

# 社会水文学和城市水文学研究进展

田富强<sup>1</sup>, 程涛<sup>2,3</sup>, 芦由<sup>1</sup>, 徐宗学<sup>2,3</sup>

(1. 清华大学水利水电工程系, 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 3. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875)

**摘要:**进入人类纪尤其是近数十年来,人类活动对水文过程的影响愈来愈突出,愈来愈强烈,许多新的问题用传统水文学理论难以给出合理的分析和解释,因此,作为两个关注人类活动影响的水文学分支学科,社会水文学和城市水文学受到越来越多的关注。随着人水互动关系的增强,水文系统和人类系统逐渐演变为一个耦合系统,为研究其互馈关系和协同演化过程,社会水文学应运而生。城市是人类活动与自然系统相互影响最剧烈的部分之一,城市区域水循环问题日趋复杂,由此诞生了城市水文学。这两个学科的研究,对水资源和与其相关的经济社会发展的中长期规划和管理,指导城市规划建设、增强城市水安全和改善城市水环境具有重要意义。本文梳理了两个学科的发展规律,总结了研究特点。分析了两个学科的研究现状和发展趋势,包括社会水文学对社会因子的研究、典型流域的案例研究、不同案例的对比研究、模型模拟研究;以及城市水文学中城市化对降水和洪涝灾害的影响研究,城市化与生态环境响应关系的研究。本文探讨了两个学科的重点研究领域,如社会水文学中的本构关系研究、比较社会水文学研究、交叉学科研究等;城市水文学中的城市化对水文过程影响机理及模拟研究、城市暴雨洪水监测与预测预警技术研究、城市雨洪管理和资源化利用技术研究等。

**关键词:**社会水文学;城市水文学;人类影响;人水互动;城市化

## 1 引言

人与水之间的互动自古以来就存在。一方面,人们逐水而居,也有研究表明水文过程的变异性、冰期与间冰期的交替对社会结构、王朝更迭产生重要影响(孙秋梅等, 2005);另一方面,人类利用水资源并改造自然(谢丽, 2001)。在社会生产力较低的情况下,人水互动的关系相对较弱,传统的水文学研究将水文系统和人类系统视为两个独立的系统,将人类活动影响视为水文系统的外生变量。进入人类纪,人水互动关系增强,水文系统和人类系统演变为一个耦合系统(Blair et al, 2016)。传统的水文学无法刻画水文系统和人类系统的互馈关系和协同演化过程,无法对耦合系统的变化作出合理预

测(Srinivasan et al, 2017),针对这一问题,社会水文学应运而生。社会水文学基于传统水文学和交叉学科,将人类系统的社会驱动力和水文系统的自然驱动力视为“人—水”耦合系统的内生变量,运用历史分析、比较分析和过程分析并采用定量化的方法,理解和预测“人—水”耦合系统的协同演化过程(Sivapalan et al, 2012)。

气候变化导致了水文情势的剧烈变化,水文系统的不确定性增加(Milly et al, 2008)。同时,人类活动对水文系统的影响逐渐增强,对水文系统的研究不得不更多地考虑人类活动的影响,人类因应环境变化而对自身经济社会发展模式进行调整的可能性也大大增加(丁婧玮等, 2015)。传统水文学的研究方法中,水文系统和人类系统相对独立,人类

收稿日期:2017-12-23;修订日期:2018-01-13。

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0402701);国家自然科学基金项目(L1624026);中国科学院学部学科发展战略研究项目(2016-DX-C-02) [Foundation: National Key Research and Development Program, No.2016YFC0402701; National Natural Science Foundation of China, No.L1624026; Research Project on the Development Strategy of Chinese Academy of Sciences, No.2016-DX-C-02]。

作者简介:田富强(1975-),男,河南人,副教授,从事流域水文过程及模拟、水资源管理等研究, E-mail: tianfq@tsinghua.edu.cn。

引用格式:田富强,程涛,芦由,等. 2018. 社会水文学和城市水文学研究进展[J]. 地理科学进展, 37(1): 46-56. [Tian F Q, Cheng T, Lu Y, et al. 2018. A review on socio-hydrology and urban hydrology[J]. Progress in Geography, 37(1): 46-56.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.01.006

活动的影响被视为水文系统的外生变量,因之对社会因素考虑不够,预测的作用不足,需要新的理论方法来进行研究(徐宗学等, 2010)。将人类活动视为系统的内生变量,考虑“人—水”耦合系统的协同演化过程,从而对“人—水”耦合系统进行更好地刻画和预测,成为水文科学的热点问题和关注焦点(刘攀等, 2016)。水资源的规划与管理要解决人类用水需求与自然供水之间的矛盾,最终目的是通过合理的管理来实现经济社会的可持续发展。对自然供水和人类用水需求进行合理准确地预测和规划,可为社会经济发展规划提供重要参考(顾圣平等, 2009)。社会水文学重点研究“人—水”耦合系统的互馈关系和协同演化,增强了对“人—水”耦合系统演化的长期预测能力,对水资源和与水资源相关经济社会发展的中长期规划和管理具有重要意义(Sivapalan et al, 2014)。

城市作为地球系统的一部分,在发展过程中时刻与自然环境相互影响、相互联系。随着城市化进程的加快,城市与自然环境之间的相互影响逐渐加大,城市区域的水循环相关研究面临的问题也日趋复杂,并逐渐形成城市水文学分支学科(Fletcher et al, 2013)。城市水文学研究囊括了城市化水文效应以及城市化伴生的水环境与水生态效应、城市水文过程机理解析和过程模拟等内容,通过降雨观测、水文序列分析以及水文模型等一系列研究方法,揭示城市化对城市水文过程和自然生态环境的影响特征和机理(刘家宏等, 2014; 张建云等, 2014)。在全球气候变化条件下,全球大尺度水循环过程发生改变,极端气候事件频发,引发严重的城市水资源短缺和洪涝灾害等问题(IPCC, 2014),给城市水文学研究带来了新的机遇和挑战。

城市的水文效应十分复杂,涉及水循环、水热交换、物质迁移以及城市本体功能等多个过程,因此,城市水文效应成为水科学研究的热点问题,关系到城市发展和水安全(宋晓猛等, 2013; 张建云等, 2013)。根据 IPCC 报告(IPCC, 2014),全球气候在未来一段时间内(50~100年)仍将保持继续变暖的态势,气温升高无疑将对包括城市在内的水文和生态系统产生深远的影响。同时,城市未来人口将持续增加,城市化进程继续加快,发展中国家和地区尤其如此(Grimm et al, 2008),城市的水文效应将愈加凸显。城市化改变了地形、地貌、地质条件,引起水文过程演变,造成更加频繁的极端气候事件,

