

基于 GIS 空域表征的双层排水系统构建方法

周倩倩, 苏炯恒, 梅启鹏, 梅 胜

(广东工业大学 土木与交通工程学院, 广东 广州 510006)

摘 要: 提出基于 GIS 和 SWMM 的双层排水系统构建方法。采用 GIS 水文分析、栅格计算和叠置分析等工具,提取地表洼地的空域结构属性和连接水网特征,构建地表一维排水模型。采用 SWMM 水文和水力建模,研究地表排水模型与地下管流模型的水动力耦合方式和机制,构建双层耦合排水系统。结合 GIS 空域数据库和 SWMM 水动力计算结果,完成地表积水的演进计算,实现二维淹没的动态显示。结果表明,提出的双层排水模型既可保留一维模型在计算上的高效性和稳定性,又可控地表洪涝的模拟精度,显示地表易涝区的淹没范围和水深,可为城市洪涝模拟提供选择方案和工具。

关键词: 城市洪涝模拟; 双层排水系统; 水动力模型; SWMM; GIS

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)13-0134-05

Modeling Approach of Dual Layer Drainage System Based on GIS Spatial Representation

ZHOU Qian-qian, SU Jiong-heng, MEI Qi-peng, MEI Sheng

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

Abstract: The modeling approach of a dual layer drainage system based on GIS and SWMM was proposed. Spatial structural properties of surface basin and connected water network characteristics were extracted to build the surface one-dimensional drainage model through using GIS-based tool of hydrological analysis, raster calculation and superposition analysis. The hydrodynamic coupling mode and mechanism between surface drainage model and underground drainage model were explored to build a coupled dual layer drainage system by using SWMM-based hydrological and hydraulic modeling. Combining GIS-based spatial database and SWMM-based hydrodynamic calculation results, evolution calculation of accumulated water was accomplished to realize the dynamic display of two-dimensional submersion. The results showed that the proposed dual layer drainage model could not only retain high the computation efficiency and stability of the one-dimensional model, but also regulate the simulation accuracy of surface flood and display the flood range and water depth of waterlogged area, which could provide options and tools for urban flood simulation.

Key words: urban flood simulation; dual layer drainage system; hydrodynamic model; SWMM; GIS

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(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资助项目(2017A020219003)

近年来,城市洪涝问题越来越严重,已经成为制约我国城市可持续发展的重要因素。暴雨洪涝模拟是城市排水设计和防洪减灾的重要技术支撑,可提高决策者对城市洪涝影响的预测、分析和管理能力。早期的雨洪模型以美国的SWMM(暴雨洪水管理模型)为代表,主要针对地下管流进行一维水动力模拟^[1],具有计算效率高、可靠性强的特点,但存在无法进行地表二维模拟的缺陷,因而不能实现对地表洪涝的淹没计算,导致洪涝预报结果不直观、不准确^[2]。随着计算机技术的发展以及遥感、定位和地理信息数据的丰富,当前的水动力模型都在向精细化发展^[3-5]。二维模型的提出,实现了对地表积水的双向流动计算,在模拟精度和过程描述方面具有明显优势,但其信息处理和求解时间显著增加^[6-7]。由于这两种模拟方法各有优缺点,又具有互补性,因此构建一种兼具两种方法优点的新型模型,更加符合洪涝模拟的发展方向。笔者结合GIS空域建模技术^[8]和SWMM水动力模拟,精细描述地表空域结构,建立水量耦合机制,构建双层水动力系统,兼顾城市洪涝模拟的计算精度和效率。

1 方法论

双层排水模型的构建流程见图1。

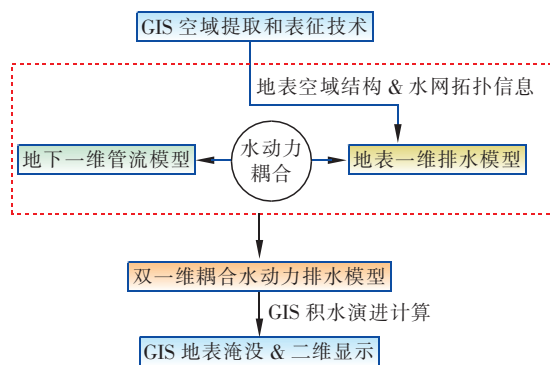


图1 构建双层排水系统的技术流程

Fig. 1 Technical process of constructing dual layer drainage system

首先,采用GIS地理空间分析技术,对数字高程模型(DEM)进行地表空域和水网拓扑结构的提取和表征,准确描述地表储水空间和连通性的变化;其次,依据GIS提取的空域拓扑模型,将其简化为一系列洼地和连通管渠,采用SWMM一维水动力模拟元件,构建地上排水模型;在此基础上,建立地上排水系统和地下管流系统的水动力耦合模块,描述地上和地下水量传输、交换和反馈过程;最后,基于

