J. Lake Sci.(湖泊科学), 2020, **32**(5): 1406-1420
DOI 10.18307/2020.0514
© 2020 by *Journal of Lake Sciences*

湖泊水情遥感研究进展*

宋春桥[1**], 詹鹏飞[1,2], 马荣华[1]
(1:中国科学院南京地理与湖泊研究所流域地理学重点实验室,南京 210008)
(2:中国科学院大学,北京 100049)

摘　要: 湖泊作为最直接的淡水资源之一,在人类的生产、生活各方面都占据至关重要的地位. 受到全球气候变化与人类活动的影响,湖泊正在发生急剧变化,因而有必要对其进行快速、准确的时空变化监测,从而为水资源管理与保护、未来气候变化预警提供依据. 遥感技术的产生与发展为大范围、实时动态的湖泊变化监测提供了难得的契机,它克服了人类对湖泊实地考察的局限性. 本文对现有国内外湖泊水情遥感监测技术与方法进行了综合梳理,主要综述了国内外在湖泊水域范围提取、湖泊水位提取、湖泊水量估算、流域水文过程等方面的遥感研究进展情况,重点总结了该领域近年来提出的新方法和新技术. 最后,结合当前遥感技术的发展,对未来遥感在湖泊动态变化监测中的应用潜力和趋势进行了简要论述,并对多源遥感数据融合与云计算平台的结合在地表水体连续变化监测中的应用进行了展望.
关键词: 湖泊;水文;遥感;流域;全球变化

Progress in remote sensing study on lake hydrologic regime*

SONG Chunqiao[1**], ZHAN Pengfei[1,2] & MA Ronghua[1]
(1: *Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210008, *P.R.China*)
(2: *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *P.R.China*)

Abstract: As the key component of available freshwater resources, lakes play an important role in all aspects of life and human activities. Influenced by global climate change and human intervention, lakes have been undergoing rapid changes. Thus it is necessary to conduct lasting and accurate investigation of spatial and temporal variations of these lakes, serving better for water resources management and protection, and early warning of future climate change risks. The emergence and development of remote sensing technology provides great opportunity for large-scale and near real-time monitoring of lake dynamics, which overcomes the limitations of field-based investigation of lakes. In this paper, the existing remote sensing technologies and methods of lake monitoring are reviewed, and the progress of remote sensing research in the aspects of lake area extraction, lake level reconstruction, lake water volume/storage variation estimation, etc., are summarizes. This review focuses on the new methods and new technologies employed in recent years. The application prospect of multi-source remote sensing data fusion and cloud computing platform in continuous change monitoring of surface water bodies is also mentioned. Finally, in view of the promising development of remote sensing technology, the application potential and prospective of remote sensing monitoring of lake dynamics in the future are discussed briefly.
Keywords: Lake; hydrology; remote sensing; watershed; global change

水是人类生存与社会发展均不可缺少的物质基础. 湖泊作为可直接利用的最重要的地表淡水资源,具有调节河川径流、提供农业和生活水源以及改善区域生态环境等功能,不仅对人类生活、国民经济和区域水资源具有非常重要的作用,在维护生态平衡方面也同样具有重要贡献[1]. 中国内陆城镇一半以上的饮用水

* 2020-07-18 收稿;2020-07-18 收修改稿.
中国科学院战略性先导科技专项子课题(XDA23100102)、国家重点研发计划项目(2019YFA0607101, 2018YFD0900804, 2018YFD1100101)、人才引进计划项目(Y7QR011001)和国家自然科学基金项目(41971403, 41801321)联合资助.
** 通信作者;E-mail: cqsong@niglas.ac.cn.

由湖泊供给[2]. 另外,从生态服务功能方面来看,与其他生态系统相比,与湖泊伴生的湿地生态系统服务价值最高,是支撑人类生存和发展的重要系统[3],并与湖泊生态系统共同在维持生态平衡、调节区域气候和河川径流、补充地下水、防洪、保护生物多样性、减轻流域洪旱灾害等方面发挥重要作用[4].

此外,湖泊作为自然综合体,由湖盆、湖水、水中所含物质(矿物质、溶解质、有机质以及水生生物等)所组成,与自然界的物质和能量循环密切相关. 湖泊不仅是水资源和多种沉积矿藏贮存的场所[5],同时也参与到各大圈层的相互作用之中,它的形成与消失、扩张与收缩及其引起的生态环境的演化过程都是全球、区域和局部的构造和气候事件共同作用的结果[6]. 因此,湖泊作为全球环境变化的敏感对象,是湖区气候变化、环境变异的指示器,尤其是位于偏远地区的内陆湖泊受到人类干扰较小,可以准确地反映气候、环境系统的变化[7].

21 世纪以来,由于气候变化、人类活动等因素的影响,中国多数湖泊发生了不同程度的变化. 例如,气温变暖[8]和地下水的过渡开发[9],导致了中国北方地区湖泊数量减少、面积萎缩;而在降雨量增加、冰川融化的共同作用下,新世纪以来青藏高原地区湖泊快速扩张,同时造成草场淹没、公路损坏等危害[10-12]. 因此,有必要对湖泊变化进行实时、持续监测. 一般来说,湖泊变化以直接的水文观测为主,可以直接测量水位和岸线. 这种传统方法虽然精度较高,但耗时耗力,且时效性有限,难以准确表达区域性湖泊的实时变化. 此外,受到经济和政治因素的影响,近年来全球水文监测站点数量有所减少. 对于一些海拔较高、地理状况复杂且恶劣的地区,甚至无法进行实地测量,也就造成了部分地区历史水文观测资料匮乏. 另一方面,不同地区水文监测站点获取的监测数据格式差异较大,在进行湖泊观测数据整合时存在不便,难以满足当前全球变化研究对区域乃至全球水文监测数据的需要[13]. 在这种情况下,遥感因其空间覆盖广、周期性观测、人力成本低等优势,为监测湖泊变化提供了难得的契机. 尤其是近年来,社会经济发展以及城市化进程的加快,用水矛盾越来越突出,水文学研究需要解决的问题越来越复杂. 遥感技术在水文学中的广泛应用,极大地推动了水文学的研究发展,湖泊水情遥感也就应运而生.

但是,由于陆表水体变化过程的复杂性以及遥感技术自身的局限性,陆地水体的长期动态监测仍然受到一定程度的制约. 例如,在湖泊水情监测方面,受到传感器时空谱分辨率的限制,能够用于精细化全天候动态监测的传感器或者传感器组合不多;又因为不同地区下垫面复杂程度不一,目前还没有统一的普适性水体提取算法. 因此,人们正在积极发展新的技术手段和方法. 除了发展新型卫星传感器,近年来建设的地球大数据云平台,能够方便、快速地获取不同数据集,同时进行高效处理. 遥感技术的不断发展、成熟和完善,将不断提升我们对陆地水体及其变化过程的理解,从而让人们更及时地适应不断变化的地球环境[14].

湖泊水情要素是描述湖泊水文信息的主要物理量,也是能够准确反映某一时间湖泊水文变化规律的最直接的指标[15],包括水域范围、水位、水量等. 湖泊水情遥感是指以电磁波与湖泊水体相互作用的机理为基础,以湖泊水文要素为主要研究对象的一门综合性交叉学科. 本文基于国内外湖泊水情遥感监测技术与方法的发展,总结该领域近年来提出的新方法和新技术. 同时,结合当前遥感技术和数据处理方法的发展,简要论述当前遥感在湖泊动态变化监测中存在的问题和未来的发展方向.

1 湖泊水情遥感的概念及由来

从 1960s 开始,各种水文要素的参数反演及应用研究已经从多方面展开[16-19]. 21 世纪以来,各类专著的出版以及研究的开展,标志着水文遥感逐步取得整体性和系统性发展,在理论、方法、技术和数据产品上也得以不断完善[20]. 在这样一个发展背景之下,分布式流域水文模型对空间信息需求的不断增强,以及全球气候变化和人类活动所带来的全球灾害事件,促进了学科交叉融合,水文遥感的加入进一步推动了水文学、生态水文学等学科的发展. 由于水体的流域循环特征,并且随着涉水问题影响面的扩大和水科学研究的不断深入,研究的重点逐渐转向以流域为单元的水文过程研究,以流域为研究对象的水文过程监测研究开始逐渐形成.

事实上,作为全球陆地的组成部分,流域一直是水文遥感的核心研究对象之一. 流域水文过程遥感也就成为一个新的发展方向,它既是水文遥感的应用对象出口,又具有特殊性[20]. 其中,流域水文过程中各个环节的变化都会最终作用于湖泊、河流水量动态平衡过程,对于流域水文遥感的研究现状及存在的主要问题,

刘元波等[20]、Tang 等[21]综述文献已做了全面深入的阐述. 从广义角度看,湖泊水情遥感包括影响湖泊水量平衡的流域各水文过程及其要素的遥感监测.

