

董岳,丁明涛,李鑫泷,等. 基于光学遥感像素偏移量的金沙江流域2018年白格滑坡演变过程[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(6): 1002-1015.

DONG Yue, DING Ming-tao, LI Xin-long, et al. Evolution of the 2018 Baige Landslides Revealed by Optical Remote Sensing Pixel Offsets in Jinsha River Basin, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(6): 1002-1015.

DOI: 10.19814/j.jese.2022.05025

· 纪念刘国昌先生诞辰110周年专辑 ·

基于光学遥感像素偏移量的金沙江流域 2018年白格滑坡演变过程

董岳^{1,2}, 丁明涛^{1,2,3*}, 李鑫泷^{1,2}, 张雪松^{1,2}, 黄武彪^{1,2},
刘振江^{1,2}, 李振洪^{1,2,3}

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西西安 710054; 2. 长安大学地学与卫星大数据研究中心,
陕西西安 710054; 3. 长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西西安 710054)

摘要:随着光学遥感卫星的增多以及影像质量的提升,利用光学遥感影像监测地表形变呈现出极大的发展潜力。以金沙江流域典型的高位远程滑坡——白格滑坡为例,选取 Sentinel-2 光学影像,综合利用像素偏移量跟踪(Offset-tracking)技术和时序反演(Time-series Inversion)算法,对2018年“10·10”白格滑坡和“11·3”白格滑坡前后的地表形变进行了反演与分析。结果表明:①“10·10”白格滑坡发生前(2015年11月13日~2018年2月5日)坡体最大水平位移为31.69 m,时序位移呈现出明显的“初始启动→等速变形→加速变形”过程特征;②“11·3”白格滑坡发生前(2018年10月28日~2018年11月2日)东西向(主滑方向)形变高达12.89 m,与雷达影像偏移量跟踪结果一致;③“11·3”白格滑坡发生后(2020年1月16日~2022年2月4日)部分残留堆积体东西向累计形变最高达7.71 m,滑移迹象明显,存在再次成灾风险。通过分析 COSI-Corr 和 CARST 两种光学影像偏移量跟踪软件的形变结果、InSAR 形变探测结果和无人机三维变化检测结果,验证光学影像偏移量跟踪方法探测地表形变具有较好的精度和可靠性。

关键词:光学遥感;偏移量跟踪技术;时序反演算法;COSI-Corr;CARST;DEM差分;形变监测;白格滑坡;金沙江流域

中图分类号:P237

文献标志码:A

文章编号:1672-6561(2022)06-1002-14

Evolution of the 2018 Baige Landslides Revealed by Optical Remote Sensing Pixel Offsets in Jinsha River Basin, China

DONG Yue^{1,2}, DING Ming-tao^{1,2,3*}, LI Xin-long^{1,2}, ZHANG Xue-song^{1,2},
HUANG Wu-biao^{1,2}, LIU Zhen-jiang^{1,2}, LI Zhen-hong^{1,2,3}

(1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Big Data Center for Geosciences and Satellites, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

3. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering of

收稿日期:2022-05-16;修回日期:2022-07-22 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3000400);国家自然科学基金项目(41941019,42090053);

陕西省科技创新团队项目(2021TD-51);陕西省地学大数据与地质灾害防治创新团队项目(2022);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102262203,300102262902);

陕西省土地整治重点实验室开放基金项目(2019-ZD04)

作者简介:董岳(1998-),女,山东德州人,工学硕士研究生,E-mail:2020126048@chd.edu.cn。

* 通讯作者:丁明涛(1983-),男,湖北天门人,副教授,理学博士,E-mail:mingtaoding@chd.edu.cn。

Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: With the increasing number of optical remote sensing satellites and the improvement of image quality, the optical images show great potential for monitoring surface deformation. Taking the typical high-elevation Baige landslides during 2018 in Jinsha River Basin as examples, the pixel offset-tracking method and time-series inversion algorithm were employed to process Sentinel-2 optical images for extracting the surface displacement time series of “10 · 10” and “11 · 3” Baige landslides. The results show that ① the cumulative surface displacement before “10 · 10” Baige landslide is up to 31.69 m from 13 November 2015 to 5 February 2018, the time series displacement presents an obvious process characteristics of “initial start → constant deformation → accelerated deformation”; ② the cumulative surface displacement before “11 · 3” Baige landslide in the EW direction is about 12.89 m (about 1 pixel) from 28 October 2018 to 2 November 2018, which is consistent with radar image offset-tracking results; ③ after “11 · 3” Baige landslide, the cumulative surface displacement in the EW direction of some residual deposits is up to 7.71 m from 16 January 2020 to 4 February 2022, and clear sliding signs can be observed, indicating a high risk for a new disaster. Furthermore, the reliability of the optical image offset-tracking method for detecting surface deformation is demonstrated through the comparisons between two offset-tracking softwares of COSI-Corr and CARST with InSAR and UAV 3D results.

Key words: optical remote sensing; offset-tracking technology; time-series inversion algorithm; COSI-Corr; CARST; DEM differential; deformation monitoring; Baige landslide; Jinsha River Basin

0 引言

滑坡作为一种最为普遍的地质灾害,在全球产生了百亿美元的经济损失,并造成了数以万计的人员伤亡。中国幅员辽阔、地质环境复杂,是全球受滑坡灾害影响最大的国家之一^[1]。在中国,滑坡占地质灾害总量的70%以上,是除地震外造成国家经济损失和人员伤亡最大的地质灾害之一^[2]。在国家工程建设不断推进、人类活动日益加剧的背景下,近年来中国滑坡灾害多发,西部大开发、“一带一路”倡议以及黄河流域生态保护和高质量发展等重要战略的实施受到很大影响^[3]。通过可靠的技术手段监测滑坡形变,减少滑坡易发区的人员伤亡,对中国社会主义建设和经济发展进步具有重大意义。

目前,滑坡监测主要以实地监测和遥感监测的方式对滑坡的演变过程进行分析并预警。实地监测过程需要耗费大量的人力物力,且危险性较高。遥感监测是一线地质调查人员广为采用的技术手段,根据影像来源可分为光学遥感监测和雷达遥感监测^[4]。雷达遥感监测利用影像中相位和强度信息,能获取距离向和方位向的时序形变结果,但在高植被覆盖区域容易出现相位失相干现象^[5]。为获取植

被茂密区域滑坡的形变过程,基于光学影像的地表形变监测技术得到新的发展。光学遥感监测最早以目视解译为主,随着卫星成像技术和航天测量技术的日益成熟,基于影像光谱自动/半自动监测地表形变逐步变得可行^[6]。偏移量跟踪(Offset-tracking)技术是一种利用互相关算法估计影像间像素位移的技术,在监测滑坡形变、同震形变、冰川流速、沙丘移动等地表形变方面得到了广泛应用^[7]。Michel等采用图像互相关法从亚像素相关角度进行偏移量跟踪,得到关于美国南加州 Landers 地震的地表断层破裂图和二维地表位移场^[8]。Strozzi等首次将偏移量跟踪技术应用于冰川,将冰川方位向偏移量和距离向偏移量相结合,得到冰川运动二维位移图^[9]。刘云华等应用偏移量跟踪技术绘制玉树地震地表破裂图,研究中国青海玉树地震断层地表破裂的空间分布特征,通过确定地震受灾区为地震救援提供帮助^[10]。Zhao等采用图像偏移跟踪技术对中国内蒙古两个矿区的地表变形进行分析,并通过最小二乘算法得到矿区的累计时序地表位移^[11]。Ding等基于 Landsat-8 和 Sentinel-2 光学影像进行偏移量跟踪运算,并借鉴 SBAS-InSAR 时序分析技术,成功获取了中国甘肃民勤沙丘的稠密位移时序及其时空

格局^[12]。Ding 等还通过图像互相关方法和位移时序反演技术,利用 Landsat-8、Sentinel-2 和 Gaofen-2 多源光学影像,研究中国西藏白格滑坡灾前的位移形变过程及诱发因素^[13]。

光学影像偏移量跟踪技术可以直接在空间域利用互相关算法获取地表形变,也可将影像进行傅里叶变换后在频域进行互相关运算,进而求解空间域二维形变。频域互相关算法基于频域相位相关性进行形变分析,空间域互相关算法基于图像幅值相关性进行形变分析。基于频域互相关算法计算光学遥感像素偏移的软件主要有 COSI-Corr (Co-registration of Optically Sensed Images and Correlation) 软件;基于空间域互相关算法计算光学遥感像素偏移的软件主要有 CARST (Cryosphere and Remote Sensing Toolkit) 软件^[14-15]、ImCorr (Image Cross-correlation Software) 软件^[16]、MicMac (Multi Images Correspondances par Methods Automatiques de Correlation) 软件^[17-18]。其中,运用最广的互相关算法软件——COSI-Corr 软件和 CARST 软件均是由美国加州理工学院为实现光学遥感像素偏移量跟踪而发布的免费公开软件。COSI-Corr 软件用于图像频域中的相位互相关分析,CARST 软件基于图像中的强度信息进行互相关分析。COSI-Corr 软件通过一个迭代的、无偏的处理器来实现图像相关,CARST 软件通过 ROI_PAC (Repeat Orbit Interferometry Package) 中的 AmpCor (Amplitude Cross Correlation) 进行像素跟踪得到位移估计值。COSI-Corr 软件于 2007 年公布,是基于 IDL 语言安装在 ENVI 下的一款插件,可以实现对光学影像亚像素级别的精确配准,被广泛应用于监测地表形变过程^[19]。Michel 等基于 Spot-5 光学影像对卡塔尔沙丘迁移进行偏移量跟踪,通过与 GCM 预测模型的对比分析来研究沙丘迁移的影响因素^[20]。Chen 等通过 COSI-Corr 软件绘制地震断裂带的地表破裂和断层滑动^[21]。Miles 等通过 COSI-Corr 软件绘制丹麦冰川流动速度图以及时序影像来记录冰川的流动过程^[22]。CARST 软件是 2019 年 Zheng 等为访问 GDAL 和 ISCE 开发的一个基于 Python 和 Bash 脚本的开源工具包^[23],可以实现光学影像的像素跟踪,并应用于监测冰川和冰盖的时序变化^[15]。

