

新型电力系统的电碳耦合交易研究

董九舟¹, 郭鸿业^{1*}, 姜涛², 杜尔顺¹, 张宁¹, 康重庆¹

(1. 新型电力系统运行与控制全国重点实验室(清华大学电机工程与应用电子技术系),
北京市 海淀区 100084; 2. 东北电力大学电气工程学院, 吉林省 吉林市 132012)

Research on Electricity-carbon Coupling Trading in the New Power System

DONG Jiuzhou¹, GUO Hongye^{1*}, JIANG Tao², DU Ershun¹, ZHANG Ning¹, KANG Chongqing¹

(1. State Key Laboratory of Power System Operation and Control (Department of Electrical Engineering, Tsinghua University),
Haidian District, Beijing 100084, China;
2. Department of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, Jilin Province, China)

ABSTRACT: The construction of China's carbon market begins with the power generation industry, and electricity trading and carbon trading are closely interrelated. Meanwhile, the clean and low-carbon goals of the new power system also require deep coupling between electricity and carbon trading to facilitate power-sector decarbonization and green-oriented transition. This paper analyzes the mechanisms of electricity-carbon coupling trading and clarifies its definition, then summarizes the commonalities and characteristics of existing research to provide a reference for future work. Firstly, trading mechanisms of carbon emission rights and tradable green certificates are introduced, and the current status of electricity-carbon coupling trading is provided. Secondly, the multi-level coupling mechanism of electricity-carbon trading is analyzed, the basic concept of electricity-carbon coupling trading is defined, and typical trading patterns are discussed. Thirdly, the common parts in existing research are summarized, and a general model of electricity-carbon coupling trading is built from the aspects of market entity behavior and transaction patterns. Finally, typical research topics of electricity-carbon coupling trading are reviewed, including individual optimization, market equilibrium analysis, and mechanism design, and prospects for the future development of electricity-carbon coupling trading in new power systems are given.

KEY WORDS: electricity-carbon coupling; carbon emission trading; electricity market; new power system

摘要: 我国碳市场建设从发电行业切入, 电力交易与碳交易

基金项目: 国家自然科学基金项目(52130702, 72342007)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52130702, 72342007).

联系密切。另一方面, 新型电力系统的清洁低碳目标也要求电碳交易深度耦合, 推动电力脱碳与绿色转型。该文分析电碳耦合交易的机理并界定其概念, 梳理相关研究的共性和特性, 为后续工作提供参考。首先, 介绍碳排放权、绿电绿证等交易机制以及电碳耦合交易的现状; 其次, 分析电碳交易的多层次耦合机理, 界定电碳耦合交易的基本概念并探讨电碳耦合交易的典型路径; 再次, 总结现有研究的共性内容, 从市场主体行为、电碳交易模式等方面归纳电碳耦合交易研究的一般模型; 最后, 从个体优化决策、市场均衡分析、机制设计等方面梳理电碳耦合交易研究的典型方向, 展望新型电力系统下电碳耦合交易的未来发展。

关键词: 电碳耦合; 碳排放交易; 电力市场; 新型电力系统

0 引言

2023 年全球碳排放量超过 374 亿 t, 其中我国碳排放量为 127 亿 t, 约占全球总量的 1/3^[1]。作为全球碳排放第一大国, 我国的二氧化碳减排面临着巨大的内部动力与外部压力。一方面, 保障能源安全、实现能源转型要求我国推动碳减排和清洁能源发展。另一方面, 应对气候变化是参与全球治理的机遇与挑战, 欧盟碳边境调节机制等国际碳关税的施行要求我国实现碳减排以提高在国际贸易中的竞争优势。我国于 2020 年提出 2030 年“碳达峰”与 2060 年“碳中和”的双碳目标, 彰显了我国面对全球气候问题的担当, 同时也对我国能源体系的低碳转型提出了巨大挑战。

我国电力行业每年碳排放量占全国总排放量的四成以上^[2], 实现双碳目标, 能源是主战场, 电力是主力军。具体的, 我国碳市场建设从发电行业切入, 初期交易主体主要是高排放的燃煤电厂^[3],

使得电、碳交易的参与主体存在较大程度的重合。对于传统发电主体而言，提供电力商品的发电过程也是产生二氧化碳排放的过程，电能量与碳排放量耦合紧密，市场主体在投标时需要同时考虑电能量交易和碳排放权交易的成本与收益。因此，虽然现阶段电力市场与碳市场一般分别组织、独立运行，但以共同的市场成员的行为决策为纽带，两市场在价格、交易量等方面产生了天然的耦合作用。同时，新型电力系统清洁低碳的核心目标也要求电力交易与碳交易深度互动耦合，推动电力脱碳与绿色转型。电碳耦合交易愈发受到业界与学界的关注。

近年来，随着新型电力系统的构建以及电力市场和碳市场的建设深化，在电碳耦合交易领域涌现了许多研究，有必要梳理相关工作的脉络进展，整理通用的研究范式，分析现有研究不足，为该领域后续的研究提供参考。目前已有部分研究进行了初步尝试：文献[4-5]采用文献计量分析的方法，分别梳理了电碳耦合交易研究的热点话题、研究方向的发展变化；文献[6]关注含氢综合能源系统这一特定主体，综述了面向此类主体的电-碳-氢耦合交易研究；文献[7]从市场均衡出发，运用因果回路图总结了电力市场、碳市场以及可再生能源配额制之间的交互作用，归纳了耦合交易的研究现状。然而，现有综述性研究较少分析电碳交易多层次耦合的内在机理，亦未探讨电碳耦合交易的基本概念，未能从典型研究问题的综述中梳理出不同电碳耦合研究的共性与特性。

为此，本文 1 节从电碳交易相关机制及现状出发，2 节深入分析电碳交易的多层次耦合机理，在此基础上明确电碳耦合交易的基本概念及典型模式。3 节提炼现有研究的共性，从市场主体电碳特性、碳配额分配与清缴、电碳交易基本模式、典型的碳价形成机制等方面归纳电碳耦合交易研究的一般模型。4 节梳理具体研究方向的进展，包括个体优化决策、市场均衡分析、机制设计等，并在此基础上展望新型电力系统电碳耦合交易的未来发展。5 节对本文进行总结。本文期待通过多层次的机理分析、明确的概念界定、兼顾共性与特性的研究归纳，填补现有综述工作的不足，为后续研究提供系统性的参考与启发。

1 电碳耦合交易背景与现状

电碳耦合交易涉及电力市场、碳排放权市场以

及绿电绿证等多种交易市场。电力市场主要可分为中长期市场^[8]、现货市场^[9]以及辅助服务市场^[10]，已有文献详细介绍了相关机制，感兴趣的读者可自行参阅。本文中“电力市场/交易”若无特殊说明，均指代广义的包含中长期、现货多时间尺度以及能量、辅助服务多交易品种的电力市场体系。本节主要介绍电碳耦合交易中除电力市场外的其他交易机制，以及电碳耦合交易的现状。

1.1 碳排放权交易机制

碳排放权交易(carbon emission trading, CET)机制是控制碳排放的有效途径，其基本交易产品是碳配额(carbon emission allowance, CEA)，又称碳排放权。截至 2022 年底，全球有 28 个正在运行中的碳市场，覆盖了全球约 17%的温室气体排放量^[11]。

国外方面，欧美发达国家的碳市场建设启动较早，发展相对成熟。欧盟碳排放交易体系是全球历史最为悠久、规模第二大的碳市场，其碳配额总量逐年收紧，碳配额交易价格水平较高，2023 年平均价格超过 90 美元/t^[12]。北美碳市场同样起步较早，典型市场包括美国加州碳市场、加拿大魁北克碳市场等。文献[13]详细梳理了全球主要碳市场的建设进展以及发展现状，感兴趣的读者可自行参阅。

国内方面，我国于 2013 年起陆续开启了 8 个地方碳交易试点，2017 年以发电行业为突破口启动全国统一碳市场建设，2021 年 7 月正式启动全国碳市场。目前，我国碳市场覆盖全国约 40%的碳排放，是全球最大的碳市场^[14]。价格方面，我国整体碳价水平较低，2023 年全国碳市场最高价为 82.79 元/t，最低价为 50.50 元/t^[15]。地方碳市场价格差异较大，2023 年北京碳市场的成交均价最高，约为 96 元/t，福建碳市场的成交均价最低，约为 23 元/t。

碳交易机制方面，不同国家或地区的碳交易在细节上存在差异，但运作流程基本一致。碳交易机制以履约周期为单位开展，例如我国的全国碳市场以两年为一个完整的履约周期。每个履约期主要有分配、交易、清缴 3 个环节，围绕碳配额这一基本交易产品开展，如图 1 所示。

1) 分配：一般在履约期初由政府组织，通过无偿或有偿方式向各责任主体分配初始碳配额。无偿分配一般按照历史排放法、排放强度下降法、行业基准线法等确定碳排放责任主体在本履约周期获得的初始碳配额数量，有偿分配一般通过拍卖完成。政府分配初始碳配额的市场又被称为一级碳

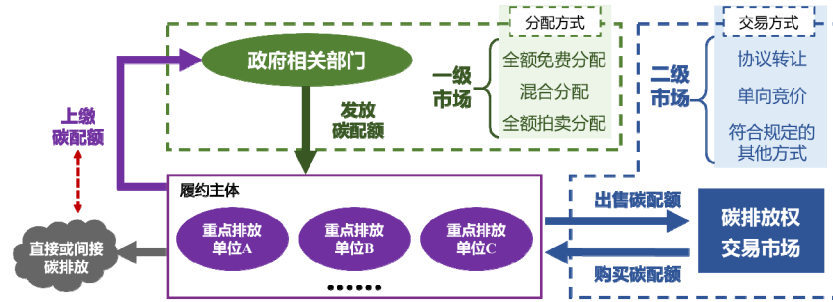


图1 碳交易机制的主要内容

Fig. 1 Main contents of CET

市场。

2) 交易: 初始分配后、履约周期中, 各主体可以通过市场平台出售自己拥有的碳配额或购买他人售出的碳配额。市场中流通的碳配额一般全部来自政府的分配, 总量有限。主体间自由交易碳配额构成二级碳市场。不同于按履约周期组织的分配与清缴, 二级碳交易的组织较为频繁, 例如每日开展交易并结算^[15]。

3) 清缴: 履约期末, 监管机构清算各主体在履约期内的实际碳排放量和其最终上缴的碳配额数量, 并基于超出配额部分的碳排放对责任主体加以惩罚, 例如收取罚款^[16]。

碳交易机制中, 碳配额的供给来自政府的宏观设定以及初始分配, 碳配额的需求来自减排责任主体的实际碳排放, 进一步分为直接碳排放与间接碳排放, 前者指生产或消费行为直接导致的碳排放, 后者指生产或消费行为不直接导致、但从全价值链来看实际引致的碳排放。