流域水文过程涉及面较广,涵盖过程较为复杂(图 1). 相对地表径流、蒸散发以及大气降水等水循环过程而言,湖泊面积、水位以及水量变化能够直接指示湖泊水文情势的动态变化,并且更适合利用遥感技术进行监测. 因此,从狭义角度看,湖泊水情遥感是指基于多源、多维度遥感对湖泊的面积、水位(水深)以及水量变化开展的定量/定性监测. 本文重点针对狭义的湖泊水情要素面积、水位以及水量变化的遥感监测技术和方法进行综述.

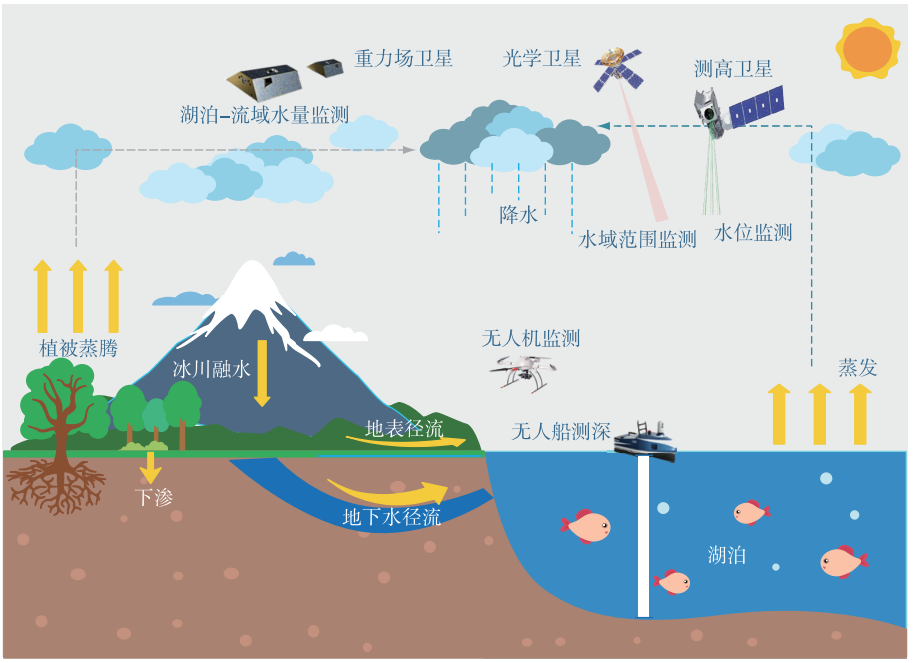


图 1 流域水循环过程及湖泊水情变量遥感监测概念图

Fig.1 Conceptual illustration of watershed-scale water cycle and lake water regime monitoring based on remote sensing

2 湖泊水情遥感的卫星传感

2.1 用于湖泊面积提取的常用遥感卫星

湖泊水域面积监测为湖泊水情研究奠定了基础,它的动态变化为研究全球气候变化乃至全球环境变化提供了重要依据. 卫星遥感技术的发展,为大尺度、实时、动态监测湖泊面积变化提供了可能性. 尤其是近年来中高分辨率遥感卫星的发展更是为大尺度的湖泊面积精细化监测提供了多种数据源. 目前常用的数据源有 SPOT HRV-CCD、EOS MODIS、Landsat MSS/TM/ETM+/OLI、CBERS CCD、Sentinel OLCI 等光学遥感影像,以及 ERS-1、ERS-2、Envisat、Sentinel-1 等微波雷达影像.

光学遥感影像包含大量易于提取的光谱信息,且由于数据可用性较高以及合适的时空分辨率,光学传感器已在水体变化监测领域得到了广泛应用[22]. 自 1972 年发射第一颗地球资源技术卫星 Landsat-1 以来,基于卫星的光学传感器已经证明了其监测地球表面大规模陆地覆被变化的潜力[23]. 作为重要的土地覆盖变化现象,地表水文学一直是地球观测的重要课题. 早在 1984 年,就有了关于遥感技术在印度水文学和水资源管理中应用的描述[24];之后,又有了许多利用卫星遥感数据得出河流淹没面积、水位和流量的研究[25];随着技术的发展,又有学者对测量地表水的遥感方法进行了更为详尽的总结和分析[26].

在地表水的遥感监测研究中,光学传感器的空间分辨率是要考虑的主要因素之一. 粗分辨率遥感器精度较低,但通常具有高时间分辨率和广阔的覆盖范围. 例如搭载在 NOAA 卫星上的 AVHRR 传感器,最初用于海洋和大气层的监测研究,但后来发现在探测大规模洪水事件时十分有效[27]. Terra 和 Aqua 卫星上的 MODIS 传感器空间分辨率较粗,但重复周期短、覆盖范围广. 自 2000 年卫星发射以来,已经积累了多年的数据记录,非常适合对地表水体进行时空分析. 因此,MODIS 时间序列数据已被广泛应用于监测湖泊水体的变化[28-30]和洪泛区淹没研究[31-32].

相对于上述中低空间分辨率卫星遥感数据源,作为中高分辨率光学卫星,Landsat 是历史上最成功的卫星系列之一,自 1972 年第一代卫星发射,该系列卫星已经连续提供了近 50 年的对地观测数据. 传感器由最早的 MSS 升级到目前最新的 OLI,空间分辨率也从 80 m 提高到 30 m,此级别的分辨率非常适合精细监测大尺度地表水的长期变化[33-35]. SPOT 是另一个中高分辨率卫星系列,装载了分辨率约为 10 m 的传感器,这比 Landsat 影像的分辨率更高. 无法免费获取数据在一定程度上限制了它的应用,但仍然有相当多的研究已经使用了 SPOT 影像[36-37]. 同类型的 Sentinel-2 由两颗卫星组成,搭载的 MSI 传感器能够提供空间分辨率为 10~60 m 的高质量多光谱影像. 其他中高分辨率的传感器,例如 HJ-1A/B[38]等,也已被证明可以有效地探测地表水体.

提高传感器的空间分辨率一直是遥感研究的主要目标,并且在过去十年中取得了重大进展. 许多新传感器,例如 IKONOS、Worldview、ZY-3、Quickbird 和 GF-1/2 能够提供米级甚至亚米级空间分辨率的影像. 在此分辨率级别上,可以成功检测到小型水体. 但是,高空间分辨率传感器同样存在一些局限:一是它们的场景覆盖小,不适合绘制大区域地表水;另一个是图像上存在阴影,特别是在城市地区或山区[39],这会严重影响水体的识别. 此外,高分数据获取方式一般都是收费的,这使得它在科学研究中的应用受到了限制. 因此,考虑要监测的水体规模,选择具有适当分辨率的遥感数据至关重要.

此外,由于光学遥感传感器容易受到夜晚和云雨天气的影响,高质量的遥感影像获取较难,在一定程度上限制了水体信息的获取. 相对而言,微波传感器具有穿透云层和某些植被的能力,并且不受太阳辐射的影响,可以在任何天气条件下昼夜工作. 随着微波遥感技术的发展,合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)数据的使用也越来越频繁[40]. Schumann 和 Moller[41]对洪水监测的可用微波遥感进行了详细综述,发现 SAR 是最适合监测洪水泛滥的微波传感器.

在实际研究中,为了充分发挥不同数据源的优势和特点,需要根据研究目标区域的特点和研究尺度等因素进行筛选,这样可以在提高时间和空间分辨的同时对比分析结果,提高识别精度. 图 2 和表 1 列出了包括以上综述的广泛用于湖泊水域范围监测的卫星/传感器发展历程和关键参数.

2.2 湖泊水位监测遥感

卫星测高的概念最早是在 1969 年召开的固体地球和海洋物理大会上由美国著名大地测量学家 Kaula W.M.提出的. 自从 1973 年第一颗星载主动微波遥感航天器 Skylab 发射以来,卫星测高技术得到不断发展,之后各种不同的雷达/激光高度计被先后搭载在 Geosat、ERS-1、TOPEX/Poseiden、ERS-2、GFO、Jason-1、Jason-2、Envisat、ICESat、Cryosat-2、SARAL、Jason-3、Sentinel-3、ICESat-2 等测高卫星上. 世界上主要测高卫星及其基本参数如图 3 和表 2 所示.

