

doi: 10.6046/zrzyyg.2022321

引用格式: 赵华伟,周林,谭明伦,等. 基于光学遥感和 SBAS-InSAR 的川渝输电网滑坡隐患早期识别[J]. 自然资源遥感, 2023,35(4):264-272. (Zhao H W,Zhou L,Tan M L,et al. Early identification of potential landslides for the Sichuan-Chongqing power grid based on optical remote sensing and SBAS-InSAR[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2023,35(4):264-272.)

基于光学遥感和 SBAS-InSAR 的 川渝输电网滑坡隐患早期识别

赵华伟¹, 周 林², 谭明伦², 汤明高¹, 童庆刚², 秦佳俊¹, 彭宇辉²

(1. 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,
成都 610059; 2. 国家电网西南分公司, 成都 641000)

摘要: 近年来,山区输电网工程遭遇滑坡而导致输电杆塔倒塌、电力中断的事故屡有发生,早期识别滑坡隐患、防患于未然,对于保障电力工程安全具有重要意义。为此,依托川渝输电网工程,采用光学遥感与小基线集 (small base-line subset, SBAS) - 合成孔径雷达差分干涉测量 (interferometric synthetic aperture radar, InSAR) 相结合的 SBAS-InSAR 方法,对川渝输电网沿线区域进行了滑坡隐患点的早期识别。通过对高分辨率光学遥感影像的解译,共识别出电网沿线杆塔附近的滑坡隐患点 28 处。在此基础上,采用 SBAS-InSAR 技术针对研究区进行地表形变探测,发现滑坡隐患点 27 处。上述 2 种方法共识别出 40 处滑坡隐患点,其中 15 处隐患点为 2 种方法共同识别。最后,通过现场复核、变形迹象及稳定性定性分析,认为 7 处隐患点对电网杆塔具有威胁而存在风险、其中 2 处风险较大。该成果对于川渝输电线路的滑坡地质灾害防治具有指导和参考价值。

关键词: 滑坡; 早期识别; 光学遥感; SBAS-InSAR; 川渝输电网

中图法分类号: P 237 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2023)04-0264-09

0 引言

输电杆塔是高压输电网中非常重要的基础设施之一,输电杆塔能否安全可靠运营关系着地方经济发展^[1]。川渝输电网杆塔多位于我国西南山区的山坡后缘或者山脊处,而西南山区地质条件复杂,地质构造发育,尤其是以滑坡为代表的地质灾害频繁发生,对川渝输电网长期正常运营构成很大威胁。因此,开展输电网沿线滑坡隐患调查和早期识别具有重要的意义。

调查滑坡隐患点的传统方式包括实地踏勘和传统测量手段(水准仪、GPS、裂缝计、观测站等),但是传统测量方式只能对小范围区域的滑坡进行调查,存在一定的局限性;且效率低、成本高、易受外界环境条件的制约,尤其对于高位远程、高隐蔽性的滑坡识别起来更为困难^[2]。随着科学技术的不断发展,光学遥感技术和合成孔径雷达干涉测量技术(inter-

ferometric synthetic aperture radar, InSAR) 等被更广泛地应用于滑坡隐患的识别中,具有识别效率较高、识别范围很广、识别成本较低等优势^[3-4]。但两者也存在一定的局限^[5-6]。光学遥感技术具有分辨率高、覆盖范围广、影像信息丰富等特点,通过地形地貌特征分析可以快速识别出发生过整体变形的古(老)滑坡以及具有明显变形特征的滑坡;但是,对于正在发生缓慢变形而又无明显变形迹象的滑坡隐患则很难识别出来,且西南地区的光学遥感影像质量受云雾遮蔽的影响较大,这对识别准确率也存在一定影响^[7]。现如今 InSAR 技术已经较为成熟,可以利用雷达影像的相位信息来探测 mm 级的地表形变量,具有测量精度高、不受云层影响、可以全天运作、测量范围广等特点^[8-10],能够很好地弥补光学遥感技术的不足,获得的地表形变量对分析滑坡体形变的演化过程、发生机理及机制、早期识别及预警有重大意义^[11]。但 InSAR 技术也存在一定的缺点:①容易受植被、大气信号或地形效应的影响,导致探

收稿日期: 2022-08-10; 修订日期: 2023-02-09

基金项目: 国家电网公司科技项目“基于 AI 技术的川渝输电网地质灾害和山火智能识别与预警研究”(编号: SGSW0000AQJS100059)和重庆市规划和自然资源局科技项目“重庆市地质灾害智能化监测预警模型建设”(编号: TC209D058)共同资助。

第一作者: 赵华伟(1998-),男,硕士研究生,主要从事岩土工程专业相关研究。Email: 2273366235@qq.com。

通信作者: 汤明高(1978-),男,博士,教授,主要从事地质灾害机理、评价预测与防治研究。Email: tomyr2008@163.com。

测结果不准确;②监测范围有限,如果隐患点变形过快,则会造成失相干现象;③由于技术本身的限制,生成的有效干涉点很难覆盖整个研究区域^[12]。由于光学遥感技术与 InSAR 技术都存在一定的优势与局限性,为避免在滑坡隐患的早期识别过程中出现遗漏的现象,许强等^[13-14]和葛大庆等^[15-17]提出,综合利用具有高分辨率的光学遥感影像与 InSAR 技术所获得的形变信息,充分发挥 2 种技术手段的优势,实现对地质灾害隐患的识别。

