

卫星遥感技术在珠江流域饮用水水源监管中的应用与探讨

冯佑斌, 何颖清

(珠江水利委员会珠江水利科学研究院 水利部珠江河口治理与保护重点实验室, 510611, 广东)

摘要: 饮用水水源监管是水安全保障的关键环节, 是水利部门的一项重要职责。近年来卫星遥感凭借其大范围、高视角的观测优势, 已成为支撑水源监管的重要技术手段。梳理总结了相关研究进展, 结合珠江流域从水域水质遥感监测与陆域风险源排查两个方面开展的饮用水水源遥感监管实践, 分析了水利部门水源监管中的职能定位及近年实践成效, 提出了基于水利监管需求的水安全风险源分类框架。针对卫星数据整合不足、遥感与地面监测协同性弱、监管范围覆盖不全等挑战, 提出优化对策: 推进高频次星座群、无人机等手段的应用, 提高饮用水水源的遥感时空覆盖能力; 细化遥感技术与地面调查协同内容, 助力形成饮用水水源闭环式监管体系; 深化饮用水水源监管内容, 提出保护区与小流域并重、水量与水质联动的监管模式。

关键词: 饮用水水源; 遥感监管; 风险源; 珠江流域

Applications and exploration of satellite remote sensing in the supervision of drinking water sources in the Pearl River basin//FENG Youbin, HE Yingqing

Abstract: Supervision of drinking water sources is a key component of water security and an essential responsibility of water administrative departments. In recent years, satellite remote sensing has become an important technical tool for supporting water source supervision due to its advantages of wide-area coverage and high-altitude observation. This paper reviews related research progress, analyzes the functional role of water administrative departments and the outcomes achieved in recent years based on the practice of remote sensing-based supervision of drinking water sources involving aquatic water quality monitoring and terrestrial risk source identification in the Pearl River basin. A classification framework of water security risk sources based on regulatory needs is proposed. In response to challenges such as limited satellite data integration, weak coordination between remote sensing and ground monitoring, and incomplete regulatory coverage, this study proposes the following optimization measures: promoting the application of high-frequency satellite constellations and drones to enhance the spatiotemporal coverage of remote sensing; refining the coordination between remote sensing technologies and field investigations to support the formation of a closed-loop supervision system; and deepening the scope of drinking water source supervision by emphasizing both protected areas and small basins, as well as the integrated regulation of water quantity and quality.

Keywords: drinking water source; remote sensing supervision; risk sources; Pearl River basin

中图分类号: TV213+TP79 文献标识码: B 文章编号: 1000-1123(2025)15-0067-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2025.15.010

收稿日期: 2025-06-13 修回日期: 2025-07-18

作者简介: 冯佑斌, 高级工程师, 主要从事水环境遥感应用研究工作。

通信作者: 何颖清, 正高级工程师, 主要从事水环境遥感、河湖监管相关工作。E-mail: heyingqing@foxmail.com

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42271334); 广州市科技计划项目(202206010018)。

饮用水安全直接关系到人民群众生命健康和社会稳定,建立制度化、规范化、常态化饮用水水源保护与监管机制,是筑牢生态安全屏障、保障居民饮用水安全的重要途径。饮用水水源监管工作由水利、生态环境、农业农村等多部门与地方政府、社会力量协同推进,涵盖专项督查、日常管护及社会监督等多个维度。专项督查由水利部与生态环境部主导,通过定期检查,重点核查水源水质、污染源及生态环境状况;日常管护由地方政府承担,通过巡河巡湖、设施维护和应急响应等措施保障水源安全;社会监督则由公众、媒体及第三方机构等社会力量共同参与,形成多元共治监管网络。受限于人力、物力和财力投入规模以及部分水源保护区地形复杂、区域分散等客观条件,仅依赖人工地面巡查难以实现动态、全域监测,在此背景下,凭借卫星遥感技术高视角、大范围立体观测优势,能弥补地面监测盲区,还可以为现场调查指引方向,是提升监管效能的重要技术手段。

