

DOI:10.13205/j.hjgc.202401019

徐常青,冷林源,陈正侠,等. 海绵城市源头设施生命周期环境经济集成评价[J]. 环境工程,2024,42(1):144-149.

海绵城市源头设施生命周期环境经济集成评价

徐常青^{1,2} 冷林源² 陈正侠^{2*} 贾海峰^{2*}

(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:建设海绵城市是城市面源污染控制和内涝防治的重要手段,在我国已进入全域推广阶段。为量化海绵城市源头设施在施工建设和运行阶段产生的环境和经济影响,针对目前国内外海绵城市源头设施生命周期环境(life cycle assessment, LCA)与生命周期经济(life cycle costing, LCC)集成量化评价研究存在的不足,选取某学校内场地5种典型海绵城市源头设施,采用LCA-LCC集成评价方法,量化分析不同源头设施的环境影响、环境效益、经济影响和经济成本,并识别关键影响因子。结果表明,源头设施施工建设阶段会产生较大环境影响与经济成本,运行阶段会产生较大环境与经济效益。运行阶段对径流量和水质控制所产生的总环境影响回收期在8年以内,总经济成本回收期在2年以内,总体效益可观。

关键词:海绵城市;源头设施;环境影响;经济效益

LIFE-CYCLE ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC BENEFITS ASSESSMENT OF SOURCE CONTROL FACILITIES FOR SPONGE CITY

XU Changqing^{1,2}, LENG Linyuan², CHEN Zhengxia^{2*}, JIA Haifeng^{2*}

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

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

Abstract: Sponge city construction is an important measure for urban non-point source pollution control and waterlogging prevention, which has been widely extended in China. To quantify the environmental and economic impacts of the construction and operation stages of sponge city source facilities, aiming at the shortcomings of the current global research on the environmental and economic benefits in sponge city, 5 typical source facilities in a school site were selected as the examples to quantitatively analyze the environmental and economic impacts and benefits and identify key influencing factors by life cycle assessment (LCA) and life cycle costing (LCC) integrated evaluation method (LCA-LCC). The results presented that the construction stage could generate high environmental impact and economic cost, while the operation stage could generate significant environmental and economic benefits. In the operational phase, the payback period of the total environmental impact on runoff and water quality control was within 8 years, and the payback period of total economic cost was within 2 years, and the overall benefits of sponge city source facilities were considerable.

Keywords: sponge city; source facility; environmental impact; economic benefit

0 引言

快速城市化在带动经济发展、拉动消费和吸引投

资的同时,也带来了一系列环境问题。城市中绿化面积逐年减少,不透水面逐年增加,不仅改变了自然生

收稿日期:2023-03-10

基金项目:国家自然科学基金青年项目(52200218);国家自然科学基金面上项目(52070112)

第一作者:徐常青(1990-),女,副教授,主要研究方向为环境管理、环境系统工程。xcq@bit.edu.cn

*通信作者:陈正侠(1984-),女,高工,主要研究方向为水环境系统分析。chenzhengxia@tsinghua.edu.cn

贾海峰(1967-),男,教授,主要研究方向为环境规划与系统分析。jhf@tsinghua.edu.cn

态的水循环过程,形成大量降雨径流,也引发众多水环境问题;城市面源污染问题突出、内涝灾害严重、应对暴雨尤其是超标暴雨的能力较低等^[1]。美国、英国、澳大利亚和新加坡等发达国家在应对降雨径流问题的过程中,通过降雨蒸发、雨水渗透、滞蓄雨水等途径^[2,3],减少地表降雨径流量,从而最大程度恢复城市雨水径流的天然水文过程,降低传统排水管网压力,缓解城市内涝和水环境等问题^[4]。

