

水文多模型拆分组配与协同优化研究进展

申笑萱^{1,2}, 张珂^{1,2,3,4,5,6}, 张兆安^{1,2}, 刘杰^{1,2}, 李致家²

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 4. 中国气象局水文气象重点开放实验室, 江苏 南京 210098;
5. 水利部水利大数据重点实验室, 江苏 南京 210098; 6. 水利部水循环与水动力系统重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:水文模型拆分组配与协同优化是水文建模有效的技术手段。基于文献聚类分析, 结合文献计量数据与聚类结果, 对水文模型的模块拆分、组合及优化方法进行了评述, 总结了水文模型模块化设计、框架模型构建及多模型间误差传递等方面的关键研究进展, 展望了水文多模型灵活组配与协同优化的研究方向。指出传统水文模型的构建方法通常缺乏必要的灵活性和可移植性, 模块化设计的理念和机器学习等前沿技术的融合为水文模型的未来发展开辟了广阔的视野, 这将为应对现代水文学面临的复杂挑战提供有力工具。

关键词:水文模型; 模块化; 灵活架构; 机器学习; 模型优化

中图分类号: P338 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004 - 6933(2025)04 - 0189 - 08

Research progress on hydrological multi-model decomposition allocation and collaborative optimization// SHEN Xiaoxuan^{1,2}, ZHANG Ke^{1,2,3,4,5,6}, ZHANG Zhaoan^{1,2}, LIU Jie^{1,2}, LI Zhijia² (1. *State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 4. *Key Laboratory of Hydro-Meteorology China Meteorological Administration, Nanjing 210098, China*; 5. *Key Laboratory of Water Big Data Technology of Ministry of Water Resources, Nanjing 210098, China*; 6. *Key Laboratory of Hydrologic-Cycle and Hydrodynamic-System of Ministry of Water Resources, Nanjing 210098, China*)

Abstract: Decomposition allocation and collaborative optimization of hydrological models are effective technical means for hydrological modeling. Based on literature clustering analysis, combined with bibliometric data and clustering results, the methods of module splitting, combination and optimization of hydrological models were reviewed. The key research progress in aspects such as modular design of hydrological models, framework model construction, and error transmission between multiple models was summarized. The research direction of flexible grouping and collaborative optimization of hydrological models was prospected. It is pointed out that the traditional construction methods of hydrological models usually lack necessary flexibility and portability. The concept of modular design and the integration of cutting-edge technologies such as machine learning have opened up a broad perspective for the future development of hydrological models, which will provide powerful tools to address the complex challenges faced by modern hydrology.

Key words: hydrological model; modularity; flexible architecture; machine learning; model optimization

近年来,极端天气事件的发生频率和强度显著上升,在全球范围内引发了严重的洪涝灾害,对人民生活和社会经济发展造成了严重影响。例如,2016 年,河北省“7·19”洪水造成超过 900 万人受灾,130 人死亡或失踪,直接经济损失达 170 亿元;2017 年,印度、尼泊尔、孟加拉国等南亚国家遭受了严重的洪灾,导致超 1 000 人死亡,数千万人受灾,上万房屋被毁;同年,海河流域发生的“23·7”特大

洪水造成大量村庄被淹,超 500 万人受灾,直接经济损失超 1 000 亿元。因此,准确预测和评估洪水风险,并制定有效的防洪减灾策略尤为重要^[1-3]。

水文模型是洪水预报的基础,对洪水风险评估、预警和管理起着核心的作用^[4-5]。尽管众多水文模型被开发用于洪水预测,但其在兼容性、模块化和适应性方面存在局限,如单一水文模型不能适应不同气象(气候)和下垫面条件下的径流模拟,影响了模

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3006500);水灾害防御全国重点实验室自主研究项目(524015222)

作者简介:申笑萱(2001—),女,博士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:1134780450@qq.com

通信作者:张珂(1979—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:kzhang@ hhu. edu. cn

型的可移植性和效果^[6]。例如,新安江模型和TOPMODEL模型适用于湿润区,在干旱区效果不佳;VIC模型适用于大尺度的水文循环模拟,尤其在流域和区域尺度的气候变化影响研究中表现出色,但不适合小尺度的精细模拟;GR4J模型结构简单、参数少,适用于中小尺度流域的降雨-径流模拟,对于干旱区的模拟效果不佳^[7]。传统水文模型通常通过不断堆砌代码的方式构建,缺乏灵活性,难以满足现代水文学日益复杂的需求,既阻碍了对不同模型间差异的理解,限制了大规模模型集合的高效运行,也不利于精准捕捉水文过程的空间异质性,同时对模型的协同开发与迭代优化造成了障碍。

