

# 水环境质量预报预警大数据平台研究

马金锋<sup>1a</sup>, 郑 华<sup>1a, 2</sup>, 彭福利<sup>3</sup>, 邓 力<sup>4</sup>, 张晓岭<sup>4</sup>, 黄 程<sup>4</sup>, 李若男<sup>1a, 2</sup>, 饶凯锋<sup>1b</sup>

1.中国科学院生态环境研究中心 a.城市与区域生态国家重点实验室; b.环境水质学国家重点实验室 北京 100085

2.中国科学院大学 北京 100049

3.中国环境监测总站 国家环境保护环境监测质量控制重点实验室 北京 100012

4.重庆市生态环境监测中心 重庆 401120

**摘 要:** 构建基于水环境模型的水质预报预警大数据平台是一项复杂的系统工程, 主要面临模型的规模计算及其引发的模拟结果规模存储、规模分析的挑战。相关挑战极大地限制了水环境质量预报预警业务的深入开展, 但目前国内外关于此方面的研究极少。为此, 提出了水环境质量预报预警大数据平台框架。该框架以水环境模型体系为基础, 以大数据集群计算体系为核心, 通过水环境模型融合大数据技术, 以实现水环境质量预报预警应用服务为目标, 旨在解决预报预警业务自动化和自定义化问题。框架明确了水环境质量预报预警大数据平台的组成及建设流程, 并以实际项目为案例, 介绍了实现框架的技术方案并证明了其可行性。研究成果可为重新审视复杂水环境模型与大数据技术的关系提供新的见解, 也可为基于大数据技术的水环境质量预报预警平台的构建提供思路和参考。

**关键词:** 水环境模型; 水环境质量预报; 水环境质量预警; 大数据; Hadoop

中图分类号: TP311.1; X143 文献标志码: A 文章编号: 1002-6002(2022) 01-0230-11

DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2022.01.22

## Research on Water Environment Quality Forecast and Early Warning Big Data Platform

MA Jinfeng<sup>1a</sup>, ZHENG Hua<sup>1a, 2</sup>, PENG Fuli<sup>3</sup>, DENG Li<sup>4</sup>, ZHANG Xiaoling<sup>4</sup>, HUANG Cheng<sup>4</sup>, LI Ruonan<sup>1a, 2</sup>, RAO Kaifeng<sup>1b</sup>

1.a.State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology; b.State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3.State Environmental Protection Key Laboratory of Quality Control in Environmental Monitoring, China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China

4.Chongqing Environmental Monitoring Centre, Chongqing 401120, China

**Abstract:** The development of water environment quality forecast and early warning big data platform based on water environment model is a complex system engineering, which mainly faces the challenges of large-scale model calculation, storage and analysis of simulation results. Such challenges greatly hinder the in-depth development of water environment quality forecast and early warning services, and pertinent study is rare. This paper proposes a framework of water environment quality forecast and early warning big data platform. The framework is based on the water environment model system, which uses the cluster calculation system as the core. Through coupling big data technology and the water environment model, the framework aims to solve the problem of automation and customization of forecast and early warning operations. The framework clarified the process of development of a big data platform for water environment quality forecast and early warning. Taking the actual project as a case, the technical scheme of the framework implementation is introduced and its feasibility is demonstrated. The research results could provide new insights for reviewing the relationship between complex water environment models and big data technology, and provide guides and references for development of water environment quality forecast and early warning platform based on big data technology.

**Keywords:** water environment model; water environment quality forecast; water environment quality warning; big data; Hadoop

收稿日期: 2021-10-10; 修订日期: 2021-11-02

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFD0901105); 国家自然科学基金(41925005)

第一作者简介: 马金锋(1978-), 男, 回族, 宁夏吴忠人, 博士, 助理研究员。

通讯作者: 饶凯锋

水环境质量预报预警是以流域为单元,以定量的模型或方法模拟污染物在流域范围内的迁移转化过程,确定水环境演变趋势,从而实现水质的常规预测和对突发污染情况的预警<sup>[1]</sup>。水环境质量预测是实现流域水环境精细化、科学化管理的核心。国务院2015年印发的《水污染防治行动计划》对水环境监控预警提出了明确要求,如实行水环境承载能力监测预警、明确突发水环境污染事件预警预报与响应程序、加强水环境监控预警国际交流合作等<sup>[2]</sup>。2020年《关于构建现代环境治理体系的指导意见》再次明确提出,要强化监测能力建设,推动实现水环境质量预报预警<sup>[3]</sup>。水环境质量预测对于提供水质变化早期预警,以及通过提前采取行动从而减轻污染至关重要<sup>[4]</sup>。其核心是数值模拟技术,即构建水环境模型。水环境模型是对水体中的污染物(营养物质、悬浮物、藻类、有毒物质等)随水流迁移过程中,因水动力和生物化学等因素的影响而发生的物理、化学和生物反应的数学描述和模拟<sup>[5]</sup>。水环境数学模型在国内外已得到非常广泛的应用,成为国内外学者研究的热点<sup>[6-7]</sup>,被广泛应用于水质预测、水质预警、流域规划和水环境治理等研究。但在水环境数学模型的实际应用中,普遍面临着单个模型计算耗时较长的问题,而在模型的率定、验证和情景决策过程中,需要进行大量迭代计算,进一步加剧了计算过程的负担,极大地限制了水环境数学模型的广泛应用。而大数据技术在分布式计算、存储及分析方面显示出强大的技术优势,可为水环境模型高计算负荷问题提供一种潜在的解决方案。

基于大数据技术构建水质预报预警大数据平台是一项艰巨而复杂的系统工程。由于平台构建需要将数值模拟技术与大数据技术深度融合,即需要交叉应用多学科的基础理论和技术方法,目前国内外关于此方面的研究极少。鉴于目前国家水生态环境管理工作对水质预报预警系统的迫切需求,本文以解决水环境质量预报预警自动化和自定义化业务需求为导向,围绕水环境模型与大数据技术的深度融合,提出以水环境模型体系为基础,以大数据计算体系为核心,由空间建模、参数率定、边界条件预测、规模计算、规模存储、通用服务和专用服务7个部分组成的大数据平台框架。按照水环境模型过程模拟、趋势预测和应对决策的应用流程,明确水环境质量预报预警大数

