

Impact of Urbanization Process on Drainage System and Modification Measures Analysis

Yalin Li¹, Yuntao Wang¹, Hong Zhang², Chi Zhang¹, Muwei Cheng², Zihui Yu²

¹School of Hydraulic Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning

²Dalian Drainage Department, Dalian Liaoning

Email: liyalin89@163.com

Received: Jun. 6th, 2015; accepted: Jun. 27th, 2015; published: Jun. 30th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

Abstract

With the speeding up of urbanization process and frequently appearing of extreme weather, urban waterlogging is becoming increasingly serious. In this paper, the SWMM model combined with ArcGIS was used to stimulate the drainage system of the study area, a part of Dalian, and then the impact of urbanization on the existing drainage system was analyzed. As a result, Hydro-Brake Optimum was brought up and applied as a renovating measure. The results revealed that: urbanization increases the volume of runoff and the load of the existing drainage system, and as an aided solution, Hydro-Brake Optimum can reduce and delay the flow peak in the downstream pipelines by controlling water flow in the upstream pipelines. This research may provide guidance and theoretical basis for urban drainage system planning and designing and Urban Flood Control and Drainage.

Keywords

Urban Waterlogging, Modification Measures, SWMM, Urbanization, Drainage System, Hydro-Braker Optimum, Simulation Calculation

城市化进程对排水系统的影响及改造措施分析

李亚琳¹, 王运涛¹, 张 弘², 张 弛¹, 程木炜², 于子恢²

¹大连理工大学建设工程学部水利工程学院, 辽宁 大连

²大连市排水处, 辽宁 大连

Email: liyalin89@163.com

作者简介: 李亚琳(1989-), 女, 硕士研究生, 主要从事城市防洪排涝、水文水资源方向的研究。

收稿日期：2015年6月6日；录用日期：2015年6月27日；发布日期：2015年6月30日

摘要

随着城市化进程的加快以及极端天气的频发，城市内涝现象日益严重。本文以大连市片区为研究区域，应用SWMM工具，结合ArcGIS，对其排水系统进行了模拟计算，研究分析了城市化对原有排水系统的影响，并提出了优化制动阀的改造措施。结果表明，城市扩张增加了汇水区的径流总量和老管网的排水负荷；优化制动阀能够通过控制上游管网中的水流，从而对下游管网中的水流起到错峰的作用，可作为防洪除涝的辅助措施。本文研究为城市排水系统规划设计和城市防洪排涝提供了理论依据和指导。

关键词

城市内涝，改造措施，SWMM，城市化，排水系统，优化制动阀，模拟计算

1. 引言

科学研究[1][2]表明，不断加剧的全球气候变化、极端天气频发、快速发展的城市化等现象引发城市“热岛效应”、“雨岛效应”，导致城市洪涝灾害在频率和范围上都有增加的趋势。从城市排水管网角度分析，主要有两方面的原因[3]：一是城市不透水铺装面积的增加导致产流量增大；二是城市不断扩张导致位于下游的老管网排水压力过大，而对其进行改造常用的工程措施往往成本较大[4]-[6]，如何在控制成本的基础上对城市内涝进行防治是非常有意义的工作。目前管网改造常用的工程措施包括蓄水池、泵站、透水铺装和绿色基础设施等[7]，蓄水池适合低洼难以排水地区，泵站适合临近接纳水体(河流、湖泊等)的易涝地区，而透水铺装和绿色基础设施适合于存在大量易改造不透水面积的市区。并且以上几种措施投资成本、占地成本都比较高。近年来，一种利用优化制动阀(Hydro-Brake Optimum)控制洪水的方式在国外得到了许多应用[8][9]，该设施主要通过控制上游的管网中的水流，使其与下游管网中水流错峰，从而达到减缓下游管网洪水压力的目的。

本文主要应用SWMM模型，结合ArcGIS，对城市化前后的排水系统进行模拟计算，分析城市化进程对排水系统的影响，并提出了优化制动阀的改造措施，对优化制动对水流的控制进行了分析与讨论。

2. 研究区域及资料

2.1. 研究区概况

选取大连市某片区为研究对象，具有相对独立的雨水排水管网，排水口直接排向城市内河。其汇水区(黑色虚线框内)总面积为41.9 ha，其中不透水面积为27.2 ha，占65%，透水面积为14.7 ha，占35%。排水管网概化为37个管井节点、1个排放口和44根管道，管道总长度约2.77 km。

随着城市化进程加快，人口数量的增长，为满足居民住房需求以及地区发展需要，原有的林地、草地等被开发为居民建筑、广场等。城市面积向外扩张并铺设新管道，形成新的排水管网，但对于下游的旧管网并未进行相应改造使之与新管网相适应。城市扩张后，管井节点增至84个，管道增至91根，管线总长增至5.78 km，汇水区面积增至91.5 ha，全区不透水面积增至77.8 ha，占85%，透水区面积为13.7 ha，占15%。如图1为研究区城市扩张前后排水管网系统结构图，其中红色虚线框内原为林地、草地、裸露土地等，在城市扩张前，这部分面积产生的汇水不经过下游排水管网，因此在下文SWMM模型对现状排水管网进行模拟计算时，扣除了此部分的计算。城市化后，此部分产生的汇水经新敷设管道排出。

