生滑坡或已有滑坡复活。④坡体结构,深切河谷斜坡结构是滑坡形成的必要地形与物质条件,根据斜坡与下伏基岩组合关系、岩土体物理力学差异性,判定斜坡的稳定性。

(3)滑坡灾变过程指标。①滑坡成因指标,根据现场调查分析滑坡形成地质环境、演化过程,形成年代,初步判定其潜在演化趋势和稳定性。②岩土体结构指标,根据现场调查斜坡体岩土体结构,土质斜坡重点识别土石混合物土石含量、颗粒级配、胶结状态、平剖面发育分布特征;岩质斜坡重点识别地层岩性及软弱夹层发育特征、岩体内结构面产状及组合、岩体质量、强风化强斜坡带的划分及其稳定性^[27]。③已有老滑坡或古滑坡滑源区、运移区、堆积区滑体等边界、滑移运动、解体扩散、铲刮携带、堆积地形、堆积结构、堆积体损毁破坏建构筑物堵江堵河等效应。

3.2 深切河谷典型滑坡早期识别验证

采用高精度遥感解译、InSAR 技术、无人机航拍和地面调查等“空-天-地”技术对甲西滑坡进行早期识别验证。甲西滑坡位于甘孜州新龙县和平乡甲西村,上游距拟建甲西水电站下坝址约 2.7 km,下游距在建两河口水电站坝址约 118 km、距拟建川藏铁路 129 km。滑坡于 1952 年 11 月高速下滑,形成高约 40 m、宽约 500 m 的堵江坝体,造成雅砻江江面由 80 m 变窄为 35 m^[28]。

(1)InSAR 监测识别,通过 SBAS-InSAR 监测结果表明滑坡体坡体存在明显的形变(图 5a)。坡体的形变主要位于坡体的中下部,形变速率最大达 60 mm/a。P1 特征点形变量自 2019 年 1 月至 12 月累计变形位移逐渐增大,最大形变量大 35 mm,后缘坡肩带也存在明显变形迹象(图 5b)。

(2)现场调查识别,滑坡发育于深切峡谷河段脊状岸坡的端部三面临空,平面形态呈倒钟型,

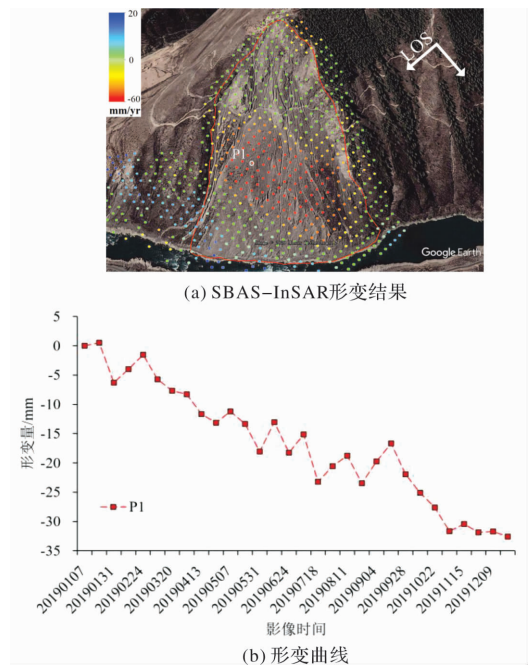


图5 InSAR 监测识别甲西滑坡及滑坡变形曲线

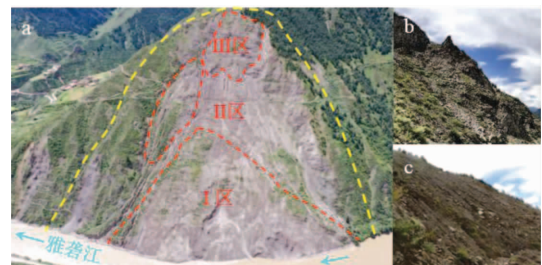


图6 深切河谷甲居滑坡变形破坏迹象

宽约 520 m,纵向长约 490 m,厚约 35~45 m,体积约 $480 \times 10^4 \text{ m}^3$,主滑方向 35° ,滑坡体呈陡-缓-陡折线型,平均坡度约 40° (图 6)。通过无人机航拍发现滑坡变形破坏可分为前缘强变形 I 区,中部和后缘残留体 II 区和 III 区。①前缘强变形 I 区,前缘直抵雅砻江,高程为 2 868 m~3 070 m,平均坡度 50° ,横向宽约 160~330 m,纵向长 130 m,

