

基于MIKE URBAN模型的武汉市典型城区内涝研究

—II: 管网排水能力分析

孙晓晨¹, 熊立华¹, 周密¹, 闫磊²

¹武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉

²河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸

Email: sunxiaochen@whu.edu.cn

收稿日期: 2021年7月30日; 录用日期: 2021年10月11日; 发布日期: 2021年10月18日

摘要

以武汉市楚河汉街为研究区, 在假设基于MIKE URBAN模型构建的研究区城市雨洪模型结果合理的前提下, 根据模型模拟的不同重现期情景下研究区管网的超载情况, 评价了管网的排水能力。针对排水能力不足设计标准的管道, 提出将其管径扩增为原来的2倍的排水能力提升措施, 再进行研究区在有、无提升措施两种情况下的内涝模拟, 并进行对比分析。结果表明: 1) 在现行管网条件下, 研究区管网的排水能力仅基本满足1年一遇的设计标准。研究区在5年一遇或以上的情景下, 内涝程度比较严重, 以楚河南岸的东湖西路两端、烟霞路与松竹路路口附近区域的内涝程度最严重。2) 有提升措施情况下, 管网排水能力提升明显, 能基本满足现行规范中5~10年一遇的规定; 楚河北岸不再出现内涝节点, 楚河南岸仍存在内涝节点, 但数目明显减少, 内涝程度也明显减轻。

关键词

MIKE URBAN模型, 设计暴雨, 排水能力, 提升措施, 内涝模拟

Research on Waterlogging in Typical Urban Area of Wuhan City Based on MIKE URBAN Model

—II: Analysis of Drainage Capacity of Pipeline Network

Xiaochen Sun¹, Lihua Xiong¹, Mi Zhou¹, Lei Yan²

¹State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei

作者简介: 孙晓晨(1998-), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。

²School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan Hebei
Email: sunxiaochen@whu.edu.cn

Received: Jul. 30th, 2021; accepted: Oct. 11th, 2021; published: Oct. 18th, 2021

Abstract

Chu River and Han Street area in Wuhan City was taken as the study area. Given that the results of the urban storm water model based on the MIKE URBAN model of the study area were reasonable, the overload situations of the pipeline network in the study area under the different design rainstorm scenarios simulated by the model were analyzed, and the appropriateness of the drainage capacity of the pipeline network was evaluated. For the pipes with insufficient drainage capacity to the design standard, an improvement measure of increasing the pipe diameter to twice the original size was proposed to increase their drainage capacity. The waterlogging situations in the study area with and without the improvement measure were both simulated, and a comparative analysis was carried out. The results show that: 1) In the case of the current pipeline network, the drainage capacity of the pipeline network in the study area can only basically meet the design standard with the recurrence interval of 1 year. Under the scenarios of the recurrence interval of 5 years or above, the degree of waterlogging in the study area is relatively serious. The most serious waterlogging nodes are located in both ends of Donghu West Road and the area near the intersection of Yanxia Road and Songzhu Road on the south bank of the Chu River. 2) With the improvement measure considered, the drainage capacity of the pipeline network has been significantly improved, which can basically meet the requirement in the current specifications with the recurrence interval of 5 to 10 years. Waterlogging nodes no longer appear on the north bank of the Chu River. There are still waterlogging nodes on the south bank of the Chu River, but the number of waterlogging nodes has been significantly reduced, and the degree of waterlogging has also been significantly reduced.

Keywords

MIKE URBAN Model, Design Rainstorm, Drainage Capacity, Improvement Measure, Waterlogging Simulation

Copyright © 2021 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在城市化进程快速发展和全球气候变化的背景下，我国的城市内涝问题日益严峻，对于城市内涝问题的研究受到越来越广泛的关注和重视。张冬冬等[1]对城市内涝的成因与风险评估方法的研究进展进行了总结，指出了城市内涝综合应对的关键技术问题，其中包括强化城市蓄、排水工程的建设。熊立华等[2]总结了变化环境对城市排水系统影响研究的现有成果，指出应加强变化环境下排水系统设计标准方面的研究。

作为城市地区径流输送的主要方式，排水管网是用于应对城市内涝问题的重要手段，其排水能力是城市内涝问题的关键影响因素。然而，我国城市的排水管网设计标准普遍偏低，排水能力严重不足，进一步加剧了城市内涝程度。因此，提升排水管网的排水能力是未来城市排水管网设计工作中的重点。

城市排水管网的设计要求是短时间内迅速排除暴雨径流，排水工程规模受洪峰控制[3]。我国传统的城市排水管网规划设计中采用推理公式法计算雨水设计流量，这种方法只适用于地面情况比较单一、汇水面积较小、

