

遥感技术反演湖泊水质研究综述

陈洁¹, 晏富恒², 熊巧利^{2*}, 贾国山¹

¹黔西南州生态环境区域监测站, 贵州 兴义

²黔西南州生态环境局兴义分局, 贵州 兴义

收稿日期: 2025年3月9日; 录用日期: 2025年4月1日; 发布日期: 2025年4月9日

摘要

遥感技术具有大面积同步观测、高效率、低成本、周期性、数据综合性强等明显优势。研究湖泊水质关乎水域生态平衡、生物多样性保护、实现区域可持续发展、有效实施水资源管理和环境保护。目前, 遥感技术反演湖泊水质监测研究是当前热点之一, 遥感技术可在水资源、水环境、水生态、水灾害防御等业务中提供大范围且空间连续的观测数据, 与无人机、地面站点信息相结合可形成天地一体化、点面结合的水安全要素立体监测网络。遥感技术已应用在防洪抗旱、河湖管理、水土保持、水行政执法、水资源管理、水源地管理等诸多水利业务中, 发挥着越来越重要的技术支撑作用。本文主要阐述了水质反演方法、国内外遥感水质监测技术研究进展, 讨论了目前遥感水质监测中存在的问题及对反演过程进行了展望。

关键词

水质监测, 遥感反演, 环境管理

Research on Retrieving Lake Water Quality by Remote Sensing Technology

Jie Chen¹, Fuheng Yan², Qiaoli Xiong^{2*}, Guoshan Jia¹

¹Qianxinan Ecological Environment Regional Monitoring Station, Xingyi Guizhou

²Xingyi Branch of Qianxinan Prefecture Ecological Environment Bureau, Xingyi Guizhou

Received: Mar. 9th, 2025; accepted: Apr. 1st, 2025; published: Apr. 9th, 2025

Abstract

Remote sensing technology has obvious advantages such as large area synchronous observation, high efficiency, low cost, periodicity and strong data synthesis. The study of lake water quality is

*通讯作者。

related to water ecological balance, biodiversity conservation, regional sustainable development, effective implementation of water resources management and environmental protection. At present, remote sensing technology inversion of lake water quality monitoring research is one of the current hot spots. Remote sensing technology can provide a large range and spatial continuous observation data in water resources, water environment, water ecology, water disaster prevention and other services. Combined with UAV and ground station information, it can form a three-dimensional monitoring network of water security elements that integrates space and earth and point and surface. Remote sensing technology has been applied in flood control and drought relief, river and lake management, soil and water conservation, water administration law enforcement, water resources management, water source management and many other water conservancy operations, playing an increasingly important technical support role. In this paper, water quality inversion methods and remote sensing water quality monitoring technology at home and abroad are described, the existing problems in remote sensing water quality monitoring are discussed, and the inversion process is prospected.

Keywords

Water Quality Monitoring, Remote Sensing Inversion, Environmental Management

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

湖泊在地球水循环、全球生态系统物质循环、减轻洪涝灾害和提供丰富水产品等方面中扮演着重要角色。几十年来，气候变化和人类活动与湖泊水质变化相互影响着。湖泊水质不佳的问题严重制约着生态环境高质量发展和乡村振兴，也给人们的身体健康带来了威胁。为确保湖泊的可持续发展，需加强对湖泊水质的适时监测和有效治理。样点布设、现场采样、实验室分析及数据整理分析的传统监测方法不仅工序多，分析样品有限；适时的大范围水域水质的空间分布和变化趋势成为发展难点，快捷、精确、动态的湖泊水质监测已经显得尤为必要。

