



移动扫码阅读

刘铁牛, 郭少华, 张笛, 等. 国内外工业碳排放数据平台建设现状与应用展望[J]. 能源环境保护, 2023, 37(4): 121-130.

LIU Tieniu, GUO Shaohua, ZHANG Di, et al. Current status and application prospects of industrial carbon emission data platforms at home and abroad[J]. Energy Environmental Protection, 2023, 37(4): 121-130.

国内外工业碳排放数据平台建设现状与应用展望

刘铁牛¹, 郭少华^{2, 3, 4, *}, 张笛^{2, 3, 4}, 赵赫^{2, 3, 4}, 魏平¹, 李塔娜⁵

- (1. 铜陵泰富特种材料有限公司, 安徽 铜陵 244000; 2. 中国科学院绿色过程制造创新研究院, 北京 100190; 3. 中国科学院化学化工科学数据中心, 北京 100190; 4. 中国科学院过程工程研究所, 北京 100190; 5. 中共内蒙古自治区委员会党校, 内蒙古 呼和浩特 010070)

摘要:中国作为当今全球碳排放最大的国家,工业碳排放量约占全国总碳排放量的68%。在碳排放总量和强度“双控”的新制度要求下,准确核算工业碳排放量具有重要意义。通过分析国内外碳排放总量和产品碳排放强度相关标准及其低碳数据平台建设情况发现,目前国内外碳排放总量核算标准大都基于《IPCC 清单指南》;国外产品碳足迹相关标准已经建立,而国内发展相对滞后,大部分行业仍缺乏权威性产品碳足迹核算及评价标准;国内外碳排放数据平台及软件均缺乏覆盖工艺过程或工序的碳排放信息,且数据基本来源于文献报道或统计年鉴,本土化程度低,不能达到高精度和国际互认水平。基于对国内外标准体系、数据平台和软件的调研分析,本研究提出,亟需完善全链条低碳标准体系,建设多产业互联的行业低碳数据平台,并开发资源-环境-碳-经济多尺度评价软件,将企业/行业工艺过程与产品供应链碳排放数据深度融合,实现数据资源公开统筹应用,服务工业领域精准降碳与绿色、低碳等多目标协同发展。

关键词:工艺过程;碳排放;数据平台;产品碳足迹;标准体系;模型软件

中图分类号:X51

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2023)04-0121-10

Current status and application prospects of industrial carbon emission data platforms at home and abroad

LIU Tieniu¹, GUO Shaohua^{2, 3, 4, *}, ZHANG Di^{2, 3, 4}, ZHAO He^{2, 3, 4}, WEI Ping¹, LI Tana⁵

- (1. Tongling Pacific Special Materials Co., Ltd., Tongling 244000, China; 2. Innovation Academy for Green Manufacture, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Chemistry & Chemical Engineering Data Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 4. Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 5. The Party School of C.P.C Inner Mongolia District Committee, Hohhot 010070, China)

Abstract: China is currently the country with the largest carbon emissions in the world, with industrial carbon emissions accounting for approximately 68% of the global carbon emissions. Under the "double control" of total amount and intensity of carbon emissions, calculating accurately of industrial carbon emissions is of great significance. This article analyzes the relevant standards for total carbon emissions and products carbon emissions intensity at home and abroad, as well as the construction of low-carbon data platforms. It is found that currently, the accounting standards for total carbon emissions at home and abroad are mostly based on the "IPCC Inventory Guidelines". Internationally, standards related to product carbon footprint have been established, but domestic development is relatively lagging, and

收稿日期:2023-04-28;责任编辑:蒋雯婷

DOI:10.20078/j.eep.20030509

基金项目:中国科学院绿色过程制造创新研究院自主部署项目(IAGM2022D05)

作者简介:刘铁牛(1967—),男,山东菏泽人,高级工程师,主要从事冶金、煤化工及能源环保研究。E-mail: liutieniu@citisteel.com

通讯作者:郭少华(1991—),女,河北定州人,工程师,主要从事工业碳排放数据资源建设。E-mail: shguo@ipe.ac.cn

most industries still lack authoritative product carbon footprint accounting and evaluation standards. Both domestic and foreign carbon emission data platforms and software lack carbon emission information covering process. The data is mainly from literature reports or statistical yearbook with low degree of data localization, and is unable to achieve high accuracy and international mutual recognition level. Based on research and analysis of domestic and foreign standard systems, data platforms, and software, this study proposes the urgent need to improve the full chain low-carbon standard system, build a multi-industry interconnected low-carbon data platform, and develop a multi-scale evaluation software for resources, environment, carbon, and economy. This will deeply integrate industry processes and the carbon emission data of productions supply chains. Furthermore, the open and coordinated application of data resources will be achieved, serving the precise carbon reduction and coordinated development of multiple goals such as green and low-carbon in the industrial field.

