

道路全生命周期碳排放分析方法及特征规律研究综述

张兴宇, 何佳, 朱晓东

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津市 300074)

摘要: 交通领域碳排放约占全球化石能源碳排放总量的四分之一。我国作为交通大国, 交通碳减排工作任务艰巨。为促进生命周期评价方法在道路工程领域的研究与发展, 进一步制定有效的减排措施, 综合国内外最新研究成果, 分析了道路全生命周期碳排放系统的边界划分, 确定各阶段的碳排放贡献规律, 并给出未来发展方向。结果表明: 道路全生命周期通常包括材料生产与运输、施工、运营使用、养护维修和拆除回收5个阶段; 材料生产与运输阶段、施工阶段的碳排放量最多, 且水泥、沥青和钢材的生产是主要排放来源; 运营使用阶段排放不容忽视, 且路面平整度、路面反射率和混凝土碳化是主要影响因素。研究结果可为道路工程领域碳排放研究提供更为全面的借鉴, 助力“双碳”战略目标实现。

关键词: 道路; 全生命周期; 碳排放分析; 特征规律; 研究综述

中图分类号: U411

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)02-0021-05

Review on Analysis Methods and Characteristic Law of Life-cycle Carbon Emissions of Roads

ZHANG Xingyu, HE Jia, ZHU Xiaodong

(North China Institute of Municipal Engineering Design and Research Co., Ltd., Tianjin 300074, China)

Abstract: The transportation field accounts for about a quarter of global carbon emissions from fossil fuel. As a major transportation country, China has an arduous task of carbon emission reduction in transportation. In order to promote the research and development of life-cycle assessment method in the field of road engineering, the effective emission reduction measures are further formulated and the latest research results at home and abroad are synthesized. The boundary division of the carbon emission system of the full life cycle of the road is analyzed. The carbon emission contribution law of each stage is determined. And the future development direction is given. The results show that the full life cycle of road usually includes five stages of material production and transportation, construction, operation and use, maintenance and repair, and dismantling and recycling. The production and transportation phase of materials and the construction phase have the most carbon emissions, and the production of cement, asphalt and steel is the main source of emissions. The emission of the operation and use phase should not be neglected, and the pavement smoothness, pavement reflectivity and concrete carbonization are the main influencing factor. The research result can provide a more comprehensive reference for the study of carbon emission in the field of road engineering and help to realize the goal of “double carbon” strategy.

Keywords: road; full life cycle; carbon emission analysis; characteristic law; research review

0 引言

为应对全球变暖带来的灾害, 高质量落实碳达峰碳中和目标成为我国重大战略决策。我国交通运输

领域碳排放占全国终端排放的15%左右, 是仅次于工业、建筑之后的第三大碳排放源。当前, 我国道路基础设施建养总量跃居世界前列, 但仍存在碳排放强度高、与生态环境协调发展不足的问题。除了车辆运行直接排放的二氧化碳外, 道路基础设施的排放, 包括材料生产和运输、现场施工、运营养护和拆除回收, 占交通运输碳排放总量的5%~25%^[1], 减排任务艰巨。因此, 研究道路基础设施碳排放核算方法, 摸清道路碳排放水平, 明确道路生命周期各

收稿日期: 2024-11-11

基金项目: 2024年度天津市交通运输科技项目(2024-A11); 天津市计量科技项目(2024JMT034); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助(300102344501-2-2)

作者简介: 张兴宇(1992-), 女, 硕士, 高级工程师, 从事低碳交通研究工作。

阶段排放规律及排放热点,对于推动交通领域碳减排至关重要。

目前国内外道路领域低碳研究重点关注碳排放量核算、排放规律解析、减碳路径等方面。例如20世纪90年代,芬兰学者 Häkkinen^[2]首次将LCA理论应用于道路工程,将其全生命周期分为建设、养护、改建及回收4个阶段,分析其碳排放。杨博^[3]在公路工程施工定额法的基础上结合排放因子提出沥青路面施工阶段能耗与排放量化分析计算模型。潘美萍^[4]分析了高速公路全生命周期内4个阶段的能源消耗和二氧化碳排放,运用计算模型对半刚性基层沥青路面、柔性基层沥青路面和水泥混凝土路面3种结构进行了计算。刘圆圆^[5]提出了基于分单位-分部-分项的公路碳排放计量方法,揭示了浙江省与陕西省山区高速公路生命周期碳排放特征与规律,分析了材料、能源、施工机械设备差别对公路减排的影响。尽管道路基础设施生命周期碳排放的研究已有一定的基础,但仍存在系统边界不统一、排放贡献水平不清晰等问题,因此有必要对道路基础设施生命周期碳排放相关研究进行系统性综述,总结生命周期各阶段二氧化碳主要贡献来源,为进一步制定有效的减排措施提供参考。

