

道路工程建设期碳排放计算研究综述

刘庆琰, 刘华新*

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2025年3月31日; 录用日期: 2025年4月22日; 发布日期: 2025年5月8日

摘要

道路工程碳排放测算不仅有助于提升行业碳管理水平、支持国家“双碳”战略, 还为构建低碳交通基础设施提供坚实的数据支撑和理论依据。本文梳理碳排放标准, 总结国内外相关标准, 再将道路工程建设期碳排放分为测算模型和测算方法两部分研究, 分别进行论述分析, 又提出存在不足为日后研究提供支持。

关键词

道路工程, LCA, 碳排放测算

A Review of the Research on the Calculation of Carbon Emissions during Road Engineering Construction

Qingyan Liu, Huaxin Liu*

School of Civil and Architectural Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: Mar. 31st, 2025; accepted: Apr. 22nd, 2025; published: May 8th, 2025

Abstract

The carbon emission measurement of road engineering not only helps to improve the carbon management level of the industry and supports the national “dual carbon” strategy, but also provides solid data support and theoretical basis for the construction of low-carbon transportation infrastructure. This paper sorts out the carbon emission standards, summarizes the relevant standards at home and abroad, and then divides the carbon emissions during the construction period of road engineering into two parts: the calculation model and the calculation method, which are discussed

*通讯作者。

文章引用: 刘庆琰, 刘华新. 道路工程建设期碳排放计算研究综述[J]. 可持续发展, 2025, 15(5): 31-38.
DOI: 10.12677/sd.2025.155121

and analyzed respectively, and the shortcomings are put forward to provide support for future research.

Keywords

Road Works, LCA, Carbon Emission Measurement

Copyright © 2025 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

随着全球气候变化问题的加剧,碳达峰与碳中和目标已成为各国可持续发展的重要战略方向[1] [2]。城市道路工程作为基础设施建设的重要组成部分,其建设期碳排放对环境的影响不容忽视。建设阶段涉及材料生产与运输、机械设备运行、施工工艺实施等多个环节,能源消耗较大,是道路工程全生命周期碳排放的重要来源之一[3] [4]。

众多国内外学者针对道路工程建设过程中的碳排放进行了大量研究,并构建了多种碳排放测算模型。2001年 Stripple 等[5]建立了涵盖建设阶段材料生产、施工现场机械作业以及场内外运输设备运行等要素的碳排放模型,以开展公路、桥梁、隧道等在建设、运营、养护等全生命周期的碳排放研究。2021年吴文伶[6]提出了 CO₂ 排放量的计算方法,对不同工程和施工设备的排放量进行了测算,结果显示,排放量排名前 10 的机械约占总排放量的 90%,这为管理人员确定施工方法和选择施工机械提供了重要依据。2021年王兆伦[7]等确定了碳排放评价的量化指标,并基于碳排放因子建立了冷拌再生沥青混合料的碳排放模型。研究结果显示,在原材料生产阶段,能耗和碳排放量占比最高,分别达到 62.1%和 67.2%。2022年代丽娟[8]有学者运用 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)排放系数法对中国 2003~2017 年能源消费碳排放量进行了测算,分析了碳排放现状,结果显示能源消耗呈现稳步增长趋势。2023年牛凯[9]等人对目前常用的碳排放测算方法进行了总结,主要包括基于清单、基于投入产出、基于生命周期理论的三种方法,并从建设材料和施工工艺方面提出了减排建议。国外在道路工程碳排放研究方面相对成熟,尤其是在公路领域,已初步形成了部分数据库和模型。相比之下,我国在道路工程碳排放研究方面还不够成熟,对碳排放测算模型和预测的研究较少,与国外研究体系存在较大差距。我国在道路工程碳排放领域的研究开展时间较晚,尽管已在道路工程各阶段的材料、运输、能耗等方面碳排放的影响因素上开展了一定的研究工作[10],并对碳排放进行了测算,构建了相应的测算模型,但还存在一些问题。因此如何科学、准确地计算城市道路工程建设期的碳排放,成为实现低碳交通基础设施建设的关键问题。

