

鄢琳, 罗宇新, 林健新, 等. 复杂下垫面平原城市内涝模型构建——以排水管网溯源分析法划分子汇水区[J]. 净水技术, 2025, 44(12): 154–163.

YAN L, LUO Y X, LIN J X, et al. Modeling urban flooding in complex subsurface plains: Delineation of sub-catchment areas by traceability analysis of drainage network [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(12): 154–163.

## 复杂下垫面平原城市内涝模型构建——以排水管网溯源分析法划分子汇水区

鄢琳<sup>1</sup>, 罗宇新<sup>2</sup>, 林健新<sup>1</sup>, 陈鸿佳<sup>2</sup>, 荣宏伟<sup>2,\*</sup>, 李昀诺<sup>1</sup>

(1. 广东爱科环境科技有限公司, 广东中山 528400; 2. 广州大学土木工程学院, 广东广州 510006)

**摘要** 【目的】在复杂下垫面平原城市中, 由于地形起伏小和下垫面复杂等原因, 传统的子汇水区划分效果往往不够理想。【方法】为提高子汇水区划分精度, 本文提出一种基于排水管网溯源分析的子汇水区划分方法, 在综合考虑研究区卫星影像图、城市排水管网数据及小区内部支管数据的基础上, 对小区内部的管网收水范围进行溯源, 按照实际的排水管网收水情况和建筑物轮廓绘制子汇水区, 并通过 InfoWorks ICM 模型建立珠三角某市中心城区的城市内涝模型, 并传统泰森多边形法、基于数字高程模型 (DEM) 数据的盆域分析法的模型精度结果进行分析对比。【结果】在复杂下垫面平原城市地区, 采用基于排水管网溯源分析法的模型在 3 场 (2023–08–10、2023–09–14、2023–10–09) 不同降雨情景下研究区内 2 个监测点的 NSE 值分别为 0.750、0.795、0.864、0.800、0.829、0.876, 模拟精度均高于泰森多边形法和盆域分析法, 更能反映真实的地表径流过程。【结论】因此, 在复杂下垫面平原城市地区, 模型精度要求较高且数据完备的情况下可以采用此方案, 以提高子汇水区划分的合理性。

**关键词** InfoWorks ICM 子汇水区划分 泰森多边形法 盆域分析 排水管网溯源

**中图分类号:** TU992 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009–0177(2025)12–0154–10

**DOI:** 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.12.018

## Modeling Urban Flooding in Complex Subsurface Plains: Delineation of Sub-Catchment Areas by Traceability Analysis of Drainage Network

YAN Lin<sup>1</sup>, LUO Yuxin<sup>2</sup>, LIN Jianxin<sup>1</sup>, CHEN Hongjia<sup>2</sup>, RONG Hongwei<sup>2,\*</sup>, LI Yunnuo<sup>1</sup>

(1. Guangdong Aike Environment Science & Technology Co., Ltd., Zhongshan 528400, China;

2. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract** [Objective] In complex subsurface urban areas, traditional sub-catchment delineation is often inadequate due to small topographic variations and complex subsurface conditions. [Methods] To enhance the precision of sub-catchment delineation, a methodology predicated on drainage network traceability analysis has been introduced. Based on a comprehensive analysis of satellite image maps of the study area, urban drainage pipe network data, and internal branch pipe data of the neighborhood, the pipe network receiving range is traced back. Sub-catchment areas were delineated according to the actual drainage network receiving and building contours. An urban flooding model for a downtown area in the Pearl River Delta region was established using the InfoWorks ICM model. The model's accuracy was evaluated against that of the conventional Tyson polygon approach and the basin domain analysis technique utilizing DEM data. [Results] In the urban area with complex subsurface plains, the NSE values of the model based on the drainage network traceability analysis method for the two monitoring points in the study area under three different rainfall (2023–08–10, 2023–09–14, 2023–10–09) scenarios were 0.750, 0.795, and 0.864, 0.800, and 0.829, 0.876, respectively. The simulation

[收稿日期] 2024–04–08

[基金项目] 国家自然科学基金(52170071); 中山市重大科技专项(2022A106)

[作者简介] 鄢琳(1990—), 女, 博士研究生, 研究方向为智慧水务, E-mail: 784492343@qq.com。

[通信作者] 荣宏伟(1973—), 男, 博士研究生, 正高级工程师, E-mail: gzdxrhw@163.com。

accuracies are higher than those of the Tyson polygon method and the basin domain analysis method, enabling better reflection of the actual surface runoff process. [ **Conclusion** ] Therefore, this approach can be implemented to enhance the rationality of sub-catchment delineation in urban areas with intricate sub-surface plains, where high modeling accuracy is essential and comprehensive data are available.

**Keywords** InfoWorks ICM sub-catchment delineation Thiessen polygon method basin domain analysis drainage network traceability

近年来,由于气候变化和社会经济发展的相互作用,城市洪涝灾害日益增加<sup>[1]</sup>,在过去几十年中,洪涝灾害对全球经济产生了巨大的影响<sup>[2]</sup>。2022年,国家住房和城乡建设部印发《关于做好2022年城市排水防涝工作的通知》:要始终对城市内涝灾害保持高度警惕,充分认识全球气候变暖背景下极端天气引发灾害的多发性、危害性,主动适应和把握排水防涝的新特点、新规律,立足防大汛、抢大险、救大灾,确保城市安全度汛。城市雨洪模型是城市防洪减灾的关键技术之一,且其模拟精度关乎内涝防治工作的有效性<sup>[3]</sup>,而子汇水区的划分会直接影响到模型精度和模拟结果<sup>[4]</sup>。