增大了城市暴雨洪涝风险(Hallegatte et al, 2013)。同时,城市化使生产、生活污水增加,造成水质污染与水生态系统退化等环境问题(Grant et al, 2012; Peng et al, 2017)。城市人口急剧增长还会造成水资源供需关系紧张,城市供水安全面临新的挑战(Rogers, 2008)。城市水文效应以及城市水文学的相关研究对于指导城市规划建设、增强城市水安全和改善城市环境具有重要意义。

## 2 学科发展规律与研究特点

### 2.1 社会水文学发展规律与研究特点

随着近代以来人类活动的加剧,人对自然水文过程的影响逐渐成为热点,人和水之间的互动逐步引起研究者的关注。Falkenmark(1997)提出要从人水交互的角度来认识水问题,引发了关于人水相互作用的宏观规律和分析框架的讨论。王浩等(2006)提出“自然—社会”二元水循环理论,从自然、社会两个系统来认识水循环过程,提出了驱动力二元化、循环路径二元化、结构和参数二元化、服务功能二元化的认知模式,辩证地认识自然系统和社会系统的相互关系,为协调人类用水和生态用水关系、合理开发利用水资源提供了理论基础(秦大庸等, 2014)。有关学者还从水资源管理的角度、制度分析与发展框架的角度等对研究人水相互影响进行了探索(Schlüter et al, 2007; Ostrom, 2009)。

Sivapalan 等(2012)在前人的研究基础上,最终明确提出了社会水文学。社会水文学将人类和人类活动视为水循环动力的一部分,基于传统水文学及其交叉学科,重点关注人类系统与水文系统的反馈作用,研究“人—水”耦合系统及其协同演化动力学(Elshafei et al, 2014)。社会水文学提出以来,不同学者从不同的角度丰富了社会水文学的研究。Liu 等(2014)提出了耦合演化分析的理论框架,确定了社会水文系统的要素结构、动态反馈和驱动机制,并在一些研究中得以应用(Han et al, 2017)。有些学者对典型流域的耦合演化情况进行案例分析(Kandasamy et al, 2014; Liu et al, 2015; 陆志翔等, 2015; Srinivasan, 2015),对不同流域进行对比并总结耦合演化规律的异同(Troy et al, 2015)。一些学者尝试基于社会学、经济学等学科的研究方法,对与水文系统相互作用的社会因子进行定量研究(Elshafei et al, 2016)。有些学者还尝试构建量化的

“人—水”耦合模型(Viglione et al, 2014; Elshafei et al, 2015; Chen et al, 2016),对系统协同演化规律进行刻画和预测。随着大数据和知识挖掘技术的发展,交叉学科的不断融合(Zlinszky et al, 2013; Shang et al, 2015; Wei et al, 2015),社会水文学的研究方法和研究领域不断创新(Wei et al, 2017)。

社会水文学的研究特点包括以下几方面:一是量化研究(陆志翔等, 2016)。以往研究中对水文系统的定量刻画有较好的研究基础,对人类系统中社会因子的定量刻画,可更准确地理解和预测“人—水”耦合系统的协同演化。二是与其他学科的交叉(王雪梅等, 2016)。社会水文学注重与社会学、经济学、管理学等学科的交叉(Blume et al, 2016; Roobavannan et al, 2017),运用这些学科的研究方法,定量研究社会因子。三是探究“人—水”耦合系统的相互作用(秦大庸等, 2014),并支持水资源可持续管理(陆志翔等, 2015),特别是不仅仅考虑人类活动对水循环的影响,也考虑人类对水文变化作出的调整和响应。

## 2.2 城市水文学发展规律与研究特点

20世纪60年代以前,曾经积累了一些有关城市用水排水方面的工程实践和经验。随着此后工业化和城市化快速发展,带来了一些新的城市水文问题,利用传统的水文学理论和方法很难给出合理的分析和解释,由此产生了较为系统的有关城市水文问题的研究。然而,由于当时科学认识和技术水平的局限性,许多研究一般仅仅基于试验观测以及历史数据分析等,因为早期的观测精度和时空分辨率较低,这些研究工作往往局限于城市化流域或市区等小尺度范围(Delleur, 2003; 刘家宏等, 2014; 张建云等, 2014)。近年来,随着遥感和地理信息系统等现代科学技术的广泛应用和分布式水文模型的快速发展,城市水文学研究进入高速发展阶段,并诞生了一系列城市水文模型。通过广泛开展水科学相关研究计划,提升观测和模拟技术水平,初步揭示了变化环境下的城市水循环演变机理和规律,探讨了城市水文效应并研究了城市水环境、水生态问题。然而,由于城市水环境水生态系统的持续恶化,城市水文学研究仍然面临着很大的挑战(Niemczynowicz, 1999; Sarma et al, 2016)。另一方面,全球气候变化加剧了城市水安全问题,城市极端降雨和洪涝灾害事件显著增加。当前,全球气候变化和快速城市化影响下的水循环响应机制研究有待深

入,对于二者综合影响的应对措施研究方面仍待加强。变化环境下的城市水循环响应机制与城市水资源综合管理将成为未来城市水文学研究的重点方向(刘家宏等, 2014; 张建云等, 2014)。

城市水文学主要聚焦于城市水循环问题,作为水文学的一个分支学科,具有多学科交叉、综合性强的特点,涉及到水文学、水力学、环境科学、生态科学、气象学、城市规划等学科和水利、城建、环保、园林等部门,涉及到城市水循环、城市化水文效应、城市水文气象、城市供排水、城市防洪排涝、城市水资源与水环境问题以及城市水文模拟与预测预报等(Hall, 1984; Andrieu et al, 2004; 拜存等有, 2009)。早期的研究主要关注城市排水系统设计相关的水文学问题,进入21世纪,随着城市化进程不断加快,城市水文学面临更加复杂的城市水问题,进一步拓展了其研究范围,逐步扩展至城市化伴生的水环境与水生态效应等相关领域(Fletcher et al, 2013; 刘家宏等, 2014; 张建云等, 2014)。