2. 碳排放测算标准概述

碳排放标准的制定可以为测算模型的构建提供核算边界、范围以及基础数据,如碳排放因子等,确保模型能够全面且准确地覆盖所有相关碳排放活动。近年来国际碳排放标准有了很大进步,碳排放核算体系框架相对完善。GHG Protocol 是目前全球最广泛应用的温室气体 GHG (Greenhouse Gas)排放核算和报告标准之一。旨在帮助企业、政府和组织制定温室气体排放清单,并提供统一的方法来衡量、管理和减少碳排放。GHG Protocol 提供了系统化的碳排放核算框架,被《京都议定书》、ISO 14064 标准以及众多国家和行业碳排放报告体系所采纳。该标准适用于公司、政府机构等组织的碳排放核算,规定了碳排放范围、数据质量要求和报告格式并将碳排放分为直接碳排放、间接碳排放、其他间接碳排放三类以区

分不同来源的温室气体排放。它避免了繁琐的步骤, 为不同组织提供了标准的核算方法, 同时也为各国提供了个国际认可的管理工具。

PAS 2050、PAS 2060、PAS 2080 是国际上碳排放测算领域的相关标准。PAS 2050 即产品和服务碳足迹测算标准。该标准是全球首个专门针对产品碳足迹(Product Carbon Footprint, PCF)的测算方法, 被广泛应用于建筑材料、食品、交通运输等行业, 并为 ISO 14067 (产品碳足迹)标准的制定提供了基础。PAS 2050 采用生命周期评估(LCA)方法, 分析产品或服务从原材料开采到拆除回收的所有阶段的碳排放, 包括原料获取、运输阶段、使用阶段、废弃与回收阶段。PAS 2060 是英国标准协会(BSI)于 2010 年发布的全球首个碳中和认证标准, 旨在帮助企业、组织和政府机构实现碳中和。该标准提供了一套可验证的方法, 使企业能够量化、减少和抵消温室气体排放, 并获得碳中和认证。PAS 2060 标准适用于各类组织、产品、服务、活动和项目, 如基础设施建设、制造业、能源行业、交通运输、建筑等, 特别是在全球“碳达峰、碳中和”目标背景下, 该标准已成为国际公认的碳中和实践指南。PAS 2080 是全球首个专门针对基础设施项目全生命周期碳管理的标准, 强调“全生命周期碳管理”的理念, 包括规划与设计、施工阶段、运营和维护、拆除与再利用。综上 PAS 2060 强调碳中和, 而 PAS 2050 和 PAS 2080 主要关注碳排放测算, 并未要求强制实现碳中和。

ISO 体系涵盖了碳排放核算、碳足迹评估、生命周期分析、能源管理和碳中和等多个方面, 为全球企业和基础设施项目提供了系统化的碳管理方法。其中 ISO 14040/14044 提供产品和项目的全生命周期碳排放评估方法, 适用于道路工程、基础设施建设、制造业等。在碳排放核算与报告方面, ISO 14064 适用于组织(企业、政府)、项目的温室气体排放核算和报告, 可用于企业碳管理、碳交易等。ISO 14067 专注于产品碳足迹计算, 适用于建筑材料、消费品、供应链管理。ISO 标准体系可为道路工程碳排放测算、碳管理及碳中和提供理论方法支持, 努力实现低碳基础设施建设, 相较于 GHG 及 PAS 系列标准, ISO 系列在参考其他标准的同时进行简化, 普适性更强, 可为不同组织灵活提供最基本的要求和指导。

IPCC 温室气体核算指南, 从最早的温室气体清单核算框架, 奠定了基础方法。到 2006 年更新了碳排放因子和核算方法, 成为全球碳排放核算的主要依据, 但是该版指南存在测算体系和计算方法较为复杂、排放数据难以收集等缺点。直到 2019 年, 针对 2006 版指南的缺点进行补充和优化, 提高核算精度。综上典型碳排放标准对比分析如表 1 所示。

Table 1. Comparative analysis of typical carbon emission standards [11]

表 1. 典型碳排放标准对比分析[11]

类别	GHG 系列	PAS 系列	ISO 系列	IPCC 指南
发布单位	世界资源研究所、世界可持续发展工商理事会	英国标准协会	国际标准化组织	联合国政府间气候变化专门委员会
适用范围	从企业层面出发指导碳排放测算工作, 适用于企业、项目等	指导产品碳足迹测算及企业证明实现碳中和	指导产品碳排放测算及产品环境声明报告撰写	从国家层面编制温室气体清单
优势	实用性强	理论指导性强	适用性强	真实性、准确性高

