

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2023.05.014

水利工程卫星遥感监测技术应用与展望

李子阳^{1,2}, 戴济群¹, 黄对¹, 张文³, 李涵曼^{1,2}, 王喆³, 康芮⁴

(1. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室, 江苏南京 210029; 2. 水利部大坝安全管理中心, 江苏南京 210029;
3. 武汉大学遥感信息工程学院, 湖北武汉 430072; 4. 航天宏图信息技术股份有限公司, 北京 100195)

摘要: 卫星遥感监测在弥补地面测点不足、全面感知水利工程态势变化及风险源识别方面具有优势。总结分析了光学遥感、雷达遥感监测技术特点及在水利工程中的应用现状, 指出遥感影像分类识别、合成孔径雷达干涉形变测量技术在工程应用中尚存在准确度和精度不高、未与工程风险评估深度融合等问题; 面向水利工程建设与运行管理的应用需求, 从在建工程施工进度监督、在运工程形变精准监测及风险源识别预警等3个典型应用场景, 探讨了水利工程卫星遥感监测技术的业务化应用路径, 剖析了尚存在遥感监测定量化及时空分辨率不足、“天-空-地”多尺度协同监测不够的技术瓶颈, 展望了水利工程遥感监测技术应用的发展方向。

关键词: 卫星遥感监测; 水利工程; 光学遥感; 雷达遥感; 多尺度协同监测

中图分类号: TV698.1 文献标志码: A 文章编号: 1001-6791(2023)05-0798-14

大型水利工程如水库大坝、水电站及引调水工程等由于具有防洪兴利的多重功能, 在调控水资源时空分布、优化水资源配置方面作用重大, 保障其安全运行一直是工程管理者的重要重任。然而, 目前水利工程建设与运行管理还多以人工巡查、地面仪器监测为主, 监管模式和手段单一、效率低下, 无法实现风险监测的全覆盖且时效性难以保证; 受运行维护能力不足等因素影响, 地面监测信息化应用程度低、智能化分析预警水平不足, 与新阶段水利工程高质量发展及现代化风险管理的要求不相适应^[1-2]。卫星遥感具有观测范围广、周期性重访等独特优势, 为更好地监管水利工程安全提供了一种全新的视角^[3]。

卫星遥感在水利领域已有一些应用, 多集中于降水监测、水体目标检测与提取, 以及基于降水与水体识别数据处理的洪涝干旱监测与影响评估^[4-6], 近10多年来雷达影像的地表形变干涉测量技术也逐渐用于库岸边坡及坝体的形变监测^[7]。但受制于遥感监测精度及水利工程复杂性影响, 监测结果的可靠性、稳定性和精度与工程需求之间尚存在一定差距。随着卫星遥感技术的发展, 卫星影像数据分辨率不断提高, 在表达地物几何、纹理、拓扑关系等特征参量方面更加细致, 以深度学习为代表的遥感数据后处理增强了对地物信息的识别提取能力^[8], 已逐渐能够满足快速获取高精度水利工程特征信息的需求, 使得其在水利工程建设监督和运行风险源动态识别等方面的深层次应用成为可能。本文从光学遥感、雷达遥感的不同监测技术特点出发, 总结分析遥感监测技术应用于水利工程的研究进展及存在的技术问题, 从遥感监测的水利工程业务化应用角度探讨解决方案和发展趋势。

1 卫星遥感监测技术

卫星遥感是以航天摄影为基础、自20世纪60年代发展起来的一类综合性空间探测手段, 其通过搭载传感器收发电磁波信号, 对远距离、大范围的勘测目标开展精细化的信息收集、处理与分析工作。遥感监测具

收稿日期: 2023-06-12; 网络出版日期: 2023-10-13

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20231011.1436.004>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB3900603); 国家自然科学基金资助项目(U2243244)

作者简介: 李子阳(1983—), 男, 安徽亳州人, 正高级工程师, 博士, 主要从事水利工程健康诊断与监控预警研究。

E-mail: zyli@nhri.cn

有准确度高、时效性好、监测范围广以及动态性强等优势。目前美国、俄罗斯、日本、欧洲等多国遥感监测技术水平较为突出,对地观测数据也呈现资源整合全球化、技术规范标准化、共享服务信息化等发展趋势。中国卫星遥感事业起步较晚,但技术水平持续提高,进入21世纪后,随着资源、环境、高分等系列民用陆地观测卫星的陆续升空,已建立了较为完善的遥感数据获取体系,极大推进了卫星遥感技术在各行业的应用和服务水平^[9]。

1.1 光学遥感监测

卫星遥感监测中以光学遥感、微波遥感(以合成孔径雷达(SAR)为主)技术发展最为迅速,应用也最为广泛。光学遥感传感器工作波段在可见光波段,即 $0.38 \sim 0.76 \mu\text{m}$ 范围,其特点是能够直观反映地物目标的形状、颜色和纹理等,尤其是高分辨率光谱图像是对地观测的重要手段。20世纪70年代以来,卫星技术不断进步,遥感卫星数量增长迅速,分辨率也不断提高,具有代表性的光学遥感卫星有:美国国家航空航天局(NASA)和美国地质调查局(USGS)发射的Landsat卫星系列(Landsat 1—Landsat 8, 1972—2013年),可提供至今为止约60余年的高空间分辨率(15~30 m、60 m)、时间分辨率为16 d的光学影像;中国和巴西联合发射的CBERS资源卫星系列(CBERS-01—CBERS-04, 1999—2019年),可提供1999年至今的高空间分辨率(5~20 m)光学影像;NASA发射的Terra和Aqua卫星(1999年、2002年)搭载MODIS传感器,可提供近20余年高空间分辨率(通常为250 m~1 km)的每天地表观测数据;欧洲太空局(ESA)陆续发射Sentinel-2、Sentinel-3系列高质量可见光卫星(2015年),均含A、B双星,可提供10~60 m空间分辨率、组合周期最高为5 d的多光谱图像;中国国家航天局(CNSA)自2013年起已发射了数十颗自主可控的高分卫星系列,提供的高质量观测数据广泛应用于地质勘探、农业、环境与自然灾害监测。

目标识别和变化检测是光学遥感的主要应用领域,即利用特定的算法从图像中搜索、标记出感兴趣的目标并监测其特征性态变化情况。高光谱影像在实现细致识别地物分类的同时,其众多的波段也带来了信息的冗余以及数据处理的困难,降维和分类是高光谱遥感图像处理热点问题。数据降维可分为2类:一种是针对全部波段进行的线性或者非线性降维映射变化,即特征提取;另一种是从多个波段中选出最为合适的波段,即特征选择。特征提取的目的是获取遥感影像中具有代表性的特征,以便于更好地实现目标变化检测,以主成分分析法(PCA)最为基础,其他还有基于统计特征、纹理特征、形状特征、空间特征的各种提取方法等^[10];随着海量数据增长和计算机性能提升,基于神经网络机器学习的方法在遥感影像特征识别与变化检测中得到快速发展,如卷积神经网络(CNN)、深度卷积神经网络(DCNN)等,通过深度学习自动提取图像中的特征^[11]。特征选择方法可分为基于信息量和基于类间可分性的波段选择方法。基于信息量的波段选择主要是选出信息量大而相关性小的波段组合,最佳索引因子方法是一个应用相对较广的波段选择方法;基于高光谱各波段与地物类别之间的关系,也可通过计算已知地物类别在单波段或波段组合中的统计距离来实现不同地物特征的选择。

