

# 基于情景模拟的沥青路面工程碳排放预测研究

孙瑜<sup>1</sup>, 潘林峰<sup>1</sup>, 袁月<sup>2</sup>, 邓国民<sup>2</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学交通工程系, 上海

<sup>2</sup>上海浦东路桥(集团)有限公司, 上海

收稿日期: 2026年4月15日; 录用日期: 2026年5月12日; 发布日期: 2026年5月21日

## 摘要

为研究沥青路面工程全生命周期碳排放特征及趋势, 建立了建设阶段、养护阶段以及寿命终结阶段的碳排放计算模型, 采用排放因子法对单位长度沥青路面工程的碳排放进行量化分析; 耦合生命周期评价框架与LEAP模型, 基于现有政策文件设置不同减排情景, 预测不同情景下碳排放的变化趋势, 根据分析结果对沥青路面工程提出减排对策。研究表明: 沥青路面工程全寿命周期内建设阶段碳排放占绝对主导地位, 其中材料生产环节占该阶段的92.24%; 理想情景减排幅度可达56.9%, 具有显著的减排效益。研究可为道路领域碳减排策略制定、中长期规划编制及行业绿色转型提供参考。

## 关键词

沥青路面, 碳排放, LEAP模型, 全生命周期, 多情景预测

# A Study on Carbon Emission Prediction for Asphalt Pavement Engineering Based on Scenario Simulation

Yu Sun<sup>1</sup>, Linyi Pan<sup>1</sup>, Yue Yuan<sup>2</sup>, Guomin Deng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Transportation Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

<sup>2</sup>Shanghai Pudong Road and Bridge Group Co., Ltd., Shanghai

Received: April 15, 2026; accepted: May 12, 2026; published: May 21, 2026

## Abstract

To investigate the carbon emission characteristics and trends throughout the entire life cycle of asphalt pavement projects, emission calculation models were established for the construction phase, maintenance phase, and end-of-life phase. The emission factor method was employed to quantify

**carbon emissions per unit length of asphalt pavement projects. Integrating the life cycle assessment framework with the LEAP model, various emission reduction scenarios were set based on existing policy documents to predict carbon emission trends under different scenarios. Based on the analysis results, emission reduction countermeasures for asphalt pavement projects were proposed. The findings reveal that carbon emissions during the construction phase dominate the entire life cycle of asphalt pavement projects, with material production accounting for 92.24% of this phase's emissions. Under the ideal scenario, emissions reductions could reach 56.9%, demonstrating significant mitigation benefits. This research provides valuable insights for formulating carbon reduction strategies in the road sector, developing medium-to-long-term plans, and advancing the industry's green transformation.**

## Keywords

**Asphalt Pavement, Carbon Emissions, LEAP Model, Life Cycle, Multi-Scenario Prediction**

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

全球气候变化对自然生态系统与人类社会经济系统的可持续发展构成了深远影响。在这一背景下，交通基础设施作为支撑经济社会发展的重要基石，其建设与运营全过程伴随显著的能源消耗与温室气体排放，已成为国际社会应对气候变化的重点关注领域。根据国际能源署(IEA)统计，交通行业贡献了约全球 24% 的与能源相关的二氧化碳排放。公路交通系统因其庞大的材料需求及对化石燃料的高度依赖，成为交通碳足迹核算与减排的关键环节[1]-[3]。近年来，中国通过《交通强国建设纲要》等一系列顶层政策设计，明确推动交通运输行业向绿色化、低碳化转型，鼓励应用新能源、清洁能源及环保型技术装备。

生命周期评价(Life Cycle Assessment)作为一种系统性的环境管理工具，已被广泛应用于各领域的资源消耗与环境影响中。针对道路施工阶段，已有研究为精确量化公路建设过程的碳排放奠定了重要基础，并明确指出施工阶段是公路建设周期中对环境影响最大的环节[4] [5]。此外，生命周期评价的应用范畴已从新建工程延伸至养护阶段[6]。这些研究表明，无论是新建还是养护活动，LCA 框架都是识别环境影响热点、支撑道路基础设施绿色决策的有效工具。但现有研究多侧重于对历史或现状的静态核算，或仅对单一技术措施的减排效果进行分析。此外，大多研究仅聚焦于其生命周期中的个别阶段[7]-[9]，缺乏贯穿建设、养护、寿命终结等全过程的系统性分析。许多研究虽确认了材料生产阶段是碳排放的主要来源，但缺乏能够在长期时间尺度上，动态模拟多种技术路径组合及政策驱动下减排潜力的预测模型[10]。上述局限，导致难以对路面行业中长期低碳转型路径进行科学的量化研判与战略规划。

