

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2016.04.003

# 我国海绵城市建设中的水科学难题

左其亭<sup>1,2</sup>

(1. 郑州大学水利与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学水科学研究中心, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 在总结我国海绵城市建设实践和相关研究成果的基础上, 分析海绵城市建设提出的背景和承载的期望以及可能存在的问题, 从水科学学科体系的 10 个方面(水文学、水资源、水环境、水安全、水工程、水经济、水法律、水文化、水信息、水教育), 阐述水科学在海绵城市建设中的应用和海绵城市建设中可能遇到的 6 方面水科学难题: 海绵城市建设水文效应与水系统模型、水资源高效利用机理及方案优选、面源污染物通过土壤渗虑消减机理及效应、“渗、蓄、滞”作用机理与城市雨洪计算、水安全风险管控及适应机制、水管理体系研究, 并初步提出这些难题的解决途径, 旨在为海绵城市建设的研究和实施提供参考。

**关键词:** 海绵城市; 海绵城市建设; 水科学; 水系统

中图分类号: TV213.4      文献标志码: A      文章编号: 1004-6933(2016)04-0021-06

## Water science issues in sponge city construction

ZUO Qiting<sup>1,2</sup>

(1. School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;  
2. Center for Water Science Research, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Based on summarizing the practice and related research results regarding sponge city construction in China, we analyze the background, expectations, and possible problems regarding the construction of sponge cities, and elaborate on the application of water science to the construction of sponge cities according to the various water science disciplines, including hydrology, water resources, water environment, water security, water engineering, water economy, water law, water culture, water information, and water education. We also put forward six aspects of water science issues probably related to sponge city construction, which involve hydrological effects and water system models in sponge city construction, mechanisms and scheme optimization for effective utilization of water resources, the reduction mechanisms and effects of non-point source pollution through soil percolation, the infiltration-storage-stagnation interaction mechanism and design and calculation of urban rainfall floods, water security risk control and adaptation mechanisms, and water management system research. In addition, we propose solutions to these issues, in order to provide references for the research and implementation of sponge city construction.

**Key words:** sponge city; sponge city construction; water science; water system

快速城市化带来了一系列问题, 产生了环境污染、水旱灾害频发、生态系统退化等资源与环境问题。如何采取措施来减小快速城市化对资源与环境的影响, 20 世纪 90 年代国外提出了“低影响开发”(low impact development, LID)。针对城市建设改变

了原先的陆面系统, 水循环路径发生较大的变化, 雨水下渗量减少, 地表径流增加, 洪水洪量增加, 洪峰形成时间缩短, 频繁出现“城市看海”现象, 我国提出了海绵城市建设, 即把城市建成像“海绵”一样的区域, 下雨时能及时吸水、蓄水、渗水, 雨期过后又能

基金项目: 国家自然科学基金(51279183); 河南省高校科技创新团队支持计划(13IRTSTHN030); 郑州大学重大科技项目培育基金(2015ZDPY011)

作者简介: 左其亭(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: zuoqiting@163.cn

将蓄存的水“释放”并加以利用,增加下渗水量、减少洪量、延迟洪峰形成时间,有利于城市雨水利用、地下水补给和防洪除涝。2013年12月12日,习近平总书记讲话中强调建设海绵城市之后,我国很快出台了《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》<sup>[1]</sup>,接着在2015年10月国务院办公厅印发了《关于推进海绵城市建设的指导意见》,我国掀起了海绵城市建设的热潮。

我国学术界关于海绵城市建设的研究是从近几年开始的。笔者于2016年5月20日从中国知网上查阅,以“海绵城市”为题目的文献,2011年只有一篇文章基于“生态海绵城市”的相关研究<sup>[2]</sup>,2012年也只有一篇文章,提出构建“城市绿色海绵”<sup>[3]</sup>,2013年只在报纸上一篇报道中提到“海绵城市值得期待”<sup>[4]</sup>。到2014年文献上升到30多篇,但多数还是报纸上的新闻报道,学术性研究成果仍较少。到2015年迅速上升到750多篇,如,鞠茂森<sup>[5]</sup>对海绵城市建设理念、技术和政策问题的理论分析和讨论,张亚梅等<sup>[6]</sup>对海绵城市建设与城市水土保持的分析和研究,车伍等<sup>[7-10]</sup>对海绵城市建设指南的多个关键内容进行了深入的解读和分析;廖朝轩等<sup>[11]</sup>研究了国外雨水管理对我国海绵城市建设的启示,崔广柏等<sup>[12]</sup>系统总结了海绵城市建设的研究进展,并探讨了关键问题。从这些文献来看,对海绵城市概念、理念、某些具体做法的探讨较多,海绵城市建设的许多问题仍有待深入研究。

