

doi:10.3969/j.issn.1673-6478.2023.01.005

公路工程基础设施建设碳排放测算方法研究综述

卢勇^{1,2}, 杨克^{1,2}, 刘爱华^{1,2}, 曹荣吉^{1,2}

(1.苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 211112; 2.新型道路材料国家工程实验室, 江苏 南京 211112)

摘要: 公路工程基础设施建设的能耗及碳排放量化评估是交通运输行业低碳绿色转型发展的重要支撑保障。本文针对公路工程基础设施建设的碳排放测算方法研究, 简要介绍了全生命周期理论在该研究中的应用, 将公路工程基础设施建设的碳排放测算方法分为碳排放测算模型搭建方法及基础数据核算方法两部分, 并分别进行分析论述, 最后针对研究不足提出合理展望。

关键词: 公路工程; 基础设施建设; 碳排放测算; 模型搭建; 基础数据

中图分类号: X822.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-6478 (2023) 01-0018-05

Research of Carbon Emission Measurement Methods for Highway Engineering Infrastructure Construction

LU Yong^{1,2}, YANG Ke^{1,2}, LIU Aihua^{1,2}, CAO Rongji^{1,2}

(1.JSTI Group, Nanjing Jiangsu 211112, China; 2.National Engineering Laboratory for Advanced Road Materials, Nanjing Jiangsu 211112, China)

Abstract: The quantitative assessment of energy consumption and carbon emissions for highway engineering infrastructure construction is an important support for the low-carbon and green transformation and development of the transportation industry. This paper summarizes the research on carbon emission measurement methods for highway engineering infrastructure construction, briefly introduces the application of the whole life cycle theory in this research, and divides the carbon emission measurement methods for highway engineering infrastructure construction into carbon emission measurement model construction methods and basic data accounting method, and the analysis and discussion are carried out respectively. Reasonable prospect was put forward for the lack of research, which provides a theoretical basis for the development of green highways in China.

Key words: highway; infrastructure construction; carbon emission measurement; model building; basic data

0 引言

在全球气候变暖的大背景下, 低碳环保已成为国际社会公认的发展趋势^[1-2]。中国作为负责任的大国, 高度重视应对气候变化的工作, 并制定了一系列标准、政策、法规^[3-6], 用实际行动充分体现了中国在应对气候变化工作中的大国担当。

交通运输行业作为全球减碳任务重点环节, 根

据国际能源署统计数据, 其碳排放比例已经超过全球碳排放总量的四分之一^[7-8]。同时, 随着我国经济建设快速发展, 交通行业碳排放不断增长, 与工业、建筑业组成我国碳排放的三大重点领域^[4, 7]。公路基础设施建设作为交通运输行业中的主要板块, 其发展有利于扩大区域市场和人口流动, 促进区域间交流, 降低运输的经济与时间成本, 同时也加大了交通行业的碳排放量, 因此加强交通运输行业降耗

收稿日期: 2022-09-30

作者简介: 卢勇 (1987-), 男, 江苏南京人, 硕士, 高级工程师, 从事道路工程结构和材料开发研究工作。(ly1365@jsti.com)

减排工作刻不容缓。

进行公路基础设施建设能耗及碳排放量化研究, 能够为交通行业低碳绿色发展提供有力支持。关于此, 国内外学者已经进行了部分研究, 但仍处于起步阶段。本文针对生命周期理论、碳排放测算模型搭建及基础数据核算方法展开论述, 为我国公路工程基础设施建设碳排放测算研究提供理论支持。

