

文章编号: 2096-1618(2019)03-0316-07

基于图形处理器的涪江中段流域降雨汇流模拟方法研究

吕朝阳, 陈军, 刘意, 孙伟, 肖俊文

(成都信息工程大学资源与环境学院, 四川 成都 610225)

摘要:为增加径流汇流模型的时效性,提出一种基于图形处理器通用计算的汇流模型。首先,在稳定水源供给的条件下,通过对模型修改和完善生成流域前期水环境。最后,将小时降水数据叠加到前期水环境进行径流汇流模拟得到模拟结果。通过验证发现,模型模拟结果具有更小的水位变化误差,模拟精度进一步提高,模拟速度更快,满足实时计算要求。精度和性能的同时提升,证实汇流模型在流域暴雨洪涝灾害实时评估中具有重要的应用价值。

关键词:图形处理器通用计算;汇流模型;稳定水源;前期水环境;涪江中段;3S集成与气象应用;气象地理信息系统工程

中图分类号:P426.6

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2019.03.018

0 引言

随着计算机技术和汇流模型的快速发展,利用分布式水文模型进行径流汇流的模拟和预测逐渐成为暴雨洪涝评估的重要手段^[1-2]。在水文模型发展过程中,涌现出了诸多的数值模型,依据对空间离散程度可将水文模型分为集总式模型、分布式模型和半分布式模型^[3-4]。集总式流域水文模型将流域作为一个整体来模拟,将呈空间分布状态的降雨输入当成模型的集总输入,与流域径流分散输入实际情况不符,难以应用到实际的暴雨汇流预警预报中^[5-6]。分布式水文模型通过水循环的动力学机制来描述和模拟流域水文过程,相对于集总式模型有了很大的进步^[3,7]。TOP-MODEL是最早提出的分布式模型之一,该模型以地形为基础,利用地貌指数来反映流域水文现象^[8-9]。由于未考虑降水、蒸发等因素的空间分布,无法获取全流域的水流分布,因此被称为半分布式水文模型^[10];1994年,Jeff Arnold开发了SWAT模型,该模型是一个具有很强物理基础、适用于具有不同的土壤类型、不同的土地利用方式和管理条件下的复杂的大流域,在加拿大和北美地区具有广泛的应用^[11-12]。

真正意义上的分布式水文模型将流域划分成许多矩形栅格,每个栅格单元与周围8个栅格单元之间的水流交换,最终计算洪水淹没范围和淹没深度^[13]。SHE和FloodArea是这类模型的典型,由于模拟可得到全流域的汇流状况,在暴雨洪涝灾害预警预报中被广泛应用^[14]。Sandu等^[15]利用SHE模型对Argesel

流域地表径流和地下径流的模拟做出土地管理决策以及评估水文减灾措施。Thompson等^[16]通过改进MIKESHE的流程使模型更能准确地反映出河道土壤或地表膨胀引起的大孔隙流。McMichael等^[17]在MIKESHE模型中添加LAI轨迹基线使得模型对丛林流域具有更好的模拟结果。Fengchang Xue^[18]利用FloodArea模型模拟南昌市重现期为5 a、10 a、50 a、100 a的城市内涝深度空间分布。张磊等^[19]利用二维水动力模型FloodArea实现无水文资料的山区流域山洪灾害精细化风险评估和预警预报。

分布式水文模型计算量较大,传统分布式水文模型大多以CPU作为计算平台,CPU有限的计算能力制约了模型计算效率的提升^[20-22],因此提出一种基于GPU通用计算的汇流模型。首先,给出栅格模式下汇流模型,在稳定水源供给的条件下生成流域前期水环境;最后,将小时降水数据叠加到前期水环境中进行GPU汇流演算,获取流域径流汇流最终结果。通过涪江中段流域验证发现,汇流模型模拟结果具有更小的模型水位变化误差,而且模型模拟效率得到加强,在暴雨洪涝预警预报中具有重要的应用价值。

1 研究区与数据源

1.1 研究区概况

涪江隶属长江水系,是嘉陵江最重要的支流之一,发源于四川省松潘县岷山雪宝顶全长670 km,由西北向东南方向流动(图1)^[23-24]。涪江中段流域位于涪江中段,地貌以山地、丘陵为主,地形起伏较大,总体呈现由西北到东南方向倾斜,属于高山峡谷地貌^[25]。涪