## 3 学科研究现状与发展趋势

### 3.1 社会水文学研究现状与发展趋势

社会水文学定性和定量地考虑经济、环境、制度、政策和意识等诸多社会因子,并将这些社会因子耦合在“人—水”系统中,成为内在的社会驱动力。学者提出的考虑政策、技术、经济、人口等社会驱动的社会水文学研究框架(Liu et al, 2014),定义了社会水文学的研究要素和系统边界。学者提出的“人类—洪水”动态反馈模型框架考虑了社会认知、堤防技术等因素,研究“堤防效应”和“适应效应”带来的复杂反馈过程(Di Baldassarre et al, 2013; O'Connell et al, 2013)。有学者聚焦意识、态度、信任等社会因子,分析公众应对风险文化、洪水危害和经济发展的相互作用(Viglione et al, 2014)。Elshafei等(2014)提出了用“社群灵敏度”来定量刻画“人—水”系统的回馈过程,并在不同流域取得了较好的模拟效果(van Emmerik et al, 2014; Elshafei et al, 2015)。相比传统水文学中水文系统和人类系统的相对独立,社会因子在社会水文学中得到了重视和表达。但现有的研究普遍存在定量研究不足、定量关系物理性不足、方程与实际问题尺度不匹配、社会因子数据难以获取等困难(Sivapalan et al, 2015),有待进一步深入研究。还有学者为改进对

社会决策过程的刻画,定义了表征政策决策者进行耕地一节水政策调控意愿的“决策者敏感度”概念,对政策变量进行结构化定量表达,从而实现对政策演变过程的动态模拟(刘烨等, 2016)。

在资料相对完整的典型流域进行案例研究,是对“人—水”耦合系统研究的有效探索和示范。根据可获取资料的多少,不同学者因地制宜地分析“人—水”耦合系统协同演化的特征和规律,极大地丰富了社会水文学的研究。Kandasamy等(2014)在资料相对丰富的墨累达令河流域,研究了农业灌溉和生态环境保护之间的“钟摆现象”,用实例有效地证实和刻画了“人—水”耦合系统的互馈作用和演化过程,为其他流域的案例研究提供了分析的范式和方法。近年来,国内外学者在塔里木河(Liu et al, 2015)、黑河(Lu et al, 2015)、基西米河(Chen et al, 2016)等不同流域开展了案例研究,特别是对“人—水”矛盾较为突出的干旱区流域进行研究。今后应继续收集不同来源的资料数据,进一步加强对不同流域的研究,丰富社会水文学的研究案例库。

基于不同的流域案例,对不同流域进行对比研究,分析在不同气候条件和人类社会条件下,以及在不同时间和空间尺度上,“人—水”系统协同演化的相同点和不同点,有利于更好地发现和总结“人—水”耦合系统演化机理和特征,为“人—水”耦合系统模型提供依据。有学者对比了美国、西班牙和智利的三个不同流域,分析了“灌溉效率悖论”现象(Scott et al, 2014)。有学者交叉对比了美国、玻利维亚、斐济和新西兰不同经济和政治条件下人类对水资源问题解决路径的偏好差异(Wutich et al, 2014)。有学者通过模型模拟的方法对比了不同政治条件和社会发展条件下的“人—水”耦合系统协同演化特征(Elshafei et al, 2016)。今后应加强国内外学者的沟通合作,建立社会水文学案例数据库,在不同时空尺度上对比和研究“人—水”系统演化特征。

模型模拟是研究系统演化规律特征、作用机理和进行预测的重要工具。基于社群灵敏度的“人—水”系统耦合模型的提出,是建立定量的“人—水”系统耦合模型的重要尝试,其不同流域的运用证明了定量模型刻画“人—水”系统演化特征的可行性。有关学者还基于此模型进行了参数的不确定性分析,总结了“人—水”系统演化过程中的关键影响因子(Elshafei et al, 2016)。有学者以新疆巴音郭

勒州为例,建立了包含灌溉面积、灌溉用水、政策组合、环境评价的“人—水”耦合模型,分析了灌溉效率现象的机理,并对比了不同政策组合下的“人—水”系统演变特征(刘烨等, 2016)。有学者建立了“人—水”系统耦合模型,用于研究Maya Collapse中水文变异性对系统演化的作用(Kuil et al, 2016)。这些模型尝试用定量方法对“人—水”系统的演化进行模拟和预测,具有重要的意义,但也存在参数选取困难、方程机理性不足等问题,模型的物理性有待加强,预测的不确定性也有待进一步分析。

### 3.2 城市水文学研究现状与发展趋势

作为研究城市水循环的一门学科,城市化所带来的水问题,都是城市水文学的研究对象。具体涉及到城市化对城市水热循环过程、城市暴雨洪涝、水生态环境以及水资源等方面的影响机制,研究内容包括城市水文气象变化归因、洪涝灾害预测预报、水污染事件防控、景观生态系统建设和城市雨洪资源化利用与管理等(刘家宏等, 2014)。城市化主要影响之一是不透水表面增加,使城市水循环时空特征发生变化,进而改变了城市水量平衡,引起局部降水增加和蒸发量减少(刘珍环等, 2011)。城市的横向扩张和纵向发展改变了城市小气候特征,自然水循环过程受到干扰,蒸散发过程发生变化,降雨入渗量减少,地表径流量增加,地下径流以及地表地下的水量交换减少(张建云等, 2014)。

有关城市化对降雨的影响研究表明,城市化对降水的影响主要表现为降水的时空分布、降雨频次等发生改变(Shepherd, 2005; 徐光来等, 2010; Yan et al, 2016),如市区及其下风向一定距离内的降水强度比郊区大(Shepherd et al, 2002; 薛丽芳, 2009; Wang et al, 2015; Zhong, Qian et al, 2015);降水时空分布趋势明显,受下垫面变化及地形等因素影响较大(Wang et al, 2012; Zhong, Yang, 2015);城市化导致夏季易形成短历时的低频降雨(陈秀洪等, 2017);城市化对降水的影响也具有季节性,冬季受城市化降水影响较为显著(Wang et al, 2009; Kug et al, 2013)。蒸散发是水循环过程的重要环节,自然条件下的蒸散发比例较大,城市化造成不透水面增加、使蒸发量减少,城市水热过程、空气流动机制等发生巨大变化,对蒸散发也造成了较大影响(黄国如等, 2011; 张建云, 2012; Schirmer et al, 2013; 张建云等, 2014)。水文过程机制的改变是城市化影响的主要方面,由于不透水面积增加,地表

截留、蒸发、下渗等减少,产流量增加;同时,由于城市建设改变下垫面分布,城市汇流路径发生改变,不透水面的分布对城市河湖连通性也产生了一定影响(Han et al, 2009; Schueler et al, 2009; Ebrahimi-an et al, 2016; Pumo et al, 2017)。目前,城市化对于地下水文过程的影响方面,由于研究问题的角度不同,相关结论仍存在一定的争议。有学者分析地表产汇流变化的结果表明,随着城市不透水面积增加,地表水下渗量减少,从而使地下径流减少;但也有研究结果显示,城市排水管网的渗漏、人为补给以及各种调控措施可能会增加地下径流量(Lerner, 2002; Del Campo et al, 2014; Minnig et al, 2017)。

