

# Application of Jason and GRACE Satellites in Terrestrial Water Resources and Flood Monitoring

Jinghua Xiong, Shenglian Guo\*, Jun Wang, Jiabo Yin

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei  
Email: jhxiong@whu.edu.cn, \*slguo@whu.edu.cn

Received: Oct. 12<sup>th</sup>, 2020; accepted: Nov. 18<sup>th</sup>, 2020; published: Dec. 9<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

As powerful supplements to large-scale hydrological monitoring techniques, Jason and GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) satellites are of great significance for global and regional water resources management and disaster warning under changing environments. This study introduces the Jason altimetry satellite and GRACE data, and summarizes their applications and relevant researches on terrestrial water resources and flood monitoring. Finally, the current challenges and prospects of Jason and GRACE satellites are demonstrated.

## Keywords

Jason Satellite, GRACE Satellite, Terrestrial Water Resource, Extreme Floods, Monitoring

---

# Jason测高卫星和GRACE重力卫星在陆地水资源及洪水监测中的应用

熊景华, 郭生练\*, 王 俊, 尹家波

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉  
Email: jhxiong@whu.edu.cn, \*slguo@whu.edu.cn

收稿日期: 2020年10月12日; 录用日期: 2020年11月18日; 发布日期: 2020年12月9日

---

## 摘 要

Jason测高卫星和GRACE重力卫星作为大尺度水文监测手段的有力补充, 对变化环境下的全球和区域水资源管

作者简介: 熊景华(1998-), 男, 研究生, 主要从事遥感水文研究。

\*通讯作者。

文章引用: 熊景华, 郭生练, 王俊, 尹家波. Jason 测高卫星和 GRACE 重力卫星在陆地水资源及洪水监测中的应用[J]. 水资源研究, 2020, 9(6): 571-577. DOI: 10.12677/jwrr.2020.96062

理和灾害预警具有重要意义。本文介绍了Jason测高卫星和GRACE重力卫星数据,归纳了国内外学者基于Jason测高卫星和GRACE重力卫星开展的陆地水资源与洪水事件监测研究情况,并分析了Jason测高卫星和GRACE重力卫星目前面临的挑战与未来的展望。

## 关键词

Jason测高卫星, GRACE重力卫星, 陆地水资源, 极端洪水, 监测研究

Copyright © 2020 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

作为全球水循环的重要组成部分,陆地水资源是地表水、土壤水与地下水资源的总和。研究陆地水资源变化有助于理解水循环过程和管理水资源,对气候变化和人类活动背景下的水资源调度具有重要意义[1]。

监测陆地水资源的主要方式包括水文站、陆面过程模型反演以及光学或雷达遥感卫星等。水文站点可以测量降水、径流和水位等水文要素,在水资源监测和水文模拟中发挥了重要作用,但其只能提供点尺度的水文信息,难以代表整个流域的真实情况。此外,跨国界地区缺乏有效的水文记录,且监测标准的差异性和数据透明性的缺乏,使得基于水文站点估算水资源变化难度较大[2]。陆面过程反演对流量和土壤水等水文要素进行模拟,但对于地形地质条件较复杂的地区,模型不确定性较大,且无法考虑水库水资源调度的影响[3]。光学遥感卫星通过合成波段影像识别陆地水体测量地表水资源量,但其受恶劣天气和云层厚度的影像,数据可用量较少[4],而微波传感器可以不受天气条件影响测量降雨强度和土壤层中的水分含量,广泛用于极端水文事件的监测[5],但其仅能对地表水或地面以下一定深度的土壤含水量进行估计,无法获得陆地水资源的真实值。

