

基于鸿业SWMM模型的城市内涝防治优化设计探讨

姬晓羽

(中冶南方城市建设工程技术有限公司, 湖北 武汉 430000)

摘要: 城市内涝作为一种新型“城市病”,对城市的健康发展造成了多方面的挑战。光谷中心城作为武汉乃至全国的科技创新高地之一,为保证其内涝防治工作有的放矢,采用基于SWMM模型开发的“鸿业暴雨排水及低影响开发模拟系统”,对排水管网和水系建成后的光谷中心城,在50 a一遇的降雨条件下,进行径流在地表的淹没过程模拟,对内涝风险进行分析评估。结合分析评估结果,针对性地从排水管网、径流控制和调蓄、超标雨水通道三个方面构建排水、防涝、防洪三位一体综合体系,提出优化设计方案。优化后红I风险区面积消减44.9%,橙II风险区面积消减19.0%,黄III风险区面积消减27.8%,蓝IV风险区面积消减11.3%,中心城内涝风险整体降低21.1%,区域内内涝风险明显改善。

关键词: 内涝防治;风险评估;模型模拟;优化设计;设计探讨

中图分类号: TU992

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)05-0161-06

Discussion on Optimal Design of Urban Waterlogging Control Based on Hongye SWMM Model

JI Xiaoyu

(MCC Southern Urban Construction Engineering Technology Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: As a new type of "urban disease", urban waterlogging poses many challenges to the healthy development of cities. Optical Valley Central City is one of the scientific and technological innovation highlands of Wuhan and even the whole country. In order to ensure its waterlogging prevention and control work with a definite objective in view, the "Hongye Rainstorm Drainage and Low-impact Development Simulation System" is developed by SWMM model to simulate the process of runoff surface waterlogging under the rainfall condition of once in 50 a for the Optical Valley Center City after the completion of drainage network and water system. The waterlogging risk is analyzed and assessed. Combined with the results of analysis and evaluation, a trinity integrated system of drainage, waterlogging prevention and flood control is built specially from three aspects of drainage network, runoff control and storage, and superstandard rainwater channels. An optimal design scheme is proposed. After optimized, the area of the Red I risk zone is reduced by 44.9%, the area of the Orange II risk zone is reduced by 19.0%, the area of the Yellow III risk zone is reduced by 27.8%, and the area of the Blue IV risk zone is reduced by 11.3%. The overall waterlogging risk in the central city is reduced by 21.1%. The waterlogging risk in the area is significantly improved.

Keywords: waterlogging prevention and control; risk assessment; model simulation; optimal design; design discussion

0 引言

近年来随着极端天气的频繁发生,城市内涝威胁大大增加。在日益加快的城市化进程中,“先地上、后地下”的发展模式,使我国城市内涝防治体系与城市发展需求难以适配^[1-2],根据国家住建部2010年对349个城市内涝情况调研的情况,2008—2010年共有289个城市发生不同程度的内涝,占调查城市

的80%^[3]。

为让城市内涝防治工作有的放矢,首先要进行城市内涝风险评估。为克服历史灾情数理统计法^[4]对历史资料要求较高和指标体系法^[5]评价因子选择困难等问题,水文水力学模型与仿真模拟法已被更多地运用于城市内涝风险评估中^[6-8]。由美国环境保护局(EPA)开发的暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM)作为一种开源的、先进的用于模拟城市地区水文和水质的计算机程序^[9],其广泛运用为国内外的广大专家、学者提供了强有力的工具。但在实际运用中SWMM无法直接模拟径流

