

doi: 10.6046/zrzyyg.2021329

引用格式: 马山木, 甘甫平, 吴怀春, 等. ICESat-2 数据监测青藏高原湖泊 2018—2021 年水位变化[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(3):164-172. (Ma S M, Gan F P, Wu H C, et al. ICESat-2 data-based monitoring of 2018—2021 variations in the water levels of lakes in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(3):164-172.)

# ICESat-2 数据监测青藏高原湖泊 2018—2021 年水位变化

马山木<sup>1,2</sup>, 甘甫平<sup>3</sup>, 吴怀春<sup>1,2</sup>, 闫柏琨<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学(北京)生物地质与环境地质国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083; 3. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

**摘要:** 湖泊水位变化是气候、生态环境变化、水资源评级研究的重要指标。以往测高卫星对中小型湖泊监测难度大, 新发射的 ICESat-2 卫星可提升湖泊水位监测的全面性与精度。文章基于 ICESat-2 卫星陆地观测产品数据覆盖情况, 对 2018 年 10 月—2021 年 4 月期间青藏高原面积大于 1 km<sup>2</sup> 的 473 个湖泊进行高精度水位动态监测。从高原湖泊水位整体变化、流域和区域变化、典型湖泊水位月(或季)度的时间变化趋势 3 个方面, 分析了湖泊水位的时空变化特征。研究表明: 近 3 a 来, 青藏高原湖泊水位总体继续呈上升趋势, 年均变化率为 0.013 m/a; 大型湖泊水位上升明显, 中型湖泊水位上升平缓, 小型湖泊水位呈微弱下降。在空间分布上, 青藏高原各流域湖泊水位呈上升趋势, 水位呈下降趋势的湖泊多数分布在海拔相对较高的地区。监测期间, 色林错水位上升达 1 m, 格仁错水位下降达 1 m。该水位监测成果提供了青藏高原部分湖泊水位最新监测数据, 有助于湖泊变化动态监测等研究。

**关键词:** 湖泊水位; 时空变化; ICESat-2 卫星; 青藏高原

**中图法分类号:** TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)03-0164-09

## 0 引言

湖泊是全球水资源的重要组成部分, 其变化是区域和全球气候变化的重要指示器, 也是流域水资源评价、水平衡分析的重要参量<sup>[1]</sup>。青藏高原以“亚洲水塔”著称, 被称作地球“第三极”, 分布上千个湖泊<sup>[2]</sup>。对这些湖泊水位进行动态监测和调查, 有助于全球气候变化研究, 也将对湖泊生态维护、水资源利用、水循环和生态环境过程等研究提供动态监测信息。

卫星测高技术是获取湖泊水位变化的最重要手段之一。经过 20 多年的发展<sup>[3]</sup>, 获取了青藏高原湖泊水位变化系列监测数据, 形成了青藏高原部分湖泊从 1972—2019 年间长时间序列的水位变化监测成果<sup>[4-11]</sup>。比如, Hwang 等<sup>[4]</sup>利用 T/P 系列数据监测了 1993—2014 年间 23 个青藏高原湖泊的水位变化, 其中最小的青蛙湖约 25 km<sup>2</sup>; Gao 等<sup>[5]</sup>融合

ENVISAT, CryoSat-2, Jason-1 和 Jason-2 数据, 获取了 2002—2012 年间青藏高原 51 个湖泊的水位变化, 并分析了冻土对其影响; Song 等<sup>[6]</sup>使用 ICESat 卫星数据获取了 2003—2009 年间青藏高原 105 个湖泊的水位变化, 并分析了其与气候变化的关系; Chen 等<sup>[7]</sup>融合了 Jason-2, Jason-3, CryoSat-2 和 Sentinel-3A 数据, 获取了 2016—2019 年间 261 个面积大于 10 km<sup>2</sup> 的青藏高原湖泊的水位变化, 其中大多数湖泊呈上升趋势。

上述高原湖泊水位监测受到卫星测高点地面足印大小和距离间隔的限制, 测高点覆盖主要集中在水面面积大于 10 km<sup>2</sup> 的大中型湖泊, 对于数量相对更多的小型湖泊开展工作较少。2018 年, ICESat-2 卫星成功发射, 其足印大小为 17 m, 这使对小型湖泊水位监测成为可能。本文主要利用 ICESat-2 卫星 ATL08 产品<sup>[12]</sup>, 通过青藏高原湖泊分布位置确定、水面高程信息提取等对部分面积大于 1 km<sup>2</sup> 的高原湖泊水位及其变化信息进行了更频繁次的监

收稿日期: 2021-10-11; 修订日期: 2022-02-18

基金项目: 国防科工局项目“高分国土资源遥感应用示范系统(二期)”(编号: 04-Y30B01-9001-18/20)和自然资源部中国地质调查局项目课题“流域水循环要素与自然资源遥感定量调查监测”(编号: DD20221642-3)共同资助。

第一作者: 马山木(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事湖泊水文遥感应用研究。Email: mashanmu@163.com。

通信作者: 甘甫平(1971-), 男, 研究员, 主要从事遥感技术方法及地学应用研究。Email: fpgan@aliyun.com。

测,从而分析 2018 年 10 月—2021 年 4 月间具有水位监测信息的 473 个湖泊的水位时空变化特征。

## 1 主要数据源

湖泊水位数据主要是基于 ICESat-2 卫星 ATLAS 系统的 ATLO8 产品数据。由于 ATLO8 产品仅仅是地表高程数据,还需与湖泊位置数据进行复合,从而获取湖泊水位变化信息。利用 Hydroweb 水位等进行交叉验证,确保水位信息的可靠性。为此,本文主要数据源包括 ICESat-2 卫星 ATLO8 产品、湖泊位置与分布数据,以及 Hydroweb 水位监测等产品。