关于子汇水区的划分方法,前人已做了大量研究。杨严等<sup>[5]</sup>根据研究区域内检查井高程对上海市某区域进行子汇水汇区自动划分。李保建等<sup>[6]</sup>基于研究区内排水管网系统分区及各类用地性质布局,利用泰森多边形法对月湖新区进行子汇水区划分,将汇水区划分成256个面积为1.0~18.9 m<sup>2</sup>的子汇水区。Jain等<sup>[7]</sup>开发了一种基于遥感和地理信息系统(GIS)的子汇水区划分方法,利用地块边界、地形和拓扑关系划分城市地区子流域,使用暴雨洪水管理(SWMM)模型模拟了苏拉特市部分地区的降雨情况,该模型为雨水排放系统设计径流系数的合理化提供了空间。Li等<sup>[8]</sup>提出一种考虑土地利用类型和流向的子流域划分方法,经过在中国东营市大范围区域的验证,该方法适用于大区域的子流域划分,并且能够保证子流域与实际土地利用分布和径流方向一致。Yang等<sup>[9]</sup>基于D8算法和回流效应划分子汇水区,提出了一种SWMM和TELTMAC-2D耦合模型,经验证比传统模型具有更高的精度和优势。李铭<sup>[10]</sup>基于DeepLab V3+等深度学习手段构建的城市地类智能解译模型,提出构建一种考虑土地利用类型及径流方向的汇水区精细划分方法,对于不同空间尺度下的汇水区划分适用性较好。

然而,国内外对于提升子汇水区划分精度的研

究多是着力于根据地形、地块来分析径流方向,但这种分析方法往往需要基于高精度的数字高程模型(DEM)数据,而在地势平坦、建筑物密集的平原城市,高精度的DEM数据获取难度大,且基于DEM数据的分析方法未必适用,Gyasi-Agyei等<sup>[11]</sup>经过调查发现,在平坦区域,为了拥有良好的准确性和精密描绘水文状态,DEM数据的垂直精度要达到厘米甚至亚厘米级别。Callow等<sup>[12]</sup>经过调查发现,考虑DEM数据的D8算法在平坦的河网地区,难以复现准确的模拟结果。言铭等<sup>[13]</sup>利用InfoWorks ICM软件构建城市排水模型并探究产流表面坡度对模型模拟精度的影响,发现在受坡度影响较小的平原城市宜采用泰森多边形法,地形起伏较大的区域则宜选用GIS划分方法。因此,在地势平坦的城市密集区,需要综合考虑城市复杂下垫面信息和排水管网支管对雨水径流的影响,从而使子汇水区的划分更贴近实际情况<sup>[14]</sup>。

综上,本文选择InfoWorks ICM软件为研究工具,对传统手动划分子汇水区的方法进行优化改进,综合考虑研究区卫星影像图、城市排水主干管数据及小区内部支管数据的基础上,提出基于排水管网溯源分析法,并与泰森多边形法、基于DEM数据的盆域分析方法构建的模型进行模拟结果对比分析,验证其适用性和合理性,为复杂下垫面平原城市的子汇水区划分提供借鉴。

## 1 研究区域及基础数据

### 1.1 研究区概况

研究区位于珠三角某市中心城区北部平原片区,地势平坦,建筑物密集,面积约为2.21 km<sup>2</sup>,属亚热带季风气候,光热充足,雨量充沛。该市临海,夏季风带来大量水汽,这成为降水主要来源,年平均降水量为1 875.3 mm。夏季气温高,蒸发量大,降雨特点为短历时强降雨。研究区是该市人口、经济、交通、建筑高度集中的区域,能够较好地反映城市整体运行情况,且该区域四面环水,形成了较为封闭的

