

道路系统全生命周期碳排放量化分析框架 ——基于国际标准

何青¹, 李晔^{2,3}, 张鑫¹

(1.北京市城市规划设计研究院, 北京 100045; 2.同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 3.上海师范大学, 上海 200235)

摘要: 由于车辆为移动碳源、道路基础设施非普通建筑等特性, 道路系统全生命周期碳排放量化较为复杂。不同于传统道路基础设施生命周期评价(LCA)相关研究以道路实体作为产品系统, 在深入解析有关LCA的ISO系列标准、GHG Protocol系列标准、PAS 2050系列标准的基础上, 针对道路基础设施和车用燃料参与交通服务生产过程中的功能属性, 以交通服务作为产品系统。在PAS 2050指导下将基础设施生命周期和燃料生命周期有机结合, 建立了基础设施角度的项目级道路系统全生命周期碳排放量化分析框架, 确立了道路项目生命周期碳排放核算范围。此项研究以国际标准为基础, 为道路系统全生命周期碳排放量化研究提供了理论基础。

关键词: 道路交通; 生命周期评价; 碳排放核算; 国际标准

Quantitative Analysis Framework of Road System Life-Cycle Carbon Emissions Under International Standards

HE Qing¹, LI Ye^{2,3}, ZHANG Xin¹

(1. Beijing Municipal Institute of City Planning & Design, Beijing 100045, China; 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Shanghai Normal University, Shanghai 200235, China)

Abstract: As vehicles are mobile carbon sources and road infrastructure is uncommon building, the quantification of carbon emissions in the whole lifecycle of road systems is relatively complicated. Different from relevant research on lifecycle assessment (LCA) of traditional road infrastructure which takes road entities as the product system, this paper takes transportation services as the product system with regard to functional attributes of road infrastructure and automotive fuels in production of transportation services, based on the analysis on ISO standards, GHG Protocol standards and PAS 2050 standards relevant to LCA. Under the guidance of PAS 2050 standards, the paper organically combines the lifecycle of infrastructure and the lifecycle of fuels, sets up the analysis framework of the quantification of carbon emissions in the whole lifecycle of project-level road systems from the perspective of infrastructure, and confirms the accounting scope of lifecycle carbon emissions of road projects. The research provides a theoretical basis for research on the quantification of carbon emissions in the whole lifecycle of road systems based on international standards.

Keywords: road transportation; life cycle assessment; carbon emission accounting; international standards

收稿日期: 2021-06-10

作者简介: 何青(1990—), 女, 河北廊坊人, 博士, 工程师, 主要研究方向: 交通规划、低碳交通。E-mail: qinghe1011@163.com

0 引言

为实现碳达峰、碳中和的国家承诺, 各行各业都需要寻求有力的减碳手段, 而这一过程往往使碳排放不同行业或部门之间、不同生命阶段之间、不同主体之间发生转移。道路系统的生命周期涉及规划方、设计方、施工方、运行方、管理方等多个利益相关者, 跨越了工业、建筑业和交通运输业等

不同行业。而且, 由于车辆为移动碳源、交通基础设施非普通建筑等特性, 道路系统全生命周期碳排放量化较为复杂, 研究口径往往不一致, 这对科学衡量交通减碳成效造成障碍。

本文将深入解析有关生命周期评价的三个不同体系的系列标准, 在其理论支撑下强调道路系统和交通运行的交互关系, 将道路系统生命周期和燃料生命周期有机结合, 建

立基础设施角度的项目级道路系统全生命周期碳排放量化分析框架。

1 既有研究综述

1.1 研究现状

根据国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)的定义,生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)指“对一个产品系统的生命周期中输入、输出及潜在环境影响的汇编和评价”^[1]。LCA研究面向综合环境影响;碳排放核算研究只面向全球气候变暖的环境影响类别,是LCA研究的子集^[2]。LCA方法按研究对象可分为基于过程、基于经济投入产出和混合3类。道路建设运营过程虽然较为复杂,但可以认为是一个前后衔接的线性过程,同时LCA商业软件也大多以基于过程的LCA方法为基础,因此该方法成为项目级道路系统全生命周期碳排放量化研究的主流方法^[3]。