海绵城市建设的根本点是“水”,是在水上做文章。因此,研究海绵城市的水科学问题是很重要的。笔者基于水科学的全局角度,阐述水科学各个分支学科在海绵城市建设中应用的必要性、可行性,分析海绵城市建设中可能遇到的水科学难题,并提出问题解决途径,目的是想说明在海绵城市建设中应从水科学全局出发,系统考虑,在看到海绵城市好处的同时,也要看到其存在的问题,在建设海绵城市中加强对水科学问题的深入研究。

## 1 我国海绵城市建设提出的背景与承载的期望

### 1.1 提出的背景

a. 城市扩张导致城市洪涝灾害问题越来越突出,建设海绵城市成为破解这一困境的选择。在国外20世纪90年代提出的LID理念,其最初的出发点或目的是应对城市暴雨和面源污染。随着城市化的发展,城市规模越来越大,带来的城市洪水问题越来越突出,“暴雨一来,城市看海”现象屡见不鲜。也就是在这一背景下,人们把目光聚焦到海绵城市

建设。至于海绵城市建设是否能完全解决城市洪水问题,还需不断探索。

b. 为了尽量减少城市建设对自然水系统的影响,建设具有“水系统自然积存、自然渗透、自然净化”功能的海绵城市是出路。自古以来,城市都是人类集聚区,也是人类活动最强烈的地区,对地表下垫面甚至地下空间的改造都很强烈。特别是现代城市建设,对地表的占用和改造、对地下空间的挖掘与利用,都与日俱增,这样就在很大程度上对自然水系统产生影响。为了追求近自然的目标,按照开发前的水系统功能来引导城市建设,这就是海绵城市建设的精髓。

c. 城市面源污染集中且严重,为了治理城市面源污染,保护水环境,需要先进的治理理念,其中海绵城市建设是途径之一。海绵城市建设的思路是,从地表、地下,从源头、过程、末端,从规划、设计、建设、管理,从建筑、小区、道路、广场、公园、绿地、用水、排水全覆盖,系统治理城市水系统,包括治理面源污染,保护地表、地下水环境。这既是环境保护的需要,也是城市生态文明建设的需要。

### 1.2 承载的期望

a. 提高城市防洪能力。希望城市像“海绵”一样,将雨水下渗、滞蓄、径流外排,从而降低洪峰流量,延迟洪峰到达时间,提高防洪能力。

b. 解决面源污染问题。通过生态系统建设,综合运用物理、生物和生态作用,在“海绵体”下渗、滞蓄的过程中,降解污染物,起到净化水质的作用。

c. 回归自然水功能。建设具有“水系统自然积存、自然渗透、自然净化功能”的海绵城市,通过人工措施来弥补城市区高强度人类活动带来的水系统功能的改变,使水系统回归自然水功能。

## 2 水科学体系及其在海绵城市建设中的应用

### 2.1 水科学体系介绍

“水科学”是最近20年来出现频率很高的一个词,但对水科学一词的界定和认识存在很多观点,也有很多文献进行讨论,文献[13]对水科学研究范畴进行了一些初步梳理和评述,定义了水科学的概念及研究范畴,总结了水科学体系包括相互交叉的10个方面,即水文学、水资源、水环境、水安全、水工程、水经济、水法律、水文化、水信息、水教育。此外,为了系统总结这10个方面的水科学研究进展,笔者主持的撰写团队拟两年发布一本水科学研究进展报告,其中在文献[14-15]中已对我国2011—2012年、2013—2014年的水科学研究状况进行了总结。

## 2.2 水科学体系在海绵城市建设中的应用

笔者根据对水科学 10 个方面的理解,阐述水科学在海绵城市建设中的应用,见图 1。

**a. 水文学。**海绵城市建设的根本点是“水”,必然涉及水循环问题的研究,因此加强城市水文学研究非常必要,如研究城市高强度人类活动区水循环机理和模型、城市化水文效应、城市水文分析与计算、洪水计算、城市尺度高精度水文预报、生态水文过程和模型等。

