

# 碳交易政策下绿氢交易市场与电力市场 耦合效应分析

王浩然<sup>1</sup>, 冯天天<sup>1,2,3,✉</sup>, 崔茗莉<sup>1</sup>, 钟诚<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(北京) 经济管理学院, 北京 100083; 2. 自然资源部 资源环境承载力评价重点实验室, 北京 100083;  
3. 国土资源部 国土资源战略研究重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** [目的] 实现“双碳”目标需要充分挖掘企业节能减排的路径和发挥绿色低碳政策工具的作用。绿氢作为清洁能源以其全链路零碳排放的优势成为社会低碳转型的关键, 而碳排放权交易市场是利用市场化机制控制和减少碳排放的重要政策工具。建设碳交易中心氢能产业板块交易机制, 实现碳交易与氢能的耦合对落实“双碳”目标具有极大的推动作用。[方法] 基于此, 文章将构建“绿氢市场-全国碳交易市场-电力市场”耦合机制。进一步利用系统动力学方法对“绿氢市场-全国碳交易市场-电力市场”进行建模仿真, 研究多个市场的交互关系。[结果] 研究发现: 首先, 绿氢市场、碳交易市场与电力市场之间可以通过绿氢认证和碳配额交易实现3个市场的耦合, 通过模拟仿真发现耦合模型具有可行性。其次, 通过基础情景模拟仿真发现多重市场耦合可以促进刺激碳价的升高, 且可以控制火力发电量和绿氢生产量的上升。最后, 提升绿氢认证比例、落后机组淘汰机制和碳配额拍卖机制有助于碳定价机制的形成, 促进绿氢项目规模的扩大和控制火力发电量。[结论] 本研究既丰富绿氢交易模型, 促进绿氢通过参与碳交易获取部分收益, 减缓氢能成本压力, 又通过多市场联动, 发挥碳价的倒逼作用, 促进传统化石制氢和火力发电比例的降低。

**关键词:** 市场耦合协同; 绿氢; 全国碳排放权交易政策; 电力市场; 能源结构调整

中图分类号: TK91; F426

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)03-0032-15

开放科学(资源服务)二维码:



## Analysis of Coupling Effect Between Green Hydrogen Trading Market and Electricity Market Under Carbon Trading Policy

WANG Haoran<sup>1</sup>, FENG Tiantian<sup>1,2,3,✉</sup>, CUI Mingli<sup>1</sup>, ZHONG Cheng<sup>1</sup>

(1. School of Economics and Management, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Carrying Capacity Assessment for Resource and Environment, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China;  
3. Key Laboratory of Strategic Studies, Ministry of Land and Resources, Beijing 100083, China)

**Abstract:** [Introduction] To achieve the "carbon peak and neutrality" goals, the ways for enterprise energy conservation and emission reduction need to fully explored, and the green and low-carbon policy tools should be fully exploited. Green hydrogen, as a clean energy, has become the key to social low-carbon transition thanks to its full link zero carbon emission. Carbon emission rights trading market is a key policy tool to control and reduce carbon emissions by making use of the market-oriented mechanism. Building a carbon trading center hydrogen energy industry trading mechanism to achieve the coupling of carbon trading and hydrogen energy will greatly promote the achieving of the "carbon peak and neutrality" goals. [Method] Based on this, a coupling mechanism of "green hydrogen market - national carbon trading market - electricity market" was built in this paper. The "green hydrogen market - national carbon trading market - electricity market" was modeled and simulated by further utilizing the system dynamics method, and the interaction of multiple markets

收稿日期: 2023-02-03 修回日期: 2023-03-04

**基金项目:** 国家自然科学基金项目“碳中和目标下电力行业低碳政策耦合及协同优化研究”(42171278); 国家自然科学基金项目“矿产资源全产业链可持续管理体系优化”(71991481); 国家自然科学基金项目“新时代战略性关键矿产资源安全与管理”(71991480); 北京社科基金项目“基于区块链的北京市绿色证书智能合约交易机制研究”(17YJC029); 国家自然科学基金项目“城市绿色生产与生态节地理论究”(51978443)

was studied. **[Result]** The results show that: Firstly, the coupling among the green hydrogen market, carbon trading market and electricity market can be realized through green hydrogen certification and carbon quota trading, and it is found that the coupling model is feasible through simulation. Secondly, it is found through the simulation of the basic scenario that the coupling of multiple markets can stimulate the increase of carbon price and control the increase of thermal power generation and green hydrogen production. Finally, increasing the proportion of green hydrogen certification and improving the obsolete unit elimination mechanism and carbon quota auction mechanism will help form a carbon pricing mechanism. **[Conclusion]** On the one hand, this study diversifies the green hydrogen trading models, promotes the participation of green hydrogen in carbon trading to obtain certain benefits, and reduces the hydrogen energy cost. On the other hand, it makes use of the multi-market linkage mechanism to bring into play the forced effect of carbon price and promote the reduction of the proportion of traditional fossil hydrogen production and thermal power generation.

**Key words:** market coupling and synergy; green hydrogen; national carbon emission rights trading policy; electricity market; energy structure adjustment

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

## 0 引言

全人类为了共同保护地球生态环境和减缓温室气体排放,已有140多个经济体提出了“碳中和”承诺,并实施了一系列节能降耗的政策<sup>[1]</sup>。中国作为发展中国家期望能够在全球问题上作出相应的贡献,因此习总书记在国际上做出了振奋全球的“2030年前碳排放达峰,完成《巴黎协定》目标;争取2060年前碳中和”的承诺。为实现“双碳”目标,中国将构建清洁低碳安全高效的能源体系<sup>[2]</sup>。国家发展改革委和国家能源局共同发布《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》,从战略层面对我国氢能发展进行了顶层设计,以促进我国氢能产业的发展<sup>[3]</sup>。

氢能具有资源丰富、热值高、无污染的特点,被认为是理想的清洁能源,对氢能的开发和利用是实现低碳减排目标的重要路径。绿氢以其可持续性而被认为具有良好的发展前景。绿色制氢以可再生能源为原料制取氢能,具备全过程环保、低排放、转化灵活等特点,是可再生电力的替代和补充<sup>[4]</sup>。另外,近年来,风电和太阳能光伏发电等可再生电力增长迅猛。可再生能源发电具有极强的波动性,存在因电网短时无法消纳全部电力而导致的弃电现象,这部分弃电电量将会随着可再生能源发电装机量的快速提升而增长。即便考虑储能设备的削峰填谷作用,弃风弃光电量仍旧十分可观<sup>[5]</sup>。因此,绿氢是未来氢能市场的发展方向,也是中国实现“双碳”目标的关键路径。绿氢应用在技术上具有可行性,但是在氢能大规模利用的经济性上存在限制。其中,电解水制氢成本较高是最大的制约。如何在保障绿氢规模

化发展的前提下,降低成本成为亟须解决的问题。

为降低碳排放总量,我国实施在试点经验的基础上开展了全国碳交易机制。该政策是我国实现“双碳”目标的核心政策工具之一。2021年7月,全国碳排放权交易市场正式上线运行,标志着我国已经初步建立了碳交易市场<sup>[6]</sup>。碳交易政策体现了谁污染谁付费的原则,将外部成本内部化,是利用市场化机制降低碳排放,也是实现“双碳”目标的重要政策工具。碳交易市场分为两级。在一级市场上,政府根据整体减排目标对交易主体分配初始碳排放权。在二级市场上,纳入交易体系的企业可以自由交易碳配额。同时,控排企业也可以购买自愿减排企业的国家核证自愿减排量(China Certified Emission Reduction, CCER),利用碳抵消机制对碳配额交易进行补充。目前,中国的碳交易市场处于运行初期,存在着交易产品较为单一和市场规模较小的问题。随着碳市场的扩容,市场对于CCER的需求将进一步升级。

基于我国政策制度的不断出台,全国碳交易市场的政策效应逐步显现,且一级市场和二级市场交易频率将提升,碳价的引导作用逐步显现。这将为不同的氢气生产工艺核定真实生产成本、收益提供重要参考依据。既然绿氢与碳交易同为实现低碳减排目标和国家低碳转型的重要路径,如果两者实现深度融合,将加快我国碳中和的步伐。

文章拟解决2个问题:(1)在全国排放权交易市场的政策效应逐步显现,且一级市场和二级市场交易频率将提升,碳价的引导作用逐步显现。这将为不同的氢气生产工艺核定真实生产成本、收益提供重要参考依据。既然绿氢与碳交易同为实现低碳减排目标和国家低碳转型的重要路径,如果两者实现深度融合,将加快我国碳中和的步伐。

间的耦合和关联,充分挖掘减排潜力?(2)在绿氢市场、全国碳交易市场和电力市场联动的情况下,探寻发现多市场间协同优化的较优路径,既缓解氢能成本压力,又增强碳交易市场的活跃度,实现绿氢市场与碳交易市场的深度融合。

