*J. Lake Sci.(湖泊科学)*, 2026, 38(2):000-000
DOI 10.18307/2026.0241


# 三峡水库调蓄与流域来水对 2020 年以来鄱阳湖极端洪/枯水情的影响*

聂珉川[1,2,3]，姚　静[2]，龚磊强[4]，蔡永久[2]，熊丽黎[5]，梁涵玮[1]，王晓龙[2]，谭志强[2†]
(1:南京信息工程大学地理科学学院，南京 211800)
(2:中国科学院南京地理与湖泊研究所，湖泊与流域水安全全国重点实验室，南京 211135)
(3:中国科学院大学南京学院，南京 211135)
(4:江西鄱阳湖国家级自然保护区管理局，南昌 330038)
(5:江西省水文监测中心，南昌 330002)

**摘　要**：受长江来水与流域五河等多因素的共同作用，近年来鄱阳湖极端洪枯事件频发，2020–2024 年间出现涝旱急转现象，水文情势不确定性增加。本研究综合运用 LSTM 神经网络与 MIKE21 水动力模型构建基于实测边界条件、无三峡水库调蓄及常年平均流域来水三种情景，对比分析了三峡水库调蓄与流域来水对 2020 年以来鄱阳湖发生的极端洪枯事件的影响。结果显示：（1）三峡水库调蓄一定程度上减少了鄱阳湖洪水发生的风险；流域来水减少导致鄱阳湖低水位更低；二者共同作用导致鄱阳湖秋旱加剧。（2）三峡水库调蓄是鄱阳湖丰水期水位的主控因素，导致极端洪水下降 0.09～0.38 m（占双因素综合影响的 58%～81%），而流域来水是枯水期水位降低的主因（降幅 0.13～1.12 m，贡献率达 35%～100%）。（3）极端洪水情势下，三峡水库调蓄的影响范围波及到整个湖区，水位下降区间最大达到 1.32～1.38 m，水位降幅自北向南减弱；极端枯水情势下，流域来水主要影响主河道和南部抚河入湖区域，导致水位下降 0～3.96 m，水域面积减少 516.03 km²。研究成果可为精准识别鄱阳湖极端水文事件的主导因子、优化水位调控策略及提升区域水文风险管理能力提供科学依据。
**关键词**：三峡水库；流域来水；极端洪枯水情；水动力模拟；长短期记忆网络；鄱阳湖

## Impacts of Three Gorges Reservoir regulation and basin Inflow on extreme flood-drought events in Lake Poyang since 2020

Nie Minchuan[1,2,3], Yao Jing[2], Gong Leiqiang[4], Cai Yongjiu[2], Xiong Lili[5], Liang Hanwei[1], Wang Xiaolong[2] & Tan Zhiqiang[2†]
(*1: School of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 211800, P.R.China)*
*(2: Key Laboratory of Lake and Watershed Science for Water Security, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, P.R.China)*
*(3: University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Nanjing 211135, P.R.China)*
*(4: Jiangxi Poyang Lake National Nature Reserve Authority, Nanchang, 330038, P.R.China)*
*(5: Jiangxi Hydrological Monitoring Center, Nanchang 330002, P.R.China*)

Abstract: Under the combined influences of inflow from the Yangtze River and the five in-lake rivers basin, Lake Poyang has experienced frequent extreme flood-drought events in recent years. Rapid transitions between floods and droughts from 2020

*2025-03-25 收稿；2025-06-17 收修改稿。
国家自然科学基金项目（U2240219, 42171104, 32471651）、"赣鄱英才计划"创新领军人才项目（gpyc20240050）联合资助。
† 通信作者；E-mail：zqtan@niglas.ac.cn。

to 2024 have heightened uncertainty in its hydrological regimes. This study integrated an LSTM neural network with the MIKE21 hydrodynamic model to simulate three scenarios: measured boundary conditions, scenarios excluding the regulation of the Three Gorges Reservoir (TGR), and scenarios with average annual basin inflow. These were used to compare and analyze the impacts of TGR regulation and basin inflow on extreme flood and drought events in Lake Poyang since 2020. The results indicate that: (1) TGR regulation moderately mitigated flood risk in Lake Poyang, whereas reduced basin inflow resulted in lower water levels. The combined effect of these factors exacerbated autumn drought conditions. (2) Under combined influences, TGR regulation was the dominant factor controlling water levels during the flood season, reducing extreme flood levels by 0.09–0.38 m (accounting for 58%–81% of the total combined effect), while reduced basin inflow was the primary driver of water level decline during the dry season (a decrease of 0.13–1.12 m, contributing 35%–100%). (3) During extreme floods, TGR regulation affected the entire lake, lowering water levels by up to 1.32–1.38 m, with effects diminishing from north to south. During extreme droughts, reduced basin inflow mainly influenced the main channel and the southern inflow zone of the Fuhe River, reducing water levels by 0–3.96 m and decreasing the water surface area by 516.03 km². These findings provide scientific support for accurately identifying dominant factors in extreme hydrological events, optimizing water level regulation strategies, and improving regional hydrological risk management in Lake Poyang.
Keywords: Three Gorges Reservoir; Basin Inflow; extreme flood-drought events; hydrodynamic simulation; Long-short-term-memory network; Lake Poyang

鄱阳湖是长江中下游地区重要的天然径流调节湖泊，在优质水资源供给、洪水调蓄和流域生态保护等方面发挥着不可替代的作用[1]。湖区、长江、五河相互影响、相互制约，使鄱阳湖流域成为中国各大湖泊流域中水力联系最复杂的区域之一[2]。洪水、干旱是鄱阳湖流域主要自然灾害[3]。

1949 年以来，湖区发生大洪水 20 余次，1998 年鄱阳湖特大洪水造成直接经济损失约 376. 8 亿元，农作物受灾 158. 4 $hm^2$[4]；1978 年湖区特大干旱中，造成农业受灾面积 1445.7×$10^3$ $hm^2$，受灾人口 1154.9 万人，是 1950 年以来农业受灾最为严重的一年[5,6]。随着气候变暖和人类活动等影响，鄱阳湖的水文情势发生巨大的变化，洪水、干旱等极端事件更加频繁[7]。2020–2024 年期间鄱阳湖分别发生过一次极端洪涝和极端高温干旱事件，其中 2020 年江西省遭遇了持续性的暴雨天气，鄱阳湖水位迅速上升，湖区星子站水位达到了 22.63 m，刷新了水文历史记录最高值[8]。2022 年鄱阳湖流域发生了自 1961 年以来最严重的一次极端高温干旱事件，导致鄱阳湖水位迅速下降，出现“汛期反枯”的现象[9]。

近年来，众多学者研究发现长江和流域来水变化、流域气候变化、人类活动影响等是导致鄱阳湖极端洪枯事件频发的主要原因。在长江和流域来水影响方面，Yao 等[10]揭示了长江与本地流域对鄱阳湖季节性低水位的差异化贡献，表明 1963 年春季低水位以本地流域作用为主，而 2006 年秋季低水位则主要受长江流量控制；Xue 等 [11]得到三个关于水文干旱的重要结论：一是影响鄱阳湖水位的主要因素是流域内的赣江来水，二是鄱阳湖秋旱加剧的原因是长江排湖作用导致的湖泊出流量增加，三是极端水文干旱事件的主要原因是由于流域来水偏低。在流域气候影响方面，姚仕明等[12]认为异常气象事件影响降雨和湖区出入流是鄱阳湖出现极端洪枯水文情势的主要原因；武少轩等[2]发现鄱阳湖高水位的主因是流域内强降水导致的径流激增。在人类活动影响方面，蒋涛等[13]推断三峡水库运行、湖区采砂等人类活动可能是造成鄱阳湖面积缩小这一干旱化事件的最主要原因。其中，三峡工程调蓄是关乎鄱阳湖极端洪枯水情应对的重点。赖锡军等[14]发现三峡工程蓄水导致鄱阳湖湖口、星子、都昌和康山水位平均下降 0.94 m、0.74 m、0.50 m 和 0.03 m，加速湖水下泄，加剧了枯水期水位偏低现象。相反，胡挺等[15]发现三峡水库运行对鄱阳湖水位降低并不起到决定作用，反而在消落期对抬升鄱阳湖水位还发挥积极作用。正如宋继鹏等[16]指出：鄱阳湖的低枯水情是多种因素共同作用的结果，不能将其简单归结于某一因素的影响。此外，即使是主控因子，在不同水文阶段或水文年也存在角色差异。当前研究主要针对个别影响因素或聚焦个别历史事件，对近年来连续发生的极端洪枯事件缺乏系统性分析。此外，大部分关于三峡水库调蓄影响的研究主要基于三峡水库建设前后（2003 年前后）两个时期水文条件的对比分析，所得结论反映的是多种因素综合作用的结果，没有明确区分三峡水库调蓄的单独贡献。

