

赵超辉, 万金红, 张云霞, 等. 城市内涝特征、成因及应对研究综述[J]. 灾害学, 2023, 38(1): 220–228. [ZHAO Chao-hui, WAN Jinhong, ZHANG Yunxia, et al. Review of the Characteristics, Causes and Governance of Urban Flood in China [J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(1): 220–228. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.01.033.]

城市内涝特征、成因及应对研究综述^{*}

赵超辉¹, 万金红¹, 张云霞², 张葆蔚³

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 应急管理部国家减灾中心, 北京 100124;
3. 应急管理部防汛抗旱司, 北京 100089)

摘要:近年来, 频发的城市内涝灾害, 造成了严重经济损失和人员伤亡, 成为社会各界普遍关注的热点问题。在梳理近年文献资料的基础上, 识别出城市内涝灾害具有广泛性与高频易发性、随机性与短历时性、传导性与强破坏性、可防御性与利害性等特征; 并从降水变化、城市扩张、排水系统、防涝管理四个方面进行城市内涝成因分析; 最后基于雨水管理、组织管理、工程管理、应急管理四个方面总结了城市内涝的治理策略。认为当前中国城市的内涝防控工作, 工程措施、非工程措施相结合的防涝理念深入人心, 但在实施层面需要应对对体制、法规、技术等各方面的问题和挑战。未来的城市内涝治理工作应以具体问题为导向, 不仅要重视理论体系的发展和完善, 还应更多的将理论知识转换为实际应用。

关键词:城市内涝; 内涝特征; 内涝成因; 内涝治理

中图分类号: X43; X915.5; TU992 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2023)01-0220-09

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.01.033

近年来, 气候变化加剧^[1]、城市快速扩张^[2]使得区域性降雨发生的频率和强度呈现增加趋势^[3], 导致城市洪涝灾害越来越频繁, 造成了严重的社会危害。据统计, 2000—2018 年全球有 223 万 km² 的陆地被洪水淹没, 2.55 亿以上人口的正常生活受到干扰^[4]。在中国, 洪涝灾害造成的全国年均直接经济损失高达 1 500 亿元左右^[5-12], 2012 年北京“7.21”暴雨、2021 年郑州“7.20”暴雨造成社会影响至今仍被铭记。城市洪水已成为威胁地区公共安全和社会经济发展的新兴挑战, 受到广泛关注。

为解决“逢雨必涝”“市区看海”的城市难题, 国务院办公厅于 2013 年发布了《关于做好城市排水防涝设施建设工作的通知》^[13], 住建部印发了《城市排水防涝设施普查数据采集与管理技术导则(试行)》^[14]《城市排水(雨水)防涝综合规划编制大纲》^[15]等文件, 为科学精准有效治理城市内涝提供政策支持。次年, 住建部又相继发布《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》^[16]《关于开展中央财政支持海绵城市建设试点工作的通知》^[17]等文件, 并联合财政部、水利部在 2015 年至 2016 年陆续开展两批(共 30 座城市)海绵城市试点建设, 以水为核心的海绵城市理念逐渐被公众熟悉^[18]。而在 2021 年 4 月, 国务院办

公厅在印发的《关于加强城市内涝治理的实施意见》^[19]中明确提出了城市内涝治理目标, 即到 2025 年全国城市基本形成“源头减排、管网排放、蓄排并举、超标应急”的排水防涝体系。城市内涝问题受到政府部门高度重视, 已上升到国家战略层次。

在学术界, 内涝灾害也是防洪减灾领域研究的热点问题之一, 众学者围绕灾害模拟^[20-22]、风险评估^[23-24]、致灾机理^[25-26]、内涝特征^[27-28]、治理策略^[29-30]等方面展开广泛研究, 取得了诸多成果。然而, 目前内涝灾害相关领域的研究仍存在一些亟待解决的难题, 一方面内涝灾害是社会因素和自然因素共同影响的复杂城市问题, 涉及气候变化、生态水文、市政管理、城市发展等多个学科领域, 量化不同领域致灾因素之间的耦合关系较为困难, 对内涝致灾机理整体性、全面性的认识不足; 另一方面, 我国的内涝防控体系尚未完全建立, 内涝治理实践的成功经验少, 治理手段大多倾向于借鉴于欧美等国的技术经验, 对国内城市内涝问题适应性差, “水土不服”现象普遍存在。鉴于此, 本文系统整理近年国内外城市内涝研究的相关文献, 进一步梳理和总结我国城市内涝灾害特征、内涝成因及内涝治理策略, 以期望为内涝灾害研究和城市防灾减灾工作提供参考。

^{*} 收稿日期: 2022-07-14 修回日期: 2022-11-18

基金项目: 国家重点研发项目“小冰期以来东亚季风区极端气候变化及机制研究”(2018YFA0605600); 国家重点研发项目“不可移动文物自然灾害风险评估与应急处置研究”(2019YFC1520800)。

第一作者简介: 赵超辉(1997-), 男, 汉族, 河南开封人, 硕士研究生, 主要从事防洪减灾研究。E-mail: 3152735104@qq.com

通信作者: 万金红(1980-), 男, 汉族, 北京人, 高级工程师, 主要从事防洪减灾、水文气候史研究。E-mail: roaringwan@sina.com

1 城市内涝灾害特征

1.1 广泛性与高频易发性

我国众多城市都面临着内涝灾害威胁。据统计, 2008—2010 年全国 351 个城市中约 62% 的城市发生了积水内涝事件, 其中有 137 座城市的灾害发生次数超过 3 次^[31]。而在 2011—2018 年之间, 全国每年平均有 154 座城市遭受内涝灾害侵扰(图 1), 2013 年受淹城市数量更是达到了 243 座^[5-12]。系统整理了 2011—2018 年受淹城市的资料, 并绘制统计时段内全国内涝城市的空间分布图(图 2)。从图 2 可以看出, 内涝灾害的发生范围十分广泛, 涵盖了全国一半左右的区域, 并且主要集中在东部和南部城市。

此外, 随着区域极端暴雨发生频次和强度的增加, 城市内涝事件的发生概率显著提高^[32-33], 逐渐表现出高频易发性的特征。以武汉为例, 该市在 2015 年、2016 年、2018 年、2019 年均发生了严重的内涝灾害, 尤其是在 2016 年 7 月, 短短一个月时间内城区先后 12 次被淹^[34]。从全国城市的受灾情况来看, 内涝灾害也是更加频繁。柳杨等^[35]对 1990—2014 年的全国内涝灾害发生次数进行统计分析(表 1), 发现全国内涝城市的受灾总次数先减小后增加, 同时发生高频次内涝灾害的城市越来越多。城市内涝灾害愈演愈烈, 尤其是 21 世纪以后更加显著^[36]。

