

城市复杂区域暴雨内涝水文水动力多模型耦合技术研究

李占华¹ 袁东² 张庆竹¹

1 山东省海河淮河小清河流域水利管理服务中心

2 山东省水利勘测设计院有限公司

DOI:10.32629/hwr.v10i3.6894

[摘要] 随着数字孪生流域研究的深入,考虑流域中的城市区域暴雨内涝预报预警的研究也越来越多。城区复杂区域暴雨内涝的计算模型一般为产汇流水文模型、一维河网水动力模型、二维地表水动力模型、地下排水管网模型。本研究以济南市城区复杂区域暴雨内涝对小清河流域的影响作为切入点,研究城市区域产汇流水文模型、一维河网水动力模型、二维地表水动力模型、地下排水管网模型的多模型耦合技术,并在数字孪生小清河项目中进行应用,为智慧小清河提供有力支撑。

[关键词] 多模型耦合技术; 纵向耦合; 侧向耦合; 数字孪生

中图分类号: TH137.331 **文献标识码:** A

Research on Multi-Model Coupling Technology of Hydrology and Hydrodynamics for Rainstorm Waterlogging in Complex Urban Areas

Zhanhua Li¹ Dong Yuan² Qingzhu Zhang¹

1 Water Conservancy Management and Service Center of Haihe, Huaihe and Xiaoqing River Basins of Shandong Province

2 Shandong Survey and Design Institute of Water Conservancy Co., Ltd

[Abstract] With the in-depth research on digital twin river basins, an increasing number of studies have focused on the forecasting and early warning of rainstorm waterlogging in urban areas within river basins. The computational models for rainstorm waterlogging in complex urban zones generally include hydrological models of runoff yield and concentration, one-dimensional river network hydrodynamic models, two-dimensional surface hydrodynamic models, and underground drainage pipe network models. Taking the impact of rainstorm waterlogging in complex urban areas of Jinan on the Xiaoqing River Basin as the entry point, this study investigates the multi-model coupling technology involving hydrological models of runoff yield and concentration, one-dimensional river network hydrodynamic models, two-dimensional surface hydrodynamic models, and underground drainage pipe network models in urban regions. The proposed technology is applied to the Digital Twin Xiaoqing River Project, providing strong support for the smart Xiaoqing River.

[Key words] multi-model coupling technology; vertical coupling; lateral coupling; digital twin

1 研究背景

近年来城市暴雨内涝灾害预报预警问题愈加受到关注。国内城市洪涝预报预警研究呈现出多学科交叉的特点,当前研究的热点主题聚焦在城市洪涝灾害发生机理分析、市政基础设施、城市洪涝灾害风险防范与应急处置等方面,海绵城市、极端天气监测预警、应急预案、城市防灾减灾能力提升等问题是近几年研究的热点。

