

引用格式: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 F, Liu Z F, Yao Z J. 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.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190651

Jason-2测高卫星对湖泊水位的监测精度评价

何 飞^{1,2}, 刘兆飞^{1*}, 姚治君¹

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049

Evaluation of the Monitoring Accuracy of Lake Water Level by the Jason-2 Altimeter Satellite

HE Fei^{1,2}, LIU Zhaofei^{1*}, YAO Zhijun¹

1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China ;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: As one of the important characteristics of lakes, lake water level is an important indicator for evaluating the change of lake water storage capacity. As a new remote sensing monitoring technology, satellite altimetry technology has played an increasingly important role in monitoring the dynamic changes of lake waters, and has become an effective means for lake research, water resources investigation and wetland protection. This study took Hongze Lake, Gaoyou Lake and Dongting Lake as examples, using the Centralized Probability Density Function method (CPDF) to improve the accuracy of Jason-2 altimetry data, as well as analyze the correlation of precipitation and water level of each lake. Besides, based on the measured water level data we compared the accuracy of the original GDR data of the Jason-2 altimeter satellite and the satellite data processed by the CPDF method. Results show that: (1) The distribution of Jason-2 original GDR data points is sparse, most of the data are relatively concentrated, and there are certain periodic changes, but the evaluation results show poor accuracy, so the original GDR data cannot be directly used for lake water level monitoring. (2) CPDF method can greatly improve the accuracy of the water level data of the altimeter satellite. The evaluation results of Hongze Lake and Gaoyou Lake show that the RMSE decreased from 1.92m and 1.74m to 0.32 m and 0.36m, and the correlation coefficient increased from 0.28 and 0.04 to 0.85 and 0.72, indicating that Jason-2 altimetry data processed by the CPDF method can achieve higher accuracy in lake water level monitoring. However, it is worth noting that for the lake, which is with narrow north-south widths and large changes in daily water levels (such as Dongting Lake), the accuracy of the raw GDR improved by the CPDF method would be limited. (3) The precipitation of Dongting Lake had the strongest correlation with the water level, followed by Gaoyou Lake, the water level changes of Gaoyou Lake and Dongting Lake lag behind the precipitation by about 1 month and 1-2 months respectively. However, the precipitation of Hongze Lake was not significantly negatively correlated with the water level, which is partly due to the adjustment of water level by the Hongze Lake water conservancy project. This study is of great significance for obtaining lake water level values using altimetry satellites, and

收稿日期:2019-11-04;修回日期:2019-02-13.

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA23090302);国家自然科学基金项目(41571027)。[**Foundation items:** Special project of strategic leading science and technology of Chinese Academy of Sciences, No.XDA23090302; National Natural Science Foundation of China, No.41571027.]

作者简介:何 飞(1994—),男,安徽安庆人,硕士生,主要从事水土资源综合评价研究。E-mail: hef.17s@igsrr.ac.cn

*通讯作者:刘兆飞(1982—),男,河南郑州人,博士,副研究员,主要从事水文水资源方面研究。E-mail: zfliu@igsrr.ac.cn

then for dynamic monitoring of lakes, especially in filling lake water level data in data-poor areas.

Key words: Jason-2; satellite altimetry; water level; precipitation; Hongze Lake; Gaoyou Lake; Dongting Lake; evaluation of accuracy

***Corresponding author:** LIU Zhaofei, E-mail: zfliu@igsnrr.ac.cn

摘要:湖泊水位是评估湖泊水量变化的重要指标。本文以洪泽湖、高邮湖及洞庭湖为研究对象,利用集中度的概率密度函数方法(CPDF)来提高Jason-2测高数据精度,分析了降水量与各个湖泊水位变化的相关性,并基于实测水位数据对比评价了Jason-2测高卫星原始GDR数据和CPDF方法处理后的卫星数据的精度。结果表明:① Jason-2原始GDR数据点的分布存在疏密之分,大部分数据分布相对集中,且有一定的周期变化,但评价结果显示精度较差,故原始GDR数据不能直接用于湖泊水位监测;② CPDF方法可以极大提高测高卫星的水位数据精度,洪泽湖与高邮湖的均方根误差分别由1.92 m与1.74 m减少到了0.32 m和0.36 m,相关系数由0.28和0.04提高到了0.85和0.72。对于南北宽度较窄且日水位变化较大的湖泊(如洞庭湖),CPDF方法提高原始GDR结果的精度有限;③ 洞庭湖降水与水位相关性最强,高邮湖次之,而洪泽湖降水与水位成不显著的负相关,是洪泽湖水利工程对于水位的调节导致了这一结果。本研究对于利用测高卫星获得湖泊水位值,进而对湖泊进行动态监控,特别是在填补资料匮乏地区湖泊水位数据方面具有重要意义。

关键词: Jason-2; 卫星测高; 水位; 降水; 洪泽湖; 高邮湖; 洞庭湖; 精度评价

1 引言

湖泊是陆表系统各要素相互作用的关键节点,是地球上重要的淡水资源库、洪水调蓄库和物种基因库^[1]。近几十年来,随着区域气候环境变化和人类活动干扰加剧,湖泊数量、形态和分布发生了极大变化。湖泊水位是湖泊变化的重要表征,长序列的湖泊水位变化对于区域气候变化反映敏感,水位变化在一定程度上影响着人类的生产生活^[2]。随着遥感技术的不断发展,其已经在湖泊水域动态变化监测方面扮演着越来越重要的角色,成为湖泊研究、水资源调查及湿地保护的有效手段^[3-5]。

近年来,卫星测高技术作为一种全新的遥感监测技术不断发展,已经成为内陆湖泊与河流等水文监测的重要手段^[6]。传统湖泊监测主要利用水文站来获取湖泊水位信息,需要耗费大量的人力、物力及财力,且许多湖泊地处偏远,很难设置观测点;此外,目前水文站数据共享程度较低,获取难度较大^[7]。与传统监测方法相比,卫星测高具有快速、全天候观测的特点^[8],而且能够对全球范围内的湖泊水位变化进行监测,特别是无资料偏远地区的湖泊水位监测。因此,卫星测高技术较传统观测具有一定的优越性,在全球湖泊水位监测中得到了广泛应用,尤其是弥补了资料匮乏地区的湖泊水位监测缺失。目前,T/P、Jason-1、Jason-2、Jason-3、Envisat、ICESat、CryoSat-2、SARAL等测高卫星在内陆湖泊水位动态变化监测方面得到了有效的应用。国外研究区包括了亚马逊流域^[9]、非洲^[10]、美洲^[11]大型湖

