

电碳协同理论技术探索与实践

易俊, 赵明欣, 秦晓辉, 林伟芳, 刘超, 邓桃

(中国电力科学研究院有限公司, 北京市 海淀区 100192)

Review of Exploration and Practice of Electric-carbon Coordination Theory and Technology

YI Jun, ZHAO Mingxin, QIN Xiaohui, LIN Weifang, LIU Chao, DENG Tao

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

ABSTRACT: China is currently accelerating the transformation from energy consumption dual control to carbon emission dual control. The deep low-carbon development of power system is a key link in China's energy transition, and power system is evolving from the traditional binary balance between safety and economy to a ternary balance among safety, economy, and low carbon. How to fully integrate the carbon reduction constraints and targets into the entire process of power system planning, operation, and construction is crucial for the high-quality transformation of the power system. This paper first proposes the definition and connotation of electric-carbon collaboration, summarizes and sorts out the two major issues and five key challenges faced by electric-carbon collaboration. Aiming to build a zero-carbon power system, the theory and technical system for electric-carbon collaboration covering 5 major fields and 70 key technologies has been constructed from five aspects: indirect carbon reduction benefit evaluation and methodology, integrated carbon assessment technology of power system, electric-carbon collaboration technology throughout the entire process of the power system, application of low-carbon, zero carbon, and negative carbon technologies to the power system, carbon assets development and carbon market technology of the power system. Finally, the current research status and practice in the field of electric-carbon collaboration are summarized, and the future development trends of key technology are discussed.

KEY WORDS: new-type power system; electric-carbon coordination; zero-carbon power system; carbon assessment; technical system

摘要: 当前我国正加快推动能耗双控向碳排放双控转型, 电

力深度低碳发展是我国能源转型的关键环节, 电力系统正在由传统的“安全-经济”二元平衡向“安全-经济-低碳”三元均衡转变。如何将减碳目标约束充分融入电力系统规划、运行和建设全流程, 对于电力系统高质量转型至关重要。该文首先提出电碳协同的定义与内涵, 总结梳理电碳协同面临的两方面重大问题与5项关键挑战; 以构建零碳电力系统为目标, 从间接碳减排效益评估及方法学开发、电力系统一体化碳评估技术、电力系统全过程电碳协同技术、电力系统低碳/零碳/负碳应用技术、电力系统碳资产开发与碳市场技术5个方面, 构建覆盖5大子领域、70项关键技术的电碳协同理论与技术体系; 最后, 总结梳理电碳协同领域当前的研究现状与实践, 并展望重点技术方向的未来发展趋势。

关键词: 新型电力系统; 电碳协同; 零碳电力系统; 碳评估; 技术体系

0 引言

随着“双碳”进程的深入推进, 能源电力系统正在经历系统性、根本性变革, 碳中和逐步成为新型电力系统演化的核心目标和关键约束^[1-3]。一方面, 电力行业碳排放超过我国社会总排放的40%, 是占比最高的行业^[4]; 另一方面, 绿色电力为各行业碳减排提供重要手段, 是最有力的“减碳工具”。近年来, 党中央、国务院先后印发《关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》、《加快构建碳排放双控制度体系工作方案》等纲领性文件^[5-6], 加快推动能耗双控向碳排放双控转型, 都将电力列为重点行业, 电力系统深度低碳发展已经成为我国能源转型的关键环节。

低碳转型压力背景下, 电力系统正在由传统的“安全-经济”二元平衡向“安全-经济-低碳”三元均衡转变^[7-9]。如何将减碳目标约束充分融入电力系统规划、运行和建设全流程, 对于碳达峰关键期下电力系统高质量发展至关重要。

基金项目: 智能电网重大专项项目(2030)(2024ZD0802000); 国家电网有限公司科技项目(52280024000L)。

Project Supported by Smart Grid-national Science and Technology Major Project (2024ZD0802000); Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (52280024000L).

综上所述,电碳协同已经成为电力系统高质量发展的必然选择,并将逐步成为一个交叉融合电力系统与碳中和技术的全新研究方向。本文将立足“双碳”目标下电力系统高质量转型发展的视角,提出电碳协同的定义与内涵;总结梳理电碳协同面临的两方面重大问题与5项关键挑战;以构建零碳电力系统为目标,建立覆盖5大子领域、70项关键技术的电碳协同理论及技术体系,并对相关技术方向的研究现状与趋势进行综述;最后,对电碳协同领域技术方向的未来发展趋势进行展望。

1 电碳协同的定义与内涵

立足学科专业方向发展的角度,为准确界定电碳协同领域的技术内涵及边界范畴,本文综合考虑概念的提出背景与主要内容,提出电碳协同的定义如下:电碳协同是将“碳”元素深度融入传统“电”领域,支撑电力系统由“安全-经济”二元平衡向“安全-经济-低碳”三元均衡转变,使电力系统在满足电能消费持续增长及经济运行的同时,能够安全有序和积极稳妥地推进降碳,高质量实现碳达峰,如期实现碳中和的过程。其主要内容将贯穿和融入电力系统的战略、规划、建设、运行、供应链和市场等全流程,既包括涵盖碳监测、碳核算、碳足迹、碳评价、碳仿真的一体化碳评估技术体系,也包括低碳、零碳、负碳等跨学科前沿技术甚至颠覆性技术,还涉及碳资产与碳管理、电碳市场协同等软科学研究的交叉性学科领域。

电碳协同的具体技术内涵可以从外在驱动、内在需求、技术构成3个方面综合理解:

1) 从外在驱动看,电碳协同是传统电力系统低碳转型的必然要求。传统电力系统规划运行主要受到“安全-经济”协调平衡的影响,而在“双碳”目标下,稳步降碳并最终构建零碳电力系统已经成为电力系统发展的重要目标和约束。当前我国正处于碳达峰关键阶段,电力系统能否稳步控碳降碳不仅决定系统碳达峰的峰值水平,而且也将极大地影响未来达峰到中和阶段约30年间碳排放的积分总量与减排路径,对于我国整个“双碳”进程的推进至关重要。因此,“低碳”这一强目标约束引入后,减碳目标约束与电力保供应、保安全、促消纳目标将交织耦合并动态影响,新型电力系统的发展将受到“安全-经济-低碳”三元均衡的制约。如果将“安全-经济”视为传统“电”的范畴,则“安全-经

济-低碳”三元均衡制约也可以理解为“电”与“碳”二者的相互协调影响(见图1),可见电碳协同是电力系统低碳转型的必然要求。

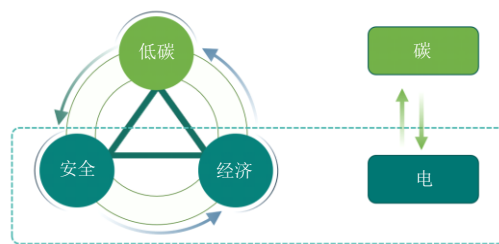


图1 “安全-经济-低碳”三元均衡与电碳协同关系图

Fig. 1 Relationship diagram between the ternary balance of "safety, economy and low carbon" and electric-carbon collaboration

2) 从内在需求看,电碳协同是电力系统核心业务重塑优化的关键路径。“双碳”目标背景下,电力系统的全链条全流程核心业务均需围绕碳减排约束和绿色低碳发展进行重塑和优化。新型电力系统的演化发展将受到碳预算与减排路径的约束影响,碳市场与电力市场的耦合也将对系统调度运行产生深刻影响,电网间接碳减排效益评估理论有待突破,企业碳资产管理能力亟待提升,未来碳评估分析作为基础性工作需要深度融入电力系统规划、建设、运行、供应链全流程,贯穿发、输、配、用全环节,实现“算碳”、“测碳”、“管碳”、“降碳”的一体化协同。

3 从技术构成看,电碳协同是融合多学科专业的全新技术领域。作为交叉技术领域,电碳协同既包括覆盖碳监测、碳核算、碳足迹、碳评价、碳仿真的碳评估技术体系,也包括新能源发电、碳捕集、工业建筑节能等跨学科前沿技术甚至颠覆性技术,还涉及电碳市场、碳资产、碳金融等软科学研究。从学科建设角度,电碳协同将是融合能源科学、环境科学与工程、材料科学与工程、经济学、管理科学、计算机科学等多学科理论于一体的交叉性学科,需要统筹考虑能源安全、气候安全、生态安全、经济增长、技术进步、社会成本等诸多因素,交叉融合和应用跨学科理论、方法和技术。

2 电碳协同的关键问题与技术挑战

聚焦支撑新型电力系统“安全-经济-低碳”三元均衡发展,电碳协同技术未来需要重点解决两个关键问题,一是如何建立高精度的碳数据体系;二是如何将碳融入电力系统全过程业务。由此展开,又具体面临5个方面的技术挑战。

2.1 电碳协同的关键问题

1) 关键问题 1: 如何利用电的实时性和广泛连接性建立高精度的碳数据支撑体系。

时空尺度上精确的“碳”数据是支撑碳达峰、碳中和的重要基础,而电力数据的实时性、精准性和普遍覆盖的优势使其在碳排放核算中扮演着关键角色。2023—2024 年,国家部委先后多次发文,要求优先在电力等行业建立碳排放监测核算体系^[10-11]。目前,以年度发布排放因子法为代表的电力碳排放监测核算技术仍较为粗放,电力系统自身及其他各行各业的碳达峰、碳中和进程都缺乏必要的“碳”数据以及科学有效的监测核算方法支撑,如何依托电力数据资源打通“电-能-碳”数据链条,推动数据共享整合,进而建立高精度的碳数据支撑体系,是支撑能源电力系统低碳转型乃至国家“双碳”目标实现的重要基础工作。

