

基于电力供应链下的可再生能源投资策略研究

吴福田, 党亚峥, 白妮蔓

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2023年2月27日; 录用日期: 2023年5月1日; 发布日期: 2023年5月8日

摘要

基于电力供应链下研究可再生能源投资决策问题。在碳限额与交易机制背景下, 构建了由发电商作为领导者与售电商作为追随者的电网供应链博弈模型, 分别考虑了发电商、售电商以及两者均等投资可再生能源下的电价、发电量的决策问题。当发电商投资可再生能源时, 售电商优先售卖可再生能源电力; 当售电商投资可再生能源时, 售电商仍优先售卖可再生能源电力, 此时发电商电力市场被瓜分; 当发电商与售电商均等投资可再生能源时, 售电商优先售卖自身生产的可再生能源电力。通过比较三种情形的均衡结果, 主要研究结果如下: 1) 发电商和售电商均等投资可再生能源时, 进一步拉低电价, 增加电力需求量, 并减少了传统发电量; 2) 随着可再生能源投资成本系数的增加, 会导致可再生能源电量和需求电量的降低。3) 可再生能源偏好系数的增加会导致售电商的利润增加, 但发电商利润降低。

关键词

碳限额与交易机制, 可再生能源投资, 电力供应链, 博弈模型

Research on Investment Strategy of Power Supply Chain Based on Carbon Quota and Trading Mechanism

Futian Wu, Yazheng Dang, Niman Bai

School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Feb. 27th, 2023; accepted: May 1st, 2023; published: May 8th, 2023

Abstract

Under the background of carbon quota and trading mechanism, this paper constructs a power grid supply chain game model with power producers as leaders and power sellers as followers, and

considers three situations: power producers investing in renewable energy, power sellers investing in renewable energy and equal investment in renewable energy. On this basis, the decision-making of electricity price and renewable energy is studied. By comparing the equilibrium results of the three cases, the main research results are as follows: 1) Compared with the situation of power producers investing in renewable energy, there will be more investment, more power demand and lower price when power sellers invest in renewable energy. At the same time, when power producers and power sellers invest in renewable energy equally, they will further lower the electricity price and increase the power demand, And reduce the traditional power generation; 2) With the increase of renewable energy investment cost coefficient, it will lead to the reduction of renewable energy power and demand power, the rise of wholesale price and retail price and the decline of profit income of e-sellers; 3) The preference coefficient of renewable energy will lead to an increase in the profits of electricity sellers, but a decrease in the profits of power producers.

Keywords

Carbon Quota and Trading Mechanism, Renewable Energy Investment, Power Supply Chain, Game Model

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

2020年9月22日, 中国政府在第七十五届联合国大会上提出: “二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和”。那么, 目前使用最广泛的减排机制为碳限额与交易机制[1], 此机制具有经济可行性和可操作性等特点[2]。电力行业作为最大的碳排放量行业, 据统计其约占社会碳排放总量的40% [3], 因此, 我国对电力行业也应该积极实施碳限额与交易机制。而目前最为有效地减少碳排放量的方式就是投资可再生能源。

从整体可再生能源电力行业来看, 截至2021年11月底, 我国可再生能源发电量2.3万亿千瓦时, 同比增长12.7% [4]。好的市场环境以及良好的国家政策, 对于企业投资可再生能源来说具有现实意义。

在电力行业的供应链管理决策中, 关于碳限额与交易机制的研究。如丁志刚, Du, Xu等发现碳排放权的交易价格对致企业选择低碳投资产生影响[5] [6] [7]。向小东等(2015) [8]在碳限额与交易机制背景下, 建议了三级供应链减排微分博弈模型和集中决策模型, 发现集中决策模型的供应链总利润以及碳减排量比微分博弈情形都要大。Dong等(2016) [9]考虑了碳限额交易机制对可持续产品技术投资的影响, 不仅发现可持续产品对均衡解有影响, 还发现订货量可能增加批发价格。周艳菊等(2017) [10]发现了制造商会高报其碳信息, 碳核查和惩罚机制可以有效降低制造商的谎报几率。郭军华等(2020) [11]发现最优碳减排量、产品零售价不仅依赖于碳限额和消费者碳排放敏感系数, 还与初始碳排放量相关。王志远等(2021) [12]研究在碳限额与交易政策下供应链成员面临的最优决策问题, 建立微分博弈模型, 得到以下结论: 当市场、政策参数满足一定约束时, 制造商才会采用碳减排策略; 当制造商与零售商均为远视者时, 供应链成员的利润将会达到最大, 碳减排量也最优。上述文献大多数是考虑减少单位碳排放量, 而本文考虑的是可再生能源投资, 即投资新的生产设备来替代部分传统能源设备且具有零碳排放量特征。

