

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2015.05.079

# 路面工程生命周期评价(LCA)方法应用研究

张倩<sup>1</sup>, 徐剑<sup>2</sup>, 张金喜<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学 交通工程北京市重点实验室, 北京市 100124; 2. 交通运输部公路科学研究院)

**摘要:** 在路面工程中运用生命周期评价(LCA)方法来进行研究分析具有重要意义。该文介绍了LCA的发展情况、定义及框架,从LCA目标与范围确定、清单分析、影响评价3个主要方面概括分析了国内外主要研究现状,分析认为目前路面LCA研究存在以下问题:范围界定没有统一标准;中国缺少数据支撑无法形成标准数据库;关于数据质量的分析研究较少;影响评价不全面等。针对上述问题,文章提出了工作建议。

**关键词:** 路面工程;生命周期评价(LCA);目标与范围确定;清单分析;影响评价

道路建设需要消耗大量沥青、水泥、石料等高能耗和高碳密度的原材料和产品,例如中国水泥产量自1985年以来连续近30年居世界第一,占世界总产量的50%以上。与此同时,道路维修养护还会产生大量废弃物,尤其是对于需频繁维护的路面工程而言更是如此。运用生命周期评价(LCA)方法评价路面工程的能耗排放,量化分析路面工程各环节、各阶段的能源消耗情况,可为路面工程的绿色化、低碳化提供指导。

## 1 生命周期评价(LCA)概述

20世纪90年代以后,在国际环境毒理学和化学学会(SETAC)、欧洲生命周期评价发展促进委员会等机构的大力推动下,LCA方法在全球范围内得到了较大规模应用,各种LCA软件和数据库不断推出,国际

标准化组织制定和发布了关于LCA的ISO 14040系列标准,促进了LCA在许多工业部门的成功应用,使之在决策制定中发挥着重要作用,成为产品环境特征分析和决策支持的有力工具。

### 1.1 LCA的定义

1990年SETAC首先系统提出了生命周期评价的概念:一种通过对产品、生产工艺及活动的物质、能量的利用及造成的环境排放进行量化和识别而进行环境负荷评价的过程;是对评价对象能量和物质消耗及环境排放进行环境影响评价的过程;也是对评价对象改善其环境影响的机会进行识别和评估的过程。生命周期评价包括产品、工艺过程或活动的整个生命周期,即原材料的开采、加工,产品制造、运输和分配,使用、重新利用、维持,循环以及最终处理。

联合国环境规划署将生命周期评价定义为:生命

### 参考文献:

- \*\*\*\*\*
- [1] 陈晓华. 云南省公路工程试验检测计费管理体系探讨[J]. 公路交通技术, 2012(1).
- [2] 云南省交通运输厅. 公路工程试验检测费用研究与计费指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [3] 国家发展计划委员会, 建设部. 工程勘察设计收费标准(2002年修订本)[M]. 北京: 中国物价出版社, 2002.
- [4] 计三友, 杨涛. EIQ-ABC分析法在钢铁物流中心规划中的应用[J]. 武汉理工大学报: 信息与管理工程版, 2012(1).
- [5] 赖世红. ABC分析法在物流库存管理中的应用[J]. 邮电设计技术, 2006(3).
- [6] 项勇, 张仕廉. 基于灰色聚类-网络分析法的工程项目风险评价[J]. 统计与决策, 2012(1).
- [7] 赵昱, 刘行, 等. 基于层次分析法-灰色聚类的PFI模式下公租房建设的风险评价方法[J]. 工程管理学报, 2013(1).
- [8] 王首绪, 朱鹏. 基于PCA-Entropy的区域公路交通发展水平综合评价[J]. 交通科学与工程, 2011(2).
- [9] 王首绪, 吴岳. 基于IAHP-Entropy-Topsis模型的公路采购决策方法[J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2013(1).

