

遥感技术在生产建设项目水土保持监测中的应用现状及展望

卢凯旋¹, 时宇², 赵永军², 黄国情¹, 罗志东², 耿韧¹, 赵广举¹, 洪大林¹, 张靖雨³, 龙昶宇³

(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 水土保持监测中心, 北京 100055;

3. 安徽省·水利部淮河水利委员会 水利科学研究院, 安徽 合肥 230088)

摘要: 遥感技术凭借信息获取快捷、覆盖范围广等优势, 已成为提高生产建设项目水土保持监测效率和智能化的重要技术手段。通过系统梳理卫星遥感和无人机遥感技术在生产建设项目水土保持监测中的应用现状, 分析了中低分辨率卫星、高分辨率卫星、高分立体测绘卫星, 以及无人机垂直摄影、倾斜摄影和激光雷达技术的适用性与局限性。同时, 讨论了目视解译、基于像元分类方法、面向对象分类方法和深度学习技术在水土保持信息提取中的特点和应用场景, 提出当前遥感技术在生产建设项目水土保持监测应用中仍存在数据处理复杂、监测精度有待提升、部分技术手段成本较高、技术标准缺乏等问题。下一步应进一步探索新兴的遥感监测技术, 综合利用多源遥感数据, 实现遥感技术与人工智能技术的深度融合, 并制定统一的技术标准与规范, 全面提升监测精度和效率, 满足新时代水土保持信息化和智能化的需求。

关键词: 卫星遥感; 无人机遥感; 信息提取; 监测; 水土保持; 生产建设项目

中图分类号: S157 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-0941.2025.08.017

引用格式: 卢凯旋, 时宇, 赵永军, 等. 遥感技术在生产建设项目水土保持监测中的应用现状及展望[J]. 中国水土保持, 2025(8): 75-80.

随着我国社会经济的快速发展, 生产建设项目的数量和规模不断扩大。近 5 a 来, 全国各级每年审批的生产建设项目水土保持方案数量达 2.5 万~3.0 万个, 水土流失防治责任范围达 1.2 万~1.8 万 km²[1]。生产建设项目施工过程中的土地整平、采石取土、排水不当、渣料随意堆放等活动极易造成水土流失[2], 对生态环境造成极大影响。因此, 及时、准确地监测生产建设项目的水土保持状况, 评估水土保持措施的防治效果, 具有重要的现实意义。

传统的水土保持监测方法包括调查监测、现场监测和数据分析等, 尽管操作简便, 但其自动化水平低、耗时耗力且数据覆盖范围有限, 难以满足日益发展的监测需求。2022 年 12 月, 中共中央办公厅、国务院办公厅印发的《关于加强新时代水土保持工作的意见》提出: “加强水土保持科技创新, 强化水土保持监测监管, 提高管理数字化、网络化、智能化水平。” 近年来, 随着遥感技术的发展, 卫星遥感和无人机遥感凭借其信息获取速度快、覆盖范围广、机动灵活等优势, 在水土保持监测领域展现出巨大的应用潜力。刘宪春等[3] 分析了遥感技术在生产建设项目水土保持监测中的应用, 认为遥感技术能够及时、快速、客观、周期性地获取地表水土保持信息, 大大提高监测的效率和准确性。综合利用卫星遥感和无人机遥感等先进技术手段, 提升生产建设项目水土保持监测的精度和效

率, 是落实国家政策、实现水土保持信息化和智能化的重要途径。因此, 通过梳理相关文献, 总结卫星遥感技术、无人机遥感技术在生产建设项目水土保持监测中的应用现状, 以及生产建设项目水土保持信息提取技术的研究进展, 并提出遥感技术在生产建设项目水土保持监测应用中的发展建议, 以期为新时代水土保持的智能化、信息化发展提供强有力支撑。

1 卫星遥感技术在生产建设项目水土保持监测中的应用现状

卫星遥感技术具有广泛的空间覆盖能力、高频次的观测周期以及多光谱、多时相的优势, 能够在范围内高效获取地表信息, 已经成为水土保持监测领域的重要工具[4]。随着卫星遥感技术的发展, 中低分辨率卫星、高分辨率卫星和高分立体测绘卫星在水土保持监测中的应用也在逐渐增多。