据平台的建设流程。针对框架的每个组成部分,分别解析其含义,提出实现思路,并以案例实证其可行性,以期重新审视复杂水环境模型与大数据技术的关系提供新的见解,也为基于大数据技术的水环境质量预报预警平台的构建提供思路和参考。

## 1 水环境质量预报预警研究进展

目前,大量研究主要集中于对新型水质、水文模型的开发<sup>[8-9]</sup>,或对已有模型的参数不确定性分析、敏感性分析、参数率定或场景分析<sup>[10-11]</sup>,而基于数学模型研发水环境质量预报预警系统的研究相对较少<sup>[12-13]</sup>,且已有的少量研究多集中于突发污染事件水质预警系统<sup>[14-15]</sup>,缺乏对常规水环境质量预报预警功能的应用。预警技术可以科学表征风险变化、提高应急响应水平和规避污染风险,已成为水环境研究及管理领域的主要关注点<sup>[16-17]</sup>。在基于现有水环境软件<sup>[18-22]</sup>或者独立开发的数学模型<sup>[23-24]</sup>开展溢油或泄漏情景下的事故污染过程模拟方面,相关研究已经取得了丰富的研究成果<sup>[25]</sup>。描述和模拟水质污染事故的最常见方法是基于过程的流体动力学模型和水质模型的耦合模型<sup>[26]</sup>。其中:水动力学模型用于模拟现实世界中可观察到的物理上的水系统;水质模型用于模拟、分析和预测污染物在水体中的迁移和转化过程,已成为预测水质的主要方法<sup>[4]</sup>。应用 Delft3D、EFDC、WASP、QUAL2K、Aquatox、MIKE 等多种流体动力学和水质模型及相关配套软件开展水环境质量预报预警,已经成为该领域发展的必然趋势。国外相关研究及应用开展较早,如美国、英国和法国分别建立了突发水污染事故预警系统,多个欧洲国家共同研发了多瑙河事故应急预警系统,上述系统在预测预报流域水质变化和保障居民饮水安全等方面发挥了重要作用。在国内,不少省级监测站和部分地级监测站基于现有水质自动监测站实时数据,建立了水质异常报警系统。以四川、浙江、广东和江苏为代表的省份对基于数值模拟的水环境质量预报预警技术进行了探索性研究。近几年,中国环境监测总站和重庆市生态环境监测中心也在开展水环境质量预报预警系统的研发工作。

综合国内外研究进展可以看出:①基于水质模型研发水环境质量预报预警系统是水环境质量

预报预警研究的必然趋势。目前主要以国家或地方水质监测站点数据为基础数据,采用国外成熟、开源的水质模型作为基础模型(以下统称为计算引擎)。

②二/三维水质模型的推广应用是未来发展的趋势。水质模型从空间尺度可以分为零维、一维、二维和三维。零维模型假设水体充分混合,因此无法同时获得河流横向和纵向的水质变化。一维水质模型的运行时间较短,从而得到广泛应用<sup>[18-19]</sup>。尽管一维模型可以实现快速运算,但是以空间高度概化为代价,使其无法捕捉敏感区域的关键信息,比如重要取水口位置。二维模型具有同时模拟横向和纵向空间的能力。三维模型则可以描述所有三个空间维度的变化,提供了最详细的污染物分布信息。相比三维模型,二维模型充分考虑了污染物的时空分布特征,且运行时间较短,弥补了一维模型的不足。因此,二维和三维水质模型的广泛应用是未来发展的趋势<sup>[19]</sup>。

③现有预报预警系统的研发主要是基于传统客户端/服务器端架构或传统浏览器端/服务器端架构,尚未见到基于大数据架构开发预报预警系统的研究。

尽管国内外已开展了广泛的水环境质量预报预警研究,但总体上并未形成可为水污染防治提供决策支撑的预报预警能力。究其原因,除了缺乏必要的水文监测数据、水下地形数据外,一方面,我国工业软件基础与核心技术薄弱,尤其是流体力学类计算机辅助工程(Computer Aided Engineering, CAE)求解器技术匮乏,CAE工业软件研发企业缺失、研发人员严重不足。另一方面,构建水环境质量预报预警系统存在着固有的复杂性。从模型构建过程的角度来看,系统建设涉及空间建模(前处理)、边界条件获取、模型模拟运

行、模拟结果存储、模型参数率定、模拟结果分析和可视化(后处理)等多个环节,每个环节都可单独作为一项技术研发主题,而多项技术研发的有机集成更是一项复杂的系统工程。再一方面,传统的高性能计算体系并不能有效支撑水环境质量预报预警业务。作为水环境质量预报预警系统的核心,水环境模型的高性能计算研究广受关注,通常采用并行技术和集群技术来提高计算效率<sup>[27-31]</sup>。由于水环境模型是一种典型的计算密集型复杂模型,其计算过程通常需要耗费大量的时间。在单个模型计算非常耗时的情况下,自动率定、情景分析等批量的模型计算甚至是被禁止的<sup>[32]</sup>。现有并行计算体系能够很好地解决模型的高性能计算问题,但未考虑结果存储和结果分析的需求。因此,水环境质量预报预警业务需要一种能够紧密衔接模型计算、存储和分析的全链条技术支撑体系。大数据技术体系因其完善的分布式计算、存储和分析框架,有望成为一种可有效解决当前水环境质量预报预警业务所面临的问题的理想选择。

2 水环境质量预报预警业务解析

水环境模型从流程角度可以分为对历史过程的模拟、对未来趋势的预测和对预测趋势的应对决策3个阶段,即过程模拟—趋势预测—应对决策;从应用角度可以分为常规水质预报预警业务和突发污染事故应急处置业务,体现了“平战结合”的理念;从用户使用角度则可以分为自动化和自定义化两种模式。表1分别从流程角度、应用角度和用户使用角度解析了水环境质量预报预警业务。

表1 水环境质量预报预警业务解析			
Table 1 Requirement analysis of water environment quality forecast and early warning system			
应用情景	过程模拟	趋势预测	应对决策
常规水环境质量预报预警	空间建模、 参数率定	流域水文预报预警、 水体水质预报预警、 水华预报预警	水环境风险评估、 水环境容量核算、 环境治理决策分析、 污染溯源分析
突发污染事故预报预警	—	突发水污染事故仿真模拟	突发水污染事故应急处置决策

