

doi: 10.6046/zrzyg.2022261

引用格式: 易邦进, 黄成, 傅涛, 等. 基于 SBAS-InSAR 技术的中缅边境山区地质灾害隐患探测[J]. 自然资源遥感, 2023, 35(4): 186-191. (Yi B J, Huang C, Fu T, et al. SBAS-InSAR-based detection of geological hazards in alpine gorge areas near the China-Myanmar border[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(4): 186-191.)

基于 SBAS-InSAR 技术的中缅 边境山区地质灾害隐患探测

易邦进¹, 黄 成², 傅 涛¹, 孙技星¹, 朱宝权¹, 钟 成³

(1. 云南省地质科学研究所, 昆明 650051; 2. 云南省地质环境监测院, 昆明 650216;

3. 中国地质大学(武汉)湖北巴东地质灾害国家野外科学观测研究站, 武汉 430079)

摘要: 云南省福贡县位于中缅边境, 是典型的高山峡谷地区, 地质环境脆弱, 滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害频发, 对人民生命财产安全、经济建设和国防安全构成严重威胁。该地区山高林密, 传统的人工排查工作较难实施, 危险性大。为了实现地质灾害隐患探测, 利用 Sentinel-1A 卫星数据, 采用短基线集差分干涉测量(SBAS-InSAR)技术对高山峡谷区域进行了地表变形监测和地质灾害隐患探测, 并结合地面调查与光学影像遥感解译对识别结果进行了验证。结果表明, 该地区的变形区域大都处于地质条件脆弱地区, 在强降雨条件下极易导致滑坡失稳, 建议后续开展持续观测。该研究成果对高山峡谷区滑坡调查与监测研究具有参考意义。

关键词: 地质灾害; 时间序列; InSAR; 隐患探测; 高山峡谷

中图分类号: P237 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2023)04-0186-06

0 引言

中国位于印度板块、欧亚板块与太平洋板块交汇区域, 构造运动活跃, 地质环境复杂, 气候类型多样, 人类工程活动频繁, 是一个滑坡等地质灾害多发的国家^[1-2]。2021 年, 中国共发生地质灾害 4 772 起, 造成 80 人死亡、11 人失踪, 其中滑坡 2 335 起、崩塌 1 746 起、泥石流 374 起、地面塌陷 285 起、地裂缝 21 起、地面沉降 11 起, 造成直接经济损失约 32 亿元。开展防灾减灾工作的先决条件是进行滑坡灾害排查, 掌握区域内滑坡隐患的分布情况^[3]。但是滑坡发生的地点、时间、规模和方式具有很大的不确定性, 地质构造、地形地貌等环境因子的复杂性也给滑坡隐患点排查带来很大困难。如何高效找出滑坡隐患点, 为制定防灾预警策略提供支持仍是当前地质灾害防治工作面临的关键问题^[3-4]。

InSAR 能够实现对微小地表形变的高精度探测, 其精度随着雷达波长的变化可以达到厘米甚至毫米级^[5-7]。通过 InSAR 技术进行地质灾害隐患的

早期识别已在多个地区的灾害调查和灾后应急中发挥了显著作用^[8-10]。其中, 差分干涉测量短基线集时序分析(SBAS-InSAR)技术以多主影像的干涉对为基础, 基于高相干点恢复研究区域的时间序列形变信息, 克服了 PS-InSAR 因选取一幅影像作为公共主影像而引起的部分干涉图相干性较差的不足, 适用于大范围的地表变形探测^[11-12]。

云南省福贡县位于中缅边境, 地质环境脆弱, 滑坡、泥石流、崩塌及滚石等地质灾害频发, 对人民生命财产安全和经济建设构成严重威胁。特别是地质灾害可能会波及到邻国境内影响到当地的安全, 引起国际纠纷^[13-14]。本研究利用 SBAS-InSAR 技术, 开展该地区潜在滑坡的早期识别, 对保护居民生命和财产安全, 指导当地政府防灾减灾和维护国防安全都具有重要意义。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

云南省福贡县位于横断山脉北段, 云贵高原西

收稿日期: 2022-07-05; 修订日期: 2023-01-20

基金项目: 云南省基础研究计划(编号: 202201AT070357)、云南省地质矿产勘查开发局科技创新项目(编号: 202235)、2020 年度云南省重点区域地质灾害精细化调查与风险评估项目(编号: YNLH202011010793/A)及国家自然科学基金面上项目(编号: 41772352)共同资助。

