

湖泊遥感研究进展与展望

段洪涛^{1,2,3}, 曹志刚¹, 沈明¹, 马金戈¹, 齐天赐¹

1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所 中国科学院流域地理学重点实验室, 南京 210008;

2. 西北大学 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127;

3. 西北大学 城市与环境学院, 西安 710127

摘要: 湖泊遥感作为一门新型交叉学科, 是湖泊科学和遥感科学的重要分支。本文探讨了湖泊遥感科学的研究对象、内容和方法, 通过梳理国内外总体研究进展, 总结出湖泊遥感的5个发展趋势: (1) 关注问题, 从兴趣导向发展到问题导向; (2) 观测手段, 从地基遥感/中分辨率卫星发展到高分辨率/高光谱/无人机; (3) 算法算力, 从单机版经验/机理模型发展到云计算器算法; (4) 研究维度, 从水体表层发展到垂向剖面; (5) 研究区域, 从单一/区域湖泊发展到国家/大洲/全球尺度。最后, 指出了湖泊遥感学科未来的重点发展方向: (1) 研制满足湖泊观测特点的静止卫星或小卫星集群; (2) 发展湖泊水色遥感标准算法, 建设全球湖泊卫星遥感监测网络; (3) 加强全球变化背景下的湖泊盐度、温度和碳循环等遥感研究; (4) 开展全流域统筹的湖泊天空地遥感监测和模拟研究。

关键词: 湖泊遥感, 机器学习, 监测网络, 卫星星座, 可持续发展, 大数据, 水色遥感

引用格式: 段洪涛, 曹志刚, 沈明, 马金戈, 齐天赐. 2022. 湖泊遥感研究进展与展望. 遥感学报, 26(1): 3-18

Duan H T, Cao Z G, Shen M, Ma J G and Qi T C. 2022. Review of lake remote sensing research. National Remote Sensing Bulletin, 26(1): 3-18 [DOI: 10.11834/jrs.20221301]

1 引言

现代湖泊学认为, 湖泊学是研究湖泊、沼泽的形成与演变的学科, 包括湖泊、沼泽中发生的水文、水质与水生生物过程及这些过程之间的相互作用与影响, 其与海洋学的研究共同组成了对水生生态系统的研究(沈吉等, 2020)。遥感科学是在地球科学与传统物理学、现代高科技基础上发展起来的一门新兴交叉学科, 为人类提供对地观测的多种信息和遥感数据产品(李小文, 2006)。而湖泊遥感作为交叉学科, 是指利用传感器等对地观测手段, 进行远距离非接触观测湖泊和湖岸带及其变化的一门学科(柯长青, 2004)。实际上, 湖泊遥感的核心是在全球变化和人类活动背景下, 围绕湖泊生态环境和水文等问题的遥感。也就是说, 湖泊遥感首先是湖泊的问题; 在此基础上, 才是遥感自身的问题。因此, 湖泊遥感的关键是首先针对湖泊自身问题, 确定某一类

或某一个关键或敏感因子作为研究对象; 在实现这些因子高精度遥感的过程中, 围绕遥感数据的预处理、大气校正、算法构建和验证、长时间序列数据重构、湖泊问题分析和诊断等逐一展开。

湖泊遥感和其他遥感领域一样, 最早始于1960年代。基于Web of Science数据库的lake、reservoir、remote sensing、satellite共4个主题词检索发现, 目前已发表近20000篇论文。其中, 1974年美国NASA的Robert Wrigley和加州大学伯克利分校的Alexander Horne合作发表于Nature的“Remote-sensing and lake eutrophication”可作为国际湖泊遥感研究的早期代表作, 其通过红外航空照片发现美国加州的克利尔湖(Lake Clear)出现蓝藻水华, 并指出由于藻类水华可能会在几分钟内发生较大变化, 因而常规湖沼学技术并没有观测到(Wrigley和Horne, 1974)。结合中国知网(CNKI)的检索发现, 中国科学院地理研究所濮静娟和王长耀1979年发表在《地理学报》的“利用

收稿日期: 2021-05-05; 预印本: 2021-08-01

基金项目: 国家自然科学基金(编号:41971309, 42101378); 蓝藻监控预警系统及平台建设项目(编号:YNYG2020-0611)

第一作者简介: 段洪涛, 1979年生, 男, 研究员, 研究方向为湖泊遥感和智慧流域。E-mail: htduan@niglas.ac.cn

卫星遥感资料研究河口三角洲、湖泊的动态”是国内湖泊遥感早期代表作，该文主要利用地球资源卫星多光谱照片和地面资料，论证卫星遥感资料在湖泊动态和发展趋势研究方面应用的可能性(濮静娟和王长耀，1979)。从这两篇中外早期文献可以看出，遥感最初主要被当作“上帝之眼”，开展常规手段无法或者较难捕捉的湖泊大范围变化或异常观测，发挥了给湖泊“照相”的作用，未过多涉及遥感机理等方面的工作。

经过近半个世纪的发展，湖泊遥感已经从最初利用光学遥感影像定性观测水华或湖岸带变化的简单应用，发展成瞄准人类活动和全球变化影响下的湖泊变化和响应等复杂问题，联合天空地多源、多类型、多尺度遥感手段(段洪涛等，2020)，从经验模型、机理模型再到机器学习算法，实现湖泊多参数长时间序列定性定量遥感的综合研究。针对2020年以前全球湖泊和水库卫星

遥感文献关键词词频统计(图1)，出现超过100次的有15个，第20名“Eutrophication”出现91次，涉及到不同的区域、不同的关注问题、不同的传感器和不同的研究手段；湖泊遥感已经开枝散叶，多元化发展，应用广泛，展现出蓬勃的生命力。集中到全球500 km²以上湖泊和水库(图2(a))，发现近半个世纪以来SCI论文数量显著增加，从1985年前年均不到20篇，发展到近5年(2016年—2020年)年均超过1000篇(图2(b))。其中，北美、亚欧大陆和非洲地区大湖遥感研究最集中(图2(c))。中国太湖、鄱阳湖近5年已成为全球遥感研究最多的湖泊，青海湖、三峡水库、纳木错和巢湖等4个湖泊和水库也位居全球前20名；但实际上中国湖泊不管是面积还是数量在全球的比重并不高，这体现了中国在全球湖泊遥感领域中的主导和领先地位。



图1 全球湖泊遥感前900个关键词,其中排名前20名分别是: Remote sensing, MODIS, Landsat, Water quality, GIS, Climate change, Lakes, Planets and satellites, Chlorophyll-a, Hydrology, NDVI, Wetland, Tibetan Plateau, SAR, Satellite altimetry, Monitoring, Poyang lake, Cyanobacteria, Eutrophication

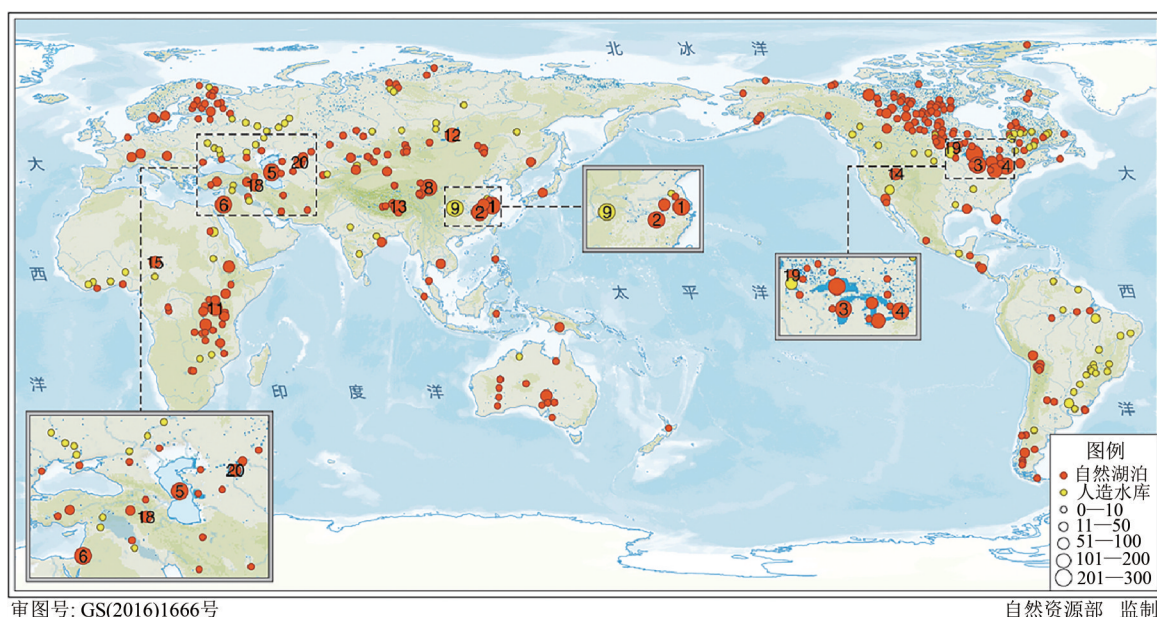
Fig. 1 The top 900 keywords of global lake remote sensing, among which the top 20 are: Remote sensing, MODIS, Landsat, Water quality, GIS, Climate change, Lakes, Planets and satellites, Chlorophyll-a, Hydrology, NDVI, Wetland, Tibetan Plateau, SAR, Satellite altimetry, Monitoring, Poyang lake, Cyanobacteria, Eutrophication

湖泊(含水库)作为中国85%以上人口的主要饮用水源地和“山水林田湖草”生命共同体的重要一环,越来越受到关注;遥感作为唯一可以

实现大范围、周期性、业务化监测的手段,已经在湖泊监测和研究方面发挥重要作用。湖泊遥感作为湖泊科学和遥感科学的一个分支和交叉学科,

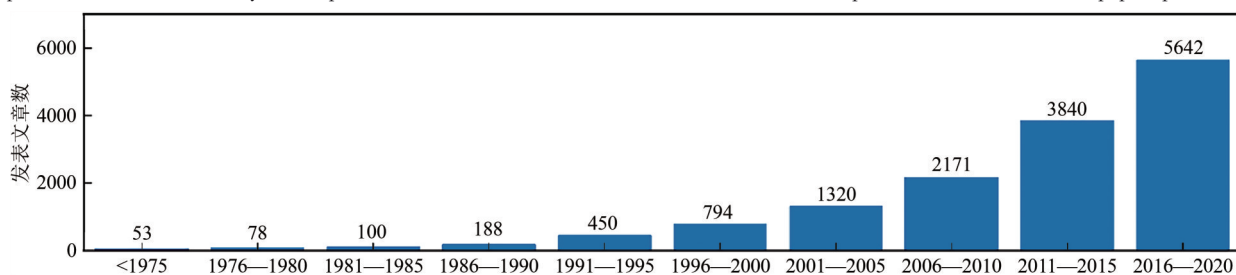
与其他学科相互借鉴，相互促进，但也自成体系，且充满了活力。本文介绍了湖泊遥感的研究对象、

