

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.005>



基于多源卫星测高数据的洞庭湖流域 2003—2017 年 湖泊水位变化监测

黎 鹏¹, 李 辉^{1,2,3*}

1. 中国地质大学地理与信息工程学院, 湖北武汉 430078
2. 中国地质大学地理与信息工程学院, 关键带演化湖北省重点实验室, 湖北武汉 430078
3. 洞庭湖区生态环境遥感监测湖南省重点实验室, 湖南长沙 410000

摘 要: 利用 ICESat-1 和 CryoSat-2 测高数据获取了 2003—2017 年洞庭湖流域内湖泊的水位信息, 分析了湖泊水位的时间变化过程, 并结合 TRMM 卫星降水数据及人类用水等数据, 讨论了湖泊水位变化对气候及人类活动的响应. 结果表明, 流域中 80% 的湖泊在 2003—2009 年呈现出水位下降趋势 ($-0.18 \sim -0.09$ m/a); 75% 的湖泊在 2010—2017 年呈现出水位稳定或上升趋势 ($0 \sim 0.39$ m/a); 总体来看, 75% 的湖泊在 2003—2017 年呈现出水位上升趋势 ($0.02 \sim 0.22$ m/a). 分析表明, 湖泊水位变化为多种因素共同作用的结果, 降水为近年来洞庭湖流域内湖泊水位变化的主要驱动因子; 以三峡水库为代表的水库运行会对湖泊水位产生季节性影响; 同时, 人类用水的持续增长也对湖泊水位有一定的影响. 多源测高卫星为长时序大范围的湖泊水位监测提供了有力的手段, 这对研究湖泊水位变化及其与气候和环境的响应具有重要意义.

关键词: 卫星测高; 湖泊水位; 洞庭湖流域; ICESat-1; CryoSat-2; 水文地质.

中图分类号: P228.3

文章编号: 1000-2383(2020)06-1956-11

收稿日期: 2019-09-30

Monitoring Lake Level Variations in Dongting Lake Basin over 2003—2017 Using Multi-mission Satellite Altimetry Data

Li Peng¹, Li Hui^{1,2,3*}

1. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China
2. Hubei Key Laboratory of Critical Zone Evolution, School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China
3. Hunan Key Laboratory of Remote Sensing of Ecological Environment in Dongting Lake Area, Changsha 410000, China

Abstract: Due to the impacts of climate change and anthropogenic activities, water resource issues are challenging and have been received much attention worldwide. Over the last few decades, the development of satellite altimetry has enabled the monitoring of lake levels over a large spatial extent. In this work, water-level changes from lakes in Dongting Lake basin were derived from ICESat-1 and CryoSat-2 altimetry data during the period of 2003 to 2017. The temporal variation of lake water levels was analyzed to characterize the water level dynamics in different periods. The TRMM satellite precipitation data and human water consumption data were collected to identify the responses of lake water level changes to both climate change and human activities. The results indicate that 80% of the lakes in the basin exhibit a downward trend (-0.18 to -0.09 m/a) in lake water levels in 2003—2009, while 75% of the lakes show a stable or rising trend ($0 \sim 0.39$ m/a) in water levels in 2010—2017. In general, 75% of the lakes

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 41201429, 41391240191); 中国地质调查局项目 (No. DD20190263).

作者简介: 黎鹏 (1994—), 硕士, 测绘科学与技术专业. ORCID: 0000-0003-4263-3685. E-mail: jackeyli@cug.edu.cn

* **通讯作者:** 李辉, ORCID: 0000-0001-9275-5408. E-mail: leelmars@gmail.com

引用格式: 黎鹏, 李辉, 2020. 基于多源卫星测高数据的洞庭湖流域 2003—2017 年湖泊水位变化监测. 地球科学, 45(6):1956—1966.

show a rising trend (0.02—0.22 m/a) in water levels during the period of 2003 to 2017. The analysis reveals that the change of lake water levels is the result of a combination of multiple factors. Precipitation is the main driving factor for lake water level change. In addition, the operation of reservoirs produced a seasonal variation in the water level of lakes. The continued growth of human water consumption also has a certain impact on the lake water level. Multi-mission altimetry satellite provides a powerful tool for the long-term and large-scale monitoring of lake level variations, which is of great significance to the study of lake level change and its response to climate and environment.

Key words: satellite altimetry; lake water level; Dongting Lake basin; ICESat-1; CryoSat-2; hydrogeology.

0 引言

湖泊是气候和环境变化的敏感指示器,是揭示全球气候变化和区域响应的重要信息载体(张鑫和吴艳红,2015).水位是湖泊的重要特征,其变化与区域降雨、气温、蒸发、湿度及人类活动等因素息息相关,长时间序列水位可反映区域气候变化及人类活动对湖泊的影响(李均力等,2011;张鑫和吴艳红,2015).湖泊水位一般通过水文站点实测的方式获取(Wang *et al.*, 2013).这种方式需要一定的经济和人力支持,地域偏远、人烟稀少的内陆湖泊,常规的水文观测方法无法提供有效、持续的水位观测值(万玮等,2014).此外,由于国内水文数据共享程度不高,长时间序列的湖泊水位数据较难获取,这为研究湖泊水位变化带来了一定的困难.卫星遥感技术可以实时获取大范围各类地表数据,被广泛应用于各种对地观测研究(李辉等,2017;向菲菲等,2018).近年来卫星测高技术为湖泊水位监测提供了一种全新的技术手段(李均力等,2011).该技术最早应用于海洋学(姜卫平,2001)和极地冰盖(Phillips and Hons, 1999)等研究.随着测高技术的改进和相关算法的优化,该技术被广泛应用于内陆湖泊的水位监测及分析其与环境的响应等研究(李建成等,2007;李景刚等,2010c;Song *et al.*, 2015; Jiang *et al.*, 2017a;赵云等,2017).与常规水位测量方法相比,卫星测高技术具有实时、全天候的特点,尤其针对缺乏地面水文观测站的湖泊,可以实时监测其水位变化,弥补其水位观测数据的缺失(金涛勇等,2011;张鑫和吴艳红,2015).此外,整合多颗测高卫星的数据可构建湖泊长时间序列的水位信息.

2003年美国宇航局发射了激光测高卫星ICESat-1(Ice, Cloud, and land Elevation satellite),其地面足迹点(footprint)的直径约为70 m,沿轨迹相邻足迹点间距约为172 m,能够对湖泊水位进行高精度的测量(李均力等,2011;Zhang *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2013).2010年欧空局发射了雷达测高

