引文格式:王毅,李天斌,李升甫,等.山区公路脆弱地质环境灾害多方法早期识别及路线优化[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(2):224-235.DOI:10.13203/j.whugis20230214

Citation:WANG Yi,LI Tianbin,LI Shengfu,et al.Multi-method Early Identification and Route Optimization of Vulnerable Geological Environment Hazards on Mountainous Highways[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(2):224-235.DOI:10.13203/j.whugis20230214

山区公路脆弱地质环境灾害多方法早期识别及路线优化

王 毅[1,2] 李天斌[1] 李升甫[2] 马洪生[2] 贾 洋[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 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司,四川 成都,610041

摘 要:山区地质灾害直接关系到高速公路建设及后期运营效果,如何提前发现并识别出重大潜在危险源,并采取相应措施,已成为山区高速公路选线关注的焦点与难点。利用多技术融合,对G4216线沿江高速公路新场沟段地质灾害进行多层次调查及分析,并给出路线优化建议。首先,应用多时相高精度光学遥感影像对规划线路范围内的地质灾害隐患进行初步解译及分析;然后,对影响路线走向的重点区域,采用小基线集合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar ,InSAR)开展地表定量探测和分析评价;最后,通过机载激光雷达(light detection and ranging,LiDAR)测量技术对地质灾害高风险区进行详细探查。光学遥感共识别出地质灾害隐患40处,其中10处隐患点对高速公路修建具有不同程度的威胁性。InSAR技术共探测出13处具有明显变形的崩滑体隐患点,并发现新场沟左岸有一处巨型变形体,直接威胁规划线路的走向。在此基础上,通过LiDAR技术与实地调查发现此变形体中部多处出现拉裂迹象,上部呈阶梯型错动,变形迹象明显,不宜扰动,应予以绕避。研究结果表明,通过以上多种手段相结合,能够最大限度且快速地探查地质灾害隐患,并给出高速公路路线安全绕避方案,促使高速公路选线技术从粗放化向精细化转变,对高等级公路选线具有较大的借鉴意义和参考价值。

关键词:地质灾害;早期识别;合成孔径雷达干涉测量;机载激光雷达测量;路线优化

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-05-15

DOI:10.13203/j.whugis20230214 **文章编号**:1671-8860(2026)02-0224-12

Multi-method Early Identification and Route Optimization of Vulnerable Geological Environment Hazards on Mountainous Highways

WANG Yi[1,2] *LI Tianbin*[1] *LI Shengfu*[2] *MA Hongsheng*[2] *JIA Yang*[2]

1 State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,Chengdu University of Technology,Chengdu 610059,China

2 Sichuan Highway Planning,Survey,Design and Research Institute Co, Ltd.Chengdu 610041,China

Abstract: **Objectives**: Geological disasters in mountain areas are directly related to the construction and operation effect of expressways. How to find and identify major potential hazard sources in advance and take corresponding measures has become the focus and difficulty of highway route selection in mountainous areas. **Methods**: Multilevel investigation and analysis of geological hazards in Xinchanggou section of G4216 expressway are carried out by using multi-technology, and the corresponding suggestions for route optimization are given. First, multi-temporal high-precision optical remote sensing images are used to interpret and analyze the hidden geological hazards within the planned route in the research process. Second, small baseline subsets interferometric synthetic aperture radar (InSAR) are used to quantitatively detect and

基金项目:四川省交通运输科技项目(2018-A-01,2021-A-02,2021-A-06);四川省公路规划勘察设计研究院有限公司科技项目(2022-YL-03)。

第一作者:王毅,硕士,高级工程师,主要从事地质灾害分布规律研究、地质灾害隐患早期识别与监测预警,遥感与GIS应用。624844957@qq.com

通信作者:李天斌,博士,教授。ltb@cdut.edu.cn

evaluate the surface deformation in the key areas affecting the route direction. Finally, the airborne light detection and ranging (LiDAR) technology is used to conduct detailed exploration of areas with high risk of geological hazards. **Results:** Optical remote sensing consensus identified 40 hidden geological hazards, 10 of which have different degrees of threat to the construction of expressways. InSAR technology was used to detect a total of 13 hidden points of sliding bodies with obvious deformation, among which a giant deformed body was found on the left bank of Xinchanggou, which directly threatened the direction of the planned route. On this basis, it was found that the middle part of the deformed body showed signs of pulling cracks through the LiDAR technology and field investigation, and the upper part of the deformed body showed ladder dislocation, and the deformation signs were obvious, which should be avoided. The results show that the combination of the above means can detect the hidden dangers of geological disasters to the maximum extent at great speed. **Conclusions:** The safe circumvention scheme of expressway route is given, which promotes the transformation of expressway route selection technology from extensive to refined. It is of great reference significance and value to highway route selection.

Key words: geological disaster; early detection; InSAR; light detection and ranging; route optimization

高速公路建设是国家和地区协调发展战略实施中最重要的一项举措,不仅可以有效地加强沿线城市的公路交流和经济联系,还能促进沿线地区的产业机构调整及经济发展。但由于西南山区地形地质环境脆弱,新构造运动强烈,地质灾害十分发育,对公路的建设带来极大的威胁[1]。因此,如何提前发现并有效识别出重大地质灾害的潜在隐患并采取相应措施,成为公路选线设计关注的焦点与难点。

近年来,随着科技的不断进步,更多高精度对地观测技术不断地应用到地质灾害早期识别当中,如多时相高精度光学遥感技术、合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar,InSAR)技术、机载激光雷达(light detection and ranging,LiDAR)测量技术等[2-9]。此类技术的应用不仅解放了传统仅靠人力的调查排查,也使一些地处高位、交通不便、人类无法到达的地质灾害隐患监测及识别成为了可能。基于此类技术,国内外学者进行了大量研究,文献[10]运用多时相高精度遥感影像对滑坡变形迹象进行目视解译,并分析其发展演化规律,为类似灾害的早期识别提供了参考。文献[11]通过使用永久散射体InSAR和转角反射体InSAR这两种方法,定量估计由大气延迟引起的误差,分析了滑坡变形与合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)数据的时空变化之间的关系,并将其用于识别滑坡,证明了该方法的可行性。文献[12-13]采用基于改进的时间序列InSAR分析方法,通过大渡河上游丹巴县滑坡进行识别,验证了时序InSAR技术应用于滑坡灾害探测结果的有效性和优势。文献[14]运用LiDAR技术获取局部高精度数字高程模型(digital elevation model,DEM),开展了三峡地区滑坡灾害早期识别方面的研究,为地质条件复杂地区的滑坡灾害早期识别提供了技术参考。此外,美国地质调查局有关单位学者[15-23]也相继开展了基于机载LiDAR技术的地质灾害早期识别,通过对LiDAR数据的处理获取地面高精度、高分辨率的地形地貌三维影像,并制作高精度DEM,从而对植被覆盖下的灾害具体形变情况进行识别,取得了较好的应用效果。

