

# 基于水循环视角的海绵城市系统及研究要点解析

杨默远<sup>1</sup>, 刘昌明<sup>2</sup>, 潘兴瑶<sup>1</sup>, 梁康<sup>2</sup>

(1. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所  
中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

**摘要:** 海绵城市建设的本质是城市水系统的重构, 明晰海绵城市系统所涉及的水循环过程是海绵城市研究中最根本、最重要的问题。以海绵城市建设区为研究对象, 本文定义了海绵城市系统的内涵, 明确海绵城市系统的输入项与输出项, 探讨了基于海绵城市系统的城市水循环过程, 即海绵城市建设区“大气水—地表水—土壤水—管网水—地下水”转化过程。分别从明确海绵城市建设区的降水与污染物输入、掌握典型海绵设施的径流及污染物转化过程、重视排水管网径流监测与汇流特征参数确定、准确分析海绵城市建设区的径流及污染物外排过程、综合评估海绵城市建设的生态与地下水回补效益共5个方面, 系统梳理了海绵城市系统的研究现状及未来的研究要点, 以为海绵城市建设的基础理论研究与工程实践提供启发和帮助, 促进中国城镇化转型发展。

**关键词:** 海绵城市; 城市水文学; 海绵设施; 城市水循环; 水系统

DOI: 10.11821/dlxb202009002

## 1 引言

城镇化是现代化的必由之路, 既是经济发展的结果, 又是经济发展的动力。2000年以来, 城镇化率以每年约1.3%的速度快速发展, 截至2017年底, 中国城镇化率达到58.52%, 按照世界发达国家城镇化率大于70%的标准和经济社会发展的需要, 中国城镇化仍有很大的发展空间, 预计2030年也将达到70%, 即中国将有10亿以上的人口聚集于城镇。传统粗放管理下的城市化发展方式以及不断增加的城市不透水面积比例, 改变了原有的自然水循环过程, 导致了内涝灾害频发、水体污染严重、缺水与水生态退化等一系列城市水问题。为了维护自然、健康的城市水循环过程, 2013年12月, 习近平在中央城镇化工作会议上提出“建设自然积存、自然渗透、自然净化的海绵城市”, 强调通过海绵城市建设维护城市下垫面对雨水径流的存蓄、入渗和净化等自然功能。

海绵城市概念的提出, 在全国范围内掀起了海绵城市建设研究与实践的热潮, 两批共30个海绵城市建设试点的开工建设更加速了海绵城市建设理念和技术的丰富与完善。车伍等深入解读了《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》(以下简称《指南》)中的基本概念与综合目标、径流总量控制率计算与区划、雨洪调蓄系统构建等具体问题, 有效指导了后续的海绵城市建设<sup>[1-3]</sup>; 张建云等从内涵解析、目标指

收稿日期: 2019-05-27; 修订日期: 2020-06-11

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07103-002, 2017ZX07103-007); 北京市自然科学基金项目(8194061); 国家重点研发计划(2016YFC0401405) [Foundation: Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment, No.2017ZX07103-002, No.2017ZX07103-007; Beijing Municipal Natural Science Foundation, No.8194061; National Key R&D Project of China, No.2016YFC0401405]

作者简介: 杨默远(1989-), 男, 河南开封人, 博士, 高级工程师, 主要从事城市水文学研究。E-mail: ymoyuan@163.com

通讯作者: 刘昌明(1934-), 男, 湖南汨罗人, 中国科学院院士, 主要从事自然地理研究工作。E-mail: liucm@igsnr.ac.cn

标、建设功能、体制机制等角度深入讨论了海绵城市建设的有关问题<sup>[4]</sup>；左其亭从学科体系的视角，阐述了海绵城市建设中需要关注的6项水科学难题<sup>[5]</sup>；王浩等基于“一片天对一片地”的核心思想，提出了海绵城市系统构建模式<sup>[6]</sup>；夏军等基于水系统的概念，深入讨论了海绵城市建设涉及的关键水文学问题<sup>[7-8]</sup>；刘昌明等从城市防洪排涝、城市面源污染控制和城市雨洪资源化利用等角度，探讨了海绵城市建设的核心内容，提出了宏观、中观、微观3个不同层面的城镇低影响发展模式，并以常德海绵试点为例进行了典型案例分析<sup>[9-10]</sup>。

海绵城市建设旨在维护良性水循环的城市水系统建设与改造，随着实践的不断深入，人们越来越认识到基于系统性视角研究海绵城市建设的重要性<sup>[11]</sup>。而目前尚缺乏基于城市水循环视角，对海绵城市系统进行界定，未明确海绵城市系统与整个城市水系统之间的复杂作用关系，亟待系统和全面地梳理海绵城市建设背景下的城市水循环过程。针对上述主要问题，本文从城市水循环的角度进行讨论，阐明了海绵城市系统的内涵，明确了海绵城市系统的输入项与输出项，分析了海绵城市建设区“大气水—地表水—土壤水—管网水—地下水”转化过程，并结合现有的海绵城市建设实践经验，较为系统地梳理了海绵城市建设区主要水文过程及研究要点，以为海绵城市建设的基础理论与工程实践提供科学参考与支撑。

## 2 海绵城市系统概念解析

### 2.1 海绵城市系统的定义与组成

海绵城市建设的初衷是重塑城市建设区的自然水循环过程，海绵城市系统是海绵城市建设和改造的主体。为了便于明确海绵城市研究的边界，聚焦恢复城市下垫面自然水文特征这一海绵城市建设的核心思想，本文所讨论的海绵城市系统主要指由河湖水系等地表水边界分隔的相对独立的海绵城市建设区，未拓展到城市流域这一较为宏观的尺度。依据功能定位和水文特性的不同，海绵城市系统包括普通下垫面、海绵设施和排水管网共3部分（图1）。普通下垫面是指传统城市水文学中重点研究的对象，包括屋顶、道路、广场等不透水下垫面，以及绿地、裸地等透水下垫面和小规模的水体等。海绵设施主要包括：① 源头低影响开发设施，例如屋顶绿化、透水铺装、生物滞留设施、雨水花园等；② 过程调控设施，例如初期雨水截留、环保型雨水口、旋流沉砂、管道在线过滤等；③ 末端蓄滞设施，例如雨水坑塘、调蓄池等。区别于自然流域水循环过程，排水管网是城市建设区重要的水流通通道及最活跃的组成部分，通过排水管网人工构建了不同产流单元之间以及海绵城市系统和外部受纳水体的快速水力联系，因此需要开展针对性的研究。

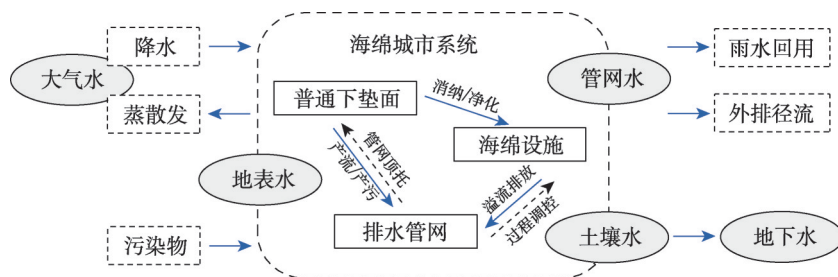


图1 海绵城市系统及输入与输出

Fig.1 Sponge city system and its input and output

## 2.2 海绵城市系统内部的水文转化过程

在海绵城市系统内部,普通下垫面、海绵设施和排水管网存在密切的水力联系(图1)。在海绵城市建设中,强调将普通下垫面形成的地表径流引入海绵设施进行消纳和净化,随后溢流排放进入排水管网(普通下垫面→海绵设施→排水管网)。但在场地条件不允许时,也不排除普通下垫面产生的地表径流和面源污染未经海绵设施处理,直接排入雨水管网的情况发生(普通下垫面→排水管网)。而当管网排水能力不足时,排水管网中的径流及污染物可能通过管网顶托作用返回普通下垫面,形成地表积水(排水管网→普通下垫面)。此外,海绵城市建设不仅强调源头减排,排水管网中的径流和污染物还可以通过海绵设施进行过程和末端调控(排水管网→海绵设施)。

