

新能源电力系统碳排放核算研究综述

张子青¹, 张旭², 田京京^{1,2}

(1. 陕西理工大学 电气工程学院, 陕西 汉中 723000;

2. 陕西理工大学 数学与计算机科学学院, 陕西 汉中 723000)

摘要: 随着“双碳”目标不断推进, 电力系统碳排放核算成为支撑能源低碳转型的重要基础。以新能源为主的新型电力系统在运行特性、电源结构以及调度机制方面与传统火电系统有显著区别, 呈现出碳排放时空异质性强、间接排放与全生命周期排放占比高、多主体碳责任边界模糊等新特征, 给现有核算方法带来严峻挑战。本文对新型电力系统中碳排放的核算体系进行系统梳理, 包括运行阶段的直接排放、因调峰火电与外部能源依赖产生的间接排放, 以及设备制造、运行及退役全过程的生命周期排放, 同时探讨了系统边界划定的科学原则与方法。基于此, 全面综述当前主流碳核算方法: 在供给侧, 生命周期评估能系统量化全链条碳足迹但数据获取困难, 投入产出分析适用于宏观政策制定却难以体现技术差异; 在需求侧, 区域平均法计算简便但忽略节点级时空动态性, 碳排放流追踪法可实现跨区交易碳责任精确分摊但计算复杂度高, 基于机器学习的方法虽有分钟级预测能力, 却依赖大量数据且可解释性弱。本文通过对比各类方法在精度、实时性、数据需求及适用场景上的差异, 指出当前体系在动态响应能力、空间分辨率、全环节覆盖及多主体责任公平划分等方面仍存在明显局限。最后, 提出未来应着重构建融合源网荷储协同的动态碳核算模型, 发展融合物理机理与人工智能的实时预测技术, 并加快建立统一、透明、覆盖全生命周期的碳排放核算标准体系, 为新型电力系统低碳转型提供科学支撑。

关键词: 新型电力系统; 碳排放核算; 新能源发电; “双碳”目标

中图分类号: TK01

文献标志码: A

文章编号: 1004-3918(2026)01-0020-11

Review on Carbon Emission Accounting in New Energy Power Systems

ZHANG Ziqing¹, ZHANG Xu², TIAN Jingjing^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, Shaanxi China;

2. School of Mathematics and Computer Science, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, Shaanxi China)

Abstract: With the continuous advancement of the “dual carbon” goals, carbon emission accounting in the power system has become a critical foundation supporting the low-carbon transition of the energy sector. The new power system, predominantly based on renewable energy, differs significantly from traditional thermal power systems in terms of operational characteristics, power source structure, and dispatch mechanisms. It exhibits new features such as strong spatiotemporal heterogeneity in carbon emissions, high proportions of indirect and lifecycle emissions, and blurred carbon responsibility boundaries among multiple entities, posing severe challenges to existing accounting methods. This paper systematically reviews the carbon emission accounting framework for the new power system,

收稿日期: 2025-08-13

修回日期: 2025-09-30

接受日期: 2025-10-28

项目基金: 国家自然科学基金(11961041); 国家社会科学基金重大项目(21&ZD153)

作者简介: 张子青(2002-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析与评价

通信作者: 田京京(1979-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为电力系统分析与评价, Email: 1519599829@qq.com

引用格式: 张子青, 张旭, 田京京. 新能源电力系统碳排放核算研究综述[J]. 河南科学, 2026, 44(1): 20-30.

Zhang Z Q, Zhang X, Tian J J. Review on carbon emission accounting in new energy power systems[J]. Henan Science, 2026, 44(1): 20-30.

including direct emissions during operation, indirect emissions resulting from peak-shaving thermal power and external energy dependencies, as well as lifecycle emissions encompassing equipment manufacturing, operation, and decommissioning. The principles for defining system boundaries are also discussed. Based on this, a comprehensive overview of current mainstream carbon accounting methods is provided. On the supply side, Life cycle assessment (LCA) can systematically quantify the carbon footprint across the entire chain but faces challenges in data acquisition; Input-output (IO) analysis is suitable for macro-level policy formulation but struggles to reflect technological differences. On the demand side, the regional average method is simple to calculate but overlooks nodal-level spatiotemporal dynamics; Carbon emission flow (CEF) tracking enables precise allocation of carbon responsibilities in cross-regional transactions but involves high computational complexity; while machine learning-based methods offer minute-level prediction capabilities, but they rely on extensive data and exhibit weak interpretability. By comparing the differences among various methods in terms of accuracy, real-time capability, data requirements, and applicable scenarios, this paper highlights the existing limitations of the current system in dynamic response capability, spatial resolution, comprehensive coverage of all segments, and fair allocation of responsibilities among multiple entities. Finally, it proposes that future efforts should focus on constructing a dynamic carbon accounting model that integrates source-grid-load-storage coordination, developing real-time prediction technologies that combine physical mechanisms with artificial intelligence, and accelerating the establishment of a unified, transparent, and lifecycle-encompassing carbon emission accounting standard system, thereby providing scientific support for the low-carbon transition of the new power system.

Key words: new-type power system; carbon emission accounting; new energy generation; dual carbon goals

0 引言

电力行业的碳排放量在能源行业总排放量中所占比例超过40%^[1-2],在全球气候变化不断加剧以及碳中和目标提出的大背景之下,电力系统作为碳排放的一个关键源头领域,其碳排放核算已成为全球能源向低碳方向转型过程中的关键议题。中国在2020年明确提出了“双碳”目标,即在2030年之前达成碳达峰,在2060年之前实现碳中和,并且明确要求构建起“以新能源作为主体的新型电力系统”,以此推动电力行业在碳排放总量与强度方面实现“双控”。为实现这一战略目标,亟需科学且严谨的电力系统碳排放核算体系作为支撑。

然而中国电力系统在向低碳转型的进程中面临着独特的挑战:一方面,能源中心与负荷中心的分布存在错位,由此产生了大规模的跨区域输电需求,在2022年,“西电东送”的规模超过了3万亿kWh,其中煤电所占比例超过60%^[3],在此过程中会出现复杂的碳排放责任归属问题;另一方面,风光新能源的装机量正在快速增长,与之相伴的弃风弃光现象以及相应的“优先消纳”政策,在很大程度上对电网碳排放的时空分布产生了影响^[4-5],另外,分布式能源的普及,也让电力系统的供需平衡变得更为复杂,增加了碳排放计算的难度与挑战^[3]。

