

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2016.04.001

中国城市洪涝问题及成因分析

张建云^{1,2}, 王银堂¹, 贺瑞敏^{1,2}, 胡庆芳¹, 宋晓猛^{2,3}

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

2. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029; 3. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 随着经济社会的发展, 中国步入城镇化快速发展的阶段, 城镇化率已由 2000 年的 36.22% 增加到 2014 年的 54.77%。在全球气候变化与快速城镇化背景下, 中国城市洪涝灾害日益严重。阐述了全球气候变化及城镇化对城市降水和极端暴雨的影响机制, 并从流域产汇流角度分析了城镇化对洪水过程的影响, 系统剖析了中国城市洪涝频发的主要原因。在成因分析的基础上, 进一步提出了中国城市洪涝防治的应对策略, 主要包括: ① 以低影响开发理念为指导, 加强城市基础设施建设, 建设海绵城市; ② 建立城市洪涝立体监测、预报预警和实时调度系统, 强化城市洪涝科学决策能力; ③ 健全和完善城市洪涝应急预案, 强化应急管理, 完善灾害救助和恢复机制。

关键词: 城镇化; 城市洪涝; 全球变化; 产汇流

中图分类号: TV124; TU992 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2016)04-0485-07

受季风气候影响, 中国暴雨洪水集中、洪涝灾害严重, 城市洪涝问题历来是一个非常突出的问题。1931 年 6—8 月, 长江上中游出现长历时大范围强降雨过程, 武汉三镇平地水深丈余, 陆地行舟, 瘟疫流行, 受淹时间长达 133 d^[1]。当时的《国闻周报》描述为“大船若蛙, 半浮水面, 小船如蚁, 漂流四周”。

城镇化的快速发展给城市水文学带来新的问题和挑战^[2-3]。根据联合国人居署发布的《2011 世界人口状况报告》^[4]指出, 到 2011 年底, 世界约 50% 的人口居住在城市, 预计到 2050 年城市人口将从 2011 年的 36 亿增长到 63 亿, 总人口将从 70 亿增长到 93 亿, 即未来城市化进程将继续加快, 城市人口持续增加^[5], 特别是发展中国家和地区城市人口增长最为显著^[6]。中国进入了城镇化高速发展的阶段, 全国城镇化率从 2000 年的 36.22% 增加到 2014 年的 54.77%, 京津、长三角、珠三角等地甚至接近或超过了 80%。2013 年《国务院关于城镇化建设工作情况的报告》提出, 中国城市群的发展目标是京津冀、长江三角洲和珠江三角洲城市群将向世界级城市群发展, 同时规划打造哈长、呼包鄂榆、太原、宁夏沿黄、江淮、北部湾、黔中、滇中、兰西、乌昌石 10 个区域性城市群。据有关规划, 在 2050 年前后, 中国人口达到高峰时, 总人口为 16 亿左右, 届时城市化水平将超过 60%, 全国将有 9.6 亿以上的人口生活在城市里。

城市化在一定程度上增大了人类社会与生态环境之间的相互作用, 从而引发一系列的社会-环境-生态问题^[7-8]。城市扩张使得区域不透水面积迅速增大, 改变了城市水循环过程, 导致极端降水事件增多、径流系数和径流量增加、城市暴雨洪涝风险增大^[9-10]; 其次, 由于城市人口增加导致需水增加, 供需关系发生改变, 从而影响城市供水安全等^[11]; 另外, 城市生活污水和工业废水增加, 引起水质恶化以及水生生态系统退化^[12]等环境问题。因此, 城市水文学研究需求愈发迫切, 加之全球气候变化的影响, 使得变化环境下的城市水文学研究成为当今水科学研究的重点方向之一。国际水文科学协会 (IAHS) 主导的 2013—2022 科学计划主题确定为“Panta Rhei” (变化环境下的水文科学研究计划)^[13], 其中城市水文学及社会水文学 (Socio-Hydrology) 研究成为水文-社会系统科学问题中的一个焦点^[14-15], 为城市水文学的发展带来了机遇和挑战。

收稿日期: 2016-01-27; 网络出版时间: 2016-07-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20160718.2044.004.html>

基金项目: 中国工程院重大咨询研究项目 (2015-ZD-07); 国家自然科学基金资助项目 (41330854)

