

基于多源遥感的铁路外部环境隐患监测方法综述

李治泓 朱庆 廖成 胡翰 陈琳

(西南交通大学地球科学与环境工程学院, 成都 611756)

摘要 随着中国铁路运营里程的不断增加, 铁路外部环境日益复杂, 以彩钢瓦房、防尘网、塑料大棚、地膜、塑料垃圾为主的铁路外部环境隐患层出不穷, 频繁引发铁路交通重大事故, 已经成为铁路安全运营的重要制约因素。铁路外部环境隐患的高效监测是实现治理的重要前提, 而遥感技术是目前实现大范围、低成本铁路外部环境隐患监测的最佳手段。为此, 文章对光学遥感、合成孔径雷达、激光雷达、地基视频监控等4类遥感监测技术的优势、局限及应用现状进行了梳理; 分析了基于人工特征和基于深度学习这两类监测识别方法的特点及不足; 最后, 从铁路外部环境多源遥感数据多层次融合、铁路外部环境隐患精准识别模型构建、知识引导的铁路外部环境隐患智能动态监测等方面, 对基于多源遥感数据融合的铁路外部环境隐患智能监测进行了展望。

关键词 多源遥感 监测技术 深度学习 知识图谱

中图分类号: TP79; U298.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-8518(2024)01-0015-14

DOI: [10.3969/j.issn.1009-8518.2024.01.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-8518.2024.01.002)

A Review of Multi-Source Remote Sensing Methods for Railway External Environmental Hazards Monitoring

LI Zhihong ZHU Qing LIAO Cheng HU Han CHEN Lin

(Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract With the continuous increase in the operational mileage of railways in our country, the external environment of railways is becoming increasingly complex. Hazards in the external environment of railways, mainly consisting of color steel tile houses, dust-proof nets, plastic greenhouses, ground films, and plastic waste, emerge frequently. These hazards, which frequently lead to major railway traffic accidents, have become a significant constraint on the safe operation of railways. The efficient monitoring of hazards in the external environment of railways is a crucial prerequisite for governance, and remote sensing technology is currently the optimal means to achieve large-scale, low-cost monitoring of external environmental hazards in railways. In this regard, this paper systematically reviews four categories of remote sensing monitoring technologies: optical remote sensing, synthetic aperture radar, lidar, and ground-based video surveillance. The paper discusses the advantages, limitations, and current applications of these technologies. It analyzes two types of monitoring and identification methods: those based on artificial features and those based on deep learning, highlighting their characteristics and shortcomings. Finally, the paper looks forward to the intelligent monitoring of railway external

收稿日期: 2023-09-20

引用格式: 李治泓, 朱庆, 廖成, 等. 基于多源遥感的铁路外部环境隐患监测方法综述[J]. 航天返回与遥感, 2024, 45(1): 15-28.

LI Zhihong, ZHU Qing, LIAO Cheng, et al. A Review of Multi-Source Remote Sensing Methods for Railway External Environmental Hazards Monitoring[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2024, 45(1): 15-28. (in Chinese)

environmental hazards based on the fusion of multi-source remote sensing data at multiple levels, the construction of precise identification models for railway external environmental hazards, and knowledge-guided intelligent dynamic monitoring of railway external environmental hazards.

Keywords multi-source remote sensing; monitoring technology; deep learning; knowledge graph

0 引言

铁路在我国综合交通运输体系中扮演着至关重要的角色，是国民经济大动脉和重要的基础设施。随着我国铁路运营里程的不断增加，铁路在西部复杂艰险山区的覆盖范围快速提升，铁路外部环境日益复杂，安全隐患频繁引发重大事故，严重威胁铁路运营安全^[1-3]。国家铁路局2023年3月发布《铁路安全风险分级管控和隐患排查治理管理办法》明确指出“推进事故预防工作科学化、信息化、标准化，实现把风险控制在隐患形成之前、把隐患消灭在事故前面。”为保障铁路安全运营，亟需对铁路外部环境隐患实施高效、精准、科学、全面的风险评估及防治措施。

铁路外部环境隐患的可靠识别和动态监测是实现风险评估、防治的重要前提。国务院办公厅转发的《关于加强铁路沿线安全环境治理工作的意见》指出，铁路两侧500 m范围内的飘浮物隐患为重点治理对象。据多个铁路局实际数据统计，飘浮物隐患的主要类型是彩钢瓦房、防尘网、塑料大棚、地膜和塑料垃圾^[4-6]，本文也主要针对这5类隐患开展研究分析。由于铁路线路跨越复杂多样的地形地貌环境，隐患分布散乱，部分隐患较细碎，同一类型隐患可能会存在形态与结构上的显著差异，不同类型的隐患也可能呈现相似特征，这导致全域隐患精确识别、监测的难度较大^[7-8]。此外，隐患受外界因素（如强降雨、大风等）影响而导致事故的发生，各因素之间错综复杂的因果关系及相互作用机理使得动态监测预警难度急剧增加。

铁路外部环境隐患监测目前主要依赖人工实地巡检，人工实地巡检主观因素多，且部分区域巡检人员不可到达，另外由于隐患点多、面广，导致隐患排查效率不高、时效性较差，隐患判识结果可靠性不强。因此，基于人工实地巡检的隐患监测方法难以满足我国铁路高质量发展和防灾减灾的需求^[9-11]。遥感技术具有覆盖范围广、对地观测效率高、信息丰富等优点^[12-14]，利用遥感技术对铁路沿线安全隐患实施智能识别及监测预警具有重大意义，是降低铁路外部环境事故风险的有效途径。

本文首先介绍了光学遥感、合成孔径雷达、激光雷达及地基视频监控作为铁路外部环境重点类型隐患遥感监测技术的应用现状以及各自的优势和不足；然后总结了现有基于遥感监测技术的隐患自动识别监测方法的特点和局限；最后，对铁路外部环境重点类型隐患智能监测的研究方向进行了展望。

1 铁路外部环境隐患遥感监测技术

近年来，空-天-地遥感平台（如星载平台、机载平台、车载平台、地基平台、背包平台等）和传感器技术（如可见光、SAR、红外传感器等）快速发展，为铁路外部环境重点类型隐患的识别及监测提供了更高空间、时间、光谱、辐射分辨率的多源多模态遥感数据。

1.1 光学遥感

光学遥感技术在铁路外部环境隐患监测方面取得了一定成效，通过获取蕴含丰富监测信息的光学影像，结合隐患自身特征，该技术已成为高效识别、监测铁路外部环境隐患的重要工具。光学遥感监测技术是利用光学成像技术采集地表反射的可见光、近红外光、短波红外光等，对所获得的影像进行分析，以实现识别和监测地物的任务要求^[15-16]，通常以星载、机载平台为主。光学遥感数据根据传感器采集信

号的波段数量可划分为全色、多光谱、高光谱影像^[17]。全色影像利用单一宽波段记录整个光谱范围,能反映出隐患精细的几何结构和纹理特征信息,具有较高的空间分辨率,但缺乏光谱信息。多光谱影像通过几个离散的波段(如红、绿、蓝和近红外波段等)获取目标的较丰富光谱特征信息,其空间分辨率低于全色影像^[18]。高光谱影像覆盖大量连续狭窄波段(数十到上千个),可以得到隐患详细的光谱特征,但受到成像技术限制,其空间分辨率最低^[19]。因此,在实际应用中,通常将全色影像、多光谱影像、高光谱影像进行融合处理,以得到高空间、高光谱分辨率的光学遥感融合影像^[20],其丰富的光谱、几何结构、纹理特征信息等优势成为铁路外部环境隐患识别与监测的有利条件^[21]。

