

# 无资料城区管网排水过程概化模拟研究

杨东<sup>1</sup>, 侯精明<sup>1</sup>, 李丙尧<sup>1</sup>, 李东来<sup>1</sup>, 李钰茜<sup>1</sup>, 付德宇<sup>2</sup>, 姬国强<sup>3</sup>

(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. 北京首创股份有限公司, 北京 100028; 3. 陕西省西咸新区沣西新城开发建设(集团)有限公司海绵城市技术中心, 陕西 西安 712000)

**摘要:** 许多城市地区都没有可用的排水管网数据, 从而降低了城市雨洪模拟的准确性, 因此需要一种新的方法来表征管网的排水能力。提出了雨水井等效排水法(RIA)和仅在道路上等效排水法(CIR)两种表征管网排水能力的方法, 采用高效高分辨率的城市雨洪模型, 以西咸新区为研究区域, 模拟了城市内涝积水过程, 并与实测数据进行了对比。通过实际降雨与设计降雨条件下的内涝结果发现, 较原有的模拟方法, 该方法可以精准的表征管网排水能力, 提高模型的准确性。

**关键词:** 城市雨洪; 管网排水; 等效排水模型; 水动力方法; 防洪排涝

中图分类号: TU992

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)03-0139-06

## Generalized simulation of drainage process in urban networks without data

YANG Dong<sup>1</sup>, HOU Jingming<sup>1</sup>, LI Bingyao<sup>1</sup>, LI Donglai<sup>1</sup>, LI Yuxi<sup>1</sup>, FU Deyu<sup>2</sup>, JI Guoqiang<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Beijing Captial Co., Ltd., Beijing 100028, China; 3. Research Center for Sponge City, Fengxi New City Development and Construction Group of Shaanxi Xixian New Area Co., Ltd., Xi'an 712000, China)

**Abstract:** There is no available drainage pipe network data in many urban areas affecting the accuracy of urban flood simulations. Therefore, a new method is needed to characterize the drainage capacity of the networks. We used the equivalent infiltration approach (RIA) of rainwater wells and the equivalent infiltration approach on road only (CIR) in the simulations of high-resolution urban flood model. With Xixian New District as the research area, the urban flood process was simulated and then compared with the measured data. According to the results of flooding under actual rainfall and designed rainfall conditions, it is found that the method can accurately characterize the drainage capacity of the pipe networks and improve the accuracy of the model compared to the original simulation method.

**Key words:** urban flood; pipe network drainage; equivalent drainage model; hydrodynamic method; flood control and drainage

## 1 研究背景

随着我国城市化水平的提高, 地表不透水性增加以及雨水入渗蒸发减少, 地表雨水的产汇流过程受到了很大的影响<sup>[1]</sup>。同时, 由于极端暴雨发生的频率和潜在风险大大增加<sup>[2-4]</sup>, 导致城市洪水灾害的发生比以往更加频繁<sup>[5-6]</sup>, 城市洪水已成为最严重的灾害之一<sup>[7-8]</sup>。因此, 利用雨洪模型预测城市

洪涝过程, 对后续城市建设以及雨洪管理具有非常重要的指导意义。

在过去的几十年里, 通过改进的数值方法<sup>[9-11]</sup>和并行计算技术, 城市雨洪模型的准确性和效率大大提高<sup>[12-13]</sup>。然而, 如何考虑城市地下排水基础设施, 目前仍在很大程度上影响着雨洪模型的准确性<sup>[14]</sup>。在许多地区, 现有的排水管网数据非常有限, 因此需要一种新的方法来考虑这一因素。HOU

收稿日期: 2019-12-01; 修回日期: 2020-02-12

基金项目: 国家十三五重大研发专项(2016YFC0402704); 国家自然科学基金项目(51609199); 陕西省国际科技合作交流平台项目(2017KW-014); 陕西省水利科技项目(2017SLKJ-14)

作者简介: 杨东(1997-), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要从事于城市雨洪模拟方面研究。

通讯作者: 侯精明(1982-), 男, 河北怀安人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地表水及其附随过程数值模型的理论推导与实际应用、城市及流域洪涝管理。