作者简介: 张建云 (1957—), 江苏沛县人, 中国工程院院士, 主要从事水文水资源、防洪减灾和气候变化影响研究。

E-mail: jyzhang@nhri.cn

变化环境下水循环与水资源脆弱性成为水科学研究的热点问题,其中城市发展与水安全成为关注的焦点^[16-19]。在全球变化的大背景下,随着中国城镇化的快速发展,城市洪涝灾害问题日趋严重,成为制约经济社会持续健康发展的突出瓶颈^[20]。据相关统计,2008—2010年,全国有60%以上的城市发生过不同程度的洪涝,其中有近140个城市洪涝灾害超过3次以上。近几年,每逢雨季,各地城市轮番上演“城市看海”的景象,造成严重的洪涝灾害和人员伤亡及财产损失。2007年7月18日,山东济南遭遇超强特大暴雨,造成34人死亡,33万群众受灾,直接经济损失约13亿元。2007年7月16日重庆发生100年一遇暴雨洪水,全市有22个区县受灾,受灾272.35万人、死亡10人、失踪5人、伤病128人,紧急转移安置11.31万人。2010年5月7日,广州发生暴雨洪涝,死亡6人,全市受灾人口3万余人,中心城区118处地段出现严重内涝水浸,造成城区大范围交通堵塞。2012年7月21日,北京市及其周边地区遭遇61年来最强暴雨及洪涝灾害,造成79人死亡,160万人受灾,经济损失116亿元。2013年10月7日,宁波余姚市遭受了100年一遇的降雨,强降雨导致城区有70%以上地区受淹7d以上,给人民的生活带来巨大的损失和困难。2014年5月11日,深圳连续遭受暴雨袭击,全市出现约300处道路积水。部分地区积水超过1m,共约2500辆汽车受淹。2015年6月17日上海暴雨,同济大学、复旦大学等被淹,学生在校园内抓鱼戏水。2015年6月26日南京市暴雨,机场高速受淹封闭,南京多所大学被淹,被戏称都改名为“河海”大学。城市防洪排涝已成为中国防洪排涝体系的一个突出短板,严重影响了城市人民生命财产安全,对城市形象也造成了极为负面的影响。

本文将重点阐述全球气候变化及城镇化对城市降水和极端暴雨的影响机制,从流域产汇流角度分析城镇化对洪水过程的影响,系统剖析中国城市洪涝频发的主要原因,从而提出应对洪涝的策略措施。

1 变化环境对城市暴雨特性的影响

根据观测资料分析,在全球变暖和城镇化发展的共同影响下,城市暴雨特性发生了明显的变化。早在1968年,美国科学家Changnon建议发起并实施了大城市气象观测试验计划(METROMEX计划),试验结果指出了城市对夏季中等以上强度的对流性降水的增雨效果显著,并提出了城市增强降水机制的假说^[2]。中国科学院大气物理研究所的有关研究指出^[21]:城市化导致降水在城市上风向和下风向都有所增加,增加30%左右。城市化对锋面降水过程的影响最为明显,使得锋面系统提前达到城区并延缓了锋面在城区的移动,最终导致城区及其边缘地区的降水时间延长1h。另外,随着城市的扩张,总降水量超过250mm以及强度超过40mm/h的降水出现的频率随之增加,这也使得城市内涝出现的风险增加。水利部应对气候变化研究中心据1981—2010年与1961—1980年资料对比分析,在长三角地区,城区暴雨天数增幅明显高于郊区:城区和郊区暴雨日数增幅,苏州市为30.0%和18.0%,南京市为22.5%和11.0%;宁波市为32.0%和2.0%。

1.1 全球变暖对城市暴雨特性的影响

根据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第4次评估报告指出^[22-24],过去的130年(1880—2012年)全球升温0.85℃,但最近的30年(1980—2012年)是北半球过去1400年最热的30年。中国的地表温度升高高于全球的平均水平,根据最新百年器测气温序列分析,在过去的100多年(1909—2011年),中国陆地区域平均增温0.9~1.5℃,近15年来气温上升趋缓,但当前仍处于100年来气温最高阶段^[25]。全球变暖一方面导致水文循环过程加快,海洋蒸发增加;另一方面由于大气温度上升,大气的持水能力增强(在气温20~30℃,温度每升高1℃,大气含水量可提高约1%,见图1);大气的持水能力增强,需要更多的气水汽,大气才能达到饱和,形成降水条件。由于空气中水分较大,一旦发生降水,降雨强度就会比以往大。此外,潮湿和温暖的大气稳定性较差,亦易形成暴雨过程。