泊;国内研究则涵盖了青藏高原、长江中下游、东北等地区的湖泊水位变化,具体包括青藏高原湖泊^[12-13]、青海湖^[2,14]、呼伦湖^[15-16]、巢湖^[17]、洞庭湖^[18-19]等湖泊。结果表明,测高卫星监测效果良好,可较好地应用于内陆湖泊的水位监测。T/P、ICESat和Envisat等测高卫星已经分别于2005、2009及2012年停止了工作,而Jason-2卫星作为T/P和Jason-1卫星任务的延续,测量精度更高。同时,相对于CryoSat-2、SARAL等测高卫星而言,Jason-2运行时间更长,可提供相对较长时间序列的内陆湖泊水位监测数据,因此本研究利用Jason-2测高卫星来对内陆湖泊水位进行监测精度评价。

一般来说,测高卫星数据容易受到探测物体周边环境的影响,即易受到“污染”,所以测高卫星数据值不能判断是否为真实正确的湖面高程。但是,由于湖面较其他陆表来说更为平整,因此在概率密度分布函数中,正确的(未受污染)湖面测高数据值应该是高度集中分布的。从另一角度讲,对于特定的湖面测高数据序列对应的概率密度分布来说,高度集中分布的测高数据群则代表了正确的湖面高程^[21]。在湖泊水位序列数据提取的研究中,目前主要是利用高程均值^[19]、中误差^[13]、最大/最小水位差^[20]等指标去除异常数据,这类方法在数据质量稳定的情况下效果良好,但当异常数据占较高比例时,其不能有效去除噪声,应用效果较差,并且会淹没部分具有较高精度的测高点。Liu等^[21]提出了一种基于集中度的概率密度函数法(Centralized Probability Density Function, CPDF),该方法可以有效提高

测高数据的精度,其在我国12个湖泊的验证结果表明,CPDF法能够大幅提高CryoSat-2的测高数据精度,经该方法处理后,测高数据绝对误差均值从0.40 m降至0.16 m。因此,本文利用CPDF方法来提高Jason-2测高数据对于洪泽湖、高邮湖、洞庭湖3个湖泊的监测精度,分析降水量与各个湖泊水位变化的关系,并基于实测的水位数据对比评价Jason-2测高卫星原始GDR数据和CPDF方法处理后的卫星数据的精度,实现对多个湖泊的水位变化的动态监测,这对区域湖泊监测、水资源利用和保护等方面具有重要的借鉴和实践意义。

2 研究区概况、数据来源及研究方法

2.1 研究区概况

本文选择洪泽湖、高邮湖、洞庭湖作为研究区(图1),主要是因为:Jason-2测高数据覆盖了这3个湖泊;这3个湖泊均是我国的大型淡水湖,且均位于我国经济相对发达地区,对周边经济社会发展提供了重要支撑;此外,前人在这3个湖泊做过相关研究,具有一定的研究基础。

洪泽湖是我国第四大浅水型湖泊,五大淡水湖之一,位于淮河下游、江苏省淮安市西北部,是淮河中、下游分界线。洪泽湖是淮河上一个极具意义的水源调蓄水库,也是南水北调东线工程的重要调节水库^[22]。洪泽湖地处淮河中游,向上承接中上游地区15.8万 km²的汇流,向下经入江水道、入海水道和苏北灌溉总渠等分泄洪水,多年平均降水量为926.7 mm,蒸发量为1047.7 mm^[23]。洪泽湖作为淮河流域最大的湿地,它不仅是周边地区的重要水

源,而且在防洪抗旱、调节区域气候及生物多样性保护等方面起着重要的作用,对区域社会经济发展和民生具有重要的意义和影响^[24]。

高邮湖位于淮河流域,跨江苏省高邮市、宝应县、金湖县与安徽省天长市,为全国第六大淡水湖。高邮湖是浅水型湖泊,湖水主要由地表径流补给,三河入湖水量占总水量的95%以上。高邮湖地处亚热带季风气候区,年平均气温14.7℃,年均降水量1029 mm,蒸发量890 mm^[25]。高邮湖是重要的生态保护区,是多种国家重点保护的野生鸟类和鱼类栖息地。

洞庭湖位于长江中游荆江南岸,跨湘、鄂两省,是我国第二大淡水湖。洞庭湖地处中亚热带的北缘。年降水量1400~1500 mm,且该湖泊水位变化较大。洞庭湖南边,有湘江、资水、沅水、澧水四水汇入;在北边,有松滋、太平、藕池、调弦四口与长江相通,湖水最后在岳阳城陵矶注入长江,是长江重要的分洪沉沙调蓄湖泊。因此,洞庭湖水位变化不仅受其流域降雨径流、湖泊调蓄、入湖径流功能强弱的影响,而且还与长江水情息息相关^[26]。

2.2 数据来源及研究方法

2.2.1 Jason-2 测高数据

Jason-2卫星测高数据来源于法国国家空间研究中心的卫星海洋学存档数据中心(网址: <https://www.aviso.altimetry.fr/en/home.html>)。Jason-2卫星于2008年6月20日成功发射,轨道高度为1336 km,轨道倾角为66°,重复周期为10 d。本研究选取Jason-2卫星2级产品中的GDR(Geophysical Data Record)数据,GDR产品具有良好的数据质量,包含了

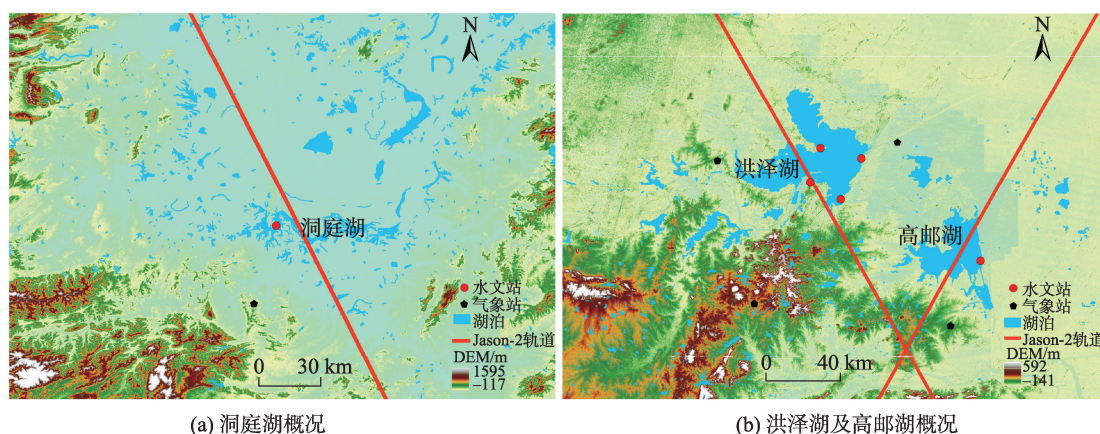


图1 洪泽湖、高邮湖、洞庭湖概况

Fig. 1 Overview of the study area

环境和地球参数的精确校正。其中,该产品以 10 d 为一个周期进行存储,每个周期包含 254 个 Pass 文件,每个文件大小 5 M 左右。

2.2.2 实测水位数据和降水数据

实测水位数据来自《中华人民共和国水文年鉴》^[27-28],包括洪泽湖、高邮湖和洞庭湖等湖泊共 6 个水文站(图 1)的日序列数据,年限为 2010—2015 年。