本项目研究基于小清河流域防洪综合治理过程中对济南城区复杂地形地貌区域暴雨内涝的预报、预警关键技术的研究与应用。

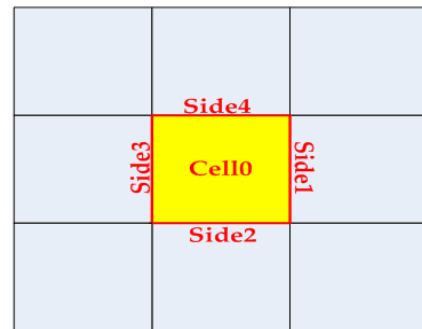


图1 地表网格结构示意图

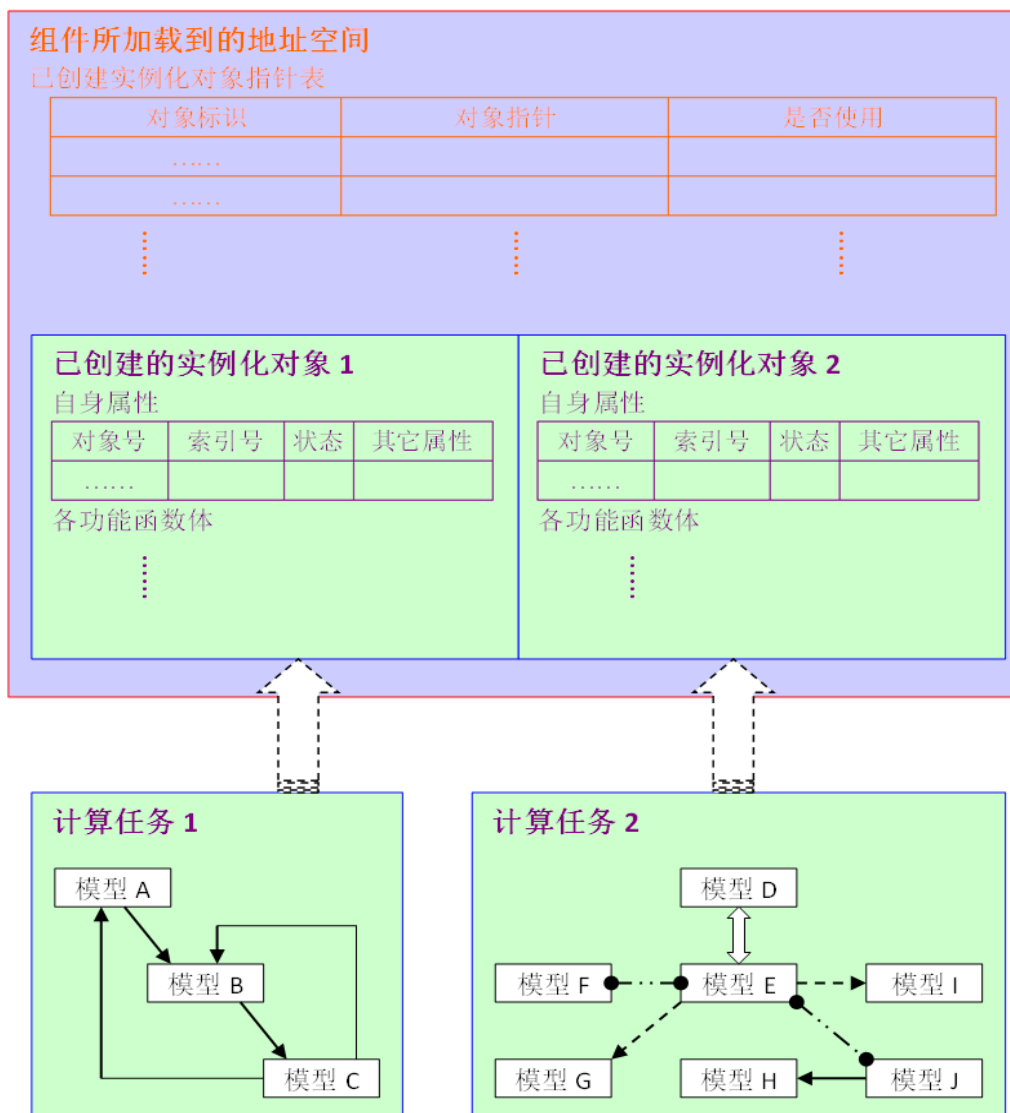


图 2 运行时对应关系

2 研究思路

复杂区域水文水动力耦合模型由多个模型耦合而成,包括产汇流水文模型、水工程调度模型、一维河网水动力模型、二维地表水动力模型、地表排水概化模型等。地表水文水动力模型将地表概化为若干网格 (Cell), 根据网格数据生成对应的网格边 (Side)。网格和网格边分别用来构建面状和线状地物模型, 二者具有与产汇流相关的属性信息, 相互配合共同构建地表产汇流模型。地表水文水动力模型采用经验水文算法计算降雨产流过程, 把降水数据插值到每个网格计算净雨, 再利用水动力方法计算地表坡面汇流过程。

多个模型的耦合计算涉及了数值计算与计算机技术两

个方面。

2.1 数值计算

数值计算方面有以下三个解决方向:

(1) 将所有领域的数值计算问题用统一的基本方程来描述, 然后把所有的计算放在一个模型中解决。但是各个领域的研究对象及问题的物理机制可能都存在很大差异, 所以不太可能统一成用某个数学规律来描述全部现象, 用单个模型解决所有计算的路线基本上也不可行。

(2) 将所有参与计算的数值模型的源程序合并到一起完成计算。这种方法可行但是代价高昂, 需要将所有模型的作者集中起来进行源代码的梳理、拆分、重组编写。如果各个源

程序是采用不同编程语言编写,还涉及到翻译成同一种语言的问题,这是非常困难而且极易出错的任务,工作量大、耗时,而且联合计算中每加入一个新的模型就需要再进行一次这个工作。

