



DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2022-1501

碳足迹评估技术及其在重点工业行业的应用

刘含笑^{1, 2, 3, 4}, 吴黎明^{1, 5}, 林青阳⁶, 周烨⁷, 罗象⁸, 桂志军⁷, 刘小伟², 单思珂⁴,
朱前林⁹, 陆诗建⁹

(¹ 浙江菲达环保科技股份有限公司浙江省燃煤烟气净化装备研究重点实验室, 浙江 诸暨 311800; ² 华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; ³ 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206; ⁴ 浙江省环保集团生态环保研究院有限公司, 浙江 杭州 310030; ⁵ 杭州钢铁集团有限公司, 浙江 杭州 310000; ⁶ 浙江大学能源工程学院, 浙江 杭州 310000; ⁷ 上海易碳数字科技有限公司, 上海 201308; ⁸ 宁波诺丁汉大学, 浙江 宁波 315100; ⁹ 中国矿业大学, 江苏 徐州 221116)

摘要: 我国碳足迹研究起步较晚, 建立完善的碳足迹评估体系是我国有效应对复杂国际关系和日益激烈的国际低碳经济竞争、科学推动和引导绿色低碳转型发展、有序实现“双碳”目标的必然选择。基于国内外文献调研, 本文系统梳理和分析了碳足迹概念、碳足迹评估方法、碳足迹评估标准、碳足迹评估边界划分及数据获取等。虽然学术上对碳足迹的定义尚未完全统一, 但更多倾向于从全生命周期来进行阐述, 本文从“全生命周期”和“全工艺流程”2个角度对工业产品碳足迹概念进行了补充完善。与投入产出分析法 (IOA) 相比, 生命周期评价法 (LCA) 发展相对较为领先, 在普适性、系统化、量化上具有一定的优势, 并对产品系统在时间和空间上进行了扩展, 但在截断误差控制、数据质量保证和标准体系统一等方面还需进一步完善。PAS2050、GHG Protocol 和 ISO14067 是目前应用最为广泛的全生命周期碳足迹评估标准, 但针对具体的产品门类, 还需开展更细化、精准、明确的产品类别评估规范 (PCR)。基于上述研究总结及碳足迹评估技术在电力、钢铁、水泥、石油和化工等重点工业控排行业的应用进展分析, 提出了目前研究存在的问题及国内碳足迹评估技术发展面临的挑战: 多领域全生命周期全流程的本土化碳排放数据库尚待完善; 高精度、标准化、国际互认的碳足迹评估方法体系尚待构建; 碳足迹和碳减排量化评估相结合的研究还不够深入, 碳足迹支撑低碳化方案实施的标志化示范项目较少。未来需进一步探索碳足迹评估技术与排放量核算、碳交易研究的结合, 产品碳足迹与产品碳标签、绿色产品认证 (EPD) 机制相结合, 充分发挥碳足迹评估技术在推动科学有序降碳、引导绿色低碳消费、应对贸易壁垒等方面的作用。

关键词: 碳足迹; 生命周期评价法; 碳达峰与碳中和; 碳足迹评估标准; 产品碳足迹; 贸易壁垒

中图分类号: X5

文献标志码: A

文章编号: 1000-6613 (2023) 05-2201-18

Carbon footprint assessment technology and its application in key industries

LIU Hanxiao^{1, 2, 3, 4}, WU Liming^{1, 5}, LIN Qingyang⁶, ZHOU Ye⁷, LUO Xiang⁸, GUI Zhijun⁷,
LIU Xiaowei², SHAN Sike⁴, ZHU Qianlin⁹, LU Shijian⁹

(¹ Key Laboratory of Coal Fired Flue Gas Purification Equipment Research of Zhejiang Province, Feida Environmental Protection Technology Co., Ltd., Zhuji 311800, Zhejiang, China; ² State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China; ³ School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; ⁴ Zhejiang Environmental Protection Group

收稿日期: 2022-08-15; 修改稿日期: 2022-09-26。

基金项目: 浙江省“尖兵”计划 (2022C03030); 国家重点研发计划 (2017YFB0603202)。

第一作者及通信作者: 刘含笑 (1987—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事大气污染治理及双碳技术研发工作。E-mail: gutounan@163.com。

引用本文: 刘含笑, 吴黎明, 林青阳, 等. 碳足迹评估技术及其在重点工业行业的应用[J]. 化工进展, 2023, 42(5): 2201-2218.

Citation: LIU Hanxiao, WU Liming, LIN Qingyang, et al. Carbon footprint assessment technology and its application in key industries[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(5): 2201-2218.

Eco-Environmental Research Institute, Hangzhou 310030, Zhejiang, China; ⁵ Hangzhou Iron & Steel Group Co., Ltd., Hangzhou 310000, Zhejiang, China; ⁶ College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310000, Zhejiang, China; ⁷ Shanghai E-Carbon Digital Technology Co., Ltd., Shanghai 201308, China; ⁸ University of Nottingham Ningbo China, Ningbo 315100, Zhejiang, China; ⁹ China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

Abstract: As our country's carbon footprint research is started late, the establishment of a thorough carbon footprint assessment system is an inevitable choice for us to effectively cope with complex international relations and increasingly fierce international low-carbon economic competition, scientifically promote and guide the development of green and low-carbon transformation, and orderly achieve the "double carbon" goal. Based on domestic and foreign literature research, the carbon footprint concept, carbon footprint assessment methods, carbon footprint assessment standards, carbon footprint assessment boundary division and data acquisition were reviewed and analyzed systematically. Although the academic definition of carbon footprint was not yet completely unified, more people tended to elaborate it from the perspective of the whole life cycle. In this paper, the concept of carbon footprint of industrial products was supplemented and improved from the perspectives of the "whole life cycle" and "whole process". Compared with the input-output analysis method (IOA), the life cycle assessment method (LCA) was relatively leading in development, had certain advantages in universality, systematization and quantification, and expanded the product system in time and space, but it still needed to be further improved in the terms of the truncation error control, data quality assurance and unification of standard system, *etc.* PAS2050, GHG Protocol and ISO14067 were currently the most widely used whole life cycle carbon footprint assessment standards. However, more detailed, precise and clear Product Category Rules (PCR) were needed for specific product categories. Based on the above research summary and the analysis of the application progress of carbon footprint assessment technology in key industrial emission control industry such as electric power, steel, cement, petroleum and chemical industry, the problems existing in the current research and the challenges facing the development of our country's carbon footprint assessment technology were proposed: ① The localization carbon emission database of the whole life cycle and whole process of multiple fields had yet to be improved; ② A high-precision, standardized and internationally recognized carbon footprint assessment methodology had yet to be built; and ③ The research on the combination of carbon footprint and quantitative assessment of carbon emission reduction was not in-depth enough, and there were few landmark demonstration projects that supported the implementation of carbon footprints for low-carbon solutions. In the future, it was necessary to further explore the combination of carbon footprint assessment technology with carbon emissions accounting and carbon trading research, combine product carbon footprint with product carbon labeling and Environmental Product Declaration (EPD), and give full play to the role of carbon footprint assessment technology in promoting scientific and orderly carbon reduction, guiding green and low-carbon consumption, and responding to trade barriers, *etc.* This paper could provide a reference for promoting the establishment of a comprehensive, scientific, accurate and standardized carbon footprint assessment system in China.

Keywords: carbon footprint; life cycle analysis; carbon peak and carbon neutral; carbon footprint assessment standards; product carbon footprint; trade barriers

自20世纪中叶以来,因CO₂等温室气体持续高排放导致全球气候持续变暖,严重威胁人类社会的生存与发展。在此背景下,碳中和战略是实现社会

生态转型的重要推手,低碳经济日益成为世界各国未来经济社会发展的最佳模式。美国、欧盟、日本等发达国家和地区陆续承诺,将在2050年前后实

现净零碳排放^[1];中国在2020年9月22日在第75届联合国大会一般性辩论上的讲话宣布,“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,争取在2060年前实现碳中和”。同时,作为协同各国碳减排的重要政策工具,碳边境调节税已成为欧盟等发达国家和地区避免“碳泄漏”、提升自身产业国际竞争力的重要手段。2022年6月22日,欧洲议会通过了关于建立世界上第一个碳边界调整机制,除了委员会提出的钢铁、炼油厂、水泥、有机基础化学品和化肥外,议会还希望该机制也涵盖有机化学品、塑料、氢气和氨等。碳边境调节税实施后,中国将成为其中受影响最大的国家之一,世界银行的研究报告显示,若碳边境调节税全面实施,中国出口产品面临的关税将增加26%,出口量将因此下滑21%^[2]。

碳边境调节税的实施对碳足迹评估技术提出了重大的需求,且不同国家的碳足迹评估方法并不完全一致^[3],存在一定的国际互认问题。碳足迹概念源自环境足迹,首次引用来自2000年出版的《西雅图时报》一篇文章《碳计量:森林与全球变暖战争》,后来陆续用于各类产品评价。Čuček等^[4]系统介绍了各类碳足迹评估的计算工具,但不同计算工具的计算结果存在较大差异;Tagliaferri等^[5]基于全生命周期方法对电动汽车开展了碳足迹评估,并将其与内燃机汽车进行了比较,虽然在使用阶段碳排放量电动汽车仅为内燃机汽车的一半,但电池组件制造阶段的碳排放量却很大;Panzone等^[6]研究发现,通过碳足迹评估及碳税制度,可有效引导居民低碳消费;王雅君等^[7]研究分析了全生命周期碳足迹评估方法在纺织、制革及其他轻工领域中的应用情况,并指出,碳足迹评估的广泛开展可有效促进全社会走向低碳绿色,推动我国节能减碳目标的实现;潘竞虎等^[8]利用DMSP-OLS夜间灯光数据和碳排放统计数据,系统研究了中国能源碳足迹时空格局演化及脱钩效应,碳足迹呈逐年增长趋势,这给中国低碳、绿色发展目标的实现带来压力和挑战,应提高能源利用效率,加快产业结构调整,优化能源消费结构;刘涛等^[9]建立产品碳足迹与组织层级碳核算的关联,并指出应用生命周期评价方法可以系统化、量化地对钢铁企业进行低碳发展规划。国内外碳足迹研究历史也并不长,且国外经验对我国的借鉴意义有一定局限性。因此,我国实现绿色低碳转型,实现双碳目标对开展有中国特色(体量大、行业领域多、流程长等)的碳足迹评估

提出了需求,同时也面临很多挑战。

本文基于浙江省“尖兵”计划“碳足迹碳标签关键技术研发”项目(2022C03030),在系统梳理碳足迹相关国内外文献的基础上,从碳足迹的概念、碳足迹评估方法、碳足迹评估标准、碳足迹评估边界划分及数据获取等方面归纳了碳足迹的研究进展,并研究分析了碳足迹评估技术在电力、钢铁、水泥、石油和化工等重点工业控排行业的应用情况,并基于此,提出目前研究存在的问题及国内碳足迹评估技术发展面临的挑战,展望未来发展方向。

