海绵城市的建设与评估概念模型构建研究

Research on Conceptual Modeling of the Construction and Evaluation of Sponge City

高峰 蔺欢欢

Gao Feng, Lin Huanhuan

摘要: 为促进和完善海绵城市建设的基础理论体系,在梳理海绵城市提出的国内外背景及其理论内涵分析的基础上剖析海绵城市塑造机理,从承受干扰能力、恢复到稳定状态需要的时间或速率与自适应的管理能力三个维度构建海绵城市弹性塑造机理概念模型,并对其进行扼要阐释。进一步从宏观、中观、微观三个层面构建海绵城市塑造方法论体系。在论述与比较现阶段海绵城市评价指标体系与评价方法的基础上,从径流排出量出发,构建海绵城市水文特征定量评估概念模型及其应用技术路线。研究结果可为海绵城市的研究与实践提供新的思路和方法。

Abstract: In order to promote and optimize the basic theory system of the construction of sponge city, the domestic and international developing background of sponge city are analyzed, and its theoretical connotation is resolved, based on this, the shaping mechanism of sponge city is argued. And then, the conceptual model of shaping mechanism of sponge city is constructed from three dimensions, which are the ability to withstand interference, the time or rate of returning to a steady state, and adaptive management capability. This paper then makes a brief explanation on this conceptual model. Furthermore, shaping methodology system of the sponge city is analyzed from three levels, namely macro-level, meso-level and micro-level. Finally, on the basis of the discussion and comparison of the evaluation index system and evaluation method of sponge city, the paper builds the conceptual of quantitative evaluation model of the hydrological characteristics of sponge city and its applied technical route from the point of view of run-off emission. The research results provide a new idea and method for the research and practice of the sponge city.

关键词: 海绵城市; 水弹性功能; 概念模型; 水文定量评估

Keywords: Sponge City; Water Elastic Function; Conceptual Model; Hydrological Quantitative Evaluation

中南大学研究生创新基金项目 (2017zzts627, 2017zzts814)

作者: 高峰, 中南大学资源与安全工程学院, 副教授, 研究生导师
蔺欢欢, 中南大学资源与安全工程学院, 硕士研究生。
linhuanhuancsu@126.com

引言

“城中看海”“东方威尼斯”“小区孤岛”等城市内涝灾害与环境问题日益突出,传统城市规划与设计理论面临挑战,新概念如“海绵城市”受到广泛关注。2012 低碳城市与区域发展科技论坛首次提出海绵城市概念,2014 年 10 月住建部印发《海绵城市建设技术指南》(下称《建设指南》)明确给出了海绵城市的概念及内涵解析。随后《关于推进海绵城市建设的指导意见》《海绵城市专项规划编制暂行规定》颁布,海绵城市建设进入推进专项规划编制、按程序报批的积极部署中。海绵城市的概念在官方文件中被明确提出,意味着生态雨洪管理思想和技术将从学界走向管理层面,并在实践中得到有力推广。

学术界对海绵城市建设已有初步研究,俞孔坚指出我国仍未摆脱“工程性措施”治水的本质,认为海绵城市科学内涵是从人适应水出发,构建以景观为载体的跨尺度水生态基础设施,以生态途径解决城乡水问题^[1];张纯等分析了美国城市精明增长(Smart Growth)策略下的暴雨最优管理经验及启示^[2];仇保兴指出海绵城市建设的本质是解决城镇化与资源环境的协调和谐,将快排式的传统雨洪管理模式转变为“渗、滞、蓄、净、用、排”新模式^[3];车伍等分析当前海绵城市建设的困境与误区,并针对性地提出建设的关键环节与技术、管理措施^[4];叶晓东、姜勇等以某一城市为例分别从海绵城市建设规划编制、实施途径及建设路径探索不同区域海绵城市建设^[5,6]。赵宏宇等和翟俊利用公共空间的巧妙构思和雨洪调蓄的弹性策略,交互利用城市土地资源,构建雨水管理基础设施与景观和生态高效复合的生态城市雨洪安全格局^[7,8]。上述研究在海绵城市建设的起步阶段具有一定的指导和借鉴作用,但主要集中于应用层面,在基础理论研究方面成果偏少,如在海绵城市塑造机理、塑造方法等基础性问题方面的研究还很缺乏,这很大程度上阻碍了海绵城市建设的研究与发展。