其中,小基线集(small baseline subset,SBAS)时序 InSAR 方法能够有效利用冗余干涉对进行干涉相位建模,可有效抑制形变恢复模型中的误差项,已在滑坡运动监测等领域中得到广泛应用^[18]。刘沛源等^[19]利用 87 景降轨的 Sentinel-1A 影像,采用 SBAS-InSAR 技术实现了对成汶高速公路成汶段滑坡隐患点的早期识别,共识别滑坡隐患点 10 处,经野外验证均为处于缓慢变形中的滑坡,为高速公路选线提供了依据。张家勇等^[20]利用 2017—2020 年间获取的 97 景 Sentinel-1A 影像,基于 SBAS-InSAR 技术,对纳雍、黔西 2 县进行了滑坡隐患点的早期识别,经探测发现了 60 处隐患点,并通过现场调查验证了 InSAR 探测结果的有效性,为该地区的防灾减灾提供了依据。

川渝输电网位于西南地区,植被覆盖茂密,云雾遮挡严重,仅采用单一技术手段很难对该地区滑坡隐患进行准确、全面的识别。因此,本文参考前人研究的经验,利用多源遥感数据,包括 Google Earth 影像、高分 2 号光学遥感影像和 Sentinel-1A 数据 SBAS-InSAR 综合分析,开展川渝输电网黄万线路沿线的滑坡隐患识别,旨在为川渝输电网地质灾害的监测与预防提供参考依据。

1 研究区概况

川渝输电网“黄万线”线路位于 E106°50′~108°16′,N30°32′~30°50′区域,穿过的行政区包括四川省广安市、达州市以及重庆市,路线总体为 SW—NE 走向,西起广安市前锋区,经达州市大竹县、重庆市梁平区,止于重庆市万州区,全长 141 km(图 1)。研究区输电网黄万线位于四川盆地向川东平行岭谷过度地带,输电网穿越了 5 大山脉,其中包括华蓥山脉、铜锣山山脉、明月山山脉、铁峰山脉以及挖断山脉,地势北高南低,西高东低。研究区处于亚热带湿润气候与亚热带季风湿润气候之间,每年降雨量为 1 000~1 200 mm。地表植被覆盖面积较大,包括阔叶林、针叶林、竹林、灌丛、草丛和

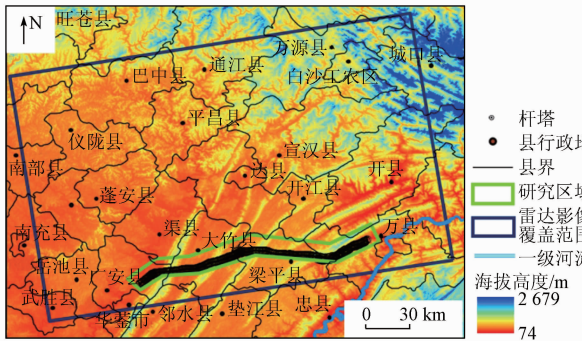


图 1 研究区位置图及雷达影像覆盖图
Fig.1 Map of location of study area and Radar image coverage

草甸,植被分布受海拔的影响明显。在区域构造上分属川东褶皱带、川中褶皱带、川东南陷褶皱带和大巴山弧形断褶皱单元,出露地层主要为中生界侏罗系到三叠系的砂泥岩、灰岩、板岩,少部分上古生界二叠系地层,以及第四系崩坡积和残积层等。研究区属于我国地质灾害易发区,但是对于川渝输电网以前并未开展遥感调查与监测,在电网运行过程中调查发现存在滑坡变形迹象,因此开展本研究对于保障输电线路的正常运营具有非常重要的意义。

2 多源遥感识别方法

首先利用 Google Earth、高分二号 2 种光学遥感影像,通过目视解译对研究区滑坡隐患点进行早期识别。但光学遥感影像对于一些正在发生缓慢变形但又无明显变形迹象的滑坡无法准确识别,且识别出来的滑坡也可能是处于稳定状态的古(老)滑坡;因此在光学遥感影像识别的基础上,利用多景 Sentinel-1A 雷达影像数据,基于 SBAS-InSAR 技术对研究区的正在变形的滑坡隐患进行早期的识别。

2.1 光学遥感影像目视解译

目前,人工目视解译法为光学遥感影像解译滑坡隐患的主要方法之一^[21]。人工目视解译能够直接识别的滑坡主要分为已经发生整体变形的老(古)滑坡和正在发生变形的滑坡 2 类。老(古)滑坡识别起来比较容易,识别标志主要为地形地貌特征,比如整体地貌呈现圈椅状、簸箕形、长舌形等平面形态,两侧“双沟同源”的地貌特征,滑坡前缘部分隆起、滑舌挤压河流导致河流改道等,中部分为多级平台、封闭洼地等,后缘有拉裂缝、滑坡壁等,以及滑坡上的植被与周围植被颜色差异显著等(图 2)。

