



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目：综合遥感精准解译红层岩质滑坡四维特征——以垮梁子滑坡为例
作者：闫开云，李江，许强，吴宁安，张继，龚涛，刘义
DOI：10.13203/j.whugis20230118
收稿日期：2023-04-04
网络首发日期：2023-07-27
引用格式：闫开云，李江，许强，吴宁安，张继，龚涛，刘义. 综合遥感精准解译红层岩质滑坡四维特征——以垮梁子滑坡为例[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20230118>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20230118

引用格式：闫开云,李江,许强,等. 综合遥感精准解译红层岩质滑坡四维特征——以垮梁子滑坡为例[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,DOI:10.13203/J.whugis20230118 (YAN Kaiyun, LI Jiang, XU Qiang, et al. Accurate Interpretation of Four-Dimensional Characteristics of Red-Bed Rock Landslide by Comprehensive Remote Sensing- Taking Kualiangzi Landslide as an Example[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, DOI:10.13203/J.whugis20230118)

收稿日期：2023-04-04

项目资助：四川省科技计划项目(2021YFSY0036, 2022YFG0047); 四川省地矿局科技创新项目(SCDKZCKJXM-2021064)。

第一作者：闫开云, 硕士, 从事综合遥感数据处理、数据融合、地质灾害研究。keringyan@163.com。

通讯作者：李江, 博士, 高级工程师。815332772@qq.com

综合遥感精准解译红层岩质滑坡四维特征——以垮梁子滑坡为例

闫开云¹ 李江^{1,2} 许强² 吴宁安¹ 张继¹ 龚涛¹ 刘义³

1 四川省地质工程勘察院集团有限公司, 四川 成都, 610072

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, 四川 成都, 610059

3.北京兴遥数据科技有限公司, 北京, 102211

摘要：针对红层滑坡隐蔽性强、突发性高、成因机理复杂等特点, 人工地面调查或单一遥感手段难以实现滑坡的精准解译。以垮梁子特大型红层岩质滑坡为例, 采用机载激光雷达(Light Detection and Ranging, LiDAR)、光学遥感、合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)综合遥感技术, 对滑坡标志三维空间形态、滑坡水平方向及沿雷达视线方向时空变形演化规律的综合四维特征展开精准解译。结果表明, LiDAR 成果解译出滑坡边界与裂缝 33 条, 鼓丘 5 处、垮塌 3 处; 多时相光学影像数据结合高分辨率数字高程模型山体阴影图, 进行捕捉典型特征点变形位移, 解译了研究区 53 年内时空演化规律, 最大水平位移量为 40 m, 位于滑坡中部; 小基线集、干涉图堆叠时序 InSAR 技术破译滑坡中部近年来持续抬升, 最大抬升速率为 55 mm/a; 研究成果可实现对红层岩质滑坡四维特征的精准解译, 为红层地区滑坡灾害识别与防治提供指导。

关键词：综合遥感; 红层岩质滑坡; 四维特征; 垮梁子滑坡

中图分类号: P237

文献标识码: A

Accurate Interpretation of Four-Dimensional Characteristics of Red-Bed Rock Landslide by Comprehensive Remote Sensing

— Taking Kualiangzi Landslide as an Example

YAN Kaiyun¹ LI Jiang^{1,2} XU Qiang² WU Ning'an¹ ZHANG Ji¹ GONG Tao¹ LIU Yi³

1 Sichuan Institute of Geological Engineering Investigation Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610072,

China

2 State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of

Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China

3 Beijing Xingyao Data Technology Co., Ltd., Beijing 102211 China

Abstract: Objectives: Due to the characteristics of red-bed landslide, such as strong concealment, high suddenness and complex formation mechanism, it is difficult to accurately interpret the landslide by artificial ground survey or single remote sensing method. **Methods:** Taking Kualiangzi super-large red-bed rock landslide as an example, light detection and ranging (LiDAR), optical remote sensing and Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) comprehensive remote sensing technologies are used to accurately interpret the comprehensive four-dimensional characteristics of the three-dimensional spatial form of landslide signs, the horizontal direction of landslide and the spatiotemporal deformation evolution law in the line of sight direction. **Results:** LiDAR results have interpreted 33 landslide boundaries and cracks, 5 drums and 3 collapses. Multi-temporal optical image data were combined with

high-resolution digital elevation model hillshade map to capture the deformation and displacement of typical feature points, and interpret the spatiotemporal evolution law of the study area in 53 years. The maximum horizontal displacement is 40 m, which is located in the middle of the landslide. The InSAR technique of small baseline subsets and interferometer Stacking shows that the central part of the landslide has been continuously uplifted in recent years, and the maximum uplifting rate is 55 mm/a. **Conclusions:** The research results can accurately interpret the four-dimensional characteristics of red-bed rock landslide, and provide guidance for the identification and prevention of landslide disasters in red-bed areas.

Key words: Comprehensive remote sensing; Red bed rock landslide; Four-dimensional characteristics; Kualiangzi landslide

红层是典型的“易滑地层”，并在我国广泛分布，红层滑坡具有群发性和突发性高、隐蔽性强等特点^[1]。传统的地面调查手段受作业装备、人员效率、地质环境条件、调查成本等因素限制，难以精准解译滑坡特征。近年来，随着机载激光雷达（Light Detection and Ranging, LiDAR）、光学遥感、合成孔径雷达干涉测量（Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR）等技术的快速发展，借助以上手段可获得滑坡灾害多尺度、全方位、高精度的调查成果，为大型复杂红层滑坡这类隐蔽性灾害识别研究提供重要途径。

近年来，LiDAR 技术作为“三查”体系的重要手段^[2-4]，广泛应用于植被茂密、地形复杂地区地质灾害范围解译^[5-8]，总结了各类地质灾害地貌识别标志、解译方法，给出高植被覆盖山区地质灾害激光点云采样密度建议值^[9]，目前，机载 LiDAR 技术多用于确定滑坡边界等宏观信息，但针对红层岩质滑坡常见的拉陷槽、鼓丘、前缘垮塌等微地貌特征未建立相应的识别标志，难以实现对滑坡的精细化解译。对于滑坡识别及其空间形态变化规律分析，高精度光学遥感影像因其具有覆盖范围广、分辨率高、影像信息丰富等优势，基于灾害发生前后高精度遥感影像，完成了对九寨沟、金沙江地质灾害特征解译^[10-12]，利用多期次光学遥感影像对比分析滑坡的空间形态规律^[13]。对于变形周期超长的复杂滑坡，变形前期的影像资料对于变形规律的研究至关重要，随着美国锁眼卫星（KeyHole）影像数据的公开，相关学者开展了基于锁眼卫星数据的地震破坏分析^[14,15]、滑坡变化特征分析^[16]，由于锁眼卫星影像拍摄历史久远，存在无坐标系，地形起伏引起的畸变差大的问题，需要进行配准及

畸变差改正后才可应用于滑坡变形研究。将锁眼历史影像与近期高精度遥感影像相结合，对探索滑坡长期变形规律提供了有利的数据支持。时序 InSAR 技术因高效率、高精度、低成本等优点成为滑坡的识别和变形监测的重要手段^[17,18]，但 InSAR 监测数据受到地形、植被影响较大^[19,20]，以四川红层地区为例，红层分布地形以丘陵为主，地表植被覆盖度较高，通过小基线集（Small Baselines Subset, SBAS）、干涉图堆叠（Stacking）时序 InSAR 技术对四川典型红层区域进行监测，探索两种时序 InSAR 技术在典型红层地区适用性，并进一步总结红层岩质滑坡沿雷达视线（Line of Sight, LOS）方向变形规律。