收稿日期:2018-09-25

基金项目:四川省科技厅资助项目(2017JY0157);四川省科技厅支撑计划资助项目(2015SZ0214);四川省国土资源厅科学研究计划资助项目(KJ-2015-18)

江中段流域属于亚热带湿润气候,全年降雨量比较充沛且分布不均,大的降雨过程主要集中在每年5-9月^[26]。强降水天气频发导致不同程度的暴雨洪涝灾害是涪江中段最主要的自然灾害,每年造成严重的财产损失^[27-28]。因此,做好涪江中段流域暴雨洪涝灾害的模拟监测具有重要意义。

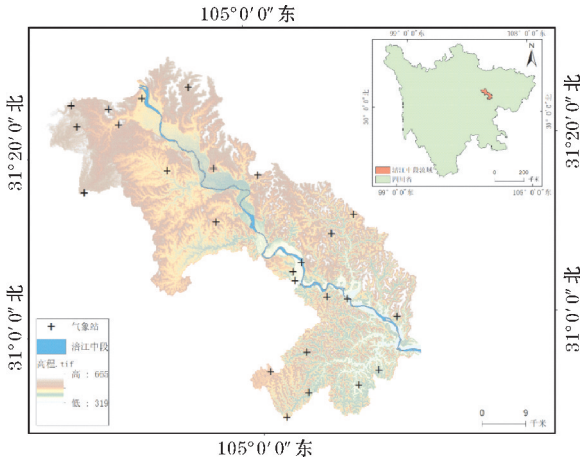


图1 涪江中段流域位置分布图

1.2 数据来源

采用四川省30 m分辨率DEM数据作为地形数据,在地形基础上通过模拟的方式获取流域前期稳定水环境。流域降水数据采用涪江中段流域25个气象站实况降水数据,在流域前期水环境基础上叠加实况降水数据并模拟得到降雨后的径流汇流结果。为实时监测流域主河道水位变化情况,选择涪江中段流域中的潼川水文站作为验证对象,通过对比潼川水文站实测水位数据和模拟水位数据验证模型的稳定性和准确性。

2 栅格模式下模型实现

首先依据一定的空间分辨率将流域划分为面积大小相等的网格集合,以栅格数据存储和表示^[3]。在此基础上,将汇流过程划分为时间间隔相等的时间片,每一个时间片以栅格为单元进行汇流计算,以便于通用计算的实现。通过时间片的迭代,完成流域汇流过程模拟。为使模型更真实地反映实际的汇流过程,将时间片上的径流汇流分解为两步,即水量收支和受力计算。

2.1 栅格单元水量收支计算

设任意栅格单元 c ,时间片起始时刻为 t_n ,终止时刻为 t_{n+1} ,汇流时间为

$$\Delta t = t_{n+1} - t_n \quad (1)$$

设 t_n 时刻的栅格水深为 h_c^n ,时间片上的降水量、下渗量、蒸发量、流入量和流出量分别为 R_c^n 、 I_c^n 、 E_c^n 、 In_c^n

和 Out_c^n ,依据水量平衡原理, t_{n+1} 时刻的栅格水深 W_c^{n+1} 为

$$W_c^{n+1} = W_c^n + R_c^n + In_c^n - I_c^n - E_c^n - Out_c^n \quad (2)$$

其中, R_c^n 来源于气象站观测。首先将小时站点降水通过反距离权重插值,得到流域面雨量。各栅格单元的降水量除以1 h的时间片数,得到 R_c^n ; E_c^n 设置为常数,表示每一个时间片上蒸发量; I_c^n 利用菲利普下渗曲线^[29]进行模拟:

$$f_t = f(t) = \frac{1}{2} S \cdot t^{-0.5} + A \quad (3)$$

式中, S 、 A 为反映下渗影响因素的参数,与土壤性质有关。

在通用计算模式下, In_c^n 和 Out_c^n 仅考虑中心栅格与周围的8邻域栅格单元的水量交换。设栅格单元 c 的邻域像元为 b , $V_{b \rightarrow c}$ 为栅格 b 水流流入栅格 c 的速度分量, ΔL 为栅格 b 和栅格 c 的中心距离,则流入量 In_c^n 为

$$In_c^n = \sum_{b=1}^8 \left(\frac{V_{b \rightarrow c} \Delta t}{\Delta L} W_b^n \right) \quad (4)$$