1.2 雷达遥感监测

雷达遥感监测通过发送雷达波束,接收和解析回波信号,从而获取地表的反射、散射和回波特征,实现对目标的探测与测量。最大的优点是其主动遥感工作方式少受云层遮挡限制,可全天时、全天候进行观测。20世纪50年代,使用脉冲雷达用于军事侦察和天气预报,分辨率和探测能力较低。1967年,NASA喷气推进实验室进行了最早的雷达干涉测量实验,即通过使用2个雷达波束、测量波束的相位差来获取地表形变信息;由此,SAR技术的出现使雷达遥感监测迈向了新阶段,并逐渐发展具有不同穿透能力的多波段雷达技术(包括X、C、L波段)以提供更丰富的地表信息。ESA发射的ERS-1(1991年)、ERS-2(1995年)卫星搭载SAR进行对地观测,为雷达干涉测量技术的发展提供了重要的数据源;加拿大航天局(CSA)发射的RADARSAT系列,其中RADARSAT-1(1995年)为第一颗C波段合成孔径雷达卫星,具有高分辨率和全天候观测能力,RADARSAT-2(2007年)具有更高空间分辨率与灵活观测模式,之后发射的RADARSAT Constella-

tion Mission(RCM, 2019 年) 更是能提供多种成像模式的高分辨率 SAR 影像; ESA 发射了 Envisat、Sentinel-1 合成孔径雷达卫星, 其中 Sentinel-1 A/B(2014 年、2016 年) 提供 C 波段、4 种极化工作模式、多种成像模式以及 5 ~ 20 m 不等空间分辨率、重访周期为 6 ~ 12 d 的影像; 日本航空航天局(JAXA) 发射了 ALOS 系列 L 波段 SAR 卫星, 具有多种成像模式, 空间分辨率在干涉模式下由 3 m(ALOS-1, 2006 年) 提升至 2.5 m(ALOS-2, 2014 年); 此外, 德国航天中心(DLR) 和 ESA 开发的 TerraSAR-X(2007 年) 可提供 X 波段、多种成像模式、空间分辨率高达 1 m、重访周期为 11 d 的 SAR 影像; 意大利航天局(ASI) 提供的 COSMO-SkyMed(2022 年) 为 X 波段、多成像模式、空间分辨率高达 1 m、重访周期为 16 d 的 SAR 影像; 中国的高分三号卫星(GF-3, 2016 年) 也具有 1 m 的分辨率, 是世界上分辨率最高的 C 波段、多极化卫星。

雷达遥感以 SAR 与电磁波干涉测量融合发展起来的合成孔径雷达干涉(InSAR) 测量应用最为广泛。由于 SAR 影像的像元既包含地物后向散射强度信息, 也包含与斜距有关的相位信息, 将覆盖同一地区的 2 幅卫星 SAR 影像对应像素的相位值进行差分, 便可得到干涉相位图, InSAR 主要围绕干涉相位及干涉结果来分离和提取感兴趣的信息。以相位差异反映距离差异, InSAR 技术具有以厘米级甚至亚厘米级精度分辨大范围地表形变的能力, 在高精度 DEM 建模或监测区域地表形变方面具有优势, 广泛应用于地形三维重建和由地震、火山、地面沉陷、滑坡等引起的地表形变探测及人工建构物变形监测等方面。InSAR 干涉相位中除了地形相位外, 还包括地形误差、大气延迟误差、轨道误差、解缠误差和相干性误差等, 影响地表形变干涉精度, 其中大气误差和解缠误差是主要影响因素。结合多期 SAR 观测数据, 并利用时间序列分析方法的多时相 InSAR 技术可有效削弱误差影响, 已成为当前 InSAR 研究和应用的主流, 近年来永久散射体 PS-InSAR、分布式散射目标 DS-InSAR 和小基线集 SBAS-InSAR 等^[12] 处理技术被相继提出并得到广泛应用。

2 水利工程遥感监测应用现状分析

卫星遥感监测在水利工程上已有探索性应用, 监测对象包括水库水体、水质、地质灾害、岸坡形变、违规行为等多个方面, 为洪涝、干旱、滑坡等灾害监测评估发挥着越来越重要的支撑作用^[13-14]。

2.1 光学遥感在图像识别中的应用

光学遥感以其高时间和空间分辨率、低成本的强大优势, 被广泛用于水利工程中的水体提取及变化监测、洪水风险识别及水质监测等领域。部分典型水利工程光学遥感应用情况统计见表 1。

准确、快速提取水体一直是光学遥感在水利工程应用研究的重点方向之一, 国内外学者提出了多种解译方法, 以阈值法最为常用。基于水体光谱特征曲线采用合适的波段来构建水体提取模型, 现以多波段的水体指数法应用最广, 如归一化差异水体指数(NDWI) 及其改进^[23]。由于水体指数法分割阈值的不确定性, 近年来面向对象的提取方法也得到较好应用, 主要结合影像空间拓扑特征、形状特征和光谱特性进行水体提取。通过高时空分辨率遥感影像对水体的准确提取, 可用于水库分布调查、水量变化监测、库容曲线复核等, 也可对洪涝灾害受影响范围、受灾程度及动态变化过程进行分析评估^[6]。

库区遥感影像的地物分类提取与变化检测对全面了解库区状况、库岸地质灾害动态监测及违规行为调查管理等具有重要作用。遥感水体及地物提取研究中, 算法精度和计算速度始终是研究热点与难点, 考虑不同水利工程规模特点、区域位置等因素选取合适时空分辨率的遥感数据至关重要。如米级或亚米级卫星影像场景识别精度高但计算量大, 水库所处的山区易有阴影等, 如何借助智能识别技术与高性能计算平台, 实现工程信息精确、自动化提取值得关注。以深度学习为代表的计算模型已成为遥感信息提取的最突出特征, 近年来基于深度学习的水体提取也取得了较好效果^[5], 仍存在的主要问题有: 由于目标尺寸以及地物遮挡等导致的目标定位不够准确、小目标与周围背景相似度高较难检出、对训练数据的需求高且工作量大限制部分场景的应用^[24-25]。

表1 典型水利工程光学遥感应用情况
Table 1 Typical application of optical remote sensing in water conservancy projects

卫星	国别/ 机构	性能参数				数据产品	工程应用
		重复周 期/d	传感器 类型	扫描幅 宽/km	空间分 辨率/m		
CBERS	中国、 巴西	26	CCD	113	19.5	1999—2004年80~160 m分辨率数据, 2003—2008年2.36 m分辨率数据, 2014年至今20~60 m分辨率数据	库容曲线复核, 库区地质灾害监测等 ^[15-16]
Terra、 Aqua	美国	0.5	MODIS	2 330	100~1 000	2 d可获得覆盖全球的36个波段数据, 提供时空分辨率8 d、250~500 m的地表反射率产品	水库水体面积变化、营养状态监测等 ^[17-18]
Landsat 7	美国	16	ETM+	185	15~30, 60	1999—2021年分辨率15~30 m、60 m的波段数据	水库水体面积识别
Landsat 8	美国	16	OLI, TIRS	185	15~30, 100	2013年至今分辨率15~30 m、100 m的波段数据, https://earthexplorer.usgs.gov/	洪水淹没灾害分析
SPOT 系列	法国	26	HRV HRG	60/120	2.5~20	1986年至今分辨率1.4~10 m的波段数据	库区地物特征分类 ^[19]
Sentinel-2	欧洲 太空局	10	MSI	290	10~20	2015年至今分辨率10~20 m数据, https://scihub.copernicus.eu/	水库水质变化监测分析 ^[20]
GF-1	中国	4/41	PMS WFV	60/800	2~8	2013年至今分辨率2~8 m数据	库水面积时空变化监测分析 ^[21]
GF-2	中国	5	多光谱相机	45	1~4	2013年至今分辨率1~4 m数据	库区违规行为调查 ^[22]

