

联合 Landsat 影像和 ICESat 测高数据 估计青海湖湖泊水量变化

吴红波^{1,2,3}, 陈艺多¹

(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: 湖泊既是陆地水资源的重要储蓄场所,也是区域和全球水文循环系统的重要组成部分,其水量波动对气候变化较为敏感。为了掌握湖泊面积、水位和水量的变化规律,借助 1988-2018 年 Landsat TM/ETM/OLI 影像和归一化差异水体指数 NDWI(normalized difference water index)提取青海湖湖泊水域面积;利用 ICESat-GLAS(ice, cloud, and land elevation satellite-geoscience laser altimeter system)测高数据提取青海湖湖泊水位变化,并结合观测资料检验陆地 GLAS 光斑脚点高程和湖泊水位的估测精度。根据湖泊面积与水位、水量与水位的关系,构建 1988-2018 年青海湖湖泊面积-水位-水量波动时变序列,并探讨湖泊水位、面积、水量的年内和年际变化特征。结果表明:GLAS 光斑脚点高程与高程实测值的标准误差为 0.14 m,与 SRTM3 高程标准误差为 0.26 m;1988-2018 年青海湖年均水位和水量总体上呈增加趋势,其中年均水位最低值出现于 2004 年,平均水位为(3 193.0 ± 0.16) m,湖泊面积为(4 190 ± 13) km²;与 1988 年年均水位相比,2018 年青海湖年均水位上升了(1.93 ± 0.22) m,湖泊年均面积扩张了(197.75 ± 6.3) km²,湖泊水量增加了(8.93 ± 0.12) km³。

关键词: ICESat-GLAS;湖泊水位;湖泊水量;标准误差;星载测高仪;青海湖

中图分类号:TV211.1⁺1; P237

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)05-0007-09

Estimation of lake water storage change of Qinghai Lake based on the ICESat satellite altimetry data and Landsat satellite imageries

WU Hongbo^{1,2,3}, CHEN Yiduo¹

(1. Department of Geographical Science, Shaanxi of University Technology, Hanzhong 723000, China;

2. Shaanxi Key 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: Lakes are not only important storage places for terrestrial water resources, but also play a vital role in the regional and global hydrological cycles, the water storage of which fluctuates with the climate change. In order to grasp the fluctuation law of lake area, water level and water storage, the lake area of Qinghai Lake was extracted by means of Landsat TM/ETM/OLI imageries during the period of 1988-2018, based on normalized difference water index (NDWI), and the water level change of Qinghai Lake was estimated using ice, cloud, and land elevation satellite-geoscience laser altimeter system (ICESat-GLAS) altimetry data. And then the GLAS footprint elevation of land surface as well as lake water surface was validated with the measured data. Based on the relationship between the lake area and water level, water storage and water level, the time-varying series of lake area-water level-water storage of Qinghai Lake during 1988 to 2018 were constructed, and the characteristics of inter-annual and intra-annual variations of the lake water level, lake area and water storage was discussed. The results show that the root mean square error (RMSE) between the GLAS footprint elevation and the measured elevation

收稿日期:2019-12-12; 修回日期:2020-03-16

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(41601067);中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA19070302);
国家重点研发计划项目(2017YFC0404302);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,博士(后),副教授,硕士生导师,主要从事冰雪遥感和水资源研究。

was 0.14 m, and the *RMSE* between GLAS footprint elevation and that of SRTM3 product was 0.26 m. In the period of 1988 to 2018, both the water storage and water level of Qinghai Lake increased. The lowest annual mean water level appeared in 2004, when the mean annual water level of Qinghai Lake was $(3\ 193.0 \pm 0.16)$ m, and the lake area was $(4\ 190 \pm 13)$ km². Compared to 1988, the mean lake water level of 2018 rose by (1.93 ± 0.22) m, the mean lake area expanded by (197.75 ± 6.3) km² and the water volume increased by (8.93 ± 0.12) km³.

Key words: ice, cloud, and land elevation satellite – geoscience laser altimeter system (ICESat – GLAS); lake water level; lake water storage; root mean square error (RMSE); satellite altimeter; Qinghai Lake

1 研究背景

湖泊作为陆地水体的一部分,也是陆地水循环的重要储蓄场所。在气候变暖背景下,青藏高原的高山湖泊对气候变化的信息较为敏感,是指示气候变化的重要载体和指示器,能够敏感地指示某一区域的降水、蒸发、温度和湿度气象要素变化趋势^[1],因而深受国内外学者的广泛关注^[2-4]。青海湖是我国湖泊面积最大的内陆湖泊,位于青藏高原东北边缘,处于青藏高原高寒区、黄土高原和西北干旱区的过渡地带,是研究气候响应、水量平衡及水文过程的理想场所^[5]。内陆湖泊水量波动不仅受到气候变化影响,而且也受到人类活动干扰。为了揭示青海湖湖泊水量变化规律和特征^[6],急需借助星载遥感技术对青海湖面积、水位、水量的变化进行监测,揭示高山内陆湖泊水量变化规律及气候响应,为青海湖流域生态环境保护提供科学依据。

随着星载测高技术的发展与应用,星载测高雷达和激光雷达测高技术具有了全球覆盖能力^[7],能够较大范围、周期性探测和记录地表水体和海平面的水位变化,在地表高程和地物垂直结构观测方面具有较大潜力和优势^[8]。关于利用星载 ICESat、Jason、EnviSat、Cryosat 等估计全球典型湖泊水位变化的研究^[9-11],国内外已有报道^[12-13]。李生生等^[14]利用 Landsat-8 OLI 数据的绿光和近红外波段提取青海湖湖体边界,在水体与湖滩地的边界准确性和连续性方面具有明显的改进。赵云等^[15]利用主波峰重心偏移法、主波峰阈值法、主波峰 $5 - \beta$ 参数法、传统重心偏移法、传统阈值法和传统 $5 - \beta$ 参数法 6 种算法对 Cryosat-2/SIRAL LRM 1 级数据进行波形重跟踪,提取青海湖水域日均水位,并结合 EnviSat/RA-2 GDR 数据,获得 2002-2015 年的青海湖水位时变序列。此外,青海湖湖泊水域面积的遥感监测研究,主要以季节性和年际变化特征为