早在 1982 年,Brooks[42]就已经借助 Seasat 测高卫星获得湖泊水位观测数据并用到绘图工作中. Birkett 等[43-44]先后利用 Geosat、T/P 等测高数据对全球不同湖泊水位变化进行监测,并对其精度做出评估. 随着 ERS-1 和 ERS-2 卫星相继发射,Ducet 等[45]将 T/P 和 ERS-1、ERS-2 数据结合起来,绘制了高分辨率的全球大洋环流图. 随着科技水平的提高,可用的测高卫星逐步增多,作为 T/P 卫星的后继卫星,Jason-1、Jason-2 以及 Jason-3 分别于 2001、2008 和 2016 年成功发射,延续对全球海洋表面进行监测的任务. 已有研究对三者进行组合从而构成长时序水位变化分析,并对系统偏差做出评估并校正[46]. 欧洲航天局(ESA)在 2002 年发射了 Envisat 卫星,相对上一代卫星 ERS-1 和 ERS-2,Envisat 卫星搭载了新一代雷达高度计(Radar Altimeter-2, RA-2),测高精度也提高到了厘米级[47]. ESA 在 2010 年发射的雷达测高卫星 CryoSat-2 搭载了先进的 Ku 波段 SIRAL 高度计,能够准确测量南北极的海冰厚度以及冰盖的变化. 上述这几颗卫星的分辨率都相对较低,只适用于面积较大的湖泊. 2016 年发射的 Sentinel-3A 和 2018 年发射的 Sentinel-3B 上的高度计设计为在 Ku

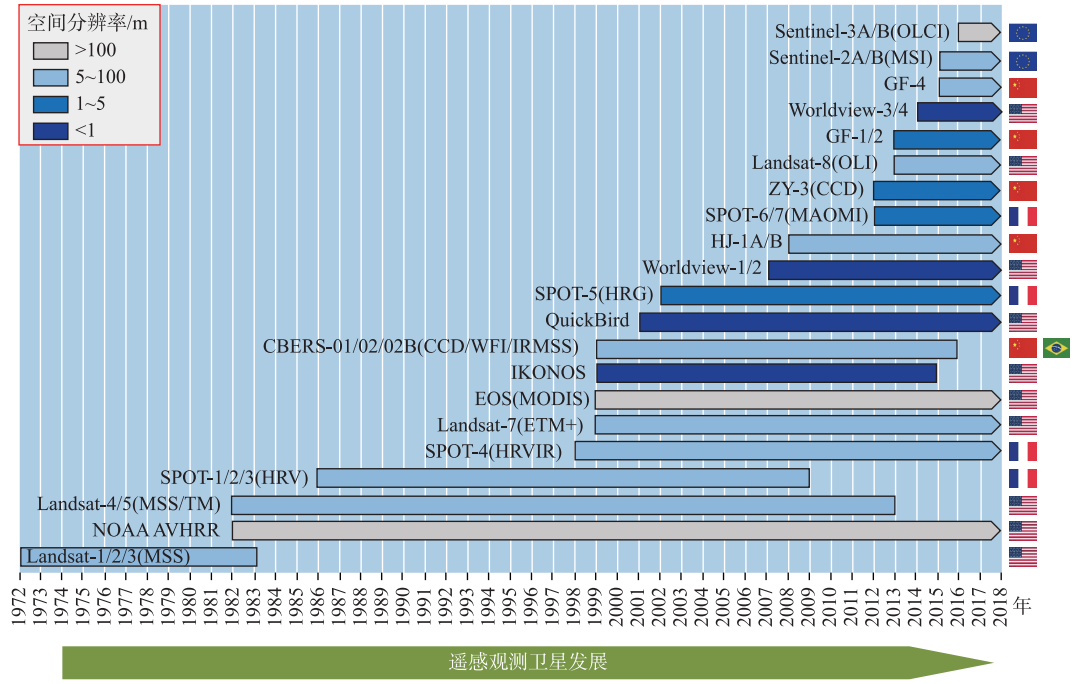


图 2 水域范围提取常用光学遥感卫星/传感器的发展

Fig.2 Development of optical satellites/sensors for water extraction

频段上以 SAR 模式运行. SAR 模式将提高高度计接收水体反射信号的能力,对于小型水体而言,这尤其重要. Gao 等[48]评估了 Sentinel-3 内陆水体水位产品的精度,证明了其在监测中小型水体时受到的陆面干扰很小.

除了这些雷达高度计,美国国家航空航天局(NASA)在 2003 年发射了激光测高卫星 ICESat,搭载了地球科学激光测高系统 GLAS(Geoscience Laser Altimeter System),其星下点足迹(footprint)可以达到 70 m,比起早期的卫星测高数据,精度得到了很大的提高,广泛用于内陆湖泊水位变化的研究. 例如,Zhang 等[49]、Phan 等[50]、Song 等[11]利用 ICESat 数据监测了青藏高原湖泊在 2003－2009 年期间的水位和水量变化速率. 作为 ICESat 卫星的后继卫星,2018 年发射的 ICESat-2 继续执行对全球冰盖、冰川、海冰等的监测任务. 相比而言,ICESat-2 能够覆盖数量更多的湖泊,测高精度也有所提高. Zhang 等[51]结合前序卫星 ICESat 对其进行了比较,验证了其精度的可靠性.

3 湖泊水情要素遥感

3.1 湖泊水域范围遥感

传统的水体提取方法一般依靠人工判读、目视检测,这不仅费时、费力,还会引入目视解译人员的经验知识从而存在不可控的主观误差,并不适用于面积较大、周边地理状况复杂的水体. 随着计算机科学技术的发展,借助计算机识别技术实现水体信息自动化提取的研究已经陆续开展. 现阶段,计算机自动化识别方法主要包括:单波段阈值法、多波段运算法(谱间关系法、比值法、水体指数法等)、色度判别法、决策树分类以及机器学习算法等.

单波段阈值法原理简单,操作简便. 单波段阈值法通常涉及从多光谱图像中选择一个波段提取开放水体信息,然后确定该波段以区分水和陆地的阈值,这主要依据水体在近红外波段和短波红外波段具有强吸收的特点. 该方法是最早用于水体提取的,早在 1957 年,就有人将单波段阈值法用到了海洋研究中[52]. 之后直到 1992 年,基于单波段阈值法发现并改进了用于区分较小水体的红外单波段阈值法[53]. 然而,阈值的主

表 1 水域范围提取常用光学遥感卫星及相关信息

Tab.1 Optical satellites and related information for water extraction

卫星	时间范围	重访周期	传感器参数信息
中低空间分辨率			
NOAA(AVHRR1/2/3)	1981 年至今	12 h	一共有 3 代传感器,最新的包含 6 个波段,地面分辨率为 1.1 km
EOS(MODIS)	1999 年至今	0.5 d	36 个离散光谱波段,最大空间分辨率为 250 m
Sentinel-3A/3B(OLCI)	2016 年至今	4 d	空间分辨率为 300 m
中等空间分辨率			
Landsat-1/2/3(MSS)	1972－1983 年	18 d	包含 4 个波段,空间分辨率为 80 m
Landsat-4/5(MSS/TM)	1982－2013 年	16 d	包含 7 个波段,空间分辨率为 30 m
Landsat-7(ETM+)	1999 年至今	16 d	包含 8 个波段,空间分辨率为 30 m
Landsat-8(OLI)	2013 年至今	16 d	包含 9 个波段,空间分辨率为 30 m
SPOT-1/2(HRV)	1986－2009 年	2~3 d	空间分辨率最高可达 10 m
SPOT-4(HRVIR)	1998 年至今	2~3 d	空间分辨率最高可达 10 m
SPOT-5(HRG)	2002 年至今	2~3 d	空间分辨率最高可达 2.5 m
SPOT-6/7(MAOMI)	2012 年至今	2~3 d	空间分辨率最高可达 2.5 m
HJ-1A/B	2008 年至今	4 d	共 4 个波段,空间分辨率为 30 m
GF-4	2015 年至今	—	可见光分辨率约为 50 m
Sentinel-2A/2B(MSI)	2015 年至今	10 d	覆盖 13 个光谱波段,空间分辨率最高可达 10 m
HY-1C(CCD)	2018 年至今	3 d	空间分辨率优于 50 m
高空间分辨率			
CBERS-01/02/02B (CCD/WFI/IRMSS)	1999－2010 年	26 d	包含多种传感器,空间分辨率最高可达 2.36 m
IKONOS	1999－2015 年	1~3 d	全色波段 1 m,多光谱波段 4 m
QuickBird	2001 年至今	1~6 d	全色波段约 0.61 m,多光谱波段 2.44 m
Worldview-1/2	2007 年至今	1.7 d	共 8 个波段,全色波段 0.5 m,多光谱波段 1.8 m
Worldview-3/4	2014 年至今	1 d	全色波段 0.31 m,多光谱波段 1.2 m
GF-1/2	2013 年至今	2 d	全色波段 0.81 m,多光谱波段 3.24 m
ZY-3 (CCD)	2012 年至今	5 d	空间分辨率最高可达 2.1 m

