

# 基于系统动力学的海绵型装配式道路增量成本效益

郭爱<sup>1,2</sup>, 黄淑萍<sup>3</sup>, 张杰辉<sup>1</sup>, 陈石玮<sup>1</sup>

(1. 福建理工大学 管理学院, 福建 福州 350118;

2. 福州软件职业技术学院 智能建造产业学院, 福建 福州 350211;

3. 福建理工大学 建筑与城乡规划学院, 福建 福州 350118)

**摘要:** 基于系统动力学的理论, 将海绵型装配式道路与传统现浇混凝土道路进行对比, 构建了海绵型装配式道路增量成本效益的因果关系图和存量流量图。根据实际案例进行模型仿真, 从增量效益、增量成本和增量成本效益3个方面对海绵型装配式道路的增量成本效益进行了详细分析。研究结果表明, 所建立的模型有效支持了海绵型装配式道路增量成本效益的综合分析, 提供了评估其可行性和增量成本效益的新思路, 对海绵型装配式道路的推广应用具有促进作用。

**关键词:** 装配式道路; 增量效益; 增量成本; 海绵型; 系统动力学

中图分类号: TU997

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2025)03-0292-07

## Research on incremental cost-effectiveness of sponge-type prefabricated roads based on system dynamics

GUO Aihe<sup>1,2</sup>, HUANG Shuping<sup>3</sup>, ZHANG Jiehui<sup>1</sup>, CHEN Shiwei<sup>1</sup>

(1. School of Management, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Intelligent Construction Industry College, Fuzhou Software Technology Vocational College, Fuzhou 350211, China;

3. School of Architecture and Urban Rural Planning, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** Based on the theory of system dynamics, the sponge-type prefabricated roads are compared with traditional cast-in-place concrete roads, and the causal relationship diagrams and stock flow diagrams for the incremental cost-effectiveness are constructed of sponge-type prefabricated roads. According to the model simulation analysis based on actual cases, the incremental cost-effectiveness of sponge-type prefabricated roads is studied in detail from three aspects: incremental benefits, incremental costs, and incremental cost-effectiveness. Results indicate that the model established effectively supports the comprehensive analysis of the incremental cost-effectiveness of sponge-type prefabricated roads, provides new ideas for evaluating their feasibility and incremental cost-effectiveness, and has a promoting effect on the promotion and application of this type of prefabricated roads.

**Keywords:** prefabricated roads; incremental benefits; incremental cost; sponge-type; system dynamics

随着城市化进程的不断推进, 传统道路建设面临诸多挑战, 存在如施工占地周期长、路面排水不畅、热岛效应严重等问题。海绵型装配式道路作为一种新兴的道路建设技术, 因其良好的排水能力和生态恢复功能成为解决这些问题的有效方案。海绵型装配式道路可以对雨水进行收集、渗

透和净化, 以达到改善城市生态环境、缓解城市内涝的目的。然而海绵型装配式道路建设的实际推广应用还需考虑其成本和效益。在海绵型装配式道路成本效益研究方面, 刘成成结合了直觉模糊理论与灰色理论构建基于灰色直觉模糊综合评价的透水铺装综合效益评价模型<sup>[1]</sup>。李萌萌针对

收稿日期: 2024-08-06

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2022J05191)

第一作者: 郭爱(1991—), 女, 福建建阳人, 硕士研究生, 研究方向: 工程经济与项目管理。

通信作者: 黄淑萍(1990—), 女, 福建仙游人, 副教授, 博士, 研究方向: 城市规划、风景园林与工程管理。

海绵城市雨水利用技术提出一套计算其经济、生态和社会效益的方法,并构建了雨水利用技术综合评价体系<sup>[2]</sup>。沈太极采用模糊综合评价法比较分析了透水铺装和非透水铺的综合效益,分析显示透水铺装优于非透水铺装的综合效益<sup>[3]</sup>。杨亮等提出一种装配式预制道路板制作及施工方法并分析了其综合效益<sup>[4]</sup>。然而,当前关于海绵型装配式道路增量成本效益的研究分析尚显不足,鉴于此,本研究采用系统动力学的理论框架,对比分析海绵型装配式道路与传统道路,构建了海绵型装配式道路增量成本效益的因果关系图和存量流量图;并结合实际案例,基于增量效益、增量成本、增量成本效益3个方面,通过模型仿真对海绵型装配式道路的增量成本效益进行了定量评估,以期对海绵型装配式道路的可行性与增量成本效益分析提供新的研究视角。