我国自 2013 年国家提出“海绵城市”理念以来,分批分阶段在全国进行 30 个试点城市和 45 个示范城市全域推进海绵城市建设。海绵城市采用“渗、滞、蓄、净、用、排”各项源头减排技术,在保证城市排水防涝安全的基础上,充分发挥城市雨水径流渗透、滞蓄和自然净化作用,控制雨水径流保护水环境^[5]。与传统雨水管网、排涝泵站等基础设施相比,海绵城市源头设施可显著削减降雨径流峰值流量、径流总量和降低雨水径流对水体的污染程度^[6]。由于各种源头设施的建设过程涉及到原材料的生产、运输、建设、运行、维护等阶段,各阶段对环境产生的影响和经济效益大有不同。如何量化不同阶段源头设施的环境影响和经济效益是目前全域推进海绵城市建设亟需解决的问题。目前,国内外主要采用生命周期环境影响评价(life cycle assessment, LCA)^[7]或者生命周期成本评价(life cycle costing, LCC)^[8]的方法解决上述问题,但总体研究还存在明显不足,如所涉及的环境影响和设施种类单一、很少涉及源头设施环境与经济集成评价等^[9,10]。

笔者针对上述研究不足之处,采用生命周期环境与经济集成评价(LCA-LCC)方法,选取我国南方某学校场地内海绵城市源头设施进行生命周期环境与经济集成评价,以期决策者提供量化依据,为我国海绵城市建设效果评价提供科学支撑。

1 研究区域概况

本研究选取我国南方某学校内部分地块为研究区域。此地块属于城市用地类型中公共管理与公共服务用地,该类用地内建筑密度较低,绿化面积较大,活动用地较多,约占城市用地的 10%,是城市用地中的重要类别。研究区域内共设置 5 种源头设施,包括植草沟、植被缓冲带、生物滞留设施、渗透草坑和人工湿地,分布如图 1 所示。5 种源头设施的汇水区域包括篮球场和网球场,总面积为 7672 m²。

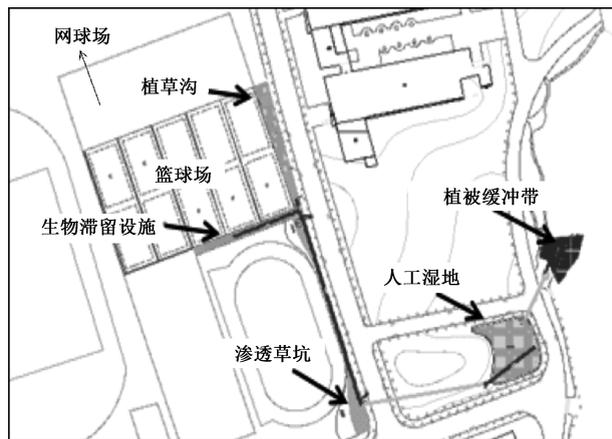


图 1 研究场地源头设施布置

Figure 1 Layout of the source control facilities at research site

2 核算方法与数据来源

2.1 核算方法

本研究采用生命周期环境与经济集成评价的方法对所选场地海绵城市源头设施建设情况进行生命周期环境与经济集成评价分析。其中,LCA 分析采用的 ReCiPe 方法是 LCA 最常用的方法之一^[11]。选取全球变暖、臭氧形成(生态/健康)、致癌性、非致癌性、电离辐射、臭氧层消耗、颗粒物形成、陆地酸化、水体富营养化、水体生态毒性、海洋富营养化、土地占用、水体消耗、金属消耗和化石燃料消耗 16 种中间点环境影响类别,对 LCA 模型的背景数据采用中国数据库背景数据进行更新,最后将 16 种中间点类别转化为 3 种终点环境影响类别。LCC 分析主要从内部成本和外部成本 2 部分进行计算。内部成本将所有原材料、能耗、劳动力以及设备的维护费用等基于当前中国市场报价进行计算^[12]。外部成本包括污染物排放成本、生态修复成本和人类健康成本,是生产过程对环境污染导致的经济影响。其中,污染物排放成本主要根据《中华人民共和国环境保护税法》中对各种污染物排放收取的费用进行计算^[13],生态修复成本主要是采用支付意愿法进行计算^[14],人类健康成本则主要分成直接健康成本和间接健康成本。计算方法如式(1)~(3)所示^[15]。

$$EC_T = \sum (EC_I + EC_E) \quad (1)$$

$$EC_E = \sum_{i=1}^n (EC_{e,i} + EC_{eco,i} + EC_{h,i}) \quad (2)$$

$$EC_{h,i} = DEC_{h,i} + NDEC_{h,i} \quad (3)$$

式中: EC_T 、 EC_I 、 EC_E 、 i 、 $EC_{e,i}$ 、 $EC_{eco,i}$ 、 $EC_{h,i}$ 、 $DEC_{h,i}$ 和 $NDEC_{h,i}$ 分别为总经济成本、内部成本、外部成本、污

