

铁路地质灾害早期识别与监测预警技术及应用研究

孙琪皓, 刘桂卫, 王 飞, 张璇钰, 王衍汇

(中国铁路设计集团有限公司, 天津 300143)

摘 要: 地质灾害隐患是我国山区铁路运输安全面临的巨大威胁, 及早发现、诊断和处置灾害隐患对于铁路安全风险防范具有重要意义。为满足隐患精细化防治需求, 系统归纳总结了我国山区运营铁路普遍存在的地质灾害隐患类型及特征, 通过将灾害筛查、危险性评估与监测预警技术有机结合与融合应用, 提出了基于天空地多源遥感和人工智能的铁路地质灾害早期识别与监测预警技术路线。研究表明: (1) 我国山区铁路的地质灾害隐患主要表现出高位陡坡多、隐蔽性和潜伏性强、受工程扰动影响大、远程链式致灾和缓变型隐患分布广泛 5 种突出特征; (2) 联合采用卫星遥感、InSAR、机载 LIDAR 和无人机遥感技术, 实现了不同类型灾害隐患的精细化识别, 形成了多层次立体化的铁路沿线隐患筛查技术方法; (3) 融合应用机器学习、图像识别及变化检测等人工智能方法, 提出了铁路沿线灾害危险性评估与监测预警技术路线, 并通过工程应用验证了技术方案的有效性; (4) 结合铁路工程特点, 提出了以“区域-区段-工点”为主线的铁路地质灾害三级防控策略, 构建了适用于铁路运维的地质灾害早期识别与监测预警技术体系。

关键词: 铁路; 地质灾害; 早期识别; 隐患筛查; 危险性评估; 监测预警

中图分类号: U212.22; U213 **文献标识码:** A **DOI:** 10.13238/j.issn.1004-2954.202302100005

Research and Application of Early Identification, Monitoring and Warning Technology of Railway Geological Disasters

SUN Qihao, LIU Guiwei, WANG Fei, ZHANG Xuanyu, WANG Yanhui

(China Railway Design Corporation, Tianjin 300143, China)

Abstract: Geological hazards pose a significant threat to the safety of railway transportation in China's mountainous regions, making early detection, diagnosis, and mitigation of these risks essential for ensuring railway safety. In order to meet the demand for advanced hazard prevention and control, this study systematically summarized the common types and characteristics of geological hazards found along mountainous railways in China. By integrating disaster screening, hazard assessment, monitoring and early warning technologies, a technical route for the early identification, monitoring, and early warning of railway geological hazards, based on air-ground multi-source remote sensing and artificial intelligence, was proposed. The study revealed that: (1) Geological hazards in China's mountainous railways mainly exhibit five prominent characteristics: numerous high, steep slopes, strong concealment and latency, high susceptibility to engineering disturbances, remote chain-triggered disasters and widespread slow-evolving hazards; (2) The joint use of satellite remote sensing, InSAR, airborne LIDAR and UAV remote sensing technologies enables detailed identification of different hazard types, forming a multi-tiered and comprehensive hazard screening method along railway lines; (3) By integrating artificial intelligence methods such as machine learning, image recognition and change detection, a technical route for hazard

assessment, monitoring, and early warning along railway lines was developed, and its effectiveness was verified through engineering applications; (4) Based on the characteristics of railway engineering, a three-level prevention and control

收稿日期: 2023-02-10; 修回日期: 2023-03-06; 网络首发日期: 2023-05-23

基金项目: 中国铁路设计集团科技开发重点课题(2020YY241013, 2021A240403, 2021A240408, 2022A02264005)

作者简介: 孙琪皓(1993—), 男, 工程师, 2021年毕业于中国科学院地质与地球物理研究所地质工程专业, 工学博士, 主要从事铁路地质勘察与地质灾害防治工作, E-mail: sqhqqyx@163.com。

strategy for railway geological hazards-centered on “region-section-worksite”-was proposed, and a technical system for early identification, monitoring, and early warning of geological hazards suitable for railway operations and maintenance was established.

