



引文格式:高志良,解明礼,巨能攀,等.堆积层滑坡多源遥感动态演变特征分析研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(8):1482-1491.DOI:10.13203/j.whugis.20220149

Citation:GAO Zhiliang,XIE Mingli,JU Nengpan,et al.Multi-source Remote Sensing Dynamic Deformation Monitoring of Accumulation Landslide[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(8): 1482-1491. DOI: 10.13203/j.whugis.20220149

堆积层滑坡多源遥感动态演变特征分析研究

高志良^{1,2,3} 解明礼⁴ 巨能攀⁴ 黄细超⁵ 彭涛³ 何朝阳⁴

1 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室,辽宁 大连,116023

2 大连理工大学岩石破裂与失稳研究所,辽宁 大连,116023

3 国能大渡河流域水电开发有限公司,四川 成都,610093

4 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

5 四川省地质调查院稀有稀土战略资源评价与利用四川省重点实验室,四川 成都,610081

摘要:堆积层滑坡随库水位变动的响应规律是一个重要的研究课题,以往研究多采用地表位移实时监测数据耦合库水位数据开展分析,然而大多库岸边坡不具有开展专业监测的条件,这给滑坡的历史变形追溯带来一定困难。采用星载与机载平台多源立体化观测技术,从多角度、多尺度监测瀑布沟水电站红岩子滑坡从蓄水至今10余年的变形演化规律。综合研究表明,红岩子滑坡这类蓄水、降雨诱发的蠕滑-拉裂式滑坡具有典型的长期性、缓慢性与季节性特征;长时间序列合成孔径雷达能够较为准确地捕捉到这些特征信息;多期次光学遥感影像比对分析可较为直观地显现出滑坡不同位置宏观变形破坏特征的差异性,机载LiDAR获取的地表点云信息进行植被剔除后可准确识别出长期蠕滑的滑坡要素变化,在以上工作基础上结合地质条件与地表滑坡调查开展工程地质分析,最终研判出滑坡成因机制、变形模式与未来发展趋势。该研究可为类似工程案例研究提供科学的思路和方法,对蓄水诱发的缓慢蠕滑型滑坡的防治提供一定参考。

关键词:堆积层滑坡;蠕滑变形;变形演化;多源立体观测;数据融合

中图分类号:P237

文献标识码:A

收稿日期:2022-07-20

DOI:10.13203/j.whugis.20220149

文章编号:1671-8860(2024)08-1482-10

Multi-source Remote Sensing Dynamic Deformation Monitoring of Accumulation Landslide

GAO Zhiliang^{1,2,3} XIE Mingli⁴ JU Nengpan⁴ HUANG Xichao⁵

PENG Tao³ HE Chaoyang⁴

1 State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China

2 Institute of Rock Instability and Seismicity Research, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China

3 Guoneng Dadu River Hydropower Co. Ltd, Chengdu 610093, China

4 State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

5 Evaluation and Utilization of Strategic Rare Metals and Rare Earth Resource Key Laboratory of Sichuan Province, Sichuan Geological Survey, Chengdu 610081, China

Abstract: Objectives: The response law of ancient (old) landslides in the reservoir area is an important research topic. Previous research primarily analyzed real-time surface displacement and reservoir water level data. However, professional monitoring conditions are often lacking on most reservoir bank slopes. This complicates tracking the landslide's historical deformation. Satellite and airborne remote sensing platforms enable multi-scale, long-term monitoring of landslide deformation and damage. **Methods:** This study employs multi-source three-dimensional observation technologies including aerial, space-based, and terrestrial platforms to monitor the deformation and evolution of the Pubugou Hydropower Station's Hongyanzi land-

基金项目:四川省科技计划(2022YFG0183);地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主研究课题(SKLG2020Z006)。

第一作者:高志良,硕士,主要研究方向为大坝安全监测与监控、水库大坝安全管理。294292823@qq.com

通讯作者:解明礼,博士,讲师。565725640@qq.com

slide over approximately 10 years. It utilizes unmanned aerial vehicle photography (optical imaging) and light detection and ranging (LiDAR) for detailed topographic mapping and deformation analysis from 2009 to 2020. Additionally, time-series interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technology is used to track long-term surface deformations from October 2014 to July 2020. Field investigations have identified typical deformation and failure characteristics of the landslide, incorporating geological conditions and external factors such as rainfall and reservoir water levels to analyze causal mechanisms and dynamic trends. **Results:** The irregularly semicircular Hongyanzi landslide spans 20–50 m in thickness, encompasses approximately 15.53 million m^3 in volume, and slides at an approximate bearing of 340° . Composed of quaternary pebbled stones, silty sand, and clay, the landslide's bed slopes between 20° and 25° . Its lithology includes Emeishan Formation basalt and Yangxin Formation dolomite. Existing since 2006 or earlier, the landslide features elements like walls and steps. LiDAR imagery from 2009 clearly delineates its boundaries, though it shows no new signs of deformation or failure. Following reservoir impoundment, the reactivated landslide develops new, widening cracks along its rear edge. Post-reactivation, the landslide predominantly undergoes uniform deformation, with more significant movement at the trailing edge than the leading edge, without marked acceleration. Heavy rainfall is the most significant control factor, imparting stepwise deformation characteristics to the landslide. **Conclusions:** A comprehensive analysis of multi-source data reveals that phenomena like the Hongyanzi landslide exhibit typical long-term, gradual, and seasonal movements. Long-term InSAR effectively captures these characteristics. Multi-stage optical remote sensing and surface point cloud data from LiDAR, after vegetation removal, enable more intuitive comparisons of macroscopic deformation across different landslide areas. Integrating this with geological assessments and field investigations allows for detailed engineering analyses to ascertain the causes, patterns, and future trends of landslide activity.