2) 关键问题 2: 碳要素如何融入电力系统,支撑行业碳达峰碳中和。

目前,碳双控(总量、强度)取代能耗双控已成为必然趋势。在电力系统中引入“碳”约束后,将对电力系统的规划、建设、运行、供应链等全流程环节产生深刻影响。在规划层面,电力系统的演化发展将受到碳预算与减排路径的约束影响,并将对电力系统规划布局产生重要影响。在运行层面,碳信号引导下未来需要在电源调度运行中引入低碳约束,负荷需求管理中引入低碳响应,系统调控模式将由传统的安全-经济调度向广域源-荷电碳协同调控转变。在建设层面,供应链的绿色转型也是电力系统碳中和的关键环节,涉及电力装备制造、运输、回收等全环节的低碳化,以减少电力全生命周期碳排放。在市场机制层面,碳市场的价格信号作用将推动市场主体直接或间接参与低碳响应,碳市场与电力市场的耦合将对系统调度运行产生深刻影响。如何基于碳要素重塑优化电力系统规划、建设、运行全流程环节业务,对于实现电力系统“安全-经济-低碳”均衡发展至关重要。

2.2 电碳协同的技术挑战

1) 间接碳减排效益评估体系亟待建立。

对于电力系统而言,输电工程、抽水蓄能、电化学储能等各类电网工程产生的减排效益均为间接效益,目前对其还缺少科学全面的评估体系,电力系统在新能源替代减排中的平台作用(含资源配置与平衡调节)难以量化体现,进而无法形成有效的

碳资产^[12-14]。

2) 一体化碳评估支撑技术尚需完善。

电力系统碳排放准确量化追踪是电力系统碳减排的基础,但电能上网后在物理上被同质化,无法区分,电碳轨迹时空机理不清晰,难以形成有效的碳排放责任分摊机制,且电力行业各环节碳排放的实时性与精细度不足,难以适应电网低碳发展运行要求,更无法支撑国家碳排放双控转型的需求^[15-18]。

3) 全过程核心业务电-碳要素缺乏融合。

“双碳”目标下,电力系统碳预算研判和减排路径优选存在较大难度,电力系统规划面临诸多不确定性挑战^[19-20];源侧新能源与荷侧灵活性资源地理位置分散、数量庞大、不确定性强,系统能量流和碳排放时空特性的耦合特性不清晰,源荷协同调控运行存在巨大挑战,系统安全韧性也亟待提升^[21-24];全社会减碳压力下,电力系统碳减排需要从全生命周期碳足迹视角入手,从供应链体系到工程建设、设备运维等全环节均需要重塑优化^[25-27]。

4) 电力系统降碳技术体系尚未成熟。

从物理属性上看,电力系统是一个天然的碳排放源,为了实现电力系统的净零排放,在大规模研发和应用降低碳排放水平的低碳、零碳技术外,还必须引入负碳环节,以中和电力系统存在的基础排放量^[28-30]。如何提前研判低碳、零碳、负碳等降碳“硬”技术的发展趋势及其技术经济性,及早开展技术储备,对于电力系统优选降碳路径、优化规划布局、推动技术规模化友好应用均具有重要意义。

5) 电力减排成本疏导机制仍不明晰。

当前电力系统低碳转型成本持续上升,现有市场机制设计难以应对高占比新能源引发的价格频繁大幅波动、转型成本增加等挑战,无法有效解决充裕性和安全性需求引发的投资引导问题及电力安全属性与商品属性的矛盾。电力减排成本如何进行有效疏导仍是电碳协同面临的重要挑战^[3,7,9]。

3 电碳协同的技术体系

电碳协同领域创新需求迫切、意义重大,但目前电碳协同整体研究体系亟需完善,平台手段仍未健全,关键技术整体仍处于跟跑状态,有必要加快打造电碳协同技术体系,为破解新型电力系统“安全-经济-低碳”均衡发展难题持续提供技术动能。本文围绕“间接碳减排效益评估及方法学开发、电力系统一体化碳评估技术、电力系统全过程电碳协

同技术、电力系统低碳/零碳/负碳应用技术、电力系统碳资产开发与碳市场技术”5个方向布局电碳

协同关键技术,建立了覆盖5个子领域、70项关键技术的电碳协同技术体系,具体如图2所示。

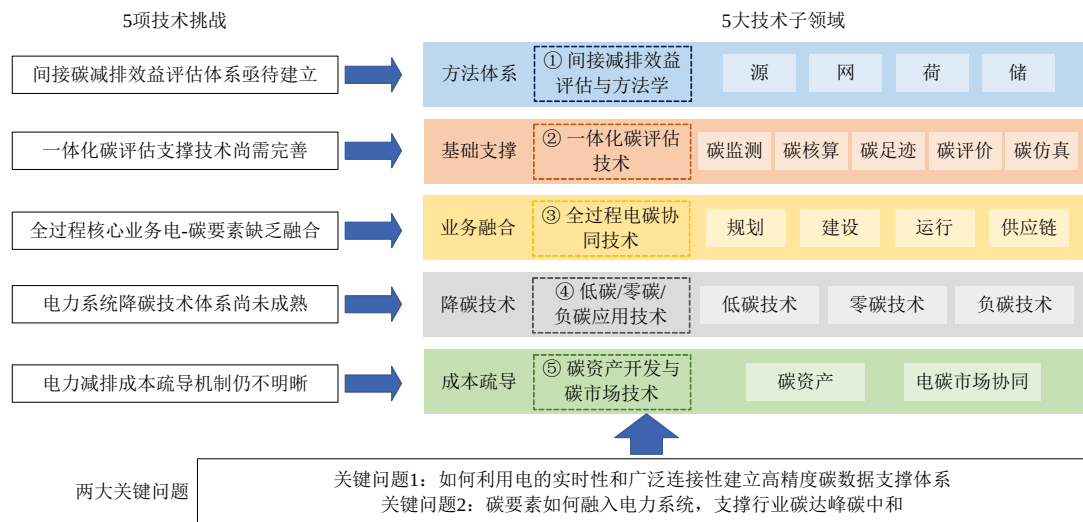


图2 电碳协同理论与技术体系图

Fig. 2 System diagram of electric-carbon collaboration theory and technologies

3.1 电力系统间接碳减排效益评估及方法学开发

电力系统间接碳减排效益评估及方法学开发领域聚焦于源网荷储碳减排相关技术方向。着重研究新型电力系统可测量、可报告、可核查的系统碳减排方法学,致力于掌握和提升新型电力系统典型场景的低碳运行特性,通过源侧清洁低碳发电及火电机组灵活性改造、网侧输变电工程及关键电力设备、荷侧灵活资源聚合及综合能源、储侧抽水蓄能和新型储能等领域碳减排方法学的研制,保障新型电力系统净零碳目标的实现,助力能源系统及全社会低碳转型。

关键技术方面,电源侧重点研究清洁发电技术系列碳减排方法学、火电机组灵活性改造碳减排效益评估等技术,电网侧重点研究输变电工程建设及运行碳减排方法学、关键电力设备碳减排效益评估、六氟化硫减排方法学、电网碳减排效益综合评估等技术,负荷侧重点研究灵活负荷资源及综合能源系统参与电网需求响应碳减排方法学,储能侧重点研究抽水蓄能电站和新型储能典型场景系统碳减排方法学等技术。参考国家标准《科学技术研究项目评价通则》(GB/T 22900-2022)的技术评级方法,该子领域国内外技术成熟度对比如图3所示。除抽水蓄能电站与六氟化硫减排方法学外,国内在该子领域技术成熟度与国际先进水平均存在一定差距。

3.2 电力系统一体化碳评估技术

电力系统一体化碳评估技术领域聚焦建立以电-碳为基础的碳数据体系。着重研究电力系统全环

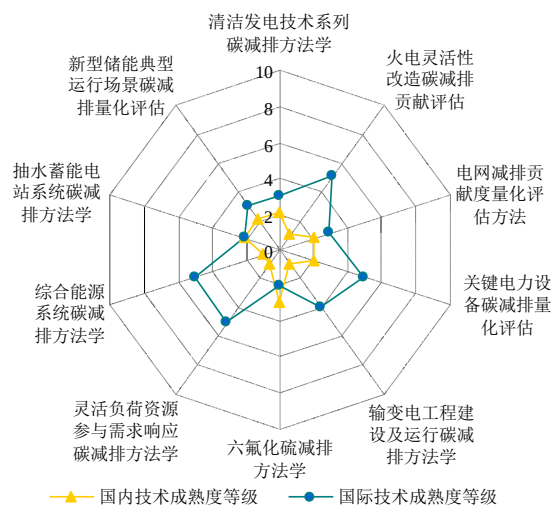


图3 电力系统间接碳减排效益评估及方法学开发技术成熟度对比图

Fig. 3 Comparison chart of technology maturity on indirect carbon emission reduction benefits evaluation and methodological development of power system