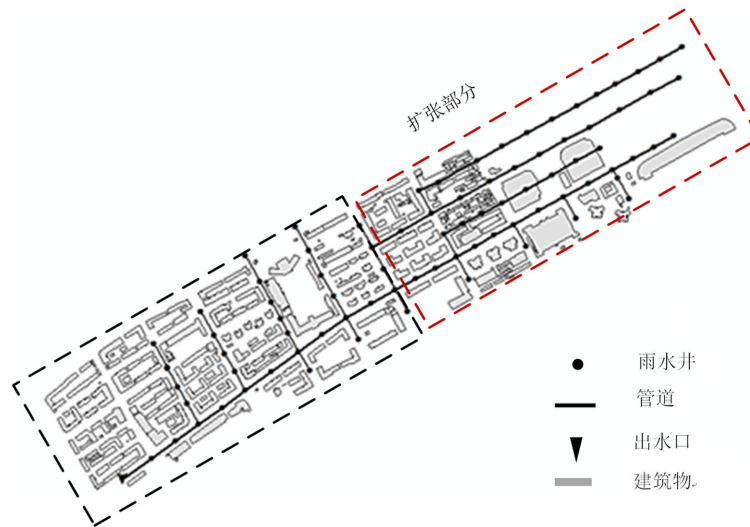


Figure 1. Drainage pipe network system structure of the study area
图 1. 研究区排水管网系统结构图

2.2. 资料及处理

现有的基础资料包括该区域 1515 m 精度的 DEM 数据, 管网 CAD 图, 以及下垫面资料(包括土地利用类型、水系信息等)。现做以下处理[10] [11]:

1) 首先根据管网数据需求, 利用现有研究区排水管网 CAD 图和数据库中提取管网基础数据信息, 包括管井、管长、管井标高等。对管网结构进行简化检查、连通性检查、水流方向检查等, 保证管网拓扑结构的规范性和合理性。使用 DEM 插值自动生成管井地面高程, 地面高程减去管井埋深得管井底部高程。若管道的坡度太大, 则灵活修改管井底部高程。

2) 利用 SWMM 模型概化下垫面, 依据土地利用利用状况和地表排水走向, 由泰森多边形原理将汇水区自动划分为若干子汇水区, 使每一个管井节点和排放口对应一个子汇水区, 并提取汇水区面积的大小、宽度、平均坡度等, 每一块汇水区面积产生的流量流入最近的检查井。本文研究区域将划分为 38 个子汇水区, 城市扩张后, 新汇水区划分为 85 个子汇水区。

3) 根据 SWMM 模型的数据输入需求和格式、利用该研究区已有的基础数据进行概化, 得到模型输入文件, 建立模型。

2.3. 降雨情景

根据《室外排水设计规范》对排水标准的规定, 重现期一般取 0.5~3 年, 重要地区等取 3~5 年或者更高[12] [13]。本文研究区为较重要地区, 采用了重现期为 3 年、5 年和 10 年的降雨条件, 并选择芝加哥降雨雨型[14] [15], 历时 2 小时, 降雨总量分别为 48.9 mm、54.8 mm 和 62.7 mm。图 2 给出了由大连市暴雨强度公式生成的不同重现期短历时芝加哥雨型。

3. 模型与方

3.1. 模型简介及参数设置

1971 年, 麦特卡夫-艾迪有限公司、佛罗里达大学和美国水资源有限公司在美国环保局的发起下, 共同研制了一个综合性数学模型-SWMM (Storm Water Management m Model)模型, 主要用于规划和设计阶段对城市暴雨、洪水的设计和管理。SWMM 模型可以模拟完整的降雨、下渗、蒸发、径流过程和污染物运动过程, 核心部分包

括计算模块、执行模块和服务模块，四个计算模块分别是径流模块、输送模块、扩充输送模块和存储/处理模块，一个服务模块包括统计模块、图表模块、合并模块、降雨模块和温度模块。各个模块既具有独立的功能，又相互联系[16]-[18]。

模型中的确定性参数(管径、管道长度等)在导入 SWMM 中自动生成,其不确定参数参考国内外研究成果[19][20]及研究区域的地面特征设定。如本文取霍顿曲线最大和最小渗透率分别为 76 mm/h 和 3.18 mm/h、不透水区和透水区的曼宁系数分别为 0.01 和 0.24、管道粗糙系数为 0.012 等。模拟过程采用动力波进行流量演算,计算时间 3.5 h, 计算时间步长为 5 min。

3.2. 优化制动阀工作原理

优化制动阀用于控制上游的水流从而起到防止或减缓下游洪水的目的。这种控制设备不需要能源,完全靠水压产生的涡流来控制流速,有效地减缓了出口的水流,以此控制流量[21]。该装置一般适用于上游较不重要且洪水不大的地区,在允许淹没范围内,必要时可以通过牺牲上游地区来保全下游地区。文献[21]对排水管道流量控制措施进行了研究,目前,孔口和涡流控制装置(优化制动阀等)是两种用于流量控制的装置,并结合实例研究和分析了两种控制措施对排水管道的控制效果,如图 3 所示。本次研究借助 SWMM 模型,由于在 SWMM 中没有优化制动阀工具选项,于是借助孔口装置进行简化分析。而对 SWMM 中孔口(Orifice)装置进行相关设置以后,借助孔口简化实现对排水管道的流量控制作用并对其效果进行分析。

