

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.269>



金沙江上游 SBAS-InSAR 滑坡三维形变监测与堵江影响分析

蒋亚楠^{1,2,3}, 许强^{1*}, 汤明高¹, 朱星¹, 张超²

1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室, 四川成都 610059
2. 成都理工大学地球与行星科学学院, 四川成都 610059
3. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院大地测量与地球动力学国家重点实验室, 湖北武汉 430077

摘要: 利用 SBAS-InSAR 技术处理了 2014—2022 年间 Sentinel-1A 升降轨 SAR 数据, 重点研究了白格滑坡堵江事件对其下游最近临滑坡群活动性的影响. 选择受堵江影响显著的沙东滑坡进行了地形约束下的 InSAR 三维形变反演, 并结合 GNSS 监测验证模型性能. 研究结果显示, 白格滑坡堵江后, 沿岸滑坡的形变速率普遍增加了 3~7 倍不等. 特别是位于金沙江凹岸的沙东滑坡, 单体受影响面积约 1.85 km², 最快变形速率增加了堵江前的 7 倍. 三维形变结果表明, 相较于地表平行流 (Surface-Parallel Flow, SPF) 模型, 坡向平行流 (Aspect Parallel Flow, APF) 地形约束模型在沙东滑坡三维形变反演中的表现更优.

关键词: SBAS-InSAR; 三维形变; 白格滑坡; 堵江影响; 工程地质学.

中图分类号: P237; P694

文章编号: 1000-2383(2026)04-1189-11

收稿日期: 2025-07-02

Three-Dimensional Deformation and River Blocking Effects of Landslides in the Upper Jinsha River Revealed by SBAS-InSAR

Jiang Yanan^{1,2,3}, Xu Qiang^{1*}, Tang Minggao¹, Zhu Xing¹, Zhang Chao²

1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
2. School of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
3. State Key Laboratory of Precision Geodesy, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

Abstract: This study employs the SBAS-InSAR technique to process Sentinel-1A ascending and descending orbit SAR data from 2014 to 2022, focusing on the impact of the Baige landslide-induced river damming event on the activity of the nearest downstream landslide cluster. The Shadong landslide, which was significantly affected by the damming, was selected for terrain-constrained three-dimensional (3D) deformation inversion using InSAR, with GNSS observations used to validate model performance. Results indicate that, following the damming event, deformation rates of the riverside landslides generally increased by a factor of 3 to 7. In particular, the Shadong landslide, located on the concave bank of the Jinsha River, exhibited a notably impacted area of

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 42304042); 四川省自然科学基金重点项目 (No. 2026NSFSCZY0024); 全国重点实验室开放基金 (No. SKLGED2024-5-2); 部-省合作重点研发项目 (No. 2023ZRBSHZ049).

作者简介: 蒋亚楠 (1988—), 女, 教授, 主要从事地质灾害隐患遥感精准识别与监测预警研究. ORCID: 0000-0002-0637-2978. E-mail: jiangyanan@cdut.edu.cn

* **通讯作者:** 许强, 教授, E-mail: xq@cdut.edu.cn

引用格式: 蒋亚楠, 许强, 汤明高, 朱星, 张超, 2026. 金沙江上游 SBAS-InSAR 滑坡三维形变监测与堵江影响分析. 地球科学, 51(4): 1189-1199.

Citation: Jiang Yanan, Xu Qiang, Tang Minggao, Zhu Xing, Zhang Chao, 2026. Three-Dimensional Deformation and River Blocking Effects of Landslides in the Upper Jinsha River Revealed by SBAS-InSAR. *Earth Science*, 51(4): 1189-1199.

approximately 1.85 km², with the maximum deformation rate increasing up to 7 times compared to the pre-damming period. The 3D deformation analysis demonstrates that the Aspect-Parallel Flow (APF) terrain-constrained model outperforms the Surface-Parallel Flow (SPF) model in reconstructing the deformation pattern of the Shadong landslide.

Key words: SBAS-InSAR; three-dimensional deformation; Baige landslide; river blocking impact; engineering geology.

0 引言

我国地质灾害分布广泛,类型多样,对工程和人类生命构成了严重威胁.单一地质灾害可引起一系列次生灾害,形成灾害链(Fan *et al.*, 2020; 朱赛楠等, 2021; 王高峰等, 2025). 其中一种是由山体滑坡引起的“滑坡失稳—堵江堰塞湖—溃决洪水”(landslide-dam breach-flood)灾害链,在时间和空间上形成比滑坡灾害更严重的灾难事件(Evans *et al.*, 2011; Penna *et al.*, 2013). 同时,溃决洪水改变了两岸斜坡的水文地质条件,进一步降低了活动性斜坡的稳定性,加剧了不稳定斜坡垮塌破坏,灾害链形成闭环(Schulz *et al.*, 2017; Franco *et al.*, 2021).

金沙江处于青藏高原东缘,其上游清洁能源基地,规划有序的推进水电开发建设.然而,地质环境脆弱,地震活动频发,沟谷深切,地表岩体破碎,沿江两岸滑坡灾害频发(Song *et al.*, 2022; 郭长宝等, 2024). 已有记载显示,金沙江干流及支流沿线滑坡堵江事件 60 余起(柴贺军等, 2000; Fan *et al.*, 2020). 其中,金沙江上游白格滑坡 2018 年 10 月和 11 月先后发生了两次滑坡灾害,形成的滑坡坝阻断了金沙江干流,造成上游多地被淹,坝体溃决后,下游多座桥梁被冲毁(Fan *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2020). 白格滑坡两次堵江泄洪,导致岸坡地质环境恶化,软化淹没坡脚(王立朝等, 2019),岸坡侵蚀加剧(Guo *et al.*, 2021). 沿江两岸大型不稳定、潜在不稳定,具有堵江风险的滑坡隐患(Liu *et al.*, 2021a)受堵江影响,稳定性降低,未来可能引发失稳垮塌,造成该域再次堵江形成新的灾害链.

Liu *et al.*(2021a)在金沙江流域进行活动滑坡识别与编目,发现强降雨和水位可能是影响滑坡变形的主要因素. Liu *et al.*(2021b)在西藏贡觉县深入开展了活动滑坡发探测,通过地表平行流(Surface-Parallel Flow, SPF)模型反演了沙东滑坡的时序三维形变,指出季节性强降雨引起的河流水位波动是影响滑坡形变的重要因素. Guo *et al.*(2021)和 Yao

et al.(2022)结合时序 InSAR 及地面调查,对沙东滑坡破坏特征进行了详细分析,并探讨了其对川藏铁路的潜在影响. Zhu *et al.*(2024)通过 3 组不同轨道的 SAR 数据集,反演了白格滑坡堵江前沙东滑坡的真三维形变,并结合质量守恒法反演了滑坡的厚度.

