

城市雨水管理

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.09.015

道路雨水口布设方案对泄流能力影响的模拟研究

张迪^{1,2}, 侯精明¹, 宁利中¹, 李东来¹, 苏锋³, 高徐军³,
张珂¹

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;
2. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611; 3. 中国电建集团西北勘测
设计研究院有限公司, 陕西 西安 710061)

摘要: 雨水口作为城市排水系统的重要组成部分,其布设情况对周边小区及道路积水的消除至关重要。为此,利用耦合了水文和水动力过程的数值模型,研究雨水口在不同道路纵坡坡度、布设数量和径流流量条件下的泄流能力。结果表明,道路纵坡坡度越大,雨水口的泄流能力越差,在小流量、雨水口数量为5个(间距为20 m)的条件下,当道路纵坡坡度从0.3%增至8%时,雨水口泄水率从55.64%降至21.05%;雨水口数量越多,其泄流能力越强,在小流量、道路纵坡坡度为0.3%的条件下,当雨水口数量从2个增至5个(间距由50 m降至20 m)时,雨水口泄水率由25.60%增至55.64%;径流流量越大,雨水口的泄流能力越差,在道路纵坡坡度为0.3%且布设5个雨水口的条件下,小、中、大3种流量下雨水口泄水率分别为55.64%、46.92%、37.28%。

关键词: 雨水口; 泄流能力; 纵坡坡度; 布设数量; 径流流量; 数值模拟

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)09-0097-06

Simulation of Effect of Road Rainwater Inlet Layout Scheme on Drainage Capacity

ZHANG Di^{1,2}, HOU Jing-ming¹, NING Li-zhong¹, LI Dong-lai¹, SU Feng³,
GAO Xu-jun³, ZHANG Ke¹

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Pearl River Water Resources Research Institute, Guangzhou 510611, China; 3. PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710061, China)

Abstract: As an important part of urban drainage system, the layout of rainwater inlet is crucial to eliminating ponding in surrounding communities and roads. Therefore, a numerical model coupled with hydrological and hydrodynamic processes was used to investigate the drainage capacity of rainwater inlet at different road longitudinal slope gradient, inlet number and runoff flow. The larger longitudinal slope gradient of the road resulted in a worse drainage capacity of the rainwater inlet. In scenario of small runoff flow and five rainwater inlets (spacing of 20 m), the drainage flow of the rainwater inlet decreased from

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51609199); 国家重点研发计划项目(2016YFC0402704)

通信作者: 侯精明 E-mail: jingming.hou@xaut.edu.cn

55.64% to 21.05% when the longitudinal slope gradient of the road increased from 0.3% to 8%. The larger number of rainwater inlets resulted in a stronger drainage capacity. In scenario of small runoff flow and longitudinal slope gradient of 0.3%, the drainage flow of rainwater inlets increased from 25.60% to 55.64% when the number of rainwater inlets increased from 2 to 5 (spacing decreasing from 50 m to 20 m). The larger runoff flow resulted in a worse drainage capacity of rainwater inlet. In scenario of longitudinal slope gradient of 0.3% and five rainwater inlets, the drainage flow of rainwater inlet under small, medium and large runoff flow was 55.64%, 46.92% and 37.28%, respectively.

Key words: rainwater inlet; drainage capacity; longitudinal slope gradient; inlet number; runoff flow; numerical simulation

近年来,随着我国城市化进程的快速推进,城市不透水区域急剧增加,再加上城市排水基础设施建设相对滞后、气候变化和极端天气等因素的影响,导致城市内涝灾害频发^[1-7]。雨水口是城市道路路面排水的常用构筑物,起着排泄雨水的作用。在某些城市,地形起伏较大,道路坡度随之增加,雨水口的布置合理性直接关系到排水系统能否发挥其功能。由于雨水口是地表径流进入地下管道的关键节点,其泄流能力直接影响区域雨水的排除效率。雨水口泄流能力不足,同样会导致局部区域内涝现象的发生^[8-9]。目前已有一些针对雨水口泄流方面的研究^[8,10],但是有关其影响因素的研究并不多。为此,笔者采用耦合了水文和水动力过程的二维水动力模型,模拟雨水口在不同道路纵坡、布置数量和径流流量下的泄流能力,探寻不同因素对雨水口泄流能力的影响,旨在为城市道路雨水口布置和解决城市内涝问题提供参考。