在2015年3月发布的《中国极端天气气候事件和灾害风险管理与适应国家评估报告》^[26]指出,中国极端天气气候事件种类多、频次高、阶段性和季节性明显,区域差异大,影响范围广。近60年中国极端天气气候事

件发生了显著变化,高温日数和暴雨日数增加,极端低温频次明显下降,局部强降雨和城市洪涝增多,北方和西南干旱化趋势加强,登陆台风强度增大,霾日数增加。中国群发性或区域性极端天气气候事件频次增加,范围有所增大。20世纪80年代以来,中国气候灾害影响范围逐渐扩大,影响程度日趋严重,直接经济损失不断增加,但死亡人数持续下降。随着气候灾害影响范围扩大和人口、经济总量增长,各类承灾体的暴露度不断增大。根据中等排放(RCP4.5)和高排放(RCP8.5)情景^[26],采用多模式集合方法,预估21世纪中国的高温和强降水事件继续呈增多趋势;预估到21世纪末中国高温、洪涝灾害风险加大,城市化和财富积聚对气候灾害风险有叠加和放大效应。

1.2 城镇化发展对城市暴雨特性的影响

城镇化对城市暴雨特性的影响主要有3个方面:

(1) 热岛效应 在现代化的大城市中,除了数百万人日常生活所发出的热量,还有工业生产、交通工具散发的大量热量。此外,城市的建筑群和柏油路面热容量大,反射率小,能有效地储存太阳辐射热。据估算,城市白天吸收储存的太阳能比乡村多80%,晚上城市降温缓慢^[27]。因此,城镇化的发展导致城市中的气温高于外围郊区(可高2℃以上),在温度的空间分布上,城市犹如一个温暖的岛屿,即城市热岛效应。城市大气温度高,增加了大气的持水能力和大气的不稳定性,增加了城区降雨的机率 and 强度。

(2) 凝结核增强作用 城市大气污染物上升,空气中污染物粒子浓度增加,污染物粒子产生凝结核增强效应,起到了水汽凝结催化剂的作用,增加城区的降雨机率 and 强度。人工降雨技术就是在空中播撒碘化银颗粒作为凝结核,促使水蒸气凝结,从而使原本可能不被凝结成雨滴的水汽凝结形成降雨。

(3) 微地形屏障效应 暖湿空气在运动过程中,遇到城市高楼大厦群,在爬升过程中,上升冷却,增加降雨的可能性。

在上述3种效应的影响下,出现市区降雨强度和频率高于郊区的现象,即城市的雨岛效应。有关研究表明,城市的热岛效应、凝结核效应、高层建筑障碍效应等的增强,使城市的年降水量增加5%以上,汛期雷暴雨的次数和暴雨量增加10%以上^[27]。上海市徐家汇站,根据1916—2014年资料统计(有小时降水记录以来),小时降水极值变化总体趋向增大,特别是1949年以来,增大趋势明显((2.72 mm/h)/10 a),尤以近期(1981—2014年)增大趋势((6.60 mm/h)/10 a)最为显著,见图2。

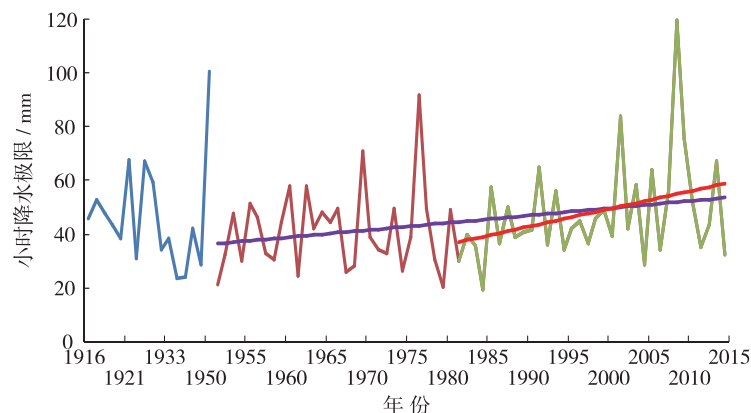


图2 上海徐家汇站近100年小时降水极值变化过程

Fig. 2 Change process of extreme precipitation in Xujiahui station in Shanghai during 1916—2014