近年来水利部持续推动卫星遥感技术在水利领域的应用,2016年印发《水利部办公厅关于加快推进卫星遥感水利业务应用的通知》(办信息〔2016〕189号),明确要求各单位提高认识,加快推进卫星遥感在水利行业业务化应用。此后,《水利部办公厅关于做好饮用水水源地水质监测工作的通知》(办水文〔2019〕214号)出台,卫星遥感技术被明确纳入饮用水水源监管政策框架。《水利部办公厅关于开展2023年水资源遥感监测与应用示范工作的通知》(办资管〔2023〕248号)进一步明确以遥感技术为核心手段推动水源监管智能化转型。《数字孪生水利“天空地水工”一体化监测感知夯基提能行动方案(2024—2026年)》(水信息〔2024〕178号)系统规划了“天空地水工”多维度监测体系,将卫星遥感作为开展饮用水水源安全风险识别和保障供水安全的关键技术支撑。上述政策文件的陆续发布,标志着卫星遥感技术在饮用水水源监管中的应用从试点示范向常态化、制度化方向加速推进。

一、饮用水水源遥感监管内容

遥感技术是一种基于电磁波与地表物质相互作用原理的非接触式监测技术,通过传感器捕捉地表反射/发射的电磁波差异实现目标特征识别及参数提取。卫星平台通过搭载多光谱、高光谱或合成孔径雷达等传感器,可获取不同时空尺度的遥感数据,为地表信息分析提供多维数据支持。相较于常规水资源、水环境遥感监测,卫星遥感在饮用水水源监管中需同时关注保

护区水域水质信息和陆域水安全风险源。

1. 水域水质遥感监测

根据水体辐射传输理论,太阳辐射在水体中的吸收、散射及衰减过程主要受水体光学组分影响,包括纯水、浮游植物(以叶绿素为主要色素成分)、悬浮颗粒及有色可溶性有机物等。在遥感领域,这些基础水色参数的反演算法已形成经验模型、半分析模型和物理模型三大类型,在海洋监测中取得较好应用效果。因地表水文条件、陆域生境及人类活动时空异质性,上述模型在内陆水体跨区域应用中面临不同程度的局限性。此外地表水质监测指标(如总磷、氨氮、溶解氧等)多为非光学活性的水质参数,相关研究主要围绕水体光学特性与水质参数的关联性展开,根据卫星光学传感器的波段设置建立区域化、经验性的反演模型,以获取目标水质参数的时空分布。例如基于Landsat-8 OLI影像的福建省莆田市木兰溪总磷、总氮、溶解氧及高锰酸盐指数反演研究;基于Landsat-5/7/8遥感影像的重庆市长寿湖水库水体富营养状态评价;基于Sentinel-2影像的小浪底水库化学需氧量、总磷、总氮及氨氮反演研究,江苏省徐州市云龙湖水库浊度与电导率反演,江苏省骆马湖水库透明度与悬浮物浓度反演,云南省洱海叶绿素a浓度反演;基于多源遥感影像(Landsat-8、GF-1、Sentinel-2等)的广西壮族自治区漓江叶绿素a与悬浮颗粒物浓度反演;基于珠海一号高光谱卫星的天津市于桥水库悬浮物浓度及透明度反演;基于高分一号卫星影像的鄱阳湖高锰酸盐指数、总磷、总氮、透明度、叶绿素a及悬浮泥沙6种水质参数反演研究,这些研究通过遥感影像与地面监测的结合,为饮用水水源水质安全评估提供了重要技术支撑。

2. 陆域风险源遥感调查

陆域风险源方面,一般根据地物在高空间分辨率遥感影像的色调、形状、纹理等特征,开展各级保护区的风险源调查与评估。当前存在两类分类体系:一类沿用生态环境评价体系,将风险源分为点源(如排污口等具有明确污染源位置和边界的污染源)与面源(如农业种植区等通过径流汇入受纳水体的污染源);另一类采用非点源(如耕地、城乡居民用地、林草地)、固定源(如码头、排涝泵站、排污工厂、填埋场等)和流动源(如陆运、航运交通)的分类方式。后者相对具体,不仅与现行《集中式饮用水水源地环境保护状况评估技术规范》(HJ 774—2015)直接对接,还能全面覆盖固定设施风险控制、运输过程动态监测及区域性面源污染治理,便于水

