

考虑绿证和碳排放权交易的电力市场 协同减碳效应与仿真

李军祥, 刘艳丽, 何建佳, 邵馨平

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 为解决电力行业降碳问题, 同时考虑绿证和碳排放权交易机制, 对两种交易机制的协同降碳效果进行定量分析, 建立以各厂商利润最大化为目标的双层博弈模型, 分析可再生能源配额比例和碳减排率对厂商决策行为的影响。针对免费碳配额的分配提出一种新的碳配额核定策略, 并利用 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 条件将双层模型转化为单层模型进行求解。研究表明: 新的碳配额核定策略既可以促进可再生能源发展, 抑制煤电增长, 又可以减少碳排放, 助力“双碳”目标实现。该研究为各厂商联动及通过优化配置资源结构推动能源转型提供了参考。

关键词: 碳减排; 绿证交易市场; 碳排放权交易市场; Stackelberg 博弈; 利润均衡

中图分类号: TM 73

文献标志码: A

Synergistic carbon reduction effect and simulation of electricity market considering the green certificate and carbon emission trading

LI Junxiang, LIU Yanli, HE Jianjia, SHAO Xinping

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to solve the problem of carbon reduction in the power industry, this paper considered both the green certificate and carbon emission trading mechanism, and made a quantitative analysis of the synergistic carbon reduction effect of the two trading mechanisms. A bi-level game model aiming at maximizing the profit of each manufacturer was established to analyze the influence of renewable energy quota ratio and carbon emission reduction rate on the decision-making behavior of manufacturers. A new carbon quota approval strategy was proposed for the allocation of free carbon

收稿日期: 2023-03-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72071130, 71871144); 上海理工大学大学生创新项目(XJ2024137)

第一作者: 李军祥(1971-), 男, 教授。研究方向: 能源降碳、智能电网。E-mail: lijx@usst.edu.cn

通信作者: 何建佳(1981-), 男, 教授。研究方向: 管理科学、供应链管理。E-mail: hejianjia@usst.edu.cn

引文格式: 李军祥, 刘艳丽, 何建佳, 等. 考虑绿证和碳排放权交易的电力市场协同减碳效应与仿真[J]. 上海理工大学学报, 2024, 46(4): 464-474. DOI: 10.13255/j.cnki.jusst.20230306002

Citation: LI Junxiang, LIU Yanli, HE Jianjia, et al. Synergistic carbon reduction effect and simulation of electricity market considering the green certificate and carbon emission trading[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2024, 46(4): 464-474.

allowances, and Karush-Kuhn-Tucker (KKT) condition was used to transform the bi-level model into a single-layer model. The results show that the new carbon quota approval strategy can not only promote the development of renewable energy, restrain the growth of coal power, but also reduce carbon emissions and help to achieve the carbon peaking and carbon neutrality goals. This research provides a reference for the linkage of various manufacturers and the promotion of energy transformation through optimizing the allocation of resource structure.

Keywords: carbon emissions reduction; green certificate trading market; carbon emissions trading market; Stackelberg game; equilibrium of profit

当前,气候变化问题已引起世界各国和社会各界的普遍重视,并成为众多学者讨论的热点问题。习近平主席在第七十五届联合国大会上宣布,中国要努力争取在2030年前二氧化碳排放达到峰值,在2060年前实现碳中和这一重要目标。电力行业作为中国目前最大的碳排放行业,是落实“双碳”目标应重点关注的领域^[1]。为了尽快实现“双碳”目标,国家出台了一系列政策,如可再生能源配额制(renewable portfolio standard, RPS)、绿色证书(简称“绿证”)交易机制(green certificate trading, GCT)和碳排放权交易机制(carbon emission trading, CET)等。围绕上述交易机制,大量学者进行了研究。董福贵等^[2]有针对性地在发电侧设计了一种尽量保证绿证供需平衡的RPS及配套的GCT,有效解决了可再生能源消纳问题。杨柳等^[3]以虚拟电厂碳交易成本及经济成本最小为目标,引入CET,通过构建新型低碳经济调度模型,实现了低碳与经济的协同优化。张磊、徐基光等^[4-5]提出基于GCT的电力系统优化模型,减少系统运行成本的同时促进了可再生能源消纳。但是,上述文献只单独考虑了GCT或CET,未研究两种机制联合运行对系统产生的影响。由于缺乏可再生能源厂商和煤电厂商联动降碳的机制,单独采用某种交易机制,可再生能源消纳和碳减排的效果并不显著,且煤电厂商在生产电力的过程中会产生大量污染物,对社会环境具有负外部性影响^[6],但往往在发电成本中并没有体现这种负外部性。如能设计一种使两者有效融合的机制,或能兼顾两者优势,则可充分挖掘可再生能源消纳和碳减排的潜力。

绿证和碳排放权交易的目的均是为促进节能减排和生态环境可持续发展,绿证交易主要侧重于对可再生能源厂商的激励,而碳排放权交易主

要侧重于对煤电厂商的惩罚。两个交易市场从本质上来讲都是通过市场化手段来对温室气体进行减排,都以总量控制为目标,在一个设定好的总量目标之下,再继续向下细化可再生能源指标或碳配额的分配^[7]。这说明两种交易模式可以协同发展,因此有必要考虑两者的联合市场设计。绿证交易市场和碳排放权交易市场的协同发展一直以来都是备受关注的话题,对两个市场之间的协同机制进行深入探讨,将有助于发挥政府综合调控功能,为“双碳”目标的实现贡献力量^[8]。但是绿证和碳排放权交易市场融合也存在一些难点,如两个市场通过可再生能源厂商和煤电厂商连接,并通过绿证价格、碳价以及众多内生外生变量相互作用,整体研究对象是一个很复杂的系统,需要基于系统的观点进行整体考量。