Keywords: Industrial process; Carbon emission; Data platform; Product carbon footprint; Standard system; Model software

0 引言

2020年9月,习近平总书记在第七十五届联合国大会发表讲话,提出我国将力争于2030年实现“碳达峰”,2060年实现“碳中和”。双碳目标将影响各个行业领域的发展,我国作为工业制造业大国,拥有全球最完备的工业体系,包含41个全部工业门类,工业产值占世界总量的30%左右^[1]。在世界500多种主要工业产品中,我国有220多种产品的产量位居世界第一^[2]。随着工业化进程加快以及对能源需求的增加,我国已成为世界上最大的能源消费国。大量化石能源的消耗使得碳排放量不断增长,据报道,目前工业碳排放量约占我国碳排放总量的68%(包含间接排放)^[3]。目前,我国工业产生的碳排放量主要通过自上而下的方式对化石燃料消耗进行粗略核算,未精确到生产过程中各工序/工艺的碳排放量。刘竹等^[4]通过对比国外常见的数据平台发现,利用我国实际数据计算水泥生产产生的碳排放量比国外常用的数据平台低32%~45%,碳排放量被大大高估。这不仅使我国制定碳达峰碳中和相关政策缺乏科学依据,而且不利于企业实施精准降碳。为了夯实碳达峰碳中和工作基础,2022年4月22日国家发展和改革委员会会同有关部门联合印发《关于加快建立统一规范的碳排放统计核算体系实施方案》(简称“方案”),该方案指出碳排放统计核算是做好碳达峰碳中和工作的重要基础,是制定政策、推动工作、开展考核、谈判履约的重要依据。未来工业仍将是我国经济增长的主要动力,减少工业领域的碳排放仍面临巨大挑战。因此,准确

核算工业碳排放量是企业报告与核查碳排放量等工作的重要依据,也是各行业领域寻求低碳化路径及适用性低碳技术的基础。党的二十大强调,完善能源消耗总量和强度调控,重点控制化石能源消费,逐步转向碳排放总量和强度“双控”制度。因此,准确核算工业生产过程各个环节的碳排放量对工业排放总量和产品排放强度控制具有重要意义,是工业能否实现科学降碳、精准降碳的基础保障。

本文在详细分析国内外碳排放总量和产品碳排放强度相关标准及相关低碳数据平台建设情况的基础上,提出了中国工业碳排放数据资源建设与应用的发展建议。

1 国内外碳排放总量数据平台建设

1.1 国家/区域/组织层面碳排放核算标准简述

国际上已发布了一系列国家/区域/组织层面碳排放核算标准,如联合国政府间气候变化专门委员会通过的《IPCC 2006年国家温室气体清单指南》及其2019年修订版(简称“《IPCC清单指南》”)、国际标准化组织(ISO)制定的《ISO14064-1:Greenhouse gases-Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emission and removal》(简称“《ISO14064-1》”)和世界资源研究所与世界可持续发展工商理事会联合发布的Greenhouse Gas Protocol体系(GHG Protocol)中企业和企业价值链核算标准等,其中《IPCC清单指南》属于国家和区域层面核算指南,给出了国家编制温室气体清单统一的方法论, GHG Protocol覆盖企业、组织、项目等层面,其中对企业或组织层面碳排放核

算提供了较为详细的指导与说明,应用广泛,与《ISO14064-1》组织层面标准一致^[5]。

在国内标准方面,国家发展和改革委员会先后发布了《省级温室气体清单编制指南(试行)》(简称“《省级指南》”)及24个行业企业核算指南(简称“《行业指南》”),以供企业建立温室气体排放报告制度等相关工作参考使用。与国际标准相比,《行业指南》给出了碳排放因子相关参数推荐值及其确定方法,实用性更强且更符合我国实际情况。然而相较于国际标准,《行业指南》缺少不确定性评估,通用性偏弱。此外,各省份也积极开展碳排放标准制定工作,如深圳、上海、北京和广东等省市结合地方情况发布《深圳市组织的温室气体排放量化和报告指南》《上海市温室气体排放核算与报告指南(试行)》《北京市企业(单位)二氧化碳排放核算和报告指南(2017版)》和《广东省市县(区)级温室气体清单编制指南》等区域性核算标准,有效指导了地方核查机构碳排放量化工作。

以上碳排放核算标准,主要基于《IPCC清单指南》方法,涉及排放因子法、物料衡算法和实测法3种核算方法。

1.2 国外碳排放数据平台建设现状

本研究调研了目前国外涉及工业碳排放信息的10个应用较广泛的权威性碳排放数据平台,见表1,其中国际/组织联合建立的有全球实时碳数据(Carbon Monitor, CM)、全球碳预算数据库

(Global Carbon Budget, GCB)、联合国气候变化框架公约秘书处负责的(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)数据库、全球大气研究排放数据库(Emissions Database for Global Atmospheric Research, EDGAR)和国际能源署(International Energy Agency, IEA)、世界资源研究所(World Resources Institute, WRI)、气候观察(Climate Watch, CW)等6大数据库;部分国家如美国、法国和英国相关机构建立了独立的数据库,如美国的能源信息管理局数据库(U. S. Energy Information Administration, EIA)和美国橡树岭国家实验室二氧化碳信息分析中心数据库(Carbon Dioxide Information Analysis Centre, CDIAC)、英国的石油公司数据库(British Petroleum, BP)和法国的Global Carbon Atlas, GCA数据库。部分学者对以上数据平台核算结果进行分析,如通过对以上数据库中涉及的中国碳排放数据与我国官方数据进行比较发现,EDGAR和CDIAC估计值分别比中国官方估计的排放量高出8%^[6],主要原因是国际机构大都基于能源数据和《IPCC清单指南》推荐的排放因子进行估算,其能源活动数据准确度有限且排放因子高于中国的实际调查值。少量学者对数据平台中的核算参数进行了对比分析^[7-8],如各数据库的活动水平数据分类和排放因子的取值原则不同,但尚未针对工业各工艺过程或工序碳排放数据进行详细分析。

