

doi: 10. 6046/zrzyyg. 2020381

引用格式: 魏浩翰,许仁杰,杨强,等. 多源卫星测高数据监测太湖水位变化及影响分析[J]. 自然资源遥感,2021,33(3):130 – 137. (Wei H H,Xu R J,Yang Q,et al. Variation and effect analysis of the water level of the Taihu Lake based on multi – source satellite altimetry data[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2021,33(3):130 – 137.)

多源卫星测高数据监测太湖水位变化及影响分析

魏浩翰¹, 许仁杰¹, 杨 强¹, 周权平²

(1. 南京林业大学土木工程学院,南京 210037; 2. 中国地质调查局南京地质调查中心,南京 210016)

摘要: 基于 Envisat 与 Cryosat-2 卫星测高数据利用波形重跟踪算法提取 2003 年 1 月—2019 年 4 月太湖水位信息,并对测高数据进行粗差剔除、卫星间系统误差消除,结合 MODIS 光学遥感影像提取太湖边界信息,得到长时间序列太湖水位数据。结合气象观测数据和城市人口变迁数据,讨论太湖水位变化规律及其对气候变化以及人类活动影响的响应。结果表明:2003—2009 年期间太湖水位呈上升趋势(0.036 m/a),2009—2019 年期间太湖水位呈下降趋势(−0.014 4 m/a);地表温度及降水均对太湖水位变化有周期性影响,其中降水的影响更为显著;此外,随着太湖周边城市化进程加快,以 2009 年为节点,2009 年后周边城市人口增长速度加快,城市用水需求加大,导致太湖水位呈下降趋势,表明人类活动对太湖水位变化有整体性影响。

关键词: 卫星测高; Envisat; Cryosat-2; 太湖水位变化; 气候变化; 人类活动

中图法分类号: P 228.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2021)03-0130-08

0 引言

太湖是中国第三大淡水湖,位于中国经济发达、人口密度大、科技能力强的长江三角洲。随着人类利用水资源的能力和强度不断增加,导致太湖流域水资源发生一定程度的时空变化,太湖水位的异常变化将导致垂向水文形变、旱涝灾害等一系列现象,影响正常的农业生活与工业生产^[1]。水文站点作为传统湖泊水位监测方式,受到成本、人力以及区位三方面的约束,难以获取大范围、持续实测水位数据;此外,我国地理状况复杂、水系发达,长时间和大范围湖泊数据难以实时共享。近年来,随着卫星测高技术在海平面监测中日趋成熟,相关学者不断优化算法^[2-3],卫星测高技术逐渐应用于内陆湖泊水位监测的研究。相较于水文站实地监测,卫星测高无需建立多个水文站便能做到长期、实时、持续监测,弥补缺失的实测数据。目前,国内外已有较多研究长江中下游地区^[4]、青藏高原^[5]、亚马孙流域^[6]等区域的湖泊水位变化。由于单一卫星运行寿命有限,时间覆盖范围大多在 5~10 a,故融合多源卫星测高数据可以有效延长观测时间^[7-8]。由于不同卫

星间运行轨道、高程基准均不同,不同研究区域选取的卫星并不固定,目前利用多源卫星测高数据监测太湖水位的研究较少。此外,结合气候变化与人类活动分析湖泊长期水位变化规律及影响因素的研究仍比较少。

综上所述,本研究融合 Envisat 与 Cryosat-2 两类卫星测高数据研究 2003—2019 年太湖水位变化规律,进一步结合地表气象数据与城市人口变迁数据分析湖泊水位变化的影响因素,为太湖流域生态环境稳步发展及水资源可持续利用提供参考。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

太湖位于江苏省南部,长江三角洲南缘,横跨江苏、浙江两省,周边主要城市有苏州、无锡、湖州、嘉兴等。主湖体地理坐标为 30°55′~31°32′N,119°52′~120°36′E,如图 1 所示。地处北亚热带气候区,温和湿润,年均水温 17.1℃,常年平均降水量 1 260 mm,常年很少结冰,湖泊平均水深 1.9 m,最深处约为 2.6 m,面积约为 2 338 km²。湖内岛屿众多,上游有苕溪、荆溪两大水系汇水入湖,下游黄浦

收稿日期: 2020-12-01; 修订日期: 2021-03-21

基金项目: 江苏省测绘地理信息科研项目“基于 JSCORS 多源数据融合监测近地空间水环境参数”(编号: JSCHKY201903)和长江经济带地质资源环境综合评价基金“长江经济带地质资源环境综合评价项目”(编号: DD20190260)共同资助。

第一作者: 魏浩翰(1978-),男,副教授,博士,主要研究方向为卫星近地表水环境监测。Email: weihaohan@njfu.edu.cn。

江是太湖最大的出水通道,太湖承担着蓄水、航运、防洪、提供生活用水的重要作用。

2018 年太湖流域总人口 14 388 万人,占全国人口的 10.3%,占全国 GDP 的 18.2%,是全国人均 GDP 的 2.2 倍,水资源总量 231.3 亿 m³。高速发展的背后带来的是对太湖的破坏,例如 2007 年的太湖蓝藻污染事件造成无锡全城自来水污染。在多年治理下,太湖水情有较大的改善,但仍存在一定隐患,因此太湖水情监测具有十分重要的战略意义。

