

冰川亏损对哈拉湖流域湖泊水位波动的影响

吴红波^{1,2,3}, 杨萌¹, 杨春利^{4,5}, 李亚楠^{4,5}

(1. 陕西理工大学 历史文化与旅游学院, 陕西 汉中 723000; 2. 中国科学院 青藏高原研究所, 北京 100101; 3. 中国科学院 青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101; 4. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 5. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 青藏高原的内陆湖泊水位和冰川变化和其流域内冰川质量亏损对湖泊水位波动的影响及其贡献对水量平衡研究具有重要意义。以哈拉湖流域冰川为例, 基于 2000 - 2015 年星载雷达测高资料和 Landsat 卫星多光谱遥感资料分别提取湖泊水位和面积变化; 结合附近的托勒台站气象观测资料, 进一步分析其水位波动变化原因和冰川亏损对湖泊水量贡献。结果表明: 受年降水量和夏季降水量增加影响, 哈拉湖水水位呈增加趋势, 但哈拉湖流域冰川亏损加速趋势不明显; 与 2000 年相比, 湖泊面积增加了 $(21.4 \pm 4.8) \text{ km}^2$, 湖泊水位增加了 $(1.68 \pm 0.26) \text{ m}$, 相应的湖泊水容量增加了 $(16.1 \pm 0.3) \times 10^8 \text{ m}^3$ 水当量。流域冰川亏损量达对哈拉湖水水量的贡献率为 39.65%, 降水量增加对湖泊水量贡献了 22.82%。

关键词: 湖泊水位; 冰川质量亏损; 贡献率; 水量; 星载测高资料

中图分类号: TV12; P333

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)04-0013-08

Effect of glacier mass loss on water level fluctuation of lake in Hala Lake basin

WU Hongbo^{1,2,3}, YANG Meng¹, YANG Chunli^{4,5}, LI Yanan^{4,5}

(1. School of History and Tourism, Shaanxi Sci-Tech University, Hanzhong 723000, China; 2. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China; 3. Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to calculate the glacier meltwater contribution to the inland lake water storage fluctuations in the Tibet Plateau, the water level and area is of great significance for the lake water balance in the basin. Taking Hala Lake valley glaciers for example, based on 2000 - 2015 satellite radar altimeter data and Landsat multi spectral remote sensing data, the paper respectively extracted the changes of lake level and area. Combined with the nearby Toler meteorological observation data, it further analyzed the fluctuation of water level change and glacier loss on lake water. The results show that impacted by the increase of annual and summer precipitation in Hala Lake basin, the water level of Hala Lake basin appears the increasing trend, but the glacier loss acceleration trend is not obvious. Compared with 2000, the lake area of Hala Lake has increased by $(21.4 \pm 4.8) \text{ km}^2$ and the corresponding lake water level increased by $(1.68 \pm 0.26) \text{ m}$ which the lake water storage increased by $(1.61 + 0.03) \text{ billion cubic meters}$. The contribution rate of glacier mass loss to lake water volume in the basin is 39.65%. The increase of precipitation contributes 22.82% to lake water volume.

Key words: lake water level; glacier mass loss; contribution rate; water volume; satellite altimetry data

收稿日期: 2016-02-03; 修回日期: 2016-04-21

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41530748); 国家自然科学基金重大项目(41190084); 中国科学院战略性先导科技专项(B类)资助(XDB03030200); 陕西理工大学人才启动项目(SLGQD16-09); 科技基础性工作专项(2013FY111400)

作者简介: 吴红波(1984-), 男, 河北栾城人, 理学博士, 博士后, 讲师, 从事冰雪遥感和冰川水资源方向研究。

青藏高原山地冰川是中国西部半干旱、干旱地区的重要淡水资源,其消融变化过程随着气候变化而不断变化^[1]。山地冰川融水不仅为下游河流和湖泊提供水源补给^[2],也对区域经济发展和生产生活有着极其重要的意义^[3]。由冰川变化所引发的气候效应、水文效应、环境效应、资源效应和生态效应也备受重视^[4]。在全球气候变暖的背景下,20世纪80年代以来,青藏高原地区冰川正全面退缩^[5],一些河流因山地冰川融化加速而使其径流量大增,施雅风^[6]对青藏高原2050年前冰川萎缩对水资源影响情景预估,冰川融水量对河流径流补给比重在1/3以上。根据已有的气象观测和冰芯记录数据分析,中国西北地区气候将在21世纪初步入暖湿转型期^[7],主要表现在降水量增加超过蒸发量增加所导致的河流径流量增长和内陆湖泊水位上升。

针对祁连山冰川遥感变化、冰川消融对河流径流补给和物质平衡监测研究,刘时银等^[8]对祁连山西段冰川变化进行遥感分析,从小冰期至1956年间冰川面积减小幅度达16.9%。张华伟等^[9]对近50年祁连山疏勒南山地区冰川面积和长度变化进行遥感研究,疏勒南山的部分冰川基本处于稳定,且冰川尾部冰湖面积呈扩张趋势。杨针娘^[10]利用祁连山冰川融水径流模数经验公式推算出河西地区冰川融水占到径流总量的12.5%,但时空差异较大,年内分配不均,疏勒河、党河、洪水河、哈尔腾河、鱼卡河和塔塔楼河等冰川融水补给比重大于30%。冰川消融量和冰川补给河流的理论推算结果较为粗糙,对于复杂的冰川水文观测不足,且缺乏冰川消融的时空变化特征研究。对冰川融水补给内陆湖和外流湖水量的研究表明^[11],星载雷达测高资料在内陆湖

