



引文格式:李永威,徐林荣,陈昀灏,等.基于天-空-车-地一体化铁路路基灾害隐患早期识别与服役状态监测[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(8):1392-1406.DOI:10.13203/j.whugis20230404

Citation:LI Yongwei,XU Linrong,CHEN Yunhao,et al.Integrated Space-Air-Train-Ground Muti-source Techniques for Early Detection of Subgrade Disasters and Service Status of Railway Subgrade[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2024,49(8):1392-1406.DOI:10.13203/j.whugis20230404

基于天-空-车-地一体化铁路路基灾害隐患 早期识别与服役状态监测

李永威^{1,2} 徐林荣^{1,2} 陈昀灏³ 邓志兴^{1,2}

1 中南大学土木工程学院,湖南 长沙,410075

2 中南大学高速铁路建造技术国家工程研究中心,湖南 长沙,410075

3 湖南大学土木工程学院,湖南 长沙,410082

摘要:气候系统变化背景下铁路路基灾害呈高发态势,表现出点多面广、隐蔽性强和突发性高等特征,且路基灾害“一点受灾,全线受阻”的巨大危害,已经使其成为铁路安全运营的“瓶颈”难题。多次铁路事故表明风险源大多不在已知灾害隐患点范围内,传统监测手段已难以满足复杂孕灾环境下的路基服役安全监测需求。鉴于此,首先总结了不同孕灾环境下路基灾害隐患特征,将路基服役状态监测定义为长期服役过程中受突发型灾害、缓变型致灾作用下可能导致路基结构损伤或功能损失等服役状态劣化的危险源及路基本体受灾程度监测,监测内容包括路基变形监测、结构健康监测、沿线地质灾害监测、几何状态测量和外部环境监测;提出了天-空-车-地多源协同路基灾害隐患早期识别与服役状态监测体系,形成了平台协同、尺度协同、参数协同、多部门协同的路基灾害协同监测内涵,初步提出多源协同路基灾害及服役状态监测方案,实现区域-工段-工点为主线的星地协同的工作模式,并在沪宁城际高速铁路路基服役状态监测中得到应用;最后对路基服役状态监测发展方向进行了展望。

关键词:铁路路基;地质灾害;早期识别;服役状态;天-空-车-地调查技术;多源协同;监测体系

中图分类号:P237

文献标识码:A

收稿日期:2023-10-24

DOI:10.13203/j.whugis20230404

文章编号:1671-8860(2024)08-1392-15

Integrated Space-Air-Train-Ground Muti-source Techniques for Early Detection of Subgrade Disasters and Service Status of Railway Subgrade

LI Yongwei^{1,2} XU Linrong^{1,2} CHEN Yunhao³ DENG Zhixing^{1,2}

1 School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China

2 National Engineering Research Center of High-Speed Railway Construction Technology, Central South University, Changsha 410075, China

3 School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China

Abstract: Objectives: Because of high frequency of extreme weather, railway subgrade disaster shows a trend of increasing, great harmfulness and is hard to detect in advance. Even a small-size subgrade disaster may cause railway paralysis, which prevents the development of transportation. Many incidents illustrate that the earliest subgrade disaster always appeared in areas where no case ever reported before. It means that traditional monitoring methods are hard to detect hidden danger area. Thus, a promising method is urgent to be proposed for meeting the monitoring requirement for railway safety. **Methods:** First, the characteristics of subgrade disaster are summarized under different disaster-pregnant environments, and the advantages of various monitoring methods are discussed to find a collaborative applications method for early identification of subgrade disaster. The potential hazards that may cause damage to subgrade structure and the

基金项目:铁路基础研究联合基金(U2268213);国家自然科学基金(42172322);湖南省研究生科研创新一般项目(QL20230104)。

第一作者:李永威,博士生,主要从事路基与地质灾害评估、防治与预警预报研究工作。yongwei_li@163.com

通讯作者:徐林荣,博士,教授。lrxu@csu.edu.cn

deterioration degree of subgrade are considered as the main monitoring object of subgrade service status, including subgrade deformation monitoring, structural health monitoring, geological hazard monitoring along the railway, track irregularity, and external environmental monitoring. Second, an investigative approach based on the integration of space-air-train-ground multi-source techniques is proposed to detect the geohazards and monitor the service status of railway subgrade. It means that collaborative application of different monitoring methods, cooperative analysis of different scales and resolutions data and collaboration of between various railway departments are required. Two monitoring schemes for subgrade disasters and service status of subgrade are proposed based on the integration of multi-source and multi-scale monitoring technique. Finally, the development direction of subgrade service status monitoring is discussed. **Results and Conclusions:** This monitoring system has been applied in the identification of subgrade service status in the Shanghai-Nanjing high speed railway, which can quickly investigate the location of the disasters and the deterioration degree of subgrade.

Key words: railway subgrade; geohazard; early detection; service status; space-air-train-ground investigation techniques; multi-sensor collaborative detection; monitoring system

截至 2023 年初,中国铁路营业里程达到 15.5 万 km,不断扩大的路网规模满足了客货运输质量与国家发展需求。但随着铁路设施持续建设,不断增加的交通量、频发的极端气候及不利的人为因素导致路基结构劣化,大量工程迈入“带病服役”阶段,线路中断、列车停运等问题,影响着铁路安全营运^[1-2]。因此,不断增长的铁路路基灾害与运营安全发展需求之间的矛盾日益突出。同时,高填路堤、深切方路堑及坡脚开挖打破原有应力平衡,增加灾害发生概率^[3-4],通常在降水或与列车反复冲击合作用下加剧灾害发生,诱发路基(堑)边坡溜坍和崩塌落石等灾害,如 2020-03-30 京广线边坡滑塌导致列车脱轨、2020-06-27 成渝线路堑滑坡导致列车脱轨、2021-07-20 路基下沉导致包广线列车倾斜和 2020-10-15 黎湛线路堤滑塌导致列车脱轨等致灾事故^[5]。

铁路路基灾害隐患的准确识别与监测一定程度上可保证铁路的安全运营。作为灾前防御手段,检/监测技术和方法在中国铁路几十年的运营实践中不断发展创新和完善。早期,由于技术手段落后,主要采用巡视或人工监测方法对路基及沿线边坡隐患进行排查,如采用水准仪、全站仪对路基变形进行监测,但该方法的精度受限于测量的天气、温度和人员配备^[6]。倾斜仪、位移计或裂缝仪等能够对岩土裂缝张合、位错变化进行监测,具有较高的精度且操作简单,但手动测量需要大量的时间和人力成本,该手段长期稳定性存在不足^[7]。全球定位系统(global positioning system, GPS)和北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)基于卫星信号进行空间后方交会测量,从而对地表变形进行自动化

实时监测,它们的监测精度都在厘米级且成本昂贵^[8]。当受高大建筑物或树木遮挡及不利天气影响时,将导致传输信号问题影响监测精度^[9]。多时相星载合成孔径雷达(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术具有全天候、范围广和远程等优势^[10],能够对铁路沿线区域沉降或地质灾害进行监测,但受限于卫星重访周期,虽然 InSAR 变形监测的结果是毫米级的,但其散射体的定位精度相对较低^[11],且复杂地形和植被覆盖会影响 InSAR 图像干涉质量^[12-13]。相较于星载 InSAR,机载激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)能根据监测需求提高监测频率,能识别植被下的裂缝信息^[14]。路基本体结构变形破坏会导致轨道几何不平顺,影响行车舒适性与安全。中国轨道质量参数(track quality index, TQI)指导铁路线路的“天窗修”,由 200 m 区间内的轨向、轨距和水平等 7 个参数的单项标准差之和表示^[15],但轨下结构塑性变形仅是影响平顺性其中一个因素。因此 TQI 仅具有统计学意义,不能直接反映路基病害。电阻率法、瞬态面波法和电磁波法等物探手段分别通过电阻率变化情况、土体波速和反射电磁波信号强弱来评判路基内部及地基服役情况,利用物探手段可以对路基施工、运营状态和维修效果进行分析^[16-18]。但目前对物探结果的解析仍主要依赖于人机交互,且解译精度依赖于专家经验。

长大线性铁路工程跨越不同自然地理和地质环境区域,孕灾环境复杂多变、监测手段适用性不一等问题,为准确判别路基灾害隐患及服役状态监测带来难题。同时,路基不单具备保障承灾体(生命和财产)安全的需求,还兼顾保障交通

大通道的畅通运输需求。线域铁路的特殊性导致路基灾害“一点受灾,全线受阻”,即局部灾害“点”可控制整体运营“线”。检/监测手段不断创新,监测内容也由单一位移指标向多源多尺度监测指标发展,但目前仍存在以下不足:(1)路基服役过程监测内涵不明确、体系不完善,路基不仅受长期循环荷载作用,还受到外部环境及地质灾害影响,不同孕灾环境下路基灾害发展规律与链生机制迥异,如何从源头识别、预判风险发展态势是路基灾害防治的关键;(2)铁路工务、机务、车务、调度部门协调不充分,各个部门数据信息(雨情、水情、灾情信息)分享不及时,联防联控机制薄弱,超前预报预警不足,导致路基灾害事故频繁发生;(3)对海量多源异构监测数据的融合分析能力不足以准确预判路基灾害发生,建立多源多尺度数据的协同分析方法、突破单一手段监测的桎梏及掌握路基灾害灾变过程,是降低铁路突发灾害危害性的关键。