## 2.3 海绵城市系统的输入与输出

海绵城市建设的核心是海绵城市系统的科学构建,难点在于统筹协调普通下垫面、海绵设施和排水管网三者的关系。而海绵城市系统对系统输入项和输出项的复杂响应关系,直接影响到海绵城市系统的建设效果。从水文过程的角度进行分析,海绵城市系统的输入项主要包括降水和污染物两部分,分别对应海绵城市重点关注的水量和水质过程。海绵城市系统的输出项主要包括:①通过蒸散发返回大气;②通过深层入渗后进入地下含水层;③通过管网进入河湖水系的外排径流;④由多种方式实现的雨水回用。需要予以明确的是,本文所研究的污染物输入及径流污染物外排过程主要针对大气干湿沉降过程以及机动车、行人、生活垃圾等引起的城市面源污染,而不包括城市生活污水及其他点源污染。

## 2.4 海绵城市系统建设目标

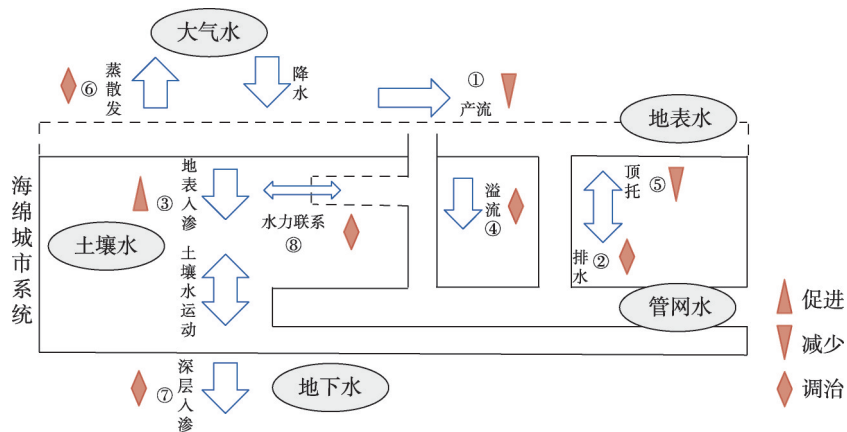
相较传统城市建设区而言,通过海绵城市系统的构建,能够在降水和污染物输入保持不变的前提下,根据海绵城市建设目标,优化海绵城市系统输出项,即蒸散发、地下水、外排径流、雨水回用量之间的分配比例。对照《指南》中给出的海绵城市建设目标,减少外排水量及污染物无疑是最为关键的,此外还强调通过海绵城市建设增加雨水回用量。但通过海绵城市建设减少的这一部分外排径流究竟是增加了蒸散发量,还是回补了地下水,或是滞留在海绵城市系统内部,是非常复杂且不应回避的问题,需要结合实际的区域特点与具体的海绵城市建设目标,从水循环的角度进行深入的分析讨论。

# 3 海绵城市建设区的水文转化过程

在明确海绵城市系统相关概念的基础上,进一步解析海绵城市系统所涉及的水循环过程是海绵城市建设中的重要基础研究。传统的自然流域水循环过程主要研究大气水、地表水、土壤水和地下水之间的转换关系(“四水”转化)。考虑到在海绵城市建设区,管网是最为活跃的水流路径,能够人为组织和串联不同的产流单元与海绵设施。同时,管网汇流取代了传统自然流域的地表汇流过程,成为径流外排的主要途径。因此,需要在传统“四水”转化的基础上考虑管网水的重要作用,研究海绵城市建设区的“大气水—地表水—土壤水—管网水—地下水”转化过程,即“五水”转化(图2)。

## 3.1 径流形成及外排过程

对于不透水下垫面而言,降水扣除初损和蒸散发后,转化为地表径流(①产流:大气水→地表水)。其中一部分地表径流汇入海绵设施,另一部分直接通过雨水口排入雨水管网,由地表水转化为管网水(②排水:地表水→管网水)。对于透水下垫面和海绵设施而言,降水首先消耗于初损过程,完全入渗进入土壤,直接完成大气水与土壤水的转



注：“促进”指海绵城市建设会加强这一水转化过程；“减少”指海绵城市建设会抑制这一水转化过程；“调治”指海绵城市建设会优化这一水转化过程。

图2 海绵城市建设区水转化过程

Fig. 2 Water transformation process in sponge city construction area

化（③ 地表入渗：大气水→土壤水）。随着降水量与土壤含水量的增加，当降水强度超过表层土壤的入渗能力或是表层土体完全饱和时，才可能发生地表产流（① 产流：大气水→地表水）。

### 3.2 土壤水转化过程

降水过程中，地表积水与降水逐渐渗入土壤，完成地表水向土壤水的转化（③ 地表入渗：地表水→土壤水）。降水结束后，增加的土壤水一部分通过蒸散发作用返回大气（⑥ 蒸散发：土壤水→大气水），一部分通过包气带土壤水分运动进入地下含水层（⑦ 深层入渗：土壤水→地下水）。海绵城市建设强调降水的就地消纳，因此在直接减少地表水和管网水的同时增加了土壤水，随后又间接增加了大气水与地下水。

### 3.3 管网水转化过程

管网水是城市建设区和自然流域水循环过程的重要区别之一，并且海绵城市建设进一步强化了管网的径流传输与汇流组织功能，因此其管网水转化过程也更为复杂。海绵城市建设区的管网水转化过程主要包括以下4种方式：发生在普通下垫面的地表径流直接外排过程（② 排水：地表水→管网水）；发生在海绵设施表层的超标雨水径流溢流排放过程（④ 溢流：地表水→管网水）；管网排水能力不足时的管网水顶托过程（⑤ 顶托：管网水→地表水）；发生于渗透型排水管的土壤水与管网水相互转化过程（⑧ 水力联系：土壤水↔管网水）。因此，海绵城市建设区管网水与其它水量成分具有复杂的转化关系，这也是海绵城市建设区水循环过程与自然流域水循环过程的主要差异。

### 3.4 海绵城市建设的水文效应

一般情况下，海绵城市建设会增加原有城市水循环过程中的蒸散发量、地表入渗量，减少产流量和管网顶托情况的发生，并根据现状条件和雨水管控需求调治管网排水过程、海绵设施溢流过程、深层入渗过程，建立表层土壤与渗透型管网的水力联系。海绵城市建设对城市水文过程的影响，包括径流减控、污染物削减、生态环境恢复等，都是上述直接水文转化过程的综合作用结果。因此，应从分析海绵城市建设对上述主要水文转化过程的影响入手，识别和评估海绵城市建设的水文效应。

