

# 极端降水诱发湖泊溃决的卫星重力与多源遥感观测

## 响应分析：以 2024 年洞庭湖团洲垸溃决为例

李梓龙<sup>1</sup>, 谢滨鸿<sup>1</sup>, 刘素兰<sup>1</sup>, 刘琦<sup>1</sup>, 陈俊杰<sup>1</sup>, 李洋<sup>1</sup>, 吴云龙<sup>1,2\*</sup>

1 中国地质大学（武汉），地理与信息工程学院，武汉，430074

2 中国地质大学（武汉），信息技术湖北省重点学科实验室，武汉，430074

**摘要：**2024 年 7 月洞庭湖流域受持续极端降水影响，团洲垸发生堤防溃决，造成严重洪涝。本研究综合利用重力恢复与气候实验后续任务（GRACE-FO）卫星重力数据、全球陆地数据同化系统（GLDAS）土壤湿度数据、高分辨率遥感影像、气象水文观测资料及三峡水库调度信息，系统分析了此次事件从降水驱动、流域响应到水利工程调控的涨-滞-退全时空过程。结果表明：6 月下旬至 7 月初的持续强降水导致流域土壤迅速饱和，陆地水储量异常（TWSA）显著累积，峰值较月初增幅达 144.15mm。基于 TWSA 构建的洪水指数（WI）可提前 4 天发出预警信号，表现出良好的洪水早期预警能力。遥感监测精准提取了团洲垸的淹没范围，溃口影响面积约 46.16 平方公里，其中建筑受损面积为 4.21 平方公里。归一化植被指数（NDVI）量化了团洲垸地区农业植被遭受的严重损失，NDVI 均值由 6 月的 0.510 骤降至 7 月的 0.165。三峡水库的调度有效减轻了长江干流对洞庭湖的顶托作用，促进了湖区洪水消退。本研究验证了多源对地观测数据协同在洪涝过程精细反演与预警中的应用潜力，为长江中游地区复合型洪灾风险防控提供了科学依据。

**关键词：**GRACE-FO；陆地水储量异常；洪水指数；极端降水；洞庭湖洪水<sup>1</sup>

中图分类号：P228 收稿日期：2025-12-30

## Analysis of Satellite Gravity and Multi-Source Remote Sensing Responses to Lake Breaches Induced by Extreme Precipitation: A Case Study of the 2024 Tuanzhouyuan Breach in Dongting Lake

Li Zilong<sup>1</sup>, Xie Binhong<sup>1</sup>, Liu Sulan<sup>1</sup>, Liu Qi<sup>1</sup>, Chen Junjie<sup>1</sup>, Li Yang<sup>1</sup>, Wu Yunlong<sup>1,2\*</sup>

1 School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2 Hubei Key Laboratory of Information Technology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** Objectives: In July 2024, the Dongting Lake basin experienced severe flooding following a levee breach at Tuanzhou Polder due to persistent extreme precipitation. This study systematically analyzed the spatiotemporal evolution of the event by integrating GRACE-FO satellite gravity data,

基金项目：科技部重点研发计划（2024YFF1308104）、国家自然科学基金项目(42274111, 42574073, 42442015)

作者简介：李梓龙（2005-），男，本科在读，主要从事大地测量水文学。ORCID: 0009-0001-2652-9565

Email: 18613548102@cug.edu.cn

\*通讯作者：吴云龙，ORCID: 0000-0002-5487-5078 Email: wuyunlong@cug.edu.cn

GLDAS soil moisture data, high-resolution remote sensing imagery, meteorological and hydrological observations, and Three Gorges Reservoir operation information. Results indicate that persistent heavy rainfall from late June to early July rapidly saturated basin soils, leading to significant accumulation of Total Water Storage Anomaly (TWSA) with a peak increase of 144.15 mm compared to the beginning of the month. The flood index (WI) constructed based on TWSA provided advance warning signals four days prior to flooding, demonstrating effective early flood warning capability. Remote sensing monitoring precisely delineated the inundation extent of Tuanzhou Polder, with the breach affecting approximately 46.16 square kilometers, including 4.21 square kilometers of built-up areas. MODIS NDVI quantified the severe damage to agricultural vegetation in the region, with the NDVI mean value plummeting from 0.510 in June to 0.165 in July. The Three Gorges Reservoir's operation effectively mitigated the backwater effect of the Yangtze River mainstem on Dongting Lake, accelerating flood recession in the lake basin. This study validates the application value of multi-source data integration in flood process inversion and early warning, providing scientific basis for composite flood risk prevention and control in the middle Yangtze River region.

**Key words:** GRACE-FO; terrestrial water storage anomaly; flood index; extreme precipitation; Dongting Lake flooding

## 0 引言

在全球气候变化与强烈人类活动的背景下,洪涝事件的发生频率、强度与复杂性显著增加,对人类社会、经济发展及生态安全等构成了严峻的挑战。监测洪涝灾害驱动下的水文响应,对理解洪水的发生过程具有重要意义,为洪水形成机理分析、风险评估及防洪减灾决策提供科学依据(Hall et al., 2014; Jia et al., 2022; Long et al., 2014)。

作为全球气候变化的敏感区,长江流域在2024年夏季经历了极为异常的极端气候事件。(Liu et al., 2025)厄尔尼诺向拉尼娜过渡的过程中,流域的大气环流出现持续异常,引发大范围降水。洞庭湖作为长江中游重要的调蓄湖泊,其防洪安全直接关系到长江中下游平原的安全(Yang et al., 2024)。然而,该区域也是一个固有的脆弱性单元,因其特殊的水文特性、长期泥沙淤积导致的湖床抬升和人类围湖造田活动的影响,洞庭湖区域在应对极端洪水时面临巨大压力,洪涝风险极高(Zhao et al., 2025; 余姝辰等,2019; 朱玲玲等,2014)。三峡工程的建成与运行进一步改变了长江中游的来水过程和江湖水沙交换格局,在一定程度上重塑了洞庭湖的水文过程与洪水响应特征,使该区域洪水演化呈现出自然气候异常与人为调控叠加作用下的复杂性(Dai et al., 2017; Zhou et al., 2016)。

传统的洪水监测方法主要采用有限的地面观测数据和历史气象数据。受限于地面监测站空间分布不均、覆盖范围有限和时间分辨率较低,传统方法难以捕捉洪水事件的时空演变过程(Tang et al., 2016)。因此,亟需应用高时空分辨率的技术以提升洪水监测能力。

遥感技术的快速发展为洪水监测提供了新的解决方案。以 Sentinel-1 为代表的合成孔径雷达(SAR)凭借其全天时、全天候的观测能力,能够有效穿透云层获取洪水期间的地表水体信息,可以用于洪水淹没范围提取(F. Chen et al., 2024; Dong et al., 2021)。高分一号(GF-1)光学卫星实现了高空间分辨率与大幅宽观测能力的结合,能够在天气条件允许时快速获取大范围、细节清晰的地表影像(付青等,2020)。然而,遥感卫星影像在水体识别方面仍存在

精度不足的问题，且受限于较低的时间分辨率，难以完整捕捉洪水事件的动态演化过程，制约其在实时灾害应急响应中的应用。为弥补上述不足，亟需利用多源遥感数据并融合其他监测手段，实现对洪水事件的全面评估。

已有大量研究利用重力恢复与气候实验（GRACE）及其后续任务（GRACE-FO）产品，通过测量地球重力场的变化反演得到全球陆地水储量异常（TWSA）数据，为研究区域洪水过程提供了高效的空间对地观测手段(Bai et al., 2025; J. Chen et al., 2024; Chen et al., 2010; Li et al., 2022; Zou et al., 2023; Sen et al., 2024; Rateb et al., 2024)。Rodell and Li (2023)利用 GRACE 和 GRACE-FO 卫星月模型数据，提取分析了 2002 年至 2021 年间的 1056 个极端水文事件。Long et al. (2014)基于 GRACE 获取了云贵高原的 TWSA，计算了 2008 年洪水期间的洪水潜在指数，结果与洪水灾害的现实相符。Jäggi et al. (2019)提出了基于重建的 TWSA 数据的 WI 指数，用于洪水监测与预警，在多瑙河流域的洪水预警中表现出了良好的应用效果。Ren et al. (2025)利用 GRACE 数据计算了储水赤字指数（WSDI），验证了 WSDI 监测水文事件的可靠性。Liu et al. (2025)基于 GRACE-FO 反演的陆地水储量异常，构建 WI 与 NDFPI 洪水指数，有效识别了 2024 年广东极端洪水，验证了该类指数在区域洪水早期识别中的有效性。

与此同时，结合全球导航卫星系统（GNSS）等多种大地测量手段，能够更精细地捕捉流域水文系统对极端气候事件的动态响应。例如，Zou et al. (2023)利用连续 GNSS 站点反演了长江流域的径流变化，有效揭示了河道流量对降水过程的响应特征。**错误!未找到引用源。**进一步利用 GNSS 解析了长江流域陆地水储量的时空动态演变，揭示了不同时间尺度下水储量变化规律。

近年来，为了更详细、快速捕捉洪水的动态演变，学者们通过数据同化、统计建模及机器学习等方法构建了更高时间分辨率的 TWSA 数据集应用于洪水监测(Li et al., 2019)。Kurtenbach et al. (2012)首次系统提出并验证了利用卡尔曼平滑器从 GRACE 原始观测中提取日尺度重力场解的方法。Retegui-Schietekatte et al. (2025)将日尺度 GRACE 数据用于评估雅鲁藏布江流域洪水事件。Cui et al. (2025)提出了一种分区反向传播神经网络（PBPNN）方法，并成功用于 1998 年极端洪水过程的分析。

此外，三峡工程（TGD）作为世界上最大的水利枢纽工程，其建成和运行改变了中下游的水文情势与防洪格局(Sun et al., 2012; 贺秋华等, 2021)。TGD 于 2003 年开始蓄水，2010 年达到设计水位全面运行(Du et al., 2011)。大量研究证实，三峡工程的运行显著降低了长江流域中下游地区的洪水风险，为深入理解其在具体洪水事件中的调控机制，有必要对其在防洪过程中的积极作用进行具体分析(Gao et al., 2013; Hu et al., 2015; Lai & Wang, 2017)。

针对 2024 年洞庭湖决堤事件，已有学者开展了初步研究(Zhang et al., 2024a)。然而，现有研究多集中于单一数据源的洪水监测或事后评估，对于融合重力遥感与高分辨率影像来系统揭示“极端降水-流域蓄满-工程调控-局部溃决”这一完整链式过程的研究仍显不足。

