

“三查”体系下的管道工程地质灾害 早期识别研究*

刘旻昊, 董秀军, 杨利, 雷文权

(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 610000)

摘要: 管道工程沿线地质灾害具有隐蔽性、突发性等特点, 针对传统人工地面巡检难以识别及工作量巨大的问题, 以及管道工程地质灾害识别工作相关学术报道较少的现状, 利用天—空—地协同调查的“三查”体系开展管道工程沿线地质灾害隐患早期识别工作, 并针对典型识别结果进行综合分析以讨论其工程应用的可靠性。以位于成都市南郊的龙泉山脉为研究区, 以敷设于此的某管道工程为示范, 进行了沿线区域时序 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) 地表形变时序监测与特征识别; 再采用机载 LiDAR (light detection and ranging) 技术获取植被下真实地表微地貌数据进行重点形变区地质灾害隐患精细化识别; 并结合野外现场调查以最终核验确定对管道工程有影响的地质灾害隐患。结果表明协同利用天—空—地“三查”识别手段在工程沿线共识别出地质灾害隐患 89 处, 多为小型滑坡、崩塌与水毁灾害, 且有个别典型灾害经实地考察分析后证实已对管道构成直接威胁。研究表明, 将“三查”技术集成应用于多层次隐患识别的方法体系可有效应用于管道、沟谷、河道等线性范围沿途地质灾害隐患的识别工作, 可为管道工程的地质灾害防治提供参考。

关键词: “三查”体系; InSAR; 机载 LiDAR; 输油管道; 地质灾害; 早期识别

中图分类号: P237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(XXXX)XX-0001-10

Research on Early Identification of Geological Hazards in Oil Pipeline under the "Space-Air-Ground Investigation" System

LIU Minhao, DONG Xiujun, YANG Li, LEI Wenquan

(State Key Laboratory of Geological Disaster Prevention and Geoenvironmental Protection of Chengdu University of Technology, Chengdu 610000, China)

Abstract: Geological hazards along pipeline engineering have the characteristics of concealment and suddenness. In response to the difficulties and huge workload of traditional manual ground inspections in identifying geological hazards along pipeline engineering, as well as the lack of academic reports on the identification of geological hazards along pipeline engineering, the "three inspections" system of sky air ground collaborative investigation is used to carry out early identification of geological hazards along pipeline engineering, and comprehensive analysis is conducted on typical identification results to discuss the reliability of its engineering application. Taking the Longquan Mountain Range located in the southern suburbs of Chengdu as the research area and a pipeline project laid here as a demonstration, time-series InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) surface deformation time-series

* 基金项目: 非显性滑坡隐患高效勘测技术装备研发项目(2022YFC3003201)资助

作者简介: 刘旻昊(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事线性工程地质灾害研究。E-mail: liumih@163.com

monitoring and feature recognition were carried out along the route; Using airborne LiDAR (light detection and ranging) technology to obtain real surface micro topography data under vegetation for precise identification of geological hazards in key deformation areas; And combined with field investigations to ultimately verify and determine geological hazards that may affect pipeline engineering. The results showed that the collaborative use of the "three inspections" of sky, air, and ground identified a total of 89 geological hazards along the project route, mostly small-scale landslides, collapses, and water damage disasters, and a few typical disasters were confirmed to pose a direct threat to the pipeline after on-site investigation and analysis. Research has shown that integrating the "three inspections" technology into a multi-level hazard identification method system can effectively be used for identifying geological hazards along linear ranges such as pipelines, valleys, and rivers, providing reference for geological hazard prevention and control in pipeline engineering.

Keywords: space-air-ground investigation system; InSAR; airborne LiDAR; petroleum pipeline; geological hazards; early identification

0 引言

我国的地质灾害通常具有高位性、隐蔽性与突发性等特征,而以输油管道为例的线性工程又因其距离长、范围跨度大的特点,会无法避免地通过各种地形地貌复杂单元,特别是河道、沟谷、山区与丘陵等地形起伏度大的区域,沿线长期遭受滑坡、崩塌落石、沟道水毁、坡面水毁、泥石流等威胁^[1-2]。

早年由于技术限制,传统的管道工程沿线地质灾害识别以日常巡视或委托专业队伍对沿线边坡隐患进行排查为主,但是日常巡视检查只能发现变形显著的灾害;专业队伍调查一般两年委托一次,调查周期长且不具备灾害调查的实时性^[3-5]。随着科技发展,遥感技术逐渐交叉应用于地质灾害的调查监测,殷跃平、许强等专家学者针对隐蔽性地质灾害早期识别的难题提出了天空地一体化“三查”技术体系,这一技术已先后在四川、西藏、贵州等地试验应用^[6-9]。

目前对此技术体系的应用研究多见于大型滑坡地质灾害^[9]。中国地质调查局联合加拿大地质调查局利用 InSAR 技术与卫星影像协同 GPS 技术对四川省丹巴县甲居滑坡进行形变监测^[11];此后,何朝阳等利用合成孔径雷达干涉测量技术,在四川省理县成功获取 3 处形变体数据,并验证了形变结果与 GPS 显示的变形趋势一致^[12];戴可人教授等利用 Sentinel-1A 数据,对雅砻江流域雅江县段高山峡谷区进行滑坡地址灾害早期识别试验,并成功探测且验证得出 8 处隐患区域^[13]。前人的研究集中针对

于单体灾害的识别分析,为地质灾害的识别探测提供了宝贵的经验,但目前仍存在以下不足:(1)对于地质灾害隐患的综合遥感识别尚无标准的技术规范,亟需开展针对不同应用工程的示范研究,以期逐步建立技术规范;(2)综合利用“三查”技术体系针对管道工程沿线,进行大范围内散布的多处小型灾害识别调查的研究还鲜有先例^[6];(3)在针对跨度较大的线性工程地质灾害识别领域的示范应用研究较少,缺乏相关典型工程案例。

