

何明琴¹ 金双根^{1,2} 张志杰² 郭孝祖¹

利用 ICESat-2 激光测高监测和评估鄱阳湖水位变化特征

摘要

ICESat-2 卫星搭载了先进的光子计数激光测高仪,可实现对内陆中大型湖泊水位动态变化监测。本文利用 ICESat-2 卫星 2018—2020 年逐月的 ATL13 全球内陆水体数据估计和分析鄱阳湖水位变化特征,利用鄱阳湖湖口、星子和康山水文站实测数据进行验证和误差修正,并结合各测站水位数据、降雨量数据分析鄱阳湖水位动态变化及其成因。结果表明:1) 鄱阳湖年内水位变化剧烈,具有明显的季节变化规律,6—10 月为高水位期,其他月份为低水位期,水位高峰期出现在 7—9 月,总体水位呈上升趋势。2) ICESat-2 测高水位与实测水位相关性 R^2 为 0.846 以上,经过误差修正后相关系数高达 0.974。湖口站、星子站和康山站的均方根误差(RMSE)分别为 1.660、1.073 和 0.836 m,经过误差修正重新计算后,三站 RMSE 分别为 0.663、0.659 和 0.440 m,其测量精度提升约 1 m。3) 鄱阳湖水位变化与降雨量高度相关,1—2 月和 10—12 月降雨量较少,为枯水期,水位下降;3—10 月降雨量增多,为丰水期,水位上涨;降雨主要集中在 7—9 月,对应水位高峰期。

关键词

ICESat-2; 测高卫星; 鄱阳湖; 水位监测; 降雨量

中图分类号 P228.5; P332

文献标志码 A

收稿日期 2022-04-29

资助项目 中科院先导 A 专项课题(XDA2304 0100); 遥感科学国家重点实验室开放基金(OFSLRSS202111)

作者简介

何明琴,女,硕士生,研究方向为水资源环境遥感与应用.1283069401@qq.com

金双根(通信作者),博士,教授,主要从事卫星导航、环境遥感和空间行星探测及应用.sgjin@nuist.edu.cn

0 引言

鄱阳湖是中国第一大淡水湖,也是中国第二大湖,是长江流域的一个过水性、吞吐型、季节性重要湖泊,是我国重要的生态功能保护区,是世界自然基金会划定的全球重要生态区,承担着调洪蓄水、调节气候、降解污染等多种生态功能^[1]。湖泊水位变化能在一定程度上揭示湖泊受气候变化与人类活动影响的程度,也是水资源管理、抗旱抗旱、生态环境科学管理等基础依据^[2-3],因此对其进行连续动态水位变化监测在调节长江水位、区域水资源管理与应用、鄱阳湖生态管理等方面有着重大的研究意义。

传统湖泊水位监测主要是通过建立人工水文站进行连续长时间观测,不仅耗时耗力,而且在一些交通不便的湖泊进行人工观测困难很大,常导致数据缺失,也不能及时共享。近年来,随着激光测高技术的不断提高,空间对地观测技术为陆表生态水文过程的连续性周期内动态监测提供了有效的数据源,具备了全天候、连续性、高精度和大尺度的监测特点^[4-5]。目前,越来越多的测高产品相继出现,从最初的 TOPEX/Poseidon(T/P)系列到 ENVISAT、Jason1/2/3、Sentinel-3A、HY-2A/2B 等星载高度计数据均已用于湖库水位监测。莫德丽等^[6]利用 Jason-2(SGDR)测高数据对洞里萨湖使用不同算法提高了测高数据监测精度;何飞等^[7]指出 Jason-2(GDR)原始测高数据不能直接用于洪泽湖、高邮湖、洞庭湖水位监测,因此利用概率密度函数方法(CPDF)提高测高数据精度;Dettmering 等^[8]利用 ENVISAT 测高卫星获取南美潘塔纳尔湿地水位,并计算得出水位时间序列的均方根误差约为 0.40 m。上述测高数据时空分辨率较低,难以满足对我国内陆中大型湖泊水位变化进行大范围有效动态监测的要求。

2018 年,美国航空航天局发射的“冰、云和陆地高程”2 号卫星(Ice, Cloud and Land Elevation Satellite, ICESat-2)配有先进地形激光测高系统(Advanced Topographic Laser Altimeter System, ATLAS),可实现对中大型湖泊水位动态变化的高精度大范围监测。Xu 等^[9]利用 Landsat 影像和 ICESat-2 数据监测 1984—2018 年美国 Mead 湖湖泊水位和水量的年变化,研究得出其年水位、水量估算值与实测值吻合较好, RMSE(均方根误差)分别为 1.06 m 和 0.36 km³;孙伟等^[10]利用 ICESat-2 卫星测高数据分析太湖水位变化,得出 ATL13 测高水位与太湖实测水位月变化趋势基本一致,两者相关系数达 0.96 以上;吴红

1 南京信息工程大学 遥感与测绘工程学院, 南京, 210044

2 中国科学院上海天文台, 上海, 200030

波等^[11]基于 ICESat-2/ATLAS 测高数据分析了青海湖湖泊水位变化,进一步评估了其对于湖泊水位监测的精度与应用潜力;Zhao 等^[12]结合 ICESat-2 激光测高仪和 CryoSat-2 雷达测高仪数据对 2010—2020 年期间纳木错湖水位进行研究,结果表明 ICESat-2 的标准差(SD)(0.089 5 m)低于 CryoSat-2 (0.255 6 m),ICESat-2 测量不确定度显著降低。

因此,利用测高卫星数据对湖泊、河流等水域的水位监测,相较于传统水位观测方法在一定程度上可以提高时效、弥补数据的缺失,但对于我国内陆中大型湖泊,利用新型单光子激光测高数据对其进行水位监测的研究较少。本文利用 2018—2020 年逐月 ICESat-2/ATLAS 测高数据对我国鄱阳湖水位进行估计,结合水文站观测数据进行精度验证与误差修正,定量分析水位动态变化特征与变化趋势,利用降雨量数据分析水位变化原因,为区域水资源管理与应用和鄱阳湖生态管理提供有效支撑和决策参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

