DOI: 10.5846/stxb201802090350
赵银兵,蔡婷婷,孙然好,倪忠云,张婷婷.海绵城市研究进展与发展趋势:从水文过程到生态恢复.生态学报,2019,39(13): - .
Zhao Y B, Cai T T, Sun R H, Ni Z Y, Zhang T T.Review on sponge city research: from hydrological process to ecological restoration. Acta Ecologica Sinica,2019,39(13): - .

海绵城市研究进展与发展趋势:从水文过程到生态恢复

赵银兵[1,2],蔡婷婷[2],孙然好[1,*],倪忠云[2],张婷婷[2]
1 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085
2 成都理工大学旅游与城乡规划学院,成都 610059

摘要:在我国快速城市化进程中,不合理的规划建设加剧了城市洪涝、城市缺水、生态功能降低等诸多问题,受国外低影响开发理念启发,国内学者提出了与城市水文过程紧密结合的解决之道——“海绵城市”。在梳理海绵城市概念、内涵和发展现状的基础上,讨论了海绵城市建设与城市水文过程之间的作用关系,指出海绵城市研究涵盖水环境、水资源、水安全和水生态等众多领域且不断融合拓展。归纳了海绵城市的发展趋势,强调应更加遵循因地制宜原则,积极响应多尺度气候变化,科学认知城市水文过程并完善城市生态系统构建。提出了海绵城市建设优化框架,在理论上从单纯地关注水文过程转变到全方位倡导生态水文修复,在技术方法上重点融合生态水文途径改善城市水文空间体系,将生态恢复作为重要建设方式来提升城市应对灾害的弹性。

关键词:海绵城市;低影响开发;城市水文;生态恢复;韧性城市

Review on sponge city research: from hydrological process to ecological restoration

ZHAO Yinbing [1,2], CAI Tingting[2], SUN Ranhao[1,*], NI Zhongyun[2], ZHANG Tingting[2]
1 *State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100085, *China*
2 *College of Tourism and Urban-Rural Planning, Chengdu University of Technology, Chengdu* 610059, *China*

Abstract: Under the background of China's rapid urbanization, the inadequate practices of urban constructions aggravate urban ecological consequences, including urban flooding, urban water shortage, and ecological degradation. Previous studies have proposed the concepts of low-impact development in urban regions. Based on these concepts and ideas, the definition of a “sponge city” is designated as an sustainable usage of urban water resources according to the urban hydrological processes. Here, we reviewed the relationship between sponge city and urban hydrological process by examining the concept, connotation, and development of the sponge city. The concept of sponge city covers many disciplines, such as the water environment, water resources, water safety, and water ecology. This concept has been continuously integrated and expanded under the concept of global change and urbanization. After summarizing the development trend of sponge cities, we emphasize the urgent need of current and future studies. First, we need to adapt the adapting principles with local conditions more closely. Second, the future study of sponge city should be actively respond to multi-scale climate change. Third, the construction of a sponge city should be based on the urban hydrological processes. Last, the construction of

基金项目:国家自然科学基金项目(41471150)
收稿日期:2018-02-09; **网络出版日期**:2018-00-00
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: rhsun@rcees.ac.cn

sponge city aims to improve the integrity of urban ecosystems. Finally, we proposed a framework for the optimization of sponge city construction in urban regions. The most important thing is to change the prevailing attitude from a focus on hydrological process to the advocacy of ecological hydrological restoration. In addition, much more focus should be placed on integrating hydrological approaches to improve urban ecological space systems and integrating ecological restoration into urban construction to improve urban resilience.

Key Words: sponge city; low impact development; urban hydrology; ecological restoration; resilient city

在全球气候变化及区域人地耦合作用日益复杂的背景下,一些城市因规划、建设和管理等方面的历史原因,缺水、洪涝和地下水污染等问题日益突出,探索城市建设与水文关系的“海绵城市”理念由此应运而生[1]。“海绵城市”(Sponge City)也称“水弹性城市”,比喻城市像海绵一样,在降雨时能就地或就近吸收、存蓄、入渗和净化雨水,从而补充地下水,实现城市雨水资源的有效利用;在干旱缺水时将蓄存的水释放出来,从而让水在城市中更加“自然”地进行传输和循环。“海绵城市”是一种形象的表达,其学术术语为“低影响开发雨水系统构建”(Low Impact Development of Rainwater System Construction,LIDRSC)。

从 19 世纪起,国外一些城市陆续开展了各种形式的治水探索:法国于 1852 年将城市排水系统纳入建设规划,英国从 1859 年开始修建地下排水系统工程,美国从 1972 年起规划建设大型排水系统并在后续的城市建设中提出“低影响开发”(Low Impact Development,LID)模式,澳大利亚自 1975 年起开始规划防治城市内涝,日本东京从 1992 年开始历经 15 年建成了世界上最先进的下水道排水系统。虽然国外并没有以“海绵城市”这一表述来定义城市雨水利用与水综合管理,但各国实践都与海绵城市强调的渗、滞、蓄、净、用、排等理念相似。

