

## 基于 Landsat 与 Sentinel-3A 卫星数据的当惹雍错 1988—2018 年 湖泊水位—水量变化及归因<sup>\*</sup>

王文种, 黄 对<sup>\*\*</sup>, 刘九夫, 刘宏伟, 王 欢

(南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029)

**摘要:** 湖泊变化是气候变化的指示器。为探索利用单一短时间尺度的卫星水位数据源估算长时间序列的湖泊水量变化的可行性, 本文利用短时间尺度(2016—2018年)Sentinel-3A 合成孔径雷达高度计(SRAL)作为唯一卫星水位数据源, 以藏北高原内陆湖泊当惹雍错为例, 结合基于 Landsat 光学遥感数据提取的 1988—2018 年的湖泊面积, 综合分析 2016—2018 年间的非结冰期遥感湖泊面积与遥感湖泊水位变化, 基于该时段范围的水位变化—面积变化关系和水量估算公式, 估算 1988—2018 年湖泊水位水量变化与 2001—2018 年的年内变化, 并结合 GLDAS 产品数据与雪线变化情况初步探讨湖泊变化的可能原因。结果表明: 当惹雍错近 30 年湖泊面积扩张明显, 湖泊水位、水量增加显著, 相比 1988 年, 2018 年的湖泊面积、水位、水量分别增加  $21.1 \text{ km}^2$ 、 $5.29 \text{ m}$ 、 $44.75 \text{亿 m}^3$ 。其中 1988—1998 年湖泊面积—水位—水量有所减少, 2000—2018 年间湖泊变化总体呈增加趋势。2001—2018 年内湖泊面积、水位、水量变化呈现干湿季特征。1996—2014/2015 年湖泊水量变化为  $38.3 \text{ 亿}/35.5 \text{ 亿 m}^3$ , 水量变化趋势、变化量与以往对应时间段的研究结果具有较强的一致性。湖泊面积扩张主要发生在水下地形平缓的东南部和中西部区域。结合气候因素与雪线变化的分析表明, 湖泊水量变化受降雨、气温影响复杂, 长时间尺度上的湖泊水量增长与气温的一致性较降水量强, 湖泊湿季受降水量与气温的影响都较大, 其中 2008—2018 年的湿季降水量、气温与水量变化散点拟合的确定性系数  $R^2$  分别为 0.613、0.845。该研究表明 Sentinel-3A 合成孔径雷达数据在湖泊水量变化估算上的潜力, 为利用单一且只具有短时段数据的卫星雷达数据估算长时间序列湖泊水量变化提供依据。

**关键词:** Sentinel-3; 合成孔径雷达; Landsat; 水位; 水量; 当惹雍错

Patterns and causes of changes in water level and volume in Tangra Yumco from 1988 to 2018 based on Landsat images and Sentinel-3A synthetic aperture radar<sup>\*</sup>

WANG Wenzhong, HUANG Dui<sup>\*\*</sup>, LIU Jiufu, LIU Hongwei & WANG Huan

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, P.R.China)

**Abstract:** This paper explored the feasibility of using water level data from a single short-time satellite source to estimate long-term changes in lake water volumes. Combined with Sentinel-3A synthetic aperture radar altimeter (SRAL) in 2016–2018 and lake water areas extracted from Landsat satellites during 1988–2018, the relationship between water level change and water area change in non-glacial period of 2016–2018 and the water volume estimation formula were used to analysis the inter-annual changes of water level and water volume from 1988 to 2018, the intra-annual change from 2001 to 2018 and the main causes of such changes. Results show that lake area, water level and water volume of Tangra Yumco rose significantly in the past three decades, increased respectively by  $21.1 \text{ km}^2$ ,  $5.29 \text{ m}$  and  $4.47 \text{ billion m}^3$  from 1988 to 2018. Although declines in the lake area and water level and water volume decreased during 1988–1998, the lake expanded during 2000–2018, exhibiting the characteristics of the dry and wet seasons during the period of 2001–2018. From 1996 to 2014/2015, the lake water volume change was from 3.83 billion to 3.55

\* 2019-11-27 收稿; 2020-03-20 收修改稿。

国家重点研发计划项目(2017YFC0405701)、国家自然科学基金重大研究计划重点项目(91647203)和水利部水资源节约、管理、调度项目(Ss518020ZS11, Ss519038ZS11)联合资助。

\*\* 通信作者; E-mail: huangdui2004520@163.com.

billion m<sup>3</sup>. Such water volume changes are in good agreement with previous research. Lake expansion occurs in the southeastern and mid-western regions where the underground-water terrain is gentle. Based on the data from global land surface data assimilation system (GLDAS) and glacier snow lines, both the changes in precipitation and air temperature exhibited strong correlations (with  $R^2$  of 0.613 and 0.845, respectively) with the changes of water volume over the period 2008–2018. The wet season of lakes was significantly affected by precipitation and air temperature. This study shows the potential of sentinel-3A SYNTHETIC aperture radar data in the estimation of lake water quantity change, and provides a basis for the estimation of lake water quantity change in a long time series by using a single satellite radar data with only short-term data.

**Keywords:** Sentinel-3; synthetic aperture radar; Landsat; water level; water volume; Tangra Yumco

青藏高原对气候变化响应极其敏感,高原南部地区是我国乃至北半球地区气候变化的启动区<sup>[1-3]</sup>. 高原湖泊数量众多,2018 年青藏高原有大于 1 km<sup>2</sup> 的湖泊约 1400 个<sup>[4]</sup>,了解湖泊水位—面积—水量变化对分析气候变化以及流域水循环具有重要意义. 地处藏北高原腹部的内陆湖泊,其特有的高寒高海拔特点使得实地观测难以进行,原始资料缺乏,卫星遥感技术的不断发展为青藏高原地区湖泊的变化监测提供了新的技术手段.

以往遥感湖泊变化研究集中于 3 方面:一是湖泊数量、水面面积和水位变化<sup>[5-11]</sup>;二是湖泊水量变化、水量平衡研究<sup>[12-16]</sup>;三是湖泊变化的影响因素与驱动机制研究<sup>[17-18]</sup>. 其中关于湖泊数量、面积、水位变化的研究成果最多,通常分析单个湖泊或一定区域内的多个湖泊的湖泊数量、面积、水位等单一或者多个特性的时空变化规律. 结合遥感面积—遥感水位的湖泊水量变化估算研究中<sup>[12,14-15,19]</sup>,通常基于水量变化公式进行<sup>[20]</sup>,在获取不同时段的遥感面积与遥感水位的基础上计算水量并分析其变化,以往研究中除了研究时段、研究对象的差异,主要在于遥感数据源的差异,其中卫星水位数据源的差异最为明显,自从 1992 年以来 TOPEX/Poseidon (T/P) 卫星测高数据出现,2000 年后发展了包括 Jason、Cryosat-2、Envisat、ICESat 等多达近 10 种可用于水位测量的卫星雷达高度计数据. 如张洪源等<sup>[12]</sup>利用整合多种卫星雷达高度计数据的 LEGOS 卫星产品数据进行青海湖近 20 年的水量变化分析,戴玉凤等<sup>[14]</sup>利用 2003—2009 年的 ICESat 数据对青藏高原佩枯错水量变化进行分析,张国庆等<sup>[15]</sup>利用 2003—2018 年的 ICESat/ICESat-2 卫星测高数据对青藏高原 62 个湖泊水位与总体水量变化量进行估算,Crétaux 等<sup>[19]</sup>以 ICESat 和 Cryosat-2 卫星测高数据为主,以 ERS2、Jason-2、Envisat 卫星测高数据为辅,估算 1994—2015 年青藏高原包含当惹雍错的 11 个大湖的水量变化. 伴随更多的卫星发射,如 Sentinel-3、SWOT 卫星,有助于扩展湖泊水量估算的时空尺度<sup>[21]</sup>. 以往关于湖泊变化的影响因素与驱动机制成果丰富,主要考虑到降水、气温、蒸散发、冰川冻土变化和人类活动影响,青藏高原不同位置的湖泊的影响因素各不相同,总体可视为气温和降水因素的影响,但对于湖泊定量的水量变化及驱动机制仍有待于进一步研究<sup>[21]</sup>. 总的来看,综合考虑遥感水位与遥感面积的湖泊变化的系统性研究并不多,在此基础上关于特定湖泊的水量分析与归因分析也较少.