Yang *et al.*(2023)分析了白格滑坡上下游的活动滑坡,确定了受堵江影响较大的区域,并分析了不同时段滑坡的变形速率.然而在定量分析滑坡受堵江事件影响,从活动性、活动范围、加速情况和影响面积方面尚未综合开展量化分析.本文在完成金沙江上游堵江事件后的活动滑坡识别基础上,结合 2014—2022 年的时序 InSAR 结果,聚焦量化堵江事件对活动性滑坡的影响,计算单体滑坡受堵江影响的面积和加速情况,选取受堵江影响最为显著的单体滑坡,开展地形约束下 InSAR 三维形变反演方法实验,并结合地面监测结果评估方法性能.

1 研究区与实验数据

金沙江流域发育有南北向和东西向两种断裂构造(图 1),岩性复杂,不规则的岩性穿插组合构成了结构复杂的高陡斜坡(陈剑平和李会中, 2016). 根据美国地质调查局地震数据(<https://earthquake.usgs.gov/>),自 1900 年以来,研究区及周边震级(M_s)4.5~6 级的中强震 400 余次,≥6 级的强震 34 次.位于白格滑坡下游约 70 km 处的西藏自治区贡觉县,地势险峻陡峭.自 2012 年以来,共计经历 36 次地震,地质条件复杂破碎.如图 1,从沙东乡向南,经过敏都乡,延伸至雄松乡,该区受一系列西北向断层的影响,大型滑坡发育(李雪等, 2021).

实验共收集了 2014 年 10 月~2022 年 5 月间的 Sentinel-1A 升降轨 SAR 数据,影像参数如表 1,对应收集了精密轨道数据.采用分辨率为 30 m 的 SRTM DEM 数据拟合和去除 InSAR 处理中的地形相位和大气相位.同时收集了巴塘县气象站的日降雨数据,白格滑坡两次堵江泄洪数据,以及沙东滑坡的地质勘探数据和 GNSS 位移监测数据.

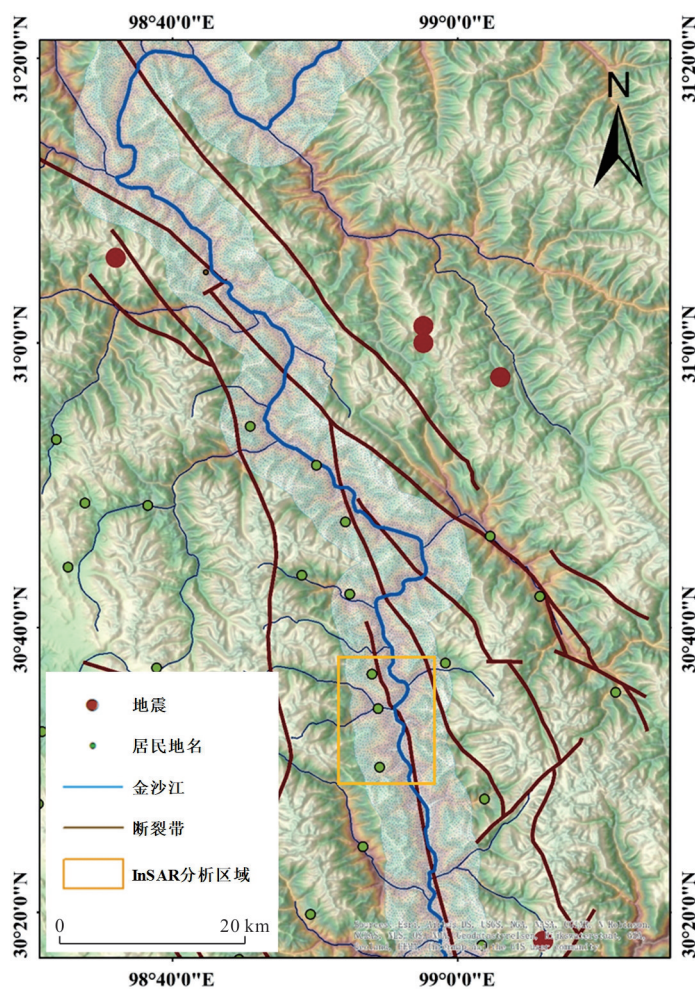


图1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

表 1 Sentinel-1A SAR 影像参数

Table 1 The parameters of Sentinel-1A SAR imagery

轨道方向	升轨	降轨
雷达入射角(°)	36.8	42.3
卫星飞行方位角(°)	-12.5	192.5
数据量(景)	82/100/110	76/99/118
时段 I	2014-10-12~2018-10-27	2014-10-07~2018-09-28
时段 II	2018-01-12~2021-05-20	2018-01-07~2021-05-27
时段 III	2018-06-05~2022-05-03	2018-06-12~2022-05-22

2 实验方法

2.1 SBAS-InSAR 变形监测

Berardino *et al.* (2002) 提出小基线集技术 (small baseline differential SAR interferograms, SBAS), 该技术利用覆盖同一区域的 N 景 SAR 影像, 经影像配准、裁剪等预处理后, 设置时-空基线阈值, 形成短基线干涉连接集, 对每组干涉对进行

差分干涉处理. 实验中, 相干目标的提取根据子视相干性和振幅离差指数实现, 同时结合了多视和单视的差分干涉相位, 以提高监测点的覆盖密度.

考虑研究地形起伏剧烈, 本文在提取了与高程相关的大气相位的基础上, 通过迭代回归分析, 综合从高质量差分干涉图获取的潜在变形区先验知识、干涉图相干性和质量等, 采用多级滤波窗口进

一步提高干涉图的质量.同时,根据残余相位中大气相位、非线性形变相位和噪声相位所表现出的时空特征的差异性,分离得到非线性形变相位,最终求和得到研究区域地表形变速率和累积形变量.

2.2 地形约束下的三维形变反演

理论上 InSAR 重建地表三维形变场,需要至少 3 组独立观测的 SAR 数据集. Samsonov and Oreye (2016) 提出多维小基线集 (multidimensional small baseline subset, MSBAS), 该技术以 SBAS 技术为基础, 利用在时间和空间上有重叠的两组不同轨道 SAR 数据集, 解算地表二维和三维形变场.

由于 InSAR 对南北 (N-S) 向形变敏感度较低, 当有先验知识表明形变显著偏离 N-S 方向, 则忽略 N-S 分量的投影贡献, 直接解算东西 (E-W) 向和垂直 (U-D) 向形变. 当 N-S 向形变不能忽略, 且仅有两组独立 SAR 观测 (如升降轨), 则可结合活动滑坡的先验知识, 施加地形约束, 将自由度从 3 降至 2, 再联合升、降轨数据反演滑坡的三维形变场.

