

文章编号:1671-6833(2023)02-0014-08

专栏:城市洪涝防治

【主持人】左其亭:郑州大学水科学研究中心主任

【按语】随着气候变化和城市化加剧,城市洪涝灾害日趋严重。城市化建设为居民生活提供很多便利,但也带来了城市拥挤、空气污染、热岛效应、雨岛效应等“城市病”,加剧了资源的聚合和风险的集中。因为城市人口集中、洪涝灾害预警难度大,一旦遭遇特大暴雨,就会引发洪涝,造成无法挽回的人民生命财产损失。2021年郑州爆发的“7·20”特大暴雨,引发新中国成立以来最严重的城市洪涝灾害。习近平总书记对洪涝防治工作作出重要指示“要始终把保障人民群众生命财产安全放在第一位”,始终坚持“人民至上、生命至上”理念。由于降雨不确定性、难预报性,再加上城市空间复杂性,城市洪涝防治一直是城市安全工作的重点,也一直是学术研究的热点和难点。从20世纪80年代的国家高技术研究发展计划(863计划)、90年代的国家重点基础研究发展计划(973计划),到如今的“十四五”国家重点研发计划,城市洪涝防治研究从初期的城市防洪逐步发展到城市洪涝治理再到城市洪涝联防联控,始终是保障经济社会稳定、促进城市高质量发展的重要科技支撑。在论文《基于绿灰蓝基础设施融合的城市洪涝灾害调控》中,作者系统研究了城市雨水系统的综合评价、优化布设以及防洪排涝优化调度;在论文《极端暴雨下城市地下空间洪涝风险及灾害防控》中,作者讨论了城市地下空间洪涝防控所面临的主要科学问题以及存在的难点、痛点与堵点;在论文《极端暴雨下城市内涝模拟与应急响应能力评估》中,作者研究了城市内涝模拟模型及其应急响应能力评估方法;在论文《郑州“7·20”特大暴雨内涝成因及灾害防控》中,作者系统分析了郑州“7·20”特大暴雨内涝灾害形成机理、防治途径以及存在的主要问题及应对措施。

基于绿灰蓝基础设施融合的城市洪涝灾害调控

黄国如^{1,2}, 杨 格¹, 曾博威¹, 吕永鹏³, 任心欣⁴

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640; 2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 3. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092; 4. 深圳市城市规划设计研究院有限公司, 广东 深圳 518049)

摘要:随着城市面临的内涝形势日益严峻,依靠雨水管网等基础设施进行末端快排的雨水管理思想难以从根本上解决城市内涝问题,而将绿灰蓝基础设施三者有机结合,能在确保城市洪涝灾害得到有效解决的基础上,系统解决多尺度下的水污染和水资源短缺等问题。基于绿灰蓝基础设施融合的理念,从城市雨水系统现状的综合评价、城市雨水系统的优化、城市防洪排涝调度等方面展开评述。在城市雨水系统评估方面,综述了以绿色基础设施为主体的低影响开发系统性能评估和以灰色基础设施为主体的城市雨水管网系统性能评估研究;在城市雨水系统优化方面,综述了绿色基础设施的设计参数优化及布局优化、管网等灰色基础设施的平面布局优化及管径埋深优化研究;在城市防洪排涝调度方面,综述了城市防洪排涝调度方法及城市防洪排涝调度系统的研究。旨在为构建集评估、优化、调度为一体的,工程措施与非工程措施相结合的城市洪涝灾害调控方法提供思路。

关键词:绿灰蓝基础设施;布局优化;代理模型;防洪排涝调度

中图分类号: TU998.4

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2023.02.018

收稿日期:2022-10-12; **修订日期:**2022-10-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51879108;52279015)

作者简介:黄国如(1969—),男,江苏南京人,华南理工大学教授,博士,博士生导师,主要从事水文学及水资源研究,
E-mail: huanggr@scut.edu.cn。

引用本文:黄国如,杨格,曾博威,等.基于绿灰蓝基础设施融合的城市洪涝灾害调控[J].郑州大学学报(工学版),2023,44(2):14-21. (HUANG G R, YANG G, ZENG B W, et al. Urban flood disaster control based on green-gray-blue infrastructure integration [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023,44(2):14-21.)

在气候变化和城市化的大背景下,极端降雨事件的强度和频率均明显增加,城市区域硬化面积不断扩张,导致降雨下渗减少、产流增量、汇流提速。同时,中国城镇化进程中长期存在着“重地上、轻地下”的现象,市政管网建设标准低,管网的错接、漏接、误接、断接等损耗屡见不鲜,排水管网系统设施老旧问题凸显。在内因和外因相互作用下,近年来中国城市洪涝灾害频发,严重影响了城市人民生命财产安全,制约了城镇化质量提高^[1]。郑州“7·20”特大暴雨内涝灾害等极端事件暴露出中国规划建设管控与洪涝风险管理不衔接、外洪防治与内涝治理不同步等隐性问题^[2]。2020 年,中国首次在《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》中提出建设“韧性城市”。韧性(弹性)城市建设旨在提高城市系统面对灾害时的弹性,要求城市能抵御和适应外界的危害或冲击并维持自身原有的功能特性。结合目前的海绵城市建设,采用绿灰蓝基础设施等洪涝适应性措施是提高城市洪涝弹性的重要手段,符合使海绵城市建设更具“弹性”的国家发展战略需求。现有研究主要关注绿色基础设施的合理运用及效果评估,而关于构建绿灰蓝基础设施融合的城市雨水管理体系的研究较少。因此,本文从阐述绿灰蓝基础设施融合理念出发,从评估、优化、调度 3 个主要研究方向厘清现有研究思路与短板,试图探讨基于绿灰蓝基础设施融合理念的未來城市洪涝灾害调控方法构建。

