

变化环境下城市暴雨洪涝研究进展

姜仁贵, 韩浩, 解建仓, 朱记伟, 李斌

(西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048)

摘要: 受气候变化和城市化进程的影响,近年城市暴雨洪涝问题频发、广发,暴雨难以精准预报、城市洪灾危害巨大,该问题受到高度重视和广泛关注,业已成为城市防洪减灾领域研究热点。本文以变化环境下的城市暴雨洪涝问题为研究对象,从城市暴雨洪涝模拟仿真、城市暴雨洪涝特征、城市暴雨洪涝形成机理以及城市暴雨洪涝应对管理4个方面对城市暴雨洪涝国内外研究进展进行综述。在此基础上,分析当前针对城市暴雨洪涝研究中存在的一些问题并对未来的研究进行展望,提出了以变化环境下暴雨洪涝特性和应对机制为重点的研究思路,以此,科学认识变化环境下城市暴雨洪涝,提升城市暴雨洪涝快速应对水平,最大限度降低城市暴雨洪涝灾害。

关键词: 暴雨洪涝; 气候变化; 城市化; 应对机制; 变化环境

中图分类号: S122.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)03-0011-07

Research progress of urban storm flood under changing environment

JIANG Rengui, HAN Hao, XIE Jiancang, ZHU Jiwei, LI Bin

(State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in the Northwest Arid Area,
Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The Urban Storm Flood (USF) has a higher frequency and is affected by global climate change and urbanization. The difficulty of rainstorm forecast and great harmfulness of urban flood disaster have been gotten great attention and wide public concern, which makes it a research focus in the field of urban flood control and disaster reduction areas. Taking the USF under changing environment as research object, the paper reviewed the domestic and abroad research processes from four aspects such as simulation, characteristics, formation mechanism and response management. The paper pointed out some existing problems and prospected the future research, and proposed research idea which focuses on the characteristics and response mechanism of the USF under changing environment. This study should be beneficial to scientifically understand the USF and improve the rapid response ability to USF and reduce disaster loss of storm flood.

Key words: storm flood; climate change; urbanization; response mechanisms; changing environment

1 研究背景

联合国环境规划署统计资料证实了全球气候变化的长期趋势,近百年来大气环流与降水时空格局发生较大变化,进而导致全球范围内与气候相关的自然灾害发生频率和影响范围加大,以洪水为例,20世纪80年代以来,洪灾数量增加近230%,受灾人口和遭受损失随之增加。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告(AR5)中指出:随着地表

平均温度上升,大部分陆地区域极端降水发生频率增加、强度加大,进而使得洪涝灾害更为频繁,气候变化引起的许多全球性风险都集中在城市,对城市防灾减灾能力提出更高要求^[1-3]。我国地处亚洲季风区,是世界上暴雨最为频发的国家之一,研究表明:近半世纪,尤其是20世纪90年代以来,我国极端降水发生强度和频率都呈现增加趋势,暴雨洪涝趋于增多^[4-5]。城市暴雨洪涝灾害给我国造成严重的人员伤亡和经济损失,危害经济社会健康发展,以

收稿日期:2015-11-30; 修回日期:2016-03-05

基金项目:国家自然科学基金项目(51509201、51479160、41471451);中国博士后科学基金资助项目(2016M590964);陕西省教育厅科研计划项目(15JK1503);陕西省高校科协青年人才托举计划项目

作者简介:姜仁贵(1985-),男,江西玉山人,博士,讲师,主要研究方向为生态水利工程。

2013 年为例,全国 31 个省(自治区、直辖市)均遭受不同程度洪涝灾害,受灾人口近 1.2 亿,因灾死亡 775 人,直接经济损失高达 3155 亿元,2266 个市(县、区)遭受洪涝灾害,其中,243 座城市发生严重内涝或进水受淹,相比之下,2011 和 2012 年分别为 136 座和 184 座,直接经济损失分别为 1301 亿元和 2675 亿元,可见,遭受暴雨洪涝影响的城市数量和洪灾损失也逐年增加。近年来我国典型的城市暴雨有^[6]:2012 年“7.21”京津冀特大暴雨,2013 年 7 月上中旬四川成都等城市的特大暴雨,2014 年 9 月上中旬发生在陕西汉中等 10 市 50 个县区和四川广元等 7 市的暴雨,以及 2015 年入汛以来南京、上海、昆明等多个城市发生的强降雨过程,引发严重洪涝灾害,且表现出:雨强大、范围广、历时长,洪水量级高、洪灾损失重等特点。新形势下科学认识城市暴雨洪涝问题已成为城市防洪减灾以及水生态文明城市建设亟待解决的问题。