对于可再生能源投资的研究, Jed等(2021) [13]通过18,037名被调查者的样本中, 发现其对CRE投

资的兴趣水平较高,且79%的被调查者选择至少投资于向他们展示的8种投资情景之一。公丕芹等(2017) [14]研究了碳价波动下可再生能源项目投资情况,利用实物期权法的二叉树模型,得到碳价波动率与可再生能源发电项目标杆价格正相关。陈威等(2020) [15]在碳限额与交易机制下,构建了单个发电商和单个售电商的二级电力供应链,考虑了发电商和售电商各自投资可再生能源的情况,研究了电价与可再生能源投资的问题,研究表明售电商投资可再生能源会有更多的可再生能源投资量,且利润高于发电商。本文和以上文献的研究有本质的区别,首先本文是在碳限额与交易机制下,研究电价与可再生能源投资问题。其次本文不仅考虑发电商投资可再生能源情形,还考虑售电商投资可再生能源的情形,更在此基础上考虑发电商和售电商均等投资可再生能源的情形。弥补了上述文献中只考虑发电商或售电商投资情形的理论空白。

本文针对碳限额与交易机制,构建了由发电商作为领导者与售电商作为追随者的电网供应链博弈模型,分别考虑了发电商投资可再生能源、售电商投资可再生能源以及发电商和售电商均等投资可再生能源的三种情形。在售电商投资可再生能源时,一方面增加了电力来源的渠道,另一方面削弱了售电商对发电商的依赖。因此,本文研究了投资可再生能源企业的投资和定价策略。本文首先研究了可再生能源投资成本系数对供应链的均衡可再生能源投资量、批发价、零售价、电量需求量、传统发电量以及供应链企业利润的影响;然后研究了碳成本对供应链企业利润的影响;最后分析了可再生能源偏好系数对供应链企业利润的影响。

本文主要贡献如下:1) 拓展到了发电商和售电商共同投资可再生能源的情形,进一步丰富了可再生能源领域的投资内容。2) 发电商和售电商投资可再生能源及他们共同投资可再生能源均对供应链企业的利润和投资决策的影响,具有一定的现实意义。

2. 模型假设

在某区域,发电商与售电商组成电力供应链为市场提供电力服务。政府出台碳限额与交易机制去约束发电商的碳排放量,且消费者对可再生能源存在偏好。在此背景下,本文考虑了电力供应链企业投资可再生能源的情形,构建发电商、售电商以及两者共同投资可再生能源的三种博弈模型。为了更好地分析博弈模型,做出如下的具体假设。

1) 假设消费者对电力的需求不仅依赖于电价,而且也依赖于对可再生能源投资量的偏好。消费者的偏好会引起市场需求量变动,那么投资者有动机投资可再生能源。不失一般性,本文借鉴 Xu 等(2017) [7]构造的需求函数。假设电力需求函数为:

$$q = m - p + \beta k. \quad (1)$$

其中 q 为市场需求, m 为最大用电需求, p 为智能电网的零售价, β 为市场可再生能源偏好系数。 k 为可再生能源的投资量。

2) 假设消费者可购买两种类型的电力,第一种为传统能源电力,例如火力发电机组,假定其单位生产成本为 b 。第二种为可再生能源电力,假设可再生能源的投资成本为:

$$G(k) = dk^2 \quad (2)$$

其中 Requate (2015) [16]采用类似可再生能源的投资成本函数。其中, d 为相应的成本系数且 $d > 1 > \beta$, d 越高表明单位投资效率越低,投资成本越高。由于市场偏好,售电商优先给用户供给可再生能源电力,然后再提供传统能源的电力。