瑞典国家公路管理局(Swedish National Road Administration)对一条假设的道路(长1 km、宽13 m)建立了LCA模型,该模型包含能源上游开采、生产、运输等过程(以下简称“能源上游过程”),以及从原材料生产和运输、现场施工、日常维持、养护维修到拆除回收的全生命周期,符合ISO 14060, ISO 14044等国际标准,为道路基础设施LCA研究提供了范本,但未考虑车辆运行产生的环境影响^[4]。Dimoula等^[5]归纳了已有研究中公路、铁路运输在基础设施建设和车辆运行阶段的碳排放数据,分析不同交通运输方式产生的环境影响,结果显示,道路受结构、宽度、使用年限等因素的影响,不同案例计算出的碳排放强度差异较大。张怡然^[6]以广东省某国道的沥青路面为例,将车辆运行直接产生的碳排放计入道路使用阶段,核算在三种养护方案下道路系统全生命周期碳排放,并重点关注养护维修施工期间拥堵绕行产生的额外碳排放,结果显示这部分碳排放占碳排放总量的比例约为0.3%。类似的,李肖燕^[7]和刘淑芬^[8]将车辆运行直接碳排放计入道路使用阶段,核算了道路系统部分生命周期过程的碳排放。此外,部分学者进行了道路基础设施全生命周期碳排放案例研究^[9-14]。

1.2 研究不足

第一,道路系统生命周期通常可分为原

材料生产和运输、现场施工、日常使用维持、养护维修和拆除回收等阶段,由此形成了较为统一的核算方法;但不同研究面向的道路结构有所差别,核算结果之间难以比较。由于道路组成较为复杂,张怡然^[6]和蔺瑞玉^[13]虽然针对同一类型沥青路面面层的建设期碳排放进行核算,但是前者没有考虑路面的粘层、透层、封层,且两者的排放因子不尽相同,使得核算结果存在一定的差异。

第二,道路生命周期覆盖的阶段并不完整,普遍没有计算机械设备所消耗的能源上游过程的碳排放。事实上,道路原材料生产阶段所用的挖掘机、推土机以及施工过程中所用的装载机、沥青摊铺机、压路机等设备的能源消耗率虽然以电功率表示,但实际消耗的多数是柴油,原油开采、柴油生产等能源上游过程的碳排放不应被忽略。

第三,有相当比例的研究将车辆运行产生的直接排放计入了道路使用阶段,但没有核算或提及车用燃料上游过程的环境影响,这不符合LCA相关国际标准的要求。根据ISO 14067产品碳足迹核算标准,车用燃料属于该产品系统的中间产品,产品碳足迹核算应当追溯中间产品“从摇篮到厂门”(from cradle to gate)的碳排放。因此,车用燃料在上游开采、生产等过程的碳排放也应当在核算范围内。

第四,普遍存在排放因子引用不规范的问题,主要体现在两方面:1)国家发展改革委为清洁发展机制(Clean Development Mechanism, CDM)项目提供的电量边际排放因子只包含火力发电方式,不代表中国电网电力平均排放水平^[15];2)对于通过柴油机发电的设备,不应使用电网电力的排放因子。

综上所述,已有研究普遍没有严格参照国际、国内标准,存在边界划分不一致和排放因子引用不规范的问题,导致在参照其数据时需专业人员进行较为烦琐的口径和参数确认,且各成果之间难以进行直观比较。因此,有必要确立规范的、符合国际标准的项目级道路系统全生命周期碳排放量化分析框架。

2 碳排放核算国际标准选择

2.1 LCA相关标准

全生命周期碳排放核算是LCA的子集,相关国际标准皆在LCA标准框架和要求下制定。1993年,环境毒理学和环境化学

学会 (Society of Environmental Toxicology and Chemistry, SETAC) 出版了第一份 LCA 指导性报告《生命周期评价纲要：使用指南》^[7]。后来，ISO 又接连发布了 LCA 相关

标准，中国对这几项标准进行了同等转化 (内容一致)。中国目前并没有采纳专门面向温室气体排放核算的国际标准，因此《环境管理 生命周期评价原则与框架》(GB/T 24040—2008) 和《环境管理 生命周期评价要求与指南》(GB/T 24044—2008) 是中国 LCA 和碳排放核算所能参照的最新版本的国家标准(见表 1)。