城市容纳了世界上半数人口,通过对卫星观测资料进行空间扩展分析结果显示,城市面积逐年增长,其中,以中国城市增长速率最大,由 2000 年的 36% 增加到 2010 年的 49%,中国社会科学院发布的社会蓝皮书中指出:2011 年我国城市化水平首超 50%,并逐年增加,21 世纪中叶预计可能超过 60%。城市扩张使得硬化面积增加,城市水循环改变,进而引起极端降水事件增多,作为规模庞大的承灾体,城市更易遭受暴雨洪涝灾害。研究表明,受“热岛效应”和高层建筑物阻碍等影响,城市年降水量增加逾 5%,其中,对汛期影响尤为明显,雷暴雨发生强度和次数增加均超 10%,给城市交通与人民生命财产安全带来极大隐患^[7-8]。国际上,以美国 Burlington(2011.6.27)、加拿大 Edmonton(2012.7.6)以及日本 Nagoya(2013.9.4)等为代表;国内,南方以广州(2010.5.7)、贵阳(2014.7.15)、上海(2015.6.17)和南京(2015.6.27)为代表,北方以北京(2012.7.21)、延安(2013.7.22)和西安(2014.8.13)等为代表的城市暴雨洪涝造成巨大人员伤亡和经济损失,严重威胁城市安全,突显开展城市暴雨洪涝问题研究的紧迫性和重要性^[9]。值得注意的,受气候变化和城市化进程影响,近年来暴雨洪涝已由沿海向内陆城市蔓延,沿海城市和内陆城市由于气候条件、城区发展和规划建设不同,暴雨洪涝特征及其易损性存在差异,以宁夏银川市(2012.7.30),陕西延安市和西安市等为典型的内陆城市暴雨洪涝问题给城市防洪减灾提出了新的要

求。本文针对近年来国内外频发、广发和高危害的城市暴雨洪涝问题,从城市暴雨洪涝模拟仿真、城市暴雨洪涝特征、城市暴雨洪涝形成机理和城市暴雨洪涝应对管理 4 个方面对变化环境下的城市暴雨洪涝国内外研究现状进行综述,在此基础上分析当前针对城市暴雨洪涝研究中存在的问题,并进一步提出研究展望,以期对城市暴雨洪涝问题的深入研究提供参考。

2 城市暴雨洪涝国内外研究现状

2.1 城市暴雨洪涝模拟仿真研究

通过对城市暴雨洪涝过程的模拟仿真可为进一步分析其特性与成因并有针对性地进行应对提供依据,提高城市防洪减灾有效性,国内外相关研究较多,国外早期便开发了一些用于暴雨洪涝模拟的数学模型,并由最初相对简单的经验性和概念性模型发展到较为复杂的水动力学物理模型^[10-11],包括:水量水质耦合模型^[12],QQS 模型^[13],Wallingford 模型^[14],SWMM 模型^[15],MIKE-SWMM 模型^[16]以及 HSPF 模型等^[10]。国内,岑国平^[17]于 1990 年便提出了城市雨水径流计算模型;赵冬泉等^[18]基于 SWMM 建立了城市降雨-径流模拟系统,并对模型参数进行分析。仇劲卫等^[19]和解以扬等^[20]结合城市气象预报监测与洪涝模拟技术建立城市暴雨内涝/沥涝仿真模型,并在重庆和西安等多个城市进行验证,结果表明该模型具有较好适用性,可为城市防洪减灾提供决策支持^[21]。计算机技术发展为城市暴雨洪涝模拟仿真提供新的手段,Yu 等^[22]通过对高分辨率遥感数据的空间分析,建立用于计算城市暴雨洪涝淹没范围的二维洪水淹没模型。Schumann 等^[23]和 Neal 等^[24]采用数字高程模型(DEM)和雷达观测数据分析 2005 年冬季发生在英国 Carlisle 市和 2007 年夏季发生在英国 Tewkesbury 市的洪涝事件。Zhang 等^[25]基于 GIS 和 DEM 提出城市暴雨淹没仿真方法(USISM),用于对城市洪涝淹没区域的快速识别和分析。徐向阳等^[26]和王林等^[27]基于 GIS 在空间分析上的优势建立城市内涝分析模型,计算城市内涝积水面积并对其涨消过程进行模拟。可视化技术则提供了更为直观的表现形式,李志锋等^[28]基于 CD-TIN 提出城区暴雨内涝淹没模拟方法,并对城区淹没过程模拟的不同场景进行可视化;姜仁贵等^[29]基于 GIS 实现洪涝淹没分析与可视化模拟仿真;张书亮等^[30]通过对城市暴雨积水进行可视化仿真为城市防洪减灾提供辅助决策手段。