地形约束主要包括地表平行流 (surface-parallel flow, SPF) (Joughin *et al.*, 1998) 和坡向平行流 (aspect parallel flow, APF) (Hu *et al.*, 2018) 两种约束模型. SPF 假定滑坡在重力作用下整体沿平行于最大坡度方向滑动, SPF 约束可用公式可表达为:

$$V_v = \left(\frac{\partial H}{\partial H_E} \right) V_E + \left(\frac{\partial H}{\partial H_N} \right) V_N, \quad (1)$$

式中: V_v , V_E 和 V_N 分别表示 U-D, E-W 和 N-S 方向形变速率, H 为地面高程, $\frac{\partial H}{\partial H_E}$ 和 $\frac{\partial H}{\partial H_N}$ 分别代表高程在 E-W、N-S 方向的一阶导.

APF 地形约束模型假定滑坡运动在水平方向与斜坡方面一致, 忽略滑坡的横向形变. APF 约束可用公式表达为:

$$V_E \cos \beta_{asp} = V_N \sin \beta_{asp}, \quad (2)$$

式中: β_{asp} 代表滑坡坡向, V_E 和 V_N 分别表示 E-W 和 N-S 方向形变速率, 通过奇异值分解求得.

3 白格滑坡堵江影响

3.1 SBAS-InSAR 监测结果

图 2 为西藏自治区贡觉县沙东乡至雄松乡的 SBAS-InSAR 年平均形变速率, 负值表示目标沿雷达视线向 (LOS) 远离卫星运动, 正值表示目标沿

LOS 靠近卫星运动. 如图 2, 2014 年 10 月~2018 年 10 月, 升轨数据共监测到 9 处活动滑坡 (图 2a), 最大形变速率约 150 mm/a; 降轨共监测到 13 处活动滑坡 (图 2b), 最大形变速率约 68 mm/a. 白格滑坡于 2018 年 10 月和 11 月发生堵江事件, 受堵江事件影响, SBAS-InSAR 的升、降轨形变速率均显著增大 (图 2c~2d), 最大形变速率均已超过 300 mm/a.

3.2 滑坡受堵江影响分析

白格滑坡于 2018 年 10 月和 11 月先后两次发生“失稳—堵江—泄洪”, 造成下游沿江两岸 400 km 区域受灾. 如图 3a~3b, 第 1 次泄流流量峰值达到 $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$, 第 2 次泄洪流量峰值达到 $3.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$, 最大蓄水量达到 $6.0 \times 10^8 \text{ m}^3$. 为探究白格滑坡“失稳—堵江—泄洪”对下游滑坡的影响, 将结合堵江事件前后的 SBAS-InSAR 形变监测结果 (图 2) 和坡体形变特征点 (标记于图 2c~2d) 进一步开展量化分析. 分析时, 设置白格滑坡堵江时刻为形变参考时刻.

如图 4a, 2 号滑坡体 (图 2a) 上典型相干点 (图 2c) 的累积形变曲线表明, 2014 年 10 月~2018 年 10 月 (时段 I), 滑坡体相干点形变速率约 -30~-60 mm/a; 2018 年 10 月至 2021 年 5 月 (时段 II), 滑坡前缘变形速率明显加快, 最大 -233 mm/a, 约为堵江前的 4 倍. 而滑坡体后缘则受堵江影响相对较小, 速率增至约 70 mm/a.

如图 4b, 3 号滑坡体 (图 2a) 上典型相干点 (图 2c) 的累积形变曲线表明, 堵江前滑坡前缘错台区形变速率最大为 -79 mm/a; 堵江后形变速率增加至 -211 mm/a. 其中, 靠近江边的 3 个特征点的形变速率由原来的 -21 mm/a, -22 mm/a 和 -40 mm/a, 分别增加至 -46 mm/a, -62 mm/a 和 -150 mm/a, 速度加快 2~4 倍不等. 而滑坡中部特征点的形变速率, 在堵江前后并未出现明显变化.

如图 4c, 5 号滑坡体 (图 2a) 上典型相干点 (图 2c) 的累积形变曲线显示, 坡体前缘在堵江前 (时段 I) 处于相对稳定状态, 堵江后变形明显加速; 坡体其他部位受堵江影响较小, 形变速率未出现明显变化. 如图 4d, 6 号滑坡 (图 2a) 上典型相干点 (图 2c) 的累积形变曲线表明, 堵江发生前, 滑坡临江前缘基本处于稳定状态, 坡体后缘变形速度较快, 累积形变量超过 -500 mm. 堵江后, 滑坡后缘未见明显加速, 前缘形变速率明显加快, 累积形变量最大达到 -520 mm, 形变速率为 -180 mm/a, 为堵江前的

