

doi:10.3969/j.issn.1673-6478.2022.06.023

全生命周期公路建养的碳排放及环境影响

任 腾¹, 成元海², 于晓晓¹, 张 璐^{1, 3}, 王仕峰¹

(1.上海交通大学化学化工学院, 上海 200240; 2.甘肃省公航旅建设集团有限公司, 甘肃 兰州 730099;
3.中国建设基础设施有限公司, 北京 100029)

摘要: 为完善公路领域能耗统计监测和计量体系, 促进我国“双碳”战略的实施, 本文评析了全生命周期评估法(LCA)公路建养的碳排放及环境影响。首先, 系统梳理了LCA目标与范围的确定、清单分析、影响评估及解释等环节在公路碳排放及环境评估中的应用。其次, 针对公路LCA存在的问题, 提出标准化功能单元、扩大系统边界、提高数据质量、进行动态化及敏感性分析等建议。

关键词: 交通碳排放; 能耗; 生命周期评估法; 环境评估; 碳达峰

中图分类号: U491.9

文献标识码: A

文章编号: 1673-6478(2022)06-0115-05

Carbon Emission and Environmental Impact of Road Construction and Maintenance Based on Life Cycle Assessment

REN Teng¹, CHENG Yuanhai², YU Xiaoxiao¹, ZHANG Lu^{1, 3}, WANG Shifeng¹

(1.School of Chemistry and Chemical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2.Gansu Provincial Highway Aviation Tourism Construction Group Co., Ltd., Lanzhou Gansu 730099, China;
3.China Construction Infrastructure Co., Ltd., Beijing 100029, China)

Abstract: In order to improve the energy consumption statistical monitoring and measurement system in the field of road engineering, and to promote the realization of “dual carbon” strategy, carbon emission and environmental impact of road construction and maintenance based on life cycle assessment (LCA) are reviewed and analyzed. First, the application of LCA's goal and scope determination, inventory analysis, impact assessment and interpretation in road carbon emissions and environmental assessment are systematically sorted out. And then, aiming at the problems existing in road LCA, suggestions on standardizing functional units, expanding system boundaries, improving data quality, dynamic and sensitivity analysis, etc. are proposed.

Key words: transportation carbon emissions; energy consumption; life cycle assessment; environmental assessment; carbon peak

0 引言

除了加快形成绿色低碳运输方式, 确保交通运输领域碳排放增长保持在合理区间之外, 交通行业

应在公路建养阶段利用全生命周期评估法(LCA)监测、分析公路工程各阶段的能耗及环境影响, 以完善公路建养系统^[1]。

LCA已被广泛用于评估公路建养对环境的影响

收稿日期: 2022-01-04

基金项目: 国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作”重点专项项目(2021YFE0105200)

作者简介: 任腾(1996-), 女, 山东济宁人, 博士在读, 研究方向为低碳路材, 高分子材料加工与废橡胶降解机理。(sjtu.rt19960906@sjtu.edu.cn)

响。例如,张红波等^[2]利用LCA评估了橡胶沥青混合料公路建设能耗与碳排放,发现同等公路结构条件下,中上面层使用橡胶沥青可有效降低能耗13.6%,减少碳排放量约14.2%。周毅等^[3]采用基于LCA的环境效益分析方法,量化分析利用厂拌热再生技术与传统铣刨重铺养护方式的能源消耗和环境保护排放,结果发现厂拌热再生技术具有良好的节能和减排效益。基于公路LCA的大多数研究侧重于利用LCA分析公路建设新技术的实施、再生材料的使用等带来的经济环境效益,而公路LCA的适用性和一致性还有待进一步完善^[4]。

鉴于此,本文基于ISO 14040和14044框架组织,如图1所示,从公路LCA目的和范围的确定、清单分析、影响评价及解释这四个方面,综述了公路建设和养护过程中所涉及的能耗、碳排放或环境评估的影响因素,指出了评估过程存在的问题,并提出可能的解决方案。