### 1.1 ATLO8 产品数据

ATLO8 产品数据是由 ICESat-2 卫星搭载的 ATLAS (Advanced Topographic Laser Altimeter System) 系统获取的点云数据生产的 3 级产品之一。ATLAS 系统具备微脉冲、多波束、低能量的单光子探测、窄脉宽及高重频 (10 kHz) 的特性<sup>[13-14]</sup>,能够探测单光子水平的激光反射,将单个激光脉冲分成 6 个光束 (3 对),从而提供比 ICESat 所使用的 GLAS 更密集的地面覆盖度。ATLAS 凭借其单光子探测方法,提供相比传统卫星雷达高度计更高的垂向准确度和精确度。足迹范围大小为 17 m,这有利于观测更多小面积 (10 km<sup>2</sup> 以下) 湖泊的水位高程。ATLO8 产品采用 DRAGANN 算法,是基于二级产品 ATLO3 数据,沿轨道地理定位点云数据的 10 km 范围上实施自适应最近邻识别,得到中高置信度光子信号并与 ATLO3 产品结合,以确保获取地表的所有潜在光子信号,其表面高度是 100 m 范围内的平均地形高度<sup>[12]</sup>——沿轨方向各种尺度的地面高度 (包含冠层覆盖高度),包括冠层高度、冠层覆盖度百分比、表面坡度和粗糙度等因素<sup>[14-15]</sup>。

本研究青藏高原湖泊水位信息的提取主要是基于 2018 年 10 月—2021 年 4 月的 ATLO8 产品数据得到的。

### 1.2 湖泊位置数据

由于 ATLO8 主要是地表高程数据,需要与湖泊位置数据的结合,才能取得为水位高程数据。湖泊位置数据主要包括 GSWO (global surface water occurrence) 水体掩模数据<sup>[16]</sup>、GRanD (global reservoir and dam) 和 GOODD (global georeferenced database of dams) 全球水库矢量数据<sup>[17]</sup>,以及包含 1 171 个面积大于 1 km<sup>2</sup> 的青藏高原湖泊名称、面积和位置等信息的青藏高原湖泊子数据集<sup>[2]</sup>。

### 1.3 交叉验证数据

主要是由美国农业部/美国国家航空航天局发

布的 G-REALM 水位产品<sup>[18]</sup>、法国和俄罗斯联合发布的 Hydroweb 水位产品<sup>[19]</sup>,以及 MERIT 水文数据集<sup>[20]</sup>。

G-REALM 水位产品主要是利用 Jason-1, Jason-2, Jason-3, T/P 及 ENVISAT 等雷达测高数据,获取了世界上最大的 353 个湖泊和水库的水位高程,精度达 10 cm。Hydroweb 水位产品包含全球 150 个湖泊和水库,基于 T/P, GFO, ENVISAT, SARAL, ERS-1, ERS-2, Jason-1, Jason-2, Jason-3 和 Sentinel-3A 等数据生产的水位产品。MERIT 水文数据集是基于 MERIT DEM 和多种内陆河流地图开发的,包含水文校准高程。

本研究使用了 4 个青藏高原湖泊的 G-REALM 水位和 18 个 Hydroweb 水位进行水位交叉验证。

## 2 技术流程与数据处理

基于 ATLO8 产品数据与湖泊位置数据,通过水面掩模处理、水位高程提取、水位信息处理和精度交叉验证等步骤,获取了湖泊时间序列的水位 (图 1)。

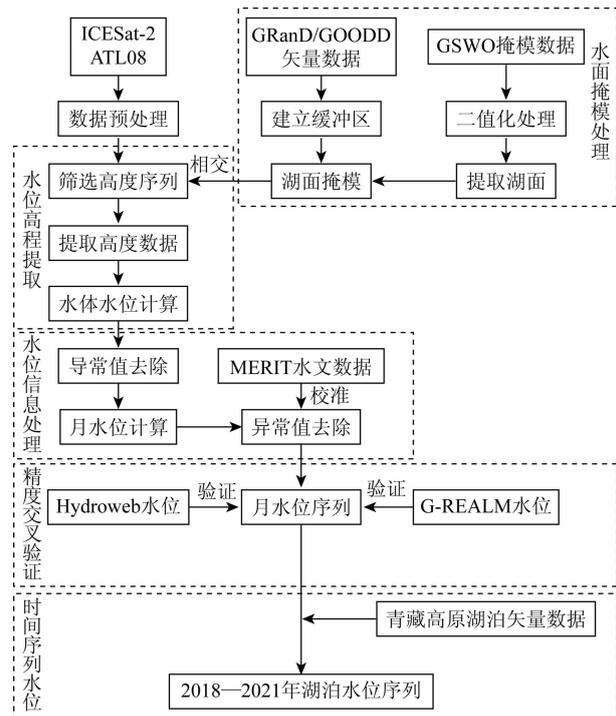


图 1 技术路线

Fig. 1 Technical route

### 2.1 水面掩模处理

由于 ATLO8 产品包括土地和植被的地表高度,以及内陆水体的高程,需要采用水面掩模对水体进行空间筛选。为了保证 ICESat-2 的足迹经过水体,对 GSWO 进行二值化处理,提取 30 a 内超过 80%

为水体的像素,然后将掩模侵蚀 3 个像素(90 μm)以进一步降低陆表地物影响。以水体面积除以包含水体的边界的水体总面积之商小于 5% 的阈值进行河流等水体的删除<sup>[21]</sup>,提取湖泊水面位置和分布。

利用全球水库矢量数据建立 1 km 范围缓冲区,并与已有的水面掩模进行叠加处理,获取水面掩模数据<sup>[21]</sup>。

### 2.2 水位高程提取

将湖泊矢量数据与 ICESat - 2 卫星 ATL08 产品数据进行位置配对处理。对每个湖泊水体,选取其高程观测数据序列 10% ~ 90% 的部分。若某一水体的高程观测数据少于 3 个,则去除该观测值,此外删除当天及轨道内标准差大于 0.25 m 的高程观测值。然后计算每个湖泊水体高程观测值的中位数为水位。

基于上述处理,得到 2018 年 10 月 14 日—2021 年 4 月 21 日青藏高原湖泊水位数据集。对于给定水体,77% 水体的当日高程观测值标准差小于 0.05 m, 86% 水体的当日高程观测值标准差小于 0.1 m。

### 2.3 水位信息处理

首先筛选与 2018 年 10 月 14 日—2021 年 4 月 21 日监测期内所有观测值的平均值相差超过 3 倍标准差的高程观测值,以消除因云层或其他传感器的错误而导致的质量较差的观测值。然后,通过取每个月所有高度观测的平均值为每月的高度观测值,以便于观察各水体一致时间段的水位。青藏高原湖泊在 31 个月中平均有 1.5 个高程观测,观测值数与湖泊面积呈正相关。

为了筛除高程观测值中的异常值,对于月度时间序列高度观测值将额外筛选。去除月度时间序列高度观测值中超过 MERIT 水文数据集中湖泊高程 40 m 的观测值,以及超出高度观测值中值 2.5 倍标准差的观测值。这些筛选步骤确保青藏地区水位高程变化观测是可靠的。

