

中国电力
Electric Power
ISSN 1004-9649, CN 11-3265/TM

《中国电力》网络首发论文

题目： 基于生命周期法的煤电碳足迹评估
作者： 刘含笑，单思珂，魏书洲，于立元，王帅，刘美玲，崔盈
网络首发日期： 2024-06-05
引用格式： 刘含笑，单思珂，魏书洲，于立元，王帅，刘美玲，崔盈. 基于生命周期法的煤电碳足迹评估[J/OL]. 中国电力.
<https://link.cnki.net/urlid/11.3265.TM.20240604.1605.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于生命周期法的煤电碳足迹评估

刘含笑^{1,2,3}, 单思珂^{1,2}, 魏书洲^{3,4}, 于立元¹, 王帅¹, 刘美玲¹, 崔盈¹

(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. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 北京 102206; 3. 华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 4. 三河发电有限责任公司, 河北 廊坊 065201)

摘要：碳足迹是量化碳排放的重要工具，能够为燃煤发电碳减排提供数据支撑。为研究燃煤机组的电力碳足迹及影响因素，基于生命周期法进行了实际案例计算及敏感性分析。碳足迹计算结果显示，300MW 燃煤发电机组的单位上网电量碳足迹为 0.932kgCO₂e/kWh，主要排放源为煤炭燃烧，占比约为 79%，其次是煤炭的上游生产和加工，占比约为 20%。碳足迹和碳核查的对比分析结论表明，减碳不仅应从燃煤电厂的常规减碳方式入手，降低上游的煤炭供给阶段排放仍是一种有效方案。

关键词：燃煤发电；碳足迹；生命周期法；温室气体；碳排放

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202404039

Carbon Footprint Assessment of Coal-fired Power Generation Based on Life-cycle Method

LIU Hanxiao^{1,2,3}, SHAN Sike^{1,2}, WEI Shuzhou^{3,4}, YU Liyuan¹, WANG Shuai¹,
LIU Meiling¹, CUI Ying¹

(1. Key Laboratory of Coal Fired Flue Gas Purification Equipment Research of Zhejiang Feida Environmental Protection Technology Co., Ltd, Zhuji 311800, China; 2. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University Beijing 102206; 3. State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 4. Sanhe Power Generation Co., Ltd, Langfang, 065201, China)

Abstract: Carbon footprint is an important tool to quantify carbon emissions, and can provide data support for carbon emission reduction in coal-fired power generation. In order to study the power carbon footprint and influencing factors of coal-fired units, practical case calculation and sensitivity analysis are conducted based on the life cycle method. The carbon footprint calculation results show that the carbon footprint of unit on-grid electricity of 300MW coal-fired generating unit is 0.932kgCO₂e/kWh. The main emission source is coal combustion, accounting for about 79%, followed by upstream production and processing of coal, accounting for about 20%. The comparative analysis of carbon footprint and carbon verification shows that carbon reduction should not only start with the conventional carbon reduction method of coal-fired power plants, but also be a very effective scheme to reduce the upstream coal supply stage emissions.

This work is supported by National Key Research and Development Plan of China (2022YFC3701501); Project Supported by Carbon Special Project of "Vanguard" Plan of Zhejiang Province (2022C03030).

Keywords: coal-fired power generation; carbon footprint; life cycle method; greenhouse gases; carbon emissions

0 引言

温室气体的过量排放问题，已经引起了世界的广泛关注^[1]，而 CO₂ 的过量排放是造成全球变暖的主要原因之一^[2]。各国在解决碳排放问题上逐步达成了国际共识，2020 年 9 月 22 日，国家主席习近平在第 75 届联合国大会上提出了双碳目标，即中国力争于 2030 年前 CO₂ 排放达到峰值、2060 年前实现碳中和。CO₂ 排放主要是由电力、水泥和钢铁等高排放行业的化石能源消耗造成的，2022 年由能源使用造成的碳排放达 34.3Gt，其中我国贡献近 1/3，排放达 10.5Gt^[3]。“十四五规划”中就重点提出要控制化石能源消费。在我国，煤炭消费是最大的碳排放源，每年因煤炭消费造成的碳排放量约占全国的 70%左右^[4]。而作为煤炭消费的主要用途，燃煤发电的碳排放问题一直不容小觑。据相关统计，中国电力行业碳排放约占全国总量的 35%，其中大部分来自燃煤发电^[5]。根据国际能源署(international energy agency, IEA)的数据，预计到 2026 年，我国煤电仍将占有 51%的发电容量占比^[6]。因此从长远来看，燃煤发电仍将在能源结构中长期具有相当占比，据测算，到 2030 年煤电年碳排放约为 36 亿 t，在发电行业碳排放总量占比超过 90%^[7]。《2030 年前碳达峰行动方案》中提出要推动煤电转型工作，开展电力节能降碳改造等，已经着重强调了煤电降碳相关工作对于实现双碳目标的重要性。

无论对于产品还是对于企业，精确的排放数据都是一切碳排放工作的前提。由发改委等部门联合印发的《关于加快建立统一规范的碳排放统计核算体系实施方案》中提到：“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。”我国电力行业已经率先启动全国碳交易体系，燃煤发电企业的碳核查工作也取得了一定成效。近几年煤电企业基本都完成了碳排行核算和报告工作，但在全球低碳发展不均衡，发达国家凭借碳关税等手段形成贸易壁垒的大背景下，出口产品的碳排放核算要求愈发严苛，核算范围趋向于全方位、全流程，作为绝大多数出口产品生产行业的上游产业，燃煤发电的现有碳核查体系不能满足国内外碳贸易的需求，现有碳排放数据不能满足工业产品排放上游数据的需求，燃煤发电产品亟须更加全面科学，覆盖全产业链的碳排放核算方式^[8]。碳足迹由于概念全面、覆盖广泛的优点，正满足目前燃煤发电企业的发展