管网系统比较简单的区域[4], 具有较大的局限性。当集水面积超过 2 km²时, 考虑到降雨在城市地区的时空分布不均匀性、更复杂的地面情况和城市排水管网的汇流过程, 我国现行的《室外排水设计规范(GB 50014-2006)》(2016 年版)推荐利用城市雨洪模型来进行城市雨洪过程的模拟[5]。

本文的研究区是武汉市楚河汉街地区。闫磊等[6]曾利用 SWMM 模型模拟出该地区五种设计暴雨情景下(重现期分别为 1, 2, 3, 5, 10 年)的城市雨洪过程, 发现暴雨重现期越高内涝情况越严重, 但缺乏内涝位置的分布情况; 指出了该地区应严格按照《室外排水设计规范(GB 50014-2006)》提升雨水管网的排水能力, 但缺乏具体提升措施的研究。

在假设基于 MIKE URBAN 模型构建的研究区城市雨洪模型结果合理的前提下, 本文对该地区的内涝问题和管网排水能力的提升问题展开研究。根据模拟的五种设计暴雨情景下(重现期 $P=1 a、2 a、3 a、5 a、10 a$)的研究区管网超载情况, 评价了管网的排水能力。针对排水能力不足设计标准的管道, 提出将其管径扩增为原来 2 倍的排水能力提升措施, 再模拟出研究区在有、无提升措施两种情况下的内涝情况, 并进行对比分析。

2. 研究方法

2.1. 模型构建方法

本文以武汉市楚河汉街为研究区, 是武汉市的一处典型城区, 集水区面积 3.44 km², 总不透水面积 2.87 km²。MIKE URBAN 模型构建与模拟验证过程, 详见本系列论文(I)。因此, 本文仅对模型构建方法作简要介绍。

以研究区 2009 年的遥感影像图为底图, 按照武汉市规划研究院于 2009 年修编的《东沙湖连通渠(楚河)修建规划》[7] (后文简称<规划>)中的规定, 对研究区内的排水管网和东沙湖连通渠(楚河)进行概化。其中, 楚河的设计最大水深 $H_0=2 m$, 渠深 $H=3 m$ 。研究区排水管网概化结果如图 1 所示, 集水区划分结果如图 2 所示。

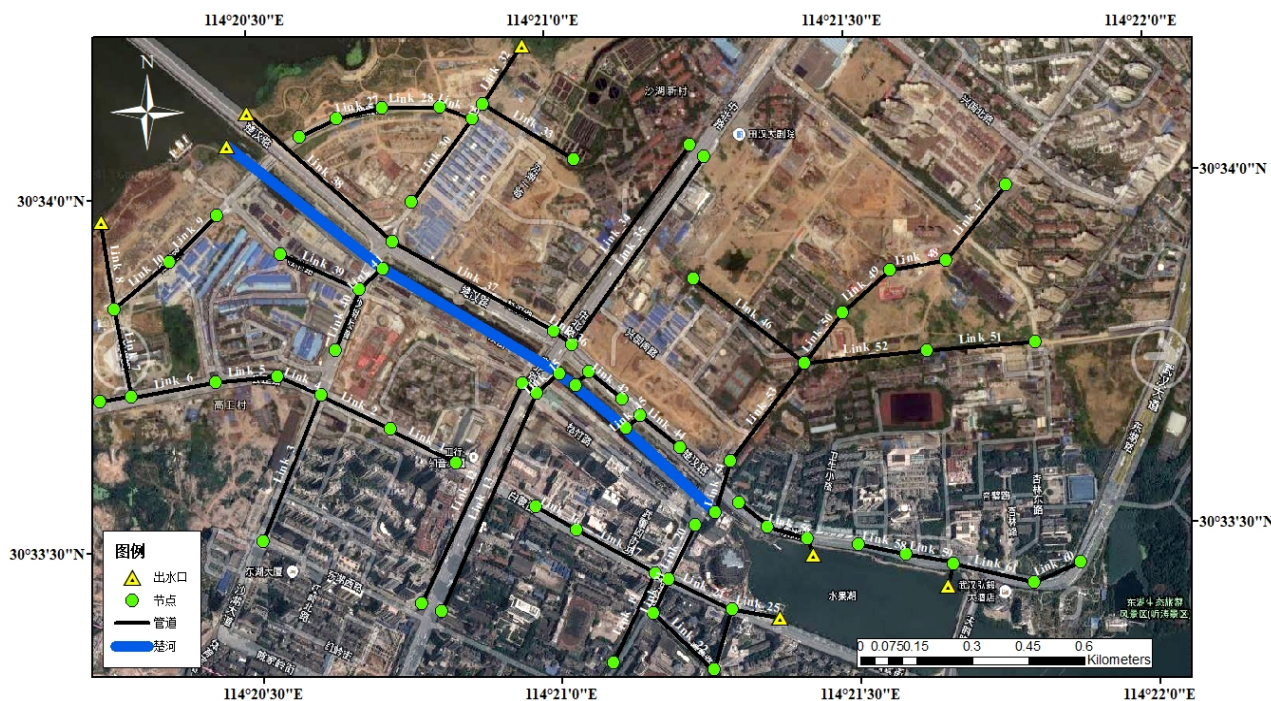


Figure 1. Generalization result of the drainage pipeline network in the study area

