

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2025. 05. 016

基于LCA-SD的老旧小区海绵化改造碳减排效益评价

陈菊香¹, 李国荣¹, 孙亮², 热依娜·阿斯哈尔¹, 孟诗¹

(1. 新疆大学 建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 乌鲁木齐市城市综合交通项目
研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 老旧小区海绵化改造是海绵城市建设的重要组成部分,研究其碳减排效益的评价方法及碳减排量的测算模型对实现碳中和具有重要意义。为此,构建了适用于老旧小区海绵化改造过程中碳减排核算及效益评价的全生命周期评价(LCA)模型和基于全生命周期理论的系统动力学(LCA-SD)模型。以W市某老旧小区的海绵化改造项目为例,通过实际数据验证LCA-SD模型仿真的可靠性,并对该案例的碳减排量进行核算。通过LCA核算模型发现,老旧小区海绵化改造过程产生的最大碳排放量发生在施工阶段,占该项目碳排放总量的48.8%,最大碳汇量来源于雨水净化阶段;LCA-SD模型具备仿真模拟的可靠性,可对老旧小区海绵化改造项目的碳排放量及碳汇量变化进行模拟与预测;在LCA-SD模型中,碳汇的主要来源是城市绿地碳循环系统,预测该项目将于2039年实现碳中和;LCA-SD模型核算的碳排放量及碳汇量结果均大于LCA模型。

关键词: 碳减排核算; 老旧小区; 海绵化改造; 全生命周期评价模型; 系统动力学模型

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1000-4602(2025)05-0115-08

Evaluation of Carbon Emission Reduction Benefits from Sponge City Renovation of Old Residential Areas Using LCA-SD Model

CHEN Ju-xiang¹, LI Guo-rong¹, SUN Liang², ASIHAER Re-yina¹, MENG Shi¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Xinjiang University, Urumqi 830000, China;
2. Urumqi Urban Comprehensive Transportation Project Research Center, Urumqi 830000, China)

Abstract: The sponge city renovation of old residential areas constitutes a critical component of sponge city construction. Investigating the evaluation methodology for carbon emission reduction benefits and developing an accounting model for carbon emission reduction are essential for achieving carbon neutrality. In this study, the life cycle assessment (LCA) model and the system dynamics (SD) model based on the theory of LCA (LCA-SD), were developed to quantify carbon emission reduction and evaluate benefits during the sponge city renovation of old residential areas. The reliability of the LCA-SD model was validated using empirical data from a sponge city renovation project of an old residential area in W city. Additionally, the carbon emission reduction achieved through this project was quantified. Through the LCA model, it was determined that the construction phase of the renovation process for the old

基金项目: 新疆乌鲁木齐市建设局项目(202309140006)

通信作者: 陈菊香 E-mail: chenju1816@126.com

residential area generated the highest carbon emission, accounting for 48.8% of the project's total carbon emission. The most significant carbon sink was associated with the rainwater purification stage. The LCA-SD model demonstrated reliable simulation capabilities, enabling accurate projections of carbon emission and carbon sink change resulting from sponge city renovation projects in old residential areas. In the LCA-SD model, the primary source of carbon sink originated from the urban green space carbon cycle system, which was projected to achieve carbon neutrality by 2039. Additionally, the carbon emission and carbon sink derived from the LCA-SD model were significantly higher than those obtained from the LCA model.

Key words: carbon emission reduction accounting; old residential area; spongy city renovation; life cycle assessment (LCA) model; system dynamics (SD) model

老旧小区海绵化改造对城市下垫面雨(雪)水的调蓄有着重要影响,是海绵城市建设的重要内容。同时,老旧小区海绵化改造是我国实现碳减排的重要途径之一,这些改造措施在实现海绵城市蓄水、雨污水就地处理、蓄水高效再利用的同时^[1-3],在全生命周期内,通过提升碳汇空间直接减排和降低能源消耗间接减排均产生了不容忽视的碳排放量和碳汇量。

