

# 三峡水库影响下长江与鄱阳湖江湖关系变化研究

焦东来<sup>1,2</sup>, 叶周兵<sup>3</sup>, 罗珏瑾<sup>1,4</sup>, 王卫光<sup>1,4</sup>

(1. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室; 2. 南京邮电大学物联网学院; 3. 太湖流域水文水资源监测中心;  
4. 河海大学水文水资源学院)

**摘要:**为系统探究三峡水库运行对长江与鄱阳湖江湖关系的影响机制,构建了 PCR-GLOBWB 与 LSTM 相结合的耦合模型,生成了 1989—2020 年有无水库调节情景下的长序列水文数据。在此基础上,集成 EEMD、IHA-RVA 法及能差指数等方法,从流量水位演变特征、水文情势改变程度及江湖作用能量对比 3 个维度,揭示了江湖关系的演变规律。结果表明:三峡水库运行显著改变了长江干流与鄱阳湖的流量及水位过程,湖口站水文情势呈中度改变(总体改变度 37.32%),其中月平均水位呈现“春冬低、夏秋高”的季节性差异,极端水位出现时间推迟 2~2.5d;江湖关系年际演变呈现长江作用增强、鄱阳湖作用减弱的趋势,2003 年三峡水库蓄水后,能差指数波动幅度显著增大,水库运行是江湖关系变化的主要驱动因素;年内不同水文期江湖作用交替主导,水库在洪水期(6—9 月)的拦蓄作用增强了长江顶托作用,加剧了鄱阳湖内涝风险;在退水期(10—11 月)和枯水期(12 月至次年 3 月)的蓄水作用则加速了湖水外泄,加剧了枯水期延长和干旱风险。

**关键词:**三峡水库;长江;鄱阳湖;江湖关系;水文情势

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2026)05-0022-09

**Research on changes in river-lake relationship between the Yangtze River and Poyang Lake under influence of Three Gorges Reservoir**//Jiao Donglai<sup>1,2</sup>, Ye Zhoubing<sup>3</sup>, Luo Juejin<sup>1,4</sup>, Wang Weiguang<sup>1,4</sup> (1. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute; 2. School of Internet of Things, Nanjing University of Posts and Telecommunications; 3. Taihu Basin Hydrology and Water Resources Monitoring Center; 4. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University)

**Abstract:** To systematically investigate the impact mechanism of Three Gorges Reservoir (TGR) operation on the Yangtze River-Poyang Lake river-lake system, a coupled simulation model integrating PCR-GLOBWB and LSTM was developed, generating long-term (1989-2020) hydrological time series under both with-and without-reservoirs regulation scenarios. On this basis, multiple analytical methods, including ensemble empirical mode decomposition (EEMD), the indicators of hydrologic alteration/range of variability approach (IHA/RVA), and the energy difference index, were integrated to examine the evolutionary patterns of the river-lake relationship from three perspectives: discharge/water-level variability, the degree of hydrological alteration, and the comparative energy dynamics between the two water bodies. The results indicate that reservoir regulation substantially modifies flow and water-level regimes in both the Yangtze mainstream and Poyang Lake. At Hukou Station, the hydrological regime shows a moderate alteration, with an overall change degree of 37.32%. Monthly mean water levels exhibit a seasonal variation of “lower in spring and winter, higher in summer and autumn”, while the timing of extreme water levels is delayed by 2-2.5 d. At the interannual scale, the influence of the Yangtze River strengthens while that of Poyang Lake weakens. After the initial impoundment of the TGR in 2003, the fluctuation amplitude of the energy difference index increases significantly, demonstrating that reservoir operation is the dominant driver of the observed changes. At the intra-annual scale, the dominant role alternates between the river and the lake across different hydrological periods. During the flood season (June to September), reservoir impoundment enhances the backwater effect of the Yangtze, thereby aggravating waterlogging risk in Poyang Lake. Conversely, water storage in the receding (October to November) and dry seasons (December to March) accelerates lake outflow, which prolongs the dry season and intensifies drought hazards.

**Key words:** Three Gorges Reservoir; the Yangtze River; Poyang Lake; river-lake relationship; hydrological regime

鄱阳湖作为长江中下游最大的通江湖泊,汇聚赣江、抚河等五河来水,经调蓄后由湖口注入长江,与长江干流形成复杂的相互作用关系。江湖关系的演变直接关系到流域防洪安全、生态平衡与水资源的可持续利用<sup>[1-2]</sup>。三峡水库作为长江上游的关键水利枢纽,自2003年蓄水运行以来,通过季节性蓄泄调节,改变了中下游流量与水位过程,对长江与鄱阳湖之间的水量交换和能量平衡产生了深远影响<sup>[3-4]</sup>。近年来,鄱阳湖枯水期提前、枯水位下降、洪涝风险加剧等问题日益突出,这些问题与三峡水库调控下的江湖关系演变密切相关<sup>[5-12]</sup>。

目前,关于三峡水库对长江与鄱阳湖江湖关系的影响已有较多研究成果,这些研究多以水旱灾害防治为导向,侧重于水量交换分析。早期研究集中于荆江—洞庭湖段,三峡水库建成后,研究重心逐渐转向三峡水库对洞庭湖与鄱阳湖的影响。部分学者通过分析实测水文数据,揭示了水库运行对鄱阳湖入湖流量、湖口水位及换水周期的影响<sup>[13-14]</sup>;另有研究借助数值模拟方法,探讨了不同调度情景下江湖水量交换的响应机制<sup>[15]</sup>。这些研究多基于水文数据与数理模型,阐释了三峡水库运行导致洞庭湖季节性缺水、鄱阳湖水文情势与径流特征变化的规律。为量化江湖作用的强度,一些学者提出了相应的表征指标,如赵军凯等<sup>[14]</sup>提出了河湖水量交换系数,邴建平等<sup>[16]</sup>基于水量平衡构建了顶托强度指数、倒灌强度指数及水量交换系数;邓金运等<sup>[17]</sup>则从水力学能量方程出发,提出用“能差”描述江湖相互作用,该方法仅需径流与水位数据,计算简便,从能量角度动态反映水位势能与动能的相对关系,有效表征了江湖间的能量对比,为长江与鄱阳湖的江湖关系研究提供了重要参考。