Key words: railway; geological disasters; early identification; hidden dangers screening; risk assessment; monitoring and early warning

引言

山区铁路沿线地形地质条件复杂,崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害多发,尤其是在强降雨等外部作用影响时,屡屡酿成铁路交通事故,已经成为铁路运维部门所面临的最棘手难题。面对隐蔽性强、分布范围广且趋于动态变化的地质灾害隐患,常规调查手段很难提早发现和防范潜在风险。近年来,随着传感器技术和数据处理算法的发展,综合利用卫星光学、雷达、无人机摄影测量等遥感技术逐渐成为地质灾害隐患探查的有效手段,基于多学科交叉融合和多技术综合应用,相关学者在地质灾害早期识别、风险评价及监测预警等方面开展了大量研究^[1],提出了以“三形”(形态、形变、形势)为观测内容的“三查”(普查、详查、核查)技术体系^[2]。本文在总结归纳文献成果的基础上,结合铁路灾害防治实践经验,构建了适用于铁路运维的地质灾害早期识别与监测预警技术体系,为铁路地质灾害隐患的主动防范和科学处置提供技术支撑。

1 我国铁路地质灾害隐患特征及防控现状

铁路地质灾害隐患主要指铁路沿线可能造成重大人员伤亡或经济损失的滑坡、崩塌、泥石流等潜在地质灾害,在我国主要分布于西南、西北、东南、华中和华北山区等地^[3]。随着近年来山区铁路运营里程的增加,叠加地震、强降雨等极端条件的不利影响,铁路地质灾害呈现高发态势,造成多起重大安全事故^[4]。

虽然在前期勘察阶段已主动绕避或工程处置了可能对线路具有影响的潜在灾害,但由于环境变量的长期作用、人类活动的扰动影响以及受限于建设期的勘察技术水平,仍然存在较多未被发现的灾害隐患,时刻威胁着行车安全。在既有铁路开展灾害筛查的实践结果表明,山区铁路沿线的地质灾害隐患主要存在以下几种突出特征。

(1) 高位陡坡多

在山高坡陡的区域(图1),尤其是峡谷地带,高位灾害隐患突出,人员往往难以到达现场,传统勘察方式调查难度大,且存在工作盲区,很难判定隐患风险程度,一旦隐患成灾则具有规模大、能量高等特点,主要类型包括高位崩塌、高位滑坡等。



图1 铁路沿线的高陡边坡

Fig. 1 High-steep slope along railway

(2) 隐蔽性和潜伏性强

地表很难观察到的灾害隐患,大范围发育于茂密植被覆盖的山区(图2),受植被阻碍,人不能至,依靠光学遥感无法获取坡体形态、结构及变形趋势,是铁路沿线最难以预测的“定时炸弹”。此外,隐蔽型灾害还包括一些致灾机制未被查清的深层灾害,如隐伏断层诱发的深层滑坡等。

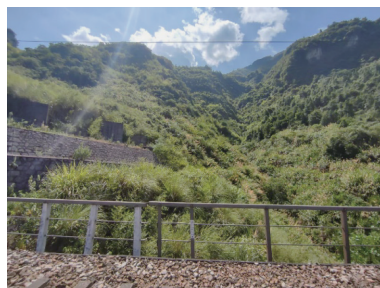


图2 茂密植被覆盖的斜坡

Fig. 2 A slope covered with dense vegetation

(3) 受工程扰动影响大

修建山区铁路会不可避免地造就大量高路堤边坡和高路堑边坡(图3),在受到雨水、风力和气候交替变化等因素的长期影响后,边坡性质逐渐劣化,极易发生工程扰动与地震、降雨等外动力因素耦合作用下的浅层边坡失稳现象,是铁路沿线最常见的灾害类型之一,多表现为路基边坡的滑塌、溜坍等。

(4) 远程链式致灾

从铁路保护区范围外侵入的远程、高速、高势能灾害,多是在强烈的外动力因素下产生的崩-滑-流复合型地质灾害,主要表现为高速远程滑坡、碎屑流和泥石流等(图4),在久旱久雨、极端暴雨和地震等极端条件



图 3 路基开挖形成的边坡

Fig. 3 A slope formed by subgrade excavation

下较易出现。



图 4 冰川消融引起的泥石流

Fig. 4 Debris flow caused by glacier melt

(5) 缓变型隐患分布广泛

有些边坡宏观上没有明显的变形破裂迹象和灾害前兆,但在较长时间内均处于缓慢变形状态,这种边坡在稳定变形阶段对铁路安全尚不具有威胁,但在强烈外力作用下较易产生加速变形,导致快速失稳。

针对既有铁路地质灾害隐患,铁路运维管理部门当前仍然以人工巡检为主要防控手段^[5],在个别重要隐患工点采用单点式监测设备开展变形监测^[6],雨季则根据雨量报警采取大范围加密巡检和长时间定点蹲