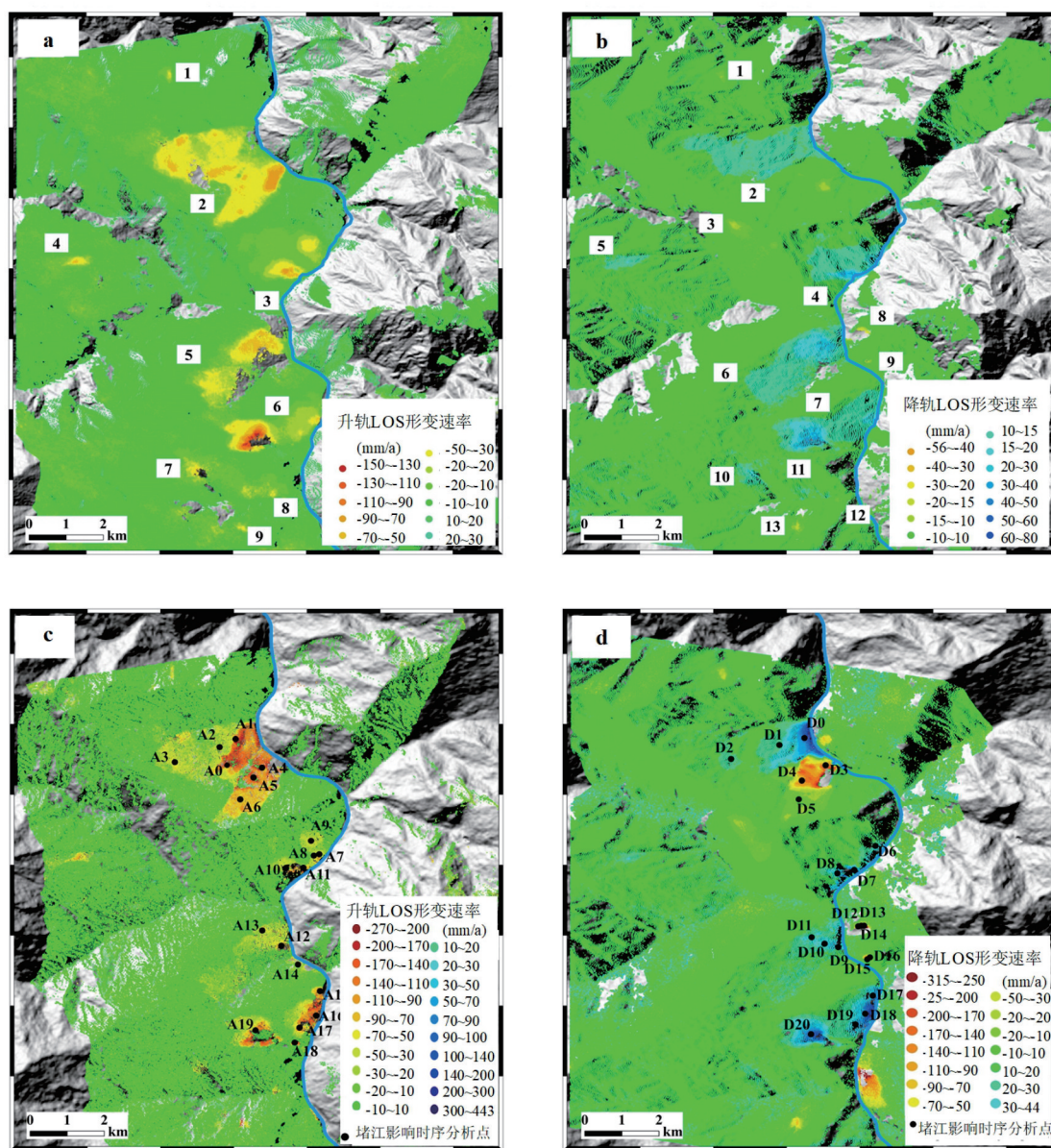


图 2 SBAS-InSAR 监测结果

Fig.2 Monitoring results of SBAS-InSAR

图 a 和图 b 为 2014 年 10 月至 2018 年 10 月的升、降轨监测结果;图 c 和图 d 为 2018 年 01 月至 2021 年 05 月的升、降轨监测结果

4~5 倍.

图 5a 中 2 号滑坡体(图 2b)上典型相干点(图 2d)的累积形变曲线显示,滑坡前缘受堵江影响明显,堵江发生前,其前缘形变速率最大 15 mm/a;2018 年 10 月~2021 年 5 月(时段 II),形变速率达 108 mm/a,约为堵江前的 7 倍;坡顶则未发生明显加速现象.

图 5b 中 4 号滑坡体(图 2b)上典型相干点(图 2d)的累积形变曲线显示,受堵江影响,临江的两个

特征点形变速率分别由 26 mm/a 和 41 mm/a 加速至 65 mm/a 和 100 mm/a;另一点则基本保持相对的匀速运动,加速不明显.

如图 5c 中 6 号滑坡体(图 2b)上典型相干点(图 2d)的累积形变曲线表明,特征点上形变速率受堵江影响并不明显,而滑坡前缘在 2020 年 5 月之后出现加速趋势.

图 5d 中 8 号滑坡体(图 2b)上典型相干点(图 2d)的累积形变曲线可以看出,在堵江前后的两个

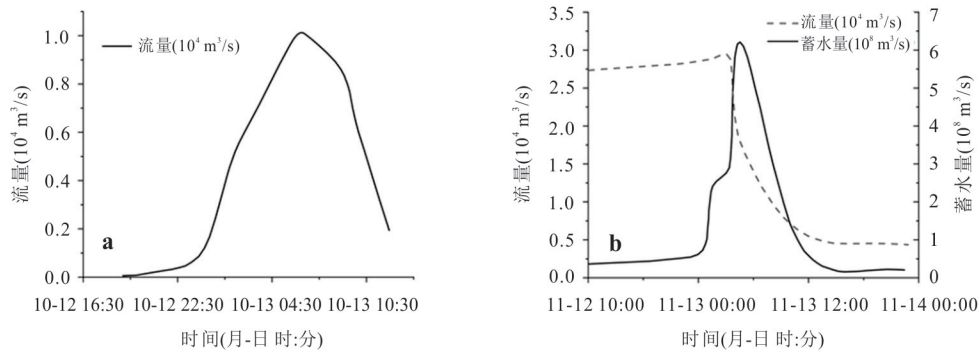


图3 堵江堰塞湖第1次泄洪流量(a);第2次泄洪流量(b)

Fig.3 The outburst-flood discharge flow of the dammed lake for the first time (a) and second time (b)

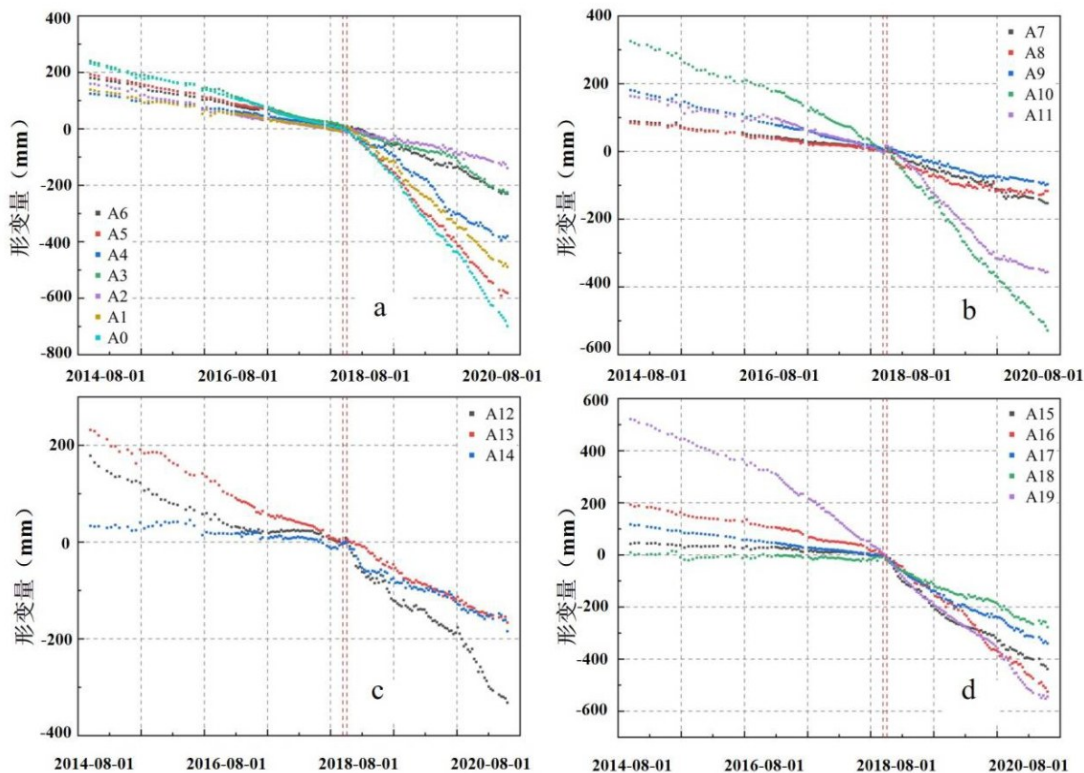


图4 特征点A1~A19时序累积形变量

Fig.4 The cumulative deformation of A1-A19

红色虚线为白格滑坡两次堵江时刻

监测周期内,形变发生了显著变化,速率从-40 mm/a 加速至-150 mm/a,累积形变量由175 mm增加至最大为434 mm.