陆地水储量衡量了陆地垂直方向上地表水、土壤水和地下水储量的总和,而陆地水储量异常值(Terrestrial water storage anomaly, TWSA)通过扣除研究时段内陆地水储量的均值,可以反映地表水至深层地下水的总体变化,从而提供陆地储水量变化的综合信息,可结合降水作为判断大尺度极端洪水发生的指标[6]。此外,考虑到极地和高原冰川及深层地下水的利用难度较高,河流及淡水湖泊水是我国最重要的可利用陆地水资源[7]。因此,监测研究江河湖等地表水资源分布特征,对社会经济发展、生态系统健康和理解气候变化非常重要[8]。作为反映陆地水体资源量的直接参数,水位是洪水过程预报的关键指标,快速精准的监测河湖水位对汛前监测、汛时决策和汛后评估起到关键作用[9]。近年来快速发展的测高卫星和重力卫星为监测陆地水资源提供了有力条件。例如,2001年成功发射的Jason系列测高卫星通过分析雷达波形和后向散射功率得到水体表面的高程信息,因其较短的重访周期(10天)和高频采样率(20 Hz)在内陆水体的水位监测中发挥了重要作用[10]。相比传统测量手段,Jason测高卫星具有快速全球覆盖能力、全天候观测等特点,是无资料地区及国际水体长期监测的有力工具[11]。2002年发射的重力恢复和气候实验(Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE)重力卫星,通过测量地球重力场的变化反演每月的全球陆地储水量变化,从而不受时间和空间限制地监测陆地水资源变化[12]。GRACE重力卫星凭借其全球高覆盖率且不受天气条件影响等优点,为监测极端洪水事件开辟了新途径[13]。

基于国内外最新的研究情况,本文综述了Jason测高卫星和GRACE重力卫星在陆地水资源和极端洪水事件的监测中的应用情况,并总结了目前Jason测高卫星和GRACE重力卫星存在的不足和挑战,对进一步在水文学

及水资源领域中利用重力卫星和雷达测高技术进行展望。

## 2. 卫星数据概述

### 2.1. Jason 测高卫星

美国星际空间中心(CNES)和美国航空航天局(NASA)于 2001 年 12 月成功发射 Jason-1 雷达测高卫星, 其搭载 Proteus 多任务航天器及 Topex-Poseidon 测高仪。重访周期为 10 天的 Jason-1 测高卫星基于 254 条卫星轨道覆盖了北纬 66°至南纬 66°范围内的海面及陆地水体高程变化, 设计寿命为 5 年。Jason-1 卫星退役后, 美国海洋和大气管理局(NOAA)、NASA、CNES 和欧洲气象卫星开发组织(EUMETSAT)共同研制的 Jason-2 测高卫星, 从 2008 年 6 月开始继续执行地球表面测高任务, 卫星载荷包括新一代 Poseidon-3 雷达测高仪, 可更好地实现陆地和冰层区域波形重跟踪, 以及 Doris 卫星定位系统和微波辐射计, 测量精度约为 2.5 cm [14]。在 Jason-2 卫星 2019 年 10 月结束观测任务后, 2016 年 1 月进入卫星轨道的 Jason-3 卫星将长期观测地球表面高程信息的任务延续至今。

Jason 系列测高卫星运行期间向地面传输可操作地球物理数据记录(OGDR)、临时地球物理数据记录(IGDR)和地球物理数据记录(GDR)三种数据产品族。三种产品族分别包含经过简化的 1 HZ 数据、原始的 NetCDF 格式数据集(1 HZ 数据和 20 HZ 数据), 以及包括所有雷达回波的传感器数据。OGDR、IGDR 和 GDR 数据产品族的数据产品复杂程度和精度逐渐增加, 且相应的分发延迟分别为 3~5 小时、1~2 天和 2 个月。使用 Jason 卫星测量的地表水面与测高仪之间的距离来反演水位, 具体公式如下所示:

$$ws = alt - ran - geo - corr \quad (1)$$

式中:  $ws$  是计算出的水位,  $alt$  表示 Jason 卫星相对于参考椭球系(半径 = 6378.1363 km, 椭球率 = 1/298.257)的高度。 $ran$  表示陆地水面和 Jason 卫星之间的距离。 $geo$  是参考椭球系至大地水准面(EGM96)的距离。 $corr$  表示各种高度校正项之和, 与海平面测高校正项不同, 陆地水体仅考虑电离层校正, 大地校正, 极潮校正, 对流层干校正和对流层湿校正。

