

变化环境下我国典型特大城市洪涝灾害成因分析

徐宗学^{1,2}, 陈 浩^{1,2}, 任梅芳^{2,3}

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875; 3. 中国城市规划设计研究院, 北京 100044)

摘要:特大城市因人口密度、GDP 密度及城市化水平远高于其他城市,其暴雨洪涝灾害造成的生命和财产损失更为严重。在变化环境下科学、系统、全面地揭示特大城市洪涝灾害成因,对于完善城市防洪除涝减灾体系、降低城市洪涝灾害损失具有至关重要的意义。本文以北京、济南和深圳 3 座典型特大城市为例,系统梳理了这些城市洪涝灾害特征,分析了气候条件、地理条件、降水变化等自然因素,以及产汇流特性变化、雨洪调蓄能力变化、排水格局、城市规划等人为因素对城市洪涝的影响,并从深化基础理论研究、构建预警预报平台、推进工程与非工程措施协同三方面提出特大城市暴雨洪涝灾害应对策略,可为变化环境下我国特大城市洪涝灾害防治工作提供科学依据。

关键词:气候变化;城市化;特大城市;洪涝灾害;成因分析

中图分类号:X43 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)05-0033-08

Analysis on causes of flooding/waterlogging disasters in typical megacities of China under changing environment//
XU Zongxue^{1,2}, CHEN Hao^{1,2}, REN Meifang^{2,3} (1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China; 3. China Academy of Urban Planning & Design, Beijing 100044, China)

Abstract: Compared with other cities, the population density, GDP density and urbanization level of megacities are higher, and the life and property losses caused by urban flooding/waterlogging disasters are more serious. A scientific, systematic and comprehensive analysis of the causes of flooding/waterlogging disasters in megacities under the changing environment is critical for improving the urban flooding/waterlogging mitigation and disaster reduction system and reducing the losses caused by urban flooding/waterlogging disasters. Taking three typical megacities, including Beijing, Jinan and Shenzhen as examples, the characteristics of flooding/waterlogging disasters in these megacities were expounded, and the impacts of natural factors and anthropogenic factors on urban flooding/waterlogging were analyzed. The natural factors includes climate conditions, geographical conditions and precipitation changes, while the anthropogenic factors include runoff generation and concentration changes, stormwater regulation and storage capacity changes, drainage patterns and urban planning. The countermeasures for flooding/waterlogging disasters in megacities were proposed from three aspects, including deepening theoretical research, constructing forecasting platform and promoting the coordination of engineering and non-engineering measures, which can provide a scientific basis for the prevention and control of flooding/waterlogging disasters in megacities of China under changing environment.

Key words: climate change; urbanization; megacities; flooding/waterlogging disasters; cause analysis

近年来,在全球气候变化和城市化快速发展的共同影响下,自然水循环过程与水文气象要素发生了显著变化^[1],极端气候事件频次增多、强度增大^[2-3],城市“热岛效应”和“雨岛效应”等问题日益凸显^[4-7],导致城市洪涝灾害的影响范围与损失不断增加,已成为威胁我国城市公共安全的重大隐患,也是制约我国经济社会发展的重要因素^[8-11]。联合国政府间气候变化专门委员会第六次评估报告指出,

相较于工业化之前 1850—1990 年,21 世纪前 20 年的平均气温升高了 0.99℃,其中 2011—2020 年的平均气温升高了 1.09℃。1901—2018 年间全球海平面上升了 0.2 m,其上升速率远超过去 3000 年中的任何一个世纪^[12]。联合国人居署统计发布的《2022 年世界城市报告:展望未来》指出,全球城市化进程将在未来 30 年内持续推进,2021 年全球城市化率为 56%,预计到 2050 年将上升至 68%,其中

基金项目:国家自然科学基金重点项目(52239003)
作者简介:徐宗学(1962—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:zxu@bnu.edu.cn

新的增长点主要发生在亚洲和非洲^[13]。人口和财富的高度集中,使城市在遭遇洪涝灾害时更加敏感和脆弱,从而导致灾害损失急剧增大^[14]。根据水利部的统计数据,2012—2018 年间我国每年发生内涝或者受淹的城市数量分别为 184、234、125、168、192、104 和 83 座,年均达 156 座。2007 年济南“7·18”、2012 年北京“7·21”^[15]、2019 年深圳“4·11”、2021 年郑州“7·20”^[16]等暴雨洪涝灾害,不仅严重威胁人民的生命财产安全,也给城市管理部门的防灾减灾工作带来了新的挑战。因此,科学、系统地解析变化环境下城市暴雨洪涝灾害成因,是完善城市防洪除涝减灾体系、提升城市防洪除涝能力、减轻城市暴雨洪涝灾害损失的首要目标和核心任务。

根据国务院 2014 年发布的《关于调整城市规划划分标准的通知》,城区常住人口 1 000 万以上的城市被定义为超大城市,城区常住人口 500 万以上 1 000 万以下的城市为特大城市。截至 2024 年,我国超大城市有 10 座,分别为上海、北京、深圳、重庆、广州、成都、天津、武汉、杭州和东莞;特大城市有 12 座,分别为西安、南京、沈阳、青岛、济南、长沙、哈尔滨、郑州、昆明、大连、苏州、佛山^[17]。相较于其他城市,超大城市和特大城市的人口密度、GDP 密度及城市化水平更高,这使得其遭遇暴雨洪涝灾害时,生命和财产损失更为严重。综合考虑到沿海与内地、南方与北方的差异性,本文以北京、济南和深圳 3 座典型超大、特大城市为例,系统分析超大、特大城市暴雨洪涝灾害的特征、影响因素及成因,并提出全局性的应对策略,以期为我国超大和特大城市防洪减灾工作提供参考。为便于表述,本文将超大城市和特大城市统称为特大城市。

