

# 可再生能源配额制下的电力市场优化策略研究

刘文君,张莉芳<sup>1</sup>

(南华大学 核能与经济管理研究中心,湖南 衡阳 421001)

**[摘要]** 文章基于一般均衡理论,结合电力市场和绿色证书交易市场的特点,构建了发电厂商之间的斯坦科尔伯格模型。运用系统动力学理论,分析了绿色证书交易对电力市场的影响机理。在此基础上,利用 Vinsim 软件仿真模拟绿色证书交易对电力市场的耦合效应。结果表明:(1)可再生能源配额制的实施在电力市场上衍生出了绿色证书交易市场,在绿色证书交易市场上煤电厂商作为需求者,可再生能源厂商作为供给者,为了完成各自的配额目标,实现利润最大化进行证书交易。(2)绿色证书交易市场的有效运行不仅能够降低煤电发电量,而且可以提高可再生能源发电量,从而有效调整电源结构。为了更好地实施可再生能源配额制,政府需要采取相关措施:(1)加大电力体制改革力度,加快建立市场化电价形成机制。(2)设定合理的绿色证书交易市场基础参数,保证绿色证书交易的正常运行。(3)鼓励发电厂商进行技术创新,提高成本优势增强市场竞争力。

**[关键词]** 绿色证书交易市场; 电力市场; 斯坦科尔伯格模型; 系统动力学

**[中图分类号]** F426.61 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1673-0755(2021)01-0071-10

**DOI:**10.13967/j.cnki.nhxb.2021.0009

为了降低不可再生能源消费带来的大气环境影响,推动生态文明和美丽中国建设,政府大力发展可再生能源,主要实施可再生能源强制上网和固定电价政策。然而产业急剧发展所带来的是上网补贴资金缺口的加速膨胀,国家财政负担压力的急剧增大<sup>[1]</sup>,这迫使我国将能源政策转向可再生能源配额制<sup>[2]</sup>。配额制的实施会对电力市场产生极大的影响,由此衍生出的绿色证书交易市场与电力市场有效融合是当前发电行业调整电源结构工作面临的新挑战。因此,研究绿色证书交易对电力市场的影响机理和耦合效应,并提出切实可行的政策实施建议具有十分重要的意义。为了确保可再生能源配额制的成功实施,需要回答三个问题:第一,绿色证书交易市场的运行机制是什么?第二,绿色证书交易对电力市场的影响机理是什么?第三,绿色证书交易市场与电力市场的耦合作用是如何生发的?于是,本文构建了绿色证书和电力交互市场的系统动力学模型,探讨了绿色证书交易市场运行机制以及对电力市场的影响机理和耦合效应。

## 一 文献综述

当前,国内外学者对可再生能源配额制尚未进

行统一和严格的界定,其通常包括可再生能源配额制和绿色证书交易<sup>[3]</sup>。可再生能源配额制是一个国家或者一个地区的政府在法律法规中对可再生能源发电的市场份额做出的强制性规定。绿色证书是将可再生能源配额形成的可再生能源发电量证券化,并借此构建基于市场的可再生能源电力供求机制和市场交易体系<sup>[4]</sup>。

国内外学者对固定电价政策与可再生能源配额制政策的对比研究比较深入。国外学者在总结各个国家制度实施经验的基础上探讨了两种制度在不同环境下的可行性。Ingmar Ritzenhofen 等(2016)研究了可再生能源配额制和固定电价政策对电力市场结构的影响<sup>[5]</sup>。在此基础上,Gobong Choi 等<sup>[6]</sup>(2018)选用收益成本比和净现值两个指标分别从政府和能源生产商的角度出发,对比分析了固定电价政策和可再生能源配额制对韩国可再生能源市场经济效率的影响。除此之外,一部分学者集中研究分析了可再生能源配额制及电力市场和碳减排之间的关系。其中 Zuo Yi 等(2019)使用多区域电力优化模型与分解方法相结合,定量评估了可再生能源配额制和碳减排上限对中国电力行业的影响,结果

**[收稿日期]** 2020-09-13

**[基金项目]** 国防科技工业核动力技术创新中心项目“核能可持续发展战略研究”资助(编号:HDLCXZX-2017-ZH-011)

**[作者简介]** 刘文君(1978—),男,陕西山阳人,南华大学核能与经济管理研究中心教授,博士。

<sup>1</sup> 南华大学经济管理与法学院硕士研究生。

表明合理的电力系统规划与当前政策组合状况之间存在强大的内部联系<sup>[7]</sup>。国内学者对固定电价政策与可再生能源配额制的研究相对较少,加之缺少必要的基础数据,大多数研究仅停留在定性分析层面。其中梁钰等(2018)从政策制定、政策影响和政策效果三个角度对固定电价政策和可再生能源配额制进行全面的对比分析<sup>[8]</sup>。付珊璐(2008)通过研究发现可再生能源配额制能够有效解决可再生能源电力的供应问题,而固定电价政策则可解决可再生能源电力的需求问题,在此基础上提出了配额制与固定电价的互补模式<sup>[9]</sup>。