2.2 城市暴雨洪涝特征研究

近年频发的城市暴雨洪涝事件证实了 IPCC 的 AR5 报告中关于局地暴雨洪涝有所增加的结论,2012 年京津冀“7.21”特大暴雨事件中,北京市 20 个气象观测站日平均降雨量达到 190 mm,其中,11 个气象站实测降水量超历史记录,单点降水强度和日平均降雨量均为 1963 年 8 月以来最大值,城区形成积水点 426 个。2013 年上中旬陕西省大部分城市遭遇强降雨天气,39 个县区累计降雨量超 100 mm,过程降雨量占到常年总降雨量的 60%,由此引发的城市洪涝造成严重人员伤亡和经济损失^[6]。通过对近年城市暴雨洪涝现状分析结果表明:宏观层面上,城市暴雨洪涝影响范围广,洪水量级大,积水和洪灾损失严重;微观层面上,城市暴雨重现期标准偏低,产汇流时间缩短,降雨径流量增加,易涝点呈现动态变化。考虑城市暴雨的难以精准预报和洪涝的高危害性,有必要对城市暴雨洪涝历史演变规律和未来变化趋势进行深入研究。全球尺度上,IPCCAR5 报告指出自 20 世纪 70 年代以来局地暴雨发生频率增加,海气耦合全球环流模式(AOGCMs)集成预估结果显示:21 世纪末,局地强降水发生频率极有可能增加^[1]。Ali 等^[31]采用历史观测(1901–2010)和气候模拟(2010–2060)资料分析印度 57 个主要城区的极端降水事件,结果表明:采用气候模拟降水极值显著增加的城区个数比基于历史观测资料的要多,为城市雨洪基础设施规划与管理提供依据。Kuo 等^[32]采用 RCM 对城市降水进行模拟,结果表明,气候变化使得城市暴雨事件发生频率和强度增加。赵庆云等^[33]基于 NCEP/NCAR 再分析资料和 1981–2010 年逐日降水量资料对我国西北地区暴雨时空变化特征进行分析,结果表明:7–8 月暴雨日数占全年 64%,暴雨次数由西北向东南递增。城市化效应进一步加剧了暴雨洪涝灾害,Tripathi 等^[34]通过对 2007 年发生在美国 Vernonia 市的洪涝事件分析发现:城市化和硬化地面的增加使得暴雨下渗减少,地面径流量增加,洪峰流量加大,洪灾更为严重。Owringi 等^[35]指出快速城市化进程极大增加了城市洪涝风险,近年来加拿大 Vancouver 市发生的洪涝灾害与土地利用状况变化密切相关。国内,初祁等^[36]采用丹麦水利研究所 MIKE 模型模拟不同暴雨重现期下城市暴雨洪涝淹没特性,结果显示:不同情景下暴雨洪涝灾害危险性不同,洪涝淹没范围呈现明显的时间和空间差异。尹占娥等^[37]基于 GIS 栅格建立不同重现期灾害情景

