

SWOT 卫星对青海湖的水位监测潜力研究

熊景华¹, 郭生练¹, 姜丽光², 尹家波¹, 王俊¹

1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072;

2. 南方科技大学 环境科学与工程学院, 深圳 518055

摘要: 青藏高原湖泊群水位变化是反映全球气候变化的重要指标。在实测数据稀缺和现有卫星时空覆盖范围低的限制下, 基于雷达干涉模式的新一代SWOT (Surface Water and Ocean Topography) 卫星可为全球内陆水体提供高时空分辨率和高精度的水位信息, 是对传统观测形式的有力补充。在卫星发射之前探讨其监测潜力具有重要意义。本研究以青藏高原最大的青海湖为例, 使用CNES SWOT水文模拟器, 模拟2010年—2018年类SWOT水位序列。通过分别采用实测水位、光学水位和雷达水位作为SWOT模拟器驱动, 探讨了SWOT模拟器模拟精度对输入驱动的敏感性, 并在多个尺度下评价了其模拟表现。结果表明: 多种驱动数据情景下, 类SWOT水位均可在季节和全年尺度上捕捉青海湖水位变化过程, 相关系数和纳什效率系数分别在0.9—1.0和0.8—0.99变化; 且可较好监测到青海湖水位长期变化趋势。SWOT具有监测青藏高原湖泊群水位动态的巨大潜力, 能够有效观测湖泊水位变化。

关键词: SWOT卫星, 青藏高原, 青海湖, 水位监测, 遥感, 测高

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 熊景华, 郭生练, 姜丽光, 尹家波, 王俊. 2023. SWOT 卫星对青海湖的水位监测潜力研究. 遥感学报, 27(8): 1888–1898

Xiong J H, Guo S L, Jiang L G, Yin J B and Wang J. 2023. Exploring the potential of SWOT for water level monitoring in the Qinghai Lake. National Remote Sensing Bulletin, 27(8): 1888–1898 [DOI:10.11834/jrs.20231628]

1 引言

青藏高原被称为“地球第三极”, 平均海拔高度超过4000 m, 中国境内部分总面积达250万 km², 约占中国总面积的27%, 是世界海拔最高, 中国面积最大的高原(张懿铨等, 2002)。青藏高原还被称为“亚洲水塔”, 截至2018年, 分布有约1400个面积大于1 km²的湖泊, 其总面积超过全国湖泊总面积的50%, 对中国西部及其周边地区数十亿人的生存和发展具有重要作用(Wan等, 2016; Pritchard, 2017; Zhang等, 2021)。然而, 最近40年青藏高原经历了剧烈的气候变化过程, 该区域降雨和气温上升速率远高于全球平均水平, 导致冰川融化、冻土消融、极端暴雨等现象频发(Zhang等, 2011, 2021)。由于受人类活动影响较小, 青藏高原湖泊成为反映全球变暖的“放大器”和“指示器”, 其数量、面积和水位主要受自然因

素驱动, 总体上保持稳定增长(Yao等, 2012; 张国庆, 2018; 廖静娟等, 2020; 朱立平等, 2020; 张国庆等, 2022)。因此, 监测青藏高原湖泊变化对于理解该地区气候变化、生态环境变化, 水循环过程和水资源管理具有重要意义。湖泊水位作为反映湖泊水文状态最重要且易于监测的指标, 通常与湖泊水量、水面面积具有稳定关系(Xiong等, 2021)。然而, 由于该地区地理位置偏远、自然环境恶劣、且经济水平落后, 布设实测水文站点难度大, 导致缺乏长期连续的湖泊水位监测数据(张国庆, 2018)。

在实测水位数据稀缺的情况下, 测高卫星成为监测青藏高原湖泊水位的重要补充手段。星载测高仪可分为两类: 雷达测高卫星和激光测高卫星。自从1991年欧洲航天局发射第一颗ERS系列卫星以来, 近30年已经有Topex-Poseidon系列(包括T/P, Jason-1/2/3)、Envisat、Saral和中国的海洋

收稿日期: 2021-10-12; 预印本: 2022-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(编号: U20A20317, 51879192)

第一作者简介: 熊景华, 研究方向为遥感水文。E-mail: jhxiong@whu.edu.cn

通信作者简介: 郭生练, 研究方向为水文学及水资源学。E-mail: slguo@whu.edu.cn

(HY) 系列等多颗脉冲式雷达测高卫星支持了大量对于青藏高原湖泊水位监测的研究 (Liao 等, 2014; Song 等, 2014; Kleinherenbrink 等, 2015; Crétau 等, 2016)。例如, Hwang 等 (2016) 使用 Topex-Poseidon 家族卫星数据成功监测了青藏高原 23 个湖泊 1993 年—2014 年的水位变化; Jiang 等 (2017) 使用 Cryosat-2 数据捕捉到了 2003 年—2015 年青藏高原 70 个面积大于 100 km² 的湖泊的水位异常上升趋势。然而, 尽管传统脉冲式雷达测高卫星可以提供长序列湖泊水位数据, 其轨道相对陆地水体较为稀疏, 难以覆盖大部分小型湖泊; 此外, 其雷达回波经常受到湖泊周围地形和湖面结冰的影响, 具有较大不确定性 (Yuan 等, 2017)。激光测高卫星可以克服上述缺点, 其轨道空间覆盖率高, 测距精度高, 可以实现对青藏高原小型湖泊水位变化的准确观测 (Zhang 等, 2017, 2019a, 2021; Jiang 等, 2020)。例如, Wang 等 (2013) 使用 ICESat/GLAS 卫星数据发现 2003 年—2009 年青藏高原 56 个大型湖泊中的 18 个具有水位下降趋势, 其余 38 个呈现上升趋势, 其变化速率在 -0.51—0.62 m/a 波动。Zhang 等 (2019a) 融合了 ICESat 与 ICESat-2 卫星数据, 发现 2003 年—2013 年期间青海湖的卫星反演水位与实测值的相关系数达到 0.95, 均方根误差为 0.1 m, 包括青海湖在内的 62 个大型湖泊的平均水位以 0.28 ± 0.03 m/a 的速率上升。尽管激光测高卫星的发展扩大了可监测湖泊数量, 并具有良好的观测精度, 但其重访周期较长 (~1 年), 难以捕捉到青藏高原湖泊的季节性水位变化, 限制了对青藏高原湖泊的多时相、高频率监测 (Ma 等, 2016, 2019; Xu 等, 2022)。

