

引用格式: 马国淞, 段茂盛. 煤炭产品碳足迹评估研究综述[J]. 资源科学, 2026, 48(5): 1077-1088. [Ma G S, Duan M S. Review of carbon footprint assessment of coal products[J]. Resources Science, 2026, 48(5): 1077-1088.] DOI: 10.18402/resci.2026.05.04

煤炭产品碳足迹评估研究综述

马国淞, 段茂盛

(清华大学能源环境经济研究所, 北京 100084)

摘要:煤炭作为支撑中国国民经济发展的主体能源, 精准核算煤炭产品全生命周期碳足迹是推动煤炭产业链低碳转型的基础与前提, 也是支撑中国碳足迹管理体系建设和应对国际涉碳贸易壁垒的必然要求。本文梳理了煤炭产品的生命周期过程及主要排放源, 基于文献调研系统综述了煤炭产品碳足迹评估研究的现状, 并对比了2000—2024年发表的22项基于生命周期评价的煤炭碳足迹研究, 发现不同研究开展煤炭碳足迹评估时采用的功能单位、系统边界、数据来源等具有很强的不一致性。对比分析发现, 不同国家(地区)的煤炭碳足迹差异显著, 例如, 部分研究中澳大利亚的“从摇篮到大门”煤炭碳足迹(31.2 kg CO₂e/t)显著低于印度尼西亚(314.0 kg CO₂e/t)和中国(部分研究高达499.0 kg CO₂e/t)的案例; 此外, 煤炭“从摇篮到大门”的碳足迹(19.8~835.0 kg CO₂e/t)与“从摇篮到坟墓”的碳足迹(1526.4~2988.1 kg CO₂e/t)差异巨大。碳足迹结果的差异一方面来源于研究对象本身的不同, 另一方面也会受研究方法差异的影响。本文进一步对比分析了不同研究的功能单位、系统边界、清单数据来源、影响评价方法等可能影响碳足迹评估结果的关键问题与假设。在此基础上, 从煤炭产品碳足迹评估的方法规范性、过程透明性、数据可获得性、样本代表性等方面提出了现有研究的不足和完善中国煤炭产品碳足迹评估方法的建议, 为推进中国煤炭产品碳足迹核算规则标准的编制和碳足迹管理体系的建设提供了科学支撑。

关键词:煤炭产品; 碳足迹; 生命周期评价; 碳核算; 碳排放

DOI: 10.18402/resci.2026.05.04

1 引言

中国的能源体系结构长期以煤为主, 2023年中国煤炭消费占能源消费总量的55.3%^[1-3]。煤炭在保障中国经济发展和能源安全中发挥压舱石作用, 在未来较长时期内, 煤炭仍将在中国能源结构中占据主导地位^[4]。煤炭的大规模开采利用在满足社会经济发展和人民生活需求的同时, 也造成了严重的生态环境污染和温室气体排放。2019年, 中国煤炭使用导致的碳排放占能源部门总排放的80%左右, 其中燃煤发电消耗了约54%的煤炭, 排放了近40%的二氧化碳^[5]。与煤炭燃烧利用相比, 煤炭开采过程产生的碳排放总量虽然较少, 但排放的甲烷(CH₄)占能源活动CH₄排放总量的80%以上, 约占中国CH₄总排放量的1/3^[6]。

鉴于中国以煤为主的基本国情, 推动煤炭行业及其产业链的绿色低碳转型是实现碳达峰碳中和目标的关键^[7]。厘清煤炭产品全生命周期的碳足迹是识别煤炭产业链碳排放热点、推动煤炭产业链低碳转型的基础和前提。产品碳足迹一般指产品从原材料获取、生产制造到出厂消费、废弃处置等整个生命周期中产生的温室气体排放量总和, 是衡量产品绿色低碳水平的重要指标^[8]。近年来, 以欧盟《电池与废电池法案》为代表的多种国际涉碳贸易壁垒政策将产品碳足迹作为关键抓手, 越来越多的大型跨国企业也将产品碳足迹纳入可持续供应链管理要求, 碳足迹成为国际贸易和产业竞争的新焦点^[9]。中国高度重视碳足迹管理工作, 从核算标准制定、数据库构建、标识认证等方面全面推进碳足

收稿日期: 2025-04-10; 修订日期: 2025-10-24

作者简介: 马国淞, 男, 山西人, 博士生, 研究方向为能源与气候政策。E-mail: mgs22@mails.tsinghua.edu.cn

通讯作者: 段茂盛, 男, 陕西人, 研究员, 研究方向为温室气体减排政策与战略。E-mail: duanmsh@mail.tsinghua.edu.cn

注: 第二十八届中国科协年会学术论文。

迹管理体系建设。以煤炭为代表的基础能源产品在其他产品生产过程中必不可少的投入原料,因此煤炭产品碳足迹核算规则和碳足迹因子的确定是准确核算其他产品碳足迹的基础和前提。产品碳足迹未来将应用于政府绿色采购、绿色金融等多种场景,在支撑经济社会发展绿色转型中发挥重要作用。在此背景下,制定煤炭产品碳足迹核算标准,准确核算中国的煤炭产品碳足迹是当前亟须推进的重点工作。近年来,国内外学者聚焦煤炭产品碳足迹开展了丰富的研究,但不同研究采用的核算方法及相应的核算结果具有一定差异,不同研究之间缺少对比分析和系统归纳总结,难以为制定规范统一的煤炭产品碳足迹核算标准提供科学依据。鉴于此,本文系统梳理了煤炭产品的生命周期过程及主要排放源,并基于对2000—2024年发表的相关文献的调研分析了煤炭碳足迹相关研究的现状与不足,在此基础上提出了未来研究的展望,以期对煤炭产品碳足迹核算研究的深入和方法的完善提供参考,同时为中国产品碳足迹管理体系的建设完善和煤炭产品碳足迹核算标准的编制提供科学参考。

2 煤炭产品碳足迹评价方法

开展煤炭产品碳足迹评估需要明确碳足迹核算的方法和煤炭的生命周期阶段。

2.1 碳足迹核算方法

碳足迹的核算方法包括排放因子法、投入产出法、生命周期评价法等^[10]。排放因子法是政府间气候变化专门委员会(IPCC)提供的温室气体排放核算方法,其基本原理是将活动水平数据与量化单位活动排放量的排放因子相乘并求和,计算得出各排放源产生的温室气体排放总量^[10]。该方法操作简便,但通常仅覆盖生产环节排放,难以全面反映产品全生命周期的碳排放水平。投入产出法(Input-Output, IO)由美国经济学家Leontief创立^[11],其二氧化碳排放量计算以投入产出表为依据,根据产品的直接消耗系数及完全消耗系数分别估算二氧化碳的直接排放和间接排放^[12]。作为一种自上而下的核算方法,投入产出法适用于国家、区域、行业等宏观层面的碳足迹估算,但难以满足产品等微观系统的碳足迹精细化评估需求。生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)是系统评估一种产品、活动或服务在其整个生命周期内所有投入和产出对环境

