

洪水风险图推演实时性提升 技术研究与实践应用

陈 胜^{1,2}, 柴福鑫^{1,2}, 刘业森^{1,2}, 刘 舒^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院, 100038, 北京; 2. 水利部防洪抗旱减灾技术创新中心, 100038, 北京)

摘 要:2024—2025年全国洪水风险图编制工作新增实时动态推演能力建设要求,旨在提升水旱灾害防御“四预”(预报、预警、预演、预案)系统应用的实战支撑能力。针对传统洪水风险图推演串行处理模式存在的响应速度慢、实时性差,以及难以适配防洪调度决策及时、高效需求的问题,本文开展洪水风险图推演实时性提升技术研究。基于洪水风险图实时动态推演平台研发实践,系统梳理洪水风险图推演全业务流程,识别方案加载、模型计算、数据存取、可视化渲染各环节的性能瓶颈。融合高性能计算、高效数据存取、服务器后台渲染等关键技术,创新构建计算流、数据存取流、渲染流的并行处理架构,突破传统全量计算完成后再渲染展示的技术模式。该优化技术方案改善了系统平台的交互体验与实践应用效果,已在水利部、太湖流域及安徽省等洪水风险图实时动态推演平台中得到应用。本文以安徽省蒙洼蓄洪区25万个网格的推演场景开展实例研究,结果显示,相较于传统模式15 min的洪水分析成果呈现等待时长,该架构可实现20 s内输出首帧推演可视化结果,后续每帧更新仅需2 s,同时支持推演过程随时暂停或终止计算,有效提升防洪决策支撑的灵活性与时效性,可为全国其他省份、流域的洪水风险图实时动态推演平台建设提供技术参考。

关键词:洪水风险图;实时性;动态性;数据缓存;后台图像渲染;动态推演平台;并行计算架构

Research and practical application of techniques for improving real-time performance of flood risk map deduction

CHEN Sheng^{1,2}, CHAI Fuxin^{1,2}, LIU Yeseng^{1,2}, LIU Shu^{1,2}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Technology Innovation Center for Flood & Drought Disaster Prevention and Reduction, Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

Abstract: The national flood risk map compilation project for 2024–2025 has put forward new requirements for the development of real-time dynamic deduction capabilities, aiming to enhance the practical support capacity of the forecasting, warning, rehearsal, and contingency planning applications for flood and drought disaster prevention. Traditional serial processing modes for flood risk deduction suffer from slow response speed and poor real-time performance, which fail to meet the timely and efficient demands of flood control scheduling and decision-making. This paper conducted technical research on improving the real-time performance of flood risk map deduction. Based on the research and development practice of a real-time dynamic deduction platform for flood risk maps, this paper systematically sorted out the entire business process of flood risk deduction and identified performance bottlenecks in key links, including scheme loading, model calculation, data access, and

收稿日期:2025-12-28 修回日期:2026-06-02

作者简介:陈胜,正高级工程师,主要研究领域为洪水预报调度与水利信息化。E-mail:19896651@qq.com

基金项目:国家重点研发计划项目“蓄滞洪区立体感知与运用智能决策关键技术”(2024YFC3012300)。

visual rendering. By integrating key technologies such as high-performance computing, efficient data access, and server-side background rendering, this paper innovatively constructed a parallel processing architecture consisting of computation flow, data access flow, and rendering flow, which broke the traditional technical mode that performs rendering only after the completion of full model calculation. The optimized technical solution has improved the interactive experience and practical application effectiveness of the system platform and has been applied in real-time dynamic flood risk map deduction platforms of the Ministry of Water Resources, the Taihu Lake basin, and Anhui Province. By taking the 250,000-grid deduction scenario of the Mengwa Flood Detention Area as a case study, the results show that compared with the 15-minute waiting time for presenting flood analysis results in the traditional mode, the proposed architecture can output the first frame of deduction visualization results within 20 seconds, with each subsequent frame updated in only 2 seconds. It supports arbitrary suspension and termination of the deduction process, effectively improving the flexibility and timeliness of flood control decision support, providing a technical reference for the construction of real-time dynamic deduction platforms for flood risk maps in other provinces and basins nationwide.

