

夏军, 骆文广, 余敦先, 等. 流域模拟器在数字流域建设及水电预报调度能力提升中的应用与展望[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(7): 1-12. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.07.001

XIA Jun, LUO Wenguang, SHE Dunxian, et al. Applications and prospects of river basin simulators in digital river basin development and hydropower forecasting and scheduling enhancement [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(7): 1-12. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.07.001

# 流域模拟器在数字流域建设及水电预报调度能力提升中的应用与展望

夏 军<sup>1,2</sup>, 骆文广<sup>1,2</sup>, 余敦先<sup>1,2</sup>, 唐国强<sup>1,2</sup>, 叶 汀<sup>1</sup>

(1. 水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学 水安全研究院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:**【目的】为全面提升我国在流域尺度下水电预报与调度的能力, 亟需加快推进以水系统科学为理论基础的数字流域体系建设, 其中“流域模拟器”作为核心支撑工具发挥着日益重要的作用。【方法】依托长江流域的典型应用实践, 围绕水系统科学与流域模拟技术在水利水电调度管理及极端水文事件应对中的关键价值, 系统论述了“长江模拟器”(典型流域模拟器平台)的研发背景、技术体系与工程应用成效。该平台集成水文监测、实时感知与模型耦合等核心技术, 构建覆盖多尺度的流域水系统的动态模拟与预报体系, 实现对复杂流域水文演变过程的模拟与预判。【结果】实际应用表明, 流域模拟器能够通过观测与多模式耦合显著提升中长期水文预报的时空分辨率和增加减少不确定性的系统模拟能力, 增强水库群多目标优化调度策略的科学性与响应时效, 尤其在应对极端洪涝与干旱等突发水文事件中展现出有效的决策支持和风险防控能力。【结论】中国的应用实践表明, 流域模拟器驱动下的数字流域建设能够提升水文预报与水库群联合调度的精度与协同效率, 在应对极端水文变化环境下展现系统的适应性与运行韧性。展望未来, 应聚焦不断变化的环境下水系统演变与不确定性等挑战, 推进复杂“河-库”水系统模拟器的集成研发, 深化多目标水库群优化调度大模型的体系构建, 强化跨部门协同机制与关键技术的联合攻关, 不断推动流域模拟器在数字流域体系中的深入应用与能力跃升。

**关键词:** 数字流域; 水系统科学; 流域模拟器; 流域智慧管理; 风险评估; 长江流域; 数字孪生; 洪水预报

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.07.001

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV697.13

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)07-0001-12



## Applications and prospects of river basin simulators in digital river basin development and hydropower forecasting and scheduling enhancement

XIA Jun<sup>1,2</sup>, LUO Wenguang<sup>1,2</sup>, SHE Dunxian<sup>1,2</sup>, TANG Guoqiang<sup>1,2</sup>, YE Ting<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan 430072, Hubei, China;

2. Research Institute of Water Security, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China)

收稿日期: 2025-04-30; 修回日期: 2025-05-12; 录用日期: 2025-05-12; 网络出版日期: 2025-05-15

基金项目: 国家自然科学基金长江水科学研究联合基金项目(U2340213)

作者简介: 夏 军(1954—), 男, 教授, 中国科学院院士, 博士, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: xiajun666@whu.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

**Abstract:** [Objective] To comprehensively enhance the capacity for hydropower forecasting and scheduling at the scale of a river basin in China, it is imperative to accelerate the development of digital river basin systems based on the theoretical foundation of water system science, in which the “river basin simulator” plays an increasingly important role as a core supporting tool. [Methods] Based on typical application practices in the Yangtze River Basin, the research and development background, technical system, and engineering application outcomes of the “Yangtze River Simulator” (a representative river basin simulator platform) were systematically elaborated, focusing on the key value of water system science and river basin simulation technologies in hydropower scheduling management and in response to extreme hydrological events. The platform integrated core technologies including hydrological monitoring, real-time sensing, and model coupling, through which a multi-scale dynamic simulation and forecasting system for basin water systems was established, enabling simulation and prediction of complex river basin hydrological evolution processes. [Results] Practical applications showed that the river basin simulator could significantly improve the spatiotemporal resolution and the system simulation ability to reduce uncertainties through observation and multi-mode in medium-and long-term hydrological forecasting, while enhancing the scientific validity and response efficiency of multi-objective reservoir group optimized scheduling strategies. Notably, they demonstrated effective capabilities in decision support and risk prevention, especially when addressing sudden hydrological events such as extreme floods and droughts. [Conclusion] China’s practical experience indicates that digital river basin development driven by river basin simulators can improve the accuracy of hydrological forecasting and the coordination efficiency of joint reservoir scheduling, and demonstrating system adaptability and operational resilience under extreme hydrological change conditions. Looking ahead, future efforts should focus on addressing challenges such as water system evolution and uncertainties driven by the constantly changing environment. The integrated development of complex “river-reservoir” system simulators should be promoted, and the system construction of multi-objective reservoir group optimized scheduling large models should be deepened. Furthermore, cross-sectoral coordination mechanisms and joint efforts in key technologies should be strengthened, and the in-depth application and capacity improvement of river basin simulators within the digital river basin system should be continuously advanced.

**Keywords:** digital river basin; water system science; river basin simulator; intelligent river basin management; risk assessment; Yangtze River Basin; digital twin; flood forecasting

## 0 引言

流域是国家人口、经济和社会发展的最基本、最重要的自然系统,同时也是国家经济建设、生态环境保护与可持续发展面临的主战场<sup>[1-3]</sup>。流域管理不仅关系到水资源的合理配置,更直接影响生态环境的稳定与社会经济的协调发展<sup>[4-6]</sup>。近年来,气候变化与人类活动加剧了流域系统的复杂性与不确定性,尤其在“长江大保护”和“黄河生态保护与高质量发展”等国家战略背景下,流域水安全与综合管理面临前所未有的挑战<sup>[7-9]</sup>。提高水文时空变异的预报精度和预见期,强化极端水旱灾害应对,优化水库群联合调度,兼顾防洪、发电、供水与生态保护等多目标协同决策,成为当前水利水电行业亟需突破的关键方向<sup>[10-12]</sup>。

国家高度重视生态文明建设与数字化转型<sup>[13]</sup>,要求加强科技支撑与关键技术攻关,推动绿色智慧数字生态文明建设<sup>[14-16]</sup>。2025年政府工作报告中进一步提出,持续推进“人工智能+”行动,鼓励大模型应用创新<sup>[17-19]</sup>。基于此,面向变化环境下流域中“水-土-气-生”及“人-地”关系的新挑战,传统以分部门、分学科为主的流域管理模式,已升级为以

“山-水-林-田-湖-草-沙”整体保护与系统治理为核心的综合智慧管理新阶段<sup>[20]</sup>。

数字流域建设起步于流域水资源管理的信息化阶段,早期通过水利自动化监测、水情信息系统与水库调度平台实现数据采集与基本决策支持<sup>[21]</sup>。随着技术进步,逐步发展出以水文气象预报、水电站调度优化、水资源综合配置为代表的智能应用系统,尤其在洪水预报与水电调度领域,基于传统的水文模型的智能化应用在提升管理效率方面取得初步成效<sup>[22]</sup>。但随着气候异常频发、多目标协同调控需求日益复杂,传统以部门分割、单一要素驱动的信息化体系已难以满足现代流域治理的需求<sup>[23]</sup>。从国家“十四五”到“十五五”发展规划来看,当前我国在建设高水平流域模拟器和数字孪生系统方面面临着新的发展机遇<sup>[24]</sup>。亟需推动从基础研究到多学科交叉融合,构建“自然流域-经济社会”耦合的流域模拟器与大模型体系,为大江大河流域的可持续发展与管理,提供“监测-监控-模拟-预测-评价-调控”一体化的现代科技支撑与智慧管理系统<sup>[25-27]</sup>。这一方向不仅是国家重大战略需求,也是全球变化背景下地球系统科学与流域系统科学研究的重要国际前沿<sup>[28]</sup>。在2023年第28届国际大地测量学和地球物理学联合会(IUGG)