三峡水库的运行不仅改变了鄱阳湖的水文情势,加剧了旱涝风险,也深刻影响了长江与鄱阳湖之间的江湖关系。因此,亟待围绕“流量水位变化特征-水文情势变化-江湖关系量化”全链条开展系统研究,综合揭示流量水位在多时间尺度上的演变特征、水文情势的整体改变程度以及江湖作用的能量平衡状态,系统阐明三峡水库运行对江湖关系演变的驱动路径与内在机理。本文集成多种水文统计方法与模型模拟结果,从流量水位变化特征、水文情势改变程度及江湖关系量化表征3个维度,系统探讨三峡水库运行对长江与鄱阳湖江湖关系的影响机制,并引入能差指数,定量刻画长江与鄱阳湖相互作用的强度对比,以期为流域水资源优化配置、生态环境保护与灾害防控提供科学依据和决策支持。

# 1 研究区概况与数据来源

## 1.1 研究区概况

鄱阳湖位于长江中下游南岸(28°24'N~29°46'N,115°49'E~116°46'E),是中国第一大淡水湖,流域面积16.2万km<sup>2</sup>,主要接纳赣江、抚河、信江、饶河、修河五河来水,经湖口汇入长江(图1)。湖口站作为鄱阳湖与长江交汇处的水文控制站,其流量、水位变化直接反映江湖关系演变特征。长江干流九江站是上游来水关键控制站,五河七口包括赣江外洲站、抚河李家渡站等7个水文站,共同构成鄱阳湖流域入流监测网络。

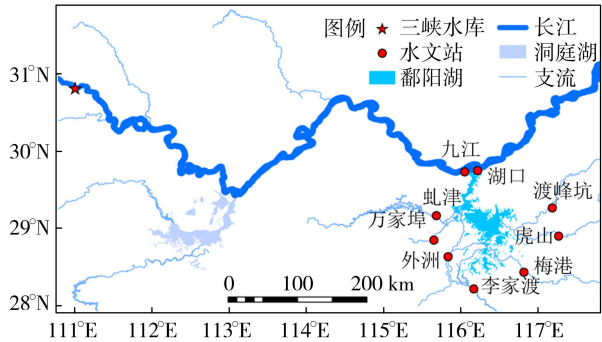


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

## 1.2 数据来源

模型所用参数主要包括地形、植被、土壤、地下水、用水需求及水库调节参数。其中,地形参数来源于数字高程模型(DEM)数据,植被参数源于全球土地覆盖特征v2.0 map数据库;土壤参数取自联合国粮农组织10km分辨率的土壤类型及土壤特性数据库;地下水参数来源于美国地质调查局地球资源观测与科学研究中心1km分辨率数据库;灌溉用水需求数据参考2000年逐月灌溉与雨水灌溉作物面积数据库;非灌溉用水需求数据来源于联合国粮农组织全球农业统计数据库;水库数据取自全球水库数据集、《长江流域及西南诸河水资源公报》和中国长江三峡集团有限公司的《长江三峡工程运行实录》。

## 2 研究方法

本文在构建长江流域的PCR-GLOBWB(PCRaster global water balance)模型<sup>[18]</sup>与长短期记忆神经网络(LSTM)模型相结合的耦合模型的基础上,通过集合经验模态分解(EEMD)与IHA-RVA法<sup>[19]</sup>,分析基于耦合模型模拟的有无水库调节两种情景下的湖口站径流过程和水位在不同时间尺度下的变化特征,并构建能差指数,定量分析长江与鄱阳湖相互作用的强度(图2)。

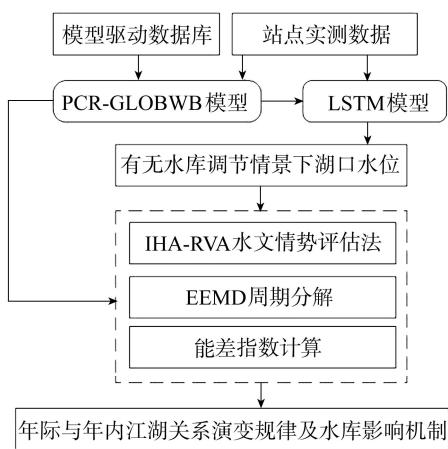


图2 整体研究方法流程

Fig. 2 Overall research methodology framework

## 2.1 PCR-GLOBWB 模型与 LSTM 模型耦合模拟

首先基于全球数据源和流域特征,对 PCR-GLOBWB 模型进行参数率定,重点调整了土壤层厚度、饱和导水率、基流衰退系数等关键参数。PCR-GLOBWB 模型由乌特勒支大学开发,在量化人类活动对陆地水循环过程的影响方面具有明显的优势。模型设置了有水库调节(包含三峡水库在内的长江流域所有大型水库)和无水库调节(模型中关闭所有水库模块)两种模拟情景。模型精度通过纳什效率系数(NSE)、均方根误差(RMSE)和偏离率(BIAS)等指标进行验证,结果显示其能够较好地模拟鄱阳湖五河七口及长江干流的流量过程。随后,利用 1989—2020 年实测水文数据,以三峡水库运行时间为时间节点(2003 年),分别训练了水库运行前(1989—2003 年)和运行后(2004—2020 年)的 LSTM 模型,用于建立多源流量(长江干流九江站和鄱阳湖五河七口的流量)与鄱阳湖湖口水位之间的非线性映射关系,模型在训练期和测试期均表现出较高的模拟精度。最后,将 PCR-GLOBWB 模拟的有无水库调节情景下的流量序列输入对应时期的 LSTM 模型中,耦合生成 1989—2020 年有无三峡水库调节情景下的湖口站日水位数据,从而实现对水库调控影响的水位响应模拟。

## 2.2 EEMD 与 IHA-RVA 法

由于水文序列具有多组分、多时间尺度特征,因此将各成分分离,进行周期识别,以提高分析结果的精确度。EEMD 方法可将非线性、非平稳的水文序列分解为若干个本征模态函数(IMF)和残差(RES)分量,其中 IMF 分量反映不同时间尺度的周期振荡特征,RES 分量反映总体变化趋势。通过方差贡献率分析各分量的重要性,结合显著性检验判断周期的可信度,由此可揭示原始水文序列在不同时间尺度下的不同变化特征<sup>[20]</sup>。在此基础上采用 IHA-

RVA 法<sup>[21-27]</sup>定量评价水文指标体系在不同时间段的变化度。本文选取各月平均水位中值、极端水位(最低和最高 1、3、7、30、90 d 中值水位及基流指数)及持续时间、极端水位发生时间(年最小和最大值出现时间)、高低水位频率(高低脉冲次数)及历时(高低脉冲历时)、水位改变率及次数(涨水率、落水率、逆转次数)五大类 32 个 IHA 指标,采用 RVA 法计算各指标的水文改变度,综合评估三峡水库对湖口站水文情势的影响程度,其中改变度 0~33% 为轻度改变, >33%~67% 为中度改变, >67%~100% 为重度改变。