等<sup>[15]</sup>在模拟洪水过程中,利用各研究区域的持续入渗代表城市排水能力。Wang等<sup>[16]</sup>用折现降雨率法和固定入渗率法两种方法代表土壤入渗和城市地下排水措施的排水能力,模拟并比较了两种方法在城市雨洪模型中的优劣性。但是,上述方法没有考虑地表雨水的产汇流过程和管网系统的实际布置范围,因此无法准确表征地下管网的排水能力,模型模拟的精度不够准确。

针对以上存在的问题,本文提出了2种能够表征管网排水能力的方法,即雨水井等效排水法(rain-water well equivalent infiltration approach, RIA)和仅在道路上等效排水法(equivalent infiltration approach on road only, CIR),与现有的两种方法,即在所有区域等效排水法(equivalent infiltration approach in all areas, CIA)和降雨率折现方法(discounted rainfall method, DRA)进行了比较,并利用实测资料进行了对比验证,为城市雨洪数值模拟计算方法的研究提供参考。

## 2 数值模型与管网排水过程概化方法

本文采用高效高分辨率城市雨洪模型 GAST (GPU accelerated surface water flow and transport model),该模型已经被大量应用与验证,表明其有较高的稳定性与计算精度<sup>[17-21]</sup>,模型控制方程为二维浅水方程(SWEs)。

真实的城市降雨-径流-淹没过程模拟可分为地表产汇流过程和管网汇流过程,涉及水文和水动

力过程。降雨和径流过程主要分为4个部分,即土壤渗透、排水管网排出量、地表径流和蒸发。在降雨率折现方法中(DRA),通过减少降雨源项中的降雨速率来表示管网的排水能力,所有区域等效排水法(CIA)是除了土壤自然入渗能力外,再在所有区域上减去一个代表管网排水能力的值。然而,实际的降雨产汇流过程是降雨落到地面,汇流至雨水井,再通过排水管网排出。但这两种方法并没有考虑由于地表形态对雨水产汇流过程的影响以及管网系统实际布置区域,因此降低了模拟结果的准确性。

CIA法与仅在道路上等效排水法(CIR)中,采用研究区域暴雨强度公式以及排水管网的設計重现期计算管网排水可以应对的峰值强度,在雨洪模型中将排水管网的排水能力以恒定下渗速率表示,两者之间的差别在于,CIA方法是通过将管网的排水能力量化,按照水量守恒原则,将管网排水效果概化成一个固定的下渗速率,累加至所有区域的实际下渗速率之上。而CIR方法考虑了管网的实际布置范围,如道路和建设小区等,将管网的排水能力量化累加至实际布置范围。雨水井等效排水法(RIA)考虑了真实地表形态对雨水产汇流过程的影响,通过实际勘测、遥感卫星等方法,了解雨水井实际布置范围以及尺寸,当雨水流入雨水井所在网格时,通过堰流公式计算雨水流入管网的水量,并按照水量守恒的原则在地表上减去这部分水量,从而精确概化管网的排水能力。图1为4种等效排水方法的原理示意图。

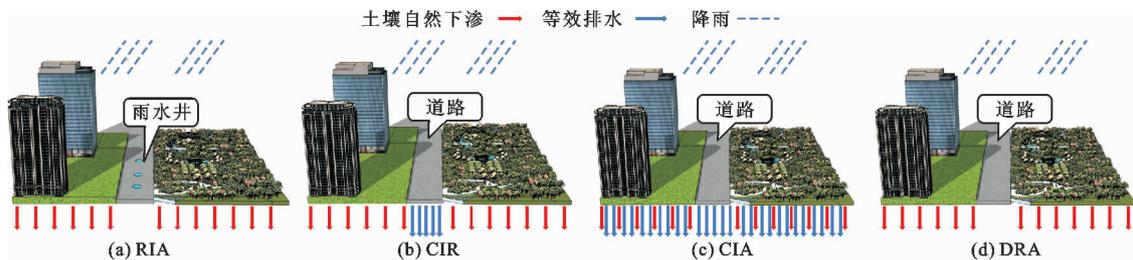


图1 4种等效排水方法原理示意图

## 3 建模数据与模型验证

### 3.1 研究区域概况

为了比较 RIA、CIR、CIA 和 DRA 4 种等效排水方法的优劣性,以陕西省西咸新区为研究区域,其总面积为 1.59 km<sup>2</sup>,通过输入基础数据,模拟研究区地表产汇流过程,分析积水情况,并与实际监测数据进行对比验证。

