

基于星载雷达测高资料估计博斯腾湖 水位-水量变化研究

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: 为了解气候变化背景下的内陆湖泊水位、面积、水量波动变化规律, 科学合理指导湖泊水资源利用与开发。利用 1990-2015 年 Landsat TM/ETM/OLI 影像和 2002-2015 年多源星载雷达测高资料, 借助归一化水体指数(Normalized Difference Water Index, NDWI)提取博斯腾湖湖泊水域面积, 结合湖泊水位观测数据, 对星载雷达测高数据提取的湖面瞬时水位估计值进行对比与分析; 根据湖泊面积与水位、水量与水位的关系式, 构建湖泊面积-水位-水量波动时变序列, 并探讨湖泊水位和水量变化的年际特征。结果表明: ICESat-GLAS、ENVISat&ERS、Jason-1&2 的当日水位估计值与附近扬水站的水位观测值绝对误差分别小于 0.21、0.18、0.15 m, 而且具有较强的相关性和一致性。1990-2002 年湖泊水位持续增长阶段; 2002-2015 年期间, 湖泊水位持续下降。2015 年湖泊水域面积比 1990 年减少了 $(32.20 \pm 3.5) \text{ km}^2$, 年均水位下降了 $(0.81 \pm 0.19) \text{ m}$, 湖泊水量减少了 $(9.49 \pm 0.022) \times 10^8 \text{ m}^3$ 。因此, 湖泊水量变化为气候系统和人类活动的影响机制的理解提供了参考依据。

关键词: 湖泊水量; 湖泊水位; 星载; 测高数据; 激光雷达; 博斯腾湖

中图分类号: P343.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)03-0009-08

Studies on changes in water level and storage of Bosten Lake based on satellite-borne radar altimetry data

WU Hongbo^{1,2,3}

(1. Department of Geographic Sciences, 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, Beijing 100101, China)

Abstract: In order to understand the fluctuation change of water level, water surface area and water storage of inland lakes under the background of climate change, it is necessary to scientifically and rationally guide the utilization and development of lake water resources. The changes of Bosten lake water storage were estimated by the lake water area and water level that derived from the Landsat TM/ETM/OLI imagery and multi-mission satellite altimetry dataset, respectively. The Normalized Difference Water Index (NDWI) was used to extract the lake water area of Bosten Lake, and the lake surface water level was derived from the satellite-borne altimetry data. The observation data of the lake water level was employed to certify the satellite-derived water level. According to the correlation between lake area and water level, water storage and water level, the serial curves of lake water storage fluctuations was constructed. The inter-annual characteristics of water level and water storage change were also discussed. The results showed that the absolute errors of the derived-water level of ICESat-GLAS, ENVISat&ERS and Jason-1&2 were less than 0.21 m, 0.18 m and 0.15 m, respectively; and has strong correlation and consistency with each other. The lake level continued to increase from 1990 to 2002; however, it declined from 2002 to

收稿日期: 2018-06-28; 修回日期: 2018-10-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0404302); 国家自然科学基金青年项目(41601067); 中国博士后科学基金项目(2017M611011)

作者简介: 吴红波(1984-), 男, 河北栾城人, 理学博士, 博士后, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为 GIS、RS 技术应用和冰川水资源。

2015. The lake water area in 2015 reduced by (32.20 ± 3.5) km² compared with 1990, the annual average water level in 2015 decreased by (0.81 ± 0.19) m, and lake water volume in 2015 decreased by (0.949 ± 0.022) billion m³. Therefore, the change of lake water storage provides a reference for understanding the impact mechanism of the climate system and human activities.

Key words: lake storage; lake level; satellite-borne; altimetry data; light laser detection and ranging; Bosten Lake

1 研究背景

湖泊作为区域陆地水循环和气候变化的重要载体之一^[1],是大气圈、冰冻圈、生物圈、岩石圈和陆地水圈相互作用的连接点^[2],是物质循环、能量流动和信息传递的重要场所。内陆湖泊水量主要依靠大气降水、地表径流、冰雪融水和地下水补给。湖泊水量受气候、地貌、土壤、植被等自然因素和人为活动的共同作用,其变化过程存在一些确定性规律,同时也表现出强烈的随机性。在气候变化和人类活动的共同干预下,湖泊水位和面积变化相继发生了一系列波动,人口增长和经济社会发展对内陆河流径流和湖泊水量的依赖程度愈加明显^[3]。因此,内陆湖泊的变化不仅能够揭示区域气候变化特征,也有助于理解内陆湖泊水循环过程、湖泊水量驱动机理及水量平衡,应对我国西北地区淡水资源短缺具有重要意义。

