

遥感技术在湖泊水质污染识别与预警中的应用研究

李壮^{1,2}, 李国栋^{1,2}, 赵剑^{1,2}, 赵东来^{1,2}, 刘正宏^{1,2}, 籍哲羽^{1,2*}

1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150000

2. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150000

DOI:10.61369/WCEST.2025010002

摘要 : 本文概述了湖泊水质污染的常见类型及成因, 并探讨了传统湖泊水质监测手段的局限性。在此基础上, 详细介绍了遥感技术在湖泊水质监测中的应用原理、监测水质参数与变化趋势、污染源定位与追踪, 以及遥感技术在湖泊水质污染预警中的应用。在文章最后分析了遥感技术应用的优势与挑战, 并提出了相应的解决策略。通过案例展示, 验证了遥感技术在湖泊水质监测与预警中的有效性和可行性。

关键词 : 遥感技术; 湖泊水质污染; 识别与预警; 监测优势; 挑战与策略

Research on the Application of Remote Sensing Technology in the Identification and Early Warning of Lake Water Pollution

Li Zhuang^{1,2}, Li Guodong^{1,2}, Zhao Jian^{1,2}, Zhao Donglai^{1,2}, Liu Zhenghong^{1,2}, Ji Zheyu^{1,2*}

1. Harbin Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey Bureau, Harbin, Heilongjiang 150000

2. Harbin Black Soil Earth Critical Zone Field Scientific Observation and Research Station, Ministry of Natural Resources, Harbin, Heilongjiang 150000

Abstract : This article summarizes the common types and causes of lake water pollution and explores the limitations of traditional lake water quality monitoring methods. Based on this, it introduces the application principles of remote sensing technology in lake water quality monitoring, monitoring water quality parameters and trends, locating and tracking pollution sources, and the application of remote sensing technology in lake water pollution early warning. Finally, the article analyzes the advantages and challenges of applying remote sensing technology and proposes corresponding solutions. Through case studies, the effectiveness and feasibility of remote sensing technology in lake water quality monitoring and early warning are verified.

Keywords : remote sensing technology; lake water pollution; identification and early warning; monitoring advantages; challenges and strategies

引言

湖泊作为地球生态系统的重要组成部分, 其水质状况直接关系到生态平衡和人类健康。然而, 随着工业化和城市化进程的加快, 湖泊水质污染问题逐步加剧, 对生态环境和水资源安全构成了巨大威胁。传统的湖泊水质监测方法在全面性、实时性和成本效益方面存在局限, 难以满足现代湖泊保护的需求。遥感技术作为一种新兴的监测手段, 在湖泊水质污染识别与预警方面展现出了显著的优势。本文旨在探讨遥感技术在湖泊水质监测中的应用, 分析其优势与挑战, 并提出相应的解决策略, 以期为湖泊水质的科学管理和生态保护提供技术支持。

一、湖泊水质污染概述

(一) 常见湖泊水质污染类型及成因

地球上淡水资源占总水量百分比的 2.8%, 但可被人类利用的淡水总量只占地球上淡水总蓄量的 0.34%, 相当于地球总水量的

十万分之三, 而这些淡水资源大部分集中在湖泊河流之中。人们可直接使用的淡水资源少之又少, 尽管如此, 大部分水资源还存在严重污染现象, 威胁着人们正常生活^[1]。

而富营养化现象尤为显著, 源于水体中氮、磷等营养物质的过量积累, 这些通常来自未经处理或处理不当的生活污水、工业

通讯作者: 籍哲羽 627660530@qq.com。

排放以及农业活动中化肥和农药的过量使用。这些营养物质加速了藻类的异常繁殖，形成了有害的水华，破坏了水体的自然生态平衡。随之而来的是水质恶化、透明度下降和恶臭气味，严重时甚至引发生物的大量死亡，使湖泊失去自我净化能力，陷入无法自拔的恶性循环。

重金属污染亦是一个严重的挑战。采矿、工业排放等人类活动将重金属如汞、铬、铅、镉等引入湖泊，这些重金属不仅难以分解，还能在食物链中积累。最终，它们通过食物链进入人体，引发慢性中毒，对儿童和成人的健康构成严重威胁，可能导致肾脏损伤、神经系统疾病甚至癌症。