作为未来 10 年 NASA 承担的地球科学重点项目, SWOT (Surface Water and Ocean Topography) 卫星通过搭载的 Ka 波段雷达干涉计 (KaRIn), 实现对海洋表面和陆地水体高程的二维连续监测。与传统的雷达测高或激光测高卫星相比, SWOT 卫星具有高精度 (10 cm)、高时间分辨率 (~22 天)、高空间覆盖率 (77°S—77°N 90% 的陆地水体) 和分辨率 (像素云尺度)、大测绘幅宽 (120 km) 等优势 (Biancamaria 等, 2016), 能够对面积大于 250 m×250 m 的湖泊实现有效监测。SWOT 卫星是由 NASA、法国空间研究中心 (CNES)、英国航空局 (UKSA) 和加拿大航空局 (CSA) 合作的国际项目, 计划于 2022 年 11 月 15 日发射, 设计寿命为

3 年。尽管距离 SWOT 卫星的发射还有一段时间, 许多学者已基于其设计参数进行在轨模拟, 以获得类 SWOT 观测数据, 该方法已在海平面变化、水文模拟、湖泊监测等领域引起强烈反响 (Biancamaria 等, 2016; Solander 等, 2016)。例如, Bonnema 和 Hossain (2019) 使用 NASA JPL 开发的 SWOT 水文模拟器对湄公河流域 20 个水库进行精度评估, 发现其对其中 17 个水库的水量估算误差在 8% 以内, 监测效果良好。Elmer 等 (2020) 将 CNES 开发的 SWOT 水文模拟器与 WRF-Hydro 水文模型进行耦合, 以阿拉斯加切纳河和尼纳纳河为例验证了 SWOT 的水位监测效果。考虑到 SWOT 卫星对于内陆水体的优异监测性能, 其对陆地水文学和海洋水文学的发展具有里程碑式的意义。然而, 未来 SWOT 卫星对青藏高原湖泊群的水位监测潜力尚且未知。

鉴于此, 本文以中国最大的内陆咸水湖: 青海湖为例 (图 1), 基于 CNES 开发的 SWOT 水文模拟器, 使用多源遥感卫星识别的湖泊边界和水位作为输入数据, 模拟得到青海湖 2010 年—2018 年的类 SWOT 水位数据, 并通过与实测资料对比评估 SWOT 卫星的水位监测潜力。

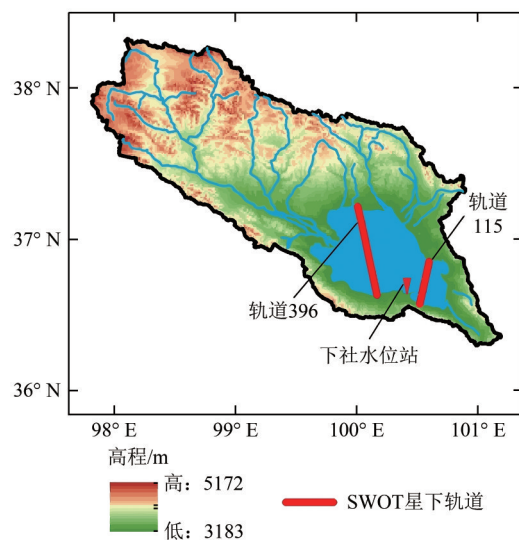


图 1 青海湖流域地理位置及 SWOT 卫星地表轨道分布

Fig. 1 Location of Qinghai Lake and the ground tracks of SWOT satellite

2 数据与方法

2.1 研究区

青海湖位于青藏高原东北部 (99° 36'E—100° 47'E, 36° 32'N—37° 15'N), 是中国最大的内陆

咸水湖,其2019年的年平均水位为3195.97 m,面积增加到4486.1 km²,总蓄水量为87.63 km³(孙永寿等,2021)(图1)。青海湖水位和水面面积自2004年以来持续上升,对周边生态环境、水利枢纽工程安全和当地居民生活造成了极大影响(程俭等,2021)。青海湖流域集水面积29661 km²,其地处青藏高原高寒区、中国东部季风区和西北干旱区交汇带,属于高原半干旱气候,多年平均气温和降水量分别为-0.21℃和374.5 mm,多年平均蒸发量达1005 mm。青海湖流域作为对全球气候变化响应最敏感的区域之一,对青藏高原的生态、水文和人类生存环境具有重要指示作用(冀钦等,2018)。

2.2 数据

(1) 湖泊掩膜数据。以张国庆(2019)发布的青藏高原面积大于1 km²湖泊边界数据集为基础,选取青海湖作为SWOT水文模拟器的输入文件。该数据集基于长序列Landsat卫星遥感数据,制作了青藏高原近50年(1970s—2018年)共12期湖泊观测产品,其精度通过了多源遥感卫星及水资源公报的对比验证,具有可靠性(Zhang等,2019b)。

(2) 光学水位数据。使用Li等(2019)发布的青藏高原高分辨率湖泊水位变化数据集,获取2010年—2018年青海湖的光学水位数据作为SWOT模拟器输入。该数据集基于Landsat影像识别的湖泊岸线与多个测高卫星(Envisat、Jason-1/2/3、CryoSat-2)观测结果之间,建立湖泊“水位—水面面积”关系,然后使用高分辨率的Landsat 5/7/8卫星影像估算湖泊水位变化,并通过野外实验验证数据集精度。该光学水位数据集可为青藏高原湖泊的水位监测提供参考,近年来得到了广泛运用(Huang等,2020)。

(3) 雷达测高水位数据。使用DAHITI(Database for Hydrological Time Series of Inland Waters)提供的2010年—2018年青海湖雷达测高水位数据作为SWOT模拟器输入,与光学及观测水位驱动结果进行对比,分析SWOT模拟器对输入水位数据的敏感性。DAHITI是德国慕尼黑工业大学地质研究所发布的雷达测高卫星产品(<https://dahiti.dgfi.tum.de> [2021-08-29]),其融合了包括Envisat、Sentinel-3a和Sentinel-3b等多种卫星数据,可提供全球365个内陆湖泊的长序列水位数据,近年来得到了广泛应用(Schwatke等,2015)。青海湖区域的测高数据则来自于Envisat卫星(2010年—2011年)、SARAL卫星(2013年—2016年)和Sentinel-3A卫星

(2017年—2018年)。

(4) 水位数据。为了验证类SWOT水位数据,采用青海湖下社水位站2010年—2018年的逐日水位实测资料,并选择与SWOT卫星过境日期一致的数据进行对比。实测数据经过了异常值剔除和质量监测,数据质量已在前人研究中得到验证(杜嘉妮等,2020)。