## 1 文献综述

### 1) 绿氢与电力市场耦合分析

近年来,绿氢的经济性受到氢能产业领域专家和学者们的诸多关注。制氢技术的选择决定了氢能的成本和碳排放。王彦哲等(2022)测度了不同制氢技术的成本变化趋势。研究结果表明:现阶段灰氢成本最低,绿氢成本最高。从长期角度来看,随着技术进步绿氢将成为成本最低的制氢方式,绿氢也将大规模发展<sup>[7]</sup>。发现降低绿氢成本的因素,实现绿氢和电力市场的耦合具有必要性。刘玮等(2022)认为降低清洁氢平准化价格,需要从技术、商业模式创新等多方面协同发力,从而发挥其在能源转型及深度脱碳方面的作用<sup>[8]</sup>。许传博等(2022)研究认为电氢耦合下风光场站氢储能配置问题可以通过商业模式进行优化<sup>[9]</sup>。顾玖等(2022)针对氢能大规模环保供应的问题,提出了一种电-氢一体化站的构建思路。在以总运行成本最小为目标的基础上,建立电-氢一体化站的优化运行模型,该模型可以有效地提高电网削峰填谷能力以及可再生能源的消纳能力<sup>[10]</sup>。

可再生能源发电耦合制氢技术,不仅可以降低大规模并网不稳定性,实现弃风弃光的充分利用,还可以显著提高可再生消纳率<sup>[11]</sup>。目前电-氢耦合的运行模式主要分为3类:(1)可再生能源制氢,保证氢能的绿色生产和稳定供应<sup>[12]</sup>;(2)发挥电解水制氢灵活响应的特性,平抑可再生能源出力波动<sup>[13]</sup>;(3)充分利用弃风、弃光资源,提高可再生能源消纳率<sup>[14]</sup>。由上述分析可以发现,绿氢的成本是发展的瓶颈。将清洁氢的减排量纳入全国碳市场,可以推动其降本增效,实现可持续发展。目前关于氢能与碳市场耦合的研究相对较少,有待进一步展开研究。

### 2) 碳交易市场与电力市场耦合分析

“电-碳”耦合是将电力市场与碳排放交易市场进行关联,通过两个市场各环节交互,确保电力市场主体开展电力交易的同时履行碳交易的市场义务,使得碳市场的碳价和交易量与电力市场的电价和电

源结构,相互制约和相互促进,提高碳电市场融合度<sup>[15-16]</sup>。电力市场与碳市场协同发展,是充分挖掘两个市场减排潜力的关键,学者们也针对该问题展开了相关研究。薛贵元等(2022)为研究碳市场与电力市场的耦合关联,以江苏省为例,构建了市场多主体行为决策模型,研究发现:两个市场间虽然存在着相互制约的关系,但是碳价和电价的深度联动还未形成,通过能源结构调整、绿证交易市场的运行有助于碳市场发挥碳价的信号引导作用<sup>[17]</sup>。冯昌森等(2021)基于区块链技术提出一种绿证交易和碳交易相结合的市场模式,将可再生能源发电企业与传统化石能源发电企业联系起来,通过设计多市场联合交易运行机制,推动能源转型,促进可再生能源的消纳和限制火力发电企业碳排放<sup>[18]</sup>。基于中国2030碳排放强度减排目标,Feng等(2021)建立了一个政策协同模型来探讨碳交易市场与绿证交易市场间的优化关系,研究发现两个市场对电力行业碳排放存在显著的缓解作用<sup>[19]</sup>。也有学者从电碳联动的角度研究碳市场对火力发电企业的影响<sup>[20-21]</sup>。

综上可知,关于电力市场与碳市场融合发展的研究相对丰富。研究成果多针对碳配额交易开展,对于CCER的研究成果较少。而CCER为多元化、市场化推动全社会低成本实现碳减排目标做出了积极贡献。基于此,文章将在“电-碳”市场耦合机制研究中引入CCER,从而对两个市场的深度融合展开研究。

### 3) 多市场耦合的研究方法

赵麟等(2022)发现,目前发电企业受到来自电力市场和碳市场竞争的双重压力,基于这一问题提出了考虑CCER机制的碳-电耦合市场中水火电协同竞价模型,并以澜沧江流域的发电站为实例验证了有效性<sup>[22]</sup>。Song等(2021)利用系统动力学方法构建了可再生能源电力市场、超额消纳量交易市场和绿色证书市场的耦合模型。研究发现:可再生能源电力消纳保障机制不仅影响多个市场的价格和交易量,且促进了中国可再生能源发电的发展<sup>[23]</sup>。针对售电商因分布式光伏高水平渗透而面临的困境,张晗等(2022)利用系统动力学方法分析了关键影响因素,并构建了分布式光伏市场与售电市场间的耦合模型<sup>[24]</sup>。Wang等(2022)利用多目标优化函数研究电力市场与氢能市场耦合下氢站定价机制。研究发

现:双向定价机制将电力和氢能系统连接起来,可以促进社会福利和可再生能源消费<sup>[25]</sup>。为解决风力发电因出力不稳定而在入网时电能大量损失的问题,Liu等(2022)利用基于接入微电网的P2H(Power to Hydrogen,电力-氢能)系统,构建了考虑了氢能市场耦合电力市场的多能源交易模型,并提出了P2H系统的市场机制<sup>[26]</sup>。万文轩等(2022)分析了碳市场和多种能源市场的耦合关系,从影响机理、交易机制和应用模式3个方面阐述了碳交易与区域综合能源系统的协同发展方式<sup>[27]</sup>。

综上所述,市场耦合机制的研究方法较多,而对绿氢市场-碳交易市场-电力市场耦合的研究需要通过因果关系形成系统反馈。鉴于系统动力学是一门研究系统动态复杂性的学科,主要用于研究复杂系统的结构、功能与动态行为之间的相互依赖关系。该方法可以从微观角度分析各决策之间的因果关系和反馈机制,也可以预测系统未来的动态行为。因此,文章利用系统动力学(System Dynamic, SD)模型研究多市场耦合机制。

文章的主要创新点:(1)将绿氢产业引入到碳交易市场机制中,模拟绿氢市场-全国碳交易市场-电力市场间的耦合机制,设计了绿氢项目通过碳减排认证体系获取CCER从而进入全国碳交易市场获得额外的政府补贴和收益,从而促进绿氢产业的大规模发展;(2)构建绿氢市场、全国碳交易市场与电力市场的系统动力学模型。仿真模拟多市场耦合下,中国绿氢产业的发电量、碳交易价格、CCER价格等变量的动态演变趋势。

## 2 “绿氢市场-全国碳交易市场-电力市场”耦合模型构建

### 2.1 多市场耦合机制分析

在构建绿氢市场、全国碳排放权交易市场以及电力市场的耦合模型之前,需要厘清每个市场的运行机制,以及多个市场的链接点。随着技术的进步,我国的可再生能源发电成本越来越具有竞争力。这将为发展绿氢提供了一定的有利条件。2020年中国氢气产量大约为3.34亿t,其中灰氢占比67%,而绿氢占比仅3%。2021年,我国氢能产能提高至4亿t。中国氢能联盟发布的《中国氢能源及燃料电池产业白皮书2020》显示,在碳排放约束下,2020—2030年

间绿氢比例将从3%上升至15%<sup>[28]</sup>。由此可见,我国为实现脱碳远景将大规模部署绿氢。与欧洲和美国的碳排放交易系统相比,我国的碳市场尚处于初期运行阶段,碳价水平较低。但是,碳定价机制正在逐步被社会广泛接受,碳交易的产品种类也将不断丰富。碳交易给碳排放一个明确的价格信号,通过价格传导机制,传导至企业的生产成本当中。目前,绿氢的成本远远高于其他工艺,在没有碳定价的情况下,传统化石能源制氢所产生的负外部性无法被内部化,绿氢的正外部性也无法得到有效的补偿。因此,建设碳交易中心氢能产业板块交易机制具有必要性。图1为基于绿氢市场、全国碳交易市场和电力市场运行体系而设计的多市场耦合机制。

从图中可以发现:(1)与灰氢相比较,绿氢更加清洁。弃风弃光等可再生能源通过电解产生绿氢并进行储存,在需要的时候绿氢转化为电能。相比于火力发电,绿氢减少碳排放。利用基准线法计算绿氢发电相比于火力发电所降低的减排量,并将减排量通过国家核证体系申请CCER,从而将绿氢的环境价值转化成CCER,并通过抵消机制参与碳市场交易。绿氢获取CCER并通过参与碳市场交易既缓解绿氢的制氢成本,也丰富了碳交易市场的产品交易品种。由此,通过CCER可以将绿氢市场与碳交易市场进行连接;(2)目前,全国碳交易市场只覆盖了部分火力发电行业。利用历史排放法,政府确定火电行业控排企业的初始碳配额。高耗能机组对碳配额的需求量较大,而低耗能机组对碳配额的需求量较小,对于碳配额的不足与剩余将在碳交易市场上开展交易。由此电力市场与碳交易市场进行了耦合;(3)对于低耗能的火力发电商也可以通过在碳交易市场上购买CCER进行碳抵消。由此,火力发电市场与绿氢市场进行了耦合。综上,绿氢市场、碳交易市场和电力市场产生耦合。

我国CCER项目由于供大于求、项目交易量小、项目不够规范等问题在实施的过程中暂停,但是随着全国碳市场的启动,CCER存量的降低和碳交易的扩容,CCER市场重启成为必然趋势。CCER除具有减排作用,还可以适当降低企业的履约成本,助推碳配额价格发现,促进可再生能源的发展。绿氢具有天然的减排优势,也具备开发CCER的条件。通

