

引用格式:陈军,高婧潇,汪永丰,金璐.联合 Sentinel-3 雷达测高和光学影像的青藏高原典型湖泊水量变化估算[J].山地学报,2023,41(6):926-940.

CHEN Jun, GAO Jingxiao, WANG Yongfeng, JIN Lu. Estimation of water volume changes in typical alpine lakes on the Tibetan Plateau by combining Sentinel-3 Radar Altimetry data and optical images [J]. Mountain Research, 2023, 41(6): 926-940.

联合 Sentinel-3 雷达测高和光学影像的青藏高原 典型湖泊水量变化估算

陈军,高婧潇,汪永丰,金璐

(安徽建筑大学 a. 环境与能源工程学院; b. 安徽省智慧城市工程技术研究中心, 合肥 230000)

摘要: 青藏高原湖泊对气候波动表现出高度的敏感性,其动态监测数据为区域甚至全球气候变化研究提供重要证据。受恶劣自然环境的限制,青藏高原大部分地区缺乏实地观测数据,现有的青藏高原湖泊变化分析,多基于遥感,湖泊水位与面积等数据通常来自不同卫星,数据之间存在时间上的偏离。本研究融合 Sentinel-3 SRAL (SAR Radar Altimeter) 雷达测高数据与相同卫星搭载的 Sentinel-3 SLSTR (Sea and Land Surface Temperature Radiometer) 光学影像监测了 2016 年 4 月—2022 年 9 月青藏高原四个大型湖泊(阿牙克库木湖、色林错、青海湖、纳木错)的水位及面积变化。通过将监测结果与实测水位及与 DAHITI 水文产品对比分析,确认 Sentinel-3 雷达测高数据能够准确地反映高原大型湖泊水位的周际和月际变化特征。结果表明:(1)四个湖泊的水位在监测期内逐年上升,分别上涨了 3.01 m、2.04 m、1.62 m、0.28 m。四个湖泊的面积与水位季节变化特征一般表现为:夏季季风期湖面显著增大,非季风期逐渐减小。(2)湖泊水位在第二季度最低,第三季度末或第四季度初上升到峰值。四个湖泊的水量在监测期内也均呈现出不同程度的涨幅,其中青海湖的水量增长最大,达到了 7.381 km^3 ;纳木错水量变化最小,监测期间仅增长 0.072 km^3 。(3)比较 DEM 估算水量法和经验公式法分别拟合出的水量线性变化趋势,证明基于 Sentinel-3 数据进行的湖泊水量估算的准确性。(4)以阿牙克库木湖为例,通过探究其水位周变化与降水量日变化之间的对应关系,证明了降水是湖泊水位变化的主要影响因素。本研究利用 Sentinel-3 同时具备光学影像和测高数据的优势,避免使用不同卫星数据组合由于时间延迟而造成结果的不确定性,为青藏高原的水资源平衡研究提供了独特的数据应用方案。

关键词: Sentinel-3; 雷达测高; 光学影像; 湖泊水位; 青藏高原

中图分类号: X87; X821

文献标志码: A

因其复杂的地形和独特的气候特点,青藏高原被作为“世界屋脊”和“第三极”^[1]。过去半个世纪高原气温不断攀升,导致全球冰川退缩和多年冻土消融加剧^[2],藏北西风带影响区内的降水量逐渐增加,而藏南西南季风带影响区内的降水量逐渐减少^[3]。湖泊作为青藏高原生态环境中不可或缺的

一部分,其水面面积、水位、水量等水文要素在水循环过程中起着至关重要的作用^[4]。因受人类活动影响较少,青藏高原湖泊被认为是气候变化的直接指示器^[5-6]。不同时期的区域气候变化特征直接决定该时段内陆湖泊水量的增减,如 1976—1990 年间,受西风带控制的地区降水减少,同时气温下降抑

收稿日期(Received date): 2023-07-06; 改回日期(Accepted date): 2023-12-14

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(41901129)。[National Natural Science Foundation of China (41901129)]

作者简介(Biography): 陈军(1984-),男,安徽宣城人,博士,副教授/高级工程师,主要研究方向:遥感地学分析、资源环境遥感。[CHEN Jun (1984-), male, born in Xuancheng, Anhui province, Ph. D., associate professor/senior engineer, research on remote sensing geoscience analysis and remote sensing of resources and environments] E-mail: gischen@126.com

制了冰川融化,导致该时期青藏高原湖泊水量减少^[7-8]。之后,随着气温恢复上升,冰川消融的程度日益加剧,打破了高原湖泊补给原本的稳定状态,该期间受总体暖湿化的驱动湖泊水量增长趋势明显^[9]。然而 2005—2013 年间,气候变暖趋势日渐明显,该期间蒸散量的增大减缓了湖泊水量的增长速率^[10-11]。总体来说,近几十年来,青藏高原湖泊水量的时空变化特征与西风带和印度季风带影响区降水量的变化规律十分相似^[10]。动态监测这些湖泊对于全球气候变化的研究大有裨益^[12]。

受恶劣自然环境的限制,青藏高原大部分地区缺乏实地观测数据,目前具有连续水文观测资料的仅限青海湖、纳木错等少数湖泊^[13]。遥感技术因其覆盖面广和周期短弥补了传统观测方法的不足,已经在空间尺度、长时间序列的湖泊动态监测中得到广泛运用,包括湖泊数量、水面面积、水位升降以及湖泊水量变化、水量平衡研究等^[14-16]。当前,基于遥感技术的湖泊水体提取由以前单一的光学影像到多幅影像,再到多源数据融合。合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 影像以其全天候、全天时的优点,在水体范围提取中发挥着重要作用^[17-18]。用于测量湖泊水位的卫星测高技术主要分为雷达测高 (Topex/Poseidon、Cryosat-2) 和激光测高 (ICESat-1/2) 两大类。在湖泊水量变化监测中,可利用数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 数据对水量变化进行估算,但由于数据采集受限于湖泊水面和水下地形,获取 DEM 数据存在较大困难^[19]。相比而言,结合面积与水位的经验公式法更为便捷,有助于观察和分析水量变化的发展趋势,该方法已被广泛地应用于国内外湖泊水量的变化监测^[20-24]。

水量估算经验公式法涉及的水位与面积通常来自不同卫星,使得获取的水位与其相对应的面积存在时间上的偏离^[25],不可避免地导致计算出的水量变化结果存在一定的偏差。本研究在 Sentinel-3 雷达数据基础上,结合相同卫星搭载的光学影像提取的湖泊面积,保证提取的水位和面积时间节点的完全一致性,避免使用不同卫星数据组合由于时间延迟而造成结果的不确定性,从而计算出更为准确的水量变化。此外, Sentinel-3 的重访周期和星下点足迹分别为 27 d 和 0.3 km,具有较高的沿轨空间分辨率和测距精度^[26],在监测内陆水体水量变化方面具

有巨大潜力^[27]。综上,本研究选取 Sentinel-3 卫星的 SAR 雷达高度计 (SAR Radar Altimeter, SRAL) 测高数据监测湖泊水位,结合该卫星双视海陆表面温度辐射计 (Sea and Land Surface Temperature Radiometer, SLSTR) 的光学影像提取湖泊面积,监测 2016—2022 年四个典型湖泊的水位和面积变化,并采用经验公式法估算出这些湖泊的水量变化,探究湖泊周变化与降水日变化相对应的内在关系,量化湖泊变化对降水量波动的响应程度。本研究基于 Sentinel-3 同时具备光学影像和测高数据的优势,为青藏高原的水资源平衡研究提供了独特的数据应用方案。

1 研究区域

青藏高原 (73°19'E ~ 104°47'E, 26°00'N ~ 39°47'N) 湖区是中国湖泊密度最高的两个湖区之一,大于 1 km² 的湖泊有 1400 个左右,面积约 5.0 万 km²,约占中国湖泊数量与面积的一半^[28]。其中湖泊面积大于 1000 km² 的有青海湖、色林错、纳木错、阿牙克库木湖、扎日南木错等。兼顾区域代表性与数据的可获得性,本研究最终选择青海湖、纳木错、色林错、阿牙克库木湖这四个大型湖泊作为研究对象 (图 1)。青海湖面积约 4800 km²,其作为中国最大咸水湖是维护青藏高原东北部地区生态安全的主要水域,该流域属青藏高原温带大陆性半干旱气候,湖区降雨呈现出季节性波动的变化规律,5—9 月降水量最大。色林错与纳木错均为大型深水湖,是羌塘高原内流区最大的两个湖泊^[29],面积分别约为 2400 km² 和 2000 km²。它们属于羌塘高原寒带半干旱季风气候带,每年 6 月至 9 月为雨季,11 月至翌年 5 月为旱季。色林错是在青藏高原形成过程期间孕育的构造湖,纳木错呈现出近似于矩形的形状,处于水流汇聚的中央,沿湖水系发达。阿牙克库木湖地处青藏高原最北端,面积约 1100 km²,处于寒冷的干旱区,年降水量 100 ~ 200 mm,且 85% 降水量集中在 5—8 月。

