

碳边境调节机制下近零碳制造体系建设研究

成润婷¹, 张勇军^{1*}, 李立涅¹, 丁茂生², 林靖淳¹, 章春锋¹, 韩永霞¹

(1. 华南理工大学电力学院, 广州 510641; 2. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 银川 750002)

摘要: 在国家“双碳”战略目标、欧盟碳排放交易体系改革的双重驱动下, 我国制造业实施节能、减污、降碳协同增效, 尽快实现低碳和零碳转型, 成为关注焦点和发展亟需。本文重点探讨了欧盟碳边境调节机制(CBAM)对我国制造业的影响, 基于此梳理了近零碳制造体系的概念特征, 从关键技术、计量基础、市场驱动力等主要维度出发, 详细阐述了近零碳制造体系的核心内容。分别从产品制造、电力供应两方面, 提炼了近零碳制造体系的技术发展方向, 建议形成“源网荷”碳计量系统以细化碳排放责任; 借鉴国外碳市场发展经验并分析我国碳市场发展格局, 在理论层面探讨了未来我国碳市场构建路径以促进近零碳制造体系发展。提出的近零碳制造体系实践方案, 可为深化“双碳”背景下我国制造业高质量发展、开展CBAM背景下我国制造业低碳转型建设研究提供先导性和基础性参考。

关键词: 欧盟碳排放交易体系; 碳边境调节机制; 零碳转型; 碳排放计量; 碳市场

中图分类号: TM-14 **文献标识码:** A

Construction of Near-Zero-Carbon Manufacturing System under the Carbon Border Adjustment Mechanism

Cheng Runting¹, Zhang Yongjun^{1*}, Li Licheng¹, Ding Maosheng², Lin Jingchun¹, Zhang Chunfeng¹, Han Yongxia¹

(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. Electric Power Research Institute, State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750002, China)

Abstract: The carbon peaking and carbon neutralization goals as well as the carbon trading system reforms of the European Union (EU) necessitate the synergy of energy conservation, pollution control, and carbon reduction in China to achieve low- and zero-carbon transformation of its manufacturing industry. This study focuses on the impact of the EU Carbon Border Adjustment Mechanism on China's manufacturing industry, clarifies the concept of a near-zero-carbon manufacturing system, and elaborates on its core content from the major dimensions of key technologies, measurement basis, and market driving force. It also proposes the technical development directions of the near-zero-carbon manufacturing system from the aspects of product manufacturing and power supply and suggests the establishment of a source-grid-load carbon measurement system to clarify carbon emission responsibilities. Moreover, the future development path for China's carbon market is explored after reviewing the carbon markets both in China and abroad. The practical solutions proposed by the study is expected to provide a basic reference for promoting the high-quality development

收稿日期: 2023-08-30; 修回日期: 2023-11-03

通讯作者: *张勇军, 华南理工大学电力学院教授, 研究方向为智能电网与能源互联网的规划、运行与控制; E-mail: zhangjun@scut.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“东部产业技术助力宁夏新能源综合示范区高质量发展的策略建议”(2022NXZD3)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

and low-carbon transformation of China's manufacturing industry.

Keywords: European Union emissions trading system; Carbon Border Adjustment Mechanism; zero-carbon transformation; carbon emission measurement; carbon emission trading market

一、前言

自第三次工业革命以来，人类活动产生过量碳排放并导致气候显著变化^[1]。《联合国气候变化框架公约》（1992年）等协议要求世界各国共同承担温室气体减排责任^[2]。超过60个国家和地区提出了2050年前实现碳中和的发展目标^[3-5]。尤其是欧盟，2005年率先建立全球最大的碳排放交易体系，2022年决议改革碳排放交易体系并于2023年5月正式发布碳边境调节机制（CBAM）^[6]：对进口商品征收碳税，使欧盟产品支付的碳价格与进口商品的碳价格趋同^[7]。美国、日本、英国等受此驱动开始制定本国的碳边境调节机制，进一步增强了碳关税的国际性影响与可操作性，也使CBAM趋向于具有全球影响力、成为多边或区域属性的制度。目前，我国提出了碳达峰、碳中和（“双碳”）战略目标^[8]，明确了建立健全“双碳”标准计量体系，加强标准国际衔接等要求^[9]。多个省份也在推进“双碳”部署方面发布了地方性政策^[2]。与此同时，我国拥有世界上规模最大的制造业，在能耗管理、碳排放控制方面面临较大压力^[10]，也不可避免地受到CBAM等一系列国外机制的影响。

我国制造业进行低碳转型，是环境、资源、市场、国际责任等因素的综合反映，经济可持续发展的内在要求。在国家“双碳”战略目标、国际碳排放交易体系的推动下，我国制造业正在有序开展零碳化转型，涵盖从上游零部件生产到下游应用的全过程以及能源供应。相应地，我国制造业体系的低碳转型路径研究获得了产业界和学术界的较多关注，如基于新型工业化的内涵提出相应发展路径^[11]，建立指标体系并评估制造业在数字化转型、绿色发展两方面的发展协调程度^[12]，探讨制造业“双碳”发展的逻辑与路径以及相应的理论框架^[13]，从各个层面研判碳中和目标下我国制造业的发展路径^[1,10,14]。也要注意，在已有制造业低碳转型的研究中，以碳元素为脉络、计及工程实践可行性的路径成果稀缺，对碳排放计量与交易等关键支撑因素的讨论并未展开；企业、政府、第三方机构等未就

近零碳体系形成共识，低碳化转型的着力点仍待明确。因此，受CBAM驱动的制造业近零碳化发展课题较为新颖、背景重大，需要开展深入探讨。

近零碳制造是一种基于海量智能化设备与数据资源以实现低碳生产的可持续制造模式，在降低产品全生命周期耗能、碳排放及其他污染物方面具有突出潜力^[15]。本文围绕我国近零碳制造体系建设课题，剖析CBAM对我国制造业的影响、近零碳制造体系的概念特征；从产品制造、电力供应两方面梳理近零碳制造体系的关键技术，探讨近零碳制造体系的计量基础、市场驱动力，进而提出我国碳排放权交易市场（碳市场）构建路径以保障制造业转型。从关键技术、计量基础、市场驱动力3个层次出发，构建近零碳制造体系的实践方案，以为深化制造业“双碳”发展和低碳转型建设研究提供参考。

二、碳边境调节机制对我国制造业的影响

欧盟提出CBAM，旨在弥补进口产品原产国与欧盟之间存在的碳价差异，防止域内高碳企业先向域外转移再回移到内部，从而削弱欧盟本土行业的综合竞争力、碳减排政策成效^[16]。CBAM涵盖钢铁、水泥、电力等高碳行业，分为3个实施阶段来不断扩大覆盖面（见表1）^[16-18]。目前，欧盟尚未详细规定产品生产全流程中碳排放量的具体计算方式、直接排放范围边界等，需申报产品的碳排放量