问题和主要手段，回顾了国内外湖泊遥感研究的相关进展，最后探讨了湖泊遥感未来的发展趋势。



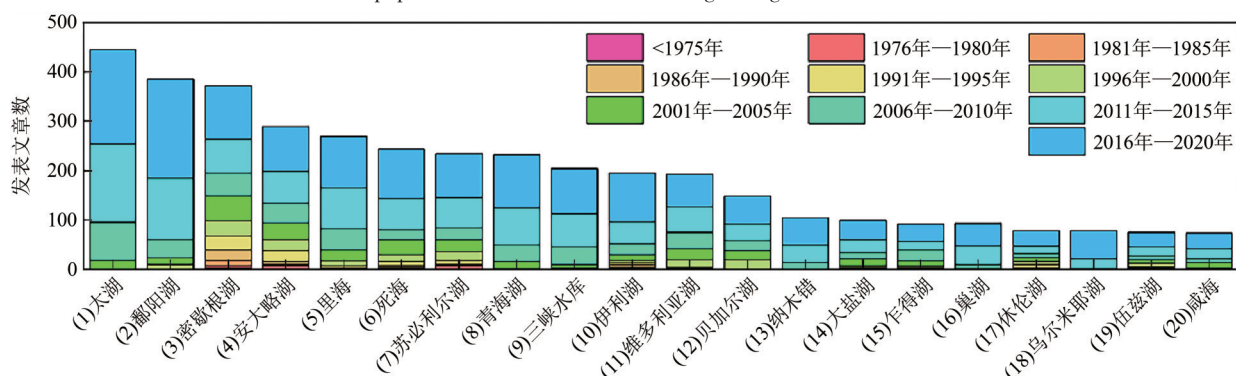
(a) 全球大型湖库遥感领域SCI论文发表情况 (Web of Science核心数据集, 湖泊名称+(remote sensing or satellite) (中国外湖泊名称来源HydroLAKES数据库, 国内湖泊按照外文名和中文拼音各搜索一次; 前20名湖泊序号按照发文数量多少排列) (橙色圆圈为自然湖泊, 黄色为人工水库, 圆圈大小代表SCI论文发表数量)

(a) SCI papers published in the field of remote sensing of global large-scale lakes and reservoirs (Web of science, lake name + (remote sensing or satellite), in which the name of foreign lakes comes from hydrolakes database, and domestic lakes are based on foreign names and Chinese Pinyin; The serial numbers of the top 20 lakes are arranged according to the number of documents issued) (The red circle represents natural lakes, the yellow represents man-made reservoirs, and the size of the circle represents the number of SCI papers published)



(b) 全球大型湖库SCI发文量的历史变化

(b) The number of SCI papers in the field of remote sensing of large lakes and reservoirs in the world



(c) 全球大型湖库SCI发文量前20名

(c) The top 20 lakes and reservoirs in SCI publications

图2 全球大型湖库(>500 km²)SCI论文发表情况

Fig. 2 SCI papers on global large-scale lakes and reservoirs (>500 km²)

2 湖泊遥感概述

湖泊遥感从研究对象上,可以分为湖泊水色遥感、湖泊水环境遥感和湖泊水文遥感(图3和表1);一般意义上,湖泊水环境遥感包括湖泊水色遥感。湖泊水色遥感是指通过严格物理辐射传输方程解析水色要素参数浓度和固有光学特性等光学量的一门学科(段洪涛等,2019)。湖泊水色遥感的基础是准确获得水体离水辐射信号(IOCCG,2010;张运林,2011),关键是解析遥感反射率与水色因子固有光学特性的内在联系(Lee等,2002)。湖泊水色遥感的核心参数为浮游植物色素、非色素颗粒物和有色溶解性有机物等水色三要素浓度和固有光学特性。湖泊水环境遥

感是指以除水色因子以外可通过遥感直接或间接获取的环境参数为研究对象的一门学科,包括水温、浮游植物水华、水生植被等可直接监测的参数和初级生产力、总磷、富营养化指数等间接监测参数(IOCCG,2018)。湖泊水文学是研究湖泊水量变化和湖水动力过程的一门学科,其核心内容是研究湖泊水文要素及湖泊水量平衡关系的变化,包括水量平衡关系的建立、湖泊水量变化的影响因素以及湖泊水量对气候变化的响应等(张奇等,2020b)。湖泊水文遥感是以遥感为基本手段,以湖泊水文要素为主要观测对象,发展针对其信息提取/定量反演或估算的原理、方法和技术的一门学科(刘元波等,2020;宋春桥等,2020a)。

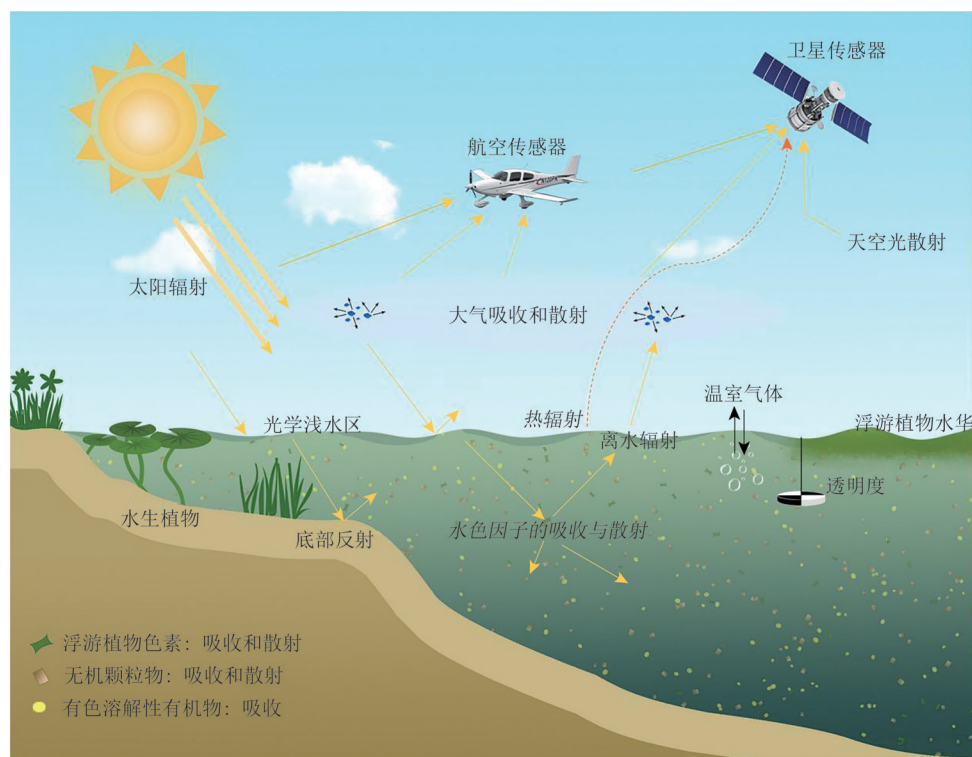


图3 湖泊遥感对象示意图

Fig. 3 Sketch map of lake remote sensing

湖泊遥感的研究问题,主要是围绕气候变化和人类活动背景下的湖泊变化展开。湖泊遥感的具体研究过程中,核心是针对湖泊的生态环境问题,或者说湖泊关键要素进行监测。比如,对于中国太湖、巢湖、滇池等富营养化湖泊,其核心问题就是藻颗粒(主要是蓝藻颗粒)大量富集(秦伯强,2020),死亡分解甚至会形成黑色的“湖泛”(Duan等,2014b),造成严重的生态环境

问题,人们更关注以叶绿素a和藻蓝素浓度等为标志的蓝藻及其衍生灾害问题;而对于洪泽湖、鄱阳湖等湖泊,富营养化问题并不严重,但非法采砂等活动一度非常猖獗,导致水体浑浊度显著提高,影响水下光场,破坏鱼类产卵场和底栖动物生境,引起生态系统失衡,因此主要关注悬浮泥沙等问题(Feng等,2012;Cao等,2017)。同时,湖泊还是全球气候变化的参与者和区域响应的重

要记录器(刘正文等, 2020), 其碳源/汇的问题已成为国际学科前沿和热点问题; 特别是“碳达峰”与“碳中和”概念的提出, 湖泊溶解有机碳 DOC (Dissolved Organic Carbon)、颗粒有机碳 POC (Particulate Organic Carbon) 和水体 CO₂ 等温室气体遥感逐步成为新的重点和方向 (Qi 等, 2020; Gao 等, 2021)。另外, 全球变暖和人类活动的双

重作用下, 湖泊温度上升、湖冰融化 (Woolway 等, 2021), 湖泊面积的萎缩或扩张 (Ma 等, 2010), 引发了湖泊水量的改变, 是湖泊水文遥感近期关注的主要问题 (宋春桥等, 2020)。因此, 不同的湖泊水体或者是同一湖泊由于关注的问题不同, 重点监测的关键因子也会存在差异。

表1 湖泊遥感研究对象与方式

Table 1 Research objects and means of lake remote sensing

研究对象		相关参数	遥感方式
领域	类别		
水色	表观光学量	水色、遥感反射率、K _d 、透明度、浊度、真光层深度等	光学
	固有光学量	吸收系数、后向散射系数、漫衰减系数等	光学
	水色因子	浮游植物色素、悬浮物、有色可溶性有机物(CDOM)、溶解有机碳、颗粒有机碳	光学
水环境	藻类水华	面积、频率、强度、物候、藻总量、浮游藻类类型等	光学、雷达
	水生植被	面积、类型、生物量、物候等	光学、激光雷达
	养殖水面	养殖水域面积、养殖类型、养殖设施等	光学、雷达
	富营养化	总磷、总氮、富营养化指数等	光学
	初级生产力	总初级生产力、净初级生产力等	光学
	温室气体	水体 CO ₂ 、CH ₄ 浓度或分压等	光学
	水温	水体表层温度、剖面温度、	热红外
	盐分	水体盐度	光学、微波
水文	水域范围	水面面积	光学、雷达
	水位	水位高度	光学、高度计
	水量	水深、水底地形、水量体积等	光学、高度计、重力卫星
	流量	入湖河流流量	光学、雷达
	降水	降水量	微波
	蒸散发	蒸散发量	微波
	湖冰	面积、厚度、物候等	光学、雷达