2 数据和方法

2.1 数据

2.1.1 Sentinel-3 光学影像

Sentinel-3 卫星发射于 2016 年 2 月 16 日,可用

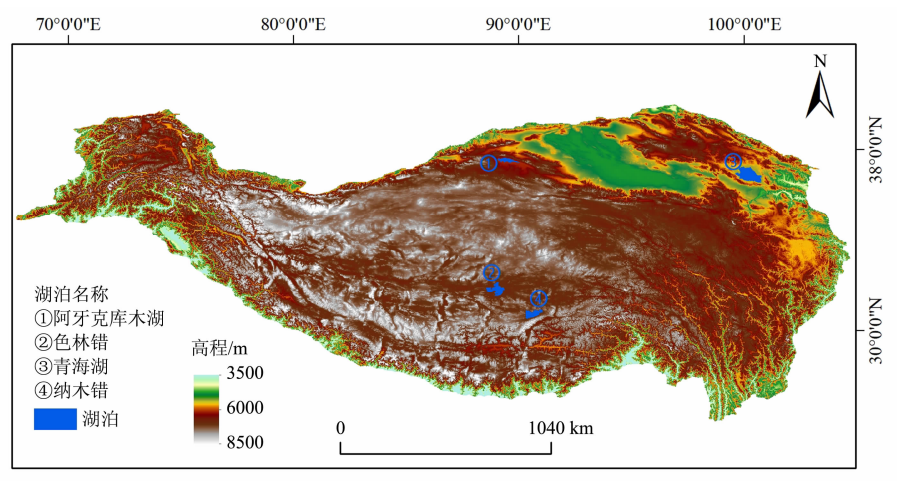


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location map of study area

于满足长期对海洋及陆地的监测任务,其搭载的海陆表面温度辐射计 SLSTR 可在低地球轨道(海拔 800 ~ 830 km)上飞行,使其具有更大的幅宽、更短的重访周期及更多的波段^[30]。SLSTR 传感器包含 6 个可见光、近红外波段,分辨率均为 0.5 km;3 个中红外、热红外波段和 2 个火灾检测波段,分辨率均为 1 km。本研究选取 2016 年 4 月至 2022 年 9 月的 169 景绿色(S1)和中红外(S5)波段的 SLSTR Level-

1 无云影像(表 1)。

2.1.2 Sentinel-3 雷达测高数据

Sentinel-3 搭载的 SRAL 雷达高度计用于海洋及潮汐、内陆水体及陆地冰研究,提供近实时、延迟及非时间临界三种数据产品^[31]。本研究采用经仪器、地理定标及波形重定后的 Sentinel-3 SRAL 的 L2 级数据产品(<https://scihub.copernicus.eu>)^[32],时间跨度为 2016 年 4 月—2022 年 9 月(图 2)。

表 1 四个典型湖泊涉及 Sentinel-3 SLSTR 光学影像的获取日期

Tab. 1 Acquisition time of four typical lakes involving Sentinel-3 SLSTR optical images

湖泊名称	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年
阿牙克库木湖	04-30,05-11、	03-02,05-14、	01-09,02-10、	03-17,03-28、			
	06-12,06-28、	06-26,07-13、	05-10,06-15、	05-10,05-20、	01-31,05-01、	02-03,05-06、	02-16,05-21、
	07-14,10-02、	08-02,10-21、	07-24,10-08、	09-14,10-27、	09-29,10-12	06-10,08-26、	09-04
	10-29,11-03	10-27,12-08	11-24	12-12		12-03,12-21	
色林错	05-29,08-21、	03-02,04-21、	02-13,05-23、	02-21,05-10、	02-21,03-31、	02-03,05-23、	02-05,05-21、
	10-29	06-04,07-20、	07-24,09-20、	08-29,11-18	05-10,09-29、	09-04,10-17	08-21
		11-26	11-03		11-19		
青海湖	05-11,07-18、	03-02,05-19、	01-09,02-23、	03-28,05-19、	02-17,05-31、	02-10,06-12、	02-15,02-27、
	10-31	07-21,10-01	06-21,09-20、	08-19,10-28	08-24,10-24、	09-29,11-11	06-24,08-21
纳木错			11-19		11-19		
	05-24,06-05、	01-26,02-27、	01-13,02-05、	01-30,02-22、	01-12,03-29、	01-28,02-03、	
	07-29,08-21、	03-02,05-06、	05-23,06-01、	03-17,05-14、	04-01,05-29、	03-29,04-29、	01-06,03-09、
	09-16,10-29、	07-02,10-23、	07-24,08-12、	06-24,07-25、	06-17,07-14、	05-19,06-30、	04-30,05-29、
	11-21,12-15	11-26,12-27	09-08,10-16、	08-29,09-05、	08-19,09-29、	07-12,08-01、	06-24,07-25、
			11-05,12-17	10-30,11-23、	10-30,11-18、	09-07,10-16、	08-21,09-10
				12-19	12-31	11-24,12-21	

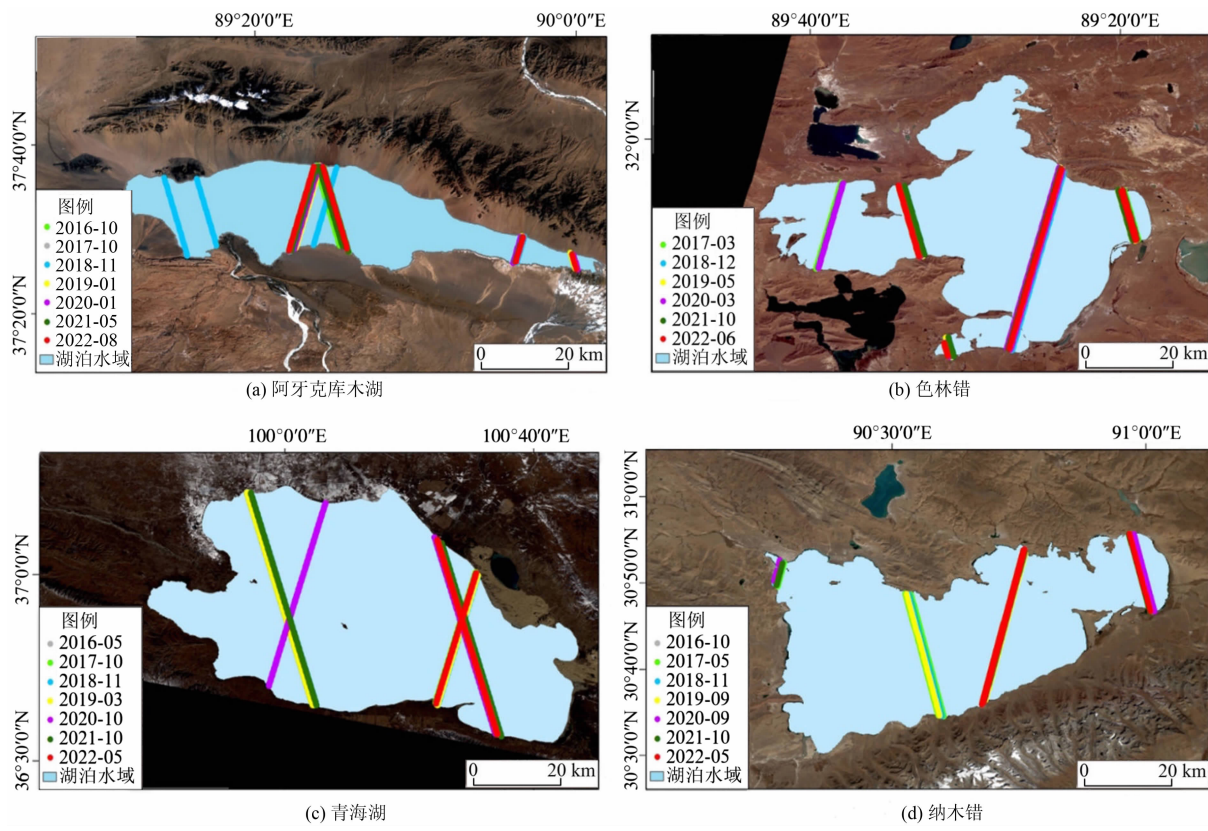


图 2 四个典型湖泊涉及 Sentinel-3 测高数据不同年份的过境轨迹

Fig. 2 Transit trajectories of four typical lakes involving Sentinel-3 altimetry data in different years

注: 每年仅显示了 1 ~ 2 个航迹。

监测期内,阿牙克库木湖、色林错、青海湖和纳木错分别获取了 273、206、270 和 274 条航迹的测高数据。以 2016 年 10 月 15 日的一条典型航迹为例,四个典型湖泊有效高程点数分别为 59、68、200、83 (表 2)。

2.1.3 其他数据

为了展示不同方法估算的水量变化结果,使用

地面分辨率为 30 m 的航天飞机雷达地形测绘任务 (Shuttle Radar Topography Mission, SRTM) DEM 数据对 2016—2022 年阿牙克库木湖的水量变化进行估算。SRTM-DEM 是美国国家航空航天局 (NASA) 和国家图像测绘局 (NIMA) 联合对干涉雷达影像进行数据处理生成的 DEM 数据 (<http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/>)^[33]。

表 2 四个典型湖泊涉及 Sentinel-3 测高数据的获取日期及有效高程点数量

Tab. 2 Acquisition date and number of effective elevation of Sentinel-3 altimetry data for four typical lakes