从湖泊水位、水量变化的研究中可知,延长研究的时间尺度,主要通过多源卫星高度计数据的组合或者利用多源卫星雷达融合产品数据来实现,然而来自于不同卫星的水位时间序列存在偏差,偏差主要源自两个原因:一是不同卫星高度计自身存在仪器偏差<sup>[22-23]</sup>;二是不同卫星在同一湖泊的过境轨道存在明显差异,这些增加了卫星水位系列间的偏差. 虽然可以采用轨迹间和卫星间偏差的先验调整,但开发不同卫星水位测量值的校准方法使得湖泊水位与水量变化计算变得繁琐与复杂. 因此,不依赖多源水位数据,基于有限时间段内的单一卫星雷达数据重现湖泊过去几十年的水位、水量变化,是本文重点考虑的方向.

Sentinel 系列雷达卫星高度计为全球海洋和陆地监测卫星之一,其 2016 年发射的 Sentinel-3A/3B 卫星携带高分辨率合成孔径雷达高度计 (Synthetic Aperture Radar Altimeter, SRAL),是水位监测的新兴数据源<sup>[24]</sup>,全球陆面数据同化系统(GLDAS) 是全球变化与水循环研究的重要数据源之一<sup>[25]</sup>,为无资料区域湖泊水量的变化评价提供了长时间序列的气象数据支撑. 因此,本文以藏北高原内陆湖泊当惹雍错为研究对象,在利用 Landsat 光学系列遥感卫星获取并分析 1988—2018 年湖泊面积的基础上,结合 2016—2018 年 Sentinel-3 SRAL 数据,综合分析了 2016—2018 年非结冰期的湖泊水位与面积变化,获取二者变化之间的相关关系,基于水量估算公式与历史卫星遥感面积,估算当惹雍错近 30 年来的水位、水量变化,并与以往的研究成果进行对比;通过 GLDAS 的降水、气温产品数据与 Landsat 提取的雪线变化数据,探讨湖泊变化原因.

本文探索利用单一卫星水位数据源分析湖泊水位—水量的长时间序列变化,为青藏高原无资料区气候变化环境下湖泊水位变化与水量分析评估提供依据。

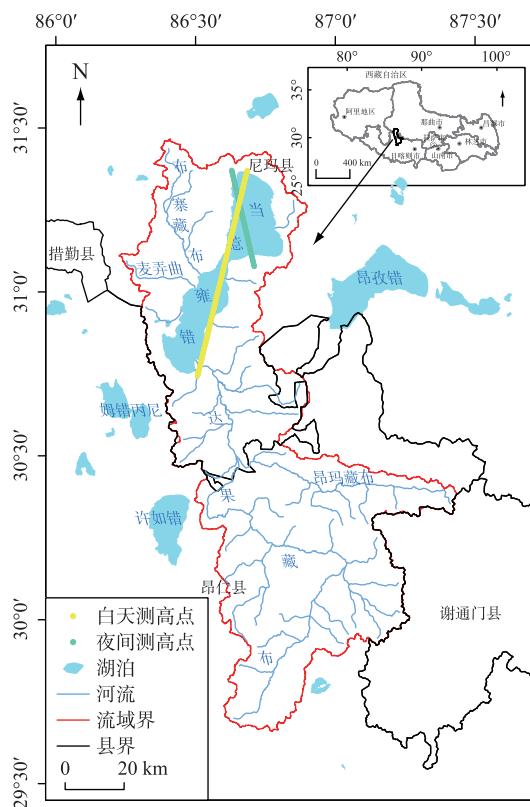


图 1 当惹雍错流域位置

Fig.1 Location of the Tangra Yumco Basin

成产品,该数据来自于美国地质调查局(<https://earthexplorer.usgs.gov/>),经过系统辐射纠正和几何校正。由于光学影像数据受到云雨天气影响,数据幅数与数据可用时段不可避免地受到限制。根据研究目标,结合以往关于高原湖泊的研究经验,湖泊最稳定的时间为10月,其次为9月和11月<sup>[28]</sup>,选取该时段影像分析1988—2018年的湖泊面积年际变化,共22期;湖泊结冰期一般为当年11月一次年3月,以非结冰期4—10月典型月份(其中4—5月代表湖泊干季,9—10月代表湖泊湿季)影像分析2000—2018年的湖泊年内面积变化,共23期;2016—2018年间的影像数据共24期,挑选相近日期的影像用于分析湖泊年内面积—水位变化,构建面积—水位关系曲线,数据情况详见表1。

高原湖泊水体和其他地物在RGB真彩色影像上的颜色呈现明显差异,水体在可见光波段上通常表现为黑色,结冰期则为深蓝色。近年来面向对象的水体提取方法得到了较好的应用<sup>[29-30]</sup>,水体提取过程中受阴影和薄云的影响小,完全消除基于像元方法提取出现的“零星水体现象”。本文利用面向对象方法提取水体,应用ENVI+IDL程序开发面向对象分割(由ENVI提供的envi\_fx\_segmentonly\_doit面向对象分割二次开发函数)获得水体分割对象,并应用Arcmap软件对分割对象进行栅格转换、水体对象合并,获取当惹雍错湖泊边界图斑,进一步结合人工目视检查对成果修正,并计算最终水体面积。对于2003年5月之后ETM+数据产品有条带现象,结合同一年份影影像日期前后质量较好的Landsat数据目视解译提取修改湖泊边界。数据处理流程见图2。