鉴于此,在综述海绵城市建设研究与实践的基础上,梳理海

绵城市国内外提出背景,提炼并解析其内涵。论述海绵城市塑造机理与塑造方法,构建塑造机理概念模型和评估模型,并对未来研究进行展望,以期完善海绵城市理论基础。

1 海绵城市的提出与内涵解读

海绵城市是具有国际语境的都市雨水管理理念的本土化表达,是我国面对“灰色发展”带来的城市环境与安全问题时,吸取和借鉴国际城市建设发展理念与技术的成果。在国外,生态雨洪的概念受到越来越多的关注^[9,11],发达国家已进行长期研究并取得系列成果,提出多种先进生态雨洪管理理念与技术^[12,14](表1)。

美国、澳大利亚等国家提出的城市雨洪管理理念与技术(低影响开发、水敏性城市设计、水资源综合管理等),已被实践证明在城市规划与设计取得了很好的应用成果,可为海绵城市的建设提供借鉴。在国内,传统的灰色发展理念^①(如缺乏完整的城市竖向规划、城市排水规划欠远景考虑、城市建设用地超负荷开发、地表设施缺乏渗透功能等)使城市发展面临巨大的环境、安全与资源压力,城市内涝、水资源短缺、水环境污染与生态环境破坏等一系列问题日益凸显。上述严峻的安全与环境问题“倒逼”我国城市发展理念转变,在吸收借鉴发达国家城市发展经验(包括绿色可持续发展理念、技术及相关政策制度)的基础上,建设具有中国特色的海绵城市。在此基础上归纳解析海绵城市的提出背景与内涵^[1,3,12](图1)。

海绵城市是指城市能够像海绵一样在适应环境变化和应对自然灾害等方面具有良好的“弹性”,下雨时吸水、蓄水、

渗水、净水,需要时将储存的水“释放”并加以利用,最大限度地维持或恢复城市开发前的自然水文循环。这是一种形象的表述,从字面上看,它是指我们在城市建设过程中利用海绵吸水、保水、释水的水分特征以及回弹、压缩、恢复等力学特征,构建像海绵一样具有对水资源伸缩自如的城市水生态循环系统或城市雨水综合利用系统;从内涵来看,它是从人适应水出发,以低影响开发为核心指导思想,以水生态、水环境、水安全、水资源为战略目标,通过灰色与绿色基础设施相结合,实现城市可持续发展的一种开发模式,不能简单地理解为仅仅是为了雨水集蓄回用,或者是水利防洪或排水防涝。

2 海绵城市塑造机理

2.1 海绵城市水弹性功能塑造机理

诸多学者提出建设弹性的海绵城市,胡灿伟提出利用海绵吸水、保水、释水及回弹、压缩、恢复等水分与力学特性实现城市水资源的安全可持续^[15];俞孔坚认为海绵城市是通过消纳、减速与适应三大关键策略弹性应对水问题,而非刚性对抗^[16]。但目前在海绵城市弹性功能塑造机理方面的研究还很欠缺,因此本文借鉴弹性城市^[17,19]、韧性城市^[20]的内涵、功能及建设机理等研究,分析海绵城市的弹性功能塑造机理。

海绵城市水弹性功能是指城市在一定时空内应对环境变化和自然灾害的冲击与扰动时,维持、恢复和优化城市自然水文循环及水生态安全状态的能力。评估海绵城市的“弹性能力”不是力学概念中城市生态处于安全状态下可接受的最大限度的形变,而是考察城市的抵抗性(承受干扰的能力)、