## 4 海绵城市建设的水文研究要点

依据前文对海绵城市系统的定义以及输入/输出关系的梳理,分别从海绵城市系统的降水与污染物输入、海绵设施的水量水质转化、排水管网径流传输规律、海绵城市系统的径流与污染物外排、海绵城市建设的生态与地下水回补效益共5个方面,论述了海绵城市建设背景下城市水文循环的研究要点,以期科学指导全国范围的海绵城市建设推广及应用。

### 4.1 明确海绵城市建设区的降水与污染物输入

降水的时空演变规律一直以来都是水文学研究的重要内容,针对城市建设区复杂下垫面条件下的降水研究也已经开展了大量的工作。从海绵城市建设的角度考虑降水时空演变规律,需要强调2项内容:①如何基于城市建设区高密度降水量站网的详细资料,充分进行数据挖掘,掌握历史降水的细节特征,特别是与局地微地形和下垫面密切相关的降水空间分布规律<sup>[12-16]</sup>;②将气候模式的降尺度成果与高分辨率历史资料进行结合,合理、谨慎的推求未来的降水变化趋势,开展海绵城市建设的气候变化适应性分析,适当优化海绵城市建设标准<sup>[17-21]</sup>。此外,由于海绵城市建设主要关注场次降水事件,因此场次降水特性应当作为降水时空演变规律分析的重点。场次降水特性包括降水重现期、降水历时、降水总量、峰值降水强度、雨前干期、雨型等要素,具体从哪些角度分析场次降水特性,应当与后续开展的地表污染物冲刷规律分析、不同下垫面产汇流特征识别、年径流总量控制率核算、海绵工程规划设计等研究需求相结合<sup>[22]</sup>。

解决城市面源污染问题是开展海绵城市建设的重要出发点之一,从海绵城市建设的角度研究城市面源污染问题,应包括以下4个方面:①定量城市下垫面的污染物输入;②识别降水过程中的污染物冲刷规律;③分析不同的面源污染削减技术途径;④综合评估面源污染控制效果。在中国的不同城市,已针对城市面源污染的上述4个方面开展了大量的实验监测与分析研究<sup>[23-29]</sup>。但由于城市面源污染存在空间分布广泛、转化环节多样、削减途径复杂、监测资料获取不便等特点,使得相对孤立的研究成果难以支撑中国城市面源污染总体规律的识别,有必要对分散的监测成果进行有效整合,掌握城市面源污染时空分布规律,并从有效控制径流污染的角度,指导全国范围的海绵城市建设<sup>[30-32]</sup>。

### 4.2 掌握典型海绵设施的径流及污染物转化过程

海绵城市的核心是一系列海绵设施的建设,和绿地、裸土等城市普通透水下垫面相比,海绵设施普遍具有地表下凹滞蓄空间和复杂的分层结构,导致其降水—入渗—产流过程具有突出的有压入渗特点,并且设施内部的垂向水分运动与传统分层土壤水运动存在较大差异。因此,有必要在现有产流机理研究的基础上,针对不同的结构特点及应用场景,进一步完善典型海绵设施的降水—入渗—产流和分层土壤水运动机理,并通过水量削减实现污染控制,定量分析海绵设施的初期雨水径流及污染截留效应,识别污染物迁移转化规律。

**4.2.1 降水—入渗—产流过程识别** 海绵设施普遍存在一定的地表下凹滞蓄空间,使得海绵设施在入渗产流过程中往往存在10 cm以上的水头压力。不同于自然流域的入渗产流过程,有压入渗过程不能够通过经验入渗模型(例如公式(1)Horton模型和公式(2)HIMS模型)较好描述<sup>[33]</sup>。而在物理入渗模型(例如公式(3)Green-Ampt模型)的土水势分析中直接添加地表净水头压力项能否准确模拟海绵设施的有压入渗过程,还需要进一步开展详细的实验分析与验证工作<sup>[34-37]</sup>。

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c) e^{-kt} \quad (1)$$

式中:  $f(t)$ 为  $t$ 时刻的下渗率;  $f_c$ 和  $f_0$ 分别为稳定下渗率和初始下渗率;  $k$ 为参数;  $f_c$ 、 $f_0$ 和  $k$ 均需率定。

$$f = R \times P^r \quad (2)$$

式中:  $P$ 为场次降水量;  $R$ 和  $r$ 为土壤下渗参数。

$$f(t) = K_s \frac{z_f(t) + h_f + H}{z_f(t)} \quad (3)$$

式中:  $K_s$ 为饱和导水率;  $z_f(t)$ 为  $t$ 时刻的湿润锋位置;  $h_f$ 为湿润锋处的土壤水吸力;  $H$ 为地表净水头压力; 其他参数同前。由上述3个公式描述的降水—入渗—产流过程可见, 还有更多的未知的过程参数需要获取。

**4.2.2 分层土壤水运动过程识别** 分层土壤水分运动过程一直以来都是土壤水研究的重点, 也取得了大量的研究成果<sup>[38-42]</sup>。但在海绵设施构建过程中, 为了强化设施的渗透和持水性能, 添加了大量的非土壤类填料, 其水分运动特征与天然土体必然存在较大差异。一般而言, 海绵设施, 特别是生物滞留设施自上而下依次为种植土层、基质层、排水砾石层和原状土层。目前得到大家广泛认可的Green-Ampt和Richards模型能否描述海绵设施复杂分层结构条件下的土壤和非土壤介质中的水分运动过程还存在较大疑问, 如何提出相对完善的海绵设施土壤水分运动机制, 是进行海绵设施精细化模拟的关键。

**4.2.3 初期雨水径流及污染截留过程识别** 海绵设施能够通过沉淀、吸附、过滤等过程降低径流污染物浓度, 特别是对悬浮物(SS)具有较好的控制效果(普遍在50%以上), 而对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{TN}$ 、 $\text{TP}$ 和 $\text{COD}$ 等其他特征污染物的去除效果不稳定, 甚至可能出现增加污染物浓度的情况。因此海绵设施的径流污染去除效果, 很大程度上归功于海绵设施突出的径流总量控制效果(对于中小重现期降雨能达到80%以上)<sup>[26-28]</sup>。此外, 通过分析入流—出流过程曲线, 能够发现在产流发生前的初损过程中, 海绵设施的径流总量控制效果更加突出<sup>[43]</sup>。与此同时, 由于初期雨水效应的存在, 使得初期被截留的径流污染浓度普遍高于整个径流过程的平均污染物浓度。因此, 初期污染物截留作用是海绵设施能够有效削减污染物的关键, 识别初期雨水径流及污染截留特征是评估海绵设施污染物削减效果的重要环节<sup>[31, 44-47]</sup>。

**4.2.4 污染物迁移转化过程识别** 海绵设施对普通下垫面的地表径流进行集中消纳, 滞留在海绵设施内部的大量径流及携带的污染物可能会带来一定的土壤环境污染风险, 因此需要研究污染物在海绵设施内部的迁移转化规律, 具体涉及弥散、吸附、解析及氧化还原等过程<sup>[48]</sup>。此外, 不同的污染物输入特征、海绵设施分层结构和土壤特性都会导致不同的迁移转化结果, 难以借助通用的机理或者模型描述所有可能的情况。因此有必要在土壤水环境研究的基础上, 针对城市面源污染的不同特征污染物分别进行分析, 系统开展各类海绵设施的污染物迁移转化规律研究, 为海绵设施的结构设计、填料优选、运营维护等实际工作提供指导。