3.3. 研究方法

1) 应用 SWMM 模型对城市化前后的排水管网进行模拟计算,从出水口状态、地表径流情况和管网负荷情况三方面进行对比分析与讨论。

2) 城市扩张后,下游旧管网未进行相应改造使之与新管网相适应,这种条件下,本文采用优化制动阀对上

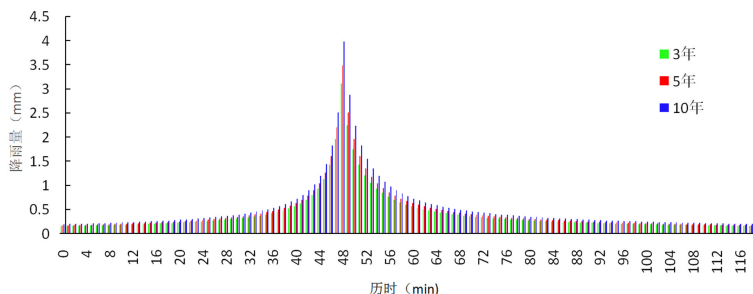


Figure 2. Different return period rainfall

图 2. 不同重现期降雨情景

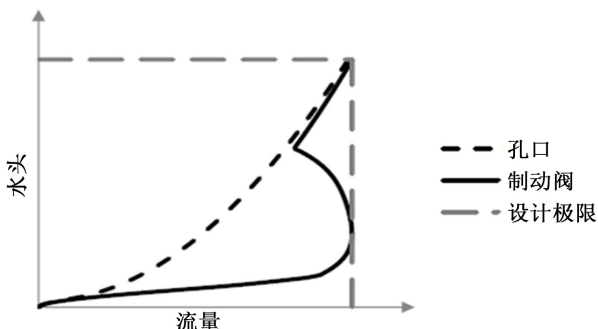


Figure 3. Working principle of orifice and hydro-braker optimum

图 3. 孔口与制动阀原理

游洪水进行控制，应用 SWMM 模型对优化制动阀添加前后的排水管网进行模拟计算，从流量、流速、溢流量三个方面对结果对比分析，讨论优化制动阀的控制效果。如图 4 所示，在上游设置优化制动阀 O1 和 O2。

4. 结果分析

4.1. 城市化对排水系统的影响分析

1) 出水口状态

出水口排水是否通畅对上游防洪排涝具有重要的意义，图 5 和图 6 分别为不同重现期降雨条件下，城市化前后汇水区出口管道水流流量与出水口水深随时间的变化过程，可以看出，城市化后出水口管道流量和水深远远大于城市化前。在重现期为 3 年、5 年和 10 年的降雨条件下，洪峰流量分别由原来的 $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $0.047 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $0.058 \text{ m}^3/\text{s}$ 增加到 $0.069 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $0.073 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $0.079 \text{ m}^3/\text{s}$ 。出口节点最大水深由原来的 0.11 m 、 0.12 m 和 0.13 m ，增加为 0.15 m 、 0.16 m 和 0.16 m 。水深小于该出口管道直径，能够安全排水研究区产生的降雨径流，但城市后出口节点水深大于城市化前，说明管网容纳了更多的雨水，增加了管道排水压力。