1 典型特大城市洪涝灾害特征

受特殊的自然地理条件影响,我国地形地貌多样,水文特性复杂,洪涝类型众多,加之沿江沿海地区城市密集,不同城市的洪涝特征、防灾能力和致灾后果均存在显著差异^[18]。因此,结合城市所处的地理位置、地形地貌、水系特点等要素,分析不同类型城市的洪涝特性,对提升城市防洪排涝减灾水平具有重要意义。滨海或河口城市不仅面临陆面外洪与内涝的威胁,而且极易遭受台风侵袭,形成台风、暴雨与高潮位“三碰头”或台风、暴雨、洪水与高潮位“四碰头”的复合型洪(潮)涝灾害;江河沿线城市的洪涝灾害易受汛期江河水位影响,而平原河网城市则常因排水不畅,引发区域性城市洪涝灾害;丘陵区

城市洪涝灾害一般由山洪和内涝共同作用形成^[19-21]。

根据北京市水旱灾害的统计资料,1949—1980 年北京城区出现过两次严重的洪涝灾害,分别为 1959 年 7 月 31 日和 1963 年 8 月 8—9 日,这两次灾害事件均由强降雨引发,内涝积水主要受河道洪水影响,积水点集中分布在河道两侧的低洼处;1981—1990 年北京城市内涝积水点多集中在二环以内,约占全部积水点的 61.3%,在三环及以内范围的积水点共 29 处,占全部积水点的 93.5%;1991—2000 年北京城市内涝积水点的分布呈现向外环逐步扩张的趋势,尽管三环及以内范围仍属于内涝积水易发区域(约 28 个积水点,占比 70%),但外围四环和五环也有部分路段发生积水内涝事件,如五环外的机场附近、立水桥附近以及通州区的 2 处区域;2000 年之后(2000—2006 年和 2007—2012 年)北京城区积水点总数显著增加,同时在空间上也表现出明显地向外环扩张趋势,表明近年来北京老城区的排水改造、河道治理等减轻了老城区的排水压力,而城市扩展使得三环及以外区域的积水点明显增多。由此可见,北京城市内涝主要受河道洪水和地形影响,城区内涝积水点在时间和空间上分别呈增加和扩张趋势。济南市地形南高北低,年内降水高度集中在汛期,占全年降水总量的 70%~80%,且汛期中降水常集中在几场大暴雨中。降雨形成的洪水由南向北宣泄,造成城区严重的洪涝灾害。以 2007 年 7 月 18 日暴雨洪涝灾害为例,强降雨形成的径流从南部山区迅速汇入市区,导致“马路行洪”现象严重;加之市区唯一的排洪通道小清河泄洪能力不足,水位陡涨缓降,部分河道洪水漫溢,形成独特的“南洪北涝”现象。深圳市洪涝灾害类型主要包括流域洪水、城市暴雨内涝、台风、天文大潮等,且易发生多种类型组合的遭遇式洪涝灾害。

2 典型特大城市洪涝成因分析

城市洪涝灾害是全球气候变化与高强度人类活动的复合影响下城市水系统状态的一种极端响应,是多种自然与人文因素相互交织的结果,是城市水循环系统的某些环节或过程发生改变而引发原有系统的失衡^[22]。根据城市洪涝灾害的特征,可将城市洪涝灾害的影响因素分为自然因素和人为因素两大类,其中自然因素主要包括气象条件、地理条件和降水变化等,人为因素主要包括城市化发展导致的产汇流特性变化、雨洪调蓄能力变化、排水格局变化及城市规划等^[23]。

2.1 自然因素

2.1.1 气候条件

区域气候条件是城市洪涝灾害最直接的影响因素之一。我国幅员辽阔,横跨多个气候带,形成了多种气候类型。北京市属典型的大陆性季风气候,多年平均降水量为 569 mm,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,全年降水量的 80%集中在汛期 6—9 月^[24]。济南市属温带季风气候,多年平均降水量为 647 mm,具有冬冷夏热和雨热同期的气候特征,全年降水量的 70%集中在主汛期 7—8 月^[25]。深圳市属南亚热带季风海洋性气候,长夏短冬,雨量丰沛且集中,多年平均年降水量为 1925 mm,全年降水量的 86%集中在汛期 4—9 月^[26]。气候变化加剧了水循环过程,影响区域降水机制^[27],导致极端降水事件的发生频率、强度和持续时间增加,从而引发了更多的城市洪涝灾害。在沿海地区,气候变化导致的海平面上升和台风强度增强,进一步提高了城市洪涝灾害发生的概率^[28]。

2.1.2 地理条件

地理条件是影响城市洪涝的直接因素。北京市地处华北平原北部,西北部群山环绕,东南部是平原地区,形成西北高、东南低的独特地形,这一地形既有利于暴雨形成,又易触发强烈的对流天气,使得暴雨中心多沿山前地带分布。北京主城区位于东南部平原地区,加之城市雨岛和热岛效应,加剧了区域性不稳定热力空气层的对流活动,一定程度上使得城区更易爆发极端降水事件,特别是城市建筑群的阻碍作用影响了移动滞缓的降水系统,使得同一降水模式在城区的滞留时间延长,进而导致城区平均降水量高于周围区域。济南市南部为泰山山地,北部为黄河平原,处于鲁中南低山丘陵区域与鲁西北冲积平原带的过渡地区,地势南高北低,南北相差约 1100 m,市区南依群山、北临黄河,大致呈朝东开口的浅盆地地形。受南北高差极大这一地形因素影响,济南市在遭遇极端降水时,南部山区洪水沿坡度较大的道路迅速涌入主城区,严重加剧主城区的洪涝灾情。深圳市位于珠江口东岸,地势东南高、西北低,东南部大鹏半岛主要为低山,中部和西北部多为丘陵,间有低山突起和冲积平原,西南部主要为较大片的滨海冲积平原。深圳市内虽地表水系众多,但河流大多短小,且山高坡陡,汛期洪水陡涨陡落,河流中下游两岸成为洪涝灾害多发区。此外,深圳市东临大亚湾和大鹏湾,西濒珠江口和伶仃洋,既受潮位变化的剧烈影响,又极易遭受台风侵袭,常出现台风、暴雨与高潮位“三碰头”或台风、暴雨、洪水与高潮位“四碰头”的复合洪(潮)涝灾害。