## 1 湖泊概况

当惹雍错( $30.45^{\circ} \sim 31.22^{\circ}\text{N}$ ,  $86.23^{\circ} \sim 86.49^{\circ}\text{E}$ )又名唐古拉攸木错,属内陆尾闾湖,位于藏北高原腹地尼玛县内,为青藏高原内目前已知最深的湖泊<sup>[26]</sup>、西藏第4大湖泊,海拔4528 m,南北向长,长轴长约72 km,东西向最宽处12 km,中间最为狭长,流域面积9059 km<sup>2</sup>(图1),湖泊补给以地表径流及湖区降水为主,降水主要集中在6—9月(湿季),主要补给河流有达果藏布、布寨藏布、麦弄曲。其中达果藏布发源于冈底斯山,河源区现代冰川不发育<sup>[27]</sup>,主要分布于湖泊的东部和南部山区。根据2009年水下地形实测资料<sup>[26]</sup>,北部湖区为整个湖泊的深水部分,四周湖岸坡度较大。中央湖区水深超过200 m,中间最窄处湖区水深超过100 m;南部湖区的最南部地形较缓,中间只有小部分湖区水深超过100 m。

## 2 数据与方法

### 2.1 Landsat 系列卫星及湖泊面积提取

Landsat系列卫星由于提供长时间序列数据、有较高的空间分辨率和免费获取特性,广泛应用于湖泊面积提取与制图<sup>[19]</sup>。从数据时空分辨率、数据可获得性与可用性考虑,本文选择时空分辨率为16 d和30 m的Landsat系列卫星(主要为Landsat-8 OLI、Landsat-7 ETM+、Landsat-5 TM5)的RGB三波段合

表 1 研究所用的 Landsat 系列影像数据  
Tab.1 Landsat data series used in this study

数据目的	数据时间
1988—2018 年 面积变化分析	19880926、19921007、19941013、19961018、19971005、19980906、20001005*、20011024*、 20021027*、20031014*、20041024、20061014、20071009*、20091022、20101001*、20111004*、 20121022*、20131009*、20141004、20151007、20161025、20171028、20181015
2016—2018 年 面积变化分析	20160424*、20160518、20160619、20160822、20160907、20161025、20170419、20170529*、 20170606、20170622、20170708、20170910、20170926、20171012、20171028、20180406、 20180422、20180524、20180609、20180812、20180828、20180929、20181015、20181031
2001—2018 年 5 月、9 月面积	20010501、20040517、20100518、20110513*、20140513、20150508、20160518、20170529、 20180524、20010922*、20030928*、20050909、20060928、20070923、20090928、20101001、 20120920*、20150905、20160907、20170910、20180929

\* 为 Landsat-7 ETM+ 数据, 其中 2003 年 5 月 31 日后数据出现条带; 2016 年 5 月份后数据为 Landsat-8 OLI 数据, 其他数据为 Landsat-5 TM5 数据.

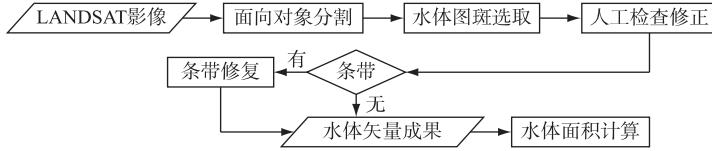


图 2 当惹雍错湖泊边界提取流程  
Fig.2 Lake boundary extraction process of Tangra Yumco

## 2.2 Sentinel-3A SRAL 卫星及湖泊水位提取

Sentinel-3 系列卫星为全球海洋和陆地监测卫星, 包括 Sentinel-3A、Sentinel-3B、Sentinel-3C 3 颗卫星。Sentinel-3A 于 2016 年 2 月发射, 其上搭载 SRAL, 主要用于海洋表面水位、浪高、风速、海冰、潮汐以及陆地冰、水体地形研究, 数据来源于欧洲航空局 (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>)。Sentinel-3A SRAL 全球运行 385 个轨道, 20Hz Ku 波段地面测高轨迹由间距为 320 m 的测点形成, 本文使用 L2 级陆地标准数据产品, 研究区共有两条轨道过境(测高轨迹见图 1), 过境时间分别为 12:34 和 23:25, 2016—2018 年间过境数目分别为 38 期和 37 期, 共 75 条轨道。

利用 ENVI+IDL, 通过卫星测高原理计算考虑大气、地形校正后的卫星水位值, 生成点矢量数据文件, 利用 Landsat 湖泊边界, 筛选落在湖面上的卫星测高数据点, 并应用拉伊达准则筛选水位数据去除异常值, 进一步对每次经过湖泊的测点数据进行平均, 获得该过境时间的湖泊水位高程。卫星测高水位计算公式为:

$$h_{al} = Altitude - Range + H_{cor} \quad (1)$$

式中,  $h_{al}$  为卫星测高水位,  $Altitude$  为卫星至参照椭球面的高度,  $Range$  为卫星至湖泊水位点的高度,  $H_{cor}$  为各项纠正项目, 分别对应 Sentinel-3 SRAL L2 数据中的 alt\_20\_ku、range\_ocean\_20\_ku、net\_instr\_cor\_range\_20\_ku。笔者利用 2016—2018 年鄱阳湖 Sentinel-3A SRAL Ku 波段卫星测高数据和卫星过境时刻的水位数据, 对卫星测高产品数据精度进行了初步评价, 卫星测高水位与实测数据的时间一致性较好, 相关系数大于 0.98, 平均绝对误差为 0.276 m, 可用于长时间尺度的湖泊变化分析。

## 2.3 湖泊水量变化计算

根据卫星提取的湖泊面积及水位数据, 建立水位—面积关系。假设湖泊水量变化为不规则的台体, 按如下公式<sup>[21]</sup>计算水位变化下的水量变化:

$$V = (\sqrt{S_a \cdot S_b} + S_a + S_b) h / 3 \quad (2)$$

式中,  $S_a$  为台体上表面积, 对应湖泊高水位时的面积;  $S_b$  为台体下表面积, 对应湖泊低水位时的面积;  $h$  为水位变化值。

## 2.4 GLDAS 产品数据

GLDAS 利用地表观测与卫星遥感观测数据,通过模型 (Mosaic、Noah、CLM 和 VIC) 模拟与数据同化生成全球的地表状态变量,广泛应用于全球变化与水循环研究。根据以往的研究成果,其在数据一致性、数据质量的季节稳定性及对趋势性描述能力方面质量较好<sup>[31]</sup>。由于研究区内缺少实测气象资料,最近的国家基准气象站距湖泊流域边界大于 80 km,因此本文选择 GLDAS-2.1 由 Noah 生成的 2000 年至今的空间分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  的包含气温和降水等多个变量的数据集,获取当惹雍错流域内的年平均气温、降雨、降雪数据。

## 2.5 Landsat 卫星的冰川雪线提取

为定性分析永久冰川及积雪融化对湖泊水量变化的影响,选取流域内典型冰碛湖的冰川雪线变化进行分析。长时间序列遥感影像显示 10—11 月降雪对永久冰川及积雪面积干扰小,影像数据质量好,故选取当惹雍错 1988 年以来该时间段内 17 幅 Landsat 影像数据,通过人工目视解译识别和提取雪线,所用数据详见表 2。

表 2 典型冰碛湖冰川雪线提取所用数据  
Tab.2 Landsat data for glacier snow line extraction

数据源	获取时间
TM5	19881012、19921007、19941013、19961018、20041024、20061014、20081104、20091022、20101025
ETM+	20001005、20011024、20121022
OLI	20141004、20151007、20161025、20171028、20181015

