

变化环境下城市水文学的发展与挑战

——I. 城市水文效应

张建云^{1,2}, 宋晓猛^{1,2}, 王国庆^{1,2}, 贺瑞敏^{1,2}, 王小军^{1,2}

(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)

摘要: 全球气候变化和快速城市化导致的城市水循环过程变化是当前城市水文学研究的热点问题。为综合理解城市水循环演变过程, 结合城市水文学的发展历程, 剖析水循环过程对快速城市化进程的响应机制。总结了国内外城市化水文效应的主要成果, 包括城市化对水循环过程、洪涝灾害、水生态系统以及水资源的影响。系统归纳了城市化水文效应的评估方法和技术手段。针对现有研究中的不足, 指出变化环境下城市化水文效应研究面临的主要挑战及关键技术难题, 提出未来研究的重点方向, 如城市化降水效应的机理、不透水面的分布及有效性评估、城市化与水生态系统的响应关系与综合城市水资源管理及需水预测等。

关键词: 城市水文学; 水循环; 水环境; 水生态; 水资源; 水文模型

中图分类号: TV11; P343.9; G353.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2014)04-0594-12

近百年来, 以平均气温升高和降水变化为主要特征的气候变化和以城市化发展为主要标志的高强度人类活动对地球系统产生了深远的影响, 其中水循环与水安全(水资源、水环境、水生态)是受气候变化和人类活动影响最直接和最重要的领域之一^[1-2]。全球气候变暖和人类活动直接影响了水循环要素的时空分布特征, 增加了极端水文事件发生的概率, 使得城市暴雨洪涝问题日益增多, 在一定程度上影响了区域的水安全以及国家的中长期发展战略。因此, 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^[3-5]。

现有预测结果表明, 未来50~100年全球气候将继续向变暖的方向发展, 这一增温对全球生态系统和社会经济将继续产生重大而深远的影响^[6]。同时, 根据联合国人居署发布的《2011世界人口状况报告》指出^[7], 到2011年底全球约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^[8], 特别是发展中国家和地区城市人口增长最为显著^[9]。然而城市化作为衡量一个国家发展水平的重要标志, 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。如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, 导致径流系数和径流量增加、极端降水事件增多、城市暴雨洪涝风险增大^[10]; 其次, 生活污水和工业废水增加, 引起水质恶化以及水生态系统退化^[11]等环境问题; 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^[12]。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, 如国际水文科学协会(IAHS)主导的2013—2022年科学计划主题确定为“Panta Rhei”: 变化环境下的

收稿日期: 2014-01-07; 网络出版时间: 2014-05-29

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20140529.1803.016.html>

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2010CB951103); 国家自然科学基金资助项目(41330854)

作者简介: 张建云(1957—), 男, 江苏沛县人, 中国工程院院士, 主要从事气候变化、水文水资源方面研究。

E-mail: jy Zhang@nhri.cn

通信作者: 宋晓猛, E-mail: xmsong@nhri.cn

水文科学研究计划^[13],其中城市水文学及社会水文学研究成为水文-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。

1 城市水文学的发展历程

城市水文学是一门研究发生在城市环境内外的一系列水科学问题、为城市建设和发展提供水文科学依据的学科,是水文学的一个分支^[16]。主要内容包括城市化的水文效应、城市水文气象的观测试验、城市供水与排水、城市防洪排涝、城市水资源与水环境问题以及城市水文模型与预测预报等,是一门多学科交叉的综合性很强的边缘学科^[17]。城市水文学属于一个相对年轻的学科,对其发展历程也曾有过探讨,如 Delleur^[18]系统总结了1850—1981年间城市水文学的主要进展。McPherson将城市水文学研究划分为3个阶段^[16,19]:1850—1967年为城市水文学的孕育阶段,主要是运用一些常规的水文学方法解决部分城市水问题,重点针对某一地区或某一特定问题;1967—1974年为模型研制时期,即城市水文研究发展最快并逐渐形成独立学科的时期,先后建立了一些具有特色的城市水文模型,如STORM、SWMM和ILLUDAS等;1975以后为定型成熟时期,主要是模型的推广应用和完善阶段。在此基础上,结合近30年来城市水文学的发展,笔者将其分为以下4个时期,即萌芽时期(1960年以前)、初步发展时期(1960—1980年),快速发展时期(1980—2000年)以及全面发展时期(2000年以后)。

一般认为城市水文研究起源于20世纪60年代,美国和西欧发达国家由于工业化程度不断提高,城市规模持续扩大,引发了一系列新的水文问题,超出了传统水文学的研究范畴,由此产生了一个新的课题,使得人们逐渐关注与城市化相关的水文学研究。此后,欧美发达国家相继开展了相关工作,如联合国教科文组织(UNESCO)发起的“国际水文10年(IHD,1965—1974年)”包括特殊自然条件下专门水文问题的研究也涉及了城市水文学方面的问题^[20];美国地质调查局1968年完成的城市土地利用变化对水循环影响指南^[21];联合国教科文组织1974年完成的城市化对水文的影响报告^[22];1978年总结了法国、德国、印度、荷兰、挪威、波兰和瑞典7国在城市水文方面的研究成果^[23]和1979年完成的城市水文学社会经济学视角报告^[24];美国农业部1986年完成的城市化对小流域的影响研究报告^[25]等。但该时期诸多成果多依赖于试验观测或历史资料分析等手段,对于城市水文模型或水动力模型的研究相对不足,加之资料观测精度和时空分辨率较低,往往局限于小尺度范围的城市化流域或城市区域。

1980年以来,随着RS和GIS在水文学上的应用以及分布式水文模型技术的提出和发展,使得城市水文学研究进入了快速发展阶段。在前期研究的基础上,该时期系统开发和完善了许多城市水文模型,如SWMM、STORM、HSPF、Wallingford model等^[26]。并结合一系列的水科学研究计划,如国际水文计划(IHP)、世界气候研究计划(WCRP)、国际地圈生物圈计划(IGBP)、全球水系统计划(GWSP)等^[4],通过强化实验观测和水文模拟技术,探讨变化环境下的水循环机理,深入认识和理解城市水循环演变规律,剖析城市化的水文效应,初步揭示了城市的水环境和水生态问题,为城市排水系统设计和城市规划提供服务^[27]。虽然在城市化水文效应、响应机制分析与暴雨洪水模拟方面取得了显著成果,但随着水环境-生态系统的恶化,城市水文研究面临着更多挑战^[27]。为此,人们开始关注于城市生态系统的健康发展和合理规划,提出并逐步实施了一系列的应对措施,如美国的低影响发展(Low Impact Development, LID)计划、英国的可持续排水系统(Sustainable Drainage System, SuDS或SUDS)计划和澳大利亚的水敏感城市设计(Water-Sensitive Urban Design, WSUD)计划以及新西兰的低影响城市设计与发展(Low Impact Urban Design and Development, LIUDD)等^[28]。