本文分析了传统水文模型的适用性与局限性,总结了水文模型模块拆分、组合及优化的研究进展,强调了模块化设计和机器学习技术在提高模型适应性和灵活性方面的重要性。

1 文献分析

根据本文的研究主题——水文多模型的拆分组配与协同优化,首先确定关键词。参考文献[8-12],以 hydrologic model, modular, split recombination, configurable, optimized 作为搜索关键词,使用河海大学图书馆(工程)数据库(包括 Web of Science、ScienceDirect、Springerlink、中国知网(CNKI)数据库和 Google Scholar 搜索引擎),共检索到 1490 篇相关英文文献和 33 篇中文文献,时间跨度为 1983—2024 年。采用 K-Means 聚类分析法^[13],对这些文献进行发表年份和论文数量的聚类分析,将年份按照相关论文发表数量聚类为高、中、低值组 3 类,发现对模块化水文模型的研究兴趣呈现明显上升趋势(图 1),尤其是对模块化水文模型框架的研究,已逐渐成为该领域的研究热点。根据文献类型、语言和相关度,精选 60 篇期刊文章进行分析,主要聚焦于

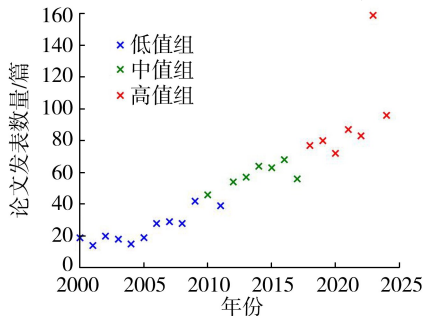


图 1 基于五大数据库的模块化水文模型研究 K-Means 聚类分析

Fig. 1 K-Means clustering analysis based on five major databases for module-based hydrological model research

近 10 年的 SCI 一区论文。

2 研究进展

2.1 水文模型模块化

由于气象(气候)条件和下垫面的空间异质性,不同地区或流域适用的水文模型不尽相同^[14]。模块化设计可以使水文模型更好地适应不同的环境和需求,并行处理不同的水文过程,并通过标准化接口和封装确保数据在模块间的无缝传递。

2.1.1 模块拆分

模块作为可整合入系统中独立且标准化的单元,不仅承载着特定的功能,还需要配备便于系统集成的接口。Rigon 等^[8]探讨了数字地球孪生水文系统(DARTHs)的理念,倡导将复杂的模型解构为一系列互动的模块。这些模块各自独立处理输入、输出数据,不依赖于特定的模型算法,而是作为模型整体的一个组成部分或针对某一特定过程的实现。

在水文模型构建中,控制方程通过层次化组织形成复杂网络,用以系统描述不同层级的水文过程。这种层次化既包含不同尺度方程对同一过程的差异化表达,也涵盖同一层级内不同方程对多样计算方法或过程的针对性描述,从而支持模型内部的并行化处理。这种层次化组织对于模型的定制优化与通用方程的识别至关重要。尽管目前已提出多种方程,但其实际应用仍存在局限。深入理解这些方程的层级关系与互动机制,对于构建可交互操作的模型组件、增强模型灵活性,以及提升复杂水文过程的预测精度,均具有重要意义。

2.1.2 模型封装接口与支撑工具

2024 年出台的《数字孪生流域共建共享管理办法(试行)》明确提出,要构建国家级模型平台,致力于开发涵盖水文、水资源、水生态环境、水力学、泥沙动力学、水土保持、水利工程安全以及智能识别与可视化等多个领域的通用模型。该办法还强调了模型平台开发、模型调用、共享技术标准及接口的重要性。

灵活组配水文模型方法的核心在于将独立的水文模型资源按标准进行分解与封装,转化为可服务化组件,再借助建模框架或接口标准实现组件的灵活组合与高效共享。该思路显著提升了模型的共享能力与应用服务水平,但需要重点解决模块间数据接口的尺度及时序匹配问题。通过建立多尺度数据描述规则与统一的时序接口规范,可确保数据在模块间实现无缝传递。此外,引入数据同化技术对模型输出进行动态校正,可有效降低模拟误差,进一步提升模型精度。

水文模型的跨流域性和多样性导致在接口、编

程语言和操作系统上均呈现异构性^[9]。Gregersen 等^[10]研发了标准化接口 OpenMI,用于在不同环境和水文模型之间实现无缝数据交换和集成,支持实时数据交换,并具有可扩展性。Wu 等^[15]通过消息传递接口 (MPI) 技术实现了 SWAT 模型的并行处理,显著缩短了模型执行时间,并提高了模型在校准和优化过程中的效率。

专用工具与用户界面开发方面,Harms 等^[16]采用 Tinamit Python 包,开发了基于套接字和 JavaScript 对象表示法 (JSON) 的通信协议,以便耦合使用 Fortran 等语言编写的模型。Han^[17]为分布式水文模型设计的通用图形用户界面 AIWA 1.0 提供了方程编辑器、多点生成器、网格生成器、插值等一系列工具模块,支持从输入管理到模型运行的全过程。Carlotto 等^[18]开发的开源工具 PFGIS-Tool 提高了 ParFlow 水文模型输入的预处理效率和用户友好性。

