

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.04.009

考虑下渗影响的洪水演进过程数值模拟研究

张兆安¹, 侯精明¹, 王峰¹, 王俊琿¹, 石宝山¹, 杨少雄¹, 孔祥建², 张建忠²

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 中建水务环保有限公司, 北京 100037)

摘要: 为分析下渗对洪水演进的影响,选取城市洪水和天然河道洪水为研究对象,采用基于二维动力波的方法耦合了水文及水动力过程的数值模型,模拟分析了不同来流条件下洪水演进时的淹没过程。研究发现:在涨水阶段,下渗对于淹没面积影响不大;在退水阶段,考虑下渗的淹没面积明显小于不考虑下渗的淹没面积,即在退水阶段下渗对洪水淹没面积影响较大。分析两个研究对象发现,下渗对于城市洪水演进相较于天然河道洪水演进的影响更小。该研究成果对防洪防汛、洪水灾后救援有指导意义。

关键词: 水动力模型; Green-Ampt 模型; 洪水演进; 淹没面积

中图分类号: TV122

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2020)04-0502-05

Numerical simulation of flood propagation process considering infiltration effect

ZHANG Zhaoan¹, HOU Jingming¹, WANG Feng¹, WANG Junhui¹, SHI Baoshan¹,
YANG Shaoxiong¹, KONG Xiangjian², ZHANG Jianzhong²

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. China Construction Water & Environment Co., Ltd, Beijing 100037, China)

Abstract: To analyze the influence of infiltration on flood propagation, urban flood and natural channel flood were selected as research objects, with the dynamic wave based numerical model coupled with hydrologic and hydrodynamic process adopted to simulate and analyze the inundation process of flood evolution under different inflow conditions. The results show that infiltration has little influence on the inundation area in the flood stage. In the recession stage, the inundation area with infiltration is significantly smaller than that without considering infiltration, that is, infiltration in the recession stage has a greater impact on the inundation area. By analyzing the two research objects, it is found that infiltration has less influence on urban flood propagation than on natural channel flood propagation. The research results are of guiding significance for flood control and rescue after flood.

Key words: hydrodynamic model; Green-Ampt model; flood propagation; flooded area

近年来,极端天气的发生频率较历史有所增长,使得如强降雨、冰雹等极端天气所引发的二次灾害也在不断增加,如泥石流,山洪等^[1],对人类的生产生活产生严重危害,也造成重大的经济损失。在一些下渗较大的区域,若发生洪水事件,下渗是行洪水量的主要损失项之一,但目前这方面的研究较少,因此,研究下渗对于漫滩洪水淹没面积的影响具有十分重大的意义。

渗透模型可以用不同的形式进行模拟。当关注地下过程时,可以使用 Richards 方程;关注地上过程时,会以水量损失的形式考虑入渗,这时可以用经验法则来表示,其中常用于计算地面入渗损失的模型有 Green-Ampt(G-A)模型、Horton 模型、Philip 模型等^[2]。这些模型能够较好地计算洪水在行洪过程中的下渗损失,国内外学者对此也有众多研究。Fernández-Pato 等^[3]使用 Green-Ampt 模型对渗透

收稿日期: 2020-09-25; 网络出版日期: 2020-10-26

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20201023.1749.008.html>

基金项目: 国家“十三五”重大研发专项资助项目(2016YFC0402704); 固原海绵城市建设示范区海绵效果数值模拟资助项目(SCHM-2018-0104); 国家自然科学基金资助项目(51709223)

第一作者: 张兆安,男,硕士生,研究方向为河道水力学。E-mail: zzaxax@hotmail.com

通信作者: 侯精明,男,博士,教授,博导,研究方向为城市水利。E-mail: jingming.hou@xaut.edu.cn

参数的敏感性进行了分析和校准;Chahinian等^[4]针对不同洪水时间,在田间尺度上对不同入渗模型进行了比较;李云玲等^[5]以黑河下游河道为研究对象,采用断面水量模型,剖析了研究区段入渗规律;喻海军等^[6]在蓄滞洪区模拟中考虑了下渗影响,表明下渗会显著减小蓄滞洪区洪峰水位,缩短淹没时间。但是,以上研究均未研究下渗对于洪水演进的影响。

