

文章编号:1005-9679(2017)03-0030-09

# 我国可再生能源电力配额及其交易研究

孔令丞, 石晶

(华东理工大学 商学院, 上海 200237)

**摘要:** 全球经济增长长期所维系的高碳模式导致化石能源大量消耗, 并产生供需矛盾和排放等环境与气候问题。以证书交易的形式建立可再生能源发电配额制, 成为缓解化石能源供给不足和强化减排的重要措施。以我国将可能实施的可再生能源发电配额制为背景, 借鉴发达国家的经验, 讨论实行配额证书市场交易的可行性; 研究配额目标和价格上限等约束对利润最大化条件下的证书交易量及价格的影响, 为我国后续开展配额交易提供政策建议。

**关键词:** 可再生能源; 可再生能源发电配额制; 可再生能源电力证书; 证书交易市场

中图分类号: TK 011

文献标志码: A

## Research of the Renewable Portfolio Standard and Tradeable Credits Market in China

KONG Lingcheng, SHI Jing

(School of Busness, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

**Abstract:** With the rapid development of global economy, the large consumption of traditional energy led to the increasingly contradiction between supply and demand, and the wide use of traditional energy also brought massive discharge of pollutant, the world have to face the global environment problems within the challenges of environmental pollution. Facing the above situation, as an effective incentive policy of promoting renewable energy development, the policy of renewable portfolio standard (RPS) with the core of renewable electricity credits (REC) has been more and more implemented by western countries. On the base of applying of renewable portfolio standard in China in the near future, this paper summarizes the practical experience in domestic and abroad, and discusses the market conditions of implementing RPS system and of construction REC trading market in China. By means of quantitatively analyzing, supply-and-demand equilibrium and price mechanism, we analyze whether the REC market price forming mechanism can promote the development of renewable energy power through effective reflecting the enterprise generating cost and then analyze its market benefit. Finally, this paper analyzes the benefits brought by RPS to electrical power system, as well as some possible obstacles in practical operation, and puts forward relevant suggestions for future study and policy making.

**Key words:** renewable electricity; renewable portfolio standard; renewable electricity credits; credits market

收稿日期: 2017-03-06

基金项目: 国家自然科学基金(71273091)“碳强度目标下可再生能源发电产业链的定价机制研究”; 教育部人文社科规划项目(11YJA790068)“基于产业链的太阳能发电政策研究”

作者简介: 孔令丞(1963-), 女, 天津宝坻; 教授、博士生导师, 博士, 研究方向: 产业经济, 能源经济, 循环经济。E-mail: 764046157@qq.com。石晶(1988-), 女, 辽宁, 硕士研究生。

## 1 引言

在人类社会的整个工业化进程中,经济增长都与化石能源的消耗量存在强的相关性。但化石能源供给的有限性、开采和利用带来的气候变化和环境污染,都迫使各国政府在制定未来的能源战略时,将开发和利用风能、太阳能、生物质能等可再生能源,作为重要的战略目标内容。可再生能源发电配额证书交易制度,因其借助于市场化手段实现可再生能源发电量目标,在众多节能减排目标约束中最能体现出市场竞争的成本优势,近年来逐渐为发达国家所采用,并很好地实现了低成本的减排效果。

2012 年,国家能源局新能源司出台了《可再生能源发电配额管理办法》(以下简称“办法”)讨论稿,确定了 2015 年 4 类资源区的可再生能源发电配额分配方案,规定内蒙古东西部一类资源区的配额高达 15%,并将绿色证书作为考核配额执行情况的凭证。该办法由于存在对交易机制的研究相对缺乏、经济性论证不足、缺乏可行的细则等问题,从出台至今已经 2 年多的时间仍未实施。因此,引入政府节能减排的规制目标等约束条件,研究以证书交易为核心的可再生能源配额制,探讨配额制及其证书交易实施的关键因素、实现条件,进而论证我国实施可再生能源发电配额证书交易市场化机制的可行性。这些都为政府的节能减排目标实现从行政命令转向市场化手段提供了理论依据和实践指导,为后续的节能减排跳出原有“限电停产”政策怪圈提供了解决思路。

## 2 文献综述

可再生能源发电配额制 (Renewable Portfolio Standard, RPS) 在也被称为可再生能源发电强制性市场份额政策 (Mandatory Market Share Policy, MMS), 这种政策是美国、澳大利亚和欧洲等国采用的一种鼓励使用可再生能源发电的强制性政策工具。

### 2.1 证书交易机制的基本框架

采用 RPS 制度之前,政府要制定出一段时期内总的可再生能源发电量目标,然后根据不同地区的资源禀赋状况,按一定比例分配给企业。企业在目标期限内必须按配额完成目标所规定的可再生能源发电量。为了考核企业完整的定额情况,很多国家

和地区的政府都规定由政府指定的第三方审计部门对企业可再生能源电力上网电量进行审核,确保不被漏计或重复计算。核准后颁发具有独特的标识代码的可再生能源电力证书 (Renewable Electronic Credit, REC), 也叫绿电证书。每份证书<sup>②</sup>都是对绿电配额这种无形商品的性质和产权进行标记的法定凭证。持有证书的企业之间可以在证书市场上进行证书买卖。绿电证书因市场交易的存在而具有了经济价值。为了保证交易效率,监管部门并不区分绿电证书的来源。对于到期未提供所分配配额的绿电证书,政府对其处以相应的处罚。