冯昌森等^[9]提出一种绿证和碳联合交易市场模式,同时基于以太坊平台构建了“去中心化”的双边联合交易市场,目的是保护数据安全和用户隐私。Feng等^[10]基于均衡和系统动力学理论和模型,分析和模拟了GCT和CET对电力市场的双重影响,目的是证实两种制度在中国具有激励兼容性。杨雪等^[11]提出基于区块链的绿证和碳交易市场联合激励机制,目的是激励可再生能源交易。苏宜强等^[12]建立了基于碳交易成本和绿证交易成本的源-荷互动优化调度模型,目的是实现发电侧资源及多种柔性负荷资源的优化分配。虽然上述文献对联合交易市场进行了相关研究,但都存在一个共性问题,即未从定量角度对两种交易机制的协同降碳效果进行深入细致的分析。此外,碳交易市场的高效活跃运行必须以碳交易政策的明确制定与规划为基础,而碳配额分配方式又是碳交易政策设计的基础,如何保证碳配额分配公正合理,是碳市场建设工作的重中之重。Kong等^[13]

使用 DEA 模型和熵值法，基于公平和效率原则，对我国碳配额分配进行了省域和区域两个角度的分析。巫瑞等^[14] 基于历史法和基准法两种碳配额分配方式构建碳减排费用不同承担模式的博弈模型，对比分析了两种方式对碳减排的影响。徐健腾等^[15] 通过构建历史法和基准线碳配额分配方式下企业减排运作决策的鲁棒优化模型，探索了两种方式对企业减排运作策略及利润和碳排放的影响。上述文献有关于免费碳配额分配方式的研究主要集中于历史法与基准线法两种形式，鲜有研究将免费碳配额分配与绿证交易相结合展开分析。

针对上述问题，首先，本文建立以各厂商利润最大化为目标的双层博弈模型，对绿证和碳排放权交易的协同降碳效果进行定量分析，并探究了 RPS 比例和碳减排率对厂商决策行为的影响。其次，针对免费碳配额的分配，提出一种新的碳配额核定策略，即将某个煤电厂商绿证购买量占所有煤电厂商绿证购买总量的比例看作其获得免费碳配额的比例，实现了碳交易市场和绿证交易市场的有效联动。最后，运用 KKT 条件将双层模型转化为单层模型，运用 Matlab 软件里的 fmincon 函数对模型进行求解，通过仿真分析验证了本文所提碳配额核定策略的有效性，以期为联合交易市场的降碳问题提供参考。

1 模型概述

1.1 模型假设

a. 绿证交易市场：(a) 只分析可再生能源厂商

和煤电厂商之间进行的绿证交易；(b) 仅考虑绿证交易现货市场，且规定绿证不能存储；(c) 可再生能源厂商每生产一单位绿色电力，就会获得一单位绿证；(d) 绿证均通过绿证认购平台进行交易。

b. 碳排放权交易市场：(a) 只考虑碳排放权交易现货市场，且规定碳排放权不能存储；(b) 仅考虑煤电厂商间的碳排放权交易，不考虑煤电厂商和其他主体间的碳排放权交易；(c) 各煤电厂商通过统一的碳排放权交易平台进行碳配额买卖，且规定碳配额买入价和卖出价相同，平台不从中赚取差价。

1.2 模型框架

中国的能源结构以煤炭为主，60% 的电力来源于燃煤发电^[16]，因此，本文选取煤电厂商作为研究对象。假设在某区域电力系统中共有 $n+1$ 个发电厂商，其中包括 n 个煤电厂商和 1 个大型可再生能源厂商。在资源有限的条件下，为了实现自身利润最大化，各发电厂商通过制定战略积极参与市场竞争。政府在该区域同时实施可再生能源配额制、绿证交易机制和碳排放权交易机制，在电力市场的基础上，可再生能源配额制的实施使得绿证交易市场得以衍生，同样，碳排放权交易机制的实施也衍生出了碳排放权交易市场。本文的模型框架如图 1 所示。在绿证交易市场上，可再生能源厂商与多个煤电厂商间进行绿证交易，构成一主多从博弈；在碳排放权交易市场上，多个煤电厂商内部进行碳配额交易，构成多主多从博弈。因此，本文是一个双层博弈模型，下面将对该博弈模型进行详细分析。

