

葛晓光, 李子阳, 张建良, 等. 基于“蓄排平衡”的城市市政-水利综合排涝探究与实践[J]. 净水技术, 2024, 43(11): 141-147.

GE X G, LI Z Y, ZHANG J L, et al. Exploration and practice of urban municipal water conservancy comprehensive drainage based on "storage and drainage balance" [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(11): 141-147.

基于“蓄排平衡”的城市市政-水利综合排涝探究与实践

葛晓光¹, 李子阳¹, 张建良¹, 周倩倩^{2,*}

(1. 广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东广州 510507; 2. 广东工业大学土木与交通学院, 广东广州 510506)

摘要 在气候变化和城市化的共同影响下, 极端暴雨天气愈演愈烈, 加之排涝除险技术体系尚不完善, 系统韧性不足, 导致城市洪涝灾害频发, 严重影响了社会经济和居民生活, 目前亟需提出符合现代化城市建设需求的排水防涝设施建设方案。针对上述普遍性问题, 文章介绍了一种基于“蓄排平衡”的市政-水利综合排涝体系, 综合市政内涝防治系统、水利防洪排涝系统、超标应急控制系统和保障措施, 利用城市自身规划条件, 结合城市地形地貌、竖向标高、水系分布和洪潮分析等多重影响因素, 对内涝风险区进行竖向标高调节、水系治理和调蓄设施建设等, 达到城市水体的“蓄排平衡”状态。该方法通过探究市政内涝防治系统和水利防洪排涝系统在标准衔接上的共通之处, 统筹两系统排水防涝设施的建设, 实现市政与水利系统在水量和水位上的衔接, 最终提出了基于“蓄排平衡”的衔接方法。研究以南方沿海某生态环境治理工程为依托, 借助该区域市政系统与水利系统的水利模型, 构建城市内涝防治体系。案例结果显示, 基于“蓄排平衡”的市政-水利综合排涝体系可以在城市内涝防治中优化排涝设施的布局, 有效缓解城市内涝灾害, 为国内其他城市类似项目提供参考。

关键词 蓄排平衡 内涝防治 市政-水利综合排涝 衔接 内涝风险评估

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2024)11-0141-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.11.018

Exploration and Practice of Urban Municipal Water Conservancy Comprehensive Drainage Based on "Storage and Drainage Balance"

GE Xiaoguang¹, LI Ziyang¹, ZHANG Jianliang¹, ZHOU Qianqian^{2,*}

(1. Guangdong Provincial Transportation Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Guangzhou 510507, China;

2. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510506, China)

Abstract Under the combined influence of climate change and urbanization, extreme rainfall events have become more severe. In addition, the technical system of flood control is not perfect and not flexible enough, leading to frequent urban flooding, which has significant impact on socio-economic development and residents' lives. Currently, there is an urgent need to propose drainage facility construction plans that meet the needs of modern urban construction. To address aforementioned problems, this paper introduced a comprehensive municipal-conservancy drainage system based on the principle of "storage and drainage balance". It integrated the urban flood prevention and control system, the water conservancy flood control and drainage system, over standard emergency control system, and guarantee measures. Considering the city's own planning conditions, combined with multiple influencing factors (e.g., urban topography, vertical elevation, water system distribution, and flood tide analysis), vertical elevation adjustment, water system management, and storage facility construction were carried out in areas with flood risk, ultimately achieving the "storage and discharge balance" state of urban water bodies. This method explored the commonalities in the standard connection between urban flood prevention and control system and the water conservancy flood control and drainage system, coordinated the construction of drainage and flood control facilities in both systems, achieved the connection between the urban and water conservancy systems in terms of water volume and level, and ultimately proposed the use of the "storage and discharge balance" connection method. Based on an ecological

[收稿日期] 2024-03-22

[基金项目] 广东省自然科学基金青年提升项目(2023A1515030126)

[作者简介] 葛晓光(1987—), 硕士, 高级工程师, 研究方向为市政给水排水及雨洪管理, E-mail: leoxg@foxmail.com。

[通信作者] 周倩倩(1984—), 博士, 教授, 研究方向为城市排水洪涝模拟和风险管理、人工智能和深度学习, E-mail: qiaz@foxmail.com。

environmental management project along the south coast, this study constructs an urban flood prevention and control system using the water conservancy model of the urban and water conservancy systems in the region. The case results showed that the municipal water conservancy comprehensive drainage system based on "storage and discharge balance" could optimize the layout of drainage facilities in urban flood prevention and control, effectively alleviate urban flood disasters, and provide reference for similar projects in other cities in China.

