

# 考虑溢价补贴的发电商参与碳 - 电市场决策的研究

梁胡涛, 徐 琪

东华大学旭日工商管理学院, 上海

收稿日期: 2024年11月6日; 录用日期: 2024年11月19日; 发布日期: 2025年2月11日

## 摘 要

在达成“双碳”目标和普及可再生能源使用的影响下, 我国电力市场与碳交易市场分别面临着结构转型与增长不足的重大挑战, 可再生能源发电比例增长与其消纳之间的不平衡导致碳交易市场和电力市场需要对市场机制进行优化。在这个过程中, 政府为了减少发电碳排放并提高发电效率, 会对发电商提供补贴, 在新的补贴模式下不同类型发电商的决策难度增加。为了确定对发电商提供的补贴的有效性, 并为发电商的决策提供帮助, 文章提出了一种使用溢价来计算社会福利损失的方式, 对不同类型发电商参与电力市场和碳交易市场的决策进行了分析。首先, 文章根据发电商参与碳 - 电市场供给的不同阶段, 构建了溢价补贴模型, 并划分三个场景用于验证溢价补贴模型的有效性以及观察发电商在不同社会用电场景下的决策; 然后, 根据发电商参与碳 - 电市场交易的流程, 构建基于溢价补贴的决策模型, 以优化决策模型的方式体现溢价补贴模型对电力系统和发电商决策的影响。算例结果对发电量、碳排放、溢价补贴总量和发电商收益从总体和个体的角度进行了分析, 说明了使用溢价补贴模型的有效性, 同时发现了碳排放系数低的发电商在进行发电决策时具有优势, 政府补贴不对发电类型进行区分会造成更多的无效补贴等。

## 关键词

“双碳”目标, 碳 - 电市场, 溢价补贴, 发电商决策

## Research on the Decision-Making of Electricity Producers Participating in the Carbon-Electricity Market Considering Premium Subsidy

Hutao Liang, Qi Xu

Glorious Sun School of Business and Management, Donghua University, Shanghai

Received: Nov. 6<sup>th</sup>, 2024; accepted: Nov. 19<sup>th</sup>, 2024; published: Feb. 11<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

Under the influence of achieving the “dual carbon” goals and the popularization of renewable energy usage, China’s electricity market and carbon trading market respectively confront significant challenges, such as structural transformation and insufficient growth. The imbalance between the increase in the proportion of renewable energy generation and its consumption has led to the need for optimization of the market mechanisms in both the carbon trading market and the electricity market. In this process, in order to reduce carbon emissions from power generation and enhance generation efficiency, the government will provide subsidies to power generators. In the new subsidy mode, the decision-making difficulty for different types of power generators has increased. To determine the effectiveness of the subsidies provided to power generators and offer assistance for their decision-making, this article proposes a method of calculating social welfare losses using premiums and analyzes the decisions of different types of power generators participating in the electricity market and the carbon trading market. Firstly, based on the different stages of power generators’ participation in the carbon-electricity market supply, this article constructs a premium subsidy model and divides it into three scenarios to verify the validity of the premium subsidy model and observe the decisions of power generators in different social electricity consumption scenarios. Then, in accordance with the process of power generators’ participation in the carbon-electricity market transactions, a decision-making model based on premium subsidies is constructed to reflect the impact of the premium subsidy model on the electricity system and the decision-making of power generators. The calculation example results conduct an analysis of power generation volume, carbon emissions, the total amount of premium subsidies, and the revenue of power generators from both the overall and individual perspectives, illustrating the effectiveness of using the premium subsidy model. Meanwhile, it is discovered that power generators with a low carbon emission coefficient have an advantage when making power generation decisions, and that government subsidies without distinction among power generation types will result in more ineffective subsidies, etc.

## Keywords

“Double Carbon” Goals, Carbon-Electricity Market, Premium Subsidy, Decision-Making of Electricity Producers

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

2020年9月,我国向国际社会做出“碳达峰,碳中和”的郑重承诺,并于2021年3月15日将碳达峰、碳中和纳入生态文明建设整体布局[1],并做出了“在2030年前完成碳达峰,二氧化碳排放不再增长”的承诺。自此,碳达峰碳中和成为了我国发展的重大战略决策之一。自2023年2月28日《中国碳达峰碳中和进展报告(2022)》暨“碳达峰碳中和”研讨会在北京召开以来,完善碳减排政策以及可再生能源使用的普及已经成为了目前我国低碳发展的重要任务,由此可见,“双碳”目标的达成取决于碳排放交易市场与电力市场的运行情况。自从2021年7月16日全国碳交易市场正式上线运行以来,据报告显示,截至2022年12月22日,全国碳市场累计交易额已经突破100亿元大关,总计上线交易日350天,碳排放配额累计成交量2.23亿吨,累计成交额101.21亿元。而相较于第一个履约期,即2021年7月16日到2021年12月31日的成交额76.61亿元而言,明显存在交易额增长不足的问题,需要鼓励碳排放交易主

体更多的参与碳交易市场。我国的电力市场作为碳排放交易的主要市场,在完成碳减排目标的同时还需要对自身发电结构进行深化改革,国家发展改革委、国家能源局发布的《有关加快建设全国统一电力市场体系的指导意见》中,提到了要构建更适合中国国情以及更强新能源消纳能力的新型电力系统以及推进电力市场能源结构转型的市场机制设计[2]。在减少碳排放与增加可再生能源使用这两方面因素的推进下,电力市场的发电结构正在经历以传统化石能源发电为主体向以可再生能源发电为主体的模式转变。

在碳减排政策的引导与补贴政策的影响下,我国可再生能源发电量近年持续增长,2023年我国非化石能源发电装机容量占比将首次超过50% [3],而根据2023年4月15日发布的《中国低碳经济发展报告蓝皮书(2022~2023)》中的内容显示,2022年中国非化石能源消费比重达到20%左右[4],全社会用电量的15.3%的比重依靠风电、光伏发电。随着可再生能源的使用比例和装机容量的提高,风电、太阳能发电等众多新能源的使用将会丰富发电市场的参与主体,有利于电力系统结构的优化升级,但是可再生能源的使用比例与装机容量的不匹配将会导致可再生能源过剩的问题。在此背景下,政府需要改变传统的补贴政策以平衡传统化石能源发电商与可再生能源发电商在电力市场中的关系,与此同时,不同类型发电商参与碳电市场的决策也变得愈发复杂。