节碳监测、以动态电力碳排放因子为基础的碳排放核算、绿色低碳评价、电力装备产品碳足迹、碳足迹追踪与溯源、碳排放时序模拟与仿真推演等技术,支撑电力碳排放精准量化评估,打造电力系统实现碳达峰、碳中和的“度量衡”和“金标准”。

关键技术方面,碳监测方向重点研究发电侧细粒度碳排放实时连续监测技术、负荷侧多源数据融合的实时碳排放监测网络构建技术,碳核算方向重点研究计及公平性、激励性和稳定性的电力系统碳排放责任分摊方法、考虑政策和经济因素的电力系统以电折碳核算技术、考虑绿电交易的动态电力碳

排放因子核算技术,碳足迹方向重点研究电力设备碳排放因子测算及数据库构建技术、电力设备全生命周期碳排放建模与评价技术,碳评价方向重点研究电力供应链企业运营管理低碳评价技术、能源电力数据驱动的企业碳效及碳信用评价技术,碳仿真方向重点研究电力系统碳排放时序模拟与预评估

技术、电力系统全环节多时空尺度实时碳轨迹追踪与溯源技术、电-碳-能协同的电力系统全景碳排放一体化评估与建模等技术。该子领域国内外技术成熟度对比如图 4 所示,国内在该子领域整体与国际先进水平存在一定差距,发电侧细粒度碳排放实时连续监测技术差距较大。



图 4 电力系统一体化碳评估技术成熟度对比图

Fig. 4 Comparison chart of technology maturity on integrated carbon assessment technology of power system

3.3 电力系统全过程电碳协同技术

电力系统全过程电碳协同技术领域聚焦于新型电力系统规划、建设、运行以及供应链全流程电碳协同相关技术方向。着重研究碳减排约束下电力系统规划运行以及电网自身绿色降碳技术,通过电力系统低碳规划、输配电工程低碳建设、电碳协同运行、绿色供应链构建技术,支撑新型电力系统“安全-经济-低碳”三元均衡发展,保障电力系统高质量达峰、如期实现碳中和。

关键技术方面,电碳协同规划方向重点研究电力系统碳预算评估、“安全-经济-低碳”三元均衡的新型电力系统构建、能源电力系统结构形态与路径协同演化、“电氢碳氮氧”多元素融合的新型能源体系构建等技术,电碳协同建设方向重点研究输配电工程全过程绿色建造、输配电工程全过程绿色建造监测、输配电工程绿色低碳评估及后评价等技术,电碳协同运行方向重点研究低碳电力调度优化决策、新能源与碳捕集电厂协同运行、考虑碳能协同的多能流系统低碳运行、电氢碳融合跨领域生态

圈协同等技术,绿色供应链方向重点研究供应链温室气体排放量核算与监控、供应链碳减排潜力评估、供应链绿色低碳评价、绿色低碳供应链标准体系构建和数字化融合、基于多源异构数据融合技术的绿色供应链数据库构建等技术。该子领域国内外技术成熟度对比如图 5 所示。除新型电力系统均衡构建、能源电力系统协同演化及低碳电力调度优化决策技术外,国内在该子领域技术成熟度与国际先进水平平均存在一定差距,绿色供应链方向相关技术差距较大。

3.4 电力系统低碳、零碳、负碳应用技术

电力系统低碳、零碳、负碳应用技术领域聚焦于降碳技术的研发与应用创新,致力于实现电力系统的清洁化、高效化和智能化。着重研究化石能源低碳供应技术、低碳输变电技术、新型非化石能源发电和并网技术以及负碳技术在新型电力系统中的应用。通过化石能源机组节能降碳改造、新型非化石能源发电技术的应用以及新型非化石能源发电并网技术研发等方面提升电力系统源侧的低碳



图5 电力系统全过程电碳协同技术成熟度对比图

Fig. 5 Comparison chart of technology maturity on electric-carbon collaboration technology throughout the entire process of power system

化水平；通过低碳输变电装备的设计、环保型绝缘气体的开发以及低碳输变电技术的应用等方面降低电力系统网侧的碳排放；通过规划碳捕集技术等负碳技术在新型电力系统中的应用，优化负碳技术的布局和运行方式，提高新能源的消纳能力，推动电力系统的低碳转型。

关键技术方面，低碳技术方向重点研究低损耗环保型输变电设备、化石能源清洁高效发电、新型环保绝缘气体及其应用、低碳环保型输变电设备设计与制造、电网废弃物无害化处置节能降碳等技术，零碳技术方向重点研究新型非化石能源发电、新型非化石能源发电并网、光热和其他新能源互补发电、海洋能源清洁发电、多类型电源协同规划、极高比例清洁能源外送等技术，负碳技术方向重点研究化石能源电厂碳捕集、利用与封存(carbon capture, utilization and storage, CCUS)全链条系统设计及运行、生物质能电厂碳捕集、利用与封存(bioenergy with carbon capture, utilization and storage, BECCUS)、化石能源电厂低能耗低成本碳捕集技术、高效率碳转化利用、低能耗直接空气捕集二氧化碳(direct air capture, DAC)、电网建设工程水土保持碳汇等技术。该子领域国内外技术成熟度对比如图6所示。国内在该子领域整体处于国际

先进水平，低能耗直接空气捕集二氧化碳技术与国际先进水平尚存在一定差距。

3.5 电力系统碳资产开发与碳市场技术

电力系统碳资产开发与碳市场技术领域聚焦于碳资产、碳管理以及电碳市场协同方向。着重研究碳资产评估与管理、电碳市场协同运行技术，掌握和提升企业碳资产管理能力、推动电碳市场融合发展。攻克碳资产评估与识别、数字化运营管理、碳金融衍生品创新技术等技术，保障碳资产高效利用，促进碳减排和绿色低碳发展；突破电碳市场协同机制设计、绿电绿证交易数据认证溯源、电碳市场协同运行建模仿真与监测评价等技术，通过市场机制优化资源配置推动能源转型。

关键技术方面，碳资产方向重点研究电力企业碳资产识别与评估、数字化碳资产管理与市场运营技术、电力行业碳金融衍生品创新等技术，电碳市场协同方向重点研究电碳市场耦合机理与协同机制设计、绿电绿证交易数据认证溯源、电碳市场协同目标下的参与主体优化决策、电碳市场协同运行建模仿真、电碳市场协同运行监测评价等技术。该子领域国内外技术成熟度对比如图7所示，国内在该子领域整体与国际先进水平存在显著差距。

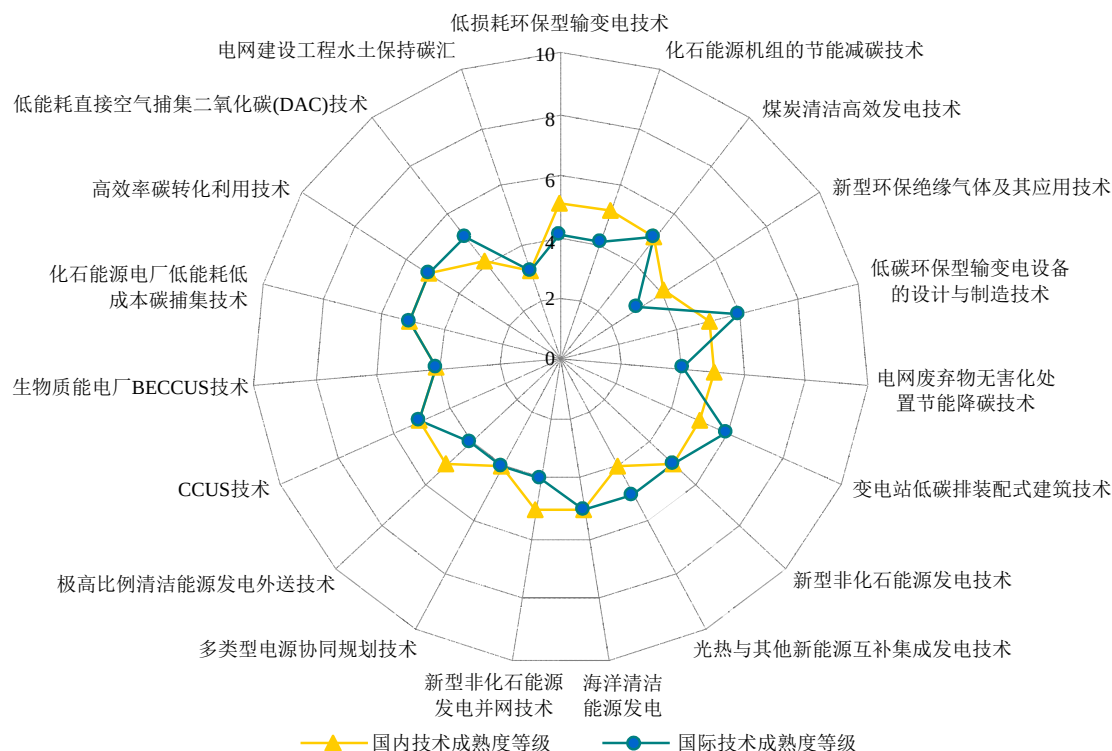


图 6 电力系统低碳、零碳、负碳应用技术成熟度对比图

Fig. 6 Comparison chart of technology maturity on application of low-carbon, zero carbon, and negative carbon technologies in power system

