文章编号：2097-096X(2026)02-0109-11

流域产汇流及洪水预报模型(Sky-RyCF)软件平台研发与应用

周祖昊，王　坤，贾仰文，刘昌军，刘佳嘉，王　超，杨明祥，刘　慧，翟家齐
(中国水利水电科学研究院 流域水循环与水安全全国重点实验室，北京　100038)

摘要：为支撑数字孪生流域建设与智慧水利发展，针对当前水文模型物理机制薄弱、功能单一、适应性不足及多模型松散耦合效率低等问题，本研究基于中国水利水电科学研究院自主研发的模型体系，研发了集成气象预报-流域产汇流-洪水预报-水库调度全链条、通用化的流域产汇流及洪水预报模型软件平台(Runoff Yield and Concentration in Watersheds and Flood Forecast Model，Sky-RyCF)。该软件以“自然-社会”二元水循环理论为主线，通过标准化接口深度融合了数值气象预报、分布式产汇流、时空变源产流、一二维水动力洪水演进、社会水循环及多目标调度等核心模块，构建了支持多模型耦合集成与可视化建模的一体化平台。应用结果表明：在永定河“23·7”特大洪水复盘模拟中，卢沟桥洪峰预报值4540 m^3/s(实测4650 m^3/s)，泛区淹没面积模拟误差≤2.0%；在松花江流域水资源评估中，主要水文站月径流模拟Nash效率系数均大于0.7，定量揭示了水资源演变规律。该模型具有物理机制强、功能完备、智能通用等特点，实现了水循环多过程的精细化模拟与业务化应用，为水利“四预”(预报、预警、预演、预案)工作和智慧水利业务提供了核心技术支撑。

关键词：流域产汇流；洪水预报；二元水循环；模型耦合；数字孪生流域
中图分类号：TV122　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.3724/j.jiwhr.20250183

1　研究背景

水文模型作为模拟水循环过程的基础工具，是构建数字孪生流域的“核心引擎”，在实现水资源管理、洪水预报模拟与“四预”(预报、预警、预演、预案)功能中具有不可替代的作用[1]。从模型软件发展历程来看，早期水文模型多侧重于单一环节模拟，虽在产汇流模拟方面较为成熟，但整体功能相对独立，难以支撑从降雨预报到调度决策的全链条业务需求[2-3]。随着模拟需求的提升与计算机技术的发展，多过程多模块耦合已成为重要趋势[4]。例如，SWAT与HEC-RAS的耦合、MIKE系列软件的联合使用等，显著提高了洪水演进过程的模拟精度[5-6]。然而，现有耦合多采用松散对接方式，模型间数据传递效率较低，且缺乏统一的参数化体系[7]。尤其在水库调度与洪水预报的协同模拟中，调度模块常作为独立组件运行，与气象预报、产汇流、洪水演进等环节之间缺乏高效动态交互[8]。

在平台化建设方面，国内外已开展一系列有益探索。国际上，美国NOAA的National Water Model实现了全国高分辨率水情预报但对人类活动影响下的社会水循环过程耦合较弱[9]；欧盟的EFAS集成了多源预报模型但侧重于跨国洪水预警[10]；荷兰的Delft-FEWS作为开放性集成框架，需用户自行配置核心模型，均非全链条打通的一体化产品[11]。在国内，数字孪生飞云江流域初步实现了水文、水动力与工程调度模型的集成[12]；流溪河模型云服务平台尝试基于云服务的模型运行模式[13]。尽管如此，现有平台仍存在以下主要问题：(1)模型集成度不足，从降水预报、产汇

收稿日期：2025-08-06；网络首发时间：2026-02-13
网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/10.1788.TV.20260212.1557.001
基金项目：水利部重大科技项目(SKR-2022056)；国家重大研发计划项目(2024YFF1306303，2016YFC0402405)；国家科技重大专项(2025ZD1208303)；国家自然科学基金黄河水科学研究联合基金项目(U2243601)
作者简介：周祖昊(1975—)，正高级工程师，主要从事流域水循环及伴生过程模拟与调控研究。E-mail：zhzh@iwhr.com
通信作者：王坤(1986—)，高级工程师，主要从事流域水循环及伴生过程模拟与调控研究。E-mail：wangkun@iwhr.com

流、洪水演进到调度决策的模拟链条尚未打通；(2)缺乏全国统一的参数库体系，难以支持无资料地区的模型构建与应用[14]；(3)现有软件多面向特定流域类型开发，缺乏适应全国不同气候和下垫面条件的通用化框架[15-16]；(4)对国产模型的支撑不足，多数平台仍依赖国外商业软件核心算法[17-18]。

为应对上述挑战，流域水文模型软件正朝着系统化、集成化与平台化方向发展。本研究基于中国水利水电科学研究院自主研发的水利专业模型体系，集成气象预报-流域产汇流-洪水预报-水库调度全链条模拟技术，研发“中国水科院流域产汇流与洪水预报模型”(Sky-RyCF)软件平台，旨在实现多过程全流程一体化模拟，并选取典型流域开展洪水预报调度与水资源管理两类典型业务场景的验证，为智慧水利建设提供技术支撑。

2　模型软件研发

2.1　研发思路　本研究以“自然-社会”二元水循环过程为主线，按照水循环的大气过程、产流过程、汇流过程、洪水演进过程、取用水过程和调度过程等6大环节，对中国水科院自主研发的数值气象模型[19]、WEP模型[20]、WACM模型[21]、时空变源混合产流模型[22]、水动力模型[23]、EasyDHM模型[24]等开展标准化改造与集成，构建形成流域产汇流及洪水预报模型软件平台。

