

基于卫星测高和实测数据的博斯腾湖水位变化分析

吴红波^{1,4}, 王宁练^{2,3,4}

(1. 陕西理工大学 地理科学系, 陕西 汉中 723000; 2. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 陕西 西安 710127; 3. 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127; 4. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101)

摘要: 湖泊水位是湖泊水文观测必不可缺的要素,直接关系到湖泊物质交换和能量平衡,对研究湖泊运动和区域气候环境变化至关重要。为了掌握内陆湖泊水位的变化过程和空间特征,以新疆博斯腾湖为例,综合 Jason-1&2、ENVISat&ERS、ICESat-1、ICESat-2 等卫星测高资料,提取博斯腾湖湖泊水域瞬时水位和日均水位,并根据 Hydroweb 水位记录和 1975-2020 年博斯腾湖湖泊水位观测及水域面积数据,检验 Jason-1&2、ENVISat&ERS、ICESat-1、ICESat-2 测高数据的估计精度。借助趋势面分析方法,分析博斯腾湖水域水位变化的空间差异和特征。结果表明:Hydroweb 水位记录、Jason-1&2、ENVISat&ERS、ICESat-1、ICESat-2 卫星资料估计湖泊日均水位的绝对误差分别为 0.24、0.34、0.28、0.18、0.08 m;2020 年博斯腾湖年均水位为 $1\,048.10 \pm 0.12$ m,与 1975 年年均水位相比增加了 0.70 ± 0.15 m;湖泊瞬时水位在空间尺度上存在一定水位差,ICESat-2 测高数据能准确地描述博斯腾湖水域表面高程和水位变化速率的空间异质性。

关键词: 湖泊水位; 湖泊水文特征; 卫星测高; 趋势面分析; 空间异质性; 博斯腾湖

中图分类号: P343.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)01-0010-10

Analysis of Bosten Lake water level change based on satellite altimetry and measured data

WU Hongbo^{1,4}, WANG Ninglian^{2,3,4}

(1. Department of Geographical Science, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China; 2. Shaanxi Key of Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, China; 3. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China; 4. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The lake water level is an important element of lake hydrological observation, which directly reflects the mass exchange and energy balance of the lake. Moreover, the analysis of lake water level is vital to the study of lake movement and regional climate and environmental change. In order to grasp the change process and spatial characteristics of the water level of inland lakes, both instantaneous and daily mean water level of Xinjiang Bosten Lake were extracted from Jason-1&2, ENVISat&ERS, ICESat-1 and ICESat-2 satellite altimetry data, which were then compared with the water level record of Hydroweb and the measured data of water level and water extent area of Bosten Lake from 1975 to 2020 to ascertain the estimation accuracy of the satellite altimetry data. Furthermore, the trend-surface analysis was used to analyze the spatial difference and characteristics of water level change in Bosten Lake. The results showed that the absolute error of the daily mean lake water level of the Hydroweb water level record, Jason-1&2, ENVISat&ERS, ICESat-1, ICESat-2 satellite altimetry data was 0.24, 0.34, 0.28, 0.18 and 0.08 m, respectively. The annual mean water level of Bosten Lake in 2020 reached $1\,048.1 \pm 0.12$ m, which had an increase of 0.70 ± 0.15 m, compared with that in 1975. The fluctuation of instantane-

收稿日期: 2021-09-27; 修回日期: 2022-09-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(42130516、41601067); 中国博士后科学基金项目(2017M611011); 陕西理工大学人才启动项目(SLGQD16-09)

作者简介: 吴红波(1984-),男,河北栾城人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事冰雪遥感与水资源研究。

通讯作者: 王宁练(1966-),男,陕西兴平人,博士,教授,博士生导师,主要从事冰冻圈与全球变化研究。

ous water level showed that there was a water level difference on the spatial scale, and ICESat - 2 satellite altimetry data accurately described the spatial heterogeneity of lake water surface elevation and change rate of Bosten Lake.

Key words: lake water level; hydrological characteristic of lake; satellite altimetry; trend-surface analysis; spatial heterogeneity; the Bosten Lake

1 研究背景

湖泊水位、水域面积和水量变化是湖泊水文观测的重要参数,湖泊水不仅关系到陆地水循环过程和驱动力,也是揭示区域气候变化与反馈的主要载体^[1]。20 世纪以来,全球气候变暖,极端气候系统活跃,多种自然灾害频发^[2]。20 世纪 80 年代,我国西北内陆地区气候由暖干向暖湿转变^[3],降水量增加,内陆湖泊作为水循环的重要组成部分,湖泊水位、水域面积和水量变化更加受到水资源和气候变化研究者的关注^[4]。湖泊水位变化受自然气候以及人类活动的共同作用,湖泊水域面积和水量会发生一系列变化,既存在一些确定性和相似性的规律,也表现出一定的随机性和异常现象。为此,在全球气候变化的背景下,地处我国西北地区的博斯腾湖成为研究内陆湖泊自然气候变化和人为作用较为理想的场所。

目前,湖泊、河流、水库、沼泽等地表水体的水文要素时空变化数据是评估全球水文循环过程的关键依据^[5]。定点观测和水文调查方法仍是获取湖泊水文数据的主要手段,但这些方法不仅时效性差,而且成本较高,难以描述湖泊水位、面积、水量的时空变化特征。1960 年以来,卫星测高 (satellite altimetry) 利用卫星、航天飞机等运载工具携带的合成孔径雷达^[6]、激光测高仪、微波辐射计、雷达散射计和红外辐射计等测定搭载平台到陆地表面、瞬时海平面、湖水面、水库表面等垂直距离的技术和方法,已逐渐成为观测地表水体水位变化的重要手段^[7],该方法不仅在数据质量^[8]、覆盖范围、观测时长和时效性等^[9]方面具有较大潜力^[10],其数据存量也在呈海量级倍增^[11]。Jason - 1、Jason - 2、ENVISat&ERS、ICESat - 1、ICESat - 2、CryoSat - 2、国产高分卫星等在湖泊及水库水位的变化估计^[12]、数据精度验证、误差分析等^[13]方面已有成果报道^[14]。Nielsen 等^[15]在加拿大和美国 100 多个湖泊验证了 ICESat - 2 卫星测高数据的估测精度,得出估算水位的均方根误差均值为 25 cm,其中,湖冰厚度会引起水位变化的较大偏差。李玉焦等^[16]结合 1960 - 2018 年博斯腾湖水位、出入湖水量以及气象站点实测资料,采用集合经验模态分解、水

