



西部黄土高原矿区采煤沉陷多源遥感监测技术进展与展望

汤伏全 杨倩

引用本文:

汤伏全, 杨倩. 西部黄土高原矿区采煤沉陷多源遥感监测技术进展与展望[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(12): 9–26.

TANG Fuquan, YANG Qian. Progress and prospects of multi-source remote sensing monitoring technology for coal mining subsidence in mining areas of the western Loess Plateau[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(12): 9–26.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1113>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于时序遥感的黄土矿区耕地变化动态监测——以大佛寺矿区为例

Dynamic monitoring of cultivated land changes in loess mining areas based on time series remote sensing: a case of Dafosi Mining Area

煤炭科学技术. 2022, 50(3): 215–223 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6a235888-34e7-4428-8445-d31e0bac040c>

黄土高原矿区生态修复固碳机制与增汇潜力及调控

Mechanism, potential and regulation of carbon sequestration and sink enhancement in ecological restoration of mining areas in the Loess Plateau

煤炭科学技术. 2023, 51(1): 502–513 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-2250>

黄土高原矿区边坡生态恢复治理研究—PVC板材格构锚杆梁植被种植保障技术

Research on slope ecological restoration and management in mining areas on loess plateau: planting support technology of PVC plates lattice anchor beam

煤炭科学技术. 2020, 48(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e6df8415-70c0-4d76-b4e1-f933a434d4aa>

融合地表温度与形变的地下煤火多源遥感识别研究

Multi-source remote sensing identification of underground coal fires based on the fusion of surface temperature and deformation.

煤炭科学技术. 2024, 52(7): 139–147 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1201>

基于无人机影像的西部矿区地表沉陷信息提取方法改进

Improvement of surface subsidence information extraction method based on UAV image modeling in Western Mining Area

煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 334–342 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1381>

煤矿开采地表沉陷UAV—摄影测量监测技术研究

Study on surface subsidence in coal mining by UAV—photogrammetry monitoring technology

煤炭科学技术. 2022, 50(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f12741f2-d042-4a5e-8565-d509f0e79b1d>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

汤伏全, 杨 倩. 西部黄土高原矿区采煤沉陷多源遥感监测技术进展与展望[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(12): 9-26.

TANG Fuquan, YANG Qian. Progress and prospects of multi-source remote sensing monitoring technology for coal mining subsidence in mining areas of the western Loess Plateau[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(12): 9-26.

西部黄土高原矿区采煤沉陷多源遥感监测技术进展与展望

汤伏全^{1,2}, 杨 倩¹

(1. 西安科技大学 测绘科学与技术学院, 陕西 西安 710054; 2. 国土资源部煤炭资源开发与综合利用重点实验室, 陕西 西安 710021)

摘 要: 西部黄土覆盖区是我国重要的煤炭生产基地, 地貌及地质采矿条件复杂, 黄土层厚度巨大, 开采沉陷具有不同于其它矿区的特殊性, 地表下沉速度大, 起动距偏小, 采动裂缝等非连续破坏更为严重, 地表沉陷盆地形状和沉陷变形分布特征更为复杂多变。在当前技术条件下开展地表沉陷的高效监测和定量评价仍面临一定困难。近年来, 合成孔径雷达干涉测量(InSAR)、无人机摄影测量(UAV photogrammetry)、激光雷达(LiDAR)等多源遥感技术迅速发展, 其具备的非接触式观测、大范围覆盖、高时空分辨率等特点, 能够实现地表沉陷连续性、动态性和全面性监测, 通过多源观测数据的融合处理, 可为西部矿区开采沉陷高效监测提供新的技术途径。综述了多源遥感技术在矿区沉陷监测中的应用进展; 通过现场试验探索了InSAR、UAV photogrammetry、LiDAR用于黄土高原矿区沉陷监测的实际效果, 发现在地貌复杂、地形起伏和植被覆盖及地表大梯度形变条件下, InSAR干涉失相关和大气延迟等各种误差过大; 无人机航测影像构建的三维模型受植被和地形影响导致地面模型的高程精度不足; 无人机激光扫描受地形坡度、点云密度和地表点水平移动的综合影响导致显著的DEM模型误差, 因而当前条件下多源遥感技术均存在各自的优势、局限性和技术瓶颈。在此基础上, 提出了黄土沟壑区地面点云提取及地表三维变形信息获取的算法流程; 指出了基于多源遥感数据融合实现矿区沉陷三维位移精准、高效监测的技术路径; 展望了构建矿区沉陷多源遥感监测智能化体系的应用前景。

关键词: 黄土高原; 西部煤矿区; 地表沉陷; 遥感监测; 多源数据融合

中图分类号: TD171

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)12-0009-18

Progress and prospects of multi-source remote sensing monitoring technology for coal mining subsidence in mining areas of the western Loess Plateau

TANG Fuquan^{1,2}, YANG Qian¹

(1. College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Coal Resources Exploration and COMPREHENSIVE Utilization, Ministry of NATURAL Resources, Xi'an 710021, China)

Abstract: The western loess-covered area is an important coal production base in China, with complex geomorphology and geological mining conditions, huge thickness of loess layer, mining subsidence with special characteristics different from other mining areas, large surface subsidence rate, small starting distance, more serious discontinuous damage such as mining cracks, and more complicated and changeable characteristics of the shape of the surface subsidence basin and the distribution of subsidence deformation. Under the current technical conditions, it is still difficult to carry out efficient monitoring and quantitative evaluation of surface subsidence. In recent years, multi-source remote sensing technologies such as Interferometric Synthetic Aperture Radar(InSAR), Unmanned Aerial Vehicle photogrammetry(UAV photogrammetry), and Light Detection and Ranging(LiDAR) have been developing rapidly, and with its features of non-contact observation, wide coverage, and high spatial and temporal resolution, it is able to realize the continuity, dynamics and comprehens-

收稿日期: 2023-07-31

责任编辑: 周子博

DOI: 10.12438/cst.2023-1113

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52274168)

作者简介: 汤伏全(1966—), 男, 湖南湘潭人, 教授, 博士生导师。E-mail: 2504557922@qq.com

通讯作者: 杨 倩(1997—), 女, 陕西渭南人, 博士研究生。E-mail: 664284876@qq.com

ive monitoring of surface subsidence. Through the fusion of multi-source observation data, it can provide a new technological way for the efficient monitoring of the mining subsidence in the western mining area. This paper summarizes the progress of the application of multi-source remote sensing technology in mining subsidence monitoring. The practical effects of InSAR, UAV photogrammetry, and LiDAR for subsidence monitoring in mining areas on the Loess Plateau are explored through field experiments, and it is found that under the conditions of complex geomorphology, undulating topography, and vegetation cover, as well as large-gradient deformation of the ground surface, the InSAR interferometric loss of correlation, atmospheric delays and other kinds of errors are too large. The 3D model constructed from UAV photogrammetry is affected by vegetation and terrain, resulting in insufficient elevation accuracy for the ground model. UAV laser scanning is affected by the combined effects of terrain slope, point cloud density, and horizontal movement of surface points leading to significant DEM modeling errors. As a result, multi-source remote sensing techniques under the current conditions all have their own advantages, limitations and technical bottlenecks. On this basis, the algorithmic process of ground point cloud extraction and surface 3D deformation information acquisition in the loess gully area is proposed; the technical path to realize accurate and efficient monitoring of mine subsidence 3D displacement based on the fusion of multi-source remote sensing data is pointed out; and the prospect of the application of constructing an intelligent system of multi-source remote sensing monitoring of mine subsidence is envisioned.

Key words: Loess Plateau; western coal mining area; surface subsidence; remote sensing monitoring; multi-source data fusion

0 引言

西部黄土高原煤矿区地处生态环境脆弱的黄河流域中上游,是我国乃至全球主要的煤炭产地之一,大规模地下采煤已造成严重的地面沉陷与环境损害。在煤炭资源开发促进区域经济社会发展的同时,如何实现矿区生态修复与环境保护已成为国家生态文明建设的重要课题^[1-3]。习总书记明确指示“要把碳达峰碳中和纳入生态文明建设整体布局”,这为我国矿业资源开发方式及矿山生态文明建设指明了方向。在新的历史条件下,要把生态环境保护的要求贯穿于矿产资源勘查开发全过程。为此,针对矿区采煤塌陷与生态扰动进行实时精准监测,亦是开展矿区环境保护与生态修复的重要基础^[4-5]。

采煤沉陷是指地下开采导致岩层与地表失去平衡而引起的不均匀下沉现象,也是造成地面形变、设施破坏、生态环境扰动以及多种安全生产隐患的主要因素。实地监测矿区采煤沉陷的常规方法主要是布设地表移动观测站,采用大地测量、静态 GNSS(Global Navigation Satellite System)或动态 GNSS 等观测地表点的坐标变化。这种监测方法精度较高,但野外工作量大,观测信息不全面。西部黄土高原煤矿开采区地貌起伏多变,植被覆盖度高,地质采矿条件复杂,采煤沉陷规律具有一定的特殊性,采用常规观测站方式其效率更低,人员投入更大,难以全面反映地表沉陷的时间和空间变化规律。因而,探索新的监测技术手段具有迫切的必要性和重要性。

随着测绘技术的快速发展,近年来包括合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic APERTURE Radar, InSAR)技术、无人机摄影测量

(Unmanned Aerial Vehicle photogrammetry, UAV photogrammetry)技术、激光雷达(Light Detection and Ranging, LiDAR)技术在内的多源遥感技术已成功应用于矿区沉陷监测中,使得高效率、高精度监测矿区全盆地、大范围、长时序的沉陷规律具备了现实可行性^[6],但这些技术由于各自存在的局限性,在应用于黄土高原复杂的地貌环境时,仍然存在诸多的技术瓶颈和挑战。为此,就西部黄土高原矿区的多源遥感监测技术特点及其发展做出系统性回顾和展望,为西部矿区复杂环境下的开采沉陷监测探索可行的技术途径。

1 黄土覆盖矿区开采沉陷及损害的特殊性

西部黄土高原区域地形起伏多变,地表高差巨大,黄土层厚度往往占到煤层开采深度的 30%~70%,其物理特性既不同于岩层,也有别于东部矿区的饱水黏土层,这导致黄土覆盖区开采沉陷及其衍生损害具有不同于其他矿区的特殊性^[7]。黄土覆盖区综放开采条件下地表沉陷变形更为剧烈。主要表现为下沉速度大、起动距偏小、裂缝角偏大,地表裂缝等非连续破坏更为严重^[8],地表沉陷盆地形状和沉陷变形分布特征更为复杂多变。黄土矿区开采沉陷过程中,黄土层多以块体运动形式向上传递而导致裂缝发育^[9],其深度和宽度往往与沉陷变形指标相关,一般可通过地表水平变形指标与黄土层物理力学参数进行估算^[10]。在黄土高原复杂地质、地貌条件下,开采沉陷极易引发山坡侧向滑移、局部崩塌及土层体积变化、失水固结、遇水湿陷等多种附加变形,在一定的地质环境下,开采沉陷变形还会诱发山体滑坡等衍生地质灾害^[11-13]。同时,黄土高原矿区煤层埋藏深度变化很大,单一工作面开采地表沉陷通常处

于非充分采动状态,采区内后续多工作面的开采往往对相邻的老采空区地表沉陷造成多次扰动和叠加影响,导致黄土高原矿区开采沉陷呈现复杂的时空分布特征。上述黄土高原地貌复杂性及采煤沉陷特殊性为沉陷监测带来了很大的挑战。