1 模型方法

本研究采用数值模拟的方法,所用模型是由西安理工大学开发的GAST模型(基于GPU加速技术的二维地表水动力城市雨洪模型)^[11]。

1.1 控制方程与数值模拟方法

GAST模型依据的控制方程为二维全动力浅水方程(SWEs),忽略其中运动黏性项、紊流黏性项、风应力以及科氏力,二维非线性浅水方程的守恒格式可表示为以下矢量形式:

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

式中: \mathbf{q} 为变量矢量,包含水深 h 及两个方向上的单宽流量 q_x 和 q_y ; \mathbf{F} 、 \mathbf{G} 分别为 x 和 y 方向的通量矢量; \mathbf{S} 为矢量源项,包括底坡源项和摩阻力源项。

GAST模型应用动力波方法进行地表洪水演进过程的模拟计算,在计算区域内采用Godunov格式有限体积法进行空间离散。选用二阶MUSCL方法对变量值进行空间插值来提高计算精度^[11-12]。为处理急变流和非连续问题,通过HLLC近似黎曼求解器计算单元界面上的质量与动量通量^[13-14]。在解决干湿交替问题时,在静水重构法基础上,引入精度格式自适应方法,即在干湿边界处水深急剧变化的条件下,算法的二阶格式自动降为一阶,以保证计算稳定性^[13-14],并采用二步龙格-库塔方法^[15]进行时间推进。为了提高计算效率,解决城市雨洪模型模拟计算量较大的问题,模型采用GPU并行计算技术实现高速运算。使用CUDA语言编程以实现GPU高速并行循环计算,具有高性能低成本的优势^[16]。

1.2 模型验证

本研究选用Soares-Fraza^[17]对欧盟IMPACT项目的一个试验进行模型验证。该试验装置长5.6 m、宽0.5 m,由一个充满0.111 m静水的上游水库和一个位于大坝下游的凸块组成。下游凸块的右侧有0.02 m的初始水位,在 $x=3.935$ 、 4.925 、 5.575 m处分别放置3个水位监测仪表,打开闸门后测量不同时刻的断面水深变化。试验装置如图1所示。

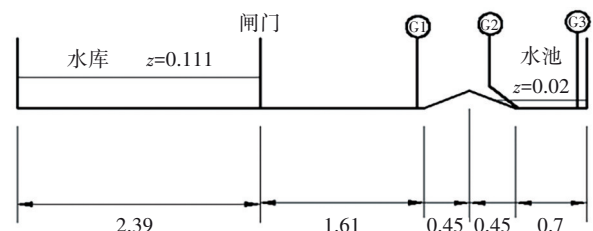


图1 试验装置示意

Fig.1 Schematics of experimental device

用GAST模型模拟时,设置与试验相同的曼宁

值即0.011,模拟闸门开启后40 s内的水位变化,并与试验值(取自 Soares-Frazão 所做的试验^[17])进行对比。3个监测点的模拟值和试验值的对比如图2所示。可以看出,在考虑试验与模拟的误差因素以及实测点提取多于模拟点的因素下,模拟值与实测值趋势吻合良好,表明模型能够进行洪水演进过程模拟研究。