21世纪以来,随着气候变化的影响加剧,城市水安全问题日益凸显,尤其沿海城市区域或特大城市群对于气候变化的影响特别敏感。IPCC报告指出全球气候变化很大程度上增加了城市极端暴雨和洪涝灾害事件发生的可能性,使得城市水文研究面临着新的挑战 and 更多压力,即如何综合应对变化环境下的城市水问题,如城市暴雨洪涝灾害、生态环境退化、水污染和水资源短缺等。虽然该时期在城市洪水风险管理^[29]、城市化的水环境效

应^[30]、城市雨洪管理利用^[31]和气候变化与城市可持续排水系统管理^[32]等方面取得了显著成果,但对于气候变化和城市化发展对水循环的综合响应机制研究相对较少,在综合应对策略方面仍显不足。因此,探讨环境变化对城市水循环过程的影响机制以及综合水资源管理成为未来水科学研究的关键问题之一。

中国在城市水文学研究方面起步较晚(1980年开始),随着改革开放和城市化进程的不断加快,中国也陆续开展了相关研究,如上海水文总站分析了上海城市化对区域降水的影响,北京水文总站开展了不同城市化程度下的水文效应试验研究等。但上述工作仍局限于资料观测和试验研究,尚未开展城市水文模型研究。20世纪90年代开始借鉴一些成熟模型或软件分析部分城市的水文问题,且结合国内城市实际情况开发了部分水文水动力模型,如岑国平^[33]提出的城市雨水径流计算模型(SSCM)。2000年以来,城市水文学研究进入了快速发展阶段,主要围绕城市化对暴雨洪水和水环境及生态系统的影响、城市雨洪模拟与利用技术以及城市洪涝风险评估等开展,整体上虽取得了一系列的创新成果,但在响应机理分析和综合模型研制方面还存在不足。

2 城市化的水文效应研究

城市化地区的不透水面积增加成为影响城市水文过程的重要因素,其不仅阻碍地表水下渗,还切断城市区域地表水与地下水之间的水文联系^[34-35]。此外,城市化还会通过改变地表覆被状况,对城市水循环产生间接影响,如对竖向的蒸散发与下渗以及横向的地表径流与壤中流等水文过程的影响^[36]。城市水文效应主要表现在以下几个方面^[37-38]:城市化对城市地区水循环过程的影响,包括城市下垫面条件改变造成的蒸散发、降水、径流特征变化;城市化对洪涝灾害的影响^[39];城市化对水环境生态系统的影响,包括城市化对地表水质、地下水水质和城市生态系统的影响及对水土保持的影响;城市化对水资源的影响,主要为用水需求量的增加以及由于污染而造成水资源短缺。

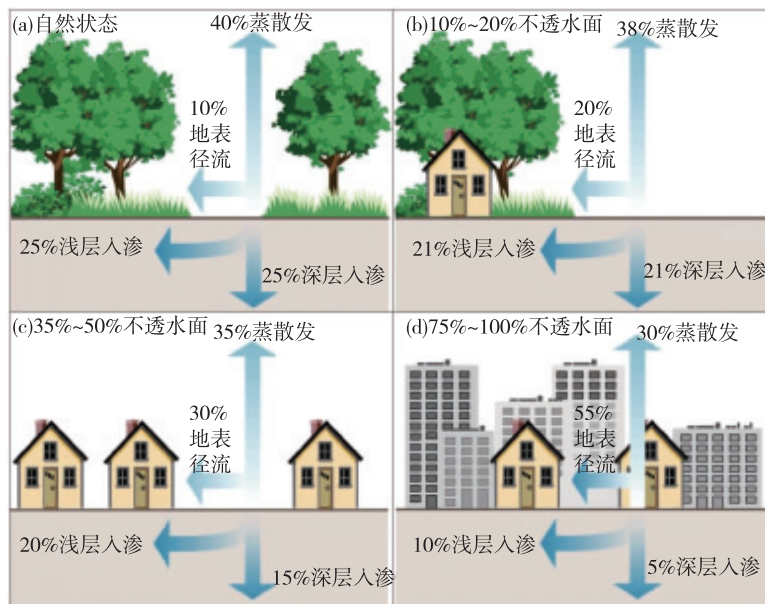
2.1 城市化对水循环过程影响

城市不透水表面的增加改变了城市地表径流的时空模式及水循环过程,进而改变了城市的水量平衡,促进局部降水增加的正反馈效应以及局部蒸散发减少的负反馈效应^[34]。由于城市小气候的改变,蒸散发过程发生变化,干扰了水循环过程,而城市地表形态的变化改变了城市区域小流域的产汇流特征,增加了城市地表径流,减少了地下径流以及地表地下的水量交换过程,如图1所示。

2.1.1 城市化对降水的影响

在城市化对降水的影响研究方面,虽然存在一些争论,但众多研究结果表明对降水的影响主要表现为^[40-41]:①市区降水量大于郊区降水量,增加幅度与城市发展下垫面变化及地形等因素密切相关^[42];②市区及其下风向一定距离内的降水强度比郊区大,降水时空分布趋势明显,降水以市区为中心向外依次减小^[43];③城市化对不同量级的降水发生频率都有影响,但对大雨及暴雨的影响最为显著,且城市暴雨雨日有明显增多趋势^[44];④城市化对不同季节降水影响也不同,冬季受城市化降水影响较为显著^[45-46]。

