

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0088

文京川, 赵红莉, 蒋云钟, 等. 卫星测高数据筛选方法研究——以 Jason 3 数据和洪泽湖为例[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(3): 194-200, 208. WEN J C, ZHAO H L, JIANG Y Z, et al. Research on the quality screening method for satellite altimetry data——take Jason 3 data and Hongze Lake as an example[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(3): 194-200, 208. (in Chinese)

# 卫星测高数据筛选方法研究

——以 Jason 3 数据和洪泽湖为例

文京川<sup>1,2,3</sup>, 赵红莉<sup>2</sup>, 蒋云钟<sup>2</sup>, 陈德清<sup>4</sup>, 纪刚<sup>1,2,3</sup>

(1. 兰州交通大学 测绘与地理信息学院, 兰州 730070; 2. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038; 3. 甘肃省地理国情监测工程实验室, 兰州 730070; 4. 水利部 水利信息中心, 北京 100053)

**摘要:** 针对卫星测高数据质量在湖库地区不稳定问题, 提出一种基于数据质量评价、筛选提取水位的方法。使用 Jason 3 卫星测高数据, 选取数据质量不稳定的洪泽湖地区为例进行实验。结果表明, 该方法在改善数据精度方面明显优于传统方法, 提取的测高水位与实测水位间相关系数从传统方法的 0.11 提高到 0.59, 均方根误差也从 2 m 减少到 0.5 m, 使得 Jason 3 数据用于湖库水位监测时具有较高的可信度。此外, 对于那些数据质量不好的周期, 提取的水位精度普遍不高, 基于数据质量评价结果将它们舍去, 可进一步提高了整体的监测精度, 相关系数可提高到 0.9, 均方根误差减少到 0.19 m, 这对于为无资料湖库构建精确的库容曲线具有重要意义。

**关键词:** 遥感监测; 测高卫星; 数据质量; 水位变化; 湖库

**中图分类号:** TP791 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)03-0194-07

## Research on the quality screening method for satellite altimetry data

——take Jason 3 data and Hongze Lake as an example

WEN Jingchuan<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Hongli<sup>2</sup>, JIANG Yunzhong<sup>2</sup>, CHEN Deqing<sup>4</sup>, JI Gang<sup>1,2,3</sup>

(1. Faculty of Geomatics of Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

3. Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China;

4. Information Center of the Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China)

**Abstract:** This paper proposes a method based on data quality evaluation and extraction of water level to improve the steadiness of data quality of satellite altimetry in lakes and reservoirs area. We used Jason 3 satellite altimetry data and performed a case study in Hongze Lake area where the altimetric data quality was unsteady. Results showed that the accuracy of this method was obviously better than that of the traditional methods. The correlation coefficient between the satellite derived water level and the gauged water level increased from 0.11 to 0.59, and the root mean square error was reduced from 2 m to 0.5 m, making the Jason 3 data more reliable for water level monitoring of lakes and reservoirs. In addition, for those periods with poor data quality, since the water level accuracy is generally low, they can be discarded based on the results of data quality evaluation. This can further improve the overall monitoring accuracy. The correlation coefficient can be increased to 0.9, and the root mean square

收稿日期: 2018-01-22 修回日期: 2018-03-30 网络出版时间: 2018-04-23

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180420.1722.005.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0405803); 中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项(WR0145B012017; WR0145B272016)

Funds: National Key Research and Development Program of China(2017YFC0405803); Fundamental Research Funds for China Institute of Water Resources and Hydropower Research(WR0145B012017; WR0145B272016)

作者简介: 文京川(1992-), 男, 四川宜宾人, 主要从事水资源遥感监测研究。E-mail: wenjingchuan@126.com

通讯作者: 赵红莉(1973-), 女, 安徽蚌埠人, 教授级高级工程师, 主要从事水资源遥感监测方面研究。E-mail: zhaohl@iwhr.com

error was reduced to 0.19 m. This is of great significance to building a precise capacity curve for the ungauged lakes and reservoirs.

**Key words:** remote sensing monitoring; altimeter satellite; data quality; water level changes; lakes and reservoirs

及时获取湖泊、水库的水位、水量和水体分布变化,是水资源监测中的重要内容之一。以往主要是采用地面定点(水文站)定时观测的方式监测水位变化,地面监测方式需要配套大量基础设施,耗费大量人力物力,对于偏远地区无法大规模布点,并且日常监测效果还会受到水文站上报频次的影响。为满足日益精细化的水资源管理需求,迫切需要扩大水资源监测范围、提升监测标准,而仅靠地面监测手段无法满足对时效性、广泛性的要求<sup>[1]</sup>。卫星测高技术的发展和快速发展,为湖库水位监测提供了一种全新的方法<sup>[2]</sup>。由于其具有周期性重访、监测成本低、监测范围可覆盖部分无资料地区等特点,在一定程度上可填补部分地面监测。