鉴于此，本研究采用最新的水文数据，以近年来鄱阳湖连续发生的极端洪枯事件为研究对象，综合运用机器学习与水动力数值模拟的方法，通过情景设置明确区分三峡水库调蓄和流域来水对鄱阳湖极端水情的影响分量，为极端水文事件的预测与防范提供科学依据。预期达到以下几个研究目标：(1)识别三峡水库调蓄和流域来水在不同极端洪枯情势下的作用方式；(2)揭示三峡水库调蓄和流域来水对鄱阳湖极端水情的影响时机和程度；(3)探究三峡水库调蓄和流域来水对鄱阳湖极端水情的影响范围与空间异质性。

## 1 研究区概况

鄱阳湖承纳赣江、抚河、信江、饶河、修水五河来水（如图 1），流域多年平均径流量约为 $1494\times10^8$ $m^3$[17]，年均入江水量 $1507\times10^8$ $m^3$，约占长江年径流量的 16.87%[18]，对长江中下游起着调洪补枯的作用。受五河及长江来水的双重影响，鄱阳湖水位的年际和年内差异较大，遵循 4–5 月涨水期、6–9 月丰水期、10–11 月退水期和 12 月–次年 3 月枯水期的水文节律[16,19]。近年来，鄱阳湖枯水期提前，退水期缩短，低枯水位持续时间延长，水文节律被扰乱，极端洪枯事件频发[19]。例如，2020 年鄱阳湖洪涝灾害共导致 673.3 万人受灾，需紧急生活救助 31.3 万人，直接经济损失约 313.3 亿元[4]。2022 年特大干旱导致 1.97 万人饮水困难、60.2 万人生活需要救助，直接经济损失高达 71.4 亿元[20]。鄱阳湖草滩和泥滩是越冬候鸟重要的觅食和栖息地，每年冬季到次年春季，大量珍惜候鸟迁徙至鄱阳湖越冬[21]。受极端洪枯事件影响，鄱阳湖植被退化，多样性减少，候鸟食物资源短缺[22]。例如，受 2020 年夏季极端高水位的影响，水鸟越冬前期湖区水位持续 38 天高于 14 m，水鸟栖息地面积不足[8]。而 2023 年极端枯水位的延长和提前对水生植物的生长和繁殖产生了不利影响[23]。鄱阳湖频发的极端洪枯事件，及其社会经济和生态环境影响引发广泛的社会关注。

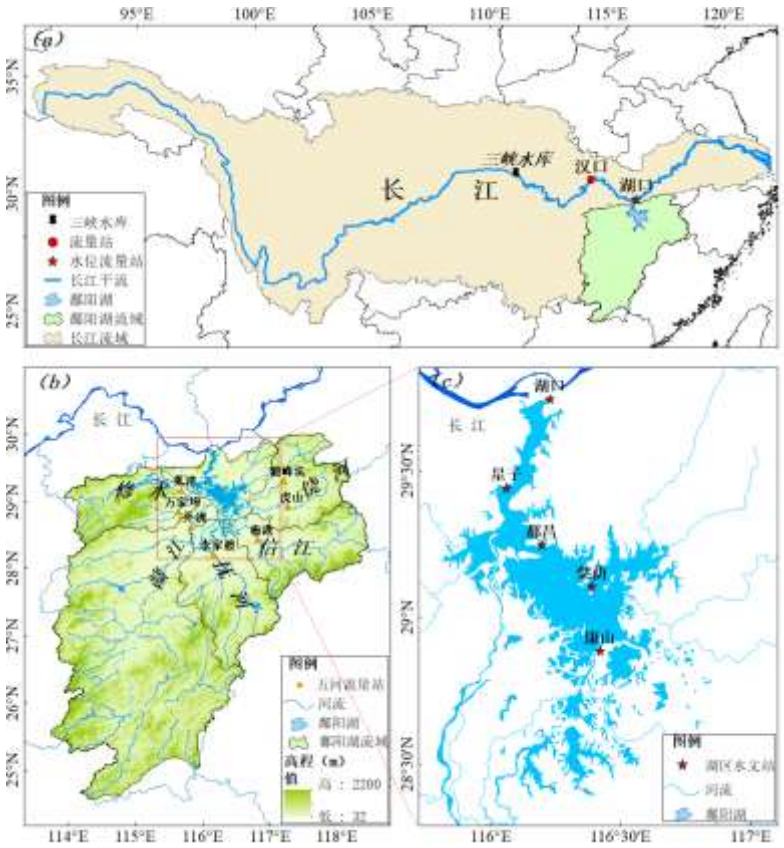


图 1 鄱阳湖流域及湖区地理位置示意图（a）及水系概图（b–c）

Fig.1 Geographical location of Lake Poyang and its catchment (a) and the related river system distribution (b–c)

## 2 数据和方法

本研究综合运用 LSTM(long-short-term-memory)神经网络和 MIKE21 水动力模型，以近年连续发生的极端洪枯事件为研究对象,探讨三峡水库调蓄与流域来水共同作用对鄱阳湖水位变化的影响。首先，基于 LSTM 建立湖口站水位与长江径流、五河来水之间的长期依赖关系；再用实际汉口站流量减去三峡出入库流量差，替代原来的实际汉口流量输入 LSTM 模型，预测无三峡调蓄情景下的湖口站水位。其次，构建二维水动力模型，上边界设置为五河日径流量（经未控区入湖流量修正后的五河来水能够代表整个流域的径流变化），下边界为湖口水位，通过参数敏感性分析优化最大、最小时间步长等关键参数，分别构建实际条件（S0）、无三峡水库调蓄（S1）和平均流域来水（S2）三种情景。最后，通过方案对比分析三峡工程调蓄和流域来水对鄱阳湖极端洪枯水情的影响。

### 2.1 数据

使用数据主要包括水文数据和气象数据。五河日径流量和湖口水位作为构建鄱阳湖二维水动力模型的数据基础，五站水位和湖口流量用于对该模型进行验证和率定。此外，汉口站、三峡出入库日径流量及湖口水位用于验证和率定 LSTM 模型。水文数据选取鄱阳湖重要水文观测五站（湖口站、星子站、都昌站、棠荫站、康山站）水位，鄱阳湖五河监测站（虬津、万家埠、外洲、李家渡、梅港、虎山、渡峰坑）、湖口站等日径流量，时间序列为 1960 年 1 月–2025 年 3 月，数据来源于江西省水文监测中心；还收集了汉口站（代表长江径流量）、三峡出入库的日径流量，时间序列为 2006 年 1 月–2025 年 3 月，数据来源于湖北省水文水资源中心；气象数据提取 ERA5 再分析数据集中的逐小时降水、蒸发数据，转换为逐日数据后使用，时间序列为 2003 年 1 月–2025 年 3 月。

### 2.2 典型年识别

通过对鄱阳湖五站 1960–2024 年水位数据的深度解析，发现各站历史最高与最低水位出现的时间有 60%集中于 2020–2024 年。如图 2 所示，2020 年 7 月 12 日，星子站出现 1960 年以来最高水位 22.6 m，较历年最高水位均值 19.17 m 偏高 3.43 m。2022 年 11 月 17 日，星子站达到历史最低水位 6.48 m，较历年同期水位均值 11.35 m 偏低 4.87 m。2023 年 7 月 20 日，星子站水位跌至枯水位以下，使 2023 年成为 1960 年有纪录以来最早进入枯水期的年份，较原最早出现日期(2022 年 8 月 6 日）提前 17 天[24]。2024 年 8 月 3 日，星子站水位达到警戒水位（19 m），仅相隔 38 天（9 月 10 日）水位便退至 11.77 m 进入枯水期，10 月 9 日跌至 8 m 极枯水位，退水速率远超历史平均水平。

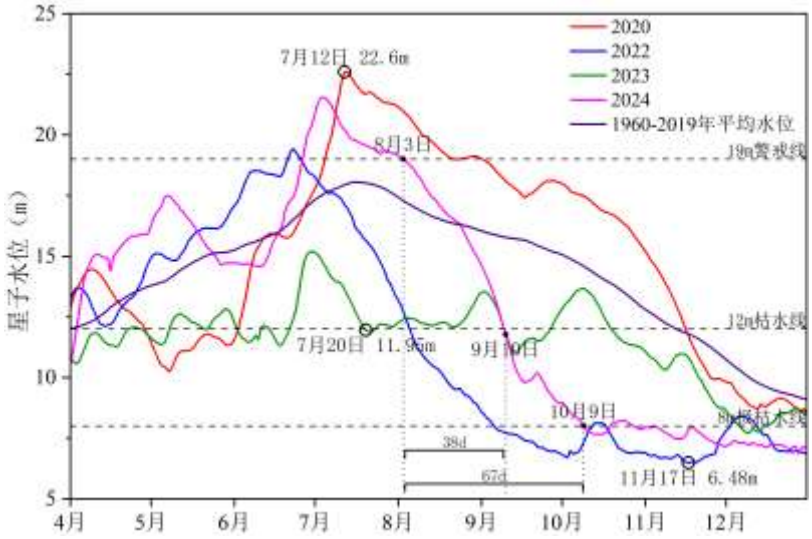


图 2 2020、2022-2024 年历年星子站水位过程线与 1960-2019 年多年平均水位线

Fig.2 Annual water level process at Xingzi Station for 2020 and 2022-2024 compared to multi-year average water level (1960-2019)