收稿日期: 2024-09-19

作者简介: 姬晓羽(1993—),女,工学硕士,工程师,从事城市防洪排涝设计工作。

的地表漫流过程。为将其直接运用于城市内涝风险评估,诸多学者^[10-12]对SWMM模型进行了改进,使其可以实现积水扩散,模拟出城市地表淹没深度和淹没范围。

“鸿业暴雨排水及低影响开发模拟系统”(版本号V4.0)是一款基于SWMM模型开发的集设计、分析、模拟多功能为一体的软件,内置地块下垫面库可以实现径流系统的快速计算,支持城市地形识别,提供淹没分析功能,可以模拟不同降雨条件下的地面积水过程,直观展示淹没区域淹没最大水深等信息。笔者运用此软件,以湖北省武汉市东湖新技术开发区光谷中心城为例,根据《光谷中心城水系规划》和《光谷中心城排水专项规划》,模拟分析未来水系及排水管网等设施完全建成后,在50 a一遇暴雨条件下,光谷中心城的防洪排涝能力。结合内涝风险评估结果,从排水管网、径流控制和调蓄、超标雨水通道设计三个方面构建排水、防涝、防洪三位一体综合体系,为光谷中心城的防洪排涝工作提供重要参考。

1 研究区域概述

光谷中心城位于东湖国家自主创新示范区中部,北靠九峰森林公园,南临综合保税区,西临光谷生物城,东接未来科技城,一期规划面积23.5 km²。年平均气温在16.2~16.7℃,年平均降水量为1 260~1 350 mm,年总蒸发量为1 437~1 573 mm。由于九峰山的影响,光谷中心城整体地势北高南低,雨水排放主要涉及两个雨水汇水系统,分别为东沙湖水系的东湖汇水系统和梁子湖水系的豹澥湖汇水系统。根据光谷中心城区域内水系规划,豹澥河汇水系统又划分为豹子溪汇水系统、新月溪—台山溪汇水系统、豹澥河汇水系统、中新生物城汇水系统,如图1所示。

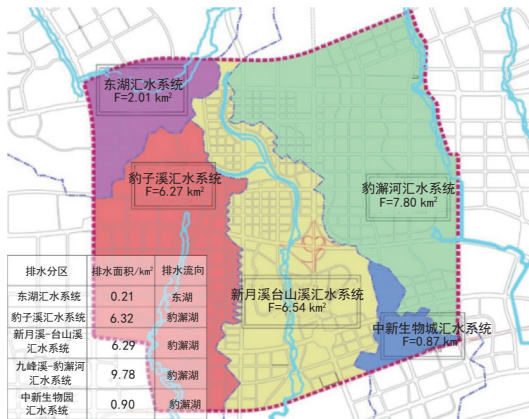


图1 光谷中心城排水分区图

2 模型建立

2.1 计算原理

地表产流由于蒸发、洼蓄和下渗会产生损失,产流初损模型考虑无洼蓄量的不透水地表的前期蒸发损失、不透水地表的洼蓄损失和透水地表的洼蓄及下渗损失。入渗模型选择Horton模型:

f_m = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}

式中: f_m 为 t 时刻的下渗强度,mm/h; f_0 为初始下渗强度,mm/h; f_c 为稳定下渗强度,mm/h; t 为时间,s; k 为下渗衰减系数,1/h。

模拟的光谷中心城,水系形成,降雨内涝通过地表漫流、管网排水,由水系承担泄洪入湖功能。为准确描述这一情况,需要建立地面二维、地下管网和水系一维的耦合模型。采用一维、二维耦合模拟,将管网一维模型、水系一维模型与地面漫流二维模型进行无缝耦合嵌套,模拟洪涝的动态演算。

2.2 基础数据处理

2.2.1 地理模型

通过载入片区高程数据建立数字高程模型,获得计算地形(见图2)。

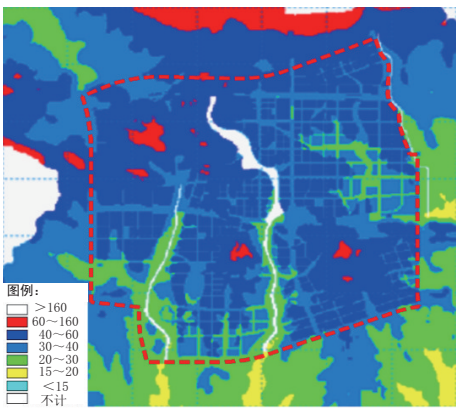


图2 规划高程分析图(单位:m)

