

## ■ 水灾害防治与可持续发展专题 (主持人: 李占斌)

**【主持人语】**在全球变化环境背景下,全球陆地大部分地区的强降水发生频率呈上升趋势。我国极端降水发生频率和强度也呈现增加趋势,新旧水灾害问题叠加严重影响着我国现代化建设进程。2020年,我国因洪涝灾害造成的直接经济损失高达2 143.1亿元;有751条河流发生超警戒线洪水,长江、黄河、淮河、珠江、太湖等大江大河大湖共发生18次编号洪水。与此同时,城镇洪涝灾害也十分突出,逢暴雨必涝已成为一种城市通病。

本专题围绕水资源、水生态、水环境、水灾害等问题,开展了变化环境下水灾害应对的系列研究,从水灾害形成机理入手,研究主要影响因素,辨析各因素之间的相互作用,模拟水灾害形成过程,开展预警预报,提出应对措施,以期减少水灾害损失,强化洪水资源化利用,实现水资源、水生态、水环境和谐友好,推动流域安全、有序、高质量和可持续发展。

本专题研究主要由西安理工大学水利工程学科开展,并取得了一批创新成果,为水灾害的防治与持续发展提供了理论基础。因成果较多,本刊共分两期发表。

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.03.001

# 西安市暴雨致涝成因分析及对策

侯精明<sup>1</sup>, 康永德<sup>1</sup>, 李 轩<sup>1</sup>, 陈光照<sup>1</sup>, 罗 慧<sup>2</sup>, 白光弼<sup>2</sup>,  
毕 旭<sup>3</sup>, 高徐军<sup>4</sup>, 孔祥建<sup>5</sup>

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 陕西省气象局 陕西省气象服务中心, 陕西 西安 710014; 3. 西安市气象局 西安市气象台, 陕西 西安 710016;  
4. 中国电力建设集团有限公司 西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065;  
5. 中国建筑集团有限公司 中建水务环保有限公司, 北京 100037)

**摘要:**受全球气候变暖和城市化进程加快的共同影响,近年来西安市极端降雨事件频发,2020年7月更是短时间内连续遭遇两场极端降雨事件。由此引发的内涝灾害已给社会造成了较大危害,成为制约城市经济社会发展的重要因素。通过调研西安市2020年7月内涝实况,从水文气象及下垫面因素、市政工程及排水设施因素、设施管理因素三方面深入分析了西安市内涝成因,并提出了开展暴雨致涝预报预警工作、加强防洪排涝基础设施建设、提倡系统治理及灰绿协同并举的内陆城市防涝方法。

**关键词:**城市内涝; 极端降雨; 内涝成因; 海绵城市; 洪涝管理

中图分类号: X43

文献标志码: B

文章编号: 1006-4710(2020)03-0269-06

## Analysis and countermeasures of inundation caused by heavy rain in Xi'an

HOU Jingming<sup>1</sup>, KANG Yongde<sup>1</sup>, LI Xuan<sup>1</sup>, CHEN Guangzhao<sup>1</sup>, LUO Hui<sup>2</sup>, BAI Guangbi<sup>2</sup>,  
BI Xu<sup>3</sup>, GAO Xujun<sup>4</sup>, KONG Xiangjian<sup>5</sup>

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shaanxi Meteorological Service Center, Shaanxi Meteorological Bureau, Xi'an 710014, China; 3. Xi'an Meteorological Station, Xi'an Meteorological Bureau, Xi'an 710016, China;  
4. Northwest Engineering Corporation Limited, Power Construction Corporation of China, Xi'an 710065, China;  
5. China construction water & environment Co., LTD, China State Construction Engineering Corporation, Beijing 100037, China)

**Abstract:** Due to the combined effects of global warming and the acceleration of urbanization, extreme rainfall events have occurred frequently in Xi'an in recent years. In July 2020, there were

收稿日期: 2020-09-01; 网络出版日期: 2020-09-28

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20200928.1142.010.html>

基金项目: 国家“十三五”重大研发专项资助项目(2016YFC0402704); 国家自然科学基金资助项目(51709223); 陕西省水利科技项目(2017slkj-21)

