

DOI:10.16867/j.issn.1673-9264.2021290

陈浩, 徐宗学, 向代峰, 等. 以深圳河流域为例分析粤港澳大湾区城市洪涝及其成因[J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(11): 14-19. CHEN Hao, XU Zongxue, XIANG Daifeng, et al. Analysis of urban flood and the causes in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area by taking the Shenzhen River Basin as an example[J]. China Flood & Drought Management, 2021, 31(11): 14-19. (in Chinese)

以深圳河流域为例分析 粤港澳大湾区城市洪涝及其成因

陈浩^{1,2} 徐宗学^{1,2} 向代峰³ 付铁文^{1,2}

(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. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘要: 随着全球气候变化和城市化快速发展, 城市洪涝灾害日趋严重, 科学、系统、全面认识变化环境下城市洪涝成因, 对于完善沿海城市防洪(潮)除涝减灾体系和减轻城市洪(潮)涝灾害损失至关重要。以粤港澳大湾区深圳河流域为例, 基于降水、下垫面、产汇流、潮位和热带气旋等因子对其城市洪涝成因进行分析。研究结果表明: 深圳河流域年降水量、极端降水量和极端降水频次均呈增加趋势; 城市化的快速发展, 显著改变了流域原有的下垫面条件, 增加了城市区域径流系数和洪峰流量, 导致城市洪涝风险加剧。此外, 深圳河流域年平均高潮潮位和超强台风呈增加趋势, 当风暴潮、天文大潮和极端降水其中两个遭遇或者“三碰头”时, 将引发更为严重的城市洪(潮)涝灾害。

关键词: 气候变化; 城市化; 洪涝成因; 极端降水; 风暴潮

中图分类号: TU998.4

文献标识码: A

文章编号: 1673-9264(2021)11-14-06

0 引言

近几十年来, 在全球气候变化和城市化快速发展的共同影响下^[1], 极端气候事件增多增强, 城市“热岛效应”“雨岛效应”凸现^[2-3], 城市降雨及产汇流特征发生了区域性变化, 洪涝灾害问题日益严重^[4-5]。根据《中国城市竞争力第17次报告》显示: 1978年我国城市化率为17.92%, 2018年上升至59.58%, 预计到2035年将达到70%以上。对于滨海城市, 其洪涝灾害的发生不仅与降水、下垫面、城市防洪排涝工程等因素的变化紧密相关, 还受到潮位变化的剧烈影响。自然资源部2020年4月公布的《2019年中国海平面公报》显示: 气候变化背景下, 我国沿海海平面变化总体呈波

动上升趋势, 1980-2019年, 中国沿海海平面上升速率为3.4 mm/a, 高于同时段全球平均水平。2010年, 住建部对全国351个城市调研发现, 2008-2010年全国62%的城市曾发生过内涝, 有137个城市发生3次以上。根据《中国水旱灾害公报 2019》统计数据, 2000-2018年我国因洪涝灾害死亡22 293人, 直接经济损失33 562.22亿元。随着城市防洪排涝工程的建设, 我国因洪涝灾害导致的死亡人口呈现递减趋势, 但是随着社会财富迅速向城市聚集, 因洪涝灾害导致的直接经济损失急剧增大。城市洪涝问题已经成为影响我国城市公共安全的突出问题, 也是制约我国经济社会发展的重要因素^[6-7]。科学、系统认识城市洪涝成因, 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

收稿日期: 2021-09-25

第一作者信息: 陈浩, 男, 博士, E-mail: hhchen@bnu.edu.cn。

通信作者信息: 徐宗学, 男, 教授, E-mail: zxxu@bnu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52079005); 国家重点研发计划项目(2017YFC1502701)。