第一作者: 易邦进(1983-), 男, 高级工程师, 主要从事遥感地质解译与监测工作。Email: bangjinyi@sina.com。

通信作者: 钟 成(1981-), 男, 副研究员, 主要从事遥感地质方向的研究。Email: zhonglxm@cug.edu.cn。

北部和青藏高原的东南部(图 1)。区内主要以北北西转为南北向的断裂构造为主,深大断裂及次级断裂均较发育,致使区内岩石破碎、揉曲现象非常强烈。工作区内深大断裂主要有怒江大断裂、獐子山—托基大断裂,此外,褶皱及次级结构面极为发育。以变质岩广泛出露、酸性侵入岩极为发育为其特征,分布于褶皱系内的各个时代地层均有不同程度的变质。

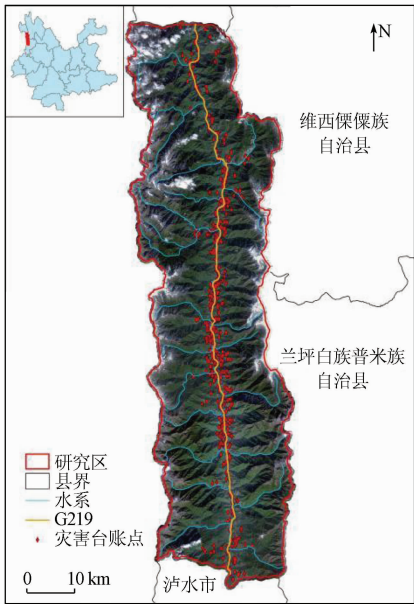


图 1 研究区概况
Fig.1 The study area

福贡县境内群山纵横交错,河流穿插切割,山脉和峡谷相间分布。大部分山区沟道巨大的地形高差,使处于高处的松散碎屑物质拥有巨大的势能,陡急的山坡和沟床为坡面和沟床松散堆积物能量的释放和势能转化为动能提供有利条件,有利于滑坡、泥石流等灾害的形成,导致该区域内滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害频发。

1.2 数据源

本文所用数据为 2019 年 01 月 12 日至 2020 年 12 月 08 日间覆盖研究区的 54 景 Sentinel-1A 升轨数据,模式为 IW 模式,影像数据集的时空基线图如图 2 所示。Sentinel-1A 影像波长 5.6 cm,分辨率

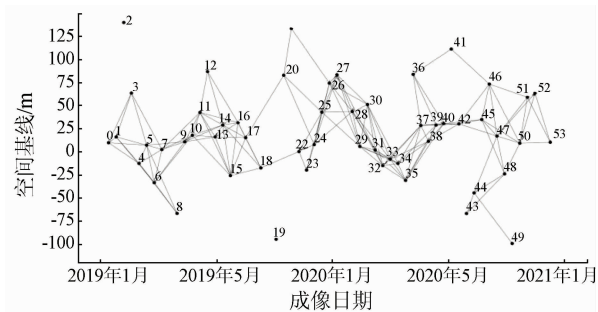


图 2 SAR 图像时空基线
Fig.2 The baseline of Sentinel-1 images

为 5 m × 20 m,幅宽 250 km。为了消除与减弱由轨道误差引起的相位误差,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。采用 30 m 分辨率的 SRTM1 数据(<https://topex.ucsd.edu/gmtsar/demgen/>)辅助去除地形相位。此外,采用 1:5 万的地形图数据库辅助分析变形分布及地理要素的影响,同时开展了地面调查工作对地质灾害隐患探测结果开展复核。

1.3 短基线 InSAR 技术

短基线集差分干涉测量技术(即 SBAS-InSAR)的核心思路是将同一个地区多幅 SAR 影像配准得到短基线对,采用奇异值分解法(singular value decomposition, SVD)将多个短基线集联合求解,得到目标区域的整个时间位移序列以及地表形变平均速率^[15]。具体原理及流程如下:

对于获取时间分别为 $t_0, t_1, \dots, t_n$ 的 $N + 1$ 幅 SAR 影像组成的数据集来说,每一幅影像至少可以和一幅其他影像组成干涉对,可以生成 M 组干涉对, M, N 满足以下关系(假设 N 为奇数):