在研究数据可重用性与模型复现性领域,Tian 等^[19]在 HydroShare 水文信息系统中提出了一种多维时空数据管理、共享与发布的方法。该方法选用 NetCDF 作为数据模型,并通过定义特定元数据元素,实现了对数据的高效存储与系统化管理。此外,Knoben 等^[20]提出了一种名为“社区工作流程以提高水文建模复现性”(CWARHM)的模型配置工作流程。该流程整合 SUMMA 与 mizuRoute 模型,结合版本控制系统对所有模型配置步骤进行追踪,并通过明确区分模型通用配置步骤与特定配置步骤,实现大范围水文模型的完全可复现性。

2.2 灵活架构水文模型

水文框架模型凭借多层次、模块化设计,能够灵活适配不同水文气象分区和下垫面条件,从而实现水文分析和预测。这种架构的优势在于其可定制性和适应性,不仅能对各模块的效果进行独立评估,还可通过灵活组合与优化,最终筛选出最贴合实际场景的模型方案。近年来,水文建模领域取得了突破性进展,得益于计算能力的提升、数据可用性的增强,以及机器学习技术的出现。现代水文框架模型融合了数据驱动方法与传统过程驱动模型的优势,从而大幅提升了模型的适用性与预测精度。

2.2.1 水文框架模型的发展

20 世纪 80 年代以来,水文模型从即插即用的模块化模型发展为完全实现的模块化建模框架。其中,较早期的模块化建模系统之一是 Leavesley 等^[21]于 1983 年提出的 PRMS (precipitation-runoff modeling system),并发布了 Fortran 代码^[22],允许用户交替使用或排除模块。美国环保署 (U. S.

Environmental Protection Agency, EPA) 开发的都市雨洪管理模型 SWMM^[23]可以通过 PySWMM 等开源项目,进一步扩展功能,实现定制化和自动化操作。分布式水文物理模型 SHE^[24]充分考虑了植被截留、蒸散发、坡面水流、河道水流、土壤水运动、地下径流和融雪径流等水文物理过程,并采用基于质量、动量、能量守恒定律的偏微分方程组和来自独立试验研究的经验公式进行数值模拟。商业软件 MIKE SHE 具备灵活性和通用性,允许用户根据需要建立特定的模型结构。后续模型如 MMS^[25]、SUPEXFLEX^[26]等进一步深化了对水文过程的描述,并且支持模型模块的灵活分离与重组。Clark 等^[11]提出了一种结构错误理解框架 (FUSE),通过整合 4 个现有水文模型组件,开发出 79 种独特的模型结构。该方法支持基于水文过程的模型模块进行灵活分离与重组,以此构建新模型、开展控制试验并运行模型集合。Addor 等^[12]在提出的 FUSE2 中,其 NetCDF 输出文件包含了对选择模块、数值方案、参数值等建模决策的详尽描述,提升了模型的可重复性。FUSE2 具备出色的代码复用性,模块也可以在整个领域中使用,并且不限于单一模型结构。2020 年,Craig 等^[27]提出了 Raven 水文模型建模框架,该框架面向对象,能够模拟、修改或扩展 GR4J (modèle du génie rural à paramètres journalier)、HMETS (hydrological model for environmental and territorial systems) 和 UBCWM (University of British Columbia watershed Model) 等多种现有水文模型,支持多种数值方案、模型结构、离散化方案和插值方法。Kneis^[28]提出的开源模型框架 ECHSE 支持快速开发,为水文模型的高效开发与修改提供了新方法,有效提高了水文模型的可扩展性和可访问性,适用于需要频繁更新或定制的前馈交互类应用场景。Erazo 等^[29]提出了社区驱动型计算网络框架 HydroLang,采用面向组件的模块化开发方法,用户可以快速完成数据检索、输入数据管理、参数配置及模型运行等一系列操作。

邓斌等^[30]围绕分布式水文模型中模块的分解与组合开展了理论研究,识别出用于描述模型中主要水文过程的基本方程,通过对这些方程的组合生成新的概念,并在此基础上构建概念格层次结构。李致家等^[31]选取中国 11 个典型流域,将其划分为蓄满产流区、超渗产流区及混合产流区,分别验证了 4 种经典概念型模型与 4 种灵活架构模型,结果表明,在超渗产流区,灵活架构模型能够显著提高水文模拟精度。刘玉环等^[32]基于 CN-TWI 的蓄满、超渗主导子流域划分结果,选用新安江、Green-Ampt 和新

安江-Green-Ampt 3 个经典产流模块,在子流域尺度进行空间组合配置,提出一种灵活架构蓄满超渗空间组合模型框架(SCCMs),利用该框架探索了适用于半湿润、半干旱流域的洪水模拟方法以及参数规律。

2.2.2 水文框架模型的应用

Van Kempen 等^[33]在模块化建模框架 FUSE 的基础上,结合大量集合气象模拟,发现不同水文模型结构对模拟极端径流事件的幅度和时机影响显著。Mai 等^[34]基于 Raven 框架提出了一种扩展的 Sobol 灵敏度分析方法(xSSA)。该方法以分组参数为基础,不仅估算了传统模型参数的灵敏度,还进一步评估了线性与非线性存储过程选项以及渗透和基流等模型过程的灵敏度^[35]。Spieler 等^[36]提出了一种新的自动模型结构识别方法(AMSI)。该方法结合了模块化水文模型 Raven 和启发式全局优化算法 DDS,能够在广泛的模型结构和参数选择中识别出最适合表示特定流域降雨径流行为的模型结构。Chlumsky 等^[37]提出的混合模型结构校准(BMSC)方法,可同时对水文模型的结构与参数进行校准。该方法在计算成本显著降低的前提下,能够有效识别接近最优的模型结构,且在流域主导性过程及模型结构识别方面具有潜在应用价值。Zhou 等^[38]以 Raven 框架为基础,提出一种基于时间敏感性加权构建性能指标的新框架。通过在移动窗口上运用 Sobol 敏感性分析,获取各过程的时间敏感性,有效提升了水文过程结构的可识别性。