2.1.3 降水变化

降水是影响城市洪涝事件最直接和最主要的因素。全球气候变化导致极端降水或短历时强降水的发生概率增加;城市化发展使得城市局域小气候发生变化,催生城市热岛与雨岛效应,进一步增强了城市暴雨强度,从而加剧城市洪涝问题。基于北京市城区 20 个国家级气象观测站(顺义、海淀、延庆、佛爷顶、汤河口、密云、怀柔、上甸子、平谷、通州、朝阳、昌平、斋堂、门头沟、北京、石景山、丰台、大兴、房山、霞云岭)、济南市 6 个国家级气象观测站(济南、长清、章丘、平阴、济阳、商河)和深圳市国家级气象观测站 1961—2018 年实测逐日降水量和逐小时雨量数据,对这 3 座典型特大城市近 58 年的年最大 1 d 降水量和最大 1 h 降水量进行统计分析。

1961—2018 年北京市年最大 1 d 降水量和年最大 1 h 降水量如图 1 所示。由图 1 可见,年最大 1 d 降水量呈略有增多趋势,平均每 10 a 增加 2.8 mm,但年际波动大,最大值出现在 2016 年,为 253.5 mm,最小值出现在 1980 年,为 42.1 mm。年最大 1 h 降水量呈显著增大趋势,平均每 10 a 增加 3.9 mm,最大值出现在 1984 年,为 96.9 mm;最小值出现在 1968 年,为 17.8 mm。从不同气候态的多年平均值可以看出,北京市年最大 1 d 降水量呈阶段性变化特征,但年最大 1 h 降水量呈增大趋势。

1961—2018 年济南市年最大 1 d 降水量和年最大 1 h 降水量如图 2 所示。由图 2 可见,年最大 1 d 降水量有微弱减小趋势,但未通过 0.05 置信水平的显著性检验,最大值出现在 1962 年,为 298.4 mm,其他年份均在 200.0 mm 以下,最小值出现在 2000 年,为 55.1 mm。年最大 1 h 降水量呈增大趋势,平均每 10 a 增加 2.1 mm,最大值出现在 2017 年,为 117.2 mm,最小值出现在 1968 年,为 20.4 mm。随着气候态的推移,济南市年均最大 1 h 降水量呈显著增大趋势。

1961—2018 年深圳市年最大 1 d 降水量和年最大 1 h 降水量如图 3 所示。由图 3 可见,年最大 1 d 降水量呈减小趋势,平均每 10 a 减少 4.6 mm,最大值出现在 2000 年,为 344.0 mm,最小值出现在 1963 年,为 66.8 mm。年最大 1 h 降水量呈增大趋势,平均每 10 a 增加 2.0 mm,最大值出现在 2000 年,为 85.5 mm,最小值出现在 2011 年,为 27.7 mm。随着气候态的推移,深圳市年平均最大 1 h 降水量亦呈显著增大趋势。

综上,北京、济南和深圳 3 座典型特大城市的年最大 1 d 降水量可能呈现增加或者减少的趋势,但年最大 1 h 降水量均呈显著增加趋势。短历时强降

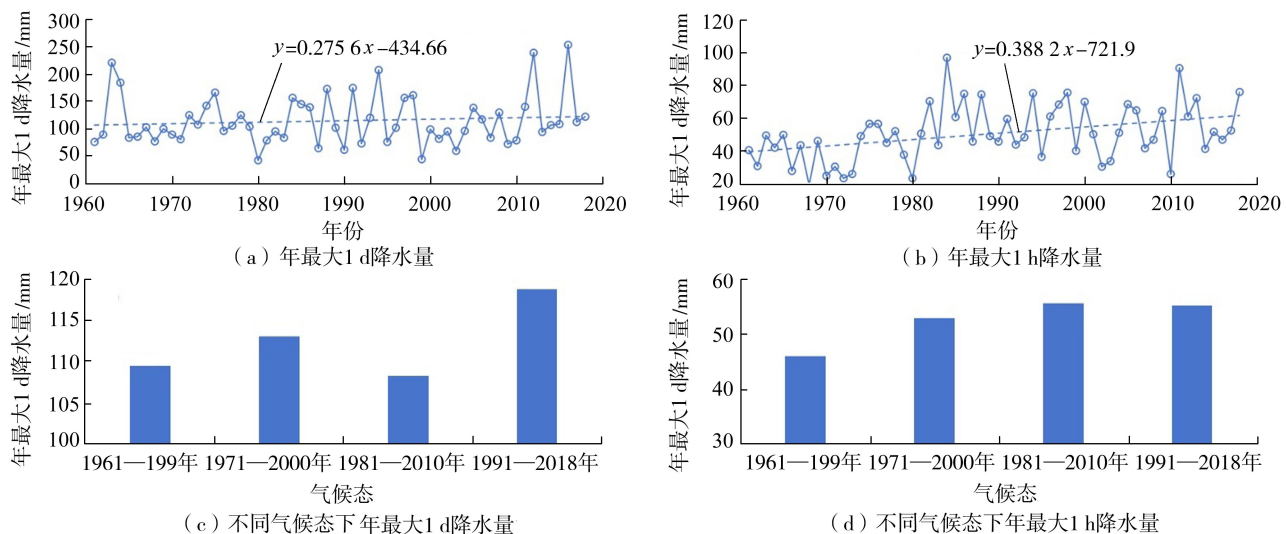


图1 1961—2018年北京市年最大1 d降水量和年最大1 h降水量变化

Fig. 1 Changes of annual maximum 1-day and 1-hour precipitation in Beijing from 1961 to 2018