表1 国外碳排放数据平台建设现状

Table 1 Current status of carbon emission data platforms abroad

分类	数据库名称及简称	管理/开发机构	建立年份	数据覆盖年份范围
国际组织	Carbon Monitor(CM)	国内外多所研究机构	2021	2019—2022
	Global Carbon Budget(GCB)	欧洲综合碳观测系统 ICOS 研究团队	2014	1959—2020
	United Nations Framework Convention on Climate Change(UNFCCC)	联合国气候变化框架公约秘书处	1994	1990—2020
	Emissions Database for Global Atmospheric Research(EDGAR)	欧盟委员会联合研究中心(JRC)和荷兰环境评估署(PBL)	/	1970—2021
	International Energy Agency(IEA)	国际能源署	1974	1960—2021
	Climate Watch(CW)	世界资源研究所	1982	1990—2019
美国	U.S. Energy Information Administration(EIA)	美国能源信息管理局	1977	1949—2019
	Carbon Dioxide Information Analysis Center(CDIAC)	美国橡树岭国家实验室二氧化碳信息分析中心	1987	1751—2015
法国	Global Carbon Atlas(GCA)	法国巴黎银行	2013	1959—2021
英国	British Petroleum(BP)	英国石油公司	1909	1965—2020

本研究对比分析了6个国际影响力较大,引用率较高,数据覆盖面较广的数据平台。从数据

来源、温室气体种类、核算范围、核算方法等方面对工业碳排放数据进行详细的剖析,见表2。

表2 国外典型碳排放数据平台对比

Table 2 Comparison of the typical carbon emission data platforms abroad

类型	UNFCCC ^[9]	CM ^[10]	IEA ^[11]	EDGAR ^[12]	EIA ^[13]	CDIAC ^[15]
主要温室气体种类	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、HFCs、PFCs、SF ₆ 、NF ₃ 等	CO ₂	CO ₂ 、N ₂ O、CH ₄	CO ₂ 、N ₂ O、CH ₄ 、含氟气体	CO ₂	CO ₂
核算范围	是否覆盖行业及工艺过程 包含矿物生产、化学工业、金属制品等大部分行业	包含钢铁、水泥、化工、其他化工4类	钢铁、化工和石化、非金属矿物制品制造等	水泥生产、石灰生产、玻璃生产、碳酸盐的其他工艺用途、化学工业等	不包括	只包括水泥生产
核算方法			《IPCC 清单指南》			
数据来源	国家统计局、行业协会等统计数据	EDGAR、各国统计公报、Carbon-Brief 报道等	《世界能源统计表》《能源平衡》秘书处估算等	IEA、《能源平衡与统计》《世界能源统计年鉴》等	各国统计部门、联邦地球科学和自然资源研究所等 ^[14]	联合国统计司

在主要温室气体种类方面,各数据平台差异较大,如CM、EIA、CDIAC主要核算CO₂,IEA包括CO₂、N₂O、CH₄三种气体,而UNFCCC和EDGAR除此之外还包括氟化物。

在核算范围方面,大部分主要展示了化石燃料燃烧消耗产生的碳排放量,未包括工业生产过程碳排放数据。UNFCCC提供的附件一缔约方数据是根据《IPCC 清单指南》要求编制国家温室气体清单,核算内容全面,基本涵盖矿物生产、化工和石化、非金属矿物制品制造等大部分行业,但非附件一缔约方的数据更新缓慢,如中国碳排放数据仅更新至2014年^[16];CM工业部分仅包含钢铁、水泥、化工、其他化工4大类碳排数据;IEA则根据不同行业能源消耗计算碳排,其中制造业包括钢铁、化学工和石油化工、有色金属、非金属矿物等10类行业,但少于UNFCCC;CDIAC工业行业中只包括碳排量最大的水泥行业;EDGAR包含5大产业,水泥生产、石灰生产、玻璃生产、碳酸盐使用、化学工业、金属加工、来自燃料和溶剂的非能源产品、石灰、尿素使用等22个部门。EIA仅给出工业排放总量,没有细分行业的数据。以上数据平台仅给出工业部分行业总体排放数据,均缺乏生产工艺、工序等详细过程排放信息。

在核算方法方面,各数据平台较为统一,均基于《IPCC 清单指南》中排放因子法,即温室气体活动水平数据乘以排放因子。

在数据来源方面,数据大都主要来源于能源消耗等统计资料。如UNFCCC数据由《联合国气

候变化框架公约》缔约方提供,主要来源于国家统计局、行业协会等数据。CM则从EDGAR中提取每个国家和地区的二氧化碳排放量和行业结构,基于此,根据各国年度统计公报、CarbonBrief等发布的年增长率估算下一年的碳排放量,进而将年度总排放量分解为日排放量^[17]。IEA收录了190个国家/地区的燃料燃烧产生的CO₂排放量,其数据主要来源于《世界能源统计表》《能源平衡》、秘书处估算等。EDGAR在全球范围内以0.1度×0.1度的分辨率提供国家排放总量和网格图,以及每年、每月和甚至每小时的数据,其数据主要基于IEA、《能源平衡与统计》《世界能源统计年鉴》等。EIA数据来源于各国统计部门及联邦地球科学和自然资源研究所机构等发布数据。CDIAC数据则主要来源于自联合国统计司公开资料,但于2017年9月底停止运行。