表 1 LCA 相关 ISO 标准和国家标准

Tab.1 ISO standards and national standards related to LCA

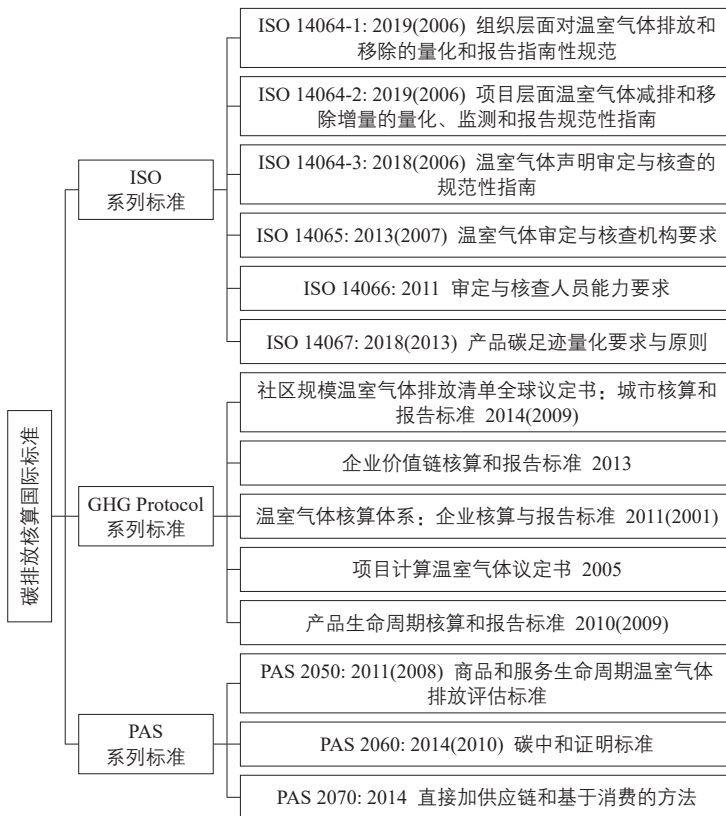
ISO 标准	与 ISO 对等的国家标准	国家标准状态
ISO 14040: 1997 Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework	《环境管理 生命周期评价原则与框架》(GB/T 24040—1999)	已废止
ISO 14041: 1998 Environmental management -Life cycle assessment-Goal and scope definition and inventory analysis	《环境管理 生命周期评价目标与范围的确定和清单分析》(GB/T 24041—2000)	已废止
ISO 14042: 2000 Environmental management -Life cycle assessment-Life cycle impact assessment	《环境管理 生命周期评价生命周期影响评价》(GB/T 24042—2002)	已废止
ISO 14043: 2000 Environmental management -Life cycle assessment-Life cycle interpretation	《环境管理 生命周期评价生命周期解释》(GB/T 24043—2002)	已废止
ISO 14040: 2006 Environmental management -Life cycle assessment-Principles and framework	《环境管理 生命周期评价原则与框架》(GB/T 24040—2008)	使用中
ISO14044: 2006 Environmental management -Life cycle assessment-Requirements and guidelines(2017年更新, 标准号不变)	《环境管理 生命周期评价要求与指南》(GB/T 24044—2008)	使用中

2.2 碳排放核算国际标准比较

具有影响力的碳排放核算国际标准主要有三个系列：第一个是 ISO 14064 至 ISO 14067 系列标准；第二个是世界资源研究所 (World Resources Institute, WRI) 与世界可持续发展工商理事会 (World Business Council for Sustainable Development, WBCSD) 合作开发的温室气体议定书系列 (GHG Protocol)；第三个是由英国标准协会 (British Standards Institution, BSI) 编制的公众可获取的规范系列 (Publicly Available Specification, PAS) (见图 1)。观察各类标准首次发布的时间可以发现，最早从企业角度出发的核算标准来自 GHG Protocol，最早从产品生命周期角度出发的核算标准来自 PAS 系列。

世界资源研究所和世界可持续发展工商理事会早在 2001 年就发布了第一版《温室气体核算体系：企业核算与报告标准》^[16] (以下简称“GHG Protocol 企业标准”)。该标准将化石燃料燃烧产生的温室气体排放划分成三个范围 (见图 2)：1) 范围一指企业、城市边界内燃料燃烧产生的直接排放；2) 范围二指外购电力生产阶段的间接排放；3) 范围三指除范围二之外企业价值链上下游其他资源能源相关的间接排放。设置范围二的原因在于电力消耗过程中不直接产生碳排放，那么耗电量很高的企业其范围一碳排放可能并不高，不便于推进节能减排。某部分电能实际使哪个企业受益，则将这部分电力生产的碳排放归因于哪个企业，体现出“归因”的思想。范围三将归因思想扩展到了价值链上下游其他资源能源，从而识别出归因于某企业的、对自然的整体碳排放。

划分范围的好处在于在进行省级、国家级温室气体排放清单汇总时，不同企业范围一、二的排放量不会被重复统计 (见表 2)。例如，发电的直接排放只会出现在发电企业的范围一，不会重复出现在其他企业的范围一。同理，使用电力带来的间接排放，只会



注：括号内数字为第一版出版年份。

图 1 最新版本主要碳排放核算国际标准汇总

Fig.1 Summary of the latest editions of major carbon emission accounting international standards

出现在使用该电力的企业的范围二，不会重复出现在其他企业的范围二，也不会重复出现在该企业的范围一。然而，这种划分方法的局限性在于从逻辑上把电力生产排放和其他二次能源生产排放放在了不对等的位置上。外购电力生产过程的排放属于范围二，外购柴油、外购氢气等其他二次能源生产过程的排放则属于范围三。ISO 14064 系列标准要求企业碳排放核算范围应包含范围一和范围二，可包含范围三^[18]，所以范围三通常不在要求企业统计的范围内。