1 碳足迹评估技术

1.1 碳足迹概念

碳足迹的概念最早源自于生态足迹,生态足迹是指维持一定人口所需的具有生物生产力的土地和海洋面积(以全球公顷为单位)。根据这一概念,碳足迹是指用于吸收人类活动排放全部CO₂所需的土地面积。随着时间的推移,碳足迹的使用逐渐普遍起来,但很少有研究报告以全球公顷为单位来表示碳足迹,更多是以CO₂排放当量(CO₂ equivalent, CO₂-eq)来表示。甚至,有些文献为了与生态足迹进行区分,采用与碳足迹概念相近的词语来描述,如隐含碳、碳含量、嵌入碳、碳流量、虚拟碳、温室气体足迹和气候足迹等^[17]。国内外学者和机构对碳足迹概念的理解不尽相同,如表1所示,主要区别如下:①碳足迹评估对象,产品、活动(个人、团体、组织、公司、政府、国家等);②碳足迹评估边界,是否需要追溯到原料开采、运输等全生命周期过程;③计算内容,仅计算CO₂排放量,还是计算所有温室气体的CO₂排放当量;仅计算直接排,还是计算直接、间接排放的累计总量。

精准科学的碳足迹评估是实现“双碳”目标的有效手段,方法明确、概念统一是碳足迹发挥其低碳社会“助推器”作用的前提,尤其是碳足迹未来要为碳边境税、碳抵消或低碳消费引导等服务,将会与货币交易紧密联系在一起,因此,定义科学全面、国际互认的碳足迹概念至关重要。结合国内外学者的研究进展以及本文作者团队在重点工业行业的产品碳足迹评估经验,本文给出了一个建议的工业产品碳足迹概念:“时间维度上,从全生命周期的角度核算‘从摇篮到坟墓’的温室气体累计碳排放总量,并在此基础上,在技术维度上核算‘全工艺流程’中各部分的直接、间接碳排放,实现相对全面的多维度、多尺度碳足迹核算评估”。

算模型,从而核算不同区域、不同部门为满足自身最终消费而引起的碳排放。该方法能够定量刻画经济系统内部各部门间的投入产出关系,更适用于中、宏观系统的分析^[31]。例如,董会娟等^[32]基于投入产出分析法研究了北京市居民消费碳足迹;Hasegawa等^[33]构建多区域投入产出表,分析日本区域经济活动的碳足迹;Weber等^[34]采用该方法对美国家庭消费碳足迹进行了核算。基于IOA的碳足迹评估方法具有原理明确、中间过程清晰、结构完整性强等优点^[35],一旦模型建立完成,所需的时间和人力就会少得多。然而,该方法假设同一部门不同产品之间完全无差异,因部门归并差异可能严重影响其核算结果,即产生集聚偏差,在核算微观对象的碳足迹时尤其如此。同时,由于投入产出表编制周期较长,实际研究通常基于往年的数据,从而造成分析结果产生系统性误差^[31]。

要进行详细、全面的碳足迹分析,可将LCA和IOA相结合构建Hybrid LCA方法,从而同时解决LCA方法的截断误差问题和IOA方法的集聚偏差问题,兼具LCA精确性和IOA的完整性。在这种背景下,无论是工业行业、单个企业,或是大的产品群体,甚至是家庭、政府、个人或特定社会组织的碳足迹均可通过投入产出分析的计算模型得到。然而,基于Hybrid LCA的碳足迹核算方法不仅需要明确产品或服务生产过程中的资源投入,同时需要将生产过程与投入产出表中的部门进行匹配,因此仍面临较高的不确定性。

对比以上几种方法,LCA方法发展相对较为领先,在普适性、系统化、定量化上具有一定的优势,并对产品系统在时间和空间上进行了扩展,更

具有现实意义。然而该方法仍具有几个缺点:①截断误差问题,在LCA评估过程中,必须确定适当的系统边界,从而将截断误差最小化;②LCA在描述复杂对象时,因对象存在各种变动,难以观测和统计,导致数据质量难以控制,这就要求对数据来源的质量进行把控,同时有针对性地开发数据清洗算法;③缺乏对时空属性的判别,空间上可以通过本土化数据库体现区域化差异,时间上则需保障数据的时效性,如建立动态数据清单等;④LCA方法中仍存在主观判别的步骤,削弱了评价的客观性,这就对在现有标准上成体系地发展更为具体的评估标准提出了要求。

因此,快速、大规模、成体系地对复杂工业生产中的特征过程、产品进行评价,是碳足迹评估进一步发展的必经之路。

1.3 碳足迹评估标准

1998年世界气象组织和联合国环境规划署共同建立了联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC),《IPCC国家温室气体清单指南》最早于1995年发布,为各国编制国家清单提供了方法学依据,属于简化版的“自上而下”方法,仅使用国家能源供应数据来计算主要化石燃料燃烧产生的CO₂排放量,后经多次修订,最新版本为2019版。

目前,国际上现行的产品碳足迹评估标准都是基于LCA方法,主要有3个:《产品与服务生命周期温室气体排放的评价规范》(PAS 2050—2011)、《产品生命周期核算与报告标准》(GHG Protocol—2011)和《产品碳足迹量化与交流的要求与指导技术规范》(ISO 14067—2013)^[36]。3个国际标准的发展历程如图2所示。国际标准化组织(ISO)于

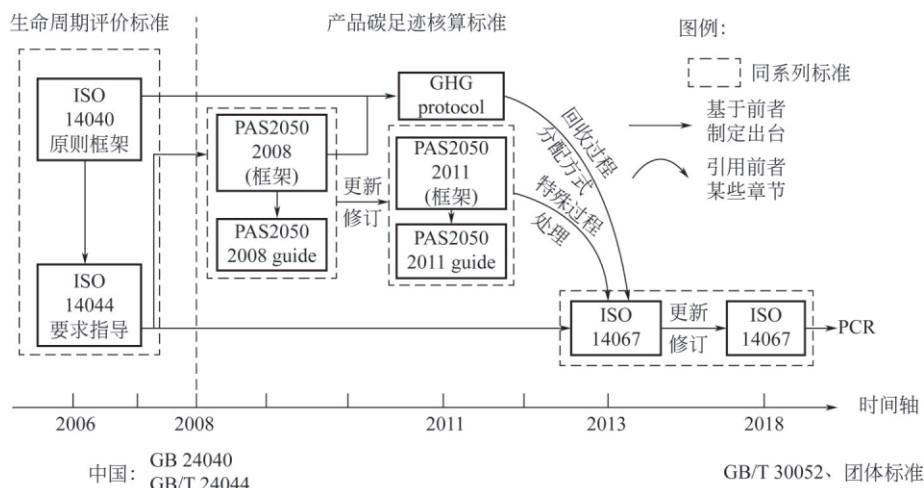


图2 LCA产品碳足迹评估国际、国内标准发展历程^[36]

2006年发布了ISO14040和ISO14044,为LCA方法提供了基本框架结构和概念。基于ISO14040和ISO14044,英国标准协会(BSI)于2008年联合发布了PAS2050和PAS2050 guide,是世界上首部针对产品碳足迹评估的标准,2011年进行修订,修订后的标准针对性更强,适用范围更广。GHG Protocol最初是由世界可持续发展商业理事会(WBCSD)和世界资源研究所(WRI)于1999年发布,先后经历了2001、2004版本,基于ISO有关LCA的标准和PAS2050初版,于2011年修订发布最新版,与PAS2050相比,GHG Protocol的操作步骤更详细和清晰。基于上述标准经验,ISO14067于2013年发布,2016年5月进行复核,是现行最新的碳足迹评估国际标准,该标准的发布实施进一步扩大了产品碳足迹评估的全球影响力。基于ISO14067等国际标准,延伸出了很多具体产品门类的碳足迹评估方法,如国际EPD体系现行有效的产品类别评估规范(PCR)已有150多项。中国的GB 24040和GB/T 24044分别为ISO14040和ISO14044的翻译版,于2008年发布;针对ISO14067的翻译转化版国家标准尚在制定中,《钢铁产品制造生命周期评价技术规范(产品种类规则)》(GB/T 30052)为国内首部产品碳足迹评估的国家标准,后来陆续又针对电子产品、农副产品等发布实施了系列团体标准^[29-30]。

3个典型的产品碳足迹评估标准对比如表2所示。3个标准在目的、范围、评估原则、评估步骤、系统边界划分等方面都有所差异,其中,在评

估步骤方面,3个标准都可以按照目标和范围界定、清单分析、影响评价、结果解释4个基本步骤,但在各步骤的具体内容上有一定区别。PAS2050和ISO14067的主要目的是规定统一的碳足迹计算步骤,而GHG Protocol的目标是提供关于评估和报告的详细规范。

尽管产品碳足迹评估标准的全面性和专业性越来越强,但仍存在一些问题:①LCA方法计算产品碳足迹时存在大量的假设和折中方案,有一定的任意性,且较难统一,这易导致相同产品的碳足迹评估结果出现差异^[40];②部分碳足迹评估存在失效问题,如再生纸的碳足迹通常高于原始纸^[41],容易造成错误的引导;③针对具体产品进行碳足迹评估时,部分会影响碳足迹最终评估结果的内容是否应纳入系统边界存在不确定性,如土壤固碳作用^[38]等。

上述问题表明,当前的碳足迹评估标准还需要进一步完善和改进,尤其需要针对具体的产品门类开展更细化、精准、明确的产品类别评估规范(PCR)。

1.4 碳足迹评估边界划分及数据获取

系统边界用于界定研究对象所需核算的所有过程单元,应遵循研究对象的生命周期流程和基本规律进行边界划分,科学、精确地梳理出研究对象在边界内的输入、输出项^[42]。以工业产品碳足迹评估为例,其系统边界划分如图3所示,上游为原辅料和能源开采生产阶段,核心流程为工业产品的加工、生产阶段,下游为副产品及产品废弃后的循环

表2 3个典型的产品碳足迹评估标准对比^[37-39]

对比项目	PAS2050	GHG Protocol	ISO14067
目的	制定关于产品温室气体评价的统一指导	提供有关评估和报告的详细规范	规范温室气体结果的量化过程和沟通
范围	评估	评估和交流	评估和交流
评估原则	相关性、完整性、一致性、准确性、透明性	相关性、完整性、一致性、准确性、透明性	相关性、完整性、一致性、准确性、透明性、连贯性、参与性、公平性、避免重复计算
评估步骤	范围-数据收集-碳足迹计算-结果解释及减排建议	商业目标制定-检查原则与框架-范围定义-边界设定-数据收集和质量评估-分配-不确定性分析-清单结果计算-保证-报告清单结果-设定减排目标	目标与范围-清单分析-影响评价-解释
系统边界	摇篮到大门、摇篮到坟墓	摇篮到大门、摇篮到坟墓	摇篮到大门、摇篮到坟墓、大门到大门、部分碳足迹
细化系统边界	无	无	敏感性分析
产品碳足迹研究报告	无	有	有
质量保证	第三方核查、自查	第三方保证、自证	第三方核查、产品碳足迹披露报告
PCR	无	无	有

