

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2019. 05. 003

固原海绵城市内涝削减效果数值模拟

黄绵松¹, 杨少雄², 齐文超², 侯精明², 张阳维²

(1. 北京首创股份有限公司, 北京 100028; 2. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要:以固原海绵城市建设核心示范区为研究区,采用考虑水文过程的二维水动力城市雨洪模型,通过模拟典型设计降雨过程下的海绵城市建设前后研究区的内涝积水情况,对固原海绵城市内涝削减效果进行分析。结果显示:在 2 年一遇降雨条件下,研究区内 9 个重点内涝点得到明显改善,积水量峰值降低 59.54%,积水面积峰值降低 62.50%;当降雨重现期为 30 年一遇时,研究区内重点内涝点内涝有所缓解,内涝风险等级降低,积水量峰值降低 60.37%,积水面积峰值降低 69.88%。

关键词:城市内涝; 海绵城市; 城市雨洪模型; 固原

中图分类号:TV121.5⁺3; TU998.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933 (2019)05 - 0013 - 06

Numerical simulation of urban waterlogging reduction effect in Guyuan sponge city // HUANG Miansong¹, YANG Shaoxiong², QI Wenchao², HOU Jingming², ZHANG Yangwei² (1. *Beijing Capital Co., Ltd., Beijing 100028, China*; 2. *School of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*)

Abstract: Taking the core demonstration area of Guyuan sponge city as the research area, a two-dimensional hydrodynamic urban rainfall flood model considering hydrological process was used to analyze the waterlogging reduction effect of Guyuan sponge city by simulating the waterlogging situation of the study area before and after the construction of the sponge city under the typical design rainfall process. The results show that under the condition with a recurrence period of 2 years, 9 key waterlogging points in the study area have been significantly improved, the water accumulating volume has been reduced by 59.54%, and the peak value of accumulated water area has been reduced by 62.50%. When the recurrence period of rainfall is 30 years, the waterlogging of the key waterlogging points in the study area will be alleviated, the risk level of waterlogging will be reduced, the water accumulating volume will be reduced by 60.37%, and the peak value of accumulated water area will be reduced by 69.88%.

Key words: urban waterlogging; sponge city; urban rainfall flood model; Guyuan

为了应对近年来日益严重的内涝问题^[1-2],我国在借鉴国外先进理念的基础上^[3-5],积极开展海绵城市试点建设。由于海绵城市建设对城市内涝缓解效果无法预知,为了科学合理地进行规划管理,需采用数值模拟的方法进行海绵城市建设效果评估^[6]。国内外学者针对城市内涝数值模拟做了大量的研究,如 Pedrozo-Acuna 等^[7]对墨西哥塔巴斯科州进行了城市洪涝的数值模拟;Mignot 等^[8]将城市计算区域的道路概化为二维路网,对道路上的洪涝过程进行了模拟;常晓栋等^[9]基于 SWMM 模型对北京清河流域进行了城市内涝模拟,得出了合理的低影响开发(LID)组合措施可有效削弱研究区域内涝的结

论;黄国如等^[10]基于 GIS 和 SWMM 模型进行了内涝模拟分析,结果显示随着设计暴雨重现期增加,内涝积水水深和积水范围不断增大;陈莎等^[11]基于 SWMM 模型对不同重现期下 LID 措施对城市雨水径流和污染物的控制效果进行了模拟,得到了 LID 控制措施对城市雨水径流量、污染物总负荷以及径流峰值均有明显削减作用,对径流峰现时间有延迟作用的结论;麻蓉等^[12]利用 MIKE 模型模拟了北京市某小区的内涝积水过程,得出了增加 LID 措施和加大下垫面下渗率可以减少积水的结论。利用现有模型进行内涝模拟及评价对于海绵城市建设具有重要的指导意义,但模拟精度与效率依然可以进一步

基金项目:2017 年宁夏建设科技计划(2017-HMKT-01);陕西省水利科技项目(2017slkj-14)

作者简介:黄绵松(1984—),男,高级工程师,博士,主要从事堆石混凝土应用研究。E-mail:huangmiansong@capitalwater.cn

提高。如引入二维水动力模型可以解决一维概化水文模型无法提供模拟区域任意点的水力要素值,在模拟结果分析时,需通过节点流量反算积水面积的问题^[13-14]。与此同时,引入 GPU 加速技术可解决输入高精度地形造成的计算量大、计算效率降低^[15-16],且易计算发散^[17]的问题。