表1 CBAM的主要内容

阶段	实施内容
2023—2025年	覆盖领域的高碳产品进口商，需申报进口数量以及相应的直接排放总量，无需缴纳费用
2026—2034年	进口企业必须每年申报上一年度的进口货物数量以及其中对应的总碳排放量（可以扣除已在产品原产国实际支付的碳价），购买对应数量的CBAM证书用于清缴
2035年后	完全取消覆盖高碳产品的免费配额，进口企业无法采用免费配额来抵扣碳排放量

仅限于相关行业的生产加工过程（包括用电碳排放量、生产过程碳排放量），尚不涉及上/下游。直观上，CBAM主要影响我国的能源和资源密集型行业，如钢铁和铝行业^[19-21]，此类行业产品的碳排放主要来自电力供应的传递，随着CBAM覆盖范围的逐步扩大将面临较为显著的碳税成本压力；为新能源制造业及其上/下游产业提供了更好的发展机遇。然而，其他制造业将面临趋紧的碳排放约束，需要加快推进制造业近零碳化转型，引导国内相关主体共建绿色制造生态。

（一）择机扩建清洁能源制造产业

CBAM推高了各地的碳排放成本，将带动各地钢铁、化工等高碳行业扩大对新能源设备的需求。我国在可再生电力，绿氢，碳捕集、利用与封存（CCUS）等领域具有技术和市场规模的双重优势，在风电、光伏发电、动力电池等装备方向更是拥有产业链的主导地位。从长期视角看，CBAM有利于我国能源转型领域的投资和对外贸易，可推动相关细分制造业的发展，重点建设清洁能源制造产业，充分把握新市场形势下的国际合作机遇。

（二）以近零碳技术推动高碳排放制造业的近零碳转型

CBAM于2023年启动试运行，到2034年转入全面运行，这一阶段与我国经济高质量发展转型时期基本重叠。我国需着力发展数字经济、新兴产业，突破生态碳汇、碳捕集等负碳技术并扩大应用规模。高碳排放行业积极使用绿电、加强近零碳产品研发、升级工艺装备，践行“优质减量”的发展道路。企业层面提高碳排放核算能力，掌握CBAM政策内容并熟悉证书购买等操作。

（三）加强碳市场建设力度与制造业应用效能

制造业与碳计量方法、碳市场联系密切：制造业采用低碳技术以减少碳排放，应用碳计量方法以掌握和管理碳排放，参与碳市场交易以实现减排目标并获得收益激励。这种密切联系推动了制造业的可持续发展，有利于实现低碳经济，可以认为碳市场对制造业绿色转型起到关键性的驱动作用。

高质量建设全国碳市场，衔接国内外碳交易机制，完善碳排放计量与监测系统，为在制造业中的

全面推广应用筑牢基础能力。从直接影响来看，国内碳排放权交易政策引导企业自发开展绿色转型；从间接影响来看，在CBAM背景下，企业可通过国家的碳排放权交易政策来获得一定额度的出口产品碳税豁免，进而降低企业的碳排放成本。

然而在我国，目前全国碳市场的覆盖范围不完整（尚未全面纳入高碳行业），加之国内碳价与欧盟差距较大，已承担国内碳成本的企业仍需购买CBAM证书以弥补差价；碳排放计量与监测系统仍不够成熟，短期内无法为碳市场运行提供可靠的数据支撑。因此，我国亟需完善碳排放交易体系，扩大碳市场覆盖面，充分激发碳市场活力；加强碳排放数据的监测、报送与核查能力，推动国内碳市场项目与海外项目互认，从而提高我国碳价的国际市场认可度。

三、近零碳制造体系的概念特征

（一）近零碳制造的内涵

近零碳制造体系以促进制造业绿色发展为目标，涵盖近零碳制造技术、碳排放计量系统、碳市场等主要内容。强调在产品制造全生命周期中（原材料获取、能源使用、产品设计、生产与装配）实现近零碳化，侧重开展全生命周期中的碳排放减量及控制，以碳效率提升为直接目标，深度融合产业价值链、供应链、碳排放链^[22]。

制造业碳排放源涉及原材料生产、运输等过程产生的碳排放，生产耗能关联的碳排放，制造生产链条中的全部碳排放；以数字化、智能化为驱动力，为近零碳生产提供新要素并改善技术效率，变革制造业企业的生产过程、组织方式、业务模式^[10,12]。

（二）近零碳制造体系的发展要素

当前，我国制造业步入了平稳发展阶段，但智能制造水平整体不高，转型升级需要一定周期^[23]。制造业转型、近零碳制造业发展应是全方位的：把握“双碳”战略目标实施节奏，推动制造业积极实施绿色转型；通过碳排放权交易政策引导企业转型，以精确的碳排放计量与监测来推动制造业产业链的健康运行；研发和推广高效低成本的绿色创新技术，从外部环境、内部技术层面出发，为高耗能、高碳排放类制造企业提供良好的转型基础。

近零碳制造体系的发展要素主要分为关键技术、计量基础、市场驱动力3个层面。首先,以近零碳关键技术为核心,从制造业生产低碳化、能源或电力供应脱碳两方面进行节能降碳。其次,以碳排放精细化计量与监测为基础,通过产品制造、电力系统两方面实现“源网荷”碳排放量的可测量与可核实。在制造业参与碳市场的背景下,准确开展碳计量是确保企业在碳市场中合法性和可信度的前提。最后,以碳市场协同发展驱动力,扩大我国碳市场覆盖范围、完善与国际碳市场衔接机制,支持制造业以近零碳排放为目标进行转型升级。

四、近零碳制造体系的关键技术

近零碳技术创新是我国制造业在“双碳”战略目标下转型发展的关键内容^[13]。支撑我国实现碳中和的技术体系主要有CO₂净零排放技术、非CO₂温室气体减排技术,其中前者细分为零碳电力系统、低碳/零碳化终端用能系统、CO₂负排放技术^[24]。为此,面向制造业从“源”到“荷”的全面绿色转型需求,主要从产品制造近零碳技术(含零碳化终端和CO₂负排放技术)、电力供应近零碳技术两方面出发,梳理制造业实现近零碳化的关键技术。

(一) 产品制造近零碳技术

近零碳制造技术分布于产品制造的全过程。重点面向产品制造,以数字化、智能化为主攻方向,从产品规划、设备运行、碳排放资源利用、碳排放监测、碳税管理五方面开展现状剖析,以全面覆盖制造流程的近零碳场景。

1. 产品近零碳规划技术

产品近零碳规划指在产品的设计过程中,考虑质量、功能等基础属性,进一步将低碳性能引入产品的全生命周期(包括设计、制造、使用、回收等阶段),通过设计优化获得低碳方案,优选低碳材料及制造工艺,使产品使用过程保持低能耗、低污染以及可进行回收与再制造。已有研究将产品碳足迹评估法引入了产品设计及规划过程,在产品设计结构中集成了碳排放数据,如提出基于碳足迹特征的低碳概念设计产品模型及其集成建模方法^[25-27],运用碳足迹特征建立设计结构模型以分析产品隐含的碳足迹信息^[28,29]。