需要，是接下来电力行业双碳目标推进工作的研究重点。发改委等部门在《关于加快建立产品碳足迹管理体系的意见》中提出到 2025 年若干重点产品碳足迹核算规则、标准和碳标识实现国际互认的主要目标。碳足迹是衡量产品或服务生命周期温室气体排放指标。燃煤发电的产品碳足迹可以定义为：在整个发电生命周期中所排放的温室气体总量，以每千瓦时发电的 CO₂ 当量重量[kgCO₂e/(kWh)]表示^[9]。燃煤发电的产品碳足迹可以挖掘发电工艺流程减碳潜力，提供减排方案数据支撑。同时，发达国家严苛的出口产品碳标识要求也使我国不得不将产品碳足迹作为下一步的战略部署目标，而电力碳足迹又是核算绝大多数工业品碳足迹的前提。因此，电力碳足迹评价工作有着不可替代的必要性。但是，目前燃煤发电碳足迹研究边界划分不全面，研究内容大多集中在燃煤发电的某个阶段或某一类别的环境影响上，导致在划分的边界和清单完整性不足，结果缺乏可信度。王斯一等^[10]对燃煤发电的碳足迹进行了生命周期分析，但边界划分存在不够完整的问题，尤其是煤炭的开采加工仅仅计入电耗，低估了上游碳足迹水平。贾亚雷等^[11]对不同发电方式进行了生命周期环境影响评价，其中评价燃煤发电方式时，边界划分较为全面，但清单分析却基本上完全忽略了燃煤发电的上游部分。因此，本研究以河北省某燃煤电厂项目为例，基于生命周期评价法(life cycle assessment, LCA)进行了燃煤发电产品碳足迹评价，从上游和核心两个环节分析燃煤机组的电力碳足迹及影响因素，对燃煤发电的温室气体排放进行完整生命周期评价，同时通过和传统的煤电碳核查的考核对象和指标的对比，为煤电减碳提供数据支撑和思路方向。

1 评价方法

1.1 生命周期法

生命周期法是一种“自下而上”的碳足迹评价方法，评价的内容包括产品或服务在原材料开采、生产、加工、储运、使用和废弃处理等过程中的温室气体排放^[12]。一个完整的 LCA 过程应至少包括目标与范围的界定、清单分析、影响评价和结果解释四个步骤^[13]。基于 LCA 的基本步骤，建立燃煤发电碳足迹的生命周期评价流程，如图 1 所示。

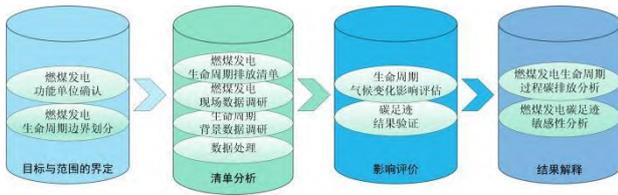


图 1 燃煤发电碳足迹生命周期评价流程

Fig. 1 LCA evaluation process of carbon footprint of coal-fired power generation

1.2 目标与范围的界定

1.2.1 功能单位

功能单位的选取考虑了以下因素：

(1)根据《环境管理 生命周期评价 原则与框架》(GB/T24040-2008)，功能单位的首要目的是为相关的输入和输出提供参考，应当保证结果的可比性^[14]。

(2)功能单位及研究边界需要基于研究目标确定，本研究的研究目标为核算燃煤发电产品的碳足迹，以挖掘煤电生命周期减碳潜力，为电力行业碳双控提供数据支持。

(3)以往的燃煤发电生命周期评价案例中，发电产品的功能单位对象一般选取机组的发电量或供电量，数量为 1kWh 或 TWh^[15-16]。

基于以上原因，以及本案例所能收集到的数据种类，确定本案例中功能单位选取为整个燃煤发电厂生产的 1kWh 供电量。

1.2.2 边界划分

产品碳足迹的研究边界要基于产品的生产工艺流程划分，应包括原材料的开采、制造、加工、包装、储存、使用和废弃等。燃煤发电的工艺流程如图 2 所示。

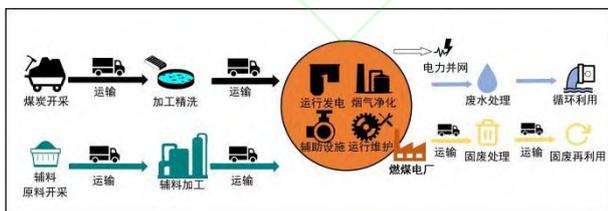


图 2 燃煤发电工艺流程

Fig. 2 Process flow of coal-fired power generation

本研究选取了 GHG protocol 所规定的范围 1、范围 2 和部分范围 3 包含的排放类别^[17]，根据燃煤发电的工艺流程划分边界，除图 2 中所示工艺流程中的所有生产单元过程外，还包括单元过程的能源输入、水的输入、废物处理及再利用，最终划分生

命周期评价边界，如图 3 中红框所示。同时参考国际环境产品认证所发布的电力相关产品种类规则 (product category rules, PCR) 《Electricity, steam and hot cold water generation and distribution》，并结合案例数据来源，将燃煤发电产品生命周期被分为上游和核心两个环节，不计算电力在电网的输送及用户使用，也不考虑电厂的建设退役回收阶段，属于“从摇篮到大门”式的使用寿命边界。

