

文章编号:0559-9350(2021)10-1137-14

## 山区流域洪涝预报水文与水动力耦合模型研究进展

江春波<sup>1</sup>, 周琦<sup>1</sup>, 申言霞<sup>1</sup>, 柳高飞<sup>1</sup>, 张帝<sup>2</sup>

(1. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084;

2. 大连理工大学 建设工程学部水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 受人类活动及气候变化的影响, 我国山区流域洪涝灾害频发, 研制洪涝模拟及预报模型对于流域洪涝灾害防治及水环境综合整治具有重要的理论意义和应用价值。论文评述了洪涝模拟与预报使用的水文及水动力模型的优缺点, 指出单一的水文或水动力模型的局限性。基于此, 分析并比较了国内外已有的水文模型与水动力模型的不同耦合方式, 包括水文模型与水动力模型的串联耦合、水文模型与一维水动力模型的动态单向耦合、水文模型与二维水动力模型的动态单向耦合。总结了各类耦合模型的优势和适用性, 评价了已有耦合模型在计算精度、数值格式稳定性和计算效率等方面所取得的创新。论文探讨了流域洪涝发生和发展的水文过程与水动力过程的互馈机制, 分析了水文模型与水动力模型新的耦合方法及可行性, 介绍了水文与二维及一维水动力的动态双向耦合模型。动态双向耦合模型预期能更加真实地反映流域洪涝发生及发展物理机制, 具有提高洪涝模拟预报精度和计算效率的潜力。各类耦合模型各有其自身优势, 可以根据流域及城市防洪实际, 选取合适的水文与水动力耦合模型, 为山区流域洪涝模拟和预报提供技术支持。

**关键词:** 洪涝预报; 流域模型; 水文模型; 水动力模型; 耦合模型

**中图分类号:** TV122

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13243/j.cnki.slxb.20210003

## 1 研究背景

洪涝灾害受自然环境变化和人类高强度活动双重影响, 是全球影响范围较广、对人类生存和发展危害较为显著的自然灾害之一。随着全球气候变化引发的极端暴雨事件增加, 洪涝灾害呈现出突发性强、峰高量大和危害面广等特征。近年来我国诸多流域尤其是中小流域洪涝灾害频发, 给当地人民生命安全和财产带来严重的损失。根据文献[1], 全国山洪灾害防治区面积386万 km<sup>2</sup>, 涉及受威胁村庄57万个, 人口3亿人, 其中直接受威胁人口近7000万人。2010年以来, 水利部在全国29个省(自治区、直辖市)和新疆生产建设兵团的305个地(市)、2076个县(市、区、旗、团场等)持续开展山洪灾害防治工作, 共投入项目建设资金352亿元; 非工程措施建设资金269亿元, 重点山洪沟防治治理资金83亿元。我国洪涝灾害防治取得了显著的效果, 2011—2019年因山洪灾害平均死亡353人, 较项目实施前的2000—2010年平均死亡1179人大幅减少7成。其中2018年死亡人口129人, 为历史最低。而在刚刚过去的2020年, 我国再次遭受严重洪涝灾害。据应急管理部统计<sup>[2]</sup>, 2020年7月份全国洪涝灾害造成3817.3万人次受灾, 56人死亡失踪, 299.6万人次紧急转移安置; 2.7万间房屋倒塌, 24万间不同程度损坏; 农作物受灾面积3868.7千公顷; 直接经济损失1097.4亿元。与近5年同期均值相比, 7月份洪涝灾害因灾死亡失踪人数、倒塌房屋数量分别下降74.2%和67.3%, 但受灾人次、紧急转移安置人次分别上升62.5%、88.6%。因此, 尽管我国洪涝风险管理取得了显著

收稿日期: 2021-01-04; 网络首发时间: 2021-06-01

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20210528.1600.001.html>

基金项目: 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室资助项目(2021-KY-04); 国家自然科学基金项目(51679121, 51909024)

作者简介: 江春波(1960-), 博士, 教授, 主要从事水力学及水灾害治理研究。E-mail: jcb@tsinghua.edu.cn

通讯作者: 申言霞(1995-), 博士生, 主要从事水文及洪涝灾害治理研究。E-mail: 1924153047@qq.com

成绩,但气候变化和城市化背景下洪涝风险管理的问题与挑战依然严峻,需要深刻梳理与针对性适应。

因山区流域洪涝灾害突发性强、预见期短,降雨及洪涝时空变化的复杂性和不确定性日益突出,由此引发的洪涝灾害日益严峻,洪涝灾害治理任务更加艰巨。及时准确地评估洪涝灾害及经济损失,是提高流域洪涝灾害监测、预报与风险防范能力建设的主要内容,为减少洪涝灾害损失提供技术支撑。

目前对于洪涝灾害预报,常采用水文模型或水动力模型,两种模型的研究方法和计算过程侧重点不同。单一的水文或水动力模型,因模型功能的局限性,其洪涝预报结果可靠性难以满足流域防洪减灾决策的需要。为了提高流域洪涝灾害模拟和预报结果的可靠性,研究流域水文过程与水动力过程的互馈机制,开发能够更加合理地反映流域洪涝形成及发展过程的模型,评价工程措施对减缓洪涝灾害损失的效果并优化工程设计,是当前洪涝灾害治理需要解决的问题。

## 2 流域洪涝预报模型

流域洪涝模拟和预报是基于已知的气象、水文、地形地貌、水工建筑等条件,利用数值模型和监测设备预报洪涝发生、发展的科学方法,其发展过程也是由多个学科共同决定的<sup>[1]</sup>。洪涝模拟及预报涉及数据的采集、传输存储、后台计算、前端显示等多个环节,每个环节都必须有相应的技术支持才能实现。洪涝预报从早期的经验公式模式逐渐演变成当前囊括遥感和地理信息技术、计算机科学、水文学、水动力学、数据库管理等多学科、多层次的综合性系统学科,充分利用水文、水力信息,准确、快速地模拟真实的洪涝演进情景,为洪涝灾害治理工作提供科学支持。

洪涝预报数学模型是洪涝灾害治理信息决策支持系统的核心,模型的精度直接影响洪涝计算结果的可靠性及防洪减灾工程布置的成效。研制洪涝预报模型是一项理论性强、应用要求较高的工作<sup>[4]</sup>。流域洪涝模拟和预报模型可以分为水文模型、水动力模型和水文与水动力耦合模型,下面分别对这三类模型进行介绍。

**2.1 水文模型** 水文模型的发展过程是伴随着对自然界水循环过程的不断深入认识而逐渐改进和完善的,其目的在于能够准确模拟大气、地表、土壤中水的迁移转化过程<sup>[4]</sup>。水文模型包括产流和汇流过程,根据降雨、蒸发、入渗等信息进行产流水量计算,通过坡面流理论或经验公式法进行汇流计算,最终输出流域或子流域出口处的流量随时间变化过程。构建水文模型需要考虑水文循环的各个环节,对表征各环节的数学方程进行合理选择,计算所需参数种类较多,包括气象、土壤条件和土地利用、植被覆盖等多个方面,需要大量数据进行率定验证后才能进行实际应用<sup>[5-6]</sup>。早期的简单水文模型包括经验公式、推理法、马斯京根法<sup>[6-7]</sup>。20世纪中期以后,逐渐形成了“集总式水文模型”和“分布式水文模型”两种模型并沿用至今,当前应用的大部分模型都可归于这两类<sup>[8]</sup>,还有部分模型介于两者之间被视为半分布式模型,如TOPMODEL<sup>[9]</sup>。

集总式水文模型不考虑流域内部地质、地貌、土壤、植被等要素空间分布不均匀性对水循环的影响,将流域作为一个整体进行研究,如水箱模型<sup>[10]</sup>和新安江模型<sup>[11]</sup>。该类水文模型忽略了流域内降雨分布、下垫面空间变化等因素的差异性。随着社会发展,为了反映流域下垫面变化对径流的影响,流域水土流失治理等对环境的影响,研发了分布式水文模型<sup>[12]</sup>。分布式水文模型根据现实流域中降雨、土壤、下垫面等地理信息的空间分布不均匀特征,将流域划分为若干子流域,在每个子流域上计算不同水文要素变化对水循环过程的影响。分布式水文模型可分为松散型和耦合型两类<sup>[13]</sup>。相对于耦合型模型,松散型水文模型假定每个响应单元对整个流域响应的贡献互不干扰,通过每个单元的叠加确定整个流域响应。该求解算法简单,但反映径流形成机制不够完善。耦合型水文模型,考虑各个水文子单元的产汇流相互影响,其精度优于其它类水文模型。陈海梅等<sup>[14]</sup>采用扩散波水文模型求解坡面流,分析了扩散波模型的精度和数值格式稳定性,结果表明扩散波水文模型在坡面流计算中具有较好的精度,格式稳定性和计算效率高于求解浅水方程。将水文模型与城市排水管网一维水力流计算耦合,可以将水文模型延伸到城市洪涝治理中。如文献[15-16]采用了地表-