在积极推进新能源电力系统建设的进程中,电力系统碳排放量科学精准的核算尤为关键,科学精确的核算不仅有助于全面评估新能源取代传统能源所产生的碳减排效益、辨别各类能源技术的碳排放差异,还有利于提高企业碳监管能力,是制定碳减排政策、推动碳市场建设、优化能源结构必不可少的支撑。在新能源逐渐取代传统能源、电力系统运行结构日益复杂的当下,传统核算方法由于忽视电力潮流动态特性,很难契合“双碳”目标下对碳责任归属、碳足迹追踪的精细化、实时化要求,需要构建起适应新型电力系统特征的碳排放核算体系。

随着国内外学者持续深入研究,电力系统碳排放核算方法体系不断丰富,主要囊括生命周期评估法、投入产出法以及碳流动态追踪法等多种研究方法,这些方法于理论和应用层面不断得到完善,在排放因子评估以及电网碳强度分析等领域取得了积极进展,为碳排放的量化分析给予了有力支持。然而当下在实际应用过程中仍面临方法体系缺乏统一、数据基础尚需完善、对高比例新能源耦合机制考量不足等诸多问题,依旧需要构建更加系统化、契合能源转型发展需求的碳核算框架。

本文系统综述了新能源电力系统碳排放核算研究成果与进展,首先对新能源电力系统的碳排放类型进行界定,包括直接、间接以及全生命周期三种类

型,接着深入剖析其时空异质性、弃风弃光影响等核心运行特征,在此基础上,分别介绍 IPCC、ISO、GHG Protocol 等主流核算标准,同时指出系统边界划分与能源结构、调度策略等关键影响因素。本文着重介绍了供给侧(LCA、投入产出法)以及需求侧(区域平均法、碳流追踪模型、机器学习)的核算方法,并对这些方法的精度、实时性及计算复杂度等差异进行评述,最后指出未来需发展源网荷储协同碳评估模型、智能实时预测技术以及精细化责任分配机制,并且解决数据缺失、多主体责任公平性及政策协同不足等问题,为构建适配高比例新能源的碳核算体系提供理论支撑。

1 新能源电力系统碳排放核算的基本概念与框架

在“双碳”目标的推动之下,我国电力系统正加快速度从以煤电为主的传统模式,向以风电、光伏等可再生能源为主体的新型电力系统转型。据国家能源局统计数据,近年来,新能源装机规模呈现爆发式增长:2019年我国可再生能源累计装机约 7.6 GW,占全部发电装机的 39%;2022 年装机突破 12 GW,装机占比提升至 47.3%;2023 年装机首次超过 15 GW,装机占比已达 52%;截至 2024 年上半年,风电与光伏装机合计约 1206 GW,提前六年实现到 2030 年风电与光伏总装机量超过 1200 GW 的目标。新能源在全部装机中的比例预计超过 55%。这一结构性的变革重塑了电力系统的物理架构与运行逻辑,并深刻改变了碳排放的生成机制与时空分布特征,对碳排放核算体系提出了全新的要求。

传统电力系统将集中式且可调度的化石能源机组当作核心,其电源结构较为稳定,碳排放主要源自燃煤、燃气等燃料的直接燃烧,具有来源集中、过程可控制以及时空分布均匀等特性。相应地,其碳核算方法大多依据静态排放因子或者燃料消耗量,着重于发电侧的直接排放计量,系统边界清晰,数据获取方便,责任归属明确。

相比而言,新能源电力系统呈现出显著差异:首先,碳排放结构变得更为复杂化,风电、光伏等在运行阶段几乎没有直接排放,然而其碳足迹间接隐含在设备制造、原材料开采、运输安装以及配套储能等整个生命周期环节,间接排放与隐含碳的占比显著提升;其次,时空动态性提高,新能源的出力受到气象条件的强烈影响,其系统碳排放强度在日内、季间甚至区域间剧烈波动^[6],传统的静态平均因子难以

体现真实的碳流情况;再次,系统耦合度提升,为了平抑波动,系统需依靠火电调峰、跨区输电、储能充放电等多种调节手段,这使得碳排放责任在源、网、荷、储多个主体之间相互交织^[7],边界模糊、归属困难;最后,运行机制变革,“优先消纳”政策、弃风弃光现象、分布式电源广泛接入等新特征,加剧了电力潮流与碳流的非线性耦合关系。

因此,面向稳态、集中式电源的碳核算范式已难以适应新型电力系统呈现出的高比例可再生能源、强不确定性、多主体协同等新特征^[6],当前迫切需要构建一套能精准刻画新能源系统碳排放时空异质性、全生命周期属性以及多主体责任边界的科学碳排放核算体系。基于此,本部分将从新能源电力系统碳排放的基本概念着手,系统梳理其核算类型划分,深入剖析其运行与排放特性,并探讨主流核算标准、系统边界设定原则以及关键影响因素,以此为本文后续核算方法的综述与体系构建提供理论基础与逻辑支撑。

1.1 基本概念

碳排放核算的科学性建立在对碳排放来源、系统运行机制及其能量转化路径的准确理解基础之上,对于新能源电力系统而言,碳排放的形式呈现出多元化的特点,不仅涉及运行环节中直接或者间接的碳排放,还包含了设备制造、运输、安装、运行以及退役等整个生命周期过程。此外,鉴于新能源出力有波动性和不稳定性,其运行方式对碳排放产生的影响十分显著,需要清晰划分不同类型的碳排放,并且深入剖析新能源电力系统的运行与排放特征。

1.1.1 碳排放类型划分

依据排放环节以及归属方式存在的差异,新能源电力系统所产生的碳排放一般可被划分成直接排放、间接排放以及生命周期排放这三种类型。

1)直接排放,指电力系统在运行期间直接生成二氧化碳^[8-10]。例如,在生物质发电当中,燃烧生物质燃料所产生的 CO₂ 构成了直接排放,而风电、光伏等可再生能源在正常运行时并不涉及燃料燃烧,几乎不存在直接碳排放^[11]。

2)间接排放,主要源自新能源系统运行所依靠的外部资源产生的碳排放。例如,风电场在建设以及运行阶段需耗费大量电力与金属材料,其依赖的传统能源系统(如煤电)会间接带来碳排放^[12],另外为应对新能源波动性而配置的火电调峰机组、储能系统充电过程中的电力来源等,也可能被算入间接