正在发生缓慢变形的滑坡人工目视解译识别相对困难,对于有明显变形迹象的滑坡,可以通过对比



图 2 典型的老滑坡的影像

Fig. 2 Image of typical old landslide

多期次高分辨率光学遥感影像的色调和纹理的微变化差异,其解译标志为后缘拉裂缝,前缘小规模滑塌、崩塌等迹象(图 3);而对于没有明显变形迹象的滑坡,则可以采用 InSAR 技术进行识别。

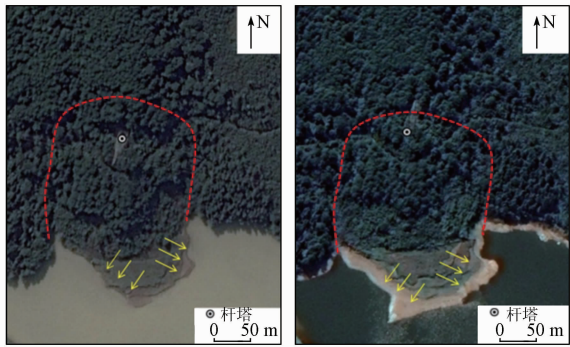


图 3 H37 滑坡隐患点光学遥感影像

Fig. 3 Optical remote image of H37 landslide hidden danger point

2.2 SBAS-InSAR 时序变形探测

在采用 InSAR 对研究区地表形变进行监测时,考虑到由于川渝地区植被覆盖率过高,会导致 SAR 影像出现一定的失相干现象,为了降低影像失相干对形变结果产生的影响,去除大气效应干扰,采用小基线集(SBAS)技术解决上述问题^[22]。SBAS-In-

$$\delta \varphi_j = \varphi_{tB} - \varphi_{tA} = \frac{4\pi}{\lambda}(d_{tB} - d_{tA}) + \Delta \Phi_j^{\text{topo}} + \Delta \Phi_j^{\text{atm}} + \Delta n_j \quad , \quad (2)$$

式中: φ_{tA} 与 φ_{tB} 为 t_A 与 t_B 时刻相对于 t_0 时刻的累积形变相位; λ 为波长; d_{tA} 与 d_{tB} 为 t_A 与 t_B 时刻相对于 t_0 时刻的影像累积形变量; $\Delta \Phi_j^{\text{topo}}$ 为地形相位; $\Delta \Phi_j^{\text{atm}}$ 为大气相位; Δn_j 为噪声相位。

在消除了大气延迟相位、残余地形相位和噪声相位后,最终差分干涉相位可简化为:

$$\delta \varphi_j = \varphi_{tA} - \varphi_{tB} = \frac{4\pi}{\lambda}(d_{tB} - d_{tA}) \quad , \quad (3)$$

SAR 技术为来自意大利的 Berardino 等^[23] 多名学者为了降低相位噪声,对 InSAR 技术进行进一步的完善所提出的,该技术应用多视化差分干涉图处理,通过提取优质相干像元、配合奇异值分解方法,进而得到影像时间序列变形速率。

2.2.1 采用的数据

通过欧空局网站获得整个研究区 2020 年 2 月—2022 年 3 月 Sentinel-1A 卫星影像数据 33 景,其覆盖范围如图 1 所示,基本参数见表 1。由于 SAR 数据本身存在一定的系统误差,为了消除系统误差影响,下载覆盖研究区范围 SRTM 30 m 分辨率的 DEM 数据和精密轨道文件对 SAR 数据进行预处理,以消除地形误差和轨道误差的影响,提高整个研究区域内形变探测结果的精确性。

表 1 Sentinel-1A 影像基本参数

Tab. 1 Basic parameters of Sentinel-1A image

参数	内容
卫星	Sentinel-1A
模式	IW
波段	C
波长/cm	VV
地面分辨率/m	5×20
重访周期/d	12
入射角/(°)	33.896
轨道方向	升轨
极化方式	VV

2.2.2 数据处理流程

SBAS 技术处理流程: 首先获取在 t_A 和 t_B 这 2 个时间段内 $N+1$ 幅 SAR 影像,选取其中一幅影像作为主影像,然后将剩余的 N 幅影像与其配准。根据实际情况设定合理的时间阈值和空间阈值,最终生成 M 幅差分干涉图,且满足:

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

对所生成的 M 幅干涉图中的第 $j(j=1,2,\cdots,M)$ 幅干涉图,其任意位置的干涉相位可表示为:

最后利用奇异值分解法估算形变速率,在时域积分得形变时间序列。

3 基于光学遥感的滑坡识别结果

通过对高分辨率的光学遥感影像进行人工目视解译,在杆塔附近共识别滑坡隐患点 28 处,因电网路线较长,将其分为 4 段进行展示(图 4)。

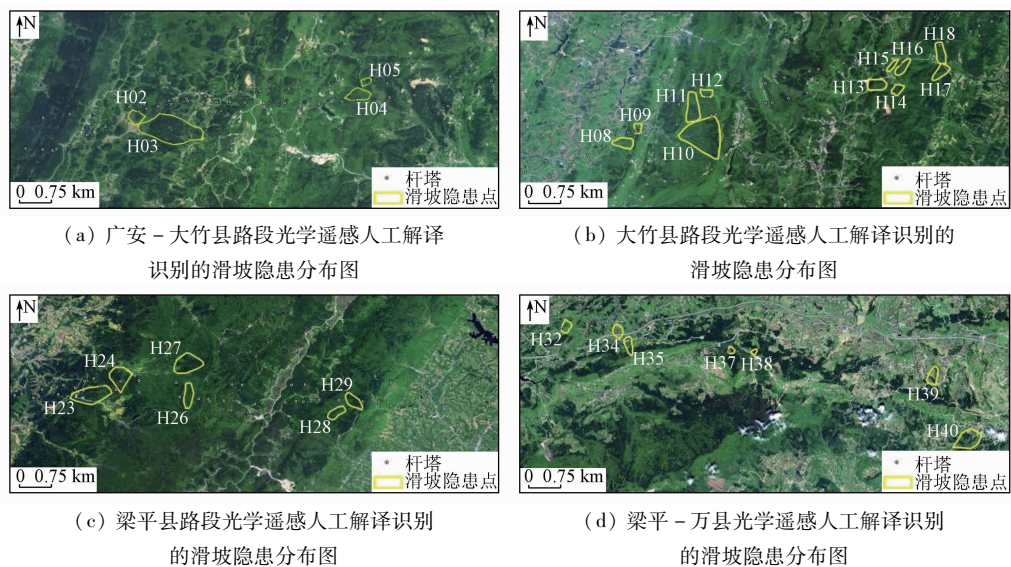


图 4 基于光学遥感人工解译识别的滑坡隐患分布图

Fig. 4 Distribution map of landslide hidden danger based on manual interpretation and identification of optical remote sensing

4 基于 SBAS – InSAR 的滑坡隐患探测结果

通过 SBAS – InSAR 技术对 Sentinel – 1A 升轨

道数据处理后,获得研究区在 2020 年 2 月—2022 年 3 月期间地表年平均形变速率,最大形变速率为 102.5 mm/a。由于研究区范围过大,将其分为 4 块区域展示(图 5)。

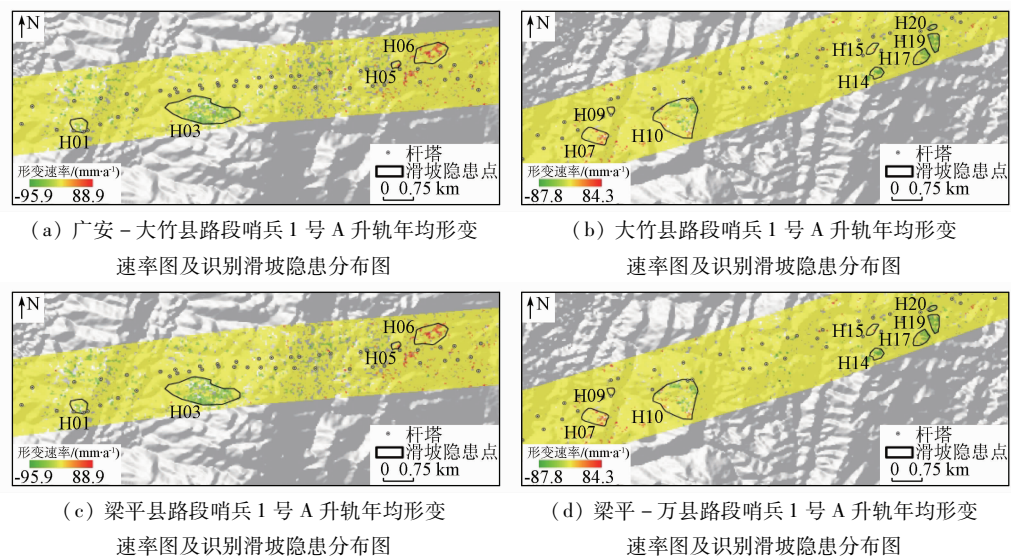


图 5 哨兵 1 号 A 升轨年均形变速率图及识别滑坡隐患分布图

Fig. 5 Maps of annual deformation rate of Sentinel – 1A Ascent and distribution of landslide hidden danger identification

图 5 中,形变量正负值在雷达视线上有不同意义,负值代表远离卫星、正值代表靠近卫星。形变集中区域可能存在滑坡隐患,也可能是由于地表自然沉降、风化作用以及人为建造改造活动导致的形变;同时,可能受技术水平、气候变化、密集植被覆盖等因素影响,也会形成一些无关形变集中区。因此,结合人工目视解译以及野外调查,排除其他地表运动、各类因素造成的干扰形变项,再从中识别滑坡隐患,

最终共识别滑坡隐患点 27 处,其中 15 处滑坡隐患点与光学遥感影像解译相符。

5 重点滑坡隐患分析

通过光学遥感影像人工目视解译和 SBAS – InSAR 技术对研究区滑坡隐患点的探测,共识别滑坡隐患点 40 处,对电网正常运营有影响的隐患点共 7

处(表 2),其中 2 处对电网正常运营的风险较大。H16,H23 和 H24 为光学遥感影像单独识别出。H08,H10,H18 和 H36 为 2 种技术手段共同识别出;

表 2 对电网正常运营有影响的滑坡隐患
Tab.2 Landslide hidden danger affecting normal operation of power grid

