

基于设计降雨雨型的长沙部分区域内涝模拟研究

曾敬哲 孔维奇

长沙市规划勘测设计研究院

摘要:为分析不同设计降雨雨型对长沙典型城区内涝的影响,构建基于典型降水过程的管网水文水动力模型和地表二维漫流模型,对研究区域的内涝灾害风险进行模拟研究。本次研究采用3年一遇降雨重现期评估城市管网的过流能力(河道水位为常水位),采用50年一遇降雨重现期分别叠加河道常水位与100年一遇洪水水位评估地面积水情况。以3年一遇降雨情况下,从管网承压角度分析管道的排水能力,结果来看,四方坪满足3年一遇以上的管网在25.81%,红旗渠满足3年一遇以上的管网在26.08%,红星满足3年一遇以上的管网在61.58%。分别对管道设计标准下的内涝点,内涝防治标准下的内涝点进行了详细原因分析,造成内涝的主要原因是管道过流能力不足,导致管道超载后由检查井溢流至低洼区域形成内涝。

关键词:城市内涝模拟;设计降雨;风险评估

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.02.072

研究背景

极端降雨引起的城市内涝在我国各城市频繁发生,给人民群众的生命财产安全造成了严重影响^[1]。如2017年,长沙城区特大暴雨和湘江历史高洪水位重叠^[2],对长沙城区内涝防治系统带来了巨大的考验,内五区总计受灾人口15.45万,倒塌房屋2400间,损坏堤防8.94公里,直接经济损失达到11.2亿元。本研究通过对比典型城区的多种雨型对内涝积水影响研究城市雨洪过程,以期辅助薄弱部分的基础设施提质改造决策,为海绵城市建设、城市排水设计和防灾减灾等工作提供参考。

一、资料与方法

(一) 研究区域

本项目研究范围内主要为红星水系、红旗渠水系以及四方坪水系,研究范围合计面积为26.72平方公里。其中红星水系为高排区,红旗渠水系与四方坪水系为低排区,高排区高地雨水直排入河,出口标高一般高于江河常年平均水位;低排区的雨水经过管网收集之后通过排渍泵站抽排入河,红旗渠水系通过三角塘泵站抽排雨水,四方坪泵站通过陈家渡泵站、社教桥泵站抽排雨水。研究范围内,主要包含管网类型有污水、雨水、合流三种管线,管网总长度为794.5Km。

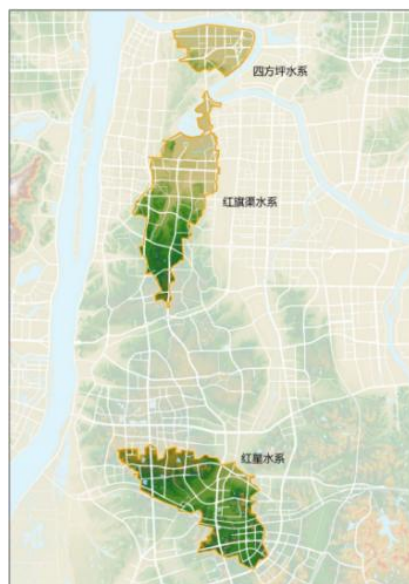


图1 研究范围图

(二) 降水、管网及地理信息数据

根据1980年-2009年30年的长沙市自记雨量资料,按《室外排水设计规范》(GB50014-2006)建议的形式,采用新暴雨强度公式,并使用芝加哥降雨模型推求长沙市区重现期3a、50a,历时120、180min,以5min为单位时段。

(三) 城市内涝模拟模型

1. 管网水文水动力模型

本次研究项目根据实际需要,选择DHI MIKE系列软件进行建模。MIKE URBAN CS降雨径流模块输出结果是降雨产生的每个集水区的流量^[3],计算结果可用于管流计算。地表径流模型使用时间-面积曲线模型,现状模型结合DEM地形与泰森多边形法划分子汇水区,并根据小区管网与影像图手动调整汇水区,为管道每个节点分配子集水区。根据下垫面性质不同设置不透水率等水文学参数。本次研究中,衰减系数取0.9,初损取0.0006m。

MIKE URBAN管流模块能够详细的预报整个管网系统中水动力学情况^[4]。MIKE URBAN水动力模块计算管网中非恒定流,计算以一维自由水面流的圣维南方程组即连续性方程(质量守恒)和动量方程(动量守恒-牛顿第二定律)为基础,采用Abbott六点隐式格式有限差分数值求解。在一维管网水动力模型中,主要涉及的参数