大会上, 数字技术驱动流域科学发展的议题成为关注焦点, 体现了国际数字流域建设的方向<sup>[29]</sup>。

随着新一代数字孪生与人工智能技术的快速发展, 建设数字孪生流域智慧管理体系, 不仅将为我国大江大河流域的生态保护与水电可持续发展提供科学支撑, 也有望引领全球变化背景下流域系统管理的新范式<sup>[30]</sup>。因此, 开展面向数字流域建设的水电预报调度能力提升研究, 既是破解极端水情下多目标调度难题的现实需要, 也是推动生态文明建设、促进绿色智慧发展、引领流域系统科学创新的重要举措, 具有重要的科学意义与广阔的应用前景。

## 1 流域水系统科学与流域模拟器

### 1.1 流域水系统的理论

#### 1.1.1 流域系统方法论

流域系统科学方法论以整体性、系统性和交叉融合为核心特征, 强调水、土、气、生及人-地关系共同构成流域系统的科学基础。围绕水(水循环、水文过程、水资源、水环境等)、土(土壤过程、土地利用、土壤资源、水土流失等)、气(大气过程、气候变化、大气环境等)与生(生态过程、生物多样性等)四大自然要素, 系统分析其相互作用过程与机制<sup>[31-33]</sup>。自然过程与人类社会经济活动(包括人文过程, 涵盖经济、社会、城乡演变与人地关系等)通过能量交换、物质迁移与信息反馈, 在流域尺度上交织形成复杂的物理、化学与生物耦合过程, 构建了流域复合系统。该方法论不仅关注自然过程内部的动态演变, 也重视人类活动对流域结构与功能的影响, 强调在变化环境下提升流域的韧性、适应性与多目标协同调控能力, 为数字流域建设与智慧管理提供了坚实的理论支撑与方法基础<sup>[34-36]</sup>。

#### 1.1.2 水系统科学

在流域系统方法论的基础上, 进一步聚焦水过程物理机制与人地系统交互作用, 形成了水系统科学这一重要分支。水系统科学以变化环境下流域尺度的水循环过程、水资源系统演变及水安全保障为研究核心, 是21世纪流域水科学发展的重要前沿方向。其研究内容涵盖水与气候、水与环境、水与生态及水与社会等多个维度, 强调自然系统与社会系统的紧密耦合与协同演变<sup>[37]</sup>。国际上, GWSP(全球水安全伙伴计划)、IAHS Panta Rhei(变化中的水文学)计划以及HELPING计划(科学解决水问题十年: 让当地人参与到全球的水文学)等, 均将水系统科学作为重点关注领域<sup>[38]</sup>。值得强调的是, 水文学作为水系统科学的

核心理论支柱, 支撑着对水循环动力机制、过程模拟及变化规律的科学认知, 为理解和应对全球变化背景下水资源可持续利用与水安全挑战提供了应用的基础<sup>[39-40]</sup>。

#### 1.1.3 水系统与关键科学问题

水系统以水循环为核心纽带, 耦合水文物理过程、水质与生态过程及人文过程, 构成了一个复杂而开放的动态系统。作为流域系统的重要组成部分, 水系统通过能量传输、物质迁移与信息反馈机制, 体现了自然与社会过程的交叉融合<sup>[41-43]</sup>。在水系统科学研究框架下, 当前对水系统的监控、模拟和调度还面临以下三个关键与难点: (1) 强调水循环联系的多过程的观测与监控, 检测水系统的变化规律; (2) 强调水循环联系的多过程的作用-反馈即水系统“耦合-解耦”模拟研究; (3) 强调了水系统关键的调控与管理, 为变化环境下的流域综合治理, 提供科学支撑。

### 1.2 流域模拟器

流域模拟器是以流域为对象, 以水循环为核心纽带, 系统集成流域自然过程与社会过程耦合机制的模拟系统, 并与示范工程集成的大型科学装置<sup>[26]</sup>。其核心任务是实现流域尺度上水文、生态与社会经济过程的综合模拟与预测。流域模拟器下设多个子系统, 包括湖库-岸线-城市群模拟子系统、河流及水网模拟子系统, 以及区域水系统联系的经济社会系统模拟子系统等, 构建多尺度、多要素、多过程相互作用的流域综合模拟能力。

流域模拟器的总体系统框架如图1所示, 主要包括监测与模拟两大核心功能模块。其中, 监测系统致力于建设天空地一体化观测网络, 整合地面常规水文学气象观测、卫星遥感、无人机与无人船巡测、5G通信与北斗定位导航等现代高科技手段, 实现流域多要素、多时空尺度的信息实时感知与动态更新。模拟系统则聚焦于搭建流域模型集/模型云/模型群(系统), 构建多领域耦合的数字孪生体系, 具体涵盖: 模型集与模型云子系统、社会经济子系统、水旱灾害预警预报子系统、环境及生态子系统、调度调控及决策支持子系统等。通过高性能算法研发、算力平台建设与算据资源集成, 支撑流域模拟器作为重大科学装置的功能完善, 最终实现面向水旱灾害预警、水资源优化调度与流域高质量发展的综合应用。

## 2 长江模拟器的研发与应用

作为典型的应用案例, 长江模拟器是流域模拟器在实际应用中的一种代表。长江作为中国最大的河

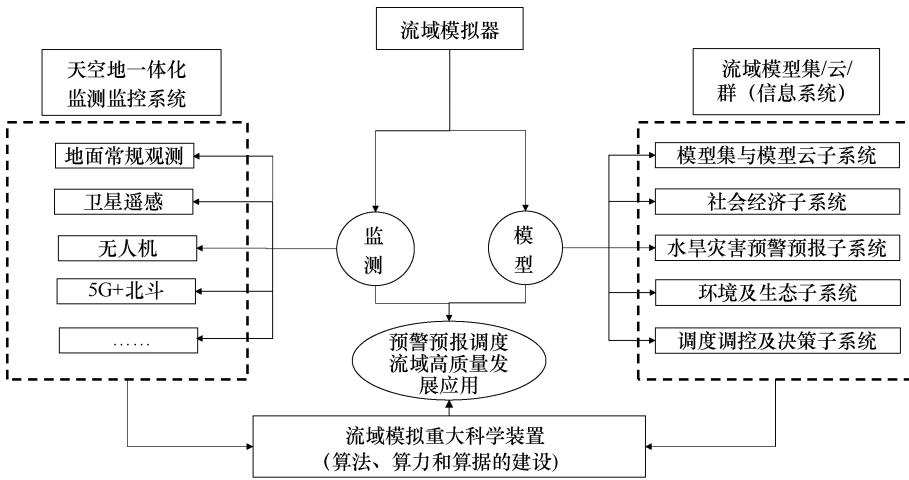


图 1 流域模拟器的系统框架

Fig. 1 System framework of river basin simulator

流, 承载着重要的生态、经济和社会功能, 对其水文过程和社会经济活动的模拟, 对于流域管理和可持续发展具有重要意义。

自 2019 年起, 夏军领衔的团队开展了长江模拟器的研发工作<sup>[47]</sup>。该项工作在中国科学院 A 类战略性先导科技专项和国家自然科学基金重大项目的支持下正式启动, 旨在通过整合水文、生态、经济等多领域的的数据, 建立一个综合性的流域模拟系统, 从而为长江流域的综合治理提供强有力的技术支持。该模拟器围绕感知体系、模拟体系和服务体系建设, 逐步构建起涵盖水质监测、水文模拟、水生态评估、城市水系统建模等多模块的一体化综合模拟平台, 为长江流域的科学治理与可持续发展提供了关键的技术支撑和