设 $V_{c \rightarrow b}$ 为栅格 c 水流流入栅格 b 的速度分量,则流出量 Out_c^n 为

$$Out_c^n = W_c^n \sum_{b=1}^8 \frac{V_{c \rightarrow b} \Delta t}{\Delta L} \quad (5)$$

栅格单元与8邻域水量交换过程中,满足动量守恒定律。设 V_c^n 和 V_c^{n+1} 分别表示栅格初始水速和终止水速,则有:

$$V_c^{n+1} = \frac{\sum_{b=1}^8 \left(\frac{V_{c \rightarrow b}^n}{\Delta L} \right)^2 \Delta t W_b^n + (h_c^n - Out_c^n) \times V_c^n}{W_c^{n+1}} \quad (6)$$

式(2)和式(6)仅计算时间片上各栅格单元 c 在水量收支过程中自身的新水深和新水速,不考虑邻域栅格的水深和水速变化,满足通用计算要求。

2.2 栅格单元受力计算

栅格单元的水体受到多种内外力的影响,水流随速度的迁移过程中,由于水压不同产生水流内部的压力梯度力。由于地表水流在坡面上或河床上流动,地表径流除受到重力作用外,还存在地表摩擦力、相邻水团的作用力等。

以中心栅格和邻域栅格水体高度差来模拟水体在重力和压力梯度的作用下产生的速度增量。设栅格 c 和邻域栅格 b 的地形高度分别为 H_c 和 H_b ,则邻域栅格相对于中心栅格的水体高度差 ΔW_{bc} 为

$$\Delta W_{bc} = \begin{cases} -W_c^n, & \Delta W < W_c^n \\ H_b + W_b^n - H_c - W_c^n, & -W_c^n \leq \Delta W_{bc} \leq W_b^n \\ W_b^n, & \Delta W_{bc} > W_b^n \end{cases} \quad (7)$$

其速度增量 ΔV_{bc} 在水平 x 和 y 方向的分量为

$$\begin{cases} \Delta V_{bc}^x = -\Delta W_{bc} \times K \times dx \\ \Delta V_{bc}^y = -\Delta W_{bc} \times K \times dy \end{cases} \quad (8)$$

其中, K 为综合压力梯度、重力及相邻水团作用等因素的水力加速度常数, dx 和 dy 为栅格 b 和栅格 c 在 x 和 y 方向的坐标之差。

地表水流由于受到河床摩擦力的影响,使水流速度发生衰减。设在单元栅格上摩擦力作用的上界深度 W_{\max} , 下界深度为 W_{\min} , 衰减系数 ε 近似定义为

$$\varepsilon = \begin{cases} \sigma \times \left(\frac{W_c^n - W_{\min}}{W_{\max} - W_{\min}} \right), & W_c^n \leq W_{\min} \\ \sigma, & W_c^n > W_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

其中, σ 为摩擦比例常数, 由具体流域特征确定。

利用式(7)和式(8), 以栅格为单元计算时间片上水流速度的变化, 得到受力计算后最终的水深和水速值。由于仅更新栅格单元本身的水速, 满足通用计算要求。

2.3 模型完善与前期水环境的生成

现实流域中, 降水并不是流域地表径流的唯一水源, 还存在上游河道来水、冰川融水、地下水补给等重要径流水源, 这些水源为流域持续不断供水, 从而保证流域即使在短期内停止降水, 其河道水位也能在一定程度上保持稳定。受到数据获取能力的限制, 这些水源尤其是地下水源往往在模型中很难被精确描述。模型假定流域上游存在稳定供水量, 利用汇流模型对流域内水流场进行不断迭代计算, 直至整个流域下游水深和流速大小不再继续增加并保持相对稳定, 则得到了流域前期水环境。依据流域所在季节和前期降水量大小, 设置适当的稳定供水量, 作为流域汇流的前期水环境。

考虑通用计算特点, 将分摊到各栅格单元中, 以栅格格式表示。设每一个栅格单元时间片上分摊的供水量为 ξ_c , 则

$$\xi = \sum_{c=1}^8 \xi_c \times N \quad (10)$$

式中, N 为每小时的时间片数

$$N = \mu / r \quad (11)$$

其中, r 表示流域栅格的分辨率, 单位 m ; μ 为最大流速, 单位 m/s , μ 一般设定为小于 1 的常数, 具体依据流域状况通过率定确定。前期水环境的水量平衡方程在式(2)的基础上添加, 即:

$$W_c^{n+1} = W_c^n + R_c^n + In_c^n - I_c^n - E_c^n - Out_c^n + \xi_c \quad (12)$$