造成的潜在影响的方法,涵盖资源开采、生产加工、运输、使用、生命末期处置的全过程^[13],包含目标与范围确定、生命周期清单分析、生命周期影响评价和结果解释4个步骤^[14]。LCA适用于分析微观产品系统的碳足迹,能够实现从产品原材料获取到最终使用和处置的全过程温室气体排放追踪,是产品碳足迹核算国际通行标准(ISO 14067)的方法学基础,也成为煤炭产品碳足迹核算的主流方法。但在煤炭产品碳足迹评估中,LCA的应用仍面临系统边界的设定差异较大、功能单位和产品定义模糊、生命周期清单数据获取难度大等关键问题和挑战。鉴于以上特点,本文选取基于LCA方法的研究文献作为综述对象,系统梳理总结其核算方法假设与评估结果,进而识别造成差异的关键因素与方法学不足,为未来煤炭碳足迹核算方法的完善和标准化提供理论基础。

2.2 煤炭产品的生命周期

在产品碳足迹研究中,常见的核算边界包括“从摇篮到大门”和“从摇篮到坟墓”两类,分别用于核算产品部分碳足迹和产品碳足迹。“从摇篮到大门”覆盖了产品从原材料获取到产品制造出厂的过程,通常用于非终端消费产品的碳足迹核算;“从摇篮到坟墓”则进一步包括产品出厂后的分销、使用和生命末期过程,通常用于面向终端用户或消费者的产品碳足迹核算。对于煤炭而言,其全生命周期可以划分为5个阶段(图1):辅助材料和能源获取阶段、煤炭生产阶段、运输阶段、利用阶段、生命末期处置阶段,每个阶段的活动都伴随着物质、能量的流动和温室气体的排放。

辅助材料和能源获取是指煤炭生产中所需的各类辅助材料(如锚杆、水泥、润滑油等)和燃料、电力、热力等的生产、运输和输送过程。

煤炭生产包括煤炭开采和洗选两个环节。煤炭开采是将煤炭资源从原始自然环境中挖掘出来的过程,根据煤炭资源所处的位置分为井工开采和露天开采两种方式^[15]。井工开采通过由地面向地下开掘井巷采出煤炭,通常包括掘进、采煤、运输、通风、排水等过程。露天开采直接将覆盖于矿体之上的土壤、岩石剥离后获取煤炭资源,通常包括钻孔、爆破、采装、运输、排土、土地复垦等过程^[16]。煤炭洗选是采用机械、物理、化学等方法对直接开采出的

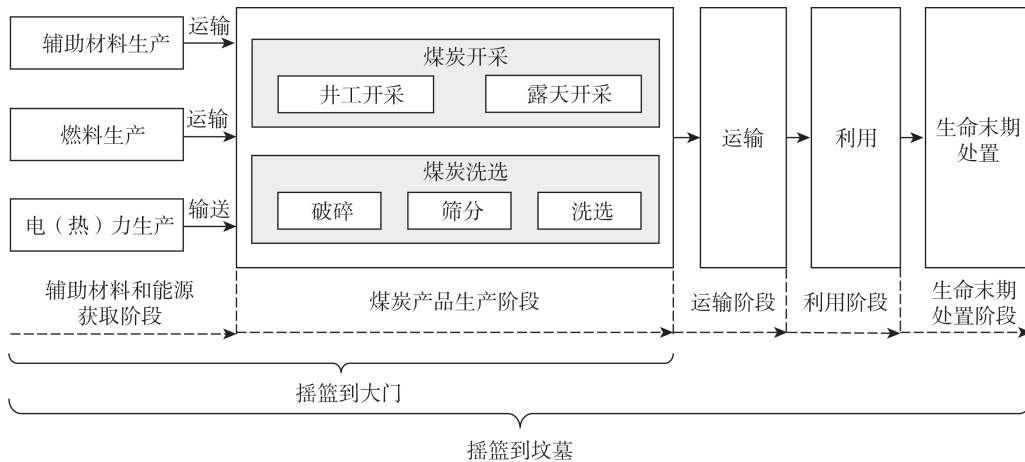


图1 煤炭产品的生命周期系统边界

Figure 1 Life cycle system boundary of coal products

含有矸石和其他杂质的原煤进行加工,清除煤炭在生产、开采、运输过程中混入的杂质,改变煤炭形状和粒度,以提高其质量及使用价值的过程,包括破碎、筛分、洗选等工序。煤炭生产阶段的碳排放主要来自化石燃料燃烧、电力消费、甲烷和二氧化碳逸散等过程^[17]。

煤炭运输是加工后的商品煤通过公路、铁路或水路运往下游消费地点的过程,煤炭运输产生的碳排放主要来自运输过程的燃料和电力消费以及煤炭中残留甲烷的逸散。

煤炭产品可用于电力、钢铁、建材、煤化工等多个下游煤炭利用行业,煤炭在不同行业中的用途和利用方式存在一定差异。燃煤发电是中国电力的第一大来源,燃煤发电也是中国煤炭下游利用产业中碳排放量最大的部门。钢铁行业中,动力煤通常用于烧结、球团、石灰、发电等工序,作为燃料为烧结矿、球团矿焙烧、发电等提供动力;炼焦煤主要用于焦化工序,而焦炭的终端消费在高炉炼铁工序,少量焦粉用于烧结工序;喷吹煤主要用于高炉喷吹^[18]。建材行业对煤炭的消费分布在以窑炉烧成工艺为主的水泥、玻璃、陶瓷、砖瓦及石灰等产业。煤炭既可以直接作为燃料使用,也可以先将煤转化成气再用作燃料^[19]。煤化工产业可以将煤炭转化为气体、液体、固体燃料及化学品和材料,其产品包括焦炭、电石、合成氨、液体燃料、合成天然气、乙二醇、烯烃等,转化过程会造成大量的温室气体排放^[20]。煤炭产品的利用方式可以概括为“燃料利用”(如燃

煤发电、工业锅炉、民用散烧等)和“物质利用”(如炼焦、煤制气、煤制油、煤制烯烃等)两类,煤炭产品的终端利用方式对其碳足迹的核算边界和结果具有显著影响。

煤炭生命末期处置活动是对煤炭利用后产生的固体废弃物的处置,例如煤炭燃烧产生的粉煤灰、煤炭化工转化过程中产生的气化灰渣等。目前对这些固体废弃物的处置方式以填埋、堆存为主^[21],煤基固废的资源化利用技术也在逐步开发推广,如将其用作燃料或生产肥料、建材、铝硅基产品的原材料等。