泊水位和冰川高程变化监测上表现出良好的应用前景^[12]。青藏高原地区内陆湖流域冰川变化、湖泊面积、水位估计已有相关研究报道^[13],但在认知内陆湖流域冰川亏损对湖泊水量贡献的研究不足^[14]。

随着雷达测高技术 and 数据处理方式改进,测量精度不断提高,如 Jason-2、Envisat、ICESat-GLAS (Ice, Cloud and Land Elevation Satellite-Geoscience Laser Altimeter System) 和 CryoSat-2 等资料,可达到厘米级精度,能满足冰川亏损对湖泊水量补给相关研究的精度要求^[15]。考虑到青藏高原偏远山区的高山湖泊水位和水量变化受人为活动影响较少,本文基于ICESat-GLAS和Envisat雷达测高资料估算哈拉湖流域冰川物质亏损和湖泊水位变化,根据2000-2015年湖泊面积-水位-水量波动变化关系,并进一步结合祁连山七一冰川和周边托勒气象台站数据,推算出哈拉湖流域冰川亏损量对湖泊水量的贡献率。

1 研究区概况

哈拉湖流域位于青海省海西蒙古族藏族自治州北部,疏勒南山以南,祁连山脉西段,哈尔科山以北(图1),系完整的独立小盆地。流域东西长约120 km,南北宽约78 km,流域面积(4801±20) km²,海拔5808 m的则吾结峰为流域最高峰。哈拉湖属于内陆咸水湖,海拔4076 m,2000年湖泊面积(585±5) km²,湖水补给为高山冰雪融水和降水,湖泊水量变化主要受自然气候因素影响。根据中国第二次冰川编目的冰川现状资料显示^[16],流域内有冰川118条,冰川面积达93.97 km²。哈拉湖流域内河流呈向心状水系^[17],受大陆性气候作用,河流径流季节性变化大。

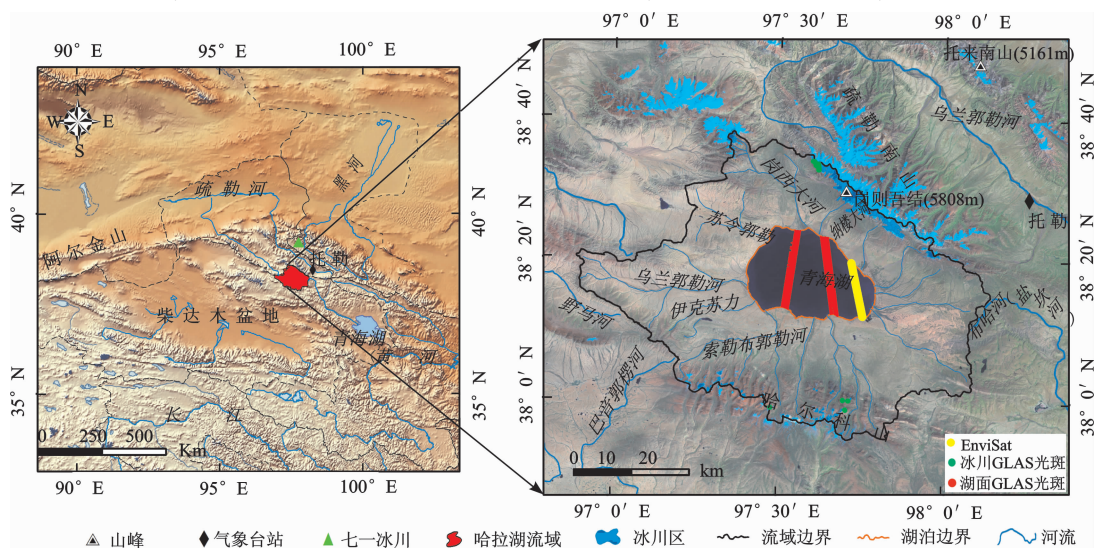


图1 哈拉湖流域地理位置及测高数据分布图

2 研究数据与方法

2.1 研究数据

2.1.1 星载雷达测高资料 湖泊水位和冰川表面高程变化估计采用ICESat卫星搭载的GLAS仪器所记录的GLAS资料^[18],即GLA01和GLA14产品,数据版本为分别为33和34,研究时段为2003年10月27日至2009年4月9日,流域内GLAS数据采集为210 d,哈拉湖水域内有效GLAS光斑共计2867个,见表1,冰川表面有效光斑174个。GLA01和GLA14数据从美国冰雪数据中心NSIDC(National Snow and Ice Data Center)网站<http://nsidc.org/data/icesat/>下载。其中,GLA01产品记录了测高仪所发送和接收波形特征数据^[19]。