利管理部门根据风险源的特点制定差异化管理策略,明确责任主体,并加强与环保、交通、公安等部门的协同监管。然而从水利监管流程视角分析,遥感解译在饮用水水源风险源普查流程中位于初始阶段,其核心作用在于风险源的空间定位与特征描述。通过聚焦于建筑物轮廓、道路线性结构、水体光谱特征等具体解译对象特征,建立稳健的解译标志,为后续地面核查提供方向;同时借助多时相遥感影像的动态监测,可描述风险源的演变过程,为监管决策提供科学依据。若初期过度纠结于大类划分,可能因数据不完整或分类标准模糊而降低效率。因此基于卫星遥感开展陆域风险源调查时,应遵循空间优先、属性渐进的监管范式,避免进行过多的语义分类。例如福建省东牙溪饮用水水源保护区违法违规活动的遥感动态监测、基于单景和多时相遥感影像的天津市于桥水库风险源调查与分析、基于面向对象分类识别的江苏省南京市夹江饮用水水源保护区内风险源目标调查,均体现了该范式在实际应用中的有效性。

二、珠江流域的水源监管实践

1. 监管主体职能

2010年6月,我国首部饮用水水源保护规划《全国城市饮用水水源地环境保护规划(2008—2020年)》发布,针对政策执行不力、保护区划分不规范等突出问题,明确提升水质安全保障水平的目标。2015年6月,原环保部与水利部联合发布《关于加强农村饮用水水源保护工作的指导意见》,推动农村水源保护区划定、规范化建设及长效机制建立。两部政策的实施推动了全国饮用水水源保护工作,环境质量持续改善。

根据部门“三定”职能,水利部门在水源监管中承担基础性统筹职责,其核心任务包括指导饮用水水源保护工作,依据《中华人民共和国水法》《水资源管理监督检查办法(试行)》等法规,通过水量保障、排污口审批及跨区域协调,为水源生态安全和污染防治提供基础支撑。生态环境部门则以污染治理和环境风险防控为核心,依据《中华人民共和国水污染防治法》《饮用水水源保护区污染防治管理规定》等法规,对水源保护区及周边区域的环境状况和污染风险进行调查评估,识别潜在污染风险并实施风险防范措施。两者在监管链条中形成互补关系:水利部门通过水量配置和跨区域协调保障水源基础条件,生态环境部门则通过污染治理和风险防控提升水质安全水平,共同实现水源保护的系统性与长效性。

珠江流域作为我国南方重要水系,其水资源安全直接关系到流域内人口的饮水安全,并维系着各地市与粤港澳大湾区的可持续发展。水利部珠江水利委员会(以下简称珠江委)作为水利部派出的流域管理机构,在珠江流域内依法行使水行政管理职责。其核心职责包括流域水资源统筹管理、防洪调度、水土保持及水资源保护等。饮用水水源地作为流域水资源安全的核心区域,其保护与管理直接关系到流域水资源的可持续利用和供水安全,符合珠江委“统筹水资源配置、保障流域生态安全”的职能定位。

2. 监管实践探索

《水利部办公厅关于做好饮用水水源地水质监测工作的通知》(办水文〔2019〕214号)明确要求流域管理机构对流域内饮用水水源地实施监督性监测。珠江委迅速响应政策要求,依托卫星遥感技术,对云南省、广东省4处湖库型水源开展试点监测,为后续工作奠定技术基础。

2020年5月,珠江委制定了饮用水水源监督性监测实施方案,创新构建“遥感宏观判别-无人机巡航排查-人工定点监测”三位一体的监督性监测技术体系。该体系通过建立水质遥感模型、遥感与无人机联合排查、人工定点检测等手段,实现饮用水水源地的水域动态监管与水安全风险源识别,为流域水源保护提供科学依据。

2023年,珠江委根据《水利部办公厅关于开展2023年水资源遥感监测与应用示范工作的通知》(办资管〔2023〕248号)要求,在广东、广西、云南、海南各选取1处水源保护区,开展水安全风险源遥感监测。