该平台由数据层、模块层、软件层、模型平台层和业务应用层等构成，总体框架如图1所示。数据层负责多源数据的统一清洗、标准化存储与管理，保障数据质量与一致性；模块层集成气象预报、产汇流计算、河道演进、社会水循环模拟及水库调度等核心算法模块；软件层提供模型数据管理、预报方案管理、模型参数率定与模型运行管理等系统功能；模型平台层支持本模型与水利部水利专业模型库的对接与集成；业务应用层面向水资源管理与旱涝灾害防御等水利业务提供模拟与决策支持。通过统一建模标准、数据规范与接口协议，实现各模型的高效耦合。结合模型耦合集成、参数自动率定、预报修正技术，提升模型在复杂流域的适用性与计算效率。

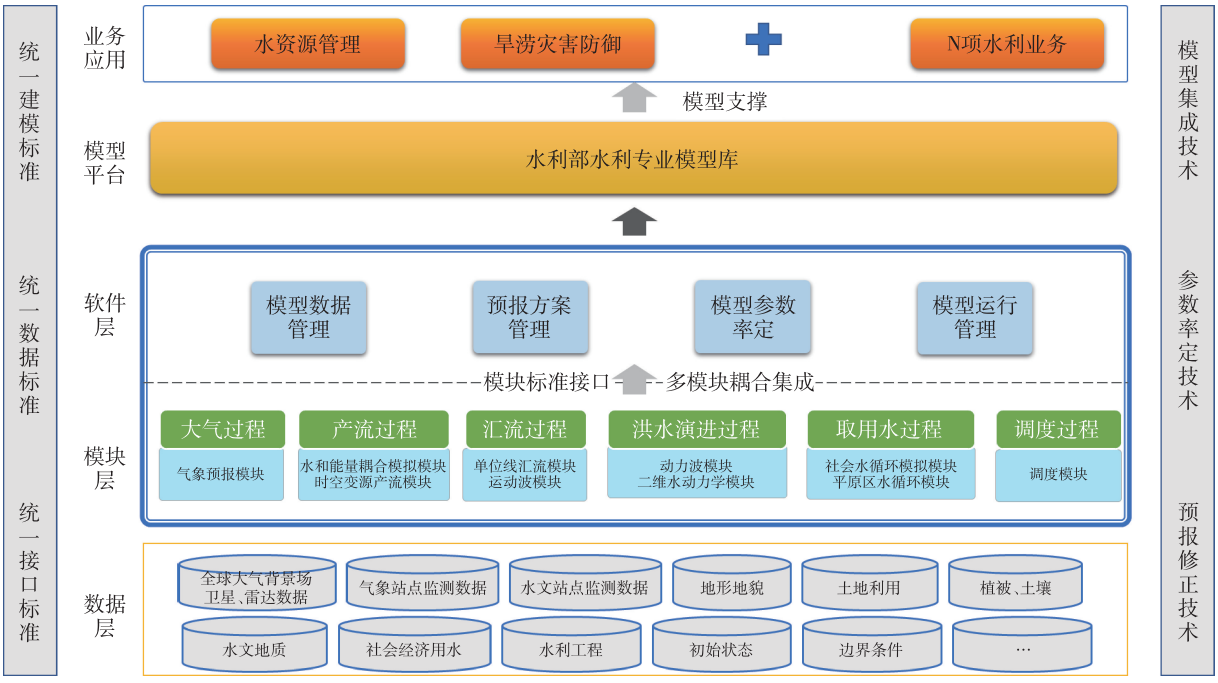


图1　总体架构

Fig. 1　Overall architecture

2.2　平台界面　基于上述架构，研发了流域产汇流及洪水预报模型平台，具备总览、数据管理、模型管理、场景管理和结果展示5大功能板块(如图2所示)。



图2　平台总览功能界面

Fig. 2　Functional interface of the overview module

总览模块展示气象预报、产汇流模拟、洪水预报、河道演进及水库调度等5大类9项水利专业模型，并提供松花江、淮河等5大示范区的流域特征(面积、子流域数量、干流长度、坡度等)及水雨情监测站点信息。

数据管理模块集成多源数据，支持流域边界、行政区划、水资源分区、河流水系、水利工程与监测站点等基础信息的统一管理与可视化查询。

模型管理模块提供图形化建模界面，支持用户灵活配置数据输入与核心算法模块；模型运行阶段采用分布式计算与GPU加速技术，实现大规模流域的高性能模拟计算；平台还提供参数自动率定与版本管理功能，保障模型持续优化与可追溯。

场景管理模块提供洪水预报与水资源管理两类核心业务场景，支持用户设定模拟时段、来水条件与调度策略等参数。洪水预报场景支持72 h洪水演进模拟，水资源管理场景包括气候变化、水利工程、水保工程、水资源规划、生态流量保障等多场景多方案的模拟推演和评价分析。

结果展示模块提供多维结果展示功能，包括基于WebGIS的空间分布展示(如洪水淹没范围、流速场)、基于过程线的时间动态分析，以及多方案统计对比等。平台还开发了洪水动态演进动画功能，辅助用户直观掌握洪水发展过程，提升决策效率。

3　主要功能及改进

该平台面向“气象预报-产汇流模拟-洪水推演-取用水模拟-调度决策”全链条业务需求，对中国水科院自主研发的系列模型进行了深度集成与标准化改造，形成了以下核心功能模块。