注:加粗部分为自定义化模式。“—”表示不涉及。

在常规水质预警预报业务中,过程模拟阶段旨在评估并确保模型具有重现历史过程的能力,即模型重现历史的能力。在这一阶段,水环境质量预报预警业务可以概括为常规空间建模和模型

参数率定(也称模型校准)两部分,其目标是确保模型可得和可用,保证模拟结果具有可信度。只有具备重现历史过程能力的模型方可用于对未来趋势开展预测。

趋势预测是水环境质量预报预警业务的核心内容,其目标是预测流域水文和水体水质的未来变化趋势。在这一阶段,水环境质量预报预警业务可以概括为包括流域水文、水体水质、水华在内的常规预报预警产品。其中:水文预报提供流域水位、流速、流量、水温等预报产品;水质预报提供悬浮物、溶解氧、高锰酸盐指数、氨氮、总磷、总氮、五日生化需氧量、化学需氧量、重金属等主要指标浓度,以及水质类别、首要污染物等预报产品;水华预报提供叶绿素a、蓝藻、绿藻、硅藻浓度,以及水华暴发时间和面积等预报产品。预警产品则是根据业务需求设置预警指标及参数范围,基于实测数据和预报数据,对超过设定范围的水质大幅变化、水质趋势性异常变化等进行实时预警。

应对决策是指通过情景分析评估调控措施对未来变化趋势的影响,其目标是识别较优或最优水环境管理措施,为环境治理决策的科学化、精细化提供支撑。在这一阶段,水环境质量预报预警业务可以概括为水环境风险评估、水环境容量核算、环境治理决策分析和污染溯源分析。水环境风险评估包括点源和面源两类,其中:前者旨在建立流域点源排放清单,集成整合污染源位置、排污口位置、特征污染物种类、污染排放量等信息,确定污染源与流域的汇合点位置、污染源影响范围等,可根据业务需求设置风险评价指标体系,定量评估点源风险;后者旨在针对面源污染负荷进行匡算,核算面源污染负荷的入河量,计算其对水体污染的贡献量及贡献率,可通过设定阈值参数识别面源污染关键源区和高风险区。水环境容量核算旨在模拟接纳水体在一定的环境质量目标规划设定条件下的水环境容量,依据水环境容量和污染负荷现状,对目标水体的环境承载力开展风险评估和超载预警。环境治理决策分析旨在根据重点流域控制单元、河湖长制管理需求,分析主要污染物及其来源,并通过情景分析评估各种污染治理措施的水质改善效果,帮助制定流域、湖库或行政区污染负荷削减方案和空间分配方案。污染溯源分析旨在掌握污染物的扩散及空间变化路径,解析各类污染来源对重点断面主要污染物通量的贡献量、贡献率。在水质大幅变化触发超标预警、偷排预警时,可结合空间拓扑技术和超标污染物特征,对污染来源进行筛查和定位。

在突发污染事故水质预报预警业务中,由于事故发生的随机性和突发性,通常忽略过程模拟

部分。在此情况下,水环境质量预报预警业务可以概括为突发水污染事故仿真模拟和突发水污染事故应急处置决策两部分。前者旨在动态模拟污染物的时空迁移转化过程,计算污染物浓度的时空分布,评估污染事件所影响地区的人口数量和水质超标程度等。后者旨在结合风险大小、环境条件,提供交互式的情景分析手段,辅助制定快速应急处置方案。

水环境质量预报预警的自动化通常涵盖常规水质预报预警业务中的过程模拟、趋势预测两个阶段,旨在实现模型的自动率定和定时自动生成预报产品。水环境质量预报预警的自定义化则涵盖常规水质预报预警业务中的应对决策阶段和突发污染事故预报预警业务的全过程,旨在提供交互式的探索手段,辅助用户识别较优或最优环境管理措施。

### 3 水环境质量预报预警大数据平台框架

为了解决水环境质量预报预警业务的自动化和自定义化问题,结合业务流程和信息化建设流程,本研究提出了水环境质量预报预警大数据平台框架,如图1所示。该框架以模型体系为基础,以计算体系为核心,以服务体系为目标。

模型体系包括空间建模、参数率定和边界条件预测3部分,实现了静态建模和动态更新的有机结合。静态是指空间建模后的模型主体总体保持不变;动态是指在参数率定过程可以动态调整模型的局部参数,在边界条件预测过程则可以更新模型局部边界条件。以Delft3D和EFDC模型为例,典型的水体水质模拟的空间建模过程包括网格剖分、地形插值、初始条件设置、反应过程设置和运行设置等,如图1所示。以SWAT模型为例,典型的流域水文模拟的空间建模过程则包括子流域剖分、土壤数据库制备、土地利用数据制备、气象数据库制备、水文响应单元划分、模拟条件设置。空间建模旨在生成一系列模型计算引擎所需的配置文件;参数率定旨在通过调整模型参数,拟合模拟结果与实测监测值,确保模型具备模拟历史过程的能力。在实际应用中,空间建模和参数率定需要大量数据作为支撑,且开发过程耗时较长。此外,模型预测精度在很大程度上取决于对边界条件(比如水文条件、水质条件和天气条件等)的预测,而边界条件通常难以预测,因

此,率定之后的水文和水质模型在生成预报产品之前,需要开展边界条件预测。由于边界条件数据属于典型的时间序列数据,目前通常采用时间序列预测方法来解决边界条件预测问题。

计算体系是水环境质量预报预警大数据平台框架的核心,包括规模计算和规模存储两部分,可实现计算过程与存储过程的绑定。传统的并行计算体系侧重单个模型算例的高性能计算,不适用于模型率定、情景分析情况下的规模计算模式。此外,传统并行计算体系并未考虑计算结果存储,不能满足计算结果的存储需要,而自动化率定和情景分析进一步加剧了规模计算和规模存储的负荷。大数据技术为复杂模型的规模计算、规模存储和规模分析提供了成熟的解决方案,依托大数据技术实现规模计算与规模存储绑定已成为必然趋势。先前的研究<sup>[33]</sup>已经提出了将模型与大数据计算框架融合的技术思路并证明了其可行性。

通过将复杂的机理模型融合在分布式计算框架中,可在计算节点执行分布式计算,并将原始模拟结果以 Hadoop 分布式文件系统 (Hadoop Distributed File System, HDFS) 存储,解析结果以 Hadoop 数据库 (Hadoop Database, HBase) 存储,取得良好的应用效果<sup>[33]</sup>。