Keywords: flood risk map; real-time performance; dynamic characteristic; data caching; background image rendering; dynamic deduction platform; parallel computing architecture

中图分类号: TV877+P429 文献标识码: A 文章编号: 1000-1123(2026)11-0024-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2026.11.003

一、引言

近几年,全国开展了新一轮洪水风险图编制工作,即2024—2025年洪水风险图编制任务。本次洪水风险图编制任务是依据《洪水风险图编制和专项评估技术要求》,在《洪水风险图编制导则》(SL 483—2017)等技术文件基础上,结合数字孪生技术和“需求牵引、应用至上”的核心思想提出的。相对于2013—2015年上一轮全国洪水风险图编制任务,新一轮洪水风险图编制任务要求新增动态洪水风险图功能,即实现洪水风险图实时动态推演能力,同时要求在水利部本级、流域和省级水利部门建设具备洪水风险图实时动态推演能力的平台,并将平台建设成果集成到水利部、流域和省级水利部门的水旱灾害防御或数字孪生防洪“四预”(预报、预警、预演、预案)应用等系统中,用来支撑各级水利部门的水旱灾害防御决策工作。

洪水风险图实时动态推演能力主要体现在动态性和实时性两个方面。

动态性体现在洪水风险图计算方案可根据洪水决策情景需要灵活设置,比如可以修改计算方案的边界条件,设置溃口,以及进行工程调度设置等。动态设置能力主要取决于模型工具的能力,不同的模型工具设置方法和灵活程度不同。目前国内外大部分模型工具都能实现边界条件修改等基本的动态配置功

能,比如成熟的IFMS国产洪水分析软件具有修改边界条件、动态增加溃口和设置阻水建筑物等功能。动态性还体现在洪水动态演进的可视化能力方面,比如通过动画形式在二三维场景中推演洪水的演进过程,这类动态可视化效果在数字孪生流域的“预演”模块中体现较多。

实时性则体现在洪水风险图计算方案在模型计算、后处理分析和结果可视化等整个过程中的高效性,只有整个过程高效才能满足洪水调度决策的及时性要求;实时性也是用户交互的需求之一,分析结果响应时间太长会导致用户体验差,从而降低洪水风险图推演平台的应用价值。目前,各模型工具主要通过优化算法、优化洪水风险图计算方案的模型结构,以及利用CPU/GPU加速技术来提升模型的计算效率。如南统超等基于国产硬件平台研发“多节点-多GPU”大规模分布式异构并行计算水动力模型,用于流域尺度二维浅水方程高效并行求解。在可视化方面的实时性也十分重要,将洪水分析结果快速渲染并展示给用户,有利于提升决策效率及用户的交互体验。可视化内容包括洪水演进范围、淹没水深及洪水影响情况等,在数字孪生系统中通常以洪水淹没图、数字流场、实景化洪水演进过程等方式展示。在整个洪水分析过程中,影响实时性的因素还包括大量数据存取和传输、大量空间数据分析处理等,目前也有相关的研究和技术方案。

计算方案的合理性及分析结果的正确性,是洪水风险图编制成果能够成功应用的根本前提,提升洪水风险图动态性和实时性则是其实战应用中的一个关键因素。本文重点从洪水风险图实时动态推演整体过程研究其实时性提升的思路和方法,切实提升洪水风险图实时推演能力,从而推动洪水风险图实时动态推演平台的实际应用进一步深化。

二、实时性影响因素分析与总体技术方案

洪水风险图推演过程涉及大量模型数据和计算结果数据的存取,模型计算量巨大,同时还需进行大量的模型后处理分析和计算结果渲染工作,这些都是影响洪水风险图推演实时性的关键因素,因而需要从整体流程上进行分析研究,并提出可行的实时性提升方案。