2.2.2 下垫面分析

光谷中心城规划用地统计表见表1,按照现状的不同类别用地分布和多个代表性用地的下垫面统计,对本区域各排水系统的下垫面进行总体解析。

不同类型下垫面解析原则见表2,可知光谷中心城占比最大下垫面为屋面及道路,占比50.1%,主要分布于区域内的市政道路、公园、居住小区;其次为绿化,占比38.2%,主要分布于区域内的高校、公园、居住小区;水面占比最低,为1.5%,主要包括区域内的水系和部分小区及高校内景观水池等。

表 1 光谷中心城规划用地统计表

代码	用地性质	用地面积/hm ²	百分比/%
R	居住用地	557.02	23.70
A	公共管理与公共服务用地	174.77	7.44
B	商业服务业设施	237.19	10.09
M	工业用地	119.15	5.07
S	交通设施用地	578.93	24.63
U	公用设施用地	7.07	0.30
G	绿地与广场用地	464.52	19.76
E	非建设用地	211.64	9.00

表 2 不同类型下垫面解析一览表 单位:%

用地类型	屋面及道路	广场	绿化
居住用地	55	15	30
行政办公用地	87	8	5
教育文化用地	70	5	25
医疗卫生用地	80	4	16
商业用地	67	30	3
工业物流用地	73	7	20

2.2.3 排水管网及水系模型

根据《光谷中心城排水专项规划》,对光谷中心城排水管网进行建模见图 3,赋予类别、管材、管径、坡度、高程、附属构筑物、流向、接口形式、管道基础、节点类型等属性;将地形转化为能识别的计算地块(参数块),使不同地块水系回流至指定的雨水井或者雨水口中。同时定义区域内水池、河道、湖泊等蓄水曲线、蒸发曲线、断面数据等以提供调蓄,定义片区内泵站运行参数用于区域排水提升,并根据排水管网情况设置排放口。



图 3 排水管网及水系分布图

2.2.4 设计降雨

设计降雨采用 24 h 长历时,50 a 重现期用以评估内涝风险,降雨数据参考《武汉市最新暴雨强度公式》(DB 4201/T-641—2020)建立,见图 4。

2.3 边界条件

本区域为东湖汇水系统和豹澥湖汇水系统,雨水通过排水管网收集分别排放至东湖和豹澥湖。

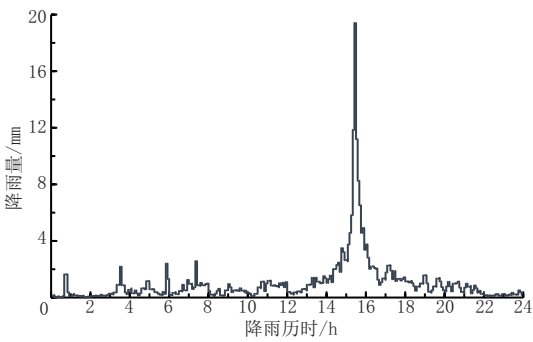


图 4 设计降雨过程线

东湖汇水系统范围内排水管网排方口标高(最低为 30.00 m)高于东湖水位(最高控制水位 19.65 m,常水位 19.15 m);豹澥汇水系统范围内排水管网排方口标高(最低为 21.00 m)高于豹澥湖水位(最高控制水位 18.50 m,常水位 17.00 m)。管网高程能基本满足降雨时重力排水要求,若排涝泵站排放及时,暴雨时受到湖泊水位顶托影响较小。

由于模型是基于规划的排水管网资料建立,排水管网资料仅包括管径、管道高程信息,不考虑管网其他情况,如淤积、渗漏、破损、堵塞、错混接等对模型产生的影响。

2.4 模型验证

根据 2019 年以来的统计,高新大道和高科技园一路交界处、神墩三路和高科技园路交界处、高新四路和豹溪路交界处均发生过严重渍水,对比下述模型模拟结果,与模型模拟情况基本一致。模型模拟结果总体与实际情况相符,可以用于光谷中心城的内涝风险评估。