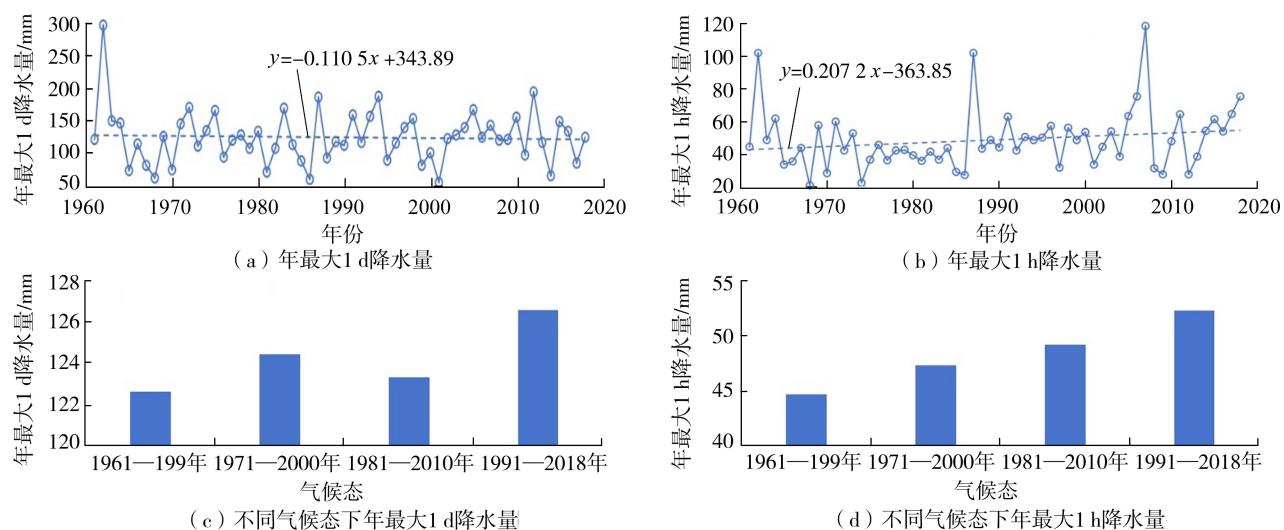


图2 1961—2018年济南市年最大1 d降水量和年最大1 h降水量变化

Fig. 2 Changes of annual maximum 1-day and 1-hour precipitation in Jinan from 1961 to 2018

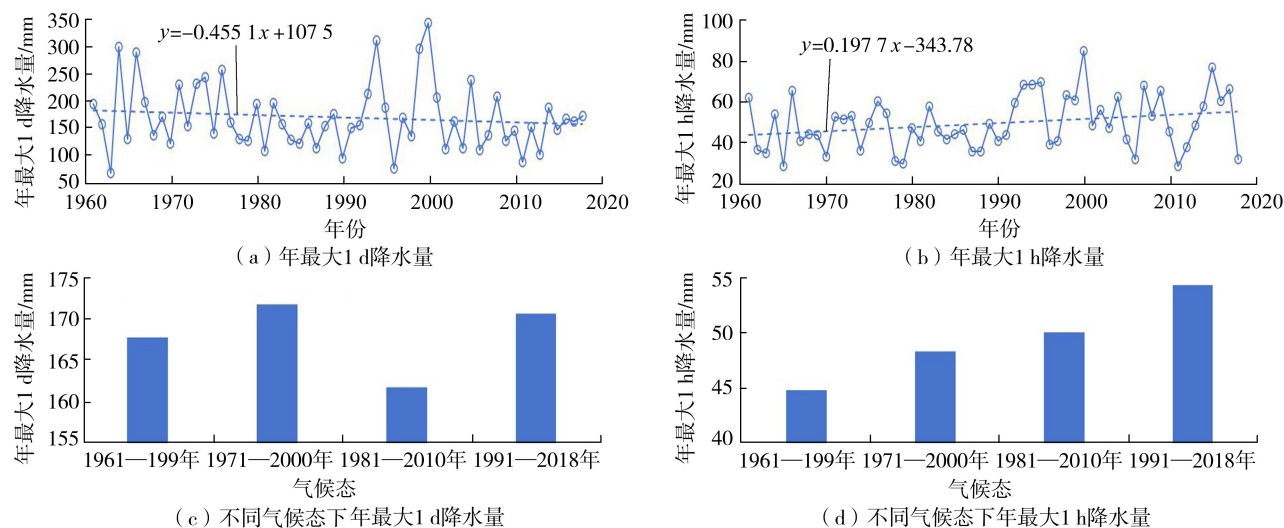


图3 1961—2018年深圳市年最大1 d降水量和年最大1 h降水量变化

Fig. 3 Changes of annual maximum 1-day and 1-hour precipitation in Shenzhen from 1961 to 2018

水事件增多增强,使得特大城市暴雨洪涝灾害的发生概率增大,灾害危险性加剧。

2.2 人为因素

2.2.1 产汇流特性变化

城市化的快速发展使得区域不透水面积增加,产汇流特性发生变化,产流速度加快、产流量增多、汇流时间缩短,从而导致洪峰流量增大,峰现时间提前,进而加剧城市暴雨洪涝风险。基于场地观测试验可知,不透水面积占比与径流系数呈线性函数关系,随着不透水面积的扩张,降雨强度对径流系数的影响逐渐减弱^[29]。基于北京市水文总站的调查资料,以通惠河乐家花园以上流域为例,分析其产汇流特性变化。统计结果显示:该流域在 20 世纪 80 年代、90 年代和 21 世纪初期 3 个时期,不透水面积占比分别为 77%、88%、86%,平均径流系数分别为 0.48、0.56、0.49。径流系数的变化与流域内不透水面积占比的变化趋势一致,20 世纪 80 年代和 90 年代北京市城市化快速发展,径流系数随不透水面积占比的增加而增大;21 世纪初期,由于城区硬化路面改造及绿地面积增加,不透水面积占比有所降低,径流系数亦随之减小。为了进一步辨析产汇流特性变化,以北京市通州区杨洼闸排水区为例,基于 SWMM 模型分别对 2010 年、2015 年两种不同城市化程度 1、5、20、50 和 100 年一遇设计降水情景下的城市产汇流特性进行定量分析(表 1)。由表 1 可见,随着设计降水重现期的增加,两种城市化背景下的径流系数均呈增大趋势,其中 1 年一遇设计降雨条件下径流系数增加了 0.13,5 年和 20 年一遇设计降雨条件下径流系数增加了 0.1,50 年和 100 年一遇设计降雨条件下径流系数基本接近,表明由城市化发展导致的不透水面积占比增加对径流系数的影响随降水重现期的增大而逐步减弱。洪峰流量的变