1 绿灰蓝基础设施融合理念

传统城市雨水系统依赖于管网等灰色基础设施。灰色基础设施(grey infrastructure)即以人工设施为主的传统市政基础设施,如水库、堤坝、管道、渠道、深隧、水泵、水处理厂和运河等建筑结构和机械设备,倡导源头收集、末端快排,但缺乏生态适应性与弹性。在这一背景下,绿色基础设施应运而生,城市雨水系统内涵进一步丰富。在国外话语体系下,绿色基础设施(green infrastructure, GI)又称绿蓝基础设施(green and blue infrastructure, GBI),以自然要素为主,如绿地、森林、农田、湿地、湖泊、河道等自然开放空间^[3]。核心思想是将城市景观设计融入城市雨水系统设计之中,模仿自然水文过程,在地表径流进入“网”之前,在源头的“面”上加强对其吸纳、蓄渗和缓释,从而起到减少径流总量、削减径流峰值、控制污染负荷、回用雨水资源等作用。基于这一思想,涌现出低影响开发理念(LID)、水敏感城市

设计(WSUD)和可持续城市排水系统(SUDS)等国外城市雨洪管理代表性技术体系。低影响开发理念(LID)于 1977 年由 Barlow 等^[4]在一份关于美国佛蒙特州土地利用规划的报告中首次提出。低影响开发理念的初衷是通过布设分散式水文景观设施来还原场地开发前的自然水文循环。水敏感城市设计(WSUD)于 1994 年由 Whelans 等^[5]在为西澳大利亚州政府准备的报告中提出。水敏感城市设计基于宏观城市规划和设计,旨在将城市发展对周边环境的水文影响降到最低。雨水管理是 WSUD 的一个子集,提供城市防洪、径流管理、水质改善和雨水回用等功能。可持续城市排水系统(SUDS)这一术语于 1997 年由苏格兰水务公司的 Conlin 率先使用^[6]。与 LID 理念相似,SUDS 也致力于尽可能地还原开发前的场地自然水文循环。与 LID 理念不同的是,SUDS 不仅包括分散的源头设施,也将传统城市雨水管网等中端输送设施、污水处理厂等末端处理设施纳入管理,共同形成一个从源头到终端的管理链。借鉴国外雨洪管理体系的成功经验,中国明确提出了“海绵城市”建设理念,统筹建设低影响开发雨水系统、城市雨水管渠系统、超标雨水径流排放系统。在中国话语体系下,绿色基础设施对标低影响开发雨水系统,通过对雨水的渗透、储存、调节、传输与截污净化等功能,有效控制径流总量、径流峰值和径流污染;灰色基础设施即传统排水系统或大型调蓄池、深隧等超标雨水排放设施,应与低影响开发雨水系统共同组织径流雨水的收集、传输与排放;蓝色基础设施即城市河湖水系等自然水体,可通过科学的联合调度,纳入超标雨水径流排放系统,用来应对超过雨水管渠系统设计标准的雨水径流。

大量研究表明,绿色基础设施在低重现期暴雨情景时有效,但随着降雨重现期增加,其控制效果急剧下降。以绿色屋顶为例,其滞蓄能力与降雨深度(P)具有强相关性,对于 $P \leq 10\text{ mm}$ 的事件,削减率通常大于 80%;当 $P > 10\text{ mm}$ 时,削减率显著降低^[7]。因此,绿色基础设施并不能取代传统灰色基础设施。对于大部分城市,灰色基础设施建设和配套都已相当成熟,在原有布局基础上的新建与修复耗资大、耗时长。故仅依靠改进灰色基础设施来应对现有的城市内涝问题并不具备经济可行性与时间有效性。将绿色基础设施建设与灰色基础设施改进相结合,可以更为经济有效地缓解城市内涝,但在区域与流域排水不协调的情况下,灰绿结合方案在应对极端暴雨时往往也力不从心。因此,将绿色基础设施的可持续性、灰色基础设施的可靠性和蓝色基

基础设施的可接受性相结合,基于绿灰蓝基础设施融合理念(hybrid green-gray-blue infrastructures,HGG-BI)构建城市洪涝灾害调控方法是缓解城市内涝、应对未来气候变化的有效途径。

2 城市雨水系统性能评估

随着城市雨水系统内涵的进一步丰富,城市雨水系统的结构复杂性、空间复杂性、功能复杂性日益突出。构建科学有效的城市雨水系统性能评估方法,对把握本底条件、明确发展方向具有重要意义。现有城市雨水系统性能评估研究从研究对象而言,主要可分为以绿色基础设施为主体的低影响开发系统性能评估和以灰色基础设施为主体的城市雨水管网系统性能评估,而对超标雨水排放系统进行性能评估较少。