决策依据。

## 2.1 长江模拟器的功能与创新

### 2.1.1 研究进展与功能体系

长江模拟器是面向长江流域多过程耦合模拟的大科学装置。以水、土、气、生及人地关系为核心要素, 系统集成和模拟了自然过程与人文过程的动态交互作用关系。围绕流域水系统模拟, 提出并建立了长江流域模拟方法论与技术体系, 形成了模拟体系、感知体系和服务体系三大支撑模块, 具备监测、模拟、评估、预警、决策、调控六大核心功能。为实现这些目标, 研发了长江模

拟器 V1.0 软件平台, 分为公众版、专业版和决策版, 满足不同层次和领域的应用需求(见图 2)。平台的核心技术包括: 通过数字流域建设、水循环模拟及多学科交叉集成, 解决了多过程、多模型集成耦合与系统模拟面对的一些关键技术难题, 显著提升了对流域综合管理与可持续发展的支撑能力。同时, 构建了覆盖科技创新服务、综合治理服务、政府决策服务、应急管理服务、公众文化服务和数据应用服务的多层次服务体系, 进一步增强了流域综合管理与可持续发展的支撑能力<sup>[47]</sup>。

### 2.1.2 技术创新与特色

(1) 强调大江大河流域“水-土-气-生”“人-

**长江模拟器专业版 (pro.cjsim.cn)**  
为流域科学研究服务

**长江模拟器决策版系统 (dss.cjsim.cn)**  
为流域绿色发展与水生态环境修复提供决策支撑

**长江模拟器公众版APP**  
服务于长江大保护公众教育与公众参与



图 2 长江模拟器 V1.0 软件平台

Fig. 2 Software platform of Yangtze River Simulator V1.0

地”关系多过程的观测与试验网络系统的应用科学基础的支撑。基于流域“水-土-气-生”与“人-地关系”多过程交互机制的科学基础,长江模拟器初步建设了空-天-地一体化立体监测体系,探索了流域/区域尺度动态监测与综合模拟的新模式。2023年5月21日,珞珈二号01星成功发射,并于5月23日首次开机成像,获取了国际首幅0.5 m分辨率星载Ka波段SAR影像,标志着流域高精度监测能力的突破。当前已建成业务化的“云+端”遥感应用系统,首次实现基于移动端操控的高分辨率SAR卫星应用服务,极大提升了数据获取与应用的灵活性与实时性。珞珈二号01星具备监测超过10 mm/h降雨量(暴雨事件)的能力,支持极端天气过程的快速识别与响应。在2023年京津冀防汛过程中,珞珈二号于8月10日04时及时获取堤防决口影像并发布预警,为防汛救灾提供了重要依据。在2024年长江洪水过程中,珞珈二号01星于7月6日成功监测洞庭湖洪水水位变化,并动态追踪华容县团洲湾溃坝决口水深演变过程。此外,长江模拟器还推进了地面观测网与测雨雷达和卫星遥感的协同建设,开展流域典型区块多尺度、多要素综合监测试验,强化了对“水-土-气-生”系统状态变化与过程机制的认识,为自然过程与社会过程的耦合模拟提供了丰富数据支撑。

(2)强调观测及多源信息支撑下,自然与社会系统多过程互馈模拟与系统综合研究。首先,长江模拟器在流域水循环与河湖水动力学模拟等应用基础研究方面,构建了全球变化背景下的流域水循环变化与年代际变异分析体系,完成了过去40 a水循环变量的系统分析,开发了极端水旱灾害发生频率与集合预测模型,支撑大江大河流域及城市水旱灾害的预测、预警与应用实践,成功实现了2020年主汛期(6—8月)旱涝演变趋势的精准预报。同步开发了融合机器学习技术的河湖水动力-水量-水质综合模拟系统,使机器学习能够在已知边界条件下模拟和预测因水库调度变化而引起的动态边界变化,提高了变化环境下多过程耦合模拟的精度,有效降低系统不确定性。

其次,深化了与长江模拟器耦合的湖库-岸线-城市群水系统模拟与应用研究。研发了与长江模拟器集成的三峡水库水流-泥沙-水质-水生态多要素耦合模型,可系统分析不同调度方式下干流水文情势变化及调蓄对水沙演变的影响;开发了“长江岸线变化与生态调控”新技术,系统监测并识别了1984—2018年长江中游河漫滩及植被指数的演变特征,揭示了河漫滩变化与江豚种群动态之间的直接联系,建

立了江豚旗舰物种的能流食物网生态水文模型,明确三峡水库调度对生境变化的影响机制,提出了针对性修复措施。同时,研发了城市-城市群尺度(水量-水质-水生态-经济社会)耦合的城市模拟器技术,已在武汉、重庆、九江等地应用,显著提升了绿色发展水平评估、防洪供水航运多目标实时预警与调控能力,有效支撑了美丽中国建设和流域绿色发展战略,为流域及行政区绿色发展水平评估、溯源分析、实时调控与管理(包括产业结构调整等)提供了技术支撑。

## 2.2 长江模拟器在国家部委的实践

长江模拟器自研发以来,在国家多部委和地方政府之间的合作中发挥了重要作用,为长江大保护及长江经济带高质量绿色发展提供了关键科技支撑。以下为几个典型应用案例。

### 2.2.1 水利部的应用

长江模拟器与水利部信息中心签署了战略合作协议,其核心模型被应用并集成于国家数字孪生水利建设工程(一期)中的模型知识平台。通过这一合作,长江模拟器为水利部提供了多方面的战略咨询与技术支撑,涵盖以下领域:(1)现代化流域水文监测体系建设。支持建立覆盖长江流域的现代化水文监测体系,实现对水文数据的实时监控与分析。(2)流域防洪规划修编。助力防洪规划的修编工作,提升流域洪水管理能力,有效降低洪涝灾害风险。(3)南水北调后续工程研究。为南水北调工程的后续规划建设提供科学的数据支持和模拟预测,为国家水安全战略提供技术保障。

### 2.2.2 生态环境部的应用

长江模拟器为国家长江生态环境保护修复联合研究中心的智慧平台建设提供了强有力支撑。通过基础数据共享与模拟预测功能,长江模拟器持续向平台提供相关数据,为生态保护和管理工作提供重要参考。特别是在智慧管理平台建设方面,模拟器的应用促进了智慧管理体系的建立,有助于推动长江流域实现生态保护与可持续发展的协同提升。

### 2.2.3 自然资源部的应用

在自然资源部的相关工作中,长江模拟器在生态红线划定及国土空间规划中发挥了关键作用,相关成果已纳入《长江经济带国土空间规划》的编制工作。此外,还在以下方面提供了重要支撑:(1)生态红线划定。通过模拟器对长江岸线生态脆弱性进行分析,科学划定生态保护红线,提升生态保护区的稳定性与科学性。(2)流域绿色生态网构建。支撑《太湖流域绿色生态网构建与化工企业治理国土空间规划初步方案》

等相关规划项目, 推动区域生态系统的绿色发展。

#### 2.2.4 应急管理部的应用

长江模拟器在应急管理领域的应用集中于水旱灾害预测及灾害模拟器建设, 为防灾减灾提供了科技支持。具体应用包括: (1) 长江水旱灾害预测。长江模拟器的水旱灾害预测成果在长江主汛期得到了应急管理部的高度评价, 并对应急响应和防灾决策起到了积极作用。(2) 灾害模拟器建设。为应急管理部拟启动的灾害模拟器系统提供了技术支撑, 助力我国自然灾害防治的科技创新。