最近十几年来,由于全球城市洪涝灾害事件频发,城市化与洪涝灾害的关系得到越来越多的关注(Jiang et al, 2018)。城市化使洪涝灾害的成灾条件发生变化,主要包括孕灾环境、致灾因子和承灾体等几个方面的变化(Jha et al, 2012; 徐宗学等, 2017)。在孕灾环境方面,由于硬化表面的透水性能变差,自然产汇流过程遭到破坏,加之排水系统管网化和河道渠化导致汇流速度加快,峰现时间提前;同时城市建设与水争地,侵占河湖湿地,区域雨水滞蓄能力和汇流连通性降低;而城市微地形和人为因素也容易诱发城市内涝,如下凹式立交桥下易形成积水洼地,雨水口的意外堵塞往往成为城市区域性洪涝的主要因素(徐宗学等, 2017)。在致灾因子方面,主要表现为城市化使降雨形成条件和特征改变,极端暴雨发生概率增大,城市洪涝灾害风险也随之增加。在承灾体方面,主要表现在城市人口、财富和资源高度集中,一旦发生极端暴雨洪涝事件,除了直接的人员伤亡和经济损失外,城市基础设施如道路、电力、通信等被破坏将造成次生灾害,其影响往往更为持久和严重(张建云等, 2014; 刘子龙等, 2015)。

城市发展对生态环境会产生显著影响,一些研究开始关注城市化与生态环境之间的关系(Walsh et al, 2005; Wenger et al, 2009; 孙艳伟等, 2012)。城市化改变了区域地形、地貌和地质条件,造成城市水生态系统的物理、化学与生物特性发生变化,使河流生态环境面临被破坏的风险。如城市化表面植被覆盖面积减少,道路和屋面等硬化表面颗粒物和污染物直接进入水体,引起河道沉积和污染物聚集;城市河道的渠道化、截弯取直和棚盖作用造成河道生态功能严重弱化,河道景观消失,生态系统

遭到破坏。随着城市化进程加快,城市化对于水资源的影响主要表现在随着城市规模和人口数量的快速增长,城市需水量、用水结构及效率等发生变化,加之日益突出的城市水环境问题造成的水质型缺水,导致城市水资源供需关系受到破坏,城市供水安全面临更大的挑战(United Nations, 2012; 张建云, 2012)。

城市化导致的城市水循环变化和水问题恶化引起了上述诸多研究和思考,人们开始关注于城市生态系统的健康发展和合理规划(张建云等, 2014),提出了一系列应对措施,如LID、BMPs、WSUD、SUDs等,在城市雨洪利用和水问题治理方面开展了大量的研究(Tedoldi et al, 2016; Eckart et al, 2017; Liu et al, 2017; Zhang et al, 2018)。中国在新型城镇化背景下,基于水生态文明理念,推行“海绵城市”建设,为城市高效、健康、可持续发展奠定良好的基础。然而,前期的“海绵城市”建设具有“大干快上”的盲目性特点(夏军, 石卫, 等, 2017)。今后海绵城市建设必须立足于水文科学基本理论,以水文学为主要支点,结合环境、水利、市政、园林、建筑等多学科和多部门的知识和技术(徐宗学等, 2017),在对城市水循环机理的清晰认识的基础上,从全流域、水循环的高度开展顶层设计和工程建设(徐宗学等, 2016; 夏军, 张永勇, 等, 2017)。另外,由于“海绵城市”建设中一系列的人为改造作用将导致水文过程更加复杂,城市流域进一步碎片化为更小的单元,如何定量描述单元尺度的城市水文过程模拟以及和城市流域尺度进行耦合成为需要解决的难题(左其亭, 2016)。

## 4 学科重点研究领域

### 4.1 社会水文学重点研究领域

(1) 社会水文学中的本构关系。构建“人—水”耦合系统模型的一个重大挑战在于社会因子的量化研究和与社会因子相关的方程构建。确定社会因子的本构关系,对参数进行选取和敏感度分析,增强参数的物理性,对发展“人—水”耦合系统模型具有重要意义。

(2) 比较社会水文学。不同自然和社会条件下的流域,在“人—水”系统协同演化的过程中,表现出一定的相同点和不同点。识别和了解不同流域之间的异同点,利用基本的“气候—景观—人类活

动”的术语来进行解释,能有效地发现和理解“人—水”系统演化的特征和机理。

(3) 交叉学科研究。对社会因子的刻画和对社会水文学中本构关系的研究,需要借助于社会学、经济学、管理学等学科的理论、研究范式和研究方法,获取更多有效数据,加强学科的交叉融合,更好地理解“人—水”系统的协同演化机理。

(4) 社会水文学的数据收集。完善历史分析,基于水文重建方法、“大数据”和知识挖掘技术、社会调研等,为社会水文学提供更多资料和数据,从而更合理有效地定量刻画社会因子,为模型的构建和模拟预测奠定基础。

#### 4.2 城市水文学重点研究领域

(1) 城市化对水文过程的影响机理与模拟研究。建立新的观测体系,耦合多源信息,深入研究城市水文效应,总结相关规律;结合多源遥感数据,探究城市不透水面空间分布特征对城市产汇流规律及其响应机制的影响;城市水文模型中水文机理的深入研究和应用以及城市水文模型不确定性问题。

(2) 城市暴雨洪水监测与预测预警技术研究。城市暴雨临近预报技术和城市水文过程监测体系;开发多过程耦合、集成多种方法的的城市水文模型,系统研究城市水循环规律和城市产汇流特征;缺资料和无资料信息条件下的城市雨洪模型参数化与不确定性评估以及集合预报方法。

(3) 城市雨洪管理和资源化利用技术研究。城市雨洪消减和雨水利用设施的科学布设与模拟技术,以及雨洪资源的处理与利用;城市雨水污染处理,包括初雨的收集处理系统、合流制管道的雨污分离系统等;城市雨洪管理体制、政策、法律、法规的研究以及新型雨洪管理模式的应用和推广。

(4) 城市水文学相关的跨学科交叉研究。城市水文学与大气科学交叉,开展区域“城市化—气候变化—水文过程”耦合机理研究,将城市水文学与生态科学、环境科学等学科相结合,研究城市河流健康、城市生态系统健康等;与城市规划、社会科学、人文科学等学科相结合,研究自然—社会二元城市水循环和城市水管理等。