鉴于此，本研究聚焦于沥青路面全生命周期碳排放，对沥青路面工程全生命周期各阶段的碳排放进行量化分析，并构建多种减排情景，模拟预测不同情景下沥青路面工程的碳排放趋势，为推动沥青路面建设的绿色低碳转型提供科学依据与决策支持。

## 2. 沥青路面碳排放核算

### 2.1. 全生命周期评价

全生命周期评价(LCA)提供了一种系统化的框架，用于评估产品、活动、技术或服务系统在其整个生

命周期中对环境的潜在影响。根据 ISO14040 标准[11]定义的技术框架, LCA 评价过程包括定义目标与确定范围、清单分析、影响评价和生命周期解释 4 部分, 如图 1 所示。

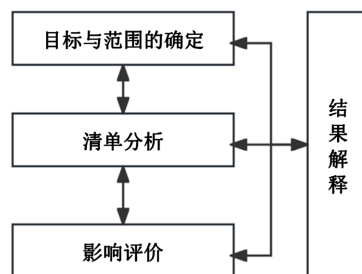


Figure 1. Structural composition of LCA  
图 1. LCA 的结构组成

沥青路面生命周期碳排放划分为建设阶段、运营阶段、养护阶段和寿命终结四个阶段。其中, 现有研究表明, 路面材料在运营阶段本身的物理化学过程中产生的微量碳排放与其他阶段相比数量级极小, 通常可忽略不计。此外不考虑人员活动在运输与施工期间的碳排放以及废品材料的回收利用产生碳排放。

## 2.2. 建设阶段

排放因子法是一种基于活动水平数据与单位排放系数估算碳排放量的系统方法, 其核心是通过活动量与排放因子的乘积关系实现碳排放的标准化核算。

### 2.2.1. 材料生产

原材料生产阶段碳排放主要与原材料碳排放因子和原材料的用量相关联, 简单采用工艺所需的混合料数量与相应排放因子耦合进行计算, 得到的原材料生产阶段碳排放计算模型采用公式 1 计算:

$$E_p = \sum_{i=1}^n AD_i \times EF_i \quad (1)$$

式中:  $AD_i$  为不同原材料  $i$  的消耗量, kg;  $EF_i$  为不同原材料  $i$  的碳排放因子;  $i$  为原材料的类型, 包括不同类型沥青、集料、矿粉等。

混合料生产环节包括集料堆料与上料、材料加热和混合料拌和三个环节, 且各个环节碳排放主要来源于施工机械设备运行的燃油消耗、购入电力产生和加热燃料燃烧两部分混合料生产阶段碳排放, 其中, 施工机械产生的碳排放量采用公式 2 计算:

$$E_{i,d} = S_{i,d} \times V_i \times EF_{i,f} \quad (2)$$

式中:  $S_{i,d}$  为施工机械  $i$  的台班消耗量, 台班;  $V_i$  为第  $i$  种施工机械单位台班的燃料消耗量, kg/台班;  $EF_{i,f}$  为第  $i$  种化石燃料的碳排放因子,  $\text{kgCO}_2/\text{kg}$  或  $\text{kgCO}_2/\text{Nm}^3$ 。

购入电力产生的碳排放采用公式 3 计算:

$$E_n = AD_e \times EF_e \quad (3)$$

式中:  $AD_e$  为购入电力使用电量, kwh;  $EF_e$  为电力的碳排放因子,  $\text{kgCO}_2/\text{kwh}$ 。

材料加热主要是集料加热和沥青加热两部分。集料的加热过程主要消耗化石燃料。根据蔺瑞玉[12]提出的集料含水率加热方法与沥青加热温度耗能及排放计算方法得出集料与沥青加热所消耗的能量。计算沥青混合料拌和阶段加热能耗值公式如下, 加热机械消耗能源主要为柴油。

$$Q = c \times m \times \Delta T \quad (4)$$

式中： $Q$ 为能耗，MJ； $c$ 为材料比热值； $m$ 为材料质量，kg； $\Delta T$ 为温度变化范围。

化石燃料燃烧的碳排放量采用公式 5 计算：

$$E_{i,e} = AD_{i,e} \times EF_{i,f} \quad (5)$$

式中： $AD_{i,e}$ 为化石燃料消耗量，kg； $EF_{i,f}$ 为第  $i$  种化石燃料的碳排放因子， $\text{kgCO}_2/\text{kg}$  或  $\text{kgCO}_2/\text{Nm}^3$ 。

