

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.06.007

城市二维内涝模型的 GPU 并行方法

向小华¹, 陈颖悟¹, 吴晓玲¹, 李超¹, 王志伟¹, 康爱卿²

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;
2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 针对二维水动力模型应用于城市内涝模拟时, 在大尺度区域或精细分辨率情形下运行耗时过长的问题, 通过耦合 SWMM 模型和 LISFLOOD-FP 模型构建城市内涝模型, 采用 GPU 的并行计算技术加速城市二维内涝模型。以盐城响水县城区的内涝模拟为例, 对并行模型的效率进行分析, 结果表明, 基于 GPU 的并行计算技术可以显著提升模型运行效率, 在 5 m 分辨率下能够 8 min 内模拟 12 h 的内涝事件, 可用于突发内涝事件下的快速响应; 并行模型的加速效果在更高的空间分辨率下表现更明显, 在 2 m 分辨率下取得最高 10.86 倍的加速比; 要最大化发挥 GPU 计算效率, 首先需要单步长有较大的计算量, 其次是要尽量减少与 GPU 的数据频繁传输导致的额外开销。
关键词: 城市二维内涝模型; GPU 加速; CUDA; 加速比; 网格分辨率
中图分类号: P333.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2020)06-0528-06

GPU parallelized algorithm of urban two-dimensional inundation model
XIANG Xiaohua¹, CHEN Yingwu¹, WU Xiaoling¹, LI Chao¹, WANG Zhiwei¹, KANG Aiqing²
(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Aiming at the problem that two-dimensional hydrodynamic model is too time-consuming to be applied in a large-scale area or case with fine resolution for the urban flood simulation, an urban inundation model was constructed by coupling the SWMM model and the LISFLOOD-FP model. Then the GPU-based parallel computing technology was adopted to accelerate the constructed inundation model. Taking the flood simulation of urban area in Xiangshui County of Yancheng City as an example, the efficiency of the parallelized algorithm was analyzed. The results show that the GPU-based parallel computing technology can significantly improve the model efficiency, and the parallelized model could simulate a 12-hour flood event in 8 minutes at 5 m resolution, which can be used for quick response to urban flood emergencies. The efficiency of the parallelized algorithm was more obvious at a higher spatial resolution, and the highest speedup of 10.86 times was achieved at 2 m resolution. In order to maximize the computing efficiency of GPU, a large amount of computation is required in each time step, and the additional time caused by frequent data transmission between host and GPU should be minimized.
Key words: urban 2D inundation model; GPU acceleration; CUDA; speedup; grid resolution

运用二维水动力模型模拟城市地表水流运动, 从而获得实时的积水面积、积水深度以及积水历时, 对城市防涝减灾具有重要意义。二维水动力模型模拟精度高, 但在大尺度区域或精细分辨率情形下, 数值计算量大, 模型运行时间长。为提高二维模型模拟速度, 可以通过简化控制方程或降低空间分辨率减少运算量, 但

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0407902, 2018YFC1508202); 中央高校基本科研业务费专项(2018B10914)
作者简介: 向小华(1981—), 男, 副教授, 博士, 主要从事水文模型研究。E-mail: xxhxiang@hhu.edu.cn
引用本文: 向小华, 陈颖悟, 吴晓玲, 等. 城市二维内涝模型的 GPU 并行方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 528-533.
XIANG Xiaohua, CHEN Yingwu, WU Xiaoling, et al. GPU parallelized algorithm of urban two-dimensional inundation model[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(6): 528-533.