根据诸多观测与模拟试验结果,城市化影响降水的主要机制包括以下4个方面^[41]:①由于城市热岛效应,热能促使城市大气层结构变得不稳定,容易形成对流性降水;②城市参差不齐的建筑物对气流有机械阻碍、触发湍流和抬升作用,使云滴绝热升降凝结形成降水;③城市特殊的下垫面对天气系统的移动还有阻滞作用,增长城市降水持续时间;④城市空气污染,凝结核丰富,也有利于降水的形成。在上述各影响因子的共同作用下,往往使得城市降水多于郊区,但由于存在地区差异及季节差异,其影响程度也与其他因素有关,如城市地形、地理位置、气候类型等。因此,部分学者认为对于城市化的影响值得商榷,如Wang等^[46]认为不能过分地高估城市化对降水的影响;Rosenfeld^[47]也得出城市产生的气溶胶减小云滴凝结核,不利于降水形成;Kaufmann等^[48]基于季风气候区的研究结果显示城市化与降水变化并无明显相关关系。由此可知,对于城市化对降水的影响机制仍需进一步研究,需要借助诸多技术手段,如雷达遥感卫星等观测技术以及气候模式和水文模型等模拟技术开展变化环境下的城市化降水效应机制研究。



资料来源: Federal Interagency Stream Restoration Working Group, 2001

图1 不透水面积变化对城市水循环要素的影响示意

Fig. 1 Schematic diagram for the impact of impervious surface area on water cycle in urban area

2.1.2 城市化对蒸散发的影响

蒸散发是水循环过程的重要环节, 根据美国环保署的研究成果显示, 在自然流域状况下, 蒸散发量占总降水量很大的比例, 而随着城市化导致的不透水面积增加而蒸发量逐渐减少, 如图1所示。在城市化过程中, 原有的植被、土壤被道路、广场、建筑等人工陆面所替代, 蒸发的性质也产生了改变。由于人工陆面没有持水能力, 相对于土壤蒸发和植物散发其蒸发持续时间短^[49]。另外, 由于城市中的温度、风速、空气湿度等控制蒸发的因子有所改变, 蒸发量也受到影响。但对于城市化对蒸散发的影响研究相对较少, Dow 和 Dewalle^[50]基于水量收支和气象方法评估了美国东部地区51个城市化流域的蒸发变化率, 结果显示城市发展和居住区的增加, 蒸发降低变化越明显。许有鹏等^[51]分析了南京城市化对秦淮河流域蒸散发的影响研究, 结果发现不透水面比率从1988年的4.2%到2001年的7.5%和2006年的13.2%, 流域的蒸散发量分别减少了3.3%和7.2%^[38]。因此, 需要开展更多的研究分析城市化对蒸发过程的变化机制, 确定城市蒸散发变化是否存在固定的模式以及是否随其他因素而变化, 如地形、地貌、植被以及城市发展密度等。

2.1.3 城市化对产汇流过程的影响

城市化水文效应主要体现为水文过程机制的改变, 天然流域地表具有良好的透水性, 雨水降落时, 一部分被植物截留蒸发, 一部分降落地面填洼, 一部分下渗补给地下水, 一部分涵养在地下水位以上的土壤孔隙内, 其余部分产生地表径流, 汇入收纳水体。而城市化后, 天然流域被开发、植被受破坏、土地利用状况改变、不透水性下垫面大量增加, 使得城市地区的水文过程发生巨大变化, 如图2(a)^[52]所示。此外, 多数研究结果证实径流系数与不透水面积比例的关系呈显著的正相关^[38], 如图2(b)^[53]所示。

除了上述因土地利用状况引发的不透水表面增加的影响之外, 城市汇流路径的连通性(不透水面的连通度)也是影响地表水文过程的重要驱动因素。对于部分不透水区域直接与相近的透水区域联通或直接进入城市水体, 则可能削弱不透水表面对产汇流的影响, 即不透水表面的空间分布及其有效性成为一个不可忽略的重要因素。因此, 引发了不透水表面分布与有效性的讨论, 如何量化城市区域不透水面积及确定有效不透水面积成为该研究的一个热点^[54-55]。然而城市化对产汇流的影响远远不止上述两个方面, 还包括城市河网水系的萎缩、排水系统的管网化建设、城市河湖泵站以及蓄水池等多种水利设施的影响, 都在一定程度上影响城市区域的产汇流特征。

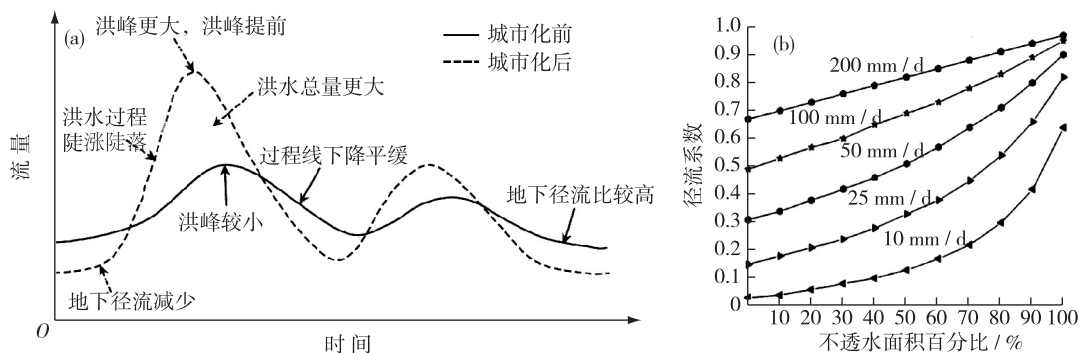


图2 城市化对地表过程的影响示意

Fig. 2 Schematic diagram for the effects of urbanization on surface runoff processes

对于城市化对地表水文过程的影响基本取得了一致的认识,然而对于地下水文过程的影响仍存在一定的争议^[49,56-57]。诸多研究证实因城市不透水面增加,减少了地表下渗量,使得地下径流减少。然而也有部分研究结果显示城市化增加了地下径流补给^[58]。分析上述两种结果产生的主要原因在于考虑不同的作用机制以及人类活动等因素可能出现不一致的结论,如图3所示^[56]。综合分析可知,对于城市化对基流和地下水的的影响主要包括两类:一类是负效应,主要表现在城市不透水表面的增加引起的下渗和基流减少以及地下水开采引起的地下水位下降等;另一方面是正效应,主要体现在城市排水管的渗漏、人为补给以及各种调控措施的影响,如地下水回灌、可渗路面改造、绿化用地增加以及其他可持续的城市规划设计等。