基于此,本文首先通过选择合适的搜索窗口和步长,用 COSI-Corr 软件和 CARST 软件对金沙江流域典型的高位远程滑坡——2018 年“10·10”和“11·3”白格滑坡进行偏移量跟踪,得到滑坡地表形

变图,对比分析这两种软件得到的偏移量跟踪结果;然后根据获取的影像对互相关结果,对“10·10”白格滑坡发生前的光学影像进行时序分析,获取两种二维时序位移形变量,分析滑坡时空演化特征,并将 Sentinel-1 雷达影像和无人机影像作为辅助数据验证光学影像形变结果,为“11·3”白格滑坡和滑坡后形变监测提供可靠的数据支撑,以期金沙江流域类似滑坡演变过程研究提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

白格滑坡位于西藏自治区昌都市江达县白格村金沙江右岸,经纬度为(31°04′55.8″N、98°42′14.69″E),地处青藏高原和四川盆地的过渡地带——金沙江构造带。该区域地壳活动剧烈,地震灾害频发。白格滑坡在 2018 年 10 月 11 日和 11 月 3 日连续发生两次滑移事件,分别命名为“10·10”白格滑坡和“11·3”白格滑坡。图 1(a)是覆盖研究区的 DEM 影像,图 1(b)、(c)分别是 2017 年 7 月 18 日 GeoEye-1 卫星和 2019 年 4 月 14 日 WorldView-2 卫星获取的白格滑坡发生前后的高分辨率遥感影像。研究区地势险峻,植被覆盖密度高,相对高差约为 2 000 m,整体呈现为“陡→缓→陡”趋势,滑坡前缘受金沙江侵蚀。

1.2 数据来源

本文采用 Google Earth Engine (GEE) 平台中经大气校正的 Sentinel-2 影像 1C 级产品作为数据源。Sentinel-2 影像的最高空间分辨率可达 10 m,经贺礼家等研究发现 Sentinel-2 影像中近红外波段的形变效果要明显优于其他同等分辨率波段^[24],因此,本文选用近红外波段进行形变分析。本文采用在 GEE 平台上获取的白格滑坡灾害发生前后 20 景 Sentinel-2 影像,时间跨度为 2015 年 11 月 13 日至 2021 年 11 月 11 日(表 1)。

选取“10·10”白格滑坡发生前获取的 2015 年

表 1 Sentinel-2 影像基本参数信息

Table 1 Basic Parameter Information of Sentinel-2 Image

参数	Sentinel-2 影像信息
光学传感器	MSI A/B
影像波段	NIR
空间分辨率/m	10
产品级别	Level-1C
影像数量	20 景
时间覆盖	2015-11-13~2021-11-11

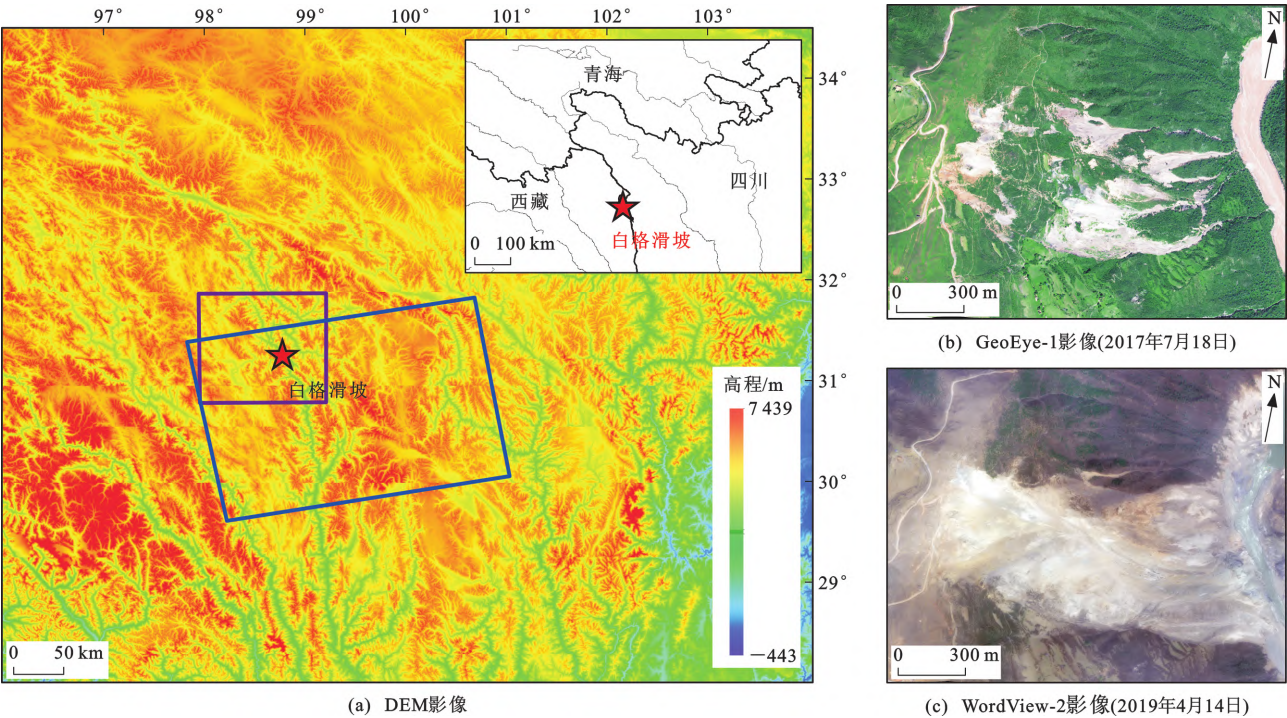


图 1 金沙江流域白格滑坡区域遥感影像

Fig. 1 Remote Sensing Images of Baige Landslides in Jinsha River Basin

11 月 13 日和 2018 年 2 月 5 日双时相影像、“11·3”白格滑坡发生前获取的 2018 年 10 月 28 日和 2018 年 11 月 2 日双时相影像以及“11·3”白格滑坡发生后获取的 2020 年 1 月 26 日和 2022 年 2 月 4 日双时相影像(表 2),利用 COSI-Corr 软件和 CARST 软件进行偏移量跟踪对比。选取覆盖 2015 年 11 月至 2018 年 6 月的 16 景影像进行偏移量跟踪和地表形变时序累计位移分析。影像配对原则为:冬季影像的太阳高度角小于 45°,太阳方位角小于 165°;夏季影像太阳高度角小于 75°,太阳方位角小于 130°。

2 分析方法与实验设置

2.1 偏移量跟踪技术与实验设置

2.1.1 相关性匹配算法

偏移量跟踪技术的基本原理是通过对光学影像采用相关性匹配算法来计算像元之间的偏移量,其核心是相关性匹配算法。

频域互相关算法是基于傅里叶变换原理,将位于空间域的偏移值转变为频域中的相位差值,从而得到两景影像前后的位移差。设两张原始影像函数分别为 $f_1(x,y)$ 和 $f_2(x,y)$,经傅里叶变换后得到函数 $F_1(u,v)$ 和 $F_2(u,v)$ 。频域互相关算法的计算公式为

$$f_2(x,y)=f_1(x-x_0,y-y_0) \tag{1}$$

$$F_2(u,v)=F_1(u,v)e^{-i(ux_0+vy_0)} \tag{2}$$

$$\frac{F_2(u,v)F_1(u,v)^*}{|F_2(u,v)F_1(u,v)^*|}=e^{-i(ux_0+vy_0)} \tag{3}$$

表 2 Sentinel-2 影像基本信息

Table 2 Basic Information of Sentinel-2 Images

影像编号	采集时间	太阳高度角/(°)	太阳方位角/(°)
1	2015-11-13	39.523 1	164.377 5
2	2015-12-23	33.256 7	162.142 4
3	2016-05-11	70.685 2	129.302 6
4	2016-11-07	40.982 2	164.074 0
5	2016-12-07	34.462 7	163.801 4
6	2017-01-16	34.856 8	158.246 3
7	2017-02-05	39.192 0	154.809 4
8	2017-05-16	71.493 3	126.767 9
9	2017-07-15	71.221 2	116.563 9
10	2017-10-18	47.358 4	161.060 0
11	2017-11-17	38.353 3	164.477 4
12	2017-12-07	33.491 4	162.780 3
13	2018-01-16	34.819 3	158.285 7
14	2018-02-05	39.124 2	154.850 3
15	2018-05-21	72.145 3	124.196 2
16	2018-06-05	73.237 2	116.968 1
17	2018-10-28	44.173 3	162.902 1
18	2018-11-02	42.613 0	163.558 4
19	2020-01-16	34.748 1	158.380 0
20	2022-02-04	35.861 5	155.027 0