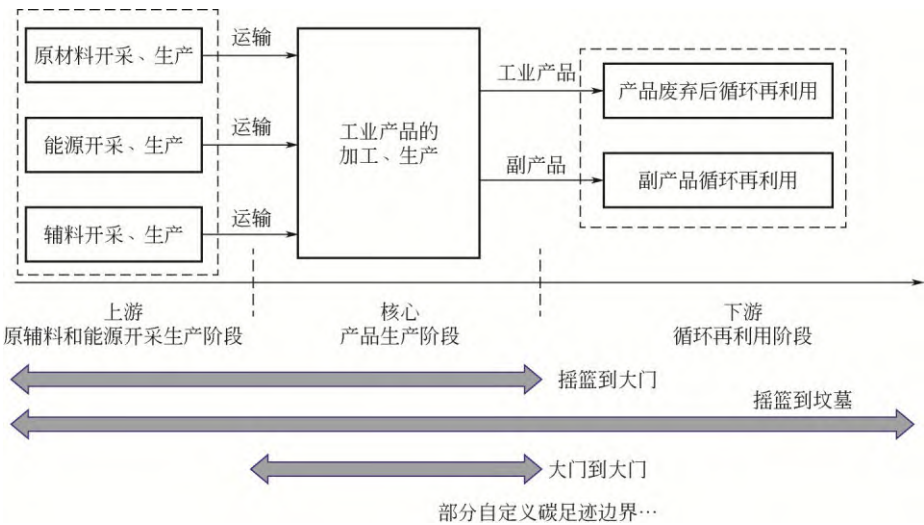


图3 工业产品碳足迹评估系统边界示意图

再利用阶段。根据ISO 14067的规定，系统边界可按摇篮到大门（上游+核心）、摇篮到坟墓（上游+核心+下游）、大门到大门（核心）、部分自定义碳足迹边界等多种方式进行划分，其中大门到大门的边界划分模式更多适用于组织碳足迹评估。

工业产品碳足迹评估所需的数据范围如表3所示。直接排放（范围1）和间接排放的范围2一般较易现场获取，可通过企业生产报表、采购合同、在线监控数据以及规范文件等来源进行收集，尤其针对重点工业控排行业的规上企业，这类数据一般都比较规范。除了现场数据外，碳足迹评估还需要背景数据（范围3），即企业运营边界外与产品生产相关的原材料获取、运输、能源生产等过程的资源消耗、能源消耗与污染物排放数据^[43]。此外，随着经济全球化、生产社会化与国际化，形成了跨国、区域、企业的多部门的分工合作，复杂的产业与供应链系统增加了碳足迹数据获取的难度。

范围3数据的获取更多是依赖数据库，国外在LCA数据库建立上起步较早，相关数据库主要有瑞士Ecoinvent、欧洲生命周期文献数据库ELCD、德国GaBi扩展数据库、美国NREL-USLCI数据库、韩国LCI数据库、日本LCA公共数据库等^[4, 44-46]。亚

洲范围内，日本、韩国、泰国等国在LCA数据库建立上较为领先。此外，相关单位开发了GaBi、Simapro环境影响评估软件，用于LCA评估。在国内开展碳足迹研究和应用需要基于中国本土的基础数据库，由四川大学王洪涛教授创建的中国生命周期基础数据库（Chinese reference life cycle database, CLCD）是国内首个公开发布的中国本地生命周期基础数据库，相关评价软件为eFootprint。国内还有多家科研单位、企业开发了LCA数据库，包括中科院生态环境研究中心开发的中国LCA数据库、清华大学开发的建材类生命周期清单网络数据库BELES、北京工业大学开发的材料产业LCA数据库SinoCentor、同济大学开发的中国汽车替代燃料生命周期数据库、宝钢开发的企业产品LCA数据库以及上海易碳数科发布的钢铁行业数据库等^[46-50]。相较于国外数据库，国内数据库仍需要基于国内实际生产生活情况进一步完善发展。如Ecoinvent 3.4包含欧洲及世界多国的13300多个单元过程数据集以及相应产品的汇总过程数据集，GaBi 4专业及扩展数据库共有4000多个可用数据。而国内CLCD数据库包含600多个大宗的能源、原材料、运输的清单数据，数据相对较少。

表3 工业产品碳足迹评估所需数据范围

排放类型	范围	定义	举例
直接排放	范围1	工厂边界内直接控制或拥有的排放源所产生的排放，包括固定源、移动源、无组织排放和过程排放等	工厂拥有或控制的锅炉燃煤排放、车辆燃油排放和工艺过程排放等
间接排放	范围2	工厂自用的外购电力、蒸汽、供暖和供冷等产生的间接排放	外购的电力、热水、蒸汽和冷气等
	范围3	工厂除范围2之外的所有间接排放，包括价值链上游和下游的排放	购买原材料的生产排放、售出产品的使用排放等

丰富本土化碳足迹基础数据是现阶段国内碳足迹研究的一大重点。同时,对收集的碳足迹数据的有效性进行判别、评价也具有重要意义,通过数据清洗、数据核验、监测数据比对等方式,对碳足迹数据进行分析,能够提升数据质量,是保障碳足迹研究准确性的基础。碳足迹评价数据分为现场数据和背景数据,以钢铁产品为例,数据质量评价体系的数据评价指标有3个:来源、类型和时间^[51],如表4所示。针对所有现场数据、背景数据,应对数据来源、数据时间、数据类型等进行详细说明,用于数据质量评价,数据质量评价采用5分制定量评价(3项累计最高15分)。对多个单元过程组成的工序(组合)的碳足迹数据质量,通过计算其包括的所有单元过程碳足迹数据的加权平均得分来获得。对于质量较差的数据应进行敏感性分析或不确定性分析,检查说明产品生命周期忽略的过程、忽略的现场数据以及主要的假设等相关因素可能对最终结果造成的影响,说明背景数据选择、现场数据收集与处理是否符合标准要求。一般对单元过程碳足迹在产品生命周期碳足迹中占比超过10%的数据称为敏感性高的数据,其数据质量应进行约束,评分最好在3分以上。另外,对于实在无法获取的数据,且该数据对整体贡献度较小时,可忽略不计,一般建议普通物料<1%,稀有物料<0.1%。

产品碳足迹评估包括所有的温室气体,即二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)、氢氟碳化物(HFCs)、全氟碳化物(PFCs)、六氟化硫(SF₆)和三氟化氮(NF₃),用温室气体100年内的全球变暖潜势(GWP100)进行计算,可按式(1)^[30]进行计算,各类温室气体的GWP100值如表5所示。

$$C = \sum Q_i \times m_i \quad (1)$$

式中, C 为产品碳足迹CO₂-eq的计算结果,kg; m_i 为温室气体*i*生命周期清单的结果,kg; Q_i 为温室气体*i*的全球变暖潜势。实际产品碳足迹评估案例中,碳足迹计算结果的单位应考虑功能单位的影响,如以单位质量(1kg)为功能单位,CO₂-eq的计算结果为kg单位。

表5 温室气体全球变暖潜势

温室气体类别	化学式	全球变暖潜势 (GWP100)
二氧化碳	CO ₂	1
甲烷	CH ₄	27.9
氧化亚氮	N ₂ O	273
氢氟碳化物	HFCs	4.84 ~ 14600
全氟碳化物	PFCs	7380 ~ 12400
六氟化硫	SF ₆	25200
三氟化氮	NF ₃	17400

2 碳足迹评估技术在电力行业的应用

电力是使用最广泛的二次能源,一方面,在各种工业产品碳足迹评估中,电力消耗往往占有显著的份额;另一方面,电力作为国内首个纳入全国碳交易的行业,自身的组织碳、产品碳足迹评估也有重大需求。因此,基于LCA方法开展电力碳足迹评估研究具有非常重要的现实意义。

在国内研究方面,侯萍等^[52]利用国内开发生命周期评价软件eBalance,计算得到全国电网组织碳、产品碳足迹排放因子的平均值分别为供电量1kWh CO₂-eq为0.93kg、1.03kg,其中组织碳足迹只需包含发电过程,而产品碳足迹的计算还需追溯电力上游燃料和原料的生产及运输过程。方恺等^[53]结合地表覆被的碳吸收能力,分类计算了不同电厂的全球平均电力碳足迹当量[单位电力消费量所产生的生命周期碳足迹,单位为10⁻⁶hm²·kWh⁻¹],仅计算CO₂形式的碳排放,系统边界包括电站建设、燃料/原料开采、发电过程、输配电和废弃物处置等电力生产的全生命周期过程,计算结果为燃煤电厂(131.3×10⁻⁶hm²·kWh⁻¹)>燃油电厂(95.8×10⁻⁶hm²·kWh⁻¹)>燃气电厂(56.6×10⁻⁶hm²·kWh⁻¹)>水电(38.8×10⁻⁶hm²·kWh⁻¹)>核电(1.9×10⁻⁶hm²·kWh⁻¹)。刘韵等^[54]基于LCA方法,计算得到山西某燃煤电厂半年度的碳足迹为236.23万吨的CO₂排放,其中,96%以上是锅炉燃煤排放,燃煤开采和加工、尾气脱硫置换、煤和废弃物运输占比分别为3%、0.68%和0.12%,经测算,折合单位供电量和发电量的碳足迹分别为供电量1kWh产生CO₂-eq 0.80kg、0.73kg。娄兰兰^[55]采

表4 数据质量评价表

数据来源			数据类型					数据时间			
现场	文献	其他	测量	计算	平均	估算	未知	≤1年	1~5年	5~10年	>10年
5	3	1	5	4	3	2	1	5	4	3	1

用IOA法计算了中国热电行业的碳足迹变化,仅计算了范围1和范围2,其中,范围1占绝对主导地位,在热电行业碳足迹中占比达90%。Liao等^[56]计算分析了中国燃煤电厂的碳足迹,但未使用LCA方法,2009年度中国燃煤电厂的碳足迹为1kWh供电量CO₂-eq为0.892kg。Wang等^[57]采用LCA方法,系统计算分析了中国燃煤电厂的全生命周期碳排放、碳足迹及发展规律,计算边界包括煤炭开采、煤矿采后活动、洗煤、运输、燃煤发电、资源循环利用等全生命周期过程,全生命周期碳排放呈现先增加后减少的趋势,2014年达到最大值CO₂-eq为3783Mt,间接碳排放量占比保持在10.7%~12%,其中2016年煤炭开采碳排放量为CO₂-eq为223Mt,占生命周期总排放量的6%以上,其他阶段,如煤炭洗选、运输和无组织排放只占总排放量的不到3%;全生命周期碳足迹从2010年1kWh供电量CO₂-eq为0.971kg下降至2016年的0.900kg,其中燃煤发电贡献近90%,具体如图4所示。Sun等^[58]基于Matrix-based模型,计算了得到2002年、2006年中国热电厂碳足迹分别为1kWh供电量CO₂-eq为1.09kg、1.19kg。

在国际研究方面,根据国际能源署(IEA)发布的数据显示^[59],燃煤电厂燃用无烟煤、烟煤和褐煤发电时的碳足迹,即1kWh供电量CO₂-eq分别为0.86kg、0.87kg、1.02kg。Carbon Footprint Ltd.发布的碳足迹计算软件^[60]中,电力碳足迹1kWh供电量CO₂-eq一般约为0.5kg。Mittal等^[61]、Odeh等^[62]、Messagie等^[63]和Santoyo-Castelazo等^[64]分别研究了印度(0.926kg)、英国(0.9897kg)、比利时(0.925kg)和墨西哥(1.045kg)燃煤电厂碳足迹,提高发电效率对降低电力碳足迹具有重要作用。Dalir等^[65]基于LCA方法,研究了燃气机组在采用联合循环技术时的碳足迹水平,碳足迹1kWh供电量CO₂-eq为0.321~0.522kg。Andric等^[66]研究了生物质掺烧对燃煤电厂碳足迹的影响,当生物质掺烧量达