收稿日期: 2025-03-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(42477377); 安徽省自然科学基金项目(2308085US04); 南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y919021, Y923005, Y922001); 江西省水利科学院开放研究基金项目(2023SKTR06); 南京市水务科技项目(202303)

第一作者: 卢凯旋(1999—), 男, 安徽宿州人, 硕士研究生, 研究方向为遥感技术在水土保持监测中的应用。

通信作者: 耿韧(1990—), 男, 安徽阜阳人, 高级工程师, 博士, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究工作。

E-mail: kxlu123@163.com

1.1 中低分辨率卫星

中低分辨率卫星具有覆盖范围广、时间序列长和多光谱观测等特点,适用于大尺度、长时序的监测任务,能够有效地对大范围内水土流失的动态变化和趋势进行分析,并且其多光谱的能力有助于区分地表覆盖类型和土地利用变化。典型的中低分辨率卫星包括 Landsat 系列、MODIS 和 Sentinel-2 等,其长期稳定的观测能力及丰富的历史数据积累,可为水土保持监测提供可靠的数据支撑。此外,中低分辨率卫星获取的影像具备价格低、数据量小且处理快捷等优势,适用于大尺度生产建设项目的动态变化监测与趋势分析。

邝高明等^[5]分析了不同分辨率遥感影像在生产建设项目水土保持动态变化监管中的应用技术体系,提出中等分辨率遥感影像比高分辨率遥感影像更适合于大尺度生产建设项目扰动变化情况的监管。刘成帅等^[6]利用 Sentinel-2 卫星遥感影像,通过随机森林模型对 2017—2021 年湖北省生产建设项目扰动区域进行了识别提取,总体识别精度高于 93.00%, Kappa 系数在 0.92 以上。李琳等^[7]利用 2000—2020 年的 Landsat 系列遥感影像,对福建省长汀县大中型生产建设项目新增施工扰动进行了监测,并评估了不同时长对监测结果精度的影响。徐丰等^[8]利用 Landsat TM 遥感影像和 Spot5 遥感影像,对洪家渡水电站的水土保持状况进行了研究,实现了对水土流失面积和分布的监测,精度可达 94%。通过中低分辨率卫星影像可快速识别大范围内的大尺度生产建设项目扰动状况,但其空间分辨率相对较低,难以精准捕捉小尺度生产建设项目的变化情况,无法满足针对小范围区域监测的需求。在实际监测工作中,需要结合高分辨率卫星影像、无人机遥感或地面观测等精细观测手段,形成多尺度互补的监测技术体系。

1.2 高分辨率卫星

高分辨率卫星凭借较高的空间分辨率和丰富的光谱信息,在生产建设项目水土保持监测中展现出明显优势,可提供更加精细的地表信息,适用于中小尺度的水土保持监测。典型的高分辨率卫星包括法国的 Spot 系列卫星和我国自主研发的高分系列卫星等。

在生产建设项目水土保持监测中,高分辨率卫星遥感技术可实现对项目扰动土地状况、水土保持措施实施情况及防治效果、土壤流失情况等多个方面的详细监测与评估^[9]。利用高分辨率影像的优势,能够精准提取项目区域及周边的扰动范围、面积、土地利用类型及其变化情况。周春波等^[10]利用高分影像对瑞金市经果林开发的扰动土地状况进行了监测分析,结

果显示扰动土地面积逐年增长。谭杰峻等^[11]通过高分一号影像提取了西藏地区生产建设项目的扰动地表范围,提取结果精度达到 83% 以上。刘二佳等^[12]以高分一号影像为数据源,采用 5 种常用的融合方法对扰动图斑进行信息提取,结果表明 GS 变换和 PC 变换在扰动地块提取方面具有较高的精度。此外,还可以利用高分影像对建设区内的水土保持措施进行识别与提取,确保这些措施按照设计要求实施,从而有效减少土壤侵蚀和水土流失。赵帮元等^[13]分析了基于不同分辨率遥感影像的水土保持措施提取精度,发现优于 2.5 m 空间分辨率的遥感影像可用于梯田、沟台地、疏林地、耕地、坝地和荒草地的提取,2 m 空间分辨率的遥感影像可用于天然草地的提取,优于 10 m 空间分辨率的遥感影像可用于林草植被的提取。杨蕾^[14]基于不同分辨率的 Spot5 影像开展了对梯田、淤地坝、植被等水土保持措施的提取研究。李国和等^[15]利用高分一号、高分二号和 World View 遥感卫星的多星协同技术对平江抽水蓄能水电站进行扰动面积、水土保持措施和道路的监测,提取结果精度满足工程需要。