鄱阳湖又称鄱湖,位于江西省北部,面积 3 960 km²,介于 115°47′~116°45′E,28°22′~29°45′N 之间。鄱阳湖流域地貌北部以平原为主,南部以山区

(赣南山区)为主,中部(赣中丘陵山区)为过渡区。日照充足,光能资源丰富。降水相对较少,地面径流较少,但河川径流较多,水资源丰富^[13]。研究区位置如图 1 所示。

1.2 数据源

美国激光卫星 ICESat-2 于 2018 年 9 月 15 日发射,时间分辨率为 10 d。ICESat-2 首次将单光子探测技术引入地球高程探测,极大地提高了地形探测的数据获取率。由于采用光子计数体制,激光器的单脉冲能量仅为 40~120 μJ,在同样系统功耗下,载荷设计了 6 个波束,激光重复频率高达 10 kHz,足印间距仅为 0.7 m,从而可实现星下 6 个条带的连续探测。表 1 为 ICESat-1 与 ICESat-2 主要参数对比。

本研究利用 ICESat-2/ATLAS 所发布的 ATL13 Version003 内陆水体高度数据集,可从美国地球数据研究中心(<https://search.earthdata.nasa.gov/search>)免费下载。该数据集包含了沿轨道的高度信息以及水体的属性特征数据,共选取了 55 期经过鄱阳湖的 ATL13 重复轨道数据,从而提取了鄱阳湖 2018 年 10 月至 2020 年 11 月间重复轨道日期的湖泊水位(激光脚点分布如图 2 所示)。使用的鄱阳湖矢量边界可从国家基础地理信息中心免费获取,用于对激光测高数据进行边界裁剪。水文观测站点水

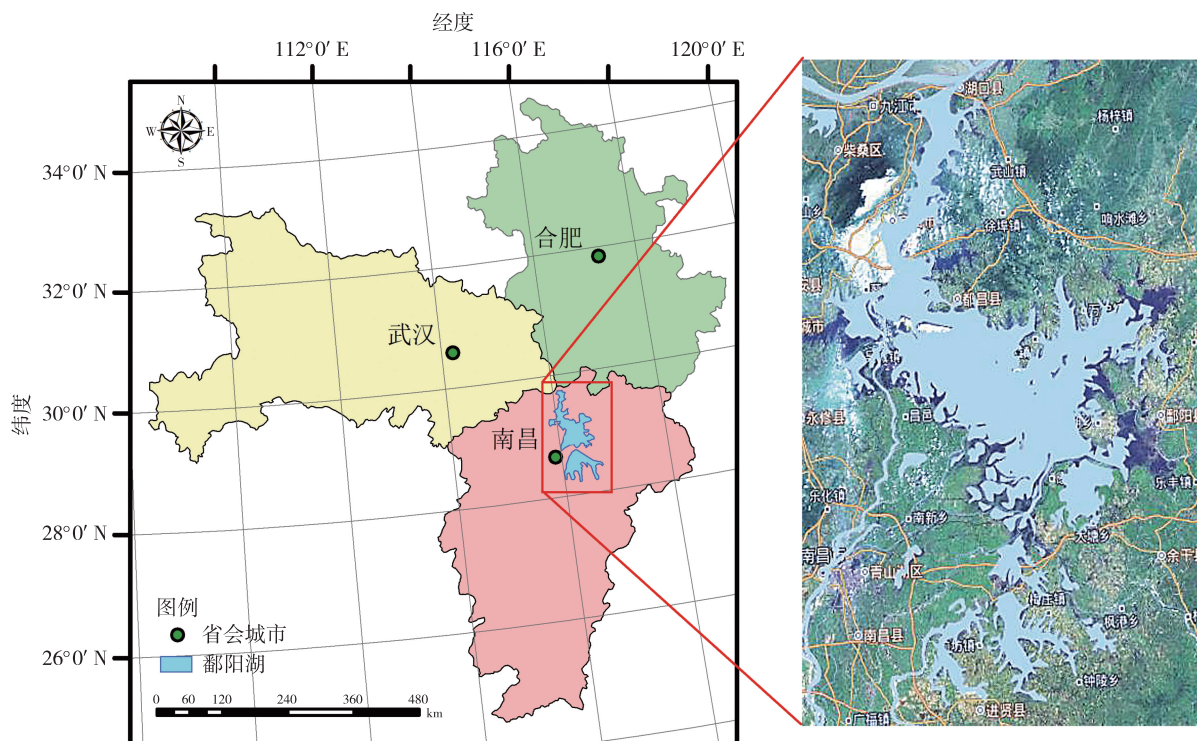


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location map of the study area

表 1 ICESat-1 与 ICESat-2 主要参数对比^[14-15]
Table 1 Comparison of ICESat-1 and ICESat-2 parameters^[14-15]

参数	ICESat-1	ICESat-2
高度计	GLAS	ATLAS
运行时间	2003—2009 年	2018 至今
轨道高度/km	600	500
轨道倾角/(°)	94	92
轨道周期/d	8/91	91
脉冲能量/mJ	50	0.2~1.2
脉冲重复频率/Hz	40	10 000
脉冲宽度/ns	4	1
波长/nm	1 064/532	532
波束/个	1	6
光斑间隔/m	167	0.7
光斑直径/m	70	17
单次测距标称精度/cm	<10	2.3

位数据和降雨量数据来自于江西省水利厅和江西省水文局,观测站水位取对应测高卫星获取日期的日平均水位。

1.3 研究方法

1.3.1 基于 ICESat-2 湖泊水位提取

利用 ICESat-2 激光雷达数据提取湖泊水位的算法流程如图 3 所示.总体技术流程主要有从测高数据集中(ATL13)读取相应的属性数据、空间位置叠加分析、异常激光数据筛选与剔除和湖泊水位高程统计计算 4 个部分.输入湖泊矢量边界数据,主要为后面的空间位置判断、提取位于湖泊内的水位激光脚点服务。

1)激光测高数据相关属性读取:ICESat-2 的测高产品数据集数据均以 H5 格式对外发布.借助 MATLAB 编程软件从中批量读取所有激光脚点的相关属性,包括经度、纬度、成像时间、大地高、参考椭球面高度等重要信息。