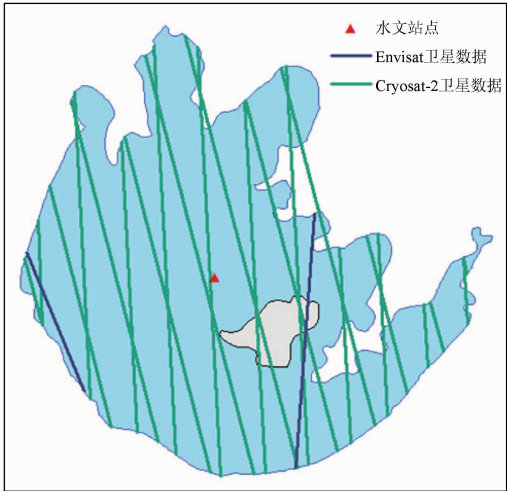


图 1 太湖概况及数据分布图

Fig. 1 Overview of Taihu Lake and data distribution map

1.2 数据源

1) Envisat 测高数据。Envisat 卫星是 ERS1 和 ERS2 后续地球观测任务,由欧洲航天局(ESA)于 2002 年 2 月 28 日发射升空,与太阳同步轨道,计划使用寿命 5 a,实际使用寿命 10 a,搭载 RA-2 雷达高度计,周期 35 d,每周期 1 002 个轨道,累计获取 108 期数据。本研究选用 Envisat/RA-2 的 GDR_v3 版本数据,时间范围为 2003 年 1 月—2010 年 9 月^[9]。针对不同类型表面(海洋、冰、海冰等)的地球数据,数据产品中使用了 Ocean、Ice-1、Ice-2、Sea-Ice 这 4 种波形跟踪算法,依据已有学者研究^[10],Ice-1 算法能够更为准确提取内陆湖泊水位信息。

2) Cryosat-2 测高数据。Cryosat-2 卫星由欧洲航天局(ESA)于 2010 年 4 月 10 日发射升空,搭载 SIRAL 合成孔径干涉雷达高度计,周期 369 d,每 30 d 为一个子周期,具有低分辨率模式(LMR)、合成孔径雷达模式(SAR)、干涉合成孔径雷达模式(SARin)3 种模式。本研究选用 Cryosat-2/SIRAL 的 SIR_GDR_Baseline-C 版本数据,时间范围为 2010 年 10 月—2019 年 4 月^[11]。选用数据产品中 LMR 模式的 OCOG 算法提取太湖水位信息。

3) MODIS 光学遥感数据。中分辨率成像光谱仪(MODIS)是搭载在 Terra 和 Aqua 卫星上的传感器,其中 Terra 卫星过境时间为上午 10:30 分左右(或晚上 10:30 分),Aqua 卫星过境时间为下午 1:30 分(或凌晨 1:30 分)。本研究选用的 MODIS 光学影像为 Terra/MODIS 的 MOD13Q1 数据产品,MOD13Q1 为 Level-3 的合成产品,将相隔 8 d 生成 16 d 的复合图像,通过组合数据来获取不同时间分辨率的数据产品,时间范围为 2003 年 1 月—2019 年 12 月^[12]。

4) 气象观测数据。气象观测数据包括地表温度与降水数据。其中降水数据采用中国气象数据网提供的 2003 年 1 月—2018 年 8 月中国月降水数据集,其空间分辨率为 0.5°×0.5°,经交叉验证质量状况良好^[13]。地表温度数据采用 NCAR 的全球探空资料^[14],该数据集中包括地表温度、地表压强、地表水汽压、地表相对湿度等气象数据,月平均地表温度观测站选择位于太湖南部约 60 km 的杭州站点,时间范围为 2003 年 1 月—2019 年 9 月。

5) 实测水位与用水量数据。实测水位数据和用水量数据来自水利部太湖流域管理局提供的太湖历年《水情月报》^[15]、《太湖流域及东南诸河水资源公报》,包括太湖流域每月雨情、水情水量及太湖流域用水量等信息。其中太湖及周边有多个水文站提供水位观测值,考虑到水位数据的连续性和可靠性,选取位于太湖中心的太湖水文站的多年连续观测水位数据作为实测数据,其位置如图 1 中红色三角形所示。

6) 城市人口变迁数据。历年城镇人口数据源于 2003—2018 年《中国人口统计年鉴》^[16],选取太湖周边城市无锡、苏州、湖州、嘉兴及其所属县级市人口数据。

