

# 多源卫星测高数据监测拉昂错 1992 年—2020 年水位变化

孙明智<sup>1</sup>, 刘新<sup>1</sup>, 汪海洪<sup>2</sup>, 袁佳佳<sup>1</sup>, 李成名<sup>3</sup>, 郭金运<sup>1</sup>

1. 山东科技大学 测绘与空间信息学院, 青岛 266590;

2. 武汉大学 测绘学院, 武汉 430079;

3. 中国测绘科学研究院, 北京 100036

**摘要:** 青藏高原湖泊水位是反映生态环境变化的重要指标, 为了使用多源卫星测高数据构建高精度、长时序的湖泊水位时间序列, 本文提出了一种基于大气路径延迟校正、波形重定、异常值检测、卫星间偏差调整的高精度湖泊水位序列构建策略。以拉昂错为研究对象, 利用本文方法对 TOPEX/Poseidon、Jason-1/2/3 高度计数据进行处理, 构建了拉昂错 1992 年—2020 年的高精度水位时间序列, 讨论分析了 1992 年—2020 年湖泊水位、面积和流域内降水、温度、蒸发的关系。结果表明, 拉昂错水位在 1992 年—2020 年整体下降约 6.00 m, 平均变化趋势为  $-0.21 \pm 0.01$  m/a, 水位变化呈现明显周年性; 本文方法构建的湖泊水位序列长、精度高, 均方根误差为 13.10 cm。

**关键词:** 卫星测高, TOPEX/Poseidon, Jason-1/2/3, 拉昂错, 湖泊水位, 青藏高原

**引用格式:** 孙明智, 刘新, 汪海洪, 袁佳佳, 李成名, 郭金运. 2022. 多源卫星测高数据监测拉昂错 1992 年—2020 年水位变化. 遥感学报, 26(1): 126–137

Sun M Z, Liu X, Wang H H, Yuan J J, Li C M and Guo J Y. 2022. Monitoring lake level change in La-ang Co from 1992 to 2020 using multi-altimeter data. National Remote Sensing Bulletin, 26 (1) : 126–137 [DOI: 10.11834/jrs.20221280]

## 1 引言

青藏高原上面积大于 1 km<sup>2</sup> 的湖泊约有 1400 个, 大多数湖泊地处偏远、环境恶劣, 很少受到人类活动的直接影响 (Ma 等, 2011)。这些高原湖泊对环境变化十分敏感, 因此它们的水位和区域水储量变化对气候和水文研究具有重要意义 (Song 等, 2014; Guo 等, 2016)。然而, 大多数湖泊缺少实地观测的水文数据。因此遥感技术成为监测高原湖泊水位变化的有效手段。

卫星测高技术在内陆水体监测中表现出优良的特性。ICESat (Ice, Cloud, and Elevation Satellite) 可提供精度达分米级的湖泊水位观测数据 (Phan 等, 2012)。ICESat 搭载的 GLAS (Geoscience Laser Altimeter System) 激光高度计的足迹直径约

为 70 m, 这使得 GLAS 可以在青藏高原上监测到更多的小型湖泊。有学者利用 2003 年—2009 年 ICESat 卫星数据成功获取了青藏高原上 111 个湖泊的水位变化, 分区域讨论了青藏高原湖泊水位的变化趋势 (Zhang 等, 2011), 同时期的 ICESat 数据显示青藏高原湖泊水位整体上升速率为 0.20 m/a (Phan 等, 2012), 然而不同区域的湖泊演变规律不同, 利用聚类分析发现高原湖泊的水位变化具有较强的时空分布特征 (Song 等, 2014)。合成孔径干涉雷达高度计 SARIn (Synthetic Aperture Radar Interferometry) (例如: CryoSat-2) 和激光高度计的轨道间距更小, 可以在青藏高原获取更多的湖泊水位数据 (Kleinherenbrink 等, 2015; Jiang 等, 2017; 廖静娟 等, 2020)。然而, ICESat 和 CryoSat-2 都采用了非重复轨道, 导致采样时间间

收稿日期: 2021-04-30; 预印本: 2021-09-13

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 41774001, 41974016); 国家测绘自主可控专项 (编号: 816-517); 山东科技大学科研创新团队支持计划 (编号: 2014TDJH101)

第一作者简介: 孙明智, 1996 年生, 男, 硕士研究生, 研究方向为卫星测高数据处理与应用。E-mail: sunmingzhismz@163.com

通信作者简介: 刘新, 1969 年生, 女, 副教授, 研究方向为空间数据挖掘和机器学习。E-mail: xinliu1969@126.com



隔不均匀,造成水位监测数据稀疏。这一缺点使它们不适合监测周期性变化的湖泊水位。

与激光测高计和 SARIn 测高计相比,传统的雷达测高法可以提供时间更均匀、更密集的水位采样数据。自 20 世纪 90 年代初以来,ERS-1 (European Remote-sensing Satellite 1)、T/P (TOPEX/Poseidon) 先后发射。21 世纪初 T/P 卫星的后继卫星 Jason-1、Jason-2、Jason-3 相继成功发射。T/P-Jason-1/2/3 (TOPEX/Poseidon-Jason-1/2/3) 系列高度计的 T/P 和 Jason-1/2/3 卫星可提供 1992 年至今,重复周期为 10 d 的湖泊水位观测数据。T/P-Jason-1/2/3 高度计由于周期短,可以监测到湖泊水位的季节性变化。随着全球变暖趋势加剧,拉昂错和昂孜错等湖泊水位对气候变化(如:厄尔尼诺—南方涛动(ENSO))的响应引发关注(Hwang 等, 2005; Guo 等, 2011)。利用 T/P 及其后继卫星 Jason-1/2/3 可以得到 1992 年至今连续湖泊水位监测数据,但由于雷达高度计足迹比较大(T/P-Jason-1/2/3 高度计足迹约为 2.20 km),数据中包含很多噪声。高原湖泊周围复杂的地形也会导致高度计数据缺失。尽管国际上已有多个基于高度计数据的内陆湖泊水位数据库,但是在高原湖泊上数据质量较差,甚至出现空缺时段。目前内陆地区的雷达高度计数据精度提升方法主要有:(1)选择合适的波形重定方法,主要通过重心偏移算法(OCOG)、阈值法(Threshold)等根据不同地表类型的反射波形特征对前缘中点进行准确跟踪,进而得到距离改正值(高永刚 等, 2008; Hwang 等, 2016)。(2)不同卫星间采用一致的、高精度的地球物理校正模型,如大气路径延迟改正使用 ERA-Interim 数据(Wang 等, 2019)、湿对流层延迟改正使用 NCEP (National Center for Environmental Prediction) 数据(Hwang 等, 2005)。(3)改进异常数据筛选方法,目前常用的数据方法有:三倍中误差(Gao 等, 2008)、连续优质点筛选法(文京川 等, 2018)。但是青藏高原地区气候条件特殊、地形复杂,常规的波形重定算法在高原地区表现不佳。高度计数据在湖泊范围内数据较少且质量不稳定,利用某一种异常值筛选方法不能准确剔除异常值。并且对波形重定方法、地球物理校正、异常值筛选中的某一方面进行改善,湖泊水位整体精度的提升有限,湖泊水位的季节性变化不明显(张鑫 等, 2015)。

本文提出了一种基于大气路径延迟校正、波形重定、异常值检测、卫星间偏差调整的高精度高原湖泊水位序列构建策略。采用最新的 ERA-5 再分析数据计算大气路径延迟校正,改善了高度计数据中不同大气路径延迟校正模型间的系统性偏差。利用适用于高原湖泊的 ICE 波形重定算法改进高度计测距精度。提出了由  $2\sigma$  准则和滑动 MAD (Median Absolute Deviation) 准则组合的异常值剔除方法,在没有任何先验信息的前提下可准确筛选异常值。使用伴飞阶段(Tandem mission)的高度计数据调整卫星间偏差。最终,以 T/P-Jason-1/2/3 为数据源,构建了拉昂错 1992 年—2020 年湖泊水位时间序列,并结合降水、温度、蒸发、湖泊面积,分析了水位变化的特征与影响因素。