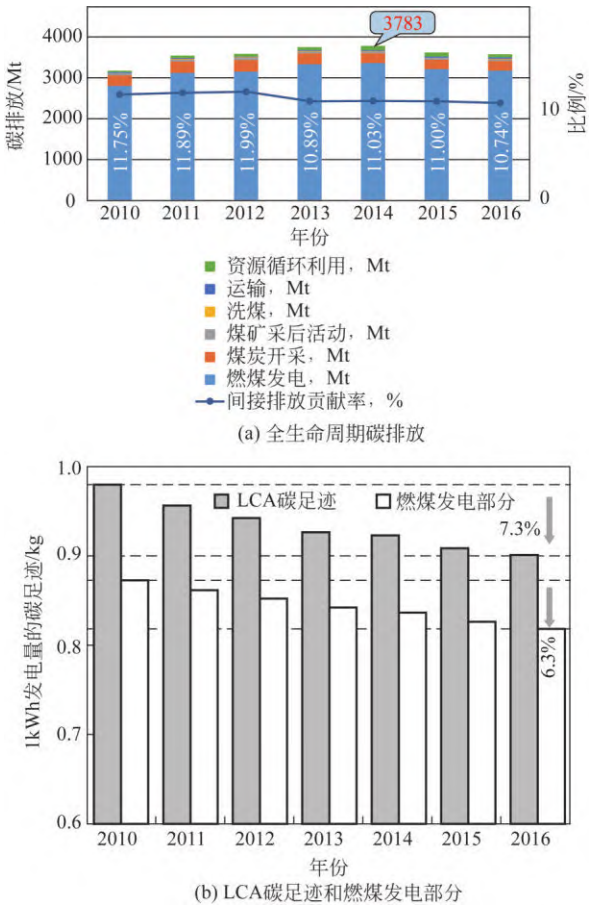


图4 中国燃煤电厂全生命周期碳足迹^[57]

到20%时,CO₂排放可减少11%~25%。

电力碳足迹背景值几乎在所有的工业产品碳足迹评估中均有使用,该数据的代表性、准确性和全面性至关重要,但值得注意的是,在电力全生命周期过程各个阶段的企业对象中,同一种类别的碳排放往往会以不同类别的范围属性出现,如图5所示。从文献分析来看,国内外电力碳足迹评估方法基本一致,后续关键在于本土化数据库和评估标准体系的构建。另外,基于精准全面的碳足迹评估“摸清家底”后,如何科学有序降低碳排放是后续研究的重点,中国电力行业碳减排主要措施如下。

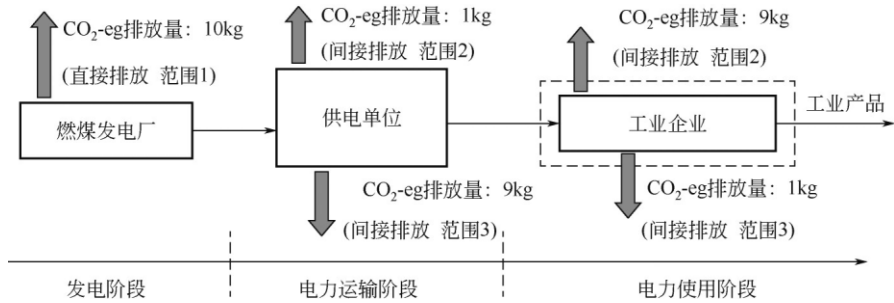


图5 同一种碳排放全生命周期过程各个阶段的企业对象中对应不同的范围属性

①燃煤电厂生物质掺烧。国内很多地方政府已出台政策,鼓励现役燃煤发电机组采用生物质等零碳燃料与煤混烧。②新能源发电。与燃煤发电相比,新能源发电的碳足迹低,如核电、水电的碳足迹仅1kWh供电量 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 约为0.00413kg、0.0143kg。但值得注意的是,目前工业企业产品碳足迹评估时,除了可以准确测算光伏等自发自用的绿电外,从电网使用的电力尚不能追踪溯源准确区分其电力类别。③设备能效提升。包括全生命周期环节各设备能效提升,重点在于燃煤发电环节主机、辅机等设备及高压输电环节。④ CO_2 捕集技术。 CO_2 捕集成本高和大规模、低成本、高附加值的 CO_2 资源化利用技术确实限制了该技术的大规模推广应用。

3 碳足迹评估技术在钢铁行业的应用

钢铁产品在各行业领域的应用都十分广泛,科学精准的碳足迹评估有助于推动钢铁生产和贸易行业的绿色低碳发展。中国以“高炉炼铁-转炉炼钢”的长流程工序为主,为有效应对国际贸易壁垒、推动钢铁行业绿色发展,中国钢铁工业协会钢铁行业EPD(环境产品声明)平台于2022年5月19日首发上线,将协助成员单位规范、有序地披露产品碳足迹等环境信息。

在国内研究方面,高成康等^[21]利用IOA法,计算分析了中国5个典型长流程钢铁企业的产品碳足迹,吨钢碳足迹范围在3.93~4.59t,从整个长流程工序来看,炼铁工序占比最高,以企业A为例,烧结、焦化、炼铁、炼钢、轧制各个工序的单位产品碳足迹,即1t钢 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 分别为0.474t、0.513t、3.98t、0.262t、0.264t,炼铁工序占比超过70%。“高炉炼铁-转炉炼钢”的长流程工序碳排放量明显高于“电炉炼钢”的短流程工序,研究表明,高炉、电炉的1t钢 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 分别为2.15t、0.15t^[67]。梁聪智^[67]计算了中国2000—2009年钢铁行业的吨钢碳排放,逐渐呈减低趋势,由2000年的1t钢 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 为2.61t降至2009年的1.60t。张玥等^[68]计算了南京某长流程钢铁企业2005—2011年的碳足迹,从2005年的1t钢 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 为2.58t降至2011年的2.25t,与日本当时的炼钢技术(1.64t)^[69]还有一定差异。刘宏强等^[70]分别采用《省级温室气体清单编制指南》、《钢铁碳排放指南》(考虑产品固碳)和LCA方法,计算某长流程钢铁企业碳足迹,即1t钢 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 为2.116t、2.013t和2.309t,LCA的计算边界为从铁矿石开采选矿、煤炭洗选、原料运输、焦

化、烧结、球团、高炉、转炉、轧制等直到钢铁产品的出厂,为“从摇篮到大门”,计算得到各工序的碳足迹占比分别为4.05%、3.18%、0.49%、17.08%、22.24%、1.46%、35.62%、5.31%、10.56%。Meng等^[71]提出了一种基于相关离散度的钢铁能源供应链碳足迹定义方法,计算得到中国钢铁1t钢 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 为1.93t。Lyu等^[72]基于LCA方法研究发现,球团工艺碳足迹1t铁球团 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 为0.0585t,其中51.4%来自原材料的提取、加工和运输、燃料和电力,与烧结相比,球团工艺更环保、能耗更低、更低碳排放。

在国外及国际研究方面,世界钢铁协会(World Steel Association, WSA)从1996年起即开始开展钢铁产品的生命周期清单研究,2012年^[73]公布的碳足迹1t钢 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 为1.8t,2020年^[74]发布了不同型号钢材的碳足迹,不同型号钢材产品的碳足迹差异较大,型材、钢筋、热轧卷、彩涂碳足迹1t钢 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 分别为1.578t、1.966t、2.343t、2.894t。2007年国际能源署(IEA)^[75]发布的“高炉+转炉”长流程、“电炉”短流程炼钢的碳足迹,1t钢 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 分别为1.3~1.6t、0.3~0.5t;2020年IEA^[76]发布的数据,1t钢 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 分别为2.2t、0.3t。Conejo等^[77]提到先进的钢铁企业碳足迹水平1t钢 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 为1.8t,“高炉+转炉”的长流程工序为1.80~2.00t,高炉、直接还原铁-电炉、废钢-电炉分别在0.8~1.3t、1.1~1.8t和0.35~0.5t,仅通过提高能源利用效率,减排幅度很难超过10%~15%。Suer等^[78]基于LCA方法,按照“从摇篮到大门”的边界划分,计算分析了热轧卷材的碳足迹1t钢 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 为2.1t,高炉天然气替代和富氢冶炼可分别实现减排4%和9%。Lisienko等^[79]研究发现“高炉+电炉”串联比“高炉+转炉”串联 CO_2 排放低,以俄罗斯某长流程钢铁企业为例,同时使用转炉和电炉炼铁(从同一个高炉获得铁水)有助于减少20%的 CO_2 排放,转炉在冶炼剩余75%、80%、85%铸铁情况下的碳足迹1t钢 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 分别为2.048t、2.166t、2.286t。Jha等^[80]研究发现,钢铁烧结工序中采用生物质替代焦炭可有效降低产品碳足迹,掺烧比例达到30%时,碳足迹可降低6%。Devasahayam等^[81]研究发现,高炉中掺烧2%的塑料可减少2%的碳排放。Ghanbari等^[82]研究发现,将常规炼钢与多联产系统相结合可以减少20%以上的 CO_2 排放,可达1t钢 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 为0.97t。Schmöle等^[83]研究发现燃料替代可有效减少高炉 CO_2 排放,基础工况、天然气代替、富氢冶炼

和热成型工艺使用时候高炉吨钢碳排放分别为1.527t、1.421t、1.235t、1.150t。

国内外学者、政府、行业协会、钢铁企业等各个层面已对钢铁产品碳足迹评估技术的方法、标准、应用方面开展了较广泛的工作,总的来说,国际方面的相关工作起步早,发展相对较为成熟,已形成较成熟的标准、认证体系、数据库。而国内方面的工作起步较晚,发展相对滞后,在2020年以前仅有宝武集团、包钢、鞍钢、马钢、河钢等少数企业开展相关的研究和应用,其中,宝武集团最为领先,2003年起就开展了LCA的研究工作,对钢铁产品生命周期评价模型进行了开发和完善,陆续完成了热轧板、冷轧板、镀锌板、硅钢、不锈钢等多类产品的生命周期评价,并将其结果用于支持绿色产品设计与认证、绿色制造、绿色供应链管理工作,2020年以来,越来越多的钢铁企业开始开展产品碳足迹评估和披露、企业“双碳”目标制定、企业碳达峰路径规划等方面的工作。国内钢铁行业碳足迹评估需要重点关注和解决的问题有:①当前我国缺乏中国钢铁产品及其上游原材料的碳排放因子基础数据库,这制约了我国钢铁产品碳足迹评价工作的开展,且由于缺乏本土数据库,加大了中国钢铁产品出口欧美等发达国家时的绿色贸易壁垒;②缺乏成熟的钢铁行业产业链协同合作开展碳足迹评估的平台,使得当前各钢铁企业的产品LCA及碳足迹评价工作往往是单打独斗,很难形成合力,不利于我国钢铁行业“双碳”目标的实现;③我国钢铁产品碳足迹评估相关标准体系不够完善,标准只是集中在钢铁大类评估方法框架等方面,缺乏如钢铁产品碳标签、碳管理等其他环节的标准以及更细致的钢铁产品类别的碳足迹评价与披露的标准;④当前我国严重缺乏同时掌握钢铁产品工艺又熟悉产品碳足迹评价、碳管理等方面的专业人才,这将影响钢铁行业产品碳足迹评价工作的开展速度和质量。因而,未来我国钢铁行业的产品碳足迹评价技术的应用发展将更加侧重于标准体系完善、本土数据库搭建、行业合作平台的开发和推广、人才培养等方面发展。