### 2.2.2. 材料运输

材料运输过程是指沥青、集料等原材料从生产厂或储存地运送到拌合站冷料仓的过程。根据沥青路面建设期碳排放环节界定以及材料运输阶段的碳源分析，可知材料运输阶段可分为原材料运输和混合料运输，且碳排放主要来源于运输机械能源消耗，运输机械设备主要是自卸汽车和载货汽车。

原材料运输过程碳排放量采用公式 2 计算。混合料运输过程的碳排放量是获取化石能源的消耗量，总的碳排放量采用公式 6 计算：

$$E_{i,2} = E_m + E_z \quad (6)$$

式中： $E_m$ 为混合料运输阶段碳排放量， $\text{kgCO}_2$ ； $E_z$ 为再生料运输阶段碳排放量， $\text{kgCO}_2$ ，若混合料中无再生料的使用，则不需考虑。

### 2.2.3. 施工

沥青路面施工环节包括摊铺压实过程，其碳排放主要是指摊铺机、压路机以及配套使用的自卸汽车作业过程中排放的二氧化碳，施工机械产生的碳排放量采用公式 2 计算。

## 2.3. 养护阶段

养护养护碳排放核算范围包括使用的材料生产、运输和施工的碳排放，其计算过程与建设阶段一致。

## 2.4. 寿命终结阶段

拆除回收阶段的碳排放核算范围包括路面铣刨、废料运输，铣刨厚度为整个路面，碳排放计算采用公式 7 计算：

$$E_4 = E_{e,1} + (1 - \varphi)E_{e,2} \quad (7)$$

式中： $E_{e,1}$ 为拆除施工产生的碳排放量，按照公式 2 计算； $E_{e,2}$ 为废料运输产生的碳排放量，按照公式 2 计算； $\varphi$ 为沥青混合料回收率，%，取 0.55。

## 3. 沥青路面生命周期碳排放量化分析

本文的研究对象为沥青路面的面层。拟建公路按照双向四车道一级公路标准建造，根据《公路工程技术标准》(JTGB01-2014) [13]规定，设计速度为 80 km/h，路基宽 27 m，路面宽 24 m，设计使用年限均为 15 年。沥青路面面层的结构形式：8 cm AC-20 沥青路面 + 6 cm AC-16 沥青路面 + 4 cm SMA-13 沥青上面层。沥青路面面层结构示意图如图 2 所示。

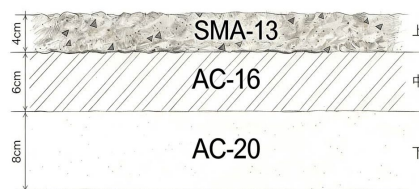


Figure 2. Schematic diagram of asphalt pavement surface layer structure  
图 2. 沥青路面面层结构示意图

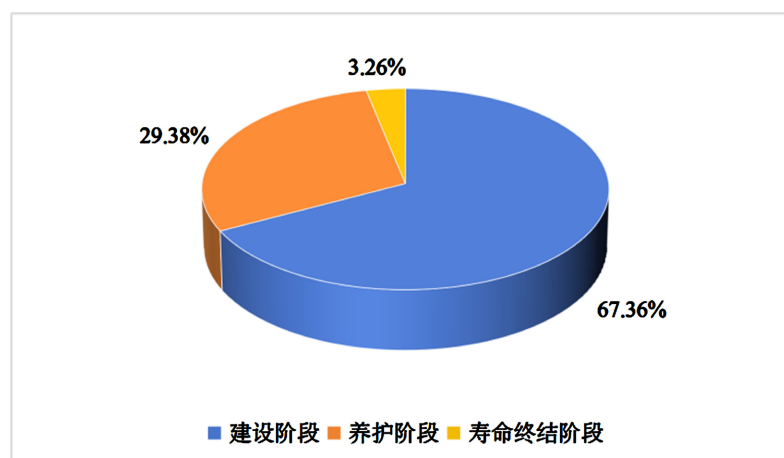
本文以 1 km 作为 1 个功能单位, 3 种沥青混合料的配合比设计均采用马歇尔设计方法, 混合料的矿料级配、配合比设计指标和技术标准需满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40-2004) [14] 中的要求。其中为简化分析过程, 养护阶段主要研究对象为沥青路面上面层, 即 SMA-13 沥青混合料。沥青路面的设计使用年限 15 年, 每 5 年进行一次罩面养护。

根据上文核算过程计算整理得到沥青路面全生命周期各阶段碳排放可得如下表 1 和图 3 所示, 三个阶段排放总量为 856599.34 kgCO<sub>2</sub>, 各阶段排放量呈现显著差异。具体占比上, 建设阶段排放量占比 67.36%, 成为最主要的排放源。养护阶段排放量占比为 29.38%。寿命终结阶段排放量最低, 占比仅为 3.26%。