SWMM模拟结果和GIS空域拓扑模型,完成地表积水演进计算,实现对积水深度和淹没范围的二维描述。

1.1 GIS空域拓扑提取和表征

GIS在模型构建中主要提供数据前处理与后处理的分析功能。前处理功能主要借助DEM伪洼地填充、水文分析、矢量计算、叠置分析和空间聚合工具,获得对地表空域结构(存储空间变化和地理位置)、空间连通性(溢流边界点和出入流方向)、水文属性(透水性和曼宁系数)和汇流通路(即水网拓扑结构)的几何拓扑描述(见图2),为地上排水模型的构建提供精细化的地表形态描述。后处理功能主要依据前处理中建立的空域结构数据库,对双层排水模型的水量模拟结果进行储水空间的匹配计算和积水演进分析,推算对应的地表淹没范围和深度。

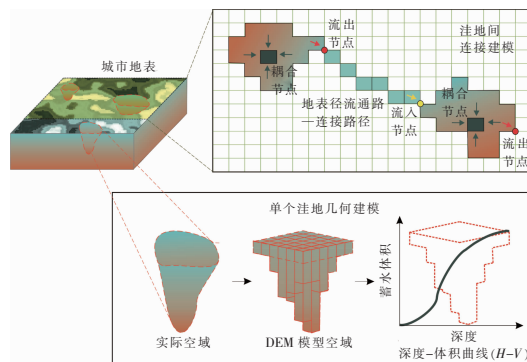


图2 基于GIS的水网信息和空域结构的提取和表征方法

Fig. 2 Extraction and characterization of spatial structure and water network based on GIS

1.2 地表—维排水模型

依据GIS中提取的水网拓扑结构和洼地空域曲线,对SWMM一维水动力模拟元件(节点、管道、明渠、堰、储水单元等)进行类型选取、配准组合和模型编译,科学定义地表计算单元和连接通路,并导入对应的空间地理属性(地理位置、连接方式、高程、尺寸)和水动力属性(储水容量曲线、管渠类型和出流控制元件),完成地表水动力模型的构建。

1.3 双层排水模型的构建

依据地上和地下系统元件的相对高程和空间距离,合理设置连接节点属性(位置、高程、出流状态)和连管道属性(管道类型、水力参数和长度),建立双层排水的连通耦合渠道,实现水量垂向交互和传输的目的(见图3)。整个系统基于一维水动力进行计算,读取每个时间步长对应地下管流的动态荷载情况,作为耦合点水量溢流的实时控制条件。当