## 1 海绵型装配式道路增量成本效益

### 1.1 海绵型装配式道路概述

海绵型装配式道路由装配式道路基层、透水

沥青面层和储水装置组成,它融合了海绵城市与装配式建筑的设计理念,不仅实现了雨水的有效管理和地表径流的减少,也显著提升了道路建设的效率与质量。

装配式道路基层构件尺寸为 $1\ 000\ \text{mm} \times 1\ 000\ \text{mm} \times 450\ \text{mm}$ ,内含混凝土、钢筋网及传力杆。混凝土强度C60,钢筋网由 $\Phi 10\ \text{mm}$ 的HRB500钢筋构成,传力杆由 $\Phi 20\ \text{mm}$ 光圆钢筋组成。基层的竖向四周均设有由波纹板组成的预埋传力杆槽,装配式道路基层主要用于承重。为了提供雨水下渗通道、改善道路的防滑性与车辆的行驶稳定性并减少行驶过程中产生的噪音<sup>[5]</sup>,道路面层采用40 mm细粒式透水沥青混合料进行铺设,雨水可快速下渗至道路基层并通过相连的纵向排水管收集于存储装置中,实现高效集蓄与利用。如图1所示,储水装置为FRP地下储罐,具备调节和储存雨水的功能。该储罐罐壁厚度为10 mm;罐顶中央设置一个直径150 mm的储罐配件,作为雨水的入口和出口。相关试验结果表明,FRP地下储罐在承受交通荷载方面表现出良好的可靠性<sup>[6]</sup>。

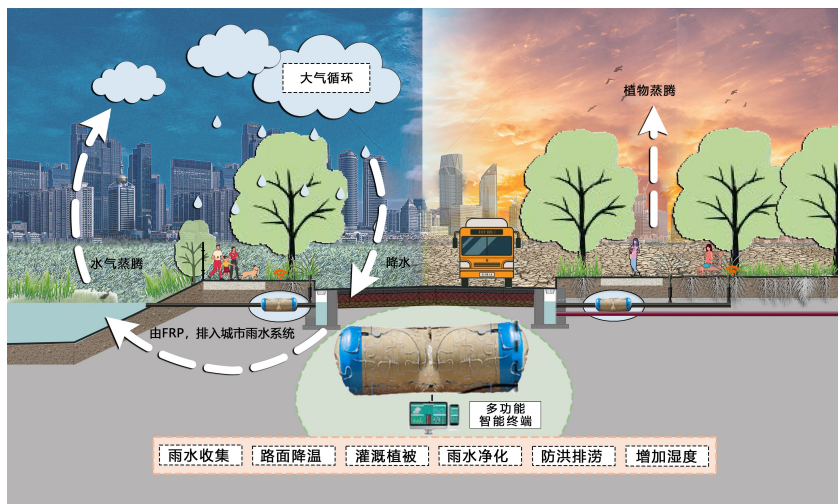


图1 储水装置系统图

Fig.1 System diagram of water storage device

### 1.2 海绵型装配式道路的增量成本

增量成本在经济学中被理解为边际成本的一种,是指采取不同决策方案时所产生的成本差值,其中心思想是以一种方案为基准进行比较,两个备选方案的成本差额即为增量成本<sup>[7]</sup>。将这一思想引入海绵型装配式道路中,以传统现浇混凝土道路为基准,对比海绵型装配式道路建设模式和传统道路建造模式,各阶段增加的成本投入之