服务体系包括通用服务和专用服务两部分,以满足水环境质量预报预警业务的自动化和定制化需求。通用服务包括交互式分析、浓度场可视化、流场可视化和 GIS 可视化。交互和可视化在知识发现中非常重要,旨在利用直观的可视化技术手段探索隐藏在数据中的规律,形成专业应用功能。专用服务提供面向用户的预报预警产品和决策支持服务,其中,前者包括流域水文预报预警和水体水质预报预警,后者包括污染源风险评估、水环境容量核算、环境治理决策分析、污染溯源分析和污染事故应急。

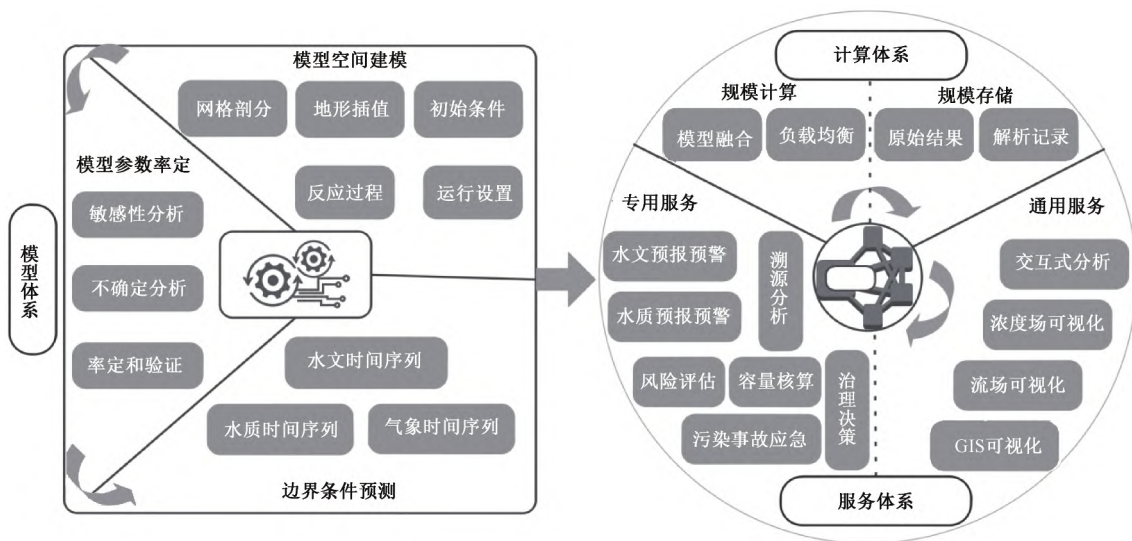


图1 水环境质量预报预警大数据平台框架

Fig.1 Framework of water environment quality forecast and early warning big data platform

#### 4 水环境质量预报预警大数据平台应用案例

总体上,水环境质量预报预警大数据平台采用 SpringBoot 框架主导开发。在 SpringBoot 框架内集成 Quartz 启动自动化业务,自定义化业务则经 SpringBoot 前端由用户交互式触发。两种业务均以 Hadoop MapReduce 作业的形式执行模型计算。将水环境模型融合于 MapReduce 计算框架之中,其原始和解析模拟结果分别被存储到

HDFS 和 HBase 中。采用 Zeppelin 框架实现解析结果的交互式 and 可视化分析。图 2 为水环境质量预报预警大数据平台应用案例。

具体来讲,基于 Quartz 定时任务框架实现水环境质量预报预警业务自动化,Quartz 充当作业调度器角色。除了定期(每月)启动水环境模型自动率定过程和定时(每天)启动水文、水质和水华预报预警业务外,Quartz 还负责定时启动提取-转换-上载 (Extract-Transform-Load, ETL) 过程。ETL 以脚本语言形式从水质监测数据库中定时提取、清洗、转换和装载最新数据到 HBase 中。这

些数据既被用作模型参数率定过程所需的观测数据,也被用作边界条件预测中的训练数据。

为了兼容大数据平台开发环境,水环境模型应选用成熟且开源的计算引擎,其空间建模则应依托已有建模工具或研发专用软件。以模型为核心的自动化和自定义化业务均以 MapReduce 作业的形式被封装并提交到另外一个资源管理器(Yet Another Resource Negotiator, YARN)。YARN 通过合理分配计算资源,实现作业执行的负载均衡。多个 MapReduce 作业并发计算,原始模拟结果和解析计算结果在所在计算节点被分别存储到 HDFS 和 HBase 中。用户可通过 Zeppelin 交互式可视化分析工具获取 HDFS 和 HBase 中的解析数

据,以深度探索数据潜在规律。

综上所述,本文基于成熟大数据平台 Hadoop 生态系统,构建了水环境模型计算体系、存储体系和快速分析体系。其中,采用 MapReduce 计算框架实现水环境模型并发计算,采用 YARN 实现计算资源调度和负载均衡,采用 HDFS 存储水环境模型原始模拟结果,采用 HBase 列式数据库存取水环境模型模拟结果解析数据,采用 Zeppelin 实现解析数据的快速获取、高效组织、交互式可视化分析。

