

基于卫星雷达测高技术湖库动态监测理论、方法和研究进展

姜丽光¹, 刘俊², 张星星³

1. 南方科技大学 环境科学与工程学院, 深圳 518055;

2. 丹麦技术大学 环境工程学院, 2800 Kgs. Lyngby, 丹麦;

3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

摘要: 水位是反映水体变化的重要变量, 利用卫星测高技术获取湖库的水位信息, 很大程度上改变了传统地面观测数据匮乏的现状。本文综述了卫星雷达测高技术湖泊和水库动态监测方面的理论、主要的数据处理方法和数据产品, 以及当前的主要研究进展。从文献检索可以看出, 当前的应用研究对象主要聚焦在个别湖泊或小范围内的湖泊群; 在数据处理方面, 数据以单一测高任务数据为主, 并依赖于主流数据库的三级产品, 针对一级、二级产品的数据处理方法研究较少; 在研究主题方面, 主要以湖库水位变化趋势及影响因素分析为主, 也有少量研究聚焦在水量估算、流域水文模拟等方向。未来发展新的数据处理方法, 如全聚焦SAR技术和干涉宽刈幅数据处理技术等, 研发新的测高任务(如测高小卫星星簇计划SMASH、地表水和海洋地形SWOT、以及欧盟的下一代测高任务Sentinel-3 NGT等), 来提高中小型湖库的测高数据精度、覆盖范围以及频率, 将为测高研究带来新的机遇。

关键词: 卫星测高, 水位, 湖泊和水库, 监测, 研究综述

引用格式: 姜丽光, 刘俊, 张星星. 2022. 基于卫星雷达测高技术湖库动态监测理论、方法和研究进展. 遥感学报, 26(1): 104-114

Jiang L G, Liu J and Zhang X X. 2022. Monitoring lakes and reservoirs using satellite radar altimetry: Theory, methods, and progresses. National Remote Sensing Bulletin, 26(1): 104-114 [DOI: 10.11834/jrs.20221221]

1 引言

湖泊、水库是地表水圈重要的组成部分, 不仅发挥着重要水源地的作用, 也具有重要的生态服务功能; 同时, 湖库对局部水循环和水文过程有着重要的影响。在全球变化背景下, 湖库动态对气候变化和人类活动的响应敏感, 是反映区域气候和环境变化的重要指标 (Zhang 等, 2020a; Jiang 等, 2017a)。因此, 开展湖库的动态监测意义重大, 不仅具有重要的科学价值, 也具有重要的实际意义。

水位是湖库变化最基础的水文要素之一, 直接影响到诸如水储量、热力和水力学过程等湖泊系统状态。因此, 一直以来水位是湖库监测的基础指标之一。传统的观测手段主要依赖于观测水尺, 进行目视判读, 效率相对较低 (da Silva 等,

2014)。现在业务化的观测设备主要有自计水位计和非接触式雷达水位计等, 虽然时间分辨率有了极大提高, 但成本较高且覆盖范围有限, 不能反映区域大范围内的湖库变化特征。尤其在偏远地区和高海拔地区, 常用的监测方法受到限制, 无法获取一手的实地观测资料。然而正是这些地区, 湖泊的变化很大程度上反映了气候变化, 是研究气候变化效应的最佳区域 (Zhang 等, 2020a)。

卫星雷达测高技术的快速发展, 为监测湖库变化提供了补充手段。现代意义的高精度测高卫星从1990s开始, 得益于精准定轨技术的发展和大气延迟误差计算的提高, 测高数据质量得到显著提高。虽然, 卫星雷达测高计是为研究海洋而诞生, 到目前为止, 所有雷达测高计划的首要任务依然是研究海洋或极地冰盖 (Chelton 等, 2001; Stern 等, 2014; Chelton 等, 1989; Wingham 等, 2006); 但

收稿日期: 2021-04-19; 预印本: 2021-07-15

第一作者简介: 姜丽光, 1987年生, 男, 副研究员, 研究方向为遥感水文学。E-mail: jianglg@sustech.edu.cn

是, 测高数据也不断被应用到内陆水体的监测研究 (Koblinsky 等, 1993; Birkett, 1995; Crétaux 和 Birkett, 2006; Jiang 等, 2020a)。TOPEX/Poseidon 和 ERS-1/-2 的相继发射, 卫星测高数据逐渐被用来监测大湖、大河的水位变化过程 (Lee 等, 2009; Frappart 等, 2016; Birkett, 1995)。2002 年欧洲航天局发射了先进极轨卫星 ENVISAT, 携带 10 种复杂的探测设备, 雷达测高计 RA-2 是其中之一。由于其精度高、覆盖范围广, 在陆地水文学的研究中得到广泛应用 (Berry 等, 2005; Michailovsky 等, 2013; Paiva 等, 2013; Becker 等, 2014; da Silva 等, 2010; Liao 等, 2014)。近 10 a 来, 陆地水体监测也被逐渐纳入到测高卫星计划的主要任务中来, 如 CryoSat-2 和 Sentinel-3 等。CryoSat-2 是欧洲航天局于 2010 年发射的配备了新一代合成孔径雷达测高计的环境卫星。其高度计在沿轨道方向的足迹仅约为 300 m, 轨道地面间隔约为 7.5 km, 所有 CryoSat-2 能够监测更多的内陆水体 (河流、湖泊、水库等), 为研究区域性湖库变化提供了全局

视角 (Jiang 等, 2017a, 2017b, 2020a)。Sentinel-3 计划不仅配备了合成孔径雷达 (SAR) 测高计, 双星星座也极大提高了空间覆盖率, 使其能够兼顾空间和时间分辨率, 非常有利于内陆水体的监测 (Jiang 等, 2020b; Kittel 等, 2021; Huang 等, 2019)。此外, SARAL/AltiKa 首次搭载 Ka 波段雷达测高计, 极大缩小了地面足迹 (相对于 Jason-2/-3 的 20 km 和 Envisat 的 15 km, AltiKa 足迹直径仅 8 km), 数据精度得到了提高 (Arsen 等, 2015; Jiang 等, 2019a; Verron 等, 2021)。与 CryoSat-2 类似, 从 2016 年开始, SARAL/AltiKa 也使用漂移轨道模式运行 (称为 AltiKa-DP 阶段), 为监测内陆湖库提供了重要数据 (Zhang 等, 2020b)。如图 1 所示, 测高卫星的漂移轨道模式能探测到更多的内陆湖库。以纳木错为例, TP/Jason 系列测高卫星, 虽然有较长的历史数据, 但在纳木错没有观测轨迹; 而 ERS/Envisat 系列和 Sentinel-3 均有观测, 但也仅有两条观测轨迹; 而 AltiKa-DP 和 CryoSat-2 观测轨迹密集, 能提供湖泊不同位置的水位数据。