收稿日期: 2014-12-17

基金项目: 国家国际科技合作专项项目(编号: 2013DFA81910)

作者简介: 张倩, 女, 硕士研究生. E-mail: youhun2008@126.com

周期评价是评价一个产品系统生命周期整个阶段(从原料的提取和加工,产品生产、包装、市场营销、使用、再使用和产品维护,直至再循环和最终废物处置)的环境影响工具。

国际标准化组织(ISO)将生命周期评价定义为:对产品系统整个生命周期的输入、输出及潜在环境影响的汇总和评价。

## 1.2 LCA 框架

不同机构对 LCA 框架的划分不尽相同,其中以 SETAC 和 ISO 的生命周期评价理论框架影响最广,它们均将生命周期评价划分为目标与范围确定、清单分析、影响评价及改善评价(或解释)4个部分。但是,无论 SETAC 还是 ISO 指南都只描述了 LCA 通用的理论框架和方法,并没有针对特定产品生产或系统过程制定详细的框架体系,不具有实际操作性的统一步骤。

## 2 路面工程 LCA 目标与范围的确定

确定 LCA 目标与范围,尤其是界定其范围,是进行 LCA 分析的前提,也是影响 LCA 评价结论的最重要因素之一。

### 2.1 国外研究概况

国外学者对路面工程 LCA 目标和范围的确定已经开展了较多研究。

Horvath and Hendrickson(1998)针对热拌沥青和连续配筋混凝土(CRCP)这两种路面材料,将路面工程生命周期分为材料生产、路面施工和使用生命结束3个阶段进行 LCA 分析。但是由于缺少可靠的数据支撑,没有考虑养护维修及路面运营。

Häkkinen and Mäkelä(1996)基于 LCA 方法对 SMA 面层和设置传力杆的接缝水泥混凝土路面(JRCP)进行了对比研究。研究范围包括材料生产、路面施工、使用及养护维修4个阶段,并分析了养护阶段的交通干扰,但没有考虑路面生命结束阶段。

英国运输研究实验室(TRL)的 asPECT 报告中,将沥青路面生命周期划分为10个阶段,包括了沥青路面从原材料获取至生命结束的各个环节,但由于缺少数据支撑,通常只重点考虑前5个或7个阶段,涵盖材料生产、施工、使用生命结束3个环节,不包括使用阶段。

Stripple(2001)针对 JPCP、热拌沥青路面、冷拌沥青路面,按照材料生产、施工、使用及养护3个阶段进

行 LCA 分析。该研究认为道路不存在所谓的“生命结束”,因此没有必要考虑生命结束阶段。

Zapata and Gambatese(2005)只对 CRCP 和沥青路面的原材料生产和施工阶段进行了 LCA 分析。没有考虑其他阶段及沥青材料生产能耗。对历史数据进行对比,发现对于大多数材料而言,不同研究者得到的能耗基础数值比较接近,而沥青生产过程能耗却在数量级上的差别。

### 2.2 中国研究概况

中国学术界从1997年前后才开始真正关注 LCA。目前,在土木工程领域 LCA 分析中,针对单一建筑材料的评价研究相对较多。例如,龚志起对钢材、建筑玻璃、水泥的生命周期环境影响进行了分析,重点考虑了这些建筑材料在物化、使用和维护以及拆除和处理阶段产生的环境影响;郑莉对路面水泥混凝土、再生水泥混凝土、粉煤灰水泥混凝土展开了生命周期评价研究。以路面水泥混凝土为例,将其生命周期划分为水泥原料开采、水泥制造、混凝土制造、混凝土路面使用和维护等几个阶段,暂未考虑水泥循环利用和废弃处理。

目前中国对路面工程 LCA 研究还很少。尚春静等通过应用 LCA 理论和方法对高速公路水泥路面生命周期消耗的能源及产生的大气排放进行计算,将公路生命周期分为材料生产、建造、养护和拆除废弃4个阶段。为计算方便,研究中做了许多假设和简化。

通过上述分析可以看出:

(1) 国内外已有研究成果对 LCA 研究范围都没有统一的界定,目前尚无研究包括生命周期的所有阶段。

(2) 几乎所有研究都考虑了材料生产阶段,但材料生产阶段考虑的具体因素又各不相同。例如,文献[9]研究没有考虑沥青生产能耗,而欧洲沥青协会专门研究了沥青生产生命周期整个阶段的能耗。

(3) 几乎所有路面 LCA 研究都忽略了用户阶段。参考文献[6]、[8]的研究虽包含了用户阶段,但其分析不够深入,均采用绝对值反映总体交通量,而不是采用对路面造成实际影响的数值。