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

对于本文的 54 幅影像的数据集,最终干涉对的数量在 27 ~ 702 之间。

假设 SAR 影像在 t_1 和 t_2 这 2 个时刻干涉得到干涉图,其相位差可以表示为:

$$\varphi = \varphi_{\text{fit}} + \varphi_{\text{top}} + \varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{noise}} + k \cdot 2\pi \quad (2)$$

$$\varphi_{\text{fit}} = -\frac{4\pi}{\lambda} S \sin(\theta^0 - \alpha) \quad (3)$$

$$\varphi_{\text{top}} = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp}^0}{R_1 \sin \theta^0} \quad (4)$$

$$\varphi_{\text{def}} = \frac{4\pi}{\lambda} d \quad (5)$$

$$\varphi_{\text{atm}} = \frac{4\pi}{\lambda} (S_{t_1} - S_{t_2}) \quad (6)$$

式中: φ_{fit} 为平地相位; φ_{top} 为地形相位; φ_{def} 为视线方向形变相位; d 为视线方向形变量; φ_{atm} 为 2 次成像期间由于大气延迟而引起的相位; S_{t_1} 为 t_1 时刻成像的大气延迟相位; S_{t_2} 为 t_2 时刻成像的大气延迟相位; φ_{noise} 为噪声相位; k 为整周模糊度。

式(2)中的平地相位 φ_{fit} 可以通过对基线进行估计而获得。地形相位可以利用参考 DEM 比较精确地估计出来。因为在 SBAS-InSAR 处理过程中,时间基线比较小,2 次成像的大气条件接近,因此,对于大气噪声带来的影响忽略不计。如此,便可获

得形变相位 φ_{def} , 再经过相位解缠, 求得整周模糊度 k , 便可以获取形变量 d , 即:

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \varphi_{\text{def}} \circ$$

(7)

根据形变量的计算原理, SBAS-InSAR 的技术流程为: 首先利用 DEM 数据进行地形相位去除, 使用精密轨道数据进行轨道信息校正; 然后对各幅影像进行基线估算以得出平地相位并为干涉对的选取提供依据; 接着选择恰当的时空基线阈值, 选取一定数量的干涉对, 本次研究中设定时间基线为 61 d, 空间基线为 75 m, 共生成 157 对干涉像对; 再对选取的干涉对进行差分干涉处理, 得到差分干涉图, 并通过相位解缠求解整周模糊度; 最后根据干涉图形成子集的情况, 对所有干涉图组成的相位方程采用最小二乘法或者 SVD 方法进行形变参数的估计。由于生成的像对之间的空间基线都比较短, 可以有效地减少由于视角变化引发的去相干^[15]。

2 SBAS-InSAR 检测结果

本文在 Linux 环境下利用 GMTSAR 开展 InSAR 处理和分析。工作站配置为 i7-9700 中央处理器, 64G DDR4 内存和 2 张 GeForce RTX 2080 super 显卡。对 54 景 Sentinel-1A 影像做 SBAS-InSAR 处理, 得到研究区形变如图 3。

支流沿岸的河谷以及两侧高山上的部分区域及部分高山地区。其中, 怒江沿岸是研究区主要的人口聚集地, 地面调查台账点也大都位于这些区域。高山地区人烟稀少, 地面调查难度大, 缺乏地质灾害编录数据。通过 InSAR 进行非接触地表形变监测可以很好的开展高位隐蔽地区的形变监测工作, 弥补了地面调查的不足。

统计表明, SBAS-InSAR 共检测到 141 032 个形变点, 平均形变为 3.98 mm/a, 标准差在 14.18 mm/a。其中 81.93% 的形变位于 -10 ~ 20 mm/a 的区间。监测结果中的正负号表示形变相对卫星的运动方向, 正值表示运动方向靠近卫星, 负值则相反, 计算形变的绝对平均值为 11.06 mm/a。从地表类型分析, 形变点在林地、草地以及耕地、不透水面所占比例分别是 35.24%, 24.33%, 16.96% 和 13.17%。可见除了建筑物外, 在其他地表类型也分布了大量形变点。相对于只能检测到永久性散射体的 PS-InSAR 技术, SBAS-InSAR 极大的扩展了监测范围和密度(图 4)。