分析的城市暴雨内涝分析模型,通过模拟内涝淹没面积和积水深度,拟合灾损曲线等方式分析城市暴雨洪涝特征。

2.3 城市暴雨洪涝形成机理研究

暴雨作为主要致灾因子,城市作为洪涝承灾体,两者共同作用形成城市暴雨洪涝灾害,为此,分别从暴雨形成与洪涝形成两个层面分析城市暴雨洪涝形成机理。当前,随着对大气环流特征和天气系统演化规律认识的深入与计算机技术的发展,诸多学者从气象角度研究暴雨洪涝形成机理。以叶笃正院士和陶诗言院士等为代表的著名气象学家开创性地采用大气环流演变过程揭示暴雨形成机理,其中,以副热带高压和阻塞高压为代表的环流特征与局部暴雨天气密切相关,研究表明:局地暴雨过程通常是由多尺度天气系统反馈调节,副热带高压北移和低涡演变,西太平洋副热带高压持续偏南异常,亚欧中高纬度持续性经向环流和中 β 尺度强涡旋系统等共同作用引起^[38]。气候异常对局地暴雨的影响也受到关注,以 ENSO 为例,据分析,历史上两次强 ENSO 事件(1982–1983,1997–1998)期间武汉市遭遇严重暴雨洪涝,2010 年汛期中国南方部分城市遭遇的特大暴雨洪涝也与强 ENSO 和北极震荡(AO)现象密切相关,研究发现 2015 年汛期中国 20 个省遭遇的暴雨洪水侵袭与强厄尔尼诺现象具有一定的相关性。Jiang 等^[39]发现加拿大 Edmonton 市发生的强降水模式与位势高度场、ENSO 和太平洋年代际涛动等多个气候异常因子呈较强的相关关系,并对以此作为预报因子预测局地暴雨的可行性进行论证。Kuo 等^[40]研究表明台湾地区北部城市强降雨与东太平洋海域温度异常显著相关,并采用 ANN–GA 模型对降水模式进行预测。城市土地利用/覆盖变化(LUCC)对城市洪涝具有显著影响,下垫面状况改变引起径流等水文要素和产汇流等水文过程变化,地表降雨径流量增加,汇流历时缩短,洪水过程线向高、瘦、尖转变,加重城市暴雨洪涝灾害^[7,41]。此外,城市热岛(UHI)效应对城市暴雨洪涝起到放大作用,研究发现:受城市规模扩大的影响,夏季容易形成以城区为中心的“热岛”,进而影响到城区及郊区降水分布,产生“雨岛效应”;研究进一步发现 UHI 效应与城市扩张及人口增长呈显著正相关,夏季暴雨受 UHI 效应影响明显^[42–43]。

2.4 城市暴雨洪涝应对管理研究

通过对城市暴雨洪涝的预防预警,及时响应,快速处置,科学应对,可一定程度上降低其灾害损失及

次生衍生灾害。在城市暴雨洪涝管理方面,国际上起步较早,欧美部分国家已建立了较为完善的城市雨洪管理体系^[44],典型的有:美国提出的低影响开发(Low Impact Development, LID)和最佳管理实践(Best Management Practices, BMPs),可持续城市排水系统(Sustainable Urban Drainage Systems, SUDS)以及新西兰的低影响城市设计与开发(Low Impact Urban Design and Development, LIUDD)等^[45-47]。借鉴上述理念并结合中国实际情况,近期多部委联合提出建设“海绵城市”以加强城市雨洪管理的思路,通过构建 LID 雨水系统,旧城改造等方式完善城市排水防涝设施。城市暴雨洪涝应对包括工程措施和非工程措施两个方面,典型的工程措施方面,秉承水涝和建筑共生的思路,俞孔坚^[48]提出将城市公园建设成雨洪公园以提高城市蓄滞暴雨能力。非工程措施方面,车伍等^[49]在总结当前城市暴雨洪涝控制与利用情况基础上,提出适应我国实际情况的城市雨洪控制优选模式,以加强我国城市雨洪的资源化管理。张冬冬等^[50]则从规划层面、建设层面和管理层面提出“三位一体”的城市内涝综合应对思路。国际上,Webster^[51]提出建立极端气候预测无国界组织加强对区域极端气候事件的应对,减少城市洪涝灾害,通过对洪涝事件的预测提前进行响应以降低洪灾。Heikkila 等^[52]针对近年频发的城市洪涝问题,提出加强基础设施建设,洪涝易损区域居民搬迁以及灾害恢复 3 条适应性应对措施。Ziegler^[3]提出通过建立堤坝等工程措施可一定程度上降低城市暴雨洪涝风险,然而,制定长期的城市防洪规划则可从根本上降低城市洪灾易损性。