在国内,俞孔坚等人在 2003 年出版的《城市景观之路:与市长们交流》一书中提及“海绵”的概念,比喻自然湿地与河流等对城市旱涝灾害的调蓄作用,由此推及“海绵城市”是具备“海绵”功能的城市。“海绵城市”在国内虽属新概念,但追溯至中国古代,就有“天水不外泄”、“四水归堂”、“南面风水塘”等利用雨水资源的做法,正如《管子·乘马》中强调正确处理城市与水的空间关系,北宋时期江西赣江独创福寿沟“水窗”,这些古代实践在雨水调蓄思想上都与当代“海绵城市”具有异曲同工之妙[2-3]。

1 海绵城市发展现状

1.1 以水循环过程为基本原理

海绵城市理念针对城市洪涝及水环境问题提出,是一种以实现水文过程动态管理与调控为目的的城市建设模式,这种模式对不同时期和不同性质的城市建设所造成的多元化水文过程干预加以考虑。中国古代城市水利建设强调化有为无、以大化小,将排他转为包容,将集中转为分散,快转化为慢,硬化转为柔和[4],普遍采用排水和蓄水的方式,即最大限度地尊重城市的水文过程。近现代硬质化城市建设形式滥用导致自然汇水方式发生改变,当这种改变超过了城市水文过程的自我调节极限,就出现了城市结构功能性退化,进而引发城市水循环失衡[5]。国外针对这一类似问题,从 20 世纪 60 年代就展开了关于城市化对水文过程影响的研究。如美国于 1965 年制定了城市雨水和水文控制指标体系并进行效益分析,该项举措被视为城市径流与水文研究的起点。20 世纪 80 年代城市水文学开始与生态学加强对接,逐步兴起了生态水文学,旨在研究水文过程与生态过程的互馈关系[6]。国内外的水文学研究奠定了海绵城市的建设理论和实践基础。2015 年出台试行的《海绵城市建设绩效评价与考核办法》强化了水环境、水资源、水安全、水生态等方面的建设指标,可见城市水文循环过程是否稳健和可持续是各个试点海绵城市评价考核的重要衡量标准[7]。虽然水文学对海绵城市影响的各项研究已经开展起来,但是城市极端水旱灾害发生的频率与强度仍在增加,水资源系统应对气候变化的适应能力较弱,湿地退化、流域水循环失衡、城市热岛效应等问题仍然突出。

1.2　技术措施多元变化

国内外海绵城市建设的技术措施包括雨洪模型、流域治理与径流控制措施、大型工程措施、低影响开发技术措施四种类型[8-9]。雨洪模型分为水动力学模型和水文模型,水动力学模型是物理和数学方法上的实验,水文模型关注城市实践应用。作为认识和理解城市水文循环的有效工具,水文模型可以在海绵城市建设措施实施前,用于评价分析数据信息采集与模拟。2014 年颁布的《海绵城市建设技术指南》也强调通过水文模型与相关计算从而优化城市控制性详细规划涉及的各项指标。结合城市化对水文过程影响机制的研究成果,国内外集成了各种水文模型,根据适用对象可以划分为流域、城市和单元等类型(表 1)[10-11]。

表 1　适用于海绵城市建设的常见模型

Table 1　Common models for sponge city construction

模型名称 Model name	模型尺度 Model scale	应用 Application
城市暴雨洪水管理模型 SWMM Storm water management model	流域、城市、单元	美国南佛罗里达州用该模型监测和管理城市降雨及径流,检验它在小亚热带城市集水区的适用性
丹麦排水管网模拟 MOUSE Modeling of urban sewer	流域、城市	瑞士洛桑使用该模型在污水处理厂和流域进行校准和验证,并预测工程与自然水系统的相互作用[12]
半分布式水文模型 TOPMODEL Topography model	流域、城市	倪用鑫等采用该模型在黄河中游府谷至吴堡区间进行洪水模拟,对区域径流变化控制和防洪有重要意义
城市暴雨处理及分析集成模型系统 SUSTAIN System for urban storm water treatment and analysis integration	城市、单元	邵明等采用该模型在迁安市绿化工程中进行最佳选址分析,基于 GIS 数据详细阐述其在海绵城市建设中的作用并进行绿地设计
美国水土评估模型 SWAT Soil and water assessment tool	流域	Santhi 等在美国德克萨斯州在博斯克河流域开发项目中运用该模型进行非点源污染研究[13]
流域水文水质模拟程序 HSPF Hydrological simulation program Fortran	流域	加拿大安大略省南部利用流域性质模拟年流量并进行校准
伊里诺斯城市排水模型 ILLUDAS Illinois urban drainage area simulator	城市	岑国平以北京百万庄小区为例,基于实测径流资料对该模型进行检验,且论证了它在不同场合的模拟情景
现代排水模型软件技术 InfoWorks CS Infoworks collection system	城市	拉脱维亚为进行城市供水服务升级,建立系统的数学模型,并缓解水力超载导致的洪水和污染问题[14]
源头负荷和管理模型 winSLAMM Source loading and management model	城市	Kabbes 等运用该模型在芝加哥附近两个子流域进行污染物负荷量预测,并配置成本效益最高的管理措施
生物滞留池模拟设计 RECARGA Recarga do lençol freático	单元	孙艳伟等采用该模型模拟生物滞留池的各项要素,研究其灵敏度和水文效应