第一作者: 侯精明,男,博士,教授,博导,研究方向为城市水利。E-mail: jingming.hou@xaut.edu.cn

two consecutive extreme rainfall events in a short period of time. The resulting inundation disaster has caused great harm to the society and has become an important factor restricting the economic and social development of cities. By investigating the actual situation of inundation in Xi'an in July 2020, this article analyzes the causes of inundation in Xi'an from three aspects: hydrometeorology and underlying surface factors, municipal engineering and drainage facilities factors, and facility management factors; it also puts forward the forecasting and early warning work of rainstorm-induced inundation, strengthening the construction of flood control and drainage infrastructure, advocating system governance and gray-green coordination of inland cities to prevent inundation.

**Key words:** urban inundation; extreme rainfall; causes for inundation; sponge city; flood management

在全球气候变化引发的极端暴雨、城市“雨岛效应”引发的局部强降雨以及快速城市化改变下垫面的背景下,城市洪涝灾害的频繁发生已成为阻碍城市发展和管理的突出问题<sup>[1]</sup>。据统计,全球55%的人口居住在城市地区,预计这一数值在2030年将达到60%<sup>[2]</sup>。在可预见的未来,洪水对这些人口密集的政治、商业和交通枢纽中心的影响将是灾难性的<sup>[3-4]</sup>。西安是关中平原城市群的核心城市,也是国家发展改革委、住房和城乡建设部批准建立的第九个国家中心城市。近年来,西安市短历时强降雨发生频次日益增多,内涝灾害频发,给城市发展带来了巨大损失,如2016年“7·24”特大暴雨、2018年“8·22”特大暴雨、2020年“7·10”特大暴雨和“7·30”特大暴雨。其中,2020年7月,西安市多次突发强对流降雨天气,20天内连续遭遇两场暴雨,西安多处下凹式立交桥、下穿通道、十字路口成为积水的重灾区,如图1所示。

暴雨致使部分地区下穿通道积水十分严重,达成人腰部以上,部分车辆在积水里熄火,导致交通阻塞无法通行,给市民出行造成不利影响。极端暴雨引发的内涝已成为制约城市经济社会发展的重要因素,分析致灾成因并提出防灾减灾对策已刻不容缓。本文结合涝灾发生时的实地调研数据及气象、下垫面详细资料,对西安市内涝成因进行分析,并提出了相应的内涝防治对策。

## 1 西安市内涝积水成因分析

每逢雨季,西安市“大雨积水、暴雨看海”的内涝泛滥问题层出不穷。城市内涝的发生是各方面因素综合作用的结果,致灾因素复杂。就内陆城市独特的自然条件而言,西安市的内涝积水来源主要为特大暴雨,加之排水管网设计标准低,导致超标雨水径流无法及时排出。致灾因素可以总结为自然与人为两方面。自然致涝因素主要有水文气象及下垫面因素,人为致涝因素主要有市政工程及排水设施因素、设施管理因素。

### 1.1 水文气象及下垫面因素

#### 1.1.1 极端降雨频发

西安地处关中中部、秦岭北麓,属温带大陆性季风型气候区,夏季高温多雨。近年来,随着全球变暖对水循环要素时空分布特征的影响加剧,且城市化发展使得“热岛效应”显著,致使城市大气层结构不稳,对流性极端降水频次和强度呈增加趋势<sup>[1]</sup>。西安市极端降雨时空演变规律量化分析结果<sup>[5]</sup>表明,全市降水量整体呈现下降的趋势,但极端降雨事件却在逐渐增加,其中中心城区的增加幅度较周边区县更加明显。从1976年开始,西安市年降水量在波动中呈逐年下降态势,减少速率为6.05 mm/10a,日降水强度呈上升趋势,增加速率为0.28 (mm/d)/10a。

继西安市遭遇2016年“7·24”特大暴雨(总降雨量为123 mm,超过百年一遇)以来,2020年7月短时间内连续出现两场极端暴雨事件,频率高、间隔短。两次降雨中心不同,据V8870西安站和V8801丰庆路空管局站监测资料显示,两次降雨过程累计