因此，本文以垮梁子特大型红层岩质滑坡为例，利用综合遥感技术对滑坡标志三维空间形态、滑坡水平方向及 LOS 向时空演化规律的综合四维特征展开精准解译。LiDAR 技术获取滑坡三维空间形态；KeyHole 卫星、Google Earth 与无人机航测多时相光学影像数据结合高分辨率数字高程模型（Digital Elevation Model, DEM）山体阴影图解译滑坡水平变形规律；SBAS、Stacking 时序 InSAR 技术获取滑坡近年来 LOS 向时空演化规律。

1 垮梁子特大型红层岩质滑坡概况

垮梁子滑坡位于四川盆地中部中江县冯店镇，滑坡区属于构造剥蚀深丘地貌，滑坡纵向长约 590 m，横向宽约 1170 m，高差约 110 m，滑体平均厚度为 50 m，体积约为 $31.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ ，滑坡总体呈缓陡相间的台阶状，滑坡区域平均坡度 $10^\circ \sim 20^\circ$ ，前缘存在多级陡坎，具有较好的临空条件。

滑坡区出露基岩主要为侏罗系蓬莱镇组上段 (J_{3p}^2) 和第四系全新统滑坡堆积层 (Q_4^{del}), 其中侏罗系蓬莱镇组上段 (J_{3p}^2) 岩性为砂岩与泥岩、粉砂岩互层, 砂岩占 65% 以上。岩层整体倾向 $330^\circ\sim 340^\circ$, 倾角 $2^\circ\sim 5^\circ$ 。滑坡堆积层 (Q_4^{del}) 主要分布在垮梁子滑坡拉陷槽西侧的滑体部分, 成分为完整的砂岩夹泥岩。其地貌特征剖面示意图如图 1 所示。

据现场调查访问, 滑坡自 20 世纪 40 年

代以来, 坡体先后经历 1949 年、1981 年两次剧烈滑动。1949 年暴雨导致坡体第一次产生大的滑动, 后续受降雨影响坡体持续变形, 地表裂缝逐渐贯通扩张形成拉陷槽, 滑坡后缘形成陡壁。1981 年滑坡发生第二次剧烈滑动, 坡体整体向前推进导致前缘大量房屋破坏, 后缘形成 3 级拉陷槽地貌。1981 年至今, 滑坡处于持续蠕滑阶段^[21,22]。

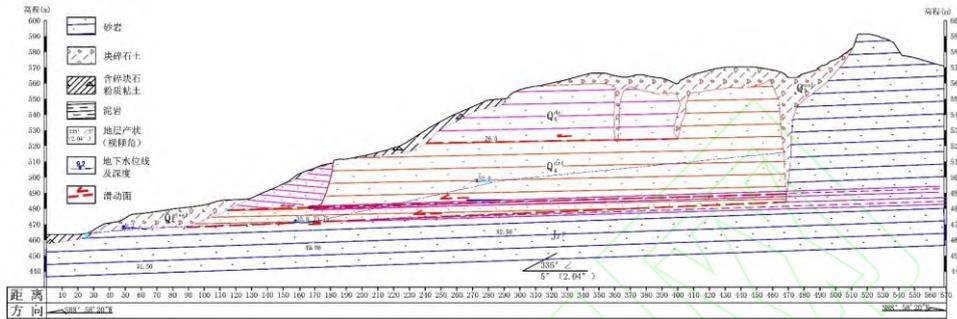


图 1 垮梁子滑坡地貌特征剖面示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Landform Feature Section of Kualiangzi Landslide

2 综合遥感精准解译红层岩质滑坡

2.1 实验数据

采用机载 LiDAR、光学遥感、InSAR 技术精准解译垮梁子特大型红层岩质滑坡四维特征。机载 LiDAR 获取高精度点云数据

生成山体阴影图, 用于解译滑坡标志。多时相光学遥感影像结合 DEM 山体阴影图解译滑坡平面变形规律。InSAR 技术用于获取滑坡的 LOS 向变形信息。相关数据主要技术参数如表 1 所示。

表 1 研究数据汇总表

Tab. 1 Summary of Research Data

技术手段	数据类型	实验数据	数据获取时间	分辨率	用途
机载 LiDAR	点云	DEM(山体阴影图)	2021 年	0.5 m	滑坡标志解译、平面变形分析
光学遥感	多时相光学影像	KeyHole 卫星影像	1968 年	2.7 m	平面变形分析
		Google Earth 影像	2003 年	0.27 m	平面变形分析
		无人机航测 DOM	2021 年	0.1 m	平面变形分析
InSAR	SAR 影像	Sentinel-1A	2018-01—2022-03	5 m × 20 m	LOS 向变形分析

2.2 机载 LiDAR 精细化解译滑坡标志

数据获取时间为 2021 年 12 月, 采用六旋翼无人机 KWT-X6L-15 搭载 RIEGL VUX-1LR 激光雷达, 飞行航高 300 m, 飞行速度 8 m/s, 获取的激光点云数据平均密度优于 200 点/m², 点云数据处理采用芬兰 Arttu Soininen 工程师开发的 Terra Solid 软件, 通过宏命令经点云去噪、滤波、分类, 同时结合人工判读修正分类结果, 获取研究区真实

地表点云数据, 分类后地面点平均密度优于 22 点/m², 进而利用分类出的地面点构建了高精度数字高程模型, 分辨率为 0.5 m, 坐标系为 2000 国家大地坐标系, 1985 国家高程基准。同时对同轴获取的光学影像采用 Pix4Dmapper 进行处理, 制作了研究区正射影像图, 分辨率 0.1 m, 用于辅助滑坡解译。

2.2.1 基于 LiDAR 点云生成山体阴影图

进行滑坡特征解译主要是通过 LiDAR

高精度 DEM 成果生成山体阴影图。当利用 DEM 生成山体阴影时需要考虑太阳方位角及高度角参数^[23]，不同方位角和高度角的配置对于局部特征的展现效果差异较大。垮梁子滑坡坡向大约为 270 度，分别设置 90°，180°，270°，360° 4 个方向（图 2）的光照，可以发现 90° 方向（与坡向相反）的山体纹理最清晰且色彩均匀，180°，360° 两个方向（与坡向垂直）山体纹理较为清晰且滑动方向山脊左、右侧色彩不一致，270° 方向（与坡向一致）山体纹理最弱。太阳高度角根据地形坡度进行调整，同一方位角，太阳高度角越大，区域范围明暗对比越弱。

观察不同太阳方位角照射的山体阴影图初步确定滑坡边界及各区域变形特征，同时以三维地表模型为基础绘制剖面线，用于解译裂缝宽度，裂缝深度等信息。最后将山体阴影图解译成果与区域高精度正射影像相结合，对解译成果进行优化，从而获取滑坡微地貌标志。