排水系统,可以较好地反映城市内涝情况,研究区概况如图 1 所示。

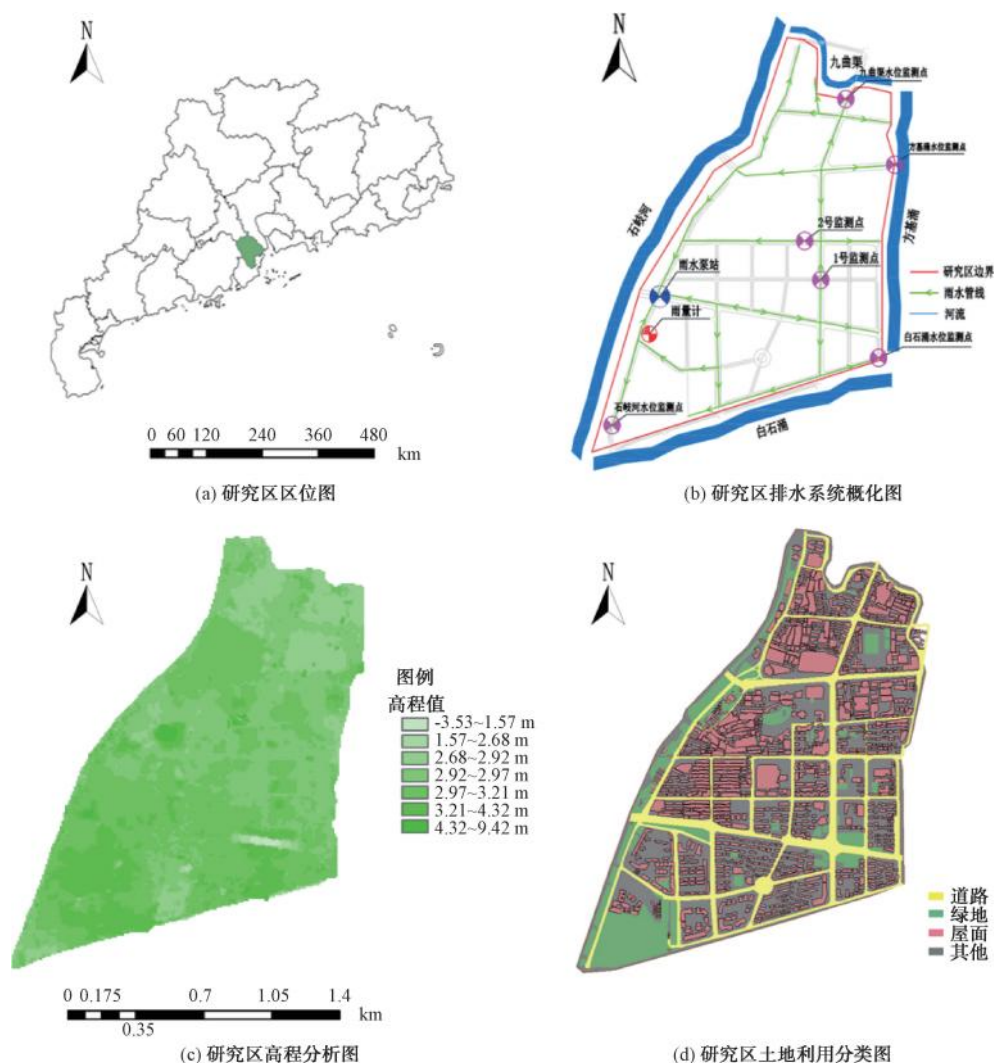


图 1 研究区概况图

Fig. 1 Overview Map of Study Area

## 1.2 基础数据

(1) 泵站运行情况: 研究区内建有一座排涝泵站, 当水位达到一定高度时会自动开启水泵往外河排水, 缓解城市内涝压力; 在研究区内还设有一座隧道提升泵站, 用于及时排出隧道内雨水。

(2) 监测数据: 研究区四面环水, 城市管网排水口易受到河水倒灌的影响, 河道水位对排水口连接管道的水位顶托作用明显, 因此, 在模型模拟时需要考虑河道水位的影响, 在研究区边界 4 条主要河渠上安装水位监测计用于获取实时边界水位数据, 用作模型模拟运行的输入条件; 为对模型进行率定和验证, 在研究区的排水管网主干管上选择 2 个关键节点安装液位监测计用于

收集井下液位数据; 降雨数据通过研究区内的雨量计获取, 研究区的主要管线概化图如图 1(b) 所示。

(3) 排水主干管数据: 研究区内包含雨水管线 40.6 km, 污水管线 21.0 km, 总节点 4 056 个, 其中排水口 94 个, 雨水口 1 380 个。

(4) 小区内部支管数据: 小区内部支管包括雨水管线 60.6 km, 节点 7 816 个。

(5) DEM 数据: 采用空间分辨率为 10 m 的 DEM 数据, 地面高程为 1.06~6.76 m, 研究区高程分析如图 1(c) 所示。

(6) 卫星影像图和土地利用分类图: 使用比例为 1:2 000 的卫星遥感影像图, 并根据影像图,

将研究区的下垫面类型分为道路、屋面、绿地、水域和其他(除道路、屋面、绿地、水域外的区域)5类,研

究区土地利用分类如图 1(d)所示。  
研究区的基础数据汇总如表 1 所示。

表 1 研究区基础数据汇总  
Tab. 1 Summary of Basic Data for Study Area

数据类型	种类	规格	备注
排涝泵站数据	—	2 用 1 备,单台流量为 3.5 m <sup>3</sup> /s,扬程为 10 m	2 用 1 备,第一台泵开闭水位为 -0.5、-2.2 m;第二台泵开闭水位-1.5、-2.2 m
隧道提升泵站数据	—	3 用 1 备,单台流量为 400 m <sup>3</sup> /h,扬程为 10 m	3 用 1 备,第一台泵开闭水位为 -4.0、-6.1 m;第二台泵开闭水位-4.2、-6.1 m;第三台泵开闭水位-4.4、-6.1 m
边界水位数据	石岐河水位 白石涌水位 方基涌水位 九曲渠水位	—	监测频率为 10 min/次
井下液位数据	1 号监测点 2 号监测点	—	监测频率为 10 min/次
降雨数据	“2023-08-10”降雨 “2023-09-14”降雨 “2023-10-09”降雨	历时 150 min,雨量为 52.36 mm 历时 165 min,雨量为 20.80 mm 历时 330 min,雨量为 97.20 mm	监测频率为 5 min/次
土地利用分类	道路 绿地 屋面 水域 其他	37 hm <sup>2</sup> 26 hm <sup>2</sup> 66 hm <sup>2</sup> 0 hm <sup>2</sup> 92 hm <sup>2</sup>	—

2 研究方法

主要研究步骤如下。(1)子汇水区划分:分别采用泰森多边形法、基于 DEM 数据的盆域分析法和基于排水管网溯源分析法对研究区进行汇水区划分。(2)模型构建及参数率定:为了便于对比 3 种不同子汇水区划分方案对模型模拟精度的影响,需要先拟定一种方案进行参数率定<sup>[15]</sup>,本文选用泰森多边形法作为参数率定的基准,统一 3 种方案的模型参数设置,先使用泰森多边形法划分的子汇水区进行 InfoWorks ICM 模型构建,并进行率定,将率定成功后的模型参数用于另外 2 种方案的模型构建中。(3)在 3 场不同的降雨情景下运行 3 种方案构建的模型,对模拟结果进行对比分析。技术流程如图 2 所示。

3 子汇水区划分方法

采用 3 种不同方法划分子汇水区,为与实际情况贴合,选择雨水口作为子汇水区的汇水节点,并选择根据泰森多边形法划分子汇水区的方案进行模型率定,将率定参数统一用于 3 种方案构建的模型,并