1.3 国内碳排放数据平台建设现状

相较于国外,国内碳排放数据平台建设发展较为缓慢,大都始于21世纪初,且缺乏国家级公开数据平台。目前公开的主要有清华大学关大博教授团队创建的中国碳核算数据库(Carbon Emission Accounts & Datasets for emerging economies, CEADs)、贺克斌院士团队建立的中国多尺度排放清单模型(MEIC Model Tracking Anthropogenic Emission, MEIC)和中国城市温室气体工作组建立的中国高空间分辨率排放网格数据库(China High Resolution Emission Database, CHRED)。国内已有部分大型企业开始搭建碳中和平台,以期助力企

业低碳发展与数字化转型,如河钢集团邯钢公司建立的“WisCarbon 碳中和数字化平台”、中国宝武钢铁集团有限公司的“碳资产经营管理平台”、冶金规划院的“钢铁企业碳管控平台”和中石化石

油化工科学研究院有限公司的“石化行业双碳数据平台”等。因企业层面的数据平台尚未对外公开,本研究仅针对以上3个公开数据库/平台进行简要分析,见表3。

表3 国内典型低碳数据平台对比

Table 3 Comparison of typical carbon emission data platforms in China

类型	CEADs ^[6, 18-19]	MEIC ^[20-22]	CHRED ^[23]
建立年份	2016	2010	2014
数据覆盖年份范围	1997—2020	1970—2020	2005—2020
主要温室气体种类	CO ₂	CO ₂	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、HFC-410A、HFC-134a、HFC-23、SF ₆ 、CF ₄ 、C ₂ F ₆
核算范围	是否覆盖行业及工艺过程 包括47个部门排放总量及水泥生产过程排放总量	未细分行业	工业过程总量
核算方法	《IPCC 清单指南》		
数据来源	《中国能源统计年鉴》及全国经济普查数据	国外:IEA、IPCC、CDIAC 国内:《省级指南》、实测、中国碳核算数据库	统计年鉴、政府文件、调研报告和现场调研等

在主要温室气体种类方面,CEADs 和 MEIC 主要核算了二氧化碳的排放,CHRED 则覆盖了较为全面的温室气体种类。

在核算范围方面,CEADs 展示了中国国家-省区-城市不同尺度黑色金属矿采选业、纺织工业等47个社会经济部门20种化石燃料排放及水泥工业过程(煤耗、电耗、生产过程)排放总量^[24],而其他数据库主要考虑化石燃料燃烧消耗产生的碳排放量,如 MEIC 包括不同国家55个部门,42种化石燃料燃烧与水泥生产过程排放总量^[25]。三个数据库都没有提供详细的工艺生产过程或工序数据。

在核算方法方面,三个数据库均基于《IPCC 清单指南》中排放因子法,即活动水平数据乘以排放因子(注:燃料的排放因子与含碳量、热值和氧化率等参数有关)。活动水平和排放因子数据来源或具体取值/计算方式略有不同,如 CEADs 利用我国最新的能源消耗量和实测排放因子均值来核算碳排放量^[6, 26],而 MEIC 中针对不同地区取值方式不同,如对于大部分国家,燃料热值数据来源于 IEA World Conversion Factors 数据库,含碳量取自《IPCC 清单指南》中推荐值,氧化率来自 CDIAC 数据库;对于中国,燃料热值和含碳量以省级温室气体清单指南为基础,并基于实测数据修正;氧化率则来自省级温室气体清单指南;对于部分新兴经济体国家,燃料热值和含碳量采用各国能源统计或提交至 UNFCCC 国家清单中提供值,

氧化率采用文献搜集的本土化数据^[27]。CHRED 活动水平数据主要依据 CHRED 3.0 数据库(<http://www.cityghg.com/>)和统计年鉴;排放因子主要源自《省级指南》,部分排放因子参考《中国温室气体清单研究》^[28-29]。

在数据来源方面,主要来源于《省级指南》、统计年鉴等,数据更本土化。其中 CEADs 中化石燃料消耗数据主要来源《中国能源统计年鉴》及各省份统计年鉴,对于某些年鉴中没有数据的省份或地区,采用2008年全国经济普查数据进行估算。MEIC 数据大都来源于其他数据库,其中国外数据来源于 IEA、CDIAC、《IPCC 清单指南》等,国内数据来源于《省级指南》、实测或中国碳核算数据库等。CHRED 数据则主要来源《省级指南》《中国城市统计年鉴》等。

2 国内外产品碳足迹平台建设

产品碳足迹涉及原辅料和能源开采、产品生产加工、储运、使用、废弃/回收等多个过程碳排放量,因此,为了获知工业过程/工序碳排放数据调研了产品碳足迹标准及数据平台。

2.1 产品碳足迹评价标准

目前,国际上应用最为广泛的产品碳足迹评价标准主要有3个,分别是英国标准协会发布的《PAS 2050: 2011 Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and

services》(简称“《PAS 2050》”)、国际标准化组织编制的《ISO 14067: Greenhouse gases—Carbon footprint of products—Requirements and guidelines for quantification》(简称“《ISO 14067》”)和《GHG Protocol Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard》。部分学者对三个标准从评估目的、适用范围、评估原则及步骤和系统边界等方面进行详细对比发现,三个标准评价方法均是基于生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA),即“自下而上”进行计算评估且覆盖范围较广,但未规定具体行业产品的精细化评估,容易导致相同产品碳足迹评估结果差异较大^[30-31]。

