

基于分布式水文模型的强降雨下 流域汇流研究

杨 崧, 李一如, 郑 聪

(常州市城市防洪工程管理处, 江苏 常州 213000)

摘要:以分布式水文模型为理论依据,在图形处理器(GPU)并行计算的技术支持下,对某流域展开了强降雨下的流域汇流研究,研究的重点在于计算优化后的流域汇流模型。结果表明:优化后的流域汇流模型更具有应用价值,模拟结果具有参考意义。

关键词:强降雨;流域汇流;分布式水文模型;GPU 并行计算。

中图分类号:TV223 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7839(2020)10-0018-03

Study on catchment confluence under heavy rainfall based on distributed hydrological model

YANG Song, LI Yiru, ZHENG Cong

(Changzhou Urban Flood Control Project Management Office, Changzhou 213000, China)

Abstract:Based on the distributed hydrological model and supported by GPU parallel computing, the catchment confluence under heavy rainfall was studied, which focused on the optimized catchment confluence model. The results showed that the optimized catchment confluence model had more application value and the simulation results had important reference significance.

Key words:heavy rainfall; catchment confluence; distributed hydrological model; GPU parallel computing

地势高差较大且植被覆盖率较低的地方容易在持续强降雨的影响下发生滑坡、泥石流和山洪等灾害^[1],如若进一步引发水库溃坝,对人民生命财产造成的损失更不堪设想,因此,能精确模拟计算出流域汇流的发展情况是提高预报暴雨洪涝灾害准确度的重要技术要求。

目前,应用较广泛的流域汇流模型是集总式水文模型和分布式水文模型^[2]。集总式水文模型是将整个流域范围作为研究对象,不考虑小范围内水文要素的具体分布,因此该模型的模拟结果能较准确的反应流域出口断面的汇流流量,但无法计算流域内的汇流过程。分布式水文模型是将流域离散为若干子区域,根据水流在各子区域内的产流、汇

流等情况,最终整合得到整个流域范围内的产流、汇流结果,研究人员应用分布式水文模型能清晰地观察、研究、整理各时段的流域汇流情况。本文基于分布式水文模型,在图形处理器(GPU)并行计算的支持下开展了针对江苏省某流域的汇流模拟。

1 GPU 模拟流域汇流的基本路径

计算机 GPU 拥有众多具有缓存和逻辑运算功能的计算内核,能为并行计算提供必要的硬件支撑^[3]。计算流域汇流模型时,在时程上将模型离散为若干个时间段,从初始时间段开始计算模型的汇流场,并将该汇流场作为下一时间段的初始汇流场,以此类推,经过一定次数的迭代计算后不仅能

收稿日期:2020-04-26

作者简介:杨崧(1980—),男,工程师,硕士,研究方向为水利工程运行管理。E-mail:oxkopk@163.com

得到流域的最终汇流结果,还可以观察到流域在各时间段内的汇流情况。GPU 具体模拟路径如下:

(1)划分单元:以合适的单元类型将流域汇流平面模型划分为众多大小、形状一致的栅格单元。见图 1。

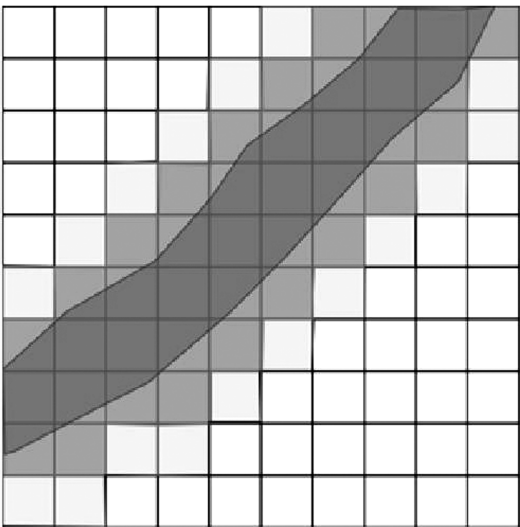


图 1 划分流域汇流模型单元

(2)定义单元属性:通过调整各单元的关键影响参数的数值来定义单元的属性,其表达式为

$$cell = \{H; s; b; W_f; \nu_f; W_t; \nu_t\} \tag{1}$$

式中, H 为单元高程; s 为单元类型; b 为单元的边界条件; W_f, ν_f 分别为各时间段上的单元初始水深和水流流速; W_t, ν_t 分别为各时间段上的单元最终水深和水流流速, W_t, ν_t 是在 W_f, ν_f 的基础上经过一个时间段的计算后得到的,经过数次迭代计算就可以模拟出流域的整个汇流过程。