产生溢流时,地下溢流水量将通过耦合点传送至地上系统的储水单元中,动态记录地表元件内的水量

变化曲线,结合地下排水荷载曲线,进行地下排水能力的恢复状态判断。

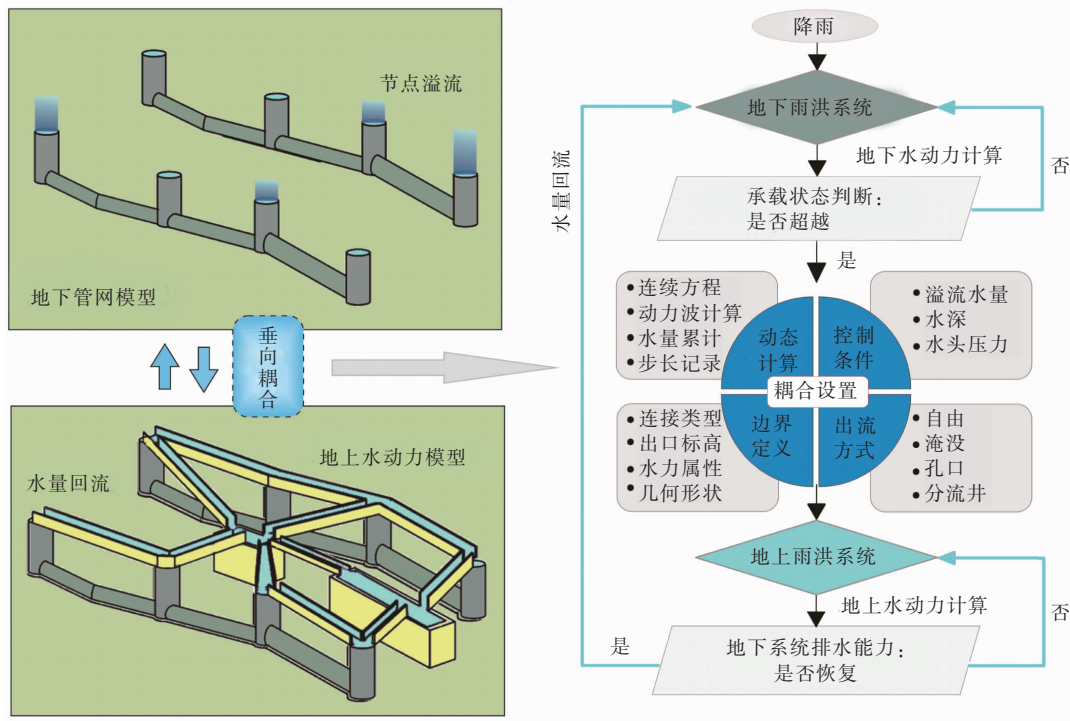


图3 双层排水模型耦合示意

Fig. 3 Sketch map of dual layer drainage model

2 案例分析

2.1 研究区概况

研究区位于H市北部的一个社区,该区域以住宅区为主,周边有少量的工业区和商业区。DEM精度为 $1.6\text{ m} \times 1.6\text{ m}$,地面高程为 $5 \sim 70\text{ m}$,地势西高东低,局部凹凸不平,年降水量约为 700 mm 。近年来,该地区有较多极端降雨事件,内涝灾害损失严重,传统一维水动力模拟方法已无法满足当地对洪涝风险的模拟及预测需要,亟需研究兼顾计算速度和效率的新型排水模型,为该地区的洪涝风险模拟分析和预警预报提供科学、有效的工具^[9-10]。

2.2 模型搭建

2.2.1 GIS空域拓扑模型与地下管流模型的搭建

研究区内提取的地表洼地和水网拓扑结构见图4(a)。通过对每个洼地结构进行高程数据的分层提取和统计计算,获得洼地在不同深度对应的储水面积和容积,绘制深度-面积-体积(DAV)的几何描述曲线,作为地表模型中储水单元的设计依据;依据洼地和水网的空间位置,确定对应的连接点(入流和出流),指示水流在地表不同洼地间的流通路

径。研究区的地下管流模型如图4(b)所示,主要基于研究区的历史管道实测数据、用地类型、数字地图和地理高程信息进行图层信息提取和分析,借助SWMM完成子汇水区、管道节点、排水管道系统的绘制和建模。

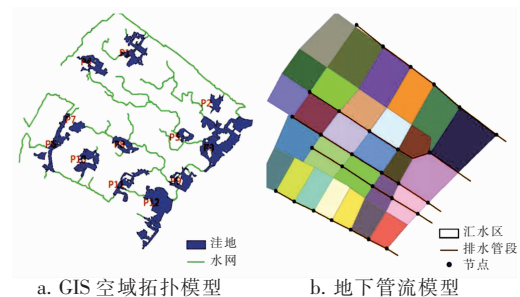


图4 GIS空域拓扑模型及地下管流模型

Fig. 4 Spatial structure topology model based on GIS and underground drainage model

2.2.2 地表排水模型的搭建

在下垫面信息和检查井位置的基础上,采用SWMM中的明渠模拟水网、储水单元元件模拟地表洼地。根据地表洼地和连通水网的地理位置和高

程,设定储水单元与连接节点以及节点与连接管道的连通关系、水流方向和地理空间属性等,为储水单元和连接管道分别导入GIS统计生成的DAV曲线和管道水力属性等,通过SWMM模型编译,完成地表水动力模型的构建,如图5所示。