3) 假设 w 为电力公司的定的批发价, p 为智能电网的零售价, q 为智能电网根据定价向发电厂采购的电量(传统发电和可再生能源发电),其次,根据《京都议定书》的定义,通过使用可再生能源节省的碳

量可以在碳交易市场上出售，并获得收入。设 c 为每碳单位的碳成本， σ 为每电单位发电量的排放因子，则可再生能源使用时的碳交易销售收入表示为 $c\sigma k$ 。

在中国电网公司承担输配电力的工作，并且电网公司会收取一定的费用，本文假定智能电网配送电时向售电商收取的单位电力费用为 h ，且 $b > c\sigma > h$ 。

由需求函数可知： $m > p > w > b + h$ 。

为保证均衡解为正故： $d^2 - 2d\beta + \beta^3 > 0$ ， $q^{c*} - k^{c*} > 0$ 。

3. 模型

3.1. 发电商投资可再生能源

在发电商投资可再生能源的模型中，售电商只能从发电商购买电力。决策顺序为：首先发电商采取投资可再生能源以及制定批发电价 (k, w) ，然后售电商采购电量以零售价 p 售往市场。那么，发电商与售电商的利润分别为

$$\pi_m^a = wq - b(q - k) + c\sigma k - dk^2. \tag{3}$$

$$\pi_r^a = (p - w)q - hq. \tag{4}$$

根据逆向归纳的方法，利用售电商的利润对零售价求一阶导令其为零可得：

$$p^{a*}(k, w) = \frac{1}{2}(m + \beta k + w + h). \tag{5}$$

将得到的 $p^*(k, w)$ 代入 π_m ，利用电力公司的利润 π_m 对投资可再生能源量 k 以及批发电价 w^* 的一阶条件，均衡批发电价 w^* 和可再生能源的投资量 k^* 分别为：

$$w^{a*} = \frac{b\beta(\beta - 2) + 4d(h - m - b) - 2\beta c\sigma}{\beta^2 - 8d}. \tag{6}$$

$$k^{a*} = \frac{b(\beta - 4) + \beta(h - m) - 4c\sigma}{\beta^2 - 8d}. \tag{7}$$

将 w^* 和 k^* 代入 q 和 $p^*(k, w)$ 中，均衡电价和均衡需求量分别为

$$p^{a*} = \frac{b\beta[(\beta - 3) - 2d] + \beta(h\beta - 3c\sigma) - 2d(3m + h)}{\beta^2 - 8d}. \tag{8}$$

$$q^{a*} = \frac{b(2d - \beta) + 2d(h - m) - \beta c\sigma}{\beta^2 - 8d}. \tag{9}$$

通过发电商和售电商的利润函数可得到各参数的最优均衡解。

命题 1: 在发电商投资可再生能源的情况下，最优均衡批发电价 w^{a*} ，可再生能源投资量 k^{a*} ，电价 p^{a*} ，需求量 q^{a*} 可由(6)~(9)式给出。

3.2. 售电商投资可再生能源

在售电商投资可再生能源的模型中，发电商只提供传统能源的电力。决策顺序为：首先发电商制定批发电价 w 。然后售电商采购电量以零售价 p 售往市场。那么，发电商与售电商的利润分别为

$$\pi_m^b = (w - b)(q - k). \tag{10}$$

$$\pi_r^b = pq - (q - k)w - hq + c\sigma k - dk^2. \tag{11}$$

根据逆向归纳法, 利用售电商的利润 π_r 对电价 p 以及可再生能源投资量 k 的一阶条件, 并令其为零, 故零售价格为:

$$p^b = \frac{2d(m+w+h) + \beta(w+c\sigma) - \beta^2(w+h)}{4d - \beta^2}. \quad (12)$$

可再生能源投资量为:

$$k^b = \frac{\beta(m-w-h) + 2w + 2c\sigma}{4d - \beta^2}. \quad (13)$$

将得到的 p^b 和 k^b 代入 π_m 得到 π_m^b

$$\pi_m^b = (w-b) \left[m - \frac{2d(m+w+h) + \beta(w+c\sigma) - \beta^2(w+h)}{4d - \beta^2} + (\beta-1) \frac{\beta(m-w-h) + 2w + 2c\sigma}{4d - \beta^2} \right]. \quad (14)$$