观选择可能导致开放水域的过度估计或估计不足,并且提取的水信息通常与阴影噪声混合. 相对而言,多波段方法使用两个或多个多光谱波段进行组合运算,从而突出了图像中的水体信息. 早在 1998 年,就有针对山区水体的多波段方法被提出并成功剔除了阴影的影响[54]. 虽然多波段组合运算相对单波段阈值法有效削弱了非水体信息的干扰,但波段选取和阈值确定的工作比较繁琐,且不能移除非水体的混合信息. 除了单波段及多波段阈值方法之外,水体指数法也是较为常用的一种水体提取方法. 水体指数法采用了归一化比值运算,因此能够自动消除地形起伏的影响,并通过突出水体、抑制其他地物信息来进行有效区分. 例如在 1996 年提出的归一化水体指数(Normalized Difference Water Index,NDWI)能够突出影像中的水体信息并减弱植被和土壤信息,从而做到水体的快速识别[55]. 之后基于 NDWI,提出用中红外波段代替近红外波段,发展改进型归一化水体指数(Modified Normalized Difference Water Index,MNDWI),解决了提取水体的面积包含有城镇建筑用地而偏大的问题[56],还解决了阴影难以消除的难题. 在部分研究中,还可以通过调整阈值大小[57]以及组合多种水体指数[58],从而达到更好的提取效果. 另外,在不同计算过程中分阶段地融合不同层次知识并建立迭代算法,能够实现水体的自动化、高精度提取[59]. 除此之外,人工智能神经网络能够对海量、复杂的数据集进行快速、准确地处理,可以很好地将遥感影像的多光谱信息和纹理特征结合起来,从而实现图像的精确分类[60-61]. 数学形态学方法[62]、混合像元分解法[63]等在用于水体信息提取时,也取得了较好的识别效果.

由于 SAR 的成像机制较为复杂,许多学者为提高水体识别的准确性,分别从不同角度分析并提出了有效的数据处理方法[64]. 基于 SAR 数据的水体信息提取方法也从传统的方法发展为多波段、多极化方式和多

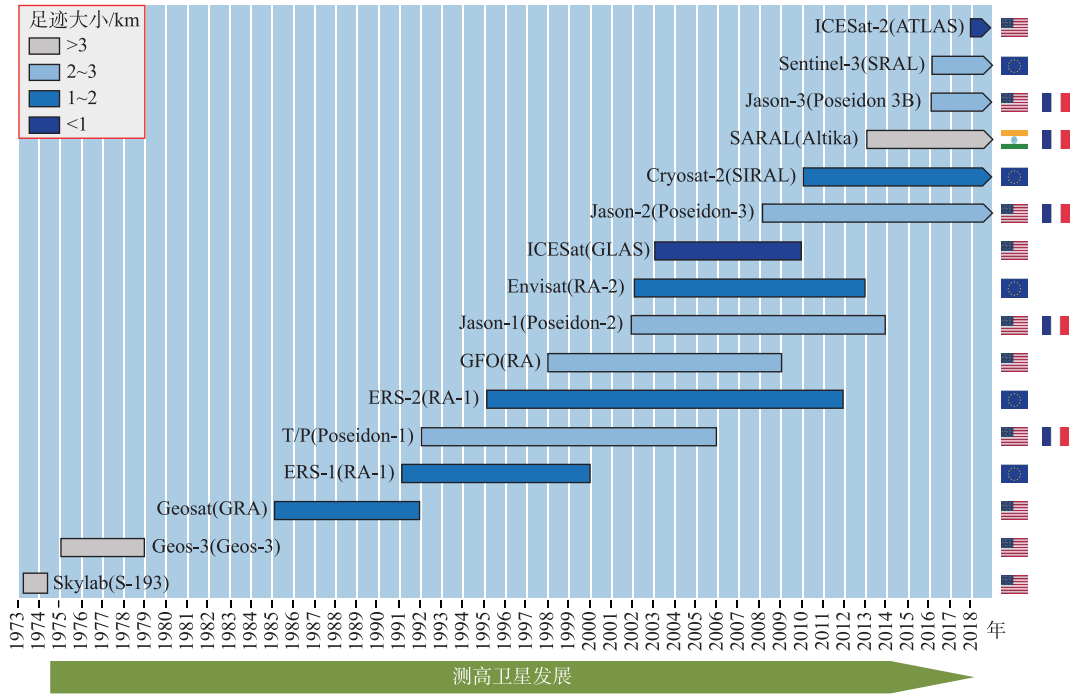


图 3 水位提取测高卫星/传感器的发展

Fig.3 Development of altimetry satellites/sensors for water level extraction

表 2 测高卫星及相关信息

Tab.2 Altimetry satellites and related information

卫星	时间范围	重访周期/d	足迹大小/km	测高精度/cm
Skylab (S-193)	1973－1974 年	—	8.0	85~100
Geos-3 (Geos-3)	1975－1978 年	2.3	3.6	25~50
Geosat (GRA)	1985－1990 年	17	1.7	10~20
ERS-1 (RA-1)	1991－2000 年	335	1.7	10
T/P (Poseidon-1)	1992－2005 年	10	2.2	6
ERS-2 (RA-1)	1995－2011 年	35	1.7	10
Jason-1 (Poseidon-2)	2001－2013 年	10	2.2	4.2
Envisat (RA-2)	2002－2012 年	35	1.7	2.5
ICESat (GLAS)	2003－2009 年	91	0.07	10
Jason-2 (Poseidon-3)	2008 年至今	10	2.2	2.5~3.4
Cryosat-2 (SIRAL)	2010 年至今	369/30	1.6	1~3
HY-2	2011 年至今	168/14	1.9	—
SARAL (Altika)	2013 年至今	35	8.0	—
Jason-3 (Poseidon-3B)	2016 年至今	10	2.2	2
Sentinel-3 (SRAL)	2016 年至今	27	0.3	2~8
CFOSAT	2018 年至今	13	1.4	—
ICESat-2 (ATLAS)	2018 年至今	91	0.017	3
Jason-CS	计划 2021 年	21	0.1	—
Sentinel-6	计划 2022 年	10	0.3	—

个入射角的SAR图像综合分类法. 近年来,基于计算机科学的遥感图像识别技术发展迅速,结合光学影像数据和SAR数据的研究也开始增多,充分利用了光学影像光谱信息丰富、SAR数据不受天气影响的特点,从而实现了更加精确的水体信息提取[65]. 不同水体提取方法优缺点比较见表3.

表3 主要水体提取方法

Tab.3 Main water extraction methods

算法名称	算法原理或关系式	参考文献	优缺点	适用领域
单波段阈值法	选取某一波段通过反复试验确定某一灰度值,将水体与地面分区分开来,该方法的关键在于阈值的确定	[52] [33]	优点:操作简单易行 缺点:难以消除植被、阴影等噪声,阈值选择受人为主观影响,精度不高	适用于较大水体、平原地区水体的提取
谱间关系法	组合多个遥感波段建立逻辑判别表达式(如利用Landsat TM:B2+B3>B4+B5)	[54]	优点:稳定性好,能区分复杂地物,能将水体和山体阴影区分开来 缺点:用到较多的逻辑判断,操作繁琐,容易将建筑物误提为水体;无法区分低密度覆盖的水植混合区	较为适用于山区水体的提取
W	基于K-T变换(缨帽变换)思想,通过简单的线性计算和空间旋转,利用TM影像6个波段的反射率数据构建了TCW(Tasseled Cap Wetness)	[66]	优点:提供了一种以最小的信息损失减少数据量的机制,光谱特征可以直接与地表的重要物理参数相关联 缺点:不易区分山体阴影	适用于平原地区,对于城市水体的提取也能取得不错的效果
NDWI	$NDWI = (GREEN - NIR)/(GREEN+NIR)$	[55]	优点:NDWI对植被的抑制效果有所改善,提高了遥感数据提取水体信息的精度 缺点:无法完全抑制水体以外的建筑物信息;对细小河流不敏感.	对于部分非山地植被区域的水体有较好的提取效果
MNDWI	$MNDWI = (GREEN - SWIR)/(GREEN+SWIR)$	[56]	优点:植被与建筑物均得到抑制;能够比较准确地区分阴影和水体 缺点:仅适用于拥有短波红外波段的传感器,容易受到冰雪的影响	对于地面建筑用地较多的区域
AWEI	$AWEI_{nsh} = 4(GREEN-NIR) - (0.25\ NIR+2.75\ SWIR2)$; $AWEI_{sh} = BLUE+2.5\ GREEN - 1.5(NIR+SWIR) - 0.25\ SWIR2$	[67]	优点:该指数包含两个公式,可分别应用于无阴影区域和阴影覆盖区域,并可以结合使用从而提高水体提取精度 缺点:对于细小河流信息的分离效果较差,容易混入大量阴影及少量的暗色建筑地物	适用于较大的线状河流的提取
WI_{2015}	$WI_{2015} = 1.7204+171\ GREEN+3\ RED-70\ NIR-45\ SWIR1-71\ SWIR2$	[68]	优点:分类精度高 缺点:相对其他水体指数而言,计算过程更加繁琐	相对其他指数,对于半干旱地区以及季节性变化较大的水体有较高精度
SWI	采用HSV颜色模型对MODIS的蓝、绿、红3个波段进行变换,并结合近红外波段构建SWI(Superfine Water Index)	[69]	优点:算法稳健,普适度高,适用于全球水体的提取 缺点:冬季对冰雪覆盖区水体的提取效果不理想	适用于全球不同地区水体提取研究