目前,湖泊水位、流量、面积等实时监测资料的获取,主要依靠地面定点观测和水文调查方法,而水文调查方法时效性差、成本较高,地点观测法较难反映湖泊水位、面积变化的时空特征。随着遥感技术、空间定位、卫星通信、地理信息系统等对地观测技术的发展,星载遥感技术能为全球气候变化提供全实时监测的数据源。利用多光谱遥感技术在湖泊面积信息动态监测方面,已有相关报道^[4]。刘瑞霞等^[5]根据水体与地物光谱特性的反射率差异,利用 NOAA/AVHRR 资料定量反演出了博斯腾湖面积信息。玉素甫江·如素力等^[6]采用多波段比值法对 Landsat ETM 影像中水体进行分类识别与信息提取,并在博斯腾湖流域水体和非水体信息提取的总体精度达到 99.29%。孙爱民等^[7]利用长序列的 Landsat 影像提取 1988-2014 年博斯腾湖面积变化,并分析了湖水面积年际变化及空间变化趋势。伊丽努尔·阿力甫江等^[8]对博斯腾湖水位变化的自然要素与人为要素进行驱动力影响分析,认为不同时期的气候要素变化对水位波动影响是有差异的。白淑英等^[9]利用 MODIS 积雪产品和 SSM/I 雪深数据,系统分析了博斯腾湖流域雪盖、雪深的时空变化规律及

其对水量波动影响。王涛等^[10]利用博斯腾湖流域 2001-2013 年 16 天合成 MODIS NDVI 影像,分析了植被变化对水文响应及时空差异。而且,对于湖泊水位变化估计及不确定性,星载雷达和激光雷达测高技术垂直结构和地表高度测量上的精度可达到分米级,可以满足湖泊水位信息提取的精度要求,尤其是较大面积的湖泊水位估计具有较大潜力^[11]。

近年来,国内外研究人员利用 TOPEX/Poseidon、ICESat、CryoSat-2、ENVISat、Jason-1&2 等在湖泊的水位变化中进行了一些相关研究,张国庆等^[12]利用 ICESat 和 Landsat 数据对中国十大湖泊水量平衡进行了估算,并结合湖水表面高程数据探讨了湖泊水位变化趋势。Hwang 等^[13]利用 TOPEX/Poseidon 测高资料尝试构建中国 6 个内陆湖泊的水位时变序列,发现水位估计值与测量结果具有很好的一致性。但是,从已有的星载遥感技术发展、应用和湖泊信息获取手段来看,主要是针对湖泊面积、水位的遥感监测与估计,而对湖泊水量变化参数估计未引起足够重视,也鲜有相关报道。

为了检验星载雷达测高数据在湖泊变化监测的可行性,通过湖泊面积与水位、水位与水量变化的相关关系,联合 Landsat 多光谱遥感数据,反演出博斯腾湖湖泊水位、面积、水量变化信息以及趋势,为湖泊水文过程模型、水资源管理提供理论基础和数据支持。文中基于 ICESat、ENVISat、Jason-1&2、ERS-1&2 测高数据和 Landsat TM/ETM/OLI 资料,首先,借助水体归一化指数(Normalized Difference Water Index, NDWI)提取 1990-2015 年博斯腾湖湖泊水域面积;其次,利用雷达测高数据提取湖泊水面的高程信息和水位瞬时值,并结合大湖区附近水文站的水位、水量数据对 ICESat、ENVISat、Jason-1&2、ERS-1&2 的水位估计值进行对比与验证;再次,根据湖泊面积-水位-水量的相关关系和遥感数据源不确定性误差,构建 1990-2015 年博斯腾湖水域面积、水位和水量波动曲线;最后,分析博斯腾湖湖泊面积、水位和水量年际变化特征,旨在为博斯腾湖流域水资源合理配置、生态环境可持续发展和气候变化研究提供技术支持。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

博斯腾湖位于天山南麓焉耆盆地东南部,新疆维吾尔自治区博湖县境内,属于山间陷落湖,地理范围 $45^{\circ}56' \sim 42^{\circ}14' \text{ N}$ 、 $86^{\circ}40' \sim 87^{\circ}56' \text{ E}$ 。博斯腾湖包括大湖区、小湖群和湖滨湿地3部分。其中,博斯腾湖湖水补给主要来自开都河、黄水沟、清水河流域山区冰雪融水、大气降水和地表径流,湖泊出水补给孔雀河见图1。流域属于暖温带干荒漠气候,受海拔高差影响,降水量、气温等差异较大。根据中国第二次冰川编目资料显示^[14],流域内冰川数目为700条,冰川面积达 332.89 km^2 。