守的防控策略(图 5),总体防灾效率不高,面临的“保安全”压力很大^[7]。



图 5 铁路防洪看守点

Fig. 5 Railway flood monitoring post

2 铁路地质灾害早期识别与监测预警技术体系

面向铁路地质灾害风险防范需求,聚焦艰险山区高位、隐蔽、多发性灾害动态识别评价和监测预警技术难题^[8-10],本文提出天空地多源遥感协同的铁路地质灾害早期识别与监测预警技术体系^[11-12](图 6)。该技术体系以“区域-区段-工点”的三级防控策略为主线,从“天、空、地”三个维度层层递进,实现了铁路沿线灾害筛查、危险性评估和监测预警的有机结合^[13-14]。

展开来讲,首先采用三维卫星遥感技术实现铁路廊道广域范围灾害隐患普查;然后借助 InSAR 技术对具有微小变形的缓变型灾害隐患开展大范围排查;进而依托机载高性能 LIDAR,提取茂密植被覆盖区段灾害隐患的详细信息;最后针对威胁重要工点的高陡边坡,采用无人机摄影测量技术构建高精度实景三维模

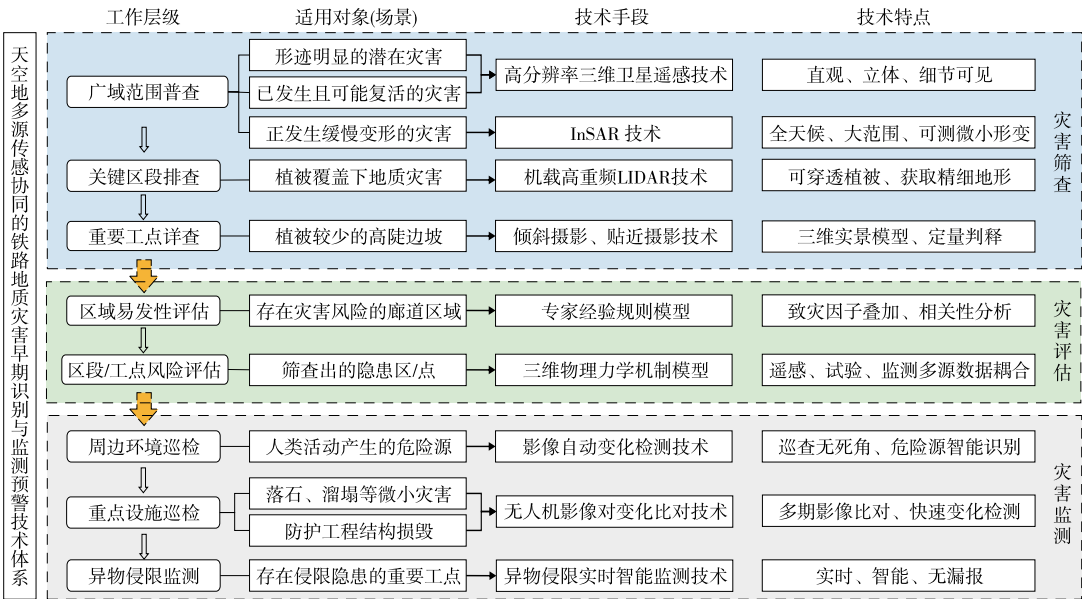


图 6 铁路地质灾害早期识别与监测预警技术体系

Fig. 6 Technical system for early identification, monitoring, and warning of railway geological disasters

型,实现灾情定量评估和精准判释。

在查明灾害隐患后,需甄别其危险程度,以采取合理的防控手段。在进行区域灾害易发性评价的基础上,采用确定性模型对重要隐患点进行风险精细诊断,定量评估其危险程度和未来发展趋势,并基于诊断结果给出防治建议。

在明确隐患风险程度的基础上,开展多层次多维度的铁路地质灾害监测预警。首先针对人类活动密集的危害易发区域,采用基于卫星或无人机影像的巡检技术代替传统人工巡检,自动提取区域内可能会诱发灾害的危险源;然后采用基于多期无人机影像的变化检测技术,及时发现重要工点边坡变形破坏及构筑物损毁迹象;最后,在诊断出的高风险隐患处应用异物侵入监测系统,实现上道异物的实时智能监测。

