

基于遥感数据的湖泊水质时空变化特征分析

李壮^{1,2}, 籍哲宇^{1,2}, 赵剑^{1,2}, 赵东来^{1,2}, 刘正宏^{1,2}, 李国栋^{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/EAE.2025010001

摘要 : 本研究利用遥感数据对湖泊水质的时空变化特征进行深入剖析。阐述了遥感技术在湖泊水质监测中的原理与优势, 详细介绍了数据获取与处理流程, 包括多源遥感数据的选择、预处理以及水质参数反演模型的构建。通过对不同时间尺度 (季节、年际) 和空间尺度 (全湖、不同湖区) 的分析, 揭示了湖泊水质参数如叶绿素 a、总磷、总氮等的时空变化规律及其相互关系, 并探讨了影响湖泊水质时空变化的主要因素, 如流域人类活动、气候条件等, 为湖泊水资源管理与生态环境保护提供了科学依据与数据支持。

关键词 : 遥感数据; 湖泊水质; 时空变化特征; 水质参数反演

Analysis of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Lake Water Quality Based on Remote Sensing Data

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

1. Harbin Natural Resources Comprehensive Survey Center of China Geological

Survey, Harbin, Heilongjiang 150000

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

Abstract : This study conducted an in-depth analysis of the temporal and spatial variation characteristics of lake water quality using remote sensing data. It elaborated on the principles and advantages of remote sensing technology in lake water quality monitoring, and provided a detailed introduction to the data acquisition and processing flow, including the selection of multi-source remote sensing data, preprocessing, and the construction of water quality parameter inversion models. Through analysis at different temporal scales (seasonal, interannual) and spatial scales (entire lake, different lake areas), the study revealed the temporal and spatial variation patterns of lake water quality parameters such as chlorophyll-a, total phosphorus, and total nitrogen, as well as their interrelationships. Additionally, it explored the main factors influencing the temporal and spatial variation of lake water quality, such as human activities in the watershed and climatic conditions, providing a scientific basis and data support for lake water resource management and ecological environmental protection.

Keywords : remote sensing data; lake water quality; temporal and spatial variation characteristics; water quality parameter inversion

引言

湖泊作为陆地水圈的重要组成部分, 在水资源存储、生态平衡维持、气候调节以及生物多样性保护等方面发挥着不可替代的作用。随着全球经济的快速发展和人口的持续增长, 湖泊面临着不断加剧的污染压力, 水质恶化问题已成为制约湖泊可持续利用的关键因素。传统的湖泊水质监测方法主要依赖于定点采样和实验室分析, 这种方法虽然精度较高, 但存在监测点稀疏、时空代表性有限、成本高昂且难以实现大面积同步监测等缺陷。

遥感技术的出现为湖泊水质监测提供了一种全新的、高效的手段。它能够在较大的时空尺度上快速获取湖泊的水质信息, 具有宏观、动态、实时、低成本等诸多优势。通过对遥感数据的分析, 可以有效地揭示湖泊水质的时空变化特征, 为湖泊水质管理和生态环境保护提供有力的技术支撑。因此, 基于遥感数据开展湖泊水质时空变化特征的研究具有极为重要的科学意义和现实价值。

一、遥感技术监测湖泊水质的原理与方法

在湖泊水质监测领域，遥感技术已成为重要手段。其核心在于依据不同水质参数与电磁波的独特交互特性开展监测工作。本章节将详细阐述相关原理、数据获取与处理方式。

（一）原理

不同的水质参数对不同波段的电磁波具有独特的吸收、反射和散射特性。例如，叶绿素 a 在蓝光和红光波段具有明显的吸收峰，在绿光波段则有较高的反射率；悬浮颗粒物对可见光的散射作用较强，使得水体在可见光波段的反射率增加；而溶解性有机物则主要影响水体在紫外和蓝光波段的光谱特性。基于这些光谱特性差异，利用遥感传感器获取水体在不同波段的反射率或辐射值，通过建立特定的数学模型，就可以反演得到相应的水质参数浓度。