流域治理与径流控制措施和大型工程措施以达到维持水文平衡为目的,可以缓解因建设尺度不一而造成的实施困境。流域调蓄系统、自然保护区湿地和河湖拦蓄等有效处理了降雨时的溢流污染及地区积水问题,本土植被种植和土壤改良以生态治理为核心进行水土防治,减轻了水资源环境压力[15]。

国外低影响开发研究起步较早,以绿色基础设施(Green Infrastructure,GI)为主,将其视作雨水资源化的重要部分,涉及城市景观与市政层面的规划与设计,重点研究降低洪涝灾害、改善水环境质量和保护城市生态系统的方法[16-17]。如着重解决小尺度层面集水渗水问题的雨水花园、植草沟、生物滞留池和透水铺装等措施被广泛运用,旨在从城市建筑和景观绿化入手增加和维系调水蓄水的天然载体[18]。国内试点城市在做居住区景观规划设计和局部给排水规划时,大都以这类小尺度技术措施为参考进行分散式的海绵体布局,以增加集水能力和污水净化功能。而在建设的空间尺度相对更大时,各城市倾向于选用可兼顾项目系统性和可实施性的海绵城市技术措施。值得关注的是,国外大部分遵循低影响开发理念建成的项目都会提及,只有在一定区域和一定降雨量范围内,低影响开发方案才可正常运行。丹麦规划设计师在 2016 年所完成的《哥本哈根暴雨应对行为准则》中特别指出,特定方案对于超出范围的暴雨量是不可控的。因此,当下海绵城市实践中所取得的成果虽然可以解决小雨和中雨等情景下的问题,是否也能抵御大雨甚至暴雨的冲击还有待检验。

1.3 研究领域融合拓展

在国外,与海绵城市理念紧密相关的研究是低影响开发和雨洪管理,研究热点有四个方面:绿色基础设施(Green Infrastructure,GI),指相互关联的网络化绿色空间,它保存自然生态系统价值和功能,为海绵城市建设提供基础条件支撑[19-20];可持续排水系统(Sustainable Drainage System,SUDS)有利于提升城市治水效益,但因水文和工程的基础资料不全,它在部分地区尤其是发展落后城市的实施仍受到诸多条件限制[21-22];水敏感城市设计(Water Sensitive Urban Design,WSUD)强调人工湿地和景观水体的作用[23];水资源综合管理(Integrated Water Resources Management,IWRM)融合城市水文学和工程水文领域的知识与技术,以实现城市水文循环平衡和水环境安全为目标[24-25]。

对国内城市发展而言,"海绵城市"这一概念明确了城市雨洪管理和雨水利用的内涵,指出了技术措施和实现路径,强调了城市建设、城市水文以及城市生态系统三者之间的耦合关系。目前国内海绵城市研究的重点是水文模型开发、城市给排水系统升级改造及综合性规划、城市市政工程综合排涝能力评估、城市水文控制模型与效益分析、低影响开发技术措施的改良优化等。随着科学技术逐渐发展,海绵城市建设不再局限于某个单一领域,而开始重视水与环境、气候、技术、经济、生态、社会等领域的交叉与融合(图 1)。在气候变化的宏观背景下,城市的脆弱性、防洪减灾能力及适应气候变化的能力被纳入城市规划的考虑范畴,海绵城市研究与大气科学的联系也越发密切[26]。地理背景研究有助于监测分析地表覆被变化与地表径流的作用关系,进而服务海绵城市建设的水文模拟。建筑信息模型(Building information modeling, BIM)可以对工程项目进行模拟并指导施工,在老旧城区地下排水工程管线信息缺失的情况下可保证一定的准确性[27]。BIM 技术与遥感、地理信息系统、大数据和云计算等相结合,有效地提高了海绵城市的定量化、综合化、动态化研究水平,有助于解决水文预报和灾害防控等方面的问题[28-29]。农学与林学涉及到的土壤和植被问题成为海绵城市生态建设需要解决的重点问题,其中主要包括植被修复和土壤改良等城市生态恢复方面的内容。