Keywords storage and drainage balance flood prevention and control municipal water conservancy comprehensive drainage connection flood risk assessment

在许多高度城市化的地区,城市内涝是一个严重的问题^[1]。传统的城镇内涝防治通常只考虑市政管道的排涝功能,既缺少对市政排涝设施的总体规划统筹,也未考虑与水利排涝相衔接,导致内涝防治中水利系统与市政系统的衔接之间存在着矛盾,在此形势下,市政-水利结合的城市排涝体系开始受到人们的广泛关注。现有城市市政内涝防治系统主要为地下管线系统,少有考虑地表排水系统、超标标准地面径流控制等措施,未能统筹与水利排涝的衔接,导致城市水系排涝压力过大。水利防洪排涝系统是解决城镇内涝的重要基础,现有排涝沟为市政排水系统的承泄区,是水利排涝系统的重要组成,但大部分排沟设计标准偏低,加上淤积堵塞等因素,造成主排沟过水严重不足。提高内涝标准,解决内涝问题,就需要与城市水体的水利设施相结合,与其水位合理调度相结合^[2],需要从城镇水资源综合管理的角度出发,统筹规划城镇各个水系统的衔接^[3]。为此,研究提出了“蓄排平衡”的城市综合排涝体系,通过结合城市地形地貌、竖向标高、蓄水设施和洪潮分析等进行系统性布局和分析。通过利用 InfoWorks ICM 对城市排水管网系统和河流系统进行建模,表征研究区域内的内涝空间风险等级,通过调控竖向标高、调蓄空间等,细化了市政与水利系统的排涝措施,为城市内涝防治工程提供了参考。

1 方法论

在市政与水利管辖范围有交叉的地区,城市内涝防治问题必须要综合考虑市政内涝防治系统和水利防洪排涝系统,然而两者在衔接上存在管理部门、设计标准、计算方法等差异。因此,城市的内涝防治需充分考虑市政与水利系统的衔接。如图 1 所示,通过综合市政内涝防治系统、水利防洪排涝系统、超标应急控制和保障措施,得出城市内涝风险区划分,以系统性评估城市在极端暴雨条件下内涝风险情况,再通过结合城市规划条件,对内涝风险区进行竖

向标高调节、水系治理和调蓄设施建设等达到城市的“蓄排平衡”状态。

1.1 问题导向

研究方法适用于城市市政系统与水利系统有衔接的内涝防治项目,市政内涝防治主要是基于城镇尺度的空间管理,针对城市雨水径流量的控制措施,主要归属于城市住建局管理。水利排涝主要是从流域的尺度对范围内的降雨量进行管理,确保水系水位,保障城市排水安全,主要归属于城市水务局管理。

近年来,我国城市的《室外排水设计标准》《城乡排水工程项目规范》,水利的《治涝标准》《防洪标准》逐渐实现统筹,但目前上述标准中同一级别城市对应的不同标准重现期仍然差异较大。市政排水计算主要针对短历时、强降雨的瞬时流量计算,注重对径流过程的控制^[4],水利排涝主要针对长历时降雨与退水时间的计算,注重对水系水位的控制,二者计算方法上的差异导致城市水系和雨水管道之间设计流量不匹配问题较为突出。以某项目为例,到 2025 年,要求雨水管道设计重现期是 3 年一遇,应对 1 h 的短历时强降雨,在排水标准的降雨下不允许地面出现积水;内涝防治标准是 30 年一遇,应对 3~24 h 的长历时强降雨,允许地面出现一定深度积水,并根据城市能承受的程度明确最大允许退水时间,一般为 1~3 h;治涝标准是 20 年一遇 24 h 暴雨 1 d 路/地面水排干;防洪标准是 100 年一遇,应对数日至数月的长历时降雨。这些标准针对对象不同,对应的降雨历时和强度、水文数据统计方法、设施计算方法都不一样。因此,市政和水利治涝系统不能单纯从标准值上进行耦合^[5],需要对其衔接关系进行全面、定量分析,保证两系统衔接通畅。