### 4.3 重视排水管网径流监测与汇流特征参数确定

**4.3.1 管网水量、水质传输过程识别** 排水管网是在海绵城市系统中人工构建的径流汇集、输送和排放通道, 不同于自然流域的坡面汇流过程, 排水管网具有汇流响应迅速、路径复杂、流态多变等特点。目前已有大量的理论公式能够较好地描述理想状态下的管网汇流过程<sup>[49-50]</sup>。但由于施工质量不达标、运行管理不完善等客观原因, 导致实际排水管网中淤积、渗漏、错接、混接等异常情况普遍存在, 管网实际的水量、水质传输过程往往与理想状态存在较大偏差<sup>[51-53]</sup>。此外, 由于排水管网相对封闭, 对管网汇流过程的监测

异常困难。目前通过常规的在线监测设备,仅能够得到少量管网关键节点的水量水质监测数据,且难以保证监测数据质量,并且针对节点与节点之间的管网水量、水质传输过程缺乏有效的监测手段<sup>[54-55]</sup>。如何获取高质量监测数据,并通过有限的监测数据还原整个管网汇流过程,是目前海绵城市建设中迫切需要解决的问题。

**4.3.2 管网汇流特征参数确定** 在目前海绵城市建设区管网汇流模拟与分析中,管网汇流参数的取值存在较高主观性,并且对管网汇流参数的重视程度远低于地表产流参数<sup>[56]</sup>。虽然径流总量的削减是海绵城市建设所重点关注的内容,但汇流过程决定了整个径流过程的时程分配,直接影响到峰值流量和峰现时间等关键要素,其重要性同样不言而喻<sup>[57]</sup>。因此,有必要在获取管网详细监测数据的基础上,考虑实际的管网运行状态,科学确定管网汇流特征参数,使得概化后的管网汇流模型能够真实反映管网汇流规律。

#### 4.4 准确分析海绵城市建设区的径流及污染物外排过程

**4.4.1 年径流总量控制率核算** 年径流总量控制率和年污染物总量去除率是海绵城市建设中最为核心的2项指标。自年径流总量控制率概念提出以来,其内涵和核算方法一直是大家关注的热点。王家彪等分别讨论了降水总量控制和降水场次控制的区别<sup>[58]</sup>。李俊奇等探析了极端降水事件对年径流总量控制率和24 h降水场次控制率的影响规律,最后确定计算过程中极端降水事件的最佳扣除比例<sup>[59]</sup>。张建云等认为海绵城市中径流控制效果与场次暴雨总量与时程分布有直接关系,根据地域降水特征来设置径流控制指标更合理<sup>[4]</sup>。

张宇航等分别从场次降水确定方法以及资料长度合理取值两个方面探讨了年径流总量控制率的核算方法。结果表明,较《指南》中选取的日降水数据而言,场次降水数据更能反映实际的降水特征。以北京城市副中心海绵城市试点区为例,在最小降水间隔时间取6 h和24 h时,日降水数据计算得到的设计降水量分别偏低19.81%和35.10%<sup>[60]</sup>。通过对全国范围降水资料的深入分析,发现对于缺资料地区,适当减少资料系列长度也可得到合理结果(20~25 a);对于历史降水资料充足的地区,应考虑历史降水序列的周期性及趋势性变化规律,综合确定最终选用的历史降水序列,并考虑不同的丰平枯阶段,得到年径流总量控制率变化区间,从而确保最优的海绵城市建设标准与合理的工程建设投入<sup>[22]</sup>。

年径流总量控制效果主要受中小降雨(<1 a一遇)的影响,而高强度降雨事件及其引起的城市洪涝灾害,同样是海绵城市建设关注的重点。通过在全国不同研究区开展的大量情景模拟分析,充分说明海绵城市建设能够有效缓解一般强度降水引起(1~3 a一遇)的洪涝灾害<sup>[61-62]</sup>。但由于目前的海绵城市实践主要集中在有限的试点建设区域,局限于低影响开发措施的应用,因此难以应对极端降水( $\geq 3$  a一遇)造成的城市区域范围洪涝灾害。因此需要进一步拓展海绵城市建设内涵,将低影响开发理念、灰色基础设施建设和城市流域统筹管理相结合,通过构建不同尺度的海绵城市建设技术体系,综合解决城市暴雨洪涝问题<sup>[63]</sup>。

**4.4.2 年污染物总量控制效果评估** 控制外排径流污染是海绵城市建设的核心目标之一,在2014年发布的《海绵城市建设技术指南》中,利用“年污染物总量去除率”指标评价径流污染控制效果,认为“年污染物总量去除率”等于年径流总量控制率与低影响开发设施污染物浓度去除率的乘积。而在2018年发布的《海绵城市建设评价标准》(GB/T51345-2018)中,将“年污染物总量去除率”指标替换为“年径流污染物总量削减率”指标,但没有给出具体的“年径流污染物总量削减率”指标定义与计算方法。根据笔者的理解定量海绵城市建设的污染物总量控制效果有如下2种思路:① 定量海绵城市系统污染物输入与输出的关系,便于关联接纳水体的水环境容量等指标;② 对比海绵城市建设前

后的径流污染外排总量,进而评估海绵城市建设的水文效应。在具体核算方法上,上述2种分析思路都需要在准确监测、合理建模的基础上,通过情景模拟分析的方法,综合评估年污染物总量控制效果。

**4.4.3 合流制溢流污染发生规律识别** 雨污分流制排水系统在新建区海绵城市建设中较为普遍,但在老城区的海绵城市改造中,通常还需要应对雨污合流制排水系统。当合流制排水系统发生溢流事件时,面源污染携带大量生活污水进入河湖水系,严重影响河湖水质。因此,合流制溢流污染的控制也是海绵城市建设的重要内容。在《海绵城市建设评价标准》中,将年均溢流次数作为评价城市水体环境质量的一项重要指标。王文亮等<sup>[64]</sup>和赵泽坤<sup>[65-66]</sup>等在借鉴美国实践经验的基础上,分别从政策管理和技术方法的角度深入讨论了合流制溢流污染控制难题。但就合流制溢流污染物发生规律而言,目前的研究多是基于模型模拟的方法,模拟结果的不确定性和建模过程的局限性较大。因此,有必要从水文过程的角度入手,在提升监测成果质量的基础上,深入研究合流制溢流污染与降水特征、海绵建设方案等因素的相关关系,进一步拓展研究思路<sup>[67-68]</sup>。

#### 4.5 综合评估海绵城市建设的生态与地下水回补效益

**4.5.1 土壤水对蒸散发的影响规律识别** 海绵城市建设将外排径流调蓄在海绵设施内部,转化为海绵设施的土壤水,随后或是通过蒸散发过程返回大气,或是通过深层入渗进入地下水系统。因此,较传统城市建设区而言,海绵城市建设在一定程度上会增加区域蒸散发量。但目前有关城市区域蒸散发的研究多是从能量平衡的角度进行分析,通过一个综合的阻抗系数反映非充分供水条件下,植被类型、土壤质地、土壤水含量等因素对蒸散发过程限制作用<sup>[69]</sup>。有必要从水文过程的角度进一步明晰土壤水对蒸散发过程的限制作用与影响规律,定量分析发生在海绵设施表面的“降水—土壤水—径流—蒸散发”动态转换过程<sup>[70-71]</sup>。