2 研究方法

2.1 卫星测高原理

高度计测量范围是从卫星到地球表面的距离,湖泊水位是指参考椭球体上方的水位高度。根据水面返回的信号以确定水面至卫星间的距离,风速,有效波高等参数^[17],计算如式(1)所示:

$$Height = H_{alt} - H_{ran} - H_{geoid} - H_{cor}, \quad (1)$$

式中:Height 为湖泊水位高度(即实际表面至参考椭球体上方的距离);H_{alt} 为卫星质心在参考椭球体上方的距离;H_{ran} 为卫星距离实际表面的高度;H_{geoid} 为大地水准面差值;H_{cor} 为各类误差校正。

H_{ran} 测得数据在理想情况下为雷达高度计至湖泊水面高度,但雷达高度计向地面发射脉冲时,受到非湖泊表面、地形等影响,回波波形中波形前缘点会出现一定的偏差,波形重跟踪算法能够进行校正^[18],校正方法如式(2)所示,即

$$H_{\text{ran_Cor}} = (C' - C) \times ds, \quad (2)$$

式中: $H_{\text{ran_Cor}}$ 为波形重跟踪后需改正的距离; C' 为波形重跟踪后的波形前缘点; C 为预设波形前缘点; ds 为距离校正因子,与脉冲宽度与光速相关。

同时观测值精度也受到轨道误差、物理仪器误差以及信号接收误差等影响。 H_{cor} 误差校正项的构成如式(3)所示,即

$$H_{\text{cor}} = wtc + dtc + ic + setc + ptc, \quad (3)$$

式中: wtc 为湿对流校正 (wet troposphere correction); dtc 为干对流校正 (dry troposphere correction); ic 为电离层校正 (ionosphere correction); $setc$ 为固体潮校正 (solid earth tide correction); ptc 为极潮校正 (pole tide correction)。

2.2 湖泊水位信息提取

卫星的发射时间,运行期限,数据发布机构不同,若获取长时间序列湖泊水位数据,需整合卫星的发布数据,分析卫星轨道、运行时间以及数据精度,组合卫星的湖泊覆盖信息与时间范围,同时受到卫星本身的各项参数、高度计等差异的影响,需校正卫星之间的系统误差、统一参考坐标系以及剔除粗差,最终提取出长时间序列湖泊水位信息。

1) 湖泊边界提取。利用 MODIS 光学遥感影像提取湖泊边界信息,采用归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI),该指数最早用于监测植被覆盖率,后从研究红波段与近红外波段中发现,植被反射率从红光波段至近红外波段逐渐增强,水体反射率从红光波段至近红外波段逐渐减弱,通过不同波段组合能够有效区分出水体与植被^[19],计算方法为:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}, \quad (4)$$

式中: Red 为红波段亮度值; NIR 为近红外波段亮度值。

通过对 NDVI 图像选取合适的阈值,能够清晰分辨出植被与水体的界限,从而较好的识别水体^[20]。 $NDVI < 0$ 时为水体, $NDVI > 0$ 时为植被或陆地。受到湖泊水生植物覆盖及泥沙的影响,需适当提高阈值,同时湖泊附近水生植物的覆盖密度及季节性变化影响,阈值因环境改变选取也不完全相同,根据学者研究与反复的实验对比验证后^[21],本研究

不同时期阈值范围为 0.05 ~ 0.25。

在 ENVI 与 ArcGIS 软件的环境下,进行遥感影像拼接、重投影及剪裁,将栅格数据转换为矢量数据,提取 2003—2019 年每月湖泊边界,从而提取对应的星下点足迹。

2) 数据预处理。① 粗差剔除。卫星大多使用雷达高度计,适用于海平面这类面积大且相对平坦的平面,而内陆湖泊大多面积较小,雷达信号触及水体以外的其他地物而被污染,导致个别水位数据异常,故首先剔除原始水位数据中的异常值。2003—2019 年期间太湖范围内 Envisat 卫星累计获取 26 728 个水位值, Cryosat-2 卫星累计获取 33 100 个水位值。正常情况下,水位值差值大多在 40 ~ 80 cm 波动,但存在一些水位值波动超过几米甚至几十米,将会影响总体平均值的计算,与总体水位平均值作差,剔除差值超过 ± 2 m 的数据。

其次采用 PauTa 准则(又称 3σ 准则)进一步剔除粗差,该准则适用于样本数量较大,且能够预先统计出标准误差,剔除等精度重复测量的基础上异常值与噪声。假定单天水位样本为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 判定方法为:

$$V_i = |x_i - \bar{x}|, \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n V_i^2}{n}}, \quad (6)$$

式中: V_i 为单天水位样本值的剩余误差, x_i ($1 \leq i \leq n$) 为单天水位样本值; $\bar{x}$ 为单天水位样本值的平均值; σ 为单天水位样本值的标准误差。

若 $V_i > 3\sigma$, 则 x_i 已超过极限误差,剔除该值;若 $V_i < 3\sigma$, 则 x_i 为正常单天水位值,保留该值。将剩余单天水位值计算平均值,即为该日水位值。

② 数据平滑。对全体单天水位值进行平滑处理,采用高斯滤波处理,其实质为信号滤波器,获取信噪比较高的信号,搜索窗口大小的选择对滤波作用效果至关重要,在前人研究与实验的基础上,选用高斯滤波的平滑窗口为半年^[22]。