1.2 城市内涝风险评估

如图 2 所示,研究采用水力模型对城市内涝进行评估,通过对排水管网系统、河道系统的模拟反应



图1 问题导向

Fig. 1 Problem Orientation

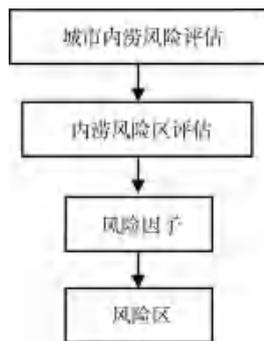


图2 城市内涝风险评估

Fig. 2 Urban Flood Risk Assessment

内涝情况,系统性评估研究区的内涝风险^[6]。在水利模型分析中采用简化的方法近似模拟研究区流域的水文特征(如径流通道、城市低洼易涝点等),从而获得对致涝因子危险性的大致描述。研究区的内涝风险等级评估主要依据水利模型数据和电子地图(如用地类型和等级、空间分布等),对主要载体(如居民区、公共建筑、工业区、交通设施、商业区等)进行内涝风险等级描述。最终结合相关规范指标进行空间分析,计算研究区的内涝风险等级分布图,划分内涝治理的优先级,识别研究区内涝灾害严重、易发的地区。并根据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)、《治涝标准》(SL 723—2016)以及《城镇内涝治理系统化实施方案(2021—2025年)》,将内涝风险总体划分为3类:低风险区、中风险区和高风险区。

1.3 “蓄排平衡”内涝治理体系的构建

基于“蓄排平衡”的市政-水利综合排涝体系的构建,需对两系统分别分析后再进行统筹衔接(图3)。市政内涝防治系统、水利排涝系统是城市内涝防治的2个基本系统,两系统通过城市内河、湖泊等“蓄”的作用减缓城市排水峰值流量对排涝流量的影响,从而实现系统上的衔接。同时,通过陆域设置有调蓄功能的设施,控制排入城市水体的径流总量和径流峰值,实现市政内涝防治与水利排涝上的统筹,形成城市市政系统与水利系统的有效衔接,确保城市满足地面积水标准和退水时间要求。

具体操作层面,两系统在规划上应统筹计算排涝水量,实现在水量和水位上的统筹衔接。在水利防洪排涝规划中应合理设计排涝工程布局 and 规模,确定合理的设计洪峰流量、时段洪量和洪水过程线,为城市提供内涝防治系统规划的边界。城市内涝防治系统以洪水过程线为规划边界,合理布局排水管道竖向标高、雨水管径和蓄水空间,实现对城市雨水径流总量、峰值等多重目标的控制。

市政上对地面竖向标高进行调节^[7]、管道竖向标高进行调节^[8]、雨水调蓄设施合理布设和提升,水利上对水系进行综合治理、建设强排措施等方式降低水系水位,有效缓解排水管网和排涝沟渠的压力^[9],实现市政排水系统与水利排涝系统的衔接。以存蓄水量和管配水系水位对城市的“蓄排平衡”内涝治理体系进行评估,形成完善的市政-水利综

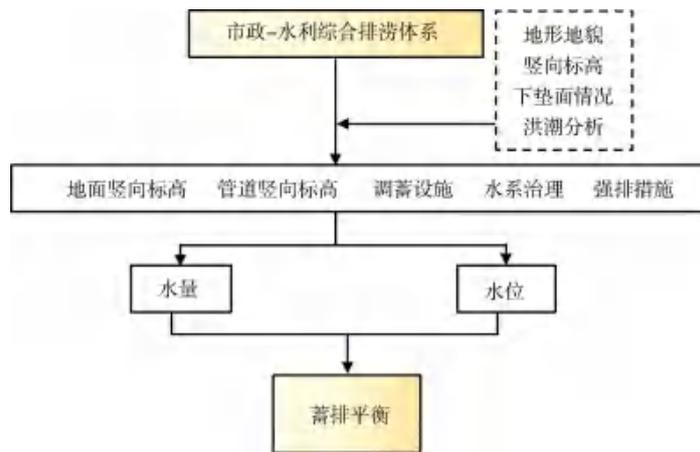


图3 “蓄排平衡”内涝治理体系的构建

Fig. 3 Construction of Flood Control System of "Storage and Drainage Balance"