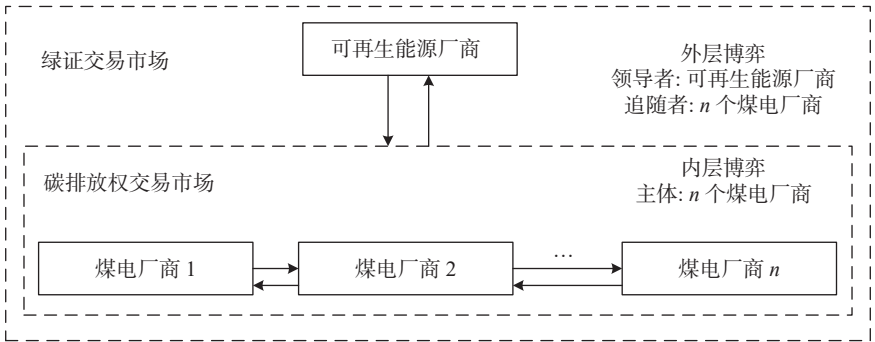


图 1 模型框架

Fig.1 Model framework

在绿证交易市场上，交易主体是可再生能源厂商和煤电厂商。拥有绿色电力生产技术的可再生能源厂商与缺乏绿色电力生产技术的煤电厂

商，根据各自需求积极参与绿证交易。二者在电力市场上是竞争关系，在绿证交易市场上又是供给关系。可再生能源厂商作为绿色电力生产者及

绿证供给者,在制度上享有优势,扮演领导者角色,能够通过调整自身发电量,影响市场上绿证的供需关系从而调整绿证价格。而煤电厂商为了完成 RPS 比例要求,需要在市场上购买绿证,如果未完成任务将会面临高额罚金,且罚金远高于绿证价格,处于制度劣势,属于市场上的追随者^[17]。由此可知,可再生能源厂商和煤电厂商的行为模式构成了 Stackelberg 模型。其中 Stackelberg 博弈的各方均以追求自身利益最大化为目标,是具有独立决策权的决策者^[18]。在碳排放权交易市场中,交易主体是煤电厂商。各煤电厂商除了在绿证交易市场上向可再生能源厂商购买绿证,同时还需要在碳排放权交易市场上根据自身需求进行碳配额交易。碳排放权交易机制所增加的成本是所有煤电厂商在电力市场上作出投标决策时都必须要考虑的因素。煤电厂商可以通过交易碳配额来增加利润,但当他们的排放量超过其分配配额时,就必须支付碳排放费用^[19]。政策强制规定每个煤电厂商都必须完成碳减排任务,免费碳配额较低的煤电厂商将缺少必要的碳排放权,为了避免高额罚金,必须从市场中购买碳配额,在制度上处于劣势,属于市场上的追随者。而自身具有较高碳配额的煤电厂商,作为碳配额的供给者,处于领导者地位,可以在市场上出售富余数量的碳配额进行获利。因此,各煤电厂商在碳排放权交易市场上也构成了博弈。综上,煤电厂商和可再生能源厂商之间构成了双层博弈关系。

假设可再生能源厂商和煤电厂商是理性经济人,均以追求自身利润最大化为目标。可再生能源厂商的利润因为出售绿证得以增加,于是厂商会加大对可再生能源装机的投入,可再生能源电力供给量相应增多,进而可再生能源电力在市场上的占比得以提高。尽管需要购买碳配额的煤电厂商和出售富余碳配额的煤电厂商交易碳配额所产生的收支最终会相互抵消,但是购买绿证会降低煤电厂商整体可获得的利润,因此,煤电厂商会减少对化石能源装机的投资,导致煤电供给量减少,进而化石能源电力在市场上的占比会逐渐降低^[20]。可见,两种交易机制的实施,通过影响可再生能源和化石能源的电力供给,可以达到调整电源结构和实现碳减排的目的。在“双碳”目标的大背景下,由于可再生能源清洁无污染的特性,政府当然希望全部使用可再生能源进行供

电,这样就可以实现零排放。但由于风光等出力不稳定,具有间歇性,可再生能源厂商很难单独满足用户的电力需求。因此,本文假定由可再生能源厂商和煤电厂商联合进行供电,优先消纳可再生能源电力,以满足用户的用电需求。

2 双层博弈模型

市场通过供需关系决定用户购买电力时的市场统一价格 P_e 。在一个交易时段内,价格将由反需求函数唯一确定^[21],其表达式为

$$P_e = u - vD \quad (1)$$

式中: u , v 为反需求函数参数,且均大于 0; D 表示该区域内所有用户在当前交易周期内的总用电量。

2.1 碳排放权交易模型

碳排放权交易不同于一般的商品交易,其交易结果会对整个社会的碳排放量产生直接的影响。积极、高效的碳排放权交易市场可以更好地对碳资源进行优化配置^[22]。在内层模型中,参与博弈的主体是 n 个煤电厂商,其内部进行碳排放权交易,目的是使最终的总碳排放量不超过政府规定的碳配额上限。各煤电厂商均以自身利润最大化为目标,构成了多主多从的 Stackelberg 博弈模型。煤电厂商 i ($i = 1, 2, \dots, n$) 的利润主要由 5 部分组成:售电收入 $R_{c,i}$ 、发电成本 $C_{c,i}$ 、购买绿证成本 $C_{g,i}$ 、碳交易成本 $C_{q,i}$ 和减排成本 $C_{e,i}$, 即煤电厂商 i 的利润 $W_{c,i}$ 为

$$W_{c,i} = R_{c,i} - C_{c,i} - C_{g,i} - C_{q,i} - C_{e,i} \quad (2)$$

a. 售电收入。

煤电厂商 i 主要通过向用户出售化石能源电力获利,其售电收入 $R_{c,i}$ 为

$$R_{c,i} = P_e x_i \quad (3)$$

式中, x_i 表示用户向煤电厂商 i 购入的电量。

b. 发电成本。

煤电厂商 i 的发电成本 $C_{c,i}$ 可以通过成本函数进行表达。通常成本函数是一个单调递增的严格凸函数,目前普遍采用的成本函数是二次函数^[23],即

$$C_{c,i} = a_{c,i}(q_{c,i})^2 + b_{c,i}q_{c,i} + c_{c,i} \quad (4)$$

式中: $a_{c,i}$, $b_{c,i}$ 为煤电厂商 i 二次项与一次项的成本系数, $c_{c,i}$ 为煤电厂商 i 的固定成本,三者都是预先给定的参数,且满足 $a_{c,i} > 0$, $b_{c,i} \geq 0$, $c_{c,i} \geq 0$; $q_{c,i}$ 为煤电厂商 i 的发电量。

c. 购买绿证成本。

RPS 要求所有类型发电厂商供给的电力中必须包含一定比例的绿色电力。由于煤电厂商缺乏可再生能源发电技术,面临着无法满足配额要求的巨额罚款,为了实现自身利润最大化,必须从市场上购买相应数量的绿证来避免高额罚金。煤电厂商*i*购买绿证的成本 $C_{g,i}$ 可以表示为

$$C_{g,i} = P_g q_{g,i} \quad (5)$$

式中: $q_{g,i}$ 表示煤电厂商*i*购买的绿证数量; P_g 表示绿证价格,且规定此价格远低于未完成配额要求时所交的罚金。

d. 碳配额交易成本。

若免费碳配额多于碳排放量,则煤电厂商可以将富余的碳配额进行出售来获取收益,反之,则煤电厂商为了避免高额罚金必须向其他碳配额富余的煤电厂商购买碳配额。这里将碳配额交易量统一看作成本,则煤电厂商*i*进行碳配额交易的成本 $C_{q,i}$ 可以表示为

$$C_{q,i} = P_a \left(\omega_{c,i} q_{c,i} - Q_{co_2} q_{g,i} \left/ \sum_{i=1}^n q_{g,i} - \delta_{c,i} q_{c,i} \right. \right) \quad (6)$$