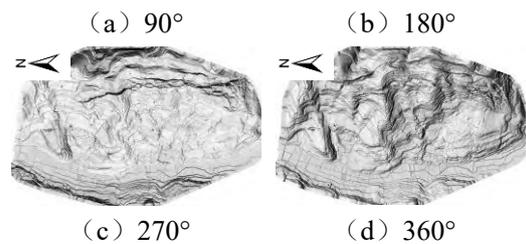


图 2 不同太阳方位角生成的山体阴影
Fig.2 Hillshade Maps Generated by Different Solar Azimuths

2.2.2 滑坡典型标志解译

确定滑坡边界，旨在找准滑坡前、后缘以及左、右侧边界的位置。滑坡的后缘主要是对拉陷槽、拉裂缝进行识别。滑坡前缘的确定，临空条件较差区域主要是通过斜坡前缘隆起现象判定，临空条件较好的区域通过出现局部溜滑、垮塌等现象进行识别。左、右侧边界可结合山脊、山谷等等地形特征以及拉裂缝的走向进行确定。

垮梁子滑坡后缘拉陷槽通过山体阴影图（图 3（a），图 3（b））观察因滑坡移动产生的陡崖，陡崖区域整体较暗。同时沿滑坡滑动方向绘制剖面线，通过剖面线（图 3（c））可直观发现拉陷槽宽度以及陡崖高差。

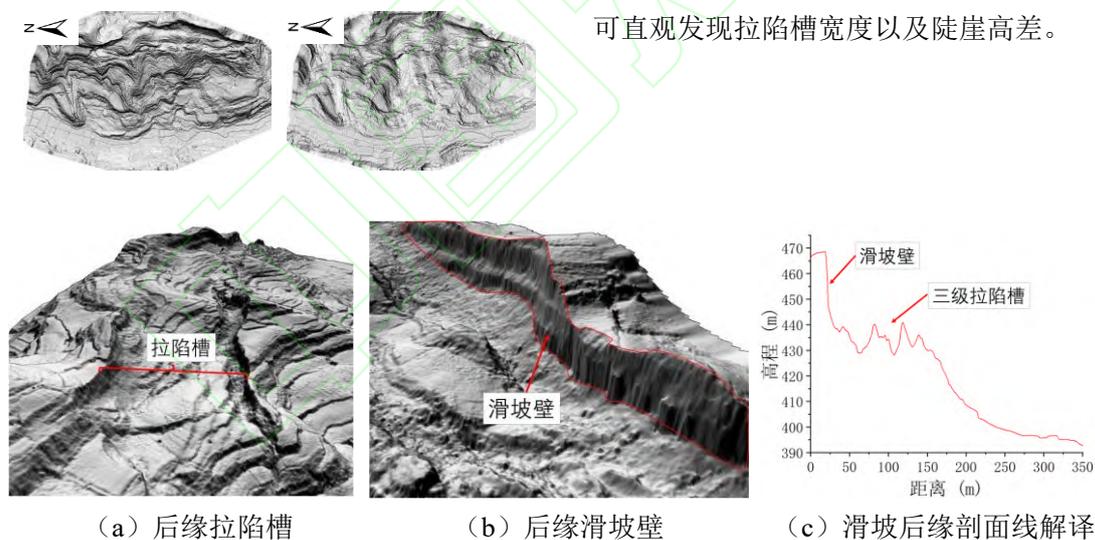


图 3 滑坡后缘解译标志

Fig.3 Identification Mark of Landslide Trailing Edge

滑坡裂缝在色彩亮度上表现出明显的阴影区，结合区域地形起伏情况对阴影区进行佐证，出现明显的凹地形可初步判别为拉裂缝（图 4）。

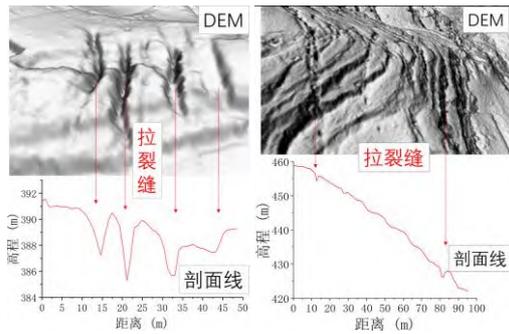


图 4 滑坡裂缝解译标志

Fig.4 Identification Mark of Landslide Crack

鼓丘与周围地貌特征呈现出一定的差异性（图 5），在地形特征上存在明显的“反翘”，鼓丘的判别主要通过三种途径：一是通过山体阴影图的亮度差异进行判断，在图像上鼓丘一侧的亮度一般明显高于附近其他区域；二是通过三维模型进行直接识别，旋转三维模型，根据地形起伏的变化识别鼓丘；三是通过绘制滑坡剖面线识别，鼓丘在曲线上存在明显凸起部分，可用于直接识别鼓丘的宽度和高度特征。

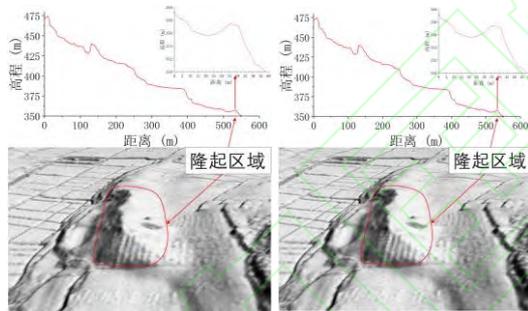
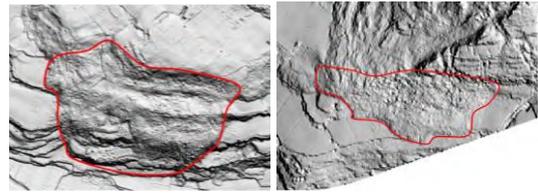


图 5 滑坡隆起区域解译标志

Fig.5 Identification Mark of Landslide Uplift Area

前缘垮塌区域主要是利用区域地形特征和图像纹理特征进行确定，以垮梁子滑坡前缘左侧垮塌为例，滑坡前缘垮塌通常具有较好的临空条件，观察区域整体地形特征，初步筛选出疑似垮塌区，进一步通过局部地形特征（图 6）发现：滑坡垮塌区域地形与未变形区域地形存在明显的差异，垮塌的发生导致原始耕地阶梯状地表形态消失，陡缓分明的区域变成坡度一致的斜坡。结合区域纹理特征，相对于未发生垮塌区域，垮塌区域纹理较为粗糙，且区域颜色较深。



(a) 前缘垮塌区 (b) 左侧垮塌区

图 6 滑坡前缘垮塌区解译标志

Fig.6 Identification Mark of Landslide Front Collapse Area

2.3 多时相影像+DEM 解译滑坡平面变形规律

研究垮梁子滑坡形态历史变形规律，采用的影像数据包括：KeyHole 卫星获取的 1968 年地面分辨率为 2.7 m 全色影像、Google Earth 获取 2003 年地面分辨率 0.27 m 多光谱影像、通过无人机获取的 2021 年滑坡区域高精度数字正射影像（Digital Orthophoto Map, DOM）和 DEM（山体阴影图）。

2.3.1 多时相影像数据融合

通过多源、多时相影像数据与 DEM 的整合，用于分析滑坡变形规律^[24]，对 KeyHole 卫星影像、Google Earth 影像两类数据成果进行如下融合处理。

1) 影像拼接。锁眼卫星获取一景影像包括多个图幅，每一个图幅为单独的 TIF 文件，且没有位置信息，实际应用过程中，需要将多张像片进行拼接处理，影像的拼接采用 Photoshop 基于相邻图幅之间重叠区域进行匹配完成。Google Earth 影像的拼接采用 ArcGIS 软件完成。