3 铁路地质灾害隐患精细筛查技术

3.1 基于高分辨率三维卫星遥感的广域灾害普查

随着卫星遥感不断朝着高分辨率方向发展,基于图像处理和虚拟现实的高分辨率三维遥感技术逐渐成为广域地质灾害普查的重要技术手段。

通过遥感图像处理、DEM 构建、空间位置配准、纹理映射和三维渲染等关键技术流程(图 7),建立铁路三维遥感广域空间场景,可以直观、立体地再现沿线边坡的空间特征和几何要素。基于“圈椅状”“双沟同源”等典型灾害特征标志,能够从宏观上对铁路地质灾害进行多视角综合判释,实现大范围灾害筛查。在太焦铁路地质灾害筛查工作中(图 8),利用三维遥感技术在全线成功识别危岩体 17 处,滑坡 27 处,有效提高了灾害判识效率。

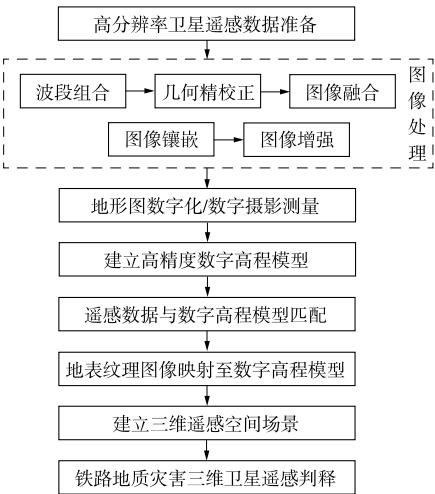


图 7 三维遥感灾害普查流程

Fig.7 3D remote sensing disaster survey process



图 8 某滑坡三维遥感判释结果

Fig. 8 3D remote sensing interpretation result of a landslide

3.2 基于 InSAR 的缓变型灾害识别

很多边坡在失稳之前会经历漫长的缓慢变形阶段,宏观上通常较难发现明显的灾害前兆或迹象,但在地震或强降雨等外力作用下又能迅速失稳。常规的光学遥感手段对此类灾害隐患“束手无策”。基于差分干涉原理的 InSAR(合成孔径雷达干涉测量)技术,提供了一种快速获取高精度地表形变信息的技术手段。利用差分监测(D-InSAR)、时序监测(PS-InSAR、SBAS-InSAR)、多时相监测(MT-InSAR)或偏移量追踪方法(Offset-InSAR),通过大范围连续跟踪地表形变,能够实现区域尺度内缓变型地质灾害隐患的早期识别。

3.3 基于高重频雷达的隐蔽性灾害筛查

在茂密植被覆盖的山区,利用光学遥感手段很难探查植被覆盖下的灾害隐患。而机载激光雷达具有较强的穿透探测能力,基于高重频雷达主动发射的高能脉冲信号,能够有效“穿透”地表植被,提取地表灾害三维精细化形态和微地貌结构信息,暴露出植被下灾害。采用图 9 所示的技术流程,在焦柳铁路沿线开展了密林区灾害隐患排查工作,在汛期来临前成功筛查