可再生能源配额制的实施会对可再生能源产业、电力市场和经济市场产生巨大的影响。一方面,可再生能源配额制的实施会对可再生能源产业的发展产生影响,学者 Sun(2016)通过建立两阶段模型,并基于可再生能源配额制对可再生能源发电产业发展的影响进行了研究,发现政策的实施不仅会促进可再生能源产业的发展,还会对上网电价产生影响,但是可再生能源配额比例的增长不会造成电力价格的大幅度增长<sup>[10]</sup>。另一方面,可再生能源配额制的实施会激励煤电厂商和可再生能源发电厂商进行技术创新减少生产成本,促使整个市场达到一定的环境目标,从而减少政府干预。董力通(2006)结合相关理论利用成本效益分析法分别从可再生能源企业和社会两个角度对实行可再生能源配额制进行成本效益实证分析,研究发现可再生能源配额制的实施不仅会显著增加可再生能源发电企业的效益,而且能够提高社会的整体效益<sup>[11]</sup>。Galen Barbose 等(2015)从碳减排、人类健康效益、经济发展水平和电价平衡等潜在社会效益的角度出发,对美国实施的可再生能源配额制政策进行了成本和收益分析<sup>[12]</sup>。

借鉴国外实施配额制的经验,部分学者分析了我国实施该政策的可行性,探讨了绿色证书交易制度设计中可再生能源发展的总量目标,绿色证书交易的定价机制以及相关的法律法规和配套实施政策等,并且就相关内容做出了明确界定,提出了可再生能源配额制的制度设计框架及实施步骤。由于之前售电侧尚未开放,所以国内前期关于可再生能源配额制的研究主要是围绕发电侧展开的,其中董福贵和时磊(2019)在发电侧设计了一种保证绿色证书交易供需平衡的可再生能源配额交易机制,为解决可再生能源消纳等问题提供了相关思路<sup>[13]</sup>。随着新一轮电力改革的不断推进,售电侧有序放开,相关研究也逐步深入,其中冯奕等(2017)从售电侧角度研究可再生能源配额制,在对现有五个国家和地区

在售电侧实施可再生能源配额制相关经验进行总结的基础上,设计出了适合我国实际情况的售电侧可再生能源配额制发展框架<sup>[14]</sup>。制度的顶层设计虽然重要,但是配额指标的合理性和公正性也是可再生能源配额制稳定实施的前提,针对此问题,Wang hongye 等(2019)分别通过最小成本法和熵权法进行研究,制定了各省可再生能源配额目标分配方案<sup>[15]</sup>。此外,还有一些学者认为可再生能源配额制和碳排放权交易存在政策上的交集,因此在制度设计时应该将这两种政策均考虑在内,统筹规划。

## 二 模 型

探究可再生能源配额制对中国电力市场的影响机理,系统动力学是最有力的分析工具。系统动力学原理是系统思考和反馈控制理论,有助于理解复杂系统的时变行为。通过分析系统中各个元素之间复杂的关系,建立一个相对有效的系统动力学模型,从而达到期望的比例和满足设定的要求。由于适合高度非线性、高阶次、多变量、因果反馈和复杂时变系统问题等的研究,近些年来常被学者用于具有长期性、周期性、低精度要求和动态复杂性的社会经济系统的分析和研究。

可再生能源配额制的实施在电力市场的基础上衍生出了绿色证书交易市场。煤电厂商和可再生能源厂商在电力市场是竞争关系,在绿色证书交易市场上是供给关系。可再生能源厂商作为可再生能源电力的生产者和绿色证书的供给者,享有制度优势,处于领导者地位,能够通过控制可再生能源发电量来改变绿色证书的供给量,从而改变绿色证书价格。煤电厂商为了完成政府规定的强制性配额比例需要在市场上购买绿色证书,面对未完成的高额罚金,处于制度劣势,属于市场上的追随者。由此可知可再生能源厂商和煤电厂商的行为模式构成了斯坦科尔伯格模型。

### (一) 运行机制

在电力和绿色证书交互市场中,煤电厂商和可再生能源厂商都需要承担一定的可再生能源配额比例,可再生能源厂商作为绿色证书的供给者,同时,煤电厂商作为绿色证书的需求者。发电厂商在绿色证书交易市场上根据绿色证书基准价格、可再生能源配额比例和罚金等参数确定期望的绿色证书购买量和销售量。然后在市场上进行交易,市场均衡时获得绿色证书的市场价格和交易数量。此时电力市场也达到了均衡,不仅可以得出两类发电厂商各自的发电量、总供电量和电力价格,还可以根据发电厂

商的利润函数计算出所获得的利润。如果绿色证书的市场价格高于基准价格,可再生能源厂商将会获得超额利润,投资者会加大对可再生能源产业的投资,促使可再生能源装机容量增加,最终导致绿色证书供给增加,从而影响下一次交易的价格。厂商根