发电厂商生产的绿电要先出售给电网公司,双方均计算上网电量并保留记录凭证。累积一定的上网电量之后,通过向第三方审计部门提交相应的凭证来获得经核准的绿电证书。考核期末,发电企业向监督机构出示证书来考核其完成的配额情况。持有超过配额部分证书的企业可在证书市场上自行出售,以获得收益。如此,电力企业在权衡成本和利润的情况下,可以选择自发绿电,或在证书市场上购买证书,来完成政府分配的配额。具有绿电成本优势的企业可以通过多发绿电,取得证书后出售超出配额部分来实现利润最大化;反之,如果企业完成配额的成本高于在证书市场上购买证书的价格,则可选择购买证书来完成配额。可见,有了证书市场,企业就可以按照地区资源禀赋、比较优势来对两种不同电源结构的发电量进行经济合理的配比,以求利润最大化。因此,绿电证书市场为低成本的开发和利用可再生能源电力提供了竞争手段,同时也能满足国家或地区范围内可再生能源发电量目标。

### 2.2 可再生能源发电政策效果评述

有些学者从不同的角度将固定上网电价制和配额制进行了对比。Butler 和 Neuhoff (2008) 分析了德国的强制上网制 (Feed-in Tariffs) 和英国的配额制,指出强制上网制更容易完成总量目标,但政府要因此付出大量的补贴成本;而配额制可有效降低可再生能源电力的价格,但却难以完成总量目标。Mészáros 等<sup>[9]</sup>应用英国电力市场数据建立寡头模型,对比了强制上网和证书交易这两种政策的不同效果,即强制上网使电网成本提高,而绿电发电量会随之增加;但证书交易由于将竞争引入可再生能源发电市场,因此会提高社会福利,效果优于强制上网制。Anna 等<sup>[1]</sup>研究认为绿电证书交易为绿电技术

② 国家能源局新能源司在《可再生能源电力配额管理办法》(草案)有两种规定 0.1 万 kW·h 电为 1 份证书。在欧美一些国家,有 1 万 kW·h 电为 1 份证书的规定。

支付了额外的价格,因此兼具了降低成本与完成目标的双重政策功效。

美国在可再生能源电力配额制实施方面较为完善,并将其拓展为绿电证书交易和限额交易政策。Bird 等<sup>[2]</sup>认为,证书交易实现减排的好处是在可竞争市场上,减排成本通过证书交易而被量化,这为设计合理的碳税提供了成本依据。Amundsen and Mortensen (2001)研究了丹麦电力部门在短期目标下,考虑证书价格上下限、碳价格和电力进口等因素,认为在严格的碳排放限额与宽松的绿电配额下,会导致绿电生产商的利润降低和证书价格下降,最终导致总体供电量减少;而不断增长的绿电配额则会导致装机容量的扩张,且扩张量取决于需求价格弹性。Jensen and Skytte(2002)建立了在配额框架下的一般电力市场模型,发现配额制对电价会产生如下影响:较高或不断上升的配额会导致绿电发电量增加,绿电发电成本高于火电成本的现实导致电价整体上涨,进而产生电力市场需求的下降;反之则反之。

Linares 等<sup>[7]</sup>检验了西班牙电力市场配额制和限额交易政策的相互作用,认为绿电配额制是限额交易政策的补充,因而这两种政策共存会降低电力市场价格。Karen(2011)对美国联邦实施的三大减少温室气体排放政策——限额交易、绿电配额和税收减免的成本效率、环境收益、经济和技术产出等进行了模拟,模拟在不同电源发电量结构下的绿电发电量比例、证书价格和不同政策组合下的减排效果,由此提出不同减排目标下合理的电源结构。Thomas(2005)模拟了瑞典、挪威、芬兰和丹麦电力系统,分析了碳排放许可限额和绿电证书对电价和碳排放的不同效果。研究表明,引入证书交易可降低绿电上网电价和碳排放许可价格。

### 2.3 可再生能源电力证书市场运行效果评估

Lipp 等<sup>[8]</sup>通过对英国、丹麦和德国电力系统所采用的不同的可再生能源电力政策及其价格政策进行分析,指出选择配额制或强制上网电价制,需要考察各国的实际需求来对相关制度和义务进行设计和分配,才能保证制度的成功。Sovacool<sup>[3]</sup>列举了包括美国在内的全球 8 个典型的实行配额制的证书交易市场效果,认为证书市场的主要障碍来自机制设计缺陷。这些缺陷造成交易成本过高、价格波动剧烈以及机制运行带来负面环境效应等,有些政策规定会限制许可交易机制的效率;企业和个人总是会寻找各种方法来使用或操控证书市场来获得利益;而一旦对市场机制不信任或证书价格剧烈波动,一