### 3.2 管网排水能力

西安市暴雨强度公式如公式(1)所示。

$$q = \frac{2785.833 \times (1 + 16581 \times \lg P)}{(t + 16.813)^{0.9302}} \quad (1)$$

式中: $q$ 为暴雨强度, L/(s·hm<sup>2</sup>);  $P$ 为重现期;  $t$ 为降雨历时, min。

研究区地下排水管网的设计重现期为1年一遇,计算可得当降雨强度低于10.74 mm/h时,管网可以正常排水。

### 3.3 降雨数据

降雨数据为 2016 年 8 月 25 日云谷 10 号气象站实测研究区降雨数据,图 2 为具体降雨过程,图 2 中降雨量统计间隔为 10 min。

### 3.4 地形和土地利用数据

图 3 和 4 为利用无人机机载激光雷达技术得到研究区网格尺寸为 2 m 的数字高程与影像数据,图 5 为通过正射影像图划分的 5 种不同的土地利用类型,表 1 为 4 种等效排水方法在不同土地利用类型

的下渗速率和糙率,取值来源于文献[19]。

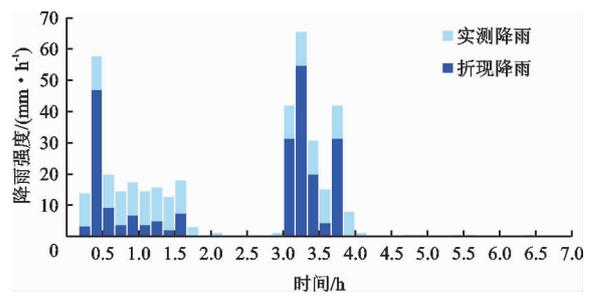


图 2 云谷 10 号气象站实测降雨过程(2016-08-25)



图 3 研究区 DOM

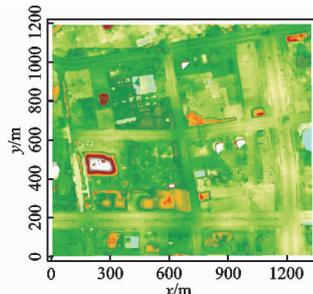


图 4 研究区数字高程数据

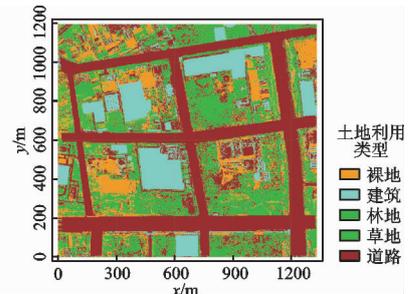


图 5 研究区土地利用类型

表 1 4 种等效排水方法在不同土地利用类型的下渗速率和糙率

土地利用类型	下渗速率/(mm·h <sup>-1</sup> )												糙率
	RIA			CIR			CIA			DRA			
	SN1	CI	IR	SN1	CI	IR	SN1	CI	IR	SN1	CI	IR	
裸地	3	0	3	3	0	3	3	6.04	9.04	3	0	3	0.030
林地	6	0	6	6	0	6	6	6.04	12.04	6	0	6	0.200
草地	5	0	5	5	0	5	5	6.04	11.04	5	0	5	0.060
建筑	1.1	0	1.1	1.1	0	1.1	1.1	6.04	7.14	1.1	0	1.1	0.015
道路	0	0	0	0	10.74	10.74	0	6.04	6.04	0	0	0	0.014

注:(1) SN1为土壤自然下渗速率;CI为表征管网等效排水能力的固定下渗速率;IR表示总下渗速率。(2)表中数据6.04为道路和房屋的占比与10.74相乘所得。