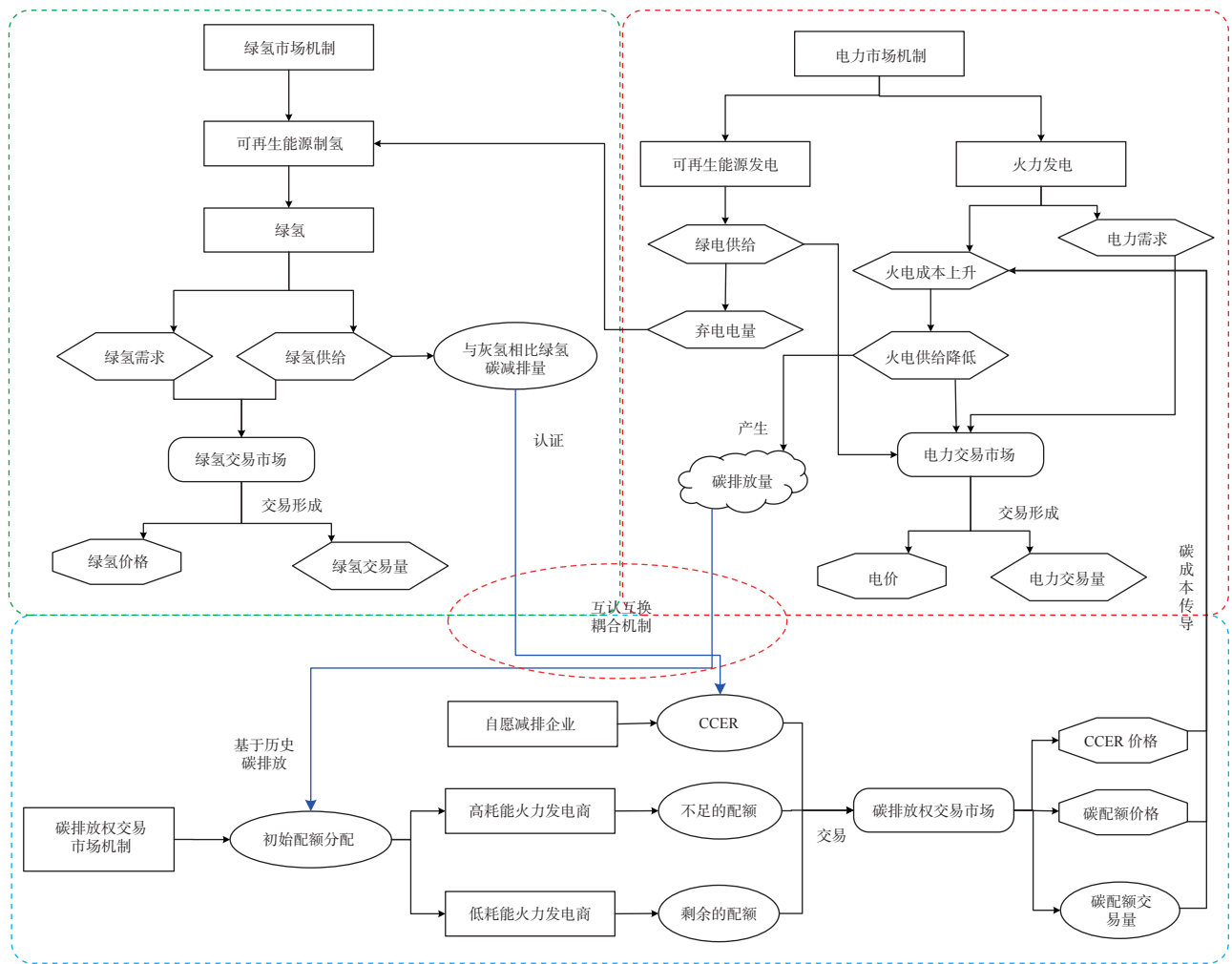


图 1 “绿氢市场-全国碳交易市场-电力市场”耦合机制

Fig. 1 Coupling mechanism of "green hydrogen market - national carbon trading market - electricity market"

过全国碳市场为绿氢提供额外的市场化收益,有助于改变其收益结构,支持绿氢的投资。另外,电力市场也通过参与碳交易市场,既可以消纳 CCER,也可以参与碳配额的交易。通过碳定价机制对电源结构进行优化。

### 2.2 多市场耦合模型构建

基于 2.1 部分构建的多市场耦合机制,本部分将研究实现多个市场协同发展的路径。可见,上述问题是一个多变量、高阶次、非线性的动态反馈复杂系统问题。而系统动力学是一门研究信息反馈系统的学科。它根据系统内部组成要素互为因果反馈特点,从系统的微观结构角度分析各决策之间的因果关系和反馈机制。从而预测模拟系统未来的动态行为,适合分析复杂系统随时间的变化趋势<sup>[29-30]</sup>。因此,

本部分采用系统动力学模型研究氢能市场、碳交易市场和电力市场协同发展问题。

#### 2.2.1 边界及模型假设

本研究所构建的模型划分为 3 个模块,主要研究绿氢市场子系统、电力市场子系统和碳市场子系统相互作用的机理。其中,辅助服务市场作为电力市场的一个子市场,与能量市场在调频和备用服务方面有耦合关系,二者共同构成电力市场。而文章研究的电力市场,重点放在能量市场。因此辅助服务市场并不在文章的研究范围内。所构建的系统动力学模型在特定的环境下运行,因此需要满足一定的假设条件。文章主要作出如下假设:

1)风、光、水等可再生能源通过制氢、用氢的过程,将能量进行存储、转换,使能量对用户的供应过程变得更加便捷灵活。绿氢生产所使用的可再生能

源发电量是采用的弃电。

2)碳交易市场中需求方为高耗能火力发电商,供给方为低耗能火力发电商。碳配额不足的主体既可以通过购买碳配额满足自身的碳排放,也可以通过CCER进行抵消。从全国碳市场运行以来的履约情况看,市场交易量与控排企业的配额需求较为接近,因此,将碳配额买方和碳配额卖方装机容量设置成整个火电市场的一半。

3)由于碳交易市场只覆盖了部分控排企业,因此对电力市场文章只考虑了火力发电商,不考虑可

再生能源发电商。假设火电机组的建设周期为12个月,电力需求按照一定的比率增长。

### 2.2.2 因果关系分析

本部分构建了一个包括绿氢市场、电力市场和碳交易市场反馈结构,如图2所示。其中,绿色线条连接了绿氢市场变量间的因果关系,橘色线条连接了碳市场系统变量间的因果关系,蓝色线条连接了电力市场变量间的因果关系。对图2分析可以发现:3个市场耦合的因果关系图包括1个正反馈和5个负反馈。

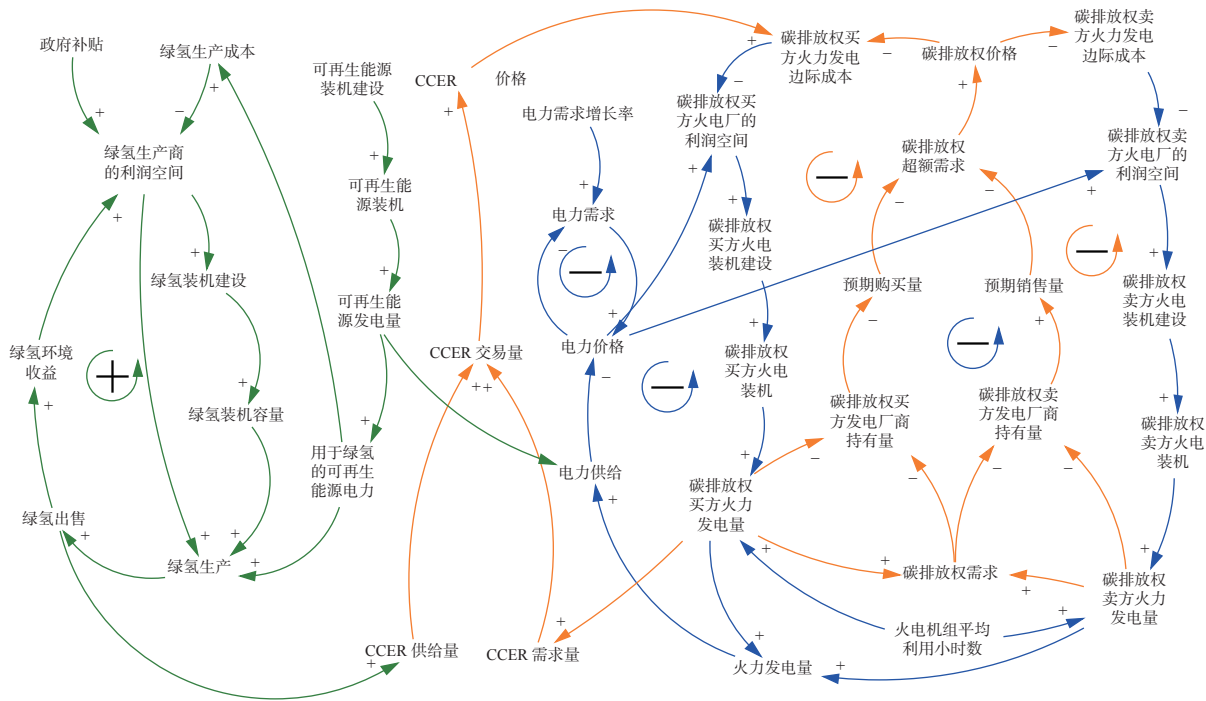


图2 “绿氢市场-全国碳交易市场-电力市场” 因果关系

Fig. 2 Causality of "green hydrogen market - national carbon trading market - electricity market"