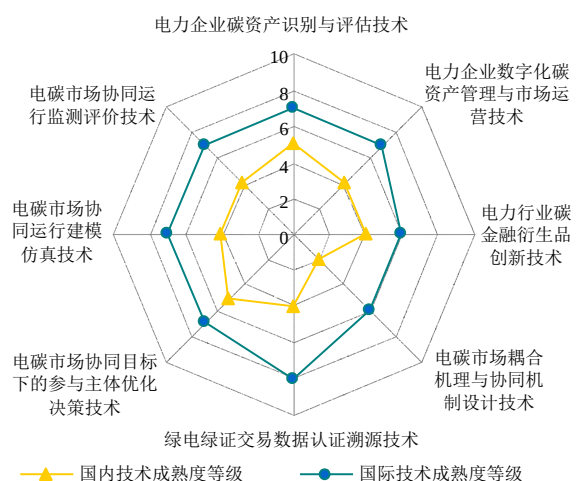


图 7 电力系统碳资产开发与碳市场技术成熟度对比图

Fig. 7 Comparison chart of technology maturity on carbon assets development and carbon market technology of power system

4 电碳协同领域的研究实践与未来展望

4.1 研究现状与实践

“双碳”目标与构建新型电力系统战略提出以来,我国在电碳协同各个技术方向的研究实践正蓬勃兴起,但相比于国际先进水平,目前整体仍处于积极追赶的状态。

1) 电力系统间接碳减排效益评估及方法学开发子领域。

电力系统间接碳减排效益评估及方法学开发方面,影响范围最广的是联合国气候变化框架公约清洁发展机制执行理事会方法学委员会批准使用的清洁发展机制(clean development mechanism, CDM)方法学。已批准的 CDM 方法学共计 220 个,应用集中在可再生能源发电、废能回收利用、垃圾及生物质利用等方面^[31-33]。国外研究人员较早开展了电力系统自愿减排交易机制相关方法学基准线设定等方面的研究^[34]。Shrestha 对印度进行的一项案例研究表明:采用特定 CDM 项目和相关减排成本的电力系统中的减排水平可能会因确定基准线排放的方法类型而显著变化,实施 CDM 项目的最佳时机可能会因采用的基准线方法类型而有所不同^[35]。目前国外仍在不断开发新的方法学以适应新能源发电、储能等相关技术的进步。在我国温室气体自愿减排机制下经备案,用于抵消碳排放的减排量为“中国核证自愿减排量”(Chinese certified emissions reductions, CCER),而生产这些减排量的项目为 CCER 项目。在国家发展改革委主管国家自愿减排项目期间,共备案了 200 个 CCER 方法学,其中 173 个来自 CDM 方法学,27 个是由国内相关机构开发的新方法学;在生态环境部变为国家自愿减排项目主管单位后,于 2023 年发布了造林碳汇、并网光

热发电、并网海上风力发电、红树林营造四项方法学^[36-37]。国内现有电力系统 CCER 方法学大多数源于 CDM 方法学,不适应国内出现的一些新技术,部分方法学对于项目额外性论证不合理,综合来看现有方法学体系难以满足新型电力系统发展。以可再生能源并网发电的 CCER 方法学(CM-001-V02)为例,一方面,该方法学形成的减排碳资产全部归属于可再生能源发电端,没有考虑电网在输电中发挥的作用;另一方面,由于风电、光伏发电成本大幅降低,可再生能源发电项目将产生一定收益,导致 CCER 项目的额外性论证存在困难^[12-13]。为适应新型电力系统的发展,我国研究人员正在尝试开发特高压输电系统、电动汽车能源替代等相关碳减排方法学^[14]。

2) 电力系统一体化碳评估技术子领域。

电力系统一体化碳评估技术方面,碳直接监测与核算两类方法并行发展,目前核算法应用更为广泛。在美国和欧盟通过烟气排放连续监测系统(continuous emission monitoring system, CEMS)对发电侧的碳排放进行连续监测均形成了较为完善的技术体系^[38],同时国外也已建立完善的碳核算标准体系与认可度较高的碳足迹数据库,碳评价与碳仿真亦是当前研究的热点^[39-40]。碳监测方向,国内在火电碳监测领域开展了许多研究,积累了大量实时在线碳监测数据和经验,但基于 CEMS 的火电碳监测仍处于试运行阶段,数据质量不满足应用要求^[41-43]。碳核算方向,国家发改委在 2013—2015 年先后出台 24 个行业的企业温室气体排放核算方法与报告指南,2021 年生态环境部发布《企业温室气体排放核算方法与报告指南 发电设施》,初步形成了一批碳核算标准,研究人员分别从直接和间接角度对排放因子法、物料平衡法等电力系统碳排放核算方法进行研究^[15,44],考虑绿电和绿证市场交易的碳排放核算研究还较少^[16]。碳足迹方向,国内相继建立了产品碳足迹评价的基本框架,但针对电工装备全生命周期碳足迹评价仍处在起步阶段,算例及数据积累较少^[45-46]。国内中科院生态环境研究中心、四川大学等研究机构创建了碳足迹基础背景数据库,但数据数量和质量较国外仍有差距,国际互认程度不高^[47-49]。碳评价方向,国网山西省电力公司等单位分别对新型电力系统与运营区域管理低碳评价指标体系进行了研究,对电网低碳发展具有指导意义^[50-51]。碳仿真方向,清华大学、中国电

力科学研究院等研究机构对电力系统碳轨迹追踪的理论和应用等进行分析研究,但目前计算方法较为复杂,应用普及度不高^[17-18]。

3) 电力系统全过程电碳协同技术子领域。

电碳协同规划方面,目前国内外在能源低碳转型路径规划方面的开展了大量研究,国外如国际能源署、国际可再生能源署等机构按年度发布世界能源发展展望报告^[52-54],为碳中和目标下全社会脱碳转型路径研究提供了方向引导;国内高校、科研院所通过设置政策清洁、强化减排情景、2℃和 1.5℃情景等假设,对碳达峰、碳中和目标下的我国能源电力转型路径开展了多情景分析并获得诸多研究成果^[2,19,55-57]。但上述研究大部分以全国作为整体研究对象对电力行业碳中和进行顶层设计和规划,对于全国减排目标和政策约束分解到特定区域,并进一步考虑区域资源禀赋、供需平衡特征、以及低碳技术应用的更为精细的省级区域的电碳协同规划^[20],有待进一步深入研究。

电碳协同建设方面,美国与欧盟较早对电力系统碳足迹开展了深入研究,因此对输配电工程建设过程碳排放核算掌握了大量数据,加之配套清洁化程度更高的工业体系,有利于针对性的开展电力低碳建设工作^[58-59]。国内研究人员也开始对输配电工程建设各阶段的碳排放量开展核算研究,这将为输配电工程低碳建设、监测及评价提供一定理论支撑,但此方面研究处于初始阶段,且工程建设涉及过程繁多,伴随特高压等工程建设过程中新技术的涌现,输配电工程全过程绿色建设领域仍有待深入研究^[25-26]。

电碳协同运行方面,国外积极探索实践并成果丰硕。英国电网开发支持电池储能等的批量调度开放式平衡平台,有效协调电力供需、优化能源结构与促进可再生能源消纳^[60]。德国依靠技术实现电力系统数字化和智能化转型,构建智能调度体系,实时监测调控碳排放并依据碳目标灵活调整电力生产分配策略^[21]。日本积极探索虚拟电厂参与电力调度新模式,提升系统灵活性与应对低碳需求能力^[22]。与此同时,国内在该领域同样积极进取且成绩斐然。清华大学、东北电力大学和国家电网公司在传统电力调度模型基础上构建电碳协同运行理论体系,为电力低碳转型提供理论支撑^[16]。国网浙江电力公司与江苏电力公司结合本地特点需求,分别开发电能碳协同调控平台和源-网-荷-储低碳调

度平台,并应用于实际场景^[61]。国内虽起步晚,但因高校与企业紧密合作且重视应用场景,在理论体系构建与平台开发应用方面进展显著,逐步缩小与国外差距,部分领域已形成特色创新成果与应用模式。

绿色供应链方面,国外较早开展绿色供应链管理^[62-64]、可持续供应链管理^[65-67]等理论研究与实践探索,在供应链产品及企业层面的碳核算与碳评价、认证领域,以 ISO14064、ISO 14067 国际标准为代表的标准建设相对成熟。近年来,国内考虑环境效益的供应链优化管理被广泛关注^[68-69],但针对电工装备及其制造商的绿色低碳供应链仍缺乏系统性研究。在碳核算方面,面向计划、采购、生产制造、交付、回收等供应链全环节^[70]的碳监测与碳核算技术在我国刚刚起步,主要依据国际通用的标准规则与相关国家标准^[71-72]开展实践,考虑具体电工装备供应链运营特性的标准化建设有待完善;在碳减排方面,目前供应链运营的碳减排研究多侧重于宏观层面,针对电工装备制造企业具体生产运营决策及供应链优化的考量有待关注^[27]。同时,结合当前供应链数智化转型需求,绿色低碳场景下的供应链多源数据管理和智慧平台建设亟需快速发展。