降水数据来自中国气象数据网(网址: <http://data.cma.cn/>),包括湖泊周边共 5 个气象站 2010—2015 年日降水和月降水数据。

2.2.3 GDR 数据预处理

湖泊水位是指湖泊自由水面的高程,湖泊水位的计算公式为^[29]:

$$H = A_{\text{Alt}} - R_{\text{Ran}} - H_{\text{Hei}} - \Delta C_{\text{Cor}} \quad (1)$$

式中: H 为湖泊水位高程; A_{Alt} 为测高仪的椭球高; R_{Ran} 为测高仪的观测距离; H_{Hei} 为大地基准面相对于参考椭球面的高度; ΔC_{Cor} 为各项误差观测修正。

与海洋相比面积较小,湖泊受海潮、逆气压、潮压等影响相对较小,可忽略不计,误差修正可表达为^[8]:

$$\Delta C_{\text{Cor}} = W_{\text{wet}} + D_{\text{dry}} + L_{\text{lono}} + S_{\text{set}} + P_{\text{pol}} \quad (2)$$

式中: W_{wet} 为湿对流层修正; D_{dry} 为干对流层修正; L_{lono} 为电离层修正; S_{set} 为固体潮修正; P_{pol} 为极潮修正。

本研究利用 Aviso 提供的雷达测高工具箱 BRAT (Basic Radar Altimetry Toolbox) 软件对 GDR 数据进行预处理,主要包括:① 明确数据位于湖面范围内;② 高度计相对于参考面的高度有效;③ 测高仪所观测的高度数据有效;④ 各项改正值在有效范围内;⑤ 利用三倍中误差法去除异常值。

2.2.4 基于集中度的概率密度函数法

在 GDR 数据的预处理结果的基础上,利用基于 CPDF 方法分别对洪泽湖、高邮湖和洞庭湖的预处理后的测高湖面高程数据进行进一步处理。CPDF 方法具体步骤如下(图 2)^[21]:

(1) 假如某一序列长度(轨道内数据个数)大于 5,则利用 Bendat&Piersol 公式计算 bin 的宽度。需要说明的是,本文针对案例数据率定,结果表明,表 1 中的 bin 计算公式中,Bendat&Piersol 公式效果相对最好;

(2) 计算每个 bin 内测高数据的频率值;

(3) 将最大频率值作为集中度频率(F_c),如果 $F_c > 50\%$,则执行第(5)步;反之,则执行第(4)步。该步骤的目的是使正确的测高水位数据比例 $> 50\%$;

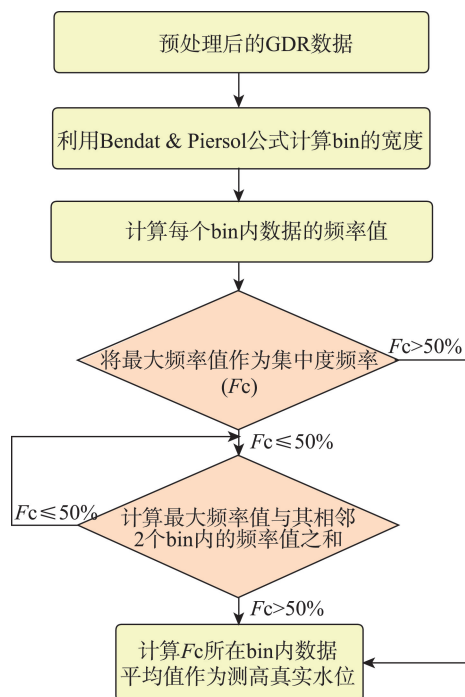


图 2 CPDF 方法流程^[21]

Fig. 2 The flow chart of the CPDF method^[21]

表 1 最佳 Bin 宽度计算公式

Tab. 1 Estimators of the optimal bin width

估算器	计算公式	公式编号	参考文献
E1	$\frac{R}{1 + \log_2 N}$	(3)	[30]
E2	$\frac{R}{1.87(N-1)^{0.4}}$	(4)	[31]
E3	$\frac{R}{1 + \log_2 \gamma^2 + \log_2 N}$	(5)	[32]
E4	$3.49\sigma N^{-\frac{1}{3}}$	(6)	[33]

注: N 为序列长度; R 为序列范围(最大值与最小值之差), σ 为标准差; γ^2 为标准化的偏态系数。

(4) 计算最大频率值与其相邻 2 个 bin 内的频率值之和,并将其作为 F_c ,如果 $F_c > 50\%$,则执行第(5)步;反之,则重复第(4)步;