**b. 水资源。**海绵城市建设的重要目标之一是解决城市水资源开发、利用和保护问题,涉及水资源的高效利用、有效保护等基础科学问题,因此应高度重视城市水资源的研究工作,如研究海绵城市建设引起的水资源变化规律与水系统模型、水资源高效利用途径、非常规水利用、最严格水资源管理、人水和谐调控、水资源优化配置等。

**c. 水环境。**海绵城市建设的重要目标之一是解决城市面源污染问题。保护水环境,涉及高强度人类活动区水污染机理、水质运移规律和模拟、水污染处理、水生态修复和保护等,因此应高度重视城市水环境的研究工作,如研究海绵城市建设引起的水环境变化机理与水质模型、海绵城市建设的水环境效应、水环境调查和评价、污染物总量控制及其分配、水污染防治、水生态保护与修复、生态需水量计

算与保障等。

**d. 水安全。**海绵城市建设不能危及水安全,包括水资源安全、水环境安全、水生态安全、水工程安全、供水保障安全、洪涝防御安全,而应该在一定程度上提升城市水安全保障能力,因此应高度重视城市水安全的研究工作,如研究城市洪水、干旱、污染的危害机理及安全调控、水安全保障能力提升建设等。

**e. 水工程。**海绵城市建设包括一系列大规模的工程建设,其中包括水工程建设项目,涉及水工程规划、设计、施工、管理的许多方面,因此应高度重视城市水工程的研究工作,如与海绵城市建设相联系的河流治理工程、雨水收集与利用工程、污水收集处理和回用工程、河湖水系连通工程等的方案论证、工程建设顺序、工程调度、运行管理等。

**f. 水经济。**海绵城市建设必然要涉及大规模的建设投资、经济分析、财务管理等,因此应高度重视城市水经济的研究工作。海绵城市建设中的经济学问题有:水资源-经济-社会-生态环境综合效益的评估、投融资途径、财务型投入产出模型、经济运行方式和模式、水价水权及水市场等。