GLA14产品记录了每个激光束的40个激光脉冲,每帧脉冲在地面形成一个直径约70 m的圆形GLAS光斑,GLAS光斑脚点间隔为170 m,包含GLAS光斑脚点的经度、纬度、高程、反射率及大气辐射等。

美国冰雪数据中心提供GLAS光斑回波可视化工具IDL Visualizer和GLAS光斑高程提取工具ngat-0.15,GLAS资料的ATBD(Algorithm Theoretical Basis Document)文档说明可从<http://www.csr.utexas.edu/glas/>和<http://nsidc.org/data/icesat/>下载。

此外,所使用Envisat卫星的GDR(Geophysical

Data Record)雷达高度计数据,由欧空局(European Space Agency,ESA)提供,卫星过境时段从2003年2月至2014年4月,其水位高程数据从网站<http://tethys.eaprs.cse.dmu.ac.uk/RiverLake/shared/main>下载,轨迹分布如图1所示。

2.1.2 Landsat TM/ETM/OLI影像 哈拉湖流域2000-2015年Landsat多光谱卫星遥感资料 and 空间分辨率90 m的SRTM DEM v4.1数据由美国地质调查局USGS(United States Geological Survey, URL:)(<http://earthexplorer.usgs.gov/>)下载。选择哈拉湖湖泊上空无云和积雪覆盖的Landsat TM/ETM/OLI卫星多光谱遥感资料,空间分辨率30 m,共计121景(表2);其中TM影像81景,ETM影像23景,OLI影像17景。

2.1.3 气象与冰川观测资料 由于哈拉湖流域缺少气象和冰川观测资料,研究中选择距离哈拉湖流域30 km的托勒气象台站(98.25°E,38.48°N,海拔3367 m)的逐月观测资料中的气温、降水数据,从中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>)下载中国地面国际交换站气候资料日值数据集(V3.0)。距离流域75 km处的祁连山七一冰川冰川物质平衡观测数据^[20],七一冰川(39°14.22'N,97°45.34'E,冰川编号:5Y437C18)位于祁连山脉的托来山,融水注入北大河支流柳沟泉河,属于亚大陆型冰川,其冰川物质平衡观测资料可用于流域冰川亏损的验证与分析^[20]。

表1 2003-2009年哈拉湖水域GLAS光斑资料汇总

| 过境日期 | 计数 | 标准偏差 | 激光发射器 | 过境日期 | 计数 | 标准偏差 | 激光发射器 |
|------------|-----|------|-------|------------|-----|------|-------|
| 2003-10-27 | 118 | 0.05 | L2A | 2006-06-04 | 65 | 0.09 | L3F |
| 2003-11-17 | 112 | 0.10 | L3A | 2006-06-24 | 81 | 0.09 | L3F |
| 2004-05-29 | 58 | 0.10 | L2C | 2006-11-05 | 115 | 0.11 | L3G |
| 2004-06-18 | 116 | 0.08 | L2C | 2006-11-25 | 53 | 0.12 | L3G |
| 2004-10-15 | 57 | 0.15 | L3A | 2007-03-22 | 117 | 0.18 | L3H |
| 2004-11-04 | 117 | 0.07 | L3A | 2007-04-12 | 73 | 0.08 | L3H |
| 2005-03-01 | 118 | 0.07 | L3B | 2007-10-13 | 118 | 0.06 | L3I |
| 2005-03-22 | 118 | 0.08 | L3B | 2007-11-3 | 117 | 0.30 | L3I |
| 2005-05-31 | 117 | 0.10 | L3C | 2008-02-28 | 119 | 0.05 | L3J |
| 2005-06-21 | 117 | 0.08 | L3C | 2008-03-19 | 117 | 0.04 | L3J |
| 2005-11-01 | 120 | 0.05 | L3D | 2008-10-15 | 118 | 0.05 | L3K |
| 2005-11-22 | 118 | 0.13 | L3D | 2008-12-15 | 116 | 0.07 | L2D |
| 2006-03-5 | 118 | 0.04 | L3E | 2009-03-19 | 18 | 0.12 | L2E |
| 2006-03-25 | 118 | 0.04 | L3E | 2009-04-09 | 118 | 0.13 | L2E |

2.2 研究方法

2.2.1 湖泊水面面积变化 湖泊水域识别采用归一化差分水体指数(Normalized Difference Water Index, NDWI),利用波段比值法,将水体反射峰值所在的波段和反射谷处所在的波段分别作为分子和分母,进一步使水体比值差扩大和亮度增强。归一化水体指数 P_{NDWI} 的计算公式为^[21]:

$$P_{NDWI} = \frac{r_{Green} - r_{NIR}}{R_{Green} + r_{NIR}} \quad (1)$$

式中:在 Landsat TM/ETM 影像中, r_{Green} 为绿色波段(0.78 ~ 0.90 μm)的反射率; r_{NIR} 为近红外波段(1.2 ~ 2.5 μm)反射率。当 $P_{NDWI} > 0$ 时,所对应的像元为水体像元投影面积。在 P_{NDWI} 计算过程中,对不同传感器和过境时间的 NDWI 数值进行了统一拉伸,使 P_{NDWI} 结果具有可比较性。