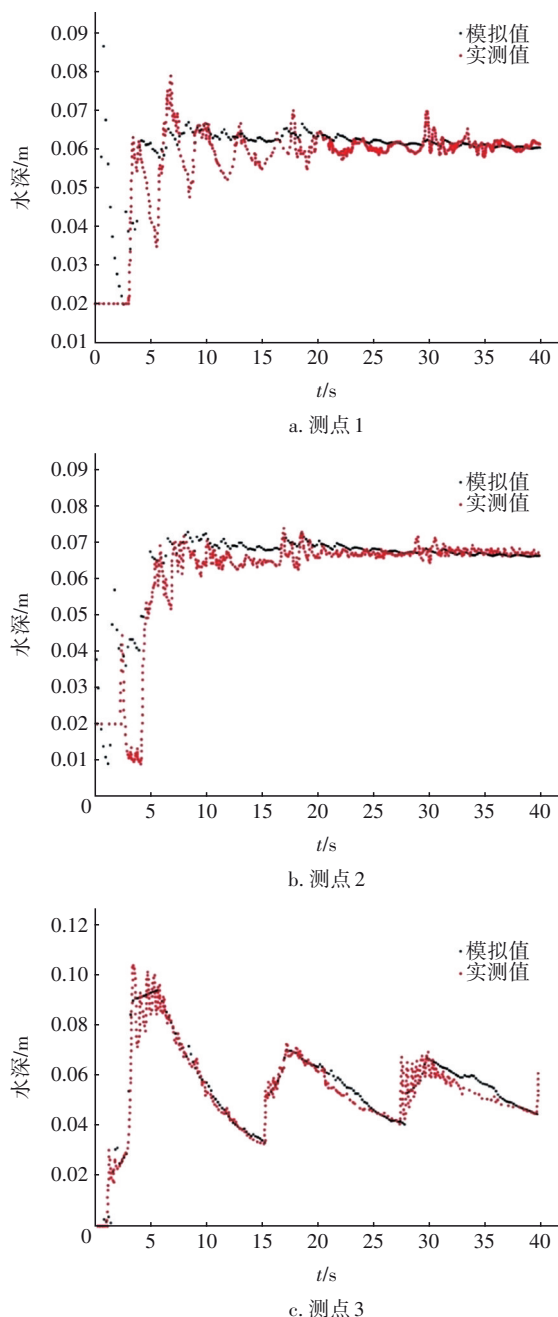


图2 3个监测点处的模拟值与实测值对比

Fig.2 Comparison of simulated values and measured values at three monitoring points

2 雨水口布置方案模拟

2.1 道路模型

本研究模拟单侧道路,道路长100 m、宽18 m。《室外排水设计规范》(GB 50014—2006)规定:普通城市道路横坡不应小于1.5%,故本研究中取2%。雨水口采用平箅式雨水口,宽度为0.5 m,设置在路边。为突出雨水口的泄流能力,路面设置为无下渗,道路下游设置足够大的集水池。本研究模拟上游来流情况,上游为入流开边界,其他边界均为闭边界。网格精度为0.5 m,共计21 636个方形网格,模型整体曼宁系数取0.014,模拟时长为14 400 s。道路模型如图3所示。

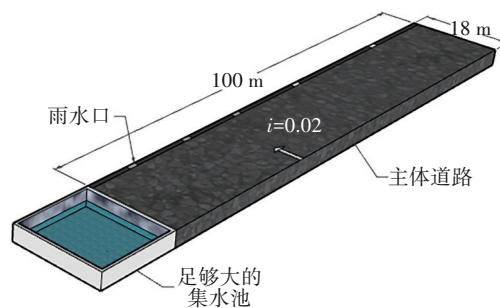


图3 道路模型示意

Fig.3 Schematics of road model

雨水口下渗公式采用修正堰流公式,如式(2)所示,但实际雨水口的泄水能力还与箅子材质等因素有关^[18]。

$$Q = m_0 b \sqrt{2g} H^{\frac{3}{2}} K \quad (2)$$

式中: Q 为雨水口泄流量, m^3/s ; m_0 为流量系数,取0.6; b 为雨水口宽度,为0.5 m; g 为重力加速度,取9.81 m/s^2 ; H 为雨水箅上的水深,为变量,由GAST模型中降雨程序实现计算, m; K 为孔口阻塞系数,取0.67。

2.2 不同影响因素的设置

2.2.1 纵坡坡度

我国现行道路设计规范要求道路纵坡坡度不小于0.3%,本研究中纵坡坡度在0.3%~8%之间变化,共设计6种工况:0.3%、0.7%、1%、3%、5%、8%。

2.2.2 雨水口数量

《室外排水设计规范》(GB 50014—2006)规定:为保证路面雨水宣泄通畅,又便于维护,雨水口间距宜为25~50 m。本研究中雨水口数量设计4种工况:5、4、3、2个,对应的雨水口间距分别为20、30、

40、50 m。

2.2.3 径流流量

本研究模拟3种不同径流流量,分别对应1、5、50年一遇降雨重现期。采用西安市暴雨公式[如式(3)所示],设计流量采用推理公式[如式(4)所示]计算。

$$q = \frac{2210.87 \times (1 + 2.915 \times \lg P)}{(t + 21.933)^{0.974}} \quad (3)$$

式中: q 为降雨强度, $L/(s \cdot \text{hm}^2)$; P 为降雨重现期, a ; t 为降雨历时, min 。

$$Q_s = q\psi F \quad (4)$$

式中: Q_s 为雨水口设计流量, L/s ; ψ 为径流系数; F 为汇水面积,在本研究中为 1.8 hm^2 。

设计降雨选用2 h短历时暴雨,峰值比取0.5,时间间隔为10 min。城镇建筑密集区的综合径流系数为0.7,为体现雨水口的泄流能力,本研究中径流系数取1。本研究模拟上游来流情况,采用降雨峰值时刻恒定值流量。1、5、50年一遇降雨重现期下2 h设计暴雨过程见图4,峰值流量分别为28.13(小流量)、74.71(中流量)、167.46(大流量) L/s 。