3 讨 论

新形势下日益严重的城市暴雨洪涝对城市安全敲响了警钟,对城市防洪减灾提出新的挑战。然而,城市暴雨过程由于突发性、随机性、局地性以及直接引发暴雨中小尺度天气系统的复杂性等特点,气象部门难以实现对局地暴雨精准预报。以美国环境预报中心(NCEP)、欧洲中期天气预报中心(ECM-WF)、英国国家气象局(Met Office)和中国气象局等为代表建立的气候模型在短期(24 h)晴雨预报准确率较高(>80%),然而仍难以实现对局地暴雨的定时、定点和定量精准预报,城市短历时、强降雨定量预报的精细化及准确率与实用需求仍有差距^[44]。中国气象局郑国光局长针对近年来频发的城市暴雨天气指出,当前对局地暴雨进行精准预报仍是个技

术难题,建立较为完善的气象灾害预警和应对机制成为当前防御城市暴雨洪涝的重要途径^[6,9]。

城市暴雨洪涝问题已经受到国务院和专家学者的高度重视,在 2011 年出台的中央一号文件和中央水利工作会议中,指出:加强城市防洪排涝工程建设,提高城市防洪标准。李克强总理在 2013 年 9 月 18 日主持召开的国务院常务会议上要求“提高城镇内涝防治能力”,在国务院印发的《关于加强城市基础设施建设的意见》(国发[2013] 36 号)中提出用 10 年左右时间建成较为完善的城市排水防涝与防洪工程体系,提高城市防洪减灾能力,解决城市积水内涝问题。为落实《意见》要求,住房和城乡建设部组织编制并于 2014 年 10 月印发的《海绵城市建设技术指南》(建城函[2014]275 号)从工程层面上提出通过建设低影响开发(LID)雨水系统以缓解城市“逢雨必涝”的现状,改善城市生态环境,提升城市防洪排涝减灾能力^[53]。2013 年 10 月份在上海举办的“城市防洪国际论坛”中,王浩院士和张建云院士等人指出“60% 以上城市发生不同程度洪涝灾害,城市内涝成因复杂”、“城市洪涝问题是气候变化和人类开发活动共同作用结果”,并结合我国城市防洪存在问题和国外先进城市防洪理念指出科学应对城市洪涝灾害的紧迫性与重要性。

近年来,学者针对城市暴雨洪涝开展理论分析和数值模拟,主要集中在降水径流模拟^[10,17,20]、洪涝过程仿真^[22,26,29]、预警监视^[54]以及雨洪控制^[55]等方面研究,取得一系列成果,可为城市暴雨洪涝防治提供指导。然而,新形势下城市暴雨洪涝突发频发、高危害且难以精准预报,对进一步研究提出了新的要求,随着气候变化和城市化进程的发展,城市暴雨洪涝情势随之改变,考虑气候变化和城市化进程影响下城市暴雨洪涝具有什么样的特性?针对变化环境下城市暴雨洪涝问题应该如何进行快速响应与科学应对?是值得深入研究两个关键问题。

4 结论与展望

通过对城市暴雨洪涝国内外研究综述,可以得出以下结论:

(1) 针对城市暴雨及暴雨洪涝模型和模拟仿真方面已经有较多的研究成果,结合当前快速发展的组件技术及可视化技术等信息化技术,在现有研究成果基础上,对传统的降雨产汇流过程、洪水演进与淹没分析等水文模型进行组件开发,建立流程化及可视化的水文模型业务应用,辅助决策。

(2)通过对城市暴雨洪涝特征研究文献的分析可知,当前研究主要集中在对历史已发生的暴雨洪涝事件,气候变化和城市化进程影响下城市暴雨洪涝情势随之改变,分别从历史观测、未来预估和不同暴雨重现期等情景,时间、空间和城郊等尺度对城市暴雨洪涝特性进行集成研究,尤其是,采用 IPCC AR5 最新典型浓度路径(RCP)的 GCMs 对未来暴雨进行预估,分析城市暴雨洪涝潜在变化趋势。

