

1D/1D 及 1D/2D 耦合水动力模型构建方法研究

周倩倩, 苏炯恒, 梅胜, 许明华

(广东工业大学 土木与交通工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 为实现高速率、精细化的洪涝模拟,以丹麦 R 市 A 区的排水系统为研究对象,构建和比较基于 GIS 空域建模技术及 SWMM 水动力耦合的 1D/1D(双一维)排水模型与基于 MIKE URBAN 的 1D/2D(一维管流和二维洪涝)耦合排水模型,对研究区的排水系统进行暴雨洪涝模拟及评估比较。研究两种模型的建模过程、模拟精度及计算效率,描述两种模型的优劣性和适用条件。结果表明:1D/1D 排水模型可实现地表淹没的拓展分析,同时确保较高的稳定性和运算速度,且在较低重现期下具有较高的计算精度,适用于大尺度、应急管理且模拟精度要求相对较低的情景;1D/2D 排水模型能实现地表积水的双向流动计算,具有良好的精细度,但其信息处理和计算时间较长,适用于计算环境和模拟精度要求较高的情景。研究结果将为不同情景、不同尺度的洪涝模拟提供科学依据。

关键词: 洪涝模拟; SWMM; 双一维模型; MIKE URBAN; 二维模型; 水动力模型

中图分类号: TU992

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)05-0021-05

Research on coupled 1D/1D and 1D/2D hydrodynamic model construction method

ZHOU Qianqian, SU Jiongheng, MEI Sheng, XU Minghua

(School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In order to achieve a high-speed and precise flood simulation, this study took the drainage system of A district in R city of Denmark as research object to construct and compare dual one-dimensional (1D/1D) drainage model by combining GIS-based spatial modeling technology and SWMM-based hydrodynamic coupling technology, and coupled one-dimensional pipe model and two-dimensional flood (1D/2D) drainage model based on MIKE URBAN. Then the flood simulation, evaluation and comparison on the drainage system of the study area were conducted. The modeling process, simulation accuracy and computational efficiency were studied to describe the characteristic and applicable conditions of the above two models. The results showed that the 1D/1D drainage model can realize the extended analysis of surface inundation with high stability and high calculation speed, and achieve high accuracy at low reappear-ance period, which is suitable for the circumstances of large-scale, emergency management and relatively lower simulation accuracy. The 1D/2D drainage model can realize two-way flow calculation of surface ac-cumulated water with good accuracy, but the information processing and calculation time are long, which is suitable for the circumstances of relatively better computing environment and higher simulation pre-cision. The research results will provide a scientific basis for flood simulation of different scenarios and scales.

Key words: flood simulation; SWMM (storm water management model); dual one-dimensional model; MIKE URBAN; two-dimensional model; hydrodynamic model

1 研究背景

城市内涝一直是困扰人民生活、制约社会发展的

重要问题。近年来,在气候化及城市化的双重影响下,极端暴雨天气愈演愈烈。暴雨洪涝模拟是城市排水设计及防涝减灾的重要支持,可提高决策者对城市

收稿日期:2019-04-09; 修回日期:2019-06-08

基金项目:国家自然科学基金青年项目(51809049);广州市科技计划项目(201804010406);广东省公益研究与能力建设基金项目(2017A020219003)

作者简介:周倩倩(1984-),女,浙江乐清人,博士,副教授,研究方向为市政排水。

洪涝影响的预测、分析和调控能力^[1-3]。随着计算机技术的不断发展,多种雨洪模拟方法相继被提出^[4-10]。其中,一维水动力模型主要以美国国家环境保护局开发的 SWMM(暴雨洪水管理模型)为代表,其运算效率高,稳定性强,但无法实现地表洪涝的淹没计算,导致预测结果不直观、不准确^[11]。二维水动力模型主要以丹麦水资源及水环境研究所(DHI)研发的 MIKE URBAN 和英国 Wallingford 公司研发的 InfoWorks ICM 为代表,其模拟精细化程度高,在过程描述上具有显著优势,但建模过程相对复杂,计算效率偏低^[12]。针对这两种洪涝模拟方法的优缺点,本文提出双一维(1D/1D)耦合排水模型的构建方法,并通过与一维管流和二维洪涝(1D/2D)耦合排水模型进行比较和分析,研究其在构建过程、输入要求、模拟精度及计算效率的特点及适用条件,为现阶段城市洪涝模型的研究及应用提供科学依据^[13-14]。