## 2 研究区域与数据

### 2.1 研究区域

拉昂错(30°40'N—31°51'N, 81°06'E—81°19'E)又名蓝嘎错,位于西藏阿里地区东南普兰县境内(图 1)。北侧为常年冰雪覆盖的冈底斯山脉,其中冈仁波齐峰海拔 6656 m,南侧是冰川发育的喜马拉雅山脉,其中纳木那尼峰海拔 7728 m。湖泊北侧的干嘎河和那曲为入湖河流,玛旁雍错的湖水在丰水期(6—8 月)通过干迦河补给拉昂错。拉昂错南、西、东三面环山,呈汤勺状,湖泊面积约 260 km<sup>2</sup>,海拔约 4573 m (王君波 等, 2013)。

### 2.2 数据

(1) T/P-Jason-1/2/3 高度计数据。本研究使用 T/P (1992 年—2002 年)、Jason-1 (2002 年—2009 年)、Jason-2 (2009 年—2016 年)、Jason-3 (2016 年—2020 年)的观测数据构建拉昂错湖泊水位序列。T/P-Jason-1/2/3 高度计数据由 AVISO (Archiving, Validation, and Interpretation of Satellite Oceanographic: <https://www.aviso.altimetry.fr/>[2021-02-03]) 发布。1992-08 发射的 T/P 卫星是 T/P-Jason-1/2/3 系列卫星的第一颗卫星,该系列卫星采用周期约为 10 d 的重复轨道。T/P GDRs (Geophysical Data Records) 数据第 1—364 周期(1992-09—2002-08)用来计算 1992 年—2002 年的拉昂错水位。Jason-1 是由美国宇航局和法国空间局联合研制的 T/P 后续卫星,发射于 2001-12,其主要特征(观

测精度、轨道、仪器等)与T/P基本一致。Jason-1的SGDRs (Sensor Geophysical Data Records) 中包含沿轨采样频率为20 Hz的波形数据,该波形由104个跟踪门(预设跟踪门32.5)组成(Hwang等, 2016)。本文使用Jason-1第1—259周期(2002—01—2009—01)的SGDRs数据。发射于2008—07的

Jason-2是该系列的第3颗卫星,本文使用Jason-2第1—303周期(2008—08—2016—09)的SGDRs数据。Jason-3任务发射于2016—01是T/P-Jason1/2/3系列卫星的第4颗卫星,本文使用Jason-3 SDGRs的第1—176周期(2016—02—2020—11)数据,数据特征与Jason-1/2相同。

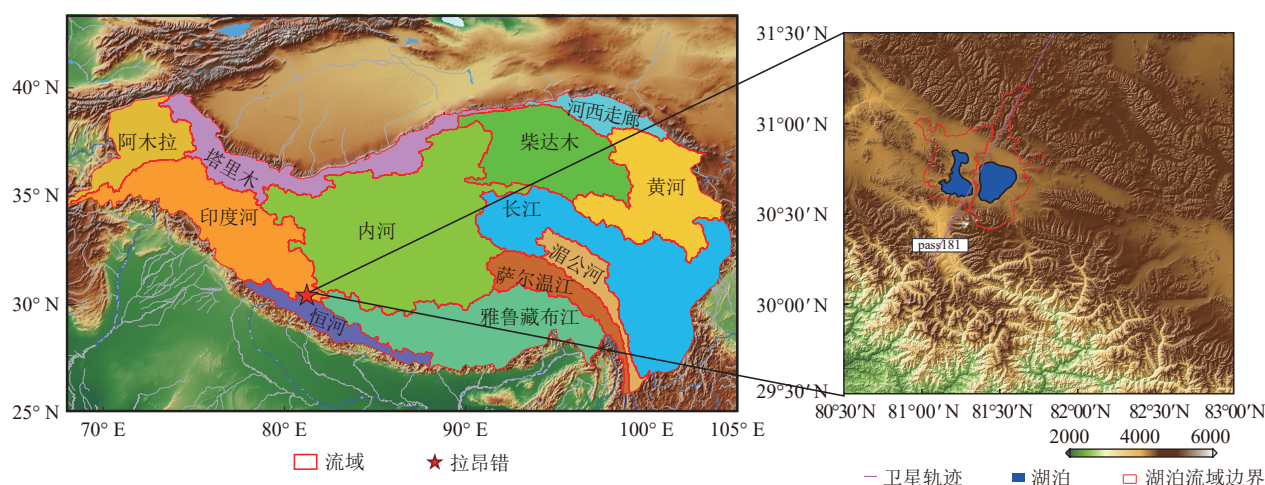


图1 研究区域概况

Fig. 1 Overview of the study area

(2) 欧洲中尺度再分析气象数据。欧洲中期天气预报中心(ECMWF: <https://www.ecmwf.int/> [2021-02-03])发布的表面压力和水汽垂直积分数据,分别被用来计算干对流层延迟DTC (Dry Troposphere Correction)和湿对流层延迟WTC (Wet Troposphere Correction)。利用ECMWF的降水、温度、蒸发数据分析湖泊水位变化的影响因素。ECMWF发布的最新版本ERA-5全球再分析产品为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 格网数据,时间分辨率为1 h。

(3) 大地水准面。本文使用由地球重力场模型(XGM2019e)解算的大地水准面。其数据获取网址为: <http://icgem.gfz-potsdam.de/calgrid> [2021-02-03]。XGM2019e重力场模型是一个5399阶次的球面谐波表示的组合全球重力场模型,空间分辨率为 $2'$ (约4 km)。该模型的数据来源包括GOCO06s模型提供的波长达到300阶次的长波重力信号,通过与地面重力网结合从而获得短波重力信号。地面数据包括由NGA提供的陆地和海洋重力异常数据( $15'$ 分辨率,与XGM2016相同),并附有陆地地形导出的重力信息(EARTH2014)(Zingerle等, 2020)。

(4) 其他数据库的湖泊水位数据。DAHITI

(Database for Hydrological Time Series of Inland Waters, <https://dahiti.dgfi.tum.de/> [2021-02-04])由慕尼黑工业大学于2013年建立(Schwatke等, 2015),该数据库内的拉昂错水位为2008—12—2020—12来自Jason-2/3和Sentinel-3高度计的数据。Hydroweb是由俄罗斯和法国共建的全球湖泊水位数据中心(<http://hydroweb.theia-land.fr/> [2021-02-04])(Crétaux等, 2009),该数据库内的拉昂错水位为2009—04—2020—12来自Jason2/3、SARAL、Sentinel-3A高度计的数据。HTRWLD (High-temporal-resolution water level: <https://data.tpdc.ac.cn/> [2021-02-04])是由中国国家青藏高原科学数据中心发布的青藏高原高时间分辨率湖泊水位及水量变化数据集(2000年—2017年),该数据中拉昂错水位为2000—05—2018—06来自Landsat、Jason1/2/3、CryoSat-2卫星的数据(Li等, 2019a, 2019b)。

(5) 湖泊面积数据集。中国国家青藏高原科学数据中心发布的青藏高原面积大于 $1 \text{ km}^2$ 湖泊数据集(V2.0)(1970s—2018)(<https://data.tpdc.ac.cn/> [2021-02-04])(张国庆, 2019),利用长时间序列Landsat遥感数据使用归一化差分水体指数和目

视解译相结合的方法 (Zhang 等, 2014), 获取了整个青藏高原近 50 a (1970 年—2018 年) 共 12 期湖泊观测数据, 对面积大于 1 km<sup>2</sup> 湖泊的数量及面积变化进行了详细记录 (Zhang 等, 2019)。

(6) 青藏高原流域边界。中国国家青藏高原科学数据中心发布的青藏高原流域边界数据集 (2016) ([https://data.tpdc.ac.cn/\[2021-02-04\]](https://data.tpdc.ac.cn/[2021-02-04])), 使用 2016 年的航天飞机雷达地形任务收集的干涉合成孔径雷达 SRTM DEM 数据、参考河流、湖泊等水系辅助数据, 利用 ArcGIS 水文模型, 分析、提取河网, 将青藏高原划分为阿木拉, 雅鲁藏布江, 恒河, 河西, 印度河, 内河, 湄公河, 柴达木, 萨尔温江, 塔里木, 长江, 黄河等 12 个子流域 (Zhang 等, 2013)。