(3)将实际物理对象发生相互作用的位置对应到数模中,只在这些特定地方将模型联接起来做运算交互。这个方向的突出优势是降低了模型之间的结合度,但其耦合程度又完全可以满足绝大部分需求,在具备很好的灵活性的同时也能达到原有目标要求。

本文研究多模型耦合计算采用第三种方式。

2.2 计算机技术

要科学、合理的反映济南城区暴雨洪水的物理循环过程,牵涉到河网演进计算、管网流动、平面产汇流分析等几个方面,其中涉及到多模型联合计算以及现有数值模型资源利用的问题,需要高效、通用化解决这个问题。

计算机上的随意两个程序是不能运行时协作的,而多模型联合计算技术要让多个数模在运行时互相协同运作。其目标简而言之就是:让多个数模程序可以同时启动运行;同步推进计算;当不同数模的目标区域范围内对象发生实际物理交互时,各个数模能够联合起来反映这种衔接或者影响;各个数模能够分别独立结束自己的运行,但不影响到参与计算的其它所有模型程序。

多模型联合计算技术需要达到的要求可归纳为以下几点:体系架构开放,让现有模型资源尽可能的加入;尽可能减少已有数模程序作者的修改工作量;不对技术人员的专业外知识提过高要求;让技术人员在发挥专业特长的过程中尽量少受到专业外的牵制;对数模的实现差异有很强的包容性;兼容早期的资源;支持多种主流编程语言;执行效率较高。

2.2.1 整体框架

耦合连接为每个数模程序提供的服务集中在启动、同步、数据传输几个方面,本项目将这些服务封装到一个COM组件中,只需按照使用方法调用各个服务函数,即可获得上述服务。为了增强使用的便捷性,组件支持Automation(自动化),这样从编译型的编程语言以及简单的脚本(VB Script和JAVA Script)都可以调用,大大方便了使用。组件的可实例化对象面向多模型耦合计算的每一次计算任务而设计,实例化对象的创建、功能调用、销毁分别对应了计算任务从定制、启动计算到结束运行的各个阶段。组件内部保留了当前组件所有已经创建的可实例化对象的指针列表,以便当数模程序出现下列不正常状态的时候对程序所对应的实例对象采取适当的处理措施:不能正常响应;运行出错而被操作系统强行终止;不能按照预期结束运行;计算不收敛;运算耗费时间过长。