(3)现有诸多文献对变化环境下城市暴雨洪涝机理进行了有益的探索,然而,考虑气候变化对暴雨洪涝的影响分析尺度主要面向大区域或流域,较少从城市尺度分析,且以定性描述为主,较少进行定量分析。

(4)引入国外先进理念,中国城市暴雨洪涝资源化利用已具有较好基础,但是针对突发频发且高危害的城市暴雨洪涝如何进行科学应对方面的研究与应用鲜有报道,尤其是,考虑城市暴雨洪涝的不可重现性与高危害性,从非工程层面提供一套可供实际操作的应对机制,为城市暴雨洪涝快速响应提供辅助决策支持,提高城市防洪减灾能力,是个亟待解决的难题。为此,针对变化环境下的城市暴雨洪涝问题,本文提出如下研究思路:随着系统科学及情景分析等理论,信息技术和系统集成等技术与方法的不断发展,为从多个角度、不同情景和尺度研究城市暴雨洪涝特征及其应对机制奠定理论基础。高性能计算、信息融合等信息技术为海量多源信息集成处理提供技术支撑;组件开发、知识可视化以及系统集成等技术为城市暴雨洪涝科学应对提供可操作的手段,推动城市暴雨洪涝应对向集成化方向发展。

由此,进一步研究将立足于:

采用情景分析和系统集成方法,从不同情景、多个角度和不同尺度研究城市暴雨洪涝特性,揭示气候变化和城市化影响下的城市暴雨洪涝历史变化特征和未来变化趋势、内在演变规律和外部驱动因素。基于成因确定城市暴雨洪涝关键驱动因子,建立城市暴雨洪涝、致灾因子和孕灾环境情景集,在此基础上,按照“情景-应对”模式提出城市暴雨洪涝应对机制;针对城市暴雨洪涝的不可重现性,在深入分析暴雨洪涝特性基础上,通过多方法综合比对与多技术系统集成建立城市暴雨洪涝应对机制,分别从理论分析和技术手段两个层面为变化环境下城市暴雨洪涝应对提供支撑。采用情景组合,情景模拟和情景重构等情景分析方法使得城市暴雨洪涝快速响应成为可能,有针对性制定防御方案,落实响应处置,

科学应对,提升城市防洪减灾能力,提高城市暴雨洪涝应对的主动性、时效性和有效性,最大限度降低城市暴雨洪涝灾害。

参考文献:

- [1] IPCC. Summary for policymakers [C] // . Climate Change 2014, Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [2] IPCC. Summary for Policymakers [C] // . 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.
- [3] Ziegler A D. Water management reduce urban flood vulnerability [J]. Nature, 2012, 481(7380): 145-145.
- [4] 刘九夫, 张建云, 关铁生. 20 世纪我国暴雨和洪水极值的变化 [J]. 中国水利, 2008(2): 35-37.
- [5] 秦大河. 气候变化: 区域应对与防灾减灾 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 27-28.
- [6] 国家防汛抗旱总指挥部, 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害公报 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014: 11-14.
- [7] 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.
- [8] Chen P, Zhang J, Zhang L, et al. Evaluation of resident evacuations in urban rainstorm waterlogging disasters based on scenario simulation: Daoli District (Harbin, China) as an example [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2014, 11(10): 9964-9980.
- [9] 王伟光, 郑国光. 应对气候变化报告 [M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2013: 263-267.
- [10] Zoppou C. Review of urban storm water models [J]. Environmental Modelling & Software, 2001, 16(3): 195-231.
- [11] 胡伟贤, 何文华, 黄国如, 等. 城市雨洪模拟技术研究进展 [J]. 水科学进展, 2010, 21(1): 137-144.
- [12] McMahon G F, Fitegerald R, McCarthy B. BRASS model: practical aspects [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1984, 110(1): 75-89.
- [13] Geiger W P, Dorsch H R. Quantity - Quality simulation (QQS): A detailed continuous planning model for the urban runoff control. Volume 1, Model Description, Testing and Applications [R]. US Environmental Protection Agency, Cincinnati, 1980.
- [14] Knight D, Sellin R. The SERC flood channel facility [J]. Water and Environment Journal, 1987, 1(2): 198-204.