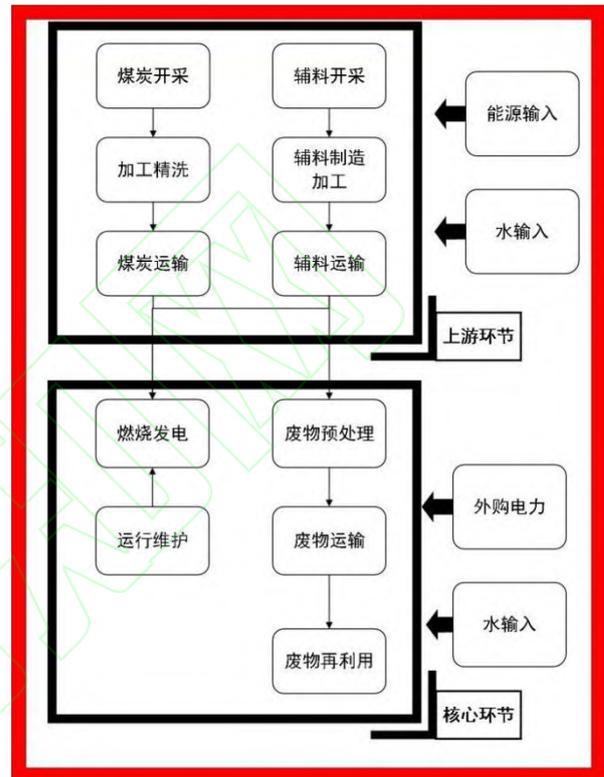


图 3 燃煤发电生命周期评价边界

Fig. 3 LCA boundary of coal-fired power generation

1.3 排放清单

根据排放方式不同，温室气体排放可以分为直接排放和间接排放。因此，依据物质流和能量流，对上游环节和核心环节分别进行直接排放和间接排放分析，排放清单如图 4 所示。

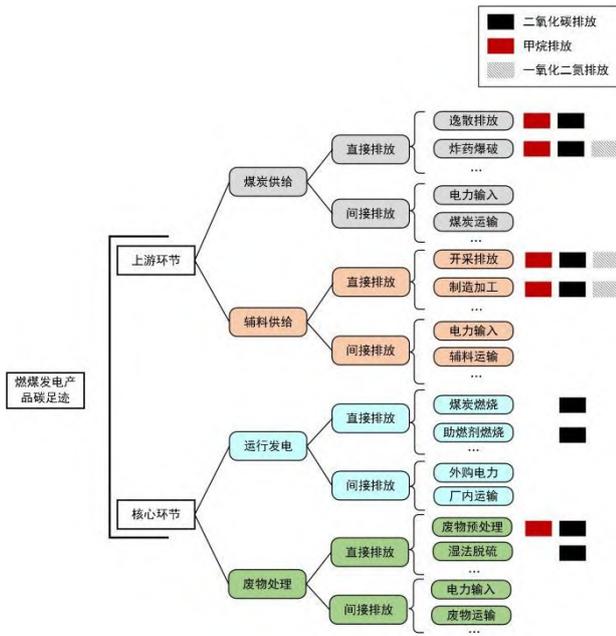


图 4 燃煤发电产品生命周期碳排放清单

Fig.4 Carbon emission list of the life cycle of coal-fired power generation products

上游环节主要涉及的排放可以分为两个过程：煤炭供给、辅料供给。煤炭供给过程中，涉及直接排放有煤炭开采及矿后的甲烷(CH₄)逸散和炸药爆破、化石燃料使用、煤炭自燃等，间接排放包括电力使用、煤炭运输等^[18]。辅料供给过程中，涉及直接排放有辅料原料开采排放、制造加工和化石燃料使用等，间接排放包括电力使用、辅料运输等，辅料包括助燃剂、脱硫剂等烟气处理辅料、润滑油等机组运行辅料等。

核心环节主要涉及的排放可以分为两个过程：运行发电、废物处理。运行发电过程涉及直接排放包括煤炭、助燃剂燃烧等，间接排放包括外购电力使用、厂内运输。燃煤电厂的厂自用电和并网电耗由于来自于燃烧排放，为避免重复计算，不列入排放清单中。废物处理过程涉及直接排放包括废物预处理、湿法脱硫^[19]、化石燃料使用等，间接排放包括电力使用、废物运输等，废物包括废气、废水和粉煤灰等固体废弃物^[20]。有些废物(如脱硫石膏)在再利用时进入了其他产品的生命周期，替代掉了原有的生产原料，从而产生了碳抵扣，这部分碳抵扣将作为负碳排放计入废物处理过程的直接排放中^[21]。

1.4 计算方法

碳足迹的数据处理计算主要采用排放因子法，

本案例中使用碳足迹省“尖兵”创新联合体团队自主开发的积木 LCA 计算工具进行计算。排放因子法来源于联合国政府间气候变化专门委员会(intergovernmental panel on climate change, IPCC)提供的温室气体排放核算指南^[22]，是一种广泛应用于生态足迹计算的方法，计算式见为^[23]

$$E = AD_i \times EF_i \quad (1)$$

式中： E 为温室气体排放量，tCO₂e； i 为单元过程； AD_i 为该单元过程的相关活动水平，根据活动类型而取不同单位，常见单位有 t、m³和 kWh 等； EF_i 为排放因子，根据活动类型而取不同单位，常见单位有 tCO₂e/t、tCO₂e/m³和 tCO₂e/kWh 等。

对于煤炭及助燃剂在锅炉燃烧的直接排放，采用《企业温室气体排放核算与报告指南 发电设施》中的方法计算，该方法基于煤炭实测数据，燃烧排放因子计算式为^[24]

$$EF_{\text{燃烧},i} = C_{ar,i} \times OF_i \times \frac{44}{12} \quad (2)$$

式中： $EF_{\text{燃烧}}$ 为燃烧排放因子，tCO₂e/t； i 为燃料种类，一般包括煤炭和柴油助燃剂两种； $C_{ar,i}$ 为该种类燃料单位含碳量，tC/t； OF_i 为该种类燃料碳氧化率，取电厂碳核查的机组实测值 98%。

对于间接排放和边界内其他类型的直接排放部分一律采用式(1)计算，根据不同的间接排放过程代入不同的活动水平数据和对应排放因子，如对运输过程排放和外购电力排放分别为

$$E_{\text{运输}} = AD_{\text{运输}} \times EF_{\text{运输}} \quad (3)$$

$$E_{\text{外购}} = AD_{\text{电}} \times EF_{\text{外购}} \quad (4)$$

式中： $E_{\text{运输}}$ 为运输过程排放，tCO₂e； $AD_{\text{运输}}$ 为单次载重和运输里程之积，t·km； $EF_{\text{运输}}$ 为运输排放因子，tCO₂e/(t·km)； $E_{\text{外购}}$ 为外购电力部分排放，tCO₂e； $AD_{\text{电}}$ 为外购电力量，MWh； $EF_{\text{外购}}$ 为外购电力排放因子，tCO₂e/MWh。

根据生命周期边界，燃煤发电的生命周期温室气体排放包括 CO₂、CH₄和 N₂O 三种，三者的 100 年全球变暖潜势值(global warming potential 100, GWP100)分别为 1、27 和 273^[24]，计算碳足迹总量时应使不同种类温室气体排放量乘以对应的 GWP100，最终的碳足迹计算结果以吨二氧化碳当量[tCO₂e]表示，根据供热比再对供电量和供热量的碳足迹进行分配，单位供电量碳足迹计算结果以单位千瓦时千克二氧化碳当量[kgCO₂e/kWh]表示。单

位供电量碳足迹的计算式为

$$E_{\text{单位}} = \frac{E_{\text{总}} \times (1-a)}{W_{\text{gd}}} \quad (5)$$

式中： $E_{\text{单位}}$ 为单位供电量碳足迹， $\text{kgCO}_2\text{e/kWh}$ ； $E_{\text{总}}$ 为燃煤发电总碳足迹， tCO_2e ； a 为供热比； W_{gd} 为燃煤电厂供电总量。

