

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230831002

基于情景模拟的街区海绵设施管控方案效能评估*

董书畅^{1,2}, 马东辉^{1,2}, 张博骞^{1,2}, 王娜^{1,2}, 王威^{1,2}

(1. 北京工业大学城市建设学部, 北京 100124; 2. 北京工业大学北京城市与工程安全减灾中心, 北京 100124)

摘要: 为精准评估海绵设施内涝防控效能, 探究海绵设施合理建设规模, 增强城市街区雨洪风险管理能力, 构建了SWMM降雨径流动态模型, 并设计多重重现期降雨情景和多水准管控情景, 全面分析了海绵设施的雨洪风险防控效能。依据历史内涝灾害情况、内涝风险现状选定三个研究街区, 选用绿色屋顶、透水铺装、雨水花园、植草沟作为雨水管控措施, 对多水准情景的交叉模拟结果, 从防控能力衰减指数及参量削减率两方面, 类比分析降雨径流的控排关系, 量化评估不同降雨重现期下各管控措施方案的雨洪风险防控效能。结果表明: ①海绵设施管控方案具有控制街区内部涝风险的作用, 对低重现期降雨效果良好, 但在面对高重现期降雨时存在管控缺口, 需补充其他防治手段; ②高布设率管控方案的雨洪防控效果提升并不大, 针对各参量的防控能力衰减更多。

关键词: 效能评估; 内涝风险; 海绵设施; 城市街区

中图分类号: TU984.116 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)04-0762-10

Efficiency Evaluation of Sponge Facility Management and Control Schemes in Urban Blocks Based on Scenario Simulation

DONG Shuchang^{1,2}, MA Donghui^{1,2}, ZHANG Boqian^{1,2}, WANG Na^{1,2}, WANG Wei^{1,2}

(1. Department of Urban Construction, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Center for Urban and Engineering Safety and Disaster Reduction, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: To accurately evaluate the prevention and control effectiveness of sponge facilities in waterlogging management and to explore the reasonable construction scale of sponge facilities for enhancing urban block rainwater and flood risk management capabilities, a SWMM rainfall-runoff dynamic model was constructed. Multiple return period rainfall scenarios and multi-level control scenarios were designed to comprehensively analyze the rainwater and flood risk prevention and control efficiency of sponge facilities. Three research blocks were selected based on historical waterlogging incidents and current waterlogging risk conditions. Green roofs, permeable pavements, rainwater gardens, and grassed swales were used as rainwater control measures. The cross-simulation results of multi-level scenarios were analyzed by comparing the control and drainage relationships of rainfall runoff in terms of control capability decay index and parameter reduction rate, quantifying the rainwater flood risk prevention and control effectiveness of each control measure scheme under different rainfall return peri-

* 收稿日期: 2023-08-31; 修回日期: 2023-12-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(52278472)、北京市自然科学基金项目(8232004)资助

作者简介: 董书畅(1996—), 男, 硕士研究生。主要从事城市安全与防灾规划研究。E-mail: 717971745@qq.com

通信作者: 马东辉(1968—), 男, 教授, 博士。主要从事城市安全与防灾规划、生命线系统抗灾技术研究。

E-mail: ieemdh@163.com

ods. The results indicate that: ① Sponge facility management and control schemes effectively control the waterlogging risk in urban blocks, performing well under low return period rainfall but exhibiting control gaps under high return period rainfall, requiring additional preventive and control measures; ② High deployment rate control schemes do not significantly improve the effectiveness of rainwater and flood control, with greater control capability decay for various parameters.

Keywords: efficiency evaluation; flood risk; sponge facilities; urban blocks

0 引言

在全球气候变化的影响下,暴雨内涝成为我国多数城市面临的主要灾害威胁之一。2020年河南信阳市三里店街区发生内涝,多名老人和儿童被困,街道两侧住宅被淹。2021年广西贵港市多处地势低洼的小区发生积水内涝,住宅及库房进水被淹,居民被困家中。增强雨洪管理能力成为安全韧性社区建设的重要目标。针对频发的城市内涝灾害,借鉴美国低影响开发(Low Impact Development)理念,我国2012年首次提出建设自然积存、自然渗透、自然净化的海绵城市,如今已成为我国首要的雨洪管理理念。

为保证海绵城市设计方案的科学性及其合理性,评估海绵设施的雨洪风险防控效能成为海绵城市理念研究的重要内容,众多学者对此开展了卓有成效的探索。如程涛等^[1]以流域为研究区域,采用Infoworks ICM,设计多种降雨情景和管控情景,利用指标削减率法分析各项风险指标,并提出理论建议。R.M.Shakya^[2]构建PCSWMM模型及多个管控情景,统计数据对比分析LID设施在流域层面对洪水的防控效能,为流域尺度下的研究奠定基础。针对小尺度的研究,如刘保莉^[3]通过户外实验观测并统计分析实验数据,首次对透水铺装和绿色屋顶两种LID措施,在不同降雨强度下的雨洪滞留效果进行了评估。Y.Zhang等^[4]建立LID设施级联体系,设计级联、半级联和并联三种LID单元连接模式,以此模拟分析四种LID设施防涝效能;刘晓云等^[5]建立暴雨洪水管理模型,通过指标削减率评估分析各低影响开发设施在不同降雨重现期情景下的防控效果。然而,目前大多数效能评估研究的角度和方法不够全面,分析不够透彻明晰,缺乏对海绵设施雨洪风险防控效能的准确评估。

鉴于此,为了更科学的评估海绵设施的雨洪风险防控效能,探究海绵设施合理建设规模,本文以北京市通州区的历史内涝街区为研究对象,构建

SWMM降雨径流模型,设定多个降雨情景和海绵设施管控情景;然后,选择影响街区内涝风险的两类参量,确定防控能力衰减指数及参量削减率作为雨洪风险防控效能评估的方法;最后,交叉两类情景进行降雨径流模拟,类比分析降雨径流的控排关系,量化评估不同降雨重现期下各管控方案的风险防控效能,并提出实际建议。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区概况

