

汇水区节点选取对城市雨洪模拟结果的影响

宋瑞宁¹, 官永伟^{1,2}, 李俊奇¹, 李小静¹, 李小宁²

(1. 北京建筑大学城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室, 北京 100044;

2. 北京建筑大学北京建筑节能减排关键技术协同创新中心, 北京 100044)

摘要:利用 InfoWorks ICM 模型建立深圳市光明新区新城公园雨水管网模型, 分别以检查井和雨水口作为模型的节点划分汇水区, 分析不同的汇水区划分方式对公园出口流量模拟结果的影响。结果表明: 在中小降雨条件下, 汇水区节点选取对峰值流量模拟结果的影响不明显; 在暴雨或特大暴雨的条件下, 汇水区节点选取对峰值流量模拟结果的影响较大; 与以检查井为节点的划分方式相比, 以雨水口为节点的划分方式产流时间会有一定程度的推迟; 在模型建立过程中应综合考虑研究目标、区域尺度和降雨特征等对汇水区进行合理划分。

关键词:检查井; 雨水口; InfoWorks ICM 模型; 泄水能力

中图分类号: P333

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2015)03-0075-05

The effect of node type selection for catchment division on urban stormwater simulation// SONG Ruining¹, GONG Yongwei^{1,2}, LI Junqi¹, LI Xiaojing¹, LI Xiaoning² (1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment, Ministry of Education, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Cooperative Innovation Research Center on Architectural Energy Saving and Emission Reduction, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: The storm drainage system model of Xincheng Park in Guangming New District of Shenzhen was set up based on InfoWorks ICM model. In this study the catchment area was divided respectively according to manhole and gully, and its effect on flow simulation results of park outlet was analyzed. The results showed that the selection of node-type had no obvious effect on peak flow simulation result in the condition of light or medium rainfall, while for storm or heavy rainfall the selection of node-type had great influence on peak flow. Compared to catchment division based on manhole, runoff-yielding time producing was delayed by dividing the catchment area based on gully. Therefore, research goal, regional scale and rainfall characteristics should be considered in the process of modeling to reasonably divide the catchment area.

Key words: manhole; gully; InfoWorks ICM model; discharging capacity

近年来,城市化的快速发展带来了一系列问题,因城市化引起的热岛效应和雨岛效应加重了城市内涝的发生。针对内涝问题,城市雨洪模型可以模拟分析不同降雨条件下的管网排水能力、地面积水情况以及雨洪管理方案的效果,从而为城市内涝防治提供技术支持^[1-3]。随着雨洪模型的广泛应用,模型模拟和预测的不确定性已经引起众多学者的关注,并成为重要研究内容之一^[4]。在构建管网模型时,不同的汇水区划分方式对城市雨洪模拟具有一定程度的影响。目前,已有一些关于汇水区划分策略的研究。赵冬泉等^[5]认为,不同坡度下汇水区划分对模型模拟结果影响差异很大,尤其是对地形平缓的地区影响较大。许仕荣等^[6]认为推求高精度的雨

水口水量过程线是建立城市雨水径流量动态模型的关键。汇水区的划分基本上以传统的手工方法划分和软件的自动划分为主。手工方法划分汇水区对操作人员的实际经验要求较高,需要耗费大量的人力、物力,所绘制的汇水区精度和效率难以保证,也难以获得物理意义较明确的模型参数,势必影响模型模拟的结果。张书亮等^[7]利用地理信息系统(GIS)等技术,通过建立南京雨水管网达标信息系统,将南京主城自动划分为233个雨水出水口汇水区。结果显示,在把雨水管网作为汇水区划分的前提条件下,自动划分的汇水区与传统手工方法划分的汇水区的走势是一致的。

现有模型通常将检查井概化为节点,各子汇水

区产生的径流通过检查井进入排水管网中,最终由出水口排往下游河道。然而实际情况是雨水是经由雨水口收集之后进入排水管网的,但由于受场地面积、管网资料以及工作量等诸多因素的制约,在汇水区概化过程中通常仍把检查井概化为节点。这种汇水区划分方式对模型模拟结果的影响有多大,目前尚未得到进一步的研究。若能以雨水口为节点进行汇水区的划分,则模型模拟结果可能更接近真实情况。因此,笔者分别以检查井和雨水口作为节点进行汇水区划分,在此基础上对研究区出口的流量过程线进行分析,以期合理选择汇水区划分方式提供依据。