有：平均坡面流速（取：0.3m/s），模拟时间步长（变步长：1s-60s），管道曼宁数（取：65-85），检查井局部水头损失（取：0.1）。

管网边界条件分别为水量负荷边界和水位边界。水量负荷边界中雨水管网的边界为不同工况下的降雨条件边界，如管网评估中采用三年一遇降雨、内涝评估采用50年一遇降雨、水位边界采用河道百年一遇洪水位。四方坪与红旗渠水系受纳水体为浏阳河，红星水系受纳水体为圭塘河，根据《长沙市城市防洪规划水文分析报告》，本次研究排口位置在浏阳河 P=1%水位边界条件为 37.57m，在圭塘河 P=1%水位边界条件为 49.97m。

2. 地表二维漫流模型

MIKE 21 在模拟城市洪水二维漫流过程中，可以真实地模拟出水在道路、小区、绿地等不同地形状况下的漫流过程^[5]，其计算基于的二维水动力学的基本方程为浅水方程，模型采用的数值方法是矩形交错网格上的ADI法，具体离散用半隐式，求解用追赶法。二维地面漫流模型中，设置网格计算水深小于0.002m为干水深，

超过0.003m为湿水深，网格大小为5m×5m。

3. 城市内涝模型

MIKE FLOOD将一维模型MIKE URBAN和二维模型MIKE 21耦合，为动态耦合的模型系统^[6]，模型可以同时模拟排水管网、明渠，排水河道、各种水工构筑物以及二维坡面流，可用于流域洪水、城市洪水等的模拟研究^[7]。城区排水管网模型的每一个检查井与二维地表模型相应的计算网格耦合，以反映管网和地表之间的水流交互。本次研究将检查井都与地形计算网格（精度5m）耦合。

二、结果分析

（一）模型检验

本次研究收集2017年6月30日13时00分至23时55分的实测降雨数据用于模型率定与验证。该次降雨过程累计降水量84.5mm，降雨历时11h通过模型模拟得到研究区域在此场实际降雨条件下的地面最大积水深度，其中四方坪在有记录的两处积水点中，均吻合较好；红旗渠在有记录的八处积水点中，有5处吻合较好；红星在有记录的六处积水点中，有5处吻合较好。



图2 四方坪积水验证图



图3 红旗渠积水验证图



图4 红星积水验证图

（二）设计暴雨雨型对城市内涝的影响

1. 管道设计达标分析

管道排水能力评估旨在判别某一降雨重现期条件下，管道是否满足排水要求，此处以管道是否承压为标准。结合3年一遇短历时降雨条件下，河道常水位时，通过模型模拟计算得出的管道承压情况，评估的标准采用：雨水管道在最大流量时刻，管顶内部承压，则认为管道未达标。结果统计见表1。

表1 四方坪管道设计标准评估统计表

| 区域 | 重现期 | 长度 (km) | 百分比 |
|-----|-------------|---------|-------|
| 四方坪 | 不满足3年 (含3年) | 30.051 | 74.19 |
| | 满足3年以上 | 10.456 | 25.81 |
| 红旗渠 | 不满足3年 (含3年) | 59.788 | 73.92 |
| | 满足3年以上 | 21.098 | 26.08 |
| 红星 | 不满足3年 (含3年) | 31.232 | 38.42 |
| | 满足3年以上 | 50.067 | 61.58 |

2. 积水水深模拟

利用上述内涝模型，将不同重现期的降水作为模型降水边界，不同河道水位作为水位边界进行降雨积水模拟。应用淹没深度与淹没深度面积来表征研究区域内涝积水程度，得到5种工况情况下各水系最大淹没深度面积统计见表2，最大积水深图见表3。