目前,光学遥感技术在铁路外部环境隐患监测方面得到了较多的应用。我国自主研发的“高分二号”、“高分七号”卫星可为隐患监测提供空间分辨率优于米级的高精度遥感影像^[22],其中“高分二号”卫星遥感影像应用较多,在武九高铁鄂州东站至大冶北站区段、京津城际铁路试验区域进行了应用^[23-24]。但这类单源星载光学遥感可能存在重访周期过长、受被动成像机制限制等问题,在重返时受云雾、光照、气候影响,难以获取满足隐患定期监测的时间窗口需求的影像。为此,有学者采用多源多时相星载光学遥感影像,并从中筛选出在监测时间窗口内效果较佳的影像对隐患进行监测,如 SPOT-6、WorldView-3、Pléiades-2、SkySat 等遥感影像^[25]。然而,在我国西南地区多云多雨的气候条件下,星载光学遥感技术仍然会受到较大程度的干扰,严重制约数据持续获取的可靠性。机载光学遥感通常处于较低的观测高度,且有更高的灵活性,能够更有效地克服云层带来的观测障碍。因此,学者在星载光学遥感技术的基础上,结合了机载光学遥感技术对隐患进行监测^[5]。但机载光学遥感技术也面临一些难题:高空机载平台数据获取成本高、灵活性差、时效性难以保证;无人机平台存在坠落风险,易造成事故,为此国家铁路部门规定铁路沿线两侧 500 m 范围禁飞^[26]。

1.2 合成孔径雷达

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一类主动式微波成像技术,通过发射微波作用于地物产生后向散射能量所形成的回波信号,来获取地物的表面特征和介电性质,并利用成像处理算法生成 SAR 影像。由于 SAR 使用微波主动成像,其穿透性和抗干扰性较强,不受天气、云雾、光线影响,具备全天时、全天候监测的优势^[27]。此外,彩钢瓦通常由金属材料制成,其微波反射率远远高于其他地物^[28],因此,利用 SAR 对彩钢瓦房隐患进行监测时存在一定的优势。极化合成孔径雷达(Polarimetric SAR, PolSAR)是一种多参数、多通道的 SAR 技术,其通过发射和接收多种极化方式的微波来探测目标的极化散射特征^[29]。微波极化散射对地物的各种属性如材质、湿度、几何形态和表面粗糙度等高度敏感^[30-33]。PolSAR 的优势在于其可反映隐患丰富的微波极化散射信息,有助于对铁路外部环境重点类型隐患进行识别和监测。因此,PolSAR 在铁路外部环境隐患监测方面得到了一定的应用。

我国自主研发的 C 频段米级空间分辨率多极化 SAR 卫星“高分三号”,以及国际上的 RADARSAT-2、Sentinel-1 等 PolSAR 卫星为铁路外部环境隐患识别监测提供了丰富的雷达、极化特征,其能力已在我国北京、江门等地进行了验证^[34-35]。针对我国部分地区的星载 PolSAR 回访周期较长、极化类型较少、SAR 波段对部分隐患的针对性不强等问题,已有学者设计了专用于服务铁路外部环境隐患识别监测的全极化 SAR 卫星^[36]。但由于成像机制的原因,SAR 影像不可避免的存在相干斑噪声,对其影像质量和解译效果造成影响。此外,SAR 影像不太符合人类视觉感知习惯,使得在基于深度学习的识别监测方法应用中较难人工标注训练样本,增加了监测应用的难度。

1.3 激光雷达

激光雷达(Light Detection and Ranging, LiDAR)是一种通过主动发射激光脉冲获取目标物三维空间信息的观测技术^[37]。在铁路外部环境隐患监测中应用较多的是机载及地面(车载、背包)平台^[38]。LiDAR 的激光光束具有较高的单色性、方向性和相干性,可将能量聚焦,这使得 LiDAR 在数据精度、穿

透性和抗干扰性等方面表现出色,且工作不受光照条件影响,为精准提取和精细刻画监测目标三维空间特征提供了有效的技术手段。LiDAR数据中包含的高度特征、激光反射强度和波形信息,为隐患监测提供了更多维度的数据支撑,能够提高对隐患的识别精度^[39]。目前,LiDAR已被应用于铁路外部环境隐患监测,利用LiDAR数据中精细的三维空间信息,可实现铁路与外部环境隐患间的测距分析^[40]、三维跟踪分析^[41]。然而,目前应用最为广泛的LiDAR采用单波段,无法提供丰富的光谱信息,难以直接用于隐患识别。在对隐患进行识别和监测时,常常需要将LiDAR数据和光学影像相结合,利用前者的高度特征、激光反射强度和波形信息来增强识别监测效果^[42]。此外,由于LiDAR单一设备探测范围的限制以及监测环境中存在遮挡,LiDAR技术难以提供大范围的监测数据,且单一平台的LiDAR往往无法获取到隐患完整的三维结构信息。

1.4 地基视频监控

面对我国不断扩张的铁路网络与日益复杂的运营环境,铁路部门积极构建了铁路综合视频监控系统、高速铁路自然灾害及异物侵限监测系统综合监测体系,以满足不断增长的安全运营监测需求^[43]。这些监测系统在铁路车站、区段、设备机房等大量点位上部署了地基视频监控设施。对于铁路外部环境关键管控区域,如复杂山区、人口密集地区以及隧桥结合部等,采用了红外、激光综合高清视频监控技术^[44]。丰富的地基视频监控数据为实现重点区域铁路外部环境隐患的针对性排查和全天时、全天候持续监测提供了有力支持,使其在复杂多变的城际铁路和艰险环境下的铁路运营场景中得到广泛应用^[45-47]。但受成本限制,综合高清视频监控通常仅支持重点管控区域的布设,且由于布设的位置受限,部分视野可能被建筑物、树植等环境因素遮挡,无法完整覆盖铁路两侧500 m范围的外部环境。

综上所述,单一的遥感监测技术难以周期性全面覆盖铁路外部环境区域,无法全面、准确地对隐患进行监测。因此,需结合各类遥感技术的特点,根据实际铁路沿线区域外部环境情况选择多源遥感监测技术,发展高效精准的多源遥感监测数据多层次融合体系,满足铁路外部环境重点类型隐患的全面识别与监测的高质量数据需求。表1归纳了本文所介绍的各项遥感监测技术的精度、监测条件、成本、监测周期、优势及主要局限。

表1 遥感监测技术对比
Tab.1 Comparison of remote sensing monitoring data sources

遥感数据源	星载光学影像	机载光学影像	星载 PolSAR	机载 LiDAR	地面 LiDAR	地基视频监控
数据精度	亚米级	厘米级	米级	亚米级	厘米级	毫米级
监测条件	天气、光照条件较好且无云雾	天气、光照条件较好且无云雾	全天时、全天候	全天时、全天候	全天时、全天候	全天时、全天候
成本	较低	较高	较低	较高	较高	较高
监测周期	依卫星重访周期(例如 GF-2 卫星为 5 d)	依采集周期	依卫星重访周期(例如 GF-3 卫星为 12 h)	依采集周期	依采集周期	持续监测
优势	丰富的光谱、几何结构、纹理特征信息	数据精度高; 监测信息丰富; 可按需采集	全天时、全天候监测; 极化信息可用于监测	可获取隐患三维结构信息	可获取隐患精细三维结构信息	可持续监测
局限	易受光照、天气、云雾影响, 导致数据缺失或质量不高	无人机平台铁路沿线两侧 500 m 范围禁飞, 高空机载平台采集周期较长	独特的成像机制及相干斑噪声导致解译难度大	无人机平台铁路沿线两侧 500 m 范围禁飞, 高空机载平台采集周期较长	难以获取隐患完整的三维信息, 且部分铁路沿线区域不可达	无法覆盖铁路外部环境全域

2 铁路外部环境重点类型隐患监测方法现状

铁路外部环境重点类型隐患监测的基本过程是通过各类监测技术获取的监测数据,结合隐患监测方法,定期识别彩钢瓦房、塑料大棚、地膜、防尘网、塑料垃圾等主要类型隐患的时空分布信息,其本质

是遥感影像像素级分类问题。早期基于遥感监测数据的隐患监测方法以目视解译法为主, 即解译人员通过直接观察影像, 识别和解译遥感影像中的隐患, 这种方法面临主观性影响多和人工劳动强度大的问题。随着遥感影像自动化解译方法的发展, 在隐患监测领域也开启了应用, 极大程度上缓解了目视解译法的压力。对于目前应用于铁路外部环境隐患监测领域的自动化解译方法, 可根据隐患分类特征获取的方式划分为基于人工特征和基于深度学习两大类。

