

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtq.2019.0042

徐袞檬,潘兴瑶,李永坤,等. 已建区排水管网评估及多尺度分区改造策略[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(2): 123-131, 139. XU J M, PAN X Y, LI Y K, et al. Evaluation of drainage network and multi-scale zoning optimization strategy in a built-up area[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(2): 123-131, 139. (in Chinese)

已建区排水管网评估及多尺度分区改造策略

徐袞檬^{1,2}, 潘兴瑶¹, 李永坤¹, 鞠琴², 王丽晶¹, 李尤^{1,2}, 张宇航^{1,2}

(1. 北京市水科学技术研究院 北京市非常规水资源开发利用与节水工程技术研究中心, 北京 100048;
2. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098)

摘要:为评估已建区现状排水管网情况并以问题为导向提出针对性的多尺度分区管网排水能力提升优化策略,以北京市东城区为例,构建基于 InfoWorks ICM 的城市综合流域排水模型,选用两场实测降雨分别进行参数率定及模型验证,结果表明模型具有较高的精度与可靠性。在此基础上,利用该模型对 1、3、5、10 a 4 种不同设计重现期、历时 1 h 降雨情景下的排水管网排水能力进行模拟,分三个尺度对研究区域模拟结果的分析如下:城市尺度的管网排水能力不足 1 a 一遇、1~3 a 一遇、3~5 a 一遇、5~10 a 一遇、10 a 一遇的管线长度比例分别为 52%、10%、4%、6%、29%;地块尺度功能分区排水能力排序为:公园绿地≥居民小区>商务行政办公区>商业区;道路尺度的主干道管线排水能力不足 1 a 一遇、1~3 a 一遇、3~5 a 一遇、5~10 a 一遇、10 a 一遇的管线长度比例分别为 38%、9%、4%、7%、42%。针对不同尺度下排水管网排水能力的现状评估结果,诊断并分析排水能力不足的问题及成因,以期通过系统性的管网现状评估及优化方案,为国内其他老城区的管网排水能力提升提供一套适用性的优化改造策略。

关键词:管网排水能力;InfoWorks ICM 模型;参数率定及模型验证;城市降雨-产汇流模拟;多尺度分区改造策略;已建区

中图分类号:TV121;TU992.1 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Evaluation of drainage network and multi-scale zoning optimization strategy in a built-up area

XU Jiameng^{1,2}, PAN Xingyao^{1,3}, LI Yongkun¹, JU Qin², WANG Lijing¹, LI You^{1,2}, ZHANG Yuhang^{1,2}

(1. Beijing Unconventional Water Resources Development and Utilization and Water Saving Engineering Technology Research Center, Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China;
2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to evaluate the situation of drainage network in a built-up area and propose a targeted multi-scale zoning optimization strategy for improving drainage capacity of pipelines, this paper constructed an urban integrated drainage model with InfoWorks ICM for the Dongcheng District of Beijing. The model was calibrated and validated with two measured rainfall event data. The results showed that the model had a high accuracy and was reliable. The model was then used to simulate the drainage capacity of the drainage network under four different rainfall scenarios of the recurrence periods of 1, 3, 5 and 10 years. The simulation results of the study area were analyzed in three scales: The proportions of pipeline lengths of urban scale pipeline networks with less than 1 year, 1-3 years, 3-5 years, 5-10 years and 10 years were 52%, 10%, 4%, 6% and 29% respectively; The drainage capacity of the functional zoning on the land was: park and green space ≥ residential area > commercial and administrative office area > business area; The proportions of pipeline length of main and secondary roads with less than 1 year, 1-3 years,

收稿日期:2018-10-26 修回日期:2018-12-18 网络出版时间:2019-01-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190118.2139.008.html>

基金项目:国家“十三五”水专项课题(2017ZX07103-002);北京市科技新星计划(Z161100004916085)

作者简介:徐袞檬(1994—),女,山东烟台人,主要从事城市水文学研究。E-mail:734759237@qq.com

通信作者:潘兴瑶(1980—),男,北京人,高级工程师,博士,主要从事城市水文学研究。E-mail:pxy@bwsti.com

3-5 years, 5-10 years and 10 years were 38%, 9%, 4%, 7% and 42%, respectively. Based on the evaluation results of drainage capacity of drainage pipe network under different scales, the problems and causes of insufficient drainage capacity were diagnosed and analyzed, and a suitability optimization strategy for improving drainage capacity was expected for other old urban areas in China through systematic assessment and optimization of the pipeline network.

Key words: network drainage capacity; InfoWorks ICM model; model calibration and validation; urban rainfall runoff simulation; multi-scale zoning optimization strategy; built-up area

城市化进程的加快使得城市不透水面积急剧增大,改变了城市水循环过程,降雨径流量和峰值增大、峰现时间提前,城市暴雨洪涝问题愈加严重^[1-3]。在高强度极端降雨致灾因子和北京市高度城市化的孕灾环境的双重作用下,2012年7月21日,北京暴雨历时17 h,降雨量达224.2 mm,内涝积水现象严重,给社会经济带来了巨大的损失^[4],东城区主干道共出现积水点14处,其中下凹式立交桥积水点7处。为此,国务院办公厅发布了《关于做好城市排水防涝设施建设工作的通知》(国办发[2013]23号),明确提出要“有效解决当前影响较大的严重积水内涝问题,避免因暴雨内涝造成人员伤亡和重大财产损失”。为落实文件要求,住建部印发了《城市排水(雨水)防涝综合规划大纲》,推荐在排水防涝设施普查的基础上,使用水力模型评估城市现有排水能力,以应对暴雨引发的城市内涝灾害,加强排水防涝设施建设与管理^[5-9]。目前常用的城市雨洪模型有 InfoWorks ICM、SWMM、MIKE 等,其中 InfoWorks ICM 实现了一维管网、二维地表漫流及河道水力模型的模拟和交互耦合,能较为真实地模拟排水管网系统与地表接纳水体之间的相互作用,且具有强大的前、后处理能力,已广泛应用于城市排水系统现状评估^[10-15]。