下文将以实际案例验证水环境质量预报预警大数据平台部分核心模块的可实现性。受篇幅所限,仅介绍空间建模、参数率定、规模计算和污染事故应急模块。

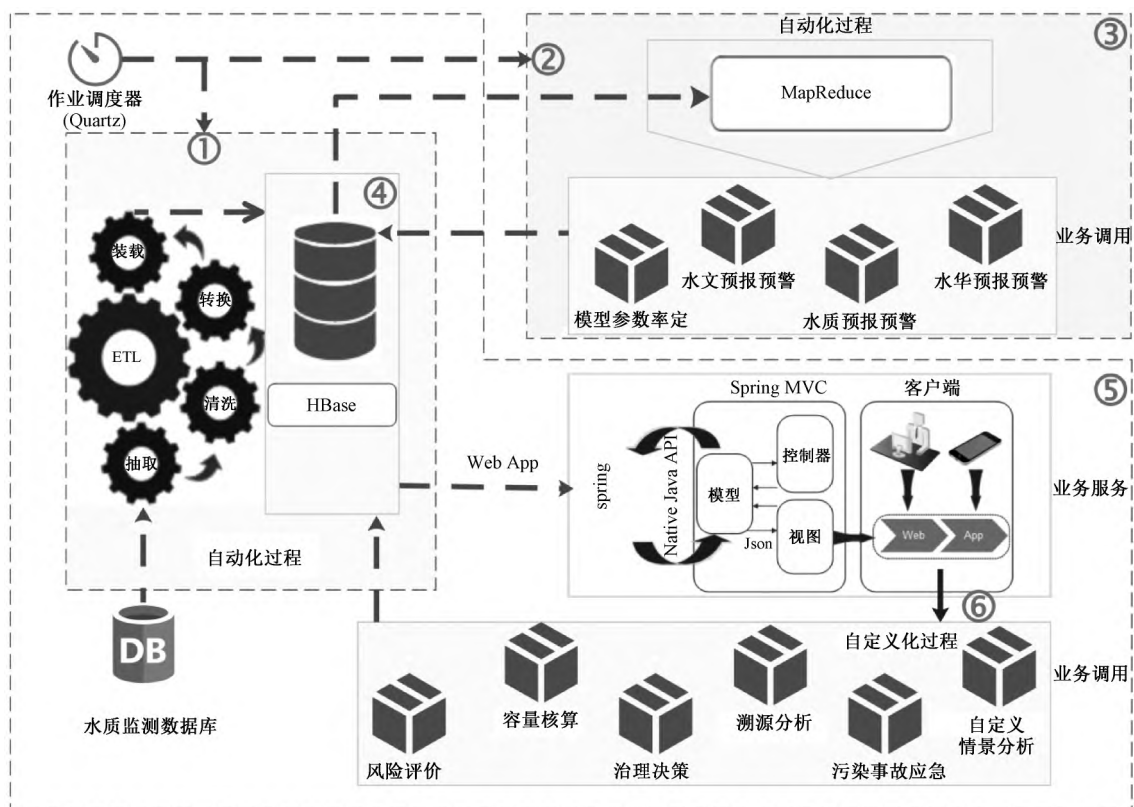


图2 水环境质量预报预警大数据平台应用案例

Fig.2 Case study of water environment quality forecast and early warning big data platform

#### 4.1 水环境模型空间建模

该案例采用 SWAT 模型模拟流域水文水质过程,采用 Delft3D 和 EFDC 模型模拟水体水动力水质过程。SWAT 空间建模通常直接采用 ArcSWAT 或 QSWAT 软件工具。对于 Delft3D 和 EFDC,虽然有商业版的建模工具可供选择,比如 EFDC-Explorer,但是这些工具属于单机(Stand-Alone)模式:一方面,不具备 GIS 可视化交互功

能,缺乏良好的用户体验,并且学习曲线相对较长;另一方面,也不满足 Web 应用系统的交互需要。因此,开发基于 GIS 的单机版和 Web 版建模工具可以改善水动力水质建模过程,促进水环境模型的业务化运行。