这样会降低模型模拟精度。另一种方法是引入并行计算,既能保证模型精度又能提高模型运行速度。目前,二维水动力模型的并行化研究已有很多成果:Neal 等^[1]基于 OpenMP 构建了 LISFLOOD-FP 二维模型的并行版本,获得了最大 5.18 倍的加速比;Lamb 等^[2]运用 DirectX 加速 JFlow 模型,模型运行时间从 18 h 减少到 5~9 min;Kalyanapu 等^[3]将 CUDA 运用于溃坝模拟加速中,能够 2 min 模拟 30 min 的洪水事件;Viñas 等^[4]在污染物输移模型中利用 GPU 进行加速,仅需 2 h 便可完成 CPU 连续执行 10 d 的模拟工作。但是将并行技术应用于城市内涝模拟的研究还较少,本文将 SWMM 模型和 LISFLOOD-FP 模型进行耦合构建城市内涝模型,基于 CUDA 对其中的二维水动力模型进行 GPU 并行化,比较分析其加速效果,以期为城市内涝快速模拟模型的进一步完善提供参考。

1 城市二维内涝模型

1.1 城市产汇流及排水管网模型

城市产汇流及管网模型采用 SWMM 模型,SWMM 模型包括下垫面产汇流模块、管网汇流演算模块以及水质模块,它能够模拟出每个子汇水区每个时刻产生径流的水质与水量,同时还能对每个管道中的水量和水质进行模拟^[5-9]。由于 SWMM 没有进行地表二维水流模拟的模块,因此将其与二维水动力模型进行耦合,从而能够对溢出排水管网的地表积水进行模拟。

1.2 地表二维漫流模型

二维漫流模型采用水动力模型 LISFLOOD-FP,该模型的二维漫流模块采用基于矩形网格的水量平衡方程以及网格间流量公式,显式地计算各时刻的网格水深^[10-13]。

网格水量平衡方程:

$$\frac{dh^{i,j}}{dt} = \frac{Q_x^{i-1,j} - Q_x^{i,j} + Q_y^{i,j-1} - Q_y^{i,j}}{\Delta x \Delta y}$$

(1)

边界流量公式:

$$Q_{t+\Delta t} = \frac{q_t - gh_t \Delta t \left(\frac{\partial (h_t + z)}{\partial x} \right)}{1 + g \Delta t n^2 |q_t| / (h_t)^{7/3}} \Delta x$$

(2)

时间步长公式:

$$\Delta t_{\max} = \alpha \frac{\Delta x}{\sqrt{gh_t}}$$

(3)

式中: i,j ——第 i 行第 j 列网格标示; Q_x ——网格 x 方向的出流量; Q_y ——网格 y 方向的出流量; h_t —— t 时刻网格水深; z ——网格底高程; q_t —— t 时刻单宽流量; n ——地表糙率; $\Delta x, \Delta y$ ——矩形网格大小; α ——0~1 的系数; g ——重力加速度。模型计算流程如图 1(a)所示。

1.3 城市二维内涝模型的构建

城市内涝模型的产汇流模块和一维管网演算模块由 SWMM 模型提供,二维地表漫流模块采用 LISFLOOD-FP 模型计算。SWMM 模型与 LISFLOOD-FP 模型之间采用双向耦合,当排水管网接纳的水量超过其负荷,水量从管网节点溢出,此时 SWMM 模型的节点溢流量作为 LISFLOOD-FP 模型的输入,参与地表二维计算,当管网负荷降低、节点溢流停止,LISFLOOD-FP 模型的水量重新