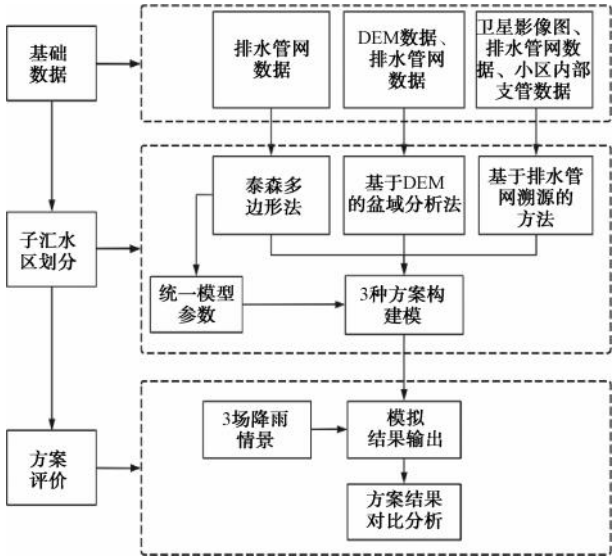


图 2 研究方法技术路线图

Fig. 2 Technology Roadmap for Research Methodology

将模拟结果与实测数据进行对比分析,3 种方案的具体划分方法如下。



### 3.1 泰森多边形法

基于 InfoWorks ICM 模型内嵌的泰森多边形法自动划分子汇水区,泰森多边形法的原理是根据雨水口节点的空间分布情况自动划分子汇水区,使每一个子汇水区内都有一个节点与其一一对应,且子汇水区内任意点到该区域节点的距离最近。泰森多边形法充分考虑了排水管网对汇水的影响,且操作简单快捷,但并未考虑地形对径流的影响,子汇水区按距离均等划分也易造成汇水区边界切割建筑物等不符合实际地表径流的情况<sup>[16]</sup>。

### 3.2 基于 DEM 数据的盆域分析法

综合地形和排水管网数据,先基于 D8 算法,以 DEM 数据为基础构建高程不规则三角网(TIN)模型并对研究区进行盆域分析,根据盆域分析结果划分出一级子汇水区,然后对一级子汇水区中不合理处进行修正,对不存在管网节点的一级子汇水区,与相邻的子汇水区进行合并,保证每个一级子汇水区都至少有一个管网节点。然后在一级子汇水区的基础上采用泰森多边形法进行细分,划分出二级子汇水区。具体操作流程:在 GIS 软件中导入高程点数据、创建 TIN 模型、TIN 转格栅、填洼处理、流向分析、盆域分析、无排水节点汇水区处理、泰森多边形法细化子汇水区。基于 DEM 数据的盆域分析法可借助 GIS 软件辅助划分子汇水区,操作简单快捷,在拥有高精度 DEM 数据且地形因素对城市管网汇水影响较大的情况下,可以获得较高精度的模拟结果,但盆域分析未考虑城市区域中其他建筑物要素对汇流过程的影响,以及排水管网支管对雨水径流的影响,且要求 DEM 数据的垂直精度高、地形起伏较大,因此,盆域分析法不适用于复杂下垫面平原城市地区。

### 3.3 基于排水管网溯源分析法

传统的汇水区划分方法以卫星影像图为背景,按照人工经验绘制得到子汇水区,这种方法主观性及不确定性大,难以考虑地形及管网对径流的影响<sup>[17]</sup>。本研究综合卫星影像图、城市排水管网数据及小区内部支管数据,提出一种基于城市排水管网和小区内部支管数据对小区内部管网收水情况进行溯源,以简化小区内部子汇水区划分的方法。模型的建立依旧以排水主管数据为基础,小区内部支管数据和卫星影像图作为辅助划分子汇水区的依据,借助城市主管数据和小区内部支管数据对小区

内支管网进行上游追踪溯源,以获取其实际的收水范围,再根据支管的服务范围和卫星影像图的建筑物轮廓划分小区内子汇水区,以小区支管实际接入的城市主管节点为子汇水区的汇入点。

基于排水管网溯源分析法流程及划分标准如下。(1)数据收集处理:先收集城市排水主管数据和小区内部支管数据,以便于管网溯源操作,在管网数据完整的情况下可将主管和支管数据导入 ICM 软件中借助上游追踪工具进行管网溯源,本研究所获取的支管数据较为复杂且存在较多连接中断的问题,借助 GIS 数据处理工具对管网数据进行预处理,并导入卫星影像图作为底图辅助划分。(2)管网溯源分析:基于小区支管在排水主管中的接入点,对小区内部管网进行溯源,以获取其实际的收水范围,管网溯源的原理概化图如图 3 所示。(3)小区内部子汇水区划分:根据管网溯源确定每套支管的服务范围后,以服务范围为边界划分子汇水区,划分过程中以卫星底图的建筑物轮廓为划分参考,避免发生划分的子汇水区边界切割建筑物的情况,尽量保证支管服务范围内的建筑物在该子汇水区内。



图3 基于排水管网溯源分析法原理概化图

Fig. 3 Principle Generalization Diagram Based on Traceability Analysis Method of Drainage Network

基于排水管网溯源分析法借助管网溯源完成子汇水区划分,充分考虑了小区内部管网的实际收水情况,同时避免发生划分的子汇水区边界切割建筑物的情况,在复杂下垫面平原城市地区,更能够准确

吻合实际管网节点的收水范围,提高子汇水区划分的合理性和准确性。

### 3.4 划分结果

3种方案的整体划分结果及局部区域示意图如图4所示。通过分析划分结果的局部示意图可知:传统的泰森多边形法依据距离最近原则划分子汇水区,只考虑地表径流的距离长短,图中示意区域的收水方向从中间向四周发散,各子汇水区均匀分布,且有较多子汇水区边界切割建筑物的情况;图中盆域分析法的子汇水区划分结果与泰森多边形法较为接近,雨水的汇流方向基本都是从中间往四周发散;通过分析盆域分析法的原理可知,盆域分析方法主要考虑地形因素对汇水的影响,在基于DEM数据生成