Key words: accumulation landslide; creep deformation; deformation evolution; multi-source stereo observation; data fusion

堆积层斜坡是自然界中常见的一种地质体,因其结构松散、力学性能差、透水能力强等特性,在降雨、地震、人为扰动等不利因素诱发下,容易丧失自身稳定性或承载内力,形成灾害体^[1]。堆积层的特殊性质使其成为水库型滑坡中最主要的类型^[2],水库蓄水初期,库水位增高,岸坡水文地质条件改变,诱发古、老滑坡堆积体复活,这类滑坡往往规模较大,一旦失稳不仅直接摧毁房屋、道路基础设施,还将引起涌浪、堵江等次生灾害,危害巨大^[2-3]。因此,分析蓄水后堆积层斜坡稳定性及发展趋势是库区防治的重要手段。

总结国内外研究文献,对库岸堆积层滑坡研究方向主要有以下几类:(1)库岸边坡随库水位变动的响应规律分析:主要采用全球导航卫星系统等实时地表位移监测设备,结合库水位监测数据,综合分析库岸边坡随库水位升降速率、幅度等变化的变形强度,经研究,绝大多数库岸边坡在蓄水后 2~4 年变形强度将削弱,表现为自适应性^[4-8];(2)库水位变化下滑坡渗流机制:堆积体渗透性是控制和影响库岸边坡稳定性的重要因素^[9],大多学者基于非饱和渗流理论揭示了边坡

岩土体非饱和渗流规律^[10],研究结果表明硬质岩边坡相较于软质岩边坡更易受库水位的影响而发生变化^[11];(3)水库型滑坡破坏机理分析:水库滑坡的成因与水息息相关,外部触发因素主要包含库水变动与降雨入渗,更为重要的是斜坡体自身地形地貌与结构特征是内外因耦合复杂作用的结果^[12-13]。降雨与库水位变动导致坡体内渗流场与应力场改变及岩土体物理力学参数降低是斜坡体稳定性减弱的主要原因^[14-15]。

水库型滑坡变形特征是一个重要研究课题,而一些水库型滑坡往往没有条件开展专业监测,实现实时监测滑坡的变形破坏特征,近年来,空-天-地一体化观测技术逐渐应用于地质灾害早期识别与监测预警^[16],尤其是空与天平台能够实现多手段、多尺度、长周期的地质灾害变形破坏特征监测^[17]。本文以瀑布沟水电站红岩子滑坡为例,运用无人机航拍影像(光学影像)、机载激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)、合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)与现场调查技术对红岩子滑坡开展长时间序列变形破坏监测,并结合滑坡体自身地

质条件与外部环境因素(降雨、库水位等)进行成因机制、动态演化趋势分析,为类似工程案例研究提供科学的思路和方法,对水库型滑坡的防治提供一定参考。

1 研究区概况

红岩子滑坡为一处蓄水诱发的古滑坡,位于四川省汉源县桂贤乡大渡河瀑布沟水电站库区右岸($102^{\circ}44'17.04''\text{E}$, $29^{\circ}17'52.57''\text{N}$),距离瀑布沟水电站拦河坝约23 km,又被称为“桂贤滑坡”^[18]。

1)地形地貌。滑坡区为中山缓脊宽谷地貌,形态呈圈椅状,整体坡度约 32° ,滑动方向约 340° ,地形呈上陡下缓,高差为184 m;滑坡最大宽度约360 m,蓄水前长725 m,蓄水后长620 m。滑坡区如图1所示。

2)岩性组成。滑坡体主要由含碎石粉质粘土、碎块石组成,碎石粒径2~7 cm,棱角状,成份为白云岩;块石破碎,粒径1~3 m,成份为白云岩;充填物为粉质粘土,可塑。滑体在滑坡后缘及两侧较薄,在中前部较厚,根据现场勘查结果,滑坡体最大厚度为52 m,潜在失稳方量约为 $15\,530\,000\text{ m}^3$ 。

3)构造活动。滑坡体下伏汉源-昭觉断裂,上

盘为二叠系下统阳新组白云岩,下盘为二叠系上统峨眉山组玄武岩,根据水电站修建前地质调查的结果,表明该断裂在中、晚更新世时期具有一定活动性,但全新世以来活动较弱,对该滑坡影响较小;周边无5级以上强震活动,外围大于7级地震距滑坡区均大于100 km。图1中A-A'剖面图如图2所示。

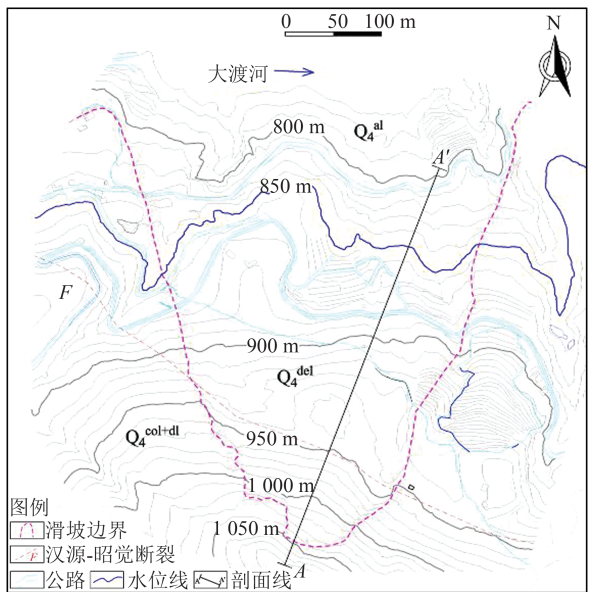


图1 工程地质平面图

Fig. 1 Engineering Geological Plan Graph

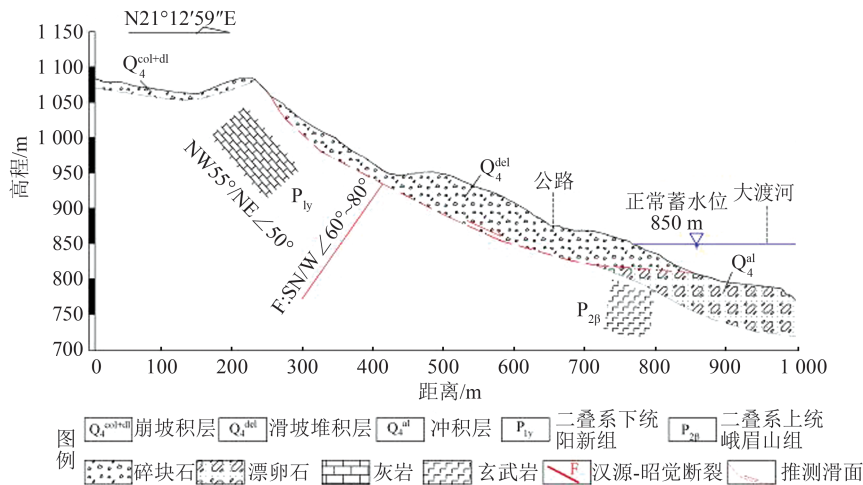


图2 A-A'工程地质剖面图

Fig. 2 Engineering Geological Section of A-A'