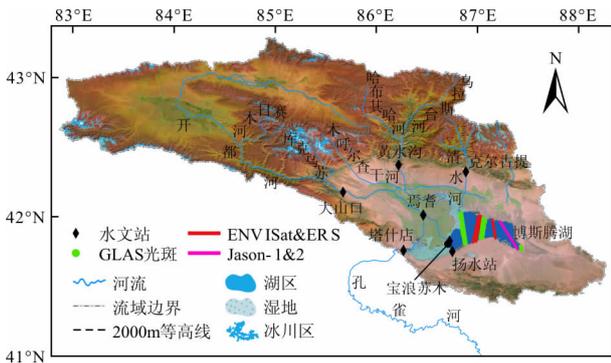


图1 博斯腾湖流域及星载测高数据的分布

2.2 数据来源

(1)多光谱遥感数据。选取1990-2015年间湖泊水面无冰封、无云覆盖($\leq 10\%$)的Landsat TM/ETM/OLI遥感影像,共297景(见表1),其中,Path/Row为142/31的影像190景,Path/Row为143/31的影像107景。Landsat TM/ETM/OLI资料通过美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS) Global Visualization Viewer (GloVis)查询下载^[15]。

(2)多源星载雷达测高数据。利用2003年2月至2009年10月ICESat-GLAS测高资料、2002年1月至2010年12月期间的Jason-1&2卫星雷达高度计测高数据、2002年3月至2010年4月期间的ENVISat卫星雷达测高资料,提取湖泊水面高度变化序列。其中,ICESat-GLAS测高资料中使用GLA01和GLA14产品^[16],数据版本分别为33和34,研究时段为2003年10月22日至2009年10月11日,湖泊大湖区内GLAS光斑共计2743个,见表2;GLAS数据可从美国冰雪数据中心(National Snow and Ice Data Center, NSIDC)网站 <http://nsidc.org/data/icesat/> 获取。

选用1990-2015年ENVISat、ERS-1&2、Jason

-1&2卫星的GDR数据(Geophysical Data Record),用于博斯腾湖瞬时水位估计,GDR数据通过法国图卢兹大学LEGOS(Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales)实验室(URL:<http://www.legos.obs-mip.fr/>)获取,观测时段为2002年10月1日-2015年1月29日。

(3)水文观测资料。博斯腾湖流域内大山口、黄水沟、克尔古提、焉耆水文站的入湖年径流量、年引水量数据,通过中国水文信息网(URL:<http://www.hydroinfo.gov.cn/>)获取。宝浪苏木、扬水站位于湖泊水域周边,其当日水位观数据用于与ICESat、Jason-1&2、ENVISat、ERS-1&2测高资料的水位估计值进行验证与对比。塔什店水文站位于孔雀河上游,用于监测湖泊流入孔雀河水量。

2.3 研究方法

2.3.1 湖泊水域面积信息提取

(1)选取1990年3月15日的Landsat TM遥感影像的湖泊界限和水域范围,作为湖泊面积变化的参考。

(2)多源多时相Landsat遥感数据经过几何校正、地理配准、辐射校正和大气校正等处理后,可用于湖泊水域范围识别和面积提取。

(3)利用归一化水体指数 R_{NDWI} 可突出水体信息,抑制地表土壤、植被信息的特性进行阈值分割^[17]。

$$R_{NDWI} = \frac{r_{green} - r_{nir}}{r_{green} + r_{nir}} \quad (1)$$

式中: r_{green} 为Landsat TM/ETM/OLI影像的绿色波段反射率; r_{nir} 为近红外波段的反射率。当 R_{NDWI} 值大于0.3时,该像元的地物类型为水体。

(4)当确定博斯腾湖水域范围后,统计出任一时期湖泊水域面积 A_{lake,t_i} 和面积误差 S_e ,湖泊水域面积误差用公式(2)计算^[18]:

$$S_e = \sum \lambda^2 \cdot \left[\frac{2(\sqrt{\sum \lambda^2} + \sqrt{\sum \varepsilon_{geo}^2})}{\sqrt{\sum \lambda^2}} \right] + \sum \varepsilon_{geo}^2 \quad (2)$$

式中: S_e 为任一时期面积误差, km^2 ; λ 为波段空间分辨率,像元大小近似采用 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$; ε_{geo} 为配准误差, m 。通过增加地面控制点的数量,均匀分布控制点,使湖泊水域边缘区的配准误差绝对值小于 5 m 。

(5)统计出任一 t_i 时期Landsat影像中博斯腾湖水域范围内的像元数量,采用公式(3)估算湖泊水域面积 A_{lake,t_i} :

$$A_{lake,t_i} = \frac{1}{1 \times 10^6} \sum_{p=1}^n a_{lake,t_i} \quad (3)$$

表 2 2003-2009 年博斯腾湖大湖区 GLAS 光斑数据汇总

ICESat 卫星过境日期/(年-月-日)	GLAS 光斑数量	ICESat 卫星过境日期/(年-月-日)	GLAS 光斑数量	ICESat 卫星过境日期/(年-月-日)	GLAS 光斑数量
2003-10-22	11	2005-05-26	12	2007-04-11	106
2003-10-27	91	2005-05-31	90	2007-10-08	15
2003-11-16	147	2005-10-27	13	2007-10-13	93
2004-02-23	15	2005-11-01	91	2007-11-02	148
2004-02-27	91	2005-11-21	101	2008-02-23	10
2004-03-19	50	2006-02-28	19	2008-02-27	96
2004-05-24	22	2006-03-04	99	2008-03-19	32
2004-05-28	48	2006-03-25	126	2008-10-10	18
2004-06-18	42	2006-05-30	20	2008-10-14	91
2004-10-10	21	2006-06-03	88	2008-12-15	57
2004-10-14	87	2006-06-24	96	2009-03-14	20
2004-11-04	117	2006-10-31	21	2009-03-19	5
2005-02-24	15	2006-11-04	88	2009-04-08	117
2005-03-01	87	2007-03-17	3	2009-10-06	19
2005-03-21	100	2007-03-22	15	2009-10-11	90