2 结果与分析

2.1 数据来源

排放计算数据包括现场数据和背景数据两种类型^[26]。现场数据主要包涵企业的生产数据，包括通过测量和调查等方式取得的清单上的所有的输入输出。背景数据来自数据库、国内外文献和已发布的标准指南等。

2.1.1 现场数据来源

本项目现场数据来源为河北省某燃煤电厂生产过程中实测，该燃煤电厂有 $2 \times 300\text{MW}$ 和 $2 \times 315\text{MW}$ 共四台凝汽式热电联产机组，以及共用的一套烟气处理设备，煤炭来自我国陕西省神东矿区。数据时间尺度选取 2022 年全年，获得方式为电厂自查，涉及到的主要现场数据如表 1 所示。

表 1 燃煤发电的现场数据

数据种类		数值
煤炭(烟煤)	用量/t	3.09×10^6
	元素碳含量/(tC/t)	0.54
	铁路运输里程/km	868.00
助燃剂(柴油)	用量/t	94.00
	元素碳含量/(tC/t)	0.86
	工艺水/t	1.69×10^7
辅料	尿素/t	941.00
	液氨/t	1.15×10^3
	石灰石/t	4.80×10^3
	各类用油/t	73.00
外购电	外购电/MWh	0
	上网电量/MWh	5.95×10^6
产品	供热量/GJ	1.29×10^{10}
	煤渣/t	7.30×10^4
副产品/废物	除尘灰/t	4.62×10^5
	石膏/t	8.40×10^4

2.1.2 背景数据

本项目的背景数据主要是来自 Ecoinvent3.8 数据库及国内外相关文献，并经比较后选取的符合电厂情况的碳排放因子，不同单元过程的碳排放因子如表 2 所示。其中粉煤灰、脱硫石膏等固废的排放因子采用系统扩展法计算，通过对文献中的单位排放结果分配后得到。系统扩展法是根据废物利用的实际用途，抵扣其所替代的产品的环境负荷。例如，对脱硫石膏进入下游建筑生命周期后，因此产生的碳抵扣量为其替代的石膏生产流程产生的碳排放值。

表 2 碳排放因子

单元过程	排放因子	来源
煤炭开采/($\text{kgCO}_2\text{e/kg}$)	0.499	[28]
铁路运输/($\text{tCO}_2\text{e}/(\text{t} \cdot \text{km})$)	10.000	[29]
货运/($\text{tCO}_2\text{e}/(\text{t} \cdot \text{km})$)	0.052	[30]
外购电/($\text{tCO}_2\text{e/MWh}$)	0.570	[31]
工艺水/($\text{kgCO}_2\text{e/kg}$)	1.905×10^{-3}	Ecoinvent3.8
尿素/($\text{kgCO}_2\text{e/kg}$)	2.898	Ecoinvent3.8
液氨/($\text{kgCO}_2\text{e/kg}$)	5.316	Ecoinvent3.8
脱硫石灰石生产/($\text{kgCO}_2\text{e/kg}$)	2.816×10^{-3}	Ecoinvent3.8
特种润滑油/($\text{kgCO}_2\text{e/kg}$)	1.457	Ecoinvent3.8
绝缘油/($\text{kgCO}_2\text{e/kg}$)	1.457	Ecoinvent3.8
柴油生产/($\text{kgCO}_2\text{e/kg}$)	0.853	[32]
除尘灰/($\text{kgCO}_2\text{e/kg}$)	-0.216	[33]
石膏/($\text{kgCO}_2\text{e/kg}$)	-0.099	[34]
粉煤灰/($\text{kgCO}_2\text{e/kg}$)	-0.253	[35]

2.2 与文献的结果对比分析

根据碳足迹的计算结果，2022 年的燃煤电厂发电产品的上网电量碳足迹总量为 $7.4 \times 10^6 \text{ tCO}_2\text{e}$ 。本案例电厂的供热比为 0.244，在对燃煤发电输出的电热产品基于供热比进行热电分摊后，得到整个燃煤电厂的单位上网电量碳足迹结果为 $0.932 \text{ kgCO}_2\text{e/kWh}$ 。为确定碳足迹计算结果的可信程度，将碳足迹结果与文献进行对比分析，并从评价方法、机组容量及类型等方面分析差异原因。

LIANG 等^[36]对不同类型的机组进行了碳足迹

生命周期评价, 其中 300MW 的亚临界机组和 600MW 的超临界机组的单位碳足迹结果为 $0.971\text{kgCO}_2\text{e/kWh}$ 和 $0.830\text{kgCO}_2\text{e/kWh}$ 。跟本文相比, 该结果是偏低的, 尤其是和本文尤其类似的 300MW 的亚临界机组评估结果。原因是上游环节的煤炭开采排放估算较低, 在总排放占比 8%, 本文中这一结果约为 15%。该文献中边界选取围绕煤炭流向, 忽略了辅料流向和废物流向两部分, 本文对此边界清单进行了补足, 虽然这并不是结果差距的主要原因, 但从边界清单方面, 本文划分的更加科学, 对类似机组的碳足迹结果的可信性有了很大的提升, 对电厂碳足迹评估方法的标准化和推广可能具有较大贡献。刘韵等^[37]对山西省某电厂进行了碳足迹的生命周期评估, 结果为 $0.800\text{kgCO}_2\text{e/kWh}$, 之所以结果大幅度偏低, 是因为文献计算时尚处于国内碳足迹研究不足的时间, 所用的排放因子基本来自于行业总值估算, 并且存在和文献[36]一样的问题, 对边界的划分仅仅集中于煤炭而失去了对燃煤发电碳足迹中其他物质流的关注。

HAN 等^[38]对韩国某 500MW 超临界燃煤电厂进行了生命周期环境评价, 结果为 $1.03\text{kgCO}_2\text{e/kWh}$, 这是因为虽然电厂为超临界机组, 但建造年份久, 电厂老化导致了热效率的大幅度降低, 因此导致直接燃烧排放很高。LETITIA 等^[39]对 385MW~545MW 超临界机组进行的碳足迹评估结果为 $0.970\text{kgCO}_2\text{e/kWh}$, 工况和其他数据与本文类似, 可能是由于文献考察的纯发电机组, 而本文的热电联产机组提高了电厂的热效率, 从能量利用的角度降低碳足迹结果。这两份文献表现了机组状况对于碳足迹值的影响, 并显示了电厂降低碳足迹努力的方向是提高热效率。