湖泊名称	过境日期	有效高程点数/个	湖泊名称	过境日期	有效高程点数/个	湖泊名称	过境日期	有效高程点数/个	湖泊名称	过境日期	有效高程点数/个
阿牙克库木湖	2016-10-21	59	色林错	2016-10-16	68	青海湖	2016-05-09	200	纳木错	2016-10-01	83
	2017-10-08	56		2017-03-04	68		2017-10-23	199		2017-05-28	83
	2018-11-17	55		2018-12-12	68		2018-10-17	201		2018-11-20	84
	2019-01-04	56		2019-05-10	66		2019-03-03	200		2019-09-16	83
	2020-01-17	58		2020-03-15	69		2020-10-15	200		2020-09-28	82
	2021-05-17	56		2021-10-13	68		2021-10-15	199		2021-10-11	84
	2022-08-19	57		2022-06-13	67		2022-05-05	198		2022-05-02	83

为了验证 Sentinel-3 测高数据精度,选取纳木错 2016 年 5—12 月逐周实测水位数据与 Sentinel-3 水位结果进行对比,实测数据来源于国家青藏高原科学数据中心(National Tibetan Plateau Data Center, TPDC)的青藏高原高时间分辨率湖泊水位数据集(<https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>)。

为了进一步评估 Sentinel-3 水位的有效性,使用内陆水域水文时间序列数据库(Database for Hydrological Time Series of Inland Waters, DAHITI)中的水位数据,选取纳木错 2016 年 5 月—2022 年 9 月 DAHITI 逐月水位数据(<https://dahiti.dgfi.tum.de/en/products/water-level-altimetry/>)与 Sentinel-3 水位结果进行对比。由德国慕尼黑工业大学建立的 DAHITI 水文数据使用多源和多传感器卫星测高数据,提供了全球 600 多个河流、水库和湖泊的水位时间序列。DAHITI 水位数据显示出优于 30 cm 的良好精度^[34],已在许多湖泊中得到很好的验证。

为了更好地探索湖泊水位周变化与降水量的对应关系,选取离阿牙克库木湖最近的茫崖气象站点,获取茫崖市茫崖镇 2016 年 4 月—2022 年 8 月的实测日降水量数据。

2.2 数据处理

2.2.1 基于 Sentinel-3 卫星影像的典型湖泊范围提取

Sentinel-3 光学影像数据预处理使用由欧空局开发用于地球观测任务的哨兵应用平台(Sentinels Application Platform, SNAP)软件,对影像数据进行读取、重采样,统一各波段分辨率^[35]。再基于 ENVI(Environment for Visualizing Images, ENVI)软件进行波段合成、辐射定标、大气校正等数据预处理。

改进的归一化差异水体指数(Modified Normalized Difference Water Index, MNDWI)方法已被广泛地用于光学影像中水体信息的提取^[36],该方法利用中红外波段替换近红外波段,以解决水体在中红外波段反射率逐渐降低的问题。MNDWI 不仅可以增强开放水域的特征,还能有效地抑制或消除自身建成土地、植被和土壤的噪声^[37]。计算公式为:

$$MNDWI = (\rho_{\text{Green}} - \rho_{\text{MIR}}) / (\rho_{\text{Green}} + \rho_{\text{MIR}}) \quad (1)$$

式中, ρ_{Green} 代表绿波段(波长为 0.52 ~ 0.6 μm); ρ_{MIR} 代表中红外波段(波长为 1.55 ~ 1.75 μm),在

Sentinel-3 影像里分别对应 S1 和 S5 波段。本研究采用 MNDWI 方法先自动提取湖泊水体信息,再基于专家经验进行人工辅助判读以提高数据精度。

2.2.2 基于 Sentinel-3 雷达测高的典型湖泊水位监测

基于 Sentinel-3 雷达测高数据主要使用以下 5 个步骤提取湖泊水位。

步骤 1:数据读取

利用 Matlab 软件读取测高数据,并通过卫星测高计算原理考虑大气、地形校正后的卫星水位值 h_{al} ,计算公式为:

$$h_{\text{al}} = \text{Altitude} - \text{Range} + H_{\text{cor}} \quad (2)$$

式中, Altitude 为卫星至参照椭球面的高度; Range 为卫星至湖泊水位点的高度; H_{cor} 为各项纠正参数,分别对应 Sentinel-3 SRAL L2 原始数据中的属性字段,如 alt_20_ku、range_ocean_20_ku、net_instr_cor_range_20_ku 等。

步骤 2:数据过滤

利用 Sentinel-3 光学影像提取出的湖泊边界,使用 ArcGIS 筛选落在湖面范围内的高程点。由于湖泊边界提取精度、回波异常等误差导致筛选出的测高数据存在异常值,因此应用箱线图法,计算数据集的上四分位数 Q_1 (数据由小到大排列第 25% 的数字),中位数 Q_2 (上述排列第 50% 的数字)和下四分位数 Q_3 (上述排列第 75% 的数字),通过数据的整体分布状况进一步计算界定异常数据的上下限阈值^[38]。剔除掉水位数据中的异常值后得到比较精确的水位信息。计算公式为:

$$\text{上下限阈值} = Q_3 \pm 1.5IQR \quad (3)$$

式中, IQR 为四分位距,是下四分位数 Q_3 与上四分位数 Q_1 的差值。

步骤 3:水位平均

计算有效高程点数据的逐周、逐月平均值,分析湖泊水位时间序列变化趋势。

步骤 4:精度验证

分别将 Sentinel-3 获取的纳木错水位与水文站实地观测值和来自 DAHITI 的水文数据产品进行对比,评估 Sentinel-3 获取湖泊水位的准确性。

步骤 5:数据分析

获得四个典型湖泊水位的周变化、月变化及季度变化特征,并采用经验公式法估算监测期内的水量变化情况。此外,分析湖泊水位的周变化与降水

量日变化的对应关系,从而探讨湖泊水位变化对降水量波动的响应程度。

2.3 青藏高原四个典型湖泊水量变化计算

为了获得湖泊相对水量变化,将表面不规则的湖泊简化为一个相对规则的台体^[39]。湖泊水量随着湖泊水位上升、面积增大而增多,反之亦然。本研究利用 Sentinel-3 搭载的 SLSTR 双视海陆表面温度辐射计和 SRAL 雷达高度计分别获取相同时点的典型湖泊面积和水位信息,采用经验公式法来估算典型湖泊的水量变化^[40]:

$$\Delta V = \frac{S_1 + S_2 + \sqrt{(S_1 \times S_2)}}{3} \times (H_1 - H_2) \quad (4)$$

式中, ΔV 为从湖泊面积 S_1 和水位 H_1 到湖泊面积 S_2 和水位 H_2 的体积变化。

3 结果分析

3.1 四个典型湖泊面积与水位监测结果

监测期内四个典型湖泊边界均逐年扩张,其中阿牙克库木湖 2016—2022 年增长了 92.66 km²,在东部径流入湖口方向变化显著;青海湖面积在监测期内持续增大,扩张了 309.23 km²,以东北、西北两侧的扩张为主。色林错湖泊在东南部(图 3)、西部

扩张明显,监测期内增加了 31.75 km²。纳木错的面积变化波动较大,在 2016—2019 年期间湖泊范围缩小了 78.54 km²。随后呈现出缓慢扩张的趋势,2019—2022 年湖泊面积增加了 74.30 km²。四个典型湖泊边界变化的季度变化呈现出相似的特征:湖泊面积从第二季度迅速增加,到第三或第四季度达到峰值,随后开始减小直到次年的第一季度降至最低值。

水位时间序列与面积变化特征一致(表 3),如阿牙克库木湖 2016 年第二季度水位为 3829.71 m,2022 年第三季度水位 3832.94 m,季节变化率为 +0.124 m/quar;色林错 2016 年第二季度水位 4504.79 m,2022 年第三季度水位 4507.24 m,季节变化率为 +0.094 m/quar;青海湖 2016 年第二季度水位 3143.83 m,2022 年第三季度 3146.05 m,水位季节变化率为 +0.085 m/quar;纳木错 2016 年第二季度水位 4685.11 m,2022 年第三季度为 4685.39 m,2016—2019 年水位趋于平稳,2020—2022 年缓慢上升,水位季节变化率为 +0.011 m/quar。综上,可以看出四个典型湖泊在监测期内水位整体均呈上升趋势。