洪水事件演化通常经历“涨-滞-退”三个关键阶段，构成完整的全时空过程。该演化框架为解析 2024 年洞庭湖决堤事件提供了系统性视角，本研究利用 GRACE-FO 等多源数据，探究决堤前后洞庭湖流域陆地水储量时空动态演化过程。通过洪水指数（WI）识别此次极端洪水事件，并结合降水等自然因子与三峡水库调度等人为调控因素，综合探讨其成因机制。

此外,本研究综合利用卫星影像与水文数据,评估多源遥感数据在洪涝监测中的有效性与局限性。

## 1. 研究区域

洞庭湖作为长江中游地区重要的调蓄湖泊,直接与长江进行水交换和相互作用(Yang et al., 2024)。洞庭湖的主要补给水源由松滋、太平、藕池进入,湖水经城陵矶出口重新汇入长江(Xu et al., 2024)。该流域地处中北亚热带湿润气候区,年际气温和降水量变化很大,丰水期极易发生洪涝灾害,枯水期容易引发干旱(Zhai et al., 2022a)。团洲垸位于湖南省岳阳市华容县东南部城陵矶水道西岸,是江湖水流进出通道的狭窄咽喉。三峡大坝可以调控长江干流的水位和流量,通过减少长江干流来水,降低经松滋口、太平口和藕池口三条通道汇入洞庭湖的上游来量,从而削弱对洞庭湖的顶托水位,缓解洞庭湖和长江中下游的防洪压力。

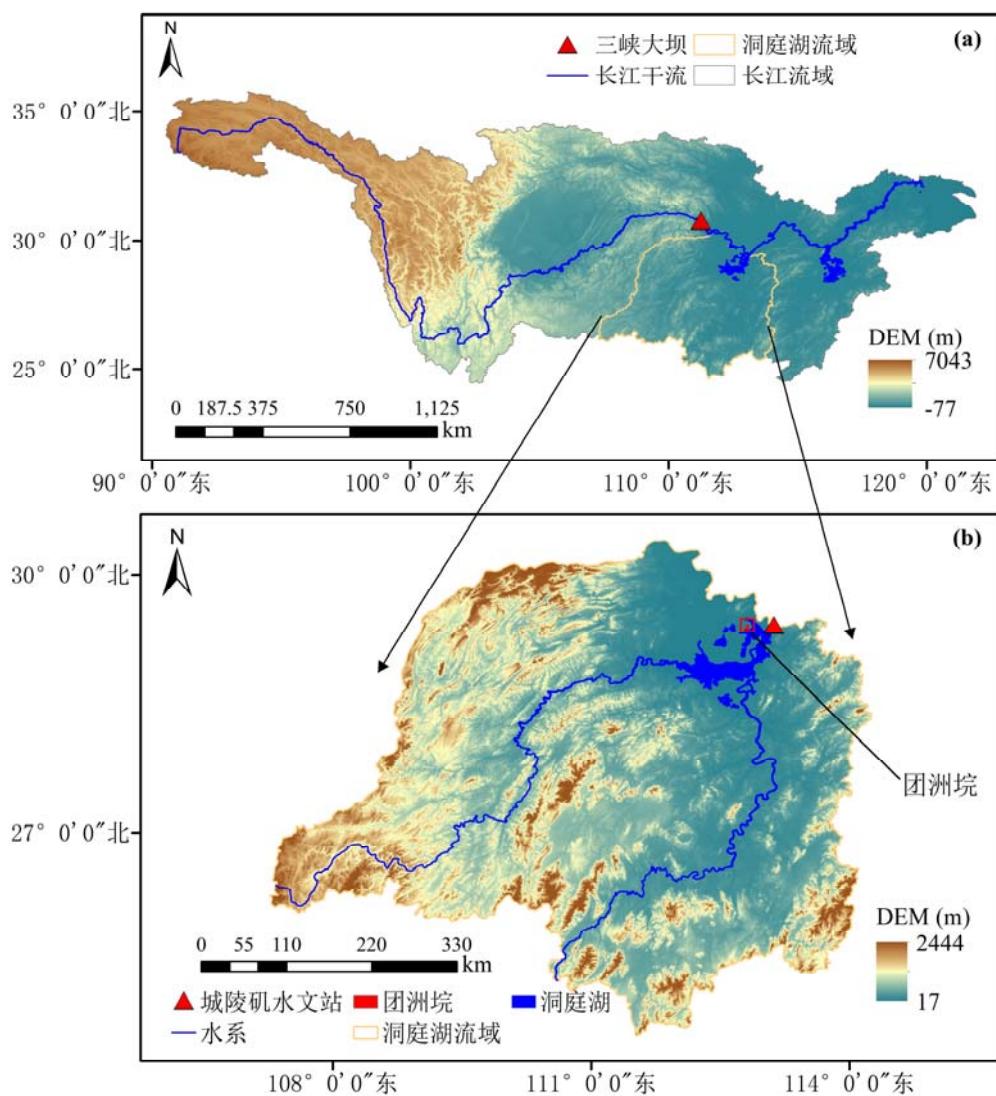


图 1 洞庭湖流域地理位置、地形特征及关键站点分布示意图

Figure 1. Geographic location, topographic features, and distribution of key stations in the Dongting Lake Basin.

## 2. 数据与方法

## 2.1 数据

### 2.1.1 GRACE/GRACE-FO 数据

卫星重力数据采用德克萨斯大学空间研究中心（CSR）发布的 CSR RL06 GRACE/GRACE-FO Mascon（CSRM）数据集，用于重建洞庭湖流域逐日 TWSA ([http://www2.csr.utexas.edu/grace/RL06\\_mascons.html](http://www2.csr.utexas.edu/grace/RL06_mascons.html))。所用数据时间范围为 2002 年 4 月到 2025 年 1 月，其原始空间分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ ，后续应用时空间分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (Ran et al., 2021)。最新研究表明，CSRM 数据与长江流域区域的原位 GPS 测量结果及实际地表物质变化更为吻合，其一致性优于球谐数据和 JPL Mascon 模型(Wang et al., 2020)。

### 2.1.2 气象与水文数据

气象数据采用中国气象局国家气象信息中心发布的 CLDAS-V2.0 日降水产品。该产品在中国区域的同类国际数据集中具有较高的精度与可靠性，空间分辨率为  $0.0625^\circ$ (Sun et al., 2020)。本研究获取了 2023 年 1 月 1 日至 2025 年 3 月 31 日的日降水数据，用于分析洞庭湖流域的降水时空分布特征和重建逐日 TWSA。

中国高分辨率水文气象降水数据集（CHM\_PRE）是基于 1961–2022 年间中国及周边地区共 2,839 个气象站点的逐日降水观测，通过插值方法生成(Han et al., 2023)。本研究采用该数据集中 2000 年 1 月至 2022 年 12 月的降水产品，覆盖中国大部分陆地区域(范围为  $18^\circ\text{N}$ – $54^\circ\text{N}$ 、 $72^\circ\text{E}$ – $136^\circ\text{E}$ ，不含台湾省及南海诸岛)，用于重建逐日 TWSA。

CN05.1 是由中国气象局国家气候中心研制的高分辨率网格化气象数据集，涵盖日平均气温等变量(Wu & Gao, 2013)。该数据集基于全国 2400 余个地面气象观测站的实测资料，通过插值与质量控制方法构建，空间分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ，覆盖中国大陆区域。CN05.1 广泛应用于气候变化检测、极端事件分析及水文模型驱动等研究。本研究采用 CN05.1 数据集中 2000 年 1 月至 2022 年 12 月的每日温度数据，用于重建逐日 TWSA。

水文模型采用 GLDAS（全球陆地数据同化系统）水文模型中的 CLSM 陆面模式数据 GLDAS\_CLSM025\_DA1\_D\_2.2，时间范围为 2018 年 1 月 1 日至 2024 年 9 月 30 日，空间分辨率为  $0.25^\circ$ ，提取其中的土壤湿度剖面含水量用于反映土壤水分动态及其与洪水过程的关联(Liu et al., 2025; Liu et al., 2021; Mishra & Singh, 2011)。

在 GLDAS CLSM 模型中，总土壤含水量通过累加三个核心分量获得，计算公式如下：

$$SM_{\text{total}} = SM_S + SM_{RZ} + SM_P \quad (1)$$

其中， $SM_{\text{total}}$ ：总土壤柱含水量（单位： $\text{kg m}^{-2}$ ）； $SM_S$ 代表表层土壤含水量； $SM_{RZ}$ 代表根区土壤含水量； $SM_P$ 代表地下水层或渗透层的含水量。本研究基于 GLDAS 表层土壤含水量数据，扣除同期 2018 至 2023 年平均季节性周期变化后计算得到表层土壤湿度异常(SSMA)，作为表征地表水分相对于气候平均态偏离程度的指标。

### 2.1.3 辅助数据

本研究采用多源高分辨率遥感数据提取团洲垸溃堤事件的淹没范围。在 Copernicus Data Space Ecosystem（CDSE）获取了 2024 年 7 月 4 日的 10 米分辨率 Sentinel-1 SAR 影像

(<https://dataspace.copernicus.eu/>)。在陆地观测卫星数据服务获取了 2024 年 7 月 6 日的 16 米分辨率 GF-1 多光谱影像 (<https://data.cresda.cn/>)。影像预处理步骤包括：对 Sentinel-1 影像依次进行辐射定标、Refined Lee 斑点滤波和地形校正处理，以消除噪声并确保几何精度；对 GF-1 影像进行辐射定标与大气校正。采用支持向量机 (SVM) 监督分类算法，对预处理后的决堤前后卫星影像进行水陆分类提取，最终生成溃堤前后的淹没范围图并计算淹没面积。

为评估溃堤事件对农业的影响，本研究采用中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 的植被指数产品 MOD13Q1 获取洞庭湖流域的植被覆盖信息 (<https://modis.gsfc.nasa.gov/>) (Zhai et al., 2022b)。该产品提供 16 天合成的归一化植被指数 (NDVI)，空间分辨率为 250 m，数据采用了 16 天最大值合成 (MVC) 算法，能够选取合成期内受大气影响最小的观测值，从而有效滤除大部分云层噪声。已完成大气校正、云检测及质量控制处理，能够有效反映区域尺度植被生长状况。选取合成起始时间为 6 月 9 日、6 月 25 日、7 月 11 日、7 月 27 日 NDVI 影像用于决堤前后对比分析灾害对农业的影响。