杜若愚等^[39]拓展了蓄满超渗空间组合模型,基于降水和反映土壤含水量动态产流因子之间的关系,动态识别产流过程中栅格的主导产流模式,构建了基于蓄满超渗时空动态组合的分布式新安江模型。Guo 等^[40]开发了一个用于整合城市洪水中水文和水力过程的空间分布式水动力学模型框架。该框架采用完整的二维浅水方程进行模拟,并结合 3 种排水流量处理方法,其并行处理策略在数据稀缺的情况下显著提高了计算效率。

2.2.3 机器学习混合框架

随着大数据和机器学习技术的发展,水文模型在模拟降雨-径流过程时越来越多地采用机器学习技术,以有效处理大量数据,识别复杂的非线性关系,并自动优化参数,提高洪水预测的准确性。在数据稀缺地区,机器学习技术支持模型可通过跨域学习进行训练,展现出良好的泛化能力;此外,该模型输出的集成预测,能够进一步提升预报准确度。

在水文框架模型的基础上,相关学者引入机器学习技术进行数据预处理,如利用 BP 神经网络等方法进行多层土壤湿度反演^[41],结合多种机器学习

算法(XGBoost、ANN、RBF 神经网络等)进行模型训练,并通过神经网络等多模式集成学习技术有效提升预测性能,或利用机器学习替代模型以高效替代传统多模型模块,在代码、接口不通用的情况下快速搭建混合框架。

Toth^[42]基于自组织映射的聚类技术对气象和水文条件进行分类,模块化地进行实时河流量预测,显著提高了降雨径流模型的性能。Seiller 等^[43]借鉴模块化框架、实证模型开发和多模型应用的思想,提出了用于概念性水文模型建模的实证多结构框架(EMF)。该框架囊括了“过度生成和选择”范式,减少了对降雨-径流转换过程主导性先验认识的假设,适用于多变的气候条件。Zaherpour 等^[44]利用遗传表达编程(GEP)的机器学习技术优化了全球水文模型(GHMs)的输出。Gharari 等^[45]探讨了模型构建的各个层次,包括系统图和保守法则假设、系统架构假设、过程参数化假设及参数规格假设,引入最小限制过程参数化方程的概念,连接当前基于过程的模型和机器学习,以增强系统过程的表达灵活性,并调查系统架构假设在决定模型行为中的重要作用。

针对混合模型的应用,Dong 等^[46]开发了基于 XGBoost 和人工神经网络(ANN)的数据驱动模型水库运作方案,并提出了将这些方案与无需校准的概念性水库运作方案相结合的混合水文模型框架,可以在具有不同数据可用性的水库上同时应用,以评估水库运作对水文情势的影响,但该数据驱动模型需依赖大量历史数据。Chen 等^[47]使用对象建模系统(OMS)作为模型框架,灵活整合了作物生长模型 WOFOST、非饱和流模型 HYDRUS 及径向基函数(RBF)神经网络。使用 RBF 神经网络替换 MODFLOW 模型,减少了计算成本并保持了输出精度。Wu 等^[48]提出了一个混合框架 HSPDM,该框架结合了水文建模和机器学习方法。通过动态检索历史相似洪水事件中的校准水文模型参数,HSPDM 能够实时更新每小时变化的模型参数,从而显著提升实时洪水预报的准确性。

2.3 多模型间误差传递规律与动态协同优化技术

水文模型可能受到输入数据、结构和参数等多方面误差的影响。通过分析误差源及其传播机制,结合动态校正和优化方法,可以有效实现多模型的协同优化,显著提高水文模型输出的准确性。

2.3.1 多模型间的误差传递规律

为探讨水文模型、校准策略和集合大小对多模型组合方法选择的影响,Wan 等^[49]研究了等权重平均(EWA)、贝叶斯信息准则(BIC)等 9 种常用的多

模型组合方法,使用纳什效率系数、均方根误差和 Pearson 相关系数等评估指标,分析各种组合方法在不同校准策略和集合成员下的表现。多模型组合可以有效提高模拟性能,尤其是在集合成员数小于 6 时表现更为明显,而集合成员数超过 9 时改进有限。Wang 等^[50]研究发现,水文模型可通过调整蒸发和土壤湿度机制适应降雨数据。Shi 等^[51]通过比较全数据训练和基于特定植物功能类型(PFT)数据训练两种方法,证明使用全数据训练的机器学习模型在大多数情况下性能更优,能够更好地捕捉蒸散发过程。Patil 等^[52]探讨了水文模型参数在不同时间和空间尺度的转移性,发现时间转移方案通常比空间或时空转移方案更为有效。这些研究均突显了现代水文模型在应对复杂环境和数据条件下的适应能力和灵活性。