在钢铁行业减碳方面,世界钢铁协会提出了钢铁工业六大减碳途径,如图6所示,从时间尺度上,应根据企业的实际情况接近、中、长期来实施,且在实施之前,采用碳足迹评估的方法准确摸清“碳家底”,是后续科学降碳的关键,尤其是针对中国占比最高的“高炉+转炉”长流程工艺。

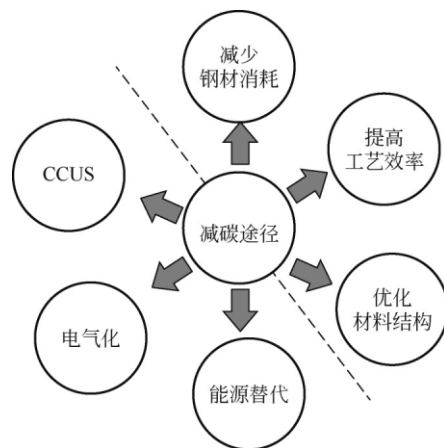


图6 WSA提出的钢铁行业六大减碳途径

4 碳足迹评估技术在水泥行业的应用

水泥行业是能源、资源消耗密集型工业,从燃料/原料开采、运输、水泥生产直至再生循环的整个生命周期,中国是世界上水泥生产第一大国,开展水泥碳足迹评估,并科学引导水泥工业降碳,是实现我国双碳目标的重点之一。

在国内研究方面,李晓鹏等^[84]参照PAS 2050标准,计算得到某典型水泥企业水泥的碳足迹1t水泥CO₂-eq为0.614t。姜睿等^[85]针对熟料质量分数为70%的水泥,测算了大型新型干法(>4kt-熟料/d)、中型新型干法(2~4kt-熟料/d)、小型新型干法(<2kt-熟料/d)和立窑(<2kt-熟料/d)1t水泥CO₂-eq分别为0.573t、0.588t、0.609t、0.619t,基于LCA方法算得全国水泥碳足迹为0.698t。白文琦等^[86]基于LCA方法,分别对硅酸盐水泥(P.I及P.II型)、普通硅酸盐水泥(P.O型)、矿渣硅酸盐水泥(P.S.A及P.S.B型)、火山灰质硅酸盐水泥(P.P型)、复合硅酸盐水泥(P.C型)和粉煤灰硅酸盐水泥(P.F型)8种水泥进行碳足迹评估,结果1t水泥CO₂-eq分别为0.933t、0.890t、0.779~0.890t、0.507~0.762t、0.336~0.507t、0.592~0.762t、0.507~0.762t、0.592~0.762t。秦于茜^[87]基于LCA方法,也对上述8个典型水泥品种进行了碳足迹评估,指标略有提升,推测是因为环保要求提高所致。杨李宁等^[88]基于LCA方法,计算重庆水泥出厂前碳足迹1t水泥CO₂-eq为0.668t,其中CaCO₃分解占比最高,为57.29%,燃料燃烧占比为38.33%。Shen等^[89]采用LCA方法研究发现,镁水泥碳足迹比硅酸盐水泥更大,前者比后者高出0.079~0.395t。Zhang等^[90]采用LCA方法研究发现,硅酸盐水泥和熟料的碳

足迹 1t 水泥 CO₂-eq 分别为 1.056t、1.008t，其各自生产阶段的碳足迹分别为 0.950t、0.917t。

在国外及国际研究方面，世界可持续发展商务委员会 2009 年^[91]公布的水泥熟料碳足迹 1t 水泥 CO₂-eq 为 0.866t，Ernst 等^[92]采用 LCA 方法，计算得到硅酸盐类水泥和硅酸盐水泥熟料碳足迹 1t 水泥 CO₂-eq 分别为 1~1.2t 和 0.87t。Barcelo 等^[93]研究发现水泥碳足迹大部分来自石灰石煅烧，设计需要更少石灰石的新熟料是降低水泥碳足迹的重要手段之一，设计的新型熟料（不同配方、不同比例碳足迹在 0.570~1.271t）与传统硅酸盐熟料（0.816）相比，碳足迹可减少 20%~30%。

水泥是各类基础建设的重要原材料，近年来已有许多文献对水泥全生命周期碳足迹开展了研究，评估方法基本一致，但现有大部分文献中均未涉及水泥作为混凝土的胶凝材料使用后碳化过程中固碳量测算。水泥碳足迹主要是石灰石煅烧和燃料燃烧，水泥行业碳减排措施主要如下：①提高能源效率，不同工艺的水泥窑热耗及能源效率如表 6 所示；②余热发电减碳，水泥熟料煅烧过程中排掉的 300℃ 以下低温废气余热可用于余热发电，其热量占水泥熟料烧成总耗热量的 33% 左右；③燃料或原料替代，燃料替代包括煤气、生物质、工业有机固废等替代煤，原料替代包括电石渣等工业固废替代石灰石；④熟料替代，如文献^[93]所述，不同配方、不同比例新型熟料使用后，水泥碳足迹可显著减低。⑤CCUS 等其他减排措施。

表 6 不同水泥窑工艺的热耗^[93]

工艺名称	热耗/GJ·t ⁻¹	效率/%
竖窑	约 5.0	35
湿法	5.9~6.7	26~30
干法		
干法长窑	4.6	38
1 级旋风预热器	4.2	42
2 级旋风预热器	3.8	46
4 级旋风预热器	3.3	53
4 级预热+预分解窑	3.1	56
5 级预热+预分解窑	3.0~3.1	58

5 碳足迹评估技术在石油和化工行业的应用

石油和化工行业作为保障国民经济基础原材料、交通运输工具等燃料的关键产业，如欧盟 95%

以上的工业产品原材料依赖于石油和化工行业生产^[94]，因此，获得石油和化工行业的产品碳足迹评估数据是其他行业碳足迹评价的基础。

在国内研究方面，马玉莲等^[95]对氯碱工业中的聚氯乙烯（PVC）产品进行了碳足迹评估计算，计算结果 1t 产品 CO₂-eq 约为 1.765t。沈毅^[96]基于全生命周期 3E 方法对煤制油工艺进行了全面分析，得出直接和间接工艺过程的碳足迹分别为 852.34g/MJ 和 996.03g/MJ。于涵等^[97]基于 LCA 对 CO₂-DMC（碳酸二甲酯）产业链碳足迹进行了评估计算，考察了各工艺在不同能源供应情景下产业链的碳足迹情况，结果表明单位产品碳足迹 CO₂-eq 为 0.70~1.67t。孙潇磊等^[98]参照 PAS 2050 标准，以某企业生产的沥青产品为研究对象，得到“从摇篮到坟墓”的全生命周期碳足迹 CO₂-eq 为 2.958t。雷昕儒^[99]对甲醇的两条以煤为原料的气化路线进行了碳足迹分析，得出煤直接气化和煤化学链气化的碳足迹 1t 产品 CO₂-eq 分别为 0.56t、0.274t。罗仁英^[100]对煤气化+液氢、煤气化+气氢、煤热解+液氢、煤热解+气氢 4 种煤气化制氢氢气方案进行全生命周期碳足迹评估，计算结果 1t 产品 CO₂-eq 分别为 27.05t、23.84t、12.54t 和 9.33t。张楚珂等^[101]对聚丙烯的三条制化方法进行了 LCA 计算，催化裂化、炼化一体化、MTO 工艺生产的聚丙烯碳足迹 1t 产品 CO₂-eq 分别为 0.206t、0.968t、5.979t。田涛等^[102]对己内酰胺全生命周期碳足迹评估结果 1t 产品 CO₂-eq 为 12.55t。卜庆佳等^[103]对乙二醇的煤制（CTEG）路线和天然气制（NGTEG）路线进行了碳足迹评估，结果 1t 产品 CO₂-eq 分别为 9.039t 和 5.745t。赵志全^[104]对多种化工产品的多种路线进行了碳排放计算，在烯烃生产上，石油和天然气凝析液路线的产品全生命周期碳足迹 1t 产品 CO₂-eq 为 1.7~2.4t，以煤和 CO₂ 为原料的路线的产品全生命周期碳足迹 1t 产品 CO₂-eq 为 8.0~9.0t。李泉鑫等^[105]对煤制聚丙烯的 HDDM-TO 和 GLLMTP 工艺分别进行了计算，得出碳足迹 1t 产品 CO₂-eq 分别为 7.95t、7.40t。孟春江^[106]以某煤制甲醇厂进行了 IPCC 方法计算分析，边界是整个煤制甲醇厂，得出二氧化碳排放主要在生产过程，占 99%。

在国外及国际研究方面，Wang 等^[107]参照 ISO 14040 对等离子体辅助甲烷转化合成气进行了全生命周期的 GWP 计算，在使用不同国家考虑国家正常电力结构的情况下，碳足迹在 0.018~0.24kg/mol 合成气，最低的是法国，最高的是中国。Burmistrz

等^[108]依照 ISO 14072、ISO14040、ISO14044 对使用褐煤和次烟煤在分别应用 GE Energy/Texaco (GET) 和 Shell (SH) 两种制氢工艺下的氢气产品碳足迹进行评估, 特殊之处在于研究团队除了将煤炭开采、煤炭机械处理、运输、气化转化列为生命周期阶段外, 还纳入了 CO₂ 的捕集和封存阶段。计算结果显示得到 SH 工艺以次烟煤和褐煤为原料时碳足迹 1t 产品 CO₂-eq 分别为 19.4t、25.3t, GE 工艺使用次烟煤当原料时为 21.7t。同时, 研究结果表明在使用二氧化碳捕集与封存后, 生产 1t 氢气的二氧化碳排放值可降低 72%~79%。Garcia Herrero 等^[109]参照 ISO14040、ISO14044 对西班牙的氯碱联合产品 (NaOH 和 Cl₂、H₂ 成一定比例的产品) 的新技术氧去极化阴极法与传统的膜技术进行了对比, 得出膜技术的碳足迹 1t 产品 CO₂-eq 为 2.28~3.14t, 新技术的碳足迹为 2.27t。Khoo 等^[110]对 CO₂ 电化学还原乙烯进行了碳足迹评估, 得出大规模的还原乙烯碳足迹为 0.65~3t。Kumar 等^[111]对印度的合成气制尿素产业进行了 LCA 碳足迹评估, 得出每公吨尿素的碳足迹为 0.714t。Guilera 等^[112]对沼气催化甲烷法合成天然气做了 LCA 评估, 得出碳足迹为 0.414t。Kang 等^[113]对 CO₂ 电化学制甲酸进行了 LCA 评估, 得出碳足迹为 1.502t。Gallego-Villada 等^[114]考察了使用改进系统时催化剂合成诺卜醇 (nopol) 的碳足迹, 为 13t。