**g. 水法律。**海绵城市建设是一项制度性、政策性很强的工作,涉及很多单位和个人,特别是在目前依法治国施政理念下,需要有一套新的城市建设法律作保障,因此应高度重视城市水法律的研究工作,

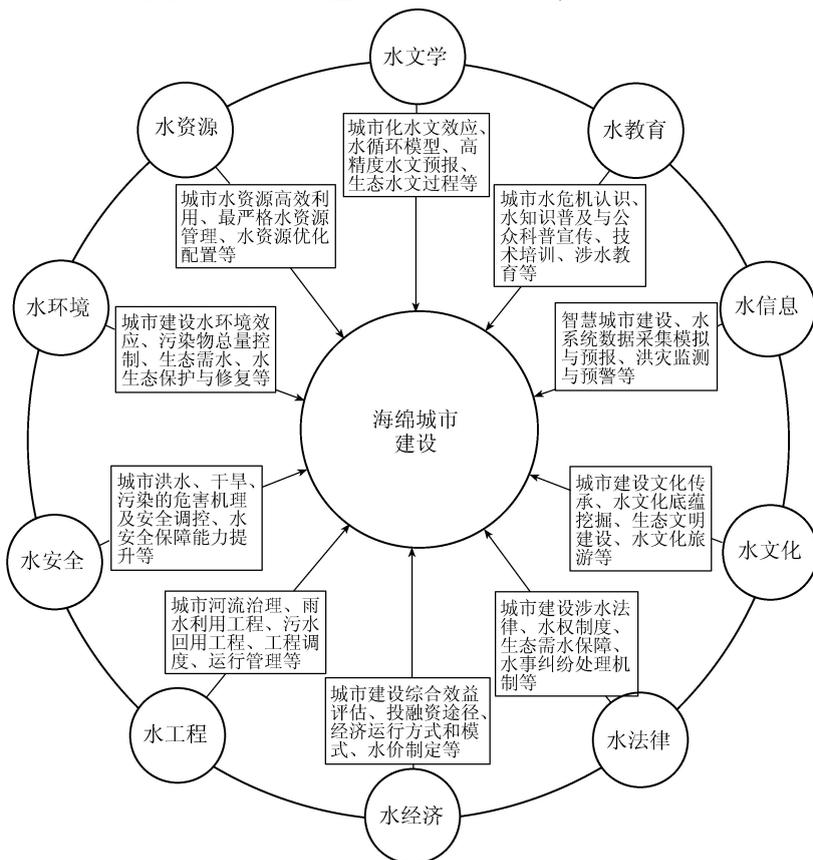


图 1 水科学在海绵城市建设中的应用框架

如水权制度、生态需水保障制度、涉水生态补偿机制、水事纠纷处理机制等。

**h. 水文化。**海绵城市建设是对城市文化、水文化的传承和创新,是生态文明建设的重要组成部分,涉及水文化的挖掘、传承、保护和建设,因此应高度重视城市水文化的研究工作,如海绵城市建设文化传承、工程建设文化底蕴挖掘、水文化旅游点开发等。

**i. 水信息。**海绵城市建设需要大量信息、海量数据,必须基于信息系统建设、智慧城市建设,以庞大的系统管理平台为支撑,因此高度重视城市水信息的研究工作,开展水系统数据采集模拟与预报、洪灾监测与预警等方面研究。

**j. 水教育。**海绵城市建设涉及城市的每一个人,因此应高度重视城市水教育的研究工作,开展城市水情教育,包括水危机认识、技术培训、涉水宣传等。

### 3 海绵城市建设中的水科学难题及研究途径

海绵城市建设的根本点是“水”,期望通过海绵城市建设解决城市洪水、面源污染问题,回归自然水功能,可能会遇到一些水科学难题。

#### 3.1 海绵城市建设水文效应与水系统模型

城市人工改造力度巨大,可以说,几乎城市区范围内的自然系统完全控制在人为活动管控之下,再加上目前推行的海绵城市建设,自然水循环路径改变更大。这些人工改造导致水文过程极其复杂,必须把人类活动与水循环过程完全耦合一起进行研究。海绵城市建设涉及许多具体小单元(如房屋顶、集雨绿地),只能采用小尺度、微观尺度进行模拟计算。以往的大尺度、自然水系统演变过程模拟模型的应用大大受到限制,甚至不能使用,因此需要发展小尺度或微观尺度的水系统模型。目前这方面研究显然不足。

从这一难题可以看出,核心点是由于人类活动的加剧、研究区人工化、研究单元小尺度化,因此,要科学揭示海绵城市建设水文效应,就必须更加细致、更加注重微观水循环变化和机理。研究途径有两大方向:一是加强城市水文学实验与机理研究;二是加强小尺度或微观尺度水系统模拟研究。无论是实验研究还是模拟研究,都必须特别关注各种具体的人类活动及其对水系统方方面面的影响、人类活动与水循环交织在一起的水系统耦合过程。构建的水系统模型应该是一个分布式的、人类活动过程与水循环过程耦合一起并考虑小单元水力学方程的复杂、精细、小尺度或微观尺度模型。模型研究需要基于微观尺度水文实验获得相关方程和参数,需要基于智慧城市的大数据和系统平台,需要定量表达高强度人类活

动下的水动力学方程。这一难题主要涉及水文学范畴,也部分涉及水工程、水经济、水信息范畴。

#### 3.2 水资源高效利用机理及方案优选

在说明海绵城市的优点时,人们会用一些常识性的描述来说明海绵城市建设促进水资源高效利用,如,由于城市化导致硬化地面增加,雨水下渗减少,易形成径流流出城区;在建设海绵城市后,增加了雨水下渗,把雨水留下来,既增加了土壤水、地下水的补给量,又减少形成城市雨洪的风险。而实际上并非这么简单,不同地区、不同尺度,可能会得出不同的结论。如,有些地区地下水埋深浅,雨水渗不下去;即使渗下去,也会导致地下水位过高,并不适合增加雨水下渗。对于适宜建海绵城市的地区,情况也不那么简单,可以这样定性分析:雨水留下来,增加了土壤水补给量和低洼处水面面积,带来蒸发量增加,地表径流和地下径流总量减少。为了说明水资源高效利用问题,需要对海绵城市建设带来水资源量的变化和利用效率进行研究,在此基础上论证水资源高效开发利用方案。而目前关于这方面的研究仍不足。