1 研究区域概况

选取深圳市光明新区新城公园为研究对象。光明新区地处北回归线以南,属亚热带海洋性季风气候,每年4—9月为雨季,多年平均降雨量为1837 mm。新城公园位于光明新区光侨大道西侧,新区管委会东侧,北面为华夏路,西、南面为公园路,是一座以山体、林地、池塘、谷田等自然资源为依托,建设面积为56 hm²的生态型区级市政公园。本文主要以新城公园一个较大的汇水区作为研究区域,研究区域总面积为8.3 hm²,其中道路、屋面和广场等不透水面积占5%,林地和草地等透水面积占95%。

2 模型的构建

2.1 模型选择及参数设置

本研究选用城市综合流域排水模型 InfoWorks ICM,该模型具有较完善的雨水口参数设置功能。InfoWorks ICM 采用分布式的降雨-径流过程,降雨经过地表截留、填洼、渗透之后产生地表径流,随后经雨水口汇入管道系统,并最终进入接纳水体。

InfoWorks ICM 通过产、汇流模拟获得进入雨水口的地面径流过程线,并以此过程线作为管道水力计算的输入条件,获得管道的水位、流速和流量等过程线。管道水力计算采用完全求解的圣维南方程组^[8],通过联立求解连续方程和动量方程来模拟渐变非恒定流。透水区域选择霍顿渗透模型进行径流计算,不透水区域的产流模型选择固定径流比例模型^[9]。汇流计算采用 SWMM 非线性水库法^[10],由连续方程和曼宁方程联立求解。为了对比分别以检查井和雨水口作为汇水区划分节点对模拟结果的影响,这2种划分方案中的参数设定均一致。

雨水口是降雨径流进入城市排水管网的管道附属构筑物。地表上的降雨径流通过雨水口进入到管网系统中,最终排往下游河道。雨水口的数量不足、类型选择不当、布置不合理以及雨水口堵塞等问题

均会造成暴雨时路面积水。考虑到雨水口经常会发生堵塞现象,以及雨水口孔口形状、雨水口厚度(孔口壁厚厚度)的影响,雨水口泄水能力计算公式^[11-12]如下:

$$Q = w\alpha k\sqrt{2gh} \quad (1)$$

式中: Q 为雨水口的泄水能力,m³/s; w 为雨水口进水孔口面积,m²; α 为孔口系数,圆角孔取0.8,方角孔取0.6; k 为孔口阻塞系数,一般 $k=2/3$; g 为重力加速度, $g=9.80\text{ m/s}^2$; h 为雨水口上允许水头,一般采用 $h=0.02\sim 0.06\text{ m}$ 。

文献[13]给出了北京市雨水口上允许水头为0.04 m时的各种雨水篦的泄水能力,平算式单算雨水口、平算式双算雨水口和平算式多算雨水口每篦泄水能力分别为0.020 m³/s、0.035 m³/s和0.015 m³/s。由于深圳和北京的降雨条件差异较大,所以应实地测量新城公园的雨水口尺寸进行校核计算,以减小误差。新城公园的雨水口为平篦式单算雨水口,尺寸为600 mm×400 mm,经测量孔口面积为0.068 m²,根据雨水口泄水能力计算公式求得雨水口的水头-流量关系曲线,如图1所示。

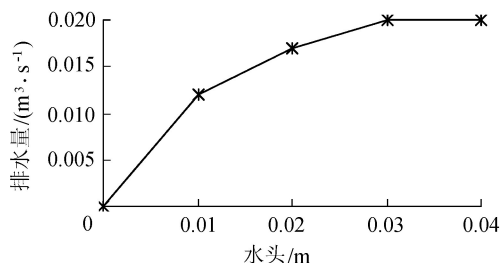


图1 雨水口的水头-流量关系曲线

2.2 输入数据

研究区域的土地利用类型图、管网数据等资料来源于新城公园施工图,降雨数据由公园内的自动雨量计测得。笔者根据降雨强度等级划分标准选择了6场实测降雨作为模型的降雨输入条件,具体降雨事件的特征参数见表1。