的盆域基础上进行子汇水区划分,但本研究区地势平坦,盆域分析生成的初级子汇水区面积过大,导致盆域分析法划分结果不够精细,而初级子汇水区内部又是按照泰森多边形法进行划分的,所以与泰森多边形法的划分结果较为接近。排水管网溯源分析法基于研究区卫星影像图、城市排水主干管及小区内部支管数据,通过对小区内部管网进行上游追踪溯源,获取实际的管网收水范围。因此,与实际管网收水情况较为接近,从局部示意图可以看出,该方法与泰森多边形法的划分结果有较大区别,汇流方向更加贴近实际,且基于小区内部管网溯源分析法划分的子汇水区面积更大,数量更少,一定程度上简化了地表及管网汇流过程,提高了模型的运行效率。

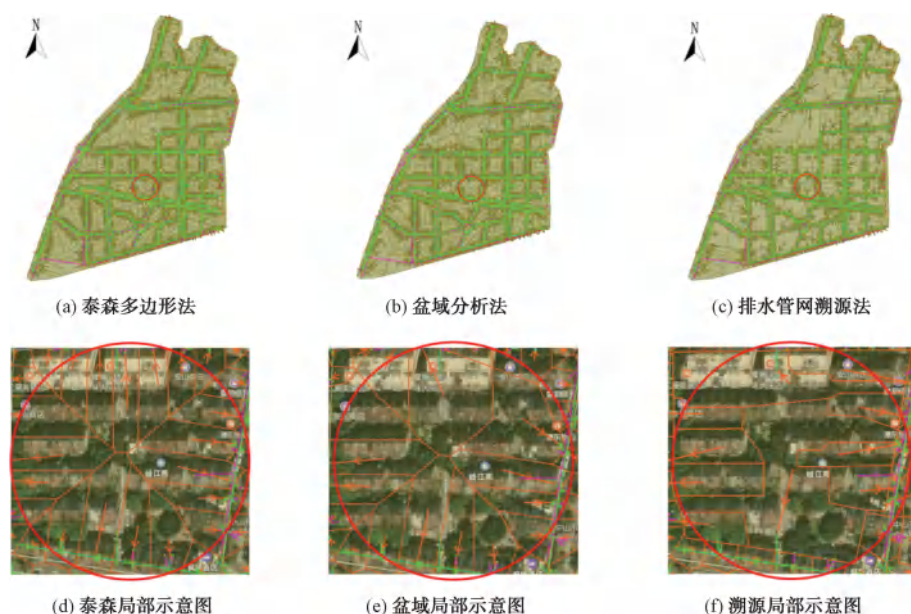


图4 划分结果方案对比

Fig. 4 Comparison of Delineation Results Schemes

## 4 模型构建及参数率定

### 4.1 研究区模型构建

选用 InfoWorks ICM 软件对研究区进行城市内涝模型构建,将研究区管线及节点进行概化并导入 ICM 构建一维管网模型,并采用3种方案进行子汇水区划分,汇水区的初始水文参数按照经验值进行确定,二维模型的建立要引入地面基础地形数据,在一维模型的基础上利用研究区 DEM 数据建立地面高程模型,并对研究区除下垫面类型为屋面外的区域进行2D三角网格划分即可实现一、二维模型耦合。考虑到河流顶托作用的影响,模型的运行除实测降雨事件外还需要实测边界水位数据为输入条

件。模型构建流程如图5所示。

### 4.2 参数率定

为了便于对比3种不同子汇水区划分方案对模型模拟精度的影响,需要先拟定一种方案进行参数率定<sup>[13]</sup>。本文选用泰森多边形法作为参数率定的基准,统一3个方案的汇水区参数设置。首先,需要根据当地相关规划文件和设计规范确定参数的初始值,采用“2023-09-14”降雨时间对模型进行模拟,并以1、2号监测点实测液位数据为标准模型参数进行率定,并采用“2023-08-10”降雨事件验证参数率定结果。

根据《城镇内涝防治系统数学模型构建和应用规程》(T/CECS 647—2019),采用纳什效率系数

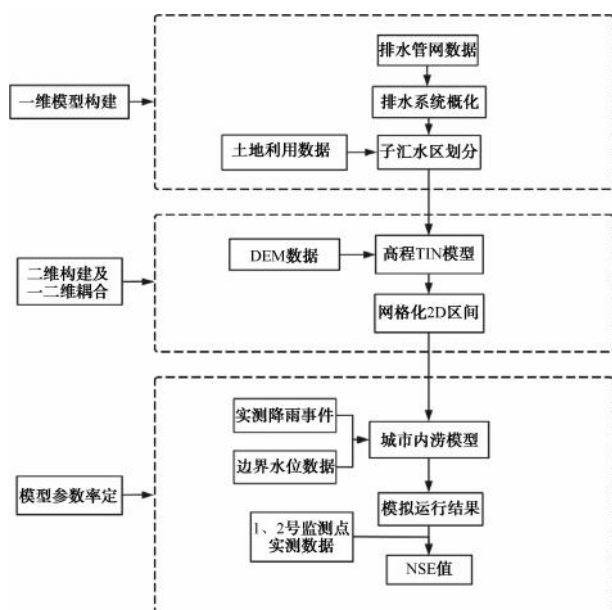
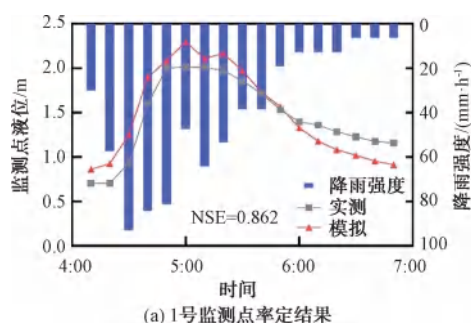
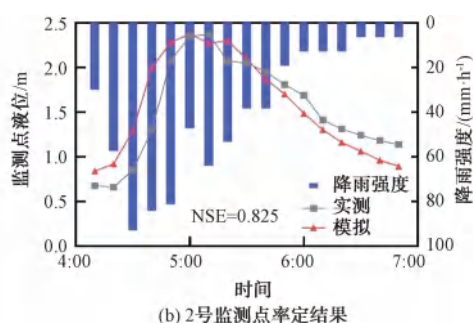


