城市暴雨积涝数值模拟技术方法

薛丰昌[1,2]　戈晓峰[2,3]　田娟[1,2]　闫研[4]　张嫣然[1,2]

(1 南京信息工程大学遥感与测绘工程学院，南京 210044；2 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室，南京 210044；3 南京信息工程大学应用气象学院，南京 210044；4 河南省商丘市梁园区气象局，商丘 476000)

摘要　洪涝灾害是中国最常见、影响最严重的自然灾害之一。在当前城市内涝模拟研究中，通常是对降雨过程中积涝最严重状态进行模拟，缺乏面向整个降雨过程的积涝动态过程模拟技术方法。本研究综合运用 SWMM 模型和 GIS 技术，通过对研究区的汇水区划分和排水管网概化建模，建立了研究区的 SWMM 模型，基于 SWMM 模型对降雨过程中汇水区积水量进行计算，利用地表积水有源扩散算法进行地表积水演进行计算，实现降雨过程中地表积水空间分布和积水风险深度模拟计算。以研究区 2016 年 6 月 18 日的降水过程进行积涝模拟及模拟误差分析，结果表明该技术方法具有良好的模拟效果。

关键词　暴雨积涝；动态模拟；GIS；SWMM

中图分类号：P456　**DOI**：10.19517/j.1671-6345.20180266　**文献标识码**：A

引言

近年来随着社会发展，城市扩张，城区面积不断增加，城市化所带来的水文效应使城市洪涝灾害出现频率不断增大，城市暴雨积涝灾情呈现出复杂性、多样性、连锁性和放大性的特点，暴雨积涝造成了严重的社会经济损失和社会影响[1]。

在当前城市内涝研究中，通常是对降雨过程中积涝最严重状态的研究[2]，对整场降雨进行详细过程分时段模拟的研究较少，没有实现定点定时的精确预警，难以为城市洪涝灾害的管理与预警提供有效支持，因此探索对城市雨洪过程进行模拟与预测的有效技术手段具有重要意义[3-4]。

就目前已有的关于城市暴雨积涝数值模拟研究而言，其中一部分研究采用的方法是对于地面以二维非恒定流为基本骨架，以不规则网格概化地物，同时结合排水管网中一维非恒定流综合考虑建立暴雨积涝数值模型。但该方法缺少对模拟结果的验证与分析，故对其模拟结果精度无从考证；此外，还有一部分研究，其数值模拟模型构建方法是利用积水区的积水量，采用基于 GIS 的“等体积法”，模拟城市道路积水区域和淹没深度，并在此基础上，吸取有限差分法和有限体积法的优点，在网格周边计算流量，在网格形心处计算水位。该方法虽然在一定程度上提高了模型计算的精度，但其过度依赖于大量的情景设定，故其模拟结果精度不好定夺。本研究以 GIS 技术为手段，利用 SWMM 模型，以漳州市龙文区水仙大街以北、漳华东路以南、九龙大道以东、龙文北路以西所围成的区域为研究区，构建城市暴雨积涝模型，剖析降雨过程中各时刻的积涝状态，实现暴雨积涝的分布式表达及动态数值模拟[5]。

1　数据来源与研究方法

1.1　数据来源

本文主要获取了以下数据：

(1)遥感影像数据：分辨率为 2.5 m 的 2016 年 3 月龙文区 SPOT 遥感影像数据，对数据进行拼接、配准和几何校准，对研究区进行土地利用类型提取；

(2)城市排水管网数据：研究区内共有 4424 个检查井，34 个排水口，4331 段管线，以此排水能力为参考，构建研究区的排水管网模型。

(3)高程数据：高程数据体现了城市高低起伏的地

江苏省研究生科研创新计划项目(SJKY19_0969)资助

作者简介：薛丰昌，男，1970 年生，博士，教授，研究方向为气象 GIS 和气象灾害数值模拟，Email：xfc9800@126.com

收稿日期：2018 年 5 月 7 日；定稿日期：2019 年 8 月 20 日

形特征，是城市地表积水分布的依据，研究区内最低处高程值为－3.96 m，最高处的高程值为17.22 m。

(4)降水数据：龙文区气象局提供的站点雨量数据。

(5)验证数据，2016年6月18日降雨后区域内淹没实况数据以及实地调研得到的易涝点数据，用做模型参数率定及结果验证。

1.2 研究方法

1.2.1 构建SWMM模型

SWMM是由美国环境保护署(Environmental Protection Agence)研究并开发的雨洪管理模型，其具有速度快、操作简单、容易掌握、提供源代码可以进行定制功能的二次开发等特点。SWMM模型不仅可以跟踪模拟不同时间步长任意时刻每个子汇水区所产生径流的水质和水量，以及每个管道和河道中水的流量、水深与水质等情况，还可以对城市雨水系统进行全过程的模拟，定量分析区域的排水能力，是区域排水分析计算的有效工具之一。同时，基于SWMM模型较为强大的排水系统模拟功能，该模型还可以用于城市排水系统规划方案的改进和评估，为城市排水系统的规划管理提供强有力的技术支持。SWMM模型的核心计算模块是产汇流计算模块，通过产流和汇流量的计算可最终确定城市积水量。