2 资料和研究方法

2.1 研究区域概况

为高效和精准测试模型质量,选取数据质量较优、信息较全的区域进行研究。研究区域位于丹麦 R 市 A 区,以居住区为主,兼有道路、绿地等。DEM(数字高程模型)通过激光雷达技术获取,栅格分辨率为 $1.6\text{ m} \times 1.6\text{ m}$,高程精度为 0.01 m 。该区域的地面高程在 $3.47 \sim 17.47\text{ m}$ 之间,地势东北高西南低,局部凹凸不平,年均降雨量在 750 mm 左右。近几年来,该地区发生较多的极端暴雨事件,洪涝灾害较为严重。为满足当地排水防涝规划要求,需对不同降雨情形下排水管网及地表的淹没状况进行分析和评估^[15-16]。

2.2 研究方法

首先,借助 GIS 空域分析技术^[17-18],获取地表空域特征信息、水网属性及管网拓扑数据,用于精细化描述地表空域结构及地下管网空间特征;其次,依据 GIS 数据,分别构建 1D/1D 及 1D/2D 耦合排水模型;最后,对比建模过程中的输入要求,分析两种模型的二维淹没显示结果,计算其模拟偏差,描述两种模型的计算效率和模拟精度,归纳总结其各自适用范围。

2.2.1 GIS 空域分析模型 基于 GIS 空间分析和拓扑数据处理,获取城市下垫面信息及地下管网空间特征,具体流程见图 1,包括空域结构、水文属性和地下管网拓扑数据的提取。具体方法如下:采用 GIS 伪洼地填充、栅格计算、叠置分析、空间聚合等工具提取空域特征信息(深度、面积和体积);采用水文分析工具提取水网系统结构(汇流通路)和流

域分界线(分水岭);通过 GIS 统计和提取技术获取水文属性(不透性及曼宁系数)和管网拓扑数据(节点和管道的空间特征信息),构建 GIS 数据库,为地上地下精细化建模提供支持。

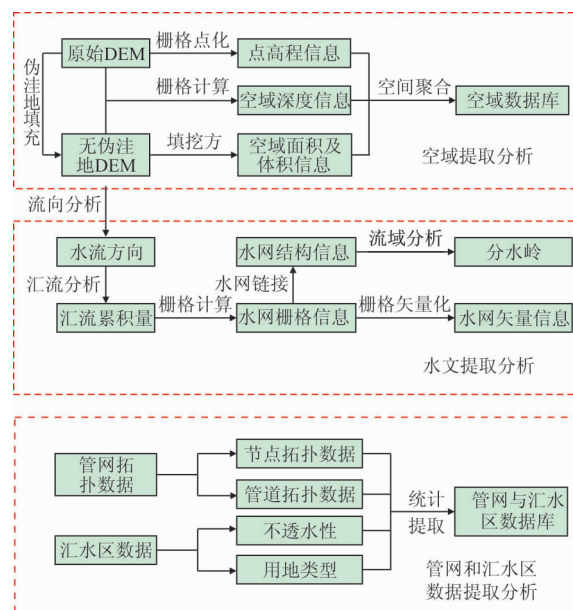


图 1 GIS 空间分析模型的构建流程

2.2.2 1D/1D 耦合排水模型 1D/1D 耦合排水模型是基于双排水概念,将地下一维管流模型与地表一维排水模型进行耦合而得的排水模型。在地下一维管流模型的基础上,选取一维计算元件,平行构建地表一维排水模型(图 2(a)),导入其地理空间属性(高程、位置、连接方式、长度)及水动力属性(蓄水变化曲线、管渠水力属性、出流控制元件属性)。通过构建耦合模块,以共用节点的方式进行连接设置,编译水动力耦合运算法则,完成 1D/1D 耦合排水模型的构建。整个模型基于对一维圣维南方程组进行求解,获取地表不同节点和蓄水单元的溢流数据(溢流总量、溢流时间、溢流峰值)。

2.2.3 1D/2D 耦合排水模型 1D/2D 耦合排水模型是将地下一维管流模型与地表二维洪涝模型进行耦合而得的排水模型。该模型在地表铺设二维计算网格,建立网格与节点、网格与网格之间的水量传输和交互关系。通过构建地下管网节点与地面二维计算网格的耦合区域,设置最大流量、出口面积、孔口系数、出流方程(孔口方程、堰流方程和幂函数)等耦合参数,实现地上和地下水动力耦合计算,完成 1D/2D 耦合排水模型的构建(图 2(b))。整个模型对基于一维管流和二维圣维南方程组进行求解,获取地表的二维淹没数据(淹没深度及淹没范围)。