### 3 研究方法 with 原理

根据卫星测高原理, 湖泊水位的计算公式为

$$LL = Sat_{Alt} - H_{Alt} - V - N \quad (1)$$

式中,  $LL$  是湖面正高;  $Sat_{Alt}$  是卫星质心的大地高;  $H_{Alt}$  为测高计测量的距离;  $V$  为各项误差的改正;  $N$  为大地水准面起伏 (本文使用 XGM2019e 大地水准面模型), 式 (1) 中具体的误差改正为

$$V = WTC + DTC + IC + Sel + Pol + RC \quad (2)$$

式中,  $WTC$  为湿对流层延迟改正;  $DTC$  为干对流层延迟改正;  $IC$  为电离层延迟改正;  $Sel$  固体潮改正;  $Pol$  为极潮改正;  $RC$  为波形重定的距离改正。固体潮和极潮可以采用模型值准确地计算, 波形重定、湿对流层延迟改正、干对流层延迟改正、电离层延迟改正对于测高卫星的内陆应用至关重要, 本文将在 3.1 节进一步讨论。与上述改正相比, 海潮、逆气压、热膨胀、风堆积效应 (谢友鸽 等, 2016) 等影响较小, 因此在本研究中被忽略 (郭金运 等, 2010, 2021)。卫星测高数据生成湖泊水位的数据处理流程如图 2 所示。

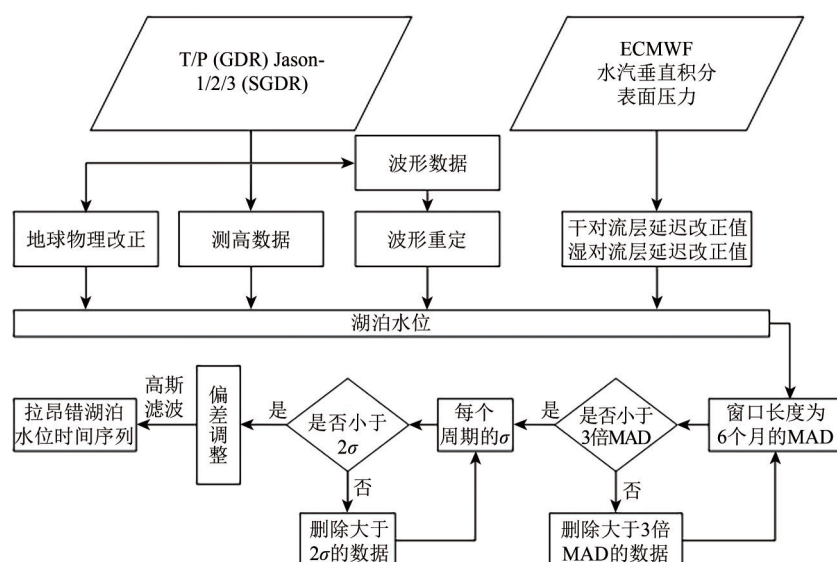


图 2 卫星测高数据处理流程

Fig. 2 Processing flow of satellite altimetry data

#### 3.1 大气路径延迟校正

由于不同高度计数据产品中使用的大气路径延迟改正模型不同, 因此在融合多个高度计数据构建湖面水位序列时, 需要对各高度计数据集中的大气路径延迟改正进行检验。图 3 为 T/P (GDR)、Jason-1 (SGDR)、Jason-2 (SGDR)、Jason-3 (SGDR) 在拉昂错湖面测量时的大气路径延迟改正值。

DTC 通常由 ECMWF 的再分析数值模型计算所

得。T/P (GDR) 中的 DTC 在计算时使用了海面压力而不是表面压力所以与 Jason 相比有 1.06 m 的偏差 (Crétau 等, 2009), 图 3 (a) 在绘制时移除了该偏差。2006 年 Jason-1 的 DTC 突然下降了 2.6 cm, 这是由于 ECMWF 模型在 2006 年做了表面压力的偏差修正, T/P (GDR) 的 DTC 整体比 Jason1/2/3 噪声更多, 2010 年 Jason-2 出现较大误差。因此本文使用 ECMWF 的再分析数值模型 (ESA-5) 计算了 1992 年—2020 年高度计的干对流延迟层改正



(郭金运 等, 2013; Gao 等, 2008)。由 ERA-5 计算的干对流层延迟改正 (图 3 (a)) 呈现良好的一致性。

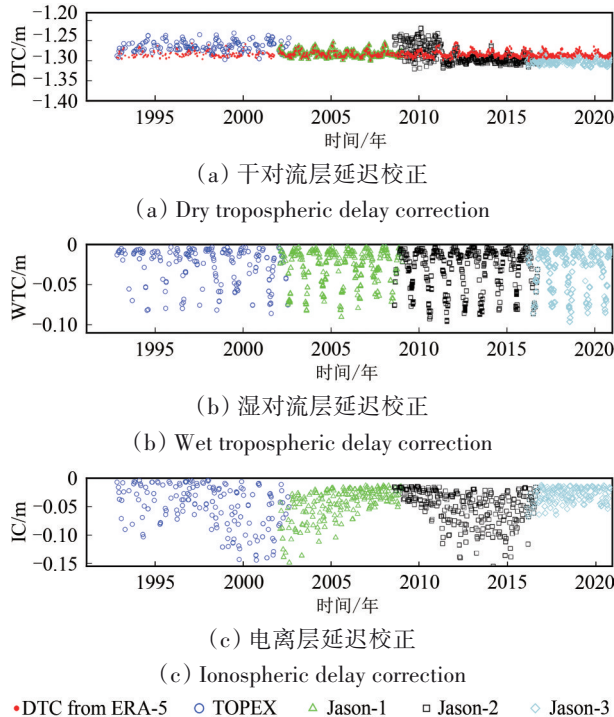


图 3 T/P-Jason1/2/3 高度计数据大气路径延迟校正  
Fig. 3 Atmospheric path delay correction for T/P-Jason1/2/3 altimeter

由于卫星辐射计数据会受到陆地污染, 因此用于内陆地区的湿对流层延迟改正必须使用模型进行重新计算。在 Jason 的 SGDR 中湿对流层延迟改正使用 ECMWF 计算的, 但是 T/P 的 GDR 在该区域并未给出改正值, 利用 ERA-5 计算了 T/P 的湿对流层延迟改正, 使用公式:

$$\Delta R_{\text{vap}} \approx \frac{\beta'_{\text{vap}}}{T_{\text{eff}}} \int_0^R \rho_{\text{vap}}(z) dz \approx 6.19 \int_0^R \rho(z) dz \quad (3)$$

式中,  $\rho_{\text{vap}}(z)$  高度  $z$  处的水汽密度;  $R$  为积分考虑的最大高度 (Hwang 等, 2005)。在中纬度地区基于经验值取常数  $\beta'_{\text{vap}}/T_{\text{eff}} = 6.19(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$ , 其中  $\beta'_{\text{vap}} = 1720.6(\text{K} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$ ,  $T_{\text{eff}} = 278\text{K}$ ,  $\rho_{\text{vap}}(z)$  的积分值来自 ERA-5。图 3 (b) 中重新计算的 T/P 高度计数据对应的湿对流层延迟改正, 计算结果与 Jason 数据集中的改正值无明显偏差。

T/P GDR 中的电离层改正使用的是 Bent 模型, 而其他高度计任务则使用的全球电离层地图 GIM

(Global Ionospheric Maps), 图 3 (c) 中显示 Bent 模型和 GIM 有良好的一致性 (Ho 等, 1997)。因此本文使用各高度计数据集中给出的电离层改正值。

### 3.2 波形重定

对高度计得到的湖泊水位进行地球物理校正后, 数据质量依然受陆地反射波形影响。陆地波形污染导致星载跟踪器无法准确测量卫星与湖面之间的距离。图 4 (a) 为拉昂错湖面 2010 年 Jason-2 高度计全年波形。波形复杂且季节性特征明显。在冬季, 后缘非常窄的镜面波形占主导地位 (图 4 (b)), 夏季波形较为复杂, 有些波形类似于布朗模型中的海洋波形 (Ho 等, 1997)。在大多数情况下波形受到陆地污染, 导致后缘出现异常峰值 (图 4 (c))。夏季湖面平静的时候也会出现镜面波形, 冰面的高反射率造成冬季的波形振幅较大。