城市洪涝灾害损失的首要目标和核心任务。

面对日益严重的城市洪涝灾害,国内外众多学者对城市洪涝成因进行了大量研究。袁艺等^[8]以深圳市布吉河流域为研究区,采用分布式水文模型模拟分析了土地利用变化对城市洪涝灾害的影响。张建云等^[9]从全球气候变化、城镇化、流域产汇流等方面系统剖析了我国的城市洪涝问题及成因。宋晓猛等^[10]基于历史水文气象资料,探讨了北京市城市化背景下的城市洪涝形成机制。Shen Y等^[11]通过构建一维管道和二维地表水动力模型,从风暴潮和强降水方面分析研究了美国弗吉尼亚州诺福克市的城市洪涝成因。Hossain等^[12]以美国 Alabama 大学校园为例,从土壤特性和土壤覆盖角度出发分析了城市洪涝灾害的成因。

粤港澳大湾区是世界四大湾区之一,也是中国开放程度最高、经济活力最强的区域之一,在国家发展大局中具有重要战略地位。然而,独特的地理位置和气候条件,使得大湾区洪水、风暴潮和暴雨内涝等灾害频发,造成巨大的经济损失和人员伤亡,严重制约大湾区经济、社会的可持续发展^[13]。因此,迫切需要开展大湾区城市洪(潮)涝灾害成因的研究,提升大湾区防洪除涝能力,减轻城市洪(潮)涝灾害损失。本文以粤港澳大湾区内的深圳河流域为研究对象,深入分析降水、下垫面、潮位和热带气旋等致灾因子

的变化规律,系统剖析城市洪涝灾害成因,以期为大湾区城市防洪(潮)减灾工作提供参考依据和科技支撑。

1 研究区概况

深圳河流域是粤港澳大湾区的重要组成部分,位于珠江口东侧,为深圳与香港的界河,北侧为深圳罗湖区、福田区及龙岗部分地区,南侧为香港新界,流域面积312.5 km²。干流深圳河发源于牛尾岭,自东北向西南流入深圳湾,主要支流有深圳一侧的福田河、布吉河、深圳水库排洪河及香港一侧的梧桐河,主河道长约33.4 km。深圳河流域属亚热带季风海洋性气候,雨量丰沛而集中但时空分布不均。根据深圳河流域及其周边12个站点1986–2017年实测降水量数据,多年平均年降水量1 764.14 mm,大部分集中在汛期4–9月,其中4–6月为前汛期,7–9月为后汛期。

2 城市洪涝问题

受海岸山脉地貌带影响,深圳河流域4–10月锋面雨和台风雨频发,洪、涝、潮灾害严重。近十几年来,深圳河流域水库、泵站、管网、闸坝等城市防洪(潮)排涝工程不断修建,城市防洪(潮)排涝应急管理措施逐步完善,但是城市洪(潮)涝灾害仍然在不断加剧(表1)。如“1993.6.16”洪灾,

表1 深圳河流域1980–2010年主要城市洪(潮)涝灾害事件统计

发生时间 (年-月-日)	发生地点	降雨量/mm	历时/h	直接经济损失/亿元	死亡人口/人	成因
1980-07-28	罗湖区东门老街	200.0	3	—	0	涝、洪
1981-07-20	宝安区松岗街道	—	—	—	0	涝
1988-07-19	罗湖区文锦渡、嘉滨路、布吉穿孔桥,福田区田面村	41.3	2	—	0	潮
1989-07-18	福田区	—	—	0.17	0	潮
1992-09-07	福田区岗厦、皇岗,罗湖区草埔、水贝、渔农村	59.0	2	—	4	涝
1993-06-16	龙岗区布吉镇,福田区沿河机场、广深铁路	256.0	5	7.37	11	涝
1993-09-26	罗湖商业区,福田区,盐田区	441.0	24	7.64	14	洪
1994-08-06	罗湖区	360.0	24	0.05	4	涝
1997-07-19	盐田区	497.0	24	1.05	0	洪
1998-05-24	罗湖区罗芳村、新秀村	412.0	24	1.83	8	洪
1999-08-22	全流域	468.8	49	1.50	7	台风
1999-09-16	福田区梅林,罗湖区洪湖,盐田区	214.4	53	0.76	0	台风
2000-04-14	全流域	307.0	41	0.51	6	涝
2001-06-27	全流域	249.0	34	0.30	0	涝
2005-08-20	全流域	204.0	24	1.80	8	
2006-06-09	全流域	193.7	24	0.30	0	
2008-06-13	全流域	500.0	24	12.00	8	涝、洪
2010-07-28	福田区、罗湖区、龙岗区等	140.0	24	—	2	涝、洪