图 1. 研究区排水管网概化结果

2.2. 设计暴雨构建方法

以汉口地区暴雨强度公式(2000年修编) [8]计算平均暴雨强度,采用芝加哥雨型法进行时程分配。参照文献 [6],构建出重现期 $P = 1\text{ a}$ 、 2 a 、 3 a 、 5 a 、 10 a 的五种设计暴雨情景。五种设计暴雨情景的时程分配结果如图 3 所示。

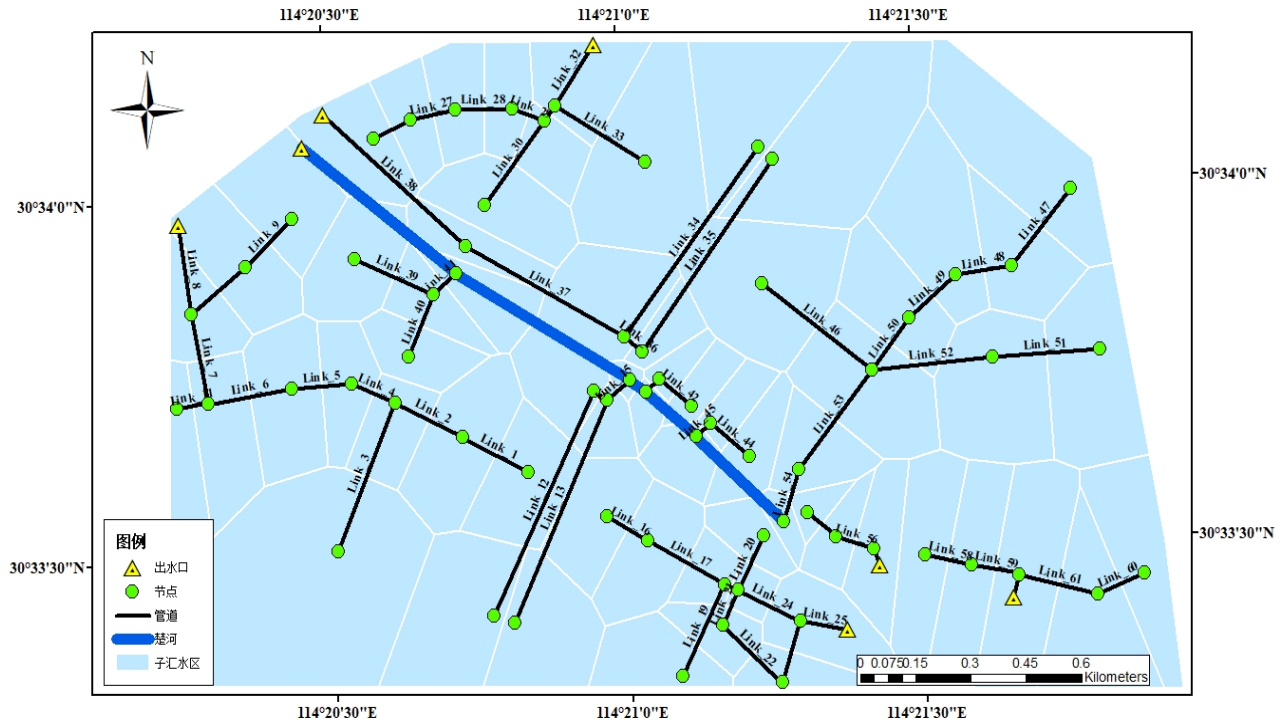


Figure 2. Division result of the catchment in the study area
图 2. 研究区集水区划分结果

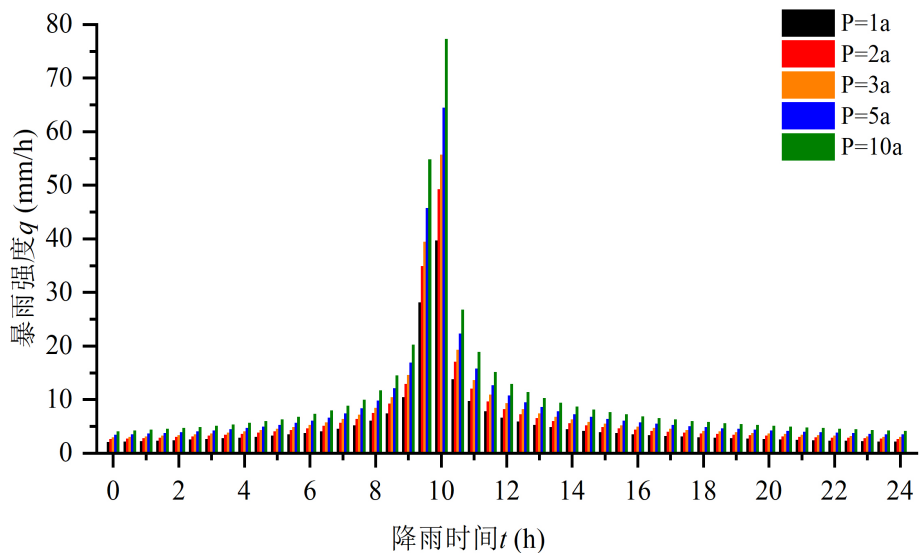


Figure 3. Temporal distribution chart of 24 h design rainstorms under scenarios of different recurrence intervals
图 3. 各重现期情景下的 24 h 设计暴雨时程分配图

2.3. 评价方法

2.3.1. 管道排水能力评价

管道的排水能力一般以重现期表示。在某重现期的设计暴雨情景下，某条管道如果能顺利排走暴雨洪水(全程没有发生超载现象)，则其排水能力至少是该重现期。MIKE URBAN 模型中，超载现象的评定依据是管道超载度(PF , Pipe Filling)。如果 $PF \leq 1$ ，说明管流水位还没有超过管顶，管流为明渠流，没有出现超载现象；如果 $PF > 1$ ，说明管流水位已经超出管顶，管流为承压流，出现超载现象。管道超载度 PF 的计算公式为：

$$PF = \frac{WL - PB}{PL} \tag{1}$$

式中， PF 为管道超载度(-)； WL 为水位高程(m)； PB 为管底高程(m)； PL 为管道高度(m)。

2.3.2. 城市内涝评价

《武汉市排水防涝系统规划设计标准》[8]对武汉市的内涝程度分级标准进行了规定：

Table 1. Classification standard of waterlogging degree in Wuhan City [8]

表 1. 武汉市内涝程度分级标准[8]

内涝等级	评价要素	
	城市地面积水深度(m)	积水时间(h)
轻微积水	≤ 0.15	< 1