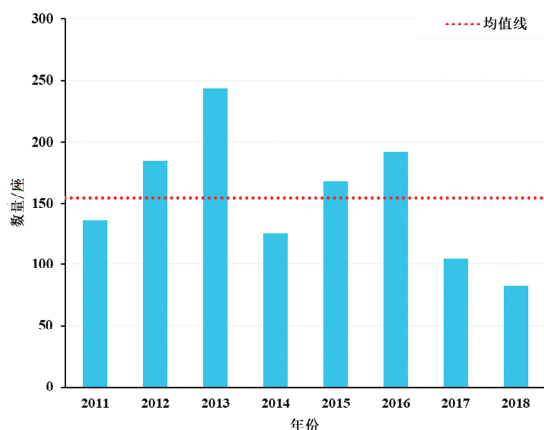


图1 2011—2018 年内涝城市数量

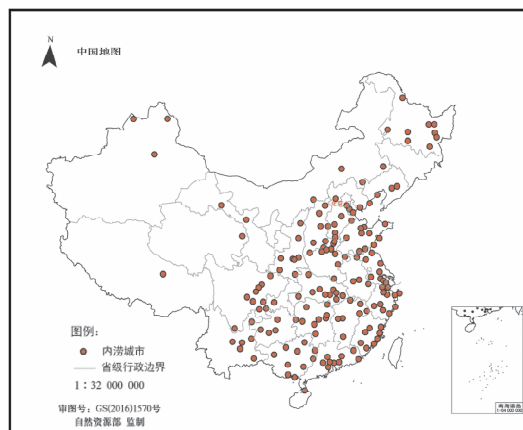


图2 2011—2018 年全国内涝城市分布

表1 1990—2014 年期间内涝灾害发生次数统计

年份	灾害总次数/次	不同灾害发生次数的城市数量/座				
		0~4 次	5~9 次	10~14 次	15~19 次	20 次以上
1990—1994	2 085	145	153	54	6	0
1995—1999	1 390	253	77	26	2	0
2000—2004	1 287	251	88	18	1	0
2005—2009	2 380	166	114	69	6	3
2010—2014	2 270	163	128	21	18	21

注: 表1 根据柳杨等人^[35]的研究整理。

1.2 随机性与短历时性

内涝灾害的发生位置具备随机性特征。城市洪水的影响区域从局部范围、排水管网、河道水系依次增加, 受产汇流机制、排水体制及建设环境地形差异影响^[37], 内涝灾害可以发生在影响区域内的任意位置, 具有很强的随机性。具体来讲, 灾害有可能发生在周边高中间低的低洼地带, 如下沉式立交桥、涵洞、隧道等^[38], 这些区域的地形特征使得雨水由高地势向低洼处汇集, 在地势最低处形成内涝。同时, 灾害也有可能发生在某些特定管网节点或城市水系附近, 如老旧管网交汇处、管网密集处、河道湖泊附近等^[39-40], 当径流量超出上述位置的排水能力时将会发生溢流, 洪水流向四周形成内涝。内涝灾害的发生位置类型多且情况复杂, 给城市内涝的监测预警工作带来巨大困难。

在时间尺度上, 城市内涝具备短历时性的特征, 受灾区域往往在较短时间便完成了整个致灾过程。由于极端雨强多集中发生于城市化率较高的城区^[41], 汇水面积相对较小, 同时不透水下垫面加快了降水的汇流速度^[42], 暴雨产汇流时空尺度被缩减。高强度、小范围的集中暴雨使得地表径流量迅速增加, 很快便能超出该区域的排水能力, 进而造成积水破坏。如 2007 年 7 月 18 日, 济南及其周边地区遭受特大暴雨袭击, 市区最大 1 h 雨量高达 151 mm, 降水仅 4 h, 市区水文站便出现最高洪峰水位, 造成低洼地区积水, 交通道路瘫痪^[43]。

1.3 传导性与强破坏性

传导性是内涝灾害的显著特征。现代城市是一个复杂巨系统,其正常运转是由交通、通信、供水、排水、供电等生命线系统所决定的^[44],这些系统彼此交织,相互依赖。倘若某一节点的损坏程度达到临界条件,破坏性将通过城市系统之间的关联性进行传递,由单一系统逐渐蔓延到其他系统,从而发生连锁反应^[43]。综合现有文献研究成果编绘的城市内涝灾害传导过程图(图3)显示,当城市易涝点汇集大量积水后,会导致区域内交通、供水、供电、通信等公共基础设施被淹没,进而引发交通拥堵瘫痪、通信受阻、区域断水断电等一系列问题^[45],严重影响城市运行和市民生产生活。同时,供水设施被淹易引发饮用水污染进而爆发传染性疾病^[46]、电力设备被淹易造成触电伤害、地铁隧道进水易导致车辆被淹和群众受困^[47],这些潜在风险将威胁市民的人身安全。另外,内涝积水退散后,大量淤泥和垃圾被滞留在原地^[48],倘若不及时清理,会严重阻碍居民日常出行。

内涝灾害的强破坏性主要表现在直接损失、间接损失两方面,其中直接损失量级与受灾区域的发展水平相关,而间接损失量级则是由内涝灾害的传导性所决定的。一方面,城镇化进程促使人口、社会财富等资源要素向经济发达城市集中^[49],而这些城市往往是内涝灾害的重灾区^[50],一旦发生内涝灾害往往会带来巨大的直接经济损失(表2)。另一方面,内涝灾害的传导性特征使得受灾区域远超出受淹范围,当超过影响区域的承灾能力时,间接损失将快速剧增^[43]。如2021年郑州720暴雨期间,雨水冲毁五龙口停车场挡水围

墙,涝水灌入地铁隧道,致使地铁5号线列车失电迫停,导致14人死亡;郑州京广快速路北隧道发生淹水倒灌,导致6人死亡,247辆汽车被淹;郭家咀水库发生漫坝,下游紧急转移9.8万人,造成重大经济损失和社会影响^[51]。

1.4 可防御性与利害性

随着人类社会的发展,城市水循环过程已经逐渐转变为“自然—社会”二元模式^[52],人类活动在自然与社会水循环耦合过程中的干扰作用正在不断变强。因此,通过实施合理有效的工程、非工程措施,在内涝可能产生的源头、中间及末端进行控制,可以有效防御内涝灾害,减轻灾害损失^[53]。广州中心城区在2009—2015年通过新建或替换排水管道、河床清淤、流域管理等措施,有效减弱了市区热点地区的洪水风险,内涝状态趋势整体呈现好转^[54]。

此外,与其他自然灾害不同,城市内涝具备利害两面性。内涝积水往往会对居民的生命财产安全构成威胁,其灾害性无可争议。随着低影响开发(LID)理念的不断发展,利用分布式雨水控制措施和自然水文特征进行城市雨洪资源化管理,以缓解城市供水压力,化害为利,已成为城市内涝治理的新追求^[55]。欧美等国自上世纪九十年代已经开始进行雨洪资源化管理的研究,提出了许多符合本国国情的雨洪管理方案,如最佳流域管理(美国)、可持续排水系统(英国)、水敏感性城市(澳大利亚)、低影响城市设计与开发(新西兰)等^[56]。在其他国家类似研究的基础上,我国提出了以水为核心的海绵城市理念,并先后在北京、上海、西安等城市开展试点工作^[57]。