路网-管网-河网的四层结构。文献[15]的地表径流模型为二维扩散波方程, 缺少淹没区的二维水动力模型, 水文模型与城市街道流动动态单向耦合, 街道水流与城市排水管网一维流动动态双向耦合, 管网水流最后流向河道。文献[17]构建了汇流过程精细化城市雨洪模型, 采用地表径流-路网-管网-河网的四层结构, 通过扩散波水文模型计算地表二维汇流, 地表水汇入路网后再通过雨水口汇入管网, 最终流入排水河道。

综上, 水文模型应用广泛, 计算效率高。但计算结果是根据流域水文条件获得产汇流的流量过程, 不能提供淹没区洪水演进的动力特征。

**2.2 水动力模型** 水动力模型不仅能模拟水流在河道及河漫滩的演进过程, 也可模拟泛滥洪水在受堤防保护的城乡与农村的演进过程, 以及由暴雨形成的洪水内涝过程, 输出结果通常是积水淹没范围的时空变化过程及淹没区域特定位置的水深和流速。水动力模型的控制方程包括质量守恒方程和动量守恒方程。模型涉及的参数相对较少, 如河床糙率系数等。

水动力模型根据是否考虑水力要素的横向和垂向变化, 可分一维、二维和三维模型<sup>[18]</sup>。一维模型只考虑流动要素在河道顺流方向的变化, 建模所需数据量少且计算效率高, 但是计算精度不高。常见的一维模型包括求解非恒定流的圣维南方程, 求解恒定流的伯努利方程; 二维模型, 如二维浅水方程(SWE), 常用于考虑沿河道横向水力要素变化的河湖及低洼积水区, 适用对江、湖、河口等区域的水位和流速分布的描述; 三维模型可考虑水力要素沿垂向的变化, 常用于江河入海口、城市大型地下蓄水隧洞进口附近的复杂流态条件下的水动力特性研究。在流域洪涝模拟和预报中, 通常一维和二维水动力模型即可满足要求, 应用三维模型的情况不是很多。对于城市地下大型蓄水隧洞入口流态、排水管内网满流等可以采用三维模型, 因计算相对复杂费时, 在流域洪涝模型中不考虑。

水动力模型的数值求解方法包括有限差分法、有限元法和有限体积法等<sup>[13]</sup>。差分法数值离散格式简单易懂, 通过前差分、后差分和中心差分等算法, 可以构造出不同精度的差分格式, 将偏微分方程转换为差分方程求解。有限差分法多使用结构化网格, 不便于网格局部加密, 同时矩形构造网格划分对复杂边界形状的适用性较低。使用差分法的模型有英国 Wallingford 和 Halcrow 公司开发的 ISIS 模型<sup>[19]</sup>、丹麦水力学研究所开发的 MIKE 11 模型<sup>[20-21]</sup>、美国陆军工程兵团水文工程中心开发的 HEC-RAS 模型<sup>[22]</sup>、澳大利亚 WBM 公司开发的 TUFLOW 模型<sup>[23]</sup>等。国内采用有限差分法对洪涝模拟的研究也比较成熟, 如文献[24]采用有限差分法求解二维浅水方程, 在二维差分网格内部“开沟”以模拟山区小河流的行洪过程、提高模型的空间分辨率; 并引入水文学法考虑不同类型土地的人渗饱和过程, 将流域降雨转为形成地表径流的净雨量。由水力学与山区河流开发保护国家重点实验室(四川大学)研发的 WWL(West Water-Lateral), 是立面二维水温分析模型<sup>[25]</sup>, 采用有限差分格式对立面二维方程进行离散。文献[26]采用有限差分法求解二维水动力方程, 模拟近海风暴潮。文献[27-28]将一维水动力与二维水动力模型进行耦合, 模型不但保证耦合节点的质量守恒, 还保证了耦合节点的动量守恒。

有限元法求解问题的基本步骤是将所讨论问题的域划分成若干微小单元, 选取基函数将节点离散变量转化成连续变量, 先在单元上积分形成单元系数矩阵, 再合成全区域的整体方程, 得到关于未知量的代数方程组。常规的有限元格式是针对结构力学问题的, 不适合求解洪水运动的双曲方程组。对于洪水运动的模拟需要选取适合对流比较强的高精度有限元格式, 数值格式稳定且计算精度良好的有限格式也有很多, 这里不准备展开介绍。

有限体积法是当前水动力模型中比较常用的数值计算方法, Fluent<sup>[29]</sup>、MIKE 21<sup>[30]</sup>、OpenFOAM<sup>[31]</sup>等均采用有限体积法。Godunov 型格式将水流运动的数值计算近似为局部黎曼问题, 数值格式精度高<sup>[32]</sup>。基于洪涝模拟结果, 结合社会经济信息可进一步开展洪涝灾害风险评价, 如 Mike Flood 模型的应用<sup>[33]</sup>。张大伟等<sup>[34]</sup>建立一维、二维溃坝水流耦合数学模型, 采用非构造网格对控制方程进行空间离散。文献[35]采用有限差分法和有限体积法相结合的数值格式, 对一维水动力方程和二维水动力方程进行求解, 并将水文模型与水动力模型进行耦合, 建立 FRAS(Flood Risk Analysis System)模型。

大连理工大学的 Hydroinfo<sup>[25]</sup>是基于水动力模型软件, 在连续方程中考虑降雨、入渗等产流水

量, 汇流及洪水运动通过水动力模型计算。该模型具有计算简便、功能齐全等优点, 包括了各种水文模型、一维水动力与二维水动力的动态耦合、城市管网模型和泥沙、污染物输移模型, 具有广泛的应用价值。

近年来, 随着计算机技术的快速发展, 一些涉及水动力方面的商业模型, 如 Mike 系列、EFDC、HEC-RAS 等模型, 在工程计算中经常应用。为了开发精确良好/数值计算稳定的洪涝模拟和预报模型, 亚利桑那大学于 2014 年和 2017 年提出 CHRE2D<sup>[36-37]</sup>, 该模型属于流域水动力模型, 需在新的时间步计算之前判断控制体单元内实际水深与水深阈值的关系, 被动切换浅水模型和扩散波模型的使用区域。在水深较浅区域, 因数值格式稳定性差, 用运动波或扩散波方程代替浅水方程的求解。该模型采用矩形均匀网格, 时空步长均受浅水方程的稳定条件控制, 在应用于中小流域规模的洪涝预报时, 其计算效率有待提高。文献[38]提出的洪涝预报模型, 采用非构造网格在流域上求解浅水方程, 通过薄层水假定提高水深较浅区域的数值格式的稳定性, 模型适合城市的洪涝预报。西安理工大学提出的 GAST 模型(GPU Accelerated Surface Water Flow and Transport Model)<sup>[39]</sup>, 在二维浅水方程中考虑水文产汇流计算功能, 使用二阶 Godunov 格式有限体积法来保证计算精度, 并采用 GPU 加速技术提高运算效率。

综上所述, 单纯的水动力模型不能满足流域洪涝模拟与预测的需求, 将水文计算公式与全动力模型进行耦合, 水动力模型在流域洪涝模拟与预报中发挥了重要应用。二维水动力模型在连续方程中考虑净雨量, 降雨、入渗和蒸发等产流量, 通过水文模型计算净雨量。对于中小流域及城镇的洪涝问题, 全动力模型具有计算分辨率高等优点<sup>[24, 34-39]</sup>。为了提高计算效率和数值格式稳定, 可在二维水动力计算中使用粗网格<sup>[24, 35]</sup>, 将一维河道和管网、行洪街道作为特殊通道, 通过特殊通道实现了一维水动力与二维水动力模型的耦合。粗网格上对浅水方程进行空间离散, 时间离散采用显式格式, 模型计算节省时间; 全流域使用二维浅水方程, 在水深很薄区域切换到二维运动波或扩散波方程<sup>[36-37]</sup>, 保证数值格式稳定; 在全流域求解二维浅水方程时, 判断水深较浅的网格, 使用薄层水假设<sup>[38, 62]</sup>、保证数值格式的稳定性; 根据二维浅水方程求解产汇流及洪水运动, 通过开发 GPU 加速算法<sup>[39]</sup>, 保证计算精度与计算效率的配置。