碳排放^[13]。

3) 生命周期排放,指整个能源系统从自然中获取资源起始,历经开采、原材料加工、产品生产、包装运输、产品销售、产品使用一直到产品废弃处置等各个阶段所产生的碳排放^[14]。新能源电力系统在制造环节的碳排放占比较大,以光伏发电为例,光伏硅料生产(约占全生命周期65%)^[15-16]与风机叶片环氧树脂工艺(约占70%~80%)是主要排放源^[9]。因此,生命周期视角下的核算尤为重要,是衡量新能源实际碳减排贡献的关键方式。

1.1.2 新能源电力系统的运行与排放特性

新能源并网显著地改变了电力系统的碳排放特征,表现为时空异质性(即其碳排放在时间与空间维度上剧烈波动)。在时间维度方面,新能源出力在日内与日间呈现显著的不确定性,如部分光伏高渗透率地区,午间和晚间的碳排放因子差距达到40%^[17],这种差异使得波动性补偿需求激增。在空间维度上,西北风电基地等新能源富集区与华东等负荷密集区产生能源与需求错位,由此产生的跨区输电引发了碳排放责任分摊的争议。这种异质性源于新能源出力与负荷需求时空错配,比如光伏发电受昼夜周期影响较大,风电则因风速波动而呈现日内与日间的不稳定性等^[18]。

当新能源消纳能力不足时会出现弃风弃光现象,既造成资源的浪费,也会阻碍低碳转型进程。为缓解此问题,需要在政策层面上统筹优化新能源开发布局的同时,推动分布式能源与微电网建设,并通过建立碳交易市场、跨区输电通道等机制提升电力系统对新能源的消纳能力。此外,电网还需提高其灵活调节能力,如配置储能设备来平滑新能源出力波动,或者利用需求侧响应技术引导负荷曲线以匹配新能源发电特性^[19]。

为了平抑新能源波动,火电需频繁进行启停调峰,但其在低负荷状态下运行效率明显下降,对于60万kW机组而言,负荷率每降低10%,煤耗大约上升6.9 g/kWh,在70%负荷的时候煤耗可达300 g/kWh^[20]。为实现消纳而配套的储能设备,其全生命周期碳排放也需要被纳入核算范围:如磷酸铁锂电池由于硅料提纯、电极制造等环节,其全生命周期碳足迹达到12 g CO₂eq/kWh^[21]。

因此,在构建新能源电力系统碳排放模型时,必须充分考虑其运行方式的多样性以及系统集成的复杂性。

1.2 碳排放核算标准

为了系统地评估新能源电力系统在不同环节的碳排放水平,研究人员提出了多种核算标准框架。当下主流的碳排放核算标准包含IPCC国家清单指南、ISO国际标准^[22]、GHG Protocol企业准则以及中国国家标准等^[23],下面是对这些主流标准的简要概述。

在新能源碳排放核算的标准体系里,IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)发布的《国家温室气体清单指南》(IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories),成为全球范围内最具权威性的核算方法依据。2006年版指南及其2019年修订版为能源部门提供了明确的碳排放计算方法和碳排放因子,涵盖了从化石燃料燃烧到可再生能源应用等多个维度。该指南主要针对国家级温室气体清单编制,运用“活动数据×排放因子”的基本核算逻辑,其方法更注重宏观统计,适用于全国或者区域层面新能源碳减排效果的评估。

ISO(国际标准化组织)制定的温室气体系列标准,包括ISO 14064、ISO 14067、ISO 14040。为组织、项目乃至产品层面的碳排放核算和碳足迹评估都提供了系统化的国际标准框架。其中ISO 14064分为三部分,分别涉及组织层面温室气体的量化与报告、减排项目的核算与验证,以及第三方审定流程;而ISO 14067则专门针对产品碳足迹(Product Carbon Footprint)进行生命周期评估^[24]。这些标准为新能源项目提供了规范的量化、报告以及验证框架,适用于碳交易和信用认证场景。

GHG Protocol企业准则是由世界资源研究所(WRI)以及世界可持续发展工商理事会(WBCSD)联合开发,它明确界定了三范围排放框架,分别是范围1直接排放、范围2间接排放和范围3价值链排放。其核算所遵循的原则包含相关性、完整性以及准确性。在新能源的研究工作当中,此准则常运用于企业级碳足迹的分析,如对生物质能项目的价值链排放进行量化,以此为碳中和路径的优化提供支持^[23]。

国家标准《工业企业温室气体排放核算和报告通则》(GB/T 32150—2015)和《温室气体排放核算与报告要求》(GB/T 32151—2015),仅覆盖运行阶段直接排放,忽略新能源设备制造、运输、退役等生命周期环节。该设计主要针对传统火力发电的碳排放监管,在新型电力系统背景下存在显著局限性。

1.3 系统边界划分以及主要影响因素

碳排放核算中系统边界的划定是核心环节^[25],它直接决定了被纳入核算的排放源种类、时间以及

空间范围,对核算结果的可比性与政策参考价值产生影响^[26]。在新能源电力系统当中,因其运行模式复杂,系统边界划分面临着更高的挑战,实践中需要结合研究目的、技术特点以及具体核算方法进行合理设定。

从空间的维度出发,系统边界可包含单个发电站、区域电网乃至全国性综合能源系统。以风电场为例,较窄的边界或许仅涉及风电场运行期间的能耗与排放,而较宽的边界则可能覆盖风电场及其供电区域在发电、输送以及分配等环节产生的碳排放,在风光储多能融合系统等多能源耦合的情形下,核算边界还需要包含储能设施、火电调峰机组以及风电场植被恢复区等相关子系统^[27]。

从时间的维度进行分析,系统边界可以依据年度、生命周期以及运行周期等进行划分,生命周期边界可充分呈现新能源项目从建设直至退役的整个过程中的碳排放情况,不过其数据采集周期较长,核算的复杂度也较高,而年度运行边界则更适合用于政策的制定以及排放报告,有利于与现行的碳市场机制实现对接。

系统碳排放的主要影响因素囊括了能源结构、技术效率、调度策略以及储能系统配置等方面。能源结构作为决定系统碳强度的关键变量,高比例可再生资源的接入可帮助降低单位电量的碳排放水平,设备自身能耗以及其运行时的负载同样会对整体排放表现产生影响,像风电机组容量因子、光伏转换效率、储能能量利用率等参数便是如此。调度方式决定了系统对火电机组的依赖程度,不合理的调度有可能引发“弃风弃光”现象,增加波动补偿设施的负担。另外储能系统的配置,比如充放电策略,也会带来额外的能耗和碳排放,在核算过程中需要给予充分考量。