1)绿氢市场的正反馈:绿氢生产量增加使得绿氢销售量增加,绿氢生产商获得更多的环境收益,绿氢生产商的利润空间增加。在利益的驱动下,绿氢生产厂商将生产更多的绿氢。

2)电力市场供需负反馈:电力价格的上升使得电力需求降低,导致供给大于需求,在此情况下电力价格下降使得电力需求增加,电力市场的供需达到稳态。

3)电力市场碳排放权买方火电生产:利润驱动下碳排放权买方增加火电的生产,电力供给增加导致电价下降;当电价下降时,发电商利润降低,碳排

放量减少火力生产,电力供给减少,电价得到回升。

4)电力市场碳排放权卖方火电生产:电价上升使得碳排放权卖方利润增加,碳排放权卖方电力生产量增加,电力供需增加;在市场调节作用下,电力供给增加使得电价下降,在利润驱动下碳排放权卖方减少电力生产。

5)碳市场碳排放权买方购买碳配额过程:碳价上升使得碳排放权买方的成本上升,利润降低,碳排放权买方电力生产量降低,对碳配额的需求降低;通过碳市场的调节,碳配额需求减少,碳价下降,碳排放权买方利润空间增加,火力发电量增加。

6)碳市场碳排放权卖方出售碳配额过程:碳价上升使得碳排放权卖方利润增多,碳排放权卖方的建设、装机和生产增加,从而导致自身配额需求量增加,用于出售配额减少,碳配额超额需求减少;在碳市场供大于求的情况下,碳价下降,碳排放权卖方减少电力生产,配额的供给又增加。

2.2.3 系统动力学模型构建

基于上述因果分析进一步构建绿氢市场、碳交

易市场和电力市场的存量流量图,如图 3 所示。绿色框内部分为绿氢市场与碳市场耦合部分,橘色框内部分为电力市场与碳市场耦合部分,黑色箭头表示流量,云朵形状表示流量的源和漏。模型采用 DYNAMO 语言。基于变量间的关系,在 Vensim 软件中设定了变量间函数关系,包括积分函数 (INTEG)、延迟函数 (DELAY1) 和平滑函数 (SMOOTH)。

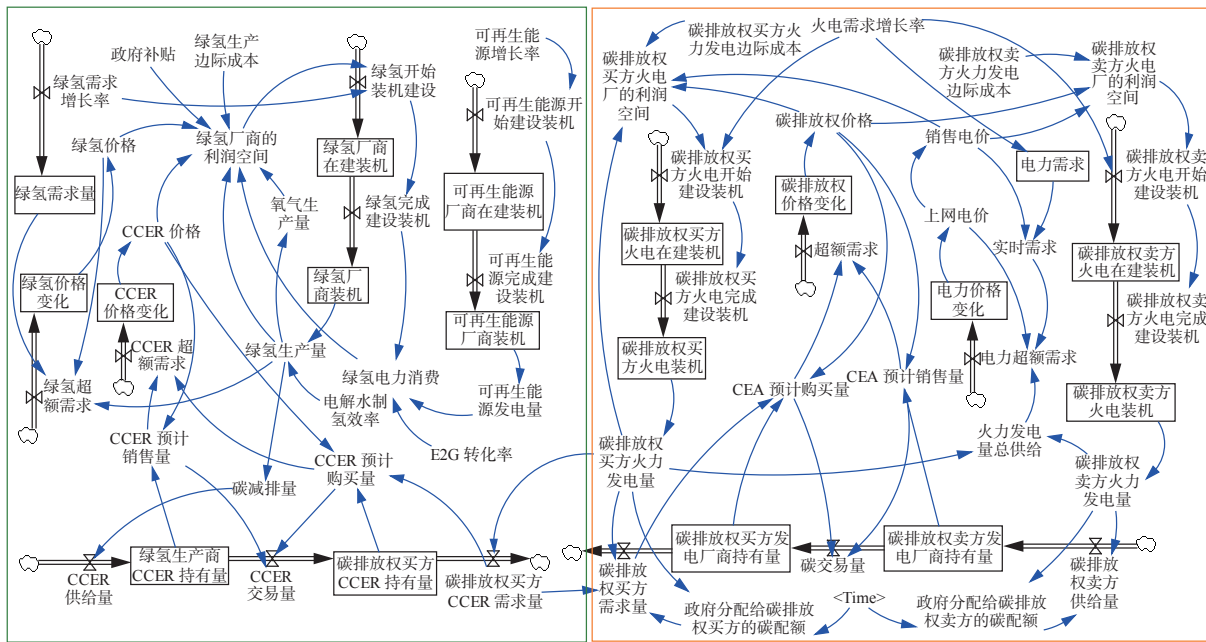


图 3 “绿氢市场-全国碳交易市场-电力市场”存量流量图

Fig. 3 Stock flow chart of "green hydrogen market - national carbon trading market - electricity market"

2.2.4 数据来源及相关参数设定

模型中火电生产、碳交易和绿氢生产过程中所需数据主要来源于国家统计局、上海环境能源数据交易所、中电联官网和中国氢能联盟。对于模型中 CCER 初始价格设定为 40 元/t,碳排放权的初始价格设定为 50 元/t,参数来自文献 [31-32]。

2.2.5 模型有效性检验

为了检验模型仿真模拟结果的有效性,文章选取了两个变量进行误差检验,分别是碳排放权价格和火力发电量总供给。对两个变量在 2021 年 7 月—2021 年 9 月模拟值和真实值进行对比,考察其误差率,所得结果如表 1 所示。从表中可以发现,碳排放权价格模拟的误差率均值为-1.92%,而火力发电量总供给模拟的误差率均值为-5.06%,处于可接受范

围,文章构建模型的拟合度较好。

表 1 模型有效性检验

Tab. 1 Model effectiveness test

时间	碳排放权价格			火力发电量总供给		
	模拟值/ (元·t <sup>-1</sup> )	真实值/ (元·t <sup>-1</sup> )	误差/ %	模拟值/ TWh	真实值/ TWh	误差/ %
2021.7	50.00	50.33	0.66	4808.89	4813.20	-0.09
2021.8	49.89	49.76	-0.26	4809.68	5239.70	-8.21
2021.9	48.32	45.35	-6.15	4810.47	5166.90	-6.89
均值	—	—	-1.92	—	—	-5.06

2.2.6 模型情景设定

表 2 是文章设定的多种情景,主要从未来绿氢市场、电力市场和碳市场的改革方向上进行情景的

设定。在绿氢市场中,根据 2021 年绿氢的年生产量将绿氢认证比例设定为 2.5%。随着绿氢储能技术的成熟以及可再生能源发电比例的增加,绿氢的生产量将增加,进而认证比例也将增加。在碳市场中,CCER 抵消机制将重启,为鼓励节能减排项目发展,

CCER 抵消比例将增加。初始碳配额分配为免费分配的方式,随着碳约束的增强,碳市场中将引入有偿拍卖机制。在电力市场中,政府为促进煤炭清洁利用效率,落后煤电机组将逐步被淘汰,这一改革措施产生的作用在多情景仿真模拟中进行分析。

表 2 情景参数设定

Tab. 2 Scenario parameter setting

影响因素	情景	参数设定			
		CCER抵消比例/%	绿氢认证比例/%	落后机组淘汰率/%	碳配额拍卖比例/%
基础情景	BAU	5	2.5	0	0
CCER抵消比例	A1	7	2.5	0	0
	A2	10	2.5	0	0
绿氢认证比例	B1	5	3	0	0
	B2	5	4	0	0
落后机组淘汰率	C1	5	2.5	5	0
	C2	5	2.5	20	0
配额拍卖比例	D1	5	2.5	0	10
	D2	5	2.5	0	20
综合情景	E1	7	3	5	10
	E2	10	4	20	20

### 3 结果与讨论

#### 3.1 模拟仿真结果分析

##### 1) 基准情景仿真结果及分析

图 4 展示了基础情景下碳排放权价格和 CCER 价格的变化趋势。从图中可以发现:碳价经历“低位-快速上升-波动上升”的过程,而 CCER 价格经历“下降-快速上升-波动上升”的过程。对比两条曲线,碳价曲线一直在 CCER 价格曲线的上方,可见碳排放权价格长期高于 CCER 价格。市场运行初期,对控排企业的管控力度较小,火力发电企业在政府分配免费配额的基础上,额外的碳配额需求较少,导致目前碳价较低,但是随着碳约束强度的增强,控排企业对碳配需求的增加从而推高碳价。另外,CCER 作为强制碳市场的补充,其价格比碳配额的价格低。