3.1　大气过程模拟模块　提出了一种基于深度学习的建模框架，用于长达30 d的交付周期的次季节联合降水和径流集合预报，对于强降水事件的RMSE比原始欧洲中期预报中心(ECMWF)预测和分位数映射(QM)低约6%和10%[25]。在深度学习方面，集成GraphCast等开源大模型，建立了全球中短期天气预报系统，实现未来10 d地面2 m气温、降水量、风场等要素的精细化预报。针对次季节尺度预报不确定性大

的难题，本研究采用基于残差连接的卷积神经网络（CNN）对ECMWF集合预报进行统计降尺度，显著提升了降水预报精度，实现了高精度的次季节径流集合预报[25-26]。

3.2 产汇流过程模拟模块 耦合WEP[20]、WACM[21]及时空变源混合产流模型[27]，以适应全国不同气候与下垫面条件。针对大尺度流域内山区-平原区地貌差异，开发了混合子流域与网格的计算单元划分方法，在地形变化剧烈的山区采用子流域单元，在平原区采用规则网格单元，有效平衡了模拟精度与计算效率[28]。针对湖泊[29]与封闭内流区[30]，提出了保持其范围完整性与独立性的子流域划分与编码方法，为精确的水量平衡分析奠定了基础。在模型算法上，引入融合WACM与LSTM的机器学习算法，实现了径流模拟精度与效率的二次提升[31]。基于全国DEM与河网数据，构建了水文站位置自动校准算法[32]。构建了全国分布式水文参数集，支撑了不同流域的水循环模拟需求。

3.3 洪水演进模拟模块 集成一维与二维水动力模型，模拟复杂地形下的洪水演进与淹没过程。针对传统水动力学模型计算效率低的瓶颈，采用GPU并行计算技术对模型核心算法进行加速，在大尺度流域模拟中取得了3.5倍的加速比，实现了超大规模水文水动力模型的分钟级模拟[33]。采用改进的有限体积法，建立了一体化的一维河网管网模型，提升了模型的数值稳定性[34]。针对山洪灾害，基于中国山洪水文模型（CNFF）[35]和分布式时空变源模型[36]，实现了小流域防灾对象预警指标的实时动态分析，有效延长了预警预见期。

3.4 取用水过程模拟模块 基于“自然-社会”二元水循环理论，详细模拟了人类取用水活动对流域水循环的干扰。空间上，依据农业、工业、生活等不同用户的空间分布及取水水源特点，将行政区单元年用水量展布至模型计算单元[37]。时间上，根据用水特性将年用水量插值至日或旬尺度，其中农业用水综合考虑种植结构、灌溉制度与气象资料计算旬分配系数，工业和生活用水按日平均分配[37]。该模块为量化社会水循环对自然水循环的影响提供了关键工具。

3.5 调度过程模拟模块 针对传统优化算法易陷入局部最优、难以协调多目标等问题，研发了基于堆叠学习与自适应权重的改进强化学习算法（SQMOGA），显著提升了生态、供水与发电等多目标的综合调度效益[38]；融合模拟退火算法，有效提高了水库削峰率和降低了最高调洪水位[39]；引入SCIP、CPLEX等高效优化求解器，实现了大规模调度模型的快速精准求解[40]。在业务应用层面，模块耦合防洪调度规则与二维水动力模型，实现了永定河等流域工程体系的动态联合调度与精准模拟[41-42]，并在飞云江等流域实现了洪水预报信息与水库群调度的深度耦合[43]，为防洪“四预”与生态流量保障提供了核心决策支持。

4 应用案例与特色优势

基于气象预报、产汇流模拟、洪水预报、水动力模拟及水库调度等模型模块协同配合，本软件平台可以开展流域防洪和水资源管理与调配等业务场景应用。以永定河流域和松花江流域为例，介绍洪水预报调度模拟和水资源管理方面的应用情况。

4.1 永定河流域洪水预报调度模拟 永定河作为海河流域重要水系之一，其防洪调度事关北京、天津等重要城市，以及北京大兴国际机场等重要基础设施安全。永定河防洪工程布局为贯彻“上蓄、中疏、下排、适当地滞”的治理方针，形成了由官厅水库1座大型水库，大宁、滞洪水库2座中型水库，三家店拦河闸、卢沟桥、屈家店3处枢纽，小清河、永定河、三角淀3处蓄滞洪区组成的防洪工程体系。2023年7月受台风“杜苏芮”影响，流域遭遇历史罕见暴雨，面雨量达155.3 mm，引发特大洪水。

基于本平台对此次洪水进行全流程复盘模拟。首先基于数据管理功能调用永定河流域基础数据，包括河道地形数据、98处堤防空间数据和126个水文站拓扑关系，整合京津冀雷达降水与ECMWF预报数据生成面雨量，并关联官厅水库实时入库流量等关键水文信息。其次，通过模型管理功能实现洪水预报调度模型构建和场景推演，基于机器学习算法同化多源数据驱动产流计算，通过GPU加速的一

二维耦合水动力学模型模拟洪水淹没情况，评估不同水库调度方案影响，并通过场景管理模块配置关键期洪水演进场景，实时修正参数并对比不同调度策略的淹没效果。最后，基于结果展示功能，通过三维 WebGIS 动态展示淹没范围、关键水文站水位流量结果，对比历史洪水过程线，生成调度方案并进行评估。