2) 地理配准。锁眼卫星影像无位置属性，Google Earth 影像也存在一定的位置偏差，影像地理配准工作采用 ArcGIS 软件平台完成，将所有影像设置到同一坐标系下，通过选择河流转折点、道路交叉点等不易发生变化的区域为控制点进行配准。由于研究区域可获取最早的锁眼卫星数据距今已有 50 余年，区域地形地貌变化较大，以及植被覆盖的影响，采用 Google Earth 获取 2003 的卫星影像、机载 LiDAR 获取的 DEM 生成的山体阴影图辅助控制点的选择。

3) 锁眼卫星影像正射校正。通过地理配准结果发现，在研究区域范围内，锁眼卫星

数据在靠近河流、沟谷等低海拔地区的地理配准效果较好，地形起伏较大的区域投影差显著增加，以 1968 年锁眼卫星影像为例，测量研究区四周未变形山地区域发现，海拔增加 100 m 产生的投影差约为 29.3 m，变形区域投影差平均变形方位角近似相等约为 9.5°。研究滑坡区域的变形，在完成地理配准后的影像上选取特征点，利用 DEM 获取特征点对应的高程信息，根据区域投影差的变形规律完成特征点的正射校正并恢复到正确位置。

2.3.2 影像特征点匹配

利用某一期影像的滑坡区域范围内确定特征点，并查找该特征点在他期影像中的相应位置，以分析滑坡平面变形规律。根据锁眼卫星获取的 1968 年影像（图 7（a）），Google Earth 获取的 2003 年影像（图 7（b）），

无人机获取的 2021 年区域正射影像（图 7（c））对比发现，1968 年历史影像植被覆盖率极低，便于直接观察滑坡各区域的地形信息。2003 年影像植被覆盖率较低，除滑坡后缘左侧发育大面积植被以外，其他区域植被较少，能较为清晰的识别地形信息。2021 年正射影像植被覆盖率较高，在滑坡前缘左、右侧存在较少区域的耕地以外，其他区域植被发育较好，难以识别地形信息。由于锁眼卫星分辨率相对较低，区域地表环境变化大，仅通过不同时期可见光遥感影像选取特征点数量有限，难以准确反应滑坡整体变化情况。采用 LiDAR 获取区域地面点，生成滑坡区域山体阴影图（图 7（d）），可直接观察典型地形特征点，有效解决植被覆盖导致特征点选择困难的问题。