从上述的问题分析可以看出,由于碳减排政策的影响,电力市场中新能源发电供给与需求出现了严重的不匹配现象,以及碳交易市场与电力市场需要在新的因素的影响下做出调整。这些问题对碳-电市场造成的负面影响主要有三个方面:其一,发电商由于补贴政策,更多地倾向于使用可再生能源进行发电,但是电力市场并不能完全消纳新增的可再生能源发电量;其二,在碳排放配额限制下,失去补贴优势的传统化石能源发电商将会降低参与碳排放交易市场和发电的积极性;其三,新能源转型过程中,电力系统面对突发电力需求的相应速度降低,由于新能源发电受外在因素的影响较大,在用电紧张时期,新能源发电为主体的电力系统能否满足供电需求尚且未知。因此,为了更好地了解和解决当前电力市场发电结构转型过程存在的问题,本文将在电力市场和碳排放交易市场的基础上对政府的补贴模式以及发电商的决策展开相应研究。

关于现有的电价制度政策以及碳排放配额制度等外部因素等问题已经展开了大量的研究。将碳排放配额制度引入电力市场是为了促进电力企业节能减排和能源结构升级,在碳中和目标下的电力系统将会在发电侧对能源结构进行改革,具体措施为淘汰碳排放量高的化石能源热发电机组以及加大清洁能源的投资开发[5],完成这一目标需要建立合适的市场机制以及补贴机制。在此基础上,文献[6]建立了火电厂和绿电厂在政府固定电价制和可再生能源配额制协同政策下的发电市场决策模型,并分析了三种情景下两种制度对电力市场的均衡影响。文献[7]从发电补贴入手,使用溢价补贴机制,对发电企业各类发电机组在不同市场用电需求情景下发电量的变化进行研究,发现了溢价补贴对发电机组效率的影响要高于对可再生能源使用率的影响,但其只对同一发电商的不同发电机组进行区分,并没有研究不同类型发电商的发电决策。同样作为补贴政策的研究,文献[8]从用电侧的补贴入手,对目前我国电力市场普遍存在的工业用电与居民用电交叉补贴问题展开了研究,并基于政策的目标电价设计了电价与碳价联动机制,发现我国的电力市场改革目标与碳减排的目标存在一定冲突,需要对碳价和电价的定价机制进行调整,但是现实中用电侧电价的可调整范围较小,研究交叉补贴的效应仅能从理论上找到电价和碳价的调整方案,将方案进行实践较难。文献[9]论述了在可再生能源配额制下如何解决可再生能源接入电网产生的辅助服务需求问题,由于可再生能源辅助服务费用全网分摊会对传统辅助服务提供商产生不公平,需要根据具体市场特征设计辅助服务绿证量化方法。文献[10]通过对美国可再生能源配额制与绿证市场的实施现状进行分析,发现我国要在可再生能源配额制下提高电力市场与碳交易市场间的相互作用,需要增强用户消纳可再生能源的主动性并实现两者市场交易的动态均衡。由此可见,可再生能源配额制度

适用于我国电力市场的碳交易场景，从发电侧入手使用新的补贴模型研究不同类型发电商在不同场景下参与电力市场和碳交易市场的决策问题是值得关注的。

要研究发电商参与电力市场和碳交易市场的决策，需要了解发电商参与二者市场的决策过程以及决策目标。在碳电市场耦合的基础下，发电商在碳市场中的决策目标受“总量分配 + 现货交易”的二级市场模式[11]影响，主要以调整发电量控制碳排放并完成碳履约为主[12]，而发电商在电力市场中的决策目标受发电机组成本和多时期下电力现货市场出清结果[13]影响，主要以发电电力结构调整[14]以及在可再生能源的影响下调整最优市场竞价策略[15]为主。发电商的发电成本函数与发电机组出力紧密关联[16]，随着碳市场的加入，碳成本会影响发电商在发电机组选择的决策，在考虑碳交易和碳关税的情况下，刘阳等[17]使用金豺优化算法对以电力用户购电成本最小和发电商利润最大为目标的电力市场主体决策模型求解，发现碳成本的引入会使发电商减少高排放发电机组的使用；李祥光等[18]将碳价、配额分配比例和配额分配基准值作为区分碳市场情景的主要元素，在轻度、中度和重度三种碳市场情景下研究碳成本对机组出清电价的影响，发现引入碳市场能有效改变新能源机组和煤电机组发电出力并且可以促进低减排性发电机组的优化升级，但其电力现货市场报价模型缺少对碳市场价格波动性的考虑。发电商分别在电力市场和碳市场中的决策是连续的，而两个市场间的决策是离散的，决策的时间、顺序、目标、约束等都有不同。在发电商决策顺序和不同市场决策时间尺度差异方面，孙晓聪等[19]将发电商在电力市场和碳市场中的竞标决策过程分解到多时间跨度，将单一的碳排放与发电量的函数关系拓展到多个时间段，解决了碳 - 电市场在多时间段上无法协同决策的问题，并且发现在两个市场决策多时间耦合的特征基础上可以进一步挖掘发电商在碳电耦合下的策略优化空间，进一步提升社会福利；董福贵等[20]将发电商在电力市场和碳市场的决策分为多阶段，根据发电商的决策目标逐步求解得到每一阶段下的最优决策，使用多阶段决策模型能够解决决策的顺序问题，但得到不同阶段求解结果需要的假设和约束都相对较多；因此，在二者的基础上，尚楠等[21]充分考虑了碳市场和电力市场在结算和决策时间上的差异，通过离散化决策和动态刷新碳排放权交易结果的方式，建立了拥有不同决策目标的多履约期多阶段市场决策模型，其结果良好的反应了在电力现货市场出清和申报约束下的碳市场决策过程，但仍然缺少对可再生能源发电主体的考虑。

本文从考虑溢价补贴对发电效应的整体社会福利影响的角度出发，考虑社会需求用电量需求的不同程度建立场景，对不同类型的发电商参与碳交易市场与电力市场过程中的发电决策进行研究，提出了电力系统在新能源化转型过程中遇到的传统化石能源发电商发电积极性不足、社会用于发电补贴的福利损失增加等问题的解决方案。本文将基于以下假设来对发电商参与电力市场和碳交易市场的决策过程进行研究：1) 可再生能源发电商和传统化石能源发电商在初期都拥有用于碳配额清缴的期初碳配额，碳清缴的周期为一天，碳交易市场和电力市场的时间尺度一致；2) 传统能源发电商和可再生能源发电商同时参与电力市场与碳排放交易市场，各自的发电成本函数都与燃料价格相关，碳交易价格使用固定值；3) 从政府的角度和发电商自身的角度出发，模型的求解目标分别为发电商收益最大和社会福利损失最小。本文将在此基础上，构建发电商参与电力市场和碳排放交易市场的多阶段交易模型，提出基于溢价补贴的溢价补贴计算模型用于计算发电商获得实际电价的溢价补贴损失；在不同的电力需求场景下，以发电商和政府的两者不同的决策目标构建发电商参与碳 - 电市场的多阶段决策模型；最后通过算例，分析溢价补贴模型对电力系统碳排放量和发电量的优化作用，以及不同类型发电商在普通情形下和考虑溢价补贴模型的情形下对不同用电需求场景的决策变化。