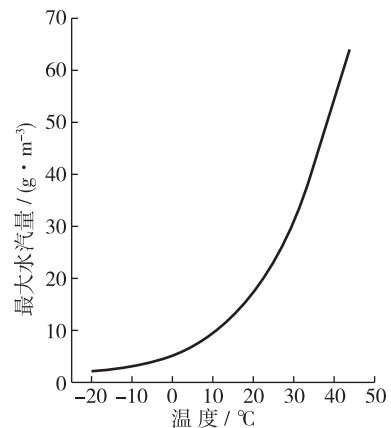


图1 大气温度与持水能力关系曲线

Fig. 1 Relationship curve between the atmospheric temperature and water holding capacity

根据上海 1981—2014 年 34 年小时强降水事件的变化趋势分析,呈现出明显的城市化效应特征:市区浦东和徐家汇站及近郊增加趋势明显,线性趋势为每 10 年增加 0.5~0.7 次。上海地区各站总的强降水事件频数呈增加趋势(图 3),表明强降水事件更集中于城区与近郊。

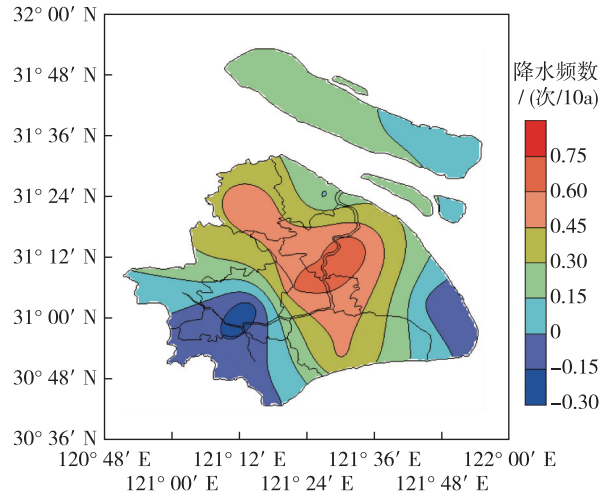


图 3 1981—2014 年上海地区小时强降水事件频数变化趋势空间分布

Fig. 3 Frequency variation spatial distribution of hourly precipitation events in Shanghai during 1981—2014

2 城镇化发展对城市洪涝及其灾害的影响

城镇化的快速发展,导致流域下垫面的剧烈变化,直接影响到流域的产汇流规律和对洪水的调节作用,同时随着社会财富向城市的聚集,使得洪涝风险的暴露度大幅度提高,城市的洪水灾害风险显著上升。

2.1 城镇化对流域水文特性的影响

城市化使得大片耕地和天然植被为街道、工厂和住宅等建筑物所代替,下垫面的滞水性、渗透性、热力状况均发生明显的变化^[28]。集水区内天然调蓄能力减弱,这些都促使市区及近郊的水文要素和水文过程发生相应的变化。

城市化增加了地表暴雨洪水的径流量。城市化的结果使地面变成了不透水表面,如路面、露天停车场及屋顶,而这些不透水表面阻止了雨水或融雪渗入地下,降水损失水量减少,径流系数显著提高^[29-31]。由于下垫面硬化将明显减少流域的蒸散发量,也增加流域的径流量。径流系数与不透水面积百分比关系如图 4 所示,即不透水面积比与径流深和径流系数呈明显的正相关关系。许有鹏等^[32]在南京秦淮河城市化对水文影响分析中指出,城镇化率(不透水率)从 4.2%(1988 年)到 7.5%(2001 年)和 13.2%(2006 年),流域的蒸散发量分别减少 3.3%和 7.2%,流域的多年平均径流深和径流系数分别增加 5.6%和 12.3%左右。