染物质类型、环境排放成本、生态修复成本、人类健康成本、直接健康成本和间接健康成本。

功能单位是进行生命周期评价的前提和基础,是在进行生命周期评价时提供一个统一的、有明确计量单位的计量输入和输出的基准,然后在此基础上将目标定义范围内的所有能耗物耗以及投入产出情况均考虑在内。由于各种源头设施所服务的汇水区面积不同,因此,本研究选取 1 ha 不透水面(/ha-IDA)作为功能单位,基于此计算所有的原材料、运输、排放、劳动力和成本。我国目前所有源头设施均处于建设或者运行阶段,因此本研究主要考虑海绵城市源头设施建设和运行阶段所产生的环境影响、环境效益、经济成本和经济效益。

2.2 数据来源

本研究中源头设施建设阶段的清单数据(如花岗岩、级配碎石、鹅卵石、PVC管、种植土壤和混凝土等)来自该场地建设项目的承包商报告(表1)。建设清单中所有建筑原材料、能源消耗、运输、维修和劳动力的价格也根据承包商合同而定,LCC内部成本的计算则依据此展开。运行阶段数据(水质与水量控制量)主要采用实际监测数据,本研究使用设施正常运行阶段的降雨监测数据,即2012-05-09—2013-09-03之间的19场降雨监测(其中有9次未形成出流,10场降雨出流)。对10场降雨监测数据计算分析得到TN、Zn、Cu、COD、TSS、TP和径流控制总量的平均去除量分别为16.46, 1.48, 1.55, 115.81, 165.70, 0.72, $1.23 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

3 结果与讨论

3.1 源头设施环境影响

源头设施的环境影响分析主要针对其建设阶段。基于表1的生命周期清单,运用SimaPro中的ReCiPe方法,计算得到16种中间点环境影响类别的环境影响结果及造成其环境影响的具体流程贡献率,最后计算每一类源头设施的中间点环境影响以及造成其环境影响的关键流程。

本研究场地中,5种源头设施建设阶段的环境影响排序为渗透草坑>生物滞留设施>人工湿地>植被缓冲带>植草沟。单项源头设施中间点环境影响及流程以生物滞留设施为例,结果如表2所示。PVC管材的消耗在全球变暖、陆地酸化、水体富营养化、颗粒物形成、臭氧形成、化石燃料消耗、致癌性、非致癌性、电离辐射和水体消耗中间点环境影响类别中

表1 研究区源头设施建设阶段清单

Table 1 List of construction stages of the source control facilities in the study area