2. 设备近零碳运行技术

在制造业运行的近零碳化方面,选择可显著降低制造过程碳排放的设备运行方式是关键,相关研究主要包括:基于数字化、智能化生产调度的系统层面优化,基于工艺参数的设备层面优化^[22]。针对具有低碳排放约束的柔性作业车间调度问题,建立了最小完工时间、机器总工作量、机器碳排放的数学模型^[30,31]。综合优化工件的机器配置、工艺路线等,形成了可降低制造过程碳排放的多目标工艺规划与调度集成优化模型^[32]。关注制造车间的碳效率,建立两阶段动态调度模型,形成制造车间层面碳效率的动态评估与优化能力^[33,34]。此外,通过物联网进行设备互联互通,针对系统与设备的总耗能、碳排放量均最小的优化目标,运用全局优化算法并基于当前负荷条件获得相应运行参数,实现主动式节能减排效果。

3. 碳排放数字化监测技术

制造系统的数字化、智能化渐成趋势,获得的碳源、碳耗、碳排放等碳数据为实施制造过程碳排放的监测与可视化提供了基础条件,成为近零碳转型方案设计及优化的判断依据。监测制造过程的碳排放,主要涉及碳数据采集、碳排放状态评估、数字驱动的近零碳优化决策等环节。目前,能效监测与管理系统已在机床加工、汽车制造等制造业获得广泛应用^[35,36],进一步扩充功能后有望形成碳排放数字化监测能力。例如,集成应用生产全环节的碳排放性能评价模型及指标,实现制造过程碳排放的动态核算与实时监测^[37];休哈特控制图和指数加权移动平均的组合方法,在监测工业碳排放方面具有良好的适用性^[38]。

4. 碳排放资源化利用技术

CO₂资源化利用是CCUS技术中的重要环节,以制备高附加值化工产品的原料居多^[39],如制备低碳烃、高分子聚合物等有机化工产品,通过电化学方法将CO₂转化为碳纳米材料^[40]。微藻固碳、CO₂气肥技术等生物利用方式,在种植业中也可发挥积极作用^[41]。然而,我国正在快速发展的CCUS项目经济可持续性较弱,与碳利用存在脱节。未来碳领域的重点任务是拓宽CO₂资源化利用途径,引入碳转化量、转化能耗、转化投资、转化价值、转化利润等指标来全面考察制造企业的经济和综合收益,拓展CO₂化工利用,CO₂转化为碳基新材料、人工

生物合成、油气行业高附加值产品等碳排放资源利用新方向^[39]。

5. 智能化碳税管理技术

制造企业的碳税管理需覆盖碳核查、碳交易、碳履约、碳监测等内容，核心在于以降碳计划驱动企业高效绿色运行^[42]。我国大部分制造企业在运营管理中并没有开展碳排放核查及监测，企业内部存在较大的碳成本调节空间。构建企业碳税管理系统，开发碳数据驱动、碳指标管理、碳绩效评价等应用功能，是闭环制造企业近零碳化工作的关键内容。基于数字和智能技术构建碳税管理平台，配置数据处理、分析预测、智能决策等手段，支持税务数据录入规范化、税务稽查流程实时化、碳税征管流程智能化，以此驱动制造企业碳税管理的规范化运行。

（二）电力供应近零碳技术

制造业生产过程的电力消耗是碳排放的主要来源之一。制造业又是电力部门的主要用电领域，电力部门的发展和供给能力直接影响制造业的生产效率及成本。电力部门产生的碳排放量约占我国总量的50%^[43]，是推动全社会碳减排、支撑经济近零碳转型的关键部门^[44]。然而，我国以煤电为主的能源供给结构仍将持续一段时期，可再生能源消费占比相对不高且可靠替代能力尚未形成。为此，主要从源侧转型、网侧计量、荷侧互动、储侧灵活、旧设备脱碳五方面出发，构建多元、绿色的电源供应结构，“源储荷网”互动的高能效生态网络，才能支撑能源供应近零碳化转型。

1. 源侧转型

推动新能源的开发建设，包括风电、光伏发电、氢能、生物质能发电、核能等类型。以风电、光伏发电为代表的可再生能源供电发展较为成熟，其发电模式与应用场景也处于持续革新状态。氢能有望与电力并重，成为世界能源科技新的重点竞争方向。扩大化工领域中的用氢规模，发展绿氢化工技术，以绿氢替代化石燃料制氢来生产氨、醇等化学品，促进新能源消纳并降低化工行业碳排放强度。

2. 网侧计量

鉴于大量强随机性和不确定性的新能源接入后的影响，重点关注高比例新能源并网支撑技术、新型电能传输技术、新型电网保护与安全防御技术^[45]。

碳排放追踪是实现电力系统中精准碳排放计量的核心环节，有助于引导碳计量终端研发，合理分摊“源网荷”各环节的碳排放责任，因而发展碳排放追踪技术是推进脱碳的重要支撑。

3. 荷侧互动

发展交通领域新能源、氢燃料电池汽车，推动智能车网双向互动^[46]。建设虚拟电厂与智能化需求响应系统平台，推动需求响应参与电力市场，考虑辅助服务参与电力现货市场。在建筑、交通等重点领域构建“源网荷储”一体化发展模式^[47]，建设可再生能源一体化示范基地。

4. 储侧灵活

发展“源网荷”各侧的新型储能应用，支持建设独立储能电站、新能源项目租赁容量等方式，深化市场引导并统一实施规划管理。完善储能参与电力现货市场的规则，增加储能可参与的电力市场服务种类，以市场化形式提升储能收益。

5. 旧设备脱碳

改造传统发电设备，发展能源脱碳技术。合理布局新能源高效火电，开展煤电灵活性改造、抽汽蓄热改造、煤电超低排放改造、节能改造、供热改造。发展发电环节的CCUS技术，推动生物能源技术研发，稳步扩大生物质加装碳捕集与封存、生物碳去除温室气体的应用规模^[48]。

五、近零碳制造体系的计量基础

对于制造业而言，碳计量方法在衡量并评估其产生的温室气体排放量方面至关重要。对制造业企业的能源消耗、原材料使用、废物处理环节的数据进行测量和监测，能够确定企业的碳足迹。制造业企业根据监测数据，科学制定碳减排进度，精准实施碳减排措施。开展近零碳化制造，基础在于碳排放计量的可测性、碳排放核算的准确性。联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）提出的“可测量、可报告、可核实”原则是国际公认的碳计量原则^[49]。目前，我国碳排放核算的统计基础不够完善，能源消费量、碳排放因子等关键数据的统计口径也不一致^[21]。