(5) 计算 F_c 所在 bin 内测高水位数据的平均值,代表真实水位值。

3 结果及分析

3.1 Jason-2 测高原始 GDR 数据分析

洪泽湖、高邮湖、洞庭湖的 Jason-2 测高原始 GDR 数据如图 3 所示。图 3 显示了数据点的在 3 个湖泊的分布存在疏密之分,大部分数据分布相对集

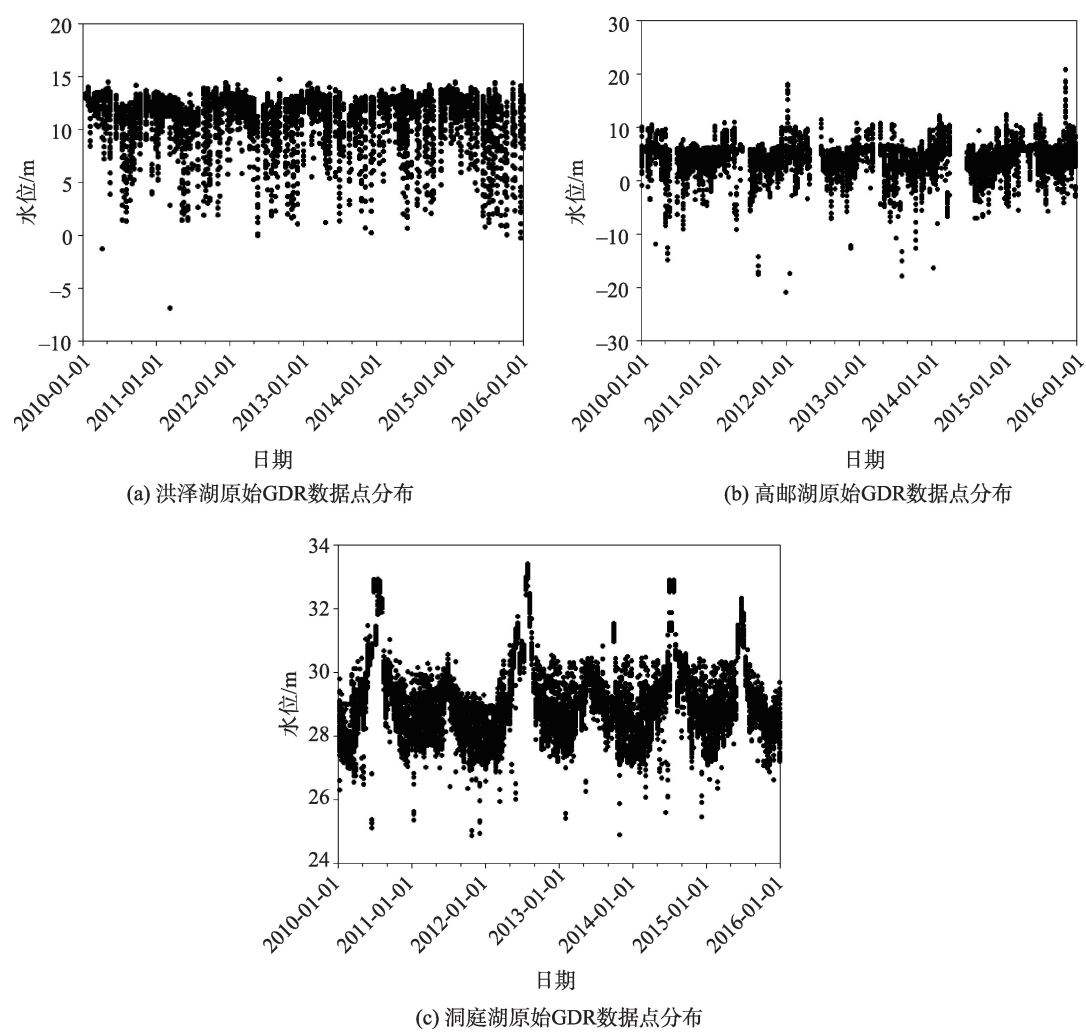


图3 研究区 Jason-2 测高原始 GDR 数据点分布

Fig. 3 Distribution of raw GDR data points for Jason-2 altimetry in study area

中,且有一定的周期变化。洪泽湖的测高原始 GDR 数据集中分布在 10~15 m 之间,原始 GDR 数据平均值为 11.39 m,实测数据平均值为 12.80 m,表明大部分异常值偏小。高邮湖的测高原始 GDR 数据集中分布在 0~10 m 之间,原始 GDR 数据平均值为 5.58 m,实测数据平均值 6.09 m,同样表明多数异常值偏小。洞庭湖的测高原始 GDR 数据集中分布在 26~30 m 之间,原始 GDR 数据平均值为 29.01 m,实测数据平均值 26.80 m,表明多数异常值偏大。结果表明,原始 GDR 数据反映出水位变化的周期性,不同湖泊测高原始 GDR 数据异常值分布特点不同。

3.2 评价指标分析与对比验证分析

3.2.1 评价指标分析

由表 2 可知,在平均值比较中,洪泽湖、高邮湖、洞庭湖原始 GDR 的平均值分别为 11.39、5.58、

表 2 基于集中度的概率密度函数法(CPDF)
处理结果精度评价

Tab. 2 Accuracy evaluation table of centralized
probability density function method(CPDF)result

湖泊名称		洪泽湖	高邮湖	洞庭湖
原始 GDR 平均值/m		11.39	5.58	29.01
原始 GDR 标准差/m		2.47	2.62	1.23
实测数据平均值/m		12.80	6.09	26.80
实测数据标准差/m		0.47	0.25	1.42
CPDF 平均值/m		12.70	5.95	28.99
CPDF 标准差/m		0.52	0.34	1.15
均值差/m	CPDF	0.38	0.25	0.85
	原始 GDR	1.15	1.04	0.79
均方根误差/m	CPDF	0.32	0.36	1.27
	原始 GDR	1.92	1.74	1.3
相关系数	CPDF	0.85	0.72	0.95
	原始 GDR	0.28	0.04	0.96
湖泊面积/km ²		879.10	612.30	153.00

29.01 m, 实测数据平均值分别为12.80、6.09、26.80 m, CPDF 结果的平均值分别为12.70、5.95、28.99 m。从洪泽湖、高邮湖来看, 原始GDR平均值和实测数据平均值相差较大, 而CPDF结果平均值与实测数据平均值相差较小, 说明CPDF方法有效提高了GDR的精度。从洞庭湖来看, 原始GDR与CPDF结果的平均值相差极小, 与实测数据平均值相差较大, 表明CPDF对于原始GDR的处理效果不够理想。在标准差比较中, 洪泽湖、高邮湖、洞庭湖原始GDR的标准差分别为2.47、2.62、1.23 m, 实测数据标准差分别为0.47、0.25、1.42 m, CPDF结果的标准差分别为0.52、0.34、1.15 m, 其中洪泽湖与高邮湖的CPDF结果与实测数据标准差比较接近, 原始GDR标准差较大, 表明CPDF处理效果良好。洞庭湖的CPDF结果标准差与原始GDR标准差相差不大, 表明, CPDF处理效果不佳。

从均值差、均方根误差、相关系数3个评价指标分析, 在洪泽湖处理结果中, CPDF结果的均值差、均方根误差分别为0.38 m和0.32 m, 远远小于原始GDR对应的1.15 m和1.92 m, 且CPDF结果的相关系数高达0.85, 远远高于原始GDR的相关系数0.28, 这表明, CPDF方法大大提高了GDR数据的精度。在高邮湖处理结果中, CPDF结果的均值差、均方根误差分别为0.25 m和0.36 m, 远远小于原始GDR对应的1.04 m和1.74 m, 相关系数达到0.72, 远大于原始GDR的相关系数0.04, 同样表明CPDF方法大大提高了GDR数据的精度。在洞庭湖处理结果中, CPDF结果的均值差、均方根误差与原始GDR对应结果相差不大, CPDF方法不能提高精

度, 但CPDF与原始GDR和实测水位的相关系数分别达到了0.95、0.96, 表明Jason-2可以用来监测洞庭湖水位。

3.2.2 测高水位与实测水位对比验证

水文站实测水位显示, 2010—2015年, 洪泽湖平均水位为12.80 m, 最低水位为11.09 m(2011年6月23日), 最高水位为13.69 m(2014年12月4日)。洪泽湖年内变化变化较为平稳, 无明显上升或下降趋势, 年内变化比较剧烈。图4(a)为洪泽湖卫星测高水位GDR结果、CPDF结果与水文站实测水位对比, 可知, GDR结果与CPDF结果相差较大, 且CPDF结果与实测水位基本吻合, 表明CPDF方法很好的提高了GDR结果的精度。图4(b)为水文站实测水位与卫星测高水位CPDF结果的散点图, 两者相关性很强, 可以通过置信水平为0.01双尾检验。总的来说, 洪泽湖测高水位CPDF结果与水文站实测水位变化趋势一致。