量平衡和气候弹性求解方法,详细分析了博斯腾湖水位的变化特征及其影响因素。彭妍菲等^[17]利用多时相光学卫星影像提取博斯腾湖湖泊水域面积时变序列,阐述了湖岸线变化的空间特征与差异。王杰等^[18]利用博斯腾湖 1956 - 2008 年实测水位、入湖水量资料,分析了入湖水量与博斯腾湖水位的变化关系,并指出博斯腾湖水位的变化主要影响因素为汛期入湖水量。总体上,已有的研究方法可借助湖泊水位 - 水域面积 - 水量变化相关关系^[19],为湖泊水文过程提供湖泊水位、面积、水量波动的时变序列和数据源,但这些方法忽视了博斯腾湖湖区水面高程变化特征和空间异质性。

为了描述博斯腾湖湖区的水位时变特征和空间差异,本文联合 Jason - 1&2、ENVISat&ERS、ICESat - 1、ICESat - 2 卫星测高数据以及 Hydroweb 水位记录和水文站观测资料,分析了 1975 - 2020 年博斯腾湖湖泊水域的日均水位和年均水位的时变特征;并借助趋势面分析和 ICESat - 1、ICESat - 2 卫星测高数据,重构博斯腾湖水域表面高程和水位变化特征,以探讨博斯腾湖湖区水面高程变化的空间差异,其结果可为湖泊演变、湖泊水情、湖水运动和水动力学特性研究提供理论参考和技术支持。

2 研究区概况及数据来源

2.1 研究区概况

博斯腾湖位于新疆维吾尔自治区博湖县,地理范围为 45°56'N ~ 42°14'N、86°40'E ~ 87°56'E,博斯腾湖湖水补给主要来自开都河、清水河、黄水沟上游的冰雪融水和山区地表径流,湖泊出水补给孔雀河。博斯腾湖流域集水面积为 $2.7 \times 10^4 \text{ km}^2$,地表总径流量为 $40 \times 10^8 \text{ m}^3$,气温年差较大,蒸发量大,平原地区降水量少。流域内山地冰川面积为 332.89 km^2 ,冰川共计 700 条^[20]。博斯腾湖流域概况及卫星测高数据分布如图 1 所示。

2.2 数据来源

(1) ICESat - 1&2 卫星数据。利用 2003 年 10 月 22 日至 2009 年 10 月 11 日 ICESat - 1/GLAS (Geoscience Laser Altimeter System) 地球科学激光测高系统的 GLA01 和 GLA14 产品,提取湖泊瞬时水

位变化数据。GLA01 和 GLA14 产品格式为 HDF5.0,数据发布版本分别为 V33 和 V34,从美国国家冰雪数据中心 (National Snow and Ice Data Center, NSIDC) 官方网站 (URL: <https://search.earthdata.nasa.gov/search>) 下载。利用 GLA01 产品中的激光脉冲的光电压、反射率、回波峰等参数可剔除云层干扰、水面反射异常值,并可与 GLA14 产品中激光光斑的脚点经度、纬度、高程等参数有效匹配。博斯腾湖湖区、沼泽区和湿地地区可使用的有效 ICESat - 1/GLAS 光斑共计2 845个(详见表1),其中湖区有效

ICESat - 1/GLAS 光斑为 2 743 个

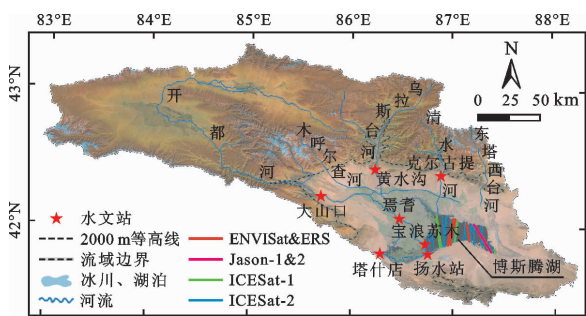


图1 博斯腾湖流域概况及卫星测高数据分布

表1 2003 - 2009 年博斯腾湖湖区有效 ICESat - 1/GLAS 光斑汇总

过境日期/ (年-月-日)	光斑 数量	标准偏差/ m	过境日期/ (年-月-日)	光斑 数量	标准偏差/ m	过境日期/ (年-月-日)	光斑 数量	标准偏差/ m
2003-10-22	11	0.20	2005-05-31	90	0.07	2007-04-11	106	0.25
2003-10-27	91	0.18	2005-05-26	12	0.21	2007-10-08	15	0.09
2003-11-16	147	0.15	2005-05-31	90	0.03	2007-10-13	93	0.18
2004-02-23	15	0.03	2005-10-27	13	0.24	2007-11-02	148	0.18
2004-02-27	91	0.04	2005-11-01	91	0.03	2008-02-23	10	0.09
2004-03-19	50	0.12	2005-11-21	101	0.05	2008-02-27	96	0.09
2004-05-24	22	0.03	2006-02-28	19	0.36	2008-03-19	32	0.27
2004-05-28	48	0.07	2006-03-04	99	0.03	2008-10-10	18	0.11
2004-06-18	42	0.09	2006-03-25	126	0.26	2008-10-14	91	0.08
2004-10-10	21	0.24	2006-05-30	20	0.14	2008-12-15	57	0.19
2004-10-14	87	0.26	2006-06-03	88	0.15	2009-03-14	20	0.06
2004-11-04	117	0.24	2006-06-24	96	0.13	2009-03-19	5	0.32
2005-02-24	15	0.17	2006-10-31	21	0.12	2009-04-08	117	0.14
2005-03-01	87	0.06	2006-11-04	88	0.31	2009-10-06	19	0.20
2005-03-21	100	0.12	2007-03-17	3	0.21	2009-10-11	90	0.15
2005-05-26	12	0.17	2007-03-22	15	0.03	合计	2845	

ICESat - 2 卫星于 2018 年 9 月 15 日在美国范登堡空军基地发射成功,搭载在 ICESat - 2 上的先进地形激光高度计系统(Advanced Topographic Laser Altimeter System, ATLAS)采用绿色波段 532 nm 处激光脉冲和单光子敏感探测器来测量地表空间三维信息^[21]。ATLAS 高度计系统使用 3 对光束(6 束),每对轨道之间间隔约为 3 km,间距约为 90 m,每束脉冲在地表形成的光斑直径为 17 m,沿轨道采样间隔距离为 0.7 m。ATLAS 高度计系统每秒向地表发射 10 000 个激光脉冲,其发射的激光脉冲仅需要 3.3 ms 即可到达地球并返回。ATL13 产品可用于湖泊、河流、水库、滩涂、坑塘等水体的水位估计^[22],其