任一物体均具有固有光学的特性，遥感技术则是通过对物体进行表观测定和标记，进而得到特殊的标定信息。遥感反演湖泊水质基本原理同上，水体中的成分(如：泥沙含量、透明度、藻类数量等)会对光产生吸收和散射作用，而在不同波段表现各异；通过被测水体回传的太阳辐射被遥感器接收呈现的光谱特征，采用建立光谱特征与水质参数之间的定量关系模型，从而获得水体的水质参数或者水体污染状况[1]。随着卫星光学遥感的发展，遥感反演湖泊水质是监测全球和区域尺度湖泊水质的有效手段[2]。湖泊水质反演早期研究的关注点是基于波段阈值(物理方法)提取水体，之后随着机器学习技术发展，决策树、支持向量机、随机森林(经验方法)等方法用于提取和预测水体信息。随着经验模型和分析模型(半经验方法)及传感器技术和成像技术、遥感数据来源多元化等逐渐发展，可以实时获得湖泊水体时空信息从而快速评估水质质量。基于遥感技术的湖泊水质反演研究在水环境保护、生态恢复和水资源管理等方面具有重要应用价值。本文从水质反演方法和水质监测技术国内外研究进展方面进行阐述，并提出目前遥感技术反演湖泊水质过程中的瓶颈及在后续研究中可重点关注的重难点，以期为湖泊水体水质精准、动态监测评价提供参考。

2. 水质反演方法

20世纪70年代，遥感反演水质逐渐从定性分析发展到定量分析，逐步从物理方法过渡到经验、半经

验方法。本文通过收集、总结国内外学者研究水质参数反演方法，深入剖析各方法优缺点及适用场景。

2.1. 物理方法

遥感反演湖泊水质物理方法是以生物-光学模型为基础。常用的物理方法有遥感法、现场光谱测量法。遥感法通过模拟太阳辐射穿越水体的过程中受水质参数的吸收、反射和散射影响，进而判断被测水体水质状况。如：陈宇洁等人[3]对高邮湖进行地面光谱和水样实测，用实测数值模拟出可利用哨兵-2 MSI 数据来研究叶绿素 a、总悬浮物水质参数指标浓度且模拟反演精度高。现场光谱测量法利用便携式光谱仪在现场测量水体光谱。在不同位置、深度测量水体的反射光谱曲线。例如水中藻类物质会在特定波长有吸收峰，据此反推藻类含量。沈英等人[4]通过对福建地区的甲藻、硅藻和针胞藻进行现场光谱测量，得到大量高光谱样本库，建立了高光谱反演藻种及浓度的方法。物理方法不仅具有严格的物理意义的特点，同时还具有反演精度高和有效性的优点。该方法的不足之处不仅需提前借助实验或野外观测得到水体中悬浮物、叶绿素及特征污染物等水质参数的散射系数、吸收系数等有关参数，而且所测参数随被测对象不同而不同。

2.2. 经验方法

多光谱遥感数据的出现，经验方法也适时而发展。该方法理论依据是根据遥感波段(多波段)与水体中待测指标的含量进行相关性分析，然后在众多波段中选取相关系数最高的单波段或多个波段组合用于数学统计分析，间接获得待测水质参数浓度的估测。常见经验方法有相关分析法、统计回归法、指数法、机器学习算法，在应用过程中常常多种方法相互使用。相关分析法通过分析遥感数据与实测水质参数之间的相关性，建立简单的线性或非线性关系模型。如吕娜等人[5]利用 Landsat 数据用相关性最好的波段建立模型，对博斯腾湖的叶绿素 a 浓度进行反演。统计回归法通过大量的水质取样实测数据，并用遥感影像中的光谱数据进行统计分析，建立统计回归模型来估算水质参数。陈方方等人[6]对干湖实地采样了 87 个样本并对悬浮物、浊度、透明度及叶绿素 a 指标进行实验室分析，然后采用 Sentinel-3OLCI 数据使用统计回归法反演查干湖水质，用实验室分析数据作为对比遴选模型精度。指数法通过构建特定的遥感指数来反演水体水质状况。何云玲等人[7]利用 MODIS 数据反演滇池水体富营养化。机器学习算法利用机器学习算法如支持向量机、随机森林、神经网络等，通过训练数据集建立水质参数反演模型，属于基于数据驱动的经验方法。胡璇伊[8]使用 Sentinel-2 遥感影像数据采用随机森林方法反演模型对斧头湖总氮进行研究。该方法的优点在于简单、易懂，常用于应急监测，但缺点是需不断验证才能达到预期精度，因其参数受研究对象自身及水文特点且参数不具有可移植性；同时，水质参数在一定范围内才有较好反演结果，超过阈值反演结果精确度会降低。

