引文格式：杨佳仪,周佳轩,吴红波. 1992年以来贝加尔湖湖区水位变化特征分析[J]. 地理空间信息, 2023, 21(9): 31-35. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.09.008

1992 年以来贝加尔湖湖区水位变化特征分析

杨佳仪[1]，周佳轩[1]，吴红波[1,2,3*]

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

摘　要：针对较大水域面积的湖泊水位动态变化不确定性和空间异质性，以贝加尔湖水域为例，利用ICESat-1、ICESat-2测高数据以及Hydroweb、Legos水位记录，基于卫星测高原理和线性回归分析方法，分析了1992年9月—2022年4月贝加尔湖湖区水位变化特征和空间异质性。结果表明，研究期间贝加尔湖湖区年均水位呈增加趋势，共上升了0.13±0.15 m；2018年以来湖区年均水位增加迅速，且月均水位波动具有明显的季节性和周期性；月均水位在9—10月处于较高水位，在4—5月处于低水位；ICESat-1、ICESat-2测高数据估计的日均水位绝对误差分别为0.18±0.08 m、0.08±0.06 m；年均水位变化的异质性受气候要素和人工调蓄的共同作用，且东部水域年变化率大于西部水域。

关键词：卫星测高；湖泊水位；空间异质性；空间分析；不确定性；时间变化

中图分类号：P228.3　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）09-0031-05

Analysis of Lake Water Level Variation Characteristics of Lake Baikal Since 1992

YANG Jiayi[1], ZHOU Jiaxuan[1], WU Hongbo[1,2,3]

(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, Northwest University, Xi'an 710127, China;
3. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: In view of the uncertainty and spatial heterogeneity of lake water level variation at the larger water area scale, we analyzed the lake water level of Lake Baikal on the principle of satellite altimetry and the linear regression analysis method. We analyzed the variation characteristics and spatial heterogeneity of lake water level of Lake Baikal from September 1992 to April 2022 by using ICESat-1 and ICESat-2 altimetry data, Hydroweb and Legos records. The results showed that the annual average water level of Lake Baikal showed an increasing trend, and the annual average water level in 2022 increased by 0.13±0.15 m compared with that in 1992. Since 2018, the annual average water level in the lake water area had increased rapidly, and the fluctuation of monthly average water level had obvious seasonality and periodicity. The monthly average water level was at a high level in September and October and a lower water level in April and May. The absolute errors of daily average water level estimated by ICESat-1 and ICESat-2 altimetry data were 0.18±0.08 m and 0.08±0.06 m, respectively. Moreover, the heterogeneous of annual average water level variation of Lake Baikal was influenced jointly by effect of climatic factors and artificial regulation and storage, and the annual variation rate of eastern waters was faster than that of western waters.

Key words: satellite altimetry, lake water level, spatial heterogeneity, spatial analysis, uncertainty, temporal variation

作为欧亚大陆最大淡水湖，贝加尔湖的水位变化受自然和人类活动的共同影响，在全球变暖背景下，其水位升降对维系流域生态系统与社会发展至关重要[1]。由于流域范围跨度大，受较大空间尺度的降水和气温影响较明显，在过去50年贝加尔湖流域已成为全球升温速率较快的区域之一[2]，而地表气温升高将直接影响湖面水位、水储量、入湖径流量等变化[3]，因此贝加尔湖是研究湖泊水文要素的理想场所。卫星测高是利用卫星、航天飞机等运载平台携带的激光、雷达测高仪测定搭载平台到陆地表面、瞬时海平面、湖水面[4]、水库表面等垂直距离的技术和方法。随着卫星遥感技术的进步和发展，卫星测高技术利用各类测高仪实时测量卫星平台到地表面的高度、后向散射系数、风速和波高等参数[5]，开展了大地测量学、地