从这一难题可以看出,核心点是海绵城市建设带来的水资源转化关系更加复杂。研究这一难题有两个途径:一是基于城市水文学实验和小尺度或微观尺度水系统模型,研究水资源高效利用机理;二是基于小尺度或微观尺度水系统模型,构建水资源高效利用方案优选模型,研究水资源高效利用途径。需要攻克的关键技术是在复杂的水系统和丰富多彩的人类活动作用下水资源高效利用方案优选技术。这一难题主要涉及水资源、水文学范畴,也部分涉及水工程、水经济、水信息范畴。

#### 3.3 面源污染物通过土壤渗虑消减机理及效应

海绵城市对雨水的净化功能包括土壤渗虑净化、人工湿地净化、生物处理。后两个功能在海绵城市建设之前都存在,人工湿地有净化水质功能,可以通过生物处理技术进行污染物处理。而第一个功能“土壤渗虑净化”效果如何,机理不清。有些污染物,如有机质,可能会被土壤中的微生物所降解;有些污染物,如重金属,不可能被降解。如果污染物在下渗过程中不被土壤降解,就没有减少污染物总量,只是把污染物转移到土壤或渗入地下水中,并没有起到净化的作用,而且使未来土壤或地下水污染治理更加困难。因此,在海绵城市建设中,首先要摸清楚面源污染物通过土壤渗虑消减的机理以及土壤渗虑和地下水水质变化的效应,在此基础上研究土壤、地下水污染治理问题。而目前关于这方面的研究不够深入。

从这一难题可以看出,核心点是由于海绵城市建设导致雨水下渗增加,带动面源污染物通过土壤下渗,需要分析面源污染物通过土壤渗滤是否消减的机理。研究这一难题需要从3方面进行研究:①通过大量的实验和分析,研究面源污染物通过土壤渗滤的过程和变化机理;②海绵城市建设带来面源污染物通过土壤渗滤变化的定量模拟,分析海绵城市建设前后污染物总量的变化大小;③如果存在土壤和地下水被污染的风险,必须寻找应对风险的治理措施。实际上,目前对这一过程的机理认识还不清晰,定量模拟的难度仍然很大,对土壤和地下水污染的治理举步维艰。这一难题主要涉及水环境研究范畴,也部分涉及水文学、水资源研究范畴。

### 3.4 “渗、蓄、滞”作用机理与城市雨洪计算

海绵城市具有显著的“渗、蓄、滞”作用。但是,城市雨洪设计到底如何考虑海绵城市的“渗、蓄、滞”作用,或者说,“渗、蓄、滞”作用在城市雨洪中起多大作用,目前研究并不成熟。水库在防洪中的作用有“蓄洪、滞洪、错峰”作用,水库的防洪调节计算已有几十年的研究积累,有比较成熟的计算方法。但具有“渗、蓄、滞”作用的海绵城市如何进行防洪调节计算,还是一个难题。

从这一难题可以看出,核心点是城市雨洪计算如何考虑海绵城市的“渗、蓄、滞”作用。研究这一难题需要深入研究城市雨洪计算方法,特别是借鉴水库防洪调节计算方法,并在实践中不断总结和完善,形成城市雨洪计算新的思路和方法。笔者认为有两种研究思路:一是简单化的经验计算方法的类似于水库防洪调节计算方法;二是基于水系统模型和洪水演进计算开发大系统分析计算软件,类似于大系统模拟计算方法。这一难题主要涉及水文学范畴,也部分涉及水安全范畴。

### 3.5 水安全风险管控及适应机制

一般来说,水安全包括水资源安全、水环境安全、水生态安全、水工程安全、供水保障安全、洪涝防御安全。海绵城市建设是一个系统工程,这几方面的水安全问题都涉及或都有可能存在。海绵城市建设的原意是通过一系列城市建设来保障水安全,但是不是都朝着安全的方向发展,还需要进一步分析。有些因素之间本身就存在比较大的矛盾,顾及一方面就有危及另一方面的可能性存在,如,为了加强供水保障安全,可能会采取一系列保水、储水措施,而这正是洪涝防御安全的弱点。怎么协调这二者的矛盾,需要研究,需要智慧。洪水本身是一个自然水文现象,人类应学会与洪水和谐相处,不要一提洪水就想“治之”。在现有技术水平、生产力水平和财政投入条件下,不一定按照一个标准去规划城市防洪建设,不一定完全消除