1 生命周期理论

国内外最常见的碳排放测算模型建立及测算边界确定主要依据生命周期评价 (Life cycle assessment, LCA)。LCA 理论思想起源于 20 世纪 60 年代, 美国中西研究所针对可口可乐公司饮料容器从“出生到死亡”, 也称从“摇篮到坟墓”对于环境、资源所造成的影响研究^[9], 后逐步被环境研究采用。该理念提出后, 一直处于探索阶段, 直到 20 世纪 90 年代, 国际环境毒理学和化学学会 (SETAC) 首次在国际研讨会上提出并召开多次研讨会后, LCA 评价方法基本框架才初步形成; 之后, 国际标准化组织 (ISO) 起草了一系列相关标准, 正式将生命周期评价纳入环境管理体系, 使其成为产品环境影响评估的核心方法, 有效指导各国开展 LCA 环境效益评价工作^[10-11]。

LCA 评价方法主要是通过统计、计算某产品从原材料生产、产品制造, 再到后期使用、废弃, 整个生命周期内各阶段或全过程中的投入与产出, 评估该产品对相关环境所产生的直接或间接影响。其主要有 4 个步骤: 目的与范围的确定、生命周期清单分析、生命周期影响评价和结果解释, 各环节互相联系, 不断重复, 最终产生评价结果。公路工程基础设施建设所产生的能耗及碳排放量化的研究, 换言之为公路基础设施建设对环境所产生的影响评估, 故可用 LCA 理论进行研究。

依据生命周期理论, 孟祥晨^[9]与张红波等^[12]分别将沥青路面、橡胶沥青路面建设过程分为原材料生产、原材料运输、施工建设三个阶段, 建立了相关阶段的能耗及碳排放量化模型, 对其环境影响进行了量化研究。郑天罡等^[13]将沥青路面就地热再生技术分为原路面铣刨与运输、原材料生产运输、混合料生产、混合料施工四个阶段, 并进行碳排放计算研究。闫强等^[14]也将沥青路面建设分为原材料生产、原材料运输、路面施工三个阶段, 研究了不同沥青路面结构类型对建设期碳排放的影响。Huang

等^[15]基于 LCA 理论将项目清单分为材料生产、材料运输以及路面施工三个单元, 并将根据路面参数、工艺参数等计算得到的碳排放结果汇总到项目清单中, 以此搭建路面建设生命周期环境影响评估模型工具。基于此, 作者将道路基础设施建设生命周期分为原材料生产、施工、材料运输三个阶段, 如图 1 所示。

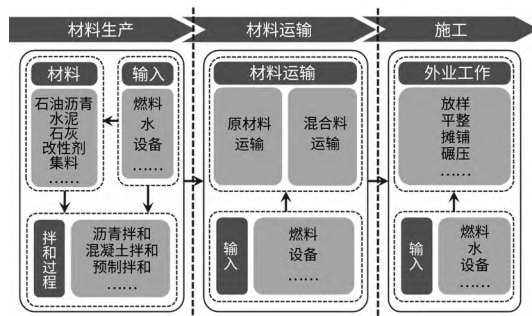


图1 道路基础设施生命周期主要过程

Fig.1 Main process of road infrastructure life cycle

2 基于生命周期理论的测算模型搭建方法

根据生命周期理论的道路基础设施建设的计算模型适用条件、边界范围等不同, 可将计算模型搭建方法分为: ①“自下而上”基于过程的生命周期分析方法 (Process-Based LCA, P-LCA); ②“自上而下”基于经济投入产出的生命周期分析方法 (Economic input-output LCA, EIO-LCA); ③将 P-LCA 与 EIO-LCA 综合使用的生命周期评价方法, 也称混合生命周期评价方法 (Hybrid LCA, H-LCA)^[16-17]。

