

滑坡灾害 InSAR 应急排查技术方法研究

刘星洪^{1,2,3}, 姚鑫^{1,3}, 周振凯^{1,3}, 李凌婧^{1,3}, 姚佳明⁴

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 中国地质大学(北京), 北京 100083;

3. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081;

4. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083)

摘要: 研究探索了一条以 InSAR 变形为主, 辅助光学遥感、地貌和地质条件特征, 进行活动性滑坡快速排查的技术方法, 并以四川省雷波县域为例进行了实验。应用 4 种 SAR 数据 (PALSAR-1 升轨、Sentinel-1 A/B 升、降轨和 PALSAR-2 降轨数据) 进行合成孔径雷达干涉 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 处理, 共解译活动性地质灾害 163 处, 并分析了其时空分布规律, 获得了几点认识: (1) InSAR 技术能够追溯滑坡长期微小变形, 从而实现活动性滑坡的有效识别; (2) 多时段、多角度和多分辨率 SAR 数据的综合使用, 可以有效克服滑坡观测的阴影叠掩、失相干等问题, 提高滑坡 (尤其是高位滑坡) 识别的效果、效率和时效性; (3) 与地面调查结果比较, InSAR 识别的滑坡更全面、规模更准确, 对高位滑坡和集中分布滑坡识别更有效, 可以作为现今地质灾害排查的重要手段之一; (4) 雷波县地质灾害主要分布在金沙江及美姑河沿岸, 北向坡和 30°~40° 坡度是地质灾害高发区, 除寒武系、奥陶—志留系地层发生地质灾害比例较高, 其它各地层总体分布较均一。

关键词: 滑坡; 地质灾害排查; InSAR; SAR 数据; 四川省雷波县

中图分类号: P694; P642.22

文献标识码: A

STUDY OF THE TECHNIQUE FOR LANDSLIDE RAPID RECOGNITION BY INSAR

LIU Xinghong^{1,2,3}, YAO Xin^{1,3}, ZHOU Zhenkai^{1,3}, LI Lingjing^{1,3}, YAO Jiaming⁴

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100081, China;

2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

3. Key Laboratory of Neotectonic Movement & Geohazards, Ministry of Land and Mineral Resources, Beijing 100081, China;

4. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: An active landslide rapid recognition method, based on InSAR deformation and assisted by optical remote sensing, geomorphologic features and geological conditions, is presented in this article and Leibo County of Sichuan Province is chosen to be the study area. Four type of SAR data, PALSAR-1/2 as-/descend and Senitnel-1A/B de-/ascend are processed, with interpretation of 163 landslides overall and analysis of spatial and temporal distribution, from which some important conclusions are drawn. (1) InSAR can trace long and small deformation so as to realize effective recognition of active landslides; (2)

基金项目: 中国地质调查局工作项目 (DD20179282, DD20160272); 国家自然科学基金项目 (41672359, 41731287)

作者简介: 刘星洪 (1994-), 女, 硕士, 主要从事地质灾害与 InSAR 研究。E-mail: 811981187@qq.com

通讯作者: 姚鑫 (1978-), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事地质灾害与 InSAR 研究。E-mail: yaoxingphd@163.com

收稿日期: 2017-10-30; **修回日期:** 2017-12-02

范二平编辑

The use of multiple types SAR data can overcome the shortages of InSAR, such as layover, shadow, incoherence, to improve the efficiency, effect and timeliness; (3) Compared with field investigation results, landslides recognized by InSAR are more comprehensive and accurate, especially for high-position and centralized landslides, and therefore InSAR can be taken as one of the important methods for landslide survey; (4) The landslides in Leibo county mainly occurred along the Jinsha river and the Meigu river, on the north slope and slope areas with a gradient from 30° to 40° . The overall distribution of geological hazards in each stratum is even, except for the Cambrian and Ordovician-Silurian with a relatively high ratio.

Key words: landslide; geological hazard recognition; InSAR; SAR data; Leibo County in Sichuan province

0 引言

2017年6月24日四川茂县叠溪镇新磨村发生高位山体滑坡,造成重大人员伤亡和财产损失。滑坡发生后,姚鑫等利用干涉合成孔径雷达技术(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)追溯观测,发现滑前长期以来存在变形现象。这与许强等^[1]发现的地质灾害发生之前一般都会有等速变形、加速变形现象相一致。但是由于我国西南地区海拔高、地形陡峭、地表覆盖条件复杂,光学遥感解译难以全面识别,地面调查很多高位不易到达,导致一定量的高危隐蔽滑源区遗漏,调查的时间周期也比较长,这无法满足地质灾害排查的需求。合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)对地观测通过自主发射和接收微波来探测地表,通过干涉相位变化测量地表变形,具有全天时、全天候、观测范围大、灵敏性高、高性价比、观测时间可回溯等优势,这对于大范围的地质灾害快速排查具有重要意义^[2-3]。