**4.5.2 海绵城市建设的生态效益评估** 热岛效应是城市建设对区域气候影响的主要特征之一,海绵城市建设降低了传统城市建设区不透水下垫面比例,增加了土壤湿度和蒸散量,能够有效缓解城市热岛效应,具有显著的生态效益<sup>[72-73]</sup>。但目前针对海绵城市建设生态效益的研究多集中在屋顶绿化、生物滞留设施等点尺度海绵设施,如何利用点尺度研究成果支撑区域尺度海绵城市生态效益的评估,是未来相关研究工作的重点<sup>[24-25, 27, 29]</sup>。因此,有必要将点尺度气象要素监测数据与基于遥感影像获取的区域尺度地温数据进行有效整合,定量海绵城市建设区的生态效益。

海绵城市建设在恢复城市下垫面自然水文特性的同时,也强调对城市河湖水系的治理与生态服务价值的提升。随着中国城市点源污染得到有效控制,面源污染已逐渐成为城市水环境保护和生态提升的首要管控对象<sup>[74]</sup>。海绵城市建设是缓解城市面源污染的有效途径,一方面提升了进入城市河湖水系的径流水质,另一方面在削减洪峰流量的同时增加径流外排历时,适度恢复了城市水系基流,提升了接纳水体的水环境容量<sup>[75]</sup>。在重点解决城市面源污染的基础上,海绵城市建设需进一步加强与城市流域黑臭水体治理、河道景观提升、河湖水系综合治理等工程的结合,逐步提升城市水环境质量,恢复河道植物及生物群落结构,并最终增强城市水生态系统韧性<sup>[76-77]</sup>。

**4.5.3 海绵城市建设的地下水文、水环境效应分析** 海绵城市建设强化了城市建设区地表水、土壤水和地下水的水力联系,通过海绵城市设施额外进入地下水系统的这部分径流及可能携带的污染物会引起复杂的地下水文、水环境效应<sup>[78]</sup>。目前针对海绵设施的水量、水质外排过程开展了大量的研究,而对深层入渗进入地下水系统的水量、水质输出过程关注不足,并且缺乏必要的监测手段与研究方法<sup>[79-80]</sup>。有必要在海绵城市建设区针对



性的开展浅层地下水水文监测与水质采样分析,并对位于中间过程的包气带进行深入的土壤与包气带环境调查。在数据监测分析的基础上,评估海绵城市建设对局地 and 区域地下水流场的影响,以及海绵设施的污染物入渗规律及对地下水环境的影响,并从地下水水文、水环境效应的角度,提出海绵城市建设的改进建议。

## 5 结论与展望

海绵城市是新的城市发展理念,包括了体现“生态优先,绿色发展”理念的大量工程建设实践,涵盖了城市建设的多学科、多领域、多部门。但就海绵城市概念提出的背景而言,其目标主要是为了在城市化高度发展的过程中,开启统筹“城市化”与“自然化”的城市水系统可持续发展新阶段。为了科学指导海绵城市建设实践,本文从城市水循环的角度,系统梳理了海绵城市建设的研究要点及发展方向。

(1) 海绵城市系统包括普通下垫面、海绵设施和排水管网。针对海绵设施,应结合设施结构特点,进一步完善降水—入渗—产流、分层土壤水运动、初期雨水及污染物截留、污染物迁移转化等关键水文过程的研究成果,定量海绵设施的水文效应。而排水管网作为海绵城市建设区最活跃的水流路径,在未来的研究中需更加重视管网水在海绵城市建设区水文转化中的突出作用。

(2) 海绵城市系统主要存在降水和污染物两大输入项。精细化的降水时空演变规律研究,特别是场次降水特征识别,应作为开展海绵城市规划设计的重要基础。此外,目前海绵城市建设的面源污染减控效果研究成果较为丰富,但多为针对某一特定研究对象的孤立成果,有必要对分散的监测及分析成果进行有效整合,识别其中的共性规律,形成参考利用价值更强的通用性成果。

(3) 外排径流与污染物的控制是海绵城市建设的核心目标。在具体的海绵建设实践中,需要在国家发布的指南及标准提供的年径流总量控制率和污染物削减率计算方法的基础上,依据各地区具体的海绵城市建设需求,不断完善上述指标的准确核算方法,更加科学的指导海绵城市规划设计与工程建设。现有实践表明,海绵城市建设能够有效缓解中小强度降水引起的洪涝灾害,但仍需要与灰色基础设施建设和城市流域统筹管理相结合,通过构建不同尺度的海绵城市建设技术体系,综合解决日益凸显的城市极端暴雨洪涝问题。

(4) 从水量平衡的角度,海绵城市建设在减少外排径流量的同时,一定程度上增加区域的蒸散发量和地下蓄水量,提升城市水生态质量。但目前海绵城市建设的生态效益研究多处于定性分析阶段,鲜有定量结论的产出。未来还需要从基础的监测分析工作入手,在完善海绵设施蒸散发及深层入渗机理的基础上,实现由点尺度水文过程研究向区域尺度水文效应评估分析的尺度转换,定量海绵城市系统的生态服务价值。

## 参考文献(References)

- [1] Wang Wenliang, Li Junqi, Che Wu, et al. Explanation of sponge city development technical guide: Planning index for urban total runoff volume capture. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(8): 18-23. [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. *中国给水排水*, 2015, 31(8): 18-23.]
- [2] Li Junqi, Wang Wenliang, Che Wu, et al. Explanation of sponge city development technical guide: Regional division for total rainfall runoff volume capture target. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(8): 6-12. [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. *中国给水排水*, 2015, 31(8): 6-12.]