## 3 结果分析

### 3.1 近 30 年来湖泊面积变化

当惹雍错在 1988—2018 年间湖泊面积整体呈上升趋势(图 3),1988 年湖泊面积为  $828.89 \text{ km}^2$ ,2018 年的湖泊面积为  $849.99 \text{ km}^2$ ,约增加了 2.55%。湖泊最小和最大面积分别为  $824.75 \text{ km}^2$ (1996 年)和  $849.99 \text{ km}^2$ (2018 年)。具体来看,1988—1998 年间湖泊面积约减少  $2.4 \text{ km}^2$ ;2000—2018 年,湖泊面积整体呈上升趋势,2000—2018 年间湖泊面积扩张  $18 \text{ km}^2$ ,平均上升速率为  $1 \text{ km}^2/\text{a}$ ,其中 2000—2006 年面积呈波动增加,2007 年相比 2006 年增加明显,2007—2015 年保持相对平缓的变化,2016—2018 年湖泊面积变化明显加快,上升速率为  $3.5 \text{ km}^2/\text{a}$ 。湖泊扩张主要发生在东南角和中西部区域(图 4),结合 2009 年实测湖泊水下地形来看<sup>[26]</sup>,这两处区域分布有达果藏布、布寨藏布入湖河口,水下地形坡度较小,地势平缓,湖泊面积变化较其他区域更为敏感。

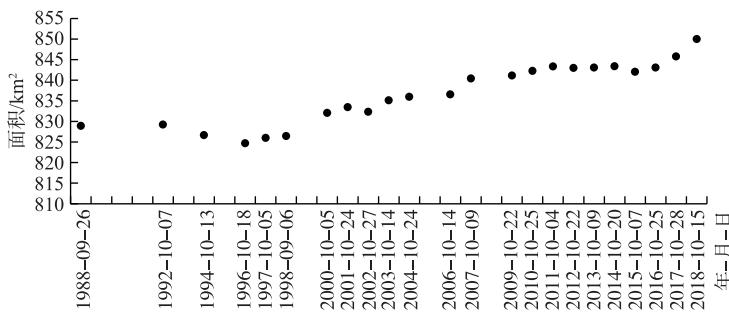


图 3 1988—2018 年当惹雍错湖泊面积的变化

Fig.3 The variation of lake area of Tangra Yumco from 1988 to 2018

### 3.2 2016—2018 年湖泊面积—水位变化与关系建立

基于 2016—2018 年的水位数据资料,结合该研究时段的遥感湖泊面积资料,建立湖泊水位—面积关系

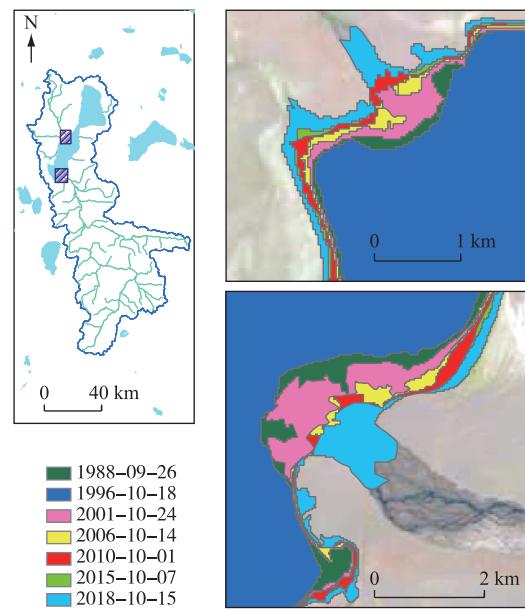


图 4 当惹雍错变化区域示意图(以 1988—2018 年间 7 期数据示意)

Fig.4 Variations of lake boundary of Tangra Yumco from 1988 to 2018

曲线,假设近 30 年湖泊地形无明显变化,并以此关系扩展估算近 30 年的水位变化与水量变化。由于青藏高原湖泊结冰期时河流结冰和积雪覆盖可能会影响湖泊面积、水位提取的精度,本文对当惹雍错 1989 年以来 11 月一次年 3 月的 Landsat 影像分析,发现该湖中部及北部结冰期一般为 1—4 月初,南部主要河流入湖口则在 11 月一次年 3 月结冰。本节主要讨论非结冰期(4—10 月)的湖泊变化情况。

2016—2018 年间湖泊面积呈明显扩张(图 5a),当惹雍错呈现 4—6 月枯水期特征,湖泊面积最小,7 月起逐渐增大,8、9 月前后达到峰值,然后逐渐减少。相比 2016 年,2017 和 2018 年年均湖泊面积分别增长 1.6 和 5.5  $\text{km}^2$ ,增长率为 0.19% 和 0.65%。从湖泊面积年内变化程度来看,2018 年远大于 2016 年。以 2016 年 4 月 3 日的水位数据为基准,计算其他时间与该时间的水位差值情况,可知 2016—2018 年间湖泊水位与面积具有相似变化(图 5b),4—6 月水位较低,8 月水位增加明显,在 9—10 月达到峰值。相比 2016 年,2017 和 2018 年湖泊平均水位增长了 0.33 和 1.04 m。其中 9—10 月水位增长最大,2018 年较 2016 年同期增长约为 1.3 m。2016 年湖泊水位年内变化最小,2018 年年内变化最大。

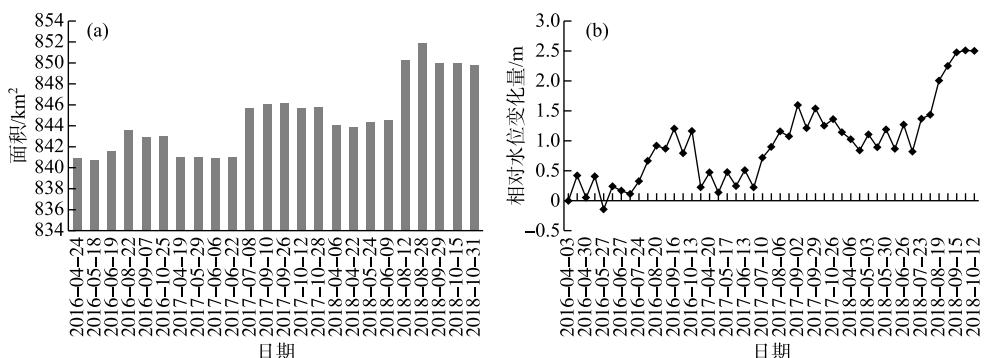


图 5 2016—2018 年非结冰期当惹雍错面积(a)和水位(b)的变化

Fig.5 Variation of lake area (a) and water level (b) of Tangra Yumco in nonglacial period from 2016 to 2018

从上述分析可知非结冰期的湖泊面积与湖泊水位变化具有一致性。选取 2016—2018 年湖泊面积与水位时间接近的数据共计 20 期,根据其散点图建立水位变化量—面积变化量线性回归关系为:

$$y = 0.2438x + 0.1433 \quad (3)$$

式中,  $y$  为面积变化量,  $x$  为水位变化量,  $R^2$  为 0.94。假设近 30 年来湖泊水下地形无明显变化,即可根据近 30 年历史遥感卫星面积,结合该线性回归关系估算历史水位变化。进一步结合水量估算模型,以 1988 年作为基准数据估算湖泊 1988—2018 年 10 月的水量变化。