图5 模型构建流程图

Fig. 5 Model Building Flowchart



(a) 1号监测点率定结果



(b) 2号监测点率定结果

图6 “2023-09-14”参数率定结果

Fig. 6 Results of “2023-09-14” Parameters Calibration

由图6可知,1、2号点位的NSE值都达到了0.75以上,模型拟合程度较高,率定参数结果可用于后续方案比较,由于参数较多,模型的率定结果分两部分展示(表2和表3)。

表2 参数率定结果1

Tab. 2 Results 1 of Parameters Calibration

下垫面类型	固定径流系数	汇流参数	初期损失	汇水区地面坡度
道路	0.76	0.010	0.000 071	0.04
绿地	—	0.025	0.002 000	0.04
屋面	0.81	0.010	0.000 071	0.04
综合	0.45	0.012	0.000 071	0.04

将参数率定结果用于运行“2023-08-10”降雨的模型中,结果如图7所示。NSE值都在0.75或以上,满足规范要求,所以此次模型参数率定的效果较

(NSE)作为模型精度的评判标准,对比2个检查井监测点位的实测液位和模拟液位的拟合程度。当 $NSE=1$ 时,说明实际情况和模拟情况完全一致; $0.50 < NSE \leq 0.65$ ,说明模拟结果可以接受; $0.65 < NSE \leq 0.75$ ,说明模拟结果较好; $0.75 < NSE < 1.00$ ,说明模拟结果非常好。

NSE值的计算如式(1)。

$$N_{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (1)$$

其中: $N_{NSE}$ ——NSE;

$Q_i$ ——实测值;

$\bar{Q}$ ——实测值的平均值;

$Q_i$ ——模拟值;

$n$ ——整个观测项目的个数。

参数率定结果如图6所示。

表3 参数率定结果2

Tab. 3 Results 2 of Parameters Calibration

管材	曼宁系数
高密度聚乙烯(HDPE)	0.014
聚乙烯(PE)	0.016
聚氯乙烯(PVC)	0.016
混凝土	0.022
砖石	0.024
砗	0.022
聚乙烯塑钢	0.016
钢	0.019
钢筋混凝土	0.022
铸铁	0.019

好,可用作后续方案对比的统一参数。



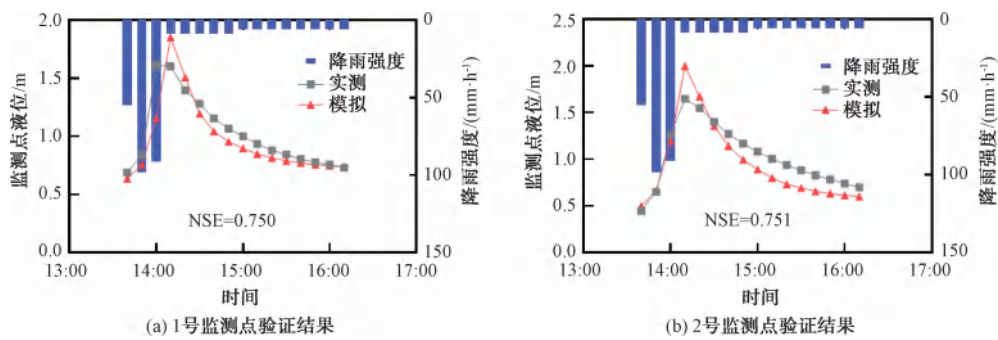


图 7 “2023-08-10”参数率定结果  
Fig. 7 Results of “2023-08-10” Parameters Calibration

5 模拟结果对比分析

(1) 监测点液位曲线与 NSE 值分析

采用 4.2 小节率定的结果作为 3 种方案统一的汇水区参数,在“2023-08-10”“2023-09-14”