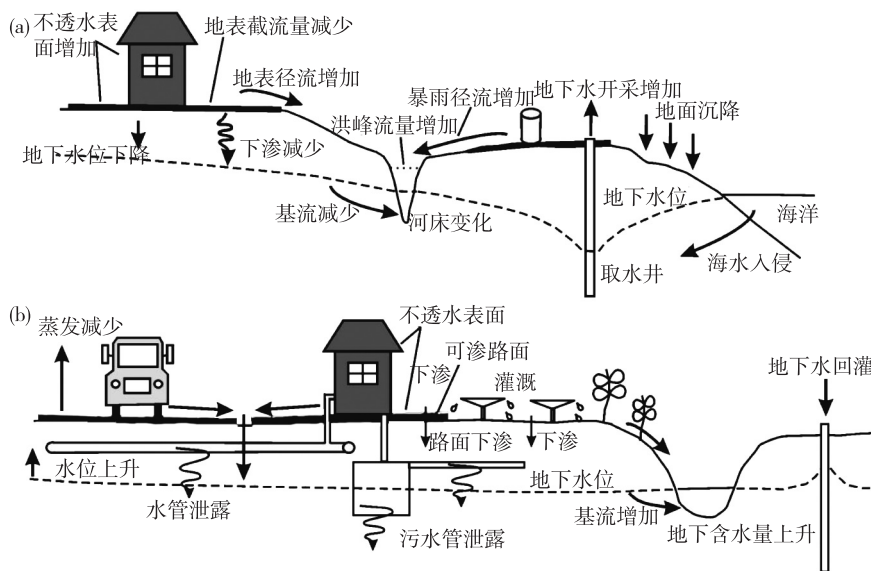


图3 城市化对基流和地下水补给的影响示意

Fig. 3 Schematic diagram for the effects of urbanization on baseflow and groundwater recharge

以上结论说明城市化对水文过程的影响并非一个简单的单向反馈过程,而是一个极其复杂的动态过程,仍然存在一些不明确的响应关系,需要综合考虑多方面因素,开展深入的机理分析和理论实践相结合的研究,开发有效的模型方法和通用的评价指标以更好地认识和理解城市化对产汇流过程的影响机制。

2.2 城市化对洪涝灾害的影响

城市化对洪涝灾害的影响主要包括孕灾环境变化、致灾因子变化和承灾体变化^[59]。城市化对孕灾环境的影响主要表现在:①地面硬化导致地面透水性差,改变了自然条件下的产汇流机制;②城市河道渠化及排水系统管网化,减少汇流时间,洪峰出现时间提前;③城市发展侵占天然河道滩地,减少行洪通路,降

低泄洪能力和河道调蓄能力。由此可见,城市地面结构的变化改变了水文情势,影响流域产汇流过程,增加了暴雨洪水灾害风险。城市化对致灾因子的影响则主要表现在城市热岛效应、阻碍效应和凝结核效应对城市降雨特征的影响,从而使得城市暴雨发生概率增加,城市洪涝灾害风险也随之增加。城市化对承灾体的影响则表现为城市化使得城市财富人口和资源集中,暴雨洪涝灾害的损失也随之增加,其影响也越发严重。

2.3 城市化对水生态系统的影响

随着城市化进程对生态环境影响显著增加,城市化与生态环境之间响应关系的研究引起国内外学者的广泛关注^[60-62]。城市土地利用变化改变了城市流域水生态系统的物理、化学与生物特性,引发城市河流综合症^[9, 60-61]。如城市化发展导致植被覆盖减少,对污染物的消解和拦截作用降低,从而导致沉淀物和污染物增多;城市发展改变了流域河网的形态,造成河流缩窄变短、湖泊河网衰退消亡,引起河流生态退化^[62]。

2.3.1 城市化对河流生态的影响

城市化发展导致城市工业废水和生活污水增多,加之城市土地利用改变,导致城市河流水系减少,河道淤积或消失等问题,降低了河流蓄水排涝和纳污自净能力,使得河流污染负荷加大,河流水质不断恶化^[34, 40, 63]。然而最初针对城市化水质研究多集中于常规指标,如沉积物、有机质、营养物以及重金属等,但近年来对于病原体以及新兴的污染物,如多环芳烃(PAHs)和除草剂等^[52]。此外诸多研究结果显示城市化地区水环境变化与径流利用率、水面比例、河网密度、不透水面积、土地利用类型等因素有关,其中土地利用类型和不透水面积对水质影响尤为重要^[40]。城市化对河流生态的影响还表现在河道生物群落结构的变化方面。为有效解决日益突出的城市河流生态问题,围绕城市发展与生态环境问题展开了诸多讨论,如 Grimm 等^[9]认为应从土地利用和覆盖变化、生物地区化学循环、气候、水文系统及生物多样性等5个方面分析了城市发展对生态环境的影响,指出应对城市河流综合症问题需要放弃最初“修复”河流的思想,着重城市水生生态系统设计,通过多种途径解决城市生态环境问题。因此,强化城市景观格局研究和探讨城市格局对水环境的影响机制,制定合理的城市化布局成为维系城市水系生态健康的主要突破口。

2.3.2 城市化对河网水系的影响

城市化导致城市河道结构简单化和渠道化,加之城市给排水管网建设改变了自然状态下的水循环路线,在一定程度上影响了城市水循环过程及水生态系统。近年来,城市化地区众多河流水系相继消失、河道人工渠化严重,且河网形态结构发生不同程度的改变^[64-65],由此导致城市洪涝干旱和水质恶化等问题日趋严重。如赵军等^[64]针对上海市河网水系与城市化的关系研究表明城市河网水系分枝结构与自然规律差异较大;陈云霞等^[65]在浙东地区研究结果表明城市化发展对河网水系及河网水环境的影响显著,河流等级越低,城镇化影响越明显,城市化程度与河网密度和河网水面比率的减幅越大,因此城市排水系统的压力也越大。

2.3.3 城市化对水土流失的影响

城市化过程中强烈的人类活动使得地表植被和自然地形遭到严重破坏,由此产生的水土流失问题日益严重^[43]。一方面,城市化导致城市地区的水塘、河流等消失或被改造,加上不透水地表面积显著增加,使暴雨径流产生的洪峰流量和能量集中,加大了水流的侵蚀能力;另一方面,城市化基础建设产生的大量松散堆积物以及城市生活垃圾的乱堆乱放为径流侵蚀提供了丰富的物质基础。水土流失不仅造成城市生态区土层变薄,土壤功能下降,同时土壤侵蚀产生大量的泥沙淤积于城市排洪渠、下水道、河道等排洪设施中,大大降低了这些设施的排洪泄洪能力^[66]。