表1 发达国家先进生态雨洪管理理念与技术

名称	地区	内容及性质
最佳管理措施(BMPs: Best Management Practices)	美国	控制降雨径流量和水质的生态可持续发展的综合性措施,最初主要用于控制城市和乡村的面源污染,是基于提倡和鼓励性质的政策
低影响开发(LID: Low Impact Development)	美国	以生态系统为基础,利用小规模、分散的设计技术和源头控制机制控制暴雨所产生的径流和污染,减少开发活动对场地水文状况影响的暴雨管理方法,主要集中在探索微观管理和综合管理实践(IMP)两个方面
绿色基础设施(GI: Green infrastructure)	美国	国家自然生命保障系统,水系、湿地、林地、农场、牧场、绿色通道、公园等其他自然保护区及荒野和其他支持本土物种生存的空间组成相互联系共同维护自然生态进程的网络
雨水生态管理系统(Green Stormwater Management)	美国	通过储蓄滞留和入渗回补相结合的方式,收集和利用建筑物屋顶、道路、绿地、广场等降雨径流,经收集、输水、净水、储存等程序实现雨水资源的综合利用
可持续排水系统(SuDS: Sustainable Drainage Systems)	英国	利用储蓄雨水后缓慢释放,促进雨水下渗,过滤污染物,通过控制流速实现沉积物沉淀的目的,从而模仿自然净化过程
水敏性城市设计(WSUD: Water Sensitive Urban Design)	澳大利亚	一种雨水源头控制的理念,将雨水在源头上进行收集、控制,减少了暴雨径流,同时也减少了水资源的浪费,是一种新型的节水技术
低影响开发雨水系统设计(Low Impact Stormwater design)	新西兰	较为完善的立法与行政法规;低设计影响理念的雨洪管理规划;基于数字模型、信息化技术的精细化管理;严格的监督与执法

资料来源:参考文献[12-14]

① 以单一功能的市政工程为主导,依赖灰色基础设施等“工程性措施”迫使“水适应人”的传统发展理念。

恢复性（恢复到稳定状态需要的时间或速率）以及优化性（自组织和自适应的管理能力）。本文根据城市水系统弹性内涵^[17]及海绵城市建设的功能解析^[15,16]，构建海绵城市建设的弹性功能塑造机理概念模型（图2）。

图2中 d_1, d_2, d_3 及 t_1, t_2, t_3 分别表示海绵城市、灰色城市、自然状态三种状态下遭受环境变化和自然灾害后生态安全状态的最低值及相对应的时间；其中 $d_1 > d_2 > d_3$ ， $t_1 > t_2 > t_3$ ，表示在采取一定应急与恢复的措施下，海绵城市受到环境变化和自然灾害时其生态安全状态等级降低的小且缓慢，并能在过程中不断学习和改进，快速恢复到等级更高的生态安全状态，即其水弹性功能最大。值得注意的是，灰色城市相较于自然状态弹性功能更强是因为其采取了一定的应急与恢复措施（大量人力、物力等），并不代表其水弹性功能一定优于自然状态。因此，对城市水弹性功能评估时要考虑应急与恢复措施及其经济性。

由图2可知，海绵城市的弹性功能包括抵御状态改变、响应和恢复以及适应和管理能力，这三种弹性作用于不同时期不同水环境状态下的城市系统。抵御状态改变能力主要指城市系统能够吸收来自环境改变或自然灾害的干扰，在被改变和重组之后仍能保持自身特征；响应和恢复能力是能够及时、准确地影响灾害并能够从灾害中恢复，将自然灾害对公共安全及经济损失的影响降到最低；管理能力是从干扰中总结学习和提升自身的能力。三种能力相辅相成，在周期循环

中保持、巩固更为稳定的城市安全状态。因此，海绵城市的建设不单是聚焦于城市内部排水系统和雨水利用、管理，而是从水生态基础设施的构建、区域规划、水文监测、防洪排涝预警预报、应急响应恢复、应急信息管理平台建设等，全面提高其弹性应对的能力，使得城市能够适应新环境，遭遇灾难后快速恢复，在循环优化中实现绿色可持续发展。

2.2 海绵城市建设方法

海绵城市建设是一项复杂的系统工程，其建设需以跨尺度的系统方法理论和水生态规划体系为基础，通过宏观层面、

图2 海绵城市水弹性功能塑造机理概念模型

资料来源：参考文献[15-17]

图1 海绵城市的提出背景及内涵解析图示

资料来源：《建设指南》及参考文献[1,3,12]

中观层面、微观层面不同尺度的承接与配合,实现区域性的、不同空间层次内在紧密联系的城市良性水循环系统的构建。因此,根据俞孔坚提出的跨尺度生态规划理论和方法体系^[1,21]以及部分学者关于海绵城市建设具体规划途径和技术集成的相关研究^[22-26],本文从宏观、中观、微观三个层面出发,构建由“区域海绵格局”“城镇海绵系统”“海绵体”所构成的海绵城市建设方法体系(图3)。