多源遥感数据的所提取的任一期湖泊投影面积 s_i 估算公式:

$$s_i = \sum_{i=1}^m (s_{pixel} + e_i) = \sum_{i=1}^m [(l_{pixel} \cdot b_{pixel}) + e_i] \quad (2)$$

式中: s_{pixel} 为水体像元投影面积, m^2 ; l_{pixel} 为水体像元投影长度, m ; b_{pixel} 为水体像元投影宽度, m ; e_i 包括第 i 期多源遥感数据之间的配准误差和传感器的随机误差。

对于年际湖泊平均面积 S_a 用公式(3) 计算

$$s_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (s_i + s_e) \quad (3)$$

式中: n 为一年内所用遥感影像的期数, $i = 1, 2, 3 \dots, n$; s_i 为第 i 期的湖泊面积, km^2 ; s_e 为第 i 期的湖泊面积不确定性误差, km^2 。

任一研究时段的湖泊面积变化率 s_v

$$s_v = \frac{1}{T}(s_{i+1} - s_i) \times 100\% \quad (4)$$

式中: T 为研究时长, a ; s_i 为研究时段初期时的湖泊面积, km^2 ; s_{i+1} 为研究时段末期时的湖泊面积, km^2 。若 $s_v > 0$, 则湖泊面积处于扩张状态; 若 $s_v < 0$ 为负值, 则湖泊面积在研究时段内呈缩减状态; 若 $s_v = 0$, 则湖泊面积未变化。

表2 2000 - 2015 年哈拉湖 Landsat TM/ETM/OLI 影像数据汇总

| 搭载平台 | 传感器 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | | |
|----------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|--|
| Lansat 5 | TM | 03-25 | 02-24 | 01-10 | 01-13 | 01-16 | 04-24 | 06-14 | 04-30 | 05-18 | 02-14 | 06-09 | 06-12 | 07-08 | | | | | |
| | | 04-10 | 03-12 | 03-31 | 04-19 | 02-17 | 05-10 | 06-30 | 05-16 | 06-03 | 06-22 | 06-25 | 07-14 | 08-25 | | | | | |
| | | 07-15 | 03-28 | 07-05 | 07-08 | 03-04 | 06-11 | 08-01 | 06-01 | 07-05 | 07-24 | 07-11 | 07-30 | 09-26 | | | | | |
| | | 10-19 | 04-13 | 07-21 | 09-10 | 05-07 | 07-13 | 09-02 | 09-21 | 08-06 | 08-09 | 07-27 | 08-31 | 10-12 | | | | | |
| | | 11-04 | 08-19 | 08-22 | 11-13 | 06-08 | 07-29 | 09-18 | | 08-22 | 09-10 | 09-29 | 09-16 | 10-28 | | | | | |
| | | | 09-04 | 10-25 | 11-29 | 06-24 | 09-15 | 10-04 | | | 09-26 | | 10-02 | | | | | | |
| | | | 10-22 | 11-10 | | 07-10 | 10-20 | | | | 10-28 | | | | | | | | |
| | | | | | | 07-26 | 11-05 | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | 08-27 | 11-21 | | | | | | | | | | | | |
| | | Lansat 7 | ETM | 03-17 | 03-20 | 01-02 | 01-05 | | | | | | | | | | | | |
| 05-20 | 06-24 | | | 03-07 | 01-21 | | | | | | | | | | | | | | |
| 06-21 | 10-14 | | | 06-11 | 04-11 | | | | | | | | | | | | | | |
| 07-07 | | | | 08-14 | 09-02 | | | | | | | | | | | | | | |
| 08-08 | | | | 09-15 | 10-20 | | | | | | | | | | | | | | |
| 11-28 | | | | 11-02 | 12-23 | | | | | | | | | | | | | | |
| 12-06 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 12-30 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Lansat 8 | OLI | | | | | | | | | | | | | | 04-14 | 05-03 | 05-22 | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | 06-01 | 06-04 | 07-09 | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | 07-19 | 08-23 | 07-25 | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | 08-04 | 09-08 | 08-10 | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | 09-05 | 11-11 | 11-14 | | |
| | | | | | | | | | | | | | | 10-07 | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | 10-23 | | | | | |

2.2.2 湖泊水位与水量变化估算 考虑到湖水波幅的随机性,雷达星下点水位高程值 h_{laser} 的估计式^[22]

$$h_{laser} = h_{\text{ellipsoid}} - h_{\text{alt}} - h_{\text{geoid}} - \delta h \quad (5)$$

式中: $h_{\text{ellipsoid}}$ 为参考椭球体高度, m; h_{alt} 为测高传感器, 运行高度, m; h_{geoid} 为大地水准面高度, m; δh 为湖泊水位高程随机偏差, m, 受降雪、浮冰、湖泊水深和湖盆影响。 $\delta h \geq 0.3$ m 可剔除漂浮物、浮冰和波浪所引起的星下点高程异常。由于缺乏详细的湖底等深线, 相邻两期的湖水变化量 ΔV_{lake}

$$\Delta V_{lake} = \frac{1}{3}(s_i + \sqrt{s_i s_{i+1}} + s_{i+1}) \cdot \Delta h \quad (6)$$