2.4 城市化对水资源的影响

城市化使城市人口不断增加,城市规模不断扩大,城市用水量和用水结构以及用水效率都随之发生变化。一般可将城市化发展与水资源的关系分成3个阶段^[37]:①初级阶段(供大于需),处于有利状况;②供需平衡阶段,处于正常发展阶段;③水荒阶段(供小于需),处于节水发展模式。随着全球城市化进程加快,城市人口急剧增多,城市人口占总人口超过50%^[7],加之日益突出的城市水环境问题导致城市水资源供需关系处于严重的水荒阶段,进而增加了城市水资源保障的风险^[38]。城市化对水资源的影响主要表现在:①城市水资源短缺;②城市水污染严重;③城市水资源管理混乱,综合管理水平欠缺;④城市供排水能

力不足, 设施建设滞后城市发展。其中城市水资源短缺和城市水污染严重是影响城市发展的最直接因素。由于城市人口急剧增加, 城市用水量持续攀升, 导致城市用水供需矛盾突出, 加之气候变化的影响以及人为用水浪费、水环境污染、水质恶化等进一步凸显城市供需严重失调, 引发一系列的城市水资源安全事故, 如2007年太湖地区蓝藻暴发引发周边地区城市供水安全危机。因此, 为综合应对水资源危机, 2003年通过的联合国第A/RES/58/217号决议关于开展“生命之水”国际行动10年(2005—2015年)重点关注水资源安全; 中国也开始实行最严格的水资源管理制度。近年来, 城市水安全与生态城市建设逐渐引起国内外的广泛关注, 研究热点主要围绕城市水资源承载力^[67]、城市需水预测^[68]、污水治理^[11]、综合水资源管理^[69]等方面, 致力于解决城市供水安全、水环境保护、防洪减灾、水资源合理配置和水安全评价以及水资源安全预警等^[70]。

3 城市化对水循环影响评估方法

城市水文效应的识别与影响评估及预测一直是城市水文学研究的重点。由于相对较短的水文观测记录, 同时受水循环系统的自然变异影响, 使得分析城市化发展的水文效应成为一个科学难题。经过几十年的理论和实践研究, 发展了许多有效的研究方法和技术手段, 由最初的单点试验观测到小型城市化流域的试验观测, 从简单的经验性公式到相对复杂的水文模型技术, 再从单纯的时间序列分析到多源信息综合评判, 实现了定性估计到定量分析的转变。目前整体上可分成3类, 即观测试验对比法、水文时间序列分析法(或水文特征参数法)和水文模型法^[63], 如表1所示。由此可知, 几种方法在探讨城市水文效应方面都存在一定的局限性和不足, 观测试验一般适用于较小的流域尺度或小范围的某一过程的变化响应, 而水文时间序列分析往往需要较长时间序列的资料, 对资料精度要求较高, 且对于过程机理认识不足, 即不能体现过程的主要响应机制。相比较而言, 水文模型是目前认为比较合理且行之有效的方法^[71], 即其在一定程度上能够反映物理过程响应机制, 但由于资料不足导致可利用性较差以及参数率定和不确定性等问题, 使得城市水文模型的研究成为城市水文学研究的最关键难题。因此, 为了克服单一方法的不足, 一些综合性方法及多方法应用技术开始被推广到城市化水文效应研究中, 如水文模型和统计分析结合、多模型集合及多模型对比分析等。

表1 城市化水文效应研究方法对比

Table 1 Comparison of methods for estimating the effects of urbanization on hydrological cycle

主要研究方法	研究尺度	特点
观测试验	单点试验观测	小范围、实验室尺度 主要用于实验室观测某过程的变化规律, 便于控制
	单独流域法	小流域尺度 长时间观测单个流域城市化发展期间的影响, 资料序列较长
	控制流域法	小流域尺度 相似流域平行观测, 控制某一流域的土地利用变化开展分析
	平行流域对比	小流域尺度 选择不同城市化程度的相似流域类型研究, 流域选择要求较高
水文时间序列分析	中小流域、较长时间尺度	根据长时间序列分析某些特定水文特征参数的变化, 评估城市化影响
	简单经验性公式	小范围、小流域 采用经验性的公式计算产汇流关系, 确定城市化前后的影响
水文模型	概念性模型	流域尺度, 适合范围较广 应用广泛, 相对简单, 资料需求较少, 可靠性依赖于模型经验与参数
	物理性模型	中小流域尺度 具有很强的物理机制, 结构复杂, 可以准确模拟水文过程, 资料需求较多
	生态水文模型	流域尺度, 适合范围较广 可揭示不同时空尺度下水生态系统的响应规律, 但技术不成熟, 应用不足

4 面临的主要挑战及关键问题

综观近年来国内外研究成果, 尽管城市水文学及城市化水文效应的理论和实践研究已取得了长足的进步, 研究方法也在不断完善, 但研究结果还存在一定差异, 甚至相反观点, 即存在许多问题需要进一步研究和探讨^[40]。因此, 从学科发展的角度分析, 当前城市化水文效应研究还应该加强以下几方面工作:

(1) 城市化的水文效应机理与模型研究 诸多结果证实城市化水文效应具有明显的区域特点, 不同地

区存在较大的差异,如何将研究成果归纳总结出规律性的结论是今后的重点方向。如城市化降水效应研究需要建立新的观测体系监测气溶胶变化、云层微观物理过程和降水动态过程,开发新模型精确分析与模拟上述变化进程,以深入理解相互之间的响应和反馈机制,建立区域城市冠层动力模式及其参数化方案研究城市降水演变机制,耦合多源信息(气象卫星、观测站点、自动监测设备等)建立高精度的信息共享体系,为城市降水效应评估和社会应用提供广泛支持。对于城市化的产汇流机制研究需要探讨城市不透水面的空间分布,融合多源信息(地理信息、地形资料、河网水系、遥感影像等)建立城市有效不透水表面的估计方法,并开发城市区域分布式水文模型,剖析城市产汇流规律及响应机制。现阶段城市水文机理研究相对缺乏且水文试验数据不足,虽然水文模型是城市水文学研究的主要手段,但特殊的城市水文机理如何在水文模型中体现以及水文模型的不确定性问题仍是模型应用所面临的主要挑战^[72]。