4) 电力系统低碳、零碳、负碳应用技术子领域。

国外在电力系统低碳、零碳、负碳相关技术研发与应用上起步较早且成果颇丰,国内在该领域正在持续追赶与创新。

国外方面,在低碳减排技术领域,德国积极致力于低损耗环保型输变电技术的研发与应用,通过对电网结构的精细化优化以及高效能设备的广泛采用,成功实现了输电环节能量损耗的显著降低^[73]。美国则借助严格的能效标准推行以及先进燃烧控制技术的运用,有效提升了化石能源机组的节能减碳效能^[74]。在(近)零碳非化石能源发电技术及应用方面,欧洲走在前列,其较早开展了风电、光伏等(近)零碳电源的探索与实践^[75],不仅大力拓展光伏和风电产业规模,还深入推进光热等低碳技术与光伏、风电的互补集成研究,并积极投入海洋清洁能源发电技术的研发^[28]。负碳技术及应用方面,欧美发达国家展现出强大的技术实力与应用经验。在大型全流程碳捕集、利用与封存工程及二氧化碳驱油利用、运输管网、地质封存等关键工程技术领域占据先发优势,多数单一项目的年二氧化碳捕集

能力可达百万吨级规模^[29]。同时,美国已成功建立起二氧化碳管道运输模式,其 CCUS 技术商业化进程趋近成熟,催生出涵盖二氧化碳捕集、运输、地质封存和监管等全流程的完整产业链与产业集群,有力推动了电力系统负碳技术的规模化应用与可持续发展。

国内方面,在提升电力系统源侧低碳化水平进程中,积极借鉴国外经验,大力开展化石能源机组节能降碳改造工作,新型非化石能源发电技术如风电、光伏等得到广泛应用,但在发电稳定性与消纳能力方面仍有待进一步提升,新型非化石能源发电并网技术虽有进展,但部分关键技术仍处于试验优化阶段,尚未实现大规模成熟应用^[9,23,76]。在低碳技术方向,低损耗环保型输变电设备、化石能源清洁高效发电等技术已取得阶段性成果^[24,77],但电网废弃物无害化处置节能降碳技术的全面推广面临着技术标准不完善、成本较高等现实困境。在零碳技术方向,新型非化石能源发电、新型非化石能源发电并网等技术稳步发展^[78],但光热和其他新能源互补发电、海洋能源清洁发电等技术在系统集成优化、并网稳定性提升以及发电效率提高等方面仍有较大的改进潜力。在负碳技术方向,化石能源电厂 CCUS 全链条系统设计及运行仍处于不断完善与调试阶段,生物质能电厂 BECCUS 相关技术应用尚处于起步摸索期^[30],部分低能耗低成本碳捕集技术的经济性与实用性验证工作仍在持续探索推进,高效率碳转化利用、低能耗直接空气捕集二氧化碳等技术多处于实验室成果向实际应用转化的关键时期,化石能源电厂低能耗低成本碳捕集技术距离大规模商业化运营尚有距离,此外电网建设工程水土保持碳汇技术的量化评估体系也亟待健全完善^[79]。

5) 电力系统碳资产开发与碳市场技术子领域。

目前全球范围内碳资产管理体系与碳市场日益成熟,欧盟碳排放交易体系作为先驱,持续引领市场机制设计,促进碳价稳步上升及低碳技术投资^[80-82],同时欧盟、北美等发达地区的碳资产管理实践亦为全球提供了宝贵经验^[83]。相较于海外较多的市场实践,我国的绿色电力市场正逐步迈入市场化改革的深水区、无人区^[84-86],目前面临着与碳市场同步建设与推进的新形势。由于我国碳市场的运行时间较短、政策调整较为频繁,目前国内仅在电碳市场的耦合模型等方面开展了关于碳市场价格、碳排放量等变化趋势的研究^[87-89],缺乏多重市场联

动运行对电力减排的正向引导,亟需电-碳-证市场协同科学工具支撑^[90]。未来仍需不断探索创新,设计更为合理的电-碳市场协同机制,推动碳成本通过市场竞价传导至终端用能侧,引导全社会用能方式的绿色转型。

4.2 未来展望

结合电碳协同领域的研究需求,本文围绕5个重点子领域方向展望未来技术发展趋势。

1) 电力系统间接碳减排效益评估及方法学开发子领域。

针对如何量化体现新型电力系统在新能源替代减排中平台作用,未来亟需研究建立新型电力系统多要素碳减排方法学体系。新型电力系统电网低碳建设与运行、抽蓄与新型储能、综合能源系统及电动汽车与电网互动等为代表的场景在碳减排中发挥着重要作用,但各场景运行模式和交互机理复杂,边际环境效益存在差异和难点,新开发的碳减排方法学体系将从单体要素基准线和监测方法的论证向多要素与电网互动复杂场景的系统方法学转变,以适应新型电力系统源网荷储互动及多能互补场景。面对新型电力系统碳减排项目及碳资产开发需求,新型电力系统碳减排方法学体系将充分体现电网对发电侧可再生能源消纳的贡献及对用电侧电能替代的引导效果,有利于合理划分电力碳资产的核算边界。

2) 电力系统一体化碳评估技术子领域。

在电力系统碳排放核算体系构建与精准量化需求驱动下,碳排放监测技术向更加精确和实时性更强的方向发展,并推动碳核算与低碳评价指标体系进一步完善,电力碳排放因子的动态计算能力将从年度向细粒度分时分区转变,电工装备产品碳足迹核算技术将逐步由通用方法研究向面向具体品类的核算规则研究过渡,碳仿真技术将向精准、实用、可视方向发展。碳监测方面,电力系统碳排放监测技术将向全环节覆盖、在线化、精准化方向发展,CEMS推广和六氟化硫监测的数字化成为发展趋势。碳核算方面,电力系统碳排放核算技术将向轨迹可追踪、生命周期可溯源方向发展,分时分区电力碳排放因子将成为碳排放核算的重要基础数据。碳足迹方面,电工装备产品碳足迹核算方法逐步完善,并推动电工装备产品碳足迹管理体系建设。碳评价方面,电力企业的低碳评价将向体系化、矩阵化方向发展,多维度、多层级的评价指标

将成为组织层面碳评价的核心依据。碳仿真方面,通过开展新型电力系统全环节多时空尺度实时碳轨迹追踪与溯源技术,建立电-碳-能协同的新型电力系统全景碳排放一体化评估与仿真模型。

3) 电力系统全过程电碳协同技术子领域。

电碳协同规划方面,“安全-经济-低碳”三元均衡目标下的新型电力系统形态路径演化及其关键支撑技术将成为未来重点方向,碳预算指标愈加关注国家与区域之间的合理衔接,时空建模尺度也将更为精细。电碳协同运行方面,将逐步以融合先进低碳、零碳及负碳技术为核心,深入开展电碳协同运行的智能化、精细化优化研究,通过构建动态精准的电碳协同模型,深度挖掘电力运行与碳减排之间的内在关联与协同增效潜力。电碳协同建设方面,面向输变电工程碳排放核算精准化与低碳评价标准化的需求,未来研究重点将向输变电工程全过程碳排放核算、绿色建造、碳排放监测、低碳评估以及后评价方向逐步发展。绿色供应链方面,覆盖电网物资供应链全要素、全环节的碳监测、核算及减排等碳管理技术将是未来的重点研究方向。

4) 电力系统低碳、零碳、负碳应用技术子领域。

紧密围绕电力碳减排的核心需求,未来重点强化低碳、零碳、负碳前沿技术与先进装备的研发及并网应用,从广度和深度上全面提升电力系统的碳减排、碳移除效能。在设备研发方面,重点关注研究先进的碳移除及电网碳检测装置关键设备,如高浓度二氧化碳捕获装置,能在复杂工况下高效捕捉二氧化碳,同时借助智能传感与数据分析技术精准监测电网各环节碳排放数据,为后续减排策略制定提供可靠依据。在并网应用方面,着重开展碳移除设备并网的仿真模拟研究,利用模型精确预测并网后对电网稳定性、电能质量等的影响并提前优化,加强实验检测工作,从多维度评估设备并网性能,包括不同负荷下的碳移除效率、电力消耗及电磁兼容性等,进而在实际电网运行中实现碳移除设备与各类发电设备的智能协同,依据电力供需灵活调配优化运行参数。

5) 电力系统碳资产开发与碳市场技术子领域。

随着CCER重启与碳市场扩容,国家核证类减排项目种类不断丰富,碳减排效益评估能力、碳资产的形成、管理及市场化交易能力及绿色电力环境价值的发现能力均持续提升。碳市场方面,国内碳

市场覆盖的行业范围进一步拓展,市场主体逐渐多元化,交易品种和创新产品不断涌现。但市场规模变化趋势呈现不确定性,对于电能替代和电能消费需求的正面影响可能增强,碳移除型减排碳资产的开发和市场化交易规模将呈上升趋势;绿色电力市场方面,随着国内新能源去补贴化,绿电交易成为新能源进入市场体现其绿色属性、保证其合理收益补偿的重要方式。建立基于“3-pillar”规则的绿色电力消费认定溯源体系,推动国际互认,是国内企业应对国际绿色贸易壁垒的重要途径。绿电绿证、碳资产等市场化机制的政策协同将进一步促进绿电环境价值发现和价格机制形成,数字化技术的发展也将进一步推动绿色电力市场的相关研究。