### 2.2. GRACE 重力卫星

GRACE 数据由美国德克萨斯大学空间研究中心(Center for Space Research, CSR)、德国波茨坦地球科学中心(German Research Centre for Geosciences, GFZ)和美国宇航局喷气动力实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)解算, 各级产品数据由 NASA 负责分发(<https://podaac.jpl.nasa.gov/GRACE>)。CSR 在 2003 年首先对 GRACE 观测数据结算月度的重力场模型数据, 即 Release01 (RL01), 并于 2004 年正式公开发布, 此后 GFZ 和 JPL 陆续发布了 RL01 和 RL02 数据产品。目前, CSR、JPL 和 GFZ 均已经发布了最新的 RL06 版本重力场, 时间分辨率为月, 空间分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$  (经度 $^\circ \times$  纬度 $^\circ$ ), 发布时间段为 2002 年 4 月至 2017 年 6 月, 其中因电池老化等问题导致 20 个月数据缺失, 有效数据共 163 个月[15]。

目前, 官方发布的 GRACE 重力卫星的数据产品主要包括五个级别, 分别是 Level-0、Level-1A、Level-1B、Level-2 和 Level-3, 而 Level-0 和 Level-1A 级别数据不对外公开。Level-0 数据是 GRACE 原始数据中心的预处理结果, 主要包括接收、记录和分解 GRACE 测量系统的每日实测数据, Level-1A 数据对 K 波段测距结果以及 GPS 系统测量数据打上时间戳, 使其结果转化为应用单位制后统一输出。Level-1B 数据通过改变时标和数据采样率实现, 主要包括加速度计观测数据和卫星轨道等数据, 旨在提高 GRACE 重力卫星的定轨和处理精度, 通过处理该级别数据可转化为球谐系数形式, 即 Level-2 级别数据, 其作为最终面向应用的产品数据, 包括 GRACE 的月时变地球重力场模型和静态地球重力场模型数据。Level-2 级数据可经过进一步反演得到 Level-3 级别的全球网格产品, 单位网格大小从  $0.25^\circ$  至  $1^\circ$  (经度 $^\circ \times$  纬度 $^\circ$ )不等。

### 3. 应用综述

#### 3.1. Jason 测高卫星

##### 3.1.1. 河流及湖泊水位监测

自 Jason 系列测高卫星发射以来,国内外学者逐渐将其从海洋表面高程测量引入到内陆水体的水位测量中。Shum 等人发现 Jason-1 卫星数据在美国伊利湖的测量误差达到+5.8 cm 和-3.9 cm,且不确定性为 1.9 cm,对大西洋海平面的分析进一步验证了该结果[16];褚永海等人利用 Jason-1 卫星 2002 年至 2004 年的 GDR 测高数据发现呼伦湖水位以每年以 30~50 cm 的速率显著下降[17]。Jason-2 测高卫星数据较第一代卫星数据精度有所提高,其对表面积在 100 km<sup>2</sup> 至 300 km<sup>2</sup> 之间的湖泊水位具有较好的监测效果,卫星测高数据与实测水位的均方根误差随着湖泊面积变化在 3 cm 至 33 cm 之间波动[14]。随着测量数据精度提高,Jason-2 测高卫星数据逐渐被运用到河流水位监测中,2011 至 2012 年 Cooper/Diamantina 河段洪水期间 Jason-2 卫星数据与实测水位数据之间线性关系的决定系数在 0.90 至 0.98 间变化,两者一致性极高[18]。Jason-3 测高卫星的成功发射进一步拓宽了卫星测高数据精度和应用范围,但由于发射时间较短,学者通常将其与第一和第二代卫星同时使用以获得湖泊和河流等内陆水体长时间的观测资料[15]。

##### 3.1.2. 河道流量估算

流量是描述洪水过程的主要指标之一,通过 Jason 测高卫星反演的河道水位,可根据当地的水位流量关系曲线或用曼宁公式计算河道流量。Papa 等[19]基于 Jason-2 测高卫星数据及实测水位流量曲线估算了 2008 年至 2011 年期间恒河-布拉马普特拉河的逐月河道流量,发现其与水文站记录值的平均误差为 6.5%。Paris [20]使用 Jason-2 卫星测高数据,采用曼宁公式估算了亚马逊河流域主要支流的流量,与多普勒流量计测量数据的相对误差在 6.4%至 19.8%之间。使用测高卫星估算河道流量,对国际河流及无资料地区的水资源管理具有重要作用[21]。