“2023-10-09”3 场降雨情景下,分别用于泰森多边形法、基于 DEM 数据的盆域分析法和基于排水管网溯源分析法中,得到模拟结果如图 8 和表 4 所示。

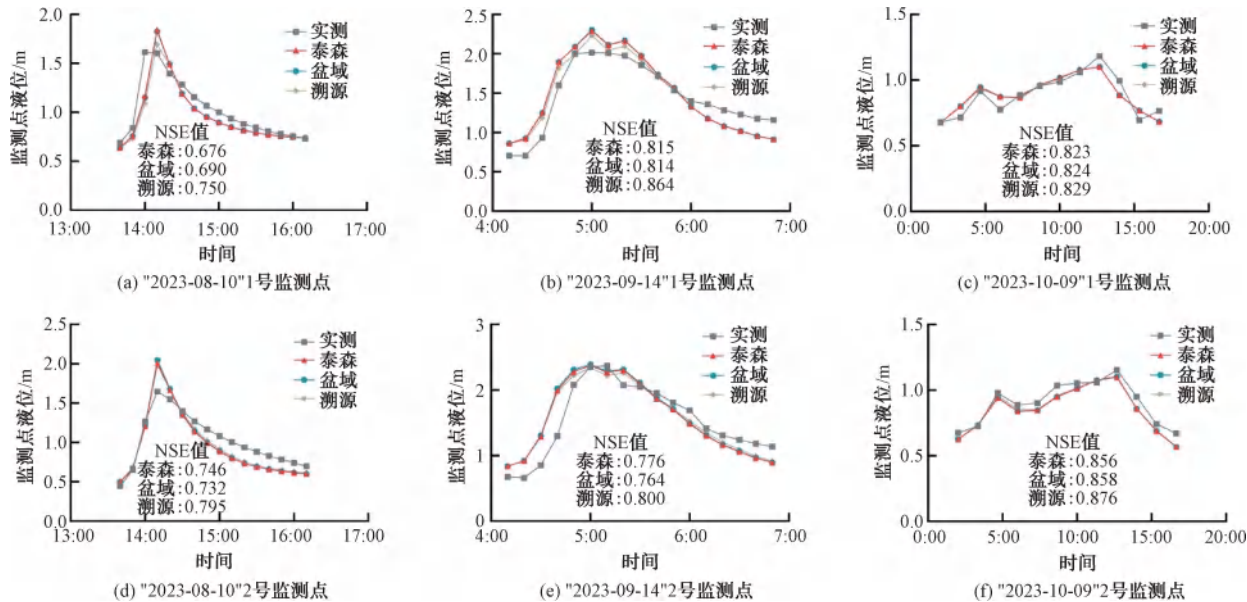


图 8 不同降雨情景下 3 种方案模拟结果对比

Fig. 8 Comparison of Simulation Results of Three Schemes under Different Rainfall Scenarios

表 4 不同降雨情景下 3 种方案 NSE 值评估

Tab. 4 Evaluation of NSE Values for Three Schemes under Different Rainfall Scenarios

降雨情景	方案	1 号监测点 (NSE 值)	2 号监测点 (NSE 值)
“2023-08-10”	泰森多边形法	0.676	0.746
	基于 DEM 数据的盆域分析法	0.690	0.732
	基于管网溯源分析法	0.750	0.795
“2023-09-14”	泰森多边形法	0.815	0.776
	基于 DEM 数据的盆域分析法	0.814	0.764
	基于管网溯源分析法	0.864	0.800
“2023-10-09”	泰森多边形法	0.823	0.856
	基于 DEM 数据的盆域分析法	0.824	0.858
	基于管网溯源分析法	0.829	0.876



综合分析图表结果可得:在 3 场不同的降雨情景下,1、2 号监测点 NSE 值均是基于排水管网溯源分析法最高,与实测液位曲线的拟合程度最接近,说明该方法的划分结果与实际情况偏差较小,模型模

拟精度最高。

#### (2) 监测点峰值液位分析

对模拟结果的峰值液位和实际峰值液位进行对比分析,结果如表 5 所示。

表 5 不同降雨情景下 3 种方案峰值液位评估

Tab. 5 Evaluation of Peak Levels for Three Schemes under Different Rainfall Scenarios

降雨情景	子汇水区划分方法	1 号监测点			2 号监测点		
		峰值液位/m	实测峰值液位/m	偏差	峰值液位/m	实测峰值液位/m	偏差
“2023-08-10”	泰森多边形法	1.844	1.615	14.18%	2.007	1.646	21.93%
	基于 DEM 的盆域分析法	1.827		13.13%	2.044		24.18%
	基于排水管网溯源分析法	1.695		4.95%	1.987		20.72%
“2023-09-14”	泰森多边形法	2.294	2.016	13.79%	2.373	2.35	0.98%
	基于 DEM 的盆域分析法	2.303		14.24%	2.388		1.62%
	基于排水管网溯源分析法	2.233		10.76%	2.339		0.47%
“2023-10-09”	泰森多边形法	1.101	1.183	6.93%	1.099	1.153	4.68%
	基于 DEM 的盆域分析法	1.101		6.93%	1.100		4.60%
	基于排水管网溯源分析法	1.101		6.93%	1.106		4.08%

对 3 种方案的峰值液位偏差结果进行分析,除“2023-10-09”的 1 号监测点峰值液位偏差值较为接近外,其他情况下基于排水管网溯源分析法的峰值液位与实测峰值液位的拟合程度最高,偏差均明显低于泰森多边形法和基于 DEM 的盆域分析法,进一步验证了该方法对于模型精度的提升作用。

综合上述分析结果可得,传统的泰森多边形法多用于对模型精度要求不高,地面坡度较缓的场景,只需要输入排水管网主管数据便可自动进行子汇水区划分,可以提高模型构建效率;而盆域分析法则适用于地形起伏较大,地表径流受地形影响较大的情况,通过 DEM 数据在 ArcGIS 软件中进行盆域分析,从而实现子汇水区划分。但在复杂下垫面平原城市中,由于建筑物密集的城中村等区域和城市的居民小区的地形起伏小、下垫面复杂,地表径流受地形、距离等因素的影响小,而受小区内部支管的布设、走向的影响大,传统的子汇水区划分方法的效果往往不够理想。因此,对于复杂下垫面平原城市地区的城市内涝模型构建,可以采取基于排水管网溯源分析法对子汇水区进行划分,该方法根据小区内部管网进行上游溯源分析,并根据建筑物空间布局划分子汇水区,可以较好地拟合实际地表汇流过程,提升模型的模拟精度。该方法对于建立城市内涝模型对城市的排水系统进行分析,或研究城市排水管网改