**Table 1.** Carbon emissions of each stage in the life cycle of asphalt pavement per unit length

**表 1.** 单位长度沥青路面全生命周期各阶段碳排放量

阶段	碳排放量/kgCO <sub>2</sub>	占比
建设阶段	577043.09	67.36%
养护阶段	251671.85	29.38%
寿命终结阶段	27884.40	3.26%
总计	856599.34	100%



**Figure 3.** Carbon emission proportion of each stage in the life cycle of asphalt pavement per unit length

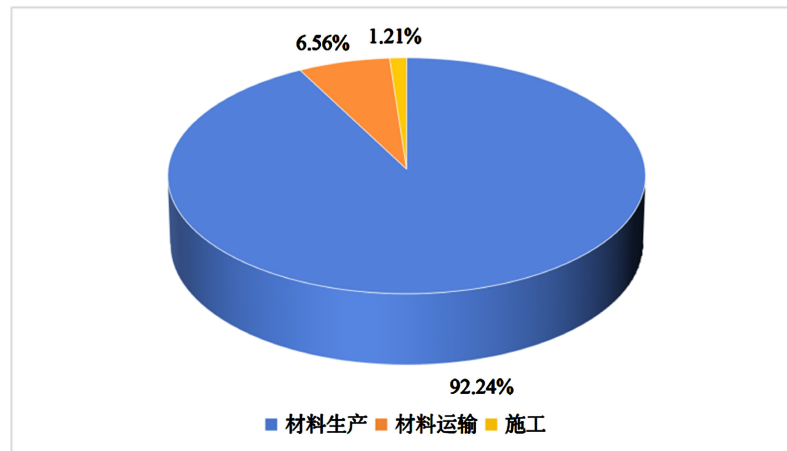
**图 3.** 单位长度沥青路面全生命周期各阶段碳排放占比

单位长度沥青路面建设阶段碳排放量如表 2 和图 4 所示, 建设阶段碳排放高度集中于材料生产, 占比 92.24%。

**Table 2.** Carbon emissions of each engineering activity during the construction stage of asphalt pavement per unit length

**表 2.** 单位长度沥青路面建设阶段各工程碳排放量

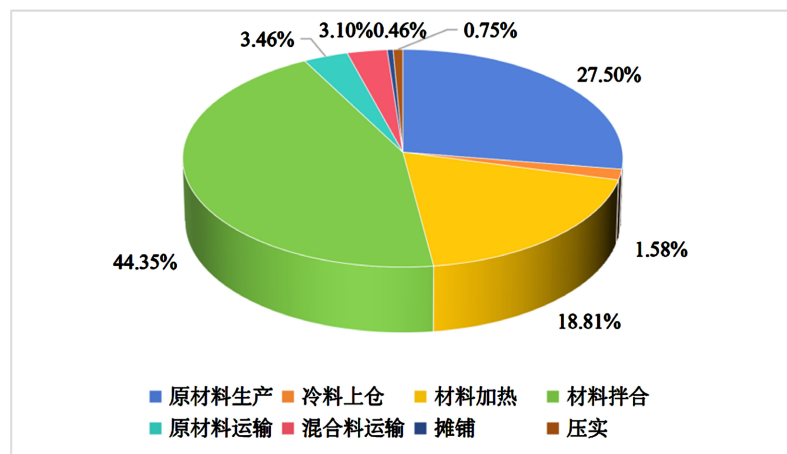
工程	碳排放量/kgCO <sub>2</sub>	占比
材料生产	532237.82	92.24%
材料运输	37847.90	6.56%
施工	6958.56	1.21%



**Figure 4.** Carbon emission proportion of each engineering activity during the construction period of asphalt pavement per unit length

**图 4.** 单位长度沥青路面建设时期各工程碳排放占比

根据表 3 和图 5 可知，材料拌合环节碳排放占比高达 44.35%，位居首位，其排放主要源于拌合站内集料烘干、加热及机械搅拌所消耗的大量电能与燃料。原材料生产与材料加热环节分别占比 27.50%和 18.81%，三者合计占比超过 90%，共同构成了建设阶段碳排放的绝对主体。这揭示了路面工程的碳足迹在很大程度上由材料自身的物化能耗以及高温生产工艺所锁定。相比之下，原材料运输与混合料运输环节合计占比 7%，而施工现场的摊铺与压实环节碳排放占比合计不足 1.5%，表明终端施工活动的直接排放贡献相对有限。