为了使多源雷达测高资料在星下点的高程参考系统具有一致性和可比性,文中分别将不同时期的 ICESat-GLAS、ENVISat、ERS 和 Jason-1&2 的水面高程值做一元线性回归修正,修正后的瞬时水位估计值 \hat{H}_{lake} 用公式(5)估算:

$$\hat{H}_{lake} = a \cdot h_{alt,lake} + b \quad (5)$$

式中: $h_{alt,lake}$ 为 Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) 重力位模型下的地表高程, m; a 为斜率; b 为高度偏移常数^[19]。TOPEX、Jason-1、Jason-2、GLAS、ENVISat&ERS 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)、(0.06 ± 0.04)、(0.39 ± 0.62) cm/a。当每次卫星过境时,湖泊表面实际上反映的是水位高度轮廓线^[20],呈抛物线或者波浪形状;湖面实际平均水位计算应剔除最大值和最小值^[21],湖泊水位平均值 \bar{H}_{lake} 的计算式为:

$$\bar{H}_{lake} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{H}_{lake} \quad (6)$$

式中: \hat{H}_{lake} 为某一时段内的湖泊水位估计值, m; n 为沿着卫星轨迹上的光斑或者星下点数量。任一时段 $T_{t_{i+1}-t_i}$ 内,湖泊平均水位变化量 ΔH ,可用公式(7)估算:

$$\Delta H = \bar{H}_{lake,t_{i+1}} - \bar{H}_{lake,t_i} \quad (7)$$

式中: $\bar{H}_{lake,t_{i+1}}$ 为 t_{i+1} 时刻的湖泊水位值, m; \bar{H}_{lake,t_i} 为 t_i 时刻的湖泊水位值, m。

(2) 湖泊水量变化估计。根据内流湖泊水量平衡方程,任一时段 $T_{t_{i+1}-t_i} = t_{i+1} - t_i$ 内,湖泊水量变化值 ΔV_{lake} 由湖泊水位和湖泊水域面积决定,估算关系式见公式(8):

$$\Delta V_{lake} = \frac{1}{3} (V_{t_{i+1}} + \sqrt{V_{t_{i+1}} \cdot V_{t_i}} + V_{t_i}) \quad (8)$$

式中: $V_{t_{i+1}}$ 为 t_{i+1} 时刻的湖泊容积, km³; V_{t_i} 为 t_i 时刻的湖泊容积, km³。

考虑湖泊面积和水位的遥感和估计偏差的共同影响,湖泊水量变化值 ΔV_{lake} 简化为:

$$\Delta V_{lake} \approx \left[\frac{1}{3} (A_{lake,t_{i+1}} + \sqrt{A_{lake,t_{i+1}} \cdot A_{lake,t_i}} + A_{lake,t_i}) \cdot \Delta H \right] + \delta v_{lake} \quad (9)$$

$$\Delta V_{lake} \approx \left[\frac{1}{3} (A_{lake,t_{i+1}} + \sqrt{A_{lake,t_{i+1}} \cdot A_{lake,t_i}} + A_{lake,t_i}) \cdot (\bar{H}_{lake,t_{i+1}} - \bar{H}_{lake,t_i}) \right] + \delta v_{lake} \quad (10)$$

式中: $A_{lake,t_{i+1}}$ 为 t_{i+1} 时刻的湖泊水域面积, km²; A_{lake,t_i} 为 t_i 时刻的湖泊水域面积, km²。 $\bar{H}_{lake,t_{i+1}}$ 为 t_{i+1} 时刻的湖泊水位, m; \bar{H}_{lake,t_i} 为 t_i 时刻的湖泊水位, m。 δv_{lake} 为 $T_{t_{i+1}-t_i} = t_{i+1} - t_i$ 时段内湖泊水量变化的

不确定偏差, km^3 。

2.3.3 湖泊水量变化的估计误差 若忽略人工调水量和地下水交换等影响, 内陆湖泊水量变化的偏差主要由湖泊面积估计误差和水位误差共同决定^[22], 湖泊水量变化的估计偏差 δv_{lake} 计算式为:

$$\delta v_{lake} = \left[\sum_{i=1}^n (S_e \cdot \bar{h}_{lake,e}) \right] + e_{bed} \quad (11)$$