合排涝系统,为城市内涝防治提供高效、精准的治理及防控措施。

2 案例分析

2.1 区域概况

项目依托南方某沿海城市生态环境治理工程,研究区是其示范片区,流域面积为 136 km²,平均高潮位为 1.46 m,历史最高潮位为 3.51 m。多年平均降水量为 1 608 mm,最大年降雨量为 2 507 mm。如图 4 所示,研究区域内,地势北高南低,防涝问题突出,存在外邻海域,内部地质低洼及山水下流等诸多问题。现拟将雨水分区排放,主要收纳水体为内江、内河涌和海湾。研究区内已建设雨水管 21.5 km,未建设蓄水设施,片区内有低级汇流路径 1 条,中级汇流路径 4 条,高级汇流路径 1 条,河道宽度为 6~42

m,通过汇流路径分析,自然汇水方向基本是汇入内江、内海湾及外海。片区内透水率较高的下垫面占比为 23.13%,透水性较差的硬质化下垫面占比为 55.80%,不产生径流的水域占比为 21.07%,可透水率为 39.88%,综合径流系数为 0.47。片区 3 年和 30 年重现期的暴雨强度计算如式(1)~式(2)。

$$q = 2\,684.191 \times (t + 9.172)^{-0.659} \quad (1)$$

$$q = 2\,681.519 \times (t + 5.926)^{-0.559} \quad (2)$$

其中: q ——设计暴雨强度, L/(hm²·s);

t ——降雨历时, min。

2.2 研究过程

按照现状的下垫面情况和设计降雨雨型,通过选取合适的暴雨历时分配方法以及产汇流计算方法,采用 InfoWorks ICM 模型软件对雨水管道、二维

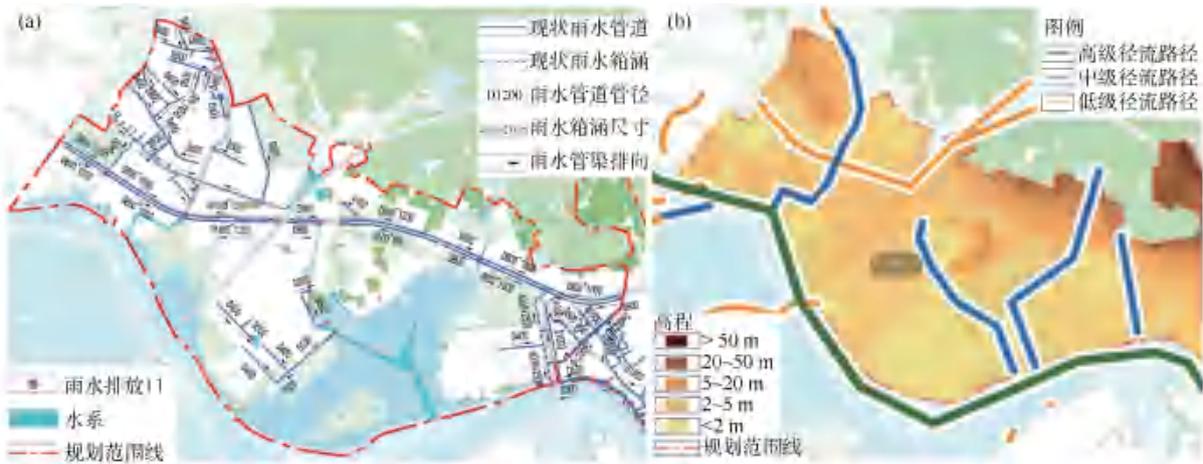


图4 (a) 现状雨水管网; (b) 现状径流路径分布

Fig. 4 (a) Existing Rainwater Pipeline Network; (b) Existing Runoff Path Distribution