湖泊遥感的研究手段, 主要是借助于卫星、航空、无人机等平台进行观测, 传感器以光学传感器为主, 合成孔径雷达、激光雷达、重力传感器为辅。光学卫星类型广、数据全、时间久, 能覆盖湖泊水色、水环境和水文等各个方面, 是湖泊遥感的主要手段 (Mouw 等, 2015)。但是, 光学遥感受限于天气状况, 合成孔径雷达 SAR (Synthetic Aperture Radar) 成为其有效补充; 特别是, 雷达比光学传感器在水体变化监测上更有效, 已经成为湖泊水文遥感的重要手段。此外, 部分因子需要使用特有传感器, 如湖泊水温的估算依赖于热红外传感器, 湖泊水位和水量的估算则需要卫星高度计的支撑。不同类型传感器有着不同的优特点, 在湖泊遥感领域有着各自的应用优势。

随着卫星传感器的多样化, 湖泊遥感的手段已开始并持续从单一传感器过渡到多传感器协同观测, 从单一平台到多平台的天空地立体监测。

3 湖泊遥感学科进展

3.1 关注问题: 从兴趣导向发展到问题导向

大自然五彩斑斓, 湖泊也五光十色。青藏高原的湖泊像天空一样蓝, 鄱阳湖、洪泽湖等江淮地区湖泊却水体偏黄, 像泥沙的颜色。蓝藻富集的太湖风平浪静时, 水体多呈现油绿色; 大风过后, 又变成了一碗黄泥汤。山西运城盐湖一些时候看起来像是一个半红半绿的“鸳鸯锅”, 澳大利亚的 Lake Hillier、Hutt Lagoon 和 Pink Lake 都是世界最著名的粉红色湖泊。遥感学家看到这些湖泊,

不禁会问：为什么水体呈现不同的颜色？水色的不同是否代表着水体中物质的不同？那么能否通过水色来反推水体中的物质？这3个问题是水色遥感研究的“初心”，其中的“水色”对遥感来说就是通过传感器获得的不同离水辐射信号的直接反映。湖泊遥感最初的水色遥感，对不同湖泊水体为什么呈现不同颜色的兴趣，至今逐步扩展到水环境、水生态和水文遥感，研究领域日益多元化。湖泊水色参数定量反演是湖泊遥感应用最成熟最广泛的领域，主要针对对于自然光有吸收和散射作用的光学活性物质进行遥感（即水色3要素：浮游植物色素、非色素颗粒物和有色溶解性有机物），其过程可以用水色遥感物理辐射传输方程表达（Morel和Prieur, 1977）。该领域基础理论方面已经基本完善，针对透明度、叶绿素a浓度、悬浮物浓度等这类具有光学响应的参数，已经发展出多种经验算法、半分析算法或者机器学习算法（张兵等, 2021）。目前研究更多是在原有基础上对算法或者参数进行修订（IOCCG, 2018；段洪涛等, 2019）。

全球变化和人类活动双重影响下，不少湖泊面积发生了显著变化（Pekel等, 2016；Zhang等, 2019），湖泊水体的富营养化在全球呈现加剧扩张的态势（杨桂山等, 2010；Wang等, 2018）。湖泊遥感逐步从自然兴趣驱动转向应用需求驱动，研究对象也从传统的水色3要素扩展到营养盐浓度（Chang等, 2013；Huang等, 2015；Shi等, 2020）、营养状态（Wang等, 2018；Shi等, 2019）、初级生产力（Kahru, 2017）、藻毒素（Shi等, 2015；Stumpf等, 2016）等非光学水质参数；从蓝藻水华面积提取（Duan等, 2009；Hu等, 2010）扩展到蓝藻指示性色素—藻蓝素估算（Simis等, 2005；Qi等, 2014）、藻总量估算（Li等, 2017；Liu等, 2021c）、浮游藻类类型识别（Hunter等, 2008）等；从水生植被盖度、面积提取逐步发展到水生植被类群识别（Zou等, 2013；Villa等, 2015；Luo等, 2017）、生物量监测（Bendig等, 2015）。湖泊作为气候变化的响应器（Adrian等, 2009），其水体中温室气体遥感监测也逐渐成为水环境领域的前沿和热点问题（Ouyang等, 2017；Qi等, 2020；Ran等, 2021）。

湖泊水文动态监测向大尺度、长时序、多维度方向发展。从20世纪50—60年代第一次湖泊调

查主要依赖实地考察和地形图为主，到2007年—2012年第二次湖泊调查充分发挥卫星遥感手段优势，摸清了中国1 km²以上湖泊的数量、面积和分布（马荣华等, 2011）；在此基础上，实现了全国湖泊多期遥感制图及区域变化差异研究（Zhang等, 2019）。随着第二次青藏高原综合科学考察的开展，利用卫星、无人机及野外测量对青藏高原湖泊水质、水深、水量变化等进行了大量系统深入的研究（张国庆, 2018；Liu等, 2021a；Pi等, 2021），并分析了其空间差异、变化趋势及驱动因素，为亚洲水塔的动态变化及其对气候变化的响应机理研究提供数据支撑，取得了第一手资料和重要成果（Zhang等, 2020；Liu等, 2021b）。计划于2022-11发射，由美国和法国联合牵头研制的地表水和海洋地形卫星SWOT（Surface Water and Ocean Topography），是首个能够提供厘米级精度的宽刈幅星载雷达干涉测高卫星，将为认识湖泊及其变化提供新的手段和数据。遥感技术的飞速发展，包括各类高时空分辨率光学影像、激光与雷达卫星测高、重力场测量等，极大地促进湖泊水文动态监测向大尺度、长时序、多维度方向研究。

3.2 观测手段：从地基遥感/中分辨率卫星发展到高分辨率/高光谱/无人机

光学卫星是湖泊遥感的主要手段，主要经历了3个时期：以实测光谱和Landsat、SPOT为代表的早期陆地传感器时期，以MODIS、MERIS、VIIRS、OLCI、GOCI为代表的中空间分辨率卫星传感器时期，以及正发展的以Sentinel-2 MSI、Landsat 8/9 OLI、无人机等为代表的高空间分辨率时期。湖泊遥感器实现了从无到有，空间、辐射和光谱分辨率从低到高的发展阶段。1972年Landsat卫星的发射拉开了湖泊遥感研究的序幕（Wulder等, 2019），一些学者通过Landsat卫星影像用于湖泊面积变化监测和历史水质调查（濮静娟和王长耀, 1979；Lillesand等, 1983；Dekker和Peters, 1993）。虽然1978年CZCS传感器发射标志着海洋水色遥感开始，但其较低的空间分辨率并未广泛应用于湖泊遥感。湖泊遥感，特别是水色遥感，主要依赖于传统实测光谱数据研究水色要素的遥感算法，或者利用Landsat等多光谱影像开展经验算法研究，停留在初步研究阶段（IOCCG,

1998)。然而,以 Landsat 卫星为代表的陆地传感器,辐射性能低、信噪比不足且波段少,难以有效探测水体物质变化,限制了水体参数的遥感研究。进入 21 世纪后,湖泊遥感进入蓬勃发展时期,MODIS (Terra: 1999~, Aqua: 2002~)、MERIS (2002 年—2012 年)、VIIRS (2012~) 和 OLCI (Sentinel 3A: 2016~, Sentinel 3B: 2018~) 等中分辨率卫星传感器的发射,提供了大量免费、较高空间分辨率(250—500 m)、较丰富的可见光至近红外光谱波段数量(8—16 个)和较短重返周期的卫星数据,支持湖泊遥感各领域中关键问题的研究(Mouw 等, 2015; Cao 等, 2018; Shen 等, 2020); GOCI、GF-4、Himawari-8 等地球静止卫星的发射,进一步将观测频率提升至小时尺度,大大丰富了湖泊遥感的观测。同时, Landsat 8/9、Sentinel-2A/B、国产高分系列等传感器具有较高的空间分辨率(<30 m)和辐射敏感度,湖泊遥感逐渐步入“高分时代”(Ruddick 等, 2016; Pahlevan 等, 2017a, 2017b)。但是,当前空间分辨率高的卫星时间分辨率相对较低(冯炼, 2021),时间分辨率高的空间分辨率低,且普遍缺少湖泊水色参数遥感的关键波段(Cao 等, 2019)。随着湖泊重要性的不断提升和传感器技术的快速进步,未来针对湖泊水体研制高空间分辨率、高时间分辨率、高光谱分辨率、高信噪比的“四高”传感器逐步提上日程。

3.3 算法算力:从单机版经验/机理模型发展到云计算的机器算法

卫星接收的大气顶层总辐亮度中通常只有约 10% 的水体信号,因此,大气校正是水色遥感研究中的关键技术。基于近红外波段“暗像元”假设(即假设水体在近红外波段处离水辐射为零),学者们针对海洋清洁水体已研发了较高精度的标准大气校正算法(Gordon 和 Wang, 1994),已经广泛应用于海洋遥感研究。但是,湖泊水体通常高浑浊且光学特性复杂,不满足“近红外波段离水辐射为零”的假设;内陆湖泊水体上空大气气溶胶模式也更为复杂,目前标准算法中集成的气溶胶模型未考虑内陆吸收性气溶胶,导致模型失效。当前国内外学者开发了多种算法试图获取精确的湖泊等浑浊水体遥感反射率,主要包括:(1)利用浑浊水体在蓝紫光或者短波红外波段离