6 结论

电力系统作为能源低碳转型的关键战场,未来在支撑电气化需求持续增长的前提下,还需要扎实稳步推进降碳。电碳协同技术的创新突破与应用对于系统高质量达峰、如期实现碳中和有着极为重要的影响。立足未来新的研究方向,本文提出电碳协同的定义与内涵,明确了电碳协同需要重点解决的两大关键问题与 5 项技术挑战,系统建立了覆盖 5 个子领域、70 项关键技术的电碳协同技术体系。作为交叉融合与新兴热点研究方向,未来电碳协同的技术内涵与外延将紧随国家政策战略与技术发展不断深入拓展,本文结合目前电碳协同领域的研究现状与实践,对重点领域方向的未来技术发展趋势进行了展望。希望本文提出的电碳协同理论与技术体系能够为低碳/零碳电力系统构建、能源电力系统转型发展等方向的研究提供参考与借鉴。

参考文献

- [1] 中华人民共和国中央人民政府. 中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见 [EB/OL]. (2021-09-22). https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5649728.htm.
- [2] 舒印彪, 张丽英, 张运洲, 等. 我国电力碳达峰、碳中和路径研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 1-14. SHU Yinbiao, ZHANG Liying, ZHANG Yunzhou, et al. Carbon peak and carbon neutrality path for China's power industry[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 1-14(in Chinese).
- [3] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2818. ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818(in Chinese).
- [4] 国网能源研究院有限公司. 中国能源电力发展展望 2021[M]. 北京: 中国电力出版社, 2021. State Grid Energy Research Institute Co., Ltd. China energy & electricity outlook[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2021(in Chinese).
- [5] 中华人民共和国中央人民政府. 中共中央国务院关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见 [EB/OL]. (2024-07-31). https://www.gov.cn/gongbao/2024/issue_11546/202408/content_6970974.html.
- [6] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于印发《加快构建碳排放双控制度体系工作方案》的通知 [EB/OL]. (2024-07-30). https://www.gov.cn/gongbao/2024/issue_11526/202408/content_6969188.html.
- [7] 郭剑波, 王铁柱, 罗魁, 等. 新型电力系统面临的挑战及应对思考[J]. 新型电力系统, 2023, 1(1): 32-43. GUO Jianbo, WANG Tiezhu, LUO Kui, et al. Development of new power systems: challenges and solutions[J]. New Type Power Systems, 2023, 1(1): 32-43(in Chinese).
- [8] 辛保安, 单葆国, 李琼慧, 等. “双碳”目标下“能源三要素”再思考[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3117-3125. XIN Bao'an, SHAN Baoguo, LI Qionghui, et al. Rethinking of the “Three Elements of Energy” toward carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3117-3125(in Chinese).
- [9] 舒印彪, 张正陵, 汤涌, 等. 新型电力系统构建的若干基本问题[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(21): 8327-8340. SHU Yinbiao, ZHANG Zhengling, TANG Yong, et al. Fundamental issues of new-type power system construction[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(21): 8327-8340(in Chinese).
- [10] 国家发展改革委, 市场监管总局, 生态环境部. 关于进一步强化碳达峰碳中和标准计量体系建设行动方案(2024—2025 年)的通知[EB/OL]. (2024-08-08). https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202408/t20240808_1392291.html.
- [11] 国家发展改革委, 生态环境部, 国家统计局, 等. 关于印发《完善碳排放统计核算体系工作方案》的通知 [EB/OL]. (2024-10-08). https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202410/t20241024_1393879.html.
- [12] 衣英华. 关于 CCER 方法学转化为标准的一点思考[J]. 核标准计量与质量, 2023(4): 16-21. YI Yinghua. Thoughts on transforming CCER methodologies into standards[J]. Nuclear Standards

- Metrology and Quality, 2023(4): 16-21(in Chinese).
- [13] 马溪原, 陈彬, 盘和林, 等. 电力碳排放核算与监测体系亟待升级[N]. 中国能源报, 2021-09-20(004).
MA Xiyuan, CHEN Bin, PAN Helin, et al. The accounting and monitoring system for carbon emissions in the electricity sector urgently needs upgrading[N]. China Energy News, 2021-09-20(004)(in Chinese).
- [14] 黄莉, 任禹丞, 周赣, 等. 电力用户侧能源优化碳普惠体系设计及应用[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(5): 70-79.
HUANG Li, REN Yucheng, ZHOU Gan, et al. Design and application of the carbon generalized system of the preferences for energy optimization for power customers [J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(5): 70-79(in Chinese).
- [15] 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): 2220-2235.
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).
- [16] 李姚旺, 张世旭, 杨晨, 等. 考虑绿电与绿证交易的实时用电碳核算方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(12): 4543-4555.
LI Yaowang, ZHANG Shixu, YANG Chen, et al. Real-time carbon emission accounting method considering green electricity and green certificate transactions[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(12): 4543-4555(in Chinese).
- [17] 康重庆, 杜尔顺, 李姚旺, 等. 新型电力系统的“碳视角”: 科学问题与研究框架[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 821-833.
KANG Chongqing, DU Ershun, LI Yaowang, et al. Key scientific problems and research framework for carbon perspective research of new power systems[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 821-833(in Chinese).
- [18] 易俊, 孙浩然, 林伟芳, 等. 电力系统碳排放核算标准对比分析[J]. 电网技术, 2025, 49(3): 920-933.
YI Jun, SUN Haoran, LIN Weifang, et al. Comparative analysis of carbon emission accounting standards for power systems[J]. Power System Technology, 2025, 49(3): 920-933(in Chinese).
- [19] 李政, 陈思源, 董文娟, 等. 碳约束条件下电力行业低碳转型路径研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 3987-4000.
LI Zheng, CHEN Siyuan, DONG Wenjuan, et al. Low carbon transition pathway of power sector under carbon emission constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 3987-4000(in Chinese).
- [20] 杨儒浦, 李丽平. 实施碳预算的国际经验借鉴[J]. 中国能源, 2023, 45(11): 73-81.
YANG Rupu, LI Liping. International experience and reference in implementing carbon budgets[J]. Energy of China, 2023, 45(11): 73-81(in Chinese).
- [21] 梁志峰, 礼晓飞, 郭琳润, 等. 德国电力系统转型对我国新能源发展运行的启示[J]. 电网技术, 2024, 48(7): 2884-2894.
LIANG Zhifeng, LI Xiaofei, GUO Linrun, et al. Enlightenment of Germany's power system transformation on the development and operation of renewable energy in China[J]. Power System Technology, 2024, 48(7): 2884-2894(in Chinese).
- [22] 李鹏, 黄龙, 陈皓勇, 等. 日本电力市场建设对我国的启示[J]. 南方电网技术, 2019, 13(9): 67-74.
LI Peng, HUANG Long, CHEN Haoyong, et al. Enlightenment of Japan's power market construction to China[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(9): 67-74(in Chinese).
- [23] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-474.
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-474(in Chinese).
- [24] 于志辉, 赵志鹏, 王进, 等. 面向灵活调节与低碳经济运行的风光水火多源多目标短期调度[J]. 电网技术, 2025, 49(8): 3104-3115.
YU Zhihui, ZHAO Zhipeng, WANG Jin, et al. Short-term multi-objective scheduling of wind-solar-hydro-thermal multi-power for flexible adjustment and low-carbon economic operation[J]. Power System Technology, 2025, 49(8): 3104-3115(in Chinese).
- [25] 王志会, 陆汉东, 陈伟哲, 等. 电力工程建设施工阶段碳排放计算研究[J]. 价值工程, 2024, 43(22): 126-128.
WANG Zhihui, LU Handong, CHEN Weizhe, et al. Research on carbon emission calculation in the construction stage of electric power engineering [J]. Value Engineering, 2024, 43(22): 126-128(in Chinese).
- [26] 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 Xiaohong, FU Yipeng, HUANG Chengdong, et al. Method and application of carbon emission calculation for ultra- high voltage(UHV) project construction [J]. Resources Science, 2023, 45(12): 2291-2310(in Chinese).
- [27] 王彦春, 冯耕中, 王能民. 制造商主导的低碳供应链减排策略分析[J]. 商业经济研究, 2017(12): 72-75.
WANG Yanchun, FENG Gengzhong, WANG Nengmin.