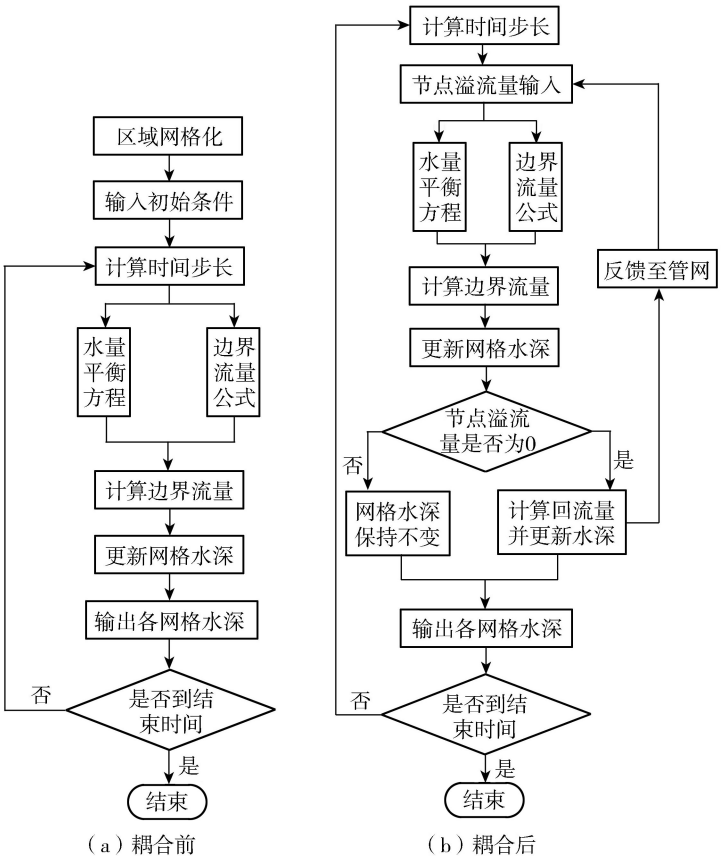


图1 二维模型计算流程

Fig.1 Computing flowchart of 2D model

回流到 SWMM 模型中,参与一维管网计算^[14-17]。耦合后二维模型计算流程如图 1(b)所示。

城市内涝模型运行效率主要受制于二维计算模块。网格分辨率增大,模型的时间步长相应缩小,同时空间上模型单步计算的耗时显著加大。因此,下面采用 GPU 并行技术来实现空间上网格的并行计算,从而加速二维内涝模型。

2 城市二维内涝并行模型

2.1 实现并行的硬件条件

采用 CUDA 并行编程模式进行二维模型加速,采用了 2 种硬件配置,配置 1 和配置 2 的主要硬件参数见表 1,均使用了支持 CUDA 的 GPU。

2.2 模型并行化的可行性分析

CUDA 适用于可以分解成若干处理单元的计算任务,各处理单元间无依赖关系,独立运行、互不干扰。在 LISFLOOD-FP 模型中,各边界流量的计算、各网格水量的更新互不影响,这是由于模型采用显式方法求解,每一个网格计算仅需用到该网格与相邻网格前一时刻已有的水深、流量等数值信息,同一时刻的各网格单元独立运行、互不干扰,因此具备并行条件。

2.3 并行模型的构建

在 CUDA 架构下,CPU 和 GPU 之间有着明确的协作,CPU 读取外部数据,通过 CUDA 提供的 API 对 GPU 进行数据传输,接着 GPU 进行并行计算,计算结束之后将结果传输回 CPU,进行数据结果的存储^[18-19]。CPU 和 GPU 之间的数据传输模型如图 2 所示。

二维模型并行后的计算流程如图 3 所示。第一部分对模型参数、网格信息、水位流量等进行初始化,CPU 端初始化完成后,在 GPU 上申请存储空间,将 CPU 端初始时刻的水位、流量以及高程等数据拷贝至 GPU;第二部分 GPU 执行密集数值计算,每个网格计算只需要前一步时间步长的结果,同一时间步的网格计算不相关,各线程求出对应网格的边界流量,并更新网格水深;第三部分 GPU 计算完成,将当前时刻的流量、水深数据返回给 CPU,CPU 计算包含节点网格的源项,更新这部分网格水深,最后存储运算结果。

表 1 硬件参数

Table 1 Hardware parameters

配置编号	CPU 频率/ GHz	GPU 型号	GPU 核心 频率/ MHz	GPU 内存/ GB	CUDA 核心数
配置 1	2.5	GTX1060maxq	1 063 ~ 1 342	6	1 280
配置 2	3.6	RTX2080Ti	1 350 ~ 1 545	11	4 352