图1 西安市2020年7月内涝点分布图

Fig. 1 Distribution map of inundation location in July 2020

降雨量均在 70 mm 左右,重现期约为 40 年一遇。

两场暴雨的峰值降雨历时及降雨量相近,均呈现出历时短、瞬时降雨强度大的特点。西安市现状绝大多数排水管网暴雨设计重现期为 1 年一遇<sup>[6]</sup>。如图 2 所示,两场暴雨的降雨强度已远超管网排水能力。由于暴雨中心集中于市辖区,如图 3 所示,故城区雨水径流量显著增加,进而提高了城市内涝等气象衍生灾害的发生几率。

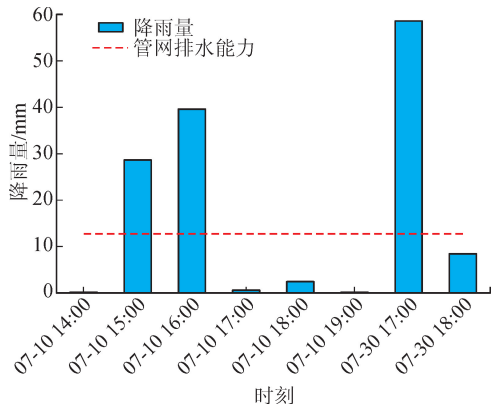
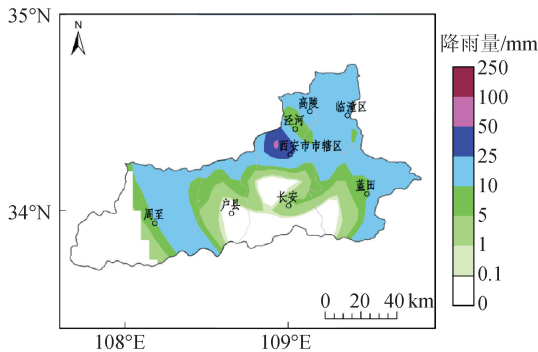
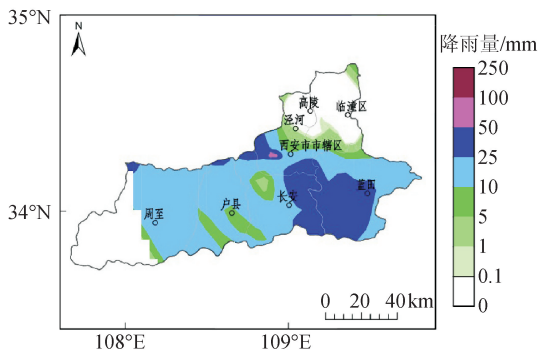


图 2 2020 年 7 月两次强降雨过程

Fig. 2 Process of two heavy rainfalls in July 2020



(a) 2020 年 7 月 10 日 12 时至 20 时短历时强降雨



(b) 2020 年 7 月 30 日 16 时至 18 时短历时强降雨

图 3 2020 年 7 月强降雨累计降雨量分布图

Fig. 3 Distribution map of cumulative rainfall in July 2020

### 1.1.2 市区下垫面不透水面积占比大

随着西安市被纳入国家中心城市建设计划及“一带一路”合作倡议的提出,西安的城市化进程进一步加快,1995—2016 年期间,城镇面积平均每年

增加 28.88 km<sup>2</sup>,但水体、林地、园地面积变幅较小,西安主城区下垫面由渗透系数较大的耕地、荒地变为以水泥、混凝土为主的城市场地<sup>[7]</sup>。图 4 为西安市北部某区域的不透水区域分布图,不透水区域已占该区域总面积的 80% 以上,而透水区域面积仅剩不到 20%。