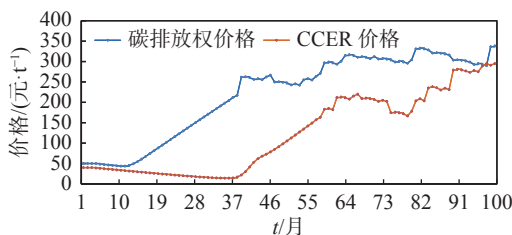


图 4 碳排放权价格和 CCER 价格趋势

Fig. 4 Trends of carbon emission right price and CCER price

图 5 为基础情景下绿氢生产量和火力发电量的变化趋势。绿氢生产量呈现出显著上升的趋势,而火力发电量虽然有上升的趋势,但是变化并不显著。究其原因:绿氢的使用会更快地促进能源转型,使国家摆脱对脱污染严重的不可再生能源的依赖,在“双碳”目标驱动下,中国政府大力鼓励绿氢产业的发展,而火力发电虽然仍旧有较大的需求,但是基于环境污染而火电的增长率较低。

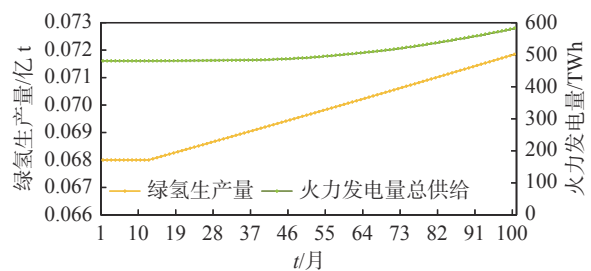


图 5 绿氢生产量和火力发电量变化趋势

Fig. 5 Change trend of green hydrogen production and thermal power generation

##### 2) 不同 CCER 抵消比例仿真结果及分析

目前,CCER 在碳市场的抵消比例为 5%,但是依据欧盟发展经验抵消比例约 15%,可以预见,未来中国碳市场的抵消比例会有一定程度的上升。因此,



本部分仿真模拟了不同 CCER 抵消比例对系统的影响。图 6 为不同 CCER 抵消比例下 CCER 价格变化趋势,从图中可以发现:CCER 的价格曲线均呈现出上升的趋势。另外,随着 CCER 抵消比例的上升 CCER 价格曲线升高时间前移。

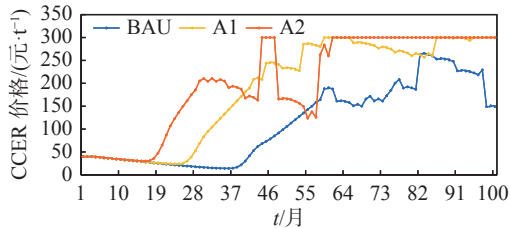


图 6 不同 CCER 抵消比例下 CCER 价格趋势

Fig. 6 CCER price trends under different CCER offset ratios

图 7 为不同 CCER 抵消比例下绿氢装机变化趋势。对图中曲线进行分析发现:一方面,绿氢装机均会经历“稳定-上升”的过程;另一方面,随着 CCER 抵消比例的增加绿氢装机曲线呈现出向上移动的趋势,但是变化并不显著。由此可见,当 CCER 价格较低时,企业会降低碳排放权的购买意愿,而偏好购买 CCER;当 CCER 价格较高时,企业对 CCER 的购买意愿降低,绿氢的生产量也随之降低。因此,CCER 抵消机制需要予以合理引导。

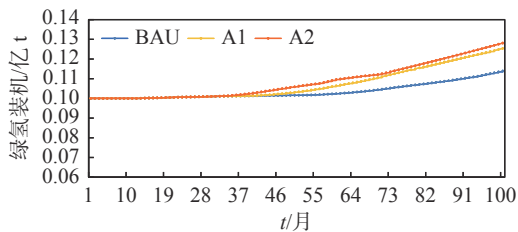


图 7 不同 CCER 抵消比例下绿氢装机变化趋势

Fig. 7 Change trends of installed capacity of green hydrogen under different CCER offset ratios

### 3) 不同绿氢认证比例仿真结果及分析

依据 CCER5% 抵消比例,将绿氢的认证比例设定为 2.5%。但是随着对绿氢认可度的提高,绿氢的认证比例也提高。因此,本部分对不同绿氢认证比例下模型仿真结果展开分析。图 8 为不同绿氢认证比例下 CCER 价格变化趋势。由图可知:CCER 价格将经过“缓慢下降-快速上升”的过程。另外,随着绿氢认证比例的提高,CCER 价格快速上升的过程向后推迟。

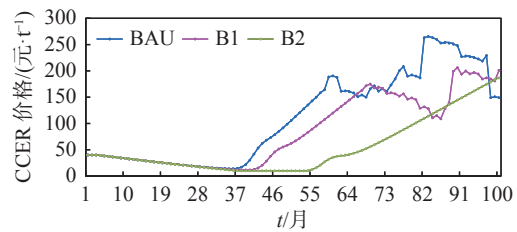


图 8 不同绿氢认证比例下 CCER 价格趋势

Fig. 8 CCER price trends under different green hydrogen certification ratios

图 9 为 CCER 预计购买量变化趋势。对图中曲线进行分析:在初期 CCER 的需求量降低,经过波动,CCER 预计购买量上升。另外,随着绿氢认证比例的上升,初期 CCER 预计购买量的曲线相近,后期 CCER 预计购买量的曲线下移。依据图 8 和图 9 可知,将绿氢项目引入到碳市场的过程中需要合理控制绿氢的认证比例,推动高效的清洁氢项目进入碳抵消市场。

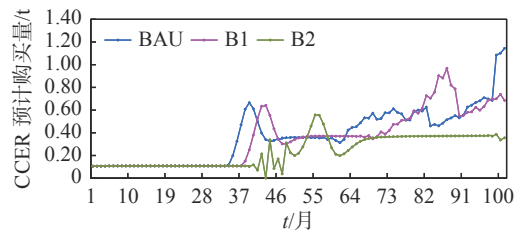


图 9 CCER 预计购买量变化趋势

Fig. 9 Change trend of CCER expected purchase

### 4) 不同落后机组淘汰率仿真结果及分析

为了响应联合国 COP26 峰会关于煤电逐步减少的协议,中国的煤电机组将逐步淘汰,尤其落后机组。基于此,本部分将模拟仿真落后机组逐步淘汰对系统产生的影响。图 10 为不同落后机组淘汰比例下碳排放权价格的变化趋势。随着落后机组淘汰比例的提高,碳价曲线初期没有显著区别,后期曲线

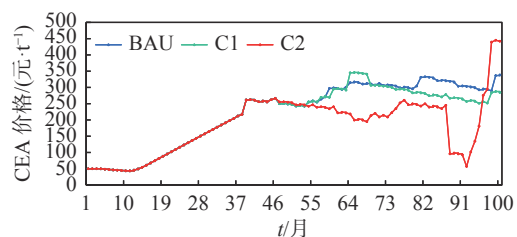


图 10 碳排放权价格变化趋势

Fig. 10 Change trend of carbon emission right price

下移。落后机组的淘汰使得控排企业对碳配额的需求减少, 在市场供需结构下, 碳配额的价格降低。

图 11 为碳配额预计销售量变化曲线。CEA 预计销售量的曲线在初期平稳, 后期显著震荡。将 3 条曲线进行对比, 初期 3 条曲线的差异并不显著, 后期落后机组淘汰比例越高, CEA 预计销售量曲线的波动性越强。随着碳价波动性的增强, 碳配额的销售量将呈现出波动性。

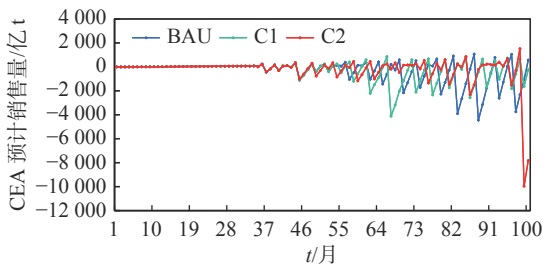


图 11 CEA 预计销售量变化趋势

Fig. 11 Change trend of CEA expected sales

#### 5) 不同拍卖比例仿真结果及分析

我国碳配额由政府免费分配, 为了充分发挥市场额度效用, 政府部门会逐步引入有偿拍卖机制。因此, 本部分考察碳市场引入拍卖机制并提高拍卖比例对系统模型的影响。图 12 为不同拍卖比例下碳价变化趋势。从图中可以显著发现: 有偿拍卖比例的提高将会拉高碳配额的价格。

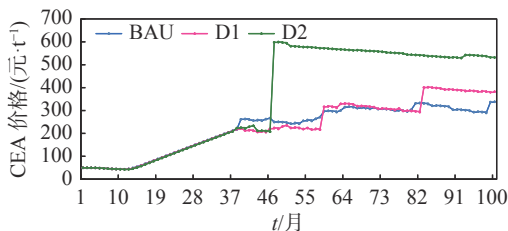


图 12 不同拍卖比例下 CEA 价格趋势

Fig. 12 CEA price trends under different auction proportions

图 13 为不同拍卖比例下碳配额预计购买量变化趋势。对图中曲线进行对比可以发现: 3 条曲线均呈现出上升的态势。另外, 随着拍卖比例的提高, CEA 预计购买量曲线向下移动。从图 12 和图 13 可知, 有偿拍卖机制将电力生产造成的外部环境成本分摊到电力企业中, 该机制的引入有助于碳价的发现, 发挥碳价的信号作用。