此外，研究工作系统收集多源水文数据，主要包括 2024 年日尺度城陵矶水文站水位数据，以及同期三峡水库的日尺度水位与蓄水量数据。城陵矶水文站是洞庭湖的出口，其水位与流量数据反映洞庭湖的整体水情。通过获取溃堤前后洞庭湖水位动态变化，结合三峡工程水位、蓄水量和调度信息，定量分析溃堤事件前后洞庭湖的水位动态，探讨大型水利工程对区域洪水调蓄的影响机制。

## 2.2 方法

### 2.2.1 GRACE 日尺度重建

为获取高时间分辨率的 TWSA 变化信号以精细监测洪水过程，本研究采用由 Humphrey 和 Gudmundsson (2019) 提出的统计重建方法，基于 GRACE-FO 月尺度 Mascon 数据及多源气象数据，重建研究区日尺度 TWSA(Humphrey & Gudmundsson, 2019)。模型假设流域的水储量变化遵循线性水库原理，即每日水储量的变化是降水输入与流出的平衡。其核心动力学方程表述为：

$$TWS(t) = TWS(t - 1) \cdot e^{-1/\tau(t)} + P(t) \quad (2)$$

式中， $t$  为日时间索引； $TWS(t)$  为第  $t$  日的总水储量； $P(t)$  为第  $t$  日的降水输入； $\tau(t)$  为表征水储滞留特性的停留时间。停留时间的值较小表示水输入倾向于通过径流或蒸散快速离开系统，而值较大则表示水滞留时间更长、流出更缓慢。

停留时间被设定为与温度相关的变量，以反映季节变化对水文响应速度的影响：

$$\tau(t) = a + b \cdot T_z(t) \quad (3)$$

式中， $a$  和  $b$  为正的待校准参数； $T_z(t)$  为原始去趋势日气温  $T(t)$  经过转换后的值。当温度变冷时， $T_z(t)$  趋近于 1，停留时间  $\tau(t)$  增加；当温度变暖时， $T_z(t)$  趋近于 0，停留时间  $\tau(t)$  减少。

模型校准过程基于 GRACE 月尺度陆地水储量 ( $TWS_{GRACE}$ ) 及其残差项（即经过去趋势和去季节化处理后的分量， $TWS_{Resi}$ ）展开，具体关系可表示为：

$$TWS_{GRACE} = \beta \cdot TWS_{Resi} + \epsilon \quad (4)$$

式中,  $TWS_{Resi}$ 是模型模拟的月尺度序列去除长期趋势和季节项后的残差;  $\beta$ 为尺度校准参数;  $\epsilon$ 为误差项。本研究的校准期为 2000 年 1 月至 2025 年 3 月, 重建的日度 TWS 分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。

为保障数据融合的一致性, 在日尺度 TWSA 重建过程中采用以下处理: 所有气象数据在输入模型前均统一插值至  $0.5^\circ$  空间分辨率, 对于具有重叠时段的数据(如 2002–2022 期间 CHM\_PRE/CN05.1 与 2022–2025 期间 CLDAS 数据), 我们通过交叉验证对比其一致性。得到结果: 同一时间段 CHM\_PRE 与 CLDAS 降水数据、CN05.1 与 CLDAS 温度数据具有良好的一致性, 差异性较小。

### 2.2.2 GRACE\_TWSA 时间序列分解

时序分解方法(STL)能够有效提取更接近真实的水储量异常信号, 更准确地反映陆地水储量的实际变化情况。TWSA 数据中通常包含各种周期性的信号, 如季节性变化和年际变化等。这些周期性信号往往掩盖了 TWSA 的真实异常变化, 时序分解可以从原始数据中分离出周期性信号。基于时间序列分析, TWSA 可以分解为三个组成部分。这些组成部分如下:

$$TWSA = TWSA_{Trend} + TWSA_{Seasonal} + TWSA_{Residuals} \quad (5)$$

其中,  $TWSA_{Trend}$ 是长期趋势项;  $TWSA_{Seasonal}$ 是季节项;  $TWSA_{Residuals}$ 是残差项。趋势项反映水储量的长期变化方向, 季节项能够捕捉周期性波动, 残差项是去除前两者后剩余的不规则分量, 通常蕴含了干旱、洪水等极端水文事件的异常信号。

### 2.2.3 洪水指数 WI

WI 的计算以重建的日尺度 TWSA 数据为基础, 定义为年际波动与残差项之和, 经 TWSA 序列的标准差 (S) 标准化后得到的无量纲数值, 其计算公式为:

$$WI = \frac{TWSA_{Resi}}{S} \quad (6)$$

正值且较高的 WI 通常指示土壤异常湿润或水体饱和, 与洪水潜势相关; 负值且较低的 WI 则指示水分亏缺, 与干旱条件相关(Jäggi et al., 2019)。

### 2.2.4 遥感影像 SVM 支持向量机监督分类

为精确获取团洲垸地区的洪水淹没范围, 本研究采用 ENVI 软件中 SVM 分类方法, 该方法是一种基于统计理论的机器学习算法, 通过构造类别间的最优决策边界或超平面分离给定数据集, 在处理高维数据、小样本情况以及解决非线性分类问题方面表现优异, 已被广泛应用于遥感地物分类(Thanh Noi & Kappas, 2018)。本研究中用于分离地面与水体类型以提取洪水淹没范围。

## 3. 结果

### 3.1 降水的时空演变

根据中国气象局的规定，降水强度等级划分如表 1，此分类标准已被广泛应用于降水分析中(Zhou & Wang, 2017)。为理解洪水发生前后的降雨过程，本文利用 CLDAS-V2.0 的日降水量数据，绘制了 2024 年 6 月和 7 月的降水量和累积降水量时间序列图（图 2）。6 月流域总面雨量为 366.06mm，降水日数达 30 天，呈现出降水频次较高、累积量大的特点。但是，在进入 7 月后，流域降水量呈现显著下降的趋势，较 6 月减少了 49.7%，表明从 6 月到 7 月洞庭湖流域的降水强度明显减弱。

6 月 27 日至 7 月 1 日期间流域出现一段持续降水过程。具体而言，6 月 27 日至 6 月 29 日降水持续增强，并于 29 日达到 23.96mm，随后 6 月 30 日回落到 13.65mm。7 月 1 日出现这两个月中最强的单日降水，区域平均日降水量达 47.48mm，属于“暴雨”并且接近上限，甚至区域内最大降水达到了 219.69mm。6 月 29 日到 7 月 1 日是本次持续降水的高强度时段，区域平均日降水量为 28.36mm，达到“大雨”等级。6 月下旬至 7 月初的持续强降水是引发此次洪水“涨”阶段的直接驱动力，大量降水输入导致流域水储量迅速累积，为后续水位持续上升奠定了水文基础。

在 7 月 2 日降水量迅速减少至 4.13mm，标志着该轮极端强降水的结束。7 月 3 日到 7 月 25 日累计降水曲线基本持平，这表明该期间流域持续处于降水偏少和无降水的过程，可能导致土壤湿度逐步下降，并进一步引起陆地水储量的减少。

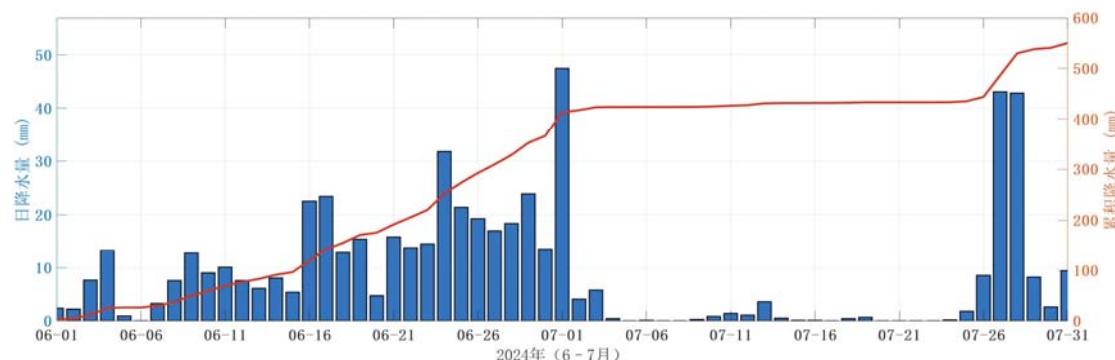


图 2 根据 CLDAS-V2.0 数据集的洞庭湖流域 2024 年 6 月 1 日至 7 月 31 日的日降水量（直方图）及累计降水量曲线

Figure 2. Daily and Cumulative Precipitation in the Dongting Lake Basin from June 1 to July 31, 2024 (CLDAS-V2.0 Data)

表 1 降水事件强度等级划分标准

Table 1. Precipitation Event Intensity Classification

降雨量(mm/d)	降雨量等级
0.0-0.1	微量降雨
0.1-9.9	小雨
10.0-24.9	中雨
25.0-49.9	大雨
50.0-99.9	暴雨
100.0-249.9	大暴雨
$\geq 250.0$	特大暴雨

为进一步了解洞庭湖流域此次降水过程的空间特征，本文利用 CLDAS-V2.0 的日降水

量数据，绘制了 2024 年 6 月 24 日到 7 月 2 日的降水量空间分布图（图 3）。洞庭湖流域的降水呈明显的条带分布，大致走向为东北——西南向，带状雨带跨越流域东西向较长距离，并在数日内多次增强，降水主要集中在流域的北部和东部地区，东南角降水较少。6 月 24 到 25 日降水质心位于流域偏东的区域，6 月 25 到 27 日质心显著北移，从流域中东部向流域北部转移，并在 6 月 27 日达到最北（ $29.18^{\circ}\text{N}$ ）。随后，6 月 27 日到 7 月 1 日质心逐渐移向流域中部。6 月 24 日至 7 月 1 日，研究区域逐日均有大范围降水发生。在此期间，日降水量达到“大雨”（ $25.0\text{--}49.9\text{mm}$ ）的区域平均覆盖率为 21.13%。其中，7 月 1 日降水强度达到峰值，有 29.9% 的区域达到“大雨”，20.6% 的区域达到“暴雨”（ $50.0\text{--}99.9\text{mm}$ ），12.4% 的区域甚至出现“大暴雨”（ $100.0\text{--}249.9\text{mm}$ ），标志着本轮降水过程的降水强度达到顶点。7 月 2 日，强降水范围急剧萎缩，日降水量达到“大雨”等级的区域占比骤降至 4.1%，且无更高等级降水出现，表明该轮持续性强降水过程已基本结束。