当前针对老旧小区海绵化改造过程中碳排放的研究主要集中于影响因素分析和改造设施在生产、运输、建设、运维等过程中的碳排放比例方面,而对老旧小区海绵化改造全过程中碳减排效益的评价方法研究较少^[4-6]。碳减排效益评价依托碳排放量和碳汇量的核算值,然而当前对于碳减排效益的评价还停留在选取评价指标、建立评价模型阶段,对碳排放量和碳汇量核算的研究还不够充分。当前普遍采用基于全生命周期评价(LCA)并结合排放因子法对某一阶段的碳排放及碳汇量进行逐条核算^[4,7-8],核算过程大多缺乏系统性,且排放因子的选取主观性较强,核算结果精度有待提高。

鉴于此,笔者分别采用LCA模型和基于全生命周期理论的系统动力学(LCA-SD)模型对老旧小区海绵化改造全过程的碳减排效益进行研究。在LCA核算模型中,将材料生产、运输、施工、设施运行、维护和拆除阶段的碳减排量确定为核算边界,基于IPCC(联合国政府间气候变化专门委员会)方法学原则,结合排放因子法对海绵设施的直接碳排放量、间接碳排放量和碳汇量进行逐一、全面的核算,以弥补LCA核算模型在老旧小区海绵化改造全过程碳减排效益研究的空白。在LCA-SD核算模型

中,通过分析并绘制因果回路图、存量-流量图并构建模型方程式,动态模拟老旧小区改造中海绵设施建造及运行全过程中的碳排放量及碳汇量。另外,对LCA模型及LCA-SD模型的核算结果进行分析,探索对老旧小区海绵化改造过程中碳减排效益评价的最优模型。

1 基于LCA模型的碳减排核算

1.1 各阶段碳减排计算方法

基于LCA模型将老旧小区海绵化改造项目产生的碳排放量分为直接和间接排放,并将间接碳排放量划分为海绵化改造全过程中的材料生产、运输、施工、设施运行、维护和拆除阶段^[6]。结合碳排放因子法核算不同阶段的碳减排量和碳汇量,具体核算公式如下^[6,9-14]:

$$TCE = (TCE_D + TCE_{in}) - TCS \quad (1)$$

式中:TCE为碳排放总量(净碳排放量),kg;TCE_D为直接碳排放总量,kg;TCE_{in}为间接碳排放总量,kg;TCS为碳汇总量,kg。

$$EF_j = B_o \times MCF_j \quad (2)$$

式中:EF_j为有机物厌氧分解过程中甲烷的排放系数;B_o为有机物厌氧分解产生甲烷的理论排放系数;MCF_j为不同厌氧环境中甲烷的排放因子。

$$GE_{CH_4} = M_{COD} \times B_o \times MCF_j \times GWP_{CH_4} \quad (3)$$

式中:GE_{CH₄}为海绵设施排放的CH₄的CO₂当量;M_{COD}为经过海绵设施处理后的污染物COD排放量,kg/a;GWP_{CH₄}为CH₄的全球增温趋势值。

$$CE_{N_2O} = M_N \times EF_{N_2O} \times \frac{44}{28} \times GWP_{N_2O} \quad (4)$$

式中:CE_{N₂O}为海绵设施排放的N₂O的CO₂当量;M_N为经海绵设施净化后雨水径流中的含氮量,kg/a;

EF_{N_2O} 为有机物分解过程中 N_2O 的排放系数; $\frac{44}{28}$ 为 $1 \text{ kg } N_2O$ 转换为 $1 \text{ kg } N_2$ 的换算系数; GWP_{N_2O} 为 N_2O 的全球增温趋势值。

$$TCE_{ID} = CE_{MP} + CE_{MT} + CE_{EC} \quad (5)$$

式中: CE_{MP} 为材料生产的碳排放量, kg ; CE_{MT} 为运输过程的碳排放量, kg ; CE_{EC} 为设备电耗对应的碳排放量, kg 。

$$CE_{MP} = \sum (M_M \times CE_{unit-M})_{i_M} \quad (6)$$

式中: M_M 为所需材料的质量, kg ; CE_{unit-M} 为所需材料的碳排放因子, kg/kg ; i_M 为材料类别。

$$CE_{MT} = \sum (Dist \times M_{MT} \times CE_{unit-MT})_{i_{MT}} \quad (7)$$

式中: $Dist$ 为运输距离, km ; M_{MT} 为需要运输的物料质量, kg ; $CE_{unit-MT}$ 为单位质量物料在单位运输距离下的碳排放因子, $\text{kg}/(\text{kg} \cdot \text{km})$; i_{MT} 为某种运输方式。