本文以宁夏固原海绵城市建设核心示范区为研究区,采用基于 GPU 加速技术的高效高精度的二维水动力城市雨洪模型^[18]分析海绵城市建设对核心示范区的内涝缓解效果,以期为固原海绵城市建设提供参考。

1 研究区概况

固原市地处黄土高原中西部,宁夏回族自治区南部。固原海绵城市建设核心示范区包含西南新区及部分老城区,核心示范区面积约为 23 km²,其位置如图 1 所示。研究区位于黄土高原半干旱区,属典型大陆性气候,干旱少雨,蒸发强烈,水资源短缺,多年平均降水量 466 mm,平均蒸发量 1 471 mm,降水年内分配不均,降雨主要集中于 7、8、9 月,易形成洪涝灾害。



图 1 研究区示意图

2 数学模型及求解方法

模型控制方程为考虑水文过程的二维水动力浅水方程^[19],守恒格式可用以下矢量形式来表示:

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

其中

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} h \\ q_x \\ q_y \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} uh \\ uq_x + gh^2/2 \\ uq_y \end{bmatrix}, \quad \mathbf{g} = \begin{bmatrix} vh \\ vq_x \\ vq_y + gh^2/2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - C_f u \sqrt{u^2 + v^2} \\ -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - C_f v \sqrt{u^2 + v^2} \end{bmatrix}$$

式中: t 为时间; h 为水深; q_x 、 q_y 分别为 x 、 y 方向上的单宽流量; u 、 v 分别为 x 、 y 方为向上的流速; $\mathbf{f}$ 、 $\mathbf{g}$ 分

别为 x 、 y 方向上的通量矢量; $\mathbf{S}$ 为源项矢量; i 为降雨强度; z_b 为底面高程; C_f 为谢才系数, $C_f = gn^2/h^{1/3}$, 其中 n 为曼宁系数, g 为重力加速度。

模型采用 Godunov 格式有限体积法离散二维浅水方程,采用二阶 MUSCL 方法对变量值进行空间插值来提高计算精度。在控制单元内,界面上的物质与动量通量通过 HLLC 近似黎曼求解器求解^[20]。通过二步龙格-库塔方法来进行时间推进。模型应用水量平衡原理计算产流,当降水量满足地表截流、填洼且大于下渗量时,地表开始积水并形成径流。在计算产流量时,主要考虑下渗损失。将管网排水能力等效为下渗值代入模型计算,即按照实际管网排水设计标准,将管网最大排水能力作为等效下渗值代入模型。等效下渗的水量即为管网的外排水量^[21-22]。

3 模型构建

3.1 模型设置

3.1.1 研究区地形数据

研究区地形高程呈现西高东低、南高北低的特点;模型采用分辨率为 2 m 高精度 DEM(图 2)。

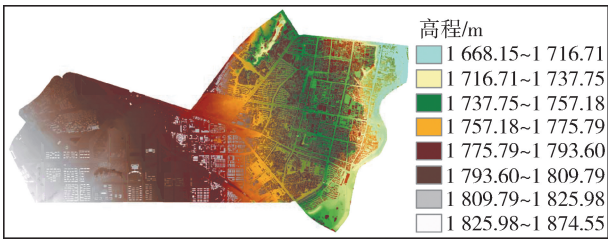


图 2 研究区地形

3.1.2 设计降雨数据

根据文献[23],本文设计降雨数据采用以下暴雨强度公式计算:

$$q_i = \frac{5.221 \ 1 + 5.935 \ 7 \lg T}{(t + 7.975 \ 4)^{0.768 \ 8}} \quad (2)$$

式中: q_i 为设计暴雨强度, L/(s·hm²); T 为重现期, a; t 为地面集水时间, min。采用芝加哥雨型生成器拟合得到不同降雨重现期 2 h 历时的降雨过程曲线如图 3 所示。