暴雨中心在深圳市布吉镇一带,5 h降雨量达256 mm,布吉镇汪洋一片,草埔村浸水约2 m,福田河沿线12个村庄受淹,福华路一带水深1 m以上,黄田深圳机场受淹关闭4 h,广深铁路布吉路段路基塌方,火车中断11 h 40 min,直接经济损失7.37亿元,死亡11人;“1993.9.26”洪灾,受199318号台风影响,深圳水库3 d降雨量达429 mm,深圳河上游香港新界地区降雨量高达600 mm,深圳河、布吉河洪水漫堤,罗湖商业区成泽国,受灾人口13万人,死亡14人,受浸面积12.41 km²,直接经济损失7.64亿元,间接经济损失5.64亿元;“2008.6.13”洪灾,日最大降雨量超过500 mm,降雨集中,范围广,强度大,损失严重,受灾人口达32万人,死亡8人,直接经济损失约5亿元。造成深圳河流域洪(潮)涝灾害的根本原因可以分为以下几个方面:深圳河流域城市化的快速发展,导致不透水面积迅速增加,河、湖、库、洼等蓄滞水区域减少,使得该区域产流时间加快、产流量增大,汇流时间缩短;受气候变化影响,极端降水强度和频次增大;海平面上升,加之风暴潮的影响,使得深圳湾潮位抬高,在发生极端降水时,深圳河泄洪不畅,进而加剧城市内涝。

3 城市洪涝成因分析

3.1 降水变化

降水是城市水循环系统的主要水源输入,而极端降水是引发城市洪涝事件最直接的驱动要素^[14]。本文在对深圳河流域及其周边12个雨量站1986–2017年年平均降雨量分析的基础上,采用年最大值抽样法和超定量抽样方法筛

选样本指标对流域降水变化特征进行评估,其中年最大值法选取各雨量站年最大日降水量进行分析,超定量法则根据百分位阈值(90%、95%)构建降水序列,并对其降水量(R90P、R95P)和发生频次(R90F、R95F)进行统计,结果如图2所示。

从图2可以看出,深圳河流域年降水量呈增加趋势,年最大日降水量基本保持不变,在166 mm上下浮动。不同阈值下的年极端降水量和发生频次均呈增大趋势。分阶段来看,1986–1990年深圳河流域年降水量和极端降水量呈下降趋势,1990年年平均降水量为1 003.98 mm,90%和95%阈值降水量分别为258.19 mm和97.56 mm,发生频次分别为4.08次和1次,为近30年来最低值;1990–2008年深圳河流域年降水量和极端降水量呈波动上升趋势,2008年达到最大值,年平均降水量为2 625.12 mm,90%和95%阈值降水量分别为1 805.28 mm和1 485.74 mm,发生频次分别为18.08次和11.67次;2008–2017年深圳河流域年降水量和极端降水量呈波动下降趋势。总体上,深圳河流域年降水量、极端降水量和极端降水频次均呈增加趋势,从而增加了城市洪涝的风险。

3.2 下垫面变化

城市化的快速发展使得城市下垫面发生了巨大的变化,原本糙率较大的透水地表由相对较光滑的人工不透水地表代替,大量的水塘、鱼塘、湖泊、河道和沟渠等低洼蓄水区域被填平或被改造,导致城市流域蓄水能力和过流能力降低,从而增加了城市内涝风险。本文基于支持向量机(Support Vector Machine, SVM)的监督分类方法对深圳河