1. 洪水风险图推演主要过程

洪水风险图推演主要过程包括风险图计算方案加载、计算设置、模型计算、模型后处理、洪水影响分析及结果可视化展示等步骤。

计算方案加载是指加载洪水风险图计算方案自身相关信息,如二维模型的网格数据(包括网格单元、边元、节点信息,以及网格单元高程、糙率等)、一维模型的河道断面数据、相关水利工程参数等。二维网格单元的数量根据计算单元的大小和网格划分精细度不同而差异较大,从几个到几千万个不等。

计算设置主要包括边界条件设置和计算参数设置等。边界条件是指定溃口、水库下泄、下游入湖口等的水位或流量过程,是洪水风险图计算方案的重要考虑因素。计算参数用来对模型计算进行控制,包括计算起止时间、输出时间步长、干湿阈值等控制信息。

模型计算根据上述计算方案的边界条件和计算参数设置进行,不同的模型工具使用的数值方法也不尽相同,主要数值方法包括有限差分法(FDM)、有限体积法(FVM)、有限元法(FEM)等。不同数值方法、计算方案编制方法(如网格剖分方法及质量)和算力条件都会影响模型计算的效率。

模型后处理一般包括对计算结果的各项处理,如计算结果的格式化存储、洪水影响分析及可视化渲染等,本文将洪水影响分析及可视化渲染作为独立过程进行说明。

洪水影响分析是根据防洪决策需要进行的各类统计分析,如最大水深统计,最大淹没范围统计,最大淹没历时统计,进洪量、滞洪量统计等。

可视化渲染是将计算分析结果通过图、表和GIS地图等方式直观呈现给用户,如将洪水分析结果渲染成淹没水深图、淹没历时图等并在洪水风险图实时动态推演平台中展示。

2. 实时性影响因素分析

洪水风险图推演过程的每个环节都可能影响其实时性。

当计算方案加载时,一维水动力模型的数据量一般不会很大,二维水动力模型中需要加载大量网格数据,同时还需要进行拓扑分析等前处理工作。虽然计算方案加载时涉及大量模型数据读取及拓扑分析工作,但在目前的计算机I/O和算力条件下,整个加载过程可以在数秒内完成,因而对整体实时性影响不大。如果需要进一步提升性能,可以考虑对计算方案进行预加载和预处理。

模型计算是影响洪水风险图推演实时性的重要因素。为了保持水动力模型计算的稳定性,实际的计算步长往往只有1~10 s,完成整个计算方案需要数万步的计算,对有数万至上千万个网格的计算方案来说,在传统CPU计算架构下的计算时间往往长达数小时甚至数天。模型计算性能提升对洪水风险图推演的实时性提升有着重要作用,目前有多个洪水分析工具通过GPU、DCU等算力资源支持,以及改进模型算法,大大提升了模型计算的性能。

在应用实践中可以发现,计算结果后处理及结果的可视化渲染是影响洪水风险图推演实时性的重要因素。现有的大部分应用系统为B/S架构,如果将大量网格结果数据从服务器端传输到浏览器进行渲染展示,一方面数据传输耗时较长,使结果数据的呈现时间大大滞后;另一方面浏览器渲染大量网格数据也比较耗时,往往还因占用太多内存导致浏览器崩溃,严重影响用户体验。在传统的洪水风险分析模式下,一般是在模型计算全部完成后再解析结果数据,然后进行可视化渲染展示,用户需要等待较长时间才能看到洪水风险分析的成果,导致洪水风险图推演的实时性大打折扣。

分析可知,由于洪水风险图计算方案数据量大、模型计算量大,导致计算方案加载、模型计算、结果可视化渲染、数据的前后台传输等每个流程都影响洪水风险图推演的实时性,因而需要从洪水风险图推演整体过程进行优化,从而切实达到提升洪水风险图推演实时性的目标。

3. 实时性提升方案

考虑到影响洪水风险图推演实时性的因素是多方面的,本文研究通过整体流程优化对其进行提升,如对于需要重复使用的大量数据使用内存进行缓存,使用后台渲染技术提升可视化渲染的性能和稳定性,通过洪水风险图推演过程并行化处理架构缩短可视化结果的呈现时间。图1为模型计算、数据存取和后台渲染并行处理的技术架构。