(5) 重力卫星和水位模型数据。使用GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)重力卫星和WaterGAP全球水文模型(WGHM)数据估算的地表水储量变化与基于“水位—水面面积”估算的类SWOT湖泊水量数据进行对比,评估SWOT卫星监测青海湖水量变化的表现。2003年—2017年的逐月GRACE卫星数据由美国德克萨斯大学奥斯汀分校空间研究中心(UTCSR)提供,<http://www2.csr.utexas.edu/grace> [2021-08-29],其为最新版(v02)的mascon方案,该产品以0.25°的空间网格的形式分发,由于不需要进行高斯滤波和去相关滤波等步骤,相比球谐系数方法具有更高的信噪比。因CSR产品将120 km的正六边形mascon空间重采样为0.25°网格,不可避免存在信号泄露和偏差,故将原始mascon中的质量异常重分配至湖泊内部以恢复泄露信号,该方法的可靠性已在里海得到了验证(Chen等,2017)。为了从GRACE数据中分离出地表水储量成分,将其扣除了WGHM模型模拟的土壤水、地下水、雪水当量和植物冠层水量,与类SWOT水量变化数据进行对比分析。与常用的全球陆地数据同化系统GLDAS(Global Land Data Assimilation System)相比,WGHM水文模型耦合了大量灌溉、牲畜、生活用水和地下水开采等用水模型,可以准确地模拟地表水和地下水成分的变化过程,该模型模拟的陆地水储量变化代表性更强。最新版本的WGHM-v2.2d模型由德国法兰克福大学提供,时间分辨率为月,空间分辨率为0.5°(Schmied等,2021)。

2.3 方法

SWOT卫星是由NASA、CNES、UKSA和CSA合作的国际项目,预计2022年11月发射,经过6个月的轨道标定和校准阶段后开启设计时限为3年的在轨运行。SWOT的核心设备为Ka波段雷达干涉计(KaRIn),其测绘幅宽为120 km,采样频率为35.75 GHz,并搭载了Poseidon-3雷达高度计(表1)。

表1 SWOT 卫星主要设备设计参数(Biancamaria 等,2016)
Table 1 Main instrument parameters of SWOT mission
(Biancamaria et al., 2016)

主要设备	参数	数值/仪器
轨道系统	高度	890.5 km
	倾角	77.6°
	重访周期	20.86 d
KaRIn 雷达干涉计	干涉计宽度	50 km
	测绘幅宽	120 km
	星下间距	20 km
	采样频率	35.75 GHz
其他仪器	Nadir 高度计	Poseidon-3
	精确定轨系统	DORIS 接收器、GPS 接收器、激光反射器

本研究使用 CNES 开发的大尺度 SWOT 水文模拟器,模拟青藏高原湖泊的类 SWOT 水位。基于简化的地理定位方程和球形地球假设,SWOT 模拟器可以模拟 SWOT 卫星对陆地水体的高速 (High-rate) 观测模式,从而生成像素云 (Pixel cloud) 尺度的水位高程数据。SWOT 模拟器考虑了随机白噪声和暗水效应 (dark water effect) 对水位观测的影响,同时能够模拟卫星位置不确定性、地理定位误差和大气干湿对流层效应。然而,由于忽略了植被的空间差异性和地形顶底效应,可能导致模拟结果不确定性增大,特别是对青藏高原这样地形条件复杂的区域 (Elmer 等, 2020)。虽然 SWOT 模拟器缺乏完整的误差模拟机制,但其性能足以支撑陆地水文学研究和应用,并已在世界多地得到验证 (Bonnema 和 Hossain, 2019; Ottlé 等, 2020)。

SWOT 模拟器仅要求输入湖泊掩膜和参考高程数据,其分别来自 Landsat 光学影像和光学及雷达测高水位数据 (Li 等, 2019; 张国庆, 2019)。以青海湖为研究对象,以 2010 年—2018 年为模拟时段,选取卫星过境日期前后 3 天的光学水位和雷达测高水位分别作为参考高程输入 SWOT 模拟器,按照以下步骤进行模拟 (图 2):

- (1) 轨道选择。设置 SWOT 卫星运行时间和研究区范围,选择研究时段内的过境轨道。
 - (2) 像素云模拟。基于湖泊掩膜和参考高程输入资料,生成像素云尺度的类 SWOT 水体高程观测数据。
 - (3) 生成湖泊产品。通过链接 CNES 发布的先验全球湖泊数据库 (LOCNES),基于类 SWOT 像素云数据生成类 SWOT 湖泊产品。
- 将类 SWOT 水位和实测结果及输入水位进行对

比分析,评价 SWOT 卫星的水位监测效果,评价指标包括相关系数 (r)、纳什效率系数 (NSE) 和均方根误差 (RMSE/m),计算公式如下:

$$r = \frac{\sum (H_o - \bar{H}_o) \times (H_s - \bar{H}_s)}{\sqrt{\sum (H_o - \bar{H}_o)^2} \times \sqrt{\sum (H_s - \bar{H}_s)^2}} \quad (1)$$

$$NSE = 1 - \frac{(H_o - H_s)^2}{(H_o - \bar{H}_o)^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{\sum (H_o - H_s)^2}{n} \right)} \quad (3)$$

式中, H_s 和 H_o 分别代表类 SWOT 水位和观测水位, $\bar{H}_s/\bar{H}_o$ 则为两者平均值的比值; n 为 2010 年—2018 年期间的有效水位个数。基于青海湖“水面面积—水位”关系,使用类 SWOT 水位估算青海湖水面面积,并进一步估算湖泊储水量变化 (Taube, 2000; Li 等, 2019):

$$S = 3.45 \times (H - 3193)^2 + 155.03 \times (H - 3193) + 4084.73 \quad (4)$$

$$V = \frac{1}{3} \times (H_2 - H_1) \times (S_1 + S_2 + \sqrt{S_1 \times S_2}) \quad (5)$$

式中, H (m) 和为类 SWOT 水位; S (km²) 为青海湖水面面积估算值; V (km³) 为 2010 年—2018 年期间青海湖储水量变化值。为了与 GRACE 数据对比,已将类 SWOT 水量变化扣除 2010 年—2018 年期间的长期平均值。

3 结果与讨论

3.1 水位误差分析

为了分析 SWOT 模拟器对输入数据的敏感性,分别使用 2010 年—2018 年青海湖实测水位、光学水位和雷达测高水位数据驱动 SWOT 模拟器,其时间序列及不确定性如图 3 所示。类 SWOT 水位在不同驱动数据情景下均能捕捉青海湖水位变化,但不同水位数据驱动类 SWOT 数据之间仍存在一定差异。例如,相较于实测水位,雷达测高数据在 2011 年之前体现了较大的偏差,其可能是由于 Envisat 运行末期 SGDR 数据质量较差,进而导致了其驱动类 SWOT 结果不能很好地捕捉实际水位。雷达测高数据在 2016 年之后和实测水位相比呈现了整体性偏移,可能是因为 DAHITI 产品采用了新的 Sentinel-3A 数据的系统性偏差导致的。另外,光学水位整体上与实测水位变化较为一致,但在 2013 年之前受到 Landsat 5 卫星太阳能阵列驱动器