和为海绵型装配式道路增量成本。海绵型装配式道路增量成本可以划分为增量建设成本和增量运营维护成本。因海绵型装配式道路与传统道路在拆除报废阶段的成本差异不大<sup>[8]</sup>,因此本研究未考虑该阶段的增量成本。

### 1.3 海绵型装配式道路的增量效益

海绵型装配式道路的增量效益是指海绵型装配式道路建设和应用相较于传统道路建设方

式所带来的额外效益。结合海绵城市建设的绩效考核指标,从经济学角度分析,可以将其划分为经济增量效益、生态增量效益和社会增量效益 3 个方面。

(1)经济增量效益:在项目建设及运行阶段,采用海绵型装配式道路所增加的经济回报,具体包括雨水回用效益、缓解水资源紧缺的效益、减少管网运行费用、减少污水处理费用。

(2)生态增量效益:涵盖了净化水质效益、增加大气湿度效益和防洪排涝效益。这些效益展示了海绵型装配式道路对生态环境的积极贡献,改善了生态系统的健康和功能。

(3)社会增量效益:海绵型装配式道路因其优良的雨水管理性能和快速施工特点,具有降低

周边噪声、提高居住舒适度以及增强城市美观度等社会增量效益。然而,这些社会效益往往难以量化,因此,本研究主要关注海绵型装配式道路在碳减排方面的社会效益,具体包括雨水回用碳减排效益、径流削减碳减排效益以及雨水净化碳减排效益。

## 2 系统动力学模型构建

### 2.1 构建因果关系模型

将模型分为经济增量效益、生态增量效益、社会增量效益、增量成本 4 个子系统,并根据相互作用的变量构建因果关系,进一步分析各变量之间相互作用关系的反馈类型,因果关系如图 2 所示。