3.2 卫星观测水位精度验证

为了更直观地比较不同数据来源的数值,将卫

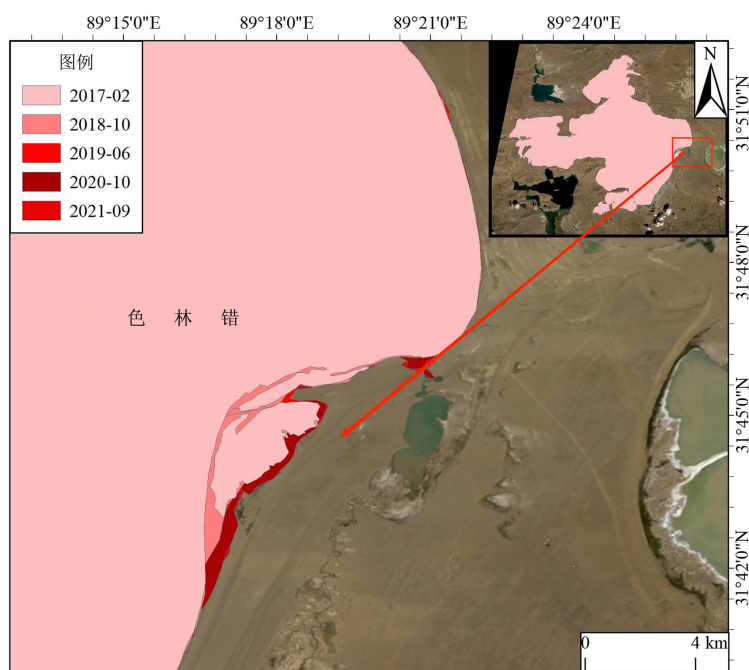


图 3 2017—2021 年色林错湖面范围变化

Fig. 3 Changes in the range of Selin Co cross water surface from 2017 to 2021

表 3 四个典型湖泊季度平均面积与水位一览表

Tab. 3 List of quarterly average area and water level of four typical lakes

年份	季度	阿牙克库木湖		色林错		青海湖		纳木错	
		面积/km ²	水位/m	面积/km ²	水位/m	面积/km ²	水位/m	面积/km ²	水位/m
2016	二	1048	3829.71	2381	4504.79	4543	3143.83	2045	4685.11
	三	941	3829.93	2376	4505.20	4613	3144.08	2043	4685.40
	四	1053	3830.48	2399	4504.86	4606.	3144.43	2046	4685.42
2017	一	994	3830.58	2348	4505.29	4592	3144.55	2015	4685.10
	二	1014	3830.37	2344	4505.23	4669	3144.28	2013	4685.04
	三	1034	3830.63	2352	4505.37	4671	3144.60	2019	4685.36
	四	1034	3831.04	2359	4505.66	4679	3144.75	2012	4685.28
2018	一	1034	3831.30	2349	4505.62	4683	3144.91	1979	4684.96
	二	1080	3830.84	2342	4505.40	4650	3144.75	1993	4684.92
	三	1035	3831.57	2374	4505.89	4693	3144.99	2011	4685.36
	四	1029	3832.09	2381	4506.26	4564	3145.42	2007	4685.30
2019	一	1064	3832.05	2420	4506.46	4643	3145.71	1966	4684.60
	二	1028	3832.04	2389	4506.29	4536	3145.37	1975	4684.95
	三	1066	3832.26	2360	4506.36	4536	3145.49	2020	4685.18
	四	1018	3832.51	2412	4506.23	4539	3145.61	2050	4685.33
2020	一	1092	3832.55	2408	4506.51	4575	3145.99	1976	4684.77
	二	1089	3832.40	2387	4506.50	4559	3145.82	2007	4685.11
	三	1096	3832.57	2438	4506.74	4607	3146.03	2020	4685.52
	四	1091	3832.64	2410	4506.84	4694	3146.14	2006	4685.37
2021	一	1078	3832.69	2397	4506.62	4734	3146.17	1996	4685.09
	二	1069	3832.56	2403	4506.53	4757	3146.04	2052	4685.03
	三	1083	3832.74	2429	4506.79	4787	3146.09	2006	4685.35
	四	1078	3832.71	2435	4507.13	4849	3146.10	2070	4685.52
2022	一	1139	3832.89	2471	4507.43	4875	3146.34	1979	4685.02
	二	1119	3832.69	2446	4507.16	4870	3145.89	2065	4685.28
	三	1141	3832.94	2412	4507.24	4852	3146.05	2049	4685.39

星测高同实测水位数据一样以每年年初的观测数值作为基准值,以变化量作趋势图(图 4)。图中显示了基于 Sentinel-3 卫星提取的纳木错水位与实测水位数据相比波动更显著,存在少数偏量,主要原因是:基于参考椭球面的地表高程由于卫星发射入轨位置在坐标轴方向上存在不确定性,使卫星测高数据出现绝对误差^[41],其次雷达高度计脉冲传播时间和速率受反射面地形起伏,大气干、湿分量等因素影响^[42],相较于利用浮标测得的实测水位波动更大。

因此,更应关注变化趋势的比较,结果表明,Sentinel-3 湖泊水位的总体变化趋势与实测水位的变化趋势一致,斜率分别为 +0.0187 和 +0.0154。

相关研究^[43]验证表明,DAHITI 水位与湖泊的水位实测数据有着良好的一致性。如图 5,除极少点数值波动较大,落入纳木错的 Sentinel-3 高程值与 DAHITI 水位值高度一致,特别是两种数据分别拟合出的整体变化趋势几乎完全吻合。综上所述,Sentinel-3 水位提取结果与实测数据及 DAHITI 水文

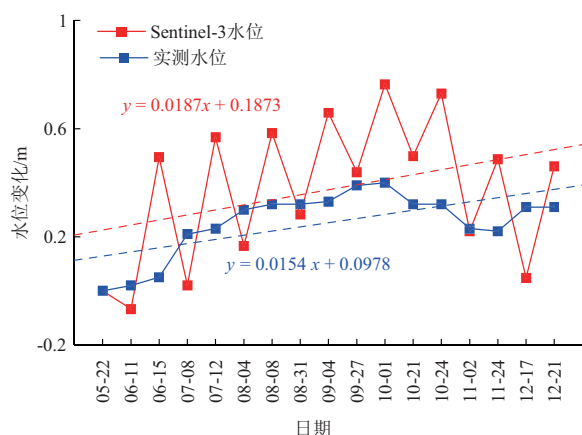


图4 2016年纳木错 Sentinel-3 卫星测高与实地观测数据的对比

Fig. 4 Comparison of altimeter and field observation data of 2016 from Sentinel-3 satellite in Namco

数据均具有较好的一致性证明了本研究提取湖泊水位的良好质量。

需要指出的是,由于本研究在提取湖泊面积和计算水位过程中仅使用 Sentinel-3 系列卫星的光学影像数据和测高数据,可能存在某个时间段内获取的数据稀疏甚至无法获取的情况,这将导致数据出现误差,若能够结合多种卫星数据进行交叉验证便可更好地提高准确度。此外,研究区中未能找到湖泊全面的水位和面积的实测数据,只可借助以往学者的数据集进行交叉验证,可能会存在些许误差,若能找到四个典型湖泊水文站的实测数据作对比便能使数据更严谨。同时,由于缺乏水深数据和精确的湖泊地形数据,也导致对整体水量及水量变化估算存在较大不确定性。

3.3 四个典型湖泊水位变化的周特征、月趋势

如前文所述,以阿牙克库木湖 2018 年 1 月 3 日高程数据为例,上四分位数、中位数、下四分位数分别为 3831.12、3831.23、3831.28,由此得到数据上下限阈值分别为 3831.53、3830.87。筛查异常值后,通过对落入四个典型湖泊范围内的有效高程点的高程值进行平均值计算,便可得到每周 1~2 次的湖泊水位信息。

逐周水位变化走势图显示出阿牙克库木湖与色林错一年中的最低水位出现在 4—5 月,从 5 月开始水位逐周上升趋势显著,直到 10 月上升至最高水位。青海湖整体升降幅度平缓,水位最小值同样出现在 5 月,最高水位出现在 10 月。纳木错一年中的最低水位出现在 2—3 月,随后水位逐周缓慢上升,9 月出现最高水位值,继而水位缓慢降低。综上,四个湖泊最低水位均出现在 3—5 月,最高水位均出现在 9—11 月,水位升降时间与年内整体趋势大致相同(图 6)。

对不同的湖泊水位分别减去不同的常数以更加直观地分析各湖泊水位的变化趋势(图 7)。此外, Sentinel-3 卫星虽于 2016 年 2 月发射,但 2 月和 3 月提供的水位数据稀疏,因此从 2016 年 4 月开始统计水位信息。四个典型湖泊在监测期内均持续上升。2016 年 4 月—2022 年 9 月期间,阿牙克库木湖的水位由 3829.60 m 上升到 3833.24 m,月平均变化率为 +0.046 m/mon。色林错和青海湖水位分别上升了 2.13 m 和 2.00 m,水位月平均变化率分别为 +0.032 m/mon 和 +0.030 m/mon。纳木错水位始

