

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.12.014

基于政策与技术视角的城市水系统发展趋势分析

周广宇, 龚道孝, 莫 曜, 林明利
(中国城市规划设计研究院, 北京 100044)

摘 要: 2000年至今,城市涉水设施经历了从保障基本供应到提升服务品质,从分行业、分专业独立建设到多领域、多系统协同发展的过程,城市治水的系统观逐步建立,最终形成城市水系统理念,已经深刻融入到各地的城市建设发展过程中。简要回顾了城市水系统的理论形成与规划实践过程,并基于政策与技术角度,对城市水系统内各相关领域的可能的发展趋势进行了分析,包括更高品质的城市供水服务、更低碳的污水处理设施、更自然的内涝防治方式、更加统筹的区域防洪体系、更精准的城市节水策略、更完善的再生水输配系统以及更大规模的海水淡化利用,可为我国城市水系统事业的发展提供参考。

关键词: 城市水系统; 政策与技术; 发展趋势; 健康水循环

中图分类号: TU99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)12-0088-06

Analysis on Urban Water System Development Trend from the Perspective of Policy and Technology

ZHOU Guang-yu, GONG Dao-xiao, MO Li, LIN Ming-li
(China Academy of Urban Planning & Design, Beijing 100044, China)

Abstract: Since 2000, urban water infrastructures have experienced a development process from ensuring basic supply to improving service quality as well as from independent construction of different industries and specialties to coordinated development of multi-fields and multi-systems. In addition, the systematic concept of urban water control has been gradually established and eventually formed the concept of urban water system, which has been deeply integrated into the process of urban construction and development in various places. This paper briefly reviewed the theoretical formation and planning practice of urban water system, and analyzed the possible development trend of various related fields in urban water system from the perspective of policy and technology, which included drinking water service with higher quality, wastewater treatment facilities with lower carbon emission, more natural ways of waterlogging control, more integrated regional flood control systems, more accurate urban water-saving strategies, more sophisticated reclaimed water supply and distribution systems and a larger-scale desalination and utilization of seawater. The findings are expected to provide reference for the development of urban water system in China.

Key words: urban water system; policy and technology; development trend; healthy water circulation

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3001405)

供排水系统是保障城市运行的重要基础设施,在城市供排水系统的建设、发展过程中,新问题与新挑战不断出现,而同时,解决水问题的理念、方法与策略也在实践中不断发展,人们逐步认识到城市水问题的综合性以及供排水是一个相互联系、相互作用的整体,城市供排水系统也逐渐发展为“城市水循环系统”“城市水综合管理”或“城市水系统”^[1-4],城市治水系统观逐步形成,专业人员开始用系统方法来解决复杂的城市水问题。

1 理论建立与实践探索

2000年,邵益生在《城市水系统及其控制原理研究》中,首次在国内以系统科学的理论为指导,从自然科学与社会科学、理论探索与实证研究结合上,对水资源利用提出了“节流优先、治污为本、多渠道开源”的发展原则,并提出了我国城市水系统的建设发展策略^[5],奠定了城市水系统发展的理论基础。

2008年,《中新天津生态城水系统规划》(2008—2020年)基于保障未来城市供水与防洪防潮安全、改善盐碱化地区城市水环境治理的目标,制订了确保多水源、提高用水效率与供水水质、确保自然流量、广泛回用再生水、建设完善排水体系,加强自然生态净化、增强地下水源涵养、修复盐碱地水生态环境的建设方案,构建了全新的、健康的城市水循环系统^[6],是国内的首次探索。

2013年,《贵安新区核心区城市水系统综合规划》(2013年—2030年)以保障水质安全为核心、保障排水排涝安全为前提,提出了低冲击、微循环的开发建设模式,实施了工程与生态措施结合的污染防治策略,并深入推行可持续排水系统和梯级水资源利用技术,奠定了新区发展建设的基础^[7],2015年,贵安新区成功入选第一批国家海绵城市建设试点城市,城市水系统的理念随时代发展而进一步扩展。

2018年,国家水污染防治重大专项“十三五”课题“雄安新区城市水系统构建与安全保障技术研究”以服务于“人民日益增长的美好生活需要”为中心,制定了研究新区如何实现“高品质饮用水、高质量水环境、高标准水设施、高安全韧性弹性”的课题目标^[8],城市水系统的规划建设,从保障安全与供给进入了提升服务品质的新阶段。

