

DOI:10.14188/j.1671-8844.2023-08-011

文章编号: 1671-8844(2023)08-0998-08

## 海绵城市源头设施生命周期评价研究进展

徐常青<sup>1,2</sup>, 张潇月<sup>2</sup>, 陈正侠<sup>2</sup>, 贾海峰<sup>2</sup>

(1. 北京理工大学管理与经济学院, 北京 100081; 2. 清华大学环境学院, 北京 100084)

**摘要:** 建设海绵城市源头设施作为城市降雨径流控制的有效举措, 受到世界各国的广泛关注。基于生命周期视角量化分析海绵城市源头设施建设和运行过程中的环境、经济影响与效益, 可为海绵城市建设提供科学、全面的依据。采用内容分析法, 综述分析了当前世界各国关于源头设施生命周期环境与经济效益的研究。研究表明, 源头设施建设阶段会产生较高的环境影响及经济成本, 但运行阶段会产生较大的环境与经济效益。当前研究存在的不足之处主要包括环境影响类别和设施种类单一、研究范围比较小及对环境与经济综合影响研究较少。最后, 提出了海绵城市源头设施今后的研究方向, 研究结果可为未来海绵城市量化研究提供一定的参考。

**关键词:** 海绵城市; 源头设施; 环境影响; 生命周期成本评价; 环境效益

**中图分类号:** X 321 **文献标志码:** A

## Research progress on life cycle assessment of sponge city source control facilities

XU Changqing<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiaoyue<sup>2</sup>, CHEN Zhengxia<sup>2</sup>, JIA Haifeng<sup>2</sup>

(1. School of Management and Economics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** As effective measures to control urban runoff, sponge city source control facilities gain more and more attention worldwide. Quantitatively evaluating the environmental and economic impact and benefit based on the life cycle perspective can provide scientific and comprehensive information for future sponge city construction. Based on the content analysis method, the current researches on life cycle environmental and economic analysis of source control facilities in various countries are summarized and analyzed. Results show that the environmental impacts and economic cost are higher in the construction stage of source control facilities, while greater environmental and economic benefits are generated in the operation stage. The shortcomings of the current research mainly include the single type of environmental impact and the type of facilities, the relatively small scope and the few studies on the comprehensive impact of environment and economy. Finally, the future research direction of sponge city source control facilities is proposed, and the research results can provide useful information for future sponge city related research.

**Key words:** sponge city; source control facility; environmental impact; life cycle cost evaluation; environmental benefit

海绵城市建设是系统解决城市化引发的水环境、水生态、水资源、水安全等一系列涉水问题的有

收稿日期: 2022-10-15

作者简介: 徐常青 (1990-), 女, 副教授, 主要从事环境管理、环境系统工程研究, E-mail: xcq@bit.edu.cn。

通讯作者: 陈正侠 (1984-), 女, 高级工程师, 主要从事水环境系统分析研究, E-mail: chenzhengxia@tsinghua.edu.cn。

贾海峰 (1967-), 男, 教授, 主要从事环境规划与系统分析研究, E-mail: jhf@tsinghua.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(编号: 52200218); 国家自然科学基金面上项目(编号: 52070112); 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室开放基金资助项目(编号: HYD20230F01)。

效途径。在我国大力推进海绵城市建设的过程中,如何客观定量地评估各类海绵城市源头设施实施成效是一项迫切的任务。与传统灰色基础设施相比,海绵城市源头设施可以实现良好的降雨径流量削减和水体污染物控制<sup>[1-3]</sup>。但各类源头设施的建设过程涉及原材料的生产、运输、建设、运行维护等阶段,且每个过程都会产生不同的环境影响和经济成本。此外,有研究指出,海绵城市源头设施低影响开发(low impact design or development, LID)的建设成本比传统灰色基础设施高<sup>[4, 5]</sup>。因此,应该对源头设施产生的环境经济影响或效益进行科学的系统性定量评价。

目前国内针对上述问题进行的量化研究较少<sup>[6, 7]</sup>,国际上主要采用生命周期环境影响评价(life cycle assessment, LCA)或者生命周期成本评价(life cycle costing, LCC)的方法进行量化分析。LCA主要用于评估某种产品或流程的整个生命周期过程(即从原材料的获取、运输、生产使用到最终处置过程)排放的污染物对环境所造成的影响<sup>[8]</sup>,其作为国际上产品设计与环境管理的重要工具已被纳入ISO14000环境管理系列标准<sup>[8]</sup>;LCC主要包括产品设计、制造、运输、购买、使用、维护、废弃处置或者循环利用等所有相关成本<sup>[9, 10]</sup>。

目前,发达国家针对海绵城市源头设施进行LCA或LCC的研究较多,主要是由于发达国家在降雨径流管理方面起步比较早(20世纪70年代),许多发展中国家对降雨径流的管理起步比较晚,关于海绵城市源头设施的LCA或LCC的研究也很少。以中国为例,从2015—2020年源头设施的建设情况来看,虽然在降雨径流控制方面取得了一定成效,但同时在实施过程中遇到了一些困难与挑战,如源头设施的适用性、成本与效益的量化分析等。

本研究采用内容分析法对相关文献进行综述<sup>[11]</sup>,概括总结了国际上关于海绵城市源头设施LCA与LCC研究的经验及不足之处,并指出未来的研究方向,为我国海绵城市的建设与应用提供参考。

## 1 研究方法

### 1.1 研究方法

本研究采用内容分析法进行综述分析,内容分析法是进行文献综述常用的方法之一<sup>[11]</sup>。首先,确定要分析的概念,如根据标题和摘要中的关键词搜索相关文献;然后,通过调查选定的文献来区分这些概念,去除重复项;其次,通过消除不相关信息,

对论文进行分析,从而确定适合进行内容分析的论文,排除不符合研究范围以及没有从生命周期视角进行评估的文章;最后,对选定的文章进行全文分析,识别海绵城市源头设施类别和采用的LCA方法、研究范围(如建设、运行和维护等阶段)和研究结果等。具体步骤如图1所示。

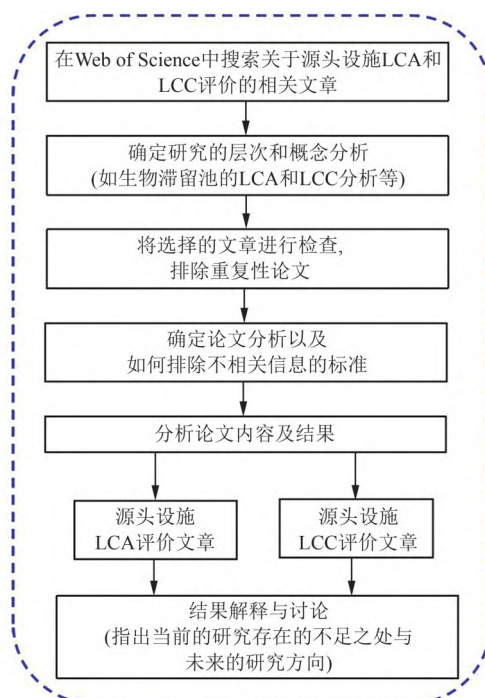


图1 内容分析法主要步骤

Fig.1 Main steps of content analysis

### 1.2 研究对象

本研究采用Web of Science数据库中关于海绵城市源头设施的LCA和LCC评价相关文献进行内容分析。主要是因为该数据库收录了12 000多种世界权威的、高影响力的学术期刊,具有综合性、多学科性和全面性,被认为是国际上最有影响力及最全面的数据库之一<sup>[12]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 文献检索结果

对Web of Science数据库的内容进行关键词检索以及重复项删除后,得到文献检索的主要结果。与源头设施相关的LCA/LCC研究可以追溯到2006年,在2006年之前几乎没有该方面的研究。此外,论文数量从2006年到2020年有所增加,但总体数量不多。该现象表明,海绵城市源头设施的LCA/LCC评价是一个较新的研究领域。目前国际上的研究主要针对绿屋顶(52篇)、人工湿地(22篇)和生物滞留设施(19篇),其他源头设施的评估相对

较少。表 1 总结了目前关于海绵城市源头设施的 LCA 与 LCC 相关文献,结果表明,大部分 LCA 研究来源于发达国家,如美国、加拿大、澳大利亚和部分欧洲国家。这主要是由于与发达国家相比,我国海绵城市源头设施的大规模建设仍处于起步阶段,且

缺乏研究成果积累。自 20 世纪 30 年代以来,世界各国研究人员逐渐开始关注 LCC,但是对源头设施的 LCC 研究少于 LCA 的研究<sup>[13,14]</sup>。如表 1 所示,大多数 LCC 研究也是在发达国家展开的。

表 1 世界各国关于海绵城市源头设施 LCA 或 LCC 研究  
Table 1 LCA or LCC studies on source facilities of sponge cities in various countries around the world

| 序号 | 作者                             | 时间   | 设施类型  | 国家   | 方法                       | 生命周期阶段        |
|----|--------------------------------|------|-------|------|--------------------------|---------------|
| 1  | Kosareo 等 <sup>[15]</sup>      | 2007 | 绿屋顶   | 美国   | LCA and LCC              | 建设、运行、维护和处置阶段 |
| 2  | Carter 等 <sup>[16]</sup>       | 2008 | 绿屋顶   | 美国   | LCC-benefit analysis     | 建设、运行和维护阶段    |
| 3  | Bianchini 等 <sup>[17]</sup>    | 2012 | 绿屋顶   | 加拿大  | Eco-Indicator (H)        | 建设阶段          |
| 4  | Dabbaghian <sup>[18]</sup>     | 2014 | 绿屋顶   | 加拿大  | IMPACT 2002+             | 建设和运行阶段       |
| 5  | El Bachawati 等 <sup>[19]</sup> | 2016 | 绿屋顶   | 黎巴嫩  | IMPACT 2002+             | 建设阶段          |
| 6  | Flynn 等 <sup>[20]</sup>        | 2013 | 雨水花园  | 美国   | LCA 和 i-Tree Eco         | 建设、运行和处置阶段    |
| 7  | Vineyard 等 <sup>[21]</sup>     | 2015 | 雨水花园  | 美国   | LCA and LCC              | 建设、使用和处置阶段    |
| 8  | Mangangka 等 <sup>[22]</sup>    | 2015 | 雨水花园  | 澳大利亚 | —                        | 运行阶段          |
| 9  | Wang 等 <sup>[23]</sup>         | 2016 | 雨水花园  | 新加坡  | LCA and LCC              | 建设和运行阶段       |
| 10 | Corbella 等 <sup>[24]</sup>     | 2017 | 人工湿地  | 西班牙  | LCA                      | 建设和运行阶段       |
| 11 | Lopsik <sup>[25]</sup>         | 2013 | 人工湿地  | 爱沙尼亚 | LCA-IMPACT 2002+和 ReCiPe | 建设和运行阶段       |
| 12 | DiMuro 等 <sup>[26]</sup>       | 2014 | 人工湿地  | 美国   | LCA-TRACI 和 LCC          | 建设和运行阶段       |
| 13 | Spatari 等 <sup>[27]</sup>      | 2011 | 透水铺装  | 美国   | LCA                      | 建设和运行阶段       |
| 14 | Xu 等 <sup>[5]</sup>            | 2017 | 源头设施链 | 中国   | ReCiPe 和 LCC             | 建设和运行阶段       |

2.2 典型源头设施 LCA/LCC 评价结果

根据文献综述结果,目前国外针对海绵城市源头设施的 LCA 与 LCC 研究主要集中在绿屋顶、人工湿地和生物滞留设施 3 类设施。

2.2.1 绿屋顶 LCA/LCC 评价结果分析

绿屋顶的环境效益主要体现在水体污染物削减<sup>[28,29]</sup>、空气污染物削减<sup>[30,31]</sup>、节能<sup>[32,33]</sup>、降雨径流控制<sup>[34,35]</sup>以及峰值流量削减<sup>[36]</sup>。Jaffal 等<sup>[37]</sup>研究了绿屋顶对建筑能源性能的影响,该研究表明绿屋顶对炎热、温和和寒冷的气候都能起到一定的作用。Bianchini 等<sup>[17]</sup>通过比较绿屋顶在运行过程中吸收的 NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub> 和 PM<sub>10</sub> 的量来评估绿屋顶所产生的环境效益,结果表明,在 13~32 a 时间内,绿屋顶可以平衡其建设过程原材料生产所造成的空气污染。然而,除了产生空气污染,聚合材料的生产过程还会对环境造成其他负面影响,因此,环境友好型和可持续型的材料应该取代聚合物,从而减少环境影响,该结论在相关文献中也有体现<sup>[5,20]</sup>。Kosareo 等<sup>[15]</sup>比较了 3 种绿色屋顶的经济与环境效能,3 种绿色屋顶的 LCA 评估均通过不同的生命周期阶段(制造、运输、安装、运行、维护和最终处置)展开,结果表明,绿色屋顶可以通过降低能耗显著减少建筑的生命周期环境影响。El Bachawati 等<sup>[19]</sup>采用 LCA

方法比较了绿色屋顶和传统屋顶对环境的影响,结果表明,综合各种环境影响类别,绿色屋顶是最佳的选择。

绿色屋顶的生命周期成本也是决定其应用范围的关键因素。影响绿色屋顶成本的因素主要包括植被类型、防水层材料、厚度以及使用寿命等<sup>[38]</sup>。Bianchini 等<sup>[17]</sup>对简单式绿色屋顶和花园式绿色屋顶 2 种类型进行了生命周期成本效益分析,研究考虑了原材料的生产、绿色屋顶的建设、运行和最终处置整个生命周期过程,结果表明,绿色屋顶能产生的潜在效益远大于其产生的环境影响和经济成本;此外,建议未来绿色屋顶的研究应该增加其原材料的重复利用率,以提高其经济和环境效益。Peng 等<sup>[39]</sup>也对简单式绿色屋顶和花园式绿色屋顶进行了经济评估,结果表明,简单式绿色屋顶在效益成本比和投资回收期两方面更加经济。假设简单式屋顶的生命周期是 40 a,其效益成本比为 3.84、回收期为 6.8 a,而花园型屋顶的效益成本比和回收期分别为 1.63 和 19.5 a。

2.2.2 生物滞留设施 LCA/LCC 评价结果分析

Flynn 等<sup>[20]</sup>对美国某城市生物滞留设施的建设、运行和处置阶段进行了 LCA 评估,结果表明,建设阶段是造成整体环境影响的主要原因,但运行阶



段对于温室气体的吸收大约在4 a左右可以抵消建设阶段所产生的碳排放。Vineyard等<sup>[21]</sup>采用LCA方法比较了生物滞留设施与传统污水处理设施在原材料生产、设施建设、运行和最终处置阶段等方面的环境影响,结果表明,生物滞留设施对环境的影响比传统污水处理设施小,与传统污水处理设施相比,可以减少62%~98%的环境影响。Wang等<sup>[23]</sup>在建设、运行、维护和运输阶段对生物滞留设施进行了LCA分析,结果表明,维护阶段对气候变化造成的影响最大(约占总环境影响的35.6%),其次是运输阶段(约占总环境影响的30.2%)。

Wang等<sup>[23]</sup>通过LCC方法评估了生物滞留设施的资本成本和运维成本,假定生物滞留设施的寿命是35 a,结果表明,维护和运输阶段是影响LCC和LCA评价结果的最关键因素。因此,在今后的研究中,严格的维护和运输管理对提高生物滞留设施的经济效益至关重要。Flynn等<sup>[20]</sup>对生物滞留设施进行了成本分析,研究结果表明,生物滞留设施建设阶段的总成本约为 $1.55 \times 10^5$  USD/公顷不透水面积(ha-IDA)。Chui等<sup>[40]</sup>使用LCC方法对源头设施(绿色屋顶、生物滞留设施和透水铺装)在应对极端降雨情况下的土地、建筑和运维等成本效益进行分析,发现透水铺装在这3种设施中最为经济有效。

### 2.2.3 人工湿地LCA/LCC评价结果分析

目前,大多数关于人工湿地的LCA研究都是通过分析不同的环境影响类别展开的。Corbella等<sup>[24]</sup>针对3种类型人工湿地(传统人工湿地、添加砾石层阳极微生物燃料电池的人工湿地、添加石墨阳极微生物燃料电池的人工湿地),从建设和运行阶段开展LCA分析,结果表明,添加石墨阳极微生物燃料电池的人工湿地在非生物耗竭的环境影响高于其他2种类型,这主要是石墨和金属材料的使用造成的。DiMuro等<sup>[26]</sup>也对人工湿地进行了LCA分析,发现人工湿地较低的能量和物质投入对化石燃料消耗、酸化、雾霾形成和臭氧损耗所造成的环境影响比较小。Lopsik<sup>[25]</sup>对爱沙尼亚一个小型人工湿地的建设和运行阶段进行了LCA分析,结果表明,建设阶段的轻质膨胀粘土骨料在人工湿地中的使用是造成其环境影响高的主要原因。Wang等<sup>[41]</sup>对潜流式人工湿地和传统人工湿地进行了环境影响评价,研究结果表明,在大多数的环境影响类别中,用于产生潜流的水泵耗电量对环境产生的影响最大,与传统人工湿地相比,潜流人工湿地植被固定CO<sub>2</sub>的效果较差。

DiMuro等<sup>[26]</sup>比较了人工湿地与灰色基础设施

的运行维护成本,结果表明,2 a后,灰色基础设施的总成本(主要指维护费用)逐年高于人工湿地,主要是因为人工湿地的低能耗、低资源需求和低运维需求使得其后期的维护费用比较低。Tupper<sup>[42]</sup>对源头设施与传统灰色基础设施进行了LCC分析,结果表明,绿色基础设施的建设成本比灰色基础设施高出约34%。然而,从运行角度分析,源头设施更具环境和经济效益。

### 2.3 国内文献综述结果

如上文所述,发展中国家缺乏对源头设施的LCA研究,但关于源头设施效能(如水质和水量控制方面)和成本的研究报道较多。本研究以中国为例,介绍了在海绵城市建设的大背景下,中国对海绵城市源头设施建设、效能、成本等相关研究情况。

该统计结果将功能相近的设施进行了合并,如生物滞留设施包括高位花坛、生物滞留池、雨水花园和生态树池;人工湿地包括湿塘和人工土壤渗滤系统;调蓄池包括蓄水池和干塘。结果表明,中国多以建设透水铺装、下凹式绿地、人工湿地、生物滞留设施为主,绿色屋顶、调蓄池、植草沟和植被缓冲带则相对较少,这主要是因为生物滞留设施、透水铺装、人工湿地的适用范围相对较广且在降雨径流控制方面具有良好性能<sup>[3]</sup>。透水铺装由于其良好的透水性,使得自然降水能够迅速透过地表,适时补充地下水资源,既蓄水又能缓解城市内涝。下凹式绿地的优势主要在于其透水性良好,可节约景观用水,且其建设成本较低,故被较多采用<sup>[3]</sup>。人工湿地由于其能耗低、易管理且可以净化雨水等优点,也被较多采用<sup>[3]</sup>。生物滞留设施在源头减排控制方面能够起到重要作用,可使峰现时间延后,实现错峰、削峰目的,从而减轻雨水管网的瞬时压力<sup>[3]</sup>。我国气候、地理、人口、经济发展等方面差异较大,因地制宜地选择海绵城市源头设施对控制城市降雨径流具有重要意义,因此应该更加科学地量化评估海绵城市源头设施的性能(如环境、经济等效益),为决策者提供可靠的依据。

#### 2.3.1 源头设施效能分析

对1995—2021年中国知网(China National Knowledge Infrastructure, CNKI)的文献进行检索,对关键词为海绵城市、透水铺装、低影响开发、雨水花园、LID、下凹式绿地、绿色屋顶、植草沟、低影响开发措施、下沉式绿地的文章分别进行搜索,文献内容涉及工程案例、综述、实验研究、规划方案、效能评估等。

将以上文章进行整理,对文章内容中关于降雨

径流水量控制、水质控制以及成本分析相关的信息进行统计,发现目前中国的研究大多侧重于对降雨径流总量的控制,包括径流总量减少量和峰值流量减少量,关于水质的研究比较少<sup>[43-55]</sup>。这主要是由于某些源头设施的入口和出口(如透水铺装)很难界定,因此,缺乏源头设施的现场监测数据是对源头设施进一步研究的主要挑战。将目前中国关于海绵城市源头设施水质控制效果的数据进行归纳整理,其对于主要水体污染物的平均去除效率如表 2 所示,表中:COD(chemical oxygen demand)为化学需氧量,表示有机污染物;SS(suspended substance)为悬浮物;TP(total phosphorus)为总磷;TN(total nitrogen)为总氮。

表 2 CNKI 中关于源头设施对于水体污染物的平均去除效率

Table 2 Average removal efficiency of pollutants in water by source facilities in CNKI literature

| 海绵城市源头<br>设施类型 | 污染物平均去除效率/% |       |                    |       |       |       |       |
|----------------|-------------|-------|--------------------|-------|-------|-------|-------|
|                | COD         | SS    | NH <sub>3</sub> -N | TP    | TN    | Pb    | Zn    |
| 下凹绿地           | 51.65       | —     | 60.39              | 54.88 | 33.00 | —     | —     |
| 人工湿地           | 86.23       | 71.18 | 67.07              | 70.56 | 85.33 | 62.71 | —     |
| 生物滞留设施         | 59.10       | 79.15 | 65.45              | 72.00 | 73.90 | —     | —     |
| 透水铺装           | 62.00       | 34.93 | 39.00              | 57.00 | 53.00 | 60.00 | 60.00 |
| 调蓄池            | 41.88       | 59.32 | 21.62              | 20.05 | 15.00 | —     | —     |
| 植被缓冲带          | 77.97       | 90.00 | —                  | 85.11 | 69.93 | —     | —     |
| 植草沟            | 26.70       | 46.25 | 44.70              | 51.40 | —     | 98.00 | 97.00 |

2.3.2 源头设施成本分析

成本分析可以为海绵城市源头设施布局优化增加可靠性和准确性。有中国学者进行了源头设施相关成本分析的研究<sup>[7, 50, 51]</sup>。陈韬等<sup>[50]</sup>对中国 15 种源头设施进行了成本效益分析,结果表明,源头设施在经济效益方面具有相当大的潜力(如减少雨水径流的成本、控制合流制溢流(combined sewer overflow, CSO)、雨水渗透和净化、洪水控制以及预防中暑等方面)。马恒升等<sup>[51]</sup>也报道了同样的结果,源头设施的成本效益明显优于传统雨水控制措施。此外,该研究还考虑了缓解供需矛盾所带来的社会效益,并表明我国缺乏海绵城市源头设施的经济研究数据,有待对源头设施的成本效益进行深入研究。芦琳等<sup>[7]</sup>对生物滞留设施和透水铺装在北京市的成本效益进行案例分析,结果表明,生物滞留设施和透水铺装的总成本分别为  $8.99 \times 10^4$  美元和  $6.05 \times 10^4$  美元,每年总经济效益为  $5.78 \times 10^3$  美元,生物滞留设施的成本回收期约为 14 a,透水铺装成

本回收期约为 9.5 a。

目前,国内的一些研究主要集中在校园和小区的径流控制成本及单项设施效能评价。《海绵城市建设技术指南》列出了北京海绵城市源头设施的若干参考价格<sup>[3]</sup>。然而,成本数据是通过建筑面积来评估的,而不是整个生命周期(包括开挖、施工、规划和运营)。本文根据 CNKI 以及中国海绵城市试点城市实际建设数据,对国内关于源头设施成本的研究进行了总结,如表 3 所示。

表 3 中国海绵城市源头设施建设成本  
Table 3 Source facilities construction cost of sponge city in China

| 源头设施类型                      | 数据量 | 建设成本 |       |       |           |
|-----------------------------|-----|------|-------|-------|-----------|
|                             |     | 最小值  | 平均值   | 最大值   | 官方参考值     |
| 调蓄池/(元·m <sup>-3</sup> )    | 29  | 300  | 1 000 | 7 600 | 800~1 200 |
| 生物滞留设施/(元·m <sup>-2</sup> ) | 85  | 250  | 837   | 1 200 | 150~800   |
| 透水铺装/(元·m <sup>-2</sup> )   | 92  | 60   | 329   | 1 200 | 60~200    |
| 植草沟/(元·m <sup>-2</sup> )    | 17  | 40   | 234   | 695   | 30~200    |
| 人工湿地/(元·m <sup>-2</sup> )   | 4   | 600  | 600   | 1 200 | 500~700   |
| 干塘/(元·m <sup>-3</sup> )     | 1   | —    | 600   | —     | —         |
| 绿色屋顶/(元·m <sup>-2</sup> )   | 17  | 200  | 200   | 800   | 100~300   |
| 植被缓冲带/(元·m <sup>-2</sup> )  | 9   | 50   | 234   | 640   | —         |
| 渗渠/(元·m <sup>-2</sup> )     | 1   | —    | 772   | —     | —         |
| 湿塘/(元·m <sup>-3</sup> )     | 2   | 600  | 600   | 600   | —         |

注:官方参考值为参考《海绵城市建设技术指南》中针对北京海绵城市源头设施的建设参考价格。

2.4 国内外研究存在的不足之处

通过对国内外文献的研究进行综述发现,目前对于源头设施的 LCA 和 LCC 研究主要集中于发达国家,且主要存在如下不足之处:

- 1)研究涉及的环境影响类别和设施种类单一。  
目前大多数关于源头设施的 LCA 和 LCC 研究只是针对单一环境影响类别(如全球变暖)或者只考虑某一种类型的设施,较少关注敏感性分析和不确定性分析。
- 2)较少涉及源头设施环境和经济集成评价。  
目前国际上大部分关于源头设施的研究是仅针对环境或者经济影响单独开展的研究,将两者结合在一起进行集成评价的研究较少,因此无法全面衡量源头设施建设的利弊。
- 3)研究尺度较小,很少涉及大尺度的研究。  
当前源头设施的 LCA 和 LCC 研究主要集中于场地尺度,缺乏大尺度(如区域尺度、流域尺度等)的研究。

### 3 结论与展望

#### 3.1 主要结论

1)从生命周期环境影响角度分析,海绵城市源头设施运行阶段可以产生较大的环境效益,但建造和维护阶段对原材料的消耗又会产生较大的环境影响,因此可通过提高原材料的回收率增加环境效益。

2)从生命周期经济角度分析,运行阶段可以产生较大的经济效益,同样地,建造和维护阶段又会产生较大的经济成本。目前关于源头设施最终处置阶段的数据比较缺乏,主要是因为绿色基础设施的寿命比较长,大部分源头设施还未到废弃阶段。

#### 3.2 展望

本研究主要提出以下几点展望:

1)应综合考虑多种环境影响类别,从而更加全面地评估源头设施的环境影响与效益。

2)应综合考虑源头设施的环境与经济效益,为决策者提供合理的选择依据。

3)研究不应该局限于场地尺度,应该从城市或者全国尺度展开研究,以便更加合理地规划未来海绵城市建设。

#### 参考文献:

- [1] 章林伟. 中国海绵城市建设与实践[J]. 给水排水, 2018, 54(11): 1-5.  
Zhang Linwei. Sponge city construction and practice in China[J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 54(11): 1-5.
- [2] 章林伟. 海绵城市建设概论[J]. 给水排水, 2015, 51(6): 1-7.  
Zhang Linwei. Introduction to sponge city construction [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 51(6): 1-7.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南(试行)(下)——低影响开发雨水系统构建[J]. 建筑砌块与砌块建筑, 2015, (2): 42-52.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical guide for the construction of sponge city (trial) (II)—construction of rainwater system for low impact development[J]. Structures Units & Units Architecture, 2015, (2): 42-52.
- [4] Santos J, Flintsch G, Ferreira A. Environmental and economic assessment of pavement construction and management practices for enhancing pavement sustainability[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2017, 116: 15-31.
- [5] Xu C Q, Hong J L, Jia H F, et al. Life cycle environmental and economic assessment of a LID-BMP treatment train system: a case study in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 149: 227-237.
- [6] 芦琳. 两种典型城市雨水LID技术生命周期评价研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2013.  
Lu Lin. Life cycle assessment of two typical low impact development technology[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2013.
- [7] 芦琳, 陈韬, 付婉霞, 等. LID措施生命周期评价方法探析——以雨水花园与渗透铺装+渗透管/井系统为例[J]. 绿色科技, 2013, (5): 287-291.  
Lu Lin, Chen Tao, Fu Wanxia, et al. Life cycle assessment method of LID measures—taking rainwater garden and infiltration pavement+infiltration pipe/well system as an example[J]. Journal of Green Science and Technology, 2013, (5): 287-291.
- [8] ISO. ISO 14040 Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework[S]. Geneva, Switzerland: ISO, 2006.
- [9] Woodward D G. Life cycle costing—theory, information acquisition and application[J]. International Journal of Project Management, 1997, 15(6): 335-344.
- [10] Standards Australia/Standards New Zealand. AS/NZS 4536:1999(Reconfirmed 2014) Life Cycle Costing—An Application Guide, Standards Australia, Sydney and Standards New Zealand[S]. Wellington: Standards Australia/Standards New Zealand, 2014.
- [11] Elo S, Kyngäs H. The qualitative content analysis process[J]. Journal of Advanced Nursing, 2008, 62(1): 107-115.
- [12] Olawumi T O, Chan D W M. A scientometric review of global research on sustainability and sustainable development[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 183: 231-250.
- [13] Thomé A M T, Santos Ceryno P, Scavarda A, et al. Sustainable infrastructure: a review and a research agenda[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 184: 143-156.
- [14] Zuo J, Pullen S, Rameezdeen R, et al. Green building evaluation from a life-cycle perspective in Australia: a critical review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 70: 358-368.
- [15] Kosareo L, Ries R. Comparative environmental life cycle assessment of green roofs[J]. Building and Environment, 2007, 42(7): 2606-2613.
- [16] Carter T, Keeler A. Life-cycle cost-benefit analysis of extensive vegetated roof systems[J]. Journal of Environmental Management, 2008, 87(3): 350-363.
- [17] Bianchini F, Hewage K. How “green” are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials[J].



- Building and Environment, 2012, 48: 57-65.
- [18] Dabbaghian M. Water quality and life cycle assessment of green roof systems in semi-arid climate[D]. Vancouver: The University of British Columbia, 2014.
- [19] El Bachawati M, Manneh R, Belarbi R, et al. Cradle-to-gate life cycle assessment of traditional gravel ballasted, white reflective, and vegetative roofs: a Lebanese case study[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 137: 833-842.
- [20] Flynn K M, Traver R G. Green infrastructure life cycle assessment: a bio-infiltration case study[J]. Ecological Engineering, 2013, 55: 9-22.
- [21] Vineyard D, Ingwersen W W, Hawkins T R, et al. Comparing green and grey infrastructure using life cycle cost and environmental impact: a rain garden case study in Cincinnati, OH[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2015, 51(5): 1342-1360.
- [22] Mangangka I R, Liu A, Egodawatta P, et al. Performance characterisation of a stormwater treatment bioretention basin[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 150: 173-178.
- [23] Wang M, Zhang D Q, Adhityan A, et al. Assessing cost-effectiveness of bioretention on stormwater in response to climate change and urbanization for future scenarios[J]. Journal of Hydrology, 2016, 543: 423-432.
- [24] Corbella C, Puigagut J, Garfí M. Life cycle assessment of constructed wetland systems for wastewater treatment coupled with microbial fuel cells[J]. Science of the Total Environment, 2017, 584: 355-362.
- [25] Lopsik K. Life cycle assessment of small-scale constructed wetland and extended aeration activated sludge wastewater treatment system[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2013, 10(6): 1295-1308.
- [26] DiMuro J L, Guertin F M, Helling R K, et al. A financial and environmental analysis of constructed wetlands for industrial wastewater treatment[J]. Journal of Industrial Ecology, 2014, 18(5): 631-640.
- [27] Spataro S, Yu Z W, Montalto F A. Life cycle implications of urban green infrastructure[J]. Environmental Pollution, 2011, 159(8/9): 2174-2179.
- [28] Jia H F, Wang X W, Ti C P, et al. Field monitoring of a LID-BMP treatment train system in China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187(6): 373.
- [29] Jia H F, Yu S L, Qin H P. Low impact development and sponge city construction for urban stormwater management[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2017, 11(4): 20.
- [30] Gwak J H, Lee B K, Lee W K, et al. Optimal location selection for the installation of urban green roofs considering honeybee habitats along with socio-economic and environmental effects[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 189: 125-133.
- [31] Yang J, Yu Q, Gong P. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(31): 7266-7273.
- [32] Cubi E, Zibin N F, Thompson S J, et al. Sustainability of rooftop technologies in cold climates: comparative life cycle assessment of white roofs, green roofs, and photovoltaic panels[J]. Journal of Industrial Ecology, 2016, 20(2): 249-262.
- [33] Pan L, Chu L M. Energy saving potential and life cycle environmental impacts of a vertical greenery system in Hong Kong: a case study[J]. Building and Environment, 2016, 96: 293-300.
- [34] Liu W, Chen W P, Peng C. Influences of setting sizes and combination of green infrastructures on community's stormwater runoff reduction[J]. Ecological Modelling, 2015, 318: 236-244.
- [35] Law E P, Diemont S A W, Toland T R. A sustainability comparison of green infrastructure interventions using emergy evaluation[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 145: 374-385.
- [36] Vijayaraghavan K. Green roofs: a critical review on the role of components, benefits, limitations and trends[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 57: 740-752.
- [37] Jaffal I, Ouldboukhite S E, Belarbi R. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance[J]. Renewable Energy, 2012, 43: 157-164.
- [38] Shafique M, Kim R, Rafiq M. Green roof benefits, opportunities and challenges — a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 90: 757-773.
- [39] Peng L L H, Jim C Y. Economic evaluation of green-roof environmental benefits in the context of climate change: the case of Hong Kong[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2015, 14(3): 554-561.
- [40] Chui T F M, Liu X, Zhan W T. Assessing cost-effectiveness of specific LID practice designs in response to large storm events[J]. Journal of Hydrology, 2016, 533: 353-364.
- [41] Wang T, Liu R B, O'Meara K, et al. Assessment of a field tidal flow constructed wetland in treatment of swine wastewater: life cycle approach[J]. Water, 2018, 10(5): 573.
- [42] Tupper J A. A cost comparison of a low impact development to traditional residential development along the South Carolina coast[D]. Columbia: University of South Carolina, 2012.

- [43] 石文娟,刘辉,张学洪,等.应用人工湿地控制降雨径流污染的实验研究[J].西南给排水,2007,29(2):20-23.  
Shi Wenjuan, Liu Hui, Zhang Xuehong, et al. Experimental study on control of rainfall runoff pollution by artificial wetland[J]. Southwest Water & Wastewater, 2007, 29(2): 20-23.
- [44] 陈莹,赵剑强,胡博.西安市城市主干道路面径流污染特征研究[J].中国环境科学,2011,31(5):781-788.  
Chen Ying, Zhao Jianqiang, Hu Bo. Pollution characteristics of urban trunk road runoff in Xi'an City[J]. China Environmental Science, 2011, 31(5): 781-788.
- [45] 李贺,张雪,高海鹰,等.高速公路路面雨水径流污染特征分析[J].中国环境科学,2008,28(11):1037-1041.  
Li He, Zhang Xue, Gao Haiying, et al. Characterization of contaminated runoff on free way surface[J]. China Environmental Science, 2008, 28(11): 1037-1041.
- [46] 李贺,张秋菊,李田.屋面径流污染物的出流类型与水质特性研究[J].中国给水排水,2009,25(9):90-93.  
Li He, Zhang Qiuju, Li Tian. Study on outflow types of pollutants in roof runoff and quality characteristics[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(9): 90-93.
- [47] 程江,杨凯,黄民生,等.下凹式绿地对城市降雨径流污染的削减效应[J].中国环境科学,2009,29(6):611-616.  
Cheng Jiang, Yang Kai, Huang Minsheng, et al. Reduction effect of sunken green space on urban rainfall-runoff pollution[J]. China Environmental Science, 2009, 29(6): 611-616.
- [48] 程江,吕永鹏,黄小芳,等.上海中心城区合流制排水系统调蓄池环境效应研究[J].环境科学,2009,30(8):2234-2240.  
Cheng Jiang, Lü Yongpeng, Huang Xiaofang, et al. Environmental effects of combined sewage detention tank in central Shanghai[J]. Environmental Science, 2009, 30(8): 2234-2240.
- [49] 肖海文,闫鸟飞,翟俊,等.人工湿地对城市住宅区降雨径流中铅的去除效果研究[J].环境工程学报,2010,4(8):1799-1804.  
Xiao Haiwen, Yan Niaofei, Zhai Jun, et al. Lead removal performance of a constructed wetland treating stormwater runoff in an urban residential area[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(8): 1799-1804.
- [50] 陈韬,李业伟,张雅君.典型城市雨水低影响开发(LID)措施的成本-效益分析[J].西南给排水,2014,36:41-46.  
Chen Tao, Li Yewei, Zhang Yajun. Cost benefit analysis of low impact development (LID) measures for typical urban rainwater[J]. Southwest Water & Wastewater, 2014, 36:41-46.
- [51] 马恒升,徐涛,赵林波,等.低影响开发(LID)雨洪管理费用效益分析[J].价值工程,2013,32(12):287-289.  
Ma Hengsheng, Xu Tao, Zhao Linbo, et al. Analysis on benefit and costs of low impact development in storm-water management[J]. Value Engineering, 2013, 32(12): 287-289.
- [52] 李海燕,魏鹏,黄延,等.暴雨情况下传输型植被浅沟的净化效果研究[J].中国给水排水,2014,30(1):99-103.  
Li Haiyan, Wei Peng, Huang Yan, et al. Research of purification effect of conveyance swale under heavy rain [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(1): 99-103.
- [53] 周开壹,高伏良,胡跃华,等.基于多孔混凝土的植草沟(GP水沟)降污能力研究[J].给水排水,2011,47(S1):269-274.  
Zhou Kaiyi, Gao Fuliang, Hu Yuehua, et al. Study on pollution reduction ability of grass planting ditch (GP ditch) based on porous concrete[J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 47(S1): 269-274.
- [54] 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[J].北京师范大学学报:自然科学版,2013,49(S1):286-291.  
Meng Yingying, Wang Huixiao, Zhang Shuhan, et al. Experiments on detention, retention and purifying effects of urban road runoff based on bioretention[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2013, 49(S1): 286-291.
- [55] 周君薇,陈一,闻岳,等.上海东方体育中心人工湖水体生态处理规划[J].中国给水排水,2011,27(16):17-21.  
Zhou Junwei, Chen Yi, Wen Yue, et al. Planning scheme for eco-treatment of artificial lake water in Shanghai Oriental Sports Center[J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(16): 17-21.
- [56] Gurung S B, Geronimo F K, Hong J, et al. Application of indices to evaluate LID facilities for sediment and heavy metal removal[J]. Chemosphere, 2018, 206: 693-700.
- [57] Liu C, Lu J, Liu J Q, et al. Effects of lead (Pb) in stormwater runoff on the microbial characteristics and organics removal in bioretention systems[J]. Chemosphere, 2020, 253: 126721.
- [58] Shang Y, Guan Y X, Tang Z, et al. Characterisation of runoff pollutant removal in biological retention systems by orthogonal experiment[J]. Journal of Water Process Engineering, 2022, 49: 103145.
- [59] Lee J, Bae S, Lee W H, et al. Effect of surface area to catchment area ratio on pollutant removal efficiency in vegetation-type facilities[J]. Ecological Engineering, 2022, 179: 106609.

(编辑:贾丽娜)