节省计算时间和保证数值格式稳定的另外一个途径, 是将流域在空间上分成淹没区和非淹没区, 在包括河湖、漫滩和低洼积水区的淹没区域采用二维水动力计算<sup>[40-45]</sup>, 淹没区采用比较精细的计算网格, 网格能反映堤防宽度、河道宽度等局部尺寸, 细网格为城市排水管网入口位置等处水深确定提供更加合理的水力条件; 在淹没区域外侧(水文产汇流区域)采用水文模型, 水文计算获得的产汇流的流量过程, 作为水动力计算的边界条件。水文模型与水动力分区计算可以达到数值格式稳定和节省计算时间的目的, 适合面积较大的山区流域洪涝模拟与预报。探讨水文与水动力模型的不同耦合方式, 可以在提高计算精度的同时提高计算效率与格式稳定性。流域分区计算, 水文模型与二维水动力模型动态耦合, 可以根据需要切换到流域全动力计算, 这种分区耦合模型将具有流域全动力模型的功能。因此水文与水动力动态耦合模型是具有发展潜力的模型之一。

**2.3 水文与水动力模型耦合** 将水文与水动力模型进行耦合, 利用水文模型和水动力模型的各自优点, 可以分别弥补水文模型和水动力模型的不足, 是流域及城市洪涝模拟和预报的发展趋势。根据水文过程与水动力过程的连接关系及计算时间顺序, 可以归纳为水文与水动力的串联耦合模型、水文与水动力的动态单向耦合模型、水文与水动力的动态双向耦合模型, 如图 1 所示。图中符号  $T$  为总计算时间长度,  $t$  为当前计算时刻。

如图 1(a), 串联耦合模型从开始时刻到计终了时刻先独立计算水文过程, 然后独立计算水动力过程, 水文计算获得的在子流域出口的流量作为水动力计算的边界条件, 水文过程影响水动力过程, 水动力过程对水文过程没有影响。如图 1(b), 水文与水动力的动态单向耦合模型, 是在时刻  $t$  同时计算水文模型和水动力模型, 水文计算影响水动力计算, 但水动力计算不影响水文计算。水文与一维水动力动态单向耦合模型在某种条件下与串联耦合模型等效的。如将动态单向耦合节点的流量信息储存记忆, 在水文计算结束后, 将耦合点的流量加载到一维水动力计算模型中, 动态单向耦合

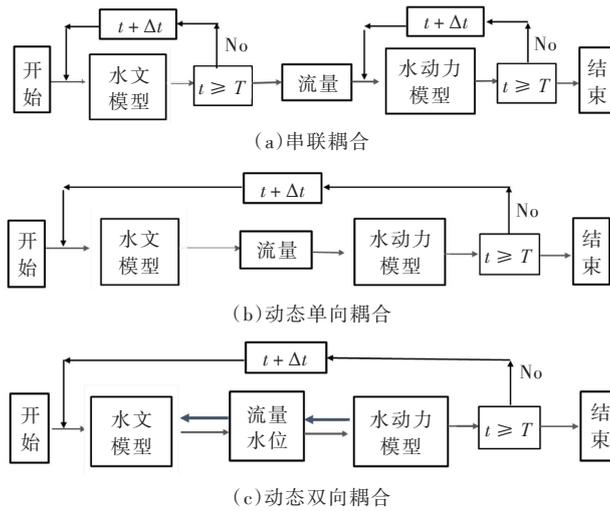


图1 水文模型与水动力模型耦合

就相当于串联耦合模型。如图1(c)，动态双向耦合模型，在时刻 $t$ 水文与水动力同时计算，水文计算信息影响水动力计算，水动力计算信息影响水文计算，水文与水动力的影响是双向的。高分辨率的分布式水文模型与二维浅水方程的动态双向耦合，显然水文模型和水动力模型均具有高分辨率，这样的动态双向耦合模型国内外还没有文献报道，也是将要建立的耦合模型。

将水文和水动力模型进行更合理的耦合，充分反映水文过程与水动力过程的互馈机制，提高洪涝预报结果的可靠性，还需要进行深入探讨，宋利祥等<sup>[46]</sup>指出水文与水动力耦合模型的本质区别在于是否合理考虑了水文与水动力过程的相互影响，尤其是水文驱动水动力模型的边界形式以及局部淹没状态对汇水单元水文响应过程的影响。因此亟需在探索水文水动力自适应耦合机制的基础上，建立水文与水动力动态双向耦合的洪涝模拟和预报模型，可为流域洪涝水文水动力过程精细化与高效模拟奠定理论基础。

2.3.1 水文与水动力模型串联耦合 水文与水动力耦合模型中应用最成熟的耦合方法是“串联耦合”。从洪涝过程的起始时刻到结束时刻，串联耦合模型首先独立运行水文模型，进行产汇流计算，获得河道上游断面及河道支流控制断面处的流量随时间变化过程。将这个流量过程作为水动力模型的输入边界条件，然后独立进行水动力计算，获得河道、河漫滩等积水区的水流运动信息。水文计算和水动力计算两个过程在空间上是相互独立的，属于前后的串联关系。

由于各种水文模型均可输出控制断面的流量过程，容易满足串联耦合模拟的需求，常用于水文与水动力串联耦合。McMillan利用降雨产流模型与一维动力波方程，将降雨产流过程作为动力波方程的上游边界，分析不同频率降雨产生的洪水对城市的淹没情况<sup>[47]</sup>。采用串联耦合模型的有 Montanari<sup>[48]</sup>、Choi<sup>[49]</sup>和 Grimaldi<sup>[50]</sup>等，研究将水文模型的产流过程作为一维、二维水动力模型的上游流量边界，驱动水动力模型运行。一些串联耦合模型的应用与研究，还可以参考文献[51-52]。此外，一些成熟的模型如SWAT<sup>[53]</sup>、HEC-HMS<sup>[54]</sup>、MIKE系列<sup>[55-56]</sup>等的应用，多是采取水文模型与水动力模型的串联耦合方式。采用基于地貌特征的流域分布式水文模型GBHM与MIKE11一维水动力模型进行串联耦合，模拟三峡区间降雨产汇流过程。其它水文与水动力耦合模型研究与应用，参见参考文献[57-60]。

串联式耦合模型应用方便，对于较小的空间区域可以获得合理的精度。但是对于较大范围的流域洪涝预报问题，水文过程与水动力过程的互馈作用更加敏感。水文与水动力串联耦合模型，仅在包括河湖、河漫滩和低洼积水区进行水动力计算，在积水区之外的流域进行水文产汇流积水，水文计算结果为水动力计算提供边界条件。在应用水文与水动力的串联耦合模型时，需要确定淹没区周围流量边界点的位置和边界点数量的合理性，保证每个边界点的流量随时间变化与实际汇流过程相符，尽量避免不合理的边界点位置和流量过程的选取，减小模拟和预报结果的误差。事实上，在暴雨过程中洪涝淹没区范围随时间变化，水动力模型的流量边界点位置也随时间变动，水文汇流进入

淹没区的边界点在空间上是连续分布的，不是有限个分散点，而串联耦合模型在确定这些流量边界点位置具有一定难度。

因此需要探讨水文与水动力模型的动态耦合，在时间上同步求解水文模型和水动力模型，两种模型需在空间上建立合理的信息交换方式，预期可提高流域洪涝模拟及预报结果的精度。水文与水动力的动态耦合模型，水文产汇流计算和淹没区水动力计算在时间上同时进行。根据水文与水动力的相互作用关系，动态耦合模型又分为“单向”耦合和“双向”耦合模型，参考文献中除文献[13]和[61]中研制的模型外，已有的动态耦合模型均为动态单向耦合模型，也常被称为动态耦合模型。对于单向耦合模型，水文产汇流计算结果是水动力计算的驱动条件，但水动力计算结果不影响水文计算；双向耦合模型中水文计算结果作为水动力计算的驱动条件，而水动力计算结果(如水位壅高等)也会对水文汇流计算产生影响。

2.3.2 水文与水动力模型动态单向耦合 水文产汇流模型与一维水动力模型在时间上同步进行计算，已有的模型可分为水文与一维水动力模型的动态单向耦合模型和水文与二维/一维水动力的动态单向耦合模型。