- [3] Che Wu, Zhao Yang, Li Junqi, et al. Explanation of sponge city development technical guide: Basic concepts and comprehensive goals. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(8): 1-5. [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. *中国给水排水*, 2015, 31(8): 1-5.]
- [4] Zhang Jianyun, Wang Yintang, Hu Qingfang, et al. Discussion and views on some issues of the sponage city construction in China. *Advances in Water Science*, 2016, 27(6): 793-799. [张建云, 王银堂, 胡庆芳, 等. 海绵城市建设有关问题讨论. *水科学进展*, 2016, 27(6): 793-799.]
- [5] Zuo Qiting. Water science issues in sponge city construction. *Water Resources Protection*, 2016, 32(4): 21-26. [左其亭. 我国海绵城市建设中的水科学难题. *水资源保护*, 2016, 32(4): 21-26.]
- [6] Wang Hao, Mei Chao, Liu Jiahong. Systematic construction pattern of the sponge city. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(9): 1009-1014+1022. [王浩, 梅超, 刘家宏. 海绵城市系统构建模式. *水利学报*, 2017, 48(9): 1009-1014, 1022.]
- [7] Xia Jun, Shi Wei, Wang Qiang, et al. Discussion of several hydrological issues regarding sponge city construction. *Water Resources Protection*, 2017, 33(1): 1-8. [夏军, 石卫, 王强, 等. 海绵城市建设中若干水文学问题的研讨. *水资源保护*, 2017, 33(1): 1-8.]
- [8] Xia J, Zhang Y Y, Xiong L H, et al. Opportunities and challenges of the sponge City construction related to urban water issues in China. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60(4): 652-658.
- [9] Liu Changming, Wang Kaiwen. Discussions on the low impact development patterns and strategies of urban water ecological civilization construction. *China Water Resources*, 2016(19): 1-4. [刘昌明, 王恺文. 城镇水生态文明建设低影响发展模式与对策探讨. *中国水利*, 2016(19): 1-4.]
- [10] Liu Changming, Zhang Yongyong, Wang Zhonggen, et al. The LID pattern for maintaining virtuous water cycle in urbanized area: A preliminary study of plannary study of planning and techniques for sponge city. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(5): 719-731. [刘昌明, 张永勇, 王中根, 等. 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.]
- [11] Xu Zongxue, Cheng Tao. Basic theory for urban water management and sponge city: Review on urban hydrology. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(1): 53-61. [徐宗学, 程涛. 城市水管理与海绵城市建设之理论基础: 城市水文学研究进展. *水利学报*, 2019, 50(1): 53-61.]
- [12] Liu Weidong, You Huanling, Ren Guoyu, et al. AWS precipitation characteristics based on k-means clustering method in Beijing area. *Meteorological Monthly*, 2014, 40(7): 844-851. [刘伟东, 尤焕苓, 任国玉, 等. 北京地区自动站降水特征的聚类分析. *气象*, 2014, 40(7): 844-851.]
- [13] Xu Guanglai, Xu Youpeng, Xu Hongliang. Advance in hydrologic process response to urbanization. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(12): 2171-2178. [徐光来, 许有鹏, 徐宏亮. 城市化水文效应研究进展. *自然资源学报*, 2010, 25(12): 2171-2178.]
- [14] Zhou Changyan, Cen Sixuan, Li Yueqing, et al. Precipitation variation and its impacts in sichuan in the last 50 years. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(5): 619-630. [周长艳, 岑思弦, 李跃清, 等. 四川省近50年降水的变化特征及影响. *地理学报*, 2011, 66(5): 619-630.]
- [15] Zhang Jianyun, Wang Yintang, He Ruimin, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China. *Advances in Water Science*, 2016, 27(4): 485-491. [张建云, 王银堂, 贺瑞敏, 等. 中国城市洪涝问题及成因分析. *水科学进展*, 2016, 27(4): 485-491.]
- [16] De Vos L, Leijnse H, Overeem A, et al. The potential of urban rainfall monitoring with crowdsourced automatic weather stations in Amsterdam. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(2): 765-777.
- [17] Sun Yanwei, Wang Wenchuan, Wei Xiaomei, et al. Eco-hydrological impacts of urbanization. *Advances in Water Science*, 2012, 23(4): 569-574. [孙艳伟, 王文川, 魏晓妹, 等. 城市化生态水文效应. *水科学进展*, 2012, 23(4): 569-574.]
- [18] Sang Yanfang, Wang Zhonggen, Liu Changming. Applications of wavelet analysis to hydrology: Status and prospects. *Progress in Geography*, 2013, 32(9): 1413-1422. [桑燕芳, 王中根, 刘昌明. 小波分析方法在水文学研究中的应用现状及展望. *地理科学进展*, 2013, 32(9): 1413-1422.]
- [19] Bi E G, Gachon P, Vrac M, et al. Which downscaled rainfall data for climate change impact studies in urban areas? Review of current approaches and trends. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 127(3/4): 685-699.
- [20] Willems P, Arnbjerg-Nielsen K, Olsson J, et al. Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: Methods and shortcomings. *Atmospheric Research*, 2012, 103: 106-118.
- [21] Miller J D, Hutchins M. The impacts of urbanisation and climate change on urban flooding and urban water quality: A

- review of the evidence concerning the United Kingdom. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2017, 12: 345-362.
- [22] Yang Moyuan, Pan Xingyao, Liu Honglu, et al. Accurate calculation of the volume capture ratio of annual rainfall considering the field rainfall evolution. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(12): 1510-1517, 1528. [杨默远, 潘兴瑶, 刘洪禄, 等. 考虑场次降雨年际变化特征的年径流总量控制率准确核算. *水利学报*, 2019, 50(12): 1510-1517, 1528.]
- [23] Yang Y Y, Toor G S. Sources and mechanisms of nitrate and orthophosphate transport in urban stormwater runoff from residential catchments. *Water Research*, 2017, 112: 176-184.
- [24] Qiu Fuguo, Chen Lixia. Research progress on contaminants removal from stormwater runoff by bioretention. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(4): 1593-1602. [仇付国, 陈丽霞. 雨水生物滞留系统控制径流污染物研究进展. *环境工程学报*, 2016, 10(4): 1593-1602.]
- [25] Ge De, Zhang Shouhong. Impacts of vegetation on hydrological performances of green roofs under different rainfall conditions. *Environmental Science*, 2018, 39(11): 5015-5023. [葛德, 张守红. 不同降雨条件下植被对绿色屋顶径流调控效益影响. *环境科学*, 2018, 39(11): 5015-5023.]
- [26] Guo Pingting, Wang Jianlong, Yang Liqiong, et al. Effect of bioretention media on pollutions removal from stormwater runoff. *Environmental Science & Technology*, 2016, 39(3): 60-67. [郭娉婷, 王建龙, 杨丽琼, 等. 生物滞留介质类型对径流雨水净化效果的影响. *环境科学与技术*, 2016, 39(3): 60-67.]
- [27] Li Jiake, Liu Zengchao, Huang Ningjun, et al. Advance in the study on bioretention technology for low-impact development. *Arid Zone Research*, 2014, 31(3): 431-439. [李家科, 刘增超, 黄宁俊, 等. 低影响开发(LID)生物滞留技术研究进展. *干旱区研究*, 2014, 31(3): 431-439.]
- [28] Meng Yingying, Wang Huixiao, Zhang Shuhan, et al. Experiments on detention, retention and purifying effects of urban road runoff based on bioretention. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2013, 49(2/3): 286-291. [孟莹莹, 王会肖, 张书函, 等. 基于生物滞留的城市道路雨水滞蓄净化效果试验研究. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2013, 49(2/3): 286-291.]
- [29] Wang Shumin, Li Xinyang, Zhang Junhua, et al. Influence of green roof application on water quantity and quality in urban region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(7): 2026-2032. [王书敏, 李兴扬, 张峻华, 等. 城市区域绿色屋顶普及对水量水质的影响. *应用生态学报*, 2014, 25(7): 2026-2032.]
- [30] Hou Peiqiang, Wang Xiaoke, Zheng Feixiang, et al. Research status of the characteristics of non-point source pollution in China. *Water & Wastewater Engineering*, 2009, 35(S1): 188-193. [侯培强, 王效科, 郑飞翔, 等. 我国城市面源污染特征的研究现状. *给水排水*, 2009, 35(增刊1): 188-193.]
- [31] Zhang Qianqian, Li Xiangquan, Wang Xiaoke, et al. Research advance in the characterization and source apportionment of pollutants in urban roadway runoff. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(2): 352-358. [张千千, 李向全, 王效科, 等. 城市路面降雨径流污染特征及源解析的研究进展. *生态环境学报*, 2014, 23(2): 352-358.]
- [32] Zhang Zhibin, Meng Qingyu, Ma Zheng. Study on pollution characteristics of urban non-point source pollution. *Water & Wastewater Engineering*, 2016, 52(S1): 163-167. [张志彬, 孟庆宇, 马征. 城市面源污染的污染特征研究. *给水排水*, 2016, 52(增刊1): 163-167.]
- [33] Liu Changming, Wang Zhonggen, Yang Shengtian, et al. Hydro-informatic modeling system: Aiming at water cycle in land surface material and energy exchange processes. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(5): 579-587. [刘昌明, 王中根, 杨胜天, 等. 地表物质能量交换过程中的水循环综合模拟系统(HIMS)研究进展. *地理学报*, 2014, 69(5): 579-587.]
- [34] Guo Huimin, Fan Guisheng. Relation between soil structure and the relative stable infiltration rate under the condition of surface water pressure infiltration. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2009, 28(6): 104-106. [郭会敏, 樊贵盛. 有压入渗条件下土壤结构与相对稳定入渗率间的关系研究. *灌溉排水学报*, 2009, 28(6): 104-106.]
- [35] Li Hongxing, Fan Guisheng. Experimental study on main factors influencing the infiltration capacity of unsaturated earth canal. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(5): 630-634. [李红星, 樊贵盛. 影响非饱和土渠床入渗能力主导因素的试验研究. *水利学报*, 2009, 40(5): 630-634.]
- [36] Li Hongxing, Fan Guisheng. The quantitative relation of stable infiltration rates between the pressured and non-pressured water infiltration in unsaturated soils. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29(2): 17-21. [李红星, 樊贵盛. 非饱和土壤有压和无压入渗稳定入渗率间的关系研究. *灌溉排水学报*, 2010, 29(2): 17-21.]
- [37] Chen L, Xiang L, Young M H, et al. Optimal parameters for the Green-Ampt infiltration model under rainfall conditions. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2015, 63(2): 93-101.
- [38] Wang Qianjiu, Shao Ming'an, Wang Zhirong, et al. Application of green ampt equation during infiltration in layered soil. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1999, 5(4): 66-70. [王全九, 邵明安, 汪志荣, 等. Green-