水辐射低的特点,将标准算法中的“暗像元”假设扩展到蓝紫光或者短波红外波段(Wang, 2007; He 等, 2012; Liu 等, 2021d);(2)利用生物光学模型或者不同波段的经验关系,结合优化算法或者迭代算法实现浑浊水体的大气校正(Ruddick 等, 2000; Bailey 等, 2010; Steinmetz 等, 2011);(3)假设一定空间范围内大气状况均一,利用陆地“暗像元”获取气溶胶信息完成浑浊水体大气校正(Guanter 等, 2007);(4)利用人工神经网络等机器学习算法(Fan 等, 2017)。这些算法虽然取得了一定成果,但对于极度浑浊水体而言,短波红外波段依然存在不可被忽略的离水信号(Zhang 等, 2014);水体反射率及其之间的关系难以通过简单的比值或者生物光学模型准确表达(Xue 等, 2017),同时气溶胶存在较强的吸收性成分导致已有气溶胶模型失效。在各水体大气校正算法普遍存在局限性或失效的情况下,一些学者尝试使用基于辐射传输模型的陆地大气校正方法(如 6S 模型等)(Shen 等, 2017),或直接陆地地表反射率产品开展相关研究(Wang 等, 2016);也有学者尝试不进行完整的大气校正,即只进行相对容易的水汽和臭氧吸收及瑞利散射信号去除,利用瑞利校正后的反射率 R_{rc} (Rayleigh Corrected Reflectance)开展研究(Feng 等, 2018)。尽管湖泊水体大气校正算法研发取得了一定的成果,但是算法精度和稳定性仍有较大提升空间(Pahlevan 等, 2021)。未来,随着深度神经网络等机器学习算法的发展,有望彻底解决内陆浑浊水体的大气校正问题。

传统湖泊水色遥感算法以半分析算法和经验算法为主。通过湖泊相关参数的光学特性,构建有效的光谱指数或发展具有明确物理机制的算法模型,实现湖泊要素的监测或定量反演/估算的方法,属于机理算法。机理算法的核心是基于光在水体的辐射传输过程,一旦建立,普适性强,机理清楚,易分析误差来源,如 QAA 算法(Lee 等, 2002)。但是,机理算法对波段要求较高,模型中的经验参数存在时空变异(比吸收、比散射系数、散射相函数等),缺省参数反演的效果有时候不理想。目前国际上更多的研究是基于原来的理论框架,针对假设条件、模型参数和区域适用性等方面进行改善或者加强,近年的突破性进展相对较少,如 Lee 等(2015)重新定义了透明度的光学反演机理,提出了一种新的半分析反演机制。经验方

法是针对卫星的信号和待观测的湖泊参数的联系直接构建经验方程,简单、高效,但是没有物理机理支撑,区域性和季节性较强。在多年的发展中,湖泊水文的归一化水体指数方法(Li等,2012)、湖泊水色的经验模型与半分析算法(Mouw等,2015;段洪涛等,2019)、湖泊水环境遥感中常用的漂浮藻类指数(Hu,2009)、水温反演使用的分裂窗算法(Wan和Dozier,1996)都在此范畴内,其应用效果在不同类型湖泊中各有千秋。经验方法在区域具有高精度,但是大尺度上的湖泊特性差异大,应用精度有限;机理算法普适性强,但是理论条件的要求导致构建困难,并且对遥感反射率的反演精度要求也提高。随着计算机技术的发展,以深度学习等为代表的人工智能技术为开发适用于多类型湖泊、多参数的遥感反演算法提供了新途径(Palmer等,2015;Sagan等,2020;Kravitz等,2021)。特别是,人工智能模型可以利用大量高质量星地同步观测数据,挖掘光谱信号与水体变量的内在联系,为湖泊遥感研究逐步从模型驱动向数据驱动发展提供了可能。

3.4 研究维度:从水体表层发展到垂向剖面

近年来,湖泊表层水质参数的遥感方法已经逐渐成熟,叶绿素a(Pahlevan等,2020)、悬浮物(Cao等,2017)、颗粒有机碳(Duan等,2014a;Xu等,2021)以及有色溶解有机物(CDOM)(Kutser等,2005;Brezonik等,2015;宋开山等,2018)等参数都进行了深入研究,这些参数算法通常以水体垂向均一为假设前提;但实际上湖泊藻类存在垂向分层,且有多种形式(马荣华等,2016)。围绕着蓝藻水华等藻类总生物量监测的现实需求,如何从二维水表层遥感扩展到三维垂向结构遥感,是湖泊水环境遥感研究面临的一个很大挑战。Xue等(2015)通过实地调查数据构建了一个基于归一化藻华指数与遥感反射率来确定浮游植物生物量垂直剖面类别的方法。Li等(2018)基于MODIS数据利用上述指数估算上层40 cm水柱中的藻类生物量,建立了40 cm以内藻类生物量与整个水柱中藻类生物量的关系。Bi等(2019)在滇池利用OLCI数据构建了水柱集成生物量估算算法,对滇池藻类生物量进行了估算。Liu等(2021c)基于Xue等(2015)的藻颗粒垂向分布模型,利用归一化藻类指数、表层叶绿素a浓度和风

速等参数,获得了巢湖2000年来的藻类生物量时空变化规律。另一方面,Moore等(2019)利用激光雷达和数字全息系统等新技术,对美国伊利湖西部的蓝藻暴发区藻类垂直结构进行了监测。Kwon等(2020)利用无人机遥感数据构建了一个水库水体的垂向水柱叶绿素a与藻蓝素浓度积分值的估算模型。目前,水体垂向剖面研究主要集中在依赖叶绿素a垂向结构的藻类总生物量遥感估算,其中藻颗粒对水下光场的影响、与遥感反射率之间的关系以及藻颗粒本身的光学特征等问题尚不明确(马荣华等,2016),有待加强。

3.5 研究区域:从单一/区域湖泊发展到国家/大洲/全球尺度

早先遥感研究大多集中在单一湖泊,未能充分发挥卫星遥感大尺度监测的潜力。得益于计算机技术以及处理能力的迅猛发展,湖泊遥感研究领域视野从单一湖泊逐步扩展到流域湖泊群、全国湖泊、甚至全球湖泊(Wang等,2018;Cao等,2020;Liu等,2020;Song等,2021)。从流域尺度来看,湖泊群水环境水文参数,包括叶绿素a、透明度、悬浮物、水面面积、水储量等(Hou等,2017;Ma等,2020b;Cao等,2020;Ho等,2019;Shen等,2020),已有大量研究和实践。也有从国家尺度实现湖泊遥感监测,主要集中在藻华(Coffer等,2020;Song等,2021)、叶绿素a(Cao等,2020)、透明度(Liu等,2020;Song等,2020)、水位(Wang等,2013)等参数。

Google Cloud、Microsoft Azure、Amazon Web Service等云计算平台加速了全球湖泊遥感研究的步伐,各种参数的遥感反演/估算都在探索过程中。Wang等(2018)基于MODIS数据与Forel-Ule指数(FUI),建立了一种遥感方法来评估全球内陆水体的营养状态,并对全球分布的2058个大型内陆水体2012年夏季的营养状态进行了评估。Ho等(2017)利用Landsat遥感数据以及美国伊利湖的实测数据建立了湖泊藻华暴发强度模型,监测了全球71个湖泊的藻华暴发情况(Ho等,2019)。Ma等(2020b)借助全球湖泊和湿地数据库(GLWD)和陆地海拔卫星(ICESat)数据,估算了全球范围内14981个湖泊和水库的水位变化。Pickens等(2020)在1999年—2018年340万景Landsat 5、Landsat 7和Landsat 8影像中对全球土

地和内陆水体进行了分类,并进行了时间序列分析。Du等(2020)基于MODIS地表温度产品监测2001年—2015年欧亚湖泊水面温度的时空变化,并研究该变化的影响因素。目前大尺度湖泊遥感监测已成为研究热点,但受限于通用算法的发展,主要研究参数集中在藻华、水温、水位以及水面面积等少数参数;浮游植物色素等水质参数由于不同湖泊水光学特性的显著差异,还存在一定挑战。

4 湖泊遥感学科发展展望

4.1 研制满足湖泊观测特点的静止卫星或小卫星集群

“工欲善其事,必先利其器”。国内外已经有大量的卫星传感器可用于湖泊观测,但是由于其设计目标不是陆地就是海洋,较少顾及到湖泊水体浑浊,光学特性复杂,水陆混合和邻近效应严重,大气气溶胶类型多样等复杂情况,导致大部分传感器很难满足湖泊观测要求。针对该问题,一方面要整合现有的多源卫星进行联合监测,开展不同传感器间的相对辐射校正、一致性检验和产品时空重构等工作;另一方面,要适时发展满足湖泊观测需要的静止卫星或小卫星集群,即高时间分辨率、高空间分辨率和高信噪比,波段设定符合湖泊等内陆水体特征波段要求(例如叶绿素a特征吸收峰665 nm与反射峰709 nm、藻蓝素特征吸收峰620 nm等),形成湖泊自有的卫星观测体系。

另外,现有的湖泊遥感研究,主要集中于少数大型湖库(图2);而作为重要战略水源地的水库等小型水体占全球水体的绝大多数(全球小于50 km²的自然湖库和人工水库共计1424286个,占全球总数1427288的99.76%;数据来源Hydrolakes数据库),但由于其水面面积较小,现有卫星首先在空间分辨率上无法满足,再次重返观测周期普遍较长,导致这些重要水体普遍缺少监测。为保障人类饮用水安全,在未来需要通过发展静止卫星或小卫星集群重点加强小型湖库的卫星遥感研究。

4.2 发展湖泊水色遥感标准算法,建设全球湖泊卫星遥感监测网络

湖泊广泛分布在地球表面,星罗棋布,不同湖泊展现出自身不同的特点,水体光学特性复杂,

导致现有算法区域性强、普适性不足,很难推广使用。随着深度学习算法的发展,科学范式开始从模型驱动向数据驱动发生转变,通过国家或者国际的研究学者间的合作,开展并收集水色遥感数据集,基于人工智能算法途径,有望形成适合湖泊的遥感标准化算法。面对这种发展,需要提前制定好湖泊遥感技术规范 and 数据处理标准化流程,为最终提供湖泊不同标准化专题产品服务。

充分发挥湖泊野外台站资源和卫星遥感研究基础,依托物理台站长期观测数据和卫星遥感大数据,以野外台站作为物理节点,卫星遥感监测网络作为面状扩展,形成野外台站物理节点和典型湖泊虚拟台站为一体的全球湖泊卫星遥感监测网络;研制湖泊遥感大数据平台和可视化系统,实现湖泊环境变化的历史长时序重建与近实时监测,服务联合国和国家可持续发展湖泊监测和评估需求。