水文站实测水位数据表明, 2010—2015年, 高邮湖平均水位为6.07 m, 最低水位为5.35 m(2011年6月16日), 最高水位为7.38 m(2015年7月2日), 最高水位与最低水位相差达到2.03 m。在2015年7月份达到近6年的高值, 年内变化比较剧烈。图5(a)为高邮湖2010—2015年的卫星测高水位GDR结果、CPDF结果与水文站实测水位对比, 可知, 高邮湖卫星测高水位原始GDR结果与实测水位偏差极大, 而CPDF结果与实测水位变化趋势一致, 表明CPDF方法大大提高了GDR数据的精度。图5(b)为水文站实测水位与卫星测高水位CPDF结果的散点图, 相关性较强, 但比洪泽湖结果相关性弱一些, 可

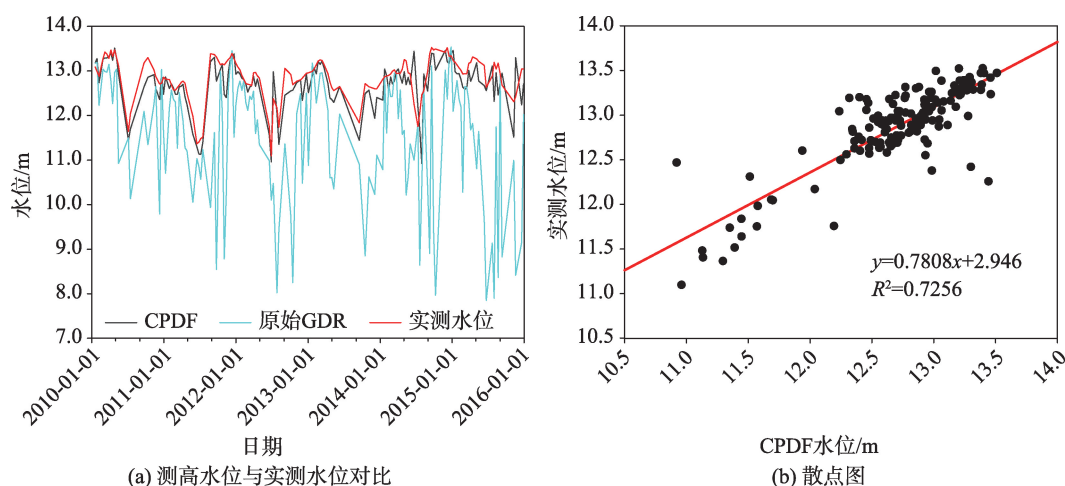


图4 测高水位与实测水位的比较(洪泽湖)

Fig. 4 Comparison between altimetry data and measured data (Hongze Lake)

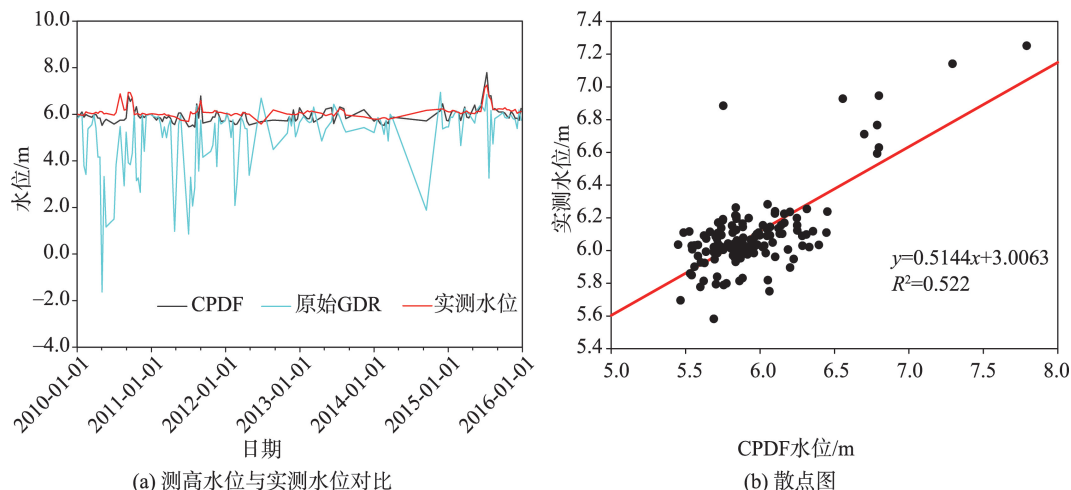


图5 测高水位与实测水位的比较(高邮湖)

Fig. 5 Comparison between altimetry data and measured data (Gaoyou Lake)

以通过置信水平为0.01双尾检验。总的来说,高邮湖测高水位CPDF结果与实测水位总体趋势一致。

水文站实测水位显示,2010—2015年,洞庭湖平均水位为29.69 m,最低水位为27.91 m(2010年3月1日),最高水位为35.49 m(2014年7月18日)。洞庭湖水位在年际之间呈周期变化,水位年内变化比较剧烈,这很大程度上是因为洞庭湖与长江相连,湖泊水位受到长江水位变化的影响。图6(a)为洞庭湖2010—2015年的卫星测高水位GDR结果、CPDF结果与水文站实测水位对比,可知,测高水位CPDF结果与GDR结合十分吻合,CPDF结果、GDR结果均与实测水位的变化一致,但整体上存在一个差值。图6(b)为水文站实测水位与卫星测高水位CPDF结果的散点图,相关性在3个湖泊结果中是

最强的, R^2 达到0.898,可以通过置信水平为0.01双尾检验。总的来说,洞庭湖测高水位CPDF结果与实测水位在数值上存在差异,但二者反映的湖泊水位变化趋势一致。

总体来说,在卫星测高水位与水文站实测水位的比较中,测高水位CPDF与实测水位变化趋势大致一致。根据评价指标分析可知,监测效果良好。Jason-2可以用来监测洪泽湖、高邮湖、洞庭湖3个湖泊的水位变化。