表 1 不同降水重现期下两种不同城市化程度产汇流变化					
Table 1 Changes of runoff generation and confluence under different urbanization levels and precipitation return periods					
重现期/a	年份	降水量/ (mm/d)	径流 系数	洪峰流量/ (m ³ /s)	峰现 时间/h
1	2010	47.7	0.15	41.79	10
	2015	47.7	0.28	74.88	7
5	2010	150.4	0.23	177.82	6
	2015	150.4	0.33	260.80	5
20	2010	260.3	0.36	536.86	4
	2015	260.3	0.46	654.48	3
50	2010	335.9	0.51	1029.07	3
	2015	335.9	0.53	1197.78	3
100	2010	395.0	0.54	1222.38	3
	2015	395.0	0.58	1483.11	3

化趋势与径流系数相似,在不同设计降雨条件下,城市化程度较高的情况(2015 年)的洪峰流量始终高于城市化程度较低的情况(2010 年)。在 1 年一遇设计降水条件下,2015 年的峰现时间比 2010 年提前了 3 h,但随着设计降水重现期的增加,两种城市化程度下峰现时间逐渐接近,从 50 年一遇设计降水开始,峰现时间不再变化,这是由于强降雨条件下流域内水流流速较快,降低了城市区域因汇流路径复杂导致汇流时间延长的影响^[30]。济南市和深圳市的产汇流特性随城市化发展的变化规律与北京市基本一致。

2.2.2 雨洪调蓄能力变化

城市发展压缩了城市雨洪调蓄空间,增加了城市洪涝风险。城市中的水塘、鱼塘、湖泊、河道和沟渠等是调蓄雨洪的主要设施。当降雨强度超过排水系统设计标准时,应采用水塘、鱼塘、湖泊、河道和沟渠等低洼区域或蓄水设施暂时蓄存雨水,降低洪峰流量,延缓峰值到达时间,待降雨峰值过后再从调蓄设施排放至排水系统或在调蓄设施中对蓄存雨水加以利用。通过雨水调蓄设施可以有效地缓解城市排水系统的压力,弥补排水设施能力不足和设计标准偏低的缺陷。然而,随着城市快速发展,城市中原有的水塘、鱼塘、湖泊、河道和沟渠等低洼区域被填平或改造,导致城市蓄水能力和过流能力大幅下降。一旦遭遇超过排水设施抽排能力的极端降水,多余雨水无法及时排出,又无处蓄存,城市内涝风险必然加剧。此外,城市化发展过程中,大量林地、耕地和草地等透水性良好的地面被改造为透水性差甚至完全不透水的地面,导致在相同的降水条件下产流量增大,产流速度加快,加重了城市排水设施的负担。而新建的公园绿地等往往高于城市地面,导致其产出的雨水反向流入道路,进一步降低了城市的雨洪调蓄能力。

2.2.3 排水格局及设计标准

城市化发展改变了天然的排水方式和排水格局,城市排水体系中增加了排水管网环节,城市排水模式一般采用地表-管道-(泵站)-河道的分级排水模式。由于管道排水不畅、管道和河道排水之间的衔接和配套不合理、河网水系退化和大量水工建筑物的出现,使得原有排水路径发生巨大改变,排水格局紊乱,增加了城市排水系统的脆弱性及城市洪涝风险。其次,我国早期城市建设中,排水管网设计标准普遍偏低,加上城市快速发展背景下“重地上、轻地下”的发展模式导致城市排水管网建设积累了大量历史欠账。尽管 2014 年颁布的《室外排水设计规范》已大幅提高我国雨水管渠设计重现期标准,但

现存的老旧管网仍然较多,导致城市排水不畅,进而引发城市洪涝问题。再者,城市化建设在一定程度上改变了城市区域原有的补-径-排关系及汇水范围,加之地下空间的开发利用,进一步减小了洪水的蓄滞空间,从而加剧了城市洪涝灾害风险。

2.2.4 城市规划、建设与管理

城市规划、建设与管理问题是我国城市洪涝的间接驱动因素。在城市规划方面,主要存在的问题包括城市规划赶不上城市化发展步伐,城市总体规划对洪涝灾害的重视程度不足,城市规划中防洪、排水、除涝标准之间缺乏有效协调,城市规划中对生态环境系统的影响等考虑不足以及缺乏人与自然和谐相处的空间布局与规划等。在城市建设方面,前期建设多重视地表建筑与环境改造,忽视了地下空间与管网体系建设,导致地下管网无法充分满足城市排水等基本需求,增加了城市暴雨内涝风险。此外,城市化建设初期修建的排水管沟多采用合流制系统,雨污水在同一管沟中泄流,导致大量沉积物在管道中积存;即使后期建设了分流制雨水管沟,降雨初期的大量污物仍会进入管沟并逐渐沉积,随时间推移形成淤塞,这不仅缩小了排水管沟的过水断面,还增加了排水阻力,导致排水能力减小,进一步增加了城市暴雨内涝风险。在城市洪涝管理机制方面,主要存在应急管理体制机制不健全、灾害预测预报预警能力不足、预警信息传递不畅、应急预案体系不完善、应急保障能力不足、避险宣传教育滞后等问题,降低了城市洪涝的有效管控和干预能力,增加了城市洪涝风险。

3 典型特大城市洪涝应对策略

基于典型特大城市洪涝灾害的特征和成因分析,本文从理论研究、预警预报平台、工程与非工程措施协同三方面提出特大城市暴雨洪涝灾害的应对策略。

a. 完善基础理论研究。在洪涝成因和致灾机制方面,全球气候变化和城市化发展加剧了城市洪涝的风险和不确定性,需要进一步完善变化环境下城市洪涝成因和致灾机制研究,系统识别城市洪涝的主要影响因素,厘清关键因子对城市洪涝过程的影响机制,揭示城市洪涝灾害链的演变特征及其级联效应,科学评估气候变化和城市化发展对城市洪涝的贡献度。在模型模拟方面,需要进一步加强降水和下垫面变化对产汇流的影响机制研究,开发适用于复杂下垫面特征的城市地表-地下空间三维立体精细化雨洪模型,提高模型的计算效率和精度。在风险评估方面,需深入研究变化环境下复合型灾