在运行时,组件、实例化对象、计算任务、数模程序之间的对应与逻辑关系可以用图来表达,组件的使用流程如图2 运行时对应关系所示。

2.2.2 同步原理

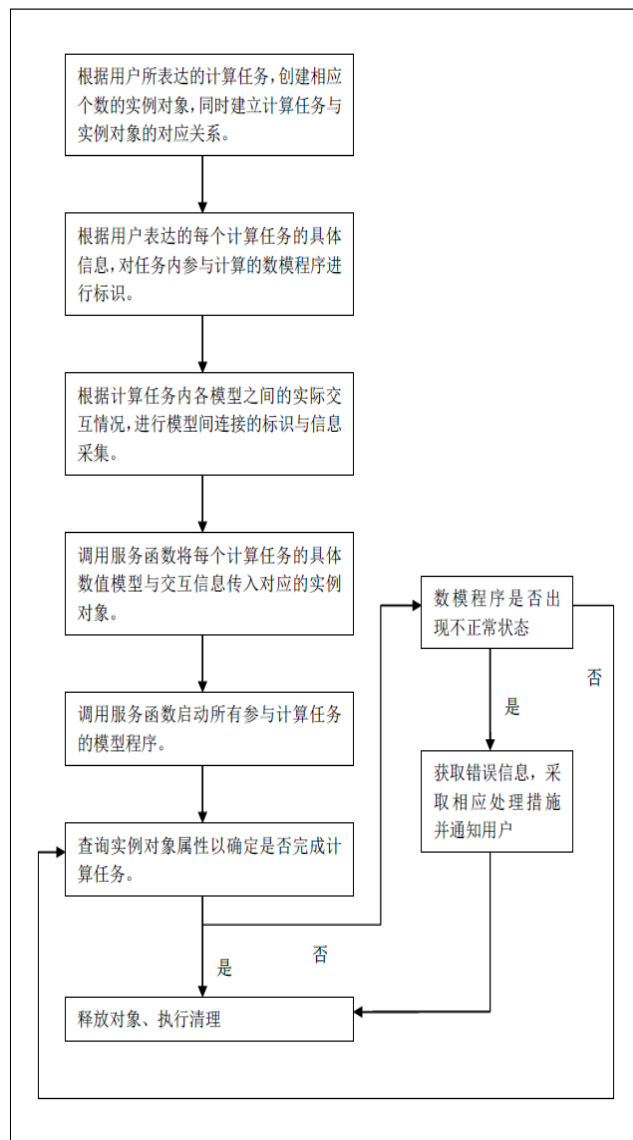


图3 组件使用流程

数模程序在运行时处于单独的进程之中,进程之间的协调在Windows下一般需要依靠内核同步对象。Windows环境下,能够创建若干种内核对象,这些内核对象可以有一个名字,也可以是匿名的,在另外的进程中用同一个名字调用对应的内核对象打开函数后就可以使用这同一个内核对象,从而通过它来实现同步。内核对象有两种状态:有信号和无信号,可以在一个进程中调用函数使内核对象在两种状态间切换,而在另一个进程中使用内核对象等待函数将自身的执行挂起,直到等待的内核对象处于有信号状态再继续往下执行。在执行联合计算任务时,每个参与的数模程序在推进完一个时间步长之后,将会通知其它数模,经过调度运算后确定其是否可以继续推进到下一个时间步长的计算。如果可以推进则将内核对象置于有信号状态,否则将其置于无信号状态令模型执行挂起进入等待。其机制如图4同步原理示意图所示(以两个模型参与计算作示例):

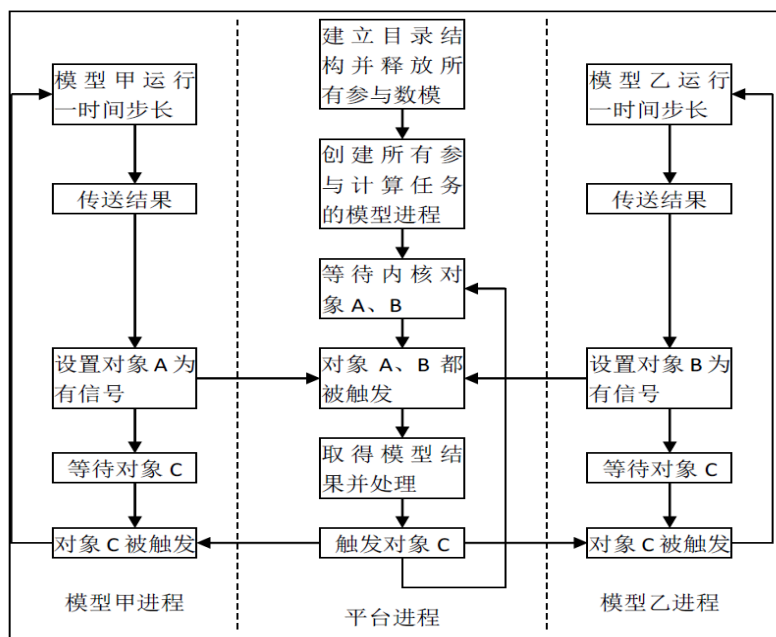


图 4 同步原理示意图

调度计算规则可以表达成：将每个模型内部时间与当前所有参与计算数模的内部时间的最大值比较, 如果大于则使其等待并释放其它处于等待中的数模, 如果小于则允许其继续执行。在数模之间时间步长不一致的时候, 推进算法如图5调度算法示意图所示(以两个模型为示例)：

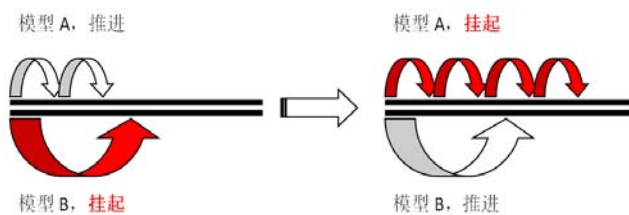


图5 调度算法示意图

3 技术实现

通过构建分布式水文模型、地表水动力模型、地表排水概化模型等模型间耦合关系, 研发济南市典型城镇复杂区域的水文水动力耦合模型, 耦合关系包括纵向耦合和侧向耦合, 耦合结构如图6水文水动力模型耦合结构示意图所示。