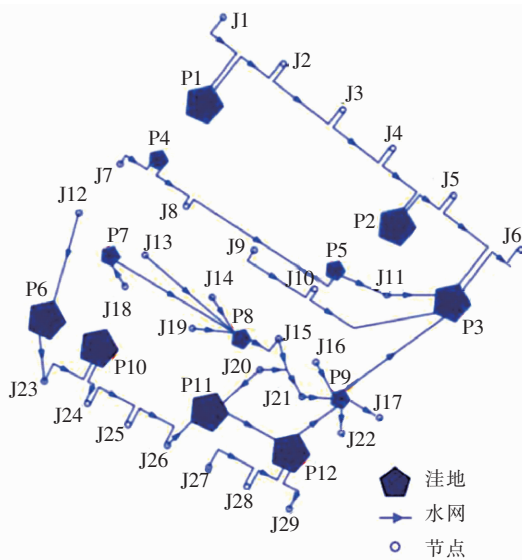


图5 地表排水模型

Fig. 5 Surface drainage model

2.2.3 双层耦合排水模型的搭建

双层耦合排水模型如图6所示。

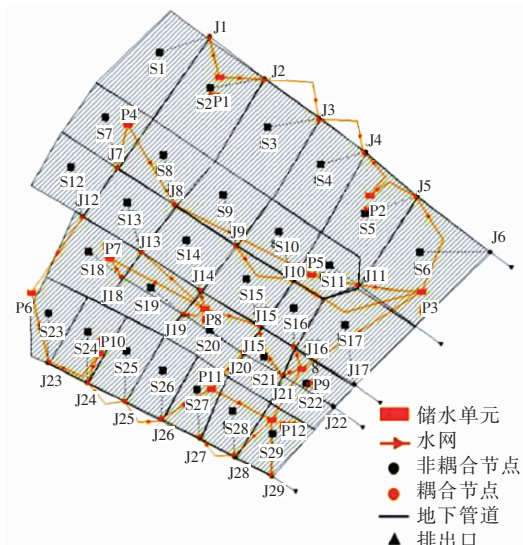


图6 双层耦合排水模型

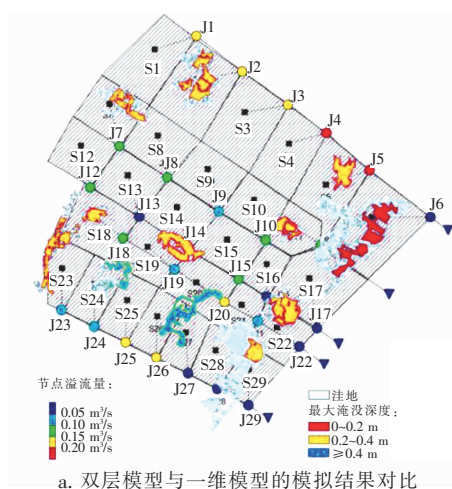
Fig. 6 Coupled dual layer drainage model

图6中,红色和黑色结构分别为地上排水系统和地下管流系统,采用地下管流模型与地表排水模型共用节点的方法,依据地上和地下模型元件的相

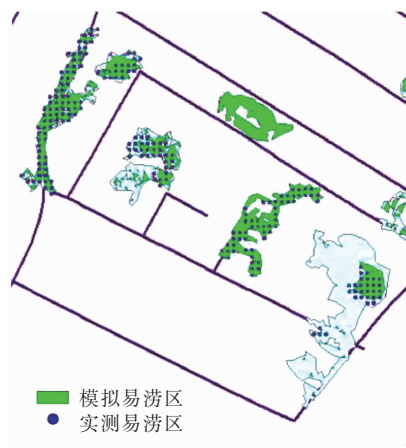
对地理空间位置,确定连接节点和管段的长度、高程和水力属性(管道类型、尺寸),就近连接地上和地下元件,实现模型的耦合连接,将地下管网的溢流水量传输到地表元件中进行水动力计算。