北京作为我国北方特大城市,高度城市化使得区域下垫面情况变得极为复杂^[8]。东城区位于北京市首都核心区,社会经济发展水平高且全部为城市化区域。此种发展较为成熟、开发较早的老城区,城市排水能力设计标准较低,普遍在1 a一遇及以下^[16],因此对城市排水管网排水能力的评估与问题诊断是解决城市内涝问题的关键环节。而大规模的工程性措施受到城市定位、发展空间、工程成本等因素的限制,在种种限制因素下如何有效提升管网的排水能力值得深入探讨。本文通过利用 InfoWorks ICM 城市综合流域模型软件构建东城区一维排水管网模型,对1 a、3 a、5 a、10 a一遇4种不同设计重现期、历时1 h降雨情景下的排水管网排水能力进行模拟评估,并针对现状评估结果,从城市、地块、道

路三个尺度进行问题诊断分析,在此基础上建立一套适用于老城区管网排水能力提升的系统性优化改造策略。

1 研究区域概况

本文选取北京市东城区为研究区域,东城区是历史文化名城中心区和首都功能核心区,地处北京市中心城区的东部。区域地理坐标为北纬39°51′26″~39°58′22″,东经116°22′17″~116°26′46″,总面积41.84 km²。研究区属大陆性季风气候,近5年平均降雨量为637.6 mm,局部高强度短历时降雨发生较为频繁,降水主要集中在6—8月,占年降水量的75%以上^[17]。

东城区目前的排水体制主要为合流制排水系统,区内排水管线建设时间较早,排水管线设计标准较低,四合院等老住宅区建设错综复杂,相对应的管线布设也极为复杂。据北京市排水集团最新统计数据,东城区排水管线总长共854.47 km,其中雨水管线、合流管线、污水管线的长度分别为286.88 km、228.81 km、338.78 km,所占比例33.6%、26.7%、39.7%。研究区域高度城市化,不透水下垫面比例为86%,通过国产高分一号卫星和高分二号卫星共两套遥感影像数据进行北京城市建成区下垫面解译,获取东城区用地类型数据见图1。

2 模型概况

2.1 模型理论基础

本文采用 InfoWorks ICM 城市综合流域排水模型,该模型结合城市排水管网系统模型和河道模型,采用一维和二维水动力学计算模型,实现城市雨水系统的动态模拟,广泛应用于城市雨洪分析与预测、排水系统暴雨径流控制等方面^[18-20]。

管网水动力模型采用圣维南方程组的一维水动力学模型方法计算模拟,基本控制方程为

连续方程

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$



图1 研究区域下垫面解译图

Fig. 1 The underlying surface interpretation of research area

动量方程

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\cos(\theta) \frac{\partial y}{\partial x} - S_0 + \frac{Q|Q|}{K^2} \right) = 0 \quad (2)$$

式中: A 为横截面积; Q 为流量; g 为重力加速度; θ 为水平夹角; t 为时间; x 为沿水流方向的水平坐标; y 为水位; S_0 为床层坡度; K 为输送量。

采用压力管流模型计算压力管流模拟情况, 压力管流基本公式为

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} - S_0 + \frac{Q|Q|}{K^2} \right) = 0 \quad (4)$$

式中: A 为管道横截面积; Q 为流量; g 为重力加速度; t 为时间; x 为沿水流方向的水平坐标; y 为水位; S_0 为底坡; K 为满管输送量。

河网洪水演进采用一维水动力学模型方法进行模拟, 其基本控制方程为

连续方程

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (5)$$

动量方程

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right) + gAS_f - u \times q = 0 \quad (6)$$

式中: A 为河道过水面积; Q 为流量; u 为侧向来流在河道方向的流速; t 为时间; x 为沿水流方向的水平坐标; q 为河道的侧向来流量; β 为动量修正系数; g 为重力加速度; y 为水位; S_f 为摩阻坡降。

2.2 模型构建情况

东城区精细化城市排水管网模型的构建主要包括基础数据资料的前期处理、排水单元划分、降雨产流模型构建、一维管网汇流模型构建、二维河道模型构建及管网与河道模型的耦合。

基于管网数据构建管网汇流模型, 在排水管线资料基础上, 依据实地调研情况梳理管线, 以主干道路排水管线为主, 进行拓扑检查和纵断面检查, 确保管线上下游连接、高程分布、埋深以及坡度等方面的合理性和准确性。概化后的模型节点共 14 545 个(其中含排水口 51 个), 管线共 14 558 条, 管线总长 481.6 km, 其中雨水管线 210.2 km、雨污合流 134.8 km、污水管线 136.6 km, 管径介于 0.3~5.6 m, 雨水排水泵站 7 座, 溢流堰 17 个, 河道两条及概化的盖板河两条。根据管网材质和实际运行状况, 管网曼宁系数选取 0.04。综合考虑东城区排水管网的汇流情况、控制范围和土地利用资料等信息, 划分出 55 个排水分区, 并基于泰森多边形法计算排水分区内各检查井的汇水范围, 依据研究区的 DEM、卫星遥感图、和实地调研情况进行调整, 最终共划分 10 410 个子汇水区(见图 2)。



图2 研究区城市排水模型构建

Fig. 2 The urban drainage construction in research area

根据下垫面数据信息,将研究区土地利用类型分为屋面、道路、绿地、水域、其他共五类,利用 Arc-

gis 提取每个子集水区下垫面面积,以真实反映每个子集水区的下垫面降雨入渗产流条件。

表 1 数据资料及来源

Tab. 1 Data used in this study and their sources

分类名称	数据时效性	数据内容	数据精度
基础地理信息	2010	全市地类斑块	矢量数据,1:10 000
	2011	基础地形	栅格数据,1:2 000
	2011	DEM 数据	栅格数据,30 m 分辨率
	2013	航空影像图	栅格数据,0.5 m 分辨率
排水设施信息	2018	排水管线	矢量数据,482 km
	2018	节点	矢量数据,14 545 个
	2018	排水口	矢量数据,51 个
水文气象数据/排口流量实测数据	2018	降雨过程	2018. 8. 12 场次,数据记录步长为 5 min
	2018	降雨过程	2018. 8. 13 场次,数据记录步长为 5 min
	2018	实测流量数据	2018. 8. 12—8. 13 场次降雨广渠门南雨水排口流量过程,数据记录步长为 15 min