有机物污染同样不可小觑。生活污水、工业废水中的有机物，以及水体生物和底泥释放的有机质，都在不断加剧湖泊的污染。这些有机物在微生物分解过程中消耗大量溶解氧，导致湖水缺氧，威胁水生生物的生存，破坏湖泊的生态功能。湖泊水质污染不仅对生态系统造成毁灭性打击，导致生物多样性减少和生态功能退化，还影响周边环境，危害人类健康，限制社会可持续发展。

（二）传统湖泊水质监测手段及局限

长期以来，湖泊水质监测依赖于固定的监测站点和现场采样，结合实验室分析的技术。这些站点装备了先进的传感器，能够实时监测酸碱度、溶解氧、电导率等关键水质参数，并将数据传输至管理平台^[2]。此外，技术人员会采集水样进行化学和仪器分析，以测定化学需氧量、生化需氧量、重金属离子浓度及营养盐含量等指标。

尽管这种传统方法能够精确描绘特定位置的水质状况，但其局限性也日益显现。固定监测站点只能提供局部信息，而现场采样尽管覆盖多个点，但在广阔的湖泊环境中，所获得的数据仍然显得分散，难以全面代表整个湖泊的水质状况，容易忽视局部的污染问题或水质变化趋势。此外，传统监测方法在人力物力上的投入巨大，耗时耗力，且无法实现水质的实时监控，对于突发性污染事件的响应不够迅速。鉴于此，尽管传统监测手段仍具有一定的应用价值，但其局限性催生了新技术的探索。

二、遥感技术应用于湖泊水质检测的原理与基础

（一）遥感技术基础原理

遥感技术的基础原理是基于物体对电磁波的反射、吸收、辐射等特性差异来实现对目标物体的识别与信息获取。地球上的各类物体，包括湖泊水体及其所含的不同物质成分，在不同波段的电磁波作用下，会呈现出独特的响应特征，这就为遥感技术应用于湖泊水质监测提供了理论依据^[3]。

具体而言，遥感技术主要依靠传感器来获取地球表面信息。传感器安装在诸如卫星、飞机、无人机等平台上，它们能够接收地球表面反射、辐射或散射的电磁波，并将这些电磁波信号转换成数字信号，进而开展后续的处理分析工作。在湖泊水质监测领域，常用的卫星传感器有 Modis、Landsat、Sentinel 等。

MODIS 传感器，搭载在 Terra 和 Aqua 卫星上，通过宽波段覆盖捕捉湖泊反射率，有效监测水质，揭示透明度、浊度、悬浮颗粒物和叶绿素浓度。叶绿素在蓝光和红光波段的反射是评估水质的重要指标。Landsat 系列传感器（TM、ETM+、OLI）以其高分辨率和长期记录，提供精细湖泊数据，大气和几何校正提高

了溶解氧、叶绿素估算的准确性^[4]。Sentinel 系列传感器则通过高分辨率、广泛覆盖数据，揭示了悬浮物和有机污染物含量，对水质监测至关重要。

（二）水质参数与遥感数据关联

遥感技术在湖泊水质监测中的应用，核心是利用传感器捕捉的水体反射率来反演水质参数。例如，MODIS 传感器能够覆盖宽波段，获取湖泊的自然光反射率，进而分析出透明度、浊度、悬浮颗粒物和叶绿素浓度等。为确保数据准确，需进行辐射定标和大气校正等预处理。通过 Python 等编程语言和算法，可以计算出反射光谱率，并依据经验关系反演水质参数。研究者已建立光谱反射率与叶绿素、悬浮物等参数的关系，并在实践中验证了其监测水质的有效性。这一方法基于物质在特定波段的吸收和反射特性，随着技术进步和案例验证，已成为一种超越传统手段的广范围、动态监测工具。