2 采煤沉陷多源遥感监测技术进展

传统的矿区沉陷监测方法通常受到时间和空间限制,仅提供有限监测点的形变信息。多源遥感技术的发展使得矿区沉陷实现高效、高精度监测成为可能。卫星遥感技术能够获取大范围的地表变化信息;机载激光雷达能够实现大范围高精度信息采集;地面激光雷达能够实现短距离厘米级精度,且获取的高密度点云数据有助于精细模型的构建;而包括无人机摄影测量及无人机激光雷达技术在内的低空无人机遥感技术具备高效率、高操作灵活性等优点,可以获取高时空分辨率地表变化信息,满足矿区采煤监测的实时性和定制性需求。图 1 展示了各遥感技术应用于矿区采煤沉陷监测的示意图,本节通过分析不同遥感技术的特点及沉陷监测应用研究现状,探讨当前条件下多源遥感技术应用于西部黄土高原矿区沉陷监测仍然存在的技术瓶颈。

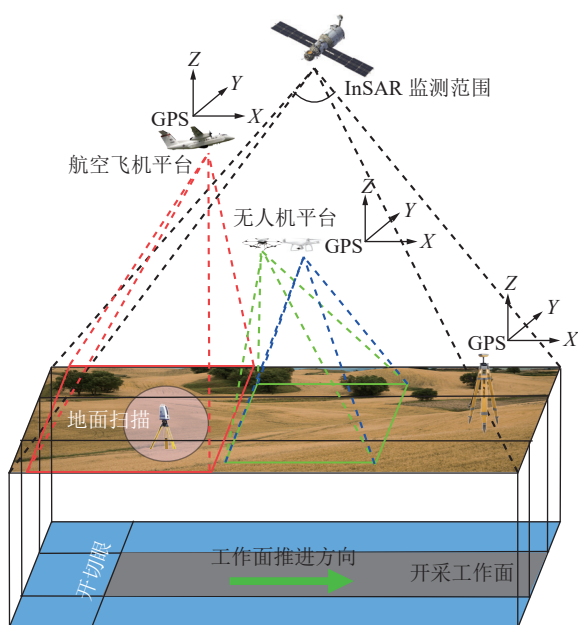


图 1 多源遥感技术沉陷监测示意

Fig.1 Schematic of subsidence monitoring by multi-source remote sensing technology

2.1 基于 InSAR 技术的矿区沉陷监测

InSAR 技术以其前所未有的连续空间覆盖、高度自动化、高精度、能够提供变形区域的“面状”形

变数据等优点,为地表形变监测提供了新方法^[14]。InSAR 技术在快速准确获取困难区域的地形模型方面具有明显优势^[15],由 InSAR 技术延伸的合成孔径雷达差分干涉测量技术 (Differential InSAR, D-InSAR),通过两景 SAR 影像联合外部地形数据进行差分处理,可获取地表微小形变。例如,Massomiet (1993) 利用 SAR 数据获取了 Landers 地震的形变场^[16],Carnec(1996) 利用 D-InSAR 技术监测法国 Gardanne 附近矿区采煤地表沉陷^[17],首次将 D-InSAR 技术应用于矿区地表沉陷监测中。多年来,国内学者陆续开展了基于 InSAR 技术的矿区沉陷监测研究,在获取矿区开采沉陷分布、探测老采空区地表残余形变、监测违法越界开采地表沉陷范围等方面,展示了 D-InSAR 技术监测采煤沉陷的可行性^[18]。

为解决 D-InSAR 存在的时空失相干和大气延迟误差等问题,众多学者发展出时序 InSAR (Time series InSAR, TS-InSAR) 技术,包括持久散射体技术 (Persistent Scatterer InSAR, PS-InSAR)、小基线集技术 (Small BAseline Subset, SBAS-InSAR) 和分布式散射体技术 (Distributed Scatter InSAR, DS-InSAR) 等。其中 PS-InSAR^[19] 通过从单主影像网络干涉图中提取时序稳定点 (Persistent Scatterer, PS) 估计时序形变量、形变速率、高程误差等参数,显著降低了大气延迟等带来的测量误差,其形变监测精度甚至可达到毫米级。在监测山区等低相干区域时,可通过布设角反射器作为 PS 点,以达到辅助监测的目的。在 PS-InSAR 基础上改进的 PS-InSARTM^[20] 方法,则利用高信噪比的点目标相位信息解算出高精度的地表形变信息。SBAS 方法^[21] 则通过设定时间、空间基线阈值,将 SAR 影像集组合成若干个干涉子集,筛选出相干性较高且受时空失相干影响较小的点目标,实现区域地表形变监测。为克服 PS-InSAR 在野外区域 PS 点较少的缺陷,有学者提出从分布式散射体 (Distributed Scatter, DS) 中提取地球物理参数,利用这些后向散射特性相似且分布于临近多个像元内的散射体 (DS),可提供更为详细的沉陷细节信息。Ferretti 等学者进一步提出了 Squee-SARTM 技术^[22],通过联合处理 PS 和 DS,其形变提取效果比 PS-InSAR 更好^[23]。

在矿区沉陷监测方面,众多学者利用上述技术开展了试验研究。例如,采用 DS-InSAR 从 sentinel-1A 影像中提取了内蒙古鄂尔多斯市红庆河煤矿 2017—2018 年间的地表形变值。与 PS-InSAR 监测结果对比表明,DS-InSAR 在采煤沉陷监测领域更

具优势^[24-25];有学者探讨了融合分布式目标进行矿区沉陷监测的优势,与 PS-InSAR 结果对比表明,融合分布式目标的 DS-InSAR 技术更有利于提取大梯度沉陷信息^[26],其受空间失相干的影响更小,形变提取精度也更高^[27];还有学者提出了基于动态置信区间假设检验的同质点选取算法以及基于卡尔曼滤波的相位优化算法与 StaMPS(Stanford Method for Persistent Scatterers),并应用于济宁某煤矿充填开采区地表形变监测,验证了 DS-InSAR 技术应用于矿区地表沉陷监测的可行性^[28]。针对相干性较低时 DS 相位估计误差较大的问题,有学者提出利用 Fisher 信息量代替相干矩阵作为 EMI(Eigendecomposition-Based Maximum-likelihood estimator of Interferometric phase) 权阵的 DS 相位优化估计算法,并构建了联合 PS 和 DS 的 SBAS 干涉处理框架,获取了较高精度的矿区沉陷信息^[29]。

近年来,随着 SAR 技术的不断成熟,不同波段的 SAR 卫星逐渐升空,为 InSAR 技术的推广应用提供了丰富的数据源。其中,低频波段(如 L/P 波段)雷达系统相较于高频波段具备更强的穿透性,后向散射更加稳定,具备较强的抗时空失相干的能力^[30],在植被高度覆盖、大梯度形变监测中具有独特优势^[31-32]。但其不同于高频波段雷达(如 X 波段)系统受电离层影响较小且具备较高的形变敏感度^[33],低频波段雷达由于其载波频率较低,更易受到电离层的干扰,同时其对形变的敏感性较低,可能无法探测到量级较小的形变信息^[34-35]。如何提高高频 InSAR 的监测梯度以及低频 InSAR 的监测精度对形变监测具有重要的意义。

利用 InSAR 技术进行煤矿开采沉陷监测时,所获得的雷达视线方向(LOS)位移是地表点垂直向、南北向、东西向三维位移的矢量叠加。将 LOS 向位移分解为地表下沉及沿工作面走向和倾向水平位移,是研究开采沉陷规律和获取地表移动参数的基础。目前,基于 InSAR LOS 位移反演开采沉陷三维位移的主要方法有:利用不同轨道卫星的 3 种 SAR 影像建立 LOS 位移方程组来求解三维位移分量;根据开采沉陷预计模型将地表水平位移视为下沉的关联函数,由单一 SAR 影像来解算下沉及水平位移;或者直接忽略水平位移的影响,将 LOS 向位移投影为下沉分量。上述方法均存在一定的局限性,而利用近水平煤层开采地表下沉和水平位移关于移动盆地主断面对称的基本特征,可构建地表移动盆地对称点上多期 InSAR LOS 向叠加位移的几何方程组,求解

LOS 向位移反演开采沉陷三维位移函数模型,以实现近水平煤层开采地表移动 InSAR 监测数据的三维位移分解^[36-37]。

2.2 基于无人机航摄的矿区沉陷及损害监测

矿区地表沉陷监测要求对同一区域进行周期性监测,低空无人机摄影测量技术凭借其操作便捷、灵活性强、成本低廉、工作高效等优势,已在采煤沉陷及地表变化监测中得到应用^[38]。目前,基于无人机航摄技术的实际应用主要分为两方面,一是利用无人机影像建模及模型叠加获取矿区地表沉陷信息;一是利用无人机影像开展地表裂缝及地面变化的识别与提取。

1) 基于无人机航测的沉陷信息提取。无人机航测技术可高效地获取与采矿活动有关的地表变化信息。国外学者 Kršák(2016)^[39]以 Jastrabá 露天矿复杂地貌区域为试验区,通过无人机摄影测量获取了高精度的数字高程模型(DEM),证实了该技术获取地表复杂细节特征的潜力;IGNJATOVIĆ^[40]通过对比验证了无人机摄影测量技术生成的地面点高程与 GNSS-RTK 和地面三维激光扫描获取的数据精度具有一致性。近年来,国内学者尝试采用无人机倾斜摄影测量技术对采煤引起的地表沉陷盆地进行短期监测,对沉陷区多期 DSM 叠加处理获取地表沉陷信息,初步证实了无人机航摄技术监测采煤沉陷变形的可行性^[41]。为提高无人机影像质量和获取地表沉陷信息的精度,一些学者通过设计科学的航摄飞行方案^[42]、优化相机标定方法^[43]、合理布设相控点^[44]等途径来提高原始影像数据质量,也有学者通过在无人机中集成 TOF(Time of flight)传感器,实时估计无人机相对航高,采用无人机地形跟随飞行作业方式,较好地克服了因地形起伏引起的影像分辨率、重叠度变化影响,提升了矿区沉陷监测精度^[45]。同时,一些学者利用各种后处理方法,通过对影像密集匹配的点云数据进行滤波处理,对地面点云插值生成的 DEM 进行叠加,使得获取的沉陷模型精度得到明显提升^[46-47]。

2) 基于航摄影像的地表裂缝识别与提取。矿区开采沉陷引起的地表裂缝会对周围建筑物及土地造成严重损害,采动裂缝也是造成土壤水分流失和生态环境恶化的重要原因^[48]。通过测绘技术有效地获取采动地裂缝信息,掌握地裂缝发展及分布规律是矿区沉陷损害监测及生态修复的重要内容。近十年来,国内学者开展了利用无人机影像获取矿区地表裂缝的专门研究,通过影像建模及其纹理、光谱等特

征建立裂缝识别模型,高精度地获得了矿区地表裂缝分布^[49],依据裂缝的形态及空间分布特征,可以更好地揭示煤炭开采过程中裂缝的发育规律^[50],通过现场试验证实了基于无人机影像相对于卫星遥感影像具有更高效精确的识别沉陷区裂缝特征的优势^[51]。一些学者针对干枯植被及裸露表土混淆所造成的地裂缝误提取问题,结合随机森林算法等图像处理技术将植被制成掩膜文件,对掩膜后的图像进行裂缝提取从而消除了植被影响^[52-53];针对不同时间、不同区域获取的无人机影像提取地表裂缝问题,有学者提出了改进的一阶高斯差分匹配滤波算法(MF-FDOG)^[54]和改进的主动轮廓模型,通过引入先验知识增强对裂缝的可识别度,有效提高了地表裂缝提取的可靠性及精度^[55]。目前,多位学者开始了融合多源数据开展采动裂缝特征获取^[56]及基于机器学习与深度学习模型进行裂缝识别与智能提取的探索^[57]。也有学者在利用无人机影像构建地表模型精细提取裂缝的基础上,结合采煤沉陷分布特征建立了采动裂缝连接算法,实现了断续裂缝的自动连接^[58]。