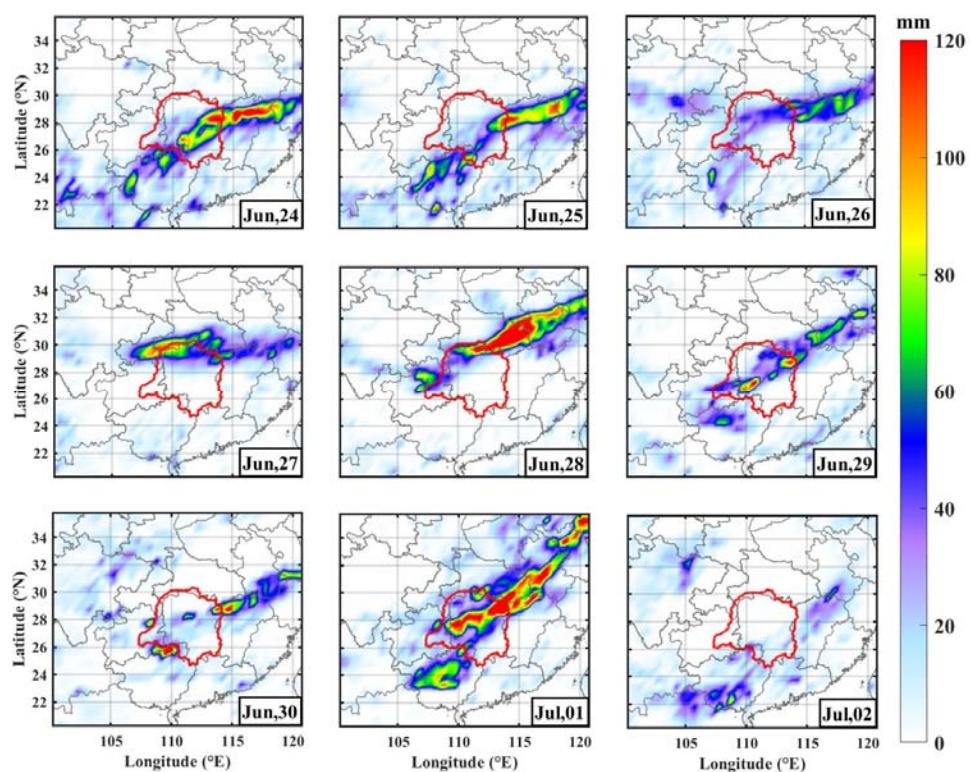


图 3 根据 CLDAS-V2.0 数据集，洞庭湖流域 2024 年 6 月 24 日到 7 月 2 日日降水的空间分布  
Figure 3. Spatial Distribution of Daily Precipitation in the Dongting Lake Basin from June 24 to July 2, 2024 (CLDAS-V2.0 Data)

### 3.2 TWSA 时空变化

本研究采用的 CSR RL06 Mascon 产品原始空间分辨率为  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ ，难以有效刻画洞庭湖流域尺度的水文细节。我们使用的研究方法重构了 TWSA 的空间分辨率至  $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ ，以更好地匹配中小流域的水文响应特征。为验证重构数据的可靠性，将 TWSA 与流域内水文站城陵矶的同期实测水位数据进行相关性分析，如图 4。结果表明，两者平均相关系数为 0.928，Nash-Sutcliffe 效率系数（NSE）为 0.861，表明重建数据具有较好的可靠性和连续性。

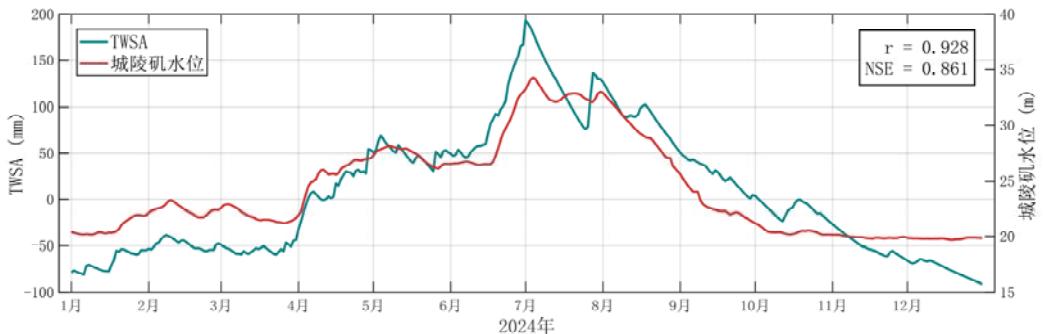


图 4 2024 年洞庭湖流域 TWSA 与城陵矶水文站水位时间序列对比

Figure 4. Time series comparison of TWSA in the Dongting Lake Basin and water level at the Chenglingji hydrological station in 2024.

从洞庭湖流域的日尺度 SSMA 与 TWSA 时序变化图（图 5），尤其是 6 月和 7 月时期可见，TWSA 从 6 月 1 日的 49.41mm 开始攀升，其峰值出现时间为 7 月 1 日，值为 193.56mm，截止流域降水峰值日累积增幅高达 144.15mm。在 6 月 27 日至 7 月 1 日持续强降雨的背景下，TWSA 累计增加了 45.20mm，具有 30.47% 的增幅百分比。这一急剧上升过程体现了洪水“涨”阶段。至 7 月 1 日 TWSA 达到峰值，标志着“涨”阶段的完成。

SSMA 反映了极端降水期间土壤水分的动态变化，并与 TWSA 的时间和空间分布表现出强烈的同步性。SSMA 表现出快速响应与快速消退的特征。在 6 月 1 日，流域的 SSMA 为 41.18mm，随着 6 月降水的持续，SSMA 急剧上升，并于 7 月 2 日达到峰值 131.37mm，较降水过程前累积量增幅达 90.19mm。其峰值时间只滞后于降水峰值（7 月 1 日）1 天，体现了表层土壤湿度对降水具有非常快速的响应。在洪水发生（7 月 5 日）之前，SSMA 已于 7 月 2 日达到 131.37mm 的高位，表明土壤湿度已趋近饱和。之后 SSMA 于 7 月 4 日出现明显转折并快速下降，土壤表层水分迅速丧失。与此同时，TWSA 也在下降，但下降更为缓和、持续时间更长，并在洪水事件之后的一段时间内仍保持较高水平，主要是因为其包含河湖水体、深层土壤水及地下水而表现出更强的滞后性。洪水事件过后，TWSA 的数值远高于 SSMA 可能是由于土壤表层水分回灌地下水造成的影响。

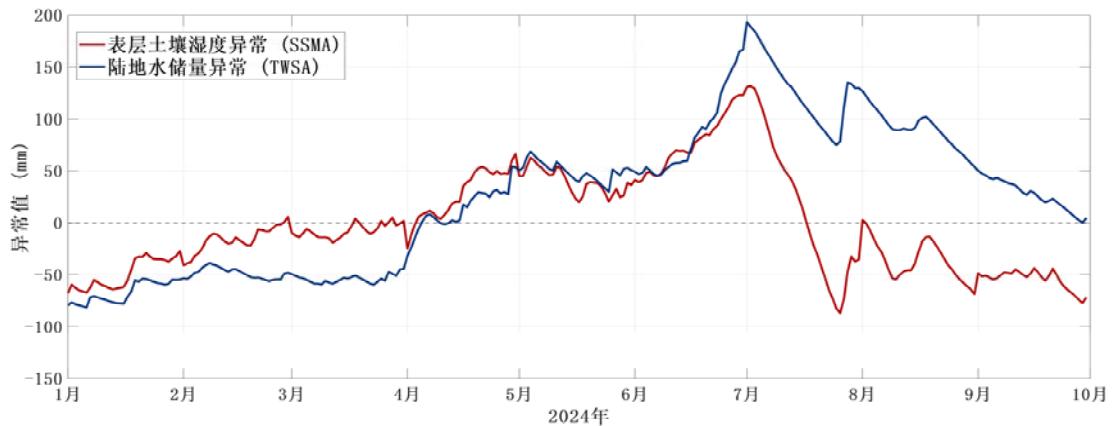


图 5 2024 年 1 月至 10 月洞庭湖流域 SSMA 与 TWSA 时间序列对比

Figure 5. Comparison of time series for SSMA and TWSA in the Dongting Lake Basin from January to October 2024

图 6 展示了洞庭湖流域在 2024 年 6 月至 7 月期间的 TWSA 的空间分布。图中选取 6 月

4日、6月14日、6月24日以及7月4日、7月14日、7月24日六个日期，展示了流域内TWSA的空间变化趋势。流域平均TWSA从6月4日的53.94mm持续上升至7月4日的179.07mm，反映强降水导致的流域水储量剧增。

空间演变上，6月4日时，流域TWSA大部分为低正值，中部和南部的TWSA高于流域北部。6月24日，东北部和东部区域TWSA显著增加，直到7月4日，流域东部和中部出现大范围的高TWSA，最大值达到179.07mm。7月24日，流域平均值下降至78.53mm，边界TWSA减小，但东部的高值异常仍然维持在较高水平。

从SSMA空间分布图（图7）来看，从6月初至7月初，SSMA的空间覆盖范围持续扩大，土壤湿度异常水平显著提升。6月4日，流域平均SSMA为48.10mm，大部分区域SSMA水平不高。随着强降水持续，土壤湿度迅速增加，空间范围急剧扩张。至6月24日，流域内 $SSMA > 100\text{mm}$ 的区域占比达53.81%。7月4日， $SSMA > 100\text{mm}$ 的高异常区比例进一步升至67.72%。7月14日，流域SSMA平均值已骤降至33.32mm，到7月24日，流域平均SSMA转为显著负值，表明土壤层已从前期饱和状态迅速过渡到水分亏缺状态。可以发现洞庭湖流域东南部的SSMA水平与其他区域相比一直较低，与降水分布和TWSA空间分布呈现出同步性。