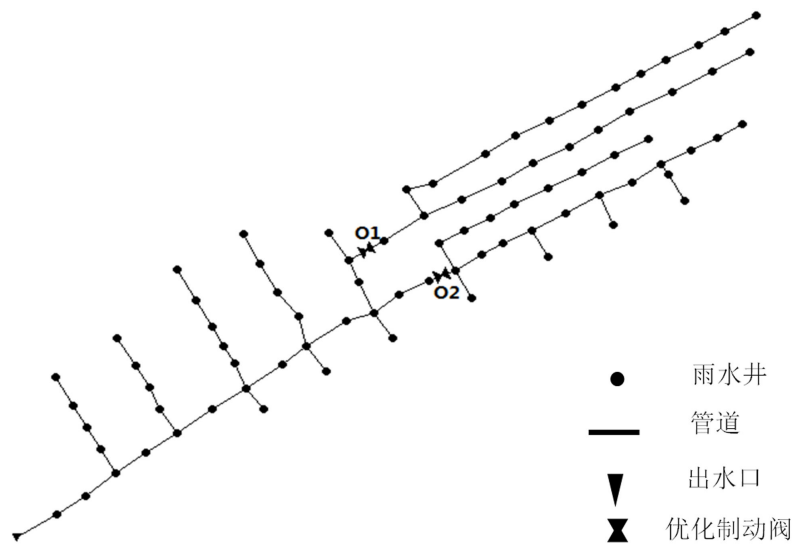


Figure 4. Setting about hydro-braker optimum
图 4. 优化制动阀设置示意图

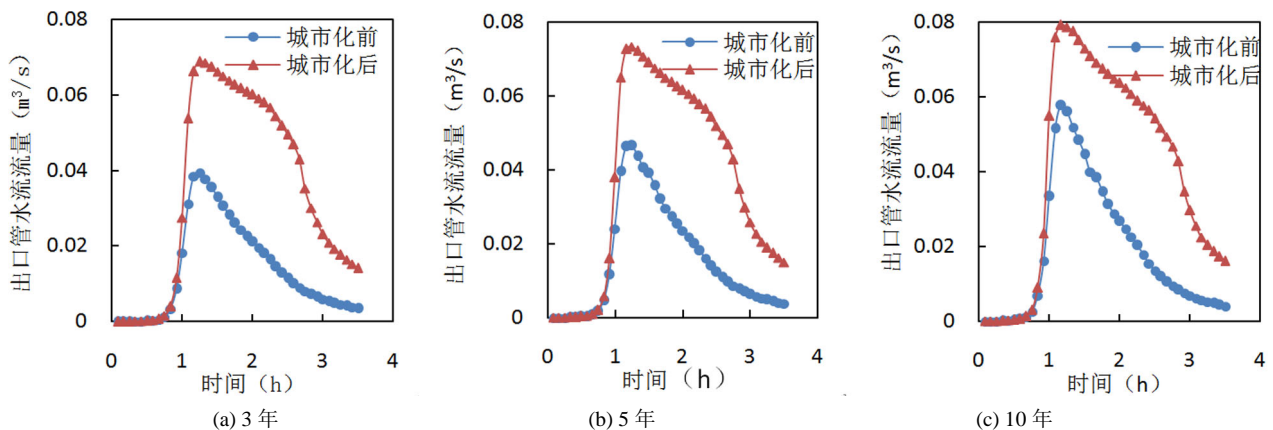


Figure 5. Outlet discharge curve before and after urbanization during different rainfall scenarios
图 5. 不同降雨条件下城市化前后汇水区出口管道水流流量过程

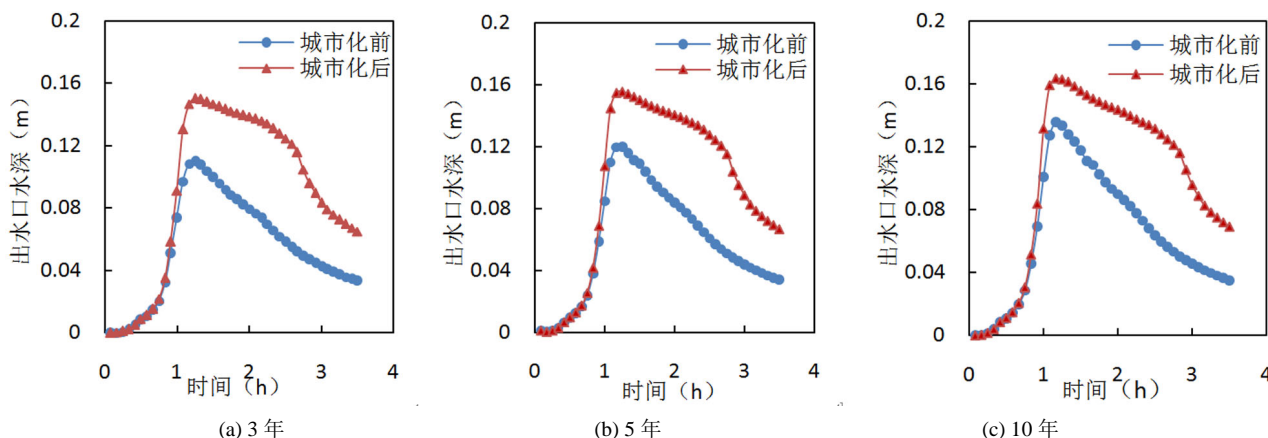


Figure 6. Outlet node depth curve before and after urbanization during different rainfall scenarios

图 6. 不同降雨条件下城市化前后汇水区出口水深过程

2) 地表径流情况

对地表径流的模拟结果，可以综合反映研究区自然地理要素对径流的影响情况，为雨、洪形成过程的分析 and 研究提供参考。城市化前后汇水区地表径流情况见表 1 所列。从中得出，城市化导致汇水区径流量增加，地面硬化使得下渗量反而减小，溢流量增加更为明显，在 3 年、5 年、10 年重现期降雨条件下，溢流量分别增加了 65 m^3 、 111 m^3 、 179 m^3 ，且溢流井主要分布下游新旧管网衔接的地方。这是由于原有排水系统的排水能力不变，却多承担了扩张区域汇面积上的雨水，增加了下游管道的排水压力。

3) 管道负荷情况

城市排水管网负荷过大，会降低其排水能力，长时间较大负荷也会影响管道的使用年限，如图 7 所示。以管道满流时间反映管道负荷情况，见表 2 所列。可见，城市化大大增加了下游老管网的负荷，表现为：满管管道数量增加，满管时间增长。且随着降雨强度增大，管网负荷越大。在城市化前，当降雨重现期为 3 年、5 年和 10 年时，分别有 3 根、2 根、1 根管道出现满管情况，而且管道满管时间均在半小时以内。城市化后分别有 14 根、16 根、16 根管道出现满管情况，且满管时间多为 1 小时以上，较城市化前，排水管网排水能力明显下降。由上节分析可知，尽管仍能排走大部分雨水，但是导致了部分管井节点的溢水。造成这些管道长时间满管的原因，一方面是因为下游排水管道管径较小，一方面是因为不透水面积的增大，使得更多的雨水径流进入排水系统，增加排水压力。

4.2. 优化制动阀措施分析

1) 对流速和流量的控制效果分析

流量和流速的变化，直接反映了管道中水流的变化。以优化制动阀位置为上下游分界，分别选取一定范围内的上下游管道为研究对象(见图 8)，分析管道水流流量和流速在优化制动阀控制前后的变化情况。从图 9~图 11 中明显看出，优化制动阀添加后，引起了管道水流最大流速与下游洪峰流量的削减，削减量的多少不一，反映了管道与优化制动阀所处的位置关系，距离优化制动阀越近，最大流速和洪峰流量减少的越多(如 L14, L8, L6)，距离优化制动阀越远，其洪峰流量与最大流速变化越小(如 L11, L1, L2)。而且可以发现，相对于下游管道，上游管道水流的流速削减更为明显。分析其原因，这是因为优化制动阀对上游的洪水一方面产生阻挡水流的水压，一方面限制了过水断面的面积，因此导致下游水流流速和流量的减少。