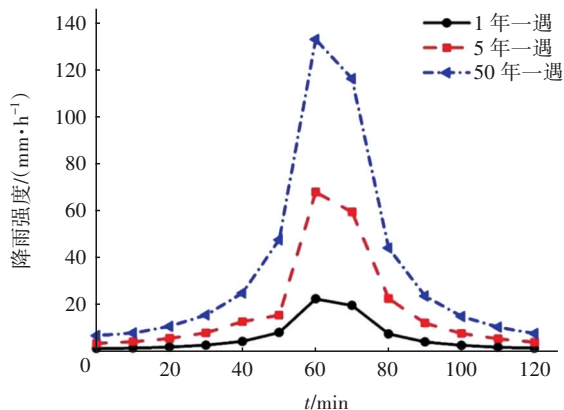


图4 不同重现期下的设计暴雨过程

Fig.4 Design rainstorm process at different return periods

3 结果与分析

本研究采用泄水率 p 反映雨水口的泄流能力,计算公式如下:

$$p = \frac{w_{\text{out}}}{w_{\text{in}}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: w_{out} 为雨水口下泄总水量; w_{in} 为入流总水量。

应用GAST模型对72种工况进行程序处理,根据得到的数据采用MATLAB程序提取水量。由于

结果数据较多,本研究对每个因素均选用最具代表性的情况进行数据分析。

3.1 纵坡坡度对雨水口泄流能力的影响

以小流量为例,纵坡坡度对雨水口泄流能力的影响如图5所示。可知,雨水口的泄流能力随着道路纵坡坡度的增大而降低;并且当道路纵坡坡度较大时,其对雨水口泄流能力的影响效果减弱。布设5个雨水口的情况下,纵坡坡度为0.7%、1%、3%、5%、8%时雨水口泄水率相比纵坡坡度为0.3%时分别减小9.46%、12.12%、23.41%、29.61%、34.59%;布设4个雨水口的情况下,上述值分别为16.39%、19.56%、28.02%、31.57%、34.87%;布设3个雨水口的情况下,上述值分别为5.95%、7.73%、15.17%、19.31%、23.14%;布设2个雨水口的情况下,上述值分别为3.18%、4.27%、9.34%、11.42%、13.71%。

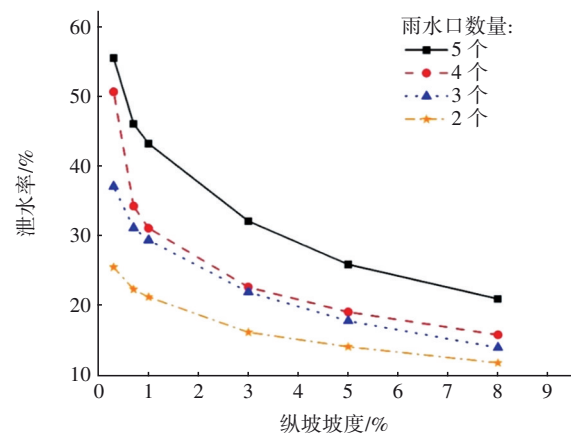


图5 道路纵坡坡度对雨水口泄流能力的影响

Fig.5 Effect of road longitudinal slope gradient on discharge capacity of rainwater inlet

3.2 雨水口数量对其泄流能力的影响

以小流量为例,雨水口布设数量对其泄流能力的影响如图6所示。可知,雨水口泄流能力随其布置数量的增多而逐渐增大。在纵坡坡度为0.3%条件下,布设3、4、5个雨水口时的泄水率相比布设2个雨水口时分别增加11.60%、25.15%、30.04%;在纵坡坡度为0.7%条件下,上述值分别为8.83%、11.94%、23.76%;在纵坡坡度为1%条件下,上述值分别为8.14%、9.86%、22.01%;在纵坡坡度为3%条件下,上述值分别为5.77%、6.47%、15.97%;在纵坡坡度为5%条件下,上述值分别为3.71%、5.00%、11.82%;在纵坡坡度为8%条件下,上述值

