卫星测高数据监测青藏高原湖泊2010年—2018年 水位变化

廖静娟^{1,2}, 薛辉^{1,3}, 陈嘉明^{1,3}

中国科学院空天信息创新研究院 数字地球重点实验室,北京 100094;
 2.海南省地球观测重点实验室,三亚 572029;
 3.中国科学院大学,北京 100049

摘 要:青藏高原湖泊水位变化是气候变化和生态环境变化研究的重要指标。随着 Cryosat-2 观测数据的日益丰富和处理技术的提升,可以有效监测更多湖泊的水位变化信息。本研究构建了基于噪声去除技术、改进的波形重跟踪处理算法(ImpMWaPP)和误差混合动态模型为一体的高精度湖泊水位序列提取方法,利用 Cryosat-2 SARIn 数据获取到133个青藏高原湖泊2010年—2018年的高精度水位序列,并分析了这些湖泊水位变化的时空变化特征。总体上,青藏高原湖泊的水位继续呈上升趋势,但上升速度较2003年—2009年趋缓,年均变化率0.159 m/a。从地域分布上,北部湖泊的水位上升最为显著,而南部湖泊的水位则趋于稳定。从时间上,2010年—2012年和2016年—2018年,大多数湖泊的水位呈现快速上涨,而其他时间水位相对稳定或略有下降。

关键词:遥感,湖泊水位,卫星测高, Cryosat-2 SARIn数据,青藏高原,时空变化

引用格式: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

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[DOI:10.11834/jrs.20209281]

1 引 言

青藏高原位于中国西南边陲,约占中国总面 积的27%(张镱锂等,2002),拥有全球最多的高 原湖泊群,湖泊约占全国湖泊总面积的49.5% (Liu等,2009)。2014年,青藏高原上面积大于1 km² 的湖泊数量超过1171个(Wan等,2016)。由于受 人类活动影响较少,该地区湖泊水位变化主要受 到降水和气温等自然因素驱动,是研究区域气候 和生态环境变化的重要指标(鲁安新等,2005; Wu等,2007;Qiu,2008;Yao等,2012;张国 庆,2018)。青藏高原是很多大河的源头,同时还 保障着中国西部及周边地区数十亿人的生存与发 展(Pritchard,2017)。因此开展该地区湖泊水位 变化监测对研究该地区的气候变化和生态环境变 化具有重要意义。

然而,由于该地区地处偏远,环境恶劣,在 地表布设水文站点进行湖泊监测较为困难。该地 区只有青海湖、纳木措和羊卓雍措有长期连续的 实测水位(张国庆, 2018), 难以满足监测需要。 卫星测高技术经过二十余年的发展,在湖泊水位 监测中取得了重要的成果(Morris和Gill, 1994; Birkett, 1995; Gao 等, 2013; 高乐 等, 2013; Liao 等, 2014; Jiang 等, 2017a)。针对该地区湖 泊水位监测, Zhang等(2011)使用ICESat-1监测 了111个青藏高原湖泊2003年—2009年的水位变 化。Phan等(2012)和Song等(2014)分别使用 ICESat-1数据监测到154和105个青藏高原湖泊的 水位变化,并分析了其与气候变化间的关系。 Gao 等(2013)融合 Envisat、Jason-1、Jason-2 和 Cryosat-2数据获取到51个青藏高原湖泊2002年— 2012年的水位变化,并分析了多年冻土对这种变

收稿日期: 2019-08-12; 预印本: 2019-09-30

基金项目:国家自然科学基金(编号:41871256);国家重点研发计划(编号:2016YFB0501501);中国科学院国际合作局对外合作重点项目(编号:131C11KYSB20160061)

第一作者简介:廖静娟,1966年生,女,研究员,研究方向为微波遥感理论和应用。E-mail: liaojj@radi.ac.cn

化的影响。Hwang等(2016)则利用T/P系列数据 监测了23个青藏高原湖泊1993年—2014年的水位 变化,其中13个湖泊的面积小于100km²,最小的 青蛙湖约25km²。此外,部分学者还专门对青藏高 原上的个别湖泊(如青海湖、纳木措和扎日南木 措等)进行了长时序的水位变化监测(姜卫平等, 2008; Kropáček等,2012;Liao等,2014;Wu等, 2014;Song等,2015;张鑫和吴艳红,2015;赵 云等,2017)。然而,受传统雷达高度计自身性能 限制,该地区大部分湖泊(特别是中小型湖泊) 仍然难以有效监测。而ICESat-1仅于2003年— 2009年运行,亦无法监测青藏高原湖泊近年来的 水位变化。

作为新一代测高卫星, Cryosat-2卫星运行已 近10年,在青藏高原主要采用SARIn观测模式。 由于具有更高的沿轨分辨率(约300 m), SARIn 模式更有利于监测中小型湖泊(Kleinherenbrink 等, 2014; Nielsen 等, 2017), 加之地面轨迹的 间距更小(赤道上7.5 km),大多数青藏高原湖泊都 能覆盖 (Jiang等, 2017b)。因此, Cryosat-2 SARIn 数据是当前研究青藏高原湖泊水位变化的重要数据 源。Kleinherenbrink等(2015)利用Cryosat-2 SARIn 数据监测了125个青藏高原湖泊2012年—2014年的 水位变化,而Jiang等(2017a)则利用同样的数据 监测了青藏高原70个湖泊2010年—2015年的水位 变化。然而近几年该地区湖泊水位的变化未有报 道,特别是近年来雷达测高数据的处理技术有了 较大发展,为监测到更多的青藏高原湖泊水位变 化提供了可能。为此,本文基于噪声去除技术, 利用Xue等(2018)提出的改进的波形重跟踪算法 (ImpMWaPP) 和误差混合动态模型等构建了高精 度湖泊水位提取方法,通过Cryosat-2 SARIn数据 获取了青藏高原133个湖泊2010年—2018年的水 位变化序列,并分析了这些湖泊水位变化的时空 特征。

2 数据和方法

2.1 数据

(1)湖泊掩模数据。研究中以Wan等(2016) 发布的2014年青藏高原湖泊子数据集为掩模数据 进行湖泊范围的圈定。该数据集包含了1171个 面积大于1km²的青藏高原湖泊的面积、位置及 形态等信息,是通过解译2014年获取的136幅高分 一号宽幅影像和11幅Landsat 8 OLI (Operational Land Imager)影像得到。