式中: S_e 为湖泊面积估计误差, km^2 ; $\bar{h}_{lake,e}$ 为湖泊平均水位估计误差, m ; e_{bed} 为湖盆形态及变化所引起的容量误差, km^3 。

鉴于湖盆的形态及其变化对湖泊容积和水量变化估计产生不确定误差, 对于同一湖泊的水量误差, 湖盆地形误差 e_{bed} 可描述为

$$e_{bed} = e_1 + e_2 + e_3 + e_4 + e_5 \quad (12)$$

式中: e_1, e_2, e_3, e_4, e_5 分别为湖岸、沿岸带、湖岸边浅滩、水下斜坡、湖盆底地形变化所引起的水量估计偏差。

3 结果与分析

3.1 水位估计值与当日水位观测值对比

为了检验 ENVISat&ERS、Jason-1&2 和 ICESat-GLAS 的瞬时水位估计值的准确性和可比性, 既要 对星下点做同一投影坐标系和高程参考, 也需要对系统误差做一元线性回归拟合和地球物理修正, 使湖泊水面高程值具有可比性。由图 2 可知, ENVISat&ERS、Jason-1&2 和 ICESat-GLAS 的当日水位估计值与附近扬水站、宝浪苏木水文站的湖面水位观测值的简单相关系数分别为 0.95、0.97 和 0.98, 绝对误差分别小于 0.21、0.18 和 0.15 m。随着 ICESat 卫星运行时间的推移和仪器特性下降, 星下点的高程误差有节律性增加, 此类系统性误差可通过线性回归平移模型进行修正。由于 ENVISat 和 ERS 卫星的测高雷达的测量精度限制, 二者的当日水位估计值与当日观测值存在一定的高度偏差, 可

通过增加地表控制点数量和布点区域, 降低水位估计误差。虽然 ENVISat&ERS、Jason-1&2 和 ICESat-GLAS 卫星航迹对应的星下点和 GLAS 光斑与扬水站、宝浪苏木站存在一定距离, 但是当日水位估计值与观测值存在较强的相关性和一致性, 能满足博斯腾湖湖泊水位估计的要求。

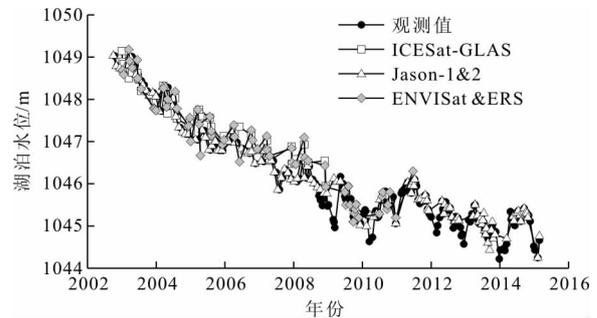
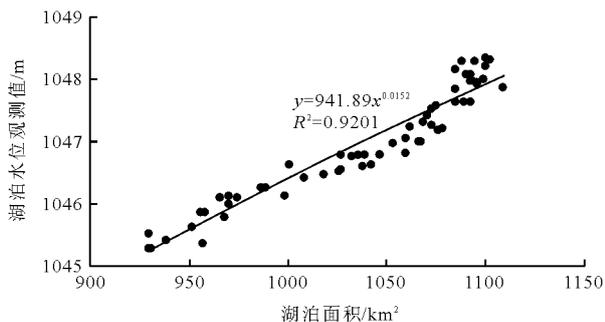


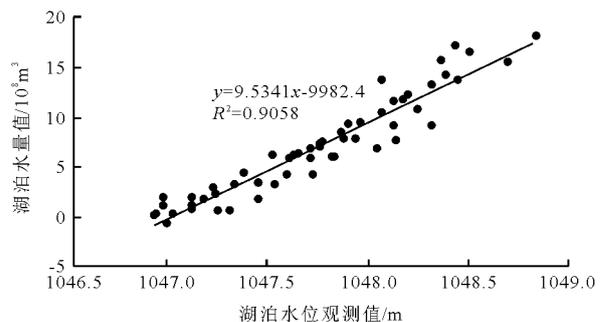
图2 湖泊水位观测值与 GLAS 数据、Jason-1&2 和 ENVISat 资料的水位估计值

3.2 湖泊水位与面积关系

湖泊水位是连接湖泊面积与水量的重要参数之一, 同时, 湖泊面积与水位、水位与水量存在较好的相关关系。为此, 文中根据测高卫星过境时间和当日水位观测值, 随机选取 2002-2015 年 60 景无云覆盖、无冰封的 Landsat TM/ETM 影像提取湖泊水域面积, 根据当日湖泊水位观测值和湖泊水域面积, 利用幂函数对湖泊水域面积与扬水站当日水位观测值进行拟合(见图 3(a)), 复相关系数 R^2 为 0.9201, 通过 0.01 的显著水平检验。利用一元线性回归关系式将当日水位观测值与湖泊水量变化进行拟合(见图 3(b)), 复相关系数 R^2 为 0.9058, 通过 0.01 的显著水平检验。根据 1990-2015 年 Landsat 卫星的 297 景中提取的湖面水域面积时变序列, 将面积-水位拟合关系式、水位-湖泊水量变化拟合关系式, 用于构建 1990-2015 年湖泊水量变化波动曲线。