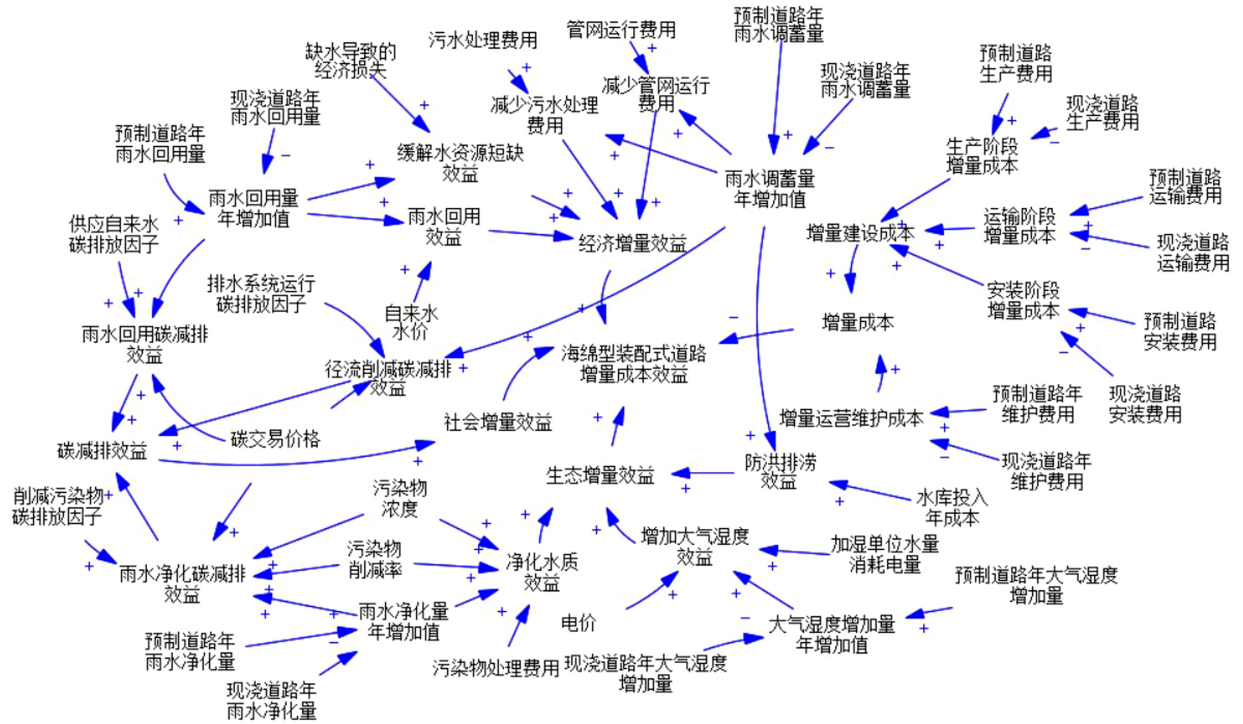


图 2 海绵型装配式道路增量成本效益因果关系图

Fig.2 Causal relationship diagram of incremental cost-effectiveness of sponge-type prefabricated roads

### 2.2 构建存量流量图

海绵型装配式道路流图是一个复杂的、动态的系统图,为了更清楚地反映出各因素之间的动态作用关系和循环机制,根据绘制的增量成本效益因果关系图中的变量及变量间关系,可以对该系统进行扩充与完善,建立增量成本效益存量流量图,描述变量间的定量关系,如图 3 所示。

### 2.3 确定系统方程式和参数

海绵型装配式道路增量成本效益的仿真模拟需要在存量流量图的基础上建立方程,还需要明确各影响因素间的函数关系,其中生态增量效益和社会增量效益采用间接效益货币化方法转变为定量关系描述。本研究将各变量之间的相互作用看作是线性的<sup>[9]</sup>,根据已绘制的因果关系图、存量流量图及确定的各变量性质,确定模型中的参

数及方程,如式(1)~(29)所示。

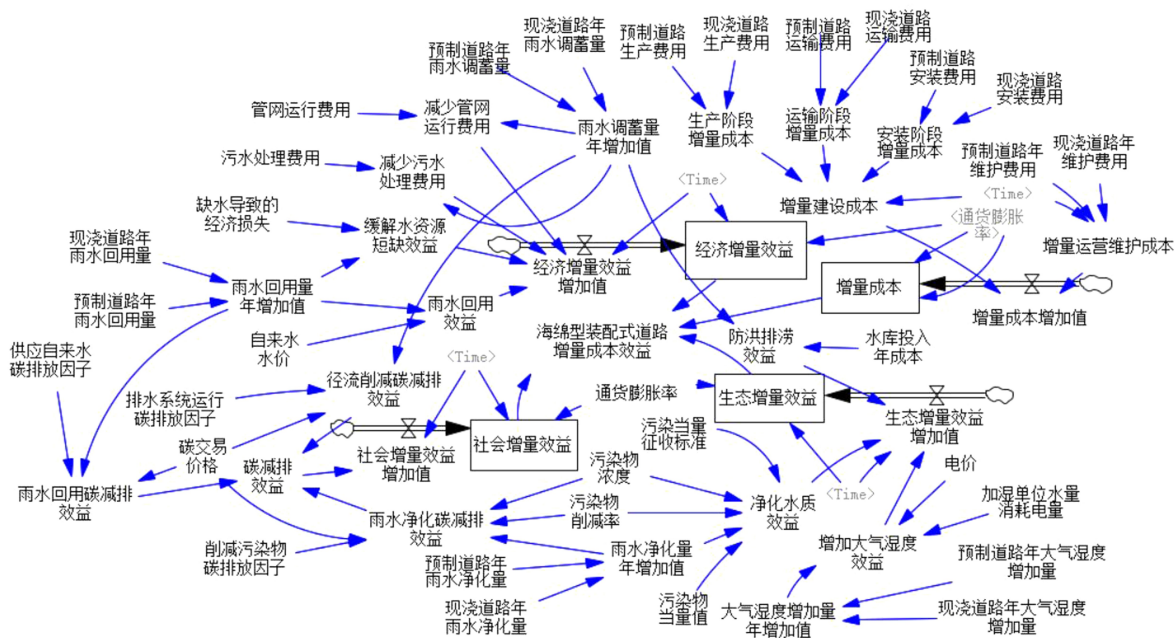


图 3 海绵型装配式道路增量成本效益存量流量图

Fig.3 Incremental cost-benefit stock flowchart of sponge-type prefabricated roads