2.1 基于人工特征的隐患监测方法

基于人工特征的隐患监测方法是指通过领域先验知识分析隐患与其他地物特征上的差异, 人为地设计特征模型, 再结合人工设定阈值或传统机器学习模型对铁路外部环境重点类型隐患进行识别^[48-49], 基于人工特征的隐患监测方法流程如图 1 所示。

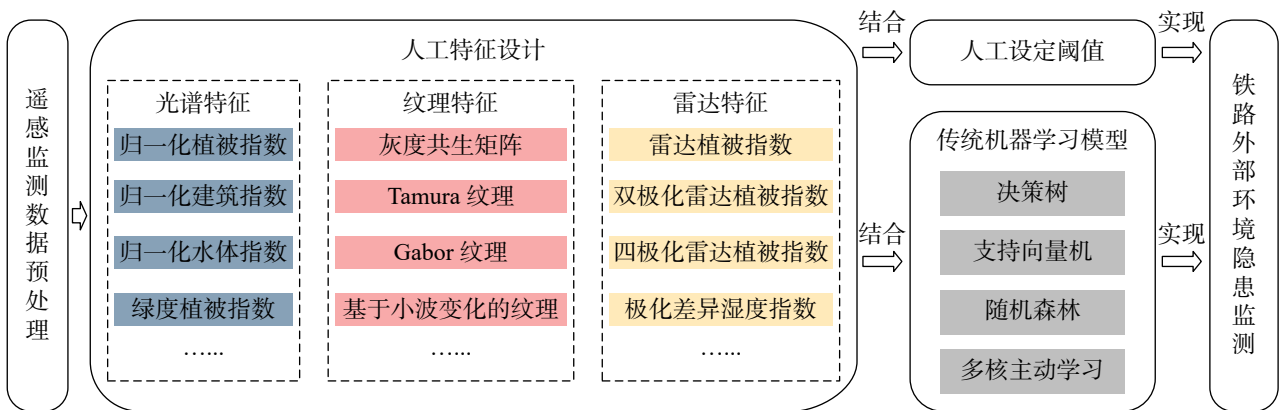


图 1 基于人工特征的隐患监测方法流程

Fig.1 Process of hazard monitoring method based on human-crafted feature

在人工特征设计方面, 学者通常结合领域先验知识从各类光谱、纹理、雷达等特征中选取能映射隐患的特征类型, 对所选的特征进行组合、权重调节及特定的数学变换, 从而构建出能够高效凸显隐患特点的人工特征模型。以光谱特征为主的人工特征模型应用较为广泛, 例如: 彩钢瓦通常为蓝色或红色, 在蓝色和近红外波段之间呈现出明显的“U形谷”, 针对彩钢瓦房这种独特的光谱特征, 学者构建了彩钢瓦指数^[50]、归一化差异蓝色建筑指数^[51]、归一化差异红色建筑指数^[51]等对彩钢瓦房进行提取; 针对以塑料垃圾在近红外波段具有独特的反射特性, 学者构建了塑料指数和反向归一化植被指数^[52]等对塑料垃圾进行提取。但这类以光谱特征为主的方法通常以像素为分析单元, 难以将光谱特征、纹理特征及上下文信息结合, 无法满足复杂的环境下的隐患识别监测需求。为解决这一问题, 基于对象的图像分析方法被提出, 通过采用非参数监督分类^[53]、多分辨率分割^[54-55]、平均局部方差函数^[56]将像素分组以形成对象, 再对各类对象的特征进行分析, 构建出更具代表性的隐患人工特征模型。此外, 随着 SAR、LiDAR 等多源遥感数据的广泛应用, 结合雷达特征^[57]、高度特征^[58]的人工特征模型也进一步提升了隐患识别的精度。

在结合机器学习模型进行识别监测方面, 学者对机器学习模型本身研究并不多, 一般直接采用较为成熟的模型, 包括决策树^[59]、支持向量机^[60]、随机森林^[61]、神经网络模型^[62]、多核主动学习^[63]等。

综上, 基于人工特征的隐患监测方法可高效率运行, 在具有明显选定特征的影像上表现良好。但人工特征模型在设计的过程中需要大量的领域先验知识来支撑特征的选取, 并且需要大量交叉验证才能有效应用。此外, 防尘网、塑料大棚、地膜等塑料覆盖物的光谱、散射特征相似, 也导致基于人工特征的监测方法难以将它们彼此区分。并且, 当面对特征存在一定差异的隐患和新的场景时, 基于人工特征的隐患监测方法需要重新设计人工特征模型, 泛化能力较差, 难以灵活应用于广域范围铁路外部环境大规模的隐患监测。

2.2 基于深度学习的隐患监测方法

基于深度学习的隐患监测方法是通过各类遥感监测数据构建训练数据集，采用深度学习模型自动学习隐患分类特征，以实现铁路外部环境重点类型隐患的识别^[64]。基于深度学习的隐患监测方法流程如图2所示。

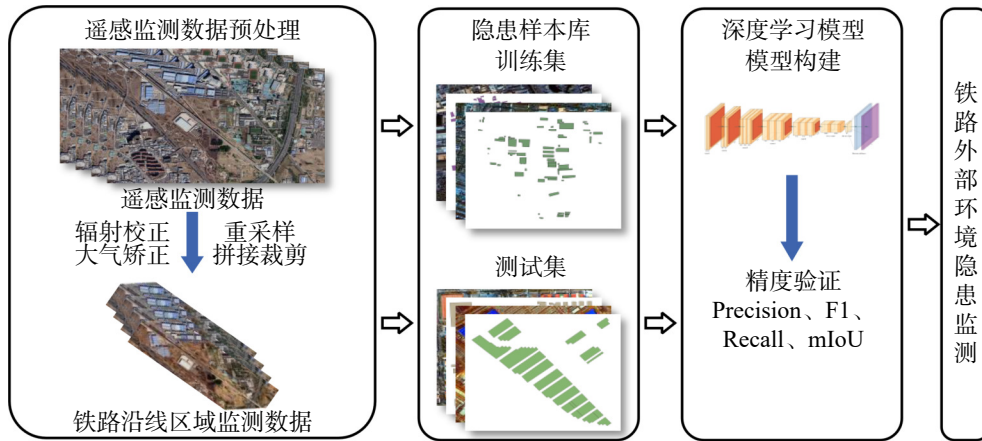


图2 基于深度学习的监测方法流程

Fig.2 Process of hazard monitoring method based on deep learning

基于深度学习的方法可以通过端到端的训练，自动从数据中学习从低层次光谱、纹理到高层次语义等各层次的分类特征，能够有效地对复杂场景影像进行解译，在铁路外部环境重点类型隐患的识别与监测方面取得了良好的效果^[65]。目前，针对本文所研究的隐患类型，卷积神经网络模型应用最为广泛。其中一些研究采用现有的卷积神经网络模型结构对隐患进行提取，例如：文献[66]采用了1D-CNN捕捉光谱曲线的微妙细节和整体趋势来实现塑料大棚的识别；文献[67]采用了DeepLabv3+语义分割模型，该模型使用空洞卷积来扩大感受野，有助于更好地捕捉影像中的上下文特征，使其能够准确地识别出防尘绿网；文献[68]采用了U-net模型，这种网络的结构呈U形，包含对称的下采样（编码器）和上采样（解码器）路径，有助于更好地捕获影像中的局部和全局特征，实现防尘网精准识别。尽管现有的网络模型结构被直接应用于隐患识别并取得了一定成效，但对隐患和遥感影像特点的考虑尚显不足，对于隐患边界的精准提取、小尺寸隐患的可靠识别监测以及存在相似特征隐患的区分等方面仍有待提升。因此，许多学者致力针对这些特点优化卷积神经网络模型以取得更优的识别效果，例如：针对彩钢瓦房所处背景场景复杂这一特点，文献[69]构建了一种基于变形感知特征增强和对齐网络（DFEANet），其中变形感知特征增强模块可自适应调整感知场，以更好地分离复杂背景和彩钢瓦房建筑，特征对齐与门控融合模块用于细化边界、保留结构细节，以改善相邻特征之间的错位，并在融合过程中抑制冗余信息；针对隐患类别间数量和分布不均衡，且部分隐患尺度较小的特点，文献[70]提出了一种基于ResUNet模型的方法，通过引入残差块对U-NET进行改进，以更有效地学习和保留图像中的特征，同时引入纹理增强模块以提高对纹理特征的感知，并采用多尺度Lovász损失函数解决类别不平衡问题，在识别隐患边界和小目标时具有较优效果；针对塑料大棚、地膜尺度多样且存在大量相似特征而难以准确区分的特点，文献[71]提出了扩张和非局部卷积神经网络（DNCNN），其包括多个多尺度扩张卷积块和一个非局部特征提取模块，前者用于聚合多级空间特征以考虑地物尺度变化，后者通过非局部模块提取全局和上下文特征，从而增强大棚和地膜之间的可分性。