依据式(12), 在前期水环境建立过程中, $R_c^n = 0$; 在降水时段的径流汇流模拟中, R_c^n 等于小时降水分摊到时间片上的水量。

研究发现, 将式(11)应用于流域汇流过程模拟

时, 随着迭代次数的增加, 流域内水流场将变得越来越不稳定, 其水深和水速变化剧烈, 甚至出现河道上相邻上下游栅格流速方向相反并相互交替的现象。流场不稳定现象首先发生在支流汇入的主河道位置, 并逐渐向河道其他位置扩散。为建立较稳定的流域前期水环境, 对模型进行修改和完善, 包括水速修正和水流混合模拟两部分。

2.3.1 水速修正

水速修正主要解决相邻栅格流速反向问题, 在时间片上利用式(8)计算速度增量计算时, 如果新的水速方向相反, 或者同向但速度绝对值大于 $1 m/s$ 时, 则使用新水速的 $1/2$ 作为新的水速。

首先, 给出水速修正的判别条件:

$$\begin{cases} A_x = \frac{1}{2} |v_x^n| - \text{sign}(v_x^n) v_x^{n+1} \\ A_y = \frac{1}{2} |v_y^n| - \text{sign}(v_y^n) v_y^{n+1} \end{cases} \quad (13)$$

式中, v_x^n, v_y^n 分别表示时间片上 x 方向和 y 方向上的初始时刻水速; v_x^{n+1}, v_y^{n+1} 分别表示 x 方向和 y 方向上修正前的终止时刻水速。

当满足 $A_x < 0$ 或 $A_y < 0$ 时, 则修正后的速度 $(v_x^{n+1})'$ 、 $(v_y^{n+1})'$ 为

$$\begin{cases} (v_x^{n+1})' = \frac{1}{2} v_x^n, & A_x \leq 0 \\ (v_y^{n+1})' = \frac{1}{2} v_y^n, & A_y \leq 0 \end{cases} \quad (14)$$

2.3.2 水流混合模拟

对水速修正后, 水流反向流动在一定程度上受到抑制。但当相邻栅格水流速度相差较大时, 迭代一定次数后, 流场仍会出现不稳定现象。因此, 在水速修正的基础上, 添加水流混合模拟环节。具体在每一个时间片上模拟完成后, 每一个栅格单元均计算与周围 8 邻域栅格的总动量和总水量, 利用总动量除以总水量得到该栅格单元新的流速。新的流速综合考虑了与相邻水团混合后的速度变化, 使流速分布更接近更真实的状态。

$$\begin{aligned} (v_c^x)'' &= \frac{\sum_{n=1}^8 v_x^n W_n + (v_c^x)' W_c}{\sum_{n=1}^8 W_n + W_c} \\ (v_c^y)'' &= \frac{\sum_{n=1}^8 v_y^n W_n + (v_c^y)' W_c}{\sum_{n=1}^8 W_n + W_c} \end{aligned} \quad (15)$$

2.4 前期水环境的合理性评价

为考查前期水环境的合理性, 在实验河道(图2)的纵断面上, 从上游到下游依次取 A、B 两个点位, 每

个点位在横断面上同时采集 3 个样点,对样点水深和流速大小及其变化进行分析。图中箭头的方向代表流速方向,也是水流方向,箭头的长短代表流速的大小,流速越大,箭头长度越长,流速越小,箭头长度越短。