### 2.4 精度交叉验证

利用 G - REALM 及 Hydroweb 水位产品数据对 ICESat - 2 数据获取的水位序列进行精度交叉验证(表 1)。为了进一步验证本文获取水位序列的精度,分别计算了上述 18 个湖泊的 ICESat - 2 水位和 Hydroweb 水位的标准差(表 2),得出两者的标准差均值分别为 0.06 m 和 0.1 m。综合来看,本文获取的 ICESat - 2 水位序列精度至少优于 Hydroweb 水位产品 0.04 m。综合表 1 和表 2 可知,在与 Hydroweb 水位交叉验证中,可可西里湖的相关系数最高,为 0.957,兹格塘错相关系数最低,为 0.122,考虑到兹格塘错月水位重复数少,且其 Hydroweb 水位的标准差高(表 2),水位数据不可靠导致相关系数低。

表 1 Hydroweb 及 G - REALM 水位产品与所获取的 ICESat - 2 水位序列的统计比较

Tab. 1 Comparison between the ICESat - 2 time series and the Hydroweb and G - REALM water levels

| 湖泊名称   | 月水位重复数/个 | 相关系数  | 均方根误差/m |
|--------|----------|-------|---------|
| 扎日南木措  | 29       | 0.776 | 0.171   |
| 赤布张错   | 21       | 0.834 | 0.194   |
| 昂孜错    | 22       | 0.846 | 0.152   |
| 色林错    | 31       | 0.717 | 0.232   |
| 兹格塘错   | 9        | 0.122 | 0.263   |
| 阿雅格库   | 26       | 0.752 | 0.237   |
| 纳木错    | 28       | 0.613 | 0.264   |
| 格仁错    | 27       | 0.795 | 0.343   |
| 多格错仁强错 | 18       | 0.870 | 0.077   |
| 鄂陵湖    | 22       | 0.798 | 0.293   |
| 青海湖    | 21       | 0.736 | 0.247   |
| 可可西里湖  | 20       | 0.957 | 0.102   |
| 勒斜武担错  | 21       | 0.934 | 0.152   |
| 达则错    | 20       | 0.925 | 0.141   |
| 阿其克库勒湖 | 20       | 0.884 | 0.256   |
| 吐错     | 16       | 0.933 | 0.098   |
| 乌兰乌拉湖  | 23       | 0.596 | 0.124   |
| 哈拉湖    | 19       | 0.913 | 0.171   |

表 2 Hydroweb 水位产品与所获取的 ICESat - 2 水位序列的标准差比较

Tab. 2 Comparison between the Hydroweb water levels and water levels obtained from ICESat - 2 data (m)

| 湖泊名称   | ICESat - 2 水位 |      |      | Hydroweb 水位 |      |      |
|--------|---------------|------|------|-------------|------|------|
|        | 最大值           | 最小值  | 均值   | 最大值         | 最小值  | 均值   |
| 扎日南木错  | 0.17          | 0.02 | 0.06 | 0.08        | 0.03 | 0.04 |
| 赤布张错   | 0.13          | 0.03 | 0.06 | 0.06        | 0.01 | 0.03 |
| 昂孜错    | 0.07          | 0.02 | 0.05 | 0.36        | 0.01 | 0.05 |
| 色林错    | 0.19          | 0.04 | 0.10 | 0.08        | 0.02 | 0.04 |
| 兹格塘错   | 0.10          | 0.02 | 0.05 | 1.10        | 0.16 | 0.35 |
| 阿雅格库   | 0.13          | 0.02 | 0.04 | 0.16        | 0.02 | 0.07 |
| 纳木错    | 0.14          | 0.03 | 0.06 | 0.09        | 0.02 | 0.04 |
| 格仁错    | 0.08          | 0.01 | 0.04 | 0.65        | 0.03 | 0.12 |
| 多格错仁强错 | 0.09          | 0.01 | 0.04 | 0.07        | 0    | 0.03 |
| 鄂陵湖    | 0.12          | 0.01 | 0.07 | 0.24        | 0.03 | 0.08 |
| 青海湖    | 0.10          | 0.04 | 0.07 | 0.27        | 0.02 | 0.10 |
| 可可西里湖  | 0.10          | 0.01 | 0.05 | 0.16        | 0.03 | 0.07 |
| 勒斜武担错  | 0.08          | 0.02 | 0.04 | 1.00        | 0.02 | 0.12 |
| 达则错    | 0.06          | 0.01 | 0.04 | 0.25        | 0.01 | 0.04 |
| 阿其克库勒湖 | 0.24          | 0.03 | 0.13 | 0.14        | 0.03 | 0.08 |
| 吐错     | 0.10          | 0.01 | 0.05 | 0.29        | 0.04 | 0.21 |
| 乌兰乌拉湖  | 0.20          | 0.01 | 0.11 | 1.36        | 0.12 | 0.23 |
| 哈拉湖    | 0.05          | 0.01 | 0.03 | 0.18        | 0.09 | 0.13 |