3 模拟结果

武汉市对城市内涝风险等级划分^[13]见表 3。

表 3 武汉市内涝风险等级划分

风险等级	划分依据		
	积水深度	积水时间	危险程度
红 I	大于 0.4 m	—	城市交通、基础设施和各类建筑物受到威胁
橙 II	大于 0.3 m, 小于 0.4 m	大于 15 min	城市交通受到严重影响
黄 III	大于 0.15 m, 小于 0.3 m	大于 30 min	城市交通不便
蓝 IV	小于 0.15 m	—	一般积水

按照《光谷中心城水系规划》和《光谷中心城排水专项规划》,水系和排水管网建成后,在 50 a 一遇降雨条件下,地面最大积水情况如图 5 所示。市区大部分路段为蓝色区域,积水深度小于 0.15 m,风险等级为蓝 IV。局部路段积水深度大于 0.15 m 小于

0.3 m,包括光谷三路与豹中街交界处、光谷六路与神墩一路交界处、高科园二路与九峰二路交界处,风险等级为黄Ⅲ。局部路段积水深度大于0.3 m小于0.4 m,致使交通受到严重影响,分别有高新大道由光谷五路至光谷六路、神墩三路从高科园西路至高科园路、高科园路从神墩三路至神墩五路、大吕路从流芳园横路至光谷四路、九峰一路和松涛路交界处等路段,风险等级为橙Ⅱ。高科园一路从神墩三路至神墩五路、神墩三路与高科园路交界处、光谷三路和高新三路交界处、高新四路和豹溪路交界处等附近路段积水超过0.4 m,内涝风险等级为红Ⅰ。

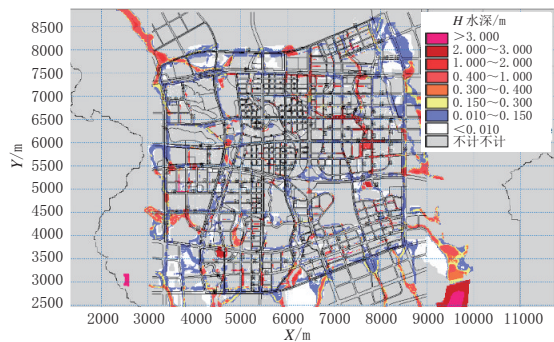


图5 50 a一遇内涝风险图

光谷中心城水系采用50 a一遇的标准进行设计,100 a一遇的标准进行校核。各断面的设计洪水量根据《湖北省暴雨径流查算图表》采用瞬时单位线法进行计算,由于光谷中心城整体地势北高南低、西高东低,下游湖泊对水系排涝影响较小。当水系按照规划建成后,在50 a一遇的降雨条件下,豹子溪、新月溪一台山溪、九峰溪河道最高水位未超过相应的地面高程,河道未漫溢。各区段断面最大流量小于对应设计流量,规划水系断面能满足光谷中心城防洪排涝要求,故水系和下游顶托并不是内涝风险的主要原因。光谷中心城的整体地势具有良好的排水条件,规划的用地竖向有利于内涝的排除,也不是导致内涝的主要原因。

光谷中心城地下排水管网根据《室外排水设计标准》中的规定,设计重现期一般为3~5 a一遇^[14]。由于排水系统设计和防洪排涝系统的目的不同,导致地下排水管网的设计重现期与防洪排涝标准之间存在一定的差异性。在实际情况中,排水管网内的无压流会随着管道内水位的上升逐渐变成有压流,排水能力虽较设计流量高,但在一些关键位置,因为上游接入、地势、周围环境等影响,地下排水管网的实际排水能力无法满足排水需求,无法及时转输的径流导致了光谷中心城内涝的发生。