(a) 湖泊面积与水位关系



(b) 湖泊水位与水量关系

图3 湖泊当日水位值与湖泊面积、水量变化的拟合曲线

3.3 湖泊水位-面积-水量波动变化

1990-2015 年博斯腾湖湖泊面积、水位、水量变化曲线见图 4。由图 4(a)可知,1990-2015 年博斯腾湖水域面积波动较大,1990-2000 年期间,博斯腾湖水域面积呈现增长趋势,1990 年湖泊面积为 $(937.8 \pm 3.5) \text{ km}^2$,到 2000 年增长到 1072.9 km^2 ,以年均 $(13.5 \pm 3.0) \text{ km}^2$ 的速度增长。2002 年年均水位达到 1956 年以来湖泊年均水位的最大值 $(1048.6 \pm 0.25) \text{ m}$ 。与此同时,湖泊最大水域面积为 $(1112.4 \pm 3.5) \text{ km}^2$ 。2002-2015 年期间,博斯腾湖水域面积波变化呈现缩减趋势。到 2015 年,水域面积为 $(905.60 \pm 3.5) \text{ km}^2$,比 2005 年面积减少了 $(63.9 \pm 3.5) \text{ km}^2$,比 1990 年减少了 $(32.20 \pm 3.5) \text{ km}^2$ 。

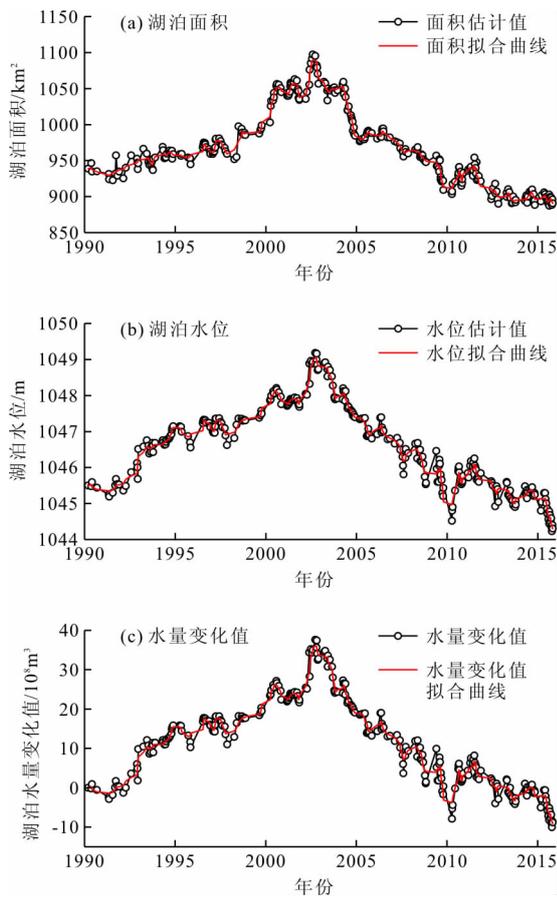


图 4 1990-2015 年博斯腾湖湖泊面积、水位、水量变化曲线

由图 4(b)、4(c)进一步对博斯腾湖年内逐月水位、水量变化情况分析如下:

湖泊水位年内变化曲线呈现出双峰特征,3-4 月份期间水位逐渐升高,出现第一个峰值;5-6 月份缓慢下降,7-8 月份形成第二个峰值;随后湖泊水位开始回落,11 月份或者 12 月份达到最低值,湖

面会出现封冻现象。由于冬季降雪、湖面封冻,雷达测高数据对湖面冰雪的回波信号异常,提取的湖泊水高程值存在较大偏差,一般在湖泊水位年际变化计算中予以剔除。

博斯腾湖年内的水量波动较大,湖泊水量波动受开都河、清水河上游山区降水变化、冰雪融水的作用,6-8 月份气温上升,上游山区冰雪消融;6-8 月份也是降水集中的时段,地表径流增加了入湖水量,因此,7-8 月份湖泊水容量达到当年最大值。

3.4 年际变化分析

1990-2015 年博斯腾湖年均水位、面积、水量变化值的年际变化见图 5。由图 5 可知,1990-2015 年博斯腾湖湖泊面积、年均水位和水量变化整体上波动较大,1990-2002 年呈现出上升过程,2002-2015 年呈现出下降过程;其中,1990-2002 年博斯腾湖年均水位上升了 $(3.24 \pm 0.20) \text{ m}$,平均每年上升 0.27 m 。2015 年博斯腾湖湖泊水位较 2002 年水位下降了 $(4.04 \pm 0.23) \text{ m}$,平均每年下降 0.31 m ,而且湖泊面积减少了约 $(32.20 \pm 3.5) \text{ km}^2$ 。