3 煤炭产品碳足迹评估研究现状

3.1 文献检索方法

为了分析煤炭产品生命周期碳足迹评估的研究现状与进展,本文基于 Web of Science 核心合集数据库和中国知网数据库,分别以 $TI = (\text{coal}) \text{ AND } TI = ((\text{carbon footprint}) \text{ OR } (\text{GHG}) \text{ OR } (\text{life cycle}) \text{ OR } (\text{LCA}))$ 和 $TI = \text{'煤炭'} \text{ AND } TI = (\text{'碳足迹'} + \text{'GHG'} + \text{'生命周期'} + \text{'LCA'})$ 为检索式检索 2000—2024 年发表的研究类论文,共检索出 332 篇文献。去除重复文献,并通过分析文献标题和摘要去除煤化工、煤炭企业管理等明显不符合主题要求的文献以及以企业、行业等作为研究对象的文献,进一步浏览文献内容去除非定量研究及其他不相关文献,最终筛选出 22 篇有效文献纳入本研究。本文所纳入的 22 篇文献涵盖了中国、美国、澳大利亚、印度尼西亚、波兰、土耳其等多个主要产煤国家(地区),这

些国家(地区)在全球煤炭生产与消费中占据重要地位,具有代表性。

3.2 文献总体概况

检索得到的煤炭碳足迹评估研究文献绝大多数发表于2010年之后,可见随着近年来气候变化问题严重性和关注度的日益提升,针对煤炭碳足迹的研究也不断深入。现有文献普遍基于典型煤矿的数据开展案例分析,研究区域主要集中在中国、美国、印度尼西亚、澳大利亚等世界主要煤炭生产国。对比这些文献可以发现,虽然所有研究均基于生命周期评价相关国际标准(ISO 14040、ISO 14044)所规定的方法学框架开展碳足迹核算,但不同研究核算出的煤炭碳足迹差异较大(图2)^①,煤炭“从摇篮到大门”的碳足迹为19.8~835.0 kg CO₂e/t,平均为172.6 kg CO₂e/t,中位数为99.5 kg CO₂e/t;煤炭“从摇篮到坟墓”的碳足迹为1526.4~2988.1 kg CO₂e/t,平均为2452.7 kg CO₂e/t,中位数为2534.4 kg CO₂e/t。一方面,不同研究针对的煤炭种类、开采方式、生产地区等不尽相同,因而煤炭碳足迹存在固有的差异,例如,部分研究中澳大利亚的“从摇篮到大门”煤炭碳足迹(31.2 kg CO₂e/t)显著低于印度尼西亚(314.0 kg CO₂e/t)和中国(部分研究高达499.0 kg CO₂e/t)的案例;另一方面,不同研究采用的方法并不统一,这可能进一步增加煤炭碳足迹评估结果的差异性。

3.3 碳足迹研究方法差异

本文进一步对比分析了上述研究的功能单位、系统边界、清单数据来源、影响评价方法等碳足迹

研究中的关键问题与假设(表1),以此说明研究方法差异对碳足迹结果的影响。

3.3.1 功能单位

功能单位是用来量化产品系统性能的基准单位,可以为输入和输出数据的归一化提供参考基准。功能单位应与碳足迹研究的目的和范围保持一致,现有研究中评估煤炭产品的部分碳足迹(“从摇篮到大门”)大多采用单位质量的煤炭产品作为功能单位,如1 t煤炭^[22,38]、1 kg褐煤^[34]等;评估煤炭产品碳足迹(“从摇篮到坟墓”)则普遍使用煤炭燃烧产生的单位发电量作为功能单位,如1 kWh电力^[30,41]。功能单位的选择不仅影响评估结果的表达方式,也直接影响结果的大小和可比性。以单位质量的煤炭为功能单位时,重点关注煤炭在生产阶段的碳排放;而以单位发电量为功能单位时,则全面考虑煤炭从开采到使用的整个链条所产生的排放。不同功能单位下的系统边界、排放源范围、转化效率假设等存在差异。例如,使用1 kWh作为功能单位时,需要考虑不同国家(地区)电力系统的煤电效率,导致相同煤种对应的碳足迹结果可能出现较大波动。此外,大多数研究中对煤炭产品的定义十分模糊,并未说明所研究煤炭产品的具体种类,也未说明研究中所指的煤炭是原煤还是商品煤,同时缺少对煤炭的热值等关键特征属性的说明。事实上,不同种类煤炭的碳足迹存在一定的差异,对于同一种煤炭而言,以原煤和商品煤为基准计算出的碳足迹也会有显著的区别。产品定义和功能单位的差异与模糊性降低了不同研究之间碳足迹结果的一

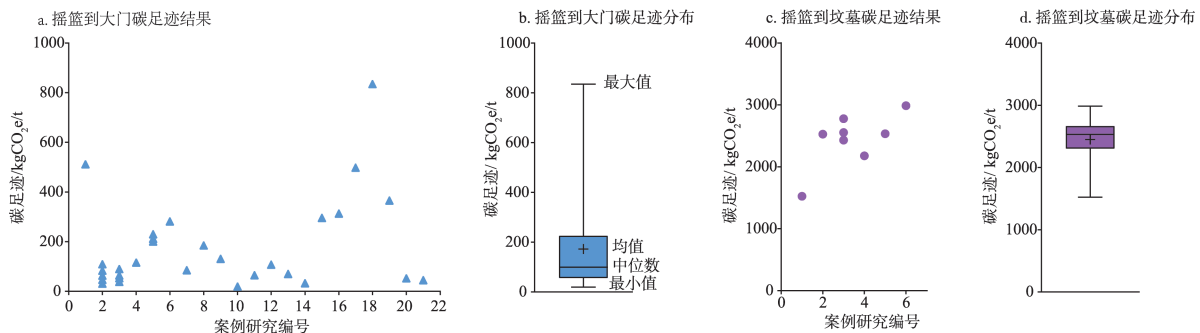


图2 现有研究中煤炭产品碳足迹结果分布

Figure 2 Distribution of carbon footprint results of coal products in existing studies
注:a、b中研究系统边界为“从摇篮到大门”,c、d中研究系统边界为“从摇篮到坟墓”。

① 为便于对比,将文献中煤炭产品碳足迹的功能单位统一转化为单位质量的煤炭产品。

表1 煤炭产品碳足迹评估典型文献LCA方法设定与结果

Table 1 LCA method setting and results in typical literature on coal products carbon footprint assessment