我国碳市场初期覆盖的责任主体为高排放的燃煤电厂, 依据直接碳排放参与碳交易机制。具体的, 燃煤机组发电需要燃烧煤炭等化石燃料, 排放二氧化碳, 这些碳排放应当在履约期末以等量的碳配额进行抵消。随着碳市场的发展, 覆盖的责任主体范围扩大, 为了实现有效的碳排放控制, 需要按照间接碳排放对部分行业加以约束。例如电解铝行业, 其生产过程主要消耗电能, 不会直接产生二氧化碳排放。但电解铝能耗极高, 大量的电能消耗使得燃煤电厂发电增多, 间接导致了燃煤碳排放量的增加。因此, 一般按照电网碳排放因子与电解铝企业用电量的乘积计算其间接碳排放量, 并要求其依此上缴相应数量的碳配额。国内外碳市场大多同时覆盖直接碳排放和与用电用热相关的间接碳排放^[11], 但大部分场景下只考虑直接碳排放责任, 一般对于主要耗电、热等二次能源且能耗大的主体, 如电

解铝企业^[17]、数据中心^[18]等, 才会要求其根据间接碳排放责任参与碳排放权交易。

理论上, 若在同一碳交易体系下同时采用直接碳排放和间接碳排放对不同主体加以考核, 将造成碳排放量的重复计算。但在实践中, 一般不考虑直接与间接碳排放的重复计算, 这是因为碳交易机制本质为政策性工具而非技术性工具, 根据不同主体用能和排放特征要求其承担直接或间接碳排放责任恰恰是实现控排减排这一政策目标的必要措施。另一方面, 由于碳交易一般难以覆盖全部碳排放, 即使避免了直接与间接碳排放的重复计算, 碳交易设定的总额仍非实际碳排放总量, 因此规避直接、间接碳排放同台使用的意义不大。

此外, 在碳交易机制的本质, 当前阶段我国碳市场实际上是多行业的可交易碳排放绩效标准 (tradable performance standard, TPS), 与总量控制与交易机制 (cap & trade, C&T) 略有差异。欧美等碳市场一般采用 C&T 机制, 配额总量在履约周期开始前确定, 从而实现履约期内碳排放的总量控制。我国 TPS 碳市场的初始配额采用行业基准线法免费分配, 履约期前仅确定各行业的基准碳排放强度, 实际发放的配额总量还与履约期内各行业的实际产量相关。

1.2 电碳交易补充机制

碳市场方面, 除了基本的碳配额交易, 我国还引入了国家核证自愿减排量 (Chinese certificated emission reduction, CCER) 抵消机制、“碳普惠”自愿减排机制等作为补充。CCER 是一种国内的温室气体减排信用, 是对可再生能源发电、林业碳汇、甲烷利用等项目的温室气体减排效果进行量化、核证并登记的温室气体减排量。碳排放责任主体可向减排项目主体购买 CCER, 并在清缴环节用于抵消自身碳排放量。CCER 的数量与减排项目的具体减排数量相关, 总量不固定, 但在清缴环节中允许使

用 CCER 进行抵消的碳排放量存在比例限制,例如抵销比例不得超过对应年度应清缴配额量的 5%^[19]。碳普惠依托于互联网平台、大数据技术以及碳金融产品,对小型主体如个人、小微企业等的节能减排行为进行记录和量化,并赋予一定的价值以激励海量小规模主体参与低碳减排。目前,碳普惠机制仍处于发展探索阶段,总体规模较小、作用有限,电碳耦合交易实践和理论研究中几乎不考虑碳普惠机制的影响。此外,由于我国碳市场建设起步较晚,碳远期、碳期货、碳期权等金融交易品种尚在探索阶段,暂未形成较为成熟和完善的交易体系。

绿电、绿证交易品包含了环境价值,与碳配额、CCER 等交易品同属于可交易减排价值权证^[20]。绿电、绿证交易机制可衔接可再生能源配额制(renewable portfolio standard, RPS)。可再生能源配额制又称可再生能源消纳责任权重考核制,政府对承担可再生能源发展指标或配额义务的主体的用电构成加以限制,要求其使用的电能中可再生能源电量不少于一定比例。绿证是绿色电力消费的凭证,责任主体可以购买绿证用于完成 RPS 的履约。此外,非履约责任主体也可以根据需求购买绿证,如企业可以购买绿证彰显自身的环保担当。具体的交易形式有“证电合一”与“证电分离”两种^[21]。证电合一对应绿电交易,在购买绿色电力的同时获得相应的绿色电力证书,该绿证无法进行二次交易。绿电价格中包含了基本的电能量价格和表征环境属性的溢价。证电分离对应绿证交易,可再生能源机组发出的电能作为常规电能量产品进行交易,同时该机组获得对应的环境效益证明即绿证。绿证可独立于物理电量进行交易,可再生能源机组通过出售绿证获得收益,其他主体则购买绿证完成 RPS 履约或满足其他个性需求。

1.3 电碳耦合交易现状

目前,国内外电力市场和碳市场一般分别组织、独立运行,两市场通过共同的发用电交易主体自发的耦合投标实现相互作用和关联。因此,现阶段国内外电碳交易的耦合主要隐含在电力市场和碳市场的运行结果中,在市场组织形式、交易机制等方面的直观体现较少。

从市场运行结果来看,部分实证研究基于真实市场运行数据,分析了碳市场价格与电力市场价格之间的关联关系。国外方面,文献[22]对美国加州电力市场在 2011 年 1 月初至 2016 年 5 月末期间的

数据进行回归分析,发现实时电价包含了碳排放溢价,该溢价很好地反映了加州燃气机组的碳排放边际成本。文献[23]应用多元向量自回归模型分析了瑞典-挪威绿证市场、欧盟碳市场、北欧电力市场之间的价格关联,发现短期内碳价的上升对绿证价格上升存在正向影响。文献[24]对 EU-ETS 出台前后西班牙的电力批发市场进行分析,发现碳价对西班牙电价的传导率超过 80%,即 ETS 排放权价格每增加 1 欧元,批发电价的平均涨幅将超过 0.8 欧元。国内方面,目前电碳交易耦合的实证研究存在空缺,这主要与我国碳市场仍处于建设初期且电力市场建设尚未成熟有关。一方面,目前我国碳市场配额总量整体宽松,碳价水平较低,对发电行业的成本传导效果较弱^[25],电碳交易尚未形成有效交互。另一方面,碳市场建设运行历史较短,交易数据积累较少,对实证研究的支撑不足。

1.4 小结

电碳耦合交易相关的市场机制中,碳排放权交易和绿电绿证交易都有利于电力行业的低碳转型和国家双碳目标的实现,具有相近的效果。但两者的出发点不同,碳交易机制是为了直接控制二氧化碳的排放,而绿电绿证交易则是为了以市场的方式补贴新能源并逐渐取代传统的政府直接补贴^[26],促进新能源的发展。前者使碳排放行为产生成本,后者增加清洁能源发电的收益。

除了碳交易机制外,碳税也是实现碳减排的有效政策手段,两者统称为碳定价机制。碳税是环境税的一种,一般由政府主管部门制定,根据受管制主体的碳排放量征收相应的税额,向二氧化碳排放行为施加成本,从而减少碳排放。碳税机制较为简单,不涉及市场交易行为,与电碳耦合交易的关联较弱,因此本文不详细介绍。

电碳交易涉及多种交易标的及配套政策机制,文献[20]详细梳理了碳配额、CCER、绿电绿证等交易品的提出背景、主要内容及配套机制,并分析了不同机制之间的关系和衔接。

2 电碳耦合交易机理与概念

本节从多个层面分析电碳交易的耦合机理,基于机理分析探讨电碳耦合交易的具体概念,进而梳理电碳交易耦合的典型路径。

2.1 电碳交易的耦合机理

电力交易与碳排放权交易的耦合机理分为 3 个

层次,如图2所示。

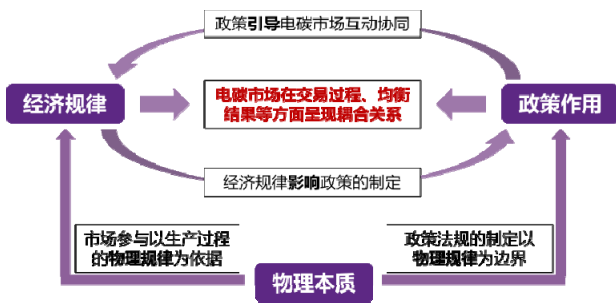


图2 电碳交易的耦合机理

Fig. 2 The mechanism of the coupling between electricity and carbon trading

首先,电碳交易耦合的物理本质在于,电力生产过程与二氧化碳等温室气体排放过程是紧密耦合的,这使得即使没有任何额外限制,电力交易与碳交易也必然会产生关联。

其次,微观层面上,经济规律的作用促进了电碳交易的耦合。具体而言,根据经济学中的理性人假设,市场主体具有趋利性,使得其自发统筹协调对于电力市场和碳市场的参与以最大化自身收益,导致电碳市场以主体的耦合决策为纽带产生关联。

最后,宏观层面上,政策作用也促进了电碳交易的耦合。碳市场具有很强的政策导向性,而电力市场的建设也受到外部政策环境的影响,政策法规等确定了电力市场和碳市场的边界与定位,在市场机制、主体行为等方面引导电碳交易关联互动。

2.2 电碳耦合交易的概念

从电碳交易耦合机理中最根本的物理本质出发,即电力生产过程与二氧化碳等温室气体排放过程实时耦合,可知“电碳耦合交易”最基本的交易品种为电能量和碳排放权,时间尺度为短期现货尺度。此外,考虑到当前电力市场和碳市场均以集中竞价市场为主,因此“电碳耦合交易”的基本组织形式为集中竞价市场。综上,本文将“电碳耦合交易”的基本概念定义为考虑电能量与碳排放实时耦合效果的集中竞价现货电力交易与碳交易。

进一步,根据2.1节耦合机理中经济规律和政策作用两个层面可得电碳耦合交易的外延,即两种典型的电碳耦合路径,如图3所示。

与经济规律相对应,可形成自下而上的“自发耦合”,如图3(a)所示。具体的,电力市场、碳市场分别组织、独立运行,在竞价投标、市场出清机制层面无直接关联。但电碳市场主体以自身总收益最大化为目标,以生产过程的电碳耦合物理特性为约

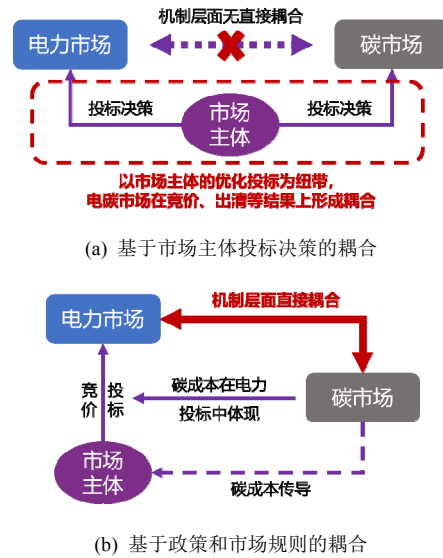


图3 电碳耦合交易的典型路径

Fig. 3 Two typical forms of electricity-carbon coupling trading

束,统筹安排其在两类市场中的决策,使得电碳交易在市场运行结果上体现出耦合特征^[27]。在这一耦合路径下,形成了实质上的电碳耦合交易即电力市场、碳市场的交易价量、最终均衡等耦合关联,但形式上并未出现新的交易产品、投标结构、出清规则等,即电力市场、碳市场的机制形态仍保持原状。本文1.3节梳理的实证研究工作很好地体现了这一耦合路径的效果。