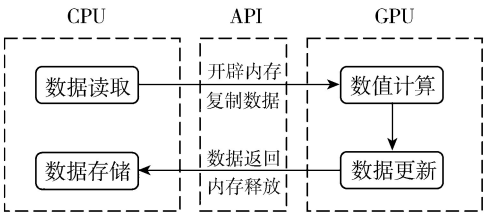


图 2 GPU 数据传输模型
Fig.2 Data transfer model of GPU

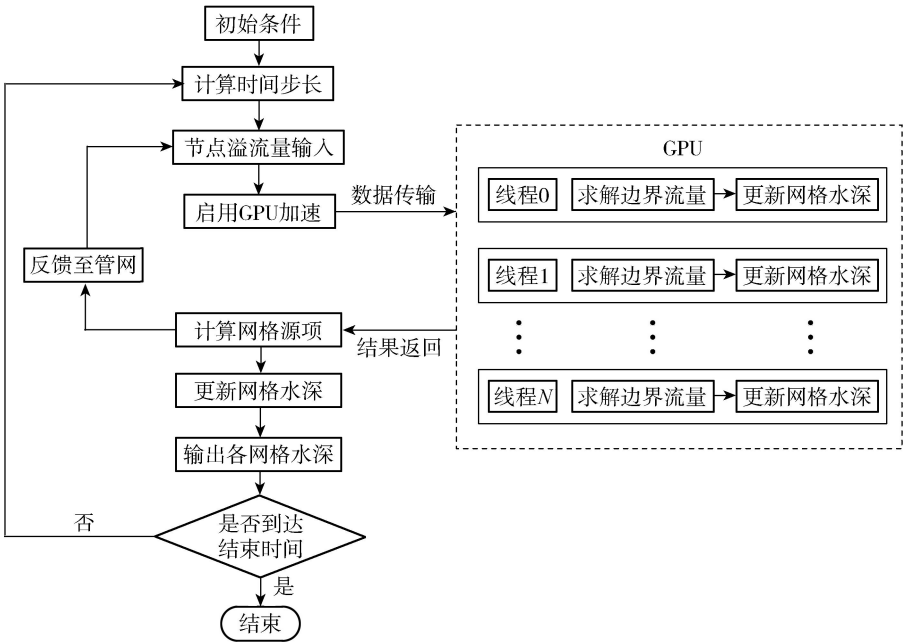


图 3 二维模型并行计算流程

Fig.3 Parallel computing flowchart of 2D model

3 模型应用与分析

3.1 模型应用

研究区域位于盐城响水县城区,城镇化水平较高,建筑密集,人口众多,地势低平,研究区域如图 4(a) 所示。该区域硬化地面占比高,且排水管网排涝标准较低、抽排设施较少,“2012·8·10”特大暴雨使得该区域一些地区积水深度超过 1 m。因此有必要对该区域建立适当的内涝模拟模型以响应突发的暴雨内涝事件。降雨条件采用当地的暴雨公式设计 2 h 短历时暴雨,下垫面资料包括遥感影像图、不同分辨率的 DEM,排水管网分布图等。经验证,原模型模拟得到的积水分布区域与实际的调研结果大致相符,且模型模拟的最大水深与实际调查水深的差距不超过 0.3 m,模型对于研究区域的雨洪模拟具有较好的适用性。并行模型模拟得到的积水分布范围与原模型一致,模拟的积水面积和水深无明显变化,并行模型依然保持原有精度。图 4(b) 为 5 m 分辨率下模型模拟运行到 2 h 的淹没图,将不同时刻的水深数据拼接起来并在 GIS 中进行演示,可得到研究区域发生内涝时地表二维水流的动态演变过程,从而直观清晰地掌握城市地表的内涝情况。