数据来源于美国国家冰雪数据中心(NSIDC)官方网站 (URL: <https://search.earthdata.nasa.gov/search>),数据发布版本为 V005,文中采用 2018 年 10 月 14 日 - 2020 年 11 月 10 日期间 ATL13 产品中的 6 束激光脉冲提取博斯腾湖湖区内水面高程,有效光斑共计 117 355 个(见表 2)。

(2)其他测高数据。法国国家空间研究中心(National Centre for Space Studies, CNES)和美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)联合研制了 Jason - 1 (2001 - 2013 年)、Jason - 2 (2008 年 6 月 20 日运行至今)、Jason - 3 (2016 年 1 月 17 日运行至今)海洋地形卫

星系列,其搭载的高度计主要用于测量近海区地形地貌和海平面的变化,利用这些数据可保证卫星观测数据的连续性。另外,欧洲航天局的 ERS-1 (1991-2000 年)和 ERS-2(1995-2011 年)、ENVISat(2002-2012 年)、Jason-1&2(2002 年 1 月至 2010 年 12 月)卫星在博斯腾湖水面上有持续性的观测数据,卫星航迹在湖区水域分布如图 1 所示。

(3)水文观测资料。1975-2020 年大山口、焉耆水文站的年径流量、年引水量和扬水站、宝浪苏木水

文站的观测资料来源于水利部信息中心 (URL: <http://xxzx.mwr.gov.cn/>);湖区水域面积年际变化数据来自《新疆水资源公报》和新疆维吾尔自治区水利厅相关公报;2002-2020 年期间博斯腾湖 Hydroweb 水位记录数据来源于法国空间地球物理和海洋学研究实验室 (Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales, LEGOS),水位观测日期、日均水位和偏差等数据通过 LEGOS 实验室网站 (URL: <https://hydroweb.theia-land.fr/>) 获取。

表 2 2018-2020 年博斯腾湖湖区 ATLAS 有效光斑汇总

过境日期/ (年-月-日)	光斑 数量	标准偏差/ m	过境日期/ (年-月-日)	光斑 数量	标准偏差/ m	过境日期/ (年-月-日)	光斑 数量	标准偏差/ m
2018-10-14	1839	0.17	2019-06-13	2136	0.05	2020-04-07	318	0.02
2018-11-12	9105	0.05	2019-08-10	171	0.03	2020-04-09	3679	0.04
2018-11-14	696	0.05	2019-08-11	996	0.06	2020-05-08	335	0.01
2018-12-11	13005	0.08	2019-09-09	2773	0.05	2020-05-10	2019	0.03
2018-12-13	18525	0.04	2019-09-12	9292	0.06	2020-05-12	866	0.06
2019-01-13	108	0.03	2019-10-08	285	0.03	2020-09-09	500	0.02
2019-02-11	5403	0.03	2019-10-11	2621	0.09	2020-07-11	130	0.05
2019-02-13	2069	0.13	2019-11-13	1850	0.07	2020-08-07	662	0.04
2019-03-14	2463	0.03	2019-12-09	2263	0.06	2020-08-08	2687	0.08
2019-04-12	8	0.02	2020-01-09	1657	0.04	2020-09-07	6	0.03
2019-04-14	1377	0.05	2020-01-11	4566	0.08	2020-09-09	500	0.02
2019-05-11	184	0.02	2020-02-07	1215	0.06	2020-10-08	4422	0.04
2019-05-12	1		2020-02-09	5807	0.07	2020-11-07	2935	0.09
2019-05-15	289	0.14	2020-03-09	23	0.31	2020-11-10	2629	0.28
2019-06-10	3726	0.04	2020-03-11	1214	0.03	合计	117355	

3 研究方法

3.1 湖泊水位估计

考虑到地球物理校正方法,由星载测高计光电信号获取的地表高程 H_{gc} (m) 的估计式为:

$$H_{gc} = H_p - H_{OL} - H_{OPT} - H_{SEPT} - H_{SET} - H_{TCA} \quad (1)$$

式中: H_p 为光子脉冲的发射高度; H_{OL} 为海洋载荷变形; H_{OPT} 为海洋平衡极潮; H_{SEPT} 为固体潮; H_{SET} 为固体的地球潮汐; H_{TCA} 为大气延迟。

3.2 湖泊瞬时水位修正

ICESat-1、ICESat-2、ENVISat&ERS 和 Jason-1&2 等测高卫星所参考的地球椭球面、地球重力场变化、潮汐潮和测高仪器光敏性衰减等因素均会引起瞬时水位的估计偏差。为此,采用线性拟合方式

修正系统性偏差,即在某一时刻 t_i ,湖泊瞬时水位修正值 $\hat{H}_{lake}$ 为:

$$\hat{H}_{lake} = a \cdot H_{gc,lake} + b \quad (2)$$

式中: $H_{gc,lake}$ 为在地球重力场模型 EGM2008 (Earth Gravitational Model 2008) 下的湖泊水面高程^[23], m; a 为斜率; b 为某一时期的偏移常数^[24], m。TOPEX/Poseidon、Jason-1、Jason-2、ENVISat&ERS、ICESat-1/GLAS、ICESat-2/ATLAS 测高数据的高度偏移斜率 a 分别为 0.16 ± 0.10 、 0.52 ± 0.17 、 0.39 ± 0.62 、 0.60 ± 0.04 、 0.19 ± 0.22 、 0.08 ± 0.03 cm/a。

3.3 湖泊平均水位估计

当测高卫星过境时,测高系统记录的湖泊水面高程实则为湖区水域表面高度的轮廓线^[25],一般呈抛物线、折线或者波浪状曲线;湖水在重力、风力、地转偏向

力、引力潮等外力作用下,湖水表面存在着重力流、风涌水、定振波等现象,因而,计算湖面平均水位时,应先剔除异常极值^[26],湖泊平均水位估算公式如下:

$$\bar{H}_{\text{lake}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{H}_{\text{lake}} \quad (3)$$

式中: $\bar{H}_{\text{lake}}$ 为某一时段湖泊平均水位的估计值, m; n 为沿着卫星升(降)轨道上的湖面光斑总数。

在任一时段 $T_{t_{i+1}-t_i}$ 内, 湖泊平均水位的变化值 ΔH 为:

$$\Delta H = \bar{H}_{\text{lake}, t_{i+1}} - \bar{H}_{\text{lake}, t_i} \quad (4)$$