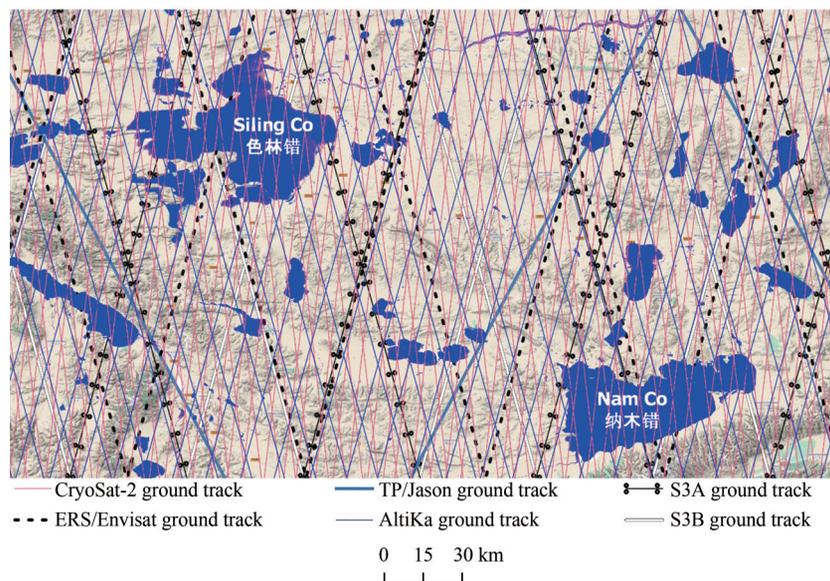


图1 不同测高卫星(TP/Jason系列、ERS/Envisat系列、Sentinel-3系列、AltiKa-DP和CryoSat-2)地面轨迹在青藏高原地区的示例
Fig. 1 Illustration of ground tracks of multiple satellite radar altimetry missions over the Nam Co-Seling Co region of the Tibetan Plateau

卫星雷达测高计经过几十年的发展, 测高数据质量、分辨率等有了显著提升, 测高数据已经被广泛应用到陆地水文学研究中, 如湖库动态变化 (Brooks, 1982; Chen 和 Liao, 2020; Song 等, 2015; 廖静娟 等, 2020; 黎鹏和李辉, 2020)、湿地与河流交互过程 (Park, 2020; Kittel 等, 2021)、流域水文模型校正 (Kittel 等, 2018a, 2020; Hulsman 等, 2020)、数据同化 (Michailovsky 等,

2013; Paiva 等, 2013)、径流估算 (Bauer-Gottwein 等, 2015; Huang 等, 2020; Tarpanelli 等, 2016; Tourian 等, 2017) 和水动力模拟 (Michailovsky 等, 2013; Jiang 等, 2019b) 等。利用雷达测高和湖泊、水库作为关键词在 Web of Science 中检索发现, 相关研究发表文章数量自 2005 年以来快速增长 (图 2), 表明基于测高技术的湖库研究得到了越加广泛的关注, 测高数据成为湖库研究中的一个重

要数据源。因此，对测高卫星在湖库动态监测方面的研究做一个梳理很有必要，以期为相关科研人员提供参考和借鉴。本文将重点介绍卫星雷达测高计在湖泊和水库动态监测方面的基本理论、主要方法和研究进展。

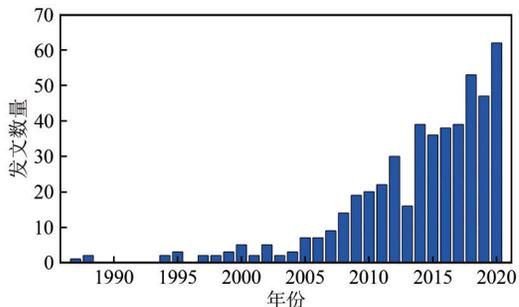


图2 在Web of Science平台以“altimetry” & (lake or reservoir)为关键词检索的逐年文章发表数量

Fig. 2 Statistics of publications retrieved through the Web of Science using the keyword of altimetry and (lake or reservoir)

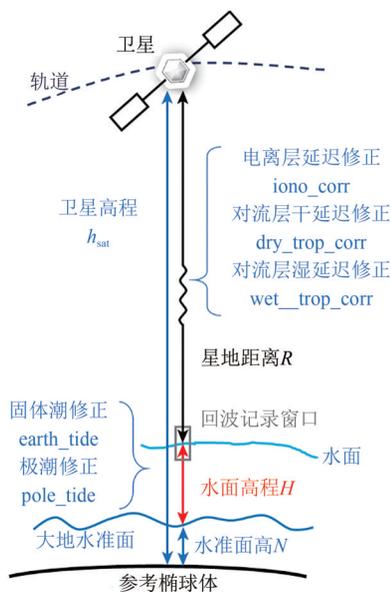
2 雷达测高原理

雷达测高计的基本原理是通过记录微波脉冲信号在发射机与地表反射物体之间的往返时间，

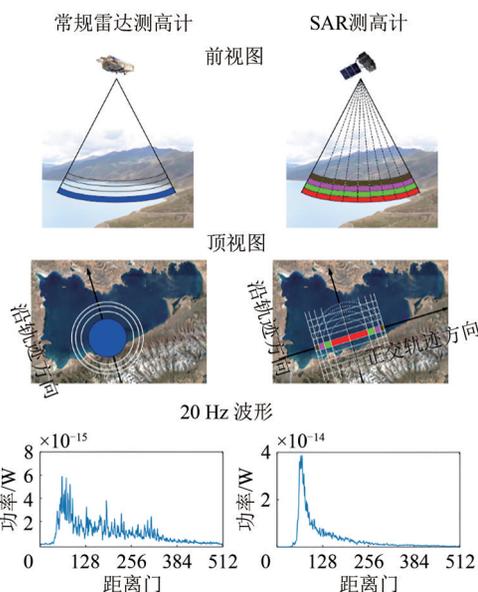
来计算星地之间的距离 (R)，基本原理及相关变量如图3所示。结合卫星精密定轨获得卫星高程 (h_{sat})，进而计算得到地表反射面的高程 h ，即 $h = h_{sat} - R$ 。不同于遥感影像观测，雷达测高记录的是星下点的高程；观测数据沿地面轨迹呈离散的单点分布，间隔约 300 m (注：早期的卫星测高计划采样间隔偏大)。