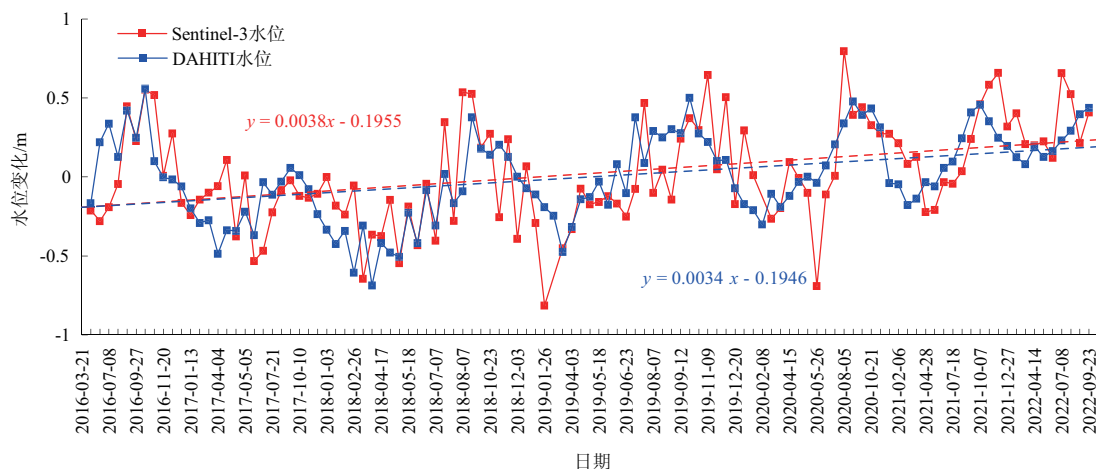


图5 纳木错 Sentinel-3 测高与 DAHITI 数据对比

Fig. 5 Comparison of Sentinel-3 altimeter and DAHITI data in Namco

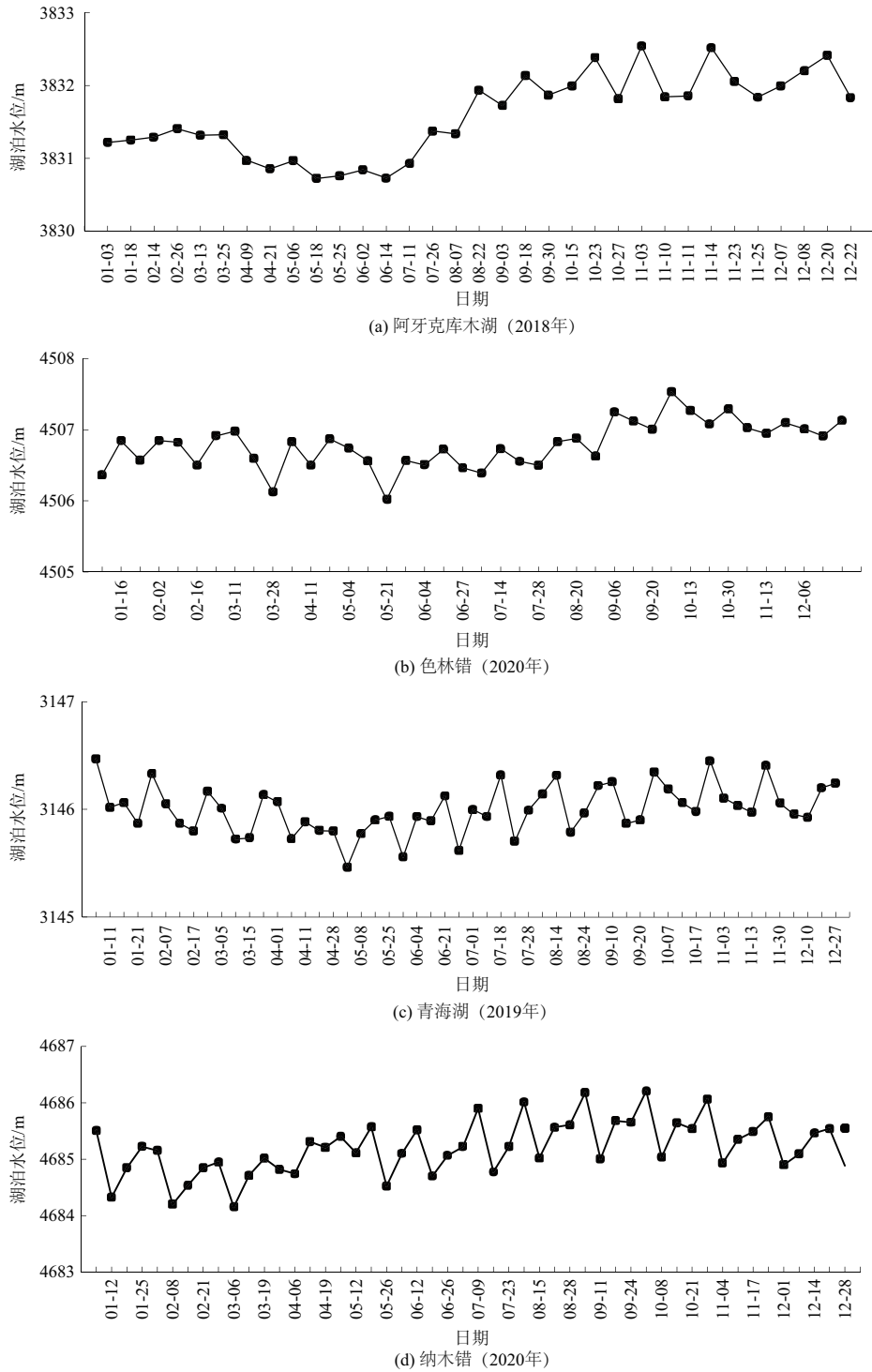


图 6 基于 Sentinel-3 测高数据获取的四个典型湖泊逐周水位变化

Fig. 6 Weekly water level changes in four typical lakes based on Sentinel-3 altimetry data

终在 4685.00 m 上下轻微浮动,月平均变化率 +0.005 m/mon,上升了 0.41 m。四个典型湖泊水位于 5 月底或 6 月初开始上升,9 月底至 10 月中旬期间出现峰值后大幅下降,直到 12 月底或翌年 1 月初湖面结冰。冰冻期间冰层覆盖使得水位趋于稳

定。于 3 月或 4 月湖面冰融化后湖面水位下降,直到夏季季开始,水位上升。

3.4 四个典型湖泊水量动态变化

如图 8 所示,阿牙克库木湖在监测期内年水量变化呈缓慢上升态势,其中 2016—2017 年变化量最

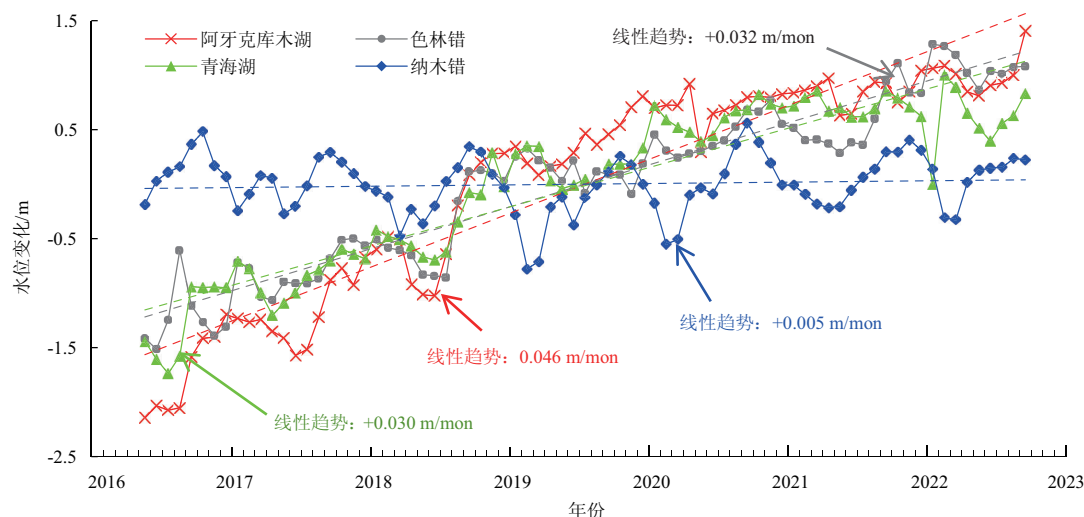


图7 基于 Sentinel-3 测高数据获取的四个湖泊监测期内月平均水位变化趋势

Fig. 7 Monthly average water level change trends of four lakes based on Sentinel-3 altimeter data

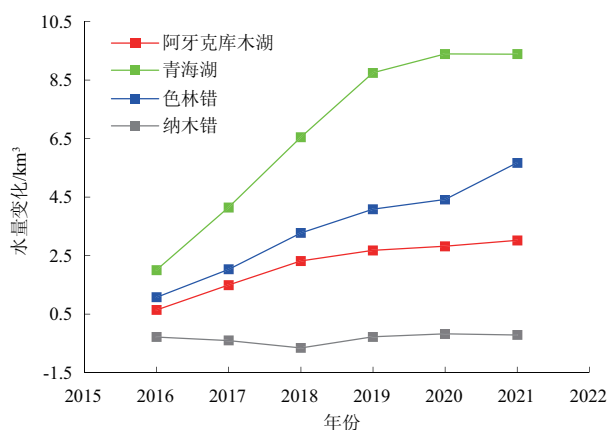


图8 基于水量经验公式估算的四个典型湖泊水量变化

Fig. 8 Estimation of water volume changes in four typical lakes based on empirical formula of water volume

大,水量增加 0.846 km^3 。色林错水量涨幅较大,2017—2018 年水量变化最大,增加 1.250 km^3 ,监测期内水量共增加了 4.599 km^3 。青海湖水量涨幅明显,2017—2018 年间水量增加 2.400 km^3 ,2020—2021 年间减少 0.006 km^3 ,共增加 7.381 km^3 。纳木错在监测期内水量变化趋于稳定,仅增加 0.072 km^3 。

4 讨论

4.1 与基于 DEM 的水量估算方法比较

为了更全面地评估利用 Sentinel-3 数据估算的水量变化结果,采用基于 DEM 等值化估算湖泊水量变化的方法进行校准^[44]。首先,提取 SRTM DEM

