

# 基于数值模拟的城市排水系统定量分析研究

文 / 张仲航 中国市政工程中南设计研究总院有限公司  
 林 璐 中国市政工程中南设计研究总院有限公司  
 卢 元 中国市政工程中南设计研究总院有限公司  
 阮鹏程 中国市政工程中南设计研究总院有限公司

**摘要:** 为明确城市排水系统影响因素,提高城市内部涝水排除效率,本文采用数值模拟方法对实际工程进行建模分析,分析结果表明,子汇水区域宽度系数、径流曲线数、不透水区域的曼宁系数、透水区域曼宁系数等因素中,径流曲线数对模型输出高度敏感,其原因在于径流曲线数会直接影响通过下渗转化为地表径流的降雨量,使得进入管道的雨水量降低,直接影响后续降雨在管道中的传输。此外,针对案例系统的优化研究表明主管道的管径对于涝水排除效果的影响较大,而部分管道若存在问题其影响范围较小,但会对具体区域内产生不利影响。本文研究内容对于城市排水系统的设计与优化工作具有指导意义。

**关键词:** 数值模拟; 市政给排水; 排水系统; 定量分析; 敏感性分析; 参数优化

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.16.018

## 引言

随着社会经济的不断发展,城市内人口数量逐年增加,同时城市规模也在逐年增大,这在促进社会发展的同时,也给城市内市政给排水系统尤其排水系统带来了巨大的压力<sup>[1,2]</sup>。当发生强度较大的降雨事件后,会造成城市排水管网压力过大,此时雨水无法及时有效的排除,极易在城市低洼处造成积水内涝,严重影响城市交通甚至人民群众生命财产安全<sup>[3~5]</sup>。自20世纪70年代起美国等发达国家开始利用数学模型模拟城市地表径流对降雨事件的响应过程用于城市防洪规划和管网的优化。本文以具体工程为研究对象进行数值模拟,分析各参数对排水系统的制约情况,以期对排水管网优化设计与改扩建工作提供理论基础。

## 一、雨水管理模型基本原理

### (一) 雨水管理模型概述

雨水管理模型(Storm water management model SWMM)是1971年于美国佛罗里达大学开发的一款计算机模拟软件,主要功能在于模拟城市降雨、城市水质、城市水量计算等。本文利用雨水管理模型及案例分析模型采用国际上降雨模拟常用的芝加哥雨型,同时结合研究区域所在城区的土地利用情况以及水文气象条件,分别计算P=5a、P=10a、P=20a的降雨数据。SWMM中针对降雨-径流水文-水力模拟是采用非线性水库路由方法计算的。SWMM具有水文径流和水力径流计算的特点,其中径流特性的差异受气候、土地覆盖、不透水和透水配置、透水区域土壤类型、管网拓扑结构和管道特性的影响。水文径流是径流出口(如节点)之间连接子流域的计算路径。而水力径流则是通过连接节点(即水力径流出口)与城市河流之间的城市排水网络向下游输送的。

### (二) 雨水管理模型计算原理

#### 1. 地表产流计算原理

图1为地表产流原理即计算过程图,如图1所示地表产流主要包括透水与不透水两类,在城市降雨模拟中

可分别对应透水路面和不透水路面,而不透水路面又可分为有存水不透水路面(S2)和无存水路面(S3)。地表产流的计算主要为降雨量减去入渗、蒸发、植物截留以及洼地存水等。

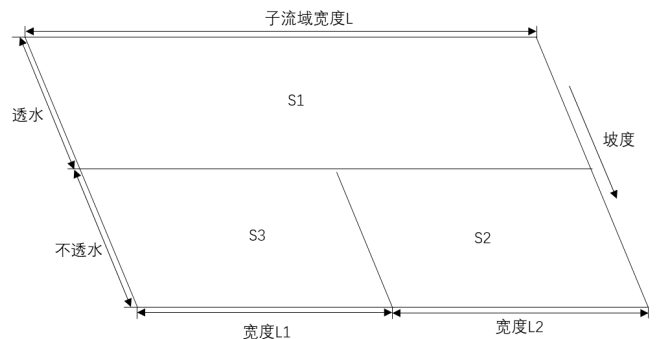


图1 地表产流计算

地表产流计算如下:

$$R = P - I - E - D \quad (1)$$

式中: R: 路面产生的产流量, mm; P: 降雨强度, mm; I: 入渗量, mm; D: 洼地存水量, mm; E: 蒸发量, mm。

式(1)为地表产流计算公式,在实际计算中可根据路面性质分别计算,其中透水路面按照式(1)计算,存水不透水路面地表产流计算中不考虑入渗量即蒸发量两项,不存水不透水路面地表产流计算不考虑入渗量项。