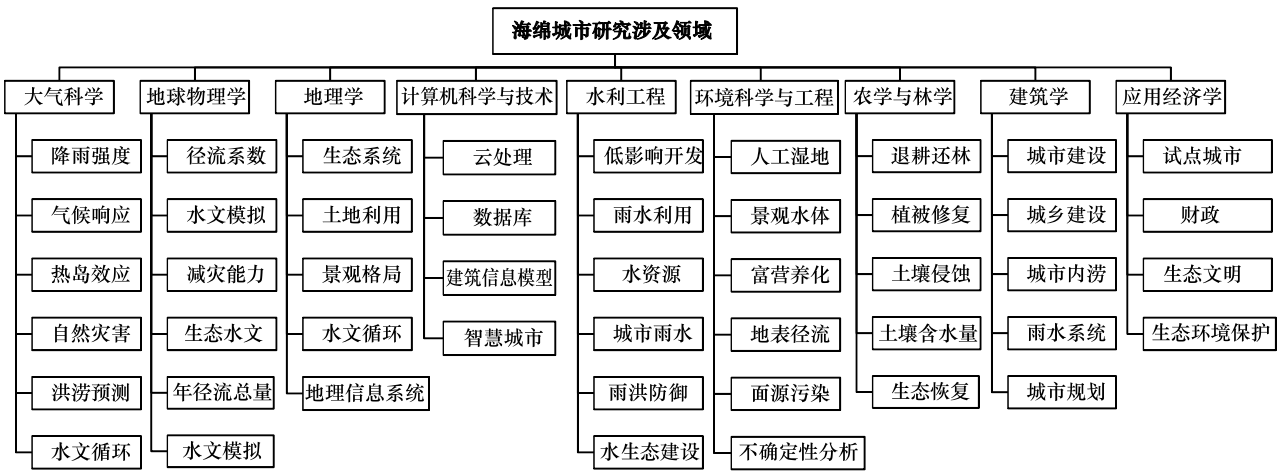

图 1 海绵城市研究涉及领域

Fig.1 Fields of sponge city research

2 海绵城市发展趋势

2.1 增强地理和气候适应性

在全球气候急剧变化的背景下,水文循环时空演变规律已成为大气科学和水科学研究的热点,水资源系统适应地理和气候的能力受到考验[30]。研究地理因子和水文过程的作用机理,可为流域及城市的水资源可持续利用提供理论依据[31]。海绵城市的地理影响要素主要分为地形地貌、气候和水文等。地形地貌作为城市下垫面,是海绵城市建设的基础本底[32]。气候要素包括大气环流、太阳辐射和下垫面状况等,对海绵城市

建设形成长时序和区域性影响。水文要素包括降雨量、水位、水质、流量、蒸发量等,是水文过程模拟和水文调控的关键对象。为解决上述问题,应当充分认识气候变化与流域和城市之间的非线性关系,突破洪涝灾害研究局限在不透水面积变化、排水标准划定和防护措施等单一领域的不足[33]。在海绵城市建设中需考虑气候变化对水资源脆弱性的影响,并做到因地制宜,结合气候适应性城市的思想,按照气候特征划分建设区域,基于区域气候风险、城市规模与功能进行分类指导,开展面向气候变化的影响评估和风险测评。进一步针对不同领域划定指标并制定建设方案,实现将气候响应指标纳入城乡规划体系与建设标准的目标。

地理区位的差异使各类海绵城市的建设措施及目标不同,平原、山地、高原的城市应区别对待,结合各自地理状况和洪涝灾害历史合理解决雨洪灾害和雨水利用问题。对处于不同地理区位的城市在规划初期就应注意空间布局和功能协调,根据城市所在地区的地形地貌特征,分析用地性质设置合理的技术措施,避免无序扩张[34]。干旱地区重点需要保证饮用水水源保护区安全,加强水质监测,并将单一的工程治水转变为与生态治水相结合的方式[35]。降雨充沛的洪涝频发地区应强化城市排水系统,实现高水高排及生态补水目标,提高城区的蓄洪和排洪能力。受水环境污染的城市,重点解决面源污染问题,改善生态环境。生态本底良好的城市,可以构建水系廊道、生态廊道和生态斑块等自然生态空间格局,规划利用水资源完成水生态修复规划。热岛效应严重的城市,生态保护与雨水径流调控应同时进行,通过构建自然海绵与人工海绵优化蓝绿空间布局以调节水文循环[36]。

2.2　强调水文过程的生态功能

台风、暴雨、洪涝、干旱等引起的城市型水问题,增加了城市水文循环的压力。城市化的水文效应研究可以指导陆地水域的保护工作,除了与城市水文学接轨,海绵城市的研究还应增加水文循环的生态性研究。从生态水文学的角度出发,可以研究城市水文过程如何影响降雨径流以及河流、湖泊的洪水调节功能,从而提高水资源质量、城市的生态效益和生态系统保护功能,增强海绵城市的“海绵”效应。

城市水文学研究重点集中于水资源问题,传统的水文调控过程使得海绵城市研究从水循环过程出发,研究水文特征关联性,探索水质演化规律,对洪涝灾害的发生进行监测和控制,制定有效的风险管理措施。生态水文调控方式填补了水文分析中生态过程研究的空缺,研究生物过程和生态系统变化状况对降雨量、径流指数和蒸发量等水相关要素的影响有助于海绵城市工程实施的科学化管理,最终实现城市淡水资源的可持续利用[37](表 2)。生态水文调控与海绵城市可持续发展的理念高度契合,可以缓解因水文学、城市水文学领域的各类实践可能引发的过度工程化以及与生态系统脱节等问题,将有助于增强流域生态稳定性[38]。