国内产品碳足迹核算及评价标准发展相对滞后,目前国内部分地方如上海、深圳等地发布适用于本地区产品的《产品碳足迹核算通则》《产品碳足迹评价通则》等标准,规定了产品碳足迹核算和评估的方法和要求。部分行业如食品行业发布《食品碳足迹评价技术通则》团体标准、钢铁行业发布了《钢铁产品制造声明周期评价技术规范(产品种类规则)》,支撑了具体行业产品碳排放量化评估,推动了行业低碳转型升级。但是,目前我国在国家层面和大部分行业仍缺乏产品碳足迹相关标准。随着欧盟碳关税的到来,急需建立高精度、国际互认的权威性碳足迹评估标准体系,以便更从容地应对国外绿色贸易壁垒。

2.2 国内外产品碳足迹平台建设现状

为了获知产品原辅料和能源开采、生产、废弃后处理、回用等各个过程碳排放详细数据信息,基于以上产品碳足迹核算标准,调研了国内外产品碳排放数据平台的建设情况。

目前国外公开的产品碳足迹数据平台很少,大多产品的碳足迹作为碳排放系数嵌入在生命周期评价软件的背景清单数据内。如常用的 LCA 数据库有瑞士的 Ecoinvent 数据库、德国 PE 公司的 GaBi 软件、丹麦的 LCA Food 数据库、美国的 USLCI 数据库、英国的 Boustead 数据库、荷兰 Leiden 大学环境科学中心开发的 SimaPro 软件和斯德哥尔摩环境研究所开发的 LEAP 模型等。这些数据库或软件一般需要用户自行建立产品生产工艺流程,输入能耗、物耗等相关参数进行建模,软件根据背景清单数据及核算方法计算出产品各个阶段碳排放量,但底层的背景数据未公开。许多学者从数据来源、准确性、数据量等不同方面进行对比分析发现,大多软件数据来源于文献报道、

研究报告等,实地调研数据很少^[32-33],即使输入相同数据,如果使用不同的 LCA 软件,获得结果也有差异^[34]。因此,建立国际通用的产品碳足迹评价标准或软件尤为重要。Meinrenken^[35]等依托企业向 CDP(Carbon Disclosure Project, CDP)披露平台提交的气候变化问卷,建立了一个包含来自 145 家公司、30 个行业组织和 28 个国家的 866 个产品碳足迹数据集,覆盖产品生命周期原料开采、加工、使用等不同阶段/价值链的碳排放量,但也未提供详细工序或生产各个阶段碳排放信息。

目前国内公开的产品碳足迹平台有中国产品全生命周期温室气体排放系数库(China Products Carbon Footprint Factors Database, CPCD)和钢铁行业发布的环境产品声明(Environmental Product Declaration, EPD)平台。其中 CPCD 基于《ISO14067》基本原则和方法,给出金属制品、机械和设备等 10 大类产品碳足迹,部分产品如钢铁给出了原料开采、运输、焦化、烧结、球团、高炉、炼钢和轧制等各个工序的碳排放量^[36],但大多数数据来源于文献,是否可以代表国内水平或者行业水平有待考证。钢铁行业 EPD 平台披露的产品信息包括产品基本信息,生产信息,生命周期评价信息,和环境绩效信息等,其中环境绩效信息中包括了该产品种类“从摇篮到大门”的全球变暖潜力,但未提供产品生产各工序碳排放信息^[36]。

国内生命周期评价软件有亿科环境科技有限公司与四川大学共同研发的 eBalance 和 eFootprint 软件、中国工程院牵头建立的中国煤炭开采全生命周期碳排放估算工具、生态环境部环境规划院建立的阿里云-能耗宝和工艺过程和产品使用温室气体在线清单核算平台等。以上计算工具与国外 LCA 评价软件相比,数据更符合中国工业实际情况,但仍然存在国内本土数据量不足、实测性数据较少等问题。

中国科学院化学化工科学数据中心研究团队充分认识到以上问题,先后部署了工业污染全过程防控综合信息平台与化工商品数据库。工业污染全过程防控综合信息平台是我国首个工业全过程污染防治综合信息数据库,主要涵盖我国重点行业相关企业从生产到三废处理整个流程的产排污、物质流以及碳排放等信息,其中碳排放信息模块主要涉及企业内部一次/二次资源生产过程或三废处理各个单元、工艺、流股碳排放详细信息(“大门到大门”)。化工商品数据库包含了

钢铁、锂电池、煤化工、有色等行业主要商品主要成分、生产企业、生产工艺、价格等基本信息模块和碳排放模块。碳排放模块包含了商品生产(“摇篮到大门”)和使用(“大门到使用”)碳排放强度,其中商品生产边界包括一次/二次原材料提取和加工、运输、企业生产和三废处理等过

程,商品使用指直接使用过程,并与工业污染全过程防控综合信息平台形成有效链接(如图1所示),展示了单元-工序-工艺-企业生产全过程和产品上下游供应链等不同尺度碳排放信息,且数据大都来源于企业实地调研信息,更符合我国工业实际碳排放情况。



图1 工业污染全过程防控综合信息平台与化工商品数据库碳排放模块整体设计思路

Fig. 1 The carbon emission section design ideas of the Industrial Whole Process Pollution Prevent and Control Comprehensive Information Platform and the Chemical Commodity Database