害的时空响应机理与成因机制,揭示复合灾害与灾害级联效应及其潜在影响^[31-33],并对城市洪涝风险进行动态综合评估^[34-35],为提升城市防洪除涝能力、降低城市洪涝灾害损失提供科学基础。

b. 开发暴雨洪涝预警预报系统。在降水预报和数据监测方面,需构建空-天-地立体化信息监测预报网络体系,提高降水预测预报的精度和时效,实现洪涝全要素、全过程、全方位的动态监测,为城市暴雨洪涝预警预报系统提供数据支撑^[36-37]。在模型开发方面,综合考虑不同下垫面、管网、河网、地下空间及水利设施之间的复杂水力联系,通过耦合流域产流模型、坡面汇流模型、地下空间淹没模型与河道、管网水动力学洪水演进模型,构建城市地表-地下空间三维立体精细化城市洪涝模型;同时结合神经网络、机器学习等人工智能技术,实现特大城市洪涝灾害的高效、精准预警预报^[38]。在信息发布方面,加强水文、气象、海洋、应急、交通、电信等部门的多源信息共享,及时、准确发布预警提示信息,为提升城市防洪除涝能力、降低城市洪涝灾害损失提供技术支撑。

c. 推进工程与非工程措施协同。城市防洪排涝工程措施主要根据城市的地理位置和气候条件进行布置。内陆平原城市以堤防与排水系统建设、河道疏浚等为重点;内陆山区城市侧重水库、挡土墙与排水系统建设等;沿海城市还需增设海堤、防波堤等设施。非工程措施主要包括完善防汛应急预案,强化防洪减灾制度体系建设,协调统一城市排水、排涝与防洪标准,加强人员培训与科普宣传等^[39-40]。综合、系统考虑城市防洪排涝体系,推进工程与非工程措施协同,统筹流域-城市雨洪调控系统,探索构建“全方位关注、全过程治理、全主体参与”的洪涝管理模式,为提升城市防洪除涝能力、降低城市洪涝灾害损失提供重要抓手。

4 结 语

城市洪涝灾害是全球气候变化与高强度人类活动的复合影响下城市水系统状态的一种极端响应,是多种自然与人文因素相互交织的结果。本文以北京、济南和深圳 3 座典型特大城市为例,基于历史文献资料深入分析了我国特大城市的暴雨洪涝灾害特征。采用数理统计、观测试验和模型模拟等方法,从自然因素和人为因素两个方面揭示变化环境下特大城市洪涝灾害成因。在此基础上,提出以完善基础理论研究为核心,以暴雨洪涝预警预报系统为平台,以推进工程与非工程措施协同为抓手,统筹流域-城市雨洪调控系统,探索建立“全方位关注、全过程治

理、全主体参与”的洪涝管理模式,为提升城市防洪除涝能力、降低城市洪涝灾害损失提供科技支撑。

参考文献:

[1] 徐宗学,程涛. 城市水管理与海绵城市建设之理论基础: 城市水文学研究进展[J]. 水利学报,2019,50(1): 53-61. (XU Zongxue, CHENG Tao. Basic theory for urban water management and sponge city:review on urban hydrology[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 2019,50(1):53-61. (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 cause analysis in China[J]. Advances in Water Science,2016, 27(4):485-491. (in Chinese))

[3] 黄国如,罗海婉,卢鑫祥,等. 城市洪涝灾害风险分析与区划方法综述[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 1-6. (HUANG Guoru, LUO Haiwan, LU Xinxiang, et al. Study on risk analysis and zoning method of urban flood disaster[J]. Water Resources Protection, 2020,36(6): 1-6. (in Chinese))

[4] KREIBICH H, VAN LOON A F, SCHRÖTER K, et al. The challenge of unprecedented floods and droughts in risk management[J]. Nature, 2022, 608(7921):80-86.

[5] 宋晓猛,张建云,占车生,等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 779-790. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, ZHAN Chesheng, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44 (7): 779-790. (in Chinese))

[6] 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. (LI Chaochao, CHENG Xiaotao, SHEN Ruozhu, et al. New characteristics and formation mechanism of flood and waterlogging disasters in the context of rapid urbanization [J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34 (2):57-62. (in Chinese))

[7] 赖成光,廖耀星,王兆礼. 不同暴雨情景下的城市内涝响应特征分析[J]. 水资源保护,2023,39(3):101-108. (LAI Chengguang, LIAO Yaoxing, WANG Zhaoli. Analysis of urban waterlogging response characteristics under different rainstorm rainfall scenarios [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (3): 101-108. (in Chinese))

[8] 徐宗学,陈浩,任梅芳,等. 中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展[J]. 水科学进展,2020,31(5): 713-724. (XU Zongxue, CHEN Hao, REN Meifang, et al. Progress on disaster mechanism and risk assessment of

urban flood/waterlogging disasters in China[J]. Advances in Water Science,2020,31(5):713-724. (in Chinese))

[9] 徐宗学,任梅芳,陈浩. 我国沿海城市洪潮组合风险分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 10-14. (XU Zongxue, REN Meifang, CHEN Hao. Analysis on urban flooding risk caused by flood tide combination in coastal cities[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 10-14. (in Chinese))

[10] 张金良,罗秋实,王冰洁,等. 城市极端暴雨洪涝灾害成因及对策研究进展[J]. 水资源保护, 2024,40(1): 6-15. (ZHANG Jinliang, LUO Qiushi, WANG Bingjie, et al. Research progress on causes and countermeasures for extreme rainstorm-induced urban flood disasters [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (1): 6-15. (in Chinese))