2)水域内激光脚点位置确定:根据所读取的激光脚点经纬度信息,结合湖泊水域边界信息,通过空间位置分析,最终确定并提取位于湖内的激光脚点数据。

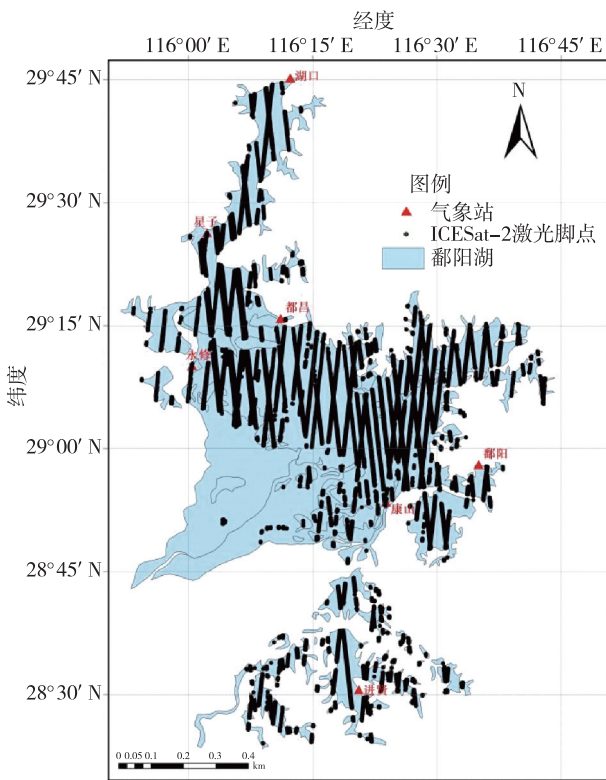


图 2 鄱阳湖 ICESat-2 激光脚点与水文站分布

Fig. 2 Distribution of ICESat-2 laser footprints and hydrological stations in Poyang Lake

3)异常激光脚点筛选与剔除:根据所提取的湖泊中的激光脚点数据,由于数据可能受环境的影响,可能存在高程异常点,需要将其筛选并剔除.本文将选择出来的数据使用式(1)—(2)进行周期内每个高程值与高程均值的差值大于 2.5 倍中误差的高程点剔除,取剩余点高程均值为提取的湖泊测高平均水位^[16].由于测高数据与水文观测站(吴淞基准面)参考基准面不一致,将其统一转换至大地水准面为基准的高程值。

$$H_{ICESat2-g} = H_{ICESat2-o} - \eta, \tag{1}$$

$$D_i = |H_{ICESat2-gi} - X| - 2.5 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_{ICESat2-gi} - X)^2}{n}}. \tag{2}$$

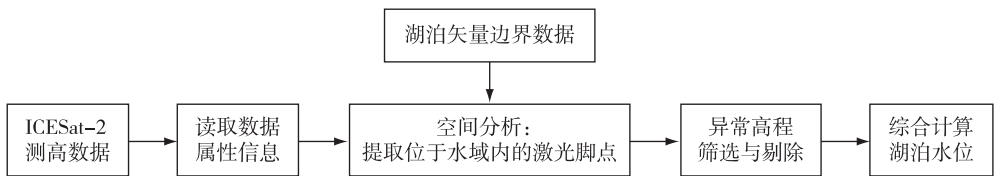


图 3 ICESat-2 激光雷达数据湖泊水位提取流程

Fig. 3 Processes of water level extraction from ICESat-2 LiDAR data

式中: $H_{\text{ICESat2-g}}$ 为提取的湖泊水位高程值; $H_{\text{ICESat2-o}}$ 为 EGM2008 大地水准面相对于参考椭球面高度 (大地水准面高); η 为 EGM2008 大地水准面相对于吴淞基准面的参考系统转换常数; $H_{\text{ICESat2-gi}}$ 为单个周期内位于湖泊内 i 点的高程值, $i = 1, 2, \dots, n, D_i > 0$ 时剔除该点, 否则保留; $\bar{H}$ 为周期内平均高程值; n 为周期内高程点数。

4) 湖泊平均水位提取: ICESat-2 为 6 条带探测方式 (gt1l, gt1r, gt2l, gt2r, gt3l, gt3r), 通过异常值剔除后, 取周期内每条轨道的有效激光脚点均值作为该轨道的估测水位高度, 然后再取周期内所有有效轨道的均值作为该日的水位高度估测值。具体如式 (3)~(4) 所示:

$$H_{\text{gtx}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m H_{\text{ICESat2-gi}}, \quad (3)$$

$$H_{\text{平均}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_{\text{gtx}}. \quad (4)$$

式中: H_{gtx} 为周期内每条轨道的平均水位高度 ($x = 1l, 1r, 2l, 2r, 3l, 3r$); m 为周期内每条轨道保留下来的高程点数; $H_{\text{平均}}$ 为最终提取的湖泊平均水位高度; n 为有效轨道数。

经过水域内激光脚点选取、异常值筛选与剔除之后, 获得 35 期有效日期内湖面范围的有效波束个数、总的激光脚点和剔除异常水位后有效激光脚点

相关信息如表 2 所示。

1.3.2 水位误差修正

大多情况下, 将沿轨道平均水位按时间组合即可得到湖泊水位序列, 但直接将平均测高高程获取水位序列的方法存在较多的残差, 水位序列的提取精度偏低。为此, 本文对实测数据与测高数据进行最小二乘估计, 并在一定程度上加入系统转换误差, 即可求解出经过误差修正的真实水位:

$$H_{\text{修正}} = H + \Delta H + C. \quad (5)$$

式中: H 为测高卫星估计得到的水位高程; ΔH 为测高数据与实测数据的最小二乘估计偏差; C 为测高数据与水文测站间参考系统转换偏差。

本文利用式 (6) 计算参考系统转换偏差:

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |h_{ai} - h_{bi}|. \quad (6)$$