4.3 加强全球变化背景下的湖泊盐度、温度和碳循环遥感研究

以湖泊盐度和温度为主的物理特征研究是微波或雷达遥感的特长,但是微波遥感的空间分辨率低,限制了在湖泊的应用。因此,需要发挥合成孔径微波遥感的优势,逐步建设高性能微波遥感盐度机理研究(Yueh等,2001; Meissner等,2016),为全球湖泊盐度变化研究提供信息与技术支持。如果能通过结合主动微波遥感与热红外遥感,实现湖泊表面粗糙度或者波浪信息提取,进一步实现湖泊水体表层温度反演,可为研究全球变化情景下的湖泊盐度和温度等物理特性变化及其导致的生态环境问题,提供新的途径。

作为气候变化的响应器,湖泊、水库和河流等淡水生态系统碳(C)循环研究,已成为当前全球碳循环研究的前沿和热点问题。内陆湖泊等水体,虽然面积远小于海洋,但其生态系统生产力很高,且与陆地生态系统物质、能量和信息交换强烈,是全球碳循环的重要组成部分。但是,目前流域、大洲和全球尺度水体碳通量估算都存在数据不一致等问题。数据不一致的一个主要原因就是数据观测的时空尺度不一致,未考虑水体的季节、空间等差异。卫星遥感快捷、大范围 and 周期性的特点,为水体碳通量由“点”到“面”的尺度上推提供可能,也为准确评估区域乃至全

球尺度上水体碳通量提供新途径。因此,未来要加强水体不同形态碳与水环境遥感参数关系的机理研究,实现更为精确的流域和全球湖泊碳通量估算,服务全球“碳达峰”“碳中和”目标。

4.4 开展全流域统筹的湖泊天空地遥感监测和模拟研究

目前湖泊水环境污染严重,但其问题根源出在流域上;通俗的讲“问题表现在水里,根子是在岸上”。目前的流域水环境遥感工作,实际上主要是针对湖泊、水库等水面面积较大的水体开展,河流水体的遥感监测工作鲜有报道,具有全流域视角的水环境遥感监测工作更是欠缺。随着卫星、无人机、岸基视频和手机摄像头等不同观测手段的快速发展,急需建立流域尺度河流—湖泊一体化的水环境智能化遥感监控技术体系,实现融水源涵养、水质目标管理、污染削减方案制定、水源地保护和供水安全保障等一体化综合管控。

综合流域野外台站观测网络、多类型陆域生态高频自动观测网络、不定期野外调查、无人机/无人船等观测手段,研发天空地一体化的流域关键要素观测技术方案;利用光学与雷达等多源卫星影像,开展河湖库塘等水域范围、不透水面、污染负荷、蒸散发、植被、生境、生物多样性等重要流域参数的历史长时序重建,形成关键流域地表参量的集成化、智能化、业务化、特色化观测系统产品。

参考文献(References)

- Adrian R, O'Reilly C M, Zagarese H, Baines S B, Hessen D O, Keller W, Livingstone D M, Sommaruga R, Straile D, Van Donk E, Weyhenmeyer G A and Winder M. 2009. Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and Oceanography*, 54(6part2): 2283-2297 [DOI: 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2283]
- Bailey S W, Franz B A and Werdell P J. 2010. Estimation of near-infrared water-leaving reflectance for satellite ocean color data processing. *Optics Express*, 18(7): 7521-7527 [DOI: 10.1364/OE.18.007521]
- Bendig J, Yu K, Aasen H, Bolten A, Bennertz S, Broscheit J, Gnyp M L and Bareth G. 2015. Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 39: 79-87 [DOI: 10.1016/j.jag.2015.02.012]
- Bi S, Li Y M, Lyu H, Mu M, Xu J, Lei S H, Miao S, Hong T L and Zhou L. 2019. Quantifying spatiotemporal dynamics of the column-integrated algal biomass in nonbloom conditions based on OLCI data: a case study of Lake Dianchi, China. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(10): 7447-7459 [DOI: 10.1109/tgrs.2019.2913401]
- Brezonik P L, Olmanson L G, Finlay J C and Bauer M E. 2015. Factors affecting the measurement of CDOM by remote sensing of optically complex inland waters. *Remote Sensing of Environment*, 157: 199-215 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.04.033]
- Cao Z G, Duan H T, Feng L, Ma R H and Xue K. 2017. Climate- and human-induced changes in suspended particulate matter over Lake Hongze on short and long timescales. *Remote Sensing of Environment*, 192: 98-113 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.02.007]
- Cao Z G, Duan H T, Shen M, Ma R H, Xue K, Liu D and Xiao Q T. 2018. Using VIIRS/NPP and MODIS/Aqua data to provide a continuous record of suspended particulate matter in a highly turbid inland lake. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64: 256-265 [DOI: 10.1016/j.jag.2017.09.012]
- Cao Z G, Ma R H, Duan H T, Pahlevan N, Melack J, Shen M and Xue K. 2020. A machine learning approach to estimate chlorophyll-a from Landsat-8 measurements in inland lakes. *Remote Sensing of Environment*, 248: 111974 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111974]
- Cao Z G, Ma R H, Duan H T and Xue K. 2019. Effects of broad bandwidth on the remote sensing of inland waters: implications for high spatial resolution satellite data applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 153: 110-122 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.05.001]
- Chang N B, Xuan Z M and Yang Y J. 2013. Exploring spatiotemporal patterns of phosphorus concentrations in a coastal bay with MODIS images and machine learning models. *Remote Sensing of Environment*, 134: 100-110 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.03.002]
- Coffer M M, Schaeffer B A, Darling J A, Urquhart E A and Salls W B. 2020. Quantifying national and regional cyanobacterial occurrence in US lakes using satellite remote sensing. *Ecological Indicators*, 111: 105976 [DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105976]
- Dekker A G and Peters S W M. 1993. The use of the Thematic Mapper for the analysis of eutrophic lakes: a case study in the Netherlands. *International Journal of Remote Sensing*, 14(5): 799-821 [DOI: 10.1080/01431169308904379]
- Du J, Jacinthe P A, Zhou H H, Xiang X Y, Zhao B Y, Wang M and Song K S. 2020. Monitoring of water surface temperature of Eurasian large lakes using MODIS land surface temperature product. *Hydrological Processes*, 34(16): 3582-3595 [DOI: 10.1002/hyp.13830]
- Duan H T, Feng L, Ma R H, Zhang Y C and Loisel S A. 2014a. Variability of particulate organic carbon in inland waters observed from MODIS Aqua imagery. *Environmental Research Letters*, 9(8): 084011 [DOI: 10.1088/1748-9326/9/8/084011]
- Duan H T, Luo J H, Cao Z G, Xue K, Xiao Q T and Liu D. 2019. Progress in remote sensing of aquatic environments at the watershed scale. *Progress in Geography*, 38(8): 1182-1195 (段洪涛, 罗菊花, 曹志刚, 薛坤, 肖启涛, 刘东. 2019. 流域水环境遥感研究进展与

- 思考. 地理科学进展, 38(8): 1182-1195 [DOI: 10.18306/dlxxjz.2019.08.007]
- Duan H T, Ma R H, Loisel S A, Shen Q S, Yin H B and Zhang Y C. 2014b. Optical characterization of black water blooms in eutrophic waters. *Science of the Total Environment*, 482-483: 174-183 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.02.113]
- Duan H T, Ma R H, Xu X F, Kong F X, Zhang S X, Kong W J, Hao J Y and Shang L L. 2009. Two-decade reconstruction of algal blooms in China's Lake Taihu. *Environmental Science and Technology*, 43(10): 3522-3528 [DOI: 10.1021/es8031852]
- Duan H T, Wan N S, Qiu Y G, Liu G, Chen Q, Luo J H, Chen Y and Qi T C. 2020. Discussions and practices on the framework of monitoring system in eutrophic lakes and reservoirs. *Journal of Lake Sciences*, 32(5): 1396-1405 (段洪涛, 万能胜, 邱银国, 刘刚, 陈青, 罗菊花, 陈远, 齐天赐. 2020. 富营养化湖库天—空—地一体化监控平台系统设计与实践. 湖泊科学, 32(5): 1396-1405) [DOI: 10.18307/2020.0513]
- Fan Y Z, Li W, Gatebe C K, Jamet C, Zibordi G, Schroeder T and Stamnes K. 2017. Atmospheric correction over coastal waters using multilayer neural networks. *Remote Sensing of Environment*, 199: 218-240 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.07.016]
- Feng L. 2021. Key issues in detecting lacustrine cyanobacterial bloom using satellite remote sensing. *Journal of Lake Sciences*, 33(3): 647-652 (冯炼. 2021. 卫星遥感解译湖泊蓝藻水华的几个关键问题探讨. 湖泊科学, 33(3): 647-652)
- Feng L, Hou X J, Li J S and Zheng Y. 2018. Exploring the potential of Rayleigh-corrected reflectance in coastal and inland water applications: a simple aerosol correction method and its merits. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 146: 52-64 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.08.020]
- Feng L, Hu C M, Chen X L, Tian L Q and Chen L Q. 2012. Human induced turbidity changes in Poyang Lake between 2000 and 2010: observations from MODIS. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C7): C07006 [DOI: 10.1029/2011jc007864]
- Gao Y, Jia J J, Lu Y, Yang T T, Lyu S, Shi K, Zhou F and Yu G R. 2021. Determining dominating control mechanisms of inland water carbon cycling processes and associated gross primary productivity on regional and global scales. *Earth-Science Reviews*, 213: 103497 [DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103497]
- Gordon H R and Wang M H. 1994. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm. *Applied Optics*, 33(3): 443-452 [DOI: 10.1364/AO.33.000443]
- Guanter L, Del Carmen González-Sanpedro M and Moreno J. 2007. A method for the atmospheric correction of ENVISAT/MERIS data over land targets. *International Journal of Remote Sensing*, 28(3/4): 709-728 [DOI: 10.1080/01431160600815525]
- He X Q, Bai Y, Pan D L, Tang J W and Wang D F. 2012. Atmospheric correction of satellite ocean color imagery using the ultraviolet wavelength for highly turbid waters. *Optics Express*, 20(18): 20754-20770 [DOI: 10.1364/OE.20.020754]
- Ho J C, Michalak A M and Pahlevan N. 2019. Widespread global increase in intense lake phytoplankton blooms since the 1980s. *Nature*, 574(7780): 667-670 [DOI: 10.1038/s41586-019-1648-7]
- Ho J C, Stumpf R P, Bridgeman T B and Michalak A M. 2017. Using Landsat to extend the historical record of lacustrine phytoplankton blooms: a Lake Erie case study. *Remote Sensing of Environment*, 191: 273-285 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.12.013]
- Hou X J, Feng L, Duan H T, Chen X L, Sun D Y and Shi K. 2017. Fifteen-year monitoring of the turbidity dynamics in large lakes and reservoirs in the middle and lower basin of the Yangtze River, China. *Remote Sensing of Environment*, 190: 107-121 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.12.006]
- Hu C M. 2009. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans. *Remote Sensing of Environment*, 113(10): 2118-2129 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.05.012]
- Hu C M, Lee Z, Ma R H, Yu K, Li D Q and Shang S L. 2010. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) observations of cyanobacteria blooms in Taihu Lake, China. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C4): C04002 [DOI: 10.1029/2009jc005511]
- Huang C C, Guo Y L, Yang H, Li Y M, Zou J, Zhang M L, Lyu H, Zhu A X and Huang T. 2015. Using remote sensing to track variation in phosphorus and its interaction with chlorophyll-a and suspended sediment. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(8): 4171-4180 [DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2438293]
- Hunter P D, Tyler A N, Présing M, Kovács A W and Preston T. 2008. Spectral discrimination of phytoplankton colour groups: the effect of suspended particulate matter and sensor spectral resolution. *Remote Sensing of Environment*, 112(4): 1527-1544 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.08.003]
- IOCCG. 1998. Minimum requirements for an operational, ocean-colour sensor for the open ocean//Morel A, ed. Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group. Dartmouth, Canada: IOCCG
- IOCCG. 2010. Atmospheric correction for remotely-sensed ocean-colour products//Wang M H, ed. Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group. Dartmouth, Canada: IOCCG
- IOCCG. 2018. Earth observations in support of global water quality monitoring//Greb S, Dekker A and Binding C, eds. Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group. Dartmouth, Canada: IOCCG
- Kahru M. 2017. Ocean productivity from space: commentary. *Global Biogeochemical Cycles*, 31(1): 214-216 [DOI: 10.1002/2016GB005582]
- Ke C Q. 2004. A review of monitoring lake environment change by means of remote sensing. *Transactions of Oceanology and Limnology*, (4): 81-86 (柯长青. 2004. 湖泊遥感研究进展. 海洋湖沼通报, (4): 81-86) [DOI: 10.13984/j.cnki.cn37-1141.2004.04.014]
- Kravitz J, Matthews M, Lain L, Fawcett S and Bernard S. 2021. Potential for high fidelity global mapping of common inland water quality products at high spatial and temporal resolutions based on a