式中: P_a 表示碳排放权交易价格; $\omega_{c,i}$ 表示煤电厂商*i*单位煤电所产生的二氧化碳排放量,由于各发电厂商前期设备投资成本不同,不同煤电厂商其单位碳排放量也不同; Q_{co_2} 表示政府分配给该区域的碳配额总量; $\delta_{c,i}$ 表示煤电厂商*i*的减排率。

e. 减排成本。

在实施“双碳”目标的同时,各煤电厂商也在大力发展节能减排技术,以降低成本。边际减排成本较低的煤电厂商会选择增加碳减排量,节余下来的碳配额可以用于转让和销售,从而获得相应的收益;而对于边际减排成本较高的煤电厂商来说,为了避免高额罚金,会选择购买碳配额,以抵消其过剩的碳排放。通过碳排放权交易,可使得碳配额从边际减排成本较低的煤电厂商转移到边际减排成本较高的煤电厂商,不仅能降低减排成本,还可以实现资源的合理配置。煤电厂商*i*的减排成本 $C_{e,i}$ 为

$$C_{e,i} = \delta_{c,i} q_{c,i} \pi_{c,i} \quad (7)$$

式中, $\pi_{c,i}$ 表示煤电厂商*i*处理单位二氧化碳所需的减排成本。

煤电厂商*i*的发电量受到机组数量和安全工作区间的约束,需要在一定区间范围内,即

$$q_c^{\min} \leq q_{c,i} \leq q_c^{\max} \quad (8)$$

式中, $q_c^{\min}$, $q_c^{\max}$ 分别为煤电厂商*i*可以发出的最小与最大电量。

煤电厂商可以选择只购买刚好满足自身可再生能源配额需求的绿证量,也可以选择购买超过自身可再生能源配额需求的绿证量,以此来获取更多的免费碳配额。超额消纳绿证的好处有两个方面,对于碳配额富余的煤电厂商来说可以通过出售碳配额进行获利,对于碳配额不足的煤电厂商来说可以节约碳交易成本。综上,煤电厂商的绿证购买量应大于等于其自身的配额需求,即

$$q_{g,i} \geq \alpha_{c,i} q_{c,i} \quad (9)$$

式中, $\alpha_{c,i}$ 表示煤电厂商*i*需要满足的可再生能源配额比例。

系统中碳排放总量等于*n*个煤电厂商的碳排放量之和,为充分发挥 CET 的作用,需要满足系统内碳排放总量不超过政府分配的总碳配额量,即

$$\sum_{i=1}^n \omega_{c,i} q_{c,i} \leq Q_{co_2} \quad (10)$$

煤电厂商*i*的目标是实现自身利润最大化,则最优决策模型为

$$\begin{aligned} & \max W_{c,i} \\ & \text{s.t.} \begin{cases} q_{g,i} \geq \alpha_{c,i} q_{c,i} \\ q_c^{\min} \leq q_{c,i} \leq q_c^{\max} \\ \sum_{i=1}^n \omega_{c,i} q_{c,i} \leq Q_{co_2} \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

2.2 绿证交易模型

众所周知,各发电站的电力都集中到了大电网,消费者很难分辨出每个电力的实际来源,只有在签订了交易合同的情况下才能分辨出来。如果强制和所谓的物理交易进行严格对应,一方面会妨碍绿证的交易,对于可再生能源厂商来说,超过自身配额要求的可再生能源电量所对应的证书权益无法转让;另一方面,电力交易和绿证交易捆绑太过紧密,不利于各交易市场的活跃^[24]。同时,电力交易市场也将成为多目标市场,其交易规则将更加复杂。因此,本文采用证电分离方式进行绿证交易,仅考虑一个大型可再生能源厂商,其利润由售电收入 R_R 、发电成本 C_R 和出售绿证的收入 R_g 组成,则利润 W_R 可表示为

$$W_R = R_R - C_R + R_g \quad (12)$$

a. 售电收入。

为了积极响应国家号召,促进风光等可再生能源消纳,用户优先从可再生能源厂商处购买电力,但可再生能源厂商发电量不足以满足用户需求,所以不足的部分由煤电厂商进行供给,通过多能互补来满足用户用电需求。其中,可再生能源厂商的售电收入 R_R 为

$$R_R = P_c q_R \quad (13)$$

式中, q_R 表示可再生能源厂商的发电量。

受限于自然资源和技术,可再生能源厂商的发电量在一定范围内波动,即

$$q_R^{\min} \leq q_R \leq q_R^{\max} \quad (14)$$

式中, $q_R^{\min}$ 和 $q_R^{\max}$ 分别表示可再生能源厂商的最小发电量和最大发电量。

虽然可再生能源发电具有间歇性和不确定性,但是目前已经可以通过一定的技术手段,如电力预测和抽水蓄能等方式实现可再生能源电力的确定性转换。因此,本文假设可再生能源出力是稳定的。另外,本文的研究对象是一个大型可再生能源厂商和 n 个煤电厂商,均以自身利润最大化为目标,主要研究其供给策略,重点不在于用户侧的需求刻画。因此,本文简单地将用户侧视为整体,用其总需求 D 进行刻画。在随后的研究中,将对用户侧需求作更详细的刻画。需要特别注意的一点是,尽管为了响应国家号召,用户会优先从可再生能源厂商处购买可再生电力,但站在可再生能源厂商视角,其需要时刻进行成本控制以追求自身利润最大化,故并不一定是生产的可再生电力越多越好。

b. 发电成本。

不同于传统煤电厂商发电,可再生能源厂商在发电时虽然不存在燃料消耗成本问题,但因其具有强烈的间歇性和不确定性,比起煤电厂商来说需要更多的运行维护和备用成本^[25],这些成本组成了可再生能源的发电成本。且随着设备使用年限增加,设备逐渐老化,其单位运行维护和备用成本会逐渐增加,不宜用固定单位成本描述,因此,发电成本不适合用线性函数刻画。根据文献[26-27],不妨采用凸增二次函数刻画其发电成本 C_R ,即

$$C_R = a_R q_R^2 + b_R q_R + c_R \quad (15)$$

式中, a_R , b_R 和 c_R 是预先确定的成本参数,且满足 $a_R > 0$, $b_R \geq 0$, $c_R \geq 0$; C_R 的导函数 $2a_R q_R + b_R$ 表