由于测高计工作过程和微波传播过程中受到多种因素的影响，计算的星地间距比实际距离偏大，必须对其进行修正。这些修正项 ($Corr$) 主要包括电离层延迟修正 ($Corr_{iono}$)、对流层干湿延迟修正 (dry_trop_corr 和 wet_trop_corr)、固体潮修正 ($earth_tide$)、极潮修正 ($pole_tide$) 等。最后，根据大地水准面改正量 (N) 转换椭球高 (h)，得到正高 (H)，具体计算公式如下：

$$H = h_{sat} - \left(\begin{matrix} R + \\ iono_corr + \\ dry_trop_corr + \\ wet_trop_corr + \\ earth_trop_corr + \\ pole_tide \end{matrix} \right) - N \quad (1)$$



(a) 由测高计反演水面高程示意图
(a) Water level derivation



(b) 传统低分辨率测高计和SAR测高计足迹和波形示意图
(b) Comparison of traditional LRM (Low Resolution Mode) and SAR (Synthetic Aperture Radar)

图3 卫星测高原理示意图

Fig. 3 Schema of radar altimetry principle

3 数据产品

卫星测高数据主要分三级，一级和二级产品

主要由测高计研发机构发布，而三级产品则主要由不同的科研机构生产。下面就3个产品做逐一介绍。

3.1 一级科学数据产品

一级产品通常是传感数据, 是在原始遥测数据的基础上, 通过校正仪器误差, 增加时间标签和地理坐标, 进行单位转换, 以及计算各项误差修正项得到。一级产品通常包含了时间、经纬度、卫星高度、脉冲延迟、各项误差校正、反射回波波形等参数。不同测高卫星计划的数据也略有不同, 例如高精度 SAR 测高计 (CryoSat-2, Sentinel-3, Sentinel-6 Michael Freilich), 其一级产品包含了多视堆栈数据 (stack data); 而 CryoSat-2 SARIn 数据还包含了两个天线接收信号的相位差, 由此可精确探测回波来源, 是当前干涉宽刈幅数据处理 (Interferometric swath processing) 的基本数据源。

3.2 二级科学数据产品

二级产品通常是在一级产品的基础上, 生成的地球物理数据, 包括地球物理参数、环境参数、高程数据等。二级产品根据发布时间不同, 可分为准实时产品、短时间临时产品、和最终产品 3 类。其主要区别在于数据处理工程中采用的辅助数据 (如轨道定位) 的不同, 进而导致数据的精度水平不同。此外, 不同的测高任务, 由于其脉冲发射频率不同, 提供了不同频率的产品, 如 CryoSat-2 和 Sentinel-3 有 20 Hz、40 Hz 和 80 Hz 等产品可供选择, 可用于研究不同频率产品对水位精度的影响。

数据发布机构提供的水位高程数据, 是经过特定的重跟踪算法校正, 可以直接应用到湖库水位的动态变化研究。此外, 用户也可利用二级产品提供的波形数据和相应的辅助数据, 通过更加合适的重跟踪算法修正默认星地距离变量。重跟踪数据处理将在 3.3 节详细阐述。

3.3 三级水位数据产品

三级产品指特定湖库的水位时间序列。该数据产品通过对二级产品进行多个步骤的编辑与处理而形成。当前主要的数据库有 Hydroweb (<http://hydroweb.theia-land.fr/> [2021-07-15]、DAHITI (<https://dahiti.dgfi.tum.de/en/> [2021-07-15])、HydroSat (<http://hydrosat.gis.uni-stuttgart.de/> [2021-07-15])、G-REALM (https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/global_reservoir/ [2021-07-15]) 等。从以上数据库可以直接下载水位时间序列, 避免了繁琐的数据处理过程。但是, 这些数据库仅包含了主要的大型湖泊, 缺少中

小型湖泊和水库。例如, DAHITI 仅拥有约 520 个湖库的数据, 而 Hydroweb 更少, 仅提供了约 263 个湖库的数据。此外, 这些产品以短重访周期的卫星为主, 如 Jason 家族系列, 没有充分利用 CryoSat-2 以及 SARAL/AltiKa 数据。大部分数据的更新相对较快, Hydroweb 提供了 124 个大湖的准实时的数据, 在获取到新测高数据之后的 1—2 d 内即可提供水位数据。相比而言, 其他数据库的更新相对较慢。

4 湖泊和水库水位数据处理

如前所述, 当前的数据库中, 包含的湖泊、水库等水体数量有限, 并不能满足研究的需要。因此, 通常需要对一级或二级产品进行编辑和处理, 获取特定研究区域湖库水位时间序列。下面依次介绍主要的数据处理步骤。

4.1 数据初筛选

数据初筛选的主要目的是剔除明显的非湖库观测异常数据, 减少不必要的数据处理负荷。通常情况下, 利用一级或二级产品的经纬度坐标与湖库的边界线的位置关系, 进行数据初步筛选, 保证数据位于湖库水面范围之内, 提取潜在可利用的观测数据。具体而言, 对于大型湖库, 利用静态边界 (指某一特定时期的边界) 即可筛选观测数据, 此时有足够多的测高数据, 静态边界并不影响后续水位的计算精度; 对于中小型湖泊, 由于测高数据偏少, 湖泊边界变化可能影响到后续水位的计算, 因此, 可以利用与测高数据同期的静态边界进行数据筛选。此外, 也可以利用动态边界 (如欧洲联合研究中心 JRC 的水域重现概率数据集, <https://global-surface-water.appspot.com/> [2021-07-15]) 进行初步数据筛选。

4.2 波形重跟踪

波形重跟踪 (Retracking) 是对默认机载跟踪的修正。由于实际回波波形的最大功率及位置存在较大不确定性, 导致实际跟踪点与默认跟踪点 (tracking point) 存在较大差异, 因此需要对波形进行重跟踪, 寻找水面高程对应的“门” (gate/bin)。多数官方二级产品, 提供了重跟踪后的高程数据, 但仅限于传统的重心偏移法 OCOG (Offset Center of Gravity) 或 ICE1 (即基于 OCOG 的阈值法)

经验重跟踪方法的修正。当前,越来越多的研究提出了新的重跟踪方法,如丹麦技术大学DTU的NPPT(Jain等,2015)和MWaPP(Villadsen等,2016)方法,该类方法主要针对SAR测高卫星(如CryoSat-2, Sentinel-3等)在湖泊、河流水位波形数据的重跟踪,较其他重跟踪算法有更好的表现;而欧空局的SAMOSA+(Dinardo等,2018)主要用于近海岸水面波形数据重跟踪,也适用于大型内陆水体,是ESA GPOD数据库的默认重跟踪算法;此外,还有多个针对子波形进行重跟踪的算法(Yuan等,2017; Guo等,2010; Ganguly等,2015; Hwang等,2016; Uebbing等,2015; Xue等,2018),该类方法主要针对常规测高数据,如Jason、Envisat系列测高任务。