[11] 程晓陶,刘昌军,李昌志,等. 变化环境下洪涝风险演变特征与城市韧性提升策略[J]. 水利学报, 2022, 53(7): 757-768. (CHENG Xiaotao, LIU Changjun, LI Changzhi, et al. Evolution characteristics of flood risk under changing environment and strategy of urban resilience improvement [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(7): 757-768. (in Chinese))

[12] 刘家宏,梅超,刘宏伟,等. 特大城市外洪内涝灾害链联防联控关键科学技术问题[J]. 水科学进展,2023,34(2):172-181. (LIU Jiahong, MEI Chao, LIU Hongwei, et al. Key scientific and technological issues of joint prevention and control of river flood and urban waterlogging disaster chain in megacities[J]. Advances in Water Science,2023,34(2):172-181. (in Chinese))

[13] 卢兴超,徐宗学,李永坤,等. 基于多智能体模型的城市洪涝灾害动态风险评估[J]. 水资源保护, 2024,40(4):36-47. (LU Xingchao, XU Zongxue, LI Yongkun, et al. Assessment on dynamic risk of urban flooding and waterlogging disaster based on multi-agent models [J]. Water Resources Protection, 2024,40(4): 36-47. (in Chinese))

[14] 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. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, HE Ruimin, et al. Urban flood and waterlogging and causes analysis in Beijing[J]. Advances in Water Science, 2019,30(2): 153-165. (in Chinese))

[15] 张杰,史培军,杨静,等. 北京地区景观城市化进程对暴雨过程的影响:以“7. 21”暴雨为例[J]. 地理学报, 2020,75(1):113-125. (ZHANG Jie, SHI Peijun, YANG Jing, et al. The impact of the urbanization process on rainfall in Beijing: a case study of 7. 21 rainstorm[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75 (1): 113-125. (in Chinese))

[16] 张建云,舒章康,王鸿杰,等. 郑州“7·20”暴雨洪涝

- 几个水文问题的讨论[J]. 地理学报, 2023, 78(7): 1618-1626. (ZHANG Jianyun, SHU Zhangkang, WANG Hongjie, et al. A discussion on several hydrological issues of “7. 20” rainstorm and flood in Zhengzhou[J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(7): 1618-1626. (in Chinese))
- [17] 靳文波, 杨继星, 刘韶菲, 等. 特大城市暴雨灾害断链推演与应对方法研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(1): 20-29. (JIN Wenbo, YANG Jixing, LIU Shaofei, et al. Chain breaking simulation and countermeasures of rainstorm disasters in megacities[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(1): 20-29. (in Chinese))
- [18] 宋晓猛, 徐楠涛, 张建云, 等. 中国城市洪涝问题: 现状、成因与挑战[J]. 水科学进展, 2024, 35(3): 357-373. (SONG Xiaomeng, XU Nantao, ZHANG Jianyun, et al. Urban flooding in China: current status, causes and challenges[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(3): 357-373. (in Chinese))
- [19] WANG Y, LI C, LIU M, et al. Spatial characteristics and driving factors of urban flooding in Chinese megacities[J]. Journal of Hydrology, 2022, 613: 128464.
- [20] WANG J, YI S, LI M Y, et al. Effects of sea level rise, land subsidence, bathymetric change and typhoon tracks on storm flooding in the coastal areas of Shanghai[J]. Science of the Total Environment, 2018, 621: 228-234.
- [21] 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))
- [22] 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. (HUANG Huabing, WANG Xianwei, LIU Lin. A review on urban pluvial floods: characteristics, mechanisms, data, and research methods[J]. Progress in Geography, 2021, 40(6): 1048-1059. (in Chinese))
- [23] BERNDTSSON R, BECKER P, PERSSON A, et al. Drivers of changing urban flood risk: a framework for action[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 240: 47-56.
- [24] 邹家祥, 段存存, 陈彬, 等. 气候变化下基于经济损失量化的北京市内涝韧性评估[J]. 水资源保护, 2024, 40(6): 85-94. (ZOU Jiaxiang, DUAN Cuncun, CHEN Bin, et al. Assessment of waterlogging resilience in Beijing based on quantification of economic losses under climate change[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(6): 85-94. (in Chinese))
- [25] 王京晶, 徐宗学, 李福林, 等. 济南市主城区城市洪涝风险分析[J]. 水电能源科学, 2024, 42(1): 22-26. (WANG Jingjing, XU Zongxue, LI Fulin, et al. Urban flooding/waterlogging risk analysis in the downtown area of Jinan City[J]. Water Resources and Power, 2024, 42(1): 22-26. (in Chinese))
- [26] 徐宗学, 唐清竹, 陈浩, 等. 基于精细化空间格局的城市承灾体脆弱性评估[J]. 水科学进展, 2024, 35(1): 38-47. (XU Zongxue, TANG Qingzhu, CHEN Hao, et al. Assessment on the vulnerability of urban hazard bearing body based on refined spatial patterns[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(1): 38-47. (in Chinese))
- [27] ALLAN R P. Climate change: human influence on rainfall[J]. Nature, 2011, 470(7334): 344-345.
- [28] 黄亦轩, 徐宗学, 陈浩, 等. 深圳河流域内陆侧洪涝风险分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 101-108. (HUANG Yixuan, XU Zongxue, CHEN Hao, et al. Analysis on flood/waterlogging risk at inland side of the Shenzhen River Basin[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 101-108. (in Chinese))
- [29] 徐宗学, 庞博, 贺瑞敏, 等. 变化环境下城市暴雨洪涝灾害成因[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2023.
- [30] 张荣, 徐宗学, 庞博, 等. 不同城市化程度对杨洼闸排水区产汇流影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(3): 76-82. (ZHANG Rong, XU Zongxue, PANG Bo, et al. The impact of different urbanization levels on rainfall-runoff processes at Yangwazha Drainage Area[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(3): 76-82. (in Chinese))
- [31] 姚蕊, 杨群涛, 张书亮. 城市暴雨内涝灾害脆弱性研究综述[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 93-100. (YAO Rui, YANG Quntao, ZHANG Shuliang. Review on vulnerability of urban rainstorm waterlogging disaster[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 93-100. (in Chinese))
- [32] 季孔阳, 李学明, 高见, 等. 城市暴雨洪涝灾害脆弱性评价[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(3): 13-20. (JI Kongyang, LI Xueming, GAO Jian, et al. Assessment of urban vulnerability to heavy rain and flood disasters[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(3): 13-20. (in Chinese))
- [33] 张书函, 郑凡东, 邸苏闯, 等. 从郑州“2021. 7. 20”暴雨洪涝思考北京的城市内涝防治[J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(9): 5-11. (ZHANG Shuhan, ZHENG Fandong, DI Suchuang, et al. Thoughts on urban waterlogging control in Beijing from the rainstorm and flood of “2021. 7. 20” in Zhengzhou[J]. China Flood & Drought Management, 2021, 31(9): 5-11. (in Chinese))