分别为2.17%、3.99%、9.16%。

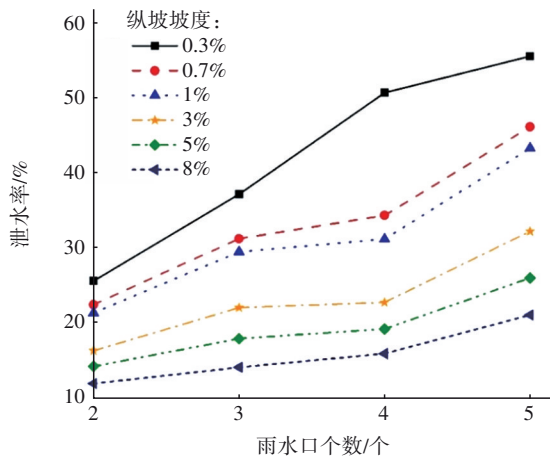


图6 雨水口布设数量对其泄水能力的影响

Fig.6 Effect of number of rainwater inlets on their discharge capacity

3.3 径流流量对雨水口泄流能力的影响

以布设5个雨水口为例,径流流量对雨水口泄流能力的影响如图7所示。可知,雨水口的泄流能力随径流流量的增大而减小;当纵坡坡度较大时,雨水口的泄水率较低,此时径流流量的影响不显著。在纵坡坡度为0.3%条件下,中流量和大流量时雨水口的泄水率相比小流量分别减少了8.72%、18.36%;在纵坡坡度为0.7%条件下,上述值分别为6.53%、13.51%;在纵坡坡度为1%条件下,上述值分别为5.46%、12.00%;在纵坡坡度为3%条件下,上述值分别为2.31%、6.66%;在纵坡坡度为5%条件下,上述值分别为0.59%、2.23%;在纵坡坡度为8%条件下,上述值分别为0.36%、1.81%。

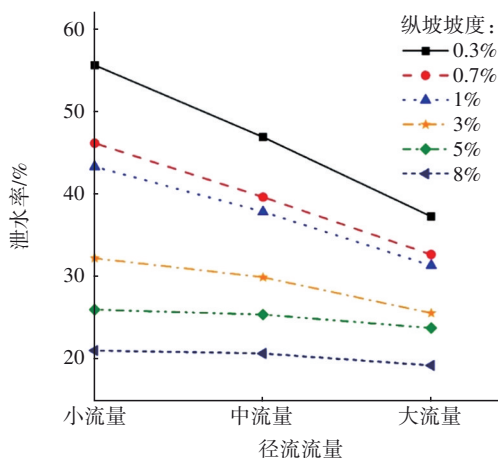


图7 径流流量对雨水口泄流能力的影响

Fig.7 Effect of runoff flow on discharge capacity of rainwater inlet

4 结论

① 雨水口的泄流能力随着道路纵坡坡度的增大而减小。在小设计流量、雨水口数量为5个(间距为20 m)的条件下,当道路纵坡坡度从0.3%增至8%时,雨水口泄水率从55.64%降至21.05%。

② 雨水口的泄流能力随布设数量的增加而增大。在小设计流量、道路纵坡坡度为0.3%的条件下,当雨水口布设数量从2个增至5个(对应间距由50 m降至20 m)时,雨水口泄水率由25.60%增至55.64%。

③ 雨水口泄流能力随径流流量的增大而减小,但当纵坡坡度较大时,雨水口泄水率较低,此时径流流量的影响不显著。在道路纵坡坡度为0.3%且布设5个雨水口的条件下,小、中、大3种流量下雨水口泄水率分别为55.64%、46.92%、37.28%。

参考文献:

- [1] 席广朋,王建龙,赵梦圆,等. 城市雨水调蓄池水质控制效果及其影响因素分析[J]. 环境工程, 2018, 36(12): 98-102.
XI Guangpeng, WANG Jianlong, ZHAO Mengyuan, et al. Water quality control effect of urban rainwater storage tank and its influencing factors [J]. Environmental Engineering, 2018, 36(12): 98-102 (in Chinese).
- [2] 周宏,刘俊,高成,等. 我国城市内涝防治现状及问题分析[J]. 灾害学, 2018, 33(3): 147-151.
ZHOU Hong, LIU Jun, GAO Cheng, et al. Analysis of current situation and problems of urban waterlogging control in China [J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(3): 147-151 (in Chinese).
- [3] 张伟,李思敏,时真男. 我国城市暴雨内涝的成因及其应对策略[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(5): 180-184.
ZHANG Wei, LI Simin, SHI Zhennan. Formation causes and coping strategies of urban rainstorm waterlogging in China [J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(5): 180-184 (in Chinese).
- [4] 齐文超,侯精明,刘家宏,等. 城市湖泊对地表径流致涝控制作用模拟研究[J]. 水力发电学报, 2018, 37(9): 8-18.
QI Wenchao, HOU Jingming, LIU Jiahong, et al. Lake control on surface runoff causing urban flood inundation [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(9): 8-18.