(1)研究区排水管网建模。管网数据作为城市排水系统的重要组成，也是SWMM模型产汇流计算的重要组成部分。城市排水管网布设错综复杂，考虑到模型对管网复杂度的限制，在模拟前要先对研究区的排水管网进行概化。管网概化是根据地表汇流特征将研究区内的管网进行简化，管网一般沿道路分布，节点根据管径大小、管道长度、排水能力进行合并设置，管道由线要素表达，其属性信息包含管道的长度、管径、坡度等信息；节点和排水口由空间点要素表达，包括上下底标高信息。利用ArcGIS平台基于上述原则对研究区的排水管网系统进行简化，研究区内原有4424个检查井，34个排水口，4331段管线，其分布如下图1所示，得到简化后的管网数据，167个节点、137条管线，其具体分布如图2。

(2)研究区汇水区划分及其参数提取。汇水区又称作集水区域、流域，是指地表径流或其他物质汇聚到一共同的出水口的过程中所流经的地表区域，

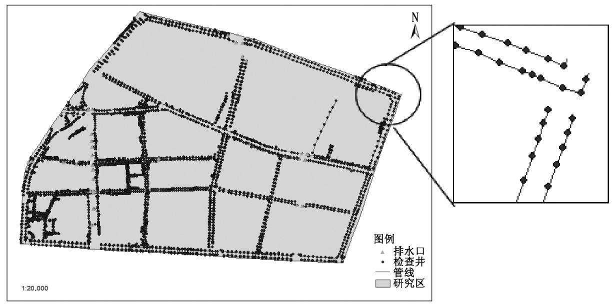

图1 研究区原始管网分布

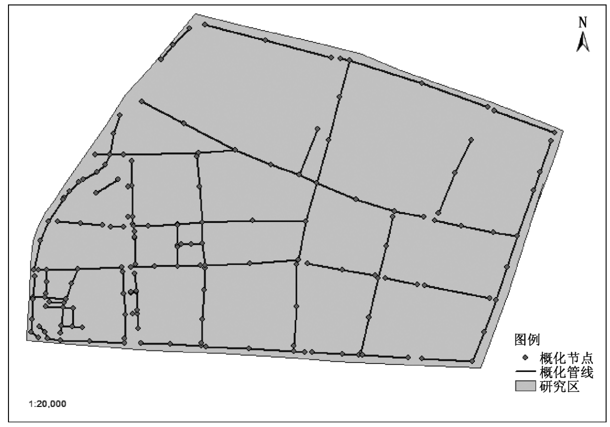

图2 研究区简化管网分布

每一个汇水区是一个独立的水力学单元[6-7]。汇水区是分布式水文模型的基础，也是SWMM模型中重要的输入参数，是构建城市内涝模型不可或缺的部分，其划分的准确性对模型的最终影响较大。目前汇水区划分的方法分为两大类：①基于DEM的水文分析方法，其基础是基于城市高程数据，根据研究重点对其中的细节进行修正，利用水文分析工具进行汇水区划分。②基于节点的几何汇水区划分方法，其实质为根据研究目标确定汇水区划分的节点，以节点为基础利用Voronoi图(泰森多边形)法进行汇水区划分。本文首先运用ArcGIS中Hydrology模块实现城市天然汇水区的划分，包括洼地填充、流域水流方向提取、子流域划分、汇水区生成等；然后根据城市排水管网空间服务范围，采用Voronoi图方法对初步划分的城市天然汇水区进行调整，最终形成既体现城市地形特征又反映城市排水设施排水能力的汇水区划分。最终划分的汇水区如图3所示。