主^[16-18]。骆成凤等^[19]利用长时间序列的 MODIS 影像,通过人工提取湖岸线信息,重建青海湖水域面积年变化序列。张洪源等^[20]用 MODIS 影像和 LEGOS (Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiale) 的水位数据,基于湖泊水位-面积关系,揭示了青海湖 2001-2016 年期间湖泊水量年内、年际变化规律。卢善龙等^[21]基于空间分辨率 250 m 的 MOD09 数据,采用阈值分割法提取湖泊水域信息,构建了 2000-2012 年青藏高原地区湖泊面积逐年变化数据集。虽然基于 Landsat、MODIS 多光谱遥感数据提取湖泊水域面积较为成熟^[22],但是联合星载测高数据和多光谱遥感影像估计青海湖湖泊水量变化的相关研究还较少,亟待通过较长时间序列的湖泊水位与水域面积数据估计青海湖湖泊水量变化,探讨湖泊水量变化估计的可行性。

青藏高原的高山湖泊地处偏僻,人类活动较少,湖泊的气象水文观测资料匮乏,且观测时段缺乏连续性,对湖泊水文特征、水量平衡和水储量变化的认知不足。为此,本文首先借助 1988-2018 年 Landsat TM/ETM/OLI 影像数据和归一化差异水体指数,提取青海湖湖泊的当日水域面积;其次,利用 2003-2009 年 ICESat 测高资料提取湖泊水体的日均水位;再次,利用湖泊水位-面积的相关关系式,重构 1988-2018 年青海湖面积-水位-水量变化序列,并结合水文观测和实地观测数据对湖泊水位估计精度进行验证;最后,分析了青海湖湖泊水位年际和年内变化特征和趋势,其结果可为青海湖流域水资源利用、生态环境保护 and 气候变迁研究提供理论参考和技术支持。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

2.1.1 GLAS 数据 搭载在 ICESat 卫星上的 GLAS (geoscience laser altimeter system) 激光测高仪采用绿光 543 nm 和近红外 1 064 nm 处激光脉冲获取地

表信息特征^[23],在平地上形成一个直径约 70 m 的圆形光斑,沿升/降轨道方向上的 GLAS 光斑脚点间隔约 170 m。GLAS 测高仪每秒发射 40 个激光脉冲,脉冲宽度为 4 ns,1 ns 的脉冲对应于 0.15 m 的高度^[24]。本文采用 Level 1B 级 GLA14 产品提取 GLAS 光斑脚点经度、纬度、高程、过境日期和记录时间、大地水准高度等参数,用于陆地高程和湖泊水位信息估计。GLA01 产品中提取光电信号延迟校正、轨道高度、波形记录参数等,用于进行湖泊水位估计的修正。GLA01 产品版本为 33, GLA14 产品版本为 34。青海湖流域及湖泊水域内有效的 GLAS 光斑分布见图 1,共计 10 678 个;青海湖湖面的 GLAS 光斑汇总见表 1,可从美国国家冰雪数据中心 NSIDC(National Snow and Ice Data Center, URL: <http://nsidc.org/data/icesat/>) 获取。

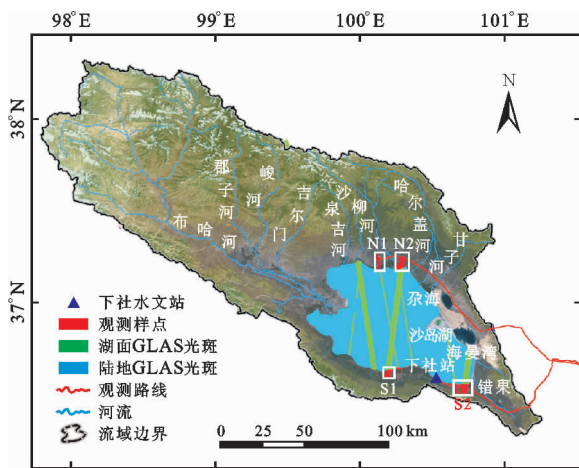


图 1 青海湖流域及 ICESat 测高有效 GLAS 光斑分布图

2.1.2 Landsat TM/ETM/OLI 数据 选取 1988 – 2018 年期间青海湖湖泊区无积雪、云量小于 15% 且湖泊水域无封冻的 Landsat TM/ETM/OLI 影像,用于提取湖泊水域面积。Level 1B 级的 Landsat 影像可通过美国地质勘探局 USGS(United States Geological Survey, URL: <https://glovis.usgs.gov/>) 下载。行号 Path = 133、列号 Row = 34 和行号 Path = 133、列号 Row = 35 的两景 Landsat TM/ETM/OLI 影像可覆盖青海湖水域范围,共计 175 景。

2.1.3 观测资料 青海湖年初、年末、年均水位和水量变化数据来源于《青海省水资源公报》和青海水利信息网(URL: <http://slt.qinghai.gov.cn/>),其中水域面积包括沙岛湖、海晏湾,不含尕斯库勒湖、错果。下社水文站的水位观测时段为当年 5 – 10 月份,当日水位观测值与 ICESat 的水位估计值进行对比验证。1995 – 2018 年青海湖湖泊水位资料从法国地

球物理学和海洋学太空观测研究中心 LEGOS (URL: <http://www.legos.obs-mip.fr/observations>) 获取。SRTM3 数字高程模型产品,空间分辨率为 90 m × 90 m,从中国科学院地理空间数据云(URL: <http://www.gscloud.cn/>) 下载。2018 年 9 – 10 月期间,在青海湖湖泊水域南缘(S1 区和 S2 区)和北缘(N1 区和 N2 区)(见图 1),用分米级差分 GPS 采集仪对湖泊水域边界和平地高程进行测量,并随机选取平地上 32 个地面控制点用于 GLAS 光斑脚点高程的精度检验。考虑到 GLAS 光斑脚点在投影时,会有一定水平位移,利用二阶多项式模型将 SRTM3 像元和 GLAS 光斑脚点的地理位置精准配准,再做 GLA14 产品中高程和 SRTM3 的高程的误差分析。