据绿色证书市场价格的变化决定是否追加投资,投资金额的变化会影响可再生能源电力装机容量,改变厂商对绿色证书的供需,从而决定绿色证书的均衡价格和均衡数量,见图1。

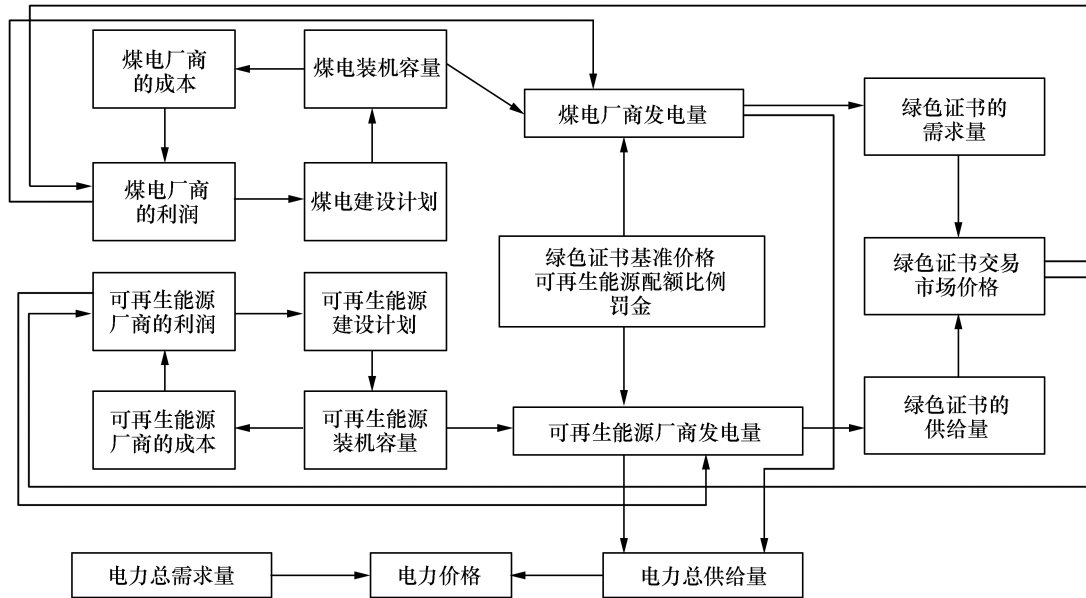


图1 可再生能源配额制下的中国电力市场研究框架

## (二)模型设计

电力市场中,发电厂商由于生产技术的不同,可以分为两类,分别是煤电厂商和可再生能源厂商。在资源有限的约束下,发电厂商通过制定战略,积极参与市场竞争,从而达到企业自身利润最大化。可再生能源配额制的实施,在电力市场的基础上衍生出了绿色证书交易市场。首先在电力市场上两类发电厂商根据消费者对电力的需求量来决定其发电量,然后在绿色证书交易市场上可再生能源厂商是绿色证书的供给者,煤电厂商是绿色证书的需求者,发电厂商能够根据自身的需求在市场上进行交易。为了更好地对电力市场和绿色证书交易市场的相关参数进行设定以及对发电厂商的行为决策进行研究,本文做出以下假设:

(1)电力市场和绿色证书交易市场都是完全竞争市场,即市场中的参与者都是理性经济人,市场交易价格由供给和需求决定。

(2)研究的范围局限于一国的电力市场,既不涉及国际市场对其可能产生的影响,也不考虑电力和绿色证书的跨境交易。

(3)研究只考虑绿色证书交易现货市场,不考虑远期市场,绿色证书不可以存储。

(4)单位电力与单位绿色证书相对应,即政府给可再生能源厂商颁发证书时,1单位可再生能源电力签发1单位绿色证书。

### 1. 经济模型

在电力市场上,煤电厂商和可再生能源厂商同时进行电力生产,共同满足消费者对电力的需求,电力市场上电力的需求函数为线性,即:

$$P_e = f - gQ_s = f - g(q_{coal} + q_{green}) \quad (1)$$

式中, $P_e$ 表示电力价格; $f, g$ 表示需求函数中的经济参数, $f, g$ 为常数,并且 $f$ 和 $g$ 都大于0; $q_{coal}$ 表示煤电发电量; $q_{green}$ 表示可再生能源发电量。

当政府实施可再生能源配额制时,电力市场上对于煤电厂商和可再生能源厂商而言都需要承担一定的配额比例。煤电厂商生产的电力为 $q_{coal}$ ,根据其发电量可以注销 $\alpha q_{coal}$ 单位的绿色证书。可再生能源厂商生产 $q_{green}$ 的电力,根据其发电量应获得 $(1-\alpha)q_{green}$ 单位的绿色证书。在绿色证书交易市场上,可再生能源厂商在满足自身需求的同时将多余绿色证书进行交易,可以获得的收益为 $(1-\alpha)q_{green}P_c$ 。煤电厂商作为绿色证书的需求者,为完成政府规定的配额比例,需要购买的绿色证书数量至少为 $\alpha q_{coal}$ ,相应的支出费用为 $\alpha q_{coal}P_c$ 。



第一,煤电厂商的生产决策原则为:

$$\max_{q_{coal}} W_{coal} = P_e q_{coal} - C_{coal} - \alpha P_c q_{coal} \quad s. t. \quad q_{coal} \geq 0 \quad (2)$$

煤电厂商的生产成本是生产数量的线性函数,即:

$$C_{coal} = c_{coal} q_{coal} + f_{coal} \quad (3)$$

式(2)中  $q_{coal}$ 、 $P_e$  与前文定义相同; $W_{coal}$  表示煤电厂商的利润; $c_{coal}$  表示煤电厂商的长期边际成本; $f_{coal}$  表示煤电厂商的固定成本; $P_c$  表示绿色证书价格; $\alpha$  表示政府相关部门设定的强制配额比例,而且  $\alpha \in [\alpha_0, \alpha_1]$ , 其中  $\alpha_0$  为比例下限,  $\alpha_1$  为比例上限, 为政策性变量。

第二,可再生能源厂商的生产决策原则为:

$$\max_{q_{green}} W_{green} = P_e q_{green} - C_{green} + (1 - \alpha) P_c q_{green} \quad s. t. \quad q_{green} \geq 0 \quad (4)$$

可再生能源厂商的成本是生产数量的线性函数,即:

$$C_{green} = c_{green} q_{green} + f_{green} \quad (5)$$

式(4)(5)中  $q_{green}$ 、 $P_e$ 、 $\alpha$ 、 $P_c$  与前文定义相同; $W_{green}$  表示可再生能源厂商的利润; $c_{green}$  表示可再生能源厂商的长期边际成本; $f_{green}$  表示可再生能源厂商的固定成本。