3) 系统误差消除。尽管 Envisat 与 Cryosat-2 卫星的参考椭球均为 WGS84 椭球,但由于卫星本身的各项参数不同以及所携带的高度计存在差异,卫星间的测高结果仍存在一定的系统误差。以 Envisat 卫星测高结果为参考值^[23],可通过下式对系统误差进行改正:

$$CR_Cor_i = CR_Int_i + (\overline{Height_{\text{EN}}} - \overline{Height_{\text{CR}}}), \quad (7)$$

式中: CR_Cor_i 为消除系统误差后的 Cryosat-2 卫星监测的第 i 天水位值; CR_Int_i 为消除系统误差前 Cryosat-2 卫星监测的第 i 天水位值; $\overline{Height}_{EN}$ 为公共时间内 Envisat 卫星监测水位值的算数平均值; $\overline{Height}_{CR}$ 为公共时间内 Cryosat-2 卫星监测水位值的算数平均值。

由式(7)可得,太湖流域内卫星间的系统误差为 0.29 m,将 Cryosat-2 卫星测高数据进行改正后即可获得长时间序列太湖水位信息,太湖水位值为整个湖面范围内去除异常值后的平均值。

3 结果

3.1 精度验证

本研究采用皮尔逊相关系数(R)、显著性值

(P)以及均方根误差($RMSE$)3项指标进行湖泊水位精度验证。利用距平值分析系统误差消除后的长时间序列卫星测高数据与地表实测水位变化,距平值为某一时刻的水位值减去该湖泊长期水位平均值后的剩余值^[24],将单天水位值按月取平均即为月水位值。精度验证采用2007年1月—2010年9月与2014年10月—2017年4月实测水位数据,分别与两类卫星测高数据对比。图2和图3分别为Envisat与Cryosat-2卫星测高水位与地表实测水位数据对比图,从图可知,Envisat与Cryosat-2卫星测高水位均与地表实测水位变化趋势基本一致,Envisat卫星测高数据 R 值为0.82, $RMSE$ 值为0.083 2 m; Cryosat-2卫星测高数据 R 值为0.82, $RMSE$ 值为0.107 7 m, P 值均小于0.01。

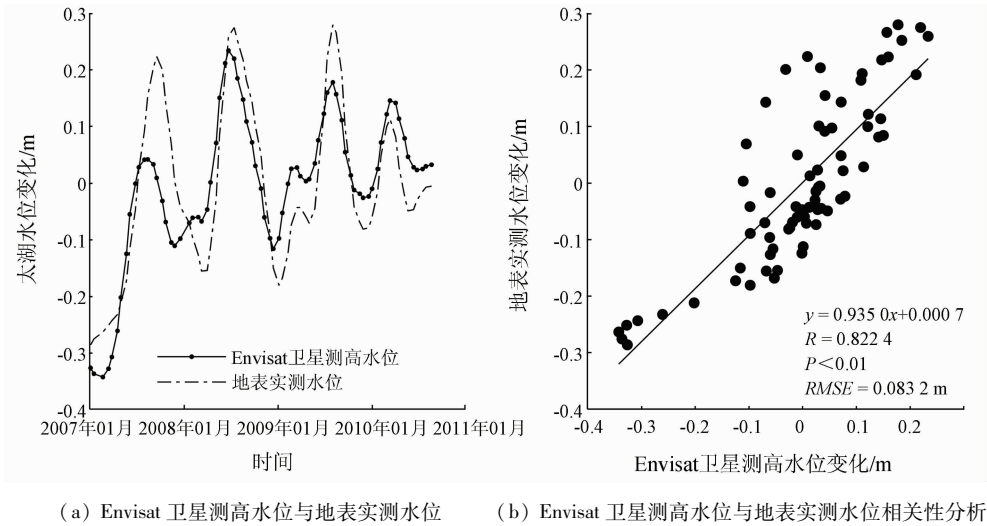


图2 Envisat 卫星测高水位与地表实测水位对比

Fig.2 Comparison of Envisat satellite altimetry water level and surface measured water level