(5) 气候变化对城市水文过程的影响研究。气候变化背景下城市极端事件的发展特征和变化规律;气候变化和城市化综合作用下的城市水循环变化机理;气候变化下的城市水安全(洪涝灾害、水资源短缺、水生态环境破坏等)问题。

## 5 展望

基于传统水文科学和交叉学科的“人—水”系统耦合演变的机理研究将成为社会水文学研究的热点和关键点。进一步挖掘不同来源的数据和资料,丰富不同流域的社会水文学案例研究,并对不同自然和社会条件下的流域在不同时间尺度和空间尺度上进行对比研究,有利于揭示“人—水”系统协同演变机理。采用不同学科的研究方法和理论,对社会因子进行更好地定量刻画,增强模型中社会部分方程的机理性和参数的物理性,能有效提高模型的模拟和预测能力。在机理性和预测能力更强的模型基础上,用“人—水”系统协同演化理论和结果,预测指导水资源管理和其他与水资源相关的社会经济规划,也是社会水文学的重要方向。

结合新技术、新方法开展城市化水文过程的演化机理研究和城市雨洪精细化模拟是当今研究的热点,如多源遥感技术能提供大范围、多时相、高精度的城市表面信息,考虑城市下垫面异质性特征的水文水动力学耦合模拟可更加全面地描述城市水文过程,基于高性能计算技术则能进一步推动精细化模拟和快速洪涝预测预报。随着全球气候变化影响加深,城市洪涝问题的进一步凸显,城市水文气象极值的定量描述、基于低影响开发和“海绵城市”技术的雨洪资源利用及其水文响应特征方面的研究,将为城市洪涝问题科学化解决提供依据,同时,基于多学科、多部门的交叉和协同研究,将为更好地解决城市水问题、保障城市水安全奠定基础。

#### 参考文献(References)

- 拜存有, 高建峰. 2009. 城市水文学[M]. 郑州: 黄河水利出版社. [Bai C Y, Gao J F. 2009. Chengshi shuiwenxue[M]. Zhengzhou, China: Yellow River Conservancy Press.]
- 陈秀洪, 刘丙军, 陈刚. 2017. 城市化建设对降水特征的影响[J]. 自然资源学报, 32(9): 1591-1601. [Chen X H, Liu B J, Chen G. 2017. Effects of urbanization on precipitation characteristics[J]. Journal of Natural Resources, 32(9): 1591-1601.]
- 丁婧祎, 赵文武, 房学宁. 2015. 社会水文学研究进展[J]. 应用生态学报, 26(4): 1055-1063. [Ding J Y, Zhao W W, Fang X N. 2015. Socio-hydrology: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 26(4): 1055-1063.]
- 顾圣平, 田富强, 徐得潜. 2009. 水资源规划及利用[M]. 北京: 中国水利水电出版社. [Gu S P, Tian F Q, Xu D Q.

2009. Shuiziyuan guihua ji liyong[M]. Beijing, China: China Water & Power Press.]
- 黄国如, 何泓杰. 2011. 城市化对济南市汛期降雨特征的影响[J]. 自然灾害学报, 20(3): 7-12. [Huang G R, He H J. 2011. Impact of urbanization on features of rainfall during flood period in Jinan City[J]. Journal of Natural Disasters, 20(3): 7-12.]
- 刘家宏, 王浩, 高学睿, 等. 2014. 城市水文学研究综述[J]. 科学通报, 59(36): 3581-3590. [Liu J H, Wang H, Gao X R, et al. 2014. Review on urban hydrology[J]. Chinese Science Bulletin, 59(36): 3581-3590.]
- 刘攀, 冯茂源, 郭生练, 等. 2016. 社会水文学研究方法和难点[J]. 水资源研究, 5(6): 521-529. [Liu P, Feng M Y, Guo S L, et al. 2016. Methodologies and challenges for socio-hydrology[J]. Journal of Water Resources Research, 5(6): 521-529.]
- 刘烨, 田富强. 2016. 基于社会水文耦合模型的干旱区节水农业水土政策比较[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 56(4): 365-372. [Liu Y, Tian F Q. 2016. Comparison of water and land policies for agriculture water conservation in arid areas based on a coupled socio-hydrological model[J]. Journal of Tsinghua University: Science & Technology, 56(4): 365-372.]
- 刘珍环, 李猷, 彭建. 2011. 城市不透水表面的水环境效应研究进展[J]. 地理科学进展, 30(3): 275-281. [Liu Z H, Li Y, Peng J. 2011. Progress and perspective of the research on hydrological effects of urban impervious surface on water environment[J]. Progress in Geography, 30(3): 275-281.]
- 刘子龙, 周玉文, 刘珊珊, 等. 2015. 基于GIS的城市建筑内涝损失和风险定量计算方法[J]. 北京工业大学学报, 41(2): 275-280. [Liu Z L, Zhou Y W, Liu S S, et al. 2015. Approach of building content damage assessment and risk quantification by urban local flooding based on GIS[J]. Journal of Beijing University of Technology, 41(2): 275-280.]
- 陆志翔, Wei Y P, 冯起, 等. 2016. 社会水文学研究进展[J]. 水科学进展, 27(5): 772-783. [Lu Z X, Wei Y P, Feng Q, et al. 2016. Progress on socio-hydrology[J]. Advances in Water Science, 27(5): 772-783.]
- 陆志翔, 肖洪浪, Wei Y P, 等. 2015. 黑河流域近两千年人—水—生态演变研究进展[J]. 地球科学进展, 30(3): 396-406. [Lu Z X, Xiao H L, Wei Y P, et al. 2015. Advances in the study on the human-water-ecology evolution in the past two thousand years in Heihe River Basin[J]. Advances in Earth Science, 30(3): 396-406.]
- 秦大庸, 陆垂裕, 刘家宏, 等. 2014. 流域“自然-社会”二元水循环理论框架[J]. 科学通报, 59(4-5): 419-427. [Qin D Y, Lu C Y, Liu J H, et al. 2014. Theoretical framework of dualistic nature-social water cycle[J]. Chinese Science Bulletin, 59(8): 810-820.]
- 宋晓猛, 张建云, 占车生, 等. 2013. 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, 44(7): 779-790. [Song X M, Zhang J Y, Zhan C S, et al. 2013. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 44(7): 779-790.]
- 孙秋梅, 李志忠, 武胜利, 等. 2005. 全球气候变化与塔里木盆地古城绿洲演变关系[J]. 新疆师范大学学报: 自然科学版, 24(3): 113-116. [Sun Q M, Li Z Z, Wu S L, et al. 2005. The augment on the relations between the global environment changes and the evolution of the ancient oasis towns of Tarim Basin[J]. Journal of Xinjiang Normal University: Natural Sciences Edition, 24(3): 113-116.]
- 孙艳伟, 王文川, 魏晓妹, 等. 2012. 城市化生态水文效应[J]. 水科学进展, 23(4): 569-574. [Sun Y W, Wang W C, Wei X M, et al. 2012. Eco-hydrological impacts of urbanization[J]. Advances in Water Science, 23(4): 569-574.]
- 王浩, 王建华, 秦大庸, 等. 2006. 基于二元水循环模式的水资源评价理论方法[J]. 水利学报, 37(12): 1496-1502. [Wang H, Wang J H, Qin D Y, et al. 2006. Theory and methodology of water resources assessment based on dualistic water cycle model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 37(12): 1496-1502.]
- 王雪梅, 张志强. 2016. 基于文献计量的社会水文学发展态势分析[J]. 地球科学进展, 31(11): 1205-1212. [Wang X M, Zhang Z Q. 2016. Tendency analysis of socio-hydrology research based on bibliometrics[J]. Advances in Earth Science, 31(11): 1205-1212.]
- 尉永平, 张志强, 等. 2017. 社会水文学理论、方法与应用[M]. 北京: 科学出版社. [Wei Y P, Zhang Z Q, et al. 2017. Shehui shuiwenxue lilun, fangfa yu yingyong[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 夏军, 石卫, 王强, 等. 2017. 海绵城市建设中若干水文学问题的研讨[J]. 水资源保护, 33(1): 1-8. [Xia J, Shi W, Wang Q, et al. 2017. Discussion of several hydrological issues regarding sponge city construction[J]. Water Resources Protection, 33(1): 1-8.]
- 夏军, 张永勇, 张印, 等. 2017. 中国海绵城市建设的水问题研究与展望[J]. 人民长江, 48(20): 1-5, 27. [Xia J, Zhang Y Y, Zhang Y, et al. 2017. Research and prospects of water problems in construction of sponge cities in China[J]. Yangtze River, 48(20): 1-5, 27.]
- 谢丽. 2001. 绿洲农业开发与楼兰古国生态环境的变迁[J]. 中国农史, 20(1): 16-26. [Xie L. 2001. Development of oasis agriculture and ecology environmental changes of Loulan Kindon[J]. Agricultural History of China, 20(1): 16-26.]