通过高分辨率影像,还可快速获取大范围的土地利用和植被覆盖信息,进一步计算扰动土地整治率、水土流失总治理度、林草植被恢复率和林草覆盖率等水土保持效果评价指标,从而判断是否达到水土保持方案设定的防治目标。康芮等^[9]通过分析水土保持卫星遥感监测的发展现状,提出了基于高分遥感的生产建设项目水土保持效果评价指标的监测方法。金文君^[16]利用 Spot 遥感影像获取项目区内土地利用类型面积,计算得到部分水土保持效果评价指标,为水土保持措施效益分析提供了数据支持。高分辨率影像在提升生产建设项目水土保持监测精度与效率方面具有重要作用。然而,高分辨率影像数据的获取成本较高、获取周期不稳定且处理过程复杂,在应用时应结合具体需求和资源条件,合理制定监测方案。

1.3 高分立体测绘卫星

高分立体测绘卫星指具备高空间分辨率、多光谱观测能力及立体成像能力的卫星。高分七号卫星作为我国首颗民用亚米级分辨率光学传输型立体测绘卫星,于 2019 年成功发射,是国家高分辨率对地观测系统重大专项(简称“高分专项”)的重要组成部分^[17]。

通过高分七号卫星能够获取大范围高分辨率遥感影像和地形数据,可用于开展土壤侵蚀区域坡度、坡长等地形因子的提取,水土流失坡耕地监测与评价指标快速提取,侵蚀沟及其形态指标快速提取等。赵

云龙等^[18]利用高分七号卫星、1:10 000 地形图和激光雷达生成的 DEM 数据对坡度和坡长进行提取,并与不同数据源的提取精度进行对比,结果显示高分七号卫星在大尺度坡度、坡长的提取中表现出较高的精度和可靠性,适用于土壤侵蚀模型的区域性评估,但在小尺度或具体位置的坡长提取方面其精度还有待提升。张俊彬等^[19]探讨了高分七号卫星影像在东北黑土区沟蚀侵蚀监测中的适用性,特别是评估了其在提取浅沟和切沟参数方面的表现,结果表明高分七号卫星立体影像在东北黑土区的小流域切沟监测中具有一定的适用性,但在浅沟监测及切沟三维参数提取方面存在较大误差。陈昶等^[20]利用高分七号卫星影像研究了自动提取东北黑土区侵蚀沟的方法,通过对比流向边缘检测、机器学习和深度学习 3 种自动提取技术,发现深度学习方法在提取侵蚀沟方面表现最佳,整体提取精度达到 60%,但仍需优化,以解决精度和连续性的问题。

高分七号卫星以其卓越的立体成像能力、高空间分辨率和高重访周期,已在自然资源调查、水利建设、环境保护、灾害监测与评估等多个领域发挥重要作用^[21]。在生产建设项目水土保持监测方面,可以用于获取大范围高分辨率地形数据、监测项目施工过程中引起的地形变化等。然而,目前高分立体测绘卫星的数据获取成本较高,数据处理过程复杂,对设备及技术要求高,因此未来应进一步探索和完善高分立体测绘卫星数据处理技术,加强与地面、无人机及其他高分数据的协同应用,充分发挥其在生产建设项目水土保持监测中的技术优势和应用潜力。

2 无人机遥感技术在生产建设项目水土保持监测中的应用现状

无人机遥感技术是以无人机搭载不同传感器采集数据,并结合计算机处理技术,根据特定需求生成监测成果^[22]。相比传统的卫星遥感,无人机遥感技术很好地解决了卫星遥感时效性差、机动性弱的缺点。目前,无人机遥感技术呈现出多用途、多机型、多种载荷能力以及长续航能力的发展态势^[23]。在生产建设项目水土保持监测中,主要以可见光相机为主^[22],可根据不同监测需求,选择垂直或倾斜摄影方式。相较可见光相机,激光雷达的应用较少,但在特定项目中展现出了独特优势。