20世纪70年代,卫星测高技术起初仅用于测量海平面和南极冰盖高度,但随着后续发射的测高卫星性能不断改善,许多学者开始尝试将其用于大型湖泊水位变化的监测并取得较好的效果<sup>[3]</sup>。1982年Brooks就将Seasat测高数据观测的湖面高程作为地面控制点用于地图的绘制。1993年Koblinsky使用Geosat测高数据实现了卫星对内陆湖泊水位变化第一次长时间监测。1994年,Birkett研究了这项技术用于内陆水域的可能性,并使用Geosat卫星测高数据监测了多个湖泊的水位变化。1995年他又使用TOPEX/Poseidon卫星测高数据计算了全球24个湖泊的水位变化,其中包括中国的呼伦湖。2001年Aldof等使用T/P测高数据结合JERS-1 SAR影像数据估算了Amazon湖蓄水量变化。2006年Frappart等利用T/P、ERS-2、GFO-1和Envisat卫星测高数据对亚马逊河流域4个试验区进行研究,提供了更准确的水位时变数据<sup>[4-9]</sup>。在国内,2005年褚永海利用Jason 1数据监测了呼伦湖水位变化,发现呼伦湖水位近年来呈明显下降趋势。2007年李建成等利用Envisat-1数据研究分析了长江中下游鄱阳湖、洞庭湖、太湖、巢湖等的水位变化及其与气候环境的关系。2008年姜卫平使用Envisat卫星SGDR数据,采用波形重跟踪技术对青海湖水位进行监测,结果表明对数据进行波形重定添加波形改正项可一定程度上提升监测精度。高永刚等利用T/P和Jason 1卫星的GDR和WDR数据,进行了波形重定,在提取的测高水位中添加了

波形改正项,并用小波分析得出了呼伦湖水位变化周期。2011年李均力利用ICESat/GLAS数据获取了2003-2009年间中亚地区24个典型湖泊的水位信息,分析该地区湖泊水位变化的时间过程和空间特征。2013年戴玉凤利用Landsat数据和ICESat卫星测高数据,分别对青藏高原佩枯错湖泊的面积和高程变化进行了分析,并进一步估算了湖泊2003-2009年相对水量变化。2016年赵瑞等使用ICESat、Cryosat-2测高数据,以及Landsat遥感影像获取了佩古错流域冰川、湖泊面积和高程变化,估算了水量变化并结果气象资料,研究了佩古错流域对气候的响应<sup>[10-14]</sup>。

卫星测高用于观测湖库水位的可行性和精度都已得到很好验证,但由于其设计原理和特性,地面诸多因素可影响到数据的质量,如复杂的地形可能导致数据的丢失和异常,还有风沙、强降雨天气以及水面结冰等都可能影响数据的质量和准确性<sup>[15-16]</sup>。在以往研究中,主要是利用高程均值、中误差、最大/最小水位差等指标去除异常数据,如传统的RANSAC算法、抗差最小二乘算法和3倍中误差算法,最常见的是高永刚、郭金运、以及孙佳龙等学者使用的3倍中误差算法。这类方法在数据质量稳定良好的情况效果良好,但有时异常数据占很高比例,中误差往往偏大,高程均值也已远远偏离真值,各指标不再具有约束效力。这样并不能有效去除噪声,并且还淹没掉少量存在的高精度高程点,在此时该类方法就不再适用。数据噪声的存在和质量的不稳定给卫星测高技术的大范围推广和业务化运行带来了很大困难。另外,Jason 3卫星于2016年1月发射工作,国内外还少有相应,Jason 3测高数据的质量和精度有待进一步验证。鉴于此,本文以Jason 3为数据源并选取数据质量不稳定的湖库进行水位监测实验,提出一套基于数据质量评价、筛选提取湖库水位的方法,提高Jason 3测高数据监测精度和适用性,为测高数据进一步应用到我国水资源监测体系中提供技术支撑。

## 1 数据与方法

### 1.1 实验数据

Jason 3卫星是由法国空间研究中心(CNES)、

美国宇航局 (NASA)、欧洲气象卫星组织 (EUMETSAT) 以及美国海洋和大气局 (NOAA) 等多个机构合作研制的一颗海洋测高卫星, 主要用于监测海面高度和气候变化。它是 T/P、Jason 1/2 系列卫星的延续, 采用了相同的轨道设计, 轨道周期为 10 d, 轨道高度为 1 336 km, 倾角为 66°。由 Poseidon 3B 高度计、微波辐射计 (AMR)、多普勒定轨和无线电定位组合系统接收机 (DORIS)、全球定位系统接收机 (GPS) 和激光跟踪器等五大部分构成。在 DORIS 系统上, 天线定位做了调整可联合多个潜在的发射通道作业。另外, 太阳能电池的位置模型得到优化, 使得卫星的定轨和定位更加精准。Jason 3 采用的大地水准面是 EGM96 水准面, 参考椭球体与 Jason 2 一样, 将地球定义为一个赤道半径为 6 378 1363 km、扁平率为 1/298 257 的椭球体。发射后的 9 个月里, 一直与 Jason 2 所处相同轨道, 接替了 Jason 2 的工作。在 2016 年 10 月, Jason 2 变轨到了 Jason 1 在 2009 年 2 月到 2012 年 8 月期间所处轨道, 保持了 Jason 系列同时有两颗卫星双轨道交叉运行的机制。