## 2.3 江湖关系量化指标

长江与鄱阳湖的江湖作用本质是能量交互过程,长江作用的核心是通过改变湖口站水位( $z$ )主导势能变化,鄱阳湖作用的核心是通过改变湖口站流量( $Q$ )主导动能变化,因此采用湖口处势能( $E_p$ )与动能( $E_k$ )分别表征两者作用强度。鉴于动能  $E_k = \frac{1}{2}mv^2$  的计算结果只有正值,无法反映长江倒灌鄱阳湖时流量方向反转的特殊水文过程,借鉴邓金运等<sup>[17]</sup>的方法,对动能与势能计算公式进行适应性修正,引入流量方向属性,使结果通过正负值直观区分流量方向:  $E'_k = \propto Q$  ( $Q$  含方向属性,鄱阳湖泄水时  $Q > 0$ , 长江倒灌时  $Q < 0$ ); 势能表达式简化为  $E'_p = \propto z$ 。

为精准量化动能与势能的相对强弱,定义能差指数( $\Delta E$ )为江湖关系核心量化指标,二者相对贡献比可反映长江与鄱阳湖作用强度对比。在水体质量恒定、断面面积不变的前提下,结合水文要素关联性推导:势能与水位呈正相关关系,简化为  $E_p = k_1 z$  ( $k_1$  为势能相关常量);因断面面积不变时流速与流量呈正相关关系,动能与流量存在关联性,结合方向修正需求简化为  $E_k = k_2 Q$  ( $k_2$  为动能相关常量)。基于“动能占比越高,鄱阳湖作用越强;势能占比越高,长江作用越强”的核心关系,构建能差指数的基础形式:

$$\Delta E = f(E_k) - f(E_p) \quad (1)$$

式中:  $f(\cdot)$  为归一化函数,结合水文数据量级特征与计算便捷性,采用线性归一化形式,通过引入经验系数  $f_1$  和  $f_2$  平衡流量与水位的量级差异,同时引入修正值  $f_3$  抵消常量偏移,最终将式(1)转化为简洁的线性表达式:

$$\Delta E = f_1 \frac{Q}{z} - f_2 \frac{z}{2} + f_3 \quad (2)$$

式中:  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  为经验参数。当  $Q$  越大、 $z$  越小时,江湖能量中动能占比越高,即鄱阳湖作用越强,此时  $\Delta E$  越大;反之,当  $Q$  越小、 $z$  越大时,势能占比越高,

即长江作用越强,此时  $\Delta E$  越小。能差指数的动能项( $Q$ )主要反映鄱阳湖出流对湖口的作用,势能项( $z$ )主要反映长江干流水位的顶托作用。当  $\Delta E > 0$  时,表明鄱阳湖作用占优(出流动能主导);当  $\Delta E < 0$  时,表明长江作用占优(顶托势能主导)。这种划分方式虽然将流量动能主要归结于鄱阳湖来水,但这是基于湖口断面能量平衡的合理简化,能够有效区分两者的贡献。经验参数  $f_1, f_2, f_3$  基于实测数据,采用非线性最小二乘法率定,率定目标为:①能差指数取值范围约束在  $[-1, 1]$ ;②多年平均能差指数趋近于 0;③能差指数的变化趋势与江湖作用实际特征一致。以 1989—2020 年湖口站实测水位、流量数据为基础,分别针对有无三峡水库调节情景进行参数率定:有水库情景下的参数取值为  $f_1 = 0.000\ 01$ ,  $f_2 = 0.87$ ,  $f_3 = 3.04$ ;无水库情景下的参数取值为  $f_1 = 0.000\ 023$ ,  $f_2 = 0.77$ ,  $f_3 = 2.71$ 。

3 结果与分析

3.1 模型模拟精度

PCR-GLOBWB 模型在长江-鄱阳湖流域展现出良好的模拟能力与适用性(表 1)。参数率定后的模型在多数水文站点的流量模拟中表现优异。率定期内,赣江外洲站、抚河李家渡站、信江梅港站、饶河渡峰坑站、虎山站及长江九江站的 NSE 均不低于

0.85,其中梅港站、虎山站和九江站分别达到 0.96、0.95 和 0.95,修河虬津站精度略低(0.62),但处于可接受范围内。各站点的 BIAS 绝对值大多低于 20%,抚河李家渡站偏差最小,为-0.14%。验证期内,多数站点的 NSE 与率定期相比基本持平或略有提升,外洲站从 0.86 升至 0.87,李家渡站从 0.85 升至 0.88,梅港站略有下降但仍保持 0.91;虬津站 NSE 为 0.59, BIAS 为-4.04%,模拟效果较为稳定。各站点 RMSE 在率定期和验证期均处于合理范围,模型整体能够较准确地反映流域受自然及人类活动影响下的水文过程,为后续分析提供了可靠的流量数据基础。

基于深度学习构建的 LSTM 模型在建立多源流量与湖口水位之间的非线性关系方面具有较高的预测精度。基于三峡水库运行前后分别训练得到的模型,在训练期与测试期内 NSE 和相关系数均达到 0.99 以上(图 3),表明模型具备对复杂水文关系的高精度捕捉能力和良好的泛化性能。该模型为流量至水位的转换提供了可靠工具,并与 PCR-GLOBWB 模型形成有效互补,共同支撑了后续有无水库调节情景下水位序列的模拟与对比分析。

3.2 长江干流流量与湖口站水位变化特征

EEMD 分解结果显示(表 2),长江干流九江站在无水库调节情景下,IMF1~IMF4 的周期分别为

表 1 PCR-GLOBWB 模型模拟精度验证

Table 1 Validation of simulation accuracy of PCR-GLOBWB model

| 站点  | 率定期(1989—2000 年) |                                |        | 验证期(2001—2020 年) |                                |        |
|-----|------------------|--------------------------------|--------|------------------|--------------------------------|--------|
|     | NSE              | RMSE/( $\text{m}^3/\text{s}$ ) | BIAS/% | NSE              | RMSE/( $\text{m}^3/\text{s}$ ) | BIAS/% |
| 外洲  | 0.86             | 647.34                         | 3.50   | 0.87             | 580.69                         | 0.51   |
| 李家渡 | 0.85             | 171.00                         | -0.14  | 0.88             | 144.58                         | -1.19  |
| 梅港  | 0.96             | 152.98                         | -8.14  | 0.91             | 157.08                         | -10.48 |
| 渡峰坑 | 0.88             | 79.04                          | 19.78  | 0.88             | 62.62                          | 31.43  |
| 虎山  | 0.95             | 70.19                          | 10.20  | 0.92             | 66.05                          | 17.80  |
| 万家埠 | 0.73             | 63.84                          | -19.54 | 0.71             | 50.41                          | -7.66  |
| 虬津  | 0.62             | 147.96                         | -13.82 | 0.59             | 141.07                         | -4.04  |
| 九江  | 0.95             | 2 917.48                       | -8.76  | 0.87             | 4 038.33                       | -8.16  |