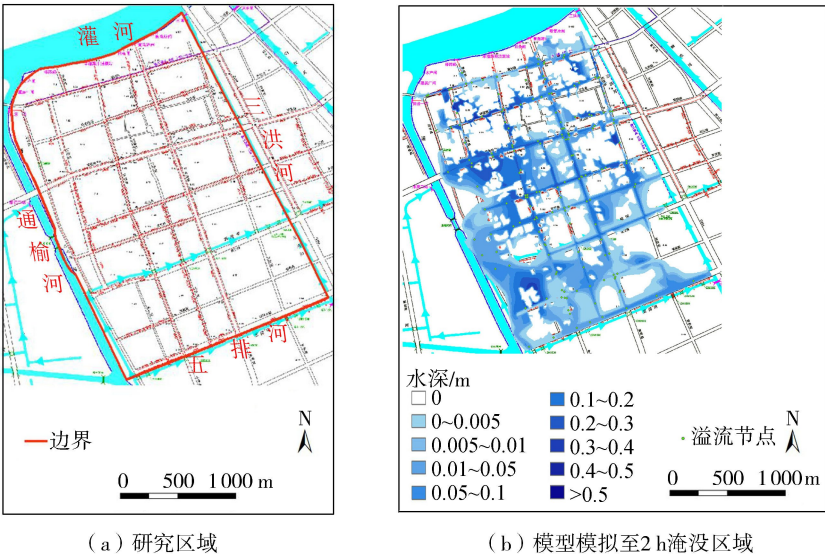


图 4 研究区域与模拟结果
Fig.4 Study area and simulation results

3.2 效率计算指标

并行模型的性能评定指标采用加速比:

$$S = \frac{T_{\text{CPU}}}{T_{\text{GPU}}} \tag{4}$$

式中: T_{CPU} ——原模型的运行时间; T_{GPU} ——并行模型的运行时间。

3.3 加速效果分析

配置 1 下原模型的模拟方案简称 CPU1,并行模型模拟方案简称 GPU1,同理,配置 2 下原模型的模拟方案为 CPU2,并行模型模拟方案为 GPU2,在 5 m 地形分辨率、2 h 短历时暴雨下,对研究区域 12 h 的内涝情况进行模拟。

计算结果显示,CPU1 运行时间为 60.7 min,GPU1 为 20.6 min,CPU2 为 43.9 min,GPU2 为 7.2 min,GPU1 取得加速比为 2.95,GPU2 为 6.10。GPU2 加速效果明显,12 h 的实际内涝过程仅需不到 8 min,并行模型做到了高分辨率网格下的城市内涝快速模拟。同时 GPU2 的加速效果是 GPU1 的大约 2 倍,核心数越多、核心频率越高的 GPU 能获得更好的加速效果,相比于花大量时间优化程序,升级硬件资源对消除程序性能瓶颈更直接有效。

还可看到,加速比远远没有达到 GPU 中处理器的数量。一方面,由于并行模型仅实现二维模型的加速,并没有对原模型的所有计算流程进行并行化,比如文件 IO 操作、SWMM 一维管网计算、管网与地表的交互计算等都不能实现并行;另一方面,启用 GPU 进行并行计算均会造成一定的额外耗时,这种耗时主要来源于

CPU 与 GPU 间的数据传输、内存延迟、线程间通信等,使得加速比的增长存在极限。

3.4 不同网格分辨率下的加速效果分析

在 30 m、10 m、5 m、2 m 网格分辨率下各模拟方案的运行时间和加速比见表 2。

表 2 不同分辨率下各方案运行时间及加速比

Table 2 Running time and speedup of each scheme under different resolutions

网格大小/m	网格数量	T_{CPU1}/min	T_{GPU1}/min	T_{CPU2}/min	T_{GPU2}/min	S_{GPU1}	S_{GPU2}
30	4 360	0.4	0.5	0.2	0.2	0.80	1.00
10	34 321	11.1	5.2	6.1	1.9	2.13	3.21
5	199 134	60.7	20.6	43.9	7.2	2.95	6.10
2	1244 589	792.1	189.5	677.9	62.4	4.18	10.86