式中: * 表示复共轭; (x, y) 为空间域坐标; (u, v) 为坐标 (x, y) 经傅里叶变换后的频域坐标; (x_0, y_0) 为两张原始影像 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 的相对位移。

由式(1)、(2)可通过两种方式求解影像偏移值 (x_0, y_0) : 一种是通过拟合相位平面在频域内求解; 另一种是通过傅里叶逆变换得到狄拉克函数 $\delta(x - x_0, y - y_0)$ 的峰值, 再使用曲面拟合算法求解偏移值 (x_0, y_0) 。

空间域互相关算法, 即强度互相关算法, 通过计算两景影像的相关系数矩阵以及插值和曲面拟合等过程来确定影像的位移。其主要步骤为: 步骤一, 获取滑坡发生前后两景影像, 将其分别作为参考影像和搜索影像; 用两个大小相同的滑动窗口 s_1 和 s_2 分别在参考影像 f_1 的目标区域 r_1 和搜索影像 f_2 的搜索区域 r_2 进行滑动, 依次计算互相关系数, 得到互相关系数矩阵; 由互相关系数最大值所在的位置计算两景影像之间的整数位移 (x_1) 。步骤二, 在互相关系数最大值的位置利用周围像素进行重采样; 选取另外两个大小相同的滑动窗口 s_3 和 s_4 , 对重采样后的影像依次计算滑动窗口 s_3 和 s_4 的互相关系数, 得到另一个互相关系数矩阵; 对其进行重采样, 根据互相关系数最大值所在位置计算小数偏移 (x_2) 。步骤三, 利用步骤二中得到的互相关系数峰值及其周围点进行 Sinc 插值, 得到精度小于 x_2 的小数偏移 (x_3) 。步骤四, 由 x_1, x_2, x_3 得到总位移 (X) 。

2.1.2 实验设置

首先在 GEE 平台上获取包含白格滑坡范围内的影像, 对其进行含云量和时间跨度的筛选, 并对整景影像进行裁剪, 获得覆盖白格滑坡范围的近红外波段影像。将在 GEE 平台上获取的 1C 级影像产品直接应用于 COSI-Corr 软件中, COSI-Corr 软件通过选择合适的搜索窗口和步长进行互相关计算, 获取白格滑坡东西向和南北向的地表形变结果图。窗口大小是影响形变结果的重要参数, 初始窗口用于获取粗估计像素的位移, 最终窗口用于获取亚像素级别的位移。窗口越大, 噪声影响越小, 形变结果越平滑; 窗口越小, 噪声影响越大, 形变边界更为详细^[25-26]。本文对选取的 6 景影像通过设置合适的步长和窗口参数进行图像互相关处理(表 3), 得到二维形变结果并对比分析。

2.2 二维时序形变方法与实验设置

2.2.1 时序反演算法

时序反演(Time-series Inversion)算法是一种

主要应用于探测长时间缓慢地表形变区域变化特征的监测技术。为了解“10·10”白格滑坡发生前的时空形变规律, 本文采用偏移量跟踪技术和奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)算法进行时序形变分析, 以得到“10·10”白格滑坡 2015 年 11 月 13 日至 2018 年 6 月 5 日期间时序稠密的地表形变, 主要流程如图 2 所示。

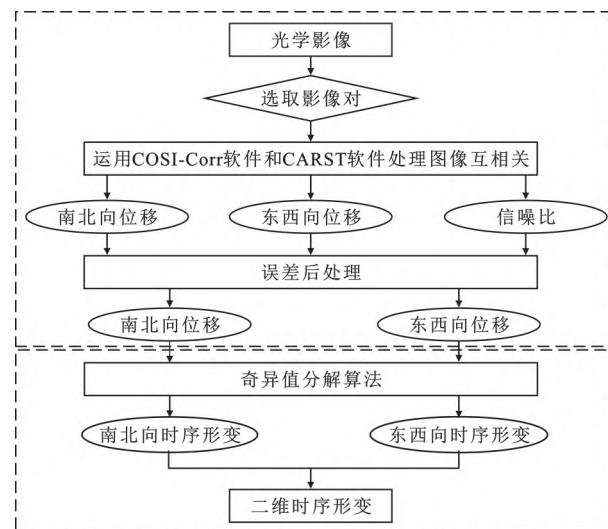


图 2 二维时序形变处理流程

Fig. 2 Workflow for Processing 2D Time Series Deformation

光学影像时序形变监测是由 Berardino 等于 2002 年提出并应用于地表形变监测的短基线差分干涉测量(SBAS-InSAR)技术^[27]演变而来。其将覆盖同一区域的 $N+1$ 景光学影像, 按时间获取顺序 $(t_0, t_1, t_2, \dots, t_N)$ 依次排列, 根据太阳高度角和太阳方位角的相似度组成影像对, 得到 M 幅互相关影像对。影像对数量 M 和影像数量 $(N+1)$ 之间的关系满足

$$\frac{N+1}{2} \leq M \leq N \left(\frac{N+1}{2} \right) \quad (4)$$

将相邻影像对之间的形变速度视为未知数, 所有影像对的形变时间和形变观测值视为已知数, 构建出相应的观测方程。其表达式为

$$Bv = d \quad (5)$$

$$d = [d_1 \ d_2 \ \dots \ d_M]^T \quad (6)$$

$$v = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_N]^T \quad (7)$$

式中: B 为 $M \times N$ 的系数矩阵, 矩阵元素由相邻影像的时间间隔组成; d 为 $M \times 1$ 的矩阵, 矩阵元素由所有互相关影像对的形变观测值 (d_i) 组成 $(i = 1, 2, \dots, M)$; v 是 $N \times 1$ 的矩阵, 矩阵元素由相邻影像之间的形变速度 (v_j) 组成 $(j = 1, 2, \dots, N)$ 。

表 3 COSI-Corr 软件和 CARST 软件参数设置

Table 3 Parameter Setting of COSI-Corr and CARST Softwares

软件名称	参数		“10·10”白格滑坡发生前 (2015-11-13~2018-02-05)	“11·3”白格滑坡发生前 (2018-10-28~2018-11-02)	“11·3”白格滑坡发生后 (2020-01-16~2022-02-04)
COSI-Corr	搜索窗口	初始窗口	64×64 像素	32×32 像素	64×64 像素
		最终窗口	64×64 像素	32×32 像素	64×64 像素
	步长		1×1 像素	1×1 像素	1×1 像素
	迭代次数		4 次	2 次	2 次
	阈值掩膜		0.9	0.9	0.9
CARST	搜索窗口	初始窗口	32×32 像素	32×32 像素	
		最终窗口	32×32 像素	4×4 像素	
	步长		1×1 像素	1×1 像素	

设主影像为 m_i , 从影像为 s_i , 矩阵 B 中的元素可表示为

$$B(i, j) = \begin{cases} t_{j+1} - t_i & (m_i + 1 \leq j \leq s_i) \\ 0 & (j < m_i + 1 \text{ 或 } j > s_i) \end{cases} \quad (8)$$

求解过程分为两种情况:一种为 B 满秩时,通过最小二乘准则解算;另一种为 B 秩亏时,通过加权奇异值分解算法求解未知数 v 。

B 满秩时,通过最小二乘准则解算的表达式为

$$v = (B^T P B)^{-1} B^T P d \quad (9)$$

$$\omega_i = \frac{1}{\sigma_i} \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (10)$$

式中: P 为 $M \times M$ 的权重矩阵, $P = \text{diag}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M)$; ω_i 由第 i 个影像对的标准差 σ_i 的倒数构成,是衡量各影像对所占权重的指标。

B 秩亏时,通过加权奇异值分解算法求解未知数,首先需要构建观测方程,然后对加权矩阵和系数矩阵进行奇异值分解。其表达式为

$$\sqrt{P} B v = \sqrt{P} d \quad (11)$$

$$Z = \sqrt{P} B = \text{svd}(U, S, V) = U S V^T \quad (12)$$

式中: $\text{svd}(U, S, V)$ 为奇异值分解函数; U 为 $M \times M$ 的正交矩阵,是 $Z Z^T$ 特征向量; V 为 $N \times M$ 的矩阵,是 $Z^T Z$ 特征向量; S 是 $M \times M$ 的对角矩阵。

最后,求解未知数 v 。其表达式为

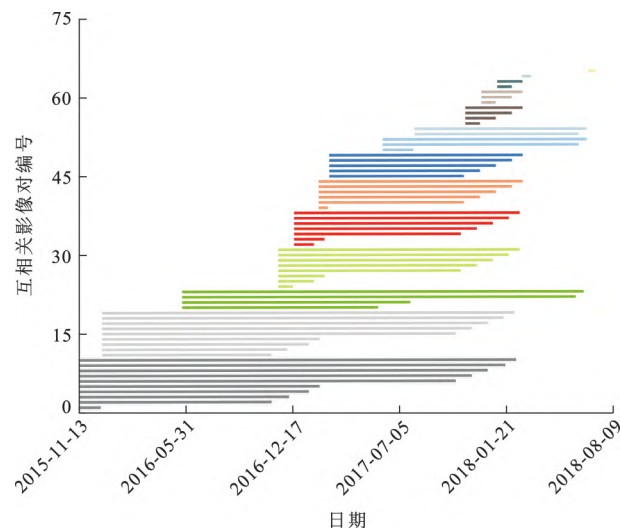
$$N = v S^+ U^T \sqrt{P} d \quad (13)$$

式中: S^+ 为 S 的伪逆,由奇异值 σ'_i 组成,即 $S^+ = \text{diag}(\frac{1}{\sigma'_1}, \frac{1}{\sigma'_2}, \dots, \frac{1}{\sigma'_{N-L+1}}, 0, \dots, 0)$, 奇异值是 0 的数量有 $L-1$ 个。