(1) 宏观层面。海绵城市要实现包括雨洪管理、生态防洪、水质净化、地下水补充、保护生物多样性及栖息地的营造在内的综合目标,首要条件是确保至关重要的水生态景观要素及空间位置。水生态安全格局是通过土地利用总体规划和城市总体规划,研究河湖水系连通、水生态治理和修复的空间格局构建,为下一步实体“城镇海绵系统”的建设奠定空间基础及景点保障。

(2) 中观层面。水生态区域建设应遵从“多层次、多部门、多专业、全寿命”的途径,从城市规划的源头着手,将海绵城市理念融入到城市各层级规划中,打破城市规划、园林、水利、市政、道路等多部门、多专业之间被动配合与有限交互的局面,运用系统科学理论与技术集成相互协调的运作路径^[22],并最终落实到土地利用控制性规划甚至城市设计中^[23],实现规划区域内滨水栖息地恢复、排洪防涝、雨污净化、文化游憩空间等雨洪资源化的城市水循环目标。

(3) 微观层面。无论海绵城市一低影响开发统筹格局中的宏观层面建设还是中观层面规划,要实现海绵城市复杂的“自然积存、自然渗透和自然净化”功能,必须落脚于微观“海绵体”的优化组合建设。微观尺度对应的则是通过水文干扰最小化、绿色生态防洪、渗透材料优化、城市雨洪管理、生物净化修复等一系列技术集成^[24-26],实现水生态基础设施建设,发挥水系统的生态功能。

3 海绵城市评估

3.1 海绵城市建设不同评价方法比较

考核评估是检验海绵城市建设工作成功与否的重要环节,评价体系构建及评价指标选取则是首要程序。住房和城乡建设部办公厅颁布的《海绵城市建设绩效评价与考核办法(试行)》,从宏观角度提出包括水生态、水环境、水资源、水安全、制度建设及执行情况、显示度六方面在内的评价体系及18项考核指标,但并未给出系统的定量评价标准,无法直接指导数据监测及分析建模等具体评价工作;马越在此基础上,结合量化分析思维详细阐述、深入剖析八项涉水核心指标的定量评价方法,从实际操作角度为海绵城市某(些)单项指标定量评估提供一定借鉴,但并未对八项指标整合后的整体效果评估进行讨论^[27];谭术魁从市政设施建设和经济发展水平两方面切入,通过构建市政经济分析模型测算14个海绵试点城市的市政经济系数,并与均衡系数进行比较,划分出完全匹配、基本匹配和不匹配三种类型评判海绵城市的发展情况^[28];方宇婷^[29]、乔爽^[30]等从评价方法改进着手,利用数学模型来克服评估对象的模糊性和不确定性,为科学评价多属性、多指标评估体系提供更客观的参考;部分学者分别利用数学模型、计算机模拟、仿真设计、优化模型等手段从不同角度研究了雨水资源的利用潜力、经济可行性、成本效率、风险评价、效率优化等^[31-33]。现阶段海绵城市建设不同指标体系评价方法比较如表2所示。

上述分析表明,评估体系的构建包括2种方式:一种只考虑水系统本身的特性,不考虑经济、规划与组织应变等外部大环境;另一种是把两者结合起来制定指标体系。目前海绵城市建设评价体系的研究并未真正从海绵城市内涵出发,不能充分体现指标间的联系与协调,使评估流于形式;再加

图3 海绵城市的建设方法体系

资料来源:参考文献[1, 21-26]

上我国区域差异巨大，海绵城市建设又是一项复杂的系统工程，制定动态化、差异化，准确反映城市实际情况的评价指标和评价标准需要更高要求的数据统计和管理。当然，海绵城市建设还处于探索阶段，科学全面评价海绵城市建设成效还需要进一步深入研究。