本文使用的是 Jason 3 卫星 2 级产品中的 GDR (Geophysical Data Record) 数据, 下载官网为: <https://www.avisio.altimetry.fr/>。它是在 60 d 内生成的延迟时间数据集, 经过了完全的验证, 包含所有的环境和地球精确校正。产品以 10 d 一个周期进行存贮, 每个周期内包含共 254 个 Pass 文件, 每个 Pass 文件大小为 5 M 左右<sup>[17]</sup>。另外, 用于精度验证的湖库实测水位数据来自地面水文站上报, 可从国家防汛抗旱指挥系统下载。研究区枯水期遥感影像为 GF-1 号卫星拍摄, 从国家卫星资源应用中心下载获取。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 湖库测高水位计算基本原理

卫星测高是在卫星上搭载微波雷达测高仪, 让测高仪上的雷达装置垂直向下发射脉冲信号, 通过测量脉冲从发射经地球表面反射再到卫星天线接收的时间, 来计算出卫星到星下点的距离, 结合卫星搭载的 GPS 定位信息计算得到海 (水、冰) 平面高度<sup>[18]</sup>。卫星测高基本原理见图 1。

根据卫星测高基本原理, 湖库测高水位计算公式<sup>[19]</sup>为:

$$h = h_{alt} - h_{ran} - h_{geoid} - c \quad (1)$$

式中:  $h$  为湖泊水位正高;  $h_{alt}$  为测高仪的椭球高;  $h_{ran}$  为测高仪的观测距离;  $h_{geoid}$  为大地水准面相对于参考椭球面高度;  $c$  为各项观测误差修正。

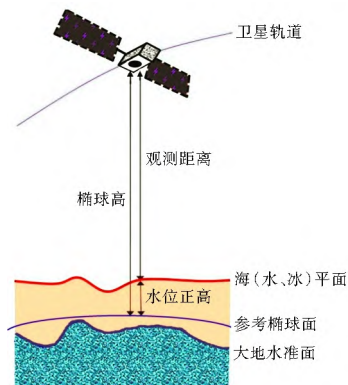


图 1 卫星测高基本原理

Fig. 1 Basic working principle of satellite altimetry

湖库水位的各项观测误差修正参照海洋数据标准处理, 但相对海面而言湖库的水面很小, 海潮、逆气压、潮压等影响可不考虑, 因此湖库水位具体的误差修正为:

$$c = i + s + p + d + w \quad (2)$$

式中各误差修正详见表 1。

表 1 误差修正项

Tab. 1 Error correction term

误差修正	中文名称	备注
$i$	电离层修正	测高卫星信号穿过电离层时, 会产生各种物理效应, 其中最主要的是折射效应, 其结果对传播信号产生延时, 对测量的影响约为 0.2~5 cm。
$s$	固体潮修正	固体潮会引起地球本体变形导致高度变化, 最多可达 50 cm。
$p$	极潮修正	极潮是指地壳对地球自转轴指向偏移的弹性相应, 极潮引起的高度误差为 0.1~25 mm。
$d$	干对流层修正	测高信号经干对流层折射率的变化使路径产生弯曲, 对对流层的影响可以分成干对流层效应和湿对流层效应, 前者引起高度上的误差约为 2.2 m。
$w$	湿对流修正	后者为 6~30 m。

### 1.2.2 测高数据编辑处理方法

从官网获取的测高数据是以二进制格式存储的, 要将原始数据转换得到湖库精确的测高水位, 需要对数据进行一系列读取转换、编辑处理和提取水位的工作<sup>[20]</sup>。经研究发现, 对于不同湖库测高数据的数据质量好坏不一, 即使对同一个湖库而言不同时期的数据质量也有所不同。因此, 本文在参照以往方法的基础上, 提出一种基于数据质量评价、筛选提取的测高数据编辑处理方法, 处理过程见图 2。

#### (1) 数据基本编辑。

使用专业软件 BRAT 读取原始测高数据, 以 Ascii 格式输出经纬度、高程、各项修正等参数。借

助 ice\_qual\_flag\_20hz\_ku、qual\_20hz\_alt\_data 等数据质量标识项保证数据系统处理过程有效,参照海洋处理标准将各修正项数值控制在有效范围内。将数据进一步导入 ArcGIS,基于经纬度信息生成高程点图层,配合经 ENVI 处理后的湖库枯水期影像剔除湖面以外的高程点。经基本编辑后,保证了测高观测的有效性,再将处理后的数据使用公式(1)和公式(2)进行计算,得到初始的水面高程值。

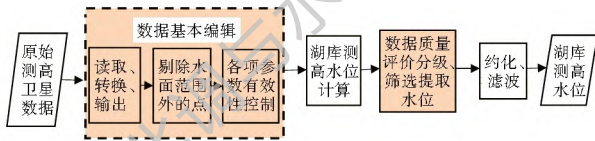


图2 测高数据编辑处理方案

Fig. 2 Altimetric data editing and processing scheme

(2) 数据质量评价分级。

提出“连续优质点群”概念,将同一周期的高程点按纬度从低到高排列,以 X 轴为点号、Y 轴为高程值,因湖库水面近似水平,数据质量较好时,各点号对应的高程值应近似在一条水平线上,数据质量

