

电力系统碳排放核算标准对比分析

易俊, 孙浩然, 林伟芳, 苗博, 邢颖, 刘超

(中国电力科学研究院有限公司, 北京市 海淀区 100192)

Comparative Analysis of Carbon Emission Accounting Standards for Power Systems

YI Jun, SUN Haoran, LIN Weifang, MIAO Bo, XING Ying, LIU Chao

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: At present, the carbon emission accounting of power systems is one of the basic works for realizing the "double carbon target." This paper analyzes the carbon emission accounting standards and methods of the power system from the perspective of source, network, and load, starting from the composition structure of the power system. First, international and domestic carbon emission standards are categorized according to methodologies, and comparative analyses are conducted. On the source side, a comparative analysis of the standards is carried out in terms of accounting boundaries, greenhouse gases, and the selection of relevant parameters; on the network side, a detailed introduction of relevant standards issued for the domestic power enterprises is given; On the load side, the classification and application of grid emission factors are summarized. On this basis, the principle and status of research and application of carbon trajectory tracking, a whole-process carbon emission tracking method for power systems, are summarized and organized in detail. Finally, the carbon emission accounting of the power system is summarized and prospected. The relevant research results can provide a reference for the establishment of the carbon emission accounting system of China's electric power system and help the electric power industry to reduce carbon emissions.

KEY WORDS: power system; source-network-load; carbon accounting; grid emission factors; carbon trajectory tracking

摘要: 现阶段, 对电力系统进行碳排放核算是实现“双碳目标”的基础工作之一。该文从电力系统的构成出发, 从源、网、荷 3 个角度对电力系统的碳排放核算标准以及方法展开分析。在对国际国内碳排放核算标准按方法学进行分类对比的基础上, 在源侧, 从核算边界、温室气体种类以及参数选取方面开展了各标准之间的对比分析; 在网侧, 对国内针对电网企业出台的碳排放核算标准进行了详细的介绍; 在荷侧,

对电网排放因子的分类和应用进行了综述。在此基础上, 对碳轨迹追踪该类电力系统全流程碳排放追踪方法的原理和研究现状以及应用场景进行了详细的归纳整理。最后, 对电力系统的碳排放核算进行了总结与展望。相关研究成果可为我国电力系统碳排放核算体系的建立提供参考, 助力电力行业的降碳减排。

关键词: 电力系统; 源网荷; 碳排放核算; 电网排放因子; 碳轨迹追踪

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0386

0 引言

近年来, 由全球变暖所造成的极端天气频发, 控制温室气体的排放, 减缓温室效应成为了人类所面临的最突出的环境治理问题^[1-2]。为了应当对全球变暖所导致的气候变化, 我国提出了到 2030 年实现“碳达峰”, 2060 年实现“碳中和”的“双碳目标”, 积极推动中国向着更低碳的发展方式进行转变^[3-4]。

碳排放是对二氧化碳、甲烷、氧化亚氮、氢氟碳化物、全氟化碳等温室气体排放的总称, 对碳排放进行准确的测算是实现“双碳目标”的基础, 准确详细的碳排放数据能够为国家科学地制定相关政策以及开展评估考核工作提供重要的依据^[5]。碳排放的测算主要包括采用监测装置测量的碳监测以及主要依托统计数据测算的碳排放核算^[6]。碳监测主要是通过气体监测设备直接获取碳排放量, 其主要优点是数据准确, 但是存在着监测设备安装和使用成本较高的缺点, 因此我国目前只是针对火电、钢铁、石油天然气开采、煤炭开采和废弃物处理 5 类重点行业, 开展碳排放试点监测^[7]。碳排放核算是指结合实测数据, 同时利用统计数据和相关的计算因子间接的计算碳排放量, 该方法相较于碳监测而言能够节省人力物力, 同时该方法不仅适用于直接碳排放核算, 也适用于间接碳排放核算。因

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(新型电力系统储能碳减排效益评估及方法学研究(1400-202355713A-3-3-JC))。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC (1400-202355713A-3-3-JC).

此在碳监测设备尚未大规模布置的情况下,碳排放核算目前在各行业的碳排放测算上应用的较为广泛。针对碳排放核算,我国成立了“中国碳排放核算统计核算工作小组”^[8],市场监督管理总局也发布了“加快建设统一规范的碳排放统计核算体系的实施方案”的公告^[9]。由此可见,完善统一的碳排放核算体系已经成为实现“双碳目标”的重要战略部署之一。

目前,能源部门是全球碳排放的主要贡献者,其中电力行业又是能源领域碳排放最高的行业^[10-13]。国际能源署发布的报告中指出 2022 碳排放量增长最大的部门也是电力部门^[14]。因此实现全球降碳,主战场在能源,而电力行业更是完成任务的主力军。作为最被广泛使用的能量产品,电力的消耗无处不在,随着电力消费,发电过程产生并释放碳排放^[15]。电力行业的碳排放主要来自于发电过程中化石燃料燃烧产生的 CO₂ 以及电力传输过程中 SF₆ 气体的泄露。从电力生产、电力传输以及电力使用的角度出发,对整个电力系统源、网、荷三侧开展准确的碳排放核算,对于梳理电力碳排放责任随着电力传输而传递的特点至关重要。

目前,国际上出台了一系列的碳排放核算标准与方法^[16-26],国内也针对发电企业以及电网企业出台了相关的碳排放核算标准^[27-33]。虽然标准种类繁多且涉及面较广,但是这也给碳核算工作的开展带来一些不可避免的问题。一方面,目前的标准体系缺乏梳理和分类,另一方面不同标准在参数的选取以及核算范围上的不同会导致在选择不同的标准进行同一过程的碳排放核算时会存在结果上的差异。基于此,本文基于电力系统的构成特点,从源、网、荷的角度出发,对各电力系统碳排放核算标准以及方法进行梳理与对比分析,从而找出采用不同标准核算时产生结果差异性的原因,为增强标准的统一性提供了方向。随后,总结了各种方法的应用与发展现状,并在此基础上对我国未来电力系统的碳排放核算研究进行了展望,给电力系统碳排放核算未来的发展提出了建议。

1 碳排放核算方法与标准

在碳排放监测设备尚未大规模布置的背景下,开展碳排放核算依然是梳理各行业碳排放情况的有效手段。制定碳排放核算标准能够增加核算结果的有效性以及统一性,但是目前国际国内基于不同方法制定的各标准之间依然存在着一定的差异,开展各标准之间的对比分析能够有效的找出各标准

之间的异同,为标准体系的完善与改进提供参考。

1.1 碳排放核算的方法

目前对于碳排放的核算主要有投入产出法、全生命周期评估法(life cycle assessment, LCA)以及 IPCC((intergovernmental panel on climate change)方法^[16,34-37]。投入产出法将生产经营活动和环境问题联系起来,利用投入产出过程数据,根据平衡方程进行全国、区域以及省级或者居民消费等宏观层面的碳排放核算。全生命周期评估法是对产品生产过程所造成的环境影响进行定量分析的方法,在确定了分析的目标以及范围之后通过对产品全生命周期数据清单的收集以及数据的特征化计算完成多种环境影响定量的计算,碳排放是全生命周期方法所分析的环境影响之一,其结果通常以全球变暖潜值的形式给出^[38]。IPCC 方法来源于联合国气候变化委员会发布的《2006 IPCC 国家温室气体清单指南》(简称《IPCC 指南》),该方法主要根据活动数据以及相应的排放因子完成碳排放的核算,指南中详细介绍了采用 IPCC 方法时能源、工业、农林以及土地利用变化等部门的碳排放核算过程^[16]。

1.2 碳排放核算的标准

在碳排放核算的 3 种方法中,投入产出法主要应用于经济、政策等宏观视角的碳排放研究^[39]。当研究对象为区域、企业或者是产品时,国际上主要基于 IPCC 方法或全生命周期方法出台了一系列的碳排放核算标准,如基于 IPCC 方法的由联合国气候变化委员会发布的《IPCC 指南》以及基于全生命周期方法的由英国碳信托联合多家单位发布的《PAS 2050:2008 商品和服务在生命周期内的温室气体排放评价规范》(简称 PAS 2050)、由世界资源环境所联合世界可持续发展工商理事会发布的《温室气体核算体系》(简称 GHG Protocol)以及由国际化标准组织发布的《温室气体排放和清除的量化和报告指南》(简称 ISO-14064)和《温室气体-产品碳足迹量化和需求指南》(简称 ISO-14067)。近年来,随着欧洲边境调节法案的实施,由欧盟发布的《欧盟产品环境足迹法》(简称 PEF)虽然不是仅仅针对碳排放核算的环境影响定量标准,但同样受到了广泛的关注^[40]。