表1 降雨事件的特征参数

降雨日期	降雨量/ mm	降雨 历时/ min	最大降雨 强度/ (mm·min ⁻¹)	平均降雨 强度/ (mm·min ⁻¹)	降雨 等级
2013-04-25	40.9	411	1.5	0.1	大雨
2013-05-19	19.9	75	1.8	0.3	中雨
2013-07-10	28.0	166	1.3	0.2	中到大雨
2013-08-17	93.6	297	1.8	0.3	暴雨
2013-08-30	139.9	344	1.8	0.4	大暴雨
2013-09-14	18.3	69	1.5	0.3	中雨

2.3 汇水区划分

模型概化过程中采用2种方案进行汇水区划分,每个子汇水区土地利用类型包括屋面、道路和绿地三大类。方案1是以检查井作为汇水区划分节点,地表径流通过检查井进入排水管网;方案2是以

雨水口作为汇水区划分节点,地表径流通过雨水口进入排水管网并流经检查井。

a. 方案1。根据新城公园地面高程和雨水管线的走向进行子汇水区划分,以检查井为节点将研究区域概化得到27个子汇水区,见图2。各子汇水区的地表径流直接排入最近的检查井。

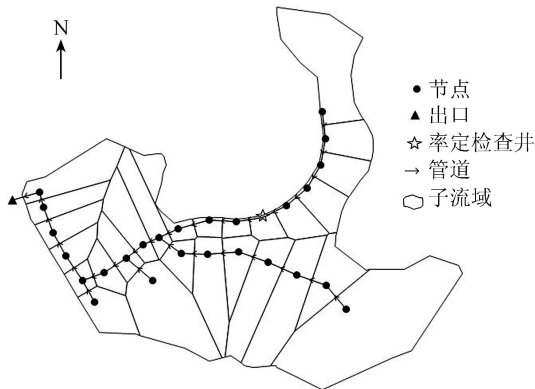


图2 以检查井为节点的研究区域概化

b. 方案2。根据新城公园地面高程、雨水口和雨水管线的走向进行子汇水区划分,以雨水口为节点将研究区域概化得到41个子汇水区,见图3。各子汇水区的地表径流直接排入最近的雨水口。

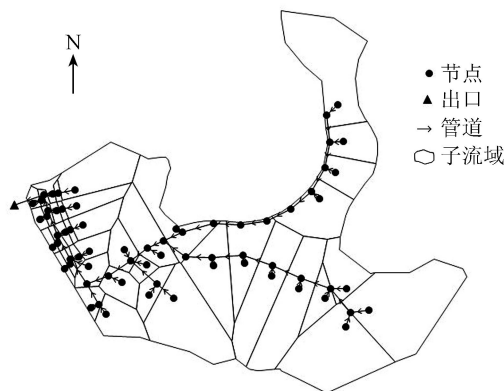


图3 以雨水口为节点的研究区域概化

3 结果与讨论

3.1 模型率定及验证

经模拟计算,2种方案率定后得出的结论基本一致,本文以方案1为例展开研究。分别采用2013年9月14日和2013年5月19日两场降雨的实测雨量和流量数据对方案1进行水文水力参数的率定和验证,并采用Nash-Sutcliffe效率系数对模型模拟结果进行评价。将公园内上游一检查井用于模型的率定,公园出口用于模型的验证(图2)。模拟流量过程线与实测流量过程线的对比见图4~5。

2013年9月14日和2013年5月19日两场降雨事件的Nash-Sutcliffe效率系数分别为0.81、0.92,该系数越接近于1,模拟结果与监测值吻合程

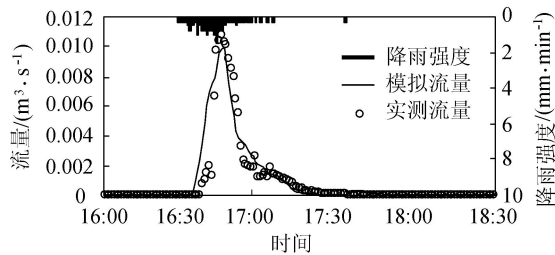


图4 2013-09-14 降雨径流模拟率定结果

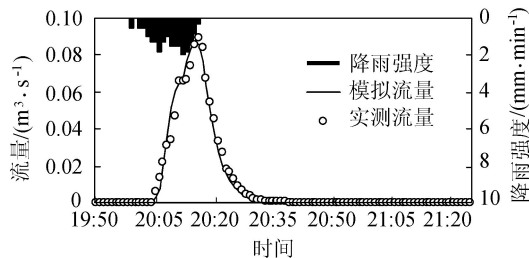


图5 2013-05-19 降雨径流模拟验证结果

度越高^[14]。因此认为模型率定的参数能够较好地表征研究区域的产汇流情况。

3.2 模拟结果

采用4场不同降雨强度的降雨事件作为水量边界条件,分别以检查井和雨水口为汇水区划分节点模拟分析这2种方案对公园出口流量的影响。2种方案在不同降雨条件下的出口流量过程线见图6。