第三,根据利润最大化的原理,由一阶条件可以得出煤电厂商的反应函数  $q_{coal}$ :

$$q_{coal} = \frac{f - g q_{green} - c_{coal} - \alpha P_c}{2g} \quad (6)$$

可再生能源厂商是在已知煤电厂商反应函数的基础上决定利润最大化产量,所以将式(6)代入式(4)可得寡头市场煤电厂商的均衡产出  $q_{coal}$  和可再生能源厂商的均衡产出  $q_{green}$ , 分别是:

$$q_{green} = \frac{f + c_{coal} - 2c_{green} + (2 - \alpha)P_c}{2g} \quad (7)$$

$$q_{coal} = \frac{f + 2c_{green} - 3c_{coal} - (2 + \alpha)P_c}{4g} \quad (8)$$

分析上述公式可以得出电力市场上煤电厂商和可再生能源厂商的最优产量均与固定成本、可变成本、配额比例和绿色证书价格相关。对于可再生能源厂商而言,最优产量随着绿色证书价格的上升而增加,因为随着绿色证书价格的上涨,厂商越有动力加大生产。对于煤电厂商而言最优的产量随着绿色证书价格的上升而减少,因为随着绿色证书价格的上涨,煤电厂商将会削减产量,从而导致单位生产成本上升。当绿色证书基准价格已知为  $P_c^0$  时,煤电厂商的最优决策  $q_{coal}^*$  和可再生能源厂商的最优决策

$q_{green}^*$  为:

$$q_{green}^* = \frac{f + c_{coal} - 2c_{green} + (2 - \alpha)P_c^0}{2g} \quad (9)$$

$$q_{coal}^* = \frac{f + 2c_{green} - 3c_{coal} - (2 + \alpha)P_c^0}{4g} \quad (10)$$

第四,在绿色证书交易市场上,可再生能源厂商作为供给者出售绿色证书,煤电厂商作为需求者购买绿色证书。为了完成政府规定的强制性配额义务,煤电厂商对绿色证书的需求量  $Q_{coal}^d$  和可再生能源厂商对绿色证书的供给量  $Q_{green}^s$  分别为:

$$Q_{coal}^d = \alpha q_{coal} = \alpha \frac{f + 2c_{green} - 3c_{coal} - (2 + \alpha)P_c}{4g} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} Q_{green}^s &= (1 - \alpha) q_{green} \\ &= (1 - \alpha) \frac{f + c_{coal} - 2c_{green} + (2 - \alpha)P_c}{2g} \end{aligned} \quad (12)$$

可再生能源配额制的实施,绿色证书基准价格及其波动幅度由政府相关部门制定,发电厂商在基准价格和单位罚金下进行产量竞争。绿色证书的市场价格  $P_c$  由绿色证书交易市场的供需平衡决定,当绿色证书交易市场达到均衡时交易价格  $P_c^*$  和交易数量  $Q_c^*$  分别为:

$$P_c^* = \frac{(3\alpha - 2)f - (\alpha + 2)c_{coal} - 2(\alpha - 2)c_{green}}{3\alpha^2 - 4\alpha + 4} \quad (13)$$

$$Q_c^* = \frac{-\alpha(\alpha - 1)[2f - 2(\alpha - 1)c_{coal} + 2\alpha c_{green}]}{g(3\alpha^2 - 4\alpha + 4)} \quad (14)$$

通过对上述公式进行分析,可以发现当绿色证书交易市场达到均衡时,均衡价格和均衡数量主要与四个因素有关,分别是配额比例、煤电厂商的成本、可再生能源厂商的成本和市场对电力的需求。由此可见,绿色证书交易市场和电力市场之间存在着十分密切的关系,电力市场的运作会影响绿色证书交易市场的均衡,绿色证书交易市场的运作会决定电力市场中厂商的行为决策。

政府相关部门设定可再生能源配额比例下限是为了保证绿色证书交易市场的效率以及电力市场和绿色证书交易市场交互作用的有效性和稳定性。绿色证书的交易价格不能为负。

$$P_c^* = \frac{(3\alpha - 2)f - (\alpha + 2)c_{coal} - 2(\alpha - 2)c_{green}}{3\alpha^2 - 4\alpha + 4} \geq 0 \quad (15)$$

政府相关部门确定的煤电厂商和可再生能源厂



商的配额比例为:

$$\alpha \geq \frac{2f + 2c_{coal} - 4c_{green}}{3f - c_{coal} - 2c_{green}} \quad (16)$$

同时对于未完成配额的厂商的罚金  $F$  应该高于绿色证书的均衡价格,即:

$$F > P_c^* = \frac{(3\alpha - 2)f - (\alpha + 2)c_{coal} - 2(\alpha - 2)c_{green}}{3\alpha^2 - 4\alpha + 4} \quad (17)$$

第五,政府实施可再生能源配额制,电力市场和绿色证书交易市场之间存在着较强的相互作用,当电力和绿色证书交易市场同时达到均衡时,煤电厂商和可再生能源厂商的发电量分别为:

$$q_{coal} = \frac{2(1 - \alpha)[f + (\alpha - 1)c_{coal} - \alpha c_{green}]}{g(3\alpha^2 - 4\alpha + 4)} \quad (18)$$

$$q_{green} = \frac{2\alpha f + 2\alpha(\alpha - 1)c_{coal} - 2\alpha^2 c_{green}}{g(3\alpha^2 - 4\alpha + 4)} \quad (19)$$

电力市场总发电量  $Q_s$  为:

$$Q_s = q_{coal} + q_{green} = \frac{2f + 2(\alpha - 1)c_{coal} - 2\alpha c_{green}}{g(3\alpha^2 - 4\alpha + 4)} \quad (20)$$