与政策作用相对应,可形成自上而下的“引导耦合”,如图3(b)所示。具体的,以政策规范等为边界,电力市场和碳市场在市场机制层面直接关联,例如美国PJM市场要求发电商在日前、实时市场上报机组的总燃料相关成本,其中就包含排放权成本^[28]。与“自发耦合”不同,“引导耦合”同时在形式上和实质上形成了电碳耦合交易。此外,碳市场的配额设定会受到实际电力碳排放的影响,与各类主体在电力市场中的中标情况密切相关,这一联系也可视作电碳市场在机制层面的直接关联,但并不涉及新交易标的、交易机制等的产生。

现阶段,无论是实践还是理论研究,电碳耦合交易均以自下而上的“自发耦合”为主要路径,部分工作探索了电碳市场在机制层面的耦合设计,如交易产品互认^[29]、履约体系衔接^[30]、市场价格联动^[31-32]、电碳市场联合出清^[33]等,但此类研究的数量相对较少,本文4.3节进行了详细梳理。此外,广义的电碳耦合交易并不局限于电能量和碳排放权两种交易品,CCER、绿电绿证等也包含在耦合

交易的框架之中。文献[34]分析了我国碳市场、电力市场和绿证市场之间的联动机理，构建因果回路图定性描述了电、碳、绿证市场的互动作用，感兴趣的读者可自行参阅。

3 电碳耦合交易的模型刻画

本节基于电碳耦合交易的机理分析，梳理现有研究的共性内容，归纳刻画电碳耦合交易的一般模型。需要注意，本节提炼的一般模型对应 2.2 节集中竞价模式下、现货尺度的电能量与碳排放权交易耦合，该模型可以描述现有的大部分电碳耦合交易研究的基本框架。在本节中，“电力市场/交易”主要指代现货电能量交易市场。

3.1 市场主体的电碳特性

电碳耦合交易研究中，市场主体的电力生产/消耗刻画相比与电力市场的相关研究并无明显变化，如发电侧受到出力上下限约束等，故此不再给出详细公式表达。

另一方面，市场主体的碳排放特性刻画主要关注碳排放量的计算。实践中，可再生能源机组不属于碳交易机制的强制履约主体，理论研究中也一般认为其发电不产生碳排放。而对于传统火电机组，其二氧化碳排放量的计算方法可归纳为式(1)，即时段 T 内第 i 个机组的实际碳排放总量 E_i^{th} 等于各子时段 t 的出力 $P_{i,t}^{\text{th}}$ (需要乘以该时段的时长 τ 换算为发电量)乘以其发电碳排放强度 e_i^{th} 。

$$E_i^{\text{th}} = \sum_{t=1}^T e_i^{\text{th}} P_{i,t}^{\text{th}} \tau \quad (1)$$

以燃煤机组为例，其发电碳排放强度与运行工况(主要是负载率)密切相关^[35]，因此 e_i^{th} 实际上是随时间变化的。但在实践中由于精确的碳排放强度难以获取，一般将 e_i^{th} 视作常数，可以认为其代表了平均意义上的机组发电碳排放强度。相应地，电碳耦合交易研究中也采用这种方式近似计算机组发电碳排放量。

对于电力用户，在直接碳排放意义上不计算其用电碳排放，但可能存在与用电设备相关的碳排放，例如钢铁生产企业的碳排放来自钢铁生产工艺而非用电行为，以钢铁生产过程的相关约束为纽带，电能消费和碳排放特性产生耦合^[36]。

此外，如果考虑间接碳排放，则用电行为为对应的间接碳排放量 E_k^{ld} 的计算方法可归纳为

$$E_k^{\text{ld}} = \sum_{t=1}^T e_{k,t}^{\text{ld}} P_{k,t}^{\text{ld}} \tau \quad (2)$$

式中： $e_{k,t}^{\text{ld}}$ 为用户 k 所在节点在时段 t 的用电碳排放强度； $P_{k,t}^{\text{ld}}$ 为该时段用户用电量。

不同于具有直观意义的发电碳排放强度，用电碳排放强度难以根据用电行为本身直接获得，而需要通过理论计算进行估计。一方面，可以将一定时间内的区域发电碳排放按照发电量均摊，作为电力碳排放强度在时空平均意义上的估计值^[30]。另一方面，也可以运用碳排放流分析理论追踪碳排放随电力潮流的转移，获得更加精细化的电力碳排放强度^[37]。碳排放流模型考虑了电力网络的拓扑结构，能够计算细分到网络节点的电力碳排放强度，进而实现更细颗粒度上的电碳耦合交易，例如计算节点碳价并与节点电价结合形成动态电碳耦合价格^[32]，或考虑用电碳排放设计电碳联合需求响应机制^[38-39]等。

3.2 碳配额的分配与清缴

在碳配额的初始分配上，现有研究主要关注免费分配中的行业基准线法。以传统火电为例，机组 i 获得的免费配额数量 $A_{i0}^{\text{CEA,th}}$ 由式(3)确定：

$$A_{i0}^{\text{CEA,th}} = \sum_{t=1}^T e_0^{\text{th}} P_{i,t}^{\text{th}} \tau \quad (3)$$

式中 e_0^{th} 为火力发电行业的基准碳排放强度。

对于可再生能源机组，由于其不属于碳交易机制的强制履约主体，通常不发放初始碳配额。但另一方面，可再生能源机组可以根据自身实际的上网电量申领其他类型的可交易减排价值权证如绿证、CCER 等，如式(4)所示：

$$A_j^{\text{CCER,re}} = \sum_{t=1}^T \alpha_0 P_{j,t}^{\text{re}} \tau \quad (4)$$

式中： $A_j^{\text{CCER,re}}$ 为可再生能源机组 j 申领的权证总量； $P_{j,t}^{\text{re}}$ 为该机组在时段 t 的实际出力； α_0 为单位可再生能源发电量可申领到的权证数量。

可再生能源机组可以在对应市场中售出自身持有的权证以获得额外的收益，通过市场交易获得对清洁能源绿色环境属性的补贴。需要注意，对于同一可再生能源主体，通常要求其不能同时申领多种权证，以避免环境权益的重复计算^[40]。同时，虽然绿证与 CCER 的申领形式类似，但两种权证对应不同的机制，其用途存在差异。绿证通常用于 RPS 机制履约，购买需求来自买方面临的可再生能源消

纳要求。CCER 通常用于 CET 机制履约,为买方抵消一定比例的碳排放量,减少需要上缴的碳配额数量。此外,绿电交易的凭证通过双边交易直接锁定而无法进行二次交易,与绿证、CCER 存在明显差异,现有工作对于绿电交易的“证电合一”模式的考虑和研究存在空缺,因此本文不梳理相关内容。

若考虑用电侧的间接碳排放责任,则可以相应设计用电侧的配额初始分配方法,如文献[41]提出了体现碳配额人人平等的人口规模方案,进行用电侧免费配额的初始分配。

在碳配额的清缴上,要求责任主体需要根据自身发用电情况和相应的碳排放量安排碳配额的交易以完成排放责任履约。以火电机组为例,其在清缴环节面临的惩罚可归纳为:

$$C_i^p = \lambda^p \max \{0, E_i^{th} - A_i^{CEA,th}\} \quad (5)$$

$$A_i^{CEA,th} = A_{i0}^{CEA,th} + \sum_{t=1}^T (A_{i,t}^{CEA,b} - A_{i,t}^{CEA,s}) \quad (6)$$

式中 λ^p 、 E_i^{th} 、 $A_i^{CEA,th}$ 分别为惩罚碳价、机组 i 在履约期内的实际碳排放总量、履约期末的碳配额持有量(权证的期末持有量也是该履约期的最大上缴量,本文不作区分)。当实际排放量超过配额持有量时,主体将受到碳交易机制的惩罚,一般体现为罚款 C_i^p 。式(6)表明机组 i 履约期末持有的碳配额数量与初始分配量和履约期中各时段碳交易数量相关,上标 b 和 s 分别代表主体相应时段在市場中的中标购买量和售卖量。

若考虑 CCER 抵消机制及相关交易,则火电机组的违约惩罚由式(5)变为式(7)、(8)。其中, $A_i^{CCER,th}$ 为机组 i 履约期末持有的 CCER 数量,具体计算方式与式(6)类似,不再赘述。式(7)表明履约期末可用于抵消碳排放量的 $A_i^{CCER,th,v}$ 的数量不超过应清缴碳排放配额的一定比例 β_0 , 如 5%。

$$A_i^{CCER,th,v} = \min \{A_i^{CCER,th}, \beta_0 E_i^{th}\} \quad (7)$$

$$C_i^p = \lambda^p \max \{0, E_i^{th} - A_i^{CEA,th} - A_i^{CCER,th,v}\} \quad (8)$$

若考虑 RPS 机制及绿证交易,则整体形式与上述内容类似,但履约主体一般为电力用户。具体来说,电力用户履约期末持有的绿证数量按照式(6)的形式进行计算,履约要求其上缴的绿证数量(对应的可再生能源消纳量)不低于其履约期内总用电量的一定比例,否则将面临罚款。

3.3 电碳交易的基本模式

在电碳耦合交易中,市场主体遵循理性人假设,以最大化自身的综合收益为决策目标。

仅考虑电能量市场,发电机组的综合收益一般等于售电收入减去发电燃料成本和运维成本,用户的综合收益一般等于用电效用减去购电成本。以 R_{i0} 表示主体 i 仅参与电力市场时的综合收益,则电碳耦合交易下的综合收益一般可归纳为式(9),即在电力市场综合收益的基础上额外考虑碳交易机制下清缴环节的惩罚成本和交易环节的交易成本(包括购入成本和售出收益)。

$$R_i = R_{i0} - C_i^p - \sum_{t=1}^T (\lambda_t^{CEA,b} A_{i,t}^{CEA,b} - \lambda_t^{CEA,s} A_{i,t}^{CEA,s}) \quad (9)$$

式中 λ_t 表示相应时段碳市场标的物购入或售出的价格。

若考虑绿证、CCER 交易,则需要在总收益中增加对应的交易成本,形式与式(9)第 2 行一致。此外,还需相应修改机制违约惩罚项,例如考虑 CCER 则需要修改 C_i^p 的计算细节,考虑绿证则需要在总收益中增加 RPS 机制的违约罚款项。

基于上述市场主体决策目标刻画与 3.1、3.2 节给出的相关约束,可以完成电碳耦合交易中的个体行为建模。进一步,考虑电碳耦合交易中标物的数量(对应出清机制)与价格(对应定价机制)的具体确定方式,可将现有研究归纳为 3 种基本模式,如图 4 所示。