## 2. 溢价补贴原理与碳 - 电市场供给交易流程

### 2.1. 溢价补贴原理

溢价是证券市场的专业术语，具体指代为实际支付的金额超过证券或股票的名目价值或者面值，而

在基金市场中的溢价泛指股票的目标价格和股票的票面价格之间的价差。可以理解为, 当购买商品或者服务的价值高于其能够提供的实际价值时, 高出的价差就是产生的溢价。合理的商品溢价能够为生产者带来更多的利益并提高生产者的生产效率, 但是过多的商品溢价将会造成额外的社会福利失。

而溢价补贴是目前在电力市场发电侧普遍存在的现象, 在 2002 年我国开始了新一轮的电力改革以来<sup>1</sup>, 由于电力需求急剧增长, 为了缓解市场竞争制度带来的电力供给与需求不匹配的压力, 政府对发电商制定了一系列发电补贴政策, 而政府实际对发电商提供的补贴与发电商实际增加社会福利之间的差值就是产生的溢价补贴, 电力市场发电侧产生的溢价补贴如图 1 所示。

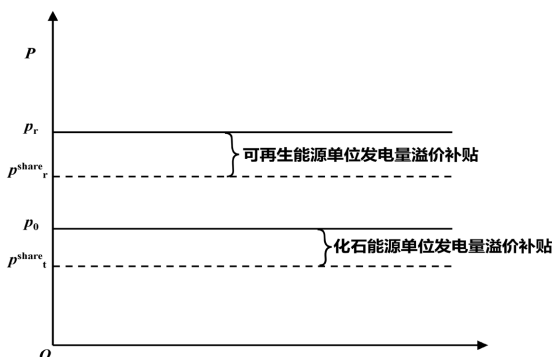


Figure 1. Premium subsidies in the electricity market  
图 1. 发电市场的溢价补贴

## 2.2. 碳 - 电市场交易流程

目前我国碳交易市场和电力交易市场的联系主要依靠碳配额、发电量、装机容量等中间变量[22], 碳市场交易机制的加入使发电商在进行电力现货交易决策的同时需要考虑额外的碳排放成本, 从而影响电力市场出清结果。目前的碳市场交易和电力市场之间的交互主要形成在供需关系的基础上, 传统能源发电商和可再生能源发电商在发电侧提供发电量满足用电侧不同需求的电力用户, 同时超出碳配额限制的发电商在对碳市场碳配额交易提出了需求, 发电商参与碳 - 电市场的具体流程如图 2 所示。

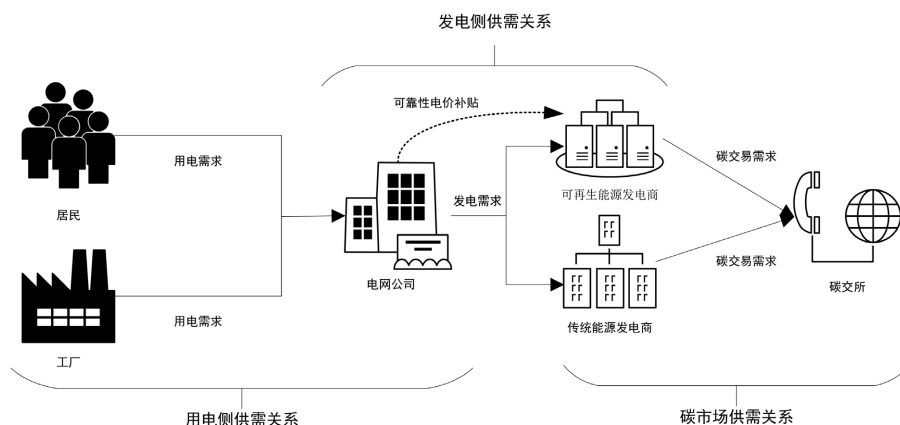


Figure 2. Flow chart of carbon-electricity market supply  
图 2. 碳 - 电市场供给流程图

<sup>1</sup>2002 年国务院发布的《电力体制改革方案》, 明确了“厂网分开、主辅分离、输配分开、竞价上网”四大改革任务。其主要工作有对电力企业进行改革(分离国有发电企业)、引入市场竞争机制实现电力价格市场化以及电力市场体系建设等方面。

其中, 产生需求的第一段为用电侧电力用户用电量需求, 而我国对于工业和居民用电的电价具有不同收费标准, 居民用电收费标准采用阶梯式用电收费, 工商业用电收费未来大多将采用峰谷分时电价政策。电力用户的用电成本变化受用电量的影响较大, 政府往往通过补贴的手段干预社会用电成本, 补贴的形式一般为发电侧提高市场出清购电价格覆盖发电商成本以及为可再生能源发电商提供可靠性发电补贴。

在政府补贴手段干预的影响下, 产生需求的第二阶段为政府提供补贴从发电商手中购买的发电量需求。这时, 考虑到发电对社会环境带来的二氧化碳排放等额外影响, 政府需要对发电商提供的发电量类型进行区分, 从而产生了可再生能源发电量和化石能源发电量的区别。

产生需求的第三阶段产生在碳市场交易过程中, 发电量超出碳配额限制的传统能源发电商需要在碳市场中购买其他发电商剩余的碳配额或者是绿色电力证书。

发电商参与碳-电市场决策受三个阶段的供需关系影响, 其中的主要中间变量包括碳配额、发电量、装机容量、电价等。在了解发电商参与电力市场以及碳交易市场的具体流程以及需要设置的相关变量后, 在构建基于溢价补贴的发电商参与碳-电市场的多阶段交易模型前, 需要对场景进行设置。

### 2.3. 交易场景设置

模型计算的场景有三个:

场景一: 社会用电需求量正常, 不考虑溢价补贴。发电商的决策目标是最大化自身总收益, 政府的决策目标是 minimized 社会福利损失。

场景二: 社会用电量正常, 考虑溢价补贴。此时, 没有供电压力, 为了达到减少碳排放的目的, 政府将根据发电类型为可再生能源发电商额外提供可靠性发电补贴, 以促进可再生能源发电商提高发电量。发电商的决策目标仍然是最大化自身总收益, 政府的决策目标是 minimized 总溢价补贴。

场景三: 社会用电量高于发电商所能提供发电量, 考虑溢价补贴。此时属于发电量稀缺场景, 政府不再对发电量类型进行区分, 为所有类型发电商提供稀缺性发电补贴, 鼓励其发电。发电商的决策目标仍然是最大化自身总收益, 政府的决策目标是 minimized 总溢价补贴。

对于在三个场景中使用的碳价均为静态固定碳价, 发电商的碳排放系数、发电功率限制都保持不变, 发电商每个时段的发电量作为模型中的决策变量。发电商在实际的发电决策中会受到发电需求场景的不同进行改变, 电量需求场景的变化为多阶段决策模型提供了不同的供给紧张关系。