**Figure 5.** Carbon emission proportion of each step during the construction period of asphalt pavement per unit length

**图 5.** 单位长度沥青路面建设时期各步骤碳排放占比

**Table 3.** Carbon emissions during the construction stage of asphalt pavement per unit length

**表 3.** 单位长度沥青路面建设阶段碳排放量

阶段	工程	步骤	碳排放量/kgCO <sub>2</sub>	占比
建设阶段	材料生产	原材料生产	158665.18	27.50%
		冷料上仓	9100.93	1.58%
		材料加热	108564.66	18.81%

续表

建设阶段	材料生产	材料拌合	255907.05	44.35%
	材料运输	原材料运输	19969.19	3.46%
		混合料运输	17878.71	3.10%
	施工	摊铺	2654.03	0.46%
		压实	4304.53	0.75%

## 4. 基于情景模拟的沥青路面碳排放预测

### 4.1. LEAP 模型测算原理

LEAP (Long-range Energy Alternatives Planning System)模型是能源 - 环境 - 经济系统分析模型。其采用自下而上的情景模拟方法,通过量化不同政策与技术路径下的能源需求、供应结构、环境排放及经济成本,支撑低碳发展战略决策。LEAP 构建分层树状能源系统,涵盖终端需求、转换系统和资源供应。其分析本质为情景比较:用户定义基准情景与政策情景,通过差异化参数设置模拟系统演变路径。LEAP 模型可根据部门特征灵活构建模型结构[15],实现不同情境下对能源需求、碳排放量的预测以及全面、详细的评价,其主要步骤如图 6 所示。

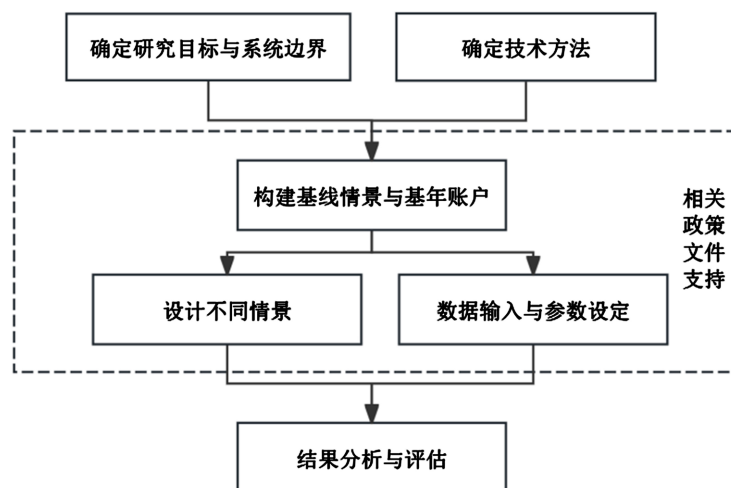


Figure 6. Steps of scenario analysis

图 6. 情景分析步骤

### 4.2. 基于 LEAP-LCA 的沥青路面碳排放预测

基于前文分析,明确了沥青路面建设期碳排放的关键特征,从而为减排情景的设置提供依据。本章将 LEAP 模型的测算原理与 LCA 模型相结合,依据 LEAP 模型的结构,构建适用于沥青路面碳排放预测的整合模型。LEAP 模型中碳排放计算底层逻辑公式如下:

$$C_n = \sum T_{n(k)} \times R_{n(k)} \quad (8)$$

式中:  $C_n$  为  $n$  环节碳排放量,单位为  $\text{kgCO}_2\text{-eq/kg}$ ;  $T_{n(k)}$  为  $n$  环节的能源  $k$  消耗量,单位为  $\text{kg}$ ;  $R_{n(k)}$  为第  $k$  种能源的碳排放因子。

针对沥青路面的建设、养护以及寿命终结阶段消耗能源产生的碳排放,根据可得数据情况,结合 LCA

计算模型,在 LEAP 模型中将能源类型为电力或者多种能源共同作用的能源部门的能源类型输入为柴油,如生产沥青过程中需要消耗多种能源,则将用能类型单纯输入为柴油,由柴油进行转换测算,其它参数输入不变,进而测算设备消耗电力或多种能源产生的碳排放,测算结果并不变化。

### 4.3. 模拟预测情景与指标设置

为可持续发展,早日实现“双碳”的目标,我国发布了一系列文件。本研究设定 2020 年为基准年,情景分析预测的时间跨度设定为 2020 年到 2035 年。基于政策导向与碳排放结构之间的联动关系,本文构建以下情景如表 4 所示,旨在深入探究有效的减排策略,为相关决策者在政策制定或行业规划方面提供有力的参考依据。