4.3 有效数据选择

经过初步筛选后的数据,需要进一步剔除异常值以获得更加可靠的湖库水位数据。通常依据DEM初步判定湖库水位基本范围,超过或低于一定的阈值(如 $DEM \pm 30$ m)则认为是异常值。另外,也可以根据后向散射系数判定回波信号是否来自水体。根据所建立的时间序列变化范围(如平均值 ± 2 倍方差),也可以作为辨识异常值的一种方法。此外,根据多视堆栈数据(multi-looking stack data)特点也可以来判断某一观测值是否可信(Jiang等,2019a, 2020b; Kittel等,2018b)。

4.4 湖库水位时间序列构建

通常情况下,湖库水位时间序列是以瞬时时刻的同一轨迹多个位置的平均值或中位值为基础进行构建。如果在上一步处理后,数据质量较高,即可计算某一瞬时时刻的水位,进而获得水位时间序列。当然,也可以采用更加复杂的处理方法,如Nielsen等(2015)假设测高观测值服从柯西分布与高斯分布的一个混合分布。通过概率分布削减异常值对最终结果的影响,避免了主观的、特定的异常值处理,更加客观地描述异常值。然后利用瞬时平均值,运用游走模型构建水位时间序列。

5 湖泊和水库动态研究进展

5.1 湖库水位监测与分析

最早基于卫星测高技术的湖库监测主要目的

是探索测高数据在内陆大型水体的适用性。早期研究主要利用Seasat、Geosat和Topex/Poseidon雷达测高计监测里海、黑海、北美和南美以及中亚的特大型湖泊的水位变化(Brooks, 1982; Morris和Gill, 1994; Birkett, 1995; Ponchaut和Cazenave, 1998)。主要是由于早期的测高任务足迹偏大、脉冲发射频率低、定轨精度低、以及大气校正误差大等因素,造成数据质量较低,回波信号常常被陆地干扰,因此仅能在大型湖泊远离湖岸的部位获取到较好的信号。虽然如此,测高卫星仍为湖泊水文研究提供了重要数据源,尤其对气候变化响应敏感的偏远地区的湖泊研究具有重要意义。Birkett(1995)首次利用Topex/Poseidon数据,研究了全球21个大型湖泊和3个水库,为全球变化背景下的全球湖库监测提供了新思路。近年来,随着测高数据的不断丰富以及数据分发多元化,基于测高数据的湖库监测研究越来越广泛。Kraemer等(2020)基于多源测高数据分析了全球200个湖泊在1992年—2019年的变化,并分析了其对全球变化的响应,结果表明:58%湖泊的水位变化和背景气候变化相关,10%湖泊的水位变化可以由季节波动来解释,而25%湖泊的水位变化是由长期变化趋势主导。然而,该研究并未完全考虑中国青藏高原地区和长江中下游的湖泊群,所得结果占比可能存在偏差。在中国青藏高原地区,Hwang等(2016)利用Topex/Poseidon家族系列测高数据,对23个湖泊在1993年—2014年的变化进行了研究,并强调了测高卫星在持续观测青藏高原湖泊变化方面的重要性。Li等(2020)利用ICESat、Envisat和CryoSat-2对长江中下游湖库在2003年—2017年的动态进行了研究,表明了湖泊水位整体呈上升趋势,而由人类活动控制的水库表现出更快的上升趋势。此外,很多研究基于测高数据对单一湖泊的水位变化进行了分析,并探讨其变化的驱动机制(Cai等,2016)。然而,在全球变化背景下,不同地区的湖泊对气候变化和人类活动的影响有很大差异,Topex/Poseidon或ERS家族系列测高任务,由于地面轨迹间隔较大(315 km或80 km),仅能观测有限的湖泊和水库,如何获得一幅全景图是一个难题。针对此问题,类似CryoSat-2这样使用漂移轨道的测高计可能是一种替代方案,由于其运行在大地轨道(也称漂移轨道),对应的地面轨迹非常密集(7 km),可

以监测到众多湖库。例如, Jiang等(2017b)利用5 a的CryoSat-2数据评估了中国1000余个湖库的水位变化。最近, Jiang等(2020a)利用10 a的CryoSat-2数据分析了青藏高原湖泊群(>200个湖泊)过去十年间(2010年—2019年)的水位变化, 得出了青藏高原湖泊变化的全貌图: 200个(76%)湖泊水位总体表现为上升趋势, 而且经历了3个阶段, 即上升—停滞/下降—上升; 北部核心区的湖泊上升速率尤为显著; 同时, 结果表明2015年、2016年厄尔尼诺现象对整个青藏高原北部核心区的湖泊都有重要影响。当然, CryoSat-2在提高空间采样密度的同时, 牺牲了采样的频率, 导致无法获取中小型湖泊月内尺度的水位动态。另外, 当前的星簇任务, 如Sentinel-3A/-3B, 在保证准月尺度的时间重访周期的同时, 提高了空间采样密度(54 km)。基于这一概念, 法国国家太空研究中心提出的SMASH (Small altimetry satellites for hydrology), 意在通过星簇增加时间和空间采样频率, 为江河湖库提供准日观测数据(Verron等, 2021)。

5.2 湖库水量动态评估

近年来, 测高数据不仅用来评估湖库水位的波动变化, 也广泛用作水资源量变化的评估。Swenson和Wahr(2009)利用多任务测高数据, 基于水量平衡法, 评估了全球第二大淡水湖—东非维多利亚湖的变化, 并指出全球变化和人类活动对维多利亚湖水量平衡具有同等重要的影响。结合遥感影像, Crétaux等(2015)利用测高数据在锡尔河流域建立了多个水库的水位—库容曲线。但是, 由于单一测高任务的地面轨迹间距通常较大, 大部分研究集中在个别或少数几个湖库的动态变化(Cai等, 2016; Shen等, 2016; Liao等, 2014)。Gao等(2012)利用MODIS影像和T/P系列测高数据, 构建了全球34个大型水库的水位—面积曲线, 进而估算水库的容积变化。少数研究通过利用多源测高数据来获取大区域湖库水量的变化研究。例如, Busker等(2019)利用DAHITI三级水位产品和JRC面积产品, 依据测深积分法估算湖库水量, 进而评估了全球137个湖库在1984年—2015年的储水量变化。正如作者强调, 这一类数据集将增加我们对大尺度湖库变化行为的认识, 也可以改进大区域水文模型中湖库的表达。测高卫星进

一步丰富了多源卫星协同观测流域储水变化量。Wang等(2018)也采用多源测高数据, 几何遥感影像, 利用测深积分法, 估算了全球142个湖泊的储水量变化, 进而评估了湖库对内陆流域总储水量的贡献。结果表明, 虽然各个内流地区有差异, 但整体而言, 地表水体储量损失贡献了约36%的总储水量变化。