- Analysis of emission reduction strategy of manufacturer-led low-carbon supply chain[J]. *Journal of Commercial Economics*, 2017(12): 72-75(in Chinese).
- [28] HOSSAIN A, AZHIM A, JAAFAR A B, et al. Ocean thermal energy conversion: the promise of a clean future [C]//Proceedings of the 2013 IEEE Conference on Clean Energy and Technology(CEAT). Langkawi: IEEE, 2013: 23-26.
- [29] MENDELEVITCH R, OEI P Y. Consequences of the UK energy market reform on the development of carbon capture, transport, and storage[C]//proceedings of the 2015 12th International Conference on the European Energy Market(EEM). Lisbon: IEEE, 2015: 1-6.
- [30] 杨秀媛, 赵刚, 吴瑞芝, 等. 生物质能电厂的监测与控制[J]. *电网技术*, 2006, 30(23): 88-90.
YANG Xiuyuan, ZHAO Gang, WU Ruizhi, et al. Monitoring and control for biological energy power plant[J]. *Power System Technology*, 2006, 30(23): 88-90(in Chinese).
- [31] 王伟中. 清洁发展机制方法学指南[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2005.
WANG Weizhong. The methodology guidelines of clean development mechanism methodology guidelines of clean development mechanism[M]. Beijing: Social Sciences Academic Press(China), 2005(in Chinese).
- [32] 吴宏杰. CCUS 碳减排方法学开发经历、难点及意义[J]. *中国国情国力*, 2021(11): 16-19.
WU Hongjie. Development experience, challenges, and significance of CCUS carbon emission reduction methodology[J]. *China National Conditions and Strength*, 2021(11): 16-19(in Chinese).
- [33] 蒋峰, 赵鲁苏. 全球碳市场及碳资产开发要点简介[J]. *石油石化绿色低碳*, 2024, 9(5): 30-35.
JIANG Feng, ZHAO Lusu. Introduction of global carbon markets and carbon asset development[J]. *Green Petroleum & Petrochemicals*, 2024, 9(5): 30-35(in Chinese).
- [34] 俞薇. 中国温室气体自愿减排机制运行效果影响因素研究[D]. 武汉: 中南财经政法大学, 2019.
YU Wei. Research on the determinants of the operational effect of China's greenhouse gases voluntary emissions reduction mechanism[D]. Wuhan: Zhongnan University of Economics and Law, 2019(in Chinese).
- [35] SHRESTHA R M, SHRESTHA R. Economics of clean development mechanism power projects under alternative approaches for setting baseline emissions [J]. *Energy Policy*, 2004, 32(12): 1363-1374.
- [36] 许猛, 黄瀚坤, 胡雨聪, 等. CCER 现行体系及未来发展趋势[J]. *广州化工*, 2024, 52(17): 16-18, 26.
XU Meng, HUANG Hankun, HU Yucong, et al. Current system and future development trend of CCER [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2024, 52(17): 16-18, 26(in Chinese).
- [37] 王陶, 张志智, 孙潇磊. 国际自愿减排交易机制评述及其对石油石化行业的启示[J]. *当代石油石化*, 2024, 32(9): 11-18.
WANG Tao, ZHANG Zhizhi, SUN Xiaolei. Review of international voluntary emission reduction trading mechanism and enlightenment to petroleum and petrochemical industry[J]. *Petroleum & Petrochemical Today*, 2024, 32(9): 11-18(in Chinese).
- [38] 张安安, 周奇, 李茜, 等. “双碳”目标下火电厂 CO₂ 计量技术研究现状与展望[J]. *发电技术*, 2024, 45(1): 51-61.
ZHANG An'an, ZHOU Qi, LI Qian, et al. Research status and prospect of CO₂ accounting technology in thermal power plants under the goal of dual carbon[J]. *Power Generation Technology*, 2024, 45(1): 51-61(in Chinese).
- [39] 刘含笑, 朱前林, 林青阳, 等. 基于 LCA 方法的光伏产品碳足迹量化评价与低碳设计[J]. *环境工程学报*, 2024, 18(10): 2972-2981.
LIU Hanxiao, ZHU Qianlin, LIN Qingyang, et al. Carbon footprint evaluation and low carbon design of China's photovoltaic products based on LCA methodology [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2024, 18(10): 2972-2981(in Chinese).
- [40] 钦卫国, 张军华, 裴会川, 等. 欧盟光伏产品碳足迹管理的关键步骤及对我国的启示[J]. *信息技术与标准化*, 2024(10): 83-88.
QIN Weiguo, ZHANG Junhua, PEI Huichuan, et al. The key procedures of product carbon footprint management of photovoltaics in the European Union and its implications for China[J]. *Information Technology & Standardization*, 2024(10): 83-88(in Chinese).
- [41] 郁丹, 唐人, 王艾荣. 国内固定排放源二氧化碳排放连续监测应用现状和问题初探[J]. *暖通空调*, 2024, 54(2): 28-32.
YU Dan, TANG Ren, WANG Airong. Application status and problems of continuous monitoring of carbon dioxide emissions from domestic fixed emission sources [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2024, 54(2): 28-32(in Chinese).
- [42] 张春雷, 赵良, 刘道, 等. 火电 CO₂ 排放连续监测的国际经验分析及启示[J]. *中国工程科学*, 2024, 26(4): 134-151.
ZHANG Chunlei, ZHAO Liang, LIU Xiao, et al. Analysis of international experience in continuous monitoring of CO₂ emissions from thermal power plants and its insights for China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2024, 26(4): 134-151(in Chinese).

- [43] 裴冰, 刘通浩, 杨文雨, 等. 典型燃煤电厂机组二氧化碳排放测试及核算研究[J]. 中国环境监测, 2023, 39(2): 225-231.
- PEI Bing, LIU Tonghao, YANG Wenyu, et al. Study on determination and accounting of CO₂ emission from typical coal-fired power plant[J]. Environmental Monitoring in China, 2023, 39(2): 225-231(in Chinese).
- [44] 刘天蔚, 边晓燕, 吴珊, 等. 电力系统碳排放核算综述与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(4): 176-187.
- LIU Tianwei, BIAN Xiaoyan, WU Shan, et al. Overview and prospect of carbon emission accounting in electric power systems[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4): 176-187(in Chinese).
- [45] 张益兵, 朱朝勇, 武美辰, 等. 基于全生命周期评价的变压器碳足迹研究与分析[J]. 高压电器, 2024, 60(11): 57-67.
- ZHANG Yibing, ZHU Chaoyong, WU Meichen, et al. Research and analysis of carbon footprint of transformer based on full life cycle assessment[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(11): 57-67(in Chinese).
- [46] 张明, 孟庆蓉, 瞿子涵, 等. 典型电力电缆碳足迹核算标准化现状及建设思考[J]. 标准科学, 2024(S1): 165-169.
- ZHANG Ming, MENG Qingrong, QU Zihan, et al. Thoughts on the current status of standardization in carbon footprint accounting of typical power cables [J]. Standard Science, 2024(S1): 165-169(in Chinese).
- [47] 边少卿, 杨姗姗, 杨秀, 等. 国际绿色贸易壁垒形势下完善我国碳核算体系的对策研究[J]. 中国工程科学, 2024, 26(4): 96-107.
- BIAN Shaoqing, YANG Shanshan, YANG Xiu, et al. Strategies to improve China's carbon accounting system under international green trade barriers [J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(4): 96-107(in Chinese).
- [48] 文刚, 石琳, 徐行文. 温室气体排放数据质量现状及提升建议[J]. 中国建材科技, 2024, 33(4): 9-12.
- WEN Gang, SHI Lin, XU Xingwen. The current status of greenhouse gas emissions data quality and suggestions for improvement[J]. China Building Materials Science & Technology, 2024, 33(4): 9-12(in Chinese).
- [49] 杨宗帅, 魏昌龙, 宋昕, 等. 生命周期评价研究及其在我国土壤修复领域的应用进展[J]. 土壤通报, 2023, 54(4): 966-977.
- YANG Zongshuai, WEI Changlong, SONG Xin, et al. Development of life cycle assessment and its applications in soil remediation in China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(4): 966-977(in Chinese).
- [50] 张敏, 李慧蓬, 常潇, 等. 新型电力系统全生命周期低碳评价指标体系与方法[J]. 太原理工大学学报, 2024, 55(1): 38-45.
- ZHANG Min, LI Huipeng, CHANG Xiao, et al. Low-carbon evaluation index system and method for the whole life cycle of the new power system[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2024, 55(1): 38-45(in Chinese).
- [51] 任宇路, 程昱舒, 吕相沅, 等. 运营商区域管理低碳综合评价指标体系和方法研究[J/OL]. 电测与仪表, 2024[2024-11-26]. <http://kns.cnki.net/http.zjlib.proxy.zyproxy.zjlib.cn/kcms/detail/23.1202.TH.20240813.1642.002.html>.
- REN Yulu, CHENG Yushu, LÜ Xiangyuan, et al. Research on low-carbon comprehensive evaluation index system and method for the operator regions management [J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024 [2024-11-26]. <http://kns.cnki.net/http.zjlib.proxy.zyproxy.zjlib.cn/kcms/detail/23.1202.TH.20240813.1642.002.html> (in Chinese).
- [52] International Energy Agency. World energy outlook 2020[R]. Paris: International Energy Agency, 2020.
- [53] BP. BP energy outlook 2020[R]. London: BP Press Office, 2020.
- [54] International Energy Agency. China power system transformation[EB/OL]. (2020-02-08)[2021-10-15]. <https://www.iea.org/reports/china-power-system-transformation>.
- [55] 清华大学气候变化与可持续发展研究院. 中国长期低碳发展战略与转型路径研究综合报告[R]. 北京: 清华大学气候变化与可持续发展研究院, 2021.
- Institute of Climate Change and Sustainable Development. Research on China's long-term low-carbon development strategy and transformation path [R]. Beijing: Institute of Climate Change and Sustainable Development, 2021(in Chinese).
- [56] 国家发展和改革委员会能源研究所. 我国实现全球1.5℃目标下的能源排放情景研究[R]. 北京: 国家发展和改革委员会能源研究所, 2018.
- Energy Research Institute of National Development and Reform Commission. China's energy emission scenario study under the global 1.5℃ target[R]. Beijing: Energy Research Institute of National Development and Reform Commission, 2018(in Chinese).
- [57] 中国石油经济技术研究院. 2050 年世界与中国能源展望[R]. 北京: 中国石油经济技术研究院, 2019.
- CNPC Economics & Technology Research Institute. World and China's energy outlook in 2050 [R]. Beijing: CNPC Economics & Technology Research Institute, 2019(in Chinese).
- [58] 杨敬言, 阮梓纹, 杨秀, 等. 陆上风电碳足迹动态变化的国际比较研究[J]. 中国工程科学, 2024, 26(4): 152-163.