与 GHG Protocol 企业标准配套发布的还有基于 Excel 的“能源消耗引起的温室气体排放计算工具”和其计算指南，帮助企业填报并计算与之相关的直接碳排放和电力生产的间接碳排放，为政府间气候变化专门委员会所倡导的国家温室气体排放清单计划提供了有力的基础。ISO 14064-1 和北美气候登记处、英国政府颁布的自愿性报告指南都采纳了 GHG Protocol 企业标准^[17]。此后，在 GHG Protocol 企业标准的理论框架下，GHG Protocol 中又增加了城市级、项目级、产品级碳排放核算标准，形成全面的温室气体核算体系^[19-21]。中国清洁发展机制基金管理中心与世界资源研究所合作，基于中国能源利用状况报告中的能源分类方法，为企业提供《能源消耗引起的温室气体排放计算工具指南》^[21]。2011 年国家发展改革委应对气候变化司组织编写的《省级温室气体清单编制指南(试行)》出版以后，燃料碳含量缺省值和碳氧化率的取值发生较大改动，世界资源研究所又发布了《能源消耗引起的温室气体排放计算工具指南(2.0 版)》^[17]。

《PAS 2050: 2008 商品和服务在生命周期内的温室气体排放评价规范》是第一个获得国际认可的产品碳足迹方法规范，英国标准协会在 2011 年又发布了修订版本^[23-24]。虽然英国标准协会定义 PAS 2050 并不是一项正式的英国标准、欧洲标准或国际标准，而是一种具有协商性质的公共可用规范，但因为科学的方法和明确的细节，PAS 2050 得到广泛的应用。

各项标准的关系是：ISO 14040 和 ISO 14044 系列标准建立在 SETAC《生命周期评价纲要：使用指南》的基础之上，所有碳排放核算标准均遵循 ISO 14040 和 ISO 14044 的框架和要求。ISO 14064-1:2006 主要参考了 GHG Protocol 2004 版的企业标准。PAS

2050:2008 以不违背 ISO 14040, ISO 14044, ISO 14064-1 为原则。2011 年 PAS 2050 修订时，各方专家进行了充分的沟通与合作，以使 PAS 2050:2011 与 ISO, GHG Protocol 系列标准相协调。ISO 14067:2013 主要参考了 PAS 2050:2011。因此，三大系列标准内容相互遵循、互不矛盾，但各自又有不同的出发点和侧重点：GHG Protocol 系列标准统计实用性强，方便指导温室气体排放清单编制；PAS 系列标准理论指导性强，能够指导复杂产品系统的碳足迹核算；ISO 系列标准普适性强，方便灵活应用。

比较这三个系列的国际标准，GHG Protocol 系列标准是理论体系和层次结构最为全面的，旨在服务企业核算、汇总直接碳排放和归因于该企业的电力碳排放，再从扩充的企业价值链和产品生命周期中寻找减排潜力。从企业角度出发的系列标准，其优势在于统计实用性，为中国省级温室气体排放清单编制和联合国气候纲要公约要求的国家级温室气体排放清单编制提供了重要的工具。PAS 系列标准则将生命周期理念贯彻得更加深入、把方法介绍得更为具体，能够指

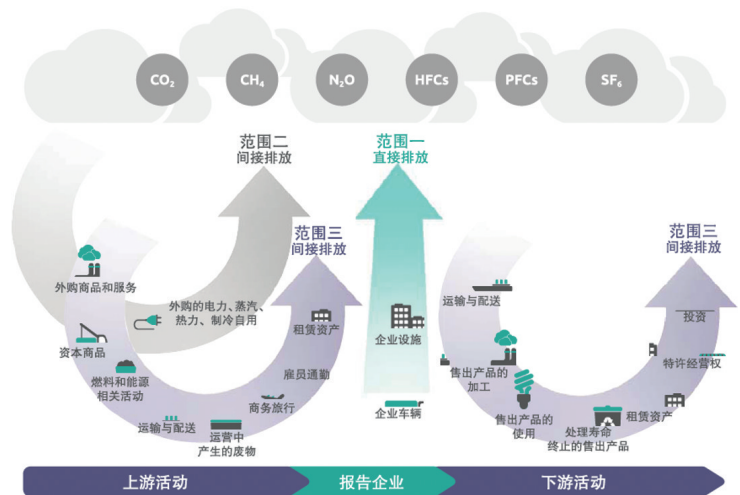


图2 GHG Protocol 核算范围划分

Fig.2 Accounting scope division of GHG Protocol

资料来源：文献[17]。

表2 能源上游碳排放对于不同企业所属的范围

Tab.2 The scope of upstream carbon emissions of energy for different companies

企业类型	一次能源开采、加工、运输、配送	二次能源生产		能源使用
		电力生产	其他二次能源生产	
发电企业	范围三	范围一	范围三	范围一
炼油厂	范围三	范围二	范围一	范围一
普通能源使用企业	范围三	范围二	范围三	范围一