### 2.5 时间序列水位监测

利用 ICESat - 2 卫星 ATL08 产品数据,基于前

文的相关数据处理流程和数据处理方法对 2018 年 10 月 14 日—2021 年 4 月 21 日期间青藏高原湖泊

水位信息进行提取和动态监测,得到了水位变化情况(图 2)。

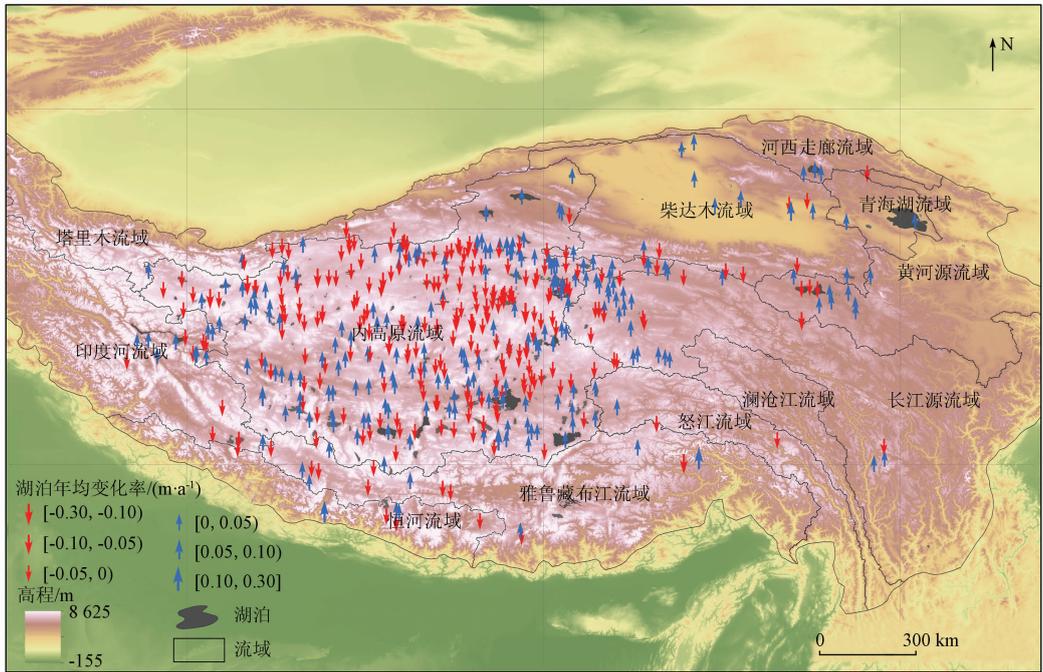


图 2 青藏高原湖泊的水位变化趋势空间分布

Fig. 2 Distribution of lake level change trends of the lakes on the Qinghai - Tibet Plateau

### 3 湖泊水位时空变化特征

对所监测到 473 个湖泊,从其整体的水位变化趋势、不同分布区域的时空特征、部分典型湖泊的月度变化趋势进行了分析。

#### 3.1 湖泊水位的整体变化

采取线性回归模型估算了 2018—2021 年间青藏高原 473 个湖泊的水位变化趋势。整体上,湖泊水位呈现明显的上升趋势(表 3),整体年均变化率(按照湖泊面积加权计算)为 0.013 m/a,水位上升湖泊面积占整体湖泊的 75%。

表 3 青藏高原 473 个湖泊的水位变化趋势统计(2018—2021 年)

Tab. 3 Lake level change trends of 473 lakes on the Qinghai - Tibet Plateau(2018—2021)

| 湖泊面积范围/km <sup>2</sup> | 湖泊数量/个 | 年均变化率/(m · a <sup>-1</sup> ) | 上升湖泊数量/个 | 年均上升率/(m · a <sup>-1</sup> ) | 下降湖泊数量/个 | 年均下降率/(m · a <sup>-1</sup> ) |
|------------------------|--------|------------------------------|----------|------------------------------|----------|------------------------------|
| > 500                  | 12     | 0.017                        | 10       | 0.023                        | 2        | -0.017                       |
| [ 200,500 ]            | 25     | 0.008                        | 16       | 0.021                        | 9        | -0.015                       |
| [ 100,200 )            | 33     | 0.010                        | 20       | 0.025                        | 13       | -0.014                       |
| [ 50,100 )             | 52     | 0.005                        | 31       | 0.017                        | 21       | -0.011                       |
| [ 10,50 )              | 141    | -0.002                       | 64       | 0.017                        | 77       | -0.018                       |
| [ 1,10 )               | 210    | -0.001                       | 80       | 0.026                        | 130      | -0.017                       |

水位上升湖泊总面积(33 422 km<sup>2</sup>)远大于水位下降湖泊总面积(10 732 km<sup>2</sup>),而且 83% 的面积大于 500 km<sup>2</sup> 的湖泊水位均为上升。绝大多数水位下降湖泊年变化率低于 0.01 m/a(图 3),这表明青藏高原湖泊水量在持续上涨。其中,水位上升最快的和下降最快的湖泊中,面积大于 500 km<sup>2</sup> 分别是阿其克库勒湖(0.061 m/a)和鄂陵湖(-0.026 m/a), [ 200,500 ] km<sup>2</sup> 分别是勒斜武担错(0.059 m/a)和吴如错(-0.035 m/a), [ 100,200 ] km<sup>2</sup> 分别是托素湖

(0.097 m/a)和振泉湖(-0.024 m/a), [ 50,100 ] km<sup>2</sup> 分别是错达日玛(0.039 m/a)和朝阳湖(-0.037 m/a), [ 10,50 ] km<sup>2</sup> 分别是荷花湖(0.085 m/a)和八松措(-0.081 m/a), [ 1,10 ] km<sup>2</sup> 分别是冲果错(0.151 m/a)和郭扎错(小)(-0.063 m/a)。综合来看,青藏高原湖泊在 2018—2021 年间总体水位明显上升,其中大型湖泊水位上升趋势明显,中型湖泊水位上升平缓,小型湖泊水位呈微弱下降。

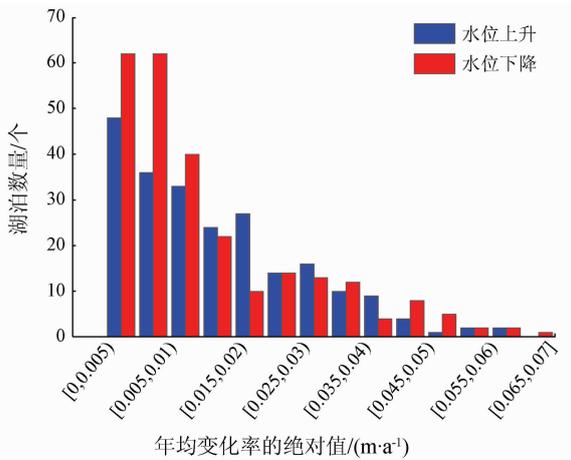


图3 青藏高原湖泊水位变化趋势统计

Fig. 3 Histogram of lake level change trends of the lakes on the Qinghai-Tibet Plateau

### 3.2 不同流域的湖泊水位变化趋势

为了更好地了解湖泊水位变化的空间分布特征,本研究将按照柴达木流域、黄河源流域、雅鲁藏布江流域、印度河流域、内高原流域等流域对青藏高原湖泊水位变化情况进行分析,流域范围如图2所示。

1) 柴达木流域。该流域内监测到的18个湖泊中,有10个湖泊水位呈上升趋势,集中分布于流域北部,年均上升率为0.024 m/a。其余8个湖泊水位呈下降趋势,多集中于流域南部,昆仑山脉北麓地区,年均下降率为-0.009 m/a。上升湖泊总面积为673 km<sup>2</sup>,下降湖泊总面积为315 km<sup>2</sup>。流域内水位上升最快的湖泊为托素湖(0.097 m/a),下降最快为库水浣(-0.006 m/a)。柴达木流域监测到的面积最大的冬给措纳湖(241 km<sup>2</sup>)水位变化率为0.035 m/a。