- [15] Huber W C. Storm water management model(Version 4), user's manual[R]. US Environmental Protection Agency, Athens, Georgia. Report EPA/600/3-88-001a, 1988.
- [16] Kim J S, Ahn J H, Oh T S, et al. Runoff analysis of urban watershed using MIKE SWMM model[J]. Journal of Korea Water Resources Association, 2005, 38(11): 907-916.
- [17] 岑国平. 城市雨水径流计算模型[J]. 水利学报, 1990, 21(10): 68-75.
- [18] 赵冬泉, 王浩正, 陈吉宁, 等. 城市暴雨径流模拟的参数不确定性研究[J]. 水科学进展, 2009, 20(1): 45-51.
- [19] 仇劲卫, 李娜, 程晓陶, 等. 天津市城区暴雨沥涝仿真模拟系统[J]. 水利学报, 2000, 31(11): 34-42.
- [20] 解以扬, 李大鸣, 李培彦, 等. 城市暴雨内涝数学模型的研究与应用[J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 384-390.
- [21] 吴战平, 马力. 城市积涝预报方法研究及其系统开发[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 51-70.
- [22] Yu D, Lane S N. Urban fluvial flood modelling using a two-dimensional diffusion-wave treatment, part 1: mesh resolution effects[J]. Hydrological Processes, 2006, 20(7): 1541-1565.
- [23] Schumann G J P, Neal J C, Mason D C, et al. The accuracy of sequential aerial photography and SAR data for observing urban flood dynamics, a case study of the UK summer 2007 floods[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(10): 2536-2546.
- [24] Neal J C, Bates P D, Fewtrell T J, et al. Distributed whole city water level measurements from the Carlisle 2005 urban flood event and comparison with hydraulic model simulations[J]. Journal of Hydrology, 2009, 368(1-4): 42-55.
- [25] Zhang S, Pan B. An urban storm-inundation simulation method based on GIS[J]. Journal of Hydrology, 2014(517): 260-268.
- [26] 徐向阳, 刘俊, 郝庆庆, 等. 城市暴雨积水过程的模拟[J]. 水科学进展, 2003, 14(2): 193-196.
- [27] 王林, 秦其明, 李吉芝, 等. 基于GIS的城市内涝灾害分析模型研究[J]. 测绘科学, 2004, 29(3): 48-51.
- [28] 李志锋, 吴立新, 张振鑫, 等. 利用CD-TIN的城区暴雨内涝淹没模拟方法及其实验[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(9): 1080-1085.
- [29] 姜仁贵, 解建仓, 李建勋, 等. 基于数字地球的洪水淹没分析及仿真研究[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(13): 219-222.
- [30] 张书亮, 曾巧玲, 姜永发, 等. GIS支持下的城市暴雨积水计算的可视化[J]. 水利学报, 2004, 12(12): 92-98.
- [31] Ali H, Mishra V, Pai D S. Observed and projected urban extreme rainfall events in India[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119(22): 12,621-12,641.
- [32] Kuo C C, Gan T Y, Hanrahan J L. Precipitation frequency analysis based on regional climate simulations in Central Alberta[J]. Journal of Hydrology, 2014, 510(3): 436-446.
- [33] 赵庆云, 宋松涛, 杨贵名, 等. 西北地区暴雨时空变化及异常年夏季环流特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版). 2014, 50(4): 517-522.
- [34] Tripathi R, Sengupta S K, Patra A, et al. Climate change, urban development, and community perception of an extreme flood: A case study of Vernonia, Oregon, USA[J]. Applied Geography, 2014, 46(1): 137-146.
- [35] Owrangi A M, Lannigan R, Simonovic S P. Interaction between land-use change, flooding and human health in Metro Vancouver, Canada[J]. Natural Hazards, 2014, 72(2): 1219-1230.
- [36] 初祁, 彭定志, 徐宗学, 等. 基于MIKE11和MIKE21的城市暴雨洪涝灾害风险分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2014, 50(5): 446-451.
- [37] 尹占娥, 许世远, 殷杰, 等. 基于小尺度的城市暴雨内涝灾害情景模拟与风险评估[J]. 地理学报, 2010, 65(5): 553-562.
- [38] 陶诗言, 赵思雄, 周晓平, 等. 天气学和天气预报的研究进展[J]. 大气科学, 2003, 27(4): 451-467.
- [39] Jiang R, Gan T Y, Xie J, et al. Spatiotemporal variability of Alberta's seasonal precipitation, their teleconnection with large-scale climate anomalies and sea surface temperature[J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(9): 2899-2917.
- [40] Kuo C C, Gan T Y, Yu P S. Wavelet analysis on the variability, teleconnectivity, and predictability of the seasonal rainfall of Taiwan[J]. Monthly Weather Review, 2010, 138(1): 162-175.
- [41] 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.
- [42] Liu W, Ji C, Zhong J, et al. Temporal characteristics of the Beijing urban heat island[J]. Theoretical & Applied Climatology, 2007, 87(1-4): 213-221.
- [43] Dou J, Wang Y, Bornstein R, et al. Observed spatial characteristics of Beijing Urban-climate impacts on summer thunderstorms[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2014, 54(1): 94-105.
- [44] 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.
- [45] 潘安君, 张书函, 陈建刚, 等. 城市雨水综合利用技术研究与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 5-9.