式中: s_i 和 s_{i+1} 分别为 t_i 时间和 t_{i+1} 时间的投影面积, km^2 ; Δh 是相邻时期的湖泊水位变化绝对高差, m, 即 $\Delta h = h_{i+1} - h_i$ 。 h_{i+1} 和 h_i 分别是 t_{i+1} 时间和 t_i 时间的湖泊水位高程, m。

2.2.3 冰川亏损量对湖泊水量贡献 冰川消融和积累变化是个动态过程, 不仅要考虑冰川表面物质密度差异性, 流域冰川亏损量还需考虑冰川面积和表面高程变化量, 首先利用 GLAS 光斑和 Envisat 测高资料对冰川表面上交叉/重复轨迹的高程校正, 分析 $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ 时间段内的冰川表面高程变化^[23]。其次, 根据冰川表面积雪、粒雪和冰的 GLA01 回波的反射率预设阈值, 借助 Envisat/ASAR 和 TM/ETM/OLI 绿色波段反射率的估算出积雪区、粒雪和裸冰区面积。那么, 流域的冰川表面物质质量变化为 M_g :

$$M_g = \sum_{i=1}^m (s_{glacier,i} \rho_{surface,i} \Delta \bar{h}_{surface,i}) \quad (7)$$

式中: m 为流域内冰川数量; $s_{glacier,i}$ 第 i 条冰川的投影面积, km^2 。 $\rho_{surface,i}$ 为第 i 条冰川表面冰雪物质密度, kg/m^3 。

通过水量平衡方程核算, 内陆湖流域冰川亏损量对湖泊水量贡献率

$$p = M_g / \Delta V_{lake} \times 100\% \quad (8)$$

式中: M_g 为冰川物质亏损量, 10^8 m^3 ; ΔV_{lake} 为湖泊水量增加量, 10^8 m^3 。

2.3 遥感不确定性

多时相遥感数据所提取湖泊面积和冰川面积的不确定性误差可参考文献^[24], 湖面 GLAS 数据估计水位的标准偏差 σ_{glas} 表示为:

$$\sigma_{glas} = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_{j=1}^p (h_{j,glas} - \bar{x}_{j,glas})^2} \quad (9)$$

式中: $h_{j,glas}$ 为 GLAS 光斑脚点高程, m; $\bar{x}_{j,glas}$ 为 GLAS 光斑脚点高程的平均值; p 为湖泊内 GLAS 光

斑个数。

湖泊库容或水量变化的不确定性主要来源于湖泊面积、水位高程及湖底地形变化影响, 湖泊水量的估计误差 δv_{lake}

$$\delta v_{lake} = \left[\sum_{i=1}^n (s_e \bar{h}_{lake,e}) \right] + e_{bed} \quad (10)$$

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} 为湖底地形变化所引起的误差, $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

3 结果与分析

3.1 不确定性分析

3.1.1 雷达测高资料对比 由图 2 可知, 2003 - 2009 年哈拉湖 Envisat 估计水位与 GLAS 资料估计的水面高程存在一定高程差, 存在较好的一致性; 需要对 GLAS 的湖面水位数据做地球物理修正后^[25], 使 GLAS 光斑高程与 Envisat 测高数据绝对误差小于 0.2 m, 二者的水位估计值更具有可比性。

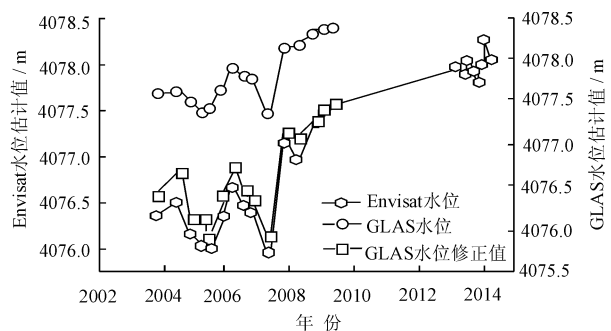


图 2 ICESat - GLAS 和 Envisat 资料的哈拉湖水位估计值对比

3.1.2 湖面面积与水位高度关系 选择与 ICESat 卫星过境时间相同的 24 景 Landsat 遥感影像(图 3), 建立湖泊面积与水位高程的线性拟合关系式 $y = 0.031x + 4059.4$, 复相关系数 0.8134, 重建研究时段内 GLAS 资料的湖泊高程和所对应的湖泊面积。