$$\text{经济增量效益} = \sum_{t=1}^n [\text{经济增量效益增加值} / (1 + \text{通货膨胀度})^t] \quad (1)$$

$$\text{生态增量效益} = \sum_{t=1}^n [\text{生态增量效益增加值} / (1 + \text{通货膨胀度})^t] \quad (2)$$

$$\text{社会增量效益} = \sum_{t=1}^n [\text{社会增量效益增加值} / (1 + \text{通货膨胀度})^t] \quad (3)$$

$$\text{增量成本} = \sum_{t=1}^n [\text{增量成本增加值} / (1 + \text{通货膨胀度})^t] \quad (4)$$

$$\text{经济增量效益增加值} = \begin{cases} \text{雨水回用效益} + \text{缓解水资源短缺效益} + \text{减少管网运行费用} + \\ \text{减少污水处理费用}, t > \text{建设期} \\ 0, t \leq \text{建设期} \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{生态增量效益增加值} = \begin{cases} \text{防洪排涝效益} + \text{增加大气湿度效益} + \text{净化水质效益}, t > \text{建设期} \\ 0, t \leq \text{建设期} \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{社会增量效益增加值} = \begin{cases} \text{碳减排效益}, t > \text{建设期} \\ 0, t \leq \text{建设期} \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{增量成本增加值} = \text{增量建设成本} + \text{增量运营维护成本} \quad (8)$$

$$\text{海绵型装配式道路增量成本效益} = \text{生态增量效益} + \text{社会增量效益} + \text{经济增量效益} - \text{增量成本} \quad (9)$$

$$\text{雨水回用效益} = \text{自来水水价} \times \text{雨水回用量年增加值} \quad (10)$$

$$\text{缓解水资源短缺效益} = \text{雨水回用量年增加值} \times \text{缺水导致的经济损失} \quad (11)$$

$$\text{减少管网运行费用} = \text{管网运行费用} \times \text{雨水调蓄量年增加值} \quad (12)$$

$$\text{减少污水处理费用} = \text{污水处理费用} \times \text{雨水调蓄量年增加值} \quad (13)$$

$$\text{防洪排涝效益} = \text{雨水调蓄量年增加值} \times \text{水库投入年成本} \quad (14)$$

$$\text{增加大气湿度效益} = \text{加湿单位水量消耗电量} \times \text{大气湿度增加量年增加值} \times \text{电价} \quad (15)$$

净化水质效益 = 雨水净化量年增加值 × 污染物浓度 × 污染物削减率 × 污染物当量值 × 污染当量征收标准 (16)

碳减排效益 = 雨水回用碳减排效益 + 径流削减碳减排效益 + 雨水净化碳减排效益 (17)

雨水回用碳减排效益 = 雨水回用量年增加值 × 供应自来水碳排放因子 × 碳交易价格 (18)

径流削减碳减排效益 = 雨水调蓄量年增加值 × 排水系统运行碳排放因子 × 碳交易价格 (19)

雨水净化碳减排效益 = 雨水净化量年增加值 × 污染物浓度 × 污染物削减率 × 削减污染物碳排放因子 × 碳交易价格 (20)

增量建设成本 =  $\begin{cases} \text{生产阶段增量成本} + \text{安装阶段增量成本} + \text{运输阶段增量成本}, & t \leq \text{建设期} \\ 0, & t > \text{建设期} \end{cases}$  (21)

增量运营维护成本 =  $\begin{cases} \text{预制道路年维护费用} - \text{现浇道路年维护费用}, & t > \text{建设期} \\ 0, & t \leq \text{建设期} \end{cases}$  (22)

雨水回用量年增加值 = 预制道路年雨水回用量 - 现浇道路年雨水回用量 (23)

雨水净化量年增加值 = 预制道路年雨水净化量 - 现浇道路年雨水净化量 (24)