2) 长江源流域。该流域内监测到的35个湖泊主要分布于长江源地区,其中的23个湖泊水位呈上升趋势,年均上升率为0.017 m/a。其余12个湖泊水位呈下降趋势,多靠近山麓,年均下降率为-0.005 m/a。上升湖泊总面积为277 km<sup>2</sup>,下降湖泊总面积为325 km<sup>2</sup>。流域内水位上升最快的湖泊为亚莫错根(0.048 m/a),下降最快为日九错(-0.013 m/a)。其中监测到的面积最大的叶鲁苏湖(202 km<sup>2</sup>)水位变化率为-0.009 m/a。

3) 青海湖流域。该流域内监测到的2个湖泊,青海湖与都兰湖水位均呈上升趋势,年均上升率为0.015 m/a,上升湖泊总面积为4391 km<sup>2</sup>。流域内监测到的面积最大的青海湖(4348 km<sup>2</sup>)水位变化率为0.028 m/a。

4) 黄河源流域。该流域内监测到的15个湖泊

中9个湖泊水位呈上升趋势,集中于下游,年均上升率为0.025 m/a;其余6个湖泊水位呈下降趋势,位于上游,年均下降率为-0.012 m/a;上升湖泊总面积为121 km<sup>2</sup>,下降湖泊总面积为1204 km<sup>2</sup>。流域内水位上升最快的湖泊为苦海(0.050 m/a),下降最快为鄂陵湖(-0.026 m/a),同时与鄂陵湖相邻的扎陵湖水位也呈下降趋势(-0.007 m/a)。

5) 雅鲁藏布江流域。该流域内监测到的18个湖泊中的7个湖泊水位呈上升趋势,年均上升率为0.027 m/a。其余11个湖泊水位呈下降趋势,多分布于上游地区,年均下降率为-0.015 m/a。上升湖泊总面积为71 km<sup>2</sup>,下降湖泊总面积为93 km<sup>2</sup>。流域内水位上升最快的湖泊为冲果错(0.151 m/a),下降最快为八松错(-0.081 m/a)。监测到的湖泊中面积最大的多庆错(49 km<sup>2</sup>)水位变化率为0.015 m/a。

6) 印度河流域。该流域监测到的18个湖泊中的9个湖泊水位呈上升趋势,年均上升率为0.015 m/a。其余9个湖泊水位虽然呈下降趋势,但年均下降率为-0.008 m/a。上升湖泊总面积为826 km<sup>2</sup>,下降湖泊总面积为610 km<sup>2</sup>。流域内水位上升最快的湖泊为台错(0.027 m/a),下降最快为阿永布错(-0.015 m/a)。印度河流域监测到的面积最大的班公错(671 km<sup>2</sup>)水位变化率为0.008 m/a。

7) 内高原流域。该流域包含羌塘高原、可可西里地区(图4),自然环境恶劣、气候干燥,是青藏高原最大的内流区,湖泊众多。该流域监测到的349个湖泊中的153个湖泊水位呈上升趋势,年均上升率为0.021 m/a。其余196个湖泊水位呈下降趋势,年均下降率为-0.017 m/a。上升湖泊总面积为19571 km<sup>2</sup>,下降湖泊总面积为6854 km<sup>2</sup>。流域内水位上升最快的湖泊为荷花湖(0.084 m/a),下降最快为向阳湖(-0.067 m/a)。内高原流域监测到的面积最大的色林错(2300 km<sup>2</sup>)水位变化率为0.019 m/a。①内高原北部流域<sup>[2]</sup>区域主要为可可西里地区<sup>[22]</sup>。该流域内监测到的121个湖泊中的50个湖泊水位呈上升趋势,多分布其东部和北部,年均上升率为0.019 m/a。其余71个湖泊水位呈下降趋势,多分布与西部和南部,年均下降率为-0.019 m/a。上升湖泊总面积为6127 km<sup>2</sup>,下降湖泊总面积为2240 km<sup>2</sup>。流域内水位上升最快的湖泊为荷花湖(0.084 m/a),下降最快为向阳湖(0.067 m/a)。②内高原中部流域<sup>[2]</sup>区域主要包含羌塘高原中西部、西北部地区<sup>[22]</sup>。该流域内监测到的126个湖泊中的49个湖泊水位呈上升趋势,年均上升率为0.016 m/a。其余77个湖泊水位呈下降趋势,年均下降率为-0.021 m/a。上升湖泊总面