#### 6) 综合情景仿真结果及分析

本部分将综合考虑 CCER 抵消比例、绿氢认证

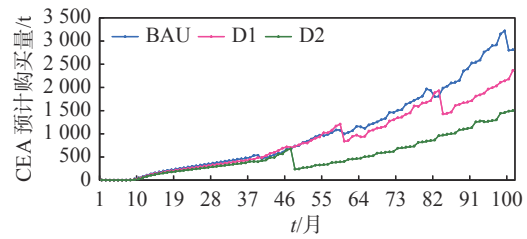


图 13 不同拍卖比例下 CEA 预计购买量

Fig. 13 CEA expected purchase under different auction proportions

比例、落后机组淘汰率和拍卖比例对系统模型的影响。图 14 为综合情景下 CCER 价格变化趋势。综合情景下 CCER 价格“快速上升”的过程将提前。可见, 在多重政策影响下碳抵消市场价格呈现上升趋势。

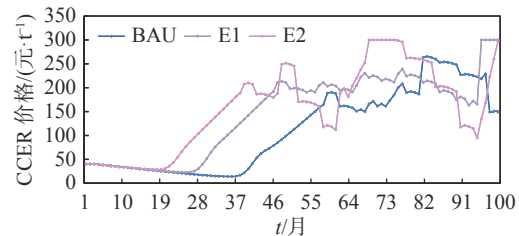


图 14 综合情景下 CCER 价格趋势

Fig. 14 CCER price trend under comprehensive scenario

图 15 为综合情景下绿氢生产量变化趋势。从图中可以发现, 3 条曲线均呈现出上升的趋势, 但是曲线间的差异并不显著。多重政策对绿氢生产的影响并不显著, 原因在于绿氢项目进入碳抵消市场的比例较低, 对于绿氢生产商的收益没有显著提升。国家需要出台更多的支持性的政策促进绿氢产业的发展。

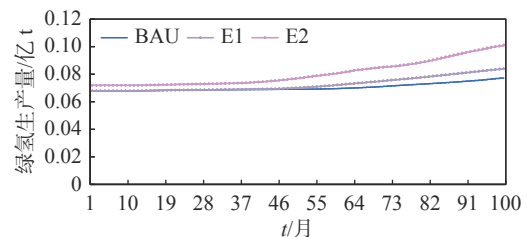


图 15 综合情景下绿氢生产量变化趋势

Fig. 15 Change trend of green hydrogen production under comprehensive scenario

图 16 为综合情景下碳配额价格的变化趋势。3 条曲线均呈现出“平稳-快速上升-震荡中上升”的

过程。随着多重因素比例的提高,碳价在后期向下移动。将图 14 和图 16 综合考虑可知,基础情景下碳价显著高于 CCER 价格,在综合情景下碳价与 CCER 间隔范围相近,均在 40~300 元/t 范围内波动。

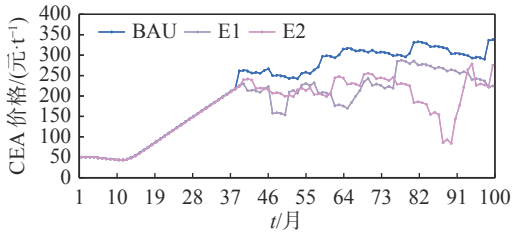


图 16 综合情景下 CEA 价格趋势

Fig. 16 CEA price trend under comprehensive scenario

图 17 为综合情景下火力发电量变化趋势。从图中可以发现,火力发电作为电力的主要供给主体呈现出一定程度的上升。随着各影响因素比例的提高火力发电量呈现出上升的趋势。但是,3 条曲线的变化并不显著。究其原因,在多重政策的压力下火电生产空间压缩到最小,保证了正常能源供应的安全。

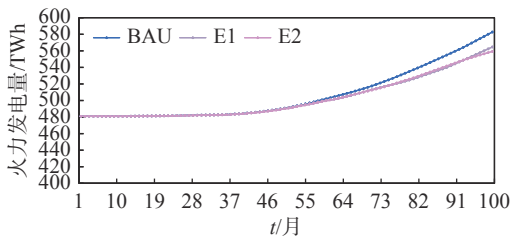


图 17 综合情景下火力发电量变化趋势

Fig. 17 Change trend of thermal power generation under comprehensive scenario

### 3.2 讨论

在对多市场耦合模型仿真模拟结果进行分析的基础上,进一步对所得结果的相关研究比较、深层原因和未来发展趋势进行讨论分析:

1) 基础情景中碳交易价格、CCER 价格的上升趋势,这与学者 Qi 等(2022)<sup>[33]</sup>和 Wang 等(2022)<sup>[34]</sup>的结论一致。造成这一现象的主要原因:从全国碳市场交易现状看,碳价在 50 元/t 水平波动,相比于国际碳价水平,我国的碳价还较低,仍旧有较大的上升的空间。碳市场形成的碳价信号是引导资本高效支持“双碳”目标实现的前提,也是激励生产和消费模式脱碳转变的关键。另外,相较于市场 CCER 项目

的供应量,其有效需求量严重不足。CCER 需求一方面来自自愿减排的“买家”,另一方面来自受排放限值的企业。CCER 抵消比例上升会促进绿氢产量的增加。相比配额,CCER 具有灵活的准入和交易机制,受到投资者和控排企业的青睐,即使抵消比例上升,未来一段时间价格仍旧会上涨。

2) 从 3.1 第(1)部分和第(2)部分可以发现绿氢生产量呈现出上升趋势,这一点得到诸多学者的认同。许传博等(2022)、潘光胜等(2020)表示,氢在能源存储和利用中巨大的应用潜力,有助于电力系统中可再生能源的消纳问题,是实现能源结构转型的重要路径之一<sup>[35-36]</sup>。李爽等(2022)认为可再生能源制氢是未来利用氢能实现碳中和的主要路径之一<sup>[37]</sup>。由于温室气体自愿减排交易量小、个别项目不够规范使得 CCER 发展受到阻碍,但是随着市场机制的不断完善,减排项目规模将扩大。绿氢项目认证比例的提升成为必然。随着 CCER 备案审批开启后,大量的绿氢项目入市,导致 CCER 价格逐步下跌。在减排项目充足的情况下,预计购买的欲望会随之降低。

3) 电力市场落后机组淘汰导致碳价的下跌,而碳市场拍卖机制的引入将拉高碳价。从短期看,落后火电将加速退出,并且根据国际能源署数据,小火电机组二氧化碳排放量高于大机组 28%,以国内碳交易试点累计交易均价测算,小火电的碳成本高于大机组 0.3 分/kWh<sup>[38]</sup>。碳配额拍卖机制会使得免费配额总量减少,在减排约束下,促使碳交易价格上升<sup>[39]</sup>。拍卖机制的引入更好地体现了“污染者付费”的原则。欧盟碳排放体系发展的过程中逐步扩大拍卖分配比例,通过将配额以拍卖的形式来取代免费分配,逐步提高企业成本来推动控排企业采取减排措施<sup>[40]</sup>。而美国 Regional Greenhouse Gas Initiative 通过完全拍卖的形式进行配额分配的碳交易体系,在 2013 年通过配额数量的削减激发碳市场的活跃度<sup>[41]</sup>。碳交易政策工具效用的发挥需要电力市场和碳市场的耦合,形成“电-碳”市场的联动。

## 4 结论

本研究基于绿氢市场、全国碳交易市场和电力市场的运行机理构建了多市场的耦合机制,并以此为基础利用系统动力学方法,构建了绿氢市场-全国

碳交易市场-电力市场耦合模型。进而,利用 Vensim 软件对基准情景进行模拟,并利用多情景分析方法,考察 CCER 抵消比例、绿氢认证比例、落后机组淘汰率、拍卖比例和综合场景因素对耦合系统的影响。基于上述研究结果得到如下主要结论:

1)通过运行基准情景下的系统,表明文章构建的系统动力学模型可以使得绿氢市场-全国碳交易市场-电力市场耦合运行具有可行性,既有助于抑制电力行业的碳排放,也有助于可再生能源电力的消纳,并且说明探索绿氢碳减排市场化交易机制具有可行性,利用清洁氢产生的减排量纳入自愿碳减排市场交易,未来可以探索建设全国性氢交易所。而文章构建的反馈机制可以促进刺激碳价的升高,且可以控制火力发电量和绿氢生产量的上升。

2)通过分析不同 CCER 抵消比例和不同绿氢认证比例情景,CCER 抵消比例需要合理控制,抵消比例上升虽然促进绿氢产量的增加,但是并不显著。而碳市场形成机制的核心是配额的总量控制,如果设定的抵消比例过高,相当于变相增加了总量供给,改变碳市场配额供需关系,从而影响配额的市场价格。绿氢的认证比例提升,增加了 CCER 供给,促使 CCER 价格曲线下移。绿氢通过认证获取一定的收益,能够有效提升产业化进程。因此,政府应该进一步完善氢能产业的支持政策,进一步扩大绿氢项目规模,使得更多的绿氢通过认证进入碳交易市场。