续表 3

算法名称	算法原理或关系式	参考文献	优缺点	适用领域
决策树分类法	通过一些判断条件对原始数据逐步进行二分和细化,通过每层决策树的判别确定每一个像素的所属正确类型	[70]	优点:算法灵活、普适性强、计算速度快 缺点:对于有类似的特征变量、空间分布的地物容易识别错误	对于不同地区均适用,在地物种类复杂(冰雪、林地等)的情况下也能达到较高的精度
面向对象分类法	是一种模拟人脑的解译方式,充分结合遥感影像的光谱、纹理、形状、拓扑以及上下文等信息,从而更大程度地发掘遥感影像中的信息	[71]	优点:分类精度高,抑制了“椒盐现象” 缺点:受到分类结果的质量和分类规则有效区分性的影响	适用于空间分析等研究
神经网络法	是一种监督分类方法,是为了克服常用的水体提取方法需要设定阈值的不足而提出的一种基于 BP 神经网络和光谱特征的水体自动提取方法	[60]	优点:自动计算样本的阈值,减少了主观选择阈值带来的误差 缺点:容易陷入局部极小、导致运行时间较长	适用于光谱信息丰富,地物复杂,阈值设定比较困难的地区

3.2 湖泊水位遥感

湖泊水位变化是评价湖泊水量平衡的重要指标. 一般来说,湖泊水位变化以直接的气象和水文观测为主,能直接测量水位和湖岸. 但这种方法并不适用于地处偏远、自然条件恶劣地区的湖泊. 卫星测高技术因其空间覆盖面广、全天时全天候重复工作、经济与人力成本相对较低等优势,为监测湖泊水位变化提供了难得的契机. 卫星测高最早用于海面测量,但后续研究发现,大型湖泊表面和海洋表面具有类似的反射特性,湖泊测高水位垂直精度较高,与海洋表面测高精度近似[72]. 由于卫星测高可以从宇宙空间大范围全天候多次重复、准确地提供海洋、冰面、陆地冰川、湖泊、河流等表面高度的观测值,具有其他监测手段无法比拟的优势[73],并且卫星测高数据处理技术更加成熟,测高精度也在不断提高,使得对于湖泊水位的研究开始增加.

自 1990s 中期以来,卫星雷达测高就被用于监测诸如湖泊和河流等内陆地表水的水位变化[26,74-75]. 在地面参照系内测量地表水位,其重复性从 10 到 35 天不等,具体取决于卫星的轨道周期. 尽管数据获取与天气条件无关,但是湖岸地形可能会影响卫星高度计的信号,从而导致湖泊水位误差较大. 最初发射的测高卫星搭载的都是雷达传感器,星下点足迹都在 2 km 左右,受湖岸地形的影响较大,更适用于监测大型湖泊的水位动态变化. 针对雷达测高卫星轨道间距远、星下点足迹大的不足,NASA 在 2003 年发射了激光测高卫星 ICESat(the Ice, Clouds, and Land Elevation Satellite),搭载了地球科学激光测高系统(Geoscience Laser Altimeter System,GLAS),空间分辨率较高,其星下点足迹可以达到 70 m,垂直精度可以达到 3 cm,能够对面积较小的湖泊进行水位变化监测. 作为 ICESat 卫星的后继卫星,2018 年发射的 ICESat-2 继续执行对全球冰盖、冰川、海冰等的监测任务,能够覆盖数量更多的湖泊,测高精度也有所提高.

但单个测高卫星存在覆盖湖泊数量少、服役年限短的不足,因此,在许多情况下,需要融合多种测高卫星数据,从而发挥各种卫星数据的优势,获取数量更多、更完整的湖泊水位多年变化信息. 例如刘英等[76]基于 Hydroweb(Hydrology website)湖泊水位长时序变化数据,对青藏高原 63 个典型湖泊的多年水位变化进行了分析. 除了使用卫星测高监测湖泊水位之外,现有研究中,也有学者通过 GIS 建模的方法获取湖泊不同位置的水深. 例如,Hollister 等[77]利用最大深度测量值和湖泊岸线,通过简单的线性变换可以估计任意点处的湖泊深度. 还有一些学者通过结合光学卫星影像和地形数据计算得到影像获取时间的湖泊平均水位[78-79]. 该方法的精度主要受到地形数据精度、遥感影像分辨率以及湖泊周围地势的影响.

3.3 湖泊水量平衡遥感建模

传统湖泊水量估算方法一般需要借助水文站实地测量获取的地表径流、湖面蒸散发等参数,但偏远地区的湖泊资料获取较难实现[80]. 随着遥感技术的发展,许多研究通过结合卫星测高数据和卫星影像数据获

取的湖泊水位和面积,估算出湖泊的水量变化,为解决这一困难提供了可靠的办法.

根据卫星测高数据和遥感影像数据的选择,通常有 3 种方法可以提取湖泊水量. 第 1 种方法利用测高水位数据或者湖泊面积数据与实测湖泊水量数据建立数学模型,就可以通过遥感数据计算得到没有观测时期的湖泊水量. 尽管这是一种简单明了的方法,但它仅适用于可直接或间接获取实际水量信息的湖泊. 第 2 种方法是利用同时段的测高数据和影像数据,结合水量估算公式,从而估算湖泊的水量变化[81-82]. 但是这种方法的局限性在于,只有在测高水位和湖泊面积数据监测时间一致的情况才能用于估算湖泊水量变化. 第 3 种方法则是建立测高水位和湖泊面积统计模型,进而通过一类遥感数据(卫星测高水位数据或者遥感影像数据)得到湖泊长时序的水量变化. 例如,在 Crétaux 等[83] 的研究中,通过多源遥感数据获取的湖泊面积扩展了 CNES 测高数据的时段,从而获取目标湖泊/水库的水量变化.

除了利用测高卫星得到的水位变化,同样可以结合光学影像得到湖泊面积变化和 DEM 数据,计算水量变化. 受湖盆地形影响,某一湖泊面积与相应的水面高程(水位)对应,并在不同形态的湖盆中具有不同的关系. 通过这种关系可以计算湖泊面积变化与水量变化之间的关系[84].

此外,由美国宇航中心和德国航天中心联合研发的 GRACE(Gravity Recovery And Climate Experiment)重力卫星,不会受到复杂地形的限制,能够进行连续多次的重复观测. 十余年来,国内外学者针对 GRACE 重力卫星的数据处理方法、产品精度以及在各个科研领域的应用等方面开展了诸多的研究工作[85-87]. 作为 GRACE 的后继卫星,2018 年 5 月发射的 GRACE-FO 能够延续之前的对地观测. 研究发现由于空间分辨率较粗,GRACE 卫星仅适合大尺度范围的陆地水量变化监测. 尽管基于 GRACE 数据的陆地水量研究中存在一定的误差,但在用于验证其他方法获取的水量估算结果的研究中取得了不错的效果[11,88].

4 湖泊水情遥感监测数据集成处理

地球大数据时代的主要特点在于数据获取速度快、更新周期短、时效性强[89],且数据量呈现出指数级增长的态势,这对数据存储、处理和分析的要求都很高,一般的本地计算机或服务器已经不能满足海量数据的计算需求. 自 21 世纪以来,基于云平台的海量数据并行计算得到快速发展,例如,由 Google 与卡内基美隆大学、美国地质调查局共同开发的免费地理计算云平台—谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE). GEE 平台建立在谷歌数据中心的一系列数据支持之上,有着强大的数据存储、处理、分析和可视化能力. 此外,该平台还整合了各类遥感影像数据、地球物理数据、气候/天气数据和人口统计数据等. GEE 高效快速的计算能力以及镶嵌其中的各种地理空间数据和分类算法为全球或区域尺度的科学研究创造了极大的便利.

近年来,高性能云计算平台已被广泛应用于社会与科学研究. 基于 GEE 平台,Pekel 等[35] 结合 1984—2015 年全球 300 多万景 Landsat 影像,生成了 30 m 空间分辨率的全球地表水体分布年度和月度数据集,最近又将数据集更新到 2019 年. 如果通过一台本地计算机完成此项计算任务的运算时间超过 1200 年,而基于 GEE 平台,完成此项工作仅耗时 45 天,可见云计算平台在提高数据处理效率上的能力十分强大.

5 研究现状及展望

卫星遥感作为一种先进的湖泊变化监测技术手段,可以实时监测当前的动态变化,掌握现有情况;也可以对历史观测资料进行分析,探究变化规律;同时还可以结合水文、水动力模型,对未来变化趋势进行预测[90]. 尤其是近年来中高分辨率遥感卫星的发展更是为多尺度的湖泊变化监测提供了多种数据源,针对全球湖泊水情监测的研究开始从多方面开展,这些研究极大地促进了对于全球湖泊在过去近半个世纪变化规律的掌握和理解,取得了显著的研究进展.