本文提出的并行处理技术架构中,模型计算每完成一个输出时间步长的计算,就将计算结果通过数据存取流缓存到内存中,同步读取相应的网格单元空间信息和计算结果进行后台渲染处理。此并行处理架构下,第一个时刻的可视化结果呈现给用户的时间等于一个时间步长模型计算的用时与渲染一个时间步长模型计算结果的用时之和。通过这一计算流、数据存取流、渲染流“三流”并行的处理架构,在英伟达 RTX A2000 8GB 的算力条件下,30万个网格、7 d 时长的洪水风险图计算方案,用户最快可以在20 s内得到第一个输出时间步长的洪水分析可视化结果。随着时间的推移,洪水风险图实时动态推演平台逐步计算、渲染和展示后续的洪水分析结果。

三、实时性提升关键技术

1. 动态模型方案加载优化技术

2024—2025年全国洪水风险图编制技术要求对

提交的计算方案和模型工具进行了明确。通过标准化的计算方案加载与调用接口可以实现对任意洪水风险图计算方案的动态加载和调用。模型方案加载需要进行大量网格数据加载及拓扑分析和检查,这种加载和分析是一次性的,以当前的计算机算力,耗时并不长,如IFMS洪水分析模型工具,对30万个网格计算方案的加载和拓扑分析等预处理耗时在3 s之内。进一步提升计算方案加载效率可从两个方面进行考虑:①模型的拓扑分析等预处理工作完成后,将分析结果存放到固定格式的文件中,每次计算时直接加载已有的分析结果数据而省去拓扑分析所花费的时间;②通过缓存机制将模型方案和拓扑分析结果提前加载到内存中,从而可以更加快速高效地使用计算方案相关信息。

2. 高性能模型计算技术

模型计算性能提升主要依赖于模型工具的研发。通过GPU/DCU加速来提升洪水风险图计算方案涉及的一二维水动力模型计算效率的方法已经被普遍采用,该加速方法可以让模型计算用时在分钟级内,大大提升洪水分析模型计算的性能。使用GPU/DCU加速的算法程序可以数量级提升计算效率,如IFMS模型工具的数值方法采用有限体积法(FVM),其支持Windows/Linux环境下GPU/DCU的加速计算。在英伟达 RTX A2000 8GB 的算力条件下,30万个网格、7 d 时长的计算方案约10 min就能完成全部计算,基本满