(4) 大部分研究主要通过施工设备的使用情况表征施工阶段的影响,通常忽略施工活动引起的交通延迟。而由于路面施工造成的交通延迟往往是生命周期的重要方面。

### 3 LCA 清单分析

清单分析是生命周期过程物质和能量流的抽象和一般化阶段,是对产品、工艺活动在其整个生命周期的资源、能源输入和环境排放(包括废气、废水、固体废物等)进行数据量化分析,其实质是数据的收集、整理与分析。清单分析的核心是建立以产品功能单位表示的产品系统的输入和输出。这种输入和输出是一种相对量,而不是绝对量。

#### 3.1 清单分析方法

清单分析方法主要有 3 类:基于过程的清单分析(LCA 过程法)、基于经济投入产出分析的清单分析(IO-LCA 法)和复合清单分析(复合法)。

##### (1) LCA 过程法

LCA 过程法旨在量化生命周期系统范围每个独立的输入和排放,把所有独立过程的数据累加起来就是输入、排放和影响。文献[6]、[8]及[9]等都是采用 LCA 过程法,目前中国路面工程也大多运用 LCA 过程法。该方法的缺点在于:LCA 过程法需要广泛大量的数据,而数据收集耗时费钱。另外,由于产品供应链具有不确定性,不可能研究无限个上游过程,需要人为设置一个系统边界进行分析,这会导致忽略一部分过程,从而产生截断误差。有时截断误差可高达 50%。对于路面和其他材料以及资源密集型产品,准确掌握所有输入材料供应链过程数据将有助于减少截断误差。

##### (2) IO-LCA 法

IO-LCA 法是一个从上而下的方法,包括经济活动的所有方面。该方法基于 Wassily Leontief 1936 年提出的输入产出法。通过识别经济活动中不同部门之间货物和服务流,输入产出模型可以追踪既定经济部分单位产出所需的直接和间接经济输入。文献[5]就采用了卡内基梅隆大学的 EIO-LCA 法。

IO-LCA 法主要优点之一是能够分析整个供应链,没有截断误差,可以作为传统过程法的有效补充。但是使用该方法会产生累计误差、分配误差及数据来源误差等三类新的误差。

##### (3) 复合法

Hendrickson 等(2006)指出,LCA 过程法和 IO-LCA 法并不是不能共存,而是各有相对的比较优势。复合分析可以提高各自方法的价值,得到更好更确信的答案。Park 等(2003)首次在路面领域采用复合法进行研究。将韩国经济的 IO 模型与国家能源资产负

债表结合起来,估算路面生命周期的材料开采和生产阶段,而施工阶段和生命结束阶段采用过程法分析。路面养护阶段综合采用 IO 法和过程法。Treloar 等(2004)采用复合法分析评估了 8 种路面类型。材料生产阶段采用过程法进行量化,施工阶段则采用澳大利亚 IO-LCA 分析。

#### 3.2 清单数据收集

国外路面 LCA 研究起步较早,已有大量的研究数据,建立了比较标准的数据库及 LCA 计算软件。生命周期清单数据来源渠道是多种多样的,包括一些政府机构的数据库、企业的研究报告、系统模型以及实地调查等多种方式,例如,文献[9]研究涉及的原材料获取、生产和施工阶段的数据来源于文献[6]、[8]及 Berthiaume&Bouchard(1999)的研究。

中国路面 LCA 研究通常采用文献数据和实测数据相结合的方法进行数据收集。但是,中国对路面工程 LCA 研究较少,生命周期清单缺少基本的数据支撑,尚没有形成标准有效的数据库。另外,清单数据质量决定 LCA 的结果,但是国内外对清单数据缺少敏感性和波动性研究分析,这将严重影响 LCA 结果的可靠性和适用性。

#### 3.3 清单数据处理

目前,路面 LCA 清单收集的数据常见的就是能耗和排放,下文以石油和温室气体为例介绍清单数据处理的一般方法。

能源碳排放因子(Carbon Emission Factor)是指消耗单位质量能源伴随的温室气体生产量,是表征某种能源温室气体排放特征的重要参数,也是计算碳足迹的基础数据。它将有关活动的数据和温室气体排放相关联。有很多机构单位都进行了不同能源碳排放因子的统计。表 1 为石油碳排放因子。

为研究全球变暖这一影响类别,通常会把收集的数据转化为当量二氧化碳。表 2 给出了不同温室气体的当量因子潜能值。

### 4 路面工程 LCA 影响评价

清单分析所得的环境交换数据中,有些影响十分显著,有些影响较小,有些则可能对环境没有影响。为了将生命周期评价应用于各种决策过程,就必须对这种环境交换的潜在影响进行评估,说明各种环境交换的相对重要性以及每个生产阶段或产品每个组成部分的环境影响大小,这一阶段称为生命周期影响评价