模拟结果显示：①雁翅站峰现时间、洪峰、洪量的误差均在《水文情报预报规范》（GB/T 22482—2021）的许可误差范围内；②卢沟桥以下关键断面洪水水头到达时间、峰现时间误差均在 4 h 以内；③泛区淹没范围（总淹没面积 259 km^2）与现场调研结果基本一致，泛区最大蓄滞水量 2.61 亿 m^3 与实测 2.56 亿 m^3 相比误差为 2.0%。

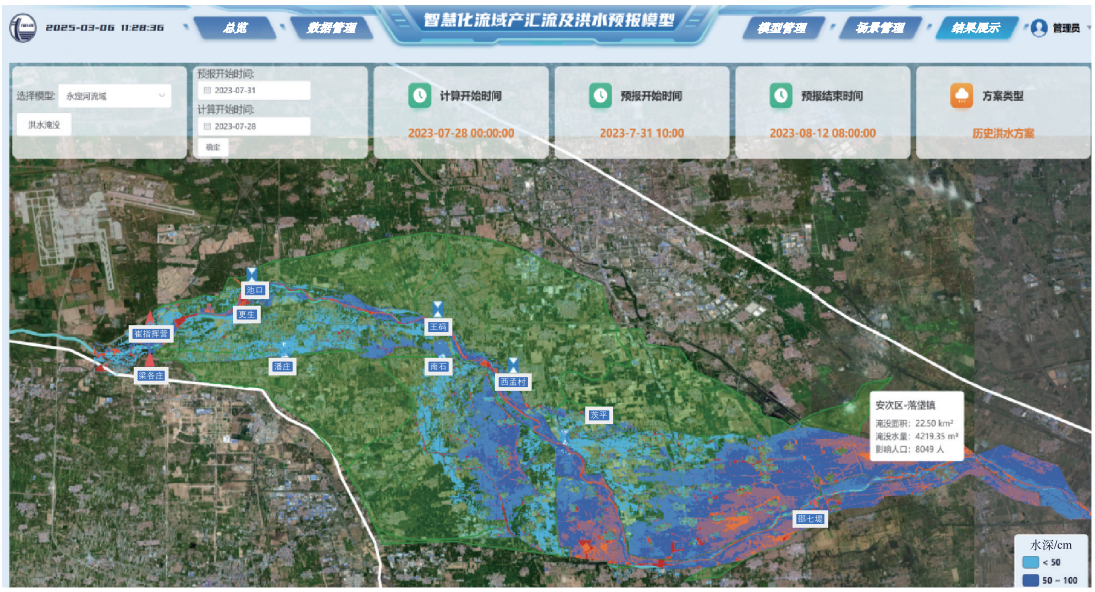


图 3　永定河泛区最大淹没情况

Fig. 3　Maximum inundation extent in the floodplain of Yongding River

4.2　松花江流域水资源评价　松花江是黑龙江的重要支流，地处中国东北寒区，北源为大兴安岭伊勒呼里山，南源为长白山天池，是我国重要的工业基地和农牧业生产基地，随着经济社会发展，流域水污染、水资源短缺、生态系统退化等问题越来越突出。松花江流域水资源量动态评价是流域水资源管理的基础，基于本软件平台对松花江流域历史水资源量进行了动态评价。首先基于数据管理功能调用松花江流域基础数据，包括地形、土地利用、土壤类型等数据，并进行标准化处理。其次，通过模型管理功能调用分布式产流模块、汇流模块、社会水循环模拟模块和水库调度模块等模块实现水资源评价模型构建、参数率定和场景推演，模拟评价松花江流域水循环过程及水资源量。最后，基于结果展示功能，对松花江流域不同尺度单元水资源量的时间变化和空间分布结果进行展示。

模拟结果显示：1956—2018 年主要水文站月流量过程 Nash-Sutcliffe 效率系数均在 0.7 以上，相对误差均在 6% 以内，模型模拟效果总体上较好；松花江流域 1956—2018 年多年平均地表水资源量、地下水资源量和总水资源量分别为 739.6 亿 m^3、218.0 亿 m^3 和 880.7 亿 m^3；水资源总量整体呈不显著减少的趋势，变化率分别为 −4.3 亿 m^3/10a、−2.3 亿 m^3/10a 和 −7.7 亿 m^3/10a，且在 0.05 显著性水平下具有突变，突变年份为 1998 年。

4.3　模型优势分析　在永定河、松花江等典型流域的应用实践中，Sky-RyCF 模型展现出区别于传统模型的显著特色与优势，其核心价值在于实现了多维度技术突破与业务应用效能的高度统一。

（1）物理机制完备，二元过程耦合紧密。基于严格的物理定律构建，模型充分融入了水循环过程的物理机制。在自然水循环方面，通过耦合能量和冻土过程，精细刻画了松花江流域等寒区的能量平衡与土壤冻融机制[44-45]；通过耦合水-热-氮多过程，定量揭示了气候变化对松花江流域水质演变的影



图4　松花江流域水资源评价模型构建数据

Fig. 4　Construction data of water resources evaluation model in Songhua River Basin

响[46]。在社会水循环方面，通过内置的取用水模块[37]与调度模块[47-48]，实现了对水资源开采、利用及水利工程调控作用的全过程模拟，形成了真正意义上的“自然-社会”二元水循环耦合模拟。