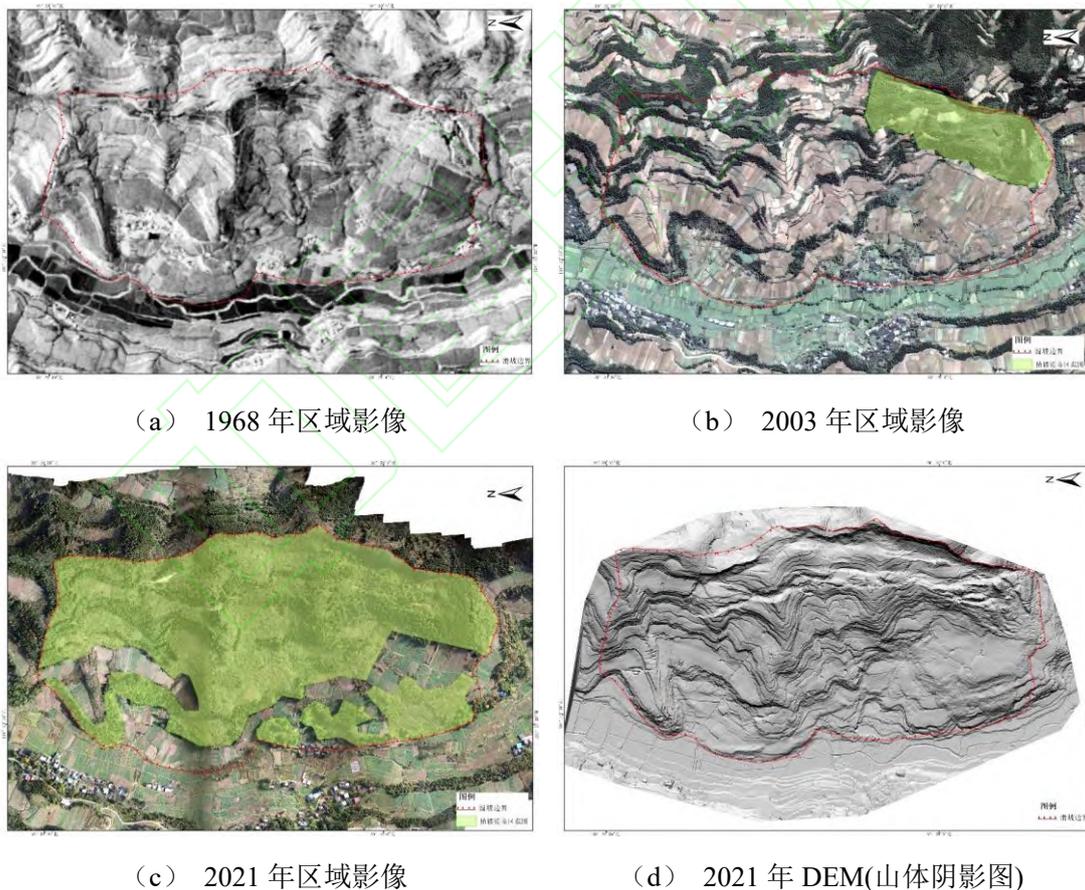


图 7 多时相遥感影像

Fig.7 Multi-temporal Remote Sensing Image

对比光学影像选择特征点，特征点一般选择在不同期次影像中色彩差异较大，明暗交界线清晰且有明显转角等容易识别的位置。

滑坡研究区域特征点的选择主要包括耕地的“L 型”边界，耕地林地交界处，道路交叉点等区域（图 8（a），图 8（b））。

利用山体阴影图选择特征点，主要包括具有明显转折角的陡坎边界、坡体范围内小型凹槽等（图 8（c），图 8（d））在小范围具

有明显地形变化的区域，相关区域在影像中明暗差异较大。

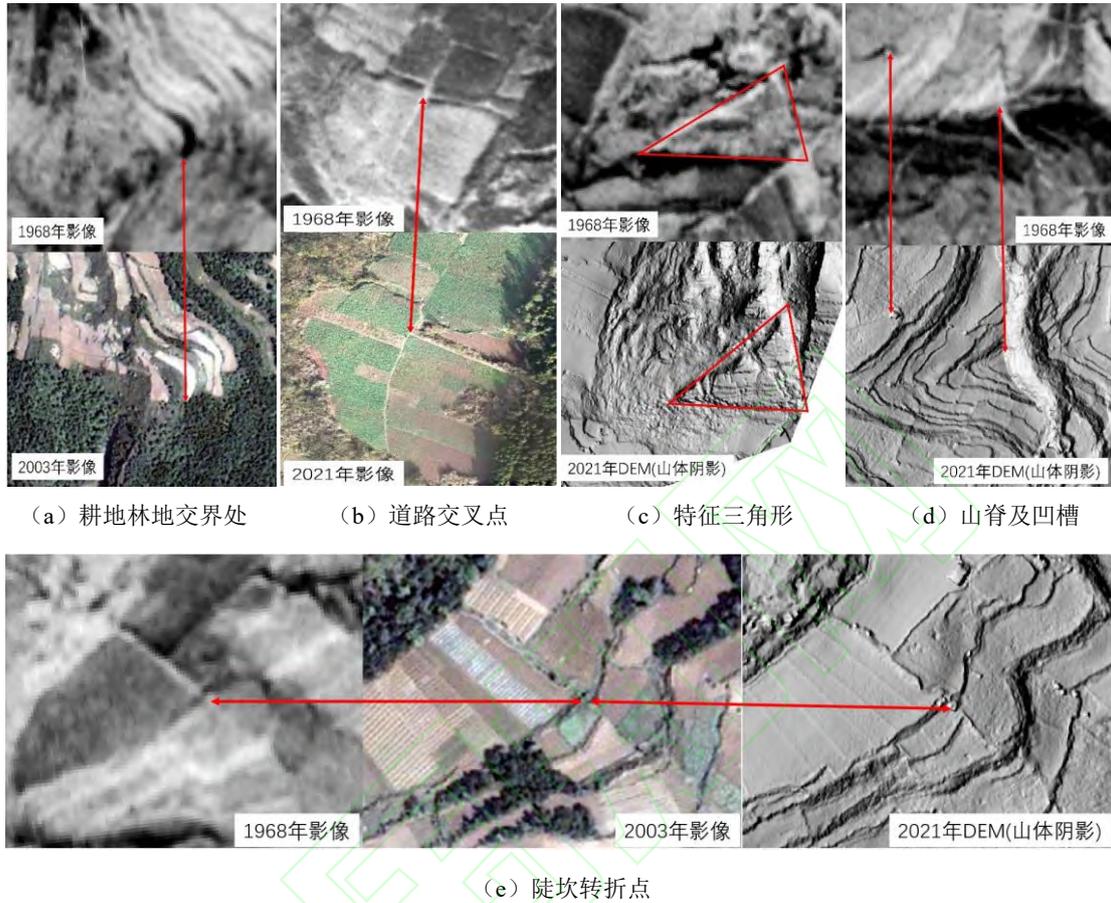


图 8 多时相光学影像和 DEM 提取特征点

Fig.8 Extraction of Feature Points Based on Multi-temporal Optical Image and DEM

2.4 InSAR 解译滑坡 LOS 向变形规律

结合研究区地形特征，选用欧空局 Sentinel-1A 卫星 SAR 影像数据，包括 2018 年 1 月至 2022 年 3 月共计 122 景升轨数据。DEM 采用由日本 METI 和美国 NASA 联合研制并免费面向公众分发空间分辨率为 30 m 的 ASTER GDEM 数据用于去除地形相位。轨道数据采用 POD 精密定轨星历数据，用于对卫星轨道信息进行修正，去除因轨道误差产生的影响。

2.4.1 区域植被覆盖度分析

由于 InSAR 技术难以适用于高植被覆盖地区滑坡识别与监测，因此，计算研究区域区域归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) (图 9)，通过对比区域 NDVI 和 SBAS、Stacking 时序 InSAR 成果，了解不同植被指数下的 InSAR 成果

的数据相关性，用于判别时序 InSAR 技术在不同植被覆盖情况下的适用情况，为 InSAR 在高植被覆盖地区进行滑坡识别与监测提供参考。分析研究区域夏、冬两季植被覆盖情况，夏季 NDVI 为 0.47~0.89，均值为 0.78，从分布情况来开，滑坡西侧（中前缘）植被覆盖度较低，NDVI 为 0.47~0.89，滑坡东侧（后缘）植被覆盖度较高，NDVI 为 0.71~0.89。冬季 NDVI 为 0.33~0.9，均值为 0.75，在滑坡中部植被覆盖度较低。对比夏、冬两季 NDVI 发现，该滑坡区域常年植被覆盖度较高，NDVI 均值长期大于 0.7。

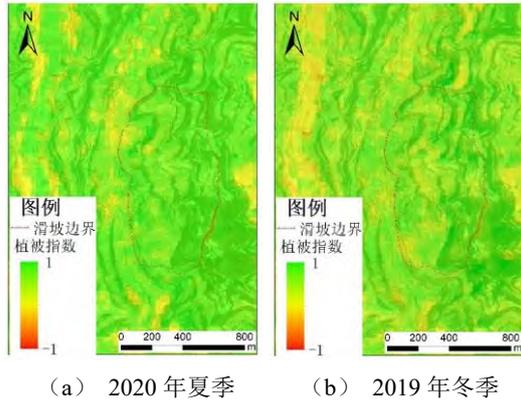


图9 研究区 NDVI

Fig.9 NDVI in the Study Area

2.4.2 时序 InSAR 监测

采用 SBAS、Stacking 两种时序 InSAR 方法进行数据处理, SBAS 是为了解决差分干涉测量 (Differential InSAR, D-InSAR) 方法中空间基线过长导致失相干问题所提出, 充分利用短基线高相关性的相干目标点, 采用最小二乘法获得相干目标点的时序形变结果。Stacking 数据处理方法是基于 D-InSAR 生成干涉图结果, 经过解缠将相位加权叠加, 最终获取地表的形变速率结果^[25]。根据两种

时序 InSAR 结果综合分析, 初步掌握时序 InSAR 技术在研究区域的适用性, 并解译滑坡的 LOS 向变形规律。

3 垮梁子滑坡四维变形特征综合分析

LiDAR 解译滑坡典型微地貌特征, 多时相影像与高精度 DEM 融合分析滑坡 53 年内水平变形, 时序 InSAR 技术精准掌握滑坡 LOS 向变形。采用综合遥感技术精准解译垮梁子特大型红层岩质滑坡平面、LOS 向历史变形四维特征。

3.1 滑坡标志解译结果

根据 LiDAR 结果 (图 10) 显示: 滑坡长约 590 m, 宽约 1170 m, 面积为 0.62 km², 明确滑坡后缘拉陷槽范围, 拉陷槽长约 975 m, 最大宽度约为 193 m, 约 0.15 km²。识别滑坡体裂缝 33 条, 其中横向裂缝 27 条, 纵向裂缝 6 条。前缘隆起区 5 处, 最大隆起区域面积为 6160 m², 位于前缘中右侧, 最小隆起区域面积为 2120 m², 位于滑坡前缘中部左侧。垮塌 3 处, 位于滑坡前缘左侧, 面积约 36327 m²。