3)通过落后机组淘汰、拍卖机制引入和综合情景的仿真模拟,“电-碳”市场都将不断改革完善,碳约束会倒逼落后机组的淘汰,而拍卖机制的比例提升有助于碳价的发现,两个政策共同促进电力市场结构的优化。政府可以考虑通过这两项政策助力“双碳”目标的实现。而在综合情景中多重政策实施会拉高 CCER 价格但是会拉低碳配额的价格。因此,鉴于当前电力市场、氢能市场以及碳市场的发展现状,相应的节能减排政策应分阶段、分步实施,与现有政策起到衔接作用。

基于上述研究结果和主要结论,针对中国绿氢市场-全国排放权交易市场-电力市场协同发展提出如下政策建议:

1)加快将绿氢减排项目纳入 CCER 认证体系。碳交易市场的碳定价机制对高排放行业的约束促进了该行业对绿氢的需求。未来政府需要构建绿氢认

证体系,具体明确绿氢认证 CCER 流程、认证机构、第三方评估机构、交易管理办法等文件。通过绿氢的认证改善绿氢产业的收益模式,改善可再生能源行业弃风弃光的现象,同时通过金融手段实现绿氢市场与电力市场的联动与融合,促进氢碳的协同发展。

2)依据历史年度碳排放量设定 CCER 抵消比例,并依据弃风弃光率和配额量设定绿氢认证比例。碳抵消机制实施的根本是降低高耗能企业的绩效成本。在确定抵消比例的过程中,政府需要随着碳市场的成熟,降低碳抵消比例,控制配额总量,从而增强碳约束。另外,政府需要考虑国内市场经常调整抵消比例会带来行政自由裁量权过大,以及经常调整抵消比例导致市场预期不明确,从而带来市场价格的异常波动。针对绿氢的认证需要建设规范化的流程和审核机制,促进高效的绿氢项目进入市场。

3)全国碳交易市场需要通过配额拍卖机制、控制配额总量等措施发挥碳定价机制的信号作用。目前,碳市场处于运行初期,还没有完全发挥碳市场对控排企业的倒逼机制以及信号引导的作用。未来,全国碳排放权交易市场逐步引入有偿拍卖机制,让企业真正为自己的外部环境成本买单。进一步,电力市场需要加快电价的改革机制,能够将碳成本反应到电价中,将其向终端传导。另外,火力发电企业可以通过煤电机组的改造和落后机组转为应急和调峰机组等措施,有序淘汰落后机组,保障电力系统的稳定发展。

#### 参考文献:

- [1] Energy & Climate. Net zero emissions race [EB/OL]. (2022-12-01) [2022-12-29]. <https://eciu.net/netzerotracker>.
- [2] 习近平. 继往开来,开启全球应对气候变化新征程——在气候雄心峰会上的讲话 [J]. 中国环境监察, 2020(12): 9.  
XI J P. Building on past achievements and launching a new journey for global climate actions [J]. China environment supervision, 2020(12): 9.
- [3] 国家发展改革委, 国家能源局. 氢能产业发展中长期规划(2021—2035年) [R/OL]. (2022-03-23) [2022-12-29]. [http://zfxgk.nea.gov.cn/1310525630\\_16479984022991n.pdf](http://zfxgk.nea.gov.cn/1310525630_16479984022991n.pdf).  
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Medium and long-term planning for the development of hydrogen energy industry (2021-2035) [R/OL]. (2022-03-23) [2022-12-29]. <http://zfxgk.nea.gov.cn/131052563>

- [0\\_16479984022991n.pdf](#).
- [4] LIU W, WAN Y M, XIONG Y L, et al. Green hydrogen standard in China: standard and evaluation of low-carbon hydrogen, clean hydrogen, and renewable hydrogen [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2022, 47(58): 24584-24591. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2021.10.193](#).
- [5] DABAR O A, AWALEH M O, WABERI M M, et al. Wind resource assessment and techno-economic analysis of wind energy and green hydrogen production in the Republic of Djibouti [J]. *Energy reports*, 2022, 8: 8996-9016. DOI: [10.1016/j.egy.2022.07.013](#).
- [6] NOGRADY B. China launches world's largest carbon market: but is it ambitious enough? [J]. *Nature*, 2021, 595(7869): 637-637. DOI: [10.1038/d41586-021-01989-7](#).
- [7] 王彦哲, 欧洲民, 周胜. 基于学习曲线的中国未来制氢成本趋势研究 [J]. *气候变化研究进展*, 2022, 18(3): 283-293. DOI: [10.12006/j.issn.1673-1719.2021.248](#).  
WANG Y Z, OU X M, ZHOU S. Future cost trend of hydrogen production in China based on learning curve [J]. *Climate change research*, 2022, 18(3): 283-293. DOI: [10.12006/j.issn.1673-1719.2021.248](#).
- [8] 刘玮, 万燕鸣, 熊亚林, 等. 碳中和目标下电解水制氢关键技术及价格平准化分析 [J]. *电工技术学报*, 2022, 37(11): 2888-2896. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.210658](#).  
LIU W, WAN Y M, XIONG Y L, et al. Key technology of water electrolysis and levelized cost of hydrogen analysis under carbon neutral vision [J]. *Transactions of China electrotechnical society*, 2022, 37(11): 2888-2896. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.210658](#).
- [9] 许传博, 赵云灏, 王晓晨, 等. 碳中和愿景下考虑电氢耦合的风光场站氢储能优化配置 [J]. *电力建设*, 2022, 43(1): 10-18. DOI: [10.12204/j.issn.1000-7229.2022.01.002](#).  
XU C B, ZHAO Y H, WANG X C, et al. Optimal configuration of hydrogen energy storage for wind and solar power stations considering electricity-hydrogen coupling under carbon neutrality vision [J]. *Electric power construction*, 2022, 43(1): 10-18. DOI: [10.12204/j.issn.1000-7229.2022.01.002](#).
- [10] 顾玖, 王晨磊, 解大. 电力市场环境下的电-氢一体化站优化运行 [J]. *电力科学与技术学报*, 2022, 37(1): 130-139. DOI: [10.19781/j.issn.1673-9140.2022.01.016](#).  
GU J, WANG C L, XIE D. Research on optimal operation of electricity-hydrogen integrated station in electricity market environment [J]. *Journal of electric power science and technology*, 2022, 37(1): 130-139. DOI: [10.19781/j.issn.1673-9140.2022.01.016](#).
- [11] DAI H C, DAI H M. Green hydrogen production based on the co-combustion of wood biomass and porous media [J]. *Applied energy*, 2022, 324: 119779. DOI: [10.1016/j.apenergy.2022.119779](#).
- [12] 中国氢能联盟. 中国氢能及燃料电池产业白皮书2020 [R]. 北京: 中国氢能联盟, 2021.  
China Hydrogen Alliance. White paper of hydrogen energy and fuel cell industry in China (2020) [R]. Beijing: China Hydrogen Alliance, 2021.
- [13] 曹蕃, 郭婷婷, 陈坤洋, 等. 风电耦合制氢技术进展与发展前景 [J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(6): 2187-2200. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.200452](#).  
CAO F, GUO T T, CHEN K Y, et al. Progress and development prospect of coupled wind and hydrogen systems [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(6): 2187-2200. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.200452](#).
- [14] SCHROTENBOER A H, VEENSTRA A A T, UIT HET BROEK M A J, et al. A green hydrogen energy system: optimal control strategies for integrated hydrogen storage and power generation with wind energy [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2022, 168: 112744. DOI: [10.1016/j.rser.2022.112744](#).
- [15] 吉斌, 孙绘, 梁肖, 等. 面向“双碳”目标的碳电市场融合交易探讨 [J]. *华电技术*, 2021, 43(6): 33-40. DOI: [10.3969/j.issn.1674-1951.2021.06.004](#).  
JI B, SUN H, LIANG X, et al. Discussion on convergent trading of the carbon and electricity market on the path to carbon peak and carbon neutrality [J]. *Huadian technology*, 2021, 43(6): 33-40. DOI: [10.3969/j.issn.1674-1951.2021.06.004](#).
- [16] 帅云峰, 周春蕾, 李梦, 等. 美国碳市场与电力市场耦合机制研究——以区域温室气体减排行动(RGGI)为例 [J]. *电力建设*, 2018, 39(7): 41-47. DOI: [10.3969/j.issn.1000-7229.2018.07.005](#).  
SHUAI Y F, ZHOU C L, LI M, et al. Coupling mechanism of U. S. carbon market and electricity market: a case study of regional greenhouse gas initiative [J]. *Electric power construction*, 2018, 39(7): 41-47. DOI: [10.3969/j.issn.1000-7229.2018.07.005](#).
- [17] 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. DOI: [10.3969/j.issn.1672-0792.2022.07.001](#).  
XUE G Y, WU C, WANG H R, 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. DOI: [10.3969/j.issn.1672-0792.2022.07.001](#).
- [18] 冯昌森, 谢方锐, 文福栓, 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. DOI: [10.7500/AEPS20200925010](#).  
FENG C S, XIE F R, WEN F S, et al. Design and implementation of joint trading market for green power certificate and carbon based on smart contract [J]. *Automation of electric power*