RIZWAN 等^[40]对巴基斯坦的 660MW 超临界电厂进行了碳足迹评估, 结果仅有 $0.751\text{kgCO}_2\text{e/kWh}$, 这是因为该文献所研究的超临界电厂机组热效率高于本文的亚临界机组, 这点可以从电煤比的对比看出, 文献 [40] 中单位供电量的煤耗量为 0.375t/MWh , 本文为 0.518t/MWh , 差距这么大的原因是文献[40]中的超临界电厂是模范型的, 投入高, 即使与其他超临界的电厂相比热效率仍然更高, 可以达到 44%, 而文献[36]和[38]中这一数据分别为 41% 和 38%。这更说明了降低热效率对于降低碳足迹的重要性和有效性。为了和本文的亚临界机组类型的热效率比较, 在此举例。Joris 等^[41]对荷兰某 460MW 亚临界电厂进行碳足迹评估, 结果为

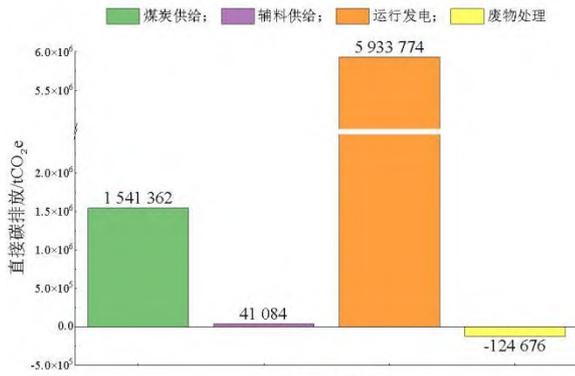
$1.092\text{kgCO}_2\text{e/kWh}$, 和本文相比, 该机组同为亚临界类型, 且容量相近, 之所以比本文结果高, 是因为热效率较低, 仅有 35%, 本案例在 38%~39%。

综上所述, 碳足迹计算结果差异主要是边界划分、煤质和机组工艺、数据来源三方面导致的, 边界方面, 由于缺乏相关数据, 本案例并未将建设期纳入碳足迹, 导致总碳足迹结果理论上偏低, 一般电厂建设的碳足迹值占总碳足迹的 1%左右^[42], 因此建设期不纳入边界的影响是可接受的; 煤质和机组工艺方面, 仅影响碳足迹计算结果, 此处不做具体分析; 数据来源方面, 现场数据中均为电厂自采, 且通过核查验证, 因此现场数据质量较高, 背景数据中, 部分排放因子来自于国外数据库, 导致本土性不足, 影响了结果的可信度。之所以选择国外数据库, 是因为国内缺少可靠的本土数据库, 国内虽然在筹建相关的燃煤发电排放因子数据库, 目前也存在许多排放因子的研究, 但无论是系统性还是可信性和国际上已经广泛商用的数据库相比仍然存在不小的差距。

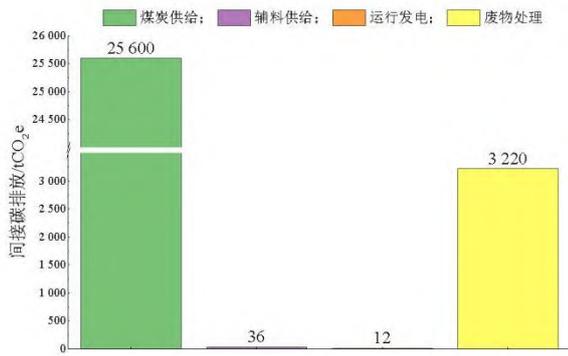
通过文献结果的对比分析, 本文对边界清单划分的严谨性和完整性具有独特的优势, 对我国电厂碳足迹评估的方法标准化具有较大贡献。

2.3 过程排放分析

综合排放清单和碳足迹的计算结果, 针对边界过程进行排放对比分析, 得到燃煤发电生命周期过程排放结果, 如图 5 所示。



a) 不同过程的直接碳排放



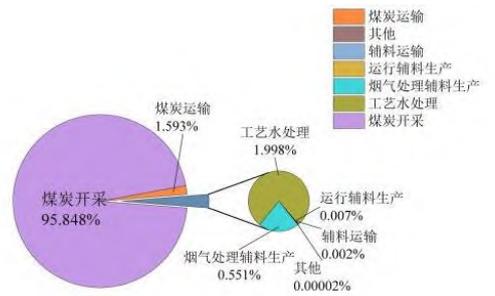
b) 不同过程的间接碳排放

图 5 燃煤发电生命周期过程排放分析

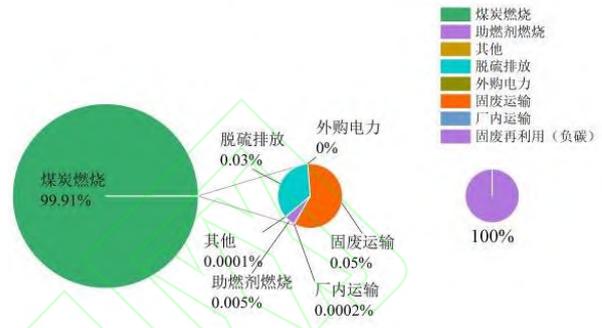
Fig. 5 Emission analysis of the life cycle process of coal-fired power generation

由图 5 可见，燃煤发电产品的生命周期碳排放以直接排放为主，占总排放的 99% 以上，间接排放总量不足 1%。直接排放中，运行发电过程占比最大，占比接近 80%。间接排放中，煤炭供给过程占比最大，占比 88% 左右。

为了深度溯源过程排放，根据排放清单对碳足迹计算结果进行了进一步分析，得到本案例的燃煤发电生命周期清单排放分析结果，如图 6 所示。



a) 上游环节碳排放占比



b) 核心环节碳排放占比

图 6 燃煤发电生命周期清单排放分析

Fig. 6 Emission analysis of the life cycle inventory of coal-fired power generation

由图 5 及图 6 得出以下分析结论：在上游环节中，煤炭开采造成的间接排放占上游环节碳足迹绝大部分，辅料生产部分碳足迹占比不足 3%；在核心环节中，煤炭燃烧造成的直接排放占核心环节碳足迹绝大部分，废物利用部分碳足迹绝对值占比超过 2%；整体来看，直接排放是燃煤发电生命周期的主要碳排放方式，占据总碳足迹的 99%，其中煤炭燃烧造成的直接排放占绝大部分，占比在 79% 左右。其次是煤炭开采造成的直接排放，占比超过 20%。燃煤发电厂的固体废物再利用是燃煤发电生命周期中的唯一碳抵消源，碳抵消量可以达到总碳足迹的 2%。