数据的湖面面积(A_{SRTM}),并计算在该海拔高度以上每升高 1 m 处对应的面积 $A_i (i = 1, 2, 3, \dots)$,运用水量变化经验公式计算湖面 A_{SRTM} 和 A_i 之间的体积,即当湖泊湖面 A_{SRTM} 升高 $i \text{ m}$ 时的水量变化量 V_i ,进而推导出一系列 (V_i, A_i) 数据对,建立起 V_i 与 A_i 之间的回归方程,据此可以推算出当湖泊扩张或收缩至某一特定面积时,其相对于湖面 A_{SRTM} 时的体积变化量。因此,将获得的湖泊在 t_1, t_2 时刻的湖面面积 A_{t1}, A_{t2} 代入到回归方程并取其差值,便得到湖泊在两个时点期间 $(t_1 - t_2)$ 的水量变化量 V_{t1}, V_{t2} 。

将基于 DEM 估算水量变化的方法和 Sentinel-3 卫星通过面积与水量拟合得到水量线性变化进行比较(图9),两者的变化趋势吻合,线性公式分别为 $0.0299x - 29.088$ 和 $0.0315x - 32.325$ 。

表4同样表明 Sentinel-3 估算水量结果和 DEM 方法有较高的一致性。不同验证方法共同证明了 Sentinel-3 估算湖泊水量的准确性以及使用 Sentinel-3 的水位和面积数据来监测并估算湖泊水量动态变化趋势的可行性。

4.2 降水日变化与湖泊水位的季节波动

无论是青藏高原湖泊水位的季节性、年际还是长期变化,都直接或间接地与降水、气温、风速等气候因素存在响应关系^[45]。四个典型湖泊均属于高山内陆湖,湖水的补给主要靠降雨和冰雪融水等地表径流,因此湖泊水位变化能明显反映出对应的降水量变化。正如目前学术界普遍认为的青藏高原大部分湖泊变化主要受制于降水因素的作用,反观冰

表 4 分别基于 Sentinel-3 与 DEM 进行的水量变化估算结果对比

Tab. 4 Comparison of water volume estimation results based on Sentinel-3 and DEM respectively

年份	季度	Sentinel-3 水量变化/km ³	DEM 水量变化/km ³
2019	一	—	—
	二	-1.15	-1.09
	三	1.19	1.13
	四	-1.50	-1.42
2020	一	2.34	2.23
	二	-0.09	-0.09
	三	0.20	0.19
	四	-0.14	-0.13

川融水只是起着重要的辅助作用^[10]。以阿牙克库木湖为例,将基于高时间分辨率的 Sentinel-3 水位周变化与湖泊周边降水量日变化(获取自茫崖气象站)进行对应关系分析,图 10 直观地展示了阿牙克库木湖水位周变化与降水日变化之间存在显著的对对应关系。通常每年 7 月底或 8 月初,降水逐渐达到峰值。此外,在丰水期湖泊水位变化相对于降水量日变化会有 1~2 天的滞后性,这是由于降水形成径流并最终补给湖泊会一定程度上产生时间差。值得注意的是,2020 年 5 月 5 日和 2021 年 4 月 22 日分别提前出现两次日降水量超过 20 mm 的特殊降雨事件直接导致了湖泊也随之更早地进入水位缓慢上

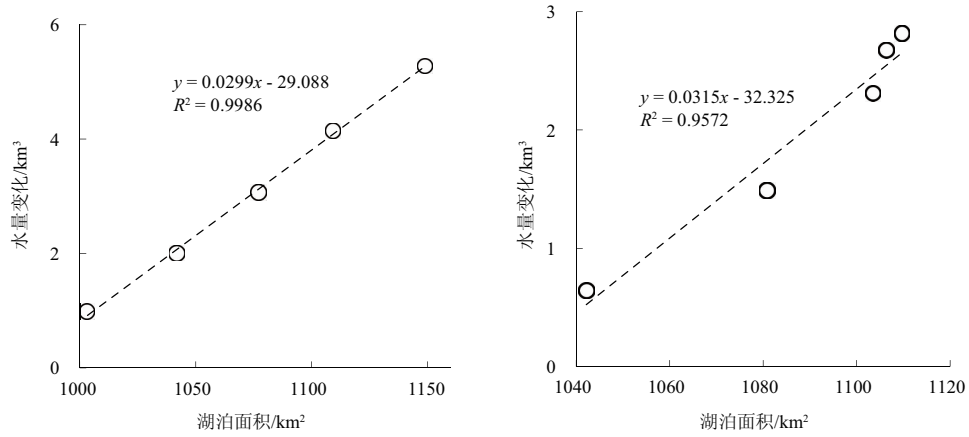


图 9 基于 DEM 和 Sentinel-3 的水量变化曲线比较

Fig. 9 Comparison of water volume change curves based on DEM and Sentinel-3

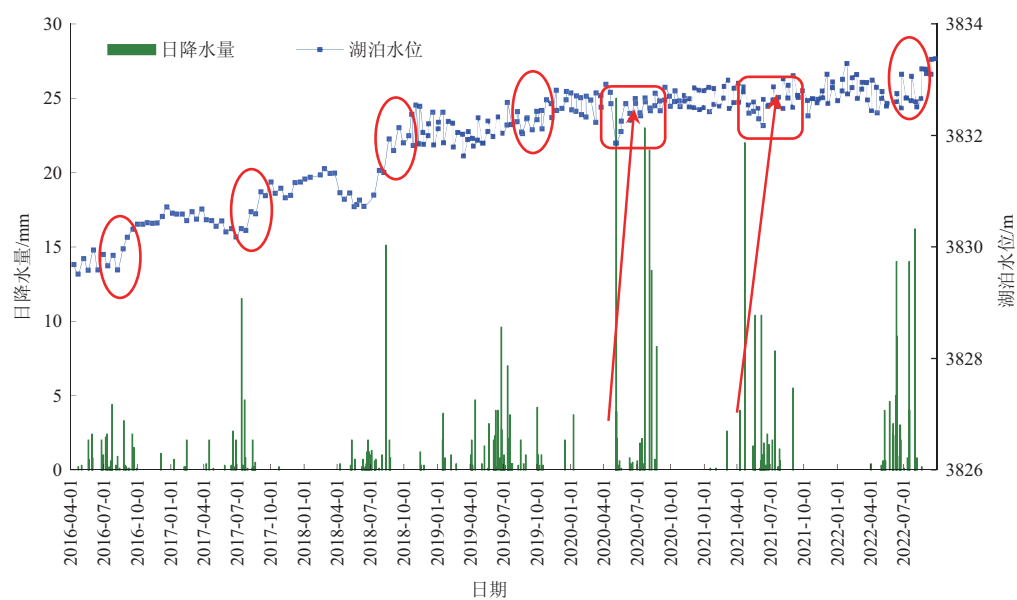


图 10 阿牙克库木湖降水日变化与湖泊水位变化的对比

Fig. 10 Comparison of daily precipitation changes and lake water level changes in Ayakkum lake

注:红色椭圆或矩形指示的是湖泊水位在短期内出现迅速升高现象。

升期。从监测期内的年际变化趋势来看,2016 年 4 月—2018 年 10 月期间湖泊水位明显上升,反观 2018 年 10 月—2020 年 5 月期间水位趋于稳定,与对应的年平均降水量变化特征是 2018 年为 34 mm,而 2019 年迅速增加至 77.7 mm。此类降水量特征持续到 2022 年,雨量充沛导致湖泊水位在此期间也稳定在高位。

综上,可以看出研究区降水量变化对湖泊水位的影响是直接而显著的,这也证明了降水量变化是青藏高原大部分湖泊水量变化的主要原因^[10]。更为具体的表象是,湖泊水位变化的季节特征与夏季风降水之间存在更好的对应关系。

5 结论

本研究结合 2016 年 4 月—2022 年 9 月的 Sentinel-3 SLSTR 光学影像以及 Sentinel-3 SRAL 雷达测高数据,监测了阿牙克库木湖、色林错、青海湖、纳木错四个青藏高原大型高山内陆湖泊的面积、水位和水量的变化,并通过与实测水位及与 DAHITI 水文产品对比分析,确认 Sentinel-3 雷达测高数据能够准确地反映高原大型湖泊水位的周际和月际变化特征。在此基础上,量化了湖泊水位波动对降水量变化的响应程度。

四个典型湖泊水位年内的季节变化规律一致。湖泊最低水位通常出现在第二季度,自 4 月底或 5 月初开始水位上升趋势明显,直到第四季度初期达到峰值。随后,水位缓慢降低,水位随着湖面冰融化,于翌年第二季度再次下降到年内最低值。总之,在夏季风季节(通常发生在第二季度末至第四季度初),湖泊水位上升明显,随后在非季风期下降。

(2)四个典型湖泊的水量变化在监测期内均呈增加趋势。其中阿牙克库木湖水量共增加 2.374 km³,色林错水量增加 4.599 km³,面积最大的青海湖水量涨幅最明显,特别是 2017—2018 年间水量增加 2.400 km³。纳木错水量整体趋于稳定,监测期内水量仅增加 0.072 km³。监测期内四个湖泊水量共增加了 14.426 km³。

(3)研究区降水量变化对湖泊水位的影响直接而显著,这也证明了降水量变化是青藏高原大部分湖泊水量变化的主要原因。以阿牙克库木湖为例,湖泊水位周变化与降水日变化之间存在显著的对应

关系,特别是在丰水期,湖泊水位变化相对于降水日变化存在 1~2 天的滞后性,这是由于降水形成径流并最终补给湖泊会一定程度上产生时间差。

参考文献(References)