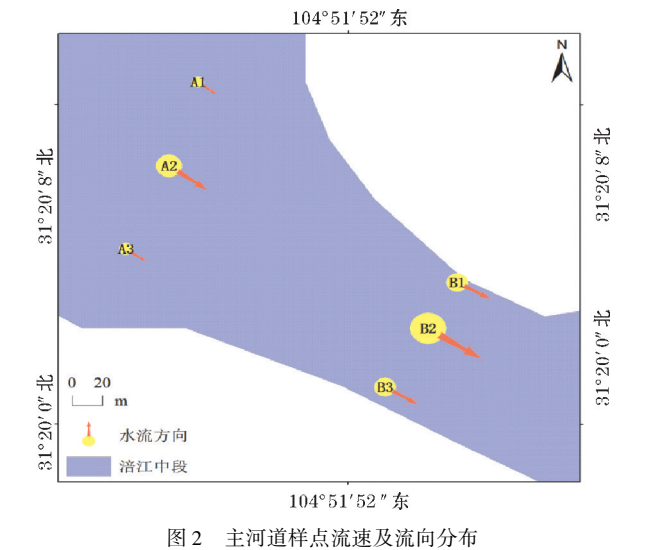


图2 主河道样点流速及流向分布

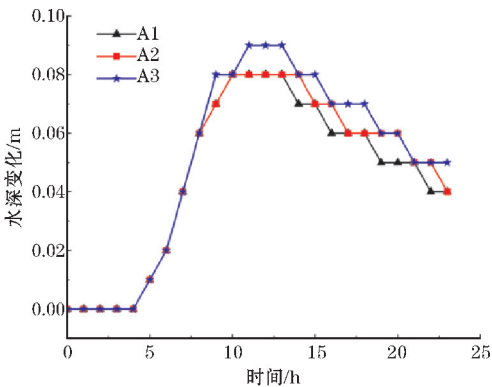
由图 2 可知,前期水环境流速方向从上游指向下游;流速在河道纵向上变化平稳;在同一河段上(无支流汇入),流量大小保持恒定。具体表现在水深相差不大的情况下,狭窄河道流速大,宽阔河道流速小。流速在河道横向上变化与真实状况一致,靠近河岸流速较小,河道中心流速较大。

在前期水环境模拟完成后,通过叠加流域的小时降水数据,利用模型进行径流汇流模拟,采集样点逐小时水深变化。通过河道横断面上水深变化和河道纵断面上水深变化研究模型算法的稳定性。图 3 为涪江中段河道样点在一个模拟时段的模拟水深变化。图 3(a)是河道横断面上水深变化,样点 A1,A2,A3 在同一河道横断面上,其模拟水深具有相似的变化规律;图 3(b)是河道纵断面上水深变化,样点 A2 位于样点 B2 上游河道,两者具有相似的模拟水深变化曲线。综上所述得出结论,由于研究河段无支流入汇,无论是横断面还是纵断面,样点的水深变化曲线基本相似,表明模型算法的稳定性。

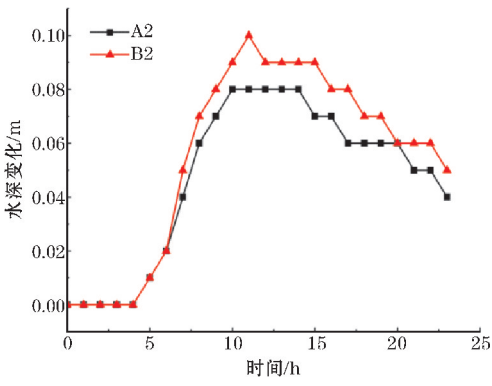
2.5 汇流模拟的通用计算流程

通用计算是一种以 GPU 为核心的计算。由于 GPU 的内核数远超 CPU,同时每个核拥有的缓存大小相对小,数字逻辑运算单元也相对少而简单,所以 GPU 更适合做简单、重复的并行运算^[30-31]。在通用计算中,整体任务被划分为大量可并行的计算单元,每一个计算单元由一个内核独立完成^[32-33]。将整个模拟过程分解为一定数量的时间片。每一个时间片以此完成水量收支计算、受力计算、流速修正和水流混合,每

一步均在 GPU 中并行计算^[34-36]。



(a) 横断面



(b) 纵断面

图3 涪江中段河道横面和纵断面的模拟水深变化

在前期水环境的制作过程中,为流域添加水位控制点。水位控制点位于下游河道,随着迭代次数的增加,控制点的水深和流速保持稳定,则迭代完成;在径流汇流模拟中,需要设定模拟的起始时间和终止时间。通过时间范围确定总时间片数。前期水环境径流汇流模拟通用计算流程如图 4 所示。

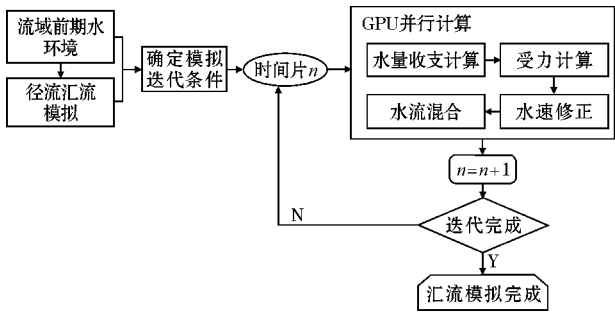


图4 径流汇流模拟通用计算流程

3 径流汇流模拟评价

3.1 汇流模型于 FloodArea 参数率定

为更好地验证汇流模拟方法的精度,对汇流模型

和 FloodArea 均进行流域的参数率定,使模型均在最优参数下模拟。经率定,FloodArea 的交换率和权重参数分别取值 5 和 1;文中模拟方法中运用到的参数列表如表 1 所示。