5.3 湖库流域水文模拟

湖库可以被视为虚拟的水位站点, 如5.2节所述, 通过利用测高数据及影像数据, 可以估算湖库的水量变化。因此, 可以利用湖库的水量变化来约束流域水文模型参数或评估水量平衡闭合和各组分变化情况。Biskop等(2016)利用遥感估算的湖泊水量变化作为校正对象, 对青藏高原4个封闭湖泊的水文模型参数进行校正, 进而评估了4个湖泊不同水量平衡组分的贡献。相似地, Vanderkelen等(2018)通过构建Victoria湖盆流域水量平衡, 以测高观测湖泊水位变化作为目标, 重新评估了湖泊水量平衡组分的长时间序列特征。Michailovsky和Bauer-Gottwein(2014)通过构建水库上游水文模型, 利用测高数据同化河道水流演进, 进而约束模型参数, 提高水库入流预报。Han等(2020)利用测高估算的水库水量变化, 来约束流域水文模型, 进而估算水库下泄水量。Zhong等(2020)利用测高数据对水库的水位—体积关系进行校正, 从而约束水库上游水文模型参数。当前的研究主要聚焦在单一的湖库, 水文系统相对比较简单, 充分探索测高数据在更加复杂的河湖系统中的价值需要进一步的研究, 例如利用测高数据研究具有多个水库或湖泊的流域水文系统等。

6 结 语

湖泊、水库作为地表重要的组成单元, 对地球系统具有多重影响作用。监测湖泊动态变化是研究水循环、局地气候、水资源、生态系统等课题的基础。传统的基于实测数据的湖库研究, 由于观测数据有限, 往往只能关注少数湖库的变化, 而无法获取大尺度范围内, 湖泊和水库对气候变化和人类活动的响应过程。卫星测高技术在很大程度上补充了实测数据, 在无资料地区, 发挥着不可替代的作用。但是由于当前测高任务主要探测星下点水体, 存在部分湖库无法被监测或采样

频率低的情况。随着多个卫星测高任务的相继实施,海量测高数据将极大丰富湖库水位数据库,将很大程度上弥补这一不足。

逐渐丰富的测高数据为研究全球或大陆尺度湖泊水位、水量变化研究,提供了重要数据源。同时,测高数据也为河湖交互补给、流域或区域水文、水动力模拟等相关研究开辟了新思路。例如,利用 CryoSat-2/AltiKa 或激光雷达 ICESat-2 等数据可以构建高精度局部大地水准面,为湖泊水动力模型模拟水热动力平衡、物质运移等提供重要条件。此外,测高技术也可以为陆面模式或流域水文模型中的湖泊模块模型参数率定,提供重要数据基础。

虽然现代意义的雷达测高计在内陆水体监测方面有了极大提高,但对于较小的水体或紧密相邻的多个小型湖泊,测高数据质量仍有待进一步提高。由于雷达测高计足迹大,水体的信号在回波中相互干扰,导致波形跟踪无法辨识特定水体,当前的 SAR 技术仍然无能为力。相比而言,全聚焦 SAR (Fully-focused SAR) 技术 (Egido 和 Smith, 2017) 通过更多视角 (multi-look) 的相干处理,可以将沿轨道方向分辨率降低到 0.5 m 左右,极大提高分辨不同水体的能力。对于 CryoSat-2、Sentinel-3 和 Sentinel-6 等 SAR 测高计,通过全聚焦 SAR 技术可以很大程度上的分辨小型水体,为中小湖库提供重要的监测途径,应用全聚焦 SAR 测高进行湖库监测将成为一个热点研究方向。同时,对于干涉 SAR 测高数据,可以利用干涉宽刈幅数据处理技术 (Gray 等, 2013), 获取更多非星下点湖库的水位。此外,由于星载跟踪算法的设计特点,测高计数据质量在山区湖库表现较差,因此,新的星载跟踪、重跟踪算法等有待进一步改善。

雷达测高技术极大地促进了地表水体动态的相关研究,为了更好的监测气候变化背景下地表水体的变化,世界主要空天机构也都在研发新一代测高任务。例如,美国航天局 (NASA) 与法国航天局国家空间研究中心 (CNES) 主导研发的地表水和海洋地形 (SWOT) 任务,是第一个宽刈幅测高任务,即将为地表水体观测提供史无前例的高时空分辨率数据。欧盟的哥白尼计划也推动了下一代测高卫星的研发,例如 Sentinel-3 Next Generation Topography (S3-NGT) 和 Sentinel-6-Next Generation, 组成哥

白尼测高星簇。此外, CNES 也在研发专用于河流和湖库监测的测高小卫星星簇 SMASH, 以期达到高覆盖范围、短重访周期的目的。因此,研发方便、快捷、高效的数据处理方法,如基于机器学习的波形分类提取、重跟踪等,为应用海量测高数据提供重要基础,是测高方面的一个重要研究方向;测高数据时间序列构建即三级产品的研发也是当前一个重要的研究领域,中国尚未构建相应的数据库,也是未来的研究方向;同时,探索测高数据的潜在价值也是一个重要的研究方向。

参考文献 (References)

- Arsen A, Crétaux J F and del Rio R A. 2015. Use of SARAL/AltiKa over mountainous lakes, intercomparison with Envisat mission. *Marine Geodesy*, 38: 534-548 [DOI: 10.1080/01490419.2014.1002590]
- Bauer-Gottwein P, Jensen I H, Guzinski R, Bredtoft G K T, Hansen S and Michailovsky C I. 2015. Operational river discharge forecasting in poorly gauged basins: the Kavango River basin case study. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(3): 1469-1485 [DOI: 10.5194/hess-19-1469-2015]
- Becker M, Santos J, Calmant S, Robinet V, Linguet L and Seyler F. 2014. Water level fluctuations in the Congo Basin derived from ENVISAT satellite altimetry. *Remote Sensing*, 6(10): 9340-9358 [DOI: 10.3390/rs6109340]
- Berry P A M, Garlick J D, Freeman J A and Mathers E L. 2005. Global inland water monitoring from multi-mission altimetry. *Geophysical Research Letters*, 32(16): L16401 [DOI: 10.1029/2005GL022814]
- Birkett C M. 1995. The contribution of TOPEX/POSEIDON to the global monitoring of climatically sensitive lakes. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 100(C12): 25179-25204 [DOI: 10.1029/95JC02125]
- Biskop S, Maussion F, Krause P and Fink M. 2016. Differences in the water-balance components of four lakes in the southern-central Tibetan Plateau. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(1): 209-225 [DOI: 10.5194/hess-20-209-2016]
- Brooks R L. 1982. Lake Elevation from Satellite Radar Altimetry from a Validation Area in Canada. *Reporte Geosci. Res*, Salisbury, MD, USA
- Busker T, De Roo A, Gelati E, Schwatke C, Adamovic M, Bisselink B, Pekel J F and Cottam A. 2019. A global lake and reservoir volume analysis using a surface water dataset and satellite altimetry. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(2): 669-690 [DOI: 10.5194/hess-23-669-2019]
- Cai Z S, Jin T Y, Li C Y, Ofterdinger U, Zhang S, Ding A Z and Li J C. 2016. Is China's fifth-largest inland lake to dry-up? Incorporated