图5e中9号滑坡体(图2b)上典型相干点(图2d)在堵江前已呈现加速趋势,堵江后形变速率成线性增加,受堵江本身影响不显著.

图5f中7号滑坡体(图2b)上典型相干点(图2d)的累积形变曲线表明,前缘临江处堵江前形变速率不超过20 mm/a,堵江后形变速率约100 mm/

a,累积形变量达280 mm,约为堵江前的5倍.滑坡后缘未发生明显变形加速.

研究区域内滑坡受堵江影响的面积则通过堵江前后变形速率之差计算得到,结果如图6所示,绿色区域代表没有显著变化的斜坡(差异<10 mm/a),红色区域表示堵江前后速率显著变化的活动斜坡(差异>10 mm/a),大部分为临江区域.经统计发现,受堵江影响的活动坡体面积约3.2 km².其中,位于金沙江凹岸的2号滑坡(图2)受堵江影响最为显

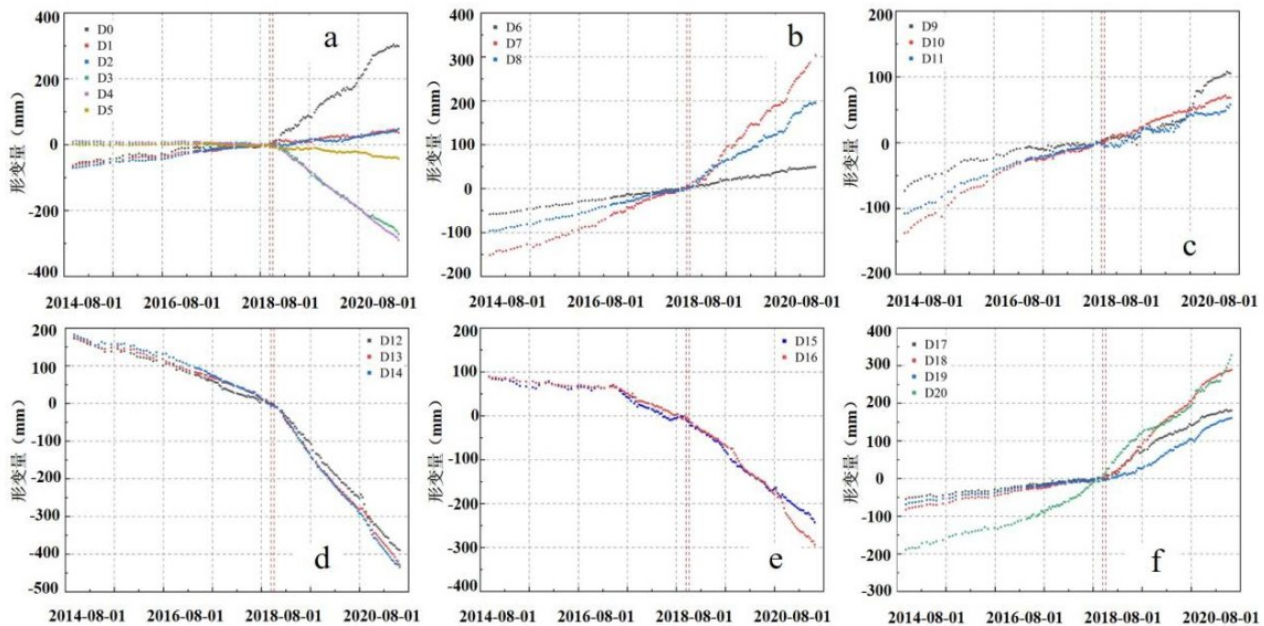


图5 特征点D1~D20时序累积形变量

Fig.5 The cumulative deformation of D1—D20

著,单体影响面积 1.85 km^2 ,该典型滑坡也被选为后续开展三维形变反演和深入分析的滑坡。

3.3 三维形变反演与结果验证

3.3.1 沙东滑坡三维形变反演 图7为沙东滑坡在SPF和APF地形模型约束下的三维形变结果,直观地呈现了滑坡体的整体运动特征,其底图为滑坡的垂直向形变速率图,红色负值表示坡体垂直向下运动,绿色表示较为稳定,蓝色则表示堆积抬升。局部抬升可能是由局部坡向变化引起,也可能为局部次级滑动后的堆积物。为更直观地呈现出沙东滑坡的水平运动模式,图7中,将E-W向和N-S向的形变通过矢量合成得到坡体的水平运动矢量,其方向和大小由黑色箭头方向和长短表示。

由图7可知,沙东滑坡具有非常显著的强弱变形分区现象,坡体整体呈现东移、下滑的状态。以滑坡中部的冲沟为界,可分为南北两侧,沙东滑坡东南侧的中前部和前缘活动强烈,前缘活动最为强烈,前缘临江的局部垮塌也是造成InSAR失相干的主要原因。SPF反演的速度场,滑坡的滑动方向与坡度方向基本一致,滑坡的变形从后缘至前缘的差异化分布,也说明该滑坡表现出明显的重力驱动特征。APF反演的三维形变场,沿坡度下滑的最大形变速率超过 -220 mm/a ,其速率分布进一步印证了坡向对滑坡运动的控制作用。主滑动区的运动方向和速率表明滑坡体在坡向控制下沿坡面向下快速滑动,

滑坡边界处的低速运动则反映了滑坡位移受限于复杂坡向及局部地形条件的影响显著。

3.3.2 不同模型结果对比与分析 整体上,SPF与APF两种地形约束模型在E-W向和U-D向形变反演中,速率量级和形变分布的一致性较高。在形变细节上,APF反演的E-W向强变形区集中在坡体的中部及东南缘,强弱变形区的边界清晰,边界内的形变分布更具连续性,较好地呈现出沙东滑坡在重力作用下的运动特征,同时也保留了滑坡后缘在向东推挤作用下形成的局部反向运动特征。相比较而言,SPF约束下的形变反演结果对坡度较大的区域更为敏感,对坡度较小区域的细化不足,可能受地形或其他噪声干扰,形变在强变形区的空间分布一致性也表现稍差。

两者在U-D向形变的表现与E-W向类似,APF反演的U-D向剧烈变形区的边界清晰,空间分布更均匀,其对滑坡前缘堆积体的边界刻画更清晰,表现出的连续性与空间分布也更与实际情况更为符合。SPF则在剧烈下滑区和后缘拉张区的表现较好,但分区边界较为模糊、分区内部常出现不连续的异常值。