4)水文地质。区内属北温带与季风带之间的亚热带气候区,多年平均降雨量为730.8 mm,最多年降雨量为935.1 mm,最少年降雨量为465.1 mm,最大日降雨量为85.9 mm;地下水主要为松散堆积层孔隙潜水,受两岸基岩裂隙地下水和河水的补给,三面临空地地形有利于地下水排泄,与河水水力联系密切,具互补关系,其动态受

河水影响较大,随河水位涨落而升降。

5)人类工程活动。区内人类工程活动主要为坡耕地种植与公路修建。滑坡区存在大量耕种活动,尤其滑坡后缘存在水稻田,地表水不断深入到滑坡体中;由于水库蓄水将原有道路淹没,在滑坡区前缘复建了一条环湖公路,开挖坡脚改变了原有斜坡内部应力场。瀑布沟水电站

蓄水导致该滑坡复活,这是对该滑坡影响最大的因素。2010-05,坝前水位快速抬升,至2010-10,水库蓄水位达到正常蓄水位(850 m)。在汛期后(11月初至次年5月下旬),坝前水位再由850 m逐渐降至790 m,坝前水位降幅为60 m。

6)前期宏观变形情况。瀑布沟水电站开始蓄水前处于基本稳定状态,仅局部表层有活动迹象。2011年初瀑布沟水电站库水位首次大幅度下降后,3月份现场巡查发现红岩子滑坡出现变形,持续变形至同年6月份,库水位抬升,变形幅度约2 m,主要以后缘拉裂为主;此后每年滑坡均会出现一定程度的变形,前缘环湖公路与滑坡边界相交处出现错断,位于滑坡体上部的公路产生沉降变形。但在2015年之后,明显的宏观变形破坏迹象的出现时间由上半年水位下降期3月—6月转换至下半年水位上升期(即雨季)6月—10月。

2 多源数据滑坡时空演变监测

2.1 历史光学影像宏观变形特征

光学遥感影像对于滑坡等地质灾害地物识别、灾情分析及滑坡调查具有重要作用^[19]。历史研究表明,该滑坡在2006-04-08 QuickBird影像中可见明显滑坡壁、滑坡台阶、滑坡舌、封闭洼地等滑坡要素^[20]。为查明红岩子滑坡历史宏观变形破坏特征,收集了滑坡区2009—2020年共6期历史影像,涵盖无人机航拍正射影像与Google Earth影像(见图3),基于影像中特征地物进行精准配准^[21],配准精度优于0.1 m。相较于2006年的遥感影像,2009年无人机航拍影像中未发现明显拉裂、解体等变形破坏迹象(见图3(a)、图4(a));2013年无人机航拍影像显示该滑坡出现明显变形迹象(见图3(b)),滑坡后壁及侧壁出现小规模滑塌和明显的拉裂缝(见图4(b));影像中可见与滑坡边界相交的绕湖公路出现明显错断,相较于2009年,滑坡前缘因库水位变动被部分淹没,并且出现大量垮塌迹象。由以上特征可以确定红岩子滑坡在2009—2013年出现过整体变形;在2015年与2018年Google Earth影像中(图3(c)、3(d)、4(c)、4(d))由于影像分辨率限制,相较于2013年,滑坡体上部未发现有明显变形破坏迹象;2019年无人机航拍影像图上,滑坡边界相较于历史影像更加清晰,可识别到明显的滑坡边界(见图3(e)),滑坡后部滑壁呈亮白色,相较于历史影像,滑坡后缘出现整体下滑现象,下滑距离0.5~1 m,

伴随着大量局部滑塌现象(见图4(e));2020年无人机航拍影像显示滑坡后缘变形破坏再次加剧(见图3(f)),滑坡后缘出现两处明显滑塌现象,大量崩落的滚石堆积在下部乡村便道上(见图4(f))。此外,滑坡右侧边界变形最为明显,参考现场调查结果,此时乡村便道已经错断。

2.2 机载LiDAR地形变化特征

机载LiDAR技术可在一定程度上“穿透”植被获取数字高程模型(digital elevation model, DEM),对滑坡显现出的各种地貌特征进行监测^[22]。分别于2009年与2020年两次开展该滑坡周边机载LiDAR地形测绘,对点云进行分类后剔除植被生成DEM^[23],基于正射影像中滑坡边界以外的相对稳定建筑物进行两期次地形精准配准,配准精度优于0.2 m,并根据地形数据生成山体阴影(见图5),可直观对比两期次滑坡地貌的变化。

2009年山体阴影影像数据分辨率为0.5 m,地形相对平滑(见图5(a)),相较于同期次无人机正射影像(见图3(a)),滑坡边界更为明显直观,滑坡后缘可见到一处明显的滑坡洼地,右侧边界延伸至下方绕湖公路处;对比2009年山体阴影成果,2020年机载LiDAR点云密度更高,生成的山体阴影影像分辨率为0.1 m,滑坡后缘、左右侧边界均有所延伸(见图5(b)),左右两侧边界已穿越下部绕湖公路。比对两期次LiDAR正射影像的配准结果,发现滑坡存在明显的向大渡河方向运动的过程,滑坡运动不仅为沉降变形,还存在水平位移,因此,高程差值处理得到的不是同一点处的真实高程变化,但滑坡运动是水平向与竖直向多维的形变,高程差值能够判断整个滑坡区域中哪些部位的沉降量最大,对滑坡形成机制判译有一定的辅助作用。对两期次地形进行差值处理(见图5(c)),发现滑坡区域后缘的变形强度最大,最大变形量为10 m(沉降变形),主要集中在滑坡后缘洼地处。对滑坡后缘局部地形进行放大比对分析,发现2009年滑坡后缘滑坡壁连续延伸(见图5(d)),2020年滑坡区微地貌更加清晰,可观察到滑坡后缘多级台坎与裂缝(见图5(e))。

2.3 时序InSAR滑坡变形趋势分析

时序InSAR技术能够有效监测斜坡长时间序列的地表形变信息^[24],有助于滑坡时空演变特征分析。本文收集覆盖研究区的Sentinel-1升轨影像141景(2014-10-14—2020-07-26)、降轨影像131景(2014-10-09—2020-07-09),采用30 m的先进陆地观测卫星数字表面模型去除地形相