明确系统边界以及准确识别影响碳排放的关键因子,是构建科学的电力系统碳核算模型的前提条件,未来要在标准化的边界设定基础之上,结合新能源电力系统实际运行的特性,提高新能源电力系统碳核算的准确性和实用性。

2 新能源电力系统碳排放核算方法与模型综述

构建科学合理的新能源电力系统碳排放核算体系时,选择合适的方法是达成科学精确核算的基础条件。传统以火电为核心的核算方法已暴露出适用性局限,无法契合高比例可再生资源接入情形下对

碳责任分摊、碳足迹溯源以及政策响应等方面的高精度要求。为此,当前学术界和工程界提出了多种核算方法,本部分会从供给侧和需求侧分别给予介绍,包括生命周期评估、投入产出分析、碳流追踪模型、机器学习预测等多种核算方法,并比较各类方法在精度、实时性、适应性等方面的差异,探寻新型电力系统架构下的碳核算技术路径与发展方向。

2.1 针对供给侧的碳排放核算方法

2.1.1 火电厂碳排放核算的传统方法

针对火电厂碳排放,传统的核算方法主要有三种:燃烧排放因子法^[28]、物料平衡法^[29-30]以及实测法^[31-33]。燃烧排放因子法借助燃料消耗与碳排放量之间的线性关系,具有数据要求低、适于大规模统计的优势,但其精度受燃料类型、燃烧条件等因素影响较大;物料平衡法基于碳守恒原理,核算精度较高,可追踪碳元素去向,但计算复杂、数据采集成本高;实测法通过烟气监测或卫星遥感的手段实时获取碳排放数据,最接近真实值但受技术与地域限制较大,尚未在我国全面普及。

随着新能源装机占比不断提升,电力系统运行特性日益复杂,传统核算方法已不适用于新能源发电环境,无法精准反映新能源并网后电力系统的实际碳排放水平。因此,推动更科学且实时性更强的新能源碳排放核算方法,是新能源背景下碳减排与碳监测的关键途径。

2.1.2 生命周期评估(LCA)方法

生命周期评估(Life Cycle Assessment, LCA)^[34-37]秉持“从摇篮到坟墓”的理念,针对电力生产的整个流程开展碳排放的系统化量化工作,其核算边界覆盖燃料生产运输、设备制造安装、运行维护以及退役处理等多个阶段,可充分揭示新能源技术的间接碳排放特征。

LCA能够比较不同新能源项目(如光伏、风电、生物质等)在不同环境和技术条件下的碳排放情况,识别主要碳排放热点环节,为政策制定、碳交易机制构建、产业链低碳化项目等提供依据。LCA核算通常分为四个步骤:目标与范围定义、数据收集与清单分析、环境影响评估以及不确定性处理。其优势在于核算方法的系统性与可扩展性,但也存在模型构建复杂、系统边界不统一、基础数据可获得性低等局限。

2.1.3 投入产出(IO)分析方法

投入产出(Input-Output, IO)分析方法起源于经济学领域^[38],该方法通过构建社会经济各个行业之

间的投入产出表,以量化的方式揭示出能源消费与碳排放于各产业以及区域之间的流动和转移关系,投入产出法的基本公式通常表示为^[39]:

$$X = A \times X + Y, \quad (1)$$

其中: X 表示总产出; A 表示技术系数矩阵; Y 表示最终需求。

基于IO分析的碳排放核算在电力系统中的应用现状较为广泛,侧重宏观层面碳排放足迹的量化,在核算地区或部门层面的碳排放方面具有显著优势,能够有效反映电力生产的间接碳排放及经济活动间的关联效应。其核算流程主要包括构建扩展投入产出模型、估算直接排放系数和间接排放系数,并对各部门或产品碳足迹进行分解与归集^[40]。LCA与IO分析都基于系统分析的框架,其中IO方法更关注宏观数据,系统边界一般基于国家或区域的经济结构,不涉及具体产品生命周期,常用于宏观政策分析。

然而,IO分析将不同类型的能源产品归入同一部门,难以体现特定发电项目或工艺的差异性;难以处理间接与发电相关的部门,如建筑和燃料生产,限制了其在复杂电力系统中的应用。同时,与LCA方法相同,模型运行需要大量专业知识和决策支持,且高度依赖于统计数据的质量,在条件受限的情况下可能与实际脱节。

2.2 针对需求侧的碳排放核算方法

以上这些传统方法提供了整体系统视角,但忽略电网节点级的时空变异和责任分配问题,为此,需要引入更精细的节点级碳排放因子计算。

2.2.1 基于区域平均法的静态碳排放因子

区域平均法是用于计算静态碳排放因子的主要方法^[41-42],鉴于局部火电厂以及新能源电厂的存在,可认定在一定区域范围内碳排放因子是相等的,即一定区域里用户的碳排放量会按照比例进行均摊。区域平均法假定区域内碳排放呈现均匀分布状态,其具体步骤如下:①划定区域边界,中国分为六大区域电网,包括华北、东北、华东、西北、华中和南方电网,各区域又进一步划分为省级电网。根据实际需要还可以划分为更小的区域,但是由于不同地区新能源装机比例不同,平均碳排放因子的区域颗粒度不能太小;②统计区域间电力流向,确定净调入量以及区域内发电量;③计算本地发电的碳排放,通常使用发电侧的方法计算;④根据调入地的碳排放因子计算净调入电力的碳排放;⑤排放因子计算,其计算公式简化为^[43]:

$$EF_{\text{region}} = \frac{\sum E_g + \sum E_{\text{in}}}{P_g}, \quad (2)$$

其中: E_g 是区域内发电产生的碳排放量, E_{in} 是净调入电力的隐含碳排放量, P_g 是区域内的总供电量。

区域平均法所需数据量较少,计算过程简单快速,适用于大规模的宏观统计以及企业年度碳排放工作。当缺少实时电力调度数据时,可直接采用由国家发展和改革委员会发布的区域电网因子。然而该方法的数据更新频率低,难以反映实时变化情况;且所有区域内的用户碳排放因子相同,会存在区域划分颗粒度导致的公平性不足;此外,对于安装光伏的用户,由于光伏出力存在波动,会致使碳排放出现时空异质性,而这种影响也通常被忽略。