此时电力价格  $P_e$  为:

$$P_e = \frac{(3\alpha^2 - 4\alpha + 2)f - 2(\alpha - 1)c_{coal} + 2\alpha c_{green}}{g(3\alpha^2 - 4\alpha + 4)} \quad (21)$$

通过分析上述公式可以看出,政府实施可再生能源配额制时,当电力市场和绿色证书交易市场同时达到均衡时,煤电厂商和可再生能源厂商的发电量、总发电量以及电力价格都与配额比例有关。煤电厂商和可再生能源厂商进行绿色证书交易,不仅可以使可再生能源厂商生产成本在行业内进行分摊,而且有利于实现煤电厂商生产负外部性的内部化。

## 2. 系统动力学模型

建立系统动力学模型的目的是研究绿色证书交易市场的运行机制,绿色证书交易市场对电力市场的影响机理,绿色证书交易市场与电力市场的耦合作用,因果回路图和存量流量图如图 2、图 3 所示。

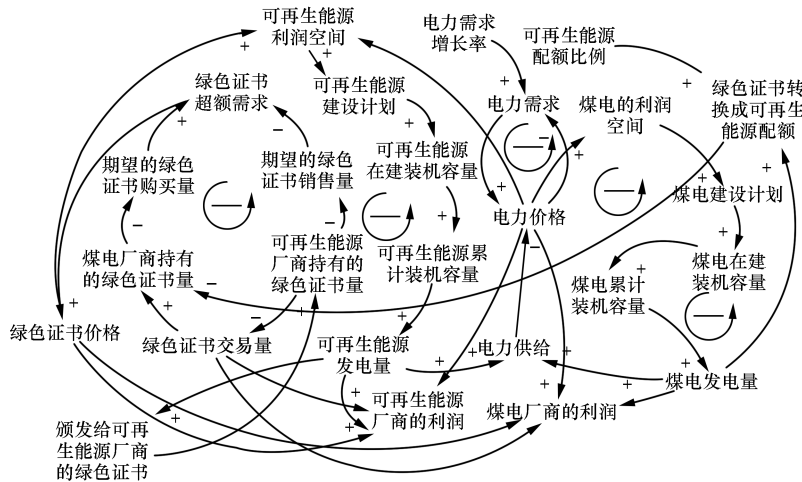


图 2 绿色证书和电力交互市场因果回路图

## 三 模拟仿真

通过理论推导和系统动力学建模,可以发现影响绿色证书交易市场和电力市场的因素有很多。本文以 2020 年为基期,设定时间步长为 1 个月,模拟时间为 120 个月(约为 10 年)。使用 Vinsim 软件模拟绿色证书交易市场的运行机制,绿色证书交易市场与电力市场的耦合作用。

### (一) 发电厂商运行机制分析

#### 1. 煤电厂商

煤电厂商运行机制如图 4 所示,煤电建设计划

受煤电厂商利润空间的影响,可再生能源配额制的实施在短期内会造成煤电厂商的利润空间下降,此时煤电厂商为了维持利润会减少煤电建设量。随着煤电厂商战略的调整和可再生能源配额制的稳定实施,长期内煤电厂商的利润会上升之后趋于平稳,此时煤电建设计划也表现出同样的变化趋势。煤电建设涉及的工程建设周期较长,导致煤电新增装机容量相比于煤电建设计划呈现出递延的趋势,但是整体走势是大致相同的。煤电累计装机容量取决于新增装机容量和初始装机容量,因为初始装机容量不



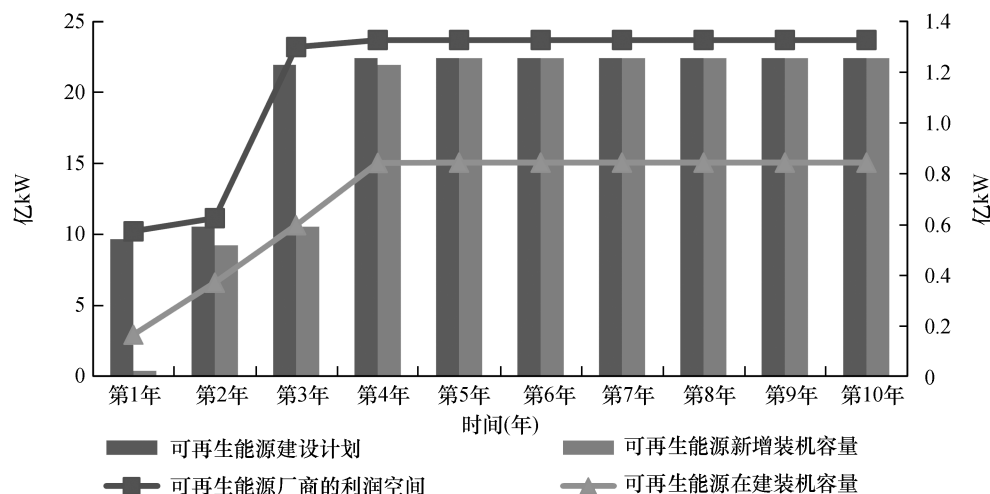


图 5 可再生能源厂商运行机制

注:主坐标轴为折线图,次坐标轴为柱状图。

## (二) 市场分析

### 1. 绿色证书交易市场

可再生能源配额制的实施在电力市场的基础上衍生出了绿色证书交易市场,煤电厂商和可再生能源厂商都需要承担一定的可再生能源配额比例,可再生能源厂商作为绿色证书的供给者,同时煤电厂商作为绿色证书的需求者。发电厂商在绿色证书交易市场上根据绿色证书基准价格,可再生能源配额比例和罚金等参数确定期望的绿色证书购买量和销售量。然后在市场上进行交易,市场均衡时获得绿色证书的市场价格和交易数量。可再生能源厂商持有的绿色证书量取决于可再生能源发电量,所以呈