北京市通州区河渠纵横,水系四通八达,内涝积水点主要位于通惠河与北运河交叉点南侧,运河西大街南北两侧及通惠河南北两侧等区域积水严重,评估该地海绵设施的雨洪风险防控效能可为防涝减灾工作提供参考。以内涝风险影响因素及现存内涝隐患为原则确定研究街区^[6],参考通州区历史内涝积水点位,在河网密度较高的地区选定三个街区(下文简称一号街区、二号街区、三号街区)进行海绵设施效能的对比分析,区位如图1所示。造成该地积水的降雨主要集中在2h以内,一般第3~6h的最大累计降雨量并无明显变化^[7]。三个街区用地功能以居住为主,并配套商业设施及文化、办公、教育、医疗等公共服务设施。区域特征分析见表1。

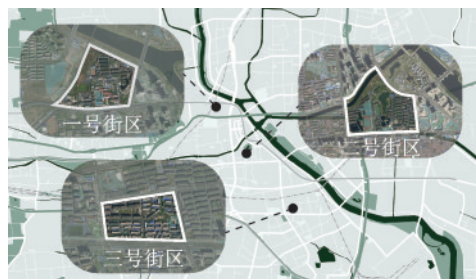


图1 选定街区区位示意

Fig.1 Block location map

按照街区管网布局原则、高程、下垫面、街区现状平面布局等信息,概化三大街区排水管网系统(图2)。明确进水节点、出水节点位置及高程,体现

表1 研究区概况

Table 1 Study area overview

编号	街区面积/hm ²	空间特征	竖向分析
一号街区	40.41	北临温榆河,间距77 m	南高北低,整体坡度较平缓
二号街区	55.96	北临通惠河,东侧距北运河540 m	东高北低,北侧坡度较大
三号街区	38.10	南临城市主干道,北侧距北运河约1 300 m	北高南低,南侧坡度较大

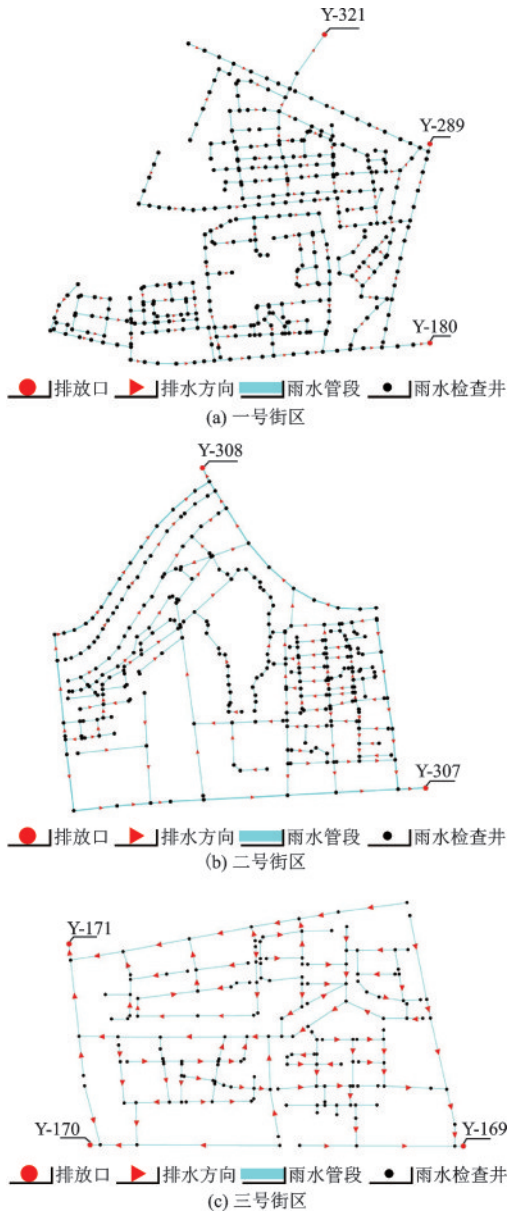


图2 街区排水管网概化示意

Fig.2 Block drainage network schematic diagram

管段走向、位置、长度等信息,图中节点代表检查井,线段代表管道,排放口代表和市政管网相连接的管口,下边界条件为自由出流。为便于降雨径流模拟,简化实验模型,二号街区概化管网系统时暂

不考虑河道中存在的排水设施,以及降雨时河道水位对排水管网的影响。

1.2 数据来源

(1)降雨数据。研究区域降雨数据由北京市暴雨强度公式生成。相关研究中指出,虽然降雨类型会受季节影响,但研究区降雨多数呈现为单峰型^[8]。降雨历时为120 min,以袁冯等^[9]建立的北京市暴雨强度公式作为降雨雨型设计的基准,如式(1):

$$q = \frac{1859.475(1 + 0.906 \log P)}{(t + 11.665)^{0.729}} \quad (1)$$

式中, q 为雨强,单位:L/s/ha; P 为重现期,单位:a。

(2)街区下垫面数据。建模之前还需明确下垫面特征,即划分透水区与不透水区。街区现状卫星影像数据及数字高程数据(DEM)通过Bigemap软件获取,利用ENVI软件的监督分类功能实现解译,将卫星影像图的不同色块进行分类,最终将三个街区概化为硬质屋面、绿地、道路铺装及水体四种类型,如图3所示。根据《雨水控制与利用工程设计规范》中的径流系数选取要求确定适宜的径流系数值。详细参数统计见表2。