源头设施类型	原材料消耗	数量
植草沟	花岗岩	$2.49 \times 10^3 \text{ kg}$
	人工挖土方	$9.15 \times 10^5 \text{ kg}$
	级配砾石	$6.62 \times 10^4 \text{ kg}$
	鹅卵石	$9.94 \times 10^3 \text{ kg}$
	种植土	$4.45 \times 10^4 \text{ kg}$
	PVC管材	$1.64 \times 10^2 \text{ kg}$
	花坛	39.10 m^2
	草皮	$5.80 \times 10^2 \text{ m}^2$
	无纺布	$2.01 \times 10^2 \text{ m}^2$
	运输(假设30 km)	$7.79 \times 10^3 \text{ t} \cdot \text{km}$
生物滞留设施	人工挖土方	$7.04 \times 10^5 \text{ kg}$
	级配砾石	$1.84 \times 10^5 \text{ kg}$
	无纺布	$5.84 \times 10^2 \text{ m}^2$
	种植土	$2.82 \times 10^5 \text{ kg}$
	花坛	$2.09 \times 10^2 \text{ m}^2$
	鹅卵石	$1.96 \times 10^4 \text{ kg}$
	花岗岩	$2.23 \times 10^3 \text{ kg}$
	覆盖层	10.43 m^3
	PVC管材	$6.93 \times 10^3 \text{ kg}$
	运输(假设30 km)	$2.55 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{km}$
渗透草坑	人工挖土方	$1.83 \times 10^6 \text{ kg}$
	级配砾石	$4.14 \times 10^5 \text{ kg}$
	无纺布	$1.62 \times 10^3 \text{ m}^2$
	种植土	$1.08 \times 10^6 \text{ kg}$
	草皮	$4.11 \times 10^2 \text{ m}^2$
	花坛	$4.37 \times 10^2 \text{ m}^2$
	灌木	41.70Plant
	鹅卵石	$6.91 \times 10^3 \text{ kg}$
	PVC管材	$1.56 \times 10^4 \text{ kg}$
	运输(假设30 km)	$7.79 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{km}$
人工湿地	人工挖土方	$8.02 \times 10^5 \text{ kg}$
	级配砾石	$5.42 \times 10^5 \text{ kg}$
	无纺布	$1.11 \times 10^2 \text{ m}^2$
	种植土	$6.69 \times 10^5 \text{ kg}$
	人造沸石	$2.60 \times 10^5 \text{ kg}$
	PVC管材	$4.57 \times 10^3 \text{ kg}$
	花坛	$9.91 \times 10^2 \text{ m}^2$
	灌木	$1.02 \times 10^2 \text{ Plant}$
	混凝土管材	$1.55 \times 10^4 \text{ kg}$
	运输(假设30 km)	$7.55 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{km}$
植被缓冲带	人工挖土方	$1.55 \times 10^5 \text{ kg}$
	级配砾石	$9.45 \times 10^3 \text{ kg}$
	无纺布	28.15 m^2
	花坛	80.81 m^2
	草皮	$1.01 \times 10^2 \text{ m}^2$
	水生植物	$1.96 \times 10^2 \text{ m}^2$
	PVC管材	$2.95 \times 10^3 \text{ kg}$
	混凝土管材	$6.35 \times 10^3 \text{ kg}$
	运输(假设30 km)	$1.09 \times 10^3 \text{ t} \cdot \text{km}$

占比较大;无纺布的使用在土地占用、水体富营养化、非致癌性、水体生态毒性、海洋富营养化和臭氧层消

耗环境影响类别产生的影响较大,这与相似区域的已有研究结论一致^[16]。

表 2 生物滞留设施中间点环境影响及流程分析

Table 2 Environmental impact and process analysis of the intermediate point of biological retention facilities

环境影响类别	共计	PVC/%	无纺布/%	运输/%
全球变暖/kg CO ₂ eq	2.49×10 ⁴	61.86	20.04	18.10
土地占用/(ha·yr arable)	0.15	3.20	93.25	3.55
陆地酸化/kg SO ₂ eq	64.96	65.29	20.49	14.22
水体富营养化/kg PO ₄ ³⁻ eq	2.94	57.97	40.15	1.87
颗粒物形成/kg PM _{2.5} eq	18.94	64.41	17.84	17.76
臭氧形成(健康)/kg NO _x	78.18	68.89	10.92	20.19
化石燃料消耗/kg oil eq	7.33×10 ³	80.70	12.50	6.80
致癌性/Cases	1.10×10 ⁻³	72.60	23.48	3.93
非致癌性/Cases	3.76×10 ⁻³	45.60	36.48	17.92
水体生态毒性/(PAF·m ³ ·d)	2.34×10 ⁷	1.45	98.47	0.08
海洋富营养化/kg N eq	6.17	25.56	67.69	6.75
电离辐射/Bq C-14 eq	7.10×10 ⁴	84.87	13.65	1.49
水体消耗/m ³	7.13×10 ³	92.53	5.19	2.28
臭氧形成(生态)/kg NO _x	130.28	72.63	8.76	18.61
臭氧层消耗/kg CFC-11eq	0.02	3.72	96.17	0.11
金属消耗/kg Fe eq	435.87	61.10	13.60	25.30