示单位运行维护和备用成本,是单调递增的线性函数,符合可再生能源单位运行维护和备用成本增加的特性。

c. 出售绿证收入。

可再生能源厂商由于具备较好的绿色电力生产能力,在完成规定的配额任务后,可以在市场上出售富余数量的绿证来获取收入。可再生能源出售的绿证数量与所有煤电厂商购买的绿证总量应相等,则其获得的绿证收入 R_g 为

$$R_g = P_g \sum_{i=1}^n q_{g,i} \quad (16)$$

用 α_R 表示可再生能源厂商自身需要满足的可再生能源配额比例,在绿证交易市场上,可再生能源厂商在满足自身需求的同时可以将多余的绿证卖出进行获利,其可以交易的绿证数量最多为 $(1 - \alpha_R)q_R$ 。由于假设区域市场上只存在一个可再生能源厂商,其供应了市场上全部的绿证,因此煤电厂商总的绿证购买量不能够超过该可再生能源厂商可以出售的最大绿证数量,即

$$\sum_{i=1}^n q_{g,i} \leq (1 - \alpha_R)q_R \quad (17)$$

为了保障居民正常生活和尽可能提高用户满意度,要求该区域内发电厂商的总发电量不少于区域内用户的总需求量 D ,即

$$q_R + \sum_{i=1}^n q_{c,i} \geq D \quad (18)$$

式中, $D \geq q_R^{\max}$ 。

用户只能从可再生能源厂商和煤电厂商处购买电力,所以各厂商的总售电量等于用户的电力需求总量,即

$$q_R + \sum_{i=1}^n x_i = D \quad (19)$$

与煤电厂商一样,可再生能源厂商的目标也是实现自身利润最大化,其最优决策模型为

$$\begin{aligned} & \max W_R \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^n q_{g,i} \leq (1 - \alpha_R)q_R \\ q_R^{\min} \leq q_R \leq q_R^{\max} \\ q_R + \sum_{i=1}^n q_{c,i} \geq D \geq q_R^{\max} \\ q_R + \sum_{i=1}^n x_i = D \end{cases} \end{aligned} \quad (20)$$

2.3 模型求解

在求解双层优化问题时，通常的技巧是把该问题等价转化为单层问题，然后再把它当作一个标准优化问题去求解。这里有很多转化技巧，其中最常用的一个方法就是把内层的凸优化问题用Karush-Kuhn-Tucker(KKT)条件来代替^[28-29]。该约简策略在经典优化和进化计算文献中均有广泛的应用。通过对所建立的双层模型分析可知，内层优化问题是凸连续可微的，可以使用KKT条件进行替换。这种方法是把内层模型转换为外层模型的附加约束条件，构成单层模型。转化后的模型优化目标只包含原有外层模型的优化目标，而原内层模型的优化目标和约束条件则以约束的形式存在^[30]。双层规划模型转化求解流程如图2所示。转化后得到的单层模型可在Matlab软件中使用fmincon优化函数进行求解。本文的仿真环境如下：硬件配置为Intel i5，主频1.80 GHz，内存12 GB；软件配置为Windows11 64 位操作系统；模型求解使用Matlab R2021a 编程实现。

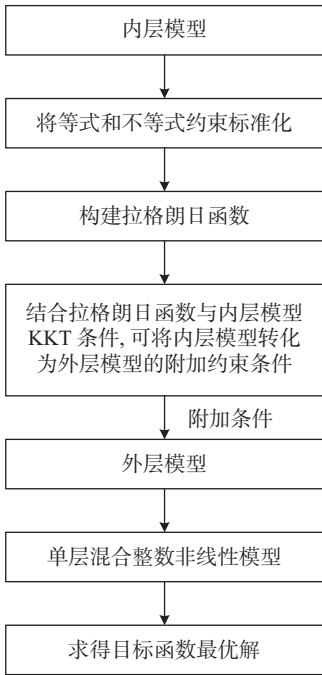


图2 双层规划转化求解流程

Fig.2 Solution process of the two-layer programming transformation

3 算例分析

3.1 基础数据

本算例考虑两个煤电厂商，分别为煤电厂商1和煤电厂商2，除此之外还有一个大型可再生能源厂商。各厂商发电成本参数^[31]设置见表1，其他参数详见表2和表3。在各发电厂商和用户的相互博弈过程中，用户根据电网电价调整自身用电策略，发电厂商则通过电价引导用户选择最优的购电方案，鼓励用户参与电量交易，提高售电利益。随着配额比例升高，煤电厂商会削减自身发电量，导致市场上总供电量减少，电价随之升高。本文规定当可再生能源配额比例不超过20%时，电价为0.6元/(kW·h)；当配额比例超过20%但小于30%时，电价为0.7元/(kW·h)；当配额比例介于30%~35%之间时，电价为0.9元/(kW·h)；当配额比例为40%时，电价为1元/(kW·h)。

表1 发电成本参数

Tab.1 Generation cost parameter

发电厂商	二次项成本系数	一次项成本系数	固定成本	最小发电量/MW	最大发电量/MW
煤电厂商1	0.061	25.265	0	100	10000
煤电厂商2	0.082	26.471	0	100	10000
可再生能源厂商	0.085	32	0	0	500