(2) Cryosat-2 SARIn 数据。Cryosat-2 SARIn 数据产品分为Level 1 (L1)、Level 1b (L1b)和 Level 2 (L2) 3个层级,并有多种数据版本。本文选用最新的Cryosat-2 SARIn Baseline-C的L1b和 L2数据产品,获取时间为2010-07至2018-07。该版本20 Hz波形具有1024个波门,所有过境数据均由L1b数据提供的星下点坐标选取。对于所选湖泊,Cryosat-2过境轨迹数平均为47条,最多的是阿雅格库(182条),最少的是东卡措(8条),过境轨迹数与湖泊的形状密切相关,东西长、南北窄型湖泊通常具有更多的过境轨迹。

(3) 实测水位数据。本文从中国科学院青藏 高原科学数据中心(http://www.tpedatabase.cn/ [2019-08-12])收集了纳木措、扎日南木措的实 测水位数据,该数据为通过人工投放的水位计或 水尺获取的相对水位数据,观测时间分别为 2010-11-2014-12和2010-04-2014-12。

(4) 辅助数据。研究中使用了 Hydroweb 湖泊 水位产品与本研究获取的水位数据进行对比分析。 Hydroweb 是由法国和俄罗斯共建的一个可提供全 球湖泊水位产品的数据中心(http://www.LEGOS. obs-mip.fr/soa/hydrologie/HYDROWEB[2019-08-12]) (Crétaux 等, 2011),可提供全球约150个湖泊和 水库的水位数据,这些水位基于6种测高数据生 成,包括 T/P、GFO、ERS-2、Jason-1、Jason-2 和 Envisat。本文共使用了22个青藏高原湖泊的 Hydroweb水位,时间跨度是最长为1992-09—2018-06 (昂孜措),水位序列的平均长度超过20年。

2.2 方法

(1)噪声轨迹去除。对 Cryosat-2 SARIn 数据 进行处理发现,湖泊观测中存在着数量不等的噪 声波形。在这些波形中,水面信号完全被噪声淹 没,不仅无法用于反演水位,而且还会干扰到水 位时间序列的构建,因此需要提前去除。波形分 类是一种识别特定波形的有效方法,已有的研究 提出了多种波形分类方法,取得了较好的识别效 果(汪海洪等,2010; Ricker等,2015;周浩 等,2015;Göttl等,2016; Lee等,2016; Marshall 和 Deng,2016;Shen等,2017)。与以往研究将

波形分为多种类型不同,本研究仅需将波形分为 噪声和非噪声波形,经反复试验,本研究采用线 性判别分析 LDA(Linear Discriminant Analysis)与 朴素贝叶斯分类器相结合的方法(Tourneret等, 2008; Chaudhary等, 2015) 来识别噪声波形, 具 体过程如下:

1) 分类特征选择:本文将所有观测波形分为 可用波形和噪声波形两类,选择的波形特征分别 为OCOG算法的基本参数(包括重跟踪点LEP、振 幅A、重心 COG、宽度 W) (Wingham 等, 1986)、 归一化的回波最大功率Pmax、归一化回波功率均值 P_{mean} 、波形的峰度 Kurt 和偏度 Skew (Lee 等, 2016) 等。

$$Kurt = E\left(\left(\frac{P - P_{mean}}{\sigma}\right)^{4}\right), Skew = E\left(\left(\frac{P - P_{mean}}{\sigma}\right)^{3}\right) (1) \qquad \vec{w} = S_{w}^{-1}(\mu_{0} - \mu_{1})_{\circ} \quad \text{def } \ddot{H} \, \vec{w} \, \text{dh} \, \lambda_{p} = \vec{w}^{\mathsf{T}} \vec{x} \, \vec{H} \, \mathfrak{P} \, \mathcal{H} \\ Sfn \tilde{H} \, \tilde{h} \, \tilde{h} \, \tilde{\mu}_{p} \circ \mathcal{H} \, \mathcal{H} \,$$

3) 波形分类: 根据朴素贝叶斯分类原理, 对于待分类波形 $a = \{z_1, z_2, \dots, z_m\}$, 其中 $z_i(i =$ 1,2,…,m)是分类特征,根据式(5)和式(6)计 算 $P(T_{a}|\boldsymbol{a})$ 和 $P(T_{1}|\boldsymbol{a})$,如果 $P(T_{k}|\boldsymbol{a}) = \max(P(T_{0}|\boldsymbol{a}))$, $P(T_1|a)$, $\mathbb{M} a \in T_{k^\circ}$

$$P(\mathbf{T}_{j}|\mathbf{a}) = \frac{P(\mathbf{a}|\mathbf{T}_{j})P(\mathbf{T}_{j})}{P(\mathbf{a})} (j = 0,1)$$
(5)

$$P(\boldsymbol{a}|\boldsymbol{T}_{j})P(\boldsymbol{T}_{j}) = P(z_{1}|\boldsymbol{T}_{j})P(z_{2}|\boldsymbol{T}_{j})\cdots P(x_{m}|\boldsymbol{T}_{j}) = P(\boldsymbol{T}_{j})\prod_{i=1}^{m}P(z_{i}|\boldsymbol{T}_{j})$$
(6)

为保证对噪声波形的筛选精度,本文根据面积 范围(100 km²以下, 100-500 km², 500-1000 km² 和1000 km²以上),从不同湖泊中选取了超过5000个 波形样本,含各类噪声波形(约30%)及似海洋 波形和多波峰波形(约70%),并将噪声波形占 80%以上的轨迹视作噪声轨予以去除。研究中发 现,噪声轨迹的产生主要与过境水面周边的地形 起伏密切相关。但面积较小湖泊的噪声轨数量亦 较多,特别是200 km²以下湖泊,由于观测轨迹偏 少,噪声轨数量占比较多,故需提前去除噪声轨。 在水位提取时,采用传统的异常值去除方法难以 获得高精度水位序列,提前通过去除噪声轨的方 法可解决这一问题。

(2) 改进的波形重跟踪。由于跨轨分辨率偏

式中, P是归一化的回波功率, σ 是归一化功率的 标准差, E是均值操作。

2) 投影后的样本集X₃计算:LDA的目标是寻 找一个新的投影轴,让同类样本的投影点更接近, 而异类样本的投影点更远。根据式(2)和式(3) 计算类内散度矩阵 S_{μ} 和类间散度矩阵 S_{μ} 。

$$S_{w} = \sum_{\vec{x} \in T_{0}} (\vec{x} - \vec{\mu_{0}}) (\vec{x} - \vec{\mu_{0}})^{\mathrm{T}} + \sum_{\vec{x} \in T_{1}} (\vec{x} - \vec{\mu_{1}}) (\vec{x} - \vec{\mu_{1}})^{\mathrm{T}}$$
(2)

$$S_{b} = (\overrightarrow{\boldsymbol{\mu}_{0}} - \overrightarrow{\boldsymbol{\mu}_{1}})(\overrightarrow{\boldsymbol{\mu}_{0}} - \overrightarrow{\boldsymbol{\mu}_{1}})^{\mathrm{T}}$$
(3)