2.1 P-LCA

P-LCA 是最常用的 LCA 方法^[18], 其分析了产品生命周期中设计的所有过程的输入和输出, 可获得较为准确的 LCA 结果, 但由于产品生命周期中通常存在大量的、耗费精力的单个过程, 导致其成为一种需要大量成本及工作量的测算方法, 只适用于测算范围比较小的单元, 例如单个产品、部门等进行碳排放测算分析。胡坤等^[19]采用“自下而上”的基于过程的生命周期方法, 评估了乳化沥青厂拌冷再生技术从原材料到施工阶段的节能减排效益, 分析得出, 乳化沥青厂拌冷再生技术相较于常规沥青混合料可减少 10.71% 的碳排放量。陈珺等^[20]基于 LCA 评估方法研究了橡胶再生沥青路面的碳排放, 其将路面建设过程分为原路面铣刨和运输、原材料生产、混合料生产、混合料运输、摊铺和碾压 5 个过程进行测算。高放^[21]将沥青路面建设期划分为材

料物化、运输、施工三个阶段,基于 LCA 方法进行沥青路面建设各阶段清单分析,对比六种不同路面结构的环境影响效益,并提出沥青路面建设的节能减排对策。

2.2 EIO-LCA

投入产出法是由美国经济学家 Wassily Leon-tief 提出的^[22],但由于其计算能力及数据可用性有限,后被用于与生命周期法相结合,形成了 EIO-LCA,该方法被广泛用于整个产品供应链的直接投入交易和环境影响效益量化研究,但其评价制度比较宏观,较适用于整个产品行业、某一特定区域、国家等进行环境效益测算研究。曾晓莹等^[24]采用自上而下的投入产出法,分析了中国 30 个省市的交通运输碳排放量与地域之间的关系,为我国各省市公路交通行业绿色发展、碳排放交易政策等提供理论依据。张智慧等^[23]采用投入产出法分析了建筑行业的总体碳排放情况,并与其他行业进行对比分析,综合衡量建筑行业的碳排放影响力,指出建筑行业具有很强的碳排放拉动影响力。Yuan Chang 等^[25]利用投入产出生命周期评估模型,从宏观层面定量分析了我国民用建筑的能源与环境影响,生成了整个经济范围的能源使用和环境排放清单,指出建筑业的隐含能源和环境排放在我国整个能源消耗与环境负荷中占很大的比例,且运营能源占主导地位。

2.3 H-LCA

由于 P-LCA 及 EIO-LCA 两者的局限性,基于以上两种方法,研究者们便提出了将两者综合使用,既保留了初级阶段的细节及精确性,也在次级阶段通过投入产出模型避免大量精力耗费。在研究中,方法的选择通常需要依靠研究目的以及数据的可获得性所决定,相较于另外两种方法,该方法更加具有普适性,不管是单个产品、项目,还是部门、行业,甚至某个区域、国家层面, H-LCA 均存在一定的技术优势^[17, 26]。但是 H-LCA 方法却很少用于公路基础设施建设碳排放研究, Rui 等^[27]针对路面使用、维修保养阶段碳排放量评估,结合西澳大利亚道路网案例,提出了一种混合 LCA 方法,指出交通管理部门应更多地关注道路使用阶段的管理,例如控制交通量、车辆限速、路面平整度等,并表明了交通量增加 10%,相关道路网络的 GWP 将增加 9.92%。Mostafa 等^[28]使用 H-LCA 方法评估了不同路面类型整个生命周期的 GWP。

2.4 P-LCA、EIO-LCA与H-LCA对比

根据具体数据要求的高低、边界范围的确定、

评价尺度的大小等, P-LCA、EIO-LCA、H-LCA 三种方法均存在较强的独特性,其对比分析如表 1 所示。

表 1 P-LCA、EIO-LCA 与 H-LCA 对比分析

Tab.1 Comparative analysis of P-LCA, EIO-LCA and H-LCA

类别	优势	不足	适用范围
P-LCA	针对性强,对于边界确定具有较强的主观性,能够获得精确的碳排放数值,可采用流程图进行表示,便于独立分析。	容易产生截断误差且误差大小难以判断,工作量巨大且细节性要求过高,需要耗费大量时间,容易造成滞后性。	单个产品 / 项目 / 工艺 / 环节 (微观)
EIO-LCA	完整性强,对数据要求性较低,工作量小,是一种更综合、更稳健的碳排放评价方法。	无法进行细节部分的碳排放测算,缺乏主观性,存在数据平均化带来的误差。	部门 / 行业 / 区域 / 国家 (宏观)
H-LCA	结合了针对性及完整性,可在保证完整性的基础上不断提高精确性。	该方法的应用也取决于数据来源和分析对象本身的限制,且缺乏有效的数据库支持。	微观 / 宏观