(2)功能集成度高，业务链条全线贯通。模型突破了传统模型功能单一的局限，将气象预报、产汇流、洪水演进及水库调度等多个专业模型集成于统一平台。其中，大气模块提供驱动数据[25]；产汇流模块依托WEP、WACM等模型实现流域产流与河道汇流[20-21, 36]；洪水演进模块通过GPU加速的一二维水动力模型提供精细化的淹没与流场信息[49]；水库调度模块基于智能算法实现多目标优化决策[48]。这种“全链条一体化”的集成模式，打通了从降水预报到调度决策的完整业务链条，为典型地区的数字孪生流域的“四预”功能提供了核心引擎[34, 50]。

(3)智能通用性强，建模模拟高效便捷。模型深度融合了多种信息处理技术与人工智能算法，显著提升了其易用性与适用性。在建模方面，研发的自动水文站位置校正算法[32]和计算单元划分方法[28-30]为快速构建精准的数字流域底板提供了工具。在参数率定方面，采用了基于优选伸缩比的SCE-UA算法[49]、动态径流系数法[51]、参数分类优化方法[52]及多目标自动校准模型[53]，有效提升了率定效率并缓解了“异参同效”问题。在计算性能上，通过GPU并行计算技术[33, 50, 54]对产汇流、洪水演进等计算密集型模块进行加速，实现了大尺度流域的高性能模拟。此外，构建了全国通用化参数库，进一步增强了模型在无/缺资料地区的推广应用潜力[52]。

5　结论与展望

面向智慧水利建设的重大需求，本研究以“自然-社会”二元水循环过程为主线，研发了流域产汇流及洪水预报模型软件平台，在永定河和松花江等流域进行了验证和应用。主要结论如下：

(1)通过统一架构与标准化接口，实现了气象预报、产汇流模拟、洪水演进及水库调度等模块的耦合集成，构建了全链条一体化的模型平台，解决了传统模型功能分散、耦合度低的问题，形成了从降水输入到调度决策的完整模拟链条。

(2)典型流域应用表明该模型平台具备良好的模拟能力。在永定河“23·7”洪水复盘模拟中，雁翅站峰现时间、洪峰、洪量误差均符合规范许可；松花江流域1956—2018年主要水文站月径流模拟Nash效率系数均大于0.7，相对误差均在6%以内。

(3)通过引入深度学习降水预报、GPU并行加速计算及参数自动率定等方法，提升了模型的运算效率。平台内置的全国参数库与图形化建模工具，有助于在无资料或缺资料地区推广应用，为智慧水利“四预”业务提供了技术支撑。

未来可进一步将Sky-RyCF平台与大语言模型及智能体技术深度融合，探索构建具备自主推理能力的“水利专业智能体”。通过自然语言交互实现复杂模型的敏捷构建与方案推演，提升人机协同决策水平，进一步推动数字孪生流域向认知智能与智慧决策方向演进。

致谢：蒋云钟、蔡思宇、董宁澎、翟明硕、阚光远、董志强、顾成杰等参与了模型平台的原型设计、模型升级、数据整理、模型调试和平台开发测试等工作，在此一并表示感谢。

参 考 文 献：

[1] 黄艳. 数字孪生长江建设关键技术与试点初探[J]. 中国防汛抗旱，2022，32(2)：16-26.（HUANG Yan. Study on key technology and pilot of digital twin Yangtze River construction[J]. China Flood & Drought Management，2022，32(2)：16-26.（in Chinese））

[2] 李峰，胡铁松，黄华金. SWAT模型的原理、结构及其应用研究[J]. 中国农村水利水电，2008(3)：24-28.（LI Feng，HU Tiesong，HUANG Huajin. Research on the principle，structure and application of SWAT model[J]. China Rural Water and Hydropower，2008(3)：24-28.（in Chinese））

[3] 雍斌，张万昌，赵登忠，等. HEC-HMS水文模型系统在汉江褒河流域的应用研究[J]. 水土保持通报，2006，26(3)：86-90.（YONG Bin，ZHANG Wanchang，ZHAO Dengzhong，et al. Application of hydrological modeling system HEC-HMS to Baohe catchment of Hanjiang basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2006，26(3)：86-90.（in Chinese））

[4] 刘昌军，文磊，周剑，等. 小流域暴雨山洪水文模型与水动力学方法计算比较分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报，2019，17(4)：262-270.（LIU Changjun，WEN Lei，ZHOU Jian，et al. Multi-scale soil moisture product verification analysis based on ground monitoring and remote sensing[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research，2019，17(4)：262-270.（in Chinese））

[5] 穆聪，李家科，邓朝显，等. MIKE模型在城市及流域水文——环境模拟中的应用进展[J]. 水资源与水工程学报，2019，30(2)：71-80.（MU Cong，LI Jiake，DENG Chaoxian，et al. Application of MIKE model in urban and basin hydrological-environmental simulation[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering，2019，30(2)：71-80.（in Chinese））

[6] 夏铭辉，尹世洋. 基于SWMM耦合HEC-RAS的人工建设水网防洪排涝模拟研究[J]. 人民珠江，2024，45(6)：30-38.（XIA Minghui，YIN Shiyang. Research on flood control and drainage simulation of artificial water networks based on SWMM coupled with HEC-RAS[J]. Pearl River，2024，45(6)：30-38.（in Chinese））

[7] 张婷，徐彬鑫，康爱卿，等. 流域水文、水动力、水质模型联合应用研究进展[J]. 水利水电科技进展，2021，41(3)：11-19.（ZHANG Ting，XU Binxin，KANG Aiqing，et al. Advances in joint application of hydrology，hydrodynamics and water environment models in river basins[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources，2021，41(3)：11-19.（in Chinese））

[8] ZANG Shuaihong，LI Zhijia，ZHANG Ke，et al. Improving the flood prediction capability of the Xin'anjiang model by formulating a new physics-based routing framework and a key routing parameter estimation method[J]. Journal of Hydrology，2021，603(PA)：126867.