3. 碳排放测算方法

3.1. 基于全生命周期的碳排放测算模型搭建

道路工程全生命周期碳排放测算方法是一种系统性方法, 用于评估道路从原材料获取、施工建设、运营维护、拆除回收各阶段的碳排放量。LCA 方法符合 ISO 14040/14044 标准, 可用于优化道路工程设

计、材料选择、施工工艺。学者们基于全生命周期做了许多研究。刘圆圆[12]提出了基于归因全寿命周期评价(ALCA)的公路生命周期碳排放分析的理论框架和方法体系王银辉[13]等人基于全寿命周期理论,将桥梁工程寿命周期划分为物化、运营维护以及拆除报废3个阶段,选取6种不同类型的桥梁,对其碳排放数据进行归一化处理,得出了各阶段的碳排放流薛志佳通过LCA方法,计算了湿软黄土路基采用不同施工方法的能耗和碳排放,并对其优缺点进行了阐述。朱合华[14]等构建了公路隧道全寿命周期多维度的评价模型,对某隧道提出5种设计方案,测算各方案的全寿命周期碳排放量。被广泛采用的全寿命周期评价方法有3种,即:基于过程的LCA(Process-based LCA, P-LCA)、投入-产出的LCA(Economic Input-Output LCA, EIO-LCA)和复合型LCA(Hybrid LCA, H-LCA)。

3.1.1. P-LCA

P-LCA是LCA领域的经典方法,其核心在于深入分析产品生命周期各阶段的输入与输出,以提高评估的准确性。然而,由于生命周期过程复杂且耗时,P-LCA的实施成本较高,工作量较大,因此更适用于单一产品或特定部门等较小范围的评估对象[15]。刘洪亮[16]等人通过明晰公路基础设施生命周期碳管理系统边界,分析碳排放来源,从材料、能耗、耐久、用能结构、碳抵消五个维度探析了公路基础设施低碳发展策略和路径。胡坤等[17]以及陈珺等[18]采用P-LCA方法分别评估了乳化沥青厂拌冷再生技术、橡胶再生沥青路面技术的节能减排效果,展示了其在具体应用中的价值。

3.1.2. EIO-LCA

EIO-LCA是一种基于经济投入产出(Input-Output)模型的生命周期评估方法。它通过分析经济部门之间的相互关系,量化产品或服务在整个供应链中的环境影响。因为其计算能力和可用的数据很少,后来又与LCA法相互融合,得到了EIO-LCA,这种方法在整个产品供应链中得到了广泛的应用,但是它的评估体系相对较为宏观,更适合于对整个产品行业、特定地区、特定国家等的环境收益评估。Jiang [19]等和Chang [20]等分别研究了EIO-LCA在柴油发电机和民用建筑领域的应用。李建国[21]等以教学楼建筑为研究对象,综合运用生命周期评价法和投入产出分析法对其碳排放进行核算。研究发现,混凝土、钢材和砌体材料是影响该建筑碳排放的关键因素,同时在运输阶段,汽油和柴油的使用控制也是碳排放管理的重点环节。

3.1.3. H-LCA

在上述两种方法基础上,学者们提出将两种方法综合使用。既有P-LCA在细节处理上的精确性,又有EIO-LCA在宏观层面的高效性,解决了单独使用其中一种方法而造成的局限。我们可以用P-LCA处理道路施工的核心过程,用EIO-LCA补充供应链影响。一般情况下,在研究过程中,要根据研究的目的和已有的资料清单来确定研究方法,与其他两种方法相比,本方法更具有普遍适用性的特点,无论是在单一产品、单一项目、部门、行业,还是在某个地区、某个国家,H-LCA都具有较强的技术优势。Batouli [22]等使用H-LCA方法研究不同路面的使用阶段影响及成本,还评估了各种活动成本及影响的不确定性。通过分析,还检验了结果对贴现率和未来交通增长率的敏感性。

3.2. 数据测算方法

目前碳排放测算主要有以下三种方法,这三种方法使用范围较广,并且在不同层面使用。

3.2.1. 碳排放因子法

碳排放因子法因其广泛的适用性和实用性,已成为目前最为成熟的碳排放测算方法。排放因子是指在获取或消耗单位质量的能源、产品过程中所产生的碳排放量[23][24]。在计算碳排放量时,通常采用联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)制定的《国家温室气体清单指南》中的公式:

$$\text{温室气体(GHG)排放} = \text{活动数据} \times \text{排放因子} \quad (1)$$

式 1 中, 活动数据是指引发温室气体排放的能源或资源的生产量与消耗量; 排放因子则是与活动数据相对应的, 每单位质量物质生产或消耗过程中所产生的温室气体量, 通常可以直接使用 IPCC、美国环境保护署、欧洲环境机构等权威机构提供的数据。