现逐年上升的趋势。煤电厂商持有的绿色证书量在开始一段时间内是负值,但是通过与可再生能源厂商交易,持有绿色证书量会逐年上升。为了完成配额目标,煤电厂商会在绿色证书交易市场上购买绿色证书,所以期望的绿色证书购买量与煤电厂商持有的绿色证书量呈现相反的变化趋势。可再生能源厂商在完成配额目标的基础上会有多余的绿色证书可供交易,因此期望的绿色证书销售量与可再生能源厂商持有的绿色证书量变化趋势相同,但是期望的绿色证书销售量小于可再生能源厂商持有的绿色证书量。短期内,绿色证书价格变化趋势为从价格下限逐渐上升到基准价格之后保持不变,如图 6 所示。

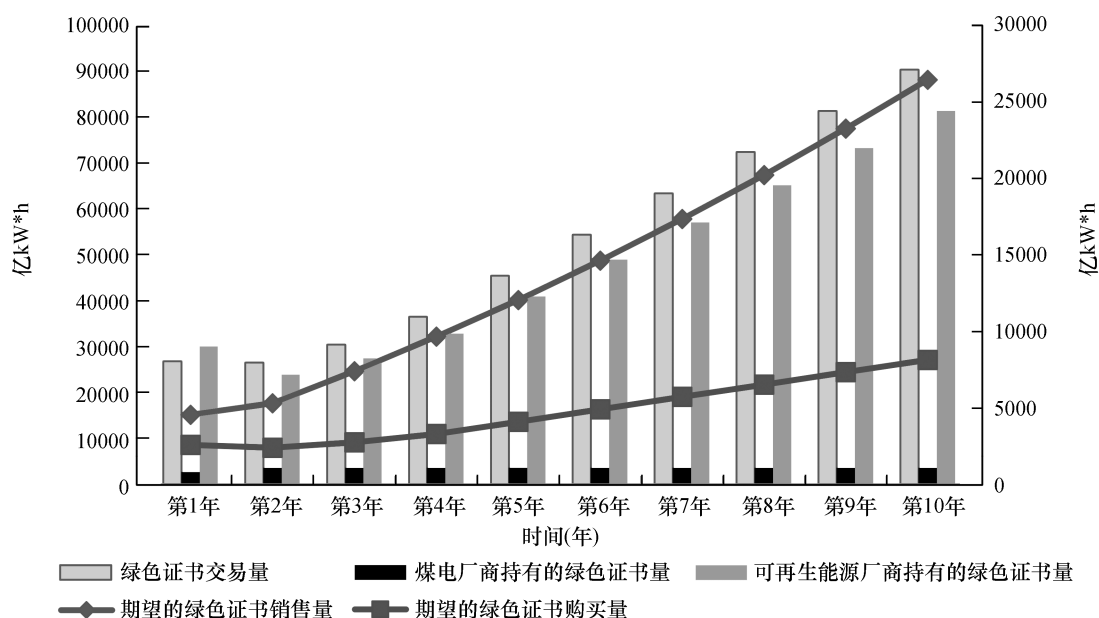


图 6 绿色证书交易市场

注:主坐标轴为折线图,次坐标轴为柱状图。



2. 电力市场

电力供给取决于可再生能源发电量和煤电发电量,由于煤电发电量和可再生能源发电量的变化趋势相同,都为逐年上升,所以电力供给整体走势为逐年上升。电力需求作为外生变量,由电力市场中的消费者决定,一般呈现出逐年递增的趋势。当电力供给等于电力需求,电力市场达到均衡时,可以得出电力价格。电力价格总体走势大致分为三个阶段。前4个月,对于电力价格而言变化趋势是从基准价格逐渐下降到价格下限,但是对于绿色证书价格而言是从价格下限逐渐上升到基准价格,此结果符合

基本经济学中绿色证书价格与电力价格呈现负相关关系的认知。虽然在电力市场上获得的收益减少,但是减少的部分可以通过绿色证书市场获得的补贴来弥补。因此,绿色证书价格和电力价格能够维持绿色证书市场和电力市场的相对稳定,并促使两个市场通过市场本身的交互作用达到均衡。第5个月至第20个月期间,电力价格一直维持价格下限不变,绿色证书一直维持在价格上限不变。第21个月之后,电力价格大幅度上升,到价格上限后,经历波动最终趋于平稳,如图7所示。