(1)水文与一维水动力模型动态单向耦合。MIKE系列软件包含了水文模型、水动力模型等多个模块，具有水文与水动力模型动态耦合功能，如MIKE-SHE和MIKE11的耦合属于动态单向耦合<sup>[56]</sup>。水文计算采用分布式水文模型(SHE)，水动力计算采用一维圣维南方程。两个模型在连接通道根据水位关系计算两种模型之间的流量交换，在指定节点处发生水量交换(参见图2)。因一维水动力模型在模拟堤外洪涝积水区具有局限性，如一维水动力模型将河道外的汇流水量强制性地加载到河道里，但实际上降雨汇流水体是从河道两侧向河道方向汇集的，因此水文与一维水动力的动态耦合模型往往不能准确反映堤防外侧低洼区的洪涝积水。将MIKE11与MIKE21耦合，组成MIKE Flood，可以克服一维水动力模型的应用限制。

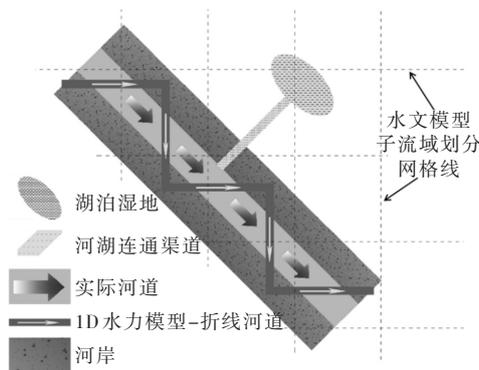


图2 MIKE SHE/MIKE 11 动态耦合示意

(2)水文模型与二维水动力模型的间接动态耦合。中国水利水电科学研究院提出CUHHM(Coupled Urban Hydrological-Hydrodynamic Model)<sup>[40-41]</sup>是水文模型与一维水动力模型进行动态单向耦合。对流域进行分区计算，水文产汇流区域采用分布式水文模型计算，河道和排水管网进行一维水动力计算，水文计算与一维水动力计算直接动态耦合。为了考虑河湖、漫滩及低洼积水区的二维水动力特征，在局部区域进行二维水动力计算，二维水动力计算与一维水动力计算动态双向耦合，属于水文产汇流模型与二维水动力模型的间接耦合。二维水动力计算可为排水管网入口提供更准确的水位条件，地表二维水流排入管网，二维计算影响一维计算，管网水流外溢也影响二维水动力计算。一维水动力与二维水动力的耦合，类似于MIKE Flood，但有许多改进。文献[41]采用TELEMAC有限元格式在局部区域求解二维浅水方程，为保证有限元格式的稳定性，推荐时间隐式格式和求解非线性代数方程组方法，每一个时间步内求解联立方程组或非线性方程组。对于二维计算区域面积有限的情况下(不是全部流域求解二维浅水方程)，时间隐格式计算花费时间不会过多，计算精度良好。CUHHM模型功能齐全，不但包括了水文与一维水动力的直接动态单向耦合，还包括了二维水动力模型与地下管网的动态双向耦合计算，模型已经应用于北京市等地的洪涝模拟和预报。

华南理工大学提出的 IHUM (Integrated Hydrology and Hydrodynamics Urban Flood Model)<sup>[42-43]</sup> 是 SWMM 分布式水文模型与一维管网、一维河道水动力模型的动态单向耦合, 这部分为 MIKE Urban 类似, 但有很多改进。基于子汇水单元的水文计算结果为包括管网入口的一维水动力计算提供水位、流量条件。二维水动力计算仅在低洼积水等局部区域进行, 也是水文产汇流模型与二维水动力模型的间接耦合点, 一维水动力计算与局部区域的二维水动力计算进行动态双向耦合, 这类似于 MIKE Urban, 但有不少改进之处, 如通过正向、侧向等连接方式实现了一维水动力模型与二维水动力模型动态双向耦合, 保证水量守恒, 局部区域的二维水动力计算结果可为一维管网入口提供更加合理的水位、流速信息。IHUM 采用时间隐格式在局部区域求解二维浅水方程, 隐格式具有较好的数值格式稳定性, 但时间隐格式需要联立求解代数方程组。二维水动力计算仅在局部区域计算, 不会花费过多的计算时间, 并能获得良好的计算精度。

美国密西根大学 2012 年提出的 TRIBS- OFM 模型是水文产流模型与二维水动力模型动态单向耦合<sup>[62]</sup>, 由于水文模型仅计算产流(不计算汇流), 坡面汇流及河道洪水演进均采用二维浅水模型进行计算, 导致全流域运行二维水动力模型, 对于大范围的流域洪涝预报, 模型的运行时间相对较长。这样的全动力模型精度较高, 但计算效率及格式稳定性均有待提高。

中国水利水电科学研究院建立的 FRAS 模型<sup>[35,63]</sup> 是水文产流模型与二维水动力模型的动态单向耦合, 水动力计算结果不影响水文计算。通过特殊通道法实现包括排水管网的一维水动力与二维水动力的动态双向耦合, 其不同维数的水动力模型耦合方式具有独创性。该模型中水文计算采用 SCS 模型, 将水文产流量作为源项加载到水动力模型中, 通过水动力模型计算坡面汇流及河道中洪水演进过程。该模型功能齐全, 水动力计算包括一维河道及管网、二维浅水模型等, 在城市洪涝模拟和预报方面, 模型具有良好的精度。FRAS 模型中的水文模型仅计算产流, 汇流过程和河道淹没区的水动力计算均需采用二维浅水方程, 模型已经成功地应用于城市洪涝模拟和预报。对于二维水动力计算区域面积有限的情况下, 通过二维稀疏网格与一维精细网格的耦合, FRAS 模型的计算效率良好。FRAS<sup>[35,63]</sup> 模型提出时间要早于 TRIBS- OFM<sup>[62]</sup> 模型, 排水管网的计算功能优于 TRIBS- OFM 模型。

2.3.3 水文产汇流与二维水动力模型直接动态双向耦合 如图 3 所示, 淹没区的空间范围随着降雨条件和时间在不断变化, 水文产汇流的流量汇入淹没区的位置也是随时间变化的, 水文与水动力过程的影响是双向的, 即水文径流影响水动力过程, 水文产汇流流量是水动力计算的边界条件; 反过来淹没区的水动力条件变化, 如淹没区水位变化会影响水文汇流计算。将陆地水文产汇流区称为非淹没区, 河道等有水区域称为淹没区, 连接两个区域的边界位置是动态变化的, 在动边界上不但有水量的传递, 还有动量的传递。清华大学提出的水文与二维水动力的动态双向耦合模型 (Dynamic Bilateral Coupling Model, DBCM)<sup>[13,61]</sup>, 尚处于研制阶段, 模型能够更真实反映流域水文过程与水动力过程的互馈机制, 除文献[61]的模拟结果外, 目前国内尚无水文产汇流模型与二维水动力模型直接动态耦合的研究成果报道。

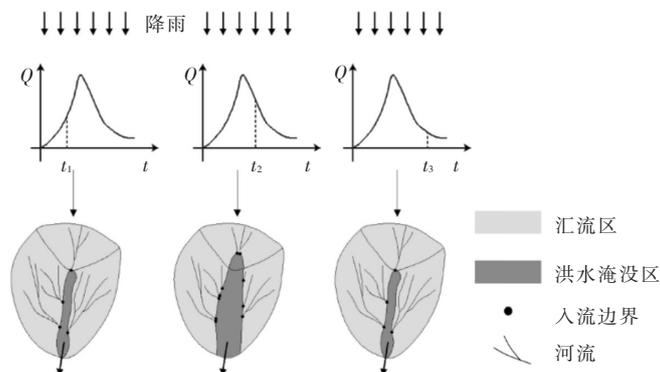


图 3 流量边界点位置变化示意

图 4 为动态双向耦合模型框图, 将计算流域在空间上划分成洪涝淹没区和非淹没区, 随着洪水的

涨落，淹没区和非淹没区的范围随时间变化，连接这两个区域的动边界位置也随着时间变化。将两个区域动边界位置变化范围作为过渡区。非淹没区的水文计算采用扩散波、运动波或其它精度良好的分布式水文模型；淹没区采用一维或二维动力波，仅对河道、河漫滩等低洼积水等局部区域采用二维浅水方程求解。在不同区域采用不同的数学模型，在保证模拟精度的同时，预期能提高计算效率。淹没区通常需要反映堤防横向断面等微观尺寸，网格划分较细，网格的空间尺寸较小，受库朗条件限制，时间步长也较小。而非淹没区的空间范围远远大于河道等淹没区的面积，水文单元网格尺寸可以远远大于水动力计算的网格尺寸，时间步长也可相对较大。水文区域的较大网格尺寸和时间步长，与非淹没区采用二维水动力模型相比可以明显节省模型的计算时间。二维扩散波水文计算和二维水动力计算均采用时间显式格式，避免