多模型间的误差传递规律研究侧重于了解误差从模型输入到输出的传播,以及在模型间的相互影响。Zhang 等^[53]提出一种多模型集成卡尔曼滤波器(EnKF),用于土壤水分剖面的获取。该研究结合 3 种陆面模型的预测集成和 EnKF,开发了一种多模型 EnKF,其背景误差协方差矩阵由简单模型平均法(SMA)和加权平均法(WAM)两种算法估计。Bach 等^[54]提出的多模型集合卡尔曼滤波(MM-EnKF),结合多个模型集合进行高维系统的流依赖性数据处理,并通过适应性模型误差估计,为不同模型和观测提供矩阵值权重。Lorenz96 模型测试结果^[55]表明,MM-EnKF 在概率和确定性误差方面,相较于最佳单一模型和未加权的多模型集合,均显示出显著的误差减少。

2.3.2 模型结构误差处理

模型结构误差源自模型本身的设计缺陷,是水文模型中的重大问题。Zhang 等^[56]提出了一种动态数据驱动方法,用于解决土壤水分数据同化中的结构误差。该方法将高斯过程回归与 EnKF 相结合,形成混合方法以处理多源模型误差。研究还设计了两种采用不同误差修正方式的混合方法变体,有效提升了模型预测的准确性及土壤水分数据的获取质量。Gao 等^[57]建立了一种基于水文过程的神经网络(HPNN)模型,该模型利用深度学习技术重新表达水文学概念,结合了径流系数和单位线法,能够有效应对小时径流预测中的模型结构误差。

2.3.3 误差校正

贝叶斯方法在模型校准中的应用日益增多,为水文模型的不确定性评估提供了一种灵活的方式。Li 等^[58]提出的贝叶斯模块化不确定性评估方法使用了日水文模型 WASMOD(water and snow balance

model),能够独立处理最高流量,提升流量估计的准确性。Wang 等^[59]结合贝叶斯模型平均(BMA)和动态系统响应曲线(DSRC),提出了 DSRC-BMA 和 BMA-DSRC 两种多模型集成误差校正方法,提高了流量模拟的精度。分割样本验证是模型校准中的常用策略,但其有效性备受质疑。

利用遗传算法、表达编程等优化技术自动调整模型参数,提高模型的泛化能力和预测精度也是当前研究的热点。Lakshmi 等^[60]开发了一种通过聚类方法消除现有限制的离散化方法,将模拟时间分割为独立的湿润和干燥时段,并对每个时段独立校准模型参数,使用多目标优化方法对不同时段进行同步校准,从而在多个校准目标间找到最佳参数。ENKI 和 Iber-PEST 等自动校准工具有效提高了水文模型的应用效率,整合多种输入数据源,为水资源管理提供了技术支持^[61]。

3 研究展望

模块化设计和接口封装作为水文模型研究的方向,不仅提高了模型的可维护性和扩展性,还促进了跨学科和跨模型的合作。研究者们通过模型结构的重组和参数的优化,实现了模型精度的显著提升。同时,灵活配置的模块化结构、高精度预测与模型优化、跨学科方法整合与应用等方面的研究,共同推动了水文模型的发展。

本文梳理了水文多模型拆分组配与协同优化的研究进展,重点阐述了 2011—2024 年在模型拆分、组合、灵活架构及配置优化等领域的成果。针对传统水文模型在复杂环境中暴露出的局限性,当前研究聚焦于模型模块化设计、优化技术创新及机器学习技术的融合应用,旨在提升模型的灵活性与环境的适应性。模块化设计与接口封装已成为水文模型研究的重要方向:一方面,显著提高了模型的可维护性与扩展能力;另一方面,为跨学科协作及不同模型间的整合提供了便利,有力促进了领域内的合作创新。研究者通过对模型结构进行重组优化,并结合参数校准技术,实现了模型模拟精度的大幅提升。此外,灵活配置的模块化结构研发、高精度预测与模型优化方法的结合、跨学科研究方法的整合与实践等多方面的探索,共同推动了水文模型的发展。综上所述,水文模型在模块化、智能化与跨学科融合方面已取得显著进展,但仍面临诸多挑战。为进一步推动该领域的发展,未来研究可从以下几个方面展开:

a. 模型结构的定制化与跨尺度整合。未来水文模型将更加注重深度定制和跨尺度整合的能力。通过开发能够根据实际应用需求动态配置模型结构的适应性算法,模型将灵活适应从小流域到整个水