3.3 湖泊水位变化与降水量的关系

图7为湖泊水位变化与降水量对比图,其中洪泽湖的降水量是由泗洪、淮安、盱眙3个气象站降水量算术平均计算得到,高邮湖的降水量由高邮气象

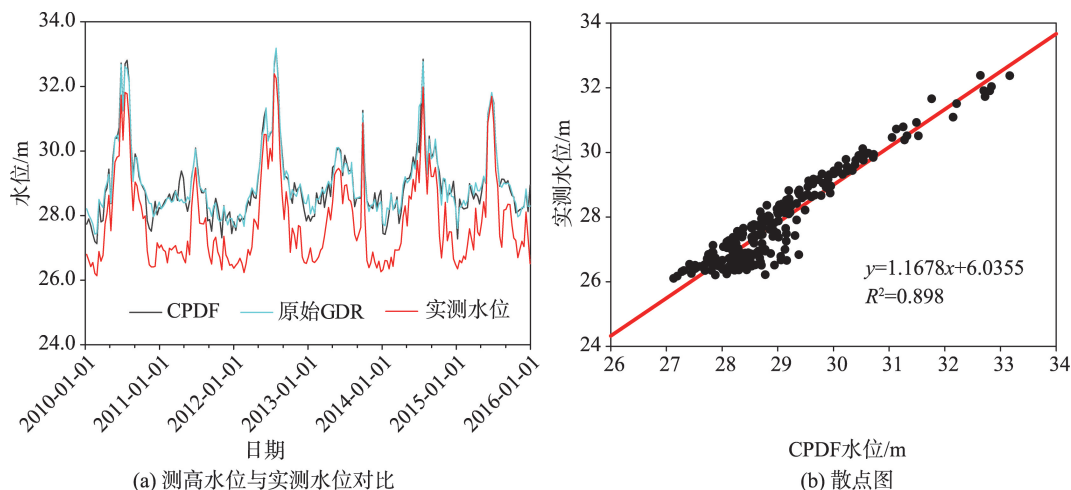


图6 测高水位与实测水位的比较(洞庭湖)

Fig. 6 Comparison between altimetry data and measured data (Dongting Lake)

站的降水数据代表,洞庭湖的降水量由沅江气象站的降水数据代表。图7(a)、(c)、(e)分别为洪泽湖、高邮湖、洞庭湖日降水量与实测水位的比较。由图7(a)可知,洪泽湖年内降水量比较集中,在降水集中的时期,湖泊水位上升,但并不是一一对应的关系。在降水极少的时期,湖泊水位却处于一个相对的高值。由图7(c)可知,高邮湖年内降水量比较集中,总体水位比较平稳,水位对于降水量变化反应比较强烈。在降水集中的时期,湖泊水位出现明显上升。由图7(e)可知,洞庭湖水位变化比较剧烈,对于降水量的响应十分明显。

图7(b)、(d)、(f)分别为洪泽湖、高邮湖、洞庭湖的实测月平均水位与月降水量的对比。洪泽湖

月平均水位变化较大,年内水位变化起伏较大;高邮湖月平均水位变化比较平稳;洞庭湖月平均水位变化剧烈,呈现周期性变化。表3为3个湖泊月平均水位与月降水量的相关关系。可知,洪泽湖在滞后月数0月的相关系数为-0.31,滞后1、2、3月的相关系数均较小,不显著,故洪泽湖月平均水位与月降水量相关性不大,这跟洪泽湖水位受上游水利工程影响较大有关,例如,洪泽湖上游水利工程包括高良涧船闸、二河闸、汴河闸、安东河闸、大柳巷船闸、团结河闸、濉河闸等等,水利工程的存在导致了水位在一定程度上受到人为调节。高邮湖在滞后月数0月、1月、2月的相关系数分别为0.24、0.43、0.18,且通过了显著性水平为0.01的双尾检验。表

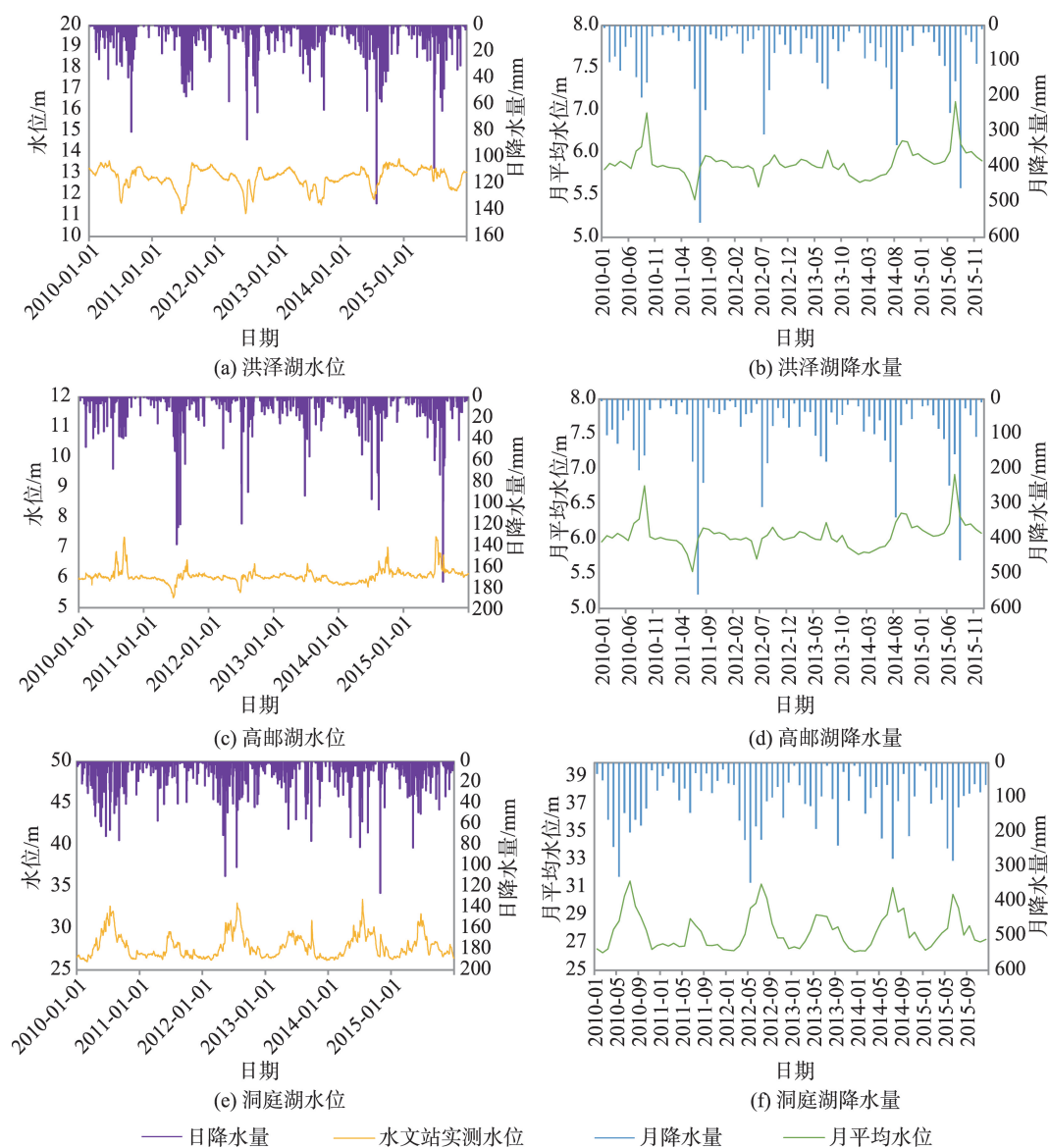


图7 研究区湖泊水位变化与降水量对比(2010—2015年)