些交易者就会退出市场;而如果市场规则会弱化惩罚,也会降低参与者参与市场交易的激励。

Golini<sup>[5]</sup>在分析欧盟绿色证书市场运行情况,认为证书市场是欧洲能源市场自由化进程中刺激可再生能源增长的最有效机制。长期来看,证书交易降低了绿电价格,这会导致可再生能源发电成本最小化并推进技术创新。进而,部分学者模拟了证书交易的实施效果。Klaus 等<sup>[6]</sup>建立了一个北欧电力市场绿色证书交易的系统动态模型,用以检测一系列的交易政策效果,结果说明证书交易市场是不稳定的,而证书的储存和抵押则可以有效降低市场的不稳定性。Ford 等<sup>[4]</sup>模拟了美国西南部的风能证书交易市场的价格机制。认为在市场建立初期,证书价格会快速上升,投资者对此做出的反应是增加风能装机容量。之后,在风电发电量逐渐达到并超过需求量后,证书价格开始下降。这种现象循环出现,可使企业在不同时期选择不同的交易策略。

### 2.4 国内可再生能源配额制研究现状

我国对于可再生能源的开发利用起步晚于西方国家,而可再生能源配额制尚未实际实施应用,对于其证书交易的研究则更加匮乏。付姗姗<sup>[10]</sup>在对配额制和强制上网这两种政策机制和国外的成功经验分析的基础上,构建了配额制与强制上网制的互补模式,提出同时使用这两种政策机制是当前的最佳选择。任东明<sup>[11]</sup>认为我国在设计 and 实施可再生能源电力配额制时,可以首先对大型传统发电企业规定配额义务,同时辅之以电网强制收购可再生能源电力的强制上网制度。通过配额制和强制上网制互相补充,来达到更好的政策效果。

综述可见,由于西方已经具备可再生能源电力证书交易的实施基础,且基于配额的证书交易机制已在多个国家成功实施,因此西方学者对配额制和证书交易的研究,主要集中在配额制有效实施的政策对比、当前配额制的效果分析和阻碍论证、未来政策效果模拟等。而可再生能源电力配额制在我国处于拟实施阶段,研究主要集中于对国外经验的借鉴、配额制的可行性、强制上网制和配额制的简单对比等,对基于配额制证书交易的经济论证相对缺乏。

## 3 我国可再生能源发电配额交易实施的初步分析

为实现低成本的可再生能源发电配额制,政府在制定发电厂商的可再生能源发电配额后,会按照一定的程序,为企业发放经第三方机构核准的绿电证书,并建立证书交易市场,准许持有绿电证书的人

在市场中交易。这样,发电厂商就可以根据自身各类状况:资源禀赋、技术实力、市场能力、发展战略等,本着追求利润最大原则,选择符合自身市场竞争战略的电源结构。选择必然在总体上产生具有成本优势的电源结构,其结果就是不断优化配额制的社会成本,为可再生能源发电实现平价上网积累优势基础。

借鉴国外可再生能源配额制的实施规定和经验,政府还要制定证书储存期限、可再生能源电力配额义务的宽限期以及奖惩机制。基本框架如图 1 所示。

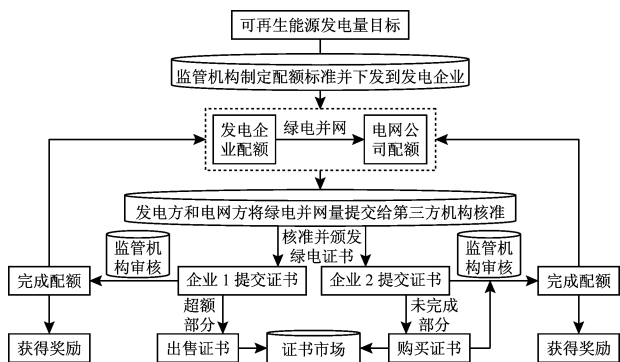


图 1 配额交易机制的基本框架

### 3.1 可再生能源发电总目标及其目标分解

政府在制定可再生能源发电配额总量目标时,需要确定的是某段时期在不同资源区的发电总量。由于不同地区的资源禀赋状况不同,同样的装机所产生的发电量也不同;政府在对可再生能源电力配额的承担主体进行义务分配时,应针对不同地区可再生能源的资源禀赋、电力消费需求、电力输送能力以及经济总量综合考量,进行分配。在“办法”中规定了四类资源区,像内蒙古东西部地区被核定为一类资源区,规定 2015 年该资源区和地区电网的发电量配额为总发电量的 15%;大型发电企业所承担的可再生能源发电装机容量占总装机的 11%。

在规定各电网公司对绿电进行保障性收购时,可按不同电网公司的电网覆盖地区范围来确定。一般按其覆盖地区在目标年份内的绿电配额总量在其收购总电力中的占比计算。如“办法”中规定,内蒙古电力公司的电网承担保障性收购指标为地区电力消费总量的 15%。

可再生能源发电配额制是一项长期政策,政策必须注意短期目标和长期目标的有效结合,才能明确义务人在每个短期时限内的配额义务,同时又能在长期为可再生能源发电量的增长提供足够的空间。结合国际经验,通常以 15-20 年为期限制定一个长期目标;将目标进行分解,规定 1-3 年为义务主

体可再生能源发电量配额的短期目标。

### 3.2 配额义务主体

制定配额时必须首先明确配额义务主体。根据国际经验,规定装机容量超过一定规模的大型发电厂商必须承担可再生能源电力生产的配额义务。我国在“办法”中规定,装机容量超过 500 万千瓦的发电厂商必须承担配额义务。本着以较低成本实现可再生能源发电量目标的原则,给发电厂商留出依据生产绿电的禀赋状况、比较优势和自身战略选择自发电或购买证书来完成配额义务的余地。这就需要在制定配额的同时,建立以配额为最低限额的证书交易市场。此外,为保证发电厂商所生产的可再生能源电力能够得到消纳,政府还须规定电网要全额承担可再生能源电力并网,而并网的绿电电量由发电商出具电网公司接收并网的绿电电量凭据来计量。政府机构需指定第三方独立的核准机构,对发电商和电网共同出具的绿电并网电量进行核准,监管机构根据发电企业、电网公司和第三方核准机构这三方共同出具的、经核准的绿电并网电量,为发电企业发放等量的绿电证书。