- hydrological and satellite-based methods for forecasting Hulan Lake Water Levels. *Advances in Water Resources*, 94: 185-199 [DOI: 10.1016/j.advwatres.2016.05.010]
- Chelton D B, Ries J C, Haines B J, Fu L L and Callahan P S. 2001. Satellite altimetry//*International Geophysics*. San Diego: Academic Press, 69: 1-131, i-ii [DOI: 10.1016/S0074-6142(01)80146-7]
- Chelton D B, Walsh E J and MacArthur J L. 1989. Pulse compression and sea level tracking in satellite altimetry. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 6(3): 407-438 [DOI: 10.1175/1520-0426(1989)006<0407:PCASLT>2.0.CO;2]
- Chen J M and Liao J J. 2020. Monitoring lake level changes in China using multi-altimeter data (2016-2019). *Journal of Hydrology*, 590: 125544 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125544]
- Crétaux J F, Biancamaria S, Arsen A, Bergé-Nguyen M and Becker M. 2015. Global surveys of reservoirs and lakes from satellites and regional application to the Syrdarya River Basin. *Environmental Research Letters*, 10(1): 015002 [DOI: 10.1088/1748-9326/10/1/015002]
- Crétaux J F and Birkett C. 2006. Lake studies from satellite radar altimetry. *Comptes Rendus Geoscience*, 338(14/15): 1098-1112 [DOI: 10.1016/j.crte.2006.08.002]
- da Silva J S, Calmant S, Seyler F, Filho O C R, Cochonneau G and Mansur W J. 2010. Water levels in the Amazon basin derived from the ERS 2 and ENVISAT radar altimetry missions. *Remote Sensing of Environment*, 114(10): 2160-2181 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.04.020]
- da Silva J S, Calmant S, Seyler F, Moreira D M, Oliveira D and Monteiro A. 2014. Radar altimetry aids managing gauge networks. *Water Resources Management*, 28(3): 587-603 [DOI: 10.1007/s11269-013-0484-z]
- De Paiva R C D, Buarque D C, Collischonn W, Bonnet M P, Frappart F, Calmant S and Mendes C A B. 2013. Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin. *Water Resources Research*, 49(3): 1226-1243 [DOI: 10.1002/wrcr.20067]
- Dinardo S, Fenoglio-Marc L, Buchhaupt C, Becker M, Scharroo R, Fernandes M J and Benveniste J. 2018. Coastal SAR and PLRM altimetry in German Bight and West Baltic Sea. *Advances in Space Research*, 62(6): 1371-1404 [DOI: 10.1016/j.asr.2017.12.018]
- Egido A and Smith W H F. 2017. Fully focused SAR altimetry: theory and applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(1): 392-406 [DOI: 10.1109/TGRS.2016.2607122]
- Frappart F, Légrésy B, Niño F, Blarel F, Fuller N, Fleury S, Birol F and Calmant S. 2016. An ERS-2 altimetry reprocessing compatible with ENVISAT for long-term land and ice sheets studies. *Remote Sensing of Environment*, 184: 558-581 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.07.037]
- Ganguly D, Chander S, Desai S and Chauhan P. 2015. A subwaveform-based retracker for multipeak waveforms: a case study over Ukai Dam/Reservoir. *Marine Geodesy*, 38: 581-596 [DOI: 10.1080/01490419.2015.1030482]
- Gao H L, Birkett C and Lettenmaier D P. 2012. Global monitoring of large reservoir storage from satellite remote sensing. *Water Resources Research*, 48(9): W09504 [DOI: 10.1029/2012WR012063]
- Gray L, Burgess D, Copland L, Cullen R, Galin N, Hawley R and Helm V. 2013. Interferometric swath processing of cryosat data for glacial ice topography. *The Cryosphere*, 7(6): 1857-1867 [DOI: 10.5194/tc-7-1857-2013]
- Guo J Y, Gao Y G, Hwang C and Sun J L. 2010. A multi-subwaveform parametric retracker of the radar satellite altimetric waveform and recovery of gravity anomalies over coastal oceans. *Science China Earth Sciences*, 53(4): 610-616 [DOI: 10.1007/s11430-009-0171-3]
- Han Z Y, Long D, Huang Q, Li X D, Zhao F Y and Wang J H. 2020. Improving reservoir outflow estimation for ungauged basins using satellite observations and a hydrological model. *Water Resources Research*, 56(9): e2020WR027590 [DOI: 10.1029/2020WR027590]
- Huang Q, Li X D, Han P F, Long D, Zhao F Y and Hou A Z. 2019. Validation and application of water levels derived from Sentinel-3A for the Brahmaputra River. *Science China Technological Sciences*, 62(10): 1760-1772 [DOI: 10.1007/s11431-019-9535-3]
- Huang Q, Long D, Du M D, Han Z Y and Han P F. 2020. Daily continuous river discharge estimation for ungauged basins using a hydrologic model calibrated by satellite altimetry: implications for the SWOT mission. *Water Resources Research*, 56(7): e2020WR027309 [DOI: 10.1029/2020WR027309]
- Hulsman P, Winsemius H C, Michailovsky C I, Savenije H H G and Hrachowitz M. 2020. Using altimetry observations combined with GRACE to select parameter sets of a hydrological model in a data-scarce region. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(6): 3331-3359 [DOI: 10.5194/hess-24-3331-2020]
- Hwang C, Cheng Y S, Han J C, Kao R, Huang C Y, Wei S H and Wang H H. 2016. Multi-decadal monitoring of lake level changes in the Qinghai-Tibet Plateau by the TOPEX/Poseidon-family altimeters: climate implication. *Remote Sensing*, 8(6): 446 [DOI: 10.3390/rs8060446]
- Jain M, Andersen O B, Dall J and Stenseng L. 2015. Sea surface height determination in the Arctic using Cryosat-2 SAR data from primary peak empirical retracker. *Advances in Space Research*, 55(1): 40-50 [DOI: 10.1016/j.asr.2014.09.006]
- Jiang L G, Andersen O B, Nielsen K, Zhang G Q and Bauer-Gottwein P. 2019a. Influence of local geoid variation on water surface elevation estimates derived from multi-mission altimetry for Lake Namco. *Remote Sensing of Environment*, 221: 65-79 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.004]
- Jiang L G, Madsen H and Bauer-Gottwein P. 2019b. Simultaneous calibration of multiple hydrodynamic model parameters using satellite altimetry observations of water surface elevation in the Songhua River. *Remote Sensing of Environment*, 225: 229-247 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.03.014]
- Jiang L G, Nielsen K, Andersen O B and Bauer-Gottwein P. 2017a. CryoSat-2 radar altimetry for monitoring freshwater resources of