卫星CryoSat-2,该卫星沿轨迹相邻足迹点间距约为300 m,赤道上的相邻轨迹间距约为8 km,因其具有较高的沿轨迹分辨率和轨迹密度而可覆盖更多的湖泊,近年来被广泛应用于内陆水体的监测(Kleinherenbrink *et al.*, 2014; Nielsen *et al.*, 2015; Jiang *et al.*, 2017a).研究表明,在理想情况下两颗卫星的湖面测高精度均可达到厘米级(Zwally *et al.*, 2002; Nielsen *et al.*, 2015; Göttlet *et al.*, 2016).更重要的是,ICESat-1和CryoSat-2的运行时间分别为2003—2009年和2010年至今,因此通过衔接两种测高数据可构建长时间序列的湖泊水位信息.例如,已有学者利用两颗测高卫星的数据成功地重建了青藏高原部分湖泊的长时间水位序列(Song *et al.*, 2015; Jiang *et al.*, 2017a).洞庭湖流域内湖泊众多,河网密布,其中洞庭湖是长江中游重要的调蓄湖泊,因其与长江直接连通且接纳流域内众多江河的径流,使之处于复杂的“江—湖—库”系统中,流域江湖水情变化对水资源利用、极端水情应对、水环境与水生态等产生了一系列影响(万荣荣等,2014).因此,监测洞庭湖流域内湖泊长时间序列水位对研究其与气候、人类活动和生态环境的响应关系有重要意义.目前利用测高卫星研究洞庭湖水位变化的工作较少.李建成等(2007)对Jason-2测高数据在南洞庭湖水位变化监测中的应用进行了试验研究.李景刚等(2010c)则利用Envisat测高数据对长江中下游4湖(鄱阳湖、洞庭湖、太湖、巢湖)的水位变化及其与气候环境的关系进行了研究.以上研究均利用单一的卫星来监测湖泊水位变化,监测的时间跨度较短,获取的水位变化信息有限,因而不能很好的反映湖泊长时间序列的水位变化情况.

因此,本文拟利用ICESat-1和CryoSat-2的测高数据,构建洞庭湖流域湖泊2003—2017年的水位序列,分析其变化特征和规律,并讨论湖泊水位变化与气候及人类活动之间的关系,为水资源利用及

生态环境保护提供科学依据。

1 研究区概况

洞庭湖流域位于长江中游荆江段以南,包括整个湖南省,以及贵州、湖北和广西壮族自治区的部分区域,面积达 26.14 万 km²,约占长江流域总面积的 12%。流域位于亚热带季风气候区,年均气温在 15.6~17.5 °C 之间,多年平均降水为 1 429 mm,流域具有明显的干湿季节性交替特征,汛期(4—9 月)降水约占全年降水的 70%(程俊翔等, 2016; 周慧, 2016)。流域内湖泊主要分布于其东北部,按照与江河的贯通关系可分为外流湖泊和人为控制湖泊(图 1)。

洞庭湖为典型的外流湖泊,其地势西高东低,被分成东洞庭湖、南洞庭湖和西洞庭湖三大部分,自西向东形成倾斜的水面。其南面和西面接纳湘、资、沅、澧(四水)等水系,北纳长江松滋、太平、藕地(三口)等水系,周边还有直接入湖的汨罗江、新墙河等中小河流,各入湖河水经湖泊调蓄后由城陵矶汇入长江(易波琳等, 2000; 刘万千等, 2016)。洞庭湖是长江中下游地区水文系统的重要组成部分,对缓解该地区洪涝灾害、维系水沙平衡具有不可替代的作用。它既是长江中下游水域生态平衡的重要功能区,也是具有国际意义的珍稀候鸟越冬栖息地(袁敏等, 2014)。流域内其他中小湖泊是人为控制湖泊(如大通湖),湖泊的河湖交界处修建了拦水坝及闸门,与江河的贯通关系受到水利部门控制(Wang

et al., 2014)。另外,流域内“四水”等河流的上游拦水筑坝形成了众多水库(如湘江上游的东江水库、新墙河的铁山水库等),这些水库的运行对洞庭湖流域内湖泊的入湖径流有着直接的影响。

2 数据及方法

2.1 数据源

(1) ICESat-1 测高数据

ICESat-1 的工作原理是通过携带的地学激光测高系统(GLAS)向星下点发射激光信号,然后测量激光信号往返时间计算卫星到星下点的距离,进而获取星下点的高程。目前该卫星用于科学研究的数据产品有 15 种(GLA01, GLA02, ..., GLA15),本文采用 GLA14 测高数据。该数据集包含 95 种参数,例如时间、经纬度、基于 T/P 椭球的高程、饱和校正参数以及用于判断高程数据是否存在波形饱和现象的参数等。

(2) CryoSat-2 测高数据

CryoSat-2 搭载了先进的合成孔径雷达测高仪(SIRAL),包括 3 种测量模式:低分辨率模式(LRM)、合成孔径雷达模式(SAR)以及合成孔径雷达干涉测量模式(SIRAL)(Jiang *et al.*, 2017a)。CryoSat-2 在洞庭湖流域的测量模式为 LRM 模式,此模式下卫星采用单天线脉冲受限的测高法,提供 level 1b 和 level 2 两级数据。本文采用 LRM level 1b 数据,该数据集包含时间、经纬度、卫星高度、脉冲信号传播时间、各项地球物理校正参数以及卫星接

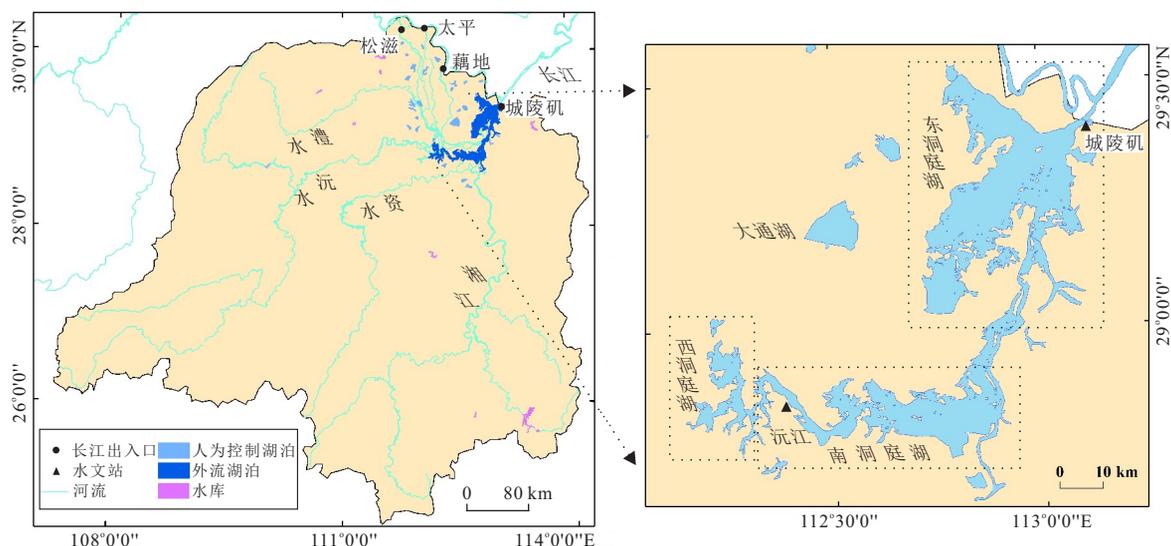


图 1 洞庭湖流域湖泊分布

Fig.1 Lake distribution map of Dongting Lake basin

收到的反射回波能量等参数。

(3) MODIS WATER MASK 产品

MODIS WATER MASK (MOD44W) 为 MODIS 250 m 分辨率影像结合 SRTM (shuttle radar topography mission) DEM 数据生成的 250 m 分辨率的全球水体掩膜产品 (Phan *et al.*, 2012), 该产品用于筛选湖泊及水库边界范围内的湖面足迹点。