此外，针对高质量的像素级别标签获取成本较高的问题，学者们引入了半监督和弱监督的学习范式，例如：文献[72]使用多尺度可变形卷积神经网络适应复杂城市景观，采用半监督学习策略整合有限标记数据和大量无标记数据，提高了模型识别防尘网的泛化能力和性能；文献[73]提出了一

种粗到细的弱监督分割方法, 利用弱监督学习降低标签获取成本, 再通过先分类-再分割策略提高防尘网识别的完整性和准确性。

综上所述, 基于人工特征的隐患监测方法在有明显选定特征的影像上表现良好, 但人工特征模型的构建需要大量先验知识支撑, 在铁路覆盖范围广泛、环境及隐患复杂多样、监测数据多源异构等情况下存在较大局限。相比之下, 基于深度学习的方法通过端到端的训练, 自动从数据中学习各层次隐患特征, 通常具有更优的识别效果和泛化能力, 但面对广域范围铁路外部环境隐患监测的应用场景时, 仍普遍存在人工标注训练样本数据匮乏、泛化能力有限、特征学习和模型训练过程复杂且耗费时间较长等困境。此外, 深度学习模型学习到的隐患特征不一定有清晰的物理意义, 存在可解释性较差的问题。为克服这些限制, 可以深入研究迁移学习、增量学习、半监督学习、自监督学习、强化学习、元学习等方式, 并结合领域先验知识引导提取高层次语义特征, 降低标注数据依赖, 使提取结果更精准、全面、可靠, 使模型泛化能力更强、更加适用广域范围铁路外部环境。

3 铁路外部环境重点类型隐患智能监测研究展望

在遥感监测技术和人工智能蓬勃发展的大背景下, 海量多源异构遥感数据的涌现和先进深度学习模型的引入, 极大地提高了铁路隐患监测的精度、效率及自动化水平。然而, 面对铁路运营中复杂多变的外部环境和动态监测的应用场景, 铁路隐患监测在数据、模型和知识应用层面仍然面临着系列的挑战。本文从铁路外部环境多源遥感数据多层次融合、铁路外部环境隐患精准识别模型构建、知识引导的铁路外部环境隐患智能动态监测这 3 个方面进行展望, 3 方面之间的关联如图 3 所示。

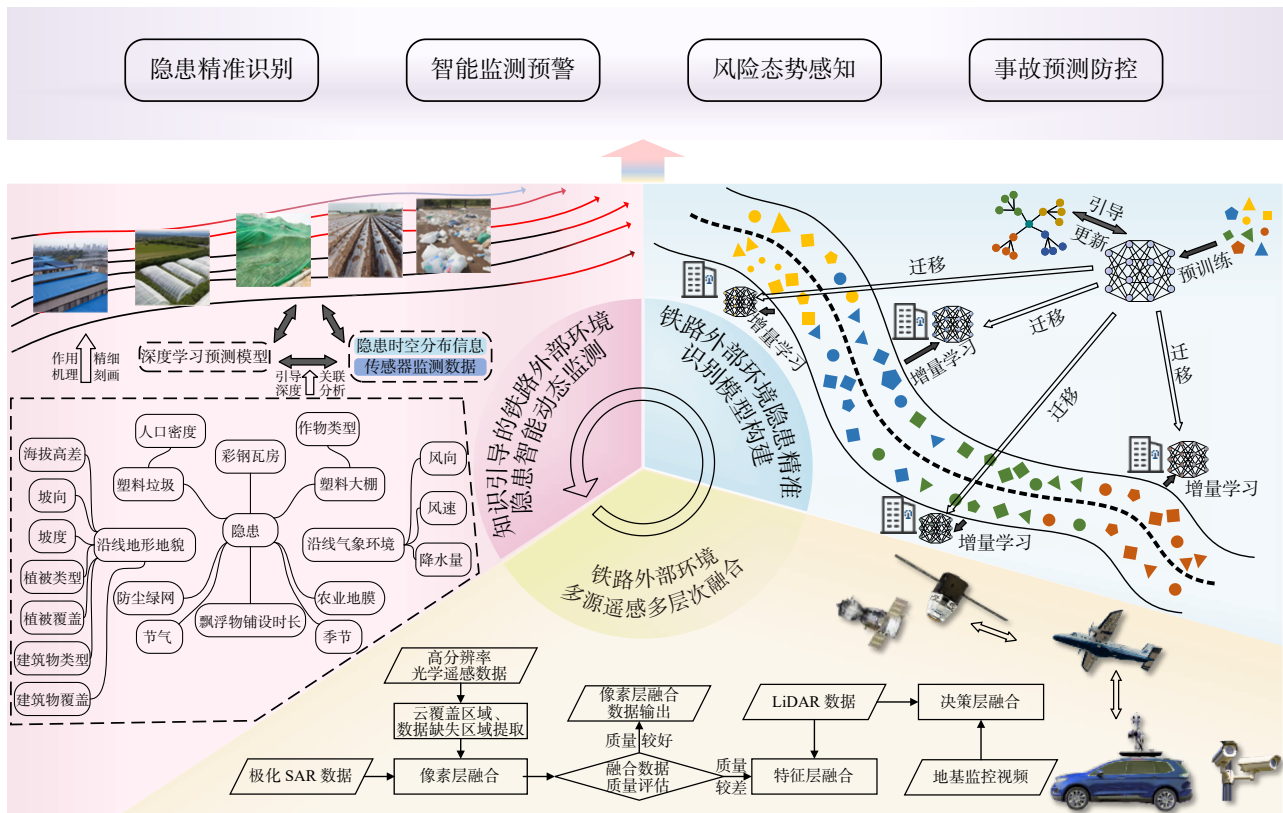


图 3 多源遥感融合隐患智能监测的展望

Fig.3 The prospect of multi-source remote sensing fusion for intelligent hazard monitoring

3.1 铁路外部环境多源遥感数据多层次融合

光学遥感、SAR、LiDAR、地基视频监控技术在铁路外部环境隐患识别监测方面提供了多源异构的监测数据，且均取得了一定的成效。然而，这些遥感技术在抗干扰性、全天候监测、成像噪声、分类信息的丰富程度、数据覆盖完整性等方面仍存在或多或少的局限。此外，铁路外部环境与隐患自身的复杂多样性，以及部分线路高频的巡检需求，对遥感监测数据的时空分辨率也提出了挑战，现实中难以直接获取满足这些要求的高质量监测数据^[74]。多源遥感数据融合有望克服以上限制。现有遥感数据融合可分为3个层次——像素层融合、特征层融合及决策层融合^[75]。像素层融合主要有全色、多光谱、高光谱影像之间的融合，以及光学遥感与SAR之间的融合。通过像素层融合可以引入更丰富的分类信息，也可以利用SAR辅助光学影像去云^[76]，如何实现多源影像的高效校正、配准等预处理及多源影像间的高精度无缝融合是像素层融合亟需关注的重点问题；特征层融合针对遥感数据的特点提取特征来进行融合，具有灵活性、融合效率高等优势^[77]，在融合过程中如何实现多源异构数据中隐患特征对齐并制定有效的特征融合策略是需要关注的研究方向；而决策层融合则涉及深层次的语义信息融合，具有鲁棒性、自适应性强等优势^[78]，如何实现多源异构数据中存在较大差异和潜在冲突的语义信息的高质量融合是重要研究方向。因此，未来可进一步探索面向铁路外部环境隐患监测应用的多源遥感多层次有效协同融合策略，通过系统深入分析多源遥感数据间的互补合作关系，整合不同平台和传感器的优势，为铁路隐患识别监测提供高质量数据支撑。此外，从硬件技术的角度出发，发展多模融合成像系统也是实现多源遥感数据高效融合的有效途径，可以有效降低多源遥感数据融合的复杂度，显著提升融合性能。