不高或不稳定时,则相反。“连续优质点群”即指纬度序号连续、高程值近乎在一条水平线上并且满足每个点与高程均值间差值不超过 0.3 m 的点群。点群至少由 3 点组成,当出现多组连续优质点群时,选中点数最多、中误差最小的点群。如果存在某一点群均值与选中点群均值近乎一致时,将两组合并生成最终选中的连续优质点群,其余的点群不予考虑,最终选中的连续优质点群应不少于 5 个点。对每一期卫星测高数据质量进行评价,最终选取的“连续优质点群”点数占周期内高程点总数比例越高,数据质量就越好。对每个周期的数据先进行质量评价,将它们分为 4 个等级,如图 3 所示,其中红色矩形框圈中的即为选中连续优质点群。评价标准如下:

- 1 级: 连续优质点群占全部数据的比例大于 66.67%。
- 2 级: 连续优质点群占全部数据的比例大于 33.33%。
- 3 级: 数据中存在少量连续优质点群。
- 4 级: 数据中没有连续优质点群。

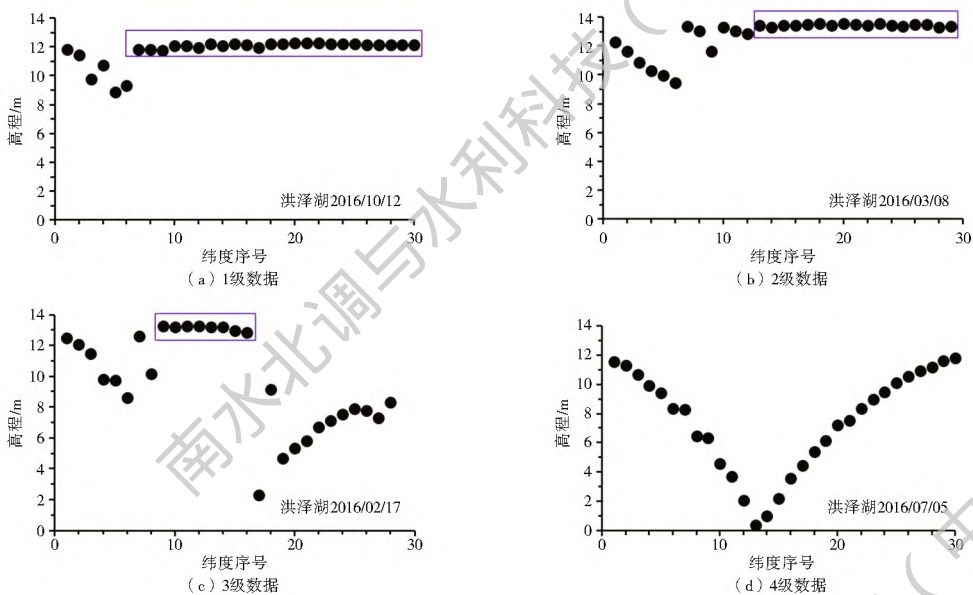


图3 数据质量分级

Fig. 3 Data quality classification

(3) 筛选提取水位。

对于 1、2、3 级数据,只保留选取的连续优质点群,将其余的高程点剔除,再将周期内的每个高程值与高程均值的差值大于 3 倍中误差的高程点剔除<sup>[21]</sup>(式(3)),取剩余点高程均值为提取的测高平均水位(式(4));对于 4 级数据,将最接近前后周期提取水位的高程值作为测高平均水位,若该值仍与前后周期水位相差甚远,则考虑直接舍去该周期数据。

$$D_i = |h_i - X| - 3 \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - X)^2}{n}} \quad (3)$$

$$H_{\text{平}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m h_i \quad (4)$$

式中:  $h_i$  为单个周期内某一高程点高程值;  $X$  为高程均值;  $n$  为该周期内高程点数,其中  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ;  $D_i$  即为各高程值与均值的差值减去三倍中误差,当  $D_i > 0$  时剔除该点,否则保留。 $m$  为经公式(3)筛选后保留下的高程点数;  $H_{\text{平}}$  即为该周期的测高

平均水位。

(4) 约化、滤波处理。

由于 Jason-3 卫星不同周期期间的同一地面轨道最大间距约为 1 km，每次测量的点位都不完全相同，所以参照文献[5]将不同周期的水位数据约化到同一参考点上。首先选取高程点数最多的周期轨迹作为参考轨道，将各周期的水位平均值  $H_{平}^1$ 、 $H_{平}^2$ 、 $H_{平}^3 \dots H_{平}^m$  依次加入大地起伏差<sup>[7]</sup>，最后根据各周期实际轨道与参考轨道的距离，将实际轨道上的湖面水位约化到参考轨道上，见图 4。

$$H_{约化}^j = H_{平}^j + (N_j - N) \quad (5)$$

式中： $H_{平}^j$  为实际轨道的平均水位值； $H_{约化}^j$  为实际轨道平均水位的约化值； $N_j$  为实际轨道均值点的大地起伏值； $N$  为参考轨道参考点的大地起伏值；其中  $j = 1, 2, 3 \dots z, z$  为观测周期数。