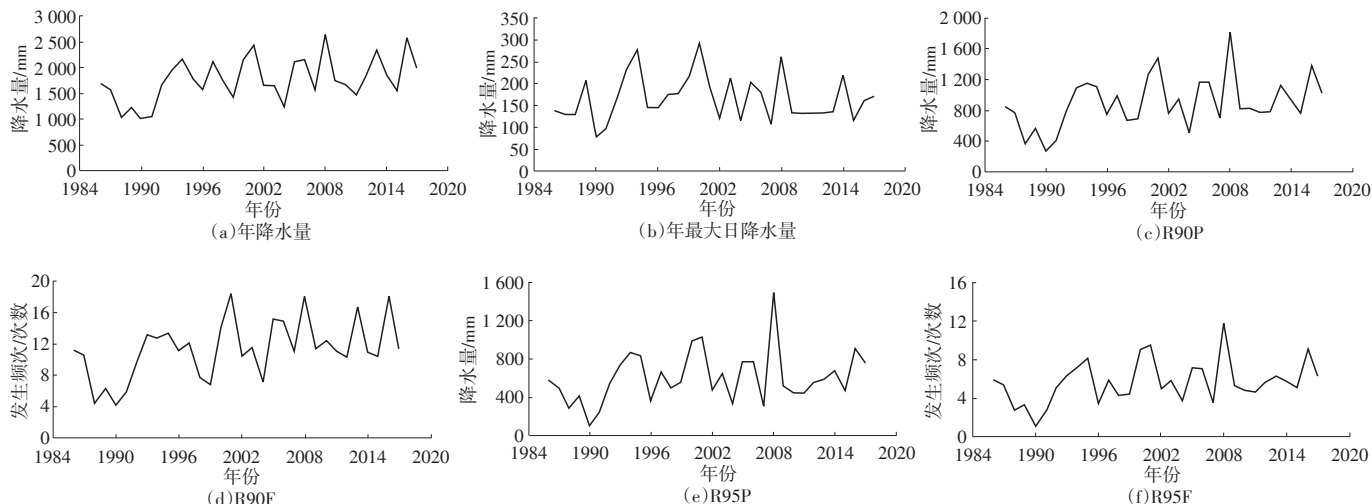


图2 深圳河流域降水指标变化

流域1987年、1995年、2000年、2010年、2014年和2020年6期云量较少且季节相一致的遥感影像进行解译,将下垫面分为城镇、林地/草地、水体、湿地和裸地5种土地利用类型,分类结果如图3所示。

从图3可以看出,20世纪90年代深圳河流域的城市化主要集中在流域中部罗湖地区;随着经济的快速发展,城市化迅速向流域东部福田区和北部龙岗区扩张;2014年以后,城镇用地基本不再扩张。对不同年份土地类型的占比进行统计,1987-2017年深圳河流域城镇用地从18.89%逐年增加至42.19%,平均每10年增加9.13%;林地/草地从64.18%逐年减少至53.69%,平均每10年减少3.38%;河、湖、库、塘等水域面积从5.29%逐年减少至3.48%,平均每10年减少0.58%。深圳河流域城市化的快速发展显著改变了流域原有的下垫面条件,进而加剧了城市内涝风险。