上世纪90年代国外学者就已经将InSAR技术应用于监测地表形变^[4-5]。国内专家在InSAR监测滑坡变形上也取得了一定的进展,张琴等^[6]基于InSAR监测发现武隆鸡尾山滑坡发生的前两年坡体就已经出现缓慢变形,Yao等^[7]通过InSAR变形系统的识别了鲜水河断裂带滑坡、泥石流、冰碛物的空间分布。借助于Sentinel-1丰富的存档数据,InSAR在此次茂县灾害性滑坡调查中发挥了重要作用,更多专家学者意识到InSAR技术的巨大潜力。因此,利用InSAR技术对四川省地质灾害高易发区进行地质灾害排查被提上议事日程。文章以雷波县为例,利用多种SAR数据干涉测量,识别了雷波县

域范围内的活动性滑坡,并与地表调查点进行对比,探讨InSAR技术在地质灾害排查中的作用。

1 研究区地质概况

四川省雷波县位于四川省西南边缘的横断山脉东段小凉山,金沙江西北岸,与云南省永善县隔江相望(见图1)。县区内地形复杂,高差为274~4000 m,差别较大,整体呈西高东低的趋势。雷波县沿江气候属亚热带山地立体气候,高山对峙,气流无法入内,其河谷区与其他同纬度地区相比温度偏高,降水较少,因而又干又热,素有“干热河谷”之称^[8]。但县域非临江区雨热同期,丛林密布,境内多年平均降雨量为852.6 mm^[9]。

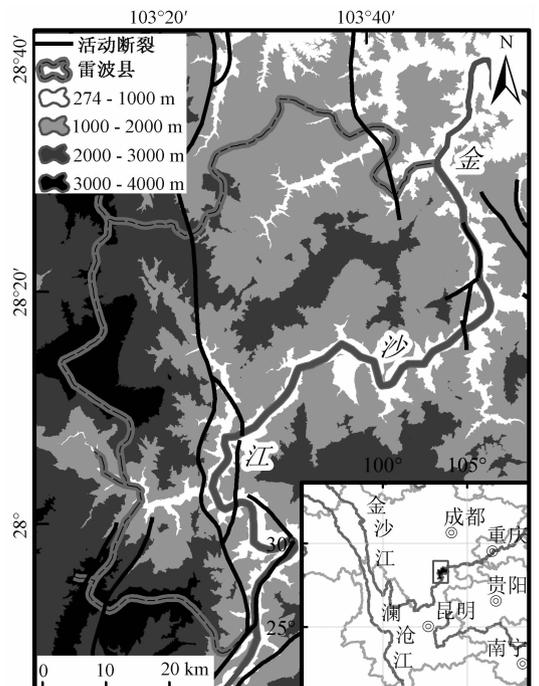


图1 雷波县区位图

Fig. 1 Location of Leibo County

从构造体系上来说, 雷波县位于扬子准地台西缘, 川滇断块构造区^[10]。雷波县也属于华夏系、新华夏系构造体系和经向构造体系的分界线, 华夏系、新华夏系构造体系位于雷波以东, 其普洱度—莲峰带构造形迹向西南方向延入雷波县; 经向构造体系分布在雷波以西, 控制着该区的沉积建造以及岩浆岩建造, 且该构造体系长期多次活动, 伴有巨型断裂的复式隆起带。雷波县内断裂分布主要为压性或压扭性断裂, 呈南北向分布, 贯穿雷波县区^[11]; 该区皱褶的轴向分布与断裂平行, 也呈南北向分布。此外, 还发育有北东—南西向断裂, 在雷波县境内戛然而止。雷波县区岩性复杂多样, 广泛分布震旦系、奥陶—志留系的地层, 以页岩为主; 部分地区出露三叠、侏罗系的碎屑岩、碳酸盐、泥页岩、砂岩和玄武岩类地层, 主要分布在县区东部和西部; 在金沙江河谷地带分布第四系松散的冲积物与残坡积物。

以上气候、地理和地质条件决定了雷波县地质环境脆弱, 是滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害易发区, 加之雷波县位于溪洛渡水库蓄水区, 库水位变动加剧了滑坡的活动, 对该区人民的生命安全和财产安全造成威胁^[9]。已有的地表调查表明雷波县灾害隐患点有 269 处, 是四川省地质灾害多发县区之一。