2.1 低影响开发系统性能评估

近年来,一些研究人员通过试验监测和模型模拟对低影响开发系统中单体设施的水文控制效果及污染物削减能力展开了研究。设施尺度评估着重关注基质层种类、配比和植物种类对单体设施性能的影响,试图寻找最优设计参数。较为典型的实验研究是 Stovin 等^[7]选用 3 种基质材料、3 种植物,组建 9 个各不相同的绿色屋顶,进行了 4 年的长期实验监测分析,以确定基质组成和植被种类对绿色屋顶水文性能的影响。监测结果表明,基质组成和植被类型均会显著影响设施性能。较为典型的模拟研究是麦叶鹏等^[8]构建了生物滞留池、下凹式绿地和透水铺装的 Hydrus-1D 模型,运用实测数据进行模型参数的率定和验证,在此基础上进一步探究了各单项措施在多种工况下的雨水径流控制效果和规律,并确定了各项 LID 措施关键参数与径流量削减率和径流污染物负荷去除率。

随着低影响开发理念的践行,应实际工程建设的需要,许多研究人员对区域尺度下低影响开发系统不同布局的雨洪管理能力从监测与模拟两方面展开了研究。监测研究多关注水质的改善,较为典型的监测研究是 Tang 等^[9]在深圳市光明区凤凰城地区,选取 13 种 LID 设施和对照设施,布设 155 个自动监测设备,进行了近两年的采样分析。模拟研究则关注区域洪水风险的削减,较为典型的模拟研究是 Hu 等^[10]使用 SWMM 模型评估了低影响开发系统在南京市河西区的雨洪管理潜力。此外,部分研究人员尝试构建综合评价体系,定量评估区域尺度低影响开发系统的环境效益、经济效益和社会效益。如 Li 等^[11]运用 SWMM 模型与层次分析法,构建了

一个综合评估系统,为广西某体育中心项目评估了 5 个低影响开发场景。

2.2 城市雨水管网系统性能评估

城市雨水管网系统性能评估应用城市洪涝模型模拟不同重现期降雨下的管网运行情况的城市内涝过程,为溯源城市内涝痛点、更新城市雨水管网系统提供思路。城市洪涝模型可分为一维模型、二维模型和耦合模型 3 种:一维模型通过求解圣维南方程组模拟管道水流的运动规律、计算各节点溢流量;二维模型通过求解二维浅水流动方程模拟溢流水量在地表的运动状态;耦合模型则将一、二维模型耦合,构建城市雨洪水文水动力耦合模型,能有效模拟管网水流运动及管网洪水的溢流或消退过程。

国内外研发的一维模型数量众多,SWMM 模型凭借其开源、稳定等优点,在管网水力性能评估中运用最为广泛。评估思路一般为建模、参数率定、选用不同重现期降雨输入模型进行计算、分析评估模型计算得到各管段流量、流速、充满度、各检查井节点的溢流量等指标。如 Ye 等^[12]基于福州市晋安区某典型居民区实测数据,构建研究区 SWMM 管网模型,并利用遗传算法对 SWMM 参数进行优化率定,利用 Morris 法对影响产汇流计算的主要参数敏感性进行分析。在此基础上,比较分析在不同重现期降雨下研究区排水管网的节点溢流数、管网超载数等指标以评估排水能力。由于 SWMM 模型无法模拟检查井溢流后的地表漫流等二维水动力过程,许多研究者自主开发二维水动力模型,并将其与一维管网模型进行耦合,构建一、二维耦合模型。如 Simons 等^[13]采用 Godunov 格式的有限体积法数值求解二维浅水方程,构建了用于模拟地表水流运动的 GAST 模型。随后侯精明等^[14]采用 GAST-SWMM 耦合模型,以西安市沣西新城某区域为研究对象,设置 1、2、5、10、30 a 一遇 5 个常规降雨情景以及 50 年一遇和 100 a 一遇两个超标暴雨情景,模拟研究区域不同重现期 2 h 降雨下的管网排水情况,计算管道超载率和管网排水量,对雨水管网性能进行量化评估。在此模型中,地表径流通过检查井节点进入管网,而当管网水流通过检查井溢流到达地表,解决了地表与管网间的水量交换问题。

气候变化和城市化对城市雨水管网系统的影响是近几年的研究热点。在城市化方面,现有研究关注土地利用变化对城市排水管网水力性能的影响,如 Gouri 等^[15]在印度班加罗尔北部的研究中,分析了 1996、2002、2006 和 2012 年的遥感卫星图像,以识别土地利用的变化。基于 4 种土地利用类型建立

SWMM 模型,并评估土地利用变化对城市雨水管网产生的影响。在气候变化方面,现有研究关注评估现有管网在未来情景下的水力性能。如 Duan 等^[16]在香港东涌镇的研究中,考虑 4 种不同的温室气体排放情景下(即 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.0)气候条件,选用数据降尺度方法预测未来时期的降雨量,利用 HBV 半分布式水文模型模拟地表径流,利用 SWMM 模拟管网水力性能,选取检查井溢流数、检查井溢流量、检查井溢流时长作为 3 个水力指标表征系统性能。研究结果表明,气候变化将使现有城市雨水管网不堪重负,城市内涝有增无减,考虑气候变化等不确定因素的雨水管网更新迫在眉睫。也有学者将气候变化情景进一步延伸,考虑海平面上升、风暴潮等复合情景。如 Grip 等^[17]在瑞典特瑞堡市的研究中,使用二阶傅里叶分析计算季节变化下的平均海平面,使用实测数据来预测风暴潮,根据排放情景 RCP8.5 生成未来降雨事件的预测,使用 MIKE Urban 一维模型模拟了排水系统的性能,并通过淹没节点数和洪水频率表征管网性能。研究结果显示,在 2075 年后风暴潮也将成为排水系统超载的主要因素。奥地利因斯布鲁克大学的 Ulrich 等^[18]将气候变化预测和城市化预测模块化纳入了城市洪涝模型,构建了较为完整的 DAnCE4Water 模型,用于模拟人口增长、城市扩张及土地利用变化、气候变化等不确定因素对城市排水系统的影响,进一步拓展了城市洪涝模型的内涵。该模型以时空降尺度后的城市未来降雨作为气候变化影响因子,以城市土地利用变化及人口变化预测作为城市化影响因子,将上述二者作为未来情景输入城市洪涝模型进行模拟,选取内涝节点数、内涝频次、内涝时长和管道充满度等评估指标表征系统性能。