国内碳排放核算尚未形成完善的体系,2005 年国家发改委组织专家参照《IPCC 指南》编制了《省级温室气体清单编制指南》,并陆续公布了 24 个行业碳排放核算试运行的方法^[41-43]。2015 年,国家标准管理委员会发布了 10 个重点行业的碳排放核算

标准^[44]，各地政府以及一些团体也根据需要出台了碳排放核算相关的标准^[45]。

1.3 碳排放核算各标准之间的对比分析

由于所采用的方法不同，各个标准的侧重点会有所区别，因此从适用对象、核算范围、温室气体种类以及核算边界等方面开展各标准之间的对比是近一步分析造成不同标准下电力系统碳排放核算结果差异性原因的基础。在适用对象上，《IPCC 国家指南》以及《省级温室气体清单编制指南》主要适用于国家和地区层面的碳排放核算；ISO-14064 主要适用于企业、组织或者项目层面的碳排放核算；GHG Protocol 标准体系中包含了分别适用于企业以及产品碳排放核算的标准；PAS 2050、ISO-14067 以及 PEF 则主要用于产品层面的碳排放核算。在所考虑的温室气体的范围上，各标准均涵盖了《京都议定书》所包含的 6 种温室气体，最终的碳排放核算结果通常以等效 CO₂ 排放的形式给出。在核算的范围上，《IPCC 指南》中将碳排放划分为直接排放和间接排放；GHG Protocol 将碳排放划分为 3 个范围，范围 1 指直接温室气体排放，范围 2 是指净购入电力和热力隐含碳排放，范围 3 则是指考虑其他输入和服务隐含碳排放。在核算边界上，涉及产品层面的相关标准会对核算边界做出明确的规定，如 PAS 以及 PEF 详细地描述了碳排放核算的系统边界，即从原料的生产一直到产品使用后的后处理阶段。其余标准则只考虑在定义的系统内对碳排放有影响的单元。综上，各标准之间的对比如表 1 所示。

表 1 碳排放核算标准间的对比分析				
Table 1 Comparative analysis of carbon emission accounting standards				
标准	适用对象	基于的方法	核算范围	核算边界
IPCC 指南	国家/地区	IPCC 法	直接+间接	根据分析划定
PAS 2050	产品	LCA 法	范围 1—3	从原材料到后处理
ISO-14064	组织	LCA 法	范围 1—3	根据分析划定
ISO-14067	企业、项目	LCA 法	范围 1—3	根据分析划定
GHG Pro	企业、组织/产品	LCA 法	范围 1—2	根据分析划定
PEF	产品	LCA 法	范围 1—3	从原材料到后处理
省级指南	区域、省	IPCC 法	直接+间接	根据分析划定

2 源侧碳排放核算

源侧碳排放核算是指对电力生产过程进行碳排放核算，其目的主要有两个：一方面是为了核查发电企业的碳排放总量；另外一方面是为了计算出生产单位电量所造成的碳排放，从而为电量消费过

程释放的碳排放计算提供数据基础^[46]。

2.1 源侧碳排放核算方法与标准介绍

国际上虽未专门针对电力生产过程的碳排放核算出台标准，但是在其碳排放以及碳足迹等方面进行了广泛的研究。同时，仍然可以将电力视为产品，然后采用本文第一部分所述的通用国际标准进行电力生产过程的碳排放核算。国内则针对电力生产过程的碳排放核算以《省级温室气体排放清单编制指南》为基础出台了一系列标准和规范^[27-31]：生态环境部发布了《企业温室气体排放核算与报告指南发电设施》；中国国家标准化管理委员会发布了 GB/T 32151.1：《温室气体排放核算与报告要求第 1 部分：发电企业》。除了国家层面以外，各地政府也针对发电企业的碳排放核算出台了一系列的地方标准，如北京发布了《二氧化碳排放核算和报告要求：电力行业》；上海发布了《上海市电力、热力生产业温室气体排放核算与报告方法(试行)》；天津发布了《天津市电力热力行业碳排放核算指南》。上述国内标准均是专门针对电力生产过程的碳排放核算进行制定并出台，标准中对电力生产过程的碳排放核算范围、边界以及温室气体的种类等进行了明确且详细的规定，并给出了具体的碳排放计算公式。

2.2 源侧碳排放核算方法与标准对比分析

对于电力生产过程的碳排放核算，各标准的区别主要在于核算范围、核算边界以及所考虑的温室气体的种类。从碳排放产生的角度来说，在电力生产过程中的碳排放主要包括直接排放(燃料燃烧造成的碳排放以及脱硫过程由于脱硫剂分解产生的碳排放-范围 1)和间接排放(外购电力、热力以及其他原料的使用所造成的碳排放-范围 2、3)^[47]。国内针对电力生产过程制定的各标准在核算边界上大部分仅仅考虑了电力生产活动中的碳排放，其主要包括燃料燃烧、脱硫过程以及外购电力所造成的碳排放，而同时在该边界内又以是否考虑脱硫过程有所区分。如果使用基于产品层面核算的通用标准 PAS 2050 以及 PEF 对电力生产过程进行碳排放核算，边界则应考虑从原料生产、运输到最终废弃物的后处理整个发电活动全生命周期内的碳排放，典型的火力发电全生命周期碳排放核算边界如图 1 所示。

除了核算边界的区别以外，PAS2050、PEF 以及 ISO-14067 还包含了范围 3 相关的排放，因此除了要考虑外购电力造成的碳排放以外还需要考虑其他材料的消耗所造成的间接碳排放。

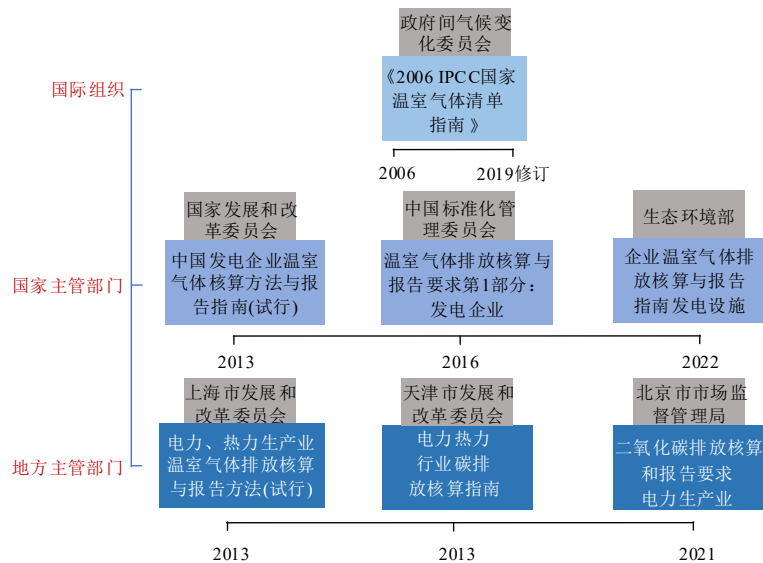


图 2 基于 IPCC 方法的源侧碳排放核算标准体系

Fig. 2 Source side carbon emission accounting standard system based on IPCC method

基于 IPCC 方法的源侧碳排放核算各标准之间除了在核算边界上存在着区别以外，最主要的区别还在于对燃料低位热值、单位热值含碳量、碳氧化率以及外购电力排放因子等参数的选取上。各标准也针对上述参数的选取进行了详细的介绍，普遍的原则是在核算的过程中优先采用实测值，当确实无法获得实际监测值时则可以采用缺省值。各标准在参数选择的原则以及缺省值上的对比如表 3—5 所示。

表 3 基于 IPCC 方法的源侧碳排放各标准相关参数选取对比分析

Table 3 Comparative analysis of the selection of criterion-related parameters of power generation side based on IPCC method

标准来源	低位热值	单位热值含碳量	碳氧化率	外购电力排放因子/(tCO ₂ /(MW·h))
IPCC	缺省值	缺省值	缺省值	无明确规定
生态环境部	检测值/缺省值	检测值/缺省值	缺省值	无明确规定
标委会	燃煤采用检测值	燃煤采用检测值	缺省值/计算值	区域电网排放因子
上海	缺省值/检测值	缺省值/检测值	缺省值/检测值	0.788
北京	燃煤优先采用检测值	燃煤优先采用检测值	燃煤优先采用检测值	0.604
天津	部分企业燃煤必须使用检测值	检测值/缺省值	检测值/缺省值	0.873

表 4 基于 IPCC 的各标准中部分燃料低位热值以及单位热值含碳率缺省值对比分析

Table 4 Comparative analysis of NCV and CC values of some fuels in each standard based on IPCC