编号	经度	纬度	长度/m	宽度/m	面积/m ²	遥感解译信息
H08	107°16'53.58"	30°40'58.33"	240	80	17 586.53	土质滑坡,前缘存在局部滑塌,公路裂缝明显,杆塔处于滑坡内部后缘,该滑坡一旦发生过大变形影响电网正常运营的风险较大
H10	107°17'50.83"	30°40'57.79"	937	950	668 049.35	古滑坡堆积体,由 2 个子滑坡组成,后缘陡峭,前缘鼓起,后缘有变形迹象,杆塔位于后缘,影响电网正常运营的风险较大
H16	107°20'30.33"	30°41'49.56"	172	445	69 764.23	古滑坡堆积体,两侧存在冲沟,杆塔存在于滑坡内部,但变形迹象不明显,有影响电网正常运营的风险
H18	107°21'1.76"	30°41'57.51"	358	175	64 833.38	土质滑坡,局部存在滑塌现象,但整体无明显变形,杆塔处于滑坡后缘,有影响电网正常运营的风险
H23	107°34'18.04"	30°45'49.50"	800	381	218 886.36	土质滑坡,前缘存在局部小型滑塌,整体无明显变形,InSAR 识别,杆塔位于滑坡中后部,影响电网正常运营的风险较大
H24	107°34'27.97"	30°46'2.87"	445	627	228 396.85	土质滑坡,两侧以冲沟为界,前缘存在局部滑塌,杆塔位于滑体中后部,有影响电网正常运营的风险
H37	107°56'31.03"	30°43'35.50"	123	232	24 831.82	土质滑坡,前缘位于河中,前缘有明显的变形迹象,杆塔位于中部,有影响电网正常运营的风险

5.1 H08 滑坡

H08 滑坡位于四川省达州市大竹县乌木镇芭蕉湾村,E107°16'53.58",N30°40'58.33"。滑坡整体形态呈长舌形,前缘高程 419 m,后缘高程 493 m,相对高差 74 m,纵长 240 m,横宽 80 m,面积约 1.75 × 10⁴ m²,为中型滑坡,左右两侧都以冲沟为界(图 6)。结合野外调查,推测其为土质滑坡,滑体厚度

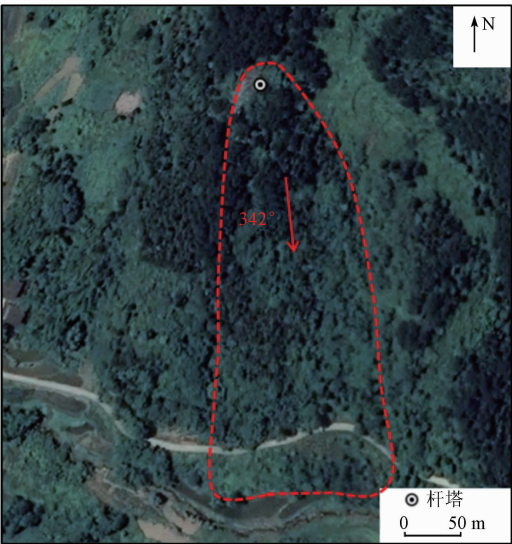


图 6 H08 滑坡隐患点光学遥感影像
Fig.6 Optical satellite images of H08 landslide hidden danger point

约为 8 m,主滑方向为 342°,平均坡度约为 18°,下伏出露基岩为三叠系中统雷口坡组(T₂l)淡黄色泥岩,产状为 300°∠47°,推测其滑面为基覆界面。前缘有局部滑塌(图 7),公路有明显裂缝迹象(图 8)。电塔处于滑坡后缘,一旦后缘发生较大变形,将直接威胁杆塔的稳定



图 7 局部破碎基岩
Fig.7 Locally broken bedrock



图 8 前缘公路裂缝
Fig.8 Leading edge road crack

通过 Sentinel – 1A 升轨方向形变速率结果发现 (图 9),该滑坡在 2020—2022 年间 LOS 方向最大的形变速率为 36.5 mm/a,形变主要集中在区域为滑坡的前缘与中部。在该滑坡上选取 3 个特征点 P1、P2 和 P3,获得其时间序列的形变曲线 (图 10),发现该滑坡堆积体整体处于一个缓慢变形的状态,其中处于滑坡前缘的 P1 处累积变形形变量为 82.2 mm,处于滑坡中部的 P2 处累积变形形变量为 65.4 mm,处于滑坡后缘的 P3 处累积形变量为 28.6 mm。结合该滑坡的形变速率与 3 个特征点的累积形变量分析发现,该滑坡前缘变形要明显大于中部和后缘,且结合该滑坡前缘较陡、后缘较缓的地形,推测该滑坡堆积体为牵引式滑坡。