三、遥感技术在湖泊水质污染识别中的应用

（一）监测水质参数与水质变化趋势

遥感技术实现对湖泊水质的深度监测与分析，有效判断和预防污染。叶绿素 a 的浓度通过可见光和近红外波段反射率的变化来反演，其浓度升高指示浮游植物的过度繁殖，预警富营养化风险。悬浮物含量通过光谱特征分析估算，识别水体是否受泥沙、有机物污染。有色可溶性有机物的吸收特征揭示了水体中的含量和分布，异常升高指示有机污染。虽难以直接监测溶解氧，但可通过相关光学特性和生物活动间接推断其状况，如藻类繁殖导致的夜间呼吸作用消耗溶解氧。卫星遥感技术的连续观测提供了水质时间尺度变化，支持水资源可持续管理，而无人机遥感技术则实时监测突发污染事件，为应急响应提供信息。遥感技术成为守护水资源安全与清洁的重要工具^[5]。

（二）污染源定位与追踪

遥感技术在湖泊污染监测领域扮演着关键角色，特别是在识别和管理点源与面源污染方面。利用高分辨率遥感影像，能够精确地确定湖泊周边的点源污染源，包括工业废水排放口和生活污水排放口。这些影像不仅展示了污染源的具体位置，还结合了监测到的水质参数分布，为分析污染物在湖泊中的扩散路径和影响范围提供了依据，进而为污染治理提供了明确的目标和高效的策略。

在面源污染监测方面，遥感技术同样展现出其强大能力。它能够监测流域内的土地利用类型、植被覆盖状况、土壤湿度等关键信息，助力分析污染物的来源及其迁移路径。例如，监测农田的施肥和灌溉状况，以及降雨后地表径流的流向，可以揭示农业面源污染物如何进入湖泊及其潜在影响区域^[6]。

四、遥感技术在湖泊水质污染预警中的应用

（一）预警指标与阈值设定

在湖泊水质污染预警系统中，遥感技术的应用依赖于预警指标与阈值的科学设定，这是确保预警及时性与准确性的核心。预警指标的选择，如叶绿素浓度、悬浮物浓度和水体透明度，是基于它们与湖泊生态环境的密切相关性。叶绿素浓度反映了藻类的生长状况，悬浮物浓度揭示了水体物理状态的改变，而水体透明

度则直观体现了水质的综合状况。设定预警阈值时，需综合考虑湖泊的功能和生态环境特点^[7]。对于饮用水源地的湖泊，预警阈值应严格遵循国家水质标准；而对于渔业养殖湖泊，则需满足水生生物的生长需求。同时，不同地区的湖泊因其生态承载能力和水质背景值的差异，预警阈值也应相应调整。

（二）动态监测与预警机制

通过对比分析多期遥感数据，可以有效追踪湖泊水质变化趋势，并构建动态监测与预警系统。定期搜集的遥感影像携带着湖泊不同时期的光谱特征和关键水质参数信息。比较不同季节或时间间隔的数据，可揭示叶绿素浓度、悬浮物浓度、水体透明度等参数的时序变化。参数接近预警阈值时，系统自动启动预警。预警阈值的设定考虑湖泊功能和区域生态环境，如饮用水源地依据国家标准设定COD、重金属含量阈值，而渔业养殖湖泊关注溶解氧含量、pH值等指标。遥感监测数据揭示潜在威胁时，系统即时向管理部门发出警示，支持及时响应。

管理部门接警后，可迅速采取措施，如针对富营养化进行污染源排查和生态修复，对重金属污染加强工业监管和水体净化，对有机物污染提升污水处理。基于遥感技术的监测与预警机制，提升了湖泊水质污染防控能力，最大程度减轻污染影响，保障了湖泊生态系统的健康和水资源的可持续利用^[8]。

（三）案例展示——辽宁东部某湖泊水源地水质污染预警

在辽宁东部一个关键湖泊水源地中，遥感技术有效应用于水质污染监测与预警。鉴于湖泊水质对生态与人类健康的重要性，以及传统监测的局限性，遥感技术提升了监测的效率和精确度，为水生态保护提供了科学依据。研究利用HJ1A/1B和Landsat8OLI数据，经过严格的数据处理，构建了水质监测与预警模型。通过Pearson分析，筛选出与水质指标高度相关的波段，建立了回归方程，并验证了模型的准确性。研究揭示了水质指标的空间分布，并建立了动态预警系统^[9]。