## 3. 考虑溢价补贴的发电商参与碳-电市场的多阶段交易模型

### 3.1. 发电商的成本模型

#### 3.1.1. 发电商的发电成本函数

本文考虑的传统能源发电商包括燃煤发电商和燃气发电商, 可再生能源发电商包括水力发电商、光伏发电商和风力发电商, 由于两类发电商的成本组成不同, 为了方便计算, 统一为与燃料价格相关的发电成本函数, 而能源发电商的发电成本与燃料消耗成本一般呈一定的比例关系[23], 发电成本函数如下所示:

$$F_{i,t}^{cost} = \frac{p_i^{fuel} (a_i q_{i,t}^2 + b_i q_{i,t} + c_i)}{\alpha_i} \quad (1)$$

其中  $F_{i,t}^{cost}$  是发电商  $i$  在  $t$  时刻的发电总成本,  $p_i^{fuel}$  是发电商  $i$  使用的单位燃料成本,  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  分别为燃料成本的系数,  $q_{i,t}$  为发电商  $i$  在  $t$  时刻的发电量,  $\alpha_i$  为发电商  $i$  燃料成本占总成本的比例。

发电商的总收益与售电收入有关, 根据购电价格和发电量相乘可以得到发电商的总收益函数:

$$I_i^{electricity} = \sum_{t=1}^T p^{tariff} q_{i,t} - F_{i,t}^{cost} \quad (2)$$

其中  $I_i^{electricity}$  是发电商  $i$  的发电总收益,  $p^{tariff}$  是基础售电价格。

### 3.1.2. 发电商的碳市场成本函数

发电商采用碳排放配额分配的方式获得期初碳配额, 在每个清缴时段发电商都需要完成碳履约清缴过程, 当碳排放超出本期用于清缴的碳配额上限时, 需要在碳市场购买超出的碳配额, 当本期碳配额有剩余时, 可以在碳市场上出售并获得收益。首先, 发电商的碳排放量与发电量挂钩, 如下所示:

$$e_{i,t} = \varphi_i q_{i,t} \quad (3)$$

式中,  $e_{i,t}$  是发电商  $i$  在时刻  $t$  的碳排放, 其与发电量成正比,  $\varphi_i$  是发电商  $i$  每单位发电量的碳排放系数。

发电商在碳交易市场的碳配额交易量如下所示:

$$E_{i,t}^{CET} = \begin{cases} e_{i,t} - \sigma_{i,t} E_i^{cap}, & i \in G \\ e_{i,t} - \sigma_{i,t} E_i^{cap}, & i \in C \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $E_{i,t}^{CET}$  为发电商  $i$  在时刻  $t$  参与碳市场的交易量, 值为负时说明发电商有碳排放配额剩余, 值为正时说明其碳排放超出了当期用于清缴的碳配额。 $\sigma_{i,t}$  代表发电商  $i$  分配到时刻  $t$  用于清缴的期初总碳配额分配比例。 $E_i^{cap}$  为发电商  $i$  获得的碳排放配额总量,  $G$  是传统能源发电商集合,  $C$  是可再生能源发电商集合, 根据该式, 可以计算得到发电商在碳市场中的交易成本:

$$C_i^{carbon} = p^{carbon} \sum_{t=1}^T E_{i,t}^{CET} \quad (5)$$

式中,  $C_i^{carbon}$  代表发电商  $i$  完成所有时段的履约最终的碳交易成本, 当其为负时, 其绝对值为发电商在碳市场中获得的收益。

## 3.2. 溢价补贴的计算模型

### 3.2.1. 单位发电量实际社会价值

在场景二和场景三中, 需要使用溢价补贴模型来计算社会福利损失。

首先需要计算发电商单位发电量的实际社会价值, 不同发电商的单位发电量实际社会价值计算如下所示:

$$p_i^{share} = p^{tariff} - \beta(\varphi_i - e_0), i \in G \quad (6)$$

$$p_i^{share} = p^{tariff} + \chi p^{carbon} (e_0 - \varphi_i), i \in C \quad (7)$$

式中,  $p_i^{share}$  为发电商  $i$  以基础售电价格为基准, 实际每单位发电量所产生的社会价值,  $e_0$  为社会可接受单位发电量碳排放基准,  $\beta$  是碳排放惩罚系数,  $\chi$  是减少碳排放的奖励系数。式子说明, 当发电商的单位发电量碳排放在基准线以下时, 发电商促进了碳减排, 其单位发电量带来的实际社会价值要高于获得的基础电价; 相反, 当发电商的单位发电量碳排放在基准线以上时, 发电商排放了多余的二氧化碳, 其单位发电量带来的实际社会价值要低于获得的基础电价, 此时, 实际发电社会价值与基础售电价之间的差值就是溢价补贴。

### 3.2.1. 单位发电量的溢价补贴

在场景二下, 可再生能源发电商会获得额外的可靠性发电量补贴, 传统能源发电商仍然按照初始上网电价出售电量, 可再生能源发电商的售电价格, 以及单位发电量溢价补贴的计算如下所示:

$$p_i^{reliable} = p^{tariff} + s \quad (8)$$

$$p_{i,t}^{reliable} = \begin{cases} p^{tariff} - p_{i,t}^{share}, & i \in G \\ p^{reliable} - p_{i,t}^{share}, & i \in C \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $p_i^{reliable}$  为可再生能源发电商  $i$  获得的可靠性发电补贴,  $s$  是每单位可再生发电量获得的可靠性补贴,  $p_{i,t}^{premium}$  为发电商  $i$  每单位发电量的溢价补贴。

当电力需求场景处于场景三时, 即电力需求高于正常情况能提供的发电量, 仅对可再生能源发电提供可靠性发电补贴的方式不能够解决电力供给的稀缺, 可再生能源发电商和传统能源发电商都会获得额外的稀缺性补贴, 此时的售电价格以及单位发电量的溢价补贴的计算如下所示:

$$p_i^{scarcity} = p^{tariff} + d \quad (10)$$

$$p_{i,t}^{scarcity} = p_{i,t}^{scarcity} - p_{i,t}^{share} \quad (11)$$

式中,  $p_i^{scarcity}$  为发电商  $i$  获得的稀缺性发电补贴电价,  $d$  是每单位发电量获得的稀缺性补贴。

### 3.3. 求解目标函数

场景一以系统社会福利损失最小和发电商收益最大作为决策目标, 场景二和场景三都以溢价补贴总量最小以及发电商收益最大作为决策目标。场景一需要引入居民和工业用电价格计算目标函数, 场景一的目标函数如下所示:

$$\max I_i = I_i^{electricity} - C_i^{carbon} \quad (12)$$

$$\min \sum_t p^{tariff} q_{i,t} - \sum_t (p^{citizen} q_i^{citizen} + p^{industry} q_i^{industry}) \quad (13)$$

式中,  $I_i$  是发电商  $i$  在整个发电周期内获得的总发电收益,  $p^{citizen}$  是居民用电平段电价,  $p^{industry}$  是工业用电平段电价。