表 2　水文调控对比

Table 2　Comparison of hydrological control

比较类型 Comparison type	传统水文调控 Traditional hydrologic control	生态水文调控 Ecological hydrological control
目标 Targets	维持水文循环过程,合理配置水资源,保护水敏感区域,实现水域环境的稳定和综合管理。	达成水资源可持续利用,促进生态建设,寻找生态恢复的合理尺度,实现生物多样性、水质水量和生态系统需水的稳定关系
原则 Principles	因地制宜,集约发展	生态优先,可持续性
内容 Contents	研究水文特征关联性,探索水质演化规律,对洪涝灾害的发生进行监测和控制,通过模型进行下垫面分析,确定降雨量大小从而建立城市防洪和给排水管道标准	统筹考虑气候变化和人类活动给水文过程带来的综合效应,分析水文过程的生态机理,生态需水量估算、水体富营养化分析、植被覆盖情况、生态系统演变规律、土地利用和水库沉积变化等内容都在研究范围内
途径 Approaches	水文观测、水文预测、水文计算、水文模型等	水文观测、水文预测、水文计算、水-生态耦合模型、生态水文平衡要素测定、流域生态水文观测系统等
前沿领域 Frontier domains	水文学、城市水文学、水利工程、地理学、地球物理学	生态水文学、城市水文学、河流生态学、流域生态学、林学

当代水文过程呈现多尺度特征[39],未来城市水文模型的开发与改进将成为研究重点,综合开发大气、水文和生态研究模式,逐步将水文模型拓展为与生态系统联系密切的水-生态耦合模型,联合生态基础措施提高海绵城市的生态水文分析和服务水平。水文分析和水文预测将成为雨洪设计的重点,利用洪水情景模拟可以科学地反馈信息,寻求城市洪涝的解决办法[40]。生态水文研究将不再局限于水文景观单元,大尺度的生态水文恢复将更受关注。

2.3 面向城市生态恢复目标

2017 年住房城乡建设部印发《关于加强生态修复城市修补工作的指导意见》文件中提出的"生态修复、城市修补"是指用再生态的理念,修复城市中被破坏的自然环境、空间环境以及景观风貌等,最终达成治理城市病和改善人居环境质量的目的。海绵城市的建设过程可以看作是一个以最终促进城市生态结构升级和提升自我愈合能力为目的的改良、修补和更新城市环境的生态恢复过程[41]。随着生态水文学的兴起,城市水文过程的调节与平衡开始加大保护与恢复的比重,生态恢复尤其是生态水文恢复成为一个新兴的研究热点。水文运动过程中受到干扰的城市生态系统具有一定的脆弱性,应首先对受影响的水环境进行恢复,再延伸至植被、土壤和生物群落的恢复,最后才能在技术措施排布以及景观规划设计上提高城市生态系统结构功能,并通过建设海绵城市起到锦上添花的作用。

陆地水域是生态过程和水文过程耦合作用的敏感区域,水生态建设至关重要。城市水敏感区应该按类别实施差异化的管理措施和治理政策,有利于提升自然水的自我净化能力和城市洪水调蓄能力,保障流域生态流量并更新流域循环过程。将流域生态修复和城市植被保护纳入现有的海绵城市规划建设中,提高城市生态系统的抵御力与恢复力作为城市生态建设目标之一[42]。注重城市与流域及气候之间的关系,探索水文过程和城市生态格局之间的互馈效应,合理规划城市水文调控过程中的生态水文恢复,建立不同情景下的海绵城市技术方法,丰富城市海绵化建设的途径、单元和层次,以解决不同的现状问题。尤其是在洪水防御和调控方面,应掌握城市和区域的灾害历史和变化过程,升级研究工具和手段,总结分析多尺度的城市灾害应对经验,使城市在再次经历相同类型、相似量级的灾害时具有缓冲空间和承受能力,面对超出预计量级的灾害时具有一定修复能力,尽可能减轻社会经济损失。构建城市不同量级和类型的海绵体协同作用体系,保证在任一量级海绵体受到洪涝侵袭时,城市生态系统能发挥效应实现一定程度的保留和修复。

2.4 完善建设技术与管理机制

新型海绵城市应该是集水文稳定性、生态性和韧性为一体的综合发展模式,该模式应扎根于国内外理论,将自然储水功能区与社会生活生产用水之间的动态取水排水过程视为完整的海绵城市系统中心,并围绕它展开各项技术措施开发、雨水资源化、水文过程模拟和水文保护与调控(图 2)。城市水资源管理以平衡蓄水和排水为目标,通过人工设置的各集水设施进行汇流运输自然水源,挖掘生态水文效应和生态潜力。为促进城市生态系统的保护和功能提升,需要以生态恢复作为重要的建设途径,以低影响开发核心理念契合各项技术性设施建设,以合理调控水文过程来实现水安全、水环境、水资源和水生态城市等关键目标,逐步完善流域生态恢复、植被生态恢复、生态系统修复等内容。

当前政府财政补贴只占海绵城市投资中的极少部分,PPP 模式不能完全解决其中的资金与风险问题,因此首先应在已有规划建设框架基础上减少资源与能源消耗,将可持续发展理念作为每一环节的实施准则,建立起切实可行的考核指标体系来评价海绵城市的经济效益、社会效益和生态效益。避开大兴土木,追求高效节约的改造方式,提高城市雨水再利用能力和稳定海绵城市收益逐步成为新时期的建设目标。其次建立以流域或城市为尺度的空间单元,把相关产业体系、管理体系和法律体系作为辅助手段。海绵城市规划应发展为跨界规划[43],渐次推进城市总体规划、城市控制性详细规划、区域生态规划、环境保护规划、绿地系统规划等不同层级规划内容之间的融合,避免短暂的规划期、规定的试点范围、特定的规划制度在衔接过程中出现的多重问题。目前海绵城市研究已经打开了生态接口,处于一个逐步升级的过渡过程,未来的建设应基于城市水文过程与生态恢复,同时达到韧性城市的建设目标并完善生态服务功能。环顾当前世界上大部分已建城市,