目前,珠江委已建立年度滚动监测机制,对流域内108个全国重要饮用水水源地实施定期监测,每年选取一定数量水源开展不少于1次的水质遥感监测与水安全风险源排查,辅助水源保护、水质监测、现场抽查等工作明确问题导向。与此同时,各流域省份也积极跟进技术应用。云南省水利厅于2024年开始每年选取5处地级以上城市的重要集中饮用水水源地开展2期水安全风险源遥感动态调查,进一步拓展了遥感监管范围。

3. 形成的风险源类别

当前已公开的水源风险源分类体系以生态环境部2022年发布的《集中式地表水饮用水水源地风险源遥感调查技术规范》(HJ 1236—2021)为主,包含8个一级风险源:排污口、工业企业、旅游餐饮、农业面源、生活面源、码头、交通穿越及其他,并进一步细分出37个二级风险源,例如将排污口细分为工矿企业排污口、工矿企业雨洪排口、城镇生活污水散排口等。饮用水水

源的水利监管对象主要包含3个方面:一是水源周边环境中的污染源,如农业面源、工业污染源、生活面源等;二是水源相关设施,如取水口、输水管等,需保障其安全运行并防范人为破坏;三是涉水活动主体,如生产建设项目、文旅活动、个人游泳垂钓等。

在珠江流域水源监督性监测风险源分类体系中,基于水利监管需求及遥感技术的实施条件,对现有风险源分类体系进行了优化调整。首先,将“旅游餐饮”与“生活面源”统一归并为“生活面源”,以消除光谱、纹理特征重叠导致的遥感解译偏差;其次,新增5类遥感判识明确且对水质影响显著的高风险类型,包括水质突变区(通过水体光谱异常识别污染物浓度骤变区域)、在建项目(施工活动易产生黄泥水)、采砂场(易发生泥沙淤积与悬浮物扩散)、采矿(石)场(易产生矿渣堆放与酸性渗滤液)、固体堆放(易发生堆存物料的淋溶与风化过程)。调整后珠江流域水源水安全风险源共包含12类,其对应的遥感解译标志见表1。

三、探讨与思考

1. 关于卫星遥感数据源

在珠江流域饮用水水源监管中,水域水质遥感监测以10 m分辨率的Sentinel-2多光谱影像和30 m分辨率的Landsat-8/9影像为主;陆域风险源遥感调查

以亚米级影像为主,如0.3 m分辨率的WorldView-3、GeoEye-1以及0.8 m分辨率的国产高分二号、高分七号、吉林一号等,并视实际成像情况补充2 m分辨率的高分一号、高分六号、中巴资源卫星等。

由于当前饮用水水源遥感监管频次为每年1~2期,上述数据已基本满足需求。然而,遥感影像仅能反映某一时刻的地表状态,在实际应用中仍存在改进空间。首先,Sentinel-2A/B双星重访周期为5天(2024年9月Sentinel-2C在轨运行后,最快达3天),Landsat-8/9重访周期为8天,二者均难以实现对突发性污染事件(如暴雨径流、河涌汇水、生产建设项目废水排放等)的实时监测;加之光学遥感影像易受云层和降雨等气象条件影响,不仅延长了可用影像的获取周期,还加剧了大气(如气溶胶、水汽)和水面波纹等干扰因素的影响,导致影像预处理难度上升,水质参数遥感反演精度难以保障。因此,在动态变化显著的水质监测场景中,例如藻类水华暴发与消亡、排污等的短期变化可能被单次观测遗漏,遥感技术的实时响应能力存在局限。此外,地表变化较快的陆域风险源(如生产建设项目、垃圾堆放等)因卫星重访周期的限制,导致水安全风险源的遥感识别滞后,进而削弱了监管工作的时效性与监管效能。