#### 3.2. GRACE 重力卫星

##### 3.2.1. 陆地水储量监测

GRACE 重力卫星通过测量地球由于局部质量异常引起的重力场变化,反演获得陆地水储量变化(TWSA)的时空分布,提供了监测地球水储量变化的新思路[22]。Syed 等[23]描述了 2002 年至 2004 年全球尺度下 GRACE 重力卫星驱动的陆地水储量变化的时空变化特征,并将其与全球陆地数据同化系统模拟的土壤水含量变化进行比较,发现两者在时间和空间尺度上变化一致。

GRACE 重力卫星通过高精度测量地球重力场的时空变化反演陆地水储量异常值,可感受到高度为 1 cm 左右的大地水准面变化,其空间分辨率约为 200~300 km [24]。由于 GRACE 重力卫星空间分辨率和测量精度的限制,大部分基于 GRACE 重力卫星的陆地水储量变化研究集中在大型流域[25]。胡小工[26]发现 2002 年 4 月至 2013 年 12 月期间 GRACE 驱动与美国陆地数据同化系统、全球陆地数据同化系统输出的 TWSA 变化规律在长江流域比较接近,并以 3.4 cm/a 的年际振幅变化。Luo 等[27]研究表明 GRACE 驱动的珠江流域陆地水储量等效水高与 WaterGap Global 水文模型模拟值基本吻合,相关系数随解算方法的差异在 0.50 至 0.60 间。

##### 3.2.2. 地下水储量监测

地下水是最重要的淡水来源之一,随着人口的增加和城市化的推进,地下水开采的强度和规模一直在增加,从而导致了土地沉降和土壤盐碱化等自然灾害频发,明确地下水储量的变化具有重要意义。GRACE 是监测地下水储量大规模变化的可靠方法,Rodell [24]首先基于水量平衡从 GRACE 反演的陆地水储量异常变化中分离出了地下水储量变化,发现密西西比河流域 2002 年 4 月至 2005 年 4 月地下水季节性振幅为 8 cm,且监测井实测数据均在 GRACE 结果不确定性范围内变化;此外,GRACE 发现了印度拉贾斯坦邦、旁遮普和哈里亚纳邦地区地

下水位 2002 年 8 月至 2008 年 10 月期间以 $-4\text{ cm/a}$  的速率下降[28]。作为世界上最大的地下储水层,华北平原的地下水变化情况是研究热点问题, Feng 等[29]基于水量平衡原理并结合 GRACE 数据估算得到华北平原 2003 年至 2010 年的地下水枯竭速率为 $-2.8\text{ cm/a}$ , 发现华北平原及山前地区深层含水层对其地下水枯竭有重要贡献。

### 3.2.3. 极端水文事件监测

GRACE 重力卫星对陆地储水状态的高精度反演使其可以监测大尺度洪水事件发生的潜力。Reager 和 Famiglietti [30]应用 GRACE 和全球降水数据率先提出洪水潜力指数表征区域的有效储水能力。Reager 等[31]还对 2011 年密苏里河洪水进行案例研究,发现通过将 GRACE 数据与河流流量自回归模型结合,可以提前 5~11 个月评估发生流域性洪灾的可能性。Long [32]改进了洪水潜力指数并使用 GRACE 数据监测了我国云贵高原 2008 年 4 月至 12 月流域性洪灾的发生。

GRACE 较粗糙的时间分辨率(每月)和空间分辨率(200~300 km)限制了其对中小型洪水的监测能力。Gouweleeuw 等[33]基于卡尔曼滤波得到降尺度的逐日 GRACE 重力场数据,其时延仅为 5 天,通过将恒河-布拉马普特拉三角洲在 2004 年和 2007 年洪水期间的高频 TWSA 时间序列与在观测的河流径流量进行比较,证明了近实时发布的每日 GRACE 数据有潜力监测高强度、短历时的洪水事件。