2.2.2 实验设置

本文选取月份数差异小于 3 个月且含云量在白格滑坡区域较少的光学影像进行时序分析^[28]。根据筛选后影像的太阳高度角和太阳方位角(表 2)选

取影像对,将太阳高度角与太阳方位角相似的每一景影像组成影像对,得到 65 组影像对(图 3)。对每一幅影像对进行偏移量跟踪,根据表 3 中设置的参数进行图像互相关处理,获取每一幅影像对的二维形变信息。将每一幅影像对得到的东西向位移和南北向位移作为已知形变值,通过对不同时间间隔的影像对赋予权重,得到累计时序形变结果。



具有相同基准影像的影像对具有相同的颜色

图 3 Sentinel-2 影像对分布

Fig. 3 Distribution of Sentinel-2 Image Pairs

3 结果分析及精度评定

3.1 “10·10”白格滑坡形变

COSI-Corr 软件初始搜索窗口和最终搜索窗口均为 64×64 像素,步长为 1×1 像素;CARST 软件初始搜索窗口和最终搜索窗口均为 32×32 像素,步长为 1×1 像素(表 3)。两种软件均通过偏移量跟踪技术得到 2015 年 11 月至 2018 年 2 月“10·10”白格滑坡发生前的二维形变。由图 4 可知:两种软件得到的结果具有相似的空间分布范围,COSI-

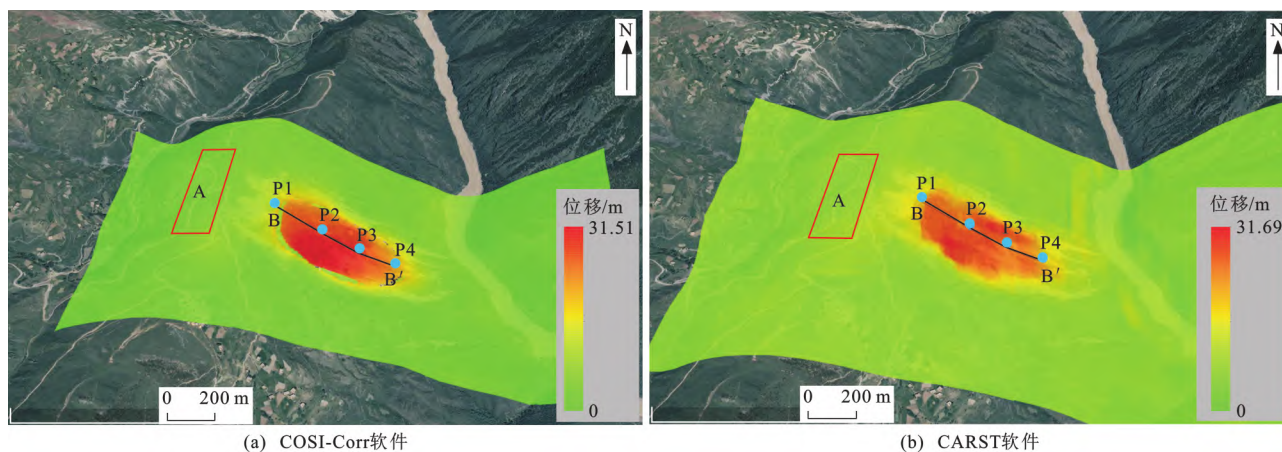


图4 “10·10”白格滑坡二维形变影像

Fig. 4 2D Deformation Images of “10 · 10” Baige Landslide

Corr 软件得到的二维形变最大值为 31.51 m(约 3 个像素), CARST 软件得到的二维形变最大值为 31.69 m(约 3.2 个像素)。由已知成果可知,“10·10”白格滑坡整体呈东西向滑动^[25],因此,选取东西向剖面线进行进一步形变分析,并沿剖面线 B—B' 分别选取 4 个剖面点 P1、P2、P3、P4,如图 4 所示。

由图 5 可知:东西向剖面线在 COSI-Corr 软件和 CARST 软件中的二维累积形变变化趋势一致;两种软件得到的沿剖面线二维形变平均值分别为 27.07 和 26.11 m;COSI-Corr 软件得到的形变曲线比 CARST 软件更平滑,这主要是由于图像经傅里叶变换后的频域对噪声更为稳健,可以很好地去掉噪声对互相关结果的影响,但两种软件都能反映出“10·10”白格滑坡的总体形变范围。

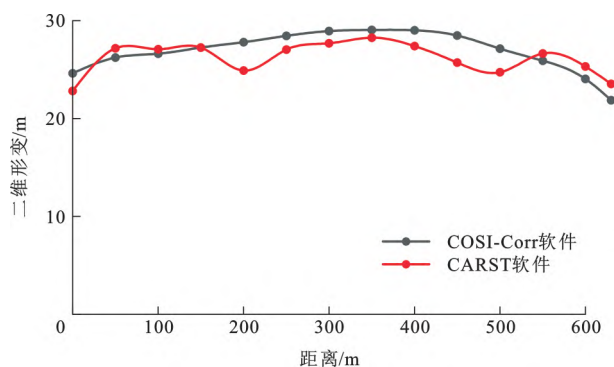


图5 “10·10”白格滑坡沿剖面线 B—B' 的二维形变

Fig. 5 Diagram of 2D Deformation of “10 · 10” Baige Landslide Along Section B—B'

为了对结果进行可靠性评价,本文选取图 4 中的稳定区域 A 作为形变参考区,通过计算标准差对实验结果进行精度评定。COSI-Corr 软件的标准差(0.44 m)比 CARST 软件(0.77 m)小,表明 COSI-Corr 软件在稳定区域 A 具有较高的稳定性,误差影

响小,这与文献[29]中标准差的形变精度高达 1/20 个像素的结论一致。

为了分析白格滑坡发生前的时序形变过程,选取 2015 年 11 月至 2018 年 6 月的 16 景 Sentinel-2 影像(表 2)进行图像互相关处理,得到 65 个影像对并对其进行时序形变计算。由白格滑坡研究结果^[13]可知,南北向水平位移相较于东西向位移对二维形变结果的影响较小,本文主要展示白格滑坡东西向时序偏移量结果。图 6(a)给出了使用 COSI-Corr 软件时,研究区在此期间内的东西向时序形变位移场;图 6(b)给出了使用 CARST 软件时,研究区东西向时序形变偏移量结果。由于夏季与冬季光学影像的太阳高度角和方位角相差较大(表 2),Sentinel-2 影像的差异使图 6 中 2015-11-13~2017-07-15、2015-11-13~2018-05-21 以及 2015-11-13~2018-06-05 的影像结果存在一定程度噪声。由实验结果可知,COSI-Corr 软件与 CARST 软件计算的最大累计位移形变均在 30.00 m 左右(约 3.0 个像素),形变具有一致性。两者的形变形状存在细微差异,基于相位相关性的 COSI-Corr 软件获取的滑坡形变区域比基于强度相关性的 CARST 软件获取的滑坡形变区域更为平滑,这主要是由于在求解整数位移时,图像灰度分布函数是离散的,经傅里叶变换后的图像频率分布函数是连续的。

柳林等通过 COSI-Corr 软件利用 24 幅 Sentinel-2 影像对测得 2015 年 11 月 22 日至 2018 年 4 月 5 日白格滑坡最大累计形变为 23.45 m,利用 51 幅 Landsat 影像对测得 2014 年 11 月 29 日至 2018 年 9 月 5 日白格滑坡最大累计形变为 45.43 m^[28]。本文利用 65 幅 Sentinel-2 影像对测得的最大累计位移形变为 30.00 m,时间跨度(2015 年 11 月 13 日