2.3 参数率定与模型验证

2.3.1 参数率定

参考相关文献、模型用户手册和实地监测数据选择研究区域的管网模型参数^[21-26]。产流模型中对于不透水下垫面“屋顶”和“道路”,采用固定径流系数法;对于透水下垫面“绿地”和“其他”,采用 Horton 公式进行降雨的入渗过程计算,汇流计算采用

非线性水库模型,依据《城镇雨水系统规划设计暴雨径流计算标准》(DB11/T 969—2017),考虑最不利因素确定最初模型参数,依据实测场次降雨—流量数据率定参数,模型参数最终取值见表 2。选择 2018 年 8 月 12 日场次降雨(古观象台雨量站降雨数据)和同时间广渠门南雨水排口的流量监测数据进行参数率定,经计算,本场次降雨调参后的纳什系数为 0.759,相关系数 R^2 为 0.881。

表 2 研究区产流参数

Tab. 2 Runoff parameters in study area

产流表面	径流量类型	固定径流系数	初期损失值/m	Horton 初渗率/($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	Horton 稳渗率/($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	Horton 衰减率/ h^{-1}
屋顶	Fixed	0.80	0.001	—	—	—
道路	Fixed	0.85	0.002	—	—	—
绿地	Horton	—	0.005	200	12.7	2
其他	Horton	—	0.005	125	6.3	2
水域	Fixed	0	—	—	—	—

2.3.2 降雨径流模拟结果验证

选取 2018 年 8 月 13 日场次降雨对率定后的模型进行验证。经计算,本场次降雨的纳什系数为 0.762,相关系数 R^2 为 0.817,拟合效果较好,满足模型使用要求。8 月 12—13 日场次降雨模拟与实测流量对比,见图 3。

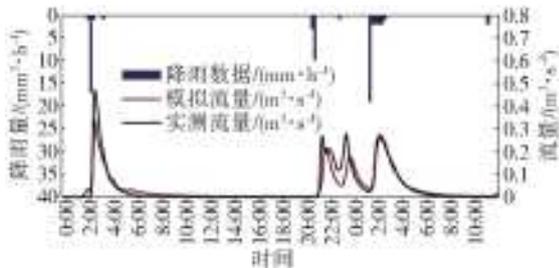


图 3 研究区 8 月 12 日—13 日场次降雨模拟与实测流量对比

Fig. 3 The simulated and measured flow for the rainfall event on 8. 12-8. 13 in the research area

2.3.3 内涝积水模拟结果验证

模拟 2018 年 8 月 12—13 日场次降雨的内涝积水情况,根据研究区域的内涝积水调研情况,模拟结果中的内涝积水点位置与调研结果较为一致,本场降雨造成内涝积水较为严重的区域主要集中在部分地势低洼的下凹桥处,统计 8 月 12—13 日场次降雨主要内涝点的最大模拟水深与调研水深,统计结果见表 3。由表 3 可知,模型模拟的易涝点位置及积水深度与实际调查结果较为一致,从而验证了模型的可靠性。

3 模型应用

3.1 降雨过程设计

根据北京地方标准《城镇雨水系统规划设计暴雨径流计算标准》中暴雨强度公式,设计重现期 1 a、

表3 研究区8月12日-13日场次降雨内涝积水点模拟与调研结果统计对比

Tab. 3 The comparison of waterlogging simulated and survey results for the rainfall event on 8. 12-8. 13 in the research area

内涝点位置	最大调研水深/cm	最大模拟水深/cm	误差/cm
陶然桥西	20	25.0	5.0
东便门铁路桥	20	26.5	6.5
东直门桥南	15	10.2	4.8
东直门北桥	20	21.8	1.8
安定门桥	10	12.8	2.8

3、5、10 a 一遇,降雨历时 1 h 的设计降雨过程。暴雨强度公式为

$$q = \frac{591(1+0.893\lg P)}{(t+1.859)^{0.436}}, 1 \text{ min} \leq t \leq 5 \text{ min} \quad (7)$$

$$q = \frac{1602(1+1.037\lg P)}{(t+11.593)^{0.681}}, 5 \text{ min} \leq t \leq 1440 \text{ min} \quad (8)$$

式中: q 是设计暴雨强度; t 是设计降雨历时; P 是设计重现期。

依据我国《给水排水设计手册》推荐使用的芝加哥雨型进行降雨历时为 1 h 的降雨过程时程分配(见图 4)。

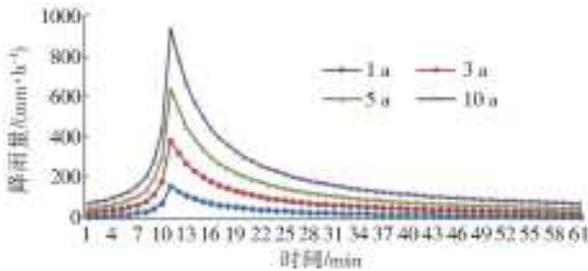


图4 不同重现期设计降雨过程

Fig. 4 Process of precipitation in different return periods

3.2 现状管网排水能力评估

依据海绵城市建设效果评估的尺度划分标准,并结合不同尺度区域的管网特征,从城市、地块、道路三个尺度对现状管网排水能力进行分析。城市尺度通常指一个城市区域或行政区域等所具有一致管理主体的区域,城市尺度的管网排水能力评估代表此区域整体的排水能力状况,将为城市排水总体规划提供现状排水情况的诊断结果;地块尺度的排水能力评估通常指以区域土地用途为划分指标,以区域功能性的差异划分为住宅区、商业区等代表性分区,针对每个功能分区进行的管网排水能力评估结果将为各分区提供针对性的管网提标与海绵改造方案参考;位于城市道路处的管网通常是一个排水分区的主干管道,汇水面积较大,且下凹桥等内涝积水频发点多分布于城市主干道路上,因此道路尺度的排水能力评估对以下凹桥等为代表的低洼积水点等

