

目次

复合污染条件下人为源 VOCs 的 SOA 生成研究进展	陈天增, 刘俊, 马庆鑫, 楚碧武, 张鹏, 刘永春, 刘昌庚, 贺泓 (1201)
全氟和多氟烷基化合物微生物降解与转化研究进展	孙红文, 方博, 陈浩, 赵茂森, 张耀之, 乔碧汀, 喻蒙 (1214)
湖泊水质参数遥感监测研究进展	王思梦, 秦伯强 (1228)
淡水环境中微塑料与重金属的“木马效应”研究进展	赵伟高, 田一梅, 赵鹏, 赵令铨, 金超 (1244)
长江经济带二氧化碳净排放时空演变特征及脱钩效应	吴一帆, 许杨, 唐洋博, 贾宁, 李玮, 李翀, 殷国栋 (1258)
中国土地利用碳排放变化及协调分区	李缘缘, 魏伟, 周俊菊, 郝瑞军, 陈帝伯 (1267)
基于 STIRPAT 模型天津减污降碳协同效应多维度分析	刘茂辉, 岳亚云, 刘胜楠, 李婧, 刘佳泓, 孙猛 (1277)
基于燃料生命周期的中国铁路排放趋势	佟惠, 范朝阳, 梁晓宇, 孙露娜, 门正宇, 赵肖阳, 毛洪钧 (1287)
浙江省大气颗粒物 PM _{2.5} 化学组分污染特征分析	周菁清, 余磊, 陈书鑫, 陆佳峰, 许亚璐, 季海冰, 张柳芳, 刘劲松, 王静 (1297)
南京亚微米级颗粒物化学组成的季节变化、粒径分布和来源	徐振麒, 尚玥, 丁峰, 谢鸣捷, 王勤耕 (1310)
洛阳地区碳质组分季节特征及来源解析: 棕碳的重要贡献	闫广轩, 侯明阳, 张朴真, 王洁琦, 王虎, 李崇浩, 王跃思 (1319)
江苏省 2019 年 S/IVOCs 排放清单及分布特征	宋童艾, 张佳颖, 关璐, 胡建林, 于兴娜 (1328)
珠三角典型工业区挥发性有机物 (VOCs) 组成特征: 含氧挥发性有机物的重要性	宋鑫, 袁斌, 王思行, 何贤俊, 李小兵, 彭钰雯, 陈钰彬, 齐吉朋, 蔡嘉骅, 黄山, 胡丹, 魏文, 刘可旋, 邵敏 (1336)
2000 ~ 2020 年天津市机动车全过程 VOCs 排放特征及演变	孙露娜, 仲崇智, 孙世达, 刘妍, 佟惠, 吴亚君, 宋鹏飞, 张丽娜, 黄旭, 吴琳, 毛洪钧 (1346)
港口自有移动源大气污染物排放清单	徐小凡, 王宝庆, 吴俊成, 李怡诺 (1357)
基于改进水资源生态足迹模型的中国水资源可持续利用仿真及调控	欧阳兴涛, 廖浩宇, 姜秋香, 王子龙 (1368)
黄河流域入海口典型区域有机磷酸酯分布特征和风险评估	曹渺, 郭昌胜, 张恒, 刘士清, 陈苗, 吕佳佩, 侯嵩, 尤新军, 徐建 (1378)
桂林会仙岩溶湿地水体与沉积物中有机氯农药污染特征	余悦, 邢新丽, 程铖, 刘威杰, 张标, 孔祥胜, 李森, 余海阔, 罗为群, 祁士华 (1387)
广东茂名主要水系表层沉积物重金属风险评估及源解析	陈小霞, 张敏, 李蓓, 温鹏翀, 丁平, 姚玲爱, 马千里, 李廷真, 蔡丹, 胡国成 (1397)
宁波市地表水重金属时空分布特性和健康风险评价	徐美娟, 杨佳, 任晓景, 赵红燕, 高夫燕, 蒋跃军 (1407)
典型西北山地-绿洲系统不同水体水化学特征及其水力关系分析	王诗语, 孙从建, 陈伟, 周思捷, 张鑫 (1416)
牟汶河中上游孔隙水化学特征及控制因素	刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 邓启军, 郑一迪, 李常锁 (1429)
石河子-昌吉地区地下水水质时空变化及污染源解析	丁启振, 周金龙, 季彦桢, 杨方源, 张淑霞 (1440)
北方富营养分层型水库藻类季节性暴发机制及其阈值分析	温成成, 黄廷林, 孔昌昊, 张志刚, 田鹏飞 (1452)
拉林河流域底栖硅藻群落结构特征及水生态健康评价	单涛, 袁安龙, 黄子芮, 周静怡, 陆欣鑫, 范亚文 (1465)
南昌市湖泊丰水期浮游细菌群落结构及影响因素	高鹏飞, 王鹏, 黄伟, 丁明军, 张华, 聂明华, 黄高翔 (1475)
调蓄水库细菌群落季节变化特征与影响因素	丁宁, 杨莹莹, 万年新, 徐爱玲, 葛建华, 宋志文 (1484)
典型城市内河细菌群落组成与氮循环功能垂直分布及溯源分析	谭秋阳, 吕金燕, 白献宇, 程莉蓉, 李晓艳, 郭蕾 (1497)
滇中高原水库外源污染负荷贡献解析与环境容量核算	郭玉静, 李红兵, 王树明, 白乙娟, 任良锁, 丁爱中 (1508)
窄孔径含磷棉秆生物质炭的制备及对四环素的吸附机制	曾少毅, 李坤权 (1519)
高比表面疏脲改性花生壳炭的制备及对四环素和铜的吸附	闵炳坤, 李坤权 (1528)
不同供水管材生物膜抗生素抗性基因分布特征	刘晨旭, 白晓慧 (1537)
水蚀环境植被恢复对土壤有机碳固存和团聚体稳定的影响: Meta 分析	杨睿哲, 杨世龙, 翁希哲, 徐灵颖, 刘雪健, 杜运田, 张雪辰, 郑伟, 翟丙年, 王朝辉, 李紫燕 (1542)
增温施肥对稻麦农田土壤有机碳及其活性组分的影响	邓旭哲, 韩晨, 薛利祥, 侯朋福, 薛利红, 杨林章 (1553)
三江源地区高寒草地土壤功能的水平分异特征及其沿发生层的垂直变化	李柏键, 申聪聪, 刘四义, 吴华勇, 王继琛, 赵冬辉, 葛源 (1562)
鄱阳湖平原直播稻 CH ₄ 通量及其与 CO ₂ 通量的综合温室效应	时元智, 崔远来, 时硕, 洪大林, 程婕 (1572)
不同土地利用类型土壤多环芳烃的纵向污染特征及来源解析	周芷嫣, 张秀秀, 王飞, 朱昌达, 潘剑君 (1583)
石家庄道路灰尘中全氟/多氟化合物及其新型替代品的污染特征及健康风险评估	李鹏飞, 王媛, 杨晨, 史亚利, 崔建升 (1593)
南方典型矿区农业小流域耕地土壤重金属空间分布特征及污染评价	杨宇, 郭婷婷, 刘孝利, 铁柏清 (1602)
三峡库区(重庆段)菜地土壤重金属污染特征、潜在生态风险评估及源解析	石雨佳, 方林发, 方标, 叶莘莘, 范晓霞, 高坤鹏, 陈征, 肖然 (1611)
兰州市耕地表层土壤重金属的积累特征及其影响因素分析	康乐, 彭鑫波, 马延龙, 张利瑞, 张妍娥, 王泉灵, 张松林 (1620)
粤北典型工矿区土壤重金属富集特征、来源解析及风险评价	王越, 莫莉, 余新晓, 师华定, 费杨 (1636)
三门峡某铝厂遗留场地土壤重金属空间分布特征及来源解析	卢小慧, 余方中, 范一鸣, 杨阳 (1646)
某试验场土壤重金属分布特征及其污染评价	王诗雨, 李淳, 赵洪伟, 陈希, 张慧君, 朱勇兵, 赵三平, 计超, 刘晓东 (1657)
化学淋洗联合电动技术修复重金属污染土壤的效果及其机制	马强, 卫泽斌, 吴启堂 (1668)
再生铜冶炼过程中重金属排放特征和控制	林炳丞, 吴广龙, 郑明辉, 刘国瑞 (1678)
长江流域(安徽段)土壤-作物系统重金属污染特征及健康风险评价	刘海, 魏伟, 黄健敏, 赵国红 (1686)
稻-麦轮作模式下不同钝化材料对镉污染农田土壤的原位钝化效应	张路, 唐婵, 余海英, 李廷轩, 张锡洲, 黄化刚 (1698)
巯基化蒙脱石用于镉污染农田安全生产的效果及其持久性	冯先翠, 陈亚刚, 焦洪鹏, 曹鹏, 朱凤榕, 李媛媛, 江海燕 (1706)
蚯蚓、秸秆和柠檬酸对少花龙葵与韭菜修复铅镉污染土壤的影响	陈敏妮, 袁小奇, 张金峰, 何川黔, 高波 (1714)
地质高背景区富 Se 耕地可利用性研究及区划建议	王锐, 李瑜, 余京, 周蛟, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (1727)
张家口市北新屯地区蔬菜种植区锆元素富集特征及成因分析	安永龙, 殷秀兰, 金爱芳, 李文娟, 鲁青原 (1735)
三峡库区消落带落羽杉人工林土壤细菌群落结构多样性及动态变化	谭雪, 董智, 张丽苗, 袁中勋, 李昌晓 (1748)
黄土丘陵区退耕还林对土壤真菌群落的影响	张蕾, 王强, 杨新月, 吕俊平 (1758)
化肥减量配施有机肥对土壤功能微生物和柠檬产量及品质的影响	王蕊燕, 熊子怡, 罗东海, 王子芳, 高明 (1768)
鸡粪和猪粪生物发酵过程中抗生素抗性基因的动态变化	张丹, 彭双, 王丹青, 王一鸣, 林先贵 (1780)
牛粪还田对土壤微生物群落特征的影响	张雅丽, 郭晓明, 胡慧, 郭暖, 徐小涛, 李建林 (1792)
《环境科学》征订启事(1406) 《环境科学》征稿简则(1592) 信息(1635, 1667, 1677)	

湖泊水质参数遥感监测研究进展

王思梦^{1,2}, 秦伯强^{1,2*}

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

摘要: 湖泊是水圈的重要组成,也是重要的淡水资源之一. 湖泊的水环境日益遭到污染,监测湖泊水质动态变化对生态环境保护具有重要意义. 遥感技术为湖泊水质监测提供技术支持,克服了人工采样成本低和时效性差的特点,在湖泊水质监测中得到了广泛的应用. 通过遥感可以监测的指标包括悬浮物、叶绿素 a、有色可溶有机物、溶解氧和透明度等. 虽然遥感为湖泊水质监测打开新思路,但是仍然存在问题:①遥感接受到的信号受到大气的影响,而大气校正算法不够成熟,需要更精确的大气校正来控制大气影响,消除大气和光照等对水体反射的影响;②受季节和空间制约,不同湖泊表面光学特性存在差异以及水中生物光学特性的差异性,利用有限实测数据建立的模型缺乏可移植性;③水生植物和外力作用(风力、鱼群等)的干扰,造成实测和模型估测之间的误差,而且数据的同步性难以保证,导致模型可靠性下降;④实测数据和遥感数据的时空尺度不匹配,难以捕捉动态精细的水质变化. 因此,未来结合多源数据以及其他水文模型,深入研究水体中各组分的光学特性,优化反演算法,发展对实测数据依赖程度低的反演算法,构建可迁移的反演模型,打破模型地域局限,推动湖泊水体污染监测预警业务化发展.

关键词: 遥感监测; 叶绿素; 水质; 反演; 水环境

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)03-1228-16 DOI: 10.13227/j.hjxx.202203285

Research Progress on Remote Sensing Monitoring of Lake Water Quality Parameters

WANG Si-meng^{1,2}, QIN Bo-qiang^{1,2*}

(1. School of Geography and Ocean Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Lakes are an important component of the hydrosphere and are important freshwater resources. The water environment of lakes has become increasingly polluted, and monitoring the dynamic changes in lake water quality is of great significance for ecological environment protection. Remote sensing can provide technical support for lake water quality monitoring, overcoming the low-cost and poor timeliness characteristics of manual sampling; thus, it has been widely used in lake water quality monitoring. Remote sensing can be used to monitor many indicators, including suspended solids, chlorophyll a, soluble organic matter, dissolved oxygen, transparency, etc. Although remote sensing provides a new method for lake water quality monitoring, there are still some problems in practical application. ① It is difficult to accurately retrieve the component changes in different substances in lake water from the signals received by remote sensing, resulting in the limitation of remote sensing accuracy. Atmospheric correction can eliminate the images reflected by factors such as atmosphere and light. In order to improve the accuracy of water quality monitoring, higher-accuracy atmospheric correction algorithms are needed. However, at present the atmospheric correction algorithm is not mature enough and lacks the portability between sensors. Therefore, atmospheric correction is still a difficult problem of remote sensing retrieval in lake water quality. ② Due to seasonal and spatial constraints, there are differences in surface optical properties of different lakes and biological optical properties, resulting in changes in remote sensing reflectance. There is also a lack of portability of the model established by using limited measured data. ③ The interference of aquatic plants and external forces (wind, fish, etc.) causes the error between the measured data and the model estimation, and the synchronization of the data is difficult to guarantee, which will introduce large errors to the lake water quality model, resulting in a decrease in the reliability of the model. ④ The spatio-temporal scale of measured data and remote sensing data do not match, and it is difficult to capture dynamic and fine changes in water quality. More precise observation of water quality is needed that can capture rapid changes in lakes. However, it is still challenging to obtain real-time measured data that meet the requirements. Therefore, it is necessary to further understand the spectral characteristics of water quality parameters, combining multi-source data and other hydrological models. In the future, a retrieval algorithm with low dependence will be developed, and migrated models will be constructed to break the regional limitations of the model. Additionally, remote sensing promotes the operational development and early warning for the water quality of lakes.