以上研究通过不同的遥感技术手段,对地质灾害早期识别进行了大量研究工作,推动了遥感技术在山地灾害早期识别中的应用进程,但研究多是采用单一的遥感技术,具有一定的局限性[24]。如上述研究中利用多时相高精度光学卫星遥感影像对识别西南山区地质灾害,其识别能力仅在灾害形态完整且有明显变形迹象的地质灾害上效果较好,但对于灾害特征要素被严重破坏、变形缓慢且迹象不明显的早期形变特征识别能力较差。星载InSAR探测技术虽然可以识别灾害隐患变形速率,但对于变形速率过快的地质灾害则将导致失相干,且在实际应用过程中往往受到地形、植被、大气等多重因素的制约,识别能力具有一定的局限性。机载LiDAR技术虽然可以解决植被覆盖等问题,但由于其对作业条件、成本等方面的限制,不适合大规模应用于地质灾害早期识别。因此,本文以高速公路规划选线工作为研究切入口,以G4216线新场沟段为典型案例,将高分辨率光学卫星遥感影像、InSAR技术和机载LiDAR技术等多方法相融合,建立了一套针对山区公路脆弱地质环境灾害早期识别、监测、分析、评价一体化

的工作模式,促使公路选线技术从粗放化向精细化转变,为高速公路选线研究提供决策支持。

1 山地灾害探测方法与遥感数据

本文基于高精度光学遥感、干涉图堆叠法技术(stacking-InSAR)、小基线集InSAR(small baseline subsets InSAR,SBAS-InSAR)时序形变探测技术及机载LiDAR技术各自的优势,对研究区地质灾害建立多层次早期识别体系。首先运用高精度光学遥感影像及InSAR技术,对区域内地质灾害进行全面普查,查明灾害点范围及形变区域较大的位置。在此基础上,综合路线规划范围及重要工点布设情况,对影响路线走向较大的高危险区域采用LiDAR技术进行详细探查,并结合SBAS-InSAR的监测数据进行综合分析,最终给出规划路线绕避的安全距离,最大限度地为高速公路选线建设提供技术支持,技术路线图如图1所示。

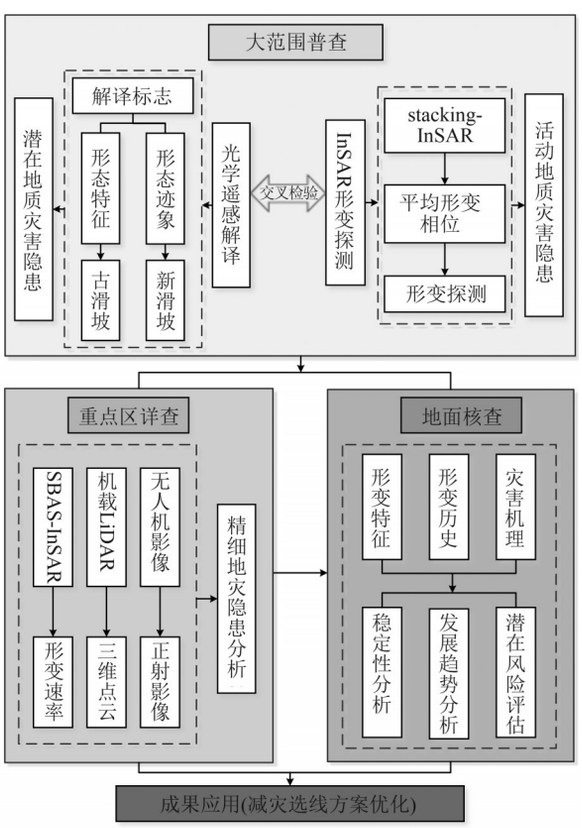


图1 技术路线图

Fig. 1 Technical Flowchart

1.1 高分辨率光学影像解译方法及卫星数据

光学卫星遥感影像因其成像直观、目标几何细节保留清晰、宏观性强等特点,已成为地质灾害调查与监测的重要技术手段之一[24]。早在20世纪中后期,一些中等分辨率的卫星遥感影像(Landsat:30~50 m,SPOT:10~20 m)便被用于地质灾害的识别调查当中[26-29]。随着科学技术的进步,一系列高等级卫星相继发射成功,卫星数量和类型也逐渐丰富起来,影像分辨率的精度也由以前的几十米提高到亚米级别,使地质灾害早期识别逐步走向精细化、专业化的道路[25,30]。光学遥感影像目视解译主要应用于特征相对明显的地质灾害,比如已经发生过或变形迹象相对明显的滑坡、崩塌、泥石流等,如表1所示。对于此类灾害的识别应充分收集精度相对较高的光学遥感影像,以提高识别灾害隐患的准确率。高速公路选线建设应充分考虑解译灾害点的类型、规模、分布情况及活动性等参数,进行综合分析及定性评价,提出线路规划建设的合理化建议。

受遥感数据获取的限制及天气原因等情况,本次目视解译选取了2019-07-12高分二号影像(分辨率1.0 m)为主影像,该影像在研究区质量较好、无云覆盖,满足该区域灾害隐患的识别要求。运用Google Earth三维可视化功能,可使各类地质灾害特征更加清晰地展现出来,增加解译辨识度。

1.2 SBAS-InSAR时序变形探测方法与影像数据

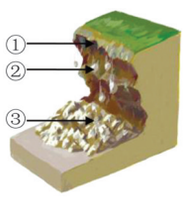
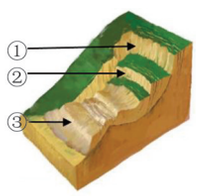
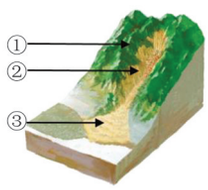
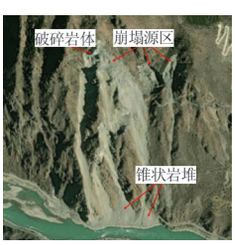
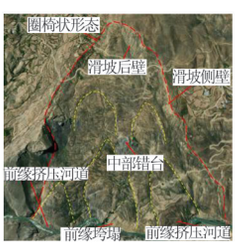
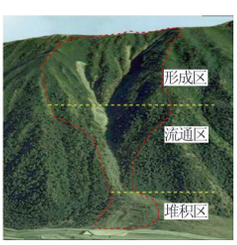
由于传统差分InSAR(differential InSAR,DInSAR)技术易受大气延迟误差、地形误差、时空失相干误差的影响,本文采用时序SBAS-InSAR[31-33]技术开展地质灾害定量监测,其核心思路是选取恰当时空基线阈值内的干涉对进行差分干涉处理及相位解缠,获得低频形变相位、地形误差相位、残差相位。随后利用时空滤波方法分离残差相位中的非线性形变、大气和噪声相位,剔除地形误差、大气延迟误差和噪声,保留低频形变与非线性形变,即可获得误差校正后的形变数据集,最后采用加权最小二乘重建形变时间序列[31]。具体原理及流程是:假设有时间序列为$\boldsymbol{t}=[t_0 t_1 \cdots t_N]^{\mathrm{T}}$共$N+1$景覆盖相同区域的同轨道SAR影像,设定时间空间阈值得到M个干涉对组合,再结合精密轨道数据和外部高精度DEM进行差分干涉处理并解缠后,M幅差分干涉图解缠后的相位计算式为:

$$\Delta\boldsymbol{\varphi}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{\varphi}+\Delta\boldsymbol{\varphi}_{\mathrm{res}} \tag{1}$$