内涝问题的解决有极大的现实意义。

InfoWorks ICM 中评估管网的超负荷状况情况采用负荷度来表示,管道的负荷度是指管道内水流的充满度,本文选取 3 个负荷状态阈值(0.5、1、2),其表示的含义见表 4。基于东城区排水管网模型的降雨产汇流模拟结果,可得到每条管线在汇流过程中最大的负荷度,通过统计 1、3、5、10 a 四种重现期降雨情景下每条管线的超负荷情况,计算得到每条管线的现状排水能力。

表4 管网负荷度取值释义

Tab. 4 The values and their meanings of overload degree of pipe network

负荷度	是否超负荷	释义	超负荷原因
0.5(<1)	否	管道内水深为管道深度的 50%	—
1	是	水力坡度小于管道坡度	由于下游管道过流能力限制
2	是	水力坡度大于管道坡度	由于管道本身过流能力限制

3.2.1 城市尺度现状管网排水能力评估

城市排水管道负荷较大会造成排水不畅,下游管道超负荷会导致所连上游检查井积水,严重时会引起检查井积水溢流。如表 3 所示,1、3、5、10 a 降雨重现期情景下超负荷排水管线的长度比例分别为 52%、62%、65%、72%,其中 52% 长度的排水管线在小重现期降雨情景下(1a)就已超负荷。超负荷管线中由于下游过流能力不足造成满载运行(负荷度=1)的管道比例分别为 35%、37%、37%、39%,由于自身过流能力不足造成满载运行(负荷度=2)的管道比例分别为 17%、25%、28%、33%。通过对各重现期降雨情境下管道负荷情况的分析、计算和汇总,得出每条排水管道的排水能力情况见表 4,不足 1 a 一遇的管线长度比例为 52%,1~3 a 一遇、3~5 a 一遇、10 a 一遇的管线长度占比分别为 10%、4%、6%、29%。

对于随降雨重现期的增加、负荷度明显增加的超负荷管线,从空间分布角度分析,随降雨重现期增大,增加的超负荷管线多集中分布于城市支路、地块功能区内部及主干管线的汇流支线处;从管线性质的角度分析,增加的超负荷管线雨污合流与雨水管路段数所占比例分别为 45.3%、54.7%。从研究区整体来看,大面积的超负荷管线主要分布于故宫博物院以东,东长安街、建国门内大街以北,朝阳门内大街以西及北护城河以南的区域,此区域相对于研究区其他区域不透水下垫面比例较大、绿化面积较小,排泄通道主要为东护城河盖板河、前三门盖板河、筒

子河、金水河等内部河道。此外,此块区域四合院、北京胡同等传统的建筑和街道较为集中,商业区和住宅区建设年份较早,因此管道排水能力设计标准偏低也是此块区域管网负荷情况严重的一个重要原因。而对于前三门盖板河以南、南护城河以北的区域,天坛及龙潭湖占据了此块区域近一半的面积,大

表 5 排水管网负荷情况汇总

Tab. 5 Summary of load situation of pipe network

1 a 重现期设计降雨					
序号	负荷度	长度/m	比例/%	段数/段	比例/%
1	<1	164 685.8	48	4 840	46
2	1	120 838.9	35	3 909	37
3	2	59 553.7	17	1 760	17
合计		345 078.4	100	10 509	100
3 a 重现期设计降雨					
序号	负荷度	长度/m	比例/%	段数/段	比例/%
1	<1	130 935.6	38	3 811	36
2	1	127 507.2	37	4 176	40
3	2	86 635.6	25	2 522	24
合计		345 078.4	100	10 509	100
5 a 重现期设计降雨					
序号	负荷度	长度/m	比例/%	段数/段	比例/%
1	<1	120 586.8	35	3 497	33
2	1	127 504.2	37	4 213	40
3	2	96 987.4	28	2 799	27
合计		345 078.4	100	10 509	100
10 a 重现期设计降雨					
序号	负荷度	长度/m	比例/%	段数/段	比例/%
1	<1	99 362.1	29	2 855	27
2	1	133 142	39	4 443	42
3	2	112 574.3	33	3 211	31
合计		345 078.4	100	10 509	100

表 6 排水管网现状排水能力汇总

Tab. 6 Summary of current drainage capacity of pipe network

管网标准	长度/m	比例/%	段数/段	比例/%
不足 1 a 一遇	180 392.6	52	5 669	54
1~3 a 一遇	33 750.2	10	1 029	10
3~5 a 一遇	12 096.4	4	357	3
5~10 a 一遇	19 477.1	6	599	6
10 a 一遇	99 362.1	29	2 855	27
合计	345 078.4	100	10 509	100

面积的水体和绿化对地表径流有极大的消纳作用,因此会减小周边地区排水管网的排水压力。

3.2.2 地块尺度现状管网排水能力评估

选取东护城河沿岸的一个面积为 1.934 km² 的闭合排水分区作为地块尺度的代表研究区域,区域内降雨径流经排水管网汇集至雨水排口,向东排入东护城河。依据用地功能的不同,将研究区划分为公园绿地、商业区、商务行政办公区及居民住宅区四类功能分区,从地块功能性角度分析其现状管网排水能力。