轻微内涝	0.15~0.4	1~2
严重内涝	> 0.4	≥ 2

注：如果一个节点的内涝程度符合两种等级，取较高等级为该节点的内涝等级。

在 MIKE URBAN 模型中，一般使用节点溢流深(NF , Node Flood)来描述城市地面积水深度。如果一个节点的 $NF > 0$ ，则该节点出现了积水现象，发生了内涝，否则没有发生内涝。节点溢流深 NF 的计算公式为：

$$NF = WL - GL \tag{2}$$

式中， NF 为节点溢流深(m)； WL 为水位高程(m)； GL 为该节点的地表高程(m)。

2.4. 排水能力提升措施

武汉市属于特大城市，楚河汉街地区(即本文的研究区)因其人口集中且商业发达，是武汉市中心城区的重要地区。根据《规划》[7]，研究区排水管网的设计排水标准为 1 年一遇(即 $P = 1 a$)。而我国现行的《室外排水设计规范(GB 50014-2006)》(2016 年版)规定：超、特大城市中心城区重要地区排水管渠的设计标准应为 5~10 年一遇[5] (即 $P = 5\sim 10 a$)。

为了满足城市的排水防涝的需求，针对管网中所有排水能力不足 $P = 1 a$ 的设计排水标准的管道，本文提出一种将其尺寸扩增为原来 2 倍的排水能力提升措施：圆形管道将直径扩增为原来的 2 倍，矩形箱涵的长与宽扩增为原来的 2 倍。

3. 结果分析

3.1. 排水能力评价结果

应用 MIKE URBAN 模型对研究区在五种重现期设计暴雨情景下的排水过程进行模拟。根据管道排水能力的评价方法，统计研究区管网在五种重现期情景下的超载情况，结果表明：有 26 条管道的排水能力不足 $P = 1 a$

的设计标准。因此，对这 26 条管道实施 2.4.节中的排水能力提升措施。

在有提升措施的情况下，应用 MIKE URBAN 模型对研究区的五种重现期情景下的排水过程进行模拟，并根据同样的评价方法对管网的排水能力进行评价。有、无提升措施两种情况下的管网排水能力统计见表 2，管网排水能力分布见图 4。

Table 2. Statistics of drainage capacity of the drainage network with and without the improvement measure
表 2. 有、无提升措施两种情况下的出水口状态模拟结果统计