系的不同尺度,更有助于准确模拟和预测复杂的水文过程。

b. 接口标准化与模型组件化。随着模型拆分与模块化的趋势加强,接口标准化成为关键。标准化的模型接口将促进模块间的有效沟通,简化用户对模型的调整和应用,使模型组件更容易在不同系统间迁移和集成。

c. 模型优化与智能化。面对复杂和动态的水文系统,模型优化策略将向智能化方向发展。利用深度学习、强化学习等先进机器学习技术,可以开发出自适应调整预测策略的智能模型。这些模型将自动识别关键水文变量,预测极端事件,并实时调整参数以响应即时数据。

d. 适应性验证与模型普适性测试。随着模型适应性的提高,全面验证和测试模型的普适性尤为重要。模型需要采用传统的验证方法和新兴的评估技术,在不同的气候、地理和环境条件下对其进行测试,以验证其效果和准确性,确保模型在实际操作中的可靠性和有效性。

e. 支持决策的集成系统。水文模型的开发和优化应支持更有效的水资源管理和决策。模型应嵌入决策支持系统,为政策制定者提供准确的数据分析和实时的预测结果,这就要求技术上的兼容性,以及政策和科学研究之间更紧密的协作,以共同应对极端气候事件和可持续管理水资源等挑战。

参考文献:

[1] 李红艳,郝景开,刘大为,等. 基于元启发式算法优化的新乡市洪水风险评价[J]. 水资源保护,2024,40(6): 104-112. (LI Hongyan,HAO Jingkai, LIU Dawei, et al. Flood risk assessment in Xinxiang City based on meta-heuristic algorithm optimization [J]. Water Resources Protection,2024,40(6):104-112. (in Chinese))

[2] 晁丽君,张珂,陈新宇,等. 基于多源降水融合驱动的WRF-Hydro模型在中小河流洪水预报中的适用性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):55-64. (CHAO Lijun, ZHANG Ke, CHEN Xinyu, et al. Applicability of WRF-Hydro model based by multi-source precipitation merging in flood forecasting for small and medium-sized watersheds[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(3):55-64. (in Chinese))

[3] 李致家,张心愿,白云鹏,等. 海河“23·7”流域性特大洪水复盘模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):13-19. (LI Zhijia, ZHANG Xinyuan, BAI Yunpeng, et al. Retrospective simulation on the Haihe “23·7” basin-wide extreme flood[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(5):13-19. (in Chinese))

[4] JAJARMIZADEH M, HARUN S, SALARPOUR M. A

review on theoretical consideration and types of models in hydrology [J]. Journal of Environmental Science and Technology,2012,5(5):249-261.

[5] SOOD A, SMAKHTIN V. Global hydrological models: a review[J]. Hydrological Sciences Journal,2015,60(4): 549-565.

[6] ADDOR N, MELSEN L A. Legacy, rather than adequacy, drives the selection of hydrological models [J]. Water Resources Research,2019,55:378-390.

[7] ZHANG Ke, ZHANG Qiunuo, CHEN Xinyu, et al. Gridded Xin'anjiang-dual anthropogenic aboveground and underground regulation distributed hydrological model [J]. Water Resources Protection,2021,37(5):94-101.

[8] RIGON R, FORMATTA G, BANCHERI M, et al. . HESS opinions: participatory digital eARth twin hydrology systems (DARTHs) for everyone: a blueprint for hydrologists [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2022,26(18):4773-4800.

[9] 余宇峰,胡健伟,严琳,等. 水文模型的服务化封装方法研究与应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022, 50(4):34-41. (YU Yufeng, HU Jianwei, YAN Lin, et al. Research and application of service encapsulation method of hydrological model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(4):34-41. (in Chinese))

[10] GREGERSEN J B, GJISBERS P J A, WESTEN S J P. OpenMI: open modelling interface [J]. Journal of Hydroinformatics,2007,9(3):175-191.

[11] CLARK M P, SLATER A G, RUPP D E, et al. Framework for understanding structural errors (FUSE): a modular framework to diagnose differences between hydrological models [J]. Water Resources Research, 2008, 44(12): W00B02.

[12] ADDOR N, CLARK M, HENN B. The emergence of community models in hydrology [C]// EGU2020, Session EOS7. 10: Open Hydrology-Advances towards Fully Reproducible, Re-usable and Collaborative Research Methods in Hydrology. Vienna: European Geosciences Union, 2020.

[13] 徐俊杰,付婷婷. 基于特征聚类和时间序列分析的协同过滤推荐方法[J]. 工业控制计算机,2024,37(5):74-76. (XU Junjie, FU Tingting. Collaborative filtering recommender based on feature clustering and time series [J]. Industrial Control Computer, 2024, 37(5):74-76. (in Chinese))

[14] TEGEGNE G, PARK D K, KIM Y O. Comparison of hydrological models for the assessment of water resources in a data-scarce region, the upper Blue Nile River Basin [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2017, 14: 49-66.