2.3. 半经验方法

半经验法是目前较为常用的方法，通过提前获取研究水体水质参数的光谱特征与数学统计分析模型(主成分分析、比值法、神经网络法)结合，从而较精确的反演大面积湖泊水质状况。主成分分析法：湖泊水体的光谱数据往往具有高维性，多个波段的反射率数据存在一定的相关性，通过提取主成分，然后分析主成分与水质参数之间的关系，建立反演模型。如：赵晏慧等人[9]利用 Canoco5.0 软件运用主成分分析法总氮、总磷、透明度、高锰酸盐指数和叶绿素 a 湖泊监测指标进行分析研究。比值法通过计算遥感影像中不同波段反射率的比值，突出水质参数对光谱反射率的影响；同时，比值法可以部分地消除水面光滑度和微波随时间和空间的变化的干扰[10]。黄启会[11]通过选取近红外 697 处的荧光峰值(R697)与红外 570 处的反射率值(R570)作比值，对百花湖水体的叶绿素浓度进行研究。神经网络法具有强大的非

线性映射能力和自动学习及适应能力，能够处理复杂的光谱与水质参数之间的关系。通过大量的实测数据对神经网络进行训练，使其学习到遥感数据与水质参数之间的内在规律，从而实现对水质参数的反演。彭翰[12]通过研究改进BP人工神经网络算法模型对水体中重金属指标进行反演，并用某河流1998年至2016年水质监测数据进行校核验证模型模拟精度预测。半经验法充分利用了水质参数的光谱特征，其反演精度远高于经验方法，由于其操作简单，目前仍是遥感水质监测的主要方法[13]。但模型的通用性不高，主要源于不同水体类型、水体深度不一、不同地区、甚至不同季节所对应的最优数学统计模型不一致。

遥感反演湖泊水质方法多样，各有优劣。具体内容见表1。

Table 1. Comparison of remote sensing retrieval methods for monitoring and analyzing lake water quality
表 1. 遥感反演湖泊水质监测分析方法比较

方法名称	优点	局限性	适用场景
物理方法	遥感法、现场光谱测量法	具有严格的物理意义，有助于理解水质参数与光谱信息之间的内在关系；可同时反演多个水质参数；模型一旦建立，便对大量现场实测数据的依赖性小。	光在水体中的散射、吸收过程极为复杂，造成构建模型复杂。参数测量难度大：测量吸收系数、散射系数等参数需在严格的实验条件下进行、需专业设备和测量过程复杂及测量成本高。模型假设与实际情况差异大，构建模型时往往要求水体水质均匀、光学特性稳定、无大气中水汽、气溶胶的影响。
经验法	相关分析法、统计回归法、指数法、机器学习算法	简单易操作，易于掌握和应用；可根据特定湖泊的实际情况，结合当地的实测数据可构建专属经验模型，反演精度高。	因经验法构建的模型均建立在特定区域、特定时段模型，故模型通用性差。易受地面实测数据质量影响，若实测数据误差大、数据量少，模型反演精度不高。由于各参数之间可能存在相互影响、相互关联的复杂情况，经验法很难构建出准确有效的多元统计关系导致反演多个水质参数的精度往往不如单参数反演时的精度高。
半经验法	主成分分析、比值法、神经网络法	结合了物理和经验法，更加合理和更高准确性；模型通用性较高；更有效地同时反演多个水质参数。	对实测数据依赖性较大，若实测数据有偏差或数据量不足，反演结果不够可靠；模型通用性较经验法稍好些，但仍不能适用于所有类型的湖泊水体，尤其是极端气候条件下光学特性与常规情况差异较大或水体中有特殊水质成分，半经验模型仍不能较好模型反演水质状况。