表2 街区下垫面数据

Table 2 Block underlying surface data

街区	汇水面类别	面积/ha	面积占比/%	雨量径流系数	综合径流系数
一号街区	硬质屋面	6.72	16.63	0.9	0.77
	绿地	7.76	19.2	0.2	
	道路广场	25.93	64.17	0.9	
	总计	40.41	100	—	
二号街区	硬质屋面	11.47	20.5	0.9	0.69
	绿地	21.7	38.78	0.2	
	道路广场	16.29	29.11	0.9	
	水面	6.5	11.62	1	
	总计	55.96	100	—	
三号街区	硬质屋面	6.96	18.27	0.9	0.76
	绿地	4.98	13.07	0.2	
	道路广场	26.16	68.66	0.9	
	总计	38.1	100	—	

(3)模拟结果数据。应用SWMM降雨径流模型,可获得详实的模拟结果数据,其中涵盖了汇水分区、管道以及雨水节点等关键要素。这些数据包括积水深度、积水容量、径流量以及径流峰值等多个重要指标的变化情况。

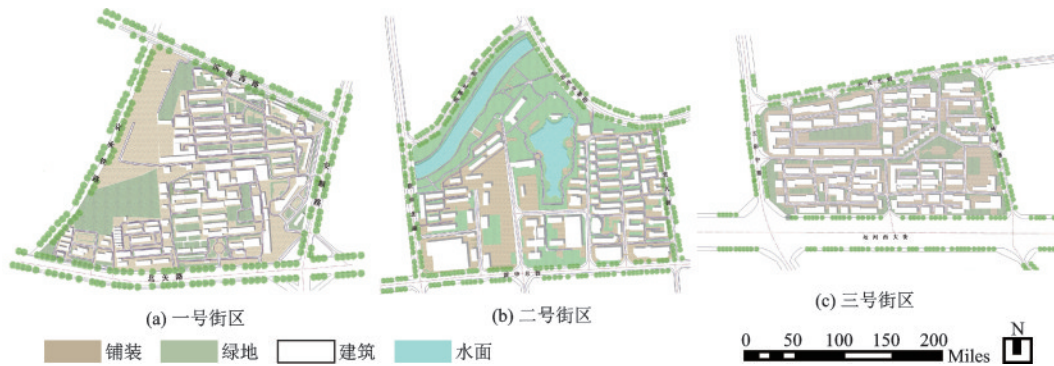


图3 街区平面概化示意

Fig.3 Block plan schematic diagram

2 研究方法

2.1 基于SWMM模型的雨洪模拟仿真

SWMM (Storm Water Management Model, 暴雨洪水管理模型) 是一个降水径流动态模拟模型, 可以模拟完整的城市降雨径流过程, 包括地面径流和排水系统中的各种水力特征。现已被广泛应用于分析降雨过程对城市下垫面径流的影响, 优化城市排水系统, 减轻内涝灾害。

在雨洪模拟仿真的运算过程中, 运用到地表产汇流模型、地表渗透模型、管道水力学模型和低影响开发技术措施模型。模型主要构建流程如图4所示, 部分参数设置见表3。因缺少实测数据, 故参考曾照洋等^[10]的研究, 通过出水口分析和溢流点分析

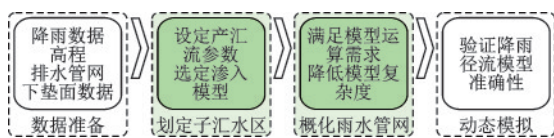


图4 SWMM降雨径流模型构建流程

Fig.4 SWMM Rainfall runoff model construction process

表3 SWMM模型主要参数

Table 3 Main parameters of SWMM model		
模拟模块	模型参数	取值
子汇水区模块	不透水区曼宁系数	0.02
	透水区曼宁系数	0.24
	不透水区洼地蓄水深度/mm	1.25
	透水区洼地蓄水深度/mm	7
下渗模块	最大下渗率/(mm·h) ⁻¹	51
	最小下渗率/(mm·h) ⁻¹	3.302
	衰减系数	4
	干燥时间/天	7
管道模块	糙率系数	0.013

验证SWMM模型模拟结果的准确性。结果显示本文所构建的SWMM模型在研究区域适用性良好。

2.2 多重现期降雨情景设计

设计雨型是指设计降雨在设计历时时段内降雨总量的时程分配, 是计算排水管网设计流量的关键模块^[11]。常用的设计雨型有: 均匀雨型、Keifer & Chu雨型(芝加哥雨型)、Yen & Chow雨型(三角形雨型)、SCS雨型、Pilgrim & Cordery雨型、Huff雨型等。其中芝加哥雨型是Keifer和Chu在1957年提出的一种应用于雨水管网设计的雨量过程线, 是根据某一特定的重现期下降雨强度和降雨历时的关系式推求出来的一种雨量过程线^[12]。该雨型应用较简单, 仅有峰值系数 r 值一个参数, 因此广泛用于国内外的排水管网设计和研究中, 并且芝加哥雨型也符合通州区单峰型降雨特征。

为更精确地模拟多状况暴雨内涝, 选用Keifer & Chu雨型(芝加哥雨型)构建2 a、10 a、50 a、100 a四种重现期下历时120 min以5 min为时间段的设计降雨情景, 通州区暴雨强度公式为式(1), 峰值时刻在第9个5 min时段, 即降雨过程的45 min。各重现期的降雨过程线如图5所示。