2) 对节点水深的影响

节点水深为管道底部到管井中水位的高度，当节点水深超过管井埋深时，管井节点出现溢流。同样，选取

Table 1. Simulation results of surface runoff on catchment area before and after urbanization
表 1. 城市化前后汇水区地表径流模拟结果

汇水区	面积(ha)	降雨重现期	总雨量(mm)	入渗量(mm)	径流量(mm)	溢流量(m ³)
城市扩张前	22.9	3 年	31.2	11.0	16.4	0
		5 年	34.6	12.2	18.8	0
		10 年	39.6	14.1	22.1	0
城市扩张后	91.5	3 年	68.9	6.7	48.6	65
		5 年	76.4	7.6	55.6	111
		10 年	88.4	8.5	66.2	179

Table 2. Conduit surcharging during different rainfall scenarios
表 2. 不同雨情境下管道负荷情况

超载管道	城市扩张前管道满管时间(h)			城市扩张后管道满管时间(h)		
	3 年	5 年	10 年	3 年	5 年	10 年
L15	—	—	—	1.39	1.52	1.65
L3	—	—	—	1.53	1.64	1.77
L24	—	—	—	—	0.06	0.55
L32	—	—	—	1.28	1.42	1.55
L26	—	—	—	—	0.21	0.53
L25	—	—	—	1.1	1.26	1.4
L1	0.27	—	—	1.68	1.78	1.89
L28	0.01	0.01	—	0.01	0.01	0.01
L29	—	—	—	1.07	1.19	1.31
L30	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
L31	—	—	—	0.01	0.01	0.01
L2	—	—	—	1.56	1.68	1.79
L27	—	—	—	1.39	1.52	1.65
L16	—	—	—	1.29	1.43	1.56
L4	—	—	—	1.48	1.59	1.71
L5	—	—	—	1.22	1.36	1.49

注：表中“—”表示管道未满流。

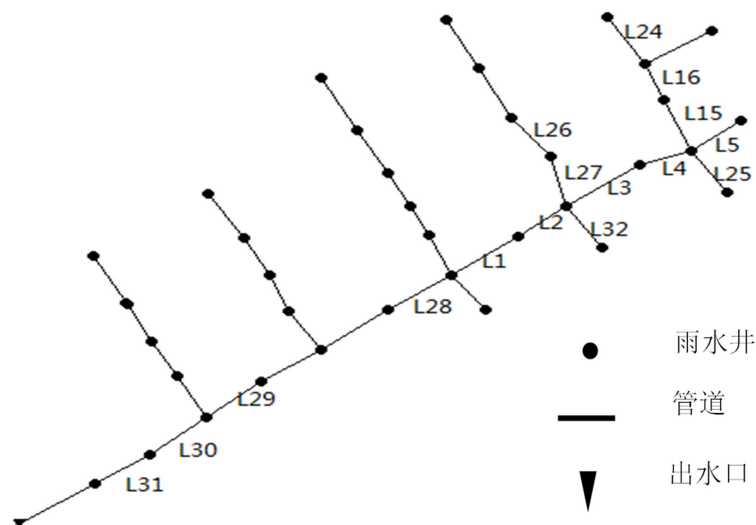


Figure 7. The piping distribution which greatly influenced by the urbanization
图 7. 受城市化影响较大的管道分布情况

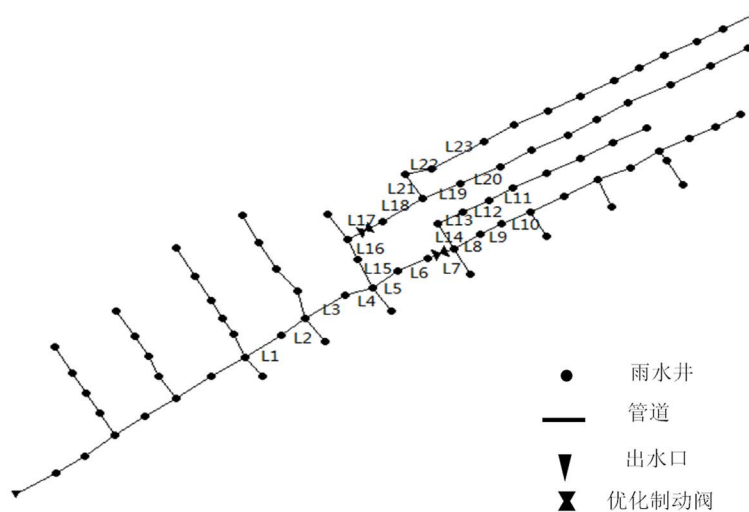


Figure 8. Pipelines which were selected
图 8. 选取管道示意图

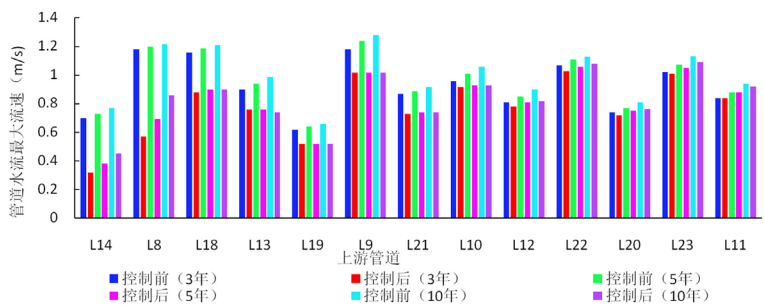


Figure 9. Variation of the upstream pipe flow's maximum flow before and after the adding of Hydro-Braker Optimum during different rainfall scenarios
图 9. 不同降雨条件下优化制动阀控制前后上游管道水流最大流速变化情况