2.3 基于激光雷达的矿区沉陷监测

激光雷达能够全天候、快速直接获取高分辨率、高精度的地面点三维坐标^[59],可穿透密林缝隙测量地面,是获取高精度地形数据的有效手段^[60-61]。根据搭载平台的不同,激光雷达系统分为航天激光雷达、机载激光雷达、地面激光雷达、移动式激光雷达和无人机激光雷达扫描系统。其中航天和机载激光雷达由于设备昂贵,成本较高,在矿区沉陷监测领域使用较少;近年来由于无人机技术的迅猛发展及其具备的低成本、高操作灵活性的特性,无人机激光雷达技术已引起开采沉陷研究者的关注,开始应用于矿区沉陷监测中^[62-64]。

1) 基于机载激光雷达的矿区沉陷监测。机载激光雷达系统集成激光扫描仪、IMU(Inertial Measurement Unit)惯性测量单元和差分 GNSS 三种技术于一体,系统搭载在机载(飞机或直升机)平台上运行。目前基于机载激光雷达技术的应用主要集中在因地下水抽取、地震等引起的地表沉降监测。2014 年有学者使用了 Terrapoint LLC 公司和 Merrick 公司采集的 1996 年、2001 年和 2008 年的美国休斯顿地区机载激光雷达数据,与全球定位系统(GPS)和干涉合成孔径雷达(SAR)遥感手段共同评估了休斯顿地区的地表变形及其与地下水抽取的关系^[65]。所采用的机载激光雷达点云数据水平精度优于 ± 75 cm,垂直精度优于 ± 15 cm,这对于小尺度的工作面地表沉

陷监测明显精度不足。2020 年荷兰学者基于机载激光雷达点云及 InSAR 数据,成功监测了堤坝加固项目的地面沉降量^[66]。同年,有学者针对目前运行的合成孔径雷达系统的空间分辨率以及各散射点的地理定位精度不足问题,采用机载激光雷达技术(点云密度为 4.66 pts/m²)获取高精度城市模型来帮助提高 InSAR PS(永久散射体)的地理定位质量,以改进对深圳地区沉降水平的详细分析和对城市环境中建筑物的危害评估^[67],这一研究为激光雷达点云数据拓宽了新的应用领域。2021 年有学者基于机载激光雷达技术,对新西兰凯库拉地区 2016 年地震前(点云密度 (3.8 ± 2.1) pts/m²,垂直精度 0.068 ~ 0.165 m)、地震后(点云密度 (11.5 ± 6.8) pts/m²,垂直精度 0.04 m)进行多次数据采集,通过对数据集进行三维点云差分,成功检测了该地区 7.8 级地震前后的地貌变化,在 95% 的置信度下,三维变化检测的最低水平可达 0.4 m^[68]。除了按需采集的数据集外,一些开放获取的数据集也引起了学者们的注意。2022 年西班牙学者利用其国家航空正射影像计划(PNOA)开放获取的 2009 年和 2016 年的两个航空激光雷达数据集(飞行相对高度 3 317 m,点云密度 0.5 pts/m²),分析了 Alto Guadalestín 盆地(西班牙)由地下水抽取引起的区域大坡度地面沉降情况^[69],与 GNSS 监测的平均绝对差异为 0.484 cm/a,该项工作证实了开放式非定制航空激光雷达在监测区域地面沉降的潜力。

机载激光雷达的飞行高度决定了其所获取点云的密度较低,构建小范围精细模型存在局限。此外,机载激光雷达的垂直精度在 ± 10 cm,水平精度较差,一般垂直精度是水平精度的 5 倍,针对矿区工作面尺度的地表形变监测,其点云密度、数据精度及投入成本均是限制该技术应用的主要因素。

2) 基于地面激光雷达的矿区沉陷监测。地面激光雷达系统不同于机载系统,其无需 GPS/IMU 系统获取位姿参考信息,而是通过安装在三脚架上的固定传感器进行扫描,根据激光脉冲的发射角度和前后时间推断环境反射点的坐标位置,利用三脚架的对中整平来控制姿态。地面激光雷达系统获取的点云密度较高,主要用于近距离测量,广泛应用于冻融循环引起的边坡形变监测^[70]、公路边坡变形监测^[71]、滑坡等地质灾害监测^[72-73]以及采煤沉陷监测等领域。李秋^[74]结合矿区采煤地表沉陷监测问题,讨论了地面激光雷达的技术优势与挑战,将该技术成功引入矿区沉陷监测领域。李强等^[75]通过将地面激光扫描仪技术应用到重庆市某矿区地表形变监测中,证明

了该技术监测采煤地表形变的可行性。所使用的ScanStation2仪器单点扫描精度为 ± 4 mm,构建的模型精度为 ± 2 mm。获取的面状形变监测结果弥补了传统单点变形监测缺乏整体特征的不足。孟万利等^[76]基于地面激光扫描技术采集的采煤地表沉陷前后两期点云数据(100 m距离单点扫描精度为5 mm),获取的采煤地表形变中误差为 ± 21 mm。何荣^[77]以陕西省大柳塔矿某工作面地表沉陷为试验区,基于地面激光扫描技术,获取沉陷前后两期点云数据中特征点的法向量变化,高精度提取了矿区地表倾斜值,再次证实了地面激光雷达技术在采煤形变监测领域的潜力。

地面激光雷达技术获取的高密度、高精度的点云数据,是构建高分辨率精细地形模型的有利条件。同时,基于该技术能够获取面状地表形变数据,这也成为其应用于采煤沉陷监测的一大优势。但在实际观测过程中,受地貌起伏及地物遮挡等因素影响,常需设置多个测站进行分站扫描,尤其在西部山区及丘陵地区复杂地形及起伏地貌条件下,搬站困难、工作量大且耗时耗力,限制了该方法在矿区的推广应用,尤其无法满足西部矿区复杂地貌的开采沉陷监测要求。

3) 基于无人机激光雷达的矿区沉陷监测。无人机激光雷达系统搭载平台为无人机,与机载激光雷达相比,能够以更高精度提供更密集点云,其体积小、重量轻,具有更高的操作灵活性,广泛应用于高精度考古测绘^[78]、高精度DEM生产^[79-81]、景观变化监测及地形测量^[82-83]、环境重建^[84]、矿区沉陷监测^[62-64]等领域。

现阶段基于无人机激光雷达技术监测采煤沉陷主要采用如下处理方案:①首先对多期点云数据进行滤波获取地面点云;②基于地面点云构建多期DEM;③将DEM叠加获取采煤沉陷模型;④进行模型后处理,采用去噪算法剔除沉陷模型噪声。上述处理方案中,点云滤波是三维点云数据处理中去除噪声及提取地面点的关键步骤。根据处理方式和原理,可以将点云滤波方法分为经典的地面滤波算法和基于学习的滤波算法两类。前者主要有基于统计的(包括均值滤波、中值滤波、高斯滤波等)^[85-86]、基于形态学的(借鉴数学形态学的概念,利用膨胀和腐蚀操作来提取地面点)^[87]、基于坡度的(根据两点之间的斜率来判断)^[88-89]、基于区域生长的(根据相邻点的相似性将点云分组,从而提取地面和非地面点)^[90]以及基于曲面的(通过判别函数构建参考面,

然后通过分析点位置与参考面相应缓冲区之间的空间关系来确定地面点)^[91]。此外,有学者提出了基于上述两种或多种典型滤波器的混合方法,以提高滤波性能^[92-93]。经典的地面滤波算法在相对平坦和植被稀疏的地区表现良好,但在处理复杂环境(如混合地形、陡坡、茂密植被和地形不连续性)时存在明显的缺陷。

与经典的地面滤波算法不同,基于学习的滤波算法将地面滤波转换为概率问题,其依赖于足够的监督样本。早期的基于学习的分类算法是从手工创建的特征中学习判别规则进行地面点的分类与分割,如支持向量机、随机森林、AdaBoost等^[94-95],但这些分类器的性能通常受到手工特征低级描述性的限制。逐渐成熟的基于深度学习的点云分割方法可以通过卷积神经网络等结构学习点云的特征,实现地面和非地面点的分类。与经典的地面滤波算法相比,基于学习的滤波算法在针对不同地形地貌条件的数据处理中,其算法性能不会表现出明显差异,具有更强的稳定性及适用性^[96-97]。但基于学习的点云滤波算法其高分类精度并不一定能获得高质量的裸露地表,裸露地表的准确性更多地取决于出现错误分类的点云。目前最先进的深度学习点云分类算法也无法保证地面点分类的准确性,在近地面的低矮植被分类中仍未得到很好的解决^[98]。

由于现有滤波算法的局限性,经滤波处理后的点云中仍会掺杂部分非地面点噪声^[99-101],这类噪声点云在后续的构网建模及模型叠加过程中,会导致所生成的沉陷模型带有显著的沉陷误差。另一方面,即使地面点云分类足够好,不同时期扫描获取的地面点云在密度、平面位置方面存在差异性,尤其在悬崖、陡坡等地貌变化大的区域,利用地面点云进行建模和叠加过程中,也会因点云分布差异及插值误差造成很大的沉陷模型误差^[62,102-103]。针对这类模型误差,有学者引入小波变换进行模型去噪处理^[62],但剔除部分模型误差的同时也剔除了沉陷模型中的沉陷细节特征;也有学者直接忽视了上述模型噪声误差影响^[64,103-104],所获取的矿区沉陷模型精度不足,限制了该技术在矿区沉陷监测中的实际应用。

有学者通过分析激光雷达点云构建的矿区沉陷模型误差,发现模型误差分布与地形特征具有高度相关性,在平坦区域测量精度较高而地形陡峭区域误差较大^[102]。这一发现恰好与激光雷达测量的二类高程误差^[105]相佐证,即当地面起伏或有一定坡度时,激光脚点平面位置的误差会产生高程方向的附加误

差。这一方面证实了激光雷达测量的二类高程误差是沉陷模型不确定性误差的来源之一；另一方面反映出开采引起的水平位移也是影响沉陷信息准确性的重要因素。为此，该文献提出了一种基于地貌特征的局部平坦地面点提取 (Local Flat Point Extraction, LFPE) 算法。算法直接寻找有利于监测的平面关键点，计算出平面关键点位精准下沉量，进一步根据开采沉陷盆地所具备的连续性特征，通过插值算法构建地表沉陷模型。该算法一方面通过判断移动窗口对应地表局部高差，提取局部平坦点集，以抵抗平面误差及水平位移对沉降监测的影响，削弱不确定性误差；另一方面，从两期扫描点云中提取公共平坦区域内部的关键点，用于抵抗两期点云在分布上的差异所造成的模型误差，有效克服了常规建模方案存在的严重缺陷。这种通过提取有利于监测的特征区域求取沉陷信息的方法，为矿区沉陷监测激光扫描点云数据处理探索了新的途径。

2.4 沉陷监测技术对比分析

随着沉陷监测技术研究的不断深入与精细化，研究人员开始关注各监测手段的特点及其差异性，以针对不同的需求结合各监测技术优势进行监测方案设计。有学者概述了 D-InSAR 技术、移动激光扫描仪和地面激光雷达技术特点，并使用三种技术在罗马南部的一段道路上进行位移监测，以评估各技术的监测能力，研究表明 D-InSAR 技术获得的位移被低估，而移动激光扫描仪和地面激光雷达技术位移监测能力表现出较好的一致性，垂直位移监测精度优于 3 cm^[106]。也有学者 (2021 年) 对无人机摄影测量和激光雷达技术在监测地下采矿引起地形变形方面的有效性展开研究，采用基于数字地形差异模型 (DoD) 的标准方法检测沉降，将地面激光雷达