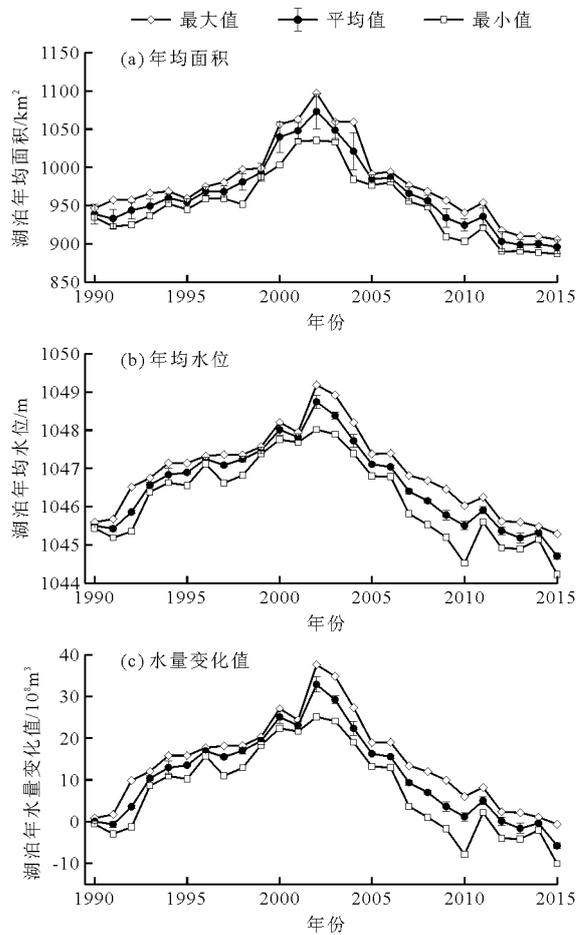


图 5 1990-2015 年博斯腾湖年均水位、面积、水量变化值的年际变化

与1990年湖泊年均水位相比,2015年博斯腾湖的水位和、水量呈现下降趋势(见图5(c)),2015年博斯腾湖湖泊年均水位下降了 $(0.81 \pm 0.19) \text{ m}$;2015年湖泊水量比1990年湖泊水量减少了 $(9.49 \pm 0.22) \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2002-2015年博斯腾湖水位和水量均呈减少趋势,虽然在2010年湖泊水量略有增加,但2005年之后,湖泊水量出现急速减少。博斯腾湖作为中国西北干旱区内流湖,其水量波动不仅受气候变化影响,也在一定程度上收到人类活动的干扰。尤其是在气候变化背景下,围湖造田、不合理开发淡水资源、水利工程调蓄等人类活动不仅在一定程度上造成入湖径流减少、湖泊水位下降,而且也会加剧湖泊面积萎缩和湖区生态环境破坏^[23]。

4 结 论

(1)在考虑卫星航迹的星下点投影坐标系、地理配准、地球物理修正后,ICESat-GLAS、ENVISat&ERS、Jason-1&2测高数据在博斯腾湖湖泊水位估计中具有可比性,ICESat-GLAS、ENVISat&ERS、Jason-1&2的当日水位估计值与附近扬水站、宝浪苏木水文站的湖面水位观测值绝对误差分别小于0.21、0.18、0.15 m,而且具有较强的相关性和一致性,能满足博斯腾湖湖泊水位估计的要求。

(2)湖泊水位作为湖泊面积、水量之间关联的重要参数,同时,博斯腾湖湖泊面积与水位、水位与水量存在显著的相关关系,复相关系数 R^2 分别为0.9201、0.9058。

(3)1990-2015期间年博斯腾湖湖泊面积、年均水位和水量变化整体上波动较大,1990-2002年水位、水量处于增加过程,2002-2015年水位、水量处于下降趋势。与1990年湖泊水位相比,2015年湖泊的年均水位下降了 $(0.81 \pm 0.19) \text{ m}$,2015年湖泊水量比1990年减少了 $(9.49 \pm 0.22) \times 10^8 \text{ m}^3$,湖泊面积缩减了 $(32.20 \pm 3.5) \text{ km}^2$ 。

此外,湖泊水量波动直接反映出人类活动和气候变化共同作用的结果,湖泊水位是地表水体水量波动的遥感反演的重要参数,而且星载雷达测高技术的工作模式和数据采集方式正在打破地表遥感反演的时空限制,使测量精度和数据覆盖能够满足面积较小的湖泊、河流、水库等地表水体的水位、水量监测需求。

参考文献:

[1] 王宁练,刘时银,吴青柏,等. 北半球冰冻圈变化及其对气

候环境的影响[J]. 中国基础科学,2015,17(2):9-14.