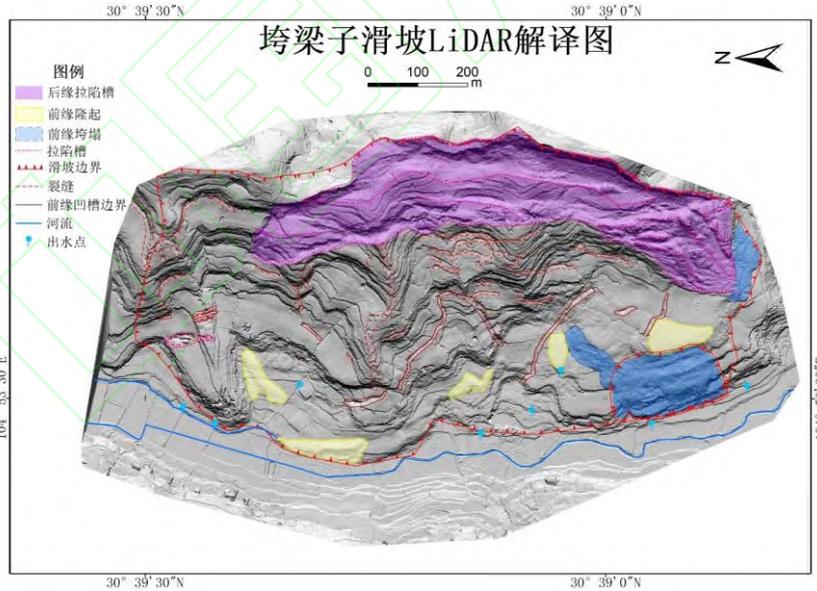


图 10 垮梁子滑坡 LiDAR 解译图

Fig.10 LiDAR Interpretation Map of Kualiangzi Landslide

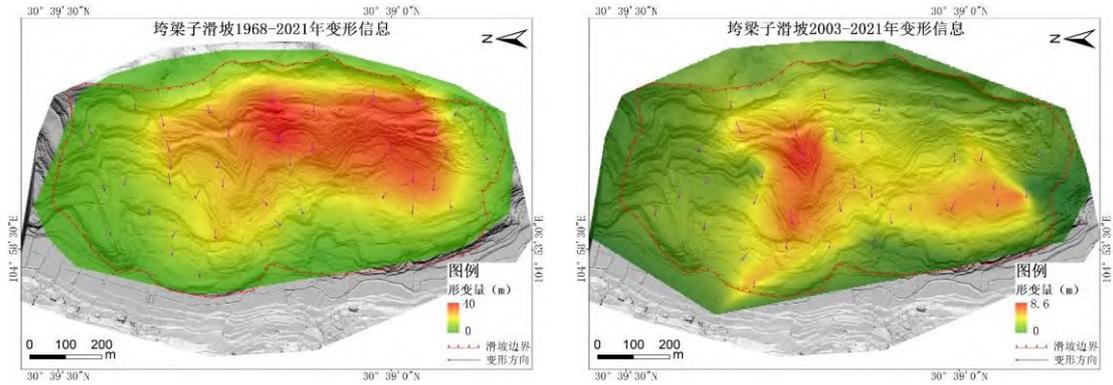
3.2 滑坡平面变形规律

在不同期次影像中选择特征点并进行匹配, 特征点经插值后得到滑坡整体变形信息。确定 1968—2021 年变形特征点 59 对, 且均匀的分布在斜坡范围内 (图 11 (a)),

其中变形较大的点位于滑坡后缘中部及滑坡后缘左侧, 最大变形量为 40 m, 滑坡整体变形方向与坡向一致。匹配 2003—2021 年变形特征点 43 对 (图 11 (b)), 变形较大区域位于滑坡中部山脊线附近以及滑坡左侧

中部。最大变形量为 8.6 m，位于滑坡中部

山脊。



(a) 1968—2021 年

(b) 2003—2021 年

图 11 垮梁子滑坡历史变形图

Fig.11 Historical Deformation Map of Kualiangzi Landslide

3.3 滑坡 LOS 向变形规律及时序 InSAR 适用性

根据 SBAS 方法得到垮梁子滑坡年均变形速率图 (图 12) 结果发现, SBAS 滑坡后缘失相干严重, 存在大面积空白区域; 在滑坡中前缘具有一定的相干性, 得到部分区域的变形信息。从相干性较好区域得变形结果分析, 滑坡前缘变形量较小, 较为稳定; 滑坡中部存在大面积的抬升区域, 最大抬升速率约为 30 mm/a; 滑坡南侧 (左侧) 出现沉降局部沉降, 最大沉降速率约为 30 mm/a。

从在滑坡变形区域提取 1~4 号四处特征点, 绘制 2018-01—2022-03 累计沉降图(图 13) 所示, 最大抬升位于 2 号点区域(滑坡中部), 累计抬升量为 90 mm, 最大沉降量位于 4 号点区域 (滑坡前缘左侧), 累计沉降量约为 100 mm。

Stacking 探测结果显示, 2018 年至 2022 年期间年平均沉降速率图 (图 14), 在垮梁子滑坡范围内出现宽约 800 m, 长约 300 m 的抬升区域, 最大抬升位于滑坡东部 (滑坡中后缘), 抬升速率为 55 mm/a, 滑坡西部 (前缘) 变形相对较为缓慢。

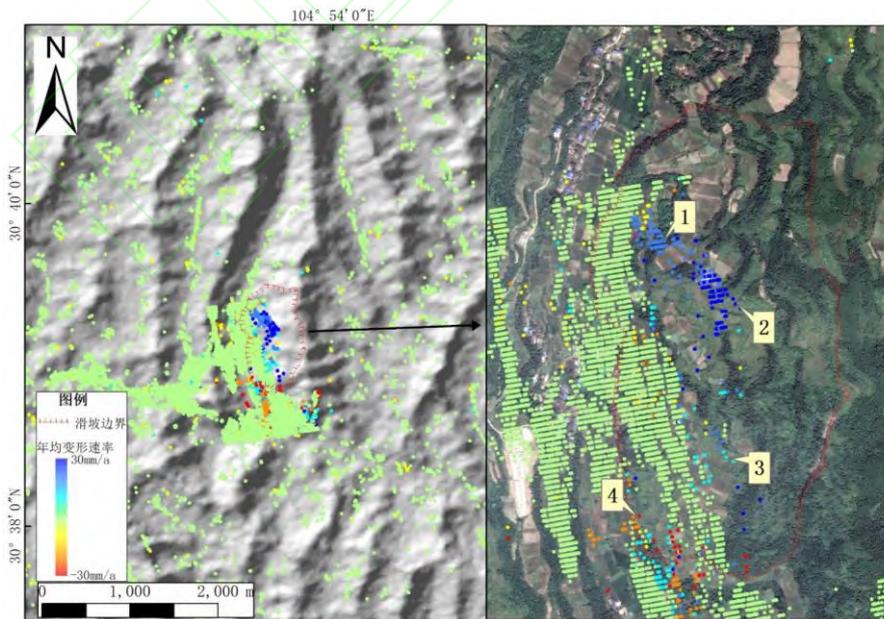


图 12 基于 SBAS 的年均形变速率图 (2018—2022 年)

Fig.12 Average Annual Deformation Rate Map by SBAS (2018—2022)