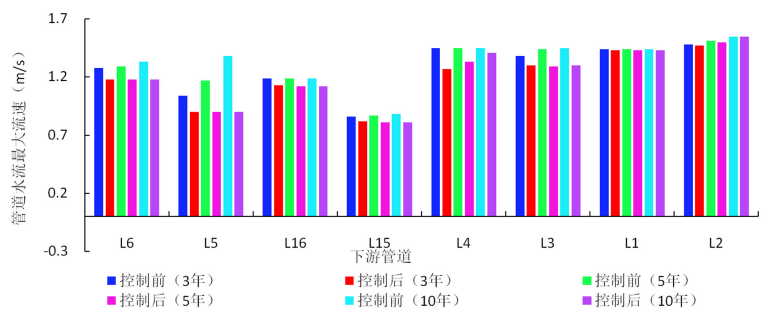


Figure 10. Variation of the downstream pipe flow's maximum flow before and after the adding of Hydro-Braker Optimum during different rainfall scenarios
图 10. 不同降雨条件下优化制动阀控制前后下游管道水流最大流速变化情况

一定范围的上下游管井节点为研究对象(见图 12)，图 13 和图 14 反映了优化制动阀控制前后节点最大水深的变化情况。从图中明显看出，优化制动阀抬高了上游节点最大水深，降低了下游管井节点最大水深。在优化制动阀的控制作用下，部分上游节点出现了溢流，如 3 年重现期降雨条件下的节点 J8 和 J18，5 年重现期降雨条件下的节点 J8、J18 和 J19，以及 10 年重现期降雨条件下的 J8、J18 和 J19，相应的部分下游节点也因优化制动阀

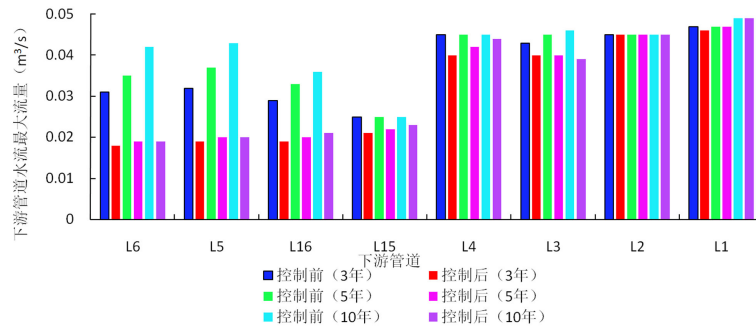


Figure 11. Variation of the downstream pipe flow's maximum flow before and after the adding of Hydro-Braker Optimum during different rainfall scenarios
图 11. 不同降雨条件下优化制动阀控制前后下游管道水流最大流量变化情况

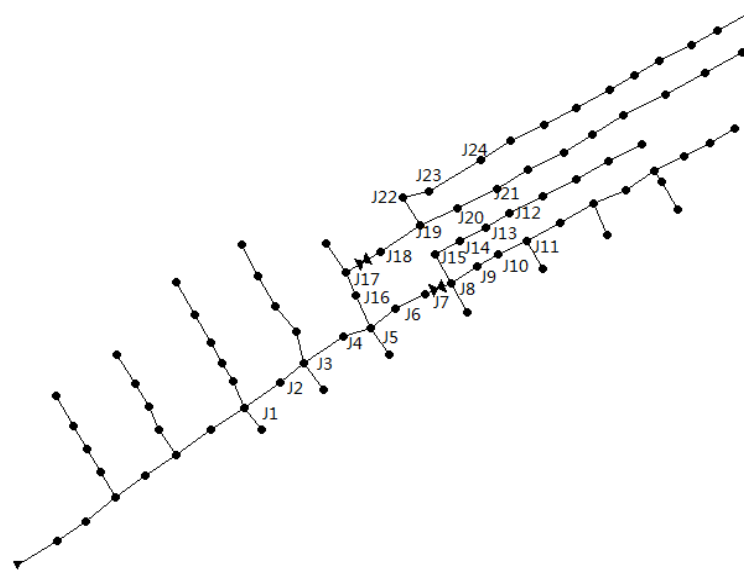


Figure 12. Studying nodes which were selected
图 12. 研究节点选取范围

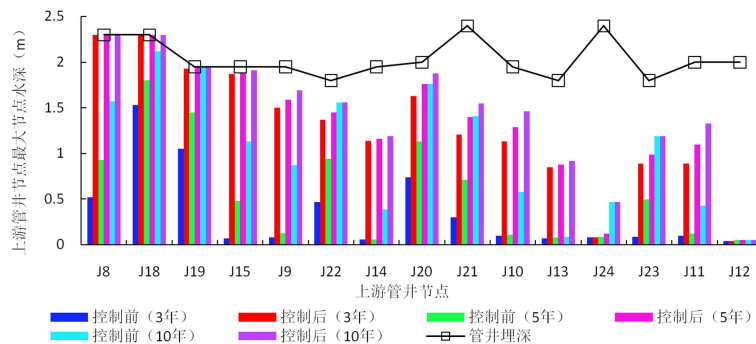


Figure 13. Variation of maximum node depth of upstream nodes before and after the adding of Hydro-Braker Optimum during different rainfall scenarios
图 13. 不同降雨条件下优化制动阀控制前后上游管井节点最大节点水深变化情况