式中, $\vec{x} = (x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(n)})^{\mathrm{T}}$ 是选取的样本, $\vec{\mu}_0$ 和 $\vec{\mu}_1$ 分别代表T。和T.类别样本的均值向量。

然后将S_和S_代入式(4)可得LDA的目标函 数J,也称作 S_{u} 和 S_{b} 的广义瑞利商,继而对目标函 数J求解最优化 arg max (J),即可获得转换向量

$$\frac{\dot{\boldsymbol{w}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}_{\boldsymbol{w}}\dot{\boldsymbol{w}}}{\boldsymbol{\vec{w}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}_{\boldsymbol{w}}\boldsymbol{\vec{w}}} = \frac{\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\mu}_{0} - \boldsymbol{\mu}_{1})(\boldsymbol{\mu}_{0} - \boldsymbol{\mu}_{1})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{w}}{\boldsymbol{\vec{w}}^{\mathrm{T}}(\sum_{\vec{x} \in T_{0}}(\vec{x} - \vec{\boldsymbol{\mu}_{0}})(\vec{x} - \vec{\boldsymbol{\mu}_{0}})^{\mathrm{T}} + \sum_{\vec{x} \in T_{1}}(\vec{x} - \vec{\boldsymbol{\mu}_{1}})(\vec{x} - \vec{\boldsymbol{\mu}_{1}})^{\mathrm{T}})\boldsymbol{\vec{w}}}$$
(4)

低,波形污染仍是Cryosat-2 SARIn数据湖泊水位 高精度反演的重大障碍。为此, Xue等(2018)通 过分析 Cryosat-2 SARIn 波形特征,发现受到陆地 噪声影响的山地湖泊近岸轨迹中含有较多复杂的 多波峰波形,依赖波形自身信息难以有效重跟踪 处理。据此提出了一种改进的波形重跟踪算法 (ImpMWaPP)。该算法以 Villadsen 等(2016)的 MWaPP算法为基础,在其中引入了参考水位计算, 并根据参考水位提取出波形中反映水面信息的子 波形,从而准确提取出复杂多波峰波形中的水面 信号。

(3) 基于动态模型构建湖泊水位时间序列。 通常情况下,将沿轨均水位按时间组合即可得到 水位序列,但是这种处理使得水位序列中存在较 多的残差,水位序列的构建精度偏低。为此,本 文采用如下步骤构建高精度的湖泊水位序列:

1) 按照式(7) 获得湖泊过境轨迹中所有观 测的重跟踪水位H,而后对每条轨迹采用3倍中误 差判断方法去除明显异常的水位值(郭金运等, $2010)_{\circ}$

 $H = H_{\rm alt} - \left(R_{\rm m} + H_{\rm geo} + C_{\rm retrack}\right) - N_{\rm geoid}$ (7)式中, H_{at}是卫星至参考椭球的高度, R_m是观测距 离 $(R_m = 0.5 \times c \times WD, c$ 是光速, WD 是窗口延 迟), H_{geo}包含电离层、干对流层、湿对流层、固 体潮、海潮和极潮等改正, C_{retrack}是重跟踪改正, N_{geoid}是大地水准面至参考椭球的改正量, 此处采用 EGM2008 大地水准面(Pavlis等, 2012), 计算 网格大小为1 min×1 min。

2)利用动态模型对湖泊所有重跟踪水位进行 处理,构建湖泊的水位时间序列。动态模型由 Nielsen等(2015)构建,即误差混合模型与空间— 状态模型的组合,包括过程模型和观测模型两个 部分。

其中,过程模型用于表示真实水位之间的关 系;观测模型则用于反映实际观测水位与真实水 位之间的关系。通过过程模型和观测模型的最大似 然估计函数相乘得到联合似然函数,再应用拉普拉 斯近似(Kristensen等, 2016)即可求解真实水位。

3 提取结果精度验证

利用部分湖泊的实测水位和Hydroweb水位产 品对Cryosat-2数据获取的水位序列进行精度验证。 图1显示了纳木措和扎日南木措利用Cryosat-2数 据基于动态模型构建的水位序列(动态模型水 位)、Hydroweb水位产品和实测水位的相对水位变 化。经计算,纳木措和扎日南木措的实测水位与 动态模型水位的RMSE分别是0.145 m和0.068 m, 而实测水位与Hydroweb水位的RMSE分别是0.256 m 和0.155 m,可见,本文构建的湖泊水位序列具有 更高的精度。





Fig. 1 Comparison of the Cryosat-2 water level time series and the *in-situ* water levels Nam Co and Zhari Namco

表1给出了22个湖泊的Hydroweb水位与本文 获取的Cryosat-2水位序列的统计比较。其中,均 值偏差由相同观测区间的水位序列计算,并以该 值修正两种序列之间的系统偏差,再计算均方根 误差(RMSE);重复水位是指此两种水位序列中 同一天的水位。可以看出,由于参考框架不同, 两种水位序列之间存在着不同的系统偏差,阿克 萨依湖的偏差最大(3.212 m),鲸鱼湖的偏差最小 (0.064 m);两序列间的 RMSE 最大值是0.570 m (多格措仁强措),最小值是0.002 m (阿雅格库), 均值是0.18 m。与Crétaux等(2011)利用实测水位 验证的部分 Hydroweb 湖泊水位的精度在 3—80 cm 相符。

为进一步验证本文获取水位序列的精度,分别计算了上述22个湖泊的Cryosat-2水位和

Hydroweb水位的标准差(表2),得出Cryosat-2水 位和Hydroweb水位的标准差均值分别为0.04 m和 0.16 m;除拉昂措和塔若措以外,其他20个湖泊 的Cryosat-2水位的标准差均明显小于Hydroweb水 位;尽管存在一定系统偏差,但在共同观测时间 内,两者反映出相近的水位变化趋势。综合看来, 本文获取的Cryosat-2水位序列精度至少优于 Hydroweb水位产品0.12 m。

此外,两种水位的标准差差值最大的是吴如 措,该湖位于青藏高原南部,与色林措毗邻,湖 泊面积较小(南北向约11 km,东西向约27 km) 且周边群山环绕,在这种环境下,传统高度计测 高数据很容易被周边地形污染,导致反演水位精 度降低,而本文构建的Cryosat-2 水位序列能得到 相对较好的水位反演精度。