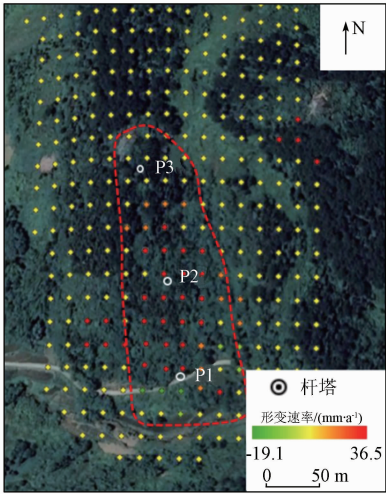


图 9 H08 滑坡隐患点形变速率图

Fig.9 Map of deformation rate of H08 landslide hidden danger point

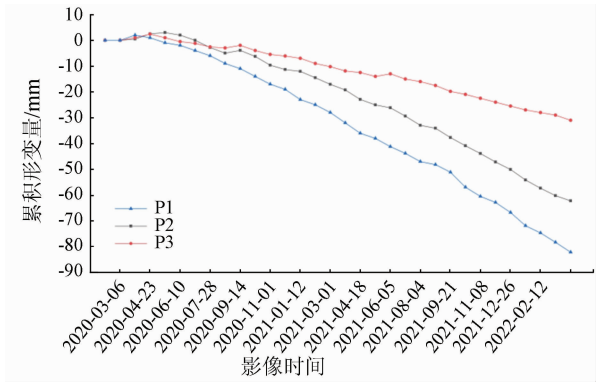


图 10 H08 滑坡隐患特征点时序形变曲线

Fig.10 Time series deformation curve of characteristic points of H08 landslide hidden danger

5.2 H10 滑坡

该滑坡位于达州市大竹县乌木镇大广子村, E107°17'36.79",N30°40'54.89"。后缘呈圈椅状,前缘高程 527 m,后缘高程 829 m,相对高差 302 m,横宽约 950 m,纵长约 937 m,面积约 $6.7 \times 10^5 \text{ m}^2$,主

滑方向为 254°,两侧以陡坎为界 (图 11)。综合 In-SAR 结果与光学遥感影像,推测该滑坡为一古滑坡堆积体,由 I 及 II 2 个子区组成,后缘较陡,坡度 25°~30°,中部前缘较缓 10°~15°。该滑坡在 2020—2022 年间 LOS 方向最大的形变速率为 66.1 mm/a (图 12)。在滑坡堆积体 I 区上选取 P1,P2,P3 这 3 个特征点,获得其时间序列的形变曲线 (图 13),其中 P1 处累积形变量为 58.6 mm,P2 处累积形变量为 32.8 mm,P3 处累积形变量为 19.8 mm,在 2021 年 4 月后形变速度加快,推测是受到降雨影响,使得该滑坡变形加剧。结合形速率结果以及 3 个特征点的累积形变量发现,滑坡堆区后缘变形明显大于前缘,且结合其前缘有鼓包,后缘陡峭的地形,推测 I 区为推移式滑坡。在滑坡堆积体 II 区上选取 P4,P5,P6 这 3 个特征点,获得其时间序列的形变曲线 (图 14),P4 处累积形变量为 60.2 mm,P5 处累积形变量为 36.8 mm,P6 处累积形变量为 21.8 mm,目

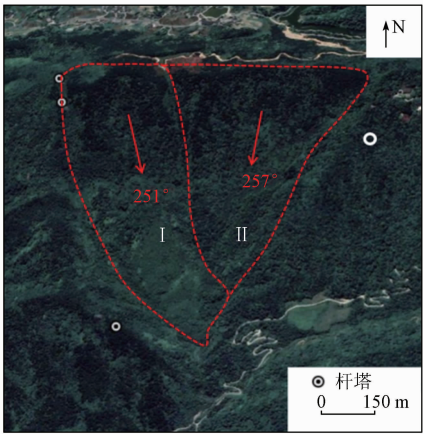


图 11 H10 滑坡隐患点光学遥感影像

Fig.11 Optical satellite images of H10 landslide hidden danger point

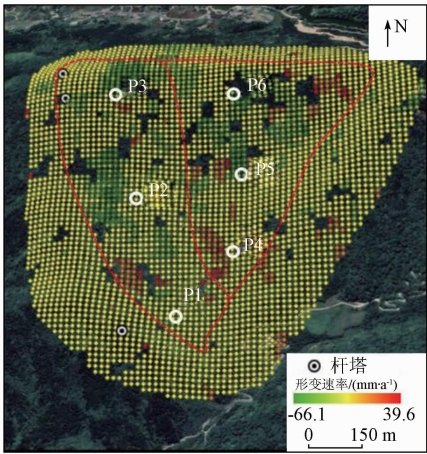


图 12 H10 滑坡隐患点形变速率图

Fig.12 Deformation rate Map of H10 landslide hidden danger point

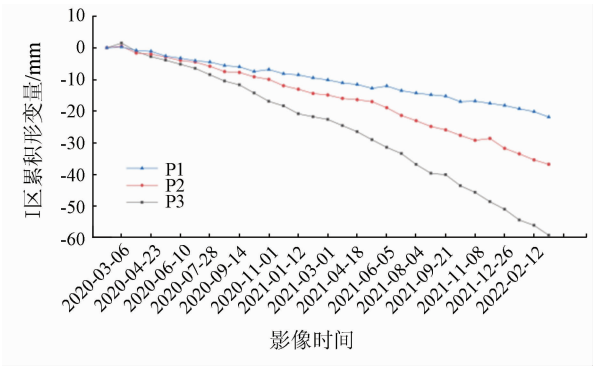


图 13 H10 滑坡隐患 I 区特征点时序形变曲线
Fig. 13 Time series deformation curves of characteristic points of H10 landslide hidden danger point in zone I area