2.1 垂直摄影

垂直摄影是无人机遥感技术中应用最为广泛的一种摄影方式,即通过无人机搭载单镜头相机,镜头垂直于地面进行拍摄,以快速获取高分辨率二维影像

数据^[24]。运用基于垂直摄影方式的无人机遥感技术进行生产建设项目水土保持监测,能够显著提升监测工作效率、监测准确率以及自动化程度,具有机动性强、便捷性高、成本低的特点,在准确掌握水土流失的位置、强度以及危害方面具有重要作用,为推进水土保持监测工作的定量化、精细化和信息化发展提供了有力支持^[25]。李岚斌等^[26]运用无人机垂直摄影技术对清远抽水蓄能电站的扰动面积、水土流失情况、水土保持措施以及取(弃)土场进行了监测。王志良等^[27]指出无人机垂直摄影技术在铁路等大型线状工程水土保持监测中的优势更加突出,具有时效性好、精度高和更加直观全面的特点。陈宇等^[28]通过无人机垂直摄影技术进行生产建设项目水土保持监测,认为该技术可准确获取扰动面积、水土流失情况和水土保持措施数量。田金梅等^[29]利用无人机垂直摄影技术对生产建设项目的渣场进行了动态监测,认为该技术能够快速、准确、直观地反映渣场的面积、体积以及水土保持措施等信息的动态变化情况。张琳琳等^[30]通过无人机垂直摄影技术生成的正射影像和三维模型有效提取出了各项目的扰动土地面积、水土保持措施实施数量和临时堆土区的土方量,结果表明提取精度较高。

综上所述,基于垂直摄影方式的无人机遥感技术可以对生产建设项目范围内的土地扰动情况、水土保持措施实施情况、土壤侵蚀程度、弃土弃渣堆放区域以及植被恢复进程等进行精细化监测。然而,由于该技术拍摄视角单一,获取的影像数据缺乏地物的三维立体结构信息,导致在坡度量测、堆场高度、侵蚀沟形态等地形特征的提取中存在精度不足的问题,且在高差显著或地形起伏复杂区域的适用性受到一定限制。因此,在实际监测任务中,可将垂直摄影技术与其他手段相结合,弥补单一技术的不足,进一步提升监测精度。

2.2 倾斜摄影

倾斜摄影测量技术是一种新兴的无人机遥感方法,通过搭载 1 个垂直向下和 4 个倾斜方向的相机,能在同一位置同时获取 5 个角度的高分辨率影像数据,打破了传统航测只能垂直向下摄影的限制,可快速、高效地采集丰富的地面信息,提升了三维数据的精度^[31-32]。相比垂直摄影方式,无人机倾斜摄影技术具有能获取全面三维信息、提升三维模型量测精度、降低监测综合成本及提高监测效率等优点,适用于地形起伏较大、地貌特征复杂的生产建设项目水土保持监测。胡云华等^[33]研究了无人机倾斜摄影测量技术在单个生产建设项目水土保持监管中的应用,建立了信

息化监管指标提取的技术流程,并在成都市进行了实际应用,结果表明该技术能够高效、低成本地获取丰富的监管信息,实现真三维量测,显著提升了监管的效率和精度。文雄飞等^[34]结合卫星影像和无人机倾斜摄影技术开展了三峡库区的水土保持动态监测,结果表明倾斜摄影技术能够提供高精度的二维平面和三维立体信息,辅助遥感影像解译,提升了监测的准确性。赵立中^[35]通过无人机倾斜摄影测量技术,从多个角度采集监测区的影像数据,提取了所需的土壤侵蚀因子、土地利用因子、植被覆盖监测因子以及坡度因子等信息。李博等^[36]介绍了利用无人机倾斜摄影测量技术进行土方计算的方法,结果表明该技术能够简化土方测量工作流程,降低成本,并且提高土方计算的精度。丁宏宇等^[37]通过无人机倾斜摄影技术构建了小流域的高分辨率三维模型,并对重点区域的土地利用现状、面积、坡度等信息进行了分析。