3.2 径流汇流模型的性能评价

对涪江中段进行重采样,得到不同流域尺度大小的涪江中段流域。为研究比较基于通用计算的径流汇流模型的模拟性能,以基于 CPU 计算平台的汇流模拟方法和 FloodArea 径流汇流模型为对比对象进行测试。测试结果如表 2 所示。

表 1 汇流模拟方法参数率定及率定值		
参数符号	参数含义	率定参数值
S	反映下渗影响因素的参数,与土壤性质有关	11.2
A	反映下渗影响因素的参数,与土壤性质有关	0.1
K	综合压力梯度、重力及相邻水团作用等因素的水力加速度常数	0.12
W_{\min}	单位栅格上摩擦力作用的下界深度	0
W_{\max}	单位栅格上摩擦力作用的上界深度	0.1
σ	摩擦比例常数	0.098
ξ	流域上游稳定供水量	45000
μ	最大流速	1/3

表 2 不同流域尺度 24 h 模拟时间对比

流域尺度	GPU 汇流模型 花费时间/s	CPU 汇流模型 花费时间/s	FloodArea 模型 花费时间/s	CPU 汇流模型与 GPU 汇流模型加速比	FloodArea 模型与 GPU 汇流模型加速比
412×863	25	115	148	4.6	5.9
640×1393	35	200	238	5.7	6.8
1463×1484	79	321	944	4.1	11.9
1704×2075	102	589	713	5.8	7.0
1073×3935	135	725	900	5.4	6.7
2059×2367	157	776	845	4.9	5.4
2331×3188	240	985	680	4.1	2.8
2023×4210	257	1376	2385	5.4	9.3

从表 2 可见,在不同尺度大小的流域径流汇流测试中发现,文中的 GPU 汇流模型完成模拟的时间均比 CPU 汇流模型和 FloodArea 模型花费的时间大大缩短,体现了通用计算的优势。

3.3 汇流模拟方法的精度评价

图 5 为利用汇流模型对一次强降雨过程的模拟结果图。由图 5(b)可以看出,模拟水位与水文站实测水位数据具有较好的拟合效果,当流域降水后,下游水文站水位开始上升,当水位达到峰值后下降。这说明模型基本符合流域内径流汇流的一般规律。

为进一步分析模型的模拟精度,选取 25 个降水时段,统计每个降水时段的降雨初始时间、降雨最大值及其时间,并利用文中的汇流模型和 FloodArea 分别对这些时段进行汇流模拟,采集水位上升滞后时间、水位峰值滞后时间和水位变化误差,如表 3 所示。

从表 3 可见,文中径流汇流模型的模拟水位变化误差小于 FloodArea 模型的模拟水位变化误差,体现了模型的有效性;从水位上升滞后时间来看,两模型水位上升的滞后时间均提前于实际的水位上升,其中本文径流汇流模型滞后时间更短。这说明,无论是哪一种汇流模型,都是对实际情况的近似,其模拟精度仍有很大的提升空间。

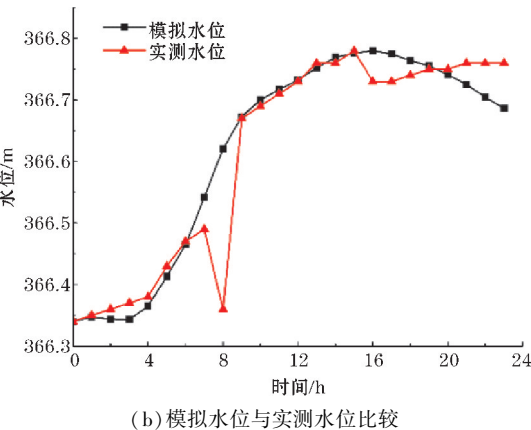
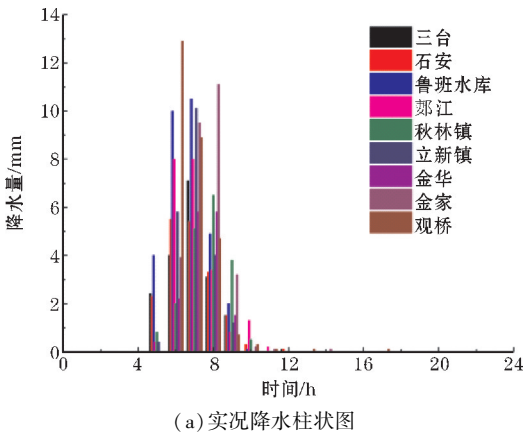