式中,$\Delta\boldsymbol{\varphi}=[\Delta\varphi^1\ \Delta\varphi^2 \cdots \Delta\varphi^M]^{\mathrm{T}}$是各干涉对干涉相位;$\boldsymbol{\varphi}=[\varphi^1\ \varphi^2 \cdots \varphi^N]^{\mathrm{T}}$是其他影像相对于参考影像的时序相位(假设参考影像相位是φ^0);$\Delta\boldsymbol{\varphi}_{\mathrm{res}}=[\Delta\varphi_{\mathrm{res}}{}^1\ \Delta\varphi_{\mathrm{res}}{}^2 \cdots \Delta\varphi_{\mathrm{res}}{}^M]^{\mathrm{T}}$是残差相位;$\boldsymbol{A}$

表 1　山区地质灾害光学遥感解译特征

Table 1　Features of Optical Remote Sensing Interpretation of Geological Hazards in Mountainous Areas

统计项	崩塌	滑坡	泥石流
三维示意图			
地貌解译特征	①崩塌多发育在陡坡或岩体破碎并存在临空面的区域。②崩塌后壁陡峭,表面坎坷不平,具粗糙感,部分后缘可见参差线状崩塌陡坎。③崩塌体通常破碎成碎块堆积于坡脚,形成锥状岩堆。高精度遥感数据甚至可识堆积碎块石的形态与粒径。	①滑坡后壁常呈圈椅状或折线形,并向后凹陷。②滑坡体有明显下错,个别滑坡可见滑坡壁、滑坡台阶、滑坡舌、滑坡鼓丘和封闭洼地等地貌特征,后缘常发育拉张裂隙。③滑坡前缘常见由于隆起形成的鼓张裂隙、垮塌等现象,临河滑坡并伴有挤压河道现象。	①形成区:一般呈瓢形、栎叶形、桃叶形或斗状圈谷,谷坡上有大量松散固体物质,崩塌、滑坡和岩堆等现象。②流通区:常呈瓶颈状或喇叭状,谷坡陡,沟床纵比降大,有时可见到陡坎或台阶。③堆积区:多位于沟口,纵坡平缓,堆积扇多呈扇形或锥形,是泥石流判别的典型标志。
光学遥感影像图			

是 $M\times N$ 个干涉组合方式的设计矩阵,由 1、0、−1组成,−1代表主影像,1代表从影像。加权最小二乘法可用于计算时序干涉相位最优解,计算式如下:

$$\hat{\boldsymbol{\varphi}}=\arg\min\left\|\boldsymbol{W}^{\frac{1}{2}}(\Delta\boldsymbol{\varphi}-\boldsymbol{A}\boldsymbol{\varphi})\right\|_2=(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}\Delta\boldsymbol{\varphi}\tag{2}$$

式中,$\hat{\varphi}$ 是时序干涉相位最优解;$\boldsymbol{W}$ 是 $M\times M$ 个对角加权矩阵,加权方法采用的是 Fisher 信息矩阵[31],其计算式如下:

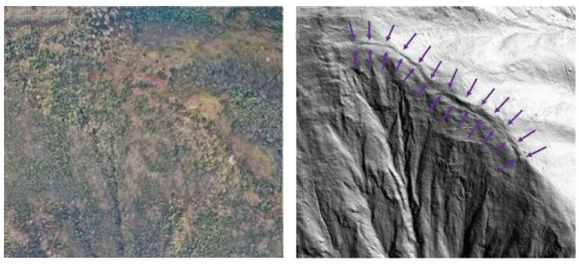
$$\boldsymbol{W}=\mathrm{diag}\left(\frac{2L\gamma^{1^2}}{1-\gamma^{1^2}},\frac{2L\gamma^{2^2}}{1-\gamma^{2^2}},\cdots,\frac{2L\gamma^{M^2}}{1-\gamma^{M^2}}\right)\tag{3}$$

式中,L 为用于计算相干系数的独立多视系数;γ 为空间相干系数[33]。

得到时序干涉相位最优解后,通过对短基线干涉组合构网并进行最小二乘平差解算恢复各相干点的时序形变相位,可采用时间相干性系数 γ_{temp} 进行高质量相干点筛选,以提高监测精度[34];再根据形变速率、累积形变量级、形变区域边界等时空特征定量识别滑坡灾害。本文使用 SBAS-InSAR 时序变形探测方法,针对光学遥感识别出的高速公路线路走向影响较大的重点区域进行监测。雷达影像数据采用 Sentinel-1A 星载 SAR。由于 G4216 线新场沟段左右岸地势陡峭,易受地形起伏影响而出现几何畸变(如阴影、覆盖和透视收缩),因此本文选择 Sentinel-1A 卫星的 49 期升轨数据(2015-11—2019-05)对左岸进行监测,60 期降轨数据(2014-10—2019-06)对右岸进行监测,并进行针对性分析。

1.3　机载 LiDAR 技术与数据处理

机载 LiDAR 集成了全球定位系统(global positioning system,GPS)、惯性测量系统(inertial measurement unit,IMU)、激光扫描仪、数码相机等光谱成像设备,能够实时准确地确定空中激光发射中心空间坐标及姿态参数,然后根据地面目标与发射中心的相对位置关系,通过联合解算得到地面目标的准确大地坐标。LiDAR 技术是测绘行业的一项先进技术,具备强大的测绘能力[35-37]。由于该技术可以穿透地面植被,因此可以去除地表植被的影响,快速高效地获取高精度、高分辨率的地面三维模型。利用 LiDAR 数据生成的 DEM 不仅可以清楚直观地看到植被覆盖下灾害具体的变形特征(如地表裂缝、陡坎、拉陷槽、错台等)(图 2),还可以进行变化前后剖面及方量等的计算,为植被覆盖率高、隐蔽性的山区地质



(a) 光学影像 (b) DEM

图2 研究区内某裂隙(陡坎)

Fig. 2 A Crack (Steep Ridge) in the Study Area

灾害早期识别提供了重要技术手段。

本文采用机载LiDAR技术获取G4216线新场沟段高危险区域的点云数据,通过TerraSolid软件对点云数据进行滤波和分类,获取重点区真实地表点云数据,构建0.5 m分辨率的高精度DEM,对此区域地质灾害进行细部特征识别,确定掩盖于植被之下的各种山体损伤。结合SBAS-InSAR的监测数据进行综合分析,给出隐患点的变形发展规律及最有可能失稳的部位及失稳后的影响范围,从而提出高速公路线路绕避的安全方案,使公路规划建议更加准确合理,对公路早期选线而言具有非常重要的意义。

2 山地灾害多方法早期识别结果及分析

G4216线经过区域构造侵蚀运动强烈,植被茂盛,地质环境复杂,地质灾害十分发育。传统的野外实地调查已经不能满足大范围的地质灾害调查与监测要求。为了查明G4216线新场沟段的地质灾害对高速公路线路走向的影响,此次工作综合利用高分辨率遥感影像、InSAR、LiDAR所获取的数据资料,对G4216线新场沟段地质灾害进行联合调查及形变分析,本文研究区域如图3所示。