针对当前遥感监管中卫星重访周期不足、气象干扰等问题,在经费允许的条件下,可通过多技术手段进

表1 水安全风险源遥感解译标志

序号	类型	解译标志
1	水质突变区	通过水质遥感模型反演叶绿素、悬浮颗粒物、有机污染物等水质参数浓度后,经色彩渲染后呈现异常偏高的区域
2	排污口	影像上呈现特定的几何形状,如矩形、梯形、三角形等;污水排出时,排水口可能呈现异于周围水域的深色或浑浊色调
3	在建项目	棕黄(裸土)或灰白(在建建筑)色调,多为几何形状规则的地块,图斑内可见点状粗糙或块状(建构物)纹理。多时相影像对比时,可见地表形态显著变化
4	采砂场	一般位于临河(湖)侧,附近可见船舶聚集;影像上为黄白、褐色调;图斑多为长条状,场内堆有不规则沙堆;有道路与外部相连;部分带有房屋
5	采矿(石)场	临山分布;因采矿种类不同色调有差异,一般为灰白(采石)、土黄(取土)或黑色(煤矿);纹理较粗糙,图斑内可存在加工砂石器械、临时板房,附近有道路。多时相影像对比时,地表可见明显变化
6	固体堆放	垃圾堆放呈灰褐色,色调偏暗,纹理粗糙,不规则分布;建材(堆土)类为灰白色或土黄色,纹理粗糙不规则,一般沿坡倾倒,呈不规则片状或带状
7	工业企业	陆域或临水厂房,屋顶多为灰白、蓝或橙色调,呈块状或片状,形状规则,一般有道路贯穿
8	农业面源	包括作物自然种植、经济林、人工草地、大棚种植、坑塘养殖等。其中,作物自然种植类的色调随农作物种类、生长季节、土壤湿度等因素而变化,一般具有规则的几何形状,纹理平滑细腻,其界多有路、渠、田间防护林等;大棚呈现规则的长条形格网纹理,灰白色调;坑塘养殖一般为不规则格网纹理,蓝黑色调
9	生活面源	指农村居民点,一般呈现不规则片状分布,图斑色调不均一,内部很多不同颜色的方块(屋顶),内部夹杂有道路、树木、小水塘等
10	码头(趸船)	码头呈灰白色调;形状较规则;有小型船只停靠(客运、渔船),或临近陆域有固体堆放(货运)。趸船可见蓝色或灰白色顶棚,多期影像可确定位置是否移动
11	交通穿越	跨一级或二级保护区水域,两端一般有道路连接,灰白色调,线状,临近水域有平行阴影。在建类可见桥梁桩基
12	其他	指未归入以上类别的陆域风险源类型,例如管线穿越(线状、灰白色调)、文体旅游项目(如亲水平台,一般几何形状规则,与周围水域、陆域呈现较大色调差异)等

行补充。首先,引入受云雨天气影响较小的极化雷达卫星(如GF-3、Sentinel-1),结合变化检测和人工智能算法,提升陆域地表动态变化(如生产建设、垃圾堆放)的识别能力;其次,订购高频次星座群影像(如Planet Scope,空间分辨率4 m),实现每1~2天的重复观测,增强水源监管的时效性;最后,可考虑在取水口、上游主要支流汇口附近等重点断面加装无人机机巢,提升监测频次和应急响应能力,并通过配置热成像传感器弥补夜间普查盲区,提升对污水偷排、违规岸线扰动等隐蔽风险源的监测能力。

2. 关于卫星遥感与地面协作

卫星遥感技术因时空分辨率的制约难以全面准确地识别水安全风险源。例如,水陆交汇区域的混合像元、浅水区底泥对水体光谱的干扰,可能导致部分水域被误判为水质突变区;再如,养殖用网箱与生态修复浮岛在遥感影像中常呈现相似的形状与纹理特征,仅凭遥感影像难以区分其性质。因此,需通过实地调研进一步核查遥感解译的水安全风险源,为后续的认可与整改措施提供实证依据。在这个过程中,卫星遥感技术应主动输出更系统的解译信息,涵盖风险源的时空演变特征(如解译时间、历史变化趋势)、空间环境要素(如周边土地利用类型、水文条件)以及风险等级评估,为地面核查提供明确的优先级指引。结合珠江委水源监督性监测与云南省水利厅重要水源水安全风险源遥感调查的实践经验,建议同样遵循属性渐进的范式,初期阶段避免过度细分,将遥感解译的饮用水水源水安全风险源划分为重点与一般两类。该分类以风险源类型的潜在影响程度、管理优先级及空间分布特征为综合判定依据,具体判定标准:①将一级保护区或毗邻一级保护区边界的建构筑物(含采煤区遗留的建构筑物)、土建项目、存在污染迹象或库区上游的坑塘、疑似网围养殖等直接威胁水域水质的地类,列为重点风险源;②将一级保护区内非汇水区域的农宅、已建成交通穿越、农业种植区以及二级保护区内的其他地类列为一般风险源。