管道工程因线路走向必须穿越山川江河时,往往难以避让,复杂的地质条件导致灾害频发^[14-16],如 2015 年 04 月 13 日,贵阳机场航油管道发生泄露,流失航油近 30 吨;2021 年 06 月 13 日,湖北十堰燃气管道因管理公司未严格执行管道沿线巡检工作,导致管道泄露发生爆炸,造成 25 人死亡,37 人重伤^[17]。鉴于此,本文针对目前存在的研究缺口,选定纵贯成都市龙泉山脉的某输油管道作为示范工程,此工程管道的建设受地方规划制约,穿越环境敏感区、地质灾害风险区、高速公路运营区,具有现场踏勘工作量巨大、局部地形复杂无道路通达、勘察设计人员难以到达线位等传统地灾调查面对的难题。此次研究将采用天—空—地协同一体化“三查”技术进行管道工程沿线的地质灾害识别调查,为工程的安全运营以及地灾识别提供数据支撑。并期为同样具有距离长跨度大、沿途地形地势险峻等特点的其他线性工程以及山区江河沿岸地质灾害隐患的早期识别提供研究方案参考,以做到及时规避如崩塌落石堵江、滑坡阻成堰塞湖、泥石流洪水隐患等地质灾害的发生^[18-20]。

1 技术方法

本文以天—空—地协同“三查”体系的综合遥感技术针对管道工程沿线地质灾害隐患进行识别,通过将卫星平台的InSAR与光学影像、航空平台的机载LiDAR与无人机摄影测量、地面平台的地表实际核实验相结合,实现对工程沿线地质灾害隐患实现全方位、多层次的多元立体识别。即首先利用星载InSAR识

别历史上曾经发生过明显变形破坏和正在变形的区域,实现对地质灾害隐患的广域大范围“普查”;之后利用机载LiDAR获取的工程沿线点云数据和无人机航拍照片,并借助衍生出的正射影像图与山体阴影图,对隐患点位进行精细化解译,实现对地质灾害隐患的短周期高精度“详查”;最后结合多层次的解译结果,通过现场地质调查复核,分析地质灾害的变形情况及威胁程度,甄别筛选并对“普查”与“详查”的结果进行确认,实现对地质灾害隐患的“核査”(图1)。

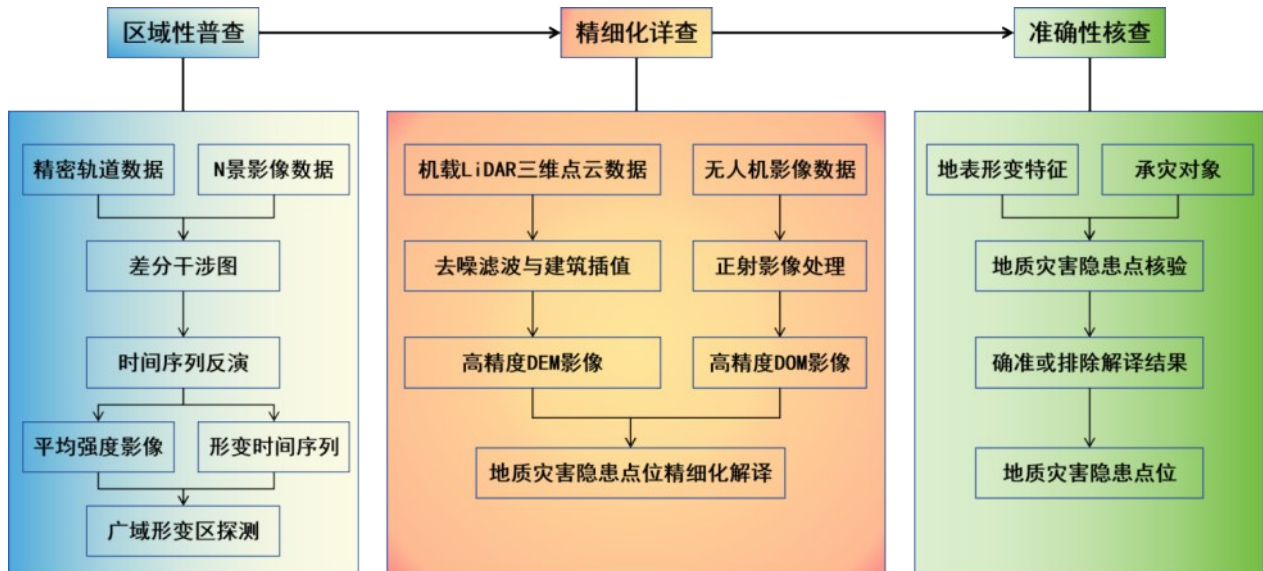


图1 技术流程图

Fig.1 Technical flowchart

InSAR与机载LiDAR综合遥感地质灾害调查识别分析重点在于多源数据的融合使用、多学科交叉融合、以及多种技术手段的综合应用,通过EarthSurvey软件将InSAR、机载LiDAR、光学影像、地质资料等融合(图2),实现多源数据在同一平台内识别地质灾害形变、形态等特征。