当前天-空-地一体化监测技术已在洪水、滑坡和泥石流等自然灾害监测方面广泛应用,突破单一手段、单一平台的局限,建立了多源立体的地质灾害隐患早期识别、监测预警及灾后救援全过程监测体系^[19-21]。区别于已有研究成果,路基灾害及服役状态监测内容更宽泛,受工程扰动更大,涉及领域更广,因此不单要对路基本体灾害、健康状态及平顺性进行监测,还需要对铁路沿线影响路基服役安全的地质灾害和外部环境进行监测。有学者尝试分析了铁路运营安全监测的手段与发展趋势^[22-23],但在路基服役状态监测方面对该方法的应用仍处于探索阶段。目前全球气候异常变化,铁路防灾形势更为严峻^[24]。国家铁路局联合相关部门制定发布《关于加强铁路自然灾害监测预警工作的指导意见》,将防灾理念从灾后救助转向灾前预防,因此,准确识别路基服役状态是关键。借鉴已有成果,本文厘清不同孕灾环境下路基灾害(路基本体及沿线地质灾害)隐患特征及影响因素,阐述多源立体监测手段在路基灾害识别与服役状态监测上的应用,确定了协同监测内涵,建立天-空-车-地多源协同分析方法。围绕自然资源部提出的研究原理、发现隐患、监测隐患灾害防治工作方案,建立区域-工段-工点从面到点、星地协同的工作模式,并将其应用在沪宁城际高速铁路的路基服役状态监测当中。

1 不同孕灾环境下路基灾害隐患特征

根据国家铁路局发布的行业标准《铁路路基病害分类》(TB/T2818—2016)可知,对于运营铁路路基灾害类型可分为翻浆冒泥、下沉、融沉、边坡溜坍、陷穴、滑坡、泥石流、危岩与崩塌落石等20种。路基灾害通常是气象-地质灾害与人为活动(建造技术与列车荷载)互作用产物,且灾害类型与分布时空特征具有明显的气候、地域因素,因此,不同孕灾环境孕育诱发的路基灾害不一。

1)西南地区四川及西藏等高山峻岭地区孕灾环境。高山峻岭地区孕灾环境极为复杂,由于铁路曲率半径及平顺性要求,人工开挖、填筑及爆破活动频繁,铁路全线桥隧占比超80%^[25]。该地区岩性复杂多变,高山峡谷地貌广泛分布,构造活跃使地震频发。地震产生的地震惯性力或土体液化诱发沿线山体滑坡、崩塌等同震灾害,直接导致路基被损毁,同样也会导致路基整体断裂、错动或坍塌^[26]。此外,地震导致铁路沿线山体岩土裂隙发育、结构松散,致使沿线地质灾害的降雨激发阈值降低,在降雨作用下引发滑坡或泥石流等次生灾害^[27],这些次生灾害会在汛期威胁路基服役安全。地震导致路基结构损伤,在降雨与行车荷载作用下将加剧路基灾变。因此,断裂构造发育、地形高陡及工程活动剧烈等因素为路基灾害形成提供了良好条件。诱发的路基灾害链形式为地震-路基灾害、地震-降雨-路基灾害,灾害规模大、隐蔽性高,人难以至和难以观测^[22]。诱发路基灾害类型主要为滑坡、泥石流、崩塌及下沉等病害。例如,由于对“5·12”震后铁路沿线山体隐患了解不够,在2008-06-08达成铁路K302+800处发生山体危岩崩塌灾害导致火车脱轨,线路中断行车^[28]。2019-08持续强降雨导致边坡失稳,造成成昆铁路甘洛段山体边坡垮塌,导致线路中断,12人遇难^[29]。由于长宁地震导致山体松动,在降雨作用下引发滑坡灾害,中国铁路成都局集团有限公司于汛期2019-08-03—2019-09-20对内六铁路K829/30、K1273/4、K853/4次列车进行绕行调整。

2)中南地区湖南和湖北等低山丘陵地区及广州珠江三角洲平原孕灾环境。路基是中南地区铁路的主要结构形式,占比约25%~60%^[30-31],而该地区低地势的湖傍洼地通常以路堤形式建造^[32]。该地区斜坡多覆盖深厚风化土层,如严重风化的花岗岩在南方丘陵区分布广泛,形成南方

特殊的侵蚀地貌——崩岗。这种地貌在富水条件下强度极低,极易引发滑坡、崩塌灾害。丘陵地区呈现雨热同期的特点,年平均降雨量在 1 200 mm 以上。台风、暴雨频发和库水波动频繁,诱发的路基灾害点多、面广。因此,气候温暖、雨量充沛生态环境脆弱、敏感的自然孕灾环境是形成与引发路基灾害的基础条件,诱发的铁路路基灾害链形式为暴雨-路基灾害,而诱发的灾害规模较小。中南地区填方路堤与路堑大量存在,引发加卸载效应,必然打破原有地层平衡,在降雨或列车循环荷载下引发或加剧路基灾变。诱发的路基灾害类型主要为下沉、外挤、边坡溜坍、边坡冲刷和滑坡等。例如,2020-03 强降雨导致京广线郴州市永兴县境内路堑边坡滑塌,造成京广线 T179 次旅客列车脱轨;2020-11 受台风“浪卡”影响,黎湛线发生路基滑塌致列车脱轨,但近两年来检修未发现该段路基病害记录^[5];2020-11 京广线岳阳段某滨湖路堤湖水骤降,导致上行线一侧老路堤发生滑塌,铁路断道 37 h,治理费用高达 7 000 万元。

2 铁路路基服役状态监测内涵及特征

通过了解不同孕灾环境下路基灾害隐患特征可知,路基灾害的形成和发展取决于区域的孕灾环境。通常在列车循环荷载、降水和沿线地质灾害复杂环境效应耦合作用下,使路基岩土劣化,最终诱发一系列路基病害。即这些因素引起路基结构和功能受损,可能会导致基础设施运营安全受到威胁。而铁路“一点受灾、全线受阻”特征使铁路部门对路基等基础设施结构的服役状态要求更为严格,多种风险威胁路基服役安全。因此,路基灾害服役过程监测内容更宽泛,不仅要监测路基结构变形,还要对线路几何平顺性进行监测,更涉及威胁路基安全的沿线地质灾害等内容的监测。参考《高速铁路工程测量规范》关于铁路运营铁路安全监测以及路基监测的内容,本文定义路基服役状态监测为:对路基在长期服役过程中受突发型灾害(泥石流、滑坡、崩塌、洪灾等)与缓变型致灾(外界干扰、长期循环荷载)作用影响,可能导致的路基结构损伤或功能损失等服役状态劣化的危险源及路基本体的受灾程度监测。鉴于此,图 1 对路基服役的监测对象以及内容进一步进行了细分。

1)路基变形监测。荷载与外部环境因素影响使路基出现下沉、外挤、路堤滑移及溜坍等病害,

导致路基变形。运营期路基变形监测主要包括路堤、路堑变形监测、地基沉降监测和过渡段沉降监测。

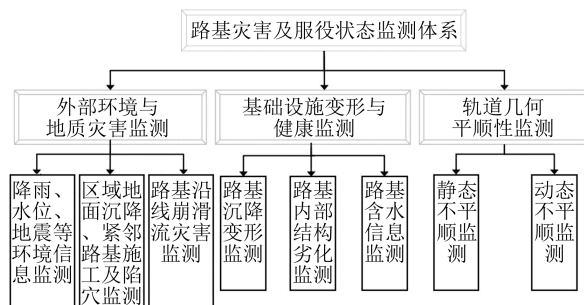


图 1 铁路路基服役状态监测内容

Fig. 1 Monitoring Content of the Service Status of Railway Subgrade

2)结构健康监测。主要对路基服役过程中诱发因素导致的性能劣化、损伤程度进行监测。例如,水侵蚀和反复列车振动使路基填料劣化,降低其密实度和承载力,进一步会导致下沉病害。由于排水不良,雨水进入路基内,产生含水异常病害,主要针对路基结构内部信息进行探测。

3)路基沿线地质灾害隐患监测。对铁路沿线地质灾害可能引起的路基服役安全的危险隐患进行监测,主要包括路堑边坡、滑坡、崩塌落石和泥石流等隐患监测。通常,有些路堑/堤边坡、路基沿线山体边坡宏观上没有明显的变形破裂迹象和灾害前兆,但强烈外力作用(地震、降水及其他荷载作用)将会导致灾害,影响服役安全。例如,路基沿线崩滑体可能会覆压路基,甚至冲毁路基。这类灾害隐蔽性强,危害性大,可以通过遥感技术建立地质灾害早期识别体系。

4)轨道几何状态测量。较好的轨道平顺性是保证列车安全和舒适运行的基础条件,通过轨道几何状态测量仪(静态不平顺)及综合轨检车(动态不平顺)等手段能够测定轨道平顺性参数。相较于静态不平顺,动态不平顺能综合反映轮-轨作用下钢轨及轨下结构的性能。通常轨面磨耗导致的不平顺能够通过捣固机治理后改善。然而不均匀沉降等病害导致的路基结构变形同样也会产生不平顺,但难以通过调整扣件改善。因此,通过动态不平顺指标能够间接反映路基状态。