利用遥感技术对陆地水体的研究从单纯的水域识别发展到对水质参数进行遥感监测始于上个世纪 70 年代，中国利用遥感技术开展水体污染研究则始于上世纪 80 年代初期，是在天津市环境遥感试验研究中，采用光谱辐射计和地物光谱仪等传感器对不同类型水体进行光谱反射率的测试，建立了不同水体的光谱反射曲线，并据此定性检测了水体的污染程度和污染类型^[1]。

（二）数据获取

本研究采用多源遥感数据，包括 Landsat 系列卫星数据、Sentinel-2 卫星数据等。这些卫星数据具有不同的空间分辨率、时间分辨率和光谱分辨率，能够满足对湖泊水质监测在不同尺度和精度上的需求。例如，Landsat 系列卫星数据具有较长的时间序列，可用于分析湖泊水质的长期变化趋势；Sentinel-2 卫星数据则具有较高的光谱分辨率，有利于更精确地识别水质参数的光谱特征^[2]。

（三）数据处理

在遥感数据处理过程中，预处理环节至关重要。首先是辐射定标，其作用在于把遥感图像原本的原始数字化值精准地转换为具备明确物理意义的辐射亮度值或者反射率值，以此有效消除传感器自身所产生的误差给数据带来的不良影响。接着进行大气校正，目的是剔除大气分子以及气溶胶等对电磁波造成的散射与吸收干扰，从而还原出水体最为真实的光谱信息，在大气校正方面，常用的方法包括基于辐射传输模型的 6S 模型、MODTRAN 模型，还有基于图像自身信息的暗目标法、直方图匹配法等。最后开展几何校正，该步骤主要是对因地形起伏、卫星姿态改变等因素引发的遥感图像几何变形予以纠正，使图像能够与实际的地理坐标精准匹配，为后续的空间分析工作顺利开展创造便利条件。

水质参数反演模型构建主要包含经验模型、半经验模型以及物理模型。经验模型着重于开展大量野外实测水质数据与对应遥感光谱数据的统计分析工作，从而确立二者间的经验关系式，以叶绿素 a 浓度反演为例，常见的有线性回归模型以及二次多项式、指数模型等非线性回归模型，其优势在于构建过程简易直观，然而其模型普适性欠佳，在不同湖泊与区域应用时往往需

重新构建^[3]。半经验模型是在经验模型的根基上融入一定物理机制，充分考量水质参数对光谱的吸收与散射过程，例如依据水体光谱吸收系数和后向散射系数构建的模型，此类模型在一定程度上对模型的物理意义予以强化，并且普适性也有所提升。物理模型则是依据辐射传输理论，全方位地考量水体里纯水、叶绿素 a、悬浮颗粒物、溶解性有机物等各种成分对电磁波的吸收、散射以及发射等过程，进而构建起复杂的数学模型来实现水质参数的反演，该模型具备较强的物理基础，普适性良好，只是其模型参数繁多，计算流程复杂，并且对数据的要求较为严苛。

在本研究中，根据研究湖泊的特点和数据的可获取性，选择合适的反演模型进行水质参数的反演。

二、湖泊水质时空变化特征分析

湖泊水质的时空变化特征反映其生态演变历程。深入探究这些变化特征，有助于精准把握湖泊水质动态，剖析其内在驱动因素，为湖泊的科学管理与生态修复提供关键依据与有效策略。

（一）时间变化特征

在季节变化方面，叶绿素 a 浓度呈现出明显的季节性波动规律。春季与秋季，气温逐渐回暖，光照条件逐步优化，为湖泊中浮游植物的生长繁殖创造了有利环境，使得叶绿素 a 浓度缓缓上升^[4]。进入夏季，水温持续升高，光照极为充足，并且营养盐含量也相对充裕，这些因素共同促使浮游植物大量繁衍，进而致使叶绿素 a 浓度攀升至峰值。而到了冬季，气温急剧下降，水温随之降低，浮游植物的生长因低温环境而受到显著抑制，其生长活动受限，叶绿素 a 浓度便显著降低。对于总磷和总氮浓度而言，雨季起着关键的影响作用。在雨季期间，比如春季融雪期以及夏季暴雨期，流域内地表径流活跃，大量的营养盐随着径流被带入湖泊之中，从而导致湖泊内总磷和总氮浓度迅速升高。相反，在非雨季时段，由于入湖的营养盐数量大幅减少，同时湖泊内部的生物地球化学过程，诸如吸附作用能够使部分营养盐附着于其他物质上，沉降作用可使营养盐沉积到湖底等，这些过程对营养盐起到了去除效果，使得总磷和总氮浓度处于相对较低的水平。