3.2 铁路外部环境隐患精准识别模型构建

基于深度学习的隐患监测方法相较于基于人工特征的隐患监测方法在大量研究场景下展现出了更高的精度和更强的适用性，但深度学习模型可解释性较弱，且通常依赖于大量的人工标注训练样本数据，并且，实际应用中难以获取广域范围铁路外部环境中大规模、高质量、完备的训练样本数据，导致深度学习模型隐患识别监测的泛化能力有限。领域先验知识的结合能够有效降低深度学习对训练样本数据的依赖^[79]。知识图谱可以有效整合领域先验知识，并以结构化的形式对领域先验知识进行存储，使得深度学习模型能够更好地理解和利用领域先验知识^[80]。迁移学习可以将源域中从大量标注训练数据里提取的知识迁移至目标域，以提高在目标域上的性能^[81]。因此，在铁路外部环境隐患精准识别模型构建过程中，可建立铁路外部环境关键类型隐患的遥感知识图谱，通过共享实体和关系、实体对齐、语义相似度计算以及领域自适应等方式，利用知识图谱为模型迁移提供丰富的语义信息和关联关系，引导和约束根据训练样本数据丰富地区构建的隐患识别模型迁移至铁路全域范围，从而提升对铁路外部环境隐患的识别性能^[82-83]。通过上述构建方式可以实现数据-知识协同驱动，使得深度学习模型能够对广域范围铁路外部环境重点类型隐患实现精准识别，也是提升深度学习模型可解释性的一个重要方向。此外，增量学习可在已有深度学习模型的基础上，通过引入新的隐患数据或任务来更新和扩展模型，并使深度学习模型对新旧隐患识别监测任务均拥有较好的性能^[84-85]，因此增量学习是实现识别模型快速落地应用的重要方向。

3.3 知识引导的铁路外部环境隐患智能动态监测

铁路外部环境隐患涵盖的类型繁多且数量庞大，其演化为事故受多种错综复杂的因果关系影响，仅通过铁路外部环境重点类型隐患的时空分布信息对其进行定期监测，以及对监测结果不分主次顺序的治理管控，可能会导致较高风险隐患未被及时治理，从而引发事故。计算流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）模型可以对复杂环境下隐患受风场等因素作用下的运动轨迹进行模拟，并结合各类传感器的动态监测数据（风速风向、降雨量等），对铁路外部环境隐患进行精细化智能动态监测^[86]。但CFD模拟通常运算量较大，难以应用于大尺度场景。CFD模拟结合深度学习技术可以构建降阶模型，实现对CFD模拟隐患复杂侵限时空过程的高效近似^[87]。然而，深度学习模型的构建面临铁路外部环境隐患

侵限训练样本数据不完备的情况,需结合侵限相关的专家经验知识以提升基于深度学习的CFD降阶的模拟精度^[88]。知识图谱具备对事故多因素耦合触发机理深层次精准刻画的能力^[89],可通过充分考虑各类型隐患的自身属性,以及隐患与环境因素间的互馈作用与级联效应,结合侵限事故风险管控领域专家经验知识来提取事故风险因素,并根据重点类型隐患历史事故信息,抽取事故触发的风险因素本体及相关知识,构建铁路外部环境重点类型隐患侵限知识图谱^[90]。因此,通过知识图谱引导CFD深度学习降阶模型的构建,是揭示隐患-事故安全态势时空演化规律、实现隐患动态智能监测所值得关注的研究方向。

4 结束语

面向铁路外部环境重点类型隐患高效、精准、智能监测需求,本文分析了光学遥感、合成孔径雷达、激光雷达、地基视频监控作为铁路外部环境重点类型隐患遥感监测技术的优势、局限及应用现状,归纳总结了以基于人工特征和基于深度学习为代表的两类铁路外部环境重点类型隐患监测方法的特点与不足。通过分析发现,单一遥感监测技术在抗干扰性、全天候监测、成像噪声、分类信息的丰富程度、数据覆盖完整性等方面仍存在或多或少的局限,难以直接获取满足隐患监测要求的高质量监测数据;现有隐患监测方法泛化能力均有限,难以对广域范围铁路外部环境适用;隐患侵限事故演化机理复杂,仅通过定期监测隐患的时空分布信息可能导致风险管控滞后。为了应对这些局限与挑战,从铁路外部环境多源遥感数据多层次融合、铁路外部环境隐患精准识别模型构建、知识引导的铁路外部环境隐患智能动态监测这三方面进行了研究展望。为铁路外部环境高质量监测数据获取、隐患高效精准识别、动态智能监测预警、侵限风险态势感知以及安全事故预测防控等提供了新思路。

参考文献 (References)

- [1] 柴冠华. 高速铁路外部环境问题分析及措施建议[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(S1): 145-148.
CHAI Guanhua. Analysis of External Environment Problems of High-speed Railway with Measures and Suggestions[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(S1): 145-148. (in Chinese)
- [2] 王猛. 基于Petri网模型的高铁沿线外部环境安全风险研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(S1): 57-62.
WANG Meng. Study on Safety Risk of External Environment along High-Speed Rail Based on Petri Net Model[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(S1): 57-62. (in Chinese)
- [3] 甘俊. 空天地一体化铁路外部环境监管技术研究[J]. 铁道工程学报, 2023, 40(4): 99-104.
GAN Jun. Study and Application of Integrated Space-air-ground Monitoring Technology in External-railway Environment Supervisor[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2023, 40(4): 99-104. (in Chinese)
- [4] 全超. 铁路沿线外部环境安全风险识别与评估方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
QUAN Chao. Research on Identification and Evaluation Method of External Environmental Safety Risk Along Railway[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [5] 宋国策, 周文明, 甘俊, 等. 高速铁路外部环境安全隐患时空变化遥感监测[J]. 铁道勘察, 2023, 49(4): 42-47, 89.
SONG Guoce, ZHOU Wenming, GAN Jun, et al. Monitoring on Spatial-temporal Changes of Potential Safety Hazards for High-speed Railway External Environment[J]. Railway Investigation and Surveying, 2023, 49(4): 42-47, 89. (in Chinese)
- [6] 丁升, 梁云. 高速铁路外部环境应急融合发展研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(6): 284-286.
DING Sheng, LIANG Yun. Research on the Integrated Development of Emergency Response in the External Environment of High-Speed Railways[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(6): 284-286. (in Chinese)
- [7] 郑佳怡, 张勇, 冯楠. 基于重建卫星影像的铁路外部环境飘浮物隐患监测技术[J]. 铁道建筑, 2023, 63(4): 119-123.
ZHENG Jiayi, ZHANG Yong, FENG Nan. Monitoring Technology for Hidden Dangers of Floating Objects in Railway External Environment Based on Reconstructed Satellite Images[J]. Railway Engineering, 2023, 63(4): 119-123. (in Chinese)
- [8] 肖铭哲. 铁路外部环境风险源遥感监测及管理研究[J]. 铁道勘察, 2021, 47(4): 28-32.
XIAO Mingzhe. Research on Remote Sensing Monitoring and Management of Railway External Environment Risk Sources[J]. Railway Engineering, 2021, 47(4): 28-32. (in Chinese)