雨水调蓄量年增加值 = 预制道路年雨水调蓄量 - 现浇道路年雨水调蓄量 (25)

大气湿度增加量年增加值 = 预制道路年大气湿度增加量 - 现浇道路年大气湿度增加量 (26)

生产阶段增量成本 = 预制道路生产费用 - 现浇道路生产费用 (27)

运输阶段增量成本 = 预制道路运输费用 - 现浇道路运输费用 (28)

安装阶段增量成本 = 预制道路安装费用 - 现浇道路安装费用 (29)

式中,  $n$  为项目建设期和运营维护期的总年限;  $t$  为项目持续时间 ( $t=1, 2, \dots, n$ )。

## 2.4 模型的有效性检验

模型构建完成后,对构建的系统动力学模型进行模型检验和单位检验。由于模型中涉及的变量较多,容易出现单位错误以及量纲不一致等问题,通过检测修正出现错误的变量,确保模型与量纲保持一致<sup>[10]</sup>。

## 3 案例分析

### 3.1 模型参数确定

海绵型装配式道路适用于城市主干路,装配式基层试块已通过了承载力实验,并获得了相应的实验报告。由于城市主干道无法作为实验路段,故本研究选取福州市左海公园装配式道路(实验路段)作为实证项目进行分析,该道路项目以海绵型装配式道路为核心设计理念,覆盖面积为  $8 \text{ m}^2$ ,由装配式基层、透水沥青面层和储水装置构成。参考国家建筑标准设计图集,城市主干路设计基准期为 30 a,结合该项目的建设周期和预期使用年限,将模型仿真步长为 1 a,仿真周期设定为 30 a,参考国家统计局近 10 a 的通货膨胀率,在本案例中设为平均值 2.1%。将该项目参数输入建立的增量成本效益系统动力学模型中,自

来水水价设置为  $2.4 \text{ 元}/\text{m}^3$ ,污水处理费用设置为  $1.4 \text{ 元}/\text{m}^3$ ,污染当量征收标准设置为  $0.7 \text{ 元}/\text{kg}^{[11]}$ ,碳交易价格设置为  $345 \text{ 元}/\text{t}^{[12]}$ ,排水系统运行碳排放因子设置为  $1.07 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,削减污染物碳排放因子设置为  $1.804 \text{ kg}/\text{m}^3^{[13]}$ ,供应自来水碳排放因子设置为  $1.07 \text{ kg}/\text{m}^3^{[14]}$ ,水库投入年成本设置为  $0.67 \text{ 元}/\text{m}^3^{[15]}$ ,缺水导致的经济损失设置为  $14.7 \text{ 元}/\text{m}^3$  等<sup>[2]</sup>。

### 3.2 模拟结果分析

#### 3.2.1 增量成本分析

增量成本的变化曲线如图 4 所示。模拟结果表明,项目的增量成本主要在建设阶段产生,相较于传统现浇混凝土道路,海绵型装配式道路的建设成本较高。在生产阶段,装配式基层构件需在预制构件生产厂家进行构件生产,业主方购买的产品为预制构件,而传统现浇道路购买的产品为建筑材料,该阶段增量成本主要包括构件模具的生产费、构件材料费等。此外,海绵型装配式道路增加了储水装置,进一步提高了生产成本。在运输阶段,传统现浇混凝土道路的运输只需运输原材料,过程较为简单,而海绵型装配式道路的预制构件体积较大,需要额外的保护措施和适合的运输车辆,以防止构件损坏,从而增加了运输成本<sup>[16]</sup>。在安装阶段,装配式基层构件涉及的技术环节较多,需要更

加准确的协调和高度的专业能力,从而增加了安装成本。进入运营期后增量成本减少,海绵型装配式道路的运营维护成本主要包括路面维护费用和储水装置维护费用,为了达到渗透功能的需求,需要对道路路面空隙进行清洗维护,从而增加了运营维护成本。根据软件导出的模拟数据计算,该项目在全寿命周期内的增量成本为 666.7 元/m<sup>2</sup>。