Table 1	The comparison between the Cryosat-2 time series and the Hydroweb water levels							
湖泊名称	观测日期	均值偏差/m	重复水位数量/个	RMSE/m				
阿克萨依湖	2010-09-10-2014-10-22	3.212	7	0.179				
阿雅格库	2010-12-06-2014-10-12	0.518	21	0.002				
赤布张措	2010-11-07-2018-06-08	1.849	8	0.174				
达则措	2010-09-18-2016-04-11	1.570	4	0.009				
多格措仁	2010-07-23-2016-10-16	1.490	16	0.171				
多格错仁强措	2010-12-10-2014-10-20	1.629	5	0.570				
鲸鱼湖	2010-12-10-2014-12-20	0.064	7	0.395				
拉昂措	2010-10-31-2017-01-01	1.632	2	0.337				
勒斜武担措	2010-07-16-2014-10-20	2.057	9	0.221				
鲁玛江东措	2011-01-22-2014-08-26	1.957	15	0.209				
玛旁雍措	2010-11-01-2014-10-16	2.103	5	0.408				
纳木措	2010-07-16-2016-10-26	1.191	30	0.164				
昂拉仁措	2010-09-28-2016-04-26	1.832	15	0.262				
昂孜措	2010-11-15-2018-06-02	2.323	7	0.178				
蓬措	2010-09-10-2017-10-14	1.032	7	0.095				
色林措	2010-07-20-2016-05-19	0.889	17	0.174				
当惹雍措	2010-09-20-2014-10-23	1.670	12	0.256				
塔若措	2010-09-26-2014-09-28	1.572	9	0.101				
吴如措	2010-09-19-2014-10-20	1.1566	8	0.087				
乌兰乌拉湖	2010-07-16-2014-09-12	1.292	13	0.014				
扎日南木措	2010-07-29-2018-06-02	2.547	12	0.053				
兹格塘措	2010-11-08-2016-11-11	2.135	3	0.095				

	表1	Hydroweb水位产品与所获取的Cryosat-2水位序列的统计比较
ble 1	The co	omparison between the Cryosat-2 time series and the Hydroweb water levels

表 2 Cryosat-2 获取的水位和 Hydroweb 水位的标准差比较

Table 2 Comparison between the water levels obtained from Cryosat-2 data and Hydroweb water levels

湖泊友护	Cryosat-2水位/m		Hydroweb水位/m		湖泊友护	Cryosat-2水位/m		Hydroweb水位/m					
砌伯石怀	最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值	砌伯石你	最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值
阿克萨依湖	0.15	0.01	0.04	0.54	0	0.11	纳木措	0.17	0.01	0.02	0.88	0	0.10
阿雅格库	0.14	0.02	0.03	2.33	0	0.40	昂拉仁措	0.13	0.03	0.05	0.27	0	0.06
赤布张措	0.14	0.01	0.03	1.80	0	0.14	昂孜措	0.28	0.02	0.04	1.47	0	0.11
达则措	0.06	0.02	0.03	1.61	0	0.25	蓬措	0.19	0.04	0.08	1.47	0	0.34
多格措仁	0.05	0.01	0.02	1.33	0	0.17	色林措	0.04	0.01	0.02	1.22	0	0.09
多格错仁强措	0.10	0.01	0.02	0.97	0	0.13	当惹雍措	0.36	0.02	0.03	1.17	0	0.17
鲸鱼湖	0.10	0.01	0.03	0.78	0	0.19	塔若措	0.20	0.02	0.04	0.08	0	0.01
拉昂措	0.51	0.03	0.07	0.29	0	0.07	吴如措	0.56	0.02	0.06	0.98	0.01	0.47
勒斜武担措	0.94	0.02	0.05	1.05	0	0.19	乌兰乌拉湖	0.08	0.02	0.03	0.73	0	0.12
鲁玛江东措	0.27	0.03	0.07	0.99	0	0.13	扎日南木措	0.05	0.01	0.02	0.81	0	0.08
玛旁雍措	0.31	0.02	0.03	0.45	0	0.07	兹格塘措	0.10	0.02	0.04	1.13	0	0.10

4 结果与讨论

4.1 湖泊水位的整体变化

利用 Cryosat-2 SARIn 数据,基于噪声去除技术、ImpMWaPP 波形重跟踪算法及误差混合动态模型,本文共监测到青藏高原 133 个湖泊 2010 年—2018 年的水位变化,并采用线性回归模型估算了各湖泊的水位变化趋势。整体上,全区湖泊水位

呈现明显的上升趋势,年均变化率为0.159 m/a, 该值略小于 Phan等(2012)和 Zhang等(2011) 分别给出的154和111个青藏高原湖泊2003年— 2009年的年均变化率(0.20 m/a),可见青藏高原 湖泊在近二十年间的水位上升趋势并未改变,但 上涨速率有所变缓;所有湖泊中上升湖泊占总数 的71%(94个),而且比下降湖泊具有更快的水位 变化(年均上升率和下降率分别是0.271 m/a和 -0.110 m/a)(表3)。

表3 青藏高原133个湖泊的水位变化趋势统计(2010年—2018年) Table 3 Lake level change trends of 133 lakes on the Tibetan Plateau (2010—2018)

分区	湖泊数量	年均变化率/(m/a)	上升湖泊数量	年均上升率/(m/a)	下降湖泊数量	年均下降率/(m/a)
全部	133	0.159	94	0.271	39	-0.110
ΙΣ	23	0.261	17	0.368	6	-0.044
Π⊠	11	0.017	8	0.062	3	-0.104
III	60	0.258	53	0.318	7	-0.191
IV 🗵	39	-0.013	16	0.117	23	-0.104

此外,上升湖泊总面积(19877 km²)远大于下 降湖泊(8840 km²),而且80%的面积大于500 km² 的湖泊水位均上升。图2显示了不同水位变化趋势 的湖泊数量。可以看出,绝大多数水位下降湖泊 的年变化率低于0.10 m/a,而大部分水位上升湖 泊的年变化率超过0.10 m/a,这表明青藏高原湖 泊水量也在持续上涨。其中,上升最快和下降最 快的湖泊分别是盐湖(2.430 m/a)和霍鲁诺尔 (-1.121 m/a)。



为更好地了解湖泊水位变化的空间分布特征, 本文以85.03°E线和32.70°N线将全区分为4个子区 (Zhang等, 2011; Jiang等, 2017a),分别对各子 区内湖泊的水位变化情况进行分析(图3)。