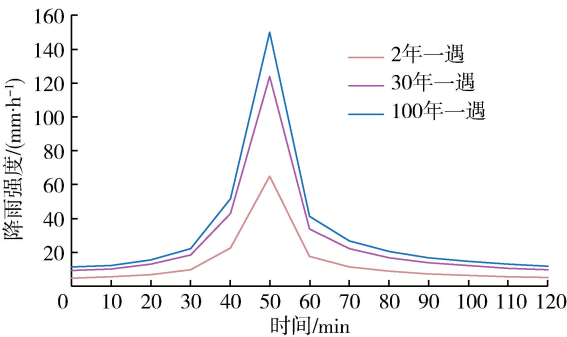


图 3 不同重现期设计降雨过程

3.1.3 研究区下垫面资料

研究区土地利用类型根据下渗率划分为道路、草地、水系、林地、居住用地及办公用地 6 类。将雨水花园、下沉式绿地和植草沟 3 种海绵措施均认为是草地。以海绵城市建设前后对应土地利用类型的不同来反映海绵措施对城市水文水动力过程的影响。根据固原市海绵城市专项规划,得到现状建设土地利用和海绵城市规划土地利用如图 4、图 5 所示。海绵城市建设前草地面积占比为 2.63%,道路和裸地占比为 18.5%,建设后两者占比分别为 7.44% 和 15.03%。



图 4 现状建设土地利用



图 5 海绵城市规划土地利用

不同土地利用类型的下垫面下渗率采用双环下渗仪测量,摩阻曼宁值依据《固原市城市总体规划(2011—2030 年)》提供的资料及相关文献^[24]获取,具体参数值如表 1 所示。此外,在海绵城市建成后,管网排水能力由 0.8 年一遇提升为 2 年一遇,等效下渗由 15.65 mm/h 提升为 22.59 mm/h。

表 1 下垫面下渗率及摩阻曼宁值

土地利用类型	下渗率/(mm·h ⁻¹)	摩阻曼宁值
道 路	10.47	0.015
草 地	76.41	0.060
水 系	0	0.015
林 地	55.79	0.200
居住用地	10.47	0.015
办公用地	10.47	0.014

3.2 模型验证

采用 2017 年 7 月 27 日降雨来验证。本场降雨为单场次降雨,降水量为 21.92 mm,降雨历时为 2 h,利用芝加哥雨型结合式(2)得到本次降雨的过程,输入模型进行模拟,并与实际踏勘结果相对比,结果如图 6(图中红色圆圈表示内涝点位置,数字为内涝

点编号)及表 2 所示。

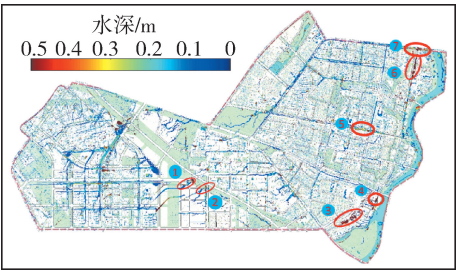


图 6 模拟内涝点位置示意图

表 2 模拟内涝点与实际内涝点对比

内涝点位置	模拟内涝点	实地踏勘内涝点
1. 上海路-九龙路交叉口		
2. 上海路-中山南路交叉口		
3. 宋家巷		
4. 南河滩市场		
5. 义乌商贸城		
6. 滨河小区		
7. 六盘山东路		

注:图例同图 6。

由图 6 与表 2 可看出模型模拟内涝点位置与实地踏勘结果基本一致,但是本场降雨缺乏实测积水深度和面积的量化资料,无法进行定量化验证。但侯精明等^[21]利用该二维水动力城市雨洪模型对沔西新城 2016 年 8 月 25 日实测降雨进行了模拟,结果显示,模型对城市内涝的位置、积水深度和积水面积等的模拟结果与实际情况基本一致,表明本文所采用的二维水动力城市雨洪模型具有较好的实用性,适用于城市内涝的实际情况的模拟及计算。

4 模拟结果分析

采用所建模型,输入实测降雨与下垫面资料,通过对比研究区在不同重现期设计降雨情境下,海绵城市建设前后的内涝积水状况来研究固原海绵城市建设的内涝削减效果。模型计算选用开放边界,四

周无入流,计算过程库朗数取 0.5,模拟降雨开始至 4 h 的积水过程。输入地形、土地利用及其对应的下渗率和摩阻曼宁值,对 2 年、30 年和 100 年一遇重现期降雨条件下海绵城市建设对城市内涝的调控效果进行数值模拟。