损坏的影响,数据质量较低,导致光学水位及其驱动的一类SWOT数据体现了明显的波动(Zhu等,2014)。总体而言,SWOT模拟结果平均不确定性分别为0.32 m(实际水位),0.27 m(光学水位)和0.24 m(雷达水位),不同数据驱动下的一类SWOT变化区间均能覆盖真实水位。图4进一步分析了类SWOT水位年内变化。实测水位驱动结果仅在丰水期(6—11月)体现良好的精度,在枯水期(12月至次年6月)则与实测水位差异较大,且总体具有

较高的不确定性。光学水位驱动的一类SWOT水位可以精确捕捉青海湖水位的实际季节变化,而雷达水位驱动结果难以模拟其季节性特征,且较实测数据存在整体的正向偏移。实测和雷达水位驱动的一类SWOT水位在季节尺度上获得的较差结果分别是由于青海湖枯水季封冻导致的实测数据采样量较小和2010年—2013年LEGOS的数据缺失导致的,说明SWOT模拟器模拟的水位年内变化对于驱动数据的采样密度较为敏感(表2)。

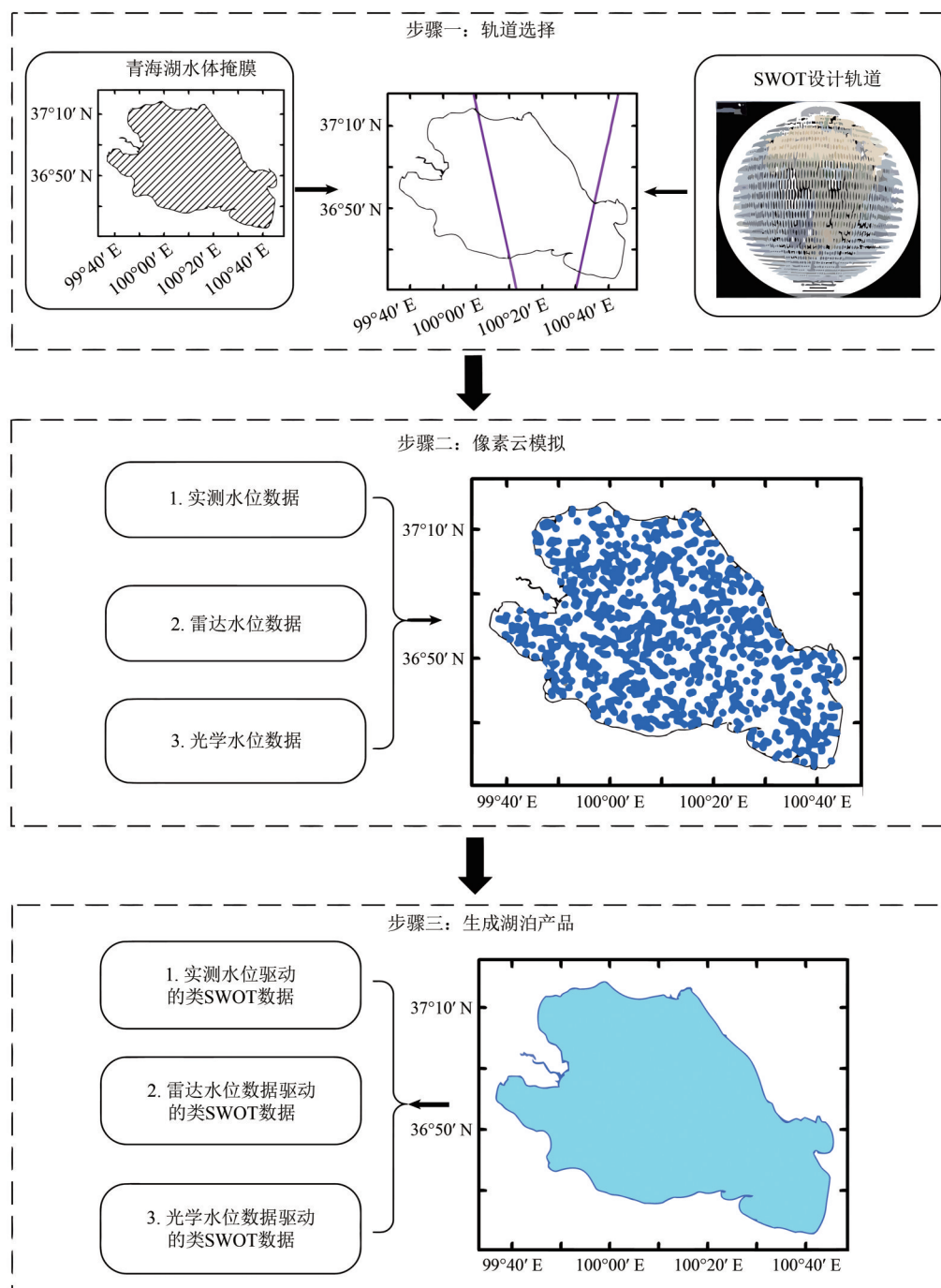


图2 SWOT模拟器流程图

Fig. 2 The flowchart of the SWOT simulator

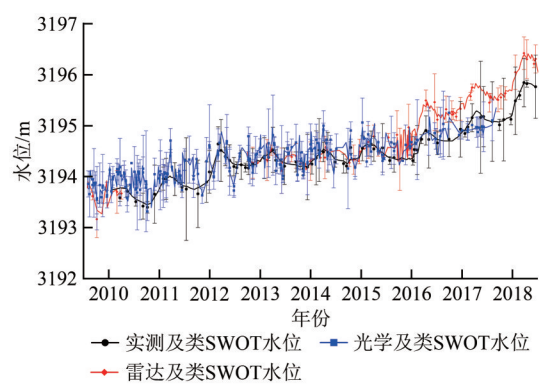


图3 不同驱动数据情景下的2010年—2018年青海湖类SWOT水位时间序列

Fig. 3 Time series of SWOT-like water level for the Qinghai Lake under different input scenarios (2010–2018)

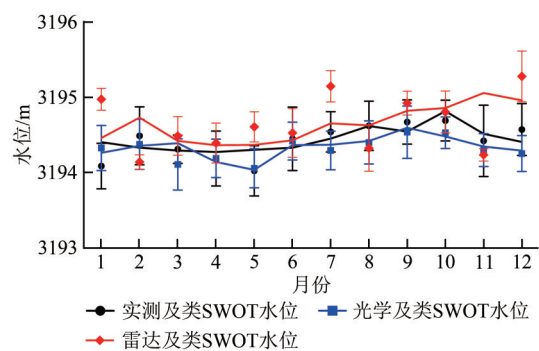


图4 不同驱动数据情景下青海湖类SWOT水位的年内变化
Fig. 4 Annual cycle of SWOT-like water level for the Qinghai Lake under different input scenarios