Fig. 7 Comparison of lake water level change and precipitation in the study area(2010—2015)

表3 月平均水位与月降水量相关关系

Tab. 3 The correlation between monthly average water level and monthly precipitation

滞后月数	洪泽湖		高邮湖		洞庭湖	
	相关系数	显著性*	相关系数	显著性*	相关系数	显著性*
0	-0.31	显著	0.24	显著	0.56	显著
1	0.08	不显著	0.43	显著	0.64	显著
2	0.22	不显著	0.18	显著	0.64	显著
3	0.16	不显著	0.16	不显著	0.33	显著

注: *表示显著性水平为0.01。

明,高邮湖降水与水位之间有明显的相关性,且降水对水位的作用存在1个月左右的滞后期。洞庭湖在滞后月数0个月、1个月、2个月、3个月的相关系数分别为0.56、0.64、0.64、0.33,通过了显著性水平为0.01的双尾检验,表明,洞庭湖降水与水位之间存在明显的相关性,且降水对水位的作用存在1~2个月的滞后期。这也说明了高邮湖、洞庭湖的水量很大程度上来自于径流的补给。

4 讨论

在洪泽湖、高邮湖水位监测中,CPDF结果的均方根误差分别为0.32 m、0.36 m,很好地提高了测高卫星数据的精度。CPDF方法可以很好去除原始GDR数据中的异常值,异常值较多是因为测高数据受到非湖面反射的污染,洪泽湖、高邮湖具有浅层、草被广泛覆盖的特点,从而对测高数据造成了污染。其中,在高邮湖水位监测中,梁子亮等^[34]测高结果标准差为0.80 m,本研究测高结果标准差为0.34 m,精度明显优于前者。在洞庭湖水位监测中,洞庭湖结果与李景刚等^[19]在此区域的研究结果一致,即测高水位与实测水位存在显著相关性。但测高水位与实测水位的数值差异较大,均方根误差达到1.27 m,这跟卫星监测点与实测水文站位置距离较远及洞庭湖水位变化相对较大2个原因有关。第一个原因是测高地面轨迹距离较短,且地面轨迹与水文站距离较远,导致了测高水位与水文站实测水位相差较大。第二个原因是洞庭湖日水位的剧烈变化,测高卫星得到的是瞬时测高值,而水位站测得的是日平均水位,这也导致了测高水位与实测水位的差异较大。从CPDF方法应用效果看,该方法对于水面宽阔的湖泊表现较好,但对于南北向较窄的湖泊(如洞庭湖)来说,由于测高数据值的数量有限,难以保证足够的精度,卫星数据与实测水位数

据绝对值之间有较大差距,但其相对变化较为一致。因此,CPDF方法适合于水面宽阔的湖泊,不适用于南北较窄的湖泊(如洞庭湖)。

5 结论

本文利用Jason-2监测湖泊水位变化,分析了洪泽湖、高邮湖、洞庭湖水位变化与降水量的关系,并基于实测水位数据对比评价了Jason-2测高卫星原始GDR数据和CPDF方法处理后的卫星数据的精度。主要结论如下:

(1) Jason-2原始GDR数据点的分布存在疏密之分,大部分数据分布相对集中,且有一定的周期变化。GDR数据虽然能大致反映周期性,但评价结果显示精度较差。在洪泽湖和高邮湖,原始GDR结果的均方根误差较大,分别达到了1.92 m、1.74 m。因此,原始GDR数据不建议直接用于湖泊水位监测。

(2) CPDF方法可以极大提高GDR数据的精度,其中洪泽湖与高邮湖的评价结果显示,CPDF方法将原始GDR结果的均方根误差由1.92 m、1.74 m减小到了0.32 m、0.36 m,相关系数由0.28、0.04提高到了0.85、0.72,表明经过CPDF方法处理后的Jason-2测高数据在湖泊水位监测中可以达到较高的精度。但值得注意的是,对于南北宽度较窄且日内水位变化较大的湖泊(如洞庭湖),CPDF方法提高Jason-2测高数据的精度相对有限。

(3) 洪泽湖的水位变化与降水量变化的相关性较差,而高邮湖和洞庭湖的水位变化与降水量变化具有一定的相关性,其中高邮湖水位变化滞后于降水量约1个月,洞庭湖的水位变化滞后于降水量1~2个月。

本文基于前人对于内陆湖泊的研究,在原始GDR数据的误差修正上,仅考虑了湿对流层修正、干对流层修正、电离层修正、固体潮修正以及极潮

修正,忽略了其他的误差,这在一定程度上会影响到测量结果。此外,实测水文站位置与卫星地面轨迹的重合与否、卫星瞬时测高结果与实测水位的采集时间不吻合性、卫星轨迹不同时期的偏移程度等都会影响到最终结果的精度,所以在湖泊水位监测中需要考虑具体情况。总的来说,利用Jason-2测高卫星监测内陆湖泊水位变化,特别是对于地处偏远的观测资料匮乏的湖泊而言,可以根据测高卫星建立湖泊的长时间水位变化序列,下一步工作应结合不同区域湖泊、不同湖泊类型以及多种卫星测高数据,进一步验证不同方法的适用性,这对于区域湖泊水资源的保护、管理和利用具有重要意义。

参考文献(References):