**Table 4.** Scenario description

**表 4.** 情景介绍

情景	具体内容
基准情景	此情景作为对比分析的基准,以 2020 年为基准年,设定基于沥青路面现有的发展路径与政策环境,维持当前的技术及政策,以客观呈现基础发展下的碳排放轨迹。
低碳情景	在基准情景的基础上,选用绿色固废材料与优化能源结构,降低对传统化石能源的依赖,同时推广清洁能源车辆与设备、改进施工工艺、应用节能技术与低碳装备,有效减少了碳排放。
理想情景	在基准情景的基础上,提高绿色固废材料的使用比例,并系统提升清洁能源占比,进一步推动能源结构向清洁化转型,显著降低碳排放。

本文依据相关政策规划、发展目标以及国内外沥青路面低碳技术发展趋势,梳理出材料能源强度、固废资源化利用水平、施工机械能源强度、施工机械电气化水平以及运载车辆能源强度五项关键参数。参数覆盖了沥青路面全生命周期中材料生产、施工建设、运料运输等主要碳排放环节,分别对应材料与能源消耗强度、能源结构与效率、资源循环利用水平等可控因素,为后续不同情景下的碳排放预测提供了量化基础。在“双碳”政策推动各行各业发展的背景下,沥青路面工程中涉及的各阶段各环节相关能耗物耗均可能会逐年递减,故参数设置以匀速或者先快后慢的增长/降低速率进行设置。

在“十五五”宏观背景下,材料能源强度的下降既源于技术能效提升,也受需求收缩影响。参照《2024—2025 年节能降碳行动方案》中规模以上工业单位增加值能源消耗降低目标,结合沥青路面工程的技术特性,将材料能源强度设置为每年下降 2%~5%;“十四五”对普通国省道沥青路面材料循环利用率提出了明确要求,此外部分交通强国建设试点项目已实现废旧路面材料高值化利用率,而“十五五”规划进一步将废旧材料再生利用列为交通基础设施高质量发展的核心方向。综合上述因素,本文将固废资源化利用水平设置为 70%~90%;根据国务院《2024—2025 年节能降碳行动方案》,规模以上工业单位增加值能源消耗需持续下降。施工机械作为交通建设领域的主要能耗设备,其能源强度下降受设备能效标准提升与老旧设备加速淘汰的双重驱动。参照工业领域节能目标,结合沥青路面施工机械的能耗特征,本文将施工机械能源强度设置为每年下降 1%~5%;《中国电气化年度发展报告 2025》,当前交通领域电气化率处于稳步提升阶段,预计“十五五”期间全国电气化率将保持持续增长态势。此外,已有相关文献研究对电动化率设置了较高目标。综上,本文将到 2035 年电气化率的范围设置为 20%~80%;ICCT 研究指出,公路运输车辆燃油消耗在技术层面有较大下降空间,但受标准实施滞后及保有量更新周期制约,实际油耗降幅有限,但运营效率改善可带来额外减排效益。综上,本文将运载车辆能源强度设置为每年下降 0.2%~1.5%。

相关情景的具体参数设定如表 5 所示。

**Table 5.** Key indicator settings  
**表 5.** 关键指标设置

指标	基准情景	低碳情景	理想情景
材料能源强度	20 年开始每年下降 3%、25 年开始下降 2%	20 年开始每年下降 5%、25 年开始下 3%	20 年开始每年下降 8%、25 年开始下降 5%
固废资源化利用水平	到 2035 为 70%	到 2035 年为 80%	到 2035 年为 90%
施工机械能源强度	20 年开始每年下降 2%，30 年开始每年下降 1%	每年下降 3%	每年下降 5%
施工机械电气化水平	2035 电气化比例 20%	2035 电气化比例 50%	2035 电气化比例 80%
运载车辆能源强度	每年下降 0.2%	每年下降 0.5%	每年下降 1.5%