综上，鄱阳湖 2020 年极端洪水位创新高，2022 年极端枯水位创新低，2023 年枯水期历史性提前和 2024 年涝旱急转的水情变化特征是极端洪枯事件判别的重要依据。因此，本研究选取 2020、2022、2023 和 2024 年作为典型年，进一步分析三峡水库调蓄和流域来水对鄱阳湖极端洪枯水情的影响。

### 2.3 研究方法

**2.3.1 LSTM 模型** 本研究利用 LSTM 模型预测无三峡情景下的湖口水位。LSTM 是一种特殊类型的循环神经网络（recurrent neural network），主要通过引入遗忘门、输入门和输出门三个门控机制来调节信息的流动[25], 处理和预测时间序列数据。本研究构建了一个单层 LSTM 模型，基于时间序列将数据集划分为训练集和测试集，分别占总数据的 80%和 20%。模型的输入特征维度为 6，序列长度为 7000 d（2006 年 1 月–2025 年 3 月），隐藏层单元数设置为 128，适用于本研究的中等规模时序数据集。批次大小设置为 16，初始学习率为 0.001，均为常用默认参数，并设置训练周期数为 500，确保能够充分学习到水位变化的季节性、年际变化趋势。

首先，利用 LSTM 模型以实际汉口站和五河流量作输入特征值，湖口水位作输出特征值，训练汉口及五河流量与湖口水位之间的水文联系。其次，用实际汉口流量减去三峡出入库流量差，将调整后的汉口流量和鄱阳湖五河来水输入长短期记忆模型，预测得到无三峡水库调蓄的湖口水位，为后续水动力模拟中三峡水库调蓄的情景设计作数据支撑。

考虑用实际汉口流量减去三峡出入库流量差并纳入滞后时间因素。三峡大坝蓄水导致的水流变化传播至洞庭湖出口城陵矶约需 2–3 天，传播至鄱阳湖出口湖口约需 7 天[26]。汉口水文站位于长江中游，且在城陵矶与湖口之间，可推测三峡大坝蓄水的水流变化到达汉口水文站的时间在 5 天左右。公式如下（$T$=5d）：

$$Q_{修正汉口}(t)=Q_{实际汉口}(t)-(Q_{三峡出库}(t-T)-Q_{三峡入库}(t-T))$$

图 3 三峡出入库流量差与汉口流量变化趋势展示了三峡水库出入库流量差与汉口实测流量的时序变化特征。在典型丰水期内，三峡出入库流量差出现大量负值，表明三峡水库采取了明显的拦蓄减泄措施，尤其在极端洪水事件下，三峡蓄水量大幅增加；在枯水期，三峡出入库流量差以正值为主，水库主要执行补枯放水操作。汉口流量作为下游重要控制站点，其变化趋势提供了区域水文情势的参考背景，以辅助理解不同调蓄行为所对应的水情状况。

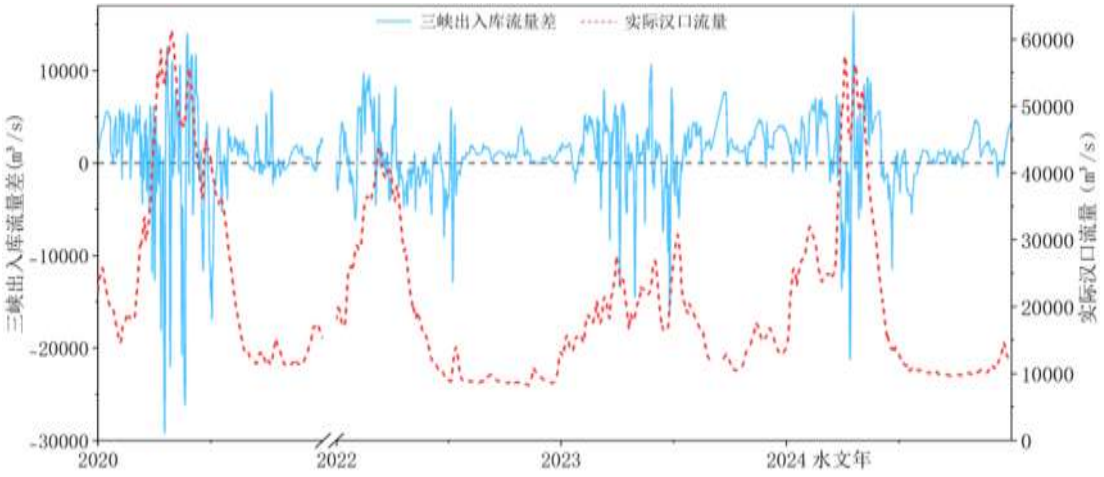


图 3 三峡出入库流量差与汉口流量变化趋势

Fig.3 Temporal variation of the Three Gorges Reservoir inflow–outflow difference and the observed discharge at Hankou

**2.3.2 水动力模型** 鄱阳湖属宽浅型湖泊，水体垂向混合状况较好，且湖区岸线曲折复杂，地形空间变异较大，适用于二维水动力数学模型。因此，本文利用无结构网格的 MIKE 21 模型[27]模拟有无三峡水库调蓄和流域来水变化情景下的水文情势。模型采用 2010 年鄱阳湖湖盆地形，根据鄱阳湖历史洪水淹没范围确定计算域（面积约为 3124 km$^2$），利用三角形网格对计算域进行网格剖分，共剖分为 11251 个节点和

20450 个三角形网格单元。分别以鄱阳湖流域五河径流量和湖口水位作为水动力模型的上、下游边界条件。模型的最大时间步长为 3600 s，最小时间步长为 4 s，可保证模拟过程的计算稳定性；涡粘系数取经验值 0.28；因湖泊主河道、滩地以及子湖泊具有不同的植被类型，曼宁系数根据空间变化设定为 30~50 $m^{1/3}/s$[28]，干湿水深边界条件按默认设定干水深为 0.005 m，淹没水深 0.05 m，湿水深 0.1 m。风场中设定风向为 45°，采用多年平均风速 3.03 m/s。将湖区逐日降雨和蒸发数据考虑到水动力模型中参与计算，以常数 0 为模型初始流速条件，以模型起始时间一个月前的湖泊水位为初始水位条件来冷启动模型，确保模型从静止状态逐步过渡到动态平衡。

本研究设计三种模拟情景（表 1）探究三峡水库调蓄与流域来水对鄱阳湖极端水情的影响。情景 S0 表征 2020–2024 年实际条件下鄱阳湖的水文情势。为了厘清三峡水库调蓄的影响，设置了情景 S1。在 S1 中，用 LSTM 预测的无三峡水库调蓄的湖口水位代替实际观测水位，通过对比情景 S0 与 S1 模拟结果，预测三峡水库调蓄的影响。为了厘清鄱阳湖流域来水的影响，设置情景 S2。在 S2 中，由于三峡工程于 2003 年竣工，为更好区分三峡调蓄和流域来水影响，以 2003–2024 五河多年平均径流量代替实际径流量，通过对比情景 S0 与 S2 模拟结果预测鄱阳湖流域气候变化和人类活动的综合影响。

三峡水库调蓄和流域来水对鄱阳湖水位变化贡献率的计算公式分别为：

$$\frac{S0-S1}{|S0-S1|+|S0-S2|}\times 100\%$$

$$\frac{S0-S2}{|S0-S1|+|S0-S2|}\times 100\%$$

表 1 水动力模拟方案

Tab.1 Hydrodynamic simulation schemes

| 模拟方案 | 模型边界条件 | | 目的与用途 |
|---|---|---|---|
| | 上边界 | 下边界 | |
| S0 | 2020–2024 年鄱阳湖流域五河实际日流量 | 2020–2024 年湖口实际日水位 | 实际条件，表征真实情况下 |
| S1 | 2020–2024 年鄱阳湖流域五河实际日流量 | 2020–2024 年 LSTM 预测得到的湖口日水位 | 情景设计，表征无三峡调蓄情况下 |
| S2 | 2003–2024 年鄱阳湖流域五河多年平均日流量过程 | 2020–2024 年湖口实际日水位 | 情景设计，表征常年流域来水情况下 |