式中: n 为观测次数; h_{ai} 为水文站实测水位; h_{bi} 为测高水位。

1.3.3 精度评价体系

均方根误差 (RMSE) 常被用于数字地图与地理空间数据点的位置精度评价^[17]。本文中湖泊水位估计的均方根误差计算公式为

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_i - G_i)^2}. \quad (7)$$

表 2 鄱阳湖有效激光脚点筛选

Table 2 Screening of effective laser footprints in Poyang Lake

获取日期	有效波束	有效激光脚点/ 湖内激光脚点	数据有效 率/%	获取日期	有效波束	有效激光脚点/ 湖内激光脚点	数据有效 率/%
2018-10-23	6	3 897/4 128	94.40	2018-12-10	4	184/192	95.83
2019-01-22	6	4 563/4 738	96.31	2019-02-06	6	366/377	97.08
2019-03-07	2	1 24/138	89.86	2019-04-05	6	9 522/9 958	95.62
2019-05-08	6	5 472/5 838	93.73	2019-05-21	6	1 706/1 765	96.66
2019-06-19	6	1 253/1 324	94.64	2019-07-22	6	1 322/1 374	96.22
2019-08-03	6	2 115/2 243	94.29	2019-08-20	6	2 610/2 775	94.05
2019-09-05	6	1 280/1 343	95.31	2019-09-18	6	3 918/4 059	96.53
2019-10-21	4	130/137	94.89	2019-11-06	3	52/55	94.55
2019-11-19	6	4 972/5 155	96.45	2019-12-04	6	6 976/7 124	97.92
2020-01-31	6	609/624	97.60	2020-02-04	6	4 699/4 749	98.95
2020-02-18	6	9 038/9 317	97.01	2020-03-04	4	221/224	98.66
2020-03-18	6	2 837/3 058	92.77	2020-04-06	6	1 971/2 042	96.53
2020-04-16	6	1 670/1 765	94.62	2020-05-05	6	1 127/1 169	96.41
2020-05-19	6	18 755/19 353	96.91	2020-06-03	4	3 187/3 267	97.55
2020-06-17	6	4 959/5 213	95.13	2020-07-31	6	2 264/2 331	97.13
2020-08-04	6	13 616/13 944	97.65	2020-08-17	6	12 018/12 611	95.30
2020-09-02	6	2 354/2 417	97.39	2020-10-01	6	8 464/8 906	95.04
2020-11-03	6	1 308/1 413	92.57				

式中: H_i 为周期内测高卫星综合计算的湖泊水位值; G_i 为对应获取日期内水文观测站日均水位值; i 为对比日期。

2 结果与分析

2.1 水位变化特征分析

鄱阳湖水位变化提取结果如图 4 所示, 其水位年内变化较为剧烈, 水位落差超过 10 m。2018—2020 年间水位变化较为规律, 在年际变化上, 上半年水位降低, 下半年水位上涨。2019 年均水位 13.29 m, 2020 年均水位 14.44 m, 较上一年水位增长 1.15 m。2019 年水位最低为 10.20 m (11 月 19 日), 最高为 18.25 m (7 月 22 日), 年内水位落差为 8.05 m; 2020 年水位最低为 10.68 m (2 月 4 日), 最高为 20.76 m (7 月 31 日), 年内水位落差为 10.08 m。鄱阳湖水位整体呈上升趋势。

鄱阳湖水位变化主要表现为自 5 月开始水位持续上涨, 直到 7 月达每年的最高水位, 后又急剧下降至 9 月, 10 月—次年 5 月水位变化反复交替, 总体呈现 10 月、1 月和 3 月水位上涨, 11 月、2 月和 5 月水位下降, 7—9 月为湖泊的高水位时期, 2 月前后表现为低水位期, 季节内平均水位夏季 (16.55 m) > 秋季 (13.87 m) > 春季 (13.00 m) > 冬季 (11.97 m)。鄱阳湖水位具有明显的季节变化规律。

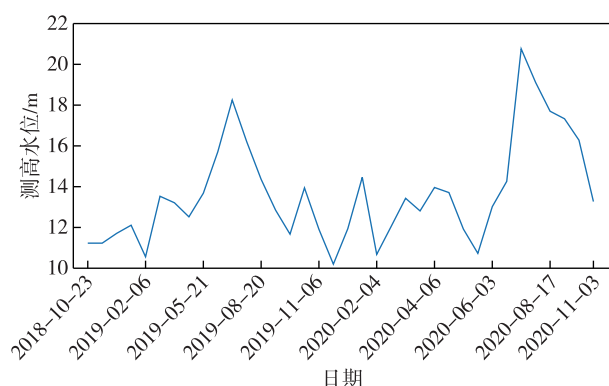


图 4 鄱阳湖水位变化序列

Fig. 4 Sequence of water level change in Poyang Lake

2.2 精度评价

受到数据获取的限制, 本文分别选用湖口、星子、康山 3 个水文站实测日均水位与 ICESat-2 测高水位数据和误差修正后的鄱阳湖水位时间序列进行对比分析 (图 5)。图 5a、c、e 分别为三站鄱阳湖 ICESat-2 水位数据和实测水位的对比验证; 图 5b、d、f 则分别表示三站经过误差修正后的水位与实测水

位的对比验证。可以看出测高水位与实测水位变化较为一致, 高水位期基本吻合, ICESat-2 能在一定精度上满足湖泊水位监测。经计算, 鄱阳湖湖口、星子、康山站实测水位与 ICESat-2 测高水位的 RMSE 分别为 1.660、1.073 和 0.836 m, 表现为康山站精度最高, 星子站次之, 湖口站最低, 实测水位与误差修正水位的 RMSE 分别为 0.663、0.659 和 0.440 m, 可见, 通过误差修正的湖泊水位序列具有更高的精度。

在低水位期, 测高卫星相较于测站高估了湖泊水位, 而在高水位期测高卫星与测站水位保持一致, 这是由于测站多建设在湖泊低洼或者湖泊边缘, 不能全面监测整个湖泊水位情况, 而测高卫星激光脚点能大范围覆盖整个湖泊, 但大多数脚点主要集中在湖泊中心, 从而表现出枯水期测高水位较高于测站。

通过对比分析测高水位与实测水位误差较大的几个观测日期, 其有效激光脚点只有几十到几百个 (如 2019 年 11 月 6 日只有 52 个), 将其少量激光脚点平均到大面积空间上作为湖泊平均水位具有一定的局限性。同时, 实测水位为观测站的日均水位, 综合反映了测站处当日蒸发、降水、灌溉等因素下的水位变化, 而测高卫星只能获取过境时刻星下点的水位高程, 从而引起较大误差。