无人机倾斜摄影技术在复杂环境下的生产建设项目水土保持监测中展现出巨大的应用潜力,可生成高精度三维模型,实现坡度、坡长以及土方量等多种地形信息的精准量测。但是,该技术在实际推广应用过程中仍存在一些不足和挑战。首先,多角度成像数据量大且结构复杂,数据处理过程通常需要专业的软件和较高的硬件配置支持,数据处理效率较低;其次,该技术的设备成本相对较高,且系统构造复杂,日常维护和操作难度较大,对操作者的专业技能水平要求高,限制了其在中小规模监测机构中的普及;最后,由于设备体积较大,因此携带与部署的便捷性不足,在条件艰苦或作业区域交通不便的地区应用时存在一定局限性。未来的研究可着重于优化数据处理流程,降低设备成本,提高设备的便携性和易用性,以推动该技术进一步推广应用。

2.3 激光雷达

激光雷达(LiDAR)技术是结合传统雷达与激光遥感的新型空间信息获取技术,具备高时空分辨率、强大的植被穿透能力以及高精度数据等优势,能够快速、精准地获取复杂地表环境下的高质量三维结构信息。基于激光雷达获取的高精度三维点云数据可提取出多种监测指标,现已在多个领域的调查监测中得到广泛应用。在水土保持监测中,可以用于详细调查侵蚀沟的形态指标,快速识别大范围植被覆盖下的沟壑网络;获取淤地坝的地理信息,实现对淤地坝淤积状况和坝体安全的调查与评估;对森林覆盖区实现林下水土流失的动态监测,弥补传统遥感技术的局限性。PERROY et al.^[38]对比了基于机载和地面激光雷达估算得到的侵蚀沟壑体积,得出基于地面激光雷达

得到的侵蚀沟壑体积精度更高,但在侵蚀沟底部和侧部扫描受限,而机载激光雷达在大范围和复杂地形条件下表现更佳。JAMES et al.^[39]利用机载激光雷达技术有效识别了森林覆盖区的侵蚀沟网络,克服了传统无人机遥感技术难以有效识别植被覆盖下侵蚀沟的难题。张建国等^[40]对比了无人机垂直摄影测量、无人机倾斜摄影测量和机载激光雷达技术在淤地坝淤积量测量中的应用,结果得出机载激光雷达技术的测量精度和采集效率最高,但是相应的成本也较高,适用于有高精度要求的淤积量测量。董彦丽等^[41]利用机载激光雷达获取三维点云数据,并生成高分辨率DEM,用于提取坝控区坡度、坡向和高程等地形因子。WANG et al.^[42]结合无人机正射影像和机载激光雷达数据,成功量化了南方丘陵区林下植被覆盖度,并得出在低冠层覆盖和缓坡条件下能达到更高的测量精度。

然而,目前该技术在生产建设项目水土保持监测中的应用研究较少,主要原因在于其设备采购与维护成本较高且数据处理技术门槛高。未来,随着技术成本的降低和数据处理能力的提升,可以将其用于获取生产建设项目植被覆盖区的高精度地形信息,准确评估项目内植被恢复条件下DEM变化情况,为生产建设项目水土保持监测工作提供更全面、更细致的数据支撑。

3 生产建设项目水土保持信息提取技术

随着遥感技术和计算机视觉技术的快速发展,目前生产建设项目水土保持监测中已应用了目视解译、基于像元分类、面向对象分类、深度学习技术等多种水土保持信息提取方法^[43]。

目视解译作为最基础的信息提取方法,主要依赖于专家经验进行人工判读,虽然具备较高的解译精度与灵活性,但效率低下且主观性强,仅适用于数据验证以及复杂地形区域的补充分析^[44]。基于像元分类是以像元为基本单位,利用其光谱信息快速进行分类的方法,计算过程自动化程度较高,适用于空间尺度大且光谱差异明显的区域。然而,该方法因仅考虑了影像的光谱信息而容易出现“同谱异物”和“同物异谱”现象,或因忽略空间关系而产生“椒盐”现象,对高分辨率影像的适应性较差,从而影响分类精度。

面向对象分类方法通过对遥感影像进行对象化分割,综合利用对象的光谱、形状、纹理以及空间关系特征进行分类,有效克服了基于像元分类在高分辨率影像处理中的不足,减少了“椒盐”现象的出现,能更加精确地识别光谱信息相似但类别不同的地物。赵