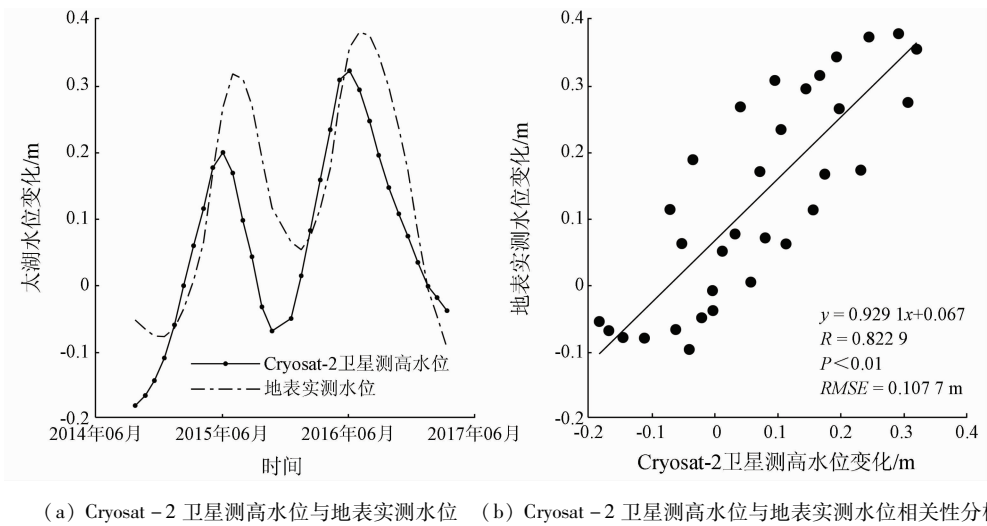


图3 Cryosat-2 卫星测高水位与地表实测水位对比

Fig.3 Comparison of Cryosat-2 satellite altimetry water level and surface measured water level

由表 1 可知,在验证水位点个数足够的基础上,两类卫星测高数据与实测数据的变化趋势仍表现出较高的一致性,且皮尔逊相关系数(R)均超过 0.8,显著性值(P)均小于 0.01,表现出极强显著相关性。结果表明,Envisat 与 Cryosat-2 卫星测高数据均可用于监测内陆湖泊长时间序列水位变化,提取湖泊水位精度较高,极大程度上方便了内陆湖泊水位的长时间监测。

表 1 卫星测高水位与地表实测水位相关性表
Tab.1 Correlation between satellite altimetry water level and surface measured water level

卫星	相关系数 (R)	显著性 (P)	均方根误差 ($RMSE$)/m	验证水位个数
Envisat	0.822 4	$P < 0.01$	0.083 2	75
Cryosat-2	0.822 9	$P < 0.01$	0.107 7	39

3.2 太湖水位变化特征分析

结合两类卫星测高数据可提取 2003—2019 年太湖水位序列,图 4 为 2003—2019 年太湖水位时间

序列图,从图可知,两类卫星测高数据均可获取较为准确水位变化趋势及明显的季节与年际波动。从季节水位变化可以看出,水位最高点大多在夏季 7,8 月份,最低点大多在冬季 1,2 月份,水位一般从年内 4 月水位开始上涨,年内 11 月水位逐渐下降,年内水位差值在 0.5~1.2 m 之间。从年际变化可以看出,水位高峰值均出现在夏季,低谷值均出现在冬季,与已有水情报告一致。其中太湖水位的最高峰值出现在 2016 年夏季,最低谷值出现在 2015 年冬季。通过对年水位值进行二次拟合得到水位变化趋势,可知 2009 年左右为节点,2003—2009 年水位呈上升趋势,2009—2019 年水位呈下降趋势。为了进一步分析水位变化趋势,分别提取 2003—2009 年和 2009—2019 年水位变化曲线的线性趋势项,可明显看出,2003—2009 年期间水位增长线性趋势为 0.036 m/a,2009—2019 年期间水位下降线性趋势为 -0.014 4 m/a。

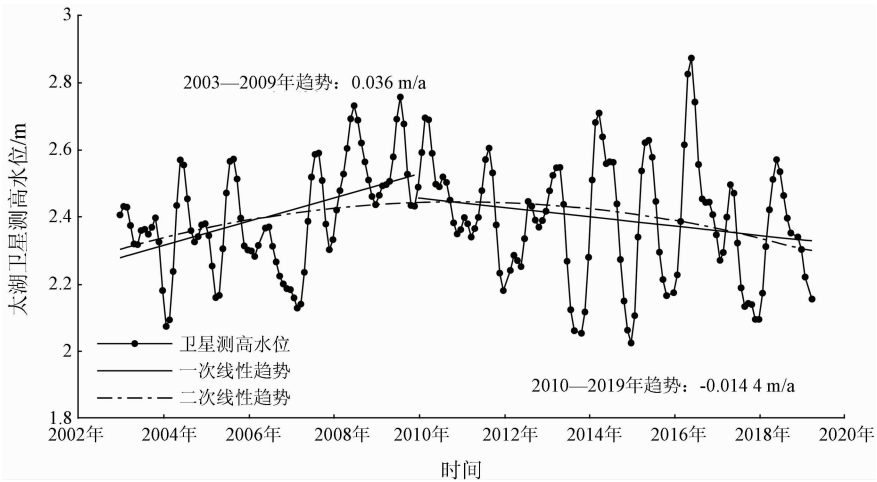


图 4 2003—2019 年太湖水位时间序列图
Fig.4 Long time series of water level of Taihu Lake (2003—2019)

4 讨论

4.1 地表温度和降水对太湖水位变化的周期性影响

地表温度和降水变化是影响湖泊的两大重要因素。太湖地处北亚热带湿润季风气候,夏热冬温,雨热同期,季风发达。图 5 为 2003—2019 年太湖月平均地表温度变化与水位变化关系图,从图中明显看出太湖流域地表温度变化稳定,呈现出明显的周期性,同时太湖水位变化与地表温度变化趋势较为一致,具体表现在夏季地表温度较高,太湖水位也较高;冬季地表温度偏低,太湖水位亦处于较低水位。虽然地表温度升高会使得湖泊水的蒸发量增大,但是地表温度升高时带来的降雨量增加会导致湖泊水量增加。因此必须考虑降水对太湖水位变化的影