4 规划方案设计及验证

4.1 规划方案设计

地下排水管网设计重现期与防洪排涝标准的不一致,导致部分关键点管道排水能力不足,但城市排水系统不应全部承担排除城市内涝的责任,在发挥排水管网作用的同时,需要从源头上考虑对径流的控制,并对“超标降雨”引起的地面漫流、滞留涝水做出妥善的安排。

故本文从排水管网、径流控制和调蓄、超标雨水通道三个方面构建排水、防涝、防洪三位一体综合体系,为光谷中心城的防洪排涝工作提供重要参考。

首先对城市排水管网进行优化。针对内涝风险较大的区域,对其所在位置的管网和下游管网进行分析,对模型中出现的流速和压力较大的管网进行适当优化,具体见表4。

表4 管网优化提升表

序号	管网位置	优化前管径/mm	优化后管径/mm
1	高科园一路 (高新二路—神墩四路)	d800	d1000
2	高科园一路 (神墩三路—神墩四路)	d800	d1200
3	流芳园横路 (光谷三路—光谷四路)	d1000	d1500
4	高新四路 (光谷五路~台山溪西路)	2d1350	2d1800
5	大吕路 (光谷四路—豹子溪)	d1000	d1500
6	高科园路 (神墩一路—神墩三路)	B×H=3.0 m× 2.0 m	B×H=3.6 m× 2.5 m
7	高科园二路 (神墩三路—神墩五路)	B×H=4.6 m× 2.2 m	B×H=4.6 m× 3.0 m
8	神墩五路 (高科园二路—高科园三路)	2B×H=3.0 m× 2.0 m	2B×H=3.6 m× 2.5 m
9	高科园三路 (神墩五路—高科园二路)	2B×H=3.0 m× 2.0 m	2B×H=3.0 m× 3.0 m
10	望月路 (松涛路—飞霞路)	d800	d1800
11	光谷三路 (九峰一路—高新大道)	d600	d1000+d1500
12	光谷七路 (高新四路—虎山街路段)	2d800~1 000	2d1200+d1500
13	神墩三路 (高科园西路—高科园路)	d800 1 000	B×H=2.0 m× 2.0 m
14	光谷四路 (高新四路—大吕路)	d1000	d1200+d2000
15	光谷四路 (流芳园横路—大吕路)	d1000~600	d350