从城市水系统理论与实践探索的过程可以看

到,从2000年到“十三五”时期末,城市涉水基础设施建设已经由保障基本供应发展到提升服务品质,从分行业、分专业独立建设走向多领域、多系统协同发展,城市治水的系统观逐渐形成(见图1),并深刻融入到各地城市建设发展之中,“十四五”时期,随着社会经济发展与科学技术进步,城市涉水基础设施建设领域的新概念、新技术应用将更加广泛,城市水系统的发展也将呈现一些新的趋势。

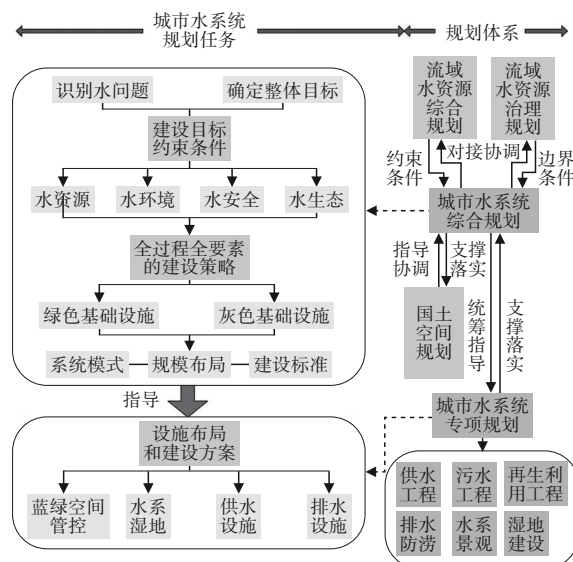


图1 城市水系统规划体系框架

Fig.1 Urban water system planning system framework

2 发展趋势分析

2.1 更高品质的城市供水服务

2015年—2020年,我国城市公共供水普及率已经由93.1%增长至98.84%、公共供水能力由 $23\ 101\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 增长至 $27\ 625\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ^[9],城市供水服务已具备良好保障能力。

在此背景下,国内一些城市开始逐步实施高品质饮用水工程,进一步提高城市供水服务品质,2021年,《福州市高品质饮用水工作实施方案》出台,计划在2023年底前,先完成4个高品质饮用水试点片区改造,到2025年底前,六城区及大学城部分区域约24万户的用户端饮用水水质全面符合高品质饮用水标准。

目前,欧洲发达国家城市供水的龙头水质普遍保持较高水平,以德国为例,2020年每10人(公共供水用户)中有9人直接使用自来水作为饮用水^[10],居民饮用自来水的习惯,证明了龙头水的高品质,福州作为城区公共供水用水人口超过300万人的大型

城市,其高品质饮用水工程的建设对国内其他同等规模或以上城市有着显著的参照意义。

2.2 更低碳的污水处理设施

2020年,我国城镇污水处理厂年均吨水电耗为 $0.48 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ^[11],按照全年城市污水厂处理总量 $547\times 10^8 \text{ m}^3$ ^[9]计算,年耗电总量约 $263\times 10^8 \text{ kW}\cdot\text{h}$,占当年全社会第三产业用电总量的2.1%。也有研究报告指出^[12],国外发达国家的污水处理能耗同样占据全社会总能耗的较大比重,如英国废水处理行业2007年就已成为第四大电力密集型行业。

自2015年巴黎气候协定签订,欧洲国家开始逐步推广利用污水源热泵等技术,减少污水处理厂的总体碳足迹。有文献报道^[13],2020年,芬兰图尔库污水厂通过回收出水余热热能,可以实现冬季为近1.5万户家庭供暖、夏季可以满足当地90%的用冷需求,污水厂年绿色总产能 $211 \text{ GW}\cdot\text{h}$,明显高于污水厂能耗 $21 \text{ GW}\cdot\text{h}$ 。2020年10月,安丘市污水处理

厂(设计能力 $12\times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)污水热泵集中供暖项目开工建设,计划通过回收利用出水余热实现辐射半径内 $220\times 10^4 \text{ m}^2$ 建筑面积供热,按照当地供暖费计算,余热回收项目总投资1.5亿元可以在3年内收回。可见,污水处理设施逐步转变为绿色能源生产设施,发展需求明确、经济效益合理,前景良好。