I区:该区湖泊位于西藏阿里地区北部,为 昆仑山、喀喇昆仑山和拉达克山所环绕,周围冰 川广布,气候寒冷干燥、降水稀少。所属23个湖 泊中的17个(74%)湖泊呈水位明显上升趋势, 年均上升率为0.368 m/a,剩余6个湖泊的水位虽然 呈现下降趋势,但年均下降率仅为-0.044 m/a(表 3)。区内上升最快的湖泊为羊湖(0.792 m/a),下 降最快的湖泊为斯潘古尔湖(-0.099 m/a)。

II 区: 该区湖泊主要分布于西藏日喀则地区 的西北部, 多属于高原草原半干旱气候。除拉昂 措和玛旁雍措两湖泊位于印度河流外流区外, 其 他湖泊均位于内流区。所属11个湖泊中8个呈水 位上升趋势, 年均上升率为0.062 m/a; 3个湖泊水 位呈下降趋势, 年均下降率为-0.104 m/a (表3)。 由于水位年均变化率很小(0.017 m/a),该子区湖 泊水位相对稳定,这与Jiang等(2017a)的结果相 一致。

Ⅲ区:该子区主要位于可可西里地区(含西 藏那曲的北部和青海玉树的西北部),自然环境恶 劣、气候干燥,几乎所有湖泊都位于内流区,在 4个子区中湖泊数量最多。其中,所属60个湖泊 中有53个的水位呈明显上升趋势,年均上升率 0.318 m/a;7个湖泊呈下降趋势,但年均下降率较 小(-0.185 m/a)。

Ⅳ 区: 该区主要位于西藏那曲地区的南部, 为念青唐古拉山和唐古拉山所环抱,分布着许多 大型湖泊,如纳木措、色林措、扎日南木措等。 其中,16个湖泊的水位呈上升趋势,但年均变化 率较小(0.117 m/a),与其他23个下降湖泊的年均 变化率(-0.104 m/a)相差不大,所有湖泊的年均 变化率仅为-0.013 m/a(表3),该结果表明该子区 内湖泊的水位相对稳定。

综合来看,青藏高原湖泊在2010年—2018年 具有北部(Ⅰ和Ⅲ区)湖泊水位剧烈上升和南部 (Ⅱ和Ⅳ区)湖泊水位相对稳定的变化趋势。

4.2 不同时期的湖泊水位变化趋势

表4列出青藏高原21个典型湖泊2010年— 2018年不同时期的水位年变化率的比较情况。其中,2010年—2018年与2010年—2015年相比,水 位上升趋势变缓的湖泊占71%(15个),且9个湖 泊的水位上升率降低了0.10 m/a以上;2010年— 2015年与2012年—2014年相比,67%(14个)湖泊 的变化率偏差超过0.10 m/a。由此可见,2016年— 2018年大多数湖泊的水位上升趋势明显降低;而 2010年—2015年多数湖泊的水位呈剧烈变化。

图4显示了各个子区内湖泊的水位变化情况, 可以看出,对于水位下降湖泊, I、Ⅲ和Ⅳ区湖 泊整体上呈逐年下降趋势,而Ⅱ区湖泊在2015年 水位转为上升。而对于水位上升湖泊, I和Ⅲ区 湖泊2013年—2016年相对平稳,其他时期剧烈上 升; Ⅱ区湖泊2010年—2016年间水位较为平稳; 而Ⅳ区湖泊则呈波动式变化,2015年由上升趋势 转为下降,2017年又开始剧烈上升。综上所述, 全区大多数湖泊在2016年—2018年的水位上升趋 势明显变缓。

表4	21个典型青藏高原湖汨不同时期水位年变化率的比较
Table	e 4 Comparison of annual change rate of water level
in e	different periods of 21 typical Tibetan Plateau lakes

典型湖泊	所属分区	$\Delta Rate_a^{1/}$ (m/a)	$\Delta Rate_b^2/$ (m/a)	水位变化特征3
鲁玛江冬措	Ι区	-0.011	0.053	上升变缓
阿克萨依湖	ΙΣ	0.017	0.022	上升变快
塔若措	III	0.065	0	下降变缓
玛旁雍措	ΠΣ	-0.063	-0.331	上升变缓
乌兰乌拉湖	III⊠	-0.168	0.509	上升变缓
阿其库勒湖	III⊠	-0.129	-0.179	上升变缓
多格错仁	Ⅲ区	-0.126	0.232	上升变缓
西金乌兰湖	III⊠	-0.107	0.500	上升变缓
可可西里湖	III⊠	-0.083	-0.040	上升变缓
鲸鱼湖	III⊠	0.320	-0.560	上升变快
库赛湖	III⊠	-0.019	0.984	上升变缓
勒斜武担措	Ⅲ区	-0.035	0.085	上升变缓
色林措	ΝØ	-0.277	0.114	上升变缓
纳木措	N 🗵	-0.084	0.032	上升转下降
扎日南木措	N 🗵	0.063	0.105	下降转上升
羊卓雍措	ΝØ	0.227	-0.146	下降变缓
格仁措	N 🗵	0.005	-0.340	下降变缓
昂孜措	N 🗵	-0.152	-0.135	上升变缓
吴如措	ΝØ	-0.094	-0.064	上升转下降
达则措	N区	-0.112	-0.264	上升变缓
其香措	N区	-0.256	0.262	上升变缓

注:¹表示本文2010年—2018年和Jiang等(2017a)2010年—2015年 的水位年变化率之差;²表示Jiang等(2017a)2010年—2015年与 Kleinherenbrink等(2015)2012年—2014年的年变化率之差;³表示 对比本文与Jiang等(2017a)的水位年变化率得出。

4.3 典型湖泊的水位变化特征

选取盐湖(水位上升最快)、霍鲁诺尔(水位 下降最快)和分属不同子区的阿克萨依湖(I区)、 昂拉仁措(Ⅱ区)、多格错仁强措(Ⅲ区)和色林 措(Ⅳ区)等6个典型湖泊,分析了其于2010年— 2018年的水位变化特征。

图5(a)和图5(b)显示了盐湖的水位和水 面变化,从图5(a)可见,由于库赛湖水的下泄 (姚晓军等,2012),盐湖水位在2011年—2012年 突然暴涨约16m,并且与同期的湖面扩张情况相 一致(图5(b));2013年—2016年,湖泊水位转 入缓慢上升;2017年—2018年,该湖水位再次大 幅上涨了约3m。