由图 5 可知,研究区内所占面积最大的居民住宅区内管网的排水能力普遍在 5~10 a 一遇及以上,而商业区中超过半数管线的排水能力不足 1 a 一遇,商务行政办公区中位于道路主干道沿线的排水管线排水能力多在 1~3 a 一遇及以下,公园绿地周边的管网排水能力均在 5 a 一遇及以上,由此可得,四种功能分区的管线整体排水能力由大到小排序为:公园绿地≥居民住宅区>商务行政办公>商业区。地块功能性的差异决定了地块绿化面积、建筑物密度、人口密度等因素具有一定的差异性,如居民住宅区相对于商业区,建筑密度和人口密度均较小,绿化面积较大,因此居民住宅区的地表曼宁系数相对较大,产流量相对较少且雨水汇流时间较长,造成检查井溢流和管道超负荷情况的压力也较小。

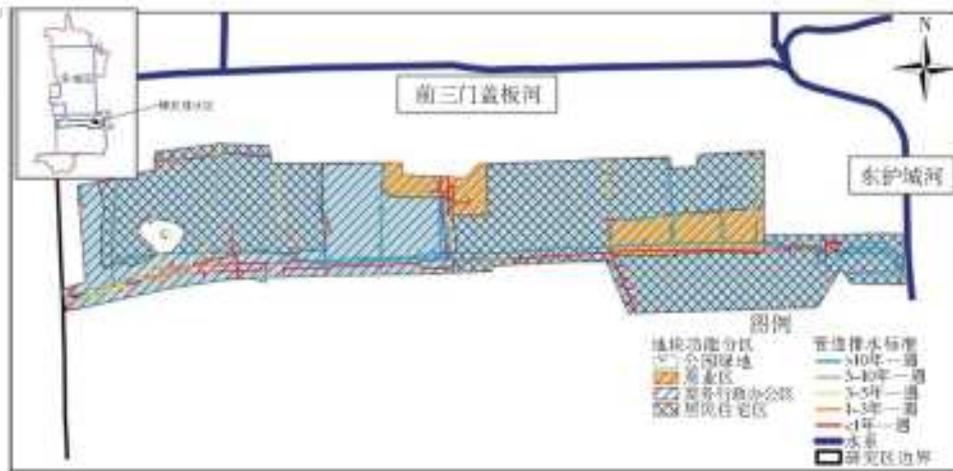


图 5 研究区(地块)功能分区及管网排水能力

Fig. 5 The functional partitions and drainage capacity of pipe network in research area (plot-scale)

3.2.3 道路尺度现状管网排水能力评估

依据《城市道路工程设计规范》(CJJ 37—2012)划分的区域主次干道,对沿城市主次干道布设的排水管线进行排水能力评估。由表7可知,不足1 a一遇的管线长度比例为39%,10 a一遇管线长度比例为40%,1~3 a一遇、3~5 a一遇、5~10 a一遇的管线长度占比分别为9%、4%、7%。从管网内部构造、管线性质及管线分布下垫面情况的角度分析,排水能力较低的主次干道管线的管径多在0.8~1.5 m,管线多为雨污合流制排水系统,周边地区建筑物密集,下垫面硬化程度较高,多为老旧住宅区及商业区,人口密度大,日产污水量相对较高。较低的管网设计标准、合流管网中日污水量占据了一定的管道排水体积、较高的硬化下垫面比例阻断了自然降雨入渗过程,因此,管网的排水能力无法满足高强度、高降雨量暴雨的排水需求,为城市内涝问题的出现增加了极大的隐患;排水能力在10 a一遇以上管线管径多在1.5~5.6 m,且多为雨水管网系统,周边有天坛、龙潭湖公园、青年湖公园等公园绿地能够对暴雨进行较为充分的消纳。

表7 主次干道管网排水能力汇总

Tab.7 Summary of load situation of pipe network

管网标准	长度/m	比例/%	段数(段)	比例/%
不足1 a一遇	55 883	39	1 557	38
1~3 a一遇	13 046.7	9	360	9
3~5 a一遇	5 736.4	4	165	4
5~10 a一遇	10 548.5	7	293	7
10 a一遇	61 131.4	40	1 600	42
合计	146 346	100	3 975	100

3.3 管网排水能力问题识别及成因分析

针对研究区管网现状排水能力的评估结果,对研究区域管网排水能力不足的问题进行分类诊断及成因分析。导致研究区域管线排水能力不足的原因可归结为以下几方面。

(1)管网设计标准低。由于研究区域为城市老城区,管网规划设计和建设时间早,管网设计标准低,此外,老城区的雨水排水管网多以合流制为主,雨污合流在雨天污水会占据一定管网过流能力,因此合流制排水系统也是造成排水能力不达标的重要原因。

(2)局部管网结构不合理。在现状管网负荷情况评估结果中,在不同重现期降雨情景下有35%~39%长度比例的管线负荷度为1,即此部分管线超负荷的原因是由于下游管道过流能力的限制而超负

荷,除上游节点收纳的地表径流量或峰值较大之外,是由于空间、成本和地形因素限制的设计排水管径较小、管线坡度较小或负坡现象的存在所导致的。

(3)不透水下垫面比例大。由于老城区高度城市化,建筑物密集,不透水下垫面比例较大。北护城河以南、前三门盖板河以北区域,不透水比例明显高于东城区平均水平,因此,区域的管网排水能力普遍在1 a一遇以下。反之,前三门盖板河以南、南护城河以北区域有大块的绿地面积,龙潭湖公园的水域和绿地对其所在的排水分区具有极大的地表径流量消纳作用,且增加了地面糙率系数,减小地表径流汇流到检查井的汇流速度,有利于减缓峰高量大的城市管网降雨产汇流过程的特点。同理,对于故宫、天坛等园林式古代建筑区,现状管网排水能力普遍在5 a甚至10 a一遇以上,这与较大的自然透水下垫面面积比等因素密不可分。

(4)河水水位顶托及河水倒灌。由于研究区地势相对平坦,管网设计较早,未充分考虑竖向设计,且研究区内河道多为早期人工沟渠或盖板河,因此市政排口的底高程较低、河道断面面积较小等因素是导致在暴雨情景下河道水位顶托市政管线排水甚至引起河水倒灌的一个重要原因。

