

分类号 X822  
密 级 公开

单位代码 10618  
学 号 622190083003



# 重庆交通大学

## 硕士学位论文

基于成本效益分析的海绵城市  
评价体系研究

研究生姓名: 薛 岳

导师姓名及职称: 蒋彬 副教授

申请学位类别 工学硕士 学位授予单位 重庆交通大学  
一级学科名称 土木工程 论文提交日期 2022年4月8日  
二级学科名称 市政工程 论文答辩日期 2022年6月10日

2022年6月10日

# **Research on the Evaluation System of Sponge City Based on Cost-Benefit Analysis**

A Dissertation Submitted for the Degree of Master

**Candidate: Xue Yue**

**Supervisor: A/Prof. Jiang Bin**

Chongqing Jiaotong University, Chongqing, China

## 摘要

城市内涝灾害的频繁发生制约了社会、经济的可持续发展。海绵城市是我国生态文明建设的重要内容之一，旨在解决由于城市水系统工程不完善引发的一系列生态环境问题。目前，针对海绵城市的研究热点主要为径流污染削减与径流总量控制效应，但鲜有研究涉足海绵城市建设的成本效益分析，缺少效益识别和相应的量化方法，对海绵城市建设对碳排放影响的研究更是鲜有报道。本研究通过借鉴国外的雨洪管理评价经验，在成本方面，通过生命周期理念和生命周期评价软件，探究海绵城市建设的环境成本；在效益方面，参考我国《海绵城市建设绩效评价与考核办法（试行）》，以双碳目标为切入点，结合我国海绵城市建设的特点，建立了海绵城市建设效益货币化评价方法，对海绵化所产生效益进行了科学识别，以生态效益、经济效益和社会效益三个维度作为准则层，以生态、水环境、固氮释氧、水资源、水安全和显示度为一级指标，并以年径流总量控制率、生态岸线恢复、污水再生利用率、雨水资源利用率等作为二级指标，结合环境经济学方法构建了基于成本效益分析的海绵城市评价体系，构建了基于成本效益分析的海绵城市评价体系，并将该方法运用至实际海绵城市建设项目进行成本效益分析，主要结论如下：

（1）运用生命周期法分析海绵城市 and 传统开发建设（地块面积  $44872\text{m}^2$ ）模式的碳排放特征，二者  $\text{CO}_2$  排放量分别为  $3.152 \times 10^6\text{kg}$  与  $4.076 \times 10^6\text{kg}$ ，前者碳排放为后者的 77.33%，可减少碳排放约  $9.24 \times 10^5\text{kg}$ 。“双碳”目标对城市建设提出新的约束，海绵城市建设能显著减少碳排放，对我国实现“双碳”目标具有重要驱动作用。

（2）以万州区双河口移民安置区海绵城市建设工程（一期）为研究区，通过构建生命周期计算模型，对研究区域内雨水花园、绿色屋顶和透水铺装进行生命周期成本分析，得出该项目的的环境成本，换算出对应的  $\text{CO}_2$  排放量为  $196.79\text{kg}/\text{m}^2$ 。

（3）对研究区区域内海绵建设的效益进行货币化分析，得到该项目的综合效益为 998.13 万元/年，其中生态指标效益 538.13 万元/年，经济指标效益 280 万元/年，社会指标效益 180 万元/年。生态指标效益约为经济指标效益的 1.9 倍、社会指标效益的 2.99 倍，生态效益最为显著。

（4）在 8-10 月期间，对双河口移民安置区的海绵设施进行水质监测，结果表明，雨水花园、透水铺装等设施对 SS、COD、TN、TP 等污染物的去除量分别为 730.1kg, 346.2kg, 2.52kg 和 0.2kg，经过折算，相当于产生了  $2.41 \times 10^2\text{kg}$  碳减排。

**关键词：**海绵城市，成本分析，效益量化，生命周期，碳减排

## ABSTRACT

The frequent occurrence of urban flooding disasters has restricted the sustainable development of society and economy. Sponge city is one of the important elements of ecological civilization construction in China, aiming to solve a series of ecological and environmental problems caused by the imperfect engineering of urban water system. At present, the research hotspots for sponge cities are mainly runoff pollution reduction and total runoff control effects, but few studies have been involved in the cost-benefit analysis of sponge city construction, lack of benefit identification and corresponding quantitative methods, and few studies on the impact of sponge city construction on carbon emissions have been reported. This study explores the environmental cost of sponge city construction through the life cycle concept and life cycle evaluation software by drawing on foreign experience in evaluating stormwater management in terms of cost; in terms of benefits, with reference to China's "Performance Evaluation and Assessment Measures for Sponge City Construction (for Trial Implementation)", and taking the double carbon target as the entry point, and combining the characteristics of sponge city construction in China, the monetized evaluation of sponge city construction benefits is established method, scientific identification of the benefits produced by sponging, three dimensions of ecological benefits, economic benefits and social benefits as the guideline layer, ecology, water environment, nitrogen fixation and oxygen release, water resources, water security and display degree as the primary indicators, and the total annual runoff control rate, ecological shoreline restoration, sewage regeneration utilization rate, rainwater resource utilization rate, etc. as the secondary indicators, combined with environmental economics methods to build a sponge city evaluation system based on the sponge city evaluation system based on cost-benefit analysis was constructed, and the method was applied to the actual sponge city construction project for cost-benefit analysis, with the following main conclusions.

(1) Using the life-cycle method to analyse the carbon emission characteristics of sponge cities and traditional development and construction (plot area of 44,872m<sup>2</sup>) models, the CO<sub>2</sub> emissions of the two are 3.152×10<sup>6</sup>kg and 4.076×10<sup>6</sup>kg respectively, with the former emitting 77.33% of the latter's carbon, which can reduce carbon emissions by about 9.24×10<sup>5</sup>kg. The "double carbon" target imposes new constraints on urban

construction, and the construction of sponge cities can significantly reduce carbon emissions, which has an important driving role in achieving the "double carbon" target in China.

(2) Taking the sponge city construction project (Phase I) of Shuanghekou Migrant Settlement Area in Wanzhou District as the study area, the life cycle cost analysis of rain gardens, green roofs and permeable paving in the study area was carried out by constructing a life cycle calculation model to arrive at the environmental cost of the project, which was converted to a corresponding CO<sub>2</sub> emission of 196.79kg/m<sup>2</sup>.

(3) Monetization analysis of the benefits of sponge construction in the study area, the comprehensive benefits of the project is 9.88 million yuan / year, of which the ecological indicators benefits of 5.38 million yuan / year, economic indicators benefits of 2.8 million yuan / year, social indicators benefits of 1.8 million yuan / year. The ecological index benefit is about 1.9 times of the economic index benefit and 2.99 times of the social index benefit, and the ecological benefit is the most significant.

(4) During August-October, the water quality monitoring of sponge facilities in Shuanghekou resettlement area showed that the removal of pollutants such as SS, COD, TN and TP by rain gardens and permeable paving were 730.1kg, 346.2kg, 2.52kg and 0.2kg respectively, which were equivalent to  $2.41 \times 10^2$ kg of carbon emission reduction after conversion.

**KEY WORDS:** sponge city, cost analysis, quantification of benefits, life cycle, carbon reduction

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	<b>1</b>
1.1 研究背景 .....	1
1.1.1 生态文明建设的推进 .....	1
1.1.2 海绵城市建设的快速发展 .....	1
1.1.3 城市海绵化改造后效益评价和管理模式 .....	2
1.2 国内外研究现状 .....	3
1.2.1 国外雨水管理模式及相应评价体系 .....	3
1.2.2 国内海绵城市研究现状 .....	6
1.3 评价体系的不足 .....	9
1.4 研究目的及意义 .....	10
1.5 研究内容和技术路线 .....	11
1.5.1 研究内容 .....	11
1.5.2 技术路线 .....	12
<b>第二章 海绵设施生命周期成本评价</b> .....	<b>13</b>
2.1 全生命周期评价理论 .....	13
2.1.1 LCA 的定义与发展 .....	13
2.1.2 我国 LCA 的发展历程和研究现状 .....	14
2.1.3 LCA 的技术框架 .....	14
2.2 海绵设施生命周期分析 .....	17
2.2.1 目标和范围界定 .....	17
2.2.2 清单分析 .....	18
2.2.3 生命周期评价应用软件选取 .....	19
2.2.4 影响评价 .....	20
2.2.5 结果解释 .....	22
2.3 海绵设施生命周期成本分析 .....	22
2.4 本章小结 .....	23
<b>第三章 两种城市建设模式的生命周期评价分析</b> .....	<b>24</b>
3.1 城市建设模式及案例范围界定 .....	24
3.2 两种城市建设模式 LCA 清单分析 .....	24
3.2.1 海绵城市建设模式的 LCA 清单分析 .....	24
3.2.2 传统城市建设模式的 LCA 清单分析 .....	33
3.3 eBalance 对不同方案进行生命周期环境评价 .....	39
3.3.1 海绵城市建设模式的生命周期环境评价 .....	39
3.3.2 传统城市建设模式的生命周期环境评价 .....	45
3.3.3 生命周期环境评价结果的比较 .....	46
3.4 两种城市建设模式的生命周期成本 .....	47
3.5 本章小结 .....	47

<b>第四章 海绵城市建设效益指标货币化评价方法 .....</b>	<b>49</b>
4.1 基于生态文明的海绵城市建设 .....	49
4.1.1 海绵城市对碳减排作用 .....	49
4.1.2 海绵设施主要类型 .....	49
4.2 海绵城市建设效益指标 .....	50
4.2.1 指标选取 .....	50
4.2.2 海绵城市效益构成 .....	50
4.3 海绵城市指标效益量化分析 .....	51
4.3.1 指标效益评估方法选取 .....	51
4.3.2 指标效益量化方法 .....	52
4.4 本章小结 .....	58
<b>第五章 海绵设施成本-效益评价实例研究 .....</b>	<b>59</b>
5.1 研究区域概况 .....	59
5.1.1 场地概述 .....	59
5.1.2 气象与水文条件 .....	60
5.1.3 海绵设施选择 .....	60
5.2 海绵设施对径流污染物控制效果 .....	60
5.3 研究区 LCA 分析 .....	61
5.3.1 清单分析 .....	61
5.3.2 研究区生命周期分析 .....	65
5.4 研究区效益量化 .....	66
5.4.1 研究区生态指标效益 .....	67
5.4.2 研究区经济指标效益 .....	68
5.4.3 研究区社会指标效益 .....	69
5.5 本章小结 .....	69
<b>第六章 结论与展望 .....</b>	<b>71</b>
6.1 结论 .....	71
6.2 展望 .....	72
<b>致 谢 .....</b>	<b>73</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>74</b>
<b>攻读学位期间取得的研究成果 .....</b>	<b>79</b>

## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景

#### 1.1.1 生态文明建设的推进

二十一世纪以来,中国城市经济繁荣发展,城市化水平显著提高,然而,一些城市问题逐渐显现,城市化进程中不透水面的大量增加<sup>[1]</sup>,城市下垫面对降雨的截留和蓄渗能力不断减弱,传统建设理念下的城市已不能适应城市径流的变化。城市下垫面的改变,不断干扰着城市可自我调节的生态能力。最终,城市出现了各种“城市病”,比如地下水水位下降、城市洪涝灾害频发、流域内水体黑臭、水资源匮乏、城市水体的水生态系统功能退化、生境遭到破坏等屡见不鲜的环境问题。目前而言,国内不少城市已经发生多次内涝灾害,不仅使经济遭受巨大损失,也使群众的人身安全和财产安全受到了极大的威胁<sup>[2]</sup>,严重破坏了人与自然命运共同体的构建。

为迎合人类生存与经济社会和谐发展的需要,十八大提出了“生态文明建设”发展决定,旨在统筹资源与生态环境承载力二者之间的关系,将尊重自然作为前提,促进人与自然,经济和社会的和谐共生。在生态环境中水作为影响环境的重要因素,结合我国国情将生态文明理念融入到城市水系统的建设、运营管理、保护等生命周期的过程<sup>[3]</sup>,驱动水生态文明的健康发展。

#### 1.1.2 海绵城市建设的快速发展

为系统性地解决这一极具复杂性和综合性的城市问题,亟需一种结合中国国情的雨水管理理念的重要举措,以破解“城市病”问题,进而推进生态文明建设进程。我国学者根据国情,从水文特征角度出发,提出增强城市韧性的设想,“海绵城市”建设这一理念应运而生<sup>[4]</sup>。“海绵”一词,顾名思义,是将具有良好弹性的城市建设类比海绵,其概念被定义于《城市景观之路:与市长交流》一书中,俞孔坚教授在将具有调蓄功能的河水、应对城市内涝灾害的自然湿地比作海绵,相关学者紧随其后探索海绵城市建设理念与实践。2011年,董淑秋等学者以城市规划为切入点,将“生态海绵”这一理念融入区域规划中,在该理念的指导下,城市建设通过绿地具体显示出城市的生态空间,耦合生态排水与管网排水,将雨水进行分散性地蓄流与净化,挖掘雨水资源化潜力<sup>[5]</sup>。2012年4月,“海绵城市”的相关概念和建设理念出现在学者的视野中。2013年12月,习近平总书记明确提出将海绵理念与城市建设相契合,建设能够实现自然存积、自然渗透、自然净化的海绵城市,将自然的力量运用至城市排水能力提升中去,实现对雨水资源的合理利用。2014年

11月，住建部发布了《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建（试用）》，仇保兴教授发表了题为《海绵城市(LID)的内涵、途径与展望》的论文，明确定义了“海绵城市”的概念。即城市具有海绵良好弹性这一特性，可有效适应环境变化，应对暴雨积涝等自然灾害，降雨过程中海绵城市将雨水进行蓄留与净化，蓄存的雨水在需要时进行“释放”并予以利用，如图 1-1 所示。为海绵城市的规划建设提供指导，营造良好生境，实现城市水文良性循环，控制雨水径流，降低洪涝风险，提高城市韧性，让城市发挥海绵功能<sup>[6]</sup>。

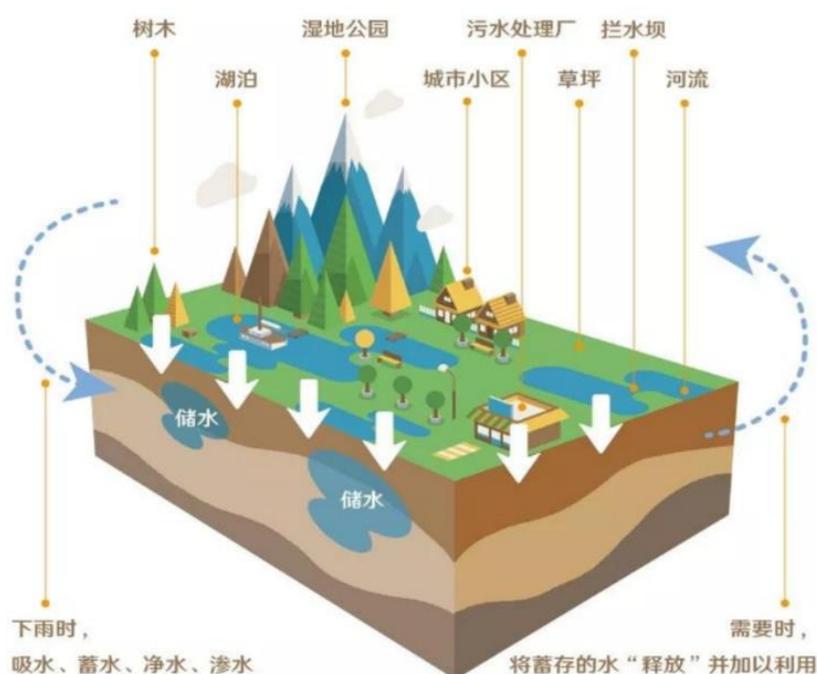


图 1-1 海绵城市示意图

目前，符合我国国情的“海绵城市”建设工作正在国家的大力支持下展开和深入。海绵城市建设符合可持续发展理念，将相关的海绵设施与城市生态环境进行有机结合，更好地适应未来城市的发展要求，提高雨水利用率，实现雨水下渗、净化和蓄集，并有效缓解城市内涝和“城市热岛”效应<sup>[7]</sup>。因此，从 2015 年开始，我国在全国范围内选择了 30 个海绵试点城市，并且这些试点城市已经陆续地推进海绵城市建设。

### 1.1.3 城市海绵化改造后效益评价和管理模式

随着海绵城市理论的日趋成熟以及技术研究的逐步系统化，城市海绵化的建设理念已经成为我国处理雨水径流问题的主要思路。目前全国各地正陆续地推进海绵理念建设，然而建设效果仍值得探讨，如何进行全方位的评价仍需深入研究。

除此之外, 在一些试点海绵城市建设过程中, 项目的推动工作主要由地方政府牵头, 未形成健全的管理体制。海绵城市建设工作与常态化体制必须密切衔接, 城市管理者日常工作内容中也将纳入海绵城市的常态化管理等内容<sup>[8]</sup>, 以此推动海绵城市建设管理和建设。

为了评价海绵城市的建设效果, 住建部制定了关于海绵城市建设绩效的考核办法及评价标准。我国海绵城市的建设目的是以缓解城市水危机、消减径流污染为主, 因此, 目前国家发布的评价标准也以考核海绵城市的城市生态环境效益为主。但随着雨水管理模式的逐渐完善, 海绵城市的经济、社会等其他方面的效益也开始显现出来<sup>[9]</sup>。如何对海绵城市进行比较全面的效益评价, 是海绵城市建设管理过程中亟需解决的问题。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 国外雨水管理模式及相应评价体系

以美国为首的发达国家率先提出城市水系统管理与优化的相关理念, 基于城市雨洪管理的研究走在世界前列<sup>[10]</sup>, 按照发展演变过程进行划分, 可分为水量控制、水质优化、可持续管理三个阶段<sup>[11]</sup>。虽然各国具体采用的雨洪管理模式不尽相同, 但是核心理念基本一致。

为了解欧美对雨洪管理技术的相关经验对国外雨洪管理文章进行了追踪和分析。关键词是文章的核心内容, 对该领域的相关文章关键词进行计量分析, 不仅可了解当下领域的研究热点, 亦可对该领域未来可研究方向进行剖析与预测。以雨洪管理为关键词, 对 2019 年至 2021 年发表至 Web of Science 数据库中的英文文献进行关键词检索, 将所得结果导入至 VOSviewer 软件并进行聚类分析, 以圆的大小表示研究热度, 以曲线代表热点间的联系, 不同颜色代表不同的聚类, 如图 1-2 所示。红色表示聚类 1, 核心内容主要是 20 世纪 90 年代, 美国提出的低影响开发 (Low Impact Development, LID); 蓝色表示聚类 2, 核心内容为最佳管理措施 (Best Management Practices, BMPS); 绿色表示聚类 3, 该聚类的核心内容为绿色基础设施 (Green Infrastructure, GI); 紫色表示聚类 4, 核心内容澳大利亚提出的水敏感城市 (Water Sensitive Urban, WSU); 黄色表示聚类 5, 核心内容主要为 20 世纪末西欧国家发起可持续城市排水系统 (Sustainable Urban Drainage System, SUDS)。

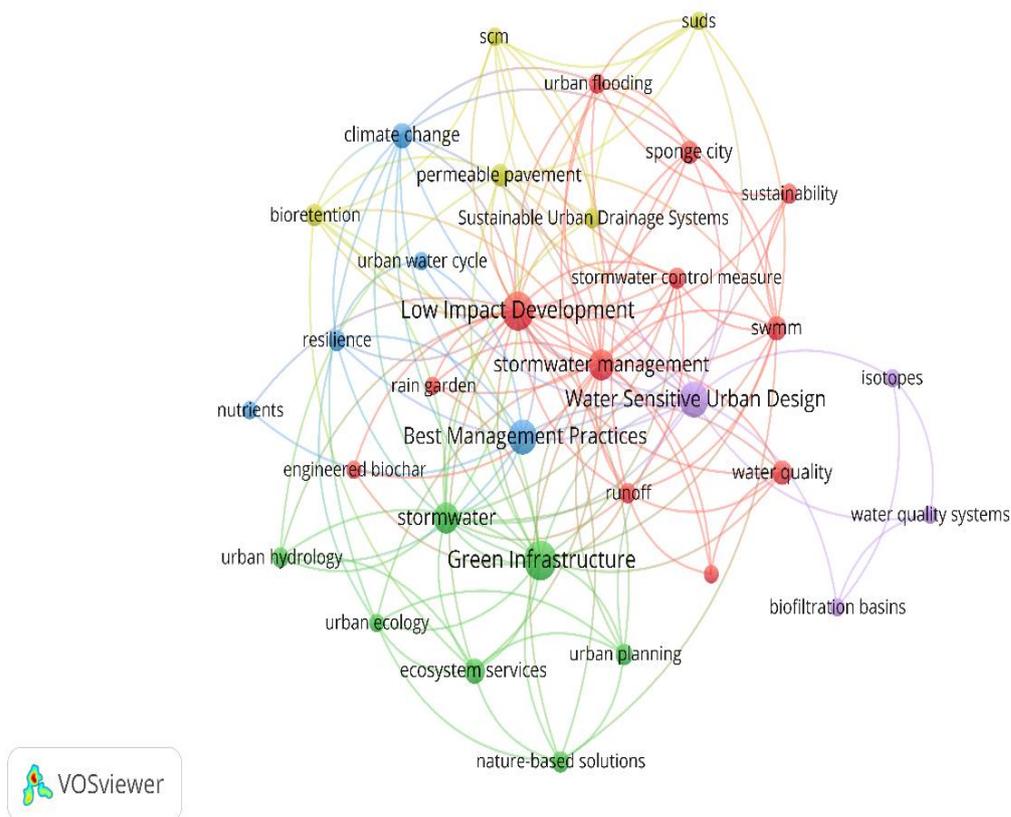


图 1-2 2019-2021 年国外雨洪管理研究关键词知识图谱

### 一、最佳管理实践

1972 年，美国政府提出了最佳管理措施（BMPS），旨在对洪峰流量与面源污染物进行针对性地控制、同时达到补给与贮存地下水等目的。BMPS 核心要义是在污染物输运至水体并对接纳水体水环境产生污染前，通过一系列经济高效且满足生态环境承载力要求的措施，使潜在污染物得到有效控制<sup>[12]</sup>。基于这一理念，对运用最佳管理实践这一理念河水水质进行分析，阐述了该模式的优缺点，提出最佳管理实践的设计准则，对应用该模式的水文地质、气候、水环境条件进行了明确<sup>[13]</sup>。