## 3 结果与分析

### 3.1 模拟精度与情景分析

LSTM 模型以及 MIKE 21 水动力模型的模拟结果和总体表现如图 4 和表 2 所示。通过对比模拟值与实测值，发现鄱阳湖水文站点实测与模拟过程线拟合良好，均很好地呈现了湖泊流量和水位的季节性变化。LSTM 模型在训练和测试阶段的确定性系数 $R^2$ 均为 0.99，纳希效率系数 $E_{ns}$ 分别达到 0.99 和 0.98，相对误差 $RE$ 均小于 4%，预测效果理想。此外，从水动力模型的水位模拟结果来看，星子、都昌、棠荫和康山站水位拟合的效果较好，确定性系数 $R^2$ 介于 0.98 ~ 0.99，纳希效率系数 $E_{ns}$ 介于 0.93 ~ 0.98，相对误差 $RE$ 均小于 7%。从水动力模型的流量模拟结果来看，湖口模拟与观测流量拟合的确定性系数 $R^2$ 达到 0.91，纳希效率系数 $E_{ns}$ 达到 0.90，模拟值与实测值的相位和峰值吻合。总体来说，两种模型的模

拟效果都较好，能够反映不同情景下鄱阳湖的水文态势。

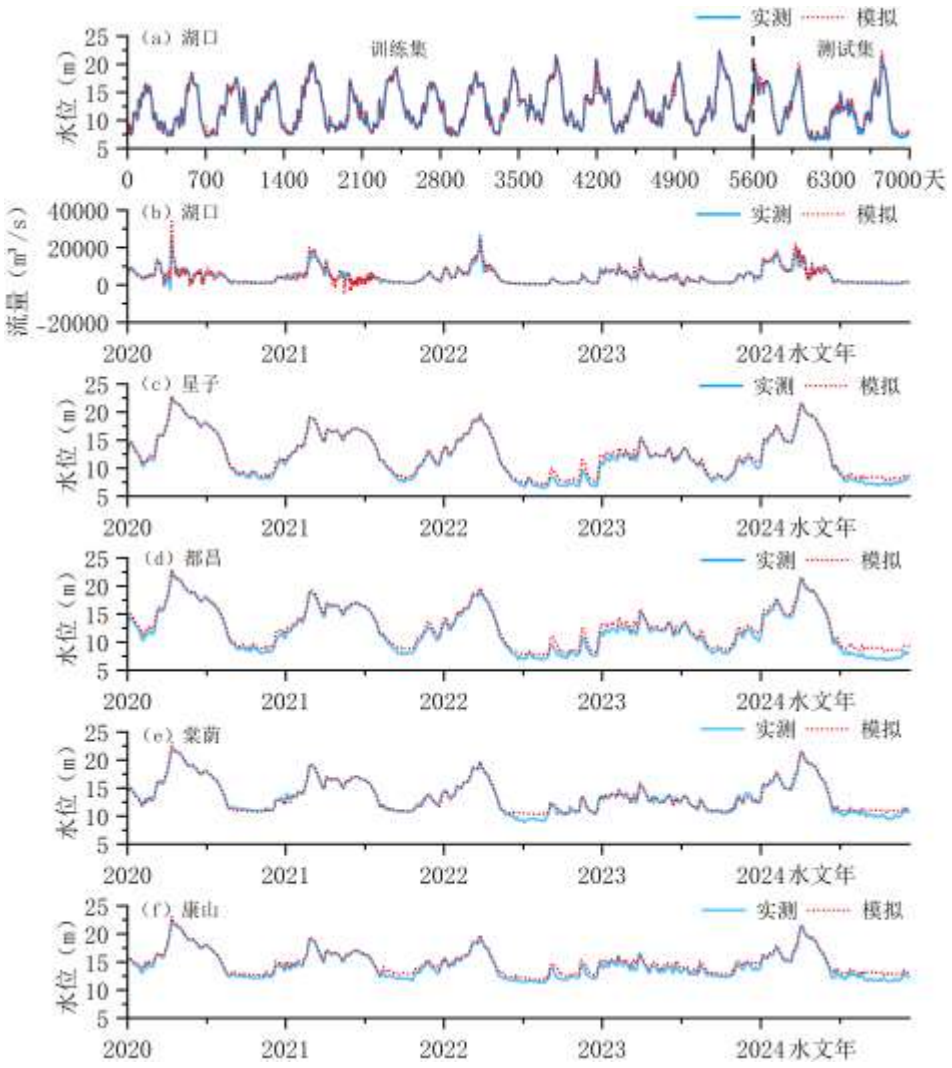


图 4 模型模拟实测值与模拟值序列（图（a）为 LSTM 模型预测结果，图（b）–图（f）为 MIKE 21 模型模拟结果）

Fig.4 Comparison of observed and simulated values (Fig. (a) shows results predicted by the LSTM model, while Figs. (b)–(f) show results simulated by the MIKE 21 model)

表 2 LSTM 和 MIKE 21 模拟结果精度

Tab.2 Accuracy of LSTM and MIKE 21 simulation results

| 模型 | 对象 | $R^2$ | $E_{ns}$ | $RE$ |
|---|---|---|---|---|
| LSTM | 训练集 | 0.99 | 0.99 | 0.2% |
| | 测试集 | 0.99 | 0.98 | 3.1% |
| MIKE 21 | 湖口流量 | 0.91 | 0.90 | 26.4% |
| | 星子水位 | 0.99 | 0.98 | 4.3% |
| | 都昌水位 | 0.99 | 0.96 | 6.7% |
| | 棠荫水位 | 0.98 | 0.98 | 2.7% |
| | 康山水位 | 0.98 | 0.93 | 3.9% |

### 3.2 三峡水库调蓄和流域来水的作用方式

为更好区分三峡水库调蓄和流域来水对鄱阳湖水位的影响，将三种模拟情景下的星子站水位进行比对（图 5）。常年平均流域来水情景（S2）的水位在低水位相较于实际情景（S0）整体偏高，而无三峡情景（S1）的水位主要在峰值处相较于实际情景（S0）偏高。这说明三峡水库调蓄在洪水期间有削弱洪峰的作用，一定程度上减少了鄱阳湖洪水发生的风险，使 2020、2022、2024 年星子的最高水位分别下降 0.34 m、0.9 m、0.79 m，最大可导致 2020 年 8 月 21 日水位下降 1.35 m。2020、2022、2023 和 2024 四个水文年星子站的平均落差分别–0.01 m、–0.31 m、0.18 m、–0.07 m，中值落差分别为 0.07m、–0.14 m、0.22 m、–0.01 m。与之相比，流域来水减少加剧了鄱阳湖的干旱情势，导致四个水文年星子的最低水位分别下降 0.67 m、0.95 m、0.59 m、0.74 m，最大导致 2023 年 3 月 12 日水位落差达–3.26 m。与多年平均来水条件相比，四个水文年星子站的平均水位落差分别为–0.3 m、–0.62 m、–0.17 m、–0.26 m，中值落差分别为–0.16 m、–0.63 m、–0.11 m、–0.18 m，说明近年来流域来水大幅减少。

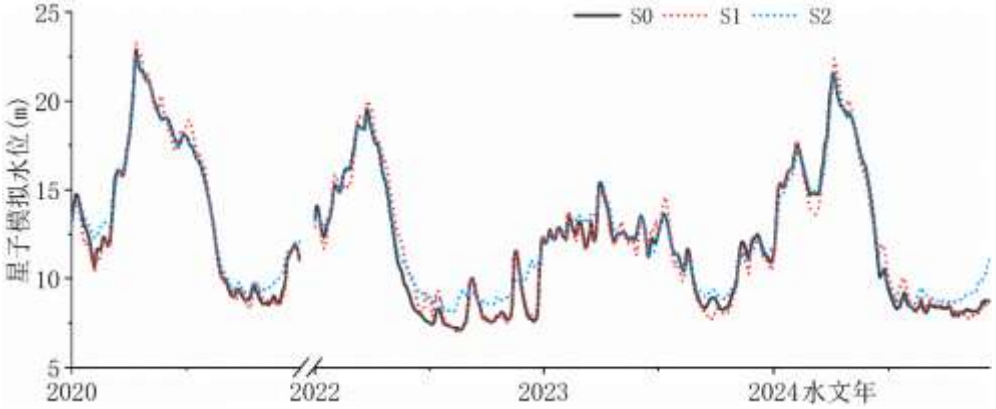


图 5 三种情景模拟结果比对

Fig.5 Comparison of simulation results under three scenarios

### 3.3 三峡水库调蓄和流域来水的影响时机和程度

图 5 展示了极端洪枯年中涨水期、丰水期、退水期和枯水期四个时间段三峡调蓄和流域来水共同作用下对鄱阳湖水位的影响程度。

三峡水库调蓄在丰水期和退水期削减了高水位，发挥了防洪作用。2020 极端洪水情势下，三峡水库调蓄使鄱阳湖丰水期水位平均下降 0.09 ~ 0.11 m（表 3）。在三峡水库调蓄与流域来水共同作用引起的水位变化中（下同），三峡水库调蓄在星子、都昌、棠荫、康山的影响分量分别是–81%、–72%、–67%、–68%。同时，三峡水库调蓄使退水期仍高居不下的洪水水位平均下降了 0.35 ~ 0.38 m，影响分量分别是–81%、–73%、–70%、–58%。由此来看，鄱阳湖洪水期水位变化主要由三峡水库调蓄起主导作用。