- (9): 8-18 (in Chinese).
- [5] 翟盘茂, 王萃萃, 李威. 极端降水事件变化的观测研究[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(3): 144-148.
ZHAI Panmao, WANG Cuicui, LI Wei. A review on study of change in precipitation extremes [J]. Advances in Climate Change Research, 2007, 3(3): 144-148 (in Chinese).
- [6] 张建云, 王银堂, 贺瑞敏, 等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展, 2016, 27(4): 485-491.
ZHANG Jianyun, WANG Yintang, HE Ruimin, *et al.* Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4): 485-491 (in Chinese).
- [7] 侯精明, 李东来, 王小军, 等. 建筑小区尺度下LID措施前期条件对径流调控效果影响模拟[J]. 水科学进展, 2019, 30(1): 45-55.
HOU Jingming, LI Donglai, WANG Xiaojun, *et al.* Effects of initial conditions of LID measures on runoff control at residential community scale [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(1): 45-55 (in Chinese).
- [8] 陈倩, 夏军强, 董柏良. 城市洪涝中雨水口泄流能力的试验研究[J]. 水科学进展, 2020, 31(1): 10-17.
CHEN Qian, XIA Junqiang, DONG Boliang. Experimental study on discharge capacity of street inlet in urban flooding [J]. Advances in Water Science, 2020, 31(1): 10-17 (in Chinese).
- [9] DESPOTOVIC J, PLAUSIC J, STEFANOVIC N, *et al.* Inefficiency of storm water inlets as a source of urban floods [J]. Water Science and Technology, 2005, 51(2): 139-145.
- [10] 赵江, 张林洪, 吴培关, 等. 公路雨水口算子泄水量试验研究[J]. 城市道桥与防洪, 2004(4): 67-70, 153.
ZHAO Jiang, ZHANG Linhong, WU Peiguan, *et al.* Study on test of sluice capacity of double-edged fine-toothed comb at rainfall inlet at highway [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2004(4): 67-70, 153 (in Chinese).
- [11] HOU J M, LIANG Q H, FRANZ S, *et al.* A stable 2D unstructured shallow flow model for simulations of wetting and drying over rough terrains [J]. Computers & Fluids, 2013, 82: 132-147.
- [12] HOU J M, LIANG Q H, ZHANG H B, *et al.* An efficient unstructured MUSCL scheme for solving the 2D shallow water equations [J]. Environmental Modelling & Software, 2015, 66: 131-152.
- [13] SMITH L S, LIANG Q H. Towards a generalised GPU/CPU shallow-flow modelling tool [J]. Computers & Fluids, 2013, 88: 334-343.
- [14] 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, 2018, 33(6): 778-785.
LIU Feifei, HOU Jingming, GUO Kaihua, *et al.* High-performance numerical model for rainfall catchment process based on hydrodynamic method [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2018, 33(6): 778-785 (in Chinese).
- [15] HOU J M, SIMONS F, MAHGOUB M, *et al.* A robust well-balanced model on unstructured grids for shallow water flows with wetting and drying over complex topography [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2013, 257: 126-149.
- [16] 张加乐. 基于GPU并行计算的非定常Euler方程算法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
ZHANG Jiale. Numerical Studies of Unsteady Euler Equations Based on GPU Parallel Computing [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012 (in Chinese).
- [17] SOARES-FRAZÃO S. Experiments of dam-break wave over a triangular bottom sill [J]. Journal of Hydraulic Research, 2007, 45(S1): 19-26.
- [18] 毛正安. 市政道路雨水口间距布置问题探析[J]. 企业导报, 2012(3): 296.
MAO Zheng'an. Analysis on the spacing arrangement of rainfall outlets of municipal roads [J]. Guide to Business, 2012(3): 296 (in Chinese).

作者简介: 张迪(1994-), 男, 河北唐山人, 硕士, 主要从事水力学及河流动力学方面的研究。

E-mail: 737762457@qq.com

收稿日期: 2020-03-15

修回日期: 2020-05-29

(编辑: 刘贵春)