高精度遥感影像主要用于对沿线地质灾害进行人工目视解译及定性评价;在此基础上,对高速公路线路走向影响较大的区域,运用SBAS-InSAR技术开展地表形变定量探测,这一方法将有助于获取目标区域的历史形变数据,特别是地质灾害隐患区的形变情况。LiDAR技术主要用于获取目标区的高精度DEM数据,用于形变量较大区域局部变形特征分析。最后,基于光学遥感、InSAR、LiDAR技术所获取的数据成果,进行综合分析,为G4216高速公路线路走向提供依据。

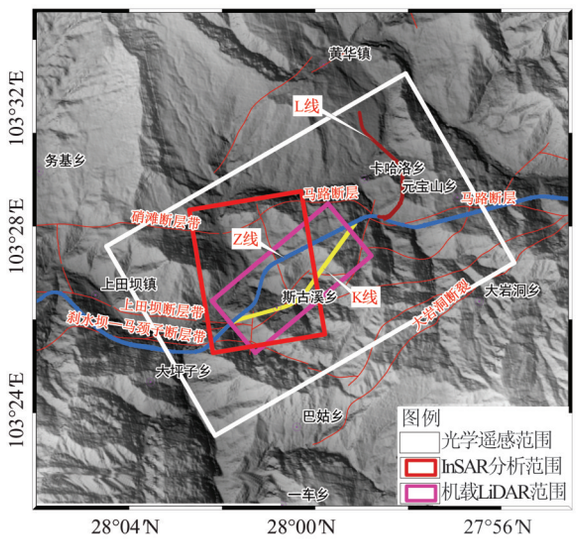


图3 研究区位置图和雷达卫星影像覆盖范围

Fig. 3 Location Map and Radar Satellite Image Coverage of the Study Area

2.1 光学遥感灾害早期识别结果

利用多时相高精度光学遥感影像对G4216高速公路新场沟段进行地质灾害隐患点识别,结果如图4所示,共识别出隐患点40处。在这些隐患点中,11处隐患点对高速公路修建具有不同程度的威胁。由表2可以看出,其中4处泥石流对高速公路有中等影响,7处崩滑体对高速公路影响较大,应予以绕避。因此,针对该高速公路选线重点区域,运用SBAS-InSAR时序变形探测技术进行进一步分析验证。

2.2 SBAS-InSAR灾害隐患探测结果及形变分析

本次监测综合运用了Sentinel-1A升轨和降轨数据,以获得新场沟左右两侧山体的形变速率情况,详见图5和图6。图5为利用SBAS-InSAR技术获得的2014—2019年Sentinel-1A升轨形变数据。由图5可以看出,红色部分的形变量(负值)表示地物沿雷达视线方向远离卫星运动,通常可视为滑坡向下沉降,而蓝色部分的形变量(正值)则代表地物沿雷达视线方向靠近卫星运动,通常可视为地表隆起运动。由于雷达观测几何的限制,采用升轨数据获得了新场沟左侧山体相对完整的监测结果,而采用降轨数据则得到了新场沟右侧山体相对理想的结果。

由图5(a)中升轨累积形变量时空分布图可以看出,监测区的累积形变量在−126~20 mm之间变化,整个区域的形变特征明显,呈集中式分布。图5(b)为年均形变速率分布场,处于−5~5 mm/a形变速率之间的地区形变状态较弱,其他形变量级则表明该处形变状态活跃。A、B、C 3点为选

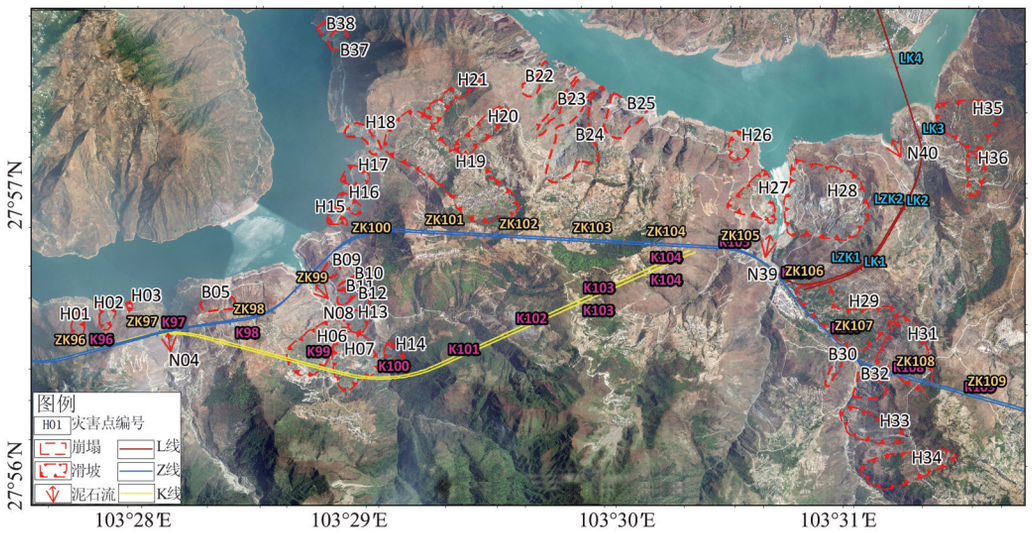


图 4　G4216 高速公路新场沟段地质灾害隐患分布图

Fig. 4　Geological Hazard Distribution Map of Xinchanggou Section of G4216 Expressway

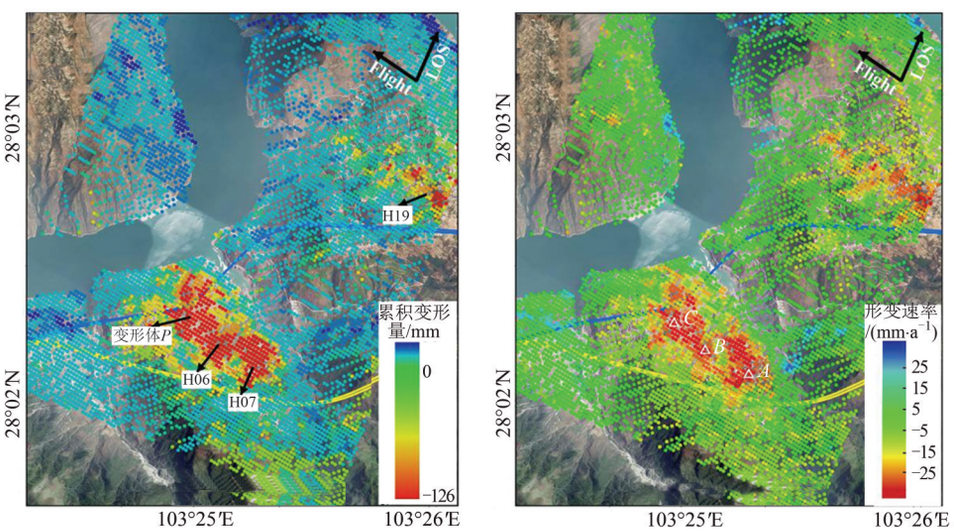
表 2　光学遥感解译出的对高速公路具有威胁性的灾害隐患

Table 2　Potential Disaster Hazards of Expressways Interpreted by Optical Remote Sensing