图 5 模型对 2010 年 7 月 13 日 3 时至 14 日 2 时一次强降雨过程的模拟结果

表 3 模拟水位与实测水位的水位变化滞后时间与水位变化误差

	水位上升滞后时间/h		水位峰值滞后时间/h		水位变化误差/m	
	平均	最大	平均	最大	平均	最大
实际水位	5.32	16	9.68	17	—	—
FloodArea 模型	3.64	13	15.36	45	1.166	3.56
本文模型	2.76	14	7.8	13	0.565	0.977

4 结束语

针对传统径流汇流模型存在的问题,提出一种基于通用计算的径流汇流模型。在完成流域前期水环境的基础上,叠加小时降水数据完成径流汇流模拟。通过实验流域验证发现,相对于目前广泛使用的 Flood-Area 模型,文中模型具有更小的水位变化误差,证明径流汇流模型的有效性。由于模型均以栅格单元并行设计,在通用计算支持下,径流汇流模拟性能有了极大的提升。汇流模型的精度和性能的同时提升,使模型在流域暴雨洪涝灾害实时评估中具有重要的应用价值。

流域汇流是一个多因素影响的复杂过程,不仅与地形和降水有关,还与地下水流场、人工调蓄等其他因素有关。而且,现有技术条件很难获取栅格尺度下高精度的地形和降水数据,这也在很大程度上降低了模型模拟精度。在文中成果基础上,如何进一步提高径流汇流精度仍需要继续研究。

参考文献:

[1] 李爱民. 分布式水文模型研究进展[J]. 中国水运,2016,16(7):171-172.

[2] 王泽群. 分布式水文模型的回顾与展望[J]. 绿色科技,2018(18):154-155.

[3] Zongxue X U. HYDROLOGICAL MODELS:PAST, PRESENT AND FUTURE[J]. Journal of Beijing Normal University,2010,46(3):278-289.

[4] 何长高,董增川,陈卫宾. 流域水文模型研究综述[J]. 江西水利科技,2008,34(1):20-25.

[5] Devia G K,Ganasri B P,Dwarakish G S. A Review on Hydrological Models[J]. Aquatic Procedia, 2015,4:1001-1007.

[6] 许志强,邓玉华. 概念性水文模型初探[J]. 江苏水利,2014(11):36-37.

[7] 郑长统,梁虹. 分布式水文模型研究进展[J]. 水科学与工程学报. 2009(6):9-11.

[8] 谢帆,李致家,姚成. TOPMODEL 和新安江模型的

应用比较[J]. 水力发电,2007,33(10):14-18.

[9] 刘志勇,赖格英. 分布式 Topmodel 模型主要应用及改进分析[J]. 黄石理工学院学报,2006,22(4):92-96.

[10] 芮孝芳,蒋成煜,张金存. 流域水文模型的发展[J]. 水文,2006,26(3):32-36.

[11] Arnold J G, Moriasi D N, Gassman P W, et al. SWAT: Model use, calibration, and validation[J]. Transactions of the Asabe, 2012, 55(4): 1345-1352.

[12] 于峰,史正涛,李滨勇. SWAT 模型及其应用研究[J]. 水科学与工程学报,2008(5):4-9.

[13] 刘军志,朱阿兴,秦承志,等. 分布式水文模型的并行计算研究进展[J]. 地理科学进展, 2013,32(4):538-547.

[14] 刘兆存,金生,韩丽华. 国内流域产汇流模型与应用分析[J]. 地球信息科学学报,2007,9(3): 96-103.

[15] Sandu M A, Virsta A. Applicability of MIKE SHE to Simulate Hydrology in Argesel River Catchment[J]. Agriculture & Agricultural Science Procedia,2015(6):517-524.

[16] Thompson J R, Srenson H R, Gavin H, et al. Application of the coupled MIKE SHE/MIKE 11 modelling system to a lowland wet grassland in southeast England[J]. Journal of Hydrology, 2004,293(1):151-179.