利用GIS工具，基于土地利用分布(图4)提取研

图 3　汇水区分布

究区曼宁系数、透水性分布、坡度分布等水文参数。

1.2.2　地表积水演进计算

在暴雨积涝数值模拟中,利用城市雨洪模型能够确定积水扩散源(通常为管道节点和积涝敏感点)的位置和积水量,积水如何在地表进一步进行扩散需一定的算法实现。传统的扩散方法通常是给每一个积涝单元设定一个扩散源,未考虑不同积涝单元的扩散源之间的相互影响[8-13],而在扩散过程中,当降雨达到某一程度时,各节点溢流量也随之增大,可能会导致相邻节点形成的积涝区域存在交叉的情景,这时候节点的扩散情况已不能以独立节点考虑。本文采用的算法是,在计算出每个扩散源的积水量后,以扩散栅格为中心,利用试算法,根据水量平衡原理,在中心栅格及其周围 8 个栅格中扩散,每扩散完一圈进行扩散结果的合理性判断,判断已形成的积涝水位是否大于其外圈某个栅格的高程值,如果存在,则将扩散范围增加一圈再次进行扩散,直到积涝水位小于其外圈的任何一个栅格的高程值。在所有节点扩散完成之后,判断是否存在栅格参与了多次节点扩散过程,若有,则对这些节点进行合并扩散处理。在整个算法计算过程中不断地对积涝结果及积涝范围进行合理性判断,动态地进行水量分配,从而实现暴雨积涝的动态扩散。

图 4　研究区土地利用分布

2　研究区暴雨积涝模拟分析实例

2.1　积涝过程模拟

对研究区 2016 年 6 月 18 日的降雨过程产生的暴雨积涝进行模拟,雨量数据采用落在研究区内的长福村自动站数据,其具体的雨量时间序列如表 1 所示。

表1　2016年6月18日降水时间序列

日期	时刻	降水/mm
2016-06-18	10:00	0.4
2016-06-18	10:30	47.1
2016-06-18	11:00	0.1
2016-06-18	11:30	0
2016-06-18	12:00	0
2016-06-18	12:30	0
2016-06-18	13:00	13.3
2016-06-18	13:30	33.9
2016-06-18	14:00	1.2
2016-06-18	14:30	0.4
2016-06-18	15:00	0.2
2016-06-18	15:30	0.2

读取SWMM模型结果数据获取节点积水信息并进行积水扩散，以半小时为时间间隔，输出每个时刻的积水模拟结果：①10:00研究区内基本没有积水；②10:30随着降水的突增，研究区内存在大面积积水，且达到一定深度；③11:00—12:30时段，由于降水的骤停，研究区内的积水得以控制，仅鲜少几个节点或排水口等存在少量积水；④13:00，随着降水的再一次来临，研究区内的小半区域再次积水，并在13:30积水增强，达到一定深度；⑤14:00—15:30时段，由于降水的减少，研究区内积水有很大的缩减，仅少部分溢流节点处等存在积水。图5为10:30研究区积涝。

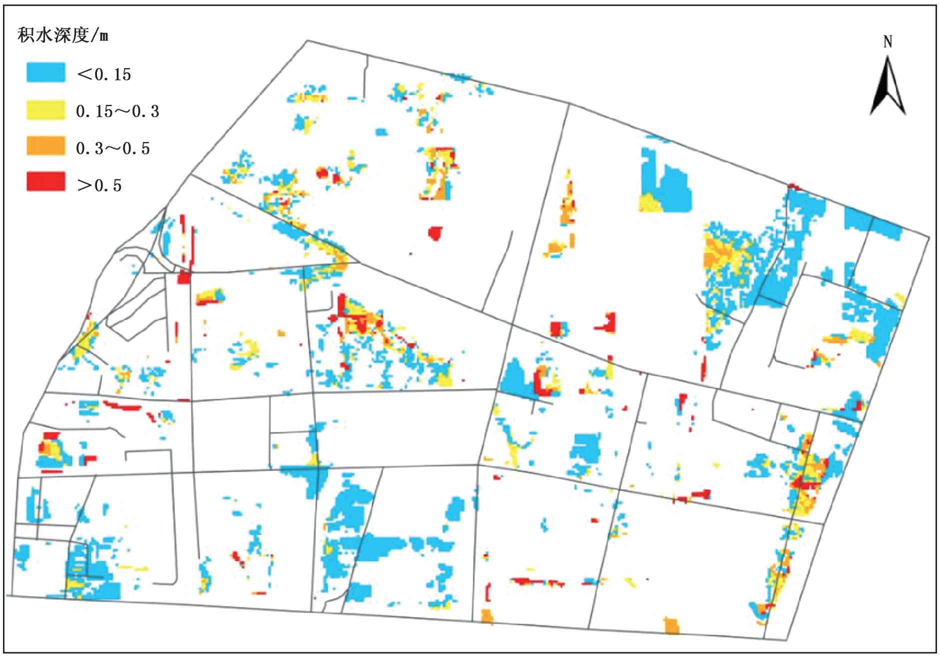

图5　2016年6月18日10:30研究区积涝

2.2　结果验证与分析

为了对模拟结果进行验证，在研究区内如图6所示的3个地方设置验证标志点，在2016年6月18日降雨过程中以30 min为间隔，记录标志点处的实测水深，形成36组观测数据，把各个时刻模拟结果与实测结果进行比较，在所有36组数据中，其中误差大于25%的有两组，占总数比例5%，误差小于25%大于20%的有4组，占比11.11%，其中交警大队和龙文北路的样点平均误差小于10%，人民广场样点的平均误差为11.84%，平均误差均在15%以内，结果表明模拟结果与实测结果基本一致，模拟结果可信度较高。