- synthetic data and machine learning approach. *Frontiers in Environmental Science*, 9: 587660 [DOI: 10.3389/fenvs.2021.587660]
- Kutser T, Pierson D C, Kallio K Y, Reinart A and Sobek S. 2005. Mapping lake CDOM by satellite remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 94(4): 535-540 [DOI: 10.1016/j.rse.2004.11.009]
- Kwon Y S, Pyo J, Kwon Y H, Duan H T, Cho K H and Park Y. 2020. Drone-based hyperspectral remote sensing of cyanobacteria using vertical cumulative pigment concentration in a deep reservoir. *Remote Sensing of Environment*, 236: 111517 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111517]
- Lee Z, Carder K L and Arnone R A. 2002. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters. *Applied Optics*, 41(27): 5755-5772 [DOI: 10.1364/AO.41.005755]
- Lee Z, Shang S L, Hu C M, Du K P, Weidemann A, Hou W L, Lin J F and Lin G. 2015. Secchi disk depth: a new theory and mechanistic model for underwater visibility. *Remote Sensing of Environment*, 169: 139-149 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.08.002]
- Li J, Ma R H, Xue K, Zhang Y C and Loiselle S. 2018. A remote sensing algorithm of column-integrated algal biomass covering algal bloom conditions in a shallow eutrophic lake. *Isprs International Journal of Geo-Information*, 7(12): 466 [DOI: 10.3390/ijgi7120466]
- Li J, Zhang Y C, Ma R H, Duan H T, Loiselle S, Xue K and Liang Q C. 2017. Satellite-based estimation of column-integrated algal biomass in nonalgae bloom conditions: a case study of Lake Chaohu, China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(2): 450-462 [DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2601083]
- Li J L and Sheng Y W. 2012. An automated scheme for glacial lake dynamics mapping using Landsat imagery and digital elevation models: a case study in the Himalayas. *International Journal of Remote Sensing*, 33(16): 5194-5213 [DOI: 10.1080/01431161.2012.657370]
- Li X W. 2006. Remote sensing science and quantitative remote sensing. *Science Focus*, 1(5): 45 (李小文. 2006. 遥感科学与定量遥感. *科学观察*, 1(5): 45)
- Lillesand T M, Johnson W L, Deuell R L, Lindstrom O M and Meisner D E. 1983. Use of Landsat data to predict the trophic state of Minnesota lakes. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49(2): 219-229
- Liu C, Zhu L P, Li J S, Wang J B, Ju J T, Qiao B J, Ma Q F and Wang S L. 2021a. The increasing water clarity of Tibetan lakes over last 20 years according to MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 253: 112199 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.112199]
- Liu C, Zhu L P, Wang J B, Ju J T, Ma Q F, Qiao B J, Wang Y, Xu T, Chen H, Kou Q Q, Zhang R and Kai J L. 2021b. In-situ water quality investigation of the lakes on the tibetan plateau. *Science Bulletin*, 66(17): 1727-1730 [DOI: 10.1016/j.scib.2021.04.024]
- Liu D, Duan H T, Loiselle S, Hu C M, Zhang G Q, Li J L, Yang H, Thompson J R, Cao Z G, Shen M, Ma R H, Zhang M and Han W X. 2020. Observations of water transparency in China's lakes from space. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 92: 102187 [DOI: 10.1016/j.jag.2020.102187]
- Liu D, Yu S J, Cao Z G, Qi T C and Duan H T. 2021c. Process-oriented estimation of column-integrated algal biomass in eutrophic lakes by MODIS/Aqua. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 99: 102321 [DOI: 10.1016/j.jag.2021.102321]
- Liu H Z, He X Q, Li Q Q, Kratzer S, Wang J J, Shi T Z, Hu Z W, Yang C, Hu S B, Zhou Q M and Wu G F. 2021d. Estimating ultraviolet reflectance from visible bands in ocean colour remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 258: 112404 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112404]
- Liu Y B, Wu G P, Zhao X S, Fan X W, Pan X, Gan G J, Liu J W, Guo R F, Zhou H, Wang Y, Wang R N and Cui Y F. 2020. Remote sensing for watershed hydrology: issues and challenges. *Advances in Earth Science*, 35(5): 488-496 (刘元波, 吴桂平, 赵晓松, 范兴旺, 潘鑫, 甘国靖, 刘永伟, 郭瑞芳, 周晗, 王颖, 王若男, 崔逸凡. 2020. 流域水文遥感的科学问题与挑战. *地球科学进展*, 35(5): 488-496) [DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2020.045]
- Liu Z W, Su Y L and Yang L. 2020. Limnology is a multidisciplinary and integrative science for studying inland waters: with special reference to the challenges and opportunities for the development of limnology in China. *Journal of Lake Sciences*, 32(5): 1244-1253 (刘正文, 苏雅玲, 杨柳. 2020. 湖沼学是研究内陆水体的多学科整合科学——兼论我国湖沼学发展面临的挑战与机遇. *湖泊科学*, 32(5): 1244-1253) [DOI: 10.18307/2020.0502]
- Luo J H, Duan H T, Ma R H, Jin X L, Li F, Hu W P, Shi K and Huang W J. 2017. Mapping species of submerged aquatic vegetation with multi-seasonal satellite images and considering life history information. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 57: 154-165 [DOI: 10.1016/j.jag.2016.11.007]
- Ma R H, Duan H T, Hu C M, Feng X Z, Li A N, Ju W M, Jiang J H and Yang G S. 2010. A half-century of changes in China's lakes: global warming or human influence?. *Geophysical Research Letters*, 37(24): L24106 [DOI: 10.1029/2010gl045514]
- Ma R H, Yang G S, Duan H T, Jiang J H, Wang S M, Feng X Z, Li A N, Kong F X, Xue B, Wu J L and Li S J. 2011. China's lakes at present: number, area and spatial distribution. *Science China Earth Sciences*, 54(2): 283-289 (马荣华, 杨桂山, 段洪涛, 姜加虎, 王苏民, 冯学智, 李爱农, 孔繁翔, 薛滨, 吴敬禄, 李世杰. 2011. 中国湖泊的数量、面积与空间分布. *中国科学: 地球科学*, 41(3): 394-401) [DOI: 10.1360/zd-2011-41-3-394]
- Ma R H, Zhang Y C and Duan H T. 2016. The status and development of the non-traditional lake water color remote sensing. *Journal of Lake Sciences*, 28(2): 237-245 (马荣华, 张玉超, 段洪涛. 2016. 非传统湖泊水色遥感的现状与发展. *湖泊科学*, 28(2): 237-245) [DOI: 10.18307/2016.0201]
- Ma Y, Xu N, Zhang W H, Wang X H, Sun J Y, Feng X J and Sun Y. 2020b. Increasing water levels of global lakes between 2003 and 2009. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 17(2): 187-191 [DOI: 10.1109/LGRS.2019.2920387]