#### 4.4. 不同情景下的沥青路面碳排放预测分析

通过对单位长度沥青路面工程不同情景下的碳排放量预测如表 6 所示，不同情景下碳排放量变化趋势如图 7 所示。在基准情景、低碳情景和理想情景下，2035 年的碳排放量分别为 701123.16 kg、511707.79 kg 和 361415.08 kg。从 2020 年至 2035 年，所有情景的碳排放量均呈现持续下降趋势。其中，基准情景作为常规发展路径下降最为平缓，至 2035 年累计降幅约为 18.2%。低碳情景减排效果显著，累计降幅达到 40.3%，体现了系统性推广清洁能源与节能技术的实际潜力。理想情景的下降幅度最为突出，累计降幅高达 57.8%，呈现出最为陡峭的下降轨迹，显示出在技术突破与能源结构彻底转型带来的明显减排效果。理想情景在早期即实现大幅减排，其 2026 年的排放水平已低于低碳情景的 2030 年目标，表明早期采取高强度措施能够带来跨越式的减排效益。从数值上看，到 2035 年，低碳情景较基准情景可额外减排约 189415.37 kg，理想情景能额外减排约 339708.08 kg，显示出技术组合实施力度的增加带来的巨大环境收益。

**Table 6.** Predicted carbon emissions under different scenarios  
**表 6.** 各情景下碳排放预测量

年份	BAS 基准情景	LCS 低碳情景	EPS 理想情景
2020	856599.34	856599.34	856599.34
2021	841220.12	823142.06	799038.98
2022	826235.03	791148.64	745637.66
2023	811628.72	760550.96	696087.08
2024	797391.55	731289.04	650106.70
2025	786382.18	704636.37	615451.16
2026	775601.30	678594.28	582023.84
2027	765044.50	653673.03	550544.71
2028	754707.45	629825.13	520901.78
2029	744585.91	607005.19	492989.47
2030	737015.38	588969.90	466708.26
2031	729578.26	572414.02	443102.66
2032	722272.48	556427.83	420845.09
2033	715096.02	540993.06	399858.84
2034	708046.89	526092.07	380071.56
2035	701123.16	511707.79	361415.08

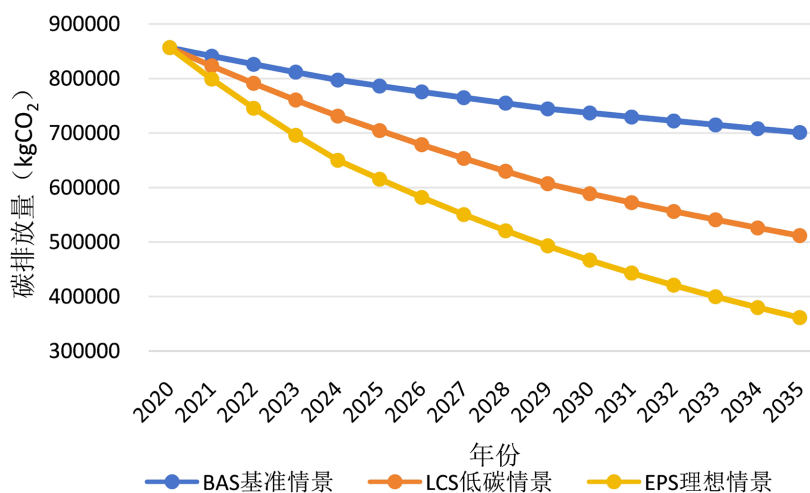


Figure 7. Carbon emission trends under different scenarios  
图 7. 各情景下碳排放趋势

#### 4.5. 减排对策

根据对单位长度的沥青路面工程全生命周期的碳排放核算，其碳排放高度集中于建设阶段，而该阶段的排放又绝对主导于材料生产环节，尤其是材料拌合、原材料生产与材料加热三个关键工序。这清晰指明了减排的核心方向：必须革新材料的生产工艺与能源结构。因此，在规划减排路径时，应系统推广温拌沥青技术以降低拌合能耗，并利用电能或生物质能对拌合站进行清洁化改造，同时大力推动钢渣等固废再生材料规模化替代原生骨料，从源头削减物化碳排放。此外，养护阶段的碳排放也不容忽视，需通过发展长寿命路面结构和推行预防性养护技术来延长大修周期，从而在全生命周期内协同增效。

综上所述，为实现行业的低碳转型，必须对各个环节进行攻坚，重点聚焦于材料环节，并以情景分析所揭示的减排潜力为科学指引，通过技术与管理措施的早期布局与高强度实施，推动发展路径从基准水平向理想脱碳目标系统跨越。前瞻性的技术路线规划与强有力的政策干预相结合，可显著增强减排成效，为道路基础设施的绿色转型提供关键支撑。

### 5. 结论与展望

本研究基于生命周期评价与碳排放因子法，系统核算了沥青路面全生命周期碳排放，并结合情景分析法揭示了不同低碳路径的减排潜力，得出如下结论：

(1) 碳排放高度集中于建设阶段，尤其是材料生产过程。核算表明，建设阶段排放占全生命周期的 67.36%，其中材料生产环节占该阶段的 92.24%；在材料生产中，材料拌合、原材料生产与材料加热是三个最主要的碳排放环节，合计占比超过 90%，其排放主要源于集料烘干加热所需燃料及电力消耗；材料运输与现场施工环节的排放贡献较小。