燃料	低位热值/((GJ/t)/((GJ/(10 ⁴ Nm ³))))						单位热值含碳量/(kgC/GJ)					
	IPCC	生态环境部	标委会	北京	上海	天津	IPCC	生态环境部	标委会	北京	上海	天津
无烟煤	26.7	26.7	—	20.3	20.3	26.34	26.8	30.85/28.58*	—	27.5	27.5	27.5
烟煤	25.8	—	—	19.57	19.57	20.91	25.8		—	26.2	26.2	26.18
汽油	43	43.07	43.07	44.8	—	43.07	20.2	18.9	18.9	18.9	18.9	18.9
柴油	43	42.65	42.65	43.3	—	—	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2
焦炉煤气	174.15	173.54	179.81	—	174.06	—	12.1	12.1	13.58	—	13.6	—
高炉煤气	32.11	33	—	—	37.71	—	70.85	70.8	—	—	70.8	—
转炉煤气	88.25	84	—	—	79.59	—	49.6	49.6	—	—	49.6	—
天然气	344.35	389.31	389.31	389.31	389.31	389.31	15.3	12.2	12.2	15.3	15.3	15.3

注：*天津的标准中未针对煤种的单位热值含碳量进行规定，而是从常规机组和非常规机组给出相应的数值

由表 4 以及表 5 可知，IPCC、生态环境部以及标委会出台的标准相较于地方出台的标准而言，在参数的选取上较为笼统，不像地方标准那样针对不同的技术类型给出相应的数值，同时也未能明确地给出外购电力的排放因子。各标准所提供的缺省值也存在一定的区别，这也是导致采用不同标准会得到不同的计算结果的原因。综上，为了增加各标准

的核算结果的准确性以及统一性，一方面可以要求相关参数必须使用实测值，另外一方面可以对缺省值进行统一。

3 网侧碳排放核算

国际上没有针对电力系统网侧的碳排放核算专门制定相关标准，国内则对网侧的碳排放针对性地制定发布了一系列标准用以规范电网企业的碳

表5 基于IPCC方法的标准中燃料的碳氧率取值对比分析
Table 5 Comparative analysis of carbon oxygen ratio of fuel in each standard based on IPCC

燃料	碳氧率/%				
	发改委	标委会	北京	上海	天津
煤炭	99	98	95	— ^a	— ^b
油	98	98	98	100	98
气体	99	99	99	100	99

注: a: 上海对不同装机容量级别下煤炭的碳氧率进行了规定, 300、600、900、1000MW 级别下碳氧率分别为 99.2%、99.5%、99.8%、99.9%。
b: 天津对不同类型的电厂煤炭的碳氧率进行了规定, 公用电力企业、自备电厂的碳氧率分别为 98%、95%。

排放核算。国家发改委在 2013 年发布了《中国电网企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》^[41]; 国家标准化委员会于 2015 年发布了《温室气体排放核算与报告要求第 2 部分: 电网企业》^[32]; 同时上海市电力协会于 2022 年发布的团体标准《区域配电网碳排放核算规范》中也对网侧碳排放核算做出了详细的规定^[33]。在上述的标准中, 网侧的碳排放主要来源于线路的网损所造成的间接排放(范围 2)以及设备 SF₆ 泄漏造成的直接排放(范围 1), 关于线路网损的碳排放核算其计算公式如下:

$$E_L = A_{DL} E_{FL} \quad (5)$$

式中: E_L 是因网损产生的碳排放, t; A_{DL} 是线路产生的网损, MW·h; E_{FL} 是该区域的电网排放因子, tCO₂/(MW·h)。

关于 SF₆ 泄漏造成的碳排放计算公式如下:

$$E_X = \left[\sum_i (R_{C_{c,i}} - R_{C_{r,i}}) + \sum_j (R_{P_{c,j}} - R_{P_{r,j}}) \right] \cdot G_{WPSF_6} \times 10^{-3} \quad (6)$$

式中: E_X 是 SF₆ 使用造成的碳排放, t; $R_{C_{c,i}}$ 是第 i 台退役设备的 SF₆ 容量, kg; $R_{C_{r,i}}$ 是第 i 台退役设备的 SF₆ 回收量, kg; $R_{P_{c,j}}$ 是第 j 台检修设备的 SF₆ 容量, kg; $R_{P_{r,j}}$ 是第 j 台检修设备的 SF₆ 回收量, kg; G_{WPSF_6} 是 SF₆ 的全球变暖潜值, 23900。

相关的统计数据指出, 国家电网公司 2021 年因 SF₆ 泄漏导致的碳排放为 104 万 t 左右, 近年来国网公司逐步提高 SF₆ 气体的回收率, 随着 SF₆ 气体回收率的增加, 网侧碳排放的降低具有较大的潜力。

4 荷侧碳排放核算

源侧产生的碳排放通过荷侧的电力消费进行释放。因此荷侧的碳排放核算主要是对因电力消费而释放的碳排放量的计算(主要是为生产生活活动所造成的范围 2 的碳排放核算提供依据和数据)。目前针对该类碳排放的核算主要采用电网排放因子法。

电网碳排放因子定义为表征单位电能消费的碳排放量的系数, 即每消费 1kW·h 的电量(或每单位购入使用电量)所产生的碳排放量, 通常又被称之为“电网平均排放因子”^[48]。

4.1 国际电网排放因子

在国际上, 欧美电力公司、企业和组织一直致力于电网排放因子的研究, 从电网结构、能源组合、碳排放因子计算方法等方面入手, 不断提升了电网排放因子的计算精度与可操作性, 并积极地通过电网排放因子的使用, 计算并减少电力行业的碳排放量。美国、欧盟、英国、澳大利亚等国家或组织均定期更新发布电网排放因子, 且电网排放因子均呈现出区域划分的特点^[49]。美国按照电网公司的经营区域范围将电网划分为 26 个区域, 并分别给出区域电网排放因子^[50]。欧盟公布的排放因子既包括欧盟整体的电网排放因子, 同时也包括各成员国的电网排放因子, 澳大利亚则是把全国划分为 7 个主要区域, 并按年度更新^[51]。在网损的考量上, 上述国家均将网损纳入消费侧的碳排放^[52]。

4.2 国内电网排放因子

4.2.1 国内电网排放因子的分类

按照不同的用途, 电网排放因子可以分为用以开发清洁发展机制(clean development mechanism, CDM)项目和中国温室气体自愿减排(China certified emission reduction, CCER)项目的减排类电网排放因子以及用以碳排放核算的排放类电网排放因子。

1) 减排类电网排放因子。

减排类电网排放因子主要是指电网基准线排放因子, 其主要作用是为了测算 CDM 以及 CCER 项目的温室气体减排量, 生态环境部应对气候变化司发布了《2019 年度减排项目中国区域电网基准线排放因子》^[53], 2023 年 11 月, 国家气候战略中心发布了 2020 年以及 2021 年的区域电网基准线排放因子, 并给出了电量边际排放因子(operation margin, OM)以及电量容量边际排放因子(build margin, BM)的计算方法^[54-55]。

华北、东北、华东以及西北电网的 OM 主要基于服务于电网系统的除低成本或必须运行机组(调入电量按规定也当作一个低成本或必须运行机组来对待)外的其他所有发电机组, 以其供电量为权重, 计算它们单位供电量排放因子的加权平均值, 其计算公式如下:

$$E_{FOM} = \frac{\sum_i (F_{Ci,y} N_{CVi,y} E_{FCO_2,i,y})}{E_{Gy}} \quad (7)$$

式中： E_{FOM} 是第 y 年的减排项目的电网电量边际排放因子， $\text{tCO}_2/(\text{MW}\cdot\text{h})$ ； E_{Gy} 是除了低成本或必须运行机组之外所有机组供给电网的总的发电量， $\text{MW}\cdot\text{h}$ ； $F_{\text{Ci},y}$ 是第 y 年第 i 种燃料的消耗量， t ； $N_{\text{Cvi},y}$ 是第 i 种燃料的低位发热量， GJ/t ； $E_{\text{FCO2i},y}$ 是第 i 种燃料的 CO_2 排放因子， tCO_2/GJ 。

华中地区以及南方电网的 OM 则是在上述方法的基础上将发电机组分为低成本或必须运行机组以及其他机组，对每类发电机组首先分别求出按各机组年供电量加权平均的单位供电量排放因子，然后求得两者参与发电调度的概率权重，最后则对两类发电机组的单位供电量排放因子按照参与发电调度的概率权重进行加权平均从而得到最终的 OM^[54]。

BM 则是考虑新建电厂对排放因子的影响，可以根据选取的 m 个样本机组(取样以累计发电量达到区域电网总发电量的 20%结束)排放因子的供电量加权平均计算^[55]，计算公式如下：

$$E_{\text{FBM}} = \frac{\sum_m (E_{\text{Gm},y} E_{\text{FELm},y})}{\sum_m E_{\text{Gm},y}} \tag{8}$$

式中： E_{FBM} 是第 y 年减排项目所在电网的容量边际排放因子， $\text{tCO}_2/(\text{MW}\cdot\text{h})$ ； $E_{\text{Gm},y}$ 是第 y 年的第 m 个样本机组的发电量， $\text{MW}\cdot\text{h}$ ； $E_{\text{FELm},y}$ 是第 y 年的第 m 个样本机组单位电量 CO_2 的排放因子， tCO_2/GJ 。