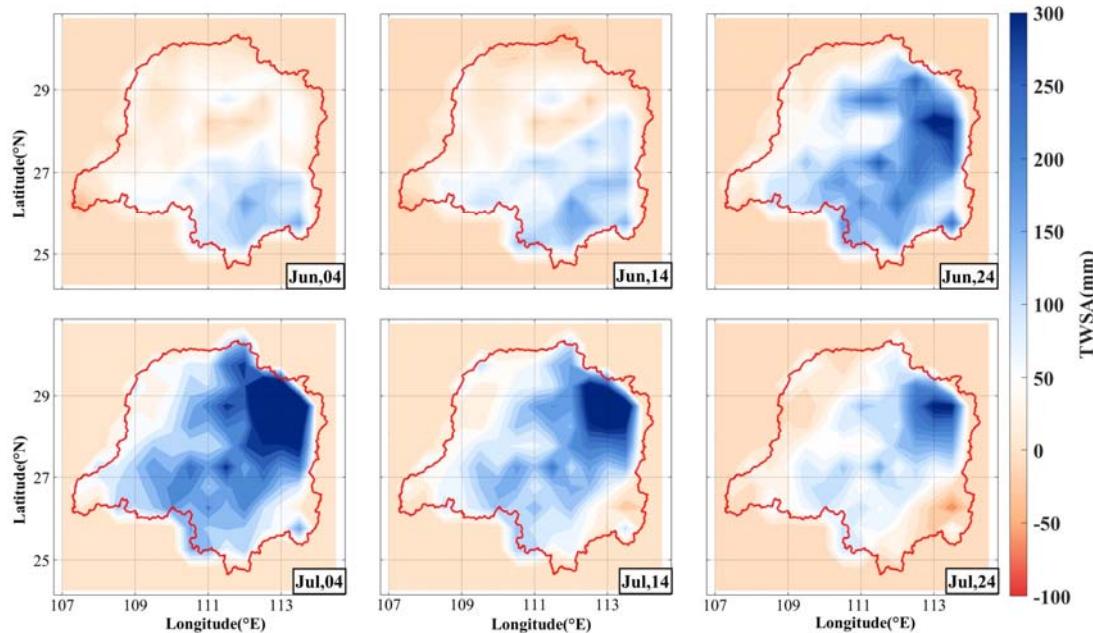


图6 洞庭湖流域6月4日至7月24日逐10天TWSA空间分布

Figure 6. Spatial Distribution of TWSA in the Dongting Lake Basin at 10-Day Intervals from June 4 to July 24, 2024

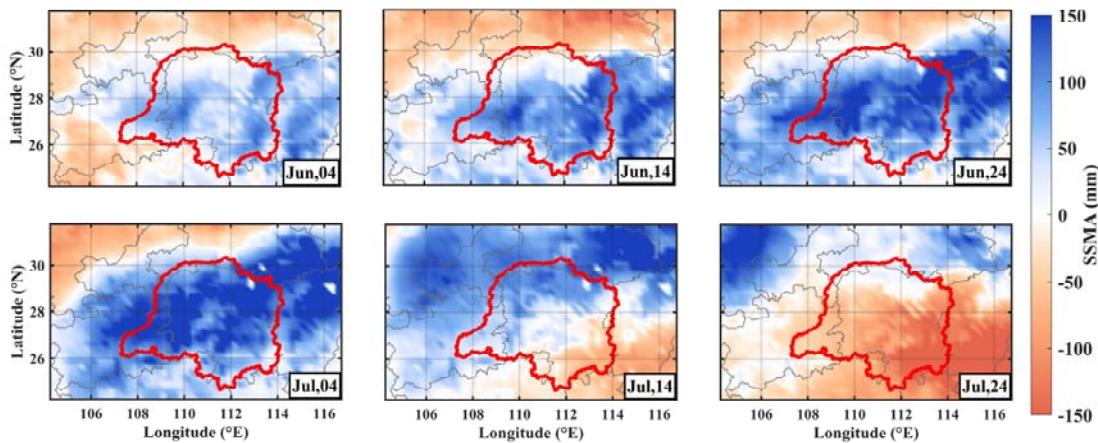


图 7 洞庭湖流域 6 月 4 日至 7 月 24 日逐 10 天 SSMA 空间分布

Figure 7. Spatial Distribution of SSMA in the Dongting Lake Basin at 10-Day Intervals from June 4 to July 24, 2024

### 3.3 洪水事件的识别

参考 Jäggi et al. (2019) 和 Xiao et al. (2023) 的研究，采用长期历史序列的高分位数作为洪水预警阈值，将 WI 的 95% 的分位数值设为预警阈值，并将城陵矶水文站的官方警戒水位（33m）作为地面实测的洪水基准，评估 WI 对洪水事件的预警能力。为分析 WI 预警信号与城陵矶水文站实测水位之间的动态关系，本研究绘制了 WI 时间序列与城陵矶水文站水位对比图（图 8）。

结果显示，WI 与城陵矶实测水位呈显著正相关 ( $r=0.945$ )，表明该指数能够有效捕捉流域水储量的动态变化，并与出口水位表现出良好的同步水文响应特征。WI 在 6 月中下旬开始迅速上升，峰值出现在 7 月 1 日 (2.485)，这与流域同期持续的极端降水过程密切相关。WI 于 6 月 27 日首次超过 95% 阈值 (1.804)，并持续处于高位直至 7 月 10 日。

预警水位在早期洪水预警中发挥着关键作用，能够有效识别潜在的洪水风险，为防洪措施和应急响应提供基础，从而降低人员伤亡和财产损失。城陵矶水位在 7 月 1 日突破 33 米警戒线，并于 7 月 8 日回落至警戒线以下。WI 相较于城陵矶站（实际水位超过警戒水位 (33 米)）提前 4 天发出预警，表明基于每日重建的 TWSA 的 WI 有效提供了此次洪水事件的早期预警，为洪水应急响应争取了宝贵时间。而 WI 信号的回落滞后于水位，这主要由于 TWSA 综合反映了地表水、土壤水、地下水等全流域的蓄水变化。

WI 的预警准确率依赖于洞庭湖全流域尺度的 TWSA 数据，而本研究采用的 GRACE-FO 数据原始空间分辨率约为 300km，尽管将其处理细化至  $0.5^\circ$ ，仍然难以有效表征小尺度区域的局部洪水动态。因此，WI 的预警性能表现出显著的空间异质性：在下游水文站点（如城陵矶）其预警准确率相对较高，而在局部子流域可能出现响应滞后或偏差(Liu et al., 2025)。

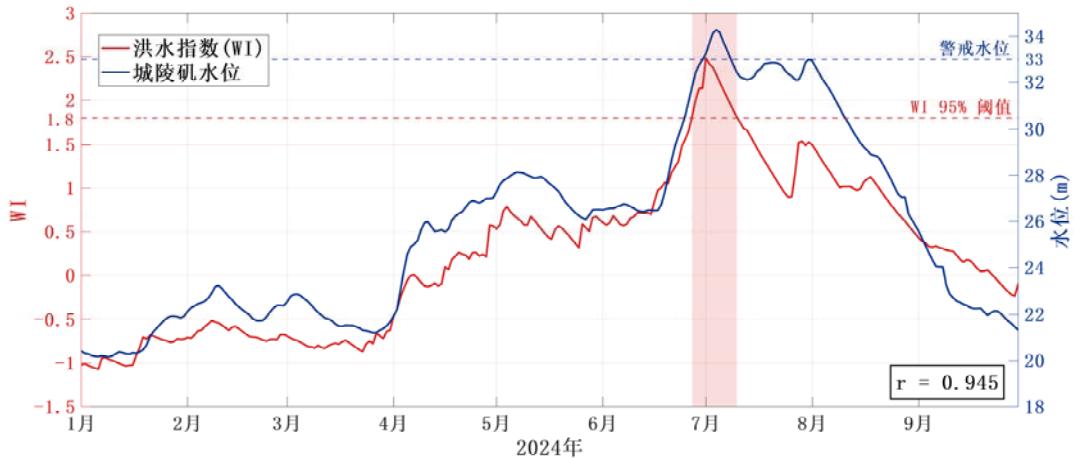


图 8 2024 年 WI 与城陵矶水文站水位时间序列对比及相关性分析，红色阴影部分表示 WI 超过 95% 阈值时间段

Figure 8. Time series comparison and correlation analysis of WI and water levels at Chenglingji Hydrological Station in 2024. The red shaded area indicates the period when WI exceeds the 95th percentile threshold.

### 3.4 遥感影像监测水体

2024 年 7 月 5 日 17 时，位于洞庭湖流域的团洲垸一线堤防因管涌发生溃决，至 7 月 6 日 9 时，决口宽度达到 226m、平均水深超 10m，属特大型决口(Lu et al., 2025)。

结合 2024 年 7 月 5 日决堤事件前后的多源卫星遥感影像，本研究利用 Sentinel-1 卫星的合成孔径雷达 (SAR) 影像和 GF-1 卫星的遥感数据，采用支持向量机 (SVM) 分类方法，提取了决堤后的淹没范围，评估洪涝灾害的空间范围与造成的影响。本研究以距离决堤事件最近的 Sentinel-1 SAR 影像 (7 月 4 日) 作为灾前基准；选取决堤后首个天气良好的 GF-1 影像 (7 月 6 日)，此时决口已基本形成，垸内淹没状态趋于稳定。图 9 展示了 7 月 4 日和 7 月 6 日决堤发生前后的团洲垸地区卫星影像。

图 10 (b) 展示了水体和陆地分类结果，水体面积 (淹没面积) 为  $46.164\text{km}^2$ ，与官方通报的  $47.64\text{km}^2$  相比，相对误差为 3.1%。在 ENVI 中采用独立验证样本 (共 50607 个像素) 进行精度评价，结果如表 2，混淆矩阵显示总体分类精度为 99.88%，Kappa 系数为 0.9976，表明分类结果具有极高的可靠性。陆地与水体两类均表现出优异的分类性能，误分像素仅占总样本的 0.12%。使用 2024 年 10 米土地利用数据，分离出建筑地类，计算淹没建筑面积，发现有  $4.21\text{km}^2$  的建筑面积被淹没 (图 10 (a))，为评估人员财产损失、规划应急安置与灾后恢复重建提供关键的数据支撑。

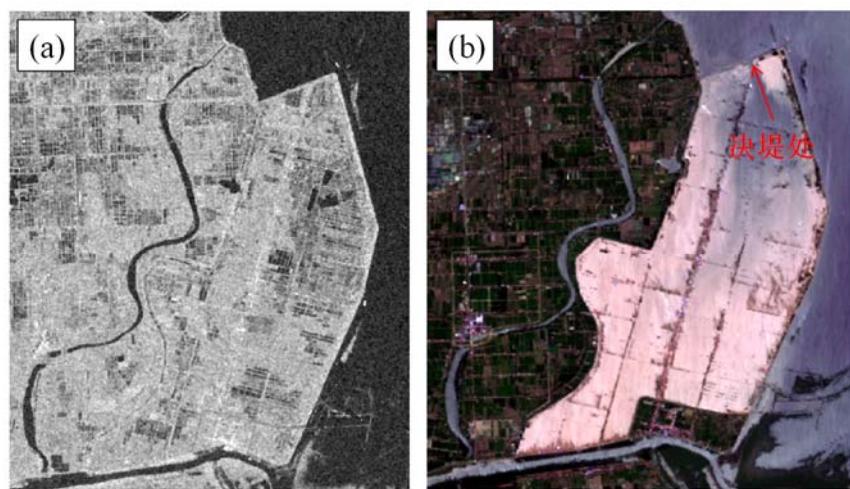


图9 团洲垸决堤前后卫星影像, (a) 为7月4日 Sentinel-1 卫星影像, (b) 为7月6日 GF-1 卫星影像  
Figure 9. Satellite images of Tuanzhou Polder before and after the levee breach: (a) Sentinel-1 SAR image on July 4, 2024; (b) GF-1 multispectral image on July 6, 2024.