Key words: remote sensing monitoring; chlorophyll; water quality; retrieval; water environment

湖泊是水圈的重要组成,也是重要的水资源^[1],在生态系统和生物多样性的过程中发挥着重要的作用^[2],湖泊对人类活动和气候变化的反应敏感^[3]. 随着工业化的迅速发展,在气候变暖叠加人类活动的影响的背景下,湖泊不仅面临着各种环境压力,外源污染对湖泊的持续影响^[4],湖泊污染日渐严重^[5,6],水体有机、无机污染以及富营养化的蓝藻水华频发等^[7]. 湖泊水质的下降不仅威胁着生态安全^[8],也对人类生产活动造成了巨大的损失,因

此水质时空变化问题逐渐引起了人们的关注和重视^[9],人们意识到需要采取水质监测技术的手段监测和防止水污染^[10]. 水质参数是水体生态环境状况最重要的特征指标,能够反映水体环境的质量水平和变化趋势,水质监测是控制水体污染的基础^[11],

收稿日期: 2022-03-30; 修订日期: 2022-06-02

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(41790423)

作者简介: 王思梦(1993~),女,博士研究生,主要研究方向为水文与水资源, E-mail: wangsimeng@mail.nju.edu.cn

* 通信作者, E-mail: qinbq@niglas.ac.cn

水质监测至关重要^[6,12]。

传统的水质采样方式是人工采样,即通过现场采样和实验室处理分析的方式获取。随着各种水质检测仪器和测定方法的不断发展完善,几乎可以测定各种指标^[13],但是费时费力费钱^[14],而且数据仅能代表样本点^[15],不能反映准确和全面的湖泊水质参数信息^[16],因此利用人工采样方式进行实时大规模的湖泊水质监测是不可能的。即使我国已经通过建立水质监测网点的方式来获取重点湖库的水质信息,仍然无法满足实时动态的水质数据的监测要求^[17]。

与传统的湖泊水质监测方式不同,遥感具有监测速度快、范围广和时效性强的特点,为湖泊水质的监测提供了新的机遇。遥感技术在水质监测的过程中拥有传统方式无法比拟的优势^[18],可以实现对湖泊水质的长期、快速和动态的监测,突破时空约束,实现大面积湖泊水质监测。遥感技术利用经验、半经验和分析方法,利用合适的波段数据,建立水质反演模型来获取湖泊的水质信息^[19],不仅揭示了湖泊水质的时空分布变化,在一定程度上弥补常规监测方法的缺陷,而且遥感能够获取到传统方法难以揭示的污染物和污染源的迁移特征,大幅度提高了湖泊水质监测的效率^[20]。遥感技术在提取关键的水质参数方面成功应用^[21],可直接监测的参数包括叶绿素 a、悬浮物和有形可溶性有机物等,间接反演总磷、总氮和生化需氧量。Wong 等^[22]通过浊度和叶绿素的算法推导,证实遥感可作为一种有效方法。

20 世纪 70 年代,随着 Landsat-1 的发射,Landsat MSS 是最先应用在内陆水体的遥感数据,悬浮物是最先被遥感技术反演的水质参数,许多学者开始研究悬浮物和遥感反射率的关系,Pulliainen 等^[23]研究证明遥感监测湖泊水质的可行性。在 20 世纪 80 年代时,随着 Landsat 系列卫星陆续发射,中国也开始利用遥感技术监测水体污染,TM 技术逐渐应用于湖泊水质反演中,Lathrop 等^[24]对美国 Michigan 湖的 Green 湖湾进行了水质反演研究,获取了叶绿素 a 浓度和悬浮物等水质信息。但是对于大部分发展中国家,遥感在监测湖泊水质的研究仍然处于起步阶段,特别是撒哈拉以南的非洲^[25,26]。20 世纪 90 年代,逐渐利用遥感研究内陆水体中的黄色物质。近年来,遥感技术的蓬勃发展也促进了人们对湖泊水质参数的光谱特征认识的加强,湖泊水质遥感监测发挥着越来越重要的作用。国内外学者针对遥感监测湖泊水质的不同参数展开了各项研究,采用 Landsat、MODIS、GF-1 和 HJ-1 等不同卫星提取不同时空尺度的水质信息^[27~29],可反演的指标也在不断增加^[30],极大丰富了湖泊水质参数遥感反

演的成果^[31,32]。

本文基于 Web of Science 文献数据库,调研国内外在 2000 ~ 2021 年以湖泊水质遥感监测为主题的研究成果,分别从水体监测的发展、水质监测的原理、遥感监测数据和水质参数的反演研究等方面进行梳理,并总结归纳遥感监测湖泊水质二十多年的研究进展以及发展中存在的问题和未来发展的新趋势,加强对遥感监测湖泊水质研究的理解,促进遥感技术在监测湖泊水质中的应用,以期对湖泊治理和管理提供政策依据和理论参考。

1 遥感水质监测的进展

本文利用“remote sensing”、“lake water quality”和“water environment”为核心关键词,在 Web of science 科学引文库中检索核心引文库到 2000 ~ 2021 年发表 1 132 篇,在过去 22 年中,对湖泊水质遥感监测的关注度较高,人们对内陆水体有了更全面的认识。图 1 为所选时间范围内的不同地区的发文量,统计是以第一单位国籍作为标准,可以看出中国和美国在这个领域的发文量较多,领先于世界其他国家。图 2 为该领域的关键词共现图谱,节点越大说明出现的频率次数越高,节点之间的连线越多代表该关键词出现的频率高,该领域的热点集中在湖泊水质的分析、叶绿素分析、算法的探索以及对水质参数的准确性的评价中,研究方法逐渐从定性到定量转变,人工神经网络的方法也已经引入到湖泊水质遥感监测的研究中,丰富水质研究。目前这一领域的文献主要发表在 Environmental Sciences、Remote Sensing 和 Water Resource 等类型期刊,随着遥感技术的进步,可供使用的数据和方法的不断拓展,推动湖泊水质研究的发展,该领域的发文量逐年增加。

2 遥感监测的原理和数据

2.1 基本原理

物体具有表观光学特性和固有光学特性,遥感是对物体固有光学特性进行表观测定和标记的方法技术。水质遥感的基本原理是太阳辐射到达水汽界面,一部分会通过水体表面被反射进入大气中,一部分可以穿透水体,和水中的物质相互作用,然后经过水体吸收、反射和大气衰减后被传感器接收,最后根据光谱特征进行水质分析^[33]。水质监测常用的波段为可见光和近红外^[34],纯净水体的光谱曲线是接近线性的^[35],最大透射波长在 0.45 ~ 0.55 μm ,波峰在 0.48 μm ,是几乎不会发生反射的^[36]。当水体中存在叶绿素 a、悬浮泥沙、有机物和浮游生物等物质时,导致水体的反射率会发生变化以及在特定

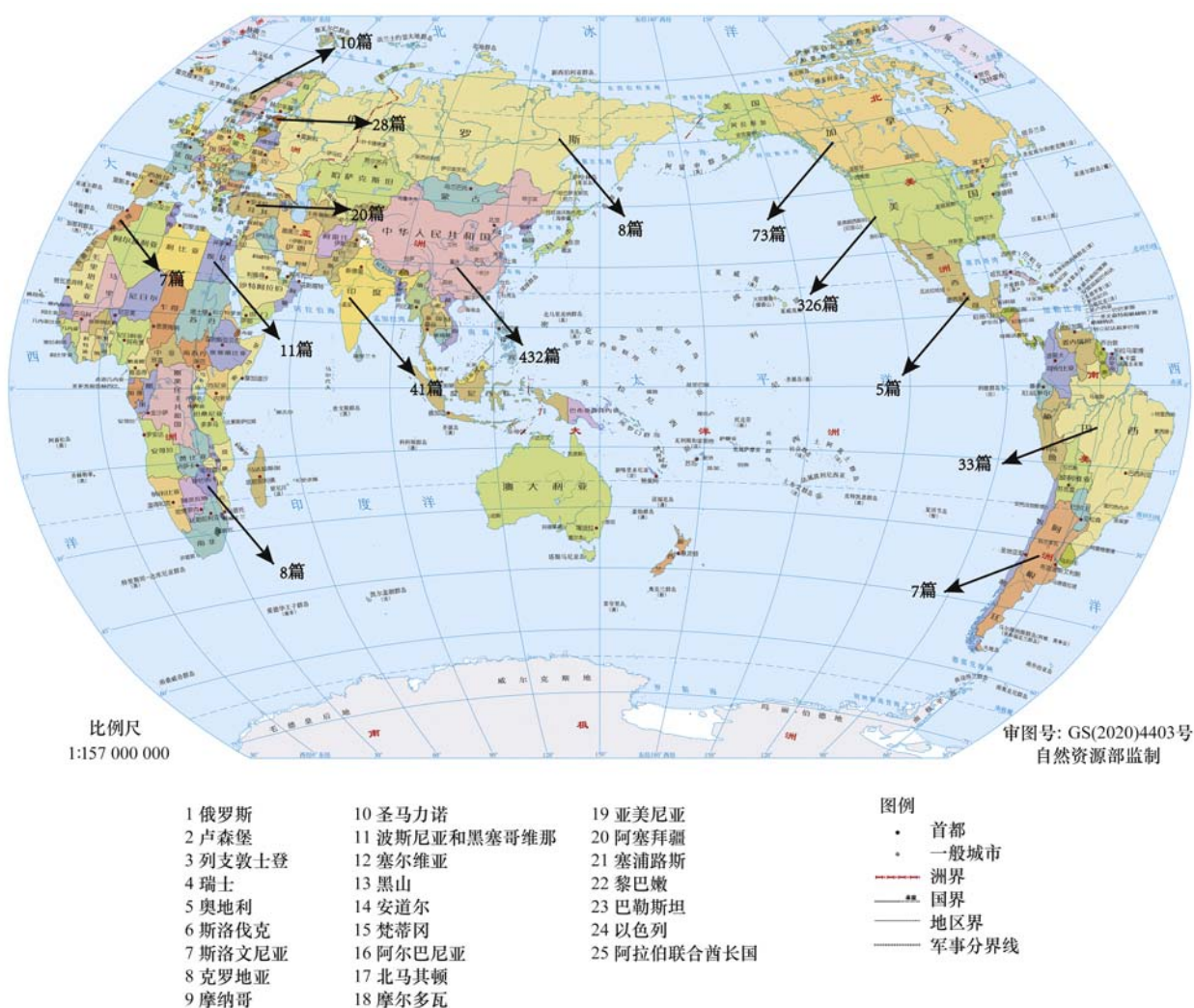


图1 不同国家的发文量

Fig. 1 Number of publications in different countries

波长不同的吸收特征差异. 通过获取水体的反射率, 分析水体各组分的吸收和散射作用, 提取水体各组分的浓度信息, 研究光谱与水质浓度之间的关系^[37], 建立遥感水质反演模型, 最终目标是获取湖泊水质的时空分布和变化情况, 图3为遥感卫星接收水体和大气辐射的过程.

目前, 通过遥感技术可以监测的湖泊水质参数包括叶绿素 a 浓度、悬浮物、水体透明度和有色可溶性有机物等. 在湖泊水质的遥感监测过程中, 浮游藻类、悬浮物质和黄色物质能够对光线反射产生严重的影响. 在蓝紫光附近或者 676 nm 附近, 会发现监测到的水体光谱曲线发生明显的变化, 特别是当水体中藻类植物聚集的时候, 在此波段附近会出现峰值, 可以以此判断湖泊中藻类的含量以及湖泊的污染程度.