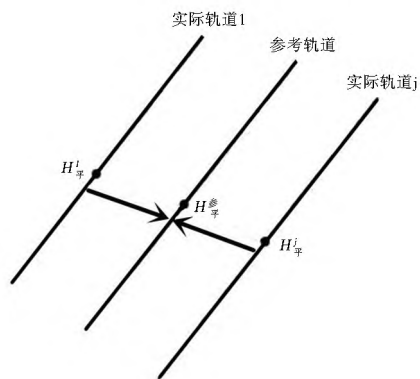


图 4 测高数据约化示意图

Fig. 4 Schematic of data reduction

经约化后得到各周期的测高水位可能还存在一些粗差，所以利用 Matlab 软件编程对数据进行高斯滤波，经上述处理后便得到湖库水位变化的时间序列。具体的高斯函数为：

$$w(\varphi) = A \exp\left[-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right] \quad r \leq R_s$$

式中： $r^2 = \varphi^2 + \lambda^2$ ； $R_s$  为搜索窗口大小的一半； $\sigma = \frac{R_s}{3}$

(这里选取的搜索窗口大小为半年)。

## 2 案例研究

### 2.1 洪泽湖水位监测

本文选取测高数据量丰富但质量不稳定的洪泽湖为研究区，分别使用传统的三倍中误差算法和本文基于数据质量筛选方法分别提取湖库水位，并利用洪泽湖尚咀水文站实测数据对监测结果进行对比分析。

洪泽湖是我国第四大浅水型湖泊，地处江苏省

淮安市洪泽县西部，在北纬  $33^\circ 06' - 33^\circ 40'$ ，东经  $118^\circ 10' - 118^\circ 52'$  之间。属平原型湖泊，湖岸线相对简单，海拔在 10 m 左右。湖区具有季风气候，四季分明，雨季多集中在 6 月 - 9 月。Jason-3 卫星地面轨迹 Pass\_240 正好扫过湖面，下载了从 2016 年 2 月至 2017 年 7 月共 52 期测高数据。地面轨迹与枯水期湖面截距约为 11 km，经编辑处理后湖面上每期测高数据平均有 29 个高程点，见图 5。

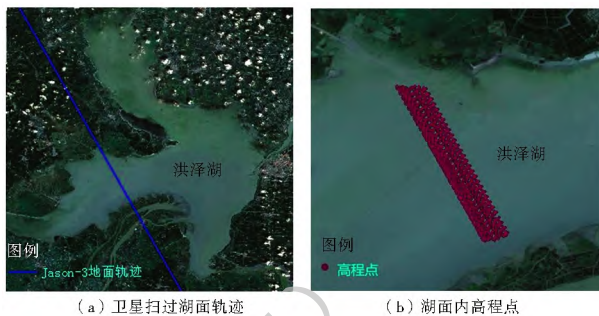


图 5 研究区示意图

Fig. 5 Schematic of study area

图 5(a) 为 Jason-3 卫星扫过枯水期洪泽湖面情况，红色线为 Pass240 地面轨迹，图 5(b) 为经编辑处理后保留下的所有高程点。经质量评价，洪泽湖 52 期数据中有 1 级数据 19 期、2 级数据 10 期、3 级数据 12 期、4 级数据 11 期，数据质量的时间分布情况见图 6。从图中可知，洪泽湖地区测高数据各时期质量不一，质量较差的 3、4 级数据分别占到 23% 和 21%，多集中在每年 6 月 - 9 月。

分别使用传统 3 倍中误差算法和基于数据质量筛选的方法提取湖面测高水位，实验结果见图 7。

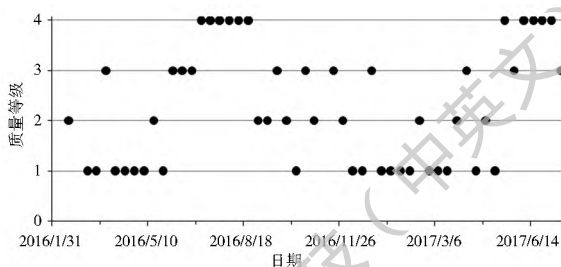


图 6 数据质量时间分布

Fig. 6 Time distribution of data quality

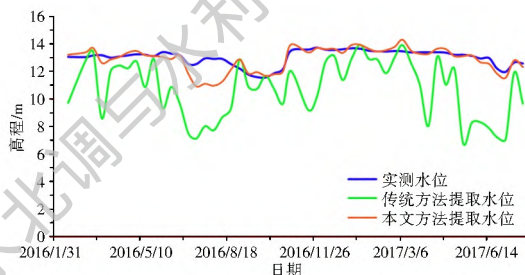


图 7 Jason-3 卫星监测洪泽湖水位变化

Fig. 7 Water level changes in Hongze Lake as monitored by Jason-3 satellite

## 2.2 实验结果分析

从图 7 可知,在洪泽湖地区传统方法提取水位整体精度较差,在数据质量好的几个周期与实测水位误差较小,但在数据质量较差时与实测水位误差达到 5 m 左右。而本文方法在改善数据精度方面明显优于传统方法,绝大部分周期数据与实测水位十分接近,误差很小且保持显著的相关性,尤其在数据质量差时与实测值也较为接近。但在极个别周期数据质量极差(大部分为 4 级数据),提取水位仍与实测水位有 1 m 左右的误差,这是由于当时卫星过境时一些地面因素对测高数据造成了极大的干扰,使得获取的所有高程点中都收到了污染。