数据作为参考，比较上述两种方法的准确性，分析表明在平坦路面及硬表面，无人机摄影测量能够获得噪声更少的数据和更准确的地形沉降测量结果；但在地形复杂或植被覆盖的条件下，无人机激光雷达则表现出较优的监测能力^[107]。通过整理已有方法对比研究并结合实际应用类文献，对现阶段常用的几种沉陷监测技术从空间尺度、监测精度、技术要求、矿区沉陷监测优势与局限性几个方面进行归纳，见表 1。可见，InSAR 技术探测小梯度形变的能力能够为沉陷边界的划分提供有力的技术支撑，无人机激光雷达和摄影测量技术虽具有较高的技术要求，但其高精度、高操作灵活性的特点在矿区沉陷监测领域拥有很大潜力。

2.5 多源遥感数据融合技术

随着对地观测技术的发展，多传感器、多时间和空间尺度、多分辨率的遥感数据不断涌现，各种传感器在所感知的属性类型、重访能力、数据的空间分辨率和光谱分辨率等方面存在很大差异，加上不同数据其深层次的异质性，对于有效和高效地处理遥感数据提出了严峻的挑战。而数据融合技术就是将不同的信息源整合起来，充分利用其时间信息、空间信息、光谱信息及后向散射信息等特性，以提高信息提取、分析和决策支持的能力，可用于环境监测、资源管理、农业、城市规划等多个领域^[108]。

多源遥感数据融合可以分为像素级融合、特征级融合和决策级融合 (图 2)^[109-110]。像素级融合是将不同传感器的原始数据组合成单一分辨率的数据，而不同传感器之间可能存在亮度、分辨率、几何配准等方面的差异，通常需要考虑数据的校正和配准以确保数据融合的有效性；特征级融合是提取和整合不同传感器的特征，如辐射特征、纹理特征、光谱特

表 1 采煤沉陷多源遥感监测技术对比

Table 1 Comparison of multi-source remote sensing monitoring techniques for coal mining subsidence

| 监测手段 | | 空间尺度 | 测量精度 | 技术要求 | 监测优势 | 局限 |
|-----------|---------|------|------|------|-----------------------------|---------------------------|
| InSAR技术 | 高频波段 | *** | *** | * | 形变敏感度高、小梯度形变监测精度高 | 对流层误差大、易出现失相干、无法监测大量级形变 |
| | 低频波段 | *** | *** | * | 穿透力强、能够用于大梯度形变监测 | 电离层误差大、形变敏感度高、小量级形变无法有效探测 |
| 无人机摄影测量技术 | | ** | ** | ** | 沉陷监测分辨率高、精度高、操作灵活性高、能够监测地裂缝 | 植被覆盖及地形复杂区域建模误差较大 |
| 激光雷达技术 | 机载激光雷达 | ** | * | *** | 测程大、覆盖范围大 | 点密度及测量精度不足，无法满足精细建模要求 |
| | 无人机激光雷达 | ** | ** | *** | 高分辨率、高监测精度、高操作灵活性 | 受监测精度限制无法划分沉陷边界 |
| | 地面激光雷达 | * | *** | ** | 监测精度高、监测数据密度高、可精细监测及建模 | 测程有限、搬站困难、工作量大、耗时耗力 |

注：其中1~3星“*”代表适用空间尺度从小到大，测量精度、技术要求由低到高。

征等,以提高分类和识别性能;决策级融合是在每种传感器上独立处理各输入数据并独立完成决策或分类的基础上,将多个传感器的识别结果进行融合,以做出全局最优决策,通常使用统计方法或机器学习

算法来整合不同来源的决策。现阶段,像素级融合方法主要集中在光学数据融合,而特征级和决策级融合方法则广泛应用于如合成孔径雷达、光学图像、激光雷达点云等数据类型^[111]。

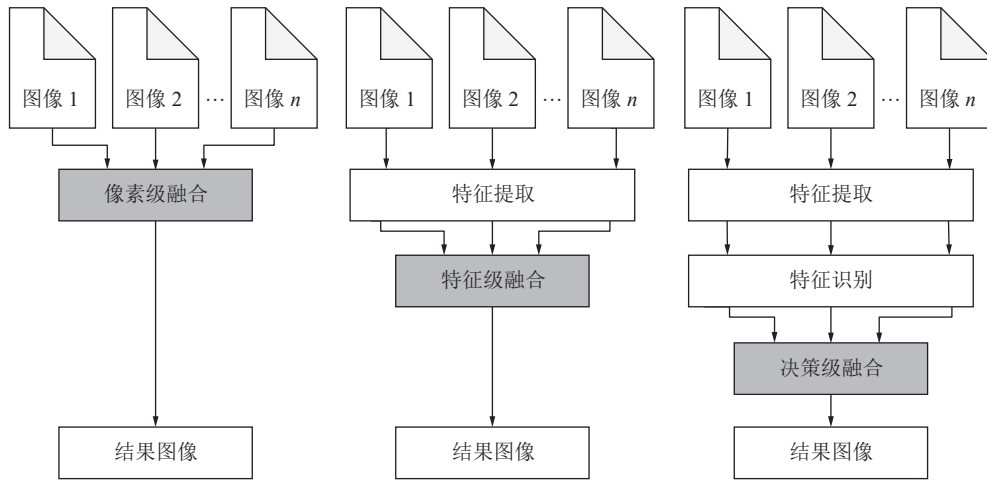


图 2 不同层级遥感数据融合框架

Fig.2 A framework for fusion of remote sensing data at different levels

2.5.1 像素级融合方法

像素级融合的目的主要是提高空间分辨率,增强结构和纹理细节,同时保留原始多光谱数据的光谱保真度^[111]。遥感图像像素级融合的算法可分为三类:分量替换融合技术、基于调制的融合技术和基于多分辨率分析的融合技术。①分量替换融合技术是将多光谱频段匹配到全色频段后,对其应用正向变换;其次,新数据空间中全色频段的组成部分被更高分辨率的频段所取代;最后,通过对原始空间的逆变换构造融合结果^[112-113]。分量替换融合技术的典型算法是强度-色调-饱和度(IHS)变换,其使用高分辨率全色图像来代替强度分量,通过IHS逆变换获得融合图像。此外,基于分量替换融合技术的方法还有主成分分析(PCA)变换融合方法、Gram-Schmidt(GS)谱锐化等。②基于调制的融合技术通过将多光谱图像乘以全色图像与合成图像(通常是全色图像的较低分辨率版本)的比值,将空间细节调制到多光谱图像中^[114-115]。典型的基于调制的融合算法包括Brovey、基于平滑滤波器的强度调制(SFIM)、高通空间滤波器(HPF)和合成可变比率(SVR)融合算法。③基于多分辨率分析的融合技术则采用多尺度分解法,如多尺度小波、拉普拉斯金字塔或二维经验模式分解,以不同级别分解多光谱图像和全色图像。该技术首先进行小波多分辨率分解;其次用多光谱频段的近似系数替代全色频段的近似系数;最后逆多分辨率变换得到融合结果^[116-117]。

由于高分辨率和多源数据融合的复杂性不断增加,结合基于分量替换融合技术的最大化空间改进的优点和基于多分辨率分析融合技术的最小化频谱失真的优点,已经开发出上述技术的混合体。如一些算法结合了小波变换和IHS变换或PCA变换,使用小波分解提取一幅图像中的细节信息,使用标准图像变换将其注入另一幅图像中以实现图像融合的目的。

2.5.2 高层次融合方法

我们将特征级融合与决策级融合统一归为高层次融合方法,本文重点对现阶段应用于矿区沉陷监测领域的几种典型遥感数据间的融合研究做出回顾,如SAR影像、光学影像、点云数据。

1) 光学图像与SAR影像融合。SAR图像具有丰富的极化散射信息,但其成像会受到相干斑噪声影响,解译效果较差^[118],光学图像具有丰富的光谱及纹理信息,同时具备高分辨率、低成本的优点。通过数据融合技术将这二者的互补信息进行有效整合,能够获得良好的地物分类效果^[119]。但将可用的像素级融合技术应用于SAR和光学图像的融合时,可能会出现光学图像的光谱特征或微波后向散射信息被破坏,或两者同时被破坏而无法有效融合。分类器组合则是一种有效的融合SAR影像与光学图像的措施,现阶段包括贝叶斯决策理论、Shafer证据理论、统计方法、神经网络、基于马尔可夫随机场、支持向量机(SVM)以及多时间分类的决策融合在内的多种数据融合理论与方法^[120-122]都取得了较好的成果。

2) 点云数据与光学图像融合。与光学图像相比, 激光雷达点云数据能更好的提供物体表面的几何特性, 特别是区分人造物体, 但其只能提供有关物体表面反射或吸收特性的有限信息^[123]。而光学图像提供的光谱信息, 在提取物体边界信息时, 通常比激光雷达点云数据效果更好, 尤其是在高度不连续性的情况下。点云与影像的融合就是使用图像数据对点云进行纹理化, 例如具有集成多光谱相机的 LiDAR 系统以及摄影测量系统的密集匹配点云, 通过特征匹配来配准点云数据与图像数据, 进而从二维图像中提取每个三维点云的光谱信息^[124], 生成包含图像中各像素值 (RGB) 作为点特征的点云数据, 可用于物体识别、分类与目标检测等领域^[125]。

3) 点云数据与点云数据的融合。其主要目标是利用点云固有的三维几何、空间结构和激光雷达后向散射信息, 将其与来自不同传感器或不同平台上的点云信息相结合。可以分为点云层面的数据融合以及特征层面的数据融合。①点云层面的数据融合。可分为来自同一传感器不同时相的点云融合、来自同一传感器不同平台的点云融合以及来自不同传感器的点云融合。其中, 来自不同传感器的点云具有不同的精度、空间覆盖范围和空间尺度, 并且在不同的时间戳处捕获, 将其进行融合能够提供信息更丰富、密度更高、覆盖范围更广的点云^[126-127]。②特征层面的数据融合。它是将点云信息转换为可以通过图像处理方法进行分析的二维图像。这些图像通常表示高程、几何特征、平面拟合残差、回波强度特征等^[128]。可以通过对点云进行特征层面的数据融合, 将三维信息封装到二维图像中以进行图像分类或将图像特征赋予三维点云辅助点云进行语义标注^[129]。

随着遥感技术的不断发展, 综合利用包括光谱、结构和纹理特征在内的多特征是数据融合的发展趋势, 多特征的组合可以提高图像分类和信息提取的准确性。另外, 面向应用的融合技术设计与优化是数据融合应考虑的重要方面。根据不同融合应用的要求及理想的成像条件, 设计优化出面向应用的数据融合新方法是开展变化检测、高精度分类以及特定特征增强和提取等各种应用的重要支撑。此外, 机器学习和深度学习技术将在多源遥感数据融合中发挥越来越重要的作用。云计算和大数据处理也将促进数据融合的发展。

3 面向西部矿区沉陷监测的多源遥感技术瓶颈与展望

面向矿区沉陷监测应用的多传感器和多时空数据日益丰富, 加之理论模型与数学方法的不断完善, 使得矿区沉陷监测向精准、高效、智能化方向发展。尽管现阶段遥感数据融合领域已经发展成熟, 但从理论和应用角度来看, 仍有许多问题有待进一步研究 (表 2)。这里特别关注形变监测能力突出的几种新型遥感手段, 在分析其形变监测优势与局限性的基础上, 讨论面临的相应挑战和未来可能的研究方向, 以期对矿区形变监测技术发展提供新的思路。

3.1 关于矿区沉陷 InSAR 监测

尽管许多学者证实了 InSAR 技术在监测矿区地表沉陷方面的可行性, 但分析发现这些成果多局限在诸如老采空区地表残余变形, 充填开采、条带开采或宽深比很小的极不充分开采等小量级的地表形变监测方面。实际上, 国内矿山普遍采用长壁综采工作面冒落式开采, 引起的地表沉陷具有下沉速度快,