2.2 遥感数据源

2.2.1 多光谱遥感数据

多光谱遥感是 20 世纪 80 年代兴起的遥感技

术, 主要是通过目标和背景之间的光谱差异来提取感兴趣的地物, 广泛用于叶绿素生长状况和悬浮物的浓度等水质监测^[39]. 美国陆地卫星 (Landsat) 是长时序日常遥感监测内陆湖泊的常用数据^[40], 其 6 个光学波段范围从蓝光到短波红外领域^[41,42]. 国内外学者利用多光谱数据反演湖泊水质进行了较多研究^[43], 况润元等^[16] 利用 Landsat 数据上任意采样点, 根据不同的光谱特征对鄱阳湖的水质进行分类, 水质分类结果与实地监测的结果一致, 结果可为鄱阳湖管理和保护提供技术支持; 程曦等^[44] 结合监测数据和遥感数据分析了淀山湖氮磷营养物的长期变化规律以及该湖泊环境的转变, 为湖泊生态修复提供理论依据; 姜腾龙等^[45] 基于 Landsat TM 水体反射率数据和地面同步水质监测数据进行相关分析, 筛选相关性较强的波段组合 (第 3 波段和第 4 波段) 来建立波段比值模型反演东平湖叶绿素 a 浓度, 证明模型可以准确快速提取叶绿素 a 的分布和变化趋势, 但是 Landsat 数据重访周期长, 难以详尽地展

表 1 常见的多光谱系列卫星数据对比数据¹⁾
Table 1 Comparison of common multispectral series satellite data

卫星数据	波段数	时间分辨率/d	空间分辨率/m
Landsat MSS	4	18 (Landsat1-3) 和 16 (Landsat4-5 和 7)	80
Landsat TM	7	16	30 (波段 1~5, 7) 和 120 (波段 6)
Landsat ETM +	8	16	30 (波段 1~5, 7)、60 (波段 6) 和 15 (波段 8)
Landsat OLI-TIRS	11	16	30 (波段 1~7, 9)、15 (波段 8) 和 100 (波段 10~11)
MODIS	36	1	500 (波段 3~7)、1000 (波段 8~36) 和 10 (波段 2~4, 8)
Sentinel-2	13	5	20 (波段 5~7、8A 和 11~12) 和 60 (波段 1 和 9~10)

1) 改自文献[52]

具有较高时空分辨率,拓宽了湖泊水质遥感监测的应用^[17]. 闻建光等^[53]利用 Hyperion 卫星数据,采用经验方法和混合光谱分解方法估算叶绿素 a 浓度,证明 Hyperion 卫星数据可以监测叶绿素 a 的分布;张兵等^[54]利用高光谱遥感数据在太湖反演了叶绿素、悬浮物和黄色物质,获得了较好的反演结果,提高了湖泊水质监测精度;Flink 等^[55]也利用高光谱数据成功分析瑞典湖泊叶绿素浓度分布. 中国也发射了环境系列卫星(HJ-1A/B)、HJ-1C 和高分系列卫星(GF1-7)等,这些卫星已经成功应用于内陆水体的水质监测和蓝藻水华富营养化预测^[56],王彦飞等^[57]利用 HJ-1A 在巢湖监测水质,证明其更适用于水质遥感应用;胡琳等^[58]利用 GF-5 数据对滇池的水体环境进行监测分析,成功识别蓝藻水华的发生状况,为滇池治理和开发提供科学依据. 由中国科学院南京地理与湖泊研究所与海康威视数字技术有限公司共同开发的近距离高光谱成像仪^[59],是一种高空间分辨率的成像仪,可以用于对内陆水体水质的长时间连续观测中. Sun 等^[60]利用在太湖、梁溪河和富春江验证了这一高空间分辨率成像仪结合机器学习在监测内陆水体的水质方面有着巨大的潜力.

此外,高光谱影像的空间分辨率较低,覆盖范围小,监测成本高^[61],对大面积的湖泊监测有局限性,而且波段多,数据量大,在选择最佳波段组合的时候受到影响^[62],在一定程度上影响了水质反演的准确性和精度.

2.2.3 其他数据类型

20 世纪初,无人机应用在军事领域,90 年代无人机在各个领域得到广泛应用,近年来逐渐应用于水质监测. 无人机遥感技术是一种全新的遥感测绘平台,集成了遥感和全球定位导航技术,可以随时随地获取指定湖泊的水质信息,具有机动灵活、使用成本低、操作简单、处理速度快和高时空分辨率的特点^[63,64]. 无人机搭载高光谱/多光谱传感器全面搜集信息,实现对湖泊水质污染的实时快速监测,为湖泊水质监测提供新的机遇^[65,66]. 黄昕晰等^[67]基于

无人机多光谱影像获取和同步实地水质采样,提出 optimize-MPP 提取算法来构建青山湖悬浮物浓度与浊度反演模型,获得更加准确的水质参数空间分布情况,研究结果不仅适用于其他参数也可以推广到其他湖泊. 臧传凯等^[68]利用无人机搭载高光谱传感器获得辐亮度信号进行遥感反射率标定的方法,计算水体颜色参量后,根据实测数据构建水质参数反演模型获得崇明岛内陆水体的颜色变化和污染水体的信息,结果表明利用该方法得到精度较高的遥感反射率. 朱熹等^[69]在夏季的淀山湖区域,利用无人机、地面光谱仪、样本点和 K6 多光谱相机等手段,采用波段比值法构建了溶解氧、总磷和总氮等水质参数的遥感反演模型,生成水质等级图,精度较高,可以及时发现水质污染区域. 赵松^[70]根据无人机遥感的波段信息,基于最佳波段组合在滄阳河构建浊度反演模型,通过与实测数据的对比分析,发现无人机遥感反演的结果具有更高的实用性和可靠性,可以为水质监测提供模型依据. 但是受制于环境、仪器和时间等因素的影响,无人机遥感仍在探索阶段,它在细小河道和水体边缘地带的精度不足,主要原因是岸边有河岸、植被以及阴影的影响,容易造成误判,因此需要更多的样本数据做验证. 此外,大量国际和国内遥感机构为满足用户需求,共同推动全球湖库水体项目的推进,力求充盈湖泊的数据库,不断提高湖泊水质遥感监测的能力^[71].

综上所述,基于以上遥感数据建立的湖泊水质监测模型在不同的时空尺度上都有着各自的优劣,湖泊不仅受到人类活动、河湖水体交换、污染源复杂以及季节更替等外在因素影响,而且不同湖泊水体中组分的光学特征存在差异,共同造就了湖泊水质遥感的不确定性和复杂性,而目前的水质研究受到遥感卫星的低信噪比和传感器分辨率的限制^[72],不能满足湖泊水质监测的时间连续性和空间完整性要求,除了多源遥感数据融合以外,还需要研制更高更好的遥感传感器,这是未来湖泊水质参数遥感监测的发展方向之一.

3 湖泊水质遥感监测

3.1 水质遥感监测的反演方法

随着传感器分辨率不断提高和反演理论不断成熟,反演方法从定性分析转到定量反演,能够监测到的湖泊的水质参数种类和精度逐渐增加.遥感反演的水质模型可以为湖泊水污染治理提供技术支持^[73].国内外学者在利用遥感数据获取不同研究区的水质,构建了线性、对数和三组分等水质参数反演模型,在湖泊水环境领域取得了较好的效果^[74~78].目前常用的遥感水质反演方法有分析方法、经验方法、半经验方法和机器学习^[79].

分析方法是生物-光学模型为核心,根据水体的光学机制与辐射传输方程,利用遥感反射率计算实际吸收系数和后向散射系数的比值^[80],构建反射光谱和水质参数之间的反演模型^[81],模型具有较强的物理性,因此可以在一定程度上突破时空局限性,将其应用于光学特征类似的水体进行反演可以得到较为理想结果^[82].但是分析方法在光学特征复杂的水体中,难以建模,而且由于模型初始时需要的测量参数较多,例如一些水质参数和纯水的光谱特性,且对光谱测量的数据要求较高,仪器设备的成本高,在实际通用方面存在改进空间.

经验方法是利用同一时间遥感数据与地面监测的水质数据建立线性回归模型反演水质参数^[83],过程比较简单,计算量小,易于实现,常用的经验模型有单波段、双波段比值、多波段线性和非线性模型等.但是经验方法局限于特定湖泊内反演,它可以解释特定水体的水质特征,随着时空尺度的变化,光学性质不均匀的水体和不断变化的外在因素干扰,使得模型不适用^[84].

半经验方法,兴起于 20 世纪 90 年代,是已知的水质参数光谱信息和统计模型相结合^[85],利用最佳波段组合建立数学统计模型^[86],具有一定的物理意义,兼具分析方法和经验方法的优点,是常用的湖泊水质遥感反演方法之一.但是半经验方法对实测数据和遥感数据的同步性要求高,依赖性强,因此局限在特定的湖泊,且受到不同季节限制.

通过以上水质反演方法的分析,发现共同点都是利用线性回归建立湖泊水质遥感反演模型,方法简单便于实现.近年来,许多学者致力于利用非线性模型来进行湖泊水质反演,目前非线性采用的方法包括神经网络、遗传算法和混合算法等回归模型^[87].

机器学习是通过算法根据已有的数据不断训练模型,利用模型对新数据进行分析 and 预测^[88].虽然

机器学习本质也是标准黑箱模型,但是机器学习对遥感水质反演这种复杂的非线性拟合过程具有较好的适用性,机器学习可以降低人为干扰,通过不断的学习,选取适合模拟遥感数据和湖泊水质参数之间复杂的关系的模型,构建的反演模型具有鲁棒性强、误差小和预测效果好的特点.但是机器学习需要大量的训练样本数据,会导致结果发生过度拟合现象,结果具有不确定性.

虽然湖泊水质遥感反演模型精度得到提升,但是当前遥感模型反演精度仍然不足,主要原因包括以下三点:一是遥感数据自身存在的问题,遥感数据的时空分辨率低,波段少;二是遥感反演对地面实测水样数据的依赖程度高,需要大量的地面实测数据作为依据建立模型,反演算法对地面的依赖性强,早期的监测站点稀疏,数据缺乏,是导致了遥感反演模型精度不高的重要原因;三是在不同地域、不同面积的湖泊水体光学特性复杂,学者多采用实地采样数据和遥感数据建立反演模型,湖泊水质遥感反演具有区域性和时效性,较难推广移植,因此如何建立较合适的反演模型仍然是一个研究难点^[89,90].

3.2 湖泊水质参数研究进展

3.2.1 叶绿素 a

叶绿素 a 是遥感监测的主要水质参数之一^[91],同时也是衡量水体富营养化程度的重要指标之一^[92],很多学者利用遥感反演叶绿素 a 来分析蓝藻水华的发生时间和大小,叶绿素在 440 nm 和 670 nm 附近有吸收峰,在富营养化程度高的湖泊,叶绿素 a 浓度越高.叶绿素 a 的空间分布和浓度的变化对湖泊生态系统有着重要的意义^[93].国内外学者针对不同研究区建立了很多关于叶绿素 a 的遥感反演模型,Bresciani 等^[94]比较了 12 个高寒湖泊的水质遥感数据,验证了遥感影像反演湖泊叶绿素 a 浓度的可行性;项雅波等^[95]基于 Landsat 8 数据和实测水质数据,采用回归分析建立沙湖叶绿素 a 浓度反演模型,研究进一步证明 Landsat 8 应用于湖泊叶绿素 a 浓度反演的可行性;波段比值法是目前用于叶绿素 a 遥感反演模型之一^[96],沈蔚等^[97]利用高光谱遥感数据结合现场测量数据运用波段比值模型、一阶微分模型和水体叶绿素提取指数来反演叶绿素 a 浓度,可以有效提取长江口叶绿素 a 浓度,未来可以应用水体环境质量监测;王莹等^[98]在千岛湖地区结合 Landsat 数据和实测数据建立了叶绿素 a 的反演模型,获取千岛湖叶绿素 a 的时空分布规律,发现易发生富营养化的区域,研究可为湖泊水质富营养化监测与预警提供理论依据;Moses 等^[99]利用 MODIS 结合三波长模型反演叶绿素 a 浓度,结果证

明三波段和两波段均能估测湖泊叶绿素 a 浓度. 但是由于受到悬浮物 and 有色可溶性有机物对光谱特征的影响, 会掩盖了叶绿素 a 的吸收特征^[52], 从而导

致模型的精度和适用性均较差. 目前不同学者针对叶绿素 a 浓度的遥感反演模型包括以下内容(见表 2).

表 2 叶绿素 a 浓度遥感反演模型

模型	区域	时间(年-月)	数据类型	文献
$a \times \left(\frac{R_{rs}CCD_4}{R_{rs}CCD_3} \right) + b$ 式中, a 和 b 为拟合系数, $R_{rs}CCD_4$ 和 $R_{rs}CCD_3$ 为此处的波长	长寿湖	2018-06	HJ-1/CCD	[100]
$10^{a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i \left[\log_{10} \left(\frac{R_{rs}(\lambda_{blue})}{R_{rs}(\lambda_{green})} \right) \right]}$ 式中, a_0 为传感器的常量值, $R_{rs}(\lambda_{blue})$ 和 $R_{rs}(\lambda_{green})$ 为此处的波长	布什尔	2018-05 2019-11	Landsat MODIS	[101]
$17.12(A_{666} - A_{750}) - 8.68(A_{653} - A_{750})$ 式中, A_{666} 、 A_{750} 和 A_{653} 为此处的波长	巴拉顿湖	2007 ~ 2011	MERIS	[102]
$Chla = \exp(ax^2 + bx + c)$ 式中, a 、 b 和 c 为常量, x 为 R_{701}/R_{677} 处波长	太湖	2004 ~ 2005 2010 ~ 2012	ASD	[103]
$\frac{(R_{rs}\lambda_1 - 1 - R_{rs}\lambda_2) \times R_{rs}\lambda_3}{R_{rs}\lambda_1}$ 式中, $R_{rs}\lambda_1$ 、 $R_{rs}\lambda_2$ 和 $R_{rs}\lambda_3$ 为此处的波长	太湖	2019-05	GOCI	[104]
$\frac{R_{rs}705}{R_{rs}671}$ 式中, $R_{rs}705$ 和 $R_{rs}671$ 为此处的波长	太湖 小浪底水库 于桥水库	2020-09 ~ 2020-11	资源一号 02D	[105]

3.2.2 悬浮物

悬浮物也是水环境监测的重要指标,包括悬浮泥沙和有机悬浮颗粒^[106]. 悬浮物物质不易溶解,影响水生植物的生长,湖泊中悬浮物的含量、类型和体积都会使得水体反射率发生变化,监测湖泊中的悬浮物浓度变化可以正确估算湖泊富营养化的变化情况. 反演悬浮物的方法有基于经验和半经验的方法,目前大量的遥感反演模型应用于悬浮物的定量监测^[17,107,108];国内外学者利用遥感对湖泊中的悬浮物浓度进行监测^[109],Williamson 等^[110]最早发现遥感数据和悬浮物浓度之间的联系;Dekker 等^[111]分析认为 TM4 是适合用来反演悬浮物浓度的波段;马荣华等^[112]实测太湖的反射光谱和实验室采样信息,采用相关分析法得到悬浮物的光谱特征波段,对比 Landsat ETM 数据,研究发现 TM4 和 TM1 的比值是估测太湖悬浮物浓度精度最高的波段;宋庆君等^[113]在太湖实测了水体遥感反射比、后向散射系数和辅助参数,对比了估算悬浮物浓度的方法,其研究认为在 812 nm 波峰高度得到的总悬浮物的精度是较高的. 但是由于水体环境的复杂性,以及不同季节悬浮物组分浓度的变化,遥感反演悬浮物的算法受到了时间和区域性的限制,难以适用于不同的湖泊. 图 4 展示了不同水体的高光谱反射率曲线.