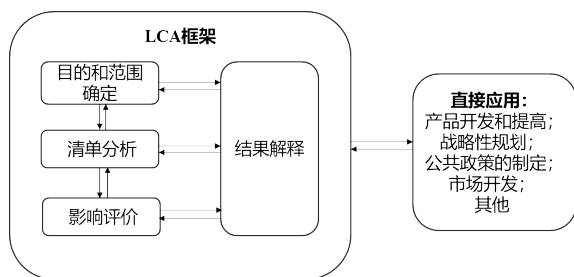


图1 ISO生命周期评估的框架

Fig.1 Framework for ISO life cycle assessment

1 公路LCA方法框架

LCA是一种汇编和评价某产品、工艺或服务在整个生命周期的输入、输出及其潜在环境影响的工具^[5]。在公路领域,LCA有助于量化、分析和比较不同类型的公路从材料提取到废弃整个阶段的环境影响。因此,LCA是构建低碳节能公路系统必不可少的方法之一。

根据系统边界和方法学原理的不同,LCA可分为投入产出、过程和混合三种生命周期评价,其中,混合生命周期评价方法是投入产出和过程方法的结合^[6]。据统计,公路LCA研究主要采用的是过程LCA或者混合LCA方法。基于ISO 14040和14044标准,公路LCA的分析步骤总结如下:首先,确定该研究的目的及范围,并由其确定公路LCA的系统边界;然后根据系统边界的划分确定每个阶段所有可能的能耗、碳排放及环境影响因素,再以一个功

能单元为基准进行清单分析,即根据实际的生产施工数据,对生命周期中所有的环境负荷进行量化和汇总;最后选择合适的影响类别,如全球变暖、资源消耗、人类健康等,对清单分析的结果进行评价和解释,得出符合研究目的和范围的结果。

2 公路LCA目的和范围的确定

在对产品或服务进行LCA分析之前,应首先确定该研究的目的和范围。公路LCA的主要目的是评估公路工程在整个生命周期的环境影响,包括直接和间接环境影响。例如,Tokede等^[7]在挪威公路隧道的LCA研究中指出,该研究旨在评估隧道建设产生的环境影响,并将分析结果用于确定挪威公路隧道的热点问题。LCA的范围应充分明确,以确保研究的广度、深度和细节兼容性。宋壮壮^[8]在基于LCA的公路养护施工区交通延误碳排放研究中,分析的范围主要是公路工程项目养护维修阶段的交通拥堵板块,涵盖了施工活动导致的所有交通延误碳排放。LCA的范围包括定义功能单元、系统边界和影响类别、数据要求及原始数据质量要求等。其中,在比较两个或多个产品系统时,功能单元和系统边界的确定在LCA结果中起着关键作用^[9]。

2.1 功能单元

ISO 14040将功能单元定义为“用作基准单元的产品系统的量化性能”。其主要目的是提供与输入和输出相关的基准单元以确保LCA结果的可比性^[9],选择不同的功能单元可能会导致同一研究产生不同结论^[10]。因此,在公路LCA的比较分析中,功能单元的引入可以使所有输入(材料资源和能源等)和输出(向空气、水和土壤的排放)标准化。表1列举了国内外公路LCA研究中所采用的功能单元,其中,最常用的是“km-车道”。利用LCA评估公路的环境影响时,由于功能单元的选择不同,所得结果可能无法进行比较,即公路LCA主要不足之一是功能单元缺乏共识性^[11]。这可能是由公路本身的复杂性和缺乏标准造成的。此外,现有功能单元常常忽略公路的实际状况,例如,如果将“km-车道”视为功能单元,则无法捕捉公路随车流量、气候及时间等发生变化的实际状况。因此,应将公路状况和性能纳入现有功能单元,为比较环境影响提供更好的分析基础^[12]。