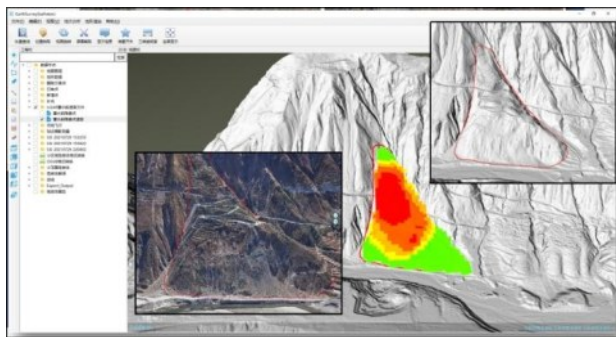


图2 InSAR与机载LiDAR综合遥感应用示例

Fig.2 Example of InSAR and Airborne LiDAR Integrated Remote Sensing Application

2 研究区及示范工程概况

本文选取坐落于成都东南的某管道工程,管道全长233.48km,其中此次研究选定的龙泉山区段长度约70km,最大落差500m左右,管道沿龙泉山脉西侧,呈北南走向横坡铺设。龙泉山脉地质构造是背斜构造断块山,存在龙泉驿主逆冲断裂,山区地质条件复杂、植被茂密、部分地段地形陡峻,单靠人工巡查无法及时、准确识别地质灾害及隐患。且管道自身属于薄壁、弹性结构,对岩土体运动十分敏感,在复杂地质环境作用下,管道本体会承受较大的位移或载荷而产生较大甚至过量变形,如伸长、压缩、弯曲等,并最终导致管道拉裂、屈曲或压溃而失效^[21]。一旦管道沿线发生地质灾害造成断管,将造成巨大经济损失及负面社会影响。自2017年管道投入运行以来,已多次发生因地质灾害造成的管

道位移、变形及重大隐患。2018年因二郎村滑坡进行的天府新区太平镇二郎村迁改,迁改长度430m,废弃长度92m;2019年因凉风垭滑坡进行的龙泉驿区凉风垭迁改,迁改长度760m,废弃长度535m;2023年因干塘村滑坡进行的天府新区永兴街道干塘村迁改,迁改长度854m,废弃长度837m。

3 数据获取与处理

3.1 InSAR数据获取与处理

本次研究收集研究区内共计194景Sentinel-1A影像数据(图3),其中升轨数据98景,时间跨度为2020年1月4日至2023年4月18日,降轨数据共96景,时间跨度为2020年1月11日至2023年4月13日(表1)。

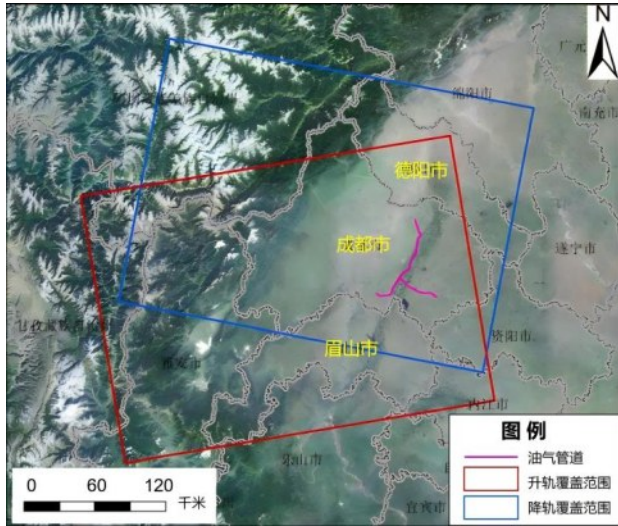


图3 InSAR数据覆盖范围

Fig.3 InSAR data coverage range

表1 Sentinel数据获取情况

Table 1 Sentinel data acquisition status

升/降轨	轨道号	时间	数量(景)
升轨	128-94	2020/1/4~2023/4/18	98
降轨	62-489	2020/1/11~2023/4/13	96

采用建立在InSAR基础技术之上的差分干涉测量短基线集时序分析技术(SBAS-InSAR)^[22]。该种新的时间序列分析技术是将获取的SAR影像按照子集内的干涉对时空基线较小的原则进行自由组合,得到差分干涉图的数量 M ,且满足 $(N+1)/2 \leq M$

$\leq N(N+1)/2$,任意一点的干涉相位 $\Delta\phi_j$ 求解如下:

$$\Delta\phi_j = \phi_{t_B} - \phi_{t_A} \approx \frac{4\pi}{\lambda}(d_{t_B} - d_{t_A}) + \phi_{atm} + \phi_{noise} + \phi_{top} \quad (1)$$

其中 λ 表示雷达波长; ϕ_{t_B} 与 ϕ_{t_A} 表示时间 t_B 时刻与 t_A 时刻的相位变化; d_{t_B} 与 d_{t_A} 表示时间 t_B 时刻与 t_A 时刻相对 t_0 时刻的形变累积量; ϕ_{atm} 表示大气的延迟相位; ϕ_{noise} 表示噪声相位; ϕ_{top} 表示地形残余相位。形成若干具有多主影像的短基线集合,将每个基线集联合,并利用奇异值分解法和最小二乘法来求解方程,从而获得目标区域的形变相位。该技术方法通过设置适宜的时间与空间阈值,将获取的数据进行排列组合,这些干涉对的组合相干性程度较好,避免了监测结果所受到的时空失相干的影响,解决了时空基线过长的难点。

3.2 机载LiDAR数据获取与处理

研究区内管道工程涉及城镇等地势平坦区域及龙泉山地地形起伏较大的区域,在地形起伏较大的区域选用搭载国产DV-LiDAR10激光雷达系统及SONY A7RII相机的飞马D20无人机,具有结构稳定,大载重长航时,任务载荷能力强等优势,且针对陡峭复杂地形采用高密度点云以捕捉微地貌特征;在地形平坦区域采用飞马V10无人机。(表2)。

表2 航飞技术设计参数表

Table 2 Design parameter table for aviation and flight technology

型号	D20	V10
平均点密度	130pts·m ⁻²	52pts·m ⁻²
航向重叠度	80%	80%
旁向重叠度	75%	80%
相对航高	279m	279m
飞机时速	11m/s	20m/s
航线间隔距离	139m	111m