2.3 更自然的内涝防治方式

2001年—2020年,我国城市排水设施建设固定资产投资总额为8 418亿元(扣除污水处理及再生利用部分),其中2001年—2005年投资占9.14%、2006年—2013年投资占29.70%^[9]。随着室外排水设计规范(标准)的不断更新完善,上述老旧管道排水能力已经无法满足当前的城市需求(不同时期的雨水管渠排水设计要求见表1),同时,上述老旧管道又往往处于城市建成区的中心地带,建筑密度高、改造难度大,容易形成城市易涝区,是城市防涝的关键地带。

表1 不同时期的雨水管渠排水设计要求

Tab.1 Design requirements of rainwater pipes in different periods

标准规范	雨水管渠排水设计要求
《室外排水设计规范》 (GBJ 14—87, 1997年版)	重现期一般选用0.5~3 a,重要干道、重要地区或短期积水即能引起较严重后果的地区,一般选用2~5 a,并与道路设计协调
《室外排水设计规范》 (GB 50014—2006)	重现期一般选用0.5~3 a,重要干道、重要地区或短期积水即能引起较严重后果的地区,一般选用3~5 a,并与道路设计协调。特别重要地区和次要地区可酌情增减
《室外排水设计规范》 (GB 50014—2006, 2014年版, 2016年版) 《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)	在条文中以表格形式,根据城镇类型及城区类型,分别规定了雨水管渠设计重现期,根据表格,中心城区雨水管渠设计重现期为2~5年一遇,中心城区的重要地区为3~10年一遇,中心城区地下通道和下沉式广场等为10~50年一遇

在这一情况下,充分结合城市自然地理特点来实施雨水源头减排工程以减轻管道排水压力,同时布局排涝通道与涝水调蓄空间并与管道合理衔接,就能够比较有效地提升城区防涝能力,形成因地制宜的“源头减排、管网排放、蓄排并举”防涝体系。

同时,充分利用自然空间的防涝措施的经济性也好于传统灰色设施,有统计报告^[14]指出,美国向各州提供的清洁水州周转性贷款基金,在2012年时,灰色、绿色基础设施的投资分别为5 803、85万美元,在2017年时分别为8 919、9 404万美元。2021年4月,国家财政部、住房和城乡建设部、水利部办公厅联合印发的《关于开展系统化全域推进海绵城市建设示范工作的通知》(财办建[2021]35号)也提出,要在“十四五”时期选拔一批系统化全域推进海绵城市建设示范城市并给予定额补助,力争通过3

年集中建设,取得防洪排涝能力明显提升等目标,更多利用自然力量排水、整体提升城市内涝治理水平的趋势已十分清晰。

2.4 更加统筹的区域防洪体系

2011年—2019年,全国发生超保证水位河流数量平均为81条/a,2020年则有269条河流发生超保证水位洪水,城市防洪形势依然较严峻^[15]。2017年,住建部发布的近年来内涝灾害严重、社会关注度高的60个城市中[见《住房城乡建设部办公厅、国家发展改革委办公厅关于做好城市排水防涝补短板建设的通知》(建办城函[(2017)43号)],位于长江中下游流域的有32个,由于城市地势相对低平、流域内河流水系密集,多数具有受区域流域影响明显的特点,以太湖流域为例,苏州、常州、无锡城市防洪大包围建成后,运河沿线泵排能力进一步增

强,分别抬高常州段、无锡洛社段运河水位0.26、0.07 m。

所以,同一区域内河流水文关系密切的地区,逐步实施干支流、上下游统筹治理,合理确定设计水位和堤防等级,统筹安排防洪工程任务,将十分必要,同时,建立完善的流域-区域-城市防洪管理信息化平台,做好流域、区域、城市的水情、雨情、工情信息共享,也将显著提升城市防洪的综合能力,2021年4月,国务院办公厅印发《关于加强城市内涝治理的实施意见》(国办发〔2021〕11号),提出要“形成流域、区域、城市协同匹配,防洪排涝、应急管理、物资储备系统完整的防灾减灾体系”,在政策、顶层设计层面,明确了空间统筹的洪涝防治策略,将是“十四五”时期城市洪涝防治的主要发展方向。