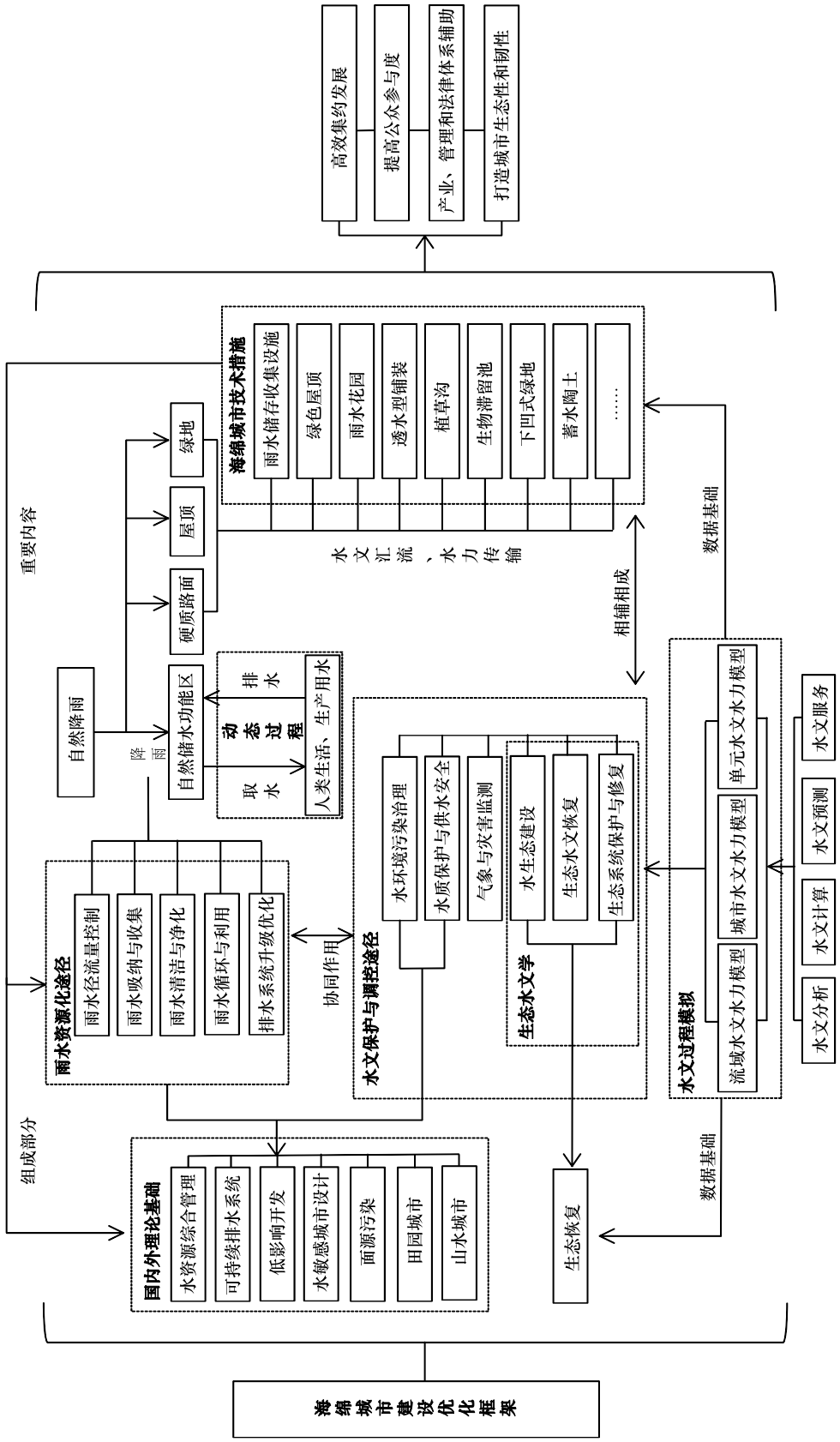

图 2　基于水文过程和生态恢复的海绵城市建设优化框架

Fig.2　Optimization framework of sponge city construction based on hydrological process and ecological restoration

它们的生命线系统、能源设施以及交通设施等都需要改善升级,进一步增强防护能力、适应能力和自我修复能力以应对洪水侵扰,如阿姆斯特丹的“韧性洪利”基础服务设施便是优先考虑城市生态效益和灾害抵御能力,通过建设城市硬件设施上的韧性最终实现海绵城市的韧性[44]。以上基于水文过程和生态恢复的海绵城市建设优化框架有助于使海绵城市理念具有更广泛的应用性。