总体看来, 在研究石油和化工产业的碳足迹文献中, 几乎都采用了生命周期法。国外的研究文献多以国际标准作为依据, 以商业数据库和企业获取等方式作为数据来源。国内数据来源往往会取大型工业示范企业的公开值或行业区域均值, 无法保证计算结果的精确度和普遍适用性。在评估模型中若对某项数据采用缺省值时, 一般使用 IPCC 指南等国际标准, 一般很难贴合国内实际情况, 无法实现结果的本土化。由于石油和化工产品的下游加工和应用路径众多, 因此通常对其产品碳足迹评估都是“摇篮到大门”。并且由于石油和化工行业步骤繁多, 导致排放点源数量多, 种类杂, 在进行清单分析时功能单位的取舍很难保证数据的全面性和可靠性, 将影响结果的可信度。另外, 多篇国内外文献表明, 电力是化工合成的主要排放因素, 研究使用不同的发电配比对应的碳足迹以获得最小的碳排放是现在及未来重要的发展方向。国内的主要研究方向为建立并发展适合我国石油和化工行业的数据库, 并且对化工合成产品的生命周期边界进行扩

展, 如在煤制氢行业中, 将氢气产品下游应用的碳足迹纳入研究框架, 如对燃料电池汽车氢能路径进行生命周期碳足迹分析, 从而实现真正意义上的生命周期评价。在现有的研究中, 较多的是单路径化工流程内各环节的纵向比较和原料相同的化工合成不同路径的横向比较, 对不同原料, 如煤化工行业对不同煤种之间的横向比较的研究较少。对于碳足迹评估的结果解释缺少不确定性分析, 除此之外, 在碳足迹评估时应能兼顾经济性方面, 对社会和环境效益进行全面可持续性的评估。

化工行业主要碳减排措施有: ①碳源头减排。通过“电气化”实现石油和化工企业的低碳化, 大力发展可再生能源在化工企业的应用。同时通过化工产业的有机耦合, 如需要消耗氢气的煤化工产业与能够副产氢气的石油化工和天然气化工产业结合, 实现氢碳互补。②过程减排。在生产过程中采用各种节能降耗的措施提高生产效率, 在反应中科学合理地使用催化剂进行工业生产, 并尽可能地利用余热余能。③碳捕集回收。对产生的二氧化碳废气进行回收利用, 如碳捕集封存 (CCS)、超临界 CO₂ 发电、CO₂ 制干冰等。石油和化工项目由于靠近原料地, 具有地理封存优势, 尤其是煤化工和石油化工产业, 可以充分利用 CO₂ 驱油封存、煤层封存等。④公共工程碳减排。尽量取消企业的自建锅炉, 降低燃料燃烧所造成的碳排放, 采用电驱或电汽同驱的方式, 利用副产减少能量的浪费。通过投建企业配套的风/光/储电厂达到能量就近利用, 减少输送损失。

6 存在问题及挑战分析

面对当前复杂的国际关系及日益激烈的国际低碳经济竞争, 建立完善的碳足迹评估体系是我国碳中和背景下绿色、低碳发展的必然选择。虽然学术上对碳足迹的定义尚未完全统一, 但更多倾向于从全生命周期来进行阐述, 并根据具体的研究对象及数据获取难易程度, 来确定参照标准、边界划分及数据获取方式。我国在包括产品级在内的微观层面碳足迹研究方面起步较晚, 基于全生命周期评估方法的碳足迹评估方法尚处于初级阶段。构建各行业领域精确化、标准化的碳足迹评估技术体系, 并准确摸清“碳家底”是实现各行业领域科学、精准降碳的关键, 从全生命周期的角度核算全流程中燃料燃烧、生产过程中的物料收支及产出、净购入电力热力等造成的直接、间接碳排放, 是碳足迹评估体

系得以推行的技术保障。

综上所述,在中国全面推进碳足迹评估技术尚面临以下问题和挑战。

(1) 多领域全生命周期全流程的本土化碳排放数据库尚待完善,现有研究多依赖国外的数据库及计算软件,中国的重点行业领域碳排放量更大,工艺流程更复杂(尤以钢铁行业最为突出),碳排放节点多、来源广(用电/热、燃料、物料等),现有的本土化数据库多依赖于文献值或统计值,数据精细度不够,难以支撑全生命周期、全工艺过程的碳足迹评估计算。如何实现多行业领域复杂多排放节点系统的数据采集及数据库构建,面临较大挑战。

(2) 高精度、标准化、国际互认的碳足迹评估方法体系尚待构建。现有碳足迹评估方法主要有LCA方法(自下而上)、IOA方法(自上而下)和混合法等,即便是同样采用LCA方法,当边界划分方式、数据获取方式等不同时,也不会造成较大的结果差异。不同区域、不同场景及方法体系下的测算结果差异极大影响了产品的横向对标及未来碳足迹指标的国际互认,如国内测算的部分本土碳排放数据较国外低了10%~15%^[115]。因此,如何建立针对不同行业、不同场景的标准化的评估方法,并争取国际互认,面临较大挑战。

(3) 碳足迹和碳减排量化评估相结合的研究还不够深入,碳足迹支撑低碳化方案实施的标志化示范项目较少。当前针对重点工业控排行业的碳核算仅注重总量的核算,难以支撑碳减排技术路线的精准制定。基于LCA方法,构建针对不同行业、领域、流程的碳减排量化分析评估技术体系,统筹考虑各行业减排潜力、经济性等指标,构建区域级碳排放综合管理示范,可“以点带面”推动碳足迹评估技术推广应用和发展,更有效助力“双碳”目标实现。

7 展望

在碳足迹领域对于碳排放量核算方法的进一步探索,也可推动核算科学、标准统一的碳足迹评估体系的建立。当前碳排放权交易体系核算标准尚不完善,碳排放核算尚未考虑整体产业供应链的碳足迹分析和评估,如部分物料使用及副产物的处理所造成的碳排放尚未纳入全生命周期碳排放核算体系中^[116]。此外,当前的碳排放核算还需解决核算工作机制不完善、方法体系相对落后、能源消费及部分化石能源碳排放因子统计基础偏差大、碳排放核

算结果缺乏年度连续性问题^[116-120]。因而需要针对重点行业,系统化发展碳足迹评估方法并形成标准,有效解决上述问题,并逐步扩充碳排放权交易体系的涵盖范围,将甲烷、氧化亚氮等温室气体逐步纳入碳排放权交易体系。

另外,产品碳足迹的研究还需要跟产品碳标签结合起来。从本质上说,产品的碳标签是其碳足迹的展现形式,碳足迹是碳标签的理论和数据基础,两个概念具有互相依存的关系。碳标签研究缺乏统一标准,而LCA作为微观层面最主要的碳足迹核算方法,却尚未有研究将其与碳标签评估连接起来。厘清碳足迹、碳标签的关系,形成碳标签的标准化体系和评估方法,最终建立覆盖面广、使用方便快捷、计算结果准确的平台化产品,有利于碳足迹、碳标签真正发挥对节能减排降碳的促进作用。而基于碳足迹、碳标签评估,发展绿色低碳技术认证、绿色产品认证(EPD),可助推国内各行业低碳发展,且对出口技术、产品时突破碳名义下的关税壁垒具有现实意义。

参考文献

- [1] Centre for Science and Environment. IPCC's Special Report on Global Warming of 1.5°C[R]. 2018.
- [2] 网易. 全球首个“碳关税”即将到来,中国企业准备好了吗? [A/OL]. [2022-04-11]. <https://www.163.com/dy/article/H4M8BLHU0552P61V.html>.
- [3] 黄晟,王静宇,李振宇. 碳中和目标下石油与化学工业绿色低碳发展路径分析[J]. 化工进展, 2022, 41(4): 1689-1703.
HUANG Sheng, WANG Jingyu, LI Zhenyu. Analysis of green and low-carbon development path of petroleum and chemical industry under the goal of carbon neutrality[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(4): 1689-1703.
- [4] ČUČEK L, KLEMEŠ J J, KRAVANJA Z. A review of Footprint analysis tools for monitoring impacts on sustainability[J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 34: 9-20.
- [5] TAGLIAFERRI C, EVANGELISTI S, ACCONCIA F, et al. Life cycle assessment of future electric and hybrid vehicles: A cradle-to-grave systems engineering approach[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2016, 112: 298-309.
- [6] PANZONE L A, ULPH A, HILTON D, et al. Sustainable by design: Choice architecture and the carbon footprint of grocery shopping[J]. Journal of Public Policy & Marketing, 2021, 40(4): 463-486.
- [7] 王雅君,孙光亚,安攀,等. 生命周期评价在轻工行业的应用及研究进展[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2022, 38(4): 20-31.
WANG Yajun, SUN Guangya, AN Pan, et al. Application and research progress of life cycle assessment in light industry[J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2022, 38(4): 20-31.
- [8] 潘竞虎,张永年. 中国能源碳足迹时空格局演化及脱钩效应[J]. 地理学报, 2021, 76(1): 206-222.
PAN Jinghu, ZHANG Yongnian. Spatiotemporal patterns of energy carbon footprint and decoupling effect in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(1): 206-222.