位。运用小基线集 InSAR 技术解算滑坡区长时间序列卫星视线向(line of sight, LOS)形变,其中时间基线为 48 d,空间基线阈值为 5%,制图分辨率为 20 m,解缠方法为最小费用流法,解缠相关系数阈值为 0.2,滤波方法为 Goldstein。红岩子滑坡整体坡向近南北向,单一轨道获得 LOS 向的一维形变难以准确描述滑坡形变特征,本文采

用升降轨不同入射方向的形变融合技术获取滑坡区 2014-10—2020-07 垂直向形变与斜坡向形变(见图 6)。

对比垂直向与斜坡向形变,滑坡区两个方向位移均较大,垂直向形变主要集中于滑坡后缘区域,而斜坡向形变在整个滑坡均有分布,且变形量大于垂直向形变,形变速率大多大于 80 mm/a。

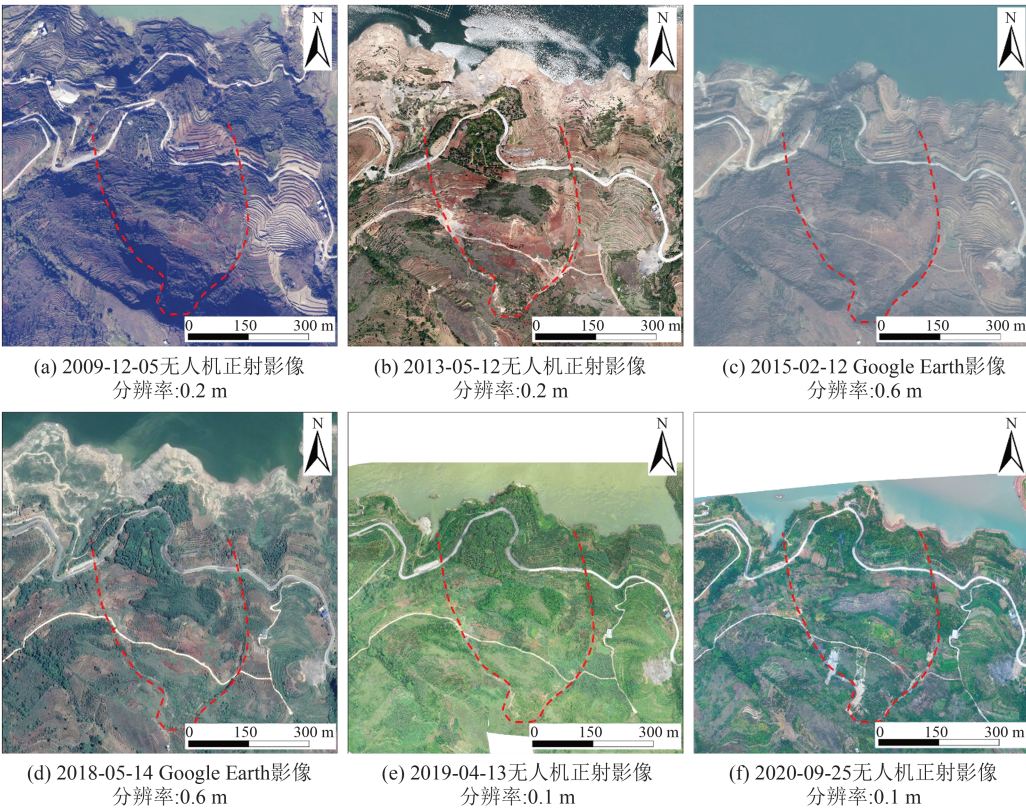


图 3 红岩子滑坡历史宏观变形
Fig. 3 Historical Deformation of the Hongyanzi Landslide

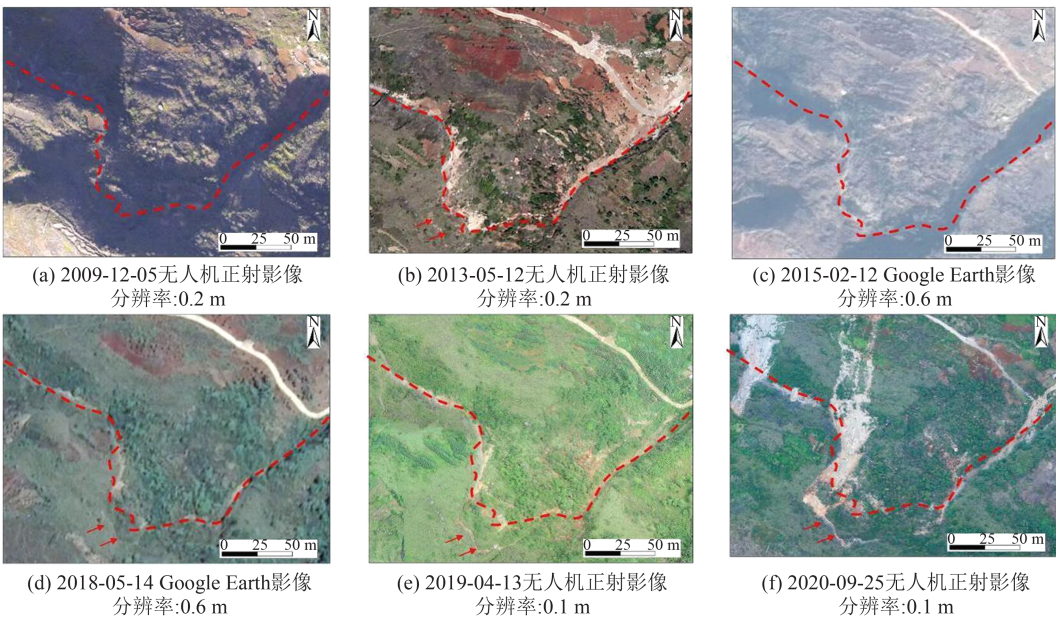


图 4 红岩子滑坡后缘局部变形
Fig. 4 Local Deformation at the Back Edge of the Hongyanzi Landslide