5)外部环境监测。包括对降雨、河水位变化、地震等外部环境信息进行监测。浸水路基地段,水位的骤降/升可能导致路基服役性能劣化。

降雨和地震能诱发沿线山体、路堑及路堤边坡变形。对降雨或地震监测,及时掌握外部环境监测信息,能对列车进行限速或禁(绕)行管控。同时,需要对采矿、采水、地铁修建地区导致的区域地面沉降进行监测,这些外部环境产生的差异沉降可能导致路基不均匀沉降。在紧邻既有线施工期间也需对铁路路基的变形进行监测。此外,采空区、黄土和岩溶地区紧邻路基施工时,需要对路基及附近区域形成的陷穴病害进行监测,防止由于空洞突然坍塌,导致路基损毁及列车倾覆事故。

3 路基灾害识别与服役状态监测手段

不同孕灾环境诱发路基病害特征不同,高山峻岭地区路基受突发型灾害影响较为突出,以地震和降雨为主要诱发因素的山区路基灾害隐蔽性高、危害大,人难以到达和难以观测,而丘陵地区路基多受缓变型致灾影响,湖水位变化、暴雨等因素可能导致路堤(堑)内部结构损伤,劣化过

程相对缓慢,路基灾害点多面广、规模相对较小及潜在隐患难以察觉。多次事故表明路基灾害大多都不在已知灾害隐患点范围,传统的人工巡视排查工作存在检视范围小、漏检严重、作业效率低下的问题,使路基病/灾害(发生及判断其服役状态)难以准确识别。如果当路基灾害反映到路基面及轨道结构上并引起相关部门重视时,表明灾情已相当严重,则必须通过列车慢行措施甚至禁行来治理。这样不仅阻碍交通运输,还将造成巨大的经济损失。

为了突破传统人工巡视、单一手段排查的局限,本文构建航天平台(光学遥感和InSAR)、航空平台(LiDAR和光学航测)、车辆平台(综合轨检车测量)和地面平台(沿线地质灾害、路基沉降及内部状态监测)天-空-车-地一体化路基灾害隐患识别与服役状态监测体系(见图2),形成区域-工段-工点从面到点、星地协同的工作模式,将中长期预警与短时、实时预警实现有机融合,为路基病害防治工作和监测预警等资源的合理调配提供指导。

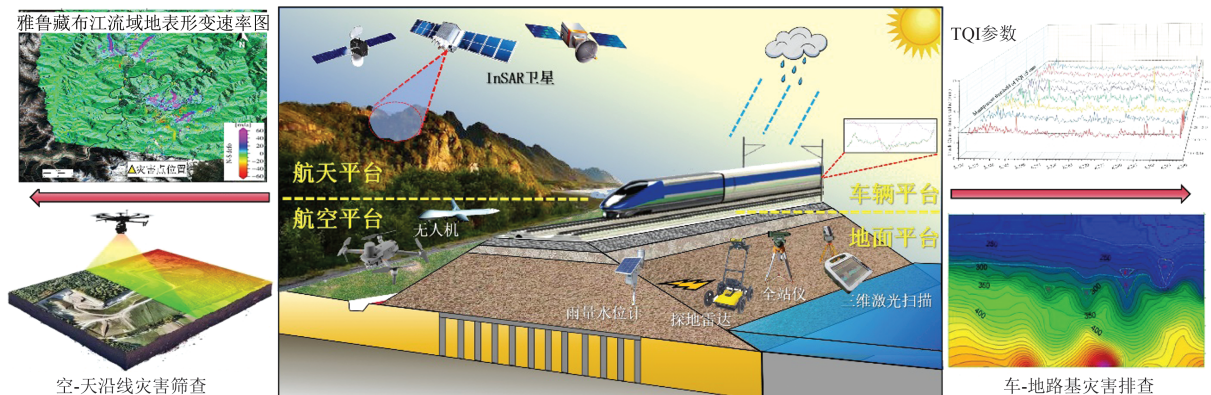


图2 天-空-车-地一体化的路基灾害隐患早期识别与服役状态监测体系

Fig. 2 Integrated Space-Air-Train-Ground Multi-source Techniques for Early Detection of Geohazards and Service Status of Subgrade

3.1 “天基”平台铁路沿线地质灾害隐患监测

由于InSAR卫星信号穿透强、覆盖范围广和远程监测等特点,其在大面积和长时段地质灾害及地表监测方面具有明显优势,适合开展大范围地质灾害普查和中、长期监测。此外,InSAR技术能够连续跟踪地表的微小形变,其对正在蠕动变形区有较好的识别能力。差分InSAR技术(differential InSAR, D-InSAR)于1996年被成功应用在滑坡变形监测^[33],后逐渐被应用于铁路路基及沿线地质灾害的变形监测中^[34-35]。但D-InSAR技术只能获取2~3景影像时相内发生的相对变形,该技术自身的局限性决定了其时间分辨

率不足,受目标散射特征变化和大气变化影响大等缺点^[36]。鉴于此,永久散射体InSAR、小基线集InSAR、干扰点目标分析等^[37-39]技术相继被提出。利用重复轨道观测获取的多时相雷达数据进行干涉处理,降低了大气变化和时空去相干对干涉相位的影响,从而获取高相干目标点毫米级精度的时序变形信息^[40-41]。

利用InSAR技术可以获取几类信息:(1)铁路路基(堑)变形信息,能够识别路基服役运营中由列车荷载作用导致土体固结而引起的路基本体沉降,确定路基(堑)本体沉降位置^[42];也能通过时序InSAR技术对路基-桥梁过渡段路基侧

的变形进行长期监测,掌握由于路基和桥梁刚度差异引起的过渡段路基侧不均匀沉降的发展趋势,为“桥头跳车”病害评判提供新思路^[43]。(2)沿线山体滑坡及路堑边坡变形隐患监测。由于山区铁路山体滑坡隐蔽性强、难以察觉,InSAR 技术恰好满足监测需求,Zhu 等^[44]、王栋等^[45]、Journault 等^[46]分别对兰新高速、内六铁路和 CN-CP 铁路沿线山体滑坡进行了监测,确定滑坡边界、变形部位及变形趋势,定量分析由于铁路建设穿越山体的建设活动引起边坡激活对路基服役的影响。(3)地面不均匀沉降引起的塌陷影响路基服役,通过 InSAR 变形监测技术,能对铁路途经软土^[47]、采矿区^[48]、盐渍土地区^[49]和地下水开采区的地面沉降进行监测,进而圈定由于地面不均匀沉降或塌陷形成的“沉降漏斗靶区”,定量分析差异沉降对铁路路基的影响。因此,通过 InSAR 技术能够捕捉铁路沿线地质灾害隐患前兆信息、蠕变变形规律及确定隐患“靶区”。如伊朗平原地区 Qom-Kashan 铁路由于地下水抽取灌溉活动,

产生地面沉降,造成 1 km 范围内局部线路受灾,确定该段为隐患风险区域,局部垂直沉降速率高达 90 mm/a^[50](如图 3(a)所示)。

目前,光学遥感影像已发展为高空间分辨率(WorldView 最高分辨率为 0.3 m)和高时间分辨率(Planet 微小卫星的重返周期仅为 1 d)。光学遥感对地质灾害监测也朝着多时相、多数据源协同的灾害形态判别分析及动态观测发展^[20],根据影像光谱(颜色)特征、纹理特征等可以圈定灾害信息。例如,通过多时相高分辨率遥感影像数据,并根据滑坡灾害的解译标志(弧形、新月形等形态,或者灰白色和白色等色调)有效识别地表变形区域,圈定潜在滑坡灾害。通过对铁路沿线泥石流沟道圈定和泥石流物源识别,实现对危岩落石和滑坡崩塌等灾害的快速筛查^[51-52]。在此基础上,获取铁路沿线地质灾害的分布位置、面积、范围边界等信息,粗略评估地质灾害大致体积。如 Huntley 等^[53]获取了加拿大国家铁路沿线高陡山体滑坡光学影像,圈定了滑坡边界,掌握了滑坡的地形地貌信息(如图 3(b)所示)。

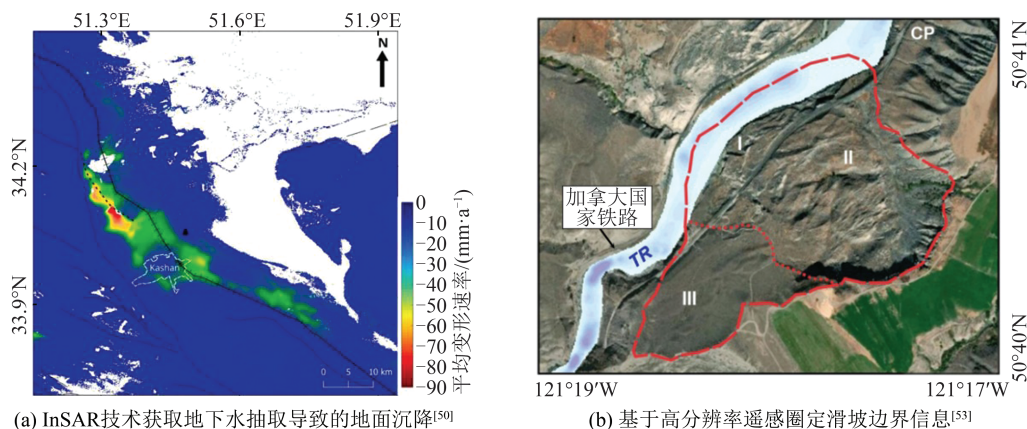


图 3 航天平台在铁路沿线灾害的应用

Fig. 3 Application of Remote Sensing Technology in Geohazards along the Railway

3.2 “空基”平台铁路地质灾害隐患详查

现有机载 LiDAR 系统能集成 LiDAR、电荷耦合器件数码相机、全球导航卫星系统、惯性测量系统于一体,能够获取高分辨率、高精度的地形地貌影像。LiDAR 通过主动发射激光信号穿透稀疏植被,还可直接获取去植被后的地表点三维坐标与高程数据信息^[54]。利用无人机可进行高精度垂直摄影测量和倾斜摄影测量,快速生成一系列的产品,如数字高程模型(digital elevation model, DEM)、数字正射影像图(digital orthophoto map, DOM)、数字地表模型(digital surface model, DSM)、数字地形模型(digital terrain model, DTM)。