表 1 青海湖湖面的 GLAS 光斑汇总

过境日期	计数	标准 偏差/m	过境日期	计数	标准 偏差/m
2003-10-14	199	0.21	2006-06-23	361	0.12
2003-10-18	327	0.15	2006-10-27	225	0.20
2003-10-22	117	0.09	2006-10-30	79	0.11
2003-11-16	357	0.11	2006-11-24	326	0.15
2004-02-19	377	0.14	2007-03-13	73	0.16
2004-02-22	84	0.13	2007-03-17	108	0.10
2004-03-18	140	0.13	2007-04-11	45	0.23
2004-05-20	372	0.06	2007-10-04	166	0.14
2004-06-17	357	0.20	2007-10-08	1	
2004-10-06	366	0.16	2007-11-02	358	0.11
2004-11-03	359	0.14	2008-02-19	344	0.09
2004-11-08	336	0.16	2008-02-22	124	0.09
2005-02-20	377	0.18	2008-02-27	181	0.15
2005-02-24	111	0.06	2008-03-18	337	0.13
2005-05-22	175	0.10	2008-10-06	377	0.13
2005-05-26	121	0.28	2008-10-09	114	0.06
2005-10-23	378	0.12	2008-10-14	98	0.14
2005-10-27	121	0.09	2008-12-14	358	0.16
2005-11-21	359	0.13	2009-03-10	19	0.11
2006-02-24	378	0.13	2009-03-14	111	0.09
2006-02-27	124	0.06	2009-03-18	180	0.17
2006-03-24	354	0.24	2009-04-08	25	0.17
2006-05-26	376	0.15	2009-10-02	278	0.15
2006-05-29	125	0.09	合计	10678	

2.2 技术路线

首先,借助 1988 – 2018 年 Landsat TM/ETM/OLI 影像和归一化差异水体指数(normalized difference water index, NDWI)提取湖泊水域面积;其次,联合 2003 – 2009 年期间 ICESat – GLAS 数据中的 GLA01 和 GLA14 产品提取湖泊水域瞬时水位高程和地表高程,并结合青海湖下社水文站水位数据和

地表高程测量值,对 GLAS 光斑脚点高程做配准误差和标准误差分析;再次,通过湖泊水位-面积的关系建立线性回归关系式,用于重建非监测时段内的湖泊水位;最后,根据湖泊面积-水位-水量的绳套关系,构建 1988-2018 年青海湖湖泊水量时变序列。技术路线详见图 2。

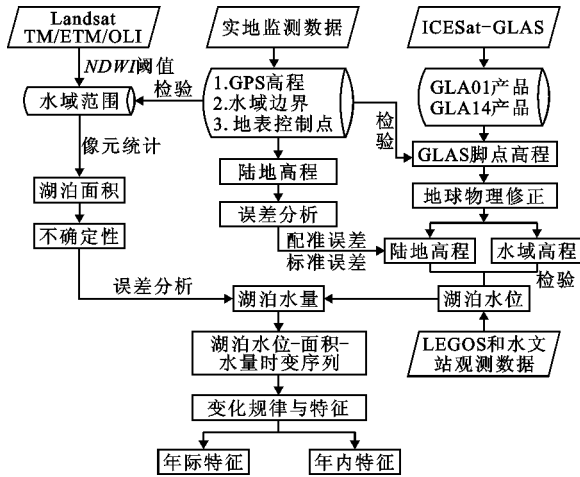


图 2 技术路线

2.3 湖泊水量估计方法

2.3.1 湖泊水位估计 ICESat 卫星测高数据估计湖泊瞬时水位 H_{lake} 的公式为:

$$H_{lake} = H_{sat} - C_{range} + C_{delay} + C_{pressure} + C_{wet} + C_{st} + C_{pt} + e \quad (1)$$

式中: H_{sat} 为 ICESat 卫星飞行高度, km; C_{range} 为 ICESat 卫星到地表距离, km; C_{delay} 为电离层传播延迟修正, m; $C_{pressure}$ 为大气气压变化所引起的信号延迟修正, m; C_{wet} 为大气湿度变化所引起的信号延迟修正, m; C_{st} 为地壳运动所引起的垂直高度修正, m; C_{pt} 为潮汐变化引起的高程修正, m; e 为未考虑的不确定性误差, m。

ICESat 卫星 18 个工作周期内的 GLAS 测高仪的光学仪器信号衰减、地球物理变化会引起 GLAS 光斑脚点高程偏差,为了使湖泊水位高程参考系统具有一致性和可比性,文中将不同时间段的 GLAS 的水位估计值参考 2003 年 2 月的水位值做线性修正,修正后的湖泊水位估计值 \hat{H}_{lake} 为:

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

式中: $h_{alt,lake}$ 为 Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) 重力位模型下的地表高程^[8], m; a 为斜率; b 为高度偏移常数^[25], m。

当每次卫星过境时,湖泊水位实际上记录的是湖泊水面高度轮廓线^[26],呈抛物线或者波浪状。湖

面日均水位估计值 \bar{H}_{lake} 的计算,应剔除异常的最大值和最小值^[27],其计算公式为:

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

式中: \hat{H}_{lake} 为修正后的湖泊瞬时水位估计值, m; n 为沿着 ICESat 卫星轨迹上的湖泊水域内 GLAS 光斑数量, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

2.3.2 湖泊水域面积提取步骤

(1) 对 1988-2018 年期间青海湖湖泊水域清晰且无云、少云、无雪覆盖的 Landsat TM/ETM/OLI 影像绿色和近红外波段做地理配准、辐射校正和大气校正;

(2) 选取 1988 年 1 月 22 日的 Landsat TM 影像的湖泊水域边界,作为湖泊水域面积变化的参考边界;

(3) 由于裸地与水体在近红外和绿色波段反射率的差异,归一化差异水体指数 R_{NDWI} 可突出水体信息^[28],抑制地表土壤、植被信息。利用 R_{NDWI} 阈值分割进行陆地和水体分类,其计算公式为:

$$R_{NDWI} = \frac{r_{green} - r_{nir}}{r_{green} + r_{nir}} \quad (4)$$

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。 R_{NDWI} 取值范围为 $-1 \sim 1$; 当像元的 $R_{NDWI} \leq 0$ 时,地物类型为陆地、植被、建筑等;当像元的 $0 < R_{NDWI} < 0.15$ 时,地表覆被为水体、湿地、水浇地等;由于入湖口泥沙、周边湿地、藻类等对湖泊水域像元共存,产生混合像元,故文中设定 $R_{NDWI} \geq 0.15$ 时,像元内的地物类别为水体。

(4) 根据预设的 $R_{NDWI} \geq 0.15$,统计出第 t_i 时期 Landsat TM/ETM/OLI 影像中青海湖水域水体像元的数量,并计算青海湖湖泊的水域面积 A_{lake,t_i} :

$$A_{lake,t_i} = 10^{-6} \times \sum_{l=1}^n a_{lake,t_i} \quad (5)$$

式中: l 为第 t_i 时期水体像元数量, $i = 1, 2, \dots, n$; a_{lake,t_i} 为任一水体像元的面积, km^2 。

(5) 当确定青海湖水域界限和面积后,湖泊水域面积在提取过程中的误差 s_e 为^[29]:

$$s_e = \sum \left\{ \lambda^2 \cdot \left(\frac{2(\sqrt{\sum \lambda^2} + \sqrt{\sum \varepsilon_{geo}^2})}{\sqrt{\sum \lambda^2}} \right) \right\} + \sum \varepsilon_{geo}^2 \quad (6)$$