城市地表模型及河道模型进行耦合后开展模拟,分析地表产流、汇流特性和管网流动排放的特性,综合城市地表积水时间和积水深度进行双因子评估。

采用 InfoWorks ICM 模型软件评估区域内管道的排水能力,模型评估 3 年一遇 2 h 降雨,结果如图 5(a) 所示,未达标的管道占比为 38.78%,现状示范片区近 40% 的雨水管无法满足要求。采用 30 年一遇 24 h 暴雨 2 h 排干评估区域内管道的排水能力,内涝风险等级划分如表 1 所示,内涝点分布如图 5(b) 所示,片区主要内涝风险点有 4 处。内涝高风险

区域表示其在遭受 30 年一遇降雨时产生内涝的可能性较高。图 5(b) 中,内涝高风险区占比为 0.31%,中风险区占比为 0.67%,低风险区占比为 0.05%,内涝区域面积总占比为 1.03%,内涝高风险区主要集中在地势低洼、建筑密集和农田等区域。通过进行现场调研归纳,现状研究区内涝点分布与风险图反映的空间位置基本一致。采用 20 年一遇 24 h 暴雨 1 d 地面水排干的标准,对区域内河涌排涝水位进行模拟,以确定市政与水利系统衔接的边界条件。



图 5 (a) 现状雨水管网排水能力评估; (b) 现状内涝风险分布

Fig. 5 (a) Assessment of Drainage Capacity of Existing Rainwater Pipeline Network; (b) Existing Flood Risk Distribution

表 1 内涝风险等级划分

Tab. 1 Classification of Flood Risk Levels

内涝深度/m	内涝时间/min		
	0~30	30~60	60~120
0.15~0.30	低风险区	中风险区	中风险区
0.3~0.50	中风险区	高风险区	高风险区
>0.15	高风险区	高风险区	高风险区

2.3 结果与讨论

研究区内涝防治系统较为薄弱,且受当地平均潮水位影响,地块雨水无法顺利排入内江。在极端天气下,研究区存在严重的城市排水、蓄水能力不足,市政内涝防治系统和水利防洪排涝系统没有形成有效衔接,存在较大内涝风险。以图 5 为例,①处为内涝高风险区,该处雨水主要排放至内河涌 A,内河涌 A 的 20 年一遇排涝水位为 3.00 m,该处洪水流量为 23.66 m³/s,根据模型测算,该处若要满足遭遇 3 年一遇降雨地面不积水和 30 年一遇暴雨不内涝,需使得排出口处管道管径达到 DN1800、管理深需

3.0 m,根据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)的规定,该地块平均路面标高需达到 4.8 m,方可以自排的形式汇入到内河涌 A 中。结合周边地块实际标高与规划标高,本次地块路面标高设定为 3.8 m,为满足雨水排放需要,需考虑增加建设雨水调蓄设施。调蓄设施需根据当地的技术条件、经济条件和地方特色选用,本次选用下凹式绿地、透水铺装和蓄水池等调蓄设施。在本次设计中,道路绿化带均设置为下凹式绿地,人行道均采用透水铺装,经软件计算,在 3 年一遇的降雨条件下,雨水下渗率增加 13.1%,排出口雨水量减少 11.7%;在口袋公园下方设置一座雨水调蓄池,蓄水容积为 1 200 m³。设置蓄水设施后,经模型测算,排出口管径 DN1500、管道内流量为 3.54 m³/s、管埋深需 2.5 m,推算排出口路面需标高 3.8 m,满足利用自排汇入到内河涌 A 的要求。内河涌 A 汇入到外江中,外江 100 年一遇防洪水位为 3.50 m。因此,需在河涌汇入口设置强排措施,本案例设置一座强排泵站,在暴雨时通过泵站强排对内河涌 A 和外江进行衔