3 问题分析及展望

3.1 问题与建议

(1) 工业低碳公开数据资源难以统筹应用,建议构建国家级工业全过程低碳管控平台。国外数据平台布局较早,但存在数据非本土化、不完善、有待更新等问题;而我国工业生产情况复杂、工序较多,各部门在数据共享开放上缺乏动力,尚未形成有效的共享开放管理闭环,造成数据资源难以统筹应用。各工业部门之间公共能耗/物耗信息数据,难以明确划分至具体工序,导致工序碳排放相关数据不能准确获取、关键数据缺失。建议从国家层面统筹布局,建设碳排放基础数据的在线直报系统,规范企业碳排放数据采集及数据披露激励机制,将工艺过程与数据信息深度融合。在建立工业碳排放总量数据平台的基础上增加工业

过程数据,构建从原料-工艺-产品的国家级工业全过程低碳管控平台,实现数据资源公开统筹,促进上下游产业链协同减碳,为制定我国工业产品低碳发展战略提供依据。

(2) 工业低碳数据标准与数据平台管理体系不健全,建议加快与国际接轨,形成工业行业低碳标准体系与碳中和数据资源建设系列标准规范。目前我国工业过程与产品的低碳数据采集标准体系不健全,各部门按照自己的标准和方式进行数据采集,造成了数据分散、重复、多余、混乱,具体到工序的碳排放数据不够准确。建立主要单元/工序碳核算数据采集标准,保证数据录入和使用规范化,支撑企业精准识别系统内部碳排放的分布与全流程协同降碳与企业统筹上下游。完善跨部门、跨行业的数据标准体系,建立行业、部门、企业多层次的数据管理标准,强化数据资源汇聚共

享。尽快出台低碳管控平台数据分级分类的政策法规,明确可开放数据的范围,推进数据脱敏技术应用,化解制约公共数据开放所面临的企业秘密、国家安全等潜在风险。

(3)工业低碳科学评估体系尚不完备,建议形成我国工业行业碳排放科学评估体系。我国产品种类多且供应链长,排碳环节较多,大部分行业仍缺乏具体产品碳足迹评估相关标准,中国学者目前大多利用国外综合评估模型开展行业/产品碳排放核算及评估,缺少自主模型方法的底层创新,很难灵活嵌入或解释具有中国特色的政策影响传导关键机制,甚至部分国外学者从发达国家视角出发评估,导致结果可能出现系统性偏倚,如高估我国碳中和的减排潜力或低估减排成本,不利于形成科学合理的决策支撑。随着欧盟碳关税的到来,各类工业产品亟须建立高精度、国际互认的权威性碳足迹核算标准,自主研发并完善基于我国工业实际情景的综合评估模型。建议加快与国际接轨,构建国际互认的产品碳核算标准体系,如积极参与国际标准的制定,努力成为规则的制定者等。对出口产品开展国际认证,提高产品竞争力。同时在贯通整合经济-资源-环境系统相关的多学科理论和多层次模型的基础上,自主开发符合中国国情、具有重大应用价值的产品低碳综合评估模型及软件,支撑企业/行业评估“碳中和”目标的实现路径、直接与间接影响、优化协同方案等。

3.2 展 望

2023年3月7日,十四届全国人大一次会议提出组建国家数据局,体现了我国对数据资源整合与开发利用的高度重视。结合我国双碳目标和阶段性任务,本研究提出工业低碳数据资源建设与开发应用的发展路线图(如图2),从标准体系、数据平台和模型软件三方面协调有序发力,构建以跨行业产业链的纵向、横向耦合为着力点的多产业互联与高效耦合的行业低碳数据平台与多尺度综合评价软件,助力工业率先碳达峰。

到2025年,引导重点行业企业开发设备/装置数据接口,制定不同级别的数据采集、存储、处理和发布等关键环节标准规范,实现生产与运营全流程数据采集。建立基于工序/装置-工艺-企业不同层级的碳排放数据清单,实现企业内部数据的深度关联与实时监测。同时积极参与国际碳排放标准制定,提升我国构建碳排放核算体系的国际话语权,依据产业链图谱或供应链地图,建立

国际互认的工业产品碳排放核算标准。搭建产品上下游在线上报系统,实现不同行业/企业多源异构数据融合和汇聚。

到2030年,结合我国工业实际情况,建立工业低碳数据平台建设标准体系,包括数据汇聚、分级管理、公开共享与安全等方面。基于大量基础数据与行业特色,建成多级联动的国家级重点行业全过程低碳数据平台和主要工业产品碳足迹平台,实现企业碳排放总量、工序/装置碳排放强度及产品碳足迹统计。同时构建企业及产品碳足迹评价标准体系,对碳排放水平进行等级划分,为企业低碳技术研究和低碳产品研发提供理论指导,引导企业向低碳型企业倾斜,加快行业节能减排。基于以上数据平台和模型开发重点行业本土化低碳评价通用模型与软件,支撑企业精准对标与全流程协同降碳。

到2040年,随着绿电/绿氢替代、碳捕集和循环利用等节能降碳变革性技术大规模应用和跨领域、跨行业间协同/耦合减碳集成技术深入研发,须进一步考虑不同领域/行业技术耦合应用的碳排放水平。在行业碳排放评估体系构建的基础上,以系统性为原则,构建首个集“评价、优化、预测及潜力分析”等功能为一体的多行业低碳耦合评价及预测模型,评估并预测不同行业耦合技术的碳排放水平,充分发挥不同行业的资源能源优势和特征,挖掘行业耦合集成减碳潜力。