图5(c)和图5(d)为霍鲁诺尔的水位和水 面变化,由图5(c)可见,2011年—2012年该湖 水位快速下降约10m,车向红等(2015)和姚晓 军等(2012)发现这种骤减是由于湖水外溢到库 赛湖所致,并且本研究也监测到同期库赛湖水位 也确实大幅上升(图6)。2012年—2018年,霍鲁 诺尔水位进入缓慢下降阶段,与同期水面变化保 持一致(图5(d))。

图7分别显示阿克萨依湖、昂拉仁措、多格错

仁强措和色林措的水位变化情况。可以看出, 2010年—2018年阿克萨依湖和多格错仁强措的水 位呈持续上涨趋势,但前者水位的暴涨主要发生 在2013年—2014年和2016年—2018年,而后者则 发生在2011年—2012年和2016年—2017年。昂拉 仁措和色林措水位则呈现出更为复杂的变化,从 图7(b)可见,昂拉仁措在2010年—2015年的水 位持续下降了约1m,2016年水位缓慢上升后, 2017年—2018年又大幅上升了约0.8m。这种变化



与通过 Landsat 8 OLI 获取的同期水面变化相一致 (图 8)。从图 8 中的红框区域可见, 2016-04-30 湖

面最小,2018-05-22湖面最大,2015-05-14和 2017-05-13的湖面则基本相同。

 $Fig. 5 \quad The \ changes \ of \ water \ level \ and \ surface \ corresponding \ to \ Yan \ Lake \ and \ Huolunuo'er$



对于色林措,2011年水位大幅上升约0.7m,2012年—2014年水位又缓慢上升约1m,2015年—

2016年则降至2012年水位,2017年—2018年水位 小幅上升约0.3 m (图7(d))。由图9红线内区域 可见,色林措在2015-05-18的水面最大,考虑到 该湖于当年11月至次年5月为结冰期,此次水面 扩张由2014年的涨水导致,其他时期的湖面变化 也与图7(d)所示水位变化相一致。

由上可见,同属青藏高原北部区域的盐湖、 阿克萨依湖和多格错仁强措具有相似的水位变化 特征,2012年—2013年和2016年—2017年均表现 出水位突涨,而在2010年—2018年的其他时间水 位缓慢上升。而对于青藏高原南部的昂拉仁措和 色林措,同样在2016年—2017年间水位突然上 升,但是在其他时间两者呈现出截然相反的水位 变化情况。



Fig. 7 The changes of water level of Ake Sayi Lake, Ngangla Ringco, Dogaicoring Qangco and Selin Co between 2010 and 2018

31.67°N

31.44°N

82.89°E 83.12°E (a) 昂拉仁措湖影像

(a) The image of Ngangla Ringco



(d) 2016-04-30



(b) 2014-06-12



(e) 2017-05-03



(c) 2015-05-14





box of Fig. 8(a))

32.10°N -

88.62°E 88.95°E 89.28°E (a) 色林措湖影像 (a) The image of Selin Co



(d) 2016-05-04



(b) 2014-05-31



(e) 2017–05–07



(c) 2015-05-18



(f) 2018-05-26

图 9 色林措湖 2014年—2018年水面变化状况(图 9(b)—图 9(f)为图 9(a)红框的区域,圆圈和方框表示水位变化明显的区域) Fig. 9 The water surface changes over Selin Co from 2014 to 2018 (Fig. 9(b)—Fig. 9(f) show the water surface changes in red box of Fig. 9(a))

5 结 论

青藏高原是对全球气候变化响应最为敏感的 区域之一,拥有世界上海拔最高、数量最多的高 原湖泊群。长期以来,由于地形复杂,通过卫星 测高数据反演的该地区湖泊水位的精度受到限制。 本文基于噪声去除技术、ImpMWaPP算法和动态 模型等处理方法,利用Cryosat-2 SARIn数据获取 到精度较高的青藏高原地区133个湖泊的2010年— 2018年水位序列,并利用22个湖泊的Hydroweb水 位进行了交叉验证,证实了本研究提取的水位序 列精度较以往研究高。

研究结果表明,青藏高原北部湖泊的水位显 著上升,南部湖泊的水位趋于稳定,与前人的研 究结果一致;同时,2010年—2012年和2016年— 2018年,大多数湖泊的水位呈现快速上涨,而其 他时间的水位相对稳定或略有下降。

本研究仅使用了 Cryosat-2 数据监测青藏高原 湖泊的水位变化,未来将融合更多测高数据,如 Sentinel-3A、天宫二号三维成像微波高度计 (InIRA)、ICESat-1/2等,监测更多青藏高原湖泊 更长时期的水位变化,并结合同期的湖泊水面信 息,掌握青藏高原湖泊的水量变化,从而更好地 为全球气候变化研究和区域水资源评价服务。 志 谢 此研究中用到的Cryosat-2高度计数 据来源于欧洲空间局 (ESA),在此表示感谢!

参考文献(References)

- Birkett C M. 1995. The contribution of TOPEX/POSEIDON to the global monitoring of climatically sensitive lakes. Journal of Geophysical Research, 100(C12): 25179-25204 [DOI: 10.1029/95 JC02125]
- Chaudhary A, Basu S, Kumar R, Mahesh C and Sharma R. 2015. Shape classification of AltiKa 40-Hz waveforms using linear discriminant analysis and Bayes decision rule in the Gujarat coastal region. Marine Geodesy, 38(S1): 62-72 [DOI: 10.1080/01490419. 2014.1001504]
- Che X H, Feng M, Jiang H, Xiao T, Jiang C Z, Jia B and Bai Y. 2015. Detection and analysis of Qinghai-Tibet Plateau lake area from 2000 to 2013. Journal of Geo-Information Science, 17(1): 99-107 (车向红, 冯敏, 姜浩, 肖桐, 王昌佐, 贾蓓, 白燕. 2015. 2000年— 2013 年青藏高原湖泊面积 MODIS 遥感监测分析. 地球信息科 学学报, 17(1): 99-107) [DOI: 10.3724/SP.J.1047.2015.00099]
- Crétaux J F, Jelinski W, Calmant S, Kouraev A, Vuglinski V, Bergé-Nguyen M, Gennero M C, Nino F, Abarca Del Rio R, Cazenave A and Maisongrande P. 2011. SOLS: A lake database to monitor in the near real time water level and storage variations from remote sensing data. Advances in Space Research, 47(9): 1497-1507 [DOI: 10.1016/j.asr.2011.01.004]