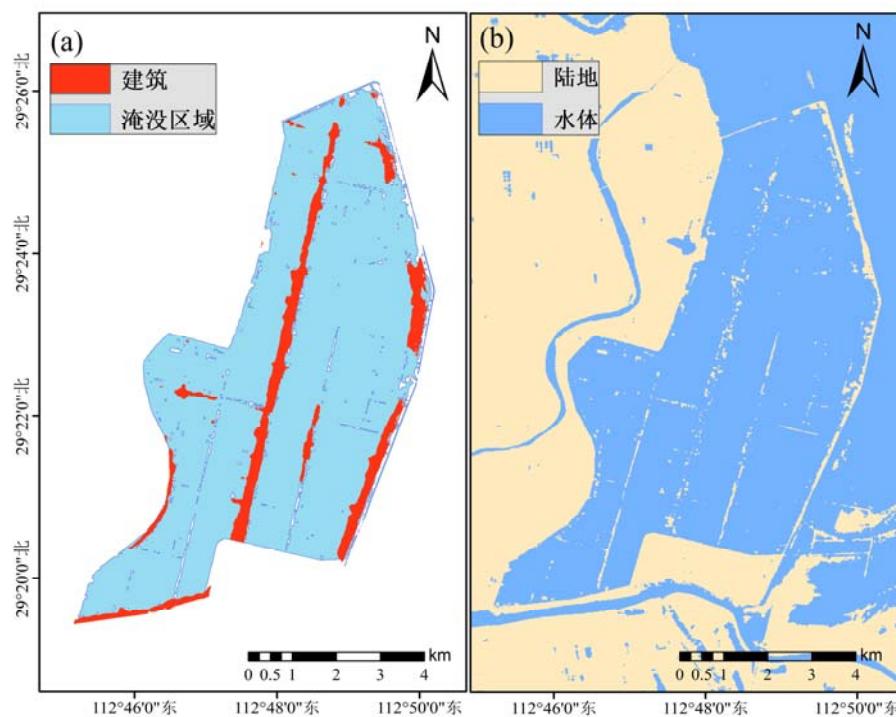


图10 基于 Sentinel-1 和 GF-1 影像 SVM 分类结果, (a) 为团洲垸建筑淹没示意图, (b) 为团洲垸地区水陆分类结果  
Figure 10. SVM classification results based on Sentinel-1 and GF-1 imagery: (a) inundated built-up areas in Tuanzhou Polder; (b) water–land classification map for the Tuanzhou Polder region.

表2 水陆分类精度评价

Table 2. Accuracy assessment of land/water classification

类别/分类结果	陆地像元个数	水体像元个数	生产者精度	用户精度
陆地	27491	29	99.88%	99.89%
水体	32	23055	99.87%	99.86%

总计	27523	23084
----	-------	-------

## 4. 讨论

### 4.1 溃坝事件的机制分析

根据前文分析（图 2、图 3），6 月 27 日至 7 月 1 日的持续强降水导致洞庭湖流域累积降水量激增，直接造成湖区水位暴涨，使土壤湿度迅速达到饱和（图 5），后续降水难以被下垫面吸收，绝大部分降水转化为地表径流汇入湖区，加剧了湖区水量累积。7 月 1 日至 7 月 8 日，城陵矶水位始终维持在警戒水位之上（图 8），对堤防形成了长时间的高压，形成洪水“滞”阶段，此阶段的长时间持续（达 8 天）对堤防安全构成严峻挑战。与此同时，长江干流维持高水位运行，对洞庭湖出流产生顶托效应，限制湖水外排能力，导致大量水体积蓄在洞庭湖，延长了高水位对堤防的浸泡时间，最终造成 7 月 5 日决堤事件。决口形成后，巨大水头差在决口处形成高速湍流，产生强烈的冲刷切削作用，导致在 24 小时内决口宽度超过 200 米。

团洲垸堤防工程主要由粉细砂土层和砂卵石层构成，堤身以沙质土为主(Lu et al., 2025)。由于特殊的地质结构和土质条件，当遭遇高水位长期浸泡时，极易发生管涌、渗漏等险情。同时，区域过度开发导致的湖泊面积缩减与蓄洪能力下降，以及部分堤垸防护设施老化这些因素也加剧了堤防工程的溃坝风险。

### 4.2 人为调控的积极影响

洪水“退”的阶段受到自然排水与人为调控的双重影响。为探讨三峡水库调度对洞庭湖水文响应的影响，本研究对三峡蓄水量、城陵矶水位、洞庭湖流域 TWSA 进行叠加分析（图 11）。从年际调控规律看，三峡水库在 4 月雨季来临前主动下泄，以增加下游消落空间，在 9 月后开始蓄水，逐步恢复水库蓄水能力。三峡通过汛前泄水和汛后蓄水，有效平衡夏冬季节水储量分布(Zhang et al., 2024b; 方春明等, 2014)。雨季前的下泄在一定程度上提高了长江中下游河道输水能力，汛期的拦蓄则会削减洪峰下泄量。根据中国政府网，2024 年 6 月 6 日三峡水库消落至 145m 汛限水位，腾空 221.5 亿  $m^3$  防洪库容，标志着其在进入主汛期前已做好拦蓄准备，为中下游提供了水情调控空间。

2024 年 7 月，TGD 下泄流量减少（图 11）。中国长江三峡集团有限公司通报显示，自 7 月 6 日 22 时起，三峡水库关闭泄洪孔，下泄流量由  $35,000 m^3/s$  降至  $31,000 m^3/s$ ，导致流域 TWSA 显著下降，城陵矶水位随之回落并趋于稳定。流域平均 TWSA 从 7 月 4 日的 179.07mm 降至 7 月 24 日的 78.53mm（图 6），降幅达 56%，清晰反映了洪水“退”的水文过程。三峡蓄水量与洞庭湖 TWSA 及城陵矶水位均呈现显著负相关，相关系数分别为 -0.918 和 -0.806，显著性水平  $p$  均小于 0.01。这一结果与(Zhang et al., 2024b)的研究结论一致，即三峡水库运行期间，人为调控是驱动区域 TWSA 变化的重要因素(Zhang et al., 2024b)。分析显示，三峡水库的蓄水量变化与 10 天后的城陵矶水位呈现最佳负相关 ( $r=-0.82$ )，表示了水文信号从三峡至城陵矶具有约 10 天传导滞后期。当三峡水库增加蓄水时，下泄流量的减少直接导致长

江干流水位下降，从而减弱对洞庭湖的顶托作用，加速湖水外排，最终表现为湖区水位和 TWSA 的同步降低(Yang et al., 2024)。TWSA 的下降实际上是自然降水减少与工程调控共同作用的结果，在已有三峡水库调度机制与洞庭湖自然水动力过程中，研究结果进一步验证了三峡调控与流域 TWSA 之间存在显著的相关性。

已有研究指出，三峡水库运行会改变东洞庭湖洪峰的到达时间与峰值规模，使洪峰更平缓、持续时间更短，从而降低湖区的结构性洪涝风险(Liu et al., 2020)。然而，三峡工程的调控主要针对长江上游洪水，对于洞庭湖流域内部的湘、资、沅、澧“四水”所引发的特大洪水，其直接削峰能力有限，仍需依赖流域内水库群的联合调度。此外，由于长江与洞庭湖之间的水力连通性呈现明显的空间差异，三峡调度对洞庭湖不同区域水位的影响也不相同。三峡水库主要通过调控经松滋、太平、藕池的入湖水量和改变长江干流的顶托强度来影响湖区水文过程。因此，与长江干流交互密切的东洞庭湖及北部区域，其水位及水储量变化对三峡调度的响应最敏感，而主要受湘、资、沅、澧“四水”补给的南洞庭湖和西洞庭湖区域，其水文过程主要受本地降水驱动，三峡调度的直接削峰作用相对滞后且有所衰减。

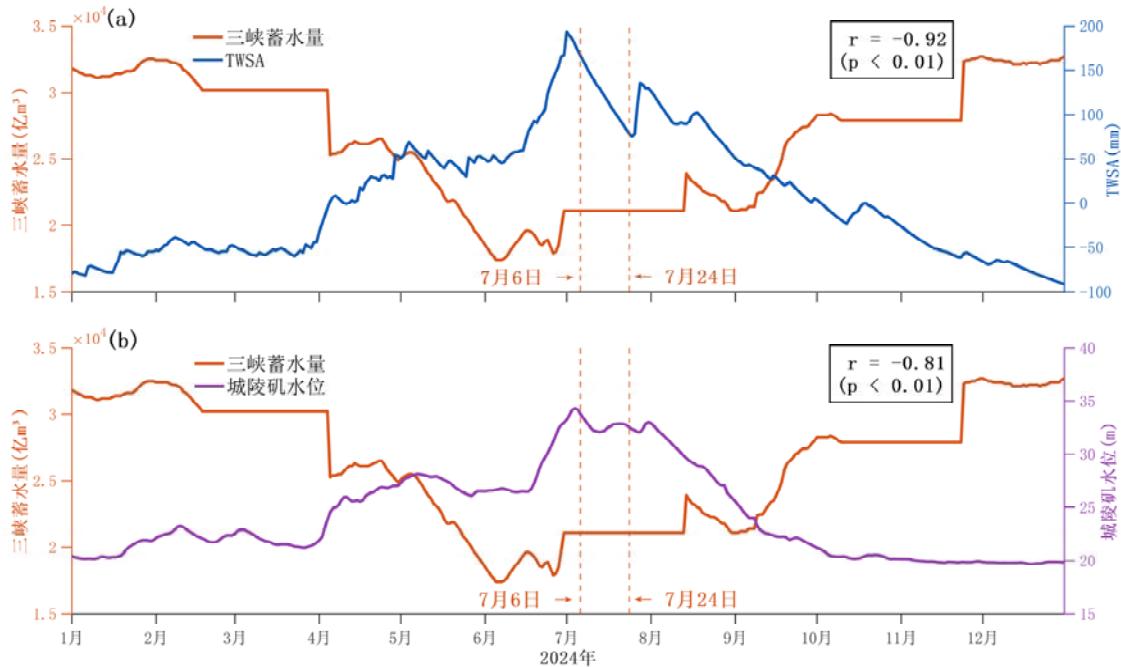


图 11 2024 年 TGD 蓄水量与洞庭湖流域 TWSA 及城陵矶水位时间序列，(a) 表示 TGD 蓄水量与 TWSA 对比，(b) 表示 TGD 蓄水量与城陵矶水位对比

Figure 11. Time series of Three Gorges Dam (TGD) reservoir storage, basin-wide TWSA, and Chenglingji water level in 2024: (a) comparison between TGD storage and TWSA; (b) comparison between TGD storage and Chenglingji water level.