(4) TRMM 降水数据

TRMM (tropical rainfall measuring mission) 是专门用于定量测量热带、亚热带降水的气象卫星。卫星上搭载的用于降水观测的主要传感器包括降水雷达、被动式微波辐射计以及可见光/红外传感器。TRMM 卫星通过雷达传感器可以获得三维结构的降水信息, 再经过多数据源反演计算可得到降水量 (刘元波等, 2011)。研究表明, TRMM 降水数据在洞庭湖流域和太湖流域与实测数据间呈现显著的相关关系 (李景刚等, 2010b; Li *et al.*, 2018)。本文使用的降水数据为 TRMM 3B43 月均降水数据, 该数据集空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 参考椭球体为 WGS-84 椭球。

(5) 其他数据

本文采用的其他数据主要包括洞庭湖城陵矶和沅江水文站的实测水位数据 (来源于湖南省水文网), 以及历年洞庭湖流域的人类用水数据 (来源于《长江流域及西南诸河水资源公报》)。

2.2 研究方法

本文首先对 ICESat-1 GLA14 和 CryoSat-2 LRM 测高数据进行预处理, 得到了基于 EGM96 大地水准面的足迹点高程。然后利用 MODIS WATER MASK 影像提取湖泊及水库边界, 筛选出了边界内的湖面足迹点。接着剔除高程异常的湖面足迹点后计算得到湖泊的卫星测高水位, 并根据实测水位数据对其进行精度验证, 最后结合两种测高数据提取的水位信息得到了 2003—2017 年洞庭湖流域内湖泊的水位序列。

2.2.1 卫星测高数据预处理 ICESat-1 测高数据的预处理主要包括椭球转换和饱和校正。由于 ICESat-1 与 CryoSat-2 测高数据基于不同的参考椭球, 因此需要将 ICESat-1 测高数据的参考椭球 (T/P 椭球) 转换成 WGS-84 椭球以消除椭球差异带来的影响。此外, ICESat-1 地学激光测高系统在进行高程测量时可能出现波形饱和现象, 会导致测量足迹点的高程低于实际高程值, 因此需要对其进行饱和校正

(Wang *et al.*, 2013)。足迹点高程的计算原理如公式 (1) 所示。

$$H = h - d_{\text{deltaEllip}} + d_{\text{satElevCorr}} - N, \quad (1)$$

公式 (1) 中, H 为基于 EGM96 大地水准面的正高; h 为基于 T/P 椭球的高程; $d_{\text{deltaEllip}}$ 为 T/P 椭球和 WGS-84 椭球之间的差值 (约 70 cm); $d_{\text{satElevCorr}}$ 为饱和校正参数, 可从数据集里获得; N 为当地大地水准面差距, 可由 MATLAB 中的 `geoidheight` 函数计算得到。

CryoSat-2 测高数据的预处理主要为波形重跟踪。由于内陆湖泊受浅水及陆地的影响, 雷达脉冲回波波形的常污染, 导致测得的卫星至水面距离不够准确。波形重跟踪算法可以校正卫星至水面距离, 从而提高 CryoSat-2 水位测量精度 (Kleinherenbrink *et al.*, 2014; 赵云等, 2017)。目前针对 CryoSat-2 测高数据的波形重跟踪算法较多, 本文采用 Jain *et al.* (2015) 提出的主波峰阈值重跟踪算法, 门槛值设为 30%。研究表明该方法处理 level 1b 数据得到的结果优于欧空局官方提供的 level 2 数据 (Jain *et al.*, 2015; Nielsen *et al.*, 2015; Villadsen *et al.*, 2016)。足迹点高程的计算原理如公式 (2~4) 所示。

$$H = H_{\text{alt}} - R_{\text{cor}} - H_{\text{geo}} - N, \quad (2)$$

$$R_{\text{cor}} = R + R_{\text{trk}}, \quad (3)$$

$$R_{\text{trk}} = (C_{\text{trk}} - C_{\text{ntp}}) \times B, \quad (4)$$

公式 (2) 中, H 为基于 EGM96 大地水准面的正高; H_{alt} 为卫星轨道高度; R_{cor} 为改正后的卫星至水面距离; H_{geo} 为各项地球物理校正参数 (包括电离层、干湿对流层、固体地球潮、海洋负荷潮和极潮的校正参数); N 为当地大地水准面差距。公式 (3) 中, R 为卫星至水面距离, R_{trk} 为波形重跟踪算法计算得到的距离改正值。在公式 (4) 中, C_{trk} 为波形重跟踪算法计算得到的波形前缘重跟踪点, C_{ntp} 为波形中点 (LRM 模式下波形的中点为 64.5, 采样数为 1~128); B 为波形的分辨率 (0.468 4 m)。

2.2.2 高程异常点移除 数据预处理完成后, 利用 MODIS WATER MASK 筛选出湖面足迹点, 此时测高数据中仍然存在一些高程异常的足迹点 (图 2), 需要被移除。通常情况下, ICESat-1 和 CryoSat-2 LRM 湖面足迹点的高程波动范围分别为 30 cm 和 40 cm (Zhang *et al.*, 2011; Phan *et al.*, 2012; Nielsen *et al.*, 2015)。因此, 超过此范围的湖面足迹点将被视为异常点移除, 具体的移除步骤如下 (Phan *et al.*, 2012; Kleinherenbrink *et al.*,

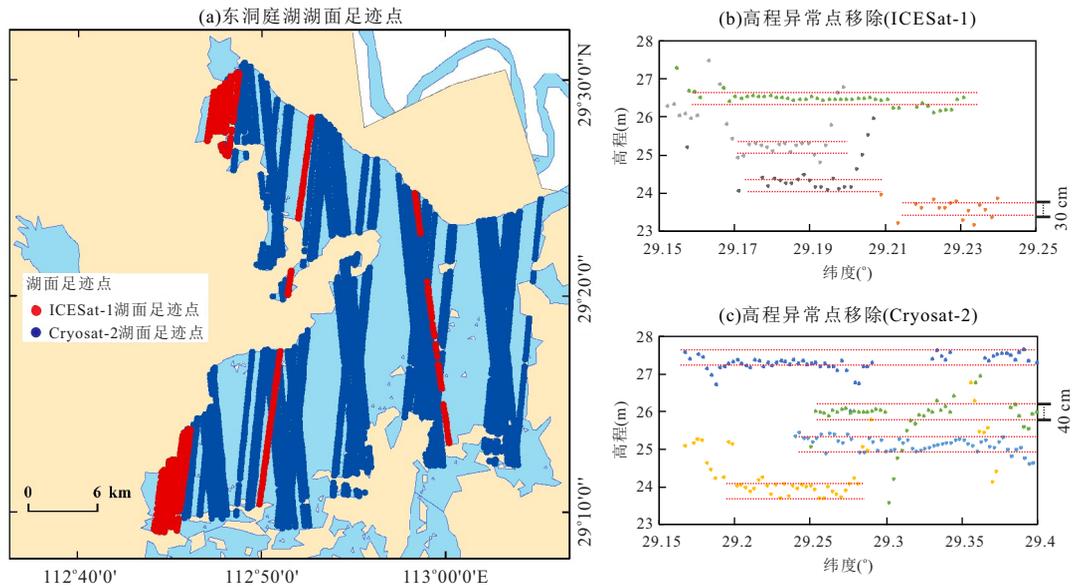


图2 两颗卫星在东洞庭湖的湖面足迹点(a)及高程异常点移除示意图(b, c)

Fig.2 The map of lake footprints (a) and outliers removal (b, c) of two satellites on East Dongting Lake

2014).