将机载LiDAR获取的原始点云数据进行去噪滤波(消除噪点)、航带平差、精细化重分类等处理(图4),以此构建剔除植被与建筑等干扰的数字高程模型(digital elevation model, DEM),同时生成山体阴影图;并通过同轴获取的无人机原始影像数据生成同范围数字正射影像图(digital orthophoto map, DOM)^[23]。利用以上数据资料,使植被覆盖下的松散堆积体、地裂缝等地质灾害隐蔽点暴露,可有效解译出滑坡、崩塌等灾害的精细化特征。

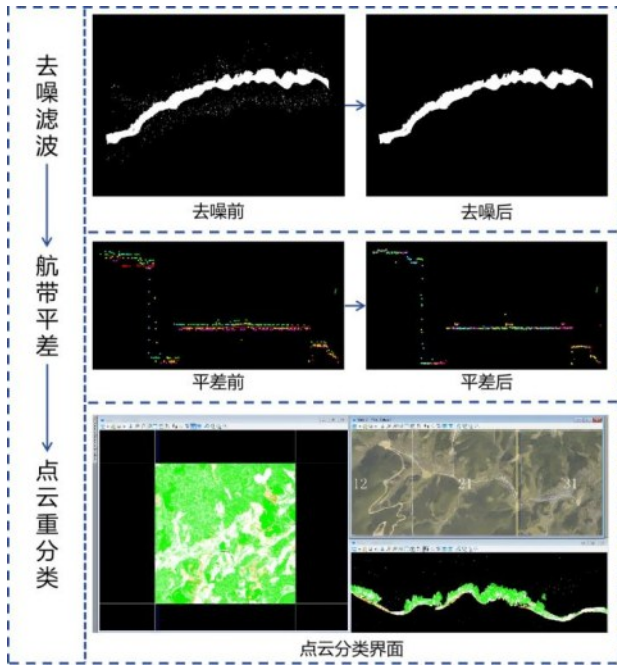


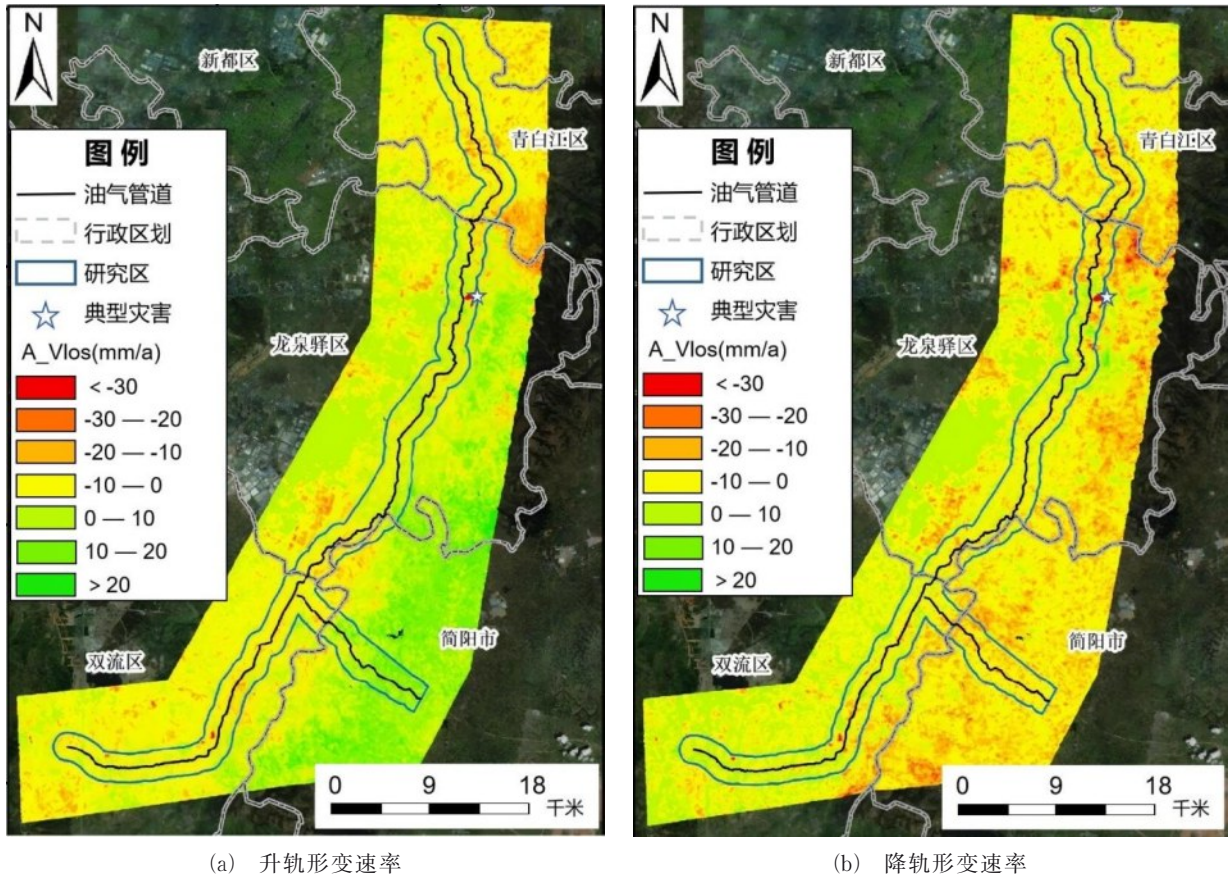
图4 点云处理流程

Fig.4 Point cloud processing flow

4 分析与讨论

4.1 InSAR识别结果

基于SBAS-InSAR技术,计算得到管道工程沿线视线方向地表形变信息(图5)。形变速率范围为 $-106\sim 27\text{mm/a}$,呈现正态分布,形变速率方向为雷达视线方向(升轨与垂直向夹角为 43.6° ,降轨与垂直向夹角为 37.0°)。升轨和降轨的区分本质是卫星观测几何方向的不同,导致LOS方向形变投影的差异,结合升轨和降轨数据可更全面地捕捉三维形变特征,减少单一视角的局限性,是InSAR高精度形变监测的核心方法之一。根据工程经验分析,滑坡灾害识别依据为有效形变速率PS点密度不少于 $150\text{pts}/\text{km}^2$,且每个滑坡内不少于30点;崩塌危岩体的预判依据为SBAS-InSAR的视线向形变速率值大于 10mm/a 。由地表变形速率图分析可知:地表变形结果覆盖了管道工程沿线及部分城区,变形监测精度达毫米级别;在管道左侧地区,地势平坦,



