

长江中下游城市内涝与雨季污染协同治理对策

夏军^{1,2}, 贾海峰³, 张翔^{1,2}, 张永勇⁴, 骆文广^{1,2}

(1. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 海绵城市建设水系统科学湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430072; 3. 清华大学环境学院, 北京 100084;

4. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘要:针对长江中下游城市内涝与雨季污染协同治理的突出问题,对城市水安全、雨季水体返黑返臭风险和河湖水生态退化三方面存在的问题进行了论述。发现长江中下游城市河网密度高、降水量大、暴雨多发,同时人口密集、经济发展水平高,内涝、污染、生态退化等水问题突出;城市内涝频发,雨季污染造成某些城市水体局部返黑返臭,严重影响城市水环境品质,成为制约长江中下游城市绿色发展的重要瓶颈问题。提出了建立三级内涝协同防治体系、构建城市“绿-灰-蓝”设施耦合工程体系、协同推进水体品质提升与生态修复等建议。

关键词:长中下游城市;城市内涝;雨季污染;协同治理;绿色发展

中图分类号:TV213

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2024)01-0001-05

Coordination strategies for urban waterlogging and rainy season pollution control in middle and lower reaches of the Yangtze River //XIA Jun^{1,2}, JIA Haifeng³, ZHANG Xiang^{1,2}, ZHANG Yongyong⁴, LUO Wenguang^{1,2} (1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan 430072, China; 2. Hubei Key Laboratory of Water System Science for Sponge City Construction, Wuhan 430072, China; 3. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China)

Abstract: In response to the prominent issues of coordinated governance of urban waterlogging and rainy season pollution in the middle and lower reaches of the Yangtze River, this paper discusses three aspects including urban water safety, risk of black and odorous return of rainy season water bodies, and ecological degradation of river and lake water. It is found that the urban river network in the middle and lower reaches of the Yangtze River is characterized by high density, heavy precipitation, frequent rainstorm, dense population, high level of economic development, and prominent water problems such as waterlogging, pollution and ecological degradation. Frequent urban waterlogging and pollution during the rainy season have caused some urban water bodies to return to black and smell, seriously affecting the quality of urban water environment and becoming an important bottleneck problem that restricts the green development of cities in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Suggestions were put forward to establish a three-level collaborative governance system for waterlogging, construct a coupling engineering system for urban “green-gray-blue” facilities, and coordinate the improvement of water quality and ecological restoration.

Key words: Cities in middle and lower reaches of the Yangtze River; urban waterlogging; rainy season pollution; collaborative governance; green development

全球变化和高强度社会经济开发导致的快速城市化进程的推进往往会严重降低城市水循环系统的自我调节效率,从而导致社会经济发展过程中屡屡发生“城市病”问题。其内在原因是变化环境下防洪排涝需求及城市天然海绵体不足引发的一系列城市水文效应负面影响^[1-3],如内涝、水体黑臭、河湖生

态退化等^[4-6]。这类问题近年来在长江中下游城市表现较为突出,住房和城乡建设部2017年资料显示,全国60个近年来内涝严重的城市,长江中下游占50%以上^[7-9]。2020年长江流域发生严重洪涝灾害时,中下游部分沿江城市甚至出现了河水经雨水管道倒灌进入城市,导致“城市看海”现象^[10-11]。另

基金项目:国家自然科学基金重大项目(41890823);中国科学院学部咨询评议重点项目(2022-ZW09-B-022);中国科学院战略性先导科技专项资金资助项目(XD23040304)

作者简介:夏军(1954—),男,教授,中国科学院院士,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: xiajun666@whu.edu.cn

外,长江中下游流域经过“长江保护修复攻坚战”“黑臭水体治理”“长江经济带生态环境警示片披露问题整改”等大规模治理,水生态破坏得到了初步遏制,水体黑臭现象基本消除^[12],但随之而来的雨季城市水体局部返黑返臭现象频发。特别是长江中下游城市进一步提升污水排放标准与处理率后,虽然遏制了点源污染问题,但面源污染在雨季引起水体临时性黑臭的现象严重^[13]。城市暴雨导致的内涝以及降水产生的面源污染已经严重影响城市水环境品质,成为制约长江中下游城市绿色发展的重要瓶颈问题。如何协调城市内涝治理与水环境保护,促进长江中下游城市群可持续协调发展,是长江流域当前面临的一个非常现实和重要的问题^[14]。目前,学界对城市内涝问题以及雨季降水污染协同治理的研究多停留在必要性研究,侧重于城市内涝或水污染治理单方面研究,对子系统之间内在相互作用的研究较少,城市内涝与水污染协同治理的水平还有很大的提升空间^[15]。因此,正确认识城市内涝与水生态环境的协同互动关系,探讨二者的协同作用效应对推动城市高质量发展有重要的意义。