### 二、低影响开发

美国的西雅图基于 BMPS 的核心理念，提出低影响开发这一理念。在该理念的指导下，城市在建设过程中可设置生态植草沟与雨水花园等系列低影响开发措施并对道路路面进行透水铺装，低影响开发旨在从源头上控制径流量，继而实现削减面源污染的目的<sup>[14]</sup>。通过对低影响开发评级指标进行分析，LID 理念将源头截污纳入指标体系，因此，相较于 BMPS 这一早期的雨洪管理模式，LID 具有较为丰富且全面的指标体系，涵盖面源污染控制、洪水预警与控制、城市雨水下渗等多项指标<sup>[15]</sup>。

### 三、绿色基础设施

20 世纪 90 年代末,美国保护基金会与农业部森林管理局提出了绿色基础设施这一概念。将其定义为:利用网络中心将城市廊道和小型场地组成的绿色空间网络系统进行连接,通过模仿蓄积、延滞、渗透、蒸腾等一系列的自然进程,并对雨水径流进行重新资源化利用,有效削减灰色基础设施产生的污染负荷<sup>[16]</sup>。GI 指标体系中涵盖了城市水文、生境营造以及土地资源利用等方面的内容,除此之外,水文学、水生态等方面的内涵亦蕴含在指标体系中。GI 指标体系主要由绿色空间网络中心与连接廊道两部分构成,包含在内的共四十余项指标<sup>[17]</sup>。在这一评价体系的框架下,可选择某一特定区域,对区域内的自然资源利用以及生物多样性进行科学评估。

### 四、水敏感城市设计

20 世纪末期,澳大利亚雨水资源匮乏,雨水有效收集与存储问题尚无良策的情况下,澳大利亚研究学者结合本国国情提出了建设水敏感城市这一设想。该设想依托城市地质地貌特征与水文条件,通过增加下垫面渗透系数的方式,减少城市地表径流量,依此可显著增添水资源的收集存蓄量<sup>[18]</sup>。WSUD 着眼于科学合理的对基础设施进行升级改造,将水资源保护与水循环、城镇规划进行密切衔接,基于此,WSUD 可有效增强区域发展过程中的协调性与可持续性。WSUD 的评价指标涵盖范围较广,囊括渗透系数、民众参与度、水资源丰度、立法法规共计 29 项指标,这一系列的评价指标可对城市雨洪管理进行综合与系统的评价<sup>[19]</sup>。

### 五、可持续排水系统

20 世纪末期,英国城市扩张进程中地下排水管网老化现象的日趋严重,仅凭借国内现存的排水系统难以适应雨洪管理的需求。在借鉴、吸纳已有 BMPS 理论的基础之上,英国研究学者经过研究和实践积累,可持续排水系统这一理念应运而生,借此解决洪涝灾害频发以及流域面源污染严重等日益凸显的问题<sup>[20]</sup>。SUDS 对降雨的源头、点域、区域以及地表径流的全过程进行综合管控,如图 1-3 所示。SUDS 将环境与城市因素融入城市排水系统中,考虑峰值流量削减、水质改善、地下水补充以及雨水回用,将可持续发展理念融入到城市建设过程中的多个方面<sup>[21]</sup>。SUDS 的评价指标共 18 项,其中包括:建设成本与效益、民众参与度、宜居性、生态环境改善程度等,能够有效的对区域内的水资源管理进行科学的评估<sup>[22]</sup>。

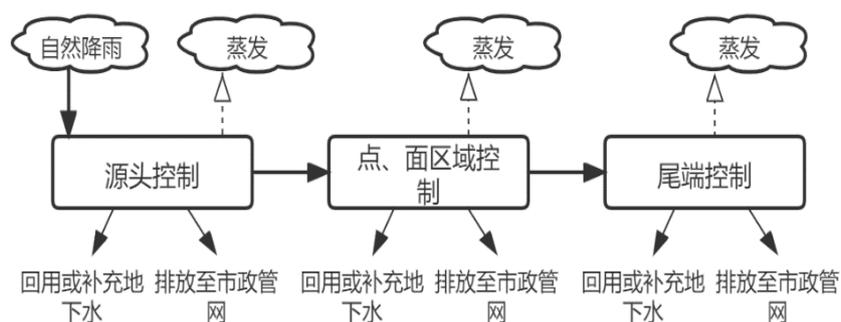


图 1-3 SUDS 综合管控示意图

## 六、国外雨洪管理模式的研究总结

纵观国外 BMPs、LID、GI、WSUD 和 SUDS 等五种雨水管理模式，通过归纳与梳理，客观说，随着对城市雨洪管理研究的不断深入，各国根据实际情况开展的雨洪管理新理念和城市设计的综合管理规划已在某些方面开始趋同，比如各种模式均采取了接近自然的干预措施，以期从源头上控制中小型雨水，这些干预措施包括对水量和水质的控制，此外，各种模式实施的落脚点均为恢复城市良性水文循环过程，涵养水源、削减径流量、恢复水生态系统功能等。

以碳中和的视角来看，雨洪管理模式不仅为解决水资源危机提供了可供借鉴、参考的技术，且对减少温室气体排放，降低碳排放存在着积极地影响<sup>[23]</sup>。例如 Liu<sup>[24]</sup>等通过实施 GI 后，城市排水系统的温室气体年排放量下降 25.9-68.7%，平均下降 45.9%；Kavehei<sup>[25]</sup>等评估了不同类型的 GI 作为碳汇的潜力，发现雨水花园提供了最高的碳封存潜力，进而抵消了其碳足迹；Sousa<sup>[26]</sup>等人使用生命周期评估（LCA）来量化 GI 的温室气体排放，发现在其生命周期内，其温室气体排放比灰色基础设施方案低 75-95%；此外，绿色屋顶是一种受欢迎的设施，通过它可评估碳排放的缓解，因为它可降低建筑温度，从而减少空调消耗的能量<sup>[27,28]</sup>。

从评价指标的视角来看，雨水管理模式的内涵不断丰富，由起初仅包含水文控制延展至涵盖城市水文、生态环境、法律法规、民众参与等诸多方面的内容，指标体系日趋完整，为城市雨水管理提供了借鉴和参考。

### 1.2.2 国内海绵城市研究现状

建设海绵城市是落实城市生态文明发展的重要表现，亦是我国解决雨水径流和水资源可持续利用的必要途径。我国对雨洪管理相较于发达国家起步较晚，相关研究在早期亦是乏善可陈。但我国因地制宜地提出了适应我国国情的海绵城市建设理念，在此基础上，我国专家学者立足国情，从不同视角对海绵城市进行积极研



## 二、海绵城市成本分析方面

国内鲜有关于海绵城市成本分析的研究报道，但是利用生命周期评价（Life Cycle Assessment, LCA）这一决策工具对建设项目进行成本研究分析在国内颇为丰富。生命周期评价对全过程中的资源消耗与环境影响进行系统性分析，历经几十年快速的发展，生命周期评价方法在国外已经逐渐成为政府和企业重要的工程预算和环境管理工具。

## 三、海绵城市效益分析方面

从经济效益的角度来看，海绵城市建设过程中的末端 LID 设施可取代传统城市建设过程中的边沟与调蓄设施，减少地下管路的敷设，可显著降低基础设施投资建设费用，除此之外，海绵城市建设还可促使建设区域土地升值<sup>[31]</sup>。随着城市居民经济水平和获得感的不断提高，许多城市购房者不仅满足于买到房，更希望所购的房子具有宜居性，即周边有开放自由的绿色空间，能够享受绿意葱茏的生态环境，相较于传统居住区，具有海绵建设元素的居民区域更有潜在价值。

从社会效益的角度来看，依托海绵城市建设理念的区域能够创造自然绿色的开放空间，不仅可美化居住环境，还能为居民提供休憩场所，甚至可减少犯罪几率<sup>[32]</sup>。由于海绵城市建设的 LID 设施处于城市居民可接触的露天状态，可潜移默化地提高大众的环境保护意识。此外，还能够减少内涝灾害，创造更多的就业岗位，刺激社会经济的繁荣发展。

从生态效益的角度来看，LID 的源头分散式设施可对区域生态环境进行微观控制，不仅可有效截留径流污染物，还可削减管网溢流污染。而绿植亦可净化空气与水体，下渗的降雨可补充地下水资源<sup>[33]</sup>。相较于传统城市建设的灰色屋顶，海绵城市中的绿色屋顶还能发挥隔绝热量、节约资源、控制温室气体排放量，缓解城市热岛效应等作用。在暴雨情形下，LID 设施可减少降雨径流，迟滞径流峰值。除此之外，还可发挥中和酸雨的作用，显著去除径流中的氮、磷、重金属等典型污染物，保障下游生态系统免遭径流的污染与侵蚀，减少洪涝灾害发生频率，提升生态系统的自我净化能力<sup>[34]</sup>。亦可利用海绵建设理念融入到城市老城区基础设施的升级改造中，这不仅具有成本低和施工简单的优点，又能较快地融入城市环境，使城市面貌焕然一新。

## 四、海绵城市评价体系方面

为深入城市的可持续发展，需对海绵城市建设效益进行科学系统的评估，2015年7月，住建部制定了《海绵城市建设绩效评价与考核办法（试行）》（以下简称《考核办法》）提出了定性以及定量的评价指标，从宏观的角度阐述了考核指标的具体要求以及考核办法。为规范海绵城市建设效果的评价，2018年7月，住建部

组织制定了《海绵城市建设评价标准》(以下简称《评价标准》),明确给出相关评价的具体方法和标准。

《考核办法》中共包含了水生态、水环境、水资源、水安全、制度建设以及执行情况和显示度 6 个方面,利用 18 项具体评价指标对试点城市的海绵城市建设效果进行系统评估。《评价标准》在此基础上明确了海绵城市建设成效评估的内容与要求,总结 7 个操作性较强的评价指标,明确说明了指标的评价方式。但文件中的评价指标更多的关注环境方面的改善效果以及此过程中产生的效益,而对于生态、经济及社会等方面的综合效益评价有所欠缺;海绵城市建设的成本因素尚未提及,还需要综合考虑建设、运行、维护、拆除等方面成本。除此之外,海绵城市评价体系中包括了不同种类的评价方法,不少学者也进行了相应的研究,并提出了相应的评价体系。例如张辰<sup>[35]</sup>依据上海的实际情况,将控制径流总量的目标进行分解,按照不同区域细分城市绿化覆盖率、透水铺装率;乔爽<sup>[36]</sup>等利用 Logistic 回归评估方法,通过精确的模拟专家打分制度,在多变量因素响应下,提高评估过程的效率与结果的准确性;孙静<sup>[37]</sup>利用多层次模糊综合评价方法在北京市研究区域内完善了效益评价指标体系,该体系明确了雨水资源综合利用、再生水回用产生的经济效益的计算方法。黄丽娟<sup>[38]</sup>等利用层次分析法确定了住建部提出的 18 项评价指标体系的各项权重,并将权重进行排序,为海绵城市评价提供了重点依据;孙文靖<sup>[39]</sup>构建综合效益评价模型并且优化其中效益指标的量化方法;马越<sup>[40]</sup>等针对暴雨内涝灾害防控、年径流总量和面源污染物控制等多项指标进行效益定量化。

总体而言,不同的评价方法在海绵城市建设中验证了其可行性,在海绵建设效益评价中的应用也将会更普遍。

### 1.3 评价体系的不足

《评价标准》实施以来,海绵建设给城市发展所带来的生态、社会及经济等效益逐渐显现出来,海绵城市效益评价得到了学者的广泛关注。为更好地建设海绵城市,亟需构建一个完善、科学、可行的海绵城市评价体系,以衡量城市的建设是否符合海绵城市的要求,为未来全域海绵城市的建设提供有效指导。目前,在海绵城市研究和建设方面我国仍处于初级阶段,鲜有建立海绵城市建设或改造后的效益及建设运营成本效益定量分析的指标体系。

海绵城市建设需积极响应国家“十四五”规划中“碳达峰、碳中和”的要求。21 世纪以来,全球气候变暖问题日趋严重,亟需控制碳排放水平。《巴黎协定》的签订标志着全球控制碳排放进入一体化进程,各国为实现碳减排目标进行了积极探索。2020 年,中国政府庄重承诺将于 2030 年达到碳达峰,并在 2060 年实现碳

中和这一终极目标。为履行这一承诺，国内各行业均开始密切关注 CO<sub>2</sub> 的排放量，并将实现碳中和作为行业发展的目标。据研究报告，建筑行业的碳排放量占我国社会总碳排放量比重过半，仅建材行业 2020 年 CO<sub>2</sub> 排放 14.8 亿吨，所以对于城市建设中产生的碳排放量不容忽视。

为践行国家的“双碳”战略，亟需建立一套更加符合当下发展的海绵城市评价体系，实现相应的效益定量分析，以期指导并规范未来海绵城市的设计与实践。当前，评价体系中还存在不足之处值得深思，如对于海绵城市评价体系大多是对建设适应性研究，并且海绵效益评价的相关文献较少，对海绵城市建设过程中产生的环境效益、社会效益仅进行定性分析，已无法全面地反映海绵城市建设所带来的多方面效益并且对于海绵城市建设的成本也未考虑，所以，更加科学的海绵城市评价体系有待更多的学者进行探讨。

综上所述，本文将《考核办法》为基础，补充完善海绵城市建设过程中所需要的成本、将海绵城市建设过程中附带的生态、环境、社会效益的进行量化，评价海绵城市建设对实现“双碳”目标的积极作用，海绵城市成本效益评价体系主要包括：

第一，进行生命周期成本分析。未来海绵城市的建设理念毫无疑问将会进一步深入，建设或改造过程中的成本分析也将进一步明确，得到海绵城市建设周期的每一个阶段的具体情况，了解每一阶段的成本以及环境成本环境，例如碳排放等。因而，对海绵化建设的生命周期成本进行定量分析是必然趋势。

第二，通过《考核办法》提供的指标，定量分析海绵城市指标的效益。海绵城市的效益主要是通过建设海绵设施来实现的，其指标效益分析是对城市海绵建设或改造后的未来多年实现收益的分析，同时也是海绵化后实际效果的体现。科学完善的指标效益量化不仅可对现有的评价体系进行优化，与此同时，也可推动海绵城市建设理念的贯彻与落实，推动海绵城市的建设实践的规范化，最终实现海绵城市建设有规可依，以期为未来的建设提供参考。

## 1.4 研究目的及意义

海绵城市通过不同种类的海绵设施对雨水径流会发挥不同的功能作用，能够产生一系列的经济效益、生态效益与社会效益。这些效益指标可分为定性与定量指标，并且相互间混杂。目前，针对海绵城市成本效益的研究大多为定性描述，定量分析较少<sup>[41]</sup>，鲜有海绵城市建设的效益货币化分析报道，其相对于传统城市建设过程中对碳减排的优势也未见指出。

因此，有必要对海绵设施中的各项成本进行系统性的梳理总结，参考《考核办

法》所提出的海绵评价指标，从多视角、多尺度、多维度地对现有的海绵城市评价体系进行分析，建立基于成本效益分析的评价体系，探究海绵城市建设与运营过程中对削减碳足迹的作用，驱动资源与环境的可持续发展，以期为海绵城市建设进程的效益评价提供借鉴。

### 1.5 研究内容和技术路线

#### 1.5.1 研究内容

国内关于海绵城市成本效益分析的研究不全面，成本方面仅在计算经济开销，对环境成本（如碳排放、废弃物等）却研究的较少；对于效益方面的研究集中在定性分析上面，无法直观的量化海绵设施所带来的效益。因此本文通过追踪和分析国内外关于雨水径流利用效益、海绵城市建设方法与措施与海绵城市效益等学者研究成果，以期完善海绵城市中相关设施功能与效益识别与量化的计算方法。主要研究内容如下：

（1）通过系统性地介绍国内外生命周期理念和发展历程，对海绵设施生命周期成本分析方法进行阐述。对比分析当前常用的生命周期评价应用软件，筛选出最合适生命周期评价软件——eBalance 软件，利用该软件对海绵设施进行生命周期分析。该部分的核心是介绍利用 LCA 对海绵设施成本进行定量分析，而海绵设施生命周期成本体现在对所造成的环境污染成本以及建设施工、运行维护和报废拆除三个阶段等成本的总和。通过对海绵设施各生命阶段的能耗进行折算，系统了解每个阶段的建设成本和造成的环境成本，以期预测出总效益和成本之间的关系。

（2）例举某地开发区的某工业园区的相关数据，演示 eBalance 软件具体操作流程，组建模型；通过设立两种方案（方案一：基于海绵城市理念的开发建设；方案二：基于传统理念的开发建设），然后对两种方案的建设施工、运行和拆除阶段进行生命周期评价，再将其 LCA 清单分析进行对比，得出依托海绵城市建设理念的成本效益的量化结果，指出海绵城市建设的优越性。

（3）通过总结国内外相关效益的经济量化理论和方法，综合运用市场价值法、替代工程法和影子价格法等环境经济学方法，采用生态、经济和社会效益等三个维度，将《考核办法》中提及的六个方面十余项海绵城市评估指标和结合具体国情提出了几项符合当代的海绵城市效益指标进行分类，最后通过经济学方法对其进行货币化。将海绵城市建设成本模型与之结合，据此建立海绵城市成本效益评价体系模型。

（4）基于实例研究，以万州区双河口移民安置区海绵城市建设工程（一期）——移民组团片区为研究区进行实例分析。基于研究区具体情况，通过本文所构建

的模型，先进行生命周期成本分析，再结合海绵城市评价指标，对研究区进行海绵指标分析，最后计算出其海绵城市建设项目的效益，并为相关政策的制定提供理论支撑。

### 1.5.2 技术路线

研究技术路线如图 1-5 所示。

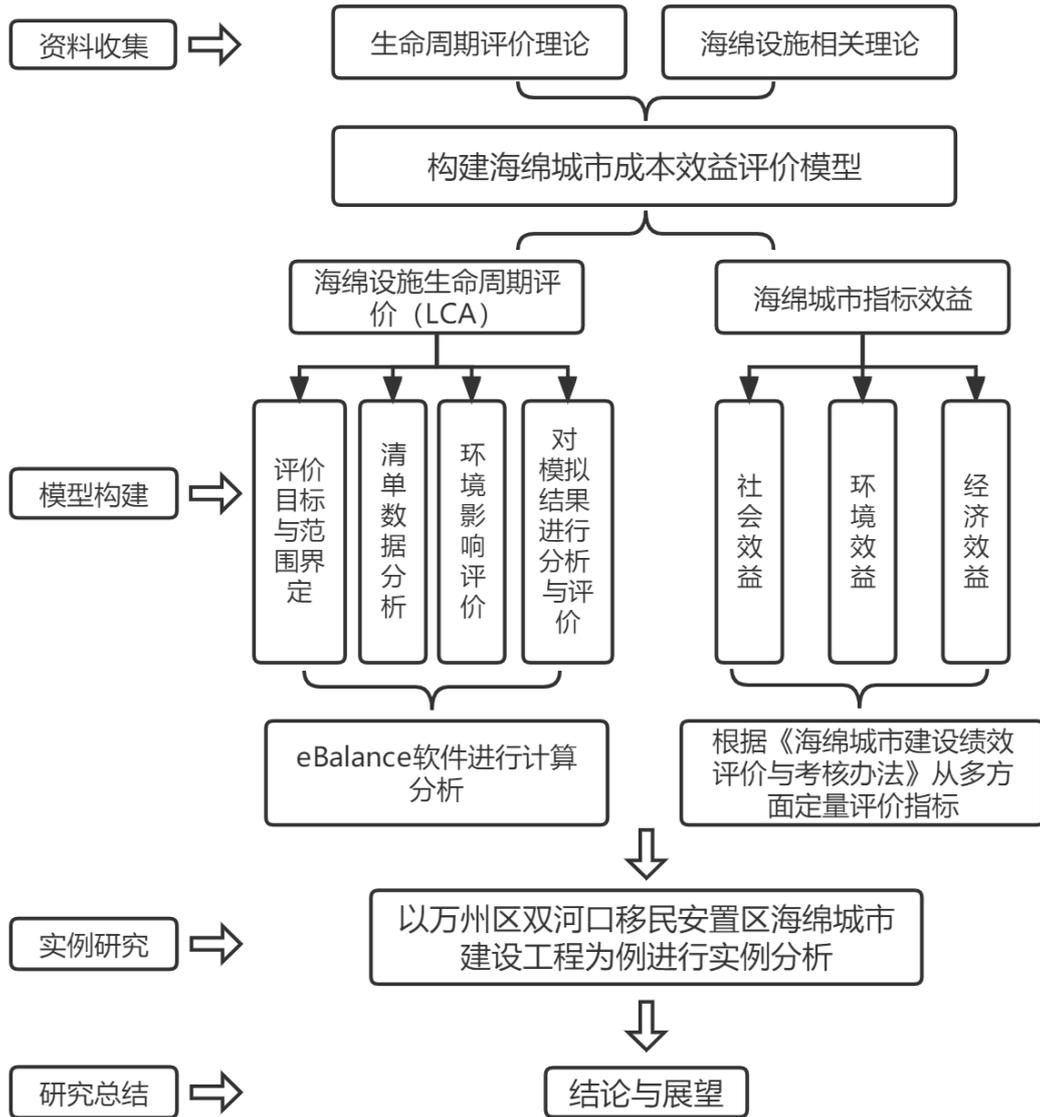


图 1-5 研究技术路线示意图

## 第二章 海绵设施生命周期成本评价

### 2.1 全生命周期评价理论

#### 2.1.1 LCA 的定义与发展

关于全生命周期评价 (Life Cycle Assessment, 即 LCA) 的定义在国内外有很多种, 但是目前国际上较为普遍认可的是环境毒理学与化学学会对于全生命周期的定义: LCA 是对某个系统所引起的或某种特定产品在生产全过程产生的环境负荷进行系统全面的量化评价。按照生命周期评价的过程阶段, 可分为原材料购置, 生产、运输、使用、回用、运行维护以及最终处理处置整个生命周期阶段, 涵盖产品或系统在全过程产生的环境负荷, 即“从摇篮到坟墓”的整个生命周期<sup>[42]</sup>。LCA 经过五十多年的研究, 其发展主要分为三个阶段<sup>[43]</sup>:

##### 一、思想萌芽阶段

20 世纪 60 年代, 全生命周期评价最初运用于可口可乐公司的饮料包装瓶, 这一评价方法由美国中西部资源研究所提出。该研究所以可口可乐饮料瓶为研究对象, 对原材料的采集到最终的废弃物处理处置进行全过程的跟踪与定量分析。自此之后, 欧美的有关大学和研究机构以及日本的一些研究机构同时也展开了针对部分包装品的相关研究。在这一个阶段中, 主要是为有关公司的产品开发和提供管理提供一种决策手段<sup>[44]</sup>。