排水能力	无提升措施		有提升措施		
	管道数目	所占比例	排水能力	管道数目	所占比例
$P = 1 a$ 以下	26	41.94%	$P = 1 a$ 以下	3	4.84%
$P = 1 \sim 2 a$	6	9.68%	$P = 1 \sim 2 a$	6	9.68%
$P = 2 \sim 3 a$	4	6.45%	$P = 2 \sim 3 a$	1	1.61%
$P = 3 \sim 5 a$	6	9.68%	$P = 3 \sim 5 a$	12	19.35%
$P = 5 \sim 10 a$	5	8.06%	$P = 5 \sim 10 a$	4	6.45%
$P = 10 a$ 以上	15	24.19%	$P = 10 a$ 以上	36	58.06%

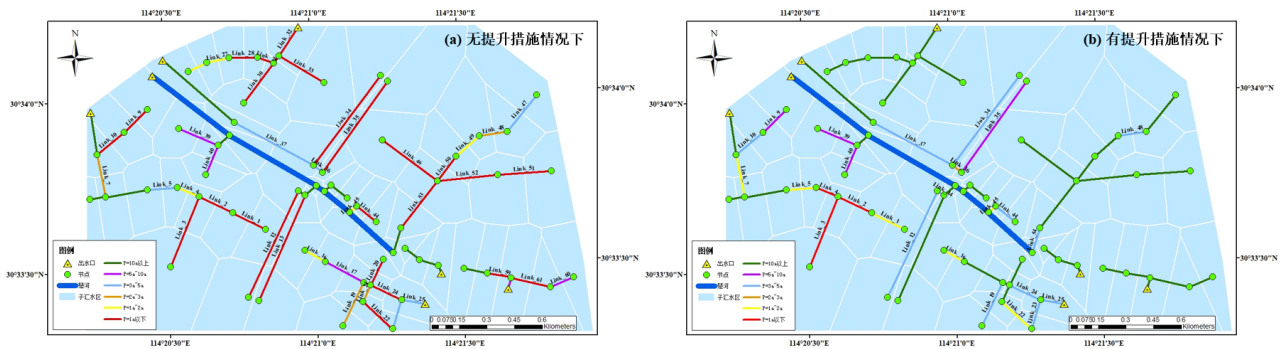


Figure 4. Distribution of the drainage capacity with and without the improvement measure
图 4. 有、无提升措施两种情况下研究区排水管网排水能力分布

从管网排水能力的评价结果可以看出，无提升措施情况下的管网有 36 条管道的排水能力在 $P = 1 a$ 或以上，占全部管道的 58.06%；有 20 条管道的排水能力在 $P = 5 a$ 或以上，仅占全部管道的 32.26%。说明研究区现行管网仅基本满足 $P = 1 a$ 的设计排水标准，无法满足现行规范 $P = 5 \sim 10 a$ 的规定。在有提升措施情况下，有 40 条管道符合标准，占全部管道的 64.52%，基本满足现行规范的规定。

3.2. 管网排水模拟结果统计

对有提升措施情况下五种设计暴雨情景下的楚河出水口状态模拟结果进行统计，并与无提升措施情况下的模拟结果进行对比，见表 3。

Table 3. Statistics of the hydraulic states simulation results of the Chu River with and without the improvement measure
表 3. 有、无提升措施两种情况下的楚河出水口状态模拟结果统计

重现期 $P(a)$	最大水深 $h_{max}(m)$		洪峰流量 $Q(m^3/s)$		径流总量 $R(\times 10^3 m^3)$	
	无提升措施	有提升措施	无提升措施	有提升措施	无提升措施	有提升措施
1	1.78	1.78	8.93	9.21	111.86	111.85

Continued

2	1.83	1.82	11.2	11.6	139.17	139.13
3	1.85	1.85	12.4	13.2	157.63	157.61
5	1.87	1.89	13.8	15.4	182.83	182.91
10	1.89	1.93	15.4	18.0	219.52	219.64

由表 3 可知,在有提升措施的情况下,各重现期情景下的径流总量 R 基本保持不变, $P = 1 a$ 、 $2 a$ 、 $3 a$ 情景下的最大水深几乎没有变化, $P = 5 a$ 、 $10 a$ 情景下最大水深 h_{max} 有小幅增加,但均未超过设计最大水深 $H_0 = 2 m$ 。说明在有提升措施的情况下,虽然洪峰流量 Q 和最大水深 h_{max} 有所增加,但仍然能保证楚河两岸的防洪安全,研究区内没有出现楚河的防洪问题。

3.3. 内涝模拟结果统计

3.3.1. 无提升措施的内涝模拟结果

根据表 1 的内涝分级标准,对无提升措施情况时五种设计暴雨情景下研究区的三种内涝等级的节点个数进行统计,见表 4。研究区的设计排水标准为 $P = 1 a$,现行规范规定的标准为 $P = 5\sim 10 a$ 。故本节分别以 $P = 1 a$ 、 $5 a$ 、 $10 a$ 为例,分析无提升措施情况下研究区内涝节点的分布情况,内涝节点分布见图 5。