### 3.3 近 30 年来湖泊水位—水量变化

近 30 年来湖泊水位、水量与面积变化呈现较强的一致性(图 6)。从水位变化来看,2018 年相比于 1988 年,水位增加了 5.29 m。具体来看,1988—1998 年间,水位减少了 0.45 m,2000—2018 年间湖泊水位增加了 4.37 m,平均增加速率为 0.24 m/a,其中 2000—2006 年间水位呈波动增加,2007 相比 2006 年增加明显,2007—2015 年间保持相对平缓的波动,2016—2018 年湖泊水位增加明显,2018 年比 2016 年增加了 1.69 m,平均增加速率为 0.56 m/a。

从水量变化来看,2018 年相比于 1988 年,水量增加了 44.75 亿  $m^3$ 。具体来看,1988—1998 年间,水量减少 3.75 亿  $m^3$ ,2000—2018 年间湖泊水量增加了 37.15 亿  $m^3$ ,平均增加速率为 2.06 亿  $m^3/a$ ,其中 2000—2006 年间水量呈波动增加,2007 相比 2006 年增加明显,2007—2015 年间保持相对平缓的波动,2016—2018 年湖泊水量增加明显,2018 年比 2016 年增加了 14.41 亿  $m^3$ ,平均增加速率为 7.2 亿  $m^3/a$ 。

已有学者以多种卫星测高数据估算了 1994—2015 年青藏高原包含当惹雍错的 11 个大湖的水量变化<sup>[19]</sup>,从其研究成果图可知,当惹雍错在 1996—2014/2015 年区间,水量变化量约在 35 亿~40 亿  $m^3$  之间。本文研究中用于水量估算的水位时间段为 10 月,1996—2014/2015 年水量变化量为 35.5 亿/38.3 亿  $m^3$ ,考虑到已有研究中所使用的数据时段并不明确,又由于湖泊在一年之中水量变化也具有一定量的差异,与该研究对比,认为本文的水量估算具有合理性。

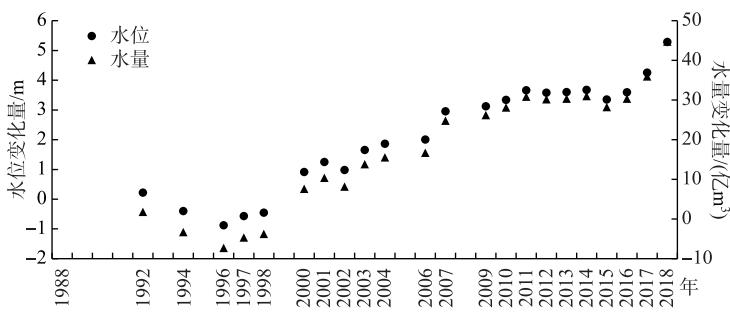


图 6 1988—2018 年当惹雍错水位和水量的变化

Fig.6 Variation of water level and water volume of Tangra Yumco from 1988 to 2018

由于 2000 年 5 月数据缺失,本研究以 2001 年 5 月(代表干季)和 9 月(代表湿季)作为基准数据,进一步估算 2001—2018 年当惹雍错的年内干湿季水量变化量(图 7)。由于水位、水量与面积变化类似,根据面积变化分析来看,2001、2010 和 2015 年湖泊年内干湿季的面积差分别为 4.1、2.3 和 0.3  $km^2$ ,不考虑缺失的数据,2001—2015 年间湖泊面积的年内变化是减少的,干季湖泊面积的增长量大于湿季,2016—2018 年间湖泊年内干湿季的面积差异又开始增大,主要表现为湿季面积的显著增加。从水量变化来看,相比 2016 年干季,2017 和 2018 年分别增加 5.22 亿和 8.73 亿  $m^3$ ;湿季,分别增加 6.16 亿和 7.48 亿  $m^3$ 。当惹雍错相比青藏高原其他大型湖泊面积变化不大,但由于该湖泊是高原第 1 深、第 4 大湖泊,面积变化为水量变化的敏感因素,近十多年湖泊水量变化十分显著。

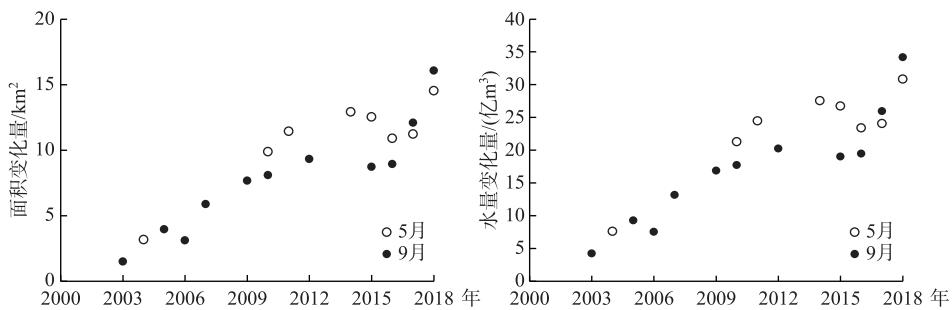


图 7 2001—2018 年当惹雍错干湿季面积与水量的变化

Fig.7 Variation of lake area and water volume of Tangra Yumco in dry and wet seasons from 2001 to 2018

#### 4 湖泊变化的影响因素探讨

##### 4.1 气候因素分析

以往研究表明,青藏高原气候向暖湿、暖干两个方向发展,其中南部地区主要呈暖湿变化,具有气温升高、降水增加的特点<sup>[3]</sup>,青藏高原湖泊的面积变化与区域气象要素具有显著的区域相关性<sup>[32]</sup>. 利用 GLDAS 2000—2018 年月气温和降雨量、降雪量数据,以此分析 2000 年以来的气候变化情况.

近 19 年以来当惹雍错流域平均气温呈现明显增加的趋势(图 8a),年均气温变化与湖泊面积、水位、水量变化一致. 流域内降水量在 2000—2005 年减少,2006 年起变化相对平缓,降雨量在 2000—2005 年减少,2007—2015 年波动明显,2016 年起开始增加(图 8b). 从长时间尺度看,湖泊水量增加与气温的一致性较降水量强(图 9).