三峡水库调蓄引起鄱阳湖秋旱加剧，枯水期提前。三峡水库调蓄在四个典型极端水文年中，均在其退水期起到了削弱水位的作用。2022 和 2024 年鄱阳湖水位分别在丰水期和退水期跌落 8 m 极枯水位，丰水期三峡水库调蓄使前者水位下降 0.35 ~ 0.9 m，对后者影响较小。退水期，三峡水库调蓄分别使这两年平均水位下降 0.26 ~ 0.3 m 和 0.3 ~ 0.43 m，且仅影响至星子和都昌，棠荫和康山的水位基本无变化。对于 2023 年，三峡水库调蓄在退水期使棠荫和康山水位下降了 0.1 ~ 0.11 m，对星子和都昌水位起到了抬升作用。四站水位产生的正负影响差异可能是由于长江拉空作用的影响范围比顶托作用的影响范围更大。长江拉空作用影响到了康山，降低了四站水位，而顶托作用只影响到了都昌，抬升了星子和都昌水位。虽然，三峡水库调蓄加剧了鄱阳湖的秋旱，但流域来水减少是导致 2022 和 2024 年退水期水位维持极端枯水的主因。流域来水减少使 2022 年水位下降 0.9 ~ 1.51 m，对四站水位的影响分量分别是–79%、–85%、–100%、–100%；使 2024 年水位下降 0.33 ~ 0.53 m，影响分量分别是–47%、–64%、–98%、–100%。

此外，流域来水主导鄱阳湖枯水期水位下降，是导致鄱阳湖极端枯水的主要原因。流域来水在枯水期加剧了鄱阳湖水位的下降，使 2020 年枯水期水位下降 0.58 ~ 0.88 m，2022 年枯水期水位下降 0.48 ~

0.9 m，2023 年枯水期水位下降 0.13 ~ 0.29 m，2024 年枯水期水位下降 0.72 ~ 1.12 m。对 2020、2022 和 2024 年水位下降的影响分量均在 95%以上，2023 年除对星子水位变化的影响分量低于三峡调蓄外，其余站均高于三峡调蓄。由此来看，鄱阳湖枯水水位变化主要由三峡水库调蓄起主导作用。

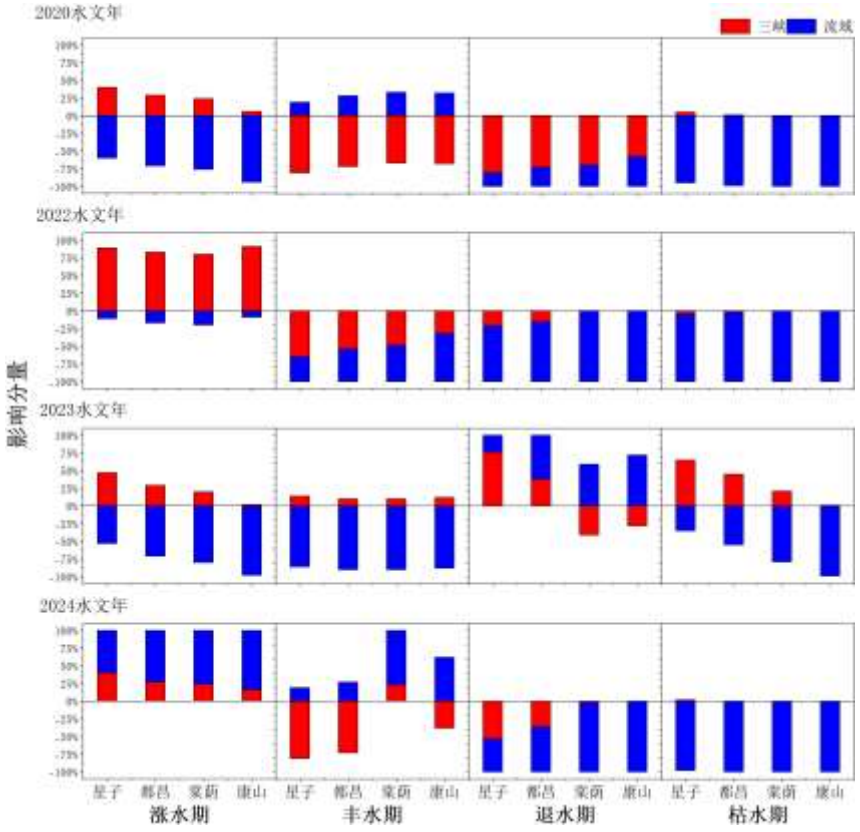


图 5 三峡水库调蓄和流域来水在涨-丰-退-枯水文节律下对鄱阳湖水位的影响分量

Fig.6 Impact components of the Three Gorges Reservoir Regulation and Basin Inflow on Lake Poyang water levels under the rising, flood, receding, and dry hydrological rhythms

### 3.4 三峡水库调蓄和流域来水变化的影响范围及空间异质性

由于三峡水库调蓄对极端洪水的水位变化起主导作用，而流域来水对极端枯水的水位变化起主导作用，为进一步阐明典型极端洪枯年三峡水库调蓄和流域来水变化对鄱阳湖极端水情的空间影响特征，以星子站为典型水文站，分别选取近年来三峡水库调蓄在洪水期水位落差最大的一天（2020 年 8 月 21 日），以及流域来水在枯水期水位落差最大的一天（2023 年 3 月 12 日）作为关键时间节点进行分析。图 6 和图 7 呈现出情景 S0-S1 和情景 S0-S2 在极端水情下鄱阳湖的水位差异时空分布，分别表示三峡水库调蓄和流域来水对鄱阳湖水位变化作用最显著时的空间影响，图中白色区域表示水位变化极小或未发生水位变化的区域，灰色和黑色分别表示在三峡或流域影响下由湿转干和由干转湿的区域。

三峡水库调蓄在极端洪水情势下最大可使水位下降 1.32 ~ 1.38 m，且影响范围波及整个湖区，全湖平均降幅 1.34 m。同时，鄱阳湖水位对三峡调蓄的来水减少呈现出明显的空间梯度响应特征，自北部入江河道向南部湖区降幅逐渐减小,但整体降幅相差并不大。

流域来水在干旱情势下最大可使水位下降 0 ~ 3.96 m，鄱阳湖主河道降幅最大、南部抚河入湖处次之，由主河道向两侧水位降幅减小，五站中星子和都昌附近降幅最大，康山附近降幅较大，湖口和棠荫东部水位降幅较小。流域来水使中部湖区面积为 516.03 $km^2$ 的区域由湿转干。

表 3 三峡水库调蓄和流域来水对 2020、2022–2024 年不同水文阶段的平均水位变化统计

Tab.3 Statistical analysis of the average water level changes in different hydrological stages of 2020 and 2022–2024 due to Three Gorges Reservoir Regulation and Basin Inflow

| 年份 | 水文阶段 | 三峡水库调蓄影响的平均水位变化/m（S0-S1） | | | | 流域来水影响的平均水位变化/m (S0-S2) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 星子 | 都昌 | 棠荫 | 康山 | 星子 | 都昌 | 棠荫 | 康山 |
| 2020 | 涨 | 0.42 | 0.32 | 0.21 | 0.03 | –0.63 | –0.78 | –0.68 | –0.43 |
| | 丰 | –0.09 | –0.10 | –0.10 | –0.11 | 0.02 | 0.04 | 0.05 | 0.05 |
| | 退 | –0.35 | –0.36 | –0.37 | –0.38 | –0.08 | –0.13 | –0.16 | –0.28 |
| | 枯 | 0.03 | 0.01 | 0 | 0 | –0.58 | –0.87 | –0.65 | –0.88 |
| 2022 | 涨 | 0.32 | 0.27 | 0.22 | 0.14 | –0.04 | –0.06 | –0.06 | –0.01 |
| | 丰 | –0.90 | –0.84 | –0.51 | –0.35 | –0.49 | –0.72 | –0.54 | –0.73 |
| | 退 | –0.30 | –0.26 | 0 | 0 | –1.12 | –1.48 | –0.90 | –1.51 |
| | 枯 | –0.03 | –0.02 | 0 | 0 | –0.79 | –0.9 | –0.48 | –0.64 |
| 2023 | 涨 | 0.07 | 0.04 | 0.03 | 0 | –0.08 | –0.10 | –0.11 | –0.05 |
| | 丰 | 0.04 | 0.04 | 0.03 | 0.02 | –0.26 | –0.33 | –0.30 | –0.14 |
| | 退 | 0.10 | 0.05 | –0.11 | –0.10 | 0.03 | 0.07 | 0.15 | 0.26 |
| | 枯 | 0.40 | 0.24 | 0.04 | 0 | –0.22 | –0.29 | –0.13 | –0.26 |
| 2024 | 涨 | 0.17 | 0.14 | 0.13 | 0.07 | 0.26 | 0.38 | 0.41 | 0.39 |
| | 丰 | –0.07 | –0.07 | 0.01 | –0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.03 |
| | 退 | –0.43 | –0.30 | –0.01 | 0 | –0.39 | –0.53 | –0.33 | –0.41 |
| | 枯 | 0.02 | 0 | 0 | 0 | –0.84 | –1.12 | –0.72 | –0.90 |