对于植被缓冲带、人工湿地和渗透草坑 3 种源头设施,PVC 管材消耗在大多数环境影响类别中占比均较大,与前人研究^[9,17]结论一致。其中,植草沟与其他 4 种设施不同,除化石燃料消耗(23.23%)和水体消耗(46.98%) 2 个环境影响类别外,PVC 管材消耗在绝大多数环境影响类别中占比都较小,但是无纺布的消耗和道路运输产生的环境影响比较大。

3.2 源头设施环境效益

与建设阶段不同,源头设施运行阶段会通过控制降雨径流的水量 and 水质而产生较大的环境效益^[11]。研究区属于分流制排水系统,即雨水通过沟渠或管道集中直接排放或经简单处理后排放到天然水体中。水体中污染物(TSS、COD、TN、TP、Cu 和 Zn)直接排入水体会对水体富营养化、非致癌性、水体生态毒性和海洋富营养化 4 种中间点的环境影响类别造成影响,源头设施建设后对于水体中污染物的控制会减少上述环境影响。另外,源头设施对径流水量的控制还可以减少水体消耗环境影响。综上,在运行阶段产生的环境效益主要体现在水体富营养化、非致癌性、水体生态毒性、海洋富营养化和水体消耗 5 种中间点环境影响类别。根据研究区实际监测的污染物去除量以及降雨径流控制总量,运用 SimaPro 中的 ReCiPe 方法计算源头设施在运行阶段的环境效益。基于表 1 的生命周期清单,结合 ReCiPe 模型中的环境影响

因子得到对应的环境影响结果以及不同物质的占比;最后将运行阶段的环境效益和建设阶段的环境影响进行对比并分别计算回收期,结果如表 3 所示。

表 3 源头设施环境影响回收期

Table 3 Payback period of environmental impact of the

source control facilities

环境影响类别	环境影响	环境效益/a	回收期/a
水体富营养化	16.90 kg PO ₄ ³⁻ eq	3.37	5.02
非致癌性	2.41×10 ⁻² Cases	3.09×10 ⁻³	7.81
水体生态毒性	1.33×10 ⁸ PAF·m ³ ·d	9.66×10 ⁷	1.38
海洋富营养化	36.90 kg N eq	16.80	2.19
水体消耗	4.12×10 ⁴ m ³	1.25×10 ⁴	3.29

不同环境影响类别对比发现,非致癌性环境影响的回收期相对较长,需要 8 年时间,水体富营养化回收期约 5 年;水体生态毒性、海洋富营养化和水体消耗的回收期则在 1~3 年。Flynn 等^[17]的研究结果表明,雨水花园关于全球变暖、富营养化、人类毒性(包括致癌性和非致癌性)、生态毒性和雾霾的回收期分别为 4 年、3 年、40 年、3 年和 253 年。此结果与国内其他研究结果具有一定可比性,进一步表明海绵城市源头设施运行阶段可以产生的显著环境效益^[7,18]。

3.3 源头设施经济成本

1) 内部经济成本分析。源头设施建设阶段的内部成本主要是指建设成本,包括原材料的购置费用、劳动力费用、运输过程产生的费用等。基于表 1 中的清单,结合各种原材料的市场价格,进行计算得到本研究中生物滞留设施、植被缓冲带、人工湿地、植草沟和渗透草坑的内部总成本分别为 7.51×10⁴ 元、6.06×10⁴ 元、1.63×10⁵ 元、5.10×10⁴ 元和 1.36×10⁵ 元,其中人工湿地的内部成本最高,植草沟内部成本最低(图 2)。由图 2 可看出:劳动力成本在各类源头设施总成本中占比较高。级配砾石和 PVC 管材的成本在生物滞留设施、植被缓冲带和渗透草坑的总成本中占比较大。植被、土壤和混凝土管的成本在人工湿地和植被缓冲带的总成本中占比较大。花岗石板的成本在植草沟的总成本中占比较大,植被和土壤以及无纺布的成本在渗透草坑的总成本中占比也较高。生物滞留设施建设阶段的总成本约为 9.79×10⁵ 元/ha-IDA,稍低于美国的 1.05×10⁶ 元/ha-IDA^[17],整体结果具有可比性,微小差异可能是建设阶段部分机械化代替劳动力的原因。