造方案,对内涝情况进行预测及整治等需要高精度模型应用的情景,具有借鉴意义。

## 6 结论与展望

本文针对复杂下垫面平原城市的径流特征,提出一种基于排水管网溯源分析法,并传统泰森多边形法、基于 DEM 数据的盆域分析法进行对比分析,得出主要的研究结论如下。

(1) 基于排水管网溯源分析法综合考虑了城市下垫面情况、城市排水主干管管网和小区支管布局,基于小区管网在主管的接入点对小区管网进行上游溯源,获取小区内部的实际收水范围,基于溯源结果进行子汇水区划分,使得划分结果能够更加准确地复现城市地表径流过程。

(2) 通过方案对比证明,在不同降雨事件下,使用基于排水管网溯源分析法构建的模型模拟精度均高于传统泰森多边形法和基于 DEM 数据的盆域分析法。因此,在复杂下垫面平原城市的模型构建时,使用基于排水管网溯源分析法能更贴合管网的实际收水情况,提高模型精度。

(3) 本研究所提出的子汇水区划分方法在下垫面复杂的平原城市地区具有较好的适用性,简化了子汇水区的划分结果,并且更符合实际情况,一定程度上提高了模型运算效率,可考虑在未来运用于城市内涝在线模型以提高响应速度,对城市内涝风险

预警具有重要意义。

### 参考文献

- [1] QUESADA-ROMÁN A. Flood risk index development at the municipal level in Costa Rica: A methodological framework [J]. *Environmental Science & Policy*, 2022, 133: 98–106. DOI: 10.1016/j.envsci.2022.03.012.
- [2] AERTS J C J H, BOTZEN W J, CLARKE K C, et al. Integrating human behaviour dynamics into flood disaster risk assessment [J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8(3): 193–199.
- [3] 胡伟贤, 何文华, 黄国如, 等. 城市雨洪模拟技术研究进展 [J]. *水科学进展*, 2010, 21(1): 137–144.
- HU W X, HE W H, HUANG G R, et al. Review of urban storm water simulation techniques [J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(1): 137–144.
- [4] CARPENTER T M, GEORGAKAKOS K P. Discretization scale dependencies of the ensemble flow range versus catchment area relationship in distributed hydrologic modeling [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 328(1/2): 242–257. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.12.008.
- [5] 杨严, 彭海琴. 城市排水系统内涝风险评估 [J]. *净水技术*, 2018, 37(8): 116–121.
- YANG Y, PENG H Q. Assessment of waterlogging risk for urban drainage system [J]. *Water Purification Technology*, 2018, 37(8): 116–121.
- [6] 李保建, 王林, 余俊. 基于 MIKE URBAN 模型的管道排水能力评估 [J]. *净水技术*, 2022, 41(2): 111–117.
- LI B J, WANG L, YU J. Evaluation of pipelines drainage capacity based on MIKE URBAN model [J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(2): 111–117.
- [7] JAIN G V, AGRAWAL R, BHANDERI R J, et al. Estimation of sub-catchment area parameters for storm water management model (SWMM) using geo-informatics [J]. *Geocarto International*, 2016, 31(4): 462–476.
- [8] LI C M, FAN Z X, WU Z, et al. Methodology of sub-catchment division considering land uses and flow directions [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2020, 9(11): 634.
- [9] YANG W C, ZHENG C X, JIANG X L, et al. Study on urban flood simulation based on a novel model of SWTM coupling D8 flow direction and backflow effect [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 621: 129608. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129608.
- [10] 李铭. 基于汇水区精细划分的城市雨洪模型优化研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- LI M. Research on optimization of urban stormwater model based on fine division of catchment area [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [11] GYASI-AGYEI Y, WILLGOOSE G, TROCH F P D. Effects of vertical resolution and map scale of digital elevation models on geomorphological parameters used in hydrology [J]. *Hydrological Processes*, 1995, 9(3/4): 363–382. DOI: 10.1002/hyp.3360090310.
- [12] CALLOW J N, VAN NIEL K P, BOGGS G S. How does modifying a DEM to reflect known hydrology affect subsequent terrain analysis? [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 332(1/2): 30–39. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.06.020.
- [13] 言铭, 魏忠庆, 黄永捷, 等. 汇水区划分对 InfoWorks ICM 水力模拟结果的影响 [J]. *中国给水排水*, 2019, 35(1): 111–117.
- YAN M, WEI Z Q, HUANG Y J, et al. Impact of catchment division on InfoWorks ICM hydraulic simulation [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(1): 111–117.
- [14] 沈黎达, 李瑶, 李东臣, 等. 复杂下垫面城市暴雨内涝汇水区划分方法研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(6): 50–58, 67.
- SHEN L D, LI Y, LI D C, et al. Study on dividing method of rainstorm waterlogging catchment area in urban area with complex underlying surface [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2019, 30(6): 50–58, 67.
- [15] 杨佳利, 徐拥军, 梁藉, 等. 雨水管网模型子汇水区划分与模拟精度 [J]. *南水北调与水利科技 (中英文)*, 2022, 20(2): 338–351.
- YANG J L, XU Y J, LIANG J, et al. Subcatchment division and simulation precision of rainwater pipe network model [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2022, 20(2): 338–351.
- [16] 朱治州, 张书亮, 王一梅, 等. 基于多要素的城市汇水区分级划分研究 [J]. *南京师大学报 (自然科学版)*, 2020, 43(3): 71–77.
- ZHU Z Z, ZHANG S L, WANG Y M, et al. Research on hierarchical partition of urban catchment area based on multiple factors [J]. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition)*, 2020, 43(3): 71–77.
- [17] 赵冬泉, 陈吉宁, 佟庆远, 等. 基于 GIS 构建 SWMM 城市排水管网模型 [J]. *中国给水排水*, 2008, 24(7): 88–91.
- ZHAO D Q, CHEN J N, TONG Q Y, et al. Construction of SWMM urban drainage network model based on GIS [J]. *China Water & Wastewater*, 2008, 24(7): 88–91.