最终用以计算所开发项目的电网基准线排放因子为 BM 以及 OM 按一定比例的加权平均值。我国公布的 2019 年以及 2021 年区域电网基准线排放因子的区域划分以及具体数值如表 6 所示。

表 6 中国区域电网基准线排放因子						
Table 6 Base line emission factors of regional power grid in China						
区域电网名称	OM/($\text{tCO}_2/(\text{MW}\cdot\text{h})$)			BM/($\text{tCO}_2/(\text{MW}\cdot\text{h})$)		
	2019	2020	2021	2019	2020	2021
华北	0.9419	0.9408	0.9714	0.4819	0.4490	0.4701
东北	1.0826	1.0650	1.0673	0.2399	0.2601	0.1892
华东	0.7921	0.7773	0.7777	0.3870	0.2758	0.2802
华中	0.8587	0.8434	0.7938	0.2854	0.3185	0.2553
西北	0.8922	0.8878	0.8995	0.4407	0.4536	0.5105
南方	0.8042	0.8072	0.7722	0.2135	0.2302	0.1880

2) 排放类电网排放因子。

排放类电网排放因子主要用于产品、企业、地区以及国家的碳排放核算，按照考虑的范围主要分为省级、区域以及全国电网排放因子。省级电网平均排放因子是以省作为边界计算得到的各省电网的电力平均碳排放，原发改委应对气候变化司于 2013 年以及 2016 年分别公布了 2010 年以及 2012

年各省的省级电网排放因子^[56-57]，2019 年生态环境部发布了《关于商请提供 2018 年度省级人民政府控制温室气体排放目标责任落实情况自评报告的函》中公布了 2018 年省级电网排放因子^[58]。

区域电网排放因子是指将我国根据地域边界划分为东北、华北、华东、华中、西北和南方区域电网，并根据各地区化石燃料用量以及各区域之间的电力传输计算各区域的电网排放因子。生态环境部于 2024 年公布了 2021 年区域电网排放因子^[59]。

全国电网排放因子是全国电力平均碳排放强度，生态环境部于 2024 年发布的《关于发布 2021 年电力二氧化碳排放因子的公告》中公布了最新的全国电网排放因子，其数值为 $0.5568\text{tCO}_2/(\text{MW}\cdot\text{h})$ ^[59]。除了上述官方公布的电网排放因子外，中国电工技术学会聚焦于微电网系统的电网排放因子的计算，于 2023 年 5 月公布了 T/CES 194—2023《微电网碳排放核算规范》，通过对微电网碳排放中分布式电源、微电网网络的碳排计算，以及核算范围内的碳捕集与封存，最终对微电网碳排放因子的计算进行了规范^[60]。同时，一些全生命周期分析软件数据库中包含了用于产品碳足迹核算的电力排放因子，如 Gabi 软件数据库中包含了不同发电方式下(火电、风电、光电)的电力排放因子^[61]。

4.2.2 国内电网排放因子的应用范围

产品生产过程中碳排放包括直接碳排放和间接碳排放，直接碳排放是指产品生产过程中直接排放的温室气体，间接碳排放是指在产品生产过程因能源、化工产品的消耗所造成的碳排放。从产品层面来说，电力是目前使用范围最为广泛的能源，因此由电力消耗造成的间接碳排放是产品生产过程碳排放的重要组成部分。2022 年，欧盟审议通过的碳边境调节机制修正案中将因电力使用造成的间接碳排放纳入“碳关税”的征收范围^[62]。目前，对于因电力消耗所造成的间接碳排放主要基于产品生产过程中的用电量和电网排放因子进行计算。从企业层面来说，对企业开展碳核查时对企业因外购电力造成的间接碳排放的核查也是重点工作之一。国家发改委在 2013 至 2015 年之间发布的 24 个行业的企业温室气体排放核算方法与报告指南中指出，企业因外购电力所造成的间接碳排放其数值为购入的电量和电网排放因子的乘积，所使用的电网排放因子主要为区域电网因子(东北、华北、华东、华中、西北以及南方)，数值以国家主管部门发布的最近年份的各区域电网排放因子为准。

作为不同地区间主要交互的能源，电力当中隐

含的碳排放伴随着电力调度在各地区之间进行传输,因此电网碳排放因子在地区碳排放核查过程中也具有广泛的应用。国家发改委发布的《省级温室气体清单编制指南》中指出对于因电力调度所造成的间接碳排放则根据调度的电量以及电网排放因子(该电网排放因子为国家主管部门公布的区域电网排放因子为准)进行计算,该方法也同样在广东、江苏等地方发布的相关标准中被提及^[63-64]。

4.2.3 针对国内电网排放因子的修正

对于电网排放因子的修正主要从核算的边界范围、温室气体种类、数据的选取以及时间尺度等几个方面开展。宋然平等^[65]在发改委公布的电网排放因子基础上扩大了温室气体的范围,计算了区域电网的 CO_2 当量排放因子。马翠梅等^[66]提出了区域电网向省级电网供电量的近似计算公式,并基于区域电网排放因子计算了省级电网排放因子。侯萍等^[67]首先在国家发改委公布的OM计算方法的基础上从燃料排放因子以及温室气体种类两个角度对其进行修正,随后又补充了基础设施建设过程,发电上游原材料和燃料生产过程、运输过程以及电力传输过程产生的温室气体排放,最终得到用于产品碳足迹核算的电网排放因子。蔡博峰等^[68]在发改委所发布的电网排放因子计算方法的基础上考虑了各区域/省之间以及区域向省之间的电力交互,计算了2020年全国区域以及省级电网排放因子,并将计算结果与发改委2010年公布的数据进行对比,结果表明随着发电结构以及各区域/省电力输配量的变化,2020年电网排放因子相较于2010年变化较大,整体呈现出下降趋势。近期由生态环境部环境规划院联合多家单位发布的《中国区域电网二氧化碳排放因子研究2023》中同样考虑各省内部的电力组成以及各省之间的电力交互分析了我国2020—2035年的区域和省级电网排放因子的变化,得出了电网排放因子普遍下降的结论^[69]。陈政等^[52]在对电网排放因子进行计算时将绿色电力与传统电力进行剥离,将电力碳排放在扣除绿色电力的其余电力中均摊,实现了基于绿色电力消费对电网排放因子的修正。在时间尺度上,文献[70]基于可再生能源发电的可变性分析了电网排放因子随着时间的变化趋势。文献[71]提出了时变的电网排放因子计算方法,并探究了可再生能源占比以及火电厂效率对其的影响。时变的电网排放因子因为计算过程的较繁琐导致了其目前未被广泛的使用,但是该类电网排放因子能够准确以及实时计算电力消费过程的碳排放,刘广一等^[49]针对我国开展分时分区

电网排放因子相关研究的必要性进行了详细的分析。

5 碳轨迹追踪

电力系统碳轨迹追踪则是对电力系统中碳排放的来源和流向进行追踪和分析的方法。碳轨迹追踪通过对电力系统中碳排放的来源和流向进行追踪,可以找出影响电网排放因子的关键因素,如不同发电方式的碳排放强度、电力传输和分配过程中的损失等,并以此为依据识别出碳排放的主要来源和关键节点,进而为优化电网结构和降低碳排放提供指导。同时,碳轨迹追踪可以准确地给出电力系统每个节点的碳排放因子,为荷侧的碳排放核算提供准确的依据。碳轨迹追踪和源、网、荷侧的碳排放核算相辅相成,碳轨迹追踪为碳排放核算提供了更全面的数据支持,而碳排放核算则进一步细化了碳轨迹追踪的结果。碳轨迹追踪的应用明晰了电力系统碳排放的产生、转移和释放机理,近年来受到了广泛的关注。

碳轨迹追踪主要是将电力系统的碳排放和电力传输特性相耦合,给电力潮流赋予碳标签,从而建立起电力生产与电力消费之间的碳关联网络,实现碳排放点在电力系统内部的轨迹追踪。相较于排放因子法,碳轨迹追踪法能够有效体现电力系统的时空差异性,同时能够较为清晰地反映碳排放随着电力传输而进行转移的路径^[72],图3显示了电力系统的电力分布与碳分布的示意图。

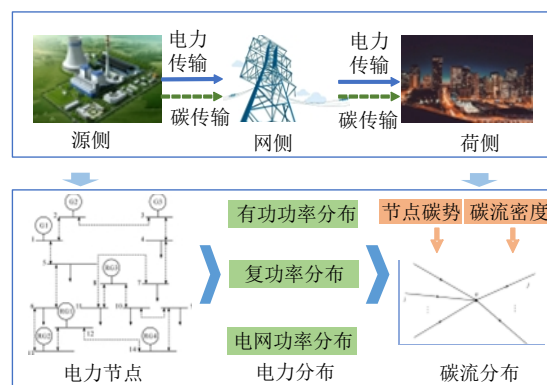


图3 电力系统电力分布与碳分布示意图

Fig. 3 Schematic diagram of power distribution and carbon distribution in power system