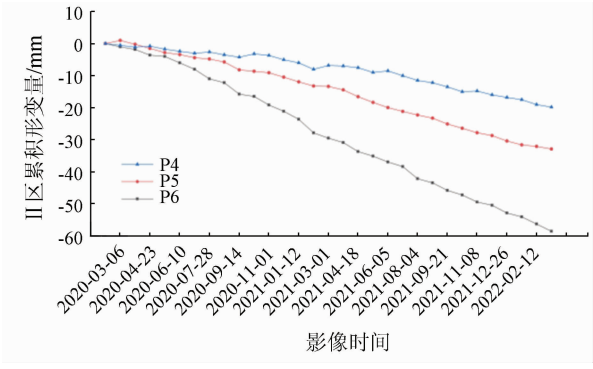


图 14 H10 滑坡隐患 II 区特征点时序形变曲线
Fig. 14 Time series deformation curves of characteristic points of H10 landslide hidden danger point in zone II area

前整体处于匀速变形阶段,发现 II 区同 I 区一样后缘的变形明显大于前缘,但是 I 区后缘变形更加剧烈,位于 I 区后缘的杆塔则可能由于后缘不断变形而发生失稳,所以应对该滑坡堆积体变形情况进行重点监测,以保证电网的正常运营。

6 结论

1) 本文采用光学遥感影像人工目视解译与 SBAS-InSAR 技术相结合的方法,辅以现场调查,实现了对川渝电网“黄万线”杆塔附近地区滑坡隐患的早期识别。利用光学遥感影像在杆塔附近共识别滑坡隐患点 28 处;再基于 SBAS-InSAR 技术,利用 Sentinel-1A 影像数据在杆塔附近探测出滑坡隐患点 27 处,2 种技术手段共识别滑坡隐患 40 处,其中 15 处滑坡隐患为 2 种技术手段共同识别,有 7 处隐患点威胁电网杆塔安全,2 处风险较大。

2) 通过光学遥感影像对研究区进行人工目视解译所识别的滑坡隐患点多为已经发生过滑动的老

(古)滑坡,或者有明显形变迹象的滑坡,但对于没有明显形变迹象的滑坡隐患点很难识别出来;SBAS-InSAR 对形变探测精度高,可以对缓慢变形的滑坡隐患进行有效探测,但是对于突发型滑坡,由于变形速度太快,则无法进行有效探测。因此,综合利用光学遥感影像目视解译法与 SBAS-InSAR 技术,可以更加准确、全面地对研究区进行滑坡隐患点进行识别,这对于滑坡隐患早期识别具有借鉴和指导意义。

3) 针对植被覆盖率较高的西南地区,采用 C 波段的 Sentinel-1A 数据成像时间间隔过长会出现较为严重的失相干现象,所以为了保持较好相干性,应控制好影像的时间间隔。

参考文献 (References):

[1] 高霞霞,李素敏,陈朋弟,等. 时序 InSAR 边坡滑移监测下输电杆塔失稳机理研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版),2022,39(1):43-50.
Gao X X, Li S M, Chen P D, et al. Research on the instability mechanism of transmission towers under time-series InSAR slope slip monitoring[J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2022, 39(1): 43-50.

[2] 董继红,马志刚,梁京涛,等. 基于时序 InSAR 技术的滑坡隐患识别对比研究[J]. 自然资源遥感,2022,34(3):73-81. doi: 10.6046/zrzyyg.2021333.
Dong J H, Ma Z G, Liang J T, et al. A comparative study of the identification of hidden landslide hazards based on time series InSAR techniques[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(3): 73-81. doi:10.6046/zrzyyg.2021333.

[3] 丁华,丁辉. 遥感技术在滑坡灾害解译中的应用——以陕西省延安市子长县为例[J]. 自然灾害学报,2013,22(2):229-233.
Ding H, Ding H. Application of remote sensing technology to interpretation of landslide disaster: A case study of Zichang County, Shanxi Province[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(2): 229-233.

[4] 董秀军,王栋,冯涛. 无人机数字摄影测量技术在滑坡灾害调查中的应用研究[J]. 地质灾害与环境保护,2019,30(3):77-84.
Dong X J, Wang D, Feng T. Research on the application of unmanned aerial vehicle digital photogrammetry in landslide disaster investigation[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2019, 30(3): 77-84.

[5] 许强,李为乐,董秀军,等. 四川茂县叠溪镇新磨村滑坡特征与成因机制初步研究[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(11):2612-2628.
Xu Q, Li W L, Dong X J, et al. The Xinmocun landslide on June 24, 2017 in Maoxian, Sichuan: characteristics and failure mechanism[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(11): 2612-2628.

[6] 张文君. 滑坡灾害遥感动态特征监测及其预测分析研究[D].

成都:西南交通大学,2007.

Zhang W J. Research on the remote sensing dynamic character monitoring and prediction analysis of landslide disaster[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2007.

[7] 朱怡飞,姚鑫,姚磊华,等. 基于 InSAR 和光学遥感的贵州聚岭采煤滑坡识别与危险性评价[J]. 地质力学学报,2022,28(2):268-280.

Zhu Y F,Yao X,Yao L H,et al. Identification and risk assessment of coal mining-induced landslides in Guizhou Province by InSAR and optical remote sensing[J]. Journal of Geomechanics,2022,28(2):268-280.