$$CE_{EC} = \sum (P_i \times T_i \times EF_{EC} \times N)_i \quad (8)$$

式中: P_i 为某设备的功率, kW ; T_i 为某设备的使用时长, h ; EF_{EC} 为电耗的碳排放因子, $\text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$; N 为某设备使用数量。

$$CE_{hs} = \sum (AD_i \times \eta_i \times EF_{hsi})_i \quad (9)$$

式中: CE_{hs} 为海绵设施回收再利用过程中的碳排放量, kg ; AD_i 为某回收材料的质量, t ; η_i 为某回收材料的回收比例, $\%$; EF_{hsi} 为某回收材料的碳排放因子, kg/t 。

$$CS_{GA-C} = \sum (S_{GA} \times CS_{unit-GA})_{i_s} \quad (10)$$

式中: CS_{GA-C} 为绿地的固碳量, kg/a ; S_{GA} 为绿地面积, m^2 ; $CS_{unit-GA}$ 为绿地的单位固碳速率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; i_s 为海绵设施的类别。

$$CS_{Reuse} = Q_r \times (EF_w - \beta) \quad (11)$$

式中: CS_{Reuse} 为雨水利用过程中的碳汇量, kg/a ; Q_r 为海绵设施所收集的雨水利用量, m^3/a ; EF_w 为自来水的碳排放因子, kg/m^3 ; β 为海绵设施处理和再分配单位雨水的碳排放因子, kg/m^3 。

$$CS_{Runoff} = \sum (M_{Runoff} \times CE_{Runoff})_{i_s} \quad (12)$$

式中: CS_{Runoff} 为削减径流量所产生的碳汇量, kg/a ; M_{Runoff} 为某种海绵设施削减的净流量, m^3/a ; CE_{Runoff} 为城市雨水管网排放相应雨水所对应的碳排放因子, kg/m^3 。

$$CS_{Building-energy} = \sum (Q_{energy} \times CE_{Building-energy})_{i_s} \quad (13)$$

式中: $CS_{Building-energy}$ 为绿色屋顶带来的建筑节能所对应的碳汇量, kg/a ; Q_{energy} 为绿色屋顶所节省的能源, kJ ; $CE_{Building-energy}$ 为提供相应能量的碳排放因子, $\text{kg}/(\text{kJ} \cdot \text{a})$ 。

$$CS_{Rain-purify} = \sum (M_{Rain-purify} \times CE_{Rain-purify})_{i_s} \quad (14)$$

式中: $CS_{Rain-purify}$ 为净化雨水产生的碳汇量, kg/a ; $M_{Rain-purify}$ 为某种海绵设施的污染物削减量, kg/a ; $CE_{Rain-purify}$ 为削减的等量污染物对应的碳排放因子, kg/kg 。

1.2 基于LCA模型的实例核算

选取2021年W市某老旧小区的海绵化改造项目为研究对象,以30年为核算周期进行全生命周期的碳排放核算。改造内容主要包括:增设透水铺装 $18\,564.65 \text{ m}^2$ 、改造管网 $1\,472 \text{ m}$ 。

1.2.1 碳排放量的核算

① 直接碳排放

W市年平均降雨量为 294 mm , 雨水中 COD 浓度为 545 mg/L (取各监测点的平均值), 经海绵设施处理后排放雨水的 COD 浓度为 327 mg/L , 碳排放因子为 0.625 kg/kg , 根据式(2)~(4)计算得到直接碳排放量为 569 kg/a 。