2 工作流程与方法

2.1 工作流程

充分利用 InSAR 技术可以多时段、多角度、多量程观测的技术优势, 对该区的地质灾害进行

排查, 构建了一个观测方法体系, 主要包括: 数据选取→干涉处理→综合解译→绘制灾害图→规律分析和总结, 流程如图 2 所示。

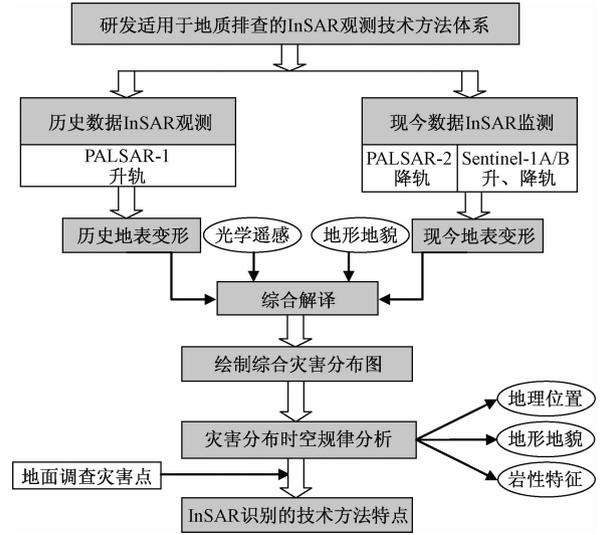


图 2 滑坡灾害 InSAR 排查的工作流程图

Fig. 2 Work flow chart of landslide detection by InSAR

2.2 数据的选取

收集覆盖研究区 2007 年 1 月至 2011 年 3 月的 17 景存档 PALSAR-1 SAR 数据, 按照研究区范围进行拼接裁剪; 使用美国 30 m 分辨率的 SRTM DEM 消除地形相位。根据小基线的计算方法, 选出 8 个干涉组合, 平均空间基线为 299.069 m。另外采用了 2016 年 10 月 22 日和 2017 年 1 月 28 日的 2 景降轨 PALSAR-2 数据、2016 年 12 月 3 日和 2017 年 12 月 27 日 Sentinel-1 A/B 的 2 景降轨数据、2016 年 1 月 7 日至 2017 年 3 月 8 日 Sentinel-1 A/B 的 2 景升轨数据, 具体参数见表 1。

表 1 所选数据类型及卫星传感器基本参数

Table 1 The selected data type and main parameters of the satellite sensor

星载 SAR 系统	波长/cm	极化方式	观测方向	数据日期	平均基线/m	侧视角/(°)	分辨率/m	灾害个数
PALSAR-1	L (23.6)	HH	升轨	2007-07-07、2007-08-22、2007-08-22、2008-01-07、2008-04-08、2008-05-24、2009-01-09、2009-02-24、2009-08-27、2010-01-12、2010-02-27、2011-01-15 和 2011-03-02	299	38.74	12	75
PALSAR-2	L (23.8)	HH	降轨	2016-10-22 和 2017-01-28	56	39.66	3.0	81
Sentinel-1 A/B	C (5.6)	VV	升轨	2016-01-07 和 2017-03-08	45	33.91	15	11
Sentinel-1 A/B	C (5.6)	VV	降轨	2016-12-03 和 2017-12-27	30	33.95	15	34

数据的选取考虑到了 PALSAR-1 和其他三种数据的时间差, 同时也用现今 L 波段和 C 波段数据进行对比补充, 其中, Sentinel-1 A/B 获取相对快捷; PALSAR-2 数据覆盖雷波县区中部和南部区域。多