2.5 更精准的城市节水策略

2000年—2020年,全国130个城市创建成为节水型城市,节水型城市用水总量占全国城市用水总量已达58.5%,节水型城市人均综合用水量从2000年的518 L/(人·d)降低到2020年的323 L/(人·d)。根据统计数据,2020年全国城镇居民生活用水量为134 L/(人·d)^[9],已经接近国际发达国家的用水水平[2020年,德国家庭用水人均用水量为127 L/(人·d)]^[10],同时,2020年全国万元工业增加值用水量为32.9 m³,已提前达到《最严格水资源管理制度的意见》(国发〔2012〕3号)的2030年要求,生活、工业等用户端用水量已经降低到较好水平。

在此形势下,2021年12月,住建部等四部委联合印发的《关于加强城市节水工作的指导意见》(建办城〔2021〕51号),在部署提高城市用水效率工作时,将狠抓城市供水管网漏损控制置于首要任务,着力进一步减少输配环节水量损失。

2022年1月、3月,住建部、国家发展改革委办公厅连续出台《关于加强公共供水管网漏损控制的通知》(建办城〔2022〕2号)、《关于组织开展公共供水管网漏损治理试点建设的通知》(发改办环资〔2022〕141号),精准锁定控制管网漏损的5项关键任务,即实施供水管网改造工程、推动供水管网分区计量工程、推进供水管网压力调控工程、开展供水管网智能化建设工程以及完善供水管网管理制度,并筛选不超过50个城市(县城)开展试点建设。“十四五”时期,与城市高质量发展相适应的、以供水管网漏损控制为关键抓手的城市节水工作,实施

将更加精准,并迈向更高水平。

2.6 更完善的再生水输配系统

2021年1月,国家发展改革委等十部门印发《关于推进污水资源化利用的指导意见》(发改环资〔2021〕13号),提出到2025年全国地级及以上缺水城市再生水利用率达到25%以上、京津冀地区达到35%以上的目标。

根据统计数据^[11],2020年全国城镇污水处理厂出水COD、BOD₅、NH₃-N、SS、TN、TP(水量-浓度累积概率5%~90%)分别介于9~27 mg/L(优于地表水Ⅳ类标准)、1~7 mg/L(优于地表水Ⅴ类标准)、0.1~1.6 mg/L(优于地表水Ⅴ类标准)、2~8 mg/L(优于一级A标准)、4.6~12.2 mg/L(优于一级A标准)、0.06~0.37 mg/L(优于地表水Ⅴ类标准),出厂水中主要污染物指标均已接近或达到现行景观环境、城市杂用再生水水质标准,良好的城镇污水处理厂出水水质为各地落实“十四五”时期再生水利用目标奠定了坚实的基础。

而同时,2020年全国城市市政再生水利用量/市政再生水管道长度为92.54×10⁴ m³/km,同期污水排放量/污水管道已经达到15.58×10⁴ m³/km,城市市政再生水输配系统依然不够完善,也在一定程度上导致城市再生水利用水平偏低,如2020年全国市政再生水利用量与生产能力的比例仅为60.85%^[9],由此,《“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划》强调,缺水城市新城区要提前规划布局再生水管网,以黄河流域地级及以上城市为重点,突出基础设施的规划建设配套,实现再生水规模化利用,明确了“十四五”时期的建设方向。

2.7 更大规模的海水淡化利用

有文献报道^[16],2013年西班牙企业全球海水淡化项目总规模达到294×10⁴ m³/d,其中一半位于西班牙国内并相当于全国工业耗水总量的60.77%或家庭与小商户耗水总量的16.57%,2018年—2020年,沙特国际电力和水务公司在拉比格、塔维拉、朱拜勒、迪拜的海水淡化项目的制水成本(用于生活饮用水)已经由约合3.65元/m³降至2.10元/m³,并有望在短期内进一步降低。

我国《2020年全国海水利用报告》显示,截至2020年底,我国共有海水淡化工程135个,工程总规模165×10⁴ m³/d,这一数字相当于2020年全国沿海11省(市)生活用水总量的1.45%、工业用水总量的