② 间接碳排放

a. 材料生产过程的碳排放量

材料生产过程的碳排放量根据式(6)进行核算。使用的材料包括透水砖和HDPE双壁波纹管, 使用量分别为 670 、 29.44 t , 两者的碳排放因子分别为 0.2 、 $2\,620 \text{ kg/t}$, 则得到两者的碳排放量分别为 134 、 $77\,133 \text{ kg}$, 合计 $77\,267 \text{ kg}$ 。

b. 运输过程的碳排放量

通过走访调研, 该项目涉及的上述建筑材料的运输方式为柴油卡车, 运输能耗为 $2.42 \text{ MJ}/(\text{t} \cdot \text{km})$ 。柴油燃烧的碳排放因子为 3.10 t/t , 柴油的热值为 $42\,652 \text{ kJ/kg}$, 则碳排放因子为 $0.176 \text{ kg}/(\text{t} \cdot \text{km})$ 。根据式(7)进行核算, 透水砖和HDPE双壁波纹管的运输距离分别为 8 、 21 km , 则得到两者运输过程的碳排放量分别为 943 、 109 kg , 合计 $1\,052 \text{ kg}$ 。

c. 施工阶段的碳排放量

为便于统计和比较不同能源种类之间的能耗和碳排放量, 需将不同能源折算成规定的统一单

位,即海绵设施建造过程中涉及的机械设施、热量、照明等来自于原煤、原油、天然气、一次电力及其他能源,每1 kJ的能耗可以产生0.103 8 kg的碳排放量^[5],据此核算得到该项目中建造施工过程的总碳排放量。该项目涉及透水铺装面积18 564.65 m²,单位面积施工能耗为273.17 kJ/m²,则碳排放量为526 402 kg。

d. 维护阶段的碳排放量

维护阶段的碳排放量主要指机械设备的能耗产生的可计量的碳排放量,透水铺装维护阶段的碳排放因子为0.017 kg/(m²·a),根据式(8)核算得到碳排放量为316 kg/a,假设每年维护措施相同,则在海绵设施设定使用寿命内(30年),维护阶段的碳排放总量为9 480 kg。

建筑拆除阶段的碳排放量可按施工能耗的90%估算^[15],由此核算得到该项目拆除阶段的碳排放量为473 762 kg。

1.2.2 碳汇量的核算

① 雨水利用的碳汇量

雨水利用的碳排放主要由两部分组成,一部分为雨水处理和再分配的碳排放;另一部分为雨水回用所抵消的碳排放,其碳汇量等于雨水回用所抵消的碳排放量减去雨水处理和再分配的碳排放量^[5]。该项目的雨水利用量为27 864 m³,供应自来水的碳排放因子为1.07 kg/m³,处理和再分配单位雨水的碳排放因子为0.18 kg/m³,经核算,雨水利用的碳汇量为24 799 kg/a。

② 径流削减的碳汇量

该项目径流削减产生的碳汇量主要源于海绵城市建设导致下游市政管网强排流量减少而产生的碳汇量。该项目占地面积为48 732 m²,年径流总量控制率为75%,计算得到的径流削减量为43 371 m³,该区域采用强排系统,海绵城市建设导致下游雨水泵站强排流量减少,水泵扬程取10 m,水泵效率为80%,则单位运行能耗为0.034 kW·h/m³,计算得到该部分的碳汇量为1 728 kg/a。

③ 雨水净化的碳汇量

海绵城市建设中削减的污染物主要为COD^[15],其碳排放系数为3.1 kg/kg,可得到削减污染物所产生的碳汇量为33 150 kg/a。

在该老旧小区海绵化改造项目中,由于建设内容不包含绿色屋顶等可产生建筑节能碳汇的设施,

因而建筑节能碳汇量设为0。

综上,该海绵化改造项目的碳汇总量为59 677 kg/a。

1.2.3 碳减排量的分析

该项目在建设过程中的碳排放量为1 078.483 t,海绵设施运行阶段的碳排放量为0.885 t/a,碳汇量为59.677 t/a,核算得到碳减排量将在2040年实现正值,具体如图1所示。