2.4 与碳核查的对比

燃煤发电的碳排放核查和碳足迹评估的排放组成高度重合，都以直接燃烧为主。因此，碳排放核查和碳足迹结果的特征应该有相似之处，但机组参数对结果的影响也存在细节上的不同。例如，在单位供电碳排放强度不变的情况下，增加供电量将导致使用煤炭量的增加，此时由于上游环节的煤炭供给过程的碳排放不可忽视，造成单位供电量碳足迹结果的上升。本节针对燃煤发电的机组碳排放核

查和碳足迹评估的考核指标,分析其中的联系性和差异性。

根据过程排放分析结论,燃煤发电生命周期的碳足迹集中于煤炭燃烧和煤炭开采的直接排放,这部分排放与电厂的煤质、煤耗量和利用率等密切相关^[43]。本节利用燃煤电厂不同机组(机组1—机组4)的数据,综合理论和数据对比验证,得到机组参数对碳足迹的关键影响情况。

根据过程排放分析,燃煤发电的碳足迹中,煤炭开采、加工、运输和燃烧环节的碳排放之和占总碳足迹的97%以上,如果忽略掉其他部分的碳排放后,燃煤发电碳足迹总量的计算式为

$$E_{\text{总}} = FC_{\text{煤}} \times (EF_{\text{开采}} + EF_{\text{运输}} + EF_{\text{燃烧}}) \quad (6)$$

式中: $E_{\text{总}}$ 为碳足迹总量, tCO_2e ; $FC_{\text{煤}}$ 为机组煤炭消耗量, t ; $EF_{\text{开采}}$ 为煤炭开采排放因子, $\text{tCO}_2\text{e}/\text{t}$; $EF_{\text{运输}}$ 为煤炭运输排放因子, $\text{tCO}_2\text{e}/(\text{t} \cdot \text{km})$; $EF_{\text{燃烧}}$ 为煤炭燃烧排放因子, $\text{tCO}_2\text{e}/\text{t}$ 。

发电直接碳排放计算式见式(7)。

$$E_{\text{fd},i} = E_{\text{直},i} \times (1 - a_i) = W_{\text{fd},i} \times S_{\text{fd},i} \quad (7)$$

式中: $E_{\text{fd},i}$ 为机组发电燃烧碳排放量, tCO_2 ; i 为机组编号; $E_{\text{直},i}$ 为机组燃烧碳排放量, tCO_2 ; a_i 为机组供热比, %; $W_{\text{fd},i}$ 为机组发电量, MWh ; $S_{\text{fd},i}$ 为机组发电碳排放强度, tCO_2/MWh 。

综合式(5)、式(6)和式(7),将煤炭开采、加工、运输和燃烧的排放因子之和设为煤炭排放相关因子 $EF_{\text{煤炭}}$,得到机组单位供电量碳足迹的计算式为

$$E_{\text{单位},i} = \frac{S_{\text{fd},i}}{1 - \omega_i} \times \frac{EF_{\text{煤炭}}}{EF_{\text{燃烧}}} \quad (8)$$

式中: $E_{\text{单位},i}$ 为机组单位供电量碳足迹, tCO_2e ; ω_i 为机组自用电量占发电量的比率, %; $EF_{\text{煤炭}}$ 为煤炭排放相关因子, $\text{tCO}_2\text{e}/\text{t}$ 。

将式(8)中前面的部分作为相关系数 X_i ,根据生命周期方法,计算燃煤电厂机组1—机组4的单位供电碳足迹,并与相关系数联系对比,二者关系如图7所示。

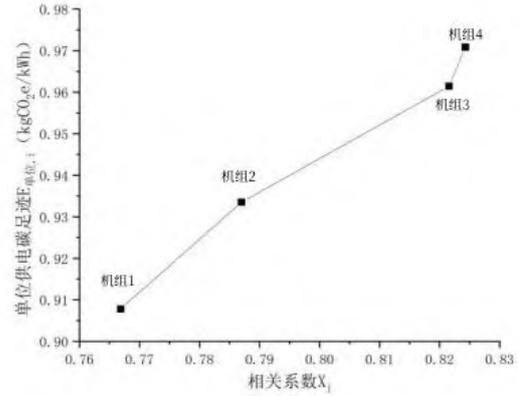


图7 机组1—机组4的单位供电碳足迹和相关系数关系

Fig. 7 Carbon footprint of unit power supply and correlation coefficient of unit 1—unit 4

根据式(6)、式(8)和图7可以看出,单位供电碳足迹和机组的发电碳排放强度 $S_{\text{fd},i}$ 、机组的自用电量比率 ω_i 和煤炭的各阶段排放因子 $EF_{\text{煤炭}}$ 有关。 $S_{\text{fd},i}$ 说明燃煤电厂的碳核查结果和碳足迹具有相当程度的相似性。 ω_i 显示了碳核查与碳足迹选取基准的不同,碳核查因为主要考核对象为燃煤电厂,考核的最终目的是限制燃煤电厂的碳排放,因此碳排放以单位发电量为基准^[44],而电力碳足迹的评价目的是为下游产品提供数据基础,需要从产品端评价,因此电力碳足迹以单位供电量为基准。 $EF_{\text{煤炭}}$ 则显示了机组的碳排放核查与碳足迹评估的主要不同,差异原因是由边界划分不同导致的。

由碳核查和碳足迹的对比可知,燃煤发电在从碳足迹角度去推进减碳工作时,除了根据碳核查分析的常规手段,如保障高负荷系数^[45]、减少供热比^[46]等,还应该从生命周期的角度考虑,降低机组自用电量,通过降低能耗保障燃煤供给阶段的低碳排放。

3 结论

本文基于生命周期理论,对燃煤发电进行了碳足迹评价方法的研究。围绕河北省某燃煤发电厂实际案例,通过目标与范围的界定、清单分析、影响评价和结果解释等步骤,完成了“从摇篮到大门”的碳足迹评价工作,得到单位上网电量碳足迹为 $0.932\text{kgCO}_2\text{e}/\text{kWh}$,并得出以下结论。