## 4. 不足与展望

### 4.1. 时空分辨率

GRACE 重力卫星在大尺度陆地水资源和洪水监测中具有较大潜力,但其时空分辨率比较粗糙,从而限制了其在中小尺度上的研究。GRACE 需要累积 1 个月的观测值以监测全球重力场异常变化,并且地面处理中心需要 60 天左右处理 Level-1 和 Level-2 级数据。尽管很多学者尝试将 GRACE 的数据进行插值和降尺度,但后处理数据在全球的适用性和准确性仍需要进一步研究。此外,GRACE 仅能提供自 2002 年成功发射以来的科学数据,时间跨度较短,无法支撑对于全球重力场的长期观测,随着 2018 年美德共同研制的 GRACE-Follow on 卫星开始运行以及数据重构技术的发展,未来新旧两代 GRACE 卫星数据能更好地为全球科学家服务。空间尺度上,目前 GRACE 产品多数以格网形式发放,大小从 $0.25^\circ$ 至 $1^\circ$ (经度 $\times$ 纬度)不等,考虑到空间滤波时的信号泄露和信号偏差,目前 GRACE 产品更加适用于大尺度研究。Yin 等[34]使用地表模型或陆面模式、空间降尺度方法等进行同化处理,可以改善 GRACE 数据的空间分辨率。

Jason 系列测高卫星以 10 天的重访周期定期监测陆地水体的水位变化,但对比光学遥感卫星还有一定差距,不能支持日尺度甚至小时尺度的实时观测。Jason 卫星仅能对 254 条固定轨迹范围内水体高程进行监测,对其未穿过的湖泊及河流则无能为力,故研究范围受到一定限制。此外,Jason 系列卫星星下点直径约为 2.2 km,相邻点中心间距约为 294 m,对于宽度较大的水体比较适用,而中小型水域误差较大。Elias 等[35]建议使用多源测高卫星数据进行研究,以补充单个卫星时空分辨率的缺陷,如结合 TOPEX/Poseidon、Envisat、Jason-1/2/3、Sentinel-3A 等卫星数据进行综合分析。

### 4.2. 不确定性

GRACE 重力卫星通过测量地球重力场的变化反演陆地水储量异常,除了卫星本身的仪器测量误差、研究区信号泄露和信号偏差、以及背景模型偏差等,GRACE 数据复杂的后处理流程也具有较大不确定性,如一阶球谐系数的替换、条带现象、冰后回弹效应等。在 GRACE-Follow on 卫星已经提供科学数据的背景下,如何进一步提高 GRACE 数据的精度是国内外学者需要共同思考的问题,其将进一步扩大 GRACE 数据的研究范围。

Jason 测高卫星通过测量起伏的大地水准面高程反演陆地水体水位,其容易受到大气层中多种因素的影响,如电离层校正,大地校正,极潮校正,对流层干校正和对流层湿校正等,容易引入参数不确定性。Jason 数据在

地形起伏较大、人类活动剧烈的地区容易受到其它地物的干扰。数据不确定性限制了 Jason 数据对于中小型水体的水位监测,在以美国 SWOT 卫星、美欧合作的 Jason-CS 卫星即将发射的前景下,激光测高技术技术和雷达测高技术测量精度不断提高,通过集中概率密度、波形重定等技术,测高卫星数据在未来将发挥重要作用。

## 5. 结语

随着反演方法和研究区域不同而变化,Jason 测高卫星和 GRACE 重力卫星观测数据精度分别达到 2.5 cm 和 1.5 cm 左右,在陆地水资源和极端洪水监测方面逐渐发挥作用。然而,由于 GRACE 和 Jason 产品数据不确定性以及时间分辨率(10 天至 1 个月)和空间分辨率( $0.25^{\circ}\sim 1^{\circ}$ )(经度 $\times$ 纬度)的限制,它们在水文水资源领域的应用仍然有待进一步研究。随着新一代 GRACE 重力卫星和 Jason 卫星的发射,研究卫星重力和测高技术对国际河流及缺乏实测资料的地区的陆地水资源测量、城市群极端水文事件监测及灾后评估、大型水库湖泊水资源调度等领域具有重要意义。