3.4 问题导向性多尺度分区改造方案制定

由于研究区是已建区中典型老城区的代表,进行大面积的管网翻新或者建设排水深邃等措施需要具备一定的空间、成本等方面的条件,此外,大规模的工程性改造将会对社会、环境产生巨大影响,因此考虑到成本效益关系等多种因素的制约,在充分分析现状、识别问题和进行可行性分析的基础上,从城市整体、地块功能分区、道路等三个尺度出发,有针对性地提出适用于老城区的分区改造方案,以解决老城区的排水能力不足和内涝积水问题。

3.4.1 城市尺度改造方案

针对区域大面积排水管线排水能力不足的问题,基于研究区管网排水能力评估结果,结合研究区实际易涝点分布情况,在其周边适宜位置建设地下调蓄池或者建设雨水排水泵站。若周边空间、环境等条件不允许,可就近选取人口、建筑密度低,如公园绿地等较为自然的区域修建调蓄池。

针对局部管线排水能力不足的问题,从管线自身工程改造角度出发,进行管线局部结构性改造:(1)对于负荷度为1的管线,可在其下游节点处设置溢流堰,减小下游管线排水流量;(2)对于负荷度为2的管线,可通过管网提标工程改造,如增大管径、

增设双排管等；(3)对于存在管道坡度负坡现象的管线,可依据实际情况进行竖向规划改造。

3.4.2 地块功能分区尺度改造方案

依据不同功能分区管网排水能力评估结果,在超负荷管线周边进行分区源头海绵设施的改造。(1)对于居民住宅区,可将花坛、绿地改造成下凹绿地或雨水花园,建筑物屋顶进行绿色屋顶的改造,此外,如透水铺装、生物滞留池等海绵设施也可因地制宜地布设。(2)对于商业区、商务行政办公区,整体管网排水能力较差,绿化面积增设空间有限,鼓励分散式的绿地和小型雨水花园建设,以及建筑物屋顶进行绿色屋顶的改造,切断产汇流路径增加地表曼宁系数。(3)对于公园绿地,则应注重竖向设计及对受纳水体的充分利用,在水文地质条件允许的区域增加入渗,绿地可进行生物滞留槽、雨水花园等绿色海绵设施的改建。

3.4.3 道路尺度改造方案

依据研究区主次干道管网排水能力评估结果,针对超负荷的城市主次干道沿线排水管线,在空间和经济基础允许的条件下,可通过建设双排管、地下调蓄通道、或扩充管径等工程性措施,道路两侧适当增建植被浅沟等措施,增加雨水的源头入渗截流能力,以提高道路沿线管线的排水能力。

4 结 论

(1)本文提出了基于精细化洪涝模型的已建区管网排水能力评估和多尺度改造策略制定技术方案,在北京市东城区进行应用,选用了实测降雨和流量数据对模型进行参数率定及验证,通过计算两场降雨的纳什系数和 R^2 ,纳什系数分别为 0.759、0.762, R^2 分别为 0.881、0.817,拟合效果较好,验证模型具有良好的精度和可靠性。

(2)利用 4 种不同重现期设计降雨模拟管网的现状负荷情况,并依据模拟结果,对每条管线的排水能力进行计算汇总,从城市、地块、道路三个尺度量化现状管网排水能力。结果表明:城市尺度的管网排水能力不足 1 a 一遇的占比最高超过一半;地块尺度按功能分区排水能力由大到小依次为:公园绿地 \geq 居民小区 $>$ 商务行政办公区 $>$ 商业区;道路尺度主次干道管线排水能力不足 1 a 一遇和 10 a 一遇的管线长度比例最高分别约占 40%,管网排水能力较低的部分道路主要是由于建成时间早造成现状下垫面不透水面积比高,管道多以雨污合流为主,而管网排水能力较高的区域则是汇水范围内下垫面有大量公园绿地。

(3)针对 4 种不同重现期设计降雨情景下不同尺度的现状管网排水能力结论,识别管网排水能力不足的问题和成因诊断,建立了问题导向性的多尺度分区优化改造方案,以期为国内其他以老城区为代表的已建区的管网改造提供量化数据的支撑或思路上的借鉴。

参考文献(References):

- [1] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展,2016,27(4):485-491. (ZHANG J Y, WANG Y T, HE R M, et al. Urban flood problems and causes in China[J]. Progress in Water Science, 2016, 27 (4): 485-491. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2016. 04. 001.
- [2] 程江,杨凯,刘兰岚,等. 上海中心城区土地利用变化对区域降雨径流的影响研究[J]. 自然资源学报,2010,25(6):914-925. (CHENG J, YANG K, LIU L L, et al. Study on the impact of land use change on regional rainfall and runoff in central Shanghai[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25 (6): 914-925. (in Chinese))
- [3] HALLEGATTE S, GREEN C, NICHOLLS R J, et al. Future flood losses in major coastal cities[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(9): 802-806.
- [4] 顾孝天,李宁,周扬,等. 北京“7·21”暴雨引发的城市内涝灾害防御思考[J]. 自然灾害学报,2013,22(2):1-6. (GU X T, LI N, ZHOU Y, et al. Reflections on urban waterlogging disaster prevention caused by the July 21 rainstorm in Beijing[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22 (2): 1-6. (in Chinese)) DOI: 10. 13577/j. jnd. 2013. 0201.
- [5] 胡坚,赵宝康,刘小梅,等. 镇江市主城区排水能力与内涝风险评估[J]. 中国给水排水,2015,31(1):100-103,108. (HU J, ZHAO B K, LIU X M, et al. Drainage capacity and waterlogging risk assessment of Zhenjiang main urban area[J]. China Water Supply and Drainage, 2015, 31 (1): 100-103, 108. (in Chinese))
- [6] 朱钢,杨森. 精细模型在成都市中心城区排涝规划中的应用[J]. 中国给水排水,2014,30(15):159-162. (ZHU G, YANG S. Application of fine model in drainage planning of Chengdu central district[J]. China Water Supply and Drainage, 2014, 30(15): 159-162. (in Chinese))
- [7] 刘小梅,吴思远,云海兰,等. 水力模型在排水防涝规划体系中的应用[J]. 中国给水排水,2017,33(11):133-138. (LIU X M, WU S Y, YUN H L, et al. Application of hydraulic model in drainage and waterlogging control planning system [J]. China Water Supply and Drainage, 2017, 33 (11): 133-138. (in Chinese))