(1)提取测高数据中1 m范围内的湖面足迹点.计算湖面足迹点的平均高程值,移除高程与平均值差值的绝对值大于3 m的点;然后计算剩余点的平均高程值,移除高程与平均值差值的绝对值大于1 m的点;按照同样的方法移除差值的绝对值大于0.5 m的点,从而移除明显的高程异常足迹点,得到高程差值在1 m内的湖面足迹点.

(2)高程异常点的进一步移除.计算第一步中剩余足迹点的平均高程值及均方差,移除高程与平均值差值的绝对值大于均方差的足迹点(考虑测高数据存在一定波动,当ICESat-1数据均方差小于15 cm时,令其为15 cm;当CryoSat-2数据均方差小于20 cm时,令其为20 cm).

(3)重复第二步.

(4)若剩余的足迹点数量不小于10或超过湖面足迹点总数的40%,则结束异常点移除.剩余点的平均高程值即为湖泊的卫星测高水位.

2.2.3 精度验证 通常将卫星测高水位与实测水位进行对比来验证测高数据的精度.但由于卫星测高数据与实测水位数据的高程参考系统不一致,且转换较为复杂,因此本文参考前人方法,通过相关系数(R)和显著性值(P)两个指标间接评价卫星测高数据的精度(Song *et al.*, 2015).

2.2.4 湖泊水位变化趋势 为了分析湖泊的水位变化

趋势,我们对湖泊的水位数据进行线性拟合.在进行拟合时,一般要求湖泊的卫星测高水位数据不少于6个,时间跨度大于3年(Wang *et al.*, 2013).此外,数据开始和结束的日期最好同处于枯水季或丰水季内.对于符合要求的湖泊,利用最小二乘法进行线性拟合,以获取其水位变化趋势(Jiang *et al.*, 2017a),原理如公式(5)所示.

$$H = trd \times date + b, \quad (5)$$

式(5)中, H 为湖泊时间序列水位, trd 为湖泊水位的变化趋势, $date$ 为观测时间, b 为截距.

3 结果

3.1 精度验证

利用ICESat-1和CryoSat-2测高数据提取东洞庭湖和南洞庭湖的水位,并分别与城陵矶和沅江水文站的实测水位进行相关性分析,以验证卫星测高数据的准确性和可靠性.结果显示,湖泊的卫星测高水位与水文站实测水位呈现出极其显著的相关关系($R \geq 0.9$, $P \leq 0.001$)(图3),表明可以使用这两种测高数据来进行洞庭湖流域长时间序列的湖泊水位变化监测.要说明的是,ICESat-1在东洞庭湖的足迹点大都在湖泊西部较为边缘的区域(图2a),其距离城陵矶水文站较远,因此ICESat-1在东洞庭湖的卫星测高水位与城陵矶站实测水位的相关系数 R 要略小于其他验证结果.

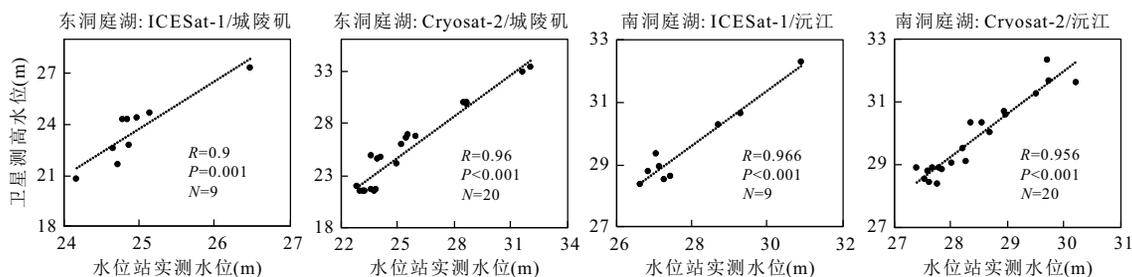


图 3 东洞庭湖及南洞庭湖的卫星测高水位与水文站实测水位的相关性

Fig.3 Correlation between water level derived by satellite altimetry and the in-situ observations in East and South Dongting Lakes

R 表示相关系数, P 表示显著性值, N 表示点数

3.2 湖泊水位变化特征

由于 ICESat-1 测高数据的轨迹密度和时间分辨率较低, 流域内仅有 5 个湖泊和 1 个水库包含至少 6 个 ICESat-1 测高水位数据, 经过公式(5)线性拟合可得到其 2003—2009 年的水位变化趋势(图 4a)。据统计, 流域内有 4 个湖泊的水位呈现下降趋势 ($-0.18 \sim -0.09$ m/a), 其中东洞庭湖和南洞庭湖的下降趋势较为明显, 下降速率分别为 -0.13 m/a 和 -0.18 m/a。仅有 1 个小湖泊呈现 0.11 m/a 的上升趋势。另外, 铁山水库的水位呈现 -0.81 m/a 的下降趋势。洞庭湖的水位在 2003—2009 年呈下降趋势, 与前人研究结果一致。例如, 李景刚等(2010a)、袁敏等(2014)及 Wang *et al.*(2014)的研究均表明, 洞庭湖的面积在 21 世纪前 10 年呈下降趋势。

由于 CryoSat-2 测高数据的轨迹密度和时间分

辨率较高, 流域内有 24 个湖泊和 7 个水库包含至少 6 个 CryoSat-2 测高水位数据, 经过公式(5)线性拟合可得到其 2010—2017 年的水位变化趋势(图 4b)。据统计, 流域内有 18 个湖泊的水位保持稳定或呈现上升趋势 ($0 \sim 0.39$ m/a), 其中东洞庭湖、南洞庭湖和西洞庭湖的上升速率分别为 0.04 m/a、 0.05 m/a 和 0.04 m/a; 仅有 6 个湖泊呈现水位下降趋势 ($-0.02 \sim -0.16$ m/a), 其中大通湖的下降速率为 -0.03 m/a。另外, 流域内监测到的 7 个水库都呈现明显的水位上升趋势 ($0.19 \sim 4.4$ m/a), 其中东江水库的上升速率为 0.98 m/a。洞庭湖流域的湖泊和水库在 2010—2017 年主要呈现水位上升趋势, 与前人研究结果一致。例如 Jiang *et al.*(2017b)的研究显示, 长江中游洞庭湖流域的湖泊和水库在 2010—2016 年主要呈现水位上升趋势。