3.1 纵向耦合

水文水动力模型涉及的纵向耦合包括河道一维模型与地表二维模型耦合、河道一维模型与水体模型耦合、河道一维模型与水文模型耦合、管网模型与地表二维模型耦合等方式。

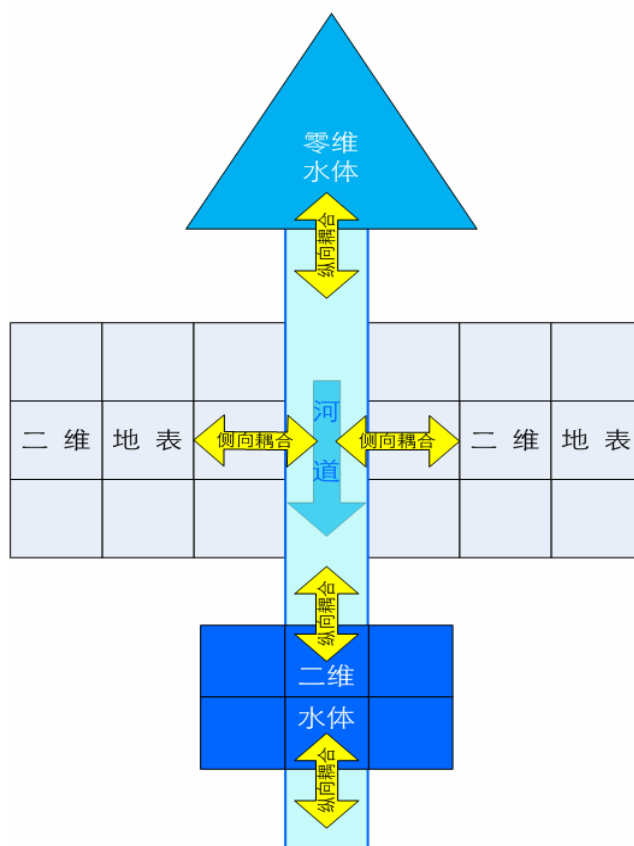


图6 水文水动力模型耦合结构示意图

3.1.1 河道一维模型与地表二维模型耦合

采用二维水动力方法构建水体模型时,河道与水体的连接方式为纵向连接。地表二维模型向上游、下游耦合的河道一维模型传输水位数据,河道一维模型计算的流量过程传输给地表二维模型,河道一维模型与地表二维模型互为边界条件,基于“耦合节点水位相同”的假定,计算水流在两个模型之间的演进过程。这种耦合方式属于物理双向耦合,耦合结构如图7河道一维模型与地表二维模型纵向耦合结构示意图所示。

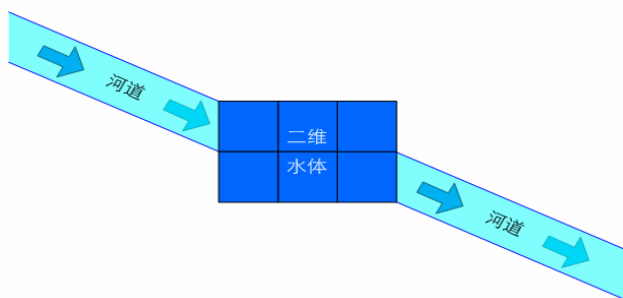


图7 河道一维模型与地表二维模型纵向耦合结构示意图

3.1.2 河道一维模型与水体零维模型耦合

水体零维与河道模型的连接方式一般为纵向耦合,水体零维模型连接上下游河道时,上游河道末端流量计算结果是水体零维模型的边界输入,水体零维模型计算的水位过程又是上游河道的下边界条件。同样,水体零维模型计算的泄流过程是下游河道模型的上边界输入,下游河道计算的起点水位过程又是水库泄流计算的边界条件。水体零维模型分别与上游河道、下游河道互为边界,完全耦合计算。河道一维模型与水体零维模型纵向耦合结构如图8河道一维模型与水体零维模型纵向耦合结构示意图所示。

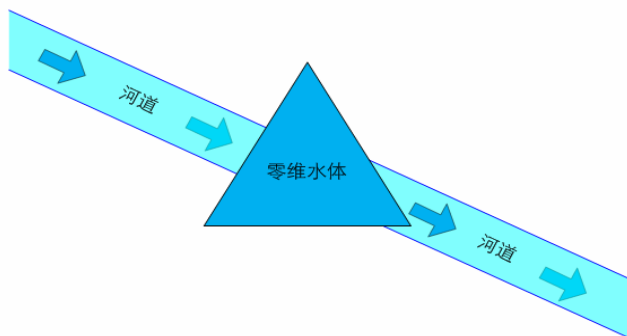


图8 河道一维模型与水体零维模型纵向耦合结构示意图

3.1.3 河道一维模型与水文模型耦合

有些城市河道上游地势起伏较大,且基本保持自然状态,居民和工商业较少,城市洪涝模拟的重点往往不在这些区域,河道上游的产流可以采用以小流域为计算单元的水文模型模拟。水文模型与河道模型之间的耦合方式一般为数据纵向耦合,水文模型计算的流量结果常作为河道一维模型的上边界,水文模型与河道模型纵向耦合结构如图9 水文模型与河道一维模型纵