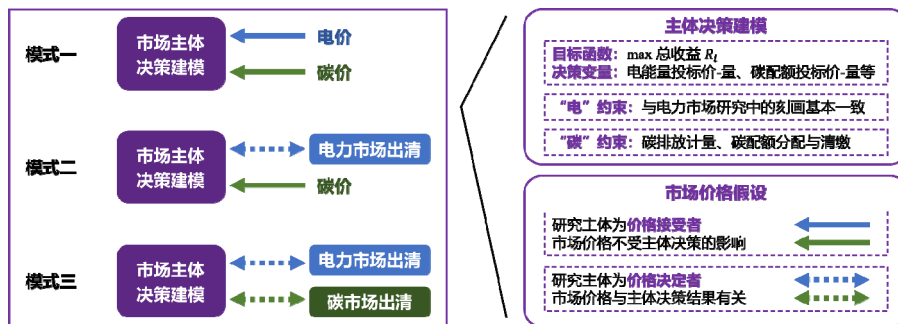


图 4 电碳耦合交易的基本模式

Fig. 4 Three basic models of electricity-carbon coupling trading

当前阶段，电力市场和碳市场的组织和运行相对独立，电碳耦合交易主要体现在市场运行结果上，例如市场价格呈现相关性^[42]，因此图 4 总结的 3 种基本模式并不涉及市场机制的耦合。

图 4 中不同交易模式的差异主要体现在市场价格假设上。若所研究的主体为价格接受者，则市场价格对于主体决策模型来说为确定的输入参数，不受主体决策的影响。同时，市场主体的购买或售卖投标一定能够全额中标，实际交易量完全可控。反之若为价格决定者，则市场价格由相应的出清模型确定，主体决策结果作为出清模型的输入会影响出清价格，价格反过来又会影响主体的优化决策。此时，市场主体购买或售卖的中标数量难以准确预知，需要与其他主体进行博弈(若不考虑其他主体的决策，则相当于直接与市场运营者进行博弈)。

3.4 典型的碳价形成机制

现有电碳耦合交易研究大多设定市场主体在碳交易中为价格接受者，即采用图 4 中的模式 1 或模式 2，较少考虑碳交易的市场博弈过程。具体的，电价设定与传统的电力市场研究类似，本文不再详细梳理，碳价设定主要可分为以下 3 种形式。

1) 统一价格：市场主体面临的碳配额价格为固定值，不随时间和主体交易的配额数量的变化而改变，缺少或盈余的配额均以该价格买入或卖出。在研究中，通常根据相关政策或历史数据取定统一价格，或根据研究需要直接设定数值。

2) 阶梯型价格：碳价取决于主体自身的碳配额交易量，价格不随时间变化且不受到其他市场主体交易情况的影响。一般而言，碳配额买入价格随买入量的增加而阶梯上升，从而惩罚高碳排放主体，而卖出价则相对恒定。为了提高对于低碳主体的奖励，也可设置卖出价随卖出量的增加而阶梯上升的改进式阶梯碳价^[43]。

3) 分时价格：碳交易按照分时变化的价格统一结算，研究主体为碳市场的价格接受者，市场价格不受主体交易行为的影响。分时价格曲线一般根据历史价格信息设定，作为研究模型的输入参数。进一步，可以基于历史信息考虑碳市场价格的波动，例如采用区间法对分时碳价的不确定性进行建模^[44]，或运用 Copula 函数刻画电-碳价格的联合概率分布^[45]。

价格接受者设定下，主体面临的碳价形成机制简单、价格数值容易预测，使得其行为建模极大程

度简化。以统一碳价下的火电机组为例^[46]，由于各时段碳配额价格一致，因此无需考虑交易计划的跨时段优化，仅考虑排放量和配额持有量的实时平衡即可，则其综合收益可以简化为

$$R_i = R_{i0} - \lambda^{\text{CEA}} \sum_{i=1}^T (e_i^{\text{th}} - e_0^{\text{th}}) P_{i,i}^{\text{th}} \tau \quad (10)$$

此时，个体行为建模结果与仅考虑电力市场的情况基本一致，碳市场的作用和影响简单体现为发电机组的发电成本变化，本质上与碳税机制相同。因此，也有部分研究并不单独考虑碳交易机制，而是基于确定性的碳价计算常规机组的发电碳排放成本，并直接将碳成本附加到机组在电力市场中的报价之上^[47-49]。同时，由于价格接受者假设下的碳价与主体自身交易量之间的关系是确定的，而不受其他主体的影响，因此市场主体的决策行为是较为简单的优化问题，不涉及与其他主体的博弈。

此外，部分研究采用市场模拟的方式确定碳市场价格，如图 4 中模式 3 所示，具体的模拟方法有多种。文献[50]将发电商参与电碳市场建模为具有均衡约束的均衡问题，碳配额价格为下层市场出清模型中碳配额供需平衡约束的对偶乘子。类似地，文献[51]以出清模型约束的对偶乘子确定 CCER 的出清价格。文献[52]构建了碳排放权的双边交易模型，设计了与市场供需数量差额相关的弹性价格机制。文献[53]提出智能楼宇群的电碳耦合共享策略，将联盟内部电碳交易价格定义为供需比的分段函数。文献[54]以古诺模型建模碳交易市场，碳价取决于包括研究主体申报数量在内的市场整体需求水平。

3.5 小结

现有电碳耦合交易研究主要从个体行为出发，构建市场主体在现货电能量、碳排放权交易市场中的决策模型，依此刻画主体的市场行为、分析电碳交易在市场均衡等方面的关联互动。基于本节对于现有研究共性内容的梳理，可将电碳耦合交易模型的刻画总结如表 1 所示。

4 电碳耦合交易研究与展望

本节面向新型电力系统的特征，梳理电碳耦合交易的典型研究方向，展望新型电力系统下电碳耦合交易的发展。

4.1 个体优化决策

电碳耦合交易研究在微观层面关注市场主体

表1 电碳耦合交易下典型主体的决策模型

Table 1 Decision models of typical entities under electricity-carbon coupling trading

主体类型	决策目标	约束条件			
		分配	交易	清缴	其他
火电机组	最大化个体收益; 在原有电力交易	通常按照式(3)分配	主要关注交易依据即碳排放量的核算(式(1))	主要考虑 CEA 清缴(式(5)、(6)); CCER 抵消机制可由式(7)、(8)刻画, 进一步可由类似形式刻画碳清缴与绿电绿证等环境权益产品的互动, 但需要自行设计衔接机制 ^[30]	原有电力交易决策研究中的相关约束基本不变, 如发电或用电容量约束等
电力用户	决策目标的基础上, 附加 CEA、CCER 等的交易成本和收入(式(9)). 电价和碳价可由市场出清模型确定,	实践层面暂无典型案例, 研究层面需自行设计用户的初始配额分配 ^[41]	考虑间接碳排放责任时, 通常按照式(2)计算用电碳排放量		
可再生 能源机组	也可直接作为输入参数给出	新能源通常不参与碳配额的初始分配	主要关注 CCER 等权证的申领(式(4))	新能源不属于碳交易履约责任主体, 一般不参与 CEA 的清缴	

的优化决策, 研究方法大多采用模型驱动的优化方法。在短时间尺度上, 主要研究市场成员的最优投标、利益集团的利益分配等问题。最优投标或最优运行计划研究通常以主体收益最大为目标函数, 刻画主体的电碳运行特性等作为约束条件, 以市场价格信息为边界参数, 求解优化模型得到最优投标策略或运行计划。不同工作的差异主要在于研究主体的不同, 如文献[55]关注具有整体煤气化燃料电池的碳捕集电厂, 详细刻画了此类主体的电碳运行特性和最优运行计划。此外, 市场价格边界与主体的市场地位假设相关, 对于价格接受者一般采用历史信息或预测价格作为优化模型的常参数边界。对于价格决定者, 其交易决策会影响市场的出清顺序和价格水平, 进而反过来影响该主体的收益情况, 因此一般建模为双层模型, 上层为主体的投标决策, 下层为市场出清模型, 如文献[56-57]分别研究了具有价格影响力的单一发电企业和聚合型发电集团在电碳交易中的最优投标。

随着新型电力系统的建设, 市场主体的类型日趋多元。不同于3节所述的传统发用电资源, 储能、电动汽车等能与电网进行双向功率交互的新型主体迅速发展, 研究这些主体对电碳耦合交易的参与, 需要准确、合理界定其碳排放量。现有研究主要基于碳排放流理论计算储能^[58]或电动汽车^[31]的电力碳排放, 文献[59]进一步提出“虚拟碳存储”的概念以考虑储能的碳排放特性。另一方面, 虚拟电厂、综合能源系统等聚合型主体也迅速发展, 碳捕集^[60]、电转气^[61]等多元且复杂的发用电设备被整合并进入市场。同时, 聚合型主体内部成员之间可能存在利益冲突, 进而涉及合作博弈^[62-63]以及利益分配^[58,64]的问题。

此外, 在长时间尺度上, 电碳耦合交易研究还关注固定资产的规划决策。与电力规划相同, 此类

研究需要综合权衡固定资产的投资建设、运行维护成本以及预期收入, 优化决策投资数量和具体方案。不同的是, 电碳耦合交易下, 投资的成本和收入除了电力相关的部分以外, 还受到碳交易等的影响。文献[65]在微电网电源规划中考虑储能的配置, 结合电源的调峰收益、碳交易成本预期, 研究了碳交易对电源规划方案的影响; 文献[66]在电-热耦合园区的规划中考虑碳排放权交易和绿证交易的成本, 构建了计及分布式光伏接入的园区低碳规划模型; 文献[67]构建双层优化模型研究电价、碳价和发电容量之间的关系, 上层优化发电出力得到电价, 驱动下层模型更新碳价和发电容量配置, 通过算例研究发现碳价上升会导致电价上升同时驱动系统增加可再生能源的装机容量。

4.2 市场均衡分析

电碳耦合交易会改变不同主体在原有市场中的竞争力, 进而影响市场均衡的形成。对电碳市场均衡状态的研究需要考虑各主体的行为决策以及市场的出清情况。一方面, 可以仅关注各主体的物理运行特性和其成本/收益函数, 以系统整体运行成本最小或社会效益最大为目标, 集中优化求解得到电碳耦合交易下的市场均衡^[68-69]; 另一方面, 可以运用双层模型刻画市场均衡机理, 在上层建模市场成员的行为特征和决策逻辑, 在下层进行市场整体的出清。如文献[70-71]通过构建发电商竞价-市场出清的双层模型求解市场均衡, 前者研究了发电权交易与碳交易市场的关联, 后者研究了碳配额总量对电力市场均衡的影响。此外, 还可以采用其他方式求解电碳耦合交易的均衡状态, 如文献[72]通过生产者与市场之间的有限信息交互迭代求解电碳市场均衡, 文献[73]根据市场主体决策模型的最优性条件和电-碳-天然气市场的出清条件直接求解市场均衡点, 文献[74]基于多主体模拟方法分析电碳市

场均衡并讨论碳市场政策对发电企业利润的影响。

需要注意，在本文所定义的电碳耦合交易的基本概念中，交易标的为电能量和碳排放权。但在新型电力系统背景下，电碳耦合交易的标的物将会进一步扩展，市场均衡分析的范畴也应相应扩大。

具体而言，在碳市场中，除碳配额这一基本产品之外，CCER 的交易与抵消机制也是电碳耦合的重要组成部分^[51,75]。同时，随着碳市场的发展，碳金融产品将日趋丰富，相应的交易也会改变电力市场和碳市场中各主体的盈利情况和市场均衡^[76]。