本文方法提取的测高水位数据一方面可用于日常水位监测,填补地面实测水位不足,另一方面可用于无资料地区库容曲线的构建。基于数据质量评价

结果,在日常水位监测上,可对每一期测高水位的可信度进行评价,数据质量越高整体误差较小,可信度越高;在构建库容曲线上,随着卫星短周期重访积累了丰富测高数据,可将质量较差的 4 级甚至 3 级数据进行剔除,以提高测高水位整体精度,进一步配合遥感影像获取的面积信息构建出精确的库容曲线。如图 8 和表 2 所示,传统方法提取的水位与实测数据比较,最小差值为 0.14 m、最大差值为 6.45 m、均方根误差为 2 m、相关性系数只有 0.11,而本文方法最小差值为 0.01 m、最大差值为 1.87 m、均方根误差减小到 0.5 m、相关性系数增加到 0.59。在将洪泽湖 3、4 级数据进一步剔除后,最大、最小差值分别减小到 0.42 m 和 0.01 m、均方根误差减小到 0.19 m、相关性系数增加到 0.9,测高水位与实测数据间整体误差明显减小,相关性进一步提高,大大提高了监测精度。

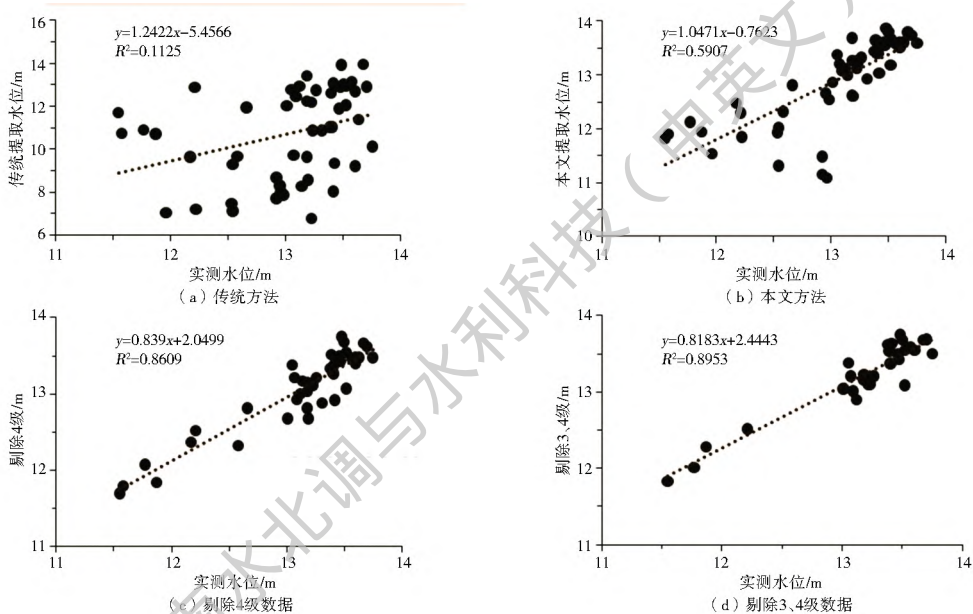


图 8 各提取结果同实测水位数据的相关性比较

Fig. 8 Comparison of correlation between each extraction result and the gauged water level

表 2 基于实测水位数据的精度评价

Tab. 2 The accuracy evaluation based on the gauged water level

评价指标	传统方法	本文方法	剔除 4 级数据	剔除 3、4 级数据
最小差值/m	0.14	0.01	0.01	0.01
最大差值/m	6.45	1.87	0.51	0.42
均方根误差/m	2.00	0.50	0.22	0.19
相关性系数	0.11	0.59	0.86	0.9

## 3 结论

本文使用 Jasonr 3 测高数据,提出一套基于数据质量评价、筛选提取湖库水位的方法。利用连续优质点群这一标准,首先进行数据质量评价,基于评价结果筛选数据,再提取湖库水位。主要结论如下。

(1) 在对数据质量全年不稳定的洪泽湖实验中,取得了最小水位差 0.01 m、最大水位差 0.42 m、均方根误差 0.19 m、与实测数据相关性达到 0.9 这样较高的监测精度,验证了 Jasonr 3 测高卫星用于湖库水位监测较高的可信度。

(2) 相较传统方法,在数据质量差、异常数据占比很大时,仍能少量存在的高精度高程点挑选保留,大大减少了与实测水位间的误差;在数据质量良好时也有一定程度改善,显著提高了整体监测精度。所以,该方法不仅适用于测高数据质量良好的湖库,也适用于数据较差或质量不一的湖库,精度更高、更具有普适性。

(3) 数据质量的评价分级对我国湖库监测有积

极意义。评价结果可对日常监测中每期测高水位的可信度进行评价,质量等级为 1、2 级的数据连续优质点占总数的 33.33% 以上,数据质量更好、可信度更高;相反,3、4 级数据可信度相对较低。此外,即便没有实测数据,基于评价结果仍可以较为精准地剔除掉质量较差的数据(3、4 级数据),使得在长时间序列上,湖库水位监测的整体精度得到大幅提升,这对于为我国无资料湖库构建库容曲线,进一步实现水位、水量的动态监测意义重大。