4.1 研究区内涝积水深度

总模拟时长 4 h,其中降雨时长为 2 h,得到不同重现期降雨条件下研究区海绵城市建设前后积水深度(忽略 0.03 m 以下水深^[25-26])的对比如图 7~9(图中方框内为内涝点局部放大)所示。

对比图 7~9 可看出,在不同重现期降雨条件下,研究区内涝均有改善,但随着重现期的增大,改善效果逐渐降低。在 2 年一遇和 30 年一遇重现期的降雨条件下,海绵城市建设后相较于建设前,研究区域内 9 个重点内涝点得到明显改善,在降雨重现期为 100 年一遇时,9 个现状重点内涝点尚存 5 个,但这 5 个内涝点积水面积和积水量均有所减小。

图 10 为本文模拟得到的建业街与九龙路交叉口严重内涝点在不同重现期降雨条件下,海绵城市

建设前后积涝情况的对比。在同一重现期下,海绵城市规划工况相较于现状建设工况,内涝积水面积减少,积水深度降低,内涝改善效果显著;在不同重现期降雨条件下,由于重现期的增大,LID 措施含水量逐渐趋于饱和,海绵城市建设对城市内涝的削减程度逐渐降低,但仍可起到一定的改善效果。

4.2 内涝积水总面积及部分重点内涝点积水量

根据城市暴雨内涝风险等级,将研究区积水程度分为 4 级^[27]:路面积水深度在 3 cm 以下为 I 级(无内涝),3~10 cm 之间为 II 级(轻度内涝),10~25 cm 之间为 III 级(中度内涝),超过 25 cm 为 IV 级(严重内涝)。III、IV 级内涝积水深度较大,严重影响城市居民生活。着重对 III、IV 级内涝进行对比分析,图 11 和图 12 为不同重现期降雨条件下研究区内 III、IV 级内涝积水总面积和严重内涝点的平均积水量模拟结果。

由图 11 和图 12 可知,在 2 年一遇降雨条件下,积水面积峰值由 1.12 km² 减少至 0.42 km²,降低了 62.50%,区域内严重内涝点平均积水量降低 4 187 m³,