## 4 可再生能源发电配额的证书交易市场均衡

从国外成功地实施基于配额的证书交易市场系统来看,配额目标、证书价格上限、惩罚力度、证书时效、目标时限、技术范围、区位因素等,都会对基于配额的证书交易系统的有效运行产生影响。通过构建发电厂商利润最大化模型,讨论常规能源发电成本、可再生能源发电成本、政府的可再生能源发电目标、可再生能源电力证书交易价格上限等因素对发电厂商可再生能源电力产量的影响,进而讨论其对证书市场交易价格的影响。

### 4.1 符号说明

假设每期末配额义务主体将证书上交给规制者,证书不设存储期限,逾期失效。如果上交量小于政府规定目标,则要接受政府处罚。

$x_j$ :发电厂商  $j$  常规能源发电量(MW·h),  
 $c_j(x_j)$ :常规能源发电成本函数, $X_j$ :发电厂商  $j$  常规能源发电产能(MW·h);

$y_j$ :发电厂商  $j$  可再生能源发电量(MW·h),  
 $k_j(y_j)$ :可再生能源发电成本函数, $Y_j$ :发电厂商  $j$  可再生能源发电产能(MW·h);

$z_j$ :发电厂商  $j$  上交给规制者的证书数量(MW·h);

$P_e$ :电力市场价格(元/MW·h), $P_c$ :证书价格

(元/证书),  $\bar{P}_c$ : 规制的证书价格上限(元/证书);

$r$ : 可再生能源证书交易总量,  $r_{i \rightarrow j}$ : 发电厂商  $i$  从  $j$  购买的证书量(MW · h);

$t$ : 规制者制定的可再生能源电力配额目标(占总发电量的百分比);

$d_j$ : 发电厂商  $j$  的总电力需求(MW · h),  $d$ : 电力需求总量。

### 4.2 因素关系

上述各因素应满足以下关系:

- (1) 非可再生能源电力产量  $x_j \leq X_j$ ;
- (2) 可再生能源电力产量  $y_j \leq Y_j$ ;
- (3) 发电厂商满足总电力需求量  $x_j + y_j = d_j$ ;
- (4) 上交给规制者的证书数量

$$z_j = y_j + \sum_{i \neq j} (r_{j \rightarrow i} - r_{i \rightarrow j}) \geq 0$$

- (5) 规制者制定的配额目标约束

$$\sum_{j=1}^n z_j = \sum_{j=1}^n [y_j + \sum_{i \neq j} (r_{j \rightarrow i} - r_{i \rightarrow j})] \geq 0$$

- (6)  $j$  厂商证书供给量的约束  $\sum_{i=1}^n r_{ij} \leq y_j$ ;

- (7) 电力总需求量  $d = \sum_{j=1}^n d_j$ 。

### 4.3 利润目标

发电厂商  $j(j=1, 2, \dots, n)$  参与到可再生能源发电配额交易系统中, 借鉴 Georges(2010) 的理论假设, 建立利润最大化的目标函数为:

$$\max_{x_j, y_j, r_{ij} \geq 0} \pi_j(x_j, y_j, r_{ij}) = p_c(x_j + y_j) - c_j(x_j) -$$

$$k_j(y_j) + p_i \sum_{i=1, i \neq j}^n - p_j \sum_{j=1, i \neq j}^n r_{j \rightarrow i}$$

$$\text{s. t. } \left\{ \sum_{j=1}^n z_j \geq td \right.$$

依据经济学惯例, 假设生产成本函数  $c_j(x_j)$  和  $k_j(y_j)$  都是递增凸函数, 且满足  $c_j(0) = k_j(0) = 0$ , 并设定为:

$$c_j(x_j) = \frac{1}{2} C_j \cdot x_j^2$$

$$k_j(y_j) = \frac{1}{2} K_j \cdot y_j^2$$

另外, 令  $r_{i \rightarrow j} \cdot r_{j \rightarrow i} = 0$ , 且  $\sum \sum (r_{j \rightarrow i} - r_{i \rightarrow j}) = 0$ , 也就是说, 每个电力生产商既是证书的买方, 也是证书的卖方, 且证书的总供给量等于总需求量。

在可再生能源配额交易系统中, 证书交易价格受证书供给量和需求量的双重影响, 即以基于市场出清的条件来讨论这一价格机制。即证书价格是由证书供给量等于证书需求量所决定的内生变量, 较高的证书需求量会拉动证书的价格上涨。同时, 证

书交易价格还受政府规定的价格上限的限制以及可再生能源电力生产能力的限制, 即证书的最大交易量不可超过最大的可再生能源发电能力, 最高的交易价格是政府规定的价格上限。