(2) 不同减排路径效果差异显著，早期强化干预效益高。相较于基准发展路径，推广成熟低碳技术的低碳情景可实现 40.3% 的碳减排，采用突破性技术及深度能源转型的理想情景减排幅度可达 57.8%；在前期采取高强度、综合性措施能显著加速减排进程，并获得更大的长期环境收益。

(3) 降低沥青路面工程碳排放的关键在于推动绿色建筑材料替代、拌合能源清洁化以及生产工艺能效提升；在拌合站采用电能、生物质能等替代传统燃料，并优化热工系统，能够从源头上大幅削减核心环节的排放。

本研究为沥青路面工程的碳核算与低碳路径选择提供了定量依据,对推动行业绿色转型具有参考价值,但仍存在以下不足,有待后续研究进一步完善:本文研究城市道路工程碳排放的最主要温室气体二氧化碳,在后续的研究中可对更全面的物质排放、碳排放源等方面进行补充。沥青路面碳排放核算与预测的时间跨度和空间跨度较大,影响因素复杂。后续研究可以加强相关基础数据与监测平台的完善,建立动态更新的碳排放因子库,并引入大数据与物联网技术,实现施工过程碳排放的实时监测与动态修正,提升核算与预测结果的精准性。

## 基金项目

排水沥青路面的三维重构及空隙特征研究(H-2025-303-134)。

## 参考文献

- [1] Flores-Ruiz, D., Montoya-Alcaraz, M., García, L., Gutiérrez, M. and Calderón-Ramírez, J. (2025) Mitigation Strategies Based on Life Cycle Assessment for Carbon Dioxide Reduction in Asphalt Pavements: Systematic Review. *Sustainability*, **17**, Article 695. <https://doi.org/10.3390/su17020695>
- [2] 姬美臣, 常征, 宋艳, 等. 营运车辆碳排放监测管理体系构建[J]. 公路交通科技, 2023, 40(S2): 385-392.
- [3] 张路路, 佟琼, 郭雅楠, 等. 基于模糊评价视角的“双碳”目标建设下城市低碳交通成效研究[J]. 公路交通科技, 2023, 40(4): 256-263.
- [4] 齐亚楠, 邓万军. 基于 LCA 的高速公路施工期碳排放量化边界界定[J]. 中国公路, 2023(5): 88-92.
- [5] 李慧, 彭夏清, 张静晓. 公路生命周期碳排放评估及其敏感性分析[J]. 公路工程, 2021, 46(2): 132-138.
- [6] Vignisdottir, H.R., Ebrahimi, B., Booto, G.K., O’Born, R., Brattebø, H., Wallbaum, H., et al. (2019) Life Cycle Assessment of Winter Road Maintenance. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, **25**, 646-661. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01682-y>
- [7] 王甲智, 冯凯, 冯家栋, 等. 沥青路面建养碳排放与低碳路径综述[J]. 市政技术, 2024, 42(09): 55-60.
- [8] Liu, Q., Yi, X., Falchetto, A.C., Wang, D., Yu, B. and Qin, S. (2024) Carbon Emissions Quantification and Different Models Comparison Throughout the Life Cycle of Asphalt Pavements. *Construction and Building Materials*, **411**, Article ID: 134323. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134323>
- [9] Aryan, Y., Dikshit, A.K. and Shinde, A.M. (2023) A Critical Review of the Life Cycle Assessment Studies on Road Pavements and Road Infrastructures. *Journal of Environmental Management*, **336**, Article ID: 117697. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117697>
- [10] Picardo, A., Soltero, V.M. and Peralta, E. (2023) Life Cycle Assessment of Sustainable Road Networks: Current State and Future Directions. *Buildings*, **13**, Article 2648. <https://doi.org/10.3390/buildings13102648>
- [11] International Organization for Standard Organization (ISO) (2006) ISO International Standard 14040: 2006. Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework.
- [12] 蔺瑞玉, 沙爱民, 杨发林, 等. 沥青路面温室气体排放评价方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2014, 34(06): 19-26.
- [13] 中华人民共和国交通运输部. JTG B01-2014 公路工程技术标准[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [14] 中华人民共和国交通运输部. JTG F40-2004 公路沥青路面施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [15] 刘方舟. 基于 LEAP 模型的城市碳排放达峰预测研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 中钢集团武汉安全环保研究院, 2021.