3.2 海绵城市水文特征定量评估概念模型

俞孔坚^[1,16]表示，海绵城市建设宗旨是用人工水共生理念综合、系统、可持续地解决水问题。由于传统灰色城市发展理念，屋面、道路、地面等设施建设导致下垫面硬化，70%~80% 的降雨形成径流，仅有 20%~30% 的雨水能够入渗地下，导致水生态恶化、水资源紧缺、水环境污染等一系列水安全问题。因此，海绵城市建设以低影响开发为核心，通过“渗、滞、蓄、净、用、排”将年径流总量排出率由传统的超过 80% 控制到 40% 之下，维持城市开发前后水文特征基本不变。毫无疑问，海绵城市建设本质上是解决水的问题，基本目标就是维持水文特征不变，而排水率则是最直观、最

简单的衡量指标。基于此，本文从径流排出量出发，根据建设指南中低影响开发水文原理、图 3 所示的海绵城市水弹性功能塑造概念模型以及城市基础设施韧性定量评估方法综述^[34]，构建海绵城市水文特征定量评估概念模型（图 4），即利用“源头消减、中途转输、末端调蓄”绿—灰科学结合的方式，发挥绿色海绵体渗透、滞留、储蓄、挥发、净化以及安全排放等功能，实现自吸收、自消化与自循环，在降低径流总量的同时，削减峰值、延缓峰值时间，实现排水防涝、水生态系统修复等综合目标。

由图 4 可知，城市某种开发状态一定时间内径流排放量 L 可用一段时间内为径流排放量随时间变化曲线 (f) 与时间轴之间的面积表征，如下式：

$$L = \int f(t) dt$$

则，灰色城市传统开发、海绵城市低影响开发、自然生态无开发状态下一段时间内径流排放量分别表示为 L_1 、 L_2 和 L_3 ，即：

图 4 海绵城市水文特征定量评估概念模型

资料来源：《建设指南》及参考文献 [34]

表 2 海绵城市建设不同评价方法比较

学者	方法	指标体系	优点	缺点
方宇婷	基于熵权 TOPSIS 评价方法	评价指标的选取考虑社会效益、生态效益等间接效益	引入信息熵计算各评价指标的权重，避免了主观确定权重的不利影响	(1) 未考虑到我国巨大的区域差异，评价体系可拓展性不强，标准制订依据不足； (2) 海绵城市建设是一个综合性的系统，评价方法未体现指标间的联系； (3) 评价方法多集中于权重改进，未真正从海绵城市建设内涵出发提出更为科学合理的评价方法
乔爽等	基于 Logistic 回归评估方法	不仅考虑水系统自身水平，也考核其与社会、经济、环境之间的作用关系	便于掌握，较为精确的模拟专家打分，提高多变量影响因素的评估效率和准确性	
马越等	定量评价分析方法	包含年径流总量、水环境质量、城市面源污染控制、水资源“三率”控制、城市暴雨内涝灾害防治	针对不同考核指标选取不同定量分析方法	
张小飞等	基于功能网络评价方法	红色景观、灰色景观、绿色景观	从功能网络连通性及其相互作用的角度分析城市景观格局、功能流路径与不同功能流在空间上的相互作用	

资料来源：参考文献 [27-33]

$$L_1 = \int_{t_1}^{t_6} f_{\text{灰色城市}}(t) dt;$$

$$L_2 = \int_{t_2}^{t_4} f_{\text{海绵城市}}(t) dt;$$

$$L_3 = \int_{t_3}^{t_5} f_{\text{自然生态}}(t) dt$$

用 $L=l \times t_6$ 表示自然生态状态下一段时间内平均径流量,可推出对应状态径流排放量吸收率 α_x , 城市建设较自然生态状态开发影响率 β_y , 海绵城市建设较灰色城市建设可提升空间 S_1 (图 4 中斜条纹阴影部分面积), 海绵城市较自然生态状态的低影响开发程度 S_2 (图 4 中竖条纹阴影部分面积), 计算公式如下:

$$\alpha_x = \frac{L_x}{L}, x = 1, 2, 3; \beta_y = \frac{L_y - L_3}{L_3}, y = 1, 2$$

$$S_1 = L_1 - L_2; S_2 = \int_{t_2}^{t_5} |f_{\text{海绵城市}}(t) - f_{\text{自然生态}}(t)| dt$$

值得注意的是,该概念模型以自然生态状态为基准状态,在实际应用过程中需要根据不同城市建设阶段灵活设置基准年与规划年。本文归纳借鉴海绵城市规划设计路线^[23]以及图 4 所示的海绵城市水文定量评估概念模型,构建如图 5 所示的海绵城市评估概念模型的应用技术路线。