- [9] 刘涛, 刘颖昊, 周焯. 生命周期评价方法在钢铁企业低碳发展规划中的应用[J]. 中国冶金, 2021, 31(9): 130-134.
LIU Tao, LIU Yinghao, ZHOU Ye. Application of life cycle assessment in low-carbon planning of iron and steel company[J]. China Metallurgy, 2021, 31(9): 130-134.
- [10] Carbon footprints in the supply chain: The next step for business[R]. London: The Carbon Trust, 2006.
- [11] GRUBB E. Meeting the carbon challenge: The role of commercial real estate owners, users & managers[R]. Chicago, USA, 2007.
- [12] WIEDMANN T, MINX J. A definition of "Carbon Footprint" [M]. New York: Nova Science Publishers, 2007.
- [13] HAMMOND G. Time to give due weight to the 'carbon footprint' issue [J]. Nature, 2007, 445(7125): 256.
- [14] BROWNE D, O'REGAN B, MOLES R. Use of carbon footprinting to explore alternative household waste policy scenarios in an Irish City-region[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2009, 54(2): 113-122.
- [15] WIEDMANN T, BARRETT J. A review of the ecological footprint indicator—perceptions and methods[J]. Sustainability, 2010, 2(6): 1645-1693.
- [16] ALLEN S, PENTLAND C. Carbon footprint of electricity generation [N].: Post Note Update, 2011.
- [17] PANDEY D, AGRAWAL M, PANDEY J S. Carbon footprint: Current methods of estimation[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 178(1/2/3/4): 135-160.
- [18] AICHELE R, FELBERMAYR G. Kyoto and the carbon footprint of nations[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2012, 63(3): 336-354.
- [19] PANDEY D, AGRAWAL M. Carbon footprint estimation in the agriculture sector[M]//Assessment of carbon footprint in different industrial sectors. Anonymous Springer, 2014.
- [20] 柯水发. 北京市碳足迹影响因素、削减潜力及低碳发展策略研究 [M]. 北京: 人民日报出版社, 2015.
KE Shuifa. Study on influencing factors, reduction potential and low-carbon development strategy of Beijing's carbon footprint[M]. Beijing: People's Daily Publishing House, 2015.
- [21] 高成康, 陈杉, 陈胜, 等. 中国典型钢铁联合企业的碳足迹分析[J]. 钢铁, 2015, 50(3): 1-8.
GAO Chengkang, CHEN Shan, CHEN Sheng, et al. Carbon footprint analysis of typical Chinese iron and steel enterprises[J]. Iron & Steel, 2015, 50(3): 1-8.
- [22] MCAUSLAND C, NAJJAR N. Carbon footprint Taxes[J]. Environmental and Resource Economics, 2015, 61(1): 37-70.
- [23] ZHAO Rui, XU Yao, WEN Xiangyu, et al. Carbon footprint assessment for a local branded pure milk product: A lifecycle based approach[J]. Food Science and Technology, 2017, 38(1): 98-105.
- [24] 崔文超, 焦雯珺, 闵庆文, 等. 基于碳足迹的传统农业系统环境影响评价——以青田稻鱼共生系统为例[J]. 生态学报, 2020, 40(13): 4362-4370.
CUI Wenchao, JIAO Wenjun, MIN Qingwen, et al. Environmental impact assessment on traditional agricultural systems based on carbon footprint: A case study of Qingtian rice-fish culture system[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(13): 4362-4370.
- [25] OMONIYI Durojaye, TIMOTHY Laseinde, IFETAYO Oluwafemi. A descriptive review of carbon footprint[M]//Advances in Intelligent Systems and Computing, 2021.
- [26] MATTHEWS H S, HENDRICKSON C T, WEBER C L. The importance of carbon footprint estimation boundaries[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(16): 5839-5842.
- [27] FRIEDRICH E, PILLAY S, BUCKLEY C A. Carbon footprint analysis for increasing water supply and sanitation in South Africa: A case study [J]. Journal of Cleaner Production, 2009, 17(1): 1-12.
- [28] BARTHELMIE R J, MORRIS S D, SCHECHTER P. Carbon neutral Biggar: Calculating the community carbon footprint and renewable energy options for footprint reduction[J]. Sustainability Science, 2008, 3(2): 267-282.
- [29] DB11/T 1860—2021. 电子信息产品碳足迹核算指南[S]. 北京: 北京市质量技术监督局, 2021.
DB11/T 1860—2021. Guidelines for carbon footprint accounting for electronic information products[S]. Beijing: Beijing Municipal Bureau of Quality and Technical Supervision, 2021.
- [30] T/CIECCPA008—2022. 香榧与香榧加工产品碳足迹量化与评价方法[S]. 北京: 中国工业节能与清洁生产协会, 2022.
T/CIECCPA008—2022. Quantification and evaluation method of Torreya grandis and Torreya grandis processed products[S]. Beijing: China Industrial Energy Conservation and Cleaner Production Association, 2022.
- [31] 张琦峰, 方恺, 徐明, 等. 基于投入产出分析的碳足迹研究进展[J]. 自然资源学报, 2018, 33(4): 696-708.
ZHANG Qifeng, FANG Kai, XU Ming, et al. Review of carbon footprint research based on input-output analysis[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(4): 696-708.
- [32] 董会娟, 耿涌. 基于投入产出分析的北京市居民消费碳足迹研究 [J]. 资源科学, 2012, 34(3): 494-501.
DONG Huijuan, GENG Yong. Study on carbon footprint of the household consumption in Beijing based on input-output analysis[J]. Resources Science, 2012, 34(3): 494-501.
- [33] HASEGAWA R, KAGAWA S, TSUKUI M. Carbon footprint analysis through constructing a multi-region input-output table: A case study of Japan[J]. Journal of Economic Structures, 2015, 4: 5.
- [34] WEBER C L, MATTHEWS H S. Quantifying the global and distributional aspects of American household carbon footprint[J]. Ecological Economics, 2008, 66(2/3): 379-391.
- [35] 付伟, 罗明灿, 陈建成. 碳足迹及其影响因素研究进展与展望[J]. 林业经济, 2021, 43(8): 39-49.
FU Wei, LUO Mingcan, CHEN Jiancheng. Research progress and prospects of carbon footprint and its influencing factors[J]. Forestry Economics, 2021, 43(8): 39-49.
- [36] 碳足迹的概念、核算及标准[EB/OL]. [2022-07-26]. https://www.sohu.com/a/571649249_289755.
Concept, accounting, and standards of the carbon footprint[EB/OL]. [2022-07-26]. https://www.sohu.com/a/571649249_289755.
- [37] WU Peng, LOW S P, XIA Bo, et al. Achieving transparency in carbon labelling for construction materials—Lessons from current assessment standards and carbon labels[J]. Environmental Science & Policy, 2014, 44: 11-25.
- [38] LIU Tiantian, WANG Qunwei, SU Bin. A review of carbon labeling: Standards, implementation, and impact[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 53: 68-79.
- [39] WU Peng, XIA Bo, WANG Xiangyu. The contribution of ISO 14067 to the evolution of global greenhouse gas standards—A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 47: 142-150.
- [40] BRENTON P, EDWARDS-JONES G, JENSEN M F. Carbon labelling and low-income country exports: A review of the development issues [J]. Development Policy Review, 2009, 27(3): 243-267.
- [41] SHI X. Carbon footprint labeling activities in the East Asia summit region: Spillover effects to less developed countries (No. DP-2010-06) [Z]. Economic Research Institute for ASEAN and East Asia (ERIA),

- 2010.
- [42] MA A J, ZHAO H Z, REN F Z. Study on food life cycle carbon emissions assessment[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2: 1983–1987.
- [43] 王瑞蕴, 李晋梅, 李保金, 等. 浅析水泥碳足迹与碳核查的区别与联系[J]. *中国水泥*, 2020 (8): 115–118.
- WANG Ruiyun, LI Jinmei, LI Baojin, et. The difference and connection between cement carbon footprint and carbon verification [J]. *China cement*, 2020 (8): 115–118.
- [44] MULROW J, MACHAJ K, DEANES J, et al. The state of carbon footprint calculators: An evaluation of calculator design and user interaction features[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2019, 18: 33–40.
- [45] JÉRÔME Mariette, ODILE Blanchard, OLIVIER Berné, et al. An open-source tool to assess the carbon footprint of research[J]. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 2022, 4 (2): 1–17.
- [46] 彭鑫. 基于碳足迹特征的机电产品方案设计建模及碳足迹评价研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- PENG Xin. Research on scheme design modeling and carbon footprint evaluation of mechatronics products based on carbon footprint characteristics[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [47] 陈炜明. 全球贸易及其结构变化对各国经济和资源环境影响研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- CHEN Weiming. Study on the impact of global trade and its structure change on national economy and environment[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019.
- [48] 彭渤. 绿色建筑全生命周期能耗及二氧化碳排放案例研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- PENG Bo. Case study on life cycle energy consumption and CO₂Emissions of green buildings[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [49] 沈思勋. 制造企业信息系统中产品碳足迹数据挖掘及其应用[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2019.
- SHEN Sixun. Product carbon footprint data mining and its application in manufacturing enterprise information system[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2019.
- [50] 浙江菲达环保科技股份有限公司. 香榧油碳足迹研究报告[A/OL]. [2022-01-10]. <https://www.feidaep.com/styj/show/id/178.html>.
- Zhejiang Feida Environmental Protection Technology Co., Ltd.. Torrey grandis oil carbon footprint study report[A/OL].[2022-01-10]. <https://www.feidaep.com/styj/show/id/178.html>.
- [51] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 钢铁产品制造生命周期评价技术规范: GB/T 30052—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Life cycle assessment specification on steel products(Product category rules): GB/T 30052—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [52] 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.
- HOU Ping, WANG Hongtao, ZHANG Hao, et al. GreenHouse gas emission factors of Chinese power grids for organization and product carbon footprint[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(6): 961–967.
- [53] 方恺, 朱晓娟, 高凯, 等. 全球电力碳足迹及其当量因子测算[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(12): 3160–3166.
- FANG Kai, ZHU Xiaojuan, GAO Kai, et al. Carbon footprint of global electricity and its equivalent calculation[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(12): 3160–3166.
- [54] 刘韵, 师华定, 曾贤刚. 基于全生命周期评价的电力企业碳足迹评估——以山西省吕梁市某燃煤电厂为例[J]. *资源科学*, 2011, 33(4): 653–658.
- LIU Yun, SHI Huading, ZENG Xiangang. A life-cycle carbon footprint assessment of electric power companies[J]. *Resources Science*, 2011, 33(4): 653–658.
- [55] 娄兰兰. 基于能源利用的中国热电行业碳足迹研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- LOU Lanlan. Analysis on carbon footprint of China's thermal power industry based on energy utilization[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [56] LIAO X, JI J, MA X. Consistency analysis between technology plans and reduction target on CO₂ emission from China's power sector in 2020[J]. *China Environ. Sci.*, 2013, 3: 553–559.
- [57] WANG Ning, REN Yixin, ZHU Tao, et al. Life cycle carbon emission modelling of coal-fired power: Chinese case[J]. *Energy*, 2018, 162: 841–852.
- [58] SUN Boxue, GONG Xianzheng, LIU Yu, et al. Matrix-based model of the carbon footprint analysis for thermal power generation in China[J]. *Materials Science Forum*, 2011, 685: 230–238.
- [59] IEA. CO₂ emissions from fuel combustion highlights. 2017[EB/OL]. <http://www.iea.org/publications/freepublications/>.
- [60] Carbon Footprint Ltd. Free Carbon Calculators. 2018 [EB/OL]. <https://www.carbonfootprint.com/calculator1.html>.
- [61] MITTAL M L, SHARMA C, SINGH R. Decadal emission estimates of carbon dioxide, sulfur dioxide, and nitric oxide emissions from coal burning in electric power generation plants in India[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, 186(10): 6857–6866.
- [62] ODEH N A, COCKERILL T T. Life cycle analysis of UK coal fired power plants[J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49(2): 212–220.
- [63] MESSAGIE M, MERTENS J, OLIVEIRA L, et al. The hourly life cycle carbon footprint of electricity generation in Belgium, bringing a temporal resolution in life cycle assessment[J]. *Applied Energy*, 2014, 134: 469–476.
- [64] SANTOYO-CASTELAZO E, GUJBA H, AZAPAGIC A. Life cycle assessment of electricity generation in Mexico[J]. *Energy*, 2011, 36(3): 1488–1499.
- [65] DALIR F, SHAFIEPOUR MOTLAGH M, ASHRAFI K. A well to wire LCA model development and sensitivity analysis for carbon footprint of combined cycle power plants in Iranian electricity network[J]. *International Journal of Green Energy*, 2017, 14(5): 499–508.
- [66] ANDRIĆ I, JAMALI-ZGHAL N, SANTARELLI M, et al. Environmental performance assessment of retrofitting existing coal fired power plants to co-firing with biomass: Carbon footprint and energy approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 103: 13–27.
- [67] 梁聪智. 我国钢铁行业碳足迹与碳排放影响因素分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012.
- LIANG Congzhi. Analysis of Chinese iron and steel industry carbon footprint and carbon emissions impact factors[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2012.
- [68] 张玥, 王让会, 刘飞. 钢铁生产过程碳足迹研究——以南京钢铁联合有限公司为例[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(4): 1195–1201.
- ZHANG Yue, WANG Ranghui, LIU Fei. Carbon footprint on steel manufacturing process—A case study of Nanjing Iron & Steel Union Company Limited[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(4): 1195–1201.