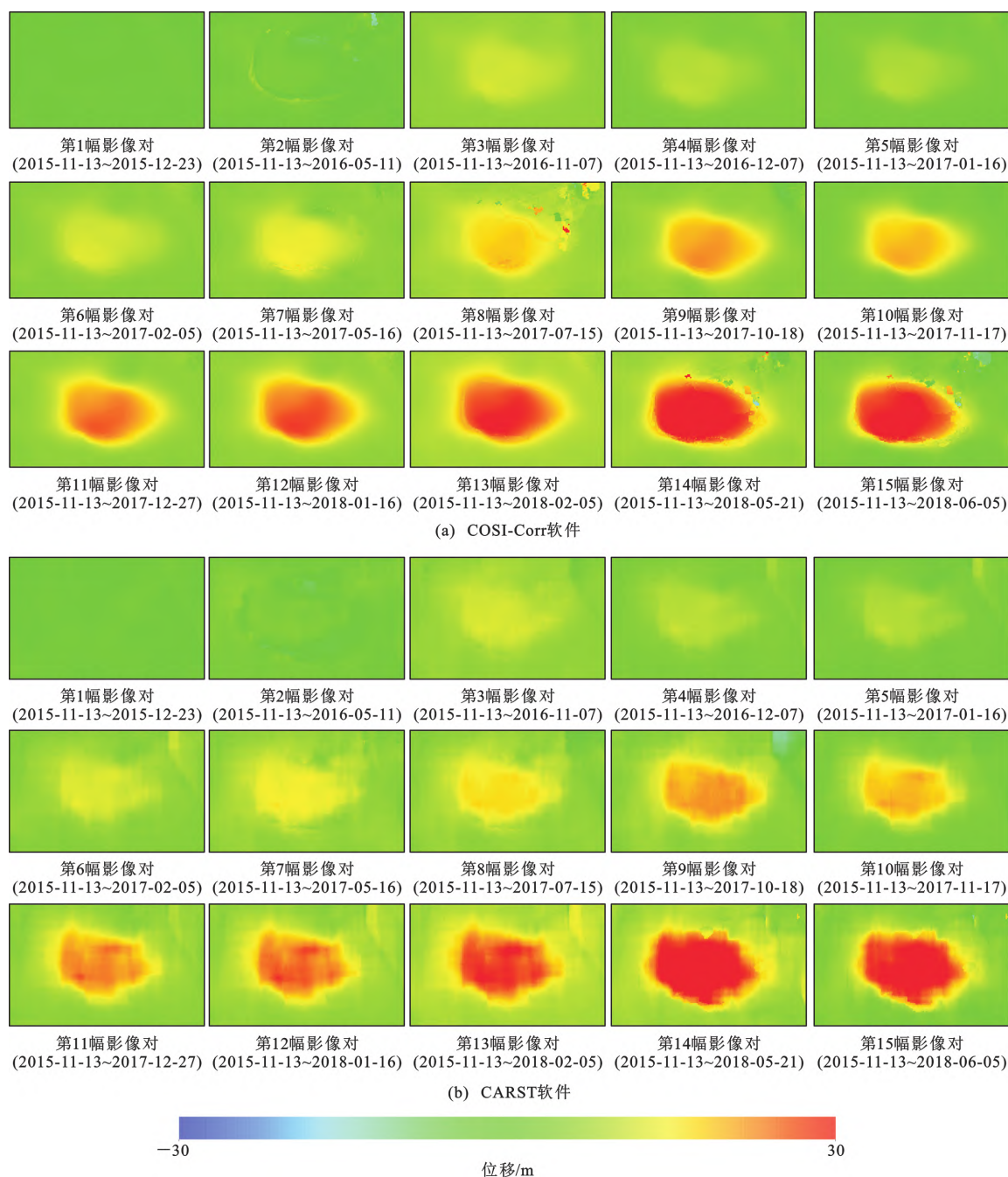


图 6 COSI-Corr 软件和 CARST 软件得到的白格滑坡偏移量时序影像对

Fig. 6 Image Pairs of Offset Time Series of Baige Landslide Calculated by COSI-Corr and CARST Softwares

至 2018 年 6 月 5 日)与累计形变均位于上述两个结果之间。除了时间跨度不同导致的累计形变差异,本文时序形变结果包含了更多的形变细节,表明通过增加有效的影像对数量,时序反演算法能够改善滑坡遥感监测的时间和空间分辨率。

为进一步评价时序形变结果的可靠性,本文对 COSI-Corr 软件和 CARST 软件偏移量结果的标准差进行对比分析。由于影像对的偏移量存在差异,并且受不同程度的误差影响,还需对两种软件中误差较大的影像对进行剔除。如图 7 所示, CARST

软件在去除标准差较大的 4 景互相关影像(即夏季互相关结果)之后剩余的 61 景影像,经与 COSI-Corr 软件得到的互相关影像对比分析,发现 CARST 软件得到的互相关影像对的标准差普遍大于 COSI-Corr 软件得到的互相关影像对。统计发现, COSI-Corr 软件得到的互相关影像对标准差的平均值为 2.31 m, CARST 软件得到的互相关影像对标准差的平均值为 2.84 m。这表明 COSI-Corr 软件比 CARST 软件得到的形变结果更为可靠。

为分析滑坡的形变过程,在白格滑坡的剖面线

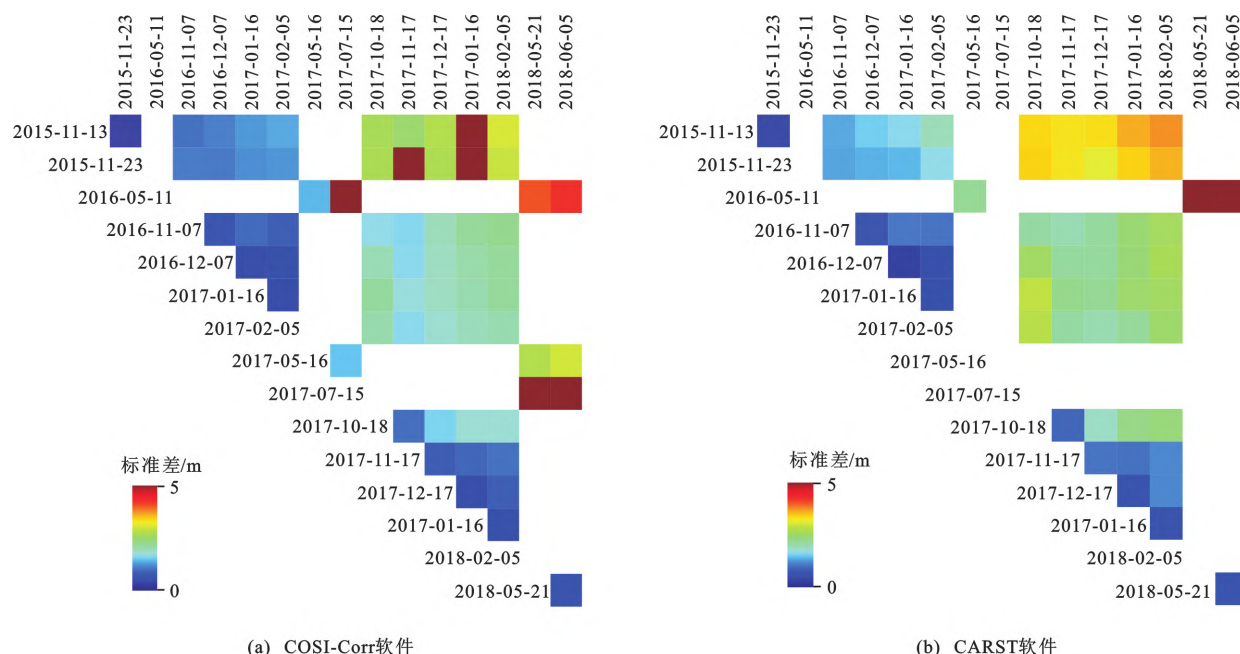


图 7 COSI-Corr 软件和 CARST 软件得到的互相关结果标准差

Fig. 7 Standard Deviations of Cross-correlation Results Calculated by COSI-Corr and CARST Softwares

上选择 4 个特征点 (P1、P2、P3、P4) (图 4) 进行位移时序分析。由图 8 可知, 2015 年 11 月 13 日至 2018 年 6 月 5 日, 白格滑坡区域内的形变随时间推移不断进行累积, COSI-Corr 软件与 CARST 软件得到的形变结果在变化范围和变化趋势上趋于一致。由于图像经过处理后仍不可避免地存在随机噪声的影响, 导致通过奇异值分解算法得到的位移时序结果会存在“负增长”值^[30]。

通过计算稳定区域 A (图 4) 的形变平均值和标准差可以验证时序结果 (图 6) 的准确性和可靠性。由图 9 可知, COSI-Corr 软件得到的稳定区域 A 东西向形变标准差普遍小于 CARST 软件, 说明 COSI-Corr 软件得到的形变场精度更高、更为可靠。图 9(a) 中第 7、8 幅影像对对应 2015-11-13~2017-05-16、2015-11-13~2017-07-15, 其标准差较大是因为夏季影像的太阳高度角及太阳方位角与冬季影像太阳高度角及太阳方位角差异较大产生异常值。图 9(b) 中两种软件得到稳定区域 A 东西向形变平均值相似, 表明两种软件得到的形变结果准确度相当。

降雨会导致土壤中的水分增加, 滑坡摩擦阻力降低, 蚀变岩带黏土化, 滑坡的岩土体在雨水冲刷下产生破碎导致滑坡稳定性变差。因此, 本文结合研究区降雨数据与时序位移, 分析白格滑坡变形演化过程。如图 10 所示, 4 个特征点 (P1、P2、P3、P4) 时序位移呈现明显斋藤曲线形态, 白格滑坡变形过程可分为初始启动阶段 (阶段 I, 2015 年 11 月至 2017

年 2 月)、等速变形阶段 (阶段 II, 2017 年 2 月至 2018 年 2 月) 以及加速变形阶段 (阶段 III, 2018 年 2 月至 2018 年 6 月) 等, 这 3 个阶段的形变位移加速过程与降雨量高度相关^[31]。阶段 I 累计形变较小, 滑坡稳定形变; 阶段 II 累计形变较大, 滑坡形变速度显著增加; 阶段 III 累计形变达到最大。阶段 II、III 滑坡发生显著形变。另外, 在阶段 II 存在滑坡形变与降雨量无显著相关关系的情况, 表明除降雨外仍存在地质构造、河流冲刷、风蚀等其他外部因素导致滑坡运动^[32]。

3.2 “11·3”白格滑坡形变

COSI-Corr 软件初始搜索窗口和最终搜索窗口均为 32×32 像素, 步长为 1×1 像素; CARST 软件初始搜索窗口为 32×32 像素, 最终搜索窗口为 4×4 像素, 步长为 1×1 像素 (表 3)。利用两种软件对互相关图像进行后处理可得到形变结果。根据已有研究成果可知, “11·3”白格滑坡形变区域主要发生在“10·10”白格滑坡的西面偏上部, 主滑方向为由西向东^[13]。COSI-Corr 软件和 CARST 软件得到的东西向形变分别为 11.53 m (约 1.2 个像素) 和 12.89 m (约 1.3 个像素), 其中位移正值表示向东移动, 位移负值表示向西移动, 如图 11(a)、(b) 所示。