场景二和场景三的目标函数如下所示:

$$\min P^{premium} = \sum_i \sum_t p_{i,t}^{premium} q_{i,t} \quad (14)$$

$$\max I_i = I_i^{electricity} - C_i^{carbon} \quad (15)$$

式中,  $P^{premium}$  是系统溢价补贴总量。

### 3.4. 约束条件

#### 1) 发电功率约束

在对溢价补贴模型的有效性进行验证时, 使用时段内的最大发电量代替发电机组功率限制, 具体约束如下所示:

$$q_{i,t} \leq q_i^{\max} \quad (16)$$

式中,  $q_i^{\max}$  为发电商  $i$  的发电机组在单个时段的最大发电量。

#### 2) 发电量和边际发电成本约束

发电商的发电量之和需要满足社会的用电需求, 基础售电价格需要覆盖发电商的边际发电成本, 具体约束如下:

$$\sum_i^{i=1} q_{i,t} \geq q_t \tag{17}$$

$$p^{tariff} \geq \frac{(2a_i q_{i,t} + b_i) p^{fuel}}{\alpha_i} \tag{18}$$

$$q_t^{citizen} + q_t^{industry} = q_t \tag{19}$$

式中： $q_t$  是  $t$  时刻的社会需求电量，社会需求电量由两部分构成，分别为  $t$  时刻的居民需求电量  $q_t^{citizen}$  和工业需求电量  $q_t^{industry}$ 。

### 3) 碳配额清缴约束

期末碳配额清缴结算时，发电商的期初碳配额与周期内在碳交易市场内购买的碳配额之和需要覆盖该周期内发电商因发电产生的二氧化碳。

$$E_i^{cap} + \sum_t^{t=1} E_{i,t}^{CET} \geq \sum_t^{t=1} e_{i,t} \tag{20}$$

## 4. 算例分析

### 4.1. 基础参数

为了验证溢价补贴模型的有效性以及发电商在不同用电需求场景下发电决策的变化，本文将采用 NSGA-II (非支配排序遗传算法) 算法对该多目标优化问题进行仿真分析求解。

发电系统中共有 7 位发电商参与仿真过程，其中包含两名火力发电商、两名燃气发电商、一名水力发电商、一名风力发电商以及一名太阳能光伏发电商，其中燃煤火力发电商不考虑碳捕集的过程。基础燃料价格中，煤炭价格和天然气价格分别为 900 元/t 和 4.5 元/m<sup>3</sup> [24]，而可再生能源发电商的发电成本函数的燃料成本使用 0.5 元，各类发电商的发电成本函数参数[25]如表 1 所示。基础碳价参考 2024 年中国碳交易网的数据，2024 年 1 月份至 6 月份碳交易开盘价格波动区间为 76.81~93 元/吨，波动范围为 21.07%，文章中设定的基础碳价为 84.9 元/t。

**Table 1.** Generator generation cost parameters

**表 1.** 发电商发电成本参数

发电商	类型	$a$	$b$	$c$	$\alpha$
G1	煤电	5E-10	0.000125	3.09	0.6
G2	煤电	79E-10	0.000148	4.45	0.75
G3	气电	0.00000009	0.0834	30	0.873
G4	气电	0.00000013	0.052	60	0.692
C1	光伏发电	0.0000001	0.121	2000	0.3
C2	水电	0.0000003	0.187	1500	0.27
C3	风电	0.0000002	0.273	1680	0.34

在不考虑使用碳捕集等技术的情况下，各类发电商的单位发电量的碳排放强度按煤电、气电、光伏发电、水电和风电的顺序由高到低排序，不同类型发电商的碳排放强度如表 2 所示。仿真场景中，发电周期为 90 天，以天为单位结算碳排放，社会需求总电量 1 亿千瓦时，其中居民用电需求量 2000 万千瓦

时, 工业用电需求量 8000 万千瓦时, 居民用电平段电价 0.5 元/千瓦时, 工业用电平段电价 0.7 元/千瓦时, 电网平均购电价格为 0.7 元/千瓦时, 发电商发电功率限制为 60 万千瓦时/天。

对于溢价补贴函数参数的设置, 碳排放惩罚系数和减少碳排放奖励系数分别为 2 和 15, 社会可接受碳排放基准线为 0.1 kg/kwh, 对于政府提供给可再生能源发电量的单位可靠性发电补贴, 本文设置为 0.25 元/kwh。

**Table 2.** Carbon emission parameters of power producers

**表 2.** 发电商碳排放参数

发电商	类型	碳排放强度(kg/kw·h)	期初碳配额(t)
G1	煤电	0.8	8000
G2	煤电	0.82	8000
G3	气电	0.4	4000
G4	气电	0.44	4000
C1	光伏发电	0.03	1000
C2	水电	0.02	1000
C3	风电	0.04	1000

仿真程序的参数设定中, 种群数量为 500, 遗传代数为 1000, 算法的交叉因子和遗传因子分别为 10 和 20, 突变率为 0.1, 根据以上算法参数, 对溢价补贴模型进行仿真求解, 并对结果进行分析。

#### 4.2. 不同场景仿真结果分析

通过仿真可以得到不同场景下的求解目标函数的仿真结果, 三种场景的总发电量和总碳排放结果如表 3 所示, 有效发电支出与当前场景下最小的溢价补贴结果如图 3 所示, 根据仿真的结果对模型的优劣进行分析。

**Table 3.** Results comparison of different scenes

**表 3.** 不同场景结果对比

场景	总碳排放量/t	总发电量/kwh	发电商总收益/元	可再生能源发电商收益占比/%
场景 1	3,6897	1,0045,0287	4211,4180	0.691
场景 2	3,5600	1,0332,9182	4594,3803	0.718
场景 3	3,6172	9981,3708	5193,5208	0.561

从表 3 中可以看出, 在使用溢价补贴模型后, 场景 2 的总发电量相比场景 1 增加了 2.87%, 总碳排放量却下降了 3.52%, 在发电量增加的情况下, 溢价补贴模型使可再生能源发电商生产更多电量, 发电系统排放的二氧化碳量减少。在增量减排之外, 场景 2 相比场景 1, 发电商获得的总收益增加了 9.09%, 同时, 可再生能源发电商的收益占比还增加了 2.72%, 这说明使用溢价补贴模型会导致更多的收益流向可再生能源发电商。根据场景 2 与场景 3 的结果对比, 可以发现, 场景 3 的碳排放量要高于场景 2, 但是场景 3 的总发电量低于场景 2, 说明电力稀缺场景下发电类型的限制变得宽松, 需要传统能源发电商提供更多的电量, 从而产生了更多的二氧化碳。

对比每个场景的发电总支出与其社会福利损失的关系, 结果如图 3 所示。场景 1 中的模型计算得到的社会福利损失为 4,312,879 元, 而场景 2 和场景 3 使用溢价补贴模型计算发电周期内的社会福利损失分