- [1] 姚檀栋,陈发虎,崔鹏,等. 从青藏高原到第三极和泛第三极[J]. 中国科学院院刊, 2017, **32**(9): 924 - 931. [YAO Tandong, CHEN Fahu, CUI Peng, et al. From Tibetan Plateau to third pole and pan-third pole [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, **32**(9): 924 - 931] DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2017.09.001
- [2] PEKEL J F, COTTAM A, GORELICK N, et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes [J]. Nature, 2016, **540**: 418 - 437. DOI: 10.1038/nature20584
- [3] YAO Tandong, THOMPSON L, YANG Wei, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings [J]. Nature Climate Change, 2012, **2**(9): 663 - 667. DOI: 10.1038/NCLIMATE1580
- [4] ZHANG Qiang, LIU Chunling, XU Chongyu, et al. Observed trends of annual maximum water level and streamflow during past 130 years in the Yangtze River basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2006, **324**(1 - 4): 255 - 265. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.09.023
- [5] 乔程,骆剑承,盛永伟,等. 青藏高原湖泊古今变化的遥感分析——以达则错为例[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(1): 98 - 102. [QIAO Cheng, LUO Jiancheng, SHENG Yongwei, et al. Analysis on lake changes since ancient and modern ages using remote sensing in Dagze Co, Tibetan Plateau [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, **22**(1): 98 - 102] DOI: 10.18307/2010.0114
- [6] 施雅风. 山地冰川与湖泊萎缩所指示的亚洲中部气候干暖化趋势与未来展望[J]. 地理学报, 1990, **57**(1): 1 - 13. [SHI Yafeng. Glacier recession and lake shrinkage indicating the climatic warming and drying trend in central Asia [J]. Acta Geographica Sinica, 1990, **57**(1): 1 - 13] DOI: 10.11821/xb199001001
- [7] 陈军,刘延昭,曹立国,等. 青藏高原湖泊变化遥感监测及水量平衡定量估算研究进展[J]. 冰川冻土, 2022, **44**(4): 1203 - 1215. [CHEN Jun, LIU Yanzhao, CAO Ligu, et al. A review on the research of remote sensing monitoring of lake changes and quantitative estimation of lake water balance in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, **44**(4): 1203 - 1215] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0110
- [8] 孙赫,苏凤阁,黄敬恒,等. 第三极西风和季风主导流域源区降水呈现不同梯度特征[J]. 科学通报, 2020, **65**(1): 91 - 104. [SUN He, SU Fengge, HUANG Jingheng, et al. Contrasting precipitation gradient characteristics between westerlies and monsoon dominated upstream river basins in the Third Pole [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, **65**(1): 91 - 104] DOI: 10.1360/TB-2019-0491
- [9] 董斯扬,薛娟,尤全刚,等. 近 40 年青藏高原湖泊面积变化遥

- 感分析[J]. 湖泊科学, 2014, **26**(4): 535 – 544. [DONG Siyang, XUE Xian, YOU Quangang, et al. Remote sensing monitoring of the lake area changes in the Qinghai-Tibet Plateau in recent 40 years [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, **26**(4): 535 – 544] DOI: 10.18307/2014.0407
- [10] 朱立平, 张国庆, 杨瑞敏, 等. 青藏高原最近 40 年湖泊变化的主要表现与发展趋势[J]. 中国科学院院刊, 2019, **34**(11): 1254 – 1263. [ZHU Liping, ZHANG Guoqing, YANG Ruimin, et al. Lake variations on Tibetan Plateau of recent 40 years and future changing tendency [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, **34**(11): 1254 – 1263] DOI: 10.16418/j. issn. 1000 – 3045. 2019. 11. 008
- [11] 朱立平, 彭萍, 张国庆, 等. 全球变化下青藏高原湖泊在地表水循环中的作用[J]. 湖泊科学, 2020, **32**(3): 597 – 608. [ZHU Liping, PENG Ping, ZHANG Guoqing, et al. The role of Tibetan Plateau lakes in surface water cycle under global changes [J]. Journal of Lake Sciences, 2020, **32**(3): 597 – 608] DOI: 10.18307/2020.0301
- [12] BERRY P A M, GARLICK J D, FREEMAN J A, et al. Global inland water monitoring from multi-mission altimetry [J]. Geophysical Research Letters, 2005, **32**(16): L16401. DOI: 10.1029/2005GL022814
- [13] 陈军, 柯长青, 汪永丰. 南极拉森北部冰架表面物质损失机制探讨[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(3): 1117 – 1125. [CHEN Jun, KE Changqing, WANG Yongfeng. Study on the surface mass loss mechanism of the northern Larsen ice shelf [J]. China Environmental Science, 2018, **38**(3): 1117 – 1125] DOI: 10.19674/j. cnki. issn1000 – 6923. 2018. 0133
- [14] MA Ronghua, DUAN Hongtao, HU Chuanmin, et al. A half-century of changes in China's lakes: Global warming or human influence? [J]. Geophysical Research Letter, 2010, **37**(24): L24106. DOI: 10.1029/2010GL045514
- [15] CRETAUX J F, 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 [J]. Advances in Space Research, 2011, **47**(9): 1497 – 1507. DOI: 10.1016/j. asr. 2011. 01. 004
- [16] KLEINHERENBRINK M, LINDENBERGH R C, DITMAR P G. Monitoring of lake level changes on the Tibetan Plateau and Tian Shan by retracking Cryosat SARIn waveforms [J]. Journal of Hydrology, 2015, **521**: 119 – 131. DOI: 10.1016/j. jhydrol. 2014. 11. 063
- [17] CUMING I G, WONG H F. Digital processing of synthetic aperture radar data [J]. Boston: Artech House, 2005: 20 – 30.
- [18] JI Lei, ZHANG Li, WYLIE B. Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2009, **75**(11): 1307 – 1317. DOI: 10.14358/PERS. 75. 11. 1307
- [19] 罗竹, 刘凯, 张春亢, 等. DEM 在湖泊水文变化研究中的应用进展[J]. 地球信息科学学报, 2020, **22**(7): 1510 – 1521. [LUO Zhu, LIU Kai, ZHANG Chunkang, et al. Progress of the DEM application for studying lake hydrologic dynamics [J]. Journal of Geo-information Science, 2020, **22**(7): 1510 – 1521] DOI: 10.12082/dqxxkx. 2020. 190538
- [20] DUAN Zheng, BASTIAANSEN W G M. Estimating water volume variations in lakes and reservoirs from four operational satellite altimetry databases and satellite imagery data [J]. Remote Sensing of Environment, 2013, **134**: 403 – 416. DOI: 10.1016/j. rse. 2013. 03. 010
- [21] MEDINA C, GOMEZ-ENRI J, ALONSO J J, et al. Water volume variations in Lake Izabal (Guatemala) from in situ measurements and ENVISAT Radar Altimeter (RA-2) and Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR) data products [J]. Journal of Hydrology, 2010, **382**(1 – 4): 34 – 48. DOI: 10.1016/j. jhydrol. 2009. 12. 016
- [22] BAUP F, FRAPPART F, MAUBANT J. Combining high-resolution satellite images and altimetry to estimate the volume of small lakes [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, **18**(5): 2007 – 2020. DOI: 10.5194/hess – 18 – 2007 – 2014
- [23] 张洪源, 吴艳红, 刘衍君, 等. 近 20 年青海湖水量变化遥感分析[J]. 地理科学进展, 2018, **37**(6): 823 – 832. [ZHANG Hongyuan, WU Yanhong, LIU Yanjun, et al. Water storage variation of the Qinghai Lake in recent decades based on satellite observation [J]. Progress in Geography, 2018, **37**(6): 823 – 832] DOI: 10.18306/dlkxjz. 2018. 06. 009
- [24] 戴玉凤, 高杨, 张国庆, 等. 2003—2011 年青藏高原佩枯错相对水量变化及其对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2013, **35**(3): 723 – 732. [DAI Yufeng, GAO Yang, ZHANG Guoqing, et al. Water volume change of the Paiku Co in the southern Tibetan Plateau and its response to climate change in 2003 – 2011 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, **35**(3): 723 – 732] DOI: 10.7522/j. issn. 1000 – 0240. 2013. 0082
- [25] 王文种, 黄对, 刘九夫, 等. 基于 Landsat 与 Sentinel-3A 卫星数据的当惹雍错 1988—2018 年湖泊水位—水量变化及归因[J]. 湖泊科学, 2020, **32**(5): 1552 – 1563. [WANG Wenzhong, HUANG Dui, LIU Jiufu, et al. Patterns and causes of changes in water level and volume in Tangra Yumco from 1988 to 2018 based on Landsat images and Sentinel-3A synthetic aperture radar [J]. Journal of Lake Sciences, 2020, **32**(5): 1552 – 1563] DOI: 10.18307/2020.0526
- [26] 黄对, 王文种, 刘九夫, 等. 基于 Sentinel-3A SRAL 2 级产品的鄱阳湖水位评估与校准[J]. 水利水运工程学报, 2022(4): 1 – 10. [HUANG Dui, WANG Wenzhong, LIU Jiufu, et al. Evaluation and calibration of Sentinel-3A SRAL Level 2 product over Poyang Lake [J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(4): 1 – 10] DOI: 10.12170/20210616005
- [27] 娄燕寒, 廖静娟, 陈嘉明. Sentinel-3A 卫星测高数据监测长江中下游河流水位变化[J]. 自然资源遥感, 2023, **35**(3): 221 – 229. [LOU Yanhan, LIAO Jingjuan, CHEN Jiaming. Monitoring water level changes in the middle and lower reaches of