表2 不同驱动数据及对应类SWOT水位有效数据个数
Table 2 Valid samples of various input data and associated SWOT-like water level for the Qinghai Lake (2010–2018)

数据来源 时段	实测水位		光学水位		雷达水位	
	原始 水位	类SWOT 水位	原始 水位	类SWOT 水位	原始 水位	类SWOT 水位
1月	19	5	17	13	11	4
2月	15	4	20	16	7	1
3月	25	6	21	17	15	5
4月	16	5	21	15	14	6
5月	16	3	19	13	18	4
6月	22	5	29	18	13	4
7月	25	8	30	19	15	2
8月	17	8	29	20	15	4
9月	27	9	23	10	13	5
10月	25	6	34	19	12	5
11月	18	4	31	19	11	1
12月	29	7	23	17	13	4
全年	254	70	297	196	157	45

表3用3种指标(r 、NSE和RMSE)量化了不同季节类SWOT水位的精度。雷达测高水位与实测数据相关性较强,但误差较大,且NSE和RMSE均表明其精度低于光学水位。同时,3种指标均指明实测和雷达测高数据驱动类SWOT水位模拟精度在季节及全年尺度上优于光学水位驱动的结果,其具有相对更高的 r /NSE和更低的RMSE值。季节尺度上,雷达水位和实测水位驱动类SWOT水位在冬季的模拟效果略差于其他季节,而光学水位则在秋季具有相对较差的结果。全年尺度上,SWOT模拟器模拟水位与输入数据之间的NSE分别为0.98(实测水位)、0.89(光学水位)和0.99(雷达水位),精度高于现有激光测高卫星(Zhang等,2011;Zhu等,2014)、雷达测高卫星(张洪源等,2018)或光学卫星衍生水位(Li等,2019)。此外,通过与实测值对比,分别基于光学或雷达测高水位模拟得到的类SWOT水位总体上并未降低其原始观测精度,体现了SWOT卫星巨大的应用潜力。

相对传统雷达高度计的沿轨工作方式,SWOT卫星可以提供二维的宽刈幅干涉测高信息,且SWOT卫星较短的重访周期(21 d),能够监测内陆湖泊的季节性水位动态,弥补现有激光测高卫星时间分辨率较低的劣势。此外,SWOT卫星具有更大的覆盖率,可以对面积在250 m×250 m以上的内陆水体实现有效监测,设计相对误差低于25%,对于1 km×1 km以上的地表水体设计相对误差则低于15%(Biancamaria等,2016)。总之,SWOT卫星数据对监测全球水资源可用性具有重要意义,未来将成为水文和遥感领域重要的遥感数据源。

3.2 水位趋势分析

考虑到青海湖水位2004年以来持续上涨(程俭等,2021),观测其长期变化趋势对周边地区社会发展和居民生活十分重要。计算了2010年—2018年期间青海湖不同季节多种数据驱动类SWOT水位的长期变化趋势(表4)。除秋季以外,光学水位及其驱动的SWOT模拟结果,在各时间尺度均体现了与实测值同样的上升速率;但雷达水位及其衍生的类SWOT数据上升速率明显快于实测值,这是2016年开始雷达测高水位异常上升引起的(图3)。此外,实测水位和光学水位驱动类SWOT水位估算的长期趋势较雷达水位结果更接近原始水位,其在冬季体现了较大误差,分别为

0.21±0.032 m/a和0.33±0.045 m/a，均高于原始实测水位（0.19±0.019 m/a）和雷达水位（0.27±0.039 m/a）。光学水位驱动结果则在春季（0.17±0.033 m/a）和夏季（0.13±0.015 m/a）相对原始水位更低，其分别为0.19±0.020 m/a和0.15±0.014 m/a。在全年尺度上，不同类型的数据驱动的SWOT模拟器模拟结果均能捕捉青海湖水位的长期上升趋势，与各自的输入数据保持高度一致。

表3 不同驱动数据情景下的类SWOT水位的精度评估

Table 3 Accuracy evaluation of SWOT-like water level for the Qinghai Lake (2010—2018)								
指标	数据来源	实测水位		光学水位		雷达水位		
	时段	类SWOT水位 vs	类SWOT水位 vs	光学水位 vs	类SWOT水位 vs	类SWOT水位 vs	雷达水位 vs	类SWO水位 vs
		实测水位	光学水位	实测水位	实测水位	雷达水位	实测水位	实测水位
<i>r</i>	春季	0.99	0.95	0.84	0.73	1.00	0.98	0.99
	夏季	0.99	0.93	0.75	0.70	1.00	0.99	1.00
	秋季	1.00	0.90	0.76	0.85	1.00	0.99	0.95
	冬季	0.97	0.92	0.81	0.79	0.99	0.99	1.00
	全年	0.99	0.95	0.79	0.77	0.99	0.98	0.98
NSE	春季	0.97	0.89	0.34	−0.07	0.99	−1.00	−0.13
	夏季	0.98	0.85	0.24	−0.09	0.99	0.47	−1.91
	秋季	0.99	0.80	0.44	0.71	0.99	0.53	−0.19
	冬季	0.89	0.82	0.55	0.46	0.98	0.28	−0.44
	全年	0.98	0.89	0.44	0.44	0.99	0.48	0.29
RMSE/m	春季	0.08	0.12	0.30	0.39	0.07	0.30	0.24
	夏季	0.07	0.14	0.27	0.28	0.06	0.36	0.54
	秋季	0.06	0.19	0.26	0.28	0.08	0.37	0.49
	冬季	0.16	0.16	0.32	0.32	0.11	0.40	0.29
	全年	0.07	0.13	0.28	0.32	0.08	0.36	0.40

表4 不同驱动数据情景下青海湖2010年—2018年类SWOT水位长期趋势

Table 4 Long-term trends of SWOT-like water level for the Qinghai Lake during 2010—2018 under different input scenarios						
数据来源	实测水位/(m/a)		光学水位/(m/a)		雷达水位/(m/a)	
时段	原始水位	类SWOT水位	原始水位	类SWOT水位	原始水位	类SWOT水位
春季	0.19±0.024	0.21±0.019	0.19±0.020	0.17±0.033	0.25±0.038	0.25±0.035
夏季	0.18±0.024	0.17±0.030	0.15±0.014	0.13±0.015	0.27±0.040	0.28±0.043
秋季	0.22±0.027	0.22±0.028	0.13±0.017	0.13±0.016	0.32±0.047	0.33±0.048
冬季	0.19±0.015	0.21±0.032	0.15±0.007	0.15±0.011	0.24±0.038	0.33±0.045
全年	0.19±0.019	0.20±0.020	0.15±0.010	0.15±0.009	0.27±0.039	0.28±0.031