编号	类型	经度	纬度	长度/m	宽度/m	遥感解译信息
N04	泥石流	103°25′33″E	28°01′45″N			在遥感影像上,流域呈长条状,山体坡度较陡,扇面上可见漫流状沟槽,沟道内松散固体物质丰富,规划线路Z/K线在其流通区通过,有中等影响。
H06	滑坡	103°26′21″E	28°00′54″N	960	470	巨型滑坡体,圈椅状,后缘壁清晰可见,滑坡体表面局部垮塌,规划线路K线从其穿过,有较大影响。
H07	滑坡	103°26′25″E	28°00′37″N	800	690	巨型滑坡体,圈椅状,后缘壁清晰可见,滑坡体表面局部垮塌,规划线路K线从其穿过,有较大影响。
N08	泥石流	103°26′45″E	28°01′01″N			在遥感影像上,流域呈扇形,山体坡度较陡,扇面上可见漫流状沟槽,沟道内松散固体物质丰富,规划线路Z/K线在其流通区通过,有中等影响。
H19	滑坡	103°28′10″E	28°00′41″N	2 050	600	古滑坡堆积体,后缘壁清晰可见,滑坡体前缘局部垮塌,规划线路K线从其后缘穿过,有较大影响。
H29	滑坡	103°28′50″E	27°57′41″N	600	1 000	岩质滑坡,后缘壁清晰可见,滑坡后缘有垮塌迹象,规划线路Z/K线从其前缘穿过,有较大影响。
B30	崩塌	103°28′25″E	27°57′33″N	480	100	遥感影像上,崩塌区地形陡峭,崩塌体表面凹凸不平,崩塌区与背景影像色调差异明显,呈现高亮色调,规划线路Z/K线从其下方穿过,有较大影响。
H31	滑坡	103°28′51″E	27°57′12″N	900	700	岩质滑坡,后缘壁清晰可见,滑坡后缘有垮塌迹象,规划线路Z/K线从其前缘穿过,有较大影响。
B32	崩塌	103°28′24″E	27°57′18″N	400	360	遥感影像上,崩塌区地形陡峭,崩塌体表面凹凸不平,崩塌区与背景影像色调差异明显,呈现高亮色调,规划线路Z/K线从其下方穿过,有较大影响。
N39	泥石流	103°28′53″E	27°58′22″N			在遥感影像上,流域呈扇形,山体坡度较陡,扇面上可见漫流状沟槽,沟道内松散固体物质丰富,规划线路Z/K/L线在其流通区通过,有中等影响。
N40	泥石流	103°30′10″E	27°57′57″N			在遥感影像上,流域呈扇形,山体坡度较陡,扇面上可见漫流状沟槽,沟道内松散固体物质丰富,规划线路L线在其流通区通过,有中等影响。

取的典型特征点,后文会对其形变特征进行详细分析。由图 5(a)可以看出,存在 4 处明显的形变区域,分别对应光学遥感解译的 H06、H07、H19 3 处巨型滑坡隐患及 1 处巨大变形体 P。其中,最大变形量区域为滑坡 H07,该滑坡体中后部形变速率较大,最高可达 −32 mm/a,累积形变量在监测时段末已达到了 −126 mm,中前部区域形变速率较小,形变速率范围在 −20～−10 mm/a 之间变化,这与光学遥感普查的滑坡整体形态有较高的吻合度。形变速率场表明此滑坡体处于较活跃状态,形变速率在 −32～10 mm/a 之间变化。根据图 5 In-SAR 形变监测结果可知,变形体 P 中后部累积形

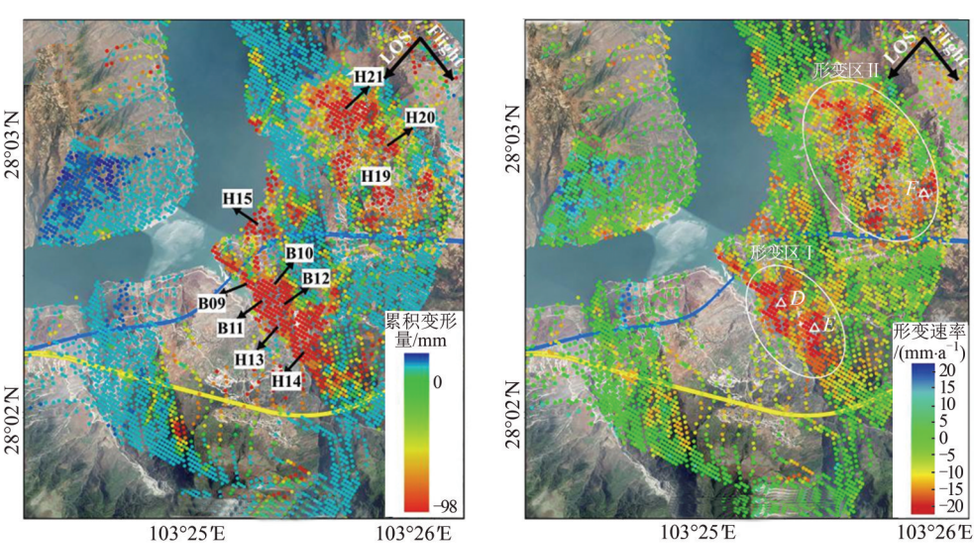
变量及形变速率均较大，前部区域较小，在监测周期末最大累积形变量已达到了－115 mm，最大变形速率为－23 mm/a，坡体整体形变速率在－23～10 mm/a之间变化，且目前处于匀速变形阶段。接下来，笔者将运用机载LiDAR技术对变形体P的详细形变特征进行深入调查分析。同时，结合2015—2019年Sentinel-1A降轨形变监测数据发现（图6），新场沟右岸形变特征明显，主要集中于图6(b)所示形变区Ⅰ及形变区Ⅱ，选取D、E、F 3个典型特征点。根据时序InSAR技术获得的监测时段末累积形变量时空分布图（图6(a)）及图4中光学遥感解译结果，形变区Ⅰ包含7处地质灾害隐患，对应光学遥感解译的B09、B10、B11、B12、H13、H14与H15，该区域累积形变量在－98～20 mm之间变化，整个区域的形变特征明显，未出现孤立的形变跳跃区域。靠近新场沟沟谷前缘区域形变速率较大，最高可达－23.4 mm/a，累积形变量在监测时段末已达到了－98 mm，中后部区域形变速率较小，速率范围在－15～－10 mm/a之间变化。经实地调查发现，该区域内岩体结构破碎，表层存在较厚的松散堆积物，力学性质差，并且由于受到降雨汇流等因素的常年侵蚀，其坡脚被强烈掏蚀，局部发生了垮塌失稳，这与InSAR监测结果相吻合。



(a) Sentinel-1A升轨累积形变量图　　(b) Sentinel-1A升轨年均形变速率图

图5　G4216高速公路新场沟段InSAR升轨形变监测图

Fig. 5　Monitoring Map of InSAR Rising Track Deformation of Xinchanggou Section of G4216 Expressway