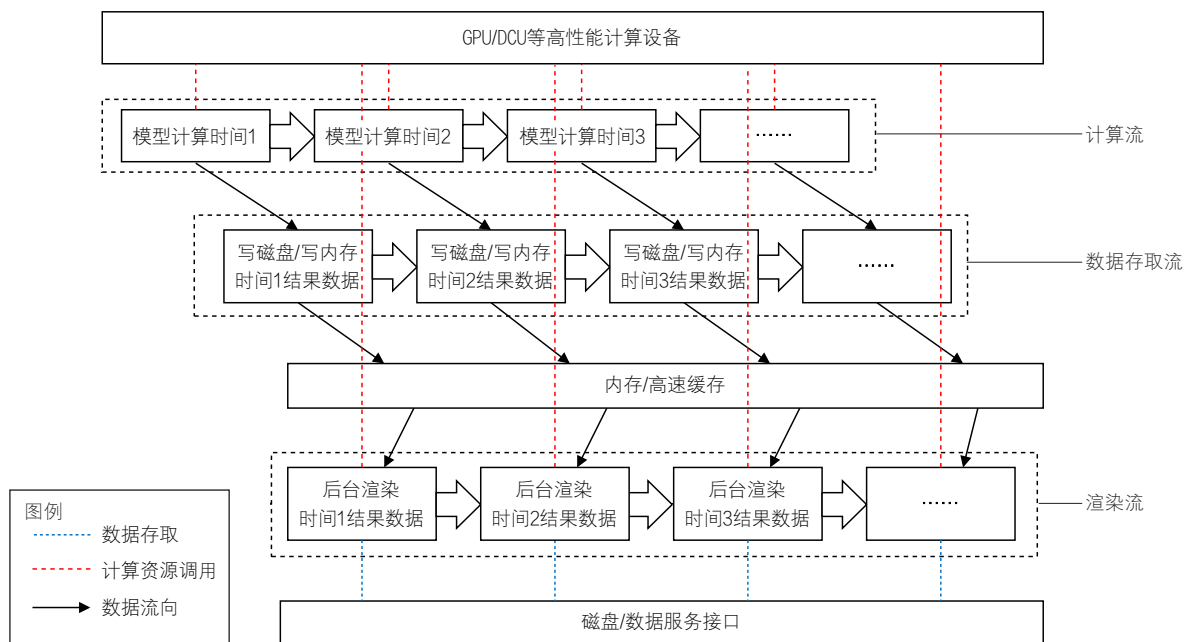


图1 模型计算、数据存取、后台渲染并行处理技术架构

足洪水风险图实时动态推演的效率要求。为了实现多个洪水风险图编制单元并行计算,以及满足多用户并发使用GPU/DCU的情况,高性能模型计算还可考虑同时使用多GPU/DCU计算资源进行多节点、多卡的并行计算。

3. 数据缓存与后台渲染技术

洪水风险图计算结果的二维模型计算结果网格数量大,每个网格包含水深、水位、流速等多个变量及多个时间点的数据,相应的数据量可能有几十GB,其存取和传输会耗费大量I/O资源和时间。在进行数据分析(如统计淹没历时)时需要对数据进行频繁的存取操作,也会耗费大量I/O资源和时间。而从内存缓存中存取数据非常高效,可以大大提升模型结果数据的存取、分析及渲染效率。在物理内存条件允许的情况下,使用数据缓存技术(如使用Ehcache、Memcached等组件)将数据缓存至内存中以提升效率。

同时,为了避免大量网格计算结果数据在服务器端和浏览器间传输,减少浏览器渲染大量网格数据的压力,本文研究和实现了服务器端后台渲染技术。在服务器端后台利用GeoTool工具的按值渲染能力,将计算结果按照网格进行渲染,生成GeoTIFF或PNG格式的渲染结果,其数据量远远小于模型计算结果的数据量,从而大大减少服务器端后台与前端浏览器之间的数据传输量。该渲染结果在浏览器端占用的内存远远小于原始网格数据,因而在浏览器的可视化界面上

展示的效率高且稳定,改善了用户的使用体验。

4. 并行处理调度与系统集成技术

模型高性能计算技术、高效数据缓存和后台渲染技术提升了洪水风险图实时动态推演各环节的性能。设计并实现一个并行处理调度模块,用于组织、监控和调度各部分高效协调运行。业务系统通过集成各个模块,将洪水风险图实时动态推演功能提供给用户应用。并行处理结构与系统集成应用架构见图2。

业务系统根据用户的洪水风险图推演指令,通过计算调度模块调用模型工具进行高效计算,计算监控模块监测模型计算输出结果的变化,每当生成一个输出时间步长的计算结果,即调用后台渲染模块进行高效渲染,生成图片格式的洪水风险分析结果。浏览器端通过WebSocket与服务器后台进行轮询通信,一旦服务器端渲染形成图片结果即取到浏览器端进行渲染展示。

四、应用实例

目前该项技术方案已经在水利部本级、太湖流域和安徽省等各级部门的洪水风险图实时动态推演平台中得到应用,在洪水风险图推演的实时性方面表现优良。以蒙洼蓄洪区洪水风险图成果推演为例对技术方案的效果进行说明。