1) 燃煤发电的碳足迹主要集中在核心阶段的燃烧直接排放,占总碳足迹的80%左右,但并不是通常认为的95%以上。这是因为煤炭开采环节存在

大量耗能和逸散排放，煤炭在上游过程的碳排放量不容忽视。

2) 通过文献的结果对比，降低燃烧直接排放是电厂降低碳足迹的有效手段。通过 CCUS 等技术手段可以有效的降低直接排放，推进现有的 CCUS 技术发展，通过在建设初期提供政策补贴、推进二氧化碳的商业化利用等方式降低电厂的经济性损失，提高 CCUS 的普及率，可以有效降低电厂的直接碳排放。

3) 燃煤发电的碳足迹降低不仅依赖常规的电厂降碳手段。由于上游环节的煤炭相关排放也具有较高占比，因此建议未来的政策方向加强上游约束，通过碳标签等方式推进煤炭生产相关企业的降碳工作，达到电力生产全产业链降碳的目的。

参考文献：

- [1] HORTON D E, JOHNSON N C, SINGH D, et al. Contribution of changes in atmospheric circulation patterns to extreme temperature trends[J]. *Nature*, 2015, 522: 465-469.
- [2] 韩昭庆. 《京都议定书》的背景及其相关问题分析[J]. *复旦学报(社会科学版)*, 2002, 44(2): 100-104. HAN Zhaoqing. Analysis of the background and related issues of the Kyoto protocol[J]. *Fudan Journal (Social Sciences Edition)*, 2002, 44(2): 100-104.
- [3] Energy Institute. Statistical Review of World Energy 2023[EB/OL]. (2023-06-01) [2024-04-30]. <https://kpmg.com/cn/zh/home/campaigns/2023/10/statistical-review-of-world-energy-2023.html>.
- [4] 燕志鹏, 于泽民, 顾新莲. 我国碳排放价格与煤炭期货价格的传导机制研究[J]. *经济问题*, 2022(6): 67-74. YAN Zhipeng, YU Zemin, GU Xinlian. Research on conduction mechanism between carbon price and coal future price in China[J]. *On Economic Problems*, 2022(6): 67-74.
- [5] 王一蓉, 陈浩林, 林立身, 等. 考虑电力行业碳排放的全国碳价预测[J]. *中国电力*, 2024, 57(5): 79-87. WANG Yirong, CHEN Haolin, LIN Lishen, et al. National carbon price prediction considering carbon emissions from the power industry[J]. *Electric Power*, 2024, 57(5): 79-87.
- [6] IEA. Electricity 2024[EB/OL]. (2024-01-04) [2024-04-30]. <https://www.iea.org/reports/electricity-2024>.
- [7] 王月明, 姚明宇, 张一帆, 等. 煤电的低碳化发展路径研究[J]. *热力发电*, 2022, 51(1): 11-20. WANG Yueming, YAO Mingyu, ZHANG Yifan, et al. Study on low-carbon development path of coal-fired power generation[J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(1): 11-20.
- [8] 汤芳, 代红才, 张宁, 等. 能耗双控向碳排放双控转变影响分析及推进路径设计[J]. *中国电力*, 2023, 56(12): 255-261. TANG Fang, DAI Hongcai, ZHANG Ning, et al. Effect analysis and promotion path design for transformation from energy consumption “dual control” to carbon “dual control”[J]. *Electric Power*, 2023, 56(12): 255-261.
- [9] METZ B, KUIJPERS L, SOLOMON S, et al. IPCC/TEAP special report on safeguarding the ozone layer and the global climate system: issues related to hydrofluorocarbons and perfluorocarbons[M]. Cambridge: Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change [M] Cambridge University Press, 2005.
- [10] 王斯一, 张彩虹, 米锋. 资源价值流视角下发电企业碳足迹与经济成本评价: 燃煤发电与生物质发电比较研究[J]. *工业技术经济*, 2018, 37(12): 78-85. WANG Siyi, ZHANG Caihong, MI Feng. Evaluation of carbon footprint and economic cost from the perspective of resource value flow of power generation enterprises[J]. *Journal of Industrial Technological Economics*, 2018, 37(12): 78-85.
- [11] 贾亚雷, 王继选, 韩中合, 等. 基于 LCA 的风力发电、光伏发电及燃煤发电的环境负荷分析[J]. *动力工程学报*, 2016, 36(12): 1000-1009. JIA Yalei, WANG Jixuan, HAN Zhonghe, et al. Analysis on environmental load of wind, PV and coal-fired power generation based on life cycle assessment[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2016, 36(12): 1000-1009.
- [12] 宋国辉, 唐璐, 姜武, 等. 2×200MW 级某天然气热电联产项目的生命周期环境影响评价[J]. *中国电力*, 2014, 47(12): 149-155. SONG Guohui, TANG Lu, JIANG Wu, et al. Life-cycle

environmental impact assessment of a typical 2 × 200 MW natural gas combined cycle-combined heat and power plant[J]. *Electric Power*, 2014, 47(12): 149-155.

[13] 刘顺妮, 林宗寿, 张小伟. 硅酸盐水泥的生命周期评价方法初探[J]. *中国环境科学*, 1998, 18(4): 328-332.

LIU Shunni, LIN Zongshou, ZHANG Xiaowei. Studies on the life circle assessment of Portland cement[J]. *China Environmental Science*, 1998, 18(4): 328-332.

[14] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 环境管理 生命周期评价 原则与框架: GB/T 24040—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and frameworks: GB/T 24040—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.

[15] TONG R P, WANG Y R, ZHAO X, et al. Modeling health impacts of air pollutant emissions from the coal-fired power industry based on LCA and oriented by WTP: a case study[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2022, 29(23): 34486-34499.

[16] MODAHL I S, ASKHAM C, LYNG K A, et al. Weighting of environmental trade-offs in CCS—an LCA case study of electricity from a fossil gas power plant with post-combustion CO₂ capture, transport and storage[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2012, 17(7): 932-943.

[17] SCHMIDT M, NILL M, SCHOLZ J. Determining the scope 3 emissions of companies[J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2022, 45(7): 1218-1230.

[18] 张振芳. 露天煤矿碳排放量核算及碳减排途径研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.

ZHANG Zhenfang. Study on carbon emissions accounting and carbon emission reduction approach of surface coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013.

[19] 邵志翔, 亢银虎, 卢啸风. 计及脱硫方式的CFB锅炉碳排放规律研究[J]. *电力学报*, 2023, 38(4): 278-286.

SHAO Zhixiang, KANG Yinhu, LU Xiaofeng. Study on carbon emission law of CFB boiler considering desulfurization method[J]. *Journal of Electric Power*, 2023, 38(4): 278-286.