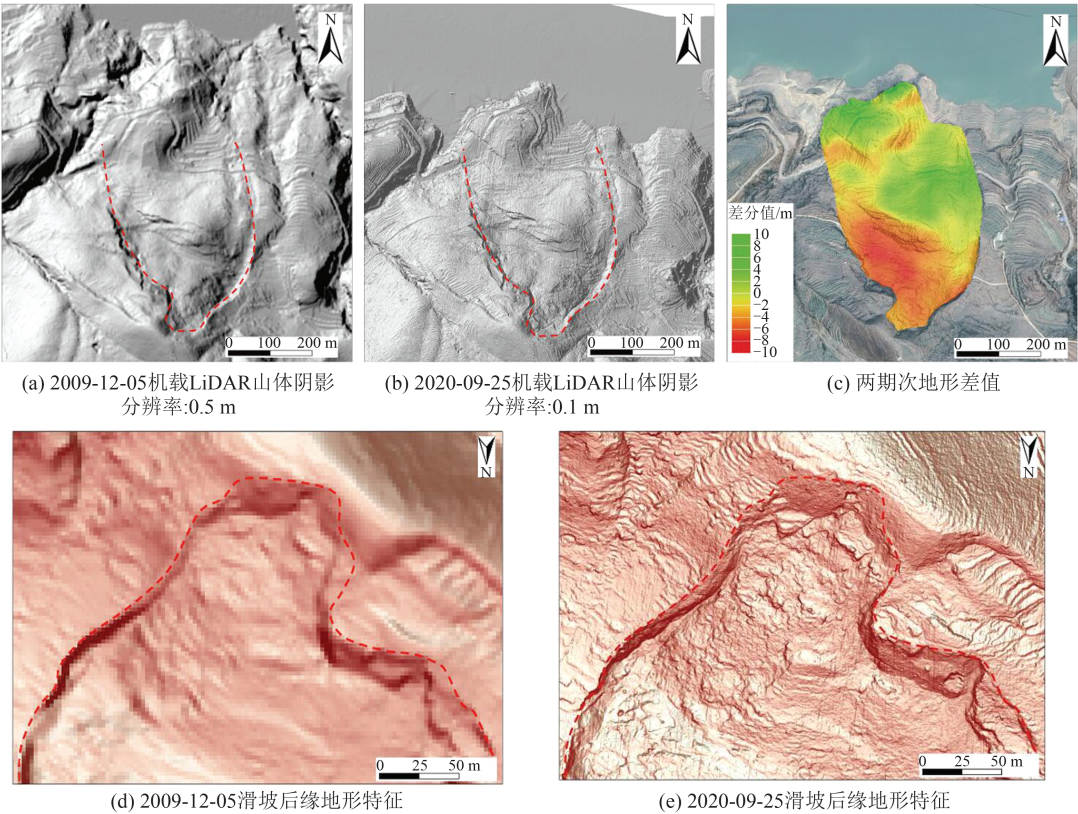


图5 两期次LiDAR结果对比

Fig. 5 Comparison of Two Phases of LiDAR Results

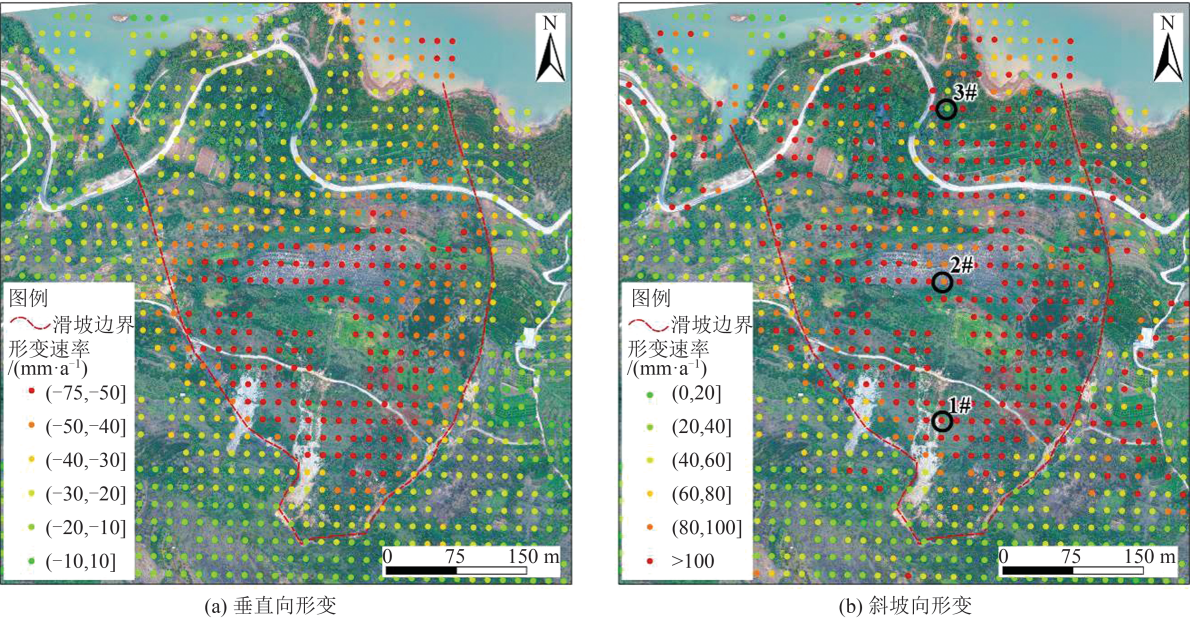


图6 红岩子滑坡二维形变速率

Fig. 6 Two-Dimensional Deformation Velocity Rate of the Hongyanzi Landslide

分别在滑坡上中下部位各选取一处监测点分析其历史坡向变形,时序变形曲线显示该滑坡自监测之日起即存在变形,通过3个部位形变点量值分布及时间序列曲线特征分析(见图7(a)),滑坡后缘变形量大于前缘变形量,整体以中后缘形变为主,向前缘形变梯度逐步降低,结合时间序列

曲线与历史光学影像分析,滑坡目前仍处于蠕滑状态,主要以后缘变形为主。

选取斜坡向位移图中滑坡后缘一处点位(1号)作为典型形变监测点,提取其2018年全年时序形变,并耦合降雨及库水位数据进行综合分析(见图7(b)),可观测到瀑布沟水电站在每年的10