图 4 目标点分布

Fig. 4 The distribution of target points

在形变区域中, 选择地质灾害台账点对应的 7 处比较具有代表性的隐患点, 开展时间序列形变分析。典型点的位置如图 3 所示, 其分布从南到北相对比较均匀, 基本覆盖了各个乡镇, 包含了滑坡、泥石流和崩塌 3 种主要的地质灾害类型, 比较具有代表性。分析每个点随着时间变化的形变量, 得到图 5 的折线图。由图 5 可以发现, 多数点位的形变速度比较稳定, 处于缓慢形变状态。FG2020015 号滑坡点在部分时间段的变形幅度较大, FG2020526 号点和 FG2020158 号点在 2019 年 10 月 27 日的形变存在显著变化。通过逐个开展灾害台账点时间变形曲线分析, 可以对灾害的动态演化过程进行深入分析, 进而开展预测预报等工作。

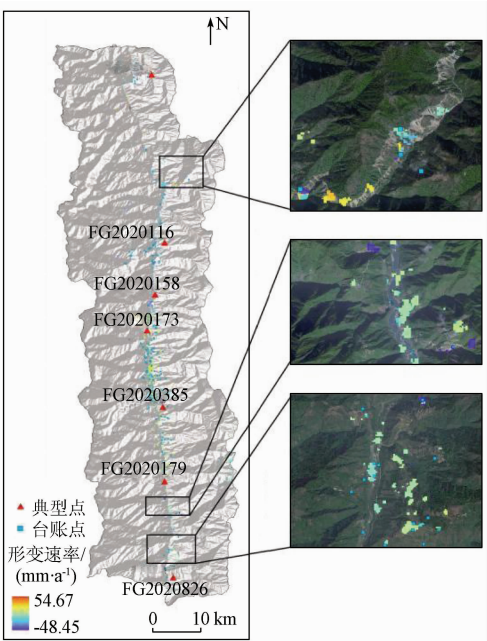


图 3 研究区形变图

Fig. 3 The surface deformation detected by SBAS-InSAR

2.1 地表变形检测

检测到显著形变的区域大都分布于怒江与怒江

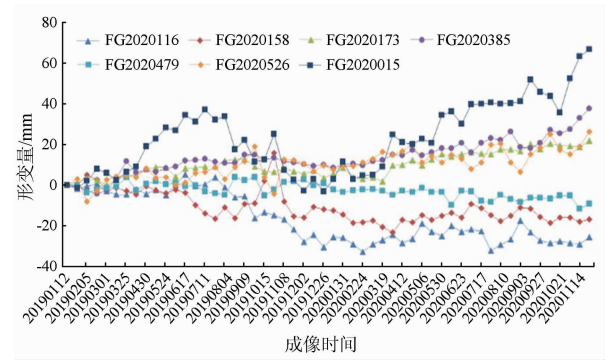


图 5 典型点位时间序列形变分析

Fig.5 Time series deformation of typical points

2.2 地质灾害隐患探测和核验

通过设置合适的形变速率阈值,可开展对潜在地质灾害的早期判别。就云南省福贡县而言,考虑到区域内地质灾害的活动性和监测误差影响,依据专家经验选定 10 mm/a 为阈值;当形变速率绝对值大于 10 mm/a 时,将被确定为潜在地质灾害。同时,通过解译高分 2 号(GF-2)影像、实地勘察和群防群测数据得到了地质灾害台账点数据。将形变检测结果与台账点记录对比,可以发现地质灾害的当前变形情况,及时发现地质灾害隐患;同时也可以用于验证变形检测结果的可靠性。地质灾害隐患探测结果见表 1,表中灾害类型对照 GF-2 影像和实地调查确定。

表 1 地质灾害隐患探测

Tab.1 The deformation of geo-hazards recorded by ground investigation

类型	变形点数	被台账记录数	匹配率/%
崩塌	12	8	66.67
滑坡	132	95	71.96
泥石流	68	42	61.76
合计	212	145	68.40

表 1 表明,约 68.40% 的变形检测结果得到地面调查台账数据的验证。另外,通过对监测结果与地面调查台账点的对比发现,没有台账点进行验证的区域大都分布于两侧高山之上,超出了地面调查的工作范围,表明 InSAR 检测可以弥补地面调查的不足。从表 1 中各类地质灾害的监测精度统计可知,InSAR 技术对于滑坡灾害的监测精度最高,达到 71.96%;对泥石流的监测精度最低,为 61.76%;对于崩塌、滑坡与泥石流的总体监测精度达 68.40%,表明 InSAR 可用于探测地表变形情况,为灾害隐患识别和早期预防提供支持。图 6 展示了部分检测结果的影像和实地调查图片,图中第一列为 InSAR 检测结果,第二列为高分 2 号影像,第三列为现场照片。