蒙洼蓄洪区位于安徽省阜阳市阜南县境内,总面积180.4 km²,建成以来已经运用16次,是淮河流域防洪安全的一张重要“底牌”。蒙洼蓄洪区的洪水风

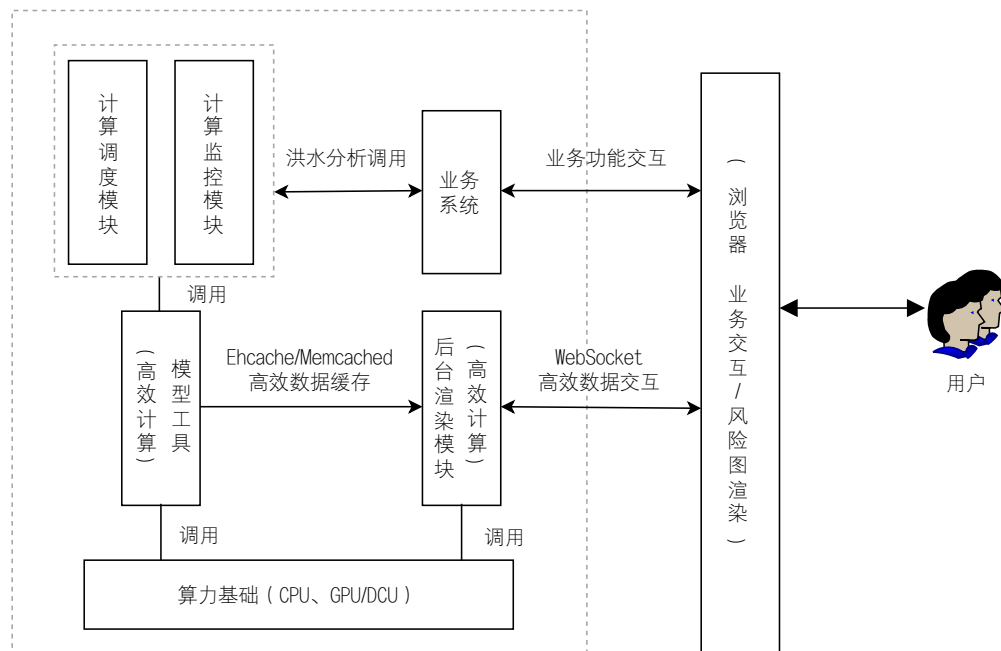


图2 并行处理结构与系统集成应用架构

险图编制成果中,蓄洪区内洪水演进使用二维水动力模型模拟,考虑到区域内庄台、沟渠对洪水演进的影响,网格不宜过大,共划分网格数25万个。以2020年蓄洪区启用的分洪过程作为边界条件,模拟76.5 h(2020年7月20日8时34分至7月23日13时18分)的分蓄洪过程和360 h的退水过程。

传统模式下,洪水风险图预演经过计算方案加载、模型计算(使用英伟达4090 GPU加速)、结果渲染和可视化展示,全部计算完成后,再从结果文件中提取数据进行渲染及可视化,用户看到分析结果需要约15 min,在会商决策场景下进行洪水实时动态推演时影响决策效率及用户体验。

优化技术方案下,蒙洼蓄洪区洪水风险图推演从开始计算到展示第一个输出时间步长的结果需要20 s左右,大大缩短了用户等待时间。随着时间的推移,洪水风险图实时动态推演平台边计算边同步渲染和展示后续每个输出时间步长的分析成果,后续每个输出时间步长的结果呈现约需2 s(见图3)。在该模式下,用户可以随时暂停或终止洪水风险图推演,具有较好的决策灵活性。该技术方案有效提升了蒙洼蓄洪区进退洪的分析效率,支撑了蒙洼蓄洪区防洪会商决策的科学、高效开展。

五、结论

本文通过高性能计算、数据缓存、后台渲染并行处

理架构,提升了洪水风险图实时动态推演效率。在洪水风险图实时动态推演平台中实现了洪水风险图模型方案的动态加载、高效模型计算,以及洪水分析结果的高效渲染与展示,满足了洪水风险分析及防洪调度决策的实时性要求,为其他省份、流域洪水风险图实时动态推演平台的研发提供了借鉴,也可为完善模型工具计算能力和模型接口提供参考。随着对洪水风险分析业务理解的深入和相关业务需求的深入挖掘,需要进一步研究和解决以下问题:实际应用中可能需要多个洪水风险图编制单元进行串并联同时计算,如何提升计算及渲染效率;考虑上下游、左右岸的洪水和水利工程相互影响,如何实现与预报调度模型的耦合计算等。

参考文献:

- [1]《洪水风险图编制和专项评估技术要求》培训班在西安召开[EB/OL].[2024-05-28](2025-12-20).http://shzhfy.mwr.gov.cn/ywdt/202405/t20240528_1749425.html.
- [2]刘汉宇.国家防汛抗旱指挥系统建设与成就[J].中国防汛抗旱,2019,29(10):30-35.
- [3]蔡阳,成建国,曾焱,等.加快构建具有“四预”功能的智慧水利体系[J].中国水利,2021(20):2-5.
- [4]叶瑞禄,左翔,刘修恒.数字孪生秦淮河流域防洪四预平台建设与应用[J].人民长江,2024,55(3):13-20.
- [5]谭森明,郭淑慧,曹润祥.实时动态洪水风险图编制

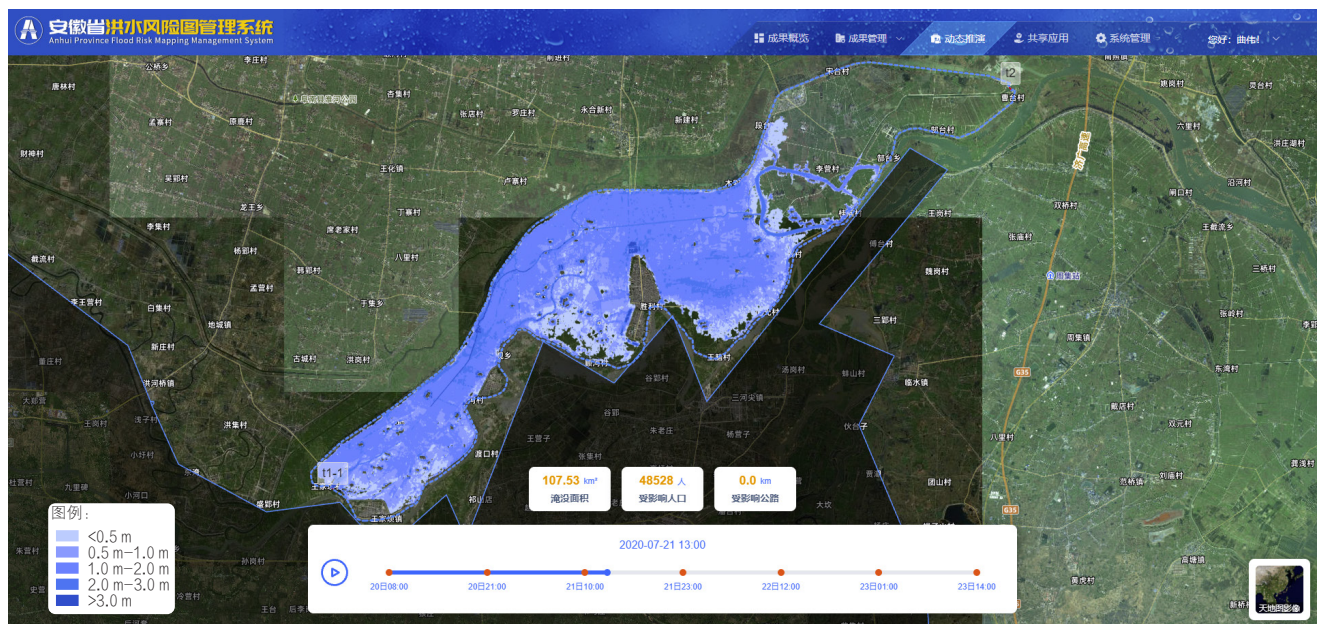


图3 安徽省洪水风险图实时动态推演平台中蒙洼蓄洪区洪水风险图洪水推演计算

- 与应用研究进展[J].人民珠江, 2024, 45(12):11-21.
- [6] 王静, 李娜. 上海城区动态洪水风险图应用系统及典型暴雨内涝分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(3):61-76.
- [7] 刘永志, 张文婷, 崔信民, 等. 动态实时洪水风险分析及管理系统[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(4):1160-1171.
- [8] 郭川靖, 郑颖. 基于IFMS/Urban的义合垆洪水风险模拟研究[J]. 水利规划与设计, 2026(7):121-126.
- [9] 隋意, 姜彪, 孙万光. 溃坝洪水溃口流量高精度计算方法[J]. 东北水利水电, 2025, 43(11):57-60+72.
- [10] 马壮壮, 于洋. 基于MIKE的松江河梯级水库溃坝洪水风险分析[J]. 吉林水利, 2024(5):52-56.
- [11] 钟建群, 李伟添, 彭海波. 基于HEC-RAS的水库溃坝洪水分析——以仁化县高坪水库为例[J]. 现代信息科技, 2024, 8(23):149-152.
- [12] 马建明, 喻海军. 洪水分析软件IFMS/Urban特点及应用[J]. 中国水利, 2017(5):74-75.
- [13] 刘成堃, 张力, 范青松, 等. 基于3DGIS的洪水时空态势推演与调度模拟研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(8):50-57.
- [14] 颜吴君. 防洪推演三维可视化关键技术研究[J]. 资源导刊, 2024(4):38-41.