电力市场中，绿证作为表征环境权益价值的电力衍生品，本身带有“电碳耦合”的特征。部分电碳耦合交易研究在基本的电能量和碳排放权交易下额外考虑了绿证交易，研究发电企业的策略性投标行为^[77]、绿证交易对于电力市场均衡的影响^[78]等。同时，现货能量市场本身仅为电力市场体系的一个板块，部分研究还关注了其他电力交易市场，如中长期电力交易^[79-80]、备用^[81]、调峰^[82]、调频^[83-84]等辅助服务交易及发电权交易^[85-87]等电力交易品种与碳排放权交易的耦合关系。

此外，新型电力系统的聚合型新主体如虚拟电厂、综合能源系统、智能楼宇等具有更加复杂的设备资源，可能涉及热、天然气等多种能源的生产转化和利用，因此电碳市场均衡还会受到供热市场^[88-89]、天然气市场^[90-92]等的影响。

4.3 机制设计

电碳耦合交易的机制设计关注两大关键问题，即多种权证的衔接互认、分布式电碳交易的设计。

4.3.1 多种权证的衔接互认

我国电碳交易中存在碳排放权、CCER、绿证等多种环境权益凭证，这些权证分属于不同主管部门且彼此缺少衔接互认，导致环境权益存在重复计算的风险，管理困难、交易成本较高，影响政策施行的实际效果。文献[40]详细列举了现阶段我国多种环境权益交易机制并行下，可能出现的碳减排效益重复计算的各种情形。

针对此类问题，需要研究不同标的体系的衔接和认证互通机制，厘清不同政策体系的定位、目标和作用范围。文献[20]将可再生能源电力消纳凭证、绿电凭证、绿证、碳排放权、CCER、用能权等统一归纳为可交易减排价值权证，梳理了各类权证对应机制的提出背景和主要内容，提出了逐步衔接不同机制、整合统一各类权证的路径规划。文献[29]

结合国内外电碳环境权益产品市场实践经验，提出不同权证之间的衔接互认机制。文献[30]考虑用电侧的碳排放责任，提出以绿证为纽带建立的绿电交易和用电碳排放的互认机制。此外，2023年8月国家发改委、财政部、国家能源局发布《关于做好可再生能源绿色电力证书全覆盖工作促进可再生能源电力消费的通知》，明确绿证是我国可再生能源电量环境属性的唯一证明，是认定可再生能源电力生产、消费的唯一凭证^[93]，从政策上避免了可再生能源发电的环境属性重复认证、多次获益的问题。

需要注意，此处考虑不同权证的重复计算与1.1节不考虑直接/间接碳排放的重复计算的底层逻辑是一致的。直接/间接碳排放的同台使用是实现政策目标的要求，而重复计算则是技术层面的考量，因此无需考虑。但不同权证重复计算环境权益则会影响各相关政策的施行效果，因此需要考虑并处理。

4.3.2 分布式电碳交易的设计

本文设定电碳耦合交易的基本组织形式为集中竞价市场，这与我国现阶段电力市场和碳市场的主要组织模式相契合。考虑新型电力系统的建设发展，分布式资源的数量和规模迅速壮大，当前集中组织的批发市场模式在准入门槛、交易成本等方面将难以适应海量分散主体的并网入市需求。为此，现有工作研究了分布式交易机制下的电碳耦合交易。一方面，部分研究关注电碳耦合交易在分布式的组织模式下的效果，从微观层面出发研究分布式电碳交易下市场主体的收益情况，分析相应的经济效益与低碳效益^[64,94]。另一方面，针对分布式交易的组织方式，部分研究设计适应性的框架与算法，实现电碳交易去中心化组织和电碳市场分布协同出清^[95-96]。最后，由于分布式交易可能存在交易结果无法安全执行的问题，部分研究设计了考虑配电完全运行约束的电碳耦合交易框架^[97]，进而考虑输电网与配电网层面电碳耦合交易的协同组织^[98]。

此外，在分布式电碳交易机制的设计和研究中，区块链技术由于其高度的透明性、自治性和安全性而被广泛关注，例如应用区块链技术构建电碳交易平台^[99-100]，或基于区块链实现市场间信息共享以改进电碳耦合交易效果^[101]。

4.4 展望

本节从市场实践方面展望电碳耦合交易的未来发展，基于现有研究的不足之处展望理论研究的未来方向。

4.4.1 市场实践

现阶段我国电力市场建设尚不完善,碳市场建设仍处于初期,使得电碳交易的耦合并不紧密。

电力市场方面,尽管我国现货市场建设进度有序推进,且已有山西、广东、山东3个现货试点转入正式运行,但现阶段进入现货市场的主体数量有限。同时,由于大部分电量电价已通过中长期合约锁定,现货电价的波动缺乏动力,难以充分反映短期电力生产成本。有限的现货交易规模和价格波动限制了发电机组通过电力市场传导碳成本的能力,阻碍了电碳交易的耦合互动。

碳市场方面,现阶段我国碳交易采用TPS机制,碳配额整体宽松,导致碳价水平偏低,火电机组缺乏在电力交易中回收碳排放成本的驱动力。从结果上看,这导致了碳成本对于电力价格的传导效果不佳,电碳交易耦合程度较低^[25]。

未来,我国电力市场建设将进一步完善,现货市场充分发挥价格发现的作用,电价有效反映发电成本,疏通碳价对电价的传导路径。同时,碳市场方面的碳配额总量将逐步收紧,初始配额也会从免费分配逐步转为拍卖为主、免费分配为辅,碳市场供给将逐步收紧、碳价整体水平上升^[102],电碳交易通过价格传导更加紧密地耦合。

此外,在市场机制层面,随着电力市场和碳市场的发展,交易产品也将根据实际需求发展丰富,电碳耦合交易可能带来全新的电力、碳排放权衍生品。同时,不同交易标的之间衔接互认的机制也将日趋完善,避免相近或相同属性的商品重复计算、重复交易而导致经济效率降低。进一步地,电力市场和碳市场可能在组织流程、投标结构、出清规则等方面形成直接耦合,但机制耦合对现行市场体系的变革较大,需要权衡改革成本与改革成效以决定电碳耦合交易的具体耦合路径。最后,电碳耦合交易的配套支撑机制也将更加体系化、完善化,例如随着碳市场覆盖主体范围的不断扩大,可能会引入基于碳流等理论的碳排放责任统一计算方法,在现有直接、间接碳排放的基础上实现各类型主体的碳排放精细化计算。同时,配套机制的完善还可能反过来促进新型交易模式的产生与发展,例如精细化、统一化的碳排放计算机制可为分散小主体的市场参与提供支持,进而促进分布式电碳交易的发展。

4.4.2 理论研究

现有电碳耦合交易研究的不足主要体现在对

于碳交易机制的刻画较为简单,按照实际碳交易机制的运作流程具体总结如下。

1) 在初始碳配额的分配方面,现有研究主要采用TPS机制免费分配碳配额,仅以式(3)即可刻画,无需考虑一级碳市场中的交易。考虑到实践层面碳配额总量将逐步收紧、分配方式逐步转为有偿分配,未来研究应当注意还原一级碳市场的相关细节,例如考虑采用集中拍卖进行碳配额的初始分配并建立相应的数学模型^[79]。

2) 在碳配额的二级交易方面,现有研究大多设定市场主体在碳交易中为价格接受者,不考虑真实碳市场中的博弈过程,这种刻画下碳交易的作用效果实际类似碳税机制。现阶段我国碳配额总量相对宽松且初始分配主要采用免费发放^[103],碳市场整体供给充裕,因此价格接受者的假设较为恰当。但随着新型电力系统的建设和碳交易的发展,配额总量将明显收紧,市场主体之间策略互动的影响增强。未来研究需要考虑个体决策对于市场价格及交易量的影响,还原实际碳市场中存在的博弈空间。

3) 在碳配额的清缴机制方面,现有研究大多设定市场主体的碳排放量与碳配额在现货尺度实现平衡,即市场主体每日通过碳交易和TPS分配机制得到的碳配额总量恰好等于其当日的碳排放量(若为可再生能源机组,则其当日获得的权证数量恰好完全在市场中卖出)。但实际上,不同于电力的生产和消费需要实时平衡,碳配额的清缴只在履约周期末尾进行,即总排放量与总配额量的平衡本质上是多时段耦合的约束,如式(5)和(6)所示,市场主体参与碳交易时存在跨时段耦合优化的空间。例如,在碳价较高时减少配额的购买,留出暂时的配额缺口,而在碳价较低时增加碳配额购买量,最终以较少的总成本实现履约周期内总排放量与配额持有量的平衡。实践方面,我国碳市场也呈现出明显的“潮汐”现象,全国碳交易集中在开市初期和临近履约期末^[104],并非按照市场主体的实际排放进行实时交易以平衡。因此,未来研究应当考虑碳配额清缴的跨时段特征,还原电碳耦合交易下市场主体在碳市场中的跨时段优化空间。

最后,除了对于碳交易机制刻画的不足,现有工作在研究方法上也较为单调,主要采用模型驱动或数学优化方法,基于实际数据的实证研究和机器学习研究较少,其中已有的机器学习研究主要基于强化学习框架开展^[105-106]。这一现状可能与电碳耦

合交易的数据获取较为困难有关。一方面，我国碳市场发展历史较短，数据积累不够丰富。另一方面，尽管国外碳市场数据积累充分，但却难以将碳市场与电力市场的投标信息按照主体进行对齐，无法满足当前以主体决策为纽带的电碳耦合交易的研究需求。未来，随着电力市场和碳市场的发展，以及市场间数据共享机制的建设，电碳耦合交易的数据来源问题可能得以解决，相关工作应关注基于实际数据的电碳耦合交易研究，分析现实规律以指导市场交易实践。

5 结论

我国碳市场的建设以发电行业为突破口，并在发电行业碳市场稳定运行的基础上逐步将其他高耗能、高排放行业纳入到全国碳交易体系中。现阶段，以发用电主体这一共同的市场成员为纽带，电力交易和碳交易相互关联，呈现出耦合态势。本文基于电碳交易的耦合机理和市场现状，将电碳耦合交易的基本概念定义为考虑电能量与碳排放实时耦合效果的集中竞价现货电力交易与碳交易。

电碳耦合交易在经济高效地建设新型电力系统、实现双碳目标方面存在巨大潜力，近年来被广泛关注。本文首先介绍了碳排放权、绿电绿证等交易的内容和电碳耦合交易的现状，而后分析了电碳耦合交易的多层次机理并界定其基本概念，进而基于现有研究从市场机制、个体建模两方面总结了电碳耦合交易的研究与刻画，梳理了现有工作关注的典型问题及其进展，最后展望了新型电力系统下电碳耦合交易的未来发展。

总体而言，现有电碳耦合交易研究对于碳交易市场的刻画较为简单，对于电碳交易的市场机制耦合关注较少，这一定程度上与我国碳市场当前仍处于探索和建设阶段有关。后续电碳耦合交易研究应当着眼于我国碳市场的未来发展，充分考虑碳市场覆盖范围扩大、行业碳排放基准收紧、适时引入有偿分配并逐步扩大有偿分配比例等变化趋势，精细化建模碳交易市场，探讨电碳交易在机制设计层面的互动耦合，为释放电力市场和碳市场的潜在合力、助力实现双碳目标等提供理论依据。

参考文献

[1] IEA. CO₂ emissions in 2023[EB/OL]. (2024-03-01) [2024-07-10]. <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023>.