5.1 碳排放流理论

康重庆等耦合了电力系统的碳排放分析与电力系统的潮流分析并基于有功潮流建立了碳排放流分析理论^[73-76]。文献[73]在明确了电力系统碳排放流概念的基础上,定义了碳流量、碳流率、碳流密度以及碳势等概念,建立了碳流理论的框架。随后文献[74]在忽略了系统网损的情况下,定义了关

键矩阵和向量,提出了碳排放流的基本计算方法,并进行了结果验证。文献[75]在上述基础上,定义了节点输出排放因子以及路径输出分布因子这两种分布因子用以表征电力系统的碳流分布,并构建了机组-节点碳流关联分析、机组-支路碳流关联分析以及机组-负荷碳流关联分析3种关联矩阵,揭示了碳排放点在电力系统中的产生、传输还有消费的机理,论文提出了矩阵的计算方法,并对计算结果的准确性进行了验证。为了进一步减少大规模的矩阵运算,文献[76]基于碳排放流指标计算的邻接特性提出了以计算节点碳势为核心的电力系统碳排放流的递推算法,并开展了算例分析与结果验证。

上述的文献虽然建立了完善的碳排放流理论,但是在进行电力系统的碳排放流分析时,该理论忽略了网损对碳排放的影响,因此为了提高电力系统碳排放核算的准确性,需要开展实际有损网络的碳排放流分析,这就要求进一步对碳排放流理论进行改善。冯欣等^[77]通过对线路等效传输功率以及节点等效负荷需求的计算将网损产生的碳排放分摊给消费(负荷)侧,实现了有损网络向无损网络的转化。汪超群等^[78]将顺流追踪以及逆流追踪相结合,将线路网损等效为电源或负荷构建了虚拟的无损网络,实现了网损碳排放的双向分摊。

5.2 新型电力系统的碳足迹追踪

随着新型电力系统构建的进程不断推进,除了对有功功率追踪以外,研究者也基于复功率追踪(考虑到无功功率对有功功率分布的影响)或者电网功率分布法开展电力系统的碳足迹追踪分析。龚昱等^[79]在复比例共享原则的前提下开展了系统碳排放的复功率追踪并开展了案例分析。刘强等^[80]将复功率网损在发电侧与用户侧进行双向分摊,计算得出了负荷以及源侧各自承担的碳排放流率,实现了对碳排放产权的界定。闫丽梅等^[81]构建了电力系统的复功率分布矩阵,得到系统内部复功率分布,通过复功率与碳排放强度之间的耦合实现了电力系统碳排放的精准追踪。李岩松等^[82]以基本的电网电流分布理论为出发点,开展电网中电源功率分布的推算与追踪,进一步地耦合碳排放强度得到系统的碳排放分布。

近年来,随着光伏、风电以及储能在电力系统中的占比增加,学者也针对储能以及新能源发电特性建立相关的碳排放追踪模型。针对具有双向性质的储能系统的碳足迹追踪,周天睿等^[83]考虑储能系统的充放电效率初步建立了该类系统的碳排放追踪模型。张笑演等^[84]考虑到储能系统在充放电过程

中的碳吸收与碳排放定义了“荷碳率”来表示储能系统中度电的碳排放量。包维瀚等^[85]区别于以往研究中认定储能不承担碳排放责任的假定,基于保障公平性原则,从计量以及政策两个角度出发提出了适用性强的双向系统碳排放核算方法。针对负荷、新能源出力波动与预测偏差带来的碳排放核算,汪超群等^[78]将新能源机组等效为负荷,同时将系统的功率网络分解(日前计划以及日内功率偏差),并分别展开潮流追踪与碳排放计算。张自强等^[86]考虑了含光伏电力系统中光伏注入功率的不确定性的影响,构建了光照强度和电力系统节点碳流率之间的函数表达式,实现了对光伏系统碳排放的灵活准确追踪。

5.3 碳足迹追踪的应用

开展电力系统的碳足迹追踪的主要目的是为了分析发电侧产生的碳排放如何在负荷、各支路功率以及线路网损之间进行分摊,因此碳足迹追踪的一个重要应用便是在电力系统的碳排放统计方面。在标准方面,中国电机工程学会于2023年5月发布了《用电间接碳排放核算技术规范》的征求意见稿,该标准从碳足迹追踪的角度出发,从碳排放流计算边界和范围确定、电网潮流数据采集、碳排放流计算相关矩阵生成、碳排放流计算开展、用电碳排放核算边界和范围确定、电力用户用电碳排放量计算等方面对用电间接碳排放的核算进行了规范^[87]。国家电网常州分公司以碳足迹追踪为目的,开发了碳表装置以及碳计量平台,成为了世界范围内的首个“全域碳计量-全链碳响应-全景碳足迹”工程示范^[88]。国家电网江苏分公司搭建了电力系统全景碳分析平台,并开展了相关的研究与示范工作^[89]。李业辉等^[90]设计并验证了基于碳足迹追踪的分布式碳表系统,该系统包括了感知层、网络层以及应用层的3层物联网架构,并形成了分布式碳表系统的通信网络。

碳足迹追踪另一个重要的应用就是通过梳理电力系统的碳排放分布,然后在电力调度中增加碳成本或者碳约束,从而实现电力系统的低碳调度。杨毅等^[91]基于碳足迹追踪的结果,构建了包含两个阶段的源网荷系统的低碳调度方法。陈家兴等^[92]基于碳足迹追踪结果除了构建了两阶段的低碳调度方法之外,还将部分碳排放责任从发电侧分摊给用户侧,从而构建了需求响应低碳调度模型用以调整负荷分布,引导用户侧的节能降碳。除了电力系统的低碳调度以外,碳足迹追踪也广泛地应用于综合能源系统的低碳调度。张笑演等^[93]以及杨毅等^[94]

将电力系统的碳排放追踪模型进行扩展,并基于模型结果开发了园区综合能源优化调度模型。严中华等^[95]以及张玉敏等^[96]针对由风、光、热、氢、电多种能源组合的能源系统,基于碳排放追踪结果构建了低碳调度模型,实现了多种能源形式下的低碳经济调度。

6 结论与展望

在碳排放监测设备大规模部署之前,开展碳排放的统计核算依然是实现电力系统碳计量的主要手段。本文针对电力系统的碳排放核算,从源网荷的角度详细论述了针对三侧的碳排放核算相关标准以及方法的应用研究现状,电力系统碳排放核算的整个研究体系如图4所示。

1) 在源侧的碳排放核算上,开展了各标准之间的对比分析,从方法学角度对比来看,基于全生命周期方法的标准因为考虑了电力生产过程全生命周期的碳排放,因此其核算结果相较于基于IPCC方法标准而言偏高。从国际国内的角度对比来看,国内标准与国外标准之间的区别主要在于核算边界以及温室气体种类的选择上,国内标准的边界仅包括燃料燃烧、脱硫过程以及外购电力,相较于国外标准而言,边界范围较小且温室气体只考虑了CO₂的排放,因此依据国内标准核算的结果相较于国际标准而言较小。就国内的各标准之间对比而言,主要的差别在于燃料的相关缺省值上,因此为了碳排放核算的准确性,针对燃料的相关参数应强调使用监测值。针对使用缺省值的情况,为了核算结果的互认性与普适性,国家相关部门应针对相关的缺省值进行统一。

2) 在网侧,碳排放主要来源于电力设备的SF₆泄漏,对于网侧碳排放核算,关键点在于电力设备SF₆泄漏的监测与核算机制。如需对网损碳排放进行统计,则关键点在于电网排放因子选择上的明确。

3) 在荷侧,排放因子法简单方便,但是实时性不足。电网排放因子法在未来几年依然是电力消费侧碳排放核算的主流,随着欧洲边境调节机制的实施,它的准确性与认可程度至关重要,因此,在电网排放因子的核算上,未来仍需针对其核算周期、核算颗粒度以及绿色电力的考虑上进行优化。同时,为了减少欧洲边境机制实施带来的影响,同时增加国内电网排放因子的国际认可度,应当根据国际相关的碳足迹核算标准对国内的电网排放因子进行修正。在电网排放因子的使用上,对排放类以及减排类排放因子的适用范围应该有所区分,对各种电网排放因子的适用场景应该给予明确。

此外,能够实现电力系统碳排放全流程追踪的碳足迹追踪法实时性强,并且能够给出各个节点的碳排放数据,因此具有较强的公平性;但是其计算复杂,前期投入大,虽然已经由理论实现了落地,但是目前的应用相对较少。