为讨论求解, 用  $x_j = d_j - y_j > 0$  和

$$y_j = z_j - \sum (r_{j \rightarrow i} - r_{i \rightarrow j})$$

代换, 关于的利润最大化为:

$$\begin{aligned} \max_{z_j, r_{ij} \geq 0} \pi_j(z_j, r_{j \rightarrow i}) &= p_c d_j - c_j(d_j - z_j + \\ &\sum_{i=1}^n (r_{j \rightarrow i} - r_{i \rightarrow j})) - k_j(z_j - \sum_{i=1}^n (r_{j \rightarrow i} - r_{i \rightarrow j})) + \\ &p_j \sum_{i=1}^n (r_{i \rightarrow j}) - p_i \sum_{i=1}^n (r_{j \rightarrow i}) \\ \text{s. t. } &\begin{cases} z_j - \sum_{i=1}^n (r_{j \rightarrow i} - r_{i \rightarrow j}) \geq d_j - X_j \\ z_j - \sum_{i=1}^n (r_{j \rightarrow i} - r_{i \rightarrow j}) \geq \max(Y_j, d_j) \\ \sum_{j=1}^n z_j \geq t \sum_{j=1}^n d_j \end{cases} \end{aligned}$$

根据单个厂商利润最大化函数可以导出可再生能源电力配额框架下的总利润最大化函数, 即:

$$\max_{z_j, r_{ij} \geq 0} \pi = \sum_{j=1}^n \pi_j + \lambda (\sum_{j=1}^n z_j - t \sum_{j=1}^n d_j)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} z_j - \sum_{i=1}^n (r_{j \rightarrow i} - r_{i \rightarrow j}) \geq d_j - X_j \\ z_j - \sum_{i=1}^n (r_{j \rightarrow i} - r_{i \rightarrow j}) \geq \min(Y_j, d_j) \end{cases}$$

其中,  $\lambda$  为拉格朗日乘子, 即政府规制总目标约束条件下的拉格朗日乘子, 也称为可再生能源电力证书交易的影子价格, 或称为惩罚价格。当政府规定的可再生能源电力目标强度不同时, 就会影响到企业的行为和决策。 $\lambda^*$  则表示总利润最大化函数达到最优时的拉格朗日乘子。

### 4.4 简化求解

针对我国目前的电力市场, 将可再生能源电力配额交易系统中的发电厂商分为两类, 第一类是生产可再生能源电力比较优势相对较强的厂商, 为可再生能源电力证书的卖方, 令该类发电厂商  $j=1$ ; 第二类是可再生能源电力比较优势相对较弱的厂商, 为可再生能源电力证书的买方, 令该类发电厂商  $j=2$ 。

同时, 规定卖方和买方的交易是单一的, 即没有既购买证书又销售证书的厂商。图 2 给出了该配额交易市场的结构。

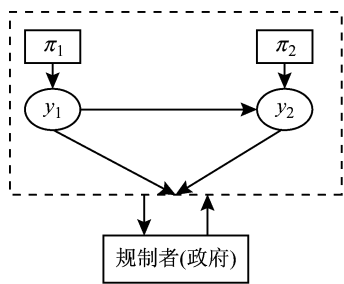


图 2 可再生能源配额交易市场结构

为了方便讨论,假设生产成本函数的边际成本都是递增的,近似于二次函数,即

$$c_j(x_j) = \frac{1}{2}C_jx_j^2 =$$

$$\frac{1}{2}C_j(d_j - z_j - \sum_{i=1}^n(r_{j \rightarrow i} - r_{i \rightarrow j}))^2$$

$$C_j > 0, \quad j = 1, 2$$

$$k_j(y_j) = \frac{1}{2}K_jy_j^2 =$$

$$\frac{1}{2}K_j(z_j + \sum_{i=1}^n(r_{j \rightarrow i} - r_{i \rightarrow j}))^2$$

$$K_j > 0, j = 1, 2$$

假设可再生能源发电的边际成本(因技术不成熟)高于常规能源发电,即

$$k_j''(y_j) = K_j > c_j''(x_j) = C_j, j = 1, 2$$

且两类发电厂商均是不对称的,则可再生能源与常规能源发电成本差异  $K_j - C_j, j = 1, 2$  可写成以下比较关系:  $K_1 - C_1 < K_2 - C_2$ 。即第一类发电厂商是潜在的证书卖方,第二类发电厂商是潜在的买方,则在可再生能源发电配额交易系统中两类发电厂商的利润最大化形式如下:

$$\max_{z_1, r \geq 0} \pi_1(z_1, r) = p_e d_1 - \frac{1}{2}C_1(d_1 - z_1 - r)^2 -$$

$$\frac{1}{2}K_1(z_1 + r)^2 + P \cdot r$$

$$\max_{z_2, r \geq 0} \pi_2(z_2, r) = p_e d_2 - \frac{1}{2}C_2(d_2 - z_2 + r)^2 -$$

$$\frac{1}{2}K_2(z_2 - r)^2 - P \cdot r$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} z_1 + z_2 - td \geq 0 \\ d = d_1 + d_2 \end{cases}$$