自 2016 年习近平总书记发出长江大保护号召以来,已取得了明显的进展和成效。但是作为长江经济带最为核心的长江上中下游城市群,面临着总书记提出的“五新”“三主”治理目标的严峻挑战,尤其面临以水问题为核心的城市群洪涝灾害问题、水污染治理问题、水生态退化修复与保护问题^[16]。本文以长江中下游典型城市为例,通过研究城市内涝与雨季污染的现状、存在问题及原因,总结加强城市暴雨内涝协同治理的经验教训,提出长江经济带中下游城市群绿色发展战略水问题治理的对策建议。

1 长江中下游城市内涝及雨季污染问题

长江中下游是长江经济带的主要组成部分,包括长江中游城市群和长三角城市群两个国家级城市群,区域辐射到上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖南、湖北 7 省市(图 1),地理位置优越。长江中下游城市在我国长江经济带,乃至全国的社会经济中占有举足轻重的地位。该区域城市河网密度高、降水量大、暴雨多发,同时人口密集、经济发展水平高,具有调节区域气候、防洪排涝、优化水质等功能^[17]。然而随着城镇化进程的加快,过于追求经济水平,未能重视城镇化“质”的发展,导致长江中下游区域水生态环境水平不断降低,城市内涝、污染、生态退化等水问题突出^[18-19]。

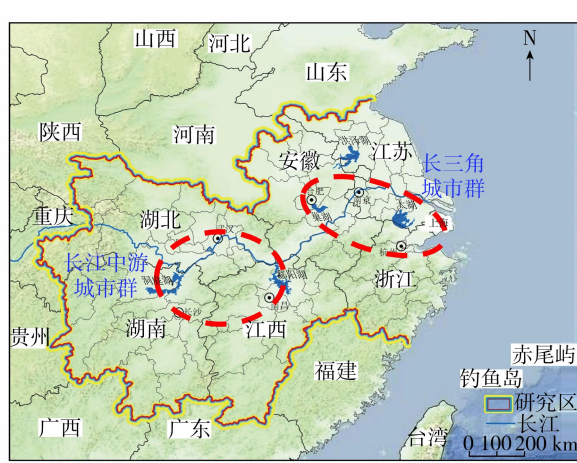


图 1 长江中下游城市群位置

Fig.1 Location of urban agglomeration in middle and lower reaches of the Yangtze River

1.1 城市水安全问题

2022 年发表于《自然·通讯》的一项研究发现,占全球人口约 1/4 的人面临百年一遇洪涝的重大风险,其中我国约 3.95 亿人,沿海地区面临的风险更高^[20]。根据《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)》,我国 2017 年发布的 60 个近年来内涝严重的城市名单中,长江中下游有 32 个城市上榜,包括湖北省武汉、黄石、荆州、荆门、恩施、当阳、宜昌、襄阳、十堰、孝感,湖南省长沙、益阳、常德、株洲、张家界、怀化、湘潭、娄底、衡阳,江西省南昌、萍乡、赣州、景德镇,安徽省芜湖、马鞍山、宣城、池州、安庆、铜陵,江苏省南京、镇江;浙江省杭州。对于长江中下游城市,2016—2020 年因洪涝灾害造成的直接经济损失较 2011—2015 年增长 50.11%。城市内涝已造成巨大的生命和财产损失,同时内涝后的一些伴生后果,包括生态影响以及可能会出现致病菌泛滥等,也对人类健康和生态安全造成不同程度的威胁,已成为制约长江中下游城市绿色可持续发展的瓶颈问题。