（一）产品制造碳排放计量与监测

产品碳排放核算是开展降碳优化、实施近零

碳技术创新的基础^[13]，较多采用的有生命周期法、投入产出法、混合生命周期法、排放因子法等。为了规范低碳认证，国际标准化组织（ISO）等机构发布了多项碳排放核算与产品碳足迹评价标准（见表2）^[22]。在实际生产中，得益于信息技术的发展，数字化、智能化使碳排放的动态监测成为可能，相应监测数据可直接或间接地支持产品生产全过程中的碳排放分析。建模产品生产、设备运行等环节与碳排放量之间的关系，基于模型进行碳排放计算与结果校正，从而实现碳排放的动态及可视化监控^[50]。在监管层面，可基于行业主管部门认定的标准计量设施和监测设备，测量废水或废气排放的参数^[49]，以为增强碳市场的交易公平性提供数据基础。

（二）电力系统碳计量与监测

1. 电力系统碳排放计量方法及场景

电力系统碳排放的精准计量与分析能力是挖掘碳减排潜力的关键内容^[49]。电力系统碳计量旨在厘清发、输、配、用侧的碳排放分摊规律，明确用户的碳排放责任。这是实现碳市场公平交易的基础。主要的电力系统碳排放计量方法如表3所示^[49,51,52]。也要注意，碳排放计量还没有统一的方法和评价标准，在碳排放体系互认、碳市场交易中存在相应的壁垒；足够准确的碳排放数据，可以促进全社会监测与管理碳排放，进而完善碳交易体系。

表2 碳排放核算与产品碳足迹评价的主要标准

标准	全称
IPCC 指南	2006 PCC 国家温室气体清单指南
PAS2050	商品和服务在生命周期内的温室气体排放评价规范
PAS2060	PAS2060—2014 碳中和论证规范
ISO1404—2006	环境管理—生命周期评价—要求和导则
ISO14040 系列	ISO14040—2006 环境管理生命周期评估—原则和框架
	ISO14040—2006 AMD 1—2020 环境管理·生命周期评估—原则和框架—修正案1
ISO14067: 2018	温室气体产品的碳足迹—量化要求和指南
ISO14068 系列	温室气体管理和相关活动—碳中和
GB/T 32150—2015	工业企业温室气体排放核算和报告通则

注：PAS 表示公开可用规范。

表3 主要的电力系统碳排放计量方法

国家和地区	计量方法	适用对象
美国	连续监测法	所有连续测点数据，以校准误差为质量指标
欧盟	质量平衡法	燃料消耗量
	排放因子法	燃料消耗量、低位发热量、单位热值含碳量、碳氧化率
中国	连续监测法	CO ₂ 排放量
	排放因子法	基于多项引述标准，分别精细控制，无统一限值
	连续监测法	CO ₂ 浓度、烟气流速、烟温、湿度，以相对误差作为质量指标

电力系统中的碳排放计量场景主要有三方面。

① 在源侧，国内多数发电企业在例行管理中并没有进行碳排放计量，难以遵循权责发生制原则进行碳排放成本的有效划分，也没有形成完善的信息披露制度，加大了实施碳排放监管的难度。② 在网侧，主要通过电网所在区域的电力碳排放因子进行碳排放计量，但因子更新频率低、核算范围不精确；随着新能源的进一步发展、区域使用新能源发电比例的分化，统一且固定的碳排放因子不再满足电力系统碳排放的精准计量需求。③ 在荷侧，各地区的经济发展、企业规模差异性较大，导致碳排放的核算标准难以确定，也未与国际标准接轨；用户的能动性较大，其活动水平数据难以获得。因此，随着电力系统智能化、数字化以及碳排放计量的发展，围绕发、输、配、用电侧的全环节碳足迹将进一步透明化和精准化，有助于引导电力系统上、下游协同降碳。

2. 电力系统全环节碳计量理论

电力系统碳排放流可视为虚拟的网络流，将电力系统碳排放责任随着能源流动从源侧传导至荷侧，表现为碳排放流依附于电力潮流且随潮流移动^[53]。电力系统中的碳足迹将近似可视化并进行计量^[51]。

在发电侧，通过连续监测法、物料平衡法等，监测发电的直接碳排放量。在源、荷侧的碳排放计量中，节点碳排放因子由接入该节点的发电机组产生的碳排放流、从其他节点流入该节点的碳排放流共同决定，再由若干虚拟变量来实现网侧碳流的可视化。考虑到区域之间存在绿电占比、经济性的差异，在实际碳计量标准中可采集油、

气、电等能源数据，通过区域内用户在不同时间段消纳电量构成的不同、反映不同时间段内用户用电行为产生碳排放的差异性，确定“动态碳排放因子”^[51,54]。

通过源侧直接测量、网侧碳流追踪、荷侧间接测量，再根据各个时段的发电与系统潮流信息进行碳排放流计算，得到逐个时段动态变化的电力系统全环节碳信息，如节点碳排放因子、线路碳流信息、发电碳排放信息等。

3. 电力系统碳流计量系统

基于电力系统碳计量理论，改造电力系统已有的电力高级量测体系以形成智能碳表，据此实现电力系统全环节碳计量^[55,56]。输电网具备相对完善的电气高级量测体系，可基于状态估计信息，在电碳平台上完成相应的碳排放追踪。对于配电网、用电侧没有状态数据的网络，可通过碳表之间“通信”，进行碳排放因子、碳流率等计量的插补迭代处理，据此实现碳排放流的分布式计算。

制造业企业基于碳计量方法获取准确的碳数据，为制定碳减排行动提供科学依据，这一需求也推动了碳计量方法的发展和完善。结合产品制造、电力系统的碳排放计量系统，可测量并核实制造业碳流从源、网到荷侧的排放足迹，从而理清大部分碳排放的分摊责任，反馈与计量方法精确度相关的校验信息。

六、近零碳制造体系的市场驱动力

碳排放权交易指在法定碳排放额度内，市场主体通过交易获得利益或碳排放权力^[57]。通过参与碳交易市场，制造业企业可以更快实现碳减排目标，更好改善环境表现，合理获得收益激励。碳市场为碳计量方法提供了发展牵引和应用场景，有助于制造业企业增强对自身碳排放情况的认知和管理能

力。高质量建设碳市场，是利用市场机制控制温室气体排放、推动产业结构优化升级、提高新能源用电占比、实现“双碳”战略目标的重要政策工具，可满足各类型企业参与碳市场的需求；通过参与国家的碳排放权交易政策豁免一定的（出口产品到欧盟的）碳税，合理降低碳排放成本。以碳市场为驱动力支持制造业绿色转型，需要完善碳排放交易体系，补充建设区域碳市场，完善区域与全国、国内与国际碳市场的衔接机制。