(下转第 51 页)

2016,84:378-394.

[44] 曾照洋,赖成光,王兆礼,等. 基于 WCA2D 与 SWMM 模型的城市暴雨洪涝快速模拟[J]. 水科学进展, 2020, 31 (1): 29-38. (ZENG Zhaoyang, LAI Chengguang, WANG Zhaoli, et al. Rapid simulation of urban rainstorm flood based on WCA2D and SWMM model[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(1): 29-38. (in Chinese))

[45] KEIFER C J, CHU H H. Synthetic storm pattern for drainage design[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1957, 83(4): 1332-1-1332-25.

[46] 赖成光,廖耀星,王兆礼. 不同暴雨情景下的城市内涝响应特征分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 101-108. (LAI Chengguang, LIAO Yaoxing, WANG Zhaoli. Analysis of urban waterlogging response characteristics under different rainstorm rainfall scenarios[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 101-108. (in Chinese))

[47] 杜佳锴,徐梦华,陈昱宏,等. 无管网资料地区城市雨洪过程模拟研究[J]. 水力发电学报, 2023, 42(2): 87-96. (DU Jiakai, XU Menghua, CHEN Yuhong, et al. Urban stormwater process simulation research in no pipe network data areas [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(2): 87-96. (in Chinese))

[48] 雷向东,赖成光,王兆礼,等. LID 改造对城市内涝与面源污染的影响[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 131-139. (LEI Xiangdong, LAI Chengguang, WANG Zhaoli, et al. Influence of LID adaptation on urban flooding and non-point source pollution [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 131-139. (in Chinese))

[49] 黄国如,罗海婉,陈文杰,等. 广州东濠涌流域城市洪涝灾害情景模拟与风险评估[J]. 水科学进展, 2019, 30(5): 643-652. (HUANG Guoru, LUO Haiwan, CHEN Wenjie, et al. Scenario simulation and risk assessment of urban flood in Donghaochong basin, Guangzhou [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(5): 643-652. (in Chinese))

[50] 傅春,付耀宗,肖存艳,等. 基于 MIKE FLOOD 模型的鹰潭市内涝弹性分析[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(1): 33-39. (FU Chun, FU Yaozong, XIAO Cunyan, et al. Analysis of urban waterlogging resilience based on MIKE FLOOD Model in Yingtan City [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1): 33-39. (in Chinese))

[51] XU Yu, XU Youpeng, WANG Qiang, et al. Spatial diversion and coordination of flood water for an urban flood control project in Suzhou, China [J]. Water Science and Engineering, 2024, 17(2): 108-117.

[52] 李雄飞,田甜,程香菊,等. 综合管廊雨水舱缓解城市内涝的效果分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 20-26. (LI Xiongfei, TIAN Tian, CHENG Xiangju, et al. Effects of rainwater tank in integrated pipe gallery on alleviating urban waterlogging [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 20-26. (in Chinese))

(收稿日期: 2024 - 05 - 14 编辑: 雷燕)

+++++

(上接第 40 页)

[34] 徐宗学,卢兴超,施奇妙. 城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1): 1-9. (XU Zongxue, LU Xingchao, SHI Qimiao. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1): 1-9. (in Chinese))

[35] 高玉琴,王慧,刘钺,等. 基于空间信息格网的南京市洪水风险评估[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(6): 6-12. (GAO Yuqin, WANG Hui, LIU Yue, et al. Flood disaster risk assessment in Nanjing City based on spatial information grids [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(6): 6-12. (in Chinese))

[36] 叶陈雷,徐宗学,雷晓辉,等. 基于 SWMM 和 InfoWorks ICM 的城市街洪涝模拟与分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 87-94. (YE Chenlei, XU Zongxue, LEI Xiaohui, et al. Flood simulation and risk analysis on urban block scale based on SWMM and InfoWorks ICM [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 87-94. (in Chinese))

[37] YUAN Xu, ZHANG Xiaochun, WANG Xiugui, et al. Flood disaster monitoring based on Sentinel-1 data: a case study of Sihui Basin and Huaibei Plain, China [J]. Water Science and Engineering, 2021, 14(2): 87-96.

[38] 李国一,刘家宏. 基于 TELEMAC-2D 模型的深圳洪涝风险评估[J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 58-64. (LI Guoyi, LIU Jiahong. Flood risk assessment of Shenzhen City based on TELEMAC-2D model [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 58-64. (in Chinese))

[39] 苑希民,兰卓青,王丽娜,等. 极端天气城市特大暴雨洪涝灾害特征再分析及应对策略[J]. 水利学报, 2024, 55(11): 1298-1308. (YUAN Ximin, LAN Zhuoqing, WANG Lina, et al. Reanalysis of the characteristics of extreme rainstorm and flood disaster in urban areas and coping countermeasures [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(11): 1298-1308. (in Chinese))

[40] CHEN Juan, ZHANG Lu, LI Guozhi, et al. Perspectives on risk analysis and control for real-time operation of flood control systems [J]. Water Science and Engineering, 2024, 17(4): 319-322.

(收稿日期: 2025 - 03 - 27 编辑: 雷燕)