[9] COSGROVE B，GOCHIS D，FLOWERS T，et al. NOAA's National Water Model：Advancing operational hydrology through continental-scale modeling[J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association，2024，60(2)：247-272.

[10] THIELEN J，BARTHOLMES J，RAMOSM H，et al. The european flood alert system-part 1：concept and development[J]. Hydrology and Earth System Sciences，2009，13(98)：125-140.

[11] ENAYET C，SAIFUL I，MATTHIJS L，et al. An efficient flash flood forecasting system for the un-gaged Meghna basin using open source platform Delft-FEWS[J]. Environmental Modelling and Software，2023，161：105614.

[12] 任明磊，赵丽平，陈智洋，等. 面向防洪“四预”的数字孪生流域水利专业模型研发与实践应用——以数字孪生飞云江流域为例[J]. 中国水利，2024(5)：58-64.（REN Minglei，ZHAO Liping，CHEN Zhiyang，et al. Development and application of digital twin watershed water resources professional model for flood control “four pres”——taking the digital twin Feiyun River basin as an example[J]. China Water，2024(5)：58-64.（in Chinese））

[13] 陈洋波，任启伟，徐会军，等. 流溪河模型Ⅰ：原理与方法[J]. 中山大学学报(自然科学版)，2010，49(1)：107-112.(CHEN Yangbo，REN Qiwei，XU Huijun，et al. Liuxihe mode I：theory and methods[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis SunYatseni，2010，49(1)：107-112.(in Chinese))

[14] 刘志雨，侯爱中，王秀庆. 基于分布式水文模型的中小河流洪水预报技术[J]. 水文，2015，35(1)：1-6.(LIU Zhiyu，HOU Aizhong，WANG Xiuqing. Flood forecasting for small- and medium-sized rivers based on distributed hydrological modeling[J]. Journal of China Hydrology，2015，35(1)：1-6.(in Chinese))

[15] 杨丽，王威. 不同分布式水文模型在大凌河中游对比运用研究[J]. 地下水，2016，38(1)：117-118.(YANG Li，WANG Wei. Comparative application of different distributed hydrological models in the middle reaches of Daling River[J]. Ground Water，2016，38(1)：117-118.(in Chinese))

[16] 郑捷，李光永，韩振中，等. 改进的SWAT模型在平原灌区的应用[J]. 水利学报，2011，42(1)：88-97.(ZHENG Jie，LI Guangyong，HAN Zhenzhong，et al. Application of modified SWAT model in plain irrigation district[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2011，42(1)：88-97.(in Chinese))

[17] 袁旭，陆颖，赵著燕，等. 国内MIKE SHE水文模型研究与应用综述[J]. 水利科技与经济，2018，24(1)：13-17.(YUAN Xu，LU Ying，ZHAO Zhuyan，et al. A review of research and applications of MIKE SHE model in China[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy，2018，24(1)：13-17.(in Chinese))

[18] 张海嘉，刘家宏，梅超，等. 基于容器技术的水文水动力模型软硬件适配方法[J]. 计算机应用研究，2024，41(1)：188-192.(ZHANG Haijia，LIU Jiahong，MEI Chao，et al. Software and hardware adaptation method of hydrodynamic model Based on container technologies[J]. Application Research of Computer，2024，41(1)：188-192.(in Chinese))

[19] 杨明祥，雷晓辉，蒋云钟，等. 青狮潭水库降水集合预报模式构建及应用[J]. 水利学报，2018，49(2)：263-270.(YANG Mingxiang，LEI Xiaohui，JIANG Yunzhong，et al. Construction and application of precipitation ensemble forecast model for Qingshitan Reservoir[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2018，49(2)：263-270.(in Chinese))

[20] ZHOU Zuhao，JIA Yangwen，QIU Yaqin，et al. Simulation of dualistic hydrological processes affected by intensive human activities based on distributed hydrological model[J]. Journal of Water Resources Planning and Management，2018，144(12)：4018071-4018077.

[21] 赵勇，陆垂裕，肖伟华. 广义水资源合理配置研究(Ⅱ)——模型[J]. 水利学报，2007，38(2)：163-170.(ZHAO Yong，LU Chuiyu，XIAO Weihua. Study on rational deployment of generalized water resources Ⅱ-model[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2007，38(2)：163-170.(in Chinese))

[22] 马强，王莹，魏琳，等. 基于分布式模型的流域洪水时空特征分析方法[J]. 水科学进展，2024，35(5)：726-737.(MA Qiang，WANG Ying，WEI Lin，et al. A modelling-based assessment approach of basin flood spatiotemporal characteristics[J]. Advances in Water Science，2024，35(5)：726-737.(in Chinese))

[23] DONG Zhiqiang，HU Hongchang，LIU Hui，et al. Superior performance of hybrid model in ungauged basins for real-time hourly water level forecasting – A case study on the Lancang-Mekong mainstream[J]. Journal of Hydrology，2024，633：130941.