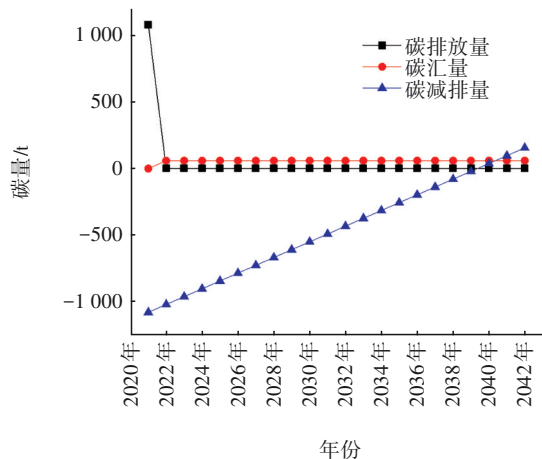


图1 LCA模型核算的碳减排效益分析

Fig.1 Analysis of carbon reduction benefit calculated by LCA model

2 基于LCA-SD的碳减排核算模型构建

依据我国住房和城乡建设部颁发的有关海绵城市建设的文件,结合“渗、滞、蓄、净、用、排”的海绵城市建设理念,筛选年径流总量控制率与径流体积控制、源头减排、路面积水控制与内涝防治、城市水体环境质量和城市热岛效应缓解等影响因素,将上述影响因素依托归因理论在LCA-SD模型中设定4个子系统,即雨水系统、城市供排水管网改造系统、下垫面调蓄系统和城市绿地碳循环系统,采用各子系统动态模拟海绵化改造全过程对碳减排的影响规律,从而构建出老旧小区海绵化改造对碳减排量影响的系统动力学模型。

2.1 确定LCA-SD模型边界

LCA-SD模型边界主要指时间边界和研究对象边界。该模型的时间边界设定为2020年—2050年,即该老旧小区开始改造的时间至海绵设施的设计使用寿命截止时间;研究对象边界为该老旧小区海绵化改造过程中和改造后对碳减排产生影响的主要因素。

2.2 LCA-SD模型构建

LCA-SD模型借助Vensim软件描述各因素间的相互影响和相互制约的关系,由因果回路图和存量-流量图构成^[11]。因果回路图中各系统变量之间的因果关系通过如下方程式构建系统存量-流量图:①碳排放量=污染物降解的碳排放量+材料生产的碳排放量+材料运输的碳排放量+海绵设施施工的碳排放量+海绵设施运维的碳排放量+海绵设施拆除的碳排放量^[4];②碳汇量=雨水净化的碳汇量+绿地固碳的碳汇量+径流削减的碳汇量+雨(雪)水收集利用产生的间接碳汇量+建筑节能的碳汇量^[4];③污染物降解的碳排放量=雨(雪)水污染物含量×COD降解的碳排放系数^[16];④雨水净化的碳汇量=海绵设施对污染物的降解量×污染物的碳排放因子^[4];⑤绿地固碳的碳汇量=植物固碳量+土壤固碳量^[11];⑥土壤固碳量=海绵设施中土壤的有机碳密度×海绵化改造新增的土壤面积^[11];⑦径流削减的碳汇量=海绵设施削减的径流量×雨水管网排放雨水的碳排放因子^[4];⑧雨(雪)水收集利用量=雨污分流装置收集量+防御式排水系统收集量+建筑立面雨落管断接收量+地面汇水后接入排水管网量^[6];⑨雨(雪)水收集利用产生的间接碳汇量=雨(雪)水

收集利用量×净化单位雨(雪)水产生的碳排放量^[4]。LCA-SD模型采用的方程式中包括上述LCA模型中的部分核算公式。

2.2.1 系统因果回路分析

在系统动力学中,依据上述确定的LCA-SD模型边界,以及年径流总量控制率与径流体积控制、源头减排、路面积水控制与内涝防治、城市水体环境质量和城市热岛效应缓解等影响因素,拆解各影响因素对应的影响因子后,结合本研究设定的小区院落海绵化改造的碳减排核算模型的4个子系统,确定主要的影响因子。雨水系统的主要影响因子:降雨量峰值、降雨强度、地形地貌、雨(雪)水中污染物含量、蒸发量等;城市供排水管网改造系统的主要影响因子:雨污分流改造、支管截流改造、防御式排水系统设置、排水管道的维护和管径、管材的优化等;下垫面调蓄系统的主要影响因子:透水铺装、生物滞留带、下沉式绿地等低影响开发(LID)设施;城市绿地碳循环系统的主要影响因子:雨水花园、下沉式绿地、生物滞留带等绿化设施。在确定各影响因子之间以及各影响因子与子系统之间的正、负相关关系后,绘制老旧小区海绵化改造的碳减排系统因果回路图,具体如图2所示。