另一方面,城市化的地面硬化,由原来多样化的土地利用(植被、林地、花草、农田等)变为灰色或黑色的道路和广场,流域地表的糙率降低。此外,城市化使得流域地表汇流呈现坡面和管道相结合的汇流特点,明显降低了流域的阻尼作用,汇流速度将显著加快,水流在地表的汇流历时和滞后时间大大缩短,集流速度明显增大,城市及其下游的洪水过程线变高、变尖、变瘦,洪峰出现时刻提前,城市地表径流量大为增加,城市化对水文过程的影响比较见图 5^[33]。美国丹佛市的观测表明,2 h 43 mm 的降雨,在草坪、沙土和黏土地带,径流系数(产流/降雨量)为 0.1~0.25,铺路地带则为 0.90^[27]。

2.2 城镇化对洪涝风险的影响

城镇化除了上述对暴雨及流域水文特性的影响之外,还有以下 3 方面的影响:

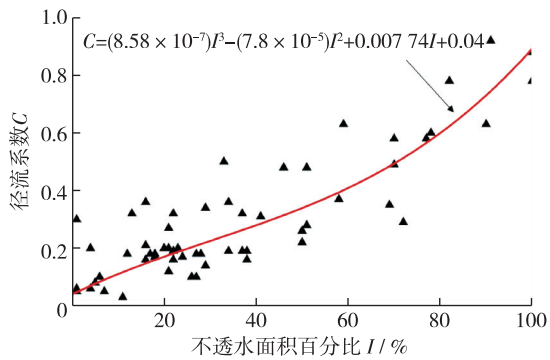


图 4 径流系数与不透水面积百分比关系^[27]
Fig. 4 Relationship between runoff coefficient and impervious area percentages

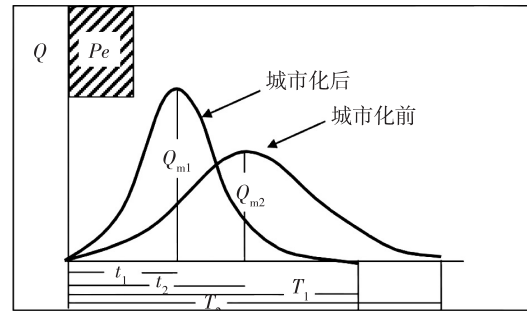


图 5 城市化对水文过程的影响比较图^[33]
Fig. 5 Impacts of urbanization on hydrologic process

(1) 城市扩张导致耕地、林地大量减少, 湿地、水域衰减或破碎化, 水量调蓄能力降低, 洪水长驱直入, 导致城区洪涝严重。以 2013 年浙江余姚洪涝为例, 1985 年县改市之前, 余姚县周围都是稻田, 山上下来的洪水由水稻田天然拦蓄调节, 现在水稻田变成了广场和柏油道路, 山上洪水直接冲击市区, 这是该市 2013 年 70% 的城区淹没 7 d 以上的重要原因。

(2) 城市建设破坏了改变城市排水方式和排水格局, 增加了排水系统脆弱性。部分河道被人为填埋或暗沟化, 河网结构及排水功能退化; 道路及地下管道基础设施建设, 破坏了原来的排水系统, 管道与河道排水之间的衔接和配套不合理, 排水路径变化, 排水格局紊乱。排水系统不完善。

(3) 城市微地形有利于洪涝的形成。城市建有大量的地下停车场、商场、立交桥等微地形有利于雨水积聚和洪涝的形成, 也是城市洪涝最为严重的地点。

3 结 语

由于特殊的地理和气候条件, 中国洪涝灾害问题十分严重。城市人口和资产集中, 自然灾害的暴露度高, 城市洪涝经常造成严重人口伤亡和财产损失, 城市洪涝防治一直是防洪减灾的重点工作。

全球变化导致极端气候事件增加以及城镇化快速发展产生的热岛效应、凝聚核作用和阻碍作用, 使得城市暴雨呈现增多趋强的态势。城市化和人类活动引起的下垫面变化, 影响到流域的产流汇流机制, 流域的径流系数增加, 汇流速度加快, 加上城市的无序开发, 破坏了城市的排水和除涝系统, 多种因素综合作用的结果, 导致城市洪涝问题越来越突出。