3. 水质反演遥感数据

现常用的水质监测光谱遥感数据有Landsat-MSS/TM/ETM+/OLI/TIRS、Sentinel-2 MSI、MODIS、GF1-WFV、SPOT-HRV、环境1号、HRV数据、EO-1卫星数据，反演水体水质指标有悬浮物、叶绿素a、透明度、BOD、COD、总氮、总磷、氨氮、溶解氧、氟化物、pH、有色可溶性有机物[14]，遥感数据反演指标愈发丰富。

3.1. 多光谱数据

多光谱遥感数据具有访问周期短、数据量丰富的特点。20世纪70年代初，主要采用多光谱数据对单一水质指标进行估测。李旭文等人[15]采用TM数据对苏州运河水质进行综合分析。陈蕾等人[16]基于TM

图像提取富营养化水体、严重污染水体。也有学者利用 SPOT 卫星数据对河川水质监测[17]。吕学研等人[18]使用多光谱遥感监测手段研究河道沿线潜在污染源调查分析。Yu 等人[19]采用 GF-2 卫星数据对杭州城市黑臭水体进行遥感识别。多光谱遥感技术所提供的信息有限，常因光谱波段数量不足，往往出现“同物异谱”、“异物同谱”的现象。

3.2. 高光谱数据

高光谱遥感数据具有波段丰富、光谱范围窄且连续的光谱通道对地物进行持续成像的特点[20]。在获取地物图像时，能达到“图谱合一”。我国对高光谱成像仪的研究始于 80 年代，将高光谱数据应用于水质反演成为近些年研究热点。疏小舟等[21]采用 GER1500 型便携式地物光谱仪，发现内陆水体在 700 nm 附近反射峰的位置与叶绿素 a 有很好的相关性。郭邵萌[22]采用野外便携式光谱仪实现水体光谱数据与东昌湖水体中叶绿素 a、总氮、总磷、浊度水质参数的同步测量。高光谱遥感数据相较于多光谱数据更能精细地识别地物信息，但也具有数据量大、处理难度大、需要专业软件进行处理等缺点。

3.3. 新型遥感数据

目前，我国的遥感卫星已经正式进入了亚米级的时代，能有效提高水体水质遥感反演的能力和水平。新型遥感基于无人机技术发展，以无人机为飞行平台获取遥感影像，以各种成像与非成像传感器为荷载，同时利用摄影测量、视频记录等功能，宏观视角掌握被测对象动态监测情况。宋挺等人[23]采用 HJ1A/B 与 MODIS 多源遥感数据用于太湖藻类水华的研究，不仅分析出蓝藻富集的原因并且提取统计了沉水植物区域与面积；郑翔宇等人[24]采用 Landsat8、Landsat7、GF-1 及 HJ-1A 多源遥感数据对黄海绿潮的遥感监测；陈彤彤等人[25]采用 MODIS、Landast8 多源遥感数据和深度学习算法对海上溢油实现实时监测。何云玲等人[7]利用 MODIS 数据反演滇池水体富营养化。

遥感反演湖泊水质数据来源较多，各有优劣。具体内容见表 2。

Table 2. Index table of water quality analysis from different remote sensing data
表 2. 不同遥感数据反演湖泊水质分析对标表

遥感数据类别	优点	局限性	适用场景
多光谱数据	多光谱传感器较常见，数据易获取；波段较丰富，能反映水体在不同光谱范围的特征。	光谱分辨率有限，难以区分光谱特征相似的物质。	大范围常规监测；对反演精度要求不高的项目研究。
高光谱数据	光谱分辨率较高，拥有成百个波段，反演信息丰富。可通过不断分析数据，拓展反演水质参数种类和提高精度。	数据量较大；传感器成本较高。	高精度研究；复杂水体环境监测。
新型遥感数据	更精细的光谱信息，可更深入解析水质信息。	处理数据技术难度大，成本高。	前沿科学研究，特殊水质成分或极端气候条件下湖泊水体研究。

4. 结论与讨论

能准确、快捷判别水质状况是水质评价与水污染防治的亟需解决的难题。而遥感技术的应用，能快速、长期、动态、区域反演水体水质，甚至能快速得到污染物排放源、迁移扩散方向以及影响范围等信息。在水体水质监测中具有巨大的应用潜力，但也存在诸多问题有待更进一步研究，如空间分辨率与光谱分辨率难以协调、生物 - 光学模型难以构建、遥感数据受大气影响难以消除等问题。