式中: s_e 为任一时期湖泊水域面积误差, km^2 ; λ 为 Landsat TM/ETM/OLI 影像中绿色和近红外波段空间分辨率,像元大小为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$; ε_{geo} 为配准误

差, m。GPS 手持仪获取的湖泊边界线和地面控制点,通过均匀布设尽可能多的控制点,使水域边界的配准误差绝对值小于 5 m。

2.3.3 湖泊水量变化估计 湖泊水量变化量 $\Delta V_{lake}(t)$ 为湖泊水域面积和水位随着时间 t 变化的关系式^[30],其估计式为:

$$\Delta V_{lake}(t) = \left[\frac{S(t) + S(t-1)}{2} \right] \cdot [H(t) - H(t-1)] \quad (7)$$

式中: $\Delta V_{lake}(t)$ 为湖泊水量随时间 t 变化的关系式, km^3 ; $S(t)$ 为湖泊水域面积随时间 t 变化的关系式, km^2 ; $H(t)$ 为在 t 时刻的湖泊水位, m; $H(t-1)$ 为在 $t-1$ 时刻的湖泊水位, m。

Landsat4-8 卫星重访间隔 16 d,但由于云层、薄雾限制,有的月份无影像可用,本文利用湖泊面积和水位的关系式插补缺失的观测时段湖泊水域面积。如果观测时段内湖泊水位波动较小,那么湖泊水量变化可以用一系列连续的截锥体之和近似代替。则从 t_{i+1} 时刻到 t_i 时刻的湖泊水量变化 $\Delta V_{lake}(t)$ 可用定积分求导:

$$\Delta V_{lake}(t) = \int_{t_i}^{t_{i+1}} f(t) dt \quad (8)$$

式中: t_i 和 t_{i+1} 为观测时段跨度, d; $f(t)$ 为湖泊水位和面积的关系式; dh 为水位变化量。

假设湖泊水域范围随水位变化呈线性增加或者减少,在未考虑湖岸线地形、湖盆变形等因素的影响下,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共同决定^[31], ΔV_{lake} 可简化为:

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

式中: $A_{lake,t_{i+1}}$ 和 A_{lake,t_i} 分别为 t_{i+1} 和 t_i 时刻的湖泊水域面积, km^2 ; $\bar{H}_{lake,t_{i+1}}$ 和 \bar{H}_{lake,t_i} 分别为 t_{i+1} 和 t_i 时刻的湖泊日均水位, m; δv_{lake} 为 $T_{t_{i+1}-t_i} = t_{i+1} - t_i$ 时段内,湖泊水量变化的估计偏差, km^3 。

2.4 误差分析

GLAS 光斑脚点、SRTM3 和 GPS 测量点的高程偏差,主要源于配准误差、地形误差和系统误差^[32]。每个 GPS 测量点为 35 m × 35 m 样方,共计 32 个,样方内中心点的高程测量 5 次,取 5 次高程测量值平均值作为控制点的高程真值;当样地平均坡度大于

5°时,需考虑地形坡度对 GLAS 光斑脚点高程的偏差^[33]。绝对误差 E_a 可用于描述 GLAS 脚点与 GPS 测量点、SRTM3 高程之间的误差大小,即:

$$E_a = |z_{sat,i} - z_{g,i}| \quad (10)$$

式中: $z_{sat,i}$ 为 ICESat 卫星下轨迹上第 i 个 GLAS 脚点高程值, m; $z_{g,i}$ 为第 i 个 GPS 测量点或者 SRTM3 像元的高程值, m。

作为评价地理空间数据质量的重要指标之一,均方根误差 (root mean square error, RMSE) 亦称标准误差,被用于数字地图和地理空间数据点的位置精度评价^[34],湖泊日均水位估计的均方根误差 $RMSE_z$ 为:

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (z_{sat,i} - z_{g,i})^2} \quad (11)$$

式中: n 为湖泊水域内 GLAS 光斑的数量。

标准化均方根误差 (normalized root mean square error, NRMSE) 用于分析湖泊水域 GLAS 光斑脚点高程与 SRTM3 像元高程、GPS 测量点高程的偏差,标准化均方根误差 $NRMSE_n$ 为:

$$NRMSE_n = \frac{RMSE_z}{z_{gps,max} - z_{gps,min}} \quad (12)$$

式中: $z_{gps,max}$ 为 GPS 测量点 (样方) 的高程最大值, m; $z_{gps,min}$ 为 GPS 测量点 (样方) 的高程最小值, m。

3 结果与分析

3.1 误差分析与验证

为了描述 GLAS 光斑脚点高程与 SRTM3 像元高程的误差大小以及空间异质性,本文随机从青海湖湖区周边陆地上 N1 区选取 49 个、N2 区选取 94 个、S1 区选取 71 个、S2 区选取 202 个 GLAS 光斑,做 GLAS 光斑脚点高程与 SRTM3 高程的标准误差分析,结果见图 3。由图 3 可知, N1、N2、S1 和 S2 区中 GLAS 光斑脚点与 SRTM3 像元高程的标准误差平均值分别为 0.19、0.12、0.17 和 0.14 m。

为了评估 GLAS 光斑脚点、SRTM3 像元和 GPS 测量点高程之间的绝对误差,从湖泊水域边界向外 2 km 的缓冲区内,选择 32 个陆地 GLAS 光斑脚点与 SRTM3 像元、GPS 测量点高程做绝对误差分析和关系式拟合,结果见图 4。由图 4 可知,在陆地上, GLAS 脚点高程与 SRTM3 高程的绝对误差均值为 0.26 m,最大值为 0.78 m,复相关系数为 0.997 6; GLAS 脚点高程与 GPS 测量点高程的绝对误差均值为 0.14 m,最大值为 0.46 m,复相关系数为 0.967 6,且存在线性相关。GLAS 光斑脚点与地表

GPS 测量点或者 SRTM3 高程的绝对误差,主要受到地形坡度、粗糙度、地表覆被、卫星姿态、透射深度等因素影响^[35-36],由于湖区周边地势较为平坦,植被覆盖度较低或者为裸地,对 GLAS 光斑脚点的高程误差影响较小,可用经验关系式修正。