响。图 6 为 2003—2019 年太湖地区月平均降水量与太湖水位变化关系图,降水数据时间范围为 2003 年 1 月—2018 年 8 月。总体来看,雨水充沛的年份,水位明显高于多年平均水位,而雨水稀少的年份,水位低于多年平均水位,由于太湖汛期大多集中在夏季,受到北亚热带湿润季风气候雨热同期的影响,太湖流域夏季正值梅雨期,雨水充沛,故各水文站涨幅与强降水分布紧密相关。从单一年份来看,2011 年,2016 年降水量明显高于平均水平,根据太湖《水情月报》显示^[15],2011 年 8 月和 2016 年 5 月—7 月,太湖流域均发生长时间的持续降水,导致相应时间段内太湖水位明显上升。其中,2011 年 8 月的持续降水主要集中在太湖流域北部,而 2016 年 5 月—7 月的持续降水主要集中在太湖湖区,因此 2016 年太湖水位增长幅度更大,水位更高。从长时

间序列来看,地表温度变化与水位变化趋势具有一致性,而降水对太湖水位变化的影响更为直接。综上所述,地表温度和降水均对太湖水位变化有周期

性影响,相对于地表温度变化,降水对太湖水位变化影响更为显著。

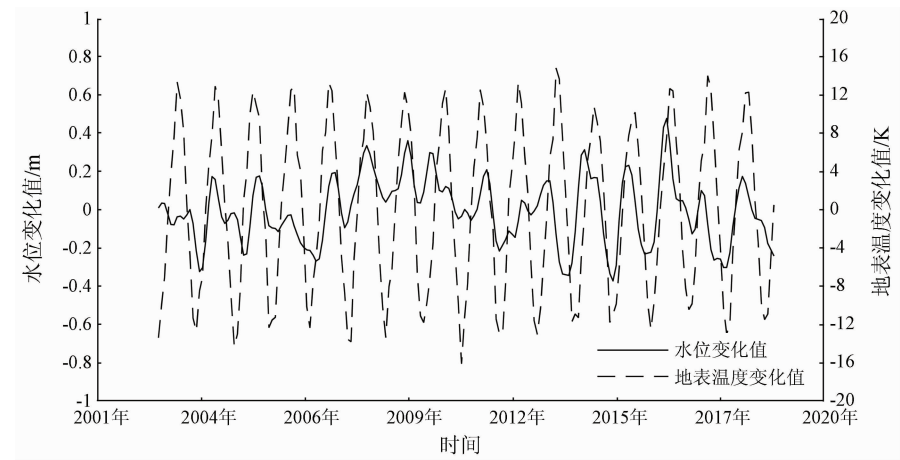


图 5 太湖水位与月平均地表温度变化趋势图

Fig. 5 Trend of water level and monthly mean surface temperature in Taihu Lake

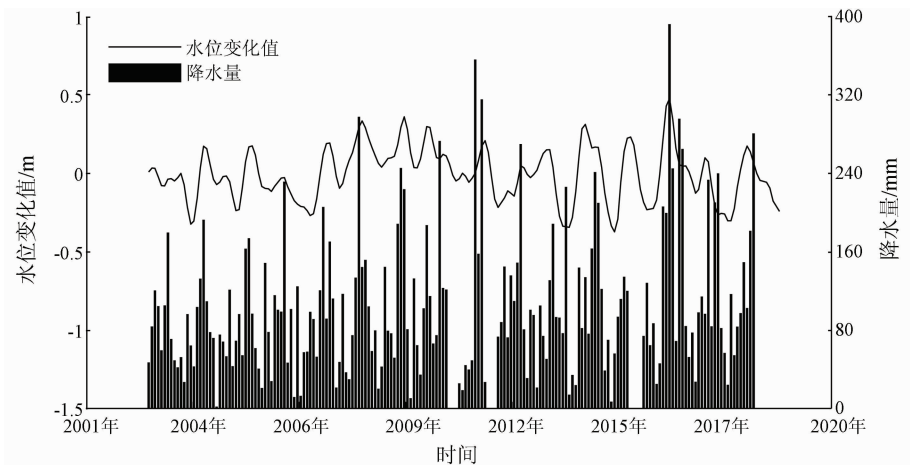


图 6 太湖水位与月降水量变化趋势图

Fig. 6 Trend of water level and monthly precipitation in Taihu Lake

4.2 城市人口变迁对太湖水位变化的整体性影响

太湖周边城市主要包括江苏的苏州、无锡与浙江的湖州、嘉兴及其所属县级市,经济发达,城市化进程快。据《中国人口统计年鉴》统计,2003—2018 年该区域人口由 807 万人增长至 940 万人,增长趋势为 7.98 万人/年。图 7 为太湖水位变化与人口增长图,由图 7 可知,2003—2019 年周边城市总人口持续增长,2009 年之前人口增长趋势为 7.89 万人/年,2009 年之后人口增长趋势为 9.764 万人/年,人口增长速度从 2009 年开始明显提高,相应的水位变化速率分别为 0.036 m/a(2009 年之前)与 -0.014 4 m/a(2009 年之后),2009 年为水位变化节点,如图 4 所示,说明人口的加速增长一定程度上影响太湖水位变化。同时,受到城市人口逐年递增为主的诸多因素影响,必将导致太湖周边城市用水量的增加,从而引起太湖水位的变化响应。据《太湖流域及东南诸