- China. *Remote Sensing of Environment*, 200: 125-139 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.08.015]
- Jiang L G, Nielsen K, Andersen O B and Bauer-Gottwein P. 2020a. A bigger picture of how the Tibetan lakes have changed over the past decade revealed by CryoSat-2 altimetry. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(23): e2020JD033161 [DOI: 10.1029/2020JD033161]
- Jiang L G, Nielsen K, Dinardo S, Andersen O B and Bauer-Gottwein P. 2020b. Evaluation of Sentinel-3 SRAL SAR altimetry over Chinese rivers. *Remote Sensing of Environment*, 237: 111546 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111546]
- Jiang L G, Schneider R, Andersen O B and Bauer-Gottwein P. 2017b. CryoSat-2 altimetry applications over rivers and lakes. *Water*, 9(3): 211 [DOI: 10.3390/w9030211]
- Kittel C M M, Arildsen A L, Dybkjær S, Hansen E R, Linde I, Slott E, Tøttrup C and Bauer-Gottwein P. 2020. Informing hydrological models of poorly gauged river catchments - a parameter regionalization and calibration approach. *Journal of Hydrology*, 587: 124999 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124999]
- Kittel C M M, Jiang L G, Schneider R, Andersen O B, Nielsen K and Bauer-Gottwein P. 2018b. CryoSat-2 for inland water applications-potential, challenges and future prospects//25 Years of Progress in Radar Altimetry Symposium. Azores Archipelago, Portugal: European Space Agency: 85
- Kittel C M M, Jiang L G, Tøttrup C and Bauer-Gottwein P. 2021. Sentinel-3 radar altimetry for river monitoring-a catchment-scale evaluation of satellite water surface elevation from Sentinel-3A and Sentinel-3B. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(1): 333-357 [DOI: 10.5194/hess-25-333-2021]
- Kittel C M M, Nielsen K, Tøttrup C and Bauer-Gottwein P. 2018a. Informing a hydrological model of the Ogooué with multi-mission remote sensing data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(2): 1453-1472 [DOI: 10.5194/hess-22-1453-2018]
- Koblinsky C J, Clarke R T, Brenner A C and Frey H. 1993. Measurement of river level variations with satellite altimetry. *Water Resources Research*, 29(6): 1839-1848 [DOI: 10.1029/93WR00542]
- Kraemer B M, Seimon A, Adrian R and McIntyre P B. 2020. Worldwide lake level trends and responses to background climate variation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(5): 2593-2608 [DOI: 10.5194/hess-24-2593-2020]
- Lee H, Shum C K, Yi Y C, Ibaraki M, Kim J W, Braun A, Kuo C Y and Lu Z. 2009. Louisiana wetland water level monitoring using re-tracked TOPEX/POSEIDON altimetry. *Marine Geodesy*, 32(3): 284-302 [DOI: 10.1080/01490410903094767]
- Li P and Li H. 2020. Monitoring lake level variations in Dongting lake basin over 2003-2017 using multi-mission satellite altimetry data. *Earth Science*, 45(6): 1956-1966 (黎鹏, 李辉. 2020. 基于多源卫星测高数据的洞庭湖流域2003—2017年湖泊水位变化监测. *地球科学*, 45(6): 1956-1966) [DOI: 10.3799/dqkx.2020.005]
- Li P, Li H, Chen F and Cai X B. 2020. Monitoring long-term lake level variations in middle and lower Yangtze basin over 2002-2017 through Integration of multiple satellite altimetry datasets. *Remote Sensing*, 12(9): 1448 [DOI: 10.3390/rs12091448]
- Liao J J, Gao L and Wang X M. 2014. Numerical simulation and forecasting of water level for Qinghai lake using multi-altimeter data between 2002 and 2012. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(2): 609-622 [DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2291516]
- Liao J J, Xue H and Chen J M. 2020. Monitoring lake level changes on the Tibetan Plateau from 2000 to 2018 using satellite altimetry data. *Journal of Remote Sensing*, 24(12): 1534-1547 (廖静娟, 薛辉, 陈嘉明. 2020. 卫星测高数据监测青藏高原湖泊2010年—2018年水位变化. *遥感学报*, 24(12): 1534-1547) [DOI: 10.11834/jrs.20209281]
- Michailovsky C I and Bauer-Gottwein P. 2014. Operational reservoir inflow forecasting with radar altimetry: the Zambezi case study. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(3): 997-1007 [DOI: 10.5194/hess-18-997-2014]
- Michailovsky C I, Milzow C and Bauer-Gottwein P. 2013. Assimilation of radar altimetry to a routing model of the Brahmaputra River. *Water Resources Research*, 49(8): 4807-4816 [DOI: 10.1002/wrcr.20345]
- Morris C S and Gill S K. 1994. Variation of Great Lakes water levels derived from Geosat altimetry. *Water Resources Research*, 30(4): 1009-1017 [DOI: 10.1029/94WR00064]
- Nielsen K, Stenseng L, Andersen O B, Villadsen H and Knudsen P. 2015. Validation of CryoSat-2 SAR mode based lake levels. *Remote Sensing of Environment*, 171: 162-170 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.10.023]
- Paiva R C D, Collischonn W, Bonnet M P, De Gonçalves L G G, Calmant S, Getirana A and Santos da Silva J. 2013. Assimilating in situ and radar altimetry data into a large-scale hydrologic-hydrodynamic model for streamflow forecast in the Amazon. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(7): 2929-2946 [DOI: 10.5194/hess-17-2929-2013]
- Park E. 2020. Characterizing channel-floodplain connectivity using satellite altimetry: mechanism, hydrogeomorphic control, and sediment budget. *Remote Sensing of Environment*, 243: 111783 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111783]
- Ponchaut F and Cazenave A. 1998. Continental lake level variations from Topex/Poseidon (1993-1996). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, 326(1): 13-20 [DOI: 10.1016/S1251-8050(97)83198-9]
- Shen G Z, Liao J J and Zhao Y. 2016. Estimate the fluctuation of Poyang Lake water level using Cryosat-2 data//2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Beijing, China: IEEE: 6799-6802 [DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7730775]
- Song C Q, Ke L H, Huang B and Richards K S. 2015. Can mountain glacier melting explain the GRACE-observed mass loss in the