当然,这离测高卫星数据业务化监测我国湖库水资源的目標仍有一定差距。下一步工作中,还需要使用多种测高卫星数据,选取不同地区、不同等级大小、不同类型的湖库进行更深入的研究分析,以制定出合理高效、针对我国湖库水资源的监测方案。

#### 参考文献(References):

- [1] 褚永海,李建成,姜卫平,等.利用 Jason 1 数据监测呼伦湖水位变化[J].大地测量与地球动力学,2005,25(4):11-16. (CHU Y H, LI J C, JIANG W P, et al. Monitoring of water level variations of Hulun Lake with Jason 1 Altimetric Data [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2005, 25(4): 11-16. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1671-5942.2005.04.003.
- [2] 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),2008,33(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, 33(1): 64-67. (in Chinese)) DOI: 10.13203/j.whugis2008.01.011.
- [3] FRAPPART F, CALMANT S, CAU HOPÉ M, et al. Preliminary results of ENVISAT RA-2 derived water levels validation over the Amazon basin[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 100(2): 252-264. DOI: 10.1016/j.rse.2005.10.027.
- [4] 李建成,褚永海,姜卫平,等.利用卫星测高资料监测长江中下游湖泊水位变化[J].武汉大学学报(信息科学版),2007,32(2):144-147. (LI J C, CHU Y H, JIANG W P, et al. Monitoring level fluctuation of lakes in Yangtze River Basin by altimetry[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(2): 144-147. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1671-8860.2007.02.013.
- [5] 李景刚,李纪人,阮宏勋,等. Jason 2 卫星测高数据在陆地水域水位变化监测中的应用——以南洞庭湖为例[J].自然资源学报,2010,25(3):502-510. (LI J G, LI J R, RUAN H X, et al. Application of Jason 2 altimetry data in monitoring of continental water level fluctuations a case study in South Dongting Lake, China [J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(3): 502-510. (in Chinese)) DOI: 10.11849/zrzyxb.2010.03.015.
- [6] HWANG C, KAO Y C, TANG DAMRONGSUB N. A preliminary analysis of lake level and water storage changes over lakes baikal and balkhash from satellite altimetry and gravimetry [J]. Terrestrial Atmospheric & Oceanic Sciences, 2011, 22(2): 97-108. DOI: 10.3319/TAO.2010.05.19.01(TibXS).
- [7] 高永刚,郭金运,岳建平.卫星测高在陆地湖泊水位变化监测中的应用[J].测绘科学,2008(6):73-75,29. (GAO Y G, GUO J Y, YUE J P. Lake level variations measurement with satellite altimetry [J]. Science of Surveying and Mapping, 2008(6): 73-75, 29. (in Chinese)) DOI: 10.3771/j.issn.1009-2307.2008.06.024.
- [8] HENRIQUE COSTA P, OLIVEIRA PEREIRA E, MAILLARD P. An original processing method of satellite altimetry for estimating water levels and volume fluctuations in a series of small lakes of the pantanal wetland complex in Brazil [J]. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2016, XLII-B8: 327-334. DOI: 10.5194/isprsarchives-XLII-B8-327-2016.
- [9] 梁子亮,岳建平.利用卫星测高监测高邮湖水位变化[J].测绘通报,2013(11):65-67. (LIANG Z L, YUE J P. Monitoring of water level variations of Gaoyou Lake by altimetry [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013(11): 65-67. (in Chinese))
- [10] 张鑫,吴艳红,张鑫.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)[J].自然资源学报,2015,30(7):1153-1162. (ZHANG X, WU Y H, ZHANG X. Zharinamcowater level change detection using multi-satellite altimetric data during 1992-2012 [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(7): 1153-1162. (in Chinese)) DOI: 10.11849/zrzyxb.2015.07.008.
- [11] 李静,岳建平,梁子亮. Jason 2 卫星波形重定技术在研究贝加尔湖水位中的应用[J].河海大学学报(自然科学版),2015,43(2):163-166. (LI J, YUE J P, LIANG Z L. Application of Jason 2 waveform retracking method to investigation of water level of Lake Baikal [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43(2): 163-166. (in Chinese)) DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2015.02.012.
- [12] BAUP F, FRAPPART F, MAUBANT J. Combining high resolution satellite images and altimetry to estimate the volume of small lakes [J]. Hydrology & Earth System Sciences Discussions, 2014, 10(12): 15731-15770. DOI: 10.5194/hess-18-2007-2014.
- [13] 戴玉凤,高杨,张国庆,等.2003-2011年青藏高原佩枯错相对水量变化及其对气候变化的响应[J].冰川冻土,2013,35(3):723-732. (DAI Y F, GAO Y, ZHANG G Q, et al. Water volume change of the Paiku Co in the Southern Tibetan Plateau and its response to climate change in 2003-2011 [J]. Journal of Glaciology & Geocryology, 2013, 35(3): 723-732. (in Chinese)) DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0082.
- [14] DUAN Z, BASTIAANSEN W G M. Estimating water volume variations in lakes and reservoirs from four operational satellite altimetry databases and satellite imagery data [J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 134(5): 403-416. DOI: 10.1016/j.rse.2013.03.010.
- [15] PAPA F, BALAS K, PANDEY R K, et al. Gangra Brahmaputra river discharge from Jason 2 radar altimetry: An update to the long term satellite derived estimates of continental freshwater forcing flux into the Bay of Bengal [J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2014, 117(C11): -. DOI: 10.1029/2012JC008158, 2012.