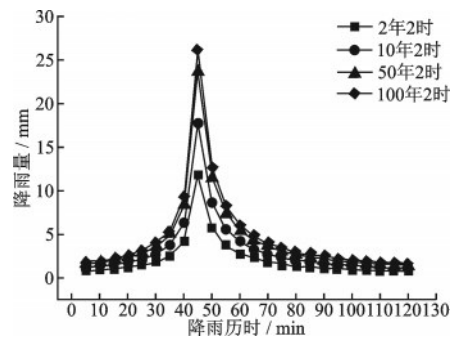


图5 模拟雨量数据

Fig.5 Simulated rainfall data

2.3 海绵设施管控情景设定

2.3.1 海绵设施比选

在设定管控情景前,对海绵设施比选。《海绵城市建设技术指南》中梳理了若干不同形式的低影响开发技术设施,分类整理如图6所示。

相关学者认为海绵设施的选择主要由雨水管控问题和目标决定,蒲贵兵等^[14]指出选择海绵设施应以小区面临的主要问题为依据,若无雨水利用需

求,下游无排水压力,应当以径流污染控制为目标。苗展堂^[15]依据降雨量的不同提出各个地区所对应的雨水管控主要目标和海绵设施的选择、布局模式。

本文中雨水管理首要目标为水安全,解决重点在于径流总量和径流峰值,降低积水深度和流速等雨洪风险指标。同时考虑汇水区特征、研究空间尺度、设置方式、经济成本和景观效果等,最终选用的海绵设施为绿色屋顶、透水铺装、雨水花园、植草沟。设施在雨洪模拟仿真中的参数设置见表4。

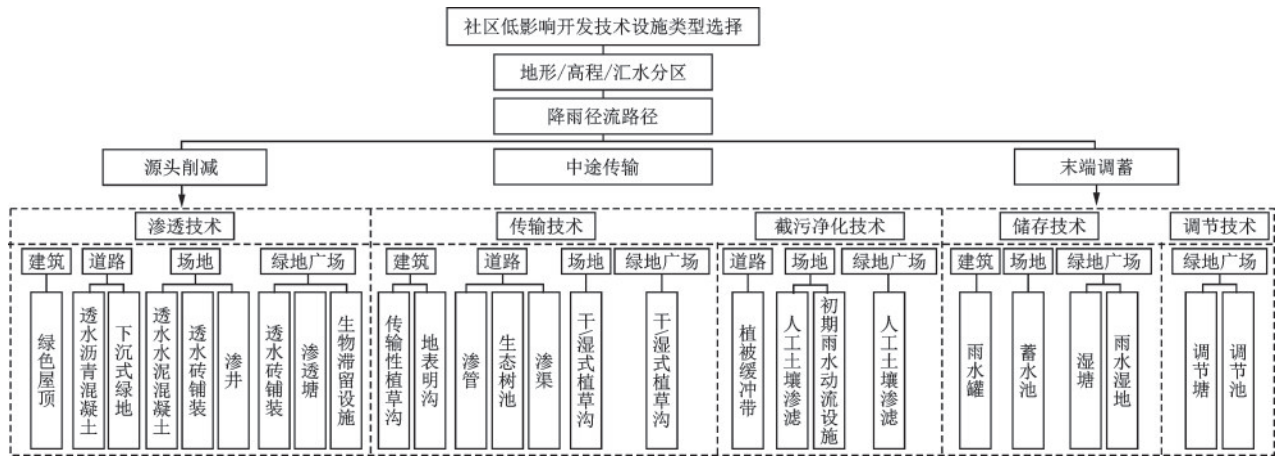


图6 社区低影响开发技术设施

Fig.6 Community low impact development technology facilities

表4 海绵设施参数设置

Table 4 Sponge facility parameter settings

表面层	蓄水深度/mm				植被体积比				表面粗糙系数				表面坡度/%			
	300 ^a	300 ^b	300 ^c	0 ^d	0.1 ^a	0.1 ^b	0.5 ^c	0 ^d	0.24 ^a	0.15 ^b	0.24 ^c	0.014 ^d	0 ^a	1 ^b	1 ^c	1 ^d
土壤层	厚度/mm				孔隙率				产水能力				枯萎点			
	500 ^a		500 ^c		0.463 ^a		0.6 ^c		0.232 ^a		0.232 ^c		0.116 ^a		0.116 ^c	
	吸水头/mm				导水率/(mm·h ⁻¹)				导水率坡度				计算蓄水量			
	88.9 ^a		50 ^c		13 ^a		20 ^c		10 ^a		10 ^c		否 ^c			
路面层	厚度/mm				孔隙比				渗透性				堵塞因子			
	150 ^d				0.2 ^d				720 ^d				180 ^d			
蓄水层	深度/mm				孔隙比				堵塞因子				—			
	150 ^a	500 ^c	200 ^d	—	0.5 ^a	0.5 ^c	0.5 ^d	—	0 ^a	0 ^c	0 ^d	—	—	—	—	—
暗渠	排水系数/(mm·h ⁻¹)				排水指数				暗渠偏移高度				—			
	12.5 ^a	0 ^c	0 ^d	—	0.5 ^a	0.5 ^c	0.5 ^d	—	0 ^a	0 ^c	0 ^d	—	—	—	—	—

注:表中数据的上标a代表绿色屋顶、b代表植草沟、c代表雨水花园、d代表透水铺装

2.3.2 海绵设施管控情景设定

考虑到不同海绵设施的特性、适用范围,并非整个街区都能布局海绵设施。绿色屋顶结合街区内符合坡度等要求的建筑屋顶布局;植草沟布置在道路两侧,用来承接周边道路和建筑绿地的雨水径流,主要利用道路两侧原有绿地进行改造;雨水花

园结合街区内原有绿地布局,同时考虑到渗透安全距离,因此雨水花园的布局需要距离建筑底部3m远;透水铺装用于广场、绿地内人行通道上铺装的改造,街区内机动车道路考虑到荷载量等问题则不予改造。由此明确各个海绵设施在街区中的可建设总面积,见表5。为充分评估海绵设施的防控效

表5 三个街区海绵设施可建设面积统计表

Table 5 Statistical table of the construction area of sponge facilities in three blocks

街区	街区总面积	绿色屋顶可铺设面积	植草沟可铺设面积	雨水花园可铺设面积	透水铺装可铺设面积	可设总面积
		设面积	面积	设面积	设面积	
街区一	40.41	5.89	7.53	7.53	13.8	27.22
街区二	55.96	10.56	18.21	18.21	14.92	43.69
街区三	38.1	6.34	4.81	4.81	7.31	18.46