两种方法均捕捉到滑坡体在N-S向的运动特性。APF方法在强变形区的速率分布更紧凑,稳定区域的速率分布更平滑,主要活动区集中在滑坡中部至南缘。该方法在沙东滑坡N-S向形变反演中,

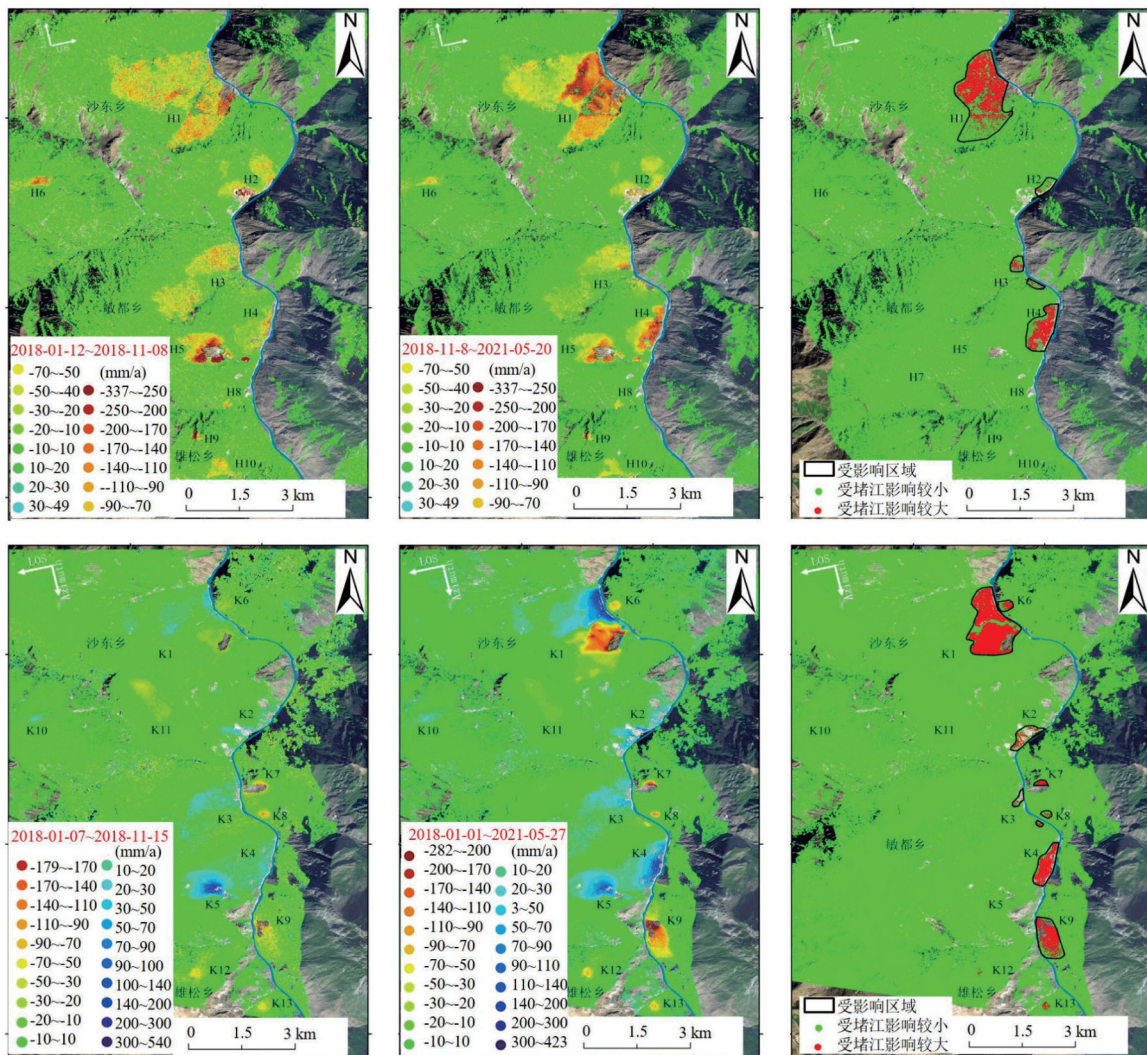


图6 堵江影响区域

Fig.6 The impact area of the damming of the river

a. 升轨; b. 降轨

表现出更强的噪声抑制能力. SPF 方法的反演结果则在强变形区内有较多离散点, 区内对应结果普遍高于 APF 方法, 推测可能是由于模型对地形复杂影响的敏感性不足, 导致其高估了 N-S 向形变.

3.3.3 GNSS 监测结果验证 考虑到 GNSS 水平方向的监测精度高, InSAR 垂直向监测精度高, 故仅从 E-W 向及 N-S 向两个维度对 SPF 和 APF 约束下的形变结果进行评估分析 (Hu *et al.*, 2018). 图 8 为相同监测时段内, GNSS (图 7) 和 InSAR 的 E-W 向和 N-S 向累积形变.

由图 8a 和表 2 可知, 两种地形约束下, E-W 向形变结果相近 (APF 稍显优势), 且与 GNSS 地面监测具有很好的一致性. 由图 8b 和表 2 可知, N-S 向

形变结果差异较大, SPF 在 N-S 向的形变累积曲线表现出更强的波动性, 相较于 GNSS 结果存在严重高估现象 (表 2), APF 约束与 GNSS 监测结果表现出很强的一致性. 由此可知, 坡向约束与坡面约束相比, 可以更有效减弱 N-S 向的形变估算误差. 整体上, APF 在沙东滑坡运动的水平分量反演中表现更优.

4 结论

本文利用 SBAS-InSAR 技术对覆盖西藏自治区贡觉县连续 8 a 的 Sentinel-1A 升降轨 SAR 数据进行处理, 获得了该区 2014—2022 年间的活动滑坡群的形变特征. 重点分析了 2018 年白格滑坡堵江事