到2050年,支持优势行业上下游企业开放数据,建立互利共赢的共享机制,建成基于工艺过程的所有工业行业低碳数据耦合平台和基于供应链的产品碳足迹平台,实现工序-工艺-企业-行业不同尺度碳排放数可视可控以及精准对标,同时支撑企业监测、报告与核查等工作;完成开发多行业低碳耦合评价及预测软件,对多行业耦合碳排放水平进行评价、预测,支撑产品上下游开展碳足迹和企业全生命周期碳排放分析研究。

到2060年,在模型软件开发方面,综合考虑资源、环境、能源、成本等多个要素,建立科学的资源-环境-碳-经济多尺度评价指标体系,确定评价指标、权重,选择合适的综合评价模型。基于模型构建,对碳排放数据进行交叉验证,提升数据质量。开发一批面向不同行业/产品的资源-环境-碳-经济多尺度评价软件,实现企业及产品生产能源结构低碳化、资源利用高值化、废弃物回收资源化并兼具经济性,支撑企业挖掘减排潜力,制定最优减排策略。



图2 工业低碳数据资源建设与开发应用发展路线图

Fig. 2 Roadmap for the construction, development and application of industrial low-carbon data resources

4 结 论

本文进行了国内外碳排放总量和产品碳排放强度相关标准及相关的低碳数据平台调研。国内外不同工业行业数据平台核算精细尺度不一,核算方法大都基于《IPCC 清单指南》,均缺乏覆盖工艺过程或产品全链条的国家级权威性数据平台。国外数据平台数量较多,核算的温室种类较全且数据来源多为能源统计平衡表、年鉴等,但因活动水平与排放因子取值方式不一,导致测算结果不同。国内数据平台核算种类多集中于二氧化碳,数据来源多为省级指南、实测数据等,更适合我国国情。但我国工业行业工艺过程更为复杂,工艺过程基础数据资源分散、关键工艺碳排数据缺失,亟需加强碳排放核算能力建设,构建工业生产全过程碳排放数据平台,建立健全行业绿色产品综合评价体系。

参考文献 (References):

- [1] 张锁江, 张香平, 葛蔚, 等. 工业过程绿色低碳技术[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 511-521.
ZHANG Suojiang, ZHANG Xiangping, GE Wei, et al. Carbon neutral transformative technologies for industrial process [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 511-521.
- [2] 张笛, 曹宏斌, 赵赫, 等. 工业污染控制发展历程及趋势分析[J]. 环境工程, 2022, 40(1): 1-7+206.
ZHANG Di, CAO Hongbin, ZHAO He, et al. The development course and trend analysis on industrial pollution control [J]. Environmental Engineering, 2022, 40(1): 1-7+206.
- [3] 曹宏斌, 赵赫, 赵月红, 等. 工业生产全过程减污降碳: 方法策略与科学基础[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(2):

342-350.

CAO Hongbin, ZHAO He, ZHAO Yuehong, et al. Pollution-control and carbon reduction in whole industrial process: Method, strategy and scientific basis [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(2): 342-350.

- [4] 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: 335-338.
- [5] 李新创, 李冰, 霍咚梅, 等. 推进中国钢铁行业低碳发展的碳排放标准思考[J]. 中国冶金, 2021, 31(6): 1-6.
LI Xinchuang, LI Bing, HUO Dongmei, et al. Concerns on drafting carbon emission standard for improvement of China's iron and steel industry with sustainable development [J]. China Metallurgy, 2021, 31(6): 1-6.
- [6] SHAN Yuli, GUAN Dabo, ZHENG Heran, et al. China CO₂ emission accounts 1997-2015 [J]. Science Data, 2018, 5: 170201.
- [7] 李青青, 苏颖, 尚丽, 等. 国际典型碳数据库对中国碳排放核算的对比分析[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(3): 275-280.
LI Qingqing, SU Ying, SHANG Li, et al. Comparison analysis of China's emissions accounting by typical international carbon databases [J]. Climate Change Research, 2018, 14(3): 275-280.
- [8] 曲建升, 曾静静, 张志强. 国际主要温室气体排放数据集比较分析研究[J]. 地球科学进展, 2008, 23(1): 47-54.
QU Jiansheng, ZENG Jingjing, ZHANG Zhiqiang. Review of the international main green house gases emission databases [J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(1): 47-54.
- [9] United Nations Climate Change [DB/OL]. [2023-04-24]. https://di.unfccc.int/flex_cad.
- [10] LIU Zhu, CIAIS Philippe, DENG Zhu, et al. A near-real-time daily dataset of global CO₂ emission from fossil fuel and cement production [J]. Science Data, 2020, 7: 392.
- [11] Emission Factors Database [EB/OL]. (2022-09-16) [2023-04-24]. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/1020982c>