Gao L, Liao J J, Liu H L and Guo W. 2013. Applying Status and devel-

opment tendency of satellite radar altimeter. Remote Sensing Technology and Application, 28(6): 978-983 (高乐, 廖静娟, 刘焕 玲, 郭伟. 2013. 卫星雷达测高的应用现状及发展趋势. 遥感技术与应用, 28(6): 978-983)

- Gao L, Liao J J and Shen G Z. 2013. Monitoring lake-level changes in the Qinghai-Tibetan Plateau using radar altimeter data (2002-2012). Journal of Applied Remote Sensing, 7(1): 073470 [DOI: 10.1117/1.JRS.7.073470]
- 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)
- Göttl F, Dettmering D, Müller F L and Schwatke C. 2016. Lake level estimation based on CryoSat-2 SAR altimetry and multi-looked waveform classification. Remote Sensing, 8(1): 885 [DOI: 10. 3390/rs8110885]
- Hwang C, Cheng Y S, Han J, 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]
- Jiang L G, Nielsen K, Andersen O B and Bauer-Gottwein P. 2017a. 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]
- Jiang L G, Schneider R, Andersen O B and Bauer-Gottwein P. 2017b. CryoSat-2 altimetry applications over rivers and lakes. Water, 9 (3): 211 [DOI: 10.3390/w9030211]
- Jiang W P, Chu Y H, Li J C and Yao Y S. 2008. Water level variation of Qinghai Lake from Altimeteric data. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 33(1): 64-67 (姜卫平, 褚永海, 李建成, 姚永顺. 2008. 利用 ENVISAT 测高数据监测青海湖水 位变化. 武汉大学学报(信息科学版), 33(1): 64-67)
- Kleinherenbrink M, Ditmar P G and Lindenbergh R C. 2014. Retracking Cryosat data in the SARIn mode and robust lake level extraction. Remote Sensing of Environment, 152: 38-50 [DOI: 10.1016/ j.rse.2014.05.014]
- Kleinherenbrink M, Lindenbergh R C and Ditmar 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]
- Kristensen K, Nielsen A, Berg C W, Skaug H and Bell B M. 2016. TMB: Automatic differentiation and Laplace approximation. Journal of Statistical Software, 70(5): 1-21 [DOI: 10.18637/jss.v070.i05]
- Kropáček J, Braun A, Kang S C, Feng C, Ye Q H and Hochschild V. 2012. Analysis of lake level changes in Nam Co in central Tibet utilizing synergistic satellite altimetry and optical imagery. Inter-

national Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 17: 3-11 [DOI: 10.1016/j.jag.2011.10.001]

- Lee S, Im J, Kim J, Kim M, Shin M. Kim H C and Quackenbush L J. 2016. Arctic sea ice thickness estimation from CryoSat-2 satellite data using machine learning-based lead detection. Remote Sensing, 8(9): 698 [DOI: 10.3390/rs8090698]
- Liao J J, Gao L and Wang X M. 2014. Numerical simulation and forecasting of water level for Qinghai Lake using multi-altimeter data between 2002 and 2012. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 7(2): 609-622 [DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2291516]
- Liu J S, Wang S Y, Yu S M, Yang D Q and Zhang L. 2009. Climate warming and growth of high-elevation inland lakes on the Tibetan Plateau. Global and Planetary Change, 67(3/4): 209-217 [DOI: 10. 1016/j.gloplacha.2009.03.010]
- Lu A X, Yao T D, Wang L H, Liu S Y and Guo Z L. 2005. Study on the fluctuations of typical glaciers and lakes in the Tibetan Plateau using remote sensing. Journal of Glaciology and Geocryology, 27 (6): 783-792 (鲁安新, 姚檀栋, 王丽红, 刘时银, 郭治龙. 2005. 青藏高原典型冰川和湖泊变化遥感研究. 冰川冻土, 27(6): 783-792) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-0240.2005.06.001]
- Marshall A and Deng X L. 2016. Image analysis for altimetry waveform selection over heterogeneous inland waters. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 13(8): 1198-1202 [DOI: 10. 1109/LGRS.2016.2575068]
- Morris C S and Gill S K. 1994. Evaluation of the TOPEX/POSEIDON altimeter system over the Great Lakes. Journal of Geophysical Research, 99(C12): 24527-24539 [DOI: 10.1029/94JC01642]
- Nielsen K, Stenseng L, Andersen O B and Knudsen P. 2017. The performance and potentials of the CryoSat-2 SAR and SARIn modes for lake level estimation. Water, 9(6): 374 [DOI: 10.3390/w90 60374]
- Nielsen K, Stenseng L, Andersen O B, Villadsen H and Knudsen P. 2015. Validation of CryoSat-2 SAR mode based lake levels. Remote Sensing of Environment, 171: 162-170 [DOI: 10.1016/j.rse. 2015.10.023]
- Pavlis N K, Holmes S A, Kenyon S C and Factor J K. 2012. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 EGM2008. Journal of Geophysical Research, 117(B4): B04406 [DOI: 10.1029/2011JB008916]
- 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]
- Pritchard H D. 2017. Asia's glaciers are a regionally important buffer against drought. Nature, 545(7653): 169-174 [DOI: 10.1038/nature22062]
- Qiu J E. 2008. China: the third pole. Nature, 454(7203): 393-396 [DOI: 10.1038/454393a]