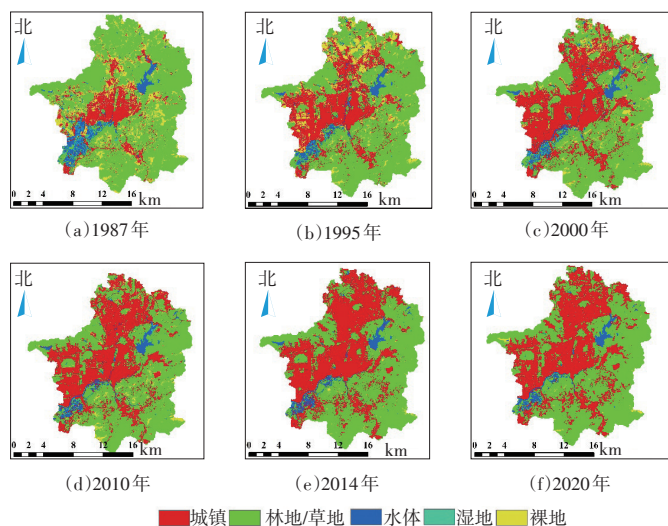


图3 深圳河流域土地利用变化

3.3 产汇流变化

降水和下垫面的变化必然导致流域内产汇流的变化。本文通过构建不同城市化背景和不同降水强度下的SWMM(Storm Water Management Model)模型,定量分析流域内产汇流的变化。为了揭示降水和城市化发展对产流的影响,分析了不同降水强度下模型各子汇水区的径流系数与不透水率的关系,如图4所示。从图中可以看出,径流系数与不透水率之间存在显著的线性正相关关系;随雨强增大,相同的不透水率变化情况下,径流系数的变化越小,即曲线越平坦。

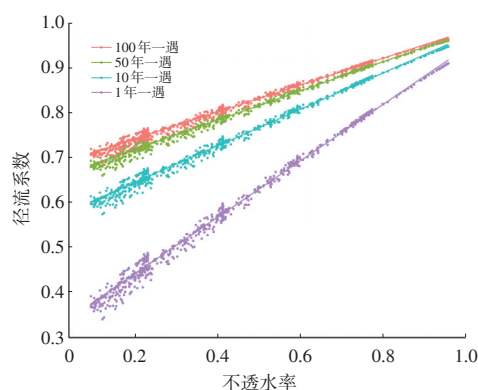


图4 径流系数与不透水率的响应关系

为揭示降水和城市化发展对汇流的影响,对不同城市化和降水强度下的流域出口流量进行统计,如图5所示。可以看出,出口流量过程线均为双峰,在重现期1 a下,随城市化发展,第一峰的峰值有所增加,峰现时间有所提前,但变化趋势不明显,第二峰的峰值有较为明显的增加,峰现时间也有明显的提前,说明随着城镇化扩张,洪峰流量有增加的趋势,并且峰现时间会提前;随降水重现期增大,两个峰的峰值出现了相反的变化趋势,这是由于流域的蓄水能力已达到最大值,在更高的城市化程度下产生更多径流导致更多节点出现溢流,另外各子汇水区不透水率的变化存在相互影响;在相同城市化水平下,随着降水重现期增加,洪峰流量增加,峰现时间提前。

3.4 其他成因分析

对于滨海城市,城市内涝不仅受降水和下垫面变化等因素影响,同时受潮位变化的剧烈影响,尤其是当极端降雨遭遇外江天文大潮或风暴潮时,高潮位顶托使得城市河

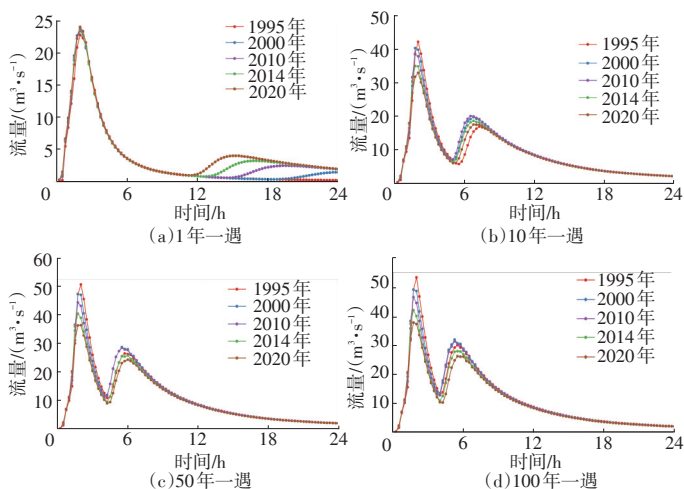


图5 不同城市化和降水强度下流域出口流量过程

道洪水不能及时排出,河道长时间维持高水位,排水管网排水能力大幅度下降,出现严重内涝。研究基于赤湾潮位站1965–2018年实测潮位数据,分析深圳河流域潮位演变规律,选取珠江基面以下2.463 m作为统一基准面进行处理,其年平均高潮潮位与年平均低潮潮位变化如图6所示。从图6可以看出,赤湾潮位站年平均高潮潮位与低潮潮位呈增大趋势,年平均高潮潮位每年增加3.2 mm,年平均低潮潮位每年增加3.7 mm。