收稿日期：2022-05-15；修回日期：2022-08-23。
项目来源：国家自然科学基金资助项目（42130516）；国家自然科学基金青年基金资助项目（41601067）。
第一作者简介：杨佳仪（2002—），研究方向为地理信息技术应用，E-mail：472769919@qq.com。
通信作者：吴红波（1984—），博士（后），副教授，硕士生导师，研究方向为星载测高雷达、冰雪遥感和地理信息技术应用，E-mail：wuhongbo12366@sina.com。

球物理学、水文学和海洋学研究。与传统水文观测方法相比，卫星测高技术可近实时、较大空间尺度地监测湖泊水域、湿地、水库的水面高度变化[6]，降低了人力、物力和财力成本。

王冠[7]等指出1900年以来，贝加尔湖水位变化由自然和人类共同作用引起，并直接影响着湖泊水量变化及其周边生态环境；宋桂英[8]等分析发现2012年7月贝加尔湖流域低涡异于常年，扰动对流层高层大气，导致7月下旬内蒙古高原极端降水事件的发生；李想[9]等指出近40年来贝加尔湖区水位整体呈先升后降的态势，并将贝加尔湖水位升降转折归因为气候变化驱动型、气候变化与人类活动共同驱动型和气候变化下的人为调控驱动型3种类型；孟国杰[10]等认为贝加尔湖地区地质层处于膨胀状态和近西北方向的拉张状态，水位变化仅是新生代以来地壳运动的延续。为分析贝加尔湖水域水位的时变特征，杨小东[11]等借助卫星测高技术分析贝加尔湖水位的年内变化特征发现，每年7、8月水位上升到最高值，随后下降，次年5月为最低水位；李静[12]等利用重心偏移法与子波形提取法的波形重定技术分析得出，2009—2012年贝加尔湖年际水位异常时间序列具有较强的正相关性和较显著的周期性变化，夏、秋季水位高，冬、春季水位低。上述研究总体上对贝加尔湖水域的水位时间特征和空间特征描述不足，且目前对贝加尔湖水位变化的人为活动干扰和气候要素变化响应[13]，已鲜有相关报道[14]。因此，本文利用ICESat-1、ICESat-2卫星测高资料以及Hydroweb、Legos水位数据，分析了贝加尔湖1992—2022年湖区水位变化的年内和年际特征；并利用趋势面和线性回归分析，提取了2018年10月—2021年10月贝加尔湖水位的空间变化特征，旨在为贝加尔湖水储量变化、生态环境保护、人工调水等研究提供理论参考和案例借鉴。

1 研究数据与方法

1.1 研究区概况

贝加尔湖地处俄罗斯布里亚特共和国和伊尔库茨克州境内，范围为51°29′~55°46′N、103°41′~109°57′E，属于地震断层陷落型湖泊，周边山脉海拔均在1 000 m以上。贝加尔湖为东北—西南走向，狭长弯曲呈新月形，长636 km，东西向平均宽度为48.0 km，水域面积为3.15万km^2，水系流域面积为56.0万km^2；总容积为23.6亿m^3（2015年），平均水深为730 m，最深处达1 637 m（2015年），是全球蓄水量最大、深度最深的湖泊，湖水通过安加拉河向北汇入叶尼塞河，最终流入北冰洋；属温带大陆性气候，气温日较差、年较差大，1月均气温为-26~-33℃，7月平均气温为17~21℃，年降水量的一半以上发生在夏季（6—8月），位于上游的色楞格河、巴尔古津河、上安加拉河的径流补给贝加尔湖的湖水。