- YANG Jingyan, RUAN Ziwen, YANG Xiu, et al. International comparative study on dynamic change of onshore wind power carbon footprint[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(4): 152-163(in Chinese).
- [59] 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): 1323-1342.
- ZHU Jizhong, ZHOU Jialin, ZHANG Di. Review of full life-cycle carbon footprints accounting of clean energy and power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(4): 1323-1342(in Chinese).
- [60] SMITH J. The development and operation of the open balancing platform for grid energy storage systems in the UK[J]. Journal of Electrical Power Systems, 2023, 15(3): 120-135.
- [61] 庞腊成, 吉斌, 徐帆, 等. 面向电—碳市场协同的负荷响应机制与效益分析初探[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(22): 62-71.
- PANG Lacheng, JI Bin, XU Fan, et al. Preliminary study on mechanism and benefit analysis of load response for electricity-carbon market collaboration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22): 62-71(in Chinese).
- [62] RIBEIRO F D M, KRUGLIANSKAS I. Principles of environmental regulatory quality: a synthesis from literature review[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 96: 58-76.
- [63] CONRAD K. Price competition and product differentiation when consumers care for the environment [J]. Environmental and Resource Economics, 2005, 31(1): 1-19.
- [64] MITRA S, WEBSTER S. Competition in remanufacturing and the effects of government subsidies [J]. International Journal of Production Economics, 2008, 111(2): 287-298.
- [65] DYLLICK T, HOCKERTS K. Beyond the business case for corporate sustainability[J]. Business Strategy and the Environment, 2002, 11(2): 130-141.
- [66] CARTER C R, ROGERS D S. A framework of sustainable supply chain management: moving toward new theory [J]. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 2008, 38(5): 360-387.
- [67] TEUTEBERG F, WITTSTRUCK D. A systematic review of sustainable supply chain management research, accounting and information systems[D]. Osnabrück: University of Osnabrück, 2010.
- [68] 徐明芳. 绿色供应链动态优化模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- XU Mingfang. Research on dynamic optimization model of environmental supply chain[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007(in Chinese).
- [69] 朱庆华, 窦一杰. 基于政府补贴分析的绿色供应链管理博弈模型[J]. 管理科学学报, 2011, 14(6): 86-95.
- ZHU Qinghua, DOU Yijie. A game model for green supply chain management based on government subsidies [J]. Journal of Management Science in China, 2011, 14(6): 86-95(in Chinese).
- [70] 连捷. 基于供应链管理的绿色物流发展路径探析[J]. 商业经济研究, 2021(9): 94-96.
- LIAN Jie. Analysis on the development path of green logistics based on supply chain management[J]. Journal of Commercial Economics, 2021(9): 94-96(in Chinese).
- [71] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 温室气体 产品碳足迹 量化要求和指南: GB/T 24067—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024
- State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Greenhouse gases — carbon footprint of products—requirements and guidelines for quantification: GB/T 24067—2024 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2024(in Chinese).
- [72] 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. 工业企业温室气体排放核算和报告通则: GB/T 32150—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration. General guideline of the greenhouse gas emissions accounting and reporting for industrial enterprises: GB/T 32150—2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016(in Chinese).
- [73] VANZETTA J, SCHNEIDERS C. Current and imminent challenges for the transmission system operator in Germany[C]//Proceedings of the 2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies. Manchester: IEEE, 2011: 1-6.
- [74] DE ARTICLE M, SELLNAU M, FOSTER W, et al. Advancement of GDCI engine technology for US 2025 CAFE and tier3 emissions[J]. Ingenieurs de l'Automobile, 2017(TN.850): 82-89.
- [75] BREYER C, KHALILI S, BOGDANOV D, et al. On the history and future of 100% renewable energy systems research[J]. IEEE Access, 2022, 10: 78176-78218.
- [76] 刘高军. 碳达峰碳中和背景下火力发电厂碳排放分析与建议[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(6): 189-195.
- LIU Gaojun. Analysis and suggestion of carbon emission in thermal power plants under the background of carbon peak and carbon neutrality[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(6): 189-195(in Chinese).
- [77] 刘丽军, 胡鑫, 林锟, 等. 计及碳排放分摊的配电网分布式低碳调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(24): 9594-9606.
- LIU Lijun, HU Xin, LIN Kun, et al. Distributed low

- carbon dispatch for distribution networks with carbon emission sharing[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(24): 9594-9606(in Chinese).
- [78] 张博, 孙旭东, 刘颖, 等. 能源新技术新兴产业发展动态与 2035 战略对策[J]. 中国工程科学, 2020, 22(2): 38-46.
- ZHANG Bo, SUN Xudong, LIU Ying, et al. Development trends and strategic countermeasures of China's emerging energy technology industry toward 2035[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(2): 38-46(in Chinese).
- [79] LI X I, ZHU Haoming, ZHANG Liping. Review on China's national carbon market and analysis for commercial development potential of carbon capture, utilization and storage in China[C]//Proceedings of the 2022 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies—Asia(ISGT Asia). Singapore: IEEE, 2022: 804-807.
- [80] 陈江宁, 夏苇, 刘晟铭, 等. 从“双碳”目标认知到碳资产管理[J]. 企业管理, 2021(11): 58-60.
- CHEN Jiangning, XIA Wei, LIU Shengming, et al. From “carbon peaking and carbon neutrality goals” target cognition to carbon asset management[J]. Enterprise Management, 2021(11): 58-60(in Chinese).
- [81] 董振龙, 李红娜, 刘士清, 等. 数字化转型促进企业碳资产高效管理[J]. 环境生态学, 2023, 5(9): 141-146.
- DONG Zhenlong, LI Hongna, LIU Shiqing, et al. Digital transformation promotes efficient management of enterprise carbon assets[J]. Environmental Ecology, 2023, 5(9): 141-146(in Chinese).
- [82] 李云松, 蔡天亮, 王磊, 等. 碳资产管理体系规划与构建研究综述[J]. 电工电气, 2023(11): 14-18.
- LI Yunsong, CAI Tianliang, WANG Lei, et al. Review of the research of progress on planning and construction of carbon asset management system[J]. Electrotechnics Electric, 2023(11): 14-18(in Chinese).
- [83] CHEVALLIER J, GOUTTE S, JI Qiang, et al. Green finance and the restructuring of the oil-gas-coal business model under carbon asset stranding constraints [J]. Energy Policy, 2021, 149: 112055.
- [84] 张显, 王彩霞, 谢开, 等. “双碳”目标下中国绿色电力市场建设关键问题[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(4): 25-33.
- ZHANG Xian, WANG Caixia, XIE Kai, et al. Key issues of green electricity market construction in China under goals of carbon emission peak and carbon neutrality [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(4): 25-33(in Chinese).
- [85] 张铮. 国际经验对中国绿证国际化的启示[J]. 中国电力企业管理, 2023(25): 68-71.
- ZHANG Zheng. Implications of international experience for the internationalization of green power certificates in China[J]. China Power Enterprise Management, 2023(25): 68-71(in Chinese).
- [86] 时璟丽. 国际可再生能源参与电力市场配套支持机制及对我国的启示[J]. 中国能源, 2021, 43(3): 55-58.
- SHI Jingli. International renewable energy's participation in power market supporting mechanism and its enlightenment in China[J]. Energy of China, 2021, 43(3): 55-58(in Chinese).
- [87] LU Yan, XIANG Jing, GENG Pengyun, et al. Coupling mechanism and synergic development of carbon market and electricity market in the region of Beijing-Tianjin-Hebei[J]. Energies, 2023, 16(4): 1726.
- [88] 冯天天. 绿证交易及碳交易对电力市场的耦合效应分析模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- FENG Tiantian. Coupling induction analysis model of tradable green certificates and carbon emission trading acting on electricity market in China[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016(in Chinese).
- [89] CHANG Xin, WU Zhaoyuan, WANG Jinting, et al. The coupling effect of carbon emission trading and tradable green certificates under electricity marketization in China [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 187: 113750.
- [90] 邹鑫, 韦雨晨. 基于系统动力学的电-碳-绿证多尺度市场耦合交易研究[J]. 电力科学与工程, 2023, 39(11): 32-44.
- ZOU Xin, WEI Yuchen. Research on multi-scale electricity-carbon-green certificate market coupling trading based on system dynamics[J]. Electric Power Science and Engineering, 2023, 39(11): 32-44(in Chinese).



易俊

在线出版日期: 2025-03-13。

收稿日期: 2024-12-06。

作者简介:

易俊(1980), 男, 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, yjun@epri.sgcc.com.cn;

赵明欣(1985), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为配电网规划、能源互联网规划、低碳电力系统等, zhaomingxin@epri.sgcc.com.cn。

(责任编辑 邱丽萍)