表2 初始参数设置1

Tab.2 Initial parameter setting 1

$\alpha_{c,1}$	$\alpha_{c,2}$	$\delta_{c,1}$	$\delta_{c,2}$	α_R
0.1	0.1	0.1	0.15	0.1

3.2 仿真结果分析

合理设置可再生能源配额比例有利于系统的经济运行，配额系数太小不利于发挥RPS和GCT制度促进系统消纳可再生能源的激励作用，并且还会降低系统对绿证基础交易价格的敏感度。同理，系数过大对系统的经济运行也存在着不利影响^[32]。由图3可知，随着政府逐渐提高RPS比例，煤电厂商的总利润会因为购买绿证的成本增加而逐渐减少，刚开始减少得较快，之后

表3 初始参数设置2

Tab.3 Initial parameter setting 2

$P_e/(\text{元}\cdot\text{MW}^{-1})$	$\omega_{c,1}/(\text{t}\cdot\text{MW}^{-1})$	$\omega_{c,2}/(\text{t}\cdot\text{MW}^{-1})$	u	v	Q_{CO_2}/t	$\pi_1/(\text{元}\cdot\text{t}^{-1})$	$\pi_2/(\text{元}\cdot\text{t}^{-1})$
600	0.7949	0.7827	1.5	0.00045	500	120	70

减少速度随着比例的增大而逐渐减缓。可再生能源厂商的利润则会因为出售绿证而逐渐增加，同样刚开始增加得较快，之后随着 RPS 比例的增加而逐步减缓，尤其是当 RPS 比例大于 25% 以后，其利润增加速度明显变缓。这是因为配额比例较低时市场上的可再生能源占比较低，绿证价格偏高，随着配额比例不断升高，可再生能源发电量越来越多，绿证价格得以下降最终趋于稳定。这启示政府需要合理设置 RPS 比例，以使市场上各发电厂商尽可能实现自身收益最大化，激励各主体积极参与节能减排，从而达到最佳的降碳效果。

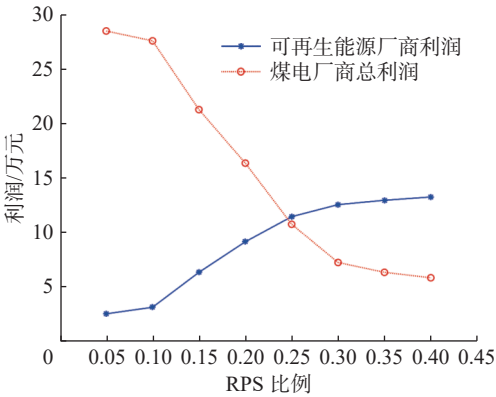


图 3 各发电厂商利润随 RPS 比例的变化情况
Fig.3 Changes in the profit of each power plant company with RPS ratio

由图 4 可知，随着 RPS 比例升高，可再生能源厂商的发电量和绿证价格的变化趋势大致相同，走势大致为先上升，后下降，最后维持高位不变。原因是初期可再生能源配额制和绿证交易机制的出台，煤电厂商对绿证的需求量较大，导致市场上的绿证供不应求，绿证价格迅速上升。随着绿证价格的升高，可再生能源厂商利润空间增加，促使可再生能源投资增加，导致可再生能源发电量上升，进而绿证市场中的绿证供应量变得充裕，绿证价格回落。之后可再生能源厂商通过减少自身发电量来控制绿证供给量，使绿证价格维持在一定水平，以此实现自身利润最大化。通过不断进行供需调整，最终可再生能源发电量、绿证购买量和绿证价格达到一个均衡状态。同时，由图 5 可知，由于购买碳排放权的煤电厂商发电量大于出售碳排放权的煤电厂商发电量，随着可再生能源配额比例的升高，碳排放权买方煤电厂商为了平衡收支，会通过减少自身发电量来降低绿证和碳排放权交易成本，所以煤电厂商总发电量呈现出递减的趋势。

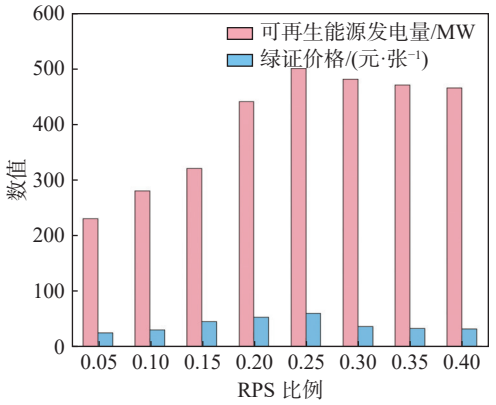


图 4 可再生能源发电量及绿证价格随 RPS 比例的变化情况
Fig.4 Changes in the renewable energy generation and green certificate prices with RPS ratio

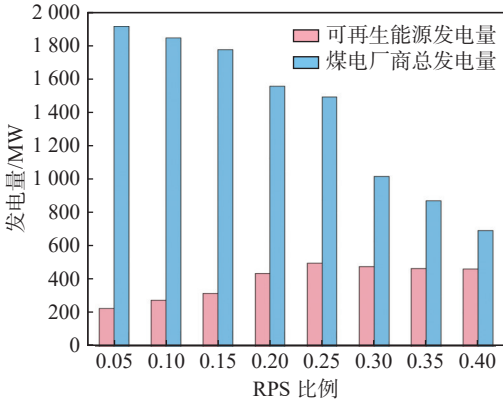


图 5 各厂商发电量随 RPS 比例的变化情况
Fig.5 Variation of the power generation by vendor with RPS ratio