建造阶段的碳排放主要来自 3 个方面: 一是混凝土加工或加工生产预制件产生的碳排放; 二是工作人员生活的临时设施所产生的碳排放; 三是施工时机械设备消耗能源所产生的碳排放。这些能耗主要包括建造阶段消耗的电、气、油、煤等。

$$\text{建造阶段碳排放量 } C_{jz} \text{ 表达式为: } C_{jz} = \sum_{i=1}^n (E_i \times Q_i) \quad (2)$$

式 2 中: E_i 为第 i 种能源的耗用量; Q_i 为第 i 种能源的碳排放因子。

运行阶段的碳排放量 C_M 为建筑使用阶段消耗的各类能源折算的碳排放量之和。运行阶段的碳排放量 C_M 表达式为: $C_M = \sum_{i=1}^n (E_i \times Q_i)$ 。

拆除阶段的碳排放量即将拆除阶段消耗的电、气、油、煤等产生的碳排放。

$$\text{拆除阶段的碳排放量 } C_M \text{ 表达式为 } C_{cc} = \sum_{i=1}^n (E_i \times Q_i) \quad (3)$$

式 3 中: E_i 为第 i 种能源的耗用量; Q_i 为第 i 种能源的碳排放因子。胡如安[25]等采用等效热值法与碳排放因子法, 对沥青混合料的能耗及碳排放量进行计算, 深入分析我国沥青路面降耗减排的关键环节, 并提出相应的优化路径及实施方案。柳根金[26]等人通过对道路物化阶段碳排放的研究现状进行综述, 结合实际案例分析, 采用碳排放因子法计算碳排放量发现路基材料和轴流通风机产生的碳排放因子占比最高, 认为二者极具减排潜能。陈园[27]等人基于生命周期评价理论, 依托某城市道路项目构建碳排放核算模型, 并对相关影响因素进行碳排放敏感性分析, 为未来城市道路低碳提供方向, 助力低碳发展。

3.2.2. 质量平衡法

质量平衡法(Mass Balance Method, MBM)是一种基于物质守恒定律的碳排放测算方法。核心思想就是输入的物质质量总和等于输出的物质质量总和, 并通过碳元素流动来计算碳排放量。采用质量平衡法计算道路工程碳排放时, 基于碳质量守恒原则, 通过输入的碳含量减去以非二氧化碳形式输出的碳量来得出结果。质量平衡法在用于道路建造阶段的碳排放测算时, 可以结合碳排放因子法(EF 方法)或生命周期评价法(LCA)来优化计算。该方法的优势在于能够准确反映碳排放发生地的实际排放量, 不仅能区分不同类型设施之间的排放差异, 还能识别单个设备与特定设备群体之间的区别。特别是在设备不断升级换代的情况下, 该方法计算更为便捷。

$$\text{CO}_2 \text{ 排放} = (\text{原料输入量} \times \text{原料含碳量} - \text{产品/废物产出量} \times \text{产品/废物含碳量}) \times 44/12 \quad (4)$$

式中, $\frac{44}{12}$ 是 CO_2 与碳元素的转换系数(即 CO_2 与 C 的相对原子质量之比)。

3.2.3. 实测法

实测法是通过使用各种测量工具和仪器对碳排放量进行直接测量的一种方法。该方法通过设备直接呈现项目碳排放数据。如果测量过程准确, 所得结果也较为可靠, 但它需要专业的测量设备和硬件支持, 通常需要政府层面的资源投入。实测法通常分为非现场实测和现场实测两种方式。非现场实测是将采集到的气体样本送往专业检测机构进行分析; 而现场实测则是直接监测碳排放源的气体排放流速和浓度, 进而计算出碳排放量。实测法的优点是中间环节较少, 测量结果相对准确, 但其缺点是人力和物力成本较高, 且对送检样本的质量要求严格。表 2 为上述 3 种碳排放测算方法对比表。