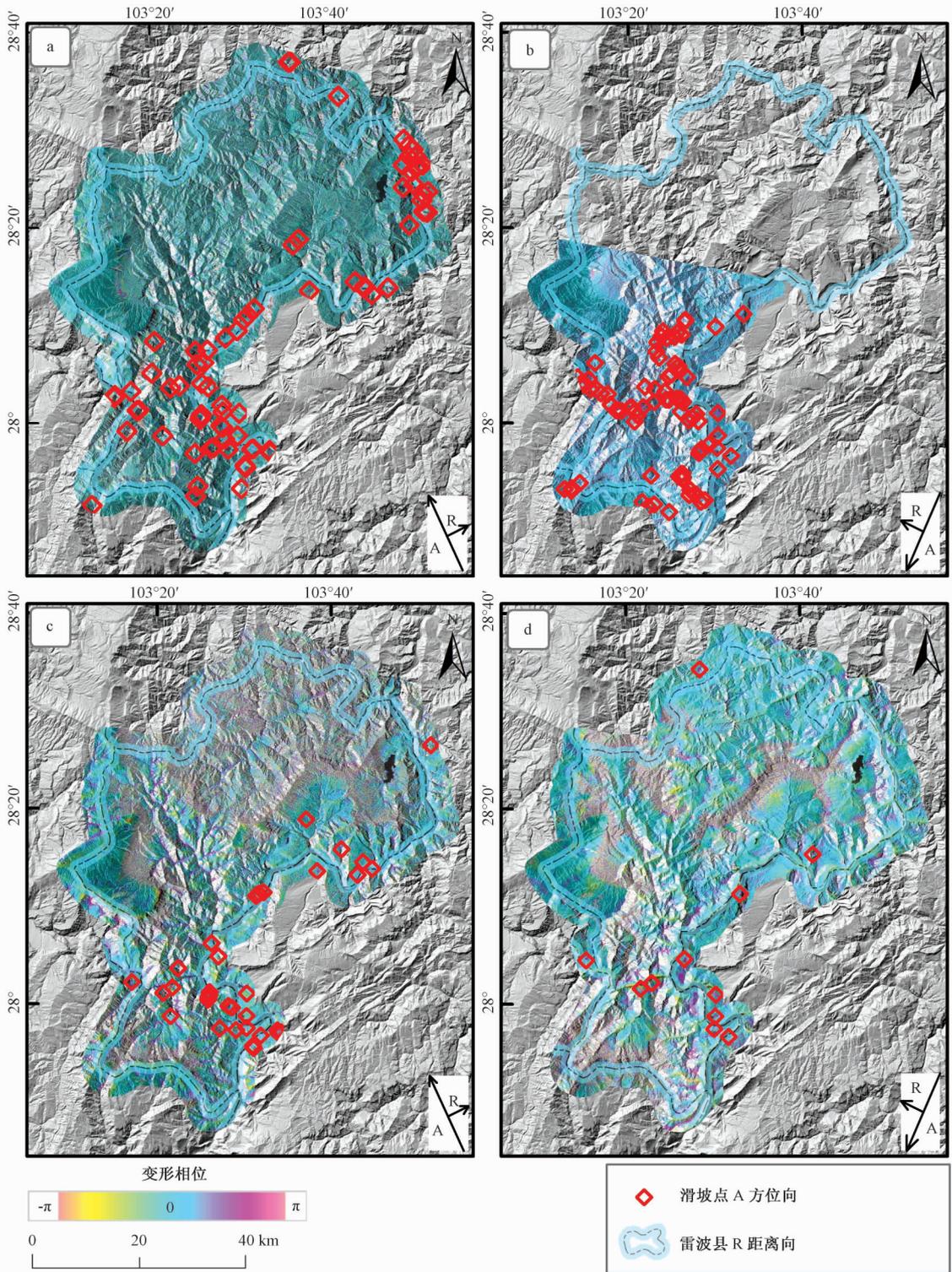
方位, 多时段, 多波段的探查结果更加完整可靠。

2.3 滑坡灾害的识别

以 InSAR 观测变形为主, 辅助光学遥感、地貌和地质条件特征解译雷波县域内的活动性地质

灾害, PALSAR-1 InSAR 变形解译滑坡 75 处 (见图 3a), PALSAR-2 解译滑坡 81 处 (见图 3b), 二者重合 4 处; Sentinel-1 A/B 升轨解译滑坡 34 处

(见图 3c), 与前两者重合 24 处; Sentinel-1 A/B 降轨解译滑坡 11 处 (见图 3d), 与 PALSAR 结果重合 9 处, 综合得出该区滑坡共 163 处 (见图 4)。