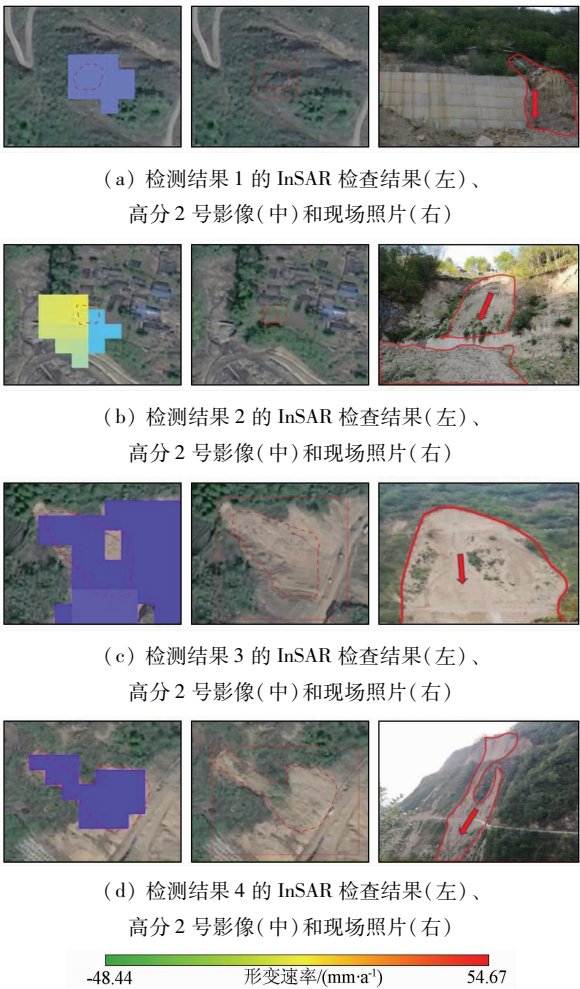


图 6 部分检测结果的核验

Fig.6 The checking of some InSAR results

3 结论

本次研究利用了 2019—2020 年的时间序列 SAR 影像,基于时间序列 InSAR 技术监测了中缅边境高山峡谷地区的地表变形情况。对监测结果进行了实地验证,并结合地质灾害台账点数据对监测结果进行评价。结果表明,研究区内的地质灾害隐患大都分布于怒江及其支流沿岸的河谷,两侧高山上也有零星分布。研究区内地质灾害隐患形变速率位于 -48.45 ~ 54.67 mm/a 的区间。SBAS – InSAR 监测结果很好地补充了传统方法不足,为开展地质灾害隐患详查和判定圈定了大致范围,提高了在高山林区实现地质灾害早期识别的可能性。下一步还需要综合利用多源、多时段和多波段 SAR 数据开展高山峡谷地区地表时序形变检测,进一步提高地质灾害识别和监测精度。

参考文献 (References) :

[1] 张培震,邓起东,张竹琪,等. 中国大陆的活动断裂、地震灾害

及其动力过程[J]. 中国科学:地球科学,2013,43(10):1607 – 1620.

Zhang P Z, Deng Q D, Zhang Z Q, et al. Active faults, earthquake disasters and their dynamic processes in Chinese mainland[J]. Scientia Sinica Terrae, 2013, 43(10):1607 – 1620.

[2] 刘传正,陈春利. 中国地质灾害防治成效与问题对策[J]. 工程地质学报,2020,28(2):375 – 383.

Liu C Z, Chen C L. Achievements and countermeasures in risk reduction of geological disasters in China[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(2):375 – 383.

[3] 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.

Xu Q, Dong X J, Li W L. 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.

[4] 廖明生,王 腾. 时间序列 InSAR 技术与应用[M]. 北京:科学出版社,2014.

Liao M S, Wang T. Time series InSAR technology and its application[M]. Beijing:Science Press, 2014.

[5] 廖明生,张 路,史绪国,等. 滑坡变形雷达遥感监测方法与实践[M]. 北京:科学出版社,2017.

Liao M S, Zhang L, Shi X G, et al. Remote sensing monitoring method and practice of landslide deformation radar[M]. Beijing: Science Press, 2017.