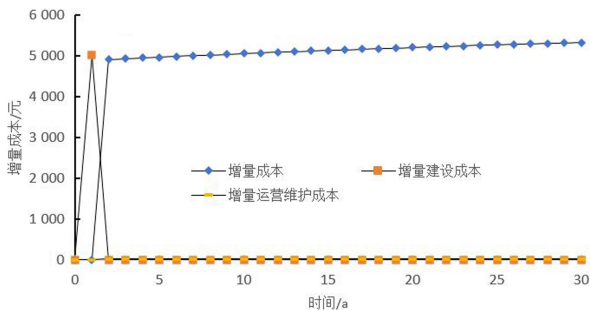


图4 增量成本变化曲线

Fig.4 Incremental cost change curve

### 3.2.2 增量效益分析

增量效益的变化曲线如图5所示。由图5可知,生态增量效益的占比最高,其次是经济增量效益,而社会增量效益的占比最低。在项目建设阶段,经济增量效益、生态增量效益和社会增量效益均为零,但在项目运行阶段开始产生并逐渐增加。海绵型装配式道路的优良雨水管理能力带来了显著的防洪排涝效益、净化水质效益和增加大气湿度效益,使得生态增量效益占比最高,而社会增量效益的占比相对较少,主要因为本研究仅考虑了碳减排定量指标,而未涵盖其他定性指标的效益。海绵型装配式道路增量效益是生态增量效益、经济增量效益和社会增量效益之和,根据软件导出的模拟数据计算,该项目在全寿命周期内的增量效益为 1 669.34 元/m<sup>2</sup>。

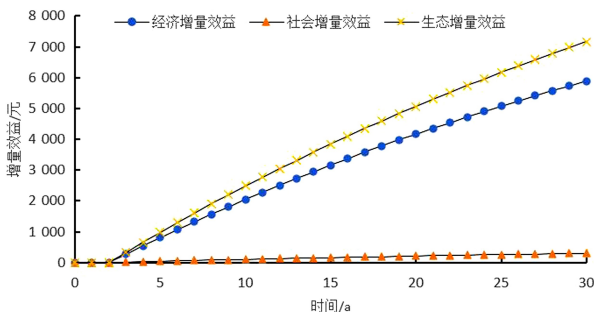


图5 增量效益变化曲线

Fig.5 Incremental benefit change curve

### 3.2.3 增量成本效益分析

海绵型装配式道路综合增量成本效益为增量效益与增量成本的差值。增量成本效益变化曲线如图6所示,从模拟结果来看,增量成本效益经历了从初始的零值出发、先下降至负值再上升至正值的过程。具体来说,项目在建设阶段初期,由于海绵型装配式道路建设成本较高的原因,增量成本效益呈现负值,随着项目进入运行阶段,海绵型装配式道路的增量效益开始显现并逐渐增加。在模拟期内,增量成本效益在第10年为-422.79元,第11年为87.89元,第30年达到最大值8021.17元,该模型引入通货膨胀率变量,考虑了资金的时间价值,因此可以通过内插法计算项目的动态投资回收期  $t_1$ ,如式(30)所示。

$$\frac{t_1 - 10}{422.79} = \frac{11 - t_1}{87.89} \quad (30)$$

计算式(30)可得,  $t_1 = 10.8$  a,因此,福州市左海公园的装配式道路项目(实验路段)的动态投资回收期为 10.8 a,即从项目开始建设后的第10.8年起,增量成本效益变为正值并逐渐增长。根据软件导出的模拟数据计算,该项目在全寿命周期内的综合增量成本效益 1 002.64 元/m<sup>2</sup>。