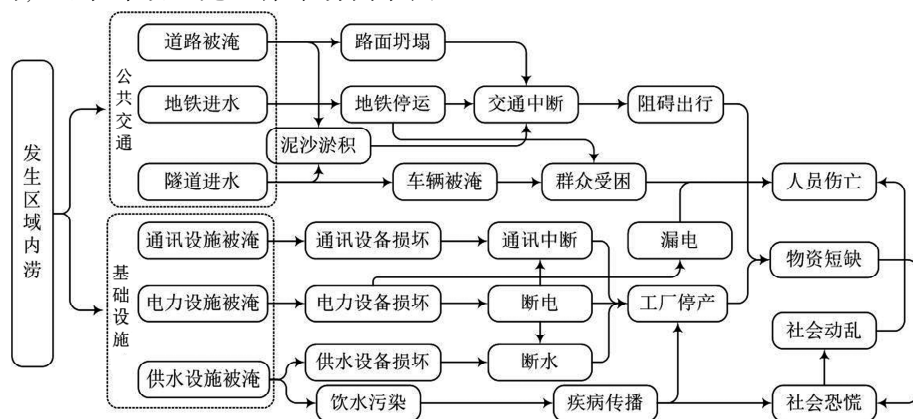


图3 城市内涝灾害传导过程

表2 暴雨洪水事件及灾害损失

时间	事件	灾害损失
2012年7月	北京“7.21”暴雨灾害	受灾面积1.6万km ² ,成灾1.4万km ² ,受灾160万人,死亡79人,房屋倒塌1万余间,经济损失116.2亿元 ^[13] 。
2015年7月	浙江暴雨	受强台风“灿鸿”影响,全省平均降雨量77mm,造成省内10市65县(市、区)受灾,受灾人口221.30万人,直接经济损失89.50亿元 ^[5] 。
2016年7月	武汉暴雨	全市200多处重要交通干道渍水,受灾人口多达100万,直接经济损失39.96亿元 ^[21] 。
2017年8月	广东暴雨	受强台风“天鸽”影响,广东大部地区降大到中雨,造成省内12市42县288乡(镇)受灾,受灾人口139.98万人,因灾死亡13人,直接经济损失超过269.82亿元 ^[6] 。
2017年6月	湖南暴雨	全省136个县(市、区)受灾,受灾人口1160.41万人,死亡50人,直接经济损失487.97亿元 ^[6] 。
2021年7月	郑州“7.20”暴雨洪水	河南省150县(市、区)1478.6万人受灾,因灾死亡失踪398人,其中郑州市380人;直接经济损失1200.6亿,其中郑州市409亿 ^[39] 。

2 城市内涝成因分析

明晰内涝成因是城市防灾减灾的基础和前提,本部分将从降水变化、城市扩张、排水系统、防涝管理四个方面系统梳理总结内涝成因。

2.1 气候变化改变极端降水特征

1850 年以来,全球平均温度已提高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,人类活动影响造成的全球变暖现象已是事实^[1]。在气温升高影响下,大气饱和状态时的水蒸气含量增加,水文循环速度加快,但稳定性减弱,易形成较大强度的降水过程^[58]。有学者对气候变化影响下的全球极端降雨时空分布特征进行了研究,如 KONAPALA 等^[59]将全球陆地区域划分为九个区,利用 CMIP5 模型评估 20 世纪末降水的平均值和季节性降水变化,结果表明,有 4 个区的季节性降水变化增加,其余 5 个区的平均降水量增加;WASKO 等^[60]对北美、欧洲、巴西、大洋洲和南部非洲 30 年及以上活跃站的水文数据进行分析,发现极端降雨事件的峰值强度以大约 $6\sim 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的速率增加,罕见量级降雨事件峰值强度增幅更大,同时降雨持续时间整体呈现减小趋势。

在中国,气候变化对极端降水的影响也十分显著。在发生频率上,极端降水天气呈现逐渐增加趋势。近 20 年我国极端降水事件的发生概率已超过 20%,高于 20 世纪中期极端降水事件的发生概率($10\%\sim 15\%$)^[31]。在降水特性方面,暴雨极端性更强。研究发现^[61],近 60 年(1961—2016 年)我国大部份地区夏季极端降水量均显著增加,仅华北及西南部分地区表现出下降趋势,各地夏季极端降水量占总降水量的比例已普遍达到 30% 以上,西北部地区的比例甚至高于 50%。短历时、高强度的极端降水事件频频发生,给城市排水系统带来了巨大压力,进而增加了城市内涝风险^[62]。另外,气候变化导致海平面上升以及强台风、风暴潮等灾害发生的机会增多,进一步加剧了沿海城市的淹没风险^[63]。沿海城市的内涝灾害往往是这些因素和极端降水共同驱动的复合灾害事件,具体表现为当强台风、风暴潮灾害发生时,河口潮位抬升,进而导致下游发生增水顶托,叠加海平面上升和极端降水作用,极易引发局部区域的城市内涝^[64]。

2.2 城市扩张影响自然水文循环

改革开放以来,我国城市建设加快,全国常住人口城镇化率已经从 17.9% (1978 年) 上升至 63.9% (2020 年)。伴随着城镇化的快速推进,市区人口密度、建筑密度不断提升,导致人工热量的大量排放以及建筑吸收、储存太阳辐射的能力增强,城市热岛效应不断凸显。彭建等^[65]借助土地利用数据对中国 285 座城市的地表温度进行了识别,结果发现有 98.9% 的城市在夏季夜间出现热岛效应,有 94.4% 的城市在冬季夜间出现热岛效应。在热岛效应影响下,城市区域的大气持水能力增加、稳定性变差,空气对流情况加剧^[54],导致城区有更大概率出现强降雨过程。有关研究表明^[66-67],在城镇化背景下城市中心城区和下风区极端降水事件更加密集,并且暴雨峰值更高、历时更短。更严重的是,城市密集的高层建筑阻碍

了降雨云团的运动,建筑上空经过的云团被分裂并在城市周围移动^[68],导致相同降水模式在市区的滞留时间被延长。

此外,城市规模的迅猛扩张带来复杂的下垫面变化过程,主要表现为土地类型变化以及地表特性改变,二者都对降雨的产汇流过程产生影响,大大增加了内涝灾害风险的暴露程度^[69]。一方面,城市基础设施建设需占用大量土地,为满足日益增长的用地需求,市区周边的农田、林地、湿地等绿地被侵占,湖泊、河网等水体空间被填埋或改造,导致城市暴雨洪水的调蓄空间被缩减。以武汉市为例,受城市扩张影响,该地区河湖水系数量和河网密度从 2000—2010 年分别降低了 14.69% 和 10.28%^[70],湖泊面积从 1996—2007 年缩减了 59.95%^[71],自然水系结构逐渐向简单、规则化转变,调蓄洪水、涵养水源等生态价值亦随之减小。另一方面,房屋、道路等建筑主要采用沥青、混凝土材料,居住用地和交通用地硬化率高,导致不透水区域范围扩大,地表下渗量减少,径流量增加。巨鑫慧等^[72]分析了 1980—2018 年之间的土地利用变化情况对京津冀城市群地表径流的影响,结果显示随着城市化的进程,京津冀地区不透水地表面积占比增加了 5.89%,地表径流量增加 11.83%。与此同时,由于粗糙的自然地表逐渐转变为较光滑的人工不透水层,地面糙率降低,径流汇流时间被缩短,导致峰现时间提前。陈佩琪等^[73]利用 SWMM 模型分析了广州车陂涌流域在不同时期(1980 年、2015 年及 2050 年)城市化水平下的水文演化规律,结果表明 2015 年、2050 年的峰现时间(相比于 1980 年)都提前了 0.5 h 以上。总体而言,城镇化背景下的城市水文循环规律已发生明显改变,进而引发致灾因子、孕灾环境的变化,最终导致城市内涝风险增加。

2.3 滞后的排水系统限制城市排水能力

中国城市的发展大都遵循“先地上后地下”的模式,住宅、交通等地上基础设施建设往往是首先解决的问题,而与之配套的地下基础设施由于投资高、审批多、施工难、工期长、形象效果不明显等缺点,往往不受城市管理者重视^[31]。地上建筑日新月异,但地下设施建设进度却进展缓慢。根据《城乡建设统计年鉴》数据显示,截止到 2020 年全国排水管道总长度为 80.3 万 km,建成区管网密度为 1.17 km/km^2 ,而美、日两国城市平均排水管道密度(2002 年)分别为 15 km/km^2 、 $20\sim 30\text{ km/km}^2$,差距明显^[74]。城市管网普及率低,难以满足极端降水期间的排水需求,致使内涝灾害频频发生。