为评估 LEGOS 水位和 ICESat 估计水位的差异,选取 2003 - 2009 年青海湖 LEGOS 日均水位值与 ICESat - GLAS 的日均水位估计值进行相关性分析,结果见图 5。由图 5 可知,青海湖 LEGOS 日均水位值与 ICESat - GLAS 的日均水位估计值呈线性正相关,复相关系数 R^2 为 0.879 9,通过显著性水平 $p < 0.05$ 检验。

下社水文站水位观测时段为每年 5 - 10 月份,为了检验 ICESat 的当日估计水位平均值与下社站日均水位观测值的差异,选取 2003 - 2009 年期间 5 - 10 月份的湖泊水域 GLAS 光斑,求出湖泊的日均水位。ICESat 估计的当日水位平均值与下社站水位

观测值的 Pearson 相关系数为 0.865,通过显著性水平 $p < 0.01$ 检验,二者存在系统性偏差,偏差均值为 (1.08 ± 0.22) m,见图 6。

Landsat 影像提取的青海湖水域面积与 ICESat - GLAS 的水位估计值相关性分析见图 7,下社水文站年均水位与当年湖泊水域面积相关性分析见图 8。由图 7 可知,两者呈线性正相关,复相关系数 R^2 为 0.789 1,通过显著性水平 $p < 0.05$ 检验。当青海湖湖泊水位持续上升较快时,青海湖大湖区与尕斯库勒湖融为一体,青海湖湖泊水域面积增加较快,导致水位和水域面积时间匹配不一致,出现拟合异常点,偏离拟合线(见图 8)。从湖泊水域面积和 ICESat 的年均水位估计值、年均水位观测值的拟合效果来看,水位实测值和湖泊水域面积的拟合曲线的相关性优于 ICESat 的估计水位与水域面积的拟合曲线,GLAS 回波信号在水体表面的透射深度、波浪形状、重力位变化的影响使 GLAS 脚点高程产生一定随机误差。

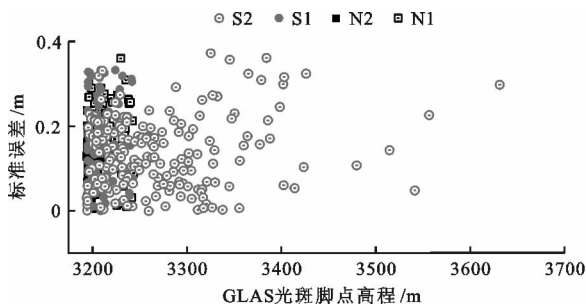


图 3 各 GLAS 光斑脚点高程与 SRTM3 高程的标准误差

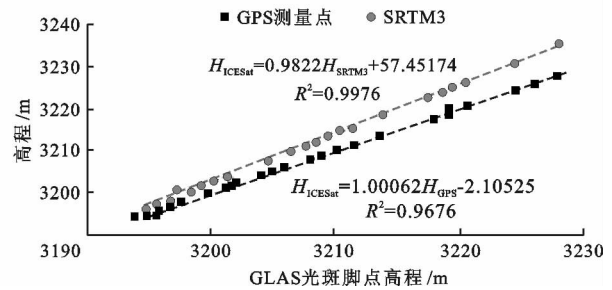


图 4 GLAS 光斑脚点高程与 SRTM3、GPS 测量点高程

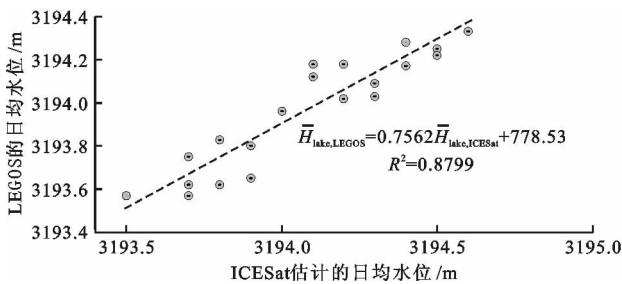


图 5 2003 - 2009 年青海湖 ICESat 估计的日均水位与 LEGOS 日均水位相关性分析

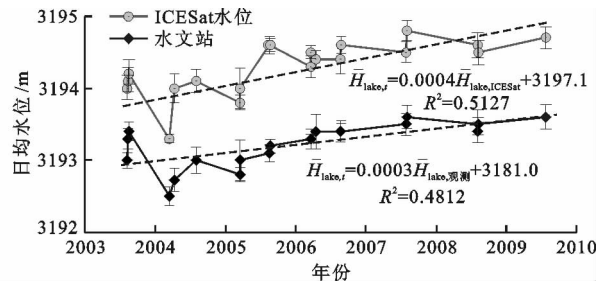


图 6 2003 - 2009 年青海湖 ICESat 估计的日均水位与下社水文站日均水位的差异

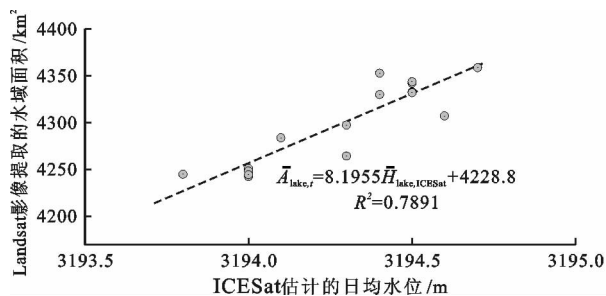


图 7 Landsat 影像提取的青海湖水域面积与 ICESat - GLAS 的水位估计值相关性分析

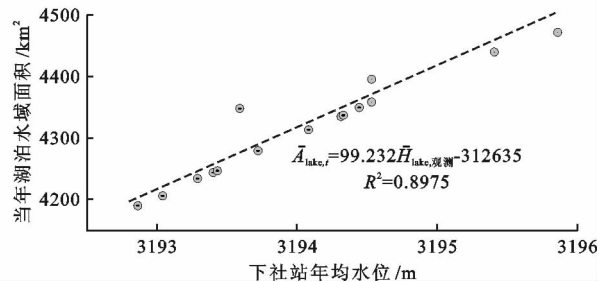


图 8 下社水文站年均水位与当年青海湖水域面积相关性分析

3.2 湖泊水位、面积和水量的时变曲线

利用公式(3)、(5)和(9)分别求出 1988 - 2018 年青海湖的日均水位、水域面积和水量变化,结果见图 9。借助 2003 - 2009 年期间 ICESat 卫星在轨运行期间的 GLA14 数据,建立湖泊水位 - 面积和面积 - 水量绳套关系,推算出非观测时段内湖泊日均水位、水量变化。由图 9 可见,ICESat 估计的 1988 - 2018 年青海湖水位与 LEGOS 水位、水域面积和水量变化均呈增加趋势,曲线峰谷节点较为一致,可计算出其 Pearson 相关系数分别为 0.879 9、0.891 0、0.861 6。