地表产流会产生汇流,如图1所示,单个子流域中的径流雨水会根据所在地势等条件的影响,根据坡度汇入一个集水口,该过程被成为地表汇流,SWMM中针对子区域中地表汇流的计算采用非线性水库计算方法:

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dd}{dt} = Ai^* - \frac{1.49W}{n} (d - d_p)^{5/3} S^{0.5} \quad (2)$$

式中: V: 为子区域排水量, m<sup>3</sup>; d: 水深, m; t: 时间, s; A: 子区域面积, m<sup>2</sup>; i: 净雨强度, mm/s; W: 子区域汇水区宽度, m; n: 曼宁糙率; d: 滞蓄深度, m; S: 子区域坡度, °。

2. 降雨过程的实现

针对降雨过程，降水的不同阶段地下状态各不相同，因此采用不同的计算方法，针对降雨初期，此时土体在雨水的作用下，其自身含水量从天然状态逐渐饱和，该过程需要根据土体渗透系数、湿润峰吸入水头等计算含水量亏损：

$$F = \frac{K_s S_w (\theta_s - \theta_i)}{i - K_s} \quad (3)$$

式中：F：降雨累计下渗量，mm；K<sub>s</sub>：饱和水力传到系数，m/d；S<sub>w</sub>：浸润面上的土壤水吸水能力；θ<sub>s</sub>：初始体积含水量，g；θ<sub>i</sub>：饱和体积含水量，g；i：降雨强度，mm/h。

在降雨初期至降雨末期，地表入渗量随时间呈现指数降低的趋势，此时需考虑入渗率、水煎指数以及土壤的排水能力：

$$f_p = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (4)$$

式中：f<sub>p</sub>：土体入渗能力，mm；f<sub>c</sub>：土体稳定入渗率，mm/min；f<sub>0</sub>：初始入渗率，mm/min；t：时间，min；k：土体经验常数。

3. 管道汇流方法

针对管道汇流计算，常采用恒定流、运动波以及动态波三种算法。动态波运算充分考虑了管道汇流的各种约束条件，其表达为求解一维圣维南方程组：

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} = S_0 - S_f \quad (6)$$

$$Q = \frac{AR^{2/3}S_0^{0.5}}{n} \quad (7)$$

式中，Q：出流流量，m<sup>3</sup>/s；A：水断面面积，m<sup>2</sup>；v：速度，m/s；x：管道长度，m；R：水力半径，m；H：水深，m；S<sup>f</sup>：摩擦系数；S<sub>0</sub>：重力项；g：重力加速度，取9.8m/s<sup>2</sup>；n：曼宁系数。

二、模型的建立

(一) 研究区域

某排水区域位于城市内，是一个具有代表性的洪涝区，年平均降雨量为1418mm。该排水网络由101个节点、101个链接和1个出口组成。排水管网的管道总长度为3.546km，子流域总面积为0.347km<sup>2</sup>。该排水管网的土地利用特征包括80%的住宅区、16%的公共区域和4%的道路区域。研究区域管道简图如图2所示。

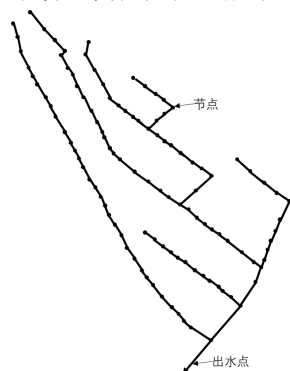


图2 研究区域管道示意图

(二) 模型建立

本文采用国际上降雨模拟常用的芝加哥雨型，同时结合研究区域所在城区的土地利用情况以及水文气象条件，分别计算P=5a、P=10a、P=20a的将与数据针对子汇水区域的建模，需要考虑子汇水面积的区域、坡度、宽度，不渗透部分展开分析，不渗透性粗糙系数、渗透性部分粗糙系数、洼地储水、管道粗糙情况等内容。本工程针对子回水区域的参数设置如下：