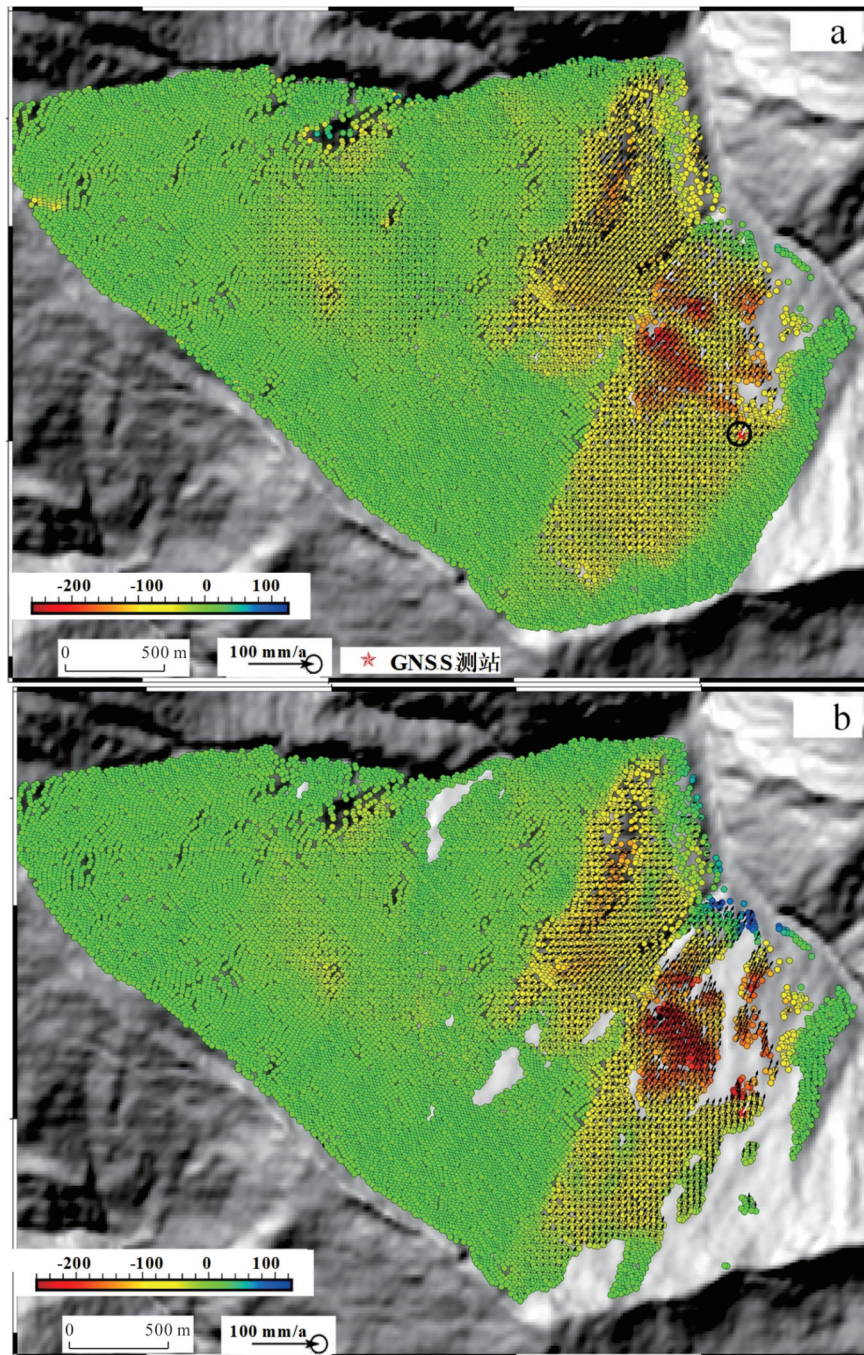


图7 2018年6月~2022年5月 SPF和APF约束下的三维形变速率

Fig.7 Three-dimensional deformation rates under SPF and APF constraints

件对滑坡群的影响,并在地形约束下,联合升降轨InSAR结果反演了沙东滑坡的三维形变.主要结论如下:

(1)通过SBAS-InSAR技术处理Sentinel-1A的升降轨SAR数据,在沙东乡至雄松乡分别探测出9处和13处滑坡隐患,其中仅升轨可探测隐患2处,仅降轨可探测隐患5处.

(2)白格滑坡堵江事件对沿岸滑坡产生了不同

程度的影响,通常前缘影响最大,中部次之,后缘影响不大;受堵江影响滑坡的形变速率普遍增加了3~7倍不等,位于金沙江凹岸的沙东滑坡受堵江影响最大,单体受影响面积约 1.85 km^2 ,前缘变形加剧,最大为堵江前的7倍.

(3)三维形变结果表明,两种地形约束模型都反演出坡体整体呈现东移、下滑的状态,在E-W向和U-D向的结果一致性较高;N-S向形变反演中,

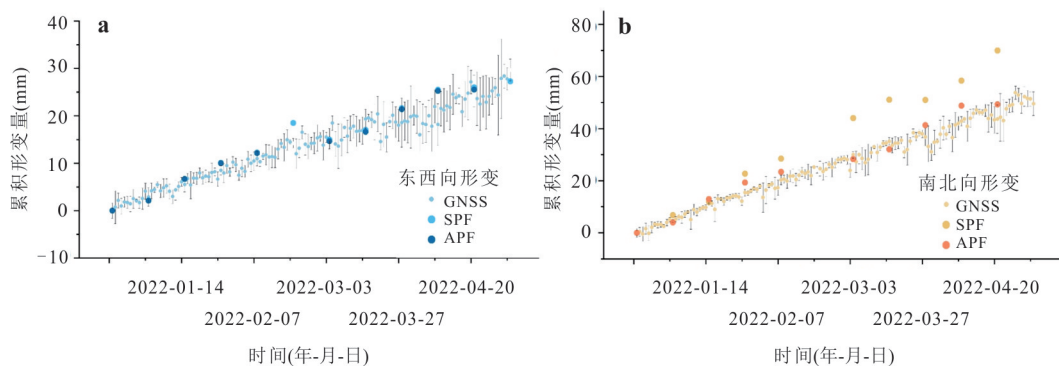


图 8 水平方向累积形变结果

Fig.8 The cumulative deformation in horizontal direction

a.E-W 向累积形变;b. N-S 向累积形变

表 2 水平方向年均形变速率对比

Table 2 Comparison of the annual average deformation rates in horizontal direction

	SPF	APF	GNSS	SPF 误差	APF 误差
东西向 (mm/a)	75.31	74.72	82.07	6.73	7.35
南北向 (mm/a)	198.21	124.43	137.00	81.21	9.57
水平面夹角 (°)	20.80	28.74	30.92	11.88	0.53

APF 更为可靠, SPF 存在明显高估. 整体上, APF 相较于 SPF 在形变细节和分区中表现更好.