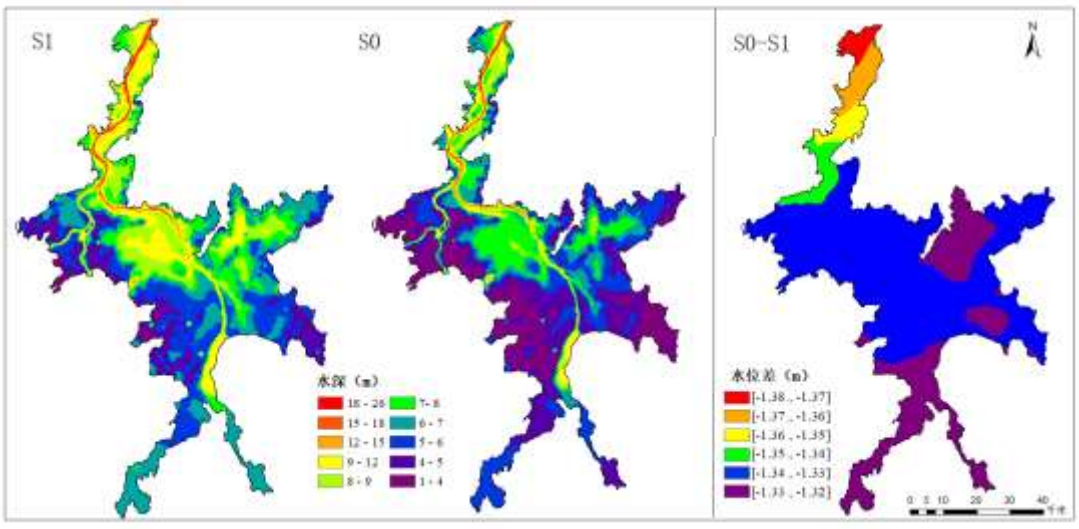


图 6 三峡水库调蓄对鄱阳湖极端洪水的影响范围

Fig.7 Impact range of Three Gorges Reservoir Regulation on extreme floods in Lake Poyang

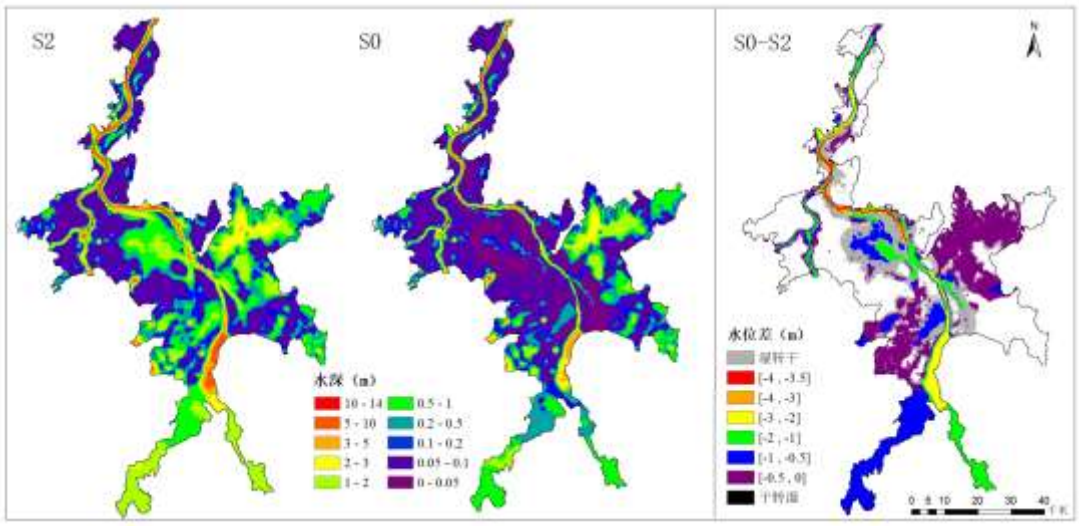


图 7 流域来水对鄱阳湖极端枯水的影响范围

Fig.8 Impact range of Basin Inflow on extreme low water levels in Lake Poyang

## 4 讨论

本研究对近年来长江中下游连续发生的极端洪枯事件进行了系统分析，构建了"实测边界条件-无三峡调蓄-多年平均流域来水"多情景对比框架，突破了传统研究依赖历史对比的局限性，实现了对三峡水库调蓄与流域来水独立贡献的精准分离。研究揭示了 2020–2024 年极端洪枯事件中两大驱动因子的差异化作用机制，从水文节律动态视角解析了不同阶段的影响权重，定量刻画了影响的空间梯度特征。该成果可为长江中下游水库群协同调度提供参考，建立的"机制解析-贡献量化-空间映射"研究方法论，为流域尺度极端水文事件归因分析提供了一种可操作的技术路径。

三峡水库调蓄能够有效削减鄱阳湖洪峰水位，而流域来水减少则是鄱阳湖极端干旱事件的主导因素，与既有研究存在一致性和差异性。一致性方面：李沛等[29]基于 2020 年洪水事件，指出三峡水库通过调度编号洪水显著削减洪峰，缓解中下游防洪压力，与本文“三峡调蓄使星子站极端洪水期水位最大下降 1.35 m”的结论一致；Zhang 等[30]发现三峡工程导致鄱阳湖夏末至秋季（对应本文退水期）水位明显降低，与本文“三峡调蓄加剧秋旱（退水期平均降幅 0.26～0.43 m）”的结论相符；闵骞等[31]强调流域降水与五河来水变化是鄱阳湖枯水主因，与本文“流域来水贡献率 35%～100%”的结论一致，均指向流域来水减少的核心作用。差异性方面：李沛等[29]认为三峡水库因高水位运行与鄱阳湖空间距离限制，防洪效能有限，而本文发现三峡调蓄仍显著缓解水位抬升（2020 年丰水期水位降幅 0.09～0.38 m）。差异原因在于情景对比方法：本文通过“无三峡情景（S1）”剥离了长江自然来水与调蓄的叠加效应，证明即便上游来水增加，三峡调蓄仍通过流量调节间接削弱倒灌压力。此外，Liu 等[32]提出鄱阳湖面积萎缩主因是长江阻水作用削弱，而本文强调流域来水减少的直接驱动（枯水期水位最大降幅 3.96 m）。矛盾可能源于变量分离不足：Liu 研究未区分长江阻水作用中三峡调蓄与其他因素（如自然径流变化）的贡献，而本文聚焦三峡调蓄对长江水位的独立影响，发现其对湖泊外流端调控有限，凸显流域来水的关键性。未来需结合阻水作用动态分析，进一步厘清双因子耦合机制。

虽然本研究对鄱阳湖极端洪枯事件的两个关键驱动因子（三峡水库调蓄与流域来水变化）的影响程度与空间分异特征进行了系统性解析，但仍存在一定局限性。首先，本研究在流域影响分析上以五河来水汇入鄱阳湖的最终径流量代表流域内发生的气候变化以及人类活动影响，将两因素划分为一个整体变量，可能会导致流域整个过程中一些细节因素的遗漏。在全球气候变暖的背景下，区域气候变化和人类活动加剧是造成鄱阳湖流域水旱灾害的主要因素[33]。气候变化通过降水的时空变化影响径流过程的时空