#### 2.3 长江模拟器的社会与科研影响

长江模拟器的成果和应用得到了广泛认可, 入选了2023年度中国生态环境十大科技进展及中国地理科学十大研究进展。反映了其在推动长江大保护和长江经济带绿色发展中的重要科技支撑作用。长江模拟器的应用不仅推动了流域治理与生态保护的科学化、数字化管理, 也为实现长江流域可持续发展目标提供了坚实的技术基础。

由此可见, 流域模拟器通过结合水文、生态、气候与社会经济等多领域数据, 为流域综合治理提供了强有力的科学支撑。通过耦合自然过程与社会过程, 流域模拟器不仅能够有效提升水资源的管理能力, 还能为生态保护、灾害预警和区域发展规划提供全方位的支持。长江模拟器作为典型应用案例, 展示了流域模拟器在实践中的巨大潜力, 尤其在促进流域水资源保护和推动高质量发展方面, 具有重要的现实意义与广阔的应用前景。

### 3 水电预报与调度能力提升面临的问题与挑战

随着长江流域综合水资源管理体系的不断完善, 水利、生态环境、应急管理等多个领域对水文预报的精准性、洪水调度的科学性以及水库群运行管理的智能化水平提出了更高要求<sup>[48-50]</sup>。在这一背景下, 流域模拟器作为集成多源观测数据与多过程模型的核心技术平台, 正在成为支撑水资源优化配置和调度决策的关键工具。通过融合水文、水资源、气象、地形地貌等多源异构数据, 流域模拟器不仅能够实现水文过程的动态模拟与趋势预测, 更在多部门协同决策、极端事件响应以及复杂系统管理中发挥着不可替代的作用<sup>[51-53]</sup>。

然而, 随着流域水库群特别是以三峡水库为核心的“河-库”系统的规模不断扩大, 系统结构与运行机制愈发复杂, 现有的监测、模拟与调度技术在处理

突发事件、应对极端气候以及实现多尺度耦合方面仍面临诸多瓶颈与挑战<sup>[54-56]</sup>。

#### 3.1 流域仿真与综合管理的关键技术问题

##### 3.1.1 三峡“河-库”系统的复杂性

三峡水库及其上游干支流构成了全球最大的“河-库”系统, 该系统深刻改变了原有的产汇流机制与水文响应特性, 显著增加了洪水预报与调度管理的复杂性。以三峡水库调度为例, 其洪水预报涉及以下核心环节: (1) 上游入库站点(如寸滩、武隆)的入流量预报; (2) 库区区间暴雨形成的产汇流过程; (3) 库容-水位( $V-A$ )之间的动态调蓄特性; (4) 调蓄过程与出库流量调控。四个环节交织形成了一个高度耦合、动态非线性的复杂系统, 成为当前全球水文水资源模拟领域的重要研究难题。

##### 3.1.2 核心技术难点分析

当前, 模拟和调控这一超大型“河-库”系统面临的关键技术难点主要包括以下几个问题。

(1) 复杂互联系统的非线性演变问题。库区来水形成过程叠加区域暴雨、干支流来水与区间产流的多重影响, 出流过程受限于调度规则、水力特性以及上下游协调目标, 整体过程高度非线性, 模型构建和算法设计难度非常大, 有别于传统的入库洪水反推的入库洪水模拟计算, 成为亟待研究解决的难题。

(2) 区间洪水的无测资料预报难题。大量产汇流过程发生于缺乏水文气象观测的区间流域, 难以获取关键输入信息。此类“无测站”预测属于典型的PUB(Prediction in Ungauged Basins)问题, 是提升现代河库系统模拟和预报精度的核心瓶颈。

(3) 水动力过程的本质变化问题。库区建成后, 洪水波动不再呈现传统的运动波特征, 而更多体现为以重力波为主导的复杂水动力过程, 导致了洪水传播时间提前, 影响水库群调度的科学性与准确性, 其调度逻辑与计算模型基础需重构, 现有理论方法需更新以适应新的动力演变机制。

#### 3.2 数字流域建设面临的形势与挑战

在全球气候变化背景下, 极端水旱事件发生的频率与强度持续上升, 长江流域洪涝与干旱交替叠加的风险显著加剧<sup>[57-59]</sup>。与此同时, 三峡水库调度面临更加复杂的多目标运行需求——防洪、发电、供水、生态等功能间的协调难度持续上升, 需依托更为先进的入库洪水模拟与运行过程动态耦合技术, 提升调度的科学性与韧性<sup>[60-62]</sup>。

此外, 受中下游洪旱演进态势复杂化、气候不确定性增强、上下游用水矛盾突出的影响, 三峡水库调

度需统筹考虑重庆库尾淹没风险、水库大坝运行安全及下游级联响应等多元要素<sup>[63-65]</sup>。这要求流域模拟与综合研判能力实现系统性跃升,以增强极端条件下的调度决策能力,进而推动“数字流域”由信息集成向智能决策的实质性转变。

### 3.2.1 极端事件下水库群调度的主要挑战

近年来,如2020年长江流域大洪水与2022年罕见长江极端干旱事件,凸显出现有水库群调度体系在极端事件响应中的脆弱性<sup>[66-68]</sup>。其中,主要挑战的问题:(1)突发性强,中长期预测能力不足。受限于对非线性气候系统的机理认知与模型适应性不足,现有预报模型难以精准捕捉旱涝急转等突发性过程,预见期短、预测误差大,严重制约了预调度方案的适时制定与调整。(2)多目标间调度冲突加剧。在极端条件下,防洪安全、供水保障、电力生产与生态维持之间常存在显著冲突,尤其在保证大坝结构安全前提下,有限水资源的分配面临更高强度的博弈与权衡,调度决策愈加复杂。

### 3.2.2 当前调度管理面临的新的突出问题

(1)洪旱调控能力亟待加强,协调体系薄弱。长江水利工程体系传统以防洪为主,抗旱调节能力建设相对滞后。在持续干旱年份中,水资源供给弹性不足,急需建立更加均衡的调度支持体系,提升低水位期的水资源保障能力。

(2)可调节库容不足,调蓄能力偏弱。长江流域现有水库5.19万座,其中大型水库300座、中型1543座、小型50057座,总库容为4141亿 $m^3$ (约占多年平均地表径流量42%),但总兴利库容仅为1800亿 $m^3$ (约占18%),总防洪库容为800亿 $m^3$ 。洞庭湖四河水库总库容为369亿 $m^3$ ,调节系数0.21;鄱阳湖五河水库总库容为178亿 $m^3$ ,调节系数仅0.16,反映出支流水系水库整体调蓄能力偏弱<sup>[69]</sup>。2021年纳入流域联合调度的控制性水库仅47座,总调节库容为1066亿 $m^3$ ,总防洪库容为695亿 $m^3$ ,整体规模与应对极端水旱灾害需求尚有较大差距。如何提升汛期可调节库容,成为亟需破解的问题<sup>[70]</sup>。

(3)中长期气象-水文预测不确定性大,调度前瞻性不足。目前中长期气象-水文耦合预测系统对极端事件的趋势判断能力仍然较弱,预报精度与可靠性不高,难以支撑以调度优化为导向的科学决策体系建设<sup>[71]</sup>。未来需提升洪水峰值预报精度至 $\pm 10\%$ 、中长期趋势预测准确率至70%以上,方可有效支撑流域“预警-响应-调度”一体化机制构建,实现“江河安澜”的治理目标。