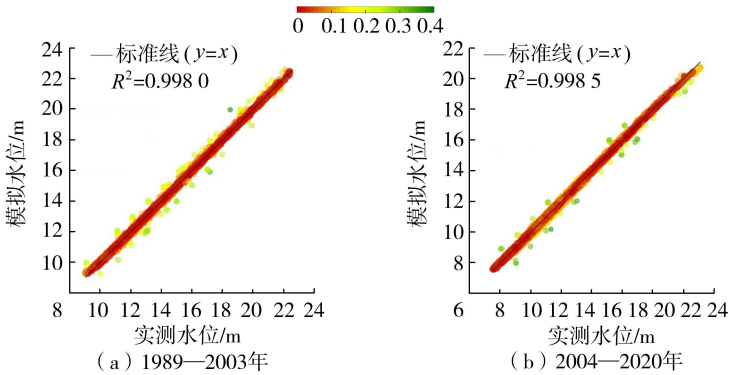


图 3 三峡水库运行前后 PCR-GLOBWB 与 LSTM 耦合模型湖口站水位散点密度图

Fig. 3 Scatter density plot of water level at Hukou Station from PCR-GLOBWB and LSTM coupled model before and after operation of Three Gorges Reservoir

表 2 九江站年流量 IMF<sub>s</sub> 的周期和方差贡献率

Table 2 Periods and variance contribution rates of IMF<sub>s</sub> of annual flow at Jiujiang Station

| 情景    | 周期/a |      |       |       | 方差贡献率/% |       |      |       | RES/% |
|-------|------|------|-------|-------|---------|-------|------|-------|-------|
|       | IMF1 | IMF2 | IMF3  | IMF4  | IMF1    | IMF2  | IMF3 | IMF4  |       |
| 无水库调节 | 2~3  | 5~6  | 16~17 | 28~29 | 46.22   | 34.57 | 6.38 | 12.77 | 0.07  |
| 有水库调节 | 2~3  | 6~7  | 16~17 | 31~32 | 47.27   | 34.85 | 5.78 | 12.06 | 0.04  |

2~3 a、5~6 a、16~17 a、28~29 a,其中 IMF1 的方差贡献率最高(46.22%),表明长江干流呈显著的季节性周期变化特征;在有水库调节情景下,IMF4 的趋势变化时间提前(1989—1992 年上升、1992—2008 年下降、2009—2020 年上升),IMF3 通过 95%置信水平检验,周期调整为 16~17 a,IMF4 周期变为 31~32 a,各分量方差贡献率无显著变化,总体趋势保持稳定。

无水库调节情景下,鄱阳湖五河七口年平均流量变化趋势存在差异:抚河李家渡站、饶河渡峰坑站呈上升趋势,赣江外洲站等 5 个站点呈下降趋势,其中外洲站变化最为明显。有水库调节情景下,各站

点流量变化趋势未改变,但幅度有所调整:李家渡站上升幅度增大,虬津站下降幅度增大,外洲站下降幅度减小。EEMD 分解结果表明(表 3),有水库调节情景下五河七口 IMF4 与 RES 分量的整体变化趋势未改变,各站点 IMF1 周期多为 3~4 a(仅虎山站在有水库调节情景下为 2~3 a),IMF2 周期为 5~8 a,IMF3 为 12~20 a,IMF4 为 17~35 a。方差贡献率方面,IMF1 占比最高(46.70%~54.43%),IMF2 次之(25.05%~37.11%),表明短周期振荡为流量变化的主要驱动因素。万家埠站 IMF3 通过 95%置信水平检验,呈强周期特征,其余站点各分量均未通过检验,表现为弱周期。

表 3 五河七口年流量 IMF<sub>s</sub> 的周期和方差贡献率

Table 3 Periods and variance contribution rates of IMF<sub>s</sub> of annual flow at seven stations of five rivers

| 站点  | 情景    | 周期/a |      |       |       | 方差贡献率/% |       |      |       | RES/% |
|-----|-------|------|------|-------|-------|---------|-------|------|-------|-------|
|     |       | IMF1 | IMF2 | IMF3  | IMF4  | IMF1    | IMF2  | IMF3 | IMF4  |       |
| 外洲  | 无水库调节 | 3~4  | 6~7  | 17~18 | 32~33 | 49.50   | 30.77 | 2.38 | 17.33 | 0.02  |
|     | 有水库调节 | 3~4  | 6~7  | 17~18 | 32~33 | 49.56   | 31.72 | 2.47 | 16.24 | 0.02  |
| 李家渡 | 无水库调节 | 3~4  | 5~6  | 15~16 | 10~11 | 48.96   | 30.80 | 8.79 | 11.28 | 0.17  |
|     | 有水库调节 | 3~4  | 5~6  | 12~13 | 17~18 | 48.81   | 30.68 | 8.86 | 11.51 | 0.14  |
| 梅港  | 无水库调节 | 3~4  | 5~6  | 15~16 | 17~18 | 49.73   | 31.00 | 1.96 | 17.23 | 0.08  |
|     | 有水库调节 | 3~4  | 5~6  | 15~16 | 17~18 | 48.98   | 31.33 | 2.07 | 17.49 | 0.12  |
| 渡峰坑 | 无水库调节 | 3~4  | 7~8  | 16~17 | 17~18 | 50.07   | 30.95 | 3.73 | 15.14 | 0.11  |
|     | 有水库调节 | 3~4  | 7~8  | 16~17 | 17~18 | 49.03   | 31.18 | 3.78 | 15.97 | 0.04  |
| 虎山  | 无水库调节 | 3~4  | 6~7  | 17~18 | 33~34 | 54.36   | 25.13 | 7.74 | 12.70 | 0.06  |
|     | 有水库调节 | 2~3  | 6~7  | 16~17 | 31~32 | 54.43   | 25.05 | 7.94 | 12.48 | 0.10  |
| 万家埠 | 无水库调节 | 3~4  | 5~6  | 18~19 | 33~34 | 48.81   | 29.18 | 3.62 | 18.36 | 0.03  |
|     | 有水库调节 | 3~4  | 6~7  | 19~20 | 34~35 | 48.42   | 28.15 | 4.10 | 19.26 | 0.07  |
| 虬津  | 无水库调节 | 3~4  | 5~6  | 17~18 | 34~35 | 46.97   | 37.11 | 4.38 | 11.50 | 0.04  |
|     | 有水库调节 | 3~4  | 5~6  | 17~18 | 34~35 | 46.70   | 36.46 | 4.92 | 11.86 | 0.06  |