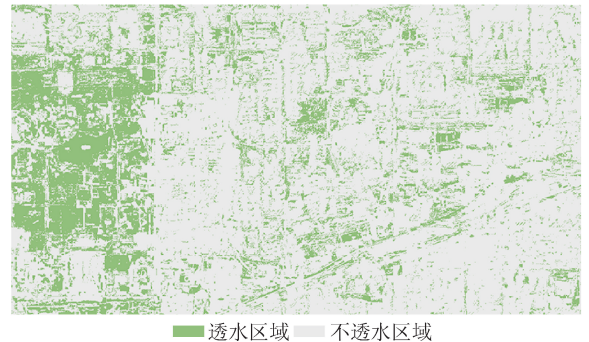


图 4 西安市金花隧道附近不透水区域

Fig. 4 Impervious area near Jinhua Tunnel, Xi'an

城市不透水面积的增加会促使城市地表径流的时空模式及水循环过程发生变化,不仅会减少雨水下渗量,而且会引发降水突增的正反馈效应及蒸散发骤减的负反馈效应,增加地表径流系数<sup>[8]</sup>。与此同时,硬化地面的地表曼宁系数较裸土、绿地更小,雨水径流的汇聚速度更快,极易在地势低洼路段和下穿通道形成内涝积水。

## 1.2 市政工程及排水设施因素

### 1.2.1 局部地区地势低洼

短历时强降雨诱发的内涝主要发生在城区局部地势低洼区域,如局部低地、下穿隧道等。城市改造过程中,随着周边新建筑物的建成,部分街巷地势变得相对低洼。当暴雨发生时,地面排水不畅,这些天然低地就会迅速产生严重积水。而下穿通道地势处于局部区域的最低点,周边汇流区域的地表径流通过与之相连接的主干道及辅道快速汇聚,加之通道处形似“锅底”,短时间内形成较深积水。且地表径流缺乏蓄滞过程,峰值流量大,峰现时间短,致灾程度高。图 5 为使用 GAST 模型<sup>[9]</sup>模拟的内涝积水情况。



图 5 西安市二环北路明珠家居至未央立交段模拟内涝积水  
Fig. 5 Simulated inundation of the region between Mingzhu furniture store and Weiyang overpass, Xi'an Erhuan North Road

由于道路在规划建设时,没有考虑到道路周边区域的规划发展,排水系统不能容纳因城市发展而增加的雨水径流,大多数位于建筑物密集区的十字路口、下穿隧道将成为超标暴雨发生时的主要内涝点。

### 1.2.2 自排及抽排能力不足

城区快速发展造成了地表径流系数的增加和曼宁系数的减少,从而提高了峰值径流量,缩短了径流汇聚时间,径流过程线偏于“尖瘦”型。部分片区尤其是老城区管网排水设计能力不足,汇入雨水自排不及,且由于施工方的不规范施工行为,存在管道混接、错接现象,影响其排水效果,如图6所示。此外,市政未落实定期的清淤和疏浚机制,长此以往,树叶、生活垃圾等漂浮物严重堵塞了雨水篦子进水口,如图7所示,影响雨水入流量。雨水无法及时排出,从而在道路中形成积水。在下穿通道和下巴式立交桥下,由于抽排泵站设计排水能力不足,强降雨导致的积水无法及时强排至市政管网。而且,配套调蓄池容积及进出口管径偏小、管道设施的老化和年久失修也会严重影响抽排效果。



图6 排水管道混接错接现象  
Fig. 6 Mixed connection and wrong connection of drainage pipes



图7 雨水篦子堵塞  
Fig. 7 Rainwater grate clog

### 1.2.3 城市排水管网系统雨污合流

部分老旧城区未开展改造,目前仍是雨污合流制管网。合流管道的纳管截污设施造成排水管道局部封堵,如图8所示,汛期遭遇短历时强降雨时,易堵塞雨水排放通道,致使排水不畅,且污水中的垃圾也易堵塞管道,若维护不及时,未能及时清理,将导致雨污合流制管网出现严重淤积现象,管网排水能力将极大下降。