为验证形变结果的可靠性, 本文对 2018 年 10 月 15 日和 2018 年 10 月 27 日两景 Sentinel-1 升轨数据进行 SAR 偏移量跟踪, 得到距离向形变和方位

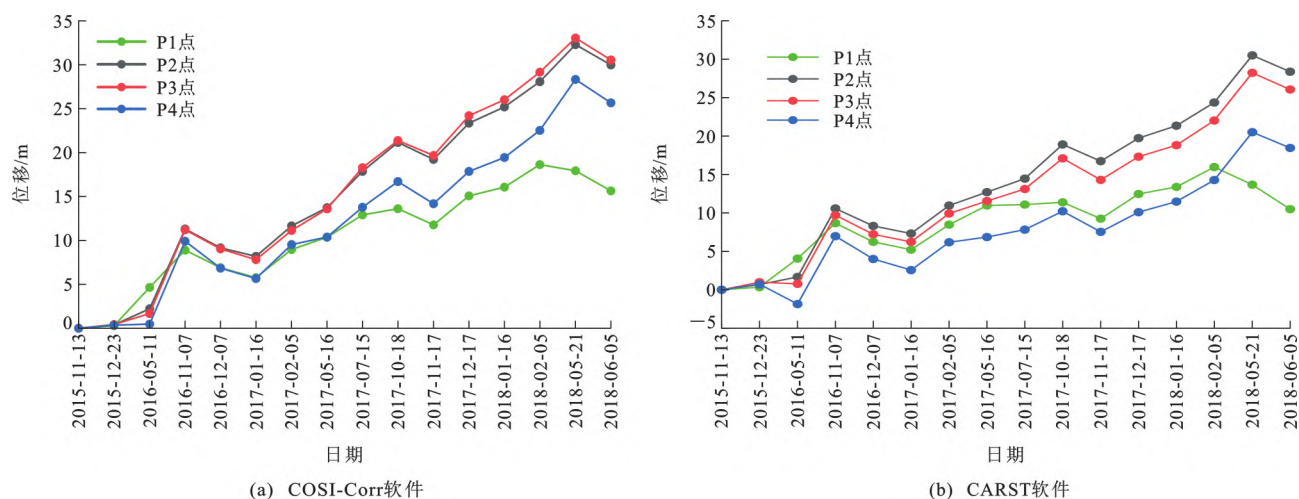
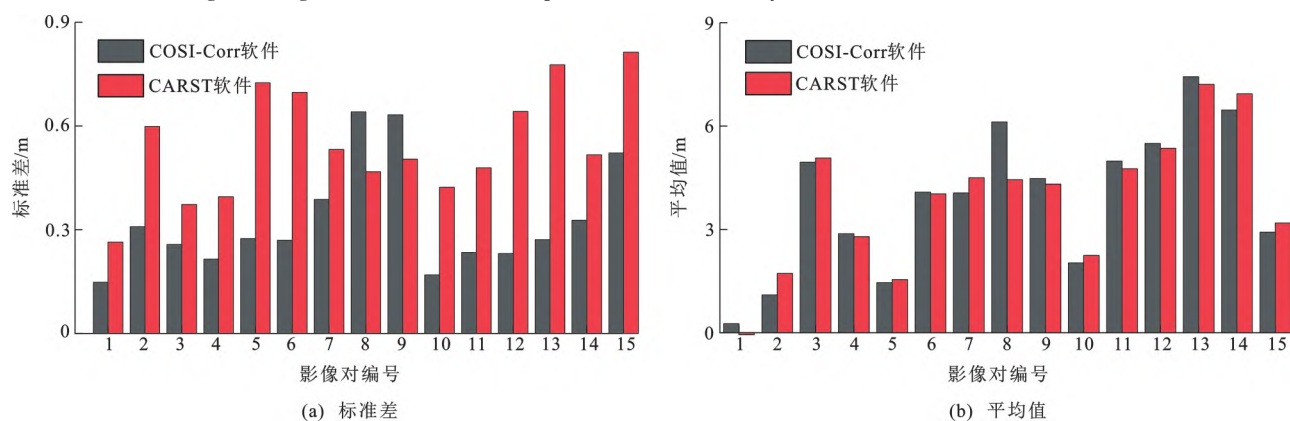


图8 COSI-Corr 软件和 CARST 软件得到的时序位移

Fig. 8 Diagrams of Time Series Displacement Calculated by COSI-Corr and CARST Softwares



影像对编号对应图6中的影像对编号

图9 COSI-Corr 软件和 CARST 软件得到的形变标准差与平均值比较

Fig. 9 Comparisons of Standard Deviation and Average of Deformation Calculated by COSI-Corr and CARST Softwares

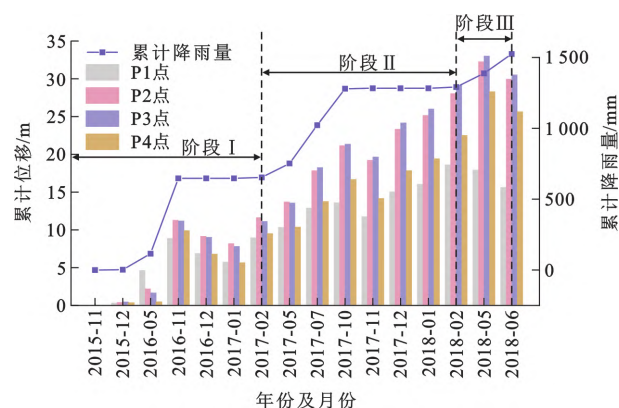


图10 累计位移、累计降雨量与滑坡形变过程

Fig. 10 Diagram of Cumulative Displacement, Cumulative Rainfall and Landslide Deformation Process

向形变,然后利用式(11)将其转换为东西向和南北向形变。其表达式为

$$\begin{bmatrix} E \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \alpha \sin \theta & \sin \alpha \sin \theta \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} R \\ A \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中: α 表示 SAR 航向角; θ 表示 SAR 入射角; E 表示东西向形变; N 表示南北向形变; R 表示距离向形变; A 表示方位向形变。

“11·3”白格滑坡 SAR 偏移量东西向形变为 11.59 m,与光学遥感影像得到的形变范围大体一致 [图 11(c)]。对比分析 COSI-Corr 软件、CARST 软件和 SAR 技术得到的形变结果,其在空间上均具有一定的相似性。

基于 Sentinel-1 影像的偏移量跟踪技术,利用雷达影像强度相关性进行形变监测;基于 Sentinel-2 影像的偏移量跟踪技术,利用光学影像光谱相关性进行形变监测。这两种偏移量跟踪技术原理大致相同,但由于成像机理的差异,地表形变结果存在一定差异。Sentinel-1 影像覆盖时间范围为 2018 年 10 月 15 日至 2018 年 10 月 27 日, Sentinel-2 影像覆盖时间范围为 2018 年 10 月 28 日至 2018 年 11 月 2 日,两类影像对联合覆盖了“10·10”白格滑坡至

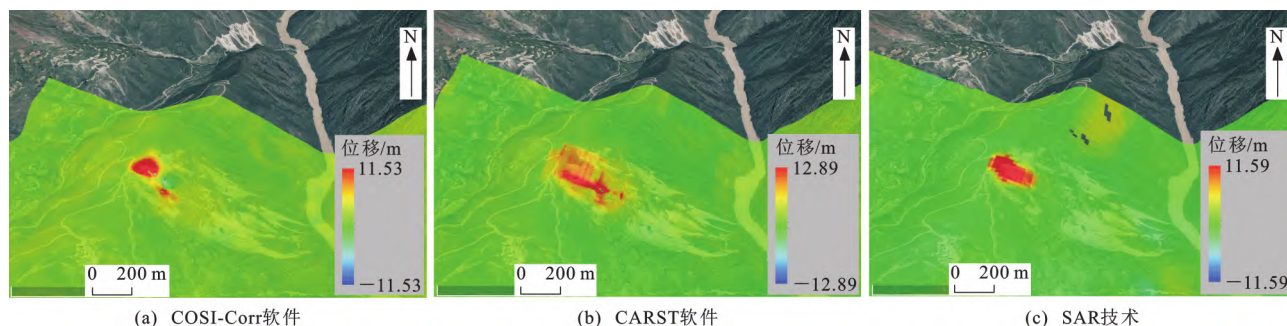


图 11 “11·3”白格滑坡形变影像

Fig. 11 Deformation Images of “11·3” Baige Landslide

“11·3”白格滑坡的时间段,反映了不同时段的地表形变(图 11)。由图 11 可知,相比于 SAR 偏移量的形变范围,COSI-Corr 软件得到的形变结果在空间上更为平滑,而 CARST 软件得到的形变梯度较大。

为进一步定量分析两种软件相对于 SAR 偏移量的延续性,对滑坡形变区域进行相关性分析(图 12)。由图 12 可知,Sentinel-1 雷达影像得到的形变结果与 COSI-Corr 软件、CARST 软件均具有一定的相关性,但由于覆盖时间范围不同,其相关性并不显著。相比于 CARST 软件与 SAR 技术得到的形变结果之间的相关系数(0.55),COSI-Corr 软件与 SAR 技术得到的形变结果之间的相关系数更高(0.63),表明在滑坡演化过程中,COSI-Corr 软件得到的偏移量与 SAR 偏移量更为接近,在时间上具有更好的延续性。