### 3.5 模型模拟结果与分析

模型计算采用开边界,四周无入流,模拟降雨开始至 10 h 后的积水过程。图 6 为不同方法在降雨开始后 3.833 h 时的研究区内涝积水深度模拟结果,此时积水达到峰值,其中 A、B、C、D 为研究区内 4 个典型积水点,与实际监测记录位置相一致;图 7 和表 2 为不同方法对 4 个典型积水点的积水水深、积水面积模拟结果以及积水面积模拟值的相对误差;图 8 为不同方法模拟的研究区积水面积与积水量随时间变化过程。

由表 2 数据通过计算可得,4 种方法模拟各典型积水点积水面积的平均相对误差分别为 1.29%、4.17%、7.80% 和 15.42%。

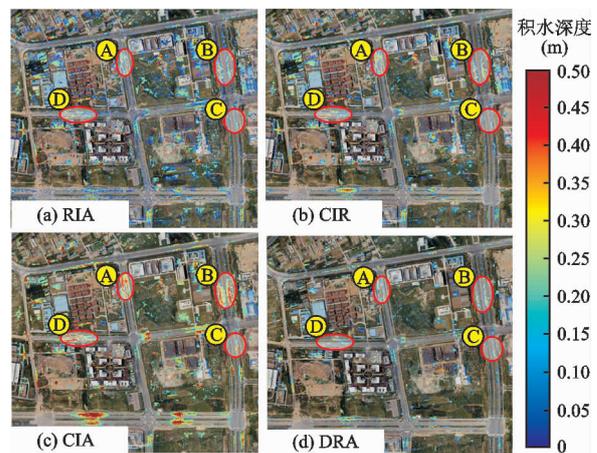


图 6 不同方法模拟的研究区内涝积水深度 (t = 3.833 h)

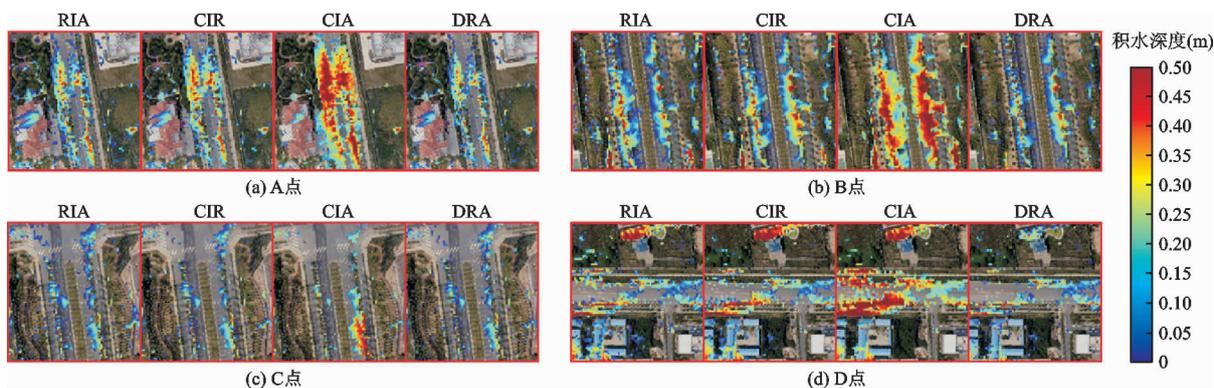


图7 不同方法模拟的研究区内4个典型积水点的积水深度( $t = 3.833\text{ h}$ )

表2 不同方法模拟的研究区内4个典型积水点的积水面积及其相对误差( $t = 3.833\text{ h}$ )

积水点	积水面积/ $\text{m}^2$					相对误差/%			
	实测值	RIA	CIR	CIA	DRA	RIA	CIR	CIA	DRA
A	1536	1516	1628	1648	1296	-1.30	5.99	7.29	-15.63
B	9600	9536	9700	10360	8308	-0.67	1.04	7.92	-13.46
C	3720	3664	3556	3968	3244	-1.51	-4.41	6.67	-12.80
D	2254	2216	2372	2464	1808	-1.69	5.24	9.32	-19.79