- Meissner T, Wentz F J, Scott J and Vazquez-Cuervo J. 2016. Sensitivity of ocean surface salinity measurements from spaceborne 1-band radiometers to ancillary sea surface temperature. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(12): 7105-7111 [DOI: 10.1109/TGRS.2016.2596100]
- Moore T S, Churnside J H, Sullivan J M, Twardowski M S, Nayak A R, McFarland M N, Stockley N D, Gould R W, Johengen T H and Ruberg S A. 2019. Vertical distributions of blooming cyanobacteria populations in a freshwater lake from LIDAR observations. *Remote Sensing of Environment*, 225: 347-367 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.02.025]
- Morel A and Prieur L. 1977. Analysis of variations in ocean color. *Limnology and Oceanography*, 22(4): 709-722 [DOI: 10.4319/lo.1977.22.4.0709]
- Mouw C B, Greb S, Aurin D, DiGiacomo P M, Lee Z, Twardowski M, Binding C, Hu C M, Ma R H, Moore T, Moses W and Craig S E. 2015. Aquatic color radiometry remote sensing of coastal and inland waters: challenges and recommendations for future satellite missions. *Remote Sensing of Environment*, 160: 15-30 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.02.001]
- Ouyang Z T, Shao C L, Chu H S, Becker R, Bridgeman T, Stepien C A, John R and Chen J Q. 2017. The effect of algal blooms on carbon emissions in western Lake Erie: an integration of remote sensing and eddy covariance measurements. *Remote Sensing*, 9(1): 44 [DOI: 10.3390/rs9010044]
- Pahlevan N, Sarkar S, Franz B A, Balasubramanian S V and He J. 2017a. Sentinel-2 MultiSpectral Instrument (MSI) data processing for aquatic science applications: demonstrations and validations. *Remote Sensing of Environment*, 201: 47-56 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.08.033]
- Pahlevan N, Mangin A, Balasubramanian S V, Smith B, Alikas K, Arai K, Barbosa C, Bélanger S, Binding C, Bresciani M, Giardino C, Gurlin D, Fan Y Z, Harmel T, Hunter P, Ishikawa J, Kratzer S, Lehmann M K, Ligi M, Ma R H, Martin-Lauzer F R, Olmanson L, Oppelt N, Pan Y Q, Peters S, Reynaud N, de Carvalho L A S, Simis S, Spyarakos E, Steinmetz F, Stelzer K, Sterckx S, Tormos T, Tyler A, Vanhellefont Q and Warren M. 2021. ACIX-Aqua: a global assessment of atmospheric correction methods for Landsat-8 and Sentinel-2 over lakes, rivers, and coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 258: 112366 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112366]
- Pahlevan N, Schott J R, Franz B A, Zibordi G, Markham B, Bailey S, Schaaf C B, Ondrusek M, Greb S and Strait C M. 2017b. Landsat 8 remote sensing reflectance (Rrs) products: evaluations, inter-comparisons, and enhancements. *Remote Sensing of Environment*, 190: 289-301 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.12.030]
- Pahlevan N, Smith B, Binding C, Gurlin D, Li L, Bresciani M and Giardino C. 2020. Hyperspectral retrievals of phytoplankton absorption and chlorophyll-a in inland and nearshore coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 253: 112200 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.112200]
- Palmer S C J, Kutser T and Hunter P D. 2015. Remote sensing of inland waters: challenges, progress and future directions. *Remote Sensing of Environment*, 157: 1-8 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.09.021]
- Pekel J F, Cottam A, Gorelick N and Belward A S. 2016. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633): 418-422 [DOI: 10.1038/nature20584]
- Pi X H, Feng L, Li W F, Liu J G, Kuang X X, Shi K, Qi W, Chen D L and Tang J. 2021. Chlorophyll-a concentrations in 82 large alpine lakes on the Tibetan Plateau during 2003-2017: temporal - spatial variations and influencing factors. *International Journal of Digital Earth*, 14(6): 714-735 [DOI: 10.1080/17538947.2021.1872722]
- Pickens A H, Hansen M C, Hancher M, Stehman S V, Tyukavina A, Potapov P, Marroquin B and Sherani Z. 2020. Mapping and sampling to characterize global inland water dynamics from 1999 to 2018 with full Landsat time-series. *Remote Sensing of Environment*, 243: 111792 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111792]
- Pu J J and Wang C Y. 1979. Studies on dynamics of some river deltas and lakes using Landsat-MSS imagery. *Acta Geographica Sinica*, 34(1): 43-54 (濮静娟, 王长耀. 1979. 利用卫星遥感资料研究河口三角洲、湖泊的动态. *地理学报*, 34(1): 43-54)
- Qi L, Hu C M, Duan H T, Cannizzaro J and Ma R H. 2014. A novel MERIS algorithm to derive cyanobacterial phycocyanin pigment concentrations in a eutrophic lake: theoretical basis and practical considerations. *Remote Sensing of Environment*, 154: 298-317 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.08.026]
- Qi T C, Xiao Q T, Cao Z G, Shen M, Ma J G, Liu D and Duan H T. 2020. Satellite estimation of dissolved carbon dioxide concentrations in China's Lake Taihu. *Environmental Science and Technology*, 54(21): 13709-13718 [DOI: 10.1021/acs.est.0c04044]
- Qin B Q. 2020. Shallow lake limnology and control of eutrophication in Lake Taihu. *Journal of Lake Sciences*, 32(5): 1229-1243 (秦伯强. 2020. 浅水湖泊湖沼学与太湖富营养化控制研究. *湖泊科学*, 32(5): 1229-1243) [DOI: 10.18307/2020.0501]
- Ran L S, Butman D E, Battin T J, Yang X K, Tian M Y, Duvert C, Hartmann J, Geeraert N and Liu S D. 2021. Substantial decrease in CO₂ emissions from Chinese inland waters due to global change. *Nature Communications*, 12(1): 1730 [DOI: 10.1038/s41467-021-21926-6]
- Ruddick K, Vanhellefont Q, Dogliotti A, Nechad B, Pringle N and Van der Zande D. 2016. New opportunities and challenges for high resolution remote sensing of water colour//*Ocean Optics XXIII*. 2016. Victoria, CB, Canada: [s.n.]
- Ruddick K G, Ovidio F and Rijkeboer M. 2000. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters. *Applied Optics*, 39(6): 897-912 [DOI: 10.1364/AO.39.000897]
- Sagan V, Peterson K T, Maimaitijiang M, Sidike P, Sloan J, Greeing B A, Maalouf S and Adams C. 2020. Monitoring inland water quality using remote sensing: potential and limitations of spectral indices, bio-optical simulations, machine learning, and cloud computing. *Earth-Science Reviews*, 205: 103187 [DOI: 10.1016/j.earsci-rev.2020.103187]

- Shen J, Liu Z W, Yang X D, Zhang Y L, Zhu G W, Wu Q L, Jiang H L, Xue B. 2020. *Limnology*. Beijing: Science Press (沈吉, 刘正文, 羊向东, 张运林, 朱广伟, 吴庆龙, 江和龙, 薛滨. 2020. 湖泊学. 北京: 高等教育出版社)
- Shen M, Duan H T, Cao Z G, Xue K, Loiselle S and Yesou H. 2017. Determination of the downwelling diffuse attenuation coefficient of lake water with the Sentinel-3A OLCI. *Remote Sensing*, 9(12): 1246 [DOI: 10.3390/rs9121246]
- Shen M, Duan H T, Cao Z G, Xue K, Qi T C, Ma J G, Liu D, Song K S, Huang C L and Song X Y. 2020. Sentinel-3 OLCI observations of water clarity in large lakes in eastern China: implications for SDG 6.3.2 evaluation. *Remote Sensing of Environment*, 247: 111950 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111950]
- Shi K, Zhang Y L, Song K S, Liu M L, Zhou Y Q, Zhang Y B, Li Y, Zhu G W and Qin B Q. 2019. A semi-analytical approach for remote sensing of trophic state in inland waters: bio-optical mechanism and application. *Remote Sensing of Environment*, 232: 111349 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111349]
- Shi K, Zhang Y L, Xu H, Zhu G W, Qin B Q, Huang C C, Liu X H, Zhou Y Q and Lv H. 2015. Long-term satellite observations of microcystin concentrations in Lake Taihu during cyanobacterial bloom periods. *Environmental Science and Technology*, 49(11): 6448-6456 [DOI: 10.1021/es505901a]
- Shi K, Zhang Y L, Zhang Y B, Qin B Q and Zhu G W. 2020. Understanding the long-term trend of particulate phosphorus in a cyanobacteria-dominated lake using MODIS-Aqua observations. *Science of the Total Environment*, 737: 139736 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139736]
- Simis S G H, Peters S W M and Gons H J. 2005. Remote sensing of the cyanobacterial pigment phycocyanin in turbid inland water. *Limnology and Oceanography*, 50(1): 237-245 [DOI: 10.4319/lo.2005.50.1.0237]
- Song C Q, Zhan P F and Ma R H. 2020. Progress in remote sensing study on lake hydrologic regime. *Journal of Lake Sciences*, 32(5): 1406-1420 (宋春桥, 詹鹏飞, 马荣华. 2020. 湖泊水情遥感研究进展. 湖泊科学, 32(5): 1406-1420) [DOI: 10.18307/2020.0514]
- Song K S, Fang C, Jacinthe P A, Wen Z D, Liu G, Xu X F, Shang Y X and Lyu L. 2021. Climatic versus anthropogenic controls of decadal trends (1983-2017) in algal blooms in lakes and reservoirs across China. *Environmental Science and Technology*, 55(5): 2929-2938 [DOI: 10.1021/acs.est.0c06480]
- Song K S, Liu G, Wang Q, Wen Z D, Lyu L, Du Y X, Sha L W and Fang C. 2020. Quantification of lake clarity in China using Landsat OLI imagery data. *Remote Sensing of Environment*, 243: 111800 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111800]
- Song K S, Wen Z D, Liu G, Shang Y X, Zhao Y and Du Y X. 2018. The research progress of CDOM optical characteristics and remote sensing retrieval for inland waters. *Journal of Jilin Normal University (Natural Science Edition)*, 39(4): 115-125 (宋开山, 温志丹, 刘阁, 尚盈辛, 赵莹, 杜云霞. 2018. 内陆水体 CDOM 光学特性与遥感反演研究进展. 吉林师范大学学报(自然科学版), 39(4): 115-125) [DOI: 10.16862/j.cnki.issn1674-3873.2018.04.022]
- Steinmetz F, Deschamps P Y and Ramon D. 2011. Atmospheric correction in presence of sun glint: application to MERIS. *Optics Express*, 19(10): 9783-9800 [DOI: 10.1364/OE.19.009783]
- Stumpf R P, Davis T W, Wynne T T, Graham J L, Loftin K A, Johengen T H, Gossiaux D, Palladino D and Burtner A. 2016. Challenges for mapping cyanotoxin patterns from remote sensing of cyanobacteria. *Harmful Algae*, 54: 160-173 [DOI: 10.1016/j.hal.2016.01.005]
- Villa P, Bresciani M, Bolpagni R, Pinaridi M and Giardino C. 2015. A rule-based approach for mapping macrophyte communities using multi-temporal aquatic vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 171: 218-233 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.10.020]
- Wan Z M and Dozier J. 1996. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(4): 892-905 [DOI: 10.1109/36.508406]
- Wang M H. 2007. Remote sensing of the ocean contributions from ultraviolet to near-infrared using the shortwave infrared bands: simulations. *Applied Optics*, 46(9): 1535-1547 [DOI: 10.1364/AO.46.001535]
- Wang S L, Li J D, Zhang B, Shen Q, Zhang F F and Lu Z Y. 2016. A simple correction method for the MODIS surface reflectance product over typical inland waters in China. *International Journal of Remote Sensing*, 37(24): 6076-6096 [DOI: 10.1080/01431161.2016.1256508]
- Wang S L, Li J S, Zhang B, Spyarakos E, Tyler A N, Shen Q, Zhang F F, Kuster T, Lehmann M K, Wu Y H and Peng D L. 2018. Trophic state assessment of global inland waters using a MODIS-derived Forel-Ule index. *Remote Sensing of Environment*, 217: 444-460 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.026]
- Wang X W, Gong P, Zhao Y Y, Xu Y, Cheng X, Niu Z G, Luo Z C, Huang H B, Sun F D and Li X W. 2013. Water-level changes in China's large lakes determined from ICESat/GLAS data. *Remote Sensing of Environment*, 132: 131-144 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.01.005]
- Woolway R I, Jennings E, Shatwell T, Golub M, Pierson D C and Maberly S C. 2021. Lake heatwaves under climate change. *Nature*, 589(7842): 402-407 [DOI: 10.1038/s41586-020-03119-1]
- Wrigley R C and Horne A J. 1974. Remote sensing and lake eutrophication. *Nature*, 250(5463): 213-214 [DOI: 10.1038/250213a0]
- Wulder M A, Loveland T R, Roy D P, Crawford C J, Masek J G, Woodecock C E, Allen R G, Anderson M C, Belward A S, Cohen W B, Dwyer J, Erb A, Gao F, Griffiths P, Helder D, Hermosilla T, Hipple J D, Hostert P, Hughes M J, Huntington J, Johnson D M, Kennedy R, Kilic A, Li Z, Lyburner L, McCorkel J, Pahlevan N, Scambos T A, Schaaf C, Schott J R, Sheng Y W, Storey J, Vermote E, Vogelmann J, White J C, Wynne R H and Zhu Z. 2019. Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*, 225: 127-147 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.02.015]