3.3 储水量变化

明确青海湖水量变化对于区域水资源管理十分重要。基于青海湖“水位—水面面积”关系，使用类SWOT水位数据估算2010年—2018年青海湖水量变化，并结合GRACE重力卫星和WGHM水文模型数据对比验证（图5），其在2010年—2012年相对类SWOT水量估算值呈现了整体偏移，其可能由青海湖区域的GRACE卫星数据信号泄露或WGHM模型较粗糙的空间分辨率（0.5°）引起。实测水位和光学水位驱动类SWOT储水量变化较雷达水位结果与GRACE/WGHM数据相关性更高，该差异是由于雷达测高水位本身的不确定性相对较大导致

的。然而，2010年—2013年期间光学水位驱动类SWOT储水量较实测水位和雷达水位结果更加分散，这可能是因为2013年底退役的Landsat-5卫星影像质量较差，从而造成相应的光学水位不确定性较大导致的（图3）（Li等，2019）。

为了量化地表水体储水量变化，传统手段往往需要结合测高卫星和光学影像数据基于水体的“蓄水量—水位—水面面积”关系进行估算，或从GRACE重力卫星反演的陆地水储量中扣除水文模型模拟的土壤水和地下水组分（Xu等，2020）。然而，SWOT卫星可以利用雷达干涉技术，实现对水体表面积和水面高程的同时监测，并结合高分辨

率的数字高程模型 (DEM) 数据估算蓄水量变化。基于 SWOT 卫星监测地表水体蓄水量, 不但克服了联合使用测高及光学成像数据引入的不确定性和系统偏差, 还比使用 GRACE 及水文模型的方法具有更高的空间分辨率, 未来在水库调度、洪涝预警方面具有较大应用价值。

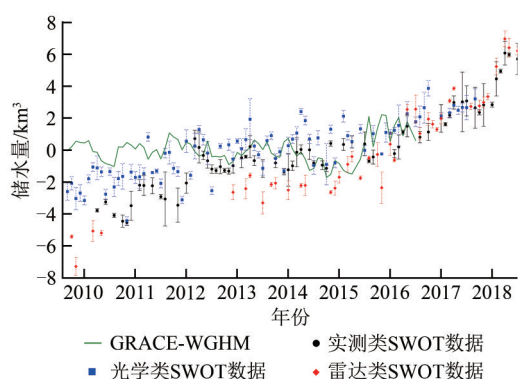


图5 不同驱动数据情景下青海湖类SWOT水位衍生储水量变化时间序列

Fig. 5 Time series of SWOT-like water level-based water storage changes for the Qinghai Lake under different input scenarios

4 结 论

青藏高原是对全球气候变化效应最剧烈的地区之一, 其拥有世界上数量最多、海拔最高的高原湖泊。然而, 由于地理位置偏远且地形条件复杂, 在实测水位资料稀缺的背景下, 通过传统测高卫星获得青海湖水位数据受到空间分辨率低、重访周期长、和反演精度差等客观条件限制。

作为新一代宽刈幅干涉测高卫星, SWOT (Surface Water and Ocean Topography) 卫星具有高精度和高时空分辨率的优势, 其发射后可显著改善青藏高原湖泊群水位监测情况。本文以青藏高原第一大湖: 青海湖为例, 使用 CNES SWOT 水文工具箱, 分别获得其在实测水位、光学水位和雷达水位驱动情景下 2010 年—2018 年类 SWOT 水位序列, 并通过时间和空间尺度上的对比分析, 验证了 SWOT 卫星对于青海湖的水位监测潜力。

研究表明, 多种数据驱动类 SWOT 水位均可在季节尺度和年尺度上捕捉真实水位变化, r 和 NSE 分别大于 0.90 和 0.80, RMSE 小于 0.19 m; 同时, 其对 2010 年—2018 年青海湖水位的长期变化趋势有较好的监测效果。空间尺度上, 类 SWOT 水位误差随干涉入射角增大而逐渐下降, 由于暗

水效应和地理定位偏差的影响, 其在湖泊岸线和碎片交接处的误差也相对较大。类 SWOT 水位衍生的湖泊储水量变化与 GRACE 及 WGHM 水文模型结果基本一致, 体现了 SWOT 卫星发射后对青海湖水资源变化的潜力。

本研究仅使用了固定的青海湖水体掩膜数据驱动 SWOT 模拟器, 未来可结合 Landsat 系列、Sentinel 系列和高分系列卫星, 获取高精度的时变湖泊掩膜, 更真实地模拟其湖泊岸线变化过程, 并进一步估算水面面积和湖泊储水量动态变化, 从而为青藏高原气候变化及区域水资源规划及管理提供科学依据。

志 谢 本文 SWOT 模拟器的安装和使用得到了法国空间研究中心 (CNES) 的帮助; 湖泊掩膜数据、实测水位数据来自国家青藏高原科学数据中心; GRACE 卫星数据来自 NASA JPL 机构。本论文的数值计算得到了武汉大学超级计算中心的计算支持和帮助。在此表示衷心的感谢!

参考文献 (References)

- Biancamaria S, Lettenmaier D P and Pavelsky T M. 2016. The SWOT mission and its capabilities for land hydrology. *Surveys in Geophysics*, 37(2): 307-337 [DOI: 10.1007/s10712-015-9346-y]
- Bonnema M and Hossain F. 2019. Assessing the potential of the Surface Water and Ocean Topography mission for reservoir monitoring in the Mekong River basin. *Water Resources Research*, 55(1): 444-461 [DOI: 10.1029/2018WR023743]
- Chen J L, Wilson C R, Tapley B D, Save H and Cretaux J F. 2017. Long-term and seasonal Caspian Sea level change from satellite gravity and altimeter measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(3): 2274-2290 [DOI: 10.1002/2016JB013595]
- Cheng J, Liu C H, Liu K, Wu J S, Fan C Y, Xue B, Ma R H and Song C Q. 2021. Potential impact of the dramatical expansion of Lake Qinghai on the habitat facilities and grassland since 2004. *Journal of Lake Sciences*, 33(3): 922-934 (程俭, 刘昌华, 刘凯, 武建双, 范晨雨, 薛滨, 马荣华, 宋春桥. 2021. 2004 年以来青海湖快速扩张对人居设施与草地的潜在影响. *湖泊科学*, 33(3): 922-934) [DOI: 10.18307/2021.0325]
- Crétaux J F, Abarca-del-Río R, Bergé-Nguyen M, Arsen A, Drolon V, Clos G and Maisongrande P. 2016. Lake volume monitoring from space. *Surveys in Geophysics*, 37(2): 269-305 [DOI: 10.1007/s10712-016-9362-6]
- Du J N, Li Q J, Liu X S and Wen D P. 2020. Hydrological characteristics of Qinghai Lake, 1956—2017. *Journal of Hydroecology*, 41(4): 27-33 (杜嘉妮, 李其江, 刘希胜, 温得平. 2020. 青海湖 1956 年—2017 年水文变化特征分析. *水生态学杂志*, 41(4): 27-33) [DOI: 10.13304/j.issn1673-9327.2020.04.005]