由图6可知,不同的汇水区划分方式下,汇水区出口流量过程线的变化趋势基本一致,均随着降雨强度的变化呈现规律性变化。究其原因,虽然2种方案汇水区的划分方式不同,但所采用的产汇流模型是一致的。产流模型决定该汇水区产生的径流量,汇流模型决定径流的汇流速度,不同的汇水区划分方式可能导致汇水区的汇流路径不同,但其流量的变化趋势是一致的。

对不同汇水区划分方式的模拟结果进行统计,见表2,可以看出,峰值流量、径流总量和产流时间均随着降雨等级的变化发生不同程度的变化。2种方案的峰值流量在2013年4月25日、2013年7月10日两场降雨中差异较小,而在2013年8月17日、2013年8月30日两场降雨中差异较大。与方

表2 不同汇水区划分方式模拟结果对比

方案	降雨日期	产流时间	峰现时间	峰值流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	径流总量/ m^3
方案1	2013-04-25	18:55	19:07	0.054	120.44
	2013-07-10	07:46	08:49	0.030	80.35
	2013-08-17	02:48	04:21	0.891	2982.69
	2013-08-30	03:46	06:55	1.023	6583.66
方案2	2013-04-25	18:58	19:08	0.052	114.84
	2013-07-10	08:05	08:50	0.029	74.76
	2013-08-17	02:56	04:20	0.610	3108.66
	2013-08-30	04:05	06:54	0.627	6583.66