- Xu J, Li Y M, Lyu H, Lei S H, Mu M, Bi S, Xu J F, Xu X G, Miao S, Li L L and Yan X C. 2021. Simultaneous inversion of concentrations of POC and its endmembers in lakes: a novel remote sensing strategy. *Science of the Total Environment*, 770: 145249 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145249]
- Xue K, Zhang Y C, Duan H T and Ma R H. 2017. Variability of light absorption properties in optically complex inland waters of Lake Chaohu, China. *Journal of Great Lakes Research*, 43(1): 17-31 [DOI: 10.1016/j.jglr.2016.10.006]
- Xue K, Zhang Y C, Duan H T, Ma R H, Loisel S and Zhang M W. 2015. A remote sensing approach to estimate vertical profile classes of phytoplankton in a eutrophic lake. *Remote Sensing*, 7(11): 14403-14427 [DOI: 10.3390/rs71114403]
- Yang G S, Ma R H, Zhang L, Jiang J H, Yao S C, Zhang M and Zeng H A. 2010. Lake status, major problems and protection strategy in China. *Journal of Lake Sciences*, 22(6): 799-810 (杨桂山, 马荣华, 张路, 姜加虎, 姚书春, 张民, 曾海鳌. 2010. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. *湖泊科学*, 22(6): 799-810) [DOI: 10.18307/2010.0601]
- Yueh S H, West R, Wilson W J, Li F K, Njoku E G and Rahmat-Samii Y. 2001. Error sources and feasibility for microwave remote sensing of ocean surface salinity. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(5): 1049-1060 [DOI: 10.1109/36.921423]
- Zhang B, Li J S, Shen Q, Wu Y H, Zhang F F, Wang S L, Yao Y, Guo L N and Yin Z Y. 2021. Recent research progress on long time series and large scale optical remote sensing of inland water. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(1): 37-52 (张兵, 李俊生, 申茜, 吴艳红, 张方方, 王胜蕾, 姚月, 郭立男, 殷子瑶. 2021. 长时序大范围内陆水体光学遥感研究进展. *遥感学报*, 25(1): 37-52) [DOI: 10.11834/jrs.20210570]
- Zhang G Q. 2018. Changes in lakes on the Tibetan Plateau observed from satellite data and their responses to climate variations. *Progress in Geography*, 37(2): 214-223 (张国庆. 2018. 青藏高原湖泊变化遥感监测及其对气候变化的响应研究进展. *地理科学进展*, 37(2): 214-223) [DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.02.004]
- Zhang G Q, Yao T D, Chen W F, Zheng G X, Shum C K, Yang K, Piao S L, Sheng Y W, Yi S, Li J L, O'Reilly C M, Qi S H, Shen S S P, Zhang H B and Jia Y Y. 2019. Regional differences of lake evolution across China during 1960s—2015 and its natural and anthropogenic causes. *Remote Sensing of Environment*, 221: 386-404 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.038]
- Zhang G Q, Yao T D, Xie H J, Yang K, Zhu L P, Shum C K, Bolch T, Yi S, Allen S, Jiang L G, Chen W F and Ke C Q. 2020. Response of Tibetan Plateau lakes to climate change: trends, patterns, and mechanisms. *Earth-Science Reviews*, 208: 103269 [DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103269]
- Zhang M W, Ma R H, Li J S, Zhang B and Duan H T. 2014. A validation study of an improved SWIR iterative atmospheric correction algorithm for MODIS-Aqua measurements in Lake Taihu, China. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(8): 4686-4695 [DOI: 10.1109/TGRS.2013.2283523]
- Zhang Q, Liu Y B, Yao J, Lai X J, Li X H, Wu G P, Huang Q, Sun Z D, Zhang D, Li Y L, Tan Z Q and Liu X G. 2020. Lake hydrology in China: advances and prospects. *Journal of Lake Sciences*, 32(5): 1360-1379 (张奇, 刘元波, 姚静, 赖锡军, 李相虎, 吴桂平, 黄群, 孙占东, 张丹, 李云良, 谭志强, 刘星根. 2020. 我国湖泊水文学研究进展与展望. *湖泊科学*, 32(5): 1360-1379) [DOI: 10.18307/2020.0511]
- Zhang Y L. 2011. Progress and prospect in lake optics: a review. *Journal of Lake Sciences*, 23(4): 483-497 (张运林. 2011. 湖泊光学研究进展及其展望. *湖泊科学*, 23(4): 483-497) [DOI: 10.18307/2011.0401]
- Zou W N, Yuan L and Zhang L Q. 2013. Analyzing the spectral response of submerged aquatic vegetation in a eutrophic lake, Shanghai, China. *Ecological Engineering*, 57: 65-71 [DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.04.008]

Review of lake remote sensing research

DUAN Hongtao^{1,2,3}, CAO Zhigang¹, SHEN Ming¹, MA Jing¹, QI Tianci¹

1. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Northwest University, Xi'an 710127, China;

3. College of Urban and Environment, Northwest University, Xi'an 710127, China

Abstract: Lake remote sensing is an important branch of limnology and remote sensing science as a new interdisciplinary discipline. In general, lake remote sensing includes water color remote sensing, lake water environment remote sensing, and lake hydrology remote sensing. The key to lake remote sensing is to initially study the lake's specific problems to address individual or a type of sensitive factors. To accomplish the monitoring of these lake factors through remote sensing, the scientific questions about the preprocessing of remote sensing data, atmospheric correction, algorithm development, and validation, as well as the reconstruction of a long time series data record,

were introduced one by one.

With the reviews in published studies, this research discussed the research object, content, and method of lake remote sensing science and summarized five development progresses of lake remote sensing by reviewing the research progress, as follows:

(1) Concerns: from interest-oriented to problem-oriented. Lake remote sensing has gradually expanded from the water color remote sensing to water environment, water ecology, and hydrology remote sensing, with diverse research fields.

(2) Observation equipment: from ground-based remote sensing and medium resolution satellite to high-resolution/hyperspectral/drone. Satellite instruments for remote sensing of lakes have developed from scratch and achieved a development stage from low to high spatial, radiometric, and spectral resolution.

(3) Algorithm and computing force: from stand-alone experience/mechanism model to machine learning algorithms based on cloud computing. The machine learning models have been used to retrieve water constituents in the lakes with complicated optical properties, which were difficult for traditional empirical and semi-analytical algorithms.

(4) Research dimension: from surface to vertical profile. The remote sensing reflectance was related to the vertical distribution of lake water quality parameters (e.g., algae biomass) in the water column; aquatic remote sensing has been gradually developed in a 3D scale.

(5) Spatial coverage: from individual/regional lake to national/continental/global scale. A number of aquatic parameters in national and global lakes, such as lake boundary, algae blooms, and water clarity, have been monitored by remote sensing data through cloud computing platforms.

Finally, the future development directions of lake remote sensing are identified, as follows: (1) Launch geostationary satellites or small satellite constellation to satisfy the requirements for lake observation; (2) Develop standard algorithms of lake remote sensing and establish the global lake satellite remote sensing monitoring network; (3) strengthen remote sensing of salinity, temperature, and carbon cycle in lakes under the background of global change; (4) conduct research with respect to satellites, aircraft, and ground remote sensing monitoring and simulation over lakes and the entire watershed.

Key words: lake remote sensing, machine learning, network, satellite constellation, SDG, big data, water color remote sensing

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41971309, 42101378); Project on Cyanobacterial Blooms Monitoring and Early Warning System and Platform (No. YNYG2020-0611)