图3展示了单机版 Delft3D 空间建模系统软件。该软件集成了网格生成工具、地形插值、边界条件设置、初始条件设置、传输条件设置及模拟过



程设置等完整的建模流程,此外还集成了计算引擎并行计算和模拟结果可视化分析功能,实现了水环

境模型的业务化运行,降低了模型的应用门槛,大大提升了水环境管理工作的科学化、智能化水平。

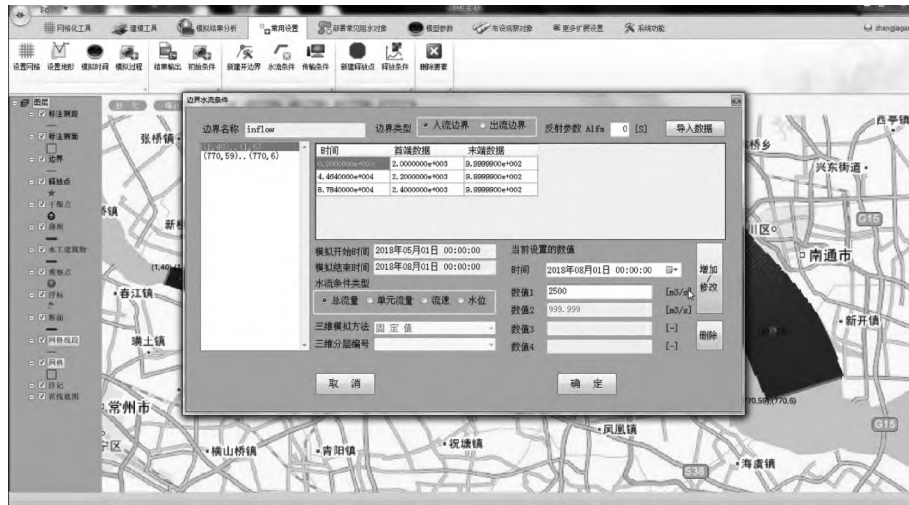


图3 单机版 Delft3D 模型空间建模软件工具

Fig.3 Stand-alone Delft3D modeling system software

图4展示了Web版Delft3D模型空间建模系统。该系统提供类似单机版的建模流程和功能,用户无需安装专业的建模软件,仅通过访问浏览

器便可开展复杂空间建模、执行模型计算和可视化分析模拟结果,极大地促进了Delft3D等模型工具与Web应用系统的集成。

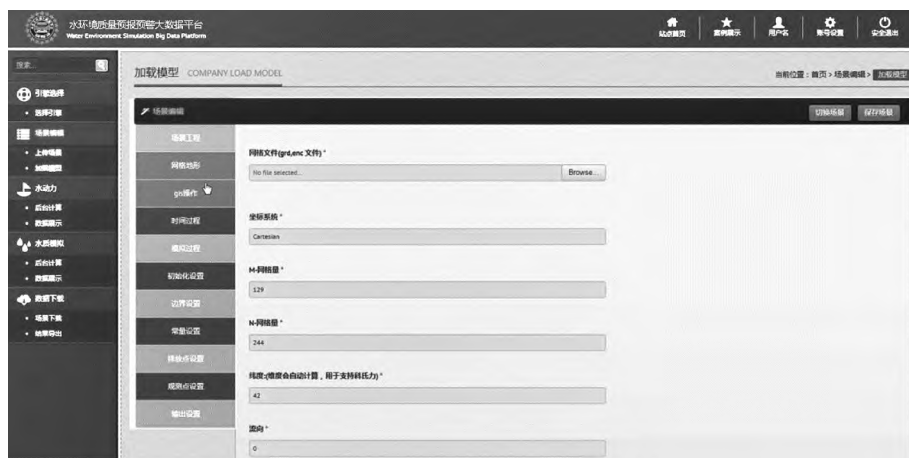


图4 Web版 Delft3D 模型空间建模软件工具

Fig.4 Web-based Delft3D modeling system software

#### 4.2 水环境模型参数自动率定

该案例<sup>[32]</sup>采用贝叶斯优化算法对SWAT模型进行参数自动率定,其主要过程包括参数敏感性分析、参数率定过程和Hadoop集群计算3部分,如图5所示。参数敏感性分析采用Morris方法,Hadoop MapReduce计算体系则承担了Morris方法所需的批量模型计算任务。由Hadoop执行模型计算并将结果返回给Morris,然后由Morris对重要参数进行敏感性排序并筛选出敏感参数。参数率定过程采用贝叶斯优化算法,所需批量计算同样委托给框架的Hadoop大数据计算体系,由

Hadoop执行模型计算并将结果返回给贝叶斯优化算法。整个率定过程自动循环,不需人为干预,直至达到算法收敛条件或者最大优化迭代次数。纳什效率系数(Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient, NSE)被作为目标函数进行水文参数敏感性分析及收敛性分析,定性分析度量方式的影响。该案例证明了大数据技术框架内的水环境模型参数自动率定的可行性和高效性。

#### 4.3 水环境模型规模计算

水环境数值模型模拟计算是典型的中央处理器(Central Processing Unit)密集型运算,具有计算

资源需求高、运行时间长、模拟结果文件大的特点。该案例<sup>[33]</sup>在框架中选用 Hadoop MapReduce 分布式计算框架(图6),以 Delft3D 模型规模计算为例,验证集群运算模式的可行性。水环境模型规模计算的设计思路是将 Delft3D 模型的批量算例工程文件分发到各个数据节点, Hadoop 集群通过位置感知机制将计算引擎程序( Delft3D 可执行

程序)定位并下载到数据节点,在节点上通过读取算例工程文件重构模型配置文件,并完成模型计算过程。案例结果表明, Hadoop 集群运算模式可有效加快模型的规模计算过程。该模式具有通用性,适用于其他复杂模型的批量计算,可为水环境质量预报预警业务中的大规模批量计算问题提供一种可行的解决方案。