表1 石油碳排放因子整理分析

	序号	来源	排放因子	均值
国家机构	1	中国工程院	0.540	
	2	国家环境局温室气体	0.583	0.574 3
	3	国家科委气候变化项目	0.583	
	4	国家发展和改革委员会能源研究所	0.591	
城市	5	国家科委北京项目	0.582 5	0.582 5
	6	湘潭市统计年鉴(2004年)	0.583	0.583 0
国际机构	1	IPCC 国家温室气体排放清单指南	原油 0.586	
	2	DOE/EIA	0.478	0.549 9
	3	日本能源经济研究所	0.586	

表2 温室气体的当量因子潜能值

物质	当量因子潜能值		
	20年	100年	500年
CO <sub>2</sub>	1	1	1
CH <sub>4</sub>	72	25	7.6
N <sub>2</sub> O	289	298	153
HFC <sub>5</sub> (HFC-134a)	3 830	1 430	435
PFC <sub>5</sub> (PFC-116)	8 630	12 200	1 820
SF <sub>6</sub>	16 300	22 800	32 600

(Life Cycle Impact Assessment, 即 LCIA)。

迄今路面 LCA 采用的环境参数多种多样,最常见的就是能耗。文献 [5]、[6]、[8] 等研究给出了常规空气污染物清单(如 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CO、PM10);另外, [5]、[6] 及 [8] 也补充了温室气体;有的研究报告了与能耗或废气排放不相关的环境影响,如氮排放到水中(文献 [6]、[8]),危险废弃物产生(文献 [5]),重金属释放(文献 [6]),以及其他环境指标。

而目前中国关于路面 LCA 影响评价的研究都还局限于能耗和温室气体排放,其他方面的环境影响评价很少涉及。二氧化碳排放虽是全球变暖的主要贡献者,其排放水平的简单清单是合理的影响指标,但是在研究过程中收集的温室气体种类并不齐全,为了完整性应加上其他的温室气体。根据《京都议定书》,温室气体包括以下 6 类:二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、甲烷(CH<sub>4</sub>)、氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)、氢氟碳化物(HFCs)、全氟化碳(PFCs)、六氟化硫(SF<sub>6</sub>)。

许多研究包括了 CO<sub>2</sub> 或其他诱使全球变暖的影响类别,然而,除了个别研究包括废弃物、噪音、水消耗和

自然资源枯竭,大部分结果通常以污染物清单呈现而不是影响,将污染物转化为诸如人体毒害、富营养化和酸化这样的影响类别将更有价值信息,也会更好地了解这些污染物的环境影响。

很明显,现有路面 LCA 研究缺少全面的影响评价。ISO 14040 将 LCA 中的影响评价定义为“旨在”了解和评价潜在环境影响的大小和意义。通常是把污染物和其他环境指标归类到影响类别,然后再把影响类别归到一个指标,以量化影响的严重程度。美国环保署(EPA)确立了 11 种常用的影响类别:全球变暖潜能、臭氧层破坏、酸雨、富营养化、光化学烟雾、陆地生态毒性、水生生物毒性、人类健康、资源消耗、土地使用和水的使用。

## 5 结论

综上所述,路面 LCA 的研究还处在起步阶段,存在许多的不足,有待改进。

(1) 国内外,目前对路面 LCA 研究范围都没有统一的界定,目前尚无研究包括生命周期的所有阶段。建议扩大系统边界,统一路面 LCA 研究范围的划分标准,更全方位地对路面工程进行分析是未来 LCA 的发展趋势。

(2) 中国对路面 LCA 的研究较少,缺少数据支撑,无法形成标准数据库,无法为后续研究提供支持。另外,中国路面 LCA 清单分析方法单一,对其存在的缺陷和漏洞,不能提供有效的补充和改善。数据的收集是一项耗时的工作,因此数据收集必须侧重于对生命周期评价结果有重大影响的方面,同时辅以敏感性分析来指导数据收集,以保证数据质量,提高 LCA 研

究结果的可靠性。

(3) 路面 LCA 缺少全面的影响评价,而且大部分结果通常以污染物清单呈现而不是影响。建立全面的 LCA 影响评价及将污染物转化为诸如人体毒害、富营养化和酸化这样的影响类别将更有价值信息。