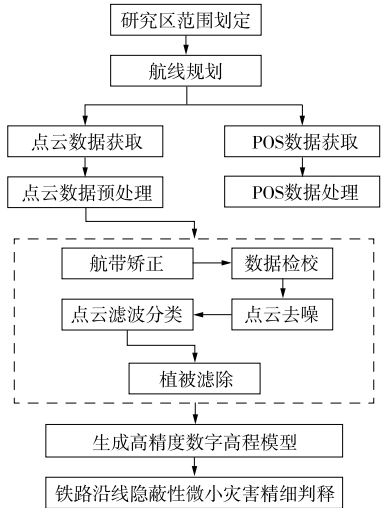


图 9 基于 LIDAR 的灾害判释流程

Fig.9 LIDAR-based hazard interpretation process

出滑坡、泥石流等灾害 30 余处(图 10),大幅减轻了汛期防灾压力。

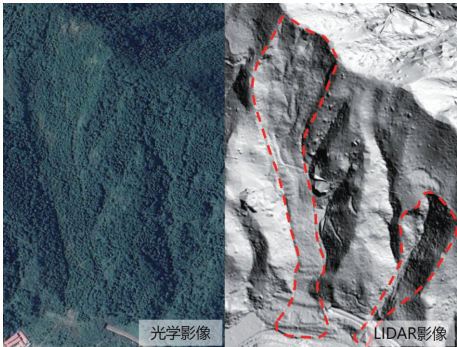


图 10 泥石流灾害判释结果

Fig. 10 Interpretation results of debris flow hazards

3.4 基于无人机实景三维模型的灾害详查

高山峡谷地区常发育有高陡边坡,调查人员无法到达现场,常规手段很难获取隐患的详细信息,往往对铁路站场、隧道口等重要工点构成潜在威胁。无人机精细测量技术为此类隐患的精细调查提供了新的手段。采用无人机倾斜摄影、仿地飞行和贴近摄影相结合的方式,快速获取隐患点的高分辨率影像,借助三维建模软件完成实景模型的精细化重构,可以实现高陡边坡的可视化详察和结构面产状等参数的非接触量测。在某铁路边坡勘察时,采用图 11 所示的技术流程构建了三维实景模型(图 12),为灾害风险的综合评估提供了量化参数^[15]。

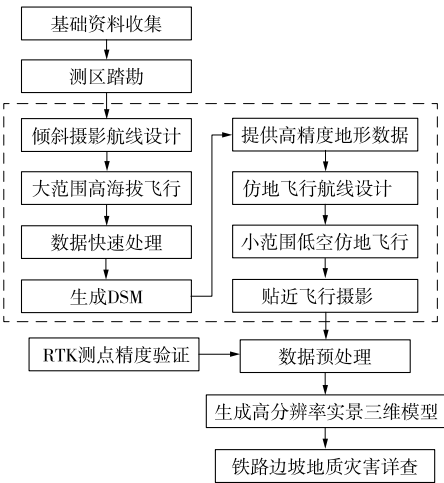


图 11 无人机实景三维建模流程

Fig. 11 UAV-based real-time 3D modeling process

4 铁路地质灾害隐患评估与趋势预测技术

在对铁路地质灾害隐患进行筛查识别后,需要对其稳定状态进行诊断评估,以明确其风险大小和发展趋势,为进一步开展主动防护或工程处置提供决策依



图 12 危岩体三维实景模型

Fig. 12 3D real-world model of dangerous rock mass

据^[16-17]。通过开展全线范围的灾害易发性分区,将灾害高易发区间确定为运维部门的重点防御地段,并对其进行常态化的危险源监测;针对重要灾害隐患点,开展基于多源数据和确定性模型的危险性动态预测,分析其失稳条件和失稳概率,为隐患风险的精细化管理提供基础支撑^[18]。

4.1 地质灾害易发性评价

铁路地质灾害易发性评价是基于区域地质环境背景因素,对未来铁路保护区范围内发生地质灾害的倾向性进行的分析和预测,主要包括查明沿线灾害分布特征、易发条件和易发性分区等^[19]。当前,地质灾害易发性评价方法总体上可归纳为基于专家经验的半定量方法和基于统计数据的定量方法。专家经验方法的步骤通常为首先选取典型的致灾因子,并基于经验知识确定不同因子对灾害发生的贡献权重,利用因子叠加分析实现易发性综合评价,这种分析方法对专家的主观认识和经验水平依赖较大。数据驱动方法则是以数据为基础,通过量化已发生灾害与影响因素之间的相关性构建统计模型,基于历史数据进行回归分析和预测,这种方法相对来说较为客观,尤其是近年来兴起的机器学习算法模型,能够较好地表达要素之间的非线性关系,在灾害数据样本充足的条件下能够实现较高的评价精度^[20]。

开展铁路地质灾害易发性评价应联合采用两种方法,在系统研究沿线地质灾害成因机理和致灾模式的基础上,深度分析和挖掘多源数据,通过数据与机理之间的深层映射关系构建更加可靠的评价模型,实现更加准确的灾害易发性评价,助力运维部门明确防御重点区间,提高防灾效率。

4.2 灾害隐患点危险性评估与趋势预测

铁路地质灾害危险性评估是对铁路沿线潜在地质灾害发生时间和地点的概率进行的动态预测,常用方法包括指标体系方法、统计学方法和确定性模型方法等。其中,确定性模型方法能够考虑边坡物质组成、力学结构、致灾因子及其相互作用机理,基于斜坡变形失