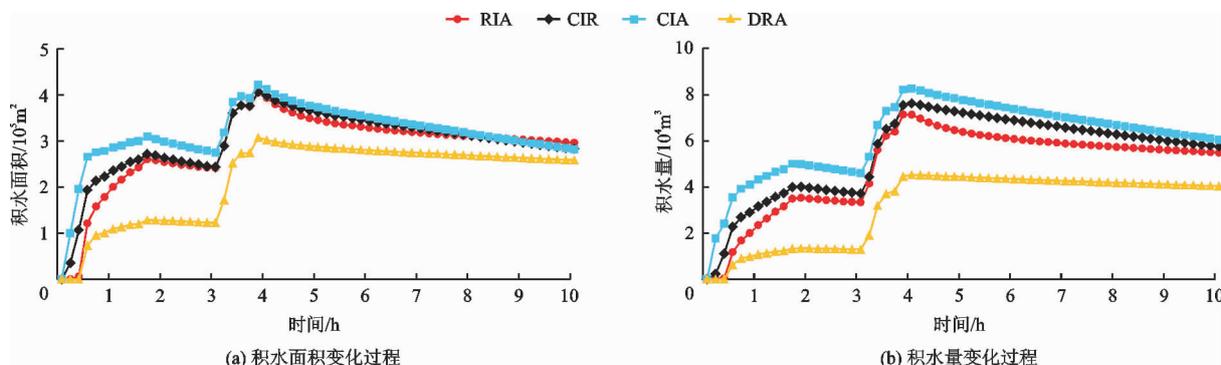


图8 不同方法模拟的研究区积水面积与积水量随时间变化过程

上述结果表明:

(1) 4种方法模拟的积水面积与降雨变化趋势一致。但是由于DRA方法降低了实际的降雨强度,使得整个研究区域的积水面积和积水量大大减小,并且其退水过程较慢,模拟精度较低。

(2) 由于排水管网主要收集来自道路和建筑小区的雨水,CIA方法通过将管网的排水效果量化,按照等量原则累加至全部研究区域,导致道路等效排水能力减弱,模拟的积水面积较大,其精度略低于CIR方法。

(3) RIA方法考虑了地表雨水的实际产汇流过程,能正确反映出雨水汇入管网的情况。此外,由于管网排水能力有限,集中在该区域的积水无法快速排出,该方法模拟的退水过程较慢,可以较好地表征

其退水过程。

## 4 模型应用

### 4.1 研究区内涝积水模拟

图9为由西安市暴雨强度公式计算得到5种设计降雨(2、5、10、20、50年一遇)的降雨过程。

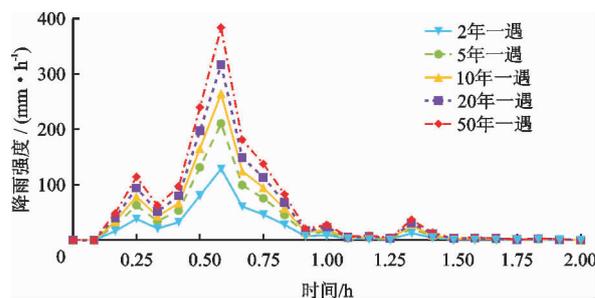


图9 不同重现期下研究区设计降雨过程

## 4.2 研究区内涝积水总量分析

研究区积水总量可表征内涝积水情况。图10为不同重现期研究区积水总量随时间变化过程(以2年一遇和5年一遇降雨条件为例)。

图10表明,降雨开始后1.08 h时,各方法模拟的研究区内涝积水总量达到峰值。经计算,当内涝

积水总量达到峰值时,在重现期为2、5、10、20、50年一遇降雨条件下,与RIA方法相比,CIR法的积水水量分别增大8%、30%、38%、46%和54%;CIA法的积水水量分别增大16%、35%、43%、50%和58%;DRA法的积水水量分别减少20.8%、7.9%、3.7%、0.8%和0.2%。