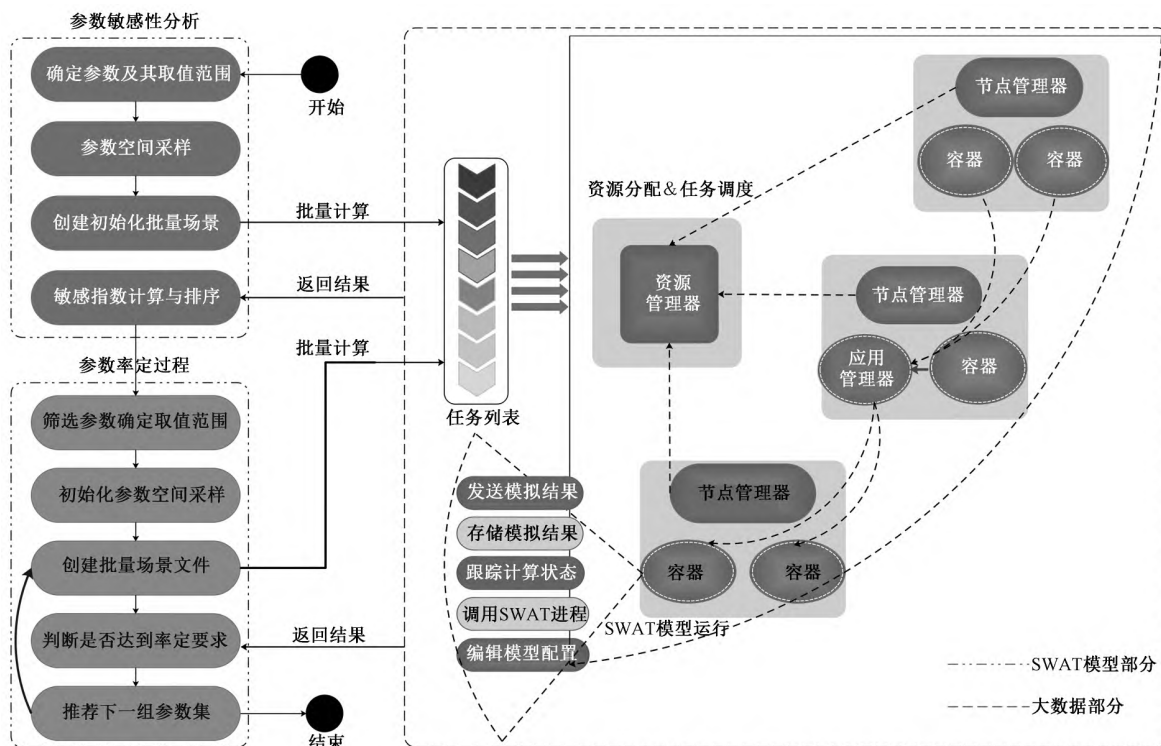


图5 SWAT模型参数自动率定过程<sup>[32]</sup>

Fig.5 Flowchart of automatic calibration of SWAT model parameters

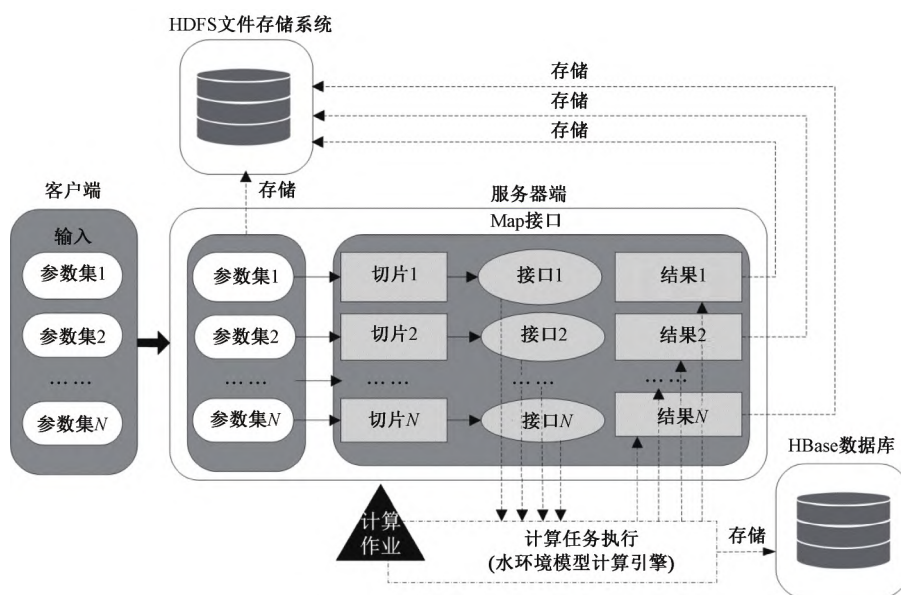


图6 基于 Hadoop MapReduce 的水环境模型规模计算框架<sup>[33]</sup>

Fig.6 Large-scale calculation framework of water environment model based on Hadoop MapReduce



#### 4.4 突发水污染事故应急

该案例采用 Delft3D 模型为基础模型进行二次开发,以实现快速、高效、可定制的污染物迁移扩散过程模拟。其计算网格采用曲面结构化交错网格,具有高度贴边、计算高效的特点。此外,可根据实际应用需求对提前生成的研究区网格进行快速合并和裁剪,以满足自定义研究区的需求。通过参数设置可对污染物进行自

定义定制,以满足自定义污染物的需求。通过对 Delft3D 计算引擎的封装,可以适应 Web 应用程序系统集成的需要。用户可在 Web 应用中自定义添加、删除、编辑边界条件、排放条件、观测点和观测断面,以满足不同污染物类型、不同突发场景、不同污染阶段下的突发污染事故预报预警要求。图 7 为突发水污染事故应急模块示意图。



图 7 基于 Delft3D 模型的突发水污染事故应急模块

Fig.7 Emergency module for sudden water pollution accident simulation based on Delft3D model

## 5 结论与展望

水环境模型的深入应用,尤其是模型参数的自动化率定和自定义场景分析,需要满足模型大规模计算及其引起的规模存储和规模分析的需求,这是当前限制水环境质量预报预警业务取得进一步发展的重要因素。大数据技术提供了融合高性能计算、分布式存储和全过程快速分析的解决方案,克服了水环境模型常规并行计算模式未考虑其引发的模拟结果的持久化存储和快速分析需求的不足。本文提出了水环境质量预报预警大数据平台框架,该框架以水环境模型体系为基础,以大数据计算体系为核心,以实现水环境质量预报预警应用服务为目标,通过水环境模型融合大数据技术,解决了预报预警业务的自动化和自定义化问题。研究结果可为重新审视复杂水环境模型与大数据技术的关系提供新的见解,也可为基

于大数据技术的水环境质量预报预警平台的构建提供思路和参考。当前,国家不断加强水环境综合治理,推进水生态环境保护,这就对水生态环境预报预警提出了更高的要求。构建水环境质量预报预警大数据平台,可为管理部门掌握水文水质总体变化态势提供科学的分析工具,更好地指导环境管理过程的精准施策和科学管控。

#### 参考文献(References):

- [1] 李茜,张鹏,彭福利,等. 国家水环境质量预报预警研究进展及业务发展思路[J]. 中国环境监测, 2019, 35(1): 8-16.  
LI Qian, ZHANG Peng, PENG Fuli, et al. Research Progress and Preliminary Plan of National Water Quality Forecasting and Alarming System [J]. Environmental Monitoring in China, 2019, 35(1): 8-16.
- [2] 国务院. 国务院关于印发水污染防治行动计划的通知: 国发〔2015〕17号 [A/OL]. (2015-04-16)