表 3 给出了鄱阳湖的 ICESat-2 测高水位、误差修正水位与各测站实测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得出, 之后再计算均方根误差 (RMSE)。可以看出: 由于系统偏差和地形误差、激光脚点到测站间的距离偏差等的存在, ICESat-2 测高水位与各测站实测水位序列之间存在不同程度的偏差, 星子站 (2019-02-04) 的偏差最大 (5.46 m), 湖口站 (2020-01-31) 偏差为 4.22 m, 康山站 (2019-10-21) 的偏差最小 (3.41 m); 加入系统偏差之后使得两者间最大均值偏差大幅减小, 表明误差修正后的水位更能描述鄱阳湖的水位值。

图 6 为利用 ICESat-2 测高水位、误差修正水位与实测水位进行了相关性对比分析。由图 6 可知: ICESat-2 测高水位和误差修正水位, 与实测水位均有良好的相关性, 决定系数 (R^2) 均在 0.846 1 以上; 通过对比可以看出, 经过误差修正的水位与实测水位线性相关性较高, 决定系数最高为康山站的 0.974 4, 进一步说明了误差修正后的水位在较高精

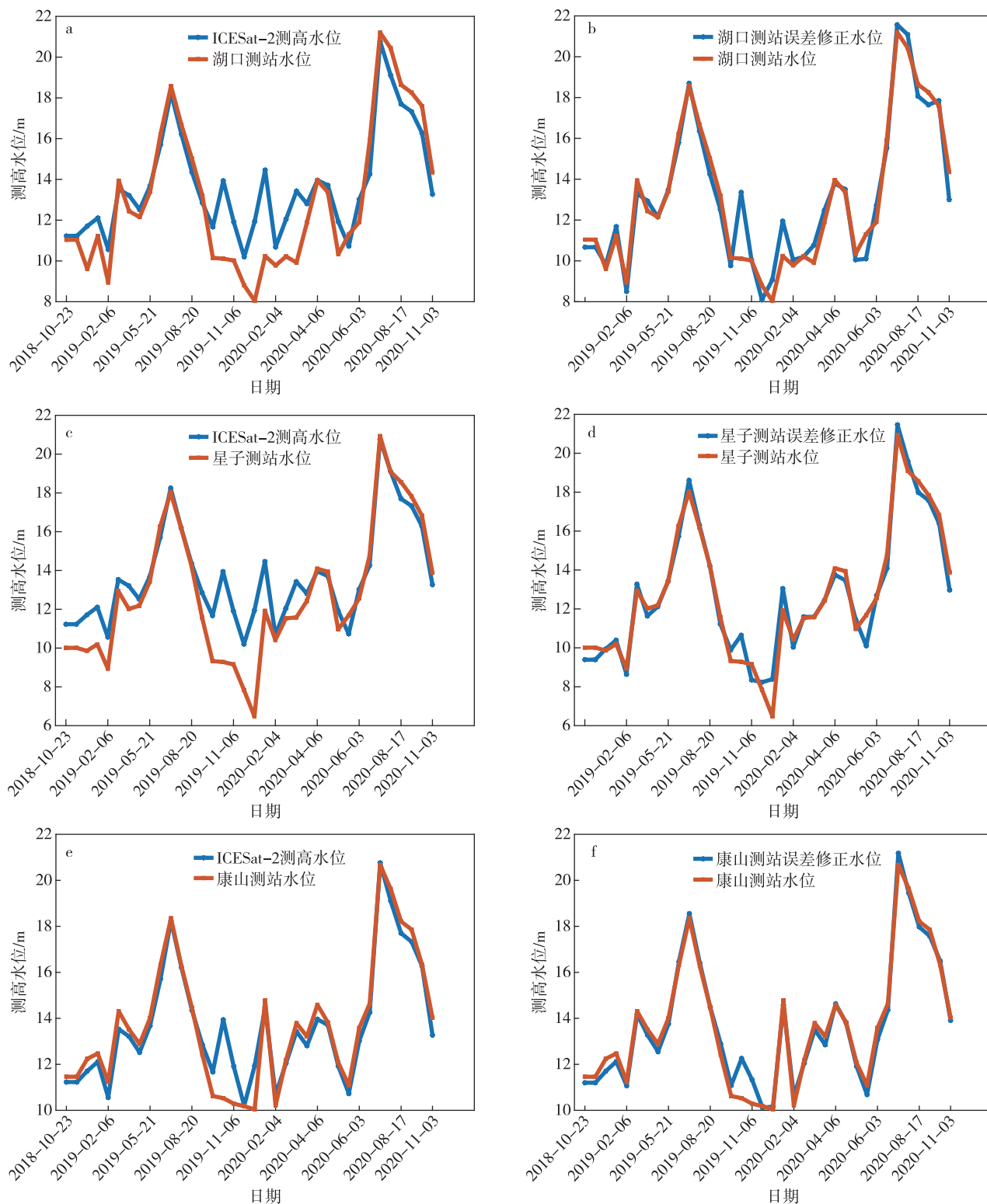


图5 鄱阳湖 ICESat-2 测高水位、误差修正水位与实测站水位对比验证

Fig. 5 Comparison and verification of water levels via ICESat-2 altimetry, error correction and station measurement in Poyang Lake

度的情况下能找出其与实测水位间的线性关系式,从而保证了 ICESat-2 测高数据对鄱阳湖水位的高精度动态监测。

2.3 误差分析与讨论

1) 异常高程值剔除不彻底、有效激光脚点数量直接影响了 ICESat-2 测高数据对湖泊水位的瞬时估

表 3 ICESat-2 测高水位、误差修正水位与
实测站水位的统计比较

Table 3 Statistical comparison of water levels between ICESat-2, error correction and station measurement in Poyang Lake

水位数据	最大均值偏差			RMSE		
	湖口	星子	康山	湖口	星子	康山
ICESat-2 测高水位	4.22	5.46	3.41	1.66	1.07	0.84
误差修正水位	1.71	1.91	1.73	0.66	0.66	0.44

计精度.受水文站数据限制与可获取影响,本文选择湖口站、星子站和康山站实测日均水位与测高水位进行对比分析(图 5),结合表 2 有效激光脚点的筛选信息,较少的有效激光脚点作为鄱阳湖水位估算时产生较大的误差,并且在较高的数据有效率下仍产生较大误差,这是由于异常值剔除不彻底造成的.激光脚点产生的噪声来源较复杂,受到自身系统、太阳背景、地形起伏、环境变化等的影响,使用单一的 n 倍中误差方法只能剔除较为明显的异常值,且对于不同数据经验系数 n 不完全一致,使得提取出的数据包含一定的噪声光子,加之测高水位为星下点瞬时水位,而侧站水位为日均水位,还有观测时间的不一致等综合影响了水位提取精度.