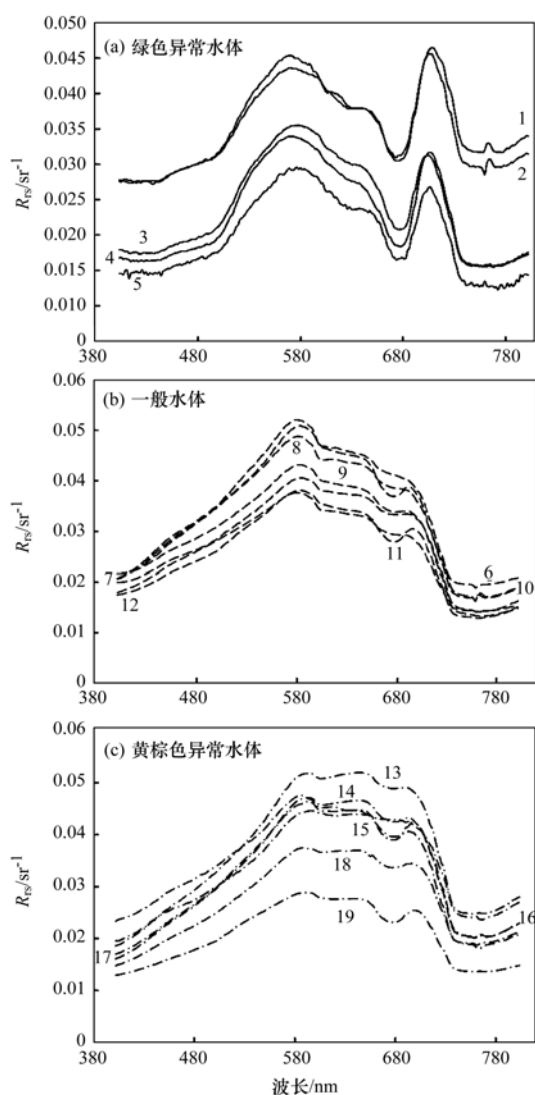
3.2.3 有色可溶性有机物

有色可溶性有机物 (colored dissolved organic matter, CDOM) 是影响水体颜色的重要参数之一,它可以强烈吸收紫外和蓝光,对于黄色波段的吸收较

小,因此呈现黄色^[114]. 90 年代,一些学者开始研究遥感监测湖泊中的 CDOM, Gitelson^[115] 提出计算 CDOM 的回归算法;陈军等^[116]利用 Landsat TM 数据采用分段映射算法在太湖构建了 CDOM 的反演模型,通过和实测数据的比较,发现模型误差较小,能够得到太湖 CDOM 浓度的分布格局;陈晓玲等^[117]分析了洪湖、东湖和梁子湖的 CDOM 空间分布,探究 CDOM 和其他水质要素的联系,为水环境监测提供理论依据;赵玉芹等^[118]根据 BP 神经网络和遥感数据反演水质参数,证明反演结果优于线性回归结果. 但是,有研究表明叶绿素 a 和悬浮物的遥感反演精度会受到 CDOM 的影响^[119],因此,宋开山等^[120]对湖泊 CDOM 遥感反演进行深入分析,提出降低其他光学活性物对 CDOM 遥感反演的影响,是提高反演 CDOM 精度的方式之一. 不同湖泊的 CDOM 光学特性不同,需要进一步理解 CDOM 的光学性质,分析 CDOM 在不同波段的吸收特征,对湖泊环境保护具有重要意义.

3.2.4 水体透明度

湖泊透明度是评价湖泊营养状态的指标之一^[121],反映湖泊的清澈程度,与叶绿素 a、悬浮物和 CDOM 等营养物质密切相关. 水体透明度的物理模型在 19 世纪 60 年初步建立^[122],Yin 等^[123]在 GEE 平台利用 Landsat 数据和实测数据优化了太湖透明度反演的半解析算法,分析太湖水体透明度的分布特征和影响因素,证明可能与风速和蓝藻水华



图中序号表示不同采样点的水体; 改自文献[68]

图4 不同类型水体光谱曲线

Fig. 4 Spectral curves of different types of water bodies

的暴发频率有关; Knight 等^[124]在 Minnesota 湖利用 MODIS 数据构建了透明度反演模型, 进一步分析了湖泊的富营养化状态; Wu 等^[125]通过在鄱阳湖进行分析发现, 比起 Landsat 数据, MODIS 数据更适合用于该地区透明度的反演; 马建行等^[126]以实测透明度数据为主, 利用 HJ-1A 卫星和 MODIS 数据构建吉林省中西部湖泊透明度的反演模型, 其研究发现 HJ-1A 数据能够获得更细节的湖泊透明度分布信息, 未来可以发挥 HJ 卫星监测湖泊水质的潜力; Song 等^[127]基于实测数据和 Landsat OLI 数据基于红蓝波段比值纸估算透明度的遥感模型, 具有较强的稳定性, 实现了 30 m 分辨率的全球湖泊透明度反演; Wang 等^[128]针对内陆水体随区域和季节变化的特点, 构建了基于 FUI 水色指数和色度角的湖泊透明度反演算法, 验证我国湖泊的透明度变化趋势 (图 5)。Liu 等^[129]利用 GEE 平台数据分析了中国大

型湖泊的水体透明度, 揭示水深是影响湖泊透明度的重要因素之一。

3.2.5 非光敏参数

目前, 针对湖泊水质参数的光学特性的遥感反演逐渐成熟, 但是非光敏参数, 例如总氮 (TN)、总磷 (TP) 和溶解氧 (DO) 等的光学特性较弱, 难以直接通过遥感反演获取^[130], 但是它们会影响到湖泊的光谱信息, 因此需要借助半经验法或机器学习进行间接遥感分析, 提高反演的精度。例如氮、磷会增加藻类生长, 虽然对参数的光谱没有直接影响^[131], 但是会引起水体富营养化, 造成健康的湖泊生态系统被破坏。

国内外学者对此进行了大量研究, 陈艳等^[132]利用实测数据和 Landsat 数据反演草海的 TN 和 TP 等参数, 证明遥感反演非光敏参数的可行性; 徐良将等^[133]利用遥感数据采用经验模型的方法建立了太湖的 TP 和 TN 反演模型, 模型精度较高; 杜程等^[134]利用遥感数据根据盐湖光谱特性建立了溶解氧的反演模型 (图 6), 具有一定适用性; Niu 等^[135]利用中国关河水下 50 cm 处的水样结合对应区域的高光谱影像, 开发基于深度学习的回归模型估算非光学特性的水质参数, 结果证明基于深度学习的回归模型不仅具有更高的精度, 也为水质参数的估测提供了一种新的方法。目前的研究都是针对某一特定的湖泊所建立的遥感反演模型, 缺乏具有普遍性的反演模型, 在今后的研究中, 应深入研究非光敏参数的特征, 发展适合其应用的遥感反演模型。

3.3 存在的问题

3.3.1 大气校正

遥感接受的信号大气的程辐射所占比例远远超过于水体反射率, 水体小信号容易被大气淹没^[76], 从遥感收到的信号中很难准确反演湖泊水体中不同物质的组分变化, 造成遥感监测精度受限, 大气校正可以消除大气和光照等因素对水体反射的影像, 为了提升水质参数获取的精度, 需要精确的大气校正来控制大气的影[105, 136], 大气校正算法还不够成熟, 缺乏传感器之间的可移植性, 因此大气校正仍然是遥感反演湖泊水质的重难点^[137]。

3.3.2 反演模型的季节和空间适用性

一方面是不同的季节的同一湖泊或者不同区域的湖泊存在水体光学特性差异。利用有限的实测水质数据来建立的模型只适用于采样的湖泊和周围具有相同或相似特征的水体条件地区, 研究湖泊的变化会导致模型的参数发生根本变化, 结果并不具备通用性^[138], 即湖泊水质遥感反演模型缺少可移植性。另一方面由于水体中颗粒物浓度及其生物光学特性

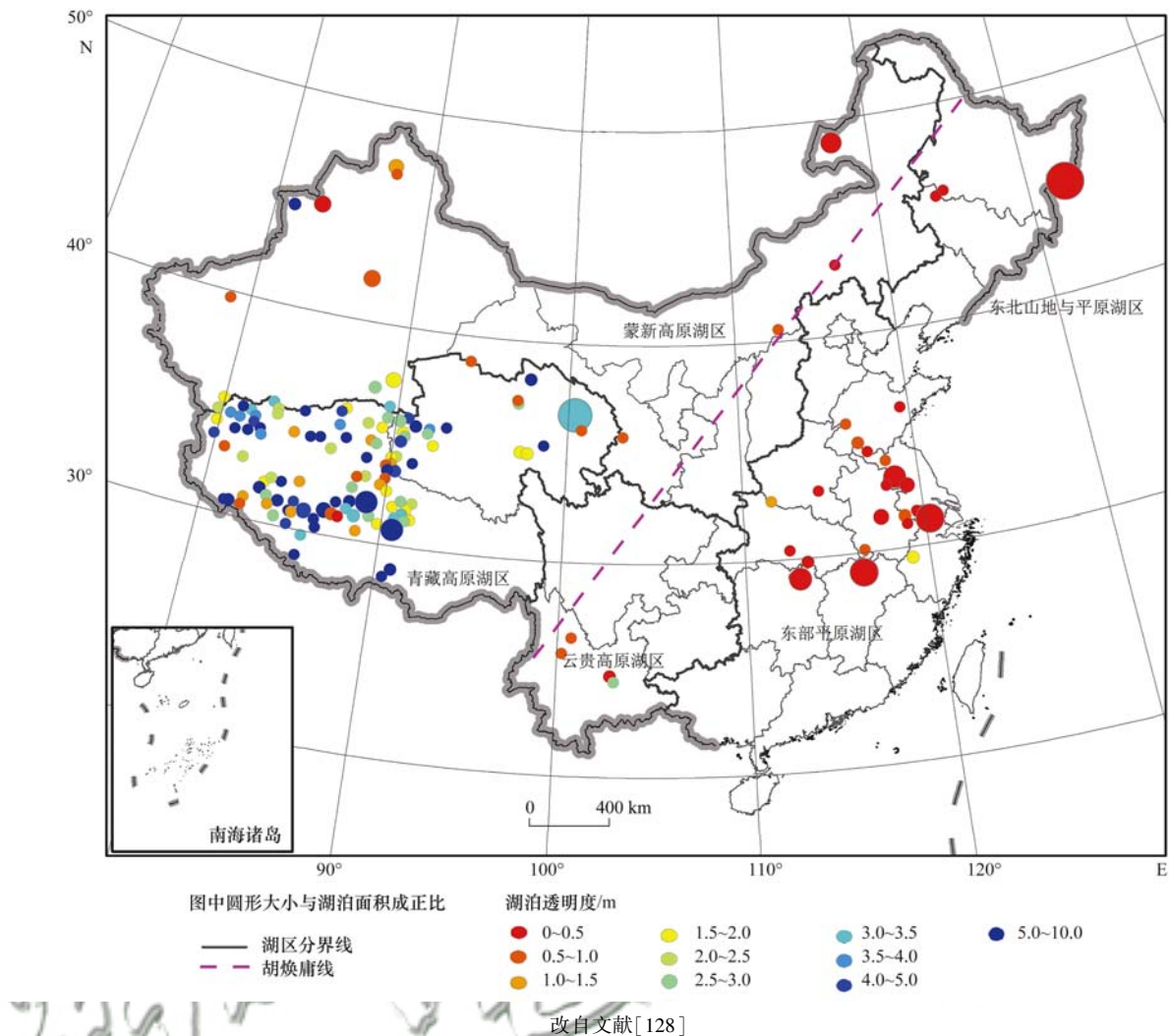
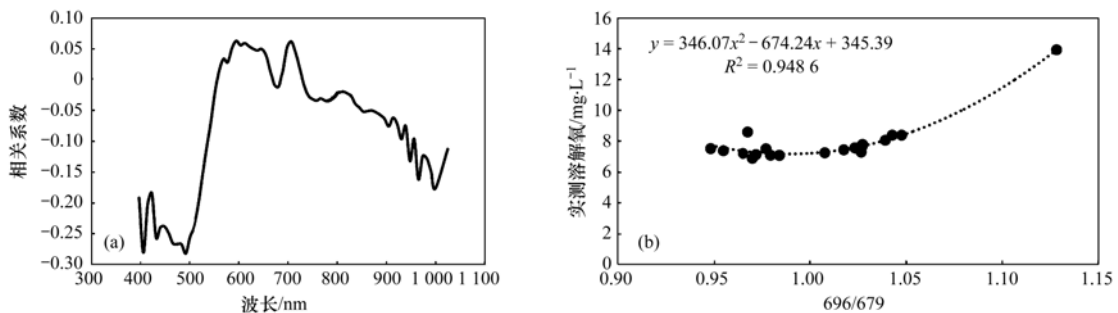


图 5 中国大型湖库夏季平均透明度分布

Fig. 5 Distribution of average transparency of large lakes and reservoirs in China in summer



(a) 为原始反射率和溶解氧含量的相关性, (b) 为溶解氧多项式模型(纵坐标为 696 和 679 波段组合下溶解性的相关度); 改自文献[134]

图 6 湖泊高光谱反演溶解氧模型

Fig. 6 Lake hyperspectral inversion of dissolved oxygen model

的差异,这也是造成模型普适性较低的重要原因,例如浮游生物、水体富营养化程度、悬浮物等在很大程度上影响到叶绿素 a 的浓度,导致其在遥感反射率发生变化,这些因素的共同作用,影响遥感水质模型的迁移.因此除了研究水体的组分的光学特性外,还需要优化反演算法,也有必要研究一种不受季节和区域制约,可以适用于不同水体的通用算法,构建

可迁移的反演模型.