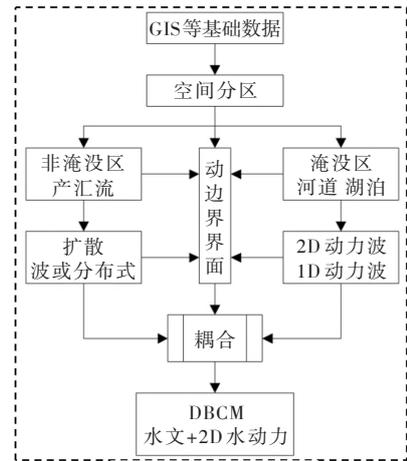


图4 DBCM模型构成框图

联立求解代数方程组，是提高计算效率的一个因素。由于水文计算和水动力计算采用不同的时间步长，在一个水文计算时间步长内，需要进行多次水动力计算。两个区域通过动边界进行空间连接，需要根据动边界两侧的流态、特征波方向等确定动边界移动方向及边界界面的水量、动量通量。

2.3.4 水文与水动力过程反馈机制分析及耦合模型发展历程 图5为水文与水动力耦合模型的发展历程示意图，水文模型由简单的经验公式发展到分布式水文模型，在流域产汇流计算方面不可缺少，但是单一的水文模型不考虑水动力过程，不能描述洪水演进的动力特征；水动力模型由谢才公式发展到流域全动力模型，在城市洪涝模拟和预报方面发挥了重要作用。单一的水动力模型，包括二维浅水方程，在城市洪涝模拟和预报方面具有精度高的优势，但是推广到流域范围的洪涝模拟和预报，还需深入讨论数值格式稳定性和计算效率问题。图5中右侧第二列，水文与2D水动力动态单向耦合，包含两种类型：(1)水文产流模型与二维(包括一维)水动力动态单向耦合，因汇流计算依赖二维浅水方程，属于流域二维全动力洪涝模型。(2)水文产汇流模型首先与一维水动力模型直接动态单向耦合，然后是一维水动力模型与二维水动力模型动态双向耦合，可以视为水文产汇流模型与二维水动力模型的间接动态耦合。图5中右侧第一列，水文与2D水动力动态双向耦合模型，是分布式水文产汇流模型与局部二维(包括一维)水动力模型直接耦合，也可称为DBCM。DBCM是由清华大学于2019年提出的，详细参考文献[13, 61]。DBCM的构建有如下两个特点：(1)水文产汇流模型与二维水动力的数值离散采用时间显格式，避免求解联立方程所花费的过多的计算时间；(2)提出的水文产汇流模型与二维水动力模型之间的动态双向耦合方法，避免在两个模型连接处设定内边界条件或通

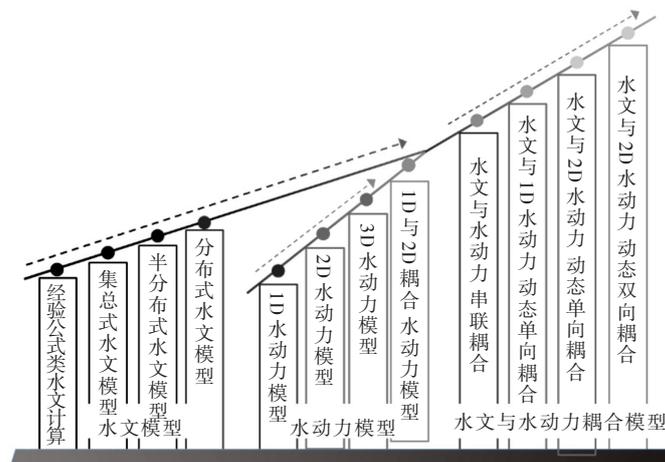
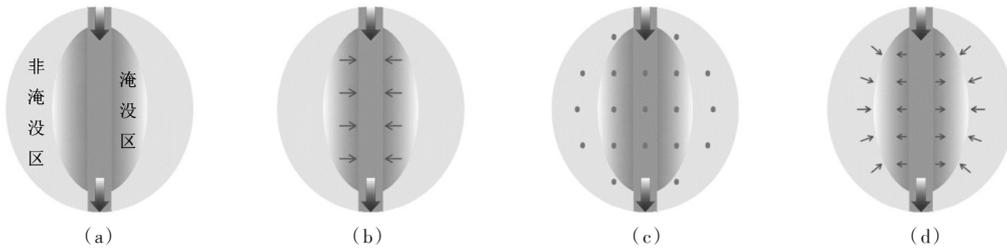


图5 水文与水动力耦合模型发展过程示意



图中黑色粗箭头表示产汇流汇入的水量，包括河道上下游入流、出流，河道两侧汇入；左右两侧黑色小箭头表示水位超过堤防时，河道水量外溢；黑点示意产流量；内部小椭圆表示淹没区范围，外部大椭圆表示流域总体范围，流域面积远远大于淹没区面积：(a)水文与水动力的串联耦合，水文与水动力计算在时间上有先后关系，水文计算的产汇流加载到河道上游或河道侧向有限地点，作为水动力计算的边界条件；(b)水文与一维水动力的动态单向耦合，水文汇流水量加载到河道上游及河道内；(c)已有水文产流模型与二维水动力的动态单向耦合，空间上不分区，水文产流量作为源项加载到水动力模型，水文汇流与水动力计算采用二维浅水方程；(d)水文与二维水动力直接动态双向耦合，空间分区，不同区域以动边界连接。不同区域采用不同的模型。

图6 水文与水动力的不同耦合示意图

过固定内边界位置来实现水文产汇流模型与二维水动力模型的耦合。对于山区流域的洪涝模拟和预报问题，在揭示水文过程与水动力过程的动态互馈机制的基础上，充分利用水文模型和水动力模型的特点，建立水文与水动力的动态双向耦合模型值得深入开展研究，在提高流域洪涝模拟和预报精度的同时，达到模拟精度与计算效率的优化配置是今后有待深入探讨的方向。

流域洪涝发生和发展的水文过程与水动力过程在时间是同时进行的，在空间上是紧密联系的，水文信息与水动力信息存在动态互馈关系。如图6(a)中所示，常用的水文与水动力的串联耦合模型将水文过程与水动力过程在时间上分开进行；在空间上，水文计算的汇流水量结果作为水动力过程的边界点，边界点流量数值集中了河道两岸的汇流水量，常常会夸大河道上游入口的流量，流量边界点位置选定具有人为因素，如果边界条件加载的不合理，串联耦合模型的模拟结果将会存在一定的误差。如图6(b)所示，水文与一维水动力模型的动态单向耦合(如MIKE SHE与MIKE 11的动态单向耦合)，全流域采用分布式水文模型计算产汇流流量，产汇流水量作为边界条件或源项加载到一维河道上游或侧向有限个节点上，计算网格一旦确定，边界点位置不再变化，水动力过程不对水文过程产生影响，一维水动力模型功能限制了模型的应用范围。如图6(c)所示，已有的水文产流模型与二维水动力模型动态单向耦合，如TRIBS-OFM、FRAS、Hydroinfo，克服了串联耦合及水文与一维水动力动态单向耦合模型的不足，有效地提高了模型精度。这类水文与二维水动力的动态单向耦合模型中，水动力过程不对水文过程产生影响，如果推广到流域范围的洪涝模拟和预报，需要解决数值格式稳定性和计算效率问题。图6(d)为水文与二维水动力的直接动态双向耦合模型(DBCM)，流域水文计算与水动力计算在时间上同时进行；在空间上，水文计算产汇流水量结果作为水动力计算的边界条件，仅在积水等局部区域进行二维水动力计算，水文计算结果按实际发生位置动态加载到淹没区的周围，淹没区与水文产汇流区以动边界动态连接，动边界位置随时间变化。图6(d)为水文产汇流模型与二维水动力的动态双向耦合模型，即DBCM模型示意图，该模型仅在局部区间进行二维水动力计算，实现水文产汇流模型与二维(包括一维)水动力模型的直接动态双向耦合。如果在全流域采用二维浅水模型进行计算，此时DBCM等价于图6(c)的水文产流模型与二维水动力模型的动态单向耦合。反过来，图6(c)的水文与水动力耦合模型不能包含DBCM的功能，因为图6(c)中的水文模型，仅进行产流计算，汇流计算需要通过浅水方程实现，不能开展局部二维水动力计算，需要在全流域进行二维水动力计算，相当于流域全动力洪涝模型。DBCM模型能更合理地反映流域水文过程与水动力过程的动态双向互馈机制，动态双向耦合模型在流域范围的洪涝模拟和预报中将具有发展潜力。