(2) 可持续水生态与水资源管理体系 需要进一步发展水环境效应和水生态影响评估方法,深化理解城市水生态结构和响应关系,识别城市河流综合症的驱动机制及主要影响因素,分析不同地理气候条件、发展状态和政府发展策略等条件下城市化影响的水生态系统演变规律,开展适当的管理策略应对和解决城市河流综合症。有效开展综合城市水资源管理策略研究,评估可持续发展状态下城市水资源的供需关系,建立有效的综合城市水资源管理体系和指标,全方位评估城市水资源安全与供需风险,结合区域和全局发展战略(如中国最严格的水资源管理制度),探讨城市应对水资源危机的主要措施和适应能力,以支撑城市可持续发展及人水和谐发展。

(3) 多学科交叉及应用研究 城市水文学研究涉及众多学科,是一个复杂的综合学科交叉问题。向不同尺度方向发展,宏观上水文科学与大气科学交叉合作,研究区域“城市化-气候变化-水文过程”耦合系统的作用机理,微观上水文科学与环境科学、生态学结合,研究河流健康与流域生态系统。同时城市水文学研究也涉及城市规划、社会科学、人文科学领域,需要综合考虑水量过程、水质变化、水生态演变和水资源安全及其相互之间的影响等多个问题,如何更好地量化上述各种影响机制,需要多学科领域的研究交叉及相互合作,才能更好地理解和认识城市化水文效应机制,为城市可持续发展和建设生态城市、保障城市水安全提供基础。

(4) 气候变化的影响研究 以全球变暖为主要特征的气候变化对城市水循环过程及水生态系统的影响不容忽视。如2008年IPCC发布的《Climate Change and Water》特别报告系统阐释了全球范围内气候变化对水循环和水资源系统的影响^[73]。此后诸多学者针对这些问题展开了广泛探讨^[74-75]。然而相较于其他地区而言,城市区域对气候变化的响应更加脆弱,因此需要重点分析气候变化对城市水循环及水生态系统的影响机制。特别是气候变化加剧了城市区域短历时极端暴雨的发生频率和强度,进而增加了城市洪涝灾害几率,且增加了城市水资源脆弱性和风险程度,危及城市水资源安全。同时也影响了城市水生态系统结构、生态环境,进而影响城市水生态安全。因此,需要高度重视气候变化对城市水安全的影响^[76]。

5 结 语

城市水文学作为一门新兴学科,经过半个多世纪的发展,取得了丰硕的研究成果,已经形成了一个相对完整的学科体系。其目的是为了更好地管理城市水系统,为了公共安全和环境健康、城市防洪以及环境保护,需要多学科的知识,如工程学、环境科学、公众健康和社会学等。因此,城市水文学远非那么简单,需要开发新的技术方法既可以解决目前的技术挑战又可以满足城市团体的需求。进入21世纪以来,由于全球气候变化和快速城市化对水循环过程的影响日益加剧,引起多学科领域的广泛关注,使得城市水文学研究进入一个新的发展阶段,且面临着诸多挑战与机遇。在今后的研究中,研究方法的改善以及多学科交叉是城市水文学的主要发展方向,GIS、RS等现代技术以及统计学方法、试验与模型技术的有效结合,水文科学、大气科学、地质学、环境学、生态学以及社会经济学等多学科交叉融合,为全面理解和认识城市水循环过程及水生态响应机理提供可靠保障。重点围绕城市化水文效应评估方法与响应机制分析、城市水生态系统演变规

律及驱动因素、综合城市水资源管理技术等问题开展,为建设生态城市,保证城市水安全,提高水资源可持续利用率及水环境质量提供理论支撑。

参考文献:

- [1] 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 Jianyun, WANG Guoqing. Effects of climate change on hydrology and water resources [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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 Jianyun, HE Ruimin, QI Jing, et al. A new perspective on water issues in North China [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(3):303-310. (in Chinese))
- [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] IPCC. Climate change 2007: Synthesis report [R]. Geneva: IPCC, 2007.
- [7] UN. World urbanization prospects: The 2011 revision [R]. New York: UN-HABITAT, 2012.
- [8] COHEN J E. Human population: The next half century [J]. Science, 2003,302(5648): 1172-1175.
- [9] 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.
- [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] 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.
- [12] ROGERS P. Facing the freshwater crisis [J]. Scientific American, 2008, 299: 46-53.
- [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] 拜存有,高建峰.城市水文学[M].郑州:黄河水利出版社,2009.(BAI Cunyou, GAO Jianfeng. Urban hydrology [M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2009. (in Chinese))
- [17] HALL M J. Urban hydrology [M]. London: Elsevier Applied Science Publishers, 1984.
- [18] DELLEUR J W. Introduction to urban hydrology and stormwater management [M]// KIBLER D F. Urban Stormwater Hydrology. Washington D C: American Geophysical Union, 1982:1-34.
- [19] MCPHERSON M B. Urban hydrology [J]. Reviews of Geophysics, 1979, 17(6): 1289-1297.
- [20] LAZARO T R. Urban hydrology: A multidisciplinary perspective; Revised edition [M]. Lancaster: Technomic Publishing Company, Inc, 1990.
- [21] LEOPOLD L B. Hydrology for urban land planning: A guidebook on the hydrologic effects of urban land use [R]. Washington D C: Geological Survey Circular 554, 1968.
- [22] MCPHERSON M B. Hydrological Effects of Urbanization [M]. Paris: UNESCO Press, 1974.
- [23] MCPHERSON M B. Research on urban hydrology: State-of the art report from France, Federal Republic of Germany, India, Netherlands, Norway, Poland, Sweden [M]. Paris: UNESCO Press, 1978.
- [24] LINDH G, BERTHELOT R M. Socio-economic aspects of urban hydrology [M]. Paris: UNESCO Press, 1979.