3.3.3 外在因素干扰

一方面是水生植物的干扰,排除水生植被的干扰是提高湖泊水质遥感模型精度的重要问题.水生植物对遥感影像辐亮度的影响^[139],会造成实测和估测之间的误差,例如浅水草型湖泊的水体光谱中夹杂混合着水生植物的光谱信息,而且蓝藻水华在

近红外抬升光谱,造成与岸边的植被难以区分的现象,影响水质监测的准确度. 另一方面湖泊受到水动力环境和外部环境条件的影响,比如风力的干扰、船体的扰动、阳光、云量和鱼群的活动,湖底底泥在风浪的扰动下会使得悬浮物含量较高^[140],造成湖泊污染加剧. 而大多数水质数据都是基于实测采样点获取的,遥感反演的模型是实测采样结果得到,因此数据同步性不能保证,会给湖泊水质反演模型引入较大的误差,导致模型的可靠性下降. 因此需要进一步深入研究各干扰因素和湖泊水质参数的关系,实现湖泊水质监测的准确监测.

3.3.4 尺度匹配问题

实测数据和遥感数据之间存在时间不匹配和空间上像元大小的差异. 时间尺度上,传统的观测多是基于日和月的观测,具有较大的不确定性,需要更精细的水质过程观测数据,捕捉到水质的快速变化;空间尺度上,实地采样点的尺度较小,而遥感数据的空间分辨率较低,采样点和遥感数据的空间尺度不匹配. 此外,不论是哪一个反演模型都需要大量的实测采样数据来验证,因此需要尽可能地增加地面观测点的数量,但是获取符合要求的地面实时实测数据具有一定难度,仍然具有挑战性,因此需要另辟蹊径,发展对实测数据依赖性低的模型算法,建立合适的湖泊水质反演的尺度模型.

4 结论与展望

(1)随着气候的变化以及人类活动对湖泊的干扰,对湖泊水环境的治理依然是全球水环境科学研究的重点内容. 遥感数据在湖泊水质监测中占有重要地位,目前湖泊水质遥感取得的成果是值得肯定的,即使存在不足也仍然具有广阔前景和发展潜力. 遥感技术的进步,增加了湖泊水质信息的获取量,加强遥感技术的应用,结合其他数据和模型,例如水文模型、水动力模型和水质模型,可以模拟入湖的悬浮物和径流量、污染源的影响范围、模拟湖泊水环境过程以及构建栖息地指数模型,拓宽了遥感水质的生态学意义,推动湖泊水污染治理工作的科学合理开展.

(2)由于湖泊本身光学性质的复杂性,未来要进一步深入理解水质参数的属性特征和波谱特征,探究不同水质参数之间的影响,充分挖掘湖泊水质信息,以及结合多源数据,综合各遥感传感器的优势,实现资源信息互补,提升湖泊水质遥感反演的效果,打破模型地域局限,推广适用性更高的水质遥感模型. 同时,有效、合理地使用大数据和云技术为湖泊水质监测的研究提供辅助,实现遥感水质监测的

体系化和业务化是大势所趋,逐步实现天地基一体化监测,以实现准确、客观、动态快速的湖泊水质的监测和发展趋势预测,推进湖泊水体污染的监测预警事业的发展.

参考文献:

- [1] Zhang G Q, Yao T D, Xie H J, *et al.* Response of Tibetan Plateau lakes to climate change: trends, patterns, and mechanisms[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, **208**, doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103269.
- [2] Miao S, Liu C, Qian B J, *et al.* Remote sensing-based water quality assessment for urban rivers: a study in Linyi development area[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(28): 34586-34595.
- [3] 谭志强, 李云良, 张奇, 等. 湖泊湿地水文过程研究进展[J]. *湖泊科学*, 2022, **34**(1): 18-37.
Tan Z Q, Li Y L, Zhang Q, *et al.* Progress of hydrological process researches in lake wetland: a review[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, **34**(1): 18-37.
- [4] 王亚宁, 李一平, 程月, 等. 大型浅水湖泊水质模型边界负荷敏感性分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(6): 2778-2786.
Wang Y N, Li Y P, Cheng Y, *et al.* Sensitivity analysis of boundary load reduction in a large shallow lake water quality model[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(6): 2778-2786.
- [5] Alcamo J, Bärlund L, Borchardt D. A snapshot on the world's water quality: towards a full assessment[R]. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2016, doi: 10.13140/RG.2.1.1413.9766.
- [6] 黄冬凌, 倪兆奎, 赵爽, 等. 基于湖泊与出入湖水水质关联性研究: 以鄱阳湖为例[J]. *环境科学*, 2019, **40**(10): 4450-4460.
Huang D L, Ni Z K, Zhao S, *et al.* Correlation analysis of water quality between lake inflow and outflow: a case study of Poyang Lake[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4450-4460.
- [7] Ho J C, Michalak A M, Pahlevan N. Widespread global increase in intense lake phytoplankton blooms since the 1980s[J]. *Nature*, 2019, **574**(7780): 667-670.
- [8] 余茂蕾, 洪国喜, 许海, 等. 湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 603-613.
Yu M L, Hong G X, Xu H, *et al.* Effects of cyanobacterial blooms in eutrophic lakes on water quality of connected rivers[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 603-613.
- [9] Paerl H W, Huisman J. Blooms like it hot[J]. *Science*, 2008, **320**(5872): 57-58.
- [10] Bhavsar P D. Review of remote sensing applications in hydrology and water resources management in India[J]. *Advances in Space Research*, 1984, **4**(11): 193-200.
- [11] 彭令, 梅军军, 王娜, 等. 工矿城市区域水质参数高光谱定量反演[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, **39**(9): 2922-2928.
Peng L, Mei J J, Wang N, *et al.* Quantitative inversion of water quality parameters in industrial and mining cities from hyperspectral remote sensing[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, **39**(9): 2922-2928.
- [12] Yang L P, Driscoll J, Sarigai S, *et al.* Towards synoptic water monitoring systems: a review of AI methods for automating water body detection and water quality monitoring using remote sensing[J]. *Sensors*, 2022, **22**(6), doi: 10.3390/s22062416.
- [13] 武万峰, 徐立中, 徐鸿. 水质自动监测技术综述[J]. *水利水文自动化*, 2004, (1): 14-18.

- Wu W F, Xu L Z, Xu H. Discussion on auto monitoring system of water quality [J]. *Automation in Water Resources and Hydrology*, 2004, (1): 14-18.
- [14] Sagan V, Peterson K T, Maimaitijiang M, *et al.* Monitoring inland water quality using remote sensing: potential and limitations of spectral indices, bio-optical simulations, machine learning, and cloud computing [J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, **205**, doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103187.
- [15] Hong S M, Cho K H, Park S, *et al.* Estimation of cyanobacteria pigments in the main rivers of South Korea using spatial attention convolutional neural network with hyperspectral imagery [J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2022, **59**(1): 547-567.
- [16] 况润元, 罗卫, 张萌. 基于实测数据与遥感影像的鄱阳湖水体光学分类[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, **24**(5): 773-780.
- Kuang R Y, Luo W, Zhang M. Optical classification of Poyang Lake waters based on in situ measurements and remote sensing images[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(5): 773-780.
- [17] 祝令亚. 湖泊水质遥感监测与评价方法研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2006.
- Zhu L Y. Remote sensing monitoring and assessment of water quality for lakes [D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [18] 曲伟, 庞治国, 雷添杰, 等. 中小河流治理及监测监管中的遥感技术应用综述[J]. *水利水电技术*, 2021, **52**(7): 23-32.
- Qu W, Pang Z G, Lei T J, *et al.* Research on the application of remote sensing technology in the management and supervision of small and medium rivers[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2021, **52**(7): 23-32.
- [19] 任春涛. 基于遥感监测的湖泊富营养化状态的模糊模式识别研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007.
- Ren C T. Fuzzy pattern recognition of lake trophic status base on remote sensing technology [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2007.
- [20] 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, **32**(7): 152-155.
- Yu H, Lin B. The application of remote sensing technology in monitoring of water quality for inland lake [J]. *Environmental Science and Management*, 2007, **32**(7): 152-155.
- [21] Majazi N P, Salama M S, Bernard S, *et al.* Remote sensing of euphotic depth in shallow tropical inland waters of Lake Naivasha using MERIS data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, **148**: 178-189.
- [22] Wong M S, Nichol J E, Lee K H, *et al.* Modeling water quality using TERRA/MODIS 500m satellite images [J]. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2008, **37**: 679-684.
- [23] Pulliainen J, Kallio K, Eloheimo K, *et al.* A semi-operative approach to lake water quality retrieval from remote sensing data [J]. *Science of the Total Environment*, 2001, **268**(1-3): 79-93.
- [24] Lathrop R G, Lillesand T M, Yandell B S. Testing the utility of simple multi-date thematic mapper calibration algorithms for monitoring turbid inland waters [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1991, **12**(10): 2045-2063.
- [25] Chawira M, Dube T, Gumindoga W. Remote sensing based water quality monitoring in Chivero and Manyame lakes of Zimbabwe [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2013, **66**: 38-44.
- [26] Kibena J, Nhapi I, Gumindoga W. Assessing the relationship between water quality parameters and changes in landuse patterns in the upper Manyame river, Zimbabwe [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2014, **67-69**: 153-163.
- [27] Baban S M J. Detecting water quality parameters in the Norfolk Broads, U. K., using Landsat imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, **14**(7): 1247-1267.
- [28] 谢欢. 基于遥感的水质监测与时空分析[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- Xie H. Remote sensing based water monitoring and spatial-temporal analysis [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [29] Wang X Y, Yang W. Water quality monitoring and evaluation using remote sensing techniques in China: a systematic review [J]. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2019, **5**(1): 47-56.
- [30] Ding H, Li R R, Lin H, *et al.* Monitoring and evaluation on water quality of Hun River based on landsat satellite data [A]. In: *Proceedings of 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium* [C]. Shanghai: IEEE, 2016. 1532-1537.
- [31] Holyer R J. Toward universal multispectral suspended sediment algorithms [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1978, **7**(4): 323-338.
- [32] Ritchie J C, Schiebe F R, McHenry J R. Remote sensing of suspended sediments in surface waters [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1976, **42**(12): 1539-1545.
- [33] 罗强. 基于遥感数据的乌梁素海水质参数及湿地演化反演研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011.
- Luo Q. Estimation of water quality parameters and wetland evolution by remote sensing for the Lake Wuliangsuhai [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2011.
- [34] 陈洁, 张立福, 张琳珊, 等. 紫外-可见光水质参数在线监测技术研究进展[J]. *自然资源遥感*, 2021, **33**(4): 1-9.
- Chen J, Zhang L F, Zhang L S, *et al.* Research progress on online monitoring technologies of water quality parameters based on ultraviolet-visible spectra [J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2021, **33**(4): 1-9.
- [35] 陶然, 彭金婵, 张豪, 等. 内陆水体叶绿素 a 浓度遥感监测方法研究进展[J]. *地理信息世界*, 2019, **26**(4): 44-53.
- Tao R, Peng J C, Zhang H, *et al.* Research progress on chlorophyll-a monitoring in inland waters based on remote sensing [J]. *Geomatics World*, 2019, **26**(4): 44-53.
- [36] Zhang Y C, Ma R H, Duan H T, *et al.* A novel algorithm to estimate algal bloom coverage to subpixel resolution in Lake Taihu [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, **7**(7): 3060-3068.
- [37] 李海元. 面向水质监测的遥感影像反演关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- Li H Y. For water quality monitoring of key techniques of remote sensing image inversion [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [38] 罗婕纯一, 秦龙君, 毛鹏, 等. 水质遥感监测的关键要素叶绿素 a 的反演算法研究进展[J]. *遥感技术与应用*, 2021, **36**(3): 473-488.
- Luo J C Y, Qin L J, Mao P, *et al.* Research progress in the retrieval algorithms for chlorophyll-a, a key element of water quality monitoring by remote sensing [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2021, **36**(3): 473-488.
- [39] 朱小明. 基于多光谱遥感图像信息的水质污染监测研究[J]. *计算机技术与发展*, 2018, **28**(11): 52-55, 60.
- Zhu X M. Research on water quality monitoring based on multi-spectral remote sensing imagery [J]. *Computer Technology and Development*, 2018, **28**(11): 52-55, 60.