由于湖面上的波形严重偏离布朗模型, 因此波形重定是获取湖泊高精度水位数据的关键。式 (2) 中的 RC 是通过将重定后的波形前缘与预设阀门的差值乘以一个系数 (一个波形门所对应的距离, 例如 Jason-1/2/3 卫星一个波形门对应的距离为 0.4687 m) 所得。目前已有多种改善高度计测量精度的波形重定方法 (Li 等, 2020), 波形重定方法中的经验法比函数法更适合应用于内陆湖泊 (Wang 等, 2019)。致力于卫星高度计数据内陆研究的 CTOH (Center for Topographic studies of the Ocean and Hydrosphere) 也在其发布的数据集 CASH 中采用了 ICE-1、ICE-2、OCEAN 等波形重定算法并将该算法成功应用于全球范围内的大型湖泊。Wang 等 (2019) 通过 ICE、Threshold-20、Threshold-50 共 3 种经验波形重定方法对比研究, 证明了 ICE 重定方法在高原湖面上数据可靠, 获取的有效测量值更多、精度更高。因此本研究采用 ICE 波形重定算法。

ICE-1 波形重定算法是 Wingham 等 (1986) 基于 OCOG (Offset Centre of Gravity) 发展得到的, 被 Bamber (1994) 首次应用于 ERS-1/2 的数据处理中。该算法以数值统计方式找到波形的后缘中点, 重心、振幅和宽度, 数学公式为 (Stammer 和 Cazenave, 2017)

$$A = \sqrt{\sum_{i=1+n}^{N-n} P_i^4(t) / \sum_{i=1+n}^{N-n} P_i^2(t)} \quad (4)$$



$$w = \left( \sum_{i=1+n}^{N-n} P_i^2(t) \right)^2 / \sum_{i=1+n}^{N-n} P_i^4(t) \quad (5)$$

$$G_{\text{COG}} = \sum_{i=1+n}^{N-n} i P_i^2(t) / \sum_{i=1+n}^{N-n} P_i^2(t) \quad (6)$$

式中,  $N$  为阀门总个数,  $n$  为波形开始和结束时应剔除的偏差波形采样个数,  $A$  振幅,  $w$  为宽度,  $G_{\text{COG}}$  为波形的重心。在振幅为 30% 的位置对波形进行插值得到该波形的预设阀门值 (Frappart 等, 2006)。

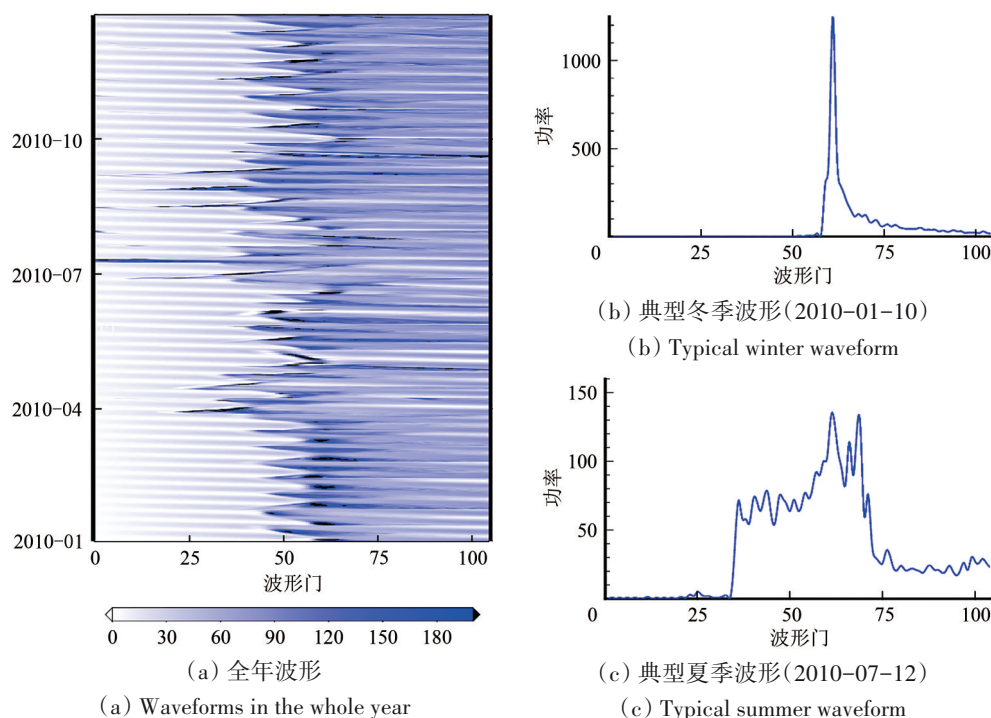


图 4 2010 年拉昂错湖面 Jason-2 高度计波形

Fig. 4 Jason-2 altimeter waveforms in 2010 over La-ang Co

### 3.3 异常值剔除与平均湖泊数水位

即使进行了波形重定和地球物理校正, 水位数据依然嘈杂。因此计算每个周期平均湖泊水位前应先剔除异常值。然而某一种异常值剔除方法难以将所有异常值剔除, 本文使用组合的异常值检测方法 (Okeowo 等, 2017)。以 Jason-2 为例 (图 5), 第 1 步对整个时间序列重复应用滑动 MAD 法确定异常值, 时间窗口为半年, 超过 3 倍 MAD 则剔除该测量值, 直到检测不到异常值。MAD 的定义式为

$$\text{MAD} = \text{median}(|LL_i - \text{median}(LL_i)|) \quad (7)$$

式中,  $i$  为窗口中观测值的总数。第 2 步使用  $2\sigma$  准则剔除异常值, 对每个周期内的观测值重复使用  $2\sigma$  准则, 即每个周期内超过两倍中误差的数据确定为异常值并被剔除。

图 5 所示 91% 的周期湖泊水位标准差小于 0.30 m。异常值约占 Jason-2 总数据的 38.1%, 大多数异常值 (64.3%) 通过滑动 MAD 的方式剔除,

剩余异常值被  $2\sigma$  准则剔除。异常值剔除后, 使用每个周期的有效值计算平均湖泊水位并构建时间序列。

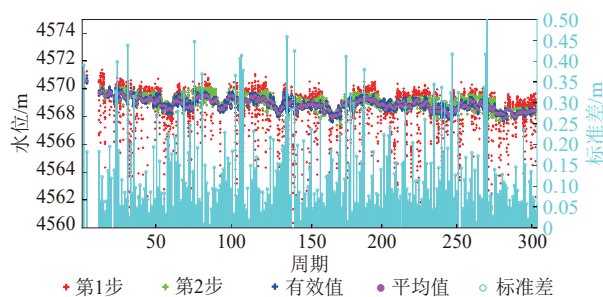


图 5 以 Jason-2 为例拉昂错湖面观测数据的异常值剔除  
Fig. 5 Example of outlier detection in the case of Jason-2 observations over La-ang Co

### 3.4 偏差调整

偏差调整是指在多高度计数据融合过程中由于高度计间的系统性偏差, 不同高度计数据不能准确衔接, 需要调整高度计间的偏差, 使之构成

连续的时间序列。偏差调整对于连续时间序列的湖泊水位构建具有重要意义 (Vu 等, 2018)。

T/P-Jason1/2/3 卫星伴飞阶段的数据可以用于卫星间偏差校准 (Wang 等, 2019)。假设湖面是一个平面, 在理想状态下, 高度计 A 测得的湖面高度  $LL_j^A$  应当等与同一时间  $t_j$  高度计 B 测得的湖面高度  $LL_j^B$ 。然而由于偏差和噪声的存在, 它们的差异实际上并不等于零, 两个卫星间偏差表示为

$$\Delta_j = LL_j^A - LL_j^B \quad (8)$$

式中,  $j$  为伴飞阶段两个高度计观测值的成对样本。一般而言, 两颗卫星不会同时飞越湖泊。差值的计算需要插值, 但这会引入插值误差。湖面在短时间内的变化是可以忽略的, 可以不进行插值处理直接计算差值进而估计卫星间偏差 (Wang 等, 2019; Sun 等, 2021)。

本文使用相邻两高度计间测量时间间隔小于 10 d 的水位数据计算卫星间偏差。在拉昂错区域, T/P 和 Jason-1 重叠观测时间段共有 8 对数据, Jason-1 和 Jason-2 重叠观测时间段共有 17 对样本, Jason-2 和 Jason-3 重叠观测时间段共有 17 对样本。

采用极大似然估计法计算卫星间的偏差。由结果可知, 在拉昂错区域, Jason-1 相对于 T/P 卫星的偏差约为 0.15 m, Jason-2 相对于 Jason-1 的偏差约为 0.02 m, Jason-3 相对于 Jason-2 的偏差约为 -0.23 m。最后, Jason-1/2/3 相对于 T/P 的偏差统计如表 1 所示。