2.2 雷达遥感在形变监测中的应用

传统的水利工程外观变形监测多采用水准仪、经纬仪、全站仪等, 依赖人工操作; 现代全站仪、引张线等监测方式虽可实现自动化操作, 但对观测条件(如测点间通视性等)要求很高。全球导航卫星系统(GNSS)观测可在某种程度上弥补传统监测手段的不足, 提升形变监测的精度和稳定性^[26], 但垂直位移监测精度较低, 且由于其点测量特性, 也无法获取工程整体形变特征。通过InSAR技术进行大范围、非接触、多频次的观察和测量, 相比传统的光电大地测量手段, 具有范围广、周期长、精度高等特点, 在工程边坡及库岸滑坡体等大范围形变监测中具有明显优势, 可有效获取异常形变区的位置、边界和动态变化特征, 弥补传统站点监测的不足。水利工程主要雷达遥感应用情况统计见表2。

雷达遥感或雷达与光学遥感结合在水体提取、水质监测以及洪涝灾害监测等方面均有所应用, 其中以InSAR技术在库岸边坡变形及滑坡体的探测与监测最具实用价值, 近十多年来相关技术方法也取得了长足发展^[37]。库岸滑坡体常发生于山区或植被茂密区域, 常规InSAR技术受时空失相干和大气延迟误差影响, 难以准确获取形变信息; 时序InSAR通过对长时间序列SAR影像进行处理减少干涉误差从而提高形变监测精度, 能较好地弥补传统InSAR的不足。通过时序InSAR技术并联合永久散射体和分布式散射目标增加观测数、增强信噪比, 可获得尽可能多的区域形变信息, 代表性技术如PS-InSAR、SBAS-InSAR等不仅支持地表形变监测, 还可应用于库岸潜在滑坡体的识别, 显著提高了InSAR监测的可靠性和适用范围, 可达到厘米乃至毫米级地表形变速率的监测精度。

Tomás等^[38]基于CPT-InSAR技术, 利用多源SAR影像恢复了西班牙La Pedrera大坝1995—2010年历史形

变时间序列,为研究大坝的长时空形变演化特征提供了参考; Milillo 等^[33]通过处理高分辨率 COSMO-SkyMed 和 TerraSAR-X 卫星影像,发现了意大利 Pertusillo 拱坝的形变随温度与静水压力呈周期性变化的关系; Al-husseini 等^[28]联合 Sentinel-1 影像与 GPS、水准实测数据分析了 2017 年两伊边境地震对伊拉克 Darbandikhan 大坝稳定性的影响,研究表明震前大坝位移速率约 4 mm/a,而震后坝顶的位移速率达到了 70 mm/a; Zhou 等^[39]采用 ALOS PALSAR 影像监测了湖北清江水布垭大坝的形变,并通过 InSAR 结果和有限元法的数值模拟分析,预测了大坝的未来形变; Zhao 等^[40]利用 InSAR 产品和 DEM 数据结合,对金沙江流域乌东德水电站段进行了滑坡体早期识别,成功探测到多处未知和已知的滑坡体; Wang 等^[36]基于 Envisat ASAR 影像研究了三峡大坝及其周边区域的稳定性,并应用 Quasi-PS 技术来解决库区失相干比较严重的问题; 朱同同^[41]、廖明生^[42]分别采用时序 InSAR 技术、PS-InSAR 技术对三峡大坝和三峡库区滑坡体变形进行了稳定性监测和时序分析等; Xiao 等^[43]利用 Sentinel-1 卫星数据开展时序 InSAR 处理,对 2020 年乌兹别克斯坦 Sardoba 水库溃坝事故进行了回溯分析,结果揭示大坝溃决处灾前最大差异沉降达 60 mm,可能是裂缝和内部侵蚀的征兆,表明时序 InSAR 分析方法在库坝安全状况普查及形变历史回溯中具有巨大的应用潜力。

表 2 水利工程主要雷达遥感应用情况

Table 2 Main application of radar remote sensing in water conservancy projects

卫星	国别/ 机构	性能参数				数据产品	工程应用
		重复 周期/d	波段 (波长/cm)	扫描 幅宽/km	空间分 辨率/m		
Sentinel-1 A/B	欧洲 太空局	6/12	C 波段 (5.63)	20~400	5~40	提供 2014 年起空间分辨率 5~40 m 数据, https:// scihub.copernicus.eu/	洪涝灾害应急监测, 库岸 与大坝变形监测及滑坡、 危岩体和塌岸识别等 ^[27-29]
GF-3	中国	29	C 波段 (5.63)	10~650	1~500	提供 2016 年起空间分辨率 1~500 m 数据	洪水动态监测与影响 评价 ^[30]
ALOS-2	日本	14	L 波段 (23.5)	25~490	1~100	提供 2014 年起空间分辨率 1~100 m 数据	滑坡体形变监测 ^[31]
TerraSAR-X	德国	11	X 波段 (3.11)	10~100	1~26	提供 2007 年起空间分辨率 1~26 m 数据	库岸滑坡及大坝形变监测 与时空分析 ^[32-33]
COSMO-SkyMed	意大利	24	X 波段 (3.12)	10~200	1~100	提供 2007 年起空间分辨率 1~100 m 数据	水库边坡及大坝形变监 测 ^[33-34]
Radarsat	加拿大	24	SAR 侧视 雷达(5.63)	20~500	3~100	提供 2007 年起空间分辨率 3~100 m 数据	水体提取 ^[35]
Envisat	欧洲 太空局	35	ASAR (5.63)	58~110	30~150	提供 2002—2012 年空间分 辨率 30~150 m 数据	水体提取、大坝及周边区 域稳定性 ^[36]

目前,工程区或库区茂密植被引起干涉失相干、岸坡陡峭地形引起 SAR 影像几何畸变、残余地形相位导致的解缠效果不理想等仍是 InSAR 在水利工程应用中的主要制约因素; 另外,工程自身及其边坡的活动特征受形变位置、速度和强度的控制,在时空间尺度上存在较大差异,不同干涉测量技术在大梯度形变监测中引起的相位失相干,形变监测可靠性范围有限也使其发展有所局限^[14]。

3 卫星遥感在水利工程监测与管理中的应用展望

卫星遥感监测技术及水利领域应用研究已取得诸多进展,但在水利工程监测中的应用总体处于起步阶

段。面向水利高质量发展要求,亟待遥感技术与传统水利监测及管理技术结合,更好地发挥遥感信息在水利工程监测监督上的应用。针对水利工程管理对象量大面广、监测技术手段相对落后、监管人员技术参差不齐等问题,充分发挥卫星遥感技术快速、实时、监测范围广等优势,以工程施工过程监督、大范围形变精准监测、运行期风险源识别等为典型应用场景,提出水利工程遥感监测业务化应用对策。

结合遥感性能参数及工程监管业务需求,首先筛选适用于水利工程的遥感卫星见表3。其中GF-1、GF-6可提供宽幅遥感影像,实现对大范围工程区的全覆盖观测;GF-2、GF-7与ZY3-02的高空间分辨率可为工程关键部位的精细化监测提供支撑;ZY3-01可补充提供工程早期的影像数据。针对不同类别、不同环境下水利工程不同时期(施工期、运行期)监测管理需求的差异性,可根据星源特点组合监测以获取较为完整的工程遥感信息。

表3 适用于水利工程的遥感卫星及主要性能参数

Table 3 Remote sensing satellites suitable for water conservancy projects and their main parameters