1.2 研究数据

本文采用2003-10-22—2009-10-11的ICESat-1/GLAS测高产品GLA01和GLA14重建贝加尔湖湖区水位的时间变化序列。GLA01、GLA14的产品格式为HDF 5.0，数据发布版本为V34[15]，从美国国家冰雪数据中心网站（URL：https://search.earthdata.nasa.gov/search）获取，并提取湖区光斑的经度、纬度、高程、大地水准高度等参数信息。ICESat-2卫星于2018-09-15在美国范登堡空军基地发射成功，其搭载的ATLAS激光测高仪采用绿色波段532 nm处激光脉冲和单光子敏感探测器来测量地表空间信息[16]。ATLAS测高仪采用3对光束，每对轨道约间隔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，沿轨道采样间隔为0.7 m。ICESat-2卫星约重155 kg，ATLAS测高仪每秒向地表发射10 000个激光脉冲，激光脉冲3.3 ms即可到达地球表面并返回。ATL13产品主要用于湖泊、河流、水库等水位估计[17]，本文采用2018-10-14—2022-04-22的ATL13中的6束测高脉冲提取贝加尔湖水面高程。1992年9月—2022年4月Hydroweb水位日志记录数据可从URL：https://hydroweb.theia-land.fr/申请获取。1992年9月—2010年9月贝加尔湖Legos水位记录从法国地球物理学和海洋学太空观测研究中心实验室网站（URL：http://www.legos.obs-mip.fr/en/soa/）获取，包括日期、日均水位和偏差。1992—2021年位于安加拉河上游的伊尔库茨克水文站水位观测资料来源于俄罗斯联邦自然资源与环境部的《贝加尔湖状态及保护措施》年度报告（2003—2017年报告网址URL：http://geol.irk.ru/baikal/activ/mactiv2003、2012—2021年报告网址URL：http://www.baikalake.ru/en/security/info）。

1.3 技术路线

首先对ICESat-1、ICESat-2卫星测高产品中异常水位进行粗差剔除，利用贝加尔湖流域湖泊水域边界和湖区激光脉冲的经度、纬度等数据进行掩膜化，并将激光脚点位置与高程参考系统地理配准后，提取湖区内ICESat-1和ICESat-2卫星的星下点和有效水位信息；然后结合1992—2022年贝加尔湖的Hydroweb水位、Legos水位、水文站观测等数据，验证ICESat-1、ICESat-2卫星瞬时水位的估计误差，并重建湖

区水位的时变序列；最后根据湖区日均、月均和年均水位特征，借助趋势面和线性回归分析，分析1992—2022年贝加尔湖水位变化率、趋势和空间异质性。

1.4　卫星测高数据估计湖泊水位的方法

卫星测高原理的基本关系式为：

$$h_a = r - r_p + \frac{r}{8}\times(1-\frac{r_p}{r})\times e^4 \times \sin^2 2\varphi - (N + \delta h_i + \delta h_s) \quad (1)$$

式中，e 为参考椭球体的偏心率；h_a 为测高仪估计的瞬时湖泊水面高度；r 为卫星的地心距；r_p 为卫星星下点的地心距；δh_i 为瞬时海面和似静海面之间的高差；δh_s 为似静海面至大地水准面的差距；φ 为地理纬度；N 为大地水准面高度。

确定ICESat-1、ICESat-2卫星高度和激光脉冲往返于卫星与贝加尔湖水面的传播时间，即可确定卫星到贝加尔湖面的距离、风速、有效波高等参数。ICESat-1、ICESat-2卫星测高数据估计湖泊水面高度的公式为：

$$H_{\text{lake}} = H_{\text{alt}} - H_{\text{ran}} - H_{\text{geoid}} - H_{\text{cor}} \quad (2)$$

式中，H_{lake} 为湖泊水位高度，即贝加尔湖湖面相对于参考椭球的高度；H_{alt} 为卫星质心相对于参考椭球体表面的距离；H_{ran} 为卫星距离贝加尔湖面的距离；H_{geoid} 为大地水准面高程差值；H_{cor} 为各类误差校正；ICESat-1卫星的参考椭球体与ICESat-2卫星相同，需转换到统一高程坐标系。

激光雷达测高仪的脉冲信号是从与有效波高和风速有关的平面反射的，受轨道误差、大气总质量、水蒸气含量等影响，必须对其进行相应改正。

$$H_{\text{cor}} = w_{\text{tc}} + d_{\text{tc}} + i_{\text{c}} + se_{\text{tc}} + p_{\text{tc}} \quad (3)$$