a—PALSAR-1; b—PALSAR-2; c—Sentinel-1 A/B 升轨; d—Sentinel-1 A/B 降轨

图 3 SAR 数据覆盖范围及滑坡解译图

Fig. 3 Coverage area of SAR data and interpretation map of landslides

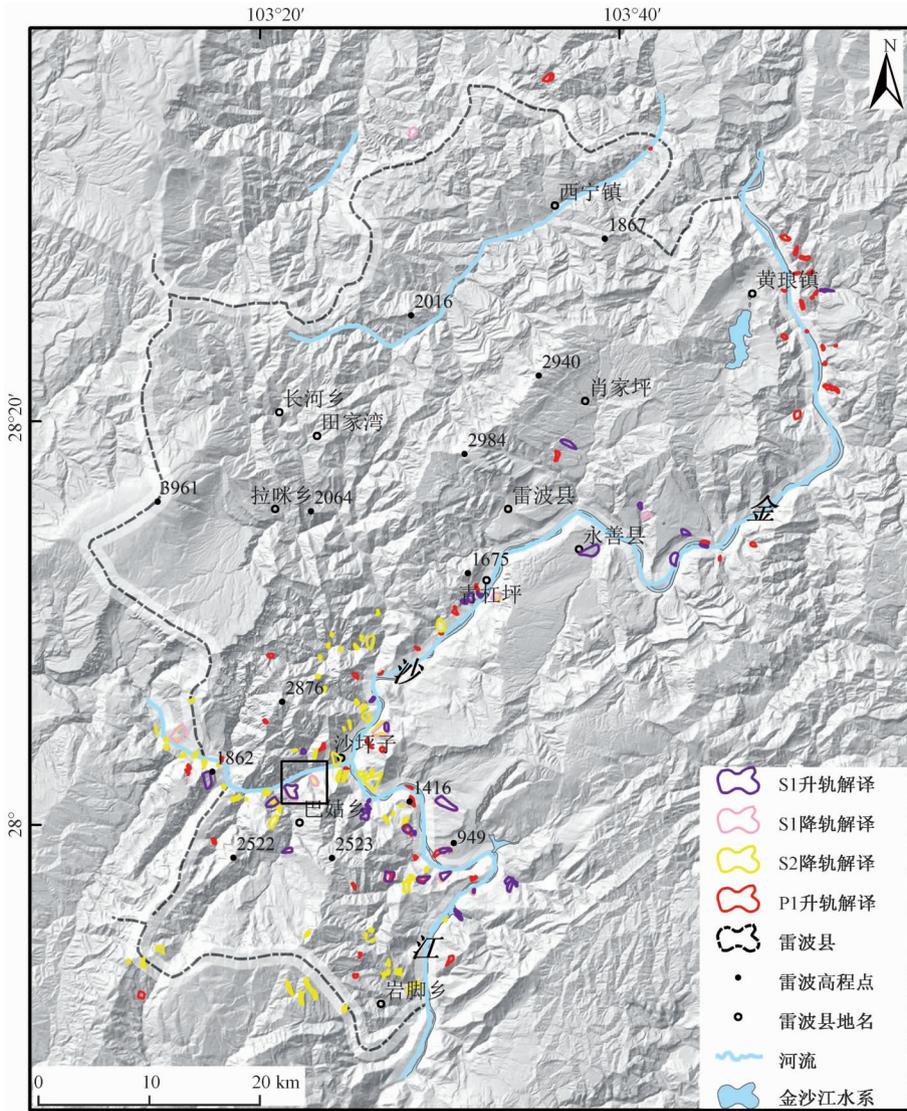


图4 灾害综合图

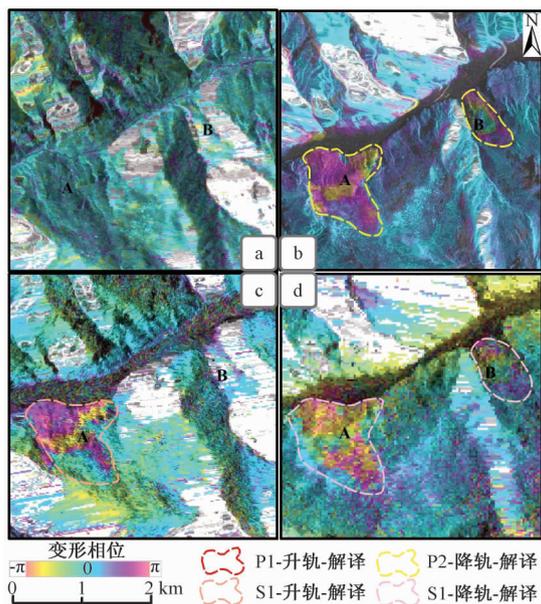
Fig. 4 Comprehensive map of hazards

在滑坡解译数量和重合度方面, 4组数据有明显差异, 原因有三方面。

首先, SAR数据的时间段不同。PALSAR-1的数据是2008—2011年的历史存档数据, 时间跨度大, 监测范围广, 且多干涉组合; 而PALSAR-2的数据是2016年冬—2017年春的两景现今干涉组合, 时间跨度小; Sentinel-1 A/B也是现今雷达数据, 测得的是2016年冬—2017年春的滑坡变化情况。部分地区在几年前未见斜坡变形, 而现今发展为不稳定斜坡。图5中4种影像进行对比可以发现A滑坡在2007—2011年PALSAR1干涉图上未发生变形, 而2016—2017年的PALSAR-2、Sentinel-1 A/B的多种干涉图则反映现今有明显的变形, 推测是由于2013年7月溪洛渡蓄水诱发。

其次, 雷达卫星的观测角度不同。雷达卫星是侧视成像, 因此会产生顶底倒置、阴影、叠衍等现象。雷波县区坡度陡、高差大, 这三种SAR成像畸变在该区普遍存在, 其中叠衍现象尤为明显, 极大影响了该区变形现象的准确探测。图5b—5d为影像时间段相近的观测, B滑坡在图5b和图5d降轨数据影像中均能呈现变形现象, 而在图5c升轨影像中则因为叠掩现象而无法干涉。

最后, 雷达数据的分辨率和波长不同。PALSAR-2数据分辨率为3 m, 信噪比较高, 识别结果健壮性好。PALSAR数据为L波段, 较C波段的Sentinel-1 A/B对植物的穿透能力更强, 因此对抗植被干扰更有利。Sentinel-1 A/B数据波长短, 对变形信息更敏感。



a—PALSAR-1 升轨；b—PALSAR-2 降轨；

c—Sentinel-1 A/B 升轨；d—Sentinel-1 A/B 降轨。

图5 分幅影像解译图

Fig. 5 Interpretation map of iframing images

四种不同时段、不同角度、不同波长和分辨率数据的联合使用可以克服大部分 SAR 干涉的固有不足，有效增加滑坡识别的全面性、动态性和准确性。

从图3和图4可以看出，在雷波县西北地区少见解译的滑坡点分布，初步分析有三种可能的原因：(1) 该区植被覆盖，而 Sentinel-1 A/B 为 C 波段，未能穿透植被而出现失相干现象；(2) 植被密度大，水土保持能力较强，不易发生滑坡；(3) 地层岩性条件好，该区主要为下一中三叠统台地相灰岩、白云岩地层，分布范围广，岩石较坚硬，不易发生斜坡变形破坏；西北角分布侏罗系泥岩地层，岩性软弱，属于易滑地层，但灾害点规模小于 InSAR 监测精度范围且属于短期新生变形，不易监测。

3 滑坡发育分布特征

3.1 70% 以上的滑坡分布在金沙江及美姑河沿岸

从地貌类型来看，河谷区占全县面积的 23%，但是却有 70% 以上的地质灾害分布在金沙江及美姑河两岸，美姑河灾害占比 22%，金沙江流域灾害占比 48%。谷区高差悬殊，河谷与高山降雨分布不均，易造成河谷上下土体饱和程度不同，这

种差异的存在，使得部分区域出现斜坡的不均匀变形，导致灾害的发生。该区也属于溪洛渡水电站蓄水影响区，库水位的升降亦是导致河谷地质灾害多发的重要因素。

3.2 北向坡和 30°~40° 坡度是滑坡高发区

坡度是影响不稳定斜坡变形的一个重要因素，一般来说，在某一地区坡度区间与滑坡灾害具有一定内在联系^[12]。以滑坡中心点的坡度、坡向为准，统计了这些滑坡灾害的坡度分布（见图6），38% 发生在 30°~40° 坡度范围内，而该坡度范围仅占全区 15% 的面积。由此可见，当坡度大于 30° 时，该区的岩土体接近或达到其稳定临界角^[13]。从滑坡坡向分布统计图中看出，南北向的滑坡分布较多（见图7）。