- 徐光来, 许有鹏, 徐宏亮. 2010. 城市化水文效应研究进展[J]. 自然资源学报, 25(12): 2171-2178. [Xu G L, Xu Y P, Xu H L. 2010. Advance in hydrologic process response to urbanization[J]. Journal of Natural Resources, 25(12): 2171-2178.]
- 徐宗学, 程涛, 任梅芳. 2017. "城市看海"何时休: 兼论海绵城市功能与作用[J]. 中国防汛抗旱, 27(5): 64-66, 95. [Xu Z X, Cheng T, Ren M F. 2017. Farewell to urban flooding: A brief discussion on the functions and features of Sponge City[J]. China Flood & Drought Management, 27(5): 64-66, 95.]
- 徐宗学, 李景玉. 2010. 水文科学研究进展的回顾与展望[J]. 水科学进展, 21(4): 450-459. [Xu Z X, Li J Y. 2010. Progress in hydrological sciences: Past, present and future[J]. Advances in Water Science, 21(4): 450-459.]
- 徐宗学, 赵刚, 程涛. 2016. "城市看海": 城市水文学面临的挑战与机遇[J]. 中国防汛抗旱, 26(5): 54-55, 57. [Xu Z X, Zhao G, Cheng T. 2016. City "Sea Views": Challenges and opportunities for urban hydrology[J]. China Flood & Drought Management, 26(5): 54-55, 57.]
- 薛丽芳. 2009. 面向流域的城市化水文效应研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, [Xue L F. 2009. Study on basin-oriented hydrological effects of urbanization[D]. Xuzhou, China: China University of Mining & Technology.]
- 张建云. 2012. 城市化与城市水文学面临的问题[J]. 水利水电工程学报, (1): 1-4. [Zhang J Y. 2012. The vital problems for the urbanization and urban hydrology today[J]. Hydro-Science and Engineering, (1): 1-4.]
- 张建云, 贺瑞敏, 齐晶, 等. 2013. 关于中国北方水资源问题的再认识[J]. 水科学进展, 24(3): 303-310. [Zhang J Y, He R M, Qi J, et al. 2013. A new perspective on water issues in North China[J]. Advances in Water Science, 24(3): 303-310.]
- 张建云, 宋晓猛, 王国庆, 等. 2014. 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, 25(4): 594-605. [Zhang J Y, Song X M, Wang G Q, et al. 2014. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I: Hydrological response to urbanization[J]. Advances in Water Science, 25(4): 594-605.]
- 左其亨. 2016. 我国海绵城市建设中的水科学难题[J]. 水资源保护, 32(4): 21-26. [Zuo Q T. 2016. Water science issues in sponge city construction[J]. Water Resources Protection, 32(4): 21-26.]
- Andrieu H, Chocat B. 2004. Introduction to the special issue on urban hydrology[J]. Journal of Hydrology, 299(3-4): 163-165.
- Blair P, Buytaert W. 2016. Socio-hydrological modelling: A review asking "why, what and how?"[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 20(1): 443-478.
- Blume T, van Meerveld I, Weiler M. 2016. The role of experimental work in hydrological sciences-insights from a community survey[J]. Hydrological Sciences Journal, 62(3): 334-337.
- Chen X, Wang DB, Tian FQ, et al. 2016. From channelization to restoration: Sociohydrologic modeling with changing community preferences in the Kissimmee River Basin, Florida[J]. Water Resources Research, 52(2): 1227-1244.
- del Campo M A M, Esteller M V, Expósito J L, et al. 2014. Impacts of urbanization on groundwater hydrodynamics and hydrochemistry of the Toluca Valley aquifer (Mexico)[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 186(5): 2979-2999.
- Delleur J W. 2003. The evolution of urban hydrology: Past, present, and future[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 129(8): 563-573.
- Di Baldassarre G, Viglione A, Carr G, et al. 2013. Socio-hydrology: Conceptualising human-flood interactions[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 17(8): 3295-3303.
- Ebrahimian A, Gulliver J S, Wilson B N. 2016. Effective impervious area for runoff in urban watersheds[J]. Hydrological Processes, 30(20): 3717-3729.
- Eckart K, McPhee Z, Bolisetti T. 2017. Performance and implementation of low impact development - a review[J]. Science of the Total Environment, 607-608: 413-432.
- Elshafei Y, Coletti J Z, Sivapalan M, et al. 2015. A model of the socio-hydrologic dynamics in a semiarid catchment: Isolating feedbacks in the coupled human-hydrology system[J]. Water Resources Research, 51(8): 6442-6471.
- Elshafei Y, Sivapalan M, Tonts M, et al. 2014. A prototype framework for models of socio-hydrology: Identification of key feedback loops and parameterisation approach[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 18(6): 2141-2166.
- Elshafei Y, Tonts M, Sivapalan M, et al. 2016. Sensitivity of emergent sociohydrologic dynamics to internal system properties and external sociopolitical factors: Implications for water management[J]. Water Resources Research, 52(6): 4944-4966.
- Falkenmark M. 1997. Society's interaction with the water cycle: A conceptual framework for a more holistic approach[J]. Hydrological Sciences Journal, 42(4): 451-466.
- Fletcher T D, Andrieu H, Hamel P. 2013. Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art[J]. Advances in Water Resources, 51: 261-279.
- Grant S B, Saphores J-D, Feldman D L, et al. 2012. Taking the