## 基金项目

国家自然科学基金重点项目(51539009)资助。

## 参考文献

- [1] CHEN, J. L., WILSON, C. R., TAPLEY, B. D., et al. 2005 drought event in the Amazon River basin as measured by GRACE and estimated by climate models. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2009, 114: B05404. <https://doi.org/10.1029/2008JB006056>
- [2] HE, D. M. Water cooperation priorities in the Lancang-Mekong river basin based on cooperative events since the Mekong River commission establishment. *Chinese Geographical Science*, 2019, 29(1): 58-69. <https://doi.org/10.1007/s11769-019-1016-4>
- [3] SCANLON, B. R., ZHANG, Z., SAVE, H., et al. Global models underestimate large decadal declining and rising water storage trends relative to GRACE satellite data. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(6): E1080-E1089. <https://doi.org/10.1073/pnas.1704665115>
- [4] IMMERZEEL, W. W., DROOGERS, P., DE JONG, S. M., et al. Large-scale monitoring of snow cover and runoff simulation in Himalayan river basins using remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(1): 40-49. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.08.010>
- [5] CARBONE, G. J. Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(12): 2875-2887. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.07.005>
- [6] LANDERER, F. W., SWENSON, S. C. Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates: Accuracy of GRACE-TWS. *Water Resources Research*, 2012, 48(4): W04531. <https://doi.org/10.1029/2011WR011453>
- [7] 中华人民共和国水利部. 2019 年中国水资源公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. *China Water Resources Bulletin 2019*. Beijing: China Water Power Press, 2020. (in Chinese)
- [8] 严登华, 王坤, 李相南, 等. 全球陆地地表水资源演变特征[J]. *水科学进展*, 2020, 31(5): 703-712. YAN Denghua, WANG Kun, LI Xiangnan, et al. Evolution characteristics of global land surface water resources. *Advances in Water Science*, 2020, 31(5): 703-712. (in Chinese)
- [9] 徐兴亚, 方红卫, 张岳峰, 等. 河道洪水实时概率预报模型与应用[J]. *水科学进展*, 2015, 26(3): 356-364. XU Xingya, FANG Hongwei, ZHANG Yuefeng, et al. A real-time probabilistic channel flood forecasting model and application based on particle filters. *Advances in Water Science*, 2015, 26(3): 356-364. (in Chinese)
- [10] 何飞, 刘兆飞, 姚治君. Jason-2 测高卫星对湖泊水位的监测精度评价[J]. *地球信息科学学报*, 2020, 22(3): 494-504. HE Fei, LIU Zhaofei and YAO Zhijun. Evaluation of the monitoring accuracy of lake water level by the Jason-2 altimeter satellite. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, 22(3): 494-504. (in Chinese)
- [11] NEREM, R. S., CHAMBERS, D. P., CHOE, C., et al. Estimating mean sea level change from the TOPEX and Jason altimeter missions. *Marine Geodesy*, 2020, 33: 435-446. <https://doi.org/10.1080/01490419.2010.491031>
- [12] 许厚泽. 卫星重力研究: 21 世纪大地测量研究的新热点[J]. *测绘科学*, 2001(3): 1-3+2. XU Houze. Satellite gravity research: A new hot spot in geodetic research in the 21st century. *Science of Surveying and Mapping*, 2001(3): 1-3+2. (in Chinese)
- [13] TAPLEY, B. D., BETTADPUR, S., WATKINS, et al. The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31: L09607. <https://doi.org/10.1029/2004GL019920>