2) 外部经济成本分析。外部成本包括污染物排放成本、生态修复成本和人类健康成本,利用

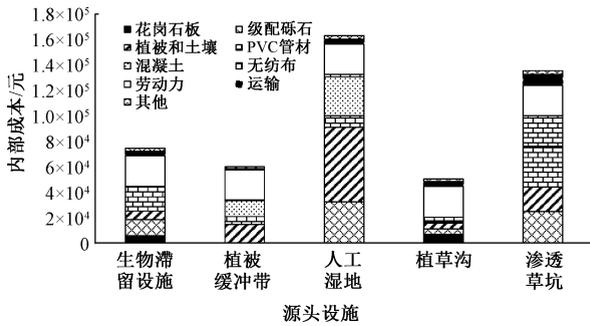


图2 5类源头设施内部经济成本分析

Figure 2 Analysis of internal economic cost of five types of the source control facilities

式(1)~(3)进行计算,得到本研究中生物滞留设施、植被缓冲带、人工湿地、植草沟和渗透草坑的外部总成本分别为 1.96×10^5 、 1.13×10^4 、 4.09×10^4 、 6.58×10^4 、 5.40×10^5 元,总体外部经济成本为 8.54×10^5 元。以生物滞留设施为例对其外部成本及其具体流程进行分析(表4),其他源头设施分析过程与生物滞留设施一致。

表4 生物滞留设施外部成本及主要流程分析

Table 4 Analysis of external cost and main process of the biological detention facilities

影响类别	外部成本/元	PVC/%	无纺布/%	运输/%
人体健康成本	2.05×10^3	62.55	21.81	15.64
生态修复成本	1.92×10^5	1.54	98.36	0.10
污染物排放成本	1.74×10^3	23.36	70.19	6.44

由表4可知:各类源头设施建设阶段所造成的生态修复成本均在其外部总成本中占比最高。PVC管材的和无纺布的使用是生物滞留设施、植被缓冲带和渗透草坑外部总成本的关键流程。无纺布在各类源头设施的生态修复成本中占比均最大。道路运输过程在人工湿地的外部成本中占比较大。源头设施外部成本的关键流程分析与源头设施的环境影响的关键流程基本一致。因此,对本研究区而言,无论是从环境角度还是经济角度,PVC管材和无纺布的使用都是关键影响因素。

3.4 源头设施经济效益

1) 内部经济效益分析。海绵城市建设的经济效益与环境效益均体现在降雨径流总量控制以及水体污染物减排2个方面。受所获数据的限制,本研究内部经济效益主要考虑对水量的控制。根据研究场地降雨径流控制总量($1.23 \times 10^4 \text{ m}^3$)和当地一级阶梯水价($1.98 \text{ 元}/\text{m}^3$),假设控制的雨水全部被利用,雨水综合利用可以获得的内部经济效益为 2.44×10^4 元。

在实际过程中,综合利用的雨水量需根据实际情况进行计算。此外,对于雨水中污染物的控制也应纳入内部经济效益的计算过程中,在今后的研究中应注意。

2) 外部经济效益分析。根据研究场地实测污染物的去除量,可以计算出源头设施在运行阶段产生的外部经济效益。经计算可知:源头设施运行阶段产生的总外部经济效益为 6.08×10^5 元,其中人类健康效益、生态修复效益和环境排放效益分别为 5.44×10^2 元、 6.07×10^5 元和 1.05×10^3 元。生态修复效益是最高的,主要是因为对水体污染物重金属的控制。

综合内部和外部经济效益,计算得到研究区源头设施的总经济成本回收期是2.06年(表5),进一步表明源头设施在运行阶段对于水质和水量的控制可产生较大经济效益。但需要说明的是,该结果是针对本研究场地,且综合考虑内部经济成本、经济效益、外部经济成本 and 经济效益综合得到的,其他场地的回收期需要结合当地实际情况进行具体分析。