3 结论与展望

对城市发展进程来说,海绵城市是城市建设模式的一次转型,也是一种着眼于更高层面环境需求的长期规划。从城市所处的地理环境入手,科学地分析流域与城市的关系,面向水文过程开展综合规划,保护地表水与地下水质量并保障供水安全,最终推动城市防洪体系建设。推进城市水文学和生态水文学的研究,完善不同环境条件下的城市水文基础资料,将城市正常降雨和极端暴雨等多种情景统筹考虑,增强海绵城市各项技术措施的可靠性。吸取韧性城市发展模式的先进理念,分析两类试点城市建设的交叉领域及各自的优缺点,相互借鉴技术和经验,将有助于解决城市生态功能退化问题。由于城市各水敏感区对水资源的依赖性较大,如何完成城市水陆区域之间的自然过渡成为未来建设过程中的难题。

除此之外,国外已经开始关注海绵城市建设过程中的社会效益,并广泛推进社会调查,以公众的意见与实际行动为参考,目标是提高公众参与率,使雨水利用更加社会化,使公众正确认识自己的义务,但这类研究已经出现了城市社会经济利益与可持续发展科学间的冲突[45]。由于法规、技术和需求结构越来越多样化,多年来各国城市所建立的水管理系统具有不确定性前景,公共事业管理者和水资源研究领域的科学家们在共享战略上达成共识的困难越来越大。除此之外,在已有的水文模型中,大部分忽略了人类社会的用水活动。可见此类模型的发展仍有一定盲区,未来海绵城市建设关于社会学领域的研究将备受重视。

参考文献(References):

[1] 赵晶. 城市化背景下的可持续雨洪管理. 国际城市规划, 2012, 27(2): 114-119.

[2] 王耀明.《管子》“凡立国都”的句读. 城市规划通讯, 1994, (5): 8-8.

[3] 刘畅, 王思思, 王文亮, 王二松. 中国古代城市规划思想对海绵城市建设的启示——以江苏省宜兴市为例. 中国勘察设计, 2015, (7): 46-51.

[4] 龚武.《管子·乘马》篇论国土、耕地的规制及其基础地位//安徽省管子研究会 2011 年年会暨全国第六届管子学术研讨会交流论文集. 颍上: 安徽省管子研究会, 2011.

[5] 刘昌明, 张永勇, 王中根, 王月玲, 白鹏. 维护良性水循环的城镇化 LID 模式:海绵城市规划方法与技术初步探讨. 自然资源学报, 2016, 31(5): 719-731.

[6] 黄奕龙, 傅伯杰, 陈利顶. 生态水文过程研究进展. 生态学报, 2003, 23(3): 580-587.

[7] 张建云, 宋晓猛, 王国庆, 贺瑞敏, 王小军. 变化环境下城市水文学的发展与挑战——I.城市水文效应. 水科学进展, 2014, 25(4): 594-605.

[8] 王国荣, 李正兆, 张文中. 海绵城市理论及其在城市规划中的实践构想. 山西建筑, 2014, 40(36): 5-7.

[9] 俞孔坚, 李迪华, 袁弘, 傅微, 乔青, 王思思. “海绵城市”理论与实践. 城市规划, 2015, 39(6): 26-36.

[10] 秦语涵, 王红武, 张一龙. 城市雨洪径流模型研究进展. 环境科学与技术, 2016, 39(1): 13-19.

[11] 蔡凌豪. 适用于“海绵城市”的水文水力模型概述. 风景园林, 2016, (2): 33-43.

[12] Coutu S, Giudice D D, Rossi L, Barry D A. Parsimonious hydrological modeling of urban sewer and river catchments. Journal of Hydrology, 2012, 464-465: 477-484.

[13] Santhi C, Arnold J G, Williams J R, Dugas W A, Srinivasan R, Hauck L M. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. Journal of the American Water Resources Association, 2001, 37(5): 1169-1188

[14] Koudelak P S. Sewerage network modelling in Latvia, use of InfoWorks CS and storm water management model 5 in Liepaja city. Water and Environment Journal, 2008, 22(2): 81-87.

[15] 俞孔坚. 海绵城市的三大关键策略:消纳、减速与适应. 南方建筑, 2015, 1(3): 4-7.

[16] Farrugia S, Hudson M D, McCulloch L. An evaluation of flood control and urban cooling ecosystem services delivered by urban green infrastructure. International Journal of Biodiversity Science Ecosystem Services & Management, 2013, 9(2): 136-145.

[17] Andersson E, Barthel S, Borgström S, Colding J, Elmqvist T, Folke C, Gren Å. Reconnecting Cities to the Biosphere: Stewardship of Green Infrastructure and Urban Ecosystem Services. Ambio, 2014, 43(4): 445-453.

[18] 李兰, 李锋. "海绵城市"建设的关键科学问题与思考. 生态学报, 2018, 38(7): 2599-2606.

[19] Marcucci D J, Jordan L M. Benefits and challenges of linking green infrastructure and highway planning in the United States. Environmental Management, 2013, 51(1): 182-197.