## 4 适应水电行业提质增效的对策与建议

为推动水电行业在极端水旱条件下实现提质增效,亟需从战略高度系统构建“监测/监控-模拟-预测(预警)-预案(对策)”一体化的智慧化管理体系。当前阶段,应重点聚焦提升洪旱灾害监测预警水平、优化水库群联合调度机制、加强库容动态管理三大关键任务,力求突破“预报精度不足、水库群调控机制不完善、调度目标冲突突出”等制约因素,为流域防洪抗旱、水资源优化配置、水电效益提升等目标提供坚实技术支撑和决策保障。

### 4.1 加快对地观测监测和“河-库”水系统模拟器的研发应用,提升水库群水文预警预测能力

为了提升水电行业的水库群水文预警预测能力,解决“河-库”系统洪水预报关键技术难点,可采用三维(3D)时变-非线性水文系统理论与方法。如图3所示,通过融合“珞珈二号”卫星、长江电力遥感卫星等空基平台,以及自动雨量站、水位站、流量站等地面观测网络,构建“空-天-地”一体化对地观测系统,实现从暴雨落区识别到产流-汇流-入库全过程的动态监测。结合耦合-解耦建模理念,发展多源信息驱动的多模式水文模型,打通降水-产流-入库-调度之间的链式模拟路径,突破传统模型静态、线性建模的局限。通过数据反演与因果追踪,实现从观测数据出发反推科学模拟计算水文过程,精准捕捉入库流量与洪峰时刻等核心信息,显著提升洪水预报时效性和精度水平,从而为水库群调度和水电站运行提供更可靠的数据基础。

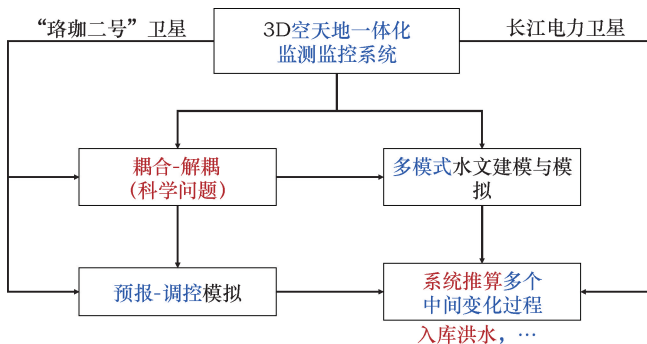


图3 三维时变-非线性水文系统理论与方法框架

Fig. 3 Theoretical and methodological framework of the 3D time-variant nonlinear hydrological system

### 4.2 依托流域模拟器的多目标水库群系统分析,提升极端事件下水库群调度与科学决策能力

针对极端气候事件频发背景下水库群调度面临的困难与挑战,应从多维度构建科学的联合调度与风险

管理体系,提升水库群调度的预见性与协同性。基于此,提出如下具体建议。

#### 4.2.1 加强长江流域旱涝监测与中长期预警预测研究

深入研究极端水旱灾害的成因与演变机制,提升流域尺度气象-水文中长期预报精度,尤其需系统开展成因诊断与过程识别研究,提升气象-水文耦合的中长期预测能力,包括多吸纳一些实践中证明有效的“大数据物理统计聚类预报模型”等和相关部门新研发的气象-水文大模型。建议依托国家重大科技基础设施与遥感平台,融合数值天气预报、陆面水文模型、人工智能技术,构建面向流域多要素(降雨、径流、蒸散发、土壤湿度等)的集成化预报系统,实现对未来1~3个月关键水文指标的滚动预测与情景演算,构建流域多要素一体化预报体系,支撑水库群在复杂气候条件下的动态响应和科学调度。

#### 4.2.2 推动复杂系统下水利工程的联合调度与动态优化

以防洪与抗旱并重为目标,强化长江流域主要水利枢纽的联合调度体系。以数字孪生流域建设为契机,探索实施动态汛限水位调整与风险分担机制,统筹考虑库容利用效率与大坝运行安全,构建调蓄能力最大化与运行风险最小化的优化调度策略,在不影响防洪安全前提下,提高库容利用率。同时,构建“目标导向—风险评估—多方案比选—滚动优化”调度决策链条,提升系统的动态适应与风险分担能力。

#### 4.2.3 优化水库库容管理与应急预案机制

提升水库群在极端事件下的库容调控弹性与应急响应能力。在季节性调度策略基础上,引入情景推演与实时评估机制,科学划分汛前、汛期、枯期调度策略,强化调蓄与泄水的协同管控,构建以三峡水库为核心、下游关键控制性水库为节点的应急蓄泄调度机制,实现多库协同调蓄、分区响应。控制跨流域引调水规模,优先保障水源区生活、生产与生态用水安全。强化与跨流域调水工程的衔接管理,确保源区生态红线与用水安全底线不被突破。

#### 4.2.4 构建三峡河-库水系统模拟器,支撑决策科学化

加快开发覆盖三峡入库站、变动区间来水、库区动态响应的“三峡河-库水系统模拟器”,该模拟器应覆盖入库站点(寸滩、武隆等)、变动区间(如库尾过渡带)、库区水体响应过程等关键单元,融合水动力、水质、水生态过程,构建可嵌入调度系统的模拟

仿真模型。通过模拟库区水位、流量等指标的时空演化,辅助评估不同调度方案对下游防洪、生态、水资源供给的影响,实现河流-水库一体化的动态模拟与调度优化。该模拟器将作为流域级水库群联调联控的技术核心,为极端事件下的精准调度和科学决策提供关键支撑。

综上所述,建议以“关键技术突破—示范工程应用—技术体系推广”为路径,联合气象、水利、电力、科研等多部门开展协同攻关,推进流域尺度智慧调度体系建设。通过部署关键观测设备、建设流域级水文模拟与决策支持平台、强化多源信息融合与数据共享机制,全面提升水电行业在极端水旱背景下的预警、调度与资源优化能力,实现从“单库优化”向“系统统筹”的跨越,为新时代水利高质量发展 and 能源安全保障提供有力支撑。

## 5 结论

(1)长江模拟器作为流域水资源优化调度和长江大保护的核心技术工具,发挥了重要的作用。通过全面整合流域水文、气象和社会经济数据,长江模拟器不仅为各相关部门提供了有力的决策支持,还在多系统联动下复杂水文与气象变化问题的应对中取得了成果。在监测、模拟、预测、预警及决策支持等方面的应用,成为长江大保护与流域综合管理的重要支撑力量。

(2)随着长江流域水库群规模的持续扩大,特别是三峡水库等超大型水利工程系统运行复杂性的不断提升,现有的监测、模拟与调度决策技术在应对极端水文气象事件和多尺度系统变化方面面临日益严峻的挑战。水电行业亟需加快创新,集成智能感知、大数据分析 with 动态模拟的新技术体系,进一步提升流域水库群的预警预测能力和科学调度水平,为长江流域水资源的高效管理与可持续发展提供有力支撑。

(3)面向水电行业提质增效的新需求,长江流域水库群运行管理正面临极端水旱事件频发、区间洪水预报难度加大、调度协调复杂性上升等多重挑战。现有的监测、模拟与调度决策技术在应对突发性、极端性变化及多系统耦合演变过程中尚存在不足。未来需依托流域模拟器,强化空天地一体化观测与“河-库”系统动态模拟,提升流域多目标水库群在洪水预警预测、极端情势响应及科学调度决策中的支撑能力,为长江流域水资源的安全高效利用与可持续治理提供坚实保障。

**致谢:** 本文论述的长江模拟器相关成果是受中国科学院 A 类战略性先导科技专项“美丽中国生态文明建设科技工程”支持的项目四所完成, 其中夏军为首席, 占车生、林忠辉、邹磊、王洪铸、张永勇、朱广伟、金双根、曾思栋、余敦先、胡实、王月玲、杜朝阳等一批骨干做出重要贡献, 一并致谢。