2.2.2 基于节点碳流动态追踪法的碳排放核算方法

碳排放流(Carbon Emission Flow, CEF)理论通过将电网视为有向加权图,建立功率-碳流耦合的虚拟网络模型。该方法基于基尔霍夫定律扩展的碳流守恒方程,利用矩阵运算实现全网碳流的动态分配^[44],并且能处理无功对节点碳排放因子的影响^[45]。其优势在于可量化跨区域电力交易中的隐含碳排放,但面临节点注入源混合比例不确定性的挑战。改进方向主要在于通过概率潮流模型处理新能源波动性^[46-47]。

依据精细潮流计算的结果,构建起依附于电网的碳排放虚拟网络流,借助潮流计算所得到的结果展开精确的潮流溯源工作,计算出各个节点的碳排放因子:

$$E = A \times e, \quad (3)$$

其中: A 是节点买入电量,kWh; e 是节点排放因子,kg/kWh。

近年来,大量研究围绕节点碳排放因子的计算展开。其核心计算公式可表示为:

$$\lambda_i = \frac{\sum_{j \in G} P_{j \rightarrow i} EF_j + \sum_{k \in T} P_{k \rightarrow i} EF_k}{P_{\text{load},i}}, \quad (4)$$

其中: $P_{j \rightarrow i}$ 为发电节点 j 注入负荷节点 i 的功率; EF_j 为发电节点 j 的碳排放因子; $P_{k \rightarrow i}$ 为输电节点 k 向 i 的传输功率; EF_k 为输电节点 k 的碳排放因子。

碳排放流(CEF)理论在应对新能源不确定性、提升计算效率及完善无功功率影响建模等方面不断深化,涌现出一系列改进方法^[48]:将风光出力的不确定性用随机变量描述,生成功率流分布,再对每个样本

求解 CEF,得到碳因子概率分布^[49];在子网内部独立求解 CEF,显著降低矩阵规模并提升时空分辨率^[50];将无功功率导致的损耗转化为等效有功功率后乘以区域碳因子,形成无功碳贡献系数,以消除因功率因数偏差导致的系统误差^[51];借助有功无功耦合,能够揭示线路网损和无功补偿对碳排放的实际贡献,避免因忽视无功而低估系统碳强度。

碳流追踪法可以实现用户侧节点级碳排放计量、小时级碳责任分摊以及源荷互动碳流优化,特别适用于含有高比例新能源、存在跨区电力交易的复杂电网。然而其计算复杂度较高,需要全电网完整且准确的数据,并且随着大规模复杂电网所含节点数量的不断增多,此方法所需的计算量极为庞大。

2.2.3 基于机器学习的碳排放核算方法

针对传统方法计算复杂度高的问题,学者提出利用深度神经网络(DNN)建立电网运行状态与碳排放因子的非线性映射关系。通过训练历史运行数据,可快速预测区域碳排放因子,输入的数据包括历史负荷等电气数据、网络拓扑数据、电力交易数据以及气象数据等^[52-53]。该方法需要解决小样本场景下的泛化性问题,近期有研究尝试结合迁移学习与物理约束嵌入来提升可靠性^[54],并且由于经过主次节点的潮流差异大,该方法面临支路末端节点处误差较主干增大的问题,可以使用主次节点法进行修正^[55]。

神经网络方法有精度高、实时性高的特性,已构建的模型其计算速度远超传统方法,可达到分钟级计算需求,十分适合处理新能源并网之后所引发的复杂性与实时性问题。借助对不同输入数据展开训练,神经网络模型可处理传统方法难以应对的非线性问题,并且可以同时解析包含各类气象数据等在

内的多模态数据。该方法能解决跨区域交易的场景并能处理新能源出力波动带来的时空异质性问题;同时以碳排放量作为目标函数,还能通过优化调度实现清洁能源消纳、降低系统碳排放量;根据历史数据,深度学习模型还能预测未来负荷变化、能源结构发展趋势,有助于政策制定。

然而,神经网络模型在进行训练的时候需要海量的历史数据(某些场景需要用到5年以上的历史数据)以及大量的计算资源,中小型企业部署的成本较高;传统方法依靠网络潮流计算,具有较高的可解释性,而神经网络模型属于黑箱模型,其得出的结论难以解读。

2.3 核算方法对比分析

由表1可以看出,上述各类碳排放核算方法在理论基础、适用尺度以及技术实现路径方面各有特色,其选择需紧密结合具体应用场景对于精度、时效性以及数据可得性的综合需求。传统火电厂核算方法立足于燃料消耗或直接监测,适用于结构稳定、以化石能源为主的系统,但在新能源高渗透环境下难以捕捉系统整体碳流的动态演化。生命周期评估(LCA)虽能全景式刻画新能源技术从“摇篮到坟墓”的碳足迹,为技术选型与政策设计提供深度支撑,但其对制造、运输等环节基础数据的高度依赖,以及静态分析框架对运行灵活性的忽视,限制了其在实时调度或短期碳管理中的应用。投入产出(IO)法则凭借其宏观经济视角,在区域或行业层面碳关联分析中具有独特优势,却因部门聚合度过高而无法辨识具体电源技术或电网节点的排放差异。

面向需求侧的核算方法则更关注碳责任的公平分配与实时响应能力。区域平均法以其简洁性成为

表1 不同碳排放核算方法对比

Tab.1 Comparison of different carbon emission accounting methods

方法类别	主要优点	主要缺点	适用场景
传统火电厂核算法(燃烧排放因子法、物料平衡法、实测法)	简便易行,适合大规模统计和年度追踪	对新能源和复杂电网环境适应性差,难以反映实时变化和节点责任分配	适用于传统火电背景的碳排放核算,统计与监管监测
生命周期评估(LCA)	系统性强,能全面揭示间接排放	模型复杂,数据成本高,动态调整难,部分环节信息难得	新能源项目的环境影响评价、政策支持和产业链低碳提升
投入产出(IO)分析	宏观视角强,便于政策分析,操作相对简便	归纳性强,难以反映微观和时空异质性,无法捕捉发电项目差异	宏观区域碳足迹、经济产业关联性分析
区域平均法	计算快速简便,适合大规模宏观统计	忽略异质性,区域间不公平,不能反映实时调度变化	大型宏观碳排放统计,年度企业排放核算
碳流追踪(动态碳排放因子)	反映时空动态变化,能实现节点责任分摊,适合复杂电网	计算复杂,数据要求高,节点数多时难以扩展	跨区域电力交易、智能电网碳责任追溯
机器学习方法	预测速度快,能处理复杂非线性关系,适应新能源变化	依赖大量高质量数据,模型“黑箱”难解读,泛化能力受限	实时监测、预测分析、优化调度,政策支持场景