[24] 雷晓辉，廖卫红，蒋云钟，等. 分布式水文模型EasyDHM(Ⅰ)：理论方法[J]. 水利学报，2010，41(7)：786-794.(LEI Xiaohui，LIAO Weihong，JIANG Yunzhong，et al. Distributed hydrological model EasyDHM Ⅰ：Theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2010，41(7)：786-794.(in Chinese))

[25] DONG Ningpeng，HAO Haoran，YANG Mingxiang，et al. Deep-learning-based sub-seasonal precipitation and streamflow ensemble forecasting over the source region of the Yangtze River[J]. Hydrology and Earth System Sciences，2025，29(8)：2023-2042.

[26] LI Chenliang，JIAO Ying，KAN Guangyuan，et al. Comparisons of different machine learning-based rainfall – runoff simulations under changing environments[J]. Water，2024，16(2)：302.

[27] 刘业森，刘媛媛，刘舒，等. 城市地区场次降雨时空展布方法研究[J]. 中国防汛抗旱，2024，34(6)：18-25.(LIU Yesen，LIU Yuanyuan，LIU Shu，et al. Study on spatial-temporal feature extraction of rainstorm in urban areas[J]. China Flood and Drought Management，2024，34(6)：18-25.(in Chinese))

[28] 关铜垒，刘佳嘉，周祖昊，等. 考虑山区-平原区的分布式水文模型计算单元划分方法研究[J]. 水文，2022，42(5)：7-13.(GUAN Tonglei，LIU Jiajia，ZHOU Zuhao，et al. Research on the division method of calcu-

lation unit considering hill-plain area to distributed hydrological model[J]. Journal of China Hydrology, 2022, 42(5): 7-13. (in Chinese))

[29] 关铜垒，刘佳嘉，周祖昊，等. 考虑湖泊范围的子流域划分和编码方法研究[J]. 人民黄河，2023，45(6)：43-47.（GUAN Tonglei，LIU Jiajia，ZHOU Zuhao，et al. Study on sub-watershed division and coding method considering lake extent[J]. Yellow River，2023，45(6)：43-47.（in Chinese））

[30] 关铜垒，刘佳嘉，周祖昊，等. 封闭内流区域的子流域划分方法研究[J]. 水电能源科学，2022，40(10)：19-21.（GUAN Tonglei，LIU Jiajia，ZHOU Zuhao，et al. Study on sub-watershed division of closed inner flow area[J]. Water Resources and Power，2022，40(10)：19-21.（in Chinese））

[31] HAN Shuying，ZHAI Jiaqi，MA Mengyang，et al. A study on the differences in vegetation phenological characteristics and their effects on water - carbon coupling in the Huang-Huai-Hai and Yangtze River Basins，China[J]. Sustainability，2024，16(14)：6245.

[32] WANG Kun，YAN Denghua，ZHOU Zuhao，et al. A new Automatic Hydrological Station Relocation Algorithm (ASRA) for moving hydrological stations onto a simulated digital river network[J]. Water Resources Research，2024，60(5)：e2023WR034567.

[33] 庞超，周祖昊，刘佳嘉，等. 基于GPU加速的分布式水文模型并行计算性能[J]. 南水北调与水利科技(中英文)，2024，22(1)：33-38.（PANG Chao，ZHOU Zuhao，LIU Jiajia，et al. Parallel computing performance of distributed hydrological model accelerated by GPU[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology，2024，22(1)：33-38.（in Chinese））

[34] 刘昌军，刘业森，喻海军，等. 水利模型平台构建及南四湖水系应用探索[J]. 中国水利，2023(20)：43-48.（LIU Changjun，LIU Yesen，YU Haijun，et al. Construction of water conservancy model platform and application exploration of Nansi Lake water system[J]. China water，2023(20)：43-48.（in Chinese））

[35] 程东，刘荣华，翟晓燕，等. 基于中国山洪水文模型的山洪灾害预警指标实时动态分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文)，2023，21(5)：444-454.（CHENG Dong，LIU Ronghua，ZHAI Xiaoyan，et al. Real-time dynamic analysis of flash flood warning indicators based on China Flash Flood Hydrological Model[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research，2023，21(5)：444-454.（in Chinese））

[36] 刘昌军，文磊，周剑，等. 小流域暴雨山洪水文模型与水动力学方法计算比较分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报，2019，17(4)：262-270.（LIU Changjun，WEN Lei，ZHOU Jian，et al. Comparative analysis of hydrological and hydrodynamic calculation method for flash flood in small watershed[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research，2019，17(4)：262-270.（in Chinese））

[37] WANG T，ZHAI J Q，LI H H，et al. A two-stage stochastic water resources planning approach with fuzzy boundary interval based on risk control and balanced development[J]. Water Resources Management，2024，38(3)：835-860.

[38] 雷其鸣，牛庚，桑学锋，等. 基于改进强化学习算法的水库群多目标优化调度[J]. 南水北调与水利科技(中英文)，2025，23(5)：1185-1195.（LEI Qiming，NIU Geng，SANG Xuefeng，et al. Multi-objective optimal scheduling of reservoir group based on improved reinforcement learning algorithm[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology，2025，23(5)：1185-1195.（in Chinese））

[39] 任明磊，张俊彬，宁亚伟，等. 水库防洪优化调度SA-POA算法研究与应用[J]. 中国防汛抗旱，2025，35(3)：4-8.（REN Minglei，ZHANG Junbin，NING Yawei，et al. Research and application of SA-POA algorithm for reservoir flood control optimal operation[J]. China Flood & Drought Management，2025，35(3)：4-8.（in Chinese））