排水系统标准偏低也是导致城市内涝的重要原因。由于历史原因,我国早期城市的排水设施建设主要借鉴苏联相关工程的经验和技术,设计标准大多为 1 年一遇或 0.5 年一遇,甚至更低^[75]。这远低于欧美国家雨水管渠的设计标准,当遭遇较大规模强降雨时,部分管段势必发生超载溢流,进而造成地面积水成灾。虽然,各城市已经逐步对老旧城区的排水系统进行升级改造,但由于建筑密度大、空间场地限制、工程费用高等原因,提档改造工作始终进展缓慢^[76]。

此外,混乱的管理模式进一步降低了城市排水系统的容量。王伟武等^[77]认为基础设施建设的

“业主制”模式,给与开发商较大的自主权力,使得开发商在满足建设标准的前提下尽可能降低工程质量来获取最大经济效益,在缺乏有效监管的情况下,工程质量往往难以达到要求;芮孝芳等^[78]认为城市排水系统大多是雨污合流的模式,导致管网排放雨水的能力被废污水侵占;WANG等^[79]认为排水系统的管理主体涉及中央到地方的多个部门,管理体制复杂,责任难以明确,导致整体运维效率降低,渗漏、堵塞、断头管等问题普遍存在;赵杨等^[80]认为部分城市对排水系统的改造缺乏系统性考虑,通常只是进行“头痛医头、脚痛医脚”式的简单改造,效果往往适得其反,进一步加剧了内涝风险。

2.4 管理体系的缺陷造成防涝力量浪费

城市防涝管理是解决城市内涝灾害的有效途径,也是工程性防涝手段的重要补充,随着近年内涝灾害发生频次的增加,内涝管理体系所暴露出的问题也越来越多。周宏等^[81]认为我国对“洪”“涝”灾害进行分开治理,人为割裂了两者之间的密切联系,同时城市排水与河道排涝之间缺乏有效衔接,进一步加重了内涝灾害的破坏程度;焦胜等^[82]认为综合性、系统性、完整性的防控管理机制是治理城市内涝的关键,而内涝管理部门之间协调性不佳导致防涝效率降低;张景奇等^[83]认为公众是内涝灾害的受害群体,拥有参与内涝治理决策的权力,但信息不对等、话语权被忽视、参与意识不足、参与模式模糊等困境,使得公众参与只能流于形式。防涝管理体系的缺陷往往造成防涝工作的冲突,最终导致防涝力量的浪费。

内涝灾害的预警应急也是城市防涝管理的重要内容,预警信息的及时性、准确性是制定城市应急救援方案的关键,应急救援方案的实施关乎城市防灾减灾工作的成败,然而目前国内大多数城市都难以有效做到各阶段有序衔接,灾害应急工作难以高效进行。吴先华等^[84]认为在灾害预警阶段需要对气象、灾情、经济等方面大量数据进行处理,实现各种数据的有效融合难度较大,对灾害应急决策管理造成巨大障碍。张冬冬等^[85]认为多数内涝灾害预警监测系统都是由水利、气象等

不同部门独立开发的,不同系统之间的关联较弱且大多建立静态数据库,难以实现灾害数据的实时更新。程占化^[86]认为应急救援专业器材不足、装备配备不合理、缺乏专业训练、部门联动机制不完善等问题普遍存在,致使现有救援力量难以满足较大灾害的抢险需要。

针对以上内涝成因研究成果,绘制了城市内涝致灾机理图(图4),可以看出城市内涝是自然因素和人为因素共同作用下的灾害事件。自然因素方面,气候变化改变了局部区域的气候环境,致使城市降水特征改变,成为内涝灾害发生的诱因之一,而沿海城市同时面临着气候变化导致的海平面上升以及强台风、强风暴潮等自然灾害频发的威胁,内涝风险更加显著。人为因素方面,城市化进程影响自然水循环的不同环节:降水阶段,热岛效应和雨岛效应加剧了城市降水变化,极端暴雨中心逐渐向市区转移;产流阶段,高密度的人工不透水层使得雨水下渗量减少,产流量增加;汇流阶段,较低的地表糙率缩短了汇流时间,最终形成同场次暴雨条件下峰值高、峰现早的洪水过程线,增加了排水压力。同时,管网普及率低、排水标准偏低、排水设施管理混乱等人为因素,进一步加重极端降水期间城市排水能力低、需求高之间的矛盾,加上不完善防涝管理体系的作用,最终导致“城市看海”现象频发。更严重的是,不同致灾因子在内涝形成过程中相互影响,加剧了城市对内涝灾害承载能力的脆弱性。综上所述,城市内涝成因十分复杂,探究内涝的致灾机理应从气候变化、城镇化、排水建设、防涝管理等多个角度进行,深入研究不同致灾因素之间的耦合关系,分析内涝灾害的内在规律,以此指导防涝治理策略的制定。

3 城市内涝的治理策略

防灾减灾是城市内涝领域研究的根本目的,因此内涝治理策略历来被学者们所重视。综合已有文献,城市内涝治理策略主要体现在雨水管理、排水管理、组织管理、应急管理等方面。

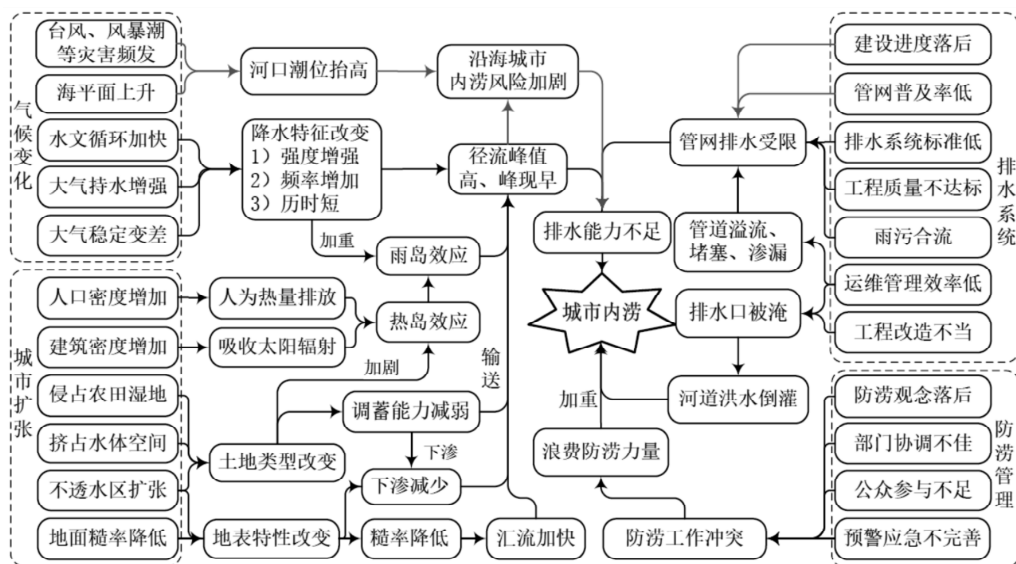


图4 城市内涝形成机理

3.1 基于雨水管理的治理策略

城市降雨是导致内涝灾害发生的根源,因此内涝治理的主要思路是对降雨产生到排放的全过程进行控制,其中雨水管理作为径流控制的主要手段,主张通过修复自然水循环系统实现对城市雨水的控制和利用,越来越被学者们的青睐^[87]。众多学者认为在汲取我国古代城市雨水工程经验智慧的基础上,借鉴国外成熟的现代雨水管理技术,探索出一条适合中国国情的雨水管理途径,可以从根源上改变现代城市的水害困境^[88-90]。在实施层面,雨水管理主要是通过改善下垫面条件提高城市地表的下渗、蓄滞能力,使得降雨尽可能保存在原地,从而分散洪水源头。具体措施包括增加透水覆盖面积^[91],合理规划绿地、水体等自然景观和建设用地的空间格局^[92],优化调整城市绿色空间的组成结构^[93],优化生物滞留池、下凹绿地、植被浅沟等绿色基础设施的配置组合^[94]等。这些措施在增加下渗、消减径流方面发挥积极作用,有效降低了城市内涝风险。