ICESat 卫星仅有 18 个工作周期,且工作周期间隔 12 ~ 55 d,观测时段连续性不足,监测时段内湖泊水位的偏差和湖泊水域面积估计误差,会导致湖泊水位、水量变化值与 LEGOS 的水位和水域面积值存在系统性偏差和时间错位。因此,应用星载测高卫星资料估计较大面积的湖泊水量变化时,需要与水文过程、湖泊水动力模型相结合,减少湖泊水位估计中的随机误差。

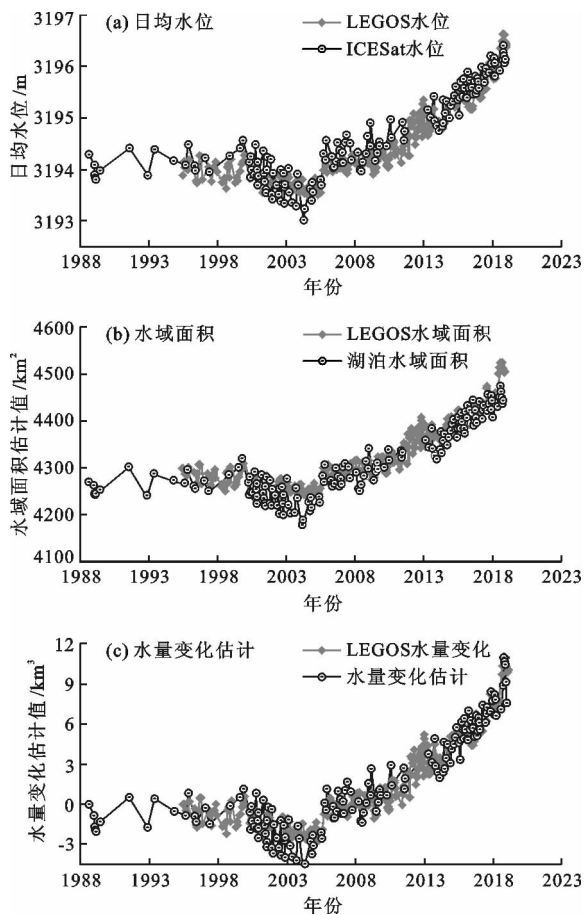


图9 1988 - 2018 年青海湖的日均水位、水域面积和水量变化曲线

3.3 湖泊水位、面积、水量变化的年际与年内变化特征

作为青藏高原地区的内陆湖,青海湖湖泊水量主要由降水、冰雪融水和冻土冰融水等补给^[37],山区降水量和冰雪融水量的变化会直接影响湖泊水域面积和水位。1988 - 2018 年青海湖湖泊年均水位、湖泊水域面积和湖泊水量变化曲线见图 10,图 10 中 LEGOS 的水位、面积和水量变化资料的时段为 1995 - 2018 年,与 Landsat 提取的水域面积在 2004 年左右存在偏差,是由于文中未统计海晏湾、沙岛湖等水域面积所致。由图 10 可知,1988 - 2018 年青海湖湖泊年均水位、面积和水量变化,总体上呈增加趋势。青海湖年均水位由 1988 年的 $(3\ 194.19 \pm 0.15)$ m 上升至 2018 年的 $(3\ 196.13 \pm 0.18)$ m,增幅为 (1.93 ± 0.22) m,见图 10(a);青海湖年均面积由 1988 年的 $(4\ 282.25 \pm 8.5)$ km² 变为 2018 年的 $(4\ 480.0 \pm 12)$ km²,增加了 (197.75 ± 6.3) km²,见图 10(b);与 1988 年的湖泊水量相比,2018 年青海湖湖泊水量增加了 (8.93 ± 0.12) km³,见图 10(c)。

1988 - 2018 年间青海湖的年均水位有两个显著变化:(1)1988 - 2004 年期间,青海湖年均水位由 1988 年的 $(3\ 194.19 \pm 0.15)$ m 下降到 2004 年的 $(3\ 193.0 \pm 0.16)$ m,年平均水位降低了 (1.19 ± 0.15) m;(2)2004 - 2018 年期间,青海湖年均水位以 0.19 m/a 的速率上升,2018 年年均水位比 2004 年增加了 (2.69 ± 0.25) m,湖泊水域面积增加了 (233.0 ± 7.3) km²。2018 年下社水文站和 LEGOS 的年均水位比 2004 年的年均水位分别增加了 2.55 m、 (2.61 ± 0.14) m,湖泊水域面积分别增加了 (250.2 ± 8.1) km²、 (215.7 ± 7.0) km²。

选取观测时段连续性较好的 2010 年青海湖湖泊水位、面积和水量变化,描述青海湖湖泊水位、面积和水量年内变化特征,结果见图 11。由图 11 可看出,2010 年 1 - 4 月期间,湖泊水量补给较少,湖泊水位降低,湖泊水量减少;同时,湖泊水面会有封冻、风吹雪或者浮冰^[37],湖冰或湖面积雪以升华为主,引起湖泊水面高程降低,湖泊水域面积萎缩。在 5 - 6 月期间,山区积雪和冻土层的地下冰开始融化,补给湖泊水量,但湖泊水域内的湖冰也开始融化,水位会略有下降。7 - 10 月期间,受到山区降水、冰雪融水的补给使湖泊水量增加,湖泊水位逐渐回升。11 - 12 月份,山区开始降雪,降雨和冻土层的地下冰融水量逐渐减少,湖泊水位逐渐下降,湖泊水面开始封冻。