[15] WU Yiping, LI Tiejian, SUN Liqun, et al. Parallelization of a hydrological model using the message passing interface [J]. Environmental Modelling & Software, 2013, 43: 124-

- 132.
- [16] HARMS J Z, MALARD-ADAM J J, ADAMOWSKI J F, et al. Dynamically coupling system dynamics and SWAT+ models using Tinamit: application of modular tools for coupled human-water system models[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2023, 27: 1683-1693.
- [17] HAN Haidong. AIWA 1. 0: a universal graphical user interface for distributed hydrological modeling [J]. Computers & Geosciences, 2013, 59: 108-115.
- [18] CARLOTTO T, KLAUS J, CHAFFE P L B. An open-source GIS preprocessing tool for the ParFlow hydrological model (PFGIS-Tool v1. 0. 0) [J]. Environmental Modelling and Software, 2023, 169: 105824.
- [19] TIAN Gan, TARBOTON D G, HORSBURGH J S, et al. Collaborative sharing of multidimensional space-time data in a next generation hydrologic information system [J]. Environmental Modelling and Software, 2020, 129: 104706.
- [20] KNOBEN W J M, CLARK M P, BALES J, et al. Community workflows to advance reproducibility in hydrologic modeling [J]. Water Resources Research, 2022, 58; e2021WR031753.
- [21] LEAVESLEY G, LICHTY R, TROUTMAN B, et al. Precipitation-runoff modeling system: user ' s manual [M]. Reston: U. S. Geological Survey, 1983: 207.
- [22] LEAVESLEY G H. Modeling the effects of climate change on water resources: a review [J]. Climatic Change, 1994, 28 (1) : 159-177.
- [23] GIRONÁS J, ROESNER L A, ROSSMAN L A, et al. A new applications manual for the storm water management model (SWMM) [J]. Environmental Modelling & Software, 2010, 25 (6) : 813-814.
- [24] ABBOTT M B, BATHURST J C, CUNGE J A, et al. An introduction to the European hydrological system: systeme hydrologique Europeen, SHE. 1: history and philosophy of a physically-based distributed modeling system [J]. Journal of Hydrology, 1986, 87 (1-2) : 45-59.
- [25] LEAVESLEY G, MARKSTROM S L, RESTREPO P J, et al. A modular approach to addressing model design, scale, and parameter estimation issues in distributed hydrological modelling [J]. Hydrological Processes, 2002, 16: 173-187.
- [26] FENICIA F, KAVETSKI D, SAVENIJE H H G. Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling: 1. motivation and theoretical development [J]. Water Resources Research, 2011, 47: W11510.
- [27] CRAIG J R, BROWN G, CHLUMSKY R, et al. Flexible watershed simulation with the Raven hydrological modelling framework [J]. Environmental Modelling & Software, 2020, 129: 104728.
- [28] KNEIS D. A lightweight framework for rapid development of object: based hydrological model engines [J]. Environmental Modelling & Software, 2015, 68: 110-121.
- [29] ERAZO R C, SERMET Y, MOLKENTHIN F, et al. HydroLang: an open-source web-based programming framework for hydrological sciences [J]. Environmental Modelling and Software, 2022, 157: 105525.
- [30] 邓斌, 蒋昌波, 阮宏勋, 等. 分布式水文模型中模块分解与组合的理论研究 [J]. 水利学报, 2009, 40 (10) : 1264-1273. (DENG Bin, JIANG Changbo, RUAN Hongxun, et al. Theoretical study on modular division and combination of distributed hydrological models [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40 (10) : 1264-1273. (in Chinese))
- [31] 李致家, 黄鹏年, 姚成, 等. 灵活架构水文模型在不同产流区的应用 [J]. 水科学进展, 2014, 25 (1) : 28-34. (LI Zhijia, HUANG Pengnian, YAO Cheng, et al. Application of flexible-structure hydrological models in different runoff generation regions [J]. Advances in Water Science, 2014, 25 (1) : 28-34. (in Chinese))
- [32] 刘玉环, 李致家, 刘志雨, 等. 半湿润半干旱流域空间组合模型研究 [J]. 湖泊科学, 2020, 32 (3) : 826-839. (LIU Yuhuan, LI Zhijia, LIU Zhiyu, et al. Spatial combination model for semi-humid and semi-arid watersheds [J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32 (3) : 826-839. (in Chinese))
- [33] VAN KEMPEN G, VAN DER WIEL K, MELSEN L A. The impact of hydrological model structure on the simulation of extreme runoff events [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2021, 21: 961-976.
- [34] MAI J, CRAIG J R, TOLSON B A. Simultaneously determining global sensitivities of model parameters and model structure [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2020, 24 (12) : 5835-5858.
- [35] MAI J, CRAIG J R, TOLSON B A, et al. The sensitivity of simulated streamflow to individual hydrologic processes across North America [J]. Nature Communications, 2022, 13: 455.
- [36] SPIELER D, MAI J, CRAIG J R, et al. Automatic model structure identification for conceptual hydrologic models [J]. Water Resources Research, 2020, 56; e2019WR027009.
- [37] CHLUMSKY R, MAI J, CRAIG J R, et al. Simultaneous calibration of hydrologic model structure and parameters using a blended model [J]. Water Resources Research, 2021, 57; e2020WR029229.
- [38] ZHOU Liting, LIU Pan, ZHANG Xiaojing, et al. Improving structure identifiability of hydrological processes by temporal sensitivity with a flexible modeling framework [J]. Journal of Hydrology, 2023, 616: 128843.
- [39] 杜若愚, 姚成, 刘玉环, 等. 基于蓄满超渗时空动态组合的网格新安江模型 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2022, 50 (6) : 25-32. (DU Ruoyu, YAO Cheng, LIU Yuhuan, et al. Grid-Xin' anjiang model based on spatio-