3 城市雨水系统性能优化

城市雨水系统的小、中、大排水系统各自承担着不同的功能,各排水系统中的不同措施在城市雨水管理中也扮演着不同的角色,不同措施之间也可根据空间布局的组合关系产生协同效应。因此,因地制宜地针对各措施的功能和特性进行组合和布局上的优化,是城市内涝调控方法中的重要一环。

3.1 低影响开发设施布局优化

低影响开发设施布局优化目标已基本明晰,主要包括:水文、经济、社会效益最优,成本最低,可行性最佳等目标。大多数研究以水文效益最优为目标,研究者根据研究区现状主观设置有限个布局方案,在相同降雨情景下分别对各方案进行模拟,选取

水文性能最佳方案。如 Ben-daoud 等^[19]在摩洛哥塞塔特市的研究中,基于 PCSWMM 模型对研究区现状的模拟结果提出了 2 种低影响开发设施布局方案,并在 4 个重现期降雨下进行模拟以选择水文性能最优方案。以水文效益最优为目标虽然能够使方案获得较理想的实施效果,但往往忽视了方案的成本控制。而在实际工程建设中,经济成本往往是决策者最关心的因素之一。为此,在低影响开发理念的践行中有必要综合考虑水文性能和成本控制的双重因素,使环境效益和经济效益之间达到平衡。在这方面,国内外专家学者已经展开了相关研究。如李尤等^[20]以北京市万泉河流域为例,基于 InfoWorks ICM 模型构建一二维耦合城市洪涝模型,针对雨水调蓄设施、下凹式绿地与透水铺装等典型 LID 措施构建组合方案,采用改进层次分析法(IAHP),从雨洪安全与成本控制 2 个方面进行系统评估,以选取最优方案。

上述研究均为在有限个方案中选取最优方案,受研究者个人主观因素的影响,容易出现局部寻优而错过实际最优解的现象。因此,许多研究人员将智能算法与城市洪涝模型相结合,进行全局优化,寻找帕累托解集。如 Xu 等^[21]在济南市黄台桥流域的研究中,选用 NSGA-II 算法进行低影响开发系统优化布局。当采用的评估模型相对简单时,由于每次计算的时间较短,优化总耗时也不会太长,采用人工智能算法在大量的随机样本中寻找全局最优方案是可行的。但当采用复杂的模型对样本方案进行评估时,对计算机的算力和计算耗时均产生了极大的挑战,将所有的随机样本均计算一遍很显然不可行的。近年来,基于代理模型的优化方法正逐步兴起,其思路是以代理模型的结果指导最优解搜索,减少昂贵的模型模拟成本,同时也能达到相当高的精度。代理模型在复杂模型参数敏感性分析、参数率确定等方面应用较为广泛,但在基础设施空间布局方面的应用较少。Latifi 等^[22]以神经网络模型作为雨洪模型 SWMM 的代理,探讨了位于伊朗某研究区的低影响开发优化方案。采用代理模型技术代理 SWMM 模型或者其他水文模型时,由于水文模型本身的计算速度较快,代理模型技术的优势无法完全展现出来。但基于水文水动力学原理的城市洪涝模型相对于水文模型来说是极其复杂的,运算速度较慢,在基础设施空间布局优化中采用代理模型代理城市洪涝模型将可大大提高计算效率,但目前这方面的研究极其薄弱。新加坡国立大学的 Lu 等^[23]基于城市洪涝模型计算结果,使用响应面模型(DYCORDS)的

动态坐标搜索替代全局优化算法以构建代理模型,在保证计算精度的前提下提高了寻优速度。

3.2 城市雨水管网优化

城市雨水管网优化研究可分为平面布局优化及管径埋深优化两大类。对于分流制城市,雨水管网是由各雨水管线串联起各检查井节点,最终排放至出水口的复杂网络系统,雨水口的布设位置决定了地表径流是否能够及时就近排放,关系着城市排水分区的划分,也影响着城市雨水系统的运行效果和建设成本。因此,空间布局优化主要围绕雨水口的布局展开。许多研究者从图论的视角,将检查井看作顶点,将管段看作弧,把城市雨水管网抽象为一张图来开展研究。如 Haghighi 等^[24]将管网概化为以检查井为顶点、管段为边的无向图,基于寻找以出水口为起点的最小支撑树的思想,开发了逐环切割算法来优化管网布局。Bakhshipour 等^[25]在平原地区由逐环切割算法生成集中式雨水管网布局,开发了空中花园算法优化出水口布局。但该算法以建设成本为唯一目标,未考虑高程和用地的影响,产生了很多横穿街道、低水高排的不切实际管线,需要大量的水力学模拟计算来剔除不合理管线。为了改善前期的研究工作,Bakhshipour 等^[26]引入了简单的成本函数来预筛选不合理的布局,但仍然需要迭代许多次才能得到较理想的布局方案,该方法也不能在地形更复杂的丘陵或山区城市运用,不具有普适性。