导复杂产品系统的碳足迹核算。ISO 系列标准博采众长，参考其他系列标准的同时进行了简化，只提出架构性原则与要求，从而可供不同组织根据具体的应用意图灵活实施。

2.3 标准选取

鉴于三大国际标准和国内标准之间相互遵循、互不矛盾，本文在探讨道路系统全生命周期碳排放属性时将同时遵从三大国际标准和国内标准，并结合各系列标准的特点：理论体系主要参考 GHG Protocol；确定核算边界与具体方法时主要参考《PAS 2050: 2011 商品和服务生命周期温室气体排放评估标准》；整体核算原则、框架则遵照 ISO 14040(GB/T 24040), ISO 14044(GB/T 24044), ISO 14064 和 ISO 14047。

3 道路系统全生命周期碳排放量化分析框架

3.1 产品系统和功能单元定义

根据 ISO 14040:2006, LCA 的第一个阶段是目的和范围确定，该阶段的核心内容为定义产品系统和功能单元。经过上节对 GHG Protocol 系列标准的讨论已知，贯彻生命周期评价方法的碳排放核算宜在产品层面进行。生命周期评价方法将产品的生命周期作为产品系统进行模拟，因此，建立全生命周期碳排放核算模型，首先要明确面向怎样的产品系统、怎样表达系统中的关键要素。

根据 ISO 14040, 产品分为四类：服务、软件、硬件和流程性材料。一个产品系统的基本性质取决于它的功能，产品系统可以是某种工艺、活动或流程，此时应当注意不能把相关实体和产品系统相混淆。比如当目标是评价“沥青拌和设备油改气”活动在拌和过程中的减碳效果，其产品碳足迹需要

关注设备消耗的燃料(重油、柴油或天然气)从一次能源开采到最终燃烧的过程，而不需要追溯冷砂、碎石等沥青混凝土原材料的生产过程。

在建设期，对于施工单位来说，道路基础设施可以看作硬件类产品，道路的产品价值在于基础设施本身，因为企业通过硬件类产品交付获得酬劳。竣工以后，道路作为一种准公共产品，由人民所共有，由公路局、路政局等部门进行管理。对此时的所有者来说，道路的存在是没有意义的，道路的产品价值并不在于基础设施本身，而在于实现人、货物的空间位移，即交通服务。

基础设施、运载工具和能源共同支撑了交通服务，因此，将最终产品定义为服役期内特定路段空间范围内产出的交通服务，则“道路交通服务产品碳足迹”应当覆盖基础设施、运载工具和能源的生命周期碳排放，且三部分互不交叉。在这样的结构下，“交通排放”“交通运输业排放”“道路建设期排放”等常用说法的概念显得更加清晰(见图3)。

由于中国交通部门关注的碳排放范围主要在于道路建设碳排放和交通运行碳排放，聚焦于道路基础设施和交通运行之间的交互关系，本文将基础设施角度出发的道路碳排放定义为道路服役期内因在其空间范围内产出的交通服务而产生的基础设施全生命周期碳排放和燃料全生命周期碳排放，并统称为“道路系统全生命周期碳排放”。

本文产品生命周期碳排放核算研究所面向的产品系统，为道路服役期内在其空间范围内产出的交通服务。服务类产品一般以一段时间作为一个功能单元，本文将对归因于道路项目服役期内产出的交通服务的全生命周期碳排放进行整体核算。一轮服役期从一段道路的新建、改建、改造升级工程完成时开始，到下一次改建、改造升级工程进行前，或拆除回收完成后结束。由于改建或改造升级工程方案对于原来道路设施的处置措施需依据实际状况综合考虑，旧路铣刨及路面再生等过程的碳排放，可在方案确定后计入下一轮生命周期建设阶段。