- [2] 王丽娟, 张剑, 王雪松, 等. 中国电力行业二氧化碳排放达峰路径研究[J]. 环境科学研究, 2022, 35(2): 329-338.
WANG Lijuan, ZHANG Jian, WANG Xuesong, et al. Pathway of carbon emission peak in China's electric power industry[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(2): 329-338(in Chinese).
- [3] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家发展改革委关于印发《全国碳排放权交易市场建设方案(发电行业)》的通知[EB/OL]. (2017-12-18)[2024-07-10]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/201712/t20171220_960930.html.
National Development and Reform Commission. Circular on the issuance of the national carbon emission trading market construction program (power generation sector) [EB/OL]. (2017-12-18)[2024-07-10]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/201712/t20171220_960930.html (in Chinese).
- [4] LI Yan, FENG Tiantian, LIU Lili, et al. How do the electricity market and carbon market interact and achieve integrated development? — a bibliometric-based review[J]. Energy, 2023, 265: 126308.
- [5] 冯天天, 李晏, 孙晓琪, 等. 大数据驱动下电-碳市场耦合及协同发展研究综述[J]. 智慧电力, 2024, 52(1): 55-64.
FENG Tiantian, LI Yan, SUN Xiaoqi, et al. Review on electricity-carbon market coupling and synergistic development driven by big data[J]. Smart Power, 2024, 52(1): 55-64(in Chinese).
- [6] 李奇, 霍莎莎, 蒲雨辰, 等. 面向含氢综合能源系统的电-碳-氢耦合交易市场研究综述[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(12): 175-187.
LI Qi, HUO Shasha, PU Yuchen, et al. Review on electricity-carbon-hydrogen coupling trading market for integrated energy system with hydrogen[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(12): 175-187(in Chinese).
- [7] 江岳文, 陈巍. 电-碳-配额制耦合交易综述与展望[J]. 电力建设, 2023, 44(12): 1-13.
JIANG Yuewen, CHEN Wei. Review and prospect of coupled electricity-carbon-renewable portfolios trading[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(12): 1-13(in Chinese).
- [8] 黄永皓, 尚金成, 康重庆, 等. 电力中长期合约交易市场的运作机制及模型[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 24-28.
HUANG Yonghao, SHANG Jincheng, KANG Chongqing, et al. An operation mechanism and model of long and middle term contract market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 24-28(in Chinese).

- [9] 陈启鑫, 房曦晨, 郭鸿业, 等. 电力现货市场建设进展与关键问题[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(6): 3-15. CHEN Qixin, FANG Xichen, GUO Hongye, et al. Progress and key issues for construction of electricity spot market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(6): 3-15(in Chinese).
- [10] 何永秀, 陈倩, 费云志, 等. 国外典型辅助服务市场产品研究及对中国的启示[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2915-2922. HE Yongxiu, CHEN Qian, FEI Yunzhi, et al. Typical foreign ancillary service market products and enlightenment to China[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2915-2922(in Chinese).
- [11] ICAP. Emissions trading worldwide: 2023 ICAP status report[M/OL]. Berlin: International Carbon Action Partnership, (2023-03-22)[2024-07-10]. <https://icapcarbonaction.com/en/publications/emissions-trading-worldwide-2023-icap-status-report>.
- [12] ICAP. EU emissions trading system (EU ETS)[EB/OL]. (2024-01-01)[2024-07-10]. <https://icapcarbonaction.com/en/ets/eu-emissions-trading-system-eu-ets>.
- [13] 秦博宇, 周星月, 丁涛, 等. 全球碳市场发展现状综述及中国碳市场建设展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(21): 186-199. QIN Boyu, ZHOU Xingyue, DING Tao, et al. Review on development of global carbon market and prospect of China's carbon market construction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(21): 186-199(in Chinese).
- [14] World Bank Group. State and trends of carbon pricing dashboard[EB/OL]. (2023-03-31)[2024-07-10]. <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org>.
- [15] 上海环境能源交易所. 全国碳市场每年综合价格行情及成交信息[EB/OL]. (2023-12-29)[2024-07-10]. <https://www.cneee.com/c/2023-12-29/494958.shtml>. Shanghai Environment and Energy Exchange. Annual consolidated price quotes and transaction information of national carbon market[EB/OL]. (2023-12-29)[2024-07-10]. <https://www.cneee.com/c/2023-12-29/494958.shtml> (in Chinese).
- [16] 中华人民共和国国务院. 碳排放权交易管理暂行条例[EB/OL]. (2024-02-04)[2024-07-10]. https://www.gov.cn/zhengce/content/202402/content_6930137.htm. The State Council of the People's Republic of China. Interim regulations on the administration of carbon emission trading[EB/OL]. (2024-02-04)[2024-07-10]. https://www.gov.cn/zhengce/content/202402/content_6930137.htm(in Chinese).
- [17] 王科, 吕晨. 中国碳市场建设成效与展望(2024)[J]. 北京理工大学学报: 社会科学版, 2024, 26(2): 16-27. WANG Ke, LV Chen. Achievements and prospect of China's national carbon market construction (2024)[J]. Journal of Beijing Institute of Technology: Social Sciences Edition, 2024, 26(2): 16-27(in Chinese).
- [18] 朱子恒, 张策, 丁肇豪, 等. 数据中心纳入全国碳排放权交易市场机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(14): 5562-5573. ZHU Ziheng, ZHANG Ce, DING Zhaohao, et al. Incorporating data centers into China's national carbon emissions trading system[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14): 5562-5573(in Chinese).
- [19] 中华人民共和国生态环境部. 碳排放权交易管理办法(试行)[R]. 北京: 中华人民共和国国务院公报, 2021(7): 46-50. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Administrative measures for carbon emission trading (trial)[R]. Beijing: Bulletin of the State Council of the People's Republic of China, 2021(7): 46-50(in Chinese).
- [20] 王心昊, 蒋艺璇, 陈启鑫, 等. 可交易减排价值权证比较分析和衔接机制研究[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 594-602. WANG Xinhao, JIANG Yixuan, CHEN Qixin, et al. On tradeable certificates of emissions reduction and their interactions[J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 594-602(in Chinese).
- [21] XU Shuqin, XU Qi. Optimal pricing decision of tradable green certificate for renewable energy power based on carbon-electricity coupling[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 410: 137111.
- [22] WOO C K, CHEN Y, ZARNIKAU J, et al. Carbon trading's impact on California's real-time electricity market prices[J]. Energy, 2018, 159: 579-587.
- [23] SCHUSSER S, JARAITE J. Explaining the interplay of three markets: green certificates, carbon emissions and electricity[J]. Energy Economics, 2018, 71: 1-13.
- [24] FABRA N, REGUANT M. Pass-through of emissions costs in electricity markets[J]. American Economic Review, 2014, 104(9): 2872-2899.
- [25] WANG Haoran, FENG Tiantian, ZHONG Cheng. Effectiveness of CO₂ cost pass-through to electricity prices under "electricity-carbon" market coupling in China[J]. Energy, 2023, 266: 126387.
- [26] SONG Yazhi, LIU Tiansen, YE Bin, et al. Linking carbon market and electricity market for promoting the grid parity of photovoltaic electricity in China[J]. Energy, 2020, 211: 118924.
- [27] 尚楠, 陈政, 卢治霖, 等. 电力市场、碳市场及绿证市场互动机理及协调机制[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 142-154.