随着水文遥感的不断发展,各种水体监测产品不断出现,提供了海量的空间数据,为进行湖泊水情实时动态监测以及变化规律分析奠定了重要的数据基础. 但是水文遥感作为一门新的学科,也面临着诸多问题,包括遥感反演算法普适性、多源遥感数据之间的差异性、长时序遥感趋势反演的可靠性等. 例如,通过对湖泊水情遥感研究进展进行回顾与综合,能够发现湖泊水域范围提取从早期单一、非连续数据向多源、多传感器遥感数据的综合使用转变,提取方法也由最初费时费力的目视判读发展为现在计算速度快、识别精度高的计算机自动化识别. 但这些提取方法仍会受到混合像元、阴影以及光谱特征相似地物的影响,针对这些问

题,用于提取的指数模型和算法也在逐步优化和发展. 国内外学者通过结合多种方法进行综合研究,以减少阴影的影响,并针对混合像元问题发展了多种混合像元分解模型,但目前并没有效果最佳的普适算法. 综上所述,湖泊面积变化研究一般集中在两个方面:一是水体信息提取普适方法研究,二是湖泊变化的趋势以及成因分析. 因此不断探索湖泊信息提取的新方法以及如何定量分析湖泊动态变化是十分重要的研究主题.

另外,湖泊水位提取发展类似,过去许多研究大多利用 1~2 种测高数据进行部分卫星轨道经过的湖泊的分析,受限于测高卫星轨道间距大、服役年限短,这就导致很难覆盖到大范围多数湖泊,并且能够得到的水位数据也仅限于卫星服役年限而无法构建长时序的湖泊历史水位资料. 但随着测高技术的发展,数据处理算法的成熟,可用的测高数据越来越多且精度得到提高,开发多源测高数据集成算法并优化成为今后湖泊水位提取的重点. 因此如何采用综合集成的方法和大数据、系列数据的优势,提高湖泊水文要素提取的精度和效率是未来研究的方向.

在当前湖泊水情遥感研究的基础上,要推动湖泊水情遥感更进一步,未来的研究及发展重点可以归纳为以下两点:

1)基于多源遥感云计算平台的湖泊水情数据批处理:在地球大数据时代,高性能云计算平台的发展为海量遥感数据存储、计算及可视化展示提供了技术支持与平台支撑. 近年来国内云计算平台也得到了快速发展,如阿里云等. 然而,目前国内云计算平台在地球科学领域的应用还较少. 因此,未来应该多考虑基于国内外云计算平台开展全球或区域尺度的地表水体连续变化研究.

2)集成站点与遥感观测发展湖泊关键要素全国乃至全球尺度产品:利用众源卫星光学与雷达遥感影像,发展耦合分步迭代与机器学习思想的水体自动化分类算法,实现大尺度长时序湖泊水域范围提取技术;引入合适的滤波算法,同化站点观测、多源雷达与激光测高卫星数据重建长时序湖泊水位,在此基础上研发"天(卫星)—空(无人机航测)—地(台站)—水(无人船载测深)"湖泊水情监测技术方案,实现湖泊水位与水量变化的历史长时序重建与近实时监测. 并将上述技术体系移植到 GEE 等遥感云平台,研发全国或全球尺度湖泊水情的业务化产品.

6 参考文献

[1] Yu XY, Jiang N. Analyzing lake area change in Ebinur by integration of RS and GIS techniques. *J Lake Sci*, 2003, **15**(1): 81-84. DOI: 10.18307/2003.0112. [于雪英, 江南. 基于 RS、GIS 技术的湖面变化信息提取与分析——以艾比湖为例. 湖泊科学, 2003, **15**(1): 81-84.]

[2] Wu FC, Meng W, Song YH *et al*. Research progress in lake water quality criteria in China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(12): 2385-2393. [吴丰昌, 孟伟, 宋永会等. 中国湖泊水环境基准的研究进展. 环境科学学报, 2008, **28**(12): 2385-2393.]

[3] Young P. The "new science" of wetland restoration. *Environmental Science & Technology*, 1996, **30**(7): 292A-296A.

[4] Wu BF, Huang JL, Shen LB. Analysis and evaluation of flood-control functions of wetland taking Dongting Lake as an example. *Geographical Research*, 2000, **19**(2): 189-193. [吴炳方, 黄进良, 沈良标. 湿地的防洪功能分析评价:以东洞庭湖为例. 地理研究, 2000, **19**(2): 189-193.]

[5] Han M, Li YH, Zhang WY *et al*. A review and prospect of lake and environmental evolution in China. *Progress in Geography*, 2003, **22**(2): 125-132. [韩美, 李艳红, 张维英等. 中国湖泊与环境演变研究的回顾与展望. 地理科学进展, 2003, **22**(2): 125-132.]

[6] Wang SM, Li JR. Late Cenozoiclake deposits of China and environmental outline. *J Lake Sci*, 1993, **5**(1): 1-8. DOI: 10.18307/1993.0101. [王苏民, 李建仁. 中国晚新生代湖泊沉积及其反映的环境概貌. 湖泊科学, 1993, **5**(1): 1-8.]

[7] Pu PM, Tu QY, Wang SM. Researeh progress of limnology in china. *J Lake Sci*, 1989, **1**(1): 1-11. DOI: 10.18307/1989.0101.[濮培民,屠清瑛, 王苏民. 中国湖泊学研究进展. 湖泊科学, 1989, **1**(1):1-11.]

[8] Guo ZM, Miao QL, Li X. Variation characteristics of temperature over Northern China in recent 50 years. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, **25**(4): 448-454. [郭志梅, 缪启龙, 李雄. 中国北方地区近 50 年来气温变化特征的研究. 地理科学, 2005, **25**(4): 448-454.]

[9] Liu CS, Du LJ, Chen X *et al*. The change of effectively irrigated land area in China during the past 20 years. *Resources Science*, 2006, **28**(2): 8-12. [柳长顺, 杜丽娟, 陈献等. 近 20 年我国有效灌溉面积动态分析. 资源科学, 2006, **28**

(2): 8-12.]

[10] Ma RH, Yang GS, Duan HT *et al*. China's lakes at present: Number, area and spatial distribution. *Science China Earth Sciences*, 2011, **54**(2): 283-289. DOI: 10.1007/s11430-010-4052-6.

[11] Song CQ, Huang B, Ke LH. Modeling and analysis of lake water storage changes on the Tibetan Plateau using multi-mission satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **135**: 25-35. DOI: 10.1016/j.rse.2013.03.013.

[12] Zhang GQ, Yao TD, Chen WF *et al*. Regional differences of lake evolution across China during 1960s-2015 and its natural and anthropogenic causes. *Remote Sensing of Environment*, 2019, **221**: 386-404. DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.038.

[13] Lu SL, Wu BF, Yan NN *et al*. Progress in river runoff monitoring by remote sensing. *Advance in Earth Sciences*, 2010, **25**(8): 820-826. [卢善龙, 吴炳方, 闫娜娜等. 河川径流遥感监测研究进展. 地球科学进展, 2010, **25**(8): 820-826.]

[14] Song P, Liu YB, Liu YC. Advances in satellite retrieval of terrestrial surface water parameters. *Advances in Earth Science*, 2011, **26**(7): 731-740.[宋平, 刘元波, 刘燕春. 陆地水体参数的卫星遥感反演研究进展. 地球科学进展, 2011, **26**(7): 731-740.]

[15] Wang ZY. Application of remote sensing in extracting hydrological elements of lakes. *Heilongjiang Science and Technology Information*, 2016, **36**: 122.[王智颖. 浅谈遥感在湖泊水文要素提取中的应用. 黑龙江科技信息, 2016, **36**: 122.]

[16] Hickman GD, Hogg JE. Application of an airborne pulsed laser for near shore bathymetric measurements. *Remote Sensing of Environment*, 1969, **1**(1): 47-58. DOI: 10.1016/s0034-4257(69)90088-1.

[17] Martin DW, Scherer WD. Review of satellite rainfall estimation methods. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1973, **54**(7): 661-675. DOI: 10.1175/1520-0477-54.7.661.

[18] Jackson RD. Evaluating evapotranspiration at local and regional scales. *Proceedings of the IEEE*, 1985, **73**(6): 1086-1096. DOI: 10.1109/proc.1985.13239.

[19] Moran MS, Jackson RD. Assessing the spatial distribution of evapotranspiration using remotely sensed inputs. *Journal of Environmental Quality*, 1991, **20**(4): 725-737. DOI: 10.2134/jeq1991.00472425002000040003x.