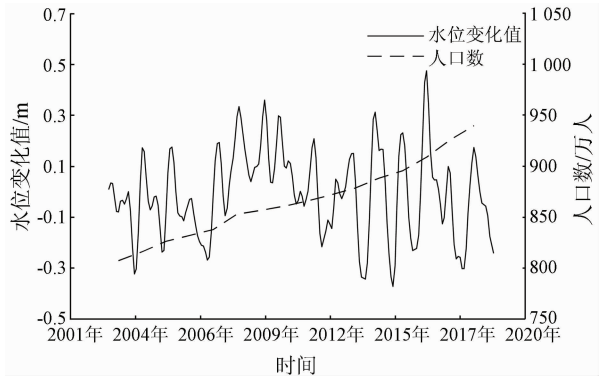


图 7 太湖水位变化与人口增长趋势图

Fig. 7 Trend of water level of Taihu Lake and population growth

河水资源公报》统计,2003—2019 年太湖流域周边城市年用水量波动变化,2010 年以来用水量总体呈下降趋势,2013 年后趋势减缓。如图 8 所示,2007 年太湖周边城市用水量达到期间峰值 372.7 亿 m³,

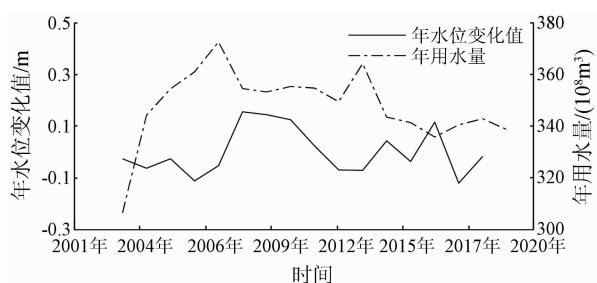


图8 太湖年水位变化与时间变化对比图

Fig.8 Comparison water level of Taihu Lake and water consumption change

与此同时,太湖水位持续下降,而2008年起用水量降低的同时太湖水位变化值转为正值,这意味着太湖水位开始上升,总体来看,用水量增加的年份太湖水位呈下降趋势。因此,城市人口变迁对太湖水位变化有整体性影响,其中城市人口带来的用水量变化与太湖年度变化趋势较为一致。

5 结论

1) Envisat 与 Cryosat - 2 卫星测高数据融合处理结果表明 2003—2009 年期间太湖水位整体以 0.036 m/a 的趋势上升,2009—2019 年期间太湖水位整体以 -0.0144 m/a 的趋势下降。

2) 太湖水位变化受气候变化与人类活动影响比较明显。月平均地表温度变化和月降水量与水位变化趋势一致,表明气候变化对太湖水位变化有周期性影响,相较于地表温度,降水对太湖水位变化影响更为显著。

3) 人类活动对太湖水位的影响主要体现在城市人口变迁带来的影响,其中用水量变化的影响更为明显。从变化趋势来看,以2009年为节点,2009年后城市人口变迁速度加快,一定程度上导致太湖水位呈下降趋势,对比之下年度用水量的影响更为明显,表明人类活动对太湖水位变化有整体性影响。

4) 本研究中,尚未获取到太湖湖盆相关数据,关于太湖湖盆抬高对水位变化的影响有待进一步研究。

参考文献 (References):

[1] 王跃峰,许有鹏,张倩玉,等. 太湖水网结构变化对调蓄能力的影响[J]. 地理学报,2016,71(3):449-458.
Wang Y F, Xu Y P, Zhang Q Y, et al. Influence of stream structure change on regulation capacity of river networks in Taihu Lake Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(3): 449-458.

[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 chan-

ges in Qinghai Lake with satellite altimetry data[J]. Journal of Remote Sensing, 2017, 21(4): 633-644.