1.2 城市雨季污染和水体返黑风险问题

长江中下游城市污水管网覆盖率和污水处理率多已高达 90% 以上,点源污染逐步得到有效控制,如今雨季面源污染已成为城市水环境的主要污染源之一^[21]。高污染径流在雨天集中排放入河,造成明显“黑团”,对城市水环境造成较大的冲击,导致雨天水环境质量达标率低。如,武汉市 2022 年 3 月 16—17 日暴雨期间,经多年治理的巡司河出现了短暂污染,后面虽得到有效控制,但是产生了河水返黑现象,引起了市民和社会的关注。苏州市自 2005 年以来水环境改善成效显著,国省考断面污染指标年均值优于Ⅲ类水的比例从 2007 年的 19.2% 逐渐提

高到 2021 年的 89.5% ;但深入分析 2015 年以来的数据,雨季断面达标率低,如在 2021 年 7 月,国省考断面污染物指标平均达标率仅为 54.4% ,优于Ⅲ类水的比例仅为 49.8% 。

1.3 雨季城市河湖生态问题

长江中下游不少城市河湖水体感官品质差,水生态退化严重。如,在污水处理方面已经卓有成效的苏州市,从水质指标看,城市河流的水质已有明显改善,主要水质指标可以达到Ⅳ类水标准,但对民众而言最直观的感官指标如透明度、色度都不理想,河道水体透明度基本维持在 30 ~ 50 cm,颜色灰黄,水生植物生境差,水生态系统不完整,生态服务功能失衡,与百姓期望的水体清澈、鱼翔浅底仍有巨大的差距。据调查,苏州市 90% 以上河道水生生态系统沉水植被缺失,水体自净能力和自我维持能力弱,河流藻类浓度甚至长期处于 1000 万个/L 的经验警戒线上,水体水华时有发生。

2 问题成因分析

2.1 城市内涝防治体系不完善

内涝灾害频发的根源为现有城市内涝防治体系不完善,主要表现在现有工程间能力不匹配,缺失源头削减系统。

长江中下游许多城市已在防洪、排涝等方面完成了多项工程设施的建设,但很多不同工程体系间衔接得不好。河道防洪与排水管网的建设和运营分属不同部门,防洪、内涝、雨水管渠规划设计的技术体系和标准无法衔接。工程设施建设虽已成型,但由于建设时间不一,采用的设计标准不同,造成能力不匹配,易导致短历时强降雨情况下发生内涝。据调查,我国 70% 以上的城市排水系统建设的设计暴雨重现期小于 1 a,而老城区大部分排水设施建造年代久远,排水管道标准还要低^[22]。

同时,在内涝防治体系中,能体现海绵城市和韧性城市理念的源头雨水绿色基础设施系统虽在海绵城市试点城市建设中进行了建设和管理的探索,但在大多城市中还缺失。源头雨水绿色基础设施系统兼具径流量控制和污染控制的功能,可以实现城市内涝防治与降雨径流面源污染控制的协同效果^[23]。但目前大多城市仍单纯靠灰色排水系统排涝,没有形成渗、滞、蓄、净、用、排相结合的综合内涝防治体系,没有将城市内涝防治、径流污染控制和水生态保护结合起来进行整体性、系统性的治理。

2.2 雨季入河面源污染缺乏有效控制

城市面源污染已成为城市河道雨季水质变差,甚至返黑返臭的重要原因。而当前大多城市缺乏有

效措施削减雨季污染负荷。

长江中下游城市发展进程快,城镇化率高,降雨径流入河路径短,入河口数量多,其携带的污染物浓度接近甚至超过城镇生活污水的平均水平,远高于城市水体的本底值。苏州市 2018—2019 年针对典型道路降雨径流的监测发现,COD 质量浓度均值为 158.1 mg/L,最高可达到 793 mg/L,SS 质量浓度均值为 298.2 mg/L,最高可达到 1094 mg/L。

同时,长江中下游不少城市都存在不同比例的合流制排水系统,即使是分流系统,也存在排水管网老旧、混接等导致的入流入渗问题。据调查,长江中下游城市排水管网雨污混接比例平均约为 26% ,最高可达 70% 。即使是分流制改造较好的苏州市,其中心城区污水管网所收集的水中,仍有 27% ~ 33% 来自地下水和雨水入流入渗为主的外来水。中心城区旱天污水管网平均收集水量 25 万 m³/d,而雨天平均收集水量 35 万 m³/d。在降雨强度大时,往往会在短时间内形成数倍于管网设计输水能力的负荷,加大了污水漫溢风险。