[20] Liu YB, Wu GP, Zhao XS *et al*. Remote sensing for watershed hydrology: Issues and challenges. *Advances in Earth Science*, 2020, **35**(5): 488-496.[刘元波, 吴桂平, 赵晓松等. 流域水文遥感的科学问题与挑战. 地球科学进展, 2020, **35**(5): 488-496.]

[21] Tang QH, Gao HL, Lu H *et al*. Remote sensing: Hydrology. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2009, **33**(4): 490-509. DOI: 10.1177/0309133309346650.

[22] Huang SL, Dahal D, Young C *et al*. Integration of Palmer Drought Severity Index and remote sensing data to simulate wetland water surface from 1910 to 2009 in Cottonwood Lake area, North Dakota. *Remote Sensing of Environment*, 2011, **115**(12): 3377-3389. DOI: 10.1016/j.rse.2011.08.002.

[23] Deutsch M. Survey of remote sensing applications. *Water Well Journal*, 1974, **28**(7): 35-38

[24] Bhavsar PD. Review of remote sensing applications in hydrology and water resources management in India. *Advances in Space Research*, 1984, **4**(11): 193-200. DOI: 10.1016/0273-1177(84)90411-3.

[25] Smith LC. Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge: A review. *Hydrological Processes*, 1997, **11**(10): 1427-1439.

[26] Alsdorf DE, Rodríguez E, Lettenmaier DP. Measuring surface water from space. *Reviews of Geophysics*, 2007, **45**(2): RG2002. DOI: 10.1029/2006rg000197.

[27] Barton I, Bathols J. Monitoring floods with AVHRR. *Remote Sensing of Environment*, 1989, **30**(1): 89-94. DOI: 10.1016/0034-4257(89)90050-3.

[28] Feng L, Hu CM, Chen XL *et al*. Assessment of inundation changes of Poyang Lake using MODIS observations between 2000 and 2010. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **121**: 80-92. DOI: 10.1016/j.rse.2012.01.014.

[29] Lu SL, Jia L, Zhang L *et al*. Lake water surface mapping in the Tibetan Plateau using the MODIS MOD09Q1 product. *Remote Sensing Letters*, 2017, **8**(3): 224-233. DOI: 10.1080/2150704x.2016.1260178.

[30] Peng DZ, Xiong LH, Guo SL *et al*. Study of Dongting Lake area variation and its influence on water level using MODIS data//Etude de la variation de la surface du Lac Dongting et de son influence sur le niveau d'eau, grâce à *Des* données MODIS. *Hydrological Sciences Journal*, 2005, **50**(1): 31-44. DOI:10.1623/hysj.50.1.31.56327.

[31] Huang C, Chen Y, Wu JP. Mappingspatio-temporal flood inundation dynamics at large river basin scale using time-series flow data and MODIS imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, **26**: 350-362.

DOI: 10.1016/j.jag.2013.09.002.

[32] Ordoyne C, Friedl MA. Using MODIS data to characterize seasonal inundation patterns in the Florida Everglades. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**(11): 4107-4119. DOI: 10.1016/j.rse.2007.08.027.

[33] Frazier PS, Page K. Water body detection and delineation with Landsat TM data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2000, **66**(12): 1461-1467.

[34] Pardo-Pascual JE, Almonacid-Caballer J, Ruiz LA *et al*. Automatic extraction of shorelines from Landsat TM and ETM+ multi-temporal images with subpixel precision. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **123**: 1-11. DOI: 10.1016/j.rse.2012.02.024.

[35] Pekel JF, Cottam A, Gorelick N *et al*. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 2016, **540**(7633): 418-422. DOI: 10.1038/nature20584.

[36] Blasco F, Bellan MF, Chaudhury MU. Estimating the extent of floods in Bangladesh using SPOT data. *Remote Sensing of Environment*, 1992, **39**(3): 167-178. DOI: 10.1016/0034-4257(92)90083-v.

[37] Davranche A, Lefebvre G, Poulin B. Wetland monitoring using classification trees and SPOT-5 seasonal time series. *Remote Sensing of Environment*, 2010, **114**(3): 552-562. DOI: 10.1016/j.rse.2009.10.009.

[38] Lu SL, Wu BF, Yan NN *et al*. Water body mapping method with HJ-1A/B satellite imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2011, **13**(3): 428-434. DOI: 10.1016/j.jag.2010.09.006.

[39] Hong L, Huang YJ, Yang K *et al*. Study on urban surface water extraction from heterogeneous environments using GF-2 remotely sensed images. *Journal of Remote Sensing*, 2019, **23**(5): 871-882. [洪亮, 黄雅君, 杨昆等. 复杂环境下高分二号遥感影像的城市地表水体提取. 遥感学报, 2019, **23**(5): 871-882.]

[40] Gu XZ, Zeng QW, Shen H *et al*. Study on water information extraction using domestic GF-3 image. *Journal of Remote Sensing*, 2019, **23**(3): 555-565. [谷鑫志, 曾庆伟, 谌华等. 高分三号影像水体信息提取. 遥感学报, 2019, **23**(3): 555-565.]

[41] Schumann GJP, Moller DK. Microwave remote sensing of flood inundation. *Physics and Chemistry Earth: Parts A/B/C*, 2015, **83/84**: 84-95. DOI: 10.1016/j.pce.2015.05.002.

[42] Brooks R. Lake elevation from satellite radar altimetry from a validation area in Canada. Report, Geoscience Research Corporation, 1982.

[43] Birkett CM. Radar altimetry: A new concept in monitoring lake level changes. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1994, **75**(24): 273. DOI: 10.1029/94eo00944.

[44] Birkett C. Synergistic remote sensing of Lake Chad variability of basin inundation. *Remote Sensing of Environment*, 2000, **72**(2): 218-236. DOI: 10.1016/s0034-4257(99)00105-4.

[45] Ducet N, Le Traon PY, Reverdin G. Global high-resolution mapping of ocean circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1 and -2. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2000, **105**(C8): 19477-19498. DOI: 10.1029/2000jc900063.

[46] Liu SW, Li YL, Sun QT *et al*. Data quality assessment of Jason-3 altimeter data based on Jason-2 synchronous data// IGARSS 2019-2019 IEEE international geoscience and remote sensing symposium. Yokohama: IEEE, 2019: 8282-8285. DOI: 10.1109/igarss.2019.8897875.

[47] Santos da Silva J, Calmant S, Seyler F *et al*. Water levels in the Amazon basin derived from the ERS 2 and ENVISAT radar altimetry missions. *Remote Sensing of Environment*, 2010, **114**(10): 2160-2181. DOI: 10.1016/j.rse.2010.04.020.

[48] Gao Q, Makhoul E, Escorihuela M *et al*. Analysis of retrackers' performances and water level retrieval over the Ebro river basin using sentinel-3. *Remote Sensing*, 2019, **11**(6): 718. DOI: 10.3390/rs11060718.

[49] Zhang GQ, Xie HJ, Kang SC *et al*. Monitoring lake level changes on the Tibetan Plateau using ICESat altimetry data (2003-2009). *Remote Sensing of Environment*, 2011, **115**(7): 1733-1742. DOI: 10.1016/j.rse.2011.03.005.

[50] Phan VH, Lindenbergh R, Menenti M. ICESat derived elevation changes of Tibetan lakes between 2003 and 2009. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, **17**: 12-22. DOI: 10.1016/j.jag.2011.09.015.

[51] Zhang GQ, Chen WF, Xie HJ. Tibetan Plateau's lake level and volume changes from NASA's ICESat/ICESat-2 and Landsat missions. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(22): 13107-13118. DOI: 10.1029/2019gl085032.

[52] Steemann-Nielsen E, Jensen HK. Primary oceanic production. Autotrophic Prod. *Organic Matter Oceans*, 1957, **1**: 49-135.

[53] Lu JJ, Li SH. Improvement of the technique for distinguishing water bodies from TM data. *Journal of Remote Sensing*, 1992, **7**(1): 17-23.[陆家驹, 李士鸿. TM 资料水体识别技术的改进. 环境遥感, 1992, **7**(1): 17-23.]

[54] Du YY, Zhou CH. Automatically extracting remote sensing information for water bodies. *Journal of Remote Sensing*, 1998, **2**(4): 264-269.[杜云艳, 周成虎. 水体的遥感信息自动提取方法. 遥感学报, 1998, **2**(4): 264-269.]

[55] McFeeters SK. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, **17**(7): 1425-1432. DOI: 10.1080/01431169608948714.

[56] Xu HQ. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI). *Journal of Remote Sensing*, 2005, **9**(5): 589-595.[徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究. 遥感学报, 2005, **9**(5): 589-595.]

[57] Ji L, Zhang L, Wylie B. Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2009, **75**(11): 1307-1317. DOI: 10.14358/pers.75.11.1307.

[58] Ma M, Wang X, Veroustraete F *et al*. Change in area of Ebinur Lake during the 1998−2005 period. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, **28**(24): 5523-5533. DOI: 10.1080/01431160601009698.