[40] 宁亚伟，任明磊，张俊彬，等. 优化求解器在水库防洪调度中的应用研究[J]. 中国防汛抗旱，2025，35(3)：15-20.（NING Yawei，REN Minglei，ZHANG Junbin，et al. Research on the application of optimization solver in flood operation for reservoirs[J]. China Flood & Drought Management，2025，35(3)：15-20.（in Chinese））

[41] 张运鑫，江泓莹，翟明硕，等. 永定河官厅下游防洪工程体系联合调度[J]. 南水北调与水利科技(中英文)，2025，23(3)：562-571.（ZHANG Yunxin，JIANG Hongying，ZHAI Mingshuo，et al. Joint dispatching of flood control project system downstream of Guanting Reservoir of Yongding River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology，2025，23(3)：562-571.（in Chinese））

[42] 蒋云钟，蔡思宇，王超. 水网格局下流域生态流量保障调度研究——以永定河流域为例[J]. 中国水利，2024

(18)：61-67.(JIANG Yunzhong，CAI Siyu，WANG Chao. Studies on safeguarding ecological flow regulation for river basins under the framework of water networks——taking the Yongding River Basin as an example[J]. China water，2024(18)：61-67.(in Chinese))

[43] 任明磊，张琪，赵丽平，等. 考虑洪水预报信息的水库群防洪联合优化调度研究与应用[J]. 中国防汛抗旱，2025，35(3)：9-14.(REN Minglei，ZHANG Qi，ZHAO Liping，et al. Research and application of joint optimal flood operation of reservoir group considering flood forecast information[J]. China Flood & Drought Management，2025，35(3)：9-14.(in Chinese))

[44] LI Xia，ZHOU Zuhao，LIU Jiajia，et al. Analysis and partitioning of terrestrial water storage in the Yellow River source region[J]. Hydrological Processes，2024，38(2)：e15097.

[45] 李霞，周祖昊，刘佳嘉，等. 基于WEP-QTP的长江源区径流组分变化及驱动机制[J]. 人民长江，2023，54(12)：105-112.(LI Xia，ZHOU Zuhao，LIU Jiajia，et al. Study on change of runoff components and driving mechanism in source region of Changjiang River based on WEP - QTP model[J]. Yangtze River，2023，54(12)：105-112.(in Chinese))

[46] LIU Shuiqing，ZHOU Zuhao，LIU Jiajia，et al. Impact of climate change on water quality evolution in cold regions using a water-heat-nitrogen processes coupled model[J]. Environmental Science and Pollution Research，2024，31(15)：22395-22409.

[47] 胡文才，王秀庆，陈胜，等. 南四湖防洪调度系统建设与应用研究[J]. 中国水利，2023(20)：54-58.(HU Wencai，WANG Xiuqing，CHEN Sheng，et al. Construction of flood control system of the Nansi Lake and practical studies[J]. China water，2023(20)：54-58.(in Chinese))

[48] 刘业森，杜庆顺，李匡，等. 数字孪生南四湖防洪调度模型研究及应用[J]. 中国水利，2023(20)：49-53.(LIU Yesen，DU Qingshun，LI Kuang，et al. Research and application of a numerical model for flood control and dispatching in the Nansi Lake digital twin watershed[J]. China water，2023(20)：49-53.(in Chinese))

[49] 侯宇，阚光远，梁珂. 优选伸缩比SCE-UA算法与新安江模型参数率定研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文)，2024，22(2)：210-218.(HOU Yu，KAN Guangyuan，LIANG Ke. Study on the SCE-UA algorithm combined with optimal scaling factor and parameter calibration of the Xin'anjiang model[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research，2024，22(2)：210-218.(in Chinese))

[50] 刘昌军，吕娟，任明磊，等. 数字孪生淮河流域智慧防洪体系研究与实践[J]. 中国防汛抗旱，2022，32(1)：47-53.(LIU Changjun，LÜ Juan，REN Minglei，et al. Research and application of digital twin intelligent flood prevention system in Huaihe River Basin[J]. China Flood & Drought Management，2022，32(1)：47-53.(in Chinese))

[51] 邵银龙，李晓晨，廖美廷，等. 动态径流系数法和基于城市功能区的SWMM参数率定方法研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文)，2024，22(4)：342-352.(SHAO Yinlong，LI Xiaochen，LIAO Meiting，et al. Calibration method of the Storm Water Management Model based on dynamic runoff coefficients and urban functional areas[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research，2024，22(4)：342-352.(in Chinese))

[52] 周祖昊，刘清燕，韦瑞深，等. 基于RAGA的分布式水文模型参数分类优化方法研究[J]. 水文，2023，43(3)：28-33.(ZHOU Zuhao，LIU Qingyan，WEI Ruishen，et al. Research on parameter classification and optimization method of distributed hydrological model based on RAGA[J]. Journal of China Hydrology，2023，43(3)：28-33.(in Chinese))

[53] WANG Tao，ZHANG Longlong，ZHAI Jiaqi，et al. Automatic calibration of SWMM parameters based on multi-objective optimisation model[J]. Journal of Hydroinformatics，2024，26(3)：683-706.

[54] 张大伟，冯新政，林文青，等. 国内外不同GPU用于洪水模拟时加速性能对比分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文)，2024，22(5)：530-538.(ZHANG Dawei，FENG Xinzheng，LIN Wenqing，et al. Comparison of acceleration performance of different graphic processing units used in flood simulation at home and abroad[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research，2024，22(5)：530-538.(in Chinese))

(下转第133页)