月份库水位逐步下降,每年的6月份开始逐步增高;降雨在每年6月—10月为频发期。滑坡时序变形存在明显的阶梯状,与库水位增长、降雨存

在一定同步性,即在雨季(或强降雨后)与库水位上升期存在加速变形,而在非汛期滑坡变形速率逐步降低。

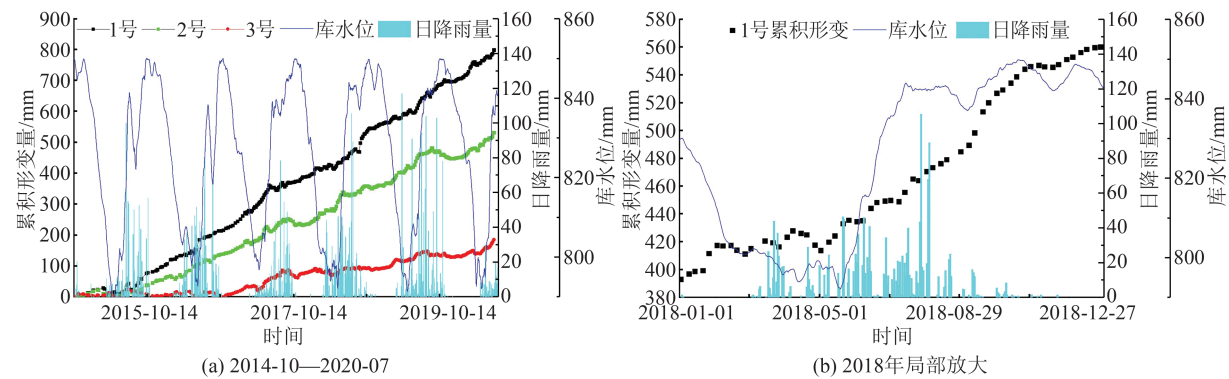


图7 红岩子滑坡时序变形趋势
Fig. 7 Time-Series Deformation Trend of the Hongyanzi Landslide

2.4 典型地物变形破坏特征

根据2020年现场调查结果可知,目前滑坡存在多处明显变形破坏现象(见图8)。红岩子滑坡具有明显加剧变形特征,边界呈圈椅状,滑坡后壁发育有宽约10 m、深3 m、延伸长度约100 m的拉陷槽,且伴随着局部垮塌、滚石现象;滑坡右左缘边界已圈闭并扩展延伸至环湖公路下部,导致

乡村公路与环湖公路错断,右侧边界的乡村公路下降约3 m,无法通过车辆,左侧边界的乡村公路下降约1.8 m,乡村公路凌空一侧产生明显向大渡河方向的水平位移与垂向位移;环湖公路存在一定的沉降变形,下降约0.5 m。公路外侧至滑坡前缘发生小规模滑塌,耕地多出现开裂变形,有多处旋水洞,灌溉沟渠、蓄水池等均开裂破坏。

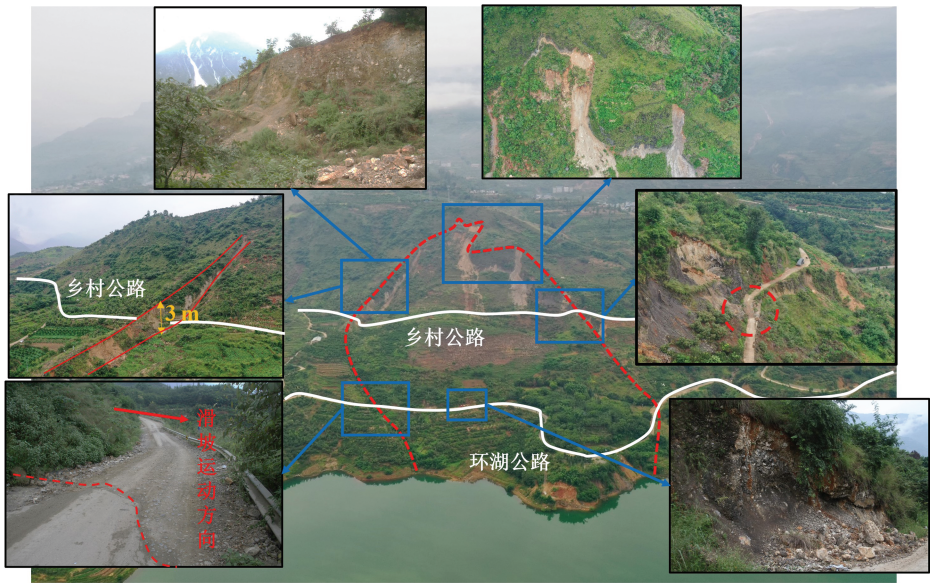


图8 2020年滑坡区现场调查结果
Fig. 8 Results of Field Survey of the Landslide Area in 2020

3 滑坡动态演化特征分析

3.1 古滑坡复活机制分析

红岩子滑坡为一处典型的蓄水诱发古滑坡堆积体复活而形成的滑坡。库水位作用主要分为3种:(1)水库蓄水前,该滑坡处于基本稳定状态,蓄

水后受库水浸泡、消落、浪蚀作用,坡脚软化;此外,该滑坡三面临空,且滑坡体物质主要由第四系块碎(卵)石层及粉砂质粘土组成,经室内渗透试验测试表明,滑坡体的平均渗透系数为0.012 8(见表1),渗透性较好,有利于地下水排泄,使得地下水位较低,水库蓄水后,库水位从792 m抬升至

850 m,地下水位抬升,滑坡体内部饱和区和浮重度区增大,同时地下水与滑坡体物质相互作用,降低土体颗粒之间的摩阻力与粘聚力,降低滑坡体强度。(2)在库水位骤然下降时,受坡体物质渗透性影响,坡体内地下水位变动滞后,产生水头差,水力梯度增大,饱水区对滑坡体作用一个向临空

面的渗透压力;同时,地下水位下降的滞后效应会导致坡体内地下水不及时排出的饱水加载效应。(3)库水位反复升降,坡体内地下水位产生变动,地下水的渗流作用携带走土体细小颗粒,对坡体产生侵蚀,尤其是对潜在滑面的溶蚀作用,将会降低其抗剪强度,削弱坡体抗滑力。

表 1 滑坡体碎石土渗透试验结果

Tab. 1 Results of Permeability Test for Debris Soil of Landslide

序号	经过时间/s	水位差/cm	渗流路径长度/cm	水力坡降	渗水量/cm ³	渗透系数
1	122	40	30	1.333	1 940.5	0.010 6
2	420	40	25	1.6	2 092.6	0.013 8
3	600	40	25	1.6	3 019.2	0.014 0