Table 4. Statistics of numbers of nodes in three waterlogging levels without the improvement measure
表 4. 无提升措施情况下三种内涝等级的节点个数统计

重现期 $P(a)$	内涝节点个数(-)			溢流率(%)
	轻微积水	轻微内涝	严重内涝	
1	1	0	3	6.10
2	0	5	3	12.12
3	7	0	3	15.15
5	10	1	3	21.21
10	10	4	4	27.27

注：“溢流率”指所有发生溢流现象的节点占全部节点的百分比,下同。

在 $P = 1 a$ 的设计标准情景下, Node_9、Node_12、Node_13 为严重内涝点,参考图 1 中的研究区概化要素分布,可以看到 Node_9 位于楚河南岸的烟霞路与松竹路路口附近区域, Node_12、Node_13 分别位于东湖西路两端。这 3 个节点是研究区在无提升措施情况下内涝程度最严重的节点,属于主要易涝点。Node_39 在 $P = 1 a$ 情景下为轻微积水点,内涝程度虽不严重,但仍然在设计标准情景下发生了内涝,故也属于主要易涝点。但总体而言, $P = 1 a$ 的设计标准情景下研究区的溢流率为 6.10%,总体内涝程度不算严重。

$P = 5 a$ 和 $P = 10 a$ 情景下,研究区内已有较大范围出现了内涝节点。参考图 1 可以看到, $P = 5 a$ 和 $P = 10 a$ 情景下的内涝节点均集中分布于楚河南岸的白鹭街-公正路沿线区域、东湖西路两端、烟霞路与松竹路路口附近区域和楚河北岸的武汉大学医学部以北区域。两种重现期情景下,研究区溢流率分别为 21.21% 和 27.27%,总体内涝程度均比较严重。

无提升措施情况下的研究区内涝模拟结果也反映出研究区现行排水管网无法满足现行规范中 $P = 5\sim 10 a$ 的排水要求。因此,对于现行排水管网进行排水能力提升的措施是有必要的。