3.3 湖口站水文指标变化特征

三峡水库调节情景下湖口站月中值水位呈现明显季节性差异(表 4):1—4 月、9—12 月水位降低,最大降幅出现在 10 月(−0.92 m)和 3 月(−0.71 m);5—8 月水位升高,最大增幅出现在 6 月(0.94 m)。5—7 月鄱阳湖处于涨水期,水库运行增加了洪水灾害风险;10 月至次年 3 月为退水期和枯水期,水位进一步降低,加剧了干旱灾害风险。

有水库调节情景与无水库调节情景相比,湖口站年极端水位最小值出现时间推迟 2 d,年极端水位最大值出现时间推迟 2.5 d(表 5)。极端水位出现时间的推迟,会干扰水生生物的迁徙、洄游及产卵等生命活动,破坏生物节律,影响生态系统稳定。低脉冲次数与高脉冲次数均未发生变化(分别为 1 次和

表 4 湖口站 IHA 月中值水位

Table 4 IHA monthly median water level at Hukou Station

| 月份 | 月中值水位/m |       |       |
|----|---------|-------|-------|
|    | 无水库调节   | 有水库调节 | 变化    |
| 1  | 8.09    | 7.49  | −0.60 |
| 2  | 8.53    | 7.84  | −0.69 |
| 3  | 10.04   | 9.33  | −0.71 |
| 4  | 11.58   | 11.30 | −0.28 |
| 5  | 13.32   | 13.63 | 0.31  |
| 6  | 14.90   | 15.84 | 0.94  |
| 7  | 17.60   | 18.36 | 0.76  |
| 8  | 16.81   | 16.99 | 0.18  |
| 9  | 16.20   | 15.87 | −0.33 |
| 10 | 14.27   | 13.35 | −0.92 |
| 11 | 11.23   | 10.63 | −0.60 |
| 12 | 9.11    | 8.40  | −0.71 |

表 5 湖口站关键水文改变指标统计

Table 5 Statistics of key IHA at Hukou Station

| 水文指标    | 年最小值<br>出现时间/d | 年最大值<br>出现时间/d | 高脉冲次数 | 低脉冲次数 | 低脉冲历时<br>时/d | 高脉冲历时<br>时/d | 涨水率/<br>(m/d) | 落水率/<br>(m/d) | 逆转次<br>数/次 |
|---------|----------------|----------------|-------|-------|--------------|--------------|---------------|---------------|------------|
| 无水库调节情景 | 13.5           | 206.0          | 2     | 1     | 98.75        | 53.00        | 0.07          | 0.07          | 50         |
| 有水库调节情景 | 11.5           | 203.5          | 2     | 1     | 101.50       | 51.25        | 0.09          | 0.08          | 52         |
| 变化      | -2.0           | -2.5           | 0     | 0     | 2.75         | -1.75        | 0.02          | 0.01          | 2          |

2 次),但低脉冲历时延长 2.75 d(从 98.75 d 增至 101.50 d),高脉冲历时缩短 1.75 d(从 53 d 减至 51.25 d)。这一变化与鄱阳湖枯水期延长的实际情况相符,反映了水库对高低流量的调节作用。有水库调节情景下,湖口站涨水率从 0.07 m/d 增至 0.09 m/d,落水率从 0.07 m/d 增至 0.08 m/d,逆转次数从 50 次增至 52 次。水位波动幅度的增大,会影响水体理化特征,对低移动能力的生物造成胁迫。

三峡水库运行后,湖口站的水文改变度变化比较明显(图 4)。RVA 法计算结果显示,32 个 IHA 指标中,1、2、3、6、10 月中值水位与最低 1、3、7、30 d 中值水位及最高 30d 中值水位、基流指数、高脉冲历时、涨水率为中度改变,其余指标为轻度改变。总体水文改变度为 37.32%,属于中度改变。与同类研究相比,洞庭湖受三峡水库影响的水文改变度为 40%~45%<sup>[15]</sup>,而黄河、汉江等流域受水库影响的水文改变度多在 30%~55%之间<sup>[17,22]</sup>,本文结果处于

中等水平,表明三峡水库对鄱阳湖湖口的水文情势造成了显著但非剧烈的改变。

三峡水库通过季节性蓄泄水改变了长江中下游的水文过程,进而重构了长江与鄱阳湖的江湖关系。洪水期水库拦蓄洪水,减少下泄流量,长江干流水位降低,对鄱阳湖的顶托作用减弱,有利于湖水外泄,在一定程度上降低了鄱阳湖流域内涝风险;退水期和枯水期水库蓄水(汛末)和补水(枯水期)导致长江干流水位先降后升,拉空效应增强,加速鄱阳湖湖水外泄,加剧了枯水期水位降低、历时延长等问题,这与已有研究结论<sup>[14,17]</sup>一致。

3.4 江湖关系变化特征

如图 5 所示,无水库调节情景下,1989—2020 年能差指数呈减小趋势,长江作用逐渐增强,1989 年、1998 年、2003 年及 2012—2020 年长江作用强于鄱阳湖作用,1990—1997 年等时段鄱阳湖作用占优。有水库调节情景下,能差指数减小趋势更