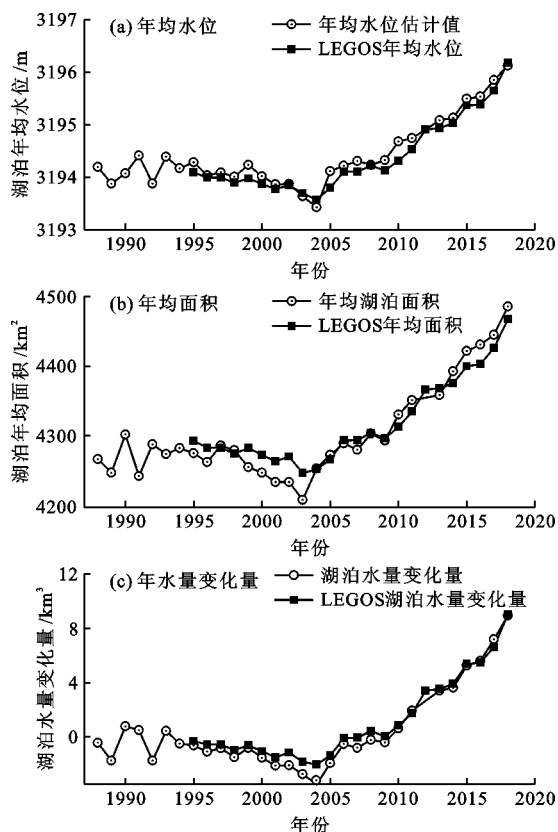


图10 1988-2018年青海湖湖泊年均水位、湖泊水域面积和湖泊水量变化曲线

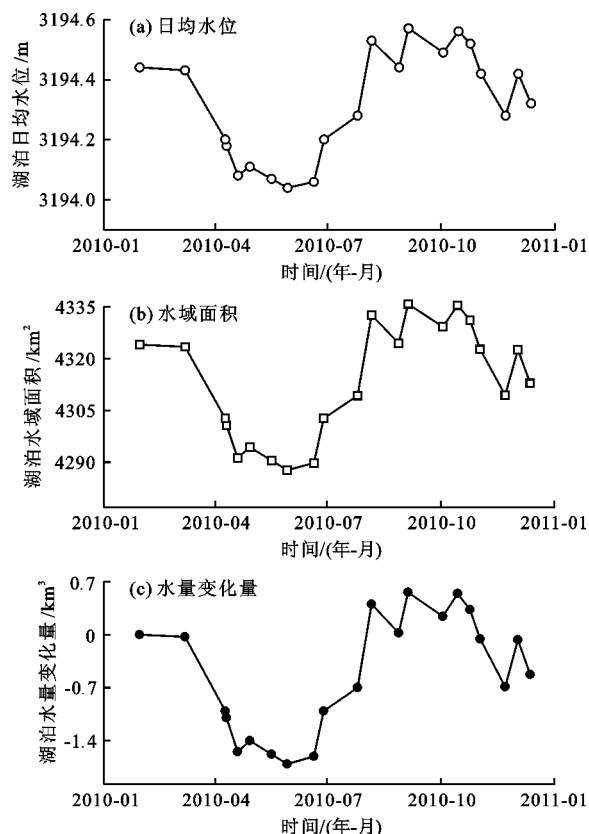


图11 2010年青海湖湖泊水位、面积和水量变化曲线

4 结论

(1) 在平地上, GLAS 光斑脚点高程与 SRTM3 高程的标准误差呈线性相关, 绝对误差最大值为 0.78 m, SRTM3 高程产品的 C 波段透射深度会使 GLAS 脚点高程的绝对误差增大; GLAS 脚点高程与 GPS 测量点高程的绝对误差均值为 0.14 m, 绝对误差最大值为 0.46 m, 主要受地形坡度、粗糙度、地表覆盖、卫星姿态等影响。ICESat 卫星观测时段的不连续性和 GLAS 光斑空间分布的异质性, 使得湖泊水位估计值与下社站观测值存在一定系统性偏差。

(2) 1988-2018 年的青海湖湖泊年均水位、水域面积、湖泊水量变化呈增加趋势, 但在 2004 年湖泊年均水位达到最低值 ($3\,193.0 \pm 0.16$) m。2004-2018 年湖泊年均水位持续上升, 2018 年年均水位已达到 ($3\,196.13 \pm 0.18$) m。青海湖水域面积也由 1988 年的 ($4\,282.25 \pm 8.5$) km^2 增加到 2018 年的 ($4\,480.0 \pm 12$) km^2 。

(3) 湖泊水量作为湖泊水文观测的重要参数, 当缺少湖泊面积或者水位观测资料时, ICESat 测高数据可较好地估计湖泊水位和水量的变化, 为青藏高原高山湖泊变化数据集重建提供理论参考和技术

支持。虽然青藏高原高山湖泊的水量波动受到人为活动干扰较少, 但是湖面蒸发、冰雪融水、山区降水、冻土退化等对湖泊水量波动的作用不可忽视。

参考文献:

- [1] MAAS A, DOZIER A, MANNING D T, et al. Water storage in a changing environment: The impact of allocation institutions on value[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(1):672-687.
- [2] YAO Tandong, WU Fuyuan, DING Lin, et al. Multispherical interactions and their effects on the Tibetan Plateau's earth system: A review of the recent researches[J]. *National Science Review*, 2015, 2(4):468-488.
- [3] ZHANG Guoqing, YAO Tandong, XIE Hongjie, et al. An inventory of glacial lakes in the Third Pole region and their changes in response to global warming[J]. *Global and Planetary Change*, 2015, 131:148-157.
- [4] IMMZEELI W W, VAN BEEK L P, BIERKENS M F. Climate change will affect the Asian Water Towers[J]. *Science*, 2010, 328(5984):1382-1385.
- [5] TANG Lingyi, DUAN Xiaofang, KONG Fanjin, et al. Influences of climate change on area variation of Qinghai Lake on Qinghai-Tibetan Plateau since 1980s[J]. *Scientific*