- [14] BIRKETT, C. M., BECKLEY, B. Investigating the performance of the Jason-2/OSTM radar altimeter over lakes and reservoirs. *Marine Geodesy*, 2010, 33: 204-238. <https://doi.org/10.1080/01490419.2010.488983>
- [15] TORTINI, R., NOUJDINA, N., YEO, S., et al. Satellite-based remote sensing data set of global surface water storage change from 1992 to 2018. *Earth System Science Data*, 2020, 12: 1141-1151. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1141-2020>
- [16] SHUM, C., YI, Y., CHENG, K., et al. Calibration of Jason-1 altimeter over Lake Erie. *Marine Geodesy*, 2003, 26: 335-354. <https://doi.org/10.1080/714044525>
- [17] 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. ZHU Youhai, LI Jiancheng, JIANG Weiping, et al. Monitoring of water level variations of Hulun Lake with Jason-1 altimetric data. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2005, 25(4): 11-16. (in Chinese)
- [18] JARIHANI, A. A., CALLOW, J. N., JOHANSEN, K. and GOUWELEEUW, B. Evaluation of multiple satellite altimetry data for studying inland water bodies and river floods. *Journal of Hydrology*, 2013, 505: 78-90. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.010>
- [19] PAPA, F., BALA, S. K., PANDEY, R. K., et al. Ganga-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. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2012, 117: C11021. <https://doi.org/10.1029/2012JC008158>
- [20] PARIS, A., DE PAIVA, R. D., DA SILVA, et al. Stage-discharge rating curves based on satellite altimetry and modeled discharge in the Amazon basin. *Water Resource Research*, 2016, 52: 3787-3814. <https://doi.org/10.1002/2014WR016618>
- [21] KIM, D., LEE, H., CHANG, C., et al. Daily river discharge estimation using multi-mission radar altimetry data and ensemble learning regression in the lower Mekong River basin. *Remote Sensing*, 2019, 11: 2684. <https://doi.org/10.3390/rs11222684>
- [22] TAPLEY, B. D., BETTADPUR, S., RIES, J. C., et al. GRACE measurements of mass variability in the Earth system. *Science*, 2004, 5386: 503-505. <https://doi.org/10.1126/science.1099192>
- [23] SYED, T. H., FAMIGLIETTI, J. S., RODELL, M., et al. Analysis of terrestrial water storage changes from GRACE and GLDAS. *Water Resource Research*, 2008, 44(2): W02433. <https://doi.org/10.1029/2006WR005779>
- [24] RODELL, M., CHEN, J., KATO, H., et al. Estimating groundwater storage changes in the Mississippi River basin (USA) using GRACE. *Hydrogeology Journal*, 2007, 15: 159-166. <https://doi.org/10.1007/s10040-006-0103-7>
- [25] SCHMIDT, R., SCHWINTZER, P., FLECHTNER, et al. GRACE observations of changes in continental water storage. *Global Planet Change*, 2006, 50: 112-126. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.11.018>
- [26] 胡小工, 陈剑利, 周永宏, 等. 利用 GRACE 空间重力测量监测长江流域水储量的季节性变化[J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 2006, 36(3): 225-232. HU Xiaogong, CHEN Jianli, ZHOU Yonghong, et al. Using GRACE data to monitor the seasonal changes of water storage in the Yangtze River basin. *Science in China (Series D)*, 2006, 36(3): 225-232. (in Chinese)
- [27] LUO, Z., YAO, C., LI, Q. and HUANG, Z. Terrestrial water storage changes over the Pearl River basin from GRACE and connections with pacific climate variability. *Geodesy and Geodynamics*, 2016, 7: 171-179. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2016.04.008>
- [28] RODELL, M., VELICOGNA, I., FAMIGLIETTI, J.S. Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. *Nature*, 2009, 460: 999-1002. <https://doi.org/10.1038/nature08238>
- [29] FENG, W., ZHONG, M., LEMOINE, J.-M., et al. Evaluation of groundwater depletion in North China using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) data and ground-based measurements: Groundwater depletion in North China. *Water Resource Research*, 2013, 49: 2110-2118. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20192>
- [30] REAGER, J. T., FAMIGLIETTI, J. S. Global terrestrial water storage capacity and flood potential using GRACE. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L23402. <https://doi.org/10.1029/2009GL040826>
- [31] REAGER, J. T., THOMAS, B. F. and FAMIGLIETTI, J. S. River basin flood potential inferred using GRACE gravity observations at several months lead time. *Nature Geoscience*, 2014, 7: 589-593. <https://doi.org/10.1038/ngeo2203>
- [32] LONG, D., SHEN, Y., SUN, A., et al. Drought and flood monitoring for a large karst plateau in southwest China using extended GRACE data. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 155: 145-160. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.08.006>
- [33] GOUWELEEUW, B. T., KVAS, A., GRUBER, C., et al. Daily GRACE gravity field solutions track major flood events in the Ganges-Brahmaputra delta. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, 22: 2867-2880. <https://doi.org/10.5194/hess-22-2867-2018>
- [34] YIN, W., HU, L., ZHANG, M., et al. Statistical downscaling of GRACE-derived groundwater storage using ET data in the North China Plain. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2018, 123: 5973-5987. <https://doi.org/10.1029/2017JD027468>
- [35] ELIAS, P., BENEKOS, G., PERROU, T. et al. Spatio-temporal assessment of land deformation as a factor contributing to relative sea level rise in coastal urban and natural protected areas using multi-source earth observation data. *Remote Sensing*, 2020, 12: 2296. <https://doi.org/10.3390/rs12142296>