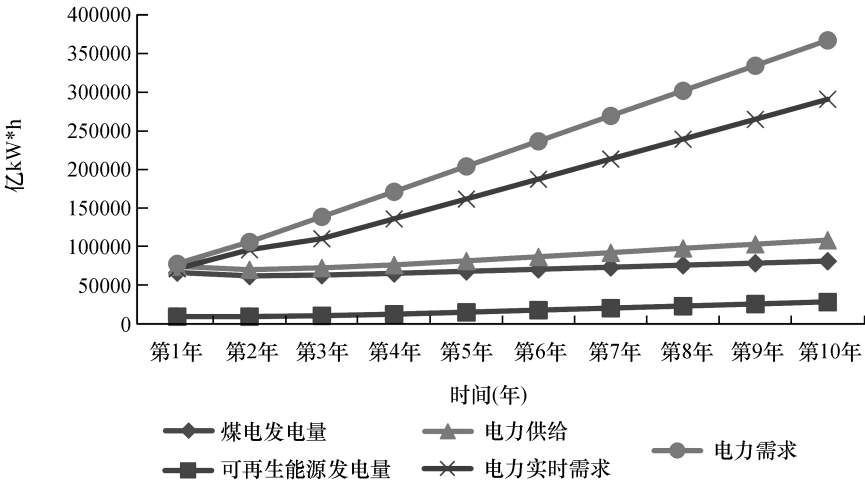


图7 电力市场

(三)电力结构分析

由表1、图8和图9可知,煤电发电量和可再生能源发电量未来10年的走势为先下降然后缓慢上升,总体来说煤电发电量会小于可再生能源发电量。随着可再生能源配额制的实施,中国的电源结构呈现出煤电发电量占比减少和可再生能源发电量占比增加的趋势,到2027年以后,电源结构会趋于稳定,每年只有小幅度的波动。通过上述分析可知,可再生能源配额制的实施能够有效地解决现阶段中国电源结构不合理和传统能源短缺的问题,可再生能源发电量的增加和煤电发电量的减少能够有效减少二氧化碳的排放,实现中国的碳减排目标。

四 建 议

实施可再生能源配额制同时建立绿色证书交易市场,不仅有助于降低政府管理成本,更好地建立公平竞争的市场化机制,而且可以更好地体现可再生能源电力的市场价值,为各类可再生能源发电提供

销售渠道,降低可再生能源发电的成本。为了促进可再生能源长期可持续发展,落实可再生能源配额制,需要进一步建立和完善以下措施。

表1 煤电发电量和可再生能源发电量对比

| 年份   | 煤电发电量<br>(亿 kW · h) | 可再生能源<br>发电量<br>(亿 kW · h) | 煤电<br>发电量<br>比例 | 可再生能源<br>发电量<br>比例 |
|------|---------------------|----------------------------|-----------------|--------------------|
| 2021 | 65 380.90           | 8 144.50                   | 88.92%          | 11.08%             |
| 2022 | 61 051.73           | 8 047.30                   | 88.35%          | 11.65%             |
| 2023 | 62 251.21           | 9 231.25                   | 87.09%          | 12.91%             |
| 2024 | 64 161.23           | 11 141.24                  | 85.20%          | 14.80%             |
| 2025 | 66 852.76           | 14 057.58                  | 82.63%          | 17.37%             |
| 2026 | 69 550.12           | 16 754.96                  | 80.59%          | 19.41%             |
| 2027 | 72 247.49           | 19 452.34                  | 78.79%          | 21.21%             |
| 2028 | 74 944.85           | 22 149.71                  | 77.19%          | 22.81%             |
| 2029 | 77 642.22           | 24 847.09                  | 75.76%          | 24.24%             |
| 2030 | 80 339.58           | 25 146.06                  | 76.16%          | 23.84%             |

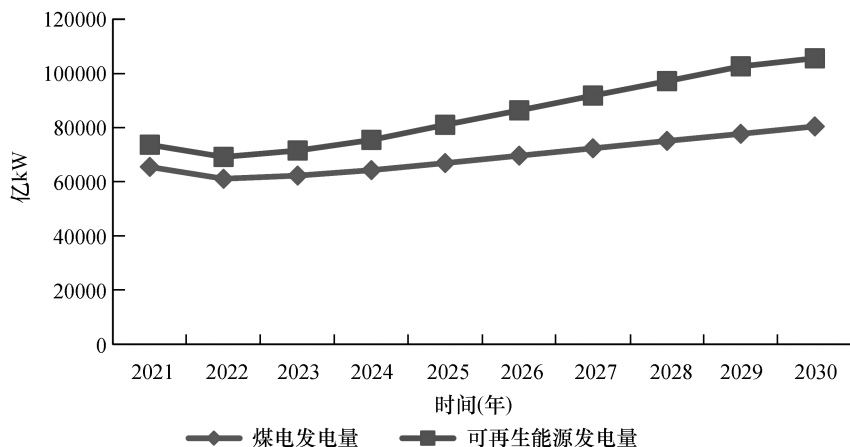


图8 可再生能源发电量与煤电发电量趋势图

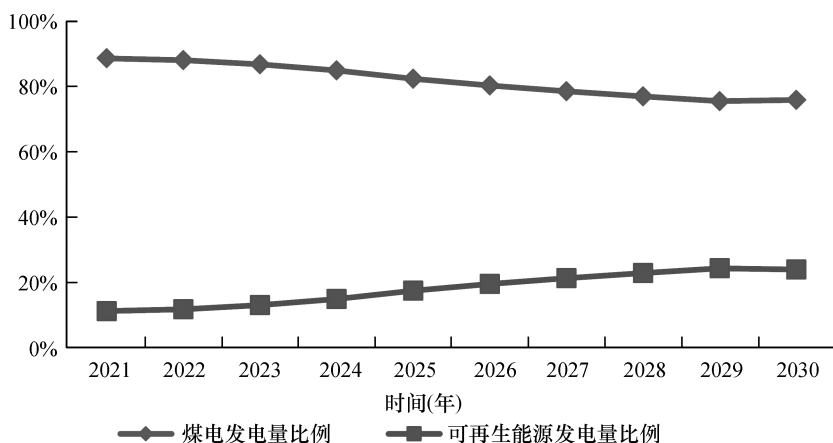


图9 可再生能源发电量占比与煤电发电量占比趋势图

(一)政府在实施可再生能源配额制时应该考虑绿色证书交易市场运行的实际情况和不足之处,在此基础上制定与可再生能源配额制相关的激励政策,鼓励发电厂商进行绿色证书交易,从而实现中国可再生能源产业发展的强制性制度变迁。电价市场化可以有效刺激发电厂商交易绿色证书,增强市场的流动性,促进可再生能源产业的发展。