#### 4.3 溃堤事件对农业的影响

团洲垸作为洞庭湖区重要的农业生产基地，其内部土地覆盖以水稻田、旱地及养殖坑塘为主。2024 年 7 月 5 日堤防溃决后，洪水长时间滞留，对区域农业植被的生长环境造成显著扰动。为定量评估此次决堤事件造成的农业植被损失程度，本研究利用 MODIS 影像获取

决堤前后合成的 NDVI，并进行差异分析。

结果表明，溃堤后研究区植被覆盖状况急剧恶化，NDVI 均值由 6 月的 0.510 显著下降至 7 月的 0.165，降幅达 0.345，反映出大量原有植被信号已被水体所替代。空间上，重度受损区域（NDVI 差值 $<-0.4$ ）达  $17.94\text{km}^2$ ，主要集中于团洲垸中部及东部。中度受损区域（ $0.4<\text{NDVI 差值}<-0.2$ ）达  $27.50\text{km}^2$ 。农作物受损范围与前文提取的淹没范围基本一致，进一步验证了团洲垸大部分农业区域已被洪水淹没，农业生产遭受严重冲击，验证了多时相植被指数在洪涝灾害农业损失快速评估中的可靠性和有效性(Miao et al., 2023)。

为排除非洪水灾害因素对 NDVI 变化的干扰，本研究在团洲垸周边未受淹区域设置了空间对照区（位置见图 12），计算其 2024 年 7 月与 6 月的 NDVI 差值，结果为 0.025，表明在同期正常水热条件下，区域植被处于稳定增长阶段。相比之下，淹没区 NDVI 剧烈下降，说明团洲垸地区内 NDVI 骤降主要由溃堤洪水直接导致，而非植物自然生长周期或气象性波动影响。

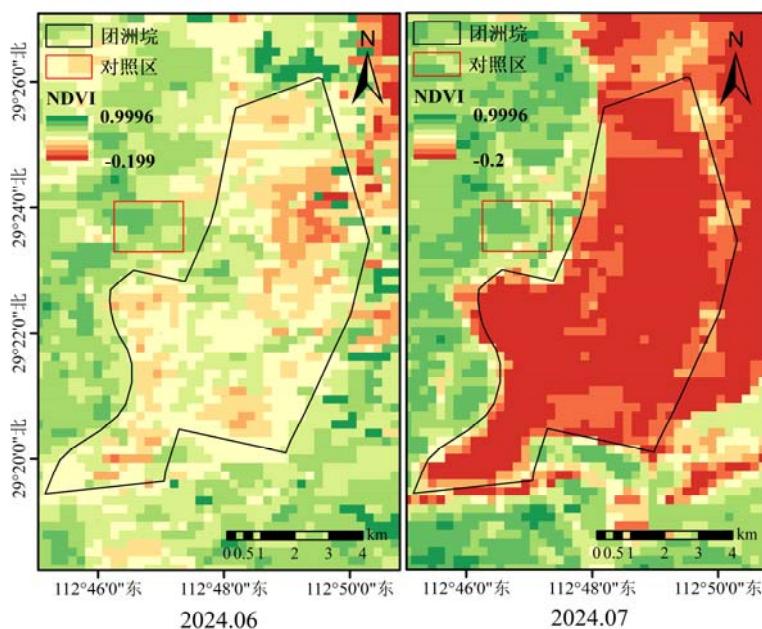


图 12 团洲垸地区 2024 年 6 月与 7 月 NDVI 空间分布

Figure 12. Spatial distribution of NDVI in Tuanzhou Polder in June and July 2024.

## 5. 结论

本研究基于 GRACE-FO 卫星重力反演的 TWSA、三峡工程调度资料、城陵矶水文站实测水位以及气象降水数据，全面评估了 2024 年 7 月洞庭湖流域洪水事件的时空演变与人为调控响应。基于 Sentinel-1 与 GF-1 遥感影像进行淹没分析进一步量化了溃堤灾害的局部影响。主要研究结果如下：

(1) 本次洪涝及溃堤事件由 2024 年 6 月下旬至 7 月初洞庭湖流域持续的极端降水直接引发。受此强降水驱动，洞庭湖流域重建的 TWSA 持续上升，由 6 月初的 49.41mm 迅速增至 7 月 1 日的峰值 193.56mm。同时，SSMA 于 7 月 2 日达到峰值 131.37mm，表示表层土壤湿度趋于饱和，后续降雨迅速转化为地表径流，最终引发洪水及团洲垸堤防溃决。

(2) 基于重建的 TWSA 构建的 WI 有效捕捉了此次洪水的早期信号, WI 于 6 月 27 日突破 95% 预警阈值 (1.804), 较城陵矶水文站实际水位超过警戒线 (33m) 提前 4 天发出预警, 验证了 WI 在大尺度流域洪水早期识别的潜力, 为应急响应争取了关键时间窗口。

(3) 基于 Sentinel-1 与 GF-1 遥感影像的淹没范围提取, 进一步从局部量化了灾害影响。结果发现团洲垸溃决后水体表面积增加约  $46.164\text{km}^2$ , 其中淹没建筑面积达  $4.21\text{km}^2$ 。同时, 使用 MODIS 数据 NDVI 分析表明农业植被遭受严重损失, NDVI 均值由 6 月的 0.510 骤降至 7 月的 0.165, 量化了洪水溃堤对团洲垸的直接影响。

(4) TGD 的人为调控在此次洪水过程中也发挥了显著调节作用。TGD 的拦蓄使长江干流水位快速消落, 加速湖泊水体下泄并且削减长江三口分流补给湖泊的水量。7 月 6 日起, TGD 下泄流量从  $35000\text{m}^3/\text{s}$  降至  $31000\text{m}^3/\text{s}$ , 有效降低了长江干流水位, 减轻对洞庭湖出流的顶托。这一人为调控加速了湖区水体外排, 促进湖区水位的回落, 拦截部分洪水量, 缓解了整体的洪水灾情。

综上, 本研究通过结合多源大地测量观测数据, 系统分析了 2024 年 7 月洞庭湖洪水从降水驱动、流域响应到水利工程调控的涨-滞-退全时空过程, 可为长江中游洪涝灾害的监测预警与风险防控提供重要参考。

## References

- Bai, H.B, Zhong, Y.L, Ma, N., et al., 2025. Changes and drivers of long-term land evapotranspiration in the Yangtze River Basin: A water balance perspective. *Journal of Hydrology*, 653, 132763. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.132763>
- Chen C, 2024. Analyzing the spatiotemporal evolution of terrestrial water in the Yangtze River Basin using GNSS technology. (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan(in Chinese with English abstract).
- Chen, F., Zhang, M.M, Zhao, H., et al., 2024. Pakistan's 2022 floods: Spatial distribution, causes and future trends from Sentinel-1 SAR observations. *Remote Sensing of Environment*, 304, 114055. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114055>
- Chen, J., Wilson, C., Seo, K.,et al., 2024. Validation of GRACE/GRACE-FO Solutions Using Caspian Sea Level Change. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17, 15885-15899. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3448488>
- Chen, J., Wilson, C., Tapley, B., 2010. The 2009 exceptional Amazon flood and interannual terrestrial water storage change observed by GRACE. *Water Resources Research*, 46(12). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2010WR009383>
- Cui, L.L, Meng, J.C, Zhong, B., et al., 2025. Spatiotemporal evolution of 1998 extreme flood event in the Yangtze River basin from the perspective of the reconstructed GRACE/GRACE-FO data. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 60, 102551. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102551>
- Dai, M.L, Wang, J., Zhang, M.B., et al., 2017. Impact of the Three Gorges Project operation on the water exchange between Dongting Lake and the Yangtze River. *International Journal of Sediment Research*, 32(4), 506-514. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2017.02.006>
- Dong, Z., Wang, G.J, Amankwah, S. O. Y.,et al., 2021. Monitoring the summer flooding in the Poyang

- Lake area of China in 2020 based on Sentinel-1 data and multiple convolutional neural networks. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 102, 102400. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102400>
- Du, Y., Xue, H.P., Wu, S.J., et al., 2011. Lake area changes in the middle Yangtze region of China over the 20th century. *Journal of Environmental Management*, 92(4), 1248-1255. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.12.007\\_](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.12.007_)
- Fang C.M, Hu C.H, Chen X.J., 2014. *Impacts of Three Georges Reservoir's operation on outflow of the three outlets of Jingjiang River and Dongting Lake*. *Journal of Hydraulic Engineering*, 45(1):36-41(in Chinese with English abstract).
- Fu Q, Guo C, Luo W.L., 2020 Land Use Change Detection Based on GF-1 Satellite Remote Sensing Images[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 57(16): 348-355(in Chinese with English abstract).
- Gao, B., Yang, D.W, Yang, H.B., 2013. Impact of the Three Gorges Dam on flow regime in the middle and lower Yangtze River. *Quaternary International*, 304, 43-50. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.11.023>
- Hall, J., Arheimer, B., Borga, M., et al., 2014. Understanding flood regime changes in Europe: a state-of-the-art assessment. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18(7), 2735-2772. <https://doi.org/10.5194/hess-18-2735-2014>
- Han, J., Miao, C., Gou, J.,et al., 2023. A new daily gridded precipitation dataset for the Chinese mainland based on gauge observations. *Earth Syst. Sci. Data*, 15(7), 3147-3161. <https://doi.org/10.5194/essd-15-3147-2023>
- He Q.H, Yu D.Q, Yu S.C, et al.,2021. Changes of Water Resources amount in Dongting Lake before and after the Operation of the Three Gorges Reservoir. *Earth Science*, 46(1): 293-307(in Chinese with English abstract).
- Hu, C.H, Fang, C.M, Cao, W.H, 2015. Shrinking of Dongting Lake and its weakening connection with the Yangtze River: Analysis of the impact on flooding. *International Journal of Sediment Research*, 30(3), 256-262. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2014.05.001>
- Humphrey, V., Gudmundsson, L., 2019. GRACE-REC: a reconstruction of climate-driven water storage changes over the last century. *Earth Syst. Sci. Data*, 11(3), 1153-1170. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1153-2019>
- Jäggi, A., Weigelt, M., Flechtner, F., et al., 2019. European Gravity Service for Improved Emergency Management (EGSIEM)—from concept to implementation. *Geophysical Journal International*, 218(3), 1572-1590. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz238>
- Jia, H.C, Chen, F., Pan, D.H, et al., 2022. Flood risk management in the Yangtze River basin — Comparison of 1998 and 2020 events. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 68, 102724. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102724>
- Kurtenbach, E., Eicker, A., Mayer-Gürr, T.,et al., 2012. Improved daily GRACE gravity field solutions using a Kalman smoother. *Journal of Geodynamics*, 59-60, 39-48. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jog.2012.02.006>
- Lai, X.J, Wang, Z.M., 2017. Flood management of Dongting Lake after operation of Three Gorges Dam. *Water Science and Engineering*, 10(4), 303-310. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wse.2017.12.005>