- [3] Sakaros B, Frédéric F, Fabien B, et al. Monitoring water levels and discharges using Radar altimetry in an ungauged river basin; The case of the Ogooué[J]. Remote Sensing, 2018, 10(3): 350.
- [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(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.
- [5] Jiang L G, Nielsen K, Andersen O B, et al. Monitoring recent lake level variations on the Tibetan Plateau using CryoSat - 2 SARIn mode data[J]. Journal of Hydrology, 2017, 544: 109-124.
- [6] 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.
- [7] Song C S C, Ye Q Y Q, Sheng Y S Y, et al. Combined ICESat and CryoSat - 2 altimetry for accessing water level dynamics of Tibetan lakes over 2003 - 2014[J]. Water, 2015, 7(9): 4685-4700.
- [8] 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(14): 67-77.
- [9] Soussi B. Envisat altimetry level 2 user manual[EB/OL]. Paris: ESA, 2011, <https://earth.esa.int/web/guest/home>.
- [10] 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.
- [11] Mertz J D, Urien S. Baseline - C CryoSat ocean processor ocean product handbook[EB/OL]. Paris: ESA, 2019, <https://science-pds.cryosat-2.esa.int>.
- [12] Kamel Didan A B M R. MODIS vegetation index user's guide[EB/OL]. Tucson: The University of Arizona, 2015, <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod13.php>.
- [13] 赵煜飞,朱江,许艳,等. 气象数据集说明文档[EB/OL]. 北京:国家气象信息中心资料服务室,2012. <http://data.cma.cn>.
Zhao Y F, Zhu J, Xu Y, et al. Surface climate changes per month grid 0.5[EB/OL]. Beijing: Data Service Room of National Meteorological Information Center, 2012. <http://data.cma.cn>.
- [14] Kuo H Y. Comparison of GPS radio occultation soundings with radiosondes[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(5): L5817.
- [15] 太湖流域管理局. 水情月报[EB/OL]. 上海:太湖流域管理局, 2007—2019. <http://www.tba.gov.cn>.
Bureau of Taihu Lake basin. Water monthly report[EB/OL]. Shanghai: Bureau of Taihu Lake Basin, 2007—2019. <http://www.tba.gov.cn>.
- [16] 国家统计局人口和就业统计司. 中国人口统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2003—2018.
Department of Population and Employment Statistics National Bureau Statistics of China. China population statistics yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2003—2018.

[17] 文汉江,金涛勇,朱广彬. 卫星测高原理及应用[M]. 北京:测绘出版社,2017.
Wen H J, Jin T Y, Zhu G B, et al. Principle and application of satellite altimetry [M]. Beijing: The mapping publishing company, 2017.

[18] Song C, Ye Q, Sheng Y, et al. Combined ICESat and CryoSat-2 altimetry for accessing water level dynamics of Tibetan lakes over 2003-2014[J]. Water, 2015, 7(9):4685-4700.

[19] 于欢,张树清,李晓峰,等. 基于TM影像的典型内陆淡水湿地水体提取研究[J]. 遥感技术与应用, 2008(3):310-315.
Yu H, Zhang S Q, Li X F, et al. Inland limnetic wetlands water body extraction using TM imagery[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2008(3):310-315.

[20] 汪丹,王点,齐述华. 鄱阳湖水位-淹水面积关系不确定性的分析[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(s1):95-102.
Wang D, Wang D, Qi S H. Uncertainty analysis of Poyang lake water level-flooded area relationship [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(s1):95-102.

[21] 张克祥,张国庆. MODIS 监测的鄱阳湖水域面积变化研究(2000—2011年)[J]. 东华理工大学学报(社会科学版), 2013, 32(3):390-396.
Zhang K X, Zhang G Q. Monitoring area changes of Poyang lake by MODIS data (2000—2011) [J]. Journal of East China University of Technology (Social Science), 2013, 32(3):390-396.

[22] 赵云. 雷达高度计数据中国主要湖泊水位变化监测方法研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2017.
Zhang Y. Method of monitoring water level change of main lakes in China with Radar altimeter data [D]. Beijing: The University of Chinese Academy of Sciences, 2017.

[23] Gao L, Liao J J, Shen G Z. 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.

[24] 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.

Variation and effect analysis of the water level of the Taihu Lake based on multi-source satellite altimetry data

WEI Haohan¹, XU Renjie¹, YANG Qiang¹, ZHOU Quanping²

(1. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China)

Abstract: The water level of the Taihu Lake from January 2003 to April 2019 was monitored using the waveform retracking method based on the altimetry data of Envisat and Cryosat-2 satellites. Through gross error elimination and system error correction as well as the boundary extraction of Taihu Lake using MODIS remote sensing images, the long time series of the water level of the Taihu Lake were obtained. Based on these as well as weather observation data and the data on urban population changes, the variation pattern of the water level and its response to climate change and human activities were discussed. The results are as follows. The water level of the Taihu Lake showed an upward trend (0.036 m/a) during 2003—2009 and a downward trend (-0.014 4 m/a) during 2010—2019. It was affected by the ground surface temperature and precipitation in a periodic manner, especially the precipitation. In addition, as the urbanization in the cities around the Taihu Lake accelerated, the population growth rate in the cities had increased and the water demand had notably increased accordingly from 2009. This resulted in a distinct downward trend in the water level of the Taihu Lake since 2009, indicating that human activities affected the water level of the Taihu Lake over.

Keywords: satellite altimetry; Envisat; Cryosat-2; Taihu water level change; climate change; human activities
(责任编辑: 李 瑜)