由图 6 可知，煤电厂商 1 碳减排成本较高，其利润随着碳减排率的增加而逐渐减少；煤电厂商 2 碳减排成本较低，利润随着碳减排率的增加而逐渐增加。这说明对于单位煤电碳减排成本高的煤电厂商来说，节能减排未必是一个好途径，过高的碳减排成本会增加煤电厂商的总成本，导致其利润下降。这种情况下煤电厂商可以通过购买超过自身可再生能源配额需求的绿证量来获得更多的免费碳配额，这样自身需要购买的碳配额量就会大大减少，对应的降碳成本也随之减少。此举既满足了自身的 RPS 比例要求，又减少了降碳支出，可谓一举两得。而对于碳减排成本低的煤电厂商来说，可通过加大资金投入进行技术研发，提高自身减排技术，并通过技术手段使自身的碳排放量保持在较低的水平。随着碳减排率的增加，厂商的减排能力体现得越来越明显。在大部分碳排放被通过自身技术处理后，煤电厂商 2 只需要购买满足自身可再生能源配额需求的绿证量

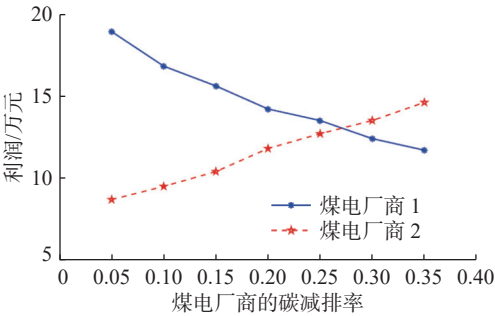


图 6 煤电厂商利润随碳减排率的变化情况

Fig.6 Changes in the profits of coal power manufacturers with carbon emission reduction rates

即可，同时还可以将富余的碳配额出售来获取收益，以此弥补减排技术成本的投入，实现自身利润最大化。

另外，本文还设置了两场景来进行对比分析，验证了所提新碳配额核定策略较一般分配方法在降碳方面更加行之有效。

场景 1：采用固定比例法(均分)进行免费碳配额分配。

场景 2：采用新的碳配额核定策略进行免费碳配额分配。

由表 4 可知，相较场景 1，场景 2 下煤电厂商的碳排放量更少，获得的总利润更高，这是因为场景 2 下免费碳配额分配量和绿证购买量挂钩，煤电厂商多购买绿证的成本比节约的碳交易成本少，厂商整体上是获利的。而场景 1 下各厂商获得的免费碳配额是固定的，不足的配额只能通过购买碳配额一种方式来满足，成本较场景 2 高得多，因此场景 2 煤电厂商的总利润更高。煤电厂商的碳排放量由其发电量决定，在场景 2 中，由于采用了新的碳配额核定策略，一些煤电厂商获得的免费碳配额相较场景 1 少，为了降低各项成本支出，煤电厂商会选择减少自身发电量。同样，免费碳配额多的煤电厂商因为受 RPS 比例的限制，考虑到成本原因也不会大量发电，最终使得煤电总发电量少于场景 1，因此，其碳排放量较场景 1 少。采用绿证购买量比例来进行免费碳配

表 4 两种场景的对比分析

Tab.4 Comparative analysis of the two scenarios

场景	煤电总 利润/万元	碳排放 量/t	可再生能源 发电量/MW	可再生能源 发电量/总发电量	碳价/ (元·t ⁻¹)
场景1	18.9	1 864	165	0.07	62.7
场景2	27.6	1 165	280	0.13	54.5

额分配的方法可使煤电厂商积极购买绿证，鼓励可再生能源厂商加大装机投资，使得可再生能源发电量在电力市场上的占比逐渐提高，有利于充分发挥可再生能源清洁无污染的特性，减少碳排放。同时，碳交易市场中的碳配额购买需求减少，导致碳价也随之下降。

此外，文献 [11] 虽然也是研究两个市场对电力供应结构和碳减排的影响，但它仅从定性角度对其进行分析，通过建立绿证和碳排放权交易市场的均衡和系统动力学模型，分析了其内在联系。仿真结果表明，在绿证和碳排放权交易耦合市场机制下，可以有效调整供电结构，控制碳排放，这些结论在本文中都得以体现。除此之外，本文还提出了一种新的碳配额核定策略，不仅能促进煤电厂商积极购买绿证，还能降低其碳交易成本，实现绿证和碳排放权交易市场的有效联动。另外，本文以各厂商利润最大化为目标，从定量角度探究了 RPS 比例对各厂商利润、发电量和绿证价格的影响，有助于为政府制定合适的配额比例提供参考。同时，还探究了碳减排率与煤电厂商利润之间的关系，可以指导其在减排和购买碳配额之间作出更好的选择。

4 结 论

在“双碳”目标的大背景下，针对电力行业的降碳问题，本文将绿证和碳排放权两种交易机制同时进行考虑，构建了以各厂商利润最大化为目标的双层博弈模型，其中内层为碳排放权交易，外层为绿证交易。利用 KKT 条件将双层模型转化为单层模型，使用 fmincon 优化函数对模型进行求解。另外，针对免费碳配额的分配问题，提出了一种新的碳配额核定策略，仿真结果表明：

a. 各厂商利润会随 RPS 比例的变化而变化，仿真结果发现配额权重过大过小对系统的经济运行都存在着不利影响，只有合理设置 RPS 比例才能保证系统的经济运行，发挥其制度的优势。

b. 碳减排率和单位减排成本会影响煤电厂商的决策行为。为了实现自身利益最大化，单位碳减排成本高的煤电厂商会选择超额购买绿证以减少其碳交易成本，而单位碳减排成本低的煤电厂商则会选择提高减排技术来抵消碳交易成本。

c. 新的碳配额核定策略既可以促进绿证超额消

纳,提高可再生能源在电力市场上的占比,又可以通过绿证成本和碳交易成本的关系来制约煤电厂商的发电量,减少碳排放量。

在绿证和碳排放权交易市场有效运行的前提下,可再生能源厂商和煤电厂商之间交易绿证,以及煤电厂商之间交易碳排放权,一方面可以激励可再生能源厂商加大可再生能源装机投资,另一方面能够抑制煤电厂商发电量的增长,中国的电力结构得以调整,有望在2030年实现可再生能源消费占能源总消费的20%的目标。同时,可再生能源发电量比例的提升和煤电发电量比例的下降会减少碳排放,推动国家碳减排目标早日实现。本文研究成果对电力行业降碳具有一定的借鉴价值,但仍存在不足之处。例如,只考虑了用户一天总的电力需求量,未考虑各时段用户电力需求量的变化。未来将根据时段对用户电力需求量进行调整。此外,可再生能源发电的不确定性亦是今后要关注的重点,将在后续研究中进一步综合考虑这些因素。