然而,由于我国雨水管理研究起步较晚,有许多地方需要改进。首先,雨洪管理的实施范围以道路、社区为主,对城市公园、湿地、河湖等景观功能的利用相对薄弱。其次,缺乏雨水管理相关技术标准的指导,工程规划建设“无据可依,无例可循”。第三,绿色基础设施建设成本、维护成本较高,加重了当地政府财政负担,且在面对较大规模的极端降水时,雨水管理工程所能发挥作用显著减小。因此,未来需对雨洪管理措施进行优化研究,探讨工程建设和管理机制的改进方法,制定相关指标和技术标准,并结合河湖水系、园林湿地、城市绿化等景观进行工程设施的合理布局研究。

3.2 基于排水管理的治理策略

城市排水系统是解决城市内涝问题的重要设施,然而由于历史欠账较多,我国的排水系统建设始终与城市发展水平不相匹配。为解决排水系统建设落后问题,众多学者建议从工程建设的不同阶段着手,规划阶段,转变城市发展思路,将水韧性思考和绿色发展理念纳入到传统排水规划的研究中,建立应对城市内涝灾害的弹性思维,同时协调排水规划与空间总体规划及其他专项规划之间的关系,进行不同定位规划的有机结合^[95];设计阶段,根据不同地区的防涝要求、暴雨发生频率和强度重新制定排水系统的设计标准,处理好市政排水与水利排涝标准之间的衔接问题^[96];施工阶段,通过限制开发商自主建设工程的权力,进行投资、建设、管理及运行职能的分离,并通过设立质量监督小组、建立工程质量奖惩制度等措施,强化质量监督管理工作^[77];管理阶段,转变传统排水观念,对雨污合流模式进行分流改造,尽可能把雨污水分开处理^[81]。

以上策略对于提高城市排水能力、缓解城市内涝具有一定的指导作用。然而大多数策略都是对排水系统进行优化和改善,较少考虑不同策略之间的相互影响以及排水系统性能改变对内涝城市环境、经济等方面的影响。因此,未来应综合考虑不同策略对排水系统的作用,同时加强排水管理策略对不同内涝城市的适应性研究。

3.3 基于组织管理的治理策略

内涝灾害不仅映射出城市发展与自然环境之间的矛盾,也揭示了城市防涝管理的缺陷。因此,

众多学者认为应将内涝治理视为一项综合性的系统工程,并基于自身研究提出相关策略。如陈伟珂等^[97]基于价值整合、资源和权力分配、政策制定和执行三个角度,指出城市内涝治理的碎片化管理状态,并在此基础上提出打造以多元主体参与,治理组织协同,信息技术支撑,制度保驾护航的城市内涝治理模式。张亮等^[98]分析了城镇化背景下内涝防治理念革新、方法革新、技术革新、管理革新的现状,认为应从成因分析、明确规划标准、构建规划体系、配套专题研究、信息化建设五个方面进行城市内涝防治规划与建设。张辰^[99]在借鉴发达国家防涝经验的基础上,提出通过适当提高管网设计标准和内涝防治标准,逐步建立涵盖“源头控制体系”“排水管网体系”“综合防治体系”内涝防治体系。

尽管学者们在各自研究领域提出了许多治理内涝的组织管理策略,但由于城市内涝成因的复杂性和内涝治理的现实困境,这些策略缺乏深层次理论的支撑和系统化的组织管理模式,实施效果往往不尽如人意。因此,对于内涝防治综合防控体系的探索仍是未来防涝策略研究的重点。

3.4 基于应急管理的治理策略

灾害应急管理是治理城市内涝的重要非工程措施,利用遥感、GIS、大数据等技术手段,收集历次降雨资料及灾害情况,建立内涝灾害数据库,并结合实时气象资料,对城市内涝过程进行模拟和预测。在此基础上,通过对暴雨期间的易内涝点进行实时监测和预警,为科学调度决策提供支撑从而减轻内涝灾害损失。目前,学术界对于内涝应急管理的研究较多,薛丰昌等^[100]基于普遍存在的视频监控数据,通过图像差分、区域分割、叠加积水深度标志点等方法提高监测精度,实现了对城市积涝区实时动态监测。李雯等^[101]基于系统动力学模型,建立了西安市内涝应急管理模型,指出灾害事前预警的准确性、事中应急救援的及时性和有效性是城市内涝应急管理的关键。

中国水利水电科学研究院(以下简称中国水科院)减灾中心在城市洪涝应急管理中做出了突出的业绩。自减灾中心成立以来,中国水科院结合我国防洪减灾的实际需求以及国外相关技术的发展情况,建立了以灾害风险管理为指导的城市防洪减灾理论体系,并在此基础上针对洪水风险分析方法和技术展开深入研究,取得了一系列达到国际先进水平的研究成果^[102]。其中,减灾中心自主研发的城市精细化洪涝模拟模型,实现了“降雨产流—坡面汇流—管网汇流—河网汇流—水体调蓄”的地表积水全过程模拟,同时有效解决了立交桥、道路积水点等局部模拟结果失真的问题^[103]。该模型为城市洪涝应急管理提供了有力支撑,已在上海、北京等多个城市得到了应用^[104-105]。与此同时,随着新一代网络技术的快速发展,中国水科院减灾中心开始进行城市洪涝模拟模型与信息技术的深度融合,推动城市内涝灾害防治向数字化、智能化转变。程晓陶^[106]认为IT新技术的快速发展为城市防洪减灾工作提供了新的机遇,应将数据库、地理信息系统(GIS)、遥感等技术手段应用到防洪减灾工作中,以信息化手段带动水利现代化建设。基于此,丁志雄等^[107]将GIS技术与洪水淹没模型相结合,采用分区平面模拟方法,实现了淹没过程的快速、准确模拟;刘舒等^[108]利用套接字技术解决了水动力模型与网

络服务器之间的交互问题;苑希民等^[109]运用 3S 技术、虚拟显示、网络通讯等高新技术手段,解决了灾情信息的三维可视化问题。以上研究在提高应急决策效率方面发挥了积极作用。

虽然对于内涝灾害应急管理方面的研究较多,但仍存在问题有待解决。一方面,数据信息是应急管理的基础和前提,信息不够、不准、不及时等问题长期存在^[110],导致基于灾害信息的应急决策效果难以保证;另一方面在应急救援过程中,政府涉及部门、民间团体之间缺乏协调配合,难以做到统一调度,严重影响应急救援的效率。因此,未来应重点解决灾害数据信息化问题,加强对灾害数据信息的收集、识别、融合等方面的研究,并通过建立灾害数据共享平台,整合各方救援力量进行集中决策,以实现不同资源之间的优势互补。