式中: $\bar{H}_{\text{lake}, t_{i+1}}$ 为第 t_{i+1} 时刻的湖面平均水位, m; $\bar{H}_{\text{lake}, t_i}$ 为第 t_i 时刻的湖面平均水位, m。

3.4 湖泊水面高程趋势面分析

趋势面分析能够描述湖泊水面高程的空间变化特征和变率, 该方法基于一元或者多元回归分析, 运用最小二乘法模拟某一个或者多个地理要素在空间上的分布规律和变化率^[27], 地理要素在空间尺度上可以是线性也可以是非线性的。设卫星观测的湖泊某一区域瞬时水位值为 $z_i(x_i, y_i)$, 空间上瞬时水位的趋势面拟合值为 $\hat{z}_i(x_i, y_i)$, 则有:

$$Q = \sum_{i=1}^n [z_i(x_i, y_i) - \hat{z}_i(x_i, y_i)]^2 = \sum_{i=1}^n [z_i - (a_0 + a_1 x_{1i} + a_2 x_{2i} + \cdots + a_p x_{pi})]^2 \quad (8)$$

(3) 求 Q 对 $a_0, a_1, \cdots, a_p$ 的偏导数, 并令其等于零, 得到正规方程组:

$$\begin{cases} na_0 + a_1 \sum_{i=1}^n x_{1i} + \cdots + a_p \sum_{i=1}^n x_{pi} = \sum_{i=1}^n z_i \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_{1i} + a_1 \sum_{i=1}^n x_{1i}x_{1i} + \cdots + a_p \sum_{i=1}^n x_{pi}x_{1i} = \sum_{i=1}^n x_{1i}z_i \\ \vdots \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_{pi} + a_1 \sum_{i=1}^n x_{1i}x_{pi} + \cdots + a_p \sum_{i=1}^n x_{pi}x_{pi} = \sum_{i=1}^n x_{pi}z_i \end{cases} \quad (9)$$

式中: $a_0, a_1, \cdots, a_p$ 为 $p+1$ 个未知量。

方程组(9) 用矩阵形式可表示为:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & \cdots & x_{p1} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & \cdots & x_{p2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & \cdots & x_{pn} \end{bmatrix}, Z = \begin{bmatrix} z_0 \\ z_1 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_n \\ x_1^2 & x_2^2 & \cdots & x_n^2 \\ x_1 y_1 & x_2 y_2 & \cdots & x_n y_n \\ y_1^2 & y_2^2 & \cdots & y_n^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & x_1 y_1 & y_1^2 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2^2 & x_2 y_2 & y_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n & x_n^2 & x_n y_n & y_n^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_n \\ x_1^2 & x_2^2 & \cdots & x_n^2 \\ x_1 y_1 & x_2 y_2 & \cdots & x_n y_n \\ y_1^2 & y_2^2 & \cdots & y_n^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} z_0 \\ z_1 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$z_i(x_i, y_i) = \hat{z}_i(x_i, y_i) + \varepsilon_i \quad (5)$$

式中: $z_i(x_i, y_i)$ 为 ICESat-1 和 ICESat-2 卫星激光光斑脚点的瞬时水位, 近似代表区域范围内的瞬时水位, $i=1, 2, \cdots, n$; x_i, y_i 为二维平面空间中的横坐标和纵坐标标识; ε_i 为残差。

当 ICESat-1、ICESat-2 卫星的激光光斑脚点 (x_i, y_i) 水面高程在空间上变化时, 公式(5) 揭示了湖泊瞬时水位的实际曲面、趋势面和残差剩余面的关系。为了准确推算出湖泊水面高程变化的趋势面, 多元回归分析能使得残差平方和 Q 趋于最小, 即:

$$Q = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n [z_i(x_i, y_i) - \hat{z}_i(x_i, y_i)]^2 \rightarrow \min \quad (6)$$

在最小二乘法曲面拟合中, 利用多项式函数和调整多项式的次数来逼近趋势面。求解过程如下:

(1) 将多项式回归模型转化为多元线性回归模型。令 $x_1 = x, x_2 = y, x_3 = x^2, x_4 = xy, x_5 = y^2, \cdots$, 则湖面瞬时水位趋势拟合值为:

$$\hat{z}(x_i, y_i) = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \cdots + a_p x_p \quad (7)$$

式中: $a_0, a_1, \cdots, a_p$ 为多项式的系数。

(2) 计算其残差平方和 Q , 计算公式为:

则方程组(9) 变为:

$$X^T X A = X^T Z \quad (11)$$

(4) 对于二元二次多项式有:

$$z_i = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 xy + a_5 y^2 \quad (12)$$

其正规方程组为:

由公式(11)求解可得:

$$\mathbf{A} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Z} \quad (14)$$

3.5 不确定性误差

湖泊水位的估计偏差主要源于风浪、涌浪、湖冰、投影坐标系转换等不确定因素,故湖泊平均水位估计偏差 $\bar{h}_{\text{lake},e}$ 为

$$\bar{h}_{\text{lake},e} = h_w + h_{\text{ice}} + h_{\text{tran}} + e \quad (15)$$

式中: h_w 为湖泊水面风浪、湖流所引起的高程差, m; h_{ice} 为解冻末期或者封冻初期湖水表面的浮冰引起的高程差, m; h_{tran} 为地理参考坐标投影、高程坐标转换中位移偏差所引起的高度差, m; e 为不确定性偏差。

4 结果分析与讨论

4.1 湖泊水位估计值与观测值对比

综合 ENVISat&ERS、Jason - 1、Jason - 2、

ICESat - 1和 ICESat - 2 卫星发射日期、参考高程坐标系和运行时长等因素,选取 2000 - 2020 年期间 ENVISat&ERS、Jason - 1&2、ICESat - 1、ICESat - 2 卫星估计的博斯腾湖日均水位和 Hydroweb 日均水位记录,与扬水站的日均水位观测值进行对比,结果见图 2。由图 2 可知,与扬水站日均水位观测值相比,Hydroweb 水位记录、Jason - 1&2、ENVISat&ERS、ICESat - 1、ICESat - 2 卫星估计的博斯腾湖湖区日均水位的绝对误差分别为 0.24、0.34、0.28、0.18、0.08 m,且存在良好的正相关性,简单相关系数分别为 0.893 6、0.881 4、0.785 6、0.913 5、0.942 3。此外,ICESat - 1、ICESat - 2、ENVISat&ERS、Jason - 1&2 卫星估计的日均水位与日均水位观测曲线的峰谷突变节点具有一致性,但存在系统性的高度偏差,主要由于引力潮、参考椭球体和投影坐标系在转换过程中的系统误差、地球重力场的引力差等因素引起。