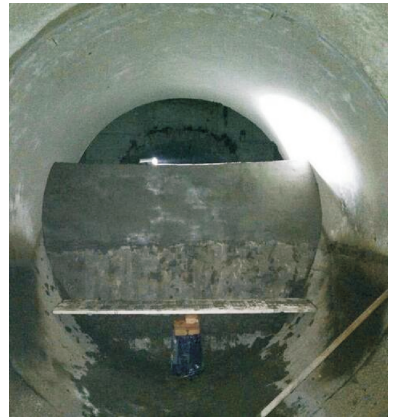


图8 合流制管道截污堰示意图  
Fig. 8 Intercepting weir of the combined pipeline

## 1.3 设施管理因素

### 1.3.1 防洪排涝规划不达标

城市建设缺乏对排水系统的长远、系统规划,未修建超标准大容量雨水泵站,导致管道系统和泵站排水能力难以满足大流量排放要求,从而使得积水现象时有发生。随着城市化的进一步推进,设计标准原本就偏低的城区排水系统,其排涝能力将进一步下降。

### 1.3.2 市政排水及应急措施未规范化

极端暴雨事件中,落叶、垃圾等杂物易堵塞雨水篦子,且排水管道未能及时清淤,造成了排水不畅。强降雨期间部分道路积水,导致交通瘫痪,流动泵车等应急抽排设备无法及时赶赴内涝积水点进行抽排作业。

### 1.3.3 蓄洪空间未充分利用

城市内现存的曲江池、兴庆湖、护城河、汉城湖、桃园湖等兼具蓄洪池功能的景观水体,具有减少或减缓城市内涝发生的作用,总调蓄水量 313 万 m<sup>3</sup>,调蓄面积 150 km<sup>2</sup>。但因环境水质原因,部分蓄洪空间无法容纳水质较差的雨水,已有调蓄空间的调蓄功能未全面发挥作用,城市原有的自然抗涝调蓄能力被弱化。

## 2 内陆城市内涝积水防控方法

### 2.1 开展暴雨致涝预报预警工作

若能提前预知灾情的发生,防灾减灾相关部门

就可科学制定减灾措施,在灾情发生前做好全面准备,从而极大地提升减灾效果。图9所示的洪涝灾害预报预警平台是国内外大力提倡的防灾措施。

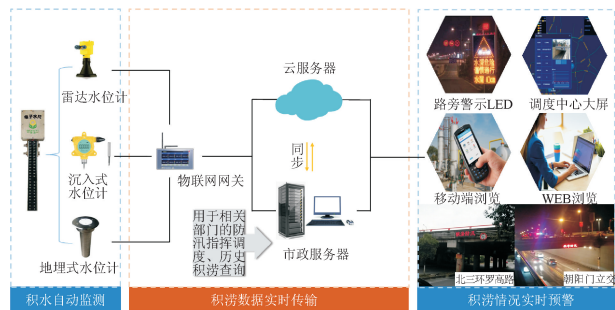


图9 城市内涝积水自动监测及实时预警

Fig. 9 Automatic monitoring and real-time warning of urban inundation

一方面,通过耦合气象降雨预报,利用雨洪过程数值模型来开展暴雨致涝的预报工作,提高内涝灾害的预见期和精度,从而在降雨未到来前指导防灾工作,如市民出行、道路积涝预警及交通疏散。另一方面,在易涝点处布设水深、流速等传感器,实时接收积涝点的积水信息,通过在十字路口及下穿通道入口处的电子显示屏实时显示积涝程度,并利用现场警报设备、手机短信、微信公众号等形式发布道路积水信息,提醒市民安全出行。同时,将积涝信息和风险分析数据传输至车辆导航系统、城市管理系统、交通指挥系统及其他相关政府决策辅助系统,以指导智慧防汛工作的有力开展。

## 2.2 加强防洪排涝基础设施改造

1) 提高积涝易发片区抽排泵站的排水能力。在内涝积水易发的下穿通道内,进行抽排泵站的提标改造,提升其应急排水能力。增设或扩容排水暗渠,最低点处加密雨水篦子,扩大泵站进水管管径及蓄水池容积,满足立交桥范围积水调蓄能力,增加排水泵机组容量。

2) 优化整体城区的排水及调蓄系统。通过优化整体城区的排水管渠,进行系统化提标改造,避免错接、漏接和混接现象。同时,合理利用城区雨水调蓄空间,有效进行削峰错峰,降低排水峰值负荷,提升整体城区的排水能力。