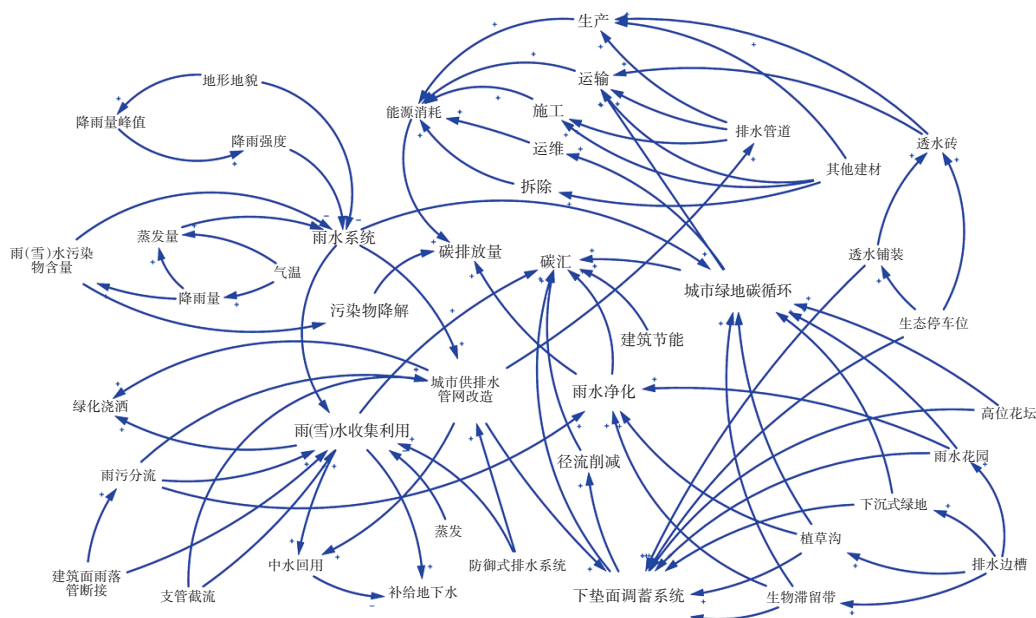


图2 老旧小区海绵化改造碳减排系统的因果回路图

Fig.2 Causal loop diagram of carbon emission reduction system for sponge city renovation of old residential area