2016-11-14 新西兰南的北坎特伯雷地区发生 7.8 级地震,北海道南部运输走廊区域内铁路沿线山体遭受破坏,且在降雨后进一步激活滑坡山体。Stringer 等^[55]通过 LiDAR 识别北干线铁路沿线山体隐患灾害,获取去植被后的山体 DSM,能清晰地看到植被下的崩塌松散堆积体、震裂土体裂缝(见图 4(a)),分析不同时刻隐患山体高程 DEM 变形信息及观察山体变形破坏迹象(如后缘拉张裂缝、危岩体、错台、滑坡壁等)。通过无人机航测技术还可快速获取高时空分辨率的航空遥感影像,对铁路沿线高陡危岩体进行排查,定性评判危岩发育趋势。李小玲等^[56]通过无人机航拍技术分析铁路沿线隐患危岩体,发现高位

裸露岩体被多组结构面切割,形成临空面,在重力、风化、根劈等作用下易失稳(见图4(b))。通过人工交互解译遥感影像,确定危岩体局部裂隙张开度为1~80 cm,估算该危岩体体积约为3 300 m³,及时发现了高位危岩体隐患灾害,并提出

了削方清除、危岩体挡墙、修复柔性防护网及设置挡墙措施。由此可见,通过无人机技术能够识别地质灾害隐患、分析山体变形趋势和评判山体对铁路的影响,必将成为铁路沿线地质灾害隐患识别的重要手段。

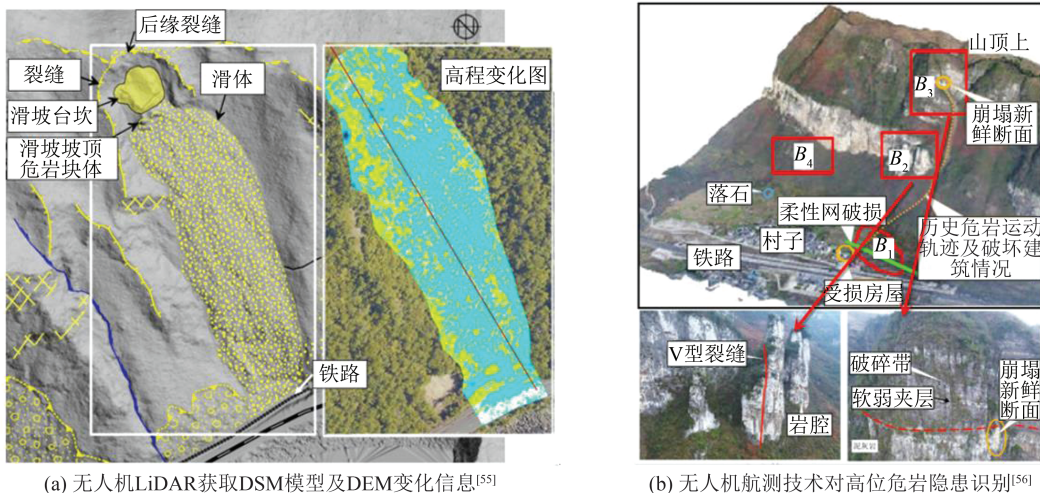


图4 无人机技术对铁路沿线地质灾害隐患的识别

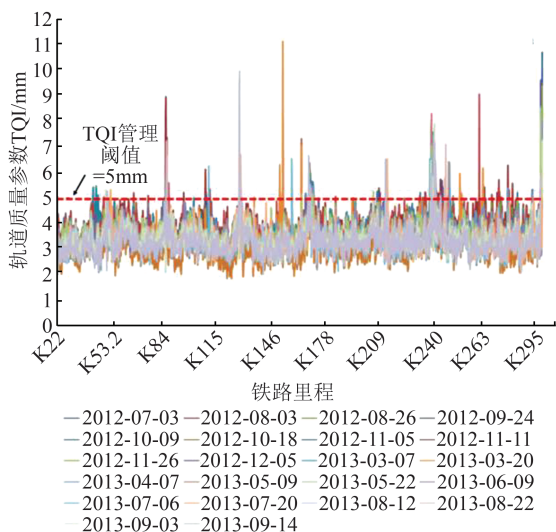
Fig. 4 Detection of Geohazards Using the Unmanned Aerial Vehicle Technology Along the Railway

3.3 “车辆”平台轨道不平顺检测

综合轨检车每月对铁路线路的平顺性进行检测,实现与铁路设计时速相同的“等速检测”,获取的结果为车-轨耦合作用下动态检测结果。轨道不平顺通常采用高低、轨向、水平、轨距、扭曲(三角坑)等参数描述。通过这些参数以特定条件进行组合,可评判轨道平顺性的优劣。国内外铁路部门对轨道平顺性质量通常基于局部峰值、整体均值、波长能量3种方法^[57-58]。峰值管理采用轨距、轨道高低、轨向等几何参数等偏离幅值的大小进行分级^[59],从而评判铁路平顺状态。均值管理则通过统计单位区段长度内的轨道几何参数标准差,将其与设定管理阈值进行对比,评判轨道平顺质量。各国依据自己的轨道维护经验,将统计区段分200~500 m不等^[60-61]。中国采用200 m区段统计共7项参数之和,得出TQI。波长管理则根据检测短波、长波不平顺,并分析波谱能量,以评价轨道周期性不平顺^[62]。就中国铁路实际运营而言,峰值管理多用于线路紧急补修。而TQI均值管理较峰值管理更为严格,被广泛应用在线路整体平顺性判定中^[63-64]。

影响轨道平顺性的因素包含路基沉陷变形、捣固不良、扣件松动、枕木腐朽和钢轨磨耗等。路基沉陷变形可能由于路基本体劣化、区域沉降灾害或过渡段差异沉降导致,但它仅是影响平顺

性的其中一个因素。本文重点关注如何从多影响因素中确定路基劣化,从而对其进行重点监测。陈舒阳等^[65]统计了2012—2013年内沪宁高速铁路K22~K295区段内每个月的轨检车TQI动检数据与管理阈值($TQI \geq 5$ mm)之间的关系(图5)。通过TQI监测数据与路基变形监测分析发现路基沉降变形越大的区域,TQI超限次数越多,而TQI超限未必都是由路基变形引起,还可能由路-桥过渡段差异沉降、气候异常、测量误差所引起。但是,若某一路基地段TQI持续超限,经维修捣固后轨道TQI仍超限的地段,则该位置可大致判别为路基灾害隐患工段。新建沪宁城际铁路的施工会影响紧邻京沪既有线路基服役安全。由于新建线地基开挖等施工改变土体原始应力场,既有线路基土体产生应力重分布,其路基边坡将发生变形以达到平衡状态,而列车循环荷载会加剧变形的发生。研究发现施工期间既有线的TQI较施工前增幅超129%^[66],说明施工导致既有线路基变形明显。基于此,指导设计了桩基、筏板跳槽浇筑加固既有线路基措施。通过TQI检测路基上覆轨道几何平顺状态能够从全线路中确定某一路基工段内轨道几何不平顺,从几百公里范围缩短至几百米工段,明确了路基灾害“靶区”工段位置。

图5 沪宁铁路K22~K295全线路轨检车动检数据统计^[65]Fig. 5 TQI Monitoring for the Shanghai-Nanjing Railway K22-K295 Based on Track Inspection Train^[65]

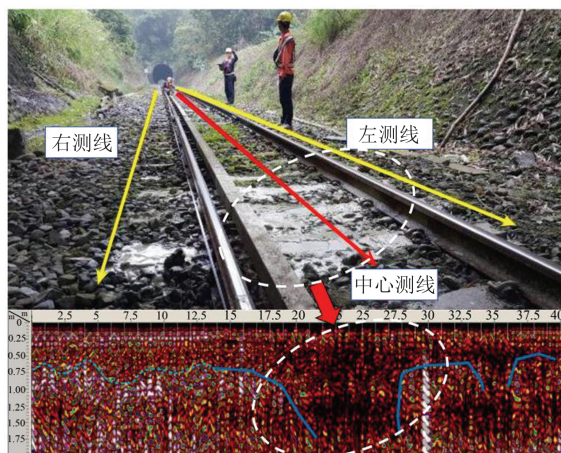
3.4 “地基”技术的路基本体及外部环境信息监测

利用空、天遥感平台仅从地貌学形态对铁路路基及其沿线地质灾害隐患进行识别。通过“车辆”平台确定某一路基段内轨道几何不平顺,进一步明确路基病害“靶区”位置。然而,受多种因素影响,基于天-空-车测量结果不一定准确。因此,还需要铁路部门人员到达现场对路基变形及地质灾害进行逐一调查甄别,确认或排除隐患点,通常需要结合现场测量和物探手段才能精准判断。

