

文章编号: 1000-5641(2018)06-0032-11

海绵城市的发展沿革及其对径流污染控制的研究现状

杨银川^{1,2}, 肖冰^{1,2}, 崔贺^{1,2}, 黄民生^{1,2},
邹颖^{1,2}, 何岩^{1,2}, 曹承进^{1,2}

(1. 华东师范大学生态与环境科学学院, 上海 200241;

2. 华东师范大学上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200241)

摘要: 以国内外海绵城市建设理论体系的发展历程为出发点, 探究各国海绵城市建设异同与发展经验, 继而以海绵城市建设最为典型的单项措施——雨水花园为例, 从其结构组成、水力特性以及植物配置等方面分析其对径流污染的控制效应, 以期为我国海绵城市建设提供理论借鉴. 最后提出了海绵城市建设与运行存在的堵塞和蚊虫孳生等潜在问题与风险, 并对我国海绵城市建设提出建议和展望: 借鉴国外海绵城市建设理论体系发展历程的同时需要实现海绵城市建设真正意义上的“中国化”; 因地制宜, 注重区域差异性; 加强现场试验, 进一步探究海绵城市对径流污染的控制机制; 与此同时, 堵塞和蚊虫孳生作为海绵城市建设与运行存在的潜在问题与风险也应予以重视.

关键词: 海绵城市; 发展历程; 雨水花园; 径流污染控制; 问题与风险

中图分类号: X52, TU99 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-5641.2018.06.004

Development history of sponge cities and the state of research on runoff pollution control

YANG Yin-chuan^{1,2}, XIAO Bing^{1,2}, CUI He^{1,2}, HUANG Min-sheng^{1,2},
ZOU Ying^{1,2}, HE Yan^{1,2}, CAO Cheng-jin^{1,2}

(1. School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University,
Shanghai 200241, China;

2. Shanghai Key Laboratory for Urban Ecological Processes and Eco-Restoration,
East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: Based on the development history of sponge city construction system in China and abroad, this paper explores the similarities and differences and development experiences of sponge cities in various countries. Taking the rain garden as the research

收稿日期: 2018-07-11

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX07207001, 2018ZX07208008); 上海市科技创新重点项目(18DZ1203806)

第一作者: 杨银川, 男, 硕士研究生, 研究方向为水环境治理与修复. E-mail: 2216955818@qq.com.

通信作者: 黄民生, 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为水环境治理与修复.

E-mail: mshuang@des.ecnu.edu.cn.

object, this paper analyzes the effect of its structural composition, hydraulic characteristics, and plant configuration on runoff pollution; these can be used to provide a theoretical reference for the construction of sponge cities in China. Finally, potential problems and risks in the construction of the sponge city were presented, and suggestions and prospects for the construction of a sponge city such as mosquito breeding and plugging are presented, and suggestions and prospects for the construction of a sponge city in China are proposed. It is important to learn from the development history of foreign stormwater management systems and realize the “Sinification” of stormwater management in practice by: adapting to local conditions, focusing on regional differences, strengthening field trials, and exploring the control mechanism of sponge cities on runoff pollution. Meanwhile, the potential risks and problems related to plugging and mosquito breeding in sponge city construction should also be taken seriously.

Keywords: sponge city; development history; rain garden; runoff pollution control; problems and risks

0 引言

近几十年来,中国经济的快速发展推动着城市化的进程,同时城市生态环境问题也逐渐凸显,致使我国经济社会发展面临着越来越大的生态环境压力^[1]。水是生态环境的重要组成部分,中国城市水环境日趋恶化,各种水安全、水生态、水资源等问题层出不穷,严重威胁到城市社会经济发展和人民生命财产安全^[2-3]。究其原因,主要是随着城市化进程的不断推进,城市下垫面透水性和排水模式也在不断变化,进而造成水资源循环以及排水的时、量、质的改变,最终体现为城市内涝、缺水以及水质恶化等一系列问题,给人民生活带来了极其不利的影响,严重威胁到城市的良性发展。因此,解决城市水环境问题已经迫在眉睫。

从这些水环境通病可以看出,一方面我国城市水资源匮乏且分布不均,致使城市地下水位下降;另一方面,城市化带来的不透水面积增加导致城市雨水无法自然下渗,从而频繁引发城市内涝。因此,原有的城市排水理念以及排水设施已不能满足城市发展的需求。这些水环境问题是系统性、综合性的问题,亟需一个更为全面系统的解决方案。“海绵城市”理念的提出正是立足于这一背景,该理念试图通过对城市雨洪进行合理管控,使城市能够像海绵一样防蓄兼顾,从而在适应环境变化和应对自然灾害等方面具有良好的弹性^[4-5]。然而,在各城市推进海绵城市建设过程中,仍会面临不少的困惑和问题,直接影响试点城市的推行效率以及实施方案的合理性^[6-7]。因此,亟待全面系统地认识该理念,以期后续建设提供导向。本文通过总结与提炼国内外海绵城市的研究进展,力求系统地展示这一研究领域的发展沿革、前沿动态与潜在风险,并对海绵工程对地表径流污染控制现状进行分析,为我国海绵城市的理论研究和建设实践提供参考与借鉴。

1 国外海绵城市发展历程

美国是最早开始研究雨洪管理的国家之一,其后是澳大利亚、英国、中国和日本等国,该理论最初主要用于控制城市和农村的面源污染,而后逐渐发展成为控制降雨径流量和水质的生态可持续的综合性措施^[8]。尽管各国关于海绵建设的核心内容均是城市化背景下因地制宜的雨洪管理策略,但其表述却不尽相同,研究情况也各有差异^[9-10]。因此,了解

国际潮流和动态,掌握不同概念和系统的内涵和关系,则不会拘泥于其名称,也可避免误读和误解,从而系统地认识该理论,为我国海绵城市的理论研究和建设实践提供技术指导.