利用发电商的利润 π_m^b 对批发价格 w 一介求导并令其为零, 故均衡批发价格为:

$$w^{b*} = \frac{2b(1+d-\beta) + (m-h)(2d-\beta) + (\beta-2)c\sigma}{4(1+d-\beta)}. \quad (15)$$

将 w^* 代入 p^b 和 k^b 可得均衡零售价格和均衡可再生能源投资量

$$p^{b*} = \frac{\{4(2dm + 2dh + \beta c\sigma - \beta^2 h)(1+d-\beta) + [2b(1+d-\beta) + (m-h)(2d-\beta) + (\beta-2)c\sigma](2d+\beta-\beta^2)\}}{4(1+d-\beta)(4d-\beta^2)}. \quad (16)$$

$$k^{b*} = \frac{\{4(m\beta - h\beta + 2c\sigma)(1+d-\beta) + [2b(1+d-\beta) + (m-h)(2d-\beta) + (\beta-2)c\sigma](2-\beta)\}}{4(1+d-\beta)(4d-\beta^2)}. \quad (17)$$

将 p^{b*} 和 k^{b*} 代入 q

$$q = m - p + \beta k = \frac{2d(m-h) + \beta c\sigma - (2d-\beta)w}{4d - \beta^2}. \quad (18)$$

均衡市场需求电量为

$$q^{b*} = \frac{\{4(2md - 2dh + \beta c\sigma)(1+d-\beta) + [2b(1+d-\beta) + (m-h)(2d-\beta) + (\beta-2)c\sigma](\beta-2d)\}}{4(1+d-\beta)(4d-\beta^2)} \quad (19)$$

通过发电商和售电商的利润函数可得到各参数的最优均衡解。

命题 2: 在售电商投资可再生能源的情况下, 最优均衡批发电价 w^{b*} , 可再生能源投资量 k^{b*} , 电价 p^{b*} , 需求量 q^{b*} 可由(15)~(19)式给出。

3.3. 发电商和售电商共同投资可再生能源

在发电商和售电商投资可再生能源的模型中, 发电商不仅提供传统能源的电力还提供可再生能源电力。决策顺序为: 首先发电商制定批发电价 w 。然后售电商确定可再生能源投资量以零售价 p 售往市场。那么, 发电商与售电商的利润分别为

$$\pi_m^c = wq - \frac{1}{2}wk - b(q-k) + \frac{1}{2}c\sigma k - \frac{1}{4}dk^2. \quad (20)$$

$$\pi_r^c = (p-w) \left(q - \frac{1}{2}k \right) - hq + \frac{1}{2}pk + \frac{1}{2}c\sigma k - \frac{1}{4}dk^2. \quad (21)$$

根据逆向归纳法, 利用售电商的利润 π_r 对电价 p 以及可再生能源投资量 k 的一阶条件, 并令其为零, 可得:

$$k^c = \frac{\beta(m-h) + w(1-\beta) + c\sigma}{d - \beta^2}. \tag{22}$$

$$p^c = \frac{\frac{1}{2}d(m-h) + \frac{1}{2}w(\beta + d - 2\beta^2) + \frac{1}{2}\beta c\sigma - h\beta^2}{d - \beta^2}. \tag{23}$$

将 k^c 和 p^c 代入 π_m^c 得

$$\begin{aligned} \pi_m^c &= \frac{1}{d - \beta^2} \left\{ \frac{1}{2}w[d(m-h) + w(\beta - d) + \beta c\sigma] - \frac{1}{2}w[\beta(m-h) + w(1-\beta) + c\sigma] \right. \\ &\quad \left. - b\left[(m-h)\left(\frac{1}{2}d - \beta\right) + w\left(\frac{3}{2}\beta - 1 - \frac{1}{2}d\right) + \left(\frac{1}{2}\beta - 1\right)c\sigma\right] \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2}c\sigma[(m-h) + w(1-\beta) + c\sigma] - \frac{1}{4}d\frac{1}{d - \beta^2}[(m-h) + w(1-\beta) + c\sigma]^2 \right\}. \end{aligned} \tag{24}$$