参考文献:

- [1] 李兴,刘自敏,杨丹,等. 电力市场效率评估与碳市场价格设计——基于电碳市场关联视角下的传导率估计[J]. 中国工业经济, 2022, (1): 132–150.
- [2] 董福贵,时磊. 可再生能源配额制及绿色证书交易机制设计及仿真[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 113–121.
- [3] 杨柳,张超,蒋勃,等. 考虑用户满意度的虚拟电厂热电联合低碳经济调度模型[J]. 热力发电, 2019, 48(9): 40–45.
- [4] 张磊,向紫藤,余朋军,等. 基于绿色证书交易机制的含风电场电力系统动态环境经济调度[J]. 智慧电力, 2021, 49(10): 75–82.
- [5] 徐基光. 基于绿色证书交易的含风电系统低碳经济调度[J]. 中国电力, 2016, 49(7): 145–150.
- [6] 于波,丁平. 煤炭资源利用过程中对城市环境负外部性的影响[J]. 环境工程, 2016, 34(S1): 1166–1168.
- [7] 崔杨,沈卓,王铮,等. 考虑绿证-碳排等价交互机制的区域综合能源系统绿色调度[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(12): 4508–4517.
- [8] 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.
- [9] 冯昌森,谢方锐,文福拴,等. 基于智能合约的绿证和碳联合交易市场的设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(23): 1–11.
- [10] FENG T T, YANG Y S, YANG Y H. What will happen to the power supply structure and CO₂ emissions reduction when TGC meets CET in the electricity market in China?[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 92: 121–132.
- [11] 杨雪,金孝俊,王海洋,等. 基于区块链的绿证和碳交易市场联合激励机制[J]. 电力建设, 2022, 43(6): 24–33.
- [12] 苏宜强,刘盛松. 计及碳交易-绿证的“源-荷”互动优化调度策略[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(5): 35–39, 45.
- [13] KONG Y C, ZHAO T, YUAN R, et al. Allocation of carbon emission quotas in Chinese provinces based on equality and efficiency principles[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 211: 222–232.
- [14] 巫瑞,夏西强,曾庆丽. 碳配额分配方式对碳减排影响对比分析[J]. 工业技术经济, 2023, 42(2): 37–47.
- [15] 徐健腾,高莹,柏庆国,等. 不同碳交易配额分配方法下的鲁棒减排运作策略研究[J]. 管理工程学报, 2023, 37(3): 191–200.
- [16] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告(2022)[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2022.
- [17] 刘文君,张莉芳. 可再生能源配额制下的电力市场优化策略研究[J]. 南华大学学报(社会科学版), 2021, 22(1): 71–80.
- [18] WANG Y L, LIU Z, WANG J Y, et al. A Stackelberg game-based approach to transaction optimization for distributed integrated energy system[J]. *Energy*, 2023, 283: 128475.
- [19] LIU D W, LUO Z, QIN J H, et al. Low-carbon dispatch of multi-district integrated energy systems considering carbon emission trading and green certificate trading[J]. *Renewable Energy*, 2023, 218: 119312.
- [20] 张莉芳. 绿色证书和碳排放权交易对中国电力市场的影响机理及政策效果研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2021.
- [21] 安学娜,张少华,李雪. 考虑绿色证书交易的寡头电力市场均衡分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 84–89.
- [22] LIN B Q, JIA Z J. What will China's carbon emission trading market affect with only electricity sector involvement? A CGE based study[J]. *Energy Economics*, 2019, 78: 301–311.
- [23] 吴志强,高岩,王波. “负载-效用”两级均衡下智能电网实时电价定价策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(17): 65–73.
- [24] 张显,王彩霞,谢开,等. “双碳”目标下中国绿色电力市场建设关键问题[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(4): 25–33.
- [25] 李飞,李咸善,鲁明芳,等. 计及配额考核约束的发电商与大用户直购电博弈优化模型[J]. 高电压技术, 2023,

49(1): 128–137.

[26] 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): 168–175.

[27] 张晓辉, 闫柯柯, 卢志刚, 等. 基于碳交易的含风电系统低碳经济调度 [J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2697–2704.

[28] LUO S J, CHEN C M, QIU W Q, et al. Bi-layer optimal planning of rural distribution network based on KKT condition and Big-M method[J]. [Energy Reports](#), 2021, 7: 637–644.

[29] YUAN G X, GAO Y, YE B, et al. Real-time pricing for smart grid with multi-energy microgrids and uncertain loads: a bilevel programming method[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 123: 106206.

[30] 谢雨龙, 罗逸飏, 李智威, 等. 考虑微网新能源经济消纳的共享储能优化配置 [J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4403–4412.

[31] 袁桂丽, 刘培德, 唐福斌, 等. 计及绿色电力证书与碳交易制度的“源–荷”协调优化调度 [J]. 太阳能学报, 2022, 43(6): 190–195.

[32] 刘晓军, 聂凡杰, 杨冬锋, 等. 碳捕集电厂–电转气联合运行模式下考虑绿证–碳交易机制的综合能源系统低碳经济调度 [J]. 电网技术, 2023, 47(6): 2207–2217.

(编辑: 丁红艺)