为研究考虑下渗的洪水演进的淹没规律,采用基于二维动力波的方法耦合了水文及水动力过程的数值模型。为实现大规模高分辨率的模拟效果,本文模型使用高性能图形处理单元(GPU)和并行计算技术,加速模拟计算速度,从而能够准确模拟洪水演进过程,并利用高分辨率地形输入数据,保证了模拟效率。本文模拟了不同来洪条件及不同下垫面条件下洪水的演进过程,分析下渗对于洪水演进的影响,研究成果对防洪防汛、灾后救援有指导意义。

1 研究方法

本文用基于二维动力波的方法耦合了水文及水动力过程的数值模型,使用显卡加速的地表水及其伴随输移过程模型计算洪水演进过程,该模型基于Godunov的有限体积法求解二维浅水方程。此方法可以稳定解决不连续问题,并严格保持物质守恒。该模型应用二阶算法提高了模拟的计算效率和精度,还耦合模拟模型中浅水流动的一些其他物理化学反应,如沉积物和污染物运输。该模型的另一个特征就是使用GPU计算来提高计算性能。计算洪水演进过程的同时,该模型耦合了Green-Ampt(G-A)模型来计算洪水演进过程中水量的下渗损失。

1.1 控制方程

平面二维浅水方程(SWEs)又称 Saint-Venant 方程,被广泛用于模拟自然河流、湖泊和沿海地区的浅水流动。二维浅水方程为:

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (1)$$

式(1)中的变量矢量、不同方向上的通量矢量以及源项矢量可以分别表示为:

$$\left\{ \begin{aligned} \mathbf{q} &= \begin{bmatrix} h \\ q_x \\ q_y \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} q_x \\ uq_x + gh^2/2 \\ uq_y \end{bmatrix}, \mathbf{G} = \begin{bmatrix} q_y \\ vq_x \\ vq_y + gh^2/2 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{S} &= \begin{bmatrix} i \\ -gh\partial z_b/\partial x \\ -gh\partial z_b/\partial y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -C_f u \sqrt{u^2 + v^2} \\ -C_f v \sqrt{u^2 + v^2} \end{bmatrix} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中: \mathbf{q} 为变量矢量,包括水深 h ,两个方向的单宽流量 q_x 和 q_y ; \mathbf{F} 、 \mathbf{G} 分别为 x 、 y 方向的通量矢量; \mathbf{S} 为源项矢量; g 为重力加速度; u 、 v 分别为 x 、 y 方向的流速; z_b 为河床底面高程; C_f 为Chézy系数,且 $C_f = gn^2/h^{1/3}$,其中 n 为Manning系数。

1.2 G-A 入渗模型

为描述土壤水分入渗特性,应用G-A入渗模型,其基本表达式为:

$$f_p = \begin{cases} R, & t \leq t_p \\ K_s [1 + (\theta_s - \theta_i) S_f / I_p], & t > t_p \end{cases} \quad (3)$$

式中: f_p 为入渗率(cm/min); K_s 为土壤饱和导水率(cm/min); θ_i 、 θ_s 分别为土壤初始含水率、饱和含水率; S_f 为湿润锋面吸力(cm); t_p 为降雨后开始积水的时间(min); R 为降雨强度(cm/min); I_p 为累计入渗量(cm),且 $I_p = t_p R$ 。

2 模型构建

为研究考虑了下渗的洪水演进淹没规律,采用基于二维动力波的方法,耦合了水文及水动力过程的数值模型,模拟了设计来洪条件与实际来洪条件下洪水的演进过程,结合不同下垫面的实际土壤条件,选用G-A模型计算下渗过程,分析对比得出结论,并对所得结论进行一般性地拓展。

2.1 城市研究区域概况及模型设置

2.1.1 城市研究区域概况

研究区域位于英国英格兰东北部诺森伯兰郡的小镇莫帕斯,莫帕斯城区内旺斯贝克河河道蜿蜒,是洪水多发地带,历史上多次洪水泛滥(见图1)。



图1 莫帕斯地理位置图^[7]