- 3b26-4eab-bf05-c877c64c9a62/EmissionsFactors_FAQ_vf.pdf.
- [12] Emissions Database for Global Atmospheric Research version v7.0[DB/OL]. (2022-09-16) [2023-04-24]. <http://data.europa.eu/89h/a7fb0a23-2f71-4d03-a73f-3b41ab62feb>.
- [13] 冯秀芬. 美国能源部能源信息管理局简介[J]. 中国能源, 1992(3): 49+28.
- [14] U.S. Energy Information Administration[DB/OL]. (2022-11-29) [2023-04-24]. <https://www.eia.gov/international/data/world/other-statistics/emissions-by-fuel?pd=40>.
- [15] Carbon Dioxide Information Analysis Center[DB/OL]. (2017-12-31) [2023-04-24]. https://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/emis/meth_reg.html.
- [16] United Nations Climate Change, China GHG profile[EB/OL]. [2023-04-24]. https://di.unfccc.int/ghg_profiles/nonAnnexOne/CHN/CHN_ghg_profile.xlsx.
- [17] LIU Zhu, PHILIPPE Giais, DENG Zhu, et al. Near-real-time data captured record decline in global CO₂ emissions due to COVID-19[EB/OL]. (2021-04-07) [2023-04-24]. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2004/2004.13614.pdf>.
- [18] SHAN Yuli, HUANG Qi, GUAN Dabo, et al. China CO₂ emission accounts 2016—2017 [J]. Science Data, 2020, 7: 54.
- [19] GUAN Yuru, SHAN Yuli, HUANG Qi, et al. Assessment to China's recent emission pattern shifts [J]. Earth's Future, 2021, 9(11): e2021EF002241.
- [20] LI Meng, LIU Huan, GENG Guannan, et al. Anthropogenic emission inventories in China: A review [J]. National Science Review, 2018, 5(4): 603.
- [21] XU Ruochong, ZHANG Qiang, TONG Dan, et al. Development of a new global CO₂ emission database with highly-resolved source category and sub-country information: Methodology and 1970—2021 emissions [C]. Vienna: EGU General Assembly 2023 Copernicus Meetings, 2023.
- [22] ZHENG Bo, TONG Dan, LI Ming, et al. Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18(19): 14095-14111.
- [23] 中国城市温室气体工作组[EB/OL]. (2022-10-07) [2023-04-24]. http://www.cityghg.com/file/jflyfox/cityghg/ueditor/file/20221016/20221016_164053_474470.xlsx.
- [24] SHAN Yuli, ZHOU Ya, MENG Jing, et al. Peak cement-related CO₂ emissions and the changes in drivers in China [J]. Journal of Industrial Ecology, 2019, 23: 959-971.
- [25] LIU Jun, TONG Dan, ZHENG Yixuan, et al. Carbon and air pollutant emissions from China's cement industry 1990—2015: Trends, evolution of technologies and drivers [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2021, 21(3): 1627-1647.
- [26] SHAN Yuli, LIU Jianghua, LIU Zhu, et al. New provincial CO₂ emission inventories in China based on apparent energy consumption data and updated emission factors [J]. Applied Energy, 2016, 184: 742-750.
- [27] MEICModel Tracking Anthropogenic Emissions [EB/OL]. (2010-01-01) [2023-04-24]. http://meicmodel.org.cn/?page_id=129&lang=en.
- [28] WANG Jinnan, CAI Bofeng, ZHANG Lixiao, et al. High resolution carbon dioxide emission gridded data for China derived from point sources [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(12): 7085-7093.
- [29] WANG Mingshu, CAI Bofeng. A two-level comparison of CO₂ emission data in China: Evidence from three gridded data sources [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 148: 194-201.
- [30] 李新创, 李晋岩, 霍咚梅, 等. 关于中国钢铁行业产品碳足迹评价标准化工作的思考 [J]. 中国冶金, 2021, 31(12): 1-7.
- LI Xinchuang, LI Jinyan, HUO Dongmei, et al. Concerns on drafting standard for evaluating product carbon footprint of China's steel industry [J]. China Metallurgy, 2021, 31(12): 1-7.
- [31] 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/OL]. 化工进展: 1-21 (2023-02-01) [2023-04-24]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2022-1501>.
- LIU Hanxiao, WU Liming, LIN Qingyang, et al. Carbon footprint assessment technology and its application in key industries [J/OL]. Chemical Industry and Engineering Progress: 1-21 (2023-02-01) [2023-04-24]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2022-1501>.
- [32] 郭崇振, 李启正, 刘灿, 等. 纺织产品生命周期评价系统与数据库分析 [J/OL]. 现代纺织技术: 1-8 (2023-02-23) [2023-04-24]. DOI:10.19398/j.att.202212023.
- WU Chongzhen, LI Qizheng, LIU Can, et al. Life cycle assessment system and database analysis of textile products [J/OL]. Advanced Textile Technology: 1-8 (2023-02-23) [2023-04-24]. DOI:10.19398/j.att.202212023.
- [33] 孙铤, 张鹏, 范亚丽. 中国汽车生命周期数据库建设的理论研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(S3): 427-430.
- SUN Xin, ZHANG Peng, FAN Yali. The theoretical study of the Construction of Chinese Automobile Life Cycle Database [J]. China Population Resources and Environment, 2014, 24(S3): 427-430.
- [34] PAUER E, WOHNER B, TACKER M. The influence of database selection on environmental impact results. Lifecycle assessment of packaging using GaBi, ecoinvent 3.6, and the environmental footprint database [J]. Sustainability, 2020, 12(23): 9948.
- [35] MEINRENKEN C J, CHEN D, ESPARZA R A, et al. The carbon catalogue, carbon footprints of 866 commercial products from 8 industry sectors and 5 continents [J]. Scientific Data, 2022, 9: 87.
- [36] 中国产品全生命周期温室气体排放系数库 [EB/OL]. (2022-01-05) [2023-04-24]. <https://www.cisa-epd.com/epd/epdSearch>.