“城市看海”现象,可以允许部分城市部分区域“城市看海”,就像预留一定的“蓄滞洪区”。此外,城市水资源安全或供水保障安全也不是城市集水区完全能解决的。从全世界的城市用水情况来看,绝大多数城市供水来源于过境水或外调水,因此,通过海绵城市建设来解决水安全问题是比较困难的,存在比较大的风险。如何管控这一风险以及如何适应城市化建设,目前有关研究还比较薄弱。

从这一难题可以看出,核心点是如何揭示水安全风险机理,科学认识水安全问题,从而进行水安全风险管控。研究途径有3方面:①通过大量的实践,揭示水安全风险机理,系统分析水安全风险规避思路,实现人与自然和谐相处,实现多因素和谐调控;②海绵城市建设涉及水安全的方方面面,需要建立一个覆盖多方面的城市水安全预警系统,该系统是城市水管理系统的一个子系统,也是智慧城市建设的重要部分;③研究适应城市化发展的水安全风险管控机制。随着城市化加剧、海绵城市的建设,水安全风险因素增多,管控难度加大,对预警系统的要求大大提高。这一难题主要涉及水安全范畴,也部分涉及水文学、水资源、水环境、水工程、水法律、水信息范畴。

### 3.6 海绵城市水管理体系

海绵城市建设的根本点是“水”,解决水问题不仅仅靠工程建设“硬件”,还要依靠科学管理“软件”。海绵城市水系统是一个复杂的大系统,需要构建完善的水管理体系。首先,水管理涉及经济活动、宣传教育、文化传承、政策法律等许多方面,需要系统化管理、标准化管理、信息化管理、智能化管理。其次,需要建立一个庞大的水管理系统,集“水循环模拟、水资源高效利用、水环境保护、水安全保障、水工程科学规划、水市场建设、水法律政策制度建设、水文化传承建设”为一体<sup>[16]</sup>,涉及水管理的方方面面,是智慧城市建设的重要部分。无论从实践上,还是从技术上,目前关于这方面的研究和应用还远达不到需求。

从这一难题可以看出,核心点是由于水系统的复杂性,水管理涉及方方面面,需要加强涉水多学科的交叉研究。研究途径有两方面:①加强水管理体系的研究和建设,构建包括水工程投资、经济分析管理、文化宣传、全民素质教育、政策法律保障等全方位的水管理体系;②加强“智慧水利”建设,构建基于通讯技术和虚拟技术的智能水管理系统,实现管理信息化、决策智能化,达到优化决策、精准调配、高效管理、自动控制、主动服务的目标,是智慧水利的“决策与服务体系”,涉及水利工程建设与维护、防洪抗旱减灾、供水分配、节水、水环境保护、水安全保障、水权交易、水法律政策制度、水文化传承等各方面需求<sup>[16]</sup>。建设的水管理系统是智慧城市建设的

重要部分。这一难题主要涉及水信息、水经济、水法律、水文化、水教育范畴,也部分涉及水文学、水资源、水环境、水安全、水工程范畴,几乎覆盖水科学10个学科方向。也就是说,要解决水管理问题,需要水科学多方向共同努力。

## 4 结 语

笔者从水科学如何支持海绵城市建设的视角,分析海绵城市建设中可能存在的难题,并从可能性方面提出解决难题的途径:海绵城市建设是一个庞大的系统工程,需要系统分析、统筹规划、科学建设;海绵城市建设的根本点是“水”,涉及水科学的方方面面,应从水科学多方向交叉研究,促进海绵城市建设中涉水问题的解决。

本文提出海绵城市建设中水科学难题的目的,不是有意去否定海绵城市,而是希望更多地去研究海绵城市建设中可能存在的水科学问题,更好地支撑海绵城市建设。

### 参考文献:

[1] 住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南:低影响开发雨水系统构建(试行)[R]. 北京:住房和城乡建设部, 2014.