- [2] 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(1): 9118-9130.
- [3] RUSULI Y, LI Lanhai, AHMAD S, et al. Dynamics model to simulate water and salt balance of Bosten Lake in Xinjiang, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(3): 2499-2510.
- [4] 白洁,陈曦,李均力,等. 1975-2007年中亚干旱区内陆湖泊面积变化遥感分析[J]. 湖泊科学,2011,23(1): 80-88.
- [5] 刘瑞霞,刘玉洁,郑照军,等. 博斯腾湖面积定量遥感[J]. 应用气象学报,2006,17(1):100-106.
- [6] 玉素甫江·如素力,李兰海,比拉力·依明,等. 基于Landsat ETM+的内陆湖泊水体信息提取方法研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2013,41(12):227-234.
- [7] 孙爱民,冯钟葵,葛小青,等. 利用长时间序列Landsat分析博斯腾湖面积变化[J]. 中国图象图形学报,2015,20(8):1122-1132.
- [8] 伊丽努尔·阿力甫江,海米提·依米提,麦麦提吐尔逊·艾则孜,等. 1958-2012年博斯腾湖水位变化驱动力[J]. 中国沙漠,2015,35(1):240-247.
- [9] 白淑英,王莉,赵巧华,等. 博斯腾湖流域积雪变化及影响因素[J]. 湖泊科学,2012,24(3):487-493.
- [10] 王涛,陶辉,雷刚,等. 博斯腾湖流域植被覆盖变化及驱动因素分析[J]. 中国农学通报,2015,31(4):228-236.
- [11] VERPOORTER C, KUTSER T, SEEKELL D A, et al. A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 41(18):6396-6402.
- [12] 张国庆, XIE Hongjie, 姚檀栋, 等. 基于ICESat和Landsat的中国十大湖泊水量平衡估算[J]. 科学通报, 2013, 58(26):2664-2678.
- [13] HWANG C, PENG M F, NING Jinsheng, et al. Lake level variations in China from TOPEX/Poseidon altimetry: data quality assessment and links to precipitation and ENSO[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 2005, 161(1):1-11.
- [14] 刘时银,姚晓军,郭万钦,等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状[J]. 地理学报,2015,70(1):3-16.
- [15] U. S. Geological Survey. USGS Global Visualization Viewer (GloVis) [DB/OL]. [2017-06-27] <https://glovis.usgs.gov/>.
- [16] SCHUTZ B E, ZWALLY H J, SHUMAN C A, et al. Overview of the ICESat Mission[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(21):L21S01. (下转第23页)

- [J]. 城市道桥与防洪, 2016(1):95-99+11-12.
- [13] 住房和城乡建设部, 中国气象局. 城市暴雨强度公式编制和设计暴雨雨型确定技术导则[Z]. 2014.
- [14] U. S. Water Resources Council. Guidelines for determining flood flow frequency[Z]. Bulletin of the Hydrology Committee (USA), No. 17B, 1982.
- [15] GRUBBS F E, BECK G. Extension of Sample Sizes and Percentage Points for Significance Tests of Outlying Observations[J]. Technometrics, 1972, 14(4):847-854.
- [16] SPENCER C S, MCCUEN R H. Detection of Outliers in Pearson Type III Data[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 1996, 1(1):2-10.
- [17] 罗雅文. 新暴雨特性下重庆市暴雨强度公式修编[D]. 重庆:重庆大学, 2012.
- [18] 王俊萍. 推求绵阳市暴雨强度公式的问题研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2007.
- [19] 翁窈瑶. 城市暴雨强度公式推求方法研究[D]. 北京:北京工业大学, 2012.
- [20] 黄泽钧. Excel 绘制水文计算海森机率格纸的方法[J]. 湖北水利水电职业技术学院学报, 2006(7):330+332.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 室外排水设计规范:GB 50014-2006 [S]. 北京:中国计划出版社, 2014.
- [22] 陈鹏飞. 基于 MATLAB 的暴雨强度公式参数推求[D]. 广州:广州大学, 2010.
- [23] 王杰, 万程炜, 郑敏杰, 等. 高斯牛顿法在皮尔逊Ⅲ型曲线适线中的应用[J]. 人民黄河, 2014, 36(9):27-30.

(上接第 16 页)

- [17] MCFEETERS S K. The use of the normalized difference water Index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7):1425-1432.
- [18] HALL D K, BAYR K J, SCHÖNER W, et al. Consideration of the errors inherent in mapping historical glacier positions in Austria from the ground and space (1893-2001) [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 86(4):566-577.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] PHAN V H, LINDENBERGH R, MENENTI M. ICESat derived elevation changes of Tibetan lakes between 2003 and 2009[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, 17(1):12-22.
- [22] 吴红波, 杨萌, 杨春利, 等. 冰川亏损对哈拉湖流域湖泊水位波动的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(4):13-20.
- [23] 郭梦京, 周孝德, 李鹏, 等. 近 50 年博斯腾湖水位变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2015, 22(2):52-57.