1.08%[直流火(核)电项目用水总量的1.94%],可以看出,我国海水淡化规模进一步扩大仍有较大空间。

我国《海水淡化利用发展行动计划(2021—2025年)》指出“发展海水淡化利用是增加水资源供给、优化供水结构的重要手段”,以上海为例,2020年全市直流火(核)电项目用水总量为 $49.3 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全市用水总量的50.56%。所以,“十四五”期间,若能够推动建设若干海水淡化利用示范城市,并在海水淡化水规模化供应、高耗水行业用水费价调整等方面形成示范效应,将对我国沿海地区缓解水资源瓶颈制约、保障经济社会可持续发展具有重要意义。

3 保障措施

一是立法为先。目前,我国城市水系统领域法律仅有《中华人民共和国水法》《中华人民共和国防洪法》,通过加强城市供水与节水、污水处理与再生利用等领域立法研究,将现行《城市供水条例》《城镇排水与污水处理条例》上升为法律并修订完善实施细则,同时针对城市水系统的事权划分、规划建设、职责分工、保障措施等方面进一步建立法规、规章,将逐渐形成更加科学、有效的城市水系统管理模式。

二是统筹管理。完善管理体制机制建设是城市水系统可持续发展的可靠保障,“一龙管水、多龙治水”是系统化推进城市水管理的基本原则^[17]。目前,北京、上海、武汉、深圳等地均由城市水务局对城市水系统各环节实施统筹管理,并在供水节水、污染防治、洪涝治理等方面均取得了显著成效,在“从源头到龙头的全流程供水保障”“厂-网-河一体化建设运维机制建立”等方面发展较快,为其他城市城市水系统管理提供了良好参考模式。

三是优化费价。2020年—2021年,《关于完善长江经济带污水处理收费机制有关政策的指导意见》(发改价格[2020]561号)、《城镇供水价格管理办法》(国家发展和改革委员会。住房和城乡建设部令第46号)陆续印发,为各地调整并建立科学合理的费价机制提供了绝佳契机,各地要研究完善自来水价格政策,科学设置阶梯水价,通过经济杠杆促进节水,要研究污水费收费标准,保障污水、污泥处理处置设施正常运营并合理盈利,并逐步覆盖污水管网建设及运营费用。

4 结语

2021年3月,《国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》发布,展望到2035年,我国将广泛形成绿色生产生活方式,碳排放达峰后稳中有降,生态环境根本好转,美丽中国建设目标基本实现。紧紧把握城市水系统领域政策与技术发展趋势,统筹城市水系统与城市发展的联系,以水而定、量水而行,构建以城市为中心的健康水循环系统,将是实现2035年远景目标的关键举措之一。通过回顾、梳理城市水系统的理论与实践、政策与技术发展,对相关领域的可能的发展特点进行了分析,以期城市水系统的进一步发展提供一定的参考。

参考文献:

- [1] 邵益生. 城市水系统控制与规划原理[J]. 城市规划, 2004(10):62-67.
SHAO Yisheng. Control and plan of city water system [J]. City Planning Review, 2004 (10): 62-67 (in Chinese).
- [2] 王晓昌. 基于水代谢理念的城市水系统构建[J]. 给水排水, 2010, 36(7):6.
WANG Xiaochang. Construction of urban water based water metabolism theory [J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(7):6(in Chinese).
- [3] 王浩, 杨贵羽. 二元水循环条件下水资源管理理念的初步探索[J]. 自然杂志, 2010, 32(3):130-133.
WANG Hao, YANG Guiyu. Preliminary study on new concept of water resources management under dualistic water cycle condition [J]. Chinese Journal of Nature, 2010, 32(3): 130-133(in Chinese).
- [4] 陈吉宁, 曾思育, 杜鹏飞, 等. 城市二元水循环系统演化与安全高效用水机制[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
CHEN Jining, ZENG Siyu, DU Pengfei, et al. Evolution of Urban Binary Water Cycle System and Safe and Efficient Water Use Mechanism [M]. Beijing: Science Press, 2017 (in Chinese).
- [5] 邵益生. 城市水系统科学导论[M]. 北京: 中国城市出版社, 2015:40-45.
SHAO Yisheng. Theory on Urban Water System Science [M]. Beijing: China City Press, 2015: 40-45 (in Chinese).
- [6] 朱坦, 吕建华, 丁玉洁, 等. 生态文明视角下的生态城