式中，w_{tc} 为湿对流校正；d_{tc} 为干对流校正；i_{c} 为电离层校正；se_{tc} 为固体潮校正；p_{tc} 为极潮校正。

由于卫星测高仪在测量过程中，光学信号会受外部环境、地球物理变化等影响[18]，产生不同程度的水平位移和高度偏差，本文参考1992年9月的平均水位值对不同时段内ICESat-1和ICESat-2卫星激光光斑估计的水位值进行线性修正，即

$$\hat{H} = a \times h_{\text{alt, lake}} + b \quad (4)$$

式中，$h_{\text{alt, lake}}$ 为EGM2008重力位模型下的湖泊水面高程，单位为m；a 为斜率；b 为高程偏移常数，单位为m。

测高仪的激光脉冲在湖泊水面的航迹其实是湖区水面高程的轮廓线[19]，该航迹覆盖区可能包含湖面设施、漂浮物、湖岸的杂草等，因此应剔除异常最大、最小值，则湖泊水位均值为：

$$\bar{h}_{\text{lake}} = \frac{1}{n}\times\sum_{i=1}^{n}\left|\bar{h}_{t_{i+1}} - \bar{h}_{t_i}\right| \quad (5)$$

式中，$\bar{h}_{t_{i+1}}$、$\bar{h}_{t_i}$ 分别为 t_{i+1}、t_i 时刻的湖泊水位均值；n 为沿卫星轨迹的光斑或星下点数量。

湖面高程异常变化被定义为任一时段内湖面高程 $\hat{H}$ 与平均湖面高程 $\bar{H}_{\text{lake}}$ 的高度差，即

$$\begin{aligned} H' &= \hat{H} - \bar{H}_{\text{lake}} = (h_{\text{d}} - \bar{h}_{\text{d}}) + (h_{\text{g}} - \bar{h}_{\text{g}}) + \sum_i (e_i - \bar{e}_i) \\ &= (h_{\text{d}} - \bar{h}_{\text{d}}) + \sum_i (e_i - \bar{e}_i) \\ &\cong (h_{\text{d}} - \bar{h}_{\text{d}}) \end{aligned} \quad (6)$$

式中，h_{d} 为湖盆地形变化值；$\bar{h}_{\text{d}}$ 为某时段内湖盆地形变化均值；h_{g} 为大地水准面高程；$\bar{h}_{\text{g}}$ 为某时段内大地水准面高程均值；e_i 为第 i 个随机误差；$\bar{e}_i$ 为某时段内误差均值。

ICESat-1和ICESat-2测高仪的激光脉冲在地表或水域表面形成近似椭圆形的光斑，光斑脚点的高程偏差主要由配准误差、地形误差和系统误差等导致[20]。均方根误差（RMSE）是指参数估计值与参数真值之差平方的期望值，常用于衡量观测值与估计值之间的偏差。贝加尔湖湖区日均水位的RMSE为：

$$e_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{n}\times\sum_{i=1}^{n}\left(\hat{H} - \bar{h}_{\text{lake}}\right)^2} \quad (7)$$

式中，$\hat{H}$ 为修正后的湖泊水位估计值；$\bar{h}_{\text{lake}}$ 为任一时段内湖面水位均值；n 为湖区内航迹覆盖区内激光光斑数量。

2　研究结果与分析

2.1　湖泊水位的验证与对比

由于ICESat-2卫星测高数据的空间分布不均匀，为描述ICESat-2估计的日均水位与Hydroweb水位记录之间的偏差，本文对ICESat-2卫星的瞬时水位做平滑处理（图1），可以看出，2018年10月—2021年12月ICESat-2估计的贝加尔湖日均水位与Hydroweb水位记录存在一定系统性偏差，绝对误差为0.34±0.08 m，ICESat-2估计的水位略高于Hydroweb水位，但具有相同的周期变化规律，拟合曲线峰谷节点较一致；日均水位的最高值出现在9月底—10月初，最低值大多出现在4月或5月，与伊尔库茨克站日均水位观测值和ICESat-2卫星估计的日均水位时间节点一致。