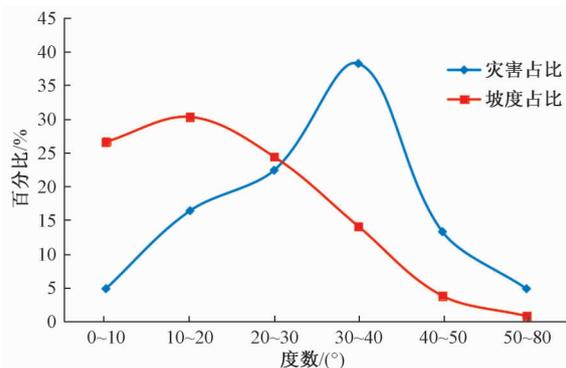


图6 滑坡灾害点坡度分布统计图

Fig. 6 Statistical graph of hazard sites according to gradient

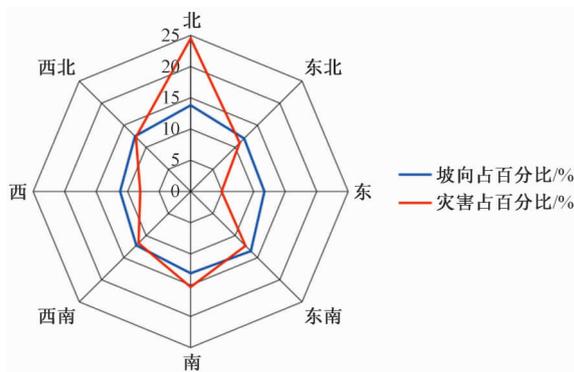


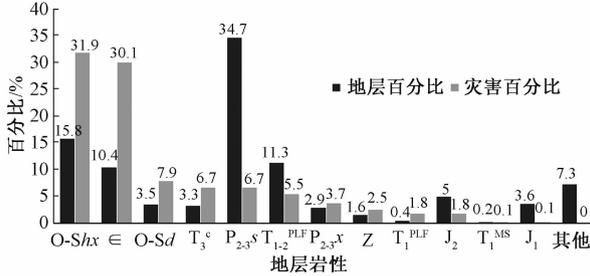
图7 滑坡灾害点坡向分布统计图

Fig. 7 Statistical graph of hazard sites according to aspect

3.3 除寒武系、奥陶—志留系地层发生地质灾害比例较高，其它各地层总体分布较均一

从岩性角度考虑，该区滑坡主要分布于寒武系筲竹寺组—娄山关组的泥页岩、粉砂岩地层和奥陶—志留系红石崖组—回星哨组的碳酸盐岩及碎屑岩地层中，部分滑坡分布于二叠系—三叠系

的白云岩和页岩地层中, 少数分布于震旦系观音崖组—灯影组的砂岩页岩中 (见图 8)。碳酸盐岩、碎屑岩和软弱岩区由于孔隙度大、松散堆积、岩性软弱等特点, 斜坡易发生变形, 导致地质灾害的发生; 该区中—上二叠统灰岩地层分布较广, 灾害分布却占比较少, 表明研究区该地层属于相对稳定地层。



O-Shx—奥陶—志留系红石崖组—回星哨组碳酸盐岩及碎屑岩; ε—寒武系第竹寺组—娄山关组泥页岩、粉砂岩、砂岩、灰岩、白云岩 (底部含磷); O-Sd—奥陶—志留系红花园组/大路寨组并层页岩、笔石页岩、灰岩夹钙质页岩、钙质砂岩、白云岩; T₃^c—上三叠统宝顶组/白果湾组陆相长石石英砂岩、粉砂岩、泥岩夹煤; P₂₋₃^s—中—上二叠统树河组/梁山组—宣威组/黑泥哨组下部为砂页岩、灰岩、白云岩, 上部为拉斑玄武岩偶含砂页岩; T₁₋₂^{PLF}—下—中三叠统飞仙关组—雷口坡组台地相以灰岩、白云岩为主, 底部为页岩, 顶部岩溶角砾岩; P₂₋₃^x—中上二叠统梁山组/峨眉山组—宣威组并层砂岩夹页 (泥) 岩、煤层, 灰岩及玄武岩; Z—震旦系观音崖组—灯影组白云岩, 底为砂岩、页岩; T₁^{PLF}—下三叠统东川组/飞仙关组—嘉陵江组台地相, 以灰岩、白云岩为主, 底部页岩; J₂—中侏罗统千佛岩组—沙溪庙组, 灰—紫红色泥岩、粉砂岩、砂岩夹灰岩; T₁^{MS}—下三叠统飞仙关组浅海相紫红色泥 (页) 岩夹灰岩; J₁—下侏罗统自流井组/新田沟组紫红色泥岩、砂岩、粉砂岩夹灰岩、泥灰岩