3.2 核算范围确定

全生命周期碳排放核算模型是否完整，取决于产品系统功能的单元过程是否从自然界或自然资源中获取原材料开始，直至其回归自然界结束(但输入输出对总体研究结论

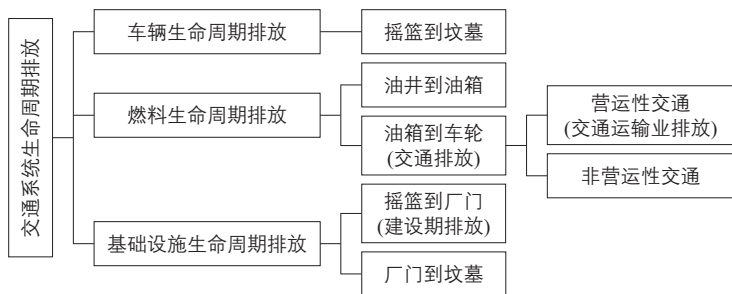


图3 交通系统生命周期排放的组成

Fig.3 Composition of life cycle emissions from transportation systems

影响不大的过程可以不进行量化)^[19]。产品生命周期单元过程一般都从原材料开采开始。值得注意的是，所谓“原材料”除了材料类还包括能源类，除了少数非燃烧化学过程会产生碳排放外，几乎每个过程的直接碳排放都来自化石燃料的燃烧。对于主要消耗煤炭、原油、电厂电力等能源的产品系统来说，上游排放占燃料生命周期排放的比例较低，可以不予计算。但柴油、汽油、液化天然气(LNG)等能源上游的可归因排放在其燃料生命周期碳排放中占有一定的比例，道路基础设施生命周期中室外作业设备会消耗大量柴油，因此基础设施生命周期和燃料生命周期都不应当忽略能源上游过程。

道路基础设施在“交通服务”产品生产过程中是一类特殊的输入，其特殊性主要体现在三点。1)道路基础设施的建设、养护维修等过程产生的排放都归因于产出的交通服务，但在交通服务生产过程中，基础设施没有转化成运输服务的有形部分，基础设施自身也不产生碳排放，只是会发生损耗。2)道路基础设施的质量直接影响着交通服务这一产品的碳排放量，但是不同于能源和车辆直接由交通服务受益者所属或控制，具有“谁使用、谁付费”的性质，非收费的道路养护资金来自财政转移支付，而不是该段道路的直接使用者，通过路面性能的提高带来的交通减排效益难以得到实际受益者的鼓励。3)服务类产品一般以一段时间为核算的时间跨度，路基、路面、桥梁、涵洞、隧道、交通附属设施等不同结构的服役期是不同的。

PAS 2050 中指出了上述问题的处理方式。对于流程性材料，PAS 2050 将路面面层这类“不构成产品的有形部分、但易磨损、一般需要在一年或不足一年的时间内补充或更换的输入部件”定义为消耗品(类似于有形产品生产中的润滑油)。而路面垫层和基层、路基、桥梁、涵洞、道路附属设施等寿命较长，在得当的养护下能长久使用的部件或建筑物，以及筑路施工所使用的机械、设备，都属于资产型商品。PAS 2050 规定最终产品碳足迹中应当包含消耗品、维持设施运行的能源等从“摇篮到坟墓”(from cradle to grave)的碳排放；用于产品生命周期中资产型商品生产所产生的碳排放则不应计入最终产品的碳足迹，除非有特别要求可单独列出。

因此，根据 PAS 2050，以交通服务为最

终产品时道路基础设施部分需要核算的碳排放来自能源、普通材料、消耗品、运行维持四类。能源即各环节所需柴油、电力等；普通材料即集料、沥青等非能源类原材料，是建设道路所需的中间产品；消耗品即路面面层，路面新建工程、改建工程和大中修工程的输入输出属性相同，区别主要在于工程强度和实施时间；运行维持部分，除了路面日常养护外，还应包括结构检修、监控、通风和照明，服务区机械设备运行等。城市道路一般有路灯，而公路一般靠近城镇处才有路灯，该部分运行维持能耗应依据具体案例而定。

对应 GHG Protocol 企业标准的范围划分，按照排放主体和产品层次划分上述燃料生命周期和基础设施生命周期的单元过程，道路系统全生命周期碳排放核算边界如图 4 所示，道路系统全生命周期单元过程如图 5 所示。其中，养护维修工程和新建工程的输入输出性质相同，归为同类单元过程。

值得指出的是，核算范围不包含能源上游过程的公路基础设施 LCA 研究、碳排放核算研究，未计算原材料生产、现场施工过程中室外作业机械消耗的柴油的上游过程排放，核算边界实际上是 GHG Protocol 企业价值链范围一+范围二，而不是产品碳足迹的完整范围。蓝色边框内的排放反映了燃料和