综上,为推动电力系统碳排放核算的进一步发展,提高核算的准确性和效率,应进一步完善核算标准与边界,结合国际通用产品的碳排放核算标准,细化和完善核算边界,提升相关标准的国际认可度。在源侧,应加强燃料参数与缺省值的标准化,强调使用燃料的实际检测值进行碳排放核算,提高核算准确性。对于使用缺省值的情况,建议国家相关部门建立统一的燃料缺省值数据库,并定期进行更新,确保核算结果的互认性与普适性。在网侧,

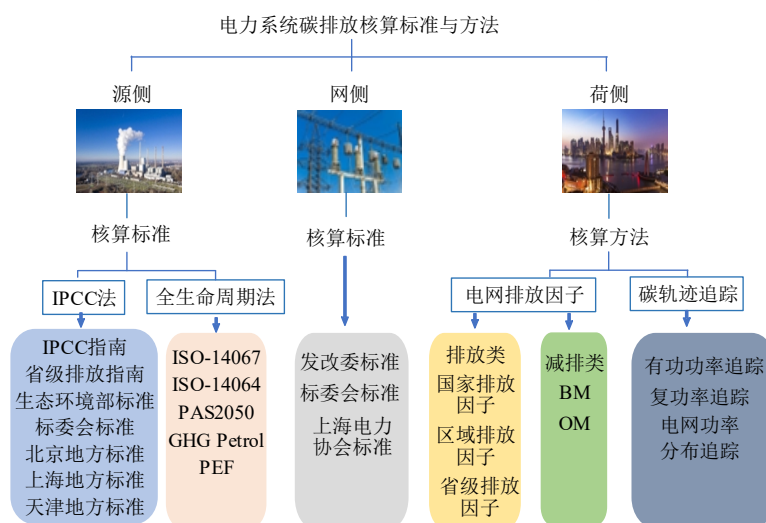


图4 电力系统碳排放核算标准及方法体系

Fig. 4 Carbon emission accounting standard and method system of power system

建立电力设备 SF₆ 泄漏的监测与核算机制, 降低泄漏对环境的影响。在荷侧, 加强电网排放因子的优化与国际接轨程度, 研究降低碳轨迹追踪计算复杂性和前期投入的方法, 增加其在实际应用中的普及度; 在核算周期、核算颗粒度以及绿色电力的考量上进行深入研究, 优化电网排放因子的核算方法; 根据国际碳足迹核算标准, 对国内电网排放因子进行修正, 提高其国际认可度; 明确各种电网排放因子的适用场景, 为不同场景下的碳排放核算提供指导。

参考文献

- [1] IPCC. Special report on global warming of 1.5°C[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
- [2] GRAHAM F. Daily briefing: what 1.5°C of global warming really means[J]. Nature, [2024-03-10].2023. <https://www.nature.com/articles/d41586-023-01720-8>.
- [3] 新华社. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[EB/OL]. [2020-09-23]. <http://www.cppcc.gov.cn/zxww/2020/09/23/ARTI1600819264410115.shtml>.
- [4] HUANG Jinliang, Han Wei, TIAN Hanlei, et al. The application and challenge of energy router in energy internet[J]. Energy Internet, 2024; 1(1): 14-26.
- [5] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家发展改革委 国家统计局生态环境部印发《关于加快建立统一规范的碳排放统计核算体系实施方案》的通知[EB/OL]. [2022-08-19]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202208/t20220819_1333231.html.
- [6] 周军红, 高富荣, 罗旭东, 等. 碳排放计量体系建设的研究[J]. 中国计量, 2013(12): 108-109.
ZHOU Junhong, GAO Furong, LUO Xudong, et al. Research on the construction of carbon emission measurement system[J]. China Metrology, 2013(12): 108-109(in Chinese).
- [7] 中华人民共和国生态环境部.《碳排放监测评估试点工作方案》的通知[EB/OL]. [2021-09-23]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/spxw/202109/t20210923_952715.shtml.
- [8] 环资司. 碳达峰碳中和工作领导小组办公室成立碳排放统计核算工作组[EB/OL]. [2022-08-19]. https://www.ndrc.gov.cn/fzggw/jgsj/hzs/sjdt/202108/t20210831_1295530.html?state=123&code=&state=123.
- [9] 市场监管总局, 国家发展改革, 工业和信息化部, 等. 关于印发建立健全碳达峰碳中和标准计量体系实施方案的通知[EB/OL]. [2022-08-19]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-11/01/content_5723071.htm.
- [10] International Energy Agency. World Energy Outlook 2023[R]. Paris: International Energy Agency (IEA), 2023.
- [11] 中国社会科学院大学(研究生院)国际能源安全研究中心. 世界能源蓝皮书: 世界能源发展报告(2023)[R]. 北京: 社会科学文献出版社, 2023.
- [12] ZHANG Ran, LU Zelong, MOHAMMAD Shahidehpour, et al. Deciphering the electricity-carbon market nexus: challenges and prospects of electricity-carbon coupling[J]. Energy Internet, 2024; 1(1): 34-51.
- [13] CHEN Xin. Enhance low-carbon power system operation via carbon-aware demand response[J]. Energy Internet, 2024; 1(2): 141-149.
- [14] International Energy Agency (IEA). CO₂ emission in 2022[R]. Paris: International Energy Agency (IEA), 2022.
- [15] 招景明, 李经儒, 潘峰, 等. 电力碳排放计量技术现状及展望[J]. 电测与仪表, 2023, 60(3): 1-8.
ZHAO Jingming, LI Jingru, PAN Feng, et al. Current status and future prospects of electricity carbon emission measurement technology[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(3): 1-8(in Chinese).
- [16] EGDELSTON S, BUENDIA L, MIWA K, et al. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. Kanagawa: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006.
- [17] WBCSD. The GHG protocol: a corporate accounting and reporting standard[R]. Geneva, Switzerland: WBCSD, 2001.
- [18] SOTOS M. GHG protocol scope 2 guidance: an amendment to the GHG protocol corporate standard[R]. Washington: World Resources Institute, 2015.
- [19] 世界可持续发展工商理事会. 温室气体核算体系: 产品生命周期核算与报告标准[R]. 北京: 中国质检出版社, 中国标准出版社, 2013.
- [20] 世界可持续发展工商理事会. 温室气体核算体系: 企业价值链(范围三)核算与报告标准-对《温室气体核算体系: 企业核算与报告标准》的补充[R]. 北京: 中国质检出版社, 中国标准出版社, 2013.
- [21] ISO. Greenhouse gases-part 1: specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals: CSA ISO 14064—1: 20[S]. Toronto: CSA Group, 2018.
- [22] ISO. Greenhouse gases-part 2: specification with guidance at the project level for quantification, monitoring and reporting of greenhouse gas emission reductions or removal enhancements: ISO 14064—2: 2019[S]. Geneva: ISO, 2019.
- [23] ISO. Greenhouse gases-part 3: specification with guidance for the verification and validation of greenhouse gas statements: ISO 14064—3: 2019[S]. Geneva: ISO, 2019.
- [24] ISO. Greenhouse gases-carbon footprint of products-requirements and guidelines for quantification: ISO 14067: 2018[S]. Geneva: ISO, 2018.
- [25] British Standards Institution. Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services: PAS 2050: 2008[R]. London: British Standards, 2008.
- [26] European Commission. Product Environmental Footprint[R]. Brussels: European Commission, 2013.
- [27] 中华人民共和国生态环境部. 关于印发《企业温室气体排放核算与报告指南发电设施》《企业温室气体排放核查技术指南发电设施》的通知[EB/OL]. [2022-12-21]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk06/202212/t20221221_1008430.html.
- [28] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 温室气体排放核算与报告要求第 1 部分: 发电企业: GB/T 32151.1-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [29] 北京市市场监督管理局. 二氧化碳排放核算和报告要求电力生产业: DB11/T 1781-2020[S]. 北京: 北京市市场监督管理局, 2020.
- [30] 上海市发展和改革委员会. 上海市电力、热力生产业温室气体排放核算与报告方法(试行): SH/MRV-002-2012[S]. 上海: 上海市发展和改革委员会, 2012.
- [31] 天津市发展和改革委员会. 天津市电力热力行业碳排放核算指南(试行)[S]. 天津: 天津市发展和改革委员会, 2013.
- [32] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 温室气体排放核算与报告要求第 2 部分: 电网企业: GB/T 32151.2-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [33] 上海市电力协会. 区域配电网碳排放核算规范: T/SEPA 2-2022[S]. 上海: 上海电力行业协会, 2022.