Fig.1 Location map of Morpeth

本次模拟地形采用当地环保部门提供的 5 m 精度 DEM 数据(见图 2),选取该小镇 2008 年 9 月 4 日到 6 日,由英格兰东北部百年一遇的强降雨导致的漫滩洪水。本文通过数值模拟的方法研究 2008 年 9 月洪水演进对莫帕斯城区的淹没过程。洪水流量过程线见图 3。

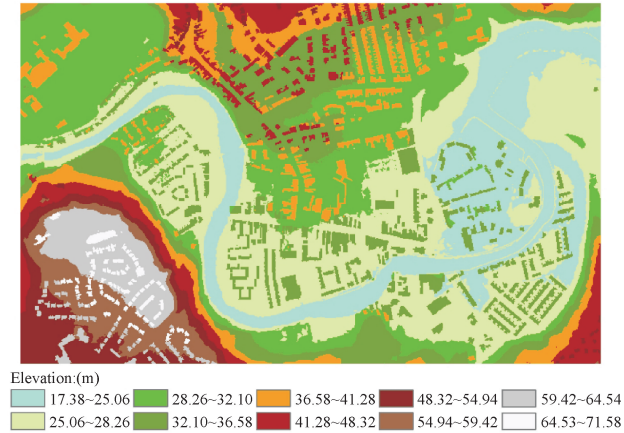


图 2 莫帕斯 5 m DEM 地形
Fig. 2 5 m DEM of Morpeth

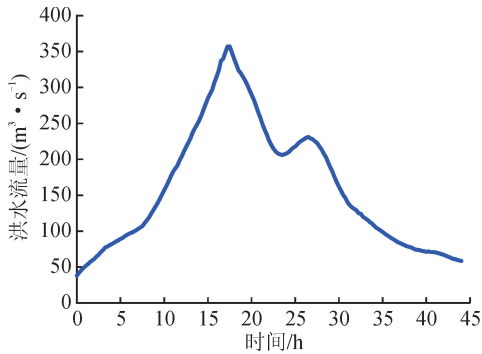


图 3 莫帕斯洪水流量过程线
Fig. 3 Flood discharge hydrograph of Morpeth

2.1.2 城市研究区域模型设置

研究模型的输入资料分为入流资料(见图 3)、地形资料及相关参数等。模型设置的下渗参数包括下垫面参数、湿润锋处的表面吸力、土壤饱和含水率与初始含水率以及两者之差,以上参数的确定均参照文献[2]与文献[8],并根据当地实际情况,选取研究区域的 Manning 系数为 0.02^[7], Courant 数为 0.5。该模型将上游设置为入流,下游设置为开边界,其余为闭边界,每隔 3 600 s 输出一次计算结果。

2.2 天然河道研究区域概况及模型设置

2.2.1 天然河道研究区域概况

研究区滹沱河位于暖温带半湿润大陆性季风气候区,是我国北方的一条天然河道河段。该区域的雨季集中在每年七月到八月,雨季期间河道满水,河岸普遍被淹,所以极易发生严重的洪涝灾害。除滩

涂地区的裸露土地外,在该区域附近的某些村庄和工矿企业里还有一些耕地。如果发生洪水往往会威胁到当地居民的生命和财产安全。

本文模拟地形采用滹沱河一段天然河段的 10 m 精度 DEM 数据(见图 4),选取该河段 200 年一遇的设计洪水,研究该河段洪水演进的淹没过程。洪水流量过程线见图 5。