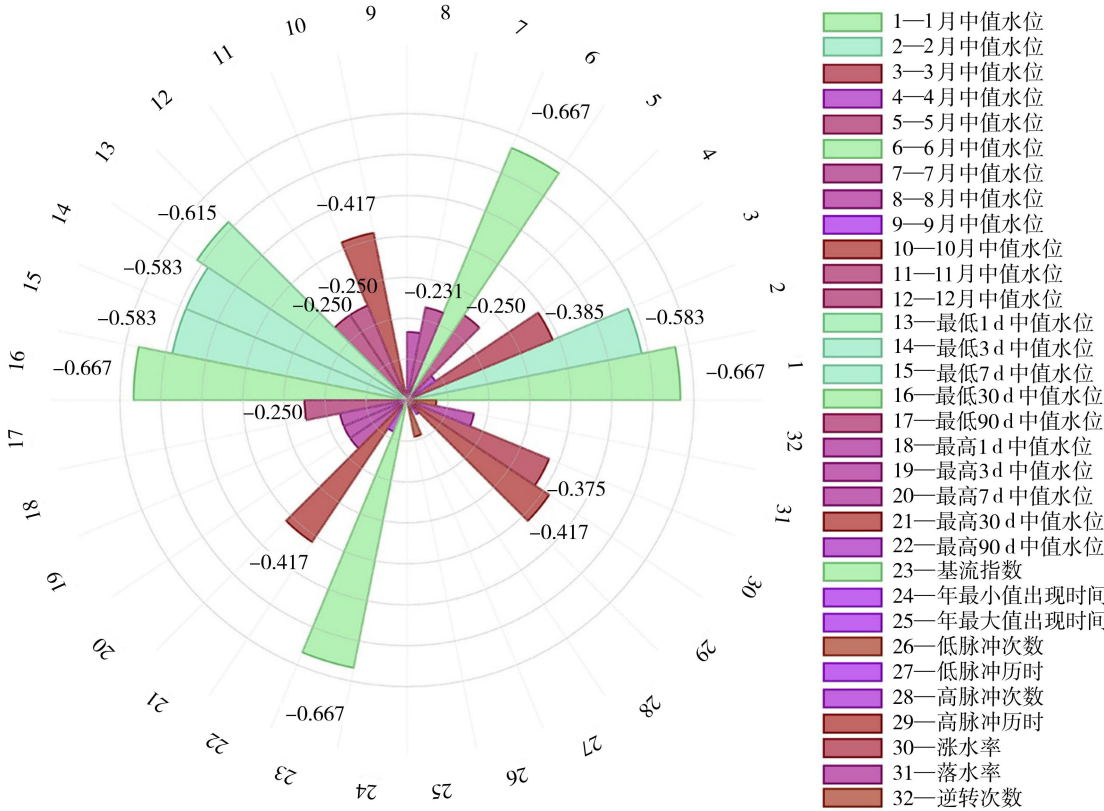


图 4 三峡水库运行后湖口站 32 个 IHA 指标的改变度

Fig. 4 Degree of change of 32 IHA indicators at Hukou Station after operation of Three Gorges Reservoir

为明显,长江作用增强、鄱阳湖作用减弱的速率加快,长江作用强于鄱阳湖作用的时段包括 1989—1990 年、1995 年等,鄱阳湖作用占优时段包括 1991—1994 年等,其中 1998 年长江作用最强,2011 年鄱阳湖作用最强。

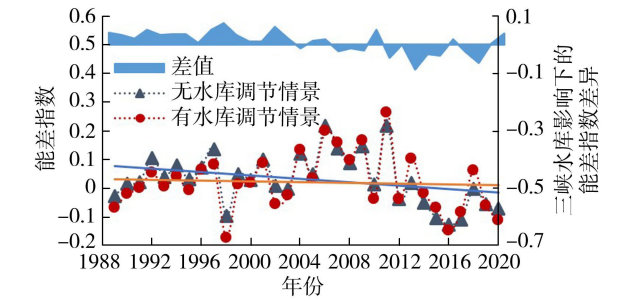


图 5 长江与鄱阳湖 1989—2020 年年际能差指数变化趋势  
Fig. 5 Trend of interannual energy index difference between the Yangtze River and Poyang Lake from 1989 to 2020

2003 年三峡水库开始蓄水后,有水库调节情景下能差指数波动幅度逐渐超过无水库调节情景,江湖关系稳定性降低;2009 年三期工程完成后,这种波动进一步加剧,表明水库运行对江湖关系的干扰持续增强。2003 年前,无水库调节情景下年均能差指数高于有水库调节情景,水库已开始对江湖关系产生潜在影响;2003 年后,有水库调节情景下能差指数波动更剧烈,长江与鄱阳湖作用强度对比发生显著变化,与三峡水库蓄水运行时间吻合,表明水库是江湖关系变化的主要驱动因素<sup>[22]</sup>;2009 年三期工程完成后,江湖关系波动进一步加剧,反映了水库调度对江湖关系的长期累积效应。

根据三峡水库蓄水调度方案和鄱阳湖流域的自然水文过程特征,本文将年内研究时段分为涨水期(4—5 月)、洪水期(6—9 月)、退水期(10—11 月)及枯水期(12 月至次年 3 月),分析不同水文时期长江与鄱阳湖江湖关系的演变趋势特征。如图 6 所示,涨水期无水库调节情景下,能差指数从 4 月的 0.1289 降至 5 月的-0.0216,长江作用增强、鄱阳湖作用减弱;有水库调节情景下,能差指数从 4 月的 0.1197 降至 5 月的-0.1305,变化幅度更大。此时三峡水库处于消落期,泄水导致长江势能增加,与鄱阳湖涨水期能量增长相互作用,使长江作用增强更为显著。洪水期无水库调节情景下,能差指数在 6—7 月下降、8—9 月上升,7 月达到最小值(-0.4474);有水库调节情景下,能差指数变化趋势一致,但数值更低(7 月最小值为-0.6207),长江作用更强。该时期三峡水库保持防洪限制水位运行,长江汛期洪水导致干流能量增强,阻碍鄱阳湖湖水

汇入,增加了流域洪水灾害风险。退水期无水库调节情景下,能差指数从 10 月的-0.1410 升至 11 月的 0.1569;有水库调节情景下,从 10 月的-0.1269 升至 11 月的 0.2284,鄱阳湖作用增强更为明显。退水期三峡水库蓄水导致长江干流水位降低,鄱阳湖湖水快速汇入长江,加剧了枯水期提前问题。枯水期无水库调节情景下,能差指数始终为正,鄱阳湖作用强于长江作用,从 12 月的 0.3746 升至次年 1 月的 0.4819,后逐渐下降;有水库调节情景下,能差指数更高(次年 1 月达到 0.6039),鄱阳湖作用更强。该时期三峡水库泄水满足下游需求,但泄水量不足时会加剧鄱阳湖干旱风险,延长枯水期。

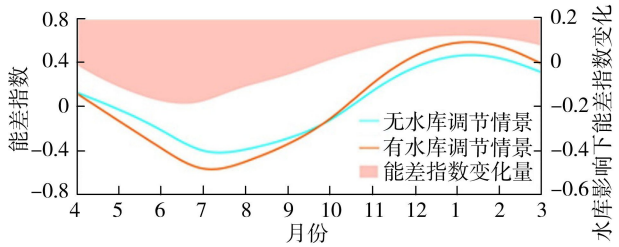


图 6 长江与鄱阳湖 1989—2020 年多月平均能差指数变化趋势  
Fig. 6 Trend of multi-year monthly average energy index difference between the Yangtze River and Poyang Lake from 1989 to 2020

总体来看,有水库调节情景下年内江湖关系变化规律一致:1—4 月、11—12 月鄱阳湖作用占优,5—10 月长江作用占优。有水库调节情景下,4—9 月能差指数低于无水库调节情景,长江作用增强;1—3 月、10—12 月能差指数高于无水库调节情景,鄱阳湖作用增强,进一步加剧了流域洪涝与干旱风险。