2) 卫星侧摆、大气散射、地形起伏等对湖面上的激光点高程精度有明显的影响.在卫星侧摆情况下,有一定坡度区域的测高精度退化往往会比较明显;同时激光传输路径上的云、气溶胶等除对激光能量有衰减外,还会因散射产生距离向的延迟效应,进而影响最终的高程测量精度,其产生的误差不能完全得到消除.

3) 坐标系统转换会存在一定误差.根据测站到激光脚点的距离及其之间的系统转换的不一致性,本文对其进行修正,根据未修正的测高数据进行精度对比发现 RMSE 从最高 1.07 m 降低至 0.44 m(表 3),观测值与实测值的相关性也得到了较大程度的提升(图 6).虽然误差修正中对系统偏差与距离进行了不同程度的修正,但并不能完全消除其影响.

4) 测高数据脚点分布、ICESat-2 激光脚点间隙、湖面波浪、湖泊类型、降雨量等都是影响 ICESat-2 测高数据估计水位精度的重要原因.通过进一步分析误差较大的测高水位与实测水位发现,主要原因是由于激光脚点主要集中于湖泊中央,并且可用测高数据量较少而造成的;湖泊水位主要受长期降雨量、人类灌溉、气候环境等因素的影响,但测高数据只能估计测量瞬时时刻的湖泊水位,受到湖面波浪与湖泊类型等的影响.

3 降雨量与水位变化关系

降雨量是影响湖泊水位的重要因素之一,通常而言,降雨量的增加必定会引起湖泊水位的上涨,因此,本文基于各测站的月降雨量、月平均水位进一步探究鄱阳湖水位动态变化,利用实测气象站点降雨量数据分析水位动态变化原因.对比月降雨量与 ICESat-2 高度计获取的月平均水位可以看出,月降雨量变化与月平均水位变化大多吻合度较高,水位呈现季节性变化.由图 7 可知:湖口站、星子站、康山站每月降雨量分别为 581、518 和 412 mm,降雨量最高月份均出现在 2020 年 7 月;湖口站、星子站、康山站每月降雨量最低分别为 8 mm(2019 年 10 月)、5 mm

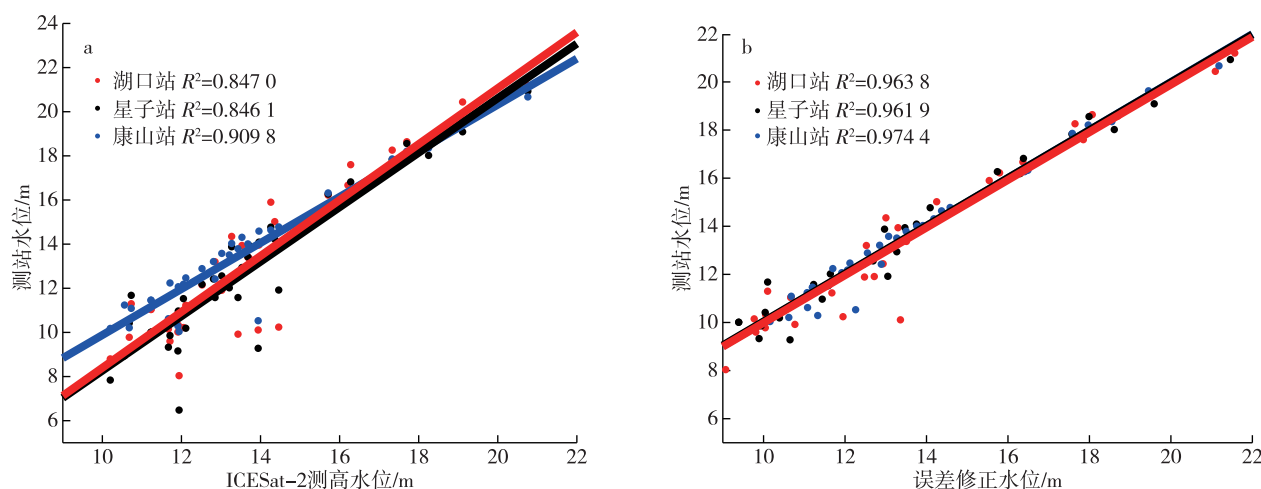


图 6 鄱阳湖 ICESat-2 测高水位、误差修正水位与实测站水位相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of water levels via ICESat-2 altimetry, error correction and station measurement in Poyang Lake

(2019 年 8 月)和 0.5 mm(2019 年 8 月);全年降雨较频繁,但在年际内均表现为 10 月—次年 2 月降雨量较少,水位下降,为枯水期;3—10 月降雨量增多,水位上涨,为丰水期;7—9 月为降水集中期,7 月为降水高峰期,对应水位最高时期.分析 2018—2020 年每月降雨量变化可知,降雨量变化与湖泊水位变化呈现较强的一致性.