1 LCA在道路中的应用

1.1 道路LCA发展

全生命周期评价(LCA)是指通过统计和计算某产品从原材料生产、产品制造,再到后期使用、废弃,整个生命周期内的投入与产出,评估其对环境所产生的直接或间接影响^[6]。评价流程主要有4个步骤:目的与范围确定、清单分析、影响评价、结果解释(见图1)。目前LCA已被广泛用于评价道路生命周期的环境影响,早期如Horvath和Hendrickson^[7]发表了第一本使用LCA方法进行道路环境影响的同行评议期刊;Stripple^[8]首次将LCA应用于道路全生命周期的环境影响评价,包括原材料提取、材料生产、现场施工、养护运营及废弃再利用的碳排放评估。随后,许多学者采用LCA方法估算道路碳排放量,如彭波等^[9]建立了热拌沥青混合料碳排放量化模型,分析了集料加热、沥青加热和混合料拌合环节的碳排放量;部分研究则将系统边界扩展到土方工程^[10]、隧道^[11]及桥梁^[12]等其他道路构筑物。

目前工程领域LCA理论模型的搭建方法分为三类:(1)基于过程的生命周期分析方法(Process-

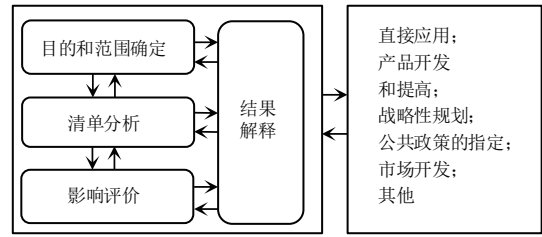


图1 ISO全生命周期分析的技术框架

Based LCA, P-LCA);(2)基于经济投入-产出的生命周期分析方法(Economic input-output LCA, EIO-LCA);(3)综合使用将P-LCA与EIO-LCA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)^[6,13]。基于道路建设碳排放量核算及边界范围的复杂性,较为常见的是采用P-LCA。P-LCA通过圈定碳排放核算边界、收集碳排放数据等过程,并通过生命周期清单分析得到数据清单,配合排放因子法,进而对研究对象的碳排放进行计算。在核算过程中要严格执行《环境管理生命周期评价原则与框架》等规范,确保评价结果的准确性。

1.2 道路LCA边界条件

道路LCA的第一步是确定目的与范围,即划定系统边界条件,若选择不当或遗漏,可能导致最终结果出现高达50%的误差^[14]。大多道路LCA方法定义道路全生命周期包括材料生产与运输、现场施工、运营使用、养护,以及生命周期结束时的拆除回收5个阶段^[8]。其中,材料生产与运输阶段、施工阶段是当前LCA研究中涉及最多的,分别占82%和78%;涉及拆除回收阶段的研究最少,占29%;仅有15%的研究在一篇论文中分析了所有5个阶段的排放^[15]。

本文结合以往研究成果,定义道路LCA分析范围应以道路基础设施为对象,覆盖其从原材料提取到拆除回收等完整生命周期,具体边界条件如图2所示。这有助于从生命周期的角度全面分析道路碳排放,并进一步识别排放源和主要贡献者。