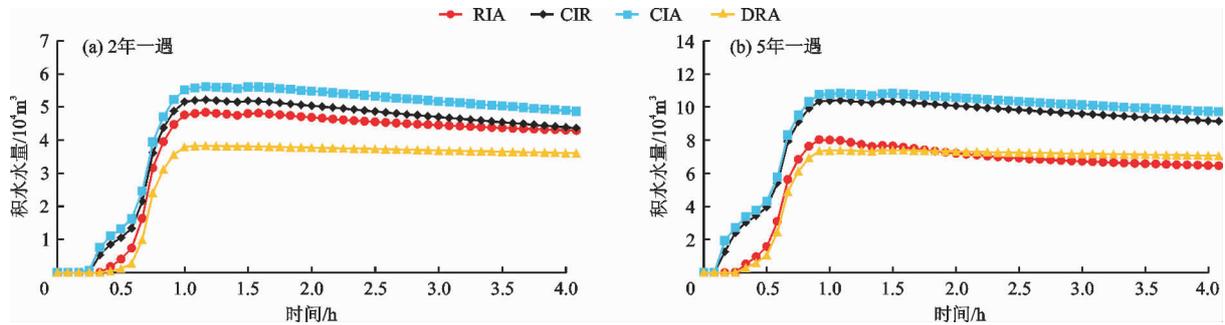


图10 不同重现期研究区积水总量随时间变化过程

## 5 结论

本文提出了2种能够表征管网排水能力的方法(雨水井等效排水法(RIA)、仅在道路上等效排水法(CIR)),采用基于GPU加速的高效高精度水文水动力模型,比较了新方法与现有方法在实际降雨和设计降雨条件下城市区域的积水过程,可以得出以下结论:

(1)4种方法模拟的积水面积与实测积水面积相比,平均相对误差分别为1.29%、4.17%、7.80%和15.42%。新方法能有效提高洪水模拟结果的精度,更准确地模拟地表雨水的产汇流过程,有助于合理开展城市雨洪管理工作。

(2)在不同降雨条件下,当地表积水总量达到最大时,随着设计降雨重现期的增加,CIR法,CIA法模拟的积水量与积水面积与RIA法相比,增加量呈逐渐增多趋势;DRA法模拟结果与RIA法相比,减少量呈逐渐减少趋势。

### 参考文献:

[1] JACOBSON C R. Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: A review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(6): 1438-1448.

[2] 周倩倩,苏炯恒,梅胜,等. 1D/1D及1D/2D耦合水动力模型构建方法研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(5): 21-25.

[3] 王少丽,臧敏,王亚娟,等. 降水和下垫面对流域径流量影响的定量研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30

(6): 1-5.

[4] HAMDI R, TERMONIA P, BAGUIS P. Effects of urbanization and climate change on surface runoff of the Brussels Capital Region: A case study using an urban soil-vegetation-atmosphere-transfer model [J]. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(13): 1959-1974.

[5] 张旭,李占斌,何文虹,等. 基于MIKE URBAN的西安市中心城区雨洪过程模拟[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(6): 157-163.

[6] 彭菊,周秋文,韦小茶,等. 贵州省1960-2014年降水量时空变化特征分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(5): 148-154.

[7] LASHFORD C, RUBINATO M, CAI Yanpeng, et al. SuDS & sponge cities: A comparative analysis of the implementation of pluvial flood management in the UK and China [J]. *Sustainability* 2019, 11(1): 213.

[8] ALI M, KHAN S J, ASLAM I, et al. Simulation of the impacts of land-use change on surface runoff of Lai Nullah Basin in Islamabad, Pakistan [J]. *Landscape and Urban Planning* 2011, 102(4): 271-279.

[9] BATES P D, HOMITT 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 (Amsterdam)*, 2010, 387(1-2): 33-45.

[10] CHEN A S, DJORDJEVI S, LEANDRO J, et al. An analysis of the combined consequences of pluvial and fluvial flooding [J]. *Water Science & Technology*, 2010, 62(7): 1491.