的控制，由溢流变为无溢流，如溢流节点 J5 和 J16。优化制动阀对节点水深的影响，体现了优化制动阀对上游

管道空间容量的充分利用，上游管道容纳更多的水量，于是减缓了下游的洪水。

3) 对汇水区溢流量的影响分析

溢流时间直接反映了研究区的淹没情况。表 3 给出了优化制动阀添加前后的管井溢流情况，随雨量的增大，溢流节点数量增加，溢流量增大，溢流时间增长。从表中可以得出，优化制动阀对溢流量的影响表现为，一方面减缓了下游溢流状况，即溢流量减少，溢流时间变短；一方面实现了溢流量从下游到上游的转移，即优化制动阀添加前，溢流节点主要分布在下游，优化制动阀添加后，溢流节点主要分布在上游。

表 4 为不同降雨条件下，优化制动阀设置前后溢流总量的情况。从表中可以得出，优化制动阀添加后，下游溢流量减少，上游相应增加一部分溢流量，汇水区总溢流量减小，且在小降雨条件下效果更为明显，在重现期 3 年、5 年、10 年降雨条件下，溢流总量分别由原来的 65 m³、111 m³ 和 179 m³ 分别降低为 53 m³、90 m³ 和

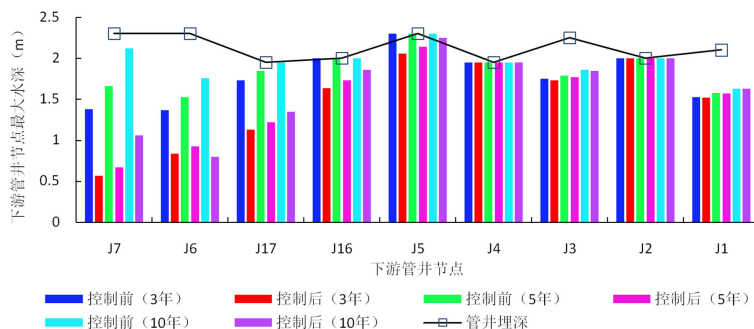


Figure 14. Variation of maximum node depth of upstream nodes before and after the adding of hydro-braker optimum during different rainfall scenarios
图 14. 不同降雨条件下优化制动阀控制前后上游管井节点最大节点水深变化情况

Table 3. Node flooding of the pipe network during different rainfall scenarios
表 3. 不同重现期降雨条件下管网溢流情况

降雨重现期	溢流节点	优化制动阀添加前		溢流节点	优化制动阀添加后	
		溢流时间(h)	溢流量(m ³)		溢流时间(h)	溢流量(m ³)
3 年	J4	0.78	23	J3	0.4	1
	J8	0.68	7	J7	0.89	21
	J3	1.03	24	J10	0.92	23
	J1	1.08	11	J1	0.87	8
5 年	J4	1.01	42	J3	0.7	7
	J8	0.96	21	J7	1.05	37
	J3	1.17	31	J11	0.33	3
	-	-	-	J1	1.05	15
	J9	0.48	4	J3	0.97	16
10 年	J4	1.19	70	J7	1.18	60
	J8	1.16	37	J11	0.61	15
	J3	1.32	39	J10	1.21	51
	J11	0.32	3	J1	1.21	24
	J1	1.34	26	-	-	-

Table 4. Total flood volume before and after the adding of Hydro-Braker Optimum during different rainfall scenarios
表 4. 不同降雨条件下优化制动阀设置前后溢流量对比

降雨重现期	优化制动阀设置前溢流量(m ³)			优化制动阀设置后溢流量(m ³)			总溢流量减少百分比(%)
	上游	下游	总量	上游	下游	总量	
3 年	0	65	65	44	9	53	18.46
5 年	0	111	111	77	22	99	10.81
10 年	3	176	179	40	126	166	7.18

166 m³，分别减少了 18.46%、10.81%和 7.18%。

5. 结论

1) 基于 SWMM 模型所构建的城市排水管网系统模型能够对城市雨洪过程进行全程动态模拟，可以动态显示所有的模拟计算输出结果，查询任意时刻流域、节点、管网各项参数和模拟结果，可以为城区防洪排涝工作提供技术支持。

2) 城市化对排水系统的影响表明，不透水面积增加导致产流量增大，城市面积的扩张增大了原有排水管网的负荷，增大了汇水区溢流量。所以在城市建设扩张当中，除了做好排水系统的规划设计外，更要保证一定比例的透水面积，增加绿化面积和透水铺装等。

3) 优化制动阀通过控制上游的水流，起到防止或减缓下游洪水的目的，可作为一种城市除涝手段。但在实际应用中，优化制动阀的单一措施往往不能取得理想的效果，仅靠管道本身的空间容量调节洪峰流量是有限的。本文的研究管网较为简单，在实际复杂排水系统管网中，还要结合蓄水池、泵站、绿色设施等方法。此外，优化制动阀的位置、数量、大小等设定，还需要深入研究。

参考文献 (References)