利用发电商利润 π_m^c 对批发价格的一阶求导并令其为零, 可得, 均衡批发价格为:

$$w^{c*} = \frac{\left\{ \left[\frac{1}{2}(d - \beta)(m - h - b) + b(1 - \beta) \right] (d - \beta^2) - \frac{d}{2}(1 - \beta) [\beta(m - h) + c\sigma] \right\}}{\left[(d + 1 - 2\beta)(d - \beta^2) + \frac{d}{2}(1 - \beta)^2 \right]}. \tag{25}$$

将 w^{c*} 代入 p^c 和 k^c 可得均衡零售价格和均衡可再生能源投资量分别为:

$$k^{c*} = \frac{\left\{ [\beta(m-h) + c\sigma] * \left[(d+1-2\beta)(d-\beta^2) + \frac{d}{2}(1-\beta)^2 \right] + (1-\beta)(d-\beta^2) \left[\frac{1}{2}(d-\beta)(m-h-b) + b(1-\beta) \right] - \frac{d}{2}(1-\beta)^2 [\beta(m-h) + c\sigma] \right\}}{\left[(d+1-2\beta)(d-\beta^2) + \frac{d}{2}(1-\beta)^2 \right] (d-\beta^2)} \tag{26}$$

$$p^{c*} = \frac{\left\{ \left[\frac{1}{2}d(m-h) + \frac{1}{2}\beta c\sigma - h\beta^2 \right] \left[(d+1-2\beta)(d-\beta^2) + \frac{d}{2}(1-\beta)^2 \right] + \frac{1}{2}(\beta + d - 2\beta^2) \left[\frac{1}{2}(d-\beta)(m-h-b) + b(1-\beta) \right] (d-\beta^2) - \frac{1}{2}(\beta + d - 2\beta^2) \frac{d}{2}(1-\beta) [\beta(m-h) + c\sigma] \right\}}{\left[(d+1-2\beta)(d-\beta^2) + \frac{d}{2}(1-\beta)^2 \right] (d-\beta^2)}. \tag{27}$$

将 k^{c*} 和 p^{c*} 带入 q^c 得到均衡市场需求电量为:

$$q^{c*} = \frac{\left[\frac{d}{2}(m+h) + \frac{\beta}{2}c\sigma \right] * \left[(d+1-2\beta)(d-\beta^2) + \frac{d}{2}(1-\beta)^2 \right] - \frac{1}{2}(d-\beta) \left[\frac{1}{2}(d-\beta)(m-h-b) + b(1-\beta) \right] (d-\beta^2) + \frac{1}{2}(d-\beta) \frac{d}{2}(1-\beta) [\beta(m-h) + c\sigma]}{\left[(d+1-2\beta)(d-\beta^2) + \frac{d}{2}(1-\beta)^2 \right] (d-\beta^2)}. \tag{28}$$

通过发电商和售电商的利润函数可得到各参数的最优均衡解。

命题 3: 在发电商和售电商均等投资可再生能源的情况下, 最优均衡批发电价 w^{c*} , 可再生能源投资量 k^{c*} , 电价 p^{c*} , 需求量 q^{c*} 可由(25)~(28)式给出。

4. 模型分析

在以上三种模型中, 都存在唯一的纳什均衡解。接下来, 基于均衡结果进行下面三方面的分析, 1) 碳成本 c 对均衡结果的影响, 2) 可再生能源偏好系数对均衡结果的影响, 3) 三种投资可再生能源情形的比较分析。

4.1. 碳成本 c 对均衡解的影响

此部分考察碳成本 c 对均衡结果的影响。具体而言, 碳成本对均衡可再生能源的投资量, 电价和需求量的影响。

命题 4: 随着碳成本的增加,

$$\frac{\partial k^{c*}}{\partial c} > 0; \frac{\partial q^{c*}}{\partial c} > 0; \frac{\partial w^{c*}}{\partial c} < 0;$$

证明见附录。

命题 4 的结果表明, 当发电商和售电商均等投资可再生能源时, 随着碳成本的增加, 售电商会通过增加投资可再生能源获取额外的补贴。在此情况下, 为了出售更多传统电力, 发电商只能降低批发价。电力需求会随着可再生能源的补贴增加而增加。这些结论表明, 提高碳成本虽然会促进可再生能源的投资, 但是会对市场电力价格的波动产生较大的影响。那么, 政府在引导碳价时应当在可再生能源投资与电力价格之间进行权衡。