单位:ha

能,三个街区的管控方案进行多级化设定,依据街区内海绵设施的可建设面积,设施布设率由最低至最高。三个街区的海绵设施管控方案情景见表6。

2.4 雨洪风险防控效能评估方法

首先确定雨洪风险防控效能评估参量,即需海绵设施组合方案管控、影响街区内涝风险的参量。在不考虑蒸发的情况下,完整的降雨径流过程涵盖了降雨量、下渗量、管网排水量、地表积水量、流入其他区域的外排流量,其中地表积水量和外排流量会对街区及相邻区域形成排水压力,统称为径流负荷。街区内涝风险即由径流负荷参量及管网排水参量决定。

落实海绵设施管控方案后,街区内涝问题将会呈现积极变化,整体径流系数减小,下渗量增加,管网排水压力和径流负荷量亦会降低,内涝风险也将得到合理管控。综上所述,雨洪风险防控效能评估参量选定为:径流负荷参量对应的最大积水容积(m^3)、最大积水深度(m)、最大积水溢流速度($m \cdot s^{-1}$)、管网排水参量对应的管网径流峰值($m^3 \cdot s^{-1}$)、管网径流总量(m^3)。径流负荷参量的各指标均通过降雨径流动态模拟得出的每一雨水节点的数据判定。

在这些指标量中部分为模拟时间末端、120 min时的即时数量值,如总降雨量、管网径流总量、饱和下渗量等;部分指标如管网径流峰值、最大积水量、最大积水深度、最大溢流速度等为降雨历时时段内某一时刻出现的状态表征值,与降雨雨型密切相关。

通过以下两种方法评估海绵设施管控方案的雨洪风险防控效能:

(1)能力衰减指数。通过比较各降雨重现期下不同方案针对每个参量应对能力的衰减程度,分析管控方案对于多变的降雨情景应对能力强弱,通过公式(2)计算各方案的能力衰减指数。

$$T_n = \frac{a_n}{a_2} \quad (2)$$

式中, T 为能力衰减指数; n 为降雨重现期; a_n 为特定重现期的参量值; a_2 为2年一遇重现期的参量值。

(2)参量削减率。比较参量削减率,分析不同降雨重现期下各方案的降雨应对能力。削减率计算如式(3)。

$$S_n = \frac{a_{现状} - a_{方案}}{a_{现状}} \quad (3)$$

式中, S 为削减率; n 为降雨重现期; $a_{现状}$ 为现状参量值; $a_{方案}$ 为管控方案后的参量值。

3 结果与分析

3.1 多情景交叉构建

将多种管控情景,结合四种重现期的降雨情景设置交叉模拟,如图7所示。由于数据处理结果庞杂,以一号街区在100 a情景下的模拟及处理结果为例说明。一号街区在重现期100 a下的模拟结果见表7。

表6 三个街区管控措施方案

Table 6 Control measures for three-blocks

方案	绿色屋顶率/%			植草沟率/%			雨水花园率/%			透水铺装率/%		
	一	二	三	一	二	三	一	二	三	一	二	三
方案初	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
方案一	2	15	2	2	5	2	2	5	2	2	12	2
方案二	25	45	25	10	20	10	15	20	10	25	45	25
方案三	50	80	50	25	40	25	25	40	25	45	80	50
方案四	70	100	72	35	50	35	35	50	35	70	100	72
方案五	95	—	95	45	—	47	45	—	47	90	—	95
方案六	100	—	100	50	—	50	50	—	50	100	—	100

注:表格中“一、二、三”分别指代“一号街区、二号街区、三号街区”

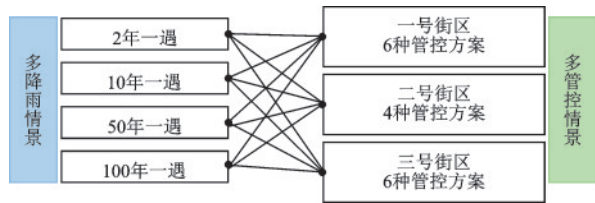


图7 多情景交叉设置示意

Fig.7 Cross-setting diagram of multiple scenarios

总结三个街区的模拟结果,可发现各参量值总体上具有一致的变化趋势,下渗量逐渐增加,径流系数逐渐降低;管网排水参量和径流负荷参量的相

关指标均逐渐降低,街区总体内涝风险逐渐降低。但值得注意的是,三个街区设施布设率最低的方案一,在各重现期中都有增加内涝风险的情况出现。经分析,出现此问题的原因为,相比无措施情景,海绵设施可减缓降雨径流排入雨水管网的速度,但方案一设施布设比例非常低,对雨水径流的管控作用甚微。当降雨量逐渐到达峰值时,在不能及时有效渗、蓄、滞降雨径流的情况下,反而提高了径流路径中的积水深度、积水容积。根据一号街区的模拟结果,计算在不同模拟情景下各管控方案的参量削减率,以重现期 100 a 为例(表 8)。

表 7 一号街区 100 a 降雨重现期模拟结果

Table 7 Simulation results of the 100 a rainfall return period in Block 1

降雨重现期	管控情景	降雨		下渗		管网排水		径流负荷	
		降雨量/ m ³	下渗量/ m ³	径流系数	径流总量/ m ³	径流峰值/ (m ³ ·s ⁻¹)	最大积水容积/m ³	积水最大溢流速度/(m·s ⁻¹)	最大积水深度/m
100 a	无措施		1 374	0.77	2 768	0.488	34 907	28.1	0.313
	方案一		1 378	0.74	2 777	0.490	35 284	27.7	0.318
	方案二		2 297	0.63	2 657	0.464	29 541	22.1	0.258
	方案三	41 640	2 347	0.53	2 412	0.432	24 259	16.2	0.204
	方案四		2 396	0.45	2 309	0.435	18 495	10.3	0.147
	方案五		2 441	0.35	2 009	0.429	11 926	8.17	0.092
	方案六		2 481	0.31	1 609	0.410	10 528	6.8	0.075