变化，而人类活动通过灌溉、水库调节等影响径流过程[34]。未来可结合降水、蒸发、土地利用变化等高时空分辨率数据，通过水文模型与遥感分析相结合的方法，量化气候变化与人类活动对五河径流的独立贡献，并评估其对极端洪枯事件的长期影响。其次，在 LSTM 模型模拟湖口水位时，由于未考虑汉口到湖口河段的流域径流，使湖口汛期水位模拟值偏高，进一步导致无三峡水库调蓄这一情景的模拟结果偏高；同时，我们直接使用实际汉口流量减去三峡出入库流量差的方法，也未充分考虑宜昌到汉口河段的河槽调蓄作用，部分水量被存储在河槽中，可能导致实际抵达汉口的流量相较于三峡调蓄后的流量偏低，两者均在一定程度上放大了三峡水库调蓄的作用。在洪水期间，高估三峡调蓄对鄱阳湖水位的降低作用可能会导致对洪水风险的低估，进而影响区域防洪规划的制定。未来可引入河槽调蓄模型，并纳入更完整的流域径流特征参数，更准确地模拟流量变化的过程。此外，随着自然和人为的共同作用，鄱阳湖的湖盆地形不断发生变化，而湖盆地形的变化将直接引起湖泊水位、流量等水文、水动力条件的变化[35]。与 1998 年地形相比，2010 年地形条件下，受地形下切影响，低水期水位最大可降低 1～2 m，涨、退水过程水位降低值也均在 0.6 m 以上，而高水期水位平均降幅最大不超过 0.4 m[27]。本文未考虑地形下切对鄱阳湖在极端水情下水位时间、空间上的影响，这可能是导致枯水位时模拟精度降低，模拟水位系统性高于实测值的原因。在湖口流量模拟中，精度较差除流量模拟本身难度较大以外，也与湖盆地形的变化密切相关。水动力模型采用 2010 年实地勘测湖盆地形资料，湖盆总体上呈现出南高北低、东高西低的分布格局，湖区北部入江通道段下切严重，而本研究模拟时段为 2020–2024 水文年，其间数十年的地形变化没有捕捉到，导致流量模拟的偏差加大。尽管湖口流量相对误差较大，但从流量过程的相位和趋势判断来看，模拟值与实测值整体吻合良好，且本文主要关注的是三峡水库调蓄与流域来水在不同情景下对鄱阳湖水位和水动力过程的相对影响与空间分布差异，因此上述误差对本文核心结论的影响相对可控。未来可通过引入高精度地形数据，更精细的捕捉地形细节，动态模拟湖盆地形变化对水文情势的影响，特别是针对极端枯水期的水位下降问题，提高模拟精度。

本研究的理论结果可为长江中下游地区应对频发极端水文事件的水资源安全调控与生态保护管理提供科学依据。三峡水库及上游干支流控制性水库群的联合运用，充分发挥了“拦洪”“削峰”和“错峰”作用[36]。正常情况下，鄱阳湖汛期主要集中在 4–6 月，长江中上游汛期在 7–8 月，两者错开，不会引发大洪水[37]。然而，受极端气候事件和人类活动等共同影响，鄱阳湖洪枯突发事件的频率和强度大幅增加，近年来水文情势呈现偏枯主导趋势。面对这一变化趋势，未来需要进一步加强对极端水文事件的预测预警，科学评估洪枯突发事件的演变规律，提前制定相应的水资源调度策略。此外，鄱阳湖作为亚洲最大的候鸟栖息地[38]，其生态环境的变化对生物多样性产生重要影响。夏季是湖区植物生长的关键期，水位过高或水淹时间过长会降低湖区沉水植物的种群密度和生物量[39]，而枯水期的水位提前消退会导致湖区苔草提前生长老化使其适口性变差[40]。过高和过低水位都在一定程度上导致越冬水鸟食物资源短缺。而三峡水库调蓄对高水位的控制作用有利于缓解对湖滨湿地植被的过度淹没压力，但对秋季旱情加剧的影响不利于水生生物生存。此外，流域来水的大幅减少，导致洲滩湿地大面积裸露，威胁生态环境的稳定性。针对以上情势，建议优化长江干流水库与鄱阳湖流域水库的联合调度模式，探索更加灵活的调控方案，如在洪水年优化洪水错峰调度，在枯水年丰水期提前蓄水，增加枯水期的水资源储备等，以增强水库群的应对能力，最大程度降低极端水情给流域生态及经济带来的损失。

## 5 结论

本研究系统评估了三峡水库调蓄与流域来水在近年来鄱阳湖连续发生的极端洪枯事件中的作用与影响，构建了融合深度学习与二维水动力模拟的耦合框架，量化了两类关键驱动因子在不同水文节律下的相对贡献，揭示了鄱阳湖水位响应的主控机制及其空间格局，为识别主导因子、制定差异化调控策略提供了技术支撑。主要结论如下：

（1）三峡水库调蓄与流域来水通过不同机制共同影响鄱阳湖极端水文情势。三峡水库调蓄主要在洪水期间通过削减长江来水抬水作用发挥控洪效应，而流域来水变化则主导了枯水期水位波动。极端洪水年中，三峡调蓄可使星子站水位最大下降 1.35 m；极端干旱年份中，流域来水减少使星子站水位最大下降 3.26

m，水文情势急转加剧。

（2）两类因子作用时段具有阶段性，影响程度具有显著差异。三峡调蓄在丰水期和退水期主导洪水水位变化，2020 年水位降幅为 0.07～0.38 m，贡献率达 58%～81%；同时，在 2022–2024 年退水期亦产生 0.1 ～ 0.43 m 的水位下降，加剧秋旱程度。流域来水是枯水期水位下降的决定性因素，2020–2024 年降幅达 0.13～1.12 m，贡献率为 35%～100%，是秋季极端干旱的主因。

（3）三峡水库调蓄与流域来水对湖区的空间作用范围存在显著异质性。调蓄影响在极端洪水期覆盖整个湖区，最大水位降幅 1.32 ～ 1.38 m，降幅自北向南逐渐减弱；而流域来水减少主要作用于主河道及抚河入湖区，最大可致水位下降 3.96 m，并导致中部湖区 516.03 km² 水体干涸。

本研究构建的响应评估框架和定量分析方法，为识别极端水文事件主控因子、优化水资源调度策略提供了科学依据。结果表明，在洪水期应充分发挥三峡及其上游水库群联合调度的“削峰错峰”效能，在枯水期需加强对流域降水和人类活动影响的综合评估。未来研究可进一步考虑湖盆地形演化与气候-人类活动协同影响，提升对极端洪枯事件的模拟与预测能力。

## 6 参考文献


[1] Liu YJ, Yu MH, Huang YY et al. Impact of the Poyang Lake Hydraulic Project on the hydrodynamic process during the flood season. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2024, **41**(3): 9-15. [刘玉娇, 余明辉, 黄宇云, 等. 鄱阳湖水利枢纽对江湖洪期水动力过程的影响. 长江科学院院报, 2024, **41**(3): 9-15.]

[2] Wu SX, Tang XP, Li GW et al. Analysis of hydrological causes of high water levels in Poyang Lake: A case study of 2020. *Journal of Hydraulic and Waterway Engineering*, 2024, (6): 43-53. [武少轩, 唐雄朋, 李国文, 等. 鄱阳湖高水位水文成因分析——以 2020 年为例. 水利水运工程学报, 2024, (6): 43-53.]

[3] Hu ZP. The 2022 severe drought in Poyang Lake and recommendations for drought mitigation and disaster prevention. *China Flood & Drought Management*, 2023, **33**(2): 1-6+39. DOI: 10.16867/j.issn.1673-9264.2022491. [胡振鹏. 2022 年鄱阳湖特大干旱及防旱减灾对策建议. 中国防汛抗旱, 2023, **33**(2): 1-6+39.]

[4] Lei S. Review and reflections on the 2020 Poyang Lake flood. *Water Resources Protection*, 2021, **37**(6): 7-12. [雷声. 2020 年鄱阳湖洪水回顾与思考. 水资源保护, 2021, **37**(6): 7-12.]

[5] Min Q. The necessity of drought prevention in plain lake regions: A case study of the Poyang Lake area. *China Disaster Reduction*, 2003, (03): 41-43. [闵骞. 平原湖区也须重视防旱——以鄱阳湖区为例. 中国减灾, 2003, (3): 41-43. ]

[6] Zhang Q, Xue CY, Xia J. Impacts, causes, and countermeasures of extreme drought in Poyang Lake. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023, **38**(12): 1894-1902. DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.20230813005. [张奇, 薛晨阳, 夏军. 鄱阳湖极端干旱的影响、成因与对策. 中国科学院院刊, 2023, **38**(12): 1894-1902.]

[7] Dai AG. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 2013, **3**(2): 52-58. DOI: 10.1038/NCLIMATE1633.

[8] Zhang C, Li YK, Ren Q et al. Community structure and the water quality during different hydrological periods in Poyang Lake. *J Lake Sci*, 2022, **34**(5): 1584-1599. DOI: 10.18307/2022.0528. [张超, 李言阔, 任琼, 等. 鄱阳湖夏季极端水位条件下越冬水鸟多样性、空间分布及其保护对策. 湖泊科学, 2022, **34**(5): 1584-1599.]

[9] Wang WJ, Shi K, Wang XW et al. A record-breaking extreme heat event caused unprecedented warming of lakes in China. *Science Bulletin*, 2023, **68**(6): 578-582. DOI: 10.1016/j.scib.2023.03.001.

[10] Yao J, Zhang Q, Li YL et al. Hydrological evidence and causes of seasonal low water levels in a large river-lake system: Poyang Lake, China. *Nordic hydrology*, 2016, **47**(SUPPLa1): 24-39.