3.2 破坏模式演化分析

红岩子滑坡在 2006 年甚至更早就已经存在滑坡壁、滑坡台阶等各种要素,2009 年 LiDAR 影像表征出明显的滑坡边界,但未有显著的新鲜变形破坏迹象。2010 年 5 月瀑布沟水电站开始蓄水,次年 1 月—2 月库水位首次大幅度下降后,3 月份现场巡查发现红岩子滑坡出现变形,此后持续变形,在 2013 年遥感影像中滑坡后缘出现明显新鲜拉裂缝,在 2018—2020 年滑坡后缘拉裂缝持续张拉最为明显,并且滑坡左右边界延伸至绕湖公路下方;时序 InSAR 显示,在 2014-10—2020-07 该滑坡始终处于匀速变形状态,在汛期时(强降雨后)变形速率增大;InSAR 与两期 LiDAR 地形差值结果均显示滑坡中后缘变形量远大于前缘;光学遥感影像与现场调查中滑坡体上未发现有明显的大变形,而是以小型开裂为主,而在滑坡边界周边持续出现明显的变形破坏迹象。综上所述,在蓄水初期,库水位淹没并软化坡脚,导致滑坡前缘强度降低,诱发古滑坡复活,该滑坡先期受库水位下降影响较大,2015 年之后明显的宏观变形破坏迹象的出现时间由水位下降期转换至水位上升期,主要受降雨控制。综合比对多源数据,在整个监测周期内,滑坡的变形模式始终是滑坡中后部推挤前部出现整体变形的蠕滑-拉裂式。

3.3 滑坡动态演化趋势分析

结合以上无人机航拍影像(光学影像)、机载 LiDAR、InSAR 与现场调查结果,并叠加库水位、降雨等环境因素综合分析,红岩子滑坡在未蓄水前自身稳定性较差,主要由第四系块碎石土及粉砂质粘土层组成,结构松散,渗透性较好,物理力学特性差,是滑坡复活的内在地质原因;水库蓄水后,古滑坡体前缘受库水浸泡、浪蚀、消落、动水压力等作用,尤其是在初期库水位大幅度下降

后,地下水的水头差造成的渗透压力使得坡体稳定性降低,是滑坡复活的主要外在原因。后缘拉裂边界形成后,该滑坡受库水位、降雨、人工灌溉及地形因素的综合影响,产生持续整体变形,后缘拉裂缝不断被拉开,降雨、农耕用水沿已有地表裂缝入渗,进一步弱化了岩土体的性质,降低了岩土体的物理力学强度,加剧了岸坡的变形。滑坡整体变形导致乡村公路与环湖公路不断被错断,左右边界向下部持续延伸。目前滑坡处于不稳定状态,时序 InSAR 变形曲线显示该滑坡始终处于匀速变形阶段,并未出现明显的加速变形,该滑坡现阶段受强降雨控制最为明显,呈现一定阶跃式变形特征。未来,该滑坡仍将以后缘推挤前缘变形为主,前缘地形相对较缓,且存在一处滑坡平台,这一特殊地形将对该滑坡起到一定抗滑作用。在降雨与重力作用下滑坡持续变形,后缘坡面不断下沉,坡表拉张裂缝不断扩展增多,向滑坡深部延伸扩展,导致滑面上部剪切面上应力持续集中,推挤滑坡前缘,最终导致整体滑动。

4 结 语

本文采用星载(多时相光学遥感技术、时序 InSAR 技术)、机载(多时相无人机航拍、多时相机载 LiDAR)及地面调查技术,并叠加库水位、降雨等环境因素综合分析红岩子滑坡自瀑布沟水电站蓄水以来 10 余年历史动态时空变形破坏演化特征,得出以下结论:

1)红岩子滑坡平面形态呈不规则半圆形,滑体厚 20~50 m,滑坡体积约 15 530 000 m³,滑动方向约 340°,三面临空,地下水位受河水影响较大。滑坡体物质主要由第四系块碎(卵)石层及

粉砂质粘土组成,结构松散渗透性较好。

2)红岩子滑坡在2006年甚至更早就已经存在在滑坡壁、滑坡台阶等各种要素,瀑布沟蓄水前期LiDAR影像(2009年)显示滑坡边界明显,但未有显著的新鲜变形破坏迹象。水库蓄水后次年大幅度水位下降后诱发滑坡复活,滑坡后缘出现明显新鲜拉裂缝,并持续被拉开,2015年之前滑坡变形受水位降幅控制,2015年之后受降雨控制。

3)红岩子滑坡为一处典型中后部推挤前部出现整体变形的蠕滑-拉裂式滑坡,前缘地形相对较缓,且存在一处滑坡平台,这一特殊地形将对该滑坡起到一定抗滑作用,在持续强降雨与滑坡重力作用下,拉张裂缝不断向深部扩展,剪应力不断集中,最终导致整体滑动。

4)本文所采用的不同技术对于滑坡演变分析起到的作用分别为:①InSAR技术能够识别滑坡不同部位的历史变形,多轨融合后能够分解出滑坡不同方向的变形特征;②多时相光学影像能够直观比对滑坡裂缝等变化特征;③多时相机载LiDAR能够实现长时间跨度周期内滑坡地形地貌变化特征,DEM差分技术能够获得滑坡垂向的变形特征。在现场调查基础上,结合以上手段可对滑坡“形态”“形变”与“形势”开展综合判译。