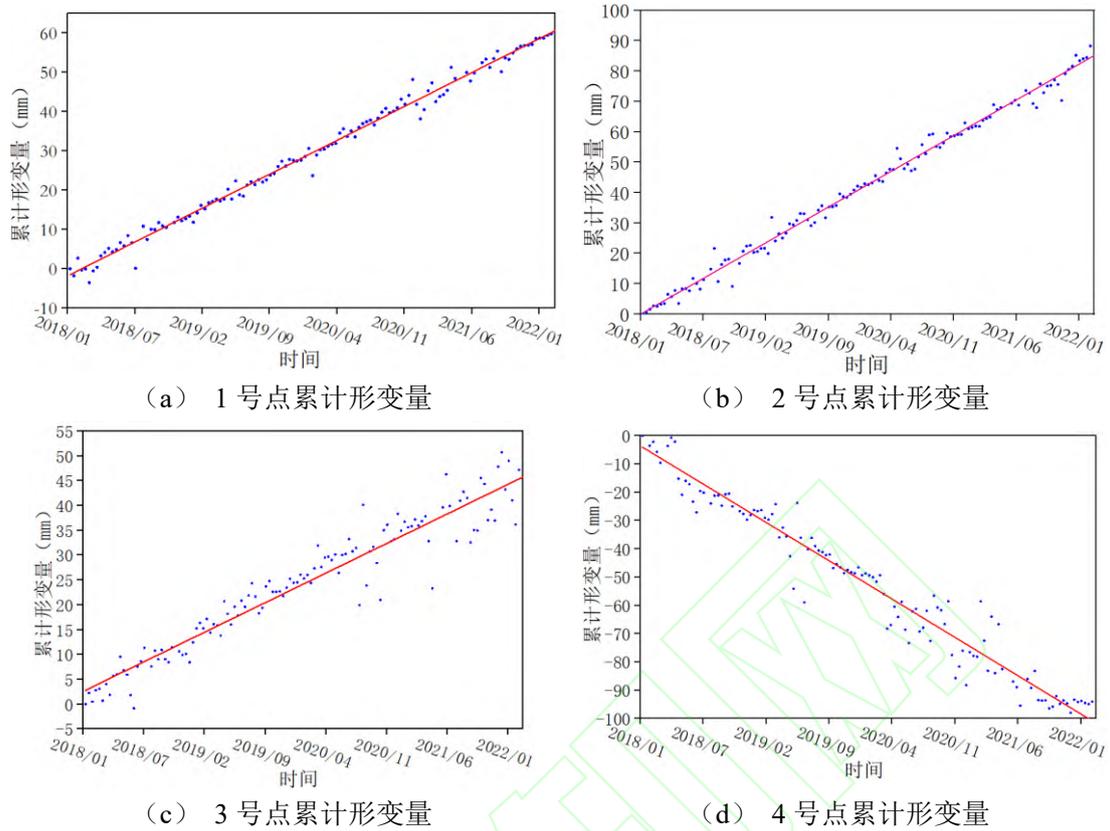


图 13 典型特征点累计形变时间序列

Fig.13 Accumulative Deformation Time Series of Typical Characteristic Points

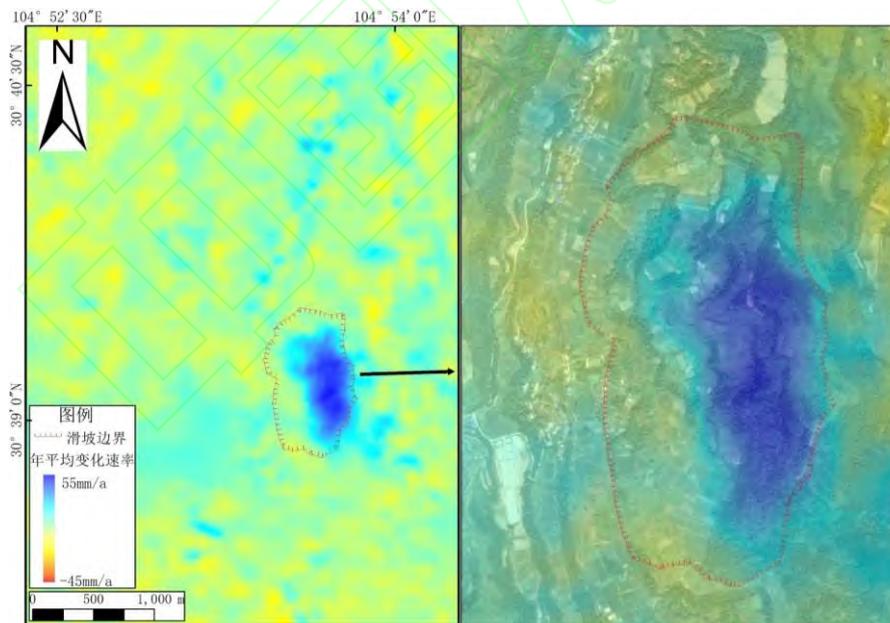


图 14 基于 Stacking 的年均形变速率图（2018—2022 年）

Fig.14 Average Annual Deformation Rate Map by Stacking (2018—2022)

时序 InSAR 结果显示, SBAS 获取最大年均变形速率为 30 mm/a, Stacking 为 55 mm/a, SBAS 和 Stacking 获取的滑坡年平均变形趋势总体一致, 垮梁子滑坡与其他典型

滑坡 InSAR 探测结果相反, 相比滑坡以沉降为主的变形特征, 垮梁子滑坡本次 InSAR 探测结果未发现明显的后缘沉降区域, 滑坡变形主要表现为大范围的抬升, 这与垮梁子

滑坡属于平推式滑坡的变形机理相吻合,由于滑坡倾角较小,滑坡中、后缘地形坡度远大于滑坡倾角,滑坡发生时,滑体中、后缘高海拔区域向前移动代替原有地形,从而滑坡监测结果表现为抬升。

对比区域 NDVI 和 SBAS、Stacking 时序 InSAR 成果表明,SBAS 探测结果在植被指数低于 0.7 的能够获取一定的相干点,植被指数大于 0.7 的区域失相干严重,相关区域存在空白。Stacking 结果受地形误差、大气误差以及耕地区域人为活动等因素的影响,探测结果中出现的局部变形主要为误差产生的噪点,垮梁子滑坡区域 Stacking 探测结果显示,滑坡出现明显的抬升变形,且抬升变形在较大范围内表现出一致性。相比于 SBAS 结果而言,Stacking 结果对于滑坡区域整体变形信息获取更加完整,形变区探测结果与实际调查滑坡范围较为一致。

3.4 垮梁子滑坡四维变形特征

综合多源遥感数据结果,LiDAR 成果数据解译垮梁子滑坡面积约为 0.62 km²,经过多年得变形逐步形成三级拉陷槽,在滑坡前缘出现明显鼓丘及垮塌地形。利用 1968 锁眼历史影像与 2021 年影像数据、高精度山体阴影图对比分析,滑坡整体变形方向与坡向基本一致,局部变形朝着优势面发展,其中滑坡中左区域、中右区域坡体位移方向朝着中部凹地形发展,滑坡历史整体变形中部及左侧变形明显,最大变形量约为 40 m,但 2003—2021 年期间,滑坡中部山脊区域变形相对活跃,最大变形量约为 8.6 m。通过 2018 年至 2022 年 InSAR 监测结果发现,垮梁子滑坡中部变形明显,滑坡年均变形量较为均衡,并表现出的整体抬升情况,符合平推式滑坡变形规律,由于平推式滑坡倾角小,滑坡整体滑动时,滑坡前缘至后缘拉陷槽之前地形整体前移,导致滑坡中前缘低海拔区域地形被后缘高海拔区域地形替代,从而在 InSAR 监测结果上表现为整体抬升,区域最大抬升速率为 55 mm/a。

4 结语

以垮梁子特大型红层岩质滑坡为例,采用 LiDAR、光学遥感、InSAR 综合遥感技术,

从红层滑坡典型微地貌、空间变形等方面对红层岩质滑坡四维特征精准解译展开研究,得到如下结论:

1) 针对红层高植被覆盖区域,通过机载 LiDAR 成果数据,精准解译了研究区红层岩质滑坡拉陷槽、鼓丘、前缘垮塌等典型微地貌。

2) 利用 KeyHole 卫星、Google Earth 无人机航测多时相光学影像数据与高分辨率 DEM 山体阴影图对比分析,精准识别滑坡各区域变形量及变形方向,滑坡变形活跃区域由前期的中左侧转为现在的中部山脊附近,揭示了垮梁子滑坡 53 年内滑坡体平面变形规律。

3) 时序 InSAR 技术获取滑坡 LOS 向变形。相比传统滑坡以区域沉降进行识别,垮梁子为代表的红层岩质平推式滑坡在 InSAR 探测结果表现出明显的“抬升”,该特征可为同类型滑坡灾害的识别及机理研究提供参考。