2.2　贝加尔湖水域日均水位变化

2001年以前，贝加尔湖的水位按照《安加拉河梯级水电站水库水资源利用条例》进行调蓄。俄罗斯联邦政府于2001-03-26颁布的第234号文件决定[21]，将

贝加尔湖的可调节库容范围限制在1 m之内，即由正常蓄水位457.00 m调节至该湖极限消落水位456.00 m。1992年以来贝加尔湖水域日均水位曲线见图2，可以看出，1992—2022年贝加尔湖水域日均水位总体呈上升趋势，2018—2022年受下游水电站调蓄影响，湖泊日均水位波动较小；1992-01-13—2002-01-13日均水位变化幅度较大，为0.20±0.21 m，受自然气候变化影响较大；2002-01-13—2022-01-13日均水位变化幅度减小，为0.12±0.09 m。与伊尔库茨克水文站观测的日均水位相比，ICESat-1、ICESat-2测高数据估计的日均水位绝对RMSE分别为0.18±0.08 m和0.08±0.06 m。

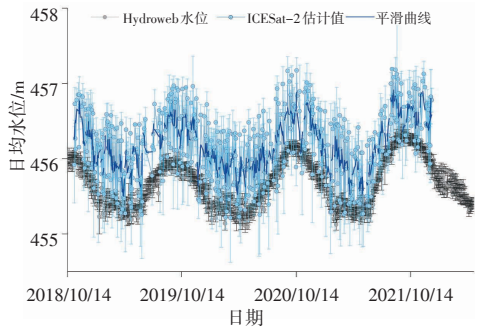


图1 2018年10月—2021年12月贝加尔湖湖区日均水位曲线

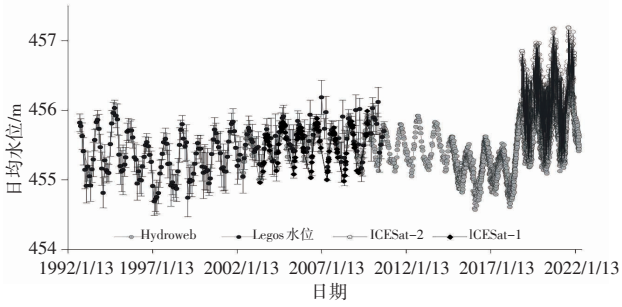


图2 1992—2022年贝加尔湖水域日均水位变化

2.3 贝加尔湖水域水位月均变化

基于Hydroweb、ICESat-1、ICESat-2卫星的月均水位估计值，本文对Hydroweb月均水位进行线性拟合（图3），可以看出，1992—2022年贝加尔湖水域月均水位出现了3次较低水位，分别为1997年2月的454.69 m、2016年2月的454.75 m、2018年4月的454.84 m；月均水位总体略有上升，为0.14±0.10 m；2018—2022年月均水位波幅增大，增加了0.35±0.06 m；月均水位变化具有显著的季节性，春季（3—5月）水位偏低、夏季（6—8月）上升、秋季（9—11月）水位处于较高值、冬季（12月—次年2月）水位下降，且月均水位波动幅度较小。ICESat-1、ICESat-2卫星测高仪激光光斑在湖区覆盖范围具有代表性差异，月均水位的绝对RMSE分别为0.13±0.12 m和0.05±0.06 m。

2.4 贝加尔湖水域水位年均变化

本文利用Hydroweb水位记录、ICESat-1和ICESat-2测高数据重建贝加尔湖水域的年均水位时变序列（图4），可以看出，1992—2022年贝加尔湖年均水位总体呈上升趋势，共上升了0.13±0.15 m；由于气候变化和人类活动的共同影响，1992—1997年年均水位大幅下降0.56±0.12 m；1997—2004年年均水位呈上升趋势，上升了0.42±0.13 m；2004—2017年年均水位呈下降趋势，下降了0.42±0.15 m；2017—2021年受人工调蓄影响，年均水位上升了0.63±0.10 m。ICESat-1、ICESat-2测高数据估计的年均水位与Hydroweb年均水位的变化趋势一致，RMSE分别为0.13±0.06 m和0.07±0.04 m。