城镇化洪涝防治的总体应对策略包括: ① 加强城市基础设施的建设, 在低影响开发思路的指导下, 建设海绵型城市, 增强措施减灾防灾的能力, 保护城市生态环境; ② 建立城市洪涝信息立体监测, 实时监控、快速预报预警的信息系统工程, 科学调度决策, 尽可能降低洪涝灾害及其产生的影响; ③ 健全和完善城市洪涝应急预案, 加强城市洪涝应急管理, 提升城市管理抗灾减灾能力。

致谢: 上海市气候中心梁萍提供图 2 和图 3 数据资料。

参考文献:

[1] 骆承政, 乐嘉祥. 中国大洪水: 灾害性洪水述要[M]. 北京: 中国书店, 1996. (LUO C Z, LE J X. China flood: summary of disastrous floods[M]. Beijing: Cathay Bookshop, 1996. (in Chinese))
[2] 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 J Y, SONG X M, WANG G Q, 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. (in Chinese))
- [3] 宋晓猛, 张建云, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战: II: 城市雨洪模拟与管理[J]. *水科学进展*, 2014, 25(5): 752-764. (SONG X M, ZHANG J Y, WANG G Q, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: II: urban stormwater modeling and management [J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(5): 752-764. (in Chinese))
- [4] UN Department of Economic and Social Affairs. World urbanization prospects: the 2011 revision[R]. New York: DESA, 2012.
- [5] COHEN J E. Human population: the next half century [J]. *Science*, 2003, 302(5648): 1172-1175.
- [6] GRIMM N B, FAETH S H, GOLUBIEWSKI N E, et al. Global change and the ecology of cities [J]. *Science*, 2008, 319(5864): 756-760.
- [7] CAMORANI G, CASTELLARIN A, BRATH A. Effects of land-use changes on the hydrologic response of reclamation systems [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2005, 30: 561-574.
- [8] WALLACE J R. The effects of land use changes on the hydrology and urban watershed[R]. Atlanta: School of Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, 1971.
- [9] 程江, 杨凯, 刘兰岚, 等. 上海中心城区土地利用变化对区域降雨径流的影响研究[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(6): 914-925. (CHENG J, YANG K, LIU L L, et al. Impact of 60 years land use change on rainfall-runoff in central Shanghai[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(6): 914-925. (in Chinese))
- [10] HALLEGATTE S, GREEN C, NICHOLLS R J, et al. Future flood losses in major coastal cities[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(9): 802-806.
- [11] ROGERS P. Facing the freshwater crisis [J]. *Scientific American*, 2008, 299: 46-53.
- [12] GRANT S B, SAPHORES J D, FELDMAN D L, et al. Taking the “waste” out of “wastewater” for human water security and ecosystem sustainability [J]. *Science*, 2012, 337(6095): 681-686.
- [13] MONTANARI A, YOUNG G, SAVENIJE H H G, et al. “Panta Rhei (Everything flows)” : change in hydrology and society: the IAHS Scientific Decade 2013—2022 [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2013, 58(6): 1256-1275.
- [14] SIVAPALAN M, SAVENIJE H H G, BLOSCHL G. Socio-hydrology: a new science of people and water [J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26: 1270-1276.
- [15] SIVAKUMAR B. Socio-hydrology: not a new science, but a recycled and re-worded hydrosociology [J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26: 3788-3790.
- [16] 张建云, 王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (ZHANG J Y, WANG G Q. Effects of climate change on hydrology and water resources [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))
- [17] MCDONALD R I, GREEN P, BALK D, et al. Urban growth, climate change, and freshwater availability[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(15): 6312-6317.
- [18] VOROSMARTY C J, GREEN P, SALISBURY J, et al. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth [J]. *Science*, 2000, 289(5477): 284-288.
- [19] 张建云, 贺瑞敏, 齐晶, 等. 关于中国北方水资源问题的再认识[J]. *水科学进展*, 2013, 24(3): 303-310. (ZHANG J Y, HE R M, QI J, et al. A new perspective on water issues in North China [J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(3): 303-310. (in Chinese))
- [20] 袁艺, 史培军, 刘颖慧, 等. 土地利用变化对城市洪涝灾害的影响[J]. *自然灾害学报*, 2003, 12(3): 6-13. (YUAN Y, SHI P J, LIU Y H, et al. Impact of land use change on urban flood disaster[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(3): 6-13. (in Chinese))
- [21] YU M, LIU Y M. The possible impact of urbanization on a heavy rainfall event in Beijing[J]. *J Geophys Res Atmos*, 2015, 120(16): 8132-8143.
- [22] IPCC. Climate change 2013: physical science base[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [23] IPCC. Climate change 2014: impacts, adaptation and vulnerability: part A: global and section aspects [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [24] IPCC. Summary for policymakers [M]// FIELD C B, BARROS V, STOCKER T F, et al. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: A special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2012: 1-19.
- [25] 《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第三次气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2014. (Editorial