- [9] 朱德稳. 协同治理视角下广西B市铁路外部环境安全环境治理优化研究[D]. 南宁: 广西大学, 2023.
ZHU Dewen. Research on the Optimization of Railway External Safety Environment Governance in B City of Guangxi from the Perspective of Collaborative Governance[D]. Nanning: Guangxi University, 2023. (in Chinese)
- [10] 潘自彪. 基于线路区段的铁路外部环境隐患分析与风险评价[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
PAN Zibiao. Analysis and Risk Assessment of Railway External Environment Hidden Danger Based on Line Section[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022. (in Chinese)
- [11] 王权, 尤淑撑. 陆地卫星遥感监测体系及应用前景[J]. 测绘学报, 2022, 51(4): 534-543.
WANG Quan, YOU Shucheng. Research and Application Outlook of Land Satellite Remote Sensing Monitoring System[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(4): 534-543. (in Chinese)
- [12] 肖青, 黄华国, 卞尊健, 等. 关于遥感实验场数字孪生体构建的思考[J]. 遥感学报, 2023, 27(3): 584-598.
XIAO Qing, HUANG Huaguo, BIAN Zunjian, et al. Digital Twin of Remote Sensing Experiment Field: Theory and Key Technology[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023, 27(3): 584-598. (in Chinese)
- [13] 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.
ZHU Qing, ZENG Haowei, DING Yulin, et al. A Review of Major Potential Landslide Hazards Analysis[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(12): 1551-1561. (in Chinese)
- [14] 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. (in Chinese)
ZHANG Qin, ZHAO Chaoying, CHEN Xuerong. Technica Progress and Development Trend of Geoloical Hazards Early Identification with Multi-Source Remote Sensing[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(6): 885-896. (in Chinese)
- [15] 聂光涛, 黄华. 光学遥感图像目标检测算法综述[J]. 自动化学报, 2021, 47(8): 1749-1768.
NIE Guangtao, HUANG Hua. A Survey of Object Detection in Optical Remote Sensing Images[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(8): 1749-1768. (in Chinese)
- [16] 李德仁, 王密. 高分辨率光学卫星测绘技术综述[J]. 航天返回与遥感, 2020, 41(2): 1-11.
LI Deren, WANG Mi. A Review of High Resolution Optical Satellite Surveying and Mapping Technology[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2020, 41(2): 1-11. (in Chinese)
- [17] 马灵玲, 王宁, 高彩霞, 等. 光学遥感卫星在轨绝对辐射定标: 进展与趋势[J]. 遥感学报, 2023, 27(5): 1061-1087.
MA Lingling, WANG Ning, GAO Caixia, et al. On-Orbit Absolute Radiometric Calibration for Optical Remote Sensing Satellites: Progress and Trends[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023, 27(5): 1061-1087. (in Chinese)
- [18] 杜玉柱. 铁路安全遥感新技术动态监测[J]. 测绘通报, 2023(9): 129-134.
DU Yuzhu. Dynamic Monitoring of New Remote Sensing Technology for Railway Safety[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(9): 129-134. (in Chinese)
- [19] JIMÉNEZ-LAO R, AGUILAR F J, NEMMAOUI A, et al. Remote Sensing of Agricultural Greenhouses and Plastic-mulched Farmland: An Analysis of Worldwide Research[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(16): 2649.
- [20] VEETIL B, VAN D, QUANG N, et al. Remote Sensing of Plastic-covered Greenhouses and Plastic-mulched Farmlands: Current Trends and Future Perspectives[J]. *Land Degradation & Development*, 2023, 34(3): 591-609.
- [21] LI Z, GUO H, ZHANG L, et al. Time-Series Monitoring of Dust-Proof Nets Covering Urban Construction Waste by Multi-spectral Images in Zhengzhou, China[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(15): 3805.
- [22] 李平苍. 高分专项系列卫星在铁路全生命周期应用探讨[J]. *卫星应用*, 2022(10): 31-36.
LI Pingcang. Exploring the Application of Special Series Satellites throughout the Entire Lifecycle of Railways[J]. *Satellite Application*, 2022(10): 31-36. (in Chinese)
- [23] 姚京川, 梁志广, 郭继亮, 等. 卫星遥感在铁路监测中的应用进展[J]. *卫星应用*, 2023(10): 13-19.
YAO Jingchuan, LIANG Zhiguang, GUO Jiliang, et al. The Application Progress of Satellite Remote Sensing in Railway Monitoring[J]. *Satellite Application*, 2023(10): 13-19. (in Chinese)
- [24] 袁慕策. 基于遥感技术的铁路外部环境安全隐患监测[J]. *铁道建筑*, 2023, 63(4): 114-118.
YUAN Muce. Monitoring of Railway External Environmental Safety Hazards Based on Remote Sensing Technology[J]. *Railway Engineering*, 2023, 63(4): 114-118. (in Chinese)
- [25] 杨移超. 铁路外部环境安全隐患变化卫星监测技术[J]. *中国铁路*, 2023(10): 151-157.
YANG Yichao. Satellite Monitoring Technology for Changes in Potential Safety Hazards of Railway External Environment[J]. *China Railway*, 2023(10): 151-157. (in Chinese)
- [26] 郑佳怡, 姚京川, 郭继亮, 等. 航空遥感技术的发展及铁路应用[J]. *铁道建筑*, 2021, 61(2): 143-148.
ZHENG Jiayi, YAO Jingchuan, GUO Jiliang, et al. Development of Aerial Remote Sensing Technology and Its Application in

- Railway[J]. *Railway Engineering*, 2021, 61(2): 143-148. (in Chinese)
- [27] 董婷, 范婕, 邵攀. 顾及不确定性分析的多数投票SAR影像变化检测[J]. *航天返回与遥感*, 2023, 44(2): 118-128.
DONG Ting, FAN Jie, SHAO Pan. Change Detection for SAR Images Based on Majority Voting Considering Uncertainty Analysis[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2023, 44(2): 118-128. (in Chinese)
- [28] ZHU X X, MONTAZERI S, ALI M, et al. Deep Learning Meets SAR: Concepts, Models, Pitfalls, and Perspectives[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2021, 9(4): 143-172.
- [29] 王泽众, 金燕, 林宽, 等. 基于多波段全极化SAR图像的建筑轮廓自动提取方法[J]. *电子与信息学报*, 2023, 45(7): 2511-2518.
WANG Zezhong, JIN Yan, LIN Kuan, et al. Auto-extraction of Building Outline with Multi-band Polarimetric SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2023, 45(7): 2511-2518. (in Chinese)
- [30] GAO G, BAI Q, ZHANG C, et al. Dualistic Cascade Convolutional Neural Network Dedicated to Fully PolSAR Image Ship Detection[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2023, 202: 663-681.
- [31] 谢雯, 王若男, 羊鑫, 等. 融合深度可分离卷积的多尺度残差UNet在PolSAR地物分类中的研究[J]. *电子与信息学报*, 2023, 45(8): 2975-2985.
XIE Wen, WANG Ruonan, YANG Xin, et al. Research on Multi-scale Residual UNet Fused with Depthwise Separable Convolution in PolSAR Terrain Classification[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2023, 45(8): 2975-2985. (in Chinese)
- [32] GARG R, KUMAR A, BANSAL N, et al. Semantic Segmentation of PolSAR Image Data Using Advanced Deep Learning Model[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 15365.
- [33] HAN W, FU H, ZHU J, et al. A Polarimetric Projection-based Scattering Characteristics Extraction Tool and Its Application to PolSAR Image Classification[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2023, 202: 314-333.
- [34] LI M, SHEN Q, XIAO Y, et al. PolSAR Image Building Extraction with G0 Statistical Texture Using Convolutional Neural Network and Superpixel[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(5): 1451.
- [35] SHANGGUAN S, QIU X, HAN B, et al. A Novel Polarimetric Channel Imbalance Phase Estimation Method Based on the Rotated Double-Bounce Backscatters in Urban Areas[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(13): 3177.
- [36] 姚京川, 袁慕策, 郭继亮, 等. 铁路专用遥感探测卫星设计与仿真[J]. *中国铁路*, 2023(10): 135-142.
YAO Jingchuan, YUAN Muze, GUO Jiliang, et al. Design and Simulation of Railway Dedicated Remote Sensing Satellite[J]. *China Railway*, 2023(10): 135-142. (in Chinese)
- [37] 李玉美, 郭庆华, 万波, 等. 基于激光雷达的自然资源三维动态监测现状与展望[J]. *遥感学报*, 2021, 25(1): 381-402.
LI Yumei, GUO Qinghua, WAN Bo, et al. Current Status and Prospect of Three-dimensional Dynamic Monitoring of Natural Resources Based on LiDAR[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(1): 381-402. (in Chinese)
- [38] 包云, 李亚群, 沈鸥, 等. 铁路外部环境安全监测方案研究[J]. *中国铁路*, 2022(4): 97-101.
BAO Yun, LI Yaqun, SHEN Kun, et al. Research on Monitoring Scheme of Railway External Environmental Safety[J]. *China Railway*, 2022(4): 97-101. (in Chinese)
- [39] 凌建明, 张玉, 满立, 等. 公路边坡智能化监测体系研究进展[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(7): 2118-2136.
LING Jianming, ZHANG Yu, MAN Li, et al. Research Progress of Intelligent Monitoring System for Highway Slope[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2021, 52(7): 2118-2136. (in Chinese)
- [40] 赵胜强. 激光雷达技术在高速铁路勘测中的应用[J]. *铁道勘察*, 2022, 48(6): 38-42.
ZHAO Shengqiang. Application of Lidar Technology in High-speed Railway Survey[J]. *Railway Investigation and Surveying*, 2022, 48(6): 38-42. (in Chinese)
- [41] WISULTSCHEW C, MUJICA G, LANZA-GUTIERREZ J M, et al. 3D-LIDAR Based Object Detection and Tracking on the Edge of IoT for Railway Level Crossing[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 35718-35729.
- [42] 李齐贤. 基于无人机图像与激光融合的铁路运行环境异常识别方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
LI Qixian. Research on Recognition Method of Railway Operation Environment Abnormality Based on UAV Image and Laser Fusion[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022. (in Chinese)
- [43] 王瑞, 史天运, 包云. 一种基于视频的铁路周界入侵检测智能综合识别技术研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(9): 188-195.
WANG Rui, SHI Tianyun, BAO Yun. Research on an Intelligent Comprehensive Recognition Technology in Railway Perimeter Intrusion Detection Based on Videos[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(9): 188-195. (in Chinese)
- [44] 柳青红, 关则彬, 赵颖, 等. 高速铁路运营环境安全监测系统综述[J]. *中国铁路*, 2023(4): 40-47.
LIU Qinghong, GUAN Zebin, ZHAO Ying, et al. Overview of Environmental Safety Monitoring System for High Speed Rail-