别为 11,902,995 和 36,016,303 元, 而场景 2 的有效发电支出又高于场景 1 和场景 3, 主要是因为场景 1 只考虑了用电侧成本和发电侧的费用, 没有考虑发电量带来的二氧化碳排放对社会带来的额外附加成本。使用场景 1 计算社会福利损失的方法, 缺少对发电量带来的碳排放的考虑, 使用溢价补贴模型计算社会福利损失可以提高有效发电支出, 而在场景 3 中, 因为电量稀缺的原因, 为了提高发电商的发电积极性, 提供的稀缺性补贴大多都成为了发电商的收益, 从而降低了有效发电支出。

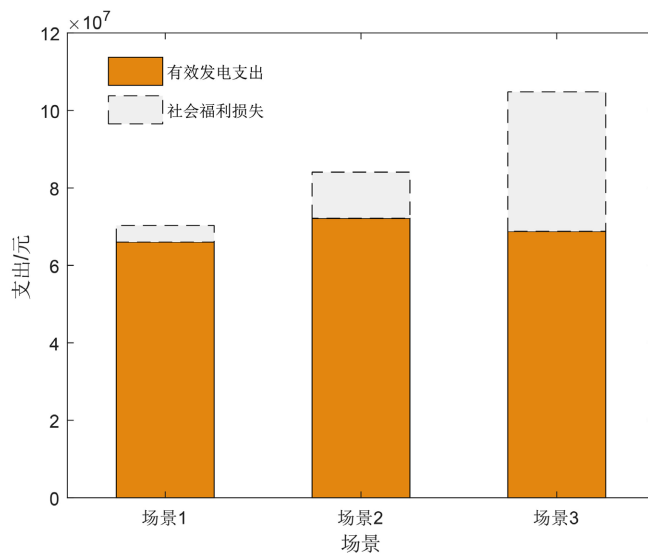


Figure 3. Generation system expenditure  
图 3. 发电系统支出

以上仿真内容结果可以看出, 通过建立溢价补贴模型计算电力市场的社会福利损失, 可以有效地控制碳排放并且优化发电结构, 在保证发电商收益最大化的情况下, 减少社会福利损失。

### 4.3. 灵敏度分析

本文将在场景 2 的溢价补贴模型中设置不同参数进行灵敏度对比分析。

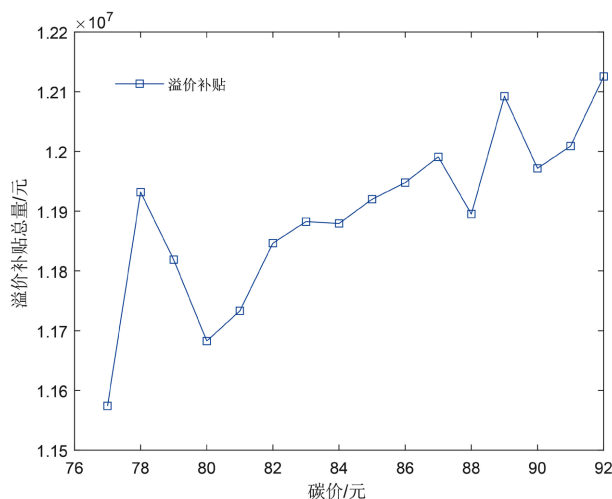
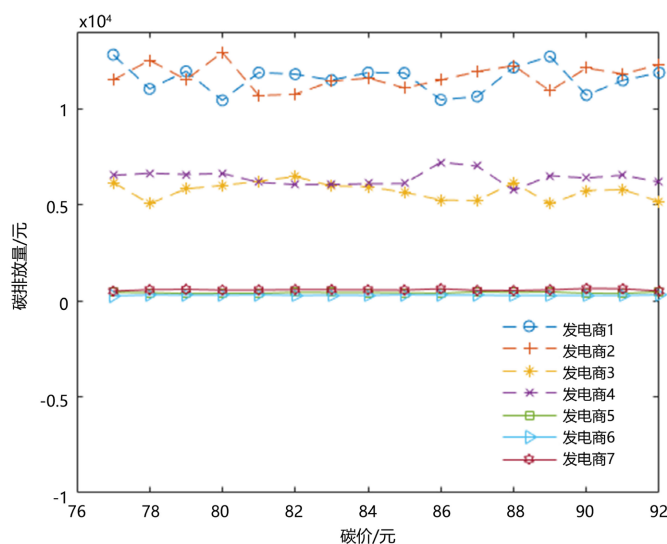


Figure 4. Premium subsidies affected by the carbon price  
图 4. 溢价补贴受碳价影响

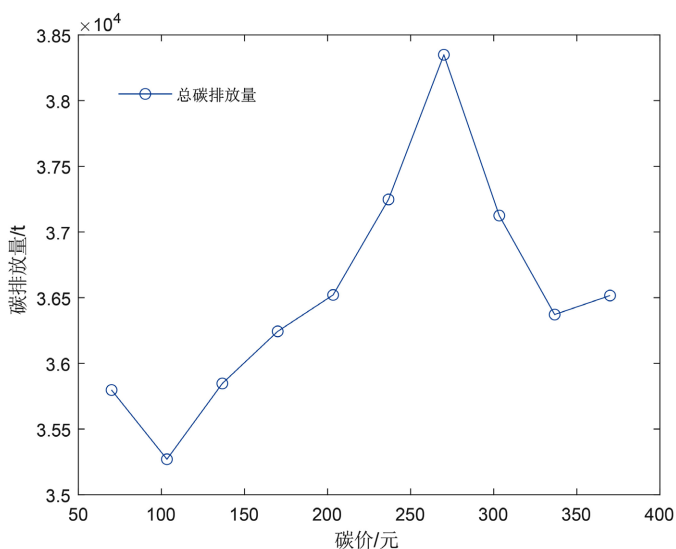
## (1) 碳价影响分析

首先, 本文将从碳排放和社会福利损失两个方面观察参数对模型的影响。在 3.1 的基础参数设置中, 2024 上半年碳价的变动区间为 76.81~93 元/吨, 在这个碳价区间观察碳价变动对溢价补贴模型的影响, 结果如图 4 和图 5 所示。



**Figure 5.** The carbon emissions of power producers affected by the carbon price  
**图 5.** 发电商碳排放量受碳价影响

通过图 4, 虽然存在仿真结果的波动, 但是仍然可以看出, 随着碳价的增长, 溢价补贴模型计算下的溢价补贴总量呈现上升趋势, 因此溢价补贴总量与碳价呈正相关。分析碳价对发电商碳排放量的影响, 通过图 5 的结果, 发现不同类型的发电商碳排放量与碳价的关系不明显, 需要扩大碳价区间进行搜索。扩大碳价区间, 碳价与碳排放量关系的仿真结果如图 6 所示, 可以看出使碳排放量最小的碳价区间为 70~130 元/吨, 随着碳价的增加, 碳排放总量先增加后减少, 当碳价为 280 元/吨时碳排放达到最大。