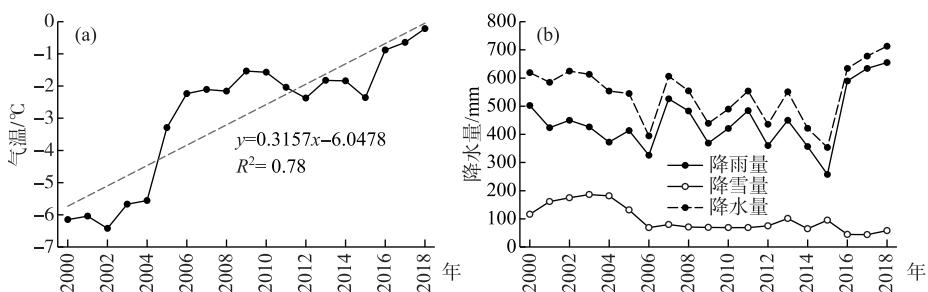


图 8 2000—2018 年当惹雍错流域平均气温(a)和降水量(b)的年际变化

Fig.8 Inter-annual variations of average temperature(a) and precipitation (b) of Tangra Yumco Basin from 2000 to 2018

从湖泊流域各年月降水分布看(图 10),湖泊呈明显的干湿季降水差异,湿季降水主要分布在 6—9 月,2016—2018 年湿季降水量增长明显. 因 2008 年前干湿季的数据缺失较多,取 2008 年之后的湖泊水量增加量(以 2001 年为基准)和干湿季降水量、气温数据(如 6—9 月降水量之和代表湿季降水量,2—5 月之和代表干季,气温则以均值代表)进行线性回归,分析干湿季降水与气温对湖泊水量变化的影响,其与湿季降水量和气温的确定性系数  $R^2$  分别为 0.613 和 0.845,而干季只有 0.007 和 0.018,说明湿季受降水和气温影响都较大(图 11).

##### 4.2 冰川雪线变化

随着全球气温的升温变暖,过去 40 年间青藏高原及其周边地区的冰川呈现不同程度的退缩态势<sup>[33]</sup>. 当惹雍错湖泊南、北部都有冰川,其中南部的波波噶乌峰冰川较大,已有文献记载表明该冰川的融水流人北部的当惹雍错<sup>[26]</sup>,以往的研究中对 2000—2014 年湖泊面积与冰川面积的变化趋势的一致性分析结果也表明

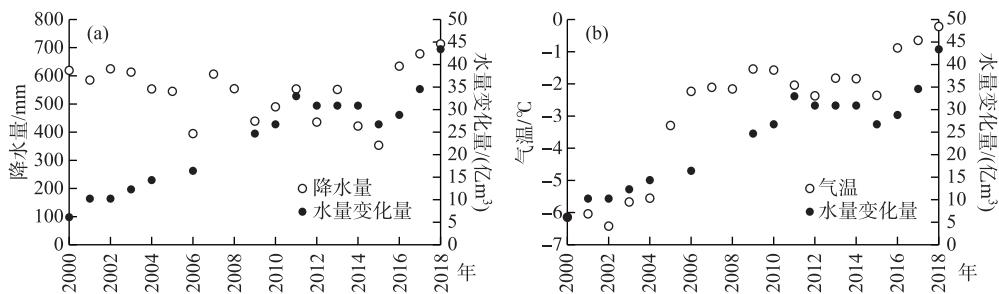


图 9 2000—2018 年当惹雍错流域湖泊水量变化量与降水量(a)和气温(b)的散点图

Fig.9 Scatter plot of water volume variation and precipitation (a) and air temperature (b) of Tangra Yumco Basin from 2000 to 2018

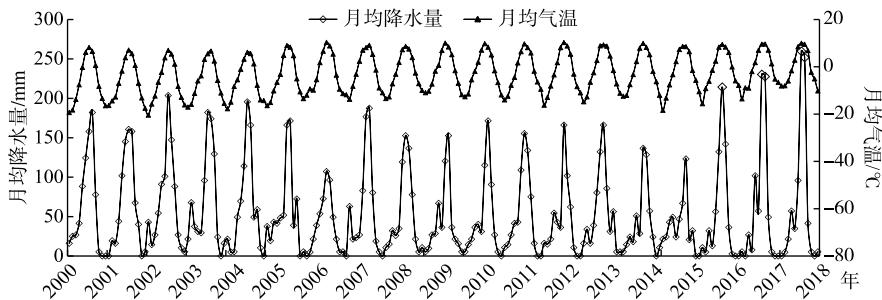


图 10 当惹雍错流域月均气温与月均降水量

Fig.10 Monthly temperature and precipitation in the Tangra Yumco Basin

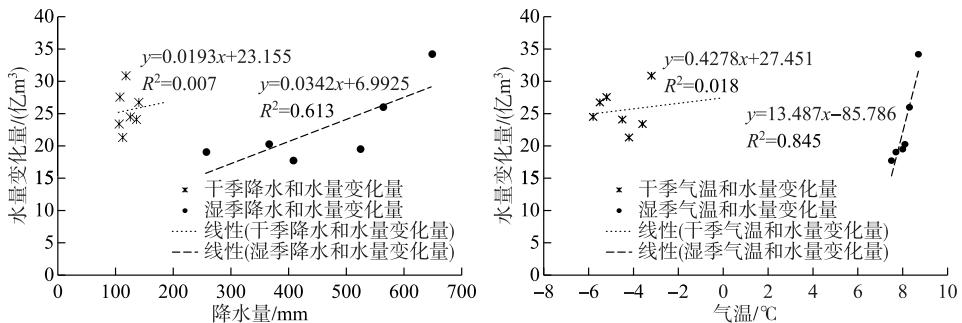


图 11 当惹雍错干湿季降水量、气温和水量变化的关系

Fig.11 Relationship between precipitation, air temperature and water volume variation of Tangra Yumco in dry and wet seasons

冰川融水补给是当惹雍错湖泊不可缺少的补给源<sup>[5]</sup>.

本文根据 Landsat 卫星 1988—2018 年 10 月份的影像提取湖泊南部典型冰碛湖冰川雪线,结果显示,近 30 年来雪线自 1988 年呈现明显上升趋势,永久冰川及积雪呈现融化加速情景(图 12). 具体来看,1988—1996 年间雪线上升并不明显,2001 年与 1996 年相比、2010 年与 2001 年相比雪线均明显上升,2010—2015 年间雪线变化较小,2018 年相比于 2015 年的雪线上升较大,总体来看,雪线逐渐上升与湖泊水量变化较一致,也与湖泊东南部达果藏布汇流处的湖泊面积增加相一致,尤其是 2015 年与 2018 年的湖泊面积、水量的变化差异,说明冰川退缩是湖泊水量的重要的补给源,对湖泊的扩张具有一定贡献,但由于冰川同时受气

温、降水量变化的影响,对于冰川融水占湖泊水量增加量的具体比例仍有待后续的定量分析研究。

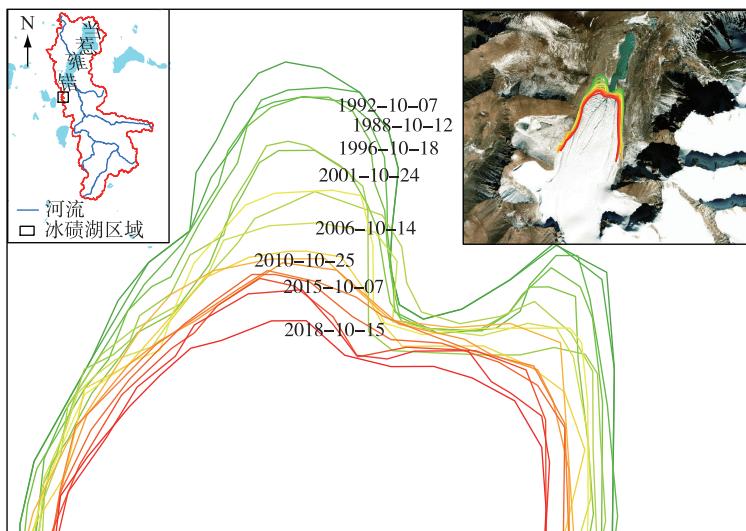


图 12 1988—2018 年冰川雪线位置

Fig.12 The location of glacier snow line from 1988 to 2018

## 5 结论

针对无资料区实测水位数据稀缺难以进行湖泊水位、水量变化估算的问题,本研究侧重于利用短时间长度(2016—2018 年)的卫星合成孔径雷达数据 Sentinel-3A SRAL 作为唯一遥感水位数据源,同时结合 Landsat 系列光学遥感影像所提取的长时间序列的湖泊面积,在细致分析并获取 2016—2018 年非结冰期湖泊面积与水位变化关系的基础上,结合水量估算公式获取并分析了 1988—2018 年的水位、水量变化与 2001—2018 年内变化。并结合 GLDAS 气象资料与雪线变化湖泊变化进行了初步探讨,主要结论如下:

1) 当惹雍错在 1988—2018 年间,湖泊面积扩张明显,湖泊水位、水量增加显著。相比 1988 年,2018 年的湖泊面积、水位和水量分别增加  $21.1 \text{ km}^2$ 、 $5.29 \text{ m}$  和  $44.75 \text{ 亿 m}^3$ 。其中 1988—1998 年湖泊面积—水位—水量有所减少,2000—2018 年整体呈增加趋势,其中 2000—2006 年呈波动增加,2007 年相比 2006 年增加明显,2007—2015 年变化平缓,2016—2018 年变化明显加剧。2001—2018 年内湖泊面积、水位、水量变化呈现干湿季的变化特征。

2) 当惹雍错在 1996—2014/2015 年湖泊水量变化值为  $38.3 \text{ 亿}/35.5 \text{ 亿 m}^3$ ,该期间的水量变化趋势、变化量与以往利用多源卫星水位数据对应时间尺度的研究结果具有较强的一致性。

3) 湖泊水面增长区域主要分布在水下地形坡度较小的东南和中西部区域,这两个区域也是入湖径流(达果藏布、布寨藏布)的主要入湖口。

4) 湖泊水量变化受降雨、气温多种因素的综合影响。长时间年际尺度看,湖泊水量增长与气温的一致性较降水量强,冰川雪线的上升表明由气温升高引起的冰雪和冻土融化水量可能是湖泊水量的重要补给源之一。结合流域内干湿季的降雨、气温变化来看,湿季湖泊受降水、气温的影响都较大,2008—2018 年的湿季降水量、气温与水量散点拟合的确定性系数  $R^2$  分别为 0.613、0.845。

本文对于长时间尺度的水量变化估算主要集中于湖泊变化最为稳定的 10 月份,由于湖泊存在明显的年内变化,因此所估算的水位、水量变化仅代表该典型时段的情况。由于研究所用的是卫星的相对水位变化,在其他湖泊的实际应用中,本文所用的方法还会受到影像幅数的限制,需要确保具有一定数量对应时段的卫星面积和卫星水位数据用于建立相对可靠的面积变化—水位变化关系。湖泊水量变化受降雨、气温等因素的影响复杂,降水量、融雪、冻土融水对湖泊水量的具体贡献量需进一步研究。因光学遥感数据普遍受到

云雨天气影响,湖泊面积数据在典型干湿季存在一定缺失,微波遥感数据理论上可以在一定程度上补充该时段的数据,但与光学数据存在成像、时空分辨率的差异,仍有待于进一步的数据收集分析等处理和联合应用研究。

## 6 参考文献

- [1] Hao ZC, Jiang WJ, Ju Q *et al.* The features of climate changes in the five river source regions of the Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(6): 1130-1135. [郝振纯, 江微娟, 鞠琴等. 青藏高原河源区气候变化特征分析. 冰川冻土, 2010, 32(6): 1130-1135.]
- [2] Gao R, Zhong HL, Dong WJ *et al.* Impact of snow cover and frozen soil in the Tibetan Plateau on summer precipitation in China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(2): 254-260. [高荣, 钟海玲, 董文杰等. 青藏高原积雪、冻土对中国夏季降水影响研究. 冰川冻土, 2011, 33(2): 254-260.]
- [3] Tan CP, Yang JP, Mi R. Analysis of the climatic change characteristics in the southern Tibetan Plateau from 1971 to 2007. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(6): 1111-1120. [谭春萍, 杨建平, 米睿. 1971—2007年青藏高原南部气候变化特征分析. 冰川冻土, 2010, 32(6): 1111-1120.]
- [4] Zhang GQ, Luo W, Chen WF *et al.* A robust but variable lake expansion on the Tibetan Plateau. *Science Bulletin*, 2019, 64(18): 1306-1309. DOI: 10.1016/j.scib.2019.07.018.
- [5] Laba ZM, Deji YZ, La B *et al.* Remote sensing analysis on the area variations of Tangra Yutso in Tibetan Plateau over the past 40 years. *J Lake Sci*, 2017, 29(2): 480-489. DOI: 10.18307/2017.0224. [拉巴卓玛, 德吉央宗, 拉巴等. 近40 a 西藏那曲当惹雍错湖泊面积变化遥感分析. 湖泊科学, 2017, 29(2): 480-489.]
- [6] Zhang GQ, Yao TD, Xie HJ *et al.* Lakes' state and abundance across the Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(24): 3010-3021. DOI: 10.1007/s11434-014-0258-x.
- [7] Dong SY, Xue X, You QG *et al.* Remote sensing monitoring of the lake area changes in the Qinghai-Tibet Plateau in recent 40 years. *J Lake Sci*, 2014, 26(4): 535-544. DOI: 10.18307/2014.0407. [董斯扬, 薛娴, 尤全刚等. 近40年青藏高原湖泊面积变化遥感分析. 湖泊科学, 2014, 26(4): 535-544.]
- [8] Chu D, Pu Q, La B *et al.* Remote sensing analysis on lake area variations of Yamzho Yumco in Tibetan Plateau over the past 40 A. *J Lake Sci*, 2012, 24(3): 494-502. DOI: 10.18307/2012.0324. [除多, 普穷, 拉巴卓玛等. 近40a 西藏羊卓雍错湖泊面积变化遥感分析. 湖泊科学, 2012, 24(3): 494-502.]
- [9] Nielsen K, Stenseng L, Andersen O *et al.* The performance and potentials of the CryoSat-2 SAR and SARIn modes for lake level estimation. *Water*, 2017, 9(6): 374. DOI: 10.3390/w9060374.
- [10] Kleinherenbrink M, Lindenbergh RC, Ditmar PG. Monitoring of lake level changes on the Tibetan Plateau and Tian Shan by retracking Cryosat SARIn waveforms. *Journal of Hydrology*, 2015, 521: 119-131. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.11.063.
- [11] Zhao Y, Liao JJ, Shen GZ *et al.* Monitoring the water level changes in Qinghai Lake with satellite altimetry data. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(4): 633-644. [赵云, 廖静娟, 沈国状等. 卫星测高数据监测青海湖水位变化. 遥感学报, 2017, 21(4): 633-644.]
- [12] Zhang HY, Wu YH, Liu YJ *et al.* Water storage variation of the Qinghai Lake in recent decades based on satellite observation. *Progress in Geography*, 2018, 37(6): 823-832. [张洪源, 吴艳红, 刘衍君等. 近20年青海湖水量变化遥感分析. 地理科学进展, 2018, 37(6): 823-832.]
- [13] Wan J. Estimation of lake water quantity in Qiangtang Plateau based on multi-source remote sensing data [Dissertation]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. [万杰. 基于多源遥感数据的羌塘高原湖泊水量变化估算研究[学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2014.]
- [14] Dai YF, Gao Y, Zhang GQ *et al.* Water volume change of the Paiku Co in the southern Tibetan Plateau and its response to climate change in 2003-2011. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(3): 723-732. [戴玉凤, 高杨, 张国庆等. 2003-2011年青藏高原佩枯错相对水量变化及其对气候变化的响应. 冰川冻土, 2013, 35(3): 723-732.]
- [15] Zhang GQ, Chen WF, Xie HJ. Tibetan Plateau's lake level and volume changes from NASA's ICESat/ICESat-2 and landsat missions. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(22): 13107-13118. DOI: 10.1029/2019gl085032.
- [16] Yang RM, Zhu LP, Wang JB *et al.* Spatiotemporal variations in volume of closed lakes on the Tibetan Plateau and their