三、结论

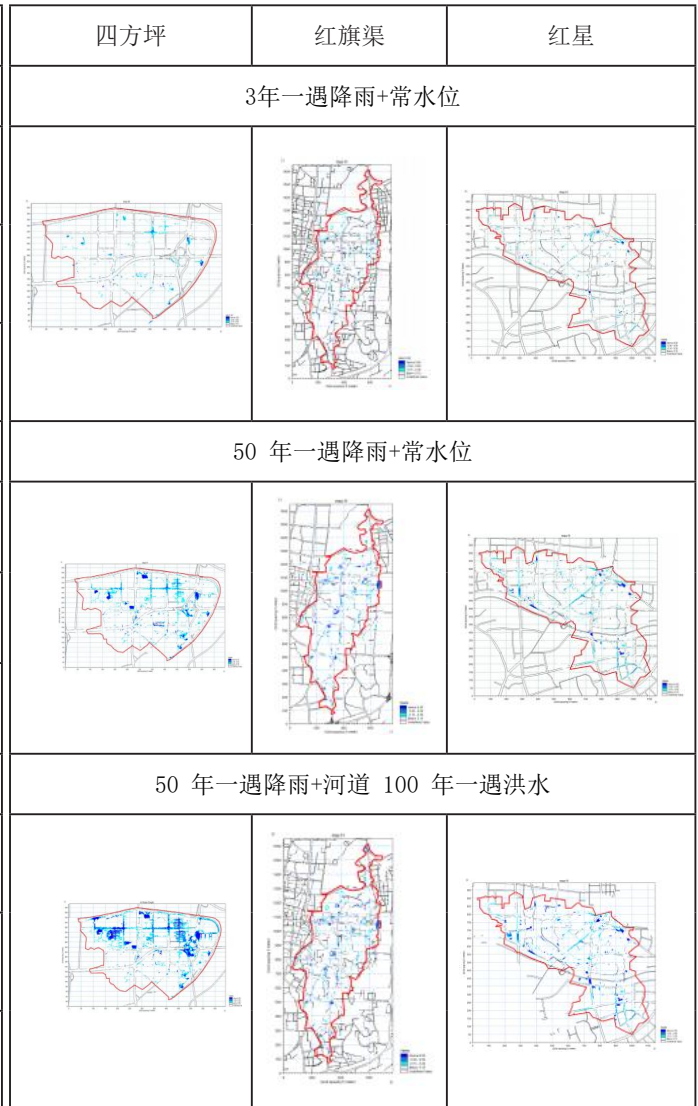
本研究通过建立数学模型，评估不同模拟工况，得到以下结论：

1. 通过建立管网模型，对整个管网系统进行了有效评估。管网系统以3年一遇降雨情况下，从管网承压角度分析管道的排水能力。结果来看，四方坪满足3年一遇以上的管网在25.81%，红旗渠满足3年一遇以上的管网在26.08%，红星满足3年一遇以上的管网在61.58%，造成管网不达标的原因有：管道自身过流能力不足、下游高水位顶托、管道存在错位与逆坡等。对于自身过流能力不足的管道，可以增加管径改造或者增加并行管

表2 各水系最大淹没深度面积统计

| 最大淹没深度 (m) | 四方坪 (ha) | 红旗渠 (ha) | 红星 (ha) |
|---------------------|----------|----------|---------|
| 3年一遇降雨+常水位 | | | |
| 0.15-0.3 | 4.87 | 18.61 | 6.15 |
| 0.3-0.5 | 1.71 | 6.56 | 2.5 |
| 0.5以上 | 0.58 | 5.54 | 2.01 |
| 50年一遇降雨+常水位 | | | |
| 0.15-0.3 | 16.76 | 26.86 | 19.11 |
| 0.3-0.5 | 6.89 | 12.25 | 8.59 |
| 0.5以上 | 4.59 | 13.56 | 7.74 |
| 50年一遇降雨+河道 100年一遇洪水 | | | |
| 0.15-0.3 | 24.01 | 27.85 | 25.92 |
| 0.3-0.5 | 17.76 | 13.46 | 10.12 |
| 0.5以上 | 11.76 | 14.52 | 9.65 |

表3 最大积水深图



道；对于下游高水位顶托导致壅水的管道，需要分析下游高水位的具体原因：泵站排水能力不足、下游管道过流能力不足、下游管道逆坡错位等等，找出原因进行针对性解决；对于管道错位逆坡的，需要针对性的进行改造。

2. 通过建立的城市内涝模型，对整个研究区域进行了现状内涝风险评估。内涝风险模拟了三种工况，即3年一遇常水位、50年一遇常水位、50年一遇叠加100年一遇洪水位的工况，得到主要积水点分布，分析得到了现状管网系统的问题，造成内涝的主要原因还是管道过流能力不足，导致管道超载后由检查井溢流至低洼区域形成内涝。

参考文献：

[1] 张爽. 基于Mike Urban的高度城市化地区内涝交通风险分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(11): 9.

[2] 《长江2017年第1号洪水正在形成 湖南334万人受灾》央视财经

[3] 李水娟. MIKE URBAN参数敏感性分析[J]. 水利科技与经济, 2022, 28(12): 7.

[4] 朱学虎. MIKE URBAN模型在城市内涝分析中的应用[J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2014, 000(029): 504-506.

[5] 朱颖蕾. 基于MIKE21和MIKE Urban耦合的湖区平原城市内涝模拟应用研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(10): 177-181.

[6] 张译心, 郝敏, 方晴, 等. 基于MIKE FLOOD耦合模型的新建城区防洪排涝模拟研究[J]. 中国农村水利水电, 2021.

[7] 查斌. 基于MIKE FLOOD模型的城市洪涝灾害场景推演研究[J]. 人民黄河, 2022, 44(11): 7.