- "waste" out of "wastewater" for human water security and ecosystem sustainability[J]. *Science*, 337: 681-686.
- Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, et al. 2008. Global change and the ecology of cities[J]. *Science*, 319: 756-760.
- Hall M J. 1984. *Urban hydrology*[M]. London, UK: Elsevier.
- Hallegatte S, Green C, Nicholls R J, et al. 2013. Future flood losses in major coastal cities[J]. *Nature Climate Change*, 3 (9): 802-806.
- Han S J, Tian F Q, Liu Y, et al. 2017. Socio-hydrological perspectives of the co-evolution of humans and groundwater in Cangzhou, North China Plain[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(7): 3619-3633.
- Han W S, Burian S J. 2009. Determining effective impervious area for urban hydrologic modeling[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 14(2): 111-120.
- IPCC. 2014. *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part B: Regional aspects*[R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Jha A K, Bloch R, Lamond J. 2012. *Cities and flooding: A guide to integrated urban flood risk management for the 21st century*[M]. Washington D C: World Bank Publications.
- Jiang Y, Zevenbergen C, Ma Y C. 2018. Urban pluvial flooding and stormwater management: A contemporary review of China's challenges and "sponge cities" strategy[J]. *Environmental Science & Policy*, 80: 132-143.
- Kandasamy J, Sountharajah D, Sivabalan P, et al. 2014. Socio-hydrologic drivers of the Pendulum Swing between agriculture development and environmental health: A case study from Murrumbidgee River Basin, Australia[J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 10(6): 7197-7233.
- Kug J-S, Ahn M-S. 2013. Impact of urbanization on recent temperature and precipitation trends in the Korean peninsula[J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 49(2): 151-159.
- Kuil L, Carr G, Viglione A, et al. 2016. Conceptualizing socio-hydrological drought processes: The case of the Maya collapse[J]. *Water Resources Research*, 52(8): 6222-6242.
- Lerner D N. 2002. Identifying and quantifying urban recharge: A review[J]. *Hydrogeology Journal*, 10(1): 143-152.
- Liu D, Tian F, Lin M, et al. 2015. A conceptual socio-hydrological model of the co-evolution of humans and water: Case study of the Tarim River basin, western China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(2): 1035-1054.
- Liu Y, Tian F, Hu H, et al. 2014. Socio-hydrologic perspectives of the co-evolution of humans and water in the Tarim River basin, Western China: The Taiji-Tire model[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(4): 1289-1303.
- Liu Y Z, Engel B A, Flanagan D C, et al. 2017. A review on effectiveness of best management practices in improving hydrology and water quality: Needs and opportunities[J]. *Science of the Total Environment*, 601-602: 580-593.
- Lu Z, Wei Y, Xiao H, et al. 2015. Evolution of the human-water relationships in Heihe River basin in the past 2000 years [J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 12 (1): 1059-1091.
- Milly P C D, Betancourt J, Falkenmark M, et al. 2008. Stationarity is dead: Whither water management[J]. *Science*, 319: 573-574.
- Minnig M, Moeck C, Radny D, et al. 2017. Impact of urbanization on groundwater recharge rates in Dübendorf, Switzerland[J]. *Journal of Hydrology*, doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.09.058. (in Press)
- Niemczynowicz J. 1999. Urban hydrology and water management - present and future challenges[J]. *Urban Water*, 1 (1): 1-14.
- O'Connell P E, O'Donnell G. 2013. Towards modelling flood protection investment as a coupled human and natural system[J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 10(6): 8279-8323.
- Ostrom E. 2009. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems[J]. *Science*, 325: 419-422.
- Peng J, Tian L, Liu Y X, et al. 2017. Ecosystem services response to urbanization in metropolitan areas: Thresholds identification[J]. *Science of the Total Environment*, 607-608: 706-714.
- Pumo D, Arnone E, Francipane A, et al. 2017. Potential implications of climate change and urbanization on watershed hydrology[J]. *Journal of Hydrology*, 554: 80-99.
- Rogers P. 2008. Facing the freshwater crisis[J]. *Scientific American*, 299(2): 46-53.
- Roobavannan M, Kandasamy J, Pande S, et al. 2017. Allocating environmental water and impact on basin unemployment: Role of a diversified economy[J]. *Ecological Economics*, 136: 178-188.
- Sarma A K, Singh V P, Kartha S A, et al. 2016. *Urban hydrology, watershed management and socio-economic aspects* [M]. Switzerland: Springer International Publishing.
- Schirmer M, Leschik S, Musolff A. 2013. Current research in urban hydrogeology - a review[J]. *Advances in Water Resources*, 51: 280-291.
- Schlüter M, Pahl-Wostl C. 2007. Mechanisms of resilience in common-pool resource management systems: An agent-based model of water use in a river basin[J]. *Ecology and*