2 流域的水文地质概况

本文选取淮沭河流域为研究对象,该地区的地势高差较大,地形自北向南呈跌落状,在东南季风的影响下形成了降水夏多冬少的典型干旱河谷气候,该流域的降水主要集中在 7~8 月,这 2 个月内的降水量能达到 400~600 mm,占年平均降水量的 50% 左右,持续的强降雨天气极易引发局部的洪涝、滑坡、泥石流等灾害。流域干流河道总长 39 km,汇流面积达到 500 km² 以上,选用流域上、下游两个水文站作为模型的断面出口,如图 2 所示。

3 流域汇流模型优化

本文将流域汇流模型的计算结果与该地区在 2018 年 6 月 600 h 强降雨下的汇流结果对比后发

现,模型处理的结果与实际水文观测记录存在很大偏差,在局部汇流路径上形成了紊流和水流反向迁移现象,而且水位出现了只升不降的异常情况,主要原因是:①模型采用的 N-S 方程中的平流项和外力项随迭代的推进出现了失真,使流域汇流场逐渐进入到不稳定状态,流域汇流场的水深和水流流速与客观规律相差的越来越远,最终使模拟结果出现较大误差;②河床地形出现了误差,主要是高程的误差,使得水流不连续,引发水流淤积现象。因此,需要在模型中增加水流混合模拟,还要对河床地形进行修正^[4]。

(1)水流混合模拟的实现路径是:在各迭代步的平流项和外力项的计算结束后,计算每个单元及周围单元的汇流总流量和总动量,将单元的总动量与汇流总流量相除,得到优化后的水流流速,其结果如表 1 所示。

表 1 水流混合模拟后的水流流速变化

时间/ h	水流混合模拟前		水流混合模拟后	
	流速 x / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	流速 y / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	流速 x / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	流速 y / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	-0.01	0.02	-0.01	0.02
20	-2.2	1.55	-1.99	1.82
40	1.22	-0.05	-0.23	0.1
60	-1.95	1.77	-0.1	0.05

由表 1 可以看出,水流混合模拟下的水流流速得到了优化,具体表现为流速随迭代步的推进能稳定在初始流速附近,这为提高流域汇流的计算精度提供了必要的条件。

(2)河床地形修正的重点在于高程,具体的步骤是:首先提取河床中心线、选择高程采集点;为保证汇流水流由高处向低处汇集,将各采集点对应的高程进行排序,保证采集点高程的排列顺序为从高到低、从上游到下游;采用空间插值法对排序后的高程进行修正,最终得到图 2 所示的结果。从图 2 可以看出,经过修正后的河床高程从上游到下游的过度平缓,水流能较平稳的流动、汇集。