- [8] 周玉文. 城市排水(雨水)防涝工程的系统架构[J]. 给水排水, 2015, 51(12): 1-5. (ZHOU Y W. System structure of urban drainage (rainwater) waterlogging prevention works [J]. Water Supply and Drainage, 2015, 51(12): 1-5. (in Chinese)) DOI: 10. 13789/j. cnki. wwe1964. 2015. 0504.
- [9] 住建部出台城市排水防涝综合规划编制大纲[J]. 给水排水, 2013, 49(S1): 266. (The Ministry of housing has issued an outline for the comprehensive planning of urban drainage and waterlogging prevention, [J]. water supply and drainage, 2013, 49 (S1): 266. (in Chinese))
- [10] 黄国如, 王欣, 黄维. 基于 InfoWorks ICM 模型的城市暴雨内涝模拟[J]. 水电能源科学, 2017, 35(2): 66-70, 60. (HUANG G R, WANG X, HUANG W. Urban rainstorm and waterlogging simulation based on InfoWorks ICM model [J]. Hydropower and Energy Science, 2017, 35(2): 66-70, 60. (in Chinese))
- [11] 汉京超. 应用 InfoWorks ICM 软件优化排水系统提标方案[J]. 中国给水排水, 2014, 30(11): 34-38. (HAN J C. Optimizing the drainage system tender raising scheme with InfoWorks ICM software [J]. China Water Supply and Drainage, 2014, 30(11): 34-38. (in Chinese))
- [12] 张念强, 马建明, 陆吉康, 等. 基于多类模型耦合的城市洪水风险分析技术研究[J]. 水利水电技术, 2013, 44(7): 125-128, 133. (ZHANG N Q, MA J M, LU J K, et al. Study on urban flood risk analysis technology based on multi-class model coupling [J]. Water Conservancy and Hydropower Technology, 2013, 44(7): 125-128, 133. (in Chinese)) DOI: 10. 13928/j. cnki. wrahe. 2013. 07. 032.
- [13] 解智强, 杜清运, 高忠, 等. GIS 与模型技术在城市排水管线承载力评价中的应用[J]. 测绘通报, 2011(12): 50-53. (XIE Z Q, DU Q Y, GAO Z, et al. Application of GIS and model technology in the evaluation of urban drainage pipeline bearing capacity [J]. Surveying and Mapping Bulletin, 2011(12): 50-53. (in Chinese))
- [14] 周思斯, 杜鹏飞, 逢勇. 城市暴雨管理模型应用研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(6): 89-97. (ZHOU S S, DU P F, YI Y. Advances in the application of urban rainstorm management models [J]. Progress in Water Conservancy and Hydropower Science and Technology, 2014, 34(6): 89-97. (in Chinese))
- [15] 康宏志, 郭祺忠, 练继建, 等. 海绵城市建设全生命周期效果模拟模型研究进展[J]. 水力发电学报, 2017, 36(11): 82-93. (KANG H Z, GUO Q Z, LIAN J J, et al. Research progress on simulation model of life cycle effect of sponge city construction [J]. Journal of Hydropower Generation, 2017, 36(11): 82-93. (in Chinese))
- [16] 潘兴瑶, 李其军, 陈建刚, 等. 城市地区流域洪水过程模拟: 以清河为例[J]. 水力发电学报, 2015, 34(6): 71-80. (PAN X Y, LI Q J, CHEN J G, et al. Flood simulation in urban area basin: Qinghe River as an example [J]. Journal of Hydropower Generation, 2015, 34(6): 71-80. (in Chinese))
- [17] 程涛, 徐宗学, 宋苏林. 济南市海绵城市建设兴隆示范区降雨径流模拟[J]. 水力发电学报, 2017, 36(6): 1-11. (CHENG T, XU Z X, SONG S L. Rainfall and runoff simulation in Xinglong demonstration area of sponge city construction in Jinan [J]. Journal of Hydropower Generation, 2017, 36(6): 1-11. (in Chinese))
- [18] 李建勇. Infoworks ICM 在城市排水系统分析中的应用[J]. 中国给水排水, 2014, 30(8): 21-24. (LI J Y. Application of infoworks ICM in urban drainage system analysis [J]. China Water Supply and Drainage, 2014, 30(8): 21-24. (in Chinese))
- [19] 王诗婧. 基于 Infoworks ICM 的城市排水管网排水能力评估[J]. 绿色科技, 2018(18): 156-159. (WANG S J. Assessment of drainage capacity of urban drainage network based on Infoworks ICM [J]. Green Science and Technology, 2018(18): 156-159. (in Chinese)) DOI: 10. 16663/j. cnki. lskj. 2018. 18. 056.
- [20] 郭芝瑞, 崔建国, 张峰, 等. 基于 Infoworks ICM 的城市排水调蓄池位置选择[J]. 给水排水, 2016, 52(2): 49-52. (GUO Z R, CUI J G, ZHANG F, et al. Location selection of urban drainage reservoir based on Infoworks ICM [J]. Water Supply and Drainage, 2016, 52(2): 49-52. (in Chinese)) DOI: 10. 13789/j. cnki. wwe1964. 2016. 0043.
- [21] 张练, 王晓晨, 赵新华. 基于排水模型的城区雨水径流削减潜力分析[J]. 中国农村水利水电, 2015(4): 38-41, 46. (ZHANG L, WANG X C, ZHAO X H. Potential analysis of rainwater runoff reduction in urban area based on drainage model [J]. Rural Water Conservancy and Hydropower in China, 2015(4): 38-41, 46. (in Chinese))
- [22] 郭磊, 姚双龙, 李玢, 等. 基于水力模型的下凹式立交桥桥区雨水泵站运行优化[J]. 给水排水, 2014, 40(3): 102-104. (GUO L, YAO S L, LI F, et al. Optimization of rainwater pumping station operation in down-concave overpass area based on hydraulic model [J]. Water Supply and Drainage, 2014, 40(3): 102-104. (in Chinese)) DOI: 10. 13789/j. cnki. wwe1964. 2014. 0025.