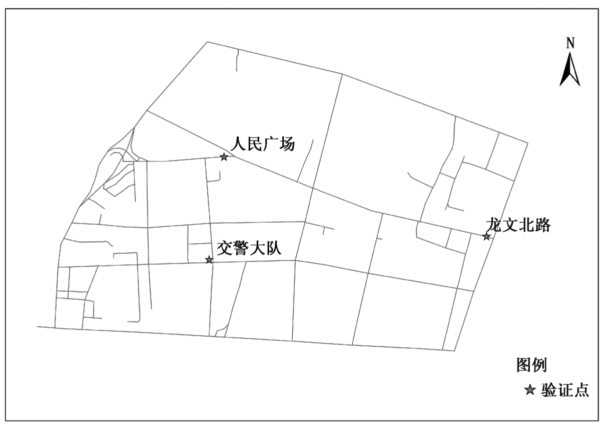

图6　验证点位置示意

3　结论

本研究综合运用 SWMM 模型和 GIS 技术,通过研究区汇水区划分、排水管网概化建模,建立了研究区的 SWMM 模型,基于 SWMM 模型对降雨过程中汇水区积水量进行计算,利用地表积水有源扩散算法进行地表积水演进计算,通过对研究区 2016 年 6 月 18 日的降水过程进行积涝模拟及模拟误差分析,结果表明该技术方法具有良好的模拟效果。

参考文献

[1]　薛丰昌,黄敏敏,唐步兴,等. 三维 GIS 的城市暴雨积涝灾害模拟[J].测绘科学,2017,42(2):53-58+64.

[2]　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,(4):1-6.

[3]　杨辰,顾宇丹,王强,等. RCP4.5 和 RCP8.5 气候变化情景下上海市暴雨内涝适应性[J]. 气象科技,2018,46(5):1004-1011.

[4]　龙余良,吴凡,阙志萍,等. 江西北部一次局地大暴雨过程分析[J]. 气象科技,2018,46(6):1211-1219.

[5]　郑艳,杨仁勇,程守长,等. 地形对台风“海燕”暴雨增幅作用的观测与模拟[J]. 气象科技,2018,46(6):1147-1153.

[6]　薛丰昌,盛洁如,钱洪亮. 面向城市平原地区暴雨积涝汇水区分级划分的方法研究[J]. 地球信息科学学报,2015(4):462-468.

[7]　左俊杰,蔡永立. 平原河网地区汇水区的划分方法——以上海市为例[J]. 水科学进展,2011(3):337-343.

[8]　丁志雄,李纪人,李琳. 基于 GIS 格网模型的洪水淹没分析方法[J]. 水利学报,2004(6):56-60,67.

[9]　孙阿丽,徐林山,石勇,等. 基于 GIS 的洪水淹没范围模拟[J]. 华北水利水电学院学报,2009,4(15): 10-12.

[10]　刘仁义,刘南. 基于 GIS 的复杂地形洪水淹没区计算方法[J]. 地理学报,2001,56(1):1-6.

[11]　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.

[12]　王昊,张永祥,唐颖,等. 暴雨洪水管理模型的城市内涝淹没模拟[J]. 北京工业大学学报,2018,44(2):303-309.

[13]　张振鑫,吴立新,李志锋,等. 城区内涝淹没模拟算法[J]. 测绘科学,2016(6):87-91.

A Numerical Simulation Technique of Urban Rainstorm Waterlogging

Xue Fengchang[1,2]　Ge Xiaofeng[2,3]　Tian Juan[1,2]　Yan Yan[4]　Zhang Yanran[1,2]

(1 School of Geography and Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044; 2 Key Laboratoty of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044; 3 Applied Meteorological Institute, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044; 4 Liangyuan District Meteorological Service, Henan, Shangqiu 476000)

Abstract: Flooding is one of the most common and serious natural disasters in China. Presently we usually simulate the most severe waterlogging during the rainfall process and lack the simulation technique for the whole rainfall process in the urban waterlogging simulation study. In this study, comprehensively using the SWMM model and GIS technology, by dividing the water catchment areas of the research area and modeling of the generalized drainage network, the SWMM model for the study area is established, and at the same time calculating the amount of water collected in the precipitation process based on the SWMM model, calculating the evolution of surface water by using the active diffusion algorithm. The simulation and simulation error analysis of the precipitation process in the research area on 18 June 2016 show that the method has good simulation effect.

Keywords: rainstorm waterlogging; dynamic simulation; GIS; SWMM