4 强降雨下的流域汇流模拟

4.1 流域前期稳定流场

实际情况中,由于上游河道补水、前期地下水的影

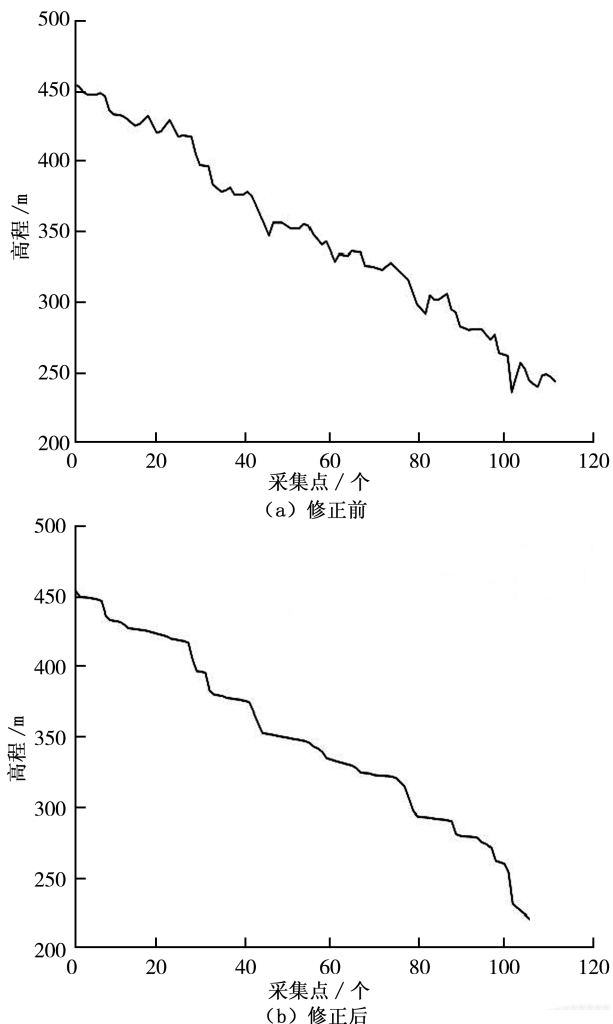


图2 河床地形修正前后的高程对比

水,这样的前期水情被称为流域前期稳定流场^[5],是否考虑前期稳定流场是影响流域汇流模拟精度的重要指标,本模型的前期稳定流场采用上游来水法得到,具体步骤为

(1)假设流域的上游来水是不间断且流量恒定的,经过一定次数的迭代后输出具有稳定水深和水流流速的稳定流场。

(2)在此基础上,以强降雨发生前 24h 的上游流量作为初始流场,再次进行迭代,直至模型产生稳定流场,该稳定流场即为流域前期稳定流场。

4.2 流域汇流模拟

为对比河道地形修正及流域前期稳定流场对模拟结果的影响,设置了不同的工况,计算强降雨 600 h 作用下的汇流水位的演变,图 3 为不同工况下的流域汇流结果。

从图 3 可观察到,考虑了河床地形修正和前期水情(流域前期稳定流场)的工况模拟的结果与实际水位较接近。实际水位的最大上升滞后时间、最

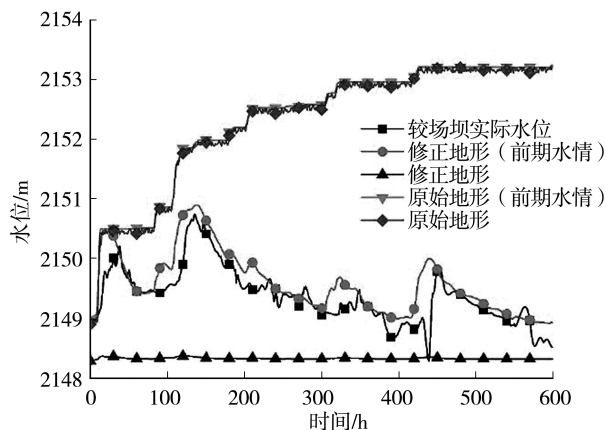


图3 不同工况下的流域汇流结果

大水峰值滞后时间分别在 13 h、14 h 左右,考虑地形修正及前期水情工况的结果分别在 13 h、16 h 左右,仅考虑地形修正工况的结果则约为 14 h、19 h,其余工况与实际水位的差距更大。与实际水位的平均值相比,考虑地形修正及前期水情工况的平均水位误差约为 0.4 m,考虑地形修正工况的平均水位误差在 0.45 m 左右,而原始地形工况下的平均水位误差达到了 2.3 m,考虑原始地形及前期水情工况的结果达到 2.4 m。考虑原始地形的工况与考虑原始地形和前期水情工况的结果高度吻合。