通过对多年遥感数据展开深入剖析，能够清晰地洞察到湖泊水质参数呈现出显著的年际变化态势。在过往的数十年历程中，因流域范围内农业活动不断强化，诸如化肥农药的大量施用，工业废水肆意排放，以及城市化进程快速推进，许多湖泊的叶绿素 a、总磷以及总氮浓度呈现出持续上扬的走向，这无疑彰显出湖泊水质在逐步趋向恶化^[5]。不过，值得欣慰的是，近年来随着湖泊流域一系列污染治理举措的有力施行，像众多污水处理厂的相继建成，农业面源污染得到有效管控等，已有部分湖泊的水质参数开始转而下降，其水质状况也由此得到了一定程度的改善与提升。

（二）空间变化特征

对整个湖泊的水质参数进行统计分析发现，不同湖区的水质存在差异。一般来说，靠近入湖河口和人类活动密集区域的湖区，水质较差，如叶绿素 a、总磷和总氮浓度较高^[6]。这是因为入

湖河口带来了大量的污染物和营养盐，而人类活动密集区域的污水排放和地表径流污染不容乐观。而位于湖泊中心或远离人类活动区域的湖区，水质相对较好。

进一步将湖泊划分为不同的湖区进行分析，发现各湖区之间的水质变化具有一定的关联性和独立性。例如，在一些大型湖泊中，具有多个相对独立的湖湾或子湖，这些湖湾或子湖由于其独特的水动力条件、地形地貌和周边土地利用类型，水质变化特征各不相同^[7]。一些湖湾由于水流缓慢、水体交换不畅，容易积累污染物，水质较差；而另一些湖湾则由于具有良好的生态自净能力（如丰富的水生植被、较大的水深等），水质相对较好。

三、湖泊水质参数间的相互关系

湖泊中的水质参数之间存在着复杂的相互关系。叶绿素 a 浓度与总磷、总氮浓度之间通常呈现正相关关系。这是因为磷和氮是浮游植物生长所必需的营养元素，当湖泊中的总磷和总氮浓度升高时，为浮游植物的生长提供了充足的养分，从而促进了叶绿素 a 的合成。然而，这种关系并非简单的线性关系，在不同的湖泊环境条件下（如水温、光照、水动力等），其相关系数会有所变化^[8]。

此外，悬浮颗粒物浓度与叶绿素 a 浓度、总磷浓度等也存在一定的关联。悬浮颗粒物可以吸附营养盐和浮游植物，影响它们在水体中的分布和迁移，同时，浮游植物的生长和死亡也会影响悬浮颗粒物的浓度和组成。例如，在浮游植物大量繁殖和死亡的过程中，会产生大量的有机碎屑，增加悬浮颗粒物的浓度。

四、影响湖泊水质时空变化的因素

湖泊水质的时空变化受多种因素交织影响，深入剖析这些因素对于全面理解湖泊生态系统至关重要。

（一）流域人类活动

在影响湖泊水质的众多人类活动因素中，农业活动首当其冲。农业生产环节大量运用的化肥与农药，一部分会伴随地表径流冲刷，另一部分则经地下渗流悄然潜入湖泊，致使湖泊中的营养盐与各类污染物含量显著攀升，像磷肥、氮肥的超量施用便是湖泊总磷和总氮的关键源头。工业活动同样不容小觑，工业生产所产生的废水往往裹挟着众多重金属以及大量有机物等污染物，