3 基础数据核算

碳排放计算模型在进行计算时,必须依靠基础数据才能正常进行。基础数据的核算方式根据计算尺度、计算方向等主要分为三种:排放因子法、质量平衡法、实测法。排放因子法是目前适用范围最广、应用最为普遍的一种碳排放基础数据核算方法,质量平衡法与实测法应用较少。

3.1 排放因子法

排放因子主要是指获得或消耗单位质量能源、产品所产生的碳排放量^[29-30]。利用排放因子法计算碳排放量的公式,参考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》,如式 1 所示:

温室气体 (GHG) 排放=活动数据×排放因子 (1)

式中,活动数据指导致温室气体产生的能源或资源生产量、消耗量;排放因子指与活动数据相对应的,生产或消耗单位质量物质所伴随的温室气体的生成量,可直接采用 IPCC、美国环境保护署、欧洲环境机构等提供的数据。

目前,国内外主要 LCA 数据库如表 2 所示。

孟祥晨等^[31]选用 IPCC 数据库的碳排放因子作为沥青路面建设期拌和阶段能耗及碳排放量化研究的量化基础参数,进行碳排放测算模型搭建及验证,指出混合料拌和站将燃料类型由重油改为天然气,可降低 29.82% 的碳排放量,推荐拌和站使用清洁能

表 2 国内外主要 LCA 数据库汇总
Tab.2 Summary of main LCA databases at home and abroad

来源	数据库名称	主要开发者
国外	IPCC 排放因子数据库	IPCC
	国际排放因子数据库	美国环境保护署 (USEPA)
	瑞士 Ecoinvent Database	瑞士 Ecoinvent Centre
	ELCD 数据库	欧盟研究总署 (JRC)
	GaBi 数据库	德国 Thinkstep 公司
	the U.S. Life Cycle Inventory	美国国家再生能源实验室 (NREL)
	Korea LCI database	韩国环境产业技术院 (KEITI)
	IDEA 数据库	产业技术综合研究所、日本产业环境管理协会
国内	中国生命周期基础数据库 (CLCD)	亿科环境科技、四川大学
	Baosteel LCA 数据库	宝钢股份
	RCESS 数据库	中国科学院生态环境研究中心
	中国汽车替代燃料生命周期数据库	同济大学

源工作。胡如安^[32]采用了等效热值法和碳排放因子法, 计算沥青混合料的能耗及碳排放量, 分析我国沥青路面降耗减排重点环节, 并提出相应的途径及实施方案。Zhou 等^[33]采用 Ecoinvent Database 中的数据作为碳排放测算基础数据, 进行了山西省公路建设能耗及环境污染程度量化研究。

3.2 质量平衡法

质量平衡法主要是根据每年用于国家生产生活的化学物质和设备, 计算为满足新设备能力或替换去除气体而消耗的新化学物质份额。以 CO₂ 为例, 由质量平衡法计算碳排放, 就是在确定碳质量守恒的情况下, 由输入碳含量减去非二氧化碳的碳输出量, 具体计算如式 2 所示^[29, 34]。

CO₂ 排放 = (原料输入量 × 原料含碳量 - 产品 / 废物产出量 × 产品 / 废物含碳量) × 44/12

(2)

式中: 44/12 是碳原子转换成的 CO₂ 转换系数 (即 CO₂/C 的相对原子质量)