(a) 升轨形变速率

(b) 降轨形变速率

图5 研究区域形变速率

Fig.5 Study the deformation rate of the research area

升降轨均监测到多处形变区；位于龙泉驿区的垃圾填埋场及附近区域表现出了较大的变形速率。并对管道沿线500m宽度范围内进行了广域范围地质灾害隐患筛查，初步识别出该区域发育灾害疑似隐患共26处，即图5a、b中颜色均较深的区域，结合地形地貌、光学影像等特征，剔除了耕作等因素导致的变形，以及不对管线造成威胁的形变区，共识别出15处隐患。

4.2 机载LiDAR识别结果

基于机载激光LiDAR高精度点云数据及高分辨率的光学影像数据对研究区的地质灾害隐患进行解译并结合升、降轨InSAR结果圈定隐患形变异常区，共解译出地质灾害隐患100处，并通过山体阴影图确定隐患范围。

其中研究区内管道沿线解译崩塌隐患17处，多为中小型，按照规模类型特征分析，以小型崩塌为主，其次为中型崩塌；解译滑坡隐患29处，多为小型土质滑坡，滑移结构面较为单一，均以组合接触面为滑移面，如松散覆盖层与下伏基岩接触带，滑动面产状普遍与坡面一致；解译水毁隐患54处，研究区内管道水毁灾害分布有坡面水毁、河沟道水毁、台田地水毁三类，在遥感影像下表现形式有地表冲刷、溪流冲击、坡面滑垮塌、冲沟等，坡面水毁严重时可形成地下暗流，导致管线悬空，河沟道水毁，可导致崩岸，继而削弱河沟岸附近管线的保护层，导致管线外露、悬空。

同时根据多期光学影像对比分析解译出42处第三方扰动破坏点(图6)，主要为修建房屋水塘等产生的工程堆土、临时棚舍搭建及耕地种植等人类活动导致油气管线受损或有受损趋势的现象。

4.3 现场勘察核验

针对InSAR与机载激光LiDAR解译出的隐患点，采用人工现场核查及小型无人机贴近航拍摄影的方式进行野外现场核验，重点核查管线临近区域，对解译InSAR形变区、LiDAR形变微地貌特征进行穿越与追索调查，以核验地质灾害隐患点的形变特征、形变原因、承灾对象并分析隐患点的发展趋势。

经现场实地逐一核查，对解译不良地质现象点边界和数量进行调整，并结合现场实际决定对以下情况的隐患点删减：(1)灾害距离管线100m以外，



图6 第三方扰动破坏点解译分布图

Fig.6 Distribution map of human engineering disturbance interpretation

且失稳后的次生灾害对管线不构成威胁的隐患点；(2)经现场调查解译InSAR形变区形变特征不明显或人为因素造成的形变异常且人为活动对管线不构成威胁的区域；(3)LiDAR解译地灾隐患形变微地貌特征，现场判识处于稳定状态的；(4)已采取有效防治措施的隐患点，目前处于稳定状态的。另外，针对沿线核查中新发现的可能对管线存在一定影响的不良地质现象增加至最终核查的隐患统计中，如LiDAR影像中难以辨识的小型岩土质崩塌。最终核定地质灾害隐患点60处，其中崩塌15处、滑坡14处、坡面水毁10处，沟道水毁22处。

针对解译出的42处人类工程活动点，经野外现场逐个排查，删减已采取有效防治措施、人类工程扰动已停止以及对管线扰动较小的点，最终核减至28处对输油管道有影响的人类工程活动扰动点。

4.4 典型灾害“三查”体系综合应用分析

此次研究首先利用SBAS-InSAR技术对近三年管道沿线的升、降轨数据进行处理，获得该区域的地表形变信息，基于升降轨数据获取的地表形变结果，根据形变趋势等共识别出15处地质灾害隐患；之后基于机载LiDAR技术获取管道沿线的点云

数据及影像数据,制作高精度的DEM、DOM、山体阴影等数据成果产品,从而识别出长输管道沿线的100处地质灾害隐患;最后经野外现场核查分析各隐患点发育程度、发展趋势、潜在的危害性以及油气管道间的关系,对形变特征不明显、距离管线较远、潜在危害小的解译识别点进行甄别删减,最终确定89处对线性管道工程构成威胁的地质灾害隐患区域。

结合InSAR形变分析结果和机载LiDAR遥感解译结果,选取管道沿线一处典型滑坡隐患区域进行管道工程沿线地质灾害天—空—地协同一体化识别应用分析。

此滑坡灾害隐患位于成都市龙泉驿区同安街道附近,即图5中标示星号位置,基于SBAS-InSAR长时间序列形变监测结果显示,形变速率分布范围为-9~27mm/a,区域内形变整体呈现出沿靠近卫星方向运动。在斜坡上按一定的空间规律选取4个特征点获取形变历史曲线以进行时间序列形

变趋势分析。其中P1、P4选取于斜坡坡脚,靠近航油管道;P2位于斜坡左侧;P3位于斜坡中部(图7a)。

在InSAR形变区域内结合机载LiDAR数据生成的山体阴影图进行精细化遥感解译,根据光学影像看(图7b),该斜坡植较密集,难以查明堆积体本身的边界和范围,对堆积物质的物质组成也难以评判。从滤除植被的机载LiDAR影像上看(图7c),斜坡边界清晰,后缘及右侧边界存在陡坎,坡体存在二级下挫,前缘可见少量堆积体。