卫星	发射时间	时间分辨率/d	空间分辨率/m	光谱波段	幅宽/km	监测特点
GF-1	2013-04-26	回归周期: 41 重访周期: 4	PMS: 2+8 WFV: 16	PAN+RGB+NIR	PMS: 60(2台相机组合) WFV: 800(4台相机组合)	2 m+8 m+16 m
GF-2	2014-08-19	回归周期: 69 重访周期: 5	PMS: 1+4	PAN+RGB+NIR	45 (2台相机组合)	亚米(星下点空间分辨率可达0.8 m)
GF-6	2018-06-02	与GF-1组网: 2	PMS: 2+8	PAN+RGB+NIR	90(高分相机) 800(宽幅相机)	2 m+8 m
GF-7	2019-11-03	回归周期: 60	PMS: 1+3 NAD: 2.1	PAN+RGB+NIR	20(两线阵立体相机)	立体测绘
ZY3-01	2012-01-09	回归周期: 59 重访周期: 5	MUX: 5.8 DLC: 3.6	PAN+RGB+NIR	51	立体测绘
ZY3-02	2016-05-30	回归周期: 59 重访周期: 5	NAD: 2.1 MUX: 5.8 DLC: 2.5	PAN+RGB+NIR	51	定位精度高,立体成像;双星组网服务
Sentinel-1	2014-04-03	重访周期: 12	5	/	400	SAR卫星星座
LT-1A/B	2022-01-26 2022-02-27	重访周期: 8	3	/	400	SAR卫星星座

注: PAN指全色图像波段; RGB指可见光波段; NIR指近红外波段。

3.1 在建工程施工过程动态监督

现有水利工程施工过程监督主要以现场检查为主,充分利用光学遥感的地物分类识别技术可对施工过程进行远程动态监督。以某渠道施工为例,采用基于随机森林的地物分类算法获取了工程区GF影像的地物分类结果(图1),不同时期渠道分类结果对比可见地物类型发生显著改变,渠道经过了场地平整、混凝土衬砌等施工过程,证实了卫星遥感监督工程整体施工进度可行性。以往水利工程的遥感识别研究多侧重水体面积的辨识,为提升遥感监督效率,需综合光谱、纹理、形状等多维度特征和遥感影像分类及高精度识别算法,重点解决大坝、溢洪道、渠道等各类主要水工建筑物的遥感智能识别,以及场地平整、基础开挖、土方填筑、混凝土浇筑、金属结构安装等典型施工阶段的遥感信息特征智能辨识,以提取施工时序进度的关键节点信息,从而实现了对施工过程及工程进度的动态遥感监管。

3.2 工程区大范围形变精准监测

时序InSAR干涉测量应用于库区、大坝、堤防等水工建筑物的变形监测及库岸滑坡风险识别,主要技

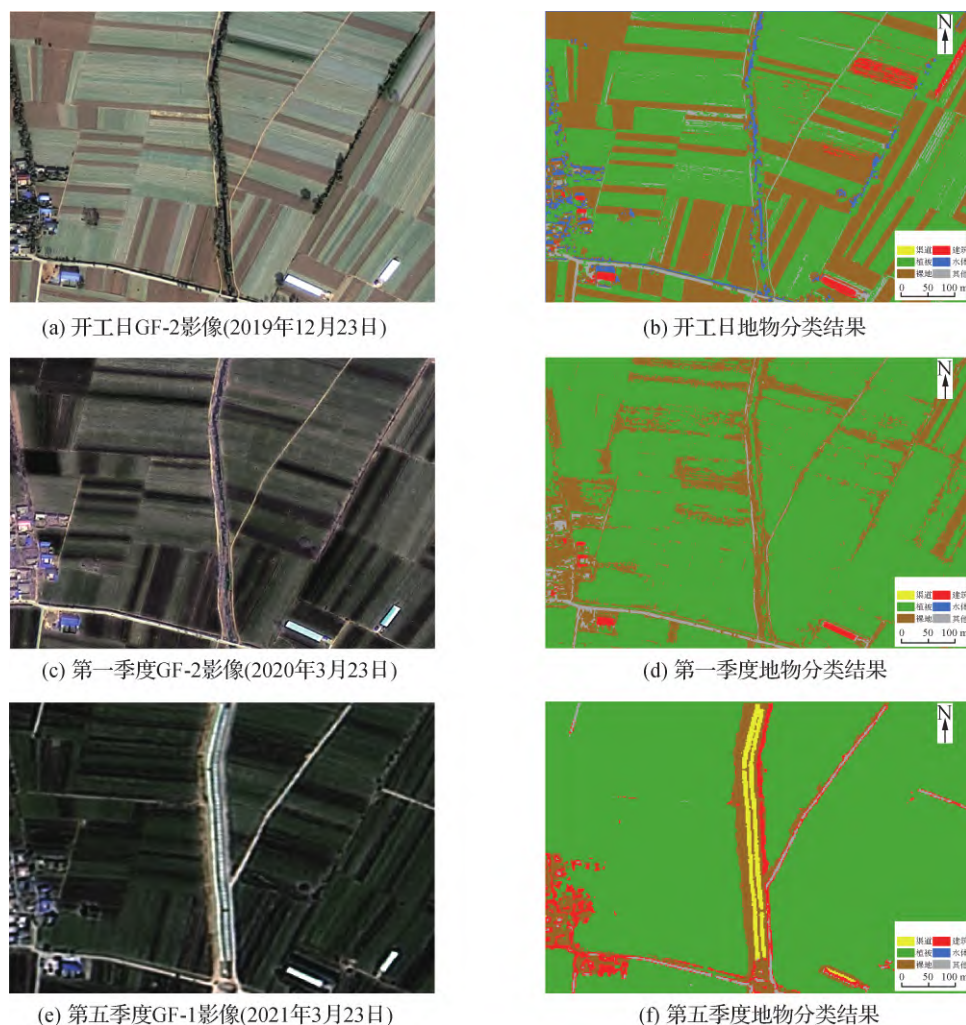


图 1 渠道施工不同阶段 GF 影像及地物分类识别结果

Fig. 1 GF images and ground feature classification recognition at different stages of channel construction

术难点是需要克服水利工程复杂地形条件下遥感信号遮挡和失相干影响。在 InSAR 基础上发展起来的 PS-InSAR 技术受时空失相干和噪声影响较小，而 DS-InSAR 技术可进一步增加复杂环境条件下的散射目标数量，以提高形变监测结果的可信度^[44]。以某水库表面垂直位移监测为例，分别采用 PS-InSAR 和 DS-InSAR 技术分析了 2017 年 10 月至 2022 年 12 月的遥感监测数据，并对比地面测点数据如图 2 所示。整体来看，位移等值线图都是坝顶向下游面、坝中向两侧逐渐减小，总体变形趋势一致；相对于左侧的地面测点位移结果，右侧的 2 个 InSAR 监测结果由于获得的形变点(散射体)数量明显更多，位移等值线更密集；中间的 DS-InSAR 监测结果在位移量的空间分布、等值线形态上相对于右侧的 PS-InSAR 结果与左侧实测位移等值线更为接近，说明比较而言 DS-InSAR 成果与实测值吻合度更高。

针对水利工程变形监测高精度的要求，遥感监测需进一步通过采用时序 InSAR 方法，对多景影像进行精准分析，以降低大气延迟等误差影响，使得形变监测精度稳定达到毫米级；另一方面，可利用贴近摄影测量技术获取的亚厘米级甚至毫米级超分辨率地面影像^[45]，以及地面 GNSS^[46]进行联合互补式监测，研究建立“天-空-地”协同的工程区多尺度监测模式和大范围形变精准监测技术体系，从而实现潜在滑坡风险区和工程主体建筑物的毫米级高精度形变遥感监测。