References

- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., et al., 2002. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11): 2375–2383. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>
- Chai, H. J., Liu, H. C., Zhang, Z. Y., 2000. Development and Distribution Characteristics of Dujiang Landslide in China. *Mountain Research*, 18(S1): 51–54 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J. P., Li, H. Z., 2016. Genetic Mechanism and Disasters Features of Complicated Structural Rock Mass along the Rapidly Uplift Section at the Upstream of Jinsha River. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 46(4): 1153–1167 (in Chinese with English abstract).
- Evans, S. G., Delaney, K. B., Hermanns, R. L., et al., 2011. The Formation and Behaviour of Natural and Artificial Rockslide Dams; Implications for Engineering Performance and Hazard Management. *Natural and Artificial Rockslide Dams*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1–75. https://doi.org/10.1007/978-3-642-04764-0_1
- Fan, X. M., Dufresne, A., Siva Subramanian, S., et al., 2020. The Formation and Impact of Landslide Dams – State of the Art. *Earth-Science Reviews*, 203: 103116. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103116>
- Fan, X. M., Xu, Q., Alonso-Rodriguez, A., et al., 2019. Successive Landsliding and Damming of the Jinsha River in Eastern Tibet, China: Prime Investigation, Early Warning, and Emergency Response. *Landslides*, 16(5): 1003–1020. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01159-x>
- Franco, A., Moernaut, J., Schneider-Muntau, B., et al., 2021. Triggers and Consequences of Landslide-Induced Impulse Waves – 3D Dynamic Reconstruction of the Tanaan Fiord 2015 Tsunami Event. *Engineering Geology*, 294: 106384. <https://doi.org/10.1016/j.eng-geo.2021.106384>
- Guo, C. B., Wu, R. A., Zhong, N., et al., 2024. Large Landslides along Active Tectonic Zones of Eastern Tibetan Plateau: Background and Mechanism of Landslide Formation. *Earth Science*, 49(12): 4635–4658 (in Chinese with English abstract).
- Guo, C. B., Yan, Y. Q., Zhang, Y. S., et al., 2021. Study on the Creep-Sliding Mechanism of the Giant Xiongba Ancient Landslide Based on the SBAS-InSAR Method, Tibetan Plateau, China. *Remote Sensing*, 13(17): 3365. <https://doi.org/10.3390/rs13173365>
- Hu, X., Lu, Z., Pierson, T. C., et al., 2018. Combining InSAR and GPS to Determine Transient Movement and Thickness of a Seasonally Active Low-Gradient Translational Landslide. *Geophysical Research Letters*, 45(3): 1453–1462. <https://doi.org/10.1002/2017GL076623>
- Joughin, I. R., Kwok, R., Fahnestock, M. A., 1998. Interferometric Estimation of Three-Dimensional Ice-Flow

- Using Ascending and Descending Passes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(1): 25–37. <https://doi.org/10.1109/36.655315>
- Li, M. H., Zhang, L., Ding, C., et al., 2020. Retrieval of Historical Surface Displacements of the Baige Landslide from Time-Series SAR Observations for Retrospective Analysis of the Collapse Event. *Remote Sensing of Environment*, 240: 111695. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111695>
- Li, X., Guo, C. B., Yang, Z. H., et al., 2021. Development Characteristics and Formation Mechanism of the Xiongba Giant Ancient Landslide in the Jinshajiang Tectonic Zone. *Geoscience*, 35(1): 47–55 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. J., Zhao, C. Y., Zhang, Q., et al., 2021a. Integration of Sentinel-1 and ALOS/PALSAR-2 SAR Datasets for Mapping Active Landslides along the Jinsha River Corridor, China. *Engineering Geology*, 284: 106033. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106033>
- Liu, X. J., Zhao, C. Y., Zhang, Q., et al., 2021b. Three-Dimensional and Long-Term Landslide Displacement Estimation by Fusing C- and L-Band SAR Observations: A Case Study in Gongjue County, Tibet, China. *Remote Sensing of Environment*, 267: 112745. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112745>
- Penna, D., Brocca, L., Borga, M., et al., 2013. Soil Moisture Temporal Stability at Different Depths on Two Alpine Hillslopes during Wet and Dry Periods. *Journal of Hydrology*, 477: 55–71. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.10.052>
- Samsonov, S. V., d'Oreye, N. F., 2016. Multidimensional Time-Series Analysis of Ground Deformation from Multiple InSAR Data Sets Applied to Virunga Volcanic Province. *Geophysical Journal International*, 191: 1095–1108. <https://doi.org/10.1111/J.1365-246X.2012.05669.X>
- Schulz, W. H., Coe, J. A., Ricci, P. P., et al., 2017. Landslide Kinematics and Their Potential Controls from Hourly to Decadal Timescales: Insights from Integrating Ground-Based InSAR Measurements with Structural Maps and Long-Term Monitoring Data. *Geomorphology*, 285: 121–136. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.02.011>
- Song, C., Yu, C., Li, Z. H., et al., 2022. Triggering and Recovery of Earthquake Accelerated Landslides in Central Italy Revealed by Satellite Radar Observations. *Nature Communications*, 13: 7278. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-35035-5>
- Wang, G. F., Bi, Y. H., Li, H., et al., 2025. Developmental and Distribution Characteristics and Formation Mechanisms of Large-Scale Landslide Disaster Chains in Bailong River Basin. *Earth Science*, 50(10): 3885–3904 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L. C., Wen, M. S., Feng, Z., et al., 2019. Researches on the Baige Landslide at Jinshajiang River, Tibet, China. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 30(1): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y. T., Liu, M., Quincey, D. J., et al., 2023. Cyclic Landslide-Flood Chains along a Major Mountain River. *Geomorphology*, 439: 108835. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108835>
- Yao, J. M., Yao, X., Liu, X. H., et al., 2022. Landslide Detection and Mapping Based on SBAS-InSAR and PS-InSAR: A Case Study in Gongjue County, Tibet, China. *Remote Sensing*, 14(19): 4728. <https://doi.org/10.3390/rs14194728>
- Zhu, S. N., Yin, Y. P., Wang, M., et al., 2021. Instability Mechanism and Disaster Mitigation Measures of Long-Distance Landslide at High Location in Jinsha River Junction Zone: Case Study of Sela Landslide in Jinsha River, Tibet. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 43(4): 688–697 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, W., Yang, L. Y., Cheng, Y. Q., et al., 2024. Active Thickness Estimation and Failure Simulation of Translational Landslide Using Multi-Orbit InSAR Observations: A Case Study of the Xiongba Landslide. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 129: 103801. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.103801>

中文参考文献

- 柴贺军, 刘汉超, 张倬元, 2000. 中国堵江滑坡发育分布特征. *山地学报*, 18(增刊1): 51–54.
- 陈剑平, 李会中, 2016. 金沙江上游快速隆升河段复杂结构岩体灾变特征与机理. *吉林大学学报(地球科学版)*, 46(4): 1153–1167.
- 郭长宝, 吴瑞安, 钟宁, 等, 2024. 青藏高原东部活动构造带大型滑坡成灾背景与灾变机制. *地球科学*, 49(12): 4635–4658.
- 李雪, 郭长宝, 杨志华, 等, 2021. 金沙江断裂带雄巴巨型古滑坡发育特征与形成机理. *现代地质*, 35(1): 47–55.
- 王高峰, 毕远宏, 李浩, 等, 2025. 白龙江流域特大滑坡灾害链发育分布特征及形成机制. *地球科学*, 50(10): 3885–3904.
- 王立朝, 温铭生, 冯振, 等, 2019. 中国西藏金沙江白格滑坡灾害研究. *中国地质灾害与防治学报*, 30(1): 1–9.
- 朱赛楠, 殷跃平, 王猛, 等, 2021. 金沙江结合带高位远程滑坡失稳机理及减灾对策研究: 以金沙江色拉滑坡为例. *岩土工程学报*, 43(4): 688–697.