两类发电厂商的总利润则为  $L = \pi_1 + \pi_2$ , 构造总利润最大化的拉格朗日函数:

$$L = \pi_1 + \pi_2 = P_e(d_1 + d_2) - \frac{1}{2}C_1(d_1 - z_1 - r)^2 -$$

$$\frac{1}{2}K_1(z_1 + r)^2 - \frac{1}{2}C_2(d_2 - z_2 + r)^2 -$$

$$\frac{1}{2}K_2(z_2 - r)^2 + \lambda(z_1 + z_2 - td)$$

其中,  $\lambda, \alpha, \beta$  和  $\theta$  为约束条件的拉格朗日乘子,一阶条件为

$$\lambda(z_1 + z_2 - td) = 0, \quad \lambda \geq 0$$

拉格朗日函数的一阶条件为如下结果:

$$\frac{\partial L}{\partial z_1} = -(C_1 + K_1)(z_1 + r) + C_1 d_1 + \lambda = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial z_2} = -(C_2 + K_2)(z_2 - r) + C_2 d_2 + \lambda = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial r} = C_1 d_1 - (C_1 + K_1)(z_1 + r) +$$

$$(C_2 + K_2)(z_2 - r) - C_2 d_2 = 0$$

下面将针对政府制定可再生能源发电配额目标分为 3 种情况进行讨论:

(1) 政府制定的可再生能源发电配额目标过小。当政府制定的可再生能源发电配额目标过小时,所有的发电厂商均能完成证书的规定义务上交易,此时市场上不存在证书买卖,因此  $\lambda = 0$ 。

规定  $t_1$ : 电力市场上,绿电发电能力最低的一家刚好能完成规制目标的临界值。当  $t \leq t_1$  时,表示市场没有证书需求。

依据利润最大化拉格朗日函数一阶条件,有

$$\begin{cases} y_1 = z_1 + r = \frac{C_1}{C_1 + K_1} d_1 \\ y_2 = z_2 - r = \frac{C_2}{C_2 + K_2} d_2 \end{cases}$$

$$t_1 d = y_1 + y_2 = \frac{C_1}{C_1 + K_1} d_1 + \frac{C_2}{C_1 + K_2} d_2 \Rightarrow t_1 =$$

$$\frac{1}{d} \left[ \frac{C_1}{C_1 + K_1} d_1 + \frac{C_2}{C_1 + K_2} d_2 \right]$$

(2) 政府制定的可再生能源发电配额目标过大。当政府制定的可再生能源发电配额目标过大时,此时,即使市场上的可再生能源电力生产能力最大的厂商,把全部生产能力都用来生产可再生能源电力,经过交易后,也无法确保所有的发电企业都可以完成政府的配额目标。考虑到存在交易,则  $\lambda > 0$ 。

规定  $t_2$ : 电力市场上,绿电发电能力最强的发电厂商,即电力证书的买方,其所发电力全部为绿电电力,经过交易后,刚好能够全部完成规制配额目标的临界值。此时,  $y_1 = d_1 = z_1 + r, C_1 = 0$ 。

依据利润最大化拉格朗日函数一阶条件,有

$$y_2 = z_2 - r = \frac{C_2 d_2 + K_1 d_1}{C_2 + K_2} d_2$$

$$t_2 d = d_1 + y_2 = \frac{C_2 d_2 + K_1 d_1}{C_2 + K_2} d_1 \Rightarrow t_2 =$$

$$\frac{1}{d} \left[ \frac{C_2 d_2 + C_2 d_1 + K_2 d_1 + K_1 d_1}{C_2 + K_2} \right]$$

(3) 政府制定的可再生能源发电配额目标适

中。当政府制定的目标符合  $t_1 < t < t_2$  时,市场上存在证书交易,同时不会达到供给饱和状态。此时,  $\lambda > 0$ ,这种  $t$  的范围就是政府制定可再生能源电力配额目标范围能够保证证书交易市场有效运行的范围。

针对上述 3 种情况,对拉格朗日函数一阶偏导方程求解,得到最优拉格朗日乘子:

$$\lambda^* = \begin{cases} 0, & t < t_1 \\ \frac{d(t-t_1)}{\sum_{j=1}^2 1/(C_j + K_j)}, & t_1 < t \leq t_2 \\ (C_2 + K_2) \left( d(t-t_1) - \frac{K_1 d_1}{C_1 + K_1} \right), & t > t_2 \end{cases}$$

## 5 参数分析

### 5.1 发电厂商可再生能源发电量

由上面对  $t$  的范围讨论已经初步得出了结论:当  $t \leq t_1$  和  $t > t_2$  时,两类发电厂商的可再生能源发电量直接由成本和电力需求决定。因此,下面着重讨论在  $t_1 < t \leq t_2$  的情况下,发电厂商可再生能源发电量的变动情况。

此时,两类发电厂商的可再生能源发电量可由以下算式表示:

$$\begin{cases} y_1 = \frac{C_1}{C_1 + K_1} d_1 + \frac{d(t-t_1)}{1 + \frac{C_1 + K_1}{C_2 + K_2}} \\ y_2 = \frac{C_2}{C_2 + K_2} d_2 + \frac{d(t-t_2)}{1 + \frac{C_2 + K_2}{C_1 + K_1}} \end{cases}$$