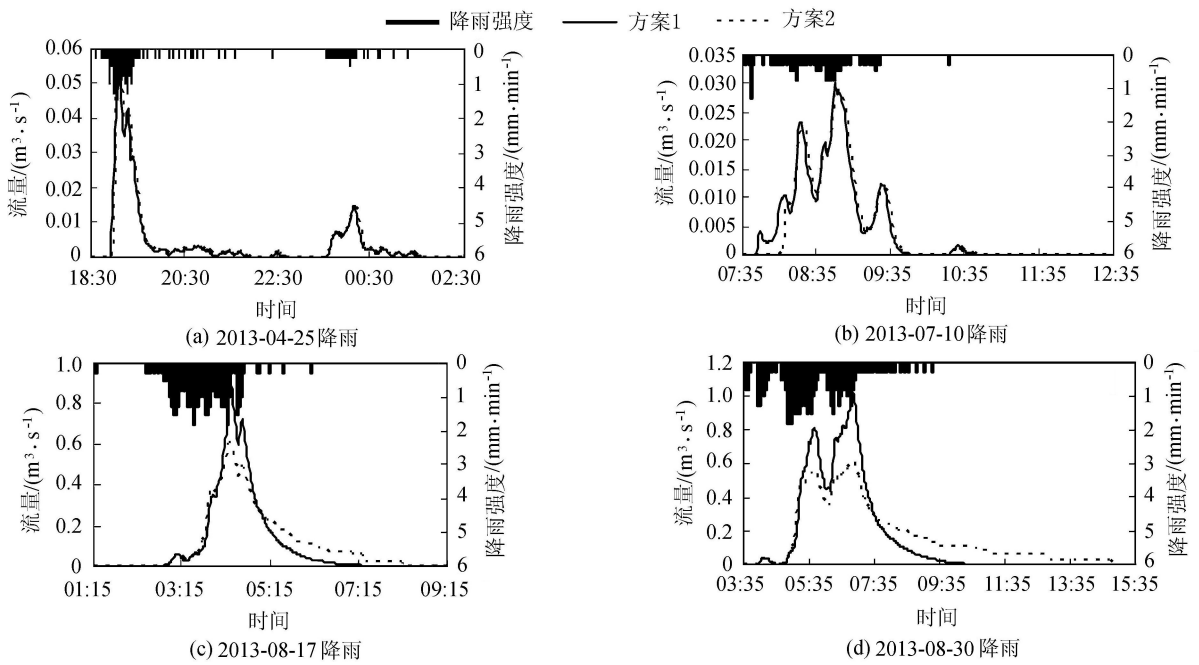


图6 不同降雨条件下2种方案的出口流量过程线对比

案1相比,方案2的产流时间均有一定程度的推迟。在这4场降雨中,2种方案的径流总量和峰值流量的出现时间(峰现时间)差异均较小。

3.3 不同汇水区划分方式对模拟结果的影响

3.3.1 对产流时间和峰现时间的影响

方案2较方案1产流时间有一定程度的推迟,峰现时间却基本没有变化。这是由于2种汇水区划分方式不同,以雨水口为节点进行汇水区的划分更接近实际情况。与以检查井为节点的划分方式相比,不透水区域(道路、屋面)和透水区域(绿地)产生的地表径流通过雨水口进入雨水管线,延长了径流的传输路径。在相同的降雨条件下,以雨水口为节点的划分方式致使地表径流路径延长,必然会导致产流时间的推迟。

3.3.2 对峰值流量的影响

不同汇水区划分方式下模拟得到的峰值流量差异变化较大,在2.7%~38.8%之间,且峰值流量差异随降雨量的增大呈逐渐增大的趋势,见表3。采用降雨等级较高的降雨(如2013年8月17日降雨、2013年8月30日降雨)进行模拟时,2种方案模拟的降雨峰值流量差异较大;而采用降雨等级较低的降雨(如2013年4月25日降雨、2013年7月10日降雨)进行模拟时,2种方案的峰值流量差异较小。导致这种结果的原因是受到雨水口泄水能力的影响,单篦雨水口的最大泄水能力为 $0.020\text{m}^3/\text{s}$,限制了汇水区径流进入雨水管网系统中的流量。随着降雨量的增大,地表径流的产生量也逐渐增大。对于方案1,该汇水区的径流量均无限制地由检查井进

入到雨水管网系统中。对于方案2,当降雨量较小时,汇水区的径流量达不到雨水口的最大泄水能力,可以全部排放至下游管段,所以两者的峰值流量差异较小;而当降雨量较大时,汇水区的地表径流量超过了雨水口的最大泄水能力,形成地表积水。由于地表积水受到雨水口最大泄水能力的限制,从而导致方案2的峰值流量比方案1的低,因此两者的峰值流量差异较大。

表3 2种方案的峰值流量差异

降雨日期	降雨量/mm	峰值流量差异/%
2013-04-25	40.9	4.4
2013-07-10	28.0	2.7
2013-08-17	93.6	31.6
2013-08-30	139.9	38.8

3.3.3 对径流总量的影响

不同汇水区划分方式下出口的径流总量与降雨量呈负相关。采用不同降雨等级的降雨进行模拟时,2种方案的径流总量差异较小,在1.6%~6.9%之间,见表4。由表4可知,出口处径流总量的差异随降雨量的增大呈减小趋势。由于本文采用的下垫面组成和产汇流模型的选择均相同,故2种汇水区划分方式对出口处径流总量的影响较小。差异产生的原因可能是下垫面相同的均一化造成,产汇流过

表4 2种方案的径流总量差异

降雨日期	降雨量/mm	径流流量差异/%
2013-04-25	40.9	4.6
2013-07-10	28.0	6.9
2013-08-17	93.6	4.2
2013-08-30	139.9	1.6

程受下垫面组成影响,而雨水口划分方式的子汇水区个数多于检查井划分方式的子汇水区个数,尽管每个下垫面的组成相同,但是总的汇水区下垫面组成受到均一化的影响会产生微小的变化,因此出口处的径流总量会随之变化。

4 结论

a. 划分汇水区时应综合考虑研究区域的尺度和降雨特征,依据研究目标选择汇水区的划分方式。在中小等级降雨情况下,汇水区划分方式对峰值流量的影响较小,推荐采用以检查井为节点进行汇水区划分;在暴雨或特大暴雨的条件下,汇水区划分方式对峰值流量的影响较大,推荐采用以雨水口为节点进行汇水区划分。

b. 在中小尺度的研究区域(如小区、公园等)下,推荐采用以雨水口为节点进行汇水区划分,使研究区域的产汇流过程更接近实际情况;在大尺度的研究区域下,由于以雨水口为节点进行汇水区划分将会增加建模成本和工作量,故推荐采用以检查井为节点进行汇水区划分;除此之外,重点区域(如下凹立交桥区)可以将雨水口作为节点进行划分,其他区域采用以检查井为节点进行划分。