可以得到,随着网格分辨率的上升,GPU1 和 GPU2 获得的加速比随之上升,加速比随着模型计算量的增大而增大,这与 Neal 等^[1]、Kalyanapu 等^[3]研究得出的结论是一致的。GPU 相比于 CPU 具有众多的处理核心,这种硬件优势使得 GPU 在处理可并发的计算流程时能够获得比 CPU 更快的速度,但是由于 GPU 内存是独立于 CPU 内存的,每次启用 GPU 进行加速都需要经历向 GPU 传送数据并返回结果的过程,这会造成一定的耗时,影响程序的整体性能。低分辨率网格下,每次时间步长里需要遍历的网格数量较少。由表 2 可知,30 m 分辨率网格,单纯使用 CPU 已经能在 1 min 内快速完成计算,利用 GPU 进行加速还要算上传输数据导致的耗时,反而起不到加速效果,此时 CPU 与 GPU 间的数据传输速度成为程序性能的主要瓶颈。对于高分辨率情形,每次时间步长里计算量大,原模型 CPU 串行处理大量网格,运行耗时显著增加;并行模型下 GPU 多处理器的性能优势得到充分发挥,计算量越大,性能优势发挥越显著,能够取得更大的加速比。

4 结 论

a. GPU 并行计算技术可以显著提升二维内涝模型的运行效率,对本文研究区域,在 5 m 高分辨率下,GPU2 能够 8 min 内模拟 12 h 的内涝事件,满足紧急内涝事件的快速响应,具有一定应用价值。

b. 并行模型的加速效果在更高的空间分辨率下表现得更为明显,取得了最高 10.86 倍的加速比,相比于 Neal 等^[1]采用 OpenMP(基于 CPU 多线程)加速 LISFLOOD 取得最高 5.18 倍加速比,GPU 显现出在并行计算方面的优势。网格单元数量越多,越能更好地体现复杂的地形和水流特征,但同时也造成较长的耗时,而使用 GPU 进行加速能在内涝模拟下仍保持较快的速度和原有的精度。

c. 影响加速比的主要因素有:(a)网格分辨率。分辨率越高,计算量越大,GPU 多核心的性能优势发挥越显著。(b)并行区域时间占比。并行部分占的时间越多,程序整体性能提升越大,加速效果越好。(c)并行带来的额外开销。主要包括 CPU 与 GPU 间的数据传输、内存延迟、线程间通信等,使得加速比的增长存在极限。

d. 要充分发挥 GPU 并行计算优势需要两个条件:首先单步数据计算量要大,充分发挥 GPU 多核心的硬件优势;其次应尽量减少每次步长里向 GPU 传输数据而产生的耗时,比如合并小规模的数据传输、减少启用次数、使用传输带宽更快的固定内存等^[18-19]。

参考文献:

[1] NEAL J, FEWTRELL T, TRIGG M. Parallelisation of storage cell flood models using OpenMP[J]. Environmental Modelling and Software, 2008, 24(7): 872-877.

[2] LAMB R, CROSSLEY M, WALLER S. A fast two-dimensional floodplain inundation model[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management, 2009, 162(6): 363-370.

[3] KALYANAPU A J, SHANKAR S, PARDYJAK E R, et al. Assessment of GPU computational enhancement to a 2D flood model [J]. Environmental Modelling and Software, 2011, 26(8): 1009-1016.

[4] VIÑAS M, LOBEIRAS J, FRAGUELA B B, et al. Simulation of pollutant transport in shallow water on a CUDA architecture [C]//SMARI W W. 2011 International Conference on High Performance Computing and Simulation. Piscataway, NJ: IEEE, 2011: 664-670.