2.2 系统边界

确定LCA目标和范围的另一个要素是系统边界

表 1 公路 LCA 功能单元参数
Tab.1 Function unit parameters in pavement LCA

地区	功能单元	分析寿命 / 年	是否考虑 交通量	引用文献
中国	1 t 沥青混合料	-	否	[13]
	公路面积: 11 250 m ²	-	否	[14]
	1 km 双向 4 车道公路,	15	是	[15]
北美	1 km 4 车道公路	40	否	[16]
	5.89 km 单向 2 车道公路	50	是	[17]
	1 km 2 车道公路	40	是	[18]
欧洲	1 km 2 车道公路	-	否	[19]
	1 m 挪威标准公路隧道	100	否	[20]
	1 km 2 车道公路	20	是	[21]

的确定。系统边界涉及公路建养在整个生命周期阶段内所有的活动过程,如图 2 所示。不合适的系统边界或遗漏某个过程可能会导致评价结果出现 50% 的误差^[22]。早期的一些研究认为不同的公路在使用阶段具有相同的环境影响,但实际上使用阶段的影响也因公路条件而异。例如,公路平整度会影响车辆的燃油消耗量、公路反射率对城市热岛效应及公路照明产生的用电量的影响等^[23]。此外,不同于其他产品,公路系统作为一种长寿命体系,其 LCA 系统边界的确定不仅要包含生命周期内的所有活动,还要选择适当的地理和时间范围,以确保 LCA 评估结果的准确性。

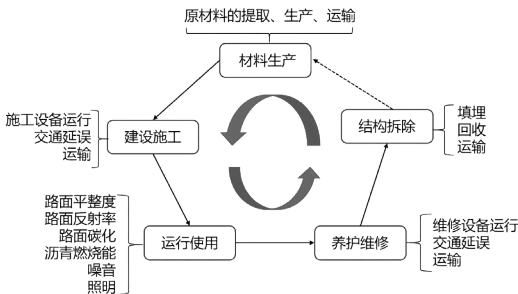


图 2 公路 LCA 的系统边界
Fig.2 System boundary in pavement LCA

2.3 数据质量要求

由于公路系统的活动强度高、寿命长等特性,进行 LCA 分析时,较难获取第一手的准确数据,可以使用相关机构提供的可用数据库,但数据库仍具有地域性和时效性,因此公路 LCA 数据的质量需要进行不确定分析^[24]。此外,碱活化材料(AAMs)

已广泛应用在公路建养中^[25],但 AAM 作为水泥混凝土的替代品在公路 LCA 的环境影响研究较少。因此,在确定公路 LCA 目的和范围时,应充分考虑一些可能的替代方案的相关数据,例如最新开发的建筑材料、交通行业的新技术工具以及新公路战略和政策等的输入数据。

3 公路LCA清单分析

公路 LCA 清单分析包括量化和记录公路生命周期所有的输入和输出数据。对于公路 LCA 的某些阶段(如材料生产和建设施工),输入和输出数据是根据不同来源的数据库获得的,即数据收集。而对于其他阶段(如运行使用和养护维修阶段),应通过使用不同的评估方法确定输入和输出,即数据评估。

3.1 数据收集

LCA 清单分析的一个重要方面是数据的适用性,大多数公路 LCA 研究采用的是国家级数据库。数据的不确定性主要是由数据库的局限性和项目特定因素造成的。数据库的局限性主要体现在数据库种类、地域和时效等方面。Wang 等^[26]使用四种不同的数据库对公路基层的环境负荷进行了比较研究。他们发现,由于使用了不同的数据库,环境负荷变化增加了 25%。因此,使用本地化和及时更新的数据库是必要的。

3.2 数据评估

Santos 等^[27]开发了一种高度可定制的公路 LCA 模型,该模型包括六个主要模块:原材料提取和生产、施工建造、养护和维修、材料运输、施工区交通管理及结构拆除。