稳的力学原理实现多物理场的耦合计算,较适用于小面积区域灾害的精细化评估。目前,应用较多的确定性模型主要包括基于极限平衡理论的 SHALSTAB 模型、TRIGRS 模型、SCOOPS3D 模型等^[21]。这类模型主要通过将高分辨率的 DEM 数据与瞬态或稳态水文模型相耦合,实现降雨或地震等工况下的斜坡危险性定量评价。在铁路重要灾害隐患点开展危险性评估,首先需要获取详细的地理、地质空间调查数据,根据研究区地质条件选用合适的力学模型,并采用合理的模型参数,计算出失稳条件和失稳概率,从而实现较为准确的危险性评价和发展趋势预测,为隐患风险的精细化管理提供科学依据。

5 铁路地质灾害隐患监测预警技术

在开展灾害评估的基础上,开展“区段-工点”多层次地质灾害监测预警。

5.1 基于人工智能的外部环境危险源自动感知

铁路保护区范围内因开挖、堆载等人类活动引起的环境变化,可能会带来新的危险源,从而导致边坡溜塌、挡墙倾倒等次生灾害发生。因此,在灾害易高发和人类活动密集的区段开展常态化巡检,是确保运营环境安全的必要工作。当前,铁路危险源巡检仍采用人工方式,执行周期长,且存在巡检盲区。采用基于高分辨率卫星或无人机遥感的巡检技术,能够克服人工作业范围受限、受环境影响大等缺陷,基于多时序影像可以实现环境信息的周期性获取^[22]。以初期影像为底版,将两期数据精确配准后,采用背景差分法进行自动变化检测,提取影像变化特征,并基于地物样本库和 AI 算法实现危险源的智能化辨识。图 13 为基于无人机影像的坡脚开挖智能检测结果^[23-24]。



图 13 坡脚开挖智能检测结果

Fig. 13 Intelligent detection results of slope toe excavation

5.2 基于多期影像比对的重要工点变化检测

筛查诊断出的重要隐患点以及桥梁、隧道口等重要工点,是铁路雨季防灾工作的重点。当前,铁路局多采用加密巡视、定点蹲守等防守方式,作业效率低。虽然无人机已被应用于铁路巡检,但由于影像数据量大,且难以准确获取相同位置和视角下的多期影像,导致

作用发挥有限。为更好地利用无人机开展巡检工作,开发了危险源图像变化检测系统,实现了多期照片与三维精细地形以及多期照片之间的联动比对(图 14),极大地释放了无人机巡检技术潜力。利用自主研发的影像对比识别系统(图 15)实现了边坡及构筑物变化信息的快速识别。

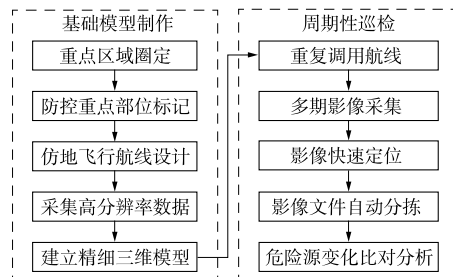


图 14 重要工点变化检测流程

Fig. 14 Change detection procedures for critical sites



图 15 多期影像快速对比系统

Fig. 15 Rapid comparison system for multi-phase images

5.3 基于智能视频的异物侵限智能监测预警

地质灾害对铁路安全最直接的危害方式就是异物侵限,一处体积不大的侵限异物就可能造成极为严重的后果。由于灾害的随机性、突发性和分散性,异物入侵到铁路限界内无法通过上述的技术手段及时发现,因此仍然需要在重要隐患点进行侵限实时监测,作为行车安全的“最后一道防线”^[25]。将 AI 技术与影像变化监测技术相结合,研发了基于图像视觉的异物侵限智能监测系统,利用大量侵限试验的样本数据,实现了铁路沿线异物侵限事件的实时监测、准确定位和快速预警。图 16 为在焦柳铁路某段开展的异物侵限监测夜间测试结果^[26]。



图 16 异物侵限夜间监测结果

Fig. 16 Night-time monitoring results of foreign object intrusion

6 结 论

针对山区铁路地质灾害隐患防治难题,基于近年来在既有铁路开展地质灾害防治工作的实践经验,提出构建基于天空地多源遥感和人工智能的铁路地质灾害早期识别与监测预警技术体系,主要结论如下。