- Li, B.L, Rodell, M., Kumar, S., et al., 2019. Global GRACE Data Assimilation for Groundwater and Drought Monitoring: Advances and Challenges. *Water Resources Research*, 55(9), 7564-7586. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2018WR024618>
- Li, X.Y, Long, D., Scanlon, B. R., et al., 2022. Climate change threatens terrestrial water storage over the Tibetan Plateau. *Nature Climate Change*, 12(9), 801-807. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41558-022-01443-0>
- Liu, S.L, Wu, Y.L, Xu, G.D, et al., 2025. Revealing the spatiotemporal evolution of the 2024 extreme flood in Guangdong Province: Insights from GRACE-FO and in situ measurements. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 59, 102451. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102451>
- Liu, Y, Jing, W., Sun, S., et al., 2021. Multi-Scale and Multi-Depth Validation of Soil Moisture From the China Land Data Assimilation System. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 9913-9930. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3116583>
- Liu, Y.Z, Yang, S.Q, Jiang, C.B., et al., 2020. Hydrological Drought in Dongting Lake Area (China) after the Running of Three Gorges Dam and a Possible Solution. *Water*, 12(10), 2713. <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/10/2713>
- Long, D., Shen, Y.J, Sun, A., et al., 2014. Drought and flood monitoring for a large karst plateau in Southwest China using extended GRACE data. *Remote Sensing of Environment*, 155, 145-160. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.08.006>
- Lu, W. J., Jiang, R. C., Li, J. H., et al., 2025. Cascading floods in multi-level levee protection areas: Case studies of Dongting lake bursting. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 60, 102495. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102495>
- Miao, S.X, Zhao, Y.X, Huang, J.X, et al., 2023. A Comprehensive Evaluation of Flooding's Effect on Crops Using Satellite Time Series Data. *Remote Sensing*, 15(5), 1305. <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/5/1305>
- Mishra, A. K., Singh, V. P., 2011. Drought modeling – A review. *Journal of Hydrology*, 403(1), 157-175. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.049>
- Ran, J.J, Ditmar, P., Liu, L., 2021. Analysis and Mitigation of Biases in Greenland Ice Sheet Mass Balance Trend Estimates From GRACE Mascon Products. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(7), e2020JB020880. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2020JB020880>
- Rateb, A., Save, H., Sun, A., et al., 2024. Rapid mapping of global flood precursors and impacts using novel five-day GRACE solutions. *Scientific Reports*, 14(1), 13841. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64491-w>
- Ren, R.Q, Nemoto, T., Raghavan, V., et al., 2025. Analysis of Droughts and Floods Evolution and Teleconnection Factors in the Yangtze River Basin Based on GRACE/GFO. *Remote Sensing*, 17(14), 2344. <https://www.mdpi.com/2072-4292/17/14/2344>
- Retegui-Schietekatte, L., Schumacher, M., Madsen, H., et al., 2025. Assessing daily GRACE Data Assimilation during flood events of the Brahmaputra River Basin. *Science of the Total Environment*, 975, 179181. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179181>
- Rodell, M., Li, B.L., 2023. Changing intensity of hydroclimatic extreme events revealed by GRACE and GRACE-FO. *Nature Water*, 1(3), 241-248. <https://doi.org/10.1038/s44221-023-00040-5>

- Sen, S., Nandi, S., Biswas, S., 2024. Application of GRACE-based satellite estimates in the assessment of flood potential: A case study of Gangetic-Brahmaputra basin, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(10), 997. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13174-0>
- Sun, S., Shi, C.X, Pan, Y., et al., 2020. Applicability Assessment of the 1998–2018 CLDAS Multi-Source Precipitation Fusion Dataset over China. *Journal of Meteorological Research*, 34(4), 879-892. <https://doi.org/10.1007/s13351-020-9101-2>
- Sun, Z.D, Huang, Q., Opp, C., et al., 2012. Impacts and implications of major changes caused by the Three Gorges Dam in the middle reaches of the Yangtze River, China. *Water resources management*, 26(12), 3367-3378. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11269-012-0076-3>
- Tang, G.Q, Ma, Y.Z, Long, D., et al., 2016. Evaluation of GPM Day-1 IMERG and TMPA Version-7 legacy products over China's mainland at multiple spatiotemporal scales. *Journal of Hydrology*, 533, 152-167. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.008>
- Thanh Noi, P., Kappas, M., 2018. Comparison of Random Forest, k-Nearest Neighbor, and Support Vector Machine Classifiers for Land Cover Classification Using Sentinel-2 Imagery. *Sensors*, 18(1), 18. <https://doi.org/10.3390/s18010018>
- Wang, L.S, Chen, C., Ma, X., et al., 2020. Evaluation of GRACE mascon solutions using in-situ geodetic data: The case of hydrologic-induced crust displacement in the Yangtze River Basin. *Science of the Total Environment*, 707, 135606. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.inoche.2025.114885>
- Wu, J., Gao, X.J, 2013. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(4), 1102-1111. <https://doi.org/https://doi.org/10.6038/cjg20130406>
- Xiao, C.Y, Zhong, Y.L, Wu, Y.L, et al., 2023. Applying Reconstructed Daily Water Storage and Modified Wetness Index to Flood Monitoring: A Case Study in the Yangtze River Basin. *Remote Sensing*, 15(12), 3192. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs15123192>
- Xu, G.D, Liu, S.L, Cheng, S.Y, et al., 2024. Quantifying the 2022 drought and spatiotemporal evolution of TWSA in the Dongting Lake Basin over the past two decades. *Geodesy and Geodynamics*, 15(5), 516-527. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geog.2024.03.001>
- Yang, S., Xie, L.L, Yang, K.J, et al., 2024. The lake and groundwater interaction based on water balance in Dongting Lake, China. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 53, 101783. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101783>
- Yu S.C, Yu D.Q, Wang L.C, et al., 2019. Remote Sensing Study of Dongting Lake Beach Changes before and after Operation of Three Gorges Reservoir. *Earth Science*, 44(12): 4275-4283(in Chinese with English abstract).
- Zhai, Y.Q, Liang, J., An, Z.Y, et al., 2022b. Data Stream Approach for Exploration of Droughts and Floods Driving Forces in the Dongting Lake Wetland. *Sustainability*, 14(24), 16778. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/24/16778>
- Zhang, Z.H, Lu, H., Xu, N., et al., 2024b. Comprehensive assessment of the recent dike breach at Dongting Lake. *The Innovation Geoscience*. <https://doi.org/10.59717/j.xinn-geo.2024.100106>
- Zhao, W.G, Ji, W.Z, Wang, J.H, et al., 2025. Research on Flood Storage and Disaster Mitigation Countermeasures for Floods in China's Dongting Lake Area Based on Hydrological Model of Jingjiang–Dongting Lake. *Water*, 17(1), 1. <https://doi.org/10.3390/w17010001>

- Zhou, C.L, Wang, K.C., 2017. Quantifying the Sensitivity of Precipitation to the Long-Term Warming Trend and Interannual-Decadal Variation of Surface Air Temperature over China. *Journal of Climate*, 30(10), 3687-3703. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0515.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0515.1)
- Zhou, Y.Q, Jeppesen, E., Li, J.B, et al., 2016. Impacts of Three Gorges Reservoir on the sedimentation regimes in the downstream-linked two largest Chinese freshwater lakes. *Scientific Reports*, 6(1), 35396. <https://doi.org/10.1038/srep35396>
- Zhu L.L, Chen J.C, Yuan J, et al., 2014. Sediment erosion and deposition in two lakes connected with the middle Yangtze River and the impact of Three Gorges Reservoir[J]. *Advances in Water Science*, 25(3): 348-357(in Chinese with English abstract).
- Zou, R., Chen, C., Cao, J.M, et al., 2023. The flow of the Yangtze River inverted from a continuous global navigation satellite system station. *Geophysical Research Letters*, 50. <https://doi.org/10.1029/2023GL104481>
- Zou, Z.B., Li, Y., Cui ,L.L, et al., 2023. Spatiotemporal Evaluation of the Flood Potential Index and Its Driving Factors across the Volga River Basin Based on Combined Satellite Gravity Observations. *Remote Sensing*, 15(17), 4144. <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/17/4144>

### 中文参考文献

- 陈超, 2024. 利用 GNSS 技术解析长江流域陆地水时空动态演变 (博士学位论文). 武汉: 中国地质大学 (武汉) .
- 方春明, 胡春宏, 陈绪坚, 2014. 三峡水库运用对荆江三口分流及洞庭湖的影响. *水利学报*, 45(1):36-41.
- 付青, 郭晨, 罗文浪, 2020. 基于高分一号卫星遥感影像的土地利用变化检测. *激光与光电子学进展*, 57(16), 348-355.
- 贺秋华, 余德清, 余姝辰, 等, 2021. 三峡水库运行前后洞庭湖水资源量变化. *地球科学*, 46(1), 293-307.
- 余姝辰, 余德清, 王伦澈, 等, 2019. 三峡水库运行前后洞庭湖洲滩面积变化遥感认识. *地球科学*, 44(12), 4275-4283.
- 朱玲玲, 陈剑池, 袁晶, 等, 2014. 洞庭湖和鄱阳湖泥沙冲淤特征及三峡水库对其影响. *水科学进展*, 25(3), 348-357.