##### 二、学术探索阶段

在各国政府积极支持与参与下, 生命周期相关的分析在欧美各国的不同研究机构展开, 但是由于相关专业的数据库缺乏, 并且许多必要数据存在于保密的专利技术文件或者政府文件之中。这一阶段的研究热点是产品包装以及废弃物处理的问题<sup>[43]</sup>, 但是这种研究方法逐渐成为一种有效的分析工具。自 1975 年开始, 单个产品的生命周期分析与评价研究逐渐不被美国国家环保局纳入考虑的范畴, 取而代之的是对能源保护与固体废弃物的减量研究; 自二十世纪八十年代开始, 由于能源危机带来的能源问题迫在眉睫, LCA 主要的研究热点逐渐从污染物排放过渡至全球资源能源分析和规划。

##### 三、迅速发展阶段

伴随着全球环境污染情况的不断恶化, 各国逐渐重视环境保护工作的推进, 可持续发展成为社会发展的趋势, 有关 LCA 的研究也如雨后春笋般进入了迅速发展的阶段。20 世纪 90 代初期, 在“国际环境毒理学与化学学会 (SETAC)”组织下, 第一届关于 LCA 的国际研讨会于葡萄牙召开, 在此次会议上, “生命周期评价

价”作为一个全新的概念被提出。在经历多次的学术交流会，让全生命周期评价方法得到广泛传播和认可。1993年，国际标准化组织(ISO)成立了有关的技术委员会，自此以后，委员会陆续制定和发布了关于LCA的ISO14040-ISO14043系列标准，在此基础上，LCA评价方法在各国逐步地得到广泛的应用，大量的LCA相关软件与数据库被开发出来，更加有力地促进了生命周期评价在各领域的应用。如席德立<sup>[45]</sup>研究团队设计研发出了一套方法以获取产品或系统LCA清单数据。之后国内有关LCA的研究也不断增加，不断从LCA方法拓展到实际应用研究中<sup>[46]</sup>。

### 2.1.2 我国LCA的发展历程和研究现状

上个世纪九十年代中期，我国开始对生命周期评价进行相关的研究，为推动LCA评价的规范化，我国颁布了一系列国家标准，自此之后，LCA评价方法在各个行业中取得了突破性发展。

鉴于LCA方法应用至具体实例中具有明显的区域性，欧美各国开发的许多相关数据库并不能满足我国的基本国情。因此，国内不少学者也渐渐开始了对LCA方法本土化的研究工作。基于LCA理论的技术和相关方法，具体结合我国基本国情，形成具有本土化特征的指标体系，这些指标体系的应用涵盖了基础能源生产与消费结构等具体方面，在评价国内的产品生命周期的资源消耗以及污染物所造成的环境危害<sup>[47]</sup>等应用较为广泛。如姜金龙<sup>[48]</sup>等在前人研究的基础之上，对LCA评价方法中的相关理论、框架、发展前景以及应用领域等方面进行系统性的阐述，此外，对评价过程中目标与范围的界定，环境影响效应中的各个因素的分类与评价进行了明确，对LCA评价结果解释进行了深入分析，最后，以金属与塑料产业为切入点，运用LCA理论对这两个产业的国内外研究现状进行剖析。杨飞<sup>[49]</sup>以建筑给排水系统为研究对象，运用LCA基本原理，对我国建筑给排水领域应用较为广泛的两种管材——镀锌钢管和硬聚氯乙烯管进行了全生命周期评价。杨健<sup>[50]</sup>等运用LCA方法，以运用不同活性污泥工艺的污水处理厂为例，按照全生命周期评价的阶段，将污水处理厂分为原材料开采、产品加工，建设施工，运行维护乃至报废拆除这一系列的生命阶段，对全过程的环境效应进行识别与评价，最后对所得结果进行对比与深入分析。

综上所述，LCA是对产品从“摇篮到坟墓”的全生命过程的评价方法，可用于评价海绵设施建设对环境的综合影响。

### 2.1.3 LCA的技术框架

有关生命周期评价技术框架，各大研究机构的定义有所差异，目前被接受的是国际环境毒理学与化学学会在“生命周期评价纲要：实用指南”的归纳以及

ISO14040-ISO14043 系列标准，将 LCA 的技术框架如下四个主要的步骤<sup>[51]</sup>：目标与范围界定、清单分析、影响评价以及结果解释，他们之间的相互关系如图 2-1 所示，具体的研究步骤如下：

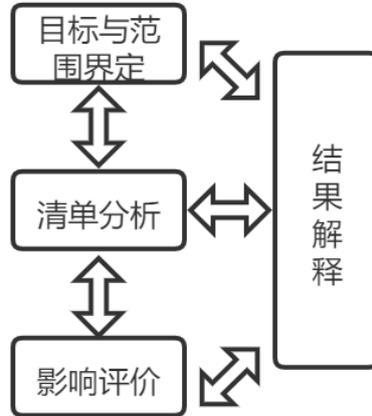


图 2-1 生命周期评价框架

### 一、目标与范围界定

目标与范围的界定（Goal and Scope Definition）是 LCA 评价研究中的第一个步骤。该步骤的内容主要包括 LCA 目标与系统边界的界定、功能单位的确定等。范围的界定是指要将所有跟评价目标相关的产品生命周期过程都包括在内。基于 ISO 标准，完整的产品生命周期过程应包括：原材料的获取；制造、加工运输过程；能源的消耗；产品运行维护；系统废弃物的处理与处置，如图 2-2 所示。

LCA 的评价过程是一个系统且漫长的过程，而评价的内涵就是评价的结果要不断回归到现实实践中去指导相关系统过程，在不断反复中收集数据信息的过程不断完善研究目标和对研究范围的界定。

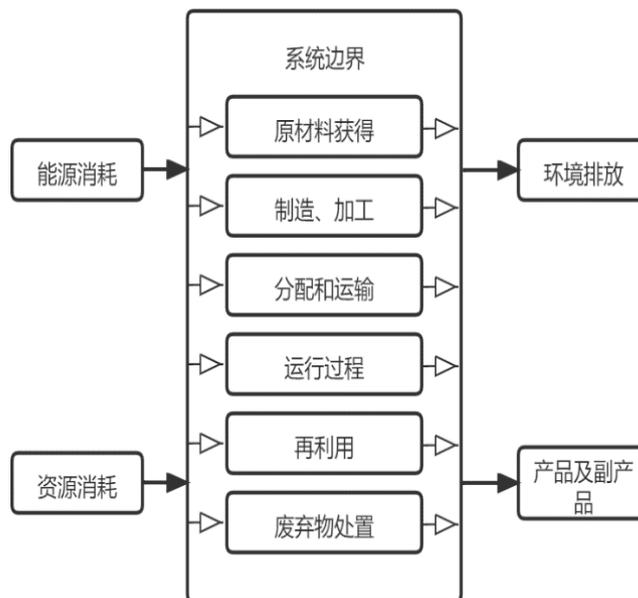


图 2-2 LCA 评价系统边界

## 二、清单分析

清单分析 (Inventory Analysis) 是 LCA 的第二个步骤, 同时也是 LCA 中研究的最成熟的部分。该步骤主要是对 LCA 评价体系的中输入及输出数据的清单进行核算与分析, 主要包括资源消耗, 能源消耗和环境排放等三类。资源消耗是指产品的原材料收集和加工、制造等; 能源消耗是指对石油、天然气、煤及电能等的消耗; 环境排放是指生产的过程及系统运行过程中污染物排放足迹对生态环境造成的影响与破坏。

## 三、影响评价

影响评估又可称为生命周期影响评估 (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) 是 LCA 的第三个步骤同时也是最重要的一步, 主要是在上一步清单分析的评价系统基础上, 对生命周期内全部的资源与能源消耗以及污染物对环境造成的影响效应进行量化与分析。

基于大多数清单分析的步骤, 主要是影响分类、特征化和加权评价等三个步骤。影响分类是将清单数据按照对环境造成的影响进行分类, 目前许多的 LCA 研究中, 都采用的美国定义的八种类别: 全球气候变化、平流层臭氧消耗、酸雨化、光化学烟雾、富营养化、人体毒性、生态毒性与资源消耗<sup>[52]</sup>。数据清单的特征化是指将影响因子产生的环境效应按照其程度进行定量化, 并以一种特定的影响因子作为参照基准对不同性质的影响因子进行汇总分析。例如在全球变暖的评价中, 通常以排放至环境中的 CO<sub>2</sub> 为标准, 按照这一基准将其他污染物以一定的标准进行 CO<sub>2</sub> 当量的折算, 最终将所有清单中同类环境影响进行加和。加权评价是通过权重因子使某一种环境影响类型能够在综合环境影响中的反映其影响比重。

这一阶段的主要作用是能够更好地了解评价系统于生命周期内所产生的环境效应。影响评价的内容与步骤如图 2-3 所示。

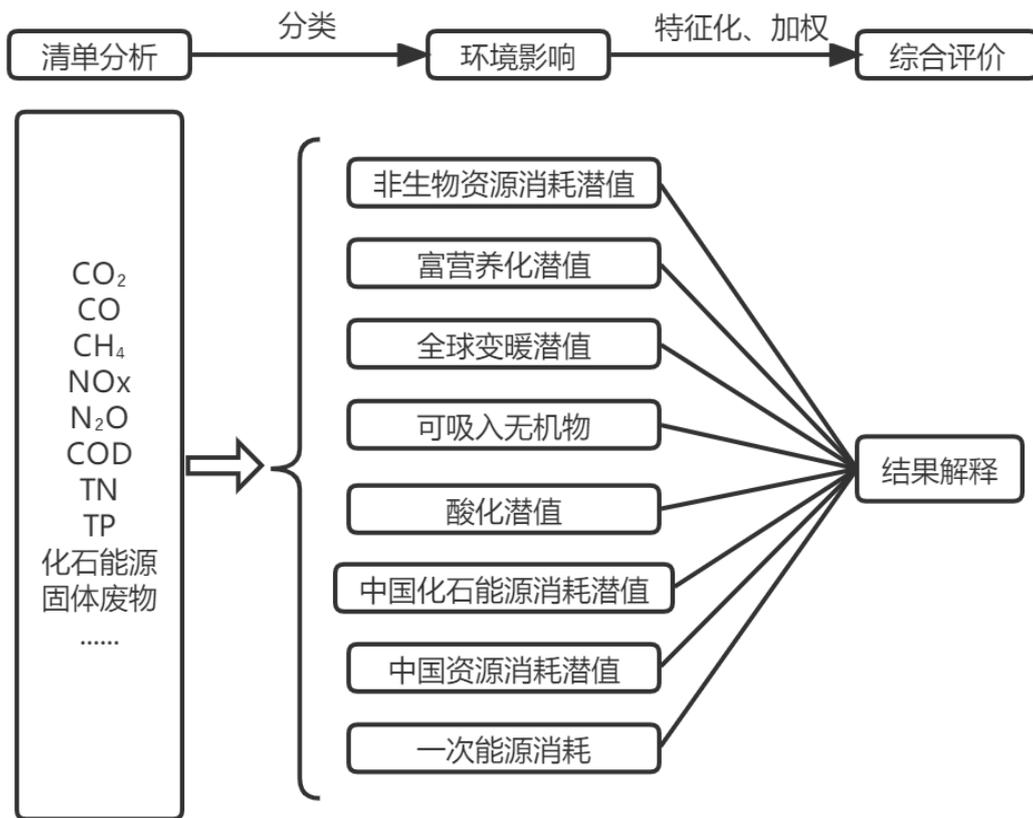


图 2-3 环境影响评价的内容和步骤

#### 四、结果解释

结果解释（interpretation）是 LCA 研究的第四个步骤。这部分主要与目标和范围界定相对应，按照确定的研究目标和研究范围，对环境影响的量化结果进行分析总结，并加以解释形成结论。

## 2.2 海绵设施生命周期分析

基于 LCA 理论的技术框架，对海绵城市建设中的 LID 设施进行生命周期成本评价与分析。第一步进行评价目标和评价范围界定；第二步进行清单数据的整理分析，再通过对相关材料的能耗进行折算，为了方便计算统一将能耗单位折算为 MJ；第三步借助目前已开发生命周期评价软件进行模拟，将软件模拟最终得出的特征化结果进行评价与分析。

### 2.2.1 目标和范围界定

将海绵设施作为生命周期评价目标，在海绵城市建设过程中全生命周期阶段从自然界中获取的资源以及消耗的能源需要进行识别与量化。而范围的界定从原

材料的开采与运输、加工、建设施工等过程至实现设施的稳定运行，最终达到使用年限之后报废拆除。其各阶段过程和成本分别在建设施工、运行维护和报废拆除中体现。

## 2.2.2 清单分析

### 一、设施施工阶段清单分析

某类型海绵设施原材料的消耗，如表 2-1 所示，具体资源的消耗总量可根据具体设施的设计方案进行调整。

表 2-1 某海绵设施原材料消耗

材料名称	碎石	砂	PE 管材	……
数量 (t)				
单价 (万元/t)				

通过文献调查，找出相关原材料生产过程对应的能耗，将所有能耗累加可得出生产过程中的总能耗，如表 2-2 所示，最后通过单位能耗的折算，得到污染物的排放量。

表 2-2 原材料生产能耗

材料名称	单位	单位生产能耗 (kJ/t)
碎石		
PE 管材		
……		
总计		

不同的运输方式产生的能耗表如表 2-3 所示。

表 2-3 运输能耗表<sup>[53]</sup>

运输方式	能耗 (kJ/t · km)
铁路	439
公路	1836
航空	27539

施工能耗需要通过设施具体的工作量来决定，单位面积的施工能耗如表 2-4 所示。通过单位面积施工能耗可具体计算相应能耗量。

表 2-4 单位面积施工能耗

项目	能耗 (kJ/m <sup>2</sup> )	项目	能耗 (KJ/m <sup>2</sup> )
材料堆放	5220	土方回填	17030
材料运输	198740	供电	22650
基础开挖	27260	绿化	2270
单位面积总能耗		273170	

## 二、运行维护阶段清单分析

运行维护阶段的能耗主要能耗体现在海绵设施建成，开始运行过程中所需的定期清理，定期维护等工作所消耗的能量，但是其数量大小相对于建设阶段而言，可忽略不计。

## 三、报废拆除阶段清单分析

当系统达到使用年限后会进入报废拆除阶段，这一阶段产生的能量消耗占建设施工阶段能量消耗的 90%<sup>[54]</sup>；所拆除的质量占原材料的 80%<sup>[55]</sup>；拆除下来的固体废物由具体的质量和运输距离决定。

### 2.2.3 生命周期评价应用软件选取

目前为止，欧美国家已经开发出数款成熟的生命周期评价软件，比如 eBalance、TEAM、Gabi、Simapro、Eco-manager 和 Boustead 等主要为人熟知。而被广泛使用的是 Gabi、Simapro 和 TEAM 三款软件，其特点比较见表 2-5。

表 2-5 国外三种 LCA 软件比较<sup>[46]</sup>

比较对象	Gabi	Simapro	TEAM
开发国家	德国	荷兰	法国
软件概述	影响评价方法	影响评价方法	影响评价方法
输入数据	燃料制造	燃料制造	燃料制造
	APME, BUWAL250, 用户调查数据 钢铁, 非铁金属 10 项, 化学产品 多数, 树脂 11 项, 玻璃纤维强 化树脂, 橡胶	EPS2000, Ecopoints97, 用户设定 钢铁等多数; 非铁金属 12 项; 化学产品多数; 树脂 14 项, 纤维, SMC, 橡胶, 其它	ETH&BUWAL250 (瑞 士), 内设单元程序 钢铁 5 项, 非铁金 属 21 项; 化学产品 多数, 树脂 10 项, 橡胶, 其它 石炭、褐煤、含铅汽 油、无铅汽油、航空 燃料、轻油、重油、 润滑油、天然瓦斯、 烷、丙烷

表 2-5 (续表)

	比较对象	Gabi	Simapro	TEAM
输入数据	大气排出物	多数	611 项	122 项
	水排出物	多数	593 项	114 项
输出数据	固体废弃物	多数	82 项	17 项
	土壤排出物	多数	514 项	18 项

虽然我国国内关于生命周期评价软件的研究相对较晚，但是仍然有学者在不断的探索，eBalance 软件作为我国 LCA 的重要软件之一，该软件内置了国际生命周期基准数据系统 (International Reference Life Cycle Database, ILCD) 中规定的物质名称和单位，主要是四川大学相关研究学者和亿科环境科技有限公司 (IKE) 共同研究开发的、具有完全自主知识产权的 LCA 软件，并且可提供全世界范围尤其是符合我国国情的、具有参考价值的数据库支持。eBalance 软件内置的数据库包括：中国生命周期基础数据库公开版、欧盟生命周期基础数据库、瑞士 Ecoinvent 数据库公开版。eBalance 软件中包含了多种 LCIA 特征化指标及 ECER-125 等加权综合指标。此外，eBalance 软件是生命周期评价相关的通用型软件，而且通过不断完善，软件目前添加了关于废弃物处理、资源管理等方面的功能。

使用者可应用于不同产品或者产品系统的生命周期评价，同时也可构建多种形式的生命周期流程图，运用于不同的生命周期建模之中。此外，清单数据录入灵活，内置运算方便，运算结果容易比较。

本研究将利用由我国自主开发的 eBalance 软件进行生命周期评价。

## 2.2.4 影响评价

特征化指标的结果是指通过建立模型，对建设、维护运行以及拆除过程中产生的污染物排放而造成的各种环境影响进行归类，通过指定特征因子将某一类有相同或者相似影响的排放物质归为一类。如 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 都可引起气候变暖，但是等量的温室气体排放造成的后果并不相同。所以，有必要将对温室气体进行特征化通过同一基准进行比较。

因此，本研究采用当量模型，典型的环境影响类型和当量因子如表 2-6 所示，将相同环境类型的负荷通过特征化进行环境影响潜值汇总，即为各种指标的影响潜值 EP(j)，计算公式如下：

$$EP(j) = \sum Q(j)_i \cdot EF(j)_i \quad (2-1)$$

式中：

EP(j)——系统中特征化指标的影响潜值；

Q(j)——第 j 种影响潜值的第 i 种物质排放量；

EF(j)——第 j 种环境影响种第 i 种物质的当量因子。

表 2-6 环境影响类型和当量因子

影响类型	GWP/ kg CO <sub>2</sub> eq.	EP/ kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq.	AP/ kg SO <sub>2</sub> eq.	RI/ kg PM <sub>2.5</sub> eq.
CO <sub>2</sub>	1	—	—	—
CH <sub>4</sub>	21	—	—	—
SO <sub>2</sub>	—	—	1	9.6E-02
NO <sub>x</sub>	320	1.35	7E-01	1.2
CO	—	—	—	—
N <sub>2</sub> O	290	—	—	—
粉尘	—	—	—	8.2E-01

本文仅通过 eBalance 软件内置的特征化指标的确定方法与计算原则做简要说明，如表 2-7 所示。

表 2-7 特征化指标的确定方法

名称	模型过程	计算方法	单位
非生物资源消耗潜值 (Abiotic Depletion Potential, ADP)	以锑为基准物质，得到各资源的特征化因子	CML2002	kg antimony eq.
富营养化潜值 (Eutrophication Potential, EP)	以磷酸根为基准物质，得到的特征化因子用于表示营养物质对富营养化的贡献	CML2002	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq.
全球变暖潜值 (Global Warming Potential, GWP)	以 CO <sub>2</sub> 为基准物质，得到的特征化因子用于表示温室气体对全球变暖的贡献	IPCC2007	kg CO <sub>2</sub> eq.
可吸入无机物 (Respiratory Inorganics, RI)	以 PM <sub>2.5</sub> 为基准物质，得到的特征化因子用于表示可吸入无机物造成的人体危害	IMPACT2002+	kg PM <sub>2.5</sub> eq.

表 2-7 (续表)

名称	模型过程	计算方法	单位
酸化潜值 (Acidification Potential, AP)	以 SO <sub>2</sub> 为基准物质, 得到的特征化因子用于表示酸性气体对酸化的贡献	CML2002	kg SO <sub>2</sub> eq.
中国化石能源消耗潜值 (Chinese Fossil Fuel Depletion Potential, CADP (fossil fuel))	以煤为基准物质, 得到各能源的特征化因子	ISCP2010	kg Coal-R eq.
中国资源消耗潜值 (Chinese Resource Depletion Potential, CADP)	以锑为基准物质, 得到各资源的特征化因子	ISCP2010	kg Coal-R eq.
一次能源消耗 (Primary Energy Demand, PED)	以初级能源的折标煤系数作为特征化因子	—	kg ce.