- [34] BULLARD C W, PENNER P S, PILATI D A. Net energy analysis: handbook for combining process and input-output analysis[J]. Resources and Energy, 1978, 1(3): 267-313.
- [35] ISO. Environmental management-life cycle assessment-requirements and guidelines: ISO 14044:2006[S]. Geneva: ISO, 2006.
- [36] 董雪,柯水发.国内外碳足迹计算方法、评估标准及研究进展[C]//绿色经济与林业发展论——第六届中国林业技术经济理论与实践论坛论文集.北京:中国林业出版社,20128.
- [37] 王永琴,周叶,张荣.碳排放影响因子与碳足迹文献综述:基于研究方法视角[J].环境工程,2017,35(1):155-159.
WANG Yongqin, ZHOU Ye, ZHANG Rong. A review of the research methods on influencing factors of carbon emissions and carbon footprint[J]. Environmental Engineering, 2017, 35(1): 155-159(in Chinese).
- [38] WANG Yan, PAN Zhen, ZHANG Wenxiang, et al. Life cycle assessment of combustion-based electricity generation technologies integrated with carbon capture and storage: a review[J]. Environmental Research, 2021, 207: 112219.
- [39] GUEDDARI-AOURIR A, A. GARCÍA-ALAMINOS, S. GARCÍA-YUSTE, et al. The carbon footprint balance of a real-case wine fermentation CO₂ capture and utilization strategy[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 157: 112058, doi: 10.1016/j.rser.2021.112058.
- [40] 徐艳,刘娟,顾江源,等.产品环境足迹:新的潜在绿色贸易壁垒[J].环境与可持续发展,2019,44(6):123-125.
XU Yan, LIU Juan, GU Jiangyuan, et al. Product environmental footprint: new potential green trade barriers[J]. Environment and Sustainable Development, 2019, 44(6): 123-125(in Chinese).
- [41] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.国家发展改革委办公厅关于印发首批10个行业企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)的通知[EB/OL].中华人民共和国国家发展和改革委员会办公厅.[2013-11-01].https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201311/t20131101_963960.html.
- [42] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.国家发展改革委办公厅关于印发第二批4个行业企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)的通知[EB/OL].中华人民共和国国家发展和改革委员会办公厅.[2015-02-09].https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201502/t20150209_963759.html.
- [43] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.国家发展改革委办公厅关于印发第三批10个行业企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)的通知[EB/OL].中华人民共和国国家发展和改革委员会办公厅.[2015-07-06].https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201511/t20151111_963496.html.
- [44] 翟吉人,贾志慧,张汇.我国碳交易试点地区化工行业碳排放量核算方法比较分析[J].环境与可持续发展,2018,43(2):31-35.
ZHAI Jiren, JIA Zhihui, ZHANG Hui. Comparison and analysis of chemical industry carbon emissions accounting methods in China carbon trading pilot areas[J]. Environment and Sustainable Development, 2018, 43(2): 31-35(in Chinese).
- [45] 李肖如,谢华生,寇文,等.钢铁行业不同二氧化碳排放核算方法比较及实例分析[J].安全与环境学报,2016,16(5):320-324.
LI Xiaoru, XIE Huasheng, KOU Wen, et al. Discussion and case study on the CO₂ emission calculation methods in iron and steel industry[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(5): 320-324(in Chinese).
- [46] 胡壮丽,罗毅初,蔡航.城市电力行业碳排放测算方法及减碳路径[J].上海交通大学学报,2024,58(1):82-90.
HU Zhuangli, LUO Yichu, CAI Hang. A method for carbon emission measurement and a carbon reduction path of urban power sector[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2024, 58(1): 82-90(in Chinese).
- [47] 王萍萍,赵永椿,张军营,等.双碳目标下燃煤电厂碳计量方法研究进展[J].洁净煤技术,2022,28(10):170-183.
WANG Pingping, ZHAO Yongchun, ZHANG Junying, et al. Research progress on carbon measurement methods of coal-fired power plants under the background of carbon neutrality[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(10): 170-183(in Chinese).
- [48] 张森林.“双碳”背景下优化调整电网碳排放因子的思考[J].中国电力企业管理,2022(22):62-65.
ZHANG Senlin. Consideration on optimizing and adjusting carbon emission factors of power grid under the background of “dual carbon”[J]. China Power Enterprise Management, 2022(22): 62-65(in Chinese).
- [49] 刘广一,王继业,汤亚宸,等.电网碳排放因子研究方向与应用需求的演变进程[J].电网技术,2024,48(1):12-28.
LIU Guangyi, WANG Jiye, TANG Yachen, et al. Evolution process of research directions and application requirements of electricity carbon emission factors[J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 12-28(in Chinese).
- [50] EPA Center for Corporate Climate Leadership. Greenhouse gas inventory guidance: indirect emissions from purchased electricity[R]. United States: EPA, 2020.
- [51] Parliamentary Counsel. National greenhouse and energy reporting act 2007[R]. Canberra: Parliamentary Counsel, 2007.
- [52] 陈政,何耿生,尚楠.面向碳达峰碳中和的电网碳排放因子改进计算方法[J].南方电网技术,2024,18(1):153-162.
CHEN Zheng, HE Gengsheng, SHANG Nan. Improved calculation method of power grid carbon emission factor for carbon peak and carbon neutrality goals[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(1): 153-162(in Chinese).
- [53] 中华人民共和国生态环境部.2019年度减排项目中国区域电网基准线排放因子[EB/OL].生态环境部.[2020-12-29].https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/wsqtz/202012/t20201229_815386.shtml.
- [54] 国家气候战略中心.2020年度中国区域电网二氧化碳基准线排放因子[R].北京:国家气候战略中心,2023.
- [55] 国家气候战略中心.2021年度中国区域电网二氧化碳基准线排放因子[R].北京:国家气候战略中心,2023.
- [56] 国家发展和改革委员会应对气候变化司.2010年中国区域及省级电网平均二氧化碳排放因子[R].北京:国家发展和改革委员会应对气候变化司,2013.
- [57] 国家发展和改革委员会应对气候变化司.2011年和2012年中国区域电网平均二氧化碳排放因子[R].北京:国家发展和改革委员会应对气候变化司,2014.
- [58] 生态环境部.生态环境部关于商请提供2018年度省级人民政府控制温室气体排放目标责任落实情况自评估报告的函[EB/OL].2019.http://www.ncsc.org.cn/SY/tjkhybg/202003/t20200323_770098.shtml.
- [59] 中华人民共和国生态环境部.生态环境部、国家统计局关于发布2021年电力二氧化碳排放因子的公告[EB/OL].生态环境部.[2024-04-12].https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk01/202404/t20240412_1070565.html.
- [60] 中国电工技术学会.微电网碳排放核算规范:T/CES 194-2023[S].北京:中国电力出版社,2023.
- [61] 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].现代纺织技术,2023,31(4):29-36.
WU Chongzhen, LI Qizheng, LIU Can, et al. Life cycle assessment system and database analysis of textile products[J]. Advanced Textile Technology, 2023, 31(4): 29-36(in Chinese).
- [62] 刘阳,刘继春,杨语嫣.考虑欧盟碳边境调节机制的碳-电融合市场各主体决策行为研究[J].电网技术,2023,47(8):3111-3120.
LIU Yang, LIU Jichun, YANG Yuyan. Decision-making behavior of various entities in carbon-electricity integration market considering EU carbon border adjustment mechanism[J]. Power System