[11] CHANG T J, WANG C H, CHEN A S. A novel approach to model dynamic flow interactions between storm

- sewer system and overland surface for different land covers in urban areas[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 524:662-679.
- [12] DECKY V K, SINGH T V. Adaptable Particle-in-Cell algorithms for graphical processing units [J]. *Computer Physics Communications*, 2011, 182(3):641-648.
- [13] ZHANG Bo, XUE Zhenghui, RENG Wu, et al. Analysis of periodic structures using improved spectral FDFA and GPU computing [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2011, 31(10):1212-1216.
- [14] LEANDRO J, SCHUMANN A, PFISTER A. A step towards considering the spatial heterogeneity of urban key features in urban hydrology flood modelling [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 535:356-365.
- [15] HOU Jingming, WANG Run, LI Guodong, et al. High-performance numerical model for high-resolution urban rainfall-runoff process based on dynamic wave method [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, 37(2):40-49.
- [16] WANG Yuntao, CHEN A S, FU Guangtao. An integrated framework for high-resolution urban flood modelling considering multiple information sources and urban features [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2018,107:85-95.
- [17] HOU Jingming, LIANG Qihua, SIMONS F, et al. A stable 2D unstructured shallow flow model for simulations of wetting and drying over rough terrains [J]. *Computers and Fluids*, 2013, 82:132-147.
- [18] HOU Jingming, 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 & Engineering*, 2013, 257(15):126-149.
- [19] 侯精明, 王润, 李国栋, 等. 基于动力波法的高效高分辨率城市雨洪过程数值模型[J]. *水力发电学报*, 2018, 37(3):40-49.
- [20] HOU Jingming, LIANG Qihua, ZHANG Hongbing, et al. An efficient unstructured MCJSCL scheme for solving the 2D shallow water equations [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2015, 66:131-152.
- [21] 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.

(上接第 138 页)

- [3] MISHRA S, SINGAL S K, KHATOD D K. A review on electromechanical equipment applicable to small hydropower plants [J]. *International Journal of Energy Research*, 2012,36(5):553-571.
- [4] 马青, 杨秋, 苏鹏. 果多水电站工程三维协同设计探索与应用[J]. *红水河*, 2016,35(3):7-10.
- [5] LIN Linglong, SONG Yuntao, TANG Yuxiang, et al. Implementation and application study on 3D collaborative design for CFETR based on ENOVIA VPM [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2015,100(11):198-203.
- [6] 陈功军, 张金辉, 高英. 实施水利工程三维协同设计的探索[J]. *人民长江*, 2013,44(16):105-108.
- [7] 周强. 水利水电工程的三维协同设计[J]. *海南师范大学学报(自然科学版)*, 2015,28(4):461-464.
- [8] 陈沉, 陆真嘉, 斯铁冬, 等. 全专业三维协同设计在抽水蓄能电站中的应用[J]. *大坝与安全*, 2018(6):20-22+36.
- [10] 周旭雄. 三维协同设计在水利水电工程设计中的应用[J]. *科技资讯*, 2018,16(20):63+65.
- [11] 翁发根, 梁必必. 三维协同设计在浯溪口水利枢纽中的应用[J]. *海河水利*, 2016(6):60-62+67.
- [12] 徐俊, 李小帅, 韩旭, 等. 巴基斯坦 Karot 水电站工程多专业三维协同设计[J]. *土木建筑工程信息技术*, 2017,9(6):1-6.
- [13] 吴维金, 李强, 陈向东, 等. 基于 VPM 系统平台的厂房机电三维协同设计应用[J]. *水利水电技术*, 2010, 41(2):52-55+59.
- [14] 杨宇虎, 王娜. 观音岩水电站 HydroBIM 厂房三维全专业协同设计[J]. *云南水力发电*, 2016,32(6):143-146.
- [15] 高博. 三维协同设计在水利设计院中的应用[J]. *水科学与工程学报*, 2013(5):94-96.
- [16] 周杰. 三维协同设计在设计院的应用[J]. *水利规划与设计*, 2014(4):58-62.
- [17] 王进丰, 李南辉, 王宁. 基于 CATIA/ENOVIA VPM 的水电工程三维协同设计[J]. *人民长江*, 2015, 46(17):28-32.
- [18] 杨东升. 基于 CATIA 的水电工程三维设计应用研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.