（一）国内外碳市场运作分析

1. 国外典型碳市场运作分析

社会生产绿色转型已成为可持续发展的战略目标，国际碳市场规模持续扩大^[58]。已有多个碳排放权交易系统正在运行，但分配方式、参与规则、交易品种等存在差异性（见表4）^[58,59]。国际碳市场的发展历程具有共性：市场覆盖范围阶段性扩大，多以电力行业为基础，逐渐延伸到交通、建筑、化工等高碳排放行业；基本采取碳配额总量控制模式，逐步减少免费配额的发放比例，同步提高拍卖配额的分配比例；通过监测-报告-核查机制明确参与各方权责，碳排放计量数据具有良好的准确性和可靠性，确保交易合规性以及参与主体顺利履约；涉及金融的碳交易被纳入金融监管范围，不履约企业面临高额的罚款，以此控制风险和明晰惩罚。

2. 国内试点碳市场运作分析

2011年，北京、天津、上海、重庆、湖北、广东、深圳等地正式开展碳排放权交易试点工作。目前，13个试点市场的交易总量为 8.71×10^8 t CO₂、130.6亿元^[60,61]。《全国碳排放权交易市场建设方案（发电行业）》（2017年）等全国以及其他地方性政策文件相继发布，形成了我国碳排放权交易制度框架^[62]，提高了企业减排意识和能力水平。然而，很多地方仍未建立区域性碳市场，全国市场与区域

表4 全球代表性的碳排放交易体系

国家和地区	分配方式	交易模式	参与规则	参与主体
欧盟	混合	总量控制	强制参与	电力用户
美国	混合	总量控制	强制参与	电力行业
澳大利亚	混合	基于项目的认证模式	强制参与	电力零售商和电力用户
新西兰	免费	总量控制	强制参与	覆盖电力、林业、化石能源等多数行业
英国	混合	总量控制和基于项目的认证模式	自愿与强制参与结合	参与国家减排项目的企业和排放单位

性市场的衔接也不够顺畅，使我国各类碳市场建设整体处于起步阶段。

当前，全国统一碳市场的覆盖行业只有电力行业，交易品种仅有碳排放配额（碳配额），而区域性碳市场更显狭小，保障各级碳市场合理衔接和运行的全国性机制缺失，难以开展全国性的统一交易。碳配额以免费分配方式为主，尽管有利于更多主体自愿参与碳市场交易，降低参与主体在绿色转型阶段的碳减排压力，但缺少市场层面的刺激作用，使企业的碳减排成效难以显现。

从二级碳市场的运营角度看，目前国内碳价普遍不高，相应碳配额的价格远低于欧盟价格^[62]。在实施CBAM的背景下，国内外显著的碳价差异不利于（主要进行出口贸易的）国内企业应对多边碳税的成本风险。我国的碳配额分配较为宽松，供大于求的情况导致市场上的流动性整体不足；市场参与主体主要为少量高耗能、高碳排放类企业，可交易品种少、可交易区域小，直接限制了国内碳市场的活力。

我国仍未形成通用性高、操作性强的碳排放计量与核查体系，统计和核算碳排放的技术能力有待提升。制造业企业不重视碳排放计量工作，在线监控设备和系统开发应用滞后，主管部门难以执行精细化的碳排放稽查，第三方核查机构的能力水平良莠不齐。碳市场的主体参数、碳排放实际数据等信息不够透明，不利于市场主体投资决策。

（二）未来我国碳市场构建路径

1. 市场主体覆盖范围

欧盟、美国加利福尼亚州、新西兰等碳排放交易体系的行业覆盖面差异很大，但都表现出逐步扩大覆盖面的发展趋势（见表6）^[63]。需要综合考虑企业成本、行业竞争力、区域性发展背景及规划等，合理确定我国碳市场覆盖的行业范围；适宜的做法是在初始阶段合理界定，然后随着时间推移逐渐扩大。能源密集型重工业，如电力、化工、石化、造纸、钢铁、热力及热电联产、有色金属和其他金属制品等，碳排放量合计占我国总量的70%以上^[63]，是应优先考虑的重点行业。

2. 碳排放总量设定

在确定碳市场的行业覆盖范围、企业门槛后，责任部门依据行业实际情况或历史碳排放数据进行

表5 碳排放市场交易体系所覆盖行业

碳市场交易体系	电力	工业	建筑	交通	航空	废弃物	林业
欧盟	√	√			√		
瑞士		√					
美国加州	√	√	√	√			
加拿大	√	√	√	√			
新西兰	√	√	√	√	√	√	√
韩国	√	√	√	√	√	√	
中国北京	√	√	√	√			
中国深圳	√	√	√	√			
中国上海	√	√	√		√		
中国广东	√	√			√		
中国重庆	√	√					
中国福建	√	√			√		
中国湖北	√	√					
中国天津	√	√					
哈萨克斯坦	√	√					
日本		√	√				

碳排放总量设定。碳排放总量设定可采用历史总量法、基准法：根据前者设定碳排放总量，可以降低行业或企业的入市门槛，促进更广泛主体参与市场交易；根据后者设定碳排放总量，可以激励工业部门转型升级和结构调整，支持供给侧结构性改革^[64]。在我国的试点碳市场中，以历史总量法为设定依据的北京、上海碳市场，取得了良好的碳减排效果。

不同地区在不同碳配额分配方式下的减排效果具有差异性^[65]，我国碳市场的碳配额设定需要关注两方面。一是采取“总量控制、自上而下”的策略。从欧盟碳市场的经验看，第一、第二阶段因总量设定过于宽松而导致碳排放权过剩。碳交易体系主管部门兼顾国家碳减排目标、行业或企业的承受能力，合理确定碳排放权总量再进行各行业分配，能够充分协调交易主体之间的碳排放权分配结构。历史总量法应逐步被基准法取代。二是根据城市层级体系设置地域建设差异。鉴于我国独特的城市等级制度带来的经济社会发展和同业结构差异，各地区的区域碳排放程度明显不同。适当考虑不同城市层级的差异，更好发挥区域碳排放强度的调节作用。

3. 碳配额分配

在确定碳配额总量后，主管部门需对纳入体系内的控排企业进行碳排放权分配。区域碳排放市场的碳配额可以进行两级分配：根据“双碳”战略目标，兼顾各省份在碳排放、经济环境方面的差异性以及省际合作与分配效率，将整体碳配额分解至各省份并进行动态调整；省级主管部门将本省碳配额分配给域内部门和企业。在碳配额供给上，采取免费分配、拍卖分配、混合分配3种方式。拍卖分配会显著增加控排企业的运营成本，但配置效率更高，有利于提高碳交易体系的市场化运行质量^[64]；宜采取总量控制模式，逐步减少免费配额发放比例，稳健提高拍卖配额分配比例。

4. 市场交易机制

一是碳市场机制建设。一些国际碳市场形成了由期货、现货、期权等构成的多层次市场结构，碳金融衍生品占据着交易主导地位，广泛激励了市场主体参与市场交易并提高了市场流动性。相比之下，我国碳市场仍有较大发展空间，应循序渐进以完善市场层次结构。可试点实施碳金融产品（含多种衍生品）交易，以政府主导的交易所、金融机构为主，鼓励私营金融机构参与，联合盘活市场；引入市场监管机制，促进碳市场健康稳定发展。