### 2.2.5 结果解释

结果解释是对海绵设施通过软件模拟的环境影响评价的研究结果进行识别、量化, 并形成表述性结论。例如分析和对比哪一种材料或者施工组合更加绿色环保, 实现的效果最好。

## 2.3 海绵设施生命周期成本分析

海绵设施的生命周期成本可按照生命周期的三个阶段与之对应, 主要是: 建设成本, 运行维护成本和报废拆除成本等三个方面。相关内容分类如图 2-4 所示。

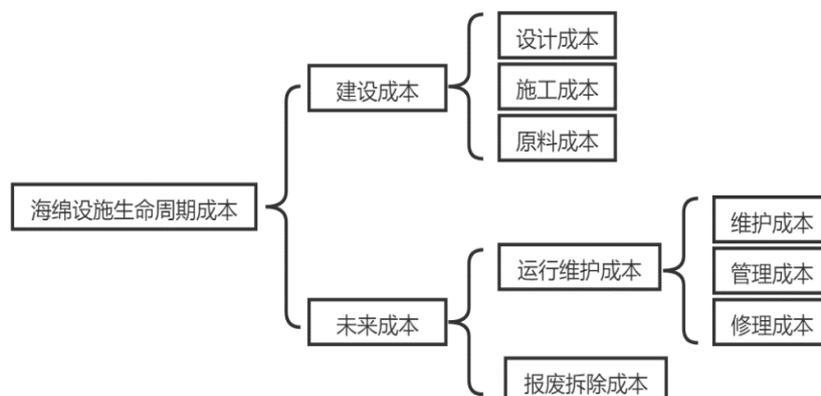


图 2-4 海绵设施生命周期成本按相关内容分类

若利用生命周期成本计算公式可将其表示为:

$$LCC=C+\sum_{t=0}^T O \cdot PV+S \quad (2-2)$$

$$PV=\frac{(1+r)^t-1}{r(1+r)^t} \quad (2-3)$$

式中:

LCC——生命周期成本, 万元;

C——海绵设施最初的建设施工成本, 万元;

O——海绵设施运营维护成本, 万元;

S——海绵设施报废拆除成本, 万元;

PV——海绵设施现值和, 万元;

T——海绵设施生命周期, 按 30 年计;

t——时间变量;

r——折现率。

## 2.4 本章小结

本章通过主要通过介绍生命周期的发展过程和具体流程, 对生命周期进行了研究分析, 主要小结如下:

(1) 介绍了海绵设施生命周期评价的框架, 该框架主要集中分析了环境影响评价。

(2) 海绵设施生命周期分析主要的四个步骤为: 目标与范围界定、清单数据分析、影响评价和结果解释。各阶段通过能耗折算求和, 进行单位能耗的折算, 得到总能耗的污染物排放量。介绍了 eBalance 软件的多种特征化指标以及指标的计算方法和原则, 通过 eBalance 软件对清单数据模拟分析, 经特征化计算得到各阶段的环境成本, 可直观了解海绵设施建设过程中相关污染物的排放情况。

(3) 海绵设施的生命周期成本包括建设成本、运行维护成本和报废拆除成本等三个方面, 可对其进行累加计算出特定海绵设施生命周期过程中的造价成本。

### 第三章 两种城市建设模式的生命周期评价分析

本章选定某研究区域内海绵城市建设过程中典型的雨水花园以及透水铺装，将其与传统城市建设的建造、运行以及报废进行能源消耗和资源消耗核算。再将海绵设施和传统城市建设的结果进行比较，可体现海绵城市建设的优越性，反映各个建设阶段的环境成本，直观体现海绵城市理念下的开发建设对我国实现“碳中和，碳达峰”目标的积极意义。

#### 3.1 城市建设模式及案例范围界定

根据特定的 LCA 目标，评价范围界定有所不同，本研究选取以下两种不同的城市建设模式为研究对象：

- 1、海绵城市建设模式：基于海绵城市理念的建设，由透水铺装+雨水花园组成；
- 2、传统城市建设模式：未进行海绵化的建设模式，主要为灰色基础设施，即用普通的路面结构和普通黏土实心砖铺装替换前一模式的海绵设施。

以下对这两种城市建设模式的生命周期评价进行研究分析，包括研究区范围内设施的建造、运行到报废的 30 年时间内所消耗的资源与能源。

研究区域为某开发区工业园区，研究过程中利用其相关数据<sup>[56]</sup>：区域总面积约为 0.154km<sup>2</sup>，其中不透水面积约 0.129km<sup>2</sup>，约占总面积的 83.8%，主要由厂区房、硬化路面、停车区域以及沥青路面组成；透水面积 0.025km<sup>2</sup>，主要由普通绿地组成，而厂区内绿化面积较少，约为区域总面积的 16.2%。

#### 3.2 两种城市建设模式 LCA 清单分析

##### 3.2.1 海绵城市建设模式的 LCA 清单分析

###### 一、建设施工阶段

在海绵城市建设模式中，将研究区的部分不透水路面和停车场改修建为透水铺装，总占地面积为 38633m<sup>2</sup>，雨水花园的占地面积为 6239m<sup>2</sup>。建设过程中所需要的材料种类和用量如表 3-1 所示。

表 3-1 透水铺装与雨水花园材料清单

类型	材料	厚度 (m)	面积 (m <sup>2</sup> )	体积 (m <sup>3</sup> )	密度 (t/m <sup>3</sup> )	总质量 (t)
雨水花园	树皮填料	0.7	6239	4367	0.2	873.4
	种植土	0.25	6239	1560	2.4	3744

表 3-1 (续表)

类型	材料	厚度 (m)	面积 (m <sup>2</sup> )	体积 (m <sup>3</sup> )	密度 (t/m <sup>3</sup> )	总质量 (t)
雨水花园	人工填料	0.7	6239	4367	2.36	10306
	砾石	0.2	6239	1248	2.66	3319
	PE 穿孔管 DN50	0.005	管长 850m	0.67	0.95	0.63
	砂基透水砖	0.07	38633	2704	1.87	5057
	中砂	0.03	38633	1159	2	2318
透水铺装	透水混凝土	0.13	38633	5022	2	10045
	碎石	0.18	38633	6954	2.66	18497
	素土夯实	0.1	38633	3863	1.4	5409
	PE 穿孔管 DN50	0.005	管长 8000m	6.28	0.95	6
总计 (t)			60000			

1) 原材料生产能耗计算

**雨水花园**

a. 树皮填料和人工填料主要为绿色无污染的材料和工业生成的废弃物，生成过程能耗可忽略。

b. 种植土：由于对种植土的研究不足，故本研究采用与之相近的砂土来替代。砂土的主要成分为砂，因此，种植土的生产能耗与砂的生产能耗相似。根据文献报道，砂的生产能耗为 600kJ/kg<sup>[57]</sup>，由此可以推算出雨水花园的种植土总能耗为： $3744 \times 10^3 \times 600 \text{kJ/kg} = 2.25 \times 10^6 \text{MJ}$ 。

c. 砾石：与石子、碎石相似。碎石的生产能耗为 900kJ/kg<sup>[58]</sup>，因此可推算出雨水花园的砾石总能耗为： $3319 \times 10^3 \times 900 \text{kJ/kg} = 2.99 \times 10^6 \text{MJ}$ 。

d. PE 管材：根据相关研究可知，PE 管材主要是由高聚乙烯组成，而高聚乙烯产品能耗为  $1.68 \times 10^8 \text{kJ/t}$ <sup>[59]</sup>。由此可推算出雨水花园在建设施工过程中 PE 管材的总生产能耗为： $0.63 \times 1.68 \times 10^8 \text{kJ/t} = 0.11 \times 10^6 \text{MJ}$ 。

雨水花园原材料生产总能耗  $T_1 = 2.25 \times 10^6 + 2.99 \times 10^6 + 0.11 \times 10^6 = 5.35 \times 10^6 \text{MJ}$ 。

**透水铺装**

a. 砂基透水砖：透水铺装主要是通过透水砖，但是目前的砂基透水砖能耗研究有待深入，无法获取其生产清单数据<sup>[44]</sup>。因此选用与之相近的普通实心黏土砖

的理化性质<sup>[60]</sup>。以一块标准砖的规格(240 mm×115 mm×53 mm),其数量为铺设面积。详细清单如表 3-2 所示。

表 3-2 普通黏土砖的生产清单

原料及能量	1 块标砖物质含量	单位	数量	总数值
砂土	2.5	kg	$1.4 \times 10^6$	$3.5 \times 10^6$
电	0.04	kWh	$1.4 \times 10^6$	$5.6 \times 10^4$
煤	0.21	kg	$1.4 \times 10^6$	$2.94 \times 10^5$
废弃物	2.5	kg	$1.4 \times 10^6$	$3.5 \times 10^6$

b. 透水混凝土承载层: 透水基层的铺装材料为透水混凝土, 该基层的材料结构组成与混凝土的比例相似, 故可参考相对而言更容易获取的混凝土生成清单数据。透水铺装过程中生产  $1\text{m}^3$  混凝土的生产清单如表 3-3 所示。

表 3-3  $1\text{m}^3$  混凝土生产清单

原料	单位	数量
水泥	kg	442
砂子	kg	629
石子	kg	1300
水	kg	180
电	kWh	2
废弃物填埋	kg	2550

通过计算可得, 研究区域内完成透水铺装所需要的混凝土总量为  $5022\text{m}^3$ , 混凝土清单如表 3-4 所示。

表 3-4 透水铺装的混凝土清单

原料	单位	数量
水泥	kg	$2.22\text{E}+06$
砂子	kg	$3.16\text{E}+06$
石子	kg	$6.53\text{E}+06$
水	kg	$9.04\text{E}+05$
电	kWh	$1.00\text{E}+04$
废弃物填埋	kg	$1.28\text{E}+07$

c. 水泥：在研究区域内的透水铺装消耗的水泥。通过相关的清单分析可知，1kg 水泥的生产清单如表 3-5 所示。

表 3-5 1kg 水泥的生产清单

类型	物质名称	单位	数量
水泥原料	石灰石	kg	1.3
	黏土质原料	kg	0.3
	石膏	kg	0.05
	煤	kg	0.22
	电	kWh	0.11
水泥污染物排放	CO <sub>2</sub>	kg	0.572
	SO <sub>2</sub>	kg	0.0012
	COD	kg	0.000012
	粉尘	kg	0.023
	固体废弃物	kg	0.00064
废弃物填埋	kg	1	

研究所用的水泥量为 2219724kg, 可知透水铺装的水泥消耗清单如表 3-6 所示。

表 3-6 透水铺装水泥的消耗清单

类型	物质名称	单位	数量
水泥原料	石灰石	kg	2.9E+06
	黏土质原料	kg	6.7E+05
	石膏	kg	1.1E+05
	煤	kg	4.9E+05
	电	kWh	2.4E+05
水泥污染物排放	CO <sub>2</sub>	kg	1.27E+06
	SO <sub>2</sub>	kg	2.7E+03
	COD	kg	2.7E+01
	粉尘	kg	5.1E+05
	固体废弃物	kg	1.4E+03
废弃物填埋	kg	2.2E+06	

d. 石子：与砾石、碎石相似，碎石的生产能耗由前文可知， $900\text{kJ/kg}^{[58]}$ 。透水铺装采用的碎石质量为  $25027\text{t}$ ，可推算出渗透铺装的石子总能耗为： $25027 \times 10^3 \times 900\text{kJ/kg} = 2.25 \times 10^7\text{MJ}$ 。

e. PE 管材：PE 管材的主要原料是高密度聚乙烯，通过特定的工艺生产，再加工而成。由前文亦知，高聚乙烯产品能耗为  $1.68 \times 10^8\text{kJ/t}^{[59]}$ ，由此可推算出透水铺装采用的 PE 管材总生产能耗为： $6 \times 1.68 \times 10^8\text{kJ/t} = 1 \times 10^6\text{MJ}$ 。

f. 砂：透水铺装的三个部分的砂量分别为：中砂  $2318000\text{kg}$ 、砂基透水砖生产用砂量  $3496286\text{kg}$  与透水混凝土生产过程用砂量  $3158838\text{kg}$ ，因此，透水铺装采用的砂土生产总能耗为： $5.38 \times 10^6\text{MJ}$ 。

透水铺装原材料生产总能耗  $T_2 = 2.25 \times 10^7 + 1 \times 10^6 + 5.38 \times 10^6 = 2.89 \times 10^7\text{MJ}$ 。

由此可计算出方案一原材料生产总能耗  $Q_1 = \text{雨水花园原材料能耗 } T_1 + \text{透水铺装原材料能耗 } T_2 = 5.35 \times 10^6 + 2.89 \times 10^7 = 3 \times 10^7\text{MJ}$ 。

## 2) 材料运输能耗

研究假定对于各类原材料采用公路运输，运输距离为  $30\text{km}$ ，公路运输的单位能耗为  $1836\text{kJ/t} \cdot \text{km}^{[61]}$ 。方案一建造所需的材料重质量为  $60000\text{t}$ ，则计算可知运输能耗为  $Q_2 = 3.3 \times 10^6\text{MJ}$ 。汽车柴油热值为  $42.8\text{MJ/kg}^{[62]}$ ，因此方案一施工阶段建设原材料运输产生的柴油消耗量为  $77102.8\text{kg}$ 。

## 3) 现场施工能耗

已知单位面积现场施工能耗为  $273\text{MJ/m}^2^{[53]}$ ，方案一的面积为  $44872\text{m}^2$ ，由此计算可得现场施工总能耗为  $Q_3 = 1.22 \times 10^7\text{MJ}$ 。

## 4) 建设施工总能耗

方案一的总能耗  $= \sum Q_i = 4.55 \times 10^7\text{MJ}$ 。

## 5) 资源消耗量与污染物质排放量

由于碎石、砂、PE 管材等生产的能耗和现场施工的能耗都是以能量的形式表示，所以对各过程资源消耗量与污染物质排放量无法判断。由于国内外计算污染物减排量常以 1990 年的数据为基准。鉴于此，本文以 1MJ 中国背景含能数据清单作为基准，将各种能耗换算为资源消耗量，并对应各自的污染物排放量，如表 3-7 所示。

表 3-7 1MJ 中国背景含能数据

资源名称	单位	数量
煤	kg	2.71E-02
天然气	m <sup>3</sup>	5.30E-04

表 3-7 (续表)

资源名称	单位	数量
电	kWh	2.16E-02
油	kg	3.97E-03

在海绵城市建设模式中，雨水花园+透水铺装的原材料生产能耗  $Q_1$  和现场施工能耗  $Q_3$  之和为  $4.22 \times 10^7 \text{MJ}$ ，折算成能源消耗量为表 3-8 所示。

表 3-8 建设施工阶段能耗折算

资源名称	单位	数量
煤	kg	1.14E+06
天然气	$\text{m}^3$	2.24E+04
电	kWh	9.12E+05
油	kg	1.68E+05

#### 6) 基础能源排放清单

以 1990 年基础能源生产与消费结构为基准，基础能源排放清单如下：

1kg 电量生产排放清单<sup>[63]</sup>如表 3-9 所示。

表 3-9 1kWh 电量生产的排放清单

名称	单位	数量
CO <sub>2</sub>	kg	1.14E+00
SO <sub>2</sub>	kg	1.03E-02
NO <sub>x</sub>	kg	5.22E-03
CO	kg	9.54E-03
COD	kg	2.77E-03
烟尘	kg	2.93E-05
固体废物	kg	4.57E-02

1kg 天然气生产排放清单<sup>[60]</sup>如表 3-10 所示。

表 3-10 1kg 天然气生产的排放清单

名称	单位	数量
CO <sub>2</sub>	kg	4.47E-02
SO <sub>2</sub>	kg	1.15E-03

表 3-10 (续表)

名称	单位	数量
NO <sub>x</sub>	kg	5.25E-05
CO	kg	8.25E-04
CH <sub>4</sub>	kg	3.70E-04
固体废物	kg	1.11E-02

1kg 原油生产排放清单<sup>[63]</sup>如表 3-11 所示。

表 3-11 1kg 原油生产的排放清单

名称	单位	数量
CO <sub>2</sub>	kg	4.81E-02
SO <sub>2</sub>	kg	1.24E-03
NO <sub>x</sub>	kg	5.65E-05
CO	kg	8.86E-04
CH <sub>4</sub>	kg	3.97E-04
固体废物	kg	1.19E-02

1kg 煤炭生产排放清单<sup>[63]</sup>如表 3-12 所示。

表 3-12 1kg 煤炭生产的排放清单

名称	单位	数量
CO <sub>2</sub>	kg	1.87E-02
SO <sub>2</sub>	kg	1.73E-04
NO <sub>x</sub>	kg	4.45E-05
CO	kg	2.44E-06
COD	kg	1.11E-06
CH <sub>4</sub>	kg	9.88E-03
粉尘	kg	7.41E-05

1kg 燃油生产排放清单<sup>[60]</sup>如表 3-13 所示。

表 3-13 1kg 燃油生产的排放清单

名称	单位	数量
CO <sub>2</sub>	kg	3.24E+00

表 3-13 (续表)

名称	单位	数量
SO <sub>2</sub>	kg	7.12E-04
NO <sub>x</sub>	kg	2.31E-02
CO	kg	4.65E-03
PM <sub>10</sub>	kg	4.44E-04
HC	kg	1.60E-03
N <sub>2</sub> O	kg	1.17E-04

最后，基于各种单位资源能耗，可得到雨水花园+透水铺装建设施工阶段的各种资源消耗和污染物排放量的清单，如表 3-14 所示。

表 3-14 雨水花园+透水铺装建设施工阶段的评价清单

名称	分类	INPUT	单位	数量
物料	雨水花园	树皮填料	t	873.4
		种植土	t	3744
		人工填料	t	10306
		砾石	t	3319
		PE 管材	t	0.63
		砂子	t	8978
		石灰石	t	2885
	透水铺装	粘土质原料	t	670
		石膏	t	110
		水	t	904
		碎石	t	25027
		PE 管材	t	6
		煤	kg	1.43E+06
		天然气	m <sup>3</sup>	2.24E+04
自然资源	能量	电	kWh	9.78E+05
		油	kg	1.68E+05
		汽车柴油	kg	7.71E+04

表 3-14 (续表)

分类	OUTPUT	单位	数量	
污染物	CO <sub>2</sub>	kg	2.67E+06	
	SO <sub>2</sub>	kg	1.33E+04	
	CO	kg	9.86E+03	
	气体污染物	CH <sub>4</sub>	kg	1.42E+04
		NO <sub>x</sub>	kg	6.96E+03
		PM <sub>10</sub>	kg	3.42E+01
	水体污染物	HC	kg	1.23E+02
		N <sub>2</sub> O	kg	9.02E+00
		COD	kg	2.74E+03
	固体废弃物	粉尘	kg	5.10E+05
固体弃物		kg	4.83E+04	
烟尘		kg	5.1E+05	

## 二、运行维护阶段

海绵设施在运行维护过程中最主要的资源消耗是人力，如需定期检查植被缓冲带的表面情况、植物生长不良情况等。由于对海绵设施的定期维护而言，相较于施工和拆除阶段相比，该部分能耗极小，可忽略不计，不列入清单内。在该研究区域内全年降水量约 893.4mm<sup>[56]</sup>，假设设计使用年限为 30 年。可估算出运营阶段的污染物质去除量，见表 3-15 所示。

表 3-15 雨水花园+透水铺装运行维护阶段清单

名称	INPUT	单位	数量
能量消耗	-	-	-
污染物质去除量	COD	kg	6139.32
	TN	kg	288.99
	TP	kg	11.46

## 三、报废拆除阶段

生命周期最后一个阶段为报废拆除阶段，此阶段所消耗的能耗占现场施工能耗的 90%，拆除的废弃物质量占施工原材料的 80%<sup>[54,55]</sup>，此外仍然假定拆除后的废弃物使用中型货车公路运输，运输距离为 30km。由施工建设阶段的数据可知拆

除阶段能耗为  $1.1 \times 10^7 \text{MJ}$ ，质量为 48000t，同时对柴油的消耗为 61772kg。所以我们可用相同的计算方法得出报废拆除阶段的清单如表 3-16 所示。

表 3-16 雨水花园+透水铺装报废拆除阶段清单

名称	分类	INPUT	单位	数量
自然资源	能量	煤	kg	2.98E+05
		天然气	m <sup>3</sup>	5.83E+03
		电	kWh	2.38E+05
		油	kg	4.37E+04
		汽车柴油	kg	6.18E+04
	分类	OUTPUT	单位	数量
污染物	气体污染物	CO <sub>2</sub>	kg	4.82E+05
		SO <sub>2</sub>	kg	2.67E+03
		CO	kg	2.65E+03
		CH <sub>4</sub>	kg	2.98E+03
		NO <sub>x</sub>	kg	2.69E+03
		PM <sub>10</sub>	kg	2.74E+01
		HC	kg	9.88E+01
	水体污染物	N <sub>2</sub> O	kg	7.23E+00
		COD	kg	6.60E+02
		粉尘	kg	2.21E+01
固体废弃物	固体弃物	kg	1.20E+04	
	烟尘	kg	6.97E+01	

### 3.2.2 传统城市建设模式的 LCA 清单分析

#### 一、建设施工阶段

传统城市建设模式中的灰色基础设施包括普通的路面结构和普通黏土实心砖铺装，铺设面积为 44872m<sup>2</sup>。普通路面设计主要的参数包括：混凝土面层总厚度为 90-120mm；基层厚度为 200-400mm；底基层总厚度为 150-350mm，则建设过程中所需要的材料种类和用量如表 3-17 所示。

表 3-17 灰色基础设施材料清单

类型	材料	厚度 (m)	面积 (m <sup>2</sup> )	体积 (m <sup>3</sup> )	密度 (t/m <sup>3</sup> )	总质量 (t)
灰色基础 设施建设	混凝土面 层	0.1	44872	4487.2	2.35	10544.9
	基层	0.35	44872	15705.2	2.66	41775.8
	底基层	0.2	44872	8974.4	2.66	23871.9
	PE 排水 管 DN50	0.005	管长 8850m	6.95	0.95	6.6
总计 (t)			76199.1			

## 1) 原材料生产能耗计算

a. 混凝土面层：该基层铺装的材料为混凝土，可参考混凝土的生成清单数据。  
1m<sup>3</sup> 混凝土的生产清单如表 3-18 所示。

表 3-18 1m<sup>3</sup> 混凝土生产清单

原料	单位	数量
水泥	kg	442
砂子	kg	629
石子	kg	1300
水	kg	180
电	kWh	2
废弃物填埋	kg	2550

通过计算可得，普通路面的混凝土用量为 4487.2m<sup>3</sup>，清单如表 3-19 所示。

表 3-19 灰色基础设施的混凝土清单

原料	单位	数量
水泥	kg	2.0E+06
砂子	kg	2.8E+06
石子	kg	5.8E+06
水	kg	8.1E+05
电	kWh	9.0E+04
废弃物填埋	kg	1.1E+07

b. 水泥：在研究区域内的灰色基础设施水泥的消耗，通过 1990 年的清单分析

可知，1kg 水泥的生产清单如表 3-20 所示。

表 3-20 1kg 水泥的生产清单（1990 年）

类型	物质名称	单位	数量
水泥原料	石灰石	kg	1.3
	黏土质原料	kg	0.3
	石膏	kg	0.05
	煤	kg	0.22
	电	kWh	0.11
水泥污染物排放	CO <sub>2</sub>	kg	0.572
	SO <sub>2</sub>	kg	0.0012
	COD	kg	0.000012
	粉尘	kg	0.023
	固体废弃物	kg	0.00064
	废弃物填埋	kg	1