参考文献:

[1] 李帅杰,程晓陶,郑经伟,等.福州市雨洪模拟[J].水利水电科技进展,2011,31(5):14-19. (LI Shuaijie, CHENG Xiaotao, ZHENG Jingwei, et al. Numerical simulation of rainstorm flood in Fuzhou City[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(5): 14-19. (in Chinese))

[2] 张书函,潘安君,孟庆义,等.北京城市雨洪智能管理总体设计[J].水利水电科技进展,2010,30(1):68-71,90. (ZHANG Shuhan, PAN Anjun, MENG Qingyi, et al. Integrated design of intelligent management of urban storm water and flood in Beijing[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(1): 68-71, 90. (in Chinese))

[3] 周思斯,杜鹏飞,逢勇.城市暴雨管理模型应用研究进展[J].水利水电科技进展,2014,34(6):89-97. (ZHOU Sisi, DU Pengfei, PANG Yong. Progress on application of storm water management model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(6): 89-97. (in Chinese))

[4] ENGELAND K, GOTTSCALK L. Bayesian estimation of parameters in a region hydrological model[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2002, 6(5): 883-898.

[5] 赵冬泉,佟庆远,王浩正,等.子汇水区的划分对SWMM模拟结果的影响研究[J].环境保护,2008,4(8):56-59. (ZHAO Dongquan, TONG Qingyuan, WANG

Haozheng, et al. The effect of sub-catchment division on SWMM simulated results [J]. Environment Protection, 2008, 4(8): 56-59. (in Chinese))

[6] 许仕荣,周永潮,张伟.雨水口流域径流水质水量动态模拟[J].环境科学与技术,2006,29(11):39-45. (XU Shirong, ZHOU Yongchao, ZHANG Wei. A dynamic model for estimating catchment runoff into rainwater gutter[J]. Environmental Science and Technology, 2006, 29(11): 39-45. (in Chinese))

[7] 张书亮,干嘉彦,曾巧玲,等. GIS支持下的城市雨水出水口汇水区自动划分研究[J].水利学报,2007,38(3):325-329. (ZHANG Shuliang, GAN Jiayan, ZENG Qiaoling, et al. Automatic compartmentalization of urban rainwater catchments on water outlet supported by GIS technology[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(3): 325-329. (in Chinese))

[8] 毛云峰,王红武,高原,等.基于InfoWorks CS软件的上海市某排水系统运行现状评估[J].给水排水,2013,39(12):111-114. (MAO Yunfeng, WANG Hongwu, GAO Yuan, et al. The evaluation of drainage system operation situation in Shanghai city based on InfoWorks CS [J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 39(12): 111-114. (in Chinese))

[9] 刘志生,李晶,崔凯,等.基于ArcGIS与InfoWorks的城市排水系统模拟研究[J].中国给水排水,2013,29(21):144-147. (LIU Zhisheng, LI Jing, CUI Kai, et al. Simulation of urban drainage system based on ArcGIS and InfoWorks [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(21): 144-147. (in Chinese))

[10] 马海波,郑雄伟,魏婧. InfoWorks CS软件在金华市城区江南片洪涝模拟中的应用[J].水电能源科学,2013,31(10):50-52. (MA Haibo, ZHENG Xiongwei, WEI Jing. Application of InfoWorks CS to simulation of urban flood in Jiangnan Zone of Jinhua City[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(10): 50-52. (in Chinese))

[11] 杨洋,陶月赞.城市道路雨水口设计浅析[J].建筑设计管理,2010,27(2):22-23,67. (YANG Yang, TAO Yuezan. An analysis of urban road gully design [J]. Architectural Design Management, 2010, 27(2): 22-23, 67. (in Chinese))

[12] 杨秋侠,陈明辉,杜珊.场地雨水口的优化设计[J].四川建筑科学研究,2013,39(6):275-277,280. (YANG Qiuxia, CHEN Minghui, DU Shan. The optimization design of site gully[J]. Sichuan Building Science, 2013, 39(6): 275-277, 280. (in Chinese))

[13] 中国建筑标准设计研究所.给水排水标准图集:合订本(下)[M].北京:中国建筑标准设计研究所出版社,2002.

[14] 王书功.水文模型参数估计方法及参数估计不确定性研究[M].郑州:黄河水利出版社,2010:15-16.

(收稿日期:2014-02-20 编辑:骆超)