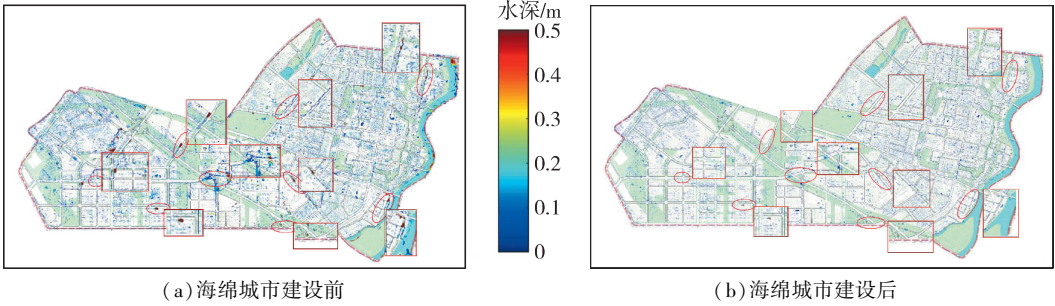


图 7 2 年一遇降雨条件下积水深度对比

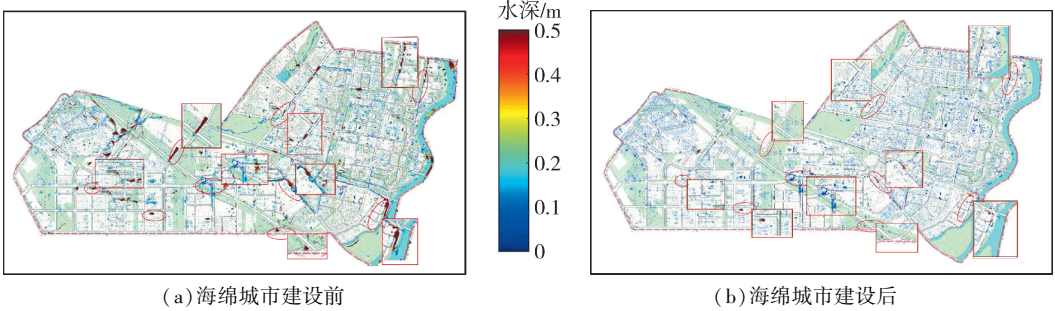


图 8 30 年一遇降雨条件下积水深度对比

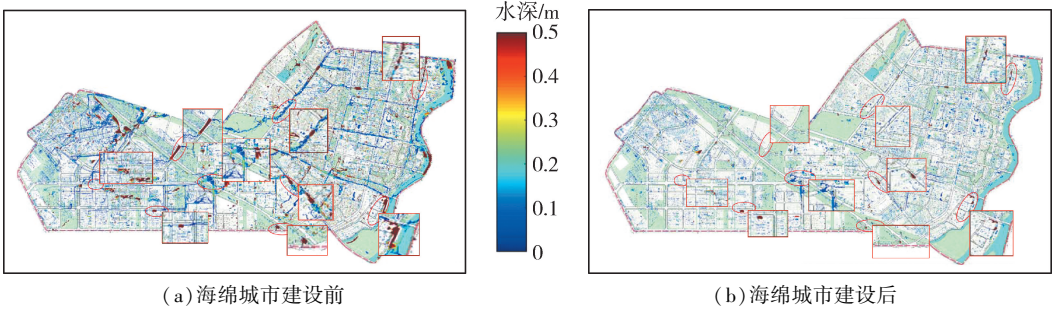


图 9 100 年一遇降雨条件下积水深度对比

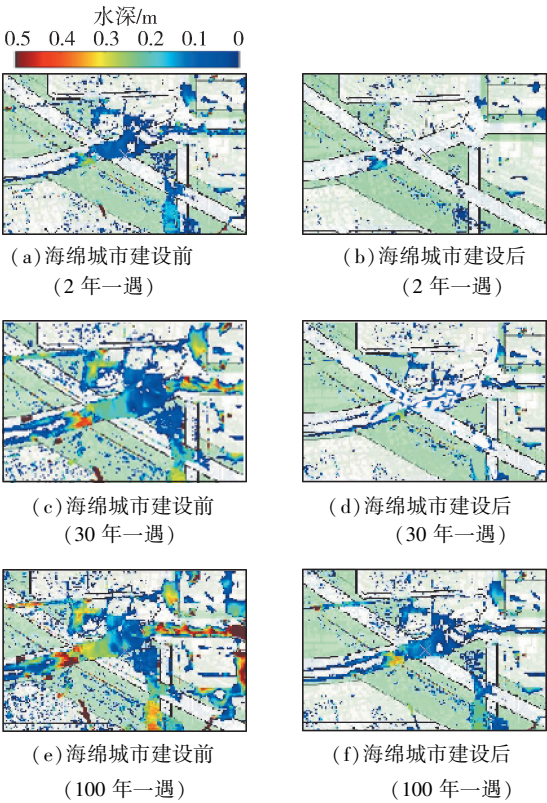


图 10 建业街与九龙路交叉口内涝点对比

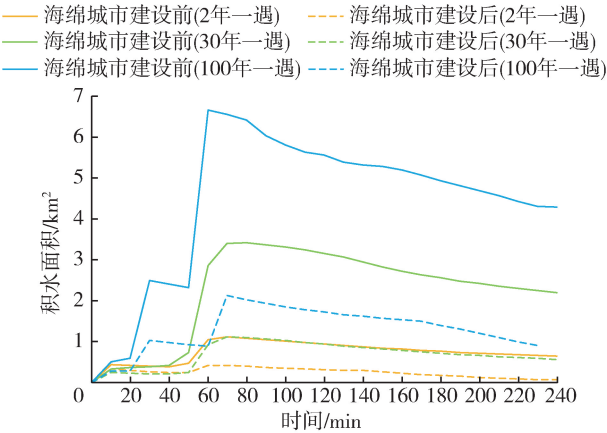


图 11 不同重现期降雨条件下Ⅲ、Ⅳ级内涝积水总面积

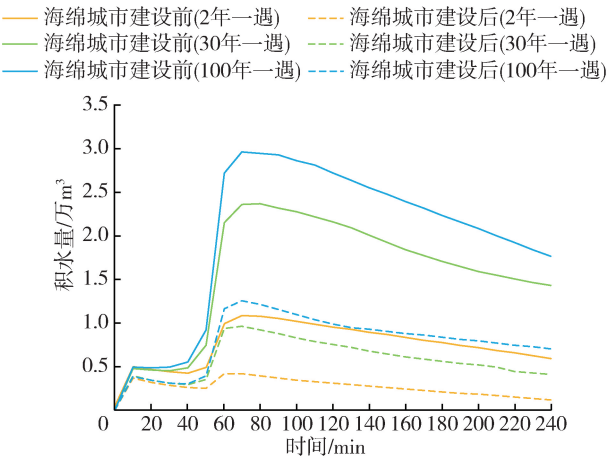


图 12 不同重现期降雨条件下严重内涝点平均积水量

峰值由 10365 m^3 降至 4194 m^3 ,降低了 59.54%。在 30 年一遇降雨条件下,积水面积峰值由 3.42 km^2 减少至 1.03 km^2 ,降低了 69.88%,区域内严重内涝点平均积水量降低 10242 m^3 ,峰值由 23567 m^3 降至 9339 m^3 ,降低了 60.37%。在 100 年一遇降雨条件下,积水面积峰值由 6.88 km^2 减少至 1.23 km^2 ,降低了 81.12%,区域内严重内涝点平均积水量降低 11469 m^3 ,峰值由 29560 m^3 降至 12519 m^3 ,降低了 57.64%。由于海绵城市建设使下垫面下渗率增大,更多的地表径流更快地渗入地下,使地表积水水深降低,积水量减少,积水面积缩小。

5 结 论

a. 考虑水文过程的二维水动力城市雨洪模型适用于城市内涝的数值模拟,模拟精度较高。

b. 海绵城市建设前后对城市内涝有明显的控制效果。在海绵城市建设后,不同重现期降雨条件下研究区内涝情况均明显改善,部分内涝点消失。如在 100 年一遇降雨条件下,现状 9 个严重内涝点减为 5 个;在 2 年一遇和 30 年一遇重现期降雨条件下,9 个严重内涝点内涝明显改善,内涝风险等级降低。

c. 在同一重现期降雨条件下海绵城市建设前后积水面积峰值均有明显减少,整个内涝过程的积水量及峰值均降低。

参考文献:

[1] 任希岩,谢映霞,朱思诚,等. 在城市发展转型中重构:关于城市内涝防治问题的战略思考[J]. 城市发展研究,2012,19(6):71-77. (REN Xiyang, XIE Yingxia, ZHU Sicheng, et al. The research of how to face and solve the city waterlogging in the urban development and transformation[J]. Urban Studies, 2012, 19(6): 71-77. (in Chinese))

[2] 刘昌明,张永勇,王中根,等. 维护良性水循环的城镇化 LID 模式:海绵城市规划方法与技术初步探讨[J]. 自然资源学报,2016,31(5):719-731. (LIU Changming, ZHANG Yongyong, WANG Zhonggen, et al. The LID pattern for maintaining virtuous water cycle in urbanized area: a preliminary study of planning and techniques for sponge city[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(5): 719-731 (in Chinese))

[3] 贾绍凤. 我国城市雨洪管理近期应以防涝达标为重点[J]. 水资源保护,2017,33(2):13-15. (JIA Shaofeng. China should prioritize waterlogging prevention for recent urban storm water management [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(2): 13-15 (in Chinese))