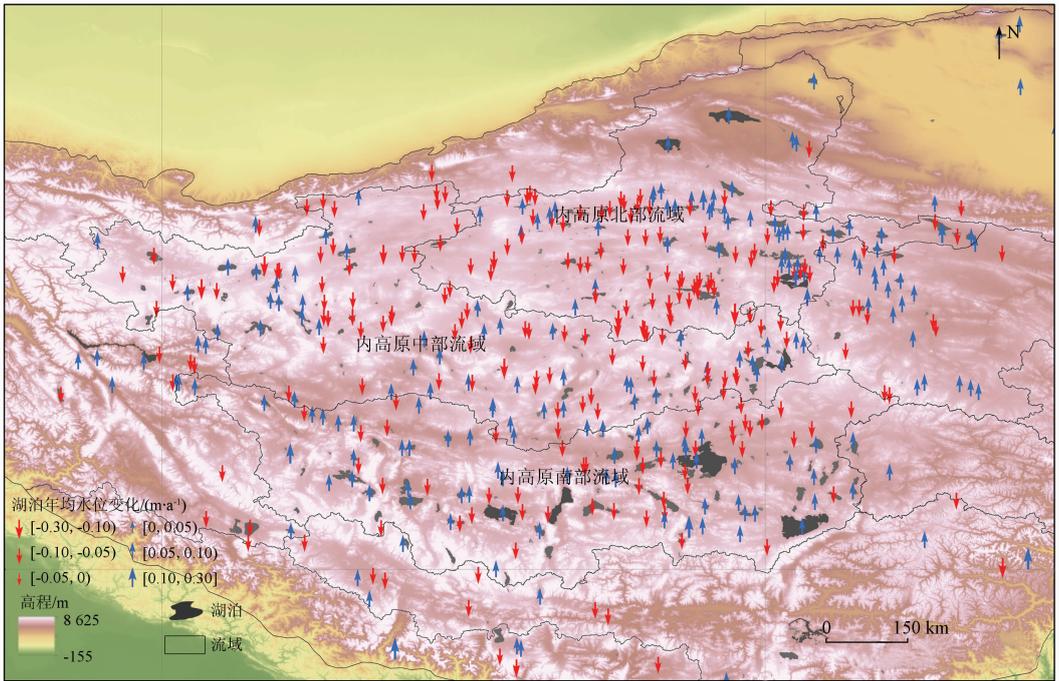


图4 内高原流域湖泊的水位变化趋势空间分布

Fig.4 Distribution of lake level change trends of the lakes in the Inner Plateau

积为 3 816 km<sup>2</sup>, 下降湖泊总面积为 1 825 km<sup>2</sup>。流域内水位上升最快的湖泊为加穷湖(0.043 m/a), 下降最快为郭扎错(小) (-0.063 m/a)。③内高原南部流域<sup>[22]</sup> 区域为羌塘高原南部地区<sup>[22]</sup>。该流域内监测到的 102 个湖泊中的 54 个湖泊水位呈上升趋势, 年均上升率为 0.029 m/a。其余 48 个湖泊水位呈下降趋势, 年均下降率为 -0.012 m/a。上升湖泊总面积为 9 628 km<sup>2</sup>, 下降湖泊总面积为 2 789 km<sup>2</sup>。流域内水位上升最快的湖泊为错雄拉则(0.047 m/a), 下降最快为查尔康错 (-0.039 m/a)。

水位变化率, 除黄河源流域湖泊水位明显下降外, 青藏高原各流域湖泊水位呈上升趋势, 其中柴达木流域与内高原南部流域湖泊水位上升显著。值得注意的是, 各流域水位呈下降趋势的湖泊多分布于山麓与上游, 即流域内海拔相对较高的地区。同时, 较多小型湖泊水位呈下降趋势, 以内高原中部和北部流域地区最明显。雅鲁藏布江流域统计湖泊总面积小, 且未获取羊卓雍措的湖泊水位数据, 故该流域变化趋势暂不确定。另外, 怒江、塔里木和澜沧江流域未能获得水位信息暂不予讨论。

总体来看(图 5 和表 4), 综合湖泊面积与湖泊

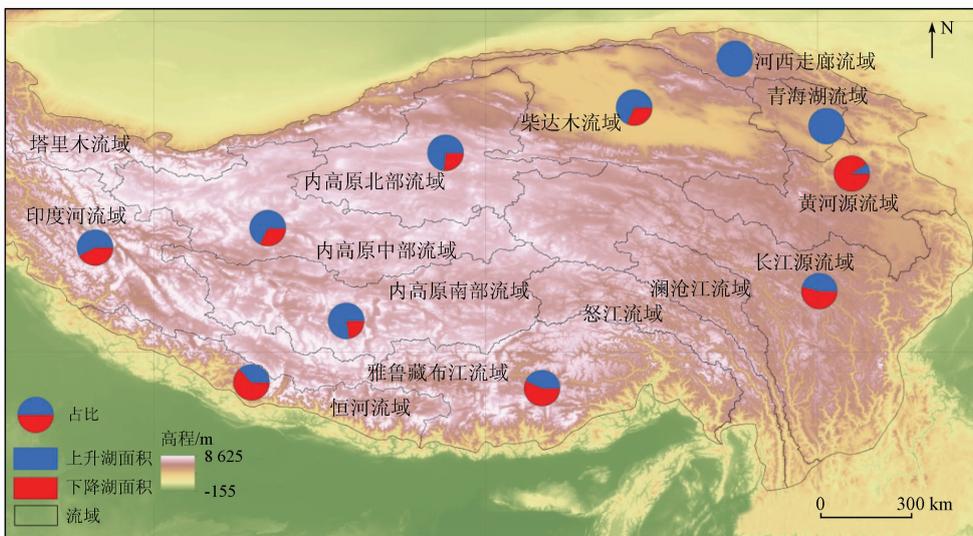


图5 各流域湖泊水位不同变化趋势占比

Fig.5 Proportion of different changing trends of lake level in each basin

表 4 青藏高原各流域湖泊的水位变化趋势统计(2018—2021 年)

Tab.4 Lake level change trends of the lakes of each basin in the Qinghai – Tibet Plateau(2018—2021)

| 流域      | 湖泊数量/个 | 上升湖泊数量/个 | 年均上升率/(m·a <sup>-1</sup> ) | 上升湖泊总面积/km <sup>2</sup> | 下降湖泊数量/个 | 年均下降率/(m·a <sup>-1</sup> ) | 下降湖泊总面积/km <sup>2</sup> |
|---------|--------|----------|----------------------------|-------------------------|----------|----------------------------|-------------------------|
| 柴达木流域   | 18     | 10       | 0.024                      | 673                     | 8        | -0.009                     | 315                     |
| 长江源流域   | 35     | 23       | 0.017                      | 277                     | 12       | -0.005                     | 325                     |
| 黄河源流域   | 15     | 9        | 0.025                      | 121                     | 6        | -0.012                     | 1 204                   |
| 青海湖流域   | 2      | 2        | 0.015                      | 4 391                   | 0        | —                          | —                       |
| 雅鲁藏布江流域 | 18     | 7        | 0.027                      | 71                      | 11       | -0.015                     | 93                      |
| 印度河流域   | 18     | 9        | 0.015                      | 826                     | 9        | -0.008                     | 610                     |
| 内高原北部流域 | 121    | 50       | 0.019                      | 6 127                   | 71       | -0.019                     | 2 240                   |
| 内高原中部流域 | 126    | 49       | 0.016                      | 3 816                   | 77       | -0.021                     | 1 825                   |
| 内高原南部流域 | 102    | 54       | 0.029                      | 9 628                   | 48       | -0.012                     | 2 789                   |
| 河西走廊流域  | 3      | 3        | 0.031                      | 612                     | 0        | —                          | —                       |
| 恒河流域    | 7      | 3        | 0.054                      | 29                      | 4        | -0.017                     | 50                      |

### 3.3 典型湖泊水位变化特征

通过结合前人研究及地区重点,与本文的湖泊面积分级、流域分区的分类标准,选取纳木错、色林错、西金乌兰湖、多格错仁与格仁错作为典型湖泊,并对其水位变化情况进行了分析(图 6)。纳木错(内高原南部, > 500 km<sup>2</sup>)湖泊水位在 2018—2021 年间,季节性变化明显,且 2020 年秋季水位显著上升;但近 3 a 内水位仅微弱上升。色林错(内高原南部, [200, 500) km<sup>2</sup>)2018 年 10 月—2020 年 10 月