- Ampt公式在层状土入渗模拟计算中的应用. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(4): 66-70.]
- [39] Chu X, Mariño M A. Determination of ponding condition and infiltration into layered soils under unsteady rainfall. *Journal of Hydrology*, 2005, 313(3/4): 195-207.
- [40] Mohammadzadeh- Habili J, Heidarpour M. Application of the green-ampt model for infiltration into layered soils. *Journal of Hydrology*, 2015, 527: 824-832.
- [41] Gohardoust M R, Sadeghi M, Ahmadi M Z, et al. Hydraulic conductivity of stratified unsaturated soils: Effects of random variability and layering. *Journal of hydrology*, 2017, 546: 81-89.
- [42] Xiong Dinghui, Liu Suxia, Mo Xingguo. Numerical difference in soil water between vertically stratified and homogenized soil profiles. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(4): 593-603. [熊丁晖, 刘苏峡, 莫兴国. 土壤垂向分层和均匀处理下水分差异的数值探讨. *中国生态农业学报*, 2018, 26(4): 593-603.]
- [43] Yang Moyuan, Zhang Shuhan, Pan Xingyao. Monitoring and evaluation of green roof runoff reduction effect. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(15): 134-138. [杨默远, 张书函, 潘兴瑶. 绿色屋顶径流减控效果的监测分析. *中国给水排水*, 2019, 35(15): 134-138.]
- [44] Wang Qian, Zhang Qionghua, Wang Xiaochang. Cumulative characteristics of runoff pollutants in typical domestic cities. *China Environmental Science*, 2015, 35(6): 1719-1725. [王倩, 张琼华, 王晓昌. 国内典型城市降雨径流初期累积特征分析. *中国环境科学*, 2015, 35(6): 1719-1725.]
- [45] Zhang Wenting, Wang Mingze, Song Danyang, et al. Study on spatial distribution of non-point source pollution in the process of rainfall runoff. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(10): 153-160. [张文婷, 王铭泽, 宋丹阳, 等. 降雨径流过程的非点源污染时空动态分布研究. *环境科学与技术*, 2015, 38(10): 153-160.]
- [46] Johnson J P, Hunt W F. A retrospective comparison of water quality treatment in a bioretention cell 16 years following initial analysis. *Sustainability*, 2019, 11(7): 1945. Doi: 10.3390/su11071945.
- [47] Cording A, Hurlley S, Whitney D. Monitoring methods and designs for evaluating bioretention performance. *Journal of Environmental Engineering*, 2017, 143(12): 05017006. Doi: 10.1061/(asce)je.1943-7870.0001276.
- [48] Gao Feng, Lin Huanhuan, Deng Hongwei. Numerical simulation of contaminant transport in heterogeneous aquifer under heavy rainfall. *Environmental Science & Technology*, 2017, 40(11): 59-66. [高峰, 蔺欢欢, 邓红卫. 强降雨条件下非均匀介质污染物运移数值模拟. *环境科学与技术*, 2017, 40(11): 59-66.]
- [49] Hu Weixian, He Wenhua, Huang Guoru, et al. Review of urban storm water simulation techniques. *Advances in Water Science*, 2010, 21(1): 137-144. [胡伟贤, 何文华, 黄国如, 等. 城市雨洪模拟技术研究进展. *水科学进展*, 2010, 21(1): 137-144.]
- [50] Wang Tong, Ding Xiang, Cai Tian, et al. Influence of routing methods on outflow of SWMM model. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(15): 133-138. [王彤, 丁祥, 蔡甜, 等. 水力演算方法对SWMM模型排放口出流的影响. *中国给水排水*, 2018, 34(15): 133-138.]
- [51] Fu Bowen, Jin Pengkang, Shi Shan, et al. Sediment characteristics of sewer network in Xi'an city. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(17): 119-122, 127. [付博文, 金鹏康, 石山, 等. 西安市污水管网中沉积物特性研究. *中国给水排水*, 2018, 34(17): 119-122, 127.]
- [52] Gan Lili. A study on urban rainwater runoff pollution control and quantitative sewer pipe defect assessment [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012. [干里里. 城市雨水径流污染控制与排水管道缺损状况量化评价研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.]
- [53] Wang Rui, Li Zhi, Liu Yufei, et al. Study on reformation and optimization of urban drainage system based on SWMM. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(1): 60-69. [王芮, 李智, 刘玉菲, 等. 基于SWMM的城市排水系统改造优化研究. *水利水电技术*, 2018, 49(1): 60-69.]
- [54] Dong Luyan, Zhao Dongquan, Liu Xiaomei, et al. Performance assessment system for drainage systems based on monitoring and modeling technology. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(17): 150-154. [董鲁燕, 赵冬泉, 刘小梅, 等. 基于监测和模拟技术的排水管网性能评估体系. *中国给水排水*, 2014, 30(17): 150-154.]
- [55] Guo Xiaochen, Li Meng, Shi Xiaoyu, et al. Research and application of warning technology for drainage network accidents based on on-line monitoring. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(19): 129-133. [郭效琛, 李萌, 史晓雨, 等. 基于在线监测的排水管网事故预警技术研究与应用. *中国给水排水*, 2018, 34(19): 129-133.]
- [56] Zhou Yunfeng. Sensitive parameters identification and multi-objective optimization calibration of SWMM drainage pipe network model [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. [周云峰. SWMM排水管网模型灵敏参数识别与多目标优化率定研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.]
- [57] Lv Heng, Ni Guangheng, Tian Fuqiang. Impacts of drainage pipe network complexity on urban stormwater modeling.

- Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(11): 97-106. [吕恒, 倪广恒, 田富强. 排水管网结构概化对城市暴雨洪水模拟的影响. 水力发电学报, 2018, 37(11): 97-106.]
- [58] Wang Jiabiao, Zhao Jianshi, Shen Ziyin, et al. Discussion about the two rainfall control approaches in sponge city construction. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(12): 1490-1498. [王家彪, 赵建世, 沈子寅, 等. 关于海绵城市两种降雨控制模式的讨论. 水利学报, 2017, 48(12): 1490-1498.]
- [59] Li Junqi, Lin Xiang. The influence of extreme rainfall events on the total runoff control rate and the 24h rainfall field control rate was analyzed. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(1): 21-26. [李俊奇, 林翔. 极端降雨事件对雨水年径流总量控制率和24h降雨场次控制率的影响规律探析. 给水排水, 2018, 44(1): 21-26.]
- [60] Zhang Yuhang, Yang Moyuan, Pan Xingyao, et al. Influence of rainfall division method on capture ratio of rainfall. China Water & Wastewater, 2019, 35(13): 122-127. [张宇航, 杨默远, 潘兴瑶, 等. 降雨场次划分方法对降雨控制率的影响分析. 中国给水排水, 2019, 35(13): 122-127.]
- [61] Jiang Y, Zevenbergen C, Ma Y. Urban pluvial flooding and stormwater management: A contemporary review of China's challenges and "sponge cities" strategy. Environmental Science & Policy, 2018, 80: 132-143.
- [62] Liu J, Shao W, Xiang C, et al. Uncertainties of urban flood modeling: Influence of parameters for different underlying surfaces. Environmental Research, 2020, 182: 108929. Doi: 10.1016/j.envres.2019.108929.
- [63] Mei C, Liu J, Wang H, et al. Integrated assessments of green infrastructure for flood mitigation to support robust decision-making for sponge city construction in an urbanized watershed. Science of the Total Environment, 2018, 639: 1394-1407.
- [64] Wang Wenliang, Wang Ersong, Jia Nan, et al. Discussion on design method of overflow storage capacity and treatment facility scale of combined sewer system based on model simulation. Water & Wastewater Engineering, 2018, 54(10): 31-34. [王文亮, 王二松, 贾楠, 等. 基于模型模拟的合流制溢流调蓄与处理设施规模设计方法探讨. 给水排水, 2018, 54(10): 31-34.]
- [65] Zhao Zekun, Che Wu, Zhao Yang, et al. Summary comparison of combined sewer overflow control between China and the United States. Water & Wastewater Engineering, 2018, 54(11): 128-134. [赵泽坤, 车伍, 赵杨, 等. 中美合流制溢流污染控制概要比较. 给水排水, 2018, 54(11): 128-134.]
- [66] Zhao Zekun, Che Wu, Zhao Yang, et al. Experiences of combination of gray-green infrastructure for combined sewer overflow control in the United States. China Water & Wastewater, 2018, 34(20): 36-41. [赵泽坤, 车伍, 赵杨, 等. 美国合流制溢流污染控制灰绿设施结合的经验. 中国给水排水, 2018, 34(20): 36-41.]
- [67] Taghipour M, Tolouei S, Autixier L, et al. Normalized dynamic behavior of combined sewer overflow discharges for source water characterization and management. Journal of Environmental Management, 2019, 249: 109386. Doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109386.
- [68] Mailhot A, Talbot G, Lavallée B. Relationships between rainfall and Combined Sewer Overflow (CSO) occurrences. Journal of Hydrology, 2015, 523: 602-609.
- [69] Vivoni E R, Moreno H A, Mascaro G, et al. Observed relation between evapotranspiration and soil moisture in the North American monsoon region. Geophysical Research Letters, 2008, 35(22): 659-662.
- [70] Wadzuk B M, Hickman J M, Traver R G. Understanding the role of evapotranspiration in bioretention: Mesocosm study. Journal of Sustainable Water in the Built Environment, 2015, 1(2): 04014002. Doi: 10.1061/jswbay.0000794.
- [71] Brown R A, Borst M. Quantifying evaporation in a permeable pavement system. Hydrological Processes, 2015, 29(9): 2100-2111.
- [72] Xiao Rongbo, Ouyang Zhiyun, Li Weifeng, et al. A review of the eco-environmental consequences of urban heat islands. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(8): 2055-2060. [肖荣波, 欧阳志云, 李伟峰, 等. 城市热岛的生态环境效应. 生态学报, 2005, 25(8): 2055-2060.]
- [73] Mao X, Jia H, Shaw L Y. Assessing the ecological benefits of aggregate LID-BMPs through modelling. Ecological Modelling, 2017, 353: 139-149.
- [74] Li Dingqiang, Liu Jiahua, Yuan Zaijian, et al. Research advance and prospects on low impact development control measures for urban non-point source pollution. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(10): 2110-2118. [李定强, 刘嘉华, 袁再健, 等. 城市低影响开发面源污染治理措施研究进展与展望. 生态环境学报, 2019, 28(10): 2110-2118.]
- [75] Zhao Yinbing, Cai Tingting, Sun Ranhao, et al. Review on sponge city research: From hydrological process to ecological restoration. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13): 4638-4646. [赵银兵, 蔡婷婷, 孙然好, 等. 海绵城市研究进展综述: 从水文过程到生态恢复. 生态学报, 2019, 39(13): 4638-4646.]
- [76] Hu Qingfang, Wang Yintang, Li Lingjie, et al. Preliminary comparison between water-ecological civilization city and

- sponge city. *Water Resources Protection*, 2017, 33(5): 13-18. [胡庆芳, 王银堂, 李伶杰, 等. 水生态文明城市与海绵城市的初步比较. *水资源保护*, 2017, 33(5): 13-18.]
- [77] Li Lan, Li Feng. The key scientific issues and thinking on the construction of "Sponge City". *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(7): 2599-2606. [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.]
- [78] Teng Yanguo, Zuo Rui, Su Xiaosi, et al. Technique for assessing environmental risk of regional groundwater. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(12): 1532-1539. [滕彦国, 左锐, 苏小四, 等. 区域地下水环境风险评价技术方法. *环境科学研究*, 2014, 27(12): 1532-1539.]
- [79] Wang Xingchao. Application of underground reservoirs in construction of sponge cities. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2018, 38(1): 83-87. [王兴超. 地下水库在海绵城市建设中的应用. *水利水电科技进步*, 2018, 38(1): 83-87.]
- [80] Zhou Dong. Interrelationship analysis of formation properties and water storage and drainage function in construction of sponge city [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017. [周栋. 海绵城市建设中地层特性与蓄排水功能的相互关系研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.]

## Analysis of sponge city system and research points from the perspective of urban water cycle

YANG Moyuan<sup>1</sup>, LIU Changming<sup>2</sup>, PAN Xingyao<sup>1</sup>, LIANG Kang<sup>2</sup>

(1. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The essence of the sponge city construction is the reconstruction of the urban water system. The most fundamental and important issue in sponge city research is to clarify the hydrological processes involved in the sponge city system. This study defines the connotation of the sponge city system, analyzes the input and output items of the sponge city system, and discusses the hydrological processes involved in the sponge city system, that is, the transformation processes of the "Five- water" (atmospheric water, surface water, soil water, drainage water, and ground water) in the sponge city construction area. And then the research status and future research points of the sponge city system are systematically summarized from the following five aspects: precipitation and pollutant input, water quantity and quality conversion of sponge facilities, runoff monitoring and flow concentration parameters of drainage pipe network, runoff and pollutant discharge processes, and ecological benefit and groundwater recharge in the sponge city construction area. This study is helpful to the basic theoretical research and the engineering practice of the sponge city construction, as well as to the transformation of urbanization development in China.

**Keywords:** sponge city; urban hydrology; sponge city facilities; urban hydrological cycle; hydrological system