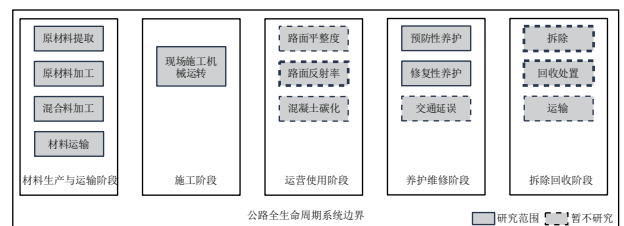


图2 道路全生命周期系统边界条件

2 道路全生命周期碳排放规律

2.1 材料生产与运输阶段碳排放

材料生产与运输阶段的碳排放主要来自原材料

的提取和生产、混合料生产以及材料运输到施工现场。现有研究多侧重于原材料、混合料的生产过程排放,少数研究对运输过程进行建模分析,发现运输距离是显著影响排放的因素^[16]。其中,材料生产碳排放量占道路全生命周期排放量的50%~60%^[17-18]。大多数研究考虑了集料、水泥、沥青、钢材、添加剂等生产过程中的排放^[1,19],以及附属设施生产的排放,如排水管道、交通设施等^[20],且结果表明,沥青、水泥和钢材等材料生产碳排放占主体地位,合计约占70%。此外,原材料生产阶段的碳排放基本符合“二八原则”,即较少的材料贡献了绝大部分的碳排放,如与水泥相关的材料碳排放量占总排放量的84%以上,但其材料消耗量仅占总量的4.7%;而消耗量较大的砂石料(约占总量的91.8%)却只贡献了3%的碳排放^[15]。由此可见,对于复杂的大型道路工程,可以选择排放量贡献较大的材料进行碳排放量估算,既简化了计算的复杂程度,又确保了结果的可靠性。由于材料生产阶段在道路生命周期中贡献了超过一半比例的碳排放,因此控制该阶段碳排放对于减排工作至关重要,可采用低碳排放替代材料(如胶凝材料、生物沥青等)、废旧材料循环利用等方式来减排。

2.2 施工阶段碳排放

施工阶段的碳排放主要来源于机械设备(如挖掘机、压路机、摊铺机)能源消耗的直接排放和燃料、电力生产及设备制造相关的间接排放。由于缺乏相关数据,目前设备制造排放很少纳入现有研究。此外,由于机械设备多在不同项目中回收利用,因此分配给单独项目的排放量较小,可忽略不计。从生命周期角度来看,施工阶段对于排放贡献相对较低,仅为道路生命周期排放的1.9%~15.0%^[17,21],但其相关研究和实验表明,该阶段产生碳排放不可忽视。刘圆圆^[5]对20个沥青路面工程和18个水泥混凝土路面工程进行了生命周期评价,发现推土机、压路机和平地机是施工过程中排放的主要来源。目前,大多研究通常依据工程量清单和定额获取活动水平数据,并采用国家或省级平均碳排放因子进行计算,未来应更多地关注实际施工活动数据的采集及现场测量的排放因子。总体而言,施工阶段碳排放的本质在于机械燃料消耗,因此,提升能源使用效率、开发清洁能源及采用低碳施工工艺将是减少排放的关键措施。

2.3 运营使用阶段碳排放

运营使用阶段是道路生命周期中持续时间最长

的阶段,其对环境的影响水平显著高于其他阶段。早期的研究并未考虑这一阶段的影响,但目前这一阶段受到了越来越多的关注,在现有的道路生命周期评价研究中,许多学者考虑了由于道路条件导致的车辆运行中额外的能耗和二氧化碳排放的因素。

2.3.1 路面平整度

道路表面不平整会显著增加汽车轮胎在行驶时的滚动阻力。根据车速的不同,可能会导致汽车燃油消耗量的15%~50%被用于克服这一阻力^[22]。虽然,对于单辆车而言,平整度改变导致额外增加的油耗微不足道,但在交通流量较大的区域,所有车辆能耗和排放量的累积效应可能会对生命周期评估产生显著影响。未来研究可结合交通量变化情况,建立如图3所示的路面平整度—车速—交通—能耗与排放的量化预估模型^[23]。

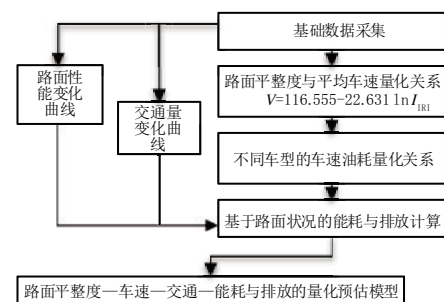


图3 路面平整度—车速—交通—能耗与排放模型参数传递流程

2.3.2 路面反射率

城市热岛现象与路面的反射能力有着直接联系。实验表明,反射率越高,路面温度越低,越有助于减少热岛效应,从而减轻温室气体排放^[24-25]。

一般水泥混凝土路面的反射率范围为0.25~0.46,沥青路面的反射率范围为0.05~0.20,经计算,每平方米路面反射率增加0.15,可以抵消38 kg的二氧化碳^[15]。建议把路面反射率作为一个参考因素,在不同类型路面能耗与二氧化碳排放的LCA分析结果相近的情况下,选用反射率较低的路面。

2.3.3 水泥混凝土碳化

混凝土碳化是指混凝土中的氢氧化钙与空气中的二氧化碳发生化学反应,生成碳酸钙和水的过程^[23]。Rossick^[26]对9种不同混凝土路面使用、废除阶段的碳化过程进行了研究,发现碳化过程吸收的二氧化碳可以占到材料生产阶段产生碳排放的5%~30%。因此,在进行全生命周期评估时,必须考虑混凝土碳化所吸收的碳排放。然而,目前中国对于水泥混凝土碳化过程的定量研究还相对有限。因此,建议基于当地收集到的水泥混凝土路面碳化数据,