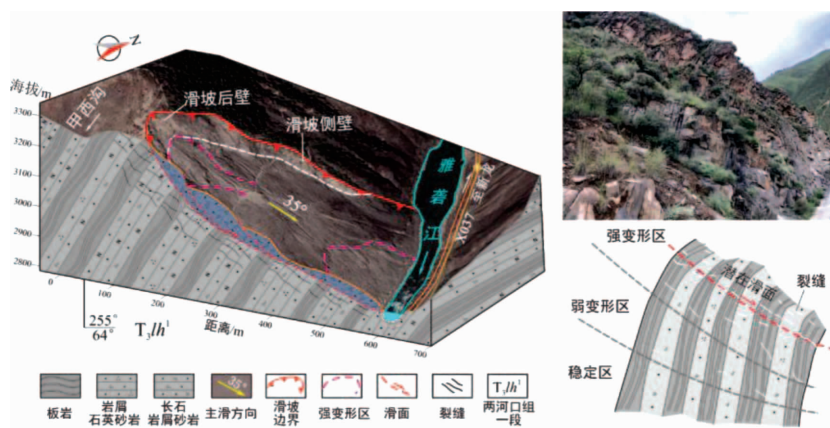


图7 甲西滑坡三维地质模型及破坏模式示意图

平均厚 40 m, 体积约 $140 \times 10^4 \text{ m}^3$ (图 6a)。②残留体强变形 II 区, 分布高程 2 868 m ~ 3 148 m, 横向宽约 300 m, 顺坡长 350 m, 平均厚约 35 m, 体积约 $260 \times 10^4 \text{ m}^3$, 残留体节理裂隙发育, 多张开, 张开度 10 ~ 40 cm, 无充填, 利于地下水入渗。浅表层稳定性差形成危岩体, 前缘坡脚岩体变形迹象明显 (图 6b)。③残留体强变形 III 区, 分布高程 3 140 m ~ 3 254 m, 高差 114 m, 横向宽约 108 m, 斜坡顺坡长 240 m, 平均厚约 30 m, 体积约 $64 \times 10^4 \text{ m}^3$, 残留体上发育多条地表水冲刷形成深切冲沟, 以及局部失稳破坏形成危岩体, 浅表层稳定性差, 产生多级错落陡坎 (图 6c)。

(3) 孕灾环境条件分析, 滑坡体主要为第四系滑坡堆积 (Q_4^{del}), 主要由块碎石土组成, 结构呈松散 ~ 中密, 块碎石母岩为砂岩及板岩。滑坡下伏基岩为雅江组 (T_{3y}), 以中薄层状砂岩与薄层板岩互层为主。地层产状为 $N35^\circ W/SW \angle 55^\circ \sim 70^\circ$, 与河谷呈小角度斜交, 斜坡总体上为一中陡倾坡内的反倾向层状结构斜坡。强风化岩体倾倒变形剧烈, 垂直层面节理发育, 产状 $10^\circ \sim 20^\circ \angle 15^\circ \sim 25^\circ$, 厚度为 50 m; 弱风化岩体倾倒变形程度相对强风化岩体弱, 厚度约 75 m。滑坡发育于麻西 - 姜嘎阔背斜西南翼近核部, 地应力场级较高导致斜坡更容易遭受变形与破坏。滑坡发育于脊状岸坡的端部, 且随着雅砻江持续下切, 河谷岸坡越来越高、越来越陡, 为斜坡变形提供了有利的临空条件和卸荷边界 (图 7)。滑坡区地层岩性为砂岩板岩软硬互层结构, 在构造变形中将产生明显的不均匀变形。滑坡前缘变形失稳破坏迹象明显, 后缘残留体发育斜坡高陡, 结构松散。滑坡上部残留体大规模滑动后铲刮携卷下部斜坡体较厚的滑体形成大规模的滑坡体, 存在堵塞雅砻江形成堰塞坝的风险。