- way Operation[J]. *China Railway*, 2023(4): 40-47. (in Chinese)
- [45] 栗文韬, 徐成伟, 张万鹏, 等. 基于激光雷达+视频的城际铁路周界入侵监测报警技术研究[J]. *铁道运输与经济*, 2023, 45(7): 134-142.
LI Wentao, XU Chengwei, ZHANG Wanpeng, et al. Detection and Alarm Technology of Intercity Railway Perimeter Intrusion Based on Laser Radar and Video[J]. *Railway Transport and Economy*, 2023, 45(7): 134-142. (in Chinese)
- [46] 韩宜君. 青藏铁路安多段护路技防系统方案研究[J]. *工程建设与设计*, 2020(4): 74-76.
HAN Yijun. Research on Technical Prevention System of Railway Protection for Anduo Section of Qinghai-Tibet Railway[J]. *Construction & Design for Engineering*, 2020(4): 74-76. (in Chinese)
- [47] 王梁, 谭金林, 孙晨红, 等. 基于天空地一体化监测的周界防范系统设计及应用示范[J]. *铁路通信信号工程技术*, 2023, 20(5): 32-38.
WANG Liang, TAN Jinlin, SUN Chenhong, et al. Design and Application Demonstration of Perimeter Protection System Based on Space-Air-Ground Integrated Monitoring[J]. *Railway Signalling & Communication Engineering*, 2023, 20(5): 32-38. (in Chinese)
- [48] TOPOUZELIS K, PAPAKONSTANTINOU A, GARABA S P. Detection of Floating Plastics from Satellite and Unmanned Aerial Systems (Plastic Litter Project 2018)[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 79: 175-183.
- [49] LIU C A, CHEN Z, WANG D, et al. Assessment of the X-and C-band Polarimetric SAR Data for Plastic-mulched Farmland Classification[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(6): 660.
- [50] ZHAO C, PAN Y. A Novel Spectral Index for Mapping Blue Colour-coated Steel Roofs (BCCSRs) in Urban Areas Using Sentinel-2 Data[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2023, 16(1): 2862-2884.
- [51] SAMAT A, GAMBA P, WANG W, et al. Mapping Blue and Red Color-Coated Steel Sheet Roof Buildings over China Using Sentinel-2A/B MSIL2A Images[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(1): 230.
- [52] THEMISTOCLEOUS K, PAPOUTSA C, MICHAELIDES S, et al. Investigating Detection of Floating Plastic Litter from Space Using Sentinel-2 Imagery[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(16): 2648.
- [53] GONZÁLEZ-YEBRA Ó, AGUILAR M A, NEMMAOUI A, et al. Methodological Proposal to Assess Plastic Greenhouses Land Cover Change from the Combination of Archival Aerial Orthoimages and Landsat Data[J]. *Biosystems Engineering*, 2018, 175: 36-51.
- [54] AGUILAR M A, JIMÉNEZ-LAO R, LADISA C, et al. Comparison of Spectral Indices Extracted from Sentinel-2 Images to Map Plastic Covered Greenhouses through an Object-based Approach[J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2022, 59(1): 822-842.
- [55] YAO Y, WANG S. Evaluating the Effects of Image Texture Analysis on Plastic Greenhouse Segments Via Recognition of the OSI-USI-ETA-CEI Pattern[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(3): 231.
- [56] HASITUYA, CHEN Z, WANG L, et al. Selecting Appropriate Spatial Scale for Mapping Plastic-mulched Farmland with Satellite Remote Sensing Imagery[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(3): 265.
- [57] PAGE R, LAVENDER S, THOMAS D, et al. Identification of Tyre and Plastic Waste from Combined Copernicus Sentinel-1 and-2 Data[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(17): 2824.
- [58] XIONG Y, ZHANG Q, CHEN X, et al. Large Scale Agricultural Plastic Mulch Detecting and Monitoring with Multi-source Remote Sensing Data: A Case Study in Xinjiang, China[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(18): 2088.
- [59] ZHANG W, LIU G, DING L, et al. Analysis and Research on Temporal and Spatial Variation of Color Steel Tile Roof of Munyaka Region in Kenya, Africa[J]. *Sustainability*, 2022, 14(22): 14886.
- [60] 高梦婕, 姜群鸥, 赵一阳, 等. 基于GF-2遥感影像的塑料大棚提取方法对比[J]. *中国农业大学学报*, 2018, 23(8): 125-134.
GAO Mengjie, JIANG Qunou, ZHAO Yiyang, et al. Comparison of Plastic Greenhouse Extraction Method Based on GF-2 Remote Sensing Imagery[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(8): 125-134. (in Chinese)
- [61] 朱德海, 刘逸铭, 冯权泷, 等. 基于GEE的山东省近30年农业大棚时空动态变化研究[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(1): 168-175.
ZHU Dehai, LIU Yiming, FENG Quanlong, et al. Spatial-temporal Dynamic Changes of Agricultural Greenhouses in Shandong Province in Recent 30 Years Based on Google Earth Engine[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(1): 168-175. (in Chinese)
- [62] LAVENDER S. Detection of Waste Plastics in the Environment: Application of Copernicus Earth Observation Data[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(19): 4772.
- [63] 冯权泷, 牛博文, 朱德海, 等. 基于多核主动学习和多源数据融合的农田塑料覆被分类[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(2): 177-185.
FENG Quanlong, NIU Bowen, ZHU Dehai, et al. Classification of Agricultural Plastic Cover Based on Multi-kernel Active