4.2. 可再生能源偏好系数 β 对均衡解的影响

可再生能源偏好系数 β 对均衡结果的影响。具体而言, 可再生能源偏好系数对均衡可再生能源的投资量, 电价和需求量的影响。

命题 5: 随着可再生能源偏好系数 β 的增加

$$\frac{\partial k^{c*}}{\partial \beta} > 0; \frac{\partial p^{c*}}{\partial \beta} > 0; \frac{\partial q^{c*}}{\partial \beta} > 0; \frac{\partial w^{c*}}{\partial \beta} > 0;$$

证明见附录。

命题 5 的结果表明, 随着可再生能源偏好系数的增加, 均衡可再生能源投资量、电价以及电力需求量均增加。因可再生能源偏好系数的增加, 导致市场可再生能源电力的增加, 当售电商观察到市场需求量的增加, 自然而然会提高零售价来提高自身的利润。这些结论表明, 随着可再生能源偏好度的增加, 不仅能提高可再生能源电力需求量, 还能提高市场总需求量。

4.3. 三种投资可再生能源情形的比较分析

命题 6: 比较不同情形下均衡可再生能源投资量有 $k^{a*} < k^{b*} < k^{c*}$ 。

证明见附录。

结果表明, 相对于发电商投资可再生能源情形而言, 售电商投资可再生能源的投资量会更多, 且发电商和售电商均等投资可再生能源的均衡投资量最多。

命题 7: 比较不同情形下均衡批发电价以及电价有 $w^{a*} > w^{b*} > w^{c*}$ 。

证明见附录。

结果表明, 相对于发电商投资可再生能源情形而言, 售电商投资可再生能源的批发价和零售价均更低, 且发电商和售电商均等投资可再生能源的均衡批发价和零售价是三种情形下最低的。

命题 8: 比较不同情形下电力总需求量, 有 $q^{a^*} < q^{b^*} < q^{c^*}$ 。

证明见附录。

结果表明, 相对于发电商投资可再生能源情形而言, 售电商投资可再生能源的均衡市场需求量更高, 且发电商和售电商均等投资可再生能源的均衡市场需求量是三种情形下最高的。影响市场需求量的关键因素就是电价和可再生能源投资量, 由命题 6 和 7 可知, 可再生能源投资量会增加而电价减少, 这两方面共同促进市场需求量的增加。

命题 9: 比较不同情形下的传统能源电力需求量有, $q^{b^*} - k^{b^*} > q^{a^*} - k^{a^*} > q^{c^*} - k^{c^*}$ 。

证明见附录。

结果表明, 相对于售电商投资可再生能源情形而言, 发电商投资可再生能源的传统发电量更低, 且发电商和售电商均等投资可再生能源的传统发电量是三种情形下最低的。

5. 数值分析

本节采用数值实验方法是符合前文的理论分析条件, 旨在形象的说明变量对供应链均衡结果的影响。具体分为以下三部分, 1) 可再生能源投资成本系数 d 对供应链的均衡可再生能源投资量 k 、批发价 w 、零售电价 p 、电量需求量 q 以及供应链企业利润的影响; 2) 碳成本 c 对供应链企业利润的影响; 3) 可再生能源偏好系数 β 对供应链企业利润的影响。

5.1. 可再生能源投资成本系数 d 的影响

利用 MATLAB 进行数值实验分析, 详细分析可再生能源投资成本系数 d 对供应链的均衡可再生能源投资量 k 、批发价 w 、零售电价 p 、电量需求量 q 以及供应链企业利润的影响。首先确定外生变量。

$$m=10, b=0.3, \beta=0.2, h=0.1, c=0.15, \sigma=1, d=1\sim 1.5$$

利用 MATLAB 刻画可再生能源系数 d 的比较静态分析结果, 得到以下图, 观察有以下结论:

1) 图 1 表明, 发电商和售电商均等投资可再生能源的投资量 k^{**} 要远大于发电商和售电商各自投资的可再生能源量, 并且售电商投资可再生能源的投资量也大于发电商。这数值实验也验证了命题 6。其次, 可自身能源投资量均随着投资成本的增加而减少, 因为成本系数的增加会导致电力行业的供应链利润减少, 意味着投资可再生能源的动机会减少。所以政府可以适当引导电力行业对可再生能源的成本进行研究, 以降低投资成本, 促进企业在可再生能源方面的投资, 减少碳排放量高的传统发电。

2) 图 2、图 3 表明, 售电商投资可再生能源的批发价和零售价均小于发电商, 并且发电商和售电商均等投资可再生能源的情况下其批发价和零售价均最低。此数值实验结果也验证了命题 7。其次, 当售电商以及发电商和售电商均等投资可再生能源时, 批发价和零售价均随着可再生能源成本系数 d 的增加而增加, 因为成本系数的增加会导致售电商的成本增加, 故而在竞争的情形下, 发电商适当提高批发价, 售电商也是可以接受的, 因此也导致了零售价的增加。

3) 图 4 表明, 售电商投资可再生能源情形下的市场电力需求量大于发电商投资可再生能源情形下的电力需求量, 并且发电商和售电商均等投资可再生能源的情况下其电力需求量最高。此数值实验结果也验证了命题 8。其次当可再生能源成本系数不断增加时, 售电商以及发电商和售电商均等投资可再生能源情形下的电力需求量不断的降低, 这也和可再生能源成本系数增加时, 可再生能源投资量和零售电价变化趋势相吻合。

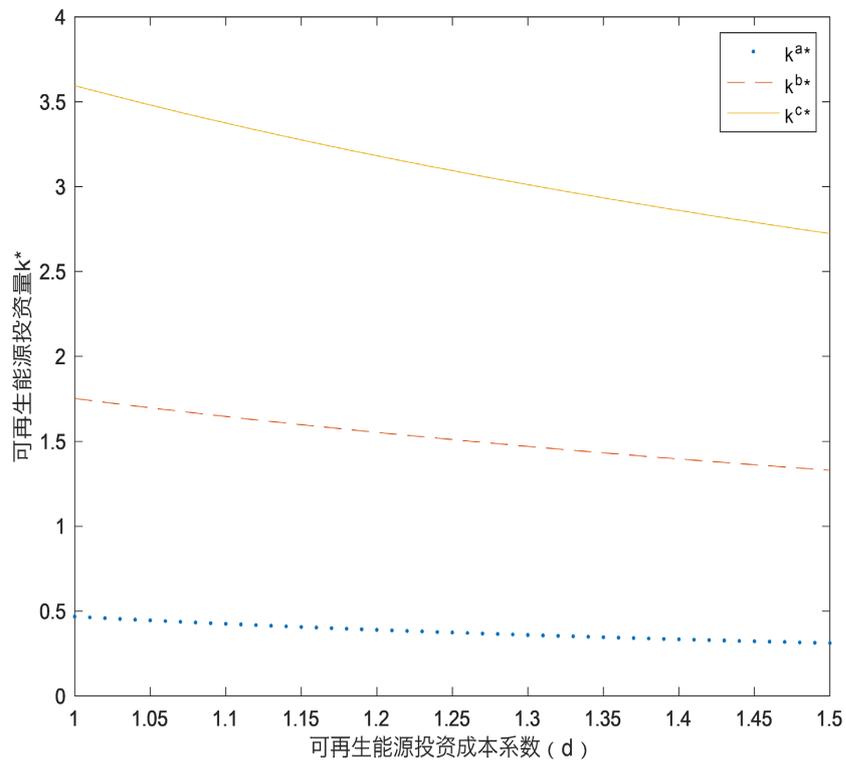


Figure 1. The effect of renewable energy investment cost coefficient on investment volume
图 1. 可再生能源投资成本系数对投资量的影响