当前碳市场与企业核算的主流工具,但其“一刀切”的假设掩盖了新能源出力波动与跨区潮流引起的碳强度时空分异,易导致用户侧碳责任误判。相较之下,碳排放流(CEF)追踪法通过构建电能-碳流耦合模型,实现了碳排放因子在电网节点层面的精细化映射,为跨省交易、分布式电源接入等复杂场景下的责任溯源提供了可能,但其计算负担随电网规模急剧增长,对数据完整性与算法效率提出极高要求。近年来兴起的机器学习方法,则尝试以数据驱动方式绕过复杂物理建模,通过学习历史运行数据实现碳因子的快速预测与优化,展现出良好的实时性潜力,但其“黑箱”特性、对高质量大数据的依赖以及在小样本或极端工况下的泛化能力不足,仍是工程化落地的主要障碍。

综上,尚无单一方法能兼顾全生命周期覆盖、高时空分辨率、强实时性与低数据门槛等多重目标。未来方法的演进方向在于融合互补——例如将LCA提供的基准排放数据嵌入动态碳流模型,或在机器学习框架中引入物理约束以提升可解释性与鲁棒性,从而构建适应新型电力系统复杂特性的多尺度、协同化核算体系。

3 未来发展的挑战及趋势

综合前文对各类碳排放核算方法的梳理可发现,虽然生命周期评估、碳流追踪、机器学习等技术在不同维度推动了核算精度与适用性的提升,然而面对新型电力系统高比例可再生能源接入、源网荷储深度耦合、运行状态高度动态等新特性,现有核算体系在全面性、实时性、公平性以及政策协同性等方面仍存在不足。在间接排放量化、全生命周期覆盖、节点级责任划分以及跨区域交易碳流追踪等关键环节,方法局限与实践需求之间的矛盾变得日益明显。

3.1 存在问题及未来挑战

尽管碳排放核算技术持续进步,初步形成了系统性框架,但随着新型电力系统结构日益复杂,现有新能源电力系统碳排放核算体系仍存在诸多局限:现有方法大多集中于发电侧和用电侧即源荷的排放,往往忽视了难以追踪的输电环节以及储能环节的损耗,而且新能源发电的全生命周期计算也尚未实现完善统一;另外现有方法普遍存在时空颗粒度粗糙、动态响应迟缓的问题,这会引发责任分摊困难等问题;机器学习等方法尽管在一定程度上缓解了响应速度问题,但需要更广泛、更全面的数据作为支撑,这对当前薄弱的数据基础提出了更高的要求与挑战。

当前核算体系在理论层面所存在的问题尚未得到完善解决,未来的体系建设以及实践运用同样面临着诸多挑战:其一,随着核算边界的不断拓展、多系统耦合程度的提升以及碳排放计算的复杂性上升,尤其在多能融合、区域协同等场景当中,构建多维度、高分辨率的数学模型已成为必要前提,这对算法效率以及所需资源提出了更高要求。其二,数据获取的难度以及准确性问题依旧是当前制约碳核算可靠性的关键因素,新能源电力系统在运行期间涉及大量设备与制造环节,但与之相关的碳排放数据分散、缺失或标准不一,尤其在生命周期核算里,不同制造商、项目之间的工艺和能耗差异极大,难以形成统一的碳排放核算体系,这直接影响了核算的科学性。其三,碳排放责任的分配以及公平性问题也日益突显,在多主体参与的新能源系统中,碳排放的归属界定较为复杂,在跨区域输电、共享储能、合同电量交易等新兴模式下,怎样合理划分不同主体的碳责任、保障市场参与者权益,需要更为细致的核算机制与制度设计。其四,排放核算与现有政策和市场机制之间尚存在较大协同缺口。目前的碳市场、绿色电力交易及能源补贴政策等多以整体电量或装机容量为基础,尚未充分纳入动态碳足迹信息。核算体系难以与政策机制高效衔接,导致碳信息在资源配置中的激励作用不足。因此,亟需推动核算机制与政策工具的深度融合,实现“数据—核算—交易—激励”一体化发展路径。

3.2 研究趋势

面向高比例可再生能源、高度智能化与分布式能源广泛渗透的新型电力系统,碳排放核算正从传统的静态、宏观统计,加速向动态、精细、系统协同的方向演进。这一转变要求碳核算体系必须与电力系统的整体结构相适应,优化其系统的层级结构以实现高效调度和绿色低碳发展的路径设计。融合源网荷储协同运行机制的动态碳评估模型正成为学术研究的前沿焦点,其核心在于突破静态核算框架,构建多时空尺度、多主体参与的碳排放量化体系,为新型电力系统低碳转型提供科学决策依据。

智能调度与决策支持技术在碳排放控制中扮演日益关键的角色。借助人工智能、机器学习、边缘计算等先进技术手段,未来的核算方法可以实现碳排放实时预测与调度优化,从而提高新能源系统运行的效率和灵活性。例如,可以在负荷侧精细化管理基础上,利用人工智能模型开展碳敏感型电力调度或动态发电计划,为实现系统碳最小化提供支持。

低碳需求响应机制的推广正在为用户侧参与碳减排创造新路径。通过引导终端用户在用电时考虑碳成本,从而改善用户用电行为,例如修改碳价或碳配额以引导用户调整用电时间、用电方式与用电量,可有效释放终端用户在碳减排中的潜力。与之相配套的精细化碳排放核算机制,需实现“小时级、用户级、设备级”的多维度核算能力,以确保响应机制的透明性与公平性。

数字化转型和大数据技术的不断深化也为碳核算提供了新的技术支撑。基于物联网、云计算和区块链的碳数据采集与存储平台,能够实现数据的实时采集、动态更新和全流程追踪;同时,通过融合多源数据进行分析,可进一步提升碳排放核算的准确性与场景适应能力,从而推动碳排放管理走向精细化与智能化。

综上所述,新能源电力系统碳排放核算在面向低碳转型目标的同时,既需要技术支撑的不断创新,也依赖制度体系的持续完善。面向未来,应加强多学科协同研究,推动核算方法、标准、平台与政策机制的全链条优化,切实发挥碳核算在绿色能源体系建设中的支撑作用。

参考文献:

[1] 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 G Y, Wang J Y, Tang Y C, et al. Evolution process of research directions and application requirements of electricity carbon emission factors[J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 12-28.