2.3 洪涝模拟结果

将地表储水单元的流量曲线与GIS空域数据曲线进行统计处理,计算测试雨量情景下对应的二维淹没区域和淹没深度。图7(a)显示了研究区地下一维模型计算获得的溢流节点和本研究提出的双层模型计算得到的二维模拟结果。可以看出,双层模型改善了一维模型只能显示节点溢流位置和溢流水量的问题,可以模拟溢流水量在地面的流动过程、淹没深度和范围,从而更全面地对洪涝灾害进行评估分析。



a. 双层模型与一维模型的模拟结果对比



b. 双层模型模拟结果与历史实测数据的对比

图7 双层排水模型模拟结果与一维模型模拟结果和历史实测洪涝数据的对比

Fig. 7 Comparison of dual layer drainage model results and 1D model results & historical flood data

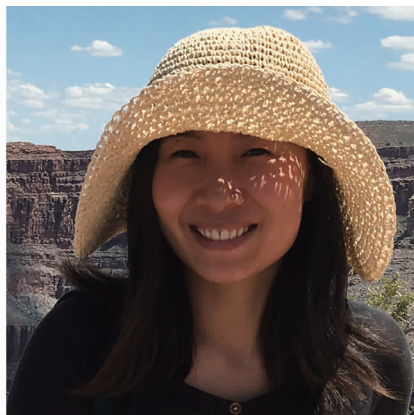
另外,将模拟结果与历史实测洪涝数据进行局部详细对比[如图7(b)所示],发现模拟结果和历史实测洪涝数据的吻合度较高,验证了双层模型对地表淹没情况的计算精度。

3 结论

针对城市洪涝模拟计算存在数据量大和复杂度高的特点,以及传统一维水动力模型无法进行地表洪涝模拟的问题,基于GIS空域拓扑建模和SWMM水动力仿真技术,构建双层排水系统,综合考量地表和地下排水系统的水动力计算,既能实现对地表径流和淹没情况的拓展分析,又能保证较高的运算速度和稳定性。研究区案例表明,该新型模型可以改善对地表淹没情况的概化处理和非节点处洪涝过程的动态描述,可为城市的内涝风险评估和洪涝预警预报提供科学的技术支持。

参考文献:

- [1] 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.
Liu Yong, Zhang Shaoyue, Liu Lin, *et al.* Research on urban flood simulation: a review from the smart city perspective[J]. Progress in Geography, 2015, 34(4): 494-504 (in Chinese).
- [2] van Dijk E, van der Meulen J, Kluck J, *et al.* Comparing modelling techniques for analysing urban pluvial flooding[J]. Water Sci Technol, 2014, 69(2): 305-311.
- [3] 石赟赟,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.
Shi Yunyun, Wan Donghui, Chen Li, *et al.* Simulation of rainstorm waterlogging and submergence in urban areas based on GIS and SWMM[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(6): 57-60, 12 (in Chinese).
- [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.
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).
- [5] 刘兴权,刘为. 城市暴雨积水的计算分析及其动态仿真研究[J]. 地理空间信息, 2010, 8(4): 10-12, 126.
Liu Xingquan, Liu Wei. Analysis and dynamic simulation of urban rainstorm waterlogging[J]. Geospatial Information, 2010, 8(4): 10-12, 126 (in Chinese).
- [6] Anthi-Eirini K V, Giasemi G M, Dimitrios D A, *et al.* Comparing 1D and combined 1D/2D hydraulic simulations using high resolution topographic data, the case study of the Koiliaris basin, Greece[J]. Hydrological Sciences Journal, 2017, 62(4): 642-656.
- [7] 陈小龙,陆露,盛政,等. 城市排水防涝地表二维模拟评估方法研究[J]. 中国给水排水, 2015, 31(23): 116-119.
Chen Xiaolong, Lu Lu, Sheng Zheng, *et al.* Study on 2D simulation of urban drainage and waterlogging prevention[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(23): 116-119 (in Chinese).
- [8] 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.
Zhou Qianqian, Wang Heping, Xu Miaomiao, *et al.* A simplified GIS-based hydrological modeling approach for rapid flood risk assessment[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(21): 109-113 (in Chinese).
- [9] Zhou Q, Panduro T E, Thorsen B J, *et al.* Adaption to extreme rainfall with open urban drainage system: an integrated hydrological cost-benefit analysis[J]. Environ Manage, 2013, 51(3): 586-601.
- [10] Zhou Q, Panduro T E, Thorsen B J, *et al.* Verification of flood damage modelling using insurance data[J]. Water Sci Technol, 2013, 68(2): 425-432.



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。

E-mail: qiaz@foxmail.com

收稿日期:2018-12-15