大气校正模型无法实时匹配遥感数据。对遥感影像进行定量反演前，均需要对影像进行大气校正。

大气校正的前提是准确的辐射定标，标准大气剖面数据是一种平均状态数据，并且不同地区的大气剖面状态不同；遥感数据为实时动态更新数据。仍然需要尝试更多的方法提高大气校正的精度和稳定性[26]。

湖泊底质对遥感的影响难以消除。水体的光谱特性主要通过水体中的体散射而非表面反射，反演时需剥离湖泊底质影响，常通过测量不同物质组成的底质、不同湖底类型(沙质水底、植被覆盖型水底)、不同底质形态的反射率，以校正水体的离水辐射。湖底底质影响程度各异，在后续的研究中可增加采样点数量、采样期数提高模型反演精度。

水体特征性污染难以寻找原因。对于水质遥感监测来说，水体特殊参数(如水体重金属污染)无法通过远程遥感确定；季节性、区域性的差异，同一水质指标的反演模型参数也很难统一[27]，“同物异谱”、“异物同谱”的情况仍存在，尚不能精确确定各组分对辐射值的单独贡献。水体污染原因多样化，但目前通过遥感手段研究掌握的水质指标偏少，部分水质指标研究处于空白，如：挥发酚、硫化物、氰化物等。下一步可增加水质参数中的非光敏参数的探索，建立水质参数的光谱特征数据库。

水质反演参数研究难以匹配某一研究对象。虽然现在已经建立起较高精度的水质参数反演模型，但模型仍具有典型的局部性、地方性和季节性，可移植性差的特点，同时仅适用于粗略的水质评价，仍不能替代精确的现场水质检测；其次研究对象的不同及其所处自然地理环境也有差异。不管利用何种卫星数据对水质指标反演时，都需要经过长时间多次迭代反演，从而找到适合当地的反演模型。

遥感数据还有深入挖掘的空间。遥感影像蕴含丰富的地物特征信息，但目前常用、探索出可用的光谱信息仍有进一步挖掘的空间。随着电脑算力、大数据的发展，可通过样本训练，优化深度学习方法指导机器学习，提高遥感反演水质精准度。

多源数据融合使用。将高光谱图像和多光谱图像进行融合，可以获得具有高空间分辨率和高光谱分辨率的光谱图像，提升光谱图像的质量。微波遥感具有不受天气影响的优势，也可应用先进的计算机视觉技术改善水体识别精度。多种遥感源数据融合使用可提高水体识别的准确性的同时还可实现不同时空尺度下的水质参数反演。

模型简易化发展。利用遥感技术实时监测水质状况是环境保护部门高效掌握和监管水生态环境的重要手段。但往往坚守在一线的工作人员具有学历低、任务繁重的特点。需简易、快速的方式进行监测与分析方式方法。模型优化与业务化产品生产、完善星地协同业务监测模式，为行业应用单位提供更丰富、更准确的产品服务。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 赵方睿, 王强, 穆春生, 等. 基于遥感的 1984-2019 年查干湖及周边湖泊透明度变化[J]. 湖泊科学, 2025, 37(1): 328-338.
- [3] 陈宇洁, 陈志芳, 邹丽, 等. 基于哨兵-2MSI 数据的高邮湖水体叶绿素 a 浓度和总悬浮物浓度遥感反演[J]. 环境监控与预警, 2024, 16(6): 21-28.
- [4] 沈英, 吴盼, 黄峰, 等. 基于高光谱成像技术的赤潮藻种鉴别和浓度测量方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(11): 3629-3636.
- [5] 吕娜, 郭梦京, 赵馨, 等. 内陆淡水湖博斯腾湖水质遥感反演及时空演变特征[J]. 干旱区地理, 2024, 47(6): 953-966.
- [6] 陈方方, 王强, 宋开山, 等. 基于 Sentinel-3OLCI 的查干湖水质参数定量反演[J]. 中国环境科学, 2023, 43(5): 2450-2459.
- [7] 何云玲, 熊巧利, 罗贤, 等. 基于 NDVI 演变特征的时空变化研究[J]. 生态环境学报, 2019, 28(3): 555-563.
- [8] 赵晏慧, 李韬, 黄波, 等. 2016-2020 年长江中游典型湖泊水质和富营养化演变特征及其驱动因素[J]. 湖泊科学, 2022, 34(5): 1441-1451.