对于铁路沿线复杂山体的核查,通常采用地基 InSAR (ground-based InSAR, GB-InSAR) 对不同时刻的崩滑灾害体雷达复图像进行共矩相乘,获得目标区域的高精度变形信息^[67],对边坡崩塌落石的前兆变形信息进行识别。三维激光扫描 (terrestrial laser scanning, TLS) 能够获得灾害体局部三维地形以及高精度的雷达轨道信息^[55]。通常这些技术融合应用至灾害形变监测、灾害体积估测等,但 TLS 信号易受地物遮挡,观测范围有限。此外,自动全站仪 (测量机器人) 能够实现对目标物自动、连续观测,获取滑坡等灾害关键特征点位移变化信息^[68]。

对于重点地段路基本体或地质灾害实时监测,通常采用 GPS/BDS 技术^[69]、测斜仪^[70]、测缝计监测技术^[71]和光纤光栅^[72]获取路基/圪灾害发育情况或局部的精确的灾害体形变信息。通过探地雷达 (ground-penetrating radar, GPR) 实现对路基内部松散区域、孔洞、积水情况的检测,定性地对路基劣化的发展趋势进行评判^[73],被广泛应

用在路基状态的探测。该技术具有类“医学 CT”功能,能够对路基内部损失进行探测。目前车载探地雷达实现了与铁路设计时速相同的“等速检测”。通过对地基技术或人员巡视核查等检测结果进行综合判断,最后确认或排除路基病害病患。对于环境及气象因素,则通过雨量计、温度计和地震仪对外部环境信息进行监测。通过水位计对浸水路基地段由水位的骤降/升影响铁路服役的环境变化信息进行监测。路基遇水软化,在列车动载作用下产生下沉、翻浆冒泥和含水率异常等病害,降低道床强度,进一步会影响铁路运输安全和运输能力。例如,采用探地雷达测量技术对内湾线铁路 K25+200 路段路基翻浆冒泥病害进行检测^[74],如图 6 所示,横坐标为测线距离,纵坐标为路基深度。由图 6 可知,在距测线起点 20~30 m 位置、路基深度为 1~1.5 m 位置出现路基恶化现象。基于此,能够确定路基病害位置以及掌握路基劣化程度等信息。

图6 探地雷达测量技术对内湾线铁路K25+200路段路基翻浆冒泥病害检测^[74]Fig. 6 Detection of Subgrade Mud in the K25+200 Section of the Neiwang Railway Using GPR Technique^[74]

4 多源协同的路基灾害识别与服役状态监测

4.1 天-空-车-地一体化协同监测内涵

通过总结上述平台监测手段在路基灾害及服役状态的应用,掌握了遥感卫星、无人机行车、综合轨检车测量和地面平台传感器的监测方式及其特点。“天基”光学遥感和 InSAR 技术实现对山区沿线地震或削坡活动导致的隐患山体及崩滑灾害隐患的普查,及确定由地下水开采区、采矿区等地区产生的“沉降漏斗靶区”。但由于植被覆盖、复杂地形等影响,监测精度不高,且受限

于卫星重返周期。优势在于能对难以到达的区域进行大范围远程测量,进行扫面性普查,明确隐患位置,提高排查效率。植被下的隐患山体、高陡边坡裂缝无法通过“天基”平台所感知,而“空基”能够弥补该缺陷。利用无人机航测和LiDAR技术获取植被下的松散堆积体、震裂土体裂缝及山体变形破坏迹象,判别隐患发育趋势,对隐患地段进行筛查。天-空平台能对威胁路基服役的沿线地质灾害进行监测,但无法掌握准确的路基本体变形、健康状态及平顺性等信息。因此,利用“车辆”平台对轨道平顺性进行监测,能够获取区域地面沉降、动载与降雨等作用导致路基沉陷变形造成不平顺的位置信息,是对路基上覆轨道平顺性进行监测。但造成轨道不平顺不仅是路基变形原因,还可能由轨道系统劣化引起。因此,需要对不平顺位置的路基变形及健康状态进行筛查,通过位移监测、GPR确定路基变形及内部缺陷,从而对路基进行诊断。此外,还可通过“地基”平台对沿线地质灾害进行详细勘查,对路基本体灾害、服役状态和沿线地质灾害进行确认和排查。

综上所述,本文主要围绕早期识别、隐患排查及重点隐患监测3个方面,遵循区域、工段、工点为主线的三级监测策略,形成从面到点、天-空-地-车协同的工作模式。因此凝练了路基服役状态监测天-空-车-地一体化协同监测内涵,包括:

1)平台协同。首先突破单一监测技术、单一平台的局限,构建天基平台(InSAR和光学遥感)、空基平台(无人机航测和LiDAR)、车辆平台和地面平台(TLS、GB-InSAR、GPS和GPR等)的天-空-车-地多平台立体观测体系。针对缓变型致灾和突发型灾害对路基服役的影响,根据监测特性和需求,制定针对性的监测方案,发挥各平台优势,进行星-地协同的有机结合,实现路基服役的监测对象以及基本要素的全覆盖。通过各个监测手段进行交叉验证与互补增强,提高时空覆盖度和观测精度。

2)尺度协同。以大尺度的区域构造、地面沉降的卫星遥测、轨检车为代表的轨道平顺性检测,能够监测区域、线域范围内监测信息,但区域大尺度监测数据的时空分辨率较低。航空平台的路基灾害局部尺度监测具有高空间分辨率特点,但获取的时间频率要根据任务需求设定。以地面采集为代表的观测尺度只能获取某一位置的灾情信息,但其具有实时监测的能力。因此,

根据监测目标及任务需求,通过各平台监测数据互补,弥补监测周期空白,满足对灾情连续监测的需求,既能进行大尺度的区域孕灾环境及灾害调查,又能排查中尺度区域内灾害隐患区,还能对小尺度的路基灾害灾变过程进行监测,聚焦灾害事件。

3)参数协同。不同参数反映不同灾情特征,沿线山体崩滑流、地震灾害、降水/洪水等对于监测对象而言属于外界因素,这些灾害的发生是个长期缓慢过程,未必会立即引起路基的破坏,即灾害的“发灾”未必造成路基“致灾”。结合路基本体变形、结构健康和轨道几何参数进行监测,多参数同时验证路基灾害的发育度,能够准确预测路基灾害及服役性能演化,精准判别灾情,在实际灾害发生前发出预警信息,以保证交通与人员安全。

4)多部门协同。建立汛期工务、机务、车务、调度部门路基灾害联防联控机制,各部门共享雨情、水情、灾情信息,加强信息沟通,紧盯降雨或地震过程,及时发布暴雨和地震信息,对重点降雨区域加大监测力度;加强降雨过程,工务、机务加强对线路路基状态的监测。机车乘务员不间断瞭望,防止突发性灾害致灾事故;列车调度员接到险情信息,立即下达指示和调度命令。坚守“情况不明,减速慢行,停车果断”的原则,并在灾后及时掌握路基灾害隐患。

4.2 天-空-车-地一体化协同监测方案

突发型灾害与缓变型致灾作用可能影响路基服役状态。根据孕灾环境、路基灾害特征及任务需求,制定多源协同智能监测技术方案。本文将路基服役过程孕灾环境与灾害监测任务分为两类:A类为面向山区铁路突发型灾害可能影响路基服役性能的路基灾害监测,旨在获取由地震或降雨引起铁路沿线的震裂山体隐患及路基本体灾害信息;B类为面向丘陵铁路缓变型致灾作用下的孕灾环境及路基灾害监测。

A类监测方案:针对山区铁路地震-降雨为诱发因素的路基灾害链形式,获取孕灾环境变化信息与路基灾变过程信息。协同监测方案为:(1)通过天、空基的InSAR和光学遥感技术获取路基周围高位、隐蔽的震裂崩滑隐患边坡信息,评估震裂灾害位置、面积及边界变化等信息。获取重点隐患区域去植被后的山体DSM,确定崩塌松散堆积体体积、震裂土体裂缝情况,察觉人难以到达的高位、隐蔽的山体崩滑及路堑边坡变形隐患信

息,判别其发育程度。(2)通过人工巡视、全站仪和 GPR 等手段协同,判别路基本体是否发生变形、结构劣化损伤等情况,是否影响其服役性能。(3)通过车辆测量平台,加强对震后、汛期轨道几何平顺性的监测,对孕灾环境改变后路基本体长期服役状态进行评判。

B 类监测方案:针对丘陵地区以降雨或湖水位变化为诱发因素的路基灾害链形式。协同监测方案为:(1)通过天、空基对地面不均匀沉降引起的塌陷进行探测,获取地面“沉降漏斗”区域,确定不均匀沉降量、塌陷规模、位置等信息,分析灾害对路基的服役影响。(2)协同轨检车获取铁路全线轨道平顺性信息,紧盯“沉降漏斗”区、紧邻施工地段等重点区域的轨道几何平顺性,确定线路劣化区段位置。(3)通过人工巡查、GPR 和全站仪协同对重点劣化区段的路基变形、内部结构损伤进行探测,对路基灾害隐患类型及其发展趋势进行评判。(4)对湖水位骤降/升影响浸水路堤服役的环境变化信息和汛期降雨量进行实时监测,掌握水位下降速率和小时降雨量信息,当降水过大时,应使列车慢行、绕行或禁行。