接,保证城市的排水体系通畅。其他内涝点均可以此方法进行优化布设,具体数据如表2所示。

表2 内涝防治系统参数

Tab. 2 Parameters for Flood Prevention and Control System

序号	排放河涌	河涌水位/m	排出口地面标高/m	新增蓄水面积/m ³	防洪水位/m
①	A	3.00	3.80	1 200	3.50
②	A	3.00	3.66	-	3.50
③	B	2.85	3.70	900	3.50
④	C	2.4	3.61	600	3.48

本项目依据内涝风险等级对市政内涝防治系统和水利防洪排涝系统进行调节,对高风险地区进行优先治理;对中低风险区,按照子分区的内涝风险程度进行相应的市政、水利系统调节顺序。通过提高片区地块的竖向标高、建设海绵设施进行源头减排、按重现期3年一遇以上标准建设雨水管道、增设蓄水池、建设强排泵站等措施对市政-水利综合排涝系统进行有效衔接,以达到城市的“蓄排平衡”状态。经调节后的高、中、低内涝风险区全部移除,满足该片区内涝防治要求。该方案已用于市政、水利等相关管理部门的协调沟通,效果良好,结合了市政-水利排涝系统的“蓄排平衡”模式对城市内涝治理的效率高、精准度高、针对性强。

3 结论

目前,我国很多城市都处于内涝治理的严峻阶段,很多治理方案缺乏科学、系统的规划指引,往往只是单独对市政或是水利系统进行整治,忽视了市政-水利系统的综合考量,且市政排水归属于住房城乡建设部指导,水利防洪归属于水利部门指导,管理部门不一导致的相关问题,造成了严重的投资浪费。本研究统筹市政和水利的设计规范、标准,以水利洪水线为城市内涝防治系统的规划边界,通过工程措施对两系统进行有效衔接,为城市内涝防治提供了高效、精确的解决方法。

基于“蓄排平衡”的市政-水利综合排涝系统旨在提高城市对内涝防治的科学性,通过对市政排水、内涝防治标准与水利治涝、防洪标准进行衔接,统筹计算排涝水量,实现在市政排涝水位与水利防洪排涝水位上的衔接,为城市市政-水利综合排涝体系提供依据,同时以此协调市政、水利、应急等各管理部门,构建市政-水利一体的综合排涝体系。本研究依托南方某沿海城市生态治理项目,结合了市政-水利综合排涝系统的理念,通过对该地区管道

竖向标高和蓄水空间布局等多方面进行调控,消除了中、高内涝风险区,有效降低了风险区面积,验证了“蓄排平衡”的市政-水利综合排涝系统在工程应用中的可行性,为其他地区内涝治理提供新的参考。

参考文献

- [1] CHENG M, QIN H P, FU G T, et al. Performance evaluation of time-sharing utilization of multi-function sponge space to reduce waterlogging in a highly urbanizing area[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 269: 110760. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110760.
- [2] 唐建国. 城市雨水排水系统提标改造与建设途径[J]. 给水排水, 2021, 47(5): 1-6.
TANG J G. Upgrading and constructing ways of urban rainwater drainage system[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(5): 1-6.
- [3] 刘广奇, 孔彦鸿, 周广宇, 等. 城市低影响开发与水系联调系统治涝研究及应用[J]. 中国给水排水, 2022, 38(12): 107-112.
LIU G Q, KONG Y H, ZHOU G Y, et al. Research and application of urban low impact development and water system joint adjustment system for flood control[J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(12): 107-112.
- [4] 周倩倩, 冯军满, 覃钊, 等. 基于GIS和SWMM的精细化水文表征方法[J]. 中国给水排水, 2023, 39(7): 126-132.
ZHOU Q Q, FENG J M, QIN Z, et al. Refined hydrological characterization method based on GIS and SWMM[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(7): 126-132.
- [5] 张辰, 章林伟, 莫祖澜, 等. 新时代我国城镇排水防涝与流域防洪体系衔接研究[J]. 给水排水, 2020, 46(10): 9-13, 58.
ZHANG C, ZHANG L W, MO Z L, et al. Discussion on coordination of control systems between urban flooding and river basin flooding in new era[J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(10): 9-13, 58.
- [6] 吴彦成, 丁祥, 杨利伟, 等. 基于InfoWorks ICM模型的陕西省咸阳市排水系统能力及内涝风险评估[J]. 地球科学与环境学报, 2020, 42(4): 552-559.