图 8 滑坡在不同地层岩性中分布的比例

Fig. 8 Percentage of landslides in different strata and lithologies

4 结果验证与分析

根据中国地质调查局县市地质灾害调查记录, 该区地质灾害隐患点共 269 处, 其中不稳定斜坡 32 处, 泥石流 60 处, 滑坡 120 处, 崩塌 57 处 (见图 9)。

由于 InSAR 识别的是活动性滑坡, 因此仅选取现场调查的 120 处滑坡和 32 处不稳定斜坡与 InSAR 结果进行对比 (见图 10)。InSAR 解译灾害点 163 处, 数量上比现场调查多 11 处, 同时两种调查结果在规模、位置和危害性上有所差别。地面调查测得的滑坡最小和最大面积分别为 375 m²

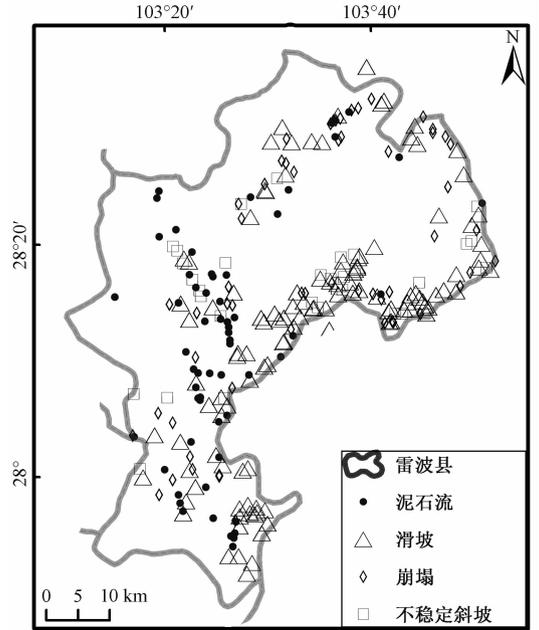


图 9 地面调查的雷波县地质灾害点

Fig. 9 Geological hazard sites in Leibo County through field survey

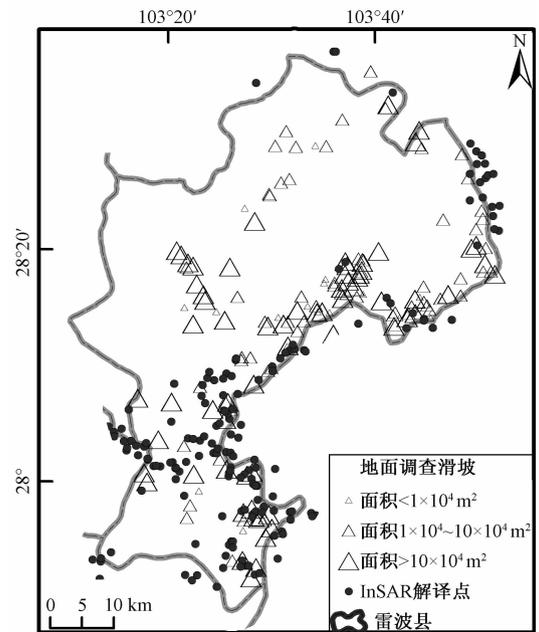


图 10 InSAR 解译滑坡点与地面调查滑坡对照

Fig. 10 Comparison between landslides detected by InSAR and those surveyed in field

和 78 × 10⁴ m², 而用 InSAR 测得的滑坡最小和最大面积分别为 9675 m² 和 116 × 10⁴ m², 由此可见, 传统地质调查对规模小的滑坡有一定优势, 而 InSAR 对大范围的滑坡把握相对准确, 且这类变形中的斜坡更易转化为突发性灾难滑坡。从分布范

围来看,地面调查区域主要分布在公路旁边,房前屋后;而在美姑河两岸,InSAR解译测得的灾害点明显多于地面调查隐患点,这表明在地势险峻地区,传统地质勘查不易到达,存在盲区。

5 讨论

InSAR变形监测结合地形地貌、光学影像等信息能够识别不稳定斜坡^[14],这对于地面调查有着重要的指导意义。地面调查测得的滑坡一般是人类活动区,且是一个状态的调查,缺乏全面性和动态性;而InSAR监测的是活动性滑坡,是现实正在发生变形的区域,更具有时效性和防灾意义。

InSAR技术在应急排查中还存在一些不足。第一,地理因素影响,因该区地处干热河谷,地形高差大,大气延迟误差严重。第二,由于观测时间基本上集中在冬天,是泥石流低易发期,对这类灾害的识别还有待补充。第三,对于小于雷达卫星分辨率范围的变形不能很好的监测,因此需要将InSAR技术和传统的地质勘查相结合,相互补充和借鉴,加快调查速率。

在实际地质灾害排查的工作中,InSAR监测需与地面调查相互补充和促进,实时了解滑坡的动态和瞬态信息,对灾害点信息的探查更加完整准确,从而造福人民群众。

6 结论

利用InSAR技术与遥感影像综合解译地表变形,快速准确的识别了雷波县区的活动性滑坡发育分布情况,获得了以下几个方面的认识。

(1) 不同卫星探测的时间有所差异,InSAR技术利用不同时段的存档数据能够追溯滑坡历史微小变形,探查过去几年甚至十几年的滑坡活动情况,从而实现活动性滑坡的有效识别。