- temporal dynamic combination of saturation-excess and infiltration-excess runoff[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(6):25-32. (in Chinese))
- [40] GUO Kaihua, GUAN Mingfu, YAN Haochen, et al. A spatially distributed hydrodynamic model framework for urban flood hydrological and hydraulic processes involving drainage flow quantification[J]. Journal of Hydrology, 2023,625:130-135.
- [41] 刘娣,孙佳倩,余钟波. 基于机器学习模型的多层土壤湿度反演[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(3):7-14. (LIU Di, SUN Jiaqian, YU Zhongbo. Multi-layer soil moisture inversion based on machine learning models [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(3):7-14. (in Chinese))
- [42] TOTH E. Classification of hydro-meteorological conditions and multiple artificial neural networks for streamflow forecasting[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2009,13(9):1555-1566.
- [43] SEILLER G, ANCTIL F, ROY R. Design and experimentation of an empirical multistructure framework for accurate, sharp, and reliable hydrological ensembles [J]. Journal of Hydrology,2017,552:313-340.
- [44] ZAHERPOUR J, MOUNT N, GOSLING S N, et al. Exploring the value of machine learning for weighted multi-model combination of an ensemble of global hydrological models [J]. Environmental Modelling & Software,2019,114:112-128.
- [45] GHARARI S, GUPTA H V, CLARK M P, et al. Understanding the information content in the hierarchy of model development decisions: learning from data [J]. Water Resources Research,2021,57:e2020WR027948.
- [46] DONG Ningpeng, GUAN Wenhai, CAO Jixue, et al. A hybrid hydrologic modelling framework with data-driven and conceptual reservoir operation schemes for reservoir impact assessment and predictions [J]. Journal of Hydrology,2023,619:129246.
- [47] CHEN Chong,ZHANG Hui,SHI Wenxuan,et al. A novel paradigm for integrating physics-based numerical and machine learning models;a case study of eco-hydrological model[J]. Environmental Modelling and Software,2023,163:105669.
- [48] WU Hongshi, SHI Peng, QU Simin, et al. A hydrologic similarity-based parameters dynamic matching framework: application to enhance the real-time flood forecasting[J]. Science of the Total Environment,2024,907:167767.
- [49] WAN Yongjin, CHEN Jie, XU Chongyu, et al. Performance dependence of multi-model combination methods on hydrological model calibration strategy and ensemble size [J]. Journal of Hydrology, 2023, 603: 127065.
- [50] WANG Jiao, LU Zhuo, HAN Dawei, et al. Hydrological model adaptability to rainfall inputs of varied quality[J]. Water Resources Research,2023,59:e2022WR032484.
- [51] SHI Haiyang, LUO Geping, HELWICH O, et al. Comparing the use of all data or specific subsets for training machine learning models in hydrology: a case study of evapotranspiration prediction [J]. Journal of Hydrology,2023,627:130399.
- [52] PATIL S D, STIEGLITZ M. Comparing spatial and temporal transferability of hydrological model parameters [J]. Journal of Hydrology,2015,525:409-417.
- [53] ZHANG Shuwen,LI Deqin,QIU Chongjian. A multimodel ensemble-based Kalman filter for the retrieval of soil moisture profiles[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2011,28(1):195-206.
- [54] BACH E,GHIL M. A multi-model ensemble Kalman filter for data assimilation and forecasting [J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2023, 15: e2022MS003123.
- [55] LORENZ E N. Predictability: a problem partly solved [C]//European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Proceedings Seminar on Predictability, Vol. 1. Reading: ECMWF, 1996.
- [56] ZHANG Qiurui,SHI Liangsheng,HOLZMAN M,et al. A dynamic data-driven method for dealing with model structural error in soil moisture data assimilation [J]. Advances in Water Resources,2019,134:103456.
- [57] GAO Shuai, ZHANG Shuo, HUANG Yuefei, et al. A hydrological process-based neural network model for hourly runoff forecasting [J]. Environmental Modelling and Software,2024,176:106029.
- [58] LI Lu, XU Chongyu, ENGELAND K. Development and comparison in uncertainty assessment based Bayesian modularization method in hydrological modeling [J]. Journal of Hydrology,2013,486:384-394.
- [59] WANG Jian,BAO Weimin,XIAO Zhangling,et al. Multi-model integrated error correction for streamflow simulation based on Bayesian model averaging and dynamic system response curve [J]. Journal of Hydrology, 2022, 607: 127518.
- [60] LAKSHMI G, SUDHEER K P. Parameterization in hydrological models through clustering of the simulation time period and multi-objective optimization based calibration [J]. Environmental Modelling & Software, 2021,138:104981.
- [61] GARCÍA-ALÉN G, MONTALVO C, CEA L, et al. IBER-PEST: automatic calibration in fully distributed hydrological models based on the 2D shallow water equations [J]. Environmental Modelling and Software, 2024,177:106047.

(收稿日期:2024-10-04 编辑:胡新宇)