- 10.15928/j.1674-3075.2020.04.004]
- Elmer N J, Hain C, Hossain F, Desroches D and Pottier C. 2020. Generating proxy SWOT water surface elevations using WRF-Hydro and the CNES SWOT hydrology simulator. *Water Resources Research*, 56(8): e2020WR027464 [DOI: 10.1029/2020WR027464]
- 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]
- 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]
- Ji Q, Yang J P and Chen H J. 2018. Comprehensive analysis of the precipitation changes over the Tibetan Plateau during 1961-2015. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 40(6): 1090-1099 (冀钦, 杨建平, 陈虹举. 2018. 1961-2015年青藏高原降水量变化综合分析. *冰川冻土*, 40(6): 1090-1099) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0415]
- Jiang L G, Nielsen K, Andersen O B and Bauer-Gottwein P. 2017. Monitoring recent lake level variations on the Tibetan Plateau using CryoSat-2 SARIn mode data. *Journal of Hydrology*, 544: 109-124 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.11.024]
- Jiang L G, Nielsen K, Andersen O B and Bauer-Gottwein P. 2020. 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]
- Kleinherenbrink M, Lindenbergh R C and Ditmar P G. 2015. Monitoring of lake level changes on the Tibetan Plateau and Tian Shan by retracking Cryosat SARIn waveforms. *Journal of Hydrology*, 521: 119-131 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.11.063]
- Li X D, Long D, Huang Q, Han P F, Zhao F Y and Wada Y. 2019. 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*, 11(4): 1603-1627 [DOI: 10.5194/essd-11-1603-2019]
- 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]
- Ma N, Szilagyi J, Niu G Y, Zhang Y S, Zhang T, Wang B B and Wu Y H. 2016. Evaporation variability of Nam Co Lake in the Tibetan Plateau and its role in recent rapid lake expansion. *Journal of Hydrology*, 537: 27-35 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.03.030]
- Ma Y, Xu N, Sun J Y, Wang X H, Yang F L and Li S. 2019. Estimating water levels and volumes of lakes dated back to the 1980s using Landsat imagery and photon-counting lidar datasets. *Remote Sensing of Environment*, 232: 111287 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111287]
- Ottlé C, Bernus A, Verbeke T, Pétrus K, Yin Z, Biancamaria S, Jost A, Desroches D, Pottier C, Perrin C, de Lavenne A, Flipo N and Rivière A. 2020. Characterization of SWOT water level errors on Seine Reservoirs and La Bassée Gravel Pits: impacts on water surface energy budget modeling. *Remote Sensing*, 12(18): 2911 [DOI: 10.3390/rs12182911]
- Pritchard H D. 2017. Asia's glaciers are a regionally important buffer against drought. *Nature*, 545(7653): 169-174 [DOI: 10.1038/nature22062]
- Schmied H M, Cáceres D, Eisner S, Flörke M, Herbert C, Niemann C, Peiris T A, Popat E, Portmann F T, Reinecke R, Schumacher M, Shadkam S, Telteu C E, Trautmann T and Döll P. 2021. The global water resources and use model WaterGAP v2.2d: model description and evaluation. *Geoscientific Model Development*, 14(2): 1037-1079 [DOI: 10.5194/gmd-14-1037-2021]
- Schwatke C, Dettmering D, Bosch W and Seitz F. 2015. DAHITI—an innovative approach for estimating water level time series over inland waters using multi-mission satellite altimetry. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(10): 4345-4364 [DOI: 10.5194/hess-19-4345-2015]
- Solander K C, Reager J T and Famiglietti J S. 2016. How well will the surface water and ocean topography (SWOT) mission observe global reservoirs?. *Water Resources Research*, 52(3): 2123-2140 [DOI: 10.1002/2015WR017952]
- Song C Q, Huang B, Ke L H and Richards K S. 2014. Seasonal and abrupt changes in the water level of closed lakes on the Tibetan Plateau and implications for climate impacts. *Journal of Hydrology*, 514: 131-144 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.04.018]
- Sun Y S, Li Q J, Liu T, Li Y and Yang Y. 2021. Analysis of Qinghai Lake's water level changes and water balance analysis from 1956 to 2019. *Journal of China Hydrology*, 41(5): 91-96 (孙永寿, 李其江, 刘弢, 李燕, 杨阳. 2021. 青海湖1956年—2019年水位变化原因及水量平衡分析研究. *水文*, 41(5): 91-96) [DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20200215]
- Taube C M. 2000. Instructions for winter lake mapping//Schneider J C, ed. *Manual of fisheries survey methods II: With periodic updates*. Michigan Department of Natural Resources, Fisheries Special Report 25. ArborAnn, MI: 1-4
- Wan W, Long D, Hong Y, Ma Y Z, Yuan Y, Xiao P F, Duan H T, Han Z Y and Gu X F. 2016. A lake data set for the Tibetan Plateau from the 1960s, 2005, and 2014. *Scientific Data*, 3(1): 160039 [DOI: 10.1038/sdata.2016.39]
- 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]
- Xiong J H, Guo S L and Yin J B. 2021. Discharge estimation using integrated satellite data and hybrid model in the midstream Yangtze River. *Remote Sensing*, 13(12): 2272 [DOI: 10.3390/rs13122272]
- Xu F L, Zhang G Q, Yi S and Chen W F. 2022. Seasonal trends and cycles of lake-level variations over the Tibetan Plateau using multi-sensor altimetry data. *Journal of Hydrology*, 604: 127251 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.127251]
- Xu Y Y, Li J, Wang J D, Chen J L, Liu Y B, Ni S N, Zhang Z Z and Ke C Q. 2020. Assessing water storage changes of Lake Poyang from multi-mission satellite data and hydrological models. *Journal of Hydrology*, 590: 125229 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125229]
- Yao X J, Liu S Y, Sun M P, Guo W Q and Zhang X. 2012. Changes of Kusai Lake in Hoh Xil region and causes of its water overflowing. *Acta Geographica Sinica*, 67(5): 689-698 (姚晓军, 刘时银, 孙美平, 郭万钦, 张晓. 2012. 可可西里地区库赛湖变化及湖水外溢成因. *地理学报*, 67(5): 689-698) [DOI: 10.11821/xb201205011]
- 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. 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. 2019. The lakes larger than 1 km² in Tibetan Plateau (V2.0) (1970s—2018). National Tibetan Plateau Data Center (张国庆. 2019. 青藏高原大于 1 平方公里湖泊数据集(V2.0)(1970s—2018). 国家青藏高原科学数据中心) [DOI: 10.11888/Hydro.tpcd.270303]
- Zhang G Q, Bolch T, Chen W F and Crétau J F. 2021. Comprehensive estimation of lake volume changes on the Tibetan Plateau during 1976—2019 and basin-wide glacier contribution. *Science of the Total Environment*, 772: 145463 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145463]
- Zhang G Q, Chen W F and Xie H J. 2019a. Tibetan Plateau's Lake level and volume changes from NASA's ICESat/ICESat-2 and Landsat missions. *Geophysical Research Letters*, 46(22): 13107-13118 [DOI: 10.1029/2019GL085032]
- Zhang G Q, Luo W, Chen W F and Zheng G X. 2019b. A robust but variable lake expansion on the Tibetan Plateau. *Science Bulletin*, 64(18): 1306-1309 [DOI: 10.1016/j.scib.2019.07.018]
- Zhang G Q, Wang M M, Zhou T and Chen W F. 2022. Progress in remote sensing monitoring of lake area, water level, and volume changes on the Tibetan Plateau. *Journal of Remote Sensing*, 26(1): 115-125 (张国庆, 王蒙蒙, 周陶, 陈文锋. 2022. 青藏高原湖泊面积、水位与水量变化遥感监测研究进展. *遥感学报*, 26(1): 115-125) [DOI: 10.11834/jrs.20221171]
- Zhang G Q, Xie H J, Kang S C, Yi D H and Ackley S F. 2011. Monitoring lake level changes on the Tibetan Plateau using ICESat altimetry data (2003—2009). *Remote Sensing of Environment*, 115(7): 1733-1742 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.03.005]
- Zhang G Q, Yao T D, Shum C K, Yi S, Yang K, Xie H J, Feng W, Bolch T, Wang L, Behrangi A, Zhang H B, Wang W C, Xiang Y and Yu J Y. 2017. Lake volume and groundwater storage variations in Tibetan Plateau's endorheic basin. *Geophysical Research Letters*, 44(11): 5550-5560 [DOI: 10.1002/2017GL073773]
- Zhang H Y, Wu Y H, Liu Y J and Guo L N. 2018. Water storage variation of the Qinghai Lake in recent decades based on satellite observation. *Progress in Geography*, 37(6): 823-832 (张洪源, 吴艳红, 刘衍君, 郭立男. 2018. 近 20 年青海湖水量变化遥感分析. *地理科学进展*, 37(6): 823-832) [DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.06.009]
- Zhang Y L, Li B Y and Zheng D. 2002. A discussion on the boundary and area of the Tibetan Plateau in China. *Geographical Research*, 21(1): 1-8 (张懿锂, 李炳元, 郑度. 2002. 论青藏高原范围与面积. *地理研究*, 21(1): 1-8) [DOI: 10.3321/j.issn:1000-0585.2002.01.001]
- Zhu L P, Peng P, Zhang G Q, Qiao B J, Liu C, Yang R M and Wang J B. 2020. The role of Tibetan Plateau lakes in surface water cycle under global changes. *Journal of Lake Sciences*, 32(3): 597-608 (朱立平, 彭萍, 张国庆, 乔宝晋, 刘翀, 杨瑞敏, 王君波. 2020. 全球变化下青藏高原湖泊在地表水循环中的作用. *湖泊科学*, 32(3): 597-608) [DOI: 10.18307/2020.0301]
- Zhu W B, Jia S F and Lv A F. 2014. Monitoring the fluctuation of Lake Qinghai using multi-source remote sensing data. *Remote Sensing*, 6(11): 10457-10482 [DOI: 10.3390/rs61110457]