研究所用的水泥量为 1983342kg。灰色基础设施的水泥消耗清单如表 3-21 所示。

表 3-21 灰色基础设施的水泥消耗清单

类型	物质名称	单位	数量
水泥原料	石灰石	kg	2.6E+06
	黏土质原料	kg	6.0E+05
	石膏	kg	9.9E+04
	煤	kg	4.4E+05
	电	kWh	2.2E+05
水泥污染物排放	CO <sub>2</sub>	kg	1.1E+06
	SO <sub>2</sub>	kg	2.4E+03
	COD	kg	2.4E+01
	粉尘	kg	4.6E+04
	固体废弃物	kg	1.3E+03
	废弃物填埋	kg	2.0E+06

c. 砂：灰色基础设施的砂主要包括混凝土生产过程用砂量。由前文亦知，砂的生产能耗为  $600\text{kJ/kg}^{[57]}$ 。混凝土生产过程用砂量为  $2822448\text{kg}$ ，由此可计算得出，灰色基础设施采用的砂生产总能耗为  $1.7 \times 10^6\text{MJ}$ 。

d. 石子：与砾石、碎石相似，碎石的生产能耗由前文可知， $900\text{kJ/kg}^{[58]}$ 。灰色基础设施采用的石子质量为  $5833\text{t}$ ，可推算出灰色基础设施的石子总能耗为： $5833 \times 10^3 \times 900\text{kJ/kg} = 5.3 \times 10^6\text{MJ}$ 。

e. 基层和底基层的材料为碎石。碎石的生产能耗为  $900\text{kJ/kg}^{[58]}$ ，因此可推算出灰色基础设施的基层和底基层总能耗为： $65647.7 \times 10^3 \times 900\text{kJ/kg} = 5.91 \times 10^7\text{MJ}$ 。

f. PE 管材：根据相关研究可知，PE 管材主要是由高聚乙烯组成，而高聚乙烯产品能耗为  $1.68 \times 10^8\text{kJ/t}^{[59]}$ 。由此可推算出灰色基础设施采用的 PE 管材总生产能耗为： $6.6 \times 1.68 \times 10^8\text{kJ/t} = 1.1 \times 10^6\text{MJ}$ 。

灰色基础设施原材料生产总能耗  $Q_1 = 1.7 \times 10^6\text{MJ} + 5.3 \times 10^6\text{MJ} + 5.91 \times 10^7\text{MJ} + 1.1 \times 10^6\text{MJ} = 6.72 \times 10^7\text{MJ}$ 。

## 2) 材料运输能耗

与前文所述一致，采用中型货车公路运输，运输距离为  $30\text{km}$ ，运输的单位能耗为  $1836\text{kJ/t} \cdot \text{km}^{[61]}$ 。灰色基础设施建设所需的材料重质量为  $76199.1\text{t}$ ，则计算可知运输能耗为  $Q_2 = 4.2 \times 10^6\text{MJ}$ 。汽车柴油热值为  $42.8\text{MJ/kg}^{[62]}$ ，由此可知灰色基础设施施工阶段过程中由于建设原材料运输而导致的柴油消耗量为  $98061.8\text{kg}$ 。

## 3) 现场施工能耗

单位面积现场施工能耗为  $273\text{MJ/m}^2^{[53]}$ ，灰色基础设施建设的面积为  $44872\text{m}^2$ ，由此计算可得，现场施工总能耗为  $Q_3 = 1.22 \times 10^7\text{MJ}$ 。

## 4) 建设施工总能耗

灰色基础设施的总能耗  $= \sum Q_i = 8.36 \times 10^7\text{MJ}$ 。

## 5) 资源消耗量与污染物质排放量

如前文所述，石子、碎石、PE 管材生产的能耗以及现场施工的能耗均是以能量的形式表示，因此计算污染物减排量以 1990 年的数据为基准。在计算灰色基础设施的能耗时，原材料生产能耗  $Q_1$  和现场施工能耗  $Q_3$  之和为  $7.94 \times 10^7\text{MJ}$ ，仍然选择 1990 年数据作为基准（见表 3-9、表 3-10、表 3-11、表 3-12、表 3-13 所示），计算方法与海绵设施相同。因此，折算成能源消耗量为表 3-22 所示。

表 3-22 灰色基础设施建设施工阶段能耗折算

类别	单位	数量
煤	kg	2.15E+06

表 3-22 (续表)

类别	单位	数量
天然气	m <sup>3</sup>	4.21E+04
电	kWh	1.72E+06
油	kg	3.15E+05

最后,基于各种单位资源能耗,可得到灰色基础设施建设施工阶段的各种资源消耗和污染物排放量的清单,如表 3-23 所示。

表 3-23 灰色基础施工阶段的评价清单

名称	分类	INPUT	单位	数量
物料	灰色基础设施	碎石	kg	6.6E+07
		砂子	kg	2.8E+06
		石子	kg	5.8E+06
		石灰石	kg	2.6E+06
		粘土质原料	kg	6.0E+05
		石膏	kg	9.9E+04
		水	kg	8.1E+05
		PE 排水管	kg	6.6E+03
自然资源	能量	煤	kg	2.15E+06
		天然气	m <sup>3</sup>	4.21E+04
		电	kWh	1.81E+06
		油	kg	3.15E+05
		汽车柴油	kg	9.8E+04
	分类	OUTPUT	单位	数量
污染物	气体污染物	CO <sub>2</sub>	kg	3.54E+06
		SO <sub>2</sub>	kg	2.19E+04
		CO	kg	1.80E+04
		CH <sub>4</sub>	kg	2.14E+04
		NO <sub>x</sub>	kg	1.18E+04
		PM <sub>10</sub>	kg	4.35E+01

表 3-23 (续表)

分类	OUTPUT	单位	数量	
污染物	HC	kg	1.57E+02	
	气体污染物	N <sub>2</sub> O	kg	1.15E+01
	水体污染物	COD	kg	5.02E+03
		粉尘	kg	4.62E+04
	固体废弃物	固体弃物	kg	8.82E+04
		烟尘	kg	5.30E+01

### 二、运行维护阶段

灰色基础设施在运行与维护过程中主要消耗的是人力资源，如需定期检查设施运行情况，损坏情况等。相较于施工和拆除阶段相比，该部分能耗极小，可忽略不计，不列入清单内。假设设计使用年限为 30 年。灰色基础设施对污染物质基本不涉及减排，均采用直接排放的方法，见表 3-24 所示。

表 3-24 灰色基础设施运行维护阶段清单

名称	INPUT	单位	数量
能量消耗	-	-	-
污染物质排放量	COD	kg	6139.32
	TN	kg	288.99
	TP	kg	11.46

### 三、报废拆除阶段

据前文所述，报废拆除阶段所消耗的能耗占现场施工能耗的 90%，拆除的废弃物质量占施工原材料的 80%<sup>[54,55]</sup>，假定拆除后的废弃物如前文所述采用公路运输，距离为 30km。根据施工建设阶段计算数据，可知拆除阶段能耗为  $1.1 \times 10^7$  MJ，质量为 60959t，对柴油的消耗为 78449kg。用相同的计算方法可得出报废拆除阶段的清单如表 3-25 所示。

表 3-25 灰色基础设施报废拆除阶段清单

名称	分类	INPUT	单位	数量
自然资源	能量	煤	kg	2.98E+05
		天然气	m <sup>3</sup>	5.83E+03
		电	kWh	2.38E+05

表 3-25 (续表)

名称	分类	INPUT	单位	数量
自然资源	能量	油	kg	4.37E+04
		汽车柴油	kg	7.84E+04
	分类	OUTPUT	单位	数量
污染物	气体污染物	CO <sub>2</sub>	kg	5.36E+05
		SO <sub>2</sub>	kg	2.68E+03
		CO	kg	2.72E+03
		CH <sub>4</sub>	kg	2.98E+03
		NO <sub>x</sub>	kg	3.07E+03
		PM <sub>10</sub>	kg	3.48E+01
	水体污染物	HC	kg	1.26E+02
		N <sub>2</sub> O	kg	9.18E+00
		COD	kg	6.60E+02
		粉尘	kg	2.21E+01
固体废弃物	固体弃物	kg	1.20E+04	
	烟尘	kg	6.97E+00	

### 3.3 eBalance 对不同方案进行生命周期环境评价

#### 3.3.1 海绵城市建设模式的生命周期环境评价

以透水铺装+雨水花园为例，对海绵设施的生命周期环境评价进行分析。主要内容包括：

(1) 按照 eBalance 界面所要求的内容，将海绵设施的施工建设、运行维护、报废拆除三个阶段进行流程图建模，再将每个阶段的结果指向整个生命周期。

(2) 将界面所示的有关产品物质投入、资源投入与环境排放等内容对应每个阶段的清单，并将清单的数据导入。

(3) 通过 eBalance 内置的计算过程，得出海绵设施每个阶段的生命周期特征化指标结果。

(4) 最后再将特征化指标的结果进行分析，讨论海绵设施建设和传统灰色建设生命周期各阶段过程，探究海绵设施对实现碳减排和碳中和的目标，对海绵建设的未来进行展望。

透水铺装+雨水花园建模结果如图 3-1 所示。

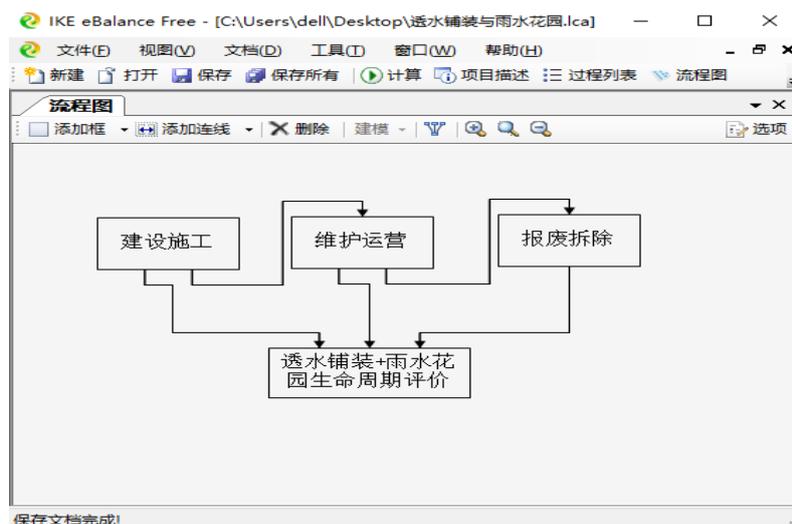


图 3-1 透水铺装+雨水花园建模结果

### 一、建设施工阶段

将海绵城市建设模式中的建设施工清单数据录入到软件之中，主要包括原材料的消耗，资源的消耗和污染物质排放的清单数据录入（结果如图 3-2 至图 3-4 所示），系统的输出项目主要为各种环境排放物质。

名称	数量	单位	关联生产过程
树皮填料	8.74E+05	kg	[未关联]
种植土	3.74E+06	kg	[未关联]
人工填料	1.03E+07	kg	[未关联]
砾石	3.32E+06	kg	[未关联]
砂子	8.98E+06	kg	[未关联]
石灰石	2.89E+06	kg	[未关联]
黏土质原料	6.7E+05	kg	[未关联]
石膏	1.1E+05	kg	[未关联]
碎石	2.5E+07	kg	[未关联]
PE管材	6.63E+03	kg	[未关联]
汽车柴油	7.71E+04	kg	[未关联]
电	9.78E+05	kWh	[未关联]

图 3-2 透水铺装+雨水花园施工阶段原材料清单数据

名称	数量	单位
褐煤 [土地不可再生能源资源]	1.43E+06	kg
天然气 [土地不可再生能源资源]	2.24E+04	m3
原油 [土地不可再生能源资源]	1.68E+05	kg
地表水 - 不明来源, 不明用途 [水体可再生材料资源]	9.04E+05	kg

图 3-3 透水铺装+雨水花园施工阶段资源消耗清单数据

名称	数量	单位
二氧化碳 [排放到大气 (未指定类型)]	2.67E+06	kg
二氧化硫 [排放到大气 (未指定类型)]	1.33E+04	kg
一氧化碳 [排放到大气 (未指定类型)]	9.86E+03	kg
甲烷 [排放到大气 (未指定类型)]	1.42E+04	kg
氮氧化物 [排放到大气 (未指定类型)]	6.96E+03	kg
HCl Blue No. 1 [排放到大气 (未指定类型)]	123	kg
氧化亚氮 [排放到大气 (未指定类型)]	9.02	kg
化学需氧量 [排放到水体 (未指定类型)]	2.74E+03	kg
废物 (未指定类型) [生产过程废弃物]	4.83E+04	kg

图 3-4 透水铺装+雨水花园施工阶段污染物质排放清单数据

通过 eBalance 内置的特征化计算过程, 可得透水铺装+雨水花园建设施工阶段特征化结果如表 3-26 所示。

表 3-26 透水铺装+雨水花园建设施工阶段特征化结果

特征化指标名称	总量
CADP (fossil fuel) (kg Coal-R eq.)	6.071E+06
CADP (kg Coal-R eq.)	6.071E+06
GWP (kg CO <sub>2</sub> eq)	3.028E+06
CO <sub>2</sub> (kg)	2.670E+06
Water Use (kg)	9.040E+05
Waste Solids (kg)	4.830E+04
AP (kg SO <sub>2</sub> eq)	1.843E+04

表 3-26 (续表)

特征化指标名称	总量
SO <sub>2</sub> (kg)	1.330E+04
NO <sub>x</sub> (kg)	6.960E+03
COD (kg)	2.740E+03
RI (kg PM2.5 eq)	1.932E+03

方案一经过特征化后,可得到在施工阶段中会造成的潜在环境影响的前四为:中国化石能源消耗潜值[CADP (fossil fuel)],中国资源消耗潜值(CADP),全球变暖潜值(GWP),二氧化碳(CO<sub>2</sub>)。

## 二、运行维护阶段

该阶段是海绵设施运作的阶段,主要体现的是对水体中污染物的去除,如 COD、TN、TP 等主要污染物。将运行维护阶段的清单数据录入,如图 3-5 所示。



名称	数量	单位
化学需氧量 [排放到水体 (未指定类型)]	-6.14E+03	kg
总氮 [排放到水体 (未指定类型)]	-289	kg
总磷 [排放到水体 (未指定类型)]	-11.5	kg

图 3-5 透水铺装+雨水花园运行维护阶段对污染物去除清单数据

透水铺装+雨水花园运行维护阶段特征化指标计算结果如表 3-27 所示。

表 3-27 透水铺装+雨水花园建设施工阶段特征化结果

特征化指标名称	总量
COD (kg)	-6.139E+03
EP (kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq)	-2.977E+02

通过特征化的结果可得知,在运行维护阶段中,水体中的 COD 降解效果最为显著,第二为富营养化潜值(EP),通过对 COD 和 EP 指标的折算,相当于实现了  $4.51 \times 10^3$  kg 的碳减排。

## 三、报废拆除阶段

在海绵设施拆除的过程中,主要能耗体现在:现场拆除施工和拆除废物的运输。

由前文所述的清单表中，导入报废拆除阶段能量消耗和资源消耗的清单数据，如图 3-6 和 3-7 所示。

名称	数量	单位
汽车柴油	6.18E+04	kg
电	2.38E+05	kWh

图 3-6 透水铺装+雨水花园报废拆除阶段对能量消耗和资源消耗清单数据

名称	数量	单位
褐煤 [土地不可再生能源资源]	2.98E+05	kg
原油 [土地不可再生能源资源]	4.37E+04	kg
天然气 [土地不可再生能源资源]	5.83E+03	m3

图 3-7 透水铺装+雨水花园报废拆除阶段对能量消耗和资源消耗清单数据

透水铺装+雨水花园报废拆除阶段各种污染物质环境排放的清单数据录入结果如图 3-8 所示。

名称	数量	单位
二氧化碳 [排放到大气 (未指定类型)]	4.82E+05	kg
二氧化硫 [排放到大气 (未指定类型)]	2.67E+03	kg
一氧化碳 [排放到大气 (未指定类型)]	2.65E+03	kg
甲烷 [排放到大气 (未指定类型)]	2.98E+03	kg
氮氧化物 [排放到大气 (未指定类型)]	2.69E+03	kg
HC Blue No. 1 [排放到大气 (未指定类型)]	98.8	kg
氧化亚氮 [排放到大气 (未指定类型)]	7.23	kg
化学需氧量 [排放到水体 (未指定类型)]	660	kg
废物 (未指定类型) [生产过程废弃物]	1.2E+04	kg

图 3-8 透水铺装+雨水花园报废拆除阶段的环境排放清单数据

通过 eBalance 内置的特征化计算过程,透水铺装+雨水花园报废拆除阶段特征化结果如表 3-28 所示。

表 3-28 透水铺装+雨水花园废拆除阶段特征化结果

特征化指标名称	总量
CADP (fossil fuel) (kg Coal-R eq.)	1.505E+06
CADP (kg Coal-R eq.)	1.505E+06
GWP (kg CO <sub>2</sub> eq)	5.587E+05
CO <sub>2</sub> (kg)	4.820E+05
Waste Solids (kg)	1.200E+04
AP (kg SO <sub>2</sub> eq)	4.553E+03
NO <sub>x</sub> (kg)	2.690E+03
SO <sub>2</sub> (kg)	2.670E+03
COD (kg)	6.600E+02
RI (kg PM2.5 eq)	5.526E+02

经过特征化计算后,可得到在施工阶段中会造成的潜在环境影响的前四为:中国化石能源消耗潜值[CADP (fossil fuel)],中国资源消耗潜值(CADP),全球变暖潜值(GWP),二氧化碳(CO<sub>2</sub>)。

#### 四、透水铺装+雨水花园生命周期影响评估

通过 eBalance 软件内置的特征化计算过程可得到方案一分别在建设施工、运行维护和报废拆除的三个阶段结果,如表 3-29 所示。

表 3-29 透水铺装+雨水花园生命周期特征化结果

特征化指标名称	总量
CADP (fossil fuel) (kg Coal-R eq.)	7.576E+06
CADP (kg Coal-R eq.)	7.576E+06
GWP (kg CO <sub>2</sub> eq)	3.587E+06
CO <sub>2</sub> (kg)	3.152E+06
Water Use (kg)	9.040E+05
Waste Solids (kg)	6.030E+04
AP (kg SO <sub>2</sub> eq)	2.298E+04
SO <sub>2</sub> (kg)	1.597E+04

表 3-29 (续表)

特征化指标名称	总量
NO <sub>x</sub> (kg)	9.650E+03
RI (kg PM <sub>2.5</sub> eq)	2.485E+03
EP (kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq)	-2.977E+02
COD (kg)	-2.739E+03

由上表数据可知,透水铺装+雨水花园生命周期过程对环境可能造成的潜在影响排前四位的为:中国化石能源消耗潜值[CADP (fossil fuel)],中国资源消耗潜值(CADP),全球变暖潜值(GWP),二氧化碳(CO<sub>2</sub>)。其中,COD和富营养化潜值(EP)的结果表明海绵设施对水体污染物质有一定的降解作用。

### 3.3.2 传统城市建设模式的生命周期环境评价

对于传统城市建设模式的生命周期环境评价,同样运用 eBalance 软件对三个阶段进行特征化,具体操作过程在此不再赘述。在传统灰色设施中,对水体里面的污染物未有降解,均采用直排的方式。根据前文所述,得到传统灰色设施分别在建设施工、运行维护和报废拆除的三个阶段结果如表 3-30 所示。

表 3-30 传统灰色设施生命周期特征化结果

特征化指标名称	总量
CADP (fossil fuel) (kg Coal-R eq.)	1.236E+07
CADP (kg Coal-R eq.)	1.236E+07
GWP (kg CO <sub>2</sub> eq)	4.692E+06
CO <sub>2</sub> (kg)	4.076E+06
Water Use (kg)	8.100E+05
Waste Solids (kg)	1.464E+05
AP (kg SO <sub>2</sub> eq)	3.499E+04
SO <sub>2</sub> (kg)	2.458E+04
NO <sub>x</sub> (kg)	1.487E+04
RI (kg PM <sub>2.5</sub> eq)	3.827E+03
EP (kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq)	2.360E+03
COD (kg)	1.184E+04

由特征化结果可知，传统灰色设施生命周期过程对环境可能造成的潜在影响排前四位的为：中国化石能源消耗潜值（CADP），中国资源消耗潜值（CADP），全球变暖潜值（GWP），二氧化碳（CO<sub>2</sub>）。

### 3.3.3 生命周期环境评价结果的比较

基于 eBalance 软件的模拟计算结果，对两种方案的特征化结果进行对比分析，如表 3-31 所示。

表 3-31 两种城市建设模式生命周期环境评价结果之比较

特征化指标名称	透水铺装+雨水花园总量/A	传统灰色设施总量/B	二则占比关系 A/B (%)
CADP (fossil fuel) (kg Coal-R eq.)	7.576E+06	1.236E+07	61.29
CADP (kg Coal-R eq.)	7.576E+06	1.236E+07	61.29
GWP (kg CO <sub>2</sub> eq)	3.587E+06	4.692E+06	76.45
CO <sub>2</sub> (kg)	3.152E+06	4.076E+06	77.33
Water Use (kg)	9.040E+05	8.100E+05	111.6
Waste Solids (kg)	6.030E+04	1.464E+05	41.19
AP (kg SO <sub>2</sub> eq)	2.298E+04	3.499E+04	65.68
SO <sub>2</sub> (kg)	1.597E+04	2.458E+04	64.97
NO <sub>x</sub> (kg)	9.650E+03	1.487E+04	64.9
RI (kg PM <sub>2.5</sub> eq)	2.485E+03	3.827E+03	64.93
EP (kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq)	-2.977E+02	2.360E+03	12.61
COD (kg)	-2.739E+03	1.184E+04	22.8

由特征化结果的数据可知，两种城市建设模式存在如下关系：

（1）海绵城市建设模式下透水铺装+雨水花园的 CADP、AP、RI 等指标结果均小于传统城市建设模式下的传统灰色设施；

（2）海绵城市建设模式下透水铺装+雨水花园可以对 COD 指标和 EP 指标进行减排作用；

（3）海绵城市建设模式下透水铺装+雨水花园全球变暖潜值（GWP）明显低于传统灰色设施，CO<sub>2</sub> 的排放量显著低于后者。

### 3.4 两种城市建设模式的生命周期成本

根据美国威斯康星州自然资源部 (Wisconsin Department of Natural Resources) 和国内的相关研究可知, 单位面积的雨水花园建设成本, 如表 3-32 所示。

表 3-32 单位面积雨水花园建设成本

	设计	建设施工	植物栽培	植株成本	总成本
价格 (元/m <sup>2</sup> )	67.42	202.27	202.27~269.7	168.56~303.41	741.66~876.51

雨水花园的面积为 6239m<sup>2</sup>, 生命周期取 30 年, 将总成本折算到每一年中, 即可得到雨水花园年均成本为 154240.6~182284.9 元。

通过国内的相关研究和调查<sup>[64]</sup>, 单位面积的透水铺装建设成本, 如表 3-33 所示。

表 3-33 单位面积透水铺装建设成本

	面层价格 元/m <sup>2</sup>	渗透层价格 元/m <sup>2</sup>	无纺布费用 元/m <sup>2</sup>	土方费用 元/m <sup>3</sup>	土方总体积 m <sup>3</sup>
价格	50	60	6	25	23433