2.3 水基础设施缺乏智慧化一体化管理

城市水设施运行效能低是内涝频发、雨季污染的另一个重要原因,主要表现在排水系统运行过程中不同设施之间的协同性不好,没有实现源-网-厂-河一体化联控联调和闸泵的智慧化精准化调度。

长江中下游城市污水设施的“高处理率、低收集率”现象相当普遍。流域内城市排水管道埋深普遍低于水面高程,污水漏失、外水侵入等问题均在水下发生,问题较隐蔽^[24]。以苏州市为例,在旱天情况下,受管网沿途地下水入渗影响,污水中 COD 平均质量浓度会由源头的 500 mg/L 下降至入污水处理厂前的 340 mg/L;而在雨天情况下,入污水处理厂前的 COD 平均质量浓度仍进一步下降,在强降雨之后甚至出现 COD 质量浓度不足 100 mg/L 的进水。过多的外来水一方面挤占了污水处理厂的处理能力;另一方面导致污水处理厂生化过程效率低下。

同时,长江中下游城市河湖闸泵工程众多,闸泵联合调度难度大,日常调度方式较为粗放,调控能耗高,河网流态也不利于污染物自净,不利于河道生境构建。如,2017 年武汉市东湖由于预降水位过低,而且降雨和入湖水量偏少,造成湖泊水位长时间低于生态水位,使得水生态系统受损。2020 年之前,苏州市日常引入城区的流量均采用经验值 30 m³/s,调度响应时间一般为 20 min 以上,河网水量分配不均,造成城区河道流速分布差异大,流速范围为 0.01 ~ 26 m/s,部分区域水体流动缺乏动力,水质较差。并且引水调度也没有考虑降雨的影响,难以

实现水资源高效利用和水体自净能力的提升。

3 城市内涝及雨季污染协同治理的对策与建议

3.1 建立三级内涝协同防治体系

城市内涝防治是一项系统性工程,流域区域洪涝统筹体系、城市排水防涝工程体系、应急管理体系必须同时发力,才能有效减缓城市内涝及其危害。首先,要统筹防洪、内涝、雨水管渠等各工程目标的衔接,制定合理的内涝防治目标;具体要因地制宜,合理确定降雨重现期,科学评估并确定不同阶段可以达到的目标。其次,要提升内涝防治措施的系统性,重视外洪与内涝协调衔接,建立涵盖城市水利防洪+市政源头减排、排水管渠、排涝除险+智慧预警与应急管理的系统内涝防治技术体系;需要从流域、城市、排水分区等不同的角度出发,系统分析梳理河道治理、排涝通道和调蓄空间建设、泵站提升、管网建设、源头绿色基础设施减排等综合性措施,构建结构完整的城市内涝防治体系。最后,需要完善城市内涝防治机制体制,完善城市内涝应急防治体系;需要建立由住建、国土、发改、水利、园林、应急管理、环保等多部门参与的沟通协调机制,明确职责,建立信息共享、联防联控的机制。

3.2 构建城市“绿-灰-蓝”设施耦合工程体系

要构建城市“绿-灰-蓝”设施耦合工程体系实现面源污染和溢流污染的协同控制。针对城市面源污染及现有排水系统的特点,统筹绿色基础设施的源头削减、灰色基础设施的过程蓄排以及受纳水体蓝色基础设施的调蓄和自净功能,优化“绿-灰-蓝”的布局 and 衔接,建立源头削减-过程蓄排-末端自净的“绿-灰-蓝”设施相耦合的工程体系。建设部门要重视城市绿色基础设施的建设,基于城市绿地、广场、道路等空间格局,结合海绵城市建设,在源头削减面源污染的产生;城市排水部门要着眼于城市排水设施的提质增效,提升和利用排水管网、污水处理厂等灰色基础设施的过程调控能力,实现污染的过程调蓄和削减。城市河湖管理部门要通过生态河道及其缓冲带的建设,提升受纳水体的污染拦截和自净能力,系统解决城市面源污染对城市水环境的冲击问题,激发城市水域与绿色基础设施网络整合的潜力。