表 1 Jason-1/2/3 相对于 T/P 的偏差调整数据统计

Table 1 Biases of Jason-1/2/3 with respect to T/P

| 卫星   | Jason-1 | Jason-2 | Jason-3 |
|------|---------|---------|---------|
| 样本数量 | 8       | 17      | 17      |
| 偏差/m | -0.15   | -0.17   | 0.06    |

## 4 结果与分析

### 4.1 湖泊水位精度

Jason-2 是提取到有效观测数据最多的高度计。289 个周期存在有效测量值, 平均每个周期有 20 个水位观测记录, 各周期标准差的平均值为 13.50 cm, 289 个周期中有 263 个周期的标准差小于 30.00 cm。相比之下 T/P 的数据更不稳定, 最大标准差达到了 65.70 cm, 这应该是 T/P 数据没有进行波形重定且 GDR 数据量相对较少的原因造成的。图 6 (b) — (e) 所示 4 个高度计各周期湖泊水位

标准差的分布情况, 对 Jason-1/2/3 各周期观测数据的标准差进行统计分析, 其期望 ( $\mu$ ) 和标准差 ( $\sigma$ ) 分布稳定, 数据质量更可靠。

### 4.2 拉昂错水位时间序列

虽然对高度计数据进行了各项地球物理改正, 但是水位序列中仍然存在异常值, 数据剔除还导致了序列时间间隔不一致。首先将时间序列间隔重采样为 30 d, 重采样该过程中对缺失数据进行线性插值, 再对整个序列进行高斯滤波生成均匀、连续的湖泊水位序列。研究表明青藏高原湖泊水位时间序列的高斯滤波窗口长度设置 6 个月结果更平滑, 季节性变化更明显 (Wang 等, 2019), 因此本文使用的滤波窗口长度为 6 个月。

图 7 为 1992 年—2020 年拉昂错湖泊水位时间序列。拉昂错水位整体呈现周期性降低趋势。1996 年—1998 年水位变化异常, 1992 年—2020 年拉昂错水位整体变化趋势为  $-0.21 \pm 0.01$  m/a, 拉昂错水位 28 年间持续下降了 6.00 m。2013 年—2020 年拉昂错水位呈现明显的周年变化, 夏季湖泊水位达到年内峰值, 冬季湖泊水位为年内最低。图 8 利用小波分析法探测拉昂错水位变化的周期, 结果显示, 该时间序列有明显的周年变化, 部分年际震荡和半周年变化也包含其中。Guo 等 (2011)、Hwang 等 (2005) 利用 T/P 数据探测到了 1992 年—2002 年拉昂错水位的变化速率为 0.23 m/a、0.27 m/a, 与本文结果 (0.21 m/a) 相近, 湖泊水位的变化特征相似。

### 4.3 其他数据库水位对比

3 个湖泊水位产品 (DAHITI、Hydroweb、HTRWLD) 在 2009-05—2018-06 均存在水位数据 (图 9), 使用本文结果、DAHITI、Hydroweb、HTRWLD 选取 2009-05—2018-06 数据作对比分析。

第 1 步将 4 组数据减去各自的平均值, 得到水位的相对变化。第 2 步将各组数据重采样得到时间间隔为 30 d (对空缺数据插值) 的时间序列, 第 3 步对各组数据进行高斯滤波处理, 窗口长度为 6 个月。将不同产品的时间序列做差 (牛余朋 等, 2019), 统计结果如表 2 所示。本文方法得到的湖泊水位时间序列与其他水位产品的偏差稳定, 精度可靠, 且时间长于其他 3 个数据库中的水位序列。

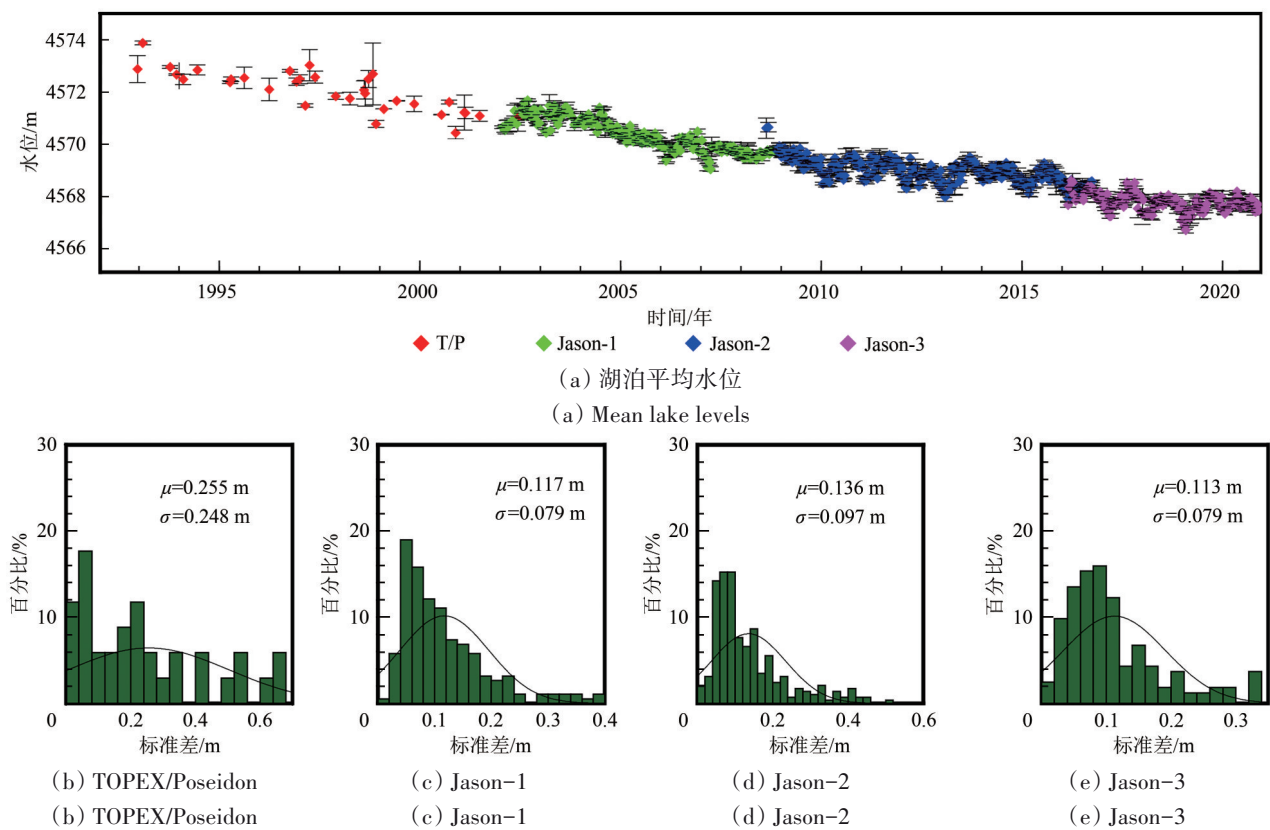
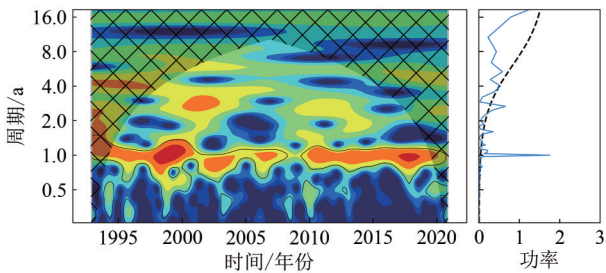
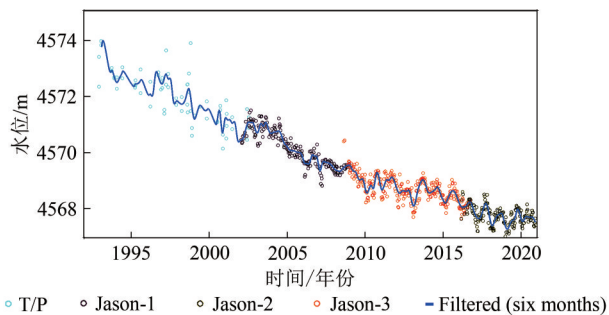
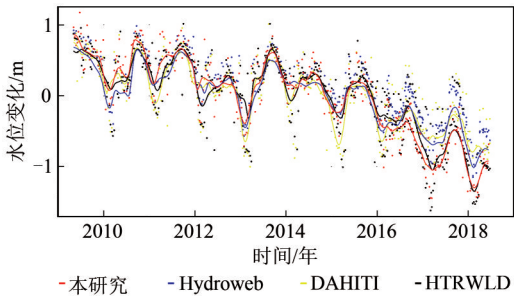