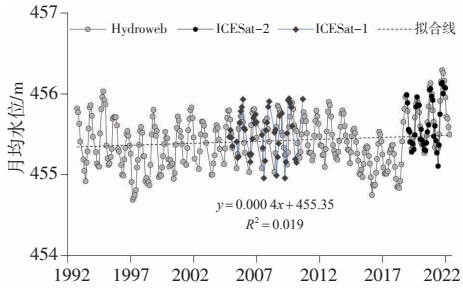


图3 1992—2022年贝加尔湖水域月均水位变化

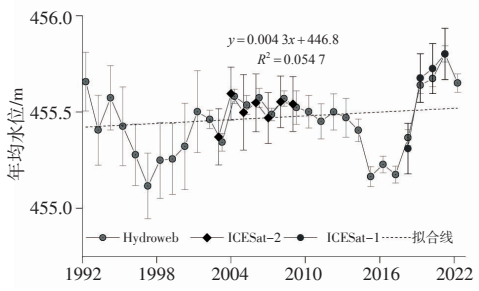


图4 1992—2022年贝加尔湖水域年均水位变化

2.5 年均水位变化的空间异质性

本文利用2018年10月—2021年11月贝加尔湖的ICESat-2卫星测高数据，借助流体静力学平衡和湖区水位高度异常计算，得到2018—2021年贝加尔湖的年均水位变化率（图5），可以看出，贝加尔湖水位变化存在空间异常和速率差异，湖区东段的年均水位上升趋势明显，湖区西段的年均水位上升较弱，主要是由于典型西北风风况下的水位变化和三维流场分布特征，湖区科氏力作用明显，有增减水的现象，表层水流主流由北向南，横剖面上存在顺时针方向的垂向环流[22]。

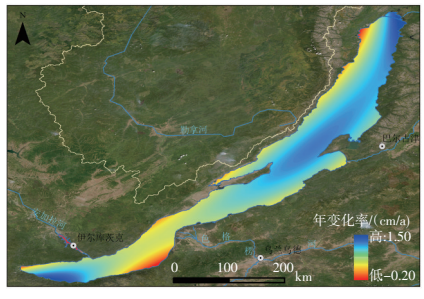


图5 2018—2021年贝加尔湖水域年均水位的变化率

3 结 语

1）由于较大水域湖泊水位变化的随机性、动态性、空间异质性和动力学特征，使得在较长时间尺度上同步观测较困难，因此空间数据质量和时间不连续一直是研究湖泊水文、流体动力学特征的障碍。本文借助Hydroweb、水文站和ICESat-1、ICESat-2星载测高仪资料快速重建了贝加尔湖水位变化序列，方法简单易行，不仅使卫星测高数据在时间维度的变化表达可信度较高，而且在空间维度上从二维转向三维，使高空间分辨率更加细化描述水位变化特征具有一定的可行性。

2）ICESat-1、ICESat-2测高数据在空间覆盖代表性和水位估计精度方面能有效提取湖泊水位变化特征信息。与伊尔库茨克水文站观测的日均水位相比，ICESat-1、ICESat-2测高数据估计的贝加尔湖水域日均水位的绝对RMSE分别为0.18±0.08 m、0.08±0.06 m。

3）1992年以来贝加尔湖的年均水位总体呈上升趋势，且东部水域年均水位上升速率大于西部水域。1992—2022年年均水位上升了0.13±0.15 m，变化幅度小于1 m。此外，贝加尔湖的月均水位出现了3次较低水位：1997年2月的454.69 m、2016年2月的454.75 m、2018年4月的454.84 m。