除了数据模型的完整性之外,在清单分析的数据评估中还容易遗漏一些环境影响,尤其是在使用及养护维修阶段^[28]。

(1) 使用阶段

该阶段需要考虑由于公路与车辆及环境的相互作用而产生的影响。这些影响主要是由于公路平整度、公路反射率、照明效应、混凝土公路碳化、热岛效应等而导致车辆消耗的额外燃料。公路平整度是公路 LCA 中最重要的参数之一,会随着公路使用年限的增加而增加。EEA 空气污染物排放清单指南表明,由公路平整度引起的滚动阻力降低 10%,可使汽车油耗降低 2%。因此,滚动阻力与车辆燃油消耗量之间存在着密切关系,参考 MIRIAM 模型估算由滚动阻力产生的额外燃油消耗量,即:

$$F_{CS} = 0.028 \times [1.209 + 0.000481 \times IRI \times v + 0.0394 \times MDP + 0.000667 \times v^2 + 0.0000807 \times ADC \times v^2 - 0.00611 \times RF + 0.000297 \times RF^2] \times v^{0.056}$$

式中: F_{CS} 为滚动阻力引起的燃油消耗量, L/km; IRI 是公路平整度, 使用国际粗糙度指数, m/km; v 是车辆速度, m/s; MDP 是公路的宏观纹理, 由参数平均轮廓深度表示, mm; ADC 是公路曲率, rad/km; RF 是公路坡度, m/km。

该模型结果公路平整度—车速—交通—能耗与排放模型参数传递流程^[29]类似, 如图 3 所示。

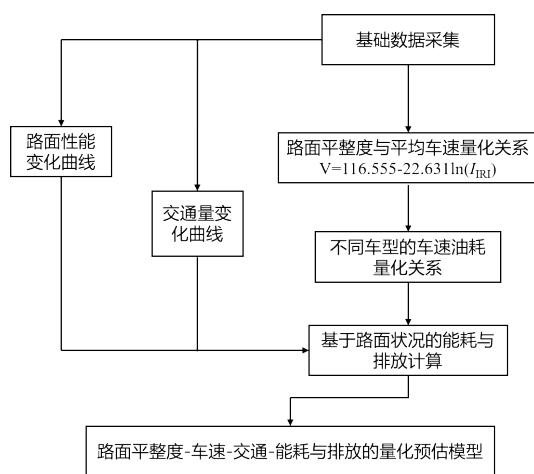


图 3 公路平整度—车速—交通—能耗与排放模型参数传递流程^[29]

Fig.3 IRI-speed-traffic-energy consumption and emission parameter delivery process^[29]

(2) 维修阶段

公路作为一种活动性强、寿命长的系统, LCA 的分析需考虑其动态变化指标, 如公路的实际状况。公路状况受到温度、交通、降水和结构特征等各种因素的影响, 评估这些因素产生的影响, 以确定公路状况的恶化程度。因此, 在公路 LCA 的养护维修阶段, 要考虑公路状况以确定养护维修的活动强度及频率。在公路 LCA 养护维修阶段, 需要注意由于施工设备运行而导致的交通拥堵和绕行, 继而产生的环境影响。结合养护维修阶段的交通延误造成的能耗及环境影响, 得到图 4 的综合量化评价模型。

4 公路LCA影响评估与解释

4.1 评估

LCA 的影响评估旨在利用清单分析的结果了解和评估潜在环境影响的大小, 并为 LCA 的解释阶段提供可靠信息。影响评估的第一步是分类, 即将清单结果分配给不同的影响类别, 如生态环境、资源

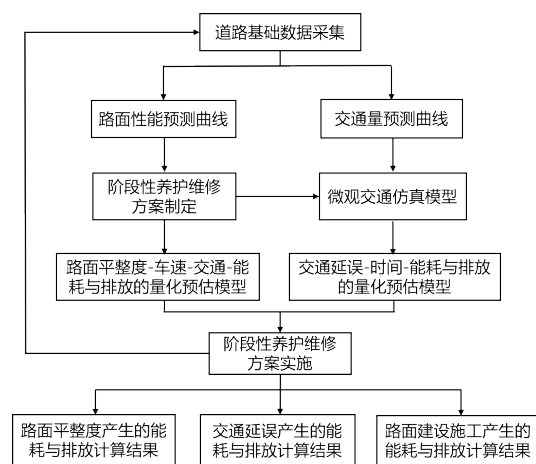


图 4 公路平整度与交通延误综合量化预估计算流程^[1]