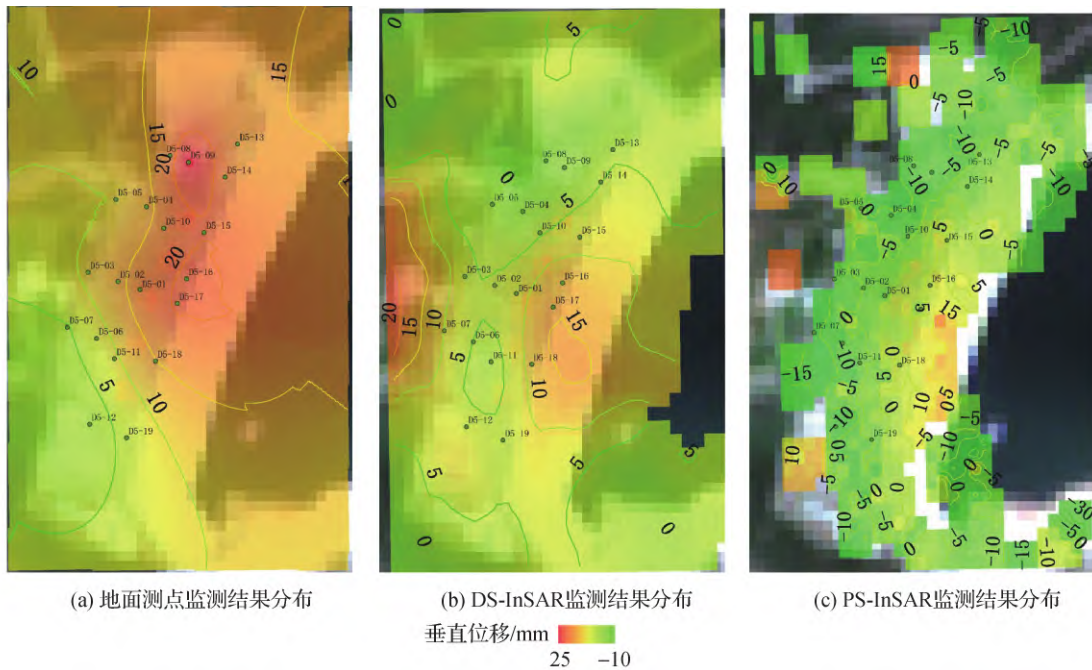


图 2 大坝坝顶垂直位移地面测点和 InSAR 监测分布

Fig.2 Vertical displacement distribution maps of ground measurements and InSAR monitoring on dam crest

3.3 在运工程风险源识别预警

基于遥感监测的水利工程风险源识别预警可分为“探测—监测—预警”3步,即:首先通过高分光学与 SAR 数据进行多源卫星协同的大范围形变、重要地质地貌标志的广域探测,充分利用光学遥感的光谱特性、微波遥感的极化和干涉特性,基于神经网络等多方法获取的地物分类特征,识别提取工程管理范围内潜在滑坡体、大变形区等目标风险区;其次分析目标风险区的后向散射特征、纹理特征等遥感监测信息,综合光学遥感的变化检测与雷达遥感的 InSAR 时序分析等多源遥感解译,进行工程结构变化的精细监测,并结合无人机航测与地面监测检验,准确跟踪监测目标风险区地类变化及形变分析;最后结合工程经验和预警模型,设立监测阈值对实时监测成果进行预警分析和专家评判,为决策提供支撑。

水利工程运行风险源可划分为环境风险、工程风险和人类活动风险(或社会风险)三大类,从卫星遥感监测技术特点及识别度出发,通过上述途径可以识别的风险源包括危岩体滑移、滑坡体崩塌、岸坡冲刷等环境风险,建筑物变形、泄洪水力冲刷影响等工程风险,岸线破坏、行洪通道侵占、洪水风险区土地利用等人类活动风险。以某水库为例,选取 GF-1 卫星影像,遥感识别了 2021 年汛期水库遭遇洪水泄洪前后下游的土地分类利用现状(图 3,分辨率为 2 m),通过分类后比较法,分析了水库下游土地利用变化情况,可以明显看出泄洪对下游河道造成了较大水毁;利用地理信息系统(GIS)软件空间量算可精确获取取毁面积及尺寸等特征数据(图 4),展示了卫星遥感监测灾情追溯方面的潜力。接下来的研究重点是区分不同类型风险源特征,研究多维遥感数据对环境、工程和人类活动等风险源特性识别的准确性,构建适用于水利工程不同风险源的遥感辨识与预警方法。

基于水利工程业务化应用场景分析,综合不同类别、不同环境下水利工程施工、运行期监管需求的差异性,未来需根据工程自身及场景特点,研究遥感星源组合、空天遥感联合监测方式、多源遥感信息融合分析方法、地面监测互证模式等方案设计与优化配置方法,形成工程建设与运行期一体化的遥感监督预警技术方法体系及优化配置应用模式,以提升遥感数据的组合模式、场景匹配能力及业务化应用效果。

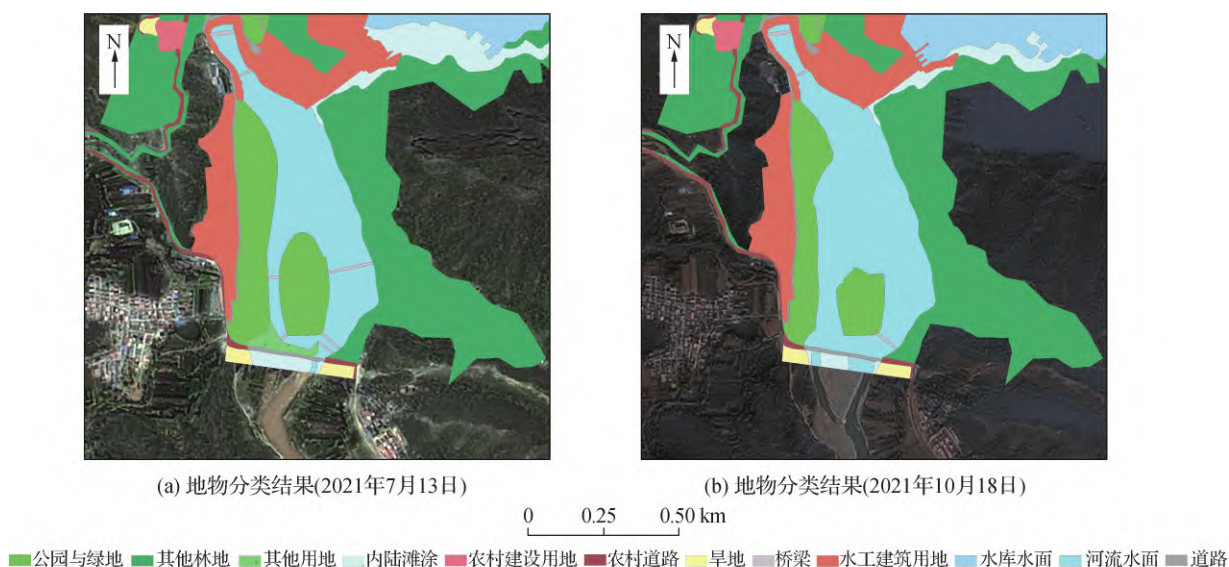


图 3 水库下游土地利用遥感影像分类结果

Fig. 3 Remote sensing images classification results for land use of reservoir downstream