**Figure 6.** Carbon emissions of power generation system affected by carbon price  
**图 6.** 发电系统碳排放量受碳价影响

(2) 碳排放奖励和惩罚系数影响分析

碳排放惩罚系数和碳排放奖励系数对溢价补贴模型的影响, 在碳价范围 70~130 元/吨内进行仿真, 碳排放奖励系数和惩罚系数的步长分别为 3 和 2, 仿真结果如图 7 所示。根据图 7 的结果, 溢价补贴模型的碳排放量与碳排放奖励系数以及碳排放惩罚系数没有明显的正负相关关系, 但随着碳排放惩罚系数的增长, 出现高碳排放的仿真结果变多, 随着碳排放奖励系数的增长, 出现高碳排放的仿真结果变少。因此, 考虑碳排放量时, 碳排放惩罚系数的较优值为 4, 碳排放奖励系数的较优值为 18。

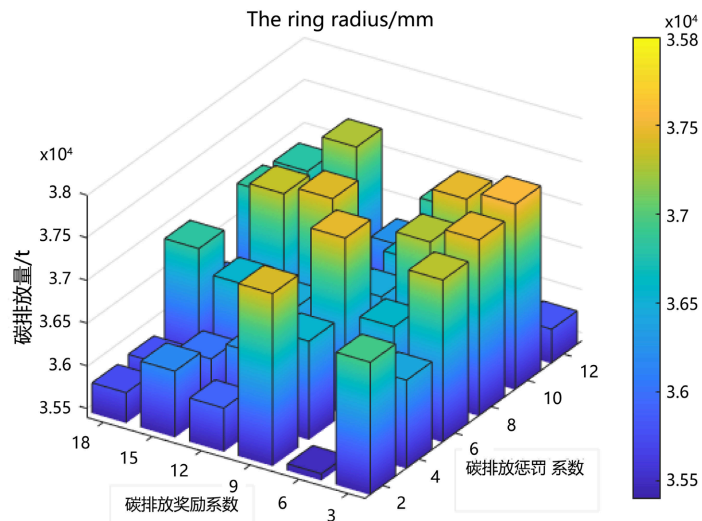


Figure 7. Carbon emissions affected by the carbon incentive/penalty coefficient  
图 7. 碳排放量受碳排放奖励/惩罚系数影响

碳排放惩罚系数和碳排放奖励系数对溢价补贴总量的影响如图 8 所示, 从图中可以看出, 随着碳排放惩罚系数的增长, 溢价补贴模型的溢价补贴总量呈现明显的上升趋势, 同时, 随着溢价补贴奖励系数的下降, 溢价补贴总量呈现缓慢的上升趋势, 碳排放奖励系数与溢价补贴总量呈负相关, 碳排放惩罚系数与溢价补贴总量呈正相关。

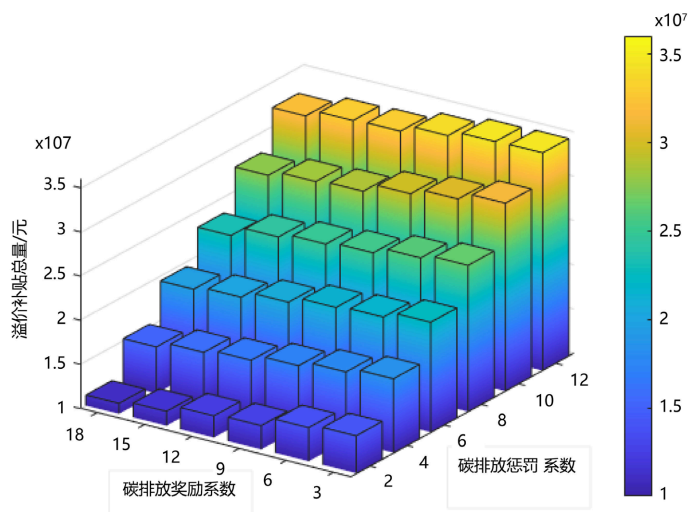


Figure 8. Premium subsidies affected by the carbon incentive/penalty factor  
图 8. 溢价补贴受碳排放奖励/惩罚系数影响

### (3) 可靠性补贴影响分析

可靠性补贴是溢价补贴模型中的重要参数, 在 70~130 元/吨的碳价范围内, 使用碳排放惩罚系数为 4, 碳排放奖励系数为 8, 以步长 0.05 对不同可靠性补贴价格下的碳排放量及溢价补贴进行对比。从图 9 可以看出, 随着可靠性补贴价格的增加, 溢价补贴总量呈现线性上升趋势, 而随着可靠性补贴价格增加, 碳排放量呈先下降后上升再下降的趋势。而产生这个现象的原因, 可能是随着可靠性补贴增加到一定值时, 可靠性补贴的影响超过了发电成本对可再生能源发电商的影响, 此时可再生能源发电商增加发电量会带来更多的收益。溢价补贴的组成受可靠性补贴价格影响的关系如图 9 所示, 可以发现, 随着可靠性补贴的增加, 可再生能源发电商获得的溢价补贴占比增加。

由此, 通过图 9 和图 10 的结果对比, 在当前参数设置下, 溢价补贴模型的最优可靠性补贴价格区间为 0.15~0.2 元/kwh。

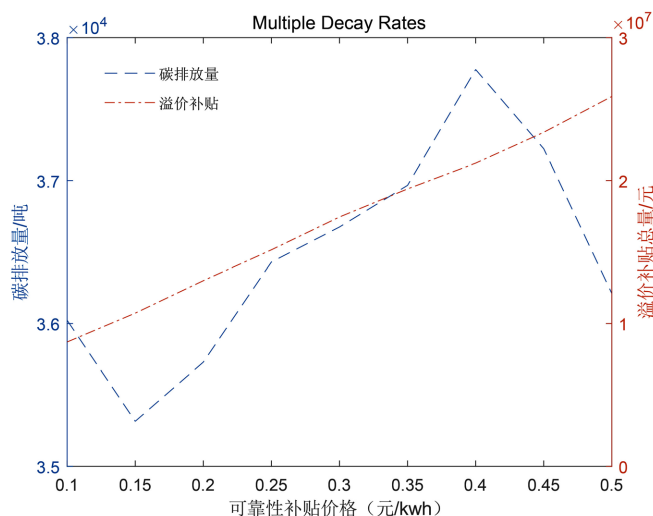


Figure 9. The influence of reliability subsidy on the main index of the model  
图 9. 可靠性补贴对模型主要指标的影响