[4] 夏军,石卫,王强,等. 海绵城市建设中若干水文学问题的研讨[J]. 水资源保护,2017,33(1):1-8. (XIA Jun,

- SHI Wei, WANG Qiang, et al. Discussion of several hydrological issues regarding sponge city construction[J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (1): 1-8 (in Chinese))
- [5] 廖朝轩,高爱国,黄恩浩. 国外雨水管理对我国海绵城市建设的启示[J]. 水资源保护,2016,32(1):42-45. (LIAO Chaohsien, GAO Aiguo, HUANG Enhao. Enlightenment of rainwater management in foreign countries to sponge city construction in China[J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (1): 42-45. (in Chinese))
- [6] 武永新,张立洪. 基于低影响开发的旧城区内涝数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(1):114-119. (WU Yongxin, ZHANG Lihong. Study on urban waterlogging numerical simulation base on low impact development[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2017,28(1):114-119. (in Chinese))
- [7] PEDROZO-ACUNA A, MORENO G, MEJIA-ESTRADA P, et al. Integrated approach to determine highway flooding and critical points of drainage [J]. Transportation Research Part D: Transport & Environment, 2017, 50: 182-191.
- [8] MIGNOT E, PAQUIER A, HAIDER S. Modeling floods in a dense urban area using 2D shallow water equations[J]. Journal of Hydrology, 2006, 327: 186-199.
- [9] 常晓栋,徐宗学,赵刚,等. 基于 SWMM 模型的城市雨洪模拟与 LID 效果评价:以北京市清河流域为例[J]. 水力发电学报, 2016, 35 (11): 84-93. (CHANG Xiaodong, XU Zongxue, ZHAO Gang, et al. Urban rainfall-runoff simulations and assessment of low impact development facilities using SWMM model: a case study of Qinghe Catchment in Beijing [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(11):84-93. (in Chinese))
- [10] 黄国如,黄维,张灵敏,等. 基于 GIS 和 SWMM 模型的城市暴雨积水模拟[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(4):1-6. (HUANG Guoru, HUANG Wei, ZHANG Lingmin, et al. Simulation of rainstorm waterlogging in urban areas based on GIS and SWMM model [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015, 26(4):1-6. (in Chinese))
- [11] 陈莎,陈晓宏. 城市雨水径流污染及 LID 控制效果模拟 [J]. 水资源保护, 2018, 34 (5): 13-19. (CHEN Sha, CHEN Xiaohong. Simulation of urban rainfall runoff pollution and control effect by low impact development [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(5):13-19. (in Chinese))
- [12] 麻蓉,白涛,黄强,等. MIKE 21 模型及其在城市内涝模拟中的应用[J]. 自然灾害学报,2017,26(4):172-179. (MA Rong, BAI Tao, HUANG Qiang, et al. MIKE21 model and its application on urban waterlogging simulation [J]. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(4):172-179. (in Chinese))
- [13] 宋晓猛,张建云,王国庆,等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战: II. 城市雨洪模拟与管理[J]. 水科学进展, 2014, 25 (5): 752-764. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: II. urban stormwater modeling and management [J]. Advances in Water Science, 2014, 25 (5): 752-764. (in Chinese))
- [14] 杨弋,吴升. 城市暴雨积水模拟方法分析及研究[J]. 测绘信息与工程, 2009, 34 (1): 35-37. (YANG Yi, WU Sheng. Analysis and study on urban rainstorm seep simulation [J]. Journal of Geomatics, 2009, 34(1):35-37. (in Chinese))
- [15] LIANG Q, SMITH L S. A High-performance integrated hydrodynamic modelling system for urban flood simulations [J]. Journal of Hydroinformatics, 2015, 17(4):518-533.
- [16] CHEN A S, EVANS B, DJORDJEVIC S, et al. A coarse-grid approach to representing building blockage effects in 2D urban flood modelling [J]. Journal of Hydrology, 2012, 426/427(6):1-16.
- [17] HOU J, LIANG Q, SIMONS F, et al. A stable 2D unstructured shallow flow model for simulations of wetting and drying over rough terrains [J]. Computers & Fluids, 2013, 82(17):132-147.
- [18] 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. (in Chinese))
- [19] HOU J, ZGEN I. A model for overland flow and associated processes within the hydroinformatics modelling system [J]. Journal of Hydroinformatics, 2014, 16(2):375-391.
- [20] HOU J, LIANG Q, SIMONS F, et al. A stable 2D unstructured shallow flow model for simulations of wetting and drying over rough terrains [J]. Computers & Fluids, 2013, 82(17):132-147.
- [21] 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. (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 (3): 40-49. (in Chinese))
- [22] 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. (in Chinese))
- [23] 邵尧明. 中国城市新一代暴雨强度公式 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

(下转第 39 页)

in China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2015,112 (4): 1031-1035.

[8] 操信春,邵光成,王小军,等. 中国农业广义水资源利用系数及时空格局分析[J]. 水科学进展,2017,28(1): 14-21. (CAO Xinchun, SHAO Guangcheng, WANG Xiaojun,et al. Generalized water efficiency and strategic implications for food security and water management; a case study of grain production in China[J]. Advances in Water Science,2017,28(1):14-21. (in Chinese))

[9] LI Bing, YANG Guishan, WAN Rongrong, et al. Dynamic water quality evaluation based on fuzzy matter-element model and functional data analysis;a case study in Poyang Lake[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017,24(23):19138-19148.