[2] 梁作宾,高山,王庆,等. 低碳背景下基于自适应鲁棒优化的含源配电系统规划方法[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(12): 70-80.
Liang Z B, Gao S, Wang Q, et al. A planning method for the source-containing distribution system based on adaptive robust optimization under low-carbon background[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(12): 70-80.

[3] Qian J, Liu S B, Wang P Y. The effect of China's carbon emissions trading system on the power sector's CO₂ emission reduction based on the "West-East Power Transmission" project[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2024, 33(4): 4687-4706.

[4] 张栋,冯凯辉,时智勇,等. 中国新能源并网发展现状与建议[J]. 太阳能, 2024(7): 89-97.
Zhang D, Feng K H, Shi Z Y, et al. Current states and recom-

mendations for grid integration of new energy in China[J]. Solar Energy, 2024(7): 89-97.

[5] 赵梓潼,顾兵. 需求响应下基于电动汽车负荷聚合商的充放电电价与时段研究[J]. 东北电力大学学报, 2023, 43(6): 79-86.
Zhao Z T, Gu B. Research on charging and discharging price and time period based on electric vehicle load aggregator under demand response [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2023, 43(6): 79-86.

[6] Zhang X X, Cong P W, Wang Y. Research on carbon emission characteristics and accounting framework of the new electric power system[J]. E3S Web of Conferences, 2024, 536: 01019.

[7] Yue Y L, Wang Q, He L, et al. Carbon emission accounting model and multi-dimensional evaluation of power system with high proportion of new energy [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2166(1): 012052.

[8] 师华定,齐永青,梁海超,等. 电力行业温室气体排放核算方法体系研究[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(1): 40-46.
Shi H D, Qi Y Q, Liang H C, et al. The research of greenhouse gas accounting system for power industry[J]. Advances in Climate Change Research, 2010, 6(1): 40-46.

[9] 刘明达,蒙古军,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 M D, Meng J J, Liu B H. Progress in the studies of carbon emission estimation[J]. Tropical Geography, 2014, 34(2): 248-258.

[10] 齐敏芳,李晓恩,刘潇,等. 基于大数据的燃煤机组供电煤耗特性分析[J]. 热力发电, 2019, 48(9): 51-57.
Qi M F, Li X E, Liu X, et al. Characteristics analysis of power supply coal consumption for coal-fired power units based on big data[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(9): 51-57.

[11] 张琦峰,方恺,徐明,等. 基于投入产出分析的碳足迹研究进展[J]. 自然资源学报, 2018, 33(4): 696-708.
Zhang Q F, Fang K, Xu M, et al. Review of carbon footprint research based on input-output analysis[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(4): 696-708.

[12] 戢时雨,高超,陈彬,等. 基于生命周期的风电场碳排放核算[J]. 生态学报, 2016, 36(4): 915-923.
Ji S Y, Gao C, Chen B, et al. Carbon emission accounting for wind farm based on life cycle assessment [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(4): 915-923.

[13] 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): 3049-3058.
Bao W H, Li Y W, Ji J, et al. Carbon emission accounting method for energy storage system and bidirectional power

- load[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(8): 3049–3058.
- [14] 朱继忠,周迦琳,张迪. 清洁能源和电力系统碳足迹全生命周期核算综述[J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(4): 1323–1343.
Zhu J Z, Zhou J L, Zhang D. Review of full life-cycle carbon footprints accounting of clean energy and power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(4): 1323–1343.
- [15] Chiesura G, Stecher H, Pagh Jensen J. Blade materials selection influence on sustainability: A case study through LCA[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 942(1): 012011.
- [16] Deng Y H, Wu J J, Yang Q, et al. Life cycle-based carbon emission reduction benefit assessment of centralized photovoltaic power plants in China[J]. *Sustainability*, 2023, 15(23): 16323.
- [17] Khan I. Temporal carbon intensity analysis: Renewable versus fossil fuel dominated electricity systems[J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2018: 1–15.
- [18] 廖昌义. 电力碳排放责任分摊核算及其影响因素分解研究[D]. 南宁: 广西大学, 2020.
Liao C Y. Power Carbon emission responsibility allocation accounting and its influencing factor decomposition [D]. Nanning: Guangxi University, 2020.
- [19] 李庆生,李震,孙斌,等. 计及不确定性的主动配电网分布式能源多时间尺度消纳方法[J]. *可再生能源*, 2023, 41(5): 692–698.
Li Q S, Li Z, Sun B, et al. Multi-time scale consumption method of distributed energy in active distribution network considering uncertainty[J]. *Renewable Energy Resources*, 2023, 41(5): 692–698.
- [20] 王川川,李金霞,张彬,等. 基于负荷率的全国0.6~1.0 GW煤电机组运行指标数据分析及节能潜力研究[J]. *黑龙江电力*, 2019, 41(4): 355–360.
Wang C C, Li J X, Zhang B, et al. Operating index data analysis and energy saving potential research of 0.6–1.0 GW coal-fired power units in China based on load rate[J]. *Heilongjiang Electric Power*, 2019, 41(4): 355–360.
- [21] Siwiec D, Fraćz W, Pacana A, et al. Analysis of the ecological footprint from the extraction and processing of materials in the LCA phase of lithium-ion batteries[J]. *Sustainability*, 2024, 16(12): 5005.
- [22] ISO 14064-1 Greenhouse gases-Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals[S].
- [23] Matisoff D C, Noonan D S, O'Brien J J. Convergence in environmental reporting: Assessing the carbon disclosure project[J]. *Business Strategy and the Environment*, 2013, 22(5): 285–305.
- [24] Jurić Ž, Ljubas D. Comparative assessment of carbon footprints of selected organizations: The application of the enhanced bilan carbone model[J]. *Sustainability*, 2020, 12(22): 9618.
- [25] 陈晓红,付益鹏,黄骋东,等. 特高压工程建设碳排放测算方法与应用[J]. *资源科学*, 2023, 45(12): 2291–2310.
Chen X H, Fu Y P, Huang C D, et al. Method and application of carbon emission calculation for ultra-high voltage (UHV) project construction[J]. *Resources Science*, 2023, 45(12): 2291–2310.
- [26] Hamels S, Himpe E, Laverge J, et al. The use of primary energy factors and CO₂ intensities—Reviewing the state of play in academic literature[EB/OL]. (2021-08-01)[2025-07-10]. <https://arxiv.org/abs/2102.13539>.
- [27] Thomson R C. Carbon and energy payback of variable renewable generation[D]. Edinburgh: The University of Edinburgh, 2014.
- [28] 刘昱良,李姚旺,周春雷,等. 电力系统碳排放计量与分析方法综述[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(6): 2220–2236.
Liu Y L, Li Y W, Zhou C L, et al. Overview of carbon measurement and analysis methods in power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(6): 2220–2236.
- [29] 王伟. 物料衡算法测算煤炭燃烧污染物排放量[J]. *山西建筑*, 2013, 39(36): 230–231.
Wang W. Using material balance calculation method to calculate the coal combustion pollutants emissions[J]. *Shanxi Architecture*, 2013, 39(36): 230–231.
- [30] 车卫红. 我国工业碳源和能源碳源碳排放量估算研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
Che W H. Estimation of carbon emissions from industrial and energy carbon sources in China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.
- [31] 郑玉蓉,孙文彬,杜守航,等. 煤炭企业碳排放核算方法研究综述[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(增刊2): 1143–1153.
Zheng Y R, Sun W B, Du S H, et al. Review of carbon emission accounting methods in coal enterprises[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(S2): 1143–1153.
- [32] Schivley G, Azevedo I, Samaras C. Assessing the evolution of power sector carbon intensity in the United States[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(6): 064018.
- [33] 张彬,靳阿妮,吉朝阳,等. 火力发电厂二氧化碳在线监测方案对比研究[J]. *能源与节能*, 2022(12): 164–167.
Zhang B, Jin A N, Ji Z Y, et al. Comparison of carbon dioxide on-line monitoring schemes in thermal power plants[J]. *Energy and Energy Conservation*, 2022(12): 164–167.
- [34] Turconi R, Boldrin A, Astrup T. Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 28: 555–565.