- [1] SEMADENI-DAVIES, A., HERNEBRING, C., SVENSSON, G., et al. The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: Combined sewer system. *Journal of Hydrology*, 2008, 350(1): 100-113.
- [2] 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)
- [3] 刘涛. 城市化进程中排水系统建设存在的问题及对策研究——以北京为例[J]. *经济师*, 2011, 10: 10.
 LIU Tao. Problems about drainage system construction in urbanization process and countermeasure research—Taking Beijing as the example. *Economist*, 2011, 10: 10. (in Chinese)
- [4] 李彦伟, 尤学一, 季民, 等. 基于 SWMM 模型的雨水管网优化[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(23): 40-43.
 LI Yanwei, YOU Xueyi, JI Min, et al. Optimization of rainwater drainage system based on SWMM model. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(23): 40-43. (in Chinese)
- [5] Dirksen, J., Baars, E. J., Langeveld, J. G., et al. Quality and use of sewer invert measurements. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2014, 10(3): 295-304.
- [6] 周振霞. 昌平老城区排水系统改造方案研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
 ZHOU Zhenxia. Urban drainage system reform scheme in Changping district. Beijing: Tsinghua University, 2010. (in Chinese)
- [7] 赵燕霞, 程木炜, 王运涛, 等. 城市防洪典型区域除涝方案分析研究. 2014.
 ZHAO Yanxia, CHENG Muwei, WANG Yuntao, et al. Research on waterlogging drainage scenarios of typical urban flood control regions. *Journal of Water Resources Research*, 2014. (in Chinese)
- [8] MATTHEWS, T. M., PITTS JR., P. D., LARLHAM, R. C., et al. Hydro brake regulated storage system for stormwater management. NTIS, Springfield, VA(USA). 1983.
- [9] LAMB, T. J. Practical use of hydro-brake® flow controls to alleviate flooding at low cost. *The Public Health Engineer*, 1983,

- 11(3): 19-23.
- [10] 刘光东, 杨毅, 吴山. 基于 SWMM 模型的北京市山区清水河流域数值模拟研究[J]. 中国水利学会 2014 学术年会论文集 (下册), 2014.
LIU Guangdong, YANG Yi, WU Shan. The application of SWMM in numerical simulation of Qingshui River watershed in Beijing. Chinese Hydraulic Engineering Society 2014 Academic Papers (Volume two), 2014. (in Chinese)
- [11] 董欣, 陈吉, 赵冬泉. SWMM 模型在城市排水系统规划中的应用[J]. 给水排水, 2006, 32(5): 106-109.
DONG Xin, CHEN Ji, ZHAO Dongquan. Application of SWMM model in urban drainage system planning. China Water & Wastewater, 2006, 32(5): 106-109. (in Chinese)
- [12] 鲁航线, 张开军, 陈微静. 城市防洪, 排涝及排水三种设计标准的关系初探[J]. 城市道桥与防洪, 2008, (11): 64-66.
LU Hangxian, ZHANG Kaijun, CHEN Weijing. Elementary probing into relation of three design standards of urban flood control, flooded fields and drainage. City Bridge & Flood, 2008, (11): 64-66. (in Chinese)
- [13] 黄常斌. 城市防洪排涝标准探讨[J]. 水利科技, 2009, (4): 60-61.
HUANG Changbin. Probing into standards of urban flood control and flooded. Hydraulic and Technology, 2009, (4): 60-61. (in Chinese)
- [14] 牟金磊. 北京市设计暴雨雨型分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2011.
MOU Jinlei. Design storm pattern analysis in the city of Beijing. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [15] 岑国平, 沈晋, 范荣生. 城市设计暴雨雨型研究[J]. 水科学进展, 1998, 9(1): 41-46.
CHEN Guoping, SHEN Jin, FAN Rongsheng. Research on rainfall pattern of urban design storm. Advances in Water Science, 1998, 9(1): 41-46. (in Chinese)
- [16] 陈晓燕, 张娜, 吴芳芳, 等. 雨洪管理模型 SWMM 的原理, 参数和应用[J]. 中国给水排水, 2013, 29(4): 4-7.
CHEN Xiaoyan, ZHANG Na, WU Fangfang, et al. Stormwater management model (SWMM): Principles, parameters and applications. China Water & Wastewater, 2013, 29(4): 4-7. (in Chinese)
- [17] 李家科, 李亚, 沈冰. 基于 SWMM 模型的城市雨水花园调控措施的效果模拟[J]. 水力发电学报, 2014, 33(4): 60-67.
LI Jiake, LI Ya, SHEN Bing. Simulation of rain garden effects in urbanized area based on SWMM. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(4): 60-67. (in Chinese)
- [18] 傅新忠. SWMM 在城市雨洪模拟中的应用研究[D]. 浙江师范大学, 2012.
FU Xinzong. A study of the application of SWMM on urban storm water simulation. Zhejiang Normal University, 2012. (in Chinese)
- [19] 王磊. 基于模型的城市排水管网积水灾害评价与防治研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2010.
WANG Lei. The research on urban drainage network inundation evaluation and control based on modeling technology. Beijing: Beijing University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [20] 李卓熹, 秦华鹏, 谢坤. 不同降雨条件下低冲击开发的水文效应分析[J]. 中国给水排水, 2012, 28(21): 37-41.
LI Zhuoxi, QIN Huapeng, XIE Kun. Hydrological effect analysis of low impact development under different rainfall conditions. China Water & Wastewater, 2012, 28(21): 37-41. (in Chinese)
- [21] NEWTON, C. J., JARMAN, D. S., MEMON, F., et al. Improvements in vortex flow control design to increase sewer network flood resistance. 7th International Conference on Sewer Processes and Networks. International Water Association (IWA), 2013.