3) 进行城市排水管网雨污分流改造。雨水系统进行“溯源调查+混接改造”,污水系统采取“顺流调查+混接改造”。雨污分流改造通过改接原有管道、新设雨污管道,实现雨、污水分类收集处理,雨水排入河道,增强城市蓄水能力,污水纳入污水处理厂进行处理再利用。不具备改造条件的城区,在暴雨时期应去掉合流管网截污堰板,避免排水阻滞。

4) 设置道路反坡和临时挡水设施,阻止高处水流汇入。设置道路反坡和临时挡水设施如挡水墙,阻挡桥区外的路面积水汇入桥区低处汇水区域,从而降低了低洼区积水量,减轻了桥区排水负荷,为泵站和应急抽水泵车及时抽排积水提供缓冲时间,如图10所示。

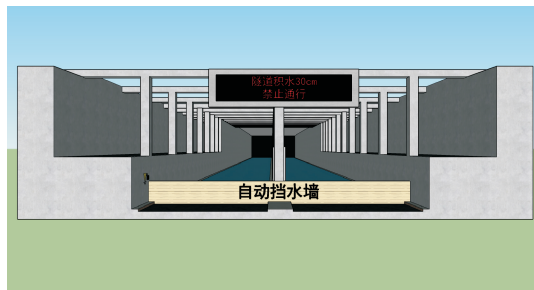


图10 下穿通道“自动挡水墙”示意图

Fig. 10 The “automatic retaining water wall” at a tunnel

## 2.3 提倡系统治理及灰绿协同并举

### 2.3.1 加强径流源头与过程控制,建设灰绿设施协同作用的海绵城市

在居民小区、公建片区、道路、建筑物屋顶等区域,建设雨水花园、植草沟、透水铺装、绿色屋顶等小规模、分散多样的涵盖“渗、滞、蓄、净、用、排”六大类型海绵城市功能的绿色基础设施,减少不透水面,增加可渗透、能蓄滞的设施,如图11所示。

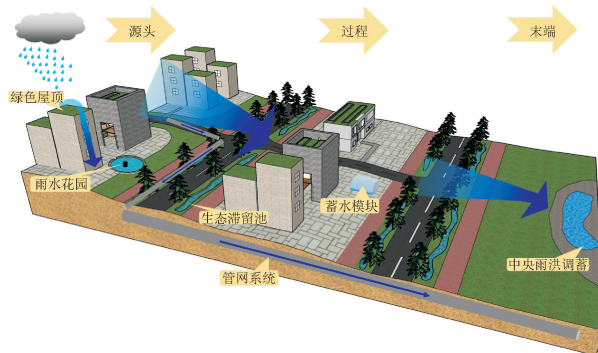


图11 海绵城市灰绿基础设施示意图

Fig. 11 Gray-green infrastructure of the sponge city

径流形成初期,可充分利用上游汇水区域的排水设施,减少上游来水,实现径流总量的源头控制。在水流向汇水区域汇聚的过程中,通过各类海绵设施进行洪峰流量控制,减少路面水流的汇合量,实现过程削减。同时,实施工程措施,如修建地下大型缓冲区,以便在内涝时缓解内涝、干旱时充分利用该部分水源。在内涝严重区域加强灰色设施建设,例如修建地下综合管廊,提升排水能力。

### 2.3.2 开展城市深层隧道系统工程建设

将深层隧道工程(深隧工程)纳入城市规划编制中,当雨季来临时,深隧将作为合流制溢流污水和初

期雨水的调蓄和传输通道,雨污经污水泵组提升后输送至污水处理厂进行处理,如图12所示。如果遇到大型暴雨,深隧将作为雨水排涝通道,发挥排涝功能,大大减少内涝灾害的发生。