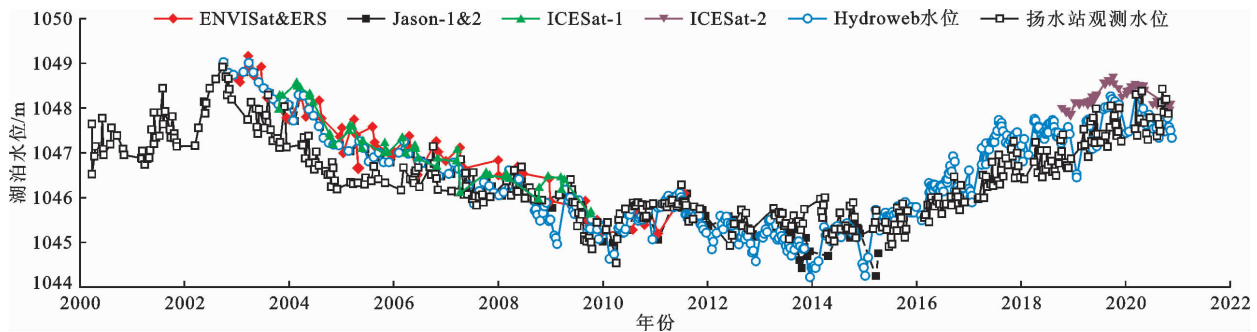


图2 博斯腾湖日均水位观测值与 ENVISat&ERS、Jason - 1&2、ICESat - 1、ICESat - 2 及 Hydroweb 日均水位估计值对比

4.2 湖泊水位 - 面积关系分析

选取 ENVISat&ERS、Jason - 1&2、ICESat - 1 和 ICESat - 2 卫星过境当日所对应的 Landsat TM/ETM/OLI 影像,利用一元线性相关函数,分析湖泊日均水位与当日湖泊水域面积估计值关系,结果见图 3。由图 3 可知,ENVISat&ERS、Jason - 1&2、ICESat - 1、ICESat - 2 估计的日均水位及 Hydroweb 日均水位与当日湖泊水域面积呈显著相关,复相关系数 R^2 分别为 0.911 2、0.875 1、0.676 4、0.894 9、0.914 6,通过了置信区间 $\alpha < 0.01$ 的显著水平检验。由于卫星平台的观测时长、工作方式、覆盖范围及观测时相不同,湖泊日均水位的估计误差在时间尺度上和空间尺度上会存在系统性偏差,需要用公式(1)进行地球物理修正。日均水位观测值描述的是某一区域的水位平均值,具有一定的随机性和偶然性,而实际上博斯腾湖湖泊水位的波动也会受到冰雪融水补给、湖流、大风、山区降水突变、调蓄量、

引水量等因素影响,使得水位观测值在空间尺度上会存在一定差异,且在时间响应上也会滞后。

4.3 湖泊水位日变化特征

1975 - 2020 年期间博斯腾湖水域日均水位总体上略有上升,主要经历了“下降 - 上升 - 下降 - 上升”4 个阶段,如图 4 所示。分析图 4 可知,1975 - 1987 年期间湖泊蒸发量的增加导致其日均水位持续下降;1987 - 2002 年期间湖泊流出量减少和湖泊流入量的持续增加共同导致了湖泊日均水位的上升^[28];2002 - 2013 年期间博斯腾湖湖泊流出量增加,而湖泊流入量因山区降水量的减少而减少^[29],所以湖泊日均水位持续下降,其中,2000 - 2011 年博斯腾湖向孔雀河下游河段进行生态输水共计 12 次^[30];2013 - 2020 年期间湖泊日均水位持续升高,主要与山区降水量增加和气温升高引起的冰雪融水补给增加有关^[31]。此外,博斯腾湖日均水位变化的时间节点与湖泊水域面积紧密相关,同时受当年 6、

7、8 月份农业灌溉用水增加、城市居民用水高峰和夏季湖面蒸发量剧增的影响,湖泊日均水位估计值与水位观测值在时间上会存在一定的响应滞后和偏差。1975–2020 年博斯腾湖湖区日均水位极大值在 2002 年 8 月为 $1\,049.3 \pm 0.16$ m, 日均水位极低值出现于 2009 年 9 月为 $1\,044.58 \pm 0.12$ m; 2010 年之后博斯腾湖湖区日均水位逐渐上升, 至 2020 年 5 月日均水位达到了 $1\,048.9 \pm 0.15$ m。

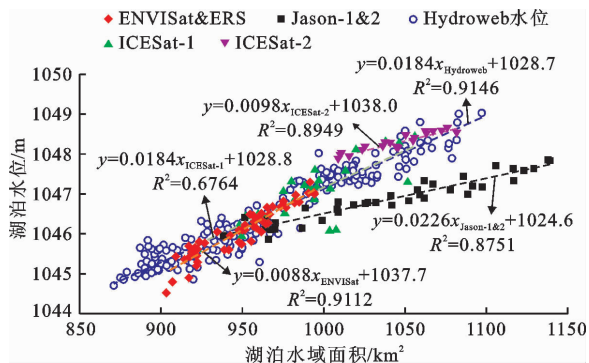


图3 博斯腾湖湖泊水域面积与 ENVISat&ERS、Jason-1&2、ICESat-1、ICESat-2 及 Hydroweb 的日均水位关系

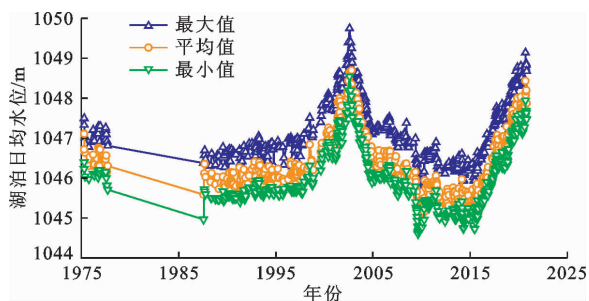


图4 1975–2020 年博斯腾湖湖区日均水位变化

4.4 湖泊水位年际变化特征

对于内陆型高山湖泊水文系统,除冰川融水、地下水补给、冻土退化和积雪融水外,山区降水变化也会直接影响湖泊水位的日均、月际、季节性和年际动态变化。1975–2020 年博斯腾湖湖区的年均水位 ICESat-2 估计值、观测值以及 Hydroweb 年均水位变化见图 5。由图 5 可知,1975–2020 年期间博斯腾湖年均水位变化经历了 4 个阶段:(1) 1975–1987 年年均水位以 $0.153\,0$ m/a 的速率下降,1987 年最低水位为 $1\,044.8 \pm 0.2$ m;(2) 1987–2002 年年均水位呈现明显的波动性上升,2002 年年均水位达到 1956 年以来湖泊年均水位极大值,为 $1\,048.9 \pm 0.16$ m,上升了 4.10 ± 0.15 m,平均上升速率为 $0.247\,0$ m/a;(3) 2002–2013 年期间年均水位以 $0.318\,8$ m/a 的平均速率下降,与 2002 年平均水位