搏华等^[45]利用5种面向对象分类方法对项目范围内的水土保持措施进行提取并分析精度差异,得出SVM分类法更适合该项目的水土保持措施分类。谭杰峻等^[11]利用基于规则的面向对象分类方法对西藏墨竹工卡县的生产建设项目扰动区进行提取,提取精度达到83%以上。面向对象分类方法在高分辨率影像的水土保持信息提取中展现出较好的适应性,但目前该方法在实际应用中仍存在一些不足,如影像分割参数设置和分类规则构建过程复杂,十分依赖于经验与主观判断,针对不同区域和不同地物类型需要频繁调整参数等,限制了算法在更大范围内的标准化应用,且处理效率相对较低。

近年来,深度学习技术逐渐被引入遥感信息提取领域,深度学习模型通过训练大量样本数据,可从影像中提取丰富的浅层和深层语义特征信息,表现出较高的自动化程度和提取精度^[46-47]。目前该技术在生产建设项目水土保持监测中的应用还相对有限,只在大范围的生产建设项目扰动图斑的识别提取方面开展了部分研究,其研究成果的区域外推性还有待商榷。康芮等^[48]采用改进的DeepLabV3+模型和U-net模型,对甘肃省中部的生产建设项目扰动图斑进行了自动提取试验,结果表明改进的DeepLabV3+模型整体效果更好。金平伟等^[49]利用卷积神经网络模型对某省生产建设项目扰动图斑进行了识别提取,最终识别精度达到97.52%。卢慧中等^[50]从目标识别与变化检测视角比较了U-net、U-net++与U-net3+三种模型的生产建设项目扰动图斑提取精度,结果显示U-net模型的表现最佳。总体而言,基于深度学习的语义分割模型如U-net、Deeplab系列等,在生产建设项目扰动图斑提取中效果较好,但也面临样本数据需求量大、模型优化周期长、可解释性不足等问题。在实际应用中,需结合不同信息提取方法的优势,不断优化遥感数据处理流程,以进一步提升生产建设项目水土保持信息提取的智能化和精准化水平。

4 发展建议

随着遥感技术在生产建设项目水土保持监测中的应用逐渐增多,监测精度和效率都得到了显著提升。同时,水土保持信息提取技术的发展,如目前较为流行的面向对象分类方法和深度学习技术,也极大地增强了影像解译的能力。然而,目前仍存在数据处理流程复杂、监测精度有待进一步提高、部分技术手段成本较高、缺乏统一技术标准等问题,限制了遥感技术在生产建设项目水土保持监测中的应用效果。因此,未来可以围绕以下几个方面开展研究:一是进

一步加强对高分立体测绘卫星、激光雷达等新兴遥感监测技术的探索,进一步拓展监测手段、扩大适用范围并提高监测精度,从而更好地满足多样化的生产建设项目水土保持监测需求;二是综合利用中低分辨率卫星、高分辨率卫星及无人机遥感等多种数据源的优势,构建多尺度、多平台协同的监测体系,实现生产建设项目的全方位监测;三是推动遥感技术与人工智能方法深度融合,引入深度学习算法,构建智能化遥感数据解译模型,实现对高分辨率影像信息的自动识别与精准提取,提高解译的效率与精度;四是制定统一的遥感监测技术标准与操作规范,以提高数据的共享性与成果的可比性,为生产建设项目水土保持监测工作的高质量发展奠定基础。

参考文献:

- [1] 姜德文,亢庆,赵永军,等.生产建设项目水土保持“天地一体化”监管技术研究[J].中国水土保持,2016(11):1-3.
- [2] 康芮,史明昌,赵院,等.基于多时相GF-1影像的施工期生产建设项目分布信息提取[J].水土保持通报,2016,36(3):253-257.
- [3] 刘宪春,王万君,王爱娟,等.遥感技术在生产建设项目水土保持监测中的应用[J].中国水土保持,2014(8):64-66.
- [4] 莫沫.水土保持遥感受成效与展望[J].中国水利,2024(11):21-25.
- [5] 邝高明,吴光艳,金平伟,等.基于不同分辨率遥感影像的生产建设项目水土保持动态变化监管技术研究[J].中国水土保持,2016(11):24-27.
- [6] 刘成帅,华丽,周玉城,等.2017—2021年湖北省生产建设项目人为扰动区域快速识别和提取[J].水土保持通报,2023,43(6):217-226.
- [7] 李琳,汪小钦,刘益锋,等.基于时序遥感影像的长汀县生产建设项目扰动监测[J].遥感技术与应用,2023,38(2):308-318.
- [8] 徐丰,曹宏,廖章志.遥感技术在开发建设项目水土保持监测中的应用:以洪家渡水电站为例[J].中国水土保持,2008(3):42-44,64.
- [9] 康芮,史明昌,赵院,等.高空间分辨率遥感技术在生产建设项目水土保持监测中的应用探讨[J].中国水土保持,2015(12):82-85.
- [10] 周春波,张龙,王嘉,等.瑞金市经果林开发扰动土地状况遥感监测与分析[J].中国水土保持,2019(11):4-6.
- [11] 谭杰峻,毕永清,周从斌.西藏地区生产建设项目扰动地表遥感监测方法与监管应用[J].中国水土保持,2019(2):63-66.
- [12] 刘二佳,罗志东,张晓丽,等.面向GF-1数据不同融合方法对扰动地块的提取[J].水土保持学报,2018,32(3):358-363.
- [13] 赵帮元,马宁,杨娟,等.基于不同分辨率遥感影像提取的