## 参考文献 (References):

- [1] 王浩. 水利新质生产力赋能水利高质量发展的思考[J]. 中国水利, 2025 (2): 10-14.  
WANG Hao. Empowering high-quality water resources development with new-quality productive forces[J]. China Water Resources, 2025 (2): 10-14.
- [2] 颜宇, 刘智勇, 陈晓宏, 等. 流域水文系统产水机制稳定性研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2024, 54 (2): 503-516.  
YAN Yu, LIU Zhiyong, CHEN Xiaohong, et al. Stability of water yield in watersheds[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2024, 54 (2): 503-516.
- [3] 谢树成, 严德天, 朱宗敏, 等. 流域地球系统科学与区域发展战略[J]. 地球科学, 2025, 50 (3): 815-829.  
XIE Shucheng, YAN Detian, ZHU Zongmin, et al. Earth system science in drainage regions connected with societal development[J]. Earth Science, 2025, 50 (3): 815-829.
- [4] 夏军, 薛颖, 骆文广, 等. 河流伦理研究及其在流域综合管理中的应用[J]. 中国水利, 2024(12): 1-6.  
XIA Jun, XUE Ying, LUO Wenguang, et al. Research of river ethics and its application in integrated river basin management[J]. China Water Resources, 2024(12): 1-6.
- [5] 夏勇, 钟茂初, 寇冬雪. 流域生态补偿试点的经济效益[J]. 世界经济, 2024, 47 (5): 64-95.  
XIA Yong, ZHONG Maochu, KOU Dongxue. Economic benefits of the pilot watershed ecological compensation project[J]. The Journal of World Economy, 2024, 47 (5): 64-95.
- [6] 孟庆帅, 巩钰, 刘小燕, 等. 水资源-社会经济-生态环境耦合协调度关系研究及预测: 以黄河流域内蒙古段为例[J]. 干旱区研究, 2025, 42 (4): 682-694.  
MENG Qingshuai, GONG Yu, LIU Xiaoyan, et al. Research and prediction of the degree of coupling coordination of water resources, socioeconomic development, and the ecological environment: A case of the Inner Mongolia section in the Yellow River Basin[J]. Arid Zone Research, 2025, 42 (4): 682-694.
- [7] 黄玲玲, 李炜贤. 科技创新、经济增长与生态效益的耦合协调发展研究: 以长江流域为例[J]. 科技创业月刊, 2024, 37 (3): 14-18.  
HUANG Lingling, LI Weixian. Research on the coordinated development of technological innovation, economic growth, and ecological environment in the Yangtze River Economic Belt[J]. Journal of Entrepreneurship in Science & Technology, 2024, 37 (3): 14-18.
- [8] 王伟, 姚文艺, 张攀, 等. 黄河流域生态治理与生态经济协同发展模式研究进展[J]. 人民黄河, 2024, 46 (2): 129-134.  
WANG Wei, YAO Wenyi, ZHANG Pan, et al. Research progress and review of ecological management and ecological economy coordinated development model in the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2024, 46 (2): 129-134.
- [9] 边婷, 孙朝阳. 数字经济对黄河流域生态保护和高质量发展的影响[J]. 内蒙古科技与经济, 2024(5): 11-14.  
BIAN Ting, SUN Zhaoyang. The impact of digital economy on ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin[J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2024 (5): 11-14.
- [10] 李肇桀, 张旺, 刘璐. 大力发展新质生产力 助推水利高质量发展: 关于水利行业发展新质生产力的认识和思考[J]. 水利发展研究, 2024, 24(6): 1-6.  
LI Zhaojie, ZHANG Wang, LIU Lu. Boosting high-quality development of water conservancy by vigorously developing new quality productive forces in the water sector [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(6): 1-6.
- [11] 唐洪武. 以发展新质生产力提升水安全保障能力的逻辑机理与关键路径[J]. 中国水利, 2024(8): 1-5.  
TANG Hongwu. Logical mechanism and key path of developing new quality productive forces to enhance capability of safeguarding water security[J]. China Water Resources, 2024(8): 1-5.
- [12] 徐长江, 熊丰, 戴明龙, 等. 梯级水库运行期设计洪水及水位联合优化调控变革与启示[J]. 中国水利, 2024(12): 13-17.  
XU Changjiang, XIONG Feng, DAI Minglong, et al. Changes and implications of joint optimal regulation of design floods and water levels during the operational period of cascade reservoirs[J]. China Water Resources, 2024(12): 13-17.
- [13] 左其亭, 王子尧, 马军霞. 我国现代治水研究热点与发展展望[J]. 水利发展研究, 2024, 24(6): 13-19.  
ZUO Qiting, WANG Ziyao, MA Junxia. Hot spots and development prospects of modern water governance research in China[J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(6): 13-19.
- [14] 余欣. 以加速治黄科技创新发展黄河保护治理新质生产力[J]. 中国水利, 2024(6): 17-20.  
YU Xin. Accelerating scientific and technological innovation and developing new quality productive forces for preservation and management of the Yellow River[J]. China Water Resources, 2024 (6): 17-20.
- [15] 中共水利部党组. 加快构建国家水网为强国建设民族复兴提供有力的水安全保障[J]. 中国水利, 2023(13): 1-4.  
Party Group of the Communist Party of China of the Ministry of Water Resources. Accelerating construction of the national water network to safeguard water security for the country and national rejuvenation[J]. China Water Resources, 2023(13): 1-4.
- [16] 李原园. 以推动水利高质量发展为主题 全面推进“十四五”水安全保障规划实施[J]. 中国水利, 2022(5): 4-7.  
LI Yuanyuan. Accelerating implementation of the 14th Five-Year Plan for water security under the theme of promoting high-quality water development[J]. China Water Resources, 2022(5): 4-7.
- [17] 夏军, 陈进. 从防御 2020 年长江洪水看新时代防洪战略[J]. 中国科学·地球科学, 2021, 51(1): 27-34.  
XIA Jun, CHEN Jin. A new era of flood control strategies from the perspective of managing 2020 Yangtze River flood[J]. Scientia Sinica