- Society, 12(2): 375-386.
- Schueler T R, Fraley-McNeal L, Cappiella K. 2009. Is impervious cover still important? Review of recent research[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 14(4): 309-315.
- Scott C A, Vicuña S, Blanco-Gutiérrez I, et al. 2014. Irrigation efficiency and water-policy implications for river basin resilience[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(4): 1339-1348.
- Shang W X, Zheng H, Wang Z J, et al. 2015. Newspaper coverage of water issues in China from 1950 to 2000[J]. *Water Policy*, 17(4): 595-611.
- Shepherd J M. 2005. A review of current investigations of urban-induced rainfall and recommendations for the future [J]. *Earth Interactions*, 9(12): 1-27.
- Shepherd J M, Pierce H, Negri A J. 2002. Rainfall modification by major urban areas: Observations from spaceborne rain radar on the TRMM satellite[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 41(7): 689-701.
- Sivapalan M, Blöschl G. 2015. Time scale interactions and the coevolution of humans and water[J]. *Water Resources Research*, 51(9): 6988-7022.
- Sivapalan M, Konar M, Srinivasan V, et al. 2014. Socio-hydrology: Use-inspired water sustainability science for the Anthropocene[J]. *Earths Future*, 2(4): 225-230.
- Sivapalan M, Savenije H H G, Blöschl G. 2012. Socio-hydrology: A new science of people and water[J]. *Hydrological Processes*, 26(8): 1270-1276.
- Srinivasan V. 2015. Reimagining the past-use of counterfactual trajectories in socio-hydrological modelling: The case of Chennai, India[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(2): 785-801.
- Srinivasan V, Sanderson M, Garcia M, et al. 2017. Prediction in a socio-hydrological world[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 62(3): 338-345.
- Tedoldi D, Chebbo G, Pierlot D, et al. 2016. Impact of runoff infiltration on contaminant accumulation and transport in the soil/filter media of Sustainable Urban Drainage Systems: A literature review[J]. *Science of the Total Environment*, 569-570: 904-926.
- Troy T J, Konar M, Srinivasan V, et al. 2015. Moving sociohydrology forward: A synthesis across studies[J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 12(3): 3319-3348.
- United Nations. 2012. World urbanization prospects: The 2011 revision[R]. New York: UN-HABITAT.
- Van Emmerik T H M, Li Z, Sivapalan M, et al. 2014. Socio-hydrologic modeling to understand and mediate the competition for water between agriculture development and environmental health: Murrumbidgee River basin, Australia[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(10): 4239-4259.
- Viglione A, Di Baldassarre G, Brandimarte L, et al. 2014. Insights from socio-hydrology modelling on dealing with flood risk-roles of collective memory, risk-taking attitude and trust[J]. *Journal of Hydrology*, 518: 71-82.
- Walsh C J, Roy A H, Feminella J W, et al. 2005. The urban stream syndrome: Current knowledge and the search for a cure[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 24(3): 706-723.
- Wang J, Feng J M, Yan Z W. 2015. Potential sensitivity of warm season precipitation to urbanization extents: Modeling study in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration in China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(18): 9408-9425.
- Wang J L, Zhang R H, Wang Y C. 2012. Areal differences in diurnal variations in summer precipitation over Beijing metropolitan region[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 110(3): 395-408.
- Wang X Q, Wang Z F, Qi Y B, et al. 2009. Effect of urbanization on the winter precipitation distribution in Beijing area [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(2): 250-256.
- Wei J, Wei Y P, Western A, et al. 2015. Evolution of newspaper coverage of water issues in Australia during 1843-2011 [J]. *Ambio*, 44(4): 319-331.
- Wei J, Wei Y P, Western A. 2017. Evolution of the societal value of water resources for economic development versus environmental sustainability in Australia from 1843 to 2011 [J]. *Global Environmental Change*, 42: 82-92.
- Wenger S J, Roy A H, Jackson C R, et al. 2009. Twenty-six key research questions in urban stream ecology: An assessment of the state of the science[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 28(4): 1080-1098.
- Wutich A, White A C, White D D, et al. 2014. Hard paths, soft paths or no paths? Cross-cultural perceptions of water solutions[J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 10(6): 7809-7835.
- Yan Z W, Wang J, Xia J J, et al. 2016. Review of recent studies of the climatic effects of urbanization in China[J]. *Advances in Climate Change Research*, 7(3): 154-168.
- Zhang K, Chui T F M. 2018. A comprehensive review of spatial allocation of LID-BMP-GI practices: Strategies and optimization tools[J]. *Science of the Total Environment*, 621: 915-929.
- Zhong S, Qian Y, Zhao C, et al. 2015. A case study of urbanization impact on summer precipitation in the greater Beijing metropolitan area: Urban heat island versus aerosol effects [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120

- (20): 10903-10914.
- Zhong S, Yang X-Q. 2015. Ensemble simulations of the urban effect on a summer rainfall event in the Great Beijing Metropolitan Area[J]. *Atmospheric Research*, 153: 318-334.
- Zlinszky A, Timár G. 2013. Historic maps as a data source for socio-hydrology: A case study of the Lake Balaton wetland system, Hungary[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(11): 4589-4606.

## A review on socio-hydrology and urban hydrology

TIAN Fuqiang<sup>1</sup>, CHENG Tao<sup>2,3</sup>, LU You<sup>1</sup>, XU Zongxue<sup>2,3</sup>

(1. Department of Hydraulic Engineering, University State Key Laboratory of Hydro-science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Beijing Key Laboratory for Urban Hydrology Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China)

**Abstract:** The impact of human activities on hydrological processes becomes remarkable in Anthropocene, and many problems go beyond the scope of traditional hydrology. As two important sub-disciplines in hydrology that focus on human interventions, socio-hydrology and urban hydrology have attracted increasingly more attention. With the strengthened interactions between human and water, hydrological and human systems are becoming tightly coupled, and socio-hydrology emerged to investigate the feedbacks between the two systems and their coevolution processes. Cities are places where human activities and the natural system interact most intensively, and the hydrological processes in urban regions are becoming more complicated, therefore urban hydrology has been developed. The two disciplines are of great importance for the medium- and long-term planning and management of water resources and related socioeconomic development, as well as for guiding urban planning and construction, enhancing urban water security, and improving urban water environment. This article reviewed the patterns of development and characteristics of research of the two disciplines. It also analyzed the research status and development trends, including the study of social factors, case study in representative basins, comparative study of different cases, and model simulation in socio-hydrology, as well as the impact of urbanization on precipitation and flood, and the response relationship between urbanization and environment in urban hydrology. Key study areas in the two disciplines are discussed. For socio-hydrology, the key study areas include constitutive relation study, comparative socio-hydrology, and interdisciplinary study while the key study areas of urban hydrology include the mechanism and simulation of urbanization impact on hydrological processes, monitoring and forecasting technology of urban rainstorm and flood, and urban rain- flood management and resource utilization technology.

**Key words:** socio-hydrology; urban hydrology; human impact; feedbacks between water and human systems; urbanization