1.1 美国

美国的海绵城市建设主要经历了“最佳管理措施”、“低影响开发”与“绿色雨洪基础设施”3个阶段. 20世纪70年代,美国颁布了清洁水法(Clean Water Act)并提出了“最佳管理措施(Best Management Practices, BMPs)”,从最初的面源污染控制,发展为面源污染与地表径流污染共同控制的综合性措施^[11]. 1997年美国国会通过的《联邦水污染控制法修正案》(Federal Water Pollution Control Act Amendment, FWPCA)首次将BMPs理念纳入立法层次. 2003年将BMPs目标扩大为涵盖雨洪控制、土壤冲蚀控制及非点源污染源的削减与控制等雨水综合管理决策体系. BMPs主要是通过结构性工程措施和非结构性管理措施来阻止或减少污染物通过地表径流进入地表水或地下水,同时达到补充与回灌地下水的目的. 20世纪90年代,美国乔治王子县(Prince George's County)与西雅图(Seattle)和波特兰市(Portland)共同提出了在BMPs的基础上发展起来的都市雨洪管理新理念:“低影响开发(Low Impact Development, LID)”. 21世纪初,在已有LID的基础上发展为“绿色雨洪基础设施(Green Stormwater Infrastructure, GSI)”,2010年美国环保总署将其定义为“绿色基础设施(Green Infrastructure, GI)”,重点在于通过复合的绿色基础设施网络体系增强城市环境的适应能力^[12]. 同时,美国政府还通过税收控制、补贴与贷款等一系列的经济手段来鼓励雨水的合理处理及资源化利用.

1.2 英国

20世纪90年代,英国在BMPs和LID的基础上,把环境和社会的因素纳入到排水系统中,通过综合措施改善城市水循环. 1999年5月,英国建立了可持续城市排水系统(Sustainable Urban Drainage System, SUDS). 2004年,英国国家城市排水系统工作组发布了《可持续城市排水系统(SUDS)过渡时期实施规范》^[13]. SUDS模仿自然过程,先储蓄雨水后缓慢释放,促进雨水下渗,利用过滤污染物与控制流速等技术实现对雨水质的改善与量的消减. 21世纪初,英国政府通过《住房建筑管理规定》等法律法规,鼓励居民家中进行家庭雨水收集与再利用. 2015年之后,英国政府为了针对性地提高水资源利用效率,要求住宅楼的人均日用水量设计量不超过125 L才能获得开工许可,要求开发商和居民在家中建立雨水回收系统. 英国政府和雨水再利用管理协会调研认为,英国利用雨水回收系统在提升水资源利用率方面仍有巨大的潜力^[14].

1.3 日本

日本的海绵城市建设大致是以20世纪80年代为转折点,在此之前多是进行大规模河道疏浚、拓宽、护岸与堤防建设,在此之后则全面实施流域综合治水对策. 1976年,鹤见川流域遭遇台风袭击,沿河4830户被淹,由此,鹤见川“水防灾计划委员会”成立,成为日本综合治水对策先驱^[15]. 1977年,日本推出“雨水贮留”概念;1980年,日本提出“综合治水对策特定河川计划”,让小区自行消纳雨水,以恢复流域固有的蓄水、滞水能力. 同步于欧美国家,日本在20世纪末开始推广“雨水贮留渗透计划”,致力于补充涵养地下水、复活泉水和恢复河川基流^[16]. 随后,日本修改了建筑法,要求大型建筑物和大型建筑群必须建设地下雨水储存池和再利用系统^[14]. 日本对雨水利用实行补助金制度. 例如,东京都墨田区1996年开始建立促进雨水利用补助金制度,对地下储水装置、地上中小型储水装置给予一定的补助,其中,雨水储存每立方米补助40~120美元,雨水净化器补助设备总价的1/3~2/3,以此促进雨水

利用技术的应用,实现雨水资源化^[17]。

1.4 澳大利亚

澳大利亚的海绵城市建设主要经历了萌芽期(1960—1989)、起步期(1990—1999)、跨越期(1999—2000)和稳定期(2011—)4个阶段^[18]。20世纪80年代,澳大利亚政府开展了一场名为“放雅拉河一条生路(Give the Yarraa Go!)”的运动,提高公众的环境保护意识^[19]。20世纪90年代,墨尔本的洪水暴发频率显著增高,导致大量经济损失和人口伤亡。1994年,来自西澳大利亚的学者理维蓝(Whelans)和哈而佩恩·格里克·曼塞尔(Halpern Glick Maunsell)首次提出“水敏性城市设计”(Water Sensitive Urban Design, WSUD)理念^[20],但在当时并未得到认可。直到20世纪90年代后期,随着可持续理念的普及,这种将城市水循环与城市设计相结合的理念才逐步被大众认同。21世纪初期是WSUD走向成熟的关键阶段,政府提出了“发挥城市雨水再利用(Cities as Water Supply Catchments)”的管理理念。2005年,水敏性城市研究中心成立,用于指导城市雨洪管理;同年,墨尔本水务局颁布了《水敏性城市设计工程手册》。至2011年,澳大利亚雨洪管理体系已经趋于完善和稳定。

1.5 小结

纵观各个国家海绵城市建设发展历程可以发现:大致经历了从“城市雨洪问题→相关理论提出→法规政策制定”这样的过程;大规模的建设始于20世纪70年代,成熟于21世纪初,均经历了较长一段时间;都经历了从单一化工程性措施到综合性措施的发展历程。

横向对比各国的海绵城市建设异同及理论发展经验虽有借鉴参考价值,但更应该结合国情。表现为:澳大利亚的水敏性城市设计理念是基于其长期干旱的自然环境^[21];日本的雨水贮留渗透计划重点在贮留,主要是基于其淡水资源的缺乏。

2 国内海绵城市发展历程

2.1 国内海绵城市发展背景

相比美英日澳等发达国家的海绵城市建设,中国对“海绵城市”的研究及实践起步相对较晚,海绵城市的概念是借鉴国外LID、SUDS和WSUD等相关雨洪管理体系而提出的。“海绵城市”一词在国内最早出现于2012年4月北京大学在深圳召开的“2012低碳城市与区域发展科技论坛”,引起社会各界的密切关注。2013年12月12日,习近平总书记在中央城镇化工作会议上明确提出:“提升城市排水系统时要优先考虑把有限的雨水留下来,优先考虑更多利用自然力量排水,建设自然存积、自然渗透、自然净化的海绵城市”^[22],自此“海绵城市”一词逐步活跃于公众视线。住建部于2014年10月22日发布了《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》,该指南对“海绵城市”的概念给出了明确的定义,即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,需要时将蓄存的水“释放”并加以利用^[23]。从而在减少城市洪涝灾害发生的同时可以提升城市生态功能^[23]。2015年4月和2016年4月,相继发布了16个和14个海绵城市建设试点名单,自此,我国海绵城市建设工作全面展开。

2.2 “海绵城市建设技术指南”解读

《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》从技术选择(单项措施)控制目标等方面系统地给出说明指导,为我国海绵城市建设提供指引^[22-23]。海绵工程单项措施主要有透水铺装、绿色屋顶、植草沟、雨水花园和雨水调节池等。建设海绵城市一般包含径流总量控制、径流峰值控制、径流污染控制和雨水资源化利用4项控制目标。这些分目标既各司其职又存在一定的耦合关系,既有区别,也有联系^[10],各地应结合气候特征、

城市化进程、水环境现状、水文地质条件等合理选择其中一项或多项目标作为规划控制目标^[23], 这些差异体现在各地的海绵城市建设“技术指南”中. 具体统计如表 1.

产生以上区别主要是由于我国地域辽阔, 气候特征、土壤地质等天然条件和经济条件差异较大. 可以看出, 径流总量控制率与当地的降雨量有着密切联系, 表 1 中, 上海、重庆和三亚的降雨量较大, 其径流总量控制率也较小; 西宁和白城的降雨量相对较小, 也决定了其较高的径流总量控制率. 径流污染控制则相对复杂, 即使在同一个城市也不能一概而论, 应该根据城市水环境质量要求、径流污染特征等因素确定径流污染综合控制目标和污染物指标. 径流峰值流量控制是低影响开发的控制目标之一, 低影响开发设施对特大暴雨事件, 虽仍可起到一定的错峰、延峰作用, 但其峰值削减幅度往往较低, 还需要依靠城市排水管网发挥作用, 其差异主要由城市功能和经济状况决定, 重庆和上海作为特大城市要求最高, 白城、鹤壁和三亚作为中等城市其排水管网要求也相对较低. 此外, 植物选择也应该因地制宜, 比如西宁考虑夏季多雨时节植物的适应性的同时, 更要兼顾干旱季节植物景观和植物耐旱能力, 白城的植物则应该以耐寒为主. 但就建设实施难度来讲, 径流污染控制面临的实践和理论方面的未知因素更为突出, 各地“建设指南”对该目标规定也不完善, 且该目标相对不易量化. 所以, 本文接下来将结合海绵城市单项措施、参考国内外研究成果, 对径流污染控制研究现状做出详细阐述.

表 1 部分海绵城市试点建设技术导则差异统计

Tab. 1 Variance statistics of construction guidelines for each sponge city					
城市	多年均 降雨量 /mm	径流总量 控制率 /%	径流污染 控制(以TSS去除率) /%	推荐植物 (水生植物为例)	径流峰值控制 (以雨水排水系统设计重现期表示 ^[24])
白城 ^[25]	399.8	80~85	50~70	石菖蒲、千屈菜等, 芦苇、鸢尾和 千屈菜等	一般地区取2~3年, 重要地区取3~5年, 地下通道和下沉式广场等取10~20年
西宁 ^[26]	380.0	85~90	68~74 (海湖片区)	水葱、旱伞草和 千屈菜等	一般地区取2~3年, 重要地区取3~5年, 地下通道和下沉式广场等取10~20年
鹤壁 ^[27]	664.9	70~85	40~60	未推荐	一般地区取2~3年, 重要地区取3~5年, 地下通道和下沉式广场等取10~20年
上海 ^[28]	1 123.7	75~85	75 ~80	美人蕉、水葱 和灯芯草等	一般地区取3~5年, 重要地区取5~10年, 地下通道和下沉式广场等取30~50年
重庆 ^[29]	1 133.0	75~85	≥ 50	千屈菜、芦竹 和美人蕉等	一般地区取2~5年, 重要地区取5~10年, 地下通道和下沉式广场等取20~30年
三亚 ^[30]	1 263.0	60~85	≥ 45	风车草、富贵 竹、菖蒲和水 生美人蕉等	一般地区取2~3年, 重要地区取3~5年, 地下通道和下沉式广场等取10~20年

3 典型海绵城市单项措施对于径流污染物的控制

径流污染控制是海绵城市建设的重要目标^[23]. 同时, 径流污染也是一个世界性的水环境问题. 美国环境保护署 (USEPA) 于 2002 年就已将该问题列为地表水环境恶化的主要来源, 在 11 个污染源中, 分别位列河流和湖泊中的第四位和第三位^[31]. 2004 年的研究报告还显示: 美国城市区域产生的雨水径流污染已成为美国 13% 的河流、18% 的湖泊和 32% 的河口的最主要污染

源^[32]. 此外, 英国环境食品和农村事务部(DEFRA)的报告也表明, 英国 23 个浴场及约 1 000 个水体的污染原因都是城市径流污染^[33]. 我国 2/3 的河流水环境由于雨水径流中的 N、P 污染物而导致功能退化^[34], 因此, 控制城市径流雨水中的 N、P 等污染物意义重大. 本节将以海绵城市建设中最为常见的单项措施——雨水花园为例, 针对 N、P 污染物阐述海绵城市对于径流污染控制的研究现状.

雨水花园 (Rain Garden) 是海绵城市建设的重要措施之一, 在欧美多叫生物滞留池 (Bioretention System/Cell), 在日本称为雨庭 (Rain Court)^[16]. 雨水花园是自然形成或人工挖掘的下凹式绿地, 被用于汇聚和吸收来自屋顶或地面的雨水, 凹地表面可以种植一些植物, 内部可放置填料以提高渗水性能, 并配以雨水的进出口和溢流口, 该系统利用植物、填料的蒸腾、蒸发和下渗等综合作用减少外排雨水径流强度, 同时通过填料过滤、植物吸收以及微生物的转化与同化等作用去除污染物, 使雨水得到净化, 并使之逐渐渗入土壤, 涵养地下水, 或使之以中水的方式回用, 是一种生态可持续的海绵城市建设单项措施. 下面分别从雨水花园的功能结构、水力特性及其对 N、P 的去除机理等角度阐述该措施对径流污染物的控制.

3.1 雨水花园的结构组成

目前, 典型的雨水花园自上而下由蓄水层、植物层、种植土层、填料层和砾石层构成(见图 1), 其设计参数和功能总结如表 2.

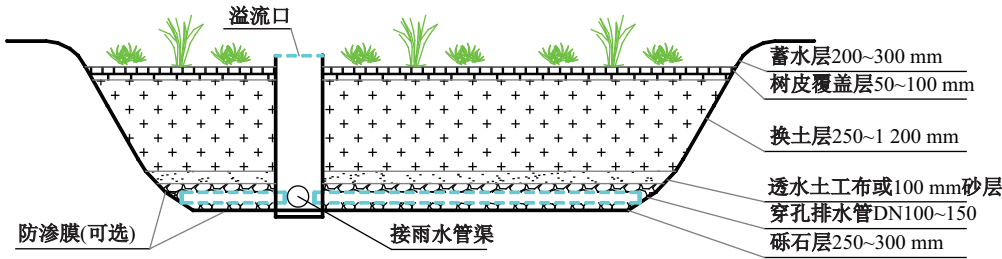


图 1 典型雨水花园的结构示意图

Fig. 1 Schematic structural diagram of a typical rain garden

表 2 典型雨水花园的结构组成及其功能说明^[23,35]

Tab. 2 Structure and function description of a typical rain garden

名称	厚度/mm	功能说明
蓄水层	200~300	蓄水层厚度即为溢流井超高, 为径流雨水提供暂时的储存空间, 使部分沉淀物在此层沉淀 ^[35]
植物层	视植物种类而定	植物通过吸收作用去除部分污染物, 发达的根系可以增强土壤渗透能力以及污染物的去除效果 ^[36]
树皮覆盖层	50~100	保持土壤的湿度, 避免表层土壤板结而造成渗透性能降低, 但是可能会因腐败对造成进行二次污染, 应该及时清理 ^[37]
换土层	250~1 200	维持植物生长; 功能同滤料层, 过滤径流雨水, 去除污染物, 多选用渗透性较强的天然或人工材料
透水土工布或砂层	100(砂层)	主要是为了防止土壤层小颗粒, 冲刷到砾石层造成排水不畅 ^[35]
砾石层	250~300	由粒径为12~35 mm的砾石组成, 承受上部荷载, 使得整个系统具有结构稳定性

雨水花园作为海绵城市建设重要的单项措施, 不仅能够收集滞留雨水, 净化径流雨水, 降低城市洪涝灾害, 更是一种集景观效果于一体的生态高效的雨水措施. 植物由于同时具有净化雨水和景观提升的功能, 是雨水花园重要组成部分之一^[38]. 雨水花园中植物根系可直接吸收径流污

染物,又能为微生物生长提供附着场所^[39],所以植物对生物滞留系统中营养物质的去除具有重要作用.研究表明,在对比有无植物条件下营养物质的去除时,用自来水冲刷,没有植物的系统中出现了 N、P 的淋溶现象,但在有植物的系统中几乎没有出现 N、P 的淋出^[40].而且在雨水花园的设计中,植物种类对水质净化效果影响差别也比较大^[36].

雨水花园中植物的选择需符合以下原则.选用根系发达、茎叶繁茂、净化能力强的植物^[41];作为一个需经常处理污染物的人工系统,容易滋生病虫害,所选的植物也要具有较高的抗逆性,如耐涝抗旱、抗冻、抗热等特点;选择可相互搭配种植的植物,研究表明不同植物的合理搭配可提高对水体的净化能力,可将根系泌氧性强与泌氧性弱的植物混合栽种,构成复合式植物床,创造出有氧微区和缺氧微区共同存在的环境,从而有利于 N 去除.雨水花园在做到净化水质与控制径流作用最优化的基础上还应该考虑其景观美学方面的效益,因为雨水花园作为城市绿化空间,需要给人们带来娱乐与感官上的感受.简言之,雨水花园就是功能为主,美学效益为辅;具体地,应该遵循“乔灌搭配,草灌花穿插,颜色深浅多变”等原则,根据植物的特性,如色彩、体量、姿态等的差异,将植物配置的疏密相间增加景观层次感.通常,植物的高度由低到高,色彩由浅到深,密度由疏到密.从而达到突出形式美感,强化景观效果,与环境更加协调等作用^[38].考虑到季节对景观效果的影响,还应该尽量将落叶与常绿结合、不同生长期和花期的植物适当搭配.

3.2 雨水花园的水力特性

研究表明,在一定范围内,水力停留时间 (Hydraulic Retention Time, HRT) 的延长可有效提高填料对污水的净化效果^[42-43].由此可以推测, HRT 对雨水花园去除径流污染物也有很大影响,而 HRT 又取决于断面流速,断面流速 (ν) 采用达西定律 (Darcy's law) 渗滤法计算^[44],计算公式为

$$HRT = \frac{V}{Q} = \frac{HA}{\nu A} = \frac{H}{\nu}, \quad \nu = KJ \Rightarrow HRT = \frac{H}{KJ}. \quad (1)$$

上式中, HRT 为雨水在与雨水花园内的平均停留时间 (min); V 为雨水花园的体积 (m^3); Q 为雨水流经雨水花园的流量 (m^3/s); H 为雨水花园在垂直方向上的长度 (m); A 为雨水流经雨水花园的过流断面面积 (m^2); ν 为雨水流经雨水花园的断面速度 (m/s); K 为雨水花园填料的渗透系数 (m/s). J 为下渗起止断面间的水力坡度.注:上述计算过程是对雨水花园结构做出合理假设后所得,认为其在空间上为标准长方体结构.

由以上计算过程可以看出,雨水花园在垂直方向上的长度 (H) 相同时,填料渗透系数 (K) 对于雨水花园径流污染物削减具有很大的影响,渗透系数太大,影响系统对于径流污染的移除效率,渗透系数太小,容易造成系统堵塞,影响系统运行稳定性.而且,各个国家地区规定的基质渗透速率也不尽相同.比如,美国环保局要求系统渗透速率至少要达到 12.7 mm/h ,奥地利要求为 $36 \sim 360 \text{ mm/h}$,澳大利亚要求为 $50 \sim 200 \text{ mm/h}$ ^[45].

3.3 雨水花园对 N、P 的去除

雨水花园对雨水径流中 N、P 污染物的去除主要依靠填料和植物的共同作用.具体地,雨水花园通过氨化、硝化、反硝化、植物的吸收以及填料过滤等作用完成对 N 的去除,径流雨水中的 N 包括颗粒态和溶解态,主要以 NH_4^+-N 和 Org-N(有机氮) 的形式存在.颗粒态 N 可通过过滤作用有效去除,溶解性 N 主要为 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、Org-N 等,溶解性的 Org-N 经过氨化作用转化成 NH_4^+-N , NH_4^+-N 经过硝化作用转化成 NO_2^--N 和 NO_3^--N ,也可被土壤颗粒和有机质吸附,最终通过反硝化作用以 N_2 的形式被去除; P 主要通过填料层的过滤、吸附、植物吸收以及微生物摄取等联合作用得以去除.径流雨水中的 P 包括颗粒态和溶解态.其中,颗粒态 P 主要随着径流中悬浮固体,经过滤截留在土壤中,成为雨水花园系统中的一部分;溶解态 P 中最主要的正磷酸盐,通过填料的吸附、离子交换以及植物的吸收和微生物摄取去除^[35,46].

在雨水花园中, 填料介质的种类和水力特性是影响其功能发挥的关键因素. 为提高 N、P 营养物的去除效果, 国内外关于雨水花园填料改良的相关研究如下表 3 所示.

表 3 雨水花园对径流污染物中 N、P 的去除状况

Tab. 3 Typical rain garden performance on the removal of N and P in stormwater runoff				
位置	填料组成	去除率/%		文献来源
		TN	TP	
Chapel Hill, NC	砂	40	65	Hunt et al ^[47]
Charlotte, NC	砂壤土, 6%细沙	30	31	Hunt et al ^[48]
Rocky Mount, NC	98%砂, 2%覆盖物	80	72	Brown et al ^[49]
Silver Spring, MD	砂质粘壤土, 54%砂, 46%细沙, 含有机质	97	100	Li and Davis ^[50]
Graham, NC	80%覆盖物, 15%砂, 5%有机质	54	63	Passport and Hunt ^[51]
Rocky Mount, NC	砂质粘壤土, 96%砂, 4%覆盖物	58	-10	Brown et al ^[52]
Lenexa, KS	木屑和砂混合种植土, 含20%有机质	56	—	Chen ^[53]
Taiyuan, Shanxi	30%壤土, 40%砂, 15%珍珠岩, 15%蛭石	82	91	Gao et al ^[54]
Wuxi, Jiangsu	80%沸石, 20%碎木屑	90	70	Wang et al ^[55]
Beijing	草炭土做覆盖层, 黏土、粗沙等为填料	62	83	Guo et al ^[56]

总体看来, 为提高雨水花园对 N、P 的去除率, 通常是调节填料的种类以及比例, 或添加一定比例有机质(硬木屑、草秆和落叶等)来增加土壤中的碳源, 为微生物的反硝化作用提供电子供体^[57], 但关于不同材料添加种类以及比例, 目前还没有定量性的资料可供参考. 此外, 基于目前的排水系统并未考虑将地表径流送入到海绵城市单项措施中, 所以在接下来的工程建设中应该增加相应的方法和必要的设施, 特别应该注重构筑物之间的高程.

4 典型海绵设施可能存在的问题与风险

海绵城市建设把原来的城市排水问题变成一个涉及排水、绿化、道路、建筑等诸多方面的系统工程, 所以, 随着海绵城市建设的推进, 一些并发问题和次生灾害也会逐步凸显和放大. 一方面, 如前文所述, 海绵设施填层和渗透系数 (K) 的设计并没有定量的参考资料, 因填料堵塞而发生故障的可能性较高, 进而会影响到该系统运行的寿命和稳定性; 另一方面, 随着海绵城市建设的推进, 城市水绿复合环境的面积会逐步扩大, 从而为蚊虫孳生提供有利生境, 具有导致蚊虫孳生的潜在风险^[58].

4.1 堵塞

海绵城市建设对于城市水生态修复具有良好效果, 但是也容易因其填料发生堵塞影响系统运行的稳定性. 1986 年, Lindsey 等在美国马里兰州 (Maryland) 对雨水过滤系统展开现场调查, 结果发现, 在所勘察的 207 个海绵城市单项措施中, 约 33% 由于发生堵塞而不能正常运转, 且这些系统中大部分仅有两年的工作时间^[59]; 该研究团队在 4 年后再次复查, 结果显示该数值上升至 50%. 其他研究也报导了相关结论^[60]. 相关研究表明, 雨水系统发生堵塞的主要原因是由于填料层设置不恰当造成, 通过使填料层具有两个明显不同颗粒尺寸的结构层, 可显著延缓系统发生堵塞的时间^[61]. 因此, 有必要根据不同地区的降雨特性, 开展海绵工程单项措施填料层构造研究, 以期更好地服务于我国海绵城市建设.

此外, 水绵(Spirogyra)等藻类也会造成海绵工程单项措施的堵塞. 水绵是淡水中常见的大型丝状藻类, 一般在春季快速生长, 大量分布于池塘、沟渠, 可在水底形成垫面, 并覆于底泥之上, 生命力极强, 生长中期呈黄色, 常聚成堆, 块与块连接在一起, 形成被状, 很难拉断, 生长后期为浅黄色, 形成很厚的层片^[62]. 研究表明, 水绵生长使得莲藕和水稻等植物根部因气体交换不良, 严重影响根部吸收功能和生长发育^[63]. 因其适生于淡水静水环境, 而海绵城市建设中使用的

植物能够减缓水流速度,且均为淡水环境,非常有利于水绵生长,所以极有可能造成系统排水不畅甚至堵塞。

4.2 蚊虫孳生

全球每年约 100 万人感染蚊媒疾病甚至死亡^[64]。众所周知,蚊虫的孳生离不开水,即“积水成蚊”,雌蚊依靠其嗅觉、视觉和触觉来辨识环境因素,选择合适的产卵地及栖息地,从而使其后代的生长和存活达到最大化,水中的蚊幼羽化成蚊后通过吸食动物或人类的血液传播疾病。海绵工程单项措施接收降雨及附近的地表径流,在一定的时间内存在积水现象,当其发生堵塞时,积水时间延长,为蚊虫孳生提供了有利生境。研究表明,平整土地可以使水池积水时间小于蚊卵生长至羽化的时间^[65],不利于蚊虫孳生,而海绵城市单项措施对土地的开挖恰好给蚊虫提供了孳生环境,同时水中的有机物、N、P 等能够直接或间接地为蚊幼生长提供所需食物^[66]。海绵城市建设中使用的植物能够减缓水流速度、遮挡部分阳光以及阻碍天敌的捕食,提高蚊幼存活率^[67]。有研究指出,被水生植物和漂浮物遮盖的污水沟其水面的蚊幼密度均大于开阔无草的水面,同时水生植物的存在能够提高蚊卵的孵化率,增加成蚊的数量。海绵工程单项措施的水绿条件无意中提高了其对蚊媒疾病传播的风险水平。因此,在海绵城市建设的过程中,还应考虑海绵工程对蚊虫孳生环境可能带来的影响,并在设计阶段和运行阶段结合一些蚊虫综合管理措施(IMM)^[68],以达到水生态治理与蚊害协同共治的目的。

5 结论与展望

(1) 借鉴国外海绵城市建设理论体系发展历程的同时需要实现海绵城市建设真正意义上的“中国化”。具体地,纵向剖析各国雨洪管理体系发展历程有如下启示:我国海绵城市研究还处于起步阶段,仍需对相关理论概念和成功经验进行系统的学习与研究;应该加强相关法律和政策来规范该领域的建设;提倡源头治理,同时采取一定的经济手段来鼓励公众参与;横向对比各国雨洪管理体系发展历程有如下启示:各国国情均有差异,应该注重与我国国情的结合;考虑到我国排水系统老化等问题,在海绵城市建设的同时更应该注重排水管网的建设;考虑到我国海绵城市建设起步较晚,应该加强媒体等的宣传来提高该政策的公众认可度;

(2) 因地制宜,注重我国地域差异性。具体地,应该考虑气候、水文地质以及经济等差异。我国大部分地区的气候受季风与热带气旋的控制,降雨时空分布不均,造成地下水位在时间和空间上分布不均,即夏丰冬枯,东高西低,南高北低;我国土壤有机质含量区域变化总趋势是中南、东北、西南、华东有机质含量较高,华北、西北低于全国平均含量;而且我国区域经济发展也存在差异。所以,应该在原有海绵城市建设指南基础上,结合各地实际情况,编写适合当地的建设指南。

(3) 雨水花园作为海绵城市建设最重要最常见的单项措施,尽管在我国已初显成效,但是仍有提高的空间。具体地,由于我国海绵城市建设起步较晚,国内对于海绵城市的研究大都停留在理论或者实验室阶段,现场试验由于受到的影响因素较多而导致其与实验室研究有一定程度的差异,所以供参考的现场试验数据相对不足,而且可以发现,现场试验去除率整体高于实验室。在以后的研究中,应该加强现场试验,进一步地,可从改进雨水花园的基质材料及其配比、优化植物配置等角度来强化其对径流污染的控制。

(4) 堵塞和蚊虫孳生作为海绵城市建设的潜在风险与问题应予以重视。有必要根据不同地区的降雨特性,开展海绵工程单项措施填料层构造研究,特别是针对堵塞问题进行的填料种类和渗透系数等方面的逐步优化完善,同时应该重视水绵等藻类造成的堵塞问题;在海绵城市建设的过程中,还应考虑海绵工程措施可能对蚊虫孳生地带来的影响,以求达到水环境与水卫生协同共治的目的。

[参 考 文 献]

- [1] 黄勤,曾元,江琴.中国推进生态文明建设的研究进展[J].中国人口·资源与环境,2015(2): 111-120.
- [2] 刘芳,苗旺.水生态文明建设系统要素的体系模型构建研究[J].中国人口·资源与环境,2016(5): 117-122.
- [3] 颜京松,王美珍.城市水环境问题的生态实质[J].现代城市研究,2005(4): 6-10.
- [4] 高峰.哈尔滨城市内涝灾害治理的规划对策研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- [5] 周勤.海绵城市技术导向下的悦来生态城控规层面规划策略研究[D].重庆:重庆大学,2015.
- [6] 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.
- [7] 陈华.关于推进海绵城市建设若干问题的探析[J].净水技术,2016(1): 102-106.
- [8] 车伍,闫攀,赵杨,等.国际现代雨洪管理体系的发展及剖析[J].中国给水排水,2014(18): 45-51.
- [9] 李强.低影响开发理论与方法述评[J].城市发展研究,2013(6): 30-35.
- [10] 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.
- [11] DIETZ M E. Low impact development practices: A review of current research and recommendations for future directions[J]. Water Air and Soil Pollution, 2007, 186(1/2/3/4): 351-363.
- [12] 车伍,闫攀,赵杨,等.国际现代雨洪管理体系的发展及剖析[J].中国给水排水,2014(18): 45-51.
- [13] 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(1): 42-45.
- [14] 吴丹洁,詹圣泽,李友华,等.中国特色海绵城市的新兴趋势与实践研究[J].中国软科学,2016(1): 79-97.
- [15] 李昌志,程晓陶.日本鹤见川流域综合治水历程的启示[J].中国水利,2012(3): 61-64.
- [16] 赖文波,蒋璐,彭坤焘.培育城市的海绵细胞——以日本城市“雨庭”为例[J].中国园林,2017(1): 66-71.
- [17] 黎靖.我国城市雨水排放费制度的设计研究[D].广州:华南理工大学,2011.
- [18] BROWN R R, FARRELLY M A, LOORBACH D A. Actors working the institutions in sustainability transitions: The case of Melbourne's stormwater management[J]. Global Environmental Change-human and Policy Dimensions, 2013, 23(4): 701-718.
- [19] 刘颂,李春晖.澳大利亚水敏性城市转型历程及其启示[J].风景园林,2016(6): 104-111.
- [20] WHELAN CONSULTANTS. Planning and management guidelines for water sensitive urban design [R]//the Water Authority of Western Australia and the Environmental Protection Authority. Whelans : State Planning Commission,1994.
- [21] 王岱霞,陈前虎,钱爱华.我国海绵城市建设的困境及建议:基于国际比较的研究[J].浙江工业大学学报(社会科学版),2017(2): 176-182.
- [22] 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.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部.关于印发《海绵城市建设技术指南—低影响开发雨水系统构建(试行)》的通知(建城函[2014]275号)[Z]. 2014-10-22.
- [24] 上海市建设和交通委员会.室外排水设计规范:GB 50014—2006(2014年版)[S].北京:中国计划出版社,2014.
- [25] 吉林省住房和城乡建设厅.吉林省建设标准化管理办公室关于《吉林省海绵城市建设技术导则(试行)》公示的函(吉建准函[2016]11号)[Z]. 2016-07-05.
- [26] 西宁市城乡规划建设和局.西宁市海绵城市建设设计导则(试行)(DBJT26-53)[Z]. 2016-01-01.
- [27] 鹤壁市人民政府.鹤壁市人民政府关于印发鹤壁市海绵城市建设试点实施计划的通知(鹤政[2015]29号)[Z]. 2015-10-15.
- [28] 上海市住房和城乡建设管理委员会.上海地方标准《上海市海绵城市建设技术规程》征求意见稿发布(沪建标定[2016]589号)[Z]. 2017-09-20.
- [29] 重庆市城乡建设委员会,重庆市规划局重庆市规划局.关于发布《重庆市海绵城市规划与设计导则(试行)》的通知(渝建[2016]549号)[Z]. 2016-11-28.
- [30] 三亚市人民政府.三亚市人民政府关于印发三亚市海绵城市规划建设管理暂行办法的通知(三府[2016]242号)[Z]. 2016-09-10.
- [31] USEPA. 2000 National Water Quality Inventory: Report to Congress [M]. Washington DC: Office of Water, 2002.
- [32] National Reserch Council (NRC). Public Participation in Environmental Assessment and Decisionmaking [M]. Washington DC: The National Academies Press, 2009.
- [33] Department of Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA). Tackling water pollution from the urban environment: Consultation on a strategy to address diffuse water pollution from the built environment [R]. [S.l.: s.n.], 2012.
- [34] 张建强,许萍,何俊超.生物滞留池去除道路径流雨水中氮磷的原理及研究现状[J].市政技术,2015(3): 128-132.
- [35] 向璐璐,李俊奇,邝诺,等.雨水花园设计方法探析[J].给水排水,2008(6): 47-51.
- [36] LUCAS W C, GREENWAY M. Nutrient retention in vegetated and nonvegetated bioretention mesocosms [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2008, 134(5): 613-623.
- [37] BRATIERES K, FLETCHER T D, DELETIC A, et al. Nutrient and sediment removal by storm water biofilters: A large-scale design optimization study [J]. Water Research, 2008, 42(14): 3930-3940.
- [38] 张倩倩.水文条件下的城市雨水花园植物配置研究[D].西安:西安建筑科技大学,2016.

- [39] READ J, WEVILL T, FLETCHER T, et al. Variation among plant species in pollutant removal from stormwater in biofiltration systems [J]. *Water Research*, 2008, 42(4/5): 893-902.
- [40] HATT B E, FLETCHER T D, DELETIC A. Hydrologic and pollutant removal performance of stormwater biofiltration systems at the field scale [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 365(3/4): 310-321.
- [41] 刘佳妮. 雨水花园的植物选择 [J]. *北方园艺*, 2010(17): 129-132.
- [42] REN L, XU L, ZHANG Y, et al. Effects of connection mode and hydraulic retention time on wastewater pollutants removal in constructed wetland microcosms [J]. *Clean-Soil, Air, Water*, 2016, 43(12): 1574-1581.
- [43] MAYO A W, MUTAMBA J. Effect of HRT on nitrogen removal in a coupled HRP and unplanted subsurface flow gravel bed constructed wetland [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2004, 29(15/16/17/18): 1253-1257.
- [44] 刘兆昌, 李广贺, 朱琨. 供水水文地质 [M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [45] 林文煌, 杨学军, 张晔. 探析雨水花园构造性能 [J]. *产业创新研究*, 2018(2): 41-45.
- [46] 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 [J]. *环境工程学报*, 2016(4): 1593-1602.
- [47] HUNT W F, JARRETT A R, SMITH J T, et al. Evaluating bioretention hydrology and nutrient removal at three field sites in North Carolina [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2006, 132(6): 600-608.
- [48] HUNT W F, SMITH J T, JADLOCKI S J, et al. Pollutant removal and peak flow mitigation by a bioretention cell in urban Charlotte, NC [J]. *Journal of Environmental Engineering-Asce*, 2008, 134(5): 403-408.
- [49] BROWN R A, HUNT W F. Impacts of media depth on effluent water quality and hydrologic performance of undersized bioretention cells [J]. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 2011, 137(3): 132-143.
- [50] LI H, DAVIS A P. Water quality improvement through reductions of pollutant loads using bioretention [J]. *Journal of Environmental Engineering-Asce*, 2009, 135(8): 567-576.
- [51] PASSEPORT E, HUNT W F, LINE D E, et al. Field study of the ability of two grassed bioretention cells to reduce storm-water runoff pollution [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2009, 135(4): 505-510.
- [52] BROWN R A, HUNT W F. Underdrain configuration to enhance bioretention exfiltration to reduce pollutant loads [J]. *Journal of Environmental Engineering-Asce*, 2011, 137(11): 1082-1091.
- [53] CHEN X, PELTIER E, STURM B S M, et al. Nitrogen removal and nitrifying and denitrifying bacteria quantification in a stormwater bioretention system [J]. *Water Research*, 2013, 47(4): 1691-1700.
- [54] 高晓丽. 道路雨水生物滞留系统内填料的研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
- [55] 王晓璐, 左剑恶, 千里里, 等. 复合填料生物渗滤系统处理城市雨水径流的研究 [J]. *环境科学*, 2015(7): 2518-2524.
- [56] 郭婷婷, 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 [J]. *环境科学与技术*, 2016(3): 60-67.
- [57] 蒋春博, 李家科, 李怀恩. 生物滞留系统处理径流营养物质研究进展 [J]. *水力发电学报*, 2017(8): 65-77.
- [58] 马明海, 张博, 黄民生, 等. 上海市地理景观对夏季蚊虫孳生的影响 [J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2015(2): 21-29.
- [59] LINDSEY G, ROBERTS L, PAGE W. Inspection and maintenance of infiltration facilities [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1992, 47(6): 481-486.
- [60] BARRETT M E, TAYLOR S. Retrofit of storm water treatment controls in a highway environment [C]//The Fifth International Conference of Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management. Lyon: [s.n.], 2004: 243-250.
- [61] KANDRA H S, DELETIC A, MCCARTHY D. Assessment of impact of filter design variables on clogging in stormwater filters [J]. *Water Resources Management*, 2014, 28(7): 1873-1885.
- [62] 黄元璜. 寒地稻作区水绵的危害及防除技术 [J]. *黑龙江农业科学*, 2008(5): 78-79.
- [63] 王桂花, 晁宁利, 黄海涛. 莲藕田水绵重发原因及防治措施 [J]. *西北园艺(蔬菜)*, 2010(2): 50-51.
- [64] SCHAFFNER F, MEDLOCK J M, VAN BORTEL W. Public health significance of invasive mosquitoes in Europe [J]. *Clinical Microbiology and Infection*, 2013, 19(8): 685-692.
- [65] GIANOTTI R L, BOMBLIES A, ELTAHIR E A B. Hydrologic modeling to screen potential environmental management methods for malaria vector control in Niger [J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(8): 0494.
- [66] YAHOUEDO G A, DJOGBENOU L, SAIZONOU J, et al. Effect of three larval diets on larval development and male sexual performance of *Anopheles gambiae* s.s. [J]. *Acta Tropica*, 2014, 132(4): S96-S101.
- [67] 周毅彬, 赵彤言, 冷培恩. 孳生地治理对控制白纹伊蚊效果的研究 [J]. *中国媒介生物学及控制杂志*, 2009, 20(1): 3-6.
- [68] IBANZ-JUSTICIA A, TEEKEMA S, DEN HARTOG W, et al. The effectiveness of Asian bush mosquito (*Aedes japonicus japonicus*) control actions in colonised peri-urban Areas in the Netherlands [J]. *Journal of Medical Entomology*, 2018, 55(3): 673-680.

(责任编辑: 李万会)