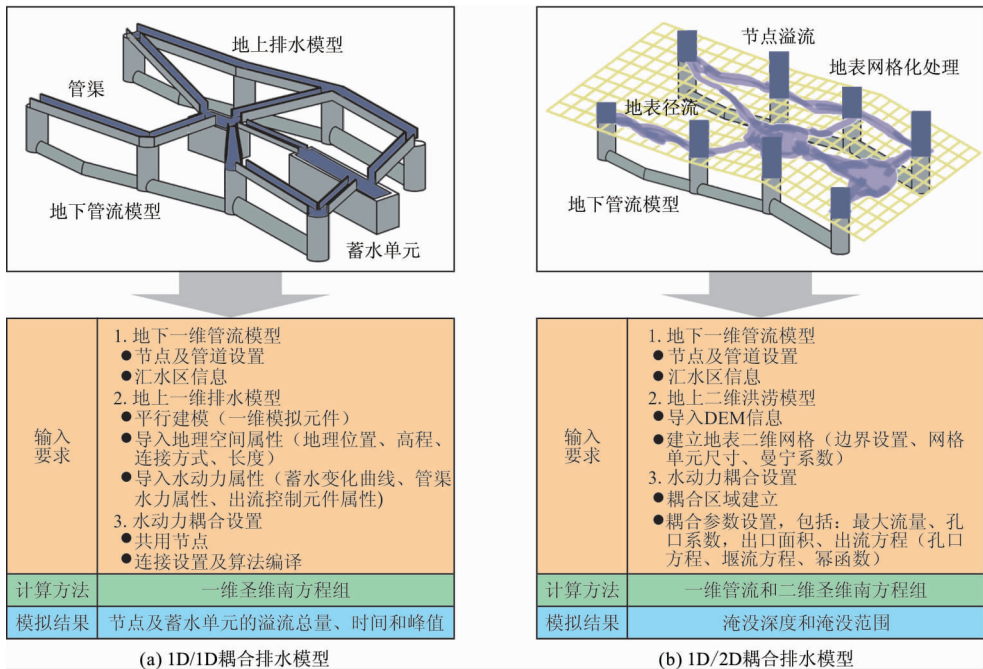


图2 1D/1D 及 1D/2D 耦合排水模型示意图

2.3 模型构建

2.3.1 GIS 空域分析模型的构建 利用 GIS 捕获城市下垫面及管网的空间特征及属性,研究区洼地提取结果及地下一维管流模型见图 3。将提取的洼地(图 3(a))进行分层和计算,获取每个洼地在不同深度下的面积和体积,绘制 DAV 曲线(空域深度-面积-体积几何描述曲线),用于精细化描述蓄水单元的几何形状及蓄水变化规律。此外,基于 GIS 对研究区的 DEM、管道实测数据和用地类型进行图层信息提取和分析,完成区域的子汇水区划分、水文数据统计、检查井地表高程提取以及管道结构建模等工作(图 3(b))。

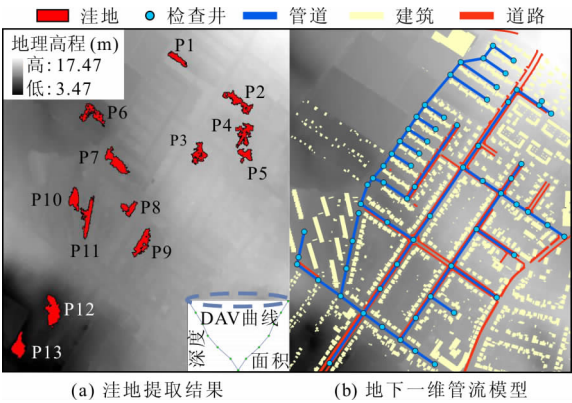


图3 研究区洼地提取结果及地下一维管流模型

2.3.2 1D/1D 耦合排水模型的构建 基于 GIS 提取的下垫面信息及节点的位置,在 SWMM 中,以明渠模

拟地表水网通路,以蓄水单元模拟洼地,对模拟元件进行选取、匹配和组合。此外,在下垫面信息及地面高程数据的基础上,赋予模拟元件之间连接关系、空间属性及流向特征。通过导入 GIS 精细描述的 DAV 曲线、管渠水力属性及出流控制元件属性等,构建地表一维排水模型(图 4(a))。建立耦合模块,将地下一维管流模型与地表一维排水模型进行耦合。在耦合过程中,基于地下一维管流模型与地表一维排水模型共用节点及平行建模的方式,选取连接节点,就近连接地上和地下模拟元件。通过水动力耦合算法编译,实现模型耦合连接,描述地上地下水量交互传输和流态变化的过程,最终完成 1D/1D 耦合排水模型的构建(图 4(b))。