3.3 实测法

实测法是指基于各种工具、仪器等进行碳排放量的实际测量, 主要分为非现场实测与现场实测两种。非现场实测是指将现场气体情况进行采样并送检, 由专门的检测机构进行测试; 现场实测是指在排放源处进行碳排放监测模块搭载, 通过连续监测气体排放流速、排放浓度, 进行碳排放量计算。

4 结论

目前, 我国经济建设仍处于急速发展的状态, 作为最基础、最广泛的运输方式, 公路交通发展取得了卓越成就, 但仍然存在不平衡不充分发展问题, 基础设施建设任务仍然较重, 其建设与运营所产生的能耗与碳排放不容忽视。合理正确的碳排放量化评估, 有利于为道路基础设施绿色转型发展提供良好的决策依据, 本文通过对道路基础设施碳排放量化评估方法研究现状进行总结分析, 得出结论如下:

(1) 有关道路基础设施建设碳排放量化评估的方法, 主要分为测算模型搭建方法与基础数据核算方法两个方面, 且绝大部分研究方法都涉及生命周期理论, 表明生命周期理论已广泛应用于道路基础设施建设碳排放量化评估工作中。

(2) 在测算模型搭建方法上, 过程分析法应用最为广泛; 但国内目前针对测算模型研究, 主要依靠借鉴国外的先进经验。尚未建立统一的相关标准、指南等对其进行约束, 同时, 随着研究的深入, 越来越多的影响因素被考虑, 致使公路基础设施建设碳排放测算边界模糊不清; 在下一步研究中, 应尽快明确道路建设过程中的重点环节, 规定各项指标加权制度, 厘清本行业与其他上游产业边界关系, 使测算结果更加准确、科学。

(3) 关于基础数据核算方法, 最为常用的是排放系数法; 但目前广泛采用的碳排放核算基础数据受产业体系、能源结构和新工艺、设备技术等因素的影响较大, 更新较慢, 且大多缺乏广泛调研、质量普遍不高; 在下一步研究中, 应立足国内实际, 从产业体系、能源结构、发展阶段等各方面出发, 进行标准化、规范化乃至一体化的清单编制或因子数据库的建立, 提高基础数据准确性。

(4) 随着国家对于环保的重视, 有关交通基础设施建设的碳排放量化研究不断增大, 但对于采用各式计算模型、核算方法得出的能耗与碳排放数据, 应尽快建立统一、精确、权威的机构或标准体系对数据的准确性进行评估验证。

参考文献:

[1] YU, LI, SUN, et al. Energy carbon emission reduction of China's transportation sector: An input-output approach[J]. Economic Analysis and Policy, 2021, 69: 378-393.
[2] 谢守红, 王利霞, 邵珠龙. 国内外碳排放研究综述[J]. 干旱区地理, 2014, 37 (04): 720-730.
[3] 张莹, 黄颖利. 碳中和实践的国际经验与中国路径[J]. 西南金