- [1] 杨桂山,马荣华,张路,等.中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略[J].湖泊科学,2010,22(6):799-810. [Yang G S, Ma R H, Zhang L, et al. Lake status, major problems and protection strategy in China[J]. Journal of Lake Sciences, 2010,22(6):799-810.]
- [2] 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.]
- [3] 金晓媚,高萌萌,柯珂,等.巴丹吉林沙漠湖泊遥感信息提取及动态变化趋势[J].科技导报,2014,32(8):15-21. [Jin X M, Gao M M, Ke K, et al. Extraction of remote sensing information of lakes in Badan Jaran Desert and trend of their dynamic changes[J]. Science and Technology Review, 2014,32(8):15-21.]
- [4] 杨珂含,姚方方,董迪,等.青藏高原湖泊面积动态监测[J].地球信息科学学报,2017,19(7):972-982. [Yang K H, Yao F F, Dong D, et al. Spatiotemporal monitoring of lake area dynamics on the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geo-information Science, 2017,19(7):972-982.]
- [5] 郝贵斌,吴波,张立福,等. ESTARFM模型在西藏色林错湖面积时空变化中的应用分析(1976-2014年)[J].地球信息科学学报,2016,18(6):833-846. [Hao G B, Wu B, Zhang L F, et al. Temporal and spatial variation analysis of the area of Siling Co Lake in Tibet based on ESTARFM (1976-2014)[J]. Journal of Geo-information Science, 2016,18(6):833-846.]
- [6] 李均力,陈曦,包安明. 2003-2009年中亚地区湖泊水位变化的时空特征[J].地理学报,2011,66(9):1219-1229. [Li J L, Chen X, Bao A M. Spatial-temporal characteristics of lake level changes in central Asia during 2003-2009[J]. Acta Geographica Sinica, 2011,66(9):1219-1229.]
- [7] Zhang J, Xu K, Yang Y, et al. Measuring water storage fluctuations in Lake Dongting, China, by Topex/Poseidon satellite altimetry[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2006,115(1-3):23-37.
- [8] 蔡宇,柯长青.基于Jason-2测高数据的新西兰陶波湖水位变化监测[J].水电能源科学,2017,35(8):31-34. [Cai Y, Ke C Q. Monitoring water level changes of Taupo Lake in New Zealand based on Jason-2 altimeter data[J]. Water Resources and Power, 2017,35(8):31-34.]
- [9] Frappart F, Calmant S, Cauhopé 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.
- [10] Birkett C M. The contribution of TOPEX/POSEIDON to the global monitoring of climatically sensitive lakes[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1995,100 (C12):25179-25204.
- [11] Medina C E, Gomez-Enri J, Alonso J J, et al. Water level fluctuations derived from ENVISAT Radar Altimeter (RA-2) and in-situ measurements in a subtropical waterbody: Lake Izabal (Guatemala)[J]. Remote Sensing of Environment, 2008,112(9):3604-3617.
- [12] Hwang C, Cheng Y S, Yang W H, et al. Lake level changes in the Tibetan Plateau from Cryosat-2, SARAL, ICESat, and Jason- 2 altimeters[J]. Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 2019,30(1):33-50.
- [13] 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. Zhari Namco water level change detection using multi-satellite altimetric data during 1992-2012[J]. Journal of Natural Resources, 2015,30(7):1153-1162.]
- [14] 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, Water level variation of Qinghai Lake from altimetric data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008,33 (1):64-67.]
- [15] 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, Monitoring of water level variations of Hunlun Lake with Jason-1 altimetric data[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2005,25(4):11-16.]
- [16] Yuan C, Gong P, Liu C, et al. Water-volume variations of Lake Hulun estimated from serial Jason altimeters and Landsat TM/ETM+ images from 2002 to 2017[J]. International journal of remote sensing, 2019,40(2):670-692.
- [17] 李程,章传银,柯宝贵,等.利用卫星测高数据监测巢湖水

- 位变化[J].测绘科学,2015,40(12):12-15. [Li C, Zhang C Y, Ke B G, et al. The level variation monitoring of Chao-hu Lake by Cryosat-2 satellite altimetry data[J]. Science of Surveying and Mapping, 2015,40(12):12-15.]
- [18] 王红,孙福宝,杨涛,等.Jason_2卫星测高数据在长江中游水位监测中的应用[J].三峡生态环境监测,2018,3(3):48-54. [Wang H, Sun F B, Yang T, et al. Application of Jason_2 satellite altimetry data to water level monitoring in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2018,3(3): 48-54.]
- [19] 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.]
- [20] 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,2008,33(6):73-75,29. [Gao Y G, Guo J Y, Yue J P. Lake water level variation measurement with satellite altimetry[J]. Science of Surveying and Mapping, 2008,33(6):73-75,29.]
- [21] Liu Z, Yao Z, Wang R. Evaluation and validation of Cryo-Sat-2-derived water levels using in situ lake data from China[J]. Remote Sensing, 2019,11(8):899.
- [22] 范亚民.淮河中下游洪泽湖水域动态变化研究[J].长江流域资源与环境,2010,19(12):1397-1403. [Fan Y M. Dynamic analysis of water area in the lake of Hongze basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010,19(12):1397-1403.]
- [23] 叶正伟.淮河洪泽湖洪涝灾害特征与成灾本底机理分析[J].水土保持研究,2006(4):90-92,273. [Ye Z W, A basic analysis on the characteristic and mechanism of the flood disaster in Hongze Lake[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006(4):90-92,273.]
- [24] 夏双,阮仁宗,颜梅春,等.洪泽湖区土地利用/覆盖变化分析[J].遥感信息,2013,28(1):54-59,64. [Xia S, Ruan R Z, Yan M C, et al. Analysis on land use/cover in Hongze Lake [J]. Remote Sensing Information, 2013,28(1):54-59,64.]
- [25] 陈珣,管仪庆,苗建中,等.基于长期水文变化的苏北高邮湖生态水位及保障程度[J].湖泊科学,2017,29(2):398-408. [Chen Y, Guan Y Q, Miao J Z, et al. Determination of the ecological water-level and assuring degree in the Lake Gaoyou, Northern Jiangsu with long-term hydrological alteration[J]. Journal of Lake Sciences, 2017,29(2):398-408.]
- [26] 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, Xu X Y, Monitoring level fluctuation of lakes in Yangtze river basin by altimetry[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007,32(2):144-147.]
- [27] 中华人民共和国水利部水文局.中华人民共和国水文年鉴:长江流域水文资料[M].北京:中华人民共和国水利部水文局,2010-2015. [Bureau of Hydrology, Ministry of Water Resources, P. R. China. Hydrological data of Yangtze river basin in Annual Hydrological Report P.R. China [M]. Beijing: Bureau of Hydrology, Ministry of Water Resources, 2010-2015.]
- [28] 中华人民共和国水利部水文局.中华人民共和国水文年鉴:淮河流域水文资料[M].北京:中华人民共和国水利部水文局,2010-2015. [Bureau of Hydrology, Ministry of Water Resources, P. R. China. Hydrological data of Huaihe river basin in Annual Hydrological Report P.R. China [M]. Beijing: Bureau of Hydrology, Ministry of Water Resources, 2010-2015.]
- [29] Cnes, Eumetsat, J P L, NOAA/NESDIS. OSTM/Jason-2 Products Handbook, 2017[EB/OL]. [2019-10-10]. https://www.aviso.altimetry.fr/fileadmin/documents/data/tools/hdbk_j2.pdf.
- [30] Sturges H A. The choice of a class interval[J]. Journal of the American Statistical Association, 1926,21(153):65-66.
- [31] Bendat J S, Piersol A G. Measurement and analysis of random data[J]. Technometrics, 1966,10(4):869-871.
- [32] Doane D P. Aesthetic frequency classifications[J]. The American Statistician, 1976,30(4):181-183.
- [33] Scott D W. On optimal and data-based histograms[J]. Biometrika, 1979,66(3):605-610.
- [34] 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):65-67,125. [Liang Z P, Yue J P. Monitoring of water level variations of Gaoyou Lake by altimetry[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013(11):65-67,125.]