表 8 一号街区 100 a 降雨重现期各参量削减率

Table 8 Reduction rate of various parameters during the 100a rainfall return period in Block 1

降雨重现期	管控情景	管网排水		径流负荷		
		径流总量削减率/%	径流峰值削减率/%	最大积水容积削减率/%	积水最大溢流速度削减率/%	最大积水深度削减率/%
100 a	方案一	-0.33	-0.41	-1.08	1.42	-1.60
	方案二	2.06	3.28	15.04	21.00	15.34
	方案三	9.75	11.07	30.06	40.93	31.63
	方案四	16.00	10.25	46.75	63.35	49.20
	方案五	27.31	11.48	65.78	70.85	69.65
	方案六	41.87	15.98	69.84	75.80	76.04

3.2 管网排水参量防控效能分析

以 2 年一遇情景下的模拟结果为定量,计算每个方案防控各参量的能力衰减指数,如图 8 所示。在径流总量防控方面,方案三的径流总量折线趋势更为平稳,在面对各重现期降雨时应对能力最强;在径流峰值方面,方案三在各重现期降雨中应对能力最强。两方面分析中,均为方案六管控措施的折线最陡峭,防控能力衰减越来越多,应对能力最弱。

依据参量削减率表绘制图 9。无论在哪一降雨重现期下,方案六的参量削减率都最大,这与各海绵设施的配比有关。针对径流总量,方案二、三在 10 a 重现期降雨下相较于其他降雨情景削减率最大,方案四、五、六在 2 a 重现期降雨下相较于其他降雨情景削减率最大。针对径流峰值,方案二、四在 10 a 重现期降雨下相较于其他降雨情景削减率最大,方案三在 50 a 重现期降雨下相较于其他降雨情景削减率最大,方案五、六在 2 a 重现期降雨下相较于其他降雨情景削减率最大。

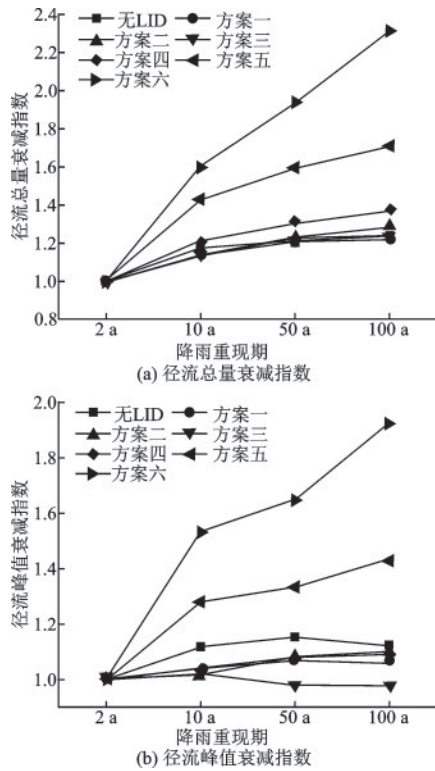


图8 多情景降雨下各方案管网排水参量能力衰减指数
Fig.8 Capability decay index diagram of pipeline network drainage parameters for various schemes under multiple rainfall scenarios

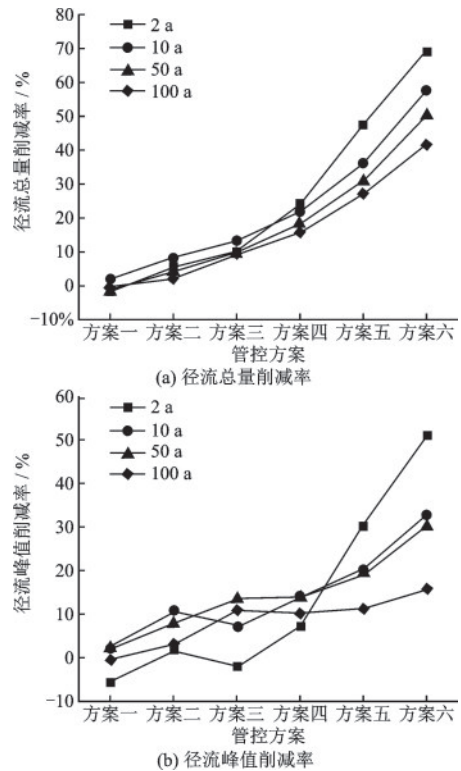


图9 多情景降雨下各方案管网排水参量削减率
Fig.9 Reduction rate diagram of pipeline drainage parameters for various schemes under multiple rainfall scenarios

3.3 径流负荷参量防控效能分析

从图10中可以看出,方案二至方案四的折线趋势走向相近,在面对各重现期降雨时应对能力趋同,表现都较为优异;管控方案五和方案六相对而言能力衰减更多,面对多重重现期降雨时应对能力最弱。

如参量削减率图11所示。任一降雨重现期下,方案六的参量削减率均最大。各个方案针对不同重现期降雨的径流负荷参量削减率变化趋势基本

一致,没有巨大差异。对于最大积水容积,除方案六外,各方案在2 a重现期下表现均不理想;对于最大积水溢流速度,变化最明显的也在于2 a重现期降雨情境下。对于最大积水深度,各方案效能趋同,方案五、六在2 a重现期降雨下参量削减率最大。