(2) SAR数据的侧视成像特点使得它具有阴影、叠衍和失相干等现象,这些现象的存在使得InSAR监测结果不能一蹴而就。也正因为这个特点,可以利用多时段、多角度和多分辨率SAR数据来进行综合的分析处理,从而提高滑坡(尤其是对高位滑坡)识别的效果、效率和时效性。

(3) 与地面调查结果比较,InSAR技术有其独特的优势,对滑坡的识别更全面、对滑坡规模

的探查更准确,对高位滑坡和集中分布滑坡的识别更有效,这些特点使得InSAR技术可以作为现今地质灾害排查的重要手段之一,其与地面调查的综合使用能够促进地质灾害调查和防治的发展。

(4) 雷波县滑坡分布有以下特点:从地貌上来看,雷波县滑坡主要分布在金沙江及美姑河沿岸;从坡向和坡度上来看,北向坡和 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 坡度是地质灾害高发区;从地层角度分析,除寒武系、奥陶—志留系地层发生地质灾害比例较高,其它各地层总体分布较均一。

参考文献/References

- [1] 许强, 汤明高, 徐开祥, 等. 滑坡时空演化规律及预警预报研究 [J]. 岩石力学与工程, 2008, 27 (6): 1104 ~ 1112.
XU Qiang, TANG Minggao, XU Kaixiang, et al. Research on space-time evolution laws and early warning-prediction of landslides [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (6): 1104 ~ 1112. (in Chinese with English abstract)
- [2] Ferretti A. Satellite InSAR data: reservoir monitoring from space [M]. Houten: European Association of Geoscientists & Engineers, 2014.
- [3] 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 Mingsheng, WANG Teng. Time series InSAR technology and application [M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)
- [4] Fruneau B, Achache J, Delacourt C. Observation and modelling of the Saint-Étienne-de-Tinée landslide using SAR interferometry [J]. Tectonophysics, 1996, 265 (3/4): 181 ~ 190.
- [5] Rott H, Scheuchl B, Siegel A, et al. Monitoring very slow slope movements by means of SAR interferometry: a case study from a mass waste above a reservoir in the Ötztal Alps, Austria [J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26 (11): 1629 ~ 1632.
- [6] Yin, Y., Zheng, W., Liu, Y., et al. Integration of GPS with InSAR to monitoring of the Jiayu landslide in Sichuan, China [J]. Landslides, 2010, 7: 359 ~ 365.
- [7] Yao X, Li L J, Zhang Y S, et al. Types and characteristics of slow-moving slope geo-hazards recognized by TS-InSAR along Xianshuihe active fault in the eastern Tibet Plateau [J]. Natural Hazards, 2017, 88 (3): 1727 ~ 1740.
- [8] 陈进, 徐平. 金沙江科学考察的几个问题及思考 [J]. 长江科学院院报, 2013, 30 (7): 1 ~ 6.
CHEN Jin, XU Ping. Considerations on the scientific investigation of Jinsha River [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30 (7): 1 ~ 6. (in

- Chinese with English abstract)
- [9] 曾陈萍, 张宏平. 物联网技术在山洪灾害监测预警系统中的应用研究 [J]. 西昌学院学报·自然科学版, 2014, 28 (3): 56 ~ 59.
ZENG Chenping, ZHANG Hongping. A review of the application of internet of things in the mountain torrent disaster monitoring and early-warning system [J]. Journal of Xichang College · Natural Science Edition, 2014, 28 (3): 56 ~ 59. (in Chinese with English abstract)
- [10] 孙瑜, 李宏俊, 曹树波, 等. 四川雷波碉楼沟泥石流特征及防治对策 [J]. 地质灾害与环境保护, 2017, 28 (1): 1 ~ 6.
SUN Yu, LI Hongjun, CAO Shubo, et al. Features and preventive countermeasures of potential debris flow in Diaolou Gully, Leibo county, Sichuan province [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2017, 28 (1): 1 ~ 6. (in Chinese with English abstract)
- [11] 陈炳蔚, 李永森, 符振康. 金沙江构造带及邻区的构造变形特征 [J]. 青藏高原地质文集, 1991, 21: 222 ~ 234.
CHEN Bingwei, LI Yongsen, FU Zhenkang. Deformations of Jinshajiang tectonic belt and its adjacent areas [J]. Contribution to the Geology of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau, 1991, 21: 222 ~ 234. (in Chinese with English abstract)
- [12] 姚鑫, 许冲, 戴福初, 等. 四川汶川 Ms8 级地震引发的滑坡与地层岩性、坡度的相关性 [J]. 地质通报, 2009, 28 (8): 1156 ~ 1162.
YAO Xin, XU Chong, DAI Fuchu, et al. Contribution of strata lithology and slope gradient to landslides triggered by Wenchuan Ms 8 earthquake, Sichuan, China [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28 (8): 1156 ~ 1162. (in Chinese with English abstract)
- [13] Colesanti C, Wasowski J. Investigating landslides with spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry [J]. Engineering Geology, 2006, 88 (3/4): 173 ~ 199.
- [14] Waltham T. Foundations of engineering geology [M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2002.