2.3.3 1D/2D 耦合排水模型的构建 将存储在 GIS 中的地下管网拓扑数据(节点和管道的数据)导入 MIKE URBAN 中,利用项目检查工具进行自动拓扑检查,确保模型无误后,完成地下一维管流模型的构建(图 5(a))。在地下一维管流模型的基础上,基于 DEM 信息,建立地表二维计算网格并设置二维网格参数。通过构建耦合区域,设定计算节点与计算网格的耦合位置及耦合参数,获取二维地表网格与节点、网格与网格的水量交互关系,构建二维洪涝模型。将一维管流模型与二维洪涝模型进行耦合计算,最终完成 1D/2D 耦合排水模型的构建(图 5(b))。

3 结果与分析

图 6 为研究区 2、10、50、100 年重现期的降雨情

景下两种模型的淹没深度及淹没范围描述。由图 6 可知,在 4 种不同重现期的降雨情景下,两种模型的淹没深度具有较高的匹配度。1D/1D 耦合排水模型主要显示城区的易涝区域分布,但对地表实际水流通路及体积较小的低洼区域缺乏精细化描述。1D/2D 耦合排水模型能够展示地表水流通路及体积较小的低洼易涝区分布,对描述地表水流连通路、内涝范

围及淹没深度的精细化程度更高,因此,1D/2D 耦合排水模型能更加精准地显示易涝区域的淹没特征及溢流后的水流运动状态。

在上述洪涝模拟结果的基础上进行数值分析,参数采用淹没深度差和标准差,不同降雨重现期下 1D/1D 及 1D/2D 耦合排水模型的淹没深度差、标准差及差值率见图 7。