由以上数据可知,考虑了地形修正和前期水情工况的模拟结果与实际水位最接近,仅考虑地形修正工况的结果与之较接近,其余工况的结果与之相差较大。

5 结 论

本文基于分布式水文模型开展了强降雨作用下的流域汇流模拟,得到以下结论:

(1)模型采用的水流混合模拟、河床地形修正及前期稳定流场设定对计算结果均产生了有利作用,计算结果的精度得到了一定程度的提高。

(2)河床地形对汇流结果的影响显著,未考虑河床地形修正的流域汇流结果与实际测量结果相差较大,而考虑了河床地形修正的流域汇流结果与实测结果更加接近,更具有参考价值。

参考文献:

- [1] 汪洋,张妮娜,孙舟,等. 2017 年中国十大自然灾害事件[J]. 中国减灾, 2018(5):38-41.
- [2] 蒋永健,陆颖,祁昌军,等. 适用于分布式水文模拟的空间方法改进[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(6):69-74.

(下转第 34 页)

代替传统巡检模式,采用热门的 RFID 技术助力水利工程巡视检查,使工程管理工作从繁琐复杂变得简单有序,巡检信息的实时传输,能够及时发现并排除安全隐患,提升检查效率,为水利工程的安全运行和发挥效益提供了保障,系统简单便捷,可充分在水利工程管理中推广使用,使水管单位精细化、现代化水平进一步提升。

参考文献:

[1] 张建云,刘九夫,金君良. 关于智慧水利的认识与思

考[J]. 水利水运工程学报, 2019(6):1-7.

[2] 张博. 河流工程运行管理巡检系统设计与实现[D]. 长春:吉林大学, 2016.

[3] 施亮. 浅谈 RFID 应用[J]. 计算机光盘软件与应用, 2012(22):113-113.

[4] CHRISTIANE HILSMANN. 条形码与 RFID 的较量 RFID 和二维条形码两种技术及应用中各有优势 [J]. 流程工业, 2010(6):58-59.

(上接第 20 页)

[3] 曹亚群. 基于 GPU 的并行优化算法研究[J]. 科技资讯, 2019, 17(21):7-8.

[4] 郭海燕,陈军,徐沅鑫,等. 径流汇流模拟的河道高程修正方法研究[J]. 干旱气象, 2019, 37(4):676-

682.

[5] 宋扬,周维博,马亚鑫,等. 降水、河流径流量与开采对西安地区潜水流场影响分析[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(6):7-13.

(上接第 29 页)

算值并没有超过实测值的 2 倍和 1/2 间的范围,且变化趋势也较为统一。模型率定结果表明,模型参数选取合理,所建立的模型能够模拟东区河道内的水流运动情况及水质变化,为改善东区水动力条件及水环境改善提供了技术支撑。

4 结 论

本文通过对扬州市通南地区河网水动力及水环境经行数值模拟,建立了通南地区水动力-水环境河网数学模型,通过实测水文资料对模型进行了率定,并经水文站实测值与计算值验证对比情况可知,本模型无论在水位、流量及水质计算上都与实测值贴合程度都较好,计算结果有较好的精确度。因此,该模型能够用于分析在不同水资源调度情况下扬州内部河网水动力条件的情况和水质情况。且根据实测数据分析,邵伯湖供水去扬州通南地区河网水流从邵仙河引入后,绝大部分都从小涵河及

顾圩河流出,其河网中部及南部地区水流流速都较慢,而且由于河流断面都较为狭窄,所以在该闸门控制现状下,如遇到大规模降雨会有洪涝灾害的可能。

参考文献:

[1] 李鑫. 扬州市水资源供需现状分析[J]. 水利发展研究, 2014, 14(9):69-71.

[2] 韩进能. 河流一维水质模型在水环境容量计算方面的应用[J]. 环境科学与技术, 1995(4):43-45.

[3] 杨国录. 四点时空偏心 Preissmann 格式的应用问题[J]. 泥沙研究, 1991(4):88-98.

[4] 褚君达. 河网对流输移问题的求解及应用[J]. 水利学报, 1994(10):14-23.

[5] 徐小明. 大型河网水力水质数值模拟方法[D]. 南京:河海大学, 2001.