透水铺装的面积为 38633m<sup>2</sup>, 生命周期取 30 年, 将总成本折算到每一年中, 即可得到透水铺装年均成本为 168908.4 元。

对于城市的传统建设, 主要的组成为灰色基础设施, 以计划的建筑面积为准, 根据相关研究, 以 10cm 水泥混凝土面层与 55cm 厚水泥稳定碎石基层为计算基准, 每平方米费用为 270~310 元。生命周期取 30 年, 将总成本折算到每一年中, 即可得到灰色基础设施年均成本为 403848~463677.3 元。

### 3.5 本章小结

本章以海绵城市理念开发建设和传统理念的开发建设为例, 基于生命周期评价理念, 对两种不同的城市建设理念进行对应的生命周期环境影响评价, 主要结果如下:

(1) 在海绵城市建设模式生命周期过程中, 面积为 44872m<sup>2</sup> 的海绵设施 (透水铺装+雨水花园) 在运行维护阶段可以实现对水体中 COD、TN、TP 的去除, 分别为 6139.32kg、288.99kg 和 11.46kg, 通过折算相当于减排了 4.51×10<sup>3</sup>kg 的 CO<sub>2</sub>。海绵城市建设模式可减少对环境的污染, 实现更低的碳排放, 助力碳中和。传统城市建设模式的灰色设施为直排, 会造成严重的环境污染。

(2) 对比两种城市建设模式生命周期内的污染物排放结果可知, 透水铺装+雨水花园和传统灰色设施建设最大的污染物排放为 CO<sub>2</sub>, 分别为 3.152×10<sup>6</sup>kg、

$4.076 \times 10^6 \text{kg}$ ，海绵城市建设模式（透水铺装+雨水花园）占传统城市建设模式（传统灰色设施）的 77.82%，前者有明显优势，对我国“十四五”规划中提出的碳中和、碳减排具有积极意义。

（3）由生命周期成本分析可知，在 30 年使用寿命前提下，透水铺装+雨水花园的年均造价为 323149-351193.3 元/年，而灰色基础设施年均成本为 403848-463677.3 元/年。在相同面积下，透水铺装+雨水花园等海绵设施年均造价成本低于传统灰色基础设施成本。

## 第四章 海绵城市建设效益指标货币化评价方法

本章结合我国海绵城市建设的特点和实际应用，对海绵化所产生的效益进行科学合理的识别，将海绵城市建设效益分为生态效益、经济效益和社会效益三类作为准则层；结合住建部发布的《考核办法》，通过专家打分等方法，遴选并拓展其中的评价指标作为指标层；利用环境经济学相关知识，建立将各指标货币化评价的方法，实现海绵城市效益货币化。

### 4.1 基于生态文明的海绵城市建设

#### 4.1.1 海绵城市对碳减排作用

海绵城市建设的过程中，海绵设施是重要的组成部分，其主要是为水文和水质而设计。在以往建设的海绵设施中，关于对环境影响评估研究逐渐增加。然而，海绵设施的附加生态系统效益，如碳固定等受到的关注较少。通过相关文献分析可知，雨水花园能够提供较高的碳潜力，抵消了大部分碳足迹。生物滞留系统、绿色屋顶、植被浅草沟和雨水池塘也分别可减轻其碳足迹的约 70%、68%、45%和 8%，表明各种海绵设施在减少碳足迹方面具有重要作用<sup>[65]</sup>。

第三章中某地海绵城市建设和传统城市建设两种模式生命周期过程的对比分析结果显示，在建设过程中，海绵城市建设能够实现更少的碳排放。随着我国城市的不断发展，海绵城市建设理念不断深入，契合我国目前对碳减排的要求，海绵城市建设对 2030 年实现碳达峰和 2060 年实现碳中和的双碳目标，存在显著的促进作用。

#### 4.1.2 海绵设施主要类型

在海绵城市建设中，雨水回流利用技术措施主要有雨水渗透设施、滞留设施、贮存设施、疏导设施、调蓄设施和净化设施<sup>[39]</sup>，其主要功能和代表见表 4-1 所示。

表 4-1 雨水利用措施功能

设施类型	主要功能	典型代表
渗透设施	净化雨水径流污染物，降低洪峰流量并且促进雨水渗流入地下	透水铺装、雨水花园及渗透井
滞留设施	推迟洪峰时间，沉淀并降解多种污染物	绿色屋顶、滞留池及雨水塘
贮存设施	存放部分净化的雨水径流	人工湿地
疏导设施	短暂疏导雨水径流	植被浅沟

表 4-1 (续表)

设施类型	主要功能	典型代表
调蓄设施	延缓洪峰出现时间、减少洪峰流量	调蓄水塘、公园水体及河湖水系
净化设施	对雨水径流的污染物进行截留沉淀分解	自然(人工)湿地

## 4.2 海绵城市建设效益指标

建设海绵城市可以有效地促进城市化进程与城市生态环境之间的协调发展,通过践行“渗、滞、蓄、净、用、排”,不仅可以缓解城市水资源问题,而且还有利于海绵城市理念更好实现。因此,指标效益评价体系的建立,不仅能够为建设海绵城市中所遇到的各类效益问题提供有效的依据,而且能够尽可能地减少不必要的建设投资,发挥已投资项目的最佳效果,减少实践过程中的盲目性。

对于指标经济量化与建设效益评价,在资源与环境经济学中主要有两种方法:有无分析法和前后比较法。两种方法均存在科学合理性,但是仍然不能具体体现建设海绵城市所带来的效益。因此,亟需一种基于海绵城市建设指标的评价体系及其量化办法。

### 4.2.1 指标选取

建设海绵城市带来的效益和相关指标经济量化的研究,必须要精准地识别海绵城市所产生的效益,这是其效益经济量化研究的根本。此外,海绵城市建设指标评价还必须着眼于一个特定区域是否在水资源、水安全、水生态、水环境上发生根本的改善。

在《考核办法》中,为海绵城市建设考核提出了相关指标和原则。但是目前针对海绵城市建设效益指标体系的研究鲜有,也不存在公认的标准,而《考核办法》中的定性指标是通过相关文件的规定,定量指标则是通过具体的测量办法。基于此,筛选其中的相关指标结合海绵城市建设的实际情况,构建海绵城市效益量化体系。

此外,鉴于建设海绵城市过程中各地的情况存在显著差别,所以对于建立效益指标体系应当了解当地的具体情况,相关的指标可根据实际有关情况进行增减,因此需在下一章实例研究中结合研究区的情况而选择相关指标。

### 4.2.2 海绵城市效益构成

海绵城市的建设效益主要由三个部分构成:生态效益,社会效益和经济效益,在各项指标效益量化之前,要区分各个层次之间含义并系统了解三者的关系。经济

指标效益是指建设项目实施完成后,所带来的直接经济价值;生态指标效益是指建设项目的实施过程中或完成后,给城市生态环境带来的各种负面的影响和积极的变化;社会指标效益是指项目完成后为社会产生的积极影响以及创造的潜在价值。

### 4.3 海绵城市指标效益量化分析

#### 4.3.1 指标效益评估方法选取

结合《评价标准》中的评价方法、国内外相关效益的经济量化方法以及环境经济学方法<sup>[66]</sup>等。通过多种方式对指标效益进行效益量化,其名称和定义见表 4-3 所示。

表 4-2 指标效益量化方法

类别	方法	定义
1.直接市场评估	市场价值法	利用环境变化导致的地域利润的变化来测算环境变化带来的经济效益或经济损失
	替代工程法	利用替代相关服务的花费来间接评估生态服务的价值
	修复费用法	对修复某种服务的花费来间接评估生态服务的价值
2.间接市场评估	影子价格法	当某种价值难以计算时,运用能够提供相似服务的替代工程的价值来评估该种效益
	机会成本法	实行某一政策而不做另一种政策时所放弃的利益
	享乐价格法	民众想要获得享受绿色环境的资源所支出的费用来推算对应的环境质量价值
3.假象市场评估	条件价值法	利用民调和咨询民众对于建设项目的支付意愿(WTP),来评估其价值
4.其他	成果参考法	参照已有的工程指标成果,来评估目标工程指标的经济价值
	专家评估法	参考专家意见评估相关指标价值

## 4.3.2 指标效益量化方法

### 4.3.2.1 生态效益

#### 一、水生态

##### (1) 年径流总量控制率

该项指标主要是指通过修建雨水利用设施,降低地表雨水径流量。利用渗透和滞留雨水等设施,可有效减少雨水的排放量,缓解市政管网和水厂处理压力。所以,对该项指标所产生的效益可认为是市政管网运行费和污水处理费。

海绵城市对雨水径流削减量计算公式<sup>[67]</sup>如下:

$$Q = A \cdot R \cdot \theta \quad (4-1)$$

式中:

Q——雨水削减量,  $m^3$ ;

A——汇水面积,  $m^2$ ;

R——年均雨水削减量, mm;

$\theta$ ——径流系数, 见表 4-4 所示。

将雨水削减量进行货币化分析,则需要利用替代工程法,该指标的效益即为所节约减省的市政管网运行和污水处理费用,公式如下:

$$M = (M_1 + M_2) \cdot Q \quad (4-2)$$

式中:

Q——雨水削减量,  $m^3$ ;

$M_1$ ——管网的运行费用, 元/ $m^3$ ;

$M_2$ ——自来水处理费用, 元/ $m^3$ 。

表 4-3 下垫面年均雨量径流系数表

类型	下垫面种类	径流系数
屋顶	硬屋顶、未铺石子的平屋顶	0.8
	绿色屋顶 (300 < 基质层厚度 < 300mm)	0.3~0.4
路面及铺装	硬化地面	0.85
	透水铺装	0.32
绿化	绿地	0.15
	有地下建筑绿地 (500 < 地下建筑覆土厚度 < 500mm)	0.15~0.3
水面	水面	1

## (2) 生态岸线恢复

不影响河道行洪排涝、航运和引排水等基本功能,并确保岸的稳定安全的前提下,生态岸线恢复的主要内容应包括:对城市河湖水系岸线的护岸材的选择、构建水体生物群落和改造护岸设施等,恢复其原有生态功能。

但是生态岸线恢复后所产生的效益很难经济量化,所以采用成果参考法结合修复费用法来量化修复后所产生的效益。

$$M_{\text{生态岸线}} = A_{\text{恢复}} \cdot P_{\text{支付}} \quad (4-3)$$

式中:

$M_{\text{生态岸线}}$ ——生态岸线效益,元/年;

$A_{\text{恢复}}$ ——生态岸线恢复的面积,  $\text{hm}^2$ ;

$P_{\text{支付}}$ ——民众对恢复生态岸线平均支付意愿,元/ $\text{hm}^2$ 。

## (3) 地下水位

建设海绵城市提高了城市的透水面积,而由灰色基础设施造成的不透水面的现状得到改善。通过建造渗透设施,比如渗透井、透水铺装、城市绿地和人工湿地等,达到下雨时雨水可入渗补充地下水。最终实现年均地下水保持稳定或下降趋势得到显著遏制,并且平均降幅低于历史同期的目标<sup>[68]</sup>。

雨水入渗量计算运用达西定律:

$$Q = \alpha \cdot H \cdot A \cdot 10^{-3} \quad (4-4)$$

式中:

$\alpha$ ——地下水的补给系数,城市区域为0.1~0.2;

$H$ ——年均降雨量,mm;

$A$ ——区域透水面面积,  $\text{m}^2$ 。

利用雨水下渗设施可使地下水位得到一定的补充,其效益可认为是下渗雨水补充地下水的过程,对地下水位补充的效益可通过影子价格法来量化。

$$M_{\text{地下水}} = Q_{\text{下渗}} \cdot P_{\text{地下水}} \quad (4-5)$$

式中:

$M_{\text{地下水}}$ ——地下水的效益,元/年;

$Q_{\text{下渗}}$ ——下渗补给量,  $\text{m}^3$ ;

$P_{\text{地下水}}$ ——地下水资源平均价格,元/ $\text{m}^3$ 。

## (4) 城市热岛效应

热岛效应对于城市的生态质量和居民生活与健康均会产生较大的负面影响,这不仅加重了城市对能源的消耗,而且极易产生恶性循环,如夏天空调耗能的同时又排放热量、汽车行驶的能耗与排放热量。在社会的发展过程中产生热岛效应的人

为因素主要包括：不透水面与灰色基础设施的增加、家电过度排放热量和城市绿地减少等方面因素。

按照《考核办法》的有关规定，海绵建设区域夏季日均气温低于同时间周围区域的日均气温，或与同区域历史同期相比具有气温降低的趋向，让城市热岛效应得到有效缓解。但是城市热岛效益并不能通过市场价值法直接进行量化，所以，需要一种合适的替代物代替其价值。

参考国外有关城市热岛效应类似的效益研究，发现可利用城市绿地湿地等降温特征，利用该特性替代夏季空调的使用，进而量化该指标的效益。根据相关研究<sup>[69]</sup>，结合利用成果参考法。

根据相关研究得出 1 公顷绿地在夏季中可从环境中吸收至少  $8.2 \times 10^7 \text{J}$  的热量，与约 190 台空调 24h 的制冷效果相同，所以选用空调作为替代，利用降低相同温度的耗电费用等量量化成绿地调节温度的价值。因为效益需按照夏季空调的使用，所以植被的降温作用也同在夏季(按 6-9 月)量化效益，每年按 4 个月(122 天)计算，普通家庭 1 匹室内空调耗电  $0.74 \text{kWh}/(\text{台} \cdot \text{h})$ ，按某地平均电费 0.5 元/kWh 计算，则植被调节温度效益计算公式：

$$M = S \times 190 \text{ 台} \times 24 \text{ h} \times 0.74 \text{ kWh}/(\text{台} \cdot \text{h}) \times 0.58 \text{ 元/kWh} \times 122 \text{ 天} \quad (4-6)$$

式中：

S——区域绿地面积， $\text{hm}^2$ 。

## 二、水环境

水环境主要从城市面源污染控制进行评价。

海绵城市建设通过建造渗透和滞留设施，如绿色屋顶、生物滞留设施、下沉式绿地等设施，将雨水径流汇集到海绵设施中，由设施将径流中的污染物截留降解，大幅度降低城市地表径流污染浓度。

污染物去除公式：

$$Q_i = \alpha \cdot \beta \cdot \text{EMC} \cdot H \cdot F / 1000 \quad (4-7)$$

式中：

$\alpha$ ——年径流总量控制率；

$\beta$ ——对污染物的去除率；

EMC——径流中污染物的平均浓度， $\text{mg/L}$ ；

H——区域年均降雨量， $\text{mm}$ ；

F——区域汇水面积， $\text{m}^2$ 。

通过设施净化效益量化得到环境污染治理效益，采用修复费用法，以降雨径流中不同污染物(SS、COD、TN、TP)的降解量作为效益评价指标，用污染物的去

除值 ( $Q_i$ ) 与污染征收标准 ( $P_{\text{处理费}}$ ) 的乘积表示, 即:

$$M=Q_i \cdot P_{\text{处理费}} \quad (4-8)$$

式中:

$M$ ——径流污染物去效益, 元;

$P_{\text{处理费}}$ ——污染物处理费, 可查阅《环境保护税法实施条例》<sup>[70]</sup>, 元/ $m^3$ 。

### 三、固碳释氧

近 30 年来我国的碳排放持续增加, 2000 年后尤为显著。目前, 我国对能源的使用仍以化石能源, 且不同省区市的碳排放量和碳排放强度差异较大。这些因素都会对我国未来可持续发展构成威胁, 将使我国在较长时期内面临减排形势。十四五规划以来, 政府大力推进海绵城市建设项目, 以期让海绵城市理念助力实现“双碳”目标。

海绵城市建设对固碳释氧、净化空气、节能减排、滞尘等方面发挥着积极的作用<sup>[71]</sup>。固碳释氧是指通过绿色植物、土壤动物以及微生物对碳的固定和氧气释放的过程, 对缓和因经济快速发展而造成的温室效应具有决定性的作用<sup>[72]</sup>。国内有研究人员研究<sup>[73]</sup>, 在单位面积绿地固碳量中, 通过生物量方法和叶面积指数法测得每天每平方米为 6.86g 与 6.17g; 而释氧量分别每天每平方米为 5.08g 与 4.78g, 参考这一实验结果, 以绿地的固碳释氧进行类比估算, 因此, 取年固碳均值为 2.38kg/ $m^2$ , 年释氧均值为 1.79kg/ $m^2$ 。

#### (1) 固碳效益

固碳是指增加除大气之外的碳库的碳含量, 其固碳指标货币化方法有不少, 可用绿地成本法或碳税法<sup>[74]</sup>。碳税法是通过对二氧化碳排放而征收的相关税, 亦是全球范围内运用最多的方法, 因此该指标的效益可直接通过碳税市场价值法进行量化。

$$M=A \cdot C_{\text{固碳}} \cdot T \quad (4-9)$$

式中:

$M$ ——绿地固定二氧化碳的效益, 元/年;

$A$ ——绿地的面积,  $km^2$ ;

$C_{\text{固碳}}$ ——绿地年固碳量,  $t/km^2$ ;

$T$ ——碳税率, 采用环境经济学家经常采用的瑞典碳税为标准 (折合人民币 1200 元/ $t$ )。

#### (2) 释氧效益

释氧指的是植被通过光合作用将二氧化碳转换为氧气的过程, 其释氧指标货币化方法可用工业制氧法, 即按照工业氧的现价来进行计算<sup>[75]</sup>, 因此该指标的效

益可通过市场价值法进行量化。

$$M = A \cdot C_{\text{释氧}} \cdot I_0 \quad (4-10)$$

式中：

M——绿地释放氧气的效益，元/年；

A——绿地的面积， $\text{km}^2$ ；

$C_{\text{释氧}}$ ——绿地年释氧量， $\text{t}/\text{km}^2$ ；

$I_0$ ——工业氧平均价格，取 400 元/t。

#### 4.3.2.2 经济效益

经济效益主要从水资源方面进行评价。

##### (1) 污水再生利用率

按照《考核办法》的有关规定，要求污水的再生利用，增加本地水资源量。再生水可通过特定输水管网或者输水车配送到城市特定需要的位置，比如城市绿地、公园喷泉景观以及其他市政杂用水等，进而可提高污水再生利用率。污水再生利用效益量化主要是依靠再生水替代自来水的的使用，进而节约城市用水带来的效益，所以可通过市场价值法将该项指标实现量化，即：

$$M = Q_{\text{污水}} \cdot P_{\text{处理费}} \quad (4-11)$$

式中：

M——污水回用产生的效益，元/年；

$Q_{\text{污水}}$ ——污水回用量， $\text{m}^3$ ；

$P_{\text{处理费}}$ ——污水处理费，元/ $\text{m}^3$ 。

##### (2) 雨水资源利用率

海绵城市建设通过建造雨水渗透和疏导设施实现对雨水径流的利用，将所收集的雨水用于道路路面浇洒养护、公园绿地灌溉以及工农业用水等方面。该指标所带来的效益可通过影子价格法来实现量化，效益计算公式如下：

$$M = Q_{\text{雨水}} \cdot P_{\text{中水}} \quad (4-12)$$

式中：

M——雨水回用产生的效益，元/年；

$Q_{\text{雨水}}$ ——雨水回用量， $\text{m}^3$ ；

$P_{\text{中水}}$ ——城市中水平均价格，元/ $\text{m}^3$ 。

##### (3) 管网漏损控制

根据《考核办法》对于管网漏损率要控制在 12% 以下，然而在海绵城市各试点城市中，对供水管网漏损率控制得更低。该项指标效益可通过市场价格法，其效益是通过降低管网漏损率，减少供水资源的浪费。因此，效益计算公式如下：

$$M = \alpha \cdot P_{\text{自来水}} \cdot Q_{\text{供水}} \quad (4-13)$$

式中：

$M$ ——降低管网漏损率产生的效益，元/年；

$\alpha$ ——因建设海绵城市而提高管网漏损控制；

$P_{\text{自来水}}$ ——城市自来水平均价格，元/ $m^3$ ；

$Q_{\text{供水}}$ ——年供水量， $m^3$ /年。

#### 4.3.2.3 社会效益

##### 一、水安全

###### (1) 城市暴雨内涝灾害防治

建设海绵城市通过渗透设施能在一定程度上滞留雨水，达到削减径流峰值，推迟峰值的出现时间，极大缓解城市市政管网的运行压力，对防止城市内涝起显著的作用，极大程度上减少暴雨所带来的损失。城市暴雨内涝灾害防治效益通过替代工程法，计算公式如下：

$$M = C \cdot A \quad (4-14)$$

式中：

$M$ ——城市暴雨灾害防治效益，元/年；

$C$ ——单位面积年防洪防涝费用，元/（ $m^2 \cdot$ 年）；

$A$ ——海绵设施面积， $m^2$ 。

###### (2) 饮用水安全

海绵城市建设指标中的饮用水安全量化难度较大，只能通过定性描述，让公众意识到其重要性。

该项指标事关民众健康，直接影响到群众的民生福祉。但是我国在城市化发展的快速进程中，存在许多盲目的施工项目，不少工程项目后期废弃物的乱堆放对城市水生态环境造成了极大的破坏，许多建筑废弃物随雨水径流排入了湖泊河道，造成严重的环境恶化，使得水体生态严重被破坏。类似的情况还在化学工业、采矿、纺织等行业，其中存在部分企业将处理不达标的废水排入水体中，大量的污染物造成大部分河流的生态环境均受到了一定程度的破坏，造成河流沿线的城市饮用水均取自于受到污染的水体，这就可能导致许多传染性疾病的传播，比如产生慢性腹泻、腹痛、腹胀、疲乏、以及引发心血管疾病等。

水安全的提高可以改善居民的生活安全感和质量，增强居民对于水安全的保护意识，可以进一步提高生活环境和生活质量。

##### 二、显示度

显示度主要从连片示范效应进行评价。

目前,海绵城市的建设多采用的是雨水管理设施,这不仅能够提高群众对有关海绵设施的了解,并且增强宣传海绵城市相关理念,而且还强化了广大群众对环境保护意识。当下,我国部分城市的海绵城市建设正在推进中,多处试点城市结合当地实际情况,建设具有当地城市特点的示范项目,例如重庆市秀山县海绵改造工程选取了人行道、公园等公共基础设施,建设了海绵公园等工程,充分发挥山城重庆的地方特点。这不仅彰显当地的生态文明建设成果,而且对当地周边的房价提高有一定积极效果,提高城市竞争力,为城市带来一定经济效益。由此可见,海绵城市建设能带来一系列的良好示范效应。