在已定布局的情况下对排水管网进行参数优化设计的影响因素众多,且各影响因素间存在协同效应,比如管径、流速和坡度三者之间的关系。且雨水管网系统牵一发而动全身,各管段间存在着水力联系。因此,雨水管网的参数优化问题是一个多约束、多目标的全局优化问题。近年来,智能算法已经成为城市雨水管网参数优化中常采用的方法,现有研究主要关注智能计算方法在优化问题中的运用和效果比较。如李芊等^[27]以改建成本、土方量和管网溢流量为目标,以管段及检查井的底高程为优化变量,建立雨水管网改建多目标优化模型,利用多目标粒子群算法(MOPSO)求解。杨祺琪等^[28]以管网水力性能为约束,以管径和埋深为优化变量,提出了一种基于 SWMM 模型和改进差分进化算法(DE)的雨水管网优化方法。方咸根^[29]以 SWMM 一维管网模型进行管网水力计算,以管网平均充满度和总造价为目标函数,将 Borg 算法应用在雨水管网多目标优化中,以确定最优的雨水管网优化改造方案。郑恺原等^[30]采用粒子群和遗传算法的联合算法,将经济成本、排涝能力和内涝风险作为优化目标,将管径和改

建管段数量作为优化变量,基于 SWMM 进行优化。

4 城市雨水系统优化调度

在海绵城市理念下,城市雨水系统可分为:低影响开发雨水系统、城市雨水管渠系统、超标雨水径流排放系统。其中低影响开发系统包含雨水花园、绿色屋顶、下凹式绿地等小尺度绿色基础设施;城市雨水管渠系统包含雨水管网、泵站、明渠、暗涵、闸门等灰色基础设施;超标雨水径流排放系统包含城市河湖水系、深隧、大型调蓄池等蓝色基础设施和灰色基础设施。可见海绵城市雨水系统元素众多、组成复杂且元素间互有联系。如何基于现有工程设施,优化调度城市雨水系统中的各元素、应对近年来频发的极端暴雨,是一个值得深入研究的方向。

4.1 城市雨水系统优化调度方法

城市雨水系统优化调度是一个多层次、多目标、多阶段的复杂决策过程。目前国内外研究工作主要集中在泵站或泵站群组、水库防洪优化调度等方面,对于城市区域内由河湖闸泵群组组成的城市雨水系统的优化调度研究较少。早期的防洪优化调度采用数学规划法,数学规划法要求约束明确、边界清晰,可分为线性规划、非线性规划、整数规划、动态规划等研究方向。如李小平等^[31]在广州市岭南围区,基于除涝排水系统建立了大系统分解协调模型,采用离散微分动态规划法求解,确定了研究区域防洪排涝系统的汛期优化调度规则。Zeng 等^[32]基于动态编程改进了并行动态规划算法,用于水库群联合优化调度。数学规划法逻辑严密、求解条件严格。但在实际工程问题中,结构模糊、元素之间关系复杂,很难建立严密的数学模型。因此,启发式算法被广泛运用到城市防洪排涝优化调度中。启发式算法以仿自然体方法居多,包含了蚁群计算、粒子群算法、模拟退火算法、神经网络等,启发式算法不依赖于目标函数的梯度方法,因此收敛速率较高,且计算精度也较好。Yazdi 等^[33]提供了混合和声搜索算法,用于城市防洪排涝系统泵站群组优化调度模型的求解。邓浩^[34]应用粒子群(PSO)计算、遗传算法(GA)和改进的遗传算法(IAGA)的综合优化方法,研究了汾河太原地区段梯级闸坝联合调节问题的最佳调度方法。Yan 等^[35]以密云水库调蓄水工程团城湖至怀柔水库段 6 个泵站群组为例,将多目标粒子群优化算法运用于梯级泵站多目标最优控制模型。