二是区域碳市场衔接。理论上，国内的区域碳市场可紧密联系，有利于降低国家碳排放总量和对应的经济损失^[66]。而目前国内试点交易体系通过全国统一碳市场进行链接，导致区域碳市场的流动性相当有限。发挥全国统一市场对区域市场调节机制的引导作用，增加区域市场的直接交易行为；进一步将我国碳交易体系与国际碳交易体系连通，创造增量收益并改善全球获益。

5. 核查及监管机制

碳市场的法律框架制定，应尽可能符合我国碳市场发展实际及目标、建设地的经济社会状况。在碳排放核查机制建设方面，依据“三可原则”，基于数字电网碳流监测系统、企业碳排放动态监测系统开展碳排放监测，通过第三方机构监测实现可复核。在碳排放监管制度建设方面，短期内可基于现有监管机制及力量来提高政府对碳排放权交易的监督管理能力；中长期则实施企业碳排放信息公开规定，完善碳市场信息披露机制，健全碳交易的社会监督管理体系。

七、结语

本文针对我国制造业的绿色近零碳化转型需求，提出了近零碳制造体系的建设路径，支持应对“双碳”战略目标和CBAM的客观约束。从CBAM对我国制造业的影响出发，剖析了近零碳制造体系的概念特征与发展路线，涵盖关键技术、计量基础、市场驱动力维度，可视为我国制造业近零碳化转型路径设计的直接依托。当前研究侧重考虑将碳市场作为驱动制造业转型的重要因素，相关逻辑可沿用至驱动制造业以外行业绿色转型的基础因素以及影响程度分析；当前保障制造业转型的碳市场构建路径较为理论化，进一步结合工程实践形成可支持全国示范区发展的对策建议，是后续的探讨重点。

在理论剖析的基础上，我国制造业近零碳化转型实践可重点关注：跟踪国际零碳技术发展前沿，把握数字化、智能化赋能制造业的重大趋势，加速零碳技术的制造业布局和专用设备研发；继续推动以新能源为主体的新型电力系统建设，加快煤电灵活性改造、可再生能源替代，从能源供应侧推动制造业用能的近零碳化；加快零碳工厂等制造业示范应用，建设近零碳制造体系试点项目，形成“双碳”战略目标下制造业高质量发展范例；发挥政府引导作用，协同政策、技术、市场以推动碳技术创新与革命，加快能源与碳市场体系建设，以市场机制更好激励降碳减排。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: August 30, 2023; **Revised date:** November 3, 2023

Corresponding author: Zhang Yongjun is a professor from the School of Electric Power Engineering, South China University of Technology. His major research fields include planning, operation and control of smart grid and energy Internet. E-mail: zhangjun@scut.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Strategic Suggestions for the High-quality Development of Ningxia New Energy Comprehensive Demonstration Zone by Eastern Industrial Technology” (2022NXZD3)

参考文献

- [1] 乔岳. 碳中和目标下中国制造业绿色发展之路 [J]. 人民论坛·学术前沿, 2023 (5): 59–70.
Qiao Y. Green development path of China's manufacturing industry under carbon neutrality goals [J]. Frontiers, 2023 (5): 59–70.
- [2] 袁学良, 杨月, 盛雪柔, 等. 碳达峰碳中和政策解析与对策建

- 议[J]. 山东大学学报(工学版), 2023, 53(5): 132-141.
- Yuan X L, Yang Y, Sheng X R, et al. Policy analysis and countermeasures for achieving carbon peak and carbon neutrality [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2023, 53(5): 132-141.
- [3] The long-term strategy of the United States: Pathways to net-zero greenhouse gas emissions by 2050 [EB/OL]. (2021-10-30)[2023-10-15]. https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/10/US-Long-Term-Strategy.pdf?itid=lk_inline_enhanced-template.
- [4] 魏寒冰.《2050年前俄罗斯联邦长期温室气体低排放发展战略》草案(节选)翻译实践报告[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学(硕士学位论文), 2022.
- Wei H B. Translation practice report on the draft of Russian federation's long-term low greenhouse gas emission development strategy by 2050 (excerpt) [D]. Urumqi: Xinjiang Normal University (Master's thesis), 2022.
- [5] 刘璐, 胡学平, 王怀, 等. 国际碳排放相关主要标准及文件体系概述[J]. 绿色矿冶, 2023, 39(1): 8-16, 52.
- Liu L, Hu X P, Wang H, et al. Overview of main international standards and document systems related to carbon emissions [J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2023, 39(1): 8-16, 52.
- [6] Oberthür S. Hard or soft governance? The EU's climate and energy policy framework for 2030 [J]. Politics and Governance, 2019, 7(1): 17-27.
- [7] 张瑞萍, 贾佳. 欧盟碳边境调节机制对中国—东盟绿色低碳发展的影响及应对[J]. 国际贸易, 2023 (3): 18-28.
- Zhang R P, Jia J. Measures and response of EU carbon border adjustment mechanism on china-ASEAN green and low carbon development [J]. Intertrade, 2023 (3): 18-28.
- [8] 2030年前碳达峰行动方案[EB/OL]. (2021-10-24)[2023-10-15]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5649731.htm. Peak carbon dioxide emissions action plan to 2030 [EB/OL]. (2021-10-24)[2023-10-15]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5649731.htm.
- [9] 王玉元, 杨志嘉. 服务低碳发展的碳计量典型场景及路径[J]. 油气储运, 2023, 42(1): 24-31.
- Wang Y Y, Yang Z J. Carbon metering typical scenarios and paths to serve low-carbon development [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(1): 24-31.
- [10] 武汉大学国家发展战略研究院课题组. 推进制造业绿色低碳转型的路径选择[J]. 中国行政管理, 2023 (1): 149-152.
- Research Group of National Institute for Development Strategy, Wuhan University. Path selection for promoting green and low-carbon transformation of manufacturing industry [J]. Chinese Public Administration, 2023 (1): 149-152.
- [11] 中国社会科学院工业经济研究所课题组. 新型工业化内涵特征、体系构建与实施路径[J]. 中国工业经济, 2023 (3): 5-19.
- Research Group of Institute of Industrial Economics of CASS. The connotation characteristics, system construction and implementation path of new industrialization [J]. China Industrial Economics, 2023 (3): 5-19.
- [12] 薛贺香. “双碳”背景下制造业数字化转型与绿色发展耦合协调研究[J]. 区域经济评论, 2023 (3): 101-110.
- Xue H X. The coupling coordination between digital transformation and green development of manufacturing industry under the background of carbon peak and carbon neutrality [J]. Regional Economic Review, 2023 (3): 101-110.
- [13] 刘启雷, 赵威, 苏锦旗, 等. 基于数智化转型的制造业“双碳”发展: 逻辑、路径与政策[J]. 科学管理研究, 2023, 41(3): 79-88.
- Liu Q L, Zhao W, Su J Q, et al. “Dual-carbon” development of manufacturing industry based on digital and intelligent transformation: Logic, path and policy [J]. Scientific Management Research, 2023, 41(3): 79-88.
- [14] 张帆, 刘嘉伟. 中国式现代化视域下制造业高质量发展的取向与路径[J]. 江海学刊, 2023 (2): 109-116.
- Zhang F, Liu J W. The orientation and path of high-quality development of manufacturing industry from the perspective of Chinese path to modernization [J]. Jianghai Academic Journal, 2023 (2): 109-116.
- [15] 李洪丞, 曹华军, 刘兰微, 等. 碳达峰碳中和背景下低碳制造研究现状与技术路径研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(7): 225-240.
- Li H C, Cao H J, Liu L W, et al. Research status and technology path of low-carbon manufacturing under the background of emission peak and carbon neutrality [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(7): 225-240.
- [16] 朱松丽, 蔡博峰, 朱建华, 等. IPCC国家温室气体清单指南精细化的主要内容和启示[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(1): 86-94.
- Zhu S L, Cai B F, Zhu J H, et al. The main content and insights of 2019 refinements to IPCC 2006 Guidelines [J]. Climate Change Research, 2018, 14(1): 86-94.
- [17] 屈满学. 欧盟碳边境调节机制及其对我国经济和贸易的影响[J]. 西北师大学报(社会科学版), 2023, 60(5): 105-113.
- Qu M X. EU carbon border adjustment mechanism: Disputes between different parties and China's response [J]. Journal of Northwest Normal University (Social Sciences), 2023, 60(5): 105-113.
- [18] 孙芳, 荣文钧, 温珺. 碳边境调节机制对中国在欧盟直接投资的影响及对策[J]. 国际经济合作, 2023 (2): 60-69, 92.
- Sun F, Rong W J, Wen J. Impact of carbon border adjustment mechanism on Chinese investment in EU and China's response [J]. Journal of International Economic Cooperation, 2023 (2): 60-69, 92.
- [19] 李涛, 上官方钦, 邴秀萍, 等. CBAM对中国钢铁行业的影响和应对策略[J]. 中国冶金, 2023, 33(8): 78-83, 91.
- Li T, Shanguan F Q, Li X P, et al. Impact of CBAM on China's iron and steel industry and strategies [J]. China Metallurgy, 2023, 33(8): 78-83, 91.
- [20] 高萍, 林菲. 欧盟碳关税影响分析及应对建议[J]. 税务研究, 2022 (7): 92-98.
- Gao P, Lin F. An analysis of the impacts of the EU carbon tariff and its countermeasures [J]. Taxation Research, 2022 (7): 92-98.
- [21] 庞军, 常原华. 欧盟碳边境调节机制对我国的影响及应对策略[J]. 可持续发展经济导刊, 2023 (1): 32-35.
- Pang J, Chang Y H. Influence of carbon border adjustment mechanism and China's countermeasures [J]. China Sustainability Tribune, 2023 (1): 32-35.
- [22] 汪惠青, 王有鑫. 欧盟碳边境调节机制的外溢影响与我国的应对措施[J]. 金融理论与实践, 2022 (8): 111-118.
- Wang H Q, Wang Y X. The spillover effects of the EU carbon border adjustment mechanism and China's countermeasures [J]. Financial Theory & Practice, 2022 (8): 111-118.
- [23] 李新宇, 李昭甫, 高亮. 离散制造行业数字化转型与智能化升级