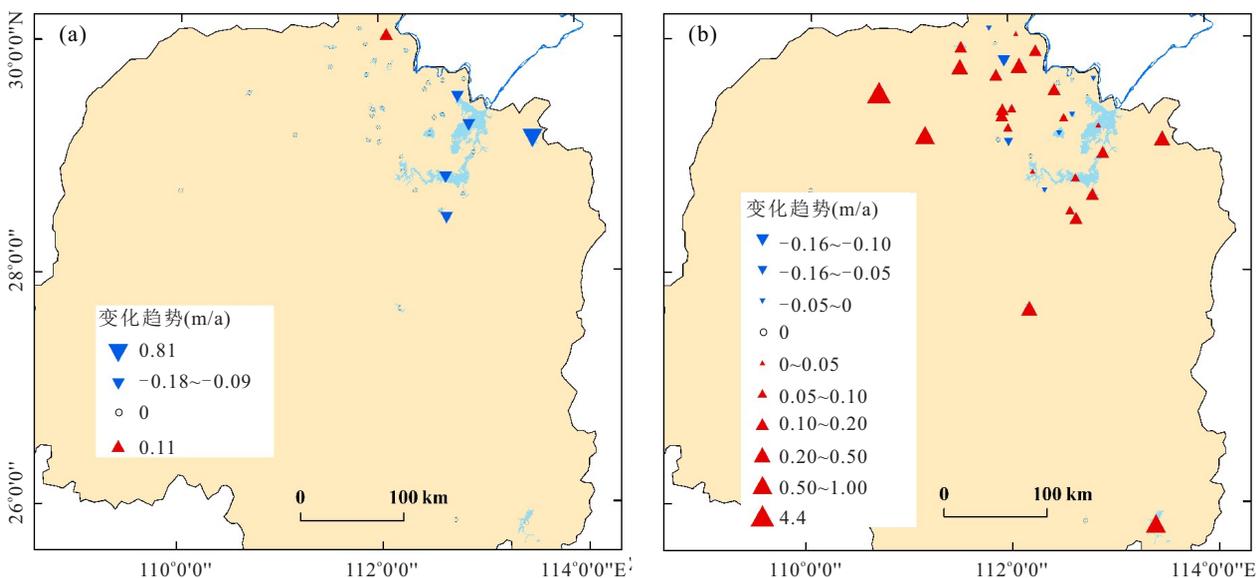


图 4 2003—2009 年(a)及 2010—2017 年(b)洞庭湖流域湖泊水位变化图

Fig.4 The map of lake level change in Dongting Lake basin during the period of 2003—2009 (a) and 2010—2017 (b)

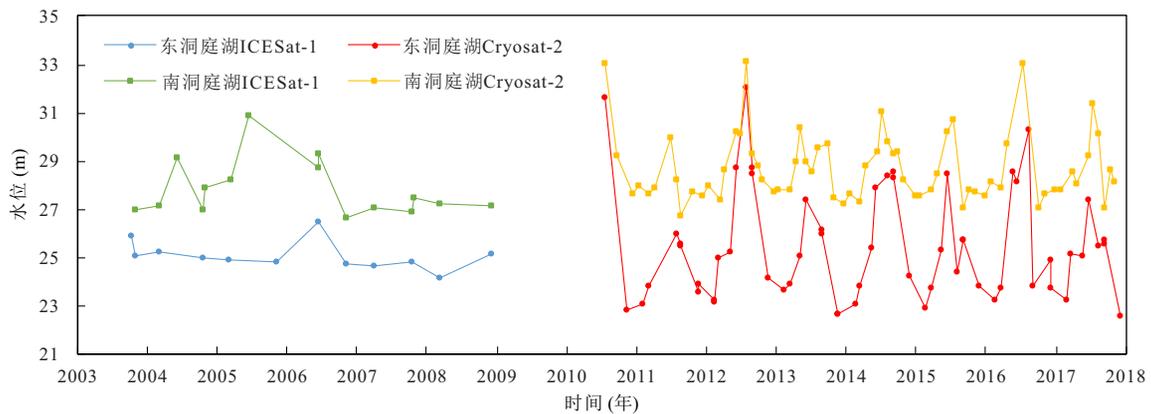


图5 2003—2017年东洞庭湖及南洞庭湖水水位时间序列图

Fig.5 Time series water level of East Dongting Lake and South Dongting Lake from 2003 to 2017

表1 结合两种卫星测高数据的数据处理结果(2003—20017)

Table 1 Data process results by combining two satellite altimetry data (2003—2017)

湖名	水位数量	平均湖面 足迹点数	起始日期 (年-月-日)	起始水位 (m)	结束日期 (年-月-日)	结束水位 (m)	变化趋势(m/a)	R^2
大通湖	26	17	2004-10-27	26.82	2017-10-09	26.63	-0.01	0.030 6
南千渠	14	5	2003-03-20	30.54	2017-06-19	29.8	-0.01	0.016 3
无名湖泊	19	7	2003-10-26	34.54	2017-12-06	34.85	0.02	0.041 7
采桑湖	13	8	2003-11-02	26.4	2017-9-10	26.6	0.03	0.052 3
东洞庭湖	61	27	2003-03-07	23.61	2017-12-04	22.75	0.03	0.002 9
南洞庭湖	81	15	2003-11-02	26.95	2017-11-07	28.15	0.06	0.031 6
团头湖	16	3	2003-11-02	27.81	2017-07-16	31.04	0.20	0.453 7
烂泥湖	13	6	2004-03-05	25.66	2017-04-22	27.45	0.22	0.661 4
铁山水库	16	8	2004-03-13	86.58	2017-10-07	91.63	0.36	0.351 2

结合两颗卫星的测高数据,可获得流域内湖泊十多年来的水位序列.图5是东洞庭湖及南洞庭湖的长时期水位序列图.从图5中可以看出,ICESat-1时间分辨率较低,只能得到大致的水位变化趋势;而CryoSat-2时间分辨率较高,可以清晰地反映出洞庭湖水位的季节波动和年际变化.今后的研究可以考虑利用更多的测高卫星(例如Envisat)数据来增加湖泊2003—2009年期间的水位观测密度,从而得到较高时间分辨率的水位序列.从年内水位变化来看,洞庭湖的水位变化具有明显的季节性特征,一般每年春季洞庭湖的水位开始上涨,夏季水位达到一年的峰值,从秋季开始水位逐渐下降,到冬季水位降至年内最低.南洞庭湖年内水位最大差值超过5 m,东洞庭湖超过7 m.从年际变化来看,东洞庭湖及南洞庭湖的水位在2010、2012及2016年出现较高峰值,而在2011年出现较低峰值.此外,由于南洞庭湖的地势较高,南洞庭湖的水位高于东洞庭湖,但在丰水期水位差距较小(最小仅为1 m左右),

枯水期水位差距较大(最大超过4 m).

分析有两种卫星测高数据覆盖的9个湖泊及水库,对其水位时间序列进行线性拟合得到其2003—2017年水位变化趋势(表1).从表中可以看出,流域内有6个湖泊的水位呈现上升趋势(0.02~0.22 m/a);仅有南千渠和大通湖的水位呈现微弱下降趋势,下降速率为-0.01 m/a.另外,铁山水库的水位呈现0.36 m/a的明显上升趋势.拟合决定系数(R^2)通常指回归直线对观测值的拟合程度,从表1中可以看出,拟合的 R^2 普遍较小,这是由于洞庭湖流域内湖泊水位波动频繁,故而线性拟合效果较差.