2.2.2 存量、流量分析

存量、流量是LCA-SD模型的核心概念。存量是累积量,通过定量分析系统内部变量^[13],表征各

子系统以及碳排放量和碳汇量的状态;流量是速率量,表征存量变化的速率^[13],即:碳排放量和碳汇量随时间变化的速率。本研究基于全生命周期理论

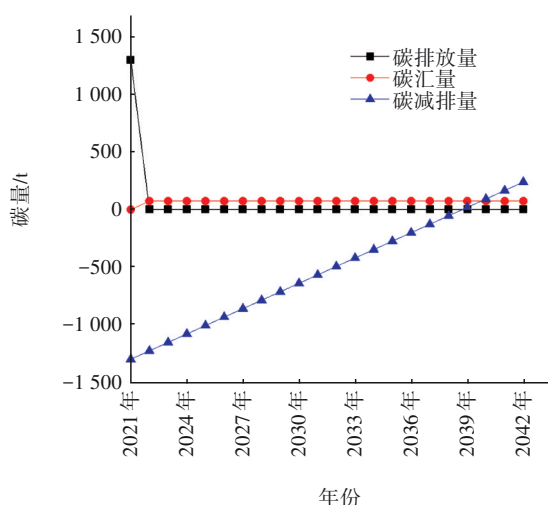


图4 LCA-SD模型核算的碳减排效益分析

Fig.4 Analysis of carbon reduction benefit calculated by LCA-SD model

4 讨论

针对该老旧小区海绵化改造项目案例,LCA模型和LCA-SD模型核算的碳减排量对比见图5。两模型核算结果之间的差异为16.70%~29.38%。

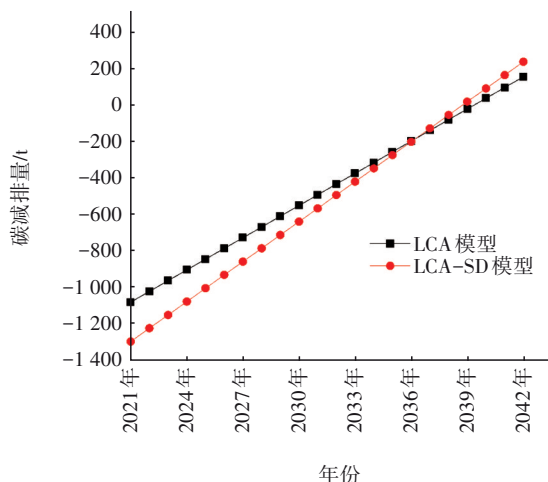


图5 LCA模型与LCA-SD模型核算的碳减排量对比

Fig.5 Comparison of carbon emission reduction calculated by LCA model and LCA-SD model

碳排放量及碳汇量受多种因素的影响,且各因素间存在协同效应^[14]。LCA模型主要依托固定的核算公式和相关的排放因子,核算公式以线性关系为主,核算过程为全生命周期中各阶段、各改造措施核算的碳减排量逐条加和,核算结果未包含各影响因素及改造措施间的协同效应和非线性相关部分;此外,排放因子的选取及调整系数依赖一定的主观判断,其核算的精度有待验证。而在LCA-SD

模型中,可通过Vensim的因果回路分析体现各因素间的相关关系,并可在本研究确定的概念框架之上结合项目所在区域的特点调整参数,使得模拟值更接近实际值,从而验证模型的可靠性和真实性;还可通过放大或增加子系统来尽可能涵盖核算因子,解决LCA模型中部分内容无法量化的问题;其整体性、系统性和关联性的特点使得核算结果均大于LCA模型,解决了LCA核算模型中各影响因素和改造措施间由于协同效应产生的碳减排量未纳入核算内容而导致核算结果偏低的问题。

5 结论

① 以老旧小区海绵化改造项目中建筑材料生产、运输、施工、设施运行、维护和拆除阶段为主线,基于LCA模型及排放因子法核算各阶段的碳排放量和碳汇量。结果表明,项目施工阶段的碳排放量最大,拆除阶段次之;雨水净化的碳汇量最大。

② 基于2017年—2022年的实际检测数据,对LCA-SD模型进行可靠性检验,仿真模拟结果与实际值偏差较小,验证了该模型仿真的可靠性。因此,可根据同类型项目的不同建设内容设定模型参数,对老旧小区海绵化改造的碳减排效益进行核算模拟和预测。

③ LCA-SD模型核算结果显示,建设期产生的碳排放量为1 294 737 kg,碳汇来源主要为城市绿地碳循环系统,该项目的碳减排量将于2039年实现正值。

④ LCA-SD模型核算的碳排放量及碳汇量结果均大于LCA模型。

参考文献:

- [1] 黄丽萍,宋仁杰,何越,等.海绵试点城市道路生物滞留带的问题分析及设计优化[J].中国给水排水,2023,39(8):89-96.
HUANG Liping, SONG Renjie, HE Yue, et al. Problem analysis and optimal design of bioretention swale near municipal roads in pilot sponge cities [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(8): 89-96 (in Chinese).
- [2] 武雨晴.海绵城市建设理念在老旧小区改造中的应用[J].科技创新与应用,2021,11(13):172-174.
WU Yuqing. Application of sponge city construction concept in the renovation of old residential areas [J]. Technology Innovation and Application, 2021, 11(13): 172-174.