优化后在不同重现期下,管网压力分布见图6。

其次对径流控制和调蓄进行设计。在地块内设

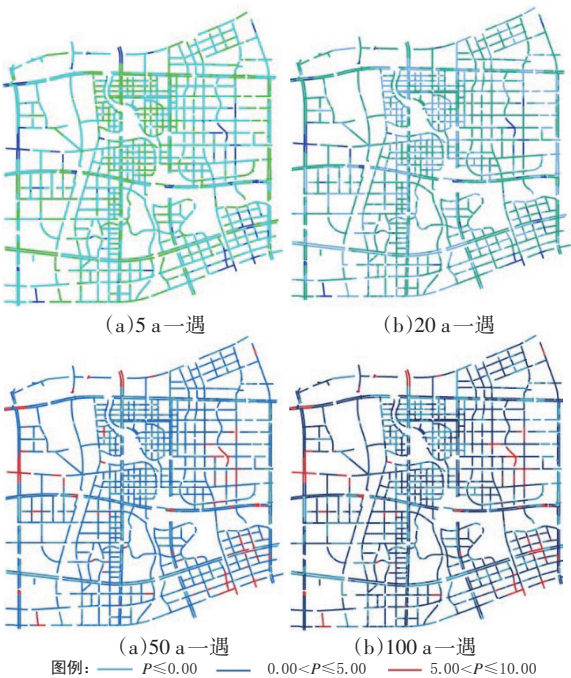


图6 优化后管网压P力分布图

置下沉绿地、绿色屋顶、透水铺装等LID低影响开发设施降低地块的平均径流系数以对雨水径流量进行源头控制,并利用光谷中心城公园、广场等有条件收集并储存雨水的基础设施进行调蓄。将新月溪公园北区、新月溪公园南区、行政中心西侧公园、豹子溪公园北区、豹子溪公园南区等公园和广场作为雨水调蓄空间,总调蓄容积17.09万m³。同时在九峰溪绿带、豹子溪绿带、新月溪绿带、高新三路与高科园路交叉口、高新五路与高科园路交叉口处设置一批雨水调蓄池,总调蓄容积3.5万m³,对强降雨期间超标径流及部分超过河道设计能力的流量进行储存,以达到削减雨水峰值的目的,从而进一步降低中心城内涝风险。

最后对超标雨水通道进行设计。豹子溪、新月溪一台山溪、九峰溪、森林渠等水系承担着城市涝水行泄通道的功能。将部分道路作为超标雨水的泄流路径、通道,如图7所示,当特大暴雨发生时,保证周围地块及重要道路的超标雨水能够汇流至雨水行泄通道中,并通过行泄通道排入水体,防止重大灾害发生。

4.2 规划方案校核

根据上述方案调整模型参数,在50 a一遇降雨条件下,地面最大积水情况如图8所示。

在进行优化后,各风险等级区域面积均有所下降。光谷三路与豹中街交界处黄Ⅲ面积有所减少,

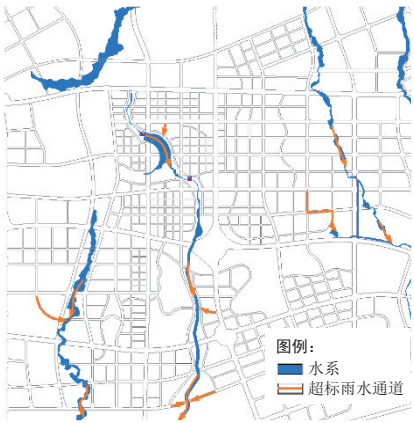


图7 超标雨水行泄通道

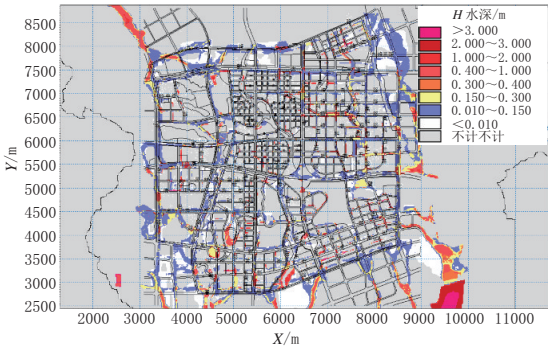


图8 优化后50 a一遇内涝风险图

光谷六路与神墩一路交界处、高科园二路与九峰二路交界处,风险等级降为蓝Ⅳ。高新大道由光谷五路至光谷六路段,红Ⅰ区域面积减少,蓝Ⅳ区域面积增加;神墩三路神墩三路从高科园西路至高科园路,红Ⅰ区域面积减少,黄Ⅲ和蓝Ⅳ区域面积增加;高科园路从神墩三路至神墩五路,内涝风险消除;大吕路从流芳园横路至光谷四路和九峰一路和松涛路交界处路段等路段,内涝风险整体降低至蓝Ⅳ;神墩三路与高科园路交界处,红Ⅰ区域面积降低,黄Ⅲ区域面积增加;高科园一路从神墩三路至神墩五路,内涝风险整体降低至黄Ⅲ;光谷三路和高新三路交界处,内涝风险整体降低至蓝Ⅳ;高新四路和豹溪路交叉口等附近路段,内涝风险消除。

优化方案总体工程费用预计8 611.459万元。优化前后,光谷中心城不同风险等级面积见表5。优化后红Ⅰ风险区面积消减44.9%,橙Ⅱ风险区面积消减19.0%,黄Ⅲ风险区面积消减27.8%,蓝Ⅳ风险区面积消减11.3%,中心城内涝风险整体降低21.1%。该优化方案已纳入《武汉光谷中心城防洪排涝专项规划》中。