4 讨论

洞庭湖流域处于亚热带季风气候区,降雨充沛,流域内人口众多,人类活动频繁,故流域内湖泊的水位受到降水等气候因素以及水库运行、人类用水等人为因素的影响.本文结合了洞庭湖流域的

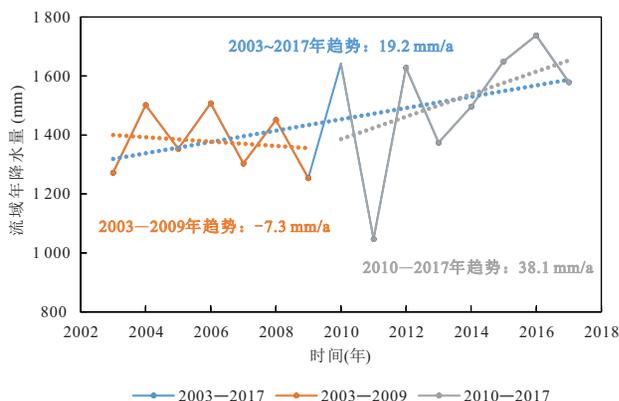


图 6 基于 TRMM 3B43 数据的洞庭湖流域 2003—2017 年降水变化

Fig.6 The change chart of annual precipitation derived by TRMM 3B43 data in Dongting basin during 2003—2017

TRMM 降水和人类用水等数据,来讨论洞庭湖流域内湖泊水位变化的驱动因素.

4.1 降水

降水是影响湖泊水位变化的最直接气候因素.图 6 为基于 TRMM 3B43 数据的洞庭湖流域 2003—2017 年降水变化曲线.从图 6 中可以看出,洞庭湖流域的年降水量在 2003—2009 年呈 7.3 mm/a 的下降趋势,而在 2010~2017 年呈 38.1 mm/a 的上升趋势,总体来看,在 2003—2017 呈现 19.2 mm/a 的上升趋势.流域降水的变化趋势与 2003—2017 年流域内湖泊卫星测高水位先下降后上升,总体为上升的变化趋势一致(图 4;表 1).此外,从单个年份来看,2010、2012 和 2016 年流域内年降水量较高,与之对应的洞庭湖水位出现较高的峰值;而 2011 年降水量最少,对应的湖泊水位也较低(图 5 和 6).

为了进一步说明降水与湖泊水位之间的关系,我们以东洞庭湖、南洞庭湖和大通湖为例,将其年

均水位与年降水量进行相关性分析.结果显示,两者呈现出正相关关系(图 7).其中,南洞庭湖的年均水位与流域内年降水量的相关性较为显著($R=0.722, P=0.067$),东洞庭湖次之($R=0.659, P=0.107$),大通湖较弱($R=0.497, P=0.256$).洞庭湖年度入湖水量的 80% 左右来自流域的“四水”及区间河湖径流(李景刚等,2010a;袁敏等,2014;程俊翔等,2016),而降水带来的径流通过“四水”等河流补给到南洞庭湖所需时间较短,通过南洞庭湖再补充到东洞庭湖所需时间较长,故南洞庭湖的年均水位与流域内降水的相关性较为显著,而东洞庭湖相对较弱.大通湖作为当地生活和工农业生产的重要水源,其水位除了受降水影响,还受当地水利部门控制,故其年均水位与降水的相关性受人为因素影响而有所减弱.综上所述,近十年来洞庭湖流域内湖泊水位变化主要受流域范围内降水的驱动.

4.2 水库运行

以三峡为主的众多水库运行会改变下游江河水情进而影响洞庭湖流域内湖泊的入湖径流补给和出湖径流量,从而引起湖泊水位的变化响应.以东洞庭湖为例,从图 8 中可以看出,东洞庭湖的水位在春、夏和冬季都呈上升趋势,与降水的变化趋势一致,但在秋季则呈下降趋势,与降水上升的趋势相反,这可能与水库运行有关.三峡水库及洞庭湖流域内水库的运行具有明显的季节性特征,秋季(9—11 月)为其蓄水时期,所以通过“三口”和“四水”进入东洞庭湖的径流会减少,进而导致其水位的下降.据统计,三峡水库蓄水后(2003—2008 年),从三口进入洞庭湖的年均入湖水量减少了 20.3% (李景刚等,2010a).与此同时,三峡蓄水期间城陵矶水位平均下降 1.32 m(赖锡军等,2012;袁敏等,2014),这意味着洞庭湖的出湖水量增加,这将进一

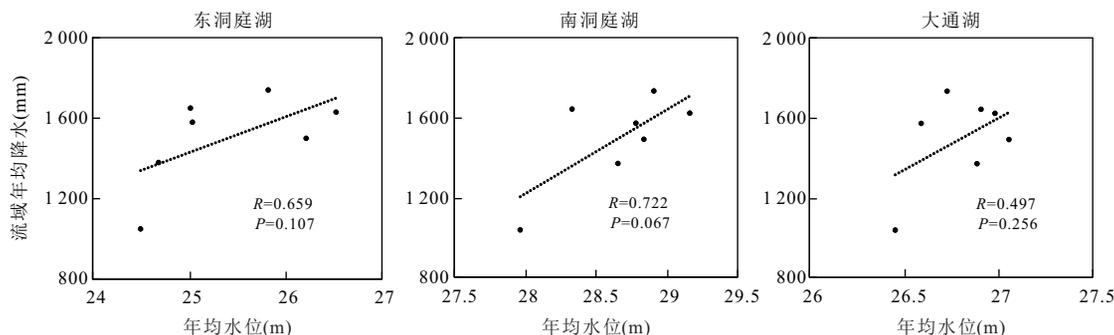


图 7 湖泊年均水位与流域年降水量相关性分析

Fig.7 Correlation between the annual average lake levels and annual precipitation of basin

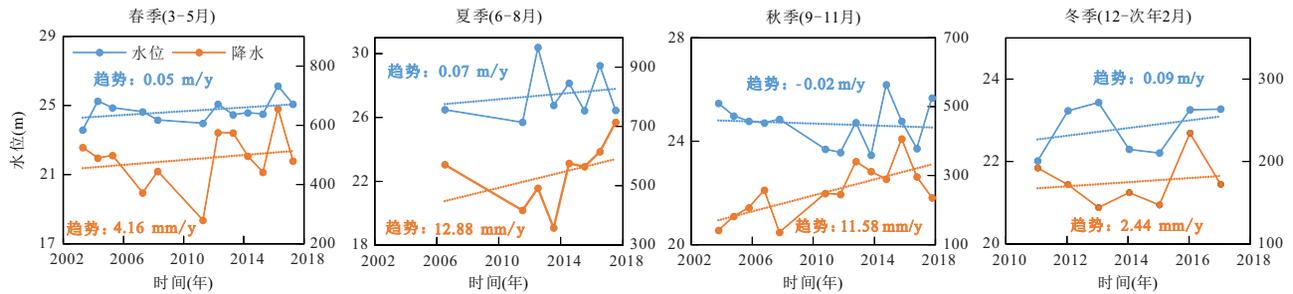


图8 东洞庭湖季节水位变化与流域季节降水变化

Fig.8 The seasonal change chart of precipitation and water level in East Dongting Lake

步导致湖泊水位的下降.因此,以三峡为主的水库秋季蓄水会对洞庭湖流域内湖泊水位产生季节性的影响.