向耦合结构示意图所示。

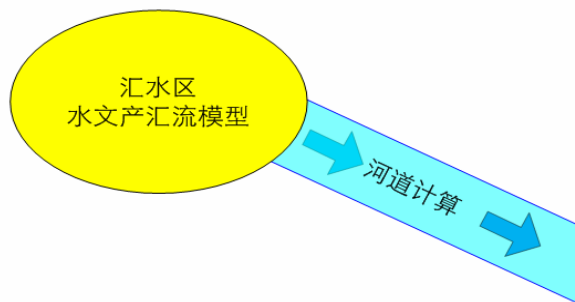


图9 水文模型与河道一维模型纵向耦合结构示意图

3.2 侧向耦合

侧向耦合一般包括河道一维模型与地表二维模型耦合等。

河道模型与地表模型的侧向耦合指通过河道堤防实现河道和地表水量交换的双向耦合。当河道水位超过堤防及地表网格水位,河道洪水可以漫溢至地面;当地面水位超过堤防高程和河道水位,则地表积水可汇入河道。河道一维模型与地表二维模型侧向耦合方式如图10河道一维模型与地表二维模型侧向耦合结构示意图所示。

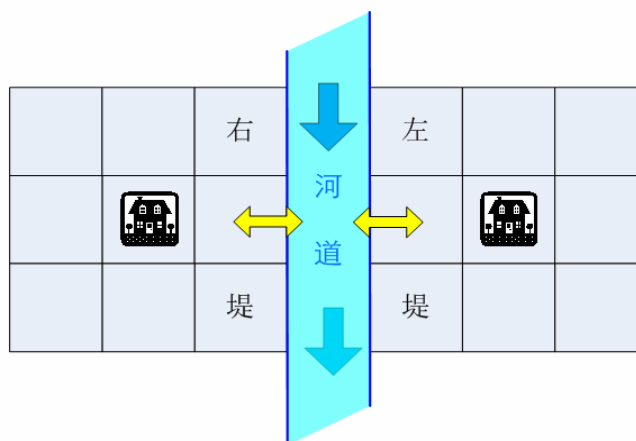


图10 河道一维模型与地表二维模型侧向耦合结构示意图

4 结论

本文研究内容综合考虑分布式水文模型、地表水动力模型、地表排水概化模型等,提出多模型耦合技术实现思路,进而进行模型率定合理性分析。

对于收集到典型暴雨过程及其相应场次的水文信息进行分析,预选出具有代表性的暴雨过程,确定用于进行的率定与合理性分析的暴雨场次。在水力学模型中重现暴雨过程,比较主要河道测站的实测与计算水位、流量过程是否吻合度满足要求;以及二维地表造成涝积水位置、面积、水深等信息是否与实际监测数据相近,或者与文字记载的描述性信息是否有合理性冲突。

针对城市复杂区域洪水预报模型多模型耦合技术关键问题研究,为城区所在的流域进行进一步数字孪生流域开发扩展利用,奠定良好基础。

[参考文献]

[1]陈剑飞,信佳岑,薛丰昌.一二维水动力-管网耦合内涝模型构建技术及应用[J].气象科技,2024,52(06):879-889.

[2]翟晓燕,张永勇.调控流域环境水文过程及其数值模拟[M].中国水利水电出版社,2023.03:222.

[3]付晓花,董增川,韩锐,等.复杂河网地区气候-水文-水动力耦合模型模拟[J].水资源保护,2023,39(03):162-169.

[4]陈奇良,王永桂,江伟民,等.水环境数值模型耦合技术及其研究进展[J].人民长江,2021,52(06):7-12.

[5]曾志强,杨明祥,雷晓辉,等.流域河流系统水文-水动力耦合模型研究综述[J].中国农村水利水电,2017,(09):72-76.

作者简介:

李占华(1969--),男,汉族,山东济南人,硕士研究生,高级工程师,研究方向:水利规划、水利信息化、工程建设管理等。