- [40] 孙向辉, 李力. 水体富营养化及其植物修复技术研究进展[J]. 安徽农业科学, 2014, **42**(18): 5902-5905.
Sun X H, Li L. Research progress on eutrofication of water system and phytoremediation[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, **42**(18): 5902-5905.
- [41] Pahlevan N, Lee Z, Wei J W, *et al.* On-orbit radiometric characterization of OLI (Landsat-8) for applications in aquatic remote sensing[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, **154**: 272-284.
- [42] Loveland T R, Dwyer J L. Landsat: building a strong future[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, **122**: 22-29.
- [43] Claverie M, Ju J C, Masek J G, *et al.* The harmonized Landsat and Sentinel-2 surface reflectance data set[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, **219**: 145-161.
- [44] 程曦, 李小平. 淀山湖氮磷营养物 20 年变化及其藻类增长响应[J]. 湖泊科学, 2008, **20**(4): 409-419.
Cheng X, Li X P. 20-year variations of nutrients (N and P) and their impacts on algal growth in Lake Dianshan, China[J]. Journal of Lake Sciences, 2008, **20**(4): 409-419.
- [45] 姜腾龙, 张水燕, 丁程程, 等. 基于 Landsat 系列卫星分析 1985-2015 年东平湖叶绿素 a 浓度变化趋势[J]. 中国环境监测, 2018, **34**(2): 137-144.
Jiang T L, Zhang S Y, Ding C C, *et al.* Analyzing trends of chlorophyll-a concentration in Dongping Lake based on Landsat image from 1985 to 2015[J]. Environmental Monitoring in China, 2018, **34**(2): 137-144.
- [46] 崔爱红, 董广军, 周亚文, 等. 水质关键因素光谱遥感监测技术分析[J]. 测绘科学, 2016, **41**(11): 61-65, 141.
Cui A H, Dong G J, Zhou Y W, *et al.* Analysis on the key factors of water quality based on spectral remote sensing monitoring[J]. Science of Surveying and Mapping, 2016, **41**(11): 61-65, 141.
- [47] Chang N B, Yang Y J, Daranpob A, *et al.* Spatiotemporal pattern validation of chlorophyll-a concentrations in Lake Okeechobee, Florida, using a comparative MODIS image mining approach[J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, **33**(7): 2233-2260.
- [48] Ndungu J, Monger B C, Augustijn D C M, *et al.* Evaluation of spatio-temporal variations in chlorophyll-a in Lake Naivasha, Kenya: remote-sensing approach[J]. International Journal of Remote Sensing, 2013, **34**(22): 8142-8155.
- [49] 吴敏, 王学军. 应用 MODIS 遥感数据监测巢湖水质[J]. 湖泊科学, 2005, **17**(2): 110-113.
Wu M, Wang X J. Application of satellite MODIS in monitoring the water quality of Lake Chaohu[J]. Journal of Lake Sciences, 2005, **17**(2): 110-113.
- [50] Kutser T, Paavel B, Verpoorter C, *et al.* Remote sensing of black lakes and using 810 nm reflectance peak for retrieving water quality parameters of optically complex waters[J]. Remote Sensing, 2016, **8**(6), doi: 10.3390/rs8060497.
- [51] Gholizadeh M H, Melesse A M, Reddi L. A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques[J]. Sensors, 2016, **16**(8), doi: 10.3390/s16081298.
- [52] 王波, 黄津辉, 郭宏伟, 等. 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.
Wang B, Huang J H, Guo H W, *et al.* Progress in research on inland water quality monitoring based on remote sensing[J]. Water Resources Protection, 2022, **38**(3): 117-124.
- [53] 闻建光, 肖青, 杨一鹏, 等. 基于 Hyperion 数据的太湖水体叶绿素 a 浓度遥感估算[J]. 湖泊科学, 2006, **18**(4): 327-336.
Wen J G, Xiao Q, Yang Y P, *et al.* Remote sensing estimation of aquatic chlorophyll-a concentration based on Hyperion data in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2006, **18**(4): 327-336.
- [54] 张兵, 申茜, 李俊生, 等. 太湖水体 3 种典型水质参数的高光谱遥感反演[J]. 湖泊科学, 2009, **21**(2): 182-192.
Zhang B, Shen Q, Li J S, *et al.* Retrieval of three kinds of representative water quality parameters of Lake Taihu from hyperspectral remote sensing data[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, **21**(2): 182-192.
- [55] Flink P, Lindell L T, Östlund C. Statistical analysis of hyperspectral data from two Swedish lakes[J]. Science of the Total Environment, 2001, **268**(1-3): 155-169.
- [56] Zhao S H, Wang Q, Li Y, *et al.* An overview of satellite remote sensing technology used in China's environmental protection[J]. Earth Science Informatics, 2017, **10**(2): 137-148.
- [57] 王彦飞, 李云梅, 吕恒, 等. 环境一号卫星高光谱遥感数据的内陆水质监测适宜性——以巢湖为例[J]. 湖泊科学, 2011, **23**(5): 789-795.
Wang Y F, Li Y M, Lv H, *et al.* Suitability assessment of lake water quality monitoring on waterbody images acquired by HJ-1A hyperspectral imager: a case study of Lake Chaohu[J]. Journal of Lake Sciences, 2011, **23**(5): 789-795.
- [58] 胡琳, 甘淑, 袁希平, 等. 滇池不同空间分布水体的高光谱特征差异分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2020, **42**(4): 695-700.
Hu L, Gan S, Yuan X P, *et al.* Difference analyses on hyperspectral characteristics of spatial distribution of different water bodies in Dianchi Lake[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2020, **42**(4): 695-700.
- [59] 张运林, 施坤, 张毅博, 等. 陆基(地基、岸基)水环境遥感的提出、实践和初步应用[J]. 遥感学报, 2021, **25**(11): 2163-2172.
Zhang Y L, Shi K, Zhang Y B, *et al.* The proposal, practice and preliminary application of land-based (ground-based, shore-based) remote sensing of water environment[J]. Journal of Remote Sensing, 2021, **25**(11): 2163-2172.
- [60] Sun X, Zhang Y L, Shi K, *et al.* Monitoring water quality using proximal remote sensing technology[J]. Science of the Total Environment, 2021, **803**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149805.
- [61] 黄耀欢, 王浩, 肖伟华, 等. 内陆水体环境遥感监测研究评述[J]. 地理科学进展, 2010, **29**(5): 549-556.
Huang Y H, Wang H, Xiao W H, *et al.* The review of inland water environment monitoring based on remote sensing[J]. Progress in Geography, 2010, **29**(5): 549-556.
- [62] 刘建平, 赵英时. 高光谱遥感数据解译的最佳波段选择方法研究[J]. 中国科学院研究生院学报, 1999, (2): 153-161.
Liu J P, Zhao Y S. Methods on optimal bands selection in hyperspectral remote sensing data interpretation[J]. Journal of the Graduate School Academia Sinica, 1999, (2): 153-161.
- [63] 金伟, 葛宏立, 杜华强, 等. 无人机遥感发展与应用概况[J]. 遥感信息, 2009, (1): 88-92.
- [64] Jin W, Ge H L, Du H Q, *et al.* A review on unmanned aerial vehicle remote sensing and its application[J]. Remote Sensing Information, 2009, (1): 88-92.
- [64] 李德仁, 李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, **39**(5): 505-513, 540.
Li D R, Li M. Research advance and application prospect of unmanned aerial vehicle remote sensing system[J]. Geomatics

- and Information Science of Wuhan University, 2014, **39**(5): 505-513, 540.
- [65] 王让虎. 基于多源多尺度数据的东北典型黑土区侵蚀沟遥感监测体系研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- Wang R H. Gully erosion monitoring at multiplescales based on multi-source remote sensing data of the typical black soil area, Northeast China[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [66] 张雅文, 许文盛, 韩培, 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——以鄂北水资源配置工程为例[J]. 中国水土保持科学, 2017, **15**(2): 132-139.
- Zhang Y W, Xu W S, Han P, *et al.* Application of the UAV remote sensing technology in soil and water conservation monitoring in construction projects; a case study of water resources allocation for the region of north Hubei[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2017, **15**(2): 132-139.
- [67] 黄昕晰, 应晗婷, 夏凯, 等. 基于无人机多光谱影像和 OPT-MPP 算法的水质参数反演[J]. 环境科学, 2020, **41**(8): 3591-3600.
- Huang X X, Ying H T, Xia K, *et al.* Inversion of water quality parameters based on UAV multispectral images and the OPT-MPP algorithm[J]. Environmental Science, 2020, **41**(8): 3591-3600.
- [68] 臧传凯, 沈芳, 杨正东. 基于无人机高光谱遥感的河湖水环境探测[J]. 自然资源遥感, 2021, **33**(3): 45-53.
- Zang C K, Shen F, Yang Z D. Aquatic environmental monitoring of inland waters based on UAV hyperspectral remote sensing[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2021, **33**(3): 45-53.
- [69] 朱熹, 刘黎明, 叶张林. 无人机水质遥感监测方法[J]. 中国水运, 2021, (7): 157-159.
- [70] 赵松. 基于多源遥感数据的邯郸市滏阳河水水质参数反演[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021.
- Zhao S. Inversion of water quality parameters of Fuyang River in Handan city based on multi-source remote sensing data[D]. Handan: Hebei university of Engineering, 2021.
- [71] Wang S L, Li J S, Zhang B, *et al.* A simple correction method for the MODIS surface reflectance product over typical inland waters in China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2016, **37**(24): 6076-6096.
- [72] Topp S N, Pavelsky T M, Jensen D, *et al.* Research trends in the use of remote sensing for inland water quality science; moving towards multidisciplinary applications[J]. Water, 2020, **12**(1), doi: 10.3390/w12010169.
- [73] 万金保, 李媛媛. 湖泊水质模型研究进展[J]. 长江流域资源与环境, 2007, **16**(6): 805-809.
- Wan J B, Li Y Y. Progress in the research of lake water quality model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2007, **16**(6): 805-809.
- [74] 曹晓峰. 基于 HJ-1A/1B 影像的滇池水质遥感监测研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2012.
- Cao X F. The study of water quality monitoring in Dianchi Lake based on HJ-1A/1B remote sensing data[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012.
- [75] 刘王兵, 于之锋, 周斌, 等. 杭州湾 HJ CCD 影像悬浮泥沙遥感定量反演[J]. 遥感学报, 2013, **17**(4): 905-918.
- Liu W B, Yu Z F, Zhou B, *et al.* Assessment of suspended sediment concentration at the Hangzhou Bay using HJ CCD imagery[J]. Journal of Remote Sensing, 2013, **17**(4): 905-918.
- [76] 马荣华, 唐军武, 段洪涛, 等. 湖泊水色遥感研究进展[J]. 湖泊科学, 2009, **21**(2): 143-158.
- Ma R H, Tang J W, Duan H T, *et al.* Progress in lake water color remote sensing[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, **21**(2): 143-158.
- [77] 马荣华, 张玉超, 段洪涛. 非传统湖泊水色遥感的现状与发展[J]. 湖泊科学, 2016, **28**(2): 237-245.
- Ma R H, Zhang Y C, Duan H T. The status and development of the non-traditional lake water color remote sensing[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, **28**(2): 237-245.
- [78] 潘邦龙, 申慧彦, 邵慧, 等. 湖泊叶绿素高光谱空谱联合遥感反演[J]. 大气与环境光学学报, 2017, **12**(6): 428-434.
- Pan B L, Shen H Y, Shao H, *et al.* Combined inversion of hyper-spectral remote sensing of space and spectrum for lake chlorophyll[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2017, **12**(6): 428-434.
- [79] 马方凯, 高兆波, 叶帮玲. 基于高分遥感卫星影像的汤逊湖水水质遥感反演[J]. 水资源开发与管理, 2021, (5): 69-75.
- Ma F K, Gao Z B, Ye B L. Remote sensing inversion of Tangxun Lake water quality based on high score remote sensing satellite image[J]. Water Resources Development and Management, 2021, (5): 69-75.
- [80] 徐慧娟. 基于遥感数据的水质评价指标研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- Xu H J. Remote sensing based water quality evaluation index research[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [81] 王林, 白洪伟. 基于遥感技术的湖泊水质参数反演研究综述[J]. 全球定位系统, 2013, **38**(1): 57-61, 72.
- Wang L, Bai H W. Research review on retrieval of water quality parameters about lake based on remote sensing techniques[J]. GNSS World of China, 2013, **38**(1): 57-61, 72.
- [82] 李代伟, 吴天振, 姜祥乐, 等. 基于遥感的内陆水体叶绿素 a 监测研究[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2022, **38**(3): 14-20.
- Li D W, Wu T Z, Jiang X L, *et al.* Study on chlorophyll a monitoring of inland water based on remote sensing[J]. Journal of Chifeng University (Natural Science Edition), 2022, **38**(3): 14-20.
- [83] 刘灿德, 何报寅. 水质遥感监测研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2005, **27**(5): 40-44.
- Liu C D, He B Y. Progresses in water quality monitoring using remote sensing[J]. World Sci-tech R&D, 2005, **27**(5): 40-44.
- [84] Politi E, Cutler M E J, Rowan J S. Evaluating the spatial transferability and temporal repeatability of remote-sensing-based lake water quality retrieval algorithms at the European scale: a meta-analysis approach[J]. International Journal of Remote Sensing, 2015, **36**(11): 2995-3023.
- [85] 林剑远, 张长兴, 尤红建. 基于固有光学量的高光谱数据反演城市河网水质[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, **39**(12): 3761-3768.
- Lin J Y, Zhang C X, You H J. Retrieval of water quality parameters of urban river network using hyperspectral data based on inherent optical parameters[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, **39**(12): 3761-3768.
- [86] 张带琴. 基于多源遥感信息的鄱阳湖叶绿素浓度反演模型研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2019.
- Zhang D Q. Inversion model of chlorophyll concentration in Poyang Lake based on multi-source remote sensing information[D]. Nanchang: Nanchang University, 2019.
- [87] 徐宗宝. 基于混合优化 BP 神经网络的水质预测系统的研究与实现[D]. 北京: 北京工业大学, 2020.
- Xu Z B. Research and realization of water quality prediction