4.2 城市防洪排涝调度系统

防洪调度过程复杂、责任重大,既需要实时的防汛信息,还需要在气象预报的基础上做出合理的洪

水预测,最终制订可行的防洪调度方案,保障人民生命财产安全。作为重要的城市雨水系统非工程措施,国内外开展了许多关于城市防洪排涝系统理论研究和软件开发工作。如 Demir 等^[36]基于 Web 开发了爱荷华州洪水信息系统 (IFIS) 平台,可为爱荷华州的 1 000 多个社区提供实时的洪水淹没地图、实时洪水状况、洪水预报、洪水相关数据和交互式可视化的访问。Canillo 等^[37]集成机器学习算法构建印尼曼尼拉市的实时洪水管理系统,实现了动态的洪水风险可视化和预测。国内对城市防洪排涝调度系统的研究起步相对较晚,从 20 世纪 80 年代起,除 7 大流域机构及各省层面级的洪水预报调度、预警预报、防汛抗旱指挥、防洪决策支持等系统外,先后有多个城市研发了防洪调度系统平台,在实际工作运用中取得了显著效果。陈琳健^[38]构建了景德镇市综合洪水风险管理决策支持系统,内容包括综合洪水风险决策支持系统总体设计、景德镇市水情监测与处理、流域实时洪水预报模型开发、城市雨洪模型开发、洪水淹没要素计算模型开发、浯溪口优化调度方案编制、建立洪灾经济损失分析方法及洪水应急预案和响应规程更新等。邹明忠等^[39]以江阴市月城马甲圩圩区为研究对象,采用 Delft-FEWS 平台框架,集成圩区河网精细化模型和水文气象监测信息,开发马甲圩防洪调度预警预报系统,实现马甲圩多方案调度预警预报,并对预报降雨、圩区水位、排涝泵站状态在预报期的动态变化及统计进行可视化展示,评估调度洪涝防控效果,最终实现圩区智慧化调度管理,提升圩区调度综合管理决策能力。张金萍等^[40]基于 InfoWorks ICM 模型构建郑州市金水区的某片区内涝模型,分析极端暴雨情景下的城市管网排水能力和内涝积水特征,基于 ArcGIS 网络分析模块评估公安、医疗和消防 3 类单一和组合应急服务部门的应急可达范围和响应时间,以此确定城市应急响应能力。

5 结论与展望

(1)目前国内外城市雨水系统性能评估内容主要可分为对绿色基础设施的评估和对管网等灰色基础设施的评估,暂无研究考虑将城市河湖水系作为调蓄设施纳入城市雨水系统性能综合评估的方案。将蓝色基础设施纳入城市雨水系统现状调蓄能力评估,基于绿灰蓝基础设施融合理念,全面进行城市雨水系统调蓄能力评估是未来需要深入研究的方向。

(2)目前国内外城市雨水系统优化的研究工作主要分为绿色基础设施的设计参数优化及布局优

化、管网等灰色基础设施的平面布局优化及管径埋深优化,两者的优化分别单独展开,工程造价在优化算法中往往作为目标函数,而不是约束条件,得到的优化方案往往难以在实际层面操作,也可能造成工程量上的浪费。将基于水文水动力学原理的城市洪涝模型与代理模型相结合,绿色基础设施与排水管网的优化算法相结合,将工程造价作为约束条件、将水文表现作为算法目标构建城市防洪工程措施优化方案是目前的研究趋势。

(3)目前国内外防洪优化调度系统构建中城市内涝计算多基于分布式水文模型,而城市区域内用地类型复杂、人工水利设施众多,分布式水文模型计算结果无法满足今天城市精细化管理的需求。就系统总体而言,城市防洪排涝调度系统目前仍缺乏一定的水文学机理支撑。基于水文水动力耦合模型着手构建数据融合、流域和城市一体,模拟和调度一体的城市防洪排涝调度模型研究是需要进一步研究的课题。

参考文献:

[1] 黄国如. 城市暴雨内涝防控与海绵城市建设辨析[J]. 中国防汛抗旱, 2018, 28(2): 8-14.

HUANG G R. Discrimination of relationship between urban storm waterlogging prevention and sponge city construction [J]. China Flood & Drought Management, 2018, 28(2): 8-14.

[2] 刘家宏,裴羽佳,梅超. 郑州“7·20”特大暴雨内涝成因及灾害防控[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(2): 38-45.

LIU J H, PEI Y J, MEI CH, et al. Waterlogging cause and disaster prevention and control of "7·20" torrential rain in Zhengzhou [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44(2): 38-45.

[3] BROWDER G, OZMENT S, REHBERGER BESCOS I, et al. Integrating green and gray: creating next generation infrastructure[J]. World Resources Institute, 2019: 15-27.

[4] BARLOW D, BURRILL G, NOLFI J R. A research report on developing a community level natural resource inventory system [M]. Burlington: Center for Studies in Food Self-Sufficiency, 1977.

[5] WHELANS C, MAUNSELL H G, THOMPSON P. et al. Planning & management guidelines for water sensitive urban (residential) design: consultants report prepared for the department of planning and urban development, the water authority of western australia and the environmental protection authority[R/OL]. (1994-03-01)[2022-10-02]. ht-