[11] Xue CY, Zhang Q, Jia YX et al. Attribution of hydrological droughts in large river-connected lakes: Insights from an explainable machine learning model. *Science of the Total Environment*, 2024, 952. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.175999.

[12] Yao SM, Fan DF, Luan HL et al. Analysis and response strategies of extreme flood and drought conditions in Poyang Lake in recent years. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2024, **41**(12): 171-179. [姚仕明, 范达福, 栾华龙, 等. 鄱阳湖近年极端洪枯情势分析及应对策略. 长江科学院院报, 2024, **41**(12): 171-179.]

[13] Jiang T, Zhang XD, Jiang C et al. Changes in Poyang Lake area over the past 40 years and their attribution analysis. *Safety and Environmental Engineering*, 2024, **31**(5): 219-227. DOI: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.20231038. [蒋涛, 张旭东, 江聪, 等. 近 40 年鄱阳湖面积变化及其归因分析. 安全与环境工程, 2024, **31**(5): 219-227.]

[14] Lai XJ, Jiang JH, Huang Q. Analysis of the impact pattern and mechanism of the Three Gorges Project on Poyang Lake hydrology. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, **31**(6): 132-136+148. [赖锡军, 姜加虎, 黄群. 三峡工程蓄水对鄱阳湖水情的影响格局及作用机制分析. 水力发电学报, 2012, **31**(6): 132-136+148.]

[15] Hu T, Qiu HY. Study on the variation of Poyang Lake water level and its quantitative attribution. *China Rural Water and Hydropower*, 2023, (9): 54-61. [胡挺, 仇红亚. 鄱阳湖水位变化及其归因量化研究. 中国农村水利水电, 2023, (9): 54-61.]

[16] Song JP, Gong LQ, Wang XL et al. Changes in hydrological regimes and ecological evolution characteristics of Poyang Lake before and after the construction of the Three Gorges Dam: Review and prospects. *J Lake Sci*, 2025, **37**(3): 716-733. [宋继鹏, 龚磊强, 王晓龙, 等. 三峡工程建设运行前后鄱阳湖水文情势变化与生态环境演变特征：回顾与展望. 湖泊科学, 2025, **37**(3): 716-733.]

[17] Liu YK, Zeng SD, Yang LH et al. Evolution of eco-hydrological regimes in the Poyang Lake Basin under future climate scenarios. *Journal of Hydroecology*, 2025, **46**(1): 58-69. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202404200143. [刘雅坤, 曾思栋, 阳林翰, 等. 未来气候情景下鄱阳湖流域生态水文情势演变. 水生态学杂志, 2025, **46**(1): 58-69.]

[18] Zhao JK, Li LX, Li JF et al. Impact of human activities on the water level changes in Poyang Lake. *Hydrology*, 2020, **40**(4): 53-60. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20190052. [赵军凯, 李立现, 李九发, 等. 人类活动对鄱阳湖水位变化的影响. 水文, 2020, **40**(4): 53-60.]

[19] Dai X, Wan RR, Yang GS et al. Changes in Poyang Lake hydrological rhythms and their relationship with Yangtze River-lake water exchange. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, **34**(12): 1488-1496. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2014.12.010.[戴雪, 万荣荣, 杨桂山, 等. 鄱阳湖水文节律变化及其与江湖水量交换的关系. 地理科学, 2014, **34**(12): 1488-1496.]

[20] 刘沁薇, 温珍玉, 张阳, 等. 2022 年鄱阳湖流域特大干旱及非工程措施应对策略//《中国防汛抗旱》杂志社, 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心（水旱灾害防御中心）. 2022-2023 年度全国典型洪旱过程应对技术经验交流会论文集.江西省水文监测中心, 2023: 357-364.

[21] 梁栋. 基于遥感和数值模拟的鄱阳湖水情变化驱动因素及湿地植被的水情影响研究[学位论文]. 武汉：武汉大学, 2019.

[22] 马吉顺. 季节性水位波动对鄱阳湖食物网结构的影响研究[学位论文]. 武汉：华中农业大学, 2024.

[23] Guo M, Yu DK, Li Z et al. Impact of extreme drought on aquatic plant communities in dish-shaped lakes of Poyang Lake. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2024, **40**(6): 790-798. DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2023.1045. [郭敏, 余定坤, 李浙, 等.极端干旱对鄱阳湖碟形湖水生植物群落的影响. 生态与农村环境学报, 2024, **40**(6): 790-798.]

[24] 葛萃. 鄱阳湖再创进入枯水期最早纪录. 江西水利,

[25] Hochreiter S, Schmidhuber J. Long Short-Term Memory. *Neural Comput*, 1997, **9**(8): 1735-1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735.

[26] Lai XJ, Liang QH, Jiang JH, et al. Impoundment Effects of the Three-Gorges-Dam on Flow Regimes in Two China's Largest Freshwater Lakes. *Water Resources Management*, 2014, **28**(14): 5111-5124. DOI: 10.1007/s11269-014-0797-6.

[27] Yao J, Li YL, Li MF et al. Influence of topographic changes on the low-water level of Poyang Lake. *J Lake Sci*, 2017, **29**(4): 955-964. [姚静, 李云良, 李梦凡, 等. 地形变化对鄱阳湖枯水的影响. 湖泊科学, 2017, **29**(4): 955-964.]

[28] Li MF, Zhang Q, Li YL et al. Impact of the Yangtze River on the Exposure Characteristics of Sandbars During the Dry Season in Poyang Lake. *Tropical Geography*, 2016, **36**(4): 700-709. DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.002837. [李梦凡, 张奇, 李云良, 等. 长江对鄱阳湖退水期洲滩出露特征的影响. 热带地理, 2016, **36**(4): 700-709.]

[29] Li P, Huang SZ, Li DP et al. Flood control function of the Three Gorges Reservoir and analysis of flood disasters in the Poyang Lake Basin. *J Xi'an Univ Technol*, 2020, **36**(4): 486-493+501. DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.04.007. [李沛, 黄生志, 李大鹏, 等. 三峡水库防洪作用与鄱阳湖流域洪灾分析. 西安理工大学学报, 2020, **36**(4): 486-493+501.]

[30] Zhang Q, Li L, Wang YG et al. Has the Three-Gorges Dam made the Poyang Lake wetlands wetter and drier? *Geophys Res Lett*, 2012, **39**(20). DOI: 10.1029/2012GL053431.

[31] Min Q, Zhan LS. Analysis of low-water level changes in Poyang Lake from 1952 to 2011. *J Lake Sci*, 2012, **24**(5): 675-678. [闵骞, 占腊生. 1952-2011 年鄱阳湖枯水变化分析. 湖泊科学, 2012, **24**(5): 675-678.]

[32] Liu YB, Wu GP, Zhao XS. Recent declines in China's largest freshwater lake: trend or regime shift? *Environ Res Lett*, 2013, **8**(1): 014010. DOI: 10.1088/1748-9326/8/1/014010.

[33] Ye XC, Zhang Q, Liu J et al. Distinguishing the relative impacts of climate change and human activities on variation of streamflow in the Poyang Lake catchment, China. *J Hydrol*, 2013, **494**: 83-95. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.04.036.

[34] Ye ZB, Yang XL, Wu F et al. Influence of climate change and human activities on the hydrological regime of Poyang Lake. *Yangtze River*, 2024, **55**(11): 119-126. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2024.11.016. [叶周兵, 杨肖丽, 吴凡, 等. 气候变化与人类活动对鄱阳湖水文情势的影响研究. 人民长江, 2024, **55**(11): 119-126.]

[35] Leon JX, Cohen TJ. An improved bathymetric model for the modern and paleo Lake Eyre. *Geomorphology*, 2012, **173-174**(9): 69-79. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.05.029.

[36] Yao SM, He ZC. Evolutionary patterns and impact effects of river-lake systems in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2025, **42**(1): 1-10. [姚仕明, 何子灿. 长江中下游江湖演变规律及其影响效应. 长江科学院院报, 2025, **42**(1): 1-10.]

[37] Zhang GM, Wang ZC, Wu LH et al. Hydrodynamic simulation of Poyang Lake under the encounter of river and lake floods. *China Rural Water and Hydropower*, 2024, (3): 69-77. [张广明, 王志超, 吴龙华, . 江湖洪水遭遇下鄱阳湖水动力模拟. 中国农村水利水电, 2024, (3): 69-77.]

[38] 韩杏杏. 基于长时序光学遥感数据的鄱阳湖湿地景观格局时空动态研究[学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2017.

[39] Macek P, Rejmánková E, Houdková K. The effect of long-term submergence on functional properties of *Eleocharis cellulosa Torr*. *Aquat Bot*, 2006, **84**(3): 251-258. DOI: 10.1016/j.aquabot.2005.11.003.

[40] 俞长好, 张琬苏. 鄱阳湖如何应对极端干旱？森林与人类, 2023, (12): 128-129.