观察4个特征点的形变趋势(图7d)发现整体呈现出沿靠近卫星的方向运动,形变趋势较为一致,形变起伏较为明显,四个点的累计形变量分别为47mm、49mm、70mm、44mm。2020年4月,4个点同时达到谷值,12天形变接近20mm;每一年的4月份是一个形变转折点,此时均表现出形变速率先增大,10月份左右逐渐趋于平缓的趋势,这与区域降雨特征能较好对应;特征点P3自2022年4月,形变

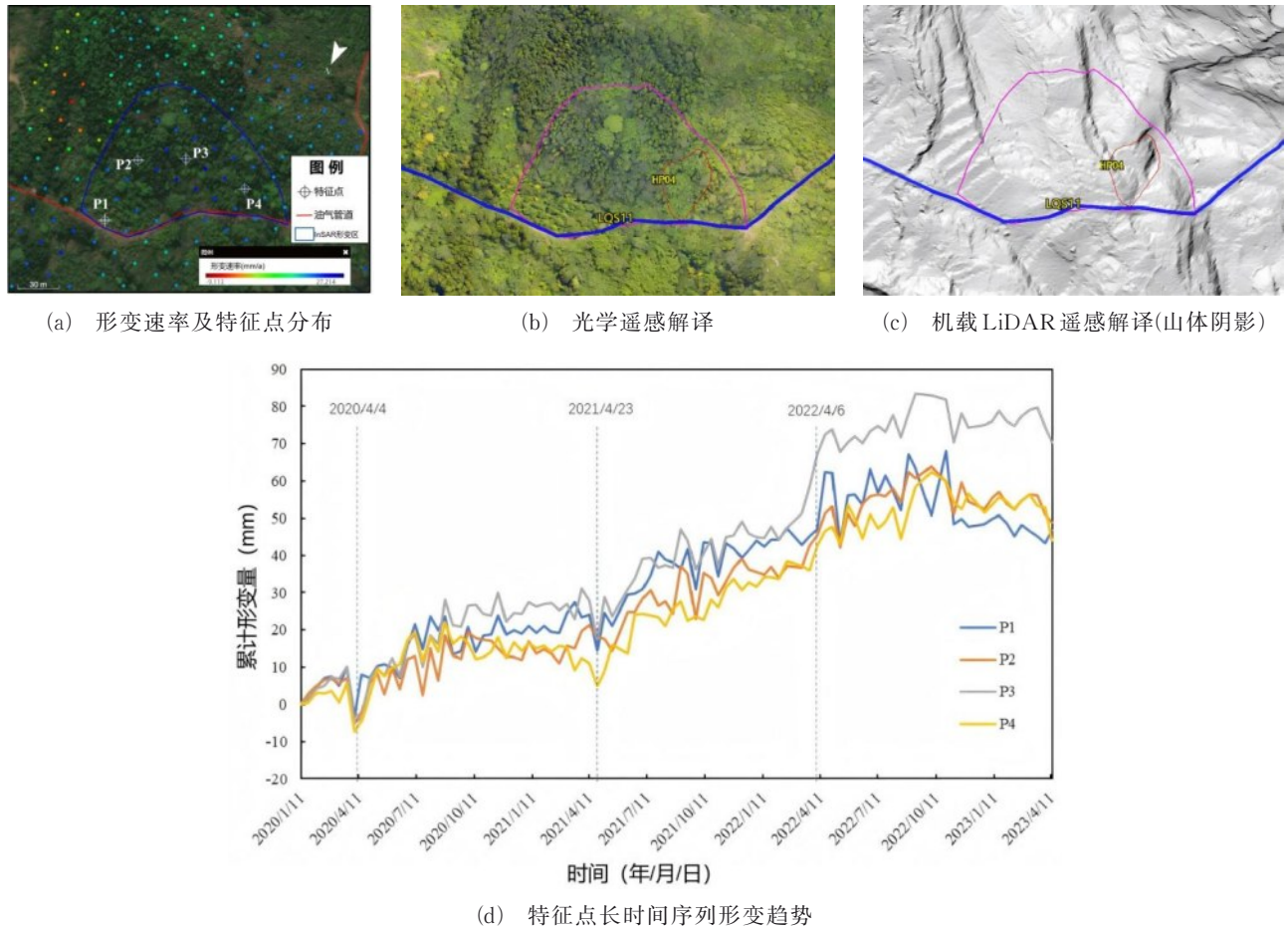


图7 典型区域InSAR、LiDAR综合分析

Fig.7 Comprehensive analysis of InSAR and LiDAR in typical areas

明显高于特征点 P1、P2、P4, 机载 LiDAR 解译结果与 InSAR 形变监测结果一致。

野外调查小组对该隐患点进行野外现场核验工作发现, 此处斜坡植被为乔木林与竹林, 后缘呈现圈椅状, 剖面呈现阶梯状形态, 后缘岩壁呈现陡立状, 有岩体滑落的风险, 坡体存在二级滑坡, 二级滑坡的后缘为竹林, 可见 0.2m 左右的裂缝, 遇大风天气, 竹林会有随风摆动增加后缘滑动的风险, 二级滑坡坡表可见大量倾倒的竹子, 推测为不久前发生过灾害, 坡体边缘的树木未见异常状态, 管道位于坡体前缘坡脚位置, 若发生整体失稳危害, 则会导致被堆积物掩埋, 对管道造成威胁(图 8)。