该海绵城市定量评估概念模型及其应用技术路线具有如下优点。(1) 将保持水文特征不变的定性分析与定量分析结合。(2) 采取不同的绿-灰系统产生不同的数据,通过分析优化可得到最优的绿-灰结合方式。(3) 控制目标及评价指标量化;通过数据收集、处理与分析,制定科学、合理的排放量控制目标以及低影响开发、中度影响开发、高度影响开发的定量评价指标。(4) 低影响开发效果直观数据化。在一定程度上直观形象表达海绵城市建设效果,为决策者提供数据依据。

此外,须指出的是,以径流排出量评估海绵城市建设成效,是从侧面反应经济、技术、政策等投入对海绵城市建设

起到的影响作用,其具体应用需要进一步深入研究,由于篇幅原因,在此不再展开论述,海绵城市定量评估概念模型技术路线可为海绵城市评估提供新的理论指导。

4 结论与展望

立足理论思辨层面,通过对海绵城市的提出背景、理论内涵及其相关基本问题的研究,主要结论如下。

(1) 海绵城市是我国在面对灰色发展带来的城市水环境与安全问题时,在吸取、借鉴并发展国际城市建设和雨水利用理念与技术(如低影响开发、水敏性城市设计、水资源综合管理等)的基础上提出的具有国际语境的城市雨水管理理念的中国化表达。

(2) 本文基于海绵城市水弹性功能定义(城市在一定时空内应对环境变化和自然灾害的冲击与扰动时,维持、恢复和优化城市自然水文循环及水生态安全状态的能力),从城市的抵抗性(承受干扰的能力)、恢复性(恢复到稳定状态需要的时间或速率)以及优化性(自组织和自适应的管理能力)三方面构建海绵城市水弹性塑造机理概念模型。

(3) 本文从宏观、中观与微观三个层面出发,构建由“区域海绵格局”“城镇海绵系统”“海绵体”构成的海绵城市塑造方法与技术体系。

(4) 本文论述并比较了现阶段不同海绵城市评估指标体系和评估方法,从径流排出量出发,利用“源头消减、中途转输、末端调蓄”绿-灰科学结合的方式,构建海绵城市水文特征定量分析概念模型,并提出径流排放量数学模型($L=\int f(t)dt$),在此基础上进一步构建海绵城市定量评估概念模型的应用技术路线。

以上研究成果可为海绵城市的深入研究与实践提供一定的理论指导。但本文只是建立了海绵城市塑造与评估的概念

图 5 海绵城市定量评估概念模型的应用技术路线
资料来源:参考文献^[23]

模型,相关问题都还有待更深层次的探索与研究,如海绵城市建设相关数据统计与计算的量化研究、物联网、云计算、大数据等信息技术在雨水资源的利用潜力、经济可行性、成本效率、风险评价与效率优化等方面的应用研究等。UPI