表1 子汇水区域主要参数取值范围

参数	取值范围
平均坡度	0.050%-1.572%
不透水百分比	0-54%
不透水性粗糙系数	0.03
渗透性粗糙系数	0.15
不透水性洼地蓄水	15mm
最大入渗率	65%-95%
最小入渗率	0%-20%
模拟径流系数	0.7-0.85

三、定量分析及参数优化

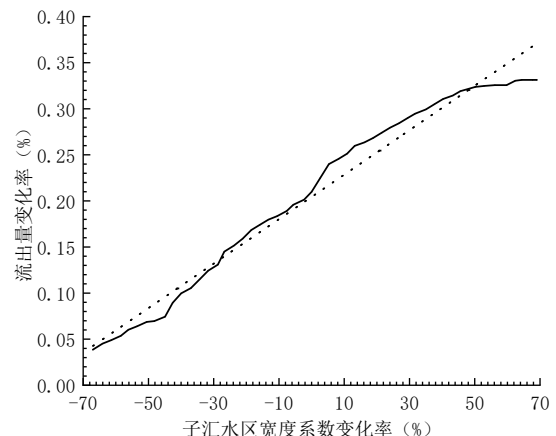
(一) 敏感性定量分析

1. 敏感性分析设置

为明确各参数对于管道流出量的影响，本文采用所建立的SWMM模型，定量论证子汇水区域宽度系数、径流曲线数、不透水区域的曼宁系数、透水区域曼宁系数等因素对管道出水口流出量的影响。本文所采用的敏感性分析方法是以前模型参数为基准，单独改变某一参数的大小，并记录所得出口处流量数据，并绘制相关曲线，以分析其敏感性。

2. 子汇水区域宽度系数敏感性

图3为子汇水区域宽度系数及径流曲线对管道系统出口出水量的影响情况，由图可知，随着子汇水区域宽度系数的增加，管道口出口处出水量逐渐增加，但整体变化范围不大，子汇水区与宽度因子从模型初始值的-70%变化至70%过程中，管道出口处储水量仅变化约0.27%，且整体呈现线性变化，将曲线进行线性拟合后，斜率约为0.00241±5.41707×10<sup>-5</sup>，由此可见，子汇水区域宽度系数对管道出口处出水量影响较小。



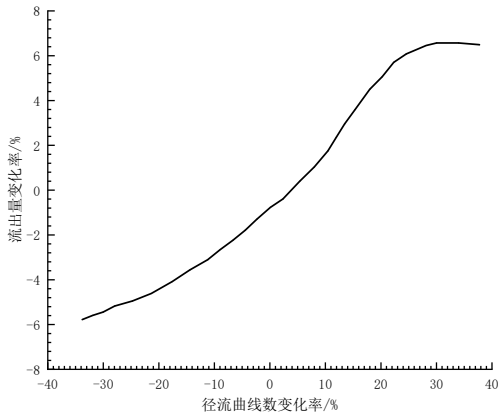


图3 宽度系数与径流曲线数敏感度曲线

### 3. 其他因素敏感性

径流曲线数对于出水流量的影响较大，计算结果显示当径流曲线数从初始值减少35%变化至从初始值增加35%时，管道流出量共增加约11.8%，为本次敏感性分析中变化量最大的影响因素。此外，分析还发现随着径流曲线数的增加，管道出口处流出量逐渐增加，但当径流曲线数增大到一定条件后，流出量逐步稳定在一定范围，不随着径流曲线数变化而变化。

通过对子汇水区域宽度系数、径流曲线数对出水量的影像进行敏感性分析。发现随着不透水区域曼宁系数、透水区域曼宁系数以及管道粗糙度的曼宁系数的增加，出水量会呈现负相关，其原因在于曼宁系数的增加代表水流出摩擦的程度越高，而摩擦造成的损失最终导致出水量降低。此外敏感性分析发现径流曲线数对模型输出高度敏感，其原因在于径流曲线数会直接影响到通过下渗转化为地表径流的降雨量，会使得进入管道的降雨量降低，直接影响后续降雨在管道中的运输。