#### 4 讨论

本文构建的 PCR-GLOBWB 与 LSTM 耦合模型,充分发挥了物理机制模型与数据驱动模型的互补优势。PCR-GLOBWB 模型能够基于物理机制模拟不同情景(有无水库调节)下的流域水文过程,而 LSTM 模型则能精准捕捉流量与水位之间的非线性映射关系。两者的耦合实现了对水库调控影响的水位响应模拟,为情景对比分析提供了可靠的数据基础。然而,该耦合模型也存在一定局限性:LSTM 模型作为黑箱模型,其内部机制难以完全解释;耦合过程依赖于两个模型的精度,误差可能存在传递和累积效应。此外,能差指数经验参数的率定、模型参数的不确定性等,也是本文的潜在不确定性来源。

本文研究发现三峡水库蓄水导致长江势能降低(水位下降),从而增强了鄱阳湖出流动能(流量增

大),表现为鄱阳湖作用增强,这与 Guo 等<sup>[13]</sup>和赵军凯等<sup>[14]</sup>的研究结果较为一致。此外,本文计算得到的湖口站总体水文改变度(37.32%)与周建银等<sup>[15]</sup>对洞庭湖的研究结果(约40%)接近,表明三峡水库对两湖的水文情势影响程度相当。基于不同时期的江湖关系特征,流域水资源管理应有所侧重:洪水期(6—9月),三峡水库在拦蓄洪水的同时,调度运行中应关注其对鄱阳湖的顶托作用,适当加大下泄流量,减轻内涝风险;退水期和枯水期(10月至次年3月),三峡水库应避免过快蓄水,以减缓对鄱阳湖的拉空效应,保障湖区生态基流。

5 结 论

- a. PCR-GLOBWB 与 LSTM 耦合模型有效模拟了1989—2020年有无水库调节情景下的湖口站日水位序列。该耦合模型有效分离了水库调节对径流和水位的影响,为江湖关系研究提供了可靠的数据支撑。
- b. 三峡水库运行显著改变了长江-鄱阳湖系统的水文情势与江湖作用能量平衡。湖口站水文情势呈中度改变(37.32%),表现为月平均水位“春冬低、夏秋高”、极端水位出现时间推迟、低脉冲历时延长等特征。能差指数分析显示,2003年水库蓄水后,江湖关系年际波动加剧,年内长江作用在洪水期增强,鄱阳湖作用在枯水期增强,这种季节性失衡是流域洪涝与干旱风险加剧的根本原因。
- c. 基于能差指数的定量评估表明,三峡水库运行是驱动江湖关系演变的关键因素。
- d. 研究结果可为三峡水库优化调度提供量化依据:洪水期适度增加下泄以缓解顶托作用带来的影响,枯水期控制蓄水速度以减轻拉空效应,从而在保障防洪安全的同时,减轻对鄱阳湖生态水文的不良影响。

参考文献:

[ 1 ] 王志寰,朱立俊,王建中,等. 长江倒灌鄱阳湖原因及发生条件的量化指标[J]. 水科学进展,2020,31(2):203-213. ( Wang Zhihuan, Zhu Lijun, Wang Jianzhong, et al. Reverse flow from Yangtze River to Poyang Lake: causes and occurrence conditions quantization index [ J ]. Advances in Water Science, 2020, 31 ( 2 ) : 203-213. ( in Chinese ) )

[ 2 ] 卞佳琪,史常乐,何琦,等. 长江下游干流与鄱阳湖洪水遭遇风险分析[J]. 水利水电科技进展,2025,45(6):38-46. ( Bian Jiaqi, Shi Changle, He Qi, et al. Analysis of flood encountering risks between main stream of the lower Yangtze River and Poyang Lake [ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45 ( 6 ) : 38-46.

( in Chinese ) )

[ 3 ] 万荣荣,杨桂山,王晓龙,等. 长江中游通江湖泊江湖关系研究进展[J]. 湖泊科学,2014,26(1):1-8. ( Wan Rongrong, Yang Guishan, Wang Xiaolong, et al. Research progress on the relationship between rivers and lakes in Tongjiang Lake in the middle reaches of the Yangtze River [ J ]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26 ( 1 ) : 1-8. ( in Chinese ) )

[ 4 ] 夏军强,尚海鑫,周美蓉,等. 洞庭湖和鄱阳湖入汇对长江中下游河道冲刷量影响的定量分析[J]. 水资源保护,2026,42(2):12-19. ( Xia Junqiang, Shang Haixin, Zhou Meirong, et al. Quantitative analysis of confluence impact of Dongting Lake and Poyang Lake on erosion of middle and lower reaches of the Yangtze River [ J ]. Water Resources Protection, 2026, 42 ( 2 ) : 12-19. ( in Chinese ) )

[ 5 ] Yang Xiaoli, Wu Fan, Yuan Shanshui, et al. Quantifying the impact of human activities on hydrological drought and drought propagation in China using the PCR-GLOBWB v2.0 model [ J ]. Water Resources Research, 2024, 60 ( 1 ) : e2023WR035443.

[ 6 ] 夏军,薛颖,骆文广,等. 旱涝灾害对鄱阳湖生态系统的影响与适应性对策[J]. 水资源保护,2025,41(5):11-21. ( Xia Jun, Xue Ying, Luo Wenguang, et al. Impacts of drought and flood disasters on the Poyang Lake ecosystem and adaptive strategies [ J ]. Water Resources Protection, 2025, 41 ( 5 ) : 11-21. ( in Chinese ) )

[ 7 ] 赵雅楠,黄国鲜,童思陈,等. 气候变化与人类活动对鄱阳湖流域入湖水沙变化的贡献率分析[J]. 水资源保护,2025,41(6):113-122. ( Zhao Yanan, Huang Guoxian, Tong Sichen, et al. Analysis of contribution rates of climate change and human activities to changes in runoff and sediment inflow into lake in the Poyang Lake Basin [ J ]. Water Resources Protection, 2025, 41 ( 6 ) : 113-122. ( in Chinese ) )

[ 8 ] 唐洪武,黄淑君,袁赛瑜,等. 长江-鄱阳湖交汇处三维水流结构研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(2):128-135. ( Tang Hongwu, Huang Shujun, Yuan Saiyu, et al. Three-dimensional flow structure at the confluence zone of Yangtze River and Poyang Lake [ J ]. Journal of Hohai University ( Natural Sciences ), 2020, 48 ( 2 ) : 128-135. ( in Chinese ) )

[ 9 ] Zhang Zengxin, Chen Xi, Xu Chongyu, et al. Examining the influence of river-lake interaction on the drought and water resources in the Poyang Lake basin [ J ]. Journal of Hydrology, 2015, 522 : 510-521.