- [35] Sun X R, Pan X P, Jin C H, et al. Life cycle assessment-based carbon footprint accounting model and analysis for integrated energy stations in China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(24):16451.
- [36] Hellweg S, Milà i Canals L. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment[J]. Science, 2014, 344(6188):1109-1113.
- [37] De Wild-Scholten M J. Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2013, 119:296-305.
- [38] Ten Raa T. On the methodology of input-output analysis[J]. Regional Science and Urban Economics, 1994, 24(1):3-25.
- [39] Hong J K, Huang H, Wang X Z. The effect of economic structural transformation on carbon emission reduction [J]. Resources Science, 2023, 45(11):2103-2116.
- [40] 彭水军, 张文城, 孙传旺. 中国生产侧和消费侧碳排放量测算及影响因素研究[J]. 经济研究, 2015, 50(1): 168-182.
Peng S J, Zhang W C, Sun C W. China's production-based and consumption-based carbon emissions and their determinants[J]. Economic Research Journal, 2015, 50(1): 168-182.
- [41] Wei Y, Chang Z W, Hu P C, et al. Rapid carbon emission measurement during the building operation phase based on PSO-SVM: Electric big data perspective[J]. Frontiers in Energy Research, 2024, 12:1329942.
- [42] Cui Z W, Chen J J, Li C, et al. The calculation and analysis of carbon emission in traction power supply system of high-speed rail [J]. Tehnički Vjesnik, 2023, 30(1):226-234.
- [43] Dong H C, Yu S, Zhang J H. An investigation of the impact of carbon emission factor selection on carbon accounting of electric power equipment [J]. E3S Web of Conferences, 2024, 536:01020.
- [44] 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 L Z, Zhang Z, Cai B F, et al. Research on China's regional and provincial electricity GHG emission factors in 2020 [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(3): 222-228.
- [45] Kang C Q, Zhou T R, Chen Q X, et al. Carbon emission flow from generation to demand: A network-based model [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5):2386-2394.
- [46] 邵冲, 余姣, 姜雪, 等. 基于复功率协同追踪的新型电力系统碳足迹分布计算方法[J]. 能源与环保, 2024, 46(12): 228-233.
Shao C, Yu J, Jiang X, et al. Calculating method for carbon footprint distribution of new power system based on complex power coordinated tracking [J]. China Energy and Environmental Protection, 2024, 46(12):228-233.
- [47] Zhang Y L, Guo B, Liu C, et al. Graph convolution network for carbon emission factor forecast of power grid[C]// Proceedings of the 5th International Conference on Power and Energy Technology (ICPET), 2023:893-898.
- [48] Sun X C, Bao M L, Ding Y, et al. Modeling and evaluation of probabilistic carbon emission flow for power systems considering load and renewable energy uncertainties [J]. Energy, 2024, 296:130768.
- [49] Spring A, Wirth G, Becker G, et al. Grid influences from reactive power flow of photovoltaic inverters with a power factor specification of one [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(3):1222-1229.
- [50] 毕瀚文, 范晓舟, 肖海, 等. 支撑电力系统全环节碳流追踪的节点导纳矩阵算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(20):7881-7892.
Bi H W, Fan X Z, Xiao H, et al. A node admittance matrix algorithm to support the carbon emission tracing model of whole power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(20):7881-7892.
- [51] Su L L, Zhao C C, Cong X, et al. Carbon emission factor calculation model of regional power grid based on electromagnetic loop network partition [C]//Proceedings of the IEEE 7th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), 2024:480-485.
- [52] Mujeeb S, Javaid N. Deep learning based carbon emissions forecasting and renewable energy's impact quantification[J]. IET Renewable Power Generation, 2023, 17(4): 873-884.
- [53] Pan F, Yang Y Y, Ji Y L, et al. Application of improved graph convolutional networks in daily-ahead carbon emission prediction [J]. Frontiers in Energy Research, 2024, 12:1371507.
- [54] 王毅星. 基于深度学习和迁移学习的电力数据挖掘技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2019.
Wang Y X. Research on power data mining technology based on deep learning and transfer learning[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [55] 边晓燕, 刘天蔚, 李锡瑞, 等. 基于图卷积网络的配电网碳排放因子计算与分析[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-15 [2026-01-28]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.tm.20250123.1631.018>.
Bian X Y, Liu T W, Li X R, et al. Calculation and analysis of carbon emission factors for distribution networks based on graph convolutional network [J/OL]. Proceedings of the CSEE, 1-15 [2026-01-28]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.tm.20250123.1631.018>.

(编辑 郑壮丽)