- Committee of Third National Assessment Report on Climate Change. Third national assessment report on climate change[M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese))
- [26] 秦大河, 张建云, 闪淳昌, 等. 中国极端天气气候事件和灾害风险管理与适应国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2015. (QIN D H, ZHANG J Y, SHAN C C, et al. China national assessment report on risk management and adaptation of climate extremes and Disasters[M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese))
- [27] 张建云, 李纪生. 水文学手册[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (ZHANG J Y, LI J S. Handbook of hydrology[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [28] WALES S G. Urban surface water management[M]. New York: Wiley, 1989.
- [29] 万荣荣, 杨桂山. 流域 LUCC 水文效应研究中的若干问题探讨[J]. 地理科学进展, 2005, 24(3): 25-33. (WAN R R, YANG G S. Discussion on some issues of hydrological effects of watershed land use and land cover change[J]. Progress in Geography, 2005, 24(3): 25-33. (in Chinese))
- [30] 史培军, 袁艺, 陈晋. 深圳市土地利用变化对流域径流的影响[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1041-1049. (SHI P J, YUAN Y, CHEN J. The effect of land use on runoff in Shenzhen city of China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(7): 1041-1049. (in Chinese))
- [31] 朱恒峰, 赵文武, 康慕谊, 等. 水土保持地区人类活动对汛期径流影响的估算[J]. 水科学进展, 2008, 19(3): 400-406. (ZHU H F, ZHAO W W, KANG M Y, et al. Effect of human activities on flood season runoff in water and soil conservation region [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(3): 400-406. (in Chinese))
- [32] 许有鹏, 石怡, 都金康. 秦淮河流域城市化对水文水资源影响[C]//首届中国湖泊论坛论文集. 南京: 东南大学出版社, 2011: 14-23. (XU Y P, SHI Y, DU J K, et al. Effects of urbanization on hydrology and water resources in the Qinhuai River basin [C]// Proceedings of the 1st China Lake Forum. Nanjing: Southeast University Press, 2011: 14-23. (in Chinese))
- [33] 张建云. 城市化与城市水文学面临的问题[J]. 水利水运工程学报, 2012(1): 1-4. (ZHANG J Y. The vital problems for the urbanization and urban hydrology today [J]. Hydro-Science and Engineering, 2012(1): 1-4. (in Chinese))

Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China*

ZHANG Jianyun^{1,2}, WANG Yintang¹, HE Ruimin^{1,2}, HU Qingfang¹, SONG Xiaomeng^{2,3}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Research Center for Climate Change of MWR, Nanjing 210029, China;

3. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: With the development of economy and society, China has stepped into the rapid urbanization process with the population urbanization rate rising from 36.22% in 2000 to 54.77% in 2014. Under the background of global climate change and rapid urbanization, urban flood and waterlogging hazards become more frequent in this country. In this paper, the mechanism of how global climate change and urbanization affect urban precipitation including extreme rainfall was preliminarily analyzed and the effect of urbanization on flood process was also explained from the aspect of surface runoff yield and flow concentration process. Then, the causes of frequent urban floods in China were analyzed systematically. Moreover, main tactics of urban flood and waterlogging prevention and alleviation were stated. Firstly, the urban infrastructure should be strengthened guided by the idea of low impact develop (LID). Thus, sponge cities with good defense ability for rainstorm could be constructed. Secondly, the urban flood management systems with 3-dimension urban flood monitoring, dynamic forecasting and warning and real time operation should be established to raise the scientifically decision-making for flood disasters reduction. Thirdly, to intensify the disaster relief and recovery for urban flood, the emergence plans should be drawn and improved.

Key words: urbanization; urban flood and waterlogging; global change; runoff yield and flow concentration

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41330854).