Table 2. Comparison table of carbon emission calculation methods
表 2. 碳排放测算方法对比表

测算方法	定义	特点	适用范围
排放系数法 (IPCC 清单法)	按照碳排放清单列表，针对每一种排放源构造其活动数据与排放系数，以活动数据和排放系数的乘积作为该排放项目的碳排放估计值	研究范式统一，数据来源可靠，易于计算，动态碳排放数据测算能力差	一般用来表示长期平均的碳排放
质量平衡法	根据每年用于国家生产生活的新化学物质和设备，计算为满足新设备能力或替换去除而消耗的新化学物质份额	反映实际排放量，测算结果精确，基础数据种类繁多	适用于大量物质排放到大气中的情况
实测法	将排放源的现场实测基础数据进行汇总，从而得到相关碳排放量	中间环节少，测算准确，测量工具技术水平要求高，数据采集困难	适用于小范围、易监测，具备监测条件的特定碳排放源的情况

4. 目前存在的主要问题

4.1. 碳排放因子库不完善

在道路工程建设阶段，涉及的建筑材料多达数百种，而分项工程更是多达上万种。我国的《建筑碳排放计算标准》提供了 60 多种碳排放因子，东禾建筑碳排放因子库则涵盖了 3500 多种碳排放因子，但即便如此，仍无法涵盖所有材料种类，尤其是缺乏一些新型材料的碳排放因子，例如某些预制构件中使用的新型复合材料。这种碳排放因子的缺失给数据采集带来了巨大挑战。因此，亟需不断完善并更新碳排放因子库。

4.2. 相关数据不足

要加强对碳排放数据的深入研究，促进对城市道路工程碳排放数据的收集和整理工作，建立更加完善的数据统计体系，为碳排放评估和管理提供更加可靠的数据基础。建立更加精准的计算模型，通过改进现有的碳排放模型或者开发新的模型，提高对城市道路路面碳排放的精准核算、预测能力，尤其是针对不同区域和不同施工条件的影响。

4.3. 相关标准不完善

道路工程碳排放核算边界界定不统一，范围不明晰，导致核算结果出现差异，得到的结果无法进行对比或参考。道路工程碳排放计算标准的研究主要侧重于能耗管理，但在标准体系的完整性、系统性以及与实际管理需求的匹配度方面，仍需进一步优化和完善。

5. 结论

本文系统研究了道路工程建设期碳排放测算，梳理了国内外碳排放标准，分析了基于全生命周期的碳排放测算模型及数据测算方法，并指出了当前存在的问题。研究发现，国际上已有多项成熟标准，如 GHG Protocol、PAS 系列、ISO 体系和 IPCC 指南等，为道路工程碳排放测算提供了理论支持，但我国相关研究起步较晚，与国际水平存在差距，标准体系仍需完善。在测算方法方面，基于全生命周期的碳排放测算模型是有效工具，P-LCA、EIO-LCA 和 H-LCA 三种方法各有优势，可根据研究需求选择。碳排放因子法、质量平衡法和实测法是常用的数据测算方法，各有优缺点。随着未来绿色发展需求，碳排放测算仍需进行深入研究，未来可从以下几方面进行研究。

(1) 完善碳排放因子库

由生态环境部和国家统计局牵头, 加快建设国家温室气体排放因子数据库, 公布一批主要能源品类和重点基础产品碳排放因子, 并定期更新。这将为碳排放核算提供基础数据支持。针对新型材料, 组织科研机构、行业协会和企业开展碳排放因子的实测、收集和分析工作, 填补新型材料碳排放因子数据的空白。

(2) 加强数据收集与整理

国家层面应建立国家及省级碳排放年报、快报制度, 逐年编制国家温室气体清单, 鼓励各地区制定省级以下地区碳排放统计核算方法。组织制修订重点行业企业碳排放核算标准和技术规范, 明确统计核算、计量、监测、核查等配套规则。同时, 推动企业建立碳排放数据监测、报告和核查体系, 确保数据的准确性和完整性。

(3) 优化道路工程碳排放计算标准

加强组织编制道路工程碳排放核算标准, 细化重要工序或设施的碳排放核算方法, 确保核算结果的一致性和可比性。并选择典型道路工程项目开展碳排放核算试点, 验证和优化核算标准, 积累实践经验。