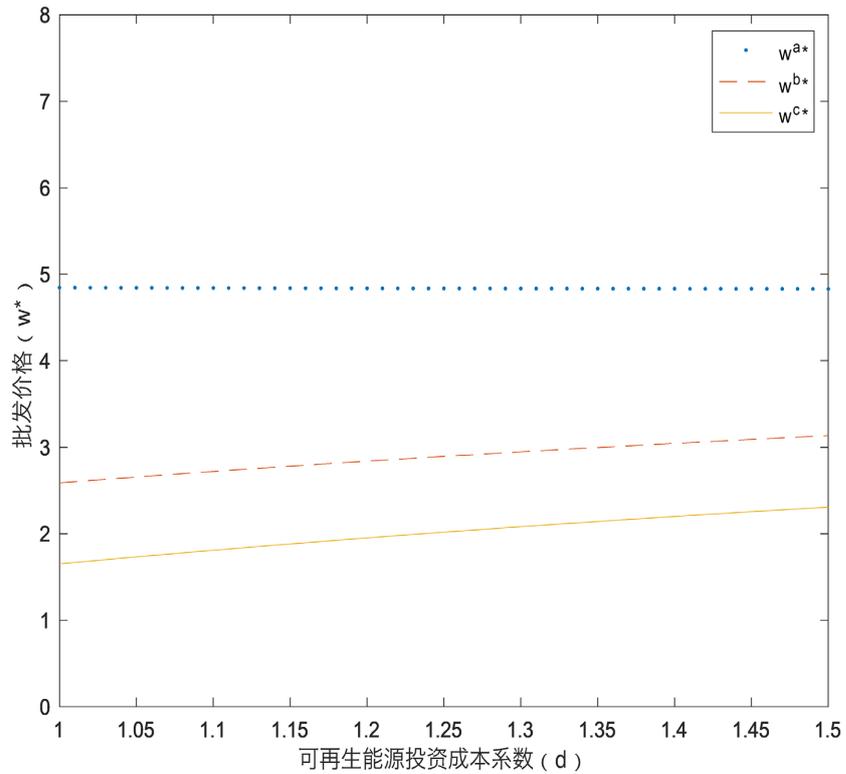


Figure 2. The effect of renewable energy investment cost coefficient on wholesale price
图 2. 可再生能源投资成本系数对批发价格的影响

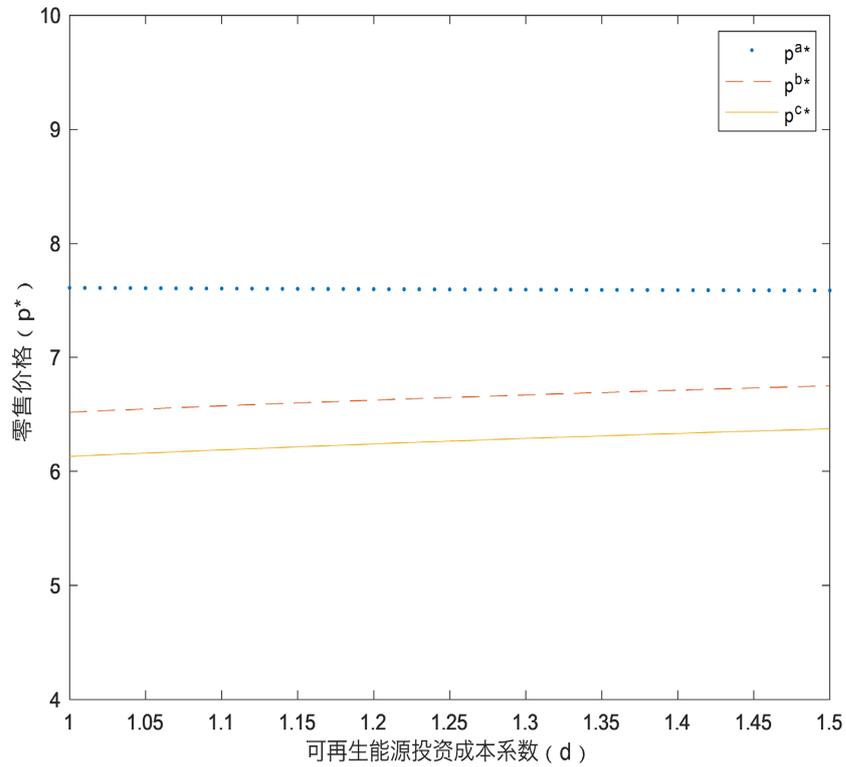


Figure 3. The impact of renewable energy investment cost coefficients on retail prices
图 3. 可再生能源投资成本系数对零售价格的影响