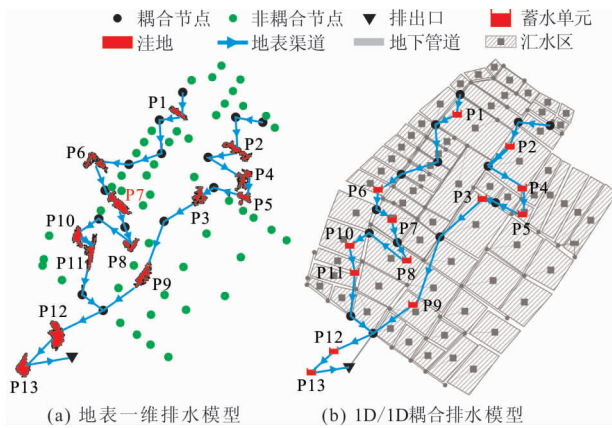


图 4 地表一维排水模型及 1D/1D 耦合排水模型

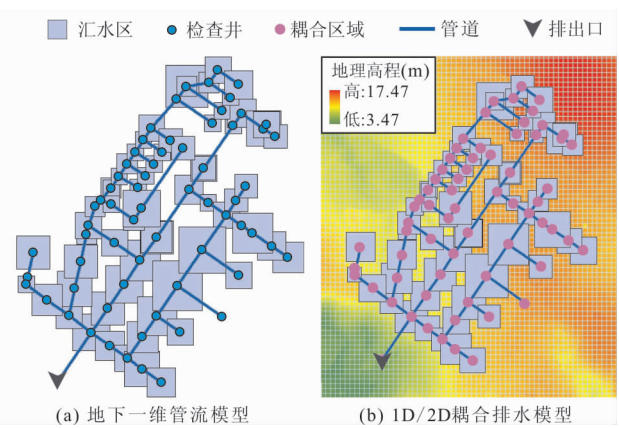


图 5 地下一维管流模型及 1D/2D 耦合排水模型

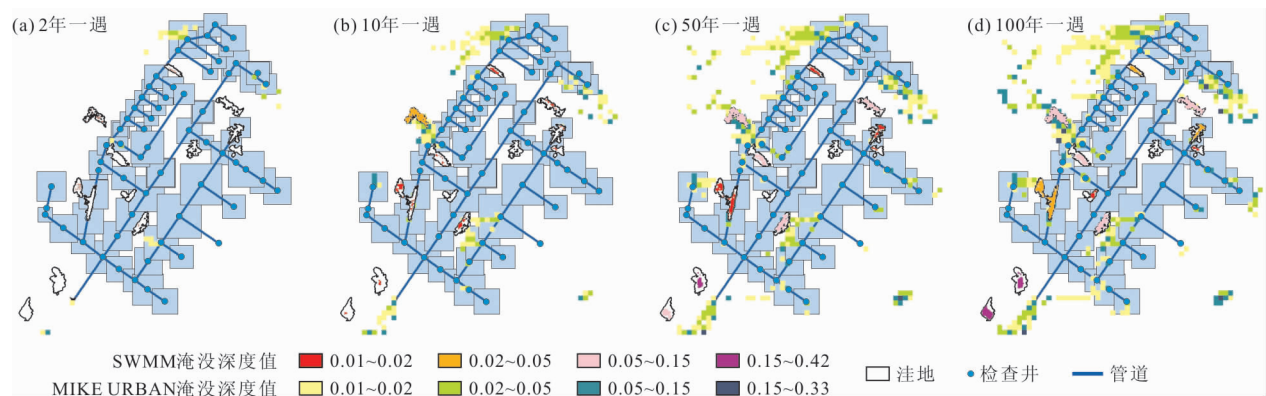


图 6 不同降雨重现期下 1D/1D 及 1D/2D 耦合排水模型的淹没深度及范围对比

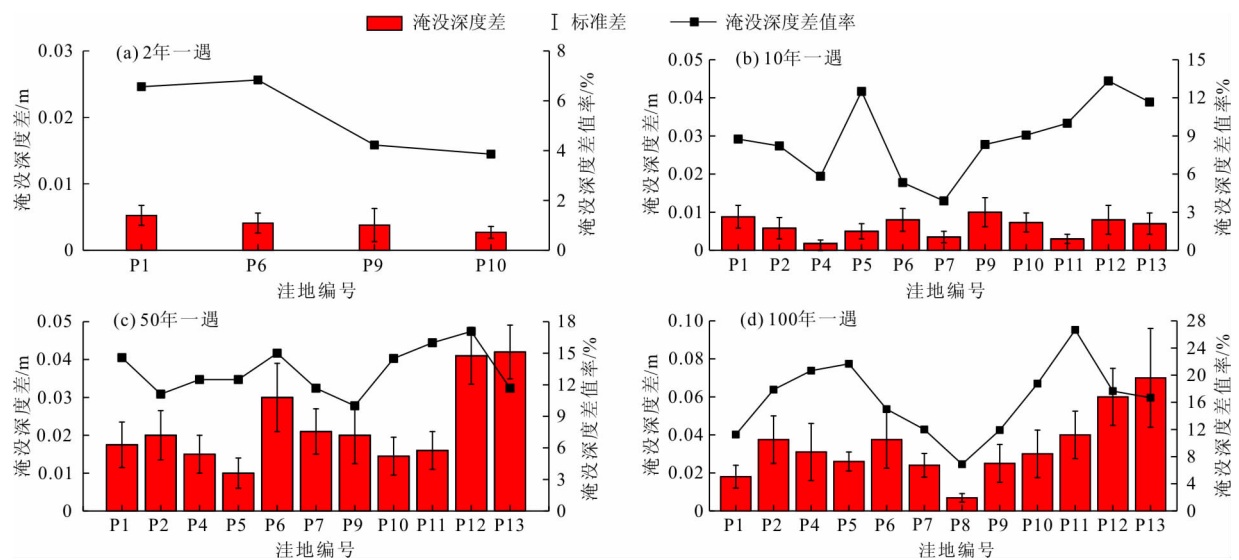


图 7 不同降雨重现期下 1D/1D 及 1D/2D 耦合排水模型的淹没深度差、标准差及差值率

随降雨重现期的增大,低洼易涝区域的数量越多,淹没深度差及标准差呈现增大的趋势。进一步地由计算获取的淹没深度差与 MIKE URBAN 模型的淹没深度作比值,计算得到不同降雨重现期下的淹没深度差值率。结果显示,在 2、10、50 和 100 年的降雨重现期下,平均淹没深度差值率分别为 5.37%、8.81%、13.33%、16.41%,说明重现期较低的情景下,两种模型具有较高的契合度,但随着降雨重现期的增大,淹没深度差值率随之增大,两种模型的契合度降低。