- 融, 2022 (09): 94-106.
- [4] 张金喜, 苏词, 王超, 等. 道路交通基础设施建设中的节能减排问题及技术综述[J]. 北京工业大学学报, 2022, (03): 1-18.
- [5] 赵震宇, 姚舜, 杨朔鹏, 等. “双碳”目标下: 中国CCUS发展现状、存在问题及建议[J/OL]. 环境科学: 1-15. Doi: 10.13227/j.hjks.202203136.
- [6] Rui Xie, Jiayu Fang, Cenjie Liu. The effects of transportation infrastructure on urban carbon emissions[J]. Applied Energy, 2017, 196: 199-207.
- [7] 杨良杰, 吴威, 苏勤, 等. 江苏省交通运输业能源消费碳排放及脱钩效应[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23 (10): 1383-1390.
- [8] 寇淋淋, 楚柏青, 李宇杰. 交通运输业碳中和政策措施分析[J]. 综合运输, 2022, 44 (06): 8-14.
- [9] 孟祥晨. 沥青路面建设期能耗及碳排放量化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [10] RAZMAN K K, HANAFIAH M M, MOHAMMAD A W. An overview of LCA applied to various membrane technologies: Progress, challenges, and harmonization[J]. Environmental Technology & Innovation, 2022, 27.
- [11] 潘美萍. 基于LCA的高速公路能耗与碳排放计算方法研究及应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [12] 张红波, 陈海涛, 徐升, 等. 橡胶改性沥青混合料路面建设能耗与碳排放评价[J]. 公路工程, 2021, 46 (03): 154-164.
- [13] 郑天罡, 白丛启, 王永立, 等. 沥青路面就地热再生技术环境效益研究[J]. 公路交通科技 (应用技术版), 2020, 16 (06): 89-92.
- [14] 闫强, 易可良, 李平, 等. 沥青路面结构类型对建设期碳排放影响分析[J]. 中外公路, 2021, 41 (02): 41-48.
- [15] HUANG Y, ROGER B, OLIVER H. Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements[J]. Journal of Cleaner Production, 2009, 17 (02): 283-296.
- [16] SALEHI S, ARASHPOUR M, KODIKARA J, et al. Sustainable pavement construction: A systematic literature review of environmental and economic analysis of recycled materials[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 313: 127936.
- [17] 董雪旺. 基于投入产出分析的区域旅游业碳足迹测度研究[D]. 南京: 南京大学, 2011.
- [18] Rui Jiang, Peng Wu. Estimation of environmental impacts of roads through life cycle assessment: A critical review and future directions[J]. Transportation Research Part D, 2019, 77 (C): 148-163.
- [19] 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 (06): 26-29.
- [20] 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 (05): 204-211.
- [21] 高放. 基于LCA的沥青路面建设期能耗和排放量化分析研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- [22] 宁森. 投入产出模型在工业生态系统分析中的应用[J]. 中国人口·资源与环境, 2006 (04): 69-72.
- [23] 张智慧, 刘睿劼. 基于投入产出分析的建筑业碳排放核算[J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2013, 53 (01): 53-57.
- [24] 曾晓莹, 邱荣祖, 林丹婷, 等. 中国交通碳排放及影响因素时空异质性[J]. 中国环境科学, 2020, 40 (10): 4304-4313.
- [25] CHANG Y, ROBERT J R, WANG Y. The embodied energy and environmental emissions of construction projects in China: An economic input-output LCA model[J]. Energy Policy, 2010, 38 (11): 6597-6603.
- [26] JOÃO S, GERARDO F, ADELINO F. Environmental and economic assessment of pavement construction and management practices for enhancing pavement sustainability[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2017, 116: 15-21.
- [27] JIANG R, WU C, SONG Y, et al. Estimating carbon emissions from road use, maintenance and rehabilitation through a hybrid life cycle assessment approach – A case study[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 277: 123276.1-123276.13.
- [28] MOSTAFA B, MICHAEL B, ALI M. Putting sustainability theory into roadway design practice: Implementation of lca and lcca analysis for pavement type selection in real world decision making[J]. Transportation Research Part D, 2017, 52: 289-302.
- [29] 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 (05): 4-9.
- [30] 申娟娟. 基于LCA的建筑碳足迹测算及减排对策研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2019.
- [31] 孟祥晨, 李源渊. 沥青路面建设期拌和阶段能耗及碳排放量化研究[J]. 公路工程, 2022, (05): 94-101.
- [32] 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]. 西安: 长安大学, 2014.
- [33] ZHOU X, ZHANG X, ZHANG Y, et al. Life cycle assessment of asphalt and cement pavements: Comparative cases in Shanxi Province[J]. Construction and Building Materials, 2022, 315: 125738.1-125738.8.
- [34] 刘明达, 蒙吉军, 刘碧寒. 国内外碳排放核算方法研究进展[J]. 热带地理, 2014, 34 (02): 248-258.