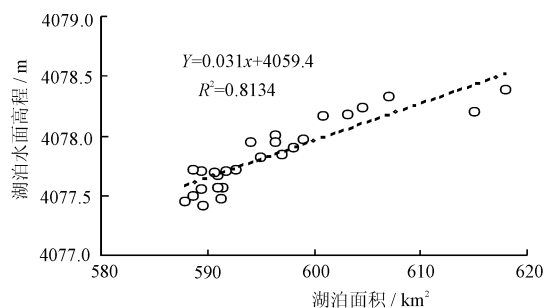


图 3 2003 - 2009 年哈拉湖湖泊面积和水位高程估计值关系

3.2 湖泊水位 - 面积 - 水量变化

利用 Landsat 卫星资料计算湖泊面积变化可知, 2000 年以来湖泊面积呈扩张趋势(图 4a), 从 2000 年的 (589 ± 5.8) km² 扩张至 2015 年的 (615 ± 5.8) km², 面积增加了 (21.4 ± 4.8) km², 湖泊面积年均变化率为 (1.43 ± 0.33) km²/a。由图(4b)可知, 湖泊水位也呈波动上升趋势, 与 2000 年相比, 湖泊水位上升了 (1.68 ± 0.26) m, 年增长率为 (0.12 ± 0.15) m, 相应的湖泊水容量增加了 $(16.1 \pm 0.3) \times 10^8$ m³ 水量(图 4c)。

分析湖泊面积、水位高程的年际波段变化可知, 2005 年后湖泊水位高程与面积均呈现出较高的增长趋势(图 5a)。受冰川消融和夏季降水共同影响, 年内的湖泊面积和水位在 8 - 9 月份会存在一个峰值。冬季哈拉湖湖面处于冰封期, 积雪或者冰层冻胀会导致湖面高程的略有增加(图 5b)。

3.3 气温与降水变化分析

由图 6 可知, 哈拉湖流域内年际和夏季降水量均在增加, 年均气温和夏季气温均呈升高趋势。2000 - 2015 年托勒站多年平均降水量 340.3 mm, 多年平均气温 -1.7 °C, 年际气温和降水量均呈增加, 且夏季、年降水量的增长率分别为 2.5 mm/a, 4.5 mm/a。此外, 哈拉湖面积年变化与托勒站降水、夏季均温具有较好的一致性, 湖泊面积较大的年份一般对应降水和温度偏高的年份。尽管托勒站的年均气温和夏季均温均呈增加趋势, 但夏季气温线性斜率大于年均气温, 这说明夏季气温增长速率大于年均气温增长。夏季气温也增加, 流域内冰川融水量增大, 冰川融水补给河流径流中的比重会增大^[26], 对湖泊面积扩张的贡献不可低估。根据托勒站气象观测, 2000 年以来周边山区夏季和年降水量呈增加趋势, 这与青藏高原北部的降水量增加趋势

较为一致^[27]。随着年降水量的增加, 哈拉湖流域降水量增加对湖泊水量的贡献为 22.8%, 此外, 湖面蒸发和山区积雪对内陆湖水量的贡献不可忽视。

3.4 冰川亏损对湖泊水量的补给

哈拉湖流域人类活动较少、工业生产和农业灌溉对湖泊水量需求较少, 可忽略不计, 因此, 内陆湖泊水位和冰川融水主要受自然气候影响。对大陆性冰川而言^[28], 随着夏季气温的增加, 冰川消融量增加, 湖泊年内水位会有峰值会有明显增大。

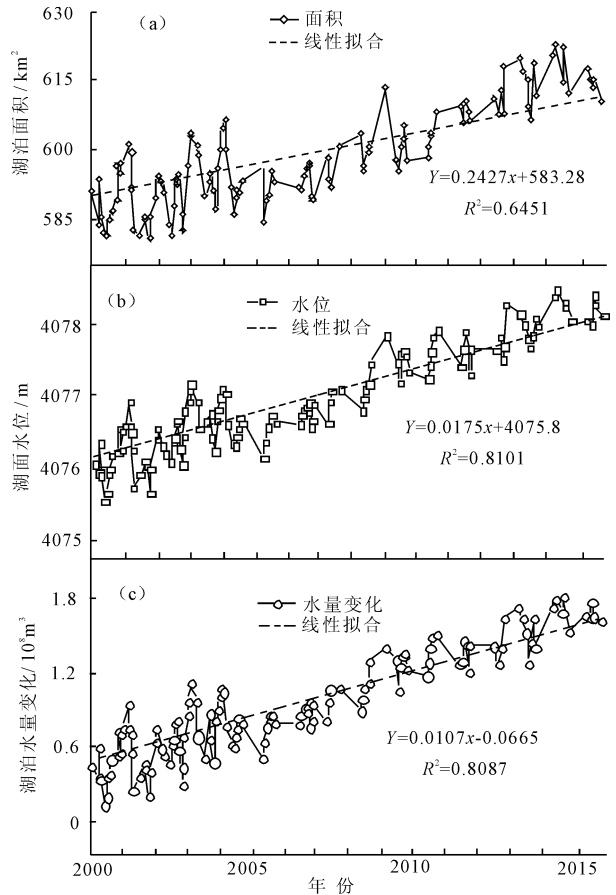
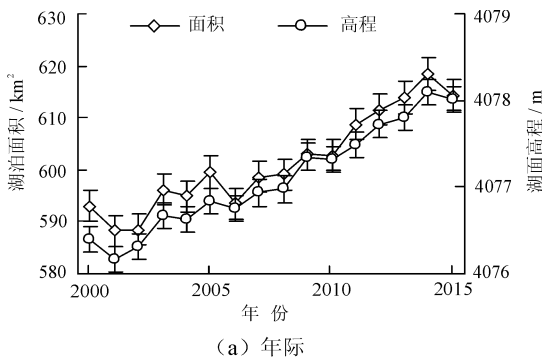
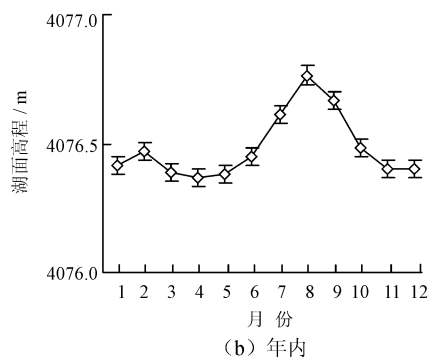