由于可再生能源电力证书价格实际上是通过市场的方式而非补贴的方式来弥补可再生能源电力与常规电力的发电成本,因此  $C_j$  和  $K_j$  表示常规能源发电成本和可再生能源发电成本的边际成本变动率。令

$$K_i = \alpha_j C_j, \quad \alpha_j \in [1, \infty)$$

$\alpha_j$  表示两类能源边际成本变化率的比例,当其趋近于 1 时,表明可再生能源发电成本接近常规能源;当其趋近于 0 时,则表明可再生能源发电成本远高于常规能源发电成本。以  $y_1$  为例,将  $K_1 = \alpha_1 C_1$  和  $K_2 = \alpha_2 C_2$  带入可以得到

$$y_1 = \frac{d_1}{1 + \alpha_1} + \frac{d(t-t_1)}{1 + \frac{(\alpha_1 + 1)C_1}{(\alpha_2 + 1)C_2}}$$

(1) 对上式进行讨论,对第 1 类企业而言,当自身和其他企业的常规能源边际成本变动率  $C_1$  和  $C_2$  均保持不变时,当  $\alpha_1$  从 1 向正无穷逐渐增加时,表

明第 1 类企业自身的可再生能源发电成本变动率越高于常规能源,即企业可再生能源发电成本越高于常规能源发电成本,企业的可再生能源电力产量越低,反之亦然。

(2) 除了成本变动,电力需求量和政府制定的可再生能源电力目标同样影响着企业对可再生能源电力产量的决策。即当电力需求量越大,可再生能源电力目标越高,企业的可再生能源产量越高。

(3) 企业在做出可再生能源电力生产量的决策时,同样还需要考虑市场上其他企业的可再生能源生产成本。当  $\alpha_2$  的值下降时,表明第 2 类企业的可再生能源电力生产的边际成本变动率逐渐向常规能源的变动率靠近,也可以说第 2 类企业的可再生能源电力的生产能力增强。此时,第 1 类企业在自身技术和成本不变时,应考虑降低可再生能源的产量,降低证书市场的证书供给。

对于第 2 类企业的分析与第 1 类企业类似,在此不做赘述。

### 5.2 可再生能源配额制及其交易体系中其他要素分析

下面将针对可再生能源电力配额体系中的其他因素进行简单讨论。

(1) 配额目标。规制者制定可再生能源发电配额目标时,必须考虑各发电厂商的发电能力。如果设定的目标过低,可再生能源发电厂商自身发电能力均可完成任务目标,则证书交易市场将失去其作用,政府实施的可再生能源发电配额政策也达不到预期的效果;当制定的目标过高,超过所有发电厂商发电能力的总和,那么政府的目标同样无法完成,市场无法达到最优状态。因此,政府制定可再生能源发电配额目标是,应根据所要达到激励效果(迅速发展或稳步发展),将目标在一个可行的范围内( $t_1 < t \leq t_2$ )调整。

而在制定可再生能源电力配额目标时, $t_1$  和  $t_2$  的值受到企业成本变动的影。当可再生能源成本变动率越高,政府在制定目标, $t_1$  和  $t_2$  的值越小,表明当发电厂商的可再生能源发电能力较弱,不需要制定较高的可再生能源电力目标就能够保证市场上证书交易的存在和顺利进行,政府反而应当注意初期不应制定过高的目标,以防止出现企业无法完成的情况。

(2) 证书价格。可再生能源发电配额交易市场上的证书交易价格,受到规制者规定的配额目标和发电厂商自身发电能力的约束。当配额目标过低,市场上不存在证书交易;当配额目标过高,证书交易

总量固定,价格也随之固定。在合理的配额目标范围内,证书价格随着配额目标的上升而增加(见图 3)。

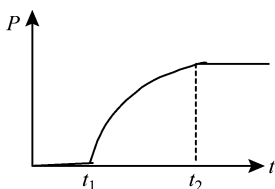


图 3 证书交易价格变动示意图

而电力厂商的可再生能力越强,表明电力厂商可再生能源生产成本越低,与常规能源的成本差异相对越小,那么此时市场上证书交易价格相对越低。

(3) 价格上限。与规制者制定配额目标类似,规制者应当将证书价格上限制定在一个合理的范围内。价格上限保证了当市场对证书的需求量较大时,证书价格不会无限制上涨,而是会达到政府规定的上限,以保证证书交易市场的稳定性。价格上限制定过高,会导致企业退出证书交易市场,使得市场失去效果。例如,若规制者将采取较为积极的激励政策,则可以制定一个较低的证书价格上限,就会激励发电厂商增加可再生能源电力的发电量,进而增加证书交易市场中流通的证书数量。

(4) 惩罚价格。本例中, $\lambda$  表示目标函数约束条件的影子价格,即可以理解为发电厂商不能完成规制者制定的配额目标时需要接受的惩罚价格。规制者制定的处罚价格不能过低,因为此时发电厂商可能会选择接受处罚而不是自行发电或购买证书;同样处罚价格过高会导致没有激励效果。

## 6 我国可再生能源发电配额交易可能存在的障碍研究

作为一项复杂的交易机制,其实施必定会面临一定的阻碍和风险。首先,可再生能源配额交易系统本身的复杂性就对其设计和实施提出了较高的要求;其次,我国目前电力市场缺乏有效的竞争机制,也对证书交易的展开产生了一定的阻碍;最后,地区间的发展不平衡、可再生能源资源禀赋条件差异等因素对政府制定可再生能源电力配额相关政策提出了较高的要求。