- WU Y C, DING X, YANG L W, et al. Evaluation of drainage system capacity and waterlogging risk in Xianyang City of Shaanxi Province based on InfoWorks ICM model[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2020, 42(4): 552–559.
- [7] ZHOU Q Q, LUO J H, QIN Z, et al. Conceptual planning approach of low impact developments for combined water quality-quantity control at an urban scale: A case study in Southern China[J]. *Journal of Flood Risk Management*, 15(1): e12760. DOI: 10.1111/jfr3.12760.
- [8] 高超. 牡丹江城市排水系统评估与防涝规划研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- GAO C. Research on assessment of urban drainage system and planning of waterlogging prevention in Mudanjiang City [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [9] 罗鸣, 叶兴成, 王以超, 等. 河道边界水位对管道排水能力的影响分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(3): 169–174.
- LUO M, YE X C, WANG Y C, et al. Impact analysis of river boundary water level on drainage capacity of pipeline [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2018, 29(3): 169–174.

(上接第 38 页)

- [53] OUYANG T, LIU W, SHI X, et al. Multi-criteria assessment and triple-objective optimization of a bio-anode microfluidic microbial fuel cell [J]. *Bioresource Technology*, 2023, 382: 129193. DOI: 10.1016/j.biortech.2023.129193.
- [54] MA F, YIN Y, PANG S, et al. A data-driven based framework of model optimization and neural network modeling for microbial fuel cells[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 162036–162049. DOI: 10.1109/access.2019.2951943.
- [55] FENG Y, BARR W, HARPER W F, JR. Neural network processing of microbial fuel cell signals for the identification of chemicals present in water [J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 120: 84–92. DOI: 10.1016/j.jenvman.2013.01.018.
- [56] KING S T, SYLVANDER M, KHEPERU M, et al. Detecting recalcitrant organic chemicals in water with microbial fuel cells and artificial neural networks [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 497: 527 – 533. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.07.108.
- [57] RAMON-FERNANDEZ A D, SALAR-GARCIA M J, FERNANDEZ D R, et al. Evaluation of artificial neural network algorithms for predicting the effect of the urine flow rate on the power performance of microbial fuel cells[J]. *Energy*, 2020, 213: 118806. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118806.
- [58] LIM C E, CHEW C L, PAN G T, et al. Predicting microbial fuel cell biofilm communities and power generation from wastewaters with artificial neural network [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 52: 1052 – 1064. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.08.290.
- [59] NASRABADI A M, MOGHIMI M. Energy analysis and optimization of a biosensor-based microfluidic microbial fuel cell using both genetic algorithm and neural network PSO [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(7): 4854–4867. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.11.125.
- [60] KIM Y, HATZELL M C, HUTCHINSON A J, et al. Capturing power at higher voltages from arrays of microbial fuel cells without voltage reversal[J]. *Energy & Environmental Science*, 2011, 4 (11): 4662–4667.
- [61] LEDEZMA P, GREENMAN J, IEROPOULOS I. MFC-cascade stacks maximise COD reduction and avoid voltage reversal under adverse conditions [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 134: 158–165. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.01.119.
- [62] GURUNG A, KIM J, JUNG S, et al. Effects of substrate concentrations on performance of serially connected microbial fuel cells (MFCs) operated in a continuous mode[J]. *Biotechnology Letters*, 2012, 34(10): 1833–1839.
- [63] NGUYEN C, TARTAKOVSKY B, WOODWARD L. Harvesting energy from multiple microbial fuel cells with a high-conversion efficiency power management system[J]. *ACS Omega*, 2019, 4 (21): 18978–18986.
- [64] KIM T, YEO J, YANG Y, et al. Boosting voltage without electrochemical degradation using energy-harvesting circuits and power management system-coupled multiple microbial fuel cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2019, 410: 171–178. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2018.11.010.