- Learning and Multi-source Data Fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 177-185. (in Chinese)
- [64] YUAN Q, SHEN H, LI T, et al. Deep Learning in Environmental Remote Sensing: Achievements and Challenges[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 241: 111716.
- [65] 陶超, 阴紫薇, 朱庆, 等. 遥感影像智能解译: 从监督学习到自监督学习[J]. 测绘学报, 2021, 50(8): 1122-1134.
TAO Chao, YIN Ziwei, ZHU Qing, et al. Remote Sensing Image Intelligent Interpretation: From Supervised Learning to Self-Supervised Learning[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(8): 1122-1134. (in Chinese)
- [66] SUN H, WANG L, LIN R, et al. Mapping Plastic Greenhouses with Two-temporal Dantinel-2 Images and 1d-cnn Deep Learning[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(14): 2820.
- [67] 刘春亭, 冯权泷, 刘建涛, 等. DeepLabv3+语义分割模型的济南市防尘绿网提取及时空变化分析[J]. 遥感学报, 2022, 26(12): 2518-2530.
LIU Chunting, FENG Quanlong, LIU Jiantao, et al. Urban Green Plastic Cover Extraction and Spatial Pattern Changes in Ji'nan City Based on Deeplabv3+ Semantic Segmentation Model[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(12): 2518-2530. (in Chinese)
- [68] CHEN Y, WU Y, MA J, et al. Microplastics Pollution in the Soil Mulched by Dust-proof Nets: A Case Study in Beijing, China[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 275: 116600.
- [69] LI Y, JIN W, QIU S, et al. Color-Coated Steel Sheet Roof Building Extraction from External Environment of High-Speed Rail Based on High-Resolution Remote Sensing Images[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(16): 3933.
- [70] PAN X, YANG L, SUN X, et al. Research on the Extraction of Hazard Sources along High-Speed Railways from High-Resolution Remote Sensing Images Based on TE-ResUNet[J]. *Sensors*, 2022, 22(10): 3784.
- [71] FENG Q, NIU B, CHEN B, et al. Mapping of Plastic Greenhouses and Mulching Films from Very High Resolution Remote Sensing Imagery Based on a Dilated and Non-local Convolutional Neural Network[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 102: 102441.
- [72] LIU J, FENG Q, WANG Y, et al. Urban Green Plastic Cover Mapping Based on VHR Remote Sensing Images and a Deep Semi-supervised Learning Framework[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2020, 9(9): 527.
- [73] CAO Y, HUANG X. A Coarse-to-fine Weakly Supervised Learning Method for Green Plastic Cover Segmentation Using High-resolution Remote Sensing Images[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022, 188: 157-176.
- [74] 陈晋, 陈学泓. 光学遥感的四种分辨率概念介绍[J]. 遥感学报, 2023, 27(7): 1754-1755.
CHEN Jin, CHEN Xuehong. Introduction to the Four Resolutions Concepts in Optical Remote Sensing[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2023, 27(7): 1754-1755. (in Chinese)
- [75] 李树涛, 李聪好, 康旭东. 多源遥感图像融合发展现状与未来展望[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 148-166.
LI Shutao, LI Congyu, KANG Xudong. Development Status and Future Prospects of Multi-Source Remote Sensing Image Fusion[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(1): 148-166. (in Chinese)
- [76] 张良培, 何江, 杨倩倩, 等. 数据驱动的多源遥感信息融合研究进展[J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1317-1337.
ZHANG Liangpei, HE Jiang, YANG Qianqian, et al. Data-Driven Multi-Source Remote Sensing Data Fusion: Progress and Challenges[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(7): 1317-1337. (in Chinese)
- [77] LI Y, ZHOU Y, ZHANG Y, et al. DKDFN: Domain Knowledge-guided Deep Collaborative Fusion Network for Multimodal Unitemporal Remote Sensing Land Cover Classification[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022, 186: 170-189.
- [78] 张立福, 彭明媛, 孙雪剑, 等. 遥感数据融合研究进展与文献定量分析(1992—2018)[J]. 遥感学报, 2019, 23(4): 603-619.
ZHANG Lifu, PENG Mingyuan, SUN Xuejian, et al. Progress and Bibliometric Analysis of Remote Sensing Data Fusion Methods (1992—2018)[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(4): 603-619. (in Chinese)
- [79] LI Y, KONG D, ZHANG Y, et al. Robust Deep Alignment Network with Remote Sensing Knowledge Graph for Zero-Shot and Generalized Zero-Shot Remote Sensing Image Scene Classification[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, 179: 145-158.
- [80] 张良培, 张乐飞, 袁强强. 遥感大模型: 进展与前瞻[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(10): 1574-1581.
ZHANG Liangpei, ZHANG Lefei, YUAN Qiangqiang. Large Remote Sensing Model: Progress and Prospects[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(10): 1574-1581. (in Chinese)
- [81] 张继贤, 顾海燕, 杨懿, 等. 自然资源要素智能解译研究进展与方向[J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1606-1617.

- ZHANG Jixian, GU Haiyan, YANG Yi, et al. Research Progress and Trend of Intelligent Interpretation for Natural Resources Features[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(7): 1606-1617.
- [82] 张永军, 王飞, 李彦胜, 等. 遥感知识图谱创建及其典型场景应用技术[J]. *遥感学报*, 2023, 27(2): 249-266.
ZHANG Yongjun, WANG Fei, LI Yansheng, et al. Remote Sensing Knowledge Graph Construction and Its Application in Typical Scenarios[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2023, 27(2): 249-266. (in Chinese)
- [83] 李彦胜, 张永军. 耦合知识图谱和深度学习的新一代遥感影像解译范式[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2022, 47(8): 1176-1190.
LI Yansheng, ZHANG Yongjun. A New Paradigm of Remote Sensing Image Interpretation by Coupling Knowledge Graph and Deep Learning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(8): 1176-1190. (in Chinese)
- [84] 姚涵涛, 余璐, 徐常胜. 视觉语言模型引导的文本知识嵌入的小样本增量学习[J/OL]. *软件学报*, 1-19 [2024-01-07]. <https://doi.org/10.13328/j.cnki.jos.007022>.
- YAO Hantao, YU Lu, XU Changsheng. Few-shot Incremental Learning with Textual-knowledge Embedding by Visual-language Model[J/OL]. *Journal of Software*, 1-19 [2024-01-07]. <https://doi.org/10.13328/j.cnki.jos.007022>. (in Chinese)
- [85] MICHIELI U, ZANUTTIGH P. Incremental Learning Techniques for Semantic Segmentation[C]//2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshop: ICCVW 2019, Seoul, South Korea, 27-28 October 2019, Volume 5. Piscataway: IEEE, 2019.
- [86] CALZOLARI G, LIU W. Deep Learning to Replace, Improve, or Aid CFD Analysis in Built Environment Applications: A Review[J]. *Building and Environment*, 2021, 206: 108315.
- [87] JIANG J, LI G, JIANG Y, et al. TransCFD: A Transformer-Based Decoder for Flow Field Prediction[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 123: 106340.
- [88] TOMINAGA Y, WANG L L, ZHAI Z J, et al. Accuracy of CFD Simulations in Urban Aerodynamics and Microclimate: Progress and Challenges[J]. *Building and Environment*, 2023: 110723.
- [89] 朱庆, 张利国, 丁雨淋, 等. 从实景三维建模到数字孪生建模[J]. *测绘学报*, 2022, 51(6): 1040-1049.
ZHU Qing, ZHANG Ligu, DING Yulin, et al. From Real 3D Modeling to Digital Twin Modeling[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(6): 1040-1049. (in Chinese)
- [90] 张利国, 丁雨淋, 朱庆, 等. 铁路地理地质数据“本体域-变化域-状态域”三域关联的集成表达模型[J/OL]. *武汉大学学报(信息科学版)*: 1-12[2023-12-13]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20220010>.
ZHANG Ligu, DING Yulin, ZHU Qing, et al. A Holistic Multi-domain Association Model for Railway Geographical and Geological Data[J/OL]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*: 1-12[2023-12-13]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20220010>. (in Chinese)

作者简介

李治泓, 男, 1998年生, 2022年获昆明理工大学摄影测量与遥感专业硕士学位, 现在西南交通大学测绘科学与技术专业攻读博士学位。研究方向为遥感影像智能解译。E-mail: 476660844@qq.com。

朱庆, 男, 1966年生, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向为数字摄影测量、多维动态GIS与虚拟地理环境。E-mail: zhuq66@263.net。

(编辑: 夏淑密)