4）贝加尔湖的日均和月均水位波动在时间和空间上表现出异质性，既有人类活动的干扰，也有自然气候变化的影响。1992—2017年贝加尔湖的日均、月均水位波动具有一定随机性，而2018—2022年湖区的月均、年均水位波动具有明显的季节性和周期性，位于安加拉河上游的伊尔库茨克水电站的水位调蓄作用使湖区水位的波动幅度不大。

参考文献

[1] Moore M V, Hampton S E, Izmest'eva L R, et al. Climate Change and the World's "Sacred Sea": Lake Baikal, Siberia[J]. BioScience,2009,59(5):405-417

[2] Hampton S E, Izmest'eva L R, Moore M V, et al. Sixty Years of Environmental Change in the World's Largest Freshwater Lake: Lake Baikal, Siberia[J]. Global Change Biology,2008,14(8):1 947-1 958

[3] Sinyukovich V, Chernishov M. Current Problems of the Water Level Control in Lake Baikal[J]. The Bulletin of Irkutsk State University Series Earth Sciences,2018,24(8):99-110

[4] 孙瑞,王洪光,张云涛,等. 基于多源遥感的呼伦湖动态监测[J]. 地理空间信息,2019,17(9):83-85

[5] 何敏,顾利红,何秀凤. 利用InSAR技术监测湿地水位变化[J]. 地理空间信息,2015,13(6):132-134

[6] 戴腾,王金龙,周锋,等. 基于LiDAR数据的水域边界提取方法探讨[J]. 地理空间信息,2022,20(4):87-90

[7] 王冠,王平,王田野,等. 1900年以来贝加尔湖水位变化及其原因分析[J]. 资源科学,2018,40(11):2 177-2 185

[8] 宋桂英,李孝泽,江靖,等. 2012年7月内蒙古极端降水事件及成因[J]. 高原气象,2015,34(1):163-172

[9] 李想,张雪芹,徐晓明. 近40年来贝加尔湖区气候变化及其对湖泊水位的影响[J]. 湖泊科学,2022,34(1):219-231

[10] 孟国杰,申旭辉,伍吉仓,等. GPS揭示的贝加尔湖地区现今地壳形变特征[J]. 大地测量与地球动力学,2006,26(1):15-20

[11] 杨小东,施颢,甄宗坤. 利用卫星测高监测贝加尔湖湖面高变化[J]. 现代测绘,2014,37(2):62-64

[12] 李静,岳建平,梁子亮. Jason-2卫星波形重定技术在研究贝加尔湖水位中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(2):163-166

[13] Bolgov M V, Buber U A L, Korobkina E A, et al. Lake Baikal: Extreme Level as a Rare Hydrological Event[J]. Water Resources,2017,44(3):522-536

[14] Luo S, Song C, Ke L, et al. Satellite Laser Altimetry Reveals a Net Water Mass Gain in Global Lakes with Spatial Heterogeneity in the Early 21st Century[J]. Geophysical Research Letters,2022,49(3):96-105

[15] Schutz B E, Zwally H J, Shuman C A, et al. Overview of the ICESat Mission[J]. Geophysical Research Letters, 2005,32(21):L21S01

[16] 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(5):260-273

[17] 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

[18] O'Loughlin F E, Neal J, Yamazaki D, et al. ICESat-derived Inland Water Surface Spot Heights[J]. Water Resources Research,2016,52(4):3 276-3 284

[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

[20] Devries B, Huang C, Lang M W, et al. Automated Quantification of Surface Water Inundation in Wetlands Using Optical Satellite Imagery[J]. Remote Sensing, 2017, 9(8): 807-828

[21] 奥格涅夫 A K. 俄罗斯贝加尔湖水资源的合理利用问题[J]. 水利水电快报,2007,28(23):5-6

[22] 匡翠萍,高健博,刘曙光,等. 贝加尔湖典型风况下三维流场数值模拟[J]. 人民长江,2010,41(3):99-101