参 考 文 献

- [1] Sassa K, Fukuoka H, Wang F W, et al. Dynamic Properties of Earthquake-Induced Large-Scale Rapid Landslides Within Past Landslide Masses[J]. *Landslides*, 2005, 2(2): 125-134.
- [2] Xia Jinwu, Guo Houzhen. Distribution Characteristics and Controlling Factors of Landslides in the Upper Reaches of Yantze River[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1997, 24(1): 19-22. (夏金梧, 郭厚桢. 长江上游地区滑坡分布特征及主要控制因素探讨[J]. 水文地质工程地质, 1997, 24(1): 19-22.)
- [3] Wang H B, Xu W Y, Xu R C, et al. Hazard Assessment by 3D Stability Analysis of Landslides Due to Reservoir Impounding[J]. *Landslides*, 2007, 4(4): 381-388.
- [4] Tang Minggao, Li Songlin, Xu Qiang, et al. Study of Deformation Characteristics of Reservoir Landslide Based on Centrifugal Model Test [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(3): 755-764. (汤明高, 李松林, 许强, 等. 基于离心模型试验的库岸滑坡变形特征研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(3): 755-764.)
- [5] van Asch T W J, Malet J P, Bogaard T A. The Effect of Groundwater Fluctuations on the Velocity Pattern of Slow-Moving Landslides [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2009, 9(3): 739-749.
- [6] Strauhal T, Zangerl C, Fellin W, et al. Structure, Mineralogy and Geomechanical Properties of Shear Zones of Deep-Seated Rockslides in Metamorphic Rocks (Tyrol, Austria) [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(2): 419-438.
- [7] Li Songlin. Study on the Reactivation Characteristic and Deformation Self-Adaptive of Landslides in the Three Gorges Reservoir Area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020. (李松林. 三峡库区涉水滑坡对库水位变动的变形响应及其自适应性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.)
- [8] Xiang Ling, Wang Shimei, Wang Li. Response of Typical Hydrodynamic Pressure Landslide to Reservoir Water Level Fluctuation: Shuping Landslide in Three Gorges Reservoir as an Example[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(5): 876-882. (向玲, 王世梅, 王力. 动水压力型滑坡对库水位升降作用的响应: 以三峡库区树坪滑坡为例[J]. 工程地质学报, 2014, 22(5): 876-882.)
- [9] Zhang Y G, Zhang Z, Xue S, et al. Stability Analysis of a Typical Landslide Mass in the Three Gorges Reservoir Under Varying Reservoir Water Levels[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, 79(1): 42.
- [10] Lu Bo, Guo Yongcheng, Zhao Erping, et al. Analysis of Seepage Characteristics and Stability of a Slope Under Conditions of Reservoir Water Level Fluctuation and Rainfall[J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2017, 39(2): 54-59. (卢博, 郭永成, 赵二平, 等. 库水位变化和降雨条件下边坡渗流特性及稳定性分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2017, 39(2): 54-59.)
- [11] Yang He. Seepage Analysis and Unsaturated Soil Water Characteristic Test of the Landslide Mass in the Three Gorges Reservoir Area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017. (杨何. 三峡库区滑坡堆积体非饱和土-水特征测试及渗流分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.)
- [12] Wang Fawu, Song Kun. Analysis of Deformation and Failure Mechanism of Bank Slopes with Different Structures Under Reservoir Water Level Fluctuation: Taking Qianjiangping Landslide and Shuping Landslide as Examples[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(3): 575-582. (汪发武, 宋琨. 库水位涨落条件下不同结构边坡的变形破坏机制分析: 以千将坪滑坡和树坪滑坡为例[J]. 工程地质学报, 2021, 29(3): 575-582.)
- [13] Paronuzzi P, Rigo E, Bolla A. Influence of Filling -

- Drawdown Cycles of the Vajont Reservoir on Mt. Toc Slope Stability [J]. *Geomorphology*, 2013, 191: 75-93.
- [14] Song K, Wang F W, Yi Q L, et al. Landslide Deformation Behavior Influenced by Water Level Fluctuations of the Three Gorges Reservoir (China) [J]. *Engineering Geology*, 2018, 247: 58-68.
- [15] Tan Linyun, Huang Runqiu, Pei Xiangjun. Deformation Characteristics and Inducing Mechanisms of a Super-Large Bedding Rock Landslide Triggered by Reservoir Water Level Decline in Three Gorges Reservoir Area [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(2): 302-314. (谭淋耘, 黄润秋, 裴向军. 库水位下降诱发的特大型顺层岩质滑坡变形特征与诱发机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(2): 302-314.)
- [16] Xu Qiang, Dong Xiujun, Li Weile. Integrated Space-Air-Ground Early Detection, Monitoring and Warning System for Potential Catastrophic Geohazards [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 957-966. (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.)
- [17] Xie Mingli, Zhao Jianjun, Ju Nengpan, et al. Research on Temporal and Spatial Evolution of Landslide Based on Multisource Data: A Case Study of Huangnibazi Landslide [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(6): 923-932. (解明礼, 赵建军, 巨能攀, 等. 多源数据滑坡时空演化规律研究: 以黄泥坝子滑坡为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(6): 923-932.)
- [18] Liang Jingtao. Study on the Early Remote Sensing Identification and Evolution Characteristics of Typical Geological Disaster in High Intensity Earthquake Zone [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018. (梁京涛. 高烈度地震区典型地质灾害遥感早期识别及震后演化特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.)
- [19] Tang Yao, Wang Lijuan, Ma Guochao, et al. Emergency Monitoring of High-Level Landslide Disasters in Jinsha River Using Domestic Remote Sensing Satellites [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(2): 252-261. (唐尧, 王立娟, 马国超, 等. 利用国产遥感卫星进行金沙江高位滑坡灾害灾情应急监测[J]. 遥感学报, 2019, 23(2): 252-261.)
- [20] Zhang Jinghua, Zhang Jianlong, Ouyang Yuan. The Application of Remote Sensing Technology to Investigation of Geological Hazards in Hanyuan County [J]. *Remote Sensing Information*, 2010, 25(5): 87-92. (张景华, 张建龙, 欧阳渊. 遥感技术在汉源县地质灾害调查中的应用[J]. 遥感信息, 2010, 25(5): 87-92.)
- [21] Li Ming, Li Deren, Fan Dengke, et al. An Automatic PC-SIFT-Based Registration of Multi-source Images from Optical Satellites [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(1): 64-70. (李明, 李德仁, 范登科, 等. 利用PC-SIFT的多源光学卫星影像自动配准方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(1): 64-70.)
- [22] Wang Xuan, Fan Xuanmei, Yang Fan, et al. Remote Sensing Interpretation Method of Geological Hazards in Lush Mountainous Area [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1771-1781. (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.)
- [23] Guo Chen, Xu Qiang, Dong Xiujun, et al. Geohazard Recognition by Airborne LiDAR Technology in Complex Mountain Areas [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10): 1538-1547. (郭晨, 许强, 董秀军, 等. 复杂山区地质灾害机载激光雷达识别研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(10): 1538-1547.)
- [24] Li Xiaoen, Zhou Liang, Su Fenzhen, et al. Application of InSAR Technology in Landslide Hazard: Progress and Prospects [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(2): 614-629. (李晓恩, 周亮, 苏奋振, 等. InSAR技术在滑坡灾害中的应用研究进展[J]. 遥感学报, 2021, 25(2): 614-629.)
- [25] Dai Keren, Zhuo Guanchen, Xu Qiang, et al. Tracing the Pre-failure Two-Dimensional Surface Displacements of Nanyu Landslide, Gansu Province with Radar Interferometry [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(12): 1778-1786. (戴可人, 卓冠晨, 许强, 等. 雷达干涉测量对甘肃南峪乡滑坡灾前二维形变追溯[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(12): 1778-1786.)