作者	研究地点	功能单位	系统边界	基准年	清单数据来源	影响评价方法	碳足迹
Day等 ^[22]	澳大利亚	1 t煤炭	摇篮到大门	—	实地调研(6家煤矿)、文献	—	31.2~109.4 kg CO ₂ e/t
da Silva等 ^[23]	巴西	1 kg煤炭	摇篮到大门	2015—2016	实地调研(1家煤矿)、文献	IPCC GWP100	0.03 kg CO ₂ e/kg
Restrepo等 ^[24]	巴西	1 kg电煤	摇篮到大门	—	实地调研、Ecoinvent	Eco-indicator 99、IPCC GWP100	0.0856 kg CO ₂ e/t
Tampubolon等 ^[25]	印度尼西亚	1 t煤炭	摇篮到大门	2020	实地调研、统计数据	IPCC GWP	314.0 kg CO ₂ e/t
Tao等 ^[26]	中国	1 t煤炭	摇篮到大门	—	实地调研(1家煤矿)、文献、Ecoinvent v3	ReCiPe Midpoint (H)	499.0 kg CO ₂ e/t
谷欣博等 ^[27]	中国	1 t煤炭	摇篮到大门	2022	实地调研	IPCC GWP100	53.0 kg CO ₂ e/t
刘明奇等 ^[28]	中国	1 t煤炭	摇篮到大门	2021	实地调研	IPCC GWP100	45.3 kg CO ₂ e/t
Ditsele等 ^[29]	美国	1 t烟煤	摇篮到大门	—	实地调研(5家煤矿)	IPCC GWP100	62.2 kg CO ₂ e/t
Burchart-Korol等 ^[30]	波兰	1 t硬煤产品	摇篮到大门	—	实地调研(31家煤矿)、Ecoinvent	IPCC 2013、ReCiPe Endpoint(H/A)	95.7~439.9 kg CO ₂ e/t
曾繁伟等 ^[31]	中国	1 t煤炭	摇篮到大门(包括运输)	—	实地调研(1家煤矿)、文献	—	113.8 kg CO ₂ e/t
Memon等 ^[32]	巴基斯坦	1 t煤炭	摇篮到大门(包括运输)	—	实地调研、文献、Ecoinvent	—	201.0~238.0 kg CO ₂ e/t
Tao等 ^[33]	巴基斯坦	1 t煤炭	摇篮到大门(包括运输)	—	实地调研、文献、Ecoinvent	ReCiPe 2016 Midpoint(H)	366.3 kg CO ₂ e/t
Şengül等 ^[34]	土耳其	1 kg褐煤	摇篮到大门(包括运输)	2011	实地调研(12家煤矿)、GABI软件内置数据库	CML、TRACI、ReCiPe	0.02 kg CO ₂ e/t
Zhang等 ^[35]	中国	100 t煤炭	摇篮到大门(包括运输)	—	实地调研(1家煤矿)	—	73.3 kg CO ₂ e/t
Roy等 ^[36]	孟加拉国	1 t硬煤	摇篮到大门(包括运输)	2017	实地调研、文献、Ecoinvent 3.5	ILCD(GWP100)	835.0 kg CO ₂ e/t
Aguirre-Villegas等 ^[37]	印度尼西亚	含能量为1GJ的煤炭	摇篮到大门(包括运输)	—	实地调研(3家煤矿)、文献、Ecoinvent v3、USLCI数据库	CML2001、ELCD(GWP100)	4.021 kg CO ₂ e/GJ
Babbitt等 ^[38]	美国佛罗里达州	1 t煤炭	摇篮到坟墓	2002	实地调研、文献、SimaPro 5.1软件中提供的数据库和过程块	—	1330.0 kg/t
Venkatesh等 ^[39]	美国	1 MJ能量	摇篮到坟墓	2010	统计数据	IPCC GWP100	0.096 kg CO ₂ e/MJ
Hyder等 ^[40]	美国	1 MWh电力	摇篮到坟墓	—	统计数据、文献、SimaPro软件内置数据库	IPCC GWP100	1080.0 kg CO ₂ e/MWh
Wang等 ^[41]	中国	1 kWh电力	摇篮到坟墓	2012	实地调研(1家煤矿)	CML 2001	1.080 kg CO ₂ e/kWh
Liang等 ^[42]	中国	1 MWh电力	摇篮到坟墓	—	实地调研、统计数据、文献、Ecoinvent数据库	CML 2001	800.7~970.6 kg CO ₂ e/MWh
Ghadimi等 ^[43]	中国	1 kWh电力	摇篮到坟墓	—	实地调研	CML 2001	1.318 kg CO ₂ e/kWh

致性和可比性。

3.3.2 碳足迹评估的系统边界

系统边界决定了产品碳足迹研究所涵盖的单元过程,即所研究的系统包含哪些生命周期阶段、过程以及物质、能量和温室气体的输入输出,因此系统边界的设定是直接影响碳足迹评估结果的关键因素(表2)。

由于煤炭属于基础能源产品而非终端消费产品,具有多种用途和功能,因此针对煤炭产品开展的碳足迹研究通常评估煤炭产品部分碳足迹,选取“从摇篮到大门”的系统边界,覆盖辅助材料和能源获取以及煤炭生产阶段,还有部分研究额外纳入了煤炭产品运输至消费者的过程。少数研究采用“从摇篮到坟墓”的系统边界,煤炭使用过程一般体现

表2 煤炭碳足迹评估典型文献系统边界覆盖范围

Table 2 Scope of system boundary in typical literature on coal carbon footprint assessment

作者	化石燃料 燃烧	化石燃料 生产	投入物料 生产	电力热力 排放	甲烷逃逸 排放	CO ₂ 逃逸 排放	煤炭产品 运输	使用阶段 排放	其他
Day等 ^[22]	√	×	×	√	√	×	×	×	自燃和低温氧化、 土地利用变化
da Silva等 ^[23]	√	√	√	√	√	×	×	×	矿区土地复垦
Restrepo等 ^[24]	√	√	√	√	√	√	×	×	—
Tampubolon等 ^[25]	√	×	×	√	√	×	×	×	—
Tao等 ^[26]	√	√	√	√	√	√	×	×	—
谷欣博等 ^[27]	√	×	×	√	√	×	×	×	—
刘明奇等 ^[28]	√	×	×	√	√	×	×	×	—
Ditsele等 ^[29]	√	√	√	√	√	×	×	×	—
Burchart-Korol等 ^[30]	√	√	√	√	√	×	×	×	—
曾繁伟等 ^[31]	√	×	×	√	√	×	√	×	—
Memon等 ^[32]	√	√	√	√	√	√	√	×	—
Tao等 ^[33]	√	√	√	√	√	√	×	×	—
Şengül等 ^[34]	√	√	√	√	√	×	√	×	—
Zhang等 ^[35]	√	×	×	√	√	√	√	×	矿区土地复垦
Roy等 ^[36]	√	√	√	√	√	×	√	×	—
Aguirre-Villegas等 ^[37]	√	√	√	√	√	×	√	×	—
Babbitt等 ^[38]	√	×	√	√	√	×	√	燃烧发电	燃烧后废物处置
Venkatesh等 ^[39]	√	×	×	√	√	×	√	燃烧	—
Hyder等 ^[40]	√	×	×	√	√	×	√	燃烧发电	燃烧后废物处置
Wang等 ^[41]	√	×	×	√	√	√	√	燃烧发电	—
Liang等 ^[42]	√	√	√	√	√	√	√	燃烧发电	—
Ghadimi等 ^[43]	√	×	×	√	√	×	√	燃烧	—

注:√表示系统边界覆盖的排放源,×表示系统边界未覆盖的排放源。

为煤炭燃烧,其中 Babbitt 等^[38]和 Hyder 等^[40]的研究覆盖了燃煤废弃物的处置过程。然而,现有“从摇篮到坟墓”的研究(表1)绝大多数集中在煤炭的燃料利用路径,特别是燃煤发电(例如,文献[39-43]的功能单位均为单位发电量),针对物质利用路径(如煤化工、炼焦)的全生命周期碳足迹研究则相对匮乏。这导致对煤炭产品碳足迹的评估主要偏向于其能源属性,而忽视了其作为原料的物质属性,对煤炭产品碳足迹的理解存在片面性。