同时,要实施源-网-厂-河设施一体化协同调控与运行维护,提升城市排水系统运行效能。为改变现状的源、网、厂、河分离运营管理,缺乏协同的问题,地方政府可以整合生态环境、水务等部门的水环境监测和运维力量,构建涵盖源-网-厂-河全系统的监测和协同调控系统。从硬件角度要加强全系统水

量水质在线监测能力建设,实现对闸泵等设施的远程控制;从软件角度要构建源-网-厂-河一体化动态耦合模型,实施对现场监测与数值模拟相结合的排水系统运行效能动态评估。在此基础上,以优化设施运行效能为目标,基于动态耦合模型实施源-网-厂-河一体化协同调控,推动全系统雨季污染负荷减排。

3.3 协同推进水体品质提升与生态修复

要提升城市水环境品质,优化水生态安全屏障体系,需要在控源截污的基础上做好如下工作:一是优化城市水系结构,推进全方位的河湖畅流,通过闸、泵、堰的智能化联合调控,优化河湖水动力条件;二是靶向去除影响透明度、色度等感官指标的悬浮类污染物,营造水下森林恢复的生境条件;三是修复河湖生态系统,基于水陆一体的思路,构建沉水植物、底栖生物、鱼类共生的水生态系统,优化水生生物链,强化水生态系统健康维系能力,最终实现水清、岸绿、鱼翔浅底的城市生态景观。

4 结 论

a. 长江中下游城市群在我国长江经济带乃至全国的社会经济中占有举足轻重地位。该区域城市河网密度高、降水量大、暴雨多发,同时人口密集、经济发展水平高,内涝、污染、生态退化等水问题突出。

b. 城市内涝频发,同时雨季污染造成某些城市水体局部返黑返臭,严重影响城市水环境品质,成为制约长江中下游城市绿色发展的重要瓶颈,也是国情与社会发展和水资源保护值得关注的重要问题之一。

c. 长江中下游城市要加强城市水安全综合管理的体制与制度创新,尤其要建立水利-环保-住建-应急等多部门统筹的机制,即“城市排水防涝-应急管理-流域区域洪涝”统筹的三级内涝协同防治体系,构建城市“绿-灰-蓝”设施耦合工程体系,研发城市水系统智慧管理的预测预警和科学决策调度系统,协同推进水体品质提升与生态修复措施,实现城市内涝与雨季污染的治理目标。

参考文献:

[1] 夏军,张永勇,张印,等. 中国海绵城市建设的水问题研究与展望[J]. 人民长江,2017,48(20):1-5. (XIA Jun, ZHANG Yongyong, ZHANG Yin, et al. Research and prospects of water problems in construction of sponge cities in China [J]. Yangtze River, 2017, 48(20):1-5. (in Chinese))

[2] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展, 2016, 27 (4): 485-491. (ZHANG Jianyun, WANG Yintang, HE Ruimin, et al.

- Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(4): 485-491. (in Chinese))
- [3] XIA J, ZHANG Y Y, XIONG L H, et al. Opportunities and challenges of the Sponge City construction related to urban water issues in China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60(4): 652-658.
- [4] 孙蓝心, 夏军, 余敦先, 等. 九江市中心城区下垫面变化及其径流响应[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(4): 625-635. (SUN Lanxin, XIA Jun, SHEN Dunxian, et al. Change of underlying surface and its runoff response in the central city of Jiujiang[J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021, 19(4): 625-635. (in Chinese))
- [5] GONG P, LI X, WANG J, et al. Annual maps of global artificial impervious area (GAIA) between 1985 and 2018 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 236: 11510.
- [6] 于欣鑫, 戴梦圆, 沈晓梅. 长江经济带水生态文明建设时空特征与优化路径[J]. *人民长江*, 2021, 52(10): 1-6. (YU Xinxin, DAI Mengyuan, SHEN Xiaomei. Spatial and temporal characteristics and optimization path of water ecological civilization construction in Yangtze River Economic Belt[J]. *Yangtze River*, 2021, 52(10): 1-6. (in Chinese))
- [7] ESCH T, MARCONCINI M, MARMANIS D, et al. Dimensioning urbanization: an advanced procedure for characterizing human settlement properties and patterns using spatial network analysis [J]. *Applied Geography*, 2014(55): 212-228.
- [8] 杨丽霞, 苑韶峰. 长三角城市群城镇化质量测度及其空间格局分析[J]. *上海国土资源*, 2017, 38(3): 5-8. (YANG Lixia, YUAN Shaofeng. Analysis of measurement and spatial pattern of urbanization quality in the Yangtze River Delta [J]. *Shanghai Land & Resources*, 2017, 38(3): 5-8. (in Chinese))
- [9] 田培, 王瑾钰, 花威, 等. 长江中游城市群水资源承载力时空格局及耦合协调性[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(6): 1871-1884. (TIAN Pei, WANG Jinyu, HUA Wei, et al. Temporal-spatial patterns and coupling coordination degree of water resources carrying capacity of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(6): 1871-1884. (in Chinese))
- [10] 徐宗学, 赵刚, 程涛. “城市看海”: 城市水文学面临的挑战与机遇[J]. *中国防汛抗旱*, 2016, 26(5): 54-55. (XU Zongxue, ZHAO Gang, CHENG Tao. “Seaview in city”: challenges and opportunities faced by urban hydrology [J]. *China Flood & Drouhhr Management*, 2016, 26(5): 54-55. (in Chinese))
- [11] 夏军, 陈进. 从防御 2020 年长江洪水看新时代防洪战略[J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(1): 27-34. (XIA Jun, CHEN Jin. A new era of flood control strategies from the perspective of managing 2020 Yangtze River flood [J]. *Scientia Sinica: Terrae*, 2021, 51(1): 27-34. (in Chinese))
- [12] 肖圣, 多玲花, 邹自力. 城镇化与水生态环境耦合协调时空演变及驱动因素: 以长江中下游城市群为例[J]. *上海国土资源*, 2022, 43(3): 61-68. (XIAO Sheng, DUO Linghua, ZOU Zili. Spatio-temporal evolution and driving factors of the coupling coordination between urbanization and water ecological environment: take the urban agglomeration in the middle and lower reaches of the Yangtze River as an example [J]. *Shanghai Land & Resources*, 2022, 43(3): 61-68. (in Chinese))
- [13] 夏军, 余敦先, 史良胜, 等. 流域模拟器的研发与实践初探[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2023, 56(12): 1425-1431. (XIA Jun, SHE Dunxian, SHI Liangsheng, et al. Watershed simulator development and initial exploration [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2023, 56(12): 1425-1431. (in Chinese))
- [14] 夏军, 占车生, 曾思栋, 等. 长江模拟器的理论方法与实践探索[J]. *水利学报*, 2022, 53(5): 505-514. (XIA Jun, ZHAN Chesheng, ZENG Sidong, et al. Theoretical method and practical exploration of Yangtze River simulator construction [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(5): 505-514. (in Chinese))
- [15] 朱凯莉, 赖成光, 王兆礼, 等. 城市化背景下长三角核心城市群汛期降水时空演变特征分析[J]. *水资源保护*, 2023, 39(6): 95-103. (ZHU Kaili, LAI Chengguang, WANG Zhaoli, et al. Temporal and spatial evolution characteristics analysis of flood season precipitation in core city group of the Yangtze River delta under background of urbanization [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(6): 95-103. (in Chinese))
- [16] XIA J. Climate change impact on water security & adaptive management in China [J]. *Water International*, 2012, 37(5): 509-610.
- [17] 夏军, 石卫, 王强, 等. 海绵城市建设中若干水文学问题的研讨[J]. *水资源保护*, 2017, 33(1): 1-8. (XIA Jun, SHI Wei, WANG Qiang, et al. Discussion of several hydrological issues regarding sponge city construction [J]. *Water Resources Protection*, 2017, 33(1): 1-8. (in Chinese))
- [18] 徐宗学, 李鹏. 城市化水文效应研究进展: 机理、方法与应对措施[J]. *水资源保护*, 2022, 38(1): 7-17. (XU Zongxue, LI Peng. Progress on hydrological response to urbanization: mechanisms, methods and solutions [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(1): 7-17. (in Chinese))

(下转第 15 页)

drainage district in Fuzhou City on urban flooding/waterlogging [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (1):83-92. (in Chinese))