水位上升 1 m,呈现上升趋势。西金乌兰湖(内高原北部, [200, 500) km<sup>2</sup>)2018 年 10 月—2020 年 10 月水位上升 0.6 m,湖泊水位呈现上升趋势的同时,同年水位的波动范围也在不断扩大。多格错仁(内高原北部, [200, 500) km<sup>2</sup>)水位变化较为稳定,略有下降趋势。格仁错(内高原南部, [100, 200) km<sup>2</sup>)湖泊水位下降趋势明显,季节性水位下降 0.6 m,2018 年 10 月—2021 年 4 月期间水位下降达 1 m。

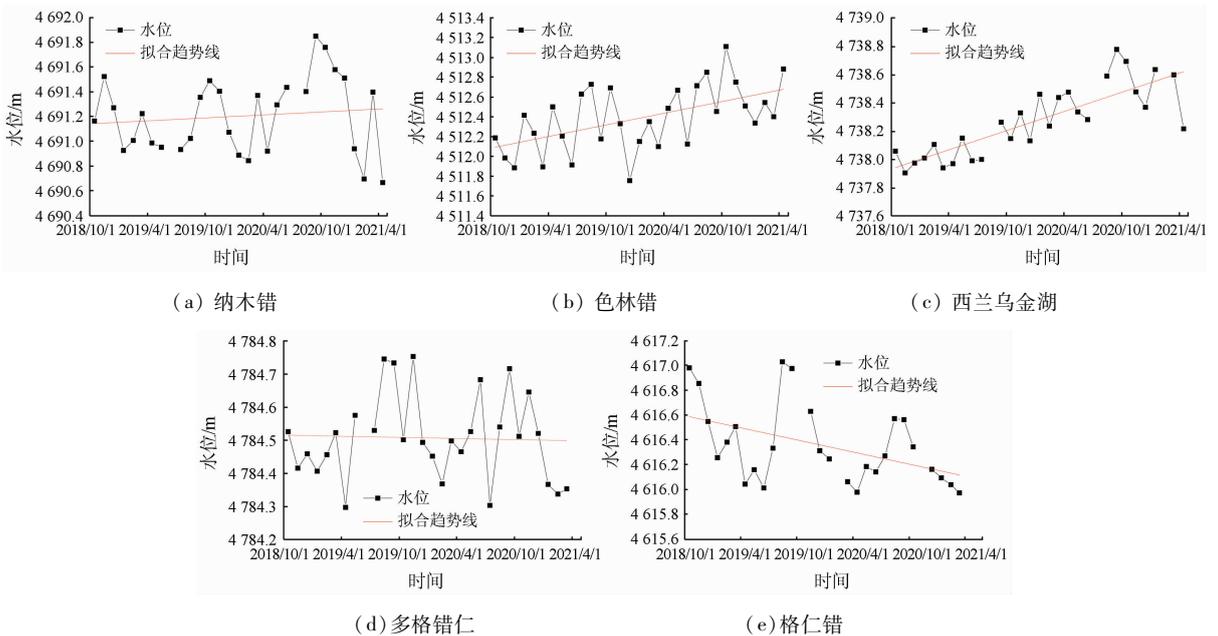


图 6 典型湖泊 2018—2021 年水位变化

Fig.6 Changes of water level of typical lakes from 2018 to 2021

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

监测结果表明,2018 年 10 月—2021 年 4 月,青藏高原湖泊水位总体呈上升趋势。大型湖泊水位上

升明显,中型湖泊水位上升平缓,小型湖泊水位略呈下降趋势。研究表明,降水对湖泊水量增加贡献占 74%,冰川、冻土与积雪消融占 26%<sup>[23]</sup>。相对于大中型湖泊,小型湖泊的冰川融水补给十分有限。因此,在青藏高原降水增多<sup>[24]</sup>的背景下,气温持续升高<sup>[25]</sup>导致冰川融水增加与湖泊蒸发增强,可能是大

中型湖泊水位上升,而小型湖泊水位呈微弱下降的原因。

#### 4.2 结论

本文基于水面掩模处理、水位高程提取、水位信息处理等方法,利用 ICESat-2 卫星 ATL08 产品对青藏高原地区湖泊水位进行动态监测。受卫星观测数据的限制,仅实现了对青藏地区 473 个面积大于  $1 \text{ km}^2$  的湖泊进行较高频次(月-季度)监测,所监测湖泊数量多于前人,并使用 Hydroweb 及 G-REALM 水位产品进行交叉验证,证实本文水位序列精度较高,弥补了青藏高原湖泊水位监测数据在时空方面的不足,为高原湖泊动态监测提供了水位变化的最新信息。

本文采用了 ICESat-2 卫星成功发射以来的最新数据,监测了近 3 a 间青藏高原湖泊的水位变化。未来将持续采用该卫星数据高精度动态监测青藏高原湖泊水位变化。同时也将进一步融合更多卫星测高数据,以期实现对整个青藏高原面积大于  $1 \text{ km}^2$  的湖泊进行全面动态监测,监测青藏高原湖泊的水量变化,更好地支撑全球气候变化研究和区域水资源评价。