[ 10 ] 卢金友,姚仕明. 水库群联合作用下长江中下游江湖关系响应机制[J]. 水利学报,2018,49(1):36-46. ( Lu Jinyou, Yao Shiming. Response mechanism of the river and lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River under the combined effect of reservoir groups [ J ]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49 ( 1 ) : 36-46. ( in Chinese ) )

- [11] 张云昌,张业刚,宋秋龄,等. 江湖关系的历史和未来[J]. 水利学报,2021,52(10):1183-1192. (Zhang Yunchang,Zhang Yegang,Song Qiuling,et al. The history and future of the relationship between the Yangtze River and connected lakes [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2021,52(10):1183-1192. (in Chinese))
- [12] 熊斌,卓云强,许崇育,等. 1956—2022 年鄱阳湖枯水情势演变及驱动机制分析[J]. 水利学报,2024,55(3):313-324. (Xiong Bin,Zhuo Yunqiang,Xu Chongyu,et al. Analysis on the evolution and driving mechanism of low flow regime from 1956 to 2022 in Poyang Lake,China[J], Journal of Hydraulic Engineering,2024,55(3):313-324. (in Chinese))
- [13] Guo Hua, Hu Qi, Zhang Qi, et al. Effects of the Three Gorges Dam on Yangtze River flow and river interaction with Poyang Lake, China: 2003-2008 [J]. Journal of Hydrology,2012,416/417:19-27.
- [14] 赵军凯,李九发,蒋陈娟,等. 长江中下游河湖水量交换过程[J]. 水科学进展,2013,24(6):759-770. (Zhao Junkai,Li Jiufa,Jiang Chenjuan,et al. Water exchange between river and lake in the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. Advances in Water Science,2013,24(6):759-770. (in Chinese))
- [15] 周建银,高菲,元媛,等. 三峡水库运行前后长江中下游干流及两湖的径流过程变化[J]. 湖泊科学,2023,35(2):696-708. (Zhou Jianyin,Gao Fei,Yuan Yuan,et al. Runoff variation in the middle and lower branches of Yangtze River and the two lakes (Dongting and Poyang Lake) before and after Three Gorges Reservoir's operation[J]. Journal of Lake Sciences,2023,35(2):696-708. (in Chinese))
- [16] 邴建平,邓鹏鑫,吕孙云,等. 鄱阳湖与长江干流水量交换效应及驱动因素分析[J]. 中国科学:技术科学,2017,47(8):856-870. (Bing Jianping,Deng Pengxin,Lyu Sunyun,et al. The analysis of water exchange regime research on Poyang Lake and Yangtze River and driving factors[J]. Scientia Sinica (Technologica),2017,47(8):856-870. (in Chinese))
- [17] 邓金运,范少英. 基于能量的鄱阳湖—长江相互作用表征指标研究[J]. 地理学报,2017,72(9):1645-1654. (Deng Jinyun,Fan Shaoying. Characterization index for expressing the relationship between the Yangtze River and Poyang Lake based on the theory of energy [J]. Acta Geographica Sinica,2017,72(9):1645-1654. (in Chinese))
- [18] Yang Xiaoli, Zhang Mengru, He Xiaogang, et al. Contrasting influences of human activities on hydrological drought regimes over China based on high-resolution simulations[J]. Water Resources Research,2020,56(6):e2019WR025843.
- [19] 李继清,刘佳利,邓世浪,等. 变化环境下西江干流水文情势演变及其驱动因素[J]. 水资源保护,2025,41(1):9-18. (Li Jiqing, Liu Jiali, Deng Shilang, et al. Hydrological regime evolution and its driving factors in main stream of the Xijiang River under changing environment [J]. Water Resources Protection,2025,41(1):9-18. (in Chinese))
- [20] 薛春芳,侯威,赵俊虎,等. 集合经验模态分解在区域降水变化多尺度分析及气候变化响应研究中的应用[J]. 物理学报,2013,62(10):504-511. (Xue Chunfang,Hou Wei,Zhao Junhu,et al. The application of ensemble empirical modedecomposition method in multiscale analysis of regionprecipitation and its response to the climate change [J]. Acta Physica Sinica,2013,62(10):504-511. (in Chinese))
- [21] Richter B D, Baumgartner J V, Powell J, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems[J]. Conservation Biology,1996,10(4):1163-1174.
- [22] 马超,崔冉昕. 基于变化范围法的黄河头道拐站水沙变化分析[J]. 水力发电学报,2018,37(5):58-68. (Ma Chao,Cui Ranxin. Analysis on changes in flow and sediment at Toudaoguai on the Yellow River using range of variability approach [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2018,37(5):58-68. (in Chinese))
- [23] 程俊翔,徐力刚,姜加虎. 水文改变指标体系在生态水文研究中的应用综述[J]. 水资源保护,2018,34(6):24-32. (Cheng Junxiang,Xu Ligang,Jiang Jiahu. Review of application of hydrologic alteration index system in eco-hydrology research [J]. Water Resources Protection,2018,34(6):24-32. (in Chinese))
- [24] 窦佳瑶,王华,王世岩,等. 鄱阳湖水文情势演变对水质的驱动作用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2026,54(2):82-93. (Dou Jiayao,Wang Hua,Wang Shiyan,et al. Driving effect of hydrological regime evolution on water quality in Poyang Lake [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2026,54(2):82-93. (in Chinese))
- [25] Singh R,Jain M K. Reappraisal of hydrologic alterations in the Roanoke River basin using extended data and improved RVA method [J]. International Journal of Environmental Science and Technology,2021,18:417-440.
- [26] 李加林,杨佳铭,刘永超,等. 鄱阳湖流域水系格局与连通性变化分析[J]. 水资源保护,2026,42(1):30-38. (Li Jialin,Yang Jiaming,Liu Yongchao,et al. Analysis of water system pattern and connectivity change in the Poyang Lake Basin [J]. Water Resources Protection,2026,42(1):30-38. (in Chinese))
- [27] 曹艳敏,王崇宇,黎小东. 湘资沅澧对洞庭湖 IHA 指标影响定量追溯研究[J/OL]. 河海大学学报(自然科学版),1-13[2026-05-15]. (Cao Yanmin,Wang Chongyu, Li Xiaodong. Quantitative ascend study on the influence of Xiangziyuanli on IHA index of Dongting Lake [J/OL]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),1-13[2026-05-15]. (in Chinese))

(收稿日期:2026-01-23 编辑:彭桃英)