- [25] United States Department of Agriculture. Urban hydrology for small watersheds [R]. Washington D C: Technical Release 55, 1986.
- [26] ZOPPOU C. Review of urban storm water models [J]. Environmental Modelling & Software, 2001, 16: 195-231.
- [27] NIEMCZYNOWICZ J. Urban hydrology and water management: Present and future challenges [J]. Urban Water, 1999, 1: 1-14.
- [28] ELLIOTT A H, TROWSDALE S A. A review of models for low impact urban stormwater drainage [J]. Environmental Modelling & Software, 2007, 22: 394-405.
- [29] ZEVENBERGEN C, VEERBEEK W, GERSONIUS B, et al. Challenges in urban flood management: Travelling across spatial and temporal scales [J]. Journal of Flood Risk Management, 2008, 1: 81-88.
- [30] BONTA J V. Challenges in conducting hydrologic and water quality research in drastically disturbed watershed [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 60(3): 121-133.
- [31] BURNS M, FLETCHER T D, WALSH C J, et al. Hydrologic shortcomings of conventional urban stormwater management and opportunities for reform [J]. Landscape Urban Plan, 2012, 105: 230-240.
- [32] CHARLESWORTH S M. A review of the adaptation and mitigation of global climate change using sustainable drainage in cities [J]. Journal of Water and Climate Change, 2010, 1(3): 165-180.
- [33] 岑国平.城市雨水径流计算模型[J].水利学报, 1990(10): 68-75. (CEN Guoping. A model to simulate stormwater runoff in urban area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990(10): 68-75. (in Chinese))
- [34] 刘珍环,李猷,彭建.城市不透水表面的水环境效应研究进展[J].地理科学进展, 2011, 30(3): 275-281. (LIU Zhenhuan, LI You, PENG Jian. Progress and perspective of the research on hydrological effects of urban impervious surface on water environment [J]. Progress in Geography, 2011, 30(3): 275-281. (in Chinese))
- [35] SURIYA S, MUDGAL B V. Impact of urbanization on flooding: The Thirusoolam subwatershed: A case study [J]. Journal of Hydrology, 2012, 412/413: 210-219.
- [36] 陈利顶,孙然好,刘海莲.城市景观格局演变的生态环境效应研究进展[J].生态学报, 2013, 33(4): 1042-1050. (CHEN Liding, SUN Ranhao, LIU Hailian. Eco-environmental effects of urban landscape pattern changes: Progresses, problems, and perspectives [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(4): 1042-1050. (in Chinese))
- [37] 宋晓猛,朱奎.城市化对水文影响的研究[J].水电能源科学, 2008, 26(4): 33-36. (SONG Xiaomeng, ZHU Kui. Research progress of urbanization effect on hydrology [J]. Water Resources and Power, 2008, 26(4): 33-36.
- [38] 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 Jianyun. The vital problems for the urbanization and urban hydrology today [J]. Hydro-Science and Engineering, 2012(1): 1-4. (in Chinese))
- [39] CARADOT N, GRANGER D, CHAPGIER J, et al. Urban flood risk assessment using sewer flooding databases [J]. Water Science & Technology, 2011, 64(4): 832-840.
- [40] 徐光来,许有鹏,徐宏亮.城市化水文效应研究进展[J].自然资源学报, 2010, 25(12): 2171-2178. (XU Guanglai, XU Youpeng, XU Hongliang. Advance in hydrologic progress response to urbanization [J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(12): 2171-2178. (in Chinese))
- [41] SHEPHERD J M. A review of current investigations of urban-induced rainfall and recommendations for the future [J]. Earth Interactions, 2005, 9(12): 1-12.
- [42] SHEPHERD J M, PIERCE H, NEGRI A J. Rainfall modification by major urban areas: Observations from spaceborne rain radar on the TRMM satellite [J]. Journal of Applied Meteorology, 2002, 41(7): 689-701.
- [43] 薛丽芳.面向流域的城市化水文效应研究[D].徐州:中国矿业大学, 2009. (XUE Lifang. Study on basin-oriented hydrological effects of urbanization [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2009. (in Chinese))
- [44] 黄国如,何泓杰.城市化对济南市汛期降水特征的影响[J].自然灾害学报, 2011, 20(3): 7-12. (HUANG Guoru, HE Hongjie. Impact of urbanization on features of rainfall during flood period in Jinan City [J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(3): 7-12. (in Chinese))
- [45] TRUSILOVA K, JUNG M, CHURKINA G, et al. Urbanization impacts on the climate in Europe: Numerical experiments by the PSU-NCAR mesoscale model (MM5) [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2008, 47(5): 1442-1455.
- [46] WANG X Q, WANG Z F, QI Y B, et al. Effect of urbanization on the winter precipitation distribution in Beijing area [J]. Science in China: Earth Sciences, 2009, 52(2): 250-256.
- [47] ROSENFELD D. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution [J]. Science, 2000, 287(5459): 1793-1796.
- [48] KAUFMANN R K, SETO K C, SCHNEIDER A, et al. Climate response to rapid urban growth: Evidence of a human-induced pre-