相比,2013 年平均水位下降了 3.53 ± 0.21 m。2002 年后博斯腾湖流域中下游年降水量减少,年均气温升高,湖区入湖水量急剧减少,尤其是 2000 年后,湖区周边人为活动的干扰已逐步超过自然环境的作用,引起湖泊水量的不平衡;(4) 2013–2020 年期间,年均水位以 $0.468\,5$ m/a 的平均速率上升。2018 年以来,人工持续生态调水量累积为 3.39×10^8 m³,使得湖泊水位快速上升和入湖水量迅速增加^[32]。2020 年博斯腾湖湖区年均水位为 $1\,048.10 \pm 0.12$ m,比 1975 年年均水位升高了 0.70 ± 0.15 m。对比水位观测值、ICESat-2 卫星估计的年均水位和 Hydroweb 年均水位,Hydroweb 记录的博斯腾湖湖区 2020 年年均水位为 $1\,047.64 \pm 0.12$ m,略低于 ICESat-2 卫星估计的年均水位和年均水位观测值。

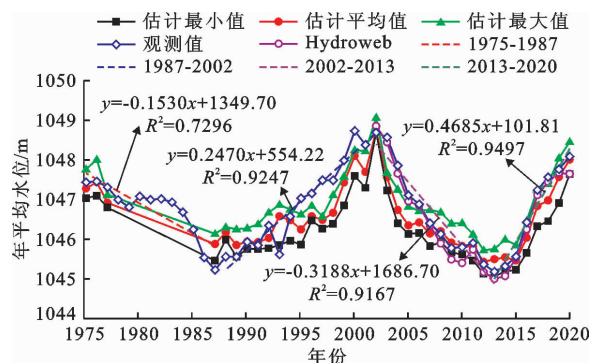


图5 1975–2020 年博斯腾湖年均水位 ICESat-2 估计值、观测值以及 Hydroweb 年均水位变化

4.5 湖泊水位及变化率空间分布特征

借助趋势面分析方法,基于 2003 年 10 月 22 日至 2003 年 11 月 16 日的 ICESat-1/GLAS 数据,获得 2003 年 11 月份博斯腾湖湖泊水面高程的空间分布特征,见图 6(a);基于 2018 年 10 月 14 日至 2018 年 11 月 14 日的 ICESat-2/ATLAS 数据,获得 2018 年 11 月份博斯腾湖水面高程的空间分布特征,见图 6(b)。由图 6(a)可知,2003 年 11 月期间博斯腾湖水域的瞬时水位绝对高差为 0.50 m,东北部水域的水位较低,入湖口和出湖口区域水位较高。图 6(b)显示,2018 年 11 月期间博斯腾湖水域的瞬时水位绝对高差为 0.40 m,ICESat-2/ATLAS 光斑在湖泊水域的覆盖范围较广,湖泊水面高程在时间和空间上受限于激光光斑脚点空间分布不均和时间滞后的影响较弱^[33]。

利用 2003 年 10 月至 2009 年 10 月的 ICESat-1/GLAS 数据,借助趋势面分析方法,获得 2003–2009 年期间博斯腾湖湖区水面高程年均变化率的

空间分布,见图7(a);利用2018年11月–2020年11月的ICESat-2/ATLAS数据,借助趋势面分析方法,获得2018–2020年博斯腾湖湖区水面高程年均变化率的空间分布,见图7(b)。

2003–2009年期间博斯腾湖湖区年均水位普遍呈下降趋势。ICESat-1卫星、Hydroweb水位记录、水文站观测资料估计的湖泊水位平均下降速率分别为 0.50 ± 0.13 、 0.46 ± 0.11 、 0.42 ± 0.17 m/a。由图7(a)可知,2003–2009年博斯腾湖湖区水面高程的年均变化率在空间上存在差异,湖区东部水域的水面高程下降速率大于西部水域的下降速率。

2018–2020年期间博斯腾湖湖区年均水位普遍呈上升趋势,ICESat-2卫星、Hydroweb水位记录、水文站观测资料估计的水位平均上升速率分别为 0.12 ± 0.06 、 0.22 ± 0.10 、 0.20 ± 0.15 m/a。由图7(b)可知,受入湖口和出湖口位置、周边农田灌溉的引水量及灌溉净耗水量等因素的影响,2018–2020年开都河、清水河、黄水沟的入湖口及湖区西部水域的水位上升速率大于湖区东部水域。总体上来看,ICESat-1、ICESat-2卫星估计的博斯腾湖湖区水位年均变化率的空间分布特征与湖岸线空间变化特征较为一致^[34]。