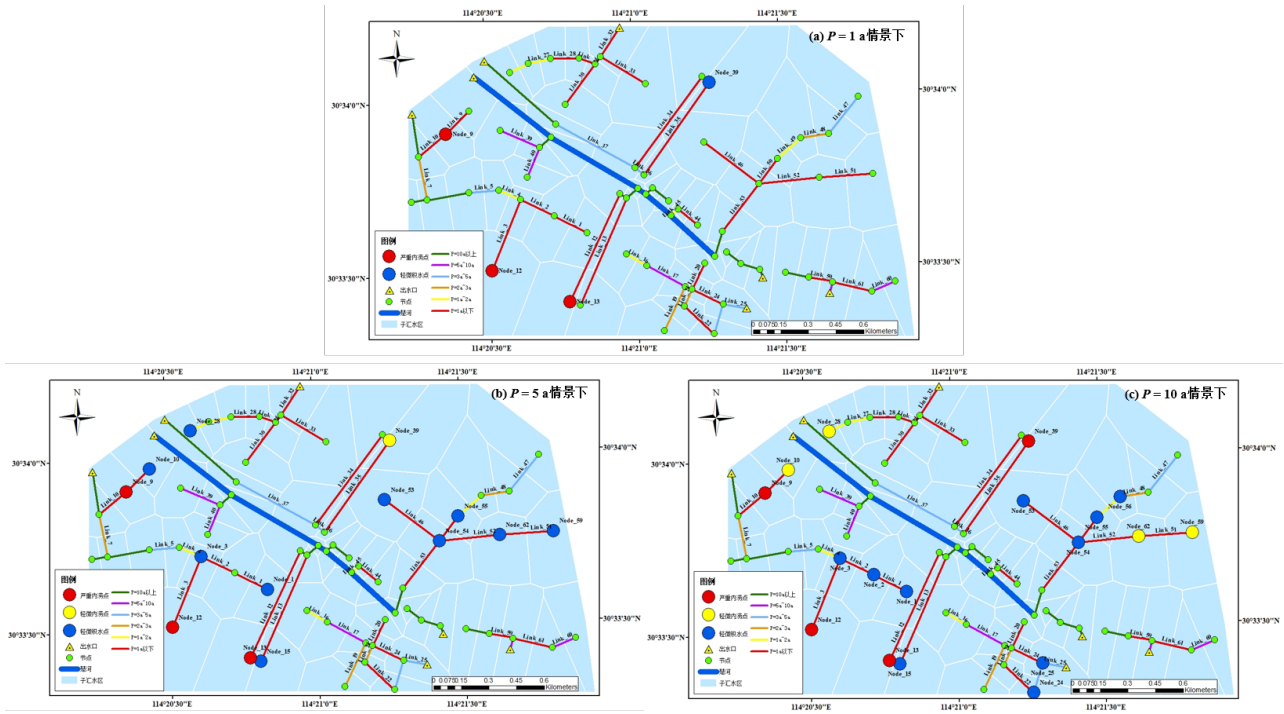


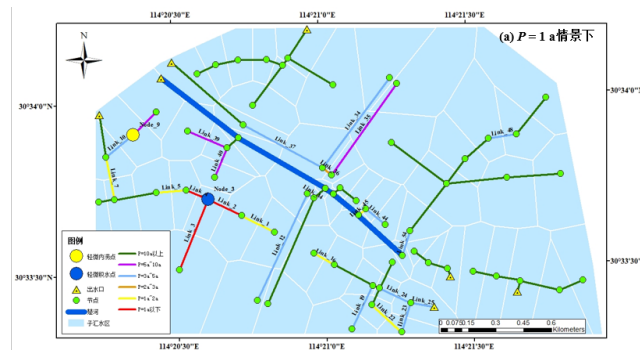
Figure 5. Distribution of waterlogging nodes without the improvement measure
图 5. 无提升措施情况下研究区内涝节点分布

3.3.2. 有提升措施的内涝模拟结果

类似地, 对有提升措施情况时五种重现期情景下的研究区三种内涝等级的节点个数进行统计, 见表 5。以 $P = 1 a$ 、 $5 a$ 和 $10 a$ 为例, 有提升措施情况下研究区内涝节点分布情况见图 6。

Table 5. Statistics of numbers of nodes in three waterlogging levels with the improvement measure
表 5. 有提升措施情况下三种内涝等级的节点个数统计

重现期 $P(a)$	内涝节点个数(-)			溢流率(%)
	轻微积水	轻微内涝	严重内涝	
1	1	1	0	3.03
2	1	0	1	3.03
3	2	0	1	4.55
5	1	1	1	4.55
10	5	1	1	10.61



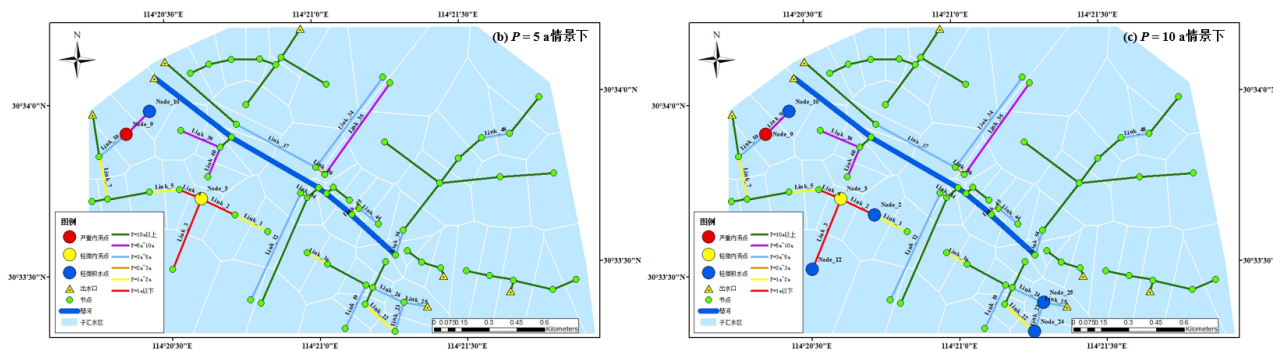


Figure 6. Distribution of waterlogging nodes with the improvement measure

图 6. 有提升措施情况下研究区内涝节点分布

将表 4 与表 5 的溢流率进行对比可以看出，同一重现期情景下，研究区节点的溢流率在有提升措施的情况下明显更低，三种内涝等级的溢流节点数也都明显地呈现出减少的趋势。在有提升措施的情况下，包括 Node_39 在内的楚河北岸节点不再出现内涝情况。剩下的 3 个主要易涝点中，Node_13 不再出现内涝情况；Node_12 在 $P = 10 a$ 情景下才出现内涝；Node_9 在 $P = 1 a$ 情景下为轻度内涝点，在 $P = 5 a$ 情景下才转变为严重内涝点。说明本文提出的提升措施能明显改善研究区的内涝情况。

然而，本文提出的提升措施无法完全解决研究区的内涝问题。在有提升措施情况下，Node_3 的内涝程度反而有所增加，原因可能为：该节点是 Link_2、Link_3 两条管道下游的共同节点；在有提升措施情况下，原本由于溢流而没有进入管道的暴雨洪水因 Link_2、Link_3 的排水能力增加而进入管道，流向 Node_3，从而增加了 Node_3 的内涝程度并降低了下游管道 Link_4 的排水能力。Node_24、Node_25 这两个节点在有提升措施情况下，与无提升措施时一样，仍然在 $P = 10 a$ 时出现内涝。针对这些情况特殊的节点，可能需要考虑其他措施(如增设地下水雨调蓄池等)来解决其内涝问题。