径直排入湖泊，对湖泊水质造成不同程度的破坏，即便近年来工业污染治理已有所进展，可仍有局部区域存在违法违规排放情况^[9]。而城市化进程的加快也给湖泊水质带来诸多负面效应，城市污水管网若存在缺陷，垃圾填埋场产生的渗滤液，还有降雨时城市地表径流携带的油污、重金属以及氮磷等物质，都会在降雨时段大规模涌入湖泊，对湖泊水质产生不良影响。

（二）气候条件

气温、降水和风速等气候因素对湖泊水质有着多方面的显著影响。气温的波动直接左右着湖泊水温的升降，从而对浮游植物的生长繁殖速率、水体蒸发状况以及生物地球化学进程速率产生作用，像气温上升时，会加快水体中的化学反应，推动营养盐的释放与转化^[10]。降水方面，其数量与分布状况决定了湖泊入湖水量的多寡以及入湖污染物的承载量，在降水丰富区域，湖泊水量交换频繁，不过也可能伴随更多污染物的汇入，而降水稀缺之处，湖泊可能遭遇水位降低、水质变浓等情形。风速会作用于湖泊的水动力条件，例如影响水体的混合程度与环流态势，强风能够促使水体混合均匀，助力污染物扩散与稀释，但某些时候，过大的风速可能引发湖底沉积物再次悬浮，使得水体中的悬浮颗粒物与营养盐含量增加。

五、结束语

本研究利用遥感数据对湖泊水质的时空变化特征进行了全面深入的分析。研究表明，遥感技术在湖泊水质监测中具有巨大的潜力，可以为湖泊水资源管理和生态环境保护提供丰富的信息和科学依据。

然而，目前基于遥感数据的湖泊水质监测仍存在一些不足之处。例如，水质参数反演模型的精度有待进一步提高，尤其是对于一些复杂的湖泊环境和特殊的水质参数；不同卫星数据之间的融合与协同应用还需要深入研究，以充分发挥各卫星数据的优势；此外，如何将遥感监测结果与湖泊生态模型相结合，实现对湖泊水质和生态系统的动态模拟与预测，也是未来研究的重要方向。

未来，随着遥感技术的不断发展，如新型传感器的研发、数据处理算法的改进等，基于遥感数据的湖泊水质监测将更加精准、高效，为湖泊的可持续发展和全球生态安全保障做出更大的贡献。

参考文献

- [1] 喻欢, 林波. 遥感技术在湖泊水质监测中的应用 [J]. 环境科学与管理, 2007, (07): 152-155.
- [2] 房冲. 国际界湖水水质遥感反演及时空演变分析 [D]. 中国科学院大学 (中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2020. DOI: 10.27536/d.cnki.gccdy.2020.000027.
- [3] 晁明灿. 巢湖叶绿素 a 浓度遥感反演及蓝藻水华监测研究 [D]. 辽宁科技大学, 2021. DOI: 10.26923/d.cnki.gasgc.2021.000369.
- [4] 梁中耀, 余艳红, 王丽娟, 等. 湖泊水质时空变化特征识别的贝叶斯方差分析方法 [J]. 环境科学学报, 2017, 37(11): 4170-4177. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2017.0276.
- [5] 侯鹏飞. 城镇化背景下滇池叶绿素 a 浓度时空变化特征研究 [D]. 云南师范大学, 2020. DOI: 10.27459/d.cnki.gynfc.2020.000038.
- [6] 孙悦. 白洋淀氮素时空分布特征及治理对策 [D]. 河北科技大学, 2020. DOI: 10.27107/d.cnki.ghbku.2020.000446.
- [7] 陈方方, 王强, 宋开山, 等. 基于 Sentinel-3OLCI 的查干湖水水质参数定量反演 [J]. 中国环境科学, 2023, 43(05): 2450-2459. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230208.002.
- [8] 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(03): 1228-1243. DOI: 10.13227/j.hjks.202203285.
- [9] 王立兵. 盐湖区水体水质参数时空变化及影响因素研究 [D]. 西北师范大学, 2022. DOI: 10.27410/d.cnki.gxbfu.2022.000124.
- [10] 唐中林, 朱忠福, 李小辉, 等. 九寨沟世界自然遗产地湖泊水质参数的高光谱定量反演模型 [J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27(05): 1256-1263. DOI: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2020.11027.