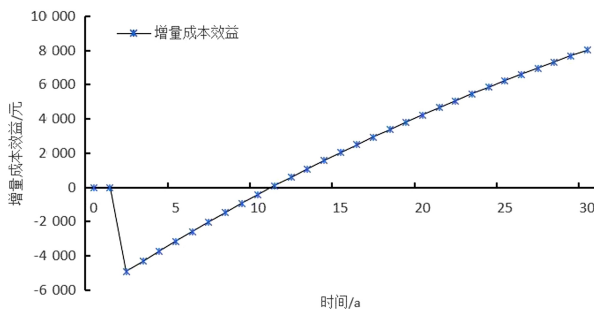


图6 增量成本效益变化曲线

Fig.6 Incremental cost-benefit change curve

## 4 结束语

海绵型装配式道路将海绵城市理念有效地融入装配式道路设计中,兼具良好的雨水管理能力和快速施工的优势,且符合国家可持续发展的战略目标。本研究通过系统动力学模型对海绵型装配式道路的增量成本效益进行了深入分析,并通过案例研究对各变量进行了量化。研究结果表明,项目增量成本主要发生在建设阶段初期;在所有增量效益中,生态增量效益的占比最高,其次是经济增量效

益,而社会增量效益的占比相对最低;增量成本效益在项目全寿命周期内经历了从初始的零值开始,先下降至负值,再逐渐回升并最终转为正值的过程。这一显著的增量成本效益验证了其在实践中

的可行性和合理性。本研究模型适用于新建项目及改建项目,研究结果为我国城市化进程中道路建设的创新提供了新的思路和解决方案,并对海绵型装配式道路的推广应用具有促进作用。

## 参考文献:

- [1] 刘成成. 基于海绵城市理论的透水铺装综合效益评价研究[D]. 福州:福建农林大学,2019.
- [2] 李萌萌. 雨水利用效益计算方法及利用模式研究[D]. 天津:天津大学,2019.
- [3] 沈太极. 透水铺装的综合效益评价及设计与管理[D]. 厦门:厦门大学,2018.
- [4] 杨亮,张金莉,范小林,等. 装配式预制道路板工法在某工程中的应用[J]. 建筑安全,2023,38(10):17-24.
- [5] 刘济嘉. 透水路面在海绵城市建设中的应用[C]//中国建筑学会建筑给水排水研究分会,中国建筑学会建筑给水排水研究分会第四届第二次全体会员大会暨学术交流会议论文集(上册). 辽宁省市政工程设计研究院有限责任公司;2023:648-654. DOI:10.26914/c.cnkihy.2023.040638.
- [6] ZHANG J H,GAO X L,ZHANG P, et al. Field tests on Fiber-Reinforced Plastic (FRP) stormwater storage tank under road pavements for "Sponge City" development[J]. Case Studies in Construction Materials,2023,18:e02097.
- [7] 邓博雯. 基于系统动力学的装配式建筑增量成本及增量效益分析[D]. 成都:西南交通大学,2022.
- [8] 王蓓蕾. 基于海绵城市建设的低影响开发措施综合效益评价[D]. 福州:福州大学,2020.
- [9] 叶明珠. 基于系统动力学的装配式建筑成本影响因素研究[D]. 南宁:广西大学,2022.
- [10] 孙国帅,姜德龙,张小令,等. 基于系统动力学的绿色建造企业生产力影响因素研究[J]. 建筑经济,2021,42(10):99-104.
- [11] 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:西安理工大学,2020.
- [12] 李红兵,吴璨,魏辰,等. 基于SD的绿色建筑优化改造增量成本效益研究[J]. 土木工程与管理学报,2022,39(3):8-15.
- [13] 苏菁慧. 双碳背景下校园海绵化改造综合效益研究:以西安某高校为例[D]. 西安:西安理工大学,2023.
- [14] 朱雨,邵薇薇,杨志勇. 海绵设施全生命周期碳排放核算方法研究[J]. 水资源保护,2023,39(6):32-38.
- [15] 黄臻,许萍. 居民小区海绵设施增量成本效益地区差异性及其敏感性分析[J]. 水电能源科学,2023,41(6):69-73.
- [16] 柯燕燕,朱小珍,彭东勤,等. 全寿命周期视角下装配式建筑项目增量成本与增量收益研究[J]. 建筑经济,2023,44(12):41-46.

(责任编辑:方素华)