3.3 “11·3”白格滑坡之后形变

为了解“11·3”白格滑坡发生后残留堆积体的稳定性,选取 2020 年 1 月 16 日和 2022 年 2 月 4 日两景 Sentinel-2 影像进行形变监测。前述实验表明 COSI-Corr 软件得到的形变探测精度高于 CARST 软件,因此,本文采用 COSI-Corr 软件进行“11·3”白格滑坡之后形变分析,互相关匹配时选择的初始搜索窗口和最终搜索窗口均为 64×64 像素,步长为 1×1 像素(表 3),可得最大形变位移为 7.71 m(0.8 个像素),共呈现 2 处明显的形变区域(区域 1 和区域 2)[图 13(a)]。

为提取研究区精细形变信息,本文采用无人机倾斜摄影三维变化检测技术获取滑坡的高程形变[图 13(b)]。无人机航拍时间分别为 2020 年 10 月 12 日和 2021 年 7 月 20 日。无人机影像获取滑坡高程形变的主要步骤为:首先,基于 SfM(Structure from Motion)算法重建地表三维模型,并根据获取的稀疏点云数据恢复像片姿态;然后,利用 MVS(Multi View Stereo)算法生成无人机影像的密集点

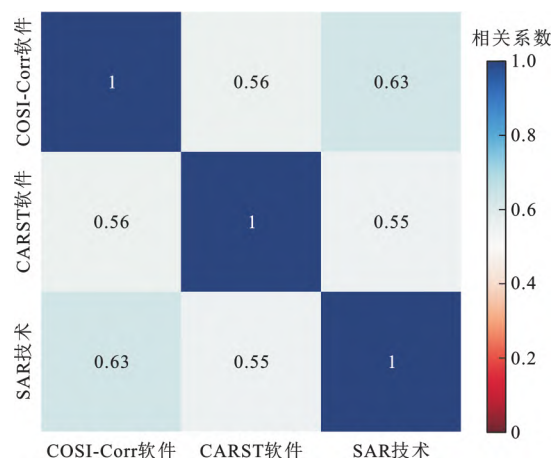


图 12 东西向形变相关性结果

Fig. 12 Correlation Results of the EW-direction

Deformation

云;最后,对密集点云数据进行网格插值获取 DEM 图像,通过 DEM 差分处理得到 3 处显著的高程形变区域(区域 1、区域 2 和区域 3),高程形变最大值为 3.32 m^[33-34]。

对比图 13(a)中水平形变结果与图 13(b)中高程形变结果可以发现:区域 1 为裂缝扩展最严重的区域,区域 2 为裂缝变形加剧区域,显著的水平位移和(沿滑面)前升后降的高程形变表明两处残留堆积体整体滑移现象明显,存在再次成灾风险;区域 3 为滑坡侧壁,COSI-Corr 软件未检测出明显水平形变,但无人机三维模型显示其存在显著高程形变,这主要是由于该区域在 Sentinel-1 影像中纹理特征较弱,而边缘结构信息的缺失导致基于频域相位差进行偏移量跟踪的 COSI-Corr 软件失效^[35-36]。

为验证 COSI-Corr 软件和无人机(Unmanned Aerial Vehicle,UAV)算法得到的形变结果可靠性,本文选取与“10·10”白格滑坡相同的稳定区域 A(图 13)对滑坡区域进行精度评定。由表 4 可以看出:COSI-Corr 软件在稳定区域 A 的水平形变平均值最大为 0.549 m(误差),水平形变标准差小于

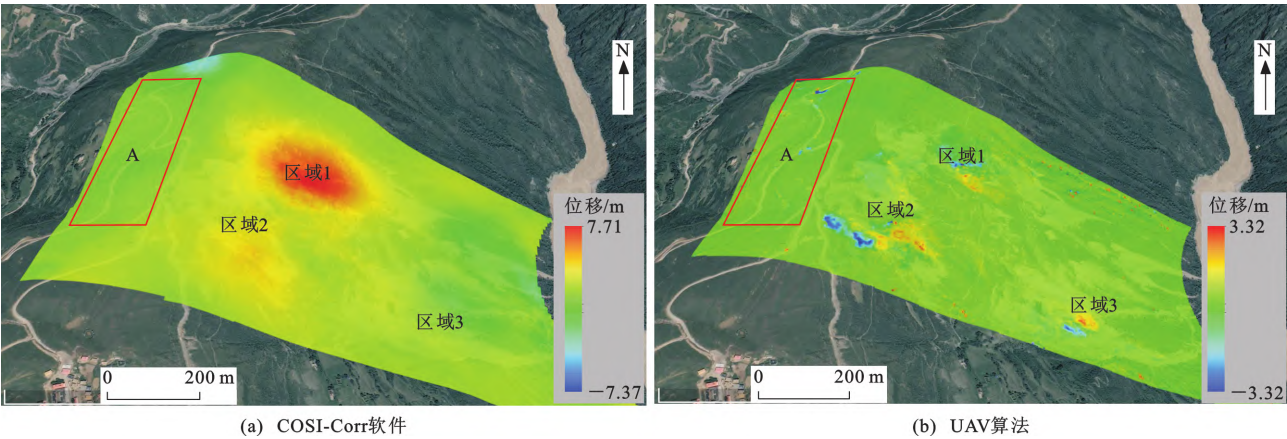


图 13 “11·3”白格滑坡发生后的形变影像
Fig. 13 Deformation Images After “11·3” Baige Landslide

表 4 稳定区域影像精度对比
Table 4 Comparisons of Image Accuracy in Stable Areas

参数	数据处理方法	稳定区域 A
平均值/m	COSI-Corr 软件	0.549
	UAV 算法	-0.071
标准差/m	COSI-Corr 软件	0.393
	UAV 算法	0.358

0.393 m(不确定度);无人机三维模型在稳定区域 A 的高程形变平均值最大为-0.071 m(误差),标准差小于 0.358 m(不确定度)。

4 结 语

本文使用 Sentinel-2 光学影像对 2018 年“10·10”白格滑坡和“11·3”白格滑坡形变过程以及后续形变过程进行研究,计算白格滑坡 2015~2018 年的时序形变结果,对比分析空间域互相关算法和频域互相关算法在光学影像像素偏移估计中的性能差异,证明 COSI-Corr 软件和 CARST 软件在滑坡形变监测中的可行性;根据滑坡时序形变过程,分析降雨对滑坡形变速度的影响;通过对比分析 COSI-Corr 软件得到的偏移量跟踪和 DEM 差分处理的形变结果,探索光学影像与无人机影像在滑坡综合形变监测中的应用前景。

(1)CARST 软件和 COSI-Corr 软件在监测白格滑坡形变过程中的探测精度分别为 0.766 m(约 1/13 个像素)和 0.436 m(约 1/20 个像素),CARST 软件和 COSI-Corr 软件均可以获得滑坡形变区域以及蠕变过程,具有一定的可靠性。

(2)COSI-Corr 软件利用 Sentinel-2 影像反演得到白格滑坡在 2015 年 11 月 13 日至 2018 年 2 月 5 日最大形变为 31.69 m(约 3 个像素),2018 年 10

月 28 日至 2018 年 11 月 2 日最大形变为 11.59 m(约 1 个像素),2020 年 1 月 16 日至 2022 年 2 月 4 日最大形变为 7.71 m(约 0.8 个像素)。

(3)经 COSI-Corr 软件处理,白格滑坡在 2020 年 1 月 16 日至 2022 年 2 月 4 日东西向最大形变为 7.71 m(约 0.8 个像素);无人机影像经 DEM 差分处理,白格滑坡在 2020 年 10 月 12 日至 2021 年 7 月 20 日的高程最大形变为 3.32 m(无人机影像分辨率为 8 cm)。

(4)CARST 软件一般应用于冰川移动,通过计算冰川速度场对冰川位移过程进行分析。本文首次将 CARST 软件应用在滑坡滑动过程,通过与 COSI-Corr 软件对比分析,提取白格滑坡发生前的地表形变过程,证明 CARST 软件在滑坡形变监测过程中有一定应用前景。

丁明涛:值此刘国昌先生诞辰 110 周年之际,谨以此文致敬刘先生!刘先生严谨求实的工作作风和艰苦奋斗的工作精神鼓舞着包括我在内的广大工程地质领域科研人员不断探索未知、揭示本质,努力为我国工程地质学体系的建设添砖加瓦!此外,Google Earth Engine 平台提供了 Sentinel-2 影像,ASF(Alaska Satellite Facility)网站提供了 Sentinel-1 影像,长安大学高性能计算平台提供了数据处理平台,在此一并致谢!