(1)我国山区铁路地质灾害隐患主要表现为高位陡坡多、隐蔽性和潜伏性强、受工程扰动影响大、远程链式致灾和缓变型隐患分布广泛 5 种突出特征。

(2)采用以“区域-区段-工点”为主线的铁路地质灾害三级防控策略,融合应用多源遥感、人工智能和精细化仿真技术,构建了适用于铁路运维的地质灾害早期识别与监测预警技术体系。

(3)基于卫星遥感、InSAR、机载 LIDAR 和无人机遥感技术,提出了不同类型灾害隐患的精细化筛查流程;融合应用机器学习、图像识别及变化检测等人工智能方法,形成了铁路沿线灾害危险性评估与监测预警技术方案。

(4)通过工程应用验证了技术方案的有效性,研究成果可为创新铁路安全风险管控手段,深化风险分级管控和隐患排查治理双重预防机制,实现铁路地质灾害多层次多维度的精准防控,进一步提高铁路安全风险防范化解效能提供有力技术支撑。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘勇,王珣,高柏松,等.铁路重大突发地质灾害应急监测技术研究[J].铁道标准设计,2022,66(1):26-32.
- [3] 朱庆,曾浩炜,丁雨淋,等.重大滑坡隐患分析方法综述[J].测绘学报,2019,48(12):1551-1561.
- [4] 刘桂卫,王长进,李国和,等.遥感技术在既有铁路地灾防治中应用方法研究[J].铁道工程学报,2019,36(6):23-27.
- [5] 张凯翔.基于“3S”技术的地质灾害监测预警系统在我国应用现状[J].中国地质灾害与防治学报,2020,31(6):1-11.

- ZHANG Kaixiang. Review on Geological Disaster Monitoring and Early Warning System Based on “3S” Technology in China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020,31(6):1-11.
- [6] 刘桂卫.多尺度三维遥感技术在某铁路地质勘察中应用[J].铁道工程学报,2016,33(8):40-43,99.
- LIU Guiwei. Application of Multi-scale 3D Remote Sensing Technology for Geological Investigation in Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016,33(8):40-43,99.
- [7] 石菊松,吴树仁,石玲.遥感在滑坡灾害研究中的应用进展[J].地质论评,2008,54(4):505-514,579.
- SHI Jusing, WU Shuren, SHI Ling. Remote Sensing for Landslide Study: an Overview[J]. Geological Review, 2008, 54(4):505-514,579.
- [8] 张勤,赵超英,陈雪蓉.多源遥感地质灾害早期识别技术进展与发展趋势[J].测绘学报,2022,51(6):885-896.
- ZHANG Qin, ZHAO Chaoying, CHEN Xuerong. Technical Progress and Development Trend of Geological Hazards Early Identification with Multi-source Remote Sensing[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022,51(6):885-896.
- [9] 王先龙.关于铁路路堑边坡区域地质灾害防治的思考[J].铁道标准设计,2016,60(7):47-51.
- WANG Xianlong. Reflection on Regional Geological Disaster Prevention of Railway Cutting Slope[J]. Railway Standard Design, 2016, 60(7):47-51.
- [10] 刘桂卫,宁新稳,杜辉,等.铁路三维地质遥感判释软件系统研发与应用[J].铁道工程学报,2016,33(6):16-21.
- LIU Guiwei, NING Xinwen, DU Hui, et al. Analysis and Application of 3D Remote Sensing Interpretation System in Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016,33(6):16-21.
- [11] 党杰,董吉,何松标,等.机载 LiDAR 与地面三维激光扫描在贵州水城独家寨崩塌地质灾害风险调查中的应用[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(4):106-113.
- DANG Jie, DONG Ji, HE Songbiao, et al. Application of Airborne LiDAR and Ground 3D Laser Scanning in Geological Hazard Risk Investigation of Dujiazhai Collapse in Shuicheng, Guizhou[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4):106-113.
- [12] 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.
- [13] 吴明轶,罗明,刘岁海.基于光学遥感与 InSAR 技术的潜在滑坡与老滑坡综合识别:以滇西北地区为例[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(3):84-93.
- WU Mingyuan, LUO Ming, LIU Suihai. Comprehensive Identification of Potential and Old Landslides Based on Optical Remote Sensing and InSAR Technologies: a Case Study in Northwestern Yunnan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(3):84-93.