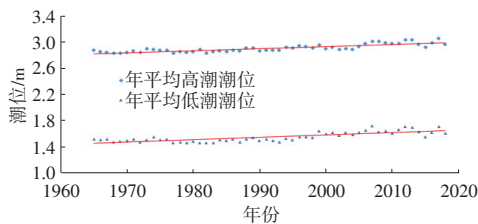


图6 赤湾潮位站年平均高潮潮位与低潮潮位变化

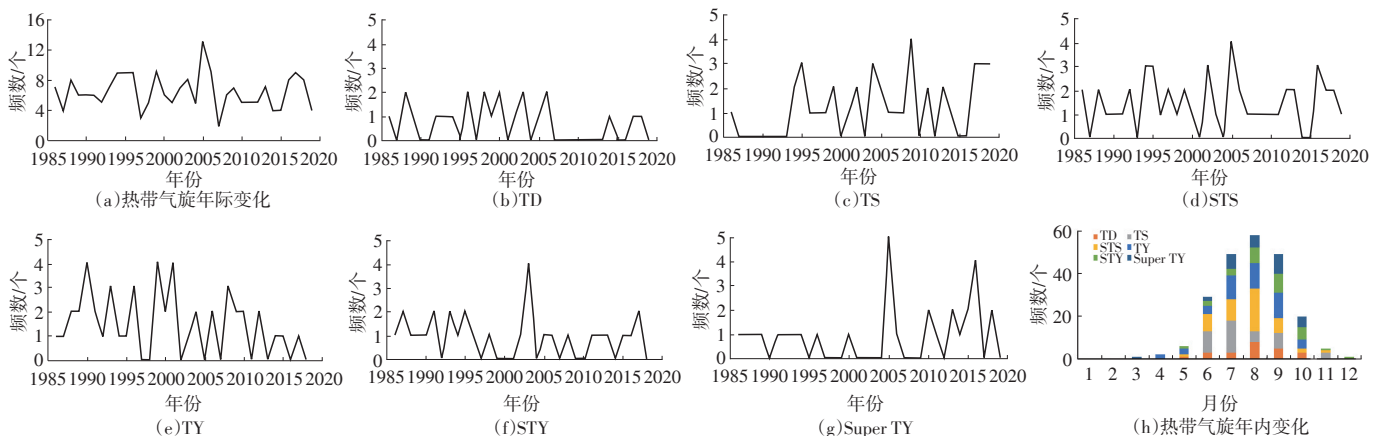


图7 深圳河流域热带气旋变化

4 结 论

科学、系统、全面认识变化环境下城市洪涝成因,对于完善城市防洪除涝减灾体系、提升城市防洪除涝能力、减轻城市洪涝灾害损失至关重要。本文以深圳河流域为例,基于降水、下垫面、产汇流、潮位和热带气旋等因子对其城市洪涝成因进行分析,以期对粤港澳大湾区及沿海地区防洪除涝减灾提供科技支撑。

(1)降水和下垫面的变化、二者变化导致的产汇流特性变化及风暴潮等是深圳河流域城市洪涝频发的根本原因。深圳河流域年降水量、极端降水量和极端降水频次均呈增加趋势;城市化的快速发展,显著改变了流域原有的下垫面条件,加剧了城市内涝的风险。

为分析深圳河流域热带气旋变化,对1987–2019年路径距深圳市市中心500 km内的热带低压(TD)、热带风暴(TS)、强热带风暴(STS)、台风(TY)、强台风(STY)和超强台风(Super TY)等热带气旋进行统计分析,如图7所示。1987–2019年对深圳河流域产生影响的热带气旋共计220个,平均每年6.47个,其中2005年最多,为13个。从年际变化来看,1987–2019年深圳河流域热带气旋个数呈下降趋势,TD、TY和STY个数均呈现下降趋势,但是TS、STS和Super TY个数均呈上升趋势,尤其是Super TY最大风力可达16级以上,其造成的风暴潮灾害严重威胁沿海地区的经济发展。从年内变化来看(图7(h)),深圳河流域热带气旋主要发生在6–10月,占全年总频次的93.18%,各类热带气旋的峰值主要出现在7–9月。