- 路径研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(2): 64–74.
- Li X Y, Li Z F, Gao L. Paths for the digital transformation and intelligent upgrade of China's discrete manufacturing industry [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(2): 64–74.
- [24] Wang C, Sun R S, Zhang J T. Supportive technologies and roadmap for China's carbon neutrality [J]. China Economist, 2021, 16(5): 32–70.
- [25] 张毅, 李文强, 李彦, 等. 基于碳足迹信息模型的产品低碳创新设计 [J]. 工程设计学报, 2017, 24(2): 141–148.
- Zhang Y, Li W Q, Li Y, et al. Product low-carbon innovative design based on the carbon footprint information model [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2017, 24(2): 141–148.
- [26] He B, Zhang D, Gu Z C, et al. Skeleton model-based product low carbon design optimization [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 264: 121687.
- [27] He B, Yu Q Y. Product sustainable design for carbon footprint during product life cycle [J]. Journal of Engineering Design, 2021, 32(9): 478–495.
- [28] Zhang X F, Zhang S Y, Hu Z Y, et al. Identification of connection units with high GHG emissions for low-carbon product structure design [J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 27: 118–125.
- [29] 彭鑫. 基于碳足迹特征的机电产品方案设计建模及碳足迹评价研究 [D]. 济南: 山东大学 (硕士学位论文), 2019.
- Peng X. Research on scheme design modeling and carbon footprint evaluation of mechatronics products based on carbon footprint characteristics [D]. Jinan: Shandong University (Master's thesis), 2019.
- [30] Ning T, Wang Z, Zhang P, et al. Integrated optimization of disruption management and scheduling for reducing carbon emission in manufacturing [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 263: 121449.
- [31] Ning T, Huang Y M. Low carbon emission management for flexible job shop scheduling: A study case in China [J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2023, 14(2): 789–805.
- [32] Yi Q, Li C B, Zhang X L, et al. An optimization model of machining process route for low carbon manufacturing [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(5): 1181–1196.
- [33] Li H C, Yang H D, Cao H J, et al. State space modelling carbon emission dynamics of machining workshop based on carbon efficiency [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2018, 31(4/5): 426–441.
- [34] Li H C, Cao H J. An optimization model for carbon efficiency of a job-shop manufacturing system [J]. Procedia CIRP, 2015, 28: 113–118.
- [35] Chen E H, Cao H J, He Q Y, et al. An IoT based framework for energy monitoring and analysis of die casting workshop [J]. Procedia CIRP, 2019, 80: 693–698.
- [36] Chen X Z, Li C B, Tang Y, et al. An Internet of Things based energy efficiency monitoring and management system for machining workshop [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 199: 957–968.
- [37] Liu G W, Chen R D, Xu P P, et al. Real-time carbon emission monitoring in prefabricated construction [J]. Automation in Construction, 2020, 110: 102945.
- [38] Shamsuzzaman M, Shamsuzzoha A, Maged A, et al. Effective monitoring of carbon emissions from industrial sector using statistical process control [J]. Applied Energy, 2021, 300: 117352.
- [39] 阳平坚, 彭栓, 王静, 等. 碳捕集、利用和封存(CCUS)技术发展现状及应用展望 [J/OL]. 中国环境科学, [2023-09-27]. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230815.001>.
- Yang P J, Peng S, Wang J, et al. Current status and application prospect of carbon capture, utilization and storage (CCUS) technology [J/OL]. China Environmental Science, [2023-09-27]. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230815.001>.
- [40] Dinca C, Slavu N, Cormoş C C, et al. CO₂ capture from syngas generated by a biomass gasification power plant with chemical absorption process [J]. Energy, 2018, 149: 925–936.
- [41] Xu P L, Li J, Qian J, et al. Recent advances in CO₂ fixation by microalgae and its potential contribution to carbon neutrality [J]. Chemosphere, 2023, 319: 137987.
- [42] 李胜. “双碳”目标下能源企业碳绩效管理体系构建研究 [J]. 财务与会计, 2023 (4): 43–47.
- Li S. Research on the construction of carbon performance management system of energy enterprises under the target of “double carbon” [J]. Finance & Accounting, 2023 (4): 43–47.
- [43] 何姣, 叶泽. 电力行业碳成本传导的基本原理及均衡模型 [J]. 生态经济, 2019, 35(9): 45–49.
- He J, Ye Z. Basic principles and equilibrium model of carbon cost pass-through in power industry [J]. Ecological Economy, 2019, 35(9): 45–49.
- [44] 赵玉荣, 刘含眸, 李伟, 等. “双碳”目标下我国电力部门低碳转型政策研究 [J]. 气候变化研究进展, 2023, 19(5): 634–644.
- Zhao Y R, Liu H M, Li W, et al. Research on the low-carbon transition policies of power sector under the “double carbon” goal [J]. Climate Change Research, 2023, 19(5): 634–644.
- [45] 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): 2806–2819.
- Zhang Z G, Kang C Q. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806–2819.
- [46] 李立涅, 张勇军, 陈泽兴, 等. 智能电网与能源网融合的模式及其发展前景 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 1–9.
- Li L C, Zhang Y J, Chen Z X, et al. Merger between smart grid and energy-net: Mode and development prospects [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 1–9.
- [47] 张勇军, 羿应棋, 李立涅, 等. 双碳目标驱动的新型低压配电系统技术展望 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(22): 1–12.
- Zhang Y J, Yi Y Q, Li L C, et al. Prospect of new low-voltage distribution system technology driven by carbon emission peak and carbon neutrality targets [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22): 1–12.
- [48] 魏一鸣, 韩融, 余碧莹, 等. 全球能源系统转型趋势与低碳转型路径——来自于IPCC第六次评估报告的证据 [J]. 北京理工大学学报 (社会科学版), 2022, 24(4): 163–188.
- Wei Y M, Han R, Yu B Y, et al. Global energy systems transition trend and low-carbon transformation pathways—Evidences from the IPCC AR6 [J]. Journal of Beijing Institute of Technology