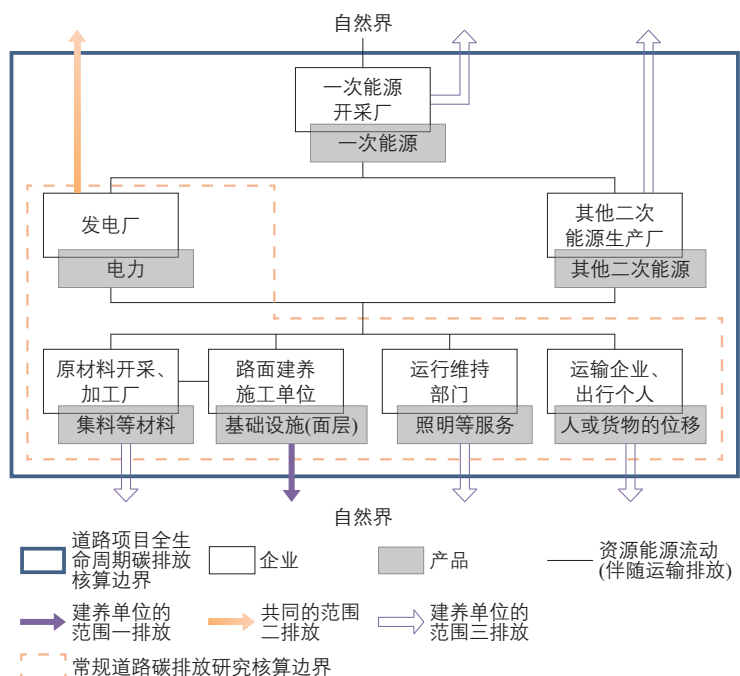


图4 道路系统全生命周期碳排放核算边界

Fig.4 Carbon emission accounting boundary for the whole life cycle of the road system

基础设施全生命周期对自然界的总体碳排放，是道路项目全生命周期碳排放的核算边界。

综上所述，遵照国际标准，本文确定的道路系统全生命周期碳排放核算范围为道路服役期内，因在其空间范围内产出的交通服务而产生的基础设施生命周期碳排放和燃料生命周期碳排放。

3.3 分析框架确立

本文确立的道路系统全生命周期碳排放量化分析框架为：应用基于过程的LCA方法；参照LCA的ISO系列标准、GHG Protocol系列标准、PAS 2050系列标准，定义项目级道路基础设施的产品系统为道路服役期内在其空间范围内产出的交通服务；按照排放主体和产品层次划分道路系统生命周期的单元过程；确定道路系统全生命周期碳排放核算范围为道路服役期内，因在其空间范围内产出的交通服务而产生的基础设施生命周期碳排放和燃料生命周期碳排放。

4 结论

不同于传统道路基础设施LCA相关研究以道路实体作为产品系统，本文在深入解析有关LCA的ISO系列标准、GHG Protocol系列标准、PAS 2050系列标准的基础上，针对道路基础设施和车用燃料参与交通服务生产过程中的功能属性，以交通服务作为产品系统，在PAS 2050指导下将基础设施生命周期和燃料生命周期有机结合，建立了基础设施角度的道路系统全生命周期碳排放量化分析框架，确立了规范的项目级道路系统生命周期碳排放核算范围。主要结论如下：

1) 传统不包含能源上游过程的公路基础设施LCA研究、碳排放核算研究，核算边界实际上是GHG Protocol企业价值链范围

一+范围二，不能称为国际标准所定义的公路产品碳足迹核算或公路LCA，可称为部分的产品碳足迹核算或生命周期分析。

2) 三大系列碳排放核算标准互不冲突但各有侧重：GHG Protocol系列从企业角度出发，主要优势在于统计实用性；PAS 2050的方法便于指导复杂产品系统的碳足迹核算；ISO系列参考上述标准的同时进行简化，侧重架构上的原则与要求，具有更强的灵活性。

3) 生命周期评价方法将产品的生命周期作为产品系统进行模拟，产品系统的基本性质取决于它的功能。所建立的全生命周期碳排放核算模型是否完整，主要取决于产品系统功能的单元过程是否从自然界或自然资源中获取原材料开始，直至其回归自然界结束，而不是与产品系统功能无关的实体的生命周期。

4) 根据PAS 2050，本文确定的项目级道路系统全生命周期碳排放核算范围为道路服役期内。道路系统全生命周期单元过程涉及因在其空间范围内产出的交通服务而产生的基础设施生命周期碳排放和燃料生命周期碳排放，包含能源、普通材料、消耗品(路面面层)、运行维持(路面、路基、桥、涵、隧道等日常维护，隧道的监控、通风和照明，服务区机械设备运行等)四类输入的全生命周期碳排放，不包含固定资产(路面面层以外结构)建设的碳排放。

参考文献：

References:

[1] ISO. Environmental management - life cycle assessment - principles and framework: ISO 14040:2006[S]. Geneva: ISO, 2006.

[2] BHATIA P, CUMMIS C, BROWN A, et al. GHG protocol product life cycle accounting and reporting standard[R]. Washington D.C.: World Resources Institute, World Business Council for Sustainable Development, 2011.

[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.

YANG B. Quantitative method and evaluation system of energy-saving and emission-reduction for asphalt pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.