[2] 董淑秋, 韩志刚. 基于“生态海绵城市”构建的雨水利用规划研究[J]. 城市发展研究, 2011(12): 37-41. (DONG Shuqiu, HAN Zhigang. Study on planning an “eco-sponge city” for rainwater utilization [J]. Urban Studies, 2011(12): 37-41. (in Chinese))

[3] 莫琳, 俞孔坚. 构建城市绿色海绵:生态雨洪调蓄系统规划研究[J]. 城市发展研究, 2012(5): 130-134. (MO Lin, YU Kongjian. Structure the urban green sponge: study on planning an ecological stormwater regulation system [J]. Urban Studies, 2012(5): 130-134. (in Chinese))

[4] 孙曙峦. “海绵城市”值得期待[N]. 中国环境报, 2013-11-06(02).

[5] 鞠茂森. 关于海绵城市建设理念、技术和政策问题的思考[J]. 水利发展研究, 2015(3): 7-10. (JU Maosen. Thinking about idea, technology and policy of spongy city construction [J]. Water Resources Development Research, 2015(3): 7-10. (in Chinese))

[6] 张亚梅, 柳长顺, 齐实. 海绵城市建设与城市水土保持[J]. 水利发展研究, 2015(2): 20-23. (ZHANG Yamei, LIU Changshun, QI Shi. Spongy city construction and city soil and water conservation [J]. Water Resources Development Research, 2015(2): 20-23. (in Chinese))

[7] 车伍, 赵杨, 李俊奇, 等. 海绵城市建设指南解读之基本概念与综合目标[J]. 中国给水排水, 2015(8): 1-5. (CHE Wu, ZHAO Yang, LI Junqi, et al. Explanation of sponge city development technical guide: basic concepts

and comprehensive goals [J]. China Water & Wastewater, 2015(8): 1-5. (in Chinese))

[8] 李俊奇, 王文亮, 车伍, 等. 海绵城市建设指南解读之降雨径流总量控制目标区域划分[J]. 中国给水排水, 2015(8): 6-12. (LI Junqi, WANG Wenliang, CHE Wu, et al. Explanation of sponge city development technical guide: regional division for total rainfall runoff volume capture target [J]. China Water & Wastewater, 2015(8): 6-12. (in Chinese))

[9] 车伍, 武彦杰, 杨正, 等. 海绵城市建设指南解读之城市雨洪调蓄系统的合理构建[J]. 中国给水排水, 2015(8): 13-17, 23. (CHE Wu, WU Yanjie, YANG Zheng, et al. Explanation of sponge city development technical guide: rational building of urban stormwater detention and retention system [J]. China Water & Wastewater, 2015(8): 13-17, 23. (in Chinese))

[10] 王文亮, 李俊奇, 车伍, 等. 海绵城市建设指南解读之城市径流总量控制指标[J]. 中国给水排水, 2015(8): 18-23. (WANG Wenliang, LI Junqi, CHE Wu, et al. Explanation of sponge city development technical guide: planning index for urban total runoff volume capture [J]. China Water & Wastewater, 2015(8): 18-23. (in Chinese))

[11] 廖朝轩, 高爱国, 黄恩浩. 国外雨水管理对我国海绵城市建设的启示[J]. 水资源保护, 2016, 32(1): 42-45, 50. (LIAW Chaohsien, GAO Aiguo, HUANG Enhao. Enlightenment of rainwater management in foreign countries to sponge city construction in China [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(1): 42-45, 50. (in Chinese))

[12] 崔广柏, 张其成, 湛忠宇, 等. 海绵城市建设研究进展与若干问题探讨[J]. 水资源保护, 2016, 32(2): 1-4. (CUI Guangbo, ZHANG Qicheng, ZHAN Zhongyu, et al. Research progress and discussion of sponge city construction [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2): 1-4. (in Chinese))

[13] 左其亭. 水科学的学科体系及研究框架探讨[J]. 南水北调与水利科技, 2011(1): 113-117, 129. (ZUO Qiting. Discussion on discipline system and research framework of water science [J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2011(1): 113-117, 129. (in Chinese))

[14] 左其亭. 中国水科学研究进展报告 2011—2012 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2013.

[15] 左其亭. 中国水科学研究进展报告 2013—2014 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2015.

[16] 左其亭. 中国水利发展阶段及未来“水利 4.0”战略构想[J]. 水电能源科学, 2015, 33(4): 1-5. (ZUO Qiting. Development stage of Chinese water conservancy and strategic concept of future “water conservancy 4.0” [J]. Water Resources and Power, 2015, 33(4): 1-5. (in Chinese))

(收稿日期:2016-05-25 编辑:彭桃英)