[5] 宋耘,李琼芳,牛铭媛,等. 基于 SWMM 模型的南京典型易涝区暴雨内涝模拟[J]. 水利水电科技进展,2019,39(6):56-

61. (SONG Yun, LI Qiongfang, NIU Mingyuan, et al. Rainstorm and waterlogging simulation in typical inundated districts of Nanjing based on SWMM[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(6): 56-61. (in Chinese))
- [6] 何福力, 胡彩虹, 王民, 等. SWMM 模型在城市排水系统规划建设中的应用[J]. 水电能源科学, 2015, 33(6): 48-53. (HE Fuli, HU Caihong, WANG Min, et al. Application of SWMM in planning and construction of urban drainage system[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(6): 48-53. (in Chinese))
- [7] 朱寒松, 董增川, 曲兆松, 等. 基于 SWMM 模型的城市工业园区低影响开发效果模拟与评估[J]. 水资源保护, 2019, 35(2): 32-36. (ZHU Hansong, DONG Zengchuan, QU Zhaosong, et al. Simulation and evaluation of low impact development effect of urban industrial park based on SWMM[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2): 32-36. (in Chinese))
- [8] 芮孝芳, 蒋成煜, 陈清锦, 等. SWMM 模型模拟雨洪原理剖析及应用建议[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(4): 1-5. (RUI Xiaofang, JIANG Chengyu, CHEN Qingjin, et al. Principle analysis and application of storm water management model on simulating rainfall-runoff[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(4): 1-5. (in Chinese))
- [9] 陆海明, 邹鹰, 孙金华, 等. 基于 SWMM 的铁心桥实验基地内涝防治效果模拟[J]. 水资源保护, 2020, 36(1): 58-65. (LU Haiming, ZOU Ying, SUN Jinhua, et al. Simulation of waterlogging control effect in Tiexinqiao experimental base based on SWMM[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 58-65. (in Chinese))
- [10] PINOS J, TIMBE L. Performance assessment of two-dimensional hydraulic models for generation of flood inundation maps in mountain river basins[J]. Water Science and Engineering, 2019, 12(1), 11-18.
- [11] BATES P D, HORRITT M S, FEWTRELL T J. A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling[J]. Journal of Hydrology, 2010, 387(1): 33-45.
- [12] DE ALMEIDA G A, BATES P D. Applicability of the local inertial approximation of the shallow water equations to flood modeling[J]. Water Resources Research, 2013, 49: 4833-4844.
- [13] NEAL J, SCHUMANN G, BATES P. A subgrid channel model for simulating river hydraulics and floodplain inundation over large and data sparse areas[J]. Water Resources Research, 2012, 48(11): W11506.
- [14] 曾照洋, 王兆礼, 吴旭树, 等. 基于 SWMM 和 LISFLOOD 模型的暴雨内涝模拟研究[J]. 水力发电学报, 2017, 36(5): 68-77. (ZENG Zhaoyang, WANG Zhaoli, WU Xushu, et al. Rainstorm waterlogging simulations based on SWMM and LISFLOOD models[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(5): 68-77. (in Chinese))
- [15] 王加虎, 梁菊平, 李丽, 等. 基于 DEM 的城市易涝点集水特征提取与应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(5): 390-394. (WANG Jiahu, LIANG Juping, LI Li, et al. Deriving and application of the catchment characteristics for urban flood point based on DEM[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(5): 390-394. (in Chinese))
- [16] 施露, 董增川, 付晓花, 等. Mike Flood 在中小河流洪涝风险分析中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(4): 350-357. (SHI Lu, DONG Zengchuan, FU Xiaohua, et al. Application of Mike Flood to analysis of flood and waterlogging risks of medium and small rivers[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(4): 350-357. (in Chinese))
- [17] SEYOUM S D, VOJINOVIC Z, PRICE R K, et al. Coupled 1D and noninertia 2D flood inundation model for simulation of urban flooding[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 138(1): 23-34.
- [18] 袁睿. 基于 GPU 的二维水动力学模型并行计算方法及应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [19] SHANE Cook. CUDA 并程序序设计: GPU 编程指南[M]. 苏统华, 译. 北京: 机械工业出版社, 2014.

(收稿日期: 2020-09-25 编辑: 刘晓艳)