[59] Luo JC, Sheng YW, Shen ZF *et al*. Automatic and high-precise extraction for water information from multispectral images with the step-by-step iterative transformation mechanism. *Journal of Remote Sensing*, 2009, **13**(4): 604-615.[骆剑承, 盛永伟, 沈占锋等. 分步迭代的多光谱遥感水体信息高精度自动提取. 遥感学报, 2009, **13**(4): 604-615.]

[60] Li XT, Li JR, Huang SF *et al*. A remote sensing image classification method based on geostatistics. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2009, **18**(1): 18-21.[李小涛, 李纪人, 黄诗峰. 变差函数和神经网络结合的遥感影像分类方法研究. 国土资源遥感, 2009, **18**(1): 18-21.]

[61] Liang YT, Hu JL, Xie P *et al*. Auto-identifying forest fire-points in meteorological satellite images based on neural network. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2003, **14**(6): 708-714.[梁益同, 胡江林, 谢萍等. 基于神经网络的气象卫星影像森林火点自动识别的试验研究. 应用气象学报, 2003, **14**(6): 708-714.]

[62] Zhai H, Wang M, Zhang B *et al*. A method of extracting water on remote sensing image using mathematics morphology. *Remote Sensing Information*, 2005, **20**(1): 18-20, 23.[翟辉琴, 王明孝, 张保明等. 一种利用数学形态学提取遥感影像水域的方法. 遥感信息, 2005, **20**(1): 18-20, 23.]

[63] Oyama Y, Matsushita B, Fukushima T *et al*. Application of spectral decomposition algorithm for mapping water quality in a turbid lake (Lake Kasumigaura, Japan) from Landsat TM data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, **64**(1): 73-85. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2008.04.005.

[64] Henry JB, Chastanet P, Fellah K *et al*. Envisat multi-polarized ASAR data for flood mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, **27**(10): 1921-1929. DOI: 10.1080/01431160500486724.

[65] Yang CJ, Zhou CH. Application of complementary information of RADARSAT SWA SAR and Landsat TM in deciding the flood extent. *Journal of Natural Disasters*, 2001, **10**(2): 79-83.

[66] Crist EP. A TM Tasseled Cap equivalent transformation for reflectance factor data. *Remote Sensing of Environment*, 1985, **17**(3): 301-306. DOI: 10.1016/0034-4257(85)90102-6.

[67] Feyisa GL, Meilby H, Fensholt R *et al*. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2014, **140**: 23-35. DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.029.

[68] Fisher A, Flood N, Danaher T. Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia. *Remote Sensing of Environment*, 2016, **175**: 167-182. DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.055.

[69] Sharma R, Tateishi R, Hara K *et al*. Developing superfine water index (SWI) for global water cover mapping using MODIS data. *Remote Sensing*, 2015, **7**(10): 13807-13841. DOI: 10.3390/rs71013807.

[70] Cheng C, Wei YC, Niu ZC. Water body extraction based on decision tree and ETM+ imagery: A case study of Poyang Lake region. *Remote Sensing Information*, 2012, **27**(6): 49-56.[程晨, 韦玉春, 牛志春. 基于ETM+图像和决策树的水体信息提取——以鄱阳湖周边区域为例. 遥感信息, 2012, **27**(6): 49-56.]

[71] Mallinis G, Koutsias N, Tsakiri-Strati M *et al*. Object-based classification using Quickbird imagery for delineating forest vegetation polygons in a Mediterranean test site. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2008, **63**(2): 237-250. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2007.08.007.

[72] Gao L, Liao JJ, Liu HL *et al*. Applying status and development tendency of satellite radar altimeter. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013, **28**(6): 978-983.[高乐, 廖静娟, 刘焕玲等. 卫星雷达测高的应用现状及发展趋势. 遥感技术与应用, 2013, **28**(6): 978-983.]

[73] Cai YL, Cheng X, Sun GQ. A review of development of radar altimeter and its applications. *Remote Sensing Information*, 2006, **21**(4): 74-78, 87.[蔡玉林, 程晓, 孙国清. 星载雷达高度计的发展及应用现状. 遥感信息, 2006, **21**(4):

74-78, 87.]

[74] Sima S, Tajrishy M. Using satellite data to extract volume-area-elevation relationships for Urmia Lake, Iran. *Journal of Great Lakes Research*, 2013, **39**(1): 90-99. DOI: 10.1016/j.jglr.2012.12.013.

[75] Morris CS, Gill SK. Variation of Great Lakes water levels derived from Geosat altimetry. *Water Resources Research*, 1994, **30**(4): 1009-1017. DOI: 10.1029/94wr00064.

[76] Liu Y, Yue H, Wang HR *et al*. Dynamic analysis of water level and area of Qinghai-Tibet plateau group lakes based on LEGOS HYDRO WEB. *Science Technology and Engineering*, 2016, **16**(30): 169-175. [刘英, 岳辉, 王浩人等. 基于LEGOS HYDROWEB 的青藏高原湖泊群水位和面积动态变化分析. 科学技术与工程, 2016, **16**(30): 169-175.]

[77] Hollister J, Milstead WB. Using GIS to estimate lake volume from limited data. *Lake and Reservoir Management*, 2010, **26**(3): 194-199. DOI: 10.1080/07438141.2010.504321.

[78] Yao FF, Wang JD, Yang KH *et al*. Lake storage variation on the endorheic Tibetan Plateau and its attribution to climate change since the new millennium. *Environmental Research Letters*, 2018, **13**(6): 064011. DOI: 10.1088/1748-9326/aab5d3.

[79] Li XD, Long D, Huang Q *et al*. High-temporal-resolution water level and storage change data sets for lakes on the Tibetan Plateau during 2000-2017 using multiple altimetric missions and Landsat-derived lake shoreline positions. *Earth System Science Data*, 2019, **11**(4): 1603-1627. DOI: 10.5194/essd-11-1603-2019.

[80] Zheng JJ. Monitoring and analysis of lake water storage changes in central Asia using multi-mission satellite data [Dissertation]. Nanjing: Nanjing University, 2017.[郑佳佳. 基于多源卫星数据的中亚地区湖泊水量变化监测研究[学位论文]. 南京: 南京大学, 2017.]

[81] Frappart F, Seyler F, Martinez JM *et al*. Floodplain water storage in the Negro River basin estimated from microwave remote sensing of inundation area and water levels. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **99**(4): 387-399. DOI: 10.1016/j.rse.2005.08.016.

[82] Duan Z, Bastiaanssen WGM. Estimating water volume variations in lakes and reservoirs from four operational satellite altimetry databases and satellite imagery data. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **134**: 403-416. DOI: 10.1016/j.rse.2013.03.010.

[83] Crétaux JF, Jelinski W, Calmant S *et al*. SOLS: A lake database to monitor in the Near Real Time water level and storage variations from remote sensing data. *Advances in Space Research*, 2011, **47**(9): 1497-1507. DOI: 10.1016/j.asr.2011.01.004.

[84] Yang RM, Zhu LP, Wang JB *et al*. Spatiotemporal variations in volume of closed lakes on the Tibetan Plateau and their climatic responses from 1976 to 2013. *Climatic Change*, 2017, **140**(3/4): 621-633. DOI: 10.1007/s10584-016-1877-9.

[85] Tapley BD. GRACE measurements of mass variability in the earth system. *Science*, 2004, **305**(5683): 503-505. DOI: 10.1126/science.1099192.

[86] Ramillien G, Cazenave A, Brunau O. Global time variations of hydrological signals from GRACE satellite gravimetry. *Geophysical Journal International*, 2004, **158**(3): 813-826. DOI: 10.1111/j.1365-246x.2004.02328.x.

[87] Schmidt R, Schwintzer P, Flechtner F *et al*. GRACE observations of changes in continental water storage. *Global and Planetary Change*, 2006, **50**(1/2): 112-126. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2004.11.018.

[88] Singh A, Seitz F, Schwatke C. Inter-annual water storage changes in the Aral Sea from multi-mission satellite altimetry, optical remote sensing, and GRACE satellite gravimetry. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **123**: 187-195. DOI: 10.1016/j.rse.2012.01.001.

[89] Shen ZF, Li JL, Yu XJ. Water information extraction of Baiyangdian wet land based on the collaborative computing method. *Journal of Geoinformation Science*, 2016, **18**(5): 690-698.[沈占锋, 李均力, 于新菊. 基于协同计算的白洋淀湿地时序水体信息提取. 地球信息科学学报, 2016, **18**(5): 690-698.]

[90] Duan HT, Luo JH, Cao ZG *et al*. Progress in remote sensing of aquatic environments at the watershed scale. *Progress in Geography*, 2019, **38**(8): 1182-1195. [段洪涛, 罗菊花, 曹志刚等. 流域水环境遥感研究进展与思考. 地理科学进展, 2019, **38**(8): 1182-1195.]