- [15] 张力, 张航, 刘成堃, 等. 水利数字孪生平台三维模拟仿真技术研究与应用[J]. 人民长江, 2023, 54(8):9-18.
- [16] 陈胜, 李京兵, 王玉丽, 等. 数字孪生漯河建设实践与思考[J]. 中国水利, 2024(13):50-56.
- [17] 朱士建, 张旺, 王高旭. 基于数字孪生的深圳市某流域防洪排涝“四预”系统应用研究[J]. 水利技术监督, 2025(3):38-41+219.
- [18] 秦旭宝, 丁少超, 王大超, 等. 杭嘉湖平原防洪“四预”平台建设与实践[J]. 水利信息化, 2025(5):15-21.
- [19] 王君诺, 马晓超, 王昊, 等. 基于决策树C5.0的水库防洪调度研究[J]. 水利水运工程学报, 2024(3):81-90.
- [20] 杨彦龙, 池建军, 沈海尧. 金沙江白格堰塞湖险情处置[J]. 水利规划与设计, 2021(11):70-75.
- [21] 赵旭东. 基于GPU加速的三维水动力数值模型及应用研究[D]. 大连:大连理工大学, 2017.
- [22] 丁武, 杨芳, 王卫光, 等. 二维水动力模型多GPU分布式数据并行计算方法研究[J]. 水利学报, 2025, 56(12):1647-1658.
- [23] 康永德, 康爱泽, 侯精明, 等. 基于GPU的洪涝模型计算效率提升方法研究[J]. 中国水利, 2025(12):64-72.
- [24] 南统超, 施睿, 于春水. 基于国产CPU/GPU平台的水动力模型异构并行计算[J]. 水利学报, 2025, 56(6):771-779.
- [25] 潘益婷, 宁海元, 黄佳河, 等. 水动力模型与数字孪生场景融合渲染技术应用研究[J]. 人民长江, 2025, 56(S1):327-332.
- [26] 李晓飞, 范青松, 杨坤. 超标准洪水演变全过程的时空态势可视化技术[J]. 人民长江, 2020, 51(S2):385-388.
- [27] 皮婵娟, 李德龙, 江顺浙, 等. 江西省洪水风险动态推演系统设计[J]. 水利规划与设计, 2026(7):58-66.
- [28] 乔贵毅, 王家嵩, 于洋. 防洪减灾决策支持系统三维可视化仿真应用研究[J]. 东北水利水电, 2025, 43(6):47-51.
- [29] 翟佳, 许建卫, 谢辉, 等. 面向IO服务器的高性能存储器的实现与优化[J]. 计算机工程与科学, 2009, 31(11):17-20.
- [30] 李瀚, 胡明晓, 龚志红, 等. 面向矢量瓦片的海量空间数据并行处理技术[J]. 计算机与现代化, 2018(9):32-37+41.
- [31] 朱沁玲, 郝斌, 南玥. 数字孪生场景中GPU加速与双引擎渲染的水流模拟研究[J]. 水利技术监督, 2026(5):61-67.

责任编辑 田灵燕