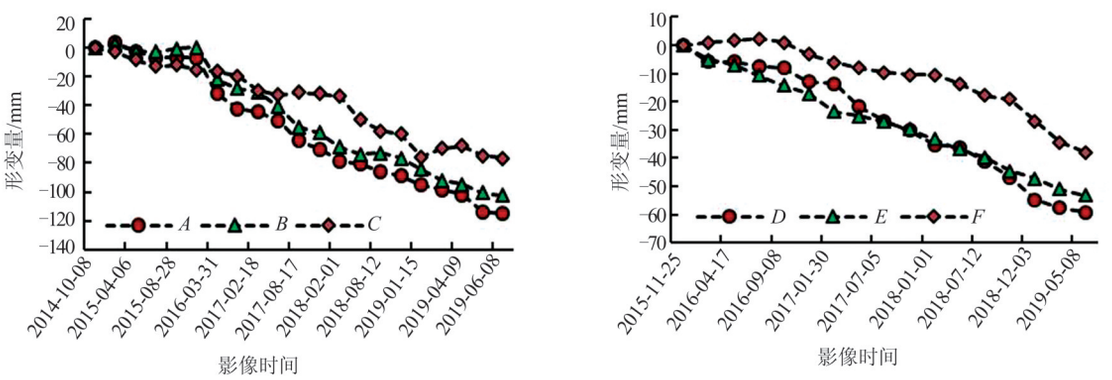
(a) Sentinel-1A降轨累积形变量图　　(b) Sentinel-1A降轨年均形变速率图

图6　G4216高速公路新场沟段InSAR降轨形变监测图

Fig. 6　Monitoring Map of InSAR Descending Track Deformation of Xinchanggou Section of G4216 Expressway

形变区Ⅱ包含3处地质灾害隐患,对应光学遥感解译的H19、H20和H21,该区域形变量最大特征点位于滑坡H21处,该滑坡体中前部形变速率较大,最高可达－22 mm/a,累积形变量在监测时段末达到了－87 mm,后部区域形变速率较小,变形速率在－12 mm/a左右。滑坡H19为一特大型古滑坡堆积体,最大形变速率为－18 mm/ a,累积形变量为－68 mm。滑坡体H20最大形变速率为－17 mm/a,累积形变量为－64 mm。目前3处滑坡均处于缓慢变形阶段。

综合Sentinel-1A升、降轨两种数据的SBAS-InSAR分析结果,研究区共有12处地质灾害隐患存在明显地表形变,其中位于新场沟左右山体的地质灾害对高速公路线路走向及工程建设具有较大影响。图7(a)为2014—2019年Sentinel-1A升轨数据对应的新场沟左岸地面目标点A、B、C的形变速率变化情况趋势图,图7(b)为2015—2019年Sentinel-1A降轨数据对应的新场沟右岸地面目标点D、E、F的形变速率变化情况趋势图。通常情况下,通过地面某些特征点的累积形变趋势可以判断坡体运动情况,是否出现加速变形,从而对坡体的稳定性起到一定的预判作用。由图7可以看出,新场沟左右岸的时序形变趋势几乎是一致的,只是在量级上存在一定差异,整体呈近线性变化,在监测时段内未出现显著的加速变形现象,表明该坡体还处于长期的缓慢变形阶段。在监测时段末最大累积形变A点已达到－126 mm,表明该处坡体的稳定性受到了较大的影响,B、C、D、E、F点的累积形变量分别为－108 mm、－80 mm、－63 mm、－54 mm、－35 mm。由此可见,新场沟左岸形变量大于右岸,说明左岸目前处于较为活跃的蠕滑运动中,需要重点关注。



(a) 新场沟左岸典型特征点形变曲线　　(b) 新场沟右岸典型特征点形变曲线

图7　新场沟地质灾害典型特征点形变曲线图

Fig. 7　Deformation Curves of Typical Characteristic Points of Geological Disasters in Xinchanggou

2.3　LiDAR技术重点区灾害隐患精细化识别结果及分析

为了查明G4216线新场沟段地质灾害细部具体变形状况,从而确定重大地质灾害对线路走向及重要设施工点的影响范围。根据前文利用高分辨率光学遥感影像及通过SBAS-InSAR技术分析的形变速率较大区域,着重对影响高速公路规划较大的变形体P进行机载LiDAR变形特征分析。本次应用机载LiDAR技术,通过多次滤波有效去除植被,对规划公路沿线制作了高精度的DEM,清楚地获取掩盖于植被之下的各种山体损伤和变形特征情况。由图8中可以清楚地看到植被覆盖下的变形体P的整体形态,该变形体长约1 200 m,宽约750 m,体积约1 350万 m^3,主滑方向为75°,为巨型倾倒变形体。变形体上部整体表现出阶梯状地形,坡度在15°～30°,下部较陡,地形坡度40°～60°。坡体上冲沟发育,两侧的自然沟割切很深,中部多处出现坡面具有明显的地形变化,呈撕裂状延展,变形迹象明显,其分布情况如图8所示。由a处与c处在通过滤除植被的机载LiDAR影像观察呈现为下错陡坎,错动距离70～100 cm不等,延伸长度约600～800 m,贯穿于整个坡体,左右侧以冲沟为界;b处裂缝呈撕裂状延展,宽度约80 cm,延伸长度约700 m;d处裂缝位于坡体前缘,整体坡度约45°,呈拉裂状前倾,拉裂宽度约70 cm,长度约700 m,从坡体中部不断向两侧延伸,右侧已贯穿坡体与纵向冲沟相连。这些区域是山区斜坡最易受损的部位,一旦受到强烈扰动,就极易发生地质灾害。因此,它们也是潜在的隐患区域,在高速公路规划及修建过程中,应予以绕避或采取相应的治理措施。