- climatic responses from 1976 to 2013. *Climatic Change*, 2017, **140**(3/4) : 621-633. DOI: 10.1007/s10584-016-1877-9.
- [17] Zhu LP, Xie MP, Wu YH. Quantitative analysis of lake area variations and the influence factors from 1971 to 2004 in the Nam Co basin of the Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2010, **55**(18) : 1789-1798. [朱立平, 谢曼平, 吴艳红. 西藏纳木错 1971~2004 年湖泊面积变化及其原因的定量分析. 科学通报, 2010, **55**(18) : 1789-1798.]
- [18] Zhang GQ, Yao TD, Shum CK et al. Lake volume and groundwater storage variations in Tibetan Plateau's endorheic basin. *Geophysical Research Letters*, 2017, **44**(11) : 5550-5560. DOI: 10.1002/2017gl073773.
- [19] Crétaux JF, Abarca-Del-río R, Bergé-Nguyen M et al. Lake volume monitoring from space. *Surveys in Geophysics*, 2016, **37**(2) : 269-305. DOI: 10.1007/s10712-016-9362-6.
- [20] Taube CM. Instructions for winter lake mapping. Manual of Fisheries Survey Methods II :With Periodic Updates, Chapter 11. Ann Arbor, MI: Michigan Department of Natural Resources, 2000.
- [21] Zhang GQ. Changes in lakes on the Tibetan Plateau observed from satellite data and their responses to climate variations. *Progress in Geography*, 2018, (2) : 214-223. [张国庆. 青藏高原湖泊变化遥感监测及其对气候变化的响应研究进展. 地理科学进展, 2018, (2) : 214-223.]
- [22] Bonnefond P, Exertier P, Laurain O et al. Absolute calibration of Jason-1 and Jason-2 altimeters in Corsica during the formation flight phase. *Marine Geodesy*, 2010, **33**(sup1) : 80-90. DOI: 10.1080/01490419.2010.487790.
- [23] Mertikas SP, Ioannides RT, Tziavos IN et al. Statistical models and latest results in the determination of the absolute bias for the radar altimeters of Jason satellites using the gavdos facility. *Marine Geodesy*, 2010, **33**(sup1) : 114-149. DOI: 10.1080/01490419.2010.488973.
- [24] Malenovský Z, Rott H, Cihlar J et al. Sentinels for science: Potential of Sentinel-1, -2, and -3 missions for scientific observations of ocean, cryosphere, and land. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **120** : 91-101. DOI: 10.1016/j.rse.2011.09.026.
- [25] Wang WZ, Gao YH, Xu JW. Applicability of GLDAS and climate change in the Qinghai-Zizang Plateau and its surrounding arid area. *Plateau Meteorology*, 2013, **32**(3) : 635. [王婉昭, 高艳红, 许建伟. 青藏高原及其周边干旱区气候变化特征与 GLDAS 适用性分析. 高原气象, 2013, **32**(3) : 635.]
- [26] Wang JB, Peng P, Ma QF et al. Modern limnological features of Tangra Yumco and Zhari Namco, Tibetan Plateau. *J Lake Sci*, 2010, **22**(4) : 629-632. DOI: 10.18307/2010.0422. [王君波, 彭萍, 马庆峰等. 西藏当惹雍错和扎日南木错现代湖泊基本特征. 湖泊科学, 2010, **22**(4) : 629-632.]
- [27] Shao ZG, Zhu DG, Meng XG et al. Characteristics of the change of major lakes on the Qinghai-Tibet Plateau in the last 25 years. *Geological Bulletin of China*, 2007, **26**(12) : 1633-1645. [邵赵刚, 朱大岗, 孟宪刚等. 青藏高原近 25 年来主要湖泊变迁的特征. 地质通报, 2007, **26**(12) : 1633-1645.]
- [28] Zhang GQ, Li JL, Zheng GX. Lake-area mapping in the Tibetan Plateau: An evaluation of data and methods. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, **38**(3) : 742-772. DOI: 10.1080/01431161.2016.1271478.
- [29] Tong LX, Yan Q, Luo CF et al. Water body information extraction based on NDWI segmentation and object-oriented method. *Geospatial Information*, 2017, **15**(5) : 57-59. [童李霞, 燕琴, 骆成凤等. 基于 NDWI 分割与面向对象的水体信息提取. 地理空间信息, 2017, **15**(5) : 57-59.]
- [30] Yin YQ, Li JG, Yu T et al. The study of object-oriented water body extraction method based on high resolution RS image. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2015, (1) : 81-85. [殷亚秋, 李家国, 余涛. 基于高分辨率遥感影像的面向对象水体提取方法研究. 测绘通报, 2015, (1) : 81-85.]
- [31] Wang W, Wang XJ, Wang P. Assessing the applicability of GLDAS monthly precipitation data in China. *Advances in Water Science*, 2014, **25**(6) : 769-778. [王文, 汪小菊, 王鹏. GLDAS 月降水数据在中国区的适用性评估. 水科学进展, 2014, **25**(6) : 769-778.]
- [32] Lv L, Zhang TB, Yi GH et al. Changes of lake areas and its response to the climate factors in Tibetan Plateau since 2000. *J Lake Sci*, 2019, **31**(2) : 573-589. DOI: 10.18307/2019.0225. [闾利, 张廷斌, 易桂花等. 2000 年以来青藏高原湖泊面积变化与气候要素的响应关系. 湖泊科学, 2019, **31**(2) : 573-589.]
- [33] Wang NL, Yao TD, Xu BQ et al. Spatiotemporal pattern, trend, and influence of glacier change in Tibetan Plateau and surroundings under global warming. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, **34**(11) : 1220-1232. [王宁练, 姚檀栋, 徐柏青等. 全球变暖背景下青藏高原及周边地区冰川变化的时空格局与趋势及影响. 中国科学院院刊, 2019, **34**(11) : 1220-1232.]