- Ricker R, Hendricks S, Helm V and Gerdes R. 2015. Classification of CryoSat-2 radar echoes//Lohmann G, Meggers H, Unnithan V, Wolf-Gladrow D, Notholt J and Bracher A, eds. Towards an Interdisciplinary Approach in Earth System Science: Advances of a Helmholtz Graduate Research School. Cham: Springer International Publishing: 149-158 [DOI: 10.1007/978-3-319-13865-7_17]
- Shen X Y, Zhang J, Zhang X, Meng J M and Ke C Q. 2017. Sea ice classification using Cryosat-2 altimeter data by optimal classifierfeature assembly. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 14(11): 1948-1952 [DOI: 10.1109/LGRS.2017.2743339]
- 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]
- Song C Q, Ye Q H and Cheng X. 2015. Shifts in water-level variation of Namco in the central Tibetan Plateau from ICESat and Cryo-Sat-2 altimetry and station observations. Science Bulletin, 60(14): 1287-1297 [DOI: 10.1007/s11434-015-0826-8]
- Tourneret J Y, Mailhes C, Amarouche L and Steunou N. 2008. Classification of altimetric signals using linear discriminant analysis//Proceedings of 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Boston, MA, USA: IEEE: 75-78 [DOI: 10. 1109/IGARSS.2008.4779286]
- Villadsen H, Deng X L, Andersen O B, Stenseng L, Nielsen K and Knudsen P. 2016. Improved inland water levels from SAR altimetry using novel empirical and physical retrackers. Journal of Hydrology, 537: 234-247 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.03.051]
- Wan W, Long D, Hong Y, Ma Y Z, Yuan Y, Xiao P F, Duan H T, Han Z Y and Gu X F. 2016. A lake data set for the Tibetan Plateau from the 1960s, 2005, and 2014. Scientific Data, 3(3): 160039 [DOI: 10.1038/sdata.2016.39]
- Wang H H, Yue Y C, Zhou X C and Yang Y D. 2010. Classification of radar altimeter waveforms based on cluster analysis. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 35(7): 833-836 (汪 海洪, 岳迎春, 邹贤才, 杨元德. 2010. 基于聚类分析的卫星雷达 测高波形分类研究. 武汉大学学报(信息科学版), 35(7): 833-836)
- Wingham D J, Rapley C G and Griffiths H. 1986. New techniques in satellite altimeter tracking systems//Proceedings of IGARSS 86 Symposium. Zurich: ESA: 1339-1344
- Wu G X, Liu Y M, Zhang, Q, Duan A M, Wang T M, Wan R J, Liu X, Li W P, Wang Z Z and Liang X Y. 2007. The influence of mechanical and thermal forcing by the Tibetan Plateau on Asian climate. Journal of Hydrometeorology, 8(4): 770-789 [DOI: 10.1175/ JHM609.1]
- Wu Y H, Zheng H X, Zhang B, Chen D M and Lei L P. 2014. Longterm changes of lake level and water budget in the Nam Co Lake

Basin, Central Tibetan Plateau. Journal of Hydrometeorology, 15(3): 1312-1322 [DOI: 10.1175/JHM-D-13-093.1]

- Xue H, Liao J J and Zhao L F, 2018. A modified empirical retracker for lake level estimation using Cryosat-2 SARin data. Water, 10 (11): 1584 [DOI: 10.3390/w10111584]
- Yao T D, Thompson L G, Mosbrugger V, Zhang F, Ma Y M, Luo T X, Xu B Q, Yang X X, Joswiak D R, Wang W C, Joswiak M E, Devkota L P, Tayal S, Jilani R and Fayziev R. 2012. Third Pole Environment (TPE). Environmental Development, 3: 52-64 [DOI: 10.1016/j.envdev.2012.04.002]
- Yao X J, Liu S Y, Sun M P, Guo W Q and Zhang X. 2012. Changes of Kusai Lake in Hoh Xil region and causes of its water overflowing. Acta Geographica Sinica, 67(5): 689-698 (姚晓军, 刘时银, 孙美平, 郭万钦, 张晓. 2012. 可可西里地区库赛湖变化及湖水 外溢成因. 地理学报, 67(5): 689-698) [DOI: 10.11821/xb2012 05011]
- Zhang G Q. 2018. Changes in lakes on the Tibetan Plateau observed from satellite data and their responses to climate variations. Progress in Geography, 37(2): 214-223 (张国庆. 2018. 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, 37(2): 214-223) [DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.02.004]
- 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 X and Wu Y H. 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. 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]
- Zhang Y L, Li B Y and Zheng D. 2002. A discussion on the boundary and area of the Tibetan Plateau in China. Geographical Research, 21(1): 1-8 (张镱锂, 李炳元, 郑度. 2002. 论青藏高原范围与面 积. 地理研究, 21(1): 1-8) [DOI: 10.3321/j.issn:1000-0585.2002. 01.001]
- Zhao Y, Liao J J, Shen G Z and Zhang X L. 2017. Monitoring the water level changes in Qinghai Lake with satellite altimetry data. Journal of Remote Sensing, 21(4): 633-644 (赵云, 廖静娟, 沈国 状, 张学良. 2017. 卫星测高数据监测青海湖水位变化. 遥感学 报, 21(4): 633-644) [DOI: 10.11834/jrs.20176217]
- Zhou H, Shen J, Yang Z Y and Wang H H. 2015. Study on the methods of coastal altimetry waveform classification and discrimination. Science of Surveying and Mapping, 40(6): 67-71, 91 (周浩, 谌佳, 杨正银, 汪海洪. 2015. 近海卫星测高波形分类与判别. 测绘科 学, 40(6): 67-71, 91) [DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2015.06. 0014]

Monitoring lake level changes on the Tibetan Plateau from 2000 to 2018 using satellite altimetry data

LIAO Jingjuan^{1,2}, XUE Hui^{1,3}, CHEN Jiaming^{1,3}

 Key Laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
 Hainan Province Key Laboratory of Earth Observation, Sanya 572029, China;
 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The changes in lake level on the Tibetan Plateau are important indicators for the study of climate and ecological environment changes. In-situ gauges can measure high-precision lake level data, but they are costly to maintain and challenging to operate in remote areas. Satellite radar altimetry has now been used successfully for more than two decades to measure lake levels as an addition to gauge measurement. Monitoring the water level changes of more lakes becomes effective with the increase in Cryosat-2 observation data and the improvement in data processing technology.

This study presents a high-precision extraction method of lake level time series based on noise removal, improved empirical retracker (ImpMWaPP), and error mixture model. The Cryosat-2 SARIn data were used to obtain water level time series of 133 Tibetan Plateau Lakes from 2010 to 2018, and the spatiotemporal variations of these lake levels were analyzed. The accuracy of lake level extraction was validated using in-situ measurements and Hydroweb water level products.

In general, the lake levels on the Tibetan Plateau continue to rise, but the rate of increase is slower than that in the period of 2003—2009. The average annual rate of change is 0.159 m/a. From the geographical distribution, the lake levels in the northern plateau rise most significantly, while the lake levels in the southern plateau tend to be stable. The water levels of most lakes showed a rapid rise in the periods of 2010—2012 and 2016—2018, while the water levels were relatively stable or slightly decreased at other times.

The results showed that the accuracy of lake level extraction in this study was higher than that of previous studies, and the change in lake levels on the Tibetan Plateau was similar to those in the previous studies. In the future work, the change in lake levels on the Tibetan Plateau will be further estimated using multi-altimeter data. We will also consider the information of lake extent and study the change in lake volume to support the exploration of climate and environmental changes on the Tibetan Plateau.

Key words: remote sensing, lake level, satellite altimetry, Cryosat-2 SARIn data, Tibetan Plateau, spatio-temporal variation

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41871256); National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0501501) ; International Partnership Program of Chinese Academy of Sciences (No. 131C11KYSB20160061)