- system based on hybrid optimized BP neural network [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2020.
- [88] 周正, 桂圣熙, 李玉翠, 等. 基于组合光谱指数的巢湖典型水质参数反演研究[J]. 人民长江, 2020, **51**(9): 45-50, 182.
- Zhou Z, Gui S X, Li Y C, *et al.* Inversion of typical water quality parameters in Chaohu Lake based on composite spectral indices[J]. Yangtze River, 2020, **51**(9): 45-50, 182.
- [89] Yang W, Matsushita B, Chen J, *et al.* Estimating constituent concentrations in case II waters from MERIS satellite data by semi-analytical model optimizing and look-up tables[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, **115**(5): 1247-1259.
- [90] 黄昌春, 李云梅, 王桥, 等. 悬浮颗粒物和叶绿素普适性生物光学反演模型[J]. 红外与毫米波学报, 2013, **32**(5): 462-467.
- Huang C C, Li Y M, Wang Q, *et al.* Suspended particle matter and chlorophyll-a universal bio-optical retrieval model [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2013, **32**(5): 462-467.
- [91] Rinaldi E, Nardelli B B, Volpe G, *et al.* Chlorophyll distribution and variability in the sicily channel (Mediterranean sea) as seen by remote sensing data [J]. Continental Shelf Research, 2014, **77**: 61-68.
- [92] Marghany M, Hashim M. MODIS satellite data for modeling chlorophyll-a concentrations in Malaysian coastal waters [J]. International Journal of Physical Sciences, 2010, **5**(10): 1489-1495.
- [93] 周冠华, 唐军武, 田国良, 等. 内陆水质遥感不确定性: 问题综述[J]. 地球科学进展, 2009, **24**(2): 150-158.
- Zhou G H, Tang J W, Tian G L, *et al.* Uncertainty analysis of inland water quality remote sensing: a review[J]. Advances in Earth Science, 2009, **24**(2): 150-158.
- [94] Bresciani M, Stroppiana D, Odermatt D, *et al.* Assessing remotely sensed chlorophyll-a for the implementation of the water framework directive in European perialpine lakes[J]. Science of the Total Environment, 2011, **409**(17): 3083-3091.
- [95] 项雅波, 张春萍, 武治国, 等. 基于 Landsat 8 数据的沙湖叶绿素 a 反演研究[J]. 国土与自然资源研究, 2022, (1): 88-91.
- Xiang Y B, Zhang C P, Wu Z G, *et al.* Inversion study on chlorophyll a of Shahu Lake based on Landsat 8 data [J]. Territory & Natural Resources Study, 2022, (1): 88-91.
- [96] O'Reilly J E, Maritorena S, Siegel D A, *et al.* Ocean color chlorophyll a algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4; version 4 [A]. In: Hooker S B, Firestone E (Eds.). Seawifs Postlaunch Calibration and Validation Analyses [C]. Greenbelt: Goddard Space Flight Center, 2000. 937-953.
- [97] 沈蔚, 纪茜, 邱耀辉, 等. 基于高光谱遥感的长江口叶绿素 a 浓度反演推算[J]. 水生态学杂志, 2021, **42**(3): 1-6.
- Shen W, Ji Q, Qiu Y W, *et al.* Estimation of chlorophyll-a concentrations in the Yangtze River estuary obtained from hyperspectral remote sensing images [J]. Journal of Hydroecology, 2021, **42**(3): 1-6.
- [98] 王莹, 刘其根, 冯权泷, 等. 基于 ETM + 影像的千岛湖叶绿素 a 浓度卫星遥感反演研究[J]. 激光生物学报, 2015, **24**(5): 441-447.
- Wang Y, Liu Q G, Feng Q L, *et al.* Inversion of chlorophyll-a concentration based on satellite remote sensing in Qiandao Lake [J]. Acta Laser Biology Sinica, 2015, **24**(5): 441-447.
- [99] Moses W J, Gitelson A A, Berdnikov S, *et al.* Estimation of chlorophyll-a concentration in case II waters using MODIS and MERIS data—successes and challenges [J]. Environmental Research Letters, 2009, **4**(4), doi: 10.1088/1748-9326/4/4/045005.
- [100] Lei F, Yu Y, Zhang D J, *et al.* Water remote sensing eutrophication inversion algorithm based on multilayer convolutional neural network[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2020, **39**(4): 5319-5327.
- [101] Tehrani N A, Janalipour M, Babaei H. Estimating water surface chlorophyll-a concentration by big remote sensing data in the Persian Gulf, Bushehr [J]. Remote Sensing in Earth Systems Sciences, 2021, **4**(1): 87-95.
- [102] Riddick C A L, Hunter P D, Gómez J A D, *et al.* Optimal cyanobacterial pigment retrieval from ocean colour sensors in a highly turbid, optically complex lake [J]. Remote Sensing, 2019, **11**(13), doi: 10.3390/rs11131613.
- [103] Cheng C M, Wei Y C, Lv G N, *et al.* Remote sensing estimation of chlorophyll-a concentration in Taihu Lake considering spatial and temporal variations[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2019, **191**(2), doi: 10.1007/s10661-018-7106-4.
- [104] 朱冰川, 尤凯, 石浚哲, 等. 基于 GOCI 数据的太湖叶绿素 a 浓度反演和蓝藻水华遥感监测[J]. 环境污染与防治, 2020, **42**(8): 1021-1025, 1032.
- Zhu B C, You K, Shi J Z, *et al.* Retrieval of chlorophyll-a and remote sensing monitoring of cyanobacteria blooms in Taihu Lake based on GOCI data[J]. Environmental Pollution and Control, 2020, **42**(8): 1021-1025, 1032.
- [105] 刘瑶, 李俊生, 肖晨超, 等. 资源一号 02D 高光谱影像内陆水体叶绿素 a 浓度反演[J]. 遥感学报, 2022, **26**(1): 168-178.
- Liu Y, Li J S, Xiao C C, *et al.* Inland water chlorophyll-a retrieval based on ZY-102D satellite hyperspectral observations [J]. Journal of Remote Sensing, 2022, **26**(1): 168-178.
- [106] 桂桂红. 基于 GOCI 影像的内陆水体悬浮物浓度遥感估算研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2013.
- Zha G H. Study on remote sensing estimation of suspended solids concentration of inland waters based on GOCI data [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2013.
- [107] Pahlevan N, Smith B, Alikas K, *et al.* Simultaneous retrieval of selected optical water quality indicators from Landsat-8, Sentinel-2, and Sentinel-3 [J]. Remote Sensing of Environment, 2022, **270**, doi: 10.1016/j.rse.2021.112860.
- [108] Ye M, Sun Y H. Review of the Forel-Ule index based on in situ and remote sensing methods and application in water quality assessment[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, **29**(9): 13024-13041.
- [109] Shi K, Zhang Y L, Zhu G W, *et al.* Long-term remote monitoring of total suspended matter concentration in Lake Taihu using 250 m MODIS-Aqua data [J]. Remote Sensing of Environment, 2015, **164**: 43-56.
- [110] Williamson A N, Grabau W E. Sediment concentration mapping in tidal estuaries [A]. In: Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium [C]. Washington: NASA, 1974. 1347-1386.
- [111] Dekker A G, Peters S W M. The use of the thematic mapper for the analysis of eutrophic lakes: a case study in the Netherlands [J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, **14**(5): 799-821.
- [112] 马荣华, 戴锦芳. 结合 Landsat ETM 与实测光谱估测太湖叶绿素及悬浮物含量[J]. 湖泊科学, 2005, **17**(2): 97-103.
- Ma R H, Dai J F. Quantitative estimation of chlorophyll-a and

- total suspended matter concentration with Landsat ETM based on field spectral features of Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2005, **17**(2): 97-103.
- [113] 宋庆君, 马荣华, 唐军武, 等. 秋季太湖悬浮物高光谱估算模型[J]. *湖泊科学*, 2008, **20**(2): 196-202.
- Song Q J, Ma R H, Tang J W, *et al.* Models of estimated total suspend matter concentration base on hyper-spectrum in Lake Taihu, in autumn [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, **20**(2): 196-202.
- [114] Aiken G R, McKnight D M, Wershaw R L, *et al.* Humic substances in soil, sediment and water: geochemistry, isolation and characterization [M]. New York: Wiley, 1985.
- [115] Gitelson A. The peak near 700 nm on radiance spectra of algae and water: relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, **13**(17): 3367-3373.
- [116] 陈军, 王保军, 孙记红, 等. 基于 Landsat/TM 影像提取太湖 CDOM 浓度空间分布[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, **31**(1): 34-38.
- Chen J, Wang B J, Sun J H, *et al.* Study on colored dissolved organic matter concentration retrieved from Landsat/TM imagery at Taihu Lake [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, **31**(1): 34-38.
- [117] 陈晓玲, 陈莉琼, 于之锋, 等. 长江中游湖泊 CDOM 光学特性及其空间分布对比[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(2): 248-254.
- Chen X L, Chen L Q, Yu Z F, *et al.* Chromophoric dissolved organic matter optical characteristics and spatial distribution in the lakes of the middle reaches of the Yangtze River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, **21**(2): 248-254.
- [118] 赵玉芹, 汪西莉, 蒋赛. 渭河水质遥感反演的人工神经网络模型研究[J]. *遥感技术与应用*, 2009, **24**(1): 63-67.
- Zhao Y Q, Wang X L, Jiang S. Study on neural network model for Weihe River water quality retrieving using remote-sensing image [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2009, **24**(1): 63-67.
- [119] Song K S, Li L, Tedesco L P, *et al.* Remote quantification of phycocyanin in potable water sources through an adaptive model [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, **95**: 68-80.
- [120] 宋开山, 温志丹, 刘阁, 等. 内陆水体 CDOM 光学特性与遥感反演研究进展[J]. *吉林师范大学学报(自然科学版)*, 2018, **39**(4): 115-125.
- Song K S, Wen Z D, Liu G, *et al.* The research progress of CDOM optical characteristics and remote sensing retrieval for inland waters [J]. *Jilin Normal University Journal (Natural Science Edition)*, 2018, **39**(4): 115-125.
- [121] 林同云. 熵权集对分析模型在湖泊富营养化评价中的应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- Lin T Y. Research on evaluation of lake eutrophication by set pair analysis model based on entropy weight [D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [122] Duntley S, Preisendorfer R. The Visibility of Submerged Objects (Chapters 1 through 4) [M]. UC San Diego: Scripps Institution of Oceanography, 1952.
- [123] Yin Z Y, Li J S, Liu Y, *et al.* Water clarity changes in Lake Taihu over 36 years based on Landsat TM and OLI observations [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, **102**, doi: 10.1016/j.jag.2021.102457.
- [124] Knight J F, Voth M L. Application of MODIS imagery for intra-annual water clarity assessment of Minnesota lakes [J]. *Remote Sensing*, 2012, **4**(7): 2181-2198.
- [125] Wu G F, De Leeuw J, Skidmore A K, *et al.* Comparison of MODIS and Landsat TM5 images for mapping tempo-spatial dynamics of secchi disk depths in Poyang Lake national nature reserve, China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, **29**(8): 2183-2198.
- [126] 马建行, 宋开山, 邵田田, 等. 基于 HJ-CCD 和 MODIS 的吉林省中西部湖泊透明度反演对比[J]. *湖泊科学*, 2016, **28**(3): 661-668.
- Ma J H, Song K S, Shao T T, *et al.* Comparison of water transparency retrieving of lakes in the mid-east part of Jilin province based on HJ-CCD and MODIS imagery [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, **28**(3): 661-668.
- [127] Song K S, Liu G, Wang Q, *et al.* Quantification of lake clarity in China using Landsat OLI imagery data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, **243**, doi: 10.1016/j.rse.2020.111800.
- [128] Wang S L, Li J S, Zhang B, *et al.* Changes of water clarity in large lakes and reservoirs across China observed from long-term MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, **247**, doi: 10.1016/j.rse.2020.111949.
- [129] Liu D, Duan H T, Loiselle S, *et al.* Observations of water transparency in China's lakes from space [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, **92**, doi: 10.1016/j.jag.2020.102187.
- [130] Abayazid H O, El-Adawy A. Assessment of a non-optical water quality property using space-based imagery in Egyptian coastal lake [J]. *Journal of Water Resource and Protection*, 2019, **11**(6): 713-727.
- [131] Huang J J, Guo H W, Chen B W, *et al.* Retrieval of non-optically active parameters for small scale urban waterbodies by a machine learning-based strategy [J]. *Environmental Sciences*, 2020, **4**(1), doi: 10.20944/preprints202004.0111.v1.
- [132] 陈艳, 刘绥华, 王堃, 等. 基于 Landsat 卫星影像的草海水水质遥感反演及营养状态评价[J]. *水生态学杂志*, 2020, **41**(3): 24-31.
- Chen Y, Liu S H, Wang K, *et al.* Remote sensing of Caohai Lake water quality using Landsat satellite images [J]. *Journal of Hydroecology*, 2020, **41**(3): 24-31.
- [133] 徐良将, 黄昌春, 李云梅, 等. 基于高光谱遥感反射率的总氮总磷的反演[J]. *遥感技术与应用*, 2013, **28**(4): 681-688.
- Xu L J, Huang C C, Li Y M, *et al.* Deriving concentration of TN, TP based on hyper spectral reflectivity [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013, **28**(4): 681-688.
- [134] 杜程, 李得林, 李根军, 等. 基于高原盐湖光谱特性下的溶解氧反演应用与探讨[J]. *自然资源遥感*, 2021, **33**(3): 246-252.
- Du C, Li D L, Li G J, *et al.* Application and exploration of dissolved oxygen inversion of plateau salt lakes based on spectral characteristics [J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2021, **33**(3): 246-252.
- [135] Niu C, Tan K, Jia X, *et al.* Deep learning based regression for optically inactive inland water quality parameter estimation using airborne hyperspectral imagery [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **286**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117534.
- [136] IOCCG. Earth observations in support of global water quality monitoring [R]. Dartmouth: International Ocean-Colour Coordinating Group, 2018. 132.