4.3 多源协同监测在路基灾害及服役状态监测的应用

借鉴笔者团队研究成果^[75],针对低山地区沪宁城际高速铁路的路基服役状态监测需求,制定了多源协同的监测方案(如图 7 所示)。该地区地势平坦,路基服役主要受缓变型致灾影响,且不涉及人难以到达的区域,因此不考虑使用航空无人机手段。应用流程为:(1)通过 InSAR 技术获取沪宁铁路沿线地面沉降信息,发现铁路 K235 和 K298~K300 附近地面沉降严重,可能危及路基服役;(2)进一步结合综合轨检车 TQI 确定轨道不平顺性工段,发现地面沉降区域中 K235 和 K299 工段的 TQI 超限最为频繁,进一步缩小了排查区域;(3)通过对隐患工段的路基沉降进行监测,发现 K235+587、K236+050 和 K236+095 的沉降过大,分别为 -46 mm、-17.7 mm 和 -16.8 mm,诊断这些工点为路基结构恶化。而 K299 紧邻地铁施工,沉降虽小,但该段 TQI 频繁超限,其 TQI 超限的缘由尚未明确,需要进一步调查;(4)通过 GPR 技术对 K235 和 K299 段内的路基内部状态进行诊断,发现 K235+587 段路基结构下部受河水位的影响导致内部结构劣化。K299+680 的路基由于紧邻既有线的施工引起该段坡脚变形而被破坏,从 GPR 图像中可以看出该

段路基结构的损伤信息。

笔者团队同样对艰险山区某路基灾害进行监测。该区域位于青藏高原东南部,为峡谷地貌,地形高差大,该地区年均降雨天数近 200 d(雨季时间长)。在施工期间,路基及施工便道穿越滑坡、崩塌体,使路基沿线不良地质隐患体在施工和运行期间对便道和路基工程的威胁极大。因此,通过空-天光学影像对沿线地质灾害高陡斜坡(滑坡隐患)、高位危岩(崩塌隐患)和潜在泥石流隐患进行解译。在 K38、K39 等段解译滑坡隐患 23 处,主要为巨型岩土混合滑坡,滑体主要为碎石土,地表植被发育。根据高位岩体临空条件、局部岩体脱离母体情况及坡面散落的块石等信息,圈定高位危岩、崩滑隐患 13 处。沿线泥石流类型主要为沟谷型与山坡型,坡面植被极为发育,使得泥石流沟内松散物源储量相对较小,但流域内降雨强度大,泥石流爆发频率较高而规模较小,确定了潜在泥石流隐患 12 处。在高路堤填筑压实过程中,长期降雨导致路堤变形大。因此,通过地面全站仪对路堤变形进行监测,及时掌握路基变形过程,确保施工安全。

4.4 多源协同监测在铁路路基灾害监测的应用展望

1)探究路基服役性能演化机制为灾害监测提供支撑。地质尺度的自然演化过程漫长,铁路建造填方及挖方工程破坏原有自然地质平衡,这使得原来由万年/百万年为周期的地质体发展演化过程极大缩短,在列车长期循环荷载下路基灾害灾变过程更为复杂。然而,在路基灾变整个过程中,孕灾环境、灾变阻断和灾害产生机制之间有着极为密切的关系。现阶段路基灾害研究主要针对单一灾害的响应机制和评估机制,对动载作用下地震-降雨-路基灾害、台风-暴雨-路基灾害等路基灾害复合链生机制研究相对缺乏,而掌握路基灾变过程能够为灾害监测预警提供理论支撑。

2)路基灾害识别与服役性能监测朝多源技术协同化发展。国家与铁路行业关于防灾减灾的任务需求紧迫,需要回答路基灾害“隐患在哪”“什么时候发生”及“如何避免发生”等关键问题。仅依靠以往的人工巡视、大地测量手段已经难以满足复杂孕灾环境下的路基安全服役监测需求。将卫星、北斗、各类传感器、视频影像等多手段、多平台技术进行综合交叉融合应用是未来发展方向,能够实现路基灾害“人防”+“技防”协同应用,保证铁路营运安全。

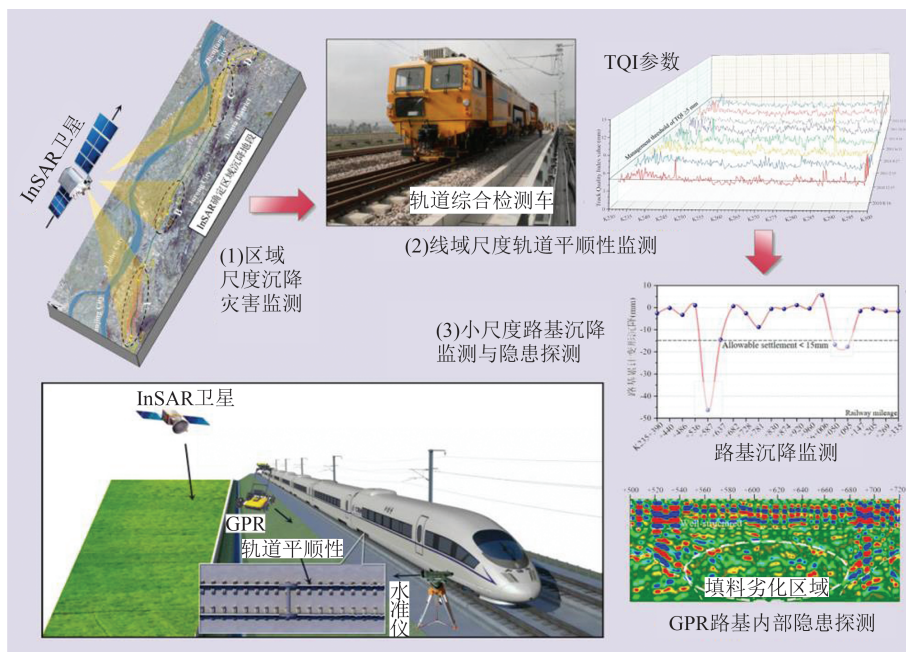


图7 多源协同在路基灾害及服役状态监测的应用

Fig. 7 Application of Multi-source Monitoring Techniques in the Subgrade Service Status of the Shanghai-Nanjing Railway

3)多源数据融合灾害隐患智能识别与预测至关重要。路基服役监测采集的数据具有多源异构、跨尺度、多模态等特点,导致对海量多源数据分析能力不足。机器学习方法能够挖掘孕灾环境因素和路基灾害隐患之间的复杂非线性关系,建立灾害隐患识别知识图谱。通过机器学习从海量GPR图片中快速识别路基灾害/病害信息。利用历史海量变形、降雨等数据,建立路堤及边坡发展态势预测模型,挖掘路基失稳变形、降雨临界阈值判据,从而实现监测数据的信息融合,能对路基灾害演化态势和灾害风险进行研判。

5 结 语

针对复杂孕灾环境下铁路路基隐患识别难、路基服役监测体系不完善等难题,本文基于近年来在运营铁路开展路基灾害监测与防治工程的经验,厘清了不同孕灾环境路基灾害隐患特征及影响因素,总结了多源监测技术应用于铁路路基灾害监测所表现的优势与自身条件限制和缺点,建立了天-空-车-地多源协同路基灾害隐患早期识别与服役状态监测体系,保障路基服役安全。主要结论如下:

1)总结了不同孕灾环境下路基灾害隐患特征。以地震、降雨为主要诱发因素的高山峻岭地区,路基灾害主要为高位陡坡、隐蔽性强的沿线地质灾害,类型为崩滑、滑坡和泥石流等突发性

灾害。诱发的灾害链式特征明显,主要为“地震-路基灾害”“地震-降雨-路基灾害”,且呈现出规模大、频发、难以观测的特点。以台风-暴雨为主要诱发因素的低山丘陵地区,台风导致暴雨频发和库水波动频繁,诱发的路基灾害点多、面广,规模普遍较小。诱发的路基灾害类型主要为下沉、外挤、边坡溜坍、边坡冲刷和滑坡等。

2)厘清了铁路路基服役状态监测内涵及特征。将路基服役状态监测定义为:对路基在长期服役过程中受突发性灾害(泥石流、滑坡、崩塌、洪灾等)与缓变型致灾(外界干扰、长期循环荷载)作用影响可能导致的路基结构损伤或功能损失等服役状态劣化的危险源及路基本体受灾程度进行监测,确定了5类路基服役状态监测内容,分别为路基变形监测、结构健康监测、路基沿线地质灾害监测、轨道几何状态测量和外部环境监测。

3)总结了多源监测技术应用在各监测中所表现的优势和限制,提出利用“天基”平台 InSAR 和光学遥感对区域铁路沿线地质灾害隐患进行普查。利用“空基”无人机 LiDAR 航测技术对高陡、重大地质灾害隐患地区进行详查。通过“车辆”综合轨检车对线路平顺性进行筛查,确定路基性能劣化“靶区”工段。并通过人工巡查、地面与路基内部检/监测手段,实现对路基灾害隐患及服役状态的排查。形成了天-空-车-地多源协同路基灾害隐患早期识别与服役状态监测体系,

建立以区域-工段-工点从面到点、星地协同的工作模式,形成了平台协同、尺度协同、参数协同、多部门协同的监测内涵,初步提出了监测方案。

4)应用多源协同监测体系监测沪宁城际高速铁路路基服役状态,通过InSAR技术确定沪宁铁路沿线软土地面沉降区域。利用综合轨检车TQI对线路不平顺性工段进行监测,确定了路基服役性能劣化的“靶区”工段。采用水准仪对路基沉降进行监测,并以15 mm高速铁路路基变形作为控制标准,最终确定了K235+587、K236+050、K236+095和K299地段为路基性能劣化的工点。利用GPR技术对其原因和恶化程度进行调查,发现K235处路基是由于河水水位变化和列车动荷载的作用导致路基内填料恶化,而K299处路基是由于紧邻既有线的施工引起路基结构损伤。证明了监测体系的有效性,实现路基灾害多层次、多维度的精准识别。