(二)政府需要设定合理的绿色证书交易市场基础参数,保证绿色证书交易的正常运行,加大发电厂商的市场参与度,提高绿色证书交易效率。同时出台相关政策鼓励发电厂商进行技术创新,技术创新有利于降低生产成本,提高竞争优势,促进厂商交易绿色证书。绿色证书交易市场在运行过程中与电力市场不易同时达到均衡,所以该政策的实施应该逐步稳健地进行。

(三)绿色证书交易市场的发展可以实行市场决定与政府调节相结合的发展策略:一方面,要坚持市场在绿色证书交易中的决定性作用,运用供

求机制、竞争机制和价格机制等手段促进绿色证书交易市场的有效运行。另一方面,充分发挥政府的调节和辅助作用,政府应制定适合市场健康有效运行的法律法规,弥补由于市场自身局限所带来的垄断、信息不对称和外部性等市场失灵,不断完善市场环境。

#### [参考文献]

- [1] 杨萌. 电力体制改革获得积极成效 新能源参与市场竞争是必然趋势[EB/OL]. (2018-10-30) [2020-08-11]. <http://www.zqrb.cn/finance/hangyedongtai/2018-10-30/A1540836880522.html>.
- [2] 李鹏. 关于可再生能源电力配额与绿证交易的思考[N]. 中国能源报, 2017-04-03(3).
- [3] 张萌, 张斌. 浅析世界可再生能源政策及发展[EB/OL]. (2014-05-14) [2020-08-11]. [http://www.nea.gov.cn/2014-05/14/c\\_133332280.htm](http://www.nea.gov.cn/2014-05/14/c_133332280.htm).
- [4] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于积极推进风电、光伏发电无补贴平价上网有关工作的通知[EB/OL].

- (2019-01-07) [2020-08-12]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201901/t20190109\\_962365.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201901/t20190109_962365.html).
- [5] INGMAR RITZENHOFEN, JOHN R BIRGE, STEFAN SPINLER. The structural impact of renewable portfolio standards and feed-in tariffs on electricity markets[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016,255(1): 224-242.
- [6] GOBONG CHOI, SUNG YOON HUH, et al. Prices versus quantities: Comparing economic efficiency of feed-in tariff and renewable portfolio standard in promoting renewable electricity generation[J]. *Energy Policy*, 2018(113): 239-248.
- [7] ZUO YI, ZHAO XINGANG, ZHANG YUZHOU, et al. From feed-in tariff to renewable portfolio standards: An evolutionary game theory perspective[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,213(10): 1274-1289.
- [8] 梁钰,孙竹,冯连勇,等. 可再生能源固定电价政策和可再生能源配额制比较分析及启示[J]. *中外能源*, 2018,23(5): 13-20.
- [9] 付珊珊. 我国可再生能源发电配额和强制上网的互补发展模式研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2009.
- [10] SUN YANMING. The optimal percentage requirement and welfare comparisons in a two-country electricity market with a common tradable green certificate system[J]. *Economic Modelling*, 2016,55:322-327.
- [11] 董力通. 电力市场下我国实行可再生能源配额制的研究[D]. 北京:华北电力大学,2006.
- [12] GALEN BARBOSE, LORI BIRD, JENNY HEETER, et al. Costs and benefits of renewables portfolio standards in the United States[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015,52:523-533.
- [13] 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.
- [14] 冯奕,刘秋华,刘颖,等. 中国售电侧可再生能源配额制设计探索[J]. *电力系统自动化*, 2017,41(24): 137-141;158.
- [15] WANG HONGYE, SU BIN, MU HAILIN, et al. Optimal way to achieve renewable portfolio standard policy goals from the electricity generation, transmission, and trading perspectives in southern China[J]. *Energy Policy*, 2020, 139: 113-119.

## Research on Electricity Market Optimization Policy Under the Renewable Energy Quota System

LIU Wen-jun, ZHANG Li-fang

(University of South China, Hengyang 421001, China)

**Abstract:** Based on the general equilibrium theory and combining the characteristics of the electricity market and the green certificate trading market, this paper constructs the Stankelberg model among power generation companies. Using system dynamics theory, the impact mechanism of green certificate trading on the electricity market is analyzed. On this basis, Vinsim software is used to simulate the coupling effect of green certificate trading on the electricity market. The results show that: (1) The implementation of the renewable energy quota system has spawned a green certificate trading market in the electricity market. In the green certificate trading market, coal power manufacturers as the demanders and renewable energy manufacturers as the suppliers, realize the maximum profit to trade in order to achieve their respective quota targets. (2) The effective operation of the green certificate trading market can not only reduce coal power generation, but also increase renewable energy generation, thereby effectively adjusting the power supply structure. In order to better implement the renewable energy quota system, the government needs to take relevant measures: (1) Intensify the reform of the electricity system and accelerate the establishment of a market-based electricity price formation mechanism. (2) Set reasonable basic parameters of the green certificate transaction market to ensure the normal operation of green certificate transactions. (3) Encourage power generation companies to carry out technological innovation, improve cost advantages and enhance market competitiveness.

**Key words:** the green certificate trading market; electricity market; Stankelberg model; system dynamics

(本文编辑:魏玮)