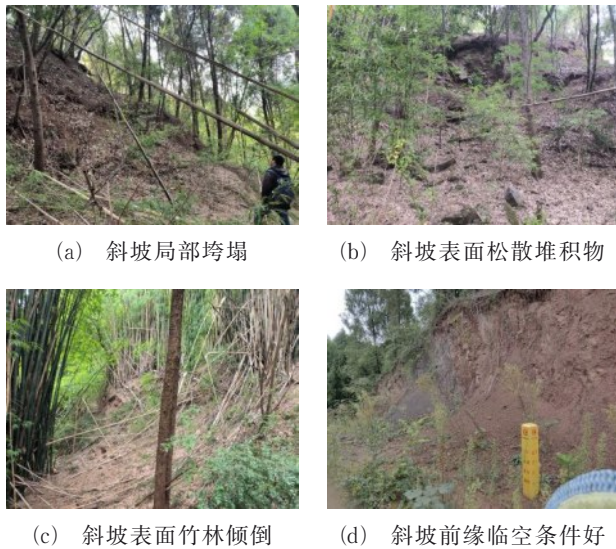


图 8 典型隐患区域现场核验照片

Fig.8 On site verification photos of typical hidden danger areas

5 结论

本文通过结合 InSAR 数据、机载 LiDAR 点云数据、高分辨率光学影像数据, 构建了天-空-地协同的管道工程沿线隐患分级识别框架, 弥补了传统地面调查难以准确识别潜在隐患及工作量巨大的不足, 填补了“三查”体系工程化应用相关学术报道较少的现状, 并得到了如下结论与认识:

(1) 研究首先利用 SBAS-InSAR 技术对近三年管道沿线的升、降轨数据进行处理, 获得该区域的地表形变信息, 基于升降轨数据获取的地表形变结果, 根据形变趋势等获取了疑似隐患点, 结合地

形地貌、光学影像等特征, 剔除了耕作等因素导致的变形, 以及不对管线造成威胁的形变区, 共识别出 15 处隐患; 之后基于机载 LiDAR 技术获取管道沿线的点云数据及影像数据, 制作高精度的 DEM、DOM、山体阴影等数据成果产品, 从而识别出长输管道沿线的 100 处地质灾害隐患; 最后经野外现场核查分析各隐患点发育程度、发展趋势、潜在的危害性以及与油气管道间的关系, 对形变特征不明显、距离管线较远、潜在危害小的解译识别点进行甄别删减, 最终确定 89 处对线性管道工程构成威胁的地质灾害隐患区域。

(2) 综合分析所有隐患点位后, 为直观说明研究成果, 选取一处典型地质灾害隐患区, 开展长输管道沿线“天-空-地”一体化地质灾害早期识别应用研究效果的展示。结果显示: InSAR 形变监测识别重点形变区形变特征与机载 LiDAR 精细化微地貌特征识别、野外核查的滑坡变形较为吻合, 表明“天-空-地”一体化下的联合 InSAR 形变识别和机载 LiDAR 技术的线性工程地质灾害解译识别方法效果明显。

(3) 长输管道沿线由于地形、地貌等多因素的作用使管道沿线成为地质灾害多发区域, 管道沿线等大型线性工程从施工到投产后的运营维护经常会受到地质灾害的威胁, 将针对地表形变识别和形态刻画等方面具有独特优势的“三查”技术体系应用至线性工程沿线地质灾害识别中, 提高了地质灾害隐患的识别效率与准确度, 具有良好的工程实际应用价值。也为同样具有距离跨度大、沿途地形地势险峻等特点的其他线性工程以及长距离河道沟谷沿岸地质灾害隐患早期识别提供了研究参考。

(4) 针对此应用方法体系中存在的局限性, 下一步将针对 InSAR 技术在植被覆盖区的适用性、机载 LiDAR 获取数据成本较高等实际问题进行研究, 以求改进完善。

参考文献:

- [1] 丁建林, 西昕, 张对红. 能源安全战略下中国管道输送技术与展望[J]. 油气储运, 2022, 41(6): 632-639. Ding J L, Xi X, Zhang D H. Development and outlook of China's pipeline transportation technologies under energy security strategy[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(6): 632-639.
- [2] 余文秀, 李秀珍, 郑玲静, 等. 基于信息量-Scoops3D 联