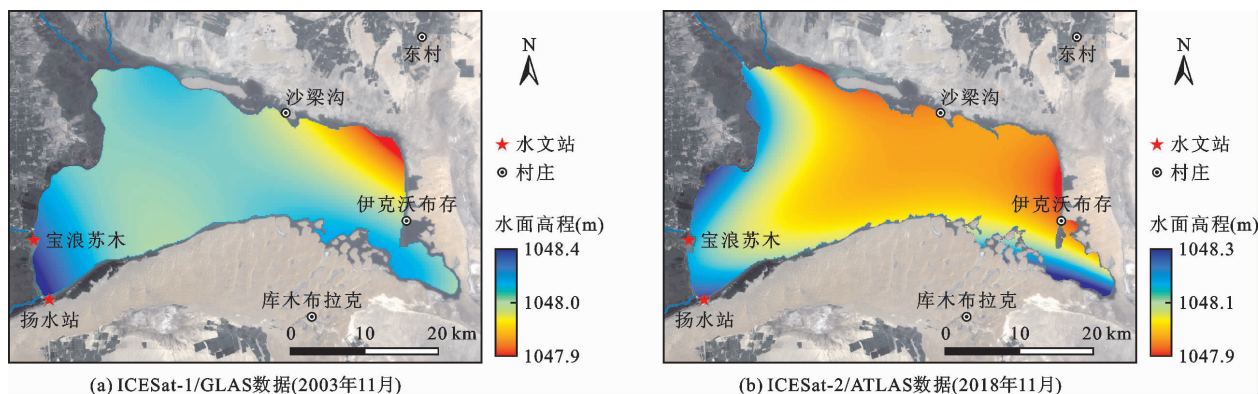


图6 ICESat-1和ICESat-2测高数据估计的博斯腾湖湖区水面高程

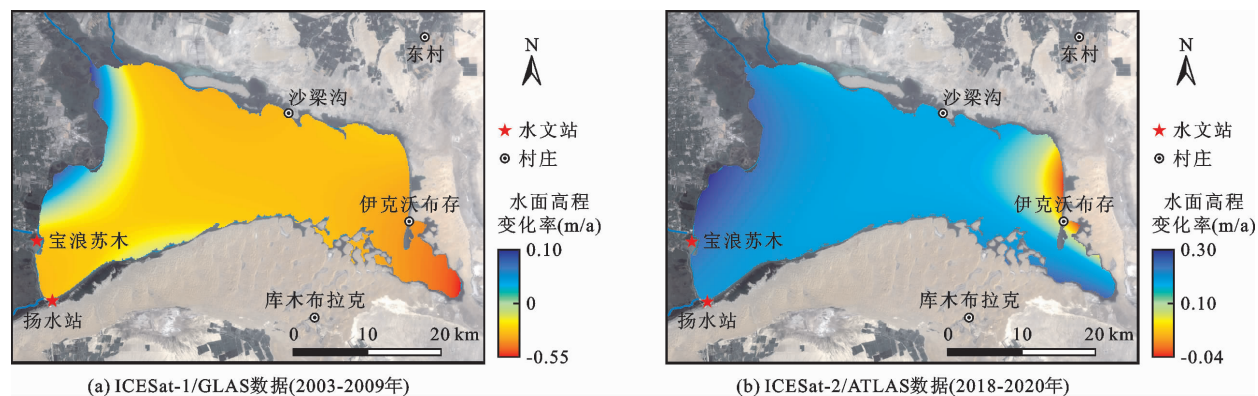


图7 ICESat-1和ICESat-2测高数据估计的博斯腾湖湖区水面高程年均变化率空间分布

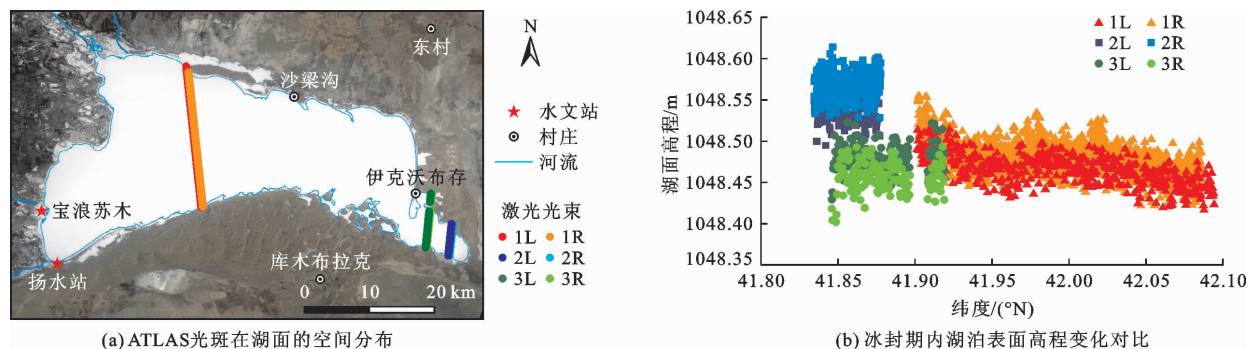


图8 2020年2月冰封期内ICESat-2/ATLAS数据估计的博斯腾湖表面高程变化

考虑到湖区湖流、风涌水、人为调蓄和引水等因素对近岸区湖泊水位的干扰,利用 2020 年 2 月 7 日和 9 日 ICESat-2/ATLAS 数据和 2020 年 2 月 21 日 Landsat 8 卫星的真彩色影像(图 8(a)),分析博斯腾湖东部和西部区域湖面在冰封条件下的表面高程偏差,结果见图 8(b)。图 8(a)中 ATLAS 发射的激光光束 1L 和 1R 分布在湖区西部区域,激光光束 2L、2R、3L 和 3R 分布在湖区东部区域,结合图 8(b)可知,沿着 ICESat-2 卫星航迹由南向北方向湖泊表面高程呈下降趋势,而且东部湖区表面高程的平均值比西部湖区高 0.10 ± 0.05 m。总体上,博斯腾湖湖面无论是处于冰封状态还是解冻状态,其湖区东部与西部区域均存在一定的高程偏差,而在湖面处于冰封期时,湖区东部与西部高程平均值的绝对差值较小。

5 结 论

(1) ENVISat&ERS、Jason-1&2、ICESat-1、ICESat-2 卫星平台的重复观测周期从逐月尺度逐步转向旬尺度、周尺度,增加了重复观测湖泊水位的次数;与 ICESat-1/GLAS 的测高数据相比,ICESat-2/ATLAS 测高数据的覆盖范围广、重访周期短、估计精度高,更能够准确反演湖泊水面高程和变化率,揭示水域面积较大湖泊的水位波动的空间异质特征,可为湖水运动、水循环和动力学特征研究提供参考。

(2) 1975-2020 年博斯腾湖的年均水位在时间尺度的变化上呈现 4 个阶段:1975-1987 年湖泊水位下降;1987-2002 年湖泊水位波动上升;2002-2013 年湖泊水位持续降低;2013-2020 年湖泊水位快速上升。与 1975 年平均水位相比,2020 年博斯腾湖湖区年均水位达到了 $1\,048.10 \pm 0.12$ m,升高了 0.70 ± 0.15 m。