- [137] 李健. 利用 MODIS 图像反演水色三要素的方法研究[D]. 芜湖: 安徽师范大学, 2011.
- Li J. A study on the chlorophyll_a suspended matter and gelbstoff concentrations based on MODIS data [D]. Wuhu: Anhui Normal University, 2011.
- [138] 罗菊花, 杨井志成, 段洪涛, 等. 浅水湖泊水生植被遥感监测研究进展[J]. 遥感学报, 2022, **26**(1): 68-76.
- Luo J H, Yang J Z C, Duan H T, *et al.* Research progress of aquatic vegetation remote sensing in shallow lakes [J]. Journal of Remote Sensing, 2022, **26**(1): 68-76.
- [139] 李燕, 顾圣海. 风力影响下湖泊湍流特征及其对湖泊污染沉积物影响研究[J]. 水利科技与经济, 2021, **27**(5): 7-12.
- Li Y, Gu S H. Study on turbulence characteristics of lakes under the influence of wind and its influence on polluted lake sediments[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2021, **27**(5): 7-12.
- [140] 田伟, 杨周生, 邵克强, 等. 城市湖泊水环境整治对改善水质的影响: 以蠡湖近 30 年水质变化为例[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 183-193.
- Tian W, Yang Z S, Shao K Q, *et al.* Effect of a comprehensive improvement project on water quality in urban lakes: a case study of water quality variation in Lihu Lake over the past 30 years[J]. Environmental Science, 2020, **41**(1): 183-193.

环境科学

CONTENTS

Research Progress of SOA Formation from Anthropogenic VOCs Under Complex Pollution Condition	CHEN Tian-zeng, LIU Jun, MA Qing-xin, <i>et al.</i>	(1201)
Advances in Microbial Degradation and Transformation of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs)	SUN Hong-wen, FANG Bo, CHEN Hao, <i>et al.</i>	(1214)
Research Progress on Remote Sensing Monitoring of Lake Water Quality Parameters	WANG Si-meng, QIN Bo-qiang	(1228)
Research Progress on Trojan-horse Effect of Microplastics and Heavy Metals in Freshwater Environment	ZHAO Wei-gao, TIAN Yi-mei, ZHAO Peng, <i>et al.</i>	(1244)
Temporal and Spatial Characteristics of Net CO ₂ Emissions and Decoupling Analysis in Yangtze River Economic Belt	WU Yi-fan, XU Yang, TANG Yang-bo, <i>et al.</i>	(1258)
Changes in Land Use Carbon Emissions and Coordinated Zoning in China	LI Yuan-yuan, WEI Wei, ZHOU Jun-ju, <i>et al.</i>	(1267)
Multi-dimensional Analysis of the Synergistic Effect of Pollution Reduction and Carbon Reduction in Tianjin Based on the STIRPAT Model	LIU Mao-hui, YUE Ya-yun, LIU Sheng-nan, <i>et al.</i>	(1277)
Railway Emission Trends in China Based on Fuel Life Cycle Analysis	TONG Hui, FAN Zhao-yang, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i>	(1287)
Pollution Characteristics of PM _{2.5} Chemical Composition in Zhejiang Province	ZHOU Jing-qing, YU Lei, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>	(1297)
Seasonal Variations, Size Distributions, and Sources of Chemical Components of Submicron Particulate Matter in Nanjing	XU Zhen-qi, SHANG Yue, DING Feng, <i>et al.</i>	(1310)
Seasonal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Components in Luoyang: Implication for Brown Carbon Contribution	YAN Guang-xuan, HOU Ming-yang, ZHANG Pu-zhen, <i>et al.</i>	(1319)
Establishment and Spatial Distribution of S/IVOCs Emission Inventory in Jiangsu Province in 2019	SONG Tong-ai, ZHANG Jia-ying, GUAN Lu, <i>et al.</i>	(1328)
Compositional Characteristics of Volatile Organic Compounds in Typical Industrial Areas of the Pearl River Delta: Importance of Oxygenated Volatile Organic Compounds	SONG Xin, YUAN Bin, WANG Si-hang, <i>et al.</i>	(1336)
Evolution and Characteristics of Full-process Vehicular VOCs Emissions in Tianjin from 2000 to 2020	SUN Lu-na, ZHONG Chong-zhi, SUN Shi-da, <i>et al.</i>	(1346)
Port-owned Mobile Source Air Pollutant Emission Inventory	XU Xiao-fan, WANG Bao-qing, WU Jun-cheng, <i>et al.</i>	(1357)
Simulation and Regulation of Sustainable Utilization of Water Resources in China Based on Improved Water Resources Ecological Footprint Model	OUYANG Xing-tao, LIAO Hao-yu, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i>	(1368)
Occurrence Distribution and Risk Assessment of Organophosphate Esters in A Typical Area of the Estuary in the Yellow River Basin	CAO Miao, GUO Chang-sheng, ZHANG Heng, <i>et al.</i>	(1378)
Pollution Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Sediments of Huixian Karst Wetland in Guilin	YU Yue, XING Xin-li, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	(1387)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments from Major River Systems in Maoming City, Guangdong Province	CHEN Xiao-xia, ZHANG Min, LI Bei, <i>et al.</i>	(1397)
Temporal-spatial Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Water of Ningbo	XU Mei-juan, YANG Jia, REN Xiao-jing, <i>et al.</i>	(1407)
Analysis of Water Chemistry Characteristics and Hydraulic Relationships of Different Water Bodies in Typical Mountain-oasis Systems in the Northwest Inland Area	WANG Shi-yu, SUN Cong-jian, CHEN Wei, <i>et al.</i>	(1416)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Pore-water in the Middle and Upper Reaches of Muwen River	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(1429)
Spatial-temporal Variation in Groundwater Quality and the Contamination Source Analysis in Shihezi-Changji Area	DING Qi-zhen, ZHOU Jin-long, JI Yan-zhen, <i>et al.</i>	(1440)
Analysis of Mechanism and Start-up Thresholds of Seasonal Algal Blooms in a Northern Eutrophic Stratified Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, KONG Chang-hao, <i>et al.</i>	(1452)
Characteristics of Benthic Diatom Community Structure and Water Ecological Health Evaluation in the Lalin River Basin	SHAN Tao, YUAN An-long, HUANG Zi-ni, <i>et al.</i>	(1465)
Bacterioplankton Communities and Assembly Mechanisms in Wet Season of Lakes, Nanchang	GAO Peng-fei, WANG Peng, HUANG Yi, <i>et al.</i>	(1475)
Seasonal Variation and Influencing Factors of Bacterial Communities in Storage Reservoirs	DING Ning, YANG Ying-ying, WAN Nian-xin, <i>et al.</i>	(1484)
Vertical Distribution and Source Tracking Analysis of Bacteria Composition and Nitrogen Metabolism Function of a Typical Urban Inland River	TAN Qiu-yang, LÜ Jin-yan, BAI Xian-yu, <i>et al.</i>	(1497)
Contribution Analysis of External Source Pollution Load and Environmental Capacity Estimation of Reservoirs in Central Yunnan Plateau	GUO Yu-jing, LI Hong-bing, WANG Shu-ming, <i>et al.</i>	(1508)
Preparation of Narrow Pore Diameter Phosphorus Containing Cotton Stalk Carbon and Its Adsorption Mechanism for Tetracycline	ZENG Shao-yi, LI Kun-quan	(1519)
Preparation of High Specific Surface Thiourea Modified Peanut Shell Carbon and Adsorption of Tetracycline and Copper	MIN Bing-kun, LI Kun-quan	(1528)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes on Different Water Supply Pipes	LIU Chen-xu, BAI Xiao-hui	(1537)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Sequestration and Aggregate Stability in Water-Eroded Environment: A Meta-analysis	YANG Rui-zhe, YANG Shi-long, WENG Xi-zhe, <i>et al.</i>	(1542)
Effects of Warming and Fertilization on Soil Organic Carbon and Its Labile Components in Rice-wheat Rotation	DENG Xu-zhe, HAN Chen, XUE Li-xiang, <i>et al.</i>	(1553)
Horizontal Variation Characteristics of Alpine Grassland Soil Function and Vertical Changes Along Soil Genetic Horizons in the Three-River Headwaters Region	LI Bo-jian, SHEN Cong-cong, LIU Si-yi, <i>et al.</i>	(1562)
CH ₄ Fluxes and Their Comprehensive Greenhouse Effects with CO ₂ Fluxes in Direct-seeded Rice in Poyang Lake Plain	SHI Yuan-zhi, CUI Yuan-lai, CAI Shuo, <i>et al.</i>	(1572)
Vertical Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil PAHs in Different Land Use Types	ZHOU Zhi-yan, ZHANG Xiu-xiu, WANG Fei, <i>et al.</i>	(1583)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Per- and Polyfluoroalkyl Substances and Emerging Alternatives in Road Dust, Shijiazhuang	LI Peng-fei, WANG Yuan, YANG Chen, <i>et al.</i>	(1593)
Spatial Distribution Characteristics and Assessment of Heavy Metal Pollution in Cultivated Soil of Agricultural Small Watershed in Typical Mining Area in South China	YANG Yu, GUO Ting-ting, LIU Xiao-li, <i>et al.</i>	(1602)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Vegetable Field in the Three Gorges Reservoir Area (Chongqing Section)	SHI Yu-jia, FANG Lin-fa, FANG Biao, <i>et al.</i>	(1611)
Accumulation Characteristics and Influencing Factors of Heavy Metals in Cultivated Land Surface Soil in Lanzhou	KANG Le, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i>	(1620)
Enrichment Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Industrial and Mining Area of Northern Guangdong Province	WANG Yue, MO Li, YU Xin-xiao, <i>et al.</i>	(1636)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soil of a Lead Plant in Sanmenxia	LU Xiao-hui, YU Fang-zhong, FAN Yi-ming, <i>et al.</i>	(1646)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soils of a Testing Range	WANG Shi-yu, LI Chun, ZHAO Hong-wei, <i>et al.</i>	(1657)
Effectiveness and Mechanisms of Chemical Leaching Combined with Electrokinetic Technology on the Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil	MA Qiang, WEI Ze-bin, WU Qi-tang	(1668)
Emission Characteristics and Control of Heavy Metals in Secondary Copper Smelting Process	LIN Bing-cheng, WU Guang-long, ZHENG Ming-hui, <i>et al.</i>	(1678)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Soil-crops System in Anhui Section of the Yangtze River Basin	LIU Hai, WEI Wei, HUANG Jian-min, <i>et al.</i>	(1686)
In-situ Remediation Effect of Cadmium-polluted Agriculture Land Using Different Amendments Under Rice-wheat Rotation	ZHANG Lu, TANG Chan, YU Hai-ying, <i>et al.</i>	(1698)
Effect and Persistent Effect of Thiolated Montmorillonite on Safe Production in Cadmium-contaminated Cropland	FENG Xian-cui, CHEN Ya-gang, JIAO Hong-peng, <i>et al.</i>	(1706)
Effects of Earthworm, Straw, and Citric Acid on the Remediation of Zn, Pb, and Cd Contaminated Soil by <i>Solanum photeinocarpum</i> and <i>Pterocypsla indica</i>	CHEN Min-ni, NIE Xiao-qi, ZHANG Xing-feng, <i>et al.</i>	(1714)
Availability of Se-rich Arable Land in High Geological Background Area and Suggestions for Zoning	WANG Rui, LI Yu, YU Jing, <i>et al.</i>	(1727)
Characteristics and Causes of Ge Enrichment in Vegetable Growing Areas of Beixintun Town, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, JIN Ai-fang, <i>et al.</i>	(1735)
Structural Diversity and Its Temporal Variation in the Soil Bacterial Community Under Plantations of <i>Taxodium distichum</i> in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir Area	TAN Xue, DONG Zhi, ZHANG Li-miao, <i>et al.</i>	(1748)
Effect of the Process of Returning Farmland to Forest in the Loess Hilly Area on Soil Fungal Communities	ZHANG Lei, WANG Qiang, YANG Xin-yue, <i>et al.</i>	(1758)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Substitute with Organic Fertilizer on Soil Functional Microbes and Lemon Yield and Quality	WANG Ying-yan, XIONG Zi-yi, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	(1768)
Dynamic Changes in Antibiotic Resistance Genes During Biological Fermentation of Chicken Manure and Pig Manure	ZHANG Dan, PENG Shuang, WANG Dan-qing, <i>et al.</i>	(1780)
Effects of Cow Manure Application on Soil Microbial Community in Farmland	ZHANG Ya-li, GUO Xiao-ming, HU Hui, <i>et al.</i>	(1792)