-
- [9] 周正, 何连, 刘良明. 基于 HJ-1A/B CCD 数据的东湖叶绿素 a 浓度反演可行性研究[J]. 测绘通报, 2011(3): 11-14.
 - [10] 黄启会. 基于遥感技术的湖泊水质叶绿素 a 浓度监测及富营养化评价研究[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州师范大学, 2019.
 - [11] 孙咏曦, 陈燕飞, 周元, 等. 洪湖水质富营养化评价方法比较[J]. 水电能源科学, 2023, 41(9): 36-39.
 - [12] 彭翰. 改进的 BP 人工神经网络算法模型在水体重金属预测中的应用[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2020.
 - [13] Dörnhöfer, K. and Oppelt, N. (2016) Remote Sensing for Lake Research and Monitoring—Recent Advances. *Ecological Indicators*, **64**, 105-122. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.12.009>
 - [14] 王波, 黄津辉, 郭宏伟, 许旺, 曾清怀, 麦有全, 祝晓瞳, 田上. 基于遥感的内陆水体水质监测研究进展[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 117-124.
 - [15] 李旭文, 季耿善. 苏州运河水质的 TM 分析[J]. 遥感学报, 1993, 8(1): 36-44.
 - [16] 陈蕾, 邓孺孺, 陈启东, 等. 基于水质类型的 TM 图像水体信息提取[J]. 国土资源遥感, 2012(1): 90-94.
 - [17] 施明伦, 游保彬, 万腾州, 等. 大气校正对 SPOT 卫星遥测水质的影响[J]. 遥感学报, 2006(4): 548-558.
 - [18] 吕学研, 张甦, 张咏, 等. 无人机多光谱遥感在社渎港污染溯源中的应用[J]. 水资源与水工程学学报, 2021, 32(3): 18-23.
 - [19] Yu, Z., Huang, Q., Peng, X., Liu, H., Ai, Q., Zhou, B., et al. (2022) Comparative Study on Recognition Models of Black-Odorous Water in Hangzhou Based on GF-2 Satellite Data. *Sensors*, **22**, Article 4593. <https://doi.org/10.3390/s22124593>
 - [20] 侯毅凯, 张安兵, 吕如兰, 等. 基于多源数据的河道水质遥感反演研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(11): 121-130.
 - [21] 疏小舟, 尹球, 匡定波. 内陆水体藻类叶绿素浓度与反射光谱特征的关系[J]. 遥感学报, 2000(1): 41-45.
 - [22] 郭邵萌. 基于高光谱遥感的湖泊水质污染研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东师范大学, 2013.
 - [23] 宋挺, 严飞, 黄君, 等. 基于环境小卫星多光谱数据的太湖叶绿素 a 浓度的反演[C]//中国环境科学学会, 四川大学. 2014 中国环境科学学会学术年会论文集. 无锡市环境监测中心站, 2014: 1-5.
 - [24] 郑翔宇. 基于多源数据的黄海绿潮遥感监测研究[D]: [硕士学位论文]. 烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所, 2017.
 - [25] 陈彤彤, 许凤至, 李建伟. 基于多源遥感影像的海上溢油监测处理系统[J]. 船海工程, 2020, 49(2): 49-51+54.
 - [26] 张福存, 李净, 吴立宗, 等. 基于 MODIS 数据的黑河流域地表温度反演研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(6): 42-51.
 - [27] 张宏建, 周健, 皇甫款. 基于 OLI 数据的信阳市境内淮河流域水质遥感反演[J]. 人民长江, 2021, 52(12): 47-53.