图 4 2000 - 2015 年哈拉湖面积 - 水位 - 水量波动情况



(a) 年际



(b) 年内

图 5 2000 - 2015 年哈拉湖面积和平均水位波动变化

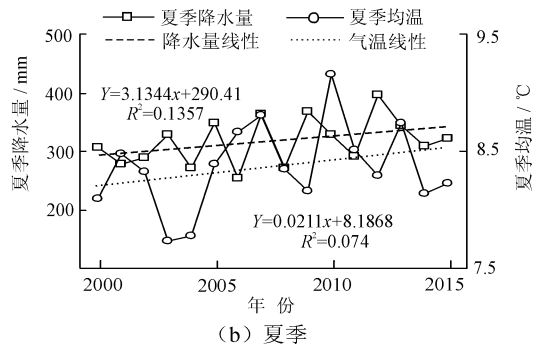
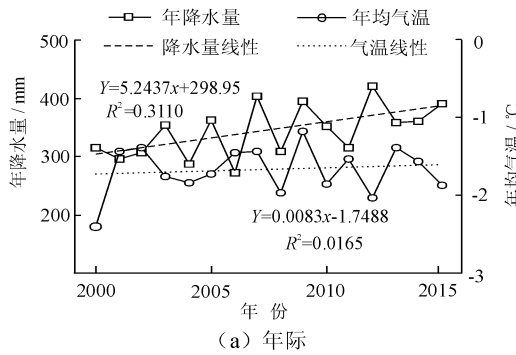


图6 2000-2015年托勒站年降水量、年均气温、夏季降水量和夏季均温变化图

利用 ICESat 光斑和 Envisat 测高资料估算出, 2000 - 2015 年流域冰川累积亏损量为 $(6.9 \pm 2.0) \times 10^8 \text{ m}^3$ 水当量, 即冰川区每年平均减薄 $(0.43 \pm 0.20) \text{ m}$ 。研究时段内的七一冰川物质平衡观测值与 GLAS 资料估计的哈拉湖流域冰川物质平衡估计值, Pearson 相关系数为 0.97, 冰川亏损均呈递减趋势(图 7)。假设流域冰川物质亏损量全部流入湖泊, 那么冰川亏损量对湖泊水量的贡献率为 39.65%。

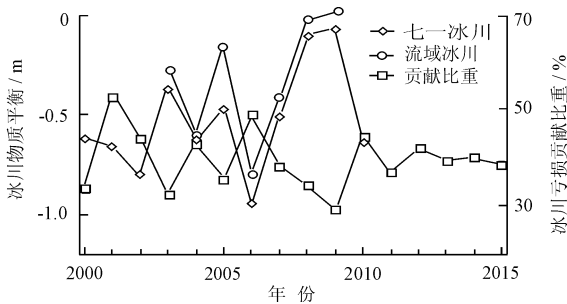


图7 2000-2015年祁连山七一冰川、哈拉湖流域冰川物质平衡与流域冰川亏损贡献率

4 结论

利用多源遥感资料分析 2000 年以来哈拉湖湖泊面积-水位-水量变化, 综合分析流域冰川亏损、降水量变化对湖泊水量波动的影响, 主要结论有:

(1) 基于多光谱遥感资料估算的湖泊面积与星载雷达测高资料估算的湖泊水位, 具有良好的一致性, Pearson 相关系数达到 0.85 以上, 且 Envisat 卫星与 ICESat - GLAS 测高资料将水位估计值能够很好的匹配。夏季气温, 年降水量和冰川亏损量变化直接会导致湖泊水位和水量波动。

(2) 2000 - 2015 年哈拉湖湖泊面积与水位均呈波动性上升趋势, 与流域冰川亏损量成正比。与 2000 年相比, 哈拉湖水容量增加了 $(16.1 \pm 0.3) \times 10^8 \text{ m}^3$ 水当量, 流域内降水量增加贡献了 3.7×10^8

m^3 水当量, 其中流域冰川亏损对湖泊水量增加贡献了 39.65%。

(3) 哈拉湖流域降水量增加对湖泊水量增加贡献率大于 22.82%, 且夏季气温和年降水量是影响冰川物质亏损对湖泊水量贡献变化的主导因素。由于缺少哈拉湖流域冰川物质平衡、冰川气象和水文观测资料, 文中对降水变化和流域冰川亏损对湖泊水量的贡献会有一定偏差, 但仍需在冰川气象观测、冻土退化、湖面蒸发方面对湖泊水量平衡影响作深入分析。