- southeast Tibetan Plateau: from a climate perspective?. *Global and Planetary Change*, 124: 1-9 [DOI: 10.1016/j.gloplacha.2014.11.001]
- Stern R J, Alon U, Fu L L, Zlotnicki V, Chelton D B, Parker A and Chapter I. 2014. *Satellite Altimetry and Earth Sciences*. Oceanography
- Swenson S and Wahr J. 2009. Monitoring the water balance of Lake Victoria, East Africa, from Space. *Journal of Hydrology*, 370(1/4): 163-176 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.03.008]
- Tarpenelli A, Amarnath G, Brocca L, Massari C and Moramarco T. 2017. Discharge estimation and forecasting by MODIS and altimetry data in Niger-Benue River. *Remote Sensing of Environment*, 195:96-106
- Tourian M J, Schwatke C and Sneeuw N. 2017. River discharge estimation at daily resolution from satellite altimetry over an entire river basin. *Journal of Hydrology*, 546: 230-247 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.01.009]
- Uebbing B, Kusche J and Forootan E. 2015. Waveform retracking for improving level estimations from TOPEX/Poseidon, Jason-1, and Jason-2 altimetry observations over African Lakes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(4): 2211-2224 [DOI: 10.1109/TGRS.2014.2357893]
- Vanderkelen I, Van Lipzig N P M and Thiery W. 2018. Modelling the water balance of Lake Victoria (East Africa) – Part 1: observational analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(10): 5509-5525 [DOI: 10.5194/hess-22-5509-2018]
- Verron J, Bonnefond P, Andersen O, Arduin F, Bergé-Nguyen M, Bhowmick S, Blumstein D, Boy F, Brodeau L, Crétaux J F, Dabat M L, Dibarboure G, Fleury S, Garnier F, Gourdeau L, Marks K, Queruel N, Sandwell D, Smith W H F and Zaron E D. 2021. The SARAL/AltiKa mission: a step forward to the future of altimetry. *Advances in Space Research*, 68(2): 808-828 [DOI: 10.1016/j.asr.2020.01.030]
- Villadsen H, Deng X L, Andersen O B, Stenseng L, Nielsen K and Knudsen P. 2016. Improved inland water levels from SAR altimetry using novel empirical and physical retrackers. *Journal of Hydrology*, 537: 234-247 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.03.051]
- Wang J D, Song C Q, Reager J T, Yao F F, Famiglietti J S, Sheng Y W, MacDonald G M, Brun F, Schmied H M, Marston R A and Wada Y. 2018. Recent global decline in endorheic basin water storages. *Nature Geoscience*, 11(12): 926-932 [DOI: 10.1038/s41561-018-0265-7]
- Wingham D J, Francis C R, Baker S, Bouzinac C, Brockley D, Cullen R, de Chateau-Thierry P, Laxon S W, Mallow U, Mavrocordatos C, Phalippou L, Ratier G, Rey L, Rostan F, Viau P and Wallis D W. 2006. CryoSat: a mission to determine the fluctuations in Earth's land and marine ice fields. *Advances in Space Research*, 37(4): 841-871 [DOI: 10.1016/j.asr.2005.07.027]
- Xue H, Liao J J and Zhao L F. 2018. A modified empirical retracker for lake level estimation using Cryosat-2 SARin data. *Water*, 10(11): 1584 [DOI: 10.3390/w10111584]
- Yuan C, Gong P, Zhang H, Guo H and Pan B Z. 2017. Monitoring water level changes from retracked Jason-2 altimetry data: a case study in the Yangtze River, China. *Remote Sensing Letters*, 8(5): 399-408 [DOI: 10.1080/2150704X.2016.1278309]
- 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. 2020a. 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 X X, Jiang L G, Kittel C M M, Yao Z J, Nielsen K, Liu Z F, Wang R, Liu J, Andersen O B and Bauer-Gottwein P. 2020b. On the performance of Sentinel-3 altimetry over new reservoirs: approaches to determine onboard a priori elevation. *Geophysical Research Letters*, 47(17): e2020GL088770 [DOI: 10.1029/2020GL088770]
- Zhong R D, Zhao T T G and Chen X H. 2020. Hydrological model calibration for dammed basins using satellite altimetry information. *Water Resources Research*, 56(8): e2020WR027442 [DOI: 10.1029/2020WR027442]

Monitoring lakes and reservoirs using satellite radar altimetry: Theory, methods, and progresses

JIANG Liguang¹, LIU Jun², ZHANG Xingxing³

1. School of Environmental Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China;
2. Department of Environmental Engineering, Technical University of Denmark, 2800 Kgs. Lyngby, Denmark;
3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Water level is an important variable that indicates the variations in the vertical dimension of inland water bodies. However, in-situ monitoring of water level of lakes and reservoirs is expensive. Thus, the coverage of gauging network is relatively low. The satellite altimetry technology, originally used for ocean research, has been widely applied for inland water research on a local to regional and global

scale. As the success of several altimetry missions, the situation of data scarcity has been mitigated, especially in the recent decade.

The literature review shows that the mainstream of altimetry research for lakes and reservoirs focuses on one specific or few lakes/reservoirs aiming at a detailed investigation. Regarding the altimetry data sets, most studies use high-level products (i.e. water level data instead of raw signals) from one certain database, such as Hydroweb, DAHITI, etc., but very few exploit the low-level products. The major research foci include temporal variations of water level, and the attribution of water level changes in the context of climate changes. Besides, some publications research the water storage changes and thus assess the water resources and management issues, while some others focus on catchment hydrologic modeling with water levels of lakes/reservoirs as constraints.

In this short review article, we first briefly introduced the theory of inland altimetry, followed by the descriptions of major freely open-access products of different levels. Then, we summarized the common data processing procedures including data screening, waveform retracking, outlier removal, time series construction, etc. We intend to guide the newcomers to prepare data for their own studies of interest when dealing with low-level products if necessary. Moreover, we reviewed the latest progresses of inland water altimetry, especially for lakes and reservoirs research. The progresses are reported in three main directions, i.e., water level monitoring and analysis, dynamics of water storage, and catchment hydrologic modeling. The latter two directions involve more data sets other than altimetry-derived water levels and still need more research for further advancement.

We concluded this study with recommendations on future research topics, such as new data processing techniques (e.g. Fully-Focused SAR and Wide swath InSAR processing, Machine Learning, etc.) to extract water levels that are more accurate. We also provide introductions of several proposed or planned future altimetry missions (e.g. SWOT, Sentinel-3 Next Generation Topography, Sentinel-6-Next Generation, etc.) that will provide many opportunities for lake and reservoir research beyond just lake/reservoir monitoring. Moreover, we highlight the value of multi-mission (or constellations) data sets for high spatio-temporal resolution mapping of inland water bodies. Meanwhile, it is also very important to develop freely open-access high-level databases for end users, such as hydrological modelers.

Key words: satellite altimetry, water level, lake and reservoir, monitoring, review