由于煤炭燃烧产生的温室气体排放量远大于煤炭开采、洗选等阶段造成的温室气体排放量,因此在“从摇篮到大门”和“从摇篮到坟墓”两类不同的系统边界下,煤炭碳足迹评估结果呈现出很大的差异。然而,即使同为研究煤炭产品“从摇篮到大门”的碳足迹,不同文献所纳入的单元过程和碳排放源也存在差异,例如是否包括煤炭开采和矿后活

动(煤炭洗选、储存、运输等)中的二氧化碳逃逸排放、是否考虑矿区土地复垦、是否纳入煤矿机械设备的隐含排放等。Day 等^[22]的研究系统边界包括煤炭自燃和低温氧化及煤炭开采导致的土地利用变化,Zhang 等^[35]的研究系统边界包括矿区土地复垦过程,Şengül 等^[34]和 Aguirre-Villegas 等^[37]的研究额外考虑了煤炭产品向下游消费部门运输产生的碳排放。

3.3.3 碳足迹评估的数据来源与不确定性

开展生命周期碳足迹评估需要收集系统边界内所有单元过程的输入输出定量数据。用于碳足迹评估的清单数据可分为初级数据或次级数据,初级数据来源于直接测量或基于直接测量的计算,而次级数据是从数据库、公开文献、国家排放因子等来源获取的具有可信度的数据^[44]。从数据代表性和准确性角度而言,通常优先选用初级数据。本文选

2026年5月

取的22篇文献中,绝大多数文献将实地调研获得的初级数据作为主要数据来源,并以次级数据作为补充。Venkatesh等^[30]和Hyder等^[40]的研究完全基于统计数据、文献数据等次级数据核算了煤炭的碳足迹。不同的数据来源和数据获取方式将显著影响碳足迹核算结果,以煤炭生产过程中的甲烷逃逸排放为例,通过实地监测获得的排放量和使用《IPCC国家温室气体清单指南》(以下简称IPCC指南)提供的缺省值计算得出的排放量可能存在较大差异,例如IPCC指南给出的露天煤矿开采甲烷排放因子的低值、平均值和高值分别为0.20、0.80、1.34 kg CH₄/t,而Zhang等^[35]研究中露天煤矿开采的甲烷排放因子为2.17 kg CH₄/t,显著高于IPCC指南的缺省值;而甲烷排放是煤炭碳足迹中的重要排放源,其数据质量直接影响碳足迹结果的准确性^[22,26]。此外,由于不同年份煤炭生产的技术水平、煤矿所在地区的电力结构等存在一定差异,不同的数据时间界限也会导致碳足迹结果的差异,然而上述文献中,仅有9篇文献给出了数据收集的基准年。

使用生命周期评价方法量化产品的碳足迹存在固有的不确定性,不确定性来源包括参数不确定性(如活动数据、排放因子)、场景不确定性(如使用阶段场景、生命末期阶段场景)、模型不确定性等。开展不确定性分析可以表征数据和结果的偏差与波动,从而更加客观地反映碳足迹评估的结果。但现有的煤炭碳足迹评估研究中普遍忽视对不确定性的分析,仅有4篇文献^[26,28,33,39]报告了碳足迹评估的不确定性。

综上,数据来源的差异是造成煤炭碳足迹研究结果不一致的重要原因之一。依赖实地调研获取的初级数据往往更具代表性和准确性,但受限于样本数量、企业保密等因素,覆盖范围有限;而次级数据虽然使用方便,但其地域适配性、时间敏感性和方法透明度参差不齐,可能引入系统偏差。不确定性分析作为LCA研究的重要环节,能有效反映参数波动对结果的影响,但多数煤炭碳足迹评估相关文献未报告不确定性区间或进行敏感性测试,导致结果的稳健性难以评估。未来研究应加强数据透明性报告,并引入蒙特卡罗模拟、敏感性分析等方法以提升评估可信度。

3.3.4 影响评价方法

影响评价方法的选择决定了生命周期清单结果与碳足迹之间的转化关系。大多数研究在评估煤炭产品碳足迹时采用了IPCC提供的100年全球变暖潜势(GWP100),通过产品生命周期内排放的每种温室气体质量乘以对应的GWP值计算每种温室气体排放的潜在气候变化影响,碳足迹为每功能单位产生的所有温室气体潜在气候变化影响的总和。部分研究没有明确指出使用的GWP值的时间跨度(例如GWP20、GWP100),降低了不同研究评估结果的可比性^[25]。此外,不同版本的IPCC评估报告中给出的GWP值存在差异,例如,IPCC第五次评估报告(AR5)中给出的甲烷和氧化亚氮的GWP100分别为28和265,而IPCC AR6中给出的甲烷和氧化亚氮的GWP100分别为27.9和273,GWP值选择的不同会导致碳足迹结果的差异。

4 煤炭产品碳足迹评估研究不足

通过分析上述文献可以发现,近年来煤炭碳足迹评估这一问题逐渐得到了国内外学者的关注和重视,已有研究针对多个煤炭生产国(地区)的典型案例开展了一系列定量评估,为后续研究打下了坚实基础,但关于煤炭碳足迹核算与评估的现有研究仍存在一些不足。

首先,现有研究对于煤炭产品种类的界定较为模糊,大多数文献并未说明其所研究煤炭的种类,只有少数文献明确指出所研究的煤炭为硬煤^[30,36]或褐煤^[34]。依据不同的分类标准,煤炭产品可以分为多种类型。例如,根据中国现行的国家标准《中国煤炭分类 GB/T 5751-2009》,可将煤炭按照煤化程度划分为无烟煤、烟煤和褐煤,这3类煤炭还可以进一步细分为不同的亚类^[45];根据加工方法和技术要求不同,可以将煤炭划分为原煤、筛选煤、洗选煤等;根据开采方式不同,可以划分为井工开采煤、露天开采煤。由于不同种类煤炭产品的成矿条件、采矿技术、瓦斯排放强度、加工流程等存在差异,其碳足迹也不尽相同。目前的研究对于煤炭品种的划分还较为粗糙,未能全面充分地揭示不同种类煤炭产品的碳足迹水平、差异及其影响因素。

其次,多数研究对于煤炭碳足迹核算中的关键过程和参数的设定不明确。甲烷逃逸排放是煤炭

生命周期中最主要的温室气体排放源之一,对煤炭碳足迹有显著影响。煤炭生命周期中的甲烷排放来源复杂多样,包括煤矿开采前的预抽瓦斯,开采过程中的风排瓦斯、抽放瓦斯,矿后活动(煤炭洗选、储存、运输等)的甲烷逃逸排放以及废弃煤矿的甲烷排放等。虽然现有文献在核算煤炭碳足迹时都考虑了甲烷排放,但普遍没有说明纳入甲烷排放的具体类型。此外,若煤炭生产过程中产生的煤矿瓦斯、煤矸石等废弃物被收集利用,则可以将其视为煤炭生产的副产品,选用合理的分配方法将物料输入、温室气体排放等生命周期清单数据在煤炭和副产品之间进行分配。然而大多数研究未说明在碳足迹核算中是否考虑以及如何处理上述问题。不同的方法和假设可能得出截然不同的碳足迹结果和研究结论,核算方法和过程的不透明导致核算结果不可比,也影响对结论的解释和理解。