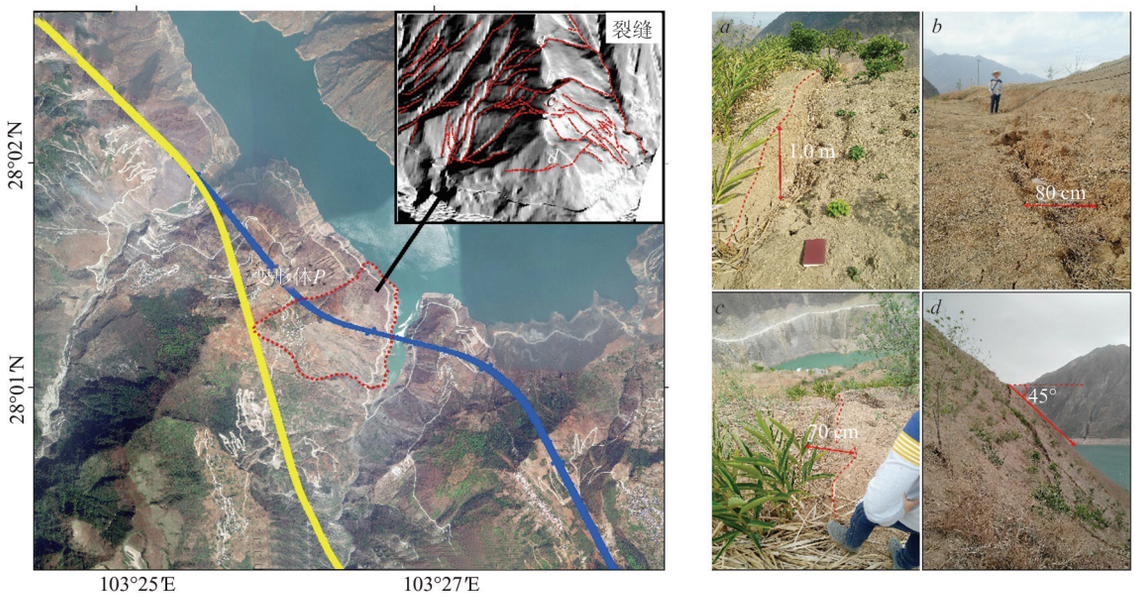


图8 变形体P机载LiDAR解译结果

Fig. 8 Results of Airborne LiDAR Interpretation of Deformable P

3 减灾选线方案优化分析

根据前文对G4216线新场沟段地质灾害的详细解译及综合分析,原规划路线Z线为沿河谷布设地段,地势陡峻,岸坡受溪洛渡水电站蓄水水位的影响,坡体稳定性低,且隧道出口正位于一变形迹象较为明显的巨型变形体中,如图9所示蓝线位置。施工开挖爆破将对其稳定性造成剧烈破坏,诱使斜坡发生新的滑动,这不仅对公路修建影响较大,也对水电站的安全造成严重威胁。而新规划K线,如图9所示黄线位置,在原Z线的基础上进行相应内移,并且以全隧道方案通过此路段,不仅绕开了沿河谷地段,满足高位选线的原则,而且对于地质灾害发育集中的不良地段也进行了相应的安全距离绕避。根据InSAR监测结果显示,此规划K线附近坡体相对稳定,几乎无形变。因此相比于原方案,规划K线方案更合理,此方案也第一时间提交给相关部门和单位。

基于本研究的成果,相关部门已迅速组织专业地质队伍对G4216线新场沟段进行重点勘察,经过实地调查,Z线隧道出口不良地质主要为隧道出口第四系斜坡坡面溯源,该斜坡坡度5°~35°,表层覆盖第四系崩坡积碎石、角砾土,植被较少,水流冲蚀现象明显,呈冲蚀沟槽状,受水流影响,斜坡冲槽局部土体底部冲蚀,形成临时剪出口,受牵引后,斜坡局部多处出现拉裂缝(图8中a、b、c),稳定性较差,最终敲定本文规划K线方案。

多种遥感技术融合调查,不仅大大缩短了外业时间,也使外业工作人员有的放矢,可以更快更准地到达问题部位进行排查。尤其是对高山地区,大多数灾害源处于人迹罕至的部位或无人区,且植被覆盖率高,具有高位、隐蔽性等特点,传统的人工排查已无能为力。因此,综合运用光学遥感解译、InSAR技术、LiDAR技术的各自优势对拟建高速公路沿线进行地质灾害早期识别是非常有必要的。

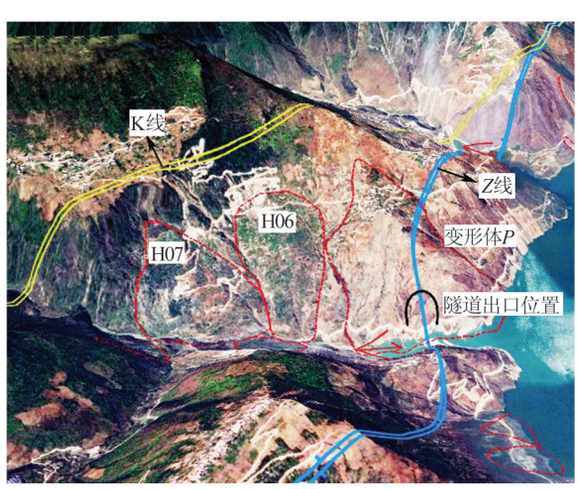


图9 G4216线新场沟段规划线路三维影像示意图

Fig. 9 3D Image Diagram of G4216 Xinchanggou Section

4 结 语

高速公路建设具有点多、线长、面广等特点,对于此类大型工程的地质灾害调查,仅靠传统的人工排查已很难达到预期效果。本文通过综合

应用多重遥感技术致力于解决山区公路规划建设面临的防灾减灾紧迫需求,其中主要专注于探究两个关键问题,即地质灾害隐患点的位置和公路路线的选址。通过深入分析和研究,成功提出精准合理的公路规划建议,为山区公路规划建设提供了强有力的技术支持和专业保障。具体研究结论如下:

1)利用多时相高精度光学遥感影像,通过地形地貌和光谱特性可识别出绝大多数地质灾害,它们在受到外界强烈扰动后,可能会再次复发,对公路修建造成较大影响。因此,利用多时相高精度光学遥感影像可以清楚掌握地质灾害发育规律,判断灾害规模及危险性的大小,对高速公路选址等具有重要的指导意义。但是,光学遥感影像也存在一定的缺陷,首先,影像可能会受到天气或山体阴影区域的影响,而无法获取有效数据。其次,光学遥感影像对于地质灾害的识别也存在一定的局限性,只对特定形态的地质灾害识别能力较好,故不能完全识别一些潜在危险源,对高速公路等大型工程的规划、避灾减灾略显不足。

2)InSAR时序变形探测技术具有全天候、全天时、范围广等特点,很适合对大范围地区进行灾害普查,尤其是对灾害特征要素不完整,地表变形迹象不明显的地质灾害非常有效,是识别和发现此类灾害隐患的主要技术手段。但InSAR技术由于自身原理的局限性,不能全部生成有效干涉,探查区域也不能全范围覆盖,并且对未发生变形的地质灾害不具有识别能力。另外,对地形起伏大及植被茂盛的地区,容易导致失相干现象,不能对地质灾害隐患进行有效探测。因此,需要多源遥感数据相结合,升降轨数据相匹配,进行融合分析识别。

3)利用机载LiDAR技术,对影响高速公路线路规划及重要工点的重大地质灾害隐患进行详细探查,可有效弥补光学遥感及InSAR技术探测的不足。应用LiDAR技术可穿透地面植被,去除地表植被的影响,能够直接获取高分辨率、高精度DEM。利用生成的高精度数字地面模型可以清楚直观地看到植被覆盖下灾害具体的变形特征(如地表裂缝、拉陷槽、错台、滑坡壁等),这些都是最容易发生地质灾害的潜在隐患区,对高速公路的修建具有极大的威胁性。但由于机载LiDAR受到诸多条件的限制,现阶段也不适合对地质灾害进行大范围探查,因此,对于高速公路这类大型工程,需与其他遥感数据相融合,充分发挥不同数据源,不同平台下遥感数据的优势和能力,以提高工程建设防灾减灾的能力。

4)应用高精度光学遥感、InSAR、LiDAR等现代遥感技术相互融合,互补验证,可以最大限度地发现地质灾害隐患,减少外业排查工作量及工作时间,为G4216高速公路新场沟段的选线工作提供了重要决策依据。并探索性地建立了一套针对山区公路脆弱地质环境灾害早期识别、监测、分析、评价一体化的工作模式,促使高速公路选线技术从粗放化向精细化转变,为山地灾害易发区高速公路规划选线提供了新的技术手段。

参　考　文　献

[1] 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 Qiang. 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.

[2] SUN Q, ZHANG L, DING X L, et al. Slope Deformation Prior to Zhouqu, China Landslide from InSAR Time Series Analysis[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 156: 45-57.

[3] DAI K R, LI Z H, TOMÁS R, et al. Monitoring Activity at the Daguangbao Mega-Landslide (China) Using Sentinel-1 TOPS Time Series Interferometry[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 186: 501-513.