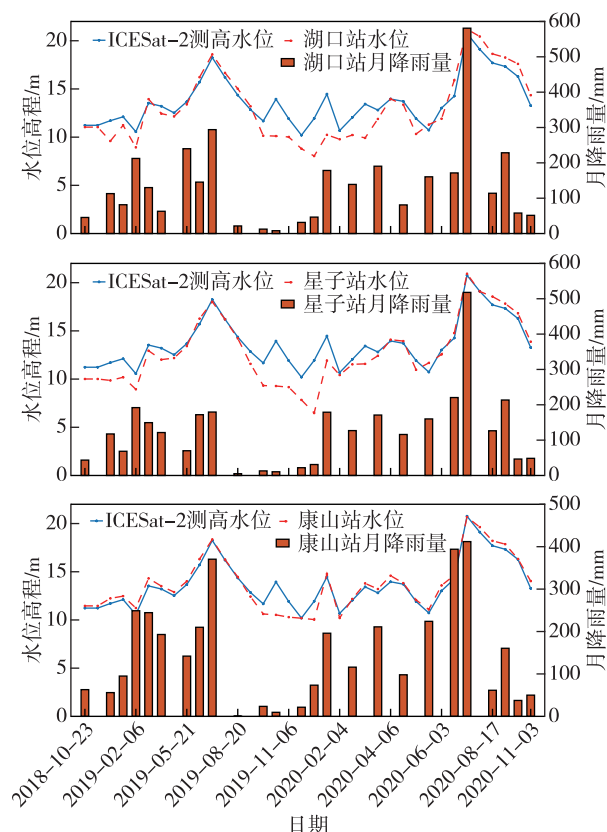


图 7 鄱阳湖 ICESat-2 测高水位与实测站降雨量统计分析
Fig. 7 Statistical analysis of ICESat-2 water level and rainfall in Poyang Lake

考虑到测高卫星时间分辨率与测高数据的可用性,其测量水位只与当日及前些日的降雨量有关.鄱阳湖面积较大,可用数据的平均水位与各个测站平均降雨量有关,所以本文另选取测高卫星当日及前 9 日(共 10 日)的累计降雨量数据,并对 7 个气象站(湖口、星子、都昌、永修、康山、鄱阳、进贤)累计降雨量进行反距离加权平均得到最终的多测站平均降雨量.在同一时间阶段内不同的气象站也表现出不同的降雨量,因此,根据可用数据位置对气象站点进行反距离加权,从而得到最终 10 日内降雨量:

$$L_{\text{平均}} = 0.4a + 0.15b + 0.15c + 0.1d + 0.1e + 0.05f + 0.05g. \quad (7)$$

式中: $L_{\text{平均}}$ 为距离加权多测站平均降雨量; a, b, c, d, e, f, g 分别表示康山、永修、都昌、湖口、星子、进贤和鄱阳气象站的 10 日内累计降雨量.

如图 8 所示,经过计算得到的距离加权多测站平均降雨量与湖泊水位变化高度吻合,除了与单测站间具有同样的季节性特征外,更加凸显水位大幅增长点处于较高降雨量时期,每一个时期高降雨量值都对应着水位的变化峰值,表明利用多测站距离加权平均降雨量更能客观、科学地反映湖泊的水位变化特征,揭示湖泊水位涨落变化的原因,降雨量变化的多少是湖泊水位动态变化的重要指示.

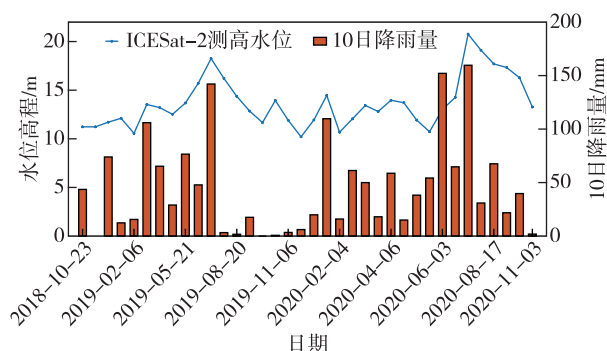


图 8 鄱阳湖 ICESat-2 测高水位与多测站加权平均降雨量统计分析

Fig. 8 Statistical analysis of ICESat-2 water level and multi-station weighted average rainfall in Poyang Lake

4 结束语

星载高度计监测湖泊水位具有一定的优势,可在一定程度上增加湖泊水位的动态监测.本文选取 2018—2020 年的 ICESat-2 测高数据,并进行误差修正,对比了修正前后两者间获取鄱阳湖水位的精度差异,根据水文站与气象站实测数据,监测鄱阳湖水位动态变化并探究其变化的主要原因.主要结论如下:

1) 鄱阳湖年内水位变化剧烈,水位落差超过 10 m,具有明显的季节变化规律,6—10 月为高水位期,其他月份为低水位期,水位高峰期出现在 7—9 月,总体水位呈上升趋势.

2) 测高卫星监测鄱阳湖水位结果与实测结果较一致,测量精度主要受有效激光脚点数量和选择、激光脚点与测站分布位置、湖泊水位获取方式等的影响.不同测站间误差修正水位测量精度湖口站 RMSE 从 1.66 m 提高至 0.66 m,星子站 RMSE 从 1.07 m 提高到 0.66 m,康山站 RMSE 从 0.84 m 提高到

0.44 m.各测站测高水位、误差修正水位与实测水位间具有较高的线性相关性,误差修正水位决定系数均在 0.96 以上,表明通过误差修正的水位与实测水位较一致。

3) 鄱阳湖水位变化与降雨量变化具有较强的相关性,10 月—次年 2 月降雨量较少,水位下降,为枯水期;3—10 月降雨量增多,水位上涨,为丰水期;7—9 月为降水集中期,7 月为降水高峰期,对应水位最高时期。通过本研究计算的多测站距离加权平均降雨量能更客观、科学地揭示水位变化的原因,为防灾减灾提供重要的数据支撑。

测高卫星对湖泊的水位监测较方便和快捷,下一步可以结合多种测高卫星对其进行水位动态监测,提高覆盖度与时间分辨率,从而进一步提高监测精度;加入多种误差修正以提高测量精度;结合使用波形数据提高测高精度。另外,降雨量是影响水位动态变化的主要原因之一,但水位变化还与湖泊蒸散量、地表径流、人类灌溉等相关,在今后的研究中可做进一步探讨。