4 结论与建议

城市内涝是在全球气候变暖及城镇化背景下产生的水安全问题,也是诸多国家都需要面对的“城市病”。与其他国家相比,中国的城镇化发展速度更快,“城市病”病情也更加突出。综合近年来的相关文献,本文对内涝灾害的特征、成因以及治理策略进行总结:

(1)从内涝现状特征来看,我国城市内涝愈来愈严重,表现出八个特征:广泛性与高频易发性,随机性与短历时性,传导性与强破坏性,可防御性与利害性。

(2)从内涝致灾机理来看,城市内涝是多因素共同作用的结果。气候变化导致极端暴雨频发,造成城市排水系统的巨大压力;城镇化影响城市自然水循环过程,引发致灾因子、孕灾环境的改变,增加了内涝风险;城市管网建设进度滞后城市发展速度,难以满足城市的排水需求;不完善的城市内涝管理体系造成防涝工作的冲突,最终造成防涝力量的浪费。

(3)从内涝治理策略来看,我国城市内涝治理理念已经发生转变,工程措施、非工程措施相结合的防涝理念深入人心,但在实施层面存在着体制、法规、技术等方面的挑战。

目前,我国仍处于城镇化快速发展的阶段,全球气候变化的影响也将持续存在,内涝灾害必将长期威胁中国城市的发展。因此,未来城市内涝治理要树立长远规划目标,坚持顶层设计,在完善相关法规制度和技术规程的基础上,综合统筹推进内涝灾害治理工作,明确内涝治理工作的综合框架及相关内容。

此外,还应深入研究城市内涝灾害的发生规律及形成机理,分析变化环境影响下短历时极端降水的特征趋势变化以及城市扩张变化对区域水文循环规律的影响机制,并在此基础上,探讨雨水管理设施、排水管网等防涝工程的具体设计参数和建设方法,并结合河湖水系、园林湿地、城市绿化等景观开展防涝工程设施的合理布局研究。考虑到内涝灾害在城市生命线系统之间的传递效应,应对基础设施在内涝灾害作用下的通达能力进行评估,识别其中的薄弱环节及断链最佳环节,避免发生连锁反应。

在非工程性防涝措施方面,内涝治理的组织管理优化研究仍需重点关注,未来应以整体性内

涝治理理论为核心,构建多方协作机制,明确不同部门之间的职责权能,促进内涝灾害治理各环节的有效衔接。同时,应关注灾害数据信息化问题,加强灾害数据信息的收集、识别、融合等方面的研究,实现灾害信息的联通共享,并在此基础上,结合智能化信息手段和模型模拟技术,搭建城市内涝综合管理信息平台,以提高内涝灾害的预警能力和处置能力。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis [M/OL]. (2021) [2021-08-01]. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#FullReport>.
- [2] LIU X P, HUANG Y H, XU X C, et al. High-resolution mapping of global urban change from 1985 to 2015 [J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3(7): 564-570.
- [3] 孔锋,方建,乔枫雪,等. 透视中国小时极端降水强度和频次的时空变化特征(1961—2013年) [J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(12): 3051-3067.
- [4] TELLMAN B, SULLIVAN J A, KUHN C, et al. Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods [J]. *Nature*, 2021, 596(7870): 80-86.
- [5] 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害公报(2011) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [6] 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害公报(2012) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [7] 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害公报(2013) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [8] 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害公报(2014) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
- [9] 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害公报(2015) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
- [10] 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害公报(2016) [M]. 北京: 中国地图出版社, 2017.
- [11] 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害公报(2017) [M]. 北京: 中国地图出版社, 2018.
- [12] 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害公报(2018) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.
- [13] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于做好城市排水防涝设施建设工作的通知 [EB/OL]. (2013-04-01) [2021-11-21]. http://www.gov.cn/jwqk/2013-04/01/content_2367368.htm.
- [14] 住房和城乡建设部. 住房和城乡建设部关于印发城市排水防涝设施普查数据采集与管理技术导则(试行)的通知 [EB/OL]. (2013-06-26) [2021-11-27]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/tzgg/201306/20130627_214141.html.
- [15] 住房和城乡建设部. 住房和城乡建设部关于印发城市排水(雨水)防涝综合规划编制大纲的通知 [EB/OL]. (2013-06-27) [2021-11-27]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/tzgg/201306/20130627_214142.html.
- [16] 住房和城乡建设部. 住房和城乡建设部关于印发海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)的通知 [EB/OL]. (2014-11-03) [2021-11-03]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/zfhxjsbjw/201411/20141103_219465.html.
- [17] 财政部, 住房和城乡建设部, 水利部. 财政部 住房和城乡建设部 水利部关于开展中央财政支持海绵城市建设试点工作的通知 [EB/OL]. (2015-01-15) [2021-11-15]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/tzgg/201501/20150115_220129.html.
- [18] WANG Y T, SUN M X, SONG B M. Public perceptions of and willingness to pay for sponge city initiatives in China [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 122: 11-20.
- [19] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于加强城市内涝治理的实施意见 [EB/OL]. (2021-4-25) [2021-11-25]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-04/25/content_5601954.htm.
- [20] LIU J H, SHAO W W, XIANG C Y, et al. Uncertainties of urban flood modeling: influence of parameters for different underlying surfaces [J]. *Environmental Research*, 2020, 182: 108929.
- [21] CHEN Z P, LI K, DU J H, et al. Three-dimensional simulation of regional urban waterlogging based on high-precision DEM model [J]. *Natural Hazards*, 2021, 108(3): 2653-2677.
- [22] 徐冰, 雷晓辉, 王昊, 等. 基于 SWMM 模型的沿海城市内涝模拟研究 [J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2019, 17(3): 211-218.
- [23] TANG X Z, SHU Y Q, LIAN Y Q et al. A spatial assessment of