- 合模型的地质灾害易发性评价[J]. 防灾减灾工程学报, 2024, 44(03): 649-659.
- Yu W X, Li X Z, Zheng L J, et al. Evaluation of the Susceptibility to Geological Hazards Based on the Information-Scoops3D Joint Model [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(03): 649-659.
- [3] 陈国华, 陶侠, 黄孔星, 等. Natech事件油气管道脆弱性评估现状与思考[J]. 油气储运, 2022, 41(8): 892-899.
- Chen G H, Tao X, Huang K X, et al. Status and thinking of vulnerability assessment of oil and gas pipelines in Natech events [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(8): 892-899.
- [4] 孙伟, 刘峻峰, 高海英, 等. 输油管道重点区段SBAS-InSAR地质灾害监测研究[J]. 石油与天然气化工, 2021, 50(4): 140-146.
- Sun W, Liu J F, Gao H Y, et al. Research on SBAS-InSAR geological disaster monitoring in key sections of oil pipelines [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2021, 50(4): 140-146.
- [5] 钟威, 高剑锋. 油气管道典型地质灾害危险性评价[J]. 油气储运, 2015, 34(9): 934-938.
- Zhong W, Gao J F. Hazard assessment of typical geological disasters along oil and gas pipeline [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(9): 934-938.
- [6] 赵洵, 杨鸣峰, 魏新年, 等. 联合InSAR和LiDAR的油气管道沿线地质灾害隐患早期识别[J]. 测绘通报, 2023(7): 131-135.
- Zhao X, Yang M F, Wei X N, et al. Early identification of hidden dangers of geological hazards along oil and gas pipelines combined with InSAR and LiDAR [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(7): 131-135.
- [7] 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(07): 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(07): 957-966.
- [8] 付豪, 李为乐, 陆会燕, 等. 基于“三查”体系的丹巴县滑坡隐患早期识别与监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(05): 734-746.
- Fu H, Li W L, Lu H Y, et al. Early Detection and Monitoring of Potential Landslides in Danba County Based on the Space-Air-Ground Investigation System [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(05): 734-746.
- [9] 赵富萌, 张毅, 孟兴民, 等. 基于小基线集雷达干涉测量的中巴公路盖孜河谷地质灾害早期识别[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(01): 142-152.
- Zhao F M, Zhang Y, Meng X M, et al. Early identification of geological hazards in the Gaizi valley near the Karakoran Highway based on SBAS-InSAR technology [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2020, 47(01): 142-152.
- [10] 周胜森, 李为乐, 陆会燕, 等. “三查”体系在高植被山区地质灾害隐患识别与监测中的应用——以四川省乐山市为例[J/OL]. 自然资源遥感, 1-11 [2025-01-09].
- Zhou S S, Li W L, Lu H Y, et al. Application of the "Three Checks" System in Identifying and Monitoring Geological Hazards in High Vegetation Mountainous Areas: A Case Study of Leshan City, Sichuan Province [J/OL]. Remote Sensing for Natural Resources, 1-11 [2025-01-09].
- [11] Yin Y P, Zheng W M, Liu Y P, et al. Integration of GPS with InSAR to Monitoring of the Jiaju Land-slide in Sichuan, China [J]. Landslides, 2010, 7(03): 359-365.
- [12] 何朝阳. 滑坡实时监测预警系统关键技术及其应用研究[D]. 成都理工大学, 2020.
- He C Y. Research on Key Technologies and Applications of Real time Monitoring and Early Warning System for Landslides [D]. Chengdu University of Technology, 2020.
- [13] 戴可人, 铁永波, 许强, 等. 高山峡谷区滑坡灾害隐患InSAR早期识别——以雅砻江中段为例[J]. 雷达学报, 2020, 9(3): 554-568.
- Dai K R, Tie Y Q, Xu Q, et al. Early Identification of Potential Landslide Geohazards in Alpine-canyon Terrain Based on SAR Interferometry—a Case Study of the Middle Section of Yalong River [J]. Journal of Radars, 2020, 9(3): 554-568.
- [14] 张帅, 吴磊, 黄玮, 等. 天然气管道穿越长江生态敏感区影响与措施研究[J]. 人民长江, 1-7 [2025-01-09].
- Zhang S, Wu L, Huang W, et al. Influence of natural gas pipeline crossing ecologically sensitive areas of Changjiang River and response measures [J]. Yangtze River, 1-7 [2025-01-09].
- [15] 孙志忠, 张满银, 谢荣, 等. 长输管道河沟道水毁危害探析[J]. 防灾科技学院学报, 2015, 17(03): 56-61.
- Sun Z Z, Zhang M Y, Xie R, et al. Research on Waterlogging Hazards of Long distance Pipeline [J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 2015, 17(03): 56-61.

- 56-61.
- [16] 徐建,马廷霞,潘玉林,等.横向滑坡作用下管道裂纹力学影响因素分析[J].防灾减灾工程学报,2023,43(02):270-276+285.
Xu J, Ma T Z, Pna Y L, et al. Analysis on Influencing Factors of Pipeline Crack Mechanics under Lateral Landslide[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(02): 270-276+285.
- [17] 孙逸林,郑小强,刘险峰,等.重大城市燃气管道泄漏爆炸事故定量分析方法研究——以湖北十堰“6·13”事故为例[J].安全与环境学报,2022,22(06):3312-3320.
Sun Y L, Zheng X Q, Liu J F, et al. Research of quantitative analysis approach for serious leakage and explosion accident of urban gas pipeline—a case study of“6·13”accident [J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(06): 3312-3320.
- [18] Yan Y, Shuyue M, Shuyao Y, et al. Detection and Numerical Simulation of Potential Hazard in Oil Pipeline Areas Based on UAV Surveys [J]. Frontiers in Earth Science, 2021, 9.
- [19] 钱雨扬,孔令利,余洲,等.基于InSAR-光学影像的白鹤滩库区地质灾害隐患识别[J].人民长江,2024,55(S2):107-112+120.
Qian Y Y, Kong L L, Yu Z, et al. Identification of Geological Hazards in the Baihetan Reservoir Area Based on InSAR Optical Imaging [J]. Yangtze River, 2024, 55(S2): 107-112+120.
- [20] 彭建兵,李永军,王祚鹏,等.黄河河道的主控因素及其衍生地质问题[J/OL].人民黄河,1-7[2025-01-09].
Peng J B, Li Y J, Wang Z P, et al. Main Controlling Factors of the Yellow River Channel and Its Derived Geological Issues [J/OL]. Yellow River, 1-7 [2025-01-09].
- [21] 冼国栋,吴森,潘国耀,等.油气管道滑坡灾害危险性评价指标体系[J].油气储运,2018,37(08):865-872.
Xian G D, Wu S, Pan G Y, et al. Risk assessment index system for landslide disasters in oil and gas pipelines [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(08): 865-872.
- [22] 张艳梅,王萍,罗想,等.利用Sentinel-1数据和SBAS-InSAR技术监测西安地表沉降[J].测绘通报,2017(4):93-97.
Zhang Y M, Wang P, Luo X, et al. Monitoring Xi'an Land Subsidence Using Sentinel-1 Images and SBAS-InSAR Technology [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017(4): 93-97.
- [23] 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(03):432-441.
Dong X J, Xu Q, She J X, et al. Preliminary study on interpretation of geological disasters from multi-source remote sensing data in Jiuzhaigou Valley Scenic and Historic Interest Area core scenic spot [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(03): 432-441.