- 172-174 (in Chinese).
- [3] 吕红亮, 吴岩杰, 于德森, 等. 后试点时代的已建区海绵城市建设方案编制[J]. 中国给水排水, 2023, 39(6): 41-48.
- LÜ Hongliang, WU Yanjie, YU Demiao, *et al.* Thoughts on the construction plan of sponge city in the built-up area in the post pilot era [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(6): 41-48 (in Chinese).
- [4] 刘博文. 老旧小区雨水系统海绵城市改造设计研究[J]. 中外建筑, 2018(7): 107-109.
- LIU Bowen. Research on design of sponge city in old residential area rainwater system [J]. *Chinese & Overseas Architecture*, 2018(7): 107-109 (in Chinese).
- [5] 郑涛. 居住社区海绵改造过程的碳排放核算研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(19): 112-119.
- ZHENG Tao. Estimation of carbon emission during sponge city reconstruction of residential community [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(19): 112-119 (in Chinese).
- [6] 肖朝红, 周丹, 王泽阳, 等. 关于老旧城区海绵城市系统化方案编制的探讨[J]. 中国给水排水, 2023, 39(24): 16-20.
- XIAO Chaohong, ZHOU Dan, WANG Zeyang, *et al.* Discussion on the systematic plan of sponge city in old urban areas [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(24): 16-20 (in Chinese).
- [7] MOORE T L C, HUNT W F. Predicting the carbon footprint of urban storm water infrastructure [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 58: 44-51.
- [8] O'SULLIVAN A D, WICKE D, HENGEN T J, *et al.* Life cycle assessment modelling of stormwater treatment systems [J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 149: 236-244.
- [9] LAUSSELET C, BORGNE V, BRATTEBØ H. LCA modelling for Zero Emission Neighbourhoods in early stage planning [J]. *Building and Environment*, 2019, 149: 379-389.
- [10] SAIZ S, KENNEDY C, BASS B, *et al.* Comparative life cycle assessment of standard and green roofs [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(13): 4312-4316.
- [11] PICEK T, CIZKOVA H, DUSEK J. Greenhouse gas emissions from a constructed wetland-plants as important sources of carbon [J]. *Ecological Engineering*, 2007, 31(2): 98-106.
- [12] 庞婕. 基于系统动力学的居民居住碳排放研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- PANG Jie. Household Carbon Emissions Based on System Dynamics [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016 (in Chinese).
- [13] 易阿岚, 孙清, 王钧. 基于SD模型的上海市湿地生态系统服务变化过程与情景研究[J]. 生态学报, 2020, 40(16): 5513-5524.
- YI Alan, SUN Qing, WANG Jun. The process of changes and scenarios of Shanghai wetland ecosystem service based on SD model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(16): 5513-5524 (in Chinese).
- [14] 付浩, 罗琦. 提质增效行动下某设区市污水处理减碳强度分析[J]. 中国给水排水, 2022, 38(23): 63-68.
- FU Hao, LUO Qi. Analysis of carbon emission reduction intensity of sewage treatment system in a districted city under the action of improving quality and efficiency [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(23): 63-68 (in Chinese).
- [15] 张孝存. 绿色建筑结构体系碳排放计量方法与对比研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- ZHANG Xiaocun. Carbon Emissions Measurement Methods and Comparative Studies on Green Building Structural System [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014 (in Chinese).
- [16] 乔大鹏. 城市老旧小区海绵设计的创新与实践[J]. 建材与装饰, 2021, 17(32): 37-38.
- QIAO Dapeng. Innovation and practice of sponge design in old urban residential areas [J]. *Construction Materials & Decoration*, 2021, 17(32): 37-38 (in Chinese).
-
- 作者简介:**陈菊香(1979-),女,重庆人,博士,教授,主要研究方向为海绵城市建设、碳中和碳减排运行以及藻源有机物、消毒副产物、微污染物控制与去除等。
- E-mail:**chenyu1816@126.com
- 收稿日期:**2024-05-08
- 修回日期:**2024-07-25

(编辑:刘贵春)