- SHANG Nan, CHEN Zheng, LU Zhilin, et al. Interaction principle and cohesive mechanism between electricity market, carbon market and green power certificate market[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(1): 142-154(in Chinese).
- [28] PJM. PJM manual 15: cost development guidelines (revision: 46)[EB/OL]. (2024-11-25)[2024-07-10]. <https://www.pjm.com/~media/documents/manuals/m15.ashx>.
- [29] 尚楠, 陈政, 冷媛. 电碳市场背景下典型环境权益产品衔接互认机制及关键技术[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(7): 2558-2577.
- SHANG Nan, CHEN Zheng, LENG Yuan. Mutual recognition mechanism and key technologies of typical environmental interest products in power and carbon markets[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(7): 2558-2577(in Chinese).
- [30] 周汝鑫, 赵勇, 胡斐, 等. 基于改进用电碳计量的绿电市场-碳市场联动交易[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2024, 36(2): 105-115.
- ZHOU Ruxin, ZHAO Yong, HU Fei, et al. Linkage trading between green electricity market and carbon market based on improved carbon metering for electricity consumption[J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2024, 36(2): 105-115(in Chinese).
- [31] 谭俊, 张世通, 刘广一, 等. 电动汽车参与多元电碳市场策略框架研究[J]. *供用电*, 2022, 39(12): 59-66.
- TAN Jun, ZHANG Shitong, LIU Guangyi, et al. A strategic framework research for integrating electric vehicles into joint electricity and carbon market[J]. *Distribution & Utilization*, 2022, 39(12): 59-66(in Chinese).
- [32] CHENG Yaohua, ZHANG Ning, ZHANG Baosen, et al. Low-carbon operation of multiple energy systems based on energy-carbon integrated prices[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(2): 1307-1318.
- [33] 吴琪, 赵宣茗, 张佳诚, 等. 促进新能源消纳的电-碳市场耦合激励型出清机制[J]. *电力建设*, 2023, 44(12): 14-27.
- WU Qi, ZHAO Xuanming, ZHANG Jiacheng, et al. Electricity-carbon market coupling incentive clearing mechanism to promote consumption of new energy[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(12): 14-27(in Chinese).
- [34] 唐葆君, 李茹, 王翔宇, 等. 中国碳市场与电力市场联动机制与协同效应[J]. *北京理工大学学报: 社会科学版*, 2023, 25(6): 25-33.
- TANG Baojun, LI Ru, WANG Xiangyu, et al. Linkage mechanism and synergistic effect of China's carbon market and electricity market[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology: Social Sciences Edition*, 2023, 25(6): 25-33(in Chinese).
- [35] 高建强, 宋铜铜, 杨东江. 燃煤发电机组碳排放折算方法研究与应用[J]. *热力发电*, 2020, 49(2): 88-92.
- GAO Jianqiang, SONG Tontong, YANG Dongjiang. Research and application of carbon emission conversion method for coal-fired generating units[J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(2): 88-92(in Chinese).
- [36] 孙啸天, 杨争林, 任涵钰, 等. 基于平均场博弈的钢铁生产企业电-碳市场非合作博弈均衡分析[J]. *电网技术*, 2023, 47(8): 3058-3069.
- SUN Xiaotian, YANG Zhenglin, REN Hanyu, et al. Non-cooperative equilibrium for iron and steel enterprises in electricity and carbon emission permission market based on mean-field game theory[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(8): 3058-3069(in Chinese).
- [37] 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).
- [38] 廖望, 刘东, 巫宇锋, 等. 考虑源荷不确定性及用户响应行为的电力系统低碳经济调度[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(3): 905-917.
- LIAO Wang, LIU Dong, WU Yufeng, et al. Low-carbon economic dispatch of power system considering source-load uncertainties and users response behavior[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(3): 905-917(in Chinese).
- [39] 许刚, 郭子轩. 考虑“响应-碳排放”责任耦合交易的IDR策略研究[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(4): 1322-1338.
- XU Gang, GUO Zixuan. Research on IDR strategy considering “response-carbon emission” responsibility coupling trading[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(4): 1322-1338(in Chinese).
- [40] 马国淞, 段茂盛. 环境权益交易中的碳减排效益重复计算风险及应对[J]. *气候变化研究进展*, 2024, 20(1): 85-96.
- MA Guosong, DUAN Maosheng. Potential risks of double-counting carbon emission reductions in environmental rights trading and countermeasures[J]. *Climate Change Research*, 2024, 20(1): 85-96(in Chinese).
- [41] 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).
- [42] CHANG Xin, WU Zhaoyuan, WANG Jingting, 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.
- [43] 彭春华, 易泰洵, 孙惠娟, 等. 基于多智能体深度确定性策略梯度的电碳耦合市场发电商均衡竞价策略[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4229-4236.
- PENG Chunhua, YI Taixun, SUN Huijuan, et al. Power generator balanced bidding based on multi-agent deep deterministic strategy gradient in electricity-carbon coupling market[J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4229-4236(in Chinese).
- [44] 李东东, 王啸林, 沈运帷, 等. 考虑多重不确定性的含需求响应及电碳交易的虚拟电厂优化调度策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(5): 210-217, 251.
- LI Dongdong, WANG Xiaolin, SHEN Yunwei, et al. Optimal scheduling strategy of virtual power plant with demand response and electricity-carbon trading considering multiple uncertainties[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(5): 210-217, 251(in Chinese).
- [45] ZHANG Wujun, CHENG Yuanlin, ZHANG Yi, et al. Cooperative operation strategy of electricity-carbon market considering randomness and correlation of electricity-carbon price[C]//2023 8th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). Tianjin: IEEE, 2023.
- [46] 林卓然, 朱晓东, 王守相, 等. 考虑热网动态特性与碳交易的电-热综合能源系统优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(4): 64-70.
- LIN Zhuoran, ZHU Xiaodong, WANG Shouxiang, et al. Optimal scheduling of electric-thermal integrated energy system considering dynamic characteristics of heating network and carbon trading[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(4): 64-70(in Chinese).
- [47] 王凯, 延肖何, 蒋凯, 等. 考虑碳交易的风光储电站参与电力现货市场报价策略与调控方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(18): 7091-7102.
- WANG Kai, YAN Xiaohe, JIANG Kai, et al. Bidding strategy and regulation method for the unified wind/photovoltaic/energy storage power stations in electricity spot market considering carbon trading[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(18): 7091-7102(in Chinese).
- [48] 靳冰洁, 李家兴, 彭虹桥, 等. 需求响应下计及电碳市场耦合的多元主体成本效益分析[J]. 电力建设, 2023, 44(2): 50-60.
- JIN Bingjie, LI Jiaying, PENG Hongqiao, et al. Cost-benefit analysis of multiple entities under the coupling of electricity and carbon trading market considering demand response[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(2): 50-60(in Chinese).
- [49] 张宪文, 殷高文, 沈非凡, 等. 计及风电不确定性及碳交易的储能参与电力市场竞价策略[J]. 上海交通大学学报, 2024, 58(12): 1868-1880.
- ZHANG Xianwen, YIN Gaowen, SHEN Feifan, et al. Bidding strategies for energy storage participation in electricity market considering uncertainty of wind power and carbon trading[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2024, 58(12): 1868-1880(in Chinese).
- [50] 孙晓聪, 丁一, 包铭磊, 等. 考虑发电商多时间耦合决策的碳-电市场均衡分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(21): 1-11.
- SUN Xiaocong, DING Yi, BAO Minglei, et al. Carbon-electricity market equilibrium analysis considering multi-time coupling decision of power producers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(21): 1-11(in Chinese).
- [51] 李亚鹏, 赵麟, 王祥祯, 等. 不确定碳-电耦合市场下梯级水电双层竞价模型[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(20): 83-94.
- LI Yapeng, ZHAO Lin, WANG Xiangzhen. Bi-level bidding model for cascaded hydropower under uncertain carbon-electricity coupled market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(20): 83-94(in Chinese).
- [52] 吉斌, 昌力, 陈振寰, 等. 基于区块链技术的电力碳排放权交易市场机制设计与应用[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(12): 1-10.
- JI Bin, CHANG Li, CHEN Zhenhuan, et al. Blockchain technology based design and application of market mechanism for power carbon emission allowance trading[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(12): 1-10(in Chinese).
- [53] 王雷雷, 高红均, 刘畅, 等. 考虑分时碳计量的智能楼宇群电-碳耦合互动共享[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2054-2063.
- WANG Leilei, GAO Hongjun, LIU Chang, et al. Electricity carbon coupling sharing among intelligent buildings considering time-of-use carbon emission measurement[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2054-2063(in Chinese).
- [54] 姚军, 何姣, 吴永飞, 等. 考虑碳交易和绿证交易制度的电力批发市场能源优化[J]. 中国电力, 2022, 55(8): 190-195.
- YAO Jun, HE Jiao, WU Yongfei, et al. Energy optimization of electricity wholesale market considering carbon emissions trading and green power certificate

- trading mechanism[J]. *Electric Power*, 2022, 55(8): 190-195(in Chinese).
- [55] 王骞, 张学广, 朱玲, 等. 含整体煤气化燃料电池-碳捕集电厂的风火储系统分布鲁棒调度方法[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(9): 3573-3587.
WANG Qian, ZHANG Xueguang, ZHU Ling, et al. Distributionally robust dispatch for wind-thermal-energy storage system with integrated gasification fuel cell-carbon capture plant[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(9): 3573-3587(in Chinese).
- [56] JIANG Kai, LIU Nian, YAN Xiaohe, et al. Modeling strategic behaviors for GenCo with joint consideration on electricity and carbon markets[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(5): 4724-4738.
- [57] ZHANG Xinyue, GUO Xiaopeng, ZHANG Xingping. Bidding modes for renewable energy considering electricity-carbon integrated market mechanism based on multi-agent hybrid game[J]. *Energy*, 2023, 263: 125616.
- [58] 詹博淳, 冯昌森, 尚楠, 等. 发电联盟参与电-碳-绿证市场的协同优化策略[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2023, 35(11): 84-94.
ZHAN Bochun, FENG Changsen, SHANG Nan, et al. Collaborative optimization strategy for generation alliance participating in electricity-carbon-green certificate markets[J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2023, 35(11): 84-94(in Chinese).
- [59] 华昊辰, 辛世禹, 陈星莺, 等. 基于“虚拟碳储存”的需求侧电-碳耦合交易机制[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(6): 2131-2143.
HUA Haochen, XIN Shiyu, CHEN Xingying, et al. Demand side electricity-carbon coupling trading mechanism based on “virtual carbon storage” [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(6): 2131-2143(in Chinese).
- [60] 郭静蓉, 向月, 吴佳婕, 等. 考虑 CCUS 电转气技术及碳市场风险的电-气综合能源系统低碳调度[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(4): 1290-1302.
WGUO Jingrong, XIANG Yue, WU Jiajie, et al. Low-carbon optimal scheduling of integrated electricity-gas energy systems considering CCUS-P2G technology and risk of carbon market[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(4): 1290-1302(in Chinese).
- [61] WANG Yunqi, QIU Jing, TAO Yuechuan, et al. Low-carbon oriented optimal energy dispatch in coupled natural gas and electricity systems[J]. *Applied Energy*, 2020, 280: 115948.
- [62] LIU Xiaou. Research on bidding strategy of virtual power plant considering carbon-electricity integrated market mechanism[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 137: 107891.
- [63] WANG Lu, RAYATI M, BOZORG M, et al. Hierarchical electricity-carbon trading for regional virtual federated prosumers[J]. *Electric Power Systems Research*, 2023, 217: 109160.
- [64] 孙国强, 陈晓东, 周亦洲, 等. 基于分布鲁棒机会约束的多类型楼宇电-碳联合分布式交易方法[J]. *电网技术*, 2023, 47(8): 3078-3087.
SUN Guoqiang, CHEN Xiaodong, ZHOU Yizhou, et al. Electricity-carbon joint distributed trading for multi-type buildings based on distributional robust chance constraint[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(8): 3078-3087(in Chinese).
- [65] 毕晨豪, 李志强. 基于电市场与碳市场耦合含储能的微电网电源规划[J]. *上海电力大学学报*, 2023, 39(3): 244-251.
BI Chenhao, LI Zhiqiang. Microgrid power capacity planning with energy storage based on coupling between electricity market and carbon market[J]. *Journal of Shanghai University of Electric Power*, 2023, 39(3): 244-251(in Chinese).
- [66] 曾慧, 杜源, 李涛, 等. 考虑碳交易与绿证交易的电-热耦合园区低碳规划[J]. *综合智慧能源*, 2023, 45(2): 22-29.
ZENG Hui, DU Yuan, LI Tao, et al. Low-carbon planning of a park-level integrated electric and heating system considering carbon trading and green certificate trading[J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2023, 45(2): 22-29(in Chinese).
- [67] DING Tao, LU Runzhao, XU Yiting, et al. Joint electricity and carbon market for northeast Asia energy interconnection[J]. *Global Energy Interconnection*, 2020, 3(2): 99-110.
- [68] 卢治霖, 刘明波, 尚楠, 等. 考虑碳排放权交易市场影响的日前电力市场两阶段出清模型[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(10): 159-170.
LU Zhilin, LIU Mingbo, SHANG Nan, et al. Two-stage clearing model for day-ahead electricity market considering impact of carbon emissions trading market[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(10): 159-170(in Chinese).
- [69] 赵宏兴, 肖建平, 乔中鹏, 等. 电碳耦合市场环境下电力系统运行模拟方法[J]. *电力建设*, 2023, 44(7): 50-56.
ZHAO Hongxing, XIAO Jianping, QIAO Zhongpeng, et al. Study on power system operation simulation method in electric-carbon coupling market environment[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(7): 50-56(in Chinese).
- [70] LIU Yuxiao, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Impact of carbon market on China's electricity market: an equilibrium analysis[C]//2017 IEEE Power & Energy