[10] MLADENOVIC-RANISAVLJEVIC I I, ŽERAJIC S A. Comparison of different models of water quality index in the assessment of surface water quality [J]. International Journal of Environmental Science and Technology,2018, 15(3):665-674.

[11] SCHOUMANS O F, CHARDON W J, BECHMANN M E, et al. Mitigation options to reduce phosphorus losses from the agricultural sector and improve surface water quality;a review[J]. Science of the Total Environment,2014,468: 1255-1266.

[12] SENER S, SENER E, DAVRAZ A. Evaluation of water quality using water quality index (WQI) method and GIS in Aksu River (SW-Turkey) [J]. Science of the Total Environment,2017,584:131-144.

[13] HOEKSTRA A Y, HUNG P Q. Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade;value of water research report series No. 11[R]. Delft:UNESCO-IHE,2002.

[14] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M M, et al. The water footprint assessment manual; setting the

global standard[M]. London:Earthscan,2011.

[15] HOEKSTRA A Y, MEKONNEN M M, CHAPAGAIN A K, et al. Global monthly water scarcity:blue water footprints versus blue water availability[J]. PLoS One,2012,7(2): e32688.

[16] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. The green,blue and grey water footprint of farm animals and animal products: value of water research report series No. 48 [R]. Delft: UNESCO-IHE,2010.

[17] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y. Virtual water flows between nations in relation to trade in livestock and livestock products; value of water research report series No. 13[R]. Delft:UNESCO-IHE,2003.

[18] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y. Water footprints of nations;value of water research report series No. 16[R]. Delft:UNESCO-IHE,2004.

[19] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y, SAVENIJE H H G. Water saving through international trade of agricultural products[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2006, 10(3):455-468.

[20] ABABAEI B, ETEDALI H R. Water footprint assessment of main cereals in Iran [J]. Agricultural Water Management,2017,179:401-411.

[21] ZENG Z, LIU J G, SAVENIJE H H. A simple approach to assess water scarcity integrating water quantity and quality [J]. Ecological indicators,2013,34:441-449.

[22] 陈玉民,郭国双,王广兴,等. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京:水利电力出版社,1995.

[23] 段爱旺,孙景生,刘钰,等. 北方地区主要农作物灌溉用水定额[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2004.

[24] BULSINK F, HOEKSTRA A Y, BOOIJ M J. The water footprint of Indonesian provinces related to the consumption of crop products [J]. Hydrology and Earth System Sciences,2010,14:119-128.

(收稿日期:2018-09-12 编辑:熊水斌)

+++++

(上接第 18 页)

[24] 郭雨华,赵廷宁,孙保平,等. 草地坡面水动力学特性及其阻延地表径流机制研究[J]. 水土保持研究,2006 (4): 264-267. (GUO Yuhua, ZHAO Tingning, SUN Baoping, et al. Study on the dynamic characteristics of overland flow and resistance to overland flow of grass slope [J]. Research of Soil and Water Conservation 2006, 13 (4):264-267. (in Chinese))

[25] 戴晶晶,刘增贤,陆沈钧. 基于数值模拟的城市内涝风险评估研究:以苏州市城市中心区为例[J]. 中国水利, 2015 (13): 20-23. (DAI Jingjing, LIU Zenxian, LU Shenjun. Risk-assessment of city waterlogging based on numerical simulation;case study on urban center of Suzhou [J]. China Water Resources, 2015 (13) : 20-23. (in Chinese))

[26] 侯精明,郭凯华,王志力,等. 设计暴雨雨型对城市内涝影响数值模拟[J]. 水科学进 展,2017,28(6):820-828. (HOU Jingming, GUO Kaihua, WANG Zhili, et al. Numerical simulation of design storm pattern effects on urban flood inundation[J]. Advances in Water Science, 2017,28(6):820-828. (in Chinese))

[27] 卢超. 基于综合风险指数的城市内涝风险评价[C]// 中国水利学会. 科技创新与水利改革:中国水利学会 2014 学术年会论文集(上册). 北京:中国水利学会, 2014:128-133.

(收稿日期:2018-12-02 编辑:熊水斌)

• 39 •