- urban waterlogging risk based on a Weighted Naïve Bayes classifier [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 630: 264–274.
- [24] WANG Y J, ZHAI J Q, SONG L C. Waterlogging risk assessment of the Beijing–Tianjin–Hebei urban agglomeration in the past 60 years[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2021, 145(3–4): 1039–1051.
- [25] 宋晓猛, 张建云, 贺瑞敏, 等. 北京城市洪涝问题与成因分析[J]. *水科学进展*, 2019, 30(2): 153–165.
- [26] ZHANG Q F, WU Z F, ZHANG H, et al. Identifying dominant factors of waterlogging events in metropolitan coastal cities: the case study of Guangzhou, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 271: 110951.
- [27] 曾鹏, 穆杰, 喻海军, 等. 成都市中心城区暴雨内涝模拟及内涝特征分析[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2020, 18(3): 232–239.
- [28] 刘家宏, 李泽锦, 梅超, 等. 基于 TELEMAC–2D 的不同设计暴雨下厦门岛城市内涝特征分析[J]. *科学通报*, 2019, 64(19): 2055–2066.
- [29] QIAN Y, WANG H, WU J S, et al. Protecting existing urban green space versus cultivating more green infrastructures: strategies choices to alleviate urban waterlogging risks in Shenzhen[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(21): 4433.
- [30] 詹美旭, 魏宗财, 王建军, 等. 面向国土空间安全的城市体检评估方法及治理策略: 以广州为例[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(9): 2382–2393.
- [31] 孔锋. 透视变化环境下的中国城市暴雨内涝灾害: 形势、原因与政策建议[J]. *水利水电技术*, 2019, 50(10): 42–52.
- [32] LI P X, YU Z B, JIANG P, et al. Spatiotemporal characteristics of regional extreme precipitation in Yangtze River basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 126910.
- [33] 李海宏, 吴吉东. 2007–2016 年上海市暴雨特征及其与内涝灾情关系分析[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(12): 2136–2148.
- [34] 伍智超, 王超, 李秉清, 等. 基于社交媒体数据的武汉内涝时空统计分析[J]. *测绘地理信息*, 2022, 47(5): 89–92.
- [35] 柳杨, 范子武, 谢忱, 等. 城镇化背景下我国城市洪涝灾害演变特征[J]. *水利水运工程学报*, 2018(2): 10–18.
- [36] 陈鲜艳, 李威, 张强, 等. 长江中下游地区雨涝指数构建及其应用[J]. *水科学进展*, 2021, 32(6): 834–842.
- [37] 黄华兵, 王先伟, 柳林. 城市暴雨内涝综述: 特征、机理、数据与方法[J]. *地理科学进展*, 2021, 40(6): 1048–1059.
- [38] 陈艺琳, 宫昌昊, 范泳雅, 等. 基于社交媒体数据的郑州市内涝时空变化分析[J]. *水文*, 2022, 42(3): 48–52, 26.
- [39] 赵丽元, 韦佳伶. 城市建设对暴雨内涝空间分布的影响研究: 以武汉市主城区为例[J]. *地理科学进展*, 2020, 39(11): 1898–1908.
- [40] HOU J W, DU Y X. Spatial simulation of rainstorm waterlogging based on a water accumulation diffusion algorithm[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2020, 11(1): 71–87.
- [41] ZHU X D, ZHANG Q, SUN P, et al. Impact of urbanization on hourly precipitation in Beijing, China: Spatiotemporal patterns and causes[J]. *Global and Planetary Change*, 2019, 172: 307–324.
- [42] SILVA C D M, SILVA G B L D. Cumulative effect of the disconnection of impervious areas within residential lots on runoff generation and temporal patterns in a small urban area[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 253: 109719.
- [43] 李超超, 程晓陶, 申若竹, 等. 城市化背景下洪涝灾害新特点及其形成机理[J]. *灾害学*, 2019, 34(2): 57–62.
- [44] HAN L, ZHAO X D, CHEN Z L, et al. Assessing resilience of urban lifeline networks to intentional attacks[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2021, 207: 107346.
- [45] 叶丽梅, 周月华, 周悦, 等. 暴雨洪涝灾害链实例分析及断链减灾框架构建[J]. *灾害学*, 2018, 33(1): 65–70.
- [46] 李冲, 程书波, 岳颖, 等. 郑州市城市内涝灾害链特征及防控对策分析[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(6): 1–19.
- [47] 朱伟, 陈长坤, 纪道溪, 等. 我国北方城市暴雨灾害演化过程及风险分析[J]. *灾害学*, 2011, 26(3): 88–91.
- [48] 吴志峰, 象伟宁. 从城市生态系统整体性、复杂性和多样性的视角透视城市内涝[J]. *生态学报*, 2016, 36(16): 4955–4957.
- [49] 年猛. 中国城乡关系演变历程、融合障碍与支持政策[J]. *经济学家*, 2020(8): 70–79.
- [50] 万金红, 张葆蔚, 刘建刚, 等. 1950–2013 年我国洪涝灾情时空特征分析[J]. *灾害学*, 2016, 31(2): 63–68.
- [51] 国务院灾害调查组. 河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告[EB/OL]. (2022–01–21)[2022–02–11]. <https://www.mem.gov.cn/gk/sgcc/tbzdsgdcbg/202201/P020220121639049697767.pdf>.
- [52] 王浩, 王佳, 刘家宏, 等. 城市水循环演变及对策分析[J]. *水利学报*, 2021, 52(1): 3–11.
- [53] 吕娟, 凌永玉, 姚力玮. 新中国成立 70 年防洪抗旱减灾成效分析[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2019, 17(4): 242–251.
- [54] HUANG H B, CHEN X, ZHU Z Q, et al. The changing pattern of urban flooding in Guangzhou, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 622: 394–401.
- [55] LIU T Q, LAWLUVY Y, SHI Y, et al. Low impact development (LID) practices: a review on recent developments, challenges and prospects[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2021, 232(9): 344.
- [56] 路琪儿, 罗平平, 虞望琦, 等. 城市雨水资源化利用研究进展[J]. *水资源保护*, 2021, 37(6): 80–87.
- [57] LI F R, ZHANG J F. A review of the progress in Chinese Sponge City programme: challenges and opportunities for urban stormwater management[J]. *Water Supply*, 2022, 22(2): 1638–1651.
- [58] 孔锋, 史培军, 方建, 等. 全球变化背景下极端降水时空格局变化及其影响因素研究进展和展望[J]. *灾害学*, 2017, 32(2): 165–174.
- [59] KONAPALA G, MISHRA A K, WADA Y, et al. Climate change will affect global water availability through compounding changes in seasonal precipitation and evaporation[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 3044.
- [60] WASKO C, NATHAN R, STEIN L, et al. Evidence of shorter more extreme rainfalls and increased flood variability under climate change[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 126994.
- [61] HE B R, ZHAI P M. Changes in persistent and non-persistent extreme precipitation in China from 1961 to 2016[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2018, 9(3): 177–184.
- [62] 陆咏晴, 严岩, 丁丁, 等. 我国极端降水变化趋势及其对城市排水压力的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(5): 1661–1667.
- [63] CHAN F K S, YANG L E, SCHEFFRAN J, et al. Urban flood risks and emerging challenges in a Chinese delta: the case of the Pearl River Delta[J]. *Environmental Science and Policy*, 2021, 122: 101–115.
- [64] 许瀚卿, 谭金凯, 李梦雅, 等. 基于 Copula 函数的沿海城市雨潮复合灾害风险研究[J]. *自然灾害学报*, 2022, 31(1): 40–48.
- [65] PENG J, MA J, LIU Q Y, et al. Spatial-temporal change of land surface temperature across 285 cities in China: an urban-rural contrast perspective[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 635: 487–497.
- [66] 刘家宏, 骆卓然, 张永祥, 等. 城市化对河南省极端降水空间分布的影响[J]. *水资源保护*, 2022, 38(1): 100–105.
- [67] LIU B J, CHEN S L, TAN X Z, et al. Response of precipitation to extensive urbanization over the Pearl River Delta metropolitan region[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(1): 9.
- [68] LIU J R, SCHLUNZEN K H, FRISIUS T, et al. Effects of urbanization on precipitation in Beijing[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2021, 122: 103005.
- [69] LUO K S, ZHANG X J. Increasing urban flood risk in China over recent 40 years induced by LUCC[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2022, 219: 104317.
- [70] 梁昌梅, 张翔, 李宗礼, 等. 武汉市城市化进程中河湖水系的时空演变特征[J]. *华北水利水电大学学报·自然科学版*, 2019, 40(6): 61–68.
- [71] 谢启姣, 刘进华. 1987–2016 年武汉城市湖泊时空演变及其生态服务价值响应[J]. *生态学报*, 2020, 40(21): 7840–7850.
- [72] 巨鑫慧, 高肖, 李伟峰, 等. 京津冀城市群土地利用变化对地表径流的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(4): 1413–1423.
- [73] 陈佩琪, 王兆礼, 曾照洋, 等. 城市化对流域水文过程的影响模拟与预测研究[J]. *水力发电学报*, 2020, 39(9): 67–77.
- [74] 盛广耀. 勿让城市内涝成为城市通病[J]. *人民论坛*, 2020(19): 92–94.
- [75] 谢映霞. 从城市内涝灾害频发看排水规划的发展趋势[J]. *城市规划*, 2013, 37(2): 45–50.
- [76] 车伍, 葛裕坤, 唐磊, 等. 我国城市排水(雨水)防涝综合规划剖析[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(10): 15–21.
- [77] 王伟武, 汪琴, 林晖, 等. 中国城市内涝研究综述及展望[J]. *城市问题*, 2015(10): 24–28.
- [78] 芮孝芳, 蒋成煜. 中国城市排水之问[J]. *水利水电科技进展*, 2013, 33(5): 1–5.
- [79] WANG J, LIU G H, WANG J Y, et al. Current status, existent problems, and coping strategy of urban drainage pipeline network in China[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 28(32): 43035–43049.
- [80] 赵杨, 车伍, 杨正. 中国城市合流制及相关排水系统的主要特征分析[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(14): 18–28.