[6] Crosetto M, Monserrat O, Cuevas – González M, et al. Persistent scatterer interferometry: A review[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 115:78 – 89.

[7] 付波霖,解淑毓,李 涛,等. 基于 SBAS/PS – InSAR 技术的滑坡遥感监测对比研究[J]. 大地测量与地球动力学,2021,41(4):392 – 398.

Fu B L, Xie S Y, Li T, et al. Comparative study of landslide remote sensing monitoring based on SBAS/PS – InSAR technology[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2021, 41(4):392 – 398.

[8] 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 C S, Dong J H, Zhu S N, 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.

[9] 代 聪,李为乐,陆会燕,等. 甘肃省舟曲县城周边活动滑坡 InSAR 探测[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2021,46(7):994 – 1002.

Dai C, Li W L, Lu H Y, et al. Active landslides detection in Zhouqu County, Gansu Province using InSAR technology[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(7):994 – 1002.

[10] 陆会燕,李为乐,许 强,等. 光学遥感与 InSAR 结合的金沙江白格滑坡上下游滑坡隐患早期识别[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2019,44(9):1342 – 1354.

Lu H Y, Li W L, Xu Q, et al. Early detection of landslides in the upstream and downstream areas of the baige landslide, the Jinsha River based on optical remote sensing and InSAR technologies[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(9):1342 – 1354.

[11] Shi X, Liao M, Li M, et al. Wide – area landslide deformation mapping with multi – path ALOS PALSAR data stacks: A case study of Three Gorges Area, China[J]. Remote Sensing, 2016, 8(2):136.

[12] 张 路,廖明生,董 杰,等. 基于时间序列 InSAR 分析的西部山区滑坡灾害隐患早期识别——以四川丹巴为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2018,43(12):2039 – 2049.

Zhang L, Liao M S, Dong J, et al. Early detection of landslide hazards in mountainous areas of west China using time series SAR interferometry—A case study of Danba, Sichuan[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(12):2039 – 2049.

[13] 李加洪,蒋卫国,张松梅,等. 基于遥感与 GIS 的西藏帕里河滑坡动态监测分析[J]. 自然灾害学报,2006,15(4):24 – 27.

Li J H, Jiang W G, Zhang S M, et al. RS and GIS based landslide monitoring of Pali River in Tibet[J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(4):24 – 27.

[14] 王治华,徐起德,杨日红,等. 中印边界附近帕里河上的滑坡灾害遥感调查[J]. 科技导报,2007,25(6):27 – 31.

Wang Z H, Xu Q D, Yang R H, et al. Remote sensing survey for a landslide disaster in the boundary river between China and India[J]. Science & Technology Review, 2007, 25(6):27 – 31.

[15] 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. doi: 10.1109/TGRS.2002.803792.

SBAS – InSAR – based detection of geological hazards in alpine gorge areas near the China – Myanmar border

YI Bangjin¹, HUANG Cheng², FU Tao¹, SUN Jixing¹, ZHU Baoquan¹, ZHONG Cheng³

(1. Yunnan Institute of Geological Science, Kuming 650051, China; 2. Yunnan Institute of Geological Environment Monitoring Institute, Kuming 650216, China; 3. Badong National Observation and Research Station of Geohazards, China University of Geosciences, Wuhan, Wuhan 430079, China)

Abstract: Fugong County of Yunnan Province, located near the Yunnan – Myanmar border, is a typical alpine

gorge area with a fragile geological environment. Geological hazards, including landslide, collapse, and debris flow, occur frequently in this area, thus posing a severe threat to the safety of people’s lives and properties, economic development, and even national defense security. However, high mountains and thick forests in this area complicate manual investigations and increase the risk. Hence, this study conducted surface deformation monitoring and geological hazard detection in this alpine gorge area by employing the small baseline subset – interferometric synthetic aperture radar (SBAS – InSAR) technology based on the Sentinel – 1A satellite data. The identification results were verified by combining ground surveys and the interpretation of optical remote sensing images. The findings indicate that most of the deformation zones in this area exhibit fragile geological conditions and are prone to landslide instability in the case of heavy rainfall, thus requiring continuous observation. This study offers a valuable reference for investigating and monitoring landslides in alpine gorge areas.

Keywords: geological hazard; time series; InSAR; hazard detection; alpine gorge

(责任编辑: 李 瑜)