- 水土保持措施精度分析[J]. 水土保持通报, 2012, 32(4): 154-157.
- [14] 杨蕾. 基于 Spot5 遥感影像提取水土保持信息的研究[D]. 西安: 西北大学, 2006: 9-10.
- [15] 李国和, 高国庆, 左程, 等. 多星协同卫星遥感技术在湖南平江抽水蓄能电站水土保持监管中的应用[J]. 矿产勘查, 2021, 12(5): 1279-1284.
- [16] 金文君. 遥感技术在线型生产建设项目水土保持监测中的应用[J]. 内蒙古水利, 2018(4): 67-69.
- [17] 曹海翊, 戴君, 张新伟, 等. “高分七号”高精度光学立体测绘卫星实现途径研究[J]. 航天返回与遥感, 2020, 41(2): 17-28.
- [18] 赵云龙, 符素华. 基于高分 7 号卫星 DEM 的坡度坡长计算精度评价[J]. 水土保持学报, 2024, 38(2): 136-146.
- [19] 张俊彬, 张岩, 李坤衡, 等. 基于高分七号立体影像提取松嫩典型黑土区切沟和浅沟的精度分析[J]. 中国水土保持科学, 2024, 22(4): 152-161.
- [20] 陈昶, 张岩, 李坤衡, 等. 基于高分七号影像自动提取东北黑土区侵蚀沟的方法[J]. 测绘通报, 2024(3): 1-7.
- [21] 唐新明, 王鸿燕. 我国民用光学卫星测绘产品体系的建立与应用[J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1386-1397.
- [22] 汪沛, 罗锡文, 周志艳, 等. 基于微小型无人机的遥感信息获取关键技术综述[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 1-12.
- [23] 韩文权, 任幼蓉, 赵少华. 无人机遥感在应对地质灾害中的主要应用[J]. 地理空间信息, 2011, 9(5): 6-8, 163.
- [24] 张文谦. 无人机遥感在建设项目水土保持监测数据获取中的应用[D]. 北京: 北京林业大学, 2019: 7-8.
- [25] 施明新. 无人机技术在生产建设项目水土保持监测中的应用[J]. 水土保持通报, 2018, 38(2): 236-240.
- [26] 李岚斌, 金平伟, 李乐, 等. 无人机遥感技术在生产建设项目水土保持监测中的应用: 以清远抽水蓄能电站为例[J]. 人民珠江, 2019, 40(1): 6-11.
- [27] 王志良, 付贵增, 韦立伟, 等. 无人机低空遥感技术在线状工程水土保持监测中的应用探讨: 以新建重庆至万州铁路为例[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(4): 109-113.
- [28] 陈宇, 付贵增, 凌峰, 等. 无人机技术在生产建设项目水土保持监测中的应用[J]. 海河水利, 2018(5): 57-59, 68.
- [29] 田金梅, 张迎, 白云, 等. 小型无人机在渣场水土保持动态监测中的应用[J]. 北京测绘, 2018, 32(10): 1165-1168.
- [30] 张琳琳, 张艳, 张文谦, 等. 无人机遥感在生产建设项目水土保持监测数据获取中的应用[J]. 绿色科技, 2019(24): 23-28.
- [31] 徐思奇, 黄先锋, 张帆, 等. 倾斜摄影测量技术在大比例尺地形图测绘中的应用[J]. 测绘通报, 2018(2): 111-115.
- [32] 杨国东, 王民水. 倾斜摄影测量技术应用及展望[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(1): 13-15, 18.
- [33] 胡云华, 许海超, 曲双锋, 等. 倾斜摄影测量技术在生产建设项目水土保持监管中的应用[J]. 水土保持研究, 2022, 29(6): 438-443.
- [34] 文雄飞, 张穗, 张煜, 等. 无人机倾斜摄影辅助遥感技术在水土保持动态监测中的应用潜力分析[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(11): 93-98.
- [35] 赵立中. 基于无人机倾斜摄影遥感技术的水土保持动态监测方法研究[J]. 环境科学与管理, 2024, 49(9): 134-137, 168.
- [36] 李博, 徐敬海. 无人机倾斜摄影测量土方计算及精度评定[J]. 测绘通报, 2020(2): 102-106, 112.
- [37] 丁宏宇, 李宝华. 无人机倾斜摄影技术在小流域综合治理中的应用[J]. 水土保持应用技术, 2021(4): 41-42.
- [38] PERROY R L, BOOKHAGEN B, ASNER G P, et al. Comparison of gully erosion estimates using airborne and ground-based LiDAR on Santa Cruz Island, California[J]. Geomorphology, 2010, 118(3-4): 288-300.
- [39] JAMES L A, WATSON D G, HANSEN W F. Using LiDAR data to map gullies and headwater streams under forest canopy: South Carolina, USA[J]. Catena, 2007, 71(1): 132-144.
- [40] 张建国, 董亚维, 李晶晶, 等. 黄土高原地区淤地坝拦沙淤积监测中存在的问题及方法探讨[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 387-392, 399.
- [41] 董彦丽, 杨世君, 高钰婷, 等. 基于无人机 LiDAR 系统的坝控流域地貌形态和侵蚀分区的提取[J]. 现代测绘, 2022, 45(1): 13-17.
- [42] WANG R F, BAO T T, TIAN S F, et al. Quantifying understory vegetation cover of *Pinus massoniana* forest in hilly region of south China by combined near-ground active and passive remote sensing[J]. Drones, 2022, 6(9): 240.
- [43] 彭道松, 聂小飞, 莫明浩, 等. 基于深度学习的水土保持措施遥感解译信息提取研究[J]. 中国水土保持, 2023(4): 45-49.
- [44] 贾坤, 李强子, 田亦陈, 等. 遥感影像分类方法研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(10): 2618-2623.
- [45] 赵搏华, 王秀茹, 阎世煜, 等. 面向对象分类方法在水土保持措施提取中的应用[J]. 中国水土保持科学, 2022, 20(1): 122-127.
- [46] 曹林林, 李海涛, 韩颜顺, 等. 卷积神经网络在高分遥感影像分类中的应用[J]. 测绘科学, 2016, 41(9): 170-175.
- [47] 董蕴雅, 张倩. 基于 CNN 的高分遥感影像深度语义特征提取研究综述[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(1): 1-11.
- [48] 康芮, 邱新玲, 马鸿财, 等. 基于深度学习生产建设项目扰动图斑自动提取[J]. 中国水土保持科学, 2023, 21(1): 128-138.
- [49] 金平伟, 黄俊, 姜学兵, 等. 基于深度学习生产建设项目扰动图斑自动识别分类[J]. 中国水土保持科学, 2022, 20(6): 116-125.
- [50] 卢慧中, 卞雪, 金秋, 等. 基于深度学习生产建设项目扰动图斑提取算法和识别策略[J]. 中国水土保持, 2024(8): 23-28.