参考文献

- [1] 丁爽, 姜玲玲, 林翎, 等. 我国碳达峰碳中和标准化发展现状及对策研究[J]. 中国标准化, 2022(1): 63-70, 75.
- [2] 舒印彪. 提升碳排放国际标准化话语权[J]. 中国质量监管, 2022(3): 10.
- [3] 方海, 曹子龙, 凤振华, 等. 基于全生命周期理论的公路建设期碳排放核算方法及实证研究[J]. 公路工程, 2021, 46(1): 92-97, 124.
- [4] 杨洋, 王雪纯, 袁振洲, 等. 基于碳回收期理论的城市轨道交通碳减排效应测算[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(5): 1-11, 23.
- [5] Stripple, H. (2001) Life Cycle Assessment of Road: A Pilot Study for Inventory Analysis. Second Revised Edition. IVL Rapport, Gothenburg.
- [6] 吴文伶, 刘星, 冯建华, 等. 建筑工程施工机械碳排放研究[J]. 施工技术(中英文), 2021, 50(13): 118-122.
- [7] 王兆仑, 宁金成, 栗威. 冷拌再生沥青混合料能耗与碳排放量分析[J]. 公路, 2021, 66(5): 263-268.
- [8] 代丽娟, 马琼, 侯玉龙. 基于 IPCC 清单编制法的碳排放现状分析[J]. 中国市场, 2022(19): 16-18.
- [9] 牛凯, 朱晓东, 张兴宇. 道路建设期碳排放核算方法与减排技术综述[J]. 交通节能与环保, 2023, 19(1): 23-26.
- [10] 何青, 李晔, 张鑫. 道路系统全生命周期碳排放量化分析框架: 基于国际标准[J]. 城市交通, 2022, 20(1): 102-109.
- [11] 刘含笑, 吴黎明, 林青阳, 等. 碳足迹评估技术及其在重点工业行业的应用[J]. 化工进展, 2023, 42(5): 2201-2218.
- [12] 刘圆圆. 基于 ALCA 的公路生命周期二氧化碳计量理论与方法研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2019.
- [13] 王银辉, 蒋建男, 谢含军, 等. 桥梁工程全寿命周期碳排放流计算与分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(22): 9605-9614.
- [14] 朱合华, 邓越, 沈奕, 等. 公路隧道光环境全寿命周期绿色指标应用案例分析[J]. 中国公路学报, 2022, 35(1): 13-22.
- [15] 薛志佳, 李辰良, 晏长根, 等. 公路工程湿软黄土路基施工能耗和碳排放评估[J]. 大连理工大学学报, 2021, 61(5): 522-530.
- [16] 刘洪亮, 高硕晗, 杨文录, 等. 公路基础设施生命周期减碳路径探析[J/OL]. 交通节能与环保, 1-5. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1261.u.20250319.1824.006.html>, 2025-03-27.
- [17] 胡坤, 孙海秀. 乳化沥青厂拌冷再生技术的能耗及碳排放分析研究[J]. 北方交通, 2020(6): 26-29.
- [18] 陈珺, 吕正龙, 刘开琼. 基于 LCA 的橡胶沥青再生路面节能减排效果研究[J]. 公路, 2016, 61(5): 204-211.
- [19] Jiang, Q., Li, T., Liu, Z., Zhang, H. and Ren, K. (2014) Life Cycle Assessment of an Engine with Input-Output Based Hybrid Analysis Method. *Journal of Cleaner Production*, 78, 131-138. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.003>
- [20] Chang, Y., Ries, R.J. and Wang, Y. (2010) The Embodied Energy and Environmental Emissions of Construction Projects in China: An Economic Input-Output LCA Model. *Energy Policy*, 38, 6597-6603.

<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.06.030>

- [21] 李建国, 农卫萍. 基于混合生命周期碳排放模型的建筑碳排放测算[J]. 广东建材, 2024, 40(10): 96-99.
- [22] Batouli, M., Bienvenu, M. and Mostafavi, A. (2017) Putting Sustainability Theory into Roadway Design Practice: Implementation of LCA and LCCA Analysis for Pavement Type Selection in Real World Decision Making. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **52**, 289-302. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.02.018>
- [23] 刘杰, 高嘉蔚. 交通基础设施碳排放核算关键问题及对策探索[J]. 交通节能与环保, 2021, 17(5): 4-9.
- [24] 申娟娟. 基于 LCA 的建筑碳足迹测算及减排对策研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2019.
- [25] 胡如安. 沥青混合料能耗与碳排放分析及节能减排技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2014.
- [26] 柳根金, 周朝阳, 谢含军, 等. 基于 LCA 的道路工程物化阶段碳排放计算[J]. 市政技术, 2024, 42(9): 48-54.
- [27] 陈园, 王春红, 何方圆, 等. 城市道路建设碳排放量化分析[J]. 安徽建筑, 2025, 32(2): 76-79.