- [ 2021-10-09 ]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-04/16/content\\_9613.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-04/16/content_9613.htm).
- [ 3 ] 中共中央办公厅, 国务院办公厅. 关于构建现代环境治理体系的指导意见 [A/OL]. ( 2020-03-03) [2021-10-09]. [http://www.gov.cn/zhengce/2020-03/03/content\\_5486380.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2020-03/03/content_5486380.htm).
- [ 4 ] LIANG Z Y ,ZOU R ,CHEN X ,et al. Simulate the Forecast Capacity of a Complicated Water Quality Model Using the Long Short-Term Memory Approach [J]. *Journal of Hydrology* 2020 ,581: 124432.
- [ 5 ] 陈永灿,刘昭伟,朱德军. 水动力及水环境模拟方法与应用[M]. 北京: 科学出版社 2012.
- [ 6 ] 彭泽洲,杨天行,梁秀娟. 水环境数学模型及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社 2007.
- [ 7 ] MELCHING C S. Application of a Water Quality Model for Determining Instream Aeration Station Location and Operational Rules: A Case Study [J]. *Water Science and Engineering* 2018 ,11( 1) : 8-16.
- [ 8 ] FU B H ,MERRITT W S ,CROKE B F W ,et al. A Review of Catchment-Scale Water Quality and Erosion Models and a Synthesis of Future Prospects [J]. *Environmental Modelling & Software* ,2019 ,114: 75-97.
- [ 9 ] FU B H ,HORSBURGH J S ,JAKEMAN A J ,et al. Modeling Water Quality in Watersheds: From Here to the Next Generation [J]. *Water Resources Research* , 2020 ,56( 11) : e2020WR027721.
- [ 10 ] ABBASPOUR K C ,ROUHOLAHNEJAD E ,VAGHEFI S ,et al. A Continental-Scale Hydrology and Water Quality Model for Europe: Calibration and Uncertainty of a High-Resolution Large-Scale SWAT Model [J]. *Journal of Hydrology* 2015 ,524: 733-752.
- [ 11 ] SHIVHARE N ,DIKSHIT P K S ,DWIVEDI S B. A Comparison of SWAT Model Calibration Techniques for Hydrological Modeling in the Ganga River Watershed [J]. *Engineering* 2018 ,4( 5) : 643-652.
- [ 12 ] PENNA P ,BALDRIGHI E ,BETTI M ,et al. Water Quality Integrated System: A Strategic Approach to Improve Bathing Water Management [J]. *Journal of Environmental Management* 2021 ,295( 2) : 113099.
- [ 13 ] CHEN Z ,XU H ,JIANG P ,et al. A Transfer Learning-Based LSTM Strategy for Imputing Large-Scale Consecutive Missing Data and Its Application in a Water Quality Prediction System [J]. *Journal of Hydrology* 2021 ,602( 1) : 126573.
- [ 14 ] 王永桂,张潇,张万顺. 流域突发性水污染事故快速模拟与预警系统[J]. *环境科学与技术* 2018 ,41( 7) : 164-171.
- WANG Yonggui ,ZHANG Xiao ,ZHANG Wanshun. A Fast Simulation and Early Warning System for Basin-Scale Emergency Water Environmental Risk [J]. *Environmental Science & Technology* ,2018 ,41( 7) : 164-171.
- [ 15 ] DING X ,DONG X ,HOU B ,et al. Visual Platform for Water Quality Prediction and Pre-warning of Drinking Water Source Area in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Journal of Cleaner Production* ,2021 ,309( 6) : 127398.
- [ 16 ] BURCHARD-LEVINE A ,LIU S M ,VINCE F ,et al. A Hybrid Evolutionary Data Driven Model for River Water Quality Early Warning [J]. *Journal of Environmental Management* 2014 ,143: 8-16.
- [ 17 ] TAO J ,CAI S B ,JIANG D X ,et al. A Data-Driven Model for Real-Time Water Quality Prediction and Early Warning by an Integration Method [J]. *Environmental Science and Pollution Research International* 2019 ,26( 3/4) : 30 374-30 385.
- [ 18 ] TANG C H ,YI Y J ,YANG Z F ,et al. Water Pollution Risk Simulation and Prediction in the Main Canal of the South-to-North Water Transfer Project [J]. *Journal of Hydrology* 2014 ,519: 2 111-2 120.
- [ 19 ] WANG Y ,ZHANG W ,ENGEL B A ,et al. A Fast Mobile Early Warning System for Water Quality Emergency Risk in Ungauged River Basins [J]. *Environmental Modelling & Software* 2015 ,73: 76-89.
- [ 20 ] VIJAY R ,MARDIKAR T ,KUMAR R. Impact of Sewage Discharges on Coastal Water Quality of Mumbai ,India: Present and Future Scenarios [J]. *Environmental Monitoring and Assessment* ,2016 ,188( 7) : 1-13.
- [ 21 ] NEVES A A S ,PINARDI N ,MARTINS F. IT-OSRA: Applying Ensemble Simulations to Estimate the Oil Spill Risk Associated to Operational and Accidental Oil Spills [J]. *Ocean Dynamics* ,2016 ,66( 8) : 939-954.
- [ 22 ] TOZ A C. Modelling Oil Spill Around Bay of Samsun , Turkey ,with the Use of Oilmap and Adios Software Systems [J]. *Polish Maritime Research* ,2017 ,24( 3) : 115-125.
- [ 23 ] HOU X L ,HODGES B R ,FENG D Y ,et al. Uncertainty Quantification and Reliability Assessment in Operational Oil Spill Forecast Modeling System [J]. *Marine Pollution Bulletin* ,2017 ,116( 1) : 420-433.
- [ 24 ] SHI B ,WANG P ,JIANG J P ,et al. Applying High-Frequency Surrogate Measurements and a Wavelet-

- ANN Model to Provide Early Warnings of Rapid Surface Water Quality Anomalies [J]. Science of the Total Environment 2018 ,610/611: 1 390-1 399.
- [25] LI D Y ,WEI Y M ,DONG Z C ,et al. Quantitative Study on the Early Warning Indexes of Conventional Sudden Water Pollution in a Plain River Network [J]. Journal of Cleaner Production , 2021 , 303 ( 4 ) : 127067.
- [26] HOU D B ,SONG X X ,ZHANG G X ,et al. An Early Warning and Control System for Urban ,Drinking Water Quality Protection: China ' s Experience [J]. Environmental Science and Pollution Research 2012 , 20( 7 ) : 4 496-4 508.
- [27] WANG H ,FU X D ,WANG G Q ,et al. A Common Parallel Computing Framework for Modeling Hydrological Processes of River Basins [J]. Parallel Computing 2011 ,37( 6 ) : 302-315.
- [28] 左一鸣 ,崔广柏. 二维水动力模型的并行计算研究 [J]. 水科学进展 2008 ,19( 6 ) : 846-850.
- ZUO Yiming ,CUI Guangbai. Parallel Computation for 2D Flow Model [J]. Advances in Water Science , 2008 ,19( 6 ) : 846-850.
- [29] 靖争. 湖泊水环境数值模拟及非静压水流并行计算方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学 2017.
- [30] 赵旭东 ,梁书秀 ,孙昭晨 ,等. 基于 GPU 并行算法的水动力数学模型建立及其效率分析 [J]. 大连理工大学学报 2014 ,54( 2 ) : 204-209.
- ZHAO Xudong ,LIANG Shuxiu ,SUN Zhaochen ,et al. Foundation and Analysis of Computational Efficiency for Hydrodynamic Model Based on GPU Parallel Algorithm [J]. Journal of Dalian University of Technology 2014 ,54( 2 ) : 204-209.
- [31] 宋利祥 ,范光伟 ,张文明 ,等. 洪水演进高速模拟系统设计及实现 [J]. 水电能源科学 2017 ,35( 12 ) : 33-36.
- SONG Lixiang ,FAN Guangwei ,ZHANG Wenming ,et al. Design and Implementation of High Speed Simulation for Flood Routing [J]. Water Resources and Power 2017 ,35( 12 ) : 33-36.
- [32] 马金锋 ,饶凯锋 ,李若男 ,等. 水环境模型与大数据技术融合研究 [J]. 大数据 2021 ,7( 6 ) : 103-119.
- MA Jinfeng ,RAO Kaifeng ,LI Ruonan ,et al. Research on the Integration of Water Environment Model and Big Data Technology [J]. Big Data Research 2021 ,7( 6 ) : 103-119.
- [33] 马金锋 ,唐力 ,饶凯锋 ,等. Hadoop 下水环境模拟集群运算模式 [J]. 大数据 2019 ,5( 6 ) : 73-84.
- MA Jinfeng ,TANG Li ,RAO Kaifeng ,et al. Cluster Computing Mode for Water Environment Simulation Based on Hadoop [J]. Big Data Research ,2019 ,5( 6 ) : 73-84.