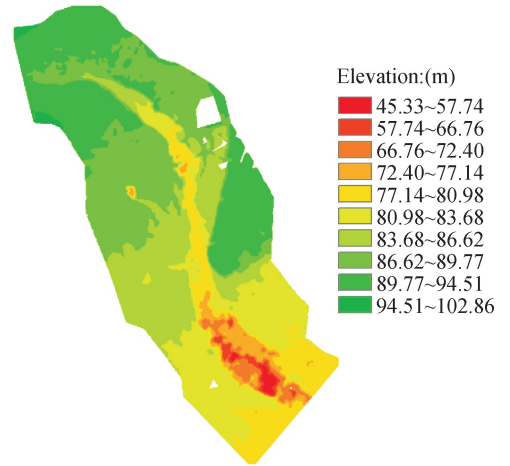


图 4 滹沱河 10 m DEM 地形
Fig. 4 10 m DEM of Hutun River

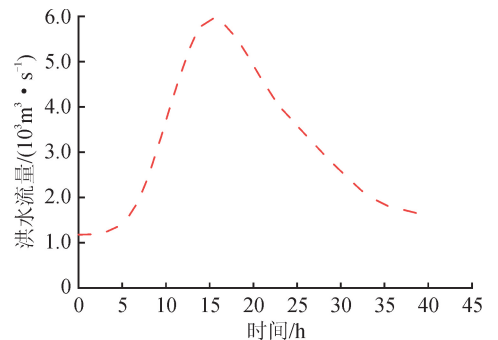


图 5 滹沱河洪水流量过程线
Fig. 5 Flood discharge hydrograph of Hutun River

2.2.2 天然河道研究区域模型设置

天然河道研究区域模型的设置与城市研究区域模型的设置相近,该模型设置的下渗参数包括下垫面参数、湿润锋处的表面吸力、土壤饱和含水率与初始含水率以及两者之差,以上参数的确定均参照文献[2]与文献[8],并根据当地实际情况,选取研究区域的 Manning 系数为 0.025, Courant 数为 0.5。该模型将上游设置为入流,下游设置为开边界,其余为闭边界,每隔 3 600 s 输出一次计算结果。

3 模拟结果对比分析

3.1 城市区域模拟结果分析

本文采用英格兰东北部百年一遇的强降雨导致

的漫滩洪水,分别模拟了有、无下渗情况下,城区淹没面积的变化情况。由于这两种情况的最大淹没范围相近,故本文只展示不考虑下渗时最大淹没范围(见图6)。



图6 莫帕斯不考虑下渗情况下设计洪水最大淹没范围
Fig. 6 Maximum inundation range of flood without infiltration of Morpeth

研究表明,在涨水阶段,是否考虑下渗对淹没面积的影响不大,两者在最大淹没点的淹没面积相差约0.23%;在退水阶段,考虑下渗的淹没面积比未考虑下渗的淹没面积小;随着流量减小,两者差距越大,最终,考虑下渗情况较未考虑下渗情况的淹没面积小25.2%左右(见图7)。

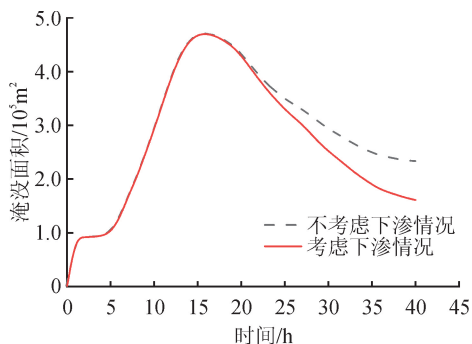


图7 莫帕斯洪水漫滩淹没面积变化过程线
Fig. 7 Inundation area change hydrograph of Morpeth

3.2 天然河道研究区域模拟结果分析

本文采用该河段200年一遇的设计洪水研究该河段洪水演进的淹没过程,分别模拟了有、无下渗情况下,淹没面积的变化情况。由于这两种情况的最大淹没范围相近,故本文只展示不考虑下渗时最大淹没范围(见图8)。

研究表明,在涨水阶段,是否考虑下渗对淹没面积的影响不大,两者在最大淹没点的淹没面积相差约5.2%;在退水阶段,考虑下渗的淹没面积比未考虑下渗的淹没面积小;随着流量减小,两者差距越大,最终考虑下渗情况较未考虑下渗情况的淹没面积小25.98%左右(见图9)。



图8 淳沱河不考虑下渗情况下设计洪水最大淹没范围
Fig. 8 Maximum inundation range of flood without infiltration of Hutun River