对新建的水泥混凝土路面在使用期间可能发生的碳化现象进行深入分析,并预测其未来结构拆除的方式,估算拆除阶段吸收的碳排放量,并考虑核减。

2.4 养护维修阶段碳排放

养护维修阶段包括预防性养护、修复性养护等,其碳排放主要来自新材料生产及运输、混合料生产、现场施工、废旧材料拆除及废弃等。该阶段碳排放约占道路生命周期总排放量的5%~50%^[10,20-21],因养护维修频率、养护类型(如路面、桥梁、交通工程等)、养护方案的不同有较大差异。此外,相较于新建工程,养护维修活动会额外产生更高的交通延误碳排放。

对道路进行养护维修,需要设置养护施工区,一般会封闭部分车道造成车辆降速、拥堵、延误,导致汽车燃料的额外消耗,从而产生额外的碳排放。Wu等^[27]研究发现,道路养护维修活动造成延误而产生的温室其他排放量占总排放的7.72%~30.12%。张倩^[28]采用Vissim模型对全长半幅施工、分段半幅施工、全长分车道施工等不同方式造成的交通延误碳排放进行了分析,结果表明分段半幅施工方式最优,且由于晚上施工时交通量减少,车辆的平均延误时间减少,也大大降低了延误排放,说明与交通量密切相关。上述研究表明,在车流量较大的道路,养护维修引起的交通延误对碳排放结果影响不可忽略。因此,建议未来结合交通量进行微观交通仿真,分析道路养护维修过程中交通延误的碳排放。

2.5 拆除回收阶段碳排放

拆除回收阶段包括道路使用寿命结束时的拆除、废弃物运输、回收和最终处置。根据Liu^[29]和Park^[17]等的研究,这一阶段仅贡献了约1%的碳排放。然而,Loijos^[30]发现,道路寿命结束时的拆除、运输、回收和处置可能贡献6%~13%的温室气体排放。总体而言,现有文献中对这一阶段的排放研究较少,主要是在实际情况下一般不允许对基础设施进行完全拆除和处置。此外,拆除后通常对于废旧材料会进行处置回收,一般应适当选择回收材料的排放因子,考虑碳核减。

3 结 语

(1)目前LCA方法已被广泛用于评估道路的生命周期环境影响。通过综述发现,现有研究普遍认为道路生命周期可以分为五个阶段:材料生产与运输、现场施工、运营使用、养护维修及拆除回收,且排

放分析大多针对材料生产与运输、现场施工两个阶段,对于运营使用、拆除回收阶段考虑较少,导致环境影响评价结果存在偏差,也影响减排措施的选择,未来更应关注这两个阶段的研究。

(2)由于道路工程结构复杂且有许多不确定性因素影响排放,较难给出生命周期各阶段绝对的排放比例。但可以确定的是材料生产与运输阶段、施工阶段的一次性排放量最大,且主要来自水泥、沥青和钢材的生产。目前,多数研究中碳排放量是采用排放因子法进行理论计算,后续研究可重点关注实际工况条件下的现场实测。

(3)从道路全生命周期考虑,运营使用阶段产生碳排放不容忽视,可从以下3个方面进行分析:a.根据现阶段研究成果,采用路面平整度—车速—交通—能耗与排放的量化预估模型,分析平整度变化导致额外的排放;b.将路面反射率作为道路节能减排的重要决策因素;c.考虑水泥混凝土碳化率,估算拆除阶段吸收的碳排放量,并考虑核减。

(4)本文对养护维修阶段的交通延误造成的能耗与排放进行了综述,建议未来结合交通量情况,采用微观交通仿真分析手段估算碳排放。对拆除回收阶段碳排放现有研究较少,后续可对拆除后废旧回收利用的核减排进行研究。

参考文献:

- [1] Liu Y, Wang Y, Li D. Estimation and uncertainty analysis on carbon dioxide emissions from construction phase of real highway projects in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017(144): 337-346.
- [2] Häkkinen T, Mäkelä K. Environmental adaption of concrete: Environmental impact of concrete and asphalt pavements, Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland, FNL, 1996: 94-95.
- [3] 杨博. 沥青路面节能减排量化分析方法及评价体系研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- [4] 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.
- [5] 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]. 西安: 长安大学, 2019.
- [6] 卢勇, 杨克, 刘爱华, 等. 公路工程基础设施建设碳排放测算方法研究综述[J]. *交通节能与环保*, 2023, 19(1): 18-22.
- [7] Horvath A, Hendrickson C T. Steel versus steel-reinforced concrete bridges: environmental assessment [J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 1998(4): 111-117.
- [8] Stripple H. Life Cycle Assessment of Road-A Pilot Study for Inventory Analysis[J]. *Swedish Environmental Research Institute (IVL), Gothenburg*, 2001.
- [9] 彭波, 邓海龙, 曹世江, 等. 热拌沥青混合料碳排放量化与评价体系[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2019, 39(3): 1-9.