**志谢:** 感谢廖静娟老师、吴艳红老师和陈嘉明博士对本研究的指导与帮助!

#### 参考文献 (References):

- [1] Zhang Q, Liu C L, Xu C Y, et al. Observed trends of annual maximum water level and streamflow during past 130 years in the Yangtze River basin, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 324(1-4): 255-265.
- [2] Wan W, Long D, Hong Y, et al. A lake data set for the Tibetan Plateau from the 1960s, 2005, and 2014[J]. *Scientific Data*, 2016, 3: 160039.
- [3] 高乐,廖静娟,刘焕玲,等. 卫星雷达测高的应用现状及发展趋势[J]. *遥感技术与应用*, 2013, 28(6): 978-983.  
Gao L, Liao J J, Liu H L, et al. Applying status and development tendency of satellite Radar altimeter [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013, 28(6): 978-983.
- [4] Hwang C, Cheng Y S, Han J, et al. Multi-decadal monitoring of lake level changes in the Qinghai-Tibet Plateau by the TOPEX/Poseidon-family altimeters: Climate implication [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(6): 446.
- [5] Gao L, Liao J, Shen G. Monitoring lake-level changes in the Qinghai-Tibetan Plateau using Radar altimeter data (2002—2012) [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2013, 7(1): 073470.
- [6] Song C, Huang B, Ke L, et al. Seasonal and abrupt changes in the water level of closed lakes on the Tibetan Plateau and implications for climate impacts [J]. *Journal of Hydrology*, 2014(514): 131-144.
- [7] Chen J, Liao J. Monitoring lake level changes in China using multi-altimeter data (2016—2019) [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125544.
- [8] 姜卫平,褚永海,李建成,等. 利用 ENVISAT 测高数据监测青海湖水位变化[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2008(1): 64-67.  
Jiang W P, Chu Y H, Li J C, et al. Water level variation of Qinghai Lake from altimetric data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008(1): 64-67.
- [9] 赵云,廖静娟,沈国状,等. 卫星测高数据监测青海湖水位变化[J]. *遥感学报*, 2017, 21(4): 633-644.  
Zhao Y, Liao J J, Shen G Z, et al. Monitoring the water level changes in Qinghai Lake with satellite altimetry data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(4): 633-644.
- [10] 吴红波,陈艺多. 联合 Landsat 影像和 ICESat 测高数据估计青海湖湖泊水量变化[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(5): 7-15, 22.  
Wu H B, Chen Y D. Estimation of lake water storage change of Qinghai Lake based on the ICESat satellite altimetry data and Landsat satellite imageries [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020, 31(5): 7-15, 22.
- [11] 廖静娟,薛辉,陈嘉明. 卫星测高数据监测青藏高原湖泊 2010 年—2018 年水位变化[J]. *遥感学报*, 2020, 24(12): 1534-1547.  
Liao J J, Xue H, Chen J M. Monitoring lake level changes on the Tibetan Plateau from 2000 to 2018 using satellite altimetry data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(12): 1534-1547.
- [12] Neuenschwander A, Pitts K. The ATL08 land and vegetation product for the ICESat-2 mission [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019(221): 247-259.
- [13] Abdalati W, Zwally H J, Bindschadler R, et al. The ICESat-2 laser altimetry mission [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, 98(5): 735-751.
- [14] Markus T, Neumann T, Martino A, et al. The ice, cloud, and land elevation satellite-2 (ICESat-2): Science requirements, concept, and implementation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 190: 260-273.
- [15] Li G Y. Earth observing satellite laser altimeter data processing method and engineer practice [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(12): 1691.
- [16] Pekel J F, Cottam A, Gorelick N, et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes [J]. *Nature*, 2016, 540(7633): 418-422.
- [17] Grill G, Lehner B, Thieme M, et al. Mapping the world's free-flowing rivers [J]. *Nature*, 2019, 569(7755): 215-221.
- [18] Birkett C M, Reynolds C A, Deeb E J, et al. G-REALM: A lake/reservoir monitoring tool for water resources and regional security assessment [C]//American Geophysical Union Fall Meeting, 2018.
- [19] Cretaux J F, Jelinski W, Calmant S, et al. SOLS: A lake database to monitor in the near real time water level and storage variations from remote sensing data [J]. *Advances in Space Research*, 2011, 47(9): 1497-1507.
- [20] Yamazaki D, Ikeshima D, Sosa J, et al. MERIT Hydro: A high-resolution global hydrography map based on latest topography dataset [J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(6): 5053-5073.

- [21] Cooley S W, Ryan J C, Smith L C. Human alteration of global surface water storage variability[J]. *Nature*, 2021, 591 (7848): 78 – 81.
- [22] Luo S, Song C, Zhan P, et al. Refined estimation of lake water level and storage changes on the Tibetan Plateau from ICESat/ICESat – 2[J]. *Catena*, 2021, 200: 105177.
- [23] Zhang G Q, Yao T D, Shum C K, et al. Lake volume and groundwater storage variations in Tibetan Plateau's endorheic basin[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(11): 5550 – 5560.
- [24] Yang K, Wu H, Qin J, et al. Recent climate changes over the Tibetan Plateau and their impacts on energy and water cycle: A review [J]. *Global and Planetary Change*, 2014, 112: 79 – 91.
- [25] Chen B X, Zhang X Z, Tao J, et al. The impact of climate change and anthropogenic activities on alpine grassland over the Qinghai – Tibet Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 189: 11 – 18.

## ICESat – 2 data – based monitoring of 2018—2021 variations in the water levels of lakes in the Qinghai – Tibet Plateau

MA Shanmu<sup>1,2</sup>, GAN Fuping<sup>3</sup>, WU Huaichun<sup>1,2</sup>, YAN Bokun<sup>3</sup>

(1. *State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China*; 2. *School of Ocean Sciences, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China*; 3. *China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China*)

**Abstract:** The variation in the water levels of lakes is an important indicator for the study of changes in climate and ecological environment and water resources rating. It was previously difficult for altimetry satellites to monitor small and medium – sized lakes, but the newly launched ICESat – 2 satellite can improve the monitoring comprehensiveness and precision of lakes' water levels. Based on the data coverage of ICESat – 2 satellite land observation products, the high – precision dynamic monitoring of water levels was conducted for 473 lakes covering an area greater than 1 km<sup>2</sup> in the Qinghai – Tibet Plateau from October 2018 to April 2021. The spatio – temporal variations of water levels of these lakes were analyzed from three aspects: the overall variations in the water levels of lakes in the Qinghai – Tibet Plateau, the basin – scaled and regional variations in the water levels of lakes, and the monthly or quarterly variation trends of water levels of typical lakes. The study results are as follows. In the past three years, the water levels of lakes in the Qinghai – Tibet Plateau continuously rose, with an average annual rate of variation of 0.013 m/a. The water levels of large, medium – sized, and small lakes rose significantly, rose gently, and dropped slightly, respectively. In terms of spatial distribution, the water levels of lakes in each basin generally showed an upward trend, and most of the lakes with declining water levels had relatively high elevations. During the monitoring period, the water level of Siling Co Lake rose by 1 m and that of Kering Tso Lake declined by 1 m. This study provides the latest monitoring data on the water levels of some lakes on the Qinghai – Tibet Plateau, which are conducive to the study of dynamic variation monitoring of lakes.

**Keywords:** lake level; spatio – temporal variation; ICESat – 2 satellite; Qinghai – Tibet Plateau

(责任编辑: 张 仙)