[20] VASSILEV S V, VASSILEVA C G. A new approach for the classification of coal fly ashes based on their origin, composition, properties, and behaviour[J]. *Fuel*, 2007, 86(10/11): 1490-1512.

[21] YAN P F, MA Z G, LI H B, et al. Laboratory tests, field application and carbon footprint assessment of cement-stabilized pure coal solid wastes as pavement base materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 366: 130265.

[22] CELLURA M, CUSENZA M A, LONGO S. Energy-related GHG emissions balances: IPCC versus LCA[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 628: 1328-1339.

[23] 刘明达, 蒙吉军, 刘碧寒. 国内外碳排放核算方法研究进展[J]. *热带地理*, 2014, 34(2): 248-258.

LIU Mingda, MENG Jijun, LIU Bihan. Progress in the studies of carbon emission estimation[J]. *Tropical Geography*, 2014, 34(2): 248-258.

[24] 中华人民共和国生态环境部. 企业温室气体排放核算与报告指南发电设施[R/OL]. (2022-12-21) [2023-06-30].

https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202212/t20221221_1008430.html.

[25] ROSENTERETER J A, LARUELLE G G, BANGE H W, et al. Coastal vegetation and estuaries are collectively a greenhouse gas sink[J]. *Nature Climate Change*, 2023, 13(6): 579-587.

[26] ZAMPORI L, PANT R. Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method[M]. Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2019.

[27] 中国工业节能与清洁生产协会. T/CIECCPA 055-2023 燃煤发电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, 2023: 4-5.

[28] TAO M, CHENG W Q, NIE K M, et al. Life cycle assessment of underground coal mining in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 805: 150231.

[29] SONG X C, DU S, DENG C N, et al. Carbon emissions in China's steel industry from a life cycle perspective: Carbon footprint insights[J]. *Journal of*

Environmental Sciences, 2025, 148: 650-664.

[30] 彭美春, 朱兵禄, 胡红斐, 等. 重型货运车辆碳排放特性研究[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(1): 269-272.

PENG Meichun, ZHU Binglu, HU Hongfei, et al. Study on the carbon emission characteristics of the heavy duty freight trucks[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(1): 269-272.

[31] 生态环保部. 关于做好2023--2025年发电行业企业温室气体排放报告管理有关工作的通知[EB/OL]. (2023-02-04) [2023-10-23]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk06/2023-02/t20230207_1015569.html.

[32] 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.

[33] OROZCO C, BABEL S, TANGTERMSIRIKUL S, et al. Comparison of environmental impacts of fly ash and slag as cement replacement materials for mass concrete and the impact of transportation[J]. Sustainable Materials and Technologies, 2024, 39: e00796.

[34] 李莹, 段鹏选, 倪文, 等. 基于生命周期的工业副产石膏制备胶凝材料碳足迹评价[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(6): 1921-1930.

LI Ying, DUAN Pengxuan, NI Wen, et al. Carbon footprint assessment of cementitious materials prepared from industrial by-product gypsum based on life cycle[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(6): 1921-1930.

[35] NATH P, SARKER P K, BISWAS W K. Effect of fly ash on the service life, carbon footprint and embodied energy of high strength concrete in the marine environment[J]. Energy and Buildings, 2018, 158: 1694-1702.

[36] LIANG X Y, WANG Z H, ZHOU Z J, 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.

[37] 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.

[38] JUNG H S, RYOO S G, KANG Y T. Life cycle environmental impact assessment of Taean coal power plant with CO₂ capture module[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 357: 131663.

[39] PETRESCU L, BONALUMI D, VALENTI G, et al. Life Cycle Assessment for supercritical pulverized coal power plants with post-combustion carbon capture and storage[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 157: 10-21.

[40] RASHEED R, JAVED H, RIZWAN A, et al. Life cycle assessment of a cleaner supercritical coal-fired power plant[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 279: 123869.

[41] KOORNNEEF J, VAN KEULEN T, FAAIJ A, et al. Life cycle assessment of a pulverized coal power plant with post-combustion capture, transport and storage of CO₂[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2008, 2(4): 448-467.

[42] WU X D, GUO J L, CHEN G Q. The striking amount of carbon emissions by the construction stage of coal-fired power generation system in China[J]. Energy Policy, 2018, 117: 358-369.

[43] 孙友源, 郑张, 秦亚琦, 等. 火电机组碳排放特性研究及管理建议[J]. 中国电力, 2018, 51(3): 144-149, 169.

SUN Youyuan, ZHENG Zhang, QIN Yaqi, et al. Study on carbon emission characteristics and suggestions on carbon emission management of coal-fired power plant[J]. Electric Power, 2018, 51(3): 144-149, 169.

[44] 宋铜铜. 燃煤电厂碳排放强度核算及影响因素研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.

SONG Tongtong. Study on accounting and influencing factors of carbon emission intensity of coal-fired power plants[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.

[45] 郭喜燕, 刘嘉康, 白雪, 等. 基于碳排放特性及碳交易规则的热电联产机组经济性分析[J]. 热力发电, 2023, 52(4): 14-23.

GUO Xiyan, LIU Jiakang, BAI Xue, et al. Economic analysis of cogeneration units based on carbon emission characteristics and carbon trading rules[J]. *Thermal Power Generation*, 2023, 52(4): 14-23.

[46] 王宁玲, 刘嘉康, 陈宏彬, 等. 计及碳交易和调峰灵活性的多场景热电负荷优化分配[J]. *华北电力大学学报(自然科学版)*, 2023, 50(6): 76-84.

WANG Ningling, LIU Jiakang, CHEN Hongbin, et al. Optimal thermoelectric load dispatching and operation considering carbon trading and peak shaving[J]. *Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition)*, 2023, 50(6): 76-84.

作者简介:

刘含笑(1987—), 男, 通信作者, 博士, 高级工

程师, 从事大气污染治理及双碳技术研发研究, E-mail: gutounan@163.com;

单思珂(2000—), 男, 硕士研究生, 从事电力碳足迹全生命周期评估研究, E-mail: 1179925720@qq.com。

基金项目及重大科研攻关项目

浙江省“尖兵”计划项目(No.2022C03030); 国家重点研发计划(No.2022YFC3701501)。

This work is supported by by Carbon Special Project of "Vanguard" Plan of Zhejiang Province (No.2022C03030); National Key Research and Development Plan of China (No.2022YFC3701501).