6 结 语

采用基于SWMM模型开发的“鸿业暴雨排水及

表5 优化前后内涝风险对比

风险等级	不同风险等级面积/hm ²		消减率/%
	优化前	优化后	
红Ⅰ	106	59	44.9
橙Ⅱ	21	17	19.0
黄Ⅲ	54	39	27.8
蓝Ⅳ	283	251	11.3
合计	464	366	21.1

低影响开发模拟系统”(版本号V4.0)对光谷中心城内涝风险进行评估,提出内涝防治设计方案。

(1)光谷中心城整体地势北高南低、西高东低,下游湖泊对水系排涝影响较小,当水系按照规划建成后,在50 a一遇的降雨条件下,主要水系最高水位未超过相应的地面高程,河道未漫溢,故水系和下游顶托并不是造成内涝风险的主要原因。

(2)排水系统设计和防洪排涝系统的目的不同,排水管网与防洪排涝标准之间存在差异性。在一些关键位置,因为上游接入、地势、周围环境等影响,地下排水管网的实际排水能力无法满足排水需求,无法及时转输的径流导致了光谷中心城内涝的发生。

(3)从排水管网、径流控制和调蓄、超标雨水通道三个方面构建排水、防涝、防洪三位一体综合体系。优化后红Ⅰ风险区面积消减44.9%,橙Ⅱ风险区面积消减19.0%,黄Ⅲ风险区面积消减27.8%,蓝Ⅳ风险区面积消减11.3%,中心城内涝风险整体降低21.1%,区域内内涝风险明显改善。

参考文献:

[1] 张辉,许新宜,张磊,等.2000—2010年我国洪涝灾害损失综合评估及其成因分析[J].水利经济,2011,29(5):5-9.

[2] 谢映霞.从城市内涝灾害频发看排水规划的发展趋势[J].城市规划,2013(2):45-50.

[3] 郭瑜,毕晓巍,杨昆,等.浅谈海绵城市给排水的建设[J].中国房地产业,2017(1):58.

[4] Hans M D, C.J.H. J A, Eric K. Development of flood exposure in the Netherlands during the 20th and 21st century[J]. Global Environmental Change, 2010, 21(2): 620-627.

[5] Kaźmierczak A, Cavan G. Surface water flooding risk to urban communities: Analysis of vulnerability, hazard and exposure[J]. Landscape and Urban Planning, 2011, 103(2): 185-197.

[6] 周玉文,赵洪宾.城市雨水径流模型研究[J].中国给水排水,1997,13(4):4-6.

[7] 尹占娥,许世远,殷杰,等.基于小尺度的城市暴雨内涝灾害情景模拟与风险评估[J].地理学报,2010,65(5):553-562.

[8] 徐俊.基于SWMM的区域防洪排涝设施布局优化模型构建[J].水利科技与经济,2023,29(3):131-134.

[9] 刘星星,王若瑜,杨青,等.基于SWMM-VIKOR的武汉市片区内涝风险评估[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2023,45(4):642-648.

[10] 薛丰昌,张嫣然,田娟,等.厦门岛内涝灾害风险评价制图[J].图学学报,2019,40(2):321-327.

[11] 王昊,张永祥,唐颖,等.暴雨洪水管理模型的城市内涝淹没模拟[J].北京工业大学学报,2018,44(2):303-309.

[12] 杨海燕,黄明阳,周广宇,等.基于流域的沿海山地城市防洪排涝规划方案设计[J].中国给水排水,2023(5):133-138.

[13] 任智博,付小莉,李南生.城市防涝风险分析研究——以武汉光谷中心城为例[J].土木工程,2019,8(2):233-243.

[14] GB 50014—2021,室外排水设计标准[S].

~~~~~

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:[roadbridgeflood@163.com](mailto:roadbridgeflood@163.com)