- Technology, 2023, 47(8): 3111-3120(in Chinese).
- [63] 国家发展和改革委员会. 省级温室气体清单编制指南(试行)[R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2011.
- [64] 广东省生态环境厅. 广东省生态环境厅关于印发广东省市(区)温室气体清单编制指南(试行)[R]. 广州: 广东省生态环境厅, 2020.
- [65] 宋然平, 朱晶晶, 侯萍. 准确核算每一吨排放: 企业外购电力温室气体排放因子解析[R]. 华盛顿: 世界资源研究所, 2013.
- [66] 马翠梅, 李士成, 葛全胜. 省级电网温室气体排放因子研究[J]. 资源科学, 2014, 36(5): 1005-1012.
- MA Cuimei, LI Shicheng, GE Quansheng. Greenhouse gas emission factors for grid electricity for chinese provinces[J]. Resource Science, 2014, 36(5): 1005-1012(in Chinese).
- [67] 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. GreenHouse gas emission factors of Chinese power grids for organization and product carbon footprint[J]. China Environmental Science, 2012, 32(6): 961-967(in Chinese).
- [68] 宁礼哲, 张哲, 蔡博峰, 等. 2020 年中国区域和省级电网温室气体排放因子研究[J]. 环境工程, 2023, 41(3): 222-228.
- NING Lizhe, ZHANG Zhe, CAI Bofeng, et al. Research on China's regional and provincial electricity GHG emission factors in 2020[J]. Environmental Engineering, 2023, 41(3): 222-228(in Chinese).
- [69] 蔡博峰, 赵良, 张哲. 中国区域电网二氧化碳排放因子研究(2023)[R]. 北京: 生态环境部环境规划院碳达峰碳中和研究中心等, 2023.
- [70] KHAN I. Importance of GHG emissions assessment in the electricity grid expansion towards a low-carbon future: a time-varying carbon intensity approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 196: 1587-1599.
- [71] JI LING, LIANGSAI, QU SHEN, et al. Greenhouse gas emission factors of purchased electricity from interconnected grids[J]. Applied Energy, 2016, 184: 751-758.
- [72] 刘昱良, 李姚旺, 周春雷, 等. 电力系统碳排放量与分析方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(6): 2220-2235.
- LIU Yuliang, LI Yaowang, ZHOU Chunlei, et al. Overview of carbon measurement and analysis methods in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(6): 2220-2235(in Chinese).
- [73] 周天睿, 康重庆, 徐乾耀, 等. 电力系统碳排放流分析理论初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 38-43.
- ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qian Yao, et al. Preliminary theoretical investigation on power system carbon emission flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 38-43(in Chinese).
- [74] 周天睿, 康重庆, 徐乾耀, 等. 电力系统碳排放流的计算方法初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 44-49.
- ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qian Yao, et al. Preliminary investigation on a method for carbon emission flow calculation of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 44-49(in Chinese).
- [75] 周天睿, 康重庆, 徐乾耀, 等. 碳排放流在电力网络中分布的特性与机理分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 39-44.
- ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qian Yao, et al. Analysis on distribution characteristics and mechanisms of carbon emission flow in electric power network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 39-44(in Chinese).
- [76] 康重庆, 程耀华, 孙彦龙, 等. 电力系统碳排放流的递推算法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(18): 10-16.
- KANG Chongqing, CHENG Yaohua, SUN Yanlong, et al. Recursive calculation method of carbon emission flow in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18): 10-16(in Chinese).
- [77] 冯欣, 杨军. 考虑网络损耗的碳排放流理论改进与完善[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5): 81-86.
- FENG Xin, YANG Jun. Improvement and enhancement of carbon emission flow theory considering power loss[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5): 81-86(in Chinese).
- [78] 汪超群, 陈懿, 文福拴, 等. 电力系统碳排放流理论改进与完善[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1683-1691.
- WANG Chaoqun, CHEN Yi, WEN Fushuan, et al. Improvement and perfection of carbon emission flow theory in power systems[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1683-1691(in Chinese).
- [79] 龚昱, 蒋传文, 李明炜, 等. 基于复功率潮流追踪的电力用户侧碳排放量计算[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 113-117.
- GONG Yu, JIANG Chuanwen, LI Mingwei, et al. Carbon emission calculation on power consumer side based on complex power tracing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 113-117(in Chinese).
- [80] 刘强. 基于复功率追踪的碳排放产权界定模型研究[J]. 通信电源技术, 2017, 34(2): 39-43.
- LIU Qiang. A research on the property right definition model of carbon emission based on complex power tracing[J]. Telecom Power Technology, 2017, 34(2): 39-43(in Chinese).
- [81] 闫丽梅, 胡汶硕. 基于复功率分布矩阵的电力系统碳流追踪方法[J]. 综合智慧能源, 2023, 45(8): 1-10.
- YAN Limei, HU Wenshuo. Carbon flow tracking method of power systems based on the complex power distribution matrix[J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(8): 1-10(in Chinese).
- [82] 李岩松, 刘启智, 张朕搏, 等. 基于电网功率分布的碳排放流计算方法[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 840-844.
- LI Yansong, LIU Qizhi, ZHANG Zhenbo, et al. Algorithm of carbon emission flow based on power distribution[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 840-844(in Chinese).
- [83] 周天睿, 康重庆. 基于碳排放流的配电系统低碳优化运行方法研究[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(3): 241-247.
- ZHOU Tianrui, KANG Zhongqing. Research on low-carbon oriented optimal operation of distribution networks based on carbon emission flow theory[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(3): 241-247(in Chinese).
- [84] 张笑演, 王槽裕, 黄蕾, 等. 考虑扩展碳排放流和碳交易议价模型的园区综合能源优化调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 34-46.
- ZHANG Xiaoyan, WANG Luyu, HUANG Lei, et al. Optimal dispatching of park-level integrated energy system considering augmented carbon emission flow and carbon trading bargain model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 34-46(in Chinese).
- [85] 包维瀚, 李姚旺, 季节, 等. 储能系统与双向电力负荷的碳排放核算方法[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3049-3057.
- BAO Weihuan, LI Yaowang, JI Jie, et al. Carbon emission accounting method for energy storage system and bidirectional power load[J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3049-3057(in Chinese).
- [86] 张自强, 申富泰, 魏军, 等. 含光伏不确定性的电力系统碳排放流分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(10): 270-278.
- ZHANG Ziqiang, SHEN Futai, WEI Jun, et al. Carbon emission flow analysis of the power system considering photovoltaic uncertainty[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2023, 37(10): 270-278(in Chinese).
- [87] 中国电机工程学会. 中国电机工程学会能源互联网专委会关于征求《用电间接碳排放核算技术规范》标准意见的函[EB/OL].

- [2023-05-19]. <http://www.csee.org.cn/portal/xpzyxjzq/20230519/30849.html>.
- [88] 清华大学电机工程与应用电子技术系. 践行碳达峰碳中和, 推进源网荷碳计量——全国首个电力系统“源网荷”实体碳表系统及能源碳计量平台在江苏常州正式上线[EB/OL]. [2022-08-12]. <https://www.eea.tsinghua.edu.cn/info/1038/3122.htm>.
- [89] 清华大学电机工程与应用电子技术系. 清华大学与国网江苏省电力有限公司联合发布全国首个电力系统全景碳排放流分析平台与“eCarbon+”智慧碳服务品牌[EB/OL]. [2022-8-12]. <https://www.eea.tsinghua.edu.cn/info/1038/5085.htm>.
- [90] 李业辉, 包维瀚, 周特, 等. 基于碳排放流迭代算法的分布式碳表系统(二): 系统设计与验证[J]. 电网技术, 2023, 47(7): 2682-2695. LI Yehui, BAO Weihang, ZHOU Te, et al. Distributed carbon meter system based on iterative calculation of carbon emission flow (II): system design and validation[J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 2682-2695(in Chinese).
- [91] 杨毅, 易文飞, 王晨清, 等. 基于碳流追踪的电力系统源网荷低碳经济调度[J]. 电力建设, 2023, 44(5): 108-119. YANG Yi, YI Wenfei, WANG Chenqing, et al. Low-carbon and economic optimal scheduling of power system source-rid-load based on carbon flow tracing method[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(5): 108-119(in Chinese).
- [92] 陈家兴, 王春玲, 刘春明. 基于改进碳排放流理论的电力系统动态低碳调度方法[J]. 中国电力, 2023, 56(03): 162-172. CHEN Jiaxing, WANG Chunling, LIU Chunming. Dynamic low-carbon dispatching method of power system based on improved carbon emission flow theory[J]. Electric Power, 2023, 56(3): 162-172(in Chinese).
- [93] 张笑演, 王槽裕, 黄蕾, 等. 考虑扩展碳排放流和碳交易议价模型的园区综合能源优化调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 34-46. ZHANG Xiaoyan, WANG Luyu, HUANG Lei, et al. Optimal dispatching of park-level integrated energy system considering augmented carbon emission flow and carbon trading bargain model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 34-46(in Chinese).
- [94] 杨毅, 易文飞, 王晨清, 等. 基于碳排放流理论的园区综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力建设, 2022, 43(11): 33-41. YANG Yi, YI Wenfei, WANG Chenqing, et al. Low-carbon economic dispatching of park integrated energy system applying carbon emission flow theory[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(11): 33-41(in Chinese).
- [95] 严中华, 王建功, 朱英刚, 等. 考虑碳排放流理论的风-碳捕-转气联合新型中长期调度方式[J]. 智慧电力, 2022, 50(6): 14-21. YAN Zhonghua, WANG Jiangong, ZHU Yinggang, et al. New medium-long term dispatching mode of wind-carbon capture-P2G combined system considering carbon emission flow theory[J]. Smart Power, 2022, 50(6): 14-21(in Chinese).
- [96] 张玉敏, 孙鹏凯, 吉兴全, 等. 考虑扩展碳排放流的综合能源系统低碳经济调度[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3174-3191. ZHANG Yumin, SUN Pengkai, JI Xingquan, et al. Low-carbon economic dispatch of integrated energy system with augmented carbon emission flow[J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3174-3191(in Chinese).



易俊

在线出版日期: 2024-07-15。

收稿日期: 2024-03-12。

作者简介:

易俊(1980), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统运行与控制、新型电力系统构建、低碳电力等, E-mail: yjun@epri.sgcc.com.cn;

孙浩然(1996), 男, 博士, 通信作者, 研究方向为电力系统电碳协同运行、能源系统综合评估等, E-mail: sunhaoran415@126.com。

(责任编辑 徐梅)