此外,目前开展煤炭产品碳足迹研究的数据基础相对薄弱,这一问题在中国尤为突出。原煤生产、洗选过程中的关键排放数据多依赖企业内部或地方统计资料,缺乏统一公开的数据平台,导致生命周期清单数据获取难度大,代表性和透明度偏低。特别是甲烷逃逸排放作为碳足迹的重要组成部分,其监测数据在中国依然有限,排放因子多采用IPCC默认值,无法体现矿区实际工况。虽然Ecoinvent、GaBi等国际主流的数据库中提供了煤炭碳足迹建模所需的部分相关数据,但这些数据大多基于国外的煤矿生产工艺过程,存在数据陈旧、溯源性较差、代表性不足等问题,直接将其用于中国的煤炭产品碳足迹核算会导致较大的系统性偏差。

最后,已有研究通常聚焦于个别的煤矿案例,碳足迹结果的时间、空间、技术代表性有限。现有的案例研究未能全面刻画不同煤炭产品的碳足迹及导致其差异的关键影响因素,也无法充分反映特定区域或国家等更大空间尺度上的煤炭碳足迹平均水平。对于中国的煤炭而言,这一问题尤为突出。在时间上,由于近年来中国高污染落后煤矿大量关闭、煤矿瓦斯收集利用率持续提升、电力结构快速清洁化等多种因素影响,中国煤炭产品的碳足迹具有明显的年际变化。在空间上,截至2023年底,中国煤矿数量约4300处,由于不同省份煤矿的

甲烷排放强度、电力排放因子等具有空间异质性,煤炭碳足迹也相应地存在显著的地区差异^[46]。在技术上,露天矿和井工矿的开采方式和工艺不同,产生的温室气体排放和碳足迹也相应地存在差异。

5 完善中国煤炭产品碳足迹评估方法的建议

针对当前煤炭产品碳足迹评估研究中存在的不足,建议从以下4个方面构建更加统一、科学、可操作的煤炭产品碳足迹评估方法体系:

(1)明确煤炭产品种类与功能单位定义。应依据《GB/T 5751-2009 中国煤炭分类》《GB/T 17608-2022 煤炭产品品种和等级划分》等国家标准细化产品分类,从煤炭的理化性质(如煤化程度、热值)、开采方式(露天开采、井工开采)、加工程度(原煤、筛选煤、洗选煤、精煤)等方面清晰界定评估对象的特征属性。同时,应根据研究目标合理选择功能单位,并说明选取依据与适用范围,以增强结果的可比性。

(2)统一系统边界划定原则。煤炭作为重要的基础能源和工业原料产品,其用途复杂多样,功能难以统一量化;此外,开展煤炭产品碳足迹评估的目的不仅限于评估煤炭产品本身的排放水平,还在于为下游煤炭深加工和煤炭利用部门提供开展产品碳足迹核算所需的背景数据。因此,建议煤炭产品碳足迹评估优先采用“从摇篮到大门”的系统边界,涵盖辅助材料和能源获取、煤炭生产两个阶段。这种边界设定可兼顾核算的完整性与操作的可行性,同时也有助于与下游碳足迹核算有效衔接,满足碳足迹管理体系建设及绿色贸易壁垒应对的实际需求。若采用“从摇篮到坟墓”的系统边界,则应根据煤炭产品的终端利用方式,清晰划分“燃料利用”和“物质利用”两种场景的系统边界。

(3)规范核算方法和参数设定,提升结果透明度。开展煤炭产品碳足迹评估应详细披露温室气体排放量计算方法、数据来源与关键假设。甲烷排放是煤炭碳足迹的关键排放源,煤炭碳足迹核算中应至少涵盖煤炭开采过程和矿后活动的甲烷排放,并阐明甲烷排放的计算公式、排放因子来源等。对于伴随着煤炭开采过程所产生的有利用价值的副

2026年5月

产品(煤矿瓦斯、煤矸石等),应根据具体情形选用系统扩展法、物理分配法或经济分配法将温室气体排放量在煤炭与副产品之间分摊。影响评价方法建议采用最新版 IPCC 评估报告给出的 100 年全球变暖潜势(GWP100)指标。同时,建议引入蒙特卡罗模拟等不确定性分析方法,量化关键参数波动对评估结果的影响,增强核算结果的稳健性与科学性;此外,也可在研究中同时选择同一参数的不同数值,例如不同的 GWP 值,给出不同参数下的计算结果,从而反映参数选择对结果的影响。

(4)加快建设本土碳足迹因子数据库,提高数据质量。建议基于重点产煤省份和典型煤矿,构建覆盖不同煤种、开采方式与地理区域的碳排放因子数据库,推动碳足迹基础数据的标准化采集和共享应用。当前,甲烷排放数据的可获得性和准确性仍是中国煤炭碳足迹核算中的关键短板,应尽快建立统一、科学的煤矿甲烷监测与核算标准体系,同时加快甲烷在线监测技术及设备的研发和推广,推动煤矿甲烷排放监测核算的精细化、数字化和智能化发展。

6 结论

制定煤炭产品碳足迹核算规则和标准、准确测算煤炭碳足迹是加快中国碳足迹管理体系建设和煤炭产业低碳转型的重要环节。本文在系统调研梳理关键文献的基础上,评述了煤炭碳足迹相关研究的现状,分析了现有文献在碳足迹研究方法和结果方面的差异,在此基础上识别了现有研究的不足,并针对性地提出完善中国煤炭产品碳足迹评估方法的建议。得出以下主要结论:

(1)现有研究得出的煤炭碳足迹评估结果存在较大差异。一方面,不同研究针对的煤种、研究区域、基准年等各不相同,自然会导致碳足迹结果的差异;另一方面,各研究中生命周期评价模型采用的功能单位、系统边界、清单数据来源、影响评价方法等存在差异,这也会影响碳足迹评估结果。

(2)当前煤炭碳足迹评估相关研究在核算方法规范性、边界界定清晰性、过程透明性、数据可获得性、样本代表性等方面仍存在不足。现有研究对于煤炭品种的划分较为粗糙;未能清晰地区分燃料利用和物质利用两种不同终端用途的系统边界,尤其

是“从摇篮到坟墓”的研究几乎仅限于燃料利用场景;对于系统边界中覆盖的具体排放源、排放分配方法等核算中的关键过程和参数的设定不明确;煤炭碳足迹核算所需的基础数据获取难度大、准确性低,且基于少数煤矿案例开展的碳足迹评估代表性不足。