- Society General Meeting. Chicago: IEEE, 2017.
- [71] 段声志, 陈皓勇, 郑晓东, 等. 碳市场背景下发电商竞价策略及电力市场均衡分析[J]. 电测与仪表, 2022, 59(5): 33-41.
- DUAN Shengzhi, CHEN Haoyong, ZHENG Xiaodong, et al. Bidding strategy of electricity generation and electricity market equilibrium analysis under the background of carbon market[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(5): 33-41(in Chinese).
- [72] WANG Zhenyu, ZHANG Haijing, YIN Weihao, et al. Equilibrium analysis for prosumer's participation in joint electricity and carbon markets[J]. Energy Reports, 2023, 9(S7): 1424-1431.
- [73] CHEN Sheng, CONEJO A J, WEI Zhinong. Conjectural-variations equilibria in electricity, natural-gas, and carbon-emission markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 4161-4171.
- [74] 董馨月, 杨金鹏, 张金良. 碳市场政策对发电企业碳排放量及利润的影响: 基于多主体模拟的分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(20): 8049-8060.
- DONG Xinyue, YANG Jinpeng, ZHANG Jinliang. Impact of carbon market policies on carbon emissions and profits of power generation enterprises using an agent-based approach[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(20): 8049-8060(in Chinese).
- [75] 赵麟, 李亚鹏, 靳晓雨, 等. 考虑 CCER 机制的碳-电耦合市场中水火电协同竞价模型[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(21): 12-24.
- ZHAO Lin, LI Yapeng, JIN Xiaoyu, et al. Coordinated bidding model of hydro-thermal power in carbon-electricity coupled market considering Chinese certified emission reduction mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(21): 12-24(in Chinese).
- [76] 刘志坚, 余宸昕, 梁宁, 等. 考虑碳排放金融市场的风-氢-火多能耦合系统交易模型[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(5): 138-144.
- LIU Zhijian, YU Chenxin, LIANG Ning, et al. Trading model of wind-hydrogen-fire coupled energy system considering carbon emission financial market[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(5): 138-144(in Chinese).
- [77] GUO Hongye, CHEN Qixin, XIA Qing, et al. Modeling strategic behaviors of renewable energy with joint consideration on energy and tradable green certificate markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 1898-1910.
- [78] 刘文君, 张莉芳. 绿色证书交易市场、碳排放权交易市场对电力市场影响机理研究[J]. 生态经济, 2021, 37(10): 21-31.
- LIU Wenjun, ZHANG Lifang. Research on the impact mechanism of green certificate trading market, carbon emission trading market on electricity market[J]. Ecological Economy, 2021, 37(10): 21-31(in Chinese).
- [79] 王一, 吴洁璇, 王浩浩, 等. 碳排放权市场与中长期电力市场交互作用影响分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(10): 44-54.
- WANG Yi, WU Jiexuan, WANG Haohao, et al. Analysis of interactions between carbon emission trading market and medium-and long-term electricity market[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(10): 44-54(in Chinese).
- [80] LI Jifeng, HE Xingtang, NIU Wei, et al. Analysis of the joint trading of local green power certificates, carbon emissions rights, and electricity considering demand flexibility[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024, 155: 109653.
- [81] 沈思辰, 韩海腾, 周亦洲, 等. 基于条件风险价值的多虚拟电厂电-碳-备用 P2P 交易模型[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(18): 147-157.
- SHEN Sichen, HAN Haiteng, ZHOU Yizhou, et al. Electricity-carbon-reserve peer-to-peer trading model for multiple virtual power plants based on conditional value-at-risk[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 147-157(in Chinese).
- [82] 郁海彬, 章明, 徐金鑫, 等. 考虑碳交易与需求响应的虚拟电厂参与电力市场调度策略[J]. 上海电力大学学报, 2023, 39(3): 211-218.
- YU Haibin, ZHANG Ming, XU Jinxin, et al. Low-carbon economic dispatching strategy of virtual power plant participating in electricity market considering carbon trading and demand response[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2023, 39(3): 211-218(in Chinese).
- [83] YANG Dechang, HE Shaowen, CHEN Qiuyue, et al. Bidding strategy of a virtual power plant considering carbon-electricity trading[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(3): 306-314.
- [84] 张钧钊, 姜欣, 段世杰, 等. 虚拟电厂参与电-碳联合市场运行的竞价策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 108-118.
- ZHANG Junzhao, JIANG Xin, DUAN Shijie, et al. Bidding strategy for a virtual power plant to participate in the power-carbon joint market[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11): 108-118(in Chinese).
- [85] 赵文会, 林美秀, 高姣倩, 等. 电力市场机制下发电权与碳排放权组合交易模型[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(11): 1-8.
- ZHAO Wenhui, LIN Meixiu, GAO Jiaoqian, et al. Combined transaction model of generation right and

- carbon emission right under the power market mechanism with renewable energy considered[J]. *Power System and Clean Energy*, 2016, 32(11): 1-8(in Chinese).
- [86] 刘洋, 崔雪, 谢雄, 等. 电碳联动环境下考虑社会效益最优的发电权交易研究[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(13): 112-117, 148.
- LIU Yang, CUI Xue, XIE Xiong, et al. Research on the trading of clean energy power generation right with the best social benefit under the electric-carbon linkage environment[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(13): 112-117, 148(in Chinese).
- [87] 王子恒, 鲍海, 张峰, 等. 考虑碳交易收益和网损成本的发电权交易优化模型[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(5): 23-29.
- WANG Ziheng, BAO Hai, ZHANG Feng, et al. Optimization model of power generation right trading considering carbon trading income and network loss cost[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(5): 23-29(in Chinese).
- [88] 吴梦凯, 施进平, 王凯, 等. 碳市场下计及电-氢储能的综合能源系统需求响应策略[J]. *现代电力*, 2023, 40(6): 947-956.
- WU Mengkai, SHI Jinping, WANG Kai, et al. Demand response strategy of integrated energy system considering electricity-hydrogen energy storage under the carbon market[J]. *Modern Electric Power*, 2023, 40(6): 947-956(in Chinese).
- [89] 王佳惠, 牛玉广, 陈玥, 等. 电-碳联合市场下虚拟电厂主从博弈优化调度[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(5): 235-242.
- WANG Jiahui, NIU Yuguang, CHEN Yue, et al. Master-slave game optimal dispatching of virtual power plant under electricity-carbon joint market[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(5): 235-242(in Chinese).
- [90] COELHO A, IRIA J, SOARES F. Network-secure bidding optimization of aggregators of multi-energy systems in electricity, gas, and carbon markets[J]. *Applied Energy*, 2021, 301: 117460.
- [91] 刘光宇, 韩东升, 刘超杰, 等. 考虑双重需求响应及阶梯型碳交易的综合能源系统双时间尺度优化调度[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(5): 218-225.
- LIU Guangyu, HAN Dongsheng, LIU Chaojie, et al. Dual time scale optimal scheduling of integrated energy system considering dual demand response and stepped carbon trading[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(5): 218-225(in Chinese).
- [92] 杜易达, 王迹, 谭忠富, 等. 电-碳-气-绿证市场耦合下的电氢耦合系统运行优化研究[J]. *电网技术*, 2023, 47(8): 3121-3131.
- DU Yida, WANG Er, TAN Zhongfu, et al. Operation optimization of electro-hydrogen coupling system under coupling of electricity, carbon, gas and green card market[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(8): 3121-3131(in Chinese).
- [93] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 中华人民共和国财政部, 国家能源局. 关于做好可再生能源绿色电力证书全覆盖工作促进可再生能源电力消费的通知[EB/OL]. (2023-08-03)[2024-07-10]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202308/t20230803_1359093.html.
- National Development and Reform Commission, Ministry of Finance of the People's Republic of China, National Energy Administration. Circular on ensuring the full coverage of renewable energy green power certificates to promote renewable energy power consumption[EB/OL]. (2023-08-04)[2024-07-10]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202308/t20230803_1359093.html(in Chinese).
- [94] 刘靛颖, 蒋凯, 刘念, 等. 基于主从博弈的园区多主体能量-碳配额共享机制[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(6): 2119-2130.
- LIU Liangying, JIANG Kai, LIU Nian, et al. Multi-agent energy-carbon sharing mechanism for parks based on Stackelberg game[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(6): 2119-2130(in Chinese).
- [95] LU Zelong, BAI Linquan, WANG Jianxue, et al. Peer-to-peer joint electricity and carbon trading based on carbon-aware distribution locational marginal pricing[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(1): 835-852.
- [96] SUN Guoqiang, ZHANG Zheyu, ZHOU Yizhou, et al. Bi-level model for integrated energy service providers in joint electricity and carbon P2P market[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 393: 136303.
- [97] LI Junkai, GE Shaoyun, XU Zhengyang, et al. A network-secure peer-to-peer trading framework for electricity-carbon integrated market among local prosumers[J]. *Applied Energy*, 2023, 335: 120420.
- [98] LI Junkai, GE Shaoyun, LIU Hong, et al. An electricity and carbon trading mechanism integrated with TSO-DSO-prosumer coordination[J]. *Applied Energy*, 2024, 356: 122328.
- [99] HUA Weiqi, JIANG Jing, SUN Hongjian, et al. A blockchain based peer-to-peer trading framework integrating energy and carbon markets[J]. *Applied Energy*, 2020, 279: 115539.
- [100] YAN Mingyu, SHAHIDEHPOUR M, ALABDULWAHAB A, et al. Blockchain for transacting energy and carbon allowance in networked microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(6): 4702-4714.

- [101] HE Houyu, LUO Zhao, WANG Qian, et al. Joint operation mechanism of distributed photovoltaic power generation market and carbon market based on cross-chain trading technology[J]. IEEE Access, 2020, 8: 66116-66130.
- [102] 李祥光, 谭青博, 李帆琪, 等. 电碳耦合对煤电机组现货市场结算电价影响分析模型[J]. 中国电力, 2024, 57(5): 113-125.
LI Xiangguang, TAN Qingbo, LI Fanqi, et al. Analysis model to study the influence of electrocarbon coupling on settlement price of coal power units in spot market[J]. Electric Power, 2024, 57(5): 113-125(in Chinese).
- [103] FENG Tiantian, LI Rong, ZHANG Huimin, et al. Induction mechanism and optimization of tradable green certificates and carbon emission trading acting on electricity market in China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 169: 105487.
- [104] 薛贵元, 吴晨, 王浩然, 等. “双碳”目标下碳市场与电力市场协同发展机制分析[J]. 电力科学与工程, 2022, 38(7): 1-7.
XUE Guiyuan, WU Chen, WANG Haoran, et al. Coordinated development mechanism of carbon market and power market under carbon peak and neutrality goals[J]. Electric Power Science and Engineering, 2022, 38(7): 1-7(in Chinese).
- [105] 李吉峰, 邹楠, 李卫东, 等. 计及需求灵活性的地区绿色证书、碳排放权及电力联合交易分析[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3164-3173.
LI Jifeng, ZOU Nan, LI Weidong, et al. Analysis of local green power certificate, carbon emission and electricity joint trading considering demand flexibility[J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3164-3173(in Chinese).
- [106] QIU Dawei, XUE Juxing, ZHANG Tingqi, et al. Federated reinforcement learning for smart building joint peer-to-peer energy and carbon allowance trading[J]. Applied Energy, 2023, 333: 120526.



董九舟

在线出版日期: 2025-03-24。

收稿日期: 2024-07-16。

作者简介:

董九舟(2001), 男, 博士研究生, 研究方向为电力市场、机制设计等, djz23@mails.tsinghua.edu.cn;

*通信作者: 郭鸿业(1993), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力市场、源网荷储市场化互动、人工智能与大数据分析等 hyguo@tsinghua.edu.cn;

姜涛(1983), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为可再生能源集成、综合能源系统等, t.jiang@aliyun.com。

(责任编辑 李泽荣)