#### 参考文献:

- [1] 李兵. 低碳建筑技术体系与碳排放测算方法研究[D]. 华中科技大学博士学位论文, 2012.
- [2] International Organization for Standardization. ISO 14040:2006(E) Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework[S], 2006.
- [3] Udo de Haes, H., Ed.. Towards a Methodology for Life Cycle Impact Assessment[M]. Society of Environmental Toxicology and Chemistry, 1996.
- [4] GB/T 24044 环境管理—生命周期评价—要求与指南[S].
- [5] Horvath, A. and Hendrickson, C.. Comparison of Environmental Implications of Asphalt and Steel—Reinforced Concrete Pavements [J]. Transportation Research Record, 1998, 1626: 105—113.
- [6] Häkkinen, T., Mäkelä, K.. Environmental Adaption of Concrete: Environmental Impact of Concrete and Asphalt Pavements[J]. VTT TIEDOTTEITA, 1996.
- [7] Asphalt Pavement Embodied Carbon Tool[R]. Transport Research Laboratory in Contact with South African Bitumen Association, 2012.
- [8] Stripple, H.. Life Cycle Assessment of Road: A Pilot Study for Inventory Analysis[J]. IVL RAPPORT, 2001 (1210).
- [9] Zapata, P. and Gambatese, J. A.. Energy Consumption of Asphalt and Reinforced Concrete Pavement Materials and Construction[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2005, 11(1): 9—20.
- [10] 龚志起. 建筑材料生命周期中物化环境状况的定量评价研究[D]. 清华大学硕士学位论文, 2004.
- [11] 郑莉. 路面材料 LCA 及其信息化开发[D]. 长沙理工大学硕士学位论文, 2007.
- [12] 尚春静, 张智慧, 李小冬. 高速公路生命周期能耗和大气排放研究[J]. 公路交通科技, 2010(8).
- [13] Life Cycle Inventory; Bitumen. European Bitumen Association. ISBN 2—930160—16—0 D/2011/7512/17 2011.
- [14] 刘江龙. 材料的环境影响评价[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [15] Roger Fay, Graham Treloar and Usha Iyer—Raniga. Life—Cycle Energy Analysis of Buildings: A Case Study [J]. Building Research and Information, 2000, 28(1): 31—41.
- [16] Lenzen, M. and Dey, C.. Truncation Error in Embodied Energy Analyses of Basic Iron and Steel Products[J]. Energy, 2000, 25(6): 577—585.
- [17] Leontief, W. W.. Quantitative Input and Output Relations in the Economic System of the United States [J]. The Review of Economic Statistics, 1936, 18(3): 105—125.
- [18] Lenzen, M.. Errors in Conventional and Input—Output—Based Life—Cycle Inventories[J]. Journal of Industrial Ecology, 2001, 4(4): 127—148.
- [19] Hendrickson, C. T., Lave, L. B., Matthews, H. S.. Environmental Life Cycle Assessment of Goods and Services: An Input—Output Approach[M]. RFF Press, 2006.
- [20] Park, K., Hwang, Y., Seo, S., and Seo, H.. Quantitative Assessment of Environmental Impacts on Life Cycle of Highways [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2003, 129(1): 25—31.
- [21] Treloar, G. J., Love, P. E. D., and Crawford, R. H.. Hybrid Life—Cycle Inventory for Road Construction and Use [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2004, 130(1): 43—49.
- [22] Berthiaume, R. and Bouchard, C.. Exergy Analysis of the Environmental Impact of Paving Material Manufacture [J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 1999, 23(1B): 187—196.
- [23] 郭运功, 林逢春, 白义琴, 等. 上海市能源利用碳排放的分解研究[J]. 环境污染与防治, 2009(9).
- [24] Swedish Defence Materiel Administration. Listing of GWP Values as Report IPCC WG1 Edition 1.0 [S]. <http://0Hwww.fmv.se>.
- [25] International Organization for Standardization. ISO 14042 Environmental Management—Life Cycle Assessment—Life Cycle Impact Assessment[S], 1998.
- [26] International Organization for Standardization. ISO 14044:2006(E) Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirement and Guidelines[S], 2006.
- [27] Scientific Applications International Corporation (SAIC), Curran M. A.. Life—Cycle Assessment: Principles and Practice[M]. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 2006.