Fig.4 Integrated quantitative forecasting calculation process of roughness and traffic delay^[1]

消耗和人类健康等。在公路 LCA 中, 主要考虑的是能源消耗和碳排放等环境影响, 而忽略水资源消耗、有毒物质释放、土地资源利用、噪声等带来的人类健康及其他影响。混凝土或沥青路面影响评估输出的估算标准有能值、火用、能量强度等。因此, 能源消耗的基本核算方法也未达成一致。此外, 沥青作为一种碳氢化合物, 具有固定的原料能量, 但大多数公路 LCA 研究都忽略了沥青的原料能量。

4.2 影响解释

在影响解释阶段中, 需要同时考虑清单分析和影响评估的结果, 提供符合确定的目标和范围的结果, 并得出结论、解释局限性、提供建议。在解释环节进行敏感性分析有助于理解输入数据、评估方法和所选择的影响类别对 LCA 结果的影响。但公路 LCA 中的许多重要参数缺乏敏感性分析。比如, 各种类型的化学外加剂, 如高效减水剂、减缩外加剂和养护剂等, 尽管与水泥、骨料和水等其他成分相比, 化学外加剂的用量较低, 但与它们的合成和毒理学特性相关的环境负担是显著的^[30], 所以不能忽视其在公路 LCA 分析中的环境影响。

5 结语

本文以 ISO 14044 为基本框架, 系统梳理了公路 LCA 各个环节的关键内容, 针对其存在的局限性提出相关建议, 并提出公路 LCA 各环节的研究方向:

(1) 目的和范围的确定: 在选择功能单元时要使用可调节公路性能的功能单元; 在比较不同公路结构的环境影响时, 要选择统一的功能单元, 即标准

化功能单元;在确定 LCA 系统边界时,既要包含生命周期内的所有活动,还要考虑评估的地点和期限。

(2) 清单分析:准确记录公路使用阶段与环境的影响相关的所有数据,包括公路平整度、公路反射率、混凝土碳化、热岛效应、沥青燃烧能等;在评估养护维修活动的类型、频率及其环境影响时,要考虑公路状况恶化的动态和不确定性;开发可靠的区域特定的清单数据,以减少清单分析中的不确定性。

(3) 影响评估及解释:拓宽公路 LCA 的影响类别,不仅仅局限于能耗及碳排放指标,还可以添加噪声等带来的人类健康的影响指标;统一能耗等环境指标的核算方法;将不确定分析、敏感性分析纳入 LCA 解释环节,完善 LCA 的研究体系。

参考文献:

- [1] 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(04):10-20.
- [2] 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.
- [3] 周毅,郭伍军,朱东莉.基于LCA的山区公路沥青路面厂拌热再生环境效益分析[J].公路工程,2021:1-9.
- [4] AZARIJAFARI H, YAHIA A, BEN AMOR M. Life cycle assessment of pavements: reviewing research challenges and opportunities[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 2187-2197.
- [5] GB/T 24040—2008. 环境管理 生命周期评价原则与框架[S].
- [6] 王长波,张力小,庞明月.生命周期评价方法研究综述——兼论混合生命周期评价的发展与应用[J].自然资源学报,2015,30(07):1232-1242.
- [7] TOKEDI O O, WHITTAKER A, MANKAA R, et al. Life cycle assessment of asphalt variants in infrastructures: The case of lignin in Australian road pavements[J]. Structures, 2020, 25: 190-199.
- [8] 宋庄庄.基于LCA的公路养护施工区交通延误碳排放研究[D].重庆:重庆交通大学,2020.
- [9] JIMÉNEZ C, BARRA M, JOSA A, et al. LCA of recycled and conventional concretes designed using the Equivalent Mortar Volume and classic methods[J]. Construction and Building Materials, 2015, 84: 245-252.
- [10] DALE B E, KIM S. Can the Predictions of Consequential Life Cycle Assessment Be Tested in the Real World? Comment on "Using Attributional Life Cycle Assessment to Estimate Climate-Change Mitigation" [J]. Journal of Industrial Ecology, 2014, 18(03): 466-467.
- [11] SANTERO N J, MASANET E, HORVATH A. Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2011, 55(9-10): 801-809.
- [12] ALALOUL W S, ALTAF M, MUSARAT M A, et al. Systematic Review of Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Analysis for Pavement and a Case Study[J]. Sustainability, 2021, 13(08): 4377.
- [13] 崔泽强.再生混凝土骨料温拌沥青的生命周期评价[J].建筑机械,2021(10):16-19.
- [14] 谈飞.基于LCA的低碳干线公路耐久性路面性能研究——以G312镇江城区改线工程为例[J].四川水泥,2020(12):253-254.
- [15] 李冠男,何亮,饶志鹏.基于LCA的高速公路养护维修能耗与CO₂排放研究[J].公路,2018,63(05):269-275.
- [16] LIU R, LIU Y, JI B, et al. Hot spot stress analysis on rib-deck welded joint in orthotropic steel decks[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 97: 1-9.
- [17] SANTOS J, BRYCE J, FLINTSCH G, et al. A life cycle assessment of in-place recycling and conventional pavement construction and maintenance practices[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2015, 11(09): 1199-1217.
- [18] CHEN F, WU Q, HUANG D, et al. Indoor air flow motions caused by the fabric air dispersion system: A simplified method for CFD simulations[J]. Indoor and Built Environment, 2017, 26(06): 841-854.
- [19] CELAURO C, CORRIERE F, GUERRIERI M, et al. Environmentally appraising different pavement and construction scenarios: A comparative analysis for a typical local road[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2015, 34: 41-51.
- [20] HUANG L, BOHNE R A, BRULAND A, et al. Life cycle assessment of Norwegian road tunnel[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2015, 20(02): 174-184.
- [21] VIDAL R, MOLINER E, MARTÍNEZ G, et al. Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2013, 74: 101-114.
- [22] LENZEN M, DEY C. Truncation error in embodied energy analyses of basic iron and steel products[J]. Energy, 2000, 25(06): 577-585.
- [23] SANTERO N J, MASANET E, HORVATH A. Life-cycle assessment of pavements Part II: Filling the research gaps[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2011, 55(9-10): 810-818.
- [24] 郑小燕, Easa Said, 季韬,等.路面养护方案生命周期环境影响评价的不确定性分析[J].福州大学学报(自然科学版),2019,47(05):689-694.
- [25] SUN Z, LIN X, LIU P, et al. Study of alkali activated slag as alternative pavement binder[J]. Construction and Building Materials, 2018, 186: 626-634.
- [26] WANG T, LEE I, KENDALL A, et al. Life cycle energy consumption and GHG emission from pavement rehabilitation with different rolling resistance[J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 33: 86-96.
- [27] SANTOS J, FERREIRA A, FLINTSCH G. A life cycle assessment model for pavement management: methodology and computational framework[J]. The international journal of pavement engineering, 2015, 16(3): 268-286.
- [28] 唐皓,崩海东,黄晓明.基于生命周期分析法的公路养护能耗模型[J].东南大学学报(自然科学版),2016,46(03):629-634.
- [29] 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.
- [30] MAEDER U G R O. Concretes of the future: The impact of concrete admixtures on the environment[J]. Construction Chemicals, Sika Technologies AG, BMG Engineering, 2004, 84: 245-252.