4 结 论

(1)1D/1D 耦合排水模型既能实现二维淹没的动态显示及拓展分析,又兼有较高计算速率和稳定度的优势。在较低降雨重现期的情景下,1D/1D 耦合排水模型仍能保证较高的准确性,但总体的计算精度仍稍逊于一维和二维耦合排水模型,因此适用于面积较大、应急评估且模拟精度要求不高的情景。

(2)1D/2D 耦合排水模型既能实现地表的双向流动计算,又集聚精细化程度高的优势,但建模过程相对复杂,且计算和信息处理时间较长,适用于计算环境良好且模拟精度要求较高的情景。

(3)地表形态的提取和表征精细度可直接影响洪涝淹没的计算精度。未来将对 1D/1D 耦合排水模型做进一步研究,力求保留高效性的同时,完善地表形态的提取与表征方式,从而提高洪涝模拟的计算精度。

参考文献:

- [1] 姜仁贵,韩 浩,解建仓,等. 变化环境下城市暴雨洪涝研究进展[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(3):11-17.
- [2] 刘 勇,张韶月,柳 林,等. 智慧城市视角下城市洪涝模拟研究综述[J]. 地理科学进展,2015,34(4):494-504.
- [3] 朱呈浩,夏军强,陈 倩,等. 基于 SWMM 模型的城市洪涝过程模拟及风险评估[J]. 灾害学,2018,33(2):224-230.
- [4] 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.
- [5] 石赞赞,万东辉,陈 黎,等. 基于 GIS 和 SWMM 的城市暴雨内涝淹没模拟分析[J]. 水电能源科学,2014,32(6):57-60+12.
- [6] 吴海春,黄国如. 基于 PCSWMM 模型的城市内涝风险评估[J]. 水资源保护,2016,32(5):11-16.
- [7] 李品良,覃光华,曹冷然,等. 基于 MIKE URBAN 的城市内涝模型应用[J]. 水利水电技术,2018,49(12):11-16.
- [8] 黄琳煜,李 迷,聂秋月,等. 基于 MIKE FLOOD 的暴雨积涝模型在川沙地区的应用[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(3):127-133.
- [9] 黄国如,王 欣,黄 维. 基于 InfoWorks ICM 模型的城市暴雨内涝模拟[J]. 水电能源科学,2017,35(2):66-70+60.
- [10] 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.
- [11] VAN DIJK E, VAN DER MEULEN J, KLUCK J, et al. Comparing modelling techniques for analysing urban pluvial flooding[J]. Water Science and Technology, 2014, 69(2):305-311.
- [12] VOZINAKI A E K, MORIANOU G G, ALEXAKIS D D, et al. Comparing 1D and combined 1D/2D hydraulic simulations using high-resolution topographic data: a case study of the Koiliaris basin, Greece[J]. Hydrological Sciences Journal - Journal Des Sciences Hydrologiques, 2017, 62(4):642-656.
- [13] LEANDRO J, CHEN A S, DJORDJEVIC S, et al. Comparison of 1D/1D and 1D/2D coupled (Sewer/Surface) hydraulic models for urban flood simulation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 135(6):495-504.
- [14] LEANDRO J, DJORDJEVIC S, Chen A S, et al. Calibration of a 1D/1D urban flood model using 1D/2D model results in the absence of field data[J]. Water Science and Technology, 2011, 64(5):1016-1024.
- [15] ZHOU Qianqian, PANDURO T E, THORSEN B J, et al. Adaptation to extreme rainfall with open urban drainage system: an integrated hydrological cost-benefit analysis[J]. Environmental Management, 2013, 51(3):586-601.
- [16] ZHOU Qianqian, PANDURO T E, THORSEN B J, et al. Verification of flood damage modelling using insurance data[J]. Water Science and Technology, 2013, 68(6):425-432.
- [17] 周倩倩,王和平,许苗苗,等. 基于 GIS 的栅格水文建模法快速评估内涝风险[J]. 中国给水排水,2015,31(21):109-113.
- [18] 周倩倩,许小文,苏炯恒. GIS 几何分析法在易涝区识别和空域构建中的应用[J]. 中国给水排水,2018,34(19):114-117+123.