- (Terra), 2021, 51(1): 27-34.
- [18] 夏军, 陈进, 余敦先. 2022 年长江流域极端干旱事件及其影响与对策[J]. 水利学报, 2022, 53(10): 1143-1153.  
XIA Jun, CHEN Jin, SHE Dunxian. Impacts and countermeasures of extreme drought in the Yangtze River Basin in 2022[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(10): 1143-1153.
- [19] 舒全英, 马媛, 陈亮, 等. 数字孪生水利建设中的人工智能大模型应用探索[J]. 中国水利, 2025(6): 14-30.  
SHU Quanying, MA Yuan, CHEN Liang, et al. Exploration of artificial intelligence large model applications in digital twin water conservancy construction. China Water Resources, 2025(6): 14-30.
- [20] 水利部编写组. 深入学习贯彻习近平关于治水的重要论述[M]. 北京: 人民出版社, 2023.  
Ministry of Water Resources Writing Group. Deeply Study and Implement Xi Jinping's Important Exposition on Water Control[M]. Beijing: People's Publishing House, 2023.
- [21] 钱峰, 夏润亮. 数字孪生水利赋能水利新质生产力发展框架研究[J]. 中国水利, 2024(8): 6-10.  
QIAN Feng, XIA Runliang. Research on the development framework of new quality productive forces of water resources enabled by digital twin water conservancy[J]. China Water Resources, 2024(8): 6-10.
- [22] 王忠静, 沈文欣, 石羽佳, 等. 数字孪生催化水利新质生产力与数字水利经济发展研究[J]. 中国水利, 2024(15): 7-12.  
WANG Zhongjing, SHEN Wenxin, SHI Yujia, et al. Digital twins stimulate new quality productive forces and digital economy in water conservancy[J]. China Water Resources, 2024(15): 7-12.
- [23] 冶运涛, 蒋云钟, 梁犁丽, 等. 数字孪生流域: 未来流域治理管理的新基建新范式[J]. 水科学进展, 2022, 33(5): 683-704.  
YE Yuntao, JIANG Yunzhong, LIANG Lili, et al. Digital twin watershed: new infrastructure and new paradigm of future watershed governance and management[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(5): 683-704.
- [24] 蔡阳. 以数字孪生流域建设为核心 构建具有“四预”功能智慧水利体系[J]. 中国水利, 2022, (20): 2-6.  
CAI Yang. Establishing a smart water system with “forecast, early-warning, rehearsal and plan” functions by focusing on the construction of digital twin basin[J]. China Water Resources, 2022, (20): 2-6.
- [25] 夏润亮, 李涛, 余伟, 等. 流域数字孪生理论及其在黄河防汛中的实践[J]. 中国水利, 2021(20): 11-13.  
XIA Runliang, LI Tao, YU Wei, et al. Digital twin theory of watershed and its application in flood control of the Yellow River[J]. China Water Resources, 2021(20): 11-13.
- [26] 新华社. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[J]. 中国水利, 2021(6): 1-38.  
Xinhua News Agency. The outline of the 14th Five-Year Plan (2021—2025) for National Economic and Social Development and the long-range objectives through the year 2035 of P. R. China[J]. China Water Resources, 2021(6): 1-38.
- [27] 杨佳利, 李杰, 陈晓武, 等. 数字孪生珠江建设技术实践与应用[J]. 中国水利, 2025(8): 1-8.  
YANG Jiali, LI Jie, CHEN Xiaowu, et al. Practice and application on digital twin Pearl River construction[J]. China Water Resources, 2025(8): 1-8.
- [28] XIA J, CHEN Y D. Water problems and opportunities in the hydrological sciences in China[J]. Hydrological Sciences Journal, 2001, 46(6): 907-921.
- [29] XIA J. Toward water systems science and technology, Viewpoint on the frontiers of water and sanitation[J]. Nature-Water, 2023, 1(1): 10-18.
- [30] 李国英. 建设数字孪生流域 推动新阶段水利高质量发展[J]. 水资源开发与管理, 2022, 8(8): 3-5.  
LI Guoying. Construction of digital twin watershed to promote high-quality development of water conservancy in the new stage[J]. Water Resources Development and Management, 2022, 8(8): 3-5.
- [31] XIA J. Enhancing water security in a changing world: experiences and perspectives in China and implications for the world[J]. Water International, 2023, 48(7): 901-908.
- [32] 王浩, 秦大庸, 王建华. 流域水资源规划的系统观与方法论[J]. 水利学报, 2002, 33(8): 1-6.  
WANG Hao, QIN Dayong, WANG Jianhua. Concept of system and methodology for river basin water resources programming[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(8): 1-6.
- [33] 贾海峰, 程声通, 高朗, 等. 流域计算机集成模型系统及其在水库流域水质规划中的应用[J]. 环境科学, 1998(5): 76-78.  
JIA Haifeng, CHENG Shengtong, GAO Lang, et al. The catchment integrated computer model system and its application in reservoir basin water quality planning[J]. Environmental Science, 1998(5): 76-78.
- [34] 刘开颜, 付湘, 刘双郡. 区域水资源压力指数评估及其适应性分析[J]. 水文, 2023, 43(6): 28-32.  
LIU Kaiyan, FU Xiang, LIU Shuangjun. Evaluation and adaptability analysis on water resources stress index [J]. Journal of China Hydrology, 2023, 43(6): 28-32.
- [35] 袁媛, 郑艳. 国内外水资源脆弱性研究进展与展望[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(7): 116-125.  
YUAN Yuan, ZHENG Yan. Progress and future prospects of water resources vulnerability at home and abroad[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(7): 116-125.
- [36] 曹建廷. 国际上水资源管理的变化历程及趋势[J]. 中国水利, 2020(5): 44-46.  
CAO Jianting. The history and trends of water resources management abroad[J]. China Water Resources, 2020(5): 44-46.
- [37] XIA J, WANG L, YU J, et al. Impact of environmental factors on water quality at multiple spatial scales and its spatial variation in Huai River Basin, China[J]. Science China Earth Sciences, 2018, 61(1): 82-92.
- [38] XIA J, SHI W. Perspective on water security issue of changing environment in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 41-50.
- [39] RODRIGUEZ-ITURBE I. Ecohydrology: a hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics [J]. Water Resource Research, 2000, 36(1): 3-10.
- [40] 夏军, 张翔, 韦芳良, 等. 流域水系统理论及其在我国的实践