表 2 沉陷监测需求分析、技术难点与解决要点
Table 2 Analysis of subsidence monitoring needs, technical difficulties and solution points

| 监测需求 | | 技术难点 | 解决要点 |
|--------|---------------------------------------|---|---|
| 精准沉降监测 | 包括小尺度的细微形变以及大范围的地面沉陷 | ①小尺度上准确监测微量沉陷(包括沉陷边界的划定); ②沉陷全盆地高精度监测 | ①使用高分辨率高频波段InSAR数据或高密度LiDAR数据, 可以检测微小尺度的沉陷; ②通过数据融合方法整合多种数据源, 如卫星数据、地面监测数据和实时传感器数据, 以获得更全面的监测结果 |
| 动态监测 | 实时或近实时监测, 能够捕捉快速沉陷事件以便采取紧急行动 | 实时监测技术的开发和实施是一个技术挑战, 尤其是在偏远或难以访问的地区 | 利用机器学习和人工智能技术, 自动分析和解释监测数据, 实现实时监测和数据分析。在关键区域部署传感器网络, 实现实地监测, 以提供实时数据和预警 |
| 长期趋势分析 | 长期趋势分析用于预测未来可能的沉陷, 帮助规划和管理资源 | 管理和处理大量监测数据需要高效的数据存储和处理系统以及适应性强的算法 | 使用云计算和大数据分析平台, 能够高效地处理和存储大量监测数据, 支持实时和长期趋势分析 |
| 水平变形监测 | 包括沿工作面走向和倾向(或沿东西方向和南北方向)在内的水平方向地表形变监测 | 矿区水平变形监测需要高时空分辨率的数据及高精度和可靠的结果, 以支持决策和风险评估 | 利用无人机遥感技术(摄影测量和激光雷达)高分辨率和高操作灵活性的优势, 可通过寻求不同时期图像同名特征点的坐标变化或通过特征点云匹配获取地表水平方向形变 |

沉降量和沉降梯度很大, 沉降范围较小的特点。高频波段 SAR 影像在波长受限条件下, 无法获取大量级的地表形变; 而低频波段虽穿透力强, 有可能获取较大量级的地表形变, 但受电离层误差影响较大且对形变信息不敏感, 细微形变难以有效捕捉, 这导致 InSAR 技术目前还无法替代常规观测站形式的地表沉陷监测。针对上述局限, 有学者提出使用时序 InSAR 获取盆地边缘微小形变, 采用 offset-tracking 方法提取盆地中心的大量级形变, 这种方法往往对于 SAR 影像的空间分辨率和影像质量有较高的要求, 针对西部黄土高原矿区沟壑地形及植被覆盖的复杂条件, 地表沉陷全盆地形变获取仍难以实现; 也有学者尝试通过完善 InSAR 电离层误差校正模型与方法, 以提高低频 InSAR 形变监测精度, 但其对形变信息不敏感的特性仍得不到有效改善; 部分学者提出利用概率积分法辅助实现矿区大量级形变监测, 但在黄土矿区复杂地质采矿条件下地表沉陷预计模型存在显著的误差, 上述方法往往引入难以估计的模型误差。

目前制约 InSAR 应用于矿区地表形变监测的一个瓶颈问题是干涉失相关和大气延迟等各种误差影响不可控制。常规的 D-InSAR 因干涉图质量问题(如地形数据误差、轨道数据误差、干涉失相关、相位解缠误差以及大气延迟误差等不确定性因素影响)导致形变监测精度往往不高。现有的时序 InSAR 方法所选取的点目标主要存在于灯塔、裸岩、城市建筑、人工布设的角反射器等后向散射特性较强的特征区域, 而在黄土高原矿区地表荒地、林地、农田较多的区域, 很难选取上述时序相干点目标, 现有的 InSAR 技术方法及流程在黄土覆盖矿区应用时仍面临很大的挑战。一方面, 黄土矿区地表起伏很大, 沟壑纵横且植被覆盖度高, 很难获得足够的 PS 点和 DS 点用于整个沉陷区的形变信息提取。另一方面, 黄土矿区开采引起的地表下沉剧烈且非连续特征明显, 时序 InSAR 在获取裂缝发育区域及沉陷盆地中央的大梯度形变时, 往往造成失相干现象。为此, 探索利用分布式目标作为相干点开展西部矿区地表形变 DS-InSAR 监测可成为解决这一问题的突破点。该方法可利用强度影像选取同质像元, 根据同质像元的分布特征, 结合干涉影像, 对分布式目标的相位进行优化, 进而对优化相位进行解算来获取形变信息。现阶段研究适用于西部矿区的同质点识别方法和相位优化算法是利用 InSAR 获取地表形变的关键环节, 目前的研究尚处于实验探索阶段。

3.2 关于矿区沉陷无人机航测

无人机航测技术的沉陷监测精度受航拍系统和地面环境影响较大, 在裸地或植被较稀疏的平坦区域监测效果较佳。在地形起伏和植被覆盖的情况下, 一方面无法穿透植被获取地表信息, 另一方面植被的时空变化对地表真实的形变信息提取造成显著干扰, 这是限制该技术在矿区沉陷监测中实际应用的重要因素。目前, 多数学者认为基于无人机航测获取的矿区沉陷信息在精度方面还存在明显的系统性误差和随机误差, 尤其高程方面的精度尚难以达到常规的地表移动监测精度要求。通过多次现场试验发现, 在外业航飞设计中根据预计的沉陷盆地范围, 沿沉陷边界布设航线, 通过降低航高增加影像分辨率, 使用沉陷边界以外的稳定地物特征点作为多期影像的像控点, 进行影像匹配和模型叠加, 利用非沉陷区下沉量应为零的先验条件, 通过统计非沉陷区域的误差分布特征, 来处理沉陷模型中潜在的系统误差, 再利用插值法施加误差改正后, 可有效提高沉陷边缘区的监测精度。应该指出, 在地貌复杂和植被覆盖较高的黄土高原矿区, 基于无人机航测的沉陷监测还处于技术探索阶段。

目前利用无人机影像识别和提取地裂缝的成果, 主要还是在地形较平坦和植被较少的沉陷区域获得的。在植被覆盖、地形变化及地物遮挡环境下, 利用无人机影像开展地表裂缝及地物变化识别与提取时, 其确定性及完整性会受到严重干扰, 在诸如黄土高原这类地貌复杂和植被覆盖矿区的采动裂缝监测中, 地表裂缝的智能识别与自动提取方法还有待研究。

3.3 关于矿区沉陷无人机 LiDAR 监测

无人机激光扫描所获取的点云数据还存在明显的不确定性误差, 但目前在面对矿区沉陷监测的应用中通常被忽略, 现有成果大都是基于点云数据直接开展应用。激光测距精度及地理参照系的不确定性误差在商业 LiDAR 系统中可以通过内置的校正模型进行部分校正, 但激光雷达系统姿态定位精度对于点云数据的不确定性影响显著。研究表明, 平坦地面和理想的航飞条件下, 无人机 LiDAR 测量数据本身的误差在 3~5 cm, 相当于 GNSS RTK 的测量精度。若要进一步提高点云数据的精度, 还有赖于无人机 LiDAR 系统的持续改进。

基于点云数据构建 DEM 的不确定性误差, 是面向矿区沉陷监测的主要误差来源。该项误差与地形复杂度密切相关, 采样密度和 DEM 尺寸也会影响不确定性的空间分布。目前, 在利用点云数据构建精

细地形模型并通过模型叠加获取矿区形变信息的实际应用中,很少考虑并能够消除点云数据本身的不确定性误差及DEM模型的不确定性误差影响。同时,基于UAV LiDAR的采煤沉陷监测所获取的仅是同一地理空间坐标下的地面高程变化,而并非地面点(或地物)真实的移动量。在面向黄土沟壑区复杂地形和植被覆盖的地表沉陷监测中,要想通过点云数据获取真实的地表三维位移量,可探索一种有效的算法来构建多期点云数据之间的空间关系,直接计算出高程方向的变化量。同时,还需进一步研究特征点云的构建、特征点云的匹配以及误匹配剔除等算法,才能真正实现矿区地表实际形变信息的精准提取。

3.4 关于沉陷区水平位移的遥感探测

地下开采引起的地表沉陷过程中,必然伴随着地表点的水平向位移。根据开采沉陷规律,地表点最大的水平位移一般达到最大下沉量的0.2~0.4倍,在黄土高原沟壑区甚至出现地表水平位移大于下沉的情形,而且水平位移监测对于地面设施防护具有更重要的意义。

目前,利用InSAR技术获取矿区地表水平位移信息方面取得了一定的进展,但仍然存在严重不足。基于InSAR获取的LOS向一维形变在进行三维位移反演时,面临不同的雷达卫星系统观测值误差带来的显著影响,而通过概率积分法预计模型所建立的下沉与水平位移之间的函数关系,往往过于理想。由于地表下沉梯度与水平位移之间的量化关系十分复杂且无法准确估计,导致三维位移分解精度很低;同样,根据开采沉陷对称性原理所构建的三维位移反演模型也具有局限性。由于黄土覆盖矿区地表沉陷及形变的对称性特征并不明确,地表水平位移的范围可能大于下沉范围,开采过程中地表动态移动存在明显的非对称特性,因此,目前还缺乏非常有效的InSAR水平位移提取方法。

在利用无人机航测的高分辨率影像提取沉陷区水平位移方面,虽然取得了一定成果^[47,130-132],但在特征地物稀少和植被覆盖的黄土高原矿区仍然存在技术瓶颈。尽管所构建的影像模型在平面上的精度要优于高程精度,但由于水平位移的提取需要具有清晰轮廓的地物细节,这种特征地物的提取在西部黄土高原沉陷区的田野和草地上较为困难。作者团队在黄土高原典型矿区开展了无人机航测试验,基于图像识别技术提出了一种结合影像地物矢量边界与影像特征信息的沉陷区水平位移提取方法。通过提

取多期DSM模型中地物矢量边界的变化信息,粗提取地表水平位移的影响范围,再利用影像特征精确地提取地表水平位移信息。结果表明,这种融合地物矢量边界和影像特征的方法,将前者的效率优势与后者的精度优势相结合,能够提取沉陷区部分地表点的水平位移信息。

利用无人机激光扫描点云数据来获取沉陷区水平位移的研究尚处于探索阶段^[62,64]。有学者引入图像亚像素相关技术,通过对沉陷前、后基于点云数据构建的特征影像进行图像亚像素相关,初步实现了地表沉陷全盆地水平位移信息的获取^[102]。然而,矿区地表水平位移并非是独立存在的,其与下沉共同引起地表形变,将下沉和水平位移割裂开来分别处理,并不符合开采沉陷的基本原理。现阶段采用DEM叠加所获取的地表沉陷模型,仅仅是同一地理空间坐标下的地面高程变化。由于模型叠加过程中忽略了地表点水平位移的影响,所获得的下沉信息并非是地物点在垂直向的位移量,这种影响在地形变化大的区域尤为显著,有可能导致沉陷信息完全错误。因此,利用激光点云构建的精细三维地形模型进行叠加和再分解,寻求三维位移一体化求解方法将是突破该问题的关键。

3.5 关于多源遥感数据融合的沉陷监测

国内学者目前主要针对单一数据源开展了地表沉陷信息提取,虽然各种遥感技术都具有其独特的优势,但在当前技术条件下,依靠单一手段无论在数据精度(确定性)方面,还是在实际应用方面依然存在明显的局限性,无法完全解决西部矿区地表沉陷高精度监测的工程问题。如何融合多源遥感数据的优势,高精度地获取矿区沉陷变形信息,是多源遥感技术真正取代传统的大地测量方法,解决西部矿区沉陷监测工程实际问题的关键所在。