- 市建设模式探讨——以天津中新生态城为例[C]//中国城市规划学会. 2009城市发展与规划国际论坛论文集. 哈尔滨:中国城市规划学会, 2009:24-29.
- ZHU Tan, LÜ Jianhua, DING Yujie, *et al.* Construction based on the conservation culture—the case study of Sino-Singapore Tianjin Eco-city construction [C]//Urban Planning Society of China. Proceedings of the 2009 International Forum on Urban Development and Planning. Harbin: Urban Planning Society of China, 2009:24-29(in Chinese).
- [7] 莫罹. 贵安新区核心区城市水系统综合规划(2013-2030)[J]. 城市规划通讯, 2014(20):15-16.
- MO Li. Comprehensive planning of urban water system in the core area of Gui'an New Area (2013-2030) [J]. Urban Planning Newsreport, 2014 (20): 15-16 (in Chinese).
- [8] 龚道孝, 莫罹, 刘曦, 等. “四水统筹、人水和谐”的雄安新区城市水系统建设标准研究[J]. 给水排水, 2021, 47(11):62-69.
- GONG Daoxiao, MO Li, LIU Xi, *et al.* Urban water system from conception, methods to planning practice [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(11): 62-69(in Chinese).
- [9] 住房和城乡建设部. 城市建设统计年鉴[EB/OL]. [2022-03-08]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/tjxx/jstjnj/index.html>.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Statistical yearbook of urban construction [EB/OL]. [2022-03-08]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/tjxx/jstjnj/index.html>(in Chinese).
- [10] German Association for Water, Wastewater and Waste. Profile of the German water sector 2020 [EB/OL]. [2022-03-08]. <http://www.dwa.de/profile-german-water-sector>.
- [11] 胡洪营. 中国城镇污水处理与再生利用发展报告(1978-2020)[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2021:55-63.
- HU Hongying. Development Report on Municipal Wastewater Treatment and Reuse in China (1978-2020) [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021:55-63(in Chinese).
- [12] 张羽就, 席佳锐, 陈玲, 等. 中国城镇污水处理厂能耗统计与基准分析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(8): 8-17.
- ZHANG Yujiu, XI Jiarui, CHEN Ling, *et al.* Energy consumption statistics and benchmarking analysis of urban wastewater treatment plants (WWTPs) in China [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(8):8-17(in Chinese).
- [13] 郝晓地, 赵梓丞, 李季, 等. 污水处理厂的能源与资源回收方式及其碳排放核算:以芬兰Kakolanmäki污水处理厂为例[J]. 环境工程学报, 2021, 15(9):2849-2857.
- HAO Xiaodi, ZHAO Zicheng, LI Ji, *et al.* Analysis of energy recovery and carbon neutrality for the Kakolanmäki WWTP in Finland [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(9): 2849-2857 (in Chinese).
- [14] United States Environmental Protection Agency. Clean water SRF program information national summary [EB/OL]. [2022-03-08]. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-02/documents/us19.pdf>.
- [15] 水利部. 2020中国水旱灾害防御公报[EB/OL]. [2022-03-08]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgshzhgb/202112/t20211208_1554245.html.
- Ministry of Water Resources. 2020 China flood and drought disaster prevention bulletin [EB/OL]. [2022-03-08]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgshzhgb/202112/t20211208_1554245.html(in Chinese).
- [16] 刘伟, 张铭, 齐连明. 西班牙海水淡化产业政策研究[J]. 海洋开发与管理, 2015, 32(3):15-20.
- LIU Wei, ZHANG Ming, QI Lianming. On seawater desalination in Spain: status and industrial policies [J]. Ocean Development and Management, 2015, 32(3): 15-20(in Chinese).
- [17] 陶相婉, 祝成, 邵宇婷, 等. 新加坡城市水管理经验与启示[J]. 给水排水, 2020, 46(11):50-53.
- TAO Xiangwan, ZHU Cheng, SHAO Yuting, *et al.* Experience and enlightenment of Singapore's urban water management [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(11):50-53(in Chinese).

作者简介:周广宇(1986-),男,黑龙江哈尔滨人,博士,教高,主任工程师,主要研究方向为城市水系统研究及规划设计,为“十四五”重点研发计划城市内涝风险防控与系统治理关键技术及示范课题负责人,多次获得国家、省级优秀勘察设计奖。

E-mail:478798147@qq.com

收稿日期:2022-04-29

修回日期:2022-05-07

(编辑:孔红春)