参考文献:

- [1] 姚檀栋, 姚治君. 青藏高原冰川退缩对河水径流的影响[J]. 自然杂志, 2010, 32(1): 4-8.
- [2] Sorg A, Bolch T, Stoffel M, et al. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia)[J]. Nature Climate Change, 2012, 2(10): 725-731.
- [3] 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(6): 9-14.
- [4] 秦大河, 丁永建. 冰冻圈变化及其影响研究——现状, 趋势及关键问题[J]. 气候变化研究进展, 2009, 5(4): 187-195.
- [5] 姚檀栋, 刘时银, 蒲健辰, 等. 高亚洲冰川的近期退缩及其对西北水资源的影响[J]. 中国科学(D辑), 2004, 34(6): 535-543.
- [6] 施雅风. 2050年前气候变暖冰川萎缩对水资源影响情景预估[J]. 冰川冻土, 2001, 23(4): 333-341.
- [7] Shi Yafeng, Shen Yongping, Kang Ersi, et al. Recent and Future Climate Change in Northwest China[J]. Climatic Change, 2006, 80(3): 379-393.
- [8] 刘时银, 沈永平, 孙文新, 等. 祁连山西段小冰期以来的冰川变化研究[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 227-233.
- [9] 张华伟, 鲁安新, 王丽红, 等. 祁连山疏勒南山地区冰川变化的遥感研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(1): 8-13.
- [10] 杨针娘. 祁连山冰川水资源[J]. 冰川冻土, 1988, 10

- (1): 36 - 46.
- [11] Song Chunqiao, Sheng Yongwei. Contrasting evolution patterns between glacier-fed and non-glacier-fed lakes in the Tanggula Mountains and climate cause analysis[J]. *Climatic Change*, 2016,135(3):493 - 507.
- [12] Tourian M J, Tarpanelli A, Elmi O, et al. Spatiotemporal densification of river water level time series by multimission satellite altimetry[J]. *Water Resources Research*, 2016(2):1140 - 1159.
- [13] 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(7):12 - 22.
- [14] 姚檀栋, 秦大河, 沈永平, 等. 青藏高原冰冻圈变化及其对区域水循环和生态条件的影响[J]. *自然杂志*, 2013,35(3):179 - 186.
- [15] Crétaux J F, Birkett C. Lake studies from satellite radar altimetry[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2006, 338(14):1098 - 1112.
- [16] 郭万钦, 许君利, 刘时银, 等. 中国第二次冰川编目数据集(V1.0)[J]. 寒区旱区科学数据中心, 2014.
- [17] 伍光和, 刘潮海. 哈拉湖流域的冰川作用特征及水资源利用问题[J]. *冰川冻土*, 1979,1(2):27 - 32.
- [18] Schutz B E, Zwally H J, Shuman C A, et al. Overview of the ICESat Mission[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005,32(21):97 - 116.
- [19] Abshire J B, Sun Xiaoli, Riris H, et al. Geoscience laser altimeter system (GLAS) on the ICESat Mission: On-orbit measurement performance[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005,32(21):21 - 24.
- [20] 王宁练, 贺建桥, 蒲健辰, 等. 近50年来祁连山七一冰川平衡线高度变化研究[J]. *科学通报*, 2010,55(32):3107 - 3115.
- [21] McFeeters S K. Using the normalized difference water index (NDWI) within a geographic information system to detect swimming pools for mosquito abatement: A practical approach[J]. *Remote Sensing*, 2013,5(7):3544 - 3561.
- [22] Zhang Guoqing, Xie Hongjie, Kang Shichang, et al. Monitoring lake level changes on the Tibetan Plateau using ICESat altimetry data (2003 - 2009)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011,115(7):1733 - 1742.
- [23] Wu Hongbo, Wang Ninglian, Jiang Xi, et al. Variations in water level and glacier mass balance in Nam Co lake, Nyainqentanglha range, Tibetan Plateau, based on ICESat data for 2003 - 09[J]. *Annals of Glaciology*, 2014,55(66):239 - 247.
- [24] 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.
- [25] Wang Ninglian, Wu Hongbo, Wu Yuwei, et al. Variations of the glacier mass balance and lake water storage in the Tarim Basin, northwest China, over the period of 2003 - 2009 estimated by the ICESat - GLAS data[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(3): 1997 - 2008.
- [26] 宋高举, 王宁练, 蒋熹, 等. 气候变暖背景下祁连山七一冰川融水径流变化研究[J]. *水文*, 2010,30(2):84 - 88.
- [27] 陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 等. 青藏高原环境变化科学评估: 过去, 现在与未来[J]. *科学通报*, 2015, 60(32):3025 - 3035.
- [28] 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.