### 3 水文与水动力耦合模型归纳与展望

对于洪涝灾害模拟和预报，水文与水动力耦合模型具有优势。水文与水动力耦合模型理论需要

反映水文过程与水动力过程的互馈机制，水文过程驱动水动力过程，反过来水动力过程影响水文的汇流条件。考虑水文与水动力这两个物理过程的相互影响，国内外学者提出了多种的耦合方法。

水文与水动力的串联耦合模型、动态耦合模型各有其优势，应该根据实际要解决的问题选取合理的耦合模型。分布式水文模型与二维水动力模型的动态双向耦合更反映水文产汇流过程与水动力洪水演进过程的互馈机制，模型预期具有良好的精度，在流域洪涝灾害预报中具有应用前景。

水文模型与二维、一维水动力模型的耦合方式可以分成如下三种模式：耦合模式1，基于水动力模型的动态耦合方式；耦合模式2，水文模型与一维水动力模型直接耦合及与局部区域二维水动力的间接耦合；耦合模式3，水文模型直接与二维和一维水动力的动态耦合。三种耦合模式如图7所示。

耦合模式1：在连续方程中考虑降雨、蒸发、入渗等水文产流过程，通过求解浅水方程的动量方程计算汇流及水动力过程。耦合模式1在全流域划分差分或控制体网格，进行高分辨率的二维水动力计算，可获得更加准确的排水管网入口处水位和流速。耦合模式1的代表性软件，包括中国水利水电科学研究院的FRAS<sup>[35,63]</sup>、西安理工大学研发的GAST<sup>[39]</sup>、大连理工大学研发的Hydroinfo<sup>[25]</sup>、密西根大学研发的TRIBS-OFM<sup>[62]</sup>、亚利桑那大学研发的CHRE2D<sup>[36-37]</sup>。中国水利水电科学研究院的FRAS在二维网格内通过特殊通道法，实现二维水动力与一维水动力的动态连接，实现了河道、排水口附近的精细水动力模拟；西安理工大学的GAST模型，求解二维浅水方程，通过GPU技术提高计算效率<sup>[39]</sup>；大连理工大学的Hydroinfo<sup>[25]</sup>通过非构造网格等手段，提高局部区域的计算精度，并提高整体计算效率。耦合模式的很多模型，均在城市及流域洪涝防治工程中得到广泛应用。

耦合模式2：由两部分组成，第一部分是分布式水文模型直接与河道、管网的一维水动力的动态耦合，与SWMM或Mike Urban有类似之处，也有不少改进；第二部分是淹没区域的局部二维水动力模型与一维水动力的动态双向耦合，与MIKE Flood有类似之处，但有所改进。耦合模式2的二维水动力计算仅在局部区域进行，在局部区域进行网格加密，可以获得排水口入口处的更加准确的水位和流速信息。局部区域精细网格的二维水动力计算，可以节省计算时间，提高计算效率。中国水利水电科学研究院的CUHHM<sup>[40-41]</sup>、华南理工大学的IHUM<sup>[42-43]</sup>等属于耦合模式2，该模式已经在城市洪涝防治工程应用。

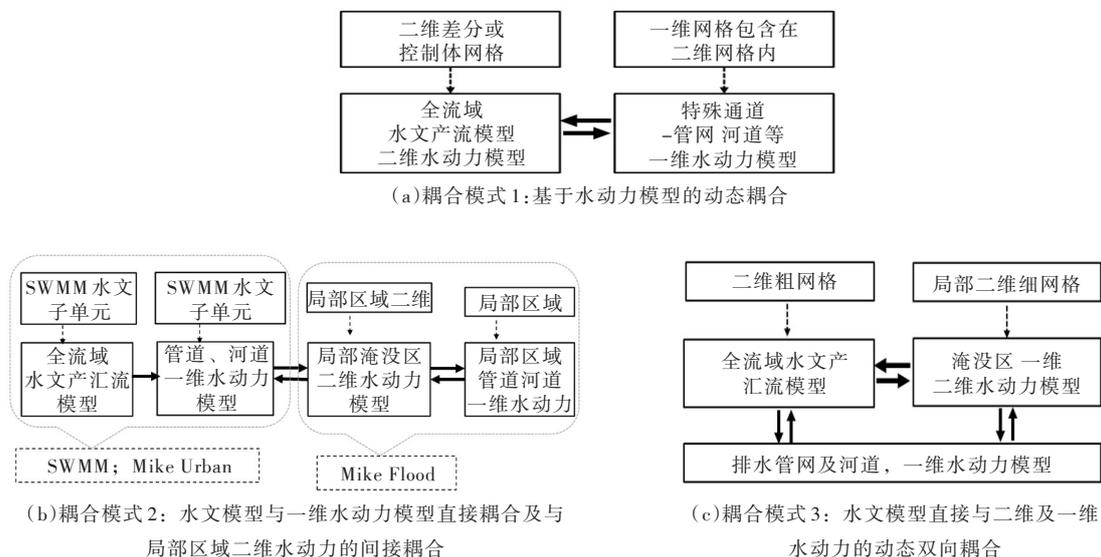


图7 耦合模式

耦合模式3：是分布式水文模型与二维及一维水动力模型的直接耦合，属于动态双向耦合。将流域空间分成非淹没区和淹没区，仅在非淹没区采用粗网格求解二维扩散波方程，计算流域的产流和汇流；在淹没区等局部区域采用精细网格求解二维浅水方程，淹没区包括河湖、漫滩、低洼积水区及排水管网密集区域；模型预期具有良好的数值精度。由于仅在局部区域(淹没区)进行二维水动力计算，耦合模式3预期具有良好的计算效率。清华大学提出的DBCM<sup>[61]</sup>模式属于耦合模式3，该耦合模式提出的时间较短，模型尚在完善之中。

流域洪涝灾害发生频发, 研制并应用洪涝灾害模拟及预报模型, 对于减缓洪涝灾害影响具有现实意义。在评价工程措施对减缓洪涝灾害风险的效果时, 国内自主开发的模型和国外的商业模型都具有其优点。国外的 Mike 系列、SWMM、SWAT、HEC-RAS 等模型, 在高校和工程设计院等部门经常使用, 在国内有较好的应用和销售市场。由于国外的商业模型模块化比较强, 不同功能在同一模型中不能同时兼顾, 对国内自主研发模型不利。国内自主研发的模型在模型功能、计算精度、计算效率和格式稳定等方面都具有独到之处和可持续开发的潜力, 如 FRAS<sup>[35,63]</sup>, GAST<sup>[39]</sup>、Hydroinfo<sup>[25]</sup>、CUHHM<sup>[40-41]</sup>、IHUM<sup>[42-43]</sup>、FRAS<sup>[35,63]</sup>、DBCM<sup>[61]</sup>等模型, 各种耦合均匀有应用案例, 模型的先进性已经得到国内外同行的良好评价。揭示水文过程与水动力过程的真实相互影响机制, 在保证数值格式稳定性的同时, 实现水文与水动力耦合模型的计算精度和计算效率的优化配置, 增加模型的功能, 将模型应用于流域范围的洪涝灾害及水环境综合整治, 是今后需要深入研究的方向之一。

将水文模型和水动力学模型作为一个整体统筹考虑, 这种耦合模式称为紧密耦合或双向耦合<sup>[61]</sup>。紧密耦合在机理上最为完善, 通过紧密耦合实现水文、水动力、水质等多过程的交互, 进而实现模拟复杂的洪涝过程和水环境, 是洪涝模型的重要发展趋势<sup>[64]</sup>。