[4] ZHANG Y, MENG X M, CHEN G, et al. Detection of Geohazards in the Bailong River Basin Using Synthetic Aperture Radar Interferometry[J]. *Landslides*, 2016, 13(5): 1273-1284.

[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 Qiang, LI Weile, DONG Xiujun, 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] INTRIERI E, RASPINI F, FUMAGALLI A, et al. The Maoxian Landslide as Seen from Space: Detecting Precursors of Failure with Sentinel-1 Data[J]. *Landslides*, 2018, 15(1): 123-133.

[7] DONG J, LIAO M S, XU Q, et al. Detection and Displacement Characterization of Landslides Using Multi-Temporal Satellite SAR Interferometry: A

Case Study of Danba County in the Dadu River Basin [J]. *Engineering Geology*, 2018, 240: 95-109.

[8] 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 Huiyan, LI Weile, XU Qiang, 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.

[9] 李为乐,许强,陆会燕,等. 大型岩质滑坡形变历史回溯及其启示[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 1043-1053.
LI Weile, XU Qiang, LU Huiyan, et al. Tracking the Deformation History of Large-Scale Rocky Landslides and Its Enlightenment [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 1043-1053.

[10] DONG J, LIAO M S, XU Q, et al. Detection and Displacement Characterization of Landslides Using Multi-temporal Satellite SAR Interferometry: A Case Study of Danba County in the Dadu River Basin [J]. *Engineering Geology*, 2018, 240: 95-109.

[11] XIE M W, HUANG J X, WANG L W, et al. Early Landslide Detection Based on D-InSAR Technique at the Wudongde Hydropower Reservoir[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(8): 717.

[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 Lu, LIAO Mingsheng, DONG Jie, et al. Early Dectection of Landslide Hazards in Mountainous Areas of West China Using Time Series SAR Inter-ferometry—A Case Study of Danba, Sichuan [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*,2018,43(12):2039-2049.

[13] 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 Mingsheng, ZHANG Lu, SHI Xuguo, et al. Remote Sensing Monitoring Method and Practice of Landslide Deformation Radar[M]. Beijing: Science Press, 2017.

[14] 李显巨. 基于LiDAR技术的复杂地质环境区滑坡识别研究[D]. 武汉:中国地质大学(武汉), 2012.
LI Xianju. Study on Landslide Identification in Complex Geological Environment Area Based on LiDAR Technology[D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan), 2012.

[15] BOOTH A M, ROERING J J, PERRON J T. Automated Landslide Mapping Using Spectral Analysis and High-Resolution Topographic Data: Puget Sound Lowlands, Washington, and Portland Hills, Oregon [J]. *Geomorphology*, 2009, 109(3/4): 132-147.

[16] CATANI F, CASAGLI N, ERMINI L, et al. Landslide Hazard and Risk Mapping at Catchment Scale in the Arno River Basin [J]. *Landslides*, 2005, 2(4): 329-342.

[17] GLENN N F, STREUTKER D R, CHADWICK D J, et al. Analysis of LiDAR-Derived Topographic Information for Characterizing and Differentiating Landslide Morphology and Activity [J]. *Geomorphology*, 2006, 73(1/2): 131-148.

[18] HANEBERG W C, COLE W F, KASALI G. High-Resolution LiDAR-Based Landslide Hazard Mapping and Modeling, UCSF Parnassus Campus, San Francisco, USA [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2009, 68(2): 263-276.

[19] KASAI M, IKEDA M, ASAHINA T, et al. LiDAR-Derived DEM Evaluation of Deep-Seated Landslides in a Steep and Rocky Region of Japan [J]. *Geomorphology*, 2009, 113(1/2): 57-69.

[20] MCKEAN J, ROERING J. Objective Landslide Detection and Surface Morphology Mapping Using High-Resolution Airborne Laser Altimetry[J]. *Geomorphology*, 2004, 57(3/4): 331-351.

[21] METTERNICHT G, HURNI L, GOGU R. Remote Sensing of Landslides: An Analysis of the Potential Contribution to Geo-Spatial Systems for Hazard Assessment in Mountainous Environments [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 98(2/3): 284-303.

[22] SCHULZ W H. Landslide Susceptibility Revealed by LiDAR Imagery and Historical Records, Seattle, Washington [J]. *Engineering Geology*, 2007, 89(1/2): 67-87.

[23] VANDEN E M, POESEN J, VERSTRAETEN G, et al. Use of LiDAR-Derived Images for Mapping Old Landslides Under Forest [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007, 32(5): 754-769.

[24] 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 Qiang, DONG Xiujun, LI Weile. 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.

[25] 卓宝熙. 工程地质遥感判释与应用[M]. 2版. 北京: 中国铁道出版社, 2011.
ZHUO Baoxi. Remote Sensing Interpretation & Application of Geology Engineering[M]. 2nd ed. Beijing: China Railway Publishing House, 2011.

[26] GAGON H. Remote Sensing of Landslides Hazards on Quick Clays of Eastern Canada[C]//The 10th International Symposium of Remote Sensing of Enviroment, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, USA, 1975.

[27] MCDONALD H C, GRUBBS R S. Landsat Imagery Analysis: An Aid for Predicting Landslide Prone Areas for Highway Construction [C]//NASA EarthResource Symposium, Houston, Texas, USA, 1975.

[28] SAUCHYN D J, TRENCH N R. Landsat Applied to Landslide Mapping[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1978, 44 (6): 735-741.

[29] STEPHENS P R. Use of Satellite Data to Map Landslide[C]//The 9th Asian Conference on Remote Sensing, Bangkok, Thailand, 1988.

[30] NICHOL J E, SHAKER A, WONG M S. Application of High-Resolution Stereo Satellite Images to Detailed Landslide Hazard Assessment[J]. *Geomorphology*, 2006, 76(1/2): 68-75.

[31] 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.

[32] ZHANG Y J, FATTAHI H, AMELUNG F. Small Baseline InSAR Time Series Analysis: Unwrapping Error Correction and Noise Reduction[J]. *Computers & Geosciences*, 2019, 133: 104331.

[33] 刘国祥, 陈强, 罗小军, 等. InSAR原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
LIU Guoxiang, CHEN Qiang, LUO Xiaojun, et al. Principle and Application of InSAR[M]. Beijing: Science Press, 2019.

[34] 朱建军,李志伟,胡俊. InSAR 变形监测方法与研究进展[J]. 测绘学报,2017,46 (10): 1717-1733.
ZHU Jianjun, LI Zhiwei, HU Jun. Research Progress and Methods of InSAR for Deformation Monitoring[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017,46(10):1717-1733.

[35] 董秀军, 邓博, 袁飞云, 等. 航空遥感在地质灾害领域的应用: 现状与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(12): 1897-1913.
DONG Xiujun, DENG Bo, YUAN Feiyun, et al. Application of Aerial Remote Sensing in Geological Hazards: Current Situation and Prospects[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(12): 1897-1913.

[36] LI X J, CHENG X W, CHEN W T, et al. Identification of Forested Landslides Using LiDAR Data, Object-Based Image Analysis, and Machine Learning Algorithms [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7 (8): 9705-9726.

[37] GORUM T. Landslide Recognition and Mapping in a Mixed Forest Environment from Airborne LiDAR Data[J]. *Engineering Geology*, 2019, 258: 105155.