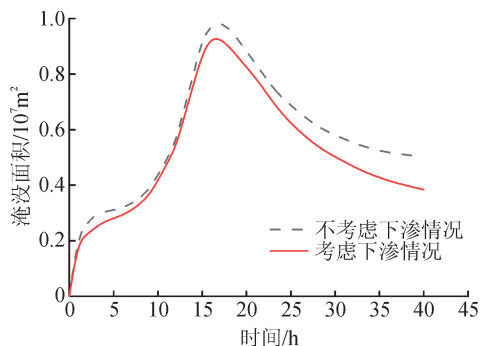


图9 淳沱河洪水漫滩淹没面积变化过程线
Fig. 9 Inundation area change hydrograph of Hutun River

4 结论

为研究下渗对洪水演进的影响及规律,采用基于二维动力波的方法耦合了水文及水动力过程的数值模型,模拟不同下垫面条件下漫滩洪水的演进过程,分析了下渗在不同下垫面条件下对于洪水演进的影响。具体结论见下。

1) 在两种下垫面的条件下,洪水演进过程中,涨水阶段下渗对淹没面积影响较小,在城市区域的最大淹没面积时刻,两者(考虑下渗与不考虑下渗情况)仅相差0.23%左右;随着退水阶段的进行,下渗对淹没面积的影响逐渐增大,最终两者(考虑下渗与不考虑下渗情况)淹没面积大约相差26%。

2) 由于两者下垫面条件不同,在城市中,由于建筑物挡水、道路下渗小等因素,洪水较天然河道情形能淹没的区域相对更少,即受下渗影响的区域也更多,所以在最大淹没面积时刻,是否考虑下渗的模拟结果差距不大。而在天然河道区域,由于更多的

裸土而导致下渗增加,所以在最大淹没面积时刻,相较城市下垫面情况的差距更大。

3) 由于考虑下渗的退水速度比不考虑下渗的退水速度更快,故在发生洪水后,可以更早进行对人民生命财产的抢救,从而提高救援效率,本文为灾后抢险救援方面提供了一定的理论依据。

本次研究未考虑地形、洪水类型等因素对淹没面积的影响,将在未来研究中加入未考虑因素,使结果更加合理。

参考文献:

- [1] 王亚东. 考虑下渗影响小流域溃漫堤洪水精细化模拟研究及应用[D]. 天津:天津大学,2018.
WANG Yadong. Research and application of refinement simulation of breakwater floods and flooding in small watershed considering infiltration[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [2] 石宝山,侯精明,李丙尧,等. 基于 Green-Ampt 和稳渗不同入渗模型下的城市内涝影响数值模拟[J]. 南水北调与水利科技,2019,17(5):115-123.
SHI Baoshan, HOU Jingming, LI Bingyao, et al. Study on numerical simulation of urban inundation effects based on Green-Ampt and constant infiltration models [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(5): 115-123.
- [3] FERNÁNDEZ-PATO J, CAVIEDES-VOULLIÈME D, GARCÍA-NAVARRO P. Rainfall/runoff simulation with 2D full shallow water equations: sensitivity analysis and calibration of infiltration parameters[J]. Journal of Hydrology, 2016:496-513.

- [4] CHAHINIAN N, MOUSSA R, ANDRIEUX P, et al. Comparison of infiltration models to simulate flood events at the field scale [J]. Journal of Hydrology, 2005, 306(1/2/3/4):191-214.
- [5] 李云玲,裴源生,秦大庸. 黑河下游河道渗漏规律研究 [J]. 自然资源学报,2005,20(2):195-199.
LI Yunling, PEI Yuansheng, QIN Dayong. A study on channel leakage in the lower Heihe River [J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(2): 195-199.
- [6] 喻海军,吴俊峰,吴滨滨,等. 基于二维网格边元设置河道方法的蓄滞洪区洪水演进分析 [J]. 中国水利水电科学研究院学报,2018,16(3):179-184.
YU Haijun, WU Junfeng, WU Binbin, et al. Application of a new 1D-2D numerical model coupling strategy to flood simulation in flood storage-detention areas [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16(3): 179-184.
- [7] 侯精明,李桂伊,李国栋,等. 高效高精度水动力模型在洪水演进中的应用研究 [J]. 水力发电学报,2018,37(2):96-107.
HOU Jingming, LI Guiyi, LI Guodong, et al. Application of efficient high-resolution hydrodynamic model to simulations of flood propagation [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37 (2): 96-107.
- [8] ZHANG H B. Urban flood simulation by coupling a hydrodynamic model with a hydrological model [D]. Newcastle: Newcastle University, 2015.

(责任编辑 卢秀,王绪迪)