(3)应构建更加统一、科学、可操作的煤炭产品碳足迹评估方法体系。明确煤炭产品种类与功能单位定义,清晰界定评估对象的理化性质、开采方式、加工程度等特征;统一系统边界划定原则,优先采用“从摇篮到大门”的系统边界开展煤炭碳足迹评估;规范核算方法和参数设定,明确甲烷排放的计算方法和数据来源,使用 IPCC 发布的最新的 GWP100 指标值核算碳足迹,深入分析所采用的各种参数和假设的不确定性及其对结果的影响;加快建设本土碳足迹因子数据库,提高甲烷排放数据的可获得性和准确性。

参考文献(References):

- [1] 杨方亮. 新型能源体系建设背景下煤炭产业发展前景分析[J]. 中国煤炭, 2024, 50(12): 11-24. [Yang F L. Analysis of the development prospects of coal industry in the context of new energy system construction[J]. China Coal, 2024, 50(12): 11-24.]
- [2] 程超, 高丹, 张衡, 等. 煤炭与新能源融合发展场景与关键技术[J]. 中国工程科学, 2024, 26(4): 52-62. [Cheng C, Gao D, Zhang H, et al. Integrated development of coal and new energy sources: Scenarios and key technologies[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(4): 52-62.]
- [3] 国家统计局. 中华人民共和国 2023 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. (2024-02-29) [2025-12-29]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202402/content_6934935.htm. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. Statistical Communiqué of the People's Republic of China on the 2023 National Economic and Social Development[EB/OL]. (2024-02-29) [2025-12-29]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202402/content_6934935.htm.]
- [4] 金之钧, 张川. 面向碳中和的中国能源转型路径思考[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2024, 60(4): 767-774. [Jin Z J, Zhang C. On China's energy transition pathway towards carbon neutrality [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2024, 60(4): 767-774.]
- [5] 全球能源互联网发展合作组织. 中国碳中和之路[R]. 北京: 全球能源互联网发展合作组织, 2021. [Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization. China's Road to

- Carbon Neutrality[R]. Beijing: GEIDCO, 2021.]
- [6] 任世华, 谢亚辰, 焦小森, 等. 煤炭开发过程碳排放特征及碳中和发展的技术途径[J]. 工程科学与技术, 2021, 54(1): 60-68. [Ren S H, Xie Y C, Jiao X M, et al. Characteristics of carbon emissions during coal development and technical approaches for carbon neutral development[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 54(1): 60-68.]
- [7] 徐顺智, 赵瑞彤, 王孝全, 等. 燃煤发电行业低碳化发展路径分析[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(12): 83-94. [Xu S Z, Zhao R X, Wang X Q, et al. Analysis on low-carbon development path of coal-fired power generation industry[J]. *Clean Coal Technology*, 2023, 29(12): 83-94.]
- [8] 荆文娜. 碳足迹管理成为助力实现碳达峰碳中和重要政策工具[N]. 中国经济导报, 2023-11-30(002). [Jing W N. Carbon Footprint Management Becomes an Important Policy Tool to Achieve Carbon Peak and Neutrality[N]. *China Economic Herald*, 2023-11-30(002).]
- [9] 马国淞, 罗崇佳, 段茂盛. 我国产品碳足迹管理体系建设现状、进展与关键问题[J]. 中国电力企业管理, 2025, (4): 73-75. [Ma G S, Luo C J, Duan M S. Current status, progress and key issues in building China's product carbon footprint management system[J]. *China Power Enterprise Management*, 2025, (4): 73-75.]
- [10] 耿涌, 董会娟, 郝凤明, 等. 应对气候变化的碳足迹研究综述[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(10): 6-12. [Geng Y, Dong H J, Xi F M, et al. A review of the research on carbon footprint responding to climate change[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(10): 6-12.]
- [11] 计军平, 马晓明. 碳足迹的概念和核算方法研究进展[J]. 生态经济, 2011, (4): 76-80. [Ji J P, Ma X M. Review of carbon footprint: Definitions and accounting methods[J]. *Ecological Economy*, 2011, (4): 76-80.]
- [12] 尚楠, 刘玺, 朱浩骏, 等. 产品生命周期碳足迹核算技术与政策标准综述[J]. 广东电力, 2025, 38(9): 80-92. [Shang N, Liu X, Zhu H J, et al. Review on carbon footprint accounting technologies and policy standard for product life cycle[J]. *Guangdong Electric Power*, 2025, 38(9): 80-92.]
- [13] 翟一杰, 张天祚, 申晓旭, 等. 生命周期评价方法研究进展[J]. 资源科学, 2021, 43(3): 446-455. [Zhai Y J, Zhang T Z, Shen X X, et al. Development of life cycle assessment method[J]. *Resources Science*, 2021, 43(3): 446-455.]
- [14] ISO. ISO 14041: Environmental Management, Life Cycle Assessment, Goal and Scope Definition and Inventory Analysis[R]. Geneva: ISO, 1998.
- [15] 李姗姗, 袁亮. 煤炭工业全生命周期碳排放核算与影响因素[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2925-2935. [Li S S, Yuan L. Carbon emission accounting and influencing factors for whole life cycle of coal industry[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(7): 2925-2935.]
- [16] 董弄红, 刘峰, 黄艳利, 等. 矿业生态学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2019. [Dong J H, Liu F, Huang Y L, et al. *Mining Ecology* [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2019.]
- [17] 王俊博, 李鑫, 田继军, 等. 煤炭开发利用产业碳足迹计算方法及减排措施综述[J]. 煤炭学报, 2023, 48(S1): 263-274. [Wang J B, Li X, Tian J J, et al. Summary of carbon footprint calculation methods and emission reduction measures for coal exploitation and utilization[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(S1): 263-274.]
- [18] 陈瑜, 王晶. 钢铁行业煤炭消费情况及控煤措施简析[J]. 中国钢铁业, 2022, (7): 23-28. [Chen Y, Wang J. Brief analysis of coal consumption and coal control measures in the steel industry[J]. *China Steel*, 2022, (7): 23-28.]
- [19] 曾琳. 中长期我国建材行业煤炭需求预测研究[J]. 煤炭经济研究, 2015, 35(8): 35-38. [Zeng L. Prediction study on coal demands by China building material industry in late middle and long-term period[J]. *Coal Economic Research*, 2015, 35(8): 35-38.]
- [20] 谢克昌. 新型能源体系发展背景下煤炭清洁高效转化的挑战及途径[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 47-56. [Xie K C. Develop new energy system and promote clean and efficient conversion of coal [J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(1): 47-56.]
- [21] 李会泉, 胡应燕, 李少鹏, 等. 煤基固废循环利用技术与产品链构建[J]. 资源科学, 2021, 43(3): 456-464. [Li H Q, Hu Y Y, Li S P, et al. Recycling and product chain of coal-based solid waste[J]. *Resources Science*, 2021, 43(3): 456-464.]
- [22] Day S J, Carras J N, Fry R, et al. Greenhouse gas emissions from Australian open-cut coal mines: Contribution from spontaneous combustion and low-temperature oxidation[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 166(1): 529-541.
- [23] da Silva M G, Muniz A R C, Hoffmann R, et al. Impact of greenhouse gases on surface coal mining in Brazil[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 193: 206-216.
- [24] Restrepo Á, Bazzo E, Miyake R. A life cycle assessment of the Brazilian coal used for electric power generation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 92: 179-186.
- [25] Tampubolon F R S, Yuwono A S, Tambunan A H, et al. Coal mining energy utilization and environmental impact management strategy using the LCA method[J]. *Nature Environment and Pollution Technology*, 2021, 20(5): 2007-2015.
- [26] Tao M, Cheng W, Nie K, et al. Life cycle assessment of underground coal mining in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150231.
- [27] 谷欣博, 潘卫东, 阿斯哈尔·尼亚孜别克, 等. 井工煤矿煤炭生产碳排放核算及减排路径研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53