(3) 借助趋势面分析方法,ICESat-1、ICESat-2 卫星测高数据能够准确描述激光脚点处湖区表面高程的空间特征与时变过程,而且 ICESat-2 卫星测高数据对湖区水位变化和空间变化率的估计精度优于 ICESat-1 卫星测高数据。湖泊水位时空变化反映了博斯腾湖流域内水文条件在气候系统和人类活动共同作用下的变化规律,除气候变化因素外,博斯腾湖湖区水位持续降低主要是由于人类活动减少了入湖流量,其次是农业灌溉水量和城市工业需水量的增加所致。因此,湖泊水位变化既是湖水运动的主要驱动因素,也关系着湖泊水量交换和能量平衡,对研究湖泊水资源合理开发利用、水环境承载力

核算、水域环境生态可持续建设具有重要意义。

参考文献:

- [1] WOOLWAY R I, MABERLY S C. Climate velocity in inland standing waters[J]. *Nature Climate Change*, 2020, 10: 1124-1129.
- [2] YANG Haiqing, XU Jianhua, CHEN Yaning, et al. Has the Bosten Lake Basin been dry or wet during the climate transition in Northwest China in the past 30 years? [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2020, 141: 627-644.
- [3] LEVIA D F, CREED I F, HANNAH D M, et al. Homogenization of the terrestrial water cycle[J]. *Nature Geoscience*, 2020, 13: 656-658.
- [4] WULF H, BOOKHAGEN B, SCHERLER D. Differentiating between rain, snow, and glacier contributions to river discharge in the western Himalaya using remote-sensing data and distributed hydrological modeling[J]. *Advances in Water Resources*, 2016, 88: 152-169.
- [5] REVEL M, IKESHIMA D, YAMAZAKI D, et al. A Framework for estimating global-scale river discharge by assimilating satellite altimetry[J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(1): e2020WR027876.
- [6] BIGGS J, WRIGHT T J. How satellite InSAR has grown from opportunistic science to routine monitoring over the last decade [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 3863.
- [7] TOTH C, JÓZ KÓW G. Remote sensing platforms and sensors: A survey[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 115: 22-36.
- [8] CRÉTAUX J F, BIRKETT C. Lake studies from satellite radar altimetry[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2006, 338(14-15): 1098-1112.
- [9] YANG Jun, GONG Peng, FU Rong, et al. The role of satellite remote sensing in climate change studies[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3: 875-883.
- [10] YI Shuang, WANG Qiuyu, CHANG Le, et al. Changes in mountain glaciers, lake levels, and snow coverage in the Tianshan monitored by GRACE, ICESat, Altimetry, and MODIS[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(10): 798.
- [11] FAYAD I, BAGHDADI N, BAILLY J S, et al. Analysis of GEDI elevation data accuracy for inland waterbodies altimetry[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(17): 2714.
- [12] 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.
- [13] YUAN Cui, GONG Peng, BAI Yuqi. Performance assessment of ICESat-2 laser altimeter data for water-level measurement over lakes and reservoirs in China[J]. *Re-*

- Remote Sensing, 2020, 12(5): 770.
- [14] VAN BEMMELEN C W T, MANN M, DE RIDDER M P, et al. Determining water reservoir characteristics with global elevation data[J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43(21): 11278–11286.
- [15] NIELSEN K, ANDERSEN O B, RANNDAL H. Validation of Sentinel-3A based lake level over US and Canada[J]. Remote Sensing, 2020, 12(17): 2835.
- [16] 李玉焦,陈亚宁,张齐飞,等. 1960–2018年博斯腾湖水位变化特征及其影响因素分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 48–58.
- [17] 彭妍菲,李忠勤,姚晓军,等. 基于多源遥感数据和GEE平台的博斯腾湖面积变化及影响因素分析[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(6): 1131–1153.
- [18] 王杰,王俊,申金玉. 新疆博斯腾湖入湖水量变化及其对湖水位的影响分析[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(4): 199–202.
- [19] 吴红波. 基于星载雷达测高资料估计博斯腾湖水位–水量变化研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(3): 9–16+23.
- [20] 何霞,周石砦. 第三极地区冰川编目评价数据(1990–2015)[DB/OL]. (2022-04-26)[2022-11-16]. 10.11888/Cryos.tpdc.272302.
- [21] BIRKETT C M. Radar altimetry: A new concept in monitoring lake level changes[J]. EOS, Transactions American Geophysical Union, 1994, 75(24): 273–275.
- [22] MARKUS T, NEUMANN T, MARTINO A, et al. The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science requirements, concept, and implementation[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 190: 260–273.
- [23] RAY R D, BECKLEY B D. Calibration of ocean wave measurements by the TOPEX, Jason-1, and Jason-2 satellites[J]. Marine Geodesy, 2012, 35(sup1): 238–257.
- [24] BROWN M E, ARIAS S D, NEUMANN T, et al. Applications for ICESat-2 data: From NASA's Early Adopter Program[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2016, 4(4): 24–37.
- [25] PAVLIS N K, HOLMES S A, KENYON S C, et al. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2012, 117(B4): B04406.
- [26] SANTOS DA SILVA J, CALMANT S, SEYLER F, et al. Water levels in the Amazon basin derived from the ERS 2 and ENVISAT radar altimetry missions[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(10): 2160–2181.
- [27] WATSON G S. Trend-surface analysis[J]. Journal of the International Association for Mathematical Geology, 1971, 3(3): 215–226.
- [28] GUO Mengjing, WU Wei, ZHOU Xiaode, et al. Investigation of the dramatic changes in lake level of the Bosten Lake in northwestern China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2015, 119: 341–351.
- [29] YAO Junqiang, CHEN Yaning, ZHAO Yong, et al. Hydroclimatic changes of Lake Bosten in Northwest China during the last decades[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 9118.
- [30] 张一琼,海米提·依米提,魏彬,等. 1972–2011年博斯腾湖面积变化遥感分析[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(12): 245–249.
- [31] 姚俊强,陈静,迪丽努尔·托列吾别克,等. 博斯腾湖流域气候水文变化及对湖泊水位的影响研究[J]. 人民珠江, 2021, 42(4): 19–27.
- [32] YE Zhaoxia, YANG Yuhai, ZHOU Honghua, et al. Ecological water rights of the Bosten Lake wetlands in Xinjiang, China[J]. Wetlands, 2020, 40: 2597–2607.
- [33] XU Nan, MA Yue, ZHANG Wenhao, et al. Monitoring annual changes of lake water levels and volumes over 1984–2018 using Landsat imagery and ICESat-2 data[J]. Remote Sensing, 2020, 12(23): 4004.
- [34] 高鹏文,李新国,阿里木江·卡斯木. 博斯腾湖湖岸线时空变化特征[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(4): 98–104.