- (Social Sciences Edition), 2022, 24(4): 163–188.
- [49] 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/OL]. 中国电机工程学报, [2023-06-27]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.223452>.
- Liu Y L, Li Y W, Zhou C L, et al. Review of carbon emission measurement and analysis methods for power systems [J/OL]. Proceedings of the CSEE, [2023-06-27]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.223452>.
- [50] Tuo J B, Liu P J, Liu F. Dynamic acquisition and real-time distribution of carbon emission for machining through mining energy data [J]. IEEE Access, 2019, 7: 78963–78975.
- [51] 张宁, 李姚旺, 黄俊辉, 等. 电力系统全环节碳计量方法与碳表系统 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 2–12.
- Zhang N, Li Y W, Huang J H, et al. Carbon measurement method and carbon meter system for whole chain of power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 2–12.
- [52] 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 J M, Li J R, Pan F, et al. Current status and future prospects of electricity carbon emission measurement technology [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(3): 1–8.
- [53] Carbon flows: The emissions omitted: The usual figures ignore the role of trade in the world's carbon economy [EB/OL]. [2022-08-12]. <https://www.nature.com/articles/srep00479>.
- [54] 李瑶虹, 卢德龙, 吴阳. 双碳背景下用户侧碳计量装置及平台的研发与应用 [J]. 电力需求侧管理, 2023, 25(3): 67–73.
- Li Y H, Lu D L, Wu Y. Development and application of user side carbon metering device and platform under the background of carbon peaking and carbon neutrality [J]. Power Demand Side Management, 2023, 25(3): 67–73.
- [55] 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 Y H, Bao W H, Zhou T, 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.
- [56] 李业辉, 李姚旺, 刘昱良, 等. 基于碳排放流迭代算法的分布式碳表系统(一): 理论方法与分析 [J]. 电网技术, 2023, 47(6): 2165–2174.
- Li Y H, Li Y W, Liu Y L, et al. Distributed carbon meter system based on iterative calculation of carbon emission flow (I): Theoretical method and analysis [J]. Power System Technology, 2023, 47(6): 2165–2174.
- [57] Adediran I A, Swaray R. Carbon trading amidst global uncertainty: The role of policy and geopolitical uncertainty [J]. Economic Modelling, 2023, 123: 106279.
- [58] Song M L, Zheng H Y, Shen Z Y. Whether the carbon emissions trading system improves energy efficiency—Empirical testing based on China's provincial panel data [J]. Energy, 2023, 275: 127465.
- [59] Bel G, Joseph S. Policy stringency under the European Union Emission trading system and its impact on technological change in the energy sector [J]. Energy Policy, 2018, 117: 434–444.
- [60] Zhang Y J, Shi W. Has China's carbon emissions trading (CET) policy improved green investment in carbon-intensive enterprises? [J]. Computers & Industrial Engineering, 2023, 180: 109240.
- [61] 成润婷, 张勇军, 李立涅, 等. 面向高比例可再生能源消纳的电力市场建设及研究进展 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(2): 89–99.
- Cheng R T, Zhang Y J, Li L C, et al. Construction and research progress of electricity market for high-proportion renewable energy consumption [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(2): 89–99.
- [62] 黄绍军. “双碳”目标下我国碳排放权市场交易制度优化路径研究 [J]. 西南金融, 2023 (6): 30–41.
- Huang S J. Study on the optimization path of China's carbon emission right market trading system under the “carbon peaking and carbon neutrality” target [J]. Southwest Finance, 2023 (6): 30–41.
- [63] Jiang J J, Xie D J, Ye B, et al. Research on China's cap-and-trade carbon emission trading scheme: Overview and outlook [J]. Applied Energy, 2016, 178: 902–917.
- [64] 王文举, 赵艳. 全球碳市场研究及对中国碳市场建设的启示 [J]. 东北亚论坛, 2019, 28(2): 97–112, 128.
- Wang W J, Zhao Y. Research on global carbon market and its enlightenment to China's national carbon market construction [J]. Northeast Asia Forum, 2019, 28(2): 97–112, 128.
- [65] Shi B B, Li N, Gao Q, et al. Market incentives, carbon quota allocation and carbon emission reduction: Evidence from China's carbon trading pilot policy [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 319: 115650.
- [66] Lin W B, Gu A L, Wang X, et al. Aligning emissions trading and feed-in tariffs in China [J]. Climate Policy, 2016, 16(4): 434–455.