- tps://books.google.com.sg/books?id=VqH2rQEACAAJ 19.
- [6] CHARLESWORTH S M, BOOTH C A. Sustainable surface water management: a handbook for SuDS [M]. New York: Wiley, 2016.
- [7] STOVIN V, POË S, DE-VILLE S, et al. The influence of substrate and vegetation configuration on green roof hydrological performance [J]. *Ecological Engineering*, 2015, 85: 159–172.
- [8] 麦叶鹏, 黄国如, 解河海, 等. 基于 Hydrus-1D 模型的 LID 措施雨水径流控制效应研究 [J]. *水利学报*, 2022, 53(7): 811–822.
- MAI Y P, HUANG G R, XIE H H, et al. Study on rain-water runoff control effect of LID measures based on Hydrus-1D [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(7): 811–822.
- [9] TANG S J, JIANG J P, ZHENG Y, et al. Robustness analysis of storm water quality modelling with LID infrastructures from natural event-based field monitoring [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 753: 142007.
- [10] HU M C, ZHANG X Q, LI Y, et al. Flood mitigation performance of low impact development technologies under different storms for retrofitting an urbanized area [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 222: 373–380.
- [11] LI Q, WANG F, YU Y, et al. Comprehensive performance evaluation of LID practices for the sponge city construction: a case study in Guangxi, China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 231: 10–20.
- [12] YE C L, XU Z X, LEI X H, et al. Simulation of pipeline network drainage at urban community scales based on SWMM: a case study in Fuzhou City [J]. *South-to-north Water Transfers and Water Science & Technology*, 2022, 20(2): 271–280.
- [13] SIMONS F, BUSSE T, HOU J M, et al. A model for overland flow and associated processes within the hydroinformatics modelling system [J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2014, 16(2): 375–391.
- [14] 侯精明, 董美君, 李东来, 等. 超标暴雨下城市雨水管网排水效果——以西安市沣西新城为例 [J/OL]. *地球科学与环境学报*, 2022; 1–10 (2022-09-07) [2022-10-06]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1423.P.20220906.1637.001.html>.
- HOU J M, DONG M J, LI D L, et al. Drainage effect of urban drainage-pipe network under extreme rainstorms——taking Fengxi New City in Xi'an City, China as an example [J/OL]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2022; 1–10 (2022-09-07) [2022-10-06]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1423.P.20220906.1637.001.html>.
- [15] GOURI R L, SRINIVAS V V, SOUMYA S N, et al. Impact assessment of land-use/land-cover changes on hydrology and storm water drain network in yelhanka watershed, Bangalore [M]// *Lecture Notes in Civil Engineering*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 279–291.
- [16] DUAN H F, XICHAO G. Flooding control and hydro-energy assessment for urban stormwater drainage systems under climate change [J]. *Water Resources Management*, 2019: 105–116.
- [17] GRIP I, HAGHIG H S, ASPEGREN H. A methodology for the assessment of compound sea level and rainfall impact on urban drainage networks in a coastal city under climate change [J]. *City and Environment Interactions*, 2021, 12: 100074.
- [18] URICH C, BACH P M, SITZENFREI R, et al. Modeling Cities and water infrastructure dynamics [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability*, 2013, 166(5): 301–308.
- [19] BEN-DAOUD A, BEN-DAOUD M, MOROSANU G A, et al. The use of low impact development technologies in the attenuation of flood flows in an urban area: Settat City (Morocco) as a case [J]. *Environmental Challenges*, 2022, 6: 100403.
- [20] 李尤, 邸苏闯, 潘兴瑶, 等. 基于改进层次分析法的 LID 空间布局优化研究 [J]. *中国给水排水*, 2020, 36(23): 113–120.
- LI Y, DI S C, PAN X Y, et al. Spatial layout optimization of low impact development based on improved analytic hierarchy process [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(23): 113–120.
- [21] XU Z X, LI P, CHENG T. LID optimization layout facilities in sponge city: a case study of Huangtaiqiao Catchment in Jinan City [J]. *South-to-north Water Transfers and Water Science & Technology*, 2022, 20(3): 552–562.
- [22] LATIFI M, RAKHSHANDEHROO G, NIKOO M R, et al. A game theoretical low impact development optimization model for urban storm water management [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 241: 118323.
- [23] LU W, XIA W, SHOEMAKER C A. Surrogate global optimization for identifying cost-effective green infrastructure for urban flood control with a computationally expensive inundation model [J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(4): 72–80.
- [24] HAGHIGHI A. Loop-by-loop cutting algorithm to generate layouts for urban drainage systems [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2013, 139(6): 693–703.