- [J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16 (1): 1-7.
- XIA Jun, ZHANG Xiang, WEI Fangliang, et al. Water system theory and its practices in China[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16 (1): 1-7.
- [41] 王芳, 王浩, 孙赫英, 等. 我国水生态格局与保护现状[J]. 中国水利, 2014 (13): 1-5.
- WANG Fang, WANG Hao, SUN Heying, et al. Water ecology pattern and protection in China[J]. China Water Resources, 2014 (13): 1-5.
- [42] ZALEWSKI M. Ecohydrology—the use of ecological and hydrological processes for sustainable management of water resources/Ecohydrologie—la prise en compte de processus écologiques et hydrologiques pour la gestion durable des ressources en eau [J]. Hydrological Sciences Journal, 2002, 47(5): 823-832.
- [43] 夏军, 李天生. 生态水文学的进展与展望[J]. 中国防汛抗旱, 2018, 28(6): 1-5.
- XIA Jun, LI Tiansheng. Advances and prospects of eco-hydrology research[J]. China Flood & Drought Management, 2018, 28(6): 1-5.
- [44] 夏军, 余敦先, 史良胜, 等. 流域模拟器的研发与实践初探[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(12): 1425-1431.
- XIA Jun, SHE Dunxian, SHI Liangsheng, et al. Watershed simulator development and initial exploration [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2023, 56(12): 1425-1431.
- [45] 夏军, 林忠辉, 占车生, 等. 长江流域生态调度与长江模拟器研发[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38 (12): 1767-1780.
- XIA Jun, LIN Zhonghui, ZHAN Chesheng, et al. Ecological operation in Yangtze River basin with Yangtze River Simulator[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38 (12): 1767-1780.
- [46] 左其亭, 秦西, 马军霞. 黄河模拟器建设框架设计及发展布局[J]. 人民黄河, 2023, 45 (9): 18-23.
- ZUO Qiting, QIN Xi, MA Junxia. Framework design and development layout of Yellow River simulator construction[J]. Yellow River, 2023, 45 (9): 18-23.
- [47] 夏军, 占车生, 曾思栋, 等. 长江模拟器的理论方法与实践探索[J]. 水利学报, 2022, 53(5): 505-514.
- XIA Jun, ZHAN Chesheng, ZENG Sidong, et al. Theoretical method and practical exploration of Yangtze River Simulator construction[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(5): 505-514.
- [48] 贺玲, 陈佳川, 程春歌, 等. 长江经济带洪涝灾害社会脆弱性评价及时空分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55 (3): 24-39.
- HE Ling, CHEN Jiachuan, CHENG Chungu, et al. Assessment and spatiotemporal analysis of flood vulnerability in the yangtze river economic belt [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55 (3): 24-39.
- [49] 程海云, 熊明, 冯宝飞, 等. 长江现代水文水资源监测预报预警体系[J]. 水利水电快报, 2023, 44 (7): 6-7.
- CHENG Haiyun, XIONG Ming, FENG Baofei, et al. Modern system for hydrological and water resources monitoring, forecasting and early warning of Yangtze River [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2023, 44 (7): 6-7.
- [50] 程海云. 强化水文监测预报预警支撑安澜长江建设[J]. 长江技术经济, 2021, 5 (5): 1-5.
- CHENG Haiyun. Strengthen the hydrological monitoring and forecasting, provide hydrological support for the flood control construction of the Yangtze River[J]. Technology and Economy of Changjiang, 2021, 5 (5): 1-5.
- [51] 张轩, 张行南, 王高旭, 等. 长江上游水库入库流量的中长期预报[J]. 水资源保护, 2022, 38 (4): 131-136.
- ZHANG Xuan, ZHANG Xingnan, WANG Gaoxu, et al. Medium and long term forecast of reservoir inflow in upper reaches of the Yangtze River[J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (4): 131-136.
- [52] 祖雷鸣. 数字孪生黄河建设先行先试进展和成效[J]. 水利发展研究, 2024, 24(9): 5-8.
- ZU L M. Progress and achievements of pilot work in the building of digital twin Yellow River [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(9): 5-8.
- [53] 张雅琦. 长江上游流域短期水文气象耦合预报技术研究[J]. 水电与新能源, 2016, (6): 1-6.
- ZHANG Yaqi. On the short-term hydrological and meteorological coupling forecasting techniques for upper Yangtze River Basin [J]. Hydropower and New Energy, 2016, (6): 1-6.
- [54] 毛镇南. 基于多尺度天气预报技术的水库流量预报平台应用研究[J]. 水利科学与寒区工程, 2023, 6(11): 110-113.
- MAO Z N. Research on the application of reservoir flow forecasting platform based on multi-scale weather forecasting technology [J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2023, 6(11): 110-113.
- [55] 王俊. 长江洪水监测预报预警体系建设与实践: 以2017年长江1号洪水预报为例[J]. 中国水利, 2017(14): 8-10.
- WANG Jun. Construction and practice of monitoring, forecasting and warning system for the flood of Yangtze River: A case study of the first flood of Yangtze River in 2017 [J]. China Water Resources, 2017 (14): 8-10.
- [56] 秦昊, 陈瑜彬. 长江洪水预报调度系统建设及应用[J]. 人民长江, 2017, 48 (4): 16-21.
- QIN Hao, CHEN Yubin. Construction and application of Changjiang River flood forecasting and dispatching system [J]. Yangtze River, 2017, 48 (4): 16-21.
- [57] 许继军, 吴道喜, 霍军军. 长江流域洪水资源利用途径与措施初步探讨[J]. 人民长江, 2008, 39(15): 1-4.
- XU Jijun, WU Daoxi, HUO Junjun. Preliminary discussion on approaches and measures of flood utilization in the Yangtze River Basin [J]. Yangtze River, 2008, 39(15): 1-4.
- [58] 陈进, 王健. 长江与黄河历史洪水对比[J]. 长江科学院院报, 2002, 19(4): 39-41.
- CHEN Jin, WANG Jian. Comparison of historical flood between Yangtze River and Yellow River [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2002, 19(4): 39-41.
- [59] 王云, 李文鑫, 张建云, 等. 长江上游流域水文干旱历史演变及未来预估[J]. 中国工程科学, 2024, 26 (6): 157-168.
- WANG Yun, LI Wenxin, ZHANG Jianyun, et al. Historical evolution and future prediction of hydrological droughts in the upper Yangtze

- River Basin[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26 (6): 157-168.
- [60] 冯宝飞, 曾明, 张虎, 等. 长江2024年第1号洪水预报调度复盘[J]. 人民长江, 2024, 55 (12): 2-7.  
FENG Baofei, ZENG Ming, ZHANG Hu, et al. Retrospective analysis of flood forecast and reservoir operation during 2024 Changjiang River No. 1 flood[J]. Yangtze River, 2024, 55 (12): 2-7.
- [61] 陈桂亚, 张俊, 邹强. 三峡工程防洪调度研究及作用分析[J]. 中国水利, 2024(22): 41-47.  
CHEN Guiya, ZHANG Jun, ZOU Qiang. Studies on flood control operation of the Three Gorges Project and its functions[J]. China Water Resources, 2024(22): 41-47.
- [62] 刘冬顺. 长江流域以三峡水库为核心的水库群统一联合调度思路、举措和成效[J]. 中国水利, 2024(22): 7-12.  
LIU Dongshun. Concepts and measures for integrated and joint operation of reservoir group in the Yangtze River Basin by taking the Three Gorges Reservoir as the core[J]. China Water Resources, 2024 (22): 7-12.
- [63] 刘罕奇, 王婷婷, 冯瑶, 等. 气候变化和水库运行对长江流域水文情势的影响预估[J]. 地理学报, 2025, 80 (1): 41-60.  
LIU Hanqi, WANG Tingting, FENG Yao, et al. Projection of the impact of climate change and reservoir on the flow regime in the Yangtze River basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2025, 80 (1): 41-60.
- [64] 王方方, 鲍正风, 许浩. 气候变化对三峡水库运行调度的影响及对策研究[J]. 水电与新能源, 2019, 33 (3): 23-27.  
WANG Fangfang, BAO Zhengfeng, XU Hao. Impact of climate change on the operation and dispatching of Three Gorges Reservoir and countermeasures[J]. Hydropower and New Energy, 2019, 33 (3): 23-27.
- [65] 舒卫民, 李秋平, 王汉涛, 等. 气候变化及人类活动对三峡水库入库径流特性影响分析[J]. 水力发电, 2016, 42 (11): 29-33.  
SHU Weimin, LI Qiuping, WANG Hantao, et al. Impact analysis of climatic changes and human activities on characteristics of inflow runoff of three gorges reservoir[J]. Water Power, 2016, 42 (11): 29-33.
- [66] 张建敏, 黄朝迎, 吴金栋. 气候变化对三峡水库运行风险的影响[J]. 地理学报, 2000, 55(S1): 26-33.  
ZHANG Jianmin, HUANG Chaoying, WU Jindong. Impacts of climate change on risk in running of the Three Gorges Reservoir[J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(S1): 26-33.
- [67] 邹逸凡, 宋晓猛, 马梓策. 长江流域干旱—热浪复合事件的历史演变及未来预估[J]. 地理科学进展, 2024, 43 (11): 2242-2257.  
ZOU Yifan, SONG Xiaomeng, MA Zice. Historical changes and future prediction of compound drought and heatwave events in the Yangtze River Basin[J]. Progress in Geography, 2024, 43 (11): 2242-2257.
- [68] 何中政, 辛秀钰, 魏博文, 等. 基于 SPADE 算法的梯级水库群联合防洪优化调度[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(4): 651-660.  
HE Z Z, XIN Y X, WEI B W, et al. Optimal operation of joint flood control for cascade reservoirs based on SPADE algorithm[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(4): 651-660.
- [69] 姚仕明, 何子灿. 长江中下游江湖演变规律及其影响效应[J]. 长江科学院院报, 2025, 42 (1): 1-10.  
YAO Shiming, HE Zican. River and lake evolution of the middle and lower Yangtze River Basin and its impacts[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2025, 42 (1): 1-10.
- [70] 许全喜, 金中武. 长江中下游干流河道安全分析与对策探讨[J]. 中国水利, 2024(22): 66-73.  
XU Quanxi, JIN Zhongwu. Safety of river courses of middle and lower mainstreams of the Yangtze River and measure study[J]. China Water Resources, 2024(22): 66-73.
- [71] 任骁军. 数字孪生三峡建设与展望[J]. 水利发展研究, 2024, 24 (9): 9-15.  
REN Xiaojun. Digital twin-based Three Gorges development and its prospect[J]. Water Resources Development Research, 2024, 24 (9): 9-15.

(责任编辑 王海锋)