#### 4.4 本章小结

本章结合我国海绵城市建设的特点,建立了海绵城市建设效益指标的货币化评价方法,主要小结如下:

(1)通过对海绵化所产生效益的科学识别,将海绵城市建设效益分为生态效益、经济效益和社会效益三类作为准则层;

(2)生态效益包括水生态、水环境、固氮释氧等一级指标。水生态包含年径流总量控制率、生态岸线恢复、地下水位、城市热岛效应等二级指标。水环境则从城市面源污染控制方面进行评价。固氮释氧将双碳理念有机结合,其中包含固氮效应和释氧效应两个方面。

(3)经济效益以水资源作为一级指标,从污水再生利用率、雨水资源利用率、管网漏损控制等二级指标进行量化。

(4)社会效益包括了水安全和显示度两个一级指标。其中,水安全中的城市暴雨内涝灾害防治二级指标采用了替代工程法来量化评价;显示度则从连片示范效应方面进行分析。

## 第五章 海绵设施成本-效益评价实例研究

### 5.1 研究区域概况

研究区为万州区双河口移民安置区海绵城市建设工程（一期）——移民组团片区，该项目通过海绵城市低影响开发设施，通过道路、广场、植被等生态系统对雨水的滞留和缓释作用，减少地表的雨水径流，降低因城镇化过程所产生的内涝事件概率，提高人民的生活质量，有利于万州区双河口移民安置区的可持续发展。项目的建设是万州区双河口移民安置区改善城市排水系统的重要措施，是在万州区双河口移民安置区纳入海绵城市建设试点城市后，积极解决城市排水系统存在的突出问题的具体实践，对完善万州区双河口移民安置区城市排水系统具有重要意义。

#### 5.1.1 场地概述

双河口移民安置区位于重庆市万州区中心城区南部龙宝组团范围内，其西连龙腾工业园区，南邻盐气化工基地，东邻红溪沟码头，北隔山脉与老城相望，是相对独立的居住综合区域。总规划面积为 5.00km<sup>2</sup>，距商业中心高笋塘 7.00km，距行政中心江南新区 7.00km，其中内含河道面积 53989 m<sup>2</sup>。万州区双河口移民安置区海绵城市建设工程（一期）设计范围为 3.14km<sup>2</sup>，常住人口为 2.4 万人，双河口片区现居住人口主要由三峡移民组成，如图 5-1 所示。

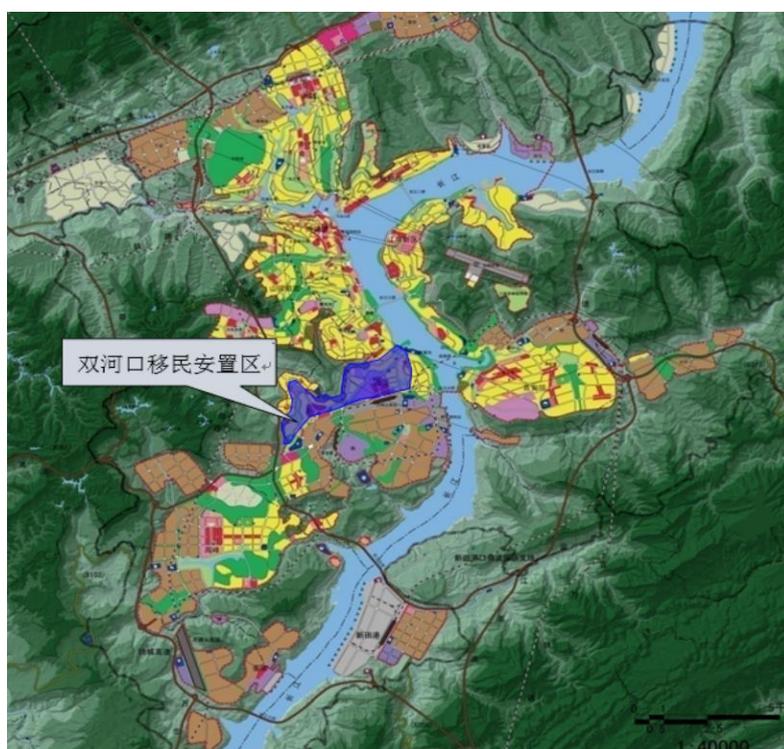


图 5-1 双河口移民安置区

### 5.1.2 气象与水文条件

万州区属亚热带季风湿润带，四季分明，日照充足，雨量充沛，夏长有伏旱，秋多绵雨；热量丰富，空气湿度大；但伏旱频繁，暴雨集中，给工农业生产造成负面影响。由于区内地形复杂，相对高差大，气候垂直变化显著，形成不同海拔高度的山地立体气候和山地多样性小气候。

通过 35 年的降雨数据可知，平均降水量约 1184mm，最大年降水量为 1635.20mm，最小年降水量为 842.10mm，两者相差 793.10mm。重庆万州地区的水丰富，年降雨量平稳，降雨量每年均能稳定在 1000mm 以上。

### 5.1.3 海绵设施选择

该项目总投资 14260 万元，对项目范围内，建设内容主要包括新建雨水花园、绿色屋顶等海绵设施，人行道、广场透水铺装改造以及完善相应景观工程。

主要的建设内容及规模：雨水花园：面积 1680m<sup>2</sup>，绿色屋顶：面积 4624m<sup>2</sup>，透水铺装：面积 157275m<sup>2</sup>。

## 5.2 海绵设施对径流污染物控制效果

通过对移民组团片区中的重庆三峡职业技术学院附近的雨水花园和透水铺装点进行多次采集，本研究采用径流中污染物的平均浓度（EMC）对其污染程度进行评估，海绵设施改造前后的不同污染物 EMC 见表 5-1 和表 5-2 所示，通过计算得出径流污染物去除量与污染物总质量，见表 5-3 所示。

表 5-1 海绵设施改造前不同污染物 EMC 表

		SS	COD	TN	TP
采 样 时 间	8 月	305	80	1.23	0.04
	9 月	30	70	1.55	0.11
	10 月	280	121	0.6	0.05
	平均值	205	90.4	1.13	0.07

表 5-2 海绵设施改造后不同污染物 EMC 表

		SS	COD	TN	TP
采 样 时 间	8 月	—	—	—	—
	9 月	40	15	0.36	0.02
	10 月	82	40	0.4	0.04

表 5-2 (续表)

	SS	COD	TN	TP
平均值	61	27.5	0.38	0.03

污染物总量控制量计算公式如下:

$$M = \sum EMC_i \cdot A_i \cdot P_i \quad (5-1)$$

式中:

$EMC_i$ ——某单一污染物的 EMC 值;  $g/m^3$ ;

$A_i$ ——不同的汇水面积,  $m^2$ ;

$P_i$ ——不同降雨强度场次降雨量,  $m$ 。

表 5-3 径流污染物去除量与污染物总质量

	径流污染降解量 (kg)	径流污染物总质量 (kg)	有效控制率 (%)
SS	730.1	1254.2	58.2
COD	346.2	595.5	58.1
TN	2.52	4.43	56.9
TP	0.2	0.32	62.5

根据万州区移民组团片区专项规划要求,海绵建设区域内年径流污染物削减率应达到 52.5%以上,因此,移民组团片区域内三峡职业技术学院海绵设施满足年径流污染削减要求。在碳减排方面,通过对 COD, TN 与 TP 的碳排放折算,该点相当于实现  $2.41 \times 10^2 kg$  的碳减排。

## 5.3 研究区 LCA 分析

### 5.3.1 清单分析

通过对研究区范围界定可知,所需的材料清单如表 5-4 所示。

表 5-4 研究区材料清单

类型	材料	厚度 (m)	面积 ( $m^2$ )	体积 ( $m^3$ )	密度 ( $t/m^3$ )	总质量 (t)
雨水花园	树皮填料	0.7	1680	1174	0.2	235
	种植土	0.4	1680	420	2.4	1612
	人工填料	0.7	1680	1176	2.36	2775
	砾石	0.3	1680	1560	2.66	1340

表 5-4 (续表)

类型	材料	厚度 (m)	面积 (m <sup>2</sup> )	体积 (m <sup>3</sup> )	密度 (t/m <sup>3</sup> )	总质量 (t)
雨水花园	PE 穿孔管 DN50	0.005	管长 2700m	0.67	0.95	6
	砂基透水 砖	0.06	157275	2704	1.87	176462
透水铺装	中砂	0.03	157275	1159	2	94364
	透水混凝 土	0.15	157275	5022	2	47182
	碎石	1.5	157275	6954	2.66	627527
	素土夯实	0.5	157275	3863	1.4	110091
	PE 穿孔管 DN50	0.005	管长 23286m	6.28	0.95	14
绿色屋顶	种植土	0.8	4624	3699	2.4	8878
	蓄水层	0.01	4624	46	0.95	44
	排水层	0.1	4624	462	2.66	1229
	阻根层	0.0005	4624	2.31	0.95	2
总计 (t)			1071761			

## 1) 原材料生产能耗计算

**绿色屋顶**

a.种植土: 由于对种植土的研究不足, 所以本研究采用与之相近的砂土来替代。由此可推算出绿色屋顶的种植土总能耗为:  $8878 \times 10^3 \times 600 \text{kJ/kg} = 5.33 \times 10^6 \text{MJ}$ 。

b.蓄水层与阻根层: 二者均主要通过聚合物材料组成, 因此可认为生产能耗与高聚乙烯能耗一致。由此可推算出绿色屋顶的蓄水层和阻根层总能耗为:  $46 \times 1.68 \times 10^8 \text{kJ/t} = 7.73 \times 10^6 \text{MJ}$ 。

c.排水层: 主要是鹅卵石组成, 本文认为生产能耗与石子一致, 因此可推算出绿色屋顶的排水层总能耗为:  $1229 \times 10^3 \times 900 \text{kJ/kg} = 1.11 \times 10^6 \text{MJ}$ 。

绿色屋顶原材料生产总能耗  $T_1 = 5.33 \times 10^6 + 7.73 \times 10^6 + 1.11 \times 10^6 = 1.42 \times 10^7 \text{MJ}$ 。

按照第三章的计算原则, 同理可得雨水花园原材料生产总能耗为:  $T_2 = 3.17 \times 10^6 \text{MJ}$ , 透水铺装原材料生产总能耗为:  $T_3 = 6.05 \times 10^8 \text{MJ}$ 。

研究区总能耗  $Q_1 = \sum T_i = 6.22 \times 10^8 \text{MJ}$ 。

## 2) 材料运输能耗

研究区建造所需的材料重质量为 1071761t, 采用公路运输, 运输距离为 30km,

公路运输的单位能耗为  $1836\text{kJ/t} \cdot \text{km}^{[61]}$ 。则计算可知运输能耗为  $Q_2=5.9 \times 10^7\text{MJ}$ 。研究区施工阶段建设原材料运输产生的柴油消耗量为  $1379266.2\text{kg}$ 。

### 3) 现场施工能耗

已知单位面积现场施工能耗为  $273\text{MJ/m}^{2[53]}$ ，研究区的面积为  $163579\text{m}^2$ ，由此计算可得现场施工总能耗为  $Q_3=4.46 \times 10^7\text{MJ}$ 。

### 4) 建设施工总能耗

研究区的总能耗  $= \sum Q_i = 7.25 \times 10^8\text{MJ}$ 。

### 5) 资源消耗量与污染物质排放量

以表 3-7 内容为标准，将研究区中，原材料生产能耗  $Q_1$  和现场施工能耗  $Q_3$  之和为  $6.67 \times 10^8\text{MJ}$ ，折算成能源消耗量为表 5-5 所示。

表 5-5 研究区施工能耗折算

资源名称	单位	数量
煤	kg	1.81E+07
天然气	m <sup>3</sup>	3.54E+05
电	kWh	1.44E+07
油	kg	2.65E+06

通过表 3-8、表 3-9、表 3-10、表 3-11、表 3-12 和表 3-13 的各种单位资源能耗，可得到研究区施工阶段的各种资源消耗和污染物排放量的清单，如表 5-6 所示。

表 5-6 研究区建设施工阶段的评价清单

名称	分类	INPUT	单位	数量
物料	雨水花园	树皮填料	t	235
		种植土	t	1612
		人工填料	t	2775
		砾石	t	1340
		PE 管材	t	6
		砂子	t	29194
		石灰石	t	13600
		粘土质原料	t	3130
		石膏	t	521
		透水铺装		

表 5-6 (续表)

名称	分类	INPUT	单位	数量
		水	t	4250
	透水铺装	碎石	t	658227
		PE 管材	t	14
物料		种植土	t	8878
	绿色屋顶	蓄水层	t	44
		排水层	t	1229
		阻根层	t	2
		煤	kg	1.93E+07
		天然气	m <sup>3</sup>	3.54E+05
自然资源	能量	电	kWh	1.46E+07
		油	kg	2.65E+06
		汽车柴油	kg	1.38E+06
	分类	OUTPUT	单位	数量
		CO <sub>2</sub>	kg	2.76E+07
		SO <sub>2</sub>	kg	1.71E+05
		CO	kg	1.48E+05
	气体污染物	CH <sub>4</sub>	kg	1.92E+05
		NO <sub>x</sub>	kg	1.09E+05
污染物		PM <sub>10</sub>	kg	6.12E+02
		HC	kg	2.21E+03
		N <sub>2</sub> O	kg	1.61E+02
	水体污染物	COD	kg	4.06E+04
		粉尘	kg	2.41E+05
	固体废弃物	固体弃物	kg	7.09E+05
		烟尘	kg	4.28E+02

运行维护阶段和报废拆除阶段的步骤同上文一致，报废拆除清单如表 5-7 所示。

表 5-7 研究区设施报废拆除阶段清单

名称	分类	INPUT	单位	数量
自然资源	能量	煤	kg	1.09E+06
		天然气	m <sup>3</sup>	2.13E+04
		电	kWh	8.68E+05
		油	kg	1.6E+05
		汽车柴油	kg	1.1E+06
	分类	OUTPUT	单位	数量
污染物	气体污染物	CO <sub>2</sub>	kg	4.59E+06
		SO <sub>2</sub>	kg	1.01E+04
		CO	kg	1.36E+04
		CH <sub>4</sub>	kg	1.08E+04
		NO <sub>x</sub>	kg	3.01E+04
		PM <sub>10</sub>	kg	4.9E+02
		HC	kg	1.77E+03
	水体污染物	N <sub>2</sub> O	kg	1.29E+02
		COD	kg	2.41E+03
	固体废弃物	粉尘	kg	8.08E+01
		固体弃物	kg	4.18E+04
		烟尘	kg	2.54E+01

### 5.3.2 研究区生命周期分析

将研究区的相关数据，写入 eBalance 软件中，如图 5-1 所示，通过软件内置的特征化计算过程可得到研究区分别在建设施工、运行维护和报废拆除的三个阶段结果，并将其结果进行汇总，如表 5-8 所示。

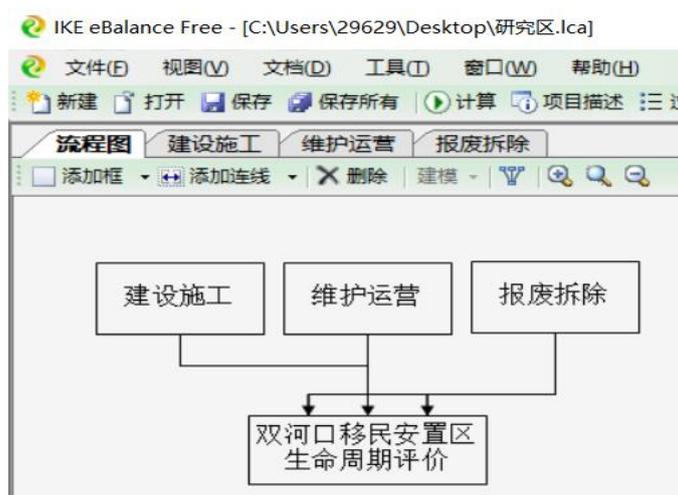


图 5-2 研究区建模流程图

表 5-8 研究区生命周期特征化结果

特征化指标名称	总量
CADP (fossil fuel) (kg Coal-R eq.)	9.802E+07
CADP (kg Coal-R eq.)	9.802E+07
GWP (kg CO <sub>2</sub> eq)	3.735E+07
CO <sub>2</sub> (kg)	3.219E+07
Water Use (kg)	4.250E+06
Waste Solids (kg)	7.508E+05
AP (kg SO <sub>2</sub> eq)	2.785E+05
SO <sub>2</sub> (kg)	1.811E+05
NO <sub>x</sub> (kg)	1.391E+05
RI (kg PM <sub>2.5</sub> eq)	3.196E+04
EP (kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq)	1.909E+04
COD (kg)	4.301E+04

根据结果，可得出研究区生命周期过程对环境可能造成的潜在影响排前四位的为：中国化石能源消耗潜值[CADP (fossil fuel)]，中国资源消耗潜值 (CADP)，全球变暖潜值 (GWP)，二氧化碳 (CO<sub>2</sub>)。

## 5.4 研究区效益量化

通过研究区的具体情况，按照本文第四章所总结的指标效益货币化体系，选取相关的指标对研究区进行效益计算。

### 5.4.1 研究区生态指标效益

#### (1) 年径流总量控制率

该指标的效益即为对年径流量的控制并利用，该项指标所产生的效益可认为是污水处理费的节约，研究区年均降雨量为 1184mm，一期面积为 3.14km<sup>2</sup>，对年径流总量控制率为 61.56%，万州区雨水处理均价为 2 元/m<sup>3</sup>，公式如下：

$$M=M_i \cdot Q=61.56\% \times 1184\text{mm}/\text{年} \times 3.14\text{km}^2 \times 2 \text{元}/\text{m}^3=457.7 \text{万}/\text{年}$$

#### (2) 生态岸线恢复

采用成果参考法结合修复费用法来量化修复后所产生的效益，对生态岸线的恢复面积为 5.3 万平方米，参考有关研究结论，全球对于保护森林资源的支付意愿是 112 美元/hm<sup>2</sup>。

$$M_{\text{生态岸线}}=A_{\text{恢复}} \cdot P_{\text{支付}}=5.3 \text{hm}^2 \times 112 \text{美元}/\text{hm}^2 \times 6.4=0.38 \text{万}/\text{年}$$

#### (3) 地下水位

该指标效益可认为是下渗雨水补充地下水的过程，对地下水位补充的效益可通过影子价格法来量化，透水铺装面积 157275 m<sup>2</sup>，绿地面积 6304 m<sup>2</sup>，本文认为二者提供了下渗途径，地下水资源均价近似等于自来水均价 3 元/t。

$$M_{\text{地下水}}=Q_{\text{下渗}} \cdot P_{\text{地下水}}=(0.1 \times 1184\text{mm} \times 163579\text{m}^2) \times 3 \text{元}/\text{t}=5.8 \text{万}/\text{年}$$

#### (4) 城市热岛效应

按照《考核办法》的有关规定，参考学习国外有关城市热岛效应类似的效益研究，发现可利用城市绿地湿地等降温特征，利用该特性替代夏季空调的使用，进而量化该指标的效益。根据相关研究<sup>[69]</sup>，结合利用成果参考法。

根据相关研究得出 1 公顷绿地在夏季中可从环境中吸收至少 8.2×10<sup>7</sup>J 的热量，与约 190 台空调 24h 的制冷效果相同，所以选用空调作为替代，利用降低相同温度的耗电费用等量量化成绿地调节温度的价值。研究区的绿地的面积可近似认为雨水花园与绿色屋顶的面积：6304m<sup>2</sup>。因为效益需按照夏季空调的使用，所以植被的降温作用也同在夏季(按 6-9 月)量化效益，每年按 4 个月(122 天)计算，普通家庭 1 匹室内空调耗电 0.74kWh/(台·h)，万州区平均电费 0.58 元/kWh，则植被调节温度效益计算公式：

$$M=S \times 190 \text{台} \times 24\text{h} \times 0.74\text{kWh}/(\text{台} \cdot \text{h}) \times 0.58 \text{元}/\text{kWh} \times 122 \text{天}=0.6304 \times 190 \text{台} \\ \times 24\text{h} \times 0.74\text{kWh}/(\text{台} \cdot \text{h}) \times 0.58 \text{元}/\text{kWh} \times 122 \text{天}=15 \text{万}/\text{年}$$

#### (5) 城市面源污染控制

该指标效益可认为减少了污水处理厂的工作负荷，将雨水径流汇聚到措施之中，进而通过设施将径流中的污染物截留降解，大幅度降低城市地表径流污染浓度。研究区年均降雨量为 1184mm，一期面积为 3.14km<sup>2</sup>，对多种年径流污染总量平均

去除率为 59%。

通过对相关污染物的调查,污费征收标准为:削减 SS 的成本为 0.2 元/(kg·m<sup>3</sup>), 削减 COD 的成本为 0.8 元/(kg·m<sup>3</sup>), 削减 TN 的成本为 1.528 元/(kg·m<sup>3</sup>), 削减 TP 的成本为 2.9 元/(kg·m<sup>3</sup>)。

$$M_1 = Q_i \cdot P_{\text{处理费}} = 58.2\% \times 61.56\% \times 1184\text{mm} \times 3.14\text{km}^2 \times 730.1\text{kg} \times 0.2 \text{ 元} / (\text{kg} \cdot \text{m}^3) / 1000 = 19.5 \text{ 万/年}$$

$$M_2 = Q_i \cdot P_{\text{处理费}} = 58.1\% \times 61.56\% \times 1184\text{mm} \times 3.14\text{km}^2 \times 346.2\text{kg} \times 0.8 \text{ 元} / (\text{kg} \cdot \text{m}^3) / 1000 = 36.9 \text{ 万/年}$$

$$M_3 = Q_i \cdot P_{\text{处理费}} = 56.9\% \times 61.56\% \times 1184\text{mm} \times 3.14\text{km}^2 \times 2.52\text{kg} \times 1.528 \text{ 元} / (\text{kg} \cdot \text{m}^3) / 1000 = 0.5 \text{ 万/年}$$

$$M_4 = Q_i \cdot P_{\text{处理费}} = 62.5\% \times 61.56\% \times 1184\text{mm} \times 3.14\text{km}^2 \times 0.2\text{kg} \times 2.9 \text{ 元} / (\text{kg} \cdot \text{m}^3) / 1000 = 0.1 \text{ 万/年}$$

$$M = \sum M_i = 57 \text{ 万/年}$$

#### (6) 固碳效益

以实验结果为标准<sup>[73]</sup>对绿地的固碳释氧进行类比估算,研究区的绿地的面积可近似认为为雨水花园与绿色屋顶的面积,取年固碳均值为 2.38kg/m<sup>2</sup>,年释氧均值为 1.79kg/m<sup>2</sup>。