图6 由各种卫星测得的湖泊平均水位及其各周期数据标准差分布直方图  
Fig. 6 Mean lake levels derived from various satellites and histograms distribution of their STDs



拉昂错湖泊水位的反演结果表明，夏季湖泊水位的精度低于冬季。例如 Jason-2 数据在 6 月份

和 7 月份的平均标准差为 11.50 cm，在 12 月份和 1 月份为 9.00 cm。首先，夏季复杂的反射波形降低了波形重定的精度，若采用更精确的波形重定算法可以改善数据质量 (Li 等, 2020)。其次，数据筛选过程中没有考虑湖泊面积的变化，利用数据集中星下点底面类型参数 (surface\_type) 筛选湖面上的数据。湖泊面积的缩小使卫星观测数据变得嘈杂。



4.4 湖泊水位与温度、降水、蒸发的关系

近年来，青藏高原整体呈现温度升高、降水



增多、冰川持续消融的趋势 (Zhang 等, 2020; 郭金运 等, 2013; Du 等, 2019)。高原湖泊主要补给来源为降水和冰川冻土融水, 湖水的损失主要是蒸发, 因此流域内降水与蒸发关系的变化是拉昂错水位变化的重要影响因素 (李武东 等, 2017)。

表 2 不同湖泊水位产品的拉昂错水位对比  
Table 2 Comparison of lake level from different products in La-ang Co

| 产品              | 最大值/cm | 最小值/cm | STD/cm | RMS/cm |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|
| Hydroweb-HTRWLD | 35.9   | -33.2  | 15.8   | 15.7   |
| 本研究-HTRWLD      | 36.6   | -28.4  | 12.0   | 11.9   |
| 本研究-Hydroweb    | 34.6   | -35.7  | 17.4   | 17.3   |
| 本研究-DAHITI      | 46.0   | -53.3  | 20.2   | 20.1   |
| DAHITI-HTRWLD   | 55.7   | -53.1  | 19.2   | 19.1   |
| DAHITI-Hydroweb | 33.4   | -45.0  | 13.0   | 13.0   |

图 10 (a) 所示, 拉昂错湖面年蒸发总量整体大于流域内年降水总量。虽然降水是导致湖泊水位变化的主要因素 (Zhang 等, 2020), 但拉昂错流域 1992 年—2020 年年总降水量相对稳定。湖面蒸发大于降水导致了湖水损失严重, 水位逐年降低。同时遥感影像显示, 1990-10—2018-10 拉昂错湖水面面积减少了 18.98 km<sup>2</sup> (Zhang 等, 2019)。

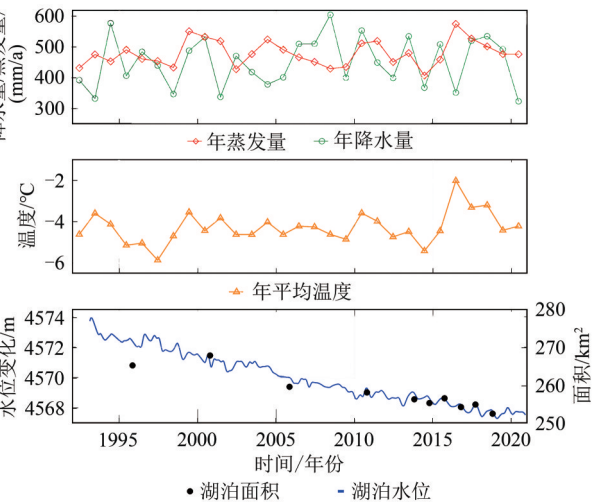


图 10 拉昂错流域年降水总量、湖面年蒸发总量、湖面温度、湖泊面积、水位变化  
Fig. 10 Variation of precipitation, evaporation, temperature, area, and lake level in La-ang Co

拉昂错流域 1992 年—2020 年平均温度为 -4.3 °C。温度的变化会影响蒸发, 图 10 (a) 中蒸发与图 10 (b) 中温度的相关系数为 0.72。总体而言, 随着全球气候变化, 青藏高原地区温度呈

现逐年上升趋势 (陈晓东 等, 2021; 刘新 等, 2020)。温度的上升会使该区域的蒸发量增加, 进而导致湖泊水位降低。

5 结 论

青藏高原湖泊是全球气候变化的敏感指示器, 由于地势崎岖、环境恶劣, 高原湖泊水位的准确监测受到限制。本文提出了一种基于大气路径延迟校正、ICE 波形重定算法、滑动 MAD (Median Absolute Deviation) 和 2 $\sigma$  结合的异常值探测、偏差调整的策略, 利用 T/P-Jason-1/2/3 数据构建了拉昂错 1992 年—2020 年湖泊水位时间序列。通过与 DAHITI、Hydroweb、HTRWLD 湖泊水位产品的对比分析, 证实了本研究提取的水位时间序列长、精度高、结果可靠。

研究结果表明, 1992 年—2020 年湖泊水位下降明显, 29 a 间湖泊水位降低了近 6.00 m, 变化趋势为 -0.21 $\pm$ 0.01 m/a, 与前人研究结果一致; 周年变化是拉昂错水位变化的主周期, 半年变化是次周期。年内水位变化呈现季节性变化, 夏季湖泊水位达到年内峰值, 冬季湖泊水位为年内最低; 蒸发量大于降水量是拉昂错水位下降的主要因素。随着青藏高原地区温度上升, 蒸发增大, 在未来一段时间内拉昂错水位仍会呈现降低趋势。

本研究仅使用了 T/P-Jason1-2/3 高度计检测湖泊水位的变化, 并分析其影响因素。未来可以融合更多高度计, 如 HY-2A/B/C/D、Sentinel-3A/B、ICESat-1/2 等, 更准确、实时地监测湖泊水位变化, 并结合气象模型、遥感影像、水文模型、重力等数据, 量化区域水平衡。从而深入了解高原湖泊变化, 更好地为高原环境研究服务。

志 谢 此研究中用到的高度计数据来源于 AVISO, 在此表示衷心的感谢!

参考文献 (References)

Bamber J L. 1994. Ice sheet altimeter processing scheme. International Journal of Remote Sensing, 15(4): 925-938 [DOI: 10.1080/01431169408954125]  
Chen X D, Guo J Y, Sun M Z, Zhu G B and Chang X T. 2021. Time-varying analysis of backscatter coefficient corresponding to different surface types in the Tibetan Plateau. Geomatics and Information Science of Wuhan University (陈晓东, 郭金运, 孙明智, 朱广彬, 常晓涛. 2021. 青藏高原区域不同地表类型对应后向散射系