### 6.1 配额交易系统的制度设计

为了保证可再生能源电力证书在市场上自由交易,需要有一整套完整的交易体系和交易制度进行支持,如果整个交易系统设计初期就没有考虑周全,或是不能与现有的电力系统实现较为顺畅的链接,甚至出现了链接上的断裂,那么就会造成后续的

实践不能顺利进行,或者出现失败的可能。

### 6.2 输配电市场缺乏有效性竞争

2002 年开始,我国对电力体制进行改革,实施“厂网分开、竞价上网”。我国目前情形是,发电端已经初步形成了竞争市场,多家发电企业参与到电力生产和竞价上网中,但参与到竞价上网的输配电公司只有国家电网和南方电网两家,这就形成了一种类似寡头垄断的市场,发电厂商和输配电网之间的数量他盘和价格谈判难以形成竞争状态,不能达到有效竞争的目的,也就不能形成市场化的价格竞争机制,这种市场状态为我国建立全国范围内的可再生能源配额交易机制带来了一定的阻碍。因此,政府在制定交易制度时,应明确划分各主体的权利和义务,合理地发电厂商和输配电网规定其可再生能源电力配额义务,达到拉动可再生能源电力需求,促进市场竞争机制的形成,有利于证书交易顺利展开的目的。

### 6.3 地区间的利益分配存在障碍

我国国土面积广大,不同地区的可再生能源资源禀赋条件也不尽相同,西部地区资源较为充足,而东部地区则相对匮乏。我国在制定可再生能源电力配额交易机制时,应首先对不同地区进行划分,进而针对地区资源禀赋制定不同程度的可再生能源电力配额义务,用以促进各地区的协调发展。同时,建立证书交易的中间平台,统一对各发电厂商的可再生能源发电量进行计量并颁发证书,并在该平台对证书的买卖进行统一操作,用以降低不同地区的证书交易成本差异,从而达到调节地区不平衡的效果,促进可再生能源在全国范围内的充分利用和发展。

### 6.4 发电配额与购电配额不对应

由于政府不仅对发电厂商规定了可再生能源电力配额义务,也对输配电网规定了相关的配额义务,因此,在可再生能源电力配额制实施的过程中,就可能会出现发电配额与购电配额不对应的情况,即发电场上的可再生能源发电量不能满足输配电网的配额义务,或者相反。因此,政府在制定相关制度时,应注意调整对各义务主体之间的义务量的联系,避免出现义务量严重不对应的情况。

## 7 结 论

通过借鉴国际成功经验,对我国实施可行性及实施重要细节进行了分析研究,并通过构建经济学模型讨论相关因素对证书交易的影响,并得出以下结论:第一,可再生能源发电配额交易机制是激励可再生能源发展的一种有效机制。第二,设计实施可



再生能源配额交易系统时,政府应重点关注可再生能源发展目标的制定、可再生能源种类的选择、责任主体的确定、监督管理机构的建立、适当的惩罚措施、证书交易的价格上限和储存期限等。第三,实现政府制定的可再生能源发电目标是电力系统下实施配额交易的目的和约束,政府制定的可再生能源发电目标过高或者过低,都不利于市场的有效运行;而价格上限的规定,也会影响企业可再生能源发电量和证书交易量。第四,我国幅员辽阔,不同地区的自然环境相差较大,应适当考虑各地配额差异。国外有些国家和地区的政策则规定证书可以储存一定年限,可进一步深入研究证书的储存期限问题,建立跨期交易模型;也可以考虑电力需求的不确定性等,进行模型拓展研究。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Anna Bergeka, Staffan Jacobsson. Are tradable green certificates a cost-efficient policy driving technical change or a rent-generating machine? Lessons from Sweden 2003-2008 [J]. *Energy Policy*, 2010, 38: 1255-1271.
- [ 2 ] Bird L A, Holt E, Carroll G L. Implications of carbon cap-and-trade for US, 2008.
- [ 3 ] Sovacool Benjamin K. The policy challenges of tradable credits; a critical review of eight markets [J]. *Energy Policy*, 2011, (39): 575-585.
- [ 4 ] Ford Andrew, Vogstad Klaus, Flynn Hilary. "Simulating price patterns for tradable green certificates to promote electricity generation from wind" [J]. *Energy Policy*, 2007, (35): 91-111.
- [ 5 ] Golini Giovanna. Tradable green certificate systems in the E. U [J]. *Energy Law Journal*, 2005(1).
- [ 6 ] Klaus Vogstad, Ingrid Slung? rd Kristensen and Ove Wolfgang. Tradable green certificates: The dynamics of coupled electricity markets [C]//Norwegian University of Science and Technology (NTNU) Sintef Energy Research, 2006.
- [ 7 ] Linares P, Santos F J, Ventosa M. Coordination of carbon reduction and renewable energy support policies [J]. *Climate Policy*, 2008(8): 377-394.
- [ 8 ] Lipp Judith. Lessons for effective renewable electricity policy from denmark [J]. *Energy Policy*, 2011 (39): 575-585.
- [ 9 ] Mészáros Mátyás Tamása, Bade Shresthab S O, Zhou Huizhong. Feed-in tariff and tradable green certificate in oligopoly [J]. *Energy Policy*, 2010 (38): 4040-4047.
- [ 10 ] 付姗姗. 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.
- [ 11 ] 任东明. 关于引入可再生能源配额制若干问题的讨论 [J]. *中国能源*, 2007, 29(11): 10-13.