Exploring the potential of SWOT for water level monitoring in the Qinghai Lake

XIONG Jinghua¹, GUO Shenglian¹, JIANG Liguang², YIN Jiabo¹, WANG Jun¹

1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. School of Environmental Science & Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China

Abstract: The water level changes in the lake groups on the Qinghai-Tibetan Plateau is crucial for understanding global climate change and melting glaciers regionally. However, in-situ measurements are still lacking due to remote locations and material requirements. The current in-orbit optical satellites as well as radar and laser altimetry satellites have a relatively coarse spatiotemporal resolution and poor

retrieval accuracies, both of which can be addressed in the future Surface Water and Ocean Topography (SWOT) mission. Therefore, the main objective of our study is to assess the water level monitoring potential of SWOT for the largest lake in China, that is, the Qinghai Lake in the Qinghai–Tibetan Plateau.

This study obtained SWOT-like water level time series covering the years 2010 to 2018 for the Qinghai Lake from in-situ measurements, the optical altimetry dataset, and radar altimetry products by using the CNES SWOT Hydrology Toolbox. A systematical performance evaluation of SWOT-like lake level was then conducted by comparing this level with the reference height. SWOT-like water volume time series under different input scenarios for the Qinghai Lake were estimated based on its hypsometric curve and were subsequently validated using the results derived from the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) mission and the WaterGAP global hydrological model (WGHM).

In general, the SWOT-like water level time series can capture the seasonal and annual water level variations with an r/NSE ranging from 0.9 to 1.0 and from 0.8 to 0.99, respectively. Meanwhile, the SWOT-like lake level time series accurately demonstrate the long-term trends of water level in Qinghai Lake for the years 2010 to 2018 at various scales. The SWOT-inferred water volume changes under multiple forcing scenarios show change patterns that are comparable with the GRACE and WGHM results.

The SWOT-like water level for the Qinghai Lake for the years 2010 to 2018 shows satisfactory accuracy at both seasonal and annual scales as revealed in comparisons with in-situ measurements, the optical altimetry dataset, and the radar altimetry product. The patterns of the SWOT-inferred water volume changes are also similar to the GRACE and WGHM results, thereby indicating the great water level and volume monitoring potential of the future SWOT mission. In our future work, we will derive time-varying water extent maps of Qinghai Lake by using multi-source optical imageries, including Landsat, Sentinel, and Gaofen series satellites. We also plan to carry further experiments for all lakes ($> 1 \text{ km}^2$) in the Qinghai–Tibetan Plateau to assess the large-scale lake level monitoring potential of SWOT.

Key words: SWOT, Qinghai–Tibetan Plateau, Qinghai Lake, water level monitoring, remote sensing, altimetry

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. U20A20317, 51879192)