参考文献

References

- [1] 杨智翔,柯劲松,周航宇.鄱阳湖水利工程地理信息管理系统研制[J].地理信息世界,2018,25(4):90-94
YANG Zhixiang, KE Jinsong, ZHOU Hangyu. Development of geographic information management system for Poyang Lake hydraulic engineering[J]. Geomatics World, 2018, 25(4): 90-94
- [2] 张奇.鄱阳湖生态环境治理[J].科学,2021,73(3):5-8,4
ZHANG Qi. Ecological and environmental restoration of Poyang Lake[J]. Science, 2021, 73(3): 5-8, 4
- [3] 胡安焱.流域气候变化和人类活动对内陆湖泊影响的分析[J].干旱区资源与环境,2007,21(5):1-5
HU Anyan. Analysis on the influence of climate change and the human activities on inland lake[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(5): 1-5
- [4] 刘琪,李琼,魏加华,等.星载高度计水位提取方法研究进展[J].南水北调与水利科技,2021,19(2):281-292
LIU Qi, LI Qiong, WEI Jiahua, et al. Research progress of water level extraction methods based on satellite altimeter[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(2): 281-292
- [5] Ren X N, Jia L, Sha J X, et al. Study on development of satellite altimetry technique and its application to inland water[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(11): 64-72
- [6] 莫德丽,赵银军,陈国清,等. Jason-2 测高卫星对洞里萨湖水位监测[J]. 南宁师范大学学报(自然科学版), 2020, 37(4): 119-126
MO Deli, ZHAO Yinjun, CHEN Guoqing, et al. Evaluation of Jason-2 altimetry satellite for monitoring water level of Tonle Sap Lake [J]. Journal of Nanning Normal University (Natural Science Edition), 2020, 37 (4): 119-126
- [7] 何飞,刘兆飞,姚治君. Jason-2 测高卫星对湖泊水位的监测精度评价[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(3): 494-504
HE Fei, LIU Zhao-fei, YAO Zhi-jun. Evaluation of the monitoring accuracy of lake water level by the Jason-2 altimeter satellite [J]. Journal of Geo-Information Science, 2020, 22(3): 494-504
- [8] Dettmering D, Schwatke C, Boergens E, et al. Potential of ENVISAT radar altimetry for water level monitoring in the Pantanal Wetland[J]. Remote Sensing, 2016, 8(7): 596
- [9] Xu N, Ma Y, Zhang W H, et al. Monitoring annual changes of lake water levels and volumes over 1984 – 2018 using Landsat imagery and ICESat-2 data [J]. Remote Sensing, 2020, 12(23): 4004
- [10] 孙伟,金建文,李国元,等. 激光测高卫星 ICESat-2 监测太湖水位精度评价[J]. 测绘科学, 2021, 46(11): 6-11
SUN Wei, JIN Jianwen, LI Guoyuan, et al. Accuracy evaluation of laser altimetry satellite ICESat-2 in monitoring water level of Taihu Lake[J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46(11): 6-11
- [11] 吴红波,王宁练,郭忠明. ICESat-2/ATLAS 测高数据在青海湖湖泊水位估计中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(5): 11-18, 26
WU Hongbo, WANG Ninglian, GUO Zhongming. Application of ICESat-2/ATLAS altimetry data to the estimation of the Qinghai Lake water level[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32(5): 11-18, 26
- [12] Zhao H, Xu R, Qiao G. Comparison of cryosat-2 and ICESat-2 on water level monitoring of Nam Co Lake[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2021, 43: 527-532
- [13] 朱鸿章.“流金淌银”鄱阳湖:都昌水产发展新业态纪实[J]. 江西农业, 2015(8): 24-25
- [14] Narine L L, Popescu S, Neuenschwander A, et al. Estimating aboveground biomass and forest canopy cover with simulated ICESat-2 data[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 224: 1-11
- [15] Neuenschwander A, Pitts K. The ATL08 land and vegetation product for the ICESat-2 mission[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 221: 247-259
- [16] 郭金运,孙佳龙,常晓涛,等. 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[J]. 测绘学报, 2010, 39(3): 221-226
GUO Jinyun, SUN Jialong, CHANG Xiaotao, et al. Water level variation of Bosten Lake monitored with TOPEX/

Poseidon and its correlation with NIN03 SST [J]. Acta
Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39 (3) :
221-226

[17] Munyaneza O, Wali U G, Uhlenbrook S, et al. Water level

monitoring using radar remote sensing data: application to
Lake Kivu, Central Africa [J]. Physics and Chemistry of
the Earth, Parts A/B/C, 2009, 34 (13/14/15/16) :
722-728

Monitoring and assessing water level variation in Poyang Lake by ICESat-2 altimetry

HE Mingqin¹ JIN Shuanggen^{1,2} ZHANG Zhijie² GUO Xiaozu¹

1 School of Remote Sensing & Geomatics Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

2 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

Abstract The photon-counting laser altimeter on the Ice, Cloud and Land Elevation 2 (ICESat-2) satellite offers a solution for tracking the dynamic water level variations in medium and large inland lakes. We utilize the monthly ATL13 global inland water data of ICESat-2 satellite from 2018 to 2020 to estimate and analyze the water level change in Poyang Lake. The measured data from Hukou, Xingzi and Kangshan hydrological stations are used for verification and error correction, and the water level and rainfall data of each station are combined to analyze the dynamic variation of Poyang Lake water level and reveal the underlying drivers. The results show that, the annual water level of Poyang Lake varied sharply with obvious seasonal variations and an overall upward trend; the high water level period was from June to October, which peaked from July to September. The linear correlation coefficient of water levels between ICESat-2 and measured data is above 0.846, rising to 0.974 after error correction. The Root Mean Square Error (RMSE) is 1.660 m, 1.073 m, and 0.836 m for Hukou, Xingzi, and Kangshan stations, respectively; error correction and recalculation can decrease the RMSE to 0.663 m, 0.659 m, and 0.440 m for Hukou, Xingzi, and Kangshan stations, respectively, enhancing the measurement accuracy by nearly one meter. The variation of water level in Poyang Lake is highly correlated with the change of rainfall, the reduced precipitation during periods from January to February and October to December corresponds to the declining water level in dry season, while the increased rainfall from March to October corresponds to the water level rise in wet season, and the precipitation concentration period from July to September aligns with the peak of water level in Poyang Lake.

Key words ICESat-2; satellite altimetry; Poyang Lake; water level monitoring; rainfall