2026年5月

- (S1): 497–507. [Gu X B, Pan W D, Niyazibieke A, et al. Study on carbon emission accounting and emission reduction path of coal production in coal mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2025, 53(S1): 497–507.]
- [28] 刘明奇, 张小平, 王瑜, 等. 典型露天煤矿全生命周期碳排放核算及其区域环境影响[J]. *煤炭学报*, 2025, 50(6): 3072–3084. [Liu M Q, Zhang X P, Wang Y, et al. Full life cycle carbon emissions accounting and regional environmental impact assessment of typical open-pit coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2025, 50(6): 3072–3084.]
- [29] Ditsele O, Awuah-Offei K. Effect of mine characteristics on life cycle impacts of US surface coal mining[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2012, 17(3): 287–294.
- [30] Burchart-Korol D, Fugiel A, Czaplicka-Kolarz K, et al. Model of environmental life cycle assessment for coal mining operations[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 562: 61–72.
- [31] 曾繁伟, 刘静静. 煤炭产品的碳足迹计算方案研究[J]. *煤炭工程*, 2017, 49(12): 169–172. [Zeng F W, Liu J J. Study of carbon footprint calculation scheme for coal products[J]. *Coal Engineering*, 2017, 49(12): 169–172.]
- [32] Memon M B, Tao M, Yang Z, et al. Life cycle assessment model for small-scale coal mining operations with equivalent coal output: A greener perspective towards coal mining[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2024, 28(3): 6525–6550.
- [33] Tao M, Memon M B, Yang Z, et al. Towards greener coal mining: A life cycle assessment model for small-scale underground operations[J]. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2024, 41(6): 3103–3118.
- [34] Şengül H, Bayrak F, Köksal M A, et al. A cradle to gate life cycle assessment of Turkish lignite used for electricity generation with site-specific data[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 129: 478–490.
- [35] Zhang L, Wang J, Feng Y. Life cycle assessment of opencast coal mine production: A case study in Yimin mining area in China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(9): 8475–8486.
- [36] Roy P, Hossain M N, Uddin S M M, et al. Unraveling the sustainability aspects of coal extraction and use in Bangladesh using material flow analysis and life cycle assessment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.135895.
- [37] Aguirre-Villegas H A, Benson C H. Case history of environmental impacts of an Indonesian coal supply chain[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 157: 47–56.
- [38] Babbitt C W, Lindner A S. A life cycle inventory of coal used for electricity production in Florida[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2005, 13(9): 903–912.
- [39] Venkatesh A, Jaramillo P, Griffin W M, et al. Uncertainty in life cycle greenhouse gas emissions from United States coal[J]. *Energy & Fuels*, 2012, 26(8): 4917–4923.
- [40] Hyder Z, Ripepi N S, Karmis M E. A life cycle comparison of greenhouse emissions for power generation from coal mining and underground coal gasification[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2016, 21(4): 515–546.
- [41] Wang C, Mu D. An LCA study of an electricity coal supply chain [J]. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 2014, 7(1): 311–335.
- [42] Liang X, Wang Z, Zhou Z, et al. Up-to-date life cycle assessment and comparison study of clean coal power generation technologies in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 39: 24–31.
- [43] Ghadimi P, Wang C, Azadnia A H, et al. Life cycle-based environmental performance indicator for the coal-to-energy supply chain: A Chinese case application[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 147: 28–38.
- [44] 全国碳排放管理标准化技术委员会. 温室气体 产品碳足迹 量化要求和指南: GB/T 24067–2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024. [National Technical Committee on Carbon Emission Management Standardization. Greenhouse gases—Product Carbon Footprint—Quantification Requirements and Guidelines: GB/T 24067–2024 [S]. Beijing: China Standards Press, 2024.]
- [45] 全国煤炭标准化技术委员会. 中国煤炭分类: GB/T 5751–2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009. [National Technical Committee of Coal Standardization. Classification of Coals in China: GB/T 5751–2009[S]. Beijing: China Standards Press, 2009.]
- [46] Zhang Y, Liu X, Patouillard L, et al. Remarkable spatial disparity of life cycle inventory for coal production in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(41): 15443–15453.

Review of carbon footprint assessment of coal products

MA Guosong, DUAN Maosheng

(Institute of Energy, Environment and Economy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Coal is the primary energy source to support China's national economic development. Accurate accounting of the carbon footprint of coal products is the basis for promoting the low-carbon transition of the coal industry chain, as well as a key requirement for supporting the construction of China's carbon footprint management system and addressing international carbon-related trade barriers. This study summarizes the life cycle of coal products and their main emission sources, and reviews the current status of research on carbon footprint assessment of coal products based on a systematic literature review. In addition, 22 life cycle assessment-based research articles about coal carbon footprint published during 2000–2024 are compared and analyzed. It is found that there is significant inconsistency in the functional units, system boundaries, and data sources in different studies, and the results of coal carbon footprint show great disparities. Comparative analysis reveals significant differences in coal carbon footprints across countries (regions). For instance, cradle-to-gate coal carbon footprint in Australia (31.2 kg CO₂e/t) in some studies is notably lower than cases in Indonesia (314.0 kg CO₂e/t) and China (up to 499.0 kg CO₂e/t). Moreover, cradle-to-gate (19.8–835.0 kg CO₂e/t) and cradle-to-grave (1526.4–2988.1 kg CO₂e/t) carbon footprints of coal differ substantially. The differences in carbon footprint results are due to the inherent disparity of the research objects, and it is also affected by the differences in specific methods. This study further compares and analyzes key issues and assumptions that may affect the carbon footprint assessment results in different studies, including functional units, system boundaries, inventory data sources, and impact assessment methods. On this basis, this study identifies the limitations in existing research and proposes recommendations for improving the carbon footprint assessment methods for China's coal products from the aspects of methodology standardization, process transparency, data availability, and sample representativeness, which provides scientific support for promoting the formulation of carbon footprint accounting standards of coal products and the construction of carbon footprint management system in China.

Key words: coal products; carbon footprint; life cycle assessment; carbon accounting; carbon emissions