- Reports,2018,8(1):7331-7337.
- [6] AN Shuai, ZHANG Xiaoyang, CHEN Xiaoqiu, et al. An exploration of terrain effects on land surface phenology across the Qinghai-Tibet Plateau using Landsat ETM+ and OLI data[J]. *Remote Sensing*, 2018,10(7):1069-1086.
- [7] YANG Jun, GONG Peng, FU Rong, et al. The role of satellite remote sensing in climate change studies[J]. *Nature Climate Change*,2013,3(10):875-883.
- [8] O'LOUGHLIN F E, NEAL J, YAMAZAKI D, et al. ICESat-derived inland water surface spot heights[J]. *Water Resources Research*,2016,52(4):3276-3284.
- [9] 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.
- [10] ZHU Wenbin, JIA Shaofeng, LV Aifeng. Monitoring the fluctuation of Lake Qinghai using multi-source remote sensing data[J]. *Remote Sensing*,2014,6(11):10457-10482.
- [11] CRÉTAUX 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.
- [12] YANG Ruimin, ZHU Liping, WANG Junbo, et al. Spatio-temporal variations in volume of closed lakes on the Tibetan Plateau and their climatic responses from 1976 to 2013[J]. *Climatic Change*,2017,140(3):621-633.
- [13] ZHANG Guoqing, YAO Tandong, SHUM C K, et al. Lake volume and groundwater storage variations in Tibetan Plateau's endorheic basin[J]. *Geophysical Research Letters*,2017,44(11):5550-5560.
- [14] 李生生,王广军,梁四海,等.基于Landsat-8 OLI数据的青海湖水体边界自动提取[J]. *遥感技术与应用*, 2018, 33(4):666-675.
- [15] 赵云,廖静娟,沈国状,等.卫星测高数据监测青海湖水位变化[J]. *遥感学报*,2017,21(4):633-644.
- [16] VERPOORTER C, KUTSER T, SEEKELL D A, et al. A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(18):6396-6402.
- [17] SONG Chunqiao, HUANG Bo, RICHARDS K, et al. Accelerated lake expansion on the Tibetan Plateau in the 2000s: Induced by glacial melting or other processes? [J]. *Water Resources Research*,2014,50(4):3170-3186.
- [18] KROPÁČEK J, BRAUM A, KANG Shichang, et al. Analysis of lake level changes in Nam Co in central Tibet utilizing synergistic satellite altimetry and optical imagery[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*,2012,17:3-11.
- [19] 骆成凤,许长军,曹银璇,等.1974-2016年青海湖水面面积变化遥感监测[J]. *湖泊科学*, 2017, 29(5):1245-1253.
- [20] 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.
- [21] 卢善龙,肖高怀,贾立,等.2000-2012年青藏高原湖泊水面时空过程数据集遥感提取[J]. *国土资源遥感*, 2016, 28(3):181-187.
- [22] 岳辉,刘英,杨维涛,等.近40年来中国西北内陆5个典型湖泊面积变化遥感分析[J]. *水资源与水工程学报*. 2017, 28(6):27-32.
- [23] SCHUTZ B E, ZWALLY H J, SHUMAN C A, et al. Overview of the ICESat mission[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005,32(21):L21S01.
- [24] 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):L21S02.
- [25] 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(S1):238-257.
- [26] SILVA J S, 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] 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*,2012,17:12-22.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] MEDINA C E, GOMEZ-ENRI J, ALONSO J J, et al. Water level fluctuations derived from ENVISAT radar altimeter (RA-2) and in-situ measurements in a subtropical waterbody: Lake Izabal (Guatemala) [J]. *Remote Sensing of Environment*,2008,112(9):3604-3617.

(下转第22页)

- [13] 李大千. 鄱阳湖叶绿素 a 浓度遥感反演研究[D]. 赣州:江西理工大学, 2016.
- [14] 顾万花. 基于遥感的淀山湖水体叶绿素 a 浓度估算研究[D]. 上海:复旦大学, 2011.
- [15] 王琦, 孟伟, 马云峰, 等. 利用 BP 神经网络预测大伙房水库叶绿素 a 质量浓度[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(12):1792-1795.
- [16] 徐逸, 董轩妍, 王俊杰. 4 种机器学习模型反演太湖叶绿素 a 浓度的比较[J]. 水生生态学杂志, 2019, 40(4):48-57.
- [17] 李峰, 纪道斌, 刘德富, 等. 基于 BPNN 的三峡水库神农溪叶绿素 α 浓度预测[J]. 环境科学与技术, 2015(12Q):23-27.
- [18] 易仲强. 基于 ANN 和 SVM 的三峡水库香溪河库湾富营养化预测研究[D]. 宜昌:三峡大学, 2011.
- [19] 吕恒, 江南, 李新国. 内陆湖泊的水质遥感监测研究[J]. 地球科学进展, 2005, 20(2):185-192.
- [20] BUCKTON D, O'MONGAIN E, DANAHER S. The use of neural networks for the estimation of oceanic constituents load on the MERIS instrument[J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(9):1841-1851.
- [21] GROSS L, THIRIA S, FROUIN R. Applying artificial neural network methodology to ocean color remote sensing [J]. Ecological Modelling, 1999, 120(2-3):237-246.
- [22] KEINER L E, YAN Xiaohai. A neural network model for estimating sea surface chlorophyll and sediments from Thematic Mapper imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 66(2):153-165.
- [23] HUANG Guangbin, ZHU Qinyu, SIEW C K. Extreme learning machine: Theory and applications [J]. Science Direct, 2006, 70(1-3):489-501.
- [24] HUANG Guangbin, BABRI H A. Upper bounds on the number of hidden neurons in feedforward networks with arbitrary bounded nonlinear activation functions[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1998, 9(1):224-229.
- [25] 李正强, 陈兴峰, 马龙天, 等. 光学遥感卫星大气校正研究综述[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2018, 10(1):6-15.
- [26] 楼顺天, 施阳. 基于 MATLAB-神经网络的系统分析与设计[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1998.
- [27] 张方方. 基于软分类的太湖水体叶绿素 a 浓度遥感反演与长时间序列分析[D]. 上海:华东师范大学, 2014.

(上接第 15 页)

- [31] ABILEAH R, VIGNUDELLI S. A completely remote sensing approach to monitoring reservoirs water volume[J]. International Water Technology Journal, 2011, 1(1):59-72.
- [32] DEVRIES B, HUANG C G, LANG W M, et al. Automated quantification of surface water inundation in wetlands using optical satellite imagery[J]. Remote Sensing, 2017, 9(8):807-828.
- [33] 吴红波, 郭忠明, 陈安安, 等. 坡度和粗糙度对 ICESat-GLAS 回波特征及其光斑脚点高程误差的影响研究[J]. 地理与地理信息科学, 2016, 32(4):30-37.
- [34] MUNYANEZA O, WALI U G, UHLENBROOK S, et al. Water level monitoring using radar remote sensing data: Application to Lake Kivu, central Africa[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2009, 34(13):722-728.
- [35] CRAIG M, NATASCHA K, SIETSE L, et al. Slope estimation from ICESat/GLAS[J]. Remote Sensing, 2014, 6(10):10051-10069.
- [36] LI Xiaolu, XU Kai, XU Lijun. Surface slope and roughness measurement using ICESat/GLAS elevation and laser waveform[J]. Measurement Science & Technology, 2016, 27(9):95202-95210.
- [37] QI Miaomiao, YAO Xiaojun, LI Xiaofeng, et al. Spatiotemporal characteristics of Qinghai Lake ice phenology between 2000 and 2016 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(1):115-130.