碳税法是通过对二氧化碳排放而征收的相关税,其值为 1200 元/t,亦是全球范围内运用最多的方法,因此该指标的效益可以直接通过碳税市场价值法进行量化。

$$M = A \cdot C_{\text{固碳}} \cdot T = 6304 \text{ m}^2 \times 2.38\text{kg/m}^2 \times 1.2 \text{ 元/kg} = 1.8 \text{ 万/年}$$

#### (7) 释氧效益

释氧指标货币化方法可用工业制氧法,即按照工业氧的现价来进行计算<sup>[75]</sup>,其值为 400 元/t,因此该指标的效益可通过市场价值法进行量化。

$$M = A \cdot C_{\text{释氧}} \cdot I_0 = 6304 \text{ m}^2 \cdot 1.79\text{kg/m}^2 \cdot 400 \text{ 元/t} = 0.45 \text{ 万元/年}$$

### 5.4.2 研究区经济指标效益

#### (1) 雨水资源利用率

该指标所带来的效益可通过影子价格法来实现量化,认为对年径流控制即为雨水效益,根据有关查询,城市中水均价为 1.1 元/t,计算公式如下:

$$M = Q_{\text{雨水}} \cdot P_{\text{中水}} = 61.56\% \times 1184\text{mm} \times 3.14\text{km}^2 \times 1.1 \text{ 元/t} = 251 \text{ 万元/年}$$

#### (2) 管网漏损控制

根据《考核办法》对于管网漏损率要控制在 12%以下。该项指标效益可通过市

场价格法,其效益是通过降低管网漏损率,减少供水资源的浪费。根据该地区的人口数据和 2020 年人均每日用水为  $1.1\text{m}^3$  可知,该地供水量为  $2.64$  万  $\text{m}^3/\text{天}$ ,自来水均价为  $3$  元/ $\text{t}$ ,因建设海绵城市预计能提高  $1\%$ 的管网漏损,其效益计算公式如下:

$$M=\alpha \cdot P_{\text{自来水}} \cdot Q_{\text{供水}}=1\% \times 3 \text{ 元/t} \times 2.64 \text{ 万 m}^3/\text{天} \times 365 \text{ 天}=29 \text{ 万元/年}$$

### 5.4.3 研究区社会指标效益

#### (1) 城市暴雨内涝灾害防治

建设海绵城市通过渗透设施能在一定程度上滞留雨水,达到削减径流峰值,推迟峰值的出现时间,极大缓解城市市政管网的运行压力,对防止城市内涝起显著的作用,极大程度上减少暴雨所带来的损失。城市暴雨内涝灾害防治效益通过替代工程法。目前万州区未有防洪防涝费用费,故参考《北京市征收防洪工程建设维护管理费暂行规定》,其规定每年居民为  $2$  元/ $\text{m}^2$ ,非居民为  $20$  元/ $\text{m}^2$ ,本文取其均值  $11$  元/ $\text{m}^2$ ,计算公式如下:

$$M=C \cdot A=11 \text{ 元/}(\text{m}^2 \cdot \text{年}) \times 163579\text{m}^2=180 \text{ 万/年}$$

#### (2) 饮用水安全

水是生命之源,我们不可或缺的部分,因此保证饮用水的安全,也是在保护我们的身体不受到更多伤害。水安全的提高可改善居民的生活安全感和质量,增强居民对于水安全的保护意识,可进一步提高生活环境和生活质量。海绵城市的建设让群众了解到饮用水安全,起到一定的宣传作用。

#### (3) 连片示范效应

通过海绵城市的建设,让广大群众认识了有关知识,起到了一定的宣传作用形成连片示范效应。这不仅对研究区周边的房价起到了良好的作用,而且为该地区海绵城市建设二期打下基础。

## 5.5 本章小结

本章以万州区双河口移民安置区海绵城市建设工程(一期)——移民组团片区作为研究区,进行了海绵设施生命周期和海绵指标效益货币化分析,主要结论如下:

(1) 通过第三章所构建的生命周期计算模型,对研究区的雨水花园、绿色屋顶和透水铺装进行生命周期分析后得到海绵城市建设过程中的环境成本,其中最大的环境污染物为二氧化碳,排放量为  $196.79\text{kg}/\text{m}^2$ 。

(2) 利用第四章建立的指标效益货币化评价方法,对研究区海绵建设效益进行分析,结果表明,研究区的综合效益为  $998.13$  万元/年,其中生态指标效益为  $538.13$  万元/年,经济指标效益为  $280$  万元/年,社会指标效益  $180$  万元/年。生态指

标效益分别约为经济指标效益、社会指标效益的 1.9 倍、2.99 倍，生态效益显著。在海绵城市建设过程中，不仅对当地居民起到了良好的宣传作用，也发挥了连片示范效应，增进了城市与自然的生态融合。其产生的综合效益远大于投入成本。

## 第六章 结论与展望

### 6.1 结论

本文将 LCA 方法应用于海绵城市绩效评价,提出了基于碳排放的海绵城市建设效益评价方法,通过特征化过程,可得到海绵设施在建设过程中的环境成本;再选取相关海绵指标,建立有关指标效益量化的方法,构建成本效益分析的评价体系,主要得到以下结论:

(1) 海绵设施生命周期评价主要分为目标与范围界定、清单数据分析、影响评价和结果解释等四个步骤,其生命周期成本包括建设成本、运行维护成本和报废拆除成本等三方面。通过生命周期分析对比,在环境成本方面,海绵城市理念开发的碳排放要低于传统理念开发,相同面积的区域,海绵城市建设模式的  $\text{CO}_2$  排放量低于传统城市建设模式 22%以上,其建设成本更低。海绵城市建设模式的优势要明显大于传统城市建设模式。

(2) 以双碳目标为切入点,结合我国海绵城市建设的特点,建立了海绵城市建设效益货币化评价方法。此方法对海绵化所产生效益进行了科学识别,以生态效益、经济效益和社会效益三个维度作为准则层,以生态、水环境、固氮释氧、水资源、水安全和显示度为一级指标,并以年径流总量控制率、生态岸线恢复、污水再生利用率、雨水资源利用率等作为二级指标,构建了基于成本效益分析的海绵城市评价体系。

(3) 以万州区双河口移民安置区海绵城市建设工程(一期)——移民组团片区为研究区,通过已构建完成的生命周期计算模型,对研究区的雨水花园、绿色屋顶和透水铺装进行生命周期成本分析,得到研究区建设过程中的环境成本,换算其中最大的环境污染物( $\text{CO}_2$ ),排放量为  $196.79\text{kg}/\text{m}^2$ 。

(4) 对万州区双河口研究区海绵城市建设效益进行了货币化分析,得到研究区的综合效益为 998.13 万元/年,其中生态指标效益 538.13 万元/年,经济指标效益 280 万元/年,社会效益 180 万元/年。结果表明,生态指标效益分别约为经济指标效益、社会指标效益的 1.9 倍、2.99 倍,生态效益显著。对 8-10 月研究区特定点位海绵设施处理的水质监测结果表明,SS、COD、TN 和 TP 等污染物的去除量分别为  $730.1\text{kg}$ 、 $346.2\text{kg}$ 、 $2.52\text{kg}$  和  $0.2\text{kg}$ ,经折算后,相当于实现碳减排  $2.41 \times 10^2\text{kg}$ 。海绵城市的建设在一定程度上促进了双碳目标的实现。

## 6.2 展望

海绵城市建设的成本效益量化体系鲜有人研究，目前尚无统一标准。本文在指标效益量化分析中，因海绵城市建设效益所涉及的经济、生态、社会等三个方面覆盖内容较广，故本文构建的成本效益量化体系具有一定局限性，仍存在不足之处，需进行更深入的研究。

(1) 未考虑海绵城市建设在改善城市景观、提升经济活力等方面的价值。对于效益量化的办法中，仅定性评价的效益指标还需要深入研究，探寻科学的方法对其进行货币化分析，完善所构建的效益量化评价体系。

(2) 评价结果存在一定偏差，需要大量的样本（或实例）数据进行印证。

## 致 谢

论文完成之际，我也即将从重庆交通大学毕业。这三年读研岁月，在生活、学习亦或者是科研中，我都经历与懂得许多，让我更成熟。回顾这三年的时光，我的点滴进步都离不开诸多老师、同学和亲朋好友的关心、支持和帮助，借此机会对他们表达最真挚的谢意。

首先，由衷感谢我的导师蒋彬副教授，在研究生期间，蒋老师治学严谨、为人和善，尤其是对科研敏锐的洞悉力，在我科研学习中提供了细心的指导，给予我很大的帮助，让我深深敬佩。在我论文的撰写与修改过程中给我提出了许多有价值的意见。蒋老师求实的专业精神、真诚热情的待人方式，都对我产生了良好的影响、使我受益终生。在此向蒋老师致以诚挚的感谢和祝福！

其次，我要感谢课题组的其他老师对我的谆谆教导，特别是陈垚老师、袁绍春老师与刘臻老师，无论老师们工作多繁杂，总能安排时间来听取我们的课题进展汇报并指出存在问题，还为我们思考解决问题的思路，对我的课题给予了莫大帮助，让我能在规定时间内顺利完成课题任务。

再次，感谢课题组的其他同学唐杰、程麒铭、叶利兰、刘玲玲、魏劲、黄恒粤、黄崇锐和吴攀，在课题研究及就业过程中，大家相互分享有价值、有意义的经验，让我受益良多，这三年来彼此鼓励打气，让我考公的道路上，永不言弃；感谢我的室友余宗泰、颜渝森和曾晨宫，师弟刘中亚和黎永燊以及研习室的其他同学们，让我这三年学习到了许多科研之外的东西。青山不改，绿水长流，衷心祝愿你们前途似锦，愿我们友谊长存。

同时，感谢所有的文献作者，在课题展开过程中，参考了大量的文献资料，是你们的工作给了我启示，给了我研究工作的基础。

最后，感谢参与我论文评审与答辩工作的老师与专家们，感谢这些老师对于我论文的耐心指导和批评指正，这都将是我前行的指路明灯。再次由衷感谢，愿老师们生活顺心，工作顺利，阖家欢乐！

## 参考文献

- [1] 韩煦,赵亚乾.海绵城市建设中“海绵体”的开发[J].地球科学与环境学报,2016,38(05):708-714.
- [2] 孙芳.基于海绵城市的城市道路系统化设计研究[D].西安建筑科技大学,2015.
- [3] 罗莎.济南市城市水系统可持续性评价研究[D].济南大学,2019.
- [4] 俞孔坚,李迪华,袁弘,等.“海绵城市”理论与实践[J].城市规划,2015,39(06):26-36.
- [5] 董淑秋,韩志刚.基于“生态海绵城市”构建的雨水利用规划研究[J].城市发展研究,2011,18(12):37-41.
- [6] Yin D, Chen Y, Jia H, et al. Sponge city practice in China: A review of construction, assessment, operational and maintenance[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 280: 124963.
- [7] 穆聪.海绵城市低影响开发设施调控效果及综合效益研究[D].西安理工大学,2020.
- [8] 覃光旭,李文杰,李涛,等.基于规划管控的海绵城市常态化管理模式研究[J].中国给水排水,2021,37(12):50-54.
- [9] 张涵.综合评价视角下城市山体公园海绵化改造设计研究[D].山东农业大学,2021.
- [10] Tan S, Yang J, Yan J, et al. A holistic low carbon city indicator framework for sustainable development[J]. *Applied Energy*, 2017, 185: 1919-1930.
- [11] 张洁.基于雨洪安全的城市绿地量化研究[D].北京林业大学,2013.
- [12] Geng R, Sharpley A N. A novel spatial optimization model for achieve the trad-offs placement of best management practices for agricultural non-point source pollution control at multi-spatial scales[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 234: 1023-1032.
- [13] Raei E, Alizadeh M R, Nikoo M R, et al. Multi-objective decision-making for green infrastructure planning (LID-BMPs) in urban storm water management under uncertainty[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 579: 124091.
- [14] Yang W, Zhang J, Mei S, et al. Impact of antecedent dry-weather period and rainfall magnitude on the performance of low impact development practices in urban flooding and non-point pollution mitigation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 320: 128946.
- [15] Loperfido J V, Noe G B, Jarnagin S T, et al. Effects of distributed and centralized stormwater best management practices and land cover on urban stream hydrology at the catchment scale[J]. *Journal Of Hydrology*, 2014, 519: 2584-2595.
- [16] Matthews T, Lo A Y, Byrne J A. Reconceptualizing green infrastructure for climate change adaptation: Barriers to adoption and drivers for uptake by spatial planners[J]. *Landscape and urban planning*, 2015, 138: 155-163.
- [17] Green D, O'donnell E, Johnson M, et al. Green infrastructure: The future of urban flood risk

- management?[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 2021, 8(6): e1560-e1560.
- [18] Akosua Boadu Anie and Adeshola Ilemobade. Conventional and Water Sensitive Urban Design (WSUD) within a greenfield township development[J]. Civil Engineering : Magazine of the South African Institution of Civil Engineering, 2020, 28(5) : 21-27.
- [19] Xiong H X, Sun Y F, Ren X W. Comprehensive Assessment of Water Sensitive Urban Design Practices based on Multi-criteria Decision Analysis via a Case Study of the University of Melbourne, Australia[J]. Water , 2020, 12(10) : 2885-2885.
- [20] Lashford C, Rubinato M, Cai Y, et al. SuDS & sponge cities: a comparative analysis of the implementation of pluvial flood management in the UK and China[J]. Sustainability, 2019, 11(1): 213-227.
- [21] Fraga J P R, Okumura C K, Guimarães L F, et al. Cost-benefit analysis of sustainable drainage systems considering ecosystems services benefits: Case study of canal do mangue watershed in Rio de Janeiro city, Brazil[J]. Clean Technologies and Environmental Policy , 2022, 24(2): 695-712.
- [22] Mahoney C T, Moshier S J, Keane T M, et al. Heightened healthcare utilization & risk of mental disorders among Veterans with comorbid opioid use disorder & posttraumatic stress disorder[J]. Addictive Behaviors , 2021, 112: 106572.
- [23] Mannina G, Butler D, Benedetti L, et al. Greenhouse gas emissions from integrated urban drainage systems: where do we stand?[J]. Journal of Hydrology, 2018, 559: 307-314.
- [24] Liu J, Wang J, Ding X, et al. Assessing the mitigation of greenhouse gas emissions from a green infrastructure-based urban drainage system[J]. Applied Energy, 2020, 278: 115686.
- [25] Kavehei E, Jenkins G A, Adame M F, et al. Carbon sequestration potential for mitigating the carbon footprint of green stormwater infrastructure[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 94: 1179-1191.
- [26] Sousa M R C D, Montalto F A, Spatari S. Using Life Cycle Assessment to Evaluate Green and Grey Combined Sewer Overflow Control Strategies[J]. Journal of Industrial Ecology, 2012, 16(6): 901-913.
- [27] Bevilacqua P, Mazzeo D, Bruno R, et al. Surface temperature analysis of an extensive green roof for the mitigation of urban heat island in southern mediterranean climate[J]. Energy & Buildings, 2017, 150: 318-327.
- [28] He Y, Yu H, Dong N, et al. Thermal and energy performance assessment of extensive green roof in summer: A case study of a lightweight building in Shanghai[J]. Energy & Buildings, 2016, 127: 762-773.

- [29] 张毅川,王江萍.国外雨水资源利用研究对我国“海绵城市”研究的启示[J].资源开发与市场,2015,31(10):1220-1223+1272.
- [30] 严飞.海绵城市建设中水系规划设计的思考与措施[J].给水排水,2016,52(07):54-56.
- [31] 李萌萌,陈亮,郭祺忠,等.海绵城市及不同设施建设效益的专家问卷调查研究[J].中国给水排水,2021,37(17):107-114.
- [32] 满莉,毛依娜.我国海绵城市建设商业模式研究——基于美、德两国的经验借鉴[J].地方财政研究,2016(07):105-112.
- [33] 高玉琴,陈佳慧,王冬冬,等.海绵城市低影响开发措施综合效益评价体系及应用[J].水资源保护,2021,37(03):13-19.
- [34] 文思敏,许申来,曾思育,等.海绵城市 LID 设施系统建设的生态效益评价研究[J].给水排水,2020,56(S1):251-255.
- [35] 张辰.上海市海绵城市建设指标体系研究[J].给水排水,2016,52(06):52-56.
- [36] 乔爽,李劲松.基于 Logistic 回归的水资源利用效率评估方法研究[J].吉林水利,2015(05):25-27+32.
- [37] 孙静.北京市非传统水资源利用潜力及效益综合评价研究[D].中国水利水电科学研究院,2007.
- [38] 黄丽娟,张鹏.海绵城市绩效评价的指标权重设定分析[J].绿色科技,2016(22):117-122.
- [39] 孙文靖.海绵城市建设效益量化及综合评价[D].西安理工大学,2020.
- [40] 马越,甘旭,邓朝显,等.海绵城市考核监测体系涉水核心指标的评价分析方法探讨[J].净水技术,2016,35(04):42-51.
- [41] 閻超成.海绵城市评价体系构建及应用[D].东南大学,2017.
- [42] 邓南圣,王小兵.生命周期评价[M].化学工业出版社,2003.
- [43] 杨建新,王如松.生命周期评价的回顾与展望[J].环境科学进展,1998,6(02):22-29.
- [44] 闫笑.海绵城市绿色基础设施的生命周期评价[D].哈尔滨工业大学,2020.
- [45] 席德立,彭小燕.LCA 中清单分析数据的获得[J].环境科学,1997,18(05):86-89+98.
- [46] 郑秀君,胡彬.我国生命周期评价(LCA)文献综述及国外最新研究进展[J].科技进步与对策,2013,30(06):155-160.
- [47] 芦琳.两种典型城市雨水 LID 技术生命周期评价研究[D].北京建筑大学,2013.
- [48] 姜金龙,吴玉萍,马军,等.生命周期评价的技术框架及研究进展[J].兰州理工大学学报,2005,31(04):23-26.
- [49] 杨飞.建筑给水排水系统生命周期评价(LCA)方法研究[D].西安建筑科技大学,2008.
- [50] 杨健,吴敏.3 种活性污泥法处理工艺的生命周期能耗分析[J].上海环境科学,2001,12(20):582-585.

- [51] ISO 14040. Life Cycle Assessment--Principles and Framework. Geneva: International Organization for Standardization, 1997.
- [52] 胡祥铮.基于LCA和LCC的不同发电方式可持续性评价及案例研究[D].东北大学,2017.
- [53] W.F.欧文.污水处理能耗与能效[M].章北平,车武,译.北京:能源出版社,1989.
- [54] 吴敏,杨健.普通生物滤池处理工艺的生命周期能耗分析[J].中国给水排水,2001,17(06):69-72.
- [55] 李翔.城市住宅(区)建筑能耗的生命周期评价方法研究[D].华中科技大学,2005.
- [56] 戎贵文,李姗姗,甘丹妮,等.不同LID组合对水质水量影响及成本效益分析[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(01):21-29.
- [57] Adalberth K. Energy use during the Life Cycle of Single-Unit Dwellings: Examples[J]. Building & Environment, 1997, 32(4): 321-329.
- [58] Scheuer C, Keoleian G A, Reppe P. Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modeling challenges and design implications[J]. Energy & Buildings, 2003, 35(10).
- [59] 陈士明,刘正乾.塑料与纸包装材料的生命周期评价研究[J].南昌航空工业学院学报,2000,14(03):82-84.
- [60] 谷立静.基于生命周期评价的中国建筑行业环境影响研究[D].清华大学,2009.
- [61] 王寿兵,杨建新,胡聘.生命周期评价方法及其进展[J].上海环境科学,1998,17(11):7-10.
- [62] 李芳,张学敏,葛蕴珊,等.甲醇柴油与生物柴油常规污染物的对比研究[J].农机化研究,2009,31(07):218-222.
- [63] 杨建新.产品生命周期评价方法及应用[M].产品生命周期评价方法及应用,2002.
- [64] 龙晨程.建筑小区雨水“渗透-排放一体化”技术性能与应用研究[D].北京工业大学,2010.
- [65] Kavehei E, Jenkins G A, Adame M F, et al. Carbon sequestration potential for mitigating the carbon footprint of green stormwater infrastructure[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 94(1364-0321): 1179-1191.
- [66] 刘浩.土地整理项目后效益测算研究[D].华中农业大学,2010.
- [67] 赵世明,赵锂,王耀堂,等.《建筑与小区雨水利用工程技术规范》部分内容的确定[J].给水排水,2007(04):117-120.
- [68] Haghani I, Shokohi T, Hajheidari Z, et al. Comparison of Diagnostic Methods in the Evaluation of Onychomycosis[J]. Mycopathologia, 2013, 175(3-4): 315-321.
- [69] 李锋,王如松.城市绿色空间生态服务功能研究进展[J].应用生态学报,2004,17(03):527-531.
- [70] 中华人民共和国国务院.中华人民共和国环境保护税法实施条例[M].北京:中国法制出版社,2018.

- [71] 王新军,曹磊,王燕,等.苏南城市中心区屋顶绿化适建性及生态价值评价[J].南京林业大学学报(自然科学版),2017,41(06):153-157.
- [72] 冷平生,杨晓红,苏芳,等.北京城市园林绿地生态效益经济评价初探[J].北京农学院学报,2004,19(04):25-28.
- [73] 勾玉莹,苏德荣,陈思佳,等.基于生物量的高尔夫球场草坪固碳释氧量分析[J].草原与草坪,2013,33(02):41-45.
- [74] 张洪涛,徐向舟,曹健,等.城市透水面集水效益评价研究——以大连市为例[J].水土保持通报,2010,30(04):163-166.
- [75] 孙静月.城市低影响开发设施效益量化研究[D].武汉大学,2018.

## 攻读学位期间取得的研究成果

### 一、攻读硕士学位期间发表的论文

1. 蒋彬,薛岳.工业废水与生活污水合并处理工程的改造与应用[J].中国给水排水,2020,36(08):92-95.

2. 薛岳,陈垚,甘春娟,唐杰,刘臻.生物炭对生物滞留设施运行性能的影响研究进展[J].应用化工,2022,51(01):206-211.

### 二、攻读硕士学位期间参与的项目

1. 四川省内江市东兴区畜禽粪污资源化利用整县推进项目

2. 重庆市排水调研项目

3. 江苏省昆山市森林公园海绵化改造工程效益评估