参 考 文 献 :
References :

[1] 孙建霖. 时序 InSAR 技术及其在滑坡形变监测中的应用:以高家湾滑坡为例[D]. 兰州:兰州大学,2019.
SUN Jian-lin. Time-series InSAR Technology and Its Application in Landslide Deformation Monitoring: A Case Study of Gaojiawan Landslide [D]. Lanzhou:

- Lanzhou University, 2019.
- [2] 杨明生. 长时序多源遥感的滑坡变化监测方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
YANG Ming-sheng. Method Research on Landslide Change Monitoring Based on Long Time Series Multi-source Remote Sensing [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [3] ALI E, XU W B, DING X L. Improved Optical Image Matching Time Series Inversion Approach for Monitoring Dune Migration in North Sinai Sand Sea: Algorithm Procedure, Application, and Validation[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, 164: 106-124.
- [4] 李振洪, 张成龙, 陈 博, 等. 一种基于多源遥感的滑坡防灾技术框架及其工程应用[J]. 地球科学, 2022, 47(6): 1901-1916.
LI Zhen-hong, ZHANG Cheng-long, CHEN Bo, et al. A Technical Framework of Landslide Prevention Based on Multi-source Remote Sensing and Its Engineering Application[J]. Earth Science, 2022, 47(6): 1901-1916.
- [5] 张成龙, 李振洪, 张双成, 等. 综合遥感解译 2022 年 M_w 6.7 青海门源地震地表破裂带[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(8): 1257-1270.
ZHANG Cheng-long, LI Zhen-hong, ZHANG Shuang-cheng, et al. Surface Reptures of the 2022 M_w 6.7 Menyuan Earthquake Revealed by Integrated Remote Sensing[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(8): 1257-1270.
- [6] 杨成生, 董继红, 朱赛楠, 等. 金沙江结合带巴塘段滑坡群 InSAR 探测识别与形变特征[J]. 地球科学与环境学报, 2021, 43(2): 398-408.
YANG Cheng-sheng, DONG Ji-hong, ZHU Sai-nan, et al. Detection, Identification, and Deformation Characteristics of Landslide Groups by InSAR in Batang Section of Jinsha River Convergence Zone, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2021, 43(2): 398-408.
- [7] CHEN B, LI Z H, ZHANG C L, et al. Wide Area Detection and Distribution Characteristics of Landslides Along Sichuan Expressways [J]. Remote Sensing, 2022, 14(14): 3431.
- [8] MICHEL R, AVOUAC J P, TABOURY J. Measuring Ground Displacements from SAR Amplitude Images: Application to the Landers Earthquake[J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(7): 875-878.
- [9] STROZZI T, LUCKMAN A, MURRAY T, et al. Glacier Motion Estimation Using SAR Offset-tracking Procedures[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(11): 2384-2391.
- [10] 刘云华, 单新建, 屈春燕, 等. 青海玉树 M_s 7.1 级地震地表形变场特征研究[J]. 中国科学: D 辑, 地球科学, 2010, 40(10): 1310-1320.
LIU Yun-hua, SHAN Xin-jian, QU Chun-yan, et al. Earthquake Deformation Field Characteristics Associated with the 2010 Yushu M_s 7.1 Earthquake[J]. Science in China: Series D, Earth Sciences, 2010, 40(10): 1310-1320.
- [11] ZHAO C Y, LU Z, ZHANG Q. Time-series Deformation Monitoring over Mining Regions with SAR Intensity-based Offset Measurements[J]. Remote Sensing Letters, 2013, 4(5): 436-445.
- [12] DING C, ZHANG L, LIAO M S, et al. Quantifying the Spatio-temporal Patterns of Dune Migration near Minqin Oasis in Northwestern China with Time Series of Landsat-8 and Sentinel-2 Observations[J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 236: 111498.
- [13] DING C, FENG G C, LIAO M S, et al. Displacement History and Potential Triggering Factors of Baige Landslides, China Revealed by Optical Imagery Time Series[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 254: 112253.
- [14] ZHENG W J, PRITCHARD M E, WILLIS M J, et al. The Possible Transition from Glacial Surge to Ice Stream on Vavilov Ice Cap[J]. Geophysical Research Letters, 2019, 46(23): 13892-13902.
- [15] VAN WYK D V M, WICKERT A D. Glacier Image Velocimetry: An Open-source Toolbox for Easy and Rapid Calculation of High-resolution Glacier Velocity Fields[J]. The Cryosphere, 2021, 15(4): 2115-2132.
- [16] SCAMBOS T A, DUTKIEWICZ M J, WILSON J C. Application of Image Cross-correlation to the Measurement of Glacier Velocity Using Satellite Image Data[J]. Remote Sensing of Environment, 1992, 42(3): 177-186.
- [17] 孔繁司, 乔 刚, 王卫安. 基于光学影像的冰流速测量软件比较与分析[J]. 中国科技论文在线精品论文, 2016, 9(12): 1240-1252.
KONG Fan-si, QIAO Gang, WANG Wei-an. Comparison of Four Ice Velocity Measurement Software Based on Optical Remote Sensing Images[J]. Highlights of Sciencepaper Online, 2016, 9(12): 1240-1252.
- [18] ROSU A M, PIERROT-DESEILLIGNY, DELORME A, et al. Measurement of Ground Displacement from Optical Satellite Image Correlation Using the Free Open-source Software MicMac[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 100: 48-59.
- [19] LEPRINCE S, AYOUB F, KLINGER Y, et al. Co-registration of Optically Sensed Images and Correlation

- (COSI-Corr): An Operational Methodology for Ground Deformation Measurements[C]//IEEE. 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Barcelona:IEEE,2007:1943-1946.
- [20] MICHEL S, AVOUAC J P, AYOUB F, et al. Comparing Dune Migration Measured from Remote Sensing with Sand Flux Prediction Based on Weather Data and Model, a Test Case in Qatar[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2018, 497: 12-21.
- [21] CHEN K, AVOUAC J P, AATI S, et al. Cascading and Pulse-like Ruptures During the 2019 Ridgecrest Earthquakes in the Eastern California Shear Zone[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 22.
- [22] MILES B W J, JORDAN J R, STOKES C R, et al. Recent Acceleration of Denman Glacier (1972 — 2017), East Antarctica, Driven by Grounding Line Retreat and Changes in Ice Tongue Configuration[J]. The Cryosphere, 2021, 15(2): 663-676.
- [23] ZHENG W J, PRITCHARD M E, WILLIS M J, et al. The Possible Transition from Glacial Surge to Ice Stream on Vavilov Ice Cap[J]. Geophysical Research Letters, 2019, 46(23): 13892-13902.
- [24] 贺礼家, 冯广财, 冯志雄, 等. 哨兵-2号光学影像地表形变监测: 以2016年 M_w 7.8新西兰凯库拉地震为例[J]. 测绘学报, 2019, 48(3): 339-351.
HE Li-jia, FENG Guang-cai, FENG Zhi-xiong, et al. Coseismic Displacements of 2016 M_w 7.8 Kaikoura, New Zealand Earthquake, Using Sentinel-2 Optical Images[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(3): 339-351.
- [25] YANG W T, WANG Y J, WANG Y Q, et al. Retrospective Deformation of the Baige Landslide Using Optical Remote Sensing Images[J]. Landslides, 2020, 17(3): 659-668.
- [26] LEPRINCE S, BARBOT S, AYOUB F, et al. Automatic and Precise Orthorectification, Coregistration, and Subpixel Correlation of Satellite Images, Application to Ground Deformation Measurements[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(6): 1529-1558.
- [27] BERARDINO P, FORNARO G, LANARI R, et al. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(11): 2375-2383.
- [28] 柳林, 宋豪峰, 杜亚男, 等. 联合 Sentinel-2 和 Landsat 8 估计白格滑坡时序偏移量[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(10): 1460-1470.
LIU Lin, SONG Hao-feng, DU Ya-nan, et al. Time-series Offset Tracking of the Baige Landslide Based on Sentinel-2 and Landsat 8[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(10): 1460-1470.
- [29] KONCA A O, LEPRINCE S, AVOUAC J P, et al. Rupture Process of the 1999 M_w 7.1 Duzce Earthquake from Joint Analysis of SPOT, GPS, InSAR, Strong-motion, and Teleseismic Data: A Supershear Rupture with Variable Rupture Velocity[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2010, 100(1): 267-288.
- [30] 郑茜, 孙建宝, 张永. 基于 Landsat-8 时间序列影像分析西昆仑山地区冰川滑移特征[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(7): 604-608.
ZHENG Qian, SUN Jian-bao, ZHANG Yong. Fast and Uniformly Slipping Western-Kunlun Glaciers from Time-series Deformation Analysis Using Periodically Captured Landsat-8 Imagery[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2016, 36(7): 604-608.
- [31] 刘传正. 累计变形曲线类型与滑坡预测预报[J]. 工程地质学报, 2021, 29(1): 86-95.
LIU Chuan-zheng. Three Types of Displacement-time Curves and Early Warning of Landslides[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(1): 86-95.
- [32] LI M H, ZHANG L, SHI X G, et al. Monitoring Activate Motion of the Guobu Landslide near the Laxiwa Hydropower Station in China by Time-series Point-like Targets Offset Tracking[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 221: 80-93.
- [33] COOK K L, DIETZE M. A Simple Workflow for Robust Low-cost UAV-derived Change Detection Without Ground Control Points[J]. Earth Surface Dynamics, 2019, 7(4): 1009-1017.
- [34] PEPPA M V, MILLS J P, MOORE P, et al. Automated Co-registration and Calibration in SfM Photogrammetry for Landslide Change Detection[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2019, 44(1): 287-303.
- [35] 陈菲, 王塞, 高云建, 等. 白格滑坡裂缝区演变过程及其发展趋势分析[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(5): 71-78.
CHEN Fei, WANG Sai, GAO Yun-jian, et al. Evolution of the Cracking Zones at the Site of the Baige Landslides and Their Future Development[J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(5): 71-78.
- [36] YE Y X, SHAN J, BRUZZONE L, et al. Robust Registration of Multimodal Remote Sensing Images Based on Structural Similarity[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(5): 2941-2958.