- [69] 徐匡迪. 低碳经济与钢铁工业[J]. 钢铁, 2010, 45(3): 1-12.
XU Kuangdi. Low carbon economy and iron and steel industry[J]. Iron & Steel, 2010, 45(3): 1-12.
- [70] 刘宏强, 付建勋, 刘思雨, 等. 钢铁生产过程二氧化碳排放计算方法与实践[J]. 钢铁, 2016, 51(4): 74-82.
LIU Hongqiang, FU Jianxun, LIU Siyu, et al. Calculation methods and application of carbon dioxide emission during steel-making process[J]. Iron & Steel, 2016, 51(4): 74-82.
- [71] MENG Hua, WANG Weixin. Definition method for carbon footprint of iron and steel energy supply chain based on relational dispersed degree [J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2020, 38(6): 7407-7416.
- [72] LYU Wei, SUN Zengqing, SU Zijian. Life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions of iron pelletizing process in China, a case study[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 233: 1314-1321.
- [73] World Steel Association (2012) sustainable steel, at the core of a green economy[R]. Brussels: World Steel Association, 2012.
- [74] 2020 Life cycle inventory study report[R]. Brussels: World Steel Association, 2020.
- [75] IEA. Tracking industrial energy efficiency and CO₂ emissions[R]. Paris: OECD/IEA, 2007.
- [76] IEA. Iron and steel technology roadmap-towards more sustainable steelmaking[R]. Paris: OECD, 2020: 8-43.
- [77] CONEJO A N, BIRAT J P, DUTTA A. A review of the current environmental challenges of the steel industry and its value chain[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 259: 109782.
- [78] SUER Julian, TRAVERSO M, AHRENHOLD F. Carbon footprint of scenarios towards climate-neutral steel according to ISO 14067[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 318: 128588.
- [79] LISIENKO V G, CHESNOKOV Y N, LAPTEVA A V. Application of the triad of blast furnace, oxygen converter, and electric arc furnace for reducing of carbon footprint[J]. Steel in Translation, 2017, 47(8): 523-527.
- [80] JHA G, SOREN S, MEHTA K D. Life cycle assessment of sintering process for carbon footprint and cost reduction: A comparative study for coke and biomass-derived sintering process[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 259: 120889.
- [81] DEVASAHAYAM S. Review: Opportunities for simultaneous energy/materials conversion of carbon dioxide and plastics in metallurgical processes[J]. Sustainable Materials and Technologies, 2019, 22: e00119.
- [82] GHANBARI H, SAXÉN H, GROSSMANN I E. Optimal design and operation of a steel plant integrated with a polygeneration system[J]. AIChE Journal, 2013, 59(10): 3659-3670.
- [83] SCHMÖLE P. The blast furnace-fit for the future? [J]. Stahl. und Eisen., 2016, 136: 31-40.
- [84] 李晓鹏, 孙晓峰, 李键. 水泥企业碳足迹初探[J]. 中国建材科技, 2010, 19(6): 18-19, 40.
LI Xiaopeng, SUN Xiaofeng, LI Jian. The primary research on carbon footprint for cement enterprises[J]. China Building Materials Science & Technology, 2010, 19(6): 18-19, 40.
- [85] 姜睿, 王洪涛. 中国水泥工业的生命周期评价[J]. 化学工程与装备, 2010(4): 183-187.
JIANG Rui, WANG Hongtao. Life cycle assessment of China's cement industry [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2010(4): 183-187.
- [86] 白文琦, 杜强, 吕晶, 等. 通用硅酸盐水泥生产的碳足迹研究[J]. 西安工程大学学报, 2013, 27(4): 472-476.
BAI Wenqi, DU Qiang, LYU Jing, et al. Research on the carbon footprint in the production of common Portland cement[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2013, 27(4): 472-476.
- [87] 秦于茜. 水泥产品碳足迹核算研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
QIN Yuqian. Research on accounting of carbon footprint of cement products[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [88] 杨李宁, 付祥钊. 以重庆为案例的水泥碳足迹研究[J]. 中国水泥, 2016, 27(8): 87-92.
YANG Lining, FU Xiangzhao. A case study of cement carbon footprint in Chongqing [J]. China Cement, 2016, 27(8): 87-92.
- [89] SHEN Weiguo, CAO Liu, LI Qiu, et al. Is magnesite cement low carbon? Life cycle carbon footprint comparing with Portland cement[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 131: 20-27.
- [90] ZHANG J L, CHENG J C P, LO I M C. Life cycle carbon footprint measurement of Portland cement and ready mix concrete for a city with local scarcity of resources like Hong Kong[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2014, 19(4): 745-757.
- [91] CSI (2009) Cement industry energy and CO₂ performance, getting the numbers right. Concrete sustainability initiative[M]// World Business Council for Sustainable Development. ISBN 978-3-940388-48-3.
- [92] ERNST Worrell, LYNN Price, NATHAN Martin, et al. Carbon dioxide emissions from the global cement industry[R]. Annual Review of Energy and Environment, 2001, 26: 303-329.
- [93] BARCELO L, KLINE J, VALENTA G, et al. Cement and carbon emissions[J]. Materials and Structures, 2014, 47(6): 1055-1065.
- [94] IEA, Technology roadmap: Energy and GHG reductions in the chemical industry via catalytic processes[R]. IEA Publications, France, May 2013.
- [95] 马玉莲, 忻仕海. 碳足迹评价方法学在PVC产品中的应用[J]. 氯碱工业, 2011, 47(1): 1-6, 34.
MA Yulian, XIN Shihai. Application of carbon footprint assessment methodology on PVC[J]. Chlor-Alkali Industry, 2011, 47(1): 1-6, 34.
- [96] 沈毅. 典型煤制油技术全生命周期评估的对比与分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
SHEN Yi. Comparison and analysis of typical coal liquefaction technology life cycle assessment[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [97] 于涵, 蒋庆哲, 宋昭峥, 等. CO₂-DMC产业链碳足迹分析[J]. 现代化工, 2017, 37(3): 9-13.
YU Han, JIANG Qingzhe, SONG Zhaozheng, et al. Carbon footprint analysis of CO₂-DMC industrial chain[J]. Modern Chemical Industry, 2017, 37(3): 9-13.
- [98] 孙满磊, 张志智, 尹泽群. 沥青产品的碳足迹研究[J]. 石油炼制与化工, 2017, 48(12): 88-92.
SUN Xiaolei, ZHANG Zhizhi, YIN Zequn. Study of carbon footprint of asphalt products[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2017, 48(12): 88-92.
- [99] 雷昕儒. 煤气化合成气调制制备甲醇的过程模拟、技术经济分析和生命周期评价[D]. 合肥: 安徽大学, 2020.
LEI Xinru. Process simulation, economic analysis and life cycle assessment of coal gasification with syngas adjustment for methanol production[D]. Hefei: Anhui University, 2020.
- [100] 罗仁英. 煤制氢气生命周期碳足迹研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
LUO Renying. Life cycle carbon footprint analysis of hydrogen production from coal[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2020.
- [101] 张楚珂, 田涛, 王之茜, 等. 聚丙烯产品碳足迹核算及对比研究[J]. 石油石化绿色低碳, 2021, 6(6): 17-23.
ZHANG Chuke, TIAN Tao, WANG Zhiyin, et al. The study of carbon footprint calculation and comparison of polypropylene product[J]. Green Petroleum & Petrochemicals, 2021, 6(6): 17-23.

- [102] 田涛, 姜晔, 李远. 石油化工行业产品碳足迹评价研究现状及应用展望[J]. 石油石化绿色低碳, 2021, 6(1): 66–72.
TIAN Tao, JIANG Ye, LI Yuan. Research and application status of carbon footprint assessment of petrochemical products[J]. Green Petroleum & Petrochemicals, 2021, 6(1): 66–72.
- [103] 卜庆佳, 张媛媛, 李俊杰, 等. 天然气/煤制乙二醇路线碳排放与经济分析[J]. 现代化工, 2022, 42(8): 209–214, 219.
BU Qingjia, ZHANG Yuanyuan, LI Junjie, et al. Analysis on carbon dioxide emission and economy of natural gas to ethylene glycol route and coal to ethylene glycol route[J]. Modern Chemical Industry, 2022, 42(8): 209–214, 219.
- [104] 赵志全. 有机化工原料的低碳路线分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
ZHAO Zhitong. The low carbon evaluation of organic chemical products[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [105] 李泉鑫, 李俊杰, 龚先政, 等. 两条不同技术路线的煤制聚丙烯生命周期评价[J]. 煤炭转化, 2022, 45(4): 1–9.
LI Quanxin, LI Junjie, GONG Xianzheng, et al. Life cycle assessment of coal to polypropylene based on two different routes[J]. Coal Conversion, 2022, 45(4): 1–9.
- [106] 孟春江. 中国煤化工行业温室气体排放核算研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
MENG Chunjiang. Research of greenhouse gas emission calculation inventory in coal chemical industry of China[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.
- [107] WANG Qi, SPASOVA B, HESSEL V, et al. Methane reforming in a small-scaled plasma reactor—Industrial application of a plasma process from the viewpoint of the environmental profile[J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 262: 766–774.
- [108] BURMISTRZ P, CHMIELNIAK T, CZEPIRSKI L, et al. Carbon footprint of the hydrogen production process utilizing subbituminous coal and lignite gasification[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 139: 858–865.
- [109] GARCIA-HERRERO I, MARGALLO M, ONANDEA R, et al. Environmental challenges of the chlor-alkali production: Seeking answers from a life cycle approach[J]. Science of the Total Environment, 2017, 580: 147–157.
- [110] KHOO H H, HALIM I, HANDOKO A D. LCA of electrochemical reduction of CO₂ to ethylene[J]. Journal of CO₂ Utilization, 2020, 41: 101229.
- [111] KUMAR P, VERMA S, GUPTA A, et al. Life cycle analysis for the production of urea through syngas[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 795(1): 012031.
- [112] GUILERA J, FILIPE M, MONTESÓ A, et al. Carbon footprint of synthetic natural gas through biogas catalytic methanation[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 287: 125020.
- [113] KANG D, BYUN J, HAN J. Electrochemical production of formic acid from carbon dioxide: A life cycle assessment study[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(5): 106130.
- [114] GALLEGO-VILLADA L A, HASENSTAB C, ALARCÓN E A, et al. Identification by life cycle assessment of the critical stage in the catalytic synthesis of nopol using heterogeneous catalysis[J]. Sustainable Production and Consumption, 2021, 27: 23–34.
- [115] LIU Zhu, GUAN Dabo, WEI Wei, et al. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China [J]. Nature, 2015, 524(7565): 335–338.
- [116] CHEN Guangwu, SHAN Yuli, HU Yuanchao, et al. Review on city-level carbon accounting[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(10): 5545–5558.
- [117] BABACAN O, DE CAUSMAECKER S, GAMBHIR A, et al. Assessing the feasibility of carbon dioxide mitigation options in terms of energy usage[J]. Nature Energy, 2020, 5(9): 720–728.
- [118] ZHANG Qi, XU Jin, WANG Yujie, et al. Comprehensive assessment of energy conservation and CO₂ emissions mitigation in China's iron and steel industry based on dynamic material flows[J]. Applied Energy, 2018, 209: 251–265.
- [119] GUO Yang, TIAN Jinping, CHEN Lyujun. Managing energy infrastructure to decarbonize industrial parks in China[J]. Nature Communications, 2020, 11: 981.
- [120] PETERS G P, ANDREW R M, CANADELL J G, et al. Key indicators to track current progress and future ambition of the Paris Agreement[J]. Nature Climate Change, 2017, 7(2): 118–122.