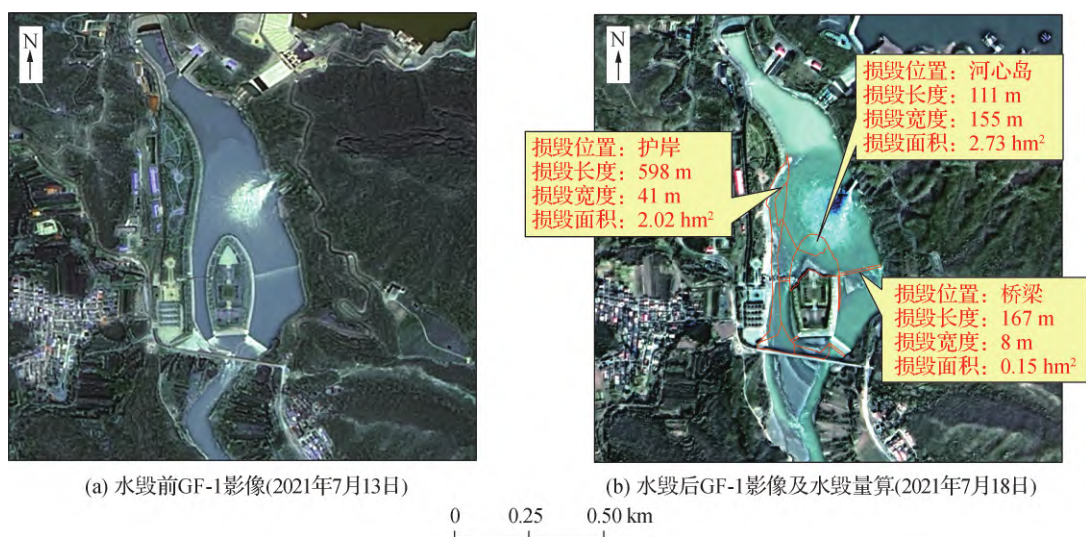


图 4 水库大坝泄洪风险遥感识别

Fig. 4 Reservoir flood discharge risk identification with remote sensing

4 业务应用存在的技术瓶颈

综合现阶段卫星遥感在水利工程监测与管理方面的应用,对光学遥感和雷达遥感技术尚存在的定量化及时空分辨率不足、应用场景有限等问题,讨论分析如下:

(1) 光学遥感工程应用较为普遍,但受天气条件影响大且精度有限。① 天气条件限制: 光学遥感对于云、雾、雨等天气条件敏感,虽然目前可识别水库水体、库区地物、施工状况、滑坡体以及库区人类活动侵占等情况,但受限于天气条件和卫星成像周期,通常缺少足够的过境卫星数据,较难完全实时监测和响应工

程应用。此外,天气条件、地形地貌也限制了识别方法的精度,受雨、冰雪天气和库区陡峭地形等因素影响存在无法识别或者错误识别工程区目标的情况。②数据时空分辨率限制:虽然目前光学遥感影像分辨率最高已达亚米级,但仍然无法获取足够细小的地表特征,如溢洪道侵占的有效识别能力有限,对于高精度的工程应用与工程安全而言其分辨率仍然不够。③遥感数据解译的复杂性:地面对象间的光谱、纹理、形状等特征差异可以一定程度上被应用于识别库区滑坡体或辅助河湖四乱监管,但识别方法的适用性与结果的准确性仍需通过无人机或人工核查进行验证与改进。虽然通过大规模的训练数据集和深度学习模型可以提高识别的准确性,但海量训练数据集也需要人工标注,耗时耗力,应用的泛化能力有待进一步加强。

(2) 雷达遥感 InSAR 形变监测精度有待进一步提高,主要存在 4 个方面的挑战。①噪声影响:相位噪声和非相干噪声的影响都会导致 InSAR 监测结果的不确定性和误差,其中,相位噪声主要来自于雷达系统的稳定性和测量误差,非相干噪声主要来自于水利工程区地表高植被覆盖的复杂散射特性和大气干扰等因素,降低相位噪声和非相干噪声仍是提高监测精度的关键。②解缠问题:雷达遥感和 InSAR 监测中经常会出现多个目标或地表形变的相互叠加,需要进行解缠处理来分离出各个目标或形变的信号,这是一个复杂的数学问题,需要考虑多个因素,如信号的相位差、相干性等,水利工程大梯度形变等引起的干涉失相干也会严重影响相位解缠的可靠性,解缠算法需要进一步改进和优化。③多次测量和时间序列分析的稳定性:通过进行多次测量可以获得地表形变的时间演化信息,但测量结果可能受到不同因素如大气干扰、仪器漂移等的影响,此外噪声的累积效应也会对时间序列分析结果产生误差,影响多次测量的一致性与稳定性。④与工程监测应用的差异:InSAR 技术仅能获取一维形变,即地表真实变化在卫星视线方向的投影,这可能导致地表形变的低估和误判;另外,SAR 卫星的近极轨飞行和侧视成像特征决定了 InSAR 对南北向的形变不敏感,这也限制了东西走向水利工程的遥感形变监测应用。上述原因综合造成了现阶段 InSAR 形变监测精度与水利工程监测规范(SL551—2012、SL601—2013、SL725—2016 等)允许的混凝土坝表面 1~2 mm、土石坝 3 mm、边坡及近坝库岸 2~3 mm、滑坡体 3~5 mm 等的外观变形监测精度要求尚有一定差距。

卫星遥感本身的技术局限性和水利工程所处的复杂环境使遥感业务化应用面临一些挑战,如何利用多源卫星融合增强影像时空分辨率和地物识别能力,如何基于单一或结合多源卫星建立精准高效算法并克服复杂的工程环境影响以获取连续长序列监测数据^[47],如何建立卫星遥感监测、无人机低空摄影测量、工程地面监测的多尺度协同监测体系以提高工程的全景式精准化预警能力,是当前水利工程遥感监测应用需重点考虑的方向。

5 结 语

遥感监测已朝着高空间分辨率、高时间分辨率以及高光谱分辨率的方向发展,对全面感知水利工程态势变化与风险源识别具有明显优势,在服务并提升工程监测与管理水平方面必将发挥越来越重要的作用,也是智慧水利建设的重要保障。

本文分析了光学遥感、雷达遥感监测技术特点及地物分类、目标识别与变化检测、形变监测等典型遥感应用技术方法,梳理总结了光学遥感图像识别、InSAR 形变监测在水利工程中的应用路径,指出受卫星影像技术局限性与水利工程环境复杂性影响,遥感影像智能识别、InSAR 形变测量技术在工程业务化应用中存在准确度不高、未与工程风险评估深度融合等主要问题。面向水利工程监测与管理应用需求,从在建工程施工过程监督、工程区大范围形变精准监测、在运工程风险源识别等典型应用场景出发,探讨提出了水利工程的遥感监测业务化应用对策与发展方向,指出亟需攻关多源卫星遥感融合监测及“天-空-地”协同监测的工程态势与风险源识别预警的关键技术瓶颈,展望了水利工程卫星遥感监测技术应用发展方向,为精准化、信息化、现代化水利工程管理的新要求提供支撑。

参考文献:

- [1] WISHART M J, BOJ GARCIA E, LYON K N, et al. Laying the foundations: a global analysis of regulatory frameworks for the safety of dams and downstream communities [M]. Washington D C: World Bank Group, 2020.
- [2] 王翔, 郑淇文, 张志勇, 等. 高质量发展阶段中国水利工程安全监测现状及提升策略 [J]. 水利水电快报, 2023, 44(3): 76-83, 88. (WANG X, ZHENG Q W, ZHANG Z Y, et al. Current situation and promotion strategy of safety monitoring of water conservancy projects in China in high-quality development stage [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2023, 44(3): 76-83, 88. (in Chinese))
- [3] 宋文龙, 杨昆, 路京选, 等. 水利遥感技术及应用学科研究进展与展望 [J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(1): 34-40. (SONG W L, YANG K, LU J X, et al. Research progress and prospects of water conservancy remote sensing technology and application [J]. China Flood & Drought Management, 2022, 32(1): 34-40. (in Chinese))
- [4] 熊立华, 刘成凯, 陈石磊, 等. 遥感降水资料后处理研究综述 [J]. 水科学进展, 2021, 32(4): 627-637. (XIONG L H, LIU C K, CHEN S L, et al. Review of post-processing research for remote-sensing precipitation products [J]. Advances in Water Science, 2021, 32(4): 627-637. (in Chinese))
- [5] LI J J, MENG Y Z, LI Y X, et al. Accurate water extraction using remote sensing imagery based on normalized difference water index and unsupervised deep learning [J]. Journal of Hydrology, 2022, 612: 128202.
- [6] 朱辉, 何祺胜, 李金阳, 等. 基于多源遥感数据的蓄洪区洪涝遥感监测与分析 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(4): 50-57. (ZHU H, HE Q S, LI J Y, et al. Remote sensing monitoring and analysis of flood in flood storage area based on multi-source remote sensing data [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(4): 50-57. (in Chinese))
- [7] 李振洪, 朱武, 余琛, 等. 雷达影像地表形变干涉测量的机遇、挑战与展望 [J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1485-1519. (LI Z H, ZHU W, YU C, et al. Interferometric synthetic aperture radar for deformation mapping: opportunities, challenges and the outlook [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(7): 1485-1519. (in Chinese))
- [8] ZHANG B, CHEN Z C, PENG D L, et al. Remotely sensed big data: evolution in model development for information extraction [J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(12): 2294-2301.
- [9] 孙伟伟, 杨刚, 陈超, 等. 中国地球观测遥感卫星发展现状及文献分析 [J]. 遥感学报, 2020, 24(5): 479-510. (SUN W W, YANG G, CHEN C, et al. Development status and literature analysis of China's earth observation remote sensing satellites [J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(5): 479-510. (in Chinese))
- [10] 姚群力, 胡显, 雷宏. 基于多尺度卷积神经网络的遥感目标检测研究 [J]. 光学学报, 2019, 39(11): 346-353. (YAO Q L, HU X, LEI H. Object detection in remote sensing images using multiscale convolutional neural networks [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 346-353. (in Chinese))
- [11] ZHAO W Z, DU S H, EMERY W J. Object-based convolutional neural network for high-resolution imagery classification [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10(7): 3386-3396.
- [12] XIAO R, YU C, LI Z H, et al. General survey of large-scale land subsidence by GACOS-corrected InSAR stacking: case study in North China Plain [J]. Proceedings of the International Association Hydrological Sciences, 2020, 382: 213-218.
- [13] 曾子悦, 许继军, 王永强. 基于遥感空间信息的洪水风险识别与动态模拟研究进展 [J]. 水科学进展, 2020, 31(3): 463-472. (ZENG Z Y, XU J J, WANG Y Q. Advances in flood risk identification and dynamic modelling based on remote sensing spatial information [J]. Advances in Water Science, 2020, 31(3): 463-472. (in Chinese))
- [14] 李振洪, 宋闯, 余琛, 等. 卫星雷达遥感在滑坡灾害探测和监测中的应用: 挑战与对策 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 967-979. (LI Z H, SONG C, YU C, et al. Application of satellite radar remote sensing to landslide detection and monitoring: challenges and solutions [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 967-979. (in Chinese))
- [15] 丁志雄, 颜廷松, 屈吉鸿. 多源遥感影像在水库水位-库容曲线复核中的应用 [J]. 华北水利水电学院学报, 2012, 33(4): 32-35. (DING Z X, YAN T S, QU J H. The application of multi-source remote sensing image in re-checking the curve of reservoir water level-storage capacity relationship [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric

- Power, 2012, 33(4): 32-35. (in Chinese)
- [16] 徐岳仁, 何宏林, 申旭辉, 等. 利用 CBERS 数据开展资兴市东江水库库区地质灾害动态监测试验研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2011, 47(4): 689-697. (XU Y R, HE H L, SHEN X H, et al. Study on dynamic survey of group geological disasters in Dongjiang Reservoir region, Zixing City, using CBERS images[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2011, 47(4): 689-697. (in Chinese))
- [17] 郝小翠, 陈军辉, 韩涛, 等. 基于 MODIS 数据的甘肃主要水库水体面积变化特征[J]. 干旱气象, 2019, 37(2): 331-338. (HAO X C, CHEN J H, HAN T, et al. Change characteristic of water areas of main reservoirs in Gansu based on MODIS data during 2000-2014[J]. Journal of Arid Meteorology, 2019, 37(2): 331-338. (in Chinese))
- [18] 曹畅, 王胜蕾, 李俊生, 等. 基于 MODIS 数据的全国 144 个重点湖库营养状态监测: 以 2018 年夏季为例[J]. 湖泊科学, 2021, 33(2): 405-413. (CAO C, WANG S L, LI J S, et al. MODIS-based monitoring of spatial distribution of trophic status in 144 key lakes and reservoirs of China in summer of 2018[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(2): 405-413. (in Chinese))
- [19] 高仁强, 欧阳建, 陈亮雄, 等. 鹤地水库 SPOT7 影像分类研究[J]. 测绘科学, 2019, 44(9): 90-99. (GAO R Q, OUYANG J, CHEN L X, et al. SPOT7 image classification of Hedi Reservoir[J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(9): 90-99. (in Chinese))
- [20] 王珊. 基于多源遥感影像的潘家口—大黑汀水库水质变化监测与分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019. (WANG S. Monitoring and analyzing of Panjiakou—Daheiting Reservoir water quality change based on multi-source remote sensing images[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2019. (in Chinese))
- [21] 王梦琦, 张文, 孟令奎. 2014—2019 年北京密云和官厅水库时空变化分析[J]. 测绘地理信息, 2022, 47(4): 100-104. (WANG M Q, ZHANG W, MENG L K. Spatial and temporal changes of Miyun and Guanting reservoirs in Beijing from 2014 to 2019[J]. Journal of Geomatics, 2022, 47(4): 100-104. (in Chinese))
- [22] 贺秋华, 邹娟, 余姝辰, 等. 基于高分二号数据的湖南省十大水库网箱围栏养殖分布遥感调查[J]. 测绘通报, 2019(10): 8-11, 159. (HE Q H, ZOU J, YU S C, et al. Remote sensing survey on the distribution of cage-fenced culture in the top 10 reservoirs of Hunan Province based on GF-2 data[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(10): 8-11, 159. (in Chinese))
- [23] 徐涵秋. 水体遥感指数研究进展[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 613-625. (XU H Q. Development of remote sensing water indices: a review[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2021, 49(5): 613-625. (in Chinese))
- [24] 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 G T, HUANG H. A survey of object detection in optical remote sensing images[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(8): 1749-1768. (in Chinese))
- [25] LI K, WAN G, CHENG G, et al. Object detection in optical remote sensing images: a survey and a new benchmark[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, 159: 296-307.
- [26] STROZZI T, KLIMEŠ J, FREY H, et al. Satellite SAR interferometry for the improved assessment of the state of activity of landslides: a case study from the Cordilleras of Peru[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 217: 111-125.
- [27] 贾佳佳, 马金戈, 沈明, 等. 基于 Sentinel-1 SAR 数据巢湖流域洪水时空动态变化监测研究[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(1): 173-185. (JIA J J, MA J G, SHEN M, et al. Research on spatial-temporal dynamic changes of flood in Lake Chaohu basin based on Sentinel-1 SAR satellite image[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(1): 173-185. (in Chinese))
- [28] AL-HUSSEINAWI Y, LI Z H, CLARKE P, et al. Evaluation of the stability of the darbandikhan dam after the 12 November 2017 mW 7. 3 Sarpol-e Zahab (Iran-Iraq border) earthquake[J]. Remote Sensing, 2018, 10(9): 1426.
- [29] 李凌婧, 姚鑫, 周振凯, 等. Sentinel-1 数据在西南山区水库变形斜坡 InSAR 监测中的适用性评价: 以溪洛渡水库为例[J]. 地质力学学报, 2022, 28(2): 281-293. (LI L J, YAO X, ZHOU Z K, et al. The applicability assessment of Sentinel-1 data in InSAR monitoring of the deformed slopes of reservoir in the mountains of Southwest China: a case study in the Xilu-