现阶段融合多源数据的沉陷监测方法主要分为3类:①InSAR数据融合常规观测数据(如监测点的水准数据和GNSS数据等)。实质上是将常规观测数据作为先验条件来检验或改正InSAR结果,相比于利用开采沉陷预计模型来校正InSAR结果的方法更为有效,但其依赖于高精度的实测数据。②融合无人机摄影测量与InSAR的矿区沉陷信息提取。利用InSAR获取的沉陷盆地边缘区域的小梯度形变与无人机航测获取的沉陷盆地中的大梯度形变,通过插值方法获取地表全盆地沉陷信息^[37,133],也可将无人机航摄获取的高分辨率高精度DEM用于InSAR影像解算的外部参照,来提高InSAR解算精度与形

变探测能力。③无人机搭载可见光相机与 LiDAR 等多传感器融合方式。利用无人机 LiDAR 能够穿透植被缝隙测量地面的特点,将其作为数据源对多时相影像密集匹配点云进行联合配准,再利用点云滤波与插值得到差分 DEM 构建更为精准的地表沉陷模型。前两类数据融合主要为了克服 InSAR 技术无法监测大梯度变形的局限,是基于各传感器获取形变信息的基础上,将不同分辨率的形变数据进行融合,其本质是低层次的像素级融合。第三类则属于高层次的点云与影像或点云与点云的特征级融合,利用两种近地遥感数据各自的优势,使矿区沉陷监测在时间分辨率、空间分辨率和植被覆盖方面减少限制。但当前技术条件下,受到无人机航测和 LiDAR 本身监测精度的限制,高精度地提取沉陷边界还存在困难。如何面向矿区沉陷监测这一特殊应用,设计优化的数据融合方法以最大程度结合各数据源的优势,如充分利用 InSAR 技术探测细微形变、LiDAR 技术穿透植被以及摄影测量高分辨率及光谱信息的优势,有望成为解决西部矿区地表沉陷高效监测的有效技术途径。

4 结 语

现阶段矿区沉陷监测中单一遥感监测技术在精度和可靠性方面,还不能完全替代常规的大地测量手段,现有研究成果还缺乏工程实际应用。在西部黄土高原矿区独特的自然环境和地质采矿条件下,无论是 InSAR、无人机航测、激光雷达技术均面临更多的困难和挑战。但是,随着对地观测技术的快速发展,面向矿区沉陷监测的遥感技术及多源数据融合方法也在不断改进和完善,依托 GNSS、物联网及人工智能等技术的进步,未来有望建立集多源监测技术为一体的矿区沉陷监测智能化体系。

参考文献(References):

- [1] 钱鸣高. 煤炭的科学开采[J]. 煤炭学报, 2010, 35(4): 529-534.
QIAN Minggao. On sustainable coal mining in China[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 529-534.
- [2] 谢和平, 王金华, 王国法, 等. 煤炭革命新理念与煤炭科技发展构想[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1187-1197.
XIE Heping, WANG Jinhua, WANG Guofa, et al. New ideas of coal revolution and layout of coal science and technology development[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1187-1197.
- [3] 袁 亮. 我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 1-6.
Yuan liang. Strategic thinking of simultaneous exploitation of coal and gas in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 1-6.
- [4] 王双明, 杜华栋, 王生全. 神木北部采煤塌陷区土壤与植被损害过程及机理分析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 17-26.
WANG Shuangming, DU Huadong, WANG Shengquan. Analysis of damage process and mechanism for plant community and soil properties at northern Shenmu subsidence mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 17-26.
- [5] 彭苏萍, 毕银丽. 黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术与战略思考[J]. 煤炭学报, 2020, 45(4): 1211-1221.
PENG Suping, BI Yinli. Strategic consideration and core technology about environmental ecological restoration in coal mine areas in the Yellow River basin of China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4): 1211-1221.
- [6] 汪云甲. 矿区生态扰动监测研究进展与展望[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1705-1716.
WANG Yunjia. Research progress and prospect on ecological disturbance monitoring in mining area[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1705-1716.
- [7] TANG J, SUI L, MA T, et al. GEE-based ecological environment variation analysis under human projects in typical china loess plateau region[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(8): 4663.
- [8] 郭文兵, 黄成飞, 陈俊杰. 厚湿陷黄土层下综放开采动态地表移动特征[J]. 煤炭学报, 2010, 35(S1): 38-43.
GUO Wenbing, HUANG Chengfei, CHEN Junjie. Dynamic surface movement characteristics of integrated mining under thick wet-sagged loess layer[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(S1): 38-43.
- [9] 余学义, 李邦帮, 李瑞斌, 等. 西部巨厚湿陷性黄土层开采损害程度分析[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(1): 43-47.
YU Xueyi, LI Bangbang, LI Ruibin, et al. Analysis of mining damage in huge thick collapsible loess of western China[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2008, 37(1): 43-47.
- [10] 刘 辉, 邓喀中, 雷少刚, 等. 采动地裂缝动态发育规律及治理标准探讨[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(5): 884-890.
LIU Hui, DANG Kazhong, LEI Shaogang, et al. Dynamic developing law and governance standard of ground fissures caused by underground mining[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2017, 34(5): 884-890.
- [11] TANG J, SUI L. Geodetector-Based Livability Analysis of potential resettlement locations for villages in coal mining areas on the loess plateau of China[J]. *Sustainability*, 2022, 14(14): 8365.
- [12] 许国胜, 李德海, 侯得峰, 等. 厚松散层下开采地表动态移动变形规律实测及预测研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 2056-2062.
XU Guosheng, LI Dehai, HOU Defeng, et al. Measurement and prediction of the transient surface movement and deformation induced by mining under thick alluvium[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(7): 2056-2062.
- [13] 陈俊杰, 邹友峰, 郭文兵. 厚松散层下沉系数与采动程度关系研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(2): 250-254.

- CHEN Junjie, ZOU Youfeng, GUO Wenbing. Study on the relationship between subsidence coefficient and mining degree under a thick alluvium stratum[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2012, 29(2): 250–254.
- [14] GABRIEL A K, GOLDSTEIN R M, ZEBKER H A. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94(B7): 9183.
- [15] ROSEN P A, HENSLEY S, JOUGHIN I R, *et al.* Synthetic Aperture Radar Interferometry[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2000, 88(3): 333–382.
- [16] MASSONNET D, ROSSI M, Carmona-MORENO C, *et al.* The displacement field of the Landers earthquake mapped by Radar interferometry[J]. *Nature*, 1993, 364: 138–142.
- [17] CARNEC C, MASSONNET D, KING C. Two examples of the use of SAR interferometry on displacement fields of small spatial extent[J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23(24): 3579–3582.
- [18] 邓喀中, 姚 宁, 卢 正, 等. D-InSAR 监测开采沉陷的实验研究[J]. *金属矿山*, 2009(12): 25–27, 120.
DENG Kazhong, YAO Ning, LU Zheng, *et al.* Experimental research on monitoring mining subsidence by D-InSAR technique[J]. *Metal Mine*, 2009(12): 25–27, 120.
- [19] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Permanent scatterers in SAR interferometry[C]//IEEE 1999 International Geoscience and Remote SENSING Symposium. IGARSS'99(Cat. No. 99CH36293). IEEE, 1999, 3: 1528–1530.
- [20] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Permanent scatterers in SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1): 8–20.
- [21] 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.
- [22] 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: 3460–3470.
- [23] FERRETTI A, FUMAGALLI A, NOVALI F, *et al.* DEM reconstruction with SqueeSAR[C]//2012 Tyrrhenian workshop on advances in radar and remote Sensing. Naples(IT): Tee-Rievenno Euro – TRE SRL, Mino, Iy, 2012: 198–201.
- [24] 胡 爽, 吴文豪, 龙四春, 等. 分布式目标在红庆河煤矿形变监测中的应用[J]. *大地测量与地球动力学*, 2019, 39(12): 1261–1264.
HU Shuang, WU Wenhao, LONG Sichun, *et al.* Application of distributed scatterer in deformation monitoring of hongqinghe Coal Mine[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2019, 39(12): 1261–1264.
- [25] 胡 爽. 利用哨兵卫星 SAR 影像监测红庆河煤矿地表形变[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2019.
HU Shuang. Monitoring the surface deformation of Hongqinghe Coal Mine with sentinel satellite SAR Image[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2019.
- [26] 李 毅. 融合分布式目标的矿区长时序 InSAR 地表形变监测[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
LI Yi. Long time-series InSAR surface deformation monitoring with distributed scatterers in mining area[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [27] 鹿 璐. 面向矿区地表时序沉降监测的 DS-InSAR 方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
LU Lu. Study on DS-InSAR method for monitoring time-series surface deformation in mining area[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [28] 刘友奉. 基于 DS-InSAR 的充填开采区地表沉降监测方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
LIU Youfeng. Study on monitoring method of surface subsidence in filling mining area based on DS-InSAR[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [29] 祝传广, 张继贤, 邓喀中, 等. 基于改进 MT-InSAR 的日兰高铁巨野煤田段沉降监测[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(3): 1031–1042.
ZHU Chuanguang, ZHANG Jixian, DENG Kazhong, *et al.* Monitoring and analysis of subsidence along RiLan high-speed railway at Juye coalfield based on the improved MT-InSAR[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(3): 1031–1042.
- [30] 毛文飞. 基于低频 SAR 分谱干涉和偏移估计的 InSAR 电离层误差校正模型与方法[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
MAO Wenfei. InSAR ionospheric error correction model and method based on low-frequency SAR split-spectrum interferometry and offset estimation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [31] 蒋 弥, 丁晓利, 李志伟, 等. 用 L 波段和 C 波段 SAR 数据研究汶川地震的同震形变[J]. *大地测量与地球动力学*, 2009, 29(1): 21–26.
JIANG Mi, DING Xiaoli, LI Zhiwei, *et al.* Study on coseismic deformation of wenchuan earthquake by use of Land C wavebands of SAR data[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2009, 29(1): 21–26.
- [32] 刘 斌, 葛大庆. L 波段 ScanSAR 模式在滑坡早期识别中的应用[J]. *大地测量与地球动力学*, 2020, 40(10): 1084–1087.
LIU Bin, GE Daqing. Application fo L-Band ScanSAR Mode in early identification of landslide[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2020, 40(10): 1084–1087.
- [33] LIANG C, AGRAM P, SIMONS M, *et al.* Ionospheric correction of InSAR time series analysis of c-band sentinel-1 tops data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(9): 6755–6773.
- [34] MEYER F J, CHOTOO K, CHOTOO S D, *et al.* The influence of equatorial scintillation on L-Band SAR image quality and phase[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(2): 869–880.
- [35] JI Y, ZHANG Y, DONG Z, *et al.* Impacts of ionospheric irregularities on L-Band geosynchronous synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(6): 3941–3954.