4 结论

(1) 川藏铁路雅砻江段深切峡谷区山高坡陡谷深, 新构造运动强烈、气候多变, 是川西地质灾害高易发区。深切峡谷滑坡地质灾害具有强隐蔽性、强突发性、强链式性、强破坏性等特点, 严

重威胁川藏铁路的建设与运营安全, 应对其进行早识别早防治。

(2) 选取深切峡谷区滑坡发育主控地质环境条件获取 8 个评价指标, 对其进行滑坡地质灾害易发性分区。高易发区、中易发区面积分别为 248 km^2 、 459 km^2 , 分别占总面积的 19.08%、35.31%。高易发区主要沿深切河谷区、断裂带成带状分布、主要发育于以石英砂岩、板岩及其互层岩体中。圈定 11 个滑坡高易发大比例尺识别调查靶区。

(3) 根据高精度遥感影像提出包括植被异常分界、斜坡体拉裂缝和凹陷地、岸坡和斜坡地形异常等 4 个识别指标, 共识别出 216 处滑坡。采用 Sentinel-1 升轨卫星数据利用小基线集时间序列方法 (SBAS-InSAR), 提出斜坡变形强度, 相干、干涉影像, 强变形控制点时间序列等 4 个识别指标, 共识别出 32 个滑坡。综合孕灾环境分析、高精度遥感影像和 InSAR 监测等多技术耦合识别潜在滑坡隐患 228 处。

(4) 深切峡谷滑坡早期识别从比例尺上可以分为区域性普查、重点区段详查、灾害体现场核查三个层次, 根据对滑坡识别过程可分为确定滑坡易发区、探测斜坡变形体、圈定潜在滑坡灾害体、确定滑坡灾害体等。基于多技术识别手段提出孕灾环境、斜坡空间几何、斜坡灾变演化特征提出 20 个识别指标, 构建了深切峡谷滑坡早期识别方法和指标体系。并对典型滑坡甲西滑坡进行识别验证。

参考文献:

- [1] 彭建兵, 崔鹏, 庄建琦. 川藏铁路对工程地质提出的挑战 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(12): 2377-2389.
- [2] 张岳桥, 李海龙, 李建. 青藏高原 30-40 ka B. P. 暖湿气候事件对川西河谷地质环境的影响 [J]. 地球学报, 2016, 37(4): 481-492.
- [3] 张永双, 郭长宝, 姚鑫, 等. 青藏高原东缘活动断裂地质灾害效应研究 [J]. 地球学报, 2016, 37(3): 277-286.
- [4] 刘传正, 刘秋强, 吕杰堂. 地质灾害防治规划编制研究 [J]. 灾害学, 2020, 35(1): 1-5.
- [5] 祝建, 朱冬春, 刘卫民. 川藏公路 (西藏段) 地质灾害类型与分布规律研究 [J]. 灾害学, 2018, 33(S1): 18-24.
- [6] 郭长宝, 杜宇本, 张永双, 等. 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, 2015, 34