- 数的时变分析. 武汉大学学报(信息科学版) [DOI: 10.13203/j.whugis20200688]
- Crétaux J F, Calmant S, Romanovski V, Shabunin A, Lyard F, Bergé-Nguyen M, Cazenave A, Hernandez F and Perosanz F. 2009. An absolute calibration site for radar altimeters in the continental domain: Lake Issykkul in Central Asia. *Journal of Geodesy*, 83(8): 723-735 [DOI: 10.1007/s00190-008-0289-7]
- Du W J, Liu X, Guo J Y, Shen Y, Li W and Chang X T. 2019. Analysis of the melting glaciers in Southeast Tibet by ALOS-PALSAR data. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 30(1): 7-19 [DOI: 10.3319/tao.2018.07.09.03]
- Frappart F, Calmant S, Cauhope M, Seyler F and Cazenave A. 2006. Preliminary results of ENVISAT RA-2-derived water levels validation over the Amazon basin. *Remote Sensing of Environment*, 100(2): 252-264 [DOI: 10.1016/j.rse.2005.10.027]
- Gao Y G, Guo J Y and Yun J P. 2008. Lake level variations measurement with satellite altimetry. *Science of Surveying and Mapping*, 33(6): 73-75, 29 (高永刚, 郭金运, 岳建平. 2008. 卫星测高在陆地湖泊水位变化监测中的应用. *测绘科学*, 33(6): 73-75, 29) [DOI: 10.3771/j.issn.1009-2307.2008.06.024]
- Guo J Y, Mu D P, Liu X, Yan H M, Sun Z C and Guo B. 2016. Water storage changes over the Tibetan Plateau revealed by GRACE mission. *Acta Geophysica*, 64(2): 463-476 [DOI: 10.1515/ageo-2016-0003]
- Guo J Y, Sun J L, Chang X T, Guo S Y and Liu X. 2010. Water level variation of bosten lake monitored with TOPEX/Poseidon and its correlation with NINO3 SST. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 39(3): 221-226 (郭金运, 孙佳龙, 常晓涛, 郭淑艳, 刘新. 2010. TOPEX/Poseidon 卫星监测博斯腾湖水位变化及其与 NINO3 SST 的相关性分析. *测绘学报*, 39(3): 221-226)
- Guo J Y, Sun J L, Chang X T, Guo S Y and Liu X. 2011. Correlation analysis of NINO3.4 SST and inland lake level variations monitored with satellite altimetry: case studies of lakes Hongze, Khandaka, La-ang, Ulungur, Issyk-kul and Baikal. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 22(2): 203-213 [DOI: 10.3319/TAO.2010.09.17.01(TibXS)]
- Guo J Y, Wei Z J, Zhu C C, Wu Y L and Ji B. 2021. Bathymetry inversion of South China Sea based on iterative continuation of gravity anomalies. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 40(4): 1-10 (郭金运, 魏志杰, 祝程程, 吴云龙, 纪兵. 2021. 基于重力异常迭代延拓的南海海底地形反演. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 40(4): 1-10) [DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2021.04.001]
- Guo J Y, Yang L, Liu X, Huang J W and Yang H. 2012. On temporal-spatial distribution of backscatter coefficients over China determined by TOPEX/Poseidon mission. *Science China Earth Sciences*, 55(12): 2068-2083 (郭金运, 杨磊, 刘新, 黄金维, 杨红. 2013. 由 TOPEX/Poseidon 探测的中国区域后向散射系数时空分布. *中国科学: 地球科学*, 43(4): 677-692) [DOI: 10.1007/s11430-012-4524-y]
- Ho C M, Wilson B D, Mannucci A J, Lindqwister U J and Yuan D N. 1997. A comparative study of ionospheric total electron content measurements using global ionospheric maps of GPS, TOPEX radar, and the Bent model. *Radio Science*, 32(4): 1499-1512 [DOI: 10.1029/97rs00580]
- Hwang C, Cheng Y S, Han J C, Kao R, Huang C Y, Wei S H and Wang H H. 2016. Multi-decadal monitoring of lake level changes in the Qinghai-Tibet Plateau by the TOPEX/Poseidon-Family altimeters: climate implication. *Remote Sensing*, 8(6): 446 [DOI: 10.3390/rs8060446]
- Hwang C, Peng M F, Ning J S, Luo J and Sui C H. 2005. Lake level variations in China from TOPEX/Poseidon altimetry: data quality assessment and links to precipitation and ENSO. *Geophysical Journal International*, 161(1): 1-11 [DOI: 10.1111/j.1365-246X.2005.02518.x]
- Jiang L G, Nielsen K, Andersen O B and Bauer-Gottwein P. 2017. Monitoring recent lake level variations on the Tibetan Plateau using CryoSat-2 SARIn mode data. *Journal of Hydrology*, 544: 109-124 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.11.024]
- Kleinherenbrink M, Lindenberg R C and Dittmar P G. 2015. Monitoring of lake level changes on the Tibetan Plateau and Tian Shan by retracking Cryosat SARIn waveforms. *Journal of Hydrology*, 521: 119-131 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.11.063]
- Li W D, Guo J Y, Chang X T, Zhu G B and Kong Q L. 2017. Terrestrial water storage changes in the Tianshan Mountains of Xinjiang Measured by GRACE during 2003~2013. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 42(7): 1021-1026 (李武东, 郭金运, 常晓涛, 朱广彬, 孔巧丽. 2017. 利用 GRACE 重力卫星反演 2003 ~ 2013 年新疆天山地区陆地水储量时空变化. *武汉大学学报(信息科学版)*, 42(7): 1021-1026) [DOI: 10.13203/j.whugis20150079]
- Li X D, Long D, Huang Q, Han P F, Zhao F Y and Wada Y. 2019a. High-temporal-resolution water level and storage change data sets for lakes on the Tibetan Plateau during 2000-2017. *National Tibetan Plateau Data Center* (李兴东, 龙笛, 黄琦, 韩鹏飞, 赵凡玉, 荣田佳秀. 2019a. 青藏高原高时间分辨率湖泊水位及水量变化数据集(2000-2017年). 国家青藏高原科学数据中心) [DOI: 10.1594/PANGAEA.898411]
- Li X D, Long D, Huang Q, Han P F, Zhao F Y and Wada Y. 2019b. High-temporal-resolution water level and storage change data sets for lakes on the Tibetan Plateau during 2000-2017 using multiple altimetric missions and Landsat-derived lake shoreline positions. *Earth System Science Data*, 11(4): 1603-1627 [DOI: 10.5194/essd-11-1603-2019]
- Li Z, Liu X, Guo J Y, Yuan J J, Niu Y P and Ji B. 2020. A new method of satellite radar altimeter waveform retracking based on waveform derivative. *Revista Internacional De Metodos Numericos Numericos Para Calculo Y Diseno En Ingenieria*, 36 (4) [DOI: 10.23967/j.rimni.2020.10.002]
- Liao J J, Xue H and Chen J M. 2020. Monitoring lake level changes on the Tibetan Plateau from 2000 to 2018 using satellite altimetry data. *Journal of Remote Sensing (Chinese)*, 24(12): 1534-1547 (廖静娟, 薛辉, 陈嘉明. 2020. 卫星测高数据监测青藏高原湖泊 2010 年-2018 年水位变化. *遥感学报*, 24(12): 1534-1547) [DOI: 10.11834/jrs.20209281]
- Liu X, Zhao N, Guo J Y and Guo B. 2020. Prediction of monthly pre-