- [10] Barandica J M, Fernandez-Sanchez G, Berzosa A, *et al.* Applying life cycle thinking to reduce greenhouse gas emissions from road projects [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013(57):79-91.
- [11] Li X, Liu J, Xu H. Calculation of endogenous carbon dioxide emission during highway tunnel construction: a case study[C]//International Symposium on Water Resource and Environmental Protection. Xi'an: 2011 International Symposium, 2011.
- [12] Wang X, Duan Z, Wu L, *et al.* Estimation of carbon dioxide emission in highway construction: a case study in southwest region of China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015(103):705-714.
- [13] 魏作标,夏立爽,刘志强,等.山区高速公路隧道建设期碳排放计算方法探讨[J].*交通节能与环保*, 2022, 18(6):120-123.
- [14] Lenzen M, Dey C. Truncation error in embodied energy analyses of basic iron and steel products[J].*Energy*, 2000, 25(6):577-585.
- [15] Liu N, Wang Y, Bai Q, *et al.* Road life-cycle carbon dioxide emissions and emission reduction technologies: A review[J].*Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2022, 9(4):532-555.
- [16] Chowdhury R, Apul D, Fry T. A life cycle based environmental impacts assessment of construction materials used in road construction [J].*Resources Conservation and Recycling*, 2010, 54(4):250-255.
- [17] Park K, Hwang Y, Seo S, *et al.* Quantitative assessment of environmental impacts on life cycle of highways[J]. *Journal of Construction Engineering & Management*, 2003, 129(1):25-31.
- [18] Mao R, Duan H, Dong D, *et al.* Quantification of carbon footprint of urban roads via life cycle assessment: case study of a megacity-Shenzhen[J].*Journal of Cleaner Production*, 2017(166):40-48.
- [19] Gulotta T M, Mistretta M, Pratico F G. A life cycle scenario analysis of different pavement technologies for urban roads[J].*Science of the Total Environment*, 2019(673):585-593.
- [20] Noland R B, Hanson C S. Life-cycle greenhouse gas emissions associated with a highway reconstruction: a New Jersey case study[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015(107):731-740.
- [21] Muench S T. Roadway construction sustainability impacts review of life-cycle assessments[J]. *Transportation Research Record*, 2010, 2151:36-45.
- [22] Gbolagah F E, Li H, Rodgers M O. Demonstrating an empirical tool to predict fleet-wide heavy-duty vehicle fuel-saving benefits from low rolling resistance tires[J]. *Transportation Research Record*, 2019, 2673:361-372.
- [23] 何亮,李冠男,张军辉,等.路面全寿命周期能耗与CO₂排放分析研究进展[J].*长安大学学报(自然科学版)*, 2018, 38(4):10-20.
- [24] Noshadravan A, Wildnauer M, Gregory J, *et al.* Comparative pavement life cycle assessment with parameter uncertainty[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2013(25):131-138.
- [25] Santero N J, Masanet E, Horvath A. Life-cycle assessment of pavements. Part II: filling the research gaps[J].*Resources Conservation and Recycling*, 2011a, 55(9e10):810-818.
- [26] Rossick K M. The Effect of Carbonation After Demolition on the Life Cycle Assessment of Pavements[J]. *Massachusetts Institute of Technology*, 2014(9):132-139.
- [27] Wu P, Xia B, Zhao X. The importance of use and end-of life phases to the life cycle greenhouse gas (GHG) emissions of concrete—a review [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2014(37):360-369.
- [28] 张倩.基于生命周期理论的沥青路面养护环境评价方法研究[D].北京:北京工业大学, 2015.
- [29] Liu R, Smartz B W, Descheneaux B. LCCA and environmental LCA for highway pavement selection in Colorado[J]. *International Journal of Sustainable Engineering*, 2015, 8(2):102-110.
- [30] Loijos A, Santero N, Ochsendorf J. Life cycle climate impacts of the US concrete pavement network[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2013(72):76-83.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadfloodbridge@163.com