### (二) 参数优化分析

#### 1. 参数优化方案

以涝水排除效率为优化结果，对案例中管网进行优化设计，针对排水系统管网的优化改造措施主要包括结构优化、设施优化和布局优化等措施。针对数值模拟分析结果，首先逐步核查出水点位上部区域排水分区是否合理，是否存在地势低洼等情况，同时核查系统内管径是否合理，是否存在大管接小管的问题。在发现问题后仍需要结合改造难度、改造成本等因素综合分析选择合理优化方法。本文中结合工程实际情况与数值计算结果发现管道系统内存在两处大管接小管的问题。同时发现出口段主管道管径无法满足实际排涝需求。因此本文针对上述问题，提出方案一为仅改善两处管径问题，将衔接处管道进行置换，方案二为对出水管出管道进行更换，增大管径。

#### 2. 方案对比结果

对两方案内容进行数值计算，并与原始方案出水量进行比较，如图4所示。在实行方案一后，随着降雨过程出水量较初始条件下略有提高，峰值储水量从1.21m<sup>3</sup>/s增长到1.45m<sup>3</sup>/s，约增长19.8%，实行方案二后，峰值

出水量从1.21m<sup>3</sup>/s约增长20.0%，增长约72.7%。从计算结果可知，两方案均能够一定程度上改善出水量，且减少积涝时间，但方案二的改善程度明显优于方案一，说明主管道管径对于涝水排除效果的影响较大，而部分管道若存在问题其影响范围较小，对于城市整体涝水排除效果影响不大，但会对具体区域内产生不利影响。

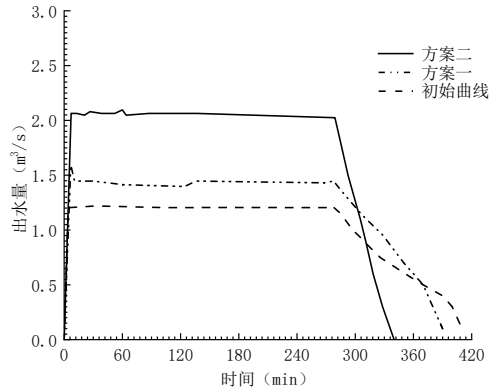


图4 优化后出水口流量曲线

### 结语

为明确城市排水系统重点影响因素，提高城市排水系统设计质量，本文采用数值模拟的方法对城市排水系统进行定量分析，所得结论如下：

(1) 通过对模型参数进行敏感性分析发现，径流曲线数对模型输出高度敏感，其原因在于径流曲线数会直接影响到下渗转化为地表径流的降雨量，会使得进入管道的降雨量降低，直接影响后续降雨在管道中的运输。

(2) 结合模型和实际情况对排水系统进行优化，说明在城市排水系统中，主管道的管径对于涝水排除效果的影响较大，而部分管道若存在问题其影响范围较小，但会对具体区域内产生不利影响。

### 参考文献

- [1] 王少冰. 海绵城市排水系统优化设计 [D]. 南昌工程学院, 2017.
- [2] 丁春梅. 基于环境整治视角下海绵城市排水系统优化设计 [J]. 江西科学, 2018, 36 (06): 1033-1038.
- [3] Xiaona G, Jie C, Chenglong Y, et al. The extraordinary Zhengzhou flood of 7/20, 2021: How extreme weather and human response compounding to the disaster [J]. Cities, 2023, 134.
- [4] 崔巍, 梁博涵, 木仁. 基于多起讫点最大流理论的城市排水系统优化改进策略 [J]. 内蒙古大学学报 (自然科学版), 2022, 53 (05): 468-475.
- [5] Yuhan Y, Jie Y, Dandan W, et al. ABM-based emergency evacuation modelling during urban pluvial floods: A “7.20” pluvial flood event study in Zhengzhou, Henan Province [J]. Science China Earth Sciences, 2022, 66 (2).

作者简介：张仲航 (1992.06-)，男，湖北省荆门市人，硕士研究生，工程师，主要研究方向：水污染控制与资源化。