- (1): 121–134.
- [7] YANG Haiqing, XU Fujie, LIU Junfeng. Analysis on the typical failure pattern of structures subjected to the impact of sliding body [J]. *European Journal of Environmental & Civil Engineering*, 2017: 1–25.
- [8] 殷跃平, 王文沛, 张楠, 等. 强震区滑坡远程灾害特征研究—以四川茂县新磨滑坡为例[J]. *中国地质*, 2017, 44(5): 827–841.
- [9] WANG P, CHEN J, DAI F, et al. Chronology of relict lake deposits around the Suwalong paleolandslide in the upper Jinsha River, SE Tibetan Plateau: Implications to Holocene tectonic perturbations[J]. *Geomorphology*, 2017, 217: 193–203.
- [10] 许强, 董秀军, 李为乐. 基于 In SAR 技术的地表变形监测与滑坡早期识别研究—以白龙江流域中游为例[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2019, 44(5): 827–841.
- [11] 邓建辉, 戴福初, 文宝萍, 等. 青藏高原重大滑坡动力灾变与风险防控关键技术研究[J]. *工程科学与技术*, 2019, 51(5): 1–8.
- [12] 张毅. 基于 InSAR 技术的地表变形监测与滑坡早期识别研究—以白龙江流域中游为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- [13] 梁京涛, 马志刚, 赵聪, 等. 西南深切峡谷区滑坡早期识别及斜坡地貌动态演化特征研究—以北川县白什乡老街后山滑坡为例[J]. *灾害学*, 2020, 35(2): 122–126.
- [14] 武文辉, 詹涵钰, 秦宇龙, 等. 川西地区甲基卡穹隆的构造变形特征[J]. *沉积与特提斯地质*, 2017, 37(4): 84–90.
- [15] 倪化勇, 王德伟, 白永健, 等. 雅砻江流域地质灾害调查与研究报告[R]. 成都: 中国地质调查局成都地质调查中心, 2016.
- [16] 李郎平, 兰恒星, 郭长宝, 等. 基于改进频率比法的川藏铁路沿线及邻区地质灾害易发性分区评价[J]. *现代地质*, 2017, 31(5): 911–929.
- [17] 白永健, 铁永波, 倪化勇, 等. 鲜水河流域地质灾害时空分布规律及孕灾环境研究[J]. *灾害学*, 2014, 29(4): 69–75.
- [18] 晏同珍, 杨顺安, 方云. 滑坡学[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 2000.
- [19] 刘星洪, 姚鑫, 於开炳, 等. 川藏高速巴塘—芒康段地质灾害遥感综合早期识别研究[J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(6): 49–60.
- [20] 解明礼. 矿山崩滑地质灾害风险评价及管理研究—以贵州省米罗煤矿后山变形体为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- [21] 戴可人, 铁永波, 许强, 等. 高山峡谷区滑坡灾害隐患 InSAR 早期识别—以雅砻江中段为例[J]. *雷达学报*, 2020, 9(3): 554–568.
- [22] 杨曦瑞, 陈谦, 任光明, 等. InSAR 应用于地质灾害早期识别的研究现状及趋势[J]. *人民长江*, 2019, 50(S2): 80–84.
- [23] 许强. 对地质灾害隐患早期识别相关问题的认识与思考[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2020, 45(11): 1651–1659.
- [24] 余金星, 周兴霞, 刘飞, 等. 丹巴地质灾害隐患早期识别关键技术研究[J]. *测绘*, 2019, 42(6): 243–247.
- [25] 梁鑫, 范文, 苏艳军, 等. 秦岭钒矿集中开采区隐蔽性地质灾害早期识别研究[J]. *灾害学*, 2019, 34(1): 208–214.
- [26] 冯志远, 乃尉华. 地质灾害遥感影像早期识别标志[J]. *世界有色金属*, 2018(5): 203–204.
- [27] BAI Y J, WANG Y S, GE H, et al. Slope structures and formation of rock–soil aggregate landslides in deeply incised valleys. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(2): 316–328.
- [28] 王飞, 唐辉明. 雅砻江上游互层斜坡倾倒变形破坏机制与演化[J]. *工程地质学报*, 2017, 25(6): 1501–1508.

Research on Early Identification of Landslide in Deeply Incised Valley of Sichuan-Tibet Railway

BAI Yongjian, XIONG Xiaohui and TIE Yongbo

(Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, China)

Abstract: The Sichuan-Tibet railway, spanning the Yalong River from east to west, has frequent geohazards, which have the characteristics of strong concealment, high sudden, strong chain and strong destruction, and seriously threatened the construction and safety operation of the Railway. In order to early identification and prevention of major landslide in deeply incised valley, we carried out the Integration of “Star-Air-Ground” identification technologies, such as environmental condition analysis, high-precision remote sensing, InSAR monitoring technology and Uav aerial photography. The evaluation methodology and index system of the early identification of landslide in deeply incised valley, including environmental condition, spatial geometry of the slope and the characteristics of the disaster evolution, were put forward, and which are used to identify and verify a typical landslide. which can provide reference for the early identification and prevention of geological hazards in deeply incised valley.

Key words: Sichuan-Tibet Railway; deeply incised valley; high landslides; early identification