- [14] 张本浩,魏云杰,杨成生,等. 西藏然乌地区地质灾害隐患点 InSAR 识别与监测[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(1): 18-26.
- ZHANG Benhao, WEI Yunjie, YANG Chengsheng, et al. InSAR Identification and Monitoring of Geological Hazards in Ranwu Region of Tibet[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(1): 18-26.
- [15] 周福军. 高原复杂山区铁路无人机倾斜摄影勘察技术应用研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(6): 1-5.
- ZHOU Fujun. Application of Unmanned Aerial Vehicle Oblique Photography Survey Technology for Railway in Complex Plateau Mountain Area[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(6): 1-5.
- [16] 李孝攀,李远富,周先虎,等. 川藏铁路康定至昌都段地质灾害区域危险性评价[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(6): 58-62.
- LI Xiaopan, LI Yuanfu, ZHOU Xianhu, et al. Evaluation of Regional Geological Hazards Risks on Kangding to Changdu Section of Sichuan-Tibet Railway[J]. Railway Standard Design, 2017, 61(6): 58-62.
- [17] 牛乐乐,苏谦,王牧麒,等. 基于 AHP 的路堑护坡风险动态加权综合评估模型研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(5): 42-50.
- NIU Lele, SU Qian, WANG Muqi, et al. Research on Dynamic Weighted Comprehensive Assessment Model of Cutting Slope Risk Based on AHP[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(5): 42-50.
- [18] 解明礼,巨能攀,赵建军,等. 区域地质灾害易发性分级方法对比分析研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(7): 1003-1014.
- XIE Mingli, JU Nengpan, ZHAO Jianjun, et al. Comparative Analysis on Classification Methods of Geological Disaster Susceptibility Assessment[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(7): 1003-1014.
- [19] 侯圣山,李昂,陈亮,等. 基于普适型仪器的滑坡监测预警初探:以甘肃兰州岷县三处滑坡为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(6): 47-53.
- HOU Shengshan, LI Ang, CHEN Liang, et al. Application of Universal Geo-hazard Monitoring Instruments in Landslides and Early Warning of Three Landslides in Gansu Province: a Case Study in Minxian County and Lanzhou City of Gansu Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(6): 47-53.
- [20] 陈水满,赵辉龙,许震,等. 基于人工神经网络模型的福建南平市滑坡危险性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(2): 133-140.
- CHEN Shuiman, ZHAO Huilong, XU Zhen, et al. Landslide Risk Assessment in Nanping City Based on Artificial Neural Networks Model[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(2): 133-140.
- [21] 于开宁,吴涛,魏爱华,等. 基于 AHP-突变理论组合模型的地质灾害危险性评价:以河北平山县为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(2): 146-155.
- YU Kaining, WU Tao, WEI Aihua, et al. Geological Hazard Assessment Based on the Models of AHP, Catastrophe Theory and Their Combination: a Case Study in Pingshan County of Hebei Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(2): 146-155.
- [22] 石越峰,危凤海,付卫霖,等. 面向防洪管理的铁路无人机巡检体系研究与应用[J]. 铁道建筑, 2022, 62(4): 120-125.
- SHI Yuefeng, WEI Fenghai, FU Weilin, et al. Research and Application of Railway Unmanned Aerial Vehicle Patrol Inspection System for Flood Control Management[J]. Railway Engineering, 2022, 62(4): 120-125.
- [23] 李振洪,宋闯,余琛,等. 卫星雷达遥感在滑坡灾害探测和监测中的应用:挑战与对策[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 967-979.
- LI Zhenhong, SONG Chuang, YU Chen, et al. Application of Satellite Radar Remote Sensing to Landslide Detection and Monitoring: Challenges and Solutions[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 967-979.
- [24] 宋章,赵平,陈明浩. 既有成渝铁路线地质灾害特性及防治对策分析[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(8): 16-21.
- SONG Zhang, ZHAO Ping, CHEN Minghao. Analysis of the Characteristics of Geological Disasters and Its Prevention Methods along the Chengdu-chongqing Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(8): 16-21.
- [25] 徐岩,陶慧青,虎丽丽. 基于 Faster R-CNN 网络模型的铁路异物侵限检测算法研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(5): 91-98.
- XU Yan, TAO Huiqing, HU Lili. Railway Foreign Body Intrusion Detection Based on Faster R-CNN Network Model[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(5): 91-98.
- [26] 王泉东,杨岳,罗意平,等. 铁路侵限异物检测方法综述[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(12): 3152-3159.
- WANG Quandong, YANG Yue, LUO Yiping, et al. Review on Railway Intrusion Detection Methods[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(12): 3152-3159.

(编辑:夏梦然)