- [46] Field R, Struck S, Tafuri A, et al. BMP technology in urban watersheds: current and future directions[R]. Virginia: American Society of Civil Engineers(ASCE), 2006:10-18.
- [47] 李家科,刘增超,黄宁俊,等. 低影响开发(LID)生物滞留技术研究进展[J]. 干旱区研究, 2014, 31(3): 431-439.
- [48] 俞孔坚. 建筑与水涝共生—哈尔滨群力雨洪公园[J]. 建筑学报, 2012(10): 68-69.
- [49] 车伍,张伟,李俊奇,等. 中国城市雨洪控制利用模式研究[J]. 中国给水排水, 2010, 26(16): 51-57.
- [50] 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.
- [51] Webster P J. Improve weather forecasts for the developing world[J]. Nature, 2013, 493(7430): 17-19.
- [52] Heikkila E J, Huang M. Adaptation to flooding in urban areas an economic primer[J]. Public Works Management & Policy, 2014, 19(1): 11-36.
- [53] 住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南[R]. 建城函[2014]275号, 2014.
- [54] 姜仁贵,解建仓,李建勋. 面向防汛的三维预警监视平台研究与应用[J]. 水利学报, 2012, 43(6): 749-755.
- [55] Liu Y C, Cheng C L. A solution for flood control in urban area: using street block and raft foundation space operation model[J]. Water Resources Management, 2014, 28(14): 4985-4998.

(上接第10页)

- [2] 李福胜,张仲. 海口市1951-2010年降雨的多时间尺度分析[J]. 广东气象, 2013, 35(3): 40-44.
- [3] 黄国如,洗卓雁,陈文杰. 海口市近年短历时暴雨演变特征分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(2): 121-126.
- [4] Lupikasza E. Spatial and temporal variability of extreme precipitation in Poland in the period 1951-2006[J]. International Journal of Climatology, 2009, 30(7): 991-1007.
- [5] 杨东,程军奇. 甘肃黄土高原近52年四季极端降雨变化特征[J]. 中国农学通报, 2013, 29(11): 180-187.
- [6] 李小亚,张勃. 河西地区最大连续降雨事件的时空变化特征[J]. 水土保持通报, 2013, 33(2): 43-48.
- [7] 曹洁萍,迟道才,武立强,等. Mann-Kendall检验方法在降雨趋势分析中的应用研究[J]. 农业科技与装备, 2008, 179(5): 35-37+40.
- [8] 王兆礼,陈晓宏,张灵,等. 近40年来珠江流域降雨量的时空演变特征[J]. 水文, 2006, 26(6): 71-75.
- [9] 张剑明,章新平,黎祖贤,等. 湖南省46年来降水的气候特征[J]. 热带气象学报, 2008, 24(5): 512-517.
- [10] 董满宇,王炳钦,廖剑宇,等. 近50年东江流域极端降水事件变化特征[J]. 资源科学, 2013, 35(3): 521-529.
- [11] 姜德娟,李志,王昆. 1961-2008年山东省极端降雨事件的变化趋势分析[J]. 地理科学, 2011, 31(9): 1118-1124.