结果显示，研究确定了适用于水质反演的波段范围，实现了全面应急监测，并制定了灵活的预警方案，有效支持了水质保护决策。尽管存在监测重金属、水温等指标的局限性，未来工作将致力于模型优化和遥感技术应用的拓展，以提供更全面的水资源保护决策支持。

五、遥感技术应用的优势与挑战

（一）遥感技术应用优势

遥感技术在湖泊水质污染识别与预警方面，相较于传统监测

手段，展现了其独特的优势。它能够实现对广袤湖泊的大范围监测，覆盖传统方法难以到达的偏远或复杂地形区域，同步获取整个水域的宏观状况，确保了水质监测的全面性。与此同时，遥感技术的快速实时特性，使得它能够及时捕捉到水质异常变化，为突发污染事件的快速响应提供了可能。此外，相较于昂贵的实地采样和实验室分析，遥感技术的成本相对较低，减轻了监测工作的资源负担。最重要的是，遥感技术能够进行长期动态监测，通过多期遥感数据的对比分析，有效追踪湖泊水质的变化趋势，建立起动态监测与预警机制。这些优势恰好弥补了传统监测的不足，为湖泊水质的科学管理和生态保护提供了强有力的技术支持。

（二）面临的挑战与解决策略

遥感技术在湖泊水质污染监测与预警领域虽有优势，但实际应用面临挑战，亟需提高其性能和精度。恶劣天气，尤其是多云多雨地区，影响遥感影像质量，从而降低监测准确性。湖泊生态系统的复杂性和污染物间的相互作用，使得遥感技术在识别微量或混合污染物时遇到难题，不同传感器数据的一致性也是挑战，限制了数据融合的应用。

为应对这些挑战，数据校准和补充观测是关键。大气校正和地面气象数据有助于减少天气影响，而多平台、多时段观测，如无人机辅助，可提高数据的质量。通过优化反演算法和深度学习技术，可以增强对复杂水质情况的处理能力。确保传感器数据一致性的关键在于多源数据融合和建立统一标准。

六、结束语

遥感技术在湖泊水质监测方面具有显著优势，能够实现广域实时监测，成本效益高，便于长期跟踪。它克服了传统监测方法的局限，全面捕捉水质变化，有效构建预警体系。尽管存在天气影响、水质反演难题和数据一致性挑战，但通过数据校准、补充观测、算法优化和数据融合等措施，如大气校正和无人机辅助，结合深度学习，提升了监测精度和数据处理能力，确保了数据的准确整合。

参考文献

- [1] 冯小涛. 基于激光诱导荧光的湖泊水质污染检测研究 [D]. 淮阴工学院, 2023. DOI: 10.27944/d.cnki.ghygy.2023.000105.
- [2] 多举措推动湖泊治理 [N]. 人民日报, 2022-07-27(017). DOI: 10.28655/n.cnki.nrmrb.2022.008060.
- [3] 杨智玲, 程玮. 基于无人机遥感技术的渔业养殖池塘水质监测方法 [J]. 太原师范学院学报 (自然科学版), 2023, 22(02): 35-40.
- [4] 周源. 基于低空遥感技术的河道水质监测方法 [J]. 经纬天地, 2022, (02): 23-25.
- [5] 何雄. 基于无人机多光谱遥感图像信息的水质污染监测研究 [J]. 河南水利与南水北调, 2021, 50(12): 58-60.
- [6] 曹淑韵, 赵起超, 曲彦达, 等. 深度学习在水利遥感领域的应用 [J]. 科技风, 2023, (15): 88-90+145. DOI: 10.19392/j.cnki.1671-7341.202315030.
- [7] 唐立羽. 无人机高光谱技术在中小河道劣V类水体识别中的应用研究 [D]. 中国矿业大学, 2021. DOI: 10.27623/d.cnki.gzkyu.2021.001822.
- [8] 金涛. 智能水质检测及预警方法研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2023. DOI: 10.27060/d.cnki.gbcu.2023.002902.
- [9] 巴诺. 环境卫星遥感反演在水源地水质应急监测预警中的精度探讨及修正方法研究 [J]. 水利规划与设计, 2020, (03): 111-116.
- [10] 张盛楠, 连帅, 肖丁源, 等. 供水水质监测预警技术研究现状 [J]. 供水技术, 2022, 16(06): 27-33.