[17] Mcmichael C E, Hope A S, Loaiciga H A. Distributed hydrological modelling in California semi-arid shrublands: MIKE SHE model calibration and uncertainty estimation[J]. Journal of Hydrology, 2006,317(3):307-324.

[18] Xue F, Huang M, Wang W, et al. Numerical Simulation of Urban Waterlogging Based on FloodArea Model[J]. Advances in Meteorology, 2016, 2016(1):1-9.

[19] 张磊,王文,文明章,等. 基于 FloodArea 模型的山洪灾害精细化预警方法研究[J]. 复旦大学学报(自然科学版),2015,54(3):282-287.

- [20] 钟联波. GPU 与 CPU 的比较分析[J]. 技术与市场, 2009(9):13-14.
- [21] 丁鹏, 陈利学, 龚捷, 等. GPU 通用计算研究[J]. 计算机与现代化, 2010(1):12-15.
- [22] 刘松, 鲍建樟, 李长瑜, 等. GPU 计算: 突破制约计算化学发展的瓶颈[J]. 科研信息化技术与应用, 2014(2):73-81.
- [23] 王渺林, 郭丽娟, 朱辉. 涪江流域气候及径流变化趋势[J]. 人民长江, 2006, 37(12):42-43.
- [24] 胡毅, 陈国刚, 杜成华, 等. 涪江流域水资源变化研究[J]. 成都气象学院学报, 1998(4):28-35.
- [25] 董孟, 李虎杰. 绵阳市北川县地质灾害发育特征及诱发因素分析[J]. 科技创新导报, 2008(8):189-190.
- [26] 王勇, 许红梅, 程炳岩, 等. 1951—2012 年降水变化对涪江流域径流的影响[J]. 气候变化研究进展, 2014(2):127-134.
- [27] 魏昕. 四川 2017 年汛期洪涝发生分布及对农业生产的影响分析[J]. 四川农业与农机, 2018(1):38-49.
- [28] 邓国卫, 孙俊, 阮贵宾, 等. 四川省暴雨洪涝灾情特征及主汛期环流背景分析[J]. 高原气象, 2017, 36(6):1521-1532.
- [29] Smiles D E, Knight J H, Smiles D E, et al. A note on the use of the Philip infiltration equation[J]. Soil Research, 1976, 14(1):103-108.
- [30] 钟联波. GPU 与 CPU 的比较分析[J]. 技术与市场, 2009(9):13-14.
- [31] 杨柳, 刘铁英. GPU 架构下的并行计算[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2012(6):629-632.
- [32] 刘松, 鲍建樟, 李长瑜, 等. GPU 计算: 突破制约计算化学发展的瓶颈[J]. 科研信息化技术与应用, 2014(2):73-81.
- [33] 张澳博. GPU 并行计算分析[J]. 数字通信世界, 2017(9):39-40.
- [34] 陈庆奎, 王海峰, 那丽春, 等. 图形处理器通用计算的研究综述[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2012, 29(5):672-679.
- [35] 覃金帛, 曾志强, 梁藉, 等. GPU 并行优化技术在水利计算中的应用综述[J]. 计算机工程与应用, 2018(3):23-29.
- [36] 刘永和, 冯锦明, 徐文鹏. 分布式水文模型的 GPU 并行化及快速模拟技术[J]. 水文, 2015, 35(4):20-26.

Simulation of Rainfall Runoff in the Middle Reaches of Fujiang River based on GPU

LV Zhaoyang, CHEN Jun, LIU Yi, SUN Wei, XIAO Junwen

(College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: In order to increase the timeliness of runoff confluence model, a confluence model based on general computing of graphics processor is proposed in this paper. Firstly, under the condition of stabilizing the water supply, the water environment in the early stage of basin formation is improved by modifying the model. Finally, the hourly precipitation data are superimposed on the previous water environment to simulate the runoff confluence and get the simulation result. Through verification, it is found that the simulation result of the model have smaller water level variation error, the simulation accuracy is further improved and the simulation speed is faster. All of those meet the requirements of real-time calculation. The accuracy and performance are improved at the same time, which proves that the confluence model has important application value in real-time assessment of rainstorm and flood disasters in river basins.

Keywords: graphics processing unit general computation; confluence model; stable water supply; early stage water environment; the middle section of Fujiang River; 3S integration and meteorological application; meteorological geographic information system engineering