参考文献

- [1] 俞孔坚,李迪华,袁弘,等. “海绵城市”理论与实践[J]. 城市规划, 2015, 39(6): 26-36.
- [2] 张纯,宋彦. 美国城市精明增长策略下的暴雨最优管理经验及启示[J]. 国际城市规划, 2015, 30(2): 75-80.
- [3] 仇保兴. 海绵城市(LID)的内涵、途径与展望[J]. 给水排水, 2015, 41(3): 1-7.
- [4] 车伍,赵杨,李俊奇. 海绵城市建设热潮下的冷思考[J]. 南方建筑, 2015(4): 104-107.
- [5] 叶晓东. 海绵城市实施途径及规划应对策略研究——以宁波市为例[J]. 上海城市规划, 2016(1): 51-56.
- [6] 姜勇. 武汉市海绵城市规划设计导则编制技术难点探讨[J]. 城市规划, 2016, 40(3): 103-107.
- [7] 赵宏宇,李耀文. 通过空间复合利用弹性应对雨洪的典型案例分析——鹿特丹水广场[J]. 国际城市规划, 2017(4): 145-150.
- [8] 翟俊. 景观基础设施公园初探——以城市雨洪公园为例[J]. 国际城市规划, 2015, 130(5): 110-115.
- [9] Van R D J, Hugh T, Trent W B. Sponge City: Water Balance of Megacity Water Use and Wastewater Use in Hyderabad, India[J]. Irrigation & Drainage, 2005, 54(1): 81-91.
- [10] Simone Alexander, David Mercer. Internal Migration in Victoria, Australia-Testing the ‘Sponge City’ Model[J]. Urban Policy & Research, 2007, 25(2): 229-255.
- [11] Argent N, Rolley F, Walmsley J. The Sponge City Hypothesis: Does It Hold Water? [J]. Australian Geographer, 2008, 39(2): 109-130.
- [12] 张丹明. 美国城市雨洪管理的演变及其对我国的启示[J]. 国际城市规划, 2010, 25(6): 83-86.
- [13] 廖朝轩,高爱国,黄思浩. 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.
- [14] 张玉鹏. 国外雨水管理理念与实践[J]. 国际城市规划, 2015, 30(S1): 89-93.
- [15] 胡灿伟. “海绵城市”重构城市水生态[J]. 生态经济, 2015, 31(7): 10-13.
- [16] 俞孔坚. 海绵城市的三大关键策略: 消纳、减速与适应[J]. 南方建筑, 2015(3): 4-7.
- [17] 俞孔坚,许涛,李迪华,等. 城市水系统弹性研究进展[J]. 城市规划学刊, 2015(1): 75-83.
- [18] 翟国方,崔功豪,谢映霞,等. 风险社会与弹性城市[J]. 城市规划, 2015, 39(27): 107-112.
- [19] 李彤玥,牛品一,顾朝林. 弹性城市研究框架综述[J]. 城市规划学刊, 2014(5): 23-31.
- [20] 周利敏. 从社会脆弱性到社会生态韧性: 灾害社会科学研究范式转型[J]. 思想战线, 2016, 6(41): 50-57.
- [21] 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, 31(8): 1-5.
- [22] 仝贺,王建龙,车伍,等. 基于海绵城市理念的城市规划方法探讨[J]. 南方建筑, 2015, 1(4): 108-114.
- [23] 赵志勇,莫锐,向文艳. 海绵城市规划设计思路: 以永定河生态新区为例[J]. 中国给水排水, 2015, 31(17): 111-118.
- [24] 车生泉,谢长坤,陈丹,等. 海绵城市理论与技术发展沿革及构建途径[J]. 中国园林, 2015(6): 11-15.
- [25] Speak A F, Rothwell J J, Lindley S J, et al. Rainwater Runoff Retention on an Aged Intensive Green Roof[J]. Science of the Total Environment, 2013(461-462): 28-38.

- [26] Joksimovic D, Alam Z. Cost Efficiency of Low Impact Development (LID) Stormwater Management Practices[J]. Procedia Engineering, 2014(89): 734-741.
- [27] 马越,甘旭,邓朝显,等. 海绵城市考核监测体系涉水核心指标的评价分析方法探讨[J]. 净水技术, 2016, 35(4): 42-51.
- [28] 谭术魁,张南. 中国海绵城市建设现状评估——以中国 16 个海绵城市为例[J]. 城市问题, 2016(6): 98-103.
- [29] 方宇婷. 海绵城市建设背景下住宅小区雨水综合利用评价[J]. 山西建筑, 2016, 42(20): 116-117.
- [30] 乔爽,李劲松. 基于 Logistic 回归的水资源利用效率评估方法研究[J]. 吉林水利, 2015(5): 25-27.
- [31] 陈小龙,赵冬泉,盛政,等. 海绵城市规划系统的开发与应用[J]. 中国给水排水, 2015, 31(19): 121-125.
- [32] 李运杰,张弛,冷祥阳. 智慧化海绵城市的探讨与展望[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 16(1): 161-171.
- [33] Andrea Bocanegra-Martinez, José María Ponce-Ortega, Fabricio Nápoles-Rivera, et al. Optimal Design of Rainwater Collecting Systems for Domestic Use into a Residential Development[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2014(84): 44-56.
- [34] 李亚,翟国方,顾福妹. 城市基础设施韧性的定量评估方法研究综述[J]. 城市发展研究, 2016, 23(6): 113-122.

(本文编辑:秦潇雨)