[8] Guo J M,Hu J Y,Li B,et al. Land Subsidence in Tianjin for 2015 to 2016 Revealed by the Analysis of Sentinel-1A with SBAS-InSAR[J]. Journal of Applied Remote Sensing,2017,11(2):026024.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 聂成顺. 基于 InSAR 和光学遥感的会东县滑坡隐患识别研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2021.

Nie C S. Recognition for potential landslides in Huidong County based on InSAR and optical remote sensing[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing),2021.

[13] 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.

[14] 许强. 对地质灾害隐患早期识别相关问题的认识与思考[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2020,45(11):1651-1659.

Xu Q. Understanding and consideration of related issues in early identification of potential geohazards[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2020,45(11):1651-1659.

[15] 葛大庆. 地质灾害早期识别与监测预警中的综合遥感应用[J]. 城市与减灾,2018(6):53-60.

Ge D Q. Comprehensive application of remote sensing application in early identification, monitoring and early warning of geological disasters[J]. City and Disaster Reduction,2018(6):53-60.

[16] 葛大庆,戴可人,郭兆成,等. 重大地质灾害隐患早期识别中综合遥感应用的思考与建议[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2019,44(7):949-956.

Ge D Q,Dai K R,Guo Z C,et al. Early identification of serious geological hazards with integrated remote sensing technologies: Thoughts and recommendations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2019,44(7):949-956.

[17] 葛大庆,郭兆成. 重大地质灾害隐患早期识别中综合遥感应用的思考[J]. 中国应急救援,2019(1):10-14.

Ge D Q,Guo Z C. Thoughts on the application of comprehensive remote sensing in the early identification of hidden dangers of major geological disasters[J]. China Emergency Rescue,2019(1):10-14.

[18] 沙永莲,王晓文,刘国祥,等. 基于 SBAS-InSAR 的新疆哈密砂墩子煤田开采沉陷监测与反演[J]. 自然资源遥感,2021,33(3):194-201. doi:10.6046/zrzyyg.2020026.

Sha Y L,Wang X W,Liu G X,et al. SBAS-InSAR based monitoring and inversion of surface subsidence of the Shadunzi Coal Mine in Hami City, Xinjiang[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2021,33(3):194-201. doi:10.6046/zrzyyg.2020026.

[19] 刘沛源,常鸣,武彬彬,等. 基于 SBAS-InSAR,技术的成汶高速汶川段滑坡易发区选线研究[J]. 地球科学,2022,47(6):2048-2057.

Liu P Y,Chang M,Wu B B,et al. Route selection of landslide prone area in Wenchuan section of Chengdu Wenchuan expressway based on SBAS-InSAR[J]. Earth Science,2022,47(6):2048-2057.

[20] 张家勇,邹银先,刘黔云,等. 利用时序 InSAR 进行毕节市潜在滑坡识别与形变监测[J]. 测绘通报,2022(6):121-124.

Zhang J Y,Zou Y X,Liu Q Y,et al. Potential landslides deformation monitoring in Bijie City with InSAR time series[J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2022(6):121-124.

[21] 卓宝熙. 工程地质遥感判释与应用[M]. 北京:中国铁道出版社,2011.

Zhuo B X. Remote sensing interpretation & application of geology engineering[M]. Beijing:China Railway Publishing House,2011.

[22] 徐子兴,季民,张过,等. 基于 SBAS-InSAR 技术和 Logistic 模型的矿区沉降动态预测方法[J]. 自然资源遥感,2022,34(2):20-29. doi:10.6046/zrzyyg.2021354.

Xu Z X,Ji M,Zhang G,et al. Method for dynamic prediction of mining subsidence based on the SBAS-InSAR technology and the logistic model[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2022,34(2):20-29. doi:10.6046/zrzyyg.2021354.

[23] 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.

Early identification of potential landslides for the Sichuan – Chongqing power grid based on optical remote sensing and SBAS – InSAR

ZHAO Huawei¹, ZHOU Lin², TAN Minglun², TANG Minggao¹, TONG Qinggang², QIN Jiajun¹, PENG Yuhui²
(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Southwest Branch of State Grid Corporation of China(SGCC), Chengdu 641000, China)

Abstract: Power grid projects in mountainous regions have encountered numerous landslides in recent years, leading to collapsed transmission towers and power outages. Hence, early identification of potential landslides is crucial for ensuring the safety of power engineering. For this purpose, this study conducted early identification of potential landslides along the Sichuan – Chongqing power grid based on optical remote sensing and the small baseline subset (SBAS) – interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technology. The interpretation of high – resolution optical remote sensing images revealed 28 potential landslide sites near the transmission towers along the power grid. Based on this, this study detected the study area’s surface deformation using the SBAS – InSAR technology, identifying 27 potential landslide sites. Except for 15 repeated results, the above two methods identified a total of 40 potential landslide sites. Finally, through field check and the qualitative analysis of deformation signs and stability, this study determined that seven potential landslide sites threaten the safety of transmission towers, with two of them presenting higher risks. These findings provide valuable guidance and references for the prevention and control of landslides along the Sichuan – Chongqing power grid.

Keywords: landslide; early identification; optical remote sensing; SBAS – InSAR; Sichuan – Chongqing power grid

(责任编辑: 李 瑜)