[20] O'Brien L, De Vreese R, Kern M, Sievänen T, Stojanova B, Atmiş E. Cultural ecosystem benefits of urban and peri-urban green infrastructure across different European countries. Urban Forestry and Urban Greening, 2017, 24: 236-248.

[21] Dunphy A, Beecham S, Vigneswaran S, Ngo H H, Mclaughlan R, Collins A. Development of a confined water sensitive urban design (WSUD) system using engineered soils. Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2007, 55(4): 211-218.

[22] Todorovic Z, Breton N P. A geographic information system screening tool to tackle diffuse pollution through the use of sustainable drainage systems. Water Science and Technology, 2014, 69(10): 2066-2073.

[23] Demuzere M, Coutts A M, Göhler M, Broadbent A M, Wouters H, van Lipzig N P M, Gebert L. The implementation of biofiltration systems, rainwater tanks and urban irrigation in a single-layer urban canopy model. Urban Climate, 2014, 10: 148-170.

[24] Saravanan V S, McDonald G T, Mollinga P P, Banuri T. Critical review of Integrated Water Resources Management: moving beyond polarised discourse. Natural Resources Forum, 2010, 33(1): 76-86.

[25] Chidammodzi C L, Muhandiki V S. Water resources management and Integrated Water Resources Management implementation in Malawi: Status and implications for lake basin management. Lakes & Reservoirs Research & Management, 2017, 22(2): 101-114.

[26] 郑艳, 翟建青, 武占云, 李莹, 史巍娜. 基于适应性周期的韧性城市分类评价——以我国海绵城市与气候适应型城市试点为例. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(3): 31-38.

[27] 李慧莉, 程一航, 赵红花, 王少峰. 基于 BIM 技术的城市管网改造工程应用分析. 给水排水, 2016, 42(5): 122-126.

[28] Graymore M L M, Wallis A M, Richards A J. An index of regional sustainability: a GIS-based multiple criteria analysis decision support system for progressing sustainability. Ecological Complexity, 2009, 6(4): 453-462.

[29] Napoli M, Cecchi S, Orlandini S, Zanchi C A. Determining potential rainwater harvesting sites using a continuous runoff potential accounting procedure and GIS techniques in central Italy. Agricultural Water Management, 2014, 141: 55-65.

[30] 夏军, 邱冰, 潘兴瑶, 翁建武, 傅国斌, 欧阳如林. 气候变化影响下水资源脆弱性评估方法及其应用. 地球科学进展, 2012, 27(4): 443-451.

[31] 李峰平, 章光新, 董李勤. 气候变化对水循环与水资源的影响研究综述. 地理科学, 2013, 33(4): 457-464.

[32] 纪迪, 张慧, 沈渭寿, 王桥, 李海东, 林乃峰. 太湖流域下垫面改变与气候变化的响应关系. 自然资源学报, 2013, 28(1): 51-62.

[33] 潘兴瑶, 徐袈檬. 城市水文过程与洪涝响应研究进展. 北京水务, 2018, (3): 7-13.

[34] 陈利顶. 城市雨洪管控需要生态智慧的引领. 生态学报, 2016, 36(16): 4932-4934.

[35] 张亮. 西北地区海绵城市建设路径探索——以西咸新区为例. 城市规划, 2016, 40(3): 108-112.

[36] 朱玲, 由阳, 程鹏飞, 刘勇洪. 海绵建设模式对城市热岛缓解效果研究. 给水排水, 2018, 44(1): 65-69.

[37] 吕一河, 胡健, 孙飞翔, 张立伟. 水源涵养与水文调节: 和而不同的陆地生态系统水文服务. 生态学报, 2015, 35(15): 5191-5196.

[38] 严登华, 王浩, 杨舒媛, 刘明国, 霍竹. 干旱区流域生态水文耦合模拟与调控的若干思考. 地球科学进展, 2008, 23(7): 773-778.

[39] Seenath A, Wilson M, Miller K. Hydrodynamic versus GIS modelling for coastal flood vulnerability assessment: which is better for guiding coastal management? Ocean & Coastal Management, 2016, 120: 99-109.

[40] 杨大文, 徐宗学, 李哲, 袁星, 王磊, 缪驰远, 田富强, 田立德, 龙笛, 汤秋鸿, 刘星才, 张学君. 水文学研究进展与展望. 地理科学进展, 2018, 37(1): 36-45.

[41] 任海, 王俊, 陆宏芳. 恢复生态学的理论与研究进展. 生态学报, 2014, 34(15): 4117-4124.

[42] Chidammodzi C L, Muhandiki V S. Water resources management and Integrated Water Resources Management implementation in Malawi: Status and implications for lake basin management. Lakes & Reservoirs Research & Management, 2017, 22(2): 101-114.

[43] 李俊奇, 任艳芝, 聂爱华, 李小宁, 宫永伟. 海绵城市: 跨界规划的思考. 规划师, 2016, 32(5): 5-9.

[44] 徐江, 邵亦文. 韧性城市: 应对城市危机的新思路. 国际城市规划, 2015, 30(2): 1-3.

[45] Lienert J, Monstadt J, Truffer B. Future scenarios for a sustainable water sector: a case study from Switzerland. Environmental Science & Technology, 2006, 40(2): 436-442.