## 4 结论

本文介绍了流域洪涝模拟和预报模型的研究进展, 包括水文模型、水动力模型、水文与水动力耦合模型。在实际应用时应该根据流域或城市洪涝问题的实际, 选取合适的模型。单一的水文模型具有计算简便、模拟范围大、计算效率高等优点, 在流域洪涝模拟与预报中已经发挥了重要作用。在流域范围较小或在城市洪涝的模拟与预报中, 单一的水动力模型具有较高的空间分辨率, 可以反映洪水与建筑物耦合作用的动力过程, 能为城市排水管网进口位置提供更加合理的水深和流速等信息。通过加大二维区域的网格尺寸、一维水动力计算与二维水动力计算耦合、在水深较浅区域使用“薄层水”假设、二维水动力与二维扩散波模型切换等方法, 可以改进数值格式的稳定性, 提高计算效率。

水文与水动力的耦合模型可分为串联耦合、动态单向耦合、动态双向耦合。水文与水动力的串联耦合模型因使用简便, 应用灵活等特点, 在洪涝灾害治理中工程中经常使用。串联耦合模型适合淹没区范围较小的洪水演进分析, 在水动力计算的边界点位置选取和流量边界条件选取上应该注意与物理过程相符合等问题, 尽量避免边界点位置固定和流量边界条件带来的误差。水文与一维水动力模型的动态单向耦合模型, 因水动力模型是一维的, 模型的应用范围受限。水文与二维、一维水动力的动态耦合模型应用范围较广, 已有的三种耦合模式如图 7 所示, 各种耦合模式均具有各自的优势, 可以根据流域或城市洪涝的实际情况选取和使用合理的耦合模式。由于耦合模式 3 的开发时间相对较短, 模型的功能还处于完善过程中。流域洪涝模型的计算精度与计算效率是一对矛盾, 往往不能同时兼顾。常规的洪涝预测模型常常是计算精度的提高, 以花费更多的计算时间及格式稳定性为代价, 采用并行计算技术也是减少模型运行时间的常用方法。在取得良好的计算精度的同时, 能够提高计算效率, 需要在模型理论上进行创新。CUHHM、IHUM、IFMS Urban<sup>[65]</sup>等正是朝着这个方向开展工作, 已经研制出具有独立知识产权的水文产汇流模型与二维水动力的间接动态耦合模型。于 2019 年提出的 DBCM, 是水文产汇流模型与二维(包括一维)水动力模型的直接动态双向耦合, 在模型理论上能更加真实地反映水文过程与水动力过程的互馈机制, 同时避免水文产汇流模型与二维水动力模型之间互为边界条件的算法、尽量减少采用二维隐式格式(联立求解大型方程组)来达到保证格式稳定的目的。通过改进水文与水动力模型的耦合方式, 研制计算精度高、数值格式稳定、计算效率高的流域洪涝模拟及预测模型, 为流域洪涝模拟和预报、智慧水务建设提供技术支撑。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 尚全民, 吴泽斌, 何秉顺. 我国山洪灾害防治建设成就[J]. 中国防汛抗旱, 2020, 30(9/10): 1-5.

- [ 2 ] 杜士强, 温家洪. 从 2020 年汛期灾情看我国洪涝风险管理的挑战与建议[J]. 中国减灾, 2020, 380(17): 12-15.
- [ 3 ] 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(9): 72-76.
- [ 4 ] 张建云. 中国水文预报技术发展的回顾与思考[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 435-443.
- [ 5 ] 宋晓猛, 张建云, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战——II. 城市雨洪模拟与管理[J]. 水科学进展, 2014, 25(5): 752-764.
- [ 6 ] 芮孝芳. 工程水文学在中国的发展[J]. 水利学报, 2019, 50(1): 145-154.
- [ 7 ] GILL M A. Flood routing by the Muskingum method[J]. Journal of Hydrology, 1978, 36(3/4): 353-363.
- [ 8 ] SINGH V P, WOOLHISER D A. Mathematical modeling of watershed hydrology[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2002, 7(4): 270-292.
- [ 9 ] BEVEN K. TOPMODEL: a critique[J]. Hydrological Processes, 1997, 11(9): 1069-1085.
- [ 10 ] SUGAWARA M, OZSKI E, WATANABE I, et al. Tank Model and its application to Bird Creek, Wollombi Brook, Bikin River, Kitsu River, Sanaga River and Nam Mune[J]. Research Notes of the National Research Center for Disaster Prevention, 1974, 11: 1-64.
- [ 11 ] ZHAO R J. The Xinanjiang Model applied in China[J]. Journal of Hydrology, 1992, 135(1/4): 371-381.
- [ 12 ] 吴险峰, 刘昌明. 流域水文模型研究的若干进展[J]. 地理科学进展, 2002, 21(4): 341-348.
- [ 13 ] 于汪洋. 基于自适应网格的水文水力耦合模型研究[D]. 北京: 清华大学, 2019.
- [ 14 ] 陈海梅, 徐金英, 赖锡军. 二维坡面雨洪水动力模型研究[J]. 水动力学研究与进展, 2017, 32(4): 484-490.
- [ 15 ] PAN A, HOU A, TIAN F, et al. Hydrologically enhanced distributed urban drainage model and its application in Beijing City[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2012, 17(6): 667-678.
- [ 16 ] LI D, WANG X, XIE Y, et al. A multi-level and modular model for simulating the urban flooding and its application to Tianjin City[J]. Natural Hazards, 2016, 82(3): 1947-1965.
- [ 17 ] 吕恒, 倪广恒, 田富强. 排水管网结构概化对城市暴雨洪水模拟的影响[J]. 水力发电学报, 2018, 37(11): 97-106.
- [ 18 ] 王达桦. 小流域水文水动力耦合模型的研究及应用[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020.
- [ 19 ] ATABAY S. Accuracy of the ISIS Bridge Methods for prediction of afflux at high flows[J]. Water and Environment Journal, 2008, 22(1): 64-73.
- [ 20 ] RENE J, MADSEN H, MARK O. A methodology for probabilistic real-time forecasting – an urban case study [J]. Journal of Hydroinformatics, 2013, 15(3): 751-762.
- [ 21 ] PATRO S, CHATTERJEE C, MOHANTY S, et al. Flood inundation modeling using MIKE FLOOD and remote sensing data[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2009, 37(1): 107-118.
- [ 22 ] BRUNNER G W. HEC-RAS river analysis system[Z]. Hydraulic Reference Manual. Version 1. 0. 1995, HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER DAVIS CA.
- [ 23 ] SYME W J. TUFLOW—Two & One—dimensional unsteady flow software for rivers, estuaries and coastal waters [C]//IEAust 2D Seminar, Sydney, 2001.
- [ 24 ] CHENG XIAOTAO, QIU JINWEI. Numerical simulation of inundation in Shenzhen City by finite difference model [J]. International Journal of Sediment Research, 1994, 9: 17-26.
- [ 25 ] 陈凯麒, 江春波. 地表水环境影响评价数值模拟方法及应用[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2018.
- [ 26 ] CHEN YIXIANG, NIU XIAOJING. Forced wave induced by an atmospheric pressure disturbance moving towards shore[J]. Continental Shelf Research, 2018, 160: 1-9.
- [ 27 ] YU KANG, CHEN YONGCAN, ZHU DEJUN, et al. Development and performance of a 1D-2D coupled shallow water model for large river and lake networks[J]. Journal of Hydraulic Research, 2019, 57(6): 852-865.
- [ 28 ] ZHU DEJUN, CHEN YONGCAN. Implementing of the JPWSPC method in RIV1H for unsteady flow modeling in general river networks[J]. International Journal of Sediment Research, 2019, 34: 379-386.
- [ 29 ] ALI K H, KARIM O A. Simulation of flow around piers[J]. Journal of Hydraulic Research, 2002, 40(2): 161-174.
- [ 30 ] WARREN I R, BACH H K. MIKE 21: a modelling system for estuaries, coastal waters and seas[J]. Environ-