[74] 徐宗学,叶陈雷.从“城市看海”到“城市看江”:极端暴雨情景下福州市洪涝过程模拟与风险分析[J].中国防汛抗旱,2021,31(9):12-20. (XU Zongxue, YE Chenlei. From “looking at sea in city” to “looking at river in city”: simulation and risk analysis of flood and waterlogging process in Fuzhou City under extreme rainstorm scenarios [J]. China Flood & Drought Management, 2021, 31 (9): 12-20. (in Chinese))

[75] 徐宗学,叶陈雷.城市暴雨洪涝模拟:原理、模型与展望[J].水利学报,2021,52(4):381-392. (XU Zongxue, YE Chenlei. Simulation of urban flooding/waterlogging processes: principle, models and prospects [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52 (4): 381-392. (in Chinese))

[76] 臧文斌,赵雪,李敏,等.城市洪涝模拟技术研究进展及发展趋势[J].中国防汛抗旱,2020,30(11):1-13. (ZANG Wenbin, ZHAO Xue, LI Min, et al. Research

progress and development trend of urban flood simulation technology [J]. China Flood & Drought Management, 2020, 30 (11): 1-13. (in Chinese))

[77] 刘媛媛,郑敬伟,刘洪伟,等.极端大暴雨对城市防洪的警示和思考[J].中国防汛抗旱,2021,31(9):21-24. (LIU Yuanyuan, ZHENG Jingwei, LIU Hongwei, et al. Warning and thoughts of extreme rainstorm on urban flood prevention [J]. China Flood & Drought Management, 2021, 31 (9): 21-24. (in Chinese))

[78] 乔地.从人民群众生命安全角度重新审视城市建设标准[N].科技日报,2021-08-13(02).

[79] 付健,高小涛,乔明叶.极端天气灾害下城市防洪排涝整体解决方案探讨:以郑州市为例[J].中国水利,2022(5):39-42. (FU Jian, GAO Xiaotao, QIAO Mingye. Overall solution for urban flood control and drainage under extreme rainfall and flood: taking Zhengzhou as an example [J]. China Water Resources, 2022 (5): 39-42. (in Chinese))

(收稿日期:2023-02-21 编辑:施业)

(上接第5页)

[19] 肖黎明,张仙鹏.强可持续理念下绿色创新效率与生态福利绩效耦合协调的时空特征[J].自然资源学报,2019,34(2):312-324. (XIAO Liming, ZHANG Xianpeng. Spatio-temporal characteristics of coupling coordination between green innovation efficiency and ecological welfare performance under the concept of strong sustainability [J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34 (2): 312-324. (in Chinese))

[20] RENTSCHLER J, SALHAB M, JAFINO B A. Flood exposure and poverty in 188 countries [J]. Nature Communications, 2022, 13: 3527.

[21] 徐祖信,张竞艺,徐晋,等.城市排水系统提质增效关键技术研究:以马鞍山市为例[J].环境工程技术学报,2022,12(2):348-355. (XU Zuxin, ZHANG Jingyi, XU Jin, et al. Study on key technologies for improving quality and efficiency of urban drainage system: a case of Ma'an Shan City [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12 (2): 348-355. (in Chinese))

[22] 武春丽.中国跨入标准定额新时代[J].工程建设标准化,2014(2):16-18. (WU Chunli. China has entered a new era of standard quotas [J]. Standardization of Engineering Construction, 2014 (2): 16-18. (in Chinese)).

[23] 邱斌,朱洪涛,齐飞,等.长江流域典型城市水生态环境特征解析及综合整治对策[J].环境工程技术学报,2023,13(1):1-9. (QIU Bin, ZHU Hongtao, QI Fei, et al. Analysis of the characteristics of water eco-environment

and comprehensive countermeasure for typical cities in the Yangtze River Basin [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13 (1): 1-9. (in Chinese))

[24] 王峥,曾令武,张妍妍,等.长江中下游城市水生态环境综合整治对策与路线图[J].环境工程,2023,41(3):1-11. (WANG Zheng, ZENG Lingwu, ZHANG Yanyan, et al. Solutions and roadmap for comprehensive remediation of water ecological environment in urban areas of the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Environmental Engineering, 2023, 41 (3): 1-11. (in Chinese))

(收稿日期:2023-12-20 编辑:王芳)