(下转第 139 页)

- runoff model and two-dimensional kinematic wave flow model [J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2016, 34(11): 1-4. (in Chinese))
- [12] 王磊,王忠静,尹航,等. GBHM 模型原理及其在中尺度流域的应用[J]. 冰川冻土, 2006, 28(2): 256-261. (WANG L, WANG Z J, YIN H, et al. A distributed hydrological model- GBHNM and its application in middle-scale catchment[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(2): 256-261. (in Chinese))
- [13] 伍永年,马啸,邱萍蔚. 台风“尼伯特”给福建省造成的灾害成因分析[J]. 中国防汛抗旱, 2017, 27(1): 88-91. (WU Y N, MA X, QIU P W. Causes of flood disaster for typhoon Nepartak in Fujian Province, 2016[J]. China Flood & Drought Management, 2017, 27(1): 88-91. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-9264. 2017. 01. 021.
- [14] HELLWEGER R. Agree-DEM surface reconditioning system[EB/OL]. <http://www.ce.utexas.edu/prof/maid/ment/gishydro/ferdi/research/agree/agree.html>, 1997.
- [15] 张维,杨昕,汤国安,等. 基于 DEM 的平缓地区水系提取和流域分割的流向算法分析[J]. 测绘科学, 2012, 37(2): 94-96. (ZHANG W, YANG X, TANG G A, et al. DEM-based flow direction algorithms study of stream extraction and watershed delineation in the low relief areas[J]. Science of Surveying and Mapping, 2012, 37(2): 94-96. (in Chinese))
- [16] O'CALLAGHAN J F, MARK D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data [J]. Computer vision, graphics, and image processing, 1984, 27(3): 323-344. DOI: org/10. 1016/S0734-189X(84)80011-0.
- [17] 芮孝芳,宫兴龙,张超,等. 流域产流分析及计算[J]. 水力发电学报, 2009, 28(6): 146-150. (RUI X F, GONG X L, ZHANG C, et al. Formation and calculation of watershed runoff yield [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(6): 146-150. (in Chinese))
- [18] 芮孝芳. 产流模式的发现与发展[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(1): 1-6. (RUI X F. Discovery and development of the flow pattern [J]. Advances in science and technology of water resources, 2013, 33(1): 1-6. (in Chinese)) DOI: 10. 3880/j. issn. 1006-7647. 2013. 01. 001.
- [19] 许波刘,董增川,洪炯. 集总式喀斯特水文模型构建及其应用[J]. 水资源保护, 2017, 33(2): 37-42. (XU B L, DONG Z C, HONG X. Lumped karst hydrological model and its application [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(2): 37-42. (in Chinese)) DOI: 10. 3880/j. issn. 1004-6933. 2017. 02. 007.
- [20] 魏兆珍. 海河流域下垫面要素变化及其对洪水的影响研究[D]. 天津:天津大学, 2013. (WEI Z Z. Study on the underlying surface change of Haihe River basin and its impacts on flood [D]. Tianjin: Tianjin University, 2013. (in Chinese))
- [21] WANG Y L, LIU R H, GUO L, et al. Forecasting and providing warnings of flash floods for ungauged mountainous areas based on a distributed hydrological model [J]. Water, 2017, 9(10): 776. DOI: org/10. 3390/w9100776.
- [22] 郭良,丁留谦,孙东亚,等. 中国山洪灾害防御关键技术[J]. 水利学报, 2018, 49(9): 1-13. (GUO L, DING L Q, SUN D Y, et al. Key techniques of flash flood disaster prevention in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(9): 1-13 (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20180728.
- [23] GB/T 22484-2008, 水文情报预报规范[S]. (GB/T 22484-2008, Standard for hydrological information and hydrological forecasting[S]. (in Chinese))

(上接第 131 页)

- [23] 吕放放,胡俊,卢爱国,等. 北京某下凹桥区排水系统建模研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(7): 103-108. (LYU F F, HU J, LU A G, et al. Modeling of drainage system in Xia Aoqiao district, Beijing [J]. Water Supply and Drainage, China, 2014, 30(7): 103-108. (in Chinese))
- [24] 钱海平,陆敏博,韩素华. 城市雨水管道排水能力影响因素分析:以苏州市为例[J]. 净水技术, 2016, 35(2): 80-83. (QIAN H P, LU M B, HAN S H. Analysis of the influencing factors on the drainage capacity of urban rainwater pipeline: A case study of Suzhou City [J]. Water Purification Technology, 2016, 35(2): 80-83. (in Chinese)) DOI: 10. 15890/j. cnki. jsjs. 2016. 02. 015.
- [25] 王溯,李田,冯沧,等. 排水系统地下水渗入量的水力学模型辅助评估[J]. 中国给水排水, 2010, 26(10): 13-18. (WANG S, LI T, FENG C, et al. Hydraulic model aided assessment of groundwater infiltration into drainage system [J]. Water Supply and Drainage, China, 2010, 26(10): 13-18. (in Chinese))
- [26] 郑敬伟,刘舒,胡昌伟. 流域洪水数字模型标准化研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, 37(5): 534-538. (ZHENG J W, LIU S, HU C W. Study on standardization of watershed flood digital model [J]. Journal of Hehai University (Natural Science Edition), 2009, 37(5): 534-538. (in Chinese))