- precipitation over the Tibetan Plateau based on LSTM neural network. *Journal of Geo-Information Science*, 22(8): 1617-1629 (刘新, 赵宁, 郭金运, 郭斌. 2020. 基于 LSTM 神经网络的青藏高原月降水量预测. *地球信息科学学报*, 22(8): 1617-1629) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2020.190378]
- Ma R H, Yang G S, Duan H T, Jiang J H, Wang S M, Feng X Z, Li A N, Kong F X, Xue B, Wu J L and Li S J. 2011. China's lakes at present: number, area and spatial distribution. *Science China Earth Sciences*, 54(2): 283-289 [DOI: 10.1007/s11430-010-4052-6]
- Niu Y P, Guo J Y, Yuan J J, Li Z, Wen H J, Liu H L and Ji B. 2019. Accuracy analysis of global mean sea surface height models based on tide gauge records. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 38(4): 18-26 (牛余朋, 郭金运, 袁佳佳, 李真, 文汉江, 刘焕玲, 纪兵. 2019. 基于验潮数据的全球平均海面高模型精度分析. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2019. 38(4): 18-26) [DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2019.04.003]
- Okeowo M A, Lee H, Hossain F and Getirana A. 2017. Automated generation of lakes and reservoirs water elevation changes from satellite radar altimetry. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(8): 3465-3481 [DOI: 10.1109/jstars.2017.2684081]
- Phan V H, Lindenbergh R and Menenti M. 2012. ICESat derived elevation changes of Tibetan lakes between 2003 and 2009. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 17: 12-22 [DOI: 10.1016/j.jag.2011.09.015]
- Schwatke C, Dettmering D, Bosch W and Seitz F. 2015. DAHITI – an innovative approach for estimating water level time series over inland waters using multi-mission satellite altimetry. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(10): 4345-4364 [DOI: 10.5194/hess-19-4345-2015]
- Song C Q, Huang B, Ke L H and Richards K S. 2014. Seasonal and abrupt changes in the water level of closed lakes on the Tibetan Plateau and implications for climate impacts. *Journal of Hydrology*, 514: 131-144 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.04.018]
- Stammer D and Cazenave A. 2017. *Satellite Altimetry over Oceans and Land Surfaces*. Boca, Raton: CRC Press
- Sun M Z, Guo J Y, Yuan J J, Liu X, Wang H H and Li C M. 2021. Detecting lake level change from 1992 to 2019 of Zhari Namco in Tibet using altimetry data of TOPEX/Poseidon and Jason-1/2/3 Missions. *Frontiers in Earth Science*, 9: 640553 [DOI: 10.3389/feart.2021.640553]
- Vu P L, Frappart F, Darrozes J, Marieu V, Blarel F, Ramillien G, Bonfond P and Birol F. 2018. Multi-satellite altimeter validation along the french atlantic coast in the southern bay of biscay from ERS-2 to SARAL. *Remote Sensing*, 10(1): 93 [DOI: 10.3390/rs10010093]
- Wang H H, Chu Y H, Huang Z K, Hwang C and Chao N F. 2019. Robust, long-term lake level change from multiple satellite altimeters in Tibet: observing the rapid rise of Ngangzi Co over a New Wetland. *Remote Sensing*, 11(5): 558 [DOI: 10.3390/rs11050558]
- Wang J B, Peng P, Ma Q F and Zhu L P. 2013. Investigation of water depth, water quality and modern sedimentation rate in Mapam Yumco and La'ang Co, Tibet. *Journal of Lake Sciences*, 25(4): 609-616 (王君波, 彭萍, 马庆峰, 朱立平. 2013. 西藏玛旁雍错和拉昂错水深、水质特征及现代沉积速率. *湖泊科学*, 25(4): 609-616) [DOI: 10.18307/2013.0420]
- Wen J C, Zhao H L, Jiang Y Z, Chen D Q and Ji G. 2018. Research on the quality screening method for satellite altimetry data—take Jason-3 data and Hongze Lake as an example. *South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology*, 16(3): 194-200, 208 (文京川, 赵红莉, 蒋云钟, 陈德清, 纪刚. 2018. 卫星测高数据筛选方法研究——以 Jason-3 数据和洪泽湖为例. *南水北调与水利科技*, 16(3): 194-200, 208) [DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkk.2018.0088]
- Wingham D J, Rapley C G and Griffiths H. 1986. New techniques in satellite altimeter tracking systems//*Proceedings of IGARSS' 86 Symposium*. Zurich: ESA Publications Division: 1339-1344
- Xie Y G, Guo J Y, Zhu J S, Kong Q L and Li G W. 2016. Simulation and analysis of significant wave height over seas of Dongsha Island based on SWAN model. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 35(3): 17-24 (谢友鸽, 郭金运, 朱金山, 孔巧丽, 李国伟. 2016. 基于 SWAN 模型的东沙岛海域有效波高模拟与分析. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 35(3): 17-24) [DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2016.03.015]
- Zhang G Q. 2019. The lakes larger than 1 km<sup>2</sup> in Tibetan Plateau (V2.0) (1970s-2018). National Tibetan Plateau Data Center (张国庆. 2019. 青藏高原大于 1 平方公里湖泊数据集(V2.0) (1970s-2018). 国家青藏高原科学数据中心) [DOI: 10.11888/Hydro.tpd.270303]
- Zhang G Q, Luo W, Chen W F and Zheng G X. 2019. A robust but variable lake expansion on the Tibetan Plateau. *Science Bulletin*, 64(18): 1306-1309 [DOI: 10.1016/j.scib.2019.07.018]
- Zhang G Q, Xie H J, Kang S C, Yi D H and Ackley S F. 2011. Monitoring lake level changes on the Tibetan Plateau using ICESat altimetry data (2003-2009). *Remote Sensing of Environment*, 115(7): 1733-1742 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.03.005]
- Zhang G Q, Yao T D, Xie H J, Kang S C and Lei Y B. 2013. Increased mass over the Tibetan Plateau: From lakes or glaciers?. *Geophysical Research Letters*, 40(10): 2125-2130 [DOI: 10.1002/grl.50462]
- Zhang G Q, Yao T D, Xie H J, Yang K, Zhu L P, Shum C K, Bolch T, Yi S, Allen S, Jiang L G, Chen W F and Ke C Q. 2020. Response of Tibetan Plateau lakes to climate change: trends, patterns, and mechanisms. *Earth-Science Reviews*, 208: 103269 [DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103269]
- Zhang G Q, Yao T D, Xie H J, Zhang K X and Zhu F J. 2014. Lakes' state and abundance across the Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 59(24): 3010-3021 [DOI: 10.1007/s11434-014-0258-x]
- Zhang X, Wu Y H and Zhang X. 2015. Zhari Namco water level change detection using multi-satellite altimetric data during 1992-2012. *Journal of Natural Resources*, 30(7): 1153-1162 (张鑫, 吴艳红, 张鑫. 2015. 基于多源卫星测高数据的扎日南木错水位动态变化(1992-2012年). *自然资源学报*, 30(7): 1153-1162) [DOI: 10.11849/zrzyxb.2015.07.008]
- Zingerle P, Pail R, Gruber T and Oikonomidou X. 2020. The combined global gravity field model XGM2019e. *Journal of Geodesy*, 94(7): 66 [DOI: 10.1007/s00190-020-01398-0]



## Monitoring lake level change in La-ang Co from 1992 to 2020 using multi-altimeter data

SUN Mingzhi<sup>1</sup>, LIU Xin<sup>1</sup>, WANG Haihong<sup>2</sup>, YUAN Jiajia<sup>1</sup>, LI Chengming<sup>3</sup>, GUO Jinyun<sup>1</sup>

1. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

3. Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100036, China

**Abstract:** Tibetan Plateau (TP) lakes are located in the high-altitude and rough-terrain region. These lakes are effective indicators and sentinels of climate changes because of the absence of direct anthropogenic influence and their dominant distribution in endorheic basins. Altimetry satellites can be used to monitor the water level changes of inland water bodies. However, satellites cannot easily obtain accurate and continuous observations of Tibetan lakes with steep terrain. This paper presents a robust scheme for constructing accurate and long-term lake level time series using multi-altimeters. We demonstrate the robust scheme over La-ang Co.

A robust strategy is presented to obtain lake levels on the TP using multi-altimeter data. The consistency of atmospheric path delay corrections should be carefully checked to integrate various altimeter products issued in different periods. Apparent biases are found in troposphere corrections from different altimeter products and updated by ERA-5 model. ICE retracker is used to correct the altimeter range. A two-step method is proposed for outlier removal, which has accurate performance without any a prior information. Bias adjustment is an essential step in the fusion of multi-altimeters. Tandem mission data of altimeters are used to estimate inter-satellite bias. Finally, a 28-year-long lake level time series are constructed using TOPEX/Poseidon and Jason-1/2/3 altimeter data from 1992 to 2020. The relationship among lake level, area, precipitation, temperature, and evaporation in the basin from 1992 to 2020 is analyzed.

The mean lake level for each cycle is estimated after outlier removal. As an example, About 38% of the observations are rejected as outliers in Jason-2 period. The T/P-family satellites share the same ground track and have an overlap between two successive satellites for intersatellite calibration. As a result, Jason-1 has a mean lake level bias of 0.15 m with respect to T/P. The bias of Jason-2 with respect to Jason-1 is 0.02 m. The bias of Jason-3 with respect to Jason-2 is -0.23 m after removing an outlier. Biases between different missions are adjusted, and a 28-year monthly lake level time series is generated. Compared to the in situ data and available lake level databases, our result is the most robust time series for La-ang Co, with high accuracy and considerably continuous samples from 1992 to 2020. The mean STD is about 13.10 cm for T/P-family satellites. From 1992 to 2020, the level of La-ang Co decreased by 6.00 m, with an average change trend of  $-0.21 \pm 0.01$  m/a.

This result showed that the lake level extraction in this study is more accurate than that of available lake level databases, and the change of lake levels in La-ang Co is similar with the previous studies. Annual and semi-annual variations as well as inter-annual oscillations can be clearly observed in the time series. Evaporation is greater than precipitation, which is the main factor leading to the decrease of lake level. The water level of La-ang Co will continue to decline in the near term due to global warming.

**Key words:** satellite altimetry, TOPEX/Poseidon, Jason-1/2/3, La-ang Co, lake level, Tibetan Plateau

**Supported by** National Natural Science Foundation of China (No. 41774001, 41974016); Autonomous and Controllable Special Project for Surveying and Mapping of China (No. 816-517); SDUST Research Fund (No. 2014TDJH101)