5)讨论了路基服役状态监测未来发展方向,通过掌握人类高填/深切工程的“工程演化”和长期循环荷载作用下路基灾害灾变演化机制,深化协同卫星、北斗、各类传感器、视频影像等多手段、多平台技术的综合交叉融合应用,开发多源数据融合处理的灾害隐患智能识别与预测方法,才能够准确判别路基灾害所处阶段和预测其发展态势,实现中长期预警与短时、实时预警的有机融合,为路基灾害防治工作和监测预警等资源的合理调配提供指导。

参 考 文 献

- [1] National Railway Administration of the People's Republic of China. 2016 Railway Safety Announcement [R/OL]. National Railway Administration of the People's Republic of China, <http://www.nra.gov.cn>, 2016. (铁路局网站. 2016年铁路安全情况公告[R/OL]. 国家铁路局, <http://www.nra.gov.cn>, 2016.)
- [2] Wu Y, Fu H R, Bian X C, et al. Impact of Extreme Climate and Train Traffic Loads on the Performance of High-Speed Railway Geotechnical Infrastructures [J]. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 2023, 24(3): 189-205.
- [3] Yu Jinxue. Analysis and Treatment of Subgrade Diseases in Parallel Sections of Newly-Built Passenger Dedicated Lines and Existing Lines [J]. *Railway Engineering*, 2009, 49(5): 87-88. (于进学. 新建客运专线和既有线并行地段路基病害的分析与处理[J]. 铁道建筑, 2009, 49(5): 87-88.)
- [4] Tan Jiahua. Instability Mechanism and Treatment Measures of Deep Cutting Slope of Zhangjiajie-Jishou-Huaihua High Speed Railway [J]. *Railway Engineering*, 2023, 63(7): 138-143. (谭家华. 张吉怀高速铁路深路堑边坡失稳机理及治理措施[J]. 铁道建筑, 2023, 63(7): 138-143.)
- [5] National Railway Administration of the People's Republic of China. Investigation on Major Railway Traffic Accidents Caused by Derailment of 43031 Freight Trains on the "10.15" Lizhan Line [R/OL]. National Railway Administration of the People's Republic of China, <http://www.nra.gov.cn>, 2020. (铁路局网站. "10.15"黎湛线43031次货物列车脱轨铁路交通较大事故调查情况[R/OL]. 国家铁路局, <http://www.nra.gov.cn>, 2020.)
- [6] Liu C, Li N, Wu H B, et al. Detection of High-Speed Railway Subsidence and Geometry Irregularity Using Terrestrial Laser Scanning [J]. *Journal of Surveying Engineering*, 2014, 140(3): 04014009.
- [7] She Xiaonian. Comprehensive Comments on the Present Situation of Monitoring Collapse and Landslide [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2007, 24(5): 6-11. (余小年. 崩塌、滑坡地质灾害监测现状综述[J]. 铁道工程学报, 2007, 24(5): 6-11.)
- [8] Wang Li. A Study on Key Technology of High Precision GPS Monitoring for Geological Hazard [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014. (王利. 地质灾害高精度GPS监测关键技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.)
- [9] Du Yuan, Wang Chun, Zhang Qin, et al. Real-Time GNSS Filtering Algorithm Considering State Characteristics of Loess Landslide Hazards [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(7): 1216-1222. (杜源, 王纯, 张勤, 等. 顾及黄土滑坡灾害状态特征的实时GNSS滤波算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(7): 1216-1222.)
- [10] Xing X M, Chang H C, Chen L F, et al. Radar Interferometry Time Series to Investigate Deformation of Soft Clay Subgrade Settlement: A Case Study of Lungui Highway, China [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(4): 429.
- [11] Dheenathayalan P, Small D, Schubert A, et al. High-Precision Positioning of Radar Scatterers [J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(5): 403-422.
- [12] Suo Z Y, Zhang J Q, Li M, et al. Improved InSAR Phase Noise Filter in Frequency Domain [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(2): 1185-1195.
- [13] Jung J, Kim D J, Lavalley M, et al. Coherent

- Change Detection Using InSAR Temporal Decorrelation Model: A Case Study for Volcanic Ash Detection[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(10): 5765-5775.
- [14] Gao Zhiliang, Xie Mingli, Ju Nengpan, et al. Multi-source Remote Sensing Dynamic Deformation Monitoring of Accumulation Landslide [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220149. (高志良, 解明礼, 巨能攀, 等. 堆积层滑坡多源遥感动态演变特征分析研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI:10.13203/j.whugis20220149)
- [15] Zhou Zheng, Zhao Guotang. Calculation Method of Track Quality Index [J]. *China Railway Science*, 2003, 24(3): 64-68. (周正, 赵国堂. 轨道质量指数计算问题的探讨[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(3): 64-68.)
- [16] Hu Yi, Xie Qiang, Li Chaoyang, et al. Comprehensive Geophysical Detection Method and Evaluation of Karst Roadbed Grouting [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2015, 23(2): 344-351. (胡熠, 谢强, 李朝阳, 等. 岩溶路基注浆质量综合物探检测方法与评价研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(2): 344-351.)
- [17] Dong Juhong, Zhao Zhigang. Analysis of the Strengthening Design and for Fill Embankment Disease of High-Speed Railway [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2013, 10(2): 66-73. (董炬洪, 赵志刚. 高速铁路无砟轨道填方路堤病害加固设计与效果分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2013, 10(2): 66-73.)
- [18] Gunn D A, Chambers J E, Uhlemann S, et al. Moisture Monitoring in Clay Embankments Using Electrical Resistivity Tomography [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 92: 82-94.
- [19] Lei T J, Wang J B, Li X Y, et al. Flood Disaster Monitoring and Emergency Assessment Based on Multi-source Remote Sensing Observations [J]. *Water*, 2022, 14(14): 2207.
- [20] 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. (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.)
- [21] Wu Lixin, Li Jia, Miao Zelang, et al. Pattern and Directions of Spaceborne-Airborne-Ground Collaborated Intelligent Monitoring on the Geohazards Developing Environment and Disasters in Glacial Basin [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(8): 1109-1121. (吴立新, 李佳, 苗则朗, 等. 冰川流域孕灾环境及灾害的天空地协同智能监测模式与方向[J]. 测绘学报, 2021, 50(8): 1109-1121.)
- [22] Sun Qihao, Liu Guiwei, Wang Fei, et al. Research and Application of Early Identification, Monitoring and Warning Technology of Railway Geological Disasters [J/OL]. *Railway Standard Design*, 2024, DOI: org/10.13238/j.issn.1004-2954.202302100005. (孙琪皓, 刘桂卫, 王飞, 等. 铁路地质灾害早期识别与监测预警技术及应用研究[J/OL]. 铁道标准设计, 2024, DOI: org/10.13238/j.issn.1004-2954.202302100005.)
- [23] Zhang Guanjun. Overview and Prospect of High-Speed Railway Operation Monitoring Technology [J]. *Railway Investigation and Surveying*, 2023, 49(1): 7-11. (张冠军. 高速铁路运营监测技术综述与展望[J]. 铁道勘察, 2023, 49(1): 7-11.)
- [24] Liu K, Wang M, Zhou T J. Increasing Costs to Chinese Railway Infrastructure by Extreme Precipitation in a Warmer World [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2021, 93: 102797.
- [25] Song Taoran. Multi-objective Concurrent Intelligent Optimization of Railway Alignments, Structures and Large-Scale Auxiliary Construction Projects in Complex Mountainous Regions [D]. Changsha: Central South University, 2023. (宋陶然. 复杂艰险山区铁路线路-结构物-大临工程多目标智能协同优化[D]. 长沙: 中南大学, 2023.)
- [26] Zhu Ying, Wei Yongxing. Characteristics of Earthquake Damage of Railway Engineering in Wenchuan Earthquake and Countermeasures for Seismic Design of Engineering [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(S1): 3378-3386. (朱颖, 魏永幸. 汶川地震铁路工程震害特征及工程抗震设计对策思考[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S1): 3378-3386.)
- [27] Shi Peijun, Yang Wentao. Compound Effects of Earthquakes and Extreme Weathers on Geohazards in Mountains [J]. *Climate Change Research*, 2020, 16(4): 405-414. (史培军, 杨文涛. 山区孕灾环境下地震和极端天气气候对地质灾害的影响[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(4): 405-414.)
- [28] Mou Kai. Research on Early Identification and Risk Evaluation Methods of Dangerous Rocks on Railway Slopes in Mountainous Areas [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022. (牟凯. 山区铁路边坡危岩早期识别与风险评价方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.)