3.4 多情景管控方案效能评估总结

汇总分析三个街区的管控方案在多降雨情景下防控各参量的能力衰减指数,统计各街区的降雨

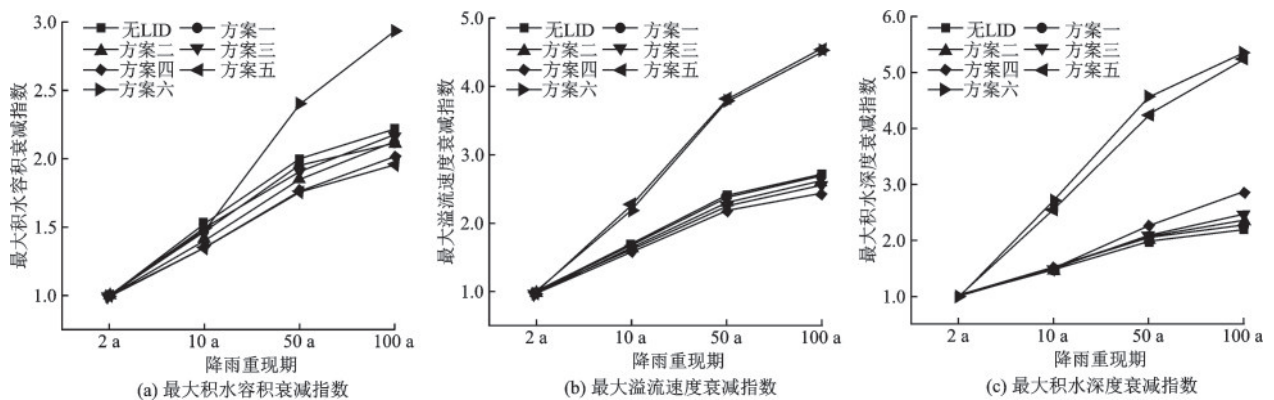


图10 多情景降雨下各方案径流负荷参量能力衰减指数
Fig.10 Decay index of runoff load parameter capability for various schemes under multiple rainfall scenarios

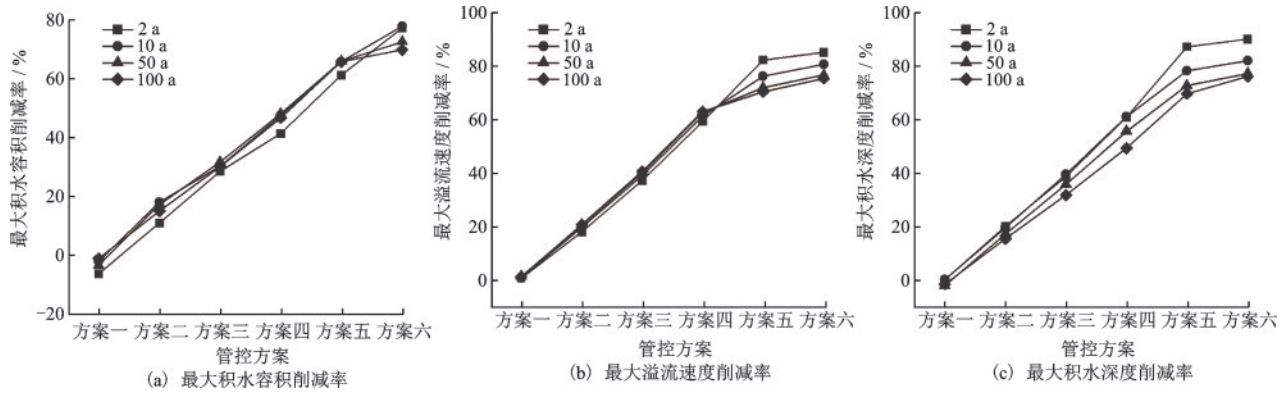


图 11 多情景降雨下各方案径流负荷参量削减率

Fig.11 Reduction rate diagram of runoff load parameters for each scheme under multiple rainfall scenarios

应对能力最强、最弱方案,详见表9。针对两参量不同指标的管控,一号街区方案三、四能力表现较为突出,三号街区能力最强的方案大部分为方案二,

相比较而言,能力最弱的方案,一号和三号街区均为方案六。二号街区稍有不同,方案二的应对能力相对较强,方案四的应对能力相对最弱。

表 9 各街区降雨应对能力最强、最弱方案

Table 9 The strongest and weakest plan for rainfall response in each block

街区	径流总量		径流峰值		最大积水容积		最大溢流速度		最大积水深度	
	强	弱	强	弱	强	弱	强	弱	强	弱
一号街区	方案三	方案六	方案三	方案六	方案四、五	方案六	方案四	方案六	方案二	方案六
二号街区	方案二	方案四	方案二	方案三	方案三	方案四	方案二	方案一	方案三	方案二
三号街区	方案二	方案六	方案二	方案六	方案一	方案六	方案三	方案六	方案二	方案六

总结三个街区参量削减率数据,分析参量削减率最大的管控方案所在的重现期。由表10可见,除最大溢流速度参量外,大部分管控方案在降雨重现期2 a、10 a时对参量的削减率最大;在100 a重现期下,各方案只在降低最大溢流速度方面效能显著。

表 10 最大参量削减率管控方案所在重现期

Table 10 Recurrence period of the control plan with the maximum parameter reduction rate

径流总量	径流峰值	最大积水容积	最大溢流速度	最大积水深度
2 a、10 a	2 a、10 a、50 a	10 a、50 a	100 a	2 a、10 a

综上所述,各降雨重现期下雨洪风险防控效能最佳的海绵设施组合模式,一号街区在2 a重现期下为方案三的组合模式,在10 a重现期下,方案三和方案四的海绵设施组合模式防控效能一致。二号街区在2 a重现期下为方案二的组合模式防控效能最好,在10 a重现期下为方案二、三的海绵设施组合模式。三号街区在2 a和10 a重现期下,均为方案二的组合方式防控效能最佳。但三个街区面对50 a和100 a重现期的降雨时,各种海绵设施组合模式均无

法起到很好的防控作用,需采取其他手段调控降雨,如进行有机的“灰绿结合”,整合传统雨水管渠、调蓄池、泵站等灰色基础设施来共同应对街区雨洪问题,构建弹性的雨水基础设施,实现对易涝区域和重点区域降雨径流的管控。同时注重避难系统规划,利用不易涝片区,规划合理的紧急避难场所和灾时响应机制,降低居民生命财产损失。