(下转第 208 页)

- Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 292-301. (in Chinese) DOI: 10.13243/j.cnki.slxk.20150937.
- [18] 吴丹洁, 詹圣泽, 李友华, 等. 中国特色海绵城市的新兴趋势与实践研究[J]. 中国软科学, 2016, 30(1): 79-97. (WU D J, ZHAN S Z, LI Y H, et al. New trends and practical research on the sponge cities with Chinese characteristics[J]. China Soft Science, 2016, 30(1): 79-97. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-9753.2016.01.008.
- [19] 谷树忠, 胡咏君, 周洪. 生态文明建设的科学内涵与基本路径[J]. 资源科学, 2013, 35(1): 2-13. (GU S Z, HU Y M, ZHOU H. Ecological civilization construction: scientific connotation and basic paths[J]. Resources Science, 2013, 35(1): 2-13. (in Chinese))
- [20] 窦明, 王艳艳, 李旺. 最严格水资源管理制度下的水权理论框架探析[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(12): 132-137. (DOU M, WANG Y Y, LI W. Discussion on theoretical framework of water rights under the most strict water resources management system[J]. China Population Resources and Environment, 2014, 24(12): 132-137. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-2104.2014.12.018.
- [21] 钟贞山. 中国特色社会主义政治经济学的生态文明观: 产生、演进与时代内涵[J]. 江西财经大学学报, 2017, 109(1): 12-19. (ZHONG Z S. Ecological civilization view of socialist political economics with Chinese characteristics: emergence, evolution and epoch connotation[J]. Journal of Jiangxi University of Finance and Economics, 2017, 109(1): 12-19. (in Chinese)) DOI: 10.13676/j.cnki.cn36-1224/f.2017.01.002.
- [22] 刘芳, 苗旺. 水生态文明建设系统要素的体系模型构建研究[J/OL]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(5): 117-122. (LIU F, MIAO W. System model construction of system elements in water ecological civilization construction[J]. China Population Resources and Environment, 2016, 26(5): 117-122. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-2104.2016.05.014
- [23] 于桓飞, 宋立松, 程海洋. 基于河长制的河道保护管理系统设计与实施[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(7): 608-614. (YU H F, SONG L S, CHENG H Y. Design and implementation of river protection management system based on river chief mechanism[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(7): 608-614. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1674-8530.15.0292.
- [24] 李运杰, 张弛, 冷祥阳, 等. 智慧化海绵城市的探讨与展望[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(1): 161-164, 171. (LI Y J, ZHANG C, LENG X Y, et al. Exploration and expectation of smart sponge city[J/OL]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(1): 161-164, 171. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdk.2016.01.027.
- [25] 唐克旺. 水生态文明的内涵及评价体系探讨[J]. 水资源保护, 2013, 29(4): 1-4. (TANG K W. Discussion on concept and assessment system of aquatic ecological civilization[J]. Water Resources Protection, 2013, 29(4): 1-4. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.10046933.2013.04.001.

(上接第200页)

- [16] 葛莉, 刁晓环, 王成, 等. ICESat-1/GLAS 数据湖泊水位监测研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(1): 14-19. (GE L, XI X H, WANG C, et al. Research progress of ICESat-1/GLAS in lake level monitoring[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(1): 14-19. (in Chinese)) DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2017.1.0014.
- [17] YING, ZHAO, XINGHUI, et al. Growth and nutrient accumulation of *Phragmites australis* in relation to water level variation and nutrient loadings in a shallow lake[J]. 环境科学学报(英文版), 2013, 25(1): 16-25. DOI: 10.1016/S1001-0742(12)60004-7.
- [18] SONG C, HUANG B, KE L. Heterogeneous change patterns of water level for inland lakes in High Mountain Asia derived from multi-mission satellite altimetry[J]. Hydrological Processes, 2015, 29(12): 2769-2781. DOI: 10.1002/hyp.10399.
- [19] SONG C, YE Q, CHENG X. Shifts in water level variation of Namco in the central Tibetan Plateau from ICESat and CryoSat-2 altimetry and station observations[J]. Science Bulletin, 2015, 60(14): 1287-1297. DOI: 10.1007/s11434-015-0826-8.
- [20] 赵瑞, 叶庆华, 宗继彪. 青藏高原南部佩枯错流域冰川湖泊变化及其对气候的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(2): 147-152. (ZHAO R, YE Q H, ZONG J B. Glacier and water storage changes in Peiku Co basin on Tibetan Plateau and its responses to the climatic changes[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(2): 147-152. (in Chinese)) DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2016.061.
- [21] 朱长明, 张新, 路明, 等. 湖盆数据未知的湖泊动态库容遥感监测方法[J]. 测绘学报, 2015, 44(3): 309-315. (ZHU C M, ZHANG X, LU M, et al. Lake storage change automatic detection by multi-source remote sensing without underwater terrain data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(3): 309-315. (in Chinese)) DOI: 10.11947/j.acgs.2015.20130438.