- [25] BAKHSHIPOUR A E, BAKHSHIZADEH M, DITTMER U, et al. Hanging gardens algorithm to generate decentralized layouts for the optimization of urban drainage systems[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2019, 145(9):66-80.
- [26] BAKHSHIPOUR A, HESPERN J, HAGHIGHI A, et al. Integrating structural resilience in the design of urban drainage networks in flat areas using a simplified multi-objective optimization framework[J]. *Water*, 2021, 13(3): 269.
- [27] 李芊, 张明媛, 袁永博. 基于 MOPSO 的雨水管网多目标改建优化[J]. *给水排水*, 2016, 52(5): 127-131.
LI Q, ZHANG M Y, YUAN Y B. Multi-objective reconstruction optimization of rainwater pipe network based on MOPSO[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2016, 52(5): 127-131.
- [28] 杨祺祺, 张书亮, 戴强, 等. 基于 SWMM 和改进差分进化算法的雨水管网优化方法[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(17): 115-119, 124.
YANG Q Q, ZHANG S L, DAI Q, et al. Optimization of rainwater pipe network based on SWMM and improved algorithm of differential evolution [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(17): 115-119, 124.
- [29] 方威根. 城市雨水管网多目标优化设计及韧性评估研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
FANG X G. Investigating the multi-objective design and resilience of urban drainage design problems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [30] 郑恺原, 向小华. 基于 SWMM 和 PSO-GA 的多目标雨水管网优化模型[J]. *水利水电技术*, 2020, 51(9): 24-33.
ZHENG K Y, XIANG X H. SWMM and PSO-GA-based multi-objective optimization model for rainwater pipeline network[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(9): 24-33.
- [31] 李小平, 邱元锋, 罗金耀, 刘志标, 李青, 胡进民. 广州市白云区岭南围排水系统优化调度研究[J]. *中国农村水利水电*, 2005(5): 23-26.
LI X P, QIU Y F, LUO J Y, et al. Study on optimal operation of drainage system in Lingnan enclosure of Baiyun District, Guangzhou[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2005(5): 23-26.
- [32] ZENG X, HU T S, CAI X M, et al. Improved dynamic programming for parallel reservoir system operation optimization[J]. *Advances in Water Resources*, 2019, 131: 103373.
- [33] YAZDI J, CHOI H S, KIM J H. A methodology for optimal operation of pumping stations in urban drainage systems [J]. *Journal of Hydro-Environment Research*, 2016, 11: 101-112.
- [34] 邓浩. 基于优化算法的梯级闸坝联合调度方法分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
DENG H. Analysis of combined operation method of cascade sluice and dam based on optimization algorithm [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.
- [35] YAN P R, ZHANG Z, LEI X H, et al. A multi-objective optimal control model of cascade pumping stations considering both cost and safety[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 345: 131171.
- [36] DEMIR I, KRAJEWSKI W F. Towards an integrated Flood Information System: centralized data access, analysis, and visualization [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2013, 50: 77-84.
- [37] CANILLO L J L, HERNANDEZ A A. Flood risk visualization and prediction information system: case of city Manila, Philippines [C]//2021 IEEE 17th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications. Piscataway: IEEE, 2021: 59-63.
- [38] 陈琳健. 景德镇市综合洪水风险管理决策支持系统开发方案研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2016.
CHEN L J. Development scheme of decision support system for integrated flood risk management in Jingdezhen City[D]. Nanchang: Nanchang University, 2016.
- [39] 邹明忠, 缪岳军, 张丽, 等. 圩区防洪调度预警预报系统: 以江阴市马甲圩为例[J]. *水利信息化*, 2020(4): 63-67.
ZOU M Z, MIAO Y J, ZHANG L, et al. Flood dispatch control and early warning system in polder area—taking Majia Polder Area in Jiangyin City as an example [J]. *Water Resources Informatization*, 2020(4): 63-67.
- [40] 张金萍, 张朝阳, 左其亭. 极端暴雨下城市内涝模拟与应急响应能力评估[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2023, 44(2): 30-37.
ZHANG J P, ZHANG C Y, ZUO Q T. Urban waterlogging simulation and emergency response capacity evaluation under extreme rainstorms [J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2023, 44(2): 30-37.

University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Network node embedding is mapping nodes in a network to a low-dimensional vector representation, so that vector space-based learning methods can be directly applied to handle downstream tasks such as link prediction. Most of the existing network node embedding models were for unsigned networks and could not be directly used to deal with signed networks (usually need to be converted into unsigned networks for processing, thus discarding a lot of valuable information embedded in the positive and negative signs on the edges). A node embedding model (SNEDA) based on graphical neural networks was proposed that could directly deal with symbolic networks. Based on structural balance theory and status theory, the paths between nodes were divided into 20 different motif structures according to the direction and the positive and negative information on the edges. A network propagation model was designed with two levels of attention mechanism, which could capture the contribution and influence of different neighboring nodes to the vector representation of node i by node-level attention mechanism when aggregating the direct neighboring information of node i , and captured the vector representation of different motif to node i by path-level attention when aggregating the second-order and higher-order neighboring information of node i . A two-level attention mechanism was introduced to integrate different contributions and influences at the node level and path level, which could it not only improve the time efficiency of the algorithm but also make the final vector representation of node i more beneficial to improve the prediction accuracy of the downstream link prediction task. Through experiments conducted on four real social network datasets, the SNEDA model improved the AUC and $F1$ metrics by about 3.1% and 1.1%, respectively, compared with the benchmark model, and the results showed that the network representation obtained by the model could improve the accuracy of link prediction.

Keywords: signed network; graph neural network; graph attention networks; network embedding; link prediction

(上接第 21 页)

Urban Flood Disaster Control Based on Green-gray-blue Infrastructure Integration

HUANG Guoru^{1,2}, YANG Ge¹, ZENG Bowei¹, LYU Yongpeng³, REN Xinxin⁴

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 4. Urban Planning & Design Institute of Shenzhen, Shenzhen 518049, China)

Abstract: With the increasingly severe urban waterlogging situation, It was difficult for rainwater management with rainwater pipe network and other grey infrastructures for terminal rapid drainage to solve the problem of urban waterlogging fundamentally. And combining the green, grey and blue infrastructure organically could besides on ensuring that urban floods were effectively solved, systematically solve multi-scale problems such as water pollution and water shortage. Based on the concept of green-grey-blue infrastructure integration, this study reviewed the comprehensive evaluation of urban stormwater system status, the optimization of urban stormwater system, and urban flood control and drainage scheduling. In terms of urban stormwater system assessment, the performance assessment of low impact development system with green infrastructure as the main body and the performance assessment of urban stormwater pipe network system with gray infrastructure as the main body were reviewed. In terms of urban stormwater system optimization, the optimization of design parameters and layout of green infrastructure and the optimization of plan layout and pipe diameter depth of gray infrastructure such as pipe network was reviewed; in terms of urban flood prevention and drainage scheduling, the study of urban flood prevention and drainage was reviewed. In urban flood control and drainage scheduling, the research on urban flood control and drainage scheduling methods and urban flood control and drainage scheduling systems were also reviewed.

Keywords: green-grey-blue infrastructure; layout optimization; surrogate model; flood control and drainage operation