[4] STRIPPLE H. Life cycle assessment of road a pilot study for inventory analysis[R]. Stockholm: Swedish National Road Administration,

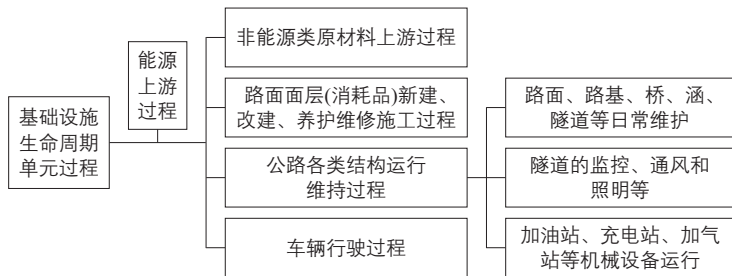


图5 道路系统全生命周期单元过程

Fig.5 The unit process of the whole life cycle of the road system

- 2001.
- [5] DIMOULA V, KEHAGIA F, TSAKALIDIS A. A holistic approach for estimating carbon emissions of road and rail transport systems [J]. *Aerosol and air quality research*, 2016, 16 (1): 61-68.
- [6] 张怡然. 道路基础设施生命周期碳排放量化分析[C]//2019世界交通运输大会, 国家会议中心, 北京, 2019-06-13: 智能绿色引领未来交通.
- [7] 李肖燕. 基于LCA的水泥路面与沥青路面环境影响评价[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- LI X Y. Environmental impact assessment of concrete pavement and asphalt pavement based on LCA[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [8] 刘淑芬. 基于LCA的京沪高速与京沪高铁基础设施建设环境影响比较研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- LIU S F. An environmental impact comparative study of the Beijing-Shanghai high-speed railway and highway infrastructure based on LCA[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [9] ANASTASIOU E K, LIAPIS A, PAPAYIAN-NI I. Comparative life cycle assessment of concrete road pavements using industrial by-products as alternative materials[J]. *Resources, conservation and recycling*, 2015, 101: 1-8.
- [10] ALZARD M H, MARAQA M A, CHOWDHURY R, et al. Estimation of greenhouse gas emissions produced by road projects in Abu Dhabi, United Arab Emirates[J]. *Sustainability*, 2019, 11(8): 2367.
- [11] MILIUTENKO S, BJORKLUND A, CARLSSON A. Opportunities for environmentally improved asphalt recycling: the example of Sweden[J]. *Journal of cleaner production*, 2013, 43: 156-165.
- [12] 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(2): 174-184.
- [13] 蔺瑞玉. 沥青路面建设过程温室气体排放评价体系研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- LIN R Y. Research on greenhouse gas emission evaluation system for asphalt pavement construction[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [14] 韩雨. 路面生命周期能耗与污染物排放模型与计算方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- HAN Y. Study of model and calculation method on energy consumption and pollutant emissions in pavement life cycle[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [15] 侯萍, 王洪涛, 张浩, 等. 用于组织和产品碳足迹的中国电力温室气体排放因子[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(6): 961-967.
- [16] RANGANATHAN J, CORBIER L, BHATIA P, et al. GHG protocol corporate accounting and reporting standard[R]. Washington D.C.: World Resources Institute, World Business Council for Sustainable Development, 2004.
- [17] 宋然平, 杨抒, 孙淼. 能源消耗引起的温室气体排放计算工具指南(2.0版)[R]. 北京: 世界资源研究所, 2012.
- SONG R P, YANG S, SUN M. GHG protocol tool for energy consumption in China (version 2.0) [R]. Beijing: World Resources Institute, 2012.
- [18] ISO. Greenhouse gases - part 1: specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals: ISO 14064-1:2008 [S]. Geneva: ISO, 2008.
- [19] BHATIA P, CUMMIS C, BROWN A, et al. GHG protocol corporate value chain (scope 3) accounting and reporting standard[R]. Washington D.C.: World Resources Institute, World Business Council for Sustainable Development, 2013.
- [20] GREENHALGH S, BROEKHOFF D, ACHARYA M, et al. GHG protocol for project accounting[R]. Washington D.C.: World Resources Institute, World Business Council for Sustainable Development, 2005.
- [21] FONG W K, SOTOS M, DOUST M, et al. Global protocol for community-scale greenhouse gas emission inventories[R]. Washington D.C.: World Resources Institute, World Business Council for Sustainable Development, 2009.
- [22] 宋然平, 杨抒. 能源消耗引起的温室气体排放计算工具指南[R]. 北京: 世界资源研究所, 2011.
- SONG R P, YANG S. GHG protocol tool for energy consumption in China[R]. Beijing: World Resources Institute, 2011.

(下转第43页)