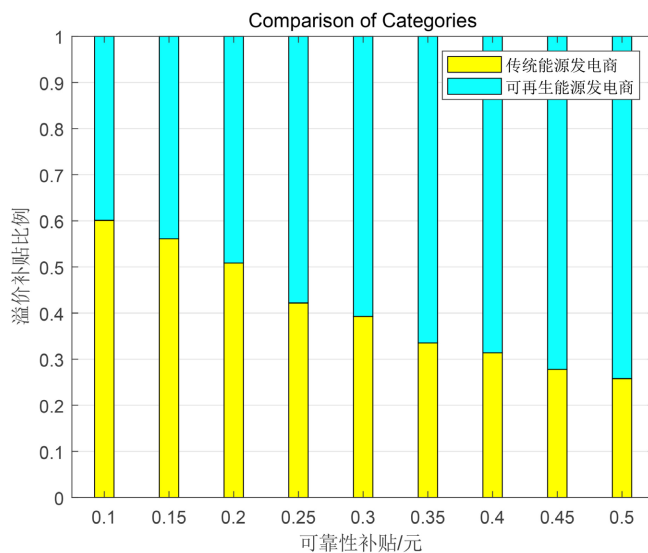


Figure 10. The influence of reliability subsidy on the composition of premium subsidy  
图 10. 可靠性补贴对溢价补贴构成的影响

## 5. 结论

为了研究不同场景下碳价和政府补贴对发电侧溢价补贴和碳减排效果的影响, 本文构建了考虑溢价补贴的发电商参与碳-电市场决策目标优化模型, 通过仿真求解的方式有了以下发现: 1) 使用溢价补贴原理的发电商决策优化模型能够有效减少发电系统的碳排放; 2) 当政府为可再生能源发电商提供发电补贴时, 传统化石能源发电商在碳-电市场上的决策处于劣势地位, 可再生能源发电量的比例得到提高, 但是补贴应控制在一定的范围内; 3) 碳价较低时, 碳价对发电商的决策影响较小; 4) 在碳-电市场中, 碳排放系数小的发电商相比于碳排放系数大的发电商的发电量决策优势更大。

本文创新性地将溢价补贴的概念引入碳-电市场的研究中, 发现使用溢价补贴作为发电系统决策目标能够有效完成碳减排和电力市场转型的目标, 以及碳价、补贴等因素对发电商决策的影响程度, 希望能够在可再生能源发电比例不断增加的背景下, 为制定更好的发电补贴策略以及碳价的设定提供帮助。文章仍然存在对碳-电市场动态性考虑不足的问题, 下一步工作将会把碳交易市场和电力市场的动态交易过程考虑进来, 在动态碳价和动态交易电价的基础上, 对发电商在溢价补贴模型下参与碳-电市场的决策进行研究。

## 参考文献

- [1] 张森林. 基于“双碳”目标的电力市场与碳市场协同发展研究[J]. 中国电力企业管理, 2021(10): 50-54.
- [2] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于加快建设全国统一电力市场体系的指导意见[J]. 大众用电, 2022, 37(2): 8-10.
- [3] 我国非化石能源发电装机容量占比超 50% [J]. 电力勘测设计, 2023(6): 60.
- [4] 今年非化石能源发电装机占比将过半[J]. 中国环境监察, 2023(4): 4.
- [5] 陈皓勇. 碳中和目标下的电力系统和电力市场转型[J]. 中国电力企业管理, 2020(28): 19-23.
- [6] 朱继忠, 冯禹清, 谢平平, 等. 考虑可再生能源配额制的中国电力市场均衡模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 168-15.
- [7] Lin, J., Kahrl, F., Yuan, J., Chen, Q. and Liu, X. (2019) Economic and Carbon Emission Impacts of Electricity Market Transition in China: A Case Study of Guangdong Province. *Applied Energy*, **238**, 1093-1107. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.128>
- [8] 刘自敏, 朱朋虎, 杨丹, 等. 交叉补贴、工业电力降费与碳价格机制设计[J]. 经济学(季刊), 2020, 19(2): 709-730.
- [9] 刘秋华, 袁浩, 杨争林, 等. 可再生能源配额制下绿色证书补偿辅助服务方案探讨[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(6): 1-8.
- [10] 张翔, 陈政, 马子明, 等. 适应可再生能源配额制的电力市场交易体系研究[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2682-2690.
- [11] 蒋金荷. 碳定价机制最新进展及对中国碳市场发展建议[J]. 价格理论与实践, 2022(2): 26-30, 90.
- [12] 邓盛盛, 陈皓勇, 肖东亮, 等. 考虑碳市场交易的寡头电力市场均衡分析[J]. 南方电网技术, 2024, 18(1): 143-152. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20230201.0954.003.html>, 2023-11-02.
- [13] 范玉宏, 丁珩, 张维, 等. 电力现货市场建设关键问题研究[J]. 湖北电力, 2018, 42(2): 45-50.
- [14] Zhu, W., Wang, C., Wang, L., Wu, X. and Yue, Q. (2022) Analysis of Energy-Saving and Environmental Benefits from Power Structure Adjustment in China: A Comparative Study from 2020 to 2060. *Sustainable Production and Consumption*, **31**, 750-761. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.03.030>
- [15] Afshar, K., Ghiasvand, F.S. and Bigdeli, N. (2018) Optimal Bidding Strategy of Wind Power Producers in Pay-as-Bid Power Markets. *Renewable Energy*, **127**, 575-586. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.015>
- [16] Wang, T., Gong, Y. and Jiang, C. (2014) A Review on Promoting Share of Renewable Energy by Green-Trading Mechanisms in Power System. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **40**, 923-929. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.011>
- [17] 刘阳, 刘继春, 杨语嫣. 考虑欧盟碳边境调节机制的碳-电融合市场各主体决策行为研究[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3111-3122.
- [18] 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. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20230907.1429.004.html>, 2023-10-30.

- 
- [19] 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. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20221020.1618.005.html>, 2023-10-30.
- [20] 董福贵, 郗来昊, 孟子航. 考虑碳交易的电力现货市场出清多阶段优化模型研究[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 79-90. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0570>, 2023-10-30.
- [21] 尚楠, 冷媛, 陈政, 等. 考虑现货电能量交易的发用电主体碳排放权交易决策模型[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(21): 36-46. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20230824.1042.002.html>, 2023-11-02.
- [22] Chi, Y., Zhao, H., Hu, Y., Yuan, Y. and Pang, Y. (2022) The Impact of Allocation Methods on Carbon Emission Trading under Electricity Marketization Reform in China: A System Dynamics Analysis. *Energy*, **259**, Article 125034. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125034>
- [23] 叶晨, 牟玉亭, 王蓓蓓, 等. 考虑动态碳交易曲线的电-碳市场出清模型及节点边际电价构成机理分析[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 613-624.
- [24] 陈延安, 龚大勇. 2024 年煤炭价格走势预测及区域特点[J]. 煤炭经济研究, 2024, 44(3): 55-59.
- [25] 崔杨, 徐扬, 刘新元, 等. 碳交易耦合下现货电能量市场日前出清方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(1): 66-80. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20231115.1731.011.html>, 2024-09-08.