- the Yangtze River using Sentinel-3A satellite altimetry data [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, **35**(3): 221–229] DOI: 10.6046/zrzyyg.2022239
- [28] ZHANG Guoqing, LUO Wei, CHEN Wenfeng, et al. A robust but variable lake expansion on the Tibetan Plateau [J]. Science Bulletin, 2019, **64**(18): 1306–1309. DOI: 10.1016/j.scib.2019.07.018
- [29] 边多, 边巴次仁, 拉巴, 等. 1975—2008 年西藏色林错湖面变化对气候变化的响应[J]. 地理学报, 2010, **65**(3): 313–319. [BIAN Duo, BIAN Baciren, LA Ba, et al. The response of water level of Selin Co to climate change during 1975–2008 [J]. Acta Geographica Sinica, 2010, **65**(3): 313–319] DOI: 10.11821/xb201003006
- [30] COPPO P, RICCIARELLI B, BRANDANI F, et al. SLSTR: A high accuracy dual scan temperature radiometer for sea and land surface monitoring from space [J]. Journal of Modern Optics, 2010, **57**(18): 1815–1830. DOI: 10.1080/09500340.2010.503010
- [31] GAO Q, MAKHOUL E, ESCORIHUELA M, et al. Analysis of retracker's performances and water level retrieval over the Ebro river basin using sentinel-3 [J]. Remote Sensing, 2019, **11**(6): 718. DOI: 10.3390/rs11060718.
- [32] DENG Xiaoli, FEATHERSTONE W E. A coastal retracking system for satellite radar altimeter waveforms: Application to ERS-2 around Australia [J]. Journal of Geophysical Research, 2006, **111**(6): C06012. DOI: 10.1029/2005JC003039
- [33] RABUS B, EINEDER M, ROTH A, et al. The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2003, **57**: 241–262. DOI: 10.1016/S0924–2716(02)00124–7
- [34] 雷道, 柯灵红, 雍斌, 等. 卫星雷达测高水位数据产品在中国区河流的监测精度评价[J]. 遥感技术与应用, 2022, **37**(1): 61–72. [LEI Xiao, KE Linghong, YONG Bin, et al. Evaluation of river water level monitoring from satellite radar altimetry datasets over Chinese rivers [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, **37**(1): 61–72] DOI: 10.11873/j.issn.1004–0323.2022.1.0061
- [35] 何云, 黄翀, 李贺, 等. 基于 Sentinel-2A 影像特征优选的随机森林土地覆盖分类[J]. 资源科学, 2019, **41**(5): 992–1001. [HE Yun, HUANG Chong, LI He, et al. Land-cover classification of random forest based on Sentinel-2A image feature optimization [J]. Resources Science, 2019, **41**(5): 992–1001] DOI: 10.18402/resci.2019.05.15
- [36] 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[J]. 遥感学报, 2005, **9**(5): 589–595. [XU Hanqiu. A study on information extraction of water body with the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) [J]. Journal of Remote Sensing, 2005, **9**(5): 589–595] DOI: 10.3321/j.issn:1007–4619.2005.05.012
- [37] 周鹏, 丁建丽, 王飞, 等. 植被覆盖地表土壤水分遥感反演[J]. 遥感学报, 2010, **14**(5): 959–973. [ZHOU Peng, DING Jianli, WANG Fei, et al. Retrieval methods of soil water content in vegetation covering areas based on multi-source remote sensing data [J]. Journal of Remote Sensing, 2010, **14**(5): 959–973] DOI: 10.11834/jrs.20100510
- [38] LI Junpeng, HUA Changchun, YANG Yana, et al. Bayesian block structure sparse based T–S fuzzy modeling for dynamic prediction of hot metal silicon content in the blast furnace [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, **65**(6): 4933–4942. DOI: 10.1109/TIE.2017.2772141
- [39] 张国庆. 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[J]. 地理科学进展, 2018, **37**(2): 214–223. [ZHANG Guoqing. Changes in lakes on the Tibetan Plateau observed from satellite data and their responses to climate variations [J]. Progress in Geography, 2018, **37**(2): 214–223] DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.02.004
- [40] CAEL B B, HEATHCOTE A J, SEEKELL D A. The volume and mean depth of Earth's lakes [J]. Geophysical Research Letters, 2017, **44**(1): 209–218. DOI: 10.1002/2016GL071378
- [41] 王萌, 马冠一, 马利华, 等. 卫星定位误差椭球的几何特征研究[J]. 宇航学报, 2012, **33**(11): 1593–1600. [WANG Meng, MA Guanyi, MA Lihua, et al. A study on geometric feature of error ellipsoid in satellite positioning systems [J]. Journal of Astronautics, 2012, **33**(11): 1593–1600] DOI: 10.3873/j.issn.1000 1328.2012.11.006
- [42] 杨磊, 周兴华, 徐全军, 等. 卫星高度计定标现状[J]. 遥感学报, 2019, **23**(3): 392–407. [YANG Lei, ZHOU Xinghua, XU Quanjun, et al. Research status of satellite altimeter calibration [J]. Journal of Remote Sensing, 2019, **23**(3): 392–407] DOI: 10.11834/jrs.20198262
- [43] SCHWATKE C, DETTMERING D, BOSCH W, et al. DAHITI—an innovative approach for estimating water level time series over inland waters using multi-mission satellite altimetry [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, **19**(10): 4345–4364. DOI: 10.5194/hess–19–4345–2015
- [44] YANG Ruimin, ZHU Liping, WANG Junbo, et al. Spatiotemporal variations in volume of closed lakes on the Tibetan Plateau and their climatic responses from 1976 to 2013 [J]. Climatic Change, 2017, **140**(3–4): 621–633. DOI: 10.1007/s10584–016–1877–9
- [45] BUERMANN W, ANDERSON B, TUCKER C J, et al. Interannual covariability in Northern Hemisphere air temperatures and greenness associated with El Niño–Southern Oscillation and the Arctic Oscillation [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, **108**(D13): 4396. DOI: 10.1029/2002JD002630

Estimation of Water Volume Changes in Typical Alpine Lakes on the Tibetan Plateau by Combining Sentinel-3 Radar Altimetry Data and Optical Images

CHEN Jun, GAO Jingxiao, WANG Yongfeng, JIN Lu

(*a. School of Environmental and Energy Engineering; b. Anhui Smart City Engineering Technology Research Center, Anhui Jianzhu University, Hefei 230000, China*)

Abstract: Lakes in the Qinghai-Tibet Plateau are highly sensitive to climate fluctuations, and dynamic monitoring of the lakes' changes provides crucial evidences for regional and even global climate research. Most of the lakes had little field observation record due to traffic inaccessibility in the Plateau. Some academic comments on the changes of lakes in the Plateau were based on remote sensing; data such as lake water level and area generally referred to multiple satellites, and there was remarkable temporal deviation between the data, for example, temporal disagreement between measured water levels and lake areas.

In this study, Sentinel-3 SRAL (SAR Radar Altimeter) radar altimetry data and Sentinel-3 SLSTR (Sea and Land Surface Temperature Radiometer) optical images collected by the same satellite were used to detect the water level and area changes of four large lakes, i. e. the Ayakkumu Lake, the Selinco Lake, the Qinghai Lake and the Namco Lake in the Qinghai-Tibet Plateau from April 2016 to September 2022. By comparison in-situ water level measurements with DAHITI data (Database for Hydrological Time Series of Inland Waters), it confirmed that Sentinel-3 radar altimetry could accurately capture weekly and monthly lake level fluctuations.

(1) A consistent annual rise in water levels took place during the monitoring period at the four lakes, rising by 3.01 m, 2.04 m, 1.62 m, and 0.28 m, respectively. Seasonal changes in the area and water level of the four lakes were generally characterized by a significant increase in the lake surface during summer monsoon periods and a gradual decrease during non-monsoon periods. (2) Lake levels were the lowest in the second quarter and rose to peak levels at the end of the third and beginning of the fourth quarter. The water volumes of the four lakes displayed different increases during the monitoring period, among which the Qinghai Lake got the largest rise of 7.381 km³ but the Namco Lake changed the least at only 0.072 km³. (3) Comparing the linear trend of water volumes fitted by DEM estimation and obtained by empirical formula, respectively, it justified the accuracy of lake water volume estimation based on Sentinel-3 data. (4) Further, taking the Lake Ayakkumu as an example, it was demonstrated that there was correspondence between the weekly change of its water level and the daily change of precipitation, proving that precipitation was the main influencing factor on the change of water level in the lake.

Based on the advantages of Sentinel-3, which produced a synchrony of optical images and radar altimetry data, i. e., exact consistency between extraction of lake water level/area and time, it avoided result uncertainty caused by time delay of using multiple satellite data combinations, and provided a unique data resource for in-depth analysis of water resources balance in the Qinghai-Tibetan Plateau.

Key words: Sentinel-3; radar altimetry; optical image; lake water level; the Qinghai-Tibet Plateau

(责任编辑 钟雨倩)