4. 结论与展望

4.1. 结论

1) 在现行管网条件下，研究区管网的排水能力基本满足 $P = 1 a$ 的设计标准；研究区在 $P = 5 a$ 或以上情景下，内涝程度比较严重，楚河南岸的东湖西路两端、烟霞路与松竹路路口附近区域的内涝程度最严重。

2) 在有本文的提升措施情况下，管网排水能力提升明显，能基本满足现行规范中 $P = 5 \sim 10 a$ 的规定；楚河北岸不再出现内涝节点，楚河南岸仍存在内涝节点，但数目明显减少，内涝程度也明显减轻。

3) 本文提出的提升措施虽然能明显减轻研究区的内涝情况，但无法完全解决研究区的内涝问题。对于一些情况特殊的节点，可能需要考虑其他措施来解决其内涝问题。

4.2. 展望

1) 传统排水管网设计标准的适用性问题可能需要重新考虑。由于气候变化和人类活动的影响，传统的管网设计所依据的一致性假设可能不再成立，在以后的研究中，可能还需要将这一因素考虑进来。

2) 可以对更多类型的排水能力提升措施展开讨论和研究。本文仅考虑了对排水能力不足设计标准的管道扩增尺寸这一种提升措施，这种措施的实施成本较高。由于成本等因素的限制，需要考虑成本更低、效果更好的一种或多种提升措施来指导工程实际。

3) 可以耦合二维模型进行更精细化的建模。本次研究缺乏暴雨洪水在城市地表上的二维漫流过程的模拟，以后的研究可以将 MIKE URBAN 模型与能模拟二维地表漫流的水动力学模型 MIKE 21 耦合建模，进行更加细致的城市内涝模拟。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(41890822)。

参考文献

- [1] 张冬冬, 严登华, 王义成, 等. 城市内涝灾害风险评估及综合应对研究进展[J]. 灾害学, 2014, 29(1): 144-149.
ZHANG Dongdong, YAN Denghua, WANG Yicheng, *et al.* Research progress on risk assessment and integrated strategies for urban pluvial flooding. *Journal of Catastrophology*, 2014, 29(1): 144-149. (in Chinese)
- [2] 熊立华, 闫磊, 李凌琪, 等. 变化环境对城市暴雨及排水系统影响研究进展[J]. 水科学进展, 2017, 28(6): 930-942.
XIONG Lihua, YAN Lei, LI Lingqi, *et al.* Advances in analysis of impacts of changing environments on extreme urban rainfall and drainage infrastructure. *Advances in Water Science*, 2017, 28(6): 930-942. (in Chinese)
- [3] 梁忠民, 钟平安, 华家鹏. 水文水利计算[M]. 第2版. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
LIANG Zhongmin, ZHONG Ping'an and HUA Jiapeng. *Hydrology and water conservancy calculation*. Second Edition. Beijing: China Water & Power Press, 2008. (in Chinese)
- [4] 黄国如, 冯杰, 刘宁宁, 等. 城市雨洪模型及应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
HUANG Guoru, FENG Jie, LIU Ningning, *et al.* *Urban storm water model and its application*. Beijing: China Water & Power Press, 2013. (in Chinese)
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50014-2006 室外排水设计规范(2016年版) [S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. *Code for design of outdoor wastewater engineering (GB 50014-2006)*, 2016. Beijing: China Planning Press, 2016. (in Chinese)
- [6] 闫磊, 熊立华, 王景芸. 基于 SWMM 的武汉市典型城区降雨径流模拟分析[J]. 水资源研究, 2014, 3(3): 216-228.
YAN Lei, XIONG Lihua and WANG Jingyun. Analysis of storm runoff simulation in typical urban region of Wuhan based on SWMM. *Journal of Water Resources Research*, 2014, 3(3): 216-228. (in Chinese)
- [7] 武汉市规划研究院. 东沙湖连通渠(楚河)修建规划[R]. 2009.
Wuhan Planning & Design Institute. *Canal construction plan linking East Lake and Shahu Lake*. 2009. (in Chinese)
- [8] 湖北省质量技术监督局, 武汉市国土资源和规划局, 武汉市水务局. 武汉市排水防涝系统规划设计标准[S]. 2013.
Hubei Quality and Technical Supervision Bureau, Wuhan Land Resources and Planning Bureau, Wuhan Water Affairs Bureau. *Planning and design standards of Wuhan drainage and waterlogging prevention system*. 2013. (in Chinese).