- mental Software, 1992, 7(4): 229–240 .
- [ 31 ] JASAK H, JEMCOV A, TUKOVIC Z . OpenFOAM: A C++ Library for complex physics simulations[C]//International Workshop on Coupled Methods in Numerical Dynamics, IUC Dubrovnik Croatia, 2007 .
- [ 32 ] GODUNOV S K . A finite difference method for the computation of discontinuous solutions of the equations of fluid dynamics[J] . Matematičeskij Sbornik, 1959, 47(89): 271–306 .
- [ 33 ] 刘杨, 张瑞海, 韩岭, 等 . 基于 MIKE FLOOD 模型的西北城市河道橡胶坝群洪水风险分析研究[J] . 水利与建筑工程学报, 2016, 14(6): 113–119 .
- [ 34 ] 张大伟, 程晓陶, 黄金池, 等 . 基于 Godunov 格式的溃坝水流数学模型[J] . 水科学进展, 2010, 21(2): 167–172 .
- [ 35 ] 王静, 李娜, 程晓陶 . 城市洪涝仿真模型的改进与应用[J] . 水利学报, 2010, 41(12): 1393–1400 .
- [ 36 ] YU C, DUAN J G . Simulation of surface runoff using hydrodynamic model[J] . Journal of Hydrologic Engineering (ASCE), 2017, 22(6): 04017006 .
- [ 37 ] YU C, DUAN J G . Two-dimensional hydrodynamic model for surface-flow routing[J] . Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 140(9): 04014045 .
- [ 38 ] 张大伟, 权锦, 马建明, 等 . 基于 Godunov 格式的流域地表径流二维数值模拟[J] . 水利学报, 2018, 49(7): 787–794 .
- [ 39 ] 刘菲菲, 侯精明, 郭凯华, 等 . 基于全水动力模型的流域雨洪过程数值模拟[J] . 水动力学研究与进展(A辑), 2018, 33(6): 778–785 .
- [ 40 ] 刘家宏, 梅超, 向晨瑶, 等 . 城市水文模型原理[J] . 水利水电技术, 2017, 48(5): 1–5 .
- [ 41 ] 梅超 . 城市水文水动力耦合模型及其应用研究[D] . 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019 .
- [ 42 ] 黄国如, 陈文杰, 喻海军 . 城市洪涝水文水动力耦合模型构建与评估[J] . 水科学进展, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20210128.1033.002.html> .
- [ 43 ] 陈文杰 . 城市洪涝水文水动力模型构建与洪涝管理关键问题研究[D] . 广州: 华南理工大学, 2019 .
- [ 44 ] LIU ZHANYAN, ZHANG HONGBIN, LIANG QIUHUA . A coupled hydrological and hydrodynamic model for flood simulation[J] . Hydrology Research, 2019, 50(2): 589–606 .
- [ 45 ] ZHAO G, BALSTRM T, MARK O, et al . Multi-scale target-specified sub-model approach for fast large-scale high-resolution 2D urban flood modelling[J] . Water, 2021, 13(3): 259 .
- [ 46 ] 宋利祥, 徐宗学 . 城市暴雨内涝水文水动力耦合模型研究进展[J] . 北京师范大学学报, 2019, 55(5): 581–587 .
- [ 47 ] MCMILLAN H K, BRASINGTON J . End-to-end flood risk assessment: a coupled model cascade with uncertainty estimation[J] . Water Resources Research, 2008, 44(3) . doi: 10.1029/2007wr005995 .
- [ 48 ] MONTANARI M, HOSTACHE R, MATGEN P, et al . Calibration and sequential updating of a coupled hydrologic-hydraulic model using remote sensing-derived water stages[J] . Hydrology and Earth System Sciences, 2008, 13(3): 367–380 .
- [ 49 ] CHOI C C, MANTILLA R . Development and analysis of GIS tools for the automatic implementation of 1D hydraulic models coupled with distributed hydrological models[J] . Journal of Hydrologic Engineering, 2015, 20(12): 06015005 .
- [ 50 ] GRIMALDI S, PETROSELLI A, ARCANGELETTI E, et al . Flood mapping in ungauged basins using fully continuous hydrologic-hydraulic modeling[J] . Journal of Hydrology, 2013, 487: 39–47 .
- [ 51 ] 余富强, 鱼京善, 蒋卫威, 等 . 基于水文水动力耦合模型的洪水淹没模拟[J] . 南水北调与水利科技, 2019, 17(5): 37–43 .
- [ 52 ] 王晓青 . 三峡库区澎溪河(小江)富营养化及水动力水质耦合模型研究[D] . 重庆: 重庆大学, 2012 .
- [ 53 ] LIU G, SCHWARTZ F W, TSENG K H, et al . Discharge and water-depth estimates for ungauged rivers: combining hydrologic, hydraulic, and inverse modeling with stage and water-area measurements from satellites[J] . Water Resources Research, 2015, 51(8): 6017–6035 .
- [ 54 ] HDEIB R, ABDALLAH C, COLIN F, et al . Constraining coupled hydrological hydraulic flood model by past storm events and post-event measurements in data-sparse regions[J] . Journal of Hydrology, 2018, 565: 160–176 .
- [ 55 ] RAYBURG S, THOMS M C . A coupled hydraulic-hydrologic modelling approach to deriving a water balance

- model for a complex floodplain wetland system[J]. *Hydrology Research*, 2009, 40(4): 364–379.
- [ 56 ] THOMPSON J R, SØRENSEN HR, GAVIN H, et al. Application of the coupled MIKE–SHE/MIKE 11 modeling system to a lowland wet grassland in Southeast England[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 293(1/4): 151–179.
- [ 57 ] 张真奇, 夏自强. 洪水预报水文-水动力模型研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2002, 30(5): 83–86.
- [ 58 ] 刘浏, 徐宗学. 太湖流域洪水过程水文-水动力耦合模拟[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2012, 48(5): 530–536.
- [ 59 ] 侯精明, 郭凯华, 王志力, 等. 设计暴雨雨型对城市内涝影响数值模拟[J]. *水科学进展*. 2017, 28(6): 820–828.
- [ 60 ] 徐涛, 李哲, 周曼, 等. 新一代三峡水利枢纽短期洪水预报系统的构建与检验[J]. *水力发电学报*, 2015, 34(3): 21–28.
- [ 61 ] JIANG CHUNBO, ZHOU QI, YU WANGYANG, et al. A dynamic bidirectional coupled surface flow model for flood inundation simulation[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2021, 21: 497–515.
- [ 62 ] KIM J, WARNOCK A, IVANOV V Y, et al. Coupled modeling of hydrologic and hydrodynamic processes including overland and channel flow[J]. *Advances in Water Resources*, 2012, 37: 104–126.
- [ 63 ] 张念强, 李娜, 甘泓, 等. 城市洪涝仿真模型地下排水计算方法的改进[J]. *水利学报*, 2017, 48(5): 536–534.
- [ 64 ] 徐宗学, 叶陈雷. 城市暴雨洪涝模拟: 原理、模型与展望[J]. *水利学报*, 2021, 52(4): 381–392.
- [ 65 ] 喻海军, 马建明, 张大伟, 等. IFMS Urban 软件在城市洪水风险图编制中的应用[J]. *洪水风险图编制*, 2018, 7(28): 13–17.

## Review on hydrological and hydrodynamic coupling models for flood forecasting in mountains watershed

JIANG Chunbo<sup>1</sup>, ZHOU Qi<sup>1</sup>, SHEN Yanxia<sup>1</sup>, LIU Gaofei<sup>1</sup>, ZHANG Di<sup>2</sup>

(1. *State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

2. *School of Hydraulic Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*)

**Abstract:** Flood disasters occur frequently in mountainous watershed due to human activities and climate change, and the development of flood prediction model has important theoretical significance and application value for flood disaster management and water environment improvement. The advantages and disadvantages of hydrological and hydrodynamic models for flood simulation and forecast were detailed in this paper, respectively, and the shortcomings of single hydrological model or hydrodynamic model for flood simulation and forecasting were proposed. Based on this, the characteristics and applicability of different coupling models, such as series coupling of hydrological and hydrodynamic models, dynamic unidirectional coupling of hydrological and 1D hydrodynamic models, and dynamic unidirectional coupling of hydrological and 2D hydrodynamic models, were summarized and compared, and it was concluded that these coupling models have made great progress in computational accuracy, computational efficiency and numerical scheme stability. The mutual feedback mechanism between hydrological process and hydrodynamic process were introduced, and the feasibility of a new coupling model was also discussed. As a result, a dynamic bilateral coupling model (DBCM) was established, which was expected to reflect the real flood routing process and improve the simulation accuracy. In the future, not only the simulation accuracy of flood disaster should be improved, but also the operation efficiency of models should be increased to achieve high-precision flood simulation, which support for flood control and comprehensive improvement of water environment. In practice, according to the actual flood control situation of mountainous watershed and cities, the different coupling model can be selected for flood simulation and forecast.

**Keywords:** flooding forecasting; watershed model; hydrology model; hydrodynamic model; coupling model

(责任编辑: 李福田)