- precipitation deficit [J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(10): 2299-2306.
- [49] SCHIRMER M, LESCHIK S, MUSOLFF A. Current research in urban hydrogeology: A review [J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 51: 280-291.
- [50] DOW C L, DEWALLE D R. Trends in evaporation and Bowen ratio on urbanizing watersheds in eastern United States [J]. *Water Resources Research*, 2000, 36(7): 1835-1843.
- [51] 许有鹏, 石怡, 都金康. 秦淮河流域城市化对水文水资源的影响 [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 Youpeng, SHI Yi, DU Jinkang. Impacts of urbanization on hydrology and water resources in Qinhuai River basin [C]// Proceedings of the 1st China's Forum on Lakes. Nanjing: Southeast University Press, 2011: 14-23. (in Chinese))
- [52] FLETCHER T D, ANDRIEU H, HAMEL P. Understanding, management and modeling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art [J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 51: 261-279.
- [53] 贺宝根, 陈春根, 周乃晟. 城市化地区径流系数及其应用 [J]. *上海环境科学*, 2003, 22(7): 472-475. (HE Baogen, CHEN Chungeng, ZHOU Naisheng. Urbanized area runoff coefficient and its application [J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2003, 22(7): 472-475. (in Chinese))
- [54] SCHUELER T R, FRALEY-MCNEAL L, CAPIELLA K. Is impervious cover still important: Review of recent research [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2009, 14(4): 309-315.
- [55] HAN W S, BURIAN S J. Determining effective impervious area for urban hydrologic modeling [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2009, 14(2): 111-120.
- [56] O'DRISCOLL M, CLINTON S, JEFFERSON A, et al. Urbanization effects on watershed hydrology and in-stream processes in the southern United States [J]. *Water*, 2010, 2(3): 605-648.
- [57] HAMEL P, DALY E, FLETCHER T D. Source-control stormwater management for mitigating the impacts of urbanisation on base-flow: A review [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 485: 201-211.
- [58] LERNER D N. Identifying and quantifying urban recharge: A review [J]. *Hydrogeology Journal*, 2002, 10(1): 143-152.
- [59] JHA A K, BLOCH R, LAMOND J. Cities and flooding guidebook: A guide to integrated urban flood risk management for the 21st century [M]. Washington D C: The World Bank, 2012.
- [60] WENGER S J, ROY A H, JACKSON C R, et al. Twenty-six key research questions in urban stream: An assessment of the state of the science [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2009, 28(4): 1080-1098.
- [61] WALSH C J, ROY A H, FEMINELLA, et al. The urban stream syndrome: Current knowledge and the search for a cure [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2005, 24(3): 706-723.
- [62] 孙艳伟, 王文川, 魏晓妹, 等. 城市化生态水文效应 [J]. *水科学进展*, 2012, 23(4): 569-574. (SUN Yanwei, WANG Wenchuan, WEI Xiaomei, et al. Eco-hydrological impacts of urbanization [J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(4): 569-574. (in Chinese))
- [63] 赵安周, 朱秀芳, 史培军, 等. 国内外城市化水文效应研究综述 [J]. *水文*, 2013, 33(5): 16-22. (ZHAO Anzhou, ZHU Xiufang, SHI Peijun, et al. Review on hydrological response to urbanization at home and abroad [J]. *Journal of China Hydrology*, 2013, 33(5): 16-22. (in Chinese))
- [64] 赵军, 单福征, 杨凯, 等. 平原河网地区河流曲度及城市化响应 [J]. *水科学进展*, 2011, 22(5): 631-637. (ZHAO Jun, DAN Fuzhen, YANG Kai, et al. River sinuosity in tidal plain and its response to rapid urbanization [J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(5): 631-637. (in Chinese))
- [65] 陈云霞, 许有鹏, 付维军. 浙东沿海城镇化对河网水系的影响 [J]. *水科学进展*, 2007, 18(1): 68-63. (CHEN Yunxia, XU Youpeng, FU Weijun. Influences of urbanization on river network in the coastal areas of east Zhejiang province [J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(1): 68-63. (in Chinese))
- [66] 丁文峰, 张平仓, 陈杰. 城市化过程中的水环境问题研究综述 [J]. *长江科学院院报*, 2006, 23(2): 21-24. (DING Wenfeng, ZHANG Pingcang, CHEN Jie. Review of water environment problem during process of urbanization [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2006, 23(2): 21-24. (in Chinese))
- [67] SONG X M, KONG F Z, ZHAN C S. Assessment of water resources carrying capacity of Tianjin city of China [J]. *Water Resources Management*, 2011, 25(3): 857-873.
- [68] HOUSE-PETERS L A, CHANG H. Urban water demand modeling: Review of concepts, methods, and organizing principles [J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(5): WR009624. [doi: 10.1029/2010WR009624]

- [69] MITCHELL V G. Applying integrated urban water management concepts: A review of Australian experience [J]. *Environmental Management*, 2006, 37(5): 589-605.
- [70] 莫淑红. 西北地区生态城市建设水资源安全保障基础研究: 以宝鸡市为例 [D]. 西安: 西安理工大学, 2010. (MO Shuhong. Fundamental study on ecological city water security in the northwest China: A case study of Baoji city [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [71] 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] (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: II: Urban stormwater modeling and management [J]. *Advances in Water Science*, [2014] (in Chinese))
- [72] 宋晓猛, 占车生, 孔凡哲, 等. 大尺度水循环模拟系统不确定性研究进展 [J]. *地理学报*, 2011, 66(3): 396-406. (SONG Xiaomeng, ZHAN Chesheng, KONG Fanzhe, et al. A review on uncertainty analysis of large-scale hydrological cycle modeling system [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(3): 396-406. (in Chinese))
- [73] BATES B C, KUNDZEWICZ Z W, WU S, et al. *Climate Change and Water* [R]. Geneva: IPCC, 2008: 1-10.
- [74] PIAO S, CIAIS P, HUANG Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China [J]. *Nature*, 2010, 467(7311): 43-51.
- [75] BAENETT T P, ADAM J C, LETTENMAIER D P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions [J]. *Nature*, 2005, 438(7066): 303-309.
- [76] 张建云, 王国庆, 杨扬, 等. 气候变化对中国水安全的影响研究 [J]. *气候变化研究进展*, 2008, 4(5): 290-295. (ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, YANG Yang, et al. The possible impacts of climate change on water security in China [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2008, 4(5): 290-295. (in Chinese))

Development and challenges of urban hydrology in a changing environment:

I: Hydrological response to urbanization*

ZHANG Jianyun^{1,2}, SONG Xiaomeng^{1,2}, WANG Guoqing^{1,2}, HE Ruimin^{1,2}, WANG Xiaojun^{1,2}

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

Abstract: The change in the natural hydrologic processes impacted by global climate change and rapid urban expansion is a hotspot issue in the field of urban hydrology. To understand the evolvement rules of urban water cycle, we discuss the development in urban hydrology, and reveal the response mechanism of hydrological processes in urban environment. Then, we summarize the advances in the effect of urbanization on hydrological regime, including hydrological cycle and water resources management, water quality and environment, and water ecosystem. There have been significant recent advances in the measurement and modeling the hydrological responses to urban expansion, with technologies such as experiments and hydrological models. Despite the advances, many new challenges in urban hydrology remain, especially in a changing environment, which impose a requirement to ensure that sustainable urban development are adaptable and resilient to changes. Further researches into the spatio-temporal dynamics response of urban rainfall, causes of urban extreme storm, quantification of the effects of urbanization on hydrological response and water ecosystem, and urban water management are required to pay more attention to. Urban hydrology will play a critical role in addressing these challenges, to support scientific foundations for establishing eco-city and ensuring water safety for cities.

Key words: urban hydrology; hydrological cycle; water environment; water ecosystem; water resources; hydrological model.

* The study is financially supported by the National Basic Research Program of China (No. 2010CB951103) and the National Natural Science Foundation of China (No. 41330854).