- [81] 周宏, 刘俊, 高成, 等. 我国城市内涝防治现状及问题分析[J]. 灾害学, 2018, 33(3): 147-151.
- [82] 焦胜, 马伯, 黎贝. 中国城市内涝成因和防控策略研究进展[J]. 生态经济, 2019, 35(7): 92-97.
- [83] 张景奇, 姜成武. 城市治理视野下我国大城市内涝防治研究[J]. 上海行政学院学报, 2014, 15(4): 31-39.
- [84] 吴先华, 肖杨, 李廉水. 大数据融合的城市暴雨内涝灾害应急管理述评[J]. 科学通报, 2017, 62(9): 920-927.
- [85] 张冬冬, 严登华, 王义成, 等. 城市内涝灾害风险评估及综合应对研究进展[J]. 灾害学, 2014, 29(1): 144-149.
- [86] 程占化. 城市内涝灾害应急救援策略分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(S2): 140-142.
- [87] YANG Q, ZHENG X Z, JIN L H, et al. Research progress of urban floods under climate change and urbanization: a scientometric analysis[J]. Buildings, 2021, 11(12): 628.
- [88] 王磊之, 云兆得, 胡庆芳, 等. 国内外城市雨洪管理指标体系对比及启示[J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 25-31.
- [89] CUN C X, ZHANG W, CHE W, et al. Review of urban drainage and stormwater management in ancient China[J]. Landscape and Urban Planning, 2019, 190: 103600.
- [90] 王虹, 丁留谦, 程晓陶, 等. 美国城市雨洪管理水文控制指标体系及其借鉴意义[J]. 水利学报, 2015, 46(11): 1261-1271, 1279.
- [91] ZHANG N, LUO Y J, CHEN X Y, et al. Understanding the effects of composition and configuration of land covers on surface runoff in a highly urbanized area[J]. Ecological Engineering, 2018, 125: 11-25.
- [92] WU J S, SHA W, ZHANG P H, et al. The spatial non-stationary effect of urban landscape pattern on urban waterlogging: a case study of Shenzhen City[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 7369.
- [93] 张彪, 王硕, 李娜. 北京市六环内绿色空间滞蓄雨水径流功能的变化评估[J]. 自然资源学报, 2015, 30(9): 1461-1471.
- [94] 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.
- [95] 王金丽, 孙永利, 郑兴灿, 等. 城市绿色排水系统规划技术体系研究[J]. 城市发展研究, 2022, 29(1): 18-21, 28.
- [96] 刘曾美, 熊腮敏, 雷勇, 等. 城镇内涝防治中市政排水与水利排涝的标准衔接研究[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 125-132.
- [97] 陈伟珂, 高双, 张煜珠. 城市内涝治理碎片化困境及其突破: 基于整体性治理理论[J]. 城市发展研究, 2019, 26(8): 84-90.
- [98] 张亮, 汤钟, 俞露, 等. 新型城镇化背景下城市内涝防治规划的编制思考[J]. 给水排水, 2021, 57(6): 43-49.
- [99] 张辰. 适当提高排水管网设计标准 逐步建立城市内涝防治体系[J]. 给水排水, 2013, 49(12): 1-3.
- [100] 薛丰昌, 宋肖依, 唐步兴, 等. 视频监控的城市内涝监测预警[J]. 测绘科学, 2018, 43(8): 50-55, 61.
- [101] 李雯, 姜仁贵, 解建仓, 等. 基于系统动力学的城市内涝灾害应急管理模型[J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 51-57.
- [102] 向立云, 张大伟, 何晓燕, 等. 防洪减灾研究进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(5): 362-372.
- [103] ZHANG H P, WU W M, HU C H, et al. A distributed hydrodynamic model for urban storm flood risk assessment[J]. Journal of Hydrology, 2021, 600: 126513.
- [104] 张念强, 李娜, 甘泓, 等. 城市洪涝仿真模型地下排水计算方法的改进[J]. 水利学报, 2017, 48(5): 526-534.
- [105] 徐美, 刘舒, 孙杨, 等. 利用洪涝模型进行城市内涝风险快速识别与预警[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(8): 1185-1194.
- [106] 程晓陶, 万洪涛, 吴兴征. 防洪减灾科技发展现状与趋势[J]. 中国水利, 2004(22): 31-33.
- [107] 丁志雄, 李纪人, 李琳. 基于GIS格网模型的洪水淹没分析方法[J]. 水利学报, 2004(6): 56-60, 67.
- [108] 刘舒, 胡昌伟, 张红萍, 等. 基于套接字技术的水动力模型的网络化[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004, 2(3): 194-198.
- [109] 苑希民, 万洪涛, 万庆, 等. 三维电子沙盘建设在防汛抗旱中的应用[J]. 中国防汛抗旱, 2009, 19(2): 51-56.
- [110] 丁留谦. 防汛抗旱信息化建设与未来发展思考[J]. 中国防汛抗旱, 2017, 27(3): 8-10.

Review of the Characteristics, Causes and Governance of Urban Flood in China

ZHAO Chaohui¹, WAN Jinhong¹, ZHANG Yunxia², ZHANG Baowei³

- (1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;
2. National Disaster Reduction Center of China, Beijing 100124, China;
3. Ministry of Emergency Management, Beijing 100089, China)

Abstract: In recent years, the frequent occurrence of urban flood disasters have caused serious economic losses and casualties, which has become a hot issue of social concern. Based on recent researches, it is identified that urban flood disasters have the characteristics of universality and high frequency, randomness and short duration, transitivity and strong destructiveness, defensiveness and bi-influence. And, the causes of urban flood are analyzed from four aspects: precipitation change, urban expansion, drainage system and waterlogging prevention management. Finally, the governance strategies of urban flood are summarized from four aspects: rainwater management, organizational management, engineering management and emergency management. It is believed that the current waterlogging prevention and control work in Chinese cities, the concept of waterlogging prevention that combines engineering measures and non-engineering measures is deeply rooted in the hearts of the people, but at the implementation level, problems and challenges in various aspects such as system, regulations, and technology need to be dealt with. The future work of urban flood control should be guided by specific problems, which not only attach importance to the development and improvement of theoretical system, but also transform theoretical knowledge into practical application. The research provides a reference for urban disaster reduction.

Keywords: urban flood; characteristics of urban flood; causes of urban flood; urban flood governance