- [36] 汤伏全, 董龙凯, 王宗良, 等. 基于沉陷对称特征的近水平煤层开采 InSAR 三维位移反演模型[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 210–220.
- TANG Fuquan, DONG Longkai, WANG Zongliang, *et al.* A 3-D inversion model for InSAR detected displacements based on ground subsidence symmetry induced by horizontal coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 210–220.
- [37] TANG F, HUANG J, DONG L, *et al.* SIP-Based inversion model of mining-induced 3D deformation[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2021, 87(1): 21–31.
- [38] DAWEI Z, LIZHUANG Q, DEMIN Z, *et al.* Unmanned aerial vehicle(UAV) photogrammetry technology for dynamic mining subsidence monitoring and parameter inversion: a case study in China[J]. IEEE Access, 2020, 8: 16372–16386.
- [39] KRŠÁK B, BLIŠTAN P, PAULIKOVÁ A, *et al.* Use of low-cost UAV photogrammetry to analyze the accuracy of a digital elevation model in a case study[J]. Measurement, 2016, 91: 276–287.
- [40] Ignjatović STUPAR D, ROŠER J, VULIĆ M. Investigation of unmanned aerial vehicles-based photogrammetry for large mine subsidence monitoring[J]. Minerals, 2020, 10(2): 196.
- [41] 高冠杰, 侯恩科, 谢晓深, 等. 基于四旋翼无人机的宁夏羊场湾煤矿采煤沉陷量监测[J]. 地质通报, 2018, 37(12): 2264–2269.
- GAO Guanjie, HOU Enke, XIE Xiaoshen, *et al.* The monitoring of ground surface subsidence related to coal seams mining in Yangchangwan coal mine by means of unmanned aerial vehicle with quad-rotors[J]. Geological Bulletin of China, 2018, 37(12): 2264–2269.
- [42] 张 曦. 基于无人机摄影测量技术的矿区沉陷监测方法研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2019.
- ZHANG Xi. Study on the method of subsidence monitoring in mining areas based on UAV photogrammetry technology[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2019.
- [43] 任本伟. 基于多源监测数据的矿区地表沉陷研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.
- REN Benwei. Study on surface subsidence of mining area based on multi-source monitoring data[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2020.
- [44] 董 祥. 垂直起降固定翼无人机摄影测量开采沉陷监测应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- DONG Xiang. Vertical take-off and landing fixed-wing UAV photogrammetry mining subsidence monitoring application[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [45] 杨绪霆, 姚顽强, 郑俊良, 等. 无人机地形跟随在矿区沉陷监测中的应用[J]. 测绘通报, 2021(5): 111–115.
- YANG Xuting, YAO Wanqiang, ZHENG Junliang, *et al.* UAV terrain following technology application in the mining subsidence monitoring research[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(5): 111–115.
- [46] 廉旭刚, 王 站, 刘晓宇, 等. 免像控无人机摄影测量开采沉陷监测方法研究[J]. 金属矿山, 2021(12): 169–176.
- LIAN Xugang, WANG Zhan, LIU Xiaoyu *et al.* Study on mining subsidence monitoring method based on image free control UAV photogrammetry[J]. Metal Mine, 2021(12): 169–176.
- [47] 马晨阳. 高时空分辨率地表移动变形动态规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- MA Chenyang. Study on dynamic law of surface movement and deformation with high temporal and spatial resolution[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [48] 张 鹏. 黄土风沙区浅埋煤层开采地裂缝发育致土壤损伤规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- ZHANG Peng. Study on soil damage caused by crack development in shallow coal mining in loess sand-blown region[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [49] 魏长婧, 汪云甲, 王 坚, 等. 无人机影像提取矿区地裂缝信息技术研究[J]. 金属矿山, 2012(10): 90–92, 96.
- WEI Changjing, WANG Yunjia, WANG Jian, *et al.* The technical research of extracting ground fissure information in mining area with the UAV image[J]. Metal Mine, 2012(10): 90–92, 96.
- [50] 侯恩科, 首召贵, 徐友宁, 等. 无人机遥感技术在采煤地面塌陷监测中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(6): 102–110.
- HOU Enke, SHOU Zhaogui, XU Youning, *et al.* Application of UAV remote sensing technology in monitoring of coal mining-induced subsidence[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(6): 102–110.
- [51] 侯恩科, 张 杰, 谢晓深, 等. 无人机遥感与卫星遥感在采煤地表裂缝识别中的对比[J]. 地质通报, 2019, 38(2/3): 443–448.
- HOU Enke, ZHANG Jie, XIE Xiaoshen, *et al.* Contrast application of unmanned aerial vehicle remote sensing and satellite remote sensing technology relating to ground surface cracks recognition in coal mining area[J]. Geological Bulletin of China, 2019, 38(2/3): 443–448.
- [52] 杨奇让, 胡振琪, 韩佳政, 等. 煤矿区无人机影像采动地裂缝提取方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(6): 187–196.
- YANG Qirang, HU Zhenqi, HAN Jiazheng, *et al.* Research on extraction method of ground fissures caused by mining through UAV image in coal mine areas[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(6): 187–196.
- [53] 李林宽. 基于无人机影像的煤矿区采动裂缝提取[D]. 西安: 西安科技大学, 2021.
- LI Linkuan. Extraction of mining cracks in coal mine area based on UAV images[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2021.
- [54] 韦博文. 基于改进的 MF-FDOG 算法和无人机影像提取黄土地区地裂缝[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- WEI Bowen. Extraction ground fissures in loess ladform area using modified MF-FDOG algorithm and UAV images[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [55] 郝 明, 林惠晶, 高彦彦. 基于改进主动轮廓模型的无人机影像矿区地裂缝提取[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(12): 2448–2457.
- HAO Ming, LIN Huijing, GAO Yanyan. Ground fissure extraction method based on improved active contour model for UAV images in mining areas[J]. Journal of Geo-information Science, 2022, 24(12): 2448–2457.
- [56] 耿诗画. 基于多源数据的采空区地表裂缝活动监测[D]. 绵阳:

- 西南科技大学, 2022.
- GENG Shihua. Monitoring of surface fracture activity in goaf based on multi-source Data[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2022.
- [57] 杨奇让. 基于无人机的西部黄土沟壑区采动地裂缝提取方法研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- YANG Qirang. Research on extraction method of mining ground fissures based on unmanned aerial vehicle in loess gully area of western China[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [58] 汤伏全, 李林宽, 李小涛, 等. 基于无人机影像的采动地表裂缝特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(10): 130–136.
- TANG Fuquan, LI Linkuan, LI Xiaotao, *et al.* Research on characteristics of mining-induced surface cracks based on UAV images[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(10): 130–136.
- [59] 隋立春, 张熠斌, 张 硕, 等. 基于渐进三角网的机载 LiDAR 点云数据滤波[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(10): 1159–1163.
- SUI Lichun, ZHANG Yibin, ZHANG Shuo *et al.* Filtering of airborne LiDAR point cloud data based on progressive TIN[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(10): 1159–1163.
- [60] 周大伟, 安士凯, 吴 侃, 等. 矿山开采损害 SAR/UAV 融合监测关键技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(10): 121–134.
- ZHOU Dawei, AN Shikai, WU Kan, *et al.* Key technology and application of InSAR /UAV fusion monitoring for coalmining damages[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(10): 121–134.
- [61] COOK K L. An evaluation of the effectiveness of low-cost UAVs and structure from motion for geomorphic change detection[J]. *Geomorphology*, 2017, 278: 195–208.
- [62] 汤伏全, 芦家欣, 韦书平, 等. 基于无人机 LiDAR 的榆神矿区采煤沉陷建模方法改进[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2655–2666.
- TANG Fuquan, LU Jiaxin, WEI Shuping, *et al.* Improvement of mining subsidence modeling method based on UAV LiDAR in Yushen mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2655–2666.
- [63] 何柯璐, 汤伏全, 韦书平, 等. 机载激光点云构建西部矿区开采沉陷模型研究[J]. 测绘科学, 2021, 46(2): 130–138.
- HE Kelu, TANG Fuquan, WEI Shuping, *et al.* Airborne laser point cloud modeling of mining subsidence in western mining areas[J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46(2): 130–138.
- [64] ZHENG J, YAO W, LIN X, *et al.* An accurate digital subsidence model for deformation detection of coal mining areas using a UAV-Based LiDAR[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(2): 421.
- [65] KHAN S D, HUANG Z, KARACAY A. Study of ground subsidence in northwest Harris county using GPS, LiDAR, and InSAR techniques[J]. *Natural Hazards*, 2014, 73(3): 1143–1173.
- [66] de KONING M, HAASNOOT J K, van BUUREN R R, *et al.* Determination of amount of land subsidence based on INSAR and LiDAR monitoring for a dike strengthening project[J]. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 2020, 382: 57–62.
- [67] HE Y, XU G, KAUFMANN H, *et al.* Integration of InSAR and LiDAR Technologies for a Detailed Urban Subsidence and Hazard Assessment in Shenzhen, China[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(12): 2366.
- [68] BERNARD T G, LAGUE D, STEER P. Beyond 2D landslide inventories and their rollover: synoptic 3D inventories and volume from repeat lidar data[J]. *Earth Surface Dynamics*, 2021, 9(4): 1013–1044.
- [69] HU L, Navarro-HERNÁNDEZ M I, LIU X, *et al.* Analysis of regional large-gradient land subsidence in the Alto Guadalentín Basin(Spain) using open-access aerial LiDAR datasets[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 280: 113218.
- [70] LUO L, MA W, ZHANG Z, *et al.* Freeze/thaw-induced deformation monitoring and assessment of the slope in permafrost based on terrestrial laser scanner and GNSS[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(3): 198.
- [71] YIN C, YIN C, LI H, *et al.* Application of the terrestrial laser scanning in slope deformation monitoring: taking a highway slope as an example[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(8): 2808.
- [72] JONES L, HOBBS P. The application of terrestrial LiDAR for geohazard mapping, monitoring and modelling in the british geological survey[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(3): 395.
- [73] KERMARREC G, ZHONGLONG Yang, Daniel Czerwionka-Schröder. Classification of terrestrial laser scanner point clouds: a comparison of methods for landslide monitoring from mathematical surface approximation[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(20): 5099–5099.
- [74] 李 秋, 秦永智, 李宏英. 激光三维扫描技术在矿区地表沉陷监测中的应用研究[J]. 煤炭工程, 2006(4): 97–99.
- LI Qiu, QIN Yongzhi, LI Hongying. Research on the application of laser three-dimensional scanning technology in the monitoring of surface subsidence in mining areas[J]. *Coal Engineering*, 2006(4): 97–99.
- [75] 李 强, 邓 辉, 周 毅. 三维激光扫描在矿区地面沉陷变形监测中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(1): 119–124.
- LI Qiang, DENG Hui, ZHOU Yi. Application of 3D laser scanning to the ground subsidence deformation monitoring in mining area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(1): 119–124.
- [76] 孟万利, 蔡来良, 王姗姗, 等. 基于 TLS 技术的矿区地表沉降快速自动获取研究[J]. 地理与地理信息科学, 2017, 33(3): 36–41.
- MENG Wanli, CAI Lailiang, WANG shanshan, *et al.* Study on rapid and automatic acquisition of surface subsidence in mining area based on TLS tschnology[J]. Geography and Geo-Infoemation Science, 2017, 33(3): 36–41.
- [77] 何 荣, 陆 广. 基于三维激光扫描的矿区地表倾斜值提取方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(11): 199–205.
- HE Rong, LU Guang. Study on extraction method of surface de-