(2)城市化发展导致城市不透水率增大,径流系数变大;同时,降雨强度变化在一定程度上影响径流系数与不透水率之间的关系。在相同的降雨条件下,随着城镇化发展,流域出口洪峰有所提前,洪峰流量在小雨强下增加,在大雨强下有所减少,说明下垫面变化导致的不透水率变化存在空间上的相互影响;在相同城市化水平下,随着降水强度增加,洪峰流量增加,峰现时间提前。

(3)深圳河流域年平均高潮潮位与低潮潮位呈增大趋势,年平均高潮潮位增加3.2 mm/a,年平均低潮潮位增加3.7 mm/a。1987–2019年深圳河流域热带气旋个数呈下降趋势,且TD、TY和STY个数均呈现下降趋势,但是TS、STS和Super TY个数均呈上升趋势。风暴潮、天文大潮和极端降水其中两个遭遇或者发生“三碰头”将引发严重的城市洪(潮)涝灾害。

参考文献

- [1] 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.
- [2] ALLEN M R, INGRAM W J. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle[J]. Nature, 2002, 419: 224-232.
- [3] 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.
- [4] 李娜,张念强,丁志雄.我国城市内涝问题分析与对策建议[J].中国防汛抗旱,2017,27(5):77-79.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 黄国如,陈易偲,姚芝军.高度城镇化背景下珠三角地区极端降雨时空演变特征[J].水科学进展,2021,32(2):161-170.
- [8] 袁艺,史培军.土地利用对流域降雨-径流关系的影响——SCS模型在深圳市的应用[J].北京师范大学学报(自然科学版),2001(1):131-136.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Shen Y, Morsy M M, Huxley C, et al. Flood risk assessment and increased resilience for coastal urban watersheds under the combined impact of storm tide and heavy rainfall[J]. Journal of Hydrology, 2019, 579: 124159.
- [12] Hossain Anni A, Cohen S, Praskievicz S. Sensitivity of urban flood simulations to stormwater infrastructure and soil infiltration [J]. Journal of hydrology (Amsterdam), 2020, 588: 125028.
- [13] 陈文龙,何颖清.粤港澳大湾区城市洪涝灾害成因及防御策略[J].中国防汛抗旱,2021,31(3):14-19.
- [14] 宋晓猛,张建云,孔凡哲,等.北京地区降水极值时空演变特征[J].水科学进展,2017,28(2):161-173.

Analysis of urban flood and the causes in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area by taking the Shenzhen River Basin as an example

CHEN Hao^{1,2}, XU Zongxue^{1,2}, XIANG Daifeng³, FU Tiewen^{1,2}

(1.College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875; 2.Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875; 3.State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072)

Abstract: During the past years, urban flood disaster is becoming a big challenge due to the joint impact of global climate change and rapid urbanization. A scientific, systematic and comprehensive understanding of the causes of urban flood under the changing environment is very important to improve the flood and tide prevention and disaster reduction system in coastal cities, and to reduce the loss of urban flood and tide disasters. The causes of urban flood are analyzed on the basis of factors such as precipitation, underlying surface, runoff, tide level and tropical cyclone in the Shenzhen River Basin of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area in this study. The results show that the annual precipitation, extreme precipitation and frequency of extreme precipitation in the Shenzhen River Basin were increasing. The rapid urbanization has significantly changed the original underlying surface conditions in the study area, increased the urban regional runoff coefficient and flood peak flow, and exacerbated the risk of urban flood disaster. In addition, the annual average high tide level and super typhoon in the Shenzhen River Basin showed an increasing tendency. When two or three of storm surge, astronomical spring tide and extreme precipitation occur at the same time, serious urban flood, tide and waterlogging disasters will occur.

Keywords: climate change; urbanization; causes of flood and waterlogging; extreme precipitation; storm surge 责任编辑 姚力玮