- odu Reservoir[J]. *Journal of Geomechanics*, 2022, 28(2): 281-293. (in Chinese)
- [30] 李磊, 崔倩, 张志新, 等. 基于 GF-3 的 2020 年鄱阳湖洪水动态监测与影响评价[J]. *水文*, 2022, 42(3): 43-47. (LI L, CUI Q, ZHANG Z X, et al. Dynamic monitoring and impact assessment of Poyang Lake flood in 2020 based on GF-3[J]. *Journal of China Hydrology*, 2022, 42(3): 43-47. (in Chinese))
- [31] 刘宇舟, 李梦华, 张路, 等. ALOS-2 PALSAR-2 的干涉相干性分析: 以黄河上游地区为例[J]. *测绘与空间地理信息*, 2016, 39(3): 37-40, 44. (LIU Y Z, LI M H, ZHANG L, et al. Interferometric coherence analysis of ALOS-2 PALSAR-2: in the upstream region of the Yellow River[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2016, 39(3): 37-40, 44. (in Chinese))
- [32] 李小凡, MULLER J P, 方晨, 等. 基于 TerraSAR-X 强度图像相关法测量三峡树坪滑坡时空形变[J]. *岩石学报*, 2011, 27(12): 3843-3850. (LI X F, MULLER J P, FANG C, et al. Measuring displacement field from TerraSAR-X amplitude images by sub-pixel correlation: an application to the landslide in Shuping, Three Gorges Area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(12): 3843-3850. (in Chinese))
- [33] MILILLO P, PERISSIN D, SALZER J T, et al. Monitoring dam structural health from space: insights from novel InSAR techniques and multi-parametric modeling applied to the Pertusillo dam Basilicata, Italy[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 52: 221-229.
- [34] 朱茂, 沈体雁, 黄松, 等. 基于 COSMO-SkyMed 数据的水库边坡 InSAR 形变监测应用[J]. *水力发电学报*, 2018, 37(12): 11-21. (ZHU M, SHEN T Y, HUANG S, et al. InSAR application to deformation monitoring on reservoir bank slopes using COSMO-SkyMed data[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, 37(12): 11-21. (in Chinese))
- [35] 叶子伟, 陈小松, 吴敦. 基于 Radarsat SAR 微波影像的水体提取研究[J]. *测绘地理信息*, 2016, 41(2): 54-57. (YE Z W, CHEN X S, WU D. Water extraction in radarsat SAR images[J]. *Journal of Geomatics*, 2016, 41(2): 54-57. (in Chinese))
- [36] WANG T, PERISSIN D, ROCCA F, et al. Three Gorges Dam stability monitoring with time-series InSAR image analysis[J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(5): 720-732.
- [37] DONG J, LIAO M S, XU Q, et al. Detection and displacement characterization of landslides using multi-temporal satellite SAR interferometry: a case study of Danba County in the Dadu River basin[J]. *Engineering Geology*, 2018, 240: 95-109.
- [38] TOMÁS R, CANO M, GARCÍA-BARBA J, et al. Monitoring an earthfill dam using differential SAR interferometry: la Pedrera Dam, Alicante, Spain[J]. *Engineering Geology*, 2013, 157: 21-32.
- [39] ZHOU W, LI S L, ZHOU Z W, et al. InSAR observation and numerical modeling of the earth-dam displacement of Shuibuya dam (China) [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(10): 877.
- [40] ZHAO C Y, KANG Y, ZHANG Q, et al. Landslide identification and monitoring along the Jinsha River catchment (Wudongde Reservoir area) China, using the InSAR method[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(7): 993.
- [41] 朱同同, 史绪国, 周超, 等. 利用 2016—2020 年 Sentinel-1 数据监测与分析三峡库区树坪滑坡稳定性[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2021, 46(10): 1560-1568. (ZHU T T, SHI X G, ZHOU C, et al. Stability monitoring and analysis of the Shuping landslide in the Three Gorges area with sentinel-1 images from 2016 to 2020[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10): 1560-1568. (in Chinese))
- [42] 廖明生, 董杰, 李梦华, 等. 雷达遥感滑坡隐患识别与形变监测[J]. *遥感学报*, 2021, 25(1): 332-341. (LIAO M S, DONG J, LI M H, et al. Radar remote sensing for potential landslides detection and deformation monitoring[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(1): 332-341. (in Chinese))
- [43] XIAO R Y, JIANG M, LI Z H, et al. New insights into the 2020 Sardoba dam failure in Uzbekistan from Earth observation[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 107: 102705.
- [44] 何沐, 赵有兵. DS-InSAR 技术在复杂艰险山区滑坡形变监测中的应用前景研究[J]. *测绘科学技术*, 2020, 8(3): 106-113. (HE M, ZHAO Y B. Study on the application prospect of DS-InSAR technology in landslide deformation monitoring in complex and dangerous mountainous areas[J]. *Geomatics Science and Technology*, 2020, 8(3): 106-113. (in Chinese))
- [45] 王小刚, 赵薛强, 王建成. 贴近摄影测量在水利工程监测中的应用[J]. *人民长江*, 2021, 52(S1): 130-133. (WANG

- X G, ZHAO X Q, WANG J C. Application of closeness photogrammetry technology in monitoring of water conservancy project [J]. *Yangtze River*, 2021, 52(S1): 130–133. (in Chinese)
- [46] 姜卫平, 梁娱涵, 余再康, 等. 卫星定位技术在水利工程变形监测中的应用进展与思考[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2022, 47(10): 1625–1634. (JIANG W P, LIANG Y H, YU Z K, et al. Progress and thoughts on application of satellite positioning technology in deformation monitoring of water conservancy projects [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1625–1634. (in Chinese))
- [47] 龙笛, 李雪莹, 李兴东, 等. 遥感反演 2000—2020 年青藏高原水储量变化及其驱动机制[J]. *水科学进展*, 2022, 33(3): 375–389. (LONG D, LI X Y, LI X D, et al. Remote sensing retrieval of water storage changes and underlying climatic mechanisms over the Tibetan Plateau during 2000—2020 [J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(3): 375–389. (in Chinese))

Application and prospects of satellite remote sensing monitoring technology in water conservancy projects*

LI Ziyang^{1 2}, DAI Jiqun¹, HUANG Dui¹, ZHANG Wen³, LI Hanman^{1 2}, WANG Zhe³, KANG Rui⁴

(1. *The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *Dam Safety Management Center of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China*; 3. *School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China*; 4. *PIESAT Information Technology Company, Beijing 100195, China*)

Abstract: Satellite remote sensing monitoring has advantages in compensating for insufficient ground measurements, comprehensively understanding behavior changes in water conservancy projects and identifying risk sources. This paper examines optical and radar remote sensing monitoring technologies, outlining their current application in water conservancy projects. It highlights challenges in image classification, recognition, InSAR deformation measurement, and their integration with risk assessment. In response to the application requirements for the construction progress and operation management of projects, the business application path of remote sensing monitoring for water conservancy projects is discussed from three typical application scenarios: progress supervision of projects under construction, precise deformation monitoring of operational projects, and risk identification and early warning. It analyzes technical bottlenecks, such as quantification, spatiotemporal resolution, and multi-scale collaborative monitoring. Finally, it outlines future trend in remote sensing monitoring technology for water conservancy projects.

Key words: satellite remote sensing monitoring; water conservancy project; optical remote sensing; radar remote sensing; multi-scale collaborative monitoring

* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2021YFB3900603) and the National Natural Science Foundation of China (No. U2243244).