- [29] Zheng Lang, Zhang Xin, Wang Lijuan. Emergency Investigation and Formation Mechanism of Landslide in Ganluo County, Sichuan Province [J]. *Yangtze River*, 2022, 53(8): 117-122. (郑琅, 张欣, 王立娟. 四川省甘洛县山体滑坡应急调查与成因机制分析[J]. 人民长江, 2022, 53(8): 117-122.)
- [30] Zhang Zhongli. Summary of Construction Mechanization of Nanning-Kunming Railway [J]. *Construction Machinery*, 1994(1): 35-37. (张仲礼. 南昆铁路施工机械化综述[J]. 建筑机械, 1994(1): 35-37.)
- [31] Liu Jianyou, Zhao Yong, Lü Gang, et al. Research on Risk Classification and Assessment Method for Tunnels Crossing Under High-Speed Railway Subgrade [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2020, 57(6): 8-16. (刘建友, 赵勇, 吕刚, 等. 隧道下穿高速铁路路基风险分级及风险评价方法研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(6): 8-16.)
- [32] Xie Qixin. Flood Control in Yueyang Section of Beijing-Guangzhou Railway [J]. *Subgrade Engineering*, 1999(5): 12-15. (谢启新. 京广线岳阳段防洪问题[J]. 路基工程, 1999(5): 12-15.)
- [33] 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.
- [34] Galve J P, Castaneda C, Gutierrez F. Railway Deformation Detected by DInSAR over Active Sinkholes in the Ebro Valley Evaporite Karst, Spain [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2015, 15(11): 2439-2448.
- [35] Liu Huan, Wang Lijuan, Ma Song, et al. Application of D-InSAR Technology in Vertical Deformation Monitoring of Subgrade and Slope in Chengdu-Kunming Double Track Railway [J]. *Railway Engineering*, 2020, 60(3): 67-72. (刘欢, 王立娟, 马松, 等. DInSAR技术在成昆铁路复线路基及边坡垂直变形监测中的应用[J]. 铁道建筑, 2020, 60(3): 67-72.)
- [36] Xu Wenbin, Luo Xingjun, Zhu Jianjun, et al. Review of Volcano Deformation Monitoring and Modeling with InSAR [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(10): 1632-1642. (许文斌, 罗兴军, 朱建军, 等. InSAR火山形变监测与参数反演研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(10): 1632-1642.)
- [37] Chen Xuan, Gao Wei, Duan Guangyao, et al. Settlement Monitoring and Influencing Factor Analysis of Beijing-Tianjin Intercity Railway(Beijing Section) [J]. *Remote Sensing Information*, 2020, 35(3): 78-84. (陈玄, 高伟, 段光耀, 等. 京津城际铁路(北京段)沉降监测及影响因素分析[J]. 遥感信息, 2020, 35(3): 78-84.)
- [38] Luo Q L, Zhou G Q, Perissin D. Monitoring of Subsidence Along Jingjin Inter-City Railway with High-Resolution TerraSAR-X MT-InSAR Analysis [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(7): 717.
- [39] Lai W, Shen Q, Wang H, et al. InSAR-Derived Land Subsidence in Wuhan Between 2015 and 2020 [J]. *All Earth*, 2022, 34(1): 224-242.
- [40] 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.
- [41] Ferretti A, Fumagalli A, Novali F, et al. A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(9): 3460-3470.
- [42] Gao Z, He X F, Xiao R Y, et al. Development of an Imagewise Stacking Method to Mitigate Atmospheric Effect with an Application to Lianyan Railway [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 4787-4797.
- [43] Wang H Y, Chang L, Markine V. Structural Health Monitoring of Railway Transition Zones Using Satellite Radar Data [J]. *Sensors*, 2018, 18(2): 413.
- [44] Zhu Y R, Qiu H J, Cui P, et al. Early Detection of Potential Landslides Along High-Speed Railway Lines: A Pressing Issue [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2023, 48(15): 3302-3314.
- [45] Wang dong, Zhang guangze, Xu Zhengxuan et al., Research on Railway Geohazards Early Detection Based on Time-Series InSAR Technology [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2019, 30(3): 85-91. (王栋, 张广泽, 徐正宣, 等. 基于时间序列 InSAR 技术的铁路地质灾害识别研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2019, 30(3): 85-91)
- [46] Journault J, Macciotta R, Hendry M T, et al. Measuring Displacements of the Thompson River Valley Landslides, South of Ashcroft, BC, Canada, Using Satellite InSAR [J]. *Landslides*, 2018, 15(4): 621-636.
- [47] Peduto D, Huber M, Speranza G, et al. DInSAR Data Assimilation for Settlement Prediction: A Case Study of a Railway Embankment in the Netherlands [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2017, 54(4): 502-517.
- [48] Liu X X, Wang Y J, Yan S Y. Interferometric SAR Time Series Analysis for Ground Subsidence of the Abandoned Mining Area in North Peixian Using Sentinel-1A TOPS Data [J]. *Journal of the Indian Society*

- of Remote Sensing*, 2018, 46(3): 451-461.
- [49] Xiang W, Zhang R, Liu G X, et al. Extraction and Analysis of Saline Soil Deformation in the Qarhan Salt Lake Region (in Qinghai, China) by the Sentinel SBAS-InSAR Technique[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2022, 13(2): 127-137.
- [50] Shami S, Azar M K, Nilfouroushan F, et al. Assessments of Ground Subsidence Along the Railway in the Kashan Plain, Iran, Using Sentinel-1 Data and NSBAS Algorithm[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 112: 102898.
- [51] Miao Xiaoqi. Application of Multi-source Remote Sensing Technology in the Identification of Debris Flow Source Within Complex Mountainous Areas in Southeast Tibet[J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(12): 2052-2060. (苗晓岐. 多源遥感技术在藏东南艰险复杂山区泥石流物源识别中的应用[J]. 地质通报, 2021, 40(12): 2052-2060.)
- [52] Liu Guiwei, Wang Changjin, Li Guohe, et al. Application Research on the Remote Sensing Technology in Geological Disaster Prevention and Control of Existing Railway[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2019, 36(6): 23-27. (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.)
- [53] Huntley D, Rotheram-Clarke D, Pon A, et al. Benchmarked Radarsat-2, Sentinel-1 and Radarsat Constellation Mission Change-Detection Monitoring at North Slide, Thompson River Valley, British Columbia: Ensuring a Landslide-Resilient National Railway Network[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2021, 47(4): 635-656.
- [54] Wu Lixin, Xu Zhihua, Fan Songtao, et al. Gully Erosion TLS Monitoring and Estimation in Area of Sparse Vegetation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(10): 1343-1349. (吴立新, 许志华, 范松滔, 等. 植被稀疏地区沟蚀变化的地面激光扫描监测与沟蚀量估算[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(10): 1343-1349.)
- [55] Stringer J, Brook M S, Justice R. Post-Earthquake Monitoring of Landslides Along the Southern Kaikoura Transport Corridor, New Zealand [J]. *Landslides*, 2021, 18(1): 409-423.
- [56] Li Xiaoling, Hu Caiyuan, Sun Quanfu, et al. Application of UAV Remote Sensing in Geological Survey of Collapses in Alpine Canyon Region[J]. *Geospatial Information*, 2021, 19(1): 78-81. (李小玲, 胡才源, 孙全福, 等. 无人机遥感在高山峡谷区崩塌地质调查中的应用[J]. 地理空间信息, 2021, 19(1): 78-81.)
- [57] Zhang Guoquan. Correlation Analysis on How to Reduce the TQI Index of High-Speed Railway[J]. *Railway Construction Technology*, 2016(2): 75-78. (张国全. 降低高速铁路TQI指标相关分析[J]. 铁道建筑技术, 2016(2): 75-78.)
- [58] Wang Guoxiang, Gao Jun, Lu Jiankang. Control Index and Inspection Technique of Track Geometry State in High-Speed Railway[J]. *Railway Investigation and Surveying*, 2012, 38(1): 1-4. (王国祥, 高俊, 卢建康. 高速铁路轨道几何状态控制指标及检测技术探讨[J]. 铁道勘察, 2012, 38(1): 1-4.)
- [59] Zhuang Peng, Jiang Nan. Using Track Quality Index (TQI) to Guide Line Maintenance[J]. *Railway Operation Technology*, 2008, 14(1): 27-29. (庄鹏, 姜楠. 利用轨道质量指数(TQI)指导线路养护维修[J]. 铁道运营技术, 2008, 14(1): 27-29.)
- [60] Liu R K, Xu P, Sun Z Z, et al. Establishment of Track Quality Index Standard Recommendations for Beijing Metro[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2015, 2015: 473830.
- [61] Lasisi A, Attah-Okine N. An Unsupervised Learning Framework for Track Quality Index and Safety[J]. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 2020, 7(1): 1-12.
- [62] Li M, Persson I, Spännar J, et al. On the Use of Second-Order Derivatives of Track Irregularity for Assessing Vertical Track Geometry Quality[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2012, 50(sup1): 389-401.
- [63] Kang Xiong, Wang Weidong, Liu Jinzhao. Research on Comprehensive Evaluation System for Track Irregularity of High-Speed Railway Based on RAMS[J]. *China Railway Science*, 2013, 34(2): 13-17. (康熙, 王卫东, 刘金朝. 基于RAMS的高速铁路轨道平顺状态综合评价体系研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(2): 13-17.)
- [64] Lu C F, Cai C X. Overview on Safety Management and Maintenance of High-Speed Railway in China [J]. *Transportation Geotechnics*, 2020, 25: 100397.
- [65] Chen Shuyang, Lu Liangkai, Yao Yongsheng. Service Status Monitoring of High-Speed Railway Subgrade Based on Correlation Analysis of Track Quality Index and Settlement[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, 42(6): 63-70. (陈舒阳, 路良恺, 姚永胜. 基于TQI与沉降关联性分析的高铁路基服役状态监测[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(6): 63-70.)