- systems, 2021, 45(23): 1-11. DOI: [10.7500/AEPS20200925010](https://doi.org/10.7500/AEPS20200925010).
- [19] FENG T T, LI R, ZHANG H M, 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. DOI: [10.1016/j.resconrec.2021.105487](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105487).
- [20] 王帮灿, 刘洋, 崔雪. 基于电碳联动的火电企业补偿机制研究 [J]. *电测与仪表*, 2019, 56(20): 65-70. DOI: [10.19753/j.issn1001-1390.2019.020.011](https://doi.org/10.19753/j.issn1001-1390.2019.020.011).  
WANG B C, LIU Y, CUI X. Research on compensation mechanism of thermal power enterprises based on electricity-carbon linkage [J]. *Electrical measurement & instrumentation*, 2019, 56(20): 65-70. DOI: [10.19753/j.issn1001-1390.2019.020.011](https://doi.org/10.19753/j.issn1001-1390.2019.020.011).
- [21] 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. DOI: [10.19753/j.issn1001-1390.2020.13.018](https://doi.org/10.19753/j.issn1001-1390.2020.13.018).  
LIU Y, CUI X, XIE X, 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. DOI: [10.19753/j.issn1001-1390.2020.13.018](https://doi.org/10.19753/j.issn1001-1390.2020.13.018).
- [22] 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/OL]. *电力系统自动化*: 1-16 (2022-10-29) [2022-12-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20221027.1803.010.html>.  
ZHAO L, LI Y P, JIN X Y, et al. Coordinated bidding model of hydropower-thermal power in carbon-electricity coupling market considering CCER mechanism [J/OL]. *Automation of electric power systems*: 1-16. (2022-10-29) [2022-12-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20221027.1803.010.html>.
- [23] SONG X H, HAN J J, ZHANG L, et al. Impacts of renewable portfolio standards on multi-market coupling trading of renewable energy in China: a scenario-based system dynamics model [J]. *Energy policy*, 2021, 159: 112647. DOI: [10.1016/j.enpol.2021.112647](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112647).
- [24] 张哈, 韩冬, 刘坦, 等. 碳中和背景下分布式光伏渗透与售电市场耦合机制分析 [J/OL]. *上海交通大学学报*: 1-9 (2022-07-28) [2022-12-29]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.514>.  
ZHANG H, HAN D, LIU T, et al. Analysis of market coupling mechanism between distributed photovoltaic penetration and electricity market under the background of carbon neutrality [J/OL]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*: 1-9 (2022-07-28) [2022-12-29]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.514>.
- [25] WANG L Z, JIAO S C, XIE Y, et al. Two-way dynamic pricing mechanism of hydrogen filling stations in electric-hydrogen coupling system enhanced by blockchain [J]. *Energy*, 2022, 239: 122194. DOI: [10.1016/j.energy.2021.122194](https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122194).
- [26] LIU H X, WANG Y Y, XU F F, et al. P2H modeling and operation in the microgrid under coupled electricity-hydrogen markets [J]. *Frontiers in energy research*, 2021, 9: 812767. DOI: [10.3389/FENRG.2021.812767](https://doi.org/10.3389/FENRG.2021.812767).
- [27] 万文轩, 冀亚男, 尹力, 等. 碳交易在综合能源系统规划与运行中的应用及展望 [J]. *电测与仪表*, 2021, 58(11): 39-48. DOI: [10.19753/j.issn1001-1390.2021.11.006](https://doi.org/10.19753/j.issn1001-1390.2021.11.006).  
WAN W X, JI Y N, YIN L, et al. Application and prospect of carbon trading in the planning and operation of integrated energy system [J]. *Electrical measurement & instrumentation*, 2021, 58(11): 39-48. DOI: [10.19753/j.issn1001-1390.2021.11.006](https://doi.org/10.19753/j.issn1001-1390.2021.11.006).
- [28] 廖远旭, 董英瑞, 孙翔, 等. 可再生能源制氢综合能源管理平台研究 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(4): 47-52. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.006](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.006).  
LIAO Y X, DONG Y R, SUN X, et al. Research on comprehensive energy management platform for hydrogen production from renewable energy [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(4): 47-52. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.006](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.006).
- [29] PENG G B, XIANG Y. CO<sub>2</sub> Emission coupled power generation mix evolution: a system dynamics approach [J]. *Energy reports*, 2022, 8(Suppl.10): 597-604. DOI: [10.1016/j.egyr.2022.05.225](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.05.225).
- [30] DING Y T, CHEN S, ZHENG Y L, et al. Resilience assessment of China's natural gas system under supply shortages: a system dynamics approach [J]. *Energy*, 2022, 247: 123518. DOI: [10.1016/j.energy.2022.123518](https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123518).
- [31] 曹先磊, 程毅明, 吴伟光. 碳中和目标背景下CCER林业碳汇项目开发优先序研究 [J]. *统计与信息论坛*, 2022, 37(5): 52-63. DOI: [10.3969/j.issn.1007-3116.2022.05.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-3116.2022.05.005).  
CAO X L, CHENG Y M, WU W G. Study on the priorities for the development of CCER forestry carbon sink projects under the context of carbon neutrality goals [J]. *Journal of statistics and information*, 2022, 37(5): 52-63. DOI: [10.3969/j.issn.1007-3116.2022.05.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-3116.2022.05.005).
- [32] WU Q Y. Price and scale effects of China's carbon emission trading system pilots on emission reduction [J]. *Journal of environmental management*, 2022, 314: 115054. DOI: [10.1016/j.jenvman.2022.115054](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115054).
- [33] QI S Z, CHENG S H, TAN X J, et al. Predicting China's carbon price based on a multi-scale integrated model [J]. *Applied energy*, 2022, 324: 119784. DOI: [10.1016/j.apenergy.2022.119784](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119784).
- [34] WANG M G, ZHU M R, TIAN L X. A novel framework for carbon price forecasting with uncertainties [J]. *Energy economics*, 2022, 112: 106162. DOI: [10.1016/j.eneco.2022.106162](https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.106162).

- [35] 许传博, 刘建国. 氢储能在我国新型电力系统中的应用价值、挑战及展望 [J]. *中国工程科学*, 2022, 24(3): 89-99. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2022.03.010.  
XU C B, LIU J G. Hydrogen energy storage in China's new-type power system: application value, challenges, and prospects [J]. *Strategic study of CAE*, 2022, 24(3): 89-99. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2022.03.010.
- [36] 潘光胜, 顾伟, 张会岩, 等. 面向高比例可再生能源消纳的电源系统 [J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(23): 1-10. DOI: 10.7500/AEPS20200202003.  
PAN G S, GU W, ZHANG H Y, et al. Electricity and Hydrogen energy system towards accomodation of high proportion of renewable energy [J]. *Automation of electric power systems*, 2020, 44(23): 1-10. DOI: 10.7500/AEPS20200202003.
- [37] 李爽, 史翔翔, 蔡宁生. 面向能源转型的化石能源与可再生能源制氢技术进展 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2022, 62(4): 655-662. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2022.25.039.  
LI S, SHI Y X, CAI N S. Progress in hydrogen production from fossil fuels and renewable energy sources for the green energy revolution [J]. *Journal of Tsinghua University (science and technology)*, 2022, 62(4): 655-662. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2022.25.039.
- [38] 岳铂雄, 熊厚博, 郭亦宗, 等. 碳交易机制推动电力行业低碳转型 [J]. *电气自动化*, 2022, 44(4): 1-3,7. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3886.2022.04.001.  
YUE B X, XIONG H B, GUO Y Z, et al. Carbon transaction mechanism promotes low-carbon transformation of power industry [J]. *Electrical automation*, 2022, 44(4): 1-3,7. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3886.2022.04.001.
- [39] WANG W J, ZHAO X J, ZHANG Q Q, et al. Auction mechanism design of the Chinese national carbon market for carbon neutralization [J]. *Chinese journal of population, resources and environment*, 2022, 20(2): 115-124. DOI: 10.1016/j.cjpre.2022.06.002.
- [40] 美国环保协会. 电力行业参与欧盟碳排放交易体系经验与教训 [R/OL]. (2022-12-22) [2022-12-29]. <http://www.cet.net.cn/html/zl/bg/2020/0521/417.html>.  
Environmental Defense Fund. Experience and lessons from the participation of the power industry in the EU carbon emissions trading system [R/OL]. (2022-12-22) [2022-12-29]. <http://www.cet.net.cn/html/zl/bg/2020/0521/417.html>.
- [41] YAN J C. The impact of climate policy on fossil fuel consumption: evidence from the regional greenhouse gas initiative (RGGI) [J]. *Energy economics*, 2021, 100: 105333. DOI: 10.1016/j.eneco.2021.105333.

---

作者简介:



王浩然

**王浩然 (第一作者)**

1993-, 女, 河北邢台人, 经济管理学院管理科学与工程专业博士在读, 主要从事电力市场低碳政策研究工作(e-mail)15732137196@163.com。



冯天天

**冯天天 (通信作者)**

1989-, 女, 北京人, 副教授, 华北电力大学技术经济与管理博士, 主要从事能源经济和低碳政策研究工作(e-mail)fengtiantian89@163.com。

**崔茗莉**

1999-, 女, 黑龙江大庆人, 中国地质大学(北京)工商管理专业硕士在读, 主要从事资源企业管理研究工作(e-mail)cui mingli99@163.com。

**钟诚**

2000-, 男, 北京人, 中国地质大学(北京)工商管理专业硕士在读, 主要从事资源企业管理研究工作(e-mail)cheng4754105@163.com。

(编辑 叶筠英)