此外,若现场核查条件允许,建议在上述一般类型风险源核查时重点关注以下情况:对于一级保护区内坡度大于 15° 的农业种植区,依据水土保持法,应采取保护性措施,以减少水土流失,现场核查时,应摸查施肥期、水土保持措施、汇排水渠道等信息,定期巡查;对于二级保护区内的土建项目、在营的采矿(石)场,应在汛期前进行至少一次巡查,降低小流域汇水区可能挟带沉积物或化学物质进入水体的风险。

在获取遥感解译的疑似风险源清单后,地面核查不应局限于简单的对错二元判断,而是形成双向反馈机制。通过实地探勘获取的隐蔽信息(如非法排污点的具体位置、违规行为的时间节点)反哺遥感初判,提升风险源识别的准确性与时效性。这种协同模式不仅能够提升监管效率,还能推动遥感技术与实地调查的深度融合,使风险源识别与治理实现动态调整与持续优化,形成闭环式监管体系。

3. 关于水源监管方向

当前水源监管多聚焦于一、二级保护区,其范围划定主要依据《饮用水水源保护区划分技术规范》(HJ 338—2018),以取水口为核心,通过缓冲区模型确定一级保护区(通常为取水口周边50~100 m水域)和二级保护区(按地形、水文条件向外扩展),并结合行政边界、水功能区划、水质模型模拟等进行局部修订。该划分方式存在忽略小流域的汇水效应及生态连通性的问题,导致上游潜在污染源可能因行政边界、山区地形等因素被排除在保护区外。

小流域是以分水岭和河道出口断面为界形成的自然集水单元,具有水文过程闭合、污染传输路径清晰的特点。应用卫星遥感开展水安全风险源排查时,可通过数字高程模型提取小流域边界,开展“保护区—小流域”两级监管范围内的风险源排查。该方式对当前一级、二级保护区边界进行了合理扩展,可在未显著增加遥感影像购置、人工解译等成本的前提下,实现饮用水水源潜在污染源的系统排查,为后续风险源管控提供更科学、全面的清单数据。

此外,当前遥感监管多侧重水质参数的监测,对水量变化的关注相对薄弱。水源的可持续性不仅依赖水质安全,更需确保水量的稳定供给,尤其是生态流量的维持。建议在遥感监管体系中纳入水量监测,通过遥感反演水体面积、水位变化等信息,评估水源水量动态与生态需水需求匹配程度。这种水质、水量并举的监管模式可更全面反映饮用水水源综合安全状况,为水资源管理提供科学依据。

四、结语

饮用水水源保护是水利部门的重要职能,需兼顾前端预警与末端督查。在珠江流域2019年至今的水源监管实践中,卫星遥感在水域水质监测和陆域风险源排查中发挥了实效、提供了水利经验。但实现卫星“看得见”、地面“管得住”仍然任重道远。例如,如何在有限的资源下

整合多源卫星遥感数据,提升饮用水水源的时空覆盖能力;如何协同遥感排查与地面核查,让盲区遗漏尽量少、问题发现尽量准;如何进一步优化监管方向,从传统保护区划分向小流域统筹管理转型,并强化水量监测维度,构建水质、水量协同监管模式。唯有以问题为导向,因地制宜推动卫星遥感等空天科技在真实场景中的应用,并积极总结实践经验,方能实现水源监管的系统性、前瞻性与可持续性,为保障国家水安全提供坚实支撑。

参考文献:

- [1] 李云梅,赵焕,毕顺,等.基于水体光学分类的二类水体水环境参数遥感监测进展[J].遥感学报,2022,26(1):19-31.
- [2] 高佳欣,林昱坤,涂耀仁,等.遥感反演技术应用于监测地表水体水质参数的现状与展望[J].遥感信息,2023,38(6):1-14.
- [3] 冯思维,杨清华,贾伟洁,等.基于光学遥感的内陆地表水体提取综述[J].自然资源遥感,2024,36(3):41-56.
- [4] 王思梦,秦伯强.湖泊水质参数遥感监测研究进展[J].环境科学,2023,44(3):1228-1243.
- [5] 张兵,李俊生,申茜,等.长时序大范围内陆水体光学遥感研究进展[J].遥感学报,2021,25(1):37-52.
- [6] 胡晴晖,宋金玲,黄达,等.基于遥感影像的木兰溪水质参数反演[J].中国环境监测,2023,39(3):206-214.
- [7] 张辰,夏婧,闵天,等.基于Landsat影像的长寿湖水体营养状态时空变化遥感研究[J].华中师范大学学报(自然科学版),2025,59(1):135-144.
- [8] 郭荣幸,王超梁,陈济民,等.基于Sentinel-2多光谱遥感影像的小浪底水质反演[J].人民黄河,2024,46(1):93-96+102.
- [9] 梁文广,陈伟,王金东,等.骆马湖水质遥感反演研究[J].中国农村水利水电,2025(5):161-170.
- [10] 谢恩弘,吴骏恩,杨昆.基于Sentinel-2影像的洱海叶绿素a质量浓度反演[J].环境工程学报,2022,16(9):3058-3069.
- [11] 刘曼,付波霖,何宏昌,等.基于多时相主被动遥感的漓江水面监测与水质参数反演(2016—2020年)[J].湖泊科学,2021,33(3):687-706.
- [12] 殷子瑶,李俊生,范海生,等.珠海一号高光谱卫星的于桥水库水质参数反演初步研究[J].光谱学与光谱分析,2021,41(2):494-498.
- [13] 李怡静,孙晓敏,郭玉银,等.基于梯度提升决策树算法的鄱阳湖水环境参数遥感反演[J].航天返回与遥感,2020,41(6):90-102.
- [14] 许芬,周小成,孟庆岩,等.基于“源-汇”景观的饮用水源地非点源污染风险遥感识别与评价[J].生态学报,2020,40(8):2609-2620.
- [15] 王旭东,李云梅,王永波.南京夹江饮用水源地环境安全评价[J].遥感信息,2018,33(3):54-62.
- [16] 苏轶君.GF-5卫星监测饮用水源地风险源的潜力研究[D].武汉:武汉大学,2017.
- [17] 姚延娟,王雪蕾,吴传庆,等.饮用水源地非点源风险遥感提取及定量评估[J].环境科学研究,2013,26(12):1349-1355.
- [18] 邵文飞,陈绪慧,张新胜,等.高分三号卫星影像在地表变化检测中的应用试验[J].航天返回与遥感,2024,45(3):41-50.
- [19] 袁洁,肖启涛,冯霞,等.人工智能在我国湖泊治理中的应用与展望[J].生态学报,2025,45(8):3569-3578.
- [20] 孙滔滔,赵鑫,李再华,等.水源地潜在风险源评估指标体系及其管理平台研发[J].中国农村水利水电,2019(11):94-97+109.
- [21] 姚莹,杨红刚,陈必群,等.基于博弈论组合赋权-云模型的河流型水源地环境风险评价研究[J].环境科学学报,2025,45(2):177-189.
- [22] 吕业佳,罗凡,姚嘉伟.水库型饮用水水源保护区划分方法与实证研究[J].环境生态学,2023,5(7):122-128.
- [23] 金磊,潘亚雷,邱全毅,等.基于污染物扩散模拟的饮用水水源地保护区划分研究[J].中国给水排水,2021,37(23):106-113.
- [24] 王谦,王雪蕾,徐雯婷,等.河流生态流量保障程度遥感监管技术方法研究[J].环境科学学报,2023,43(7):440-447.
- [25] 张秀菊,郝梦茹,罗柏明.河流型水源地安全评价及供水风险研究[J].人民黄河,2017,39(5):55-59.
- [26] 方国华,王鸿祯,于凤存,等.城市地表集中式水源地管理风险评价[J].水利经济,2022,40(6):62-67+73+104.
- [27] 柳叶,莫靖龙,张晓远.广州市从化区生态清洁小流域划分及建设模式研究[J].广东水利水电,2024(7):99-103+109.

责任编辑 刘磊宁