4 结 论

(1)同一重现期下三个街区落实任一雨洪管控方案后,对内涝风险均起到一定控制作用。雨水下渗量增加,地区径流系数降低,管网排水和径流负荷参量的相关指标值均降低,总体内涝风险降低,验证了内涝风险评估参量的可行性和海绵设施组合管控措施的有效性。

(2)将防控能力衰减指数和参量削减率结合起来,对模拟结果进行量化分析,使各管控方案的雨洪风险防控效能得到了更全面的评估,保证了研究成果的准确性。将管控情景与降雨情景结合设置

模拟情景,涵盖了研究区域可能遭遇的多水准内涝灾害。

(3)基于SWMM雨洪模拟仿真模型,结合管控方案效能评估结果,为各街区找到了适应多水准雨洪风险应布局的海绵设施规模及内涝风险管控建议。三个街区在2 a和10 a降雨重现期下都存在防控效能最佳的管控方案,但在50 a和100 a降雨重现期,存在管控缺口,需补充其他管控手段,增强街区雨洪风险管理能力,降低内涝风险。

参考文献:

- [1] 程涛,黄本胜,邱静,等.基于洪涝削减效果的海绵措施优化布局研究[J].水力发电学报,2021,40(7):32-46.
Cheng T, Huang B Sh, Qiu J, et al. Optimization of overall layout of sponge city facilities for flooding alleviation effect [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(7): 32-46. (in Chinese)
- [2] Ranish M S. Watershed-Scale evaluation of flood reduction effect of low impact development designs [D] Ann Arbor: Southern Illinois University at Edwardsville, 2014.
- [3] 刘保莉.雨洪管理的低影响开发策略研究及在厦门岛实施的可行性分析[D].厦门:厦门大学,2009.
Liu B L. Research on the low impact development strategy of rainwater and flood management and feasibility analysis of its implementation in Xiamen island [D]. Xiamen: Xiamen University, 2009. (in Chinese)
- [4] Zhang Y, Xu H, Liu H, et al. The application of low impact development facility chain on storm rainfall control: a case study in Shenzhen, China [J]. Water, 2021, 13(23): 3375.
- [5] 刘晓云,姜雨,丁晓辉,等.居住区低影响开发评价及优化研究[J].西北林学院学报,2021,36(2):266-274.
Liu X Y, Jiang Y, Ding X H, et al. Evaluation and optimization of low impact development in residential district [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(2): 266-274. (in Chinese)
- [6] 佟金萍,张涵玥,刘辉,等.基于XGBoost的长三角核心城市内涝风险评估及影响因素分析[J].水利水电技术(中英文),2021,52(10):1-11.
Tong J P, Zhang H Y, Liu H, et al. Assessment and influencing factor analysis of urban flood risk in the core area of the Yangtze River Delta based on XGBoost [J]. Water Resources and Hydropower Technology (in Chinese and English), 2021, 52(10): 1-11. (in Chinese)
- [7] 尤凤春,郭丽霞,史印山,等.北京强降雨与道路积水统计分析及应用[J].气象,2013,39(8):1050-1056.
You F C, Guo L X, Shi Y S, et al. Statistical analysis and application of heavy rain and road waterlogging in Beijing [J]. Meteorology, 2013, 39(8): 1050-1056. (in Chinese)
- [8] 王彬雁,赵琳娜,巩远发,等.北京降雨过程分型特征及短历时降雨重现期研究[J].暴雨灾害,2015,34(4):302-308.
Wang B Y, Zhao L N, Gong Y F, et al. Study on the characteristics of Beijing's precipitation process and the method of short-term precipitation recurrence period [J]. Journal of Rainstorm and Disasters, 2015, 34(4): 302-308. (in Chinese)
- [9] 袁冯,张君枝,王冀,等.气候变化背景下北京市短历时暴雨的强度及雨型变化特征[J].大气科学学报,2020,43(5):802-809.
Yuan F, Zhang J Z, Wang J, et al. Characteristics and changes of short-term rainstorm intensity and precipitation pattern in the context of climate change in Beijing [J]. Journal of Atmospheric Science and Technology, 2020, 43(5): 802-809. (in Chinese)
- [10] 曾照洋,王兆礼,吴旭树,等.基于SWMM和LIS-FLOOD模型的暴雨内涝模拟研究[J].水力发电学报,2017,36(5):68-77.
Zeng Z Y, Wang Z L, Wu X S, et al. Rainstorm waterlogging simulations based on SWMM and LISFLOOD models [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(5): 68-77. (in Chinese)
- [11] 李文涛,隋军,刘成林,等.设计降雨雨峰系数对排水管网设计流量的影响分析[J].净水技术,2015,34(5):100-103,111.
Li W T, Sui J, Liu C L, et al. Analysis of influence of design rainfall peak coefficient on design flow of drainage pipeline network [J]. Water Purification Technology, 2015, 34(5): 100-103, 111. (in Chinese)
- [12] 戴有学,王振华,戴临栋,等.芝加哥雨型法在短历时暴雨雨型设计中的应用[J].干旱气象,2017,35(6):1061-1069.
Dai Y X, Wang Z H, Dai L D, et al. Application of chicao hyetograph method in design of short duration rainstorm pattern [J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(6): 1061-1069. (in Chinese)
- [13] 蒲贵兵,古霞,蔡岚,等.“十四五”海绵城市建设发展策略[J].净水技术,2021,40(3):1-8.
Pu G B, Gu X, Cai L, et al. Development strategy for Sponge City construction during the “14th Five-Year Plan” period [J]. Water purification technology, 2021, 40(3): 1-8. (in Chinese)

(本文编辑:苏泽云)

(下转第808页)