4.3 人类用水

洞庭湖流域位于长江中游经济带,人口众多,工农业活动频繁,故工农业生产及人类生活的用水量也较大.据《长江流域及西南诸河水资源公报》中统计的长江各二级流域人类用水数据,洞庭湖流域的人类年度用水总量常年在 36 km^3 以上,近 15 年以每年 0.028 km^3 的速度增长,其用水总量为长江各二级流域之首.在 2003—2009 年流域内降水普遍减少的情形下,人类用水仍维持在较高水量,这将加剧湖泊水位的下降.2010 年以后,虽然流域内降水增加,但人类用水量也在缓慢上升,这可能导致流域内部分湖泊的水位变化仍呈现下降趋势(如大通湖).此外,Wang *et al.* (2017) 的研究表明,虽然 2010 年以来三峡水库已经满负荷运行,但人类用水对长江中下游流域湖泊水量的影响已经可以和三峡水库媲美,并且可能成为影响长江中下游湖泊水量变化的关键人为因素.

5 结论

(1) 据两颗测高卫星的监测结果,洞庭湖流域湖泊水位在 2003—2017 年呈现出先下降后上升,总体为上升的变化趋势.2003—2009 年,监测到的 80% 的湖泊(5 个湖泊中的 4 个)呈现水位下降趋势 ($-0.18 \sim -0.09 \text{ m/a}$); 而 2010—2017 年,监测到的 75% 的湖泊(24 个湖泊中的 18 个)呈现水位稳定或上升趋势 ($0 \sim 0.39 \text{ m/a}$); 结合两个时期的结果,2003—2017 年间 75% 的湖泊(8 个湖泊中的 6 个)呈现水位上升趋势 ($0.02 \sim 0.22 \text{ m/a}$).

(2) 洞庭湖流域湖泊水位变化受多种因素影响.流域范围内降水是湖泊水位变化的主要驱动因子;

此外,以三峡为主的水库运行会影响洞庭湖流域内湖泊的出入湖径流,从而对湖泊的水位产生季节性影响;同时,持续增长的人类用水也对湖泊水位有一定影响.

(3) 测高卫星为长时序大范围的湖泊水位监测提供了有力的手段.与常规水位测量方法相比,测高卫星数据可以覆盖更多湖泊,整合多颗卫星的测高数据,可获得较长时序的湖泊水位信息,这对研究湖泊水位变化及其与气候和环境的响应具有重要意义.

References

- Cheng, J.X., Xu, L.G., Jiang, J.H., et al., 2016. The Research of Runoff Responses to Climate Change and Human Activities in the Dongting Lake Catchment. *Journal of Agro-Environment Science*, 35(11): 2146—2153(in Chinese with English abstract).
- Göttl, F., Dettmering, D., Müller, F., et al., 2016. Lake Level Estimation Based on Cryosat-2 SAR Altimetry and Multi-Looked Waveform Classification. *Remote Sensing*, 8(11): 885. <https://doi.org/10.3390/rs8110885>
- Jain, M., Andersen, O. B., Dall, J., et al., 2015. Sea Surface Height Determination in the Arctic Using Cryosat-2 SAR Data from Primary Peak Empirical Retracker. *Advances in Space Research*, 55(1): 40—50. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.09.006>
- Jiang, L.G., Nielsen, K., Andersen, O.B., et al., 2017a. Monitoring Recent Lake Level Variations on the Tibetan Plateau Using Cryosat-2 SAR In Mode Data. *Journal of Hydrology*, 544: 109—124. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.11.024>
- Jiang, L.G., Nielsen, K., Andersen, O.B., et al., 2017b. Cryosat-2 Radar Altimetry for Monitoring Freshwater Resources of China. *Remote Sensing of Environment*, 200: 125—139. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.08.015>
- Jiang, W.P., 2001. The Applications of Satellite Altimetry

- Technology in Geodesy (Dissertation). Wuhan University, Wuhan(in Chinese with English abstract).
- Jin, T.Y., Li, J.C., Jiang, W.P., et al., 2011. The New Generation of Global Mean Sea Surface Height Model Based on Multi-Altmetric Data. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 40(6): 723—729(in Chinese with English abstract).
- Kleinherenbrink, M., Ditmar, P.G., Lindenbergh, R.C., 2014. Retracking Cryosat Data in the SARIn Mode and Robust Lake Level Extraction. *Remote Sensing of Environment*, 152:38—50. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.05.014>
- Lai, X.J., Jiang, J.H., Huang, Q., 2012. Pattern of Impoundment Effects and Influencing Mechanism of Three Gorges Project on Water Regime of Lake Dongting. *Journal of Lake Sciences*, 24(2): 178—184(in Chinese with English abstract).
- Li, D., Christakos, G., Ding, X., et al., 2018. Adequacy of TRMM Satellite Rainfall Data in Driving the SWAT Modeling of Tiaoxi Catchment (Taihu Lake Basin, China). *Journal of Hydrology*, 556:1139—1152. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.01.006>
- Li, H., Yu, Z.D., Cai, X.B., et al., 2017. River Terrace Extraction Based on Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing. *Earth Science*, 42(5):734—742(in Chinese with English abstract).
- Li, J.C., Chu, Y.H., Jiang, W.P., et al., 2007. Monitoring Level Fluctuation of Lakes in Yangtze River Basin by Altimetry. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 32(2):144—147(in Chinese English abstract).
- Li, J.G., Li, J.R., Huang, S.F., et al., 2010a. The Remote Sensing Monitoring Analysis of Chinese Dongting Lake Water Area Variations in Last 10 Years Using Terra/MODIS Data Time Series. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 8(3):201—207(in Chinese with English abstract).
- Li, J.G., Li, J.R., Huang, S.F., et al., 2010b. Characteristics of the Recent 10-Year Flood/Drought over the Dongting Lake Basin Based on TRMM Precipitation Data and Regional Integrated Z - Index. *Resources Science*, 32(6): 1103—1110(in Chinese with English abstract).
- Li, J.G., Li, J.R., Ruan, H.X., et al., 2010c. Application of Jason-2 Altimetry Data in Monitoring of Continental Water Level Fluctuations. *Journal of Natural Resources*, 25(3):502—510(in Chinese with English abstract).
- Li, J.L., Chen, X., Bao, A.M., 2011. Spatial-Temporal Characteristics of Lake Level Changes in Central Asia during 2003—2009. *Acta Geographica Sinica*, 66(9): 1219—1229(in Chinese with English abstract).
- Liu, W.Q., Qian, Z., Zhang, S.H., 2016. The Analysis of Evolution Trend and Causes of Water Level Variation in Dongting Lake. *China Flood & Drought Management*, 26(4):51—54(in Chinese with English abstract).
- Liu, Y.B., Fu, Q.N., Song, P., et al., 2011. Satellite Retrieval of Precipitation: An Overview. *Advances in Earth Science*, 26(11): 1162—1172(in Chinese with English abstract).
- Nielsen, K., Stenseng, L., Andersen, O.B., et al., 2015. Validation of Cryosat-2 SAR Mode Based Lake Levels. *Remote Sensing of Environment*, 171:162—170. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.10.023>
- Phan, V.H., Lindenbergh, R., Menenti, M., 2012. ICESat Derived Elevation Changes of Tibetan Lakes between 2003 and 2009. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 17:12—22. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.09.015>
- Phillips, H.A., Hons, B.S., 1999. Applications of ERS Satellite Radar Altimetry in the Lambert Glacier-Amery Ice Shelf System, East Antarctica (Dissertation). Australia University of Tasmania, Hobart.
- Song, C.Q., Ye, Q.H., Sheng, Y.W., et al., 2015. Combined ICESat and Cryosat-2 Altimetry for Accessing Water Level Dynamics of Tibetan Lakes over 2003—2014. *Water*, 7(12): 4685—470. <https://doi.org/10.3390/w7094685>
- Villadsen, H., Deng, X., Andersen, O.B., et al., 2016. Improved Inland Water Levels from SAR Altimetry Using Novel Empirical and Physical Retracker. *Journal of Hydrology*, 537:234—247. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.051>
- Wan, R.R., Yang, G.S., Wang, X.L., et al., 2014. Progress of Research on the Relationship between the Yangtze River and Its Connected Lakes in the Middle Reaches. *Journal of Lake Sciences*, 26(1):1—8(in Chinese with English abstract).
- Wan, W., Xiao, P.F., Feng, X.Z., et al., 2014. Monitoring Lake Changes of Qinghai-Tibetan Plateau over the Past 30 Years Using Satellite Remote Sensing Data. *Chinese Science Bulletin*, 59(8):701—714(in Chinese).
- Wang, J., Sheng, Y., Wada, Y., 2017. Little Impact of the Three Gorges Dam on Recent Decadal Lake Decline across China's Yangtze Plain. *Water Resources Research*, 53(5): 3854—3877. <https://doi.org/10.1002/2016wr019817>
- Wang, J.D., Sheng, Y.W., Tong, T.S.D., 2014. Monitoring Decadal Lake Dynamics across the Yangtze Basin Downstream of Three Gorges Dam. *Remote Sensing of Envi-*