- formation tilt based on 3D laser scanning[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(11): 199–205.
- [78] SCHRODER W, MURTHA T, GOLDEN C, *et al.* UAV LiDAR survey for archaeological documentation in chiapas, Mexico[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(23): 4731.
- [79] SANKEY T, DONAGER J, McVay J, *et al.* UAV lidar and hyperspectral fusion for forest monitoring in the southwestern USA[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 195: 30–43.
- [80] Escobar VILLANUEVA J R, Iglesias MARTÍNEZ L, Pérez MONTIEL J I. DEM generation from fixed-wing UAV imaging and LiDAR-derived ground control points for flood estimations[J]. *Sensors*, 2019, 19(14): 3205.
- [81] CURCIO A C, PERALTA G, ARANDA M, *et al.* Evaluating the performance of high spatial resolution UAV–photogrammetry and UAV–LiDAR for salt marshes: the cádz bay study case[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(15): 3582.
- [82] LI B, HOU J, LI D, *et al.* Application of LiDAR UAV for high-resolution flood modelling[J]. *Water Resources Management*, 2021, 35(5): 1433–1447.
- [83] DHARMADASA V, KINNARD C, BARA&R M. An accuracy assessment of snow depth measurements in agro-forested environments by UAV lidar[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(7): 1649.
- [84] CHIANG K W, TSAI G J, LI Y H, *et al.* Development of LiDAR–Based UAV system for environment reconstruction[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14: 1790–1794.
- [85] 陈琳, 范湘涛, 杜小平. 基于高程统计的机载 LiDAR 点云三角网渐进滤波方法[J]. *遥感信息*, 2014, 29(3): 19–23, 43.
CHEN Lin, FAN Xiangtao, DU Xiaoping. A filtering method with adaptive TIN models for airborne LiDAR points based on elevation statistics[J]. *Remote Sensing Information*, 2014, 29(3): 19–23, 43.
- [86] 龚亮, 张永生, 施群山, 等. 基于高程统计方法的机载 LiDAR 点云数据滤波[J]. *测绘与空间地理信息*, 2012, 35(2): 42–45.
GONG Liang, ZHANG Yongsheng, SHI Qunshan, *et al.* A filtering method of airborne LiDAR point cloud data based on statistics of elevation distribution[J]. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 2012, 35(2): 42–45.
- [87] 隋立春, 杨耘. 基于 car(p, q) 模型和数学形态学理论的 LiDAR 点云数据滤波[J]. *测绘学报*, 2012, 41(2): 219–224.
SUI Lichun, YANG Yun. LiDAR point cloud data filtering based on car(p, q) model and mathematical morphology theory[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(2): 219–224.
- [88] 何培培, 万幼川, 黄桂平, 等. 城区 LiDAR 点云自适应坡度的滤波算法[J]. *遥感信息*, 2017, 32(5): 62–68.
HE Peipei, WAN Youchuan, HUANG Guiping, *et al.* Adaptive slope filtering algorithm for LiDAR point clouds in urban areas[J]. *Remote Sensing Information*, 2017, 32(5): 62–68.
- [89] 赵明君, 刘超, 高翔, 等. 基于多尺度网格的点云自适应坡度滤波算法[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2021, 44(2): 266–272.
- ZHAO Mingjun, LIU Chao, GAO Xiang, *et al.* Adaptive slope filtering algorithm for point cloud based on multi-scale grid[J]. *Journal of Hefei University of Technology(Natural Science)*, 2021, 44(2): 266–272.
- [90] 詹总谦, 胡孟琦, 满益云. 多尺度区域生长点云滤波地表拟合法[J]. *测绘学报*, 2020, 49(6): 757–766.
- ZHAN Zongqian, HU Mengqi, MAN Yiyun. Multi-scale region growing point cloud filtering method based on surface fitting[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(6): 757–766.
- [91] 尚大师, 黎恒明, 赵羲. 一种基于曲面约束的点云数据滤波方法[J]. *雷达科学与技术*, 2013, 11(4): 413–418.
- SHANG Dashuai, LI Hengming, ZHAO Xi. A filtering method based on surface constraint for point cloud data[J]. *Radar Science and Technology*, 2013, 11(4): 413–418.
- [92] 张宁宁, 杨英宝, 于双. 基于坡度和区域生长的城市 LiDAR 点云滤波方法[J]. *地理空间信息*, 2016, 14(3): 30–32.
- ZHANG Ningning, YANG Yingbao, YU Shuang. Urban LiDAR point cloud filtering method based on slope and area growth[J]. *Geospatial Information*, 2016, 14(3): 30–32.
- [93] 郑辑涛, 张涛. 基于可变半径圆环和 B 样条拟合的机载 LiDAR 点云滤波[J]. *测绘学报*, 2015, 14(12): 1359–1366.
- ZHENG Jitao, ZHANG Tao. Filtering of airborne LiDAR point cloud based on variable radius circle and B-spline fitting[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 14(12): 1359–1366.
- [94] 文沛, 程英蕾, 余旺盛. 基于深度学习的点云分类方法综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(16): 41–67.
- WEN Pei, YINGLEI Cheng, WANGSHENG Yu. A review of deep learning-based point cloud classification methods[J]. *Advances in Lasers and Optoelectronics*, 2021, 58(16): 41–67.
- [95] 利满雯, 赵艳明, 李绍彬, 等. 点云分类方法综述[J]. *电视技术*, 2022, 46(5): 1–8.
- LI Manwen, ZHAO Yanming, LI Shaobin, *et al.* A survey of point cloud classification[J]. *Video Engineering*, 2022, 46(5): 1–8.
- [96] HAN X F, JIN J S, WANG M J, *et al.* A review of algorithms for filtering the 3D point cloud[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2017, 57: 103–112.
- [97] Janssens-CORON E, GUILBERT E. Ground point filtering from airborne lidar point clouds using deep learning: a preliminary study[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2019, XLII-2/W13: 1559–1565.
- [98] QIN N, TAN W, MA L, *et al.* Deep learning for filtering the ground from ALS point clouds: A dataset, evaluations and issues[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2023, 202: 246–261.
- [99] ZEYBEK M, ŞANLIOĞLU İ. Point cloud filtering on UAV based point cloud[J]. *Measurement*, 2019, 133: 99–111.
- [100] POLAT N, UYSAL M. Investigating performance of Airborne LiDAR data filtering algorithms for DTM generation[J]. *Measurement*, 2015, 63: 61–68.
- [101] TóVári D, PFEIFER N. Segmentation based robust interpola-

- tion- A new Approach to laser data filtering[J]. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2005, 36(3): 79–84.
- [102] QIAN Yang, FUQUAN Tang, FEI Wang, *et al.* A new technical pathway for extracting high accuracy surface deformation information in coal mining areas using UAV LiDAR data: An example from the Yushen mining area in western China[J]. *Measurement*, 2023, 218: 113220.
- [103] 何柯璐. 基于机载激光扫描特征点云的采煤沉陷信息提取[D]. 西安: 西安科技大学, 2021.
HE Kelu. Coal mining subsidence information extraction based on airborne laser scanning feature point cloud[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2021.
- [104] 何柯璐, 汤伏全, 李振洪. 基于地形特征的采煤沉陷盆地构建与水平移动信息智能提取方法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2023, 48(5): 717–729.
HE Kelu, TANG Fuquan, LI Zhenhong. Intelligent extraction method of coal mining subsidence basin construction and horizontal movement information based on topographic features[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(5): 717–729.
- [105] 张小红. 机载激光雷达测量技术理论与方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007.
ZHANG Xiaohong. Theory and methods of airborne lidar measurement technology[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007.
- [106] D'Aranno P J V, P. D'Aranno, Di BENEDETTO A, *et al.* Remote sensing technologies for linear infrastructure monitoring[J]. *ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2019, 4211: 461–468.
- [107] JÓŻKÓW G, WALICKA A, BORKOWSKI A. Monitoring terrain deformations caused by underground mining using UAV data[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2021: 737–744.
- [108] 刘继琳, 李 军. 多源遥感影像融合[J]. *遥感学报*, 1998(1): 47–50.
LIU Jilin, LI Jun. Multi-source remote sensing image data fusion[J]. *Journal of Remote Sensing*, 1998(1): 47–50.
- [109] POHL C, Van GENDEREN J L. Review article Multisensor image fusion in remote sensing: Concepts, methods and applications[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(5): 823–854.
- [110] 贾永红, 李德仁. 多源遥感影像像素级融合分类与决策级融合分类的研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2001(5): 430–434.
JIA Yonghong, LI Deren. An Approach of Classification Based on Pixel Level and Decision Level Fusion of Multi-source Images in Remote Sensing[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2001(5): 430–434.
- [111] JIXIAN Zhang. Multi-source remote sensing data fusion: status and trends[J]. *International Journal of Image and Data Fusion*, 2010, 1(1): 5–24.
- [112] AIAZZI B, BARONTI S, SELVA M. Improving component substitution pansharpening through multivariate regression of MS +Pan data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(10): 3230–3239.
- [113] LI X, CHEN H, ZHOU J, *et al.* Improving component substitution pansharpening through refinement of the injection detail[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2020, 86(5): 317–325.
- [114] ZHANG Y. A new merging method and its spectral and spatial effects[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20(10): 2003–2014.
- [115] LIU J G. Smoothing Filter-based Intensity Modulation: A spectral preserve image fusion technique for improving spatial details[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(18): 3461–3472.
- [116] AIAZZI B, ALPARONE L, BARONTI S, *et al.* Context-driven fusion of high spatial and spectral resolution images based on oversampled multiresolution analysis[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(10): 2300–2312.
- [117] AMOLINS K, ZHANG Y, DARE P. Wavelet based image fusion techniques — An introduction, review and comparison[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 62(4): 249–263.
- [118] Sukawattanavijit C, CHEN J, ZHANG H. GA-SVM algorithm for improving land-cover classification using SAR and optical remote sensing data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(3): 284–288.
- [119] Anonymous. Exploring the optimal integration levels between SAR and optical data for better urban land cover mapping in the Pearl River Delta[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 64: 87–95.
- [120] KONG Y, YAN B, LIU Y, *et al.* Feature-level fusion of polarized SAR and optical images based on random forest and conditional random fields[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(7): 1323.
- [121] 雷俊杰, 杨武年, 李 红, 等. 哨兵光学及 SAR 卫星影像协同分类研究[J]. *现代电子技术*, 2022, 45(2): 135–139.
LEI Junjie, YANG Wunian, LI Hong, *et al.* Research on cooperative classification of sentinel optical and sar satellite images[J]. *Modern Electronics Technique*, 2022, 45(2): 135–139.
- [122] 姜 文, 潘 洁, 朱金彪, 等. 基于空间与光谱注意力的光学图像和 SAR 图像特征融合分类方法[J]. *电子与信息学报*, 2023, 45(3): 987–995.
JIANG Wen, PAN Jie, ZHU Jinbiao, *et al.* Feature Fusion Classification for Optical Image and SAR Image Based on Spatial-spectral Attention[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2023, 45(3): 987–995.
- [123] ROTTENSTEINER F. Automatic generation of high-quality building models from lidar data[J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2003, 23(6): 42–50.
- [124] MOOSAVI V, TALEBI A, MOKHTARI M H, *et al.* A wavelet-artificial intelligence fusion approach(WAIFA) for blending Landsat and MODIS surface temperature[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 169: 243–254.
- [125] VERRELST J, GEERLING G W, SYKORA K V, *et al.* Map-

- ping of aggregated floodplain plant communities using image fusion of CASI and LiDAR data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2009, 11(1): 83–94.
- [126] SWETNAM T L, GILLAN J K, SANKEY T T, *et al.* Considerations for achieving cross-platform point cloud data fusion across different dryland ecosystem structural states[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 8: 2144.
- [127] HÄNSCH R, WEBER T, HELLMICH O. Comparison of 3D interest point detectors and descriptors for point cloud fusion[J]. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2014, 2: 57–64.
- [128] GHAMISI P, HÖFLE B. LiDAR data classification using extinction profiles and a composite kernel support vector machine[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(5): 659–663.
- [129] BOULCH A, SAUX B L, AUDEBERT N. Unstructured point cloud semantic labeling using deep segmentation networks[J]. *The Eurographics Association*, 2017, 3: 17–24.
- [130] 朱鹏程. 矿区地表变形的无人机监测方法及应用研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- ZHU Pengcheng. Research on UAV monitoring method and application of surface deformation in mining area[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [131] PUNIACH E, GRUSZCZYŃSKI W, ĆWIAKAŁA P, *et al.* Application of UAV-based orthomosaics for determination of horizontal displacement caused by underground mining[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, 174: 282–303.
- [132] ĆWIAKAŁA P, GRUSZCZYŃSKI W, STOCH T, *et al.* UAV applications for determination of land deformations caused by underground mining[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(11): 1733.
- [133] WANG S, BAI Z, LYU Y, *et al.* Monitoring extractive activity-induced surface subsidence in highland and alpine opencast coal mining areas with multi-source data[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(14): 3442.