参考文献

- [1] Xu Qiang, Tang Ran. Study on Red Beds and its Geological Hazards [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(1):28-50 (许强, 唐然. 红层及其地质灾害研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(1):28-50)
- [2] Xu Qiang, Lu Huiyan, Li Weile, et al. Types of Potential Landslide and Corresponding Identification Technologies[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(3): 377-387 (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)
- [3] 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)
- [4] GE Daqing. Comprehensive Application of Remote Sensing in Early Identification, Monitoring and

- Early warning in Geological Disasters [J]. *City and Disaster Reduction*, 2018(6):53-60 (葛大庆. 地质灾害早期识别与监测预警中的综合遥感应用[J]. 城市与减灾, 2018(6):53-60)
- [5] He Peng, Yan Yuyan, Wen Yan, et al. Application of the airborne LiDAR technology in the identification of flat landslides and their crack grooves[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2022, 34(4): 307-316 (贺鹏, 颜瑜严, 文艳等. 机载 LiDAR 技术在缓倾地层滑坡及其拉裂槽识别中的应用[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(4): 307-316)
- [6] Zhang Qin, Zhao Chaoying, Chen Xuerong. Technical Progress and Development Trend of Geological Hazards Early Identification with Multi-source Remote Sensing [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(6): 885-896 (张勤, 赵超英, 陈雪蓉. 多源遥感地质灾害早期识别技术进展与发展趋势[J]. 测绘学报, 2022, 51(6):885-896)
- [7] 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)
- [8] 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)
- [9] Dong Xiujun, Xu Qiang, She Jinxing, et al. Preliminary Study on Interpretation of Geological Hazards in Jiuzhaigou Based on Multisource Remote Sensing Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(3): 432-441 (董秀军, 许强, 余金星等. 九寨沟核心景区多源遥感数据地质灾害解译初探[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(3):432-441)
- [10] Ding Yonghui, Zhang Qing, Yang Chengsheng, et al. Landslide identification in Jinsha River basin based on high resolution remote sensing: taking Wangdalong village of Batang county as an example[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2022(4): 51-55 (丁永辉, 张勤, 杨成生等. 基于高分遥感的金沙江流域滑坡识别——以巴塘县王大龙村为例[J]. 测绘通报, 2022(4):51-55)
- [11] Tang Yao, Wang Lijuan, Ma Guochao, et al. Disaster Monitoring and Application Prospect Analysis of the Jinsha River Landslide Based on "Gaofen+"[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 1082-1092 (唐尧, 王立娟, 马国超等. 基于“高分+”的金沙江滑坡灾情监测与应用前景分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7):1082-1092)
- [12] Dai Lanxin, Xu Qiang, Fan Xuanmei, et al. 2017: A Preliminary Study on Spatial Distribution Patterns of Landslides Triggered by Jiuzhaigou Earthquake in Sichuan on August 8th, 2017 and Their Susceptibility Assessment. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(4): 1151-1164 (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)
- [13] 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)
- [14] Zhang Jingfa, Li Qiang, Zhang Qingyun, et al. Intensity Zone of the 1976 Ms7.8 Tangshan Earthquake Based on Multisource Remote Sensing Images[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(S1):173 (张景发, 李强, 张庆云, 等. 多源遥感图像的1976年Ms7.8唐山大地震等烈度区判定[J]. 遥感学报, 2018, 22(S1):162-173)
- [15] Lu Lejun, Zhou Yu. Extracting Surface Displacements of Historical Earthquakes Using KH-9 Satellite Images: A Case Example of 1976 Chaldiran Earthquake, Turkey[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021,

- 46(2): 289-295 (卢乐浚, 周宇. 利用锁眼卫星影像提取历史地震同震位移——以 1976 年土耳其 Chaldiran 地震为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(2):289-295)
- [16] Wang Zhe, Zhao Chaoying, Liu Xiaojie, et al. Evolution Analysis and Deformation Monitoring of Yigong Landslide in Tibet with Optical Remote Sensing and InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10):1569-1578 (王哲, 赵超英, 刘晓杰等. 西藏易贡滑坡演化光学遥感分析与 InSAR 形变监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(10):1569-1578)
- [17] Xiang Qiwen, Guo Jincheng, Wang Juan, et al. Application of time series InSAR in recognition of hidden dangers of geological hazards in Guizhou Area [J] . *Science of Surveying and Mapping*, 2022, 47(9):112-119 (向淇文, 郭金城, 汪娟等. 时序 InSAR 在贵州区域地质灾害隐患识别的应用[J]. 测绘科学, 2022, 47(9):112-119)
- [18] Zhuo Guanchen, Dai Keren, Zhou Fujun, Shen Yue, Chen Chen, Xu Qiang. Monitoring Typical Construction Sites of Sichuan-Tibet Traffic Corridor by InSAR and Intensive Distortion Analysis[J]. *Earth Science*, 2022, 47(6):2031-2047 (卓冠晨, 戴可人, 周福军等. 川藏交通廊道典型工点 InSAR 监测及几何畸变精细判识[J]. 地球科学, 2022, 47(6):2031-2047)
- [19] WU Lüchuan, WANG Jianhui, FU Yan. Early Identifying and Monitoring Landslides in Guizhou Province with InSAR and Optical Remote Sensing[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021(7): 98-102 (吴绿川, 王剑辉, 符彦. 基于 InSAR 技术和光学遥感的贵州省滑坡早期识别与监测[J]. 测绘通报, 2021(7):98-102)
- [20] Yu Xiangwei, Xue Dongjian, Chen Fengjiao. Analysis of Influence of Vegetation Coverage and Slope on SAR Interferometric Coherence[J]. *Mountain Research*, 2020, 38(6): 926-934 (余祥伟, 薛东剑, 陈凤娇. 植被及坡度对 SAR 干涉相干性的影响分析[J]. 山地学报, 2020, 38(6):926-934)
- [21] Zhai Guojun. Analysis of the Basic Characteristics and Deformation mechanism of Kualiangzi Landslide in ZhongJiang[D]. Chengdu :Chengdu University of Technology, 2011 (翟国军. 中江冯店垮梁子滑坡基本特征与变形机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011)
- [22] Guo Xiaoguang, Huang Runqiu, Deng Hui, et al. Formation and Mechanism Analysis of Multilevel Rift Trough in Translational Sliding Landslide [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2013: 21(5): 770-777 (郭晓光, 黄润秋, 邓辉等. 平推式滑坡多级拉陷槽形成过程及成因机理分析[J]. 工程地质学报, 2013, 21(5):770-778)
- [23] Liu Xiaosha, Dong Xiujun, Qian Jiren, et al. A Weighted Radial Basis Function Interpolation Method for High Accuracy DEM Modeling [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, DOI : 10.13203/j.whugis20210486. (刘小莎, 董秀军, 钱济人, 等. 高植被山区泥石流物源 LiDAR 遥感精细识别方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20210486.)
- [24] Massimo C, Michele M, Luigi B. Morphological Changes Detection of a Large Earthflow Using Archived Images, LiDAR-Derived DTM, and UAV-Based Remote Sensing[J]. *Remote Sensing*, 2020, 13(1).
- [25] Sha Yonglian. Deformation Field Monitoring in Mining Area and Parameter Inversion of Fully-mechanized Face Based on Multi-temporal InSAR [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020 (沙永莲. 基于多时相 In-SAR 的矿区形变场监测与综采面参数反演[D]. 成都: 西南交通大学, 2020)