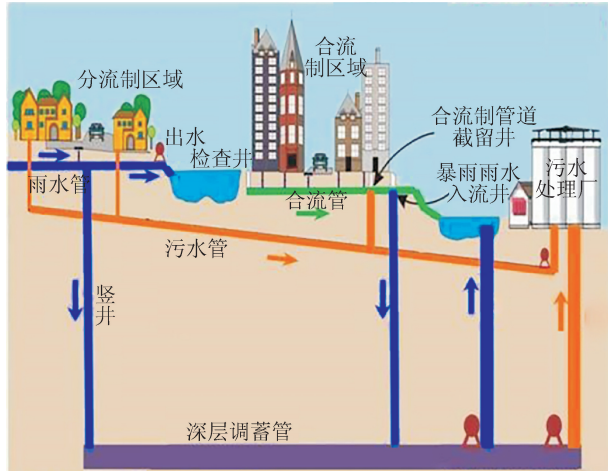


图12 城市深层隧道系统

Fig.12 Urban deep tunnel system

### 3 结 语

城市内涝是个“系统性疾病”,致灾因素复杂。通过分析典型内陆城市——西安于2020年7月发生的内涝灾情,可知致涝因素主要有:水文及下垫面因素、市政工程及排水设施因素、设施管理因素。具体表现为:城市化使市区下垫面不透水面积显著增加;城市工商业的快速发展促使大气凝结核增多,导致极端暴雨频发;城市排涝管控制度及基础设施不达标;城市建设缺乏系统性规划,致使局部地势低洼;雨季未及时维护疏浚排涝设施。针对这些内涝诱发因素,本文提出了内陆城市的内涝防治对策,包括建设内涝灾害预报预警平台、加强防洪排涝基础设施建设、提倡系统治理及灰绿协同并举。

#### 参考文献:

- [1] 张建云,宋晓猛,王国庆,等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战:I. 城市水文效应[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 594-605.  
ZHANG Jianyun, SONG Xiaomeng, WANG Guoqing, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I: Hydrological response to urbanization [J]. Advances in Water Science, 2014, 25 (4): 594-605.
- [2] TOTARO F, ALBERICO I, DI MARTIRE D, et al.

- The key role of hazard indices and hotspot in disaster risk management; the case study of Napoli and Pozzuoli municipalities (Southern Italy) [J]. Journal of Maps, 2020, 16(2): 68-78.
- [3] TANAKA T, TACHIKAWA Y, ICHIKAWA Y, et al. An automatic domain updating method for fast 2-dimensional flood-inundation modelling [J]. Environmental Modelling & Software, 2019, 116: 110-118.
- [4] GERAVAND F, HOSSEINI S M, ATAIE-ASHTIANI B. Influence of river cross-section data resolution on flood inundation modeling: case study of Kashkan river basin in western Iran [J]. Journal of Hydrology, 2020, 584: 124743.
- [5] 朱来福. 变化环境下基于整体模式的城市洪涝过程研究[D]. 西安:西安理工大学, 2019.  
ZHU Laifu. Research on urban flood process based on overall model in changing environment [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [6] 张旭,李占斌,何文虹,等. 基于 MIKE URBAN 的西安市中心城区雨洪过程模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(6): 157-163.  
ZHANG Xu, LI Zhanbin, HE Wenhong, et al. Simulation of flood process in the central urban area of Xi'an based on MIKE URBAN [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(6): 157-163.
- [7] 姚炳光. 城市化进程对西安市水系变化与水文特征的影响[D]. 西安:长安大学, 2018.  
YAO Bingguang. The influence of urbanization on water system changes and hydrological characteristics in Xi'an [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [8] 刘珍环,李猷,彭建. 城市不透水表面的水环境效应研究进展[J]. 地理科学进展, 2011, 30(3): 275-281.  
LIU Zhenhuan, LI You, PENG Jian. Progress and perspective of the research on hydrological effects of urban impervious surface on water environment [J]. Progress in Geography, 2011, 30(3): 275-281.
- [9] 侯精明,王润,李国栋,等. 基于动力波法的高效高分辨率城市雨洪过程数值模型[J]. 水力发电学报, 2018, 37(3): 40-49.  
HOU Jingming, WANG Run, LI Guodong, et al. High-performance numerical model for high-resolution urban rainfall-runoff process based on dynamic wave method [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(3): 40-49.

(责任编辑 周 蓓,卢 秀)