- ronment, 152: 251–269. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.06.004>
- Wang, X.W., Gong, P., Zhao, Y.Y., et al., 2013. Water-Level Changes in China's Large Lakes Determined from ICE-Sat/GLAS Data. *Remote Sensing of Environment*, 132: 131–144. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.01.005>
- Xiang, F.F., Wang, L.C., Yao, R., et al., 2018. The Characteristics of Climate Change and Response of Vegetation in Three Gorges Reservoir Area. *Earth Science*, 43(Suppl.1):42–52(in Chinese with English abstract).
- Yi, B.L., Li, X.B., Mei, J.H., 2000. Studying on the Relation of the Area, the Volume and the Water of Dongting Lake and Evaluating about the Ability to Modulate and Store the Flood Water. *Hunan Geology*, 19(4):267–270 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, M., Li, Z.W., Xie, G.X., et al., 2014. Effects of the Three Gorges Project on the Water Surface Area of Lake Dongting, 2000–2010. *Journal of Lake Sciences*, 26(1):37–45(in Chinese with English abstract).
- Zhang, G.Q., Xie, H.J., Kang, S.H., et al., 2011. Monitoring Lake Level Changes on the Tibetan Plateau Using ICE-Sat Altimetry Data (2003–2009). *Remote Sensing of Environment*, 115(7): 1733–1742. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.03.005>
- Zhang, X., Wu, Y.H., 2015. Zhari Namco Water Level Change Detection Using Multi-Satellite Altimetric Data during 1992–2012. *Journal of Natural Resources*, 30(7):1153–1162(in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y., Liao, J.J., Shen, G.Z., et al., 2017. Monitoring the Water Level Changes in Qinghai Lake with Satellite Altimetry Data. *Journal of Remote Sensing*, 21(4):633–644 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, H., 2016. Impact of Climate Change on Water Resources in Dongting Lake Basin (Dissertation). Hunan Normal University, Changsha(in Chinese with English abstract).
- Zwally, H.J., Schutz, B., Abdalati, W., et al., 2002. ICESat's Laser Measurements of Polar Ice, Atmosphere, Ocean, and Land. *Journal of Geodynamics*, 34:405–445. [https://doi.org/10.1016/s0264-3707\(02\)00042-x](https://doi.org/10.1016/s0264-3707(02)00042-x)
- 程俊翔, 徐力刚, 姜加虎, 等, 2016. 洞庭湖流域径流量对气候变化和人类活动的响应研究. *农业环境科学学报*, 35(11):2146–2153.
- 姜卫平, 2001. 卫星测高技术在大地的测量学中的应用(博士学位论文). 武汉:武汉大学.
- 金涛勇, 李建成, 姜卫平, 等, 2011. 基于多源卫星测高数据的新一代全球平均海面高模型. *测绘学报*, 40(6): 723–729.
- 赖锡军, 姜加虎, 黄群, 等, 2012. 三峡工程蓄水对洞庭湖水情的影响格局及其作用机制. *湖泊科学*, 24(2):178–184.
- 李辉, 余忠迪, 蔡晓斌, 等, 2017. 基于无人机遥感的河流阶地提取. *地球科学*, 42(5):734–742.
- 李建成, 褚永海, 姜卫平, 等, 2007. 利用卫星测高资料监测长江中下游湖泊水位变化. *武汉大学学报(信息科学版)*, 32(2):144–147.
- 李景刚, 李纪人, 黄诗峰, 等, 2010a. 近 10 年来洞庭湖区水面面积变化遥感监测分析. *中国水利水电科学研究院学报*, 8(3):201–207.
- 李景刚, 李纪人, 黄诗峰, 等, 2010b. 基于 TRMM 数据和区域综合 Z 指数的洞庭湖流域近 10 年旱涝特征分析. *资源科学*, 32(6):1103–1110.
- 李景刚, 李纪人, 阮宏勋, 等, 2010c. Jason-2 卫星测高数据在陆地水域水位变化监测中的应用. *自然资源学报*, 25(3):502–510.
- 李均力, 陈曦, 包安明, 2011. 2003–2009 年中亚地区湖泊水位变化的时空特征. *地理学报*, 66(9):1219–1229.
- 刘万千, 钱湛, 张双虎, 2015. 洞庭湖水位变化趋势及原因分析. *中国防汛抗旱*, 26(4):51–54.
- 刘元波, 傅巧妮, 宋平, 等, 2011. 卫星遥感反演降水研究综述. *地球科学进展*, 26(11):1162–1172.
- 万荣荣, 杨桂山, 王晓龙, 等, 2014. 长江中游通江湖泊江湖关系研究进展. *湖泊科学*, 26(1):1–8.
- 万玮, 肖鹏峰, 冯学智, 等, 2014. 卫星遥感监测近 30 年来青藏高原湖泊变化. *科学通报*, 59(8):701–714.
- 向菲菲, 王伦澈, 姚瑞, 等, 2018. 三峡库区气候变化特征及其植被响应. *地球科学*, 43(增刊 1):42–52.
- 易波琳, 李晓斌, 梅金华, 2000. 洞庭湖面积容积与水位关系及调蓄能力评估. *湖南地质*, 19(4):267–270.
- 袁敏, 李忠武, 谢更新, 等, 2014. 三峡工程调节作用对洞庭湖水面积(2000–2010 年)的影响. *湖泊科学*, 26(1): 37–45.
- 张鑫, 吴艳红, 2015. 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). *自然资源学报*, 30(7): 1153–1162.
- 赵云, 廖静娟, 沈国状, 等, 2017. 卫星测高数据监测青海湖水位变化. *遥感学报*, 21(4):633–644.
- 周慧, 2016. 气候变化对洞庭湖流域水资源影响分析(博士学位论文). 长沙:湖南师范大学.