表5 源头设施经济成本回收期

Table 5 Payback period of economic cost of the source control facilities

类别	源头设施系统
内部经济成本	4.86×10^5 元
外部经济成本	8.54×10^5 元
总成本	1.34×10^6 元
内部经济效益	2.44×10^4 元/年
外部经济效益	6.08×10^5 元/年
总效益	6.52×10^5 元/年
总成本回收期	2.06 年

4 结论

采用LCA与LCC集成评价方法,核算南方某学校场地5种典型源头设施的环境影响、环境效益、经济影响和经济成本。主要结论如下:1) 不同种类源头设施建设阶段对环境影响顺序为渗透草坑>生物滞留设施>人工湿地>植被缓冲带>植草沟。2) 源头设施总体经济成本(内部成本+外部成本)顺序为植草沟>植被缓冲带>生物滞留设施>人工湿地和渗透草坑。3) 源头设施运行阶段可以产生非常可观的环境效益,使得水体富营养化、非致癌性、水体生态毒性、海洋富营养化和水体消耗的回收期均在8年之内。4) 源头设施运行阶段可以产生非常可观的经济效益,使得总经济成本回收期仅需2.06年。需要注意的是,以上结论可为相关部门进行海绵城市的规划和建设提供量化依据;其中,源头设施建设阶段的环境与经济影响适用于各种城市建设用地类型,可在更

大层面上指导海绵城市建设;运行阶段的环境与经济量化评价结果在其他地区推广使用时应结合当地的实际降雨情况进行参数本地化。

参考文献

- [1] 尹澄清. 城市面源污染问题:我国城市化进程的新挑战[J]. 环境科学学报, 2006, 26(7): 1053-1056.
- [2] 沙永杰,纪雁. 新加坡 ABC 水计划:可持续的城市水资源管理策略[J]. 国际城市规划, 2021, 36(4): 154-158.
- [3] FLETCHER T D, SHUSTER W, HUNT W F, et al. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more: the evolution and application of terminology surrounding urban drainage[J]. Urban Water Journal, 2014, 12: 525-542.
- [4] JIA H F, YAO H R, YU S L. Advances in LID BMPs research and practices for urban runoff control in China[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2013, 7(5): 709-720.
- [5] 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:低影响开发雨水系统构建(试行)[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2015.
- [6] 印定坤,陈正侠,杨萌祺,等. 基于在线监测+模型的海绵城市建设径流水量控制效果研究[J]. 环境工程, 2020, 38(4): 151-157.
- [7] 解超,吕彬,王思思,等. 基于生命周期思想的透水铺装资源环境影响评价述评[J]. 环境工程, 2021, 39(8): 197-202,4.
- [8] WANG M, ZHANG D, 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.
- [9] VINEYARD D, INGWERSEN 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, 51:1342-1360.
- [10] 丁亚楠,王建国,汤露露. 典型雨水收集处理系统的生命周期评价[J]. 四川环境, 2020, 39(4): 194-199.
- [11] SANTOS J, FLINTSCH G, FERREIRA A. Environmental and economic assessment of pavement construction and management practices for enhancing pavement sustainability [J]. Resources, Conservation & Recycling, 2017, 116:15-31.
- [12] 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.
- [13] 全国人民代表大会常务委员会. 中华人民共和国环境保护税法[Z]. 2016. 12.
- [14] QI C, WANG Q, MA X, et al. Inventory, environmental impact, and economic burden of GHG emission at the city level: case study of Jinan, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 192: 236-243.
- [15] ZHANG R, MA X, SHEN X, et al. PET bottles recycling in China: an LCA coupled with LCC case study of blanket production made of waste PET bottles [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 260: 110062.
- [16] 陈碧宜. 基于气候变化的低影响开发设施径流量和碳排放控制研究[D]. 广州:广州大学, 2022.
- [17] FLYNN K M, TRAVER R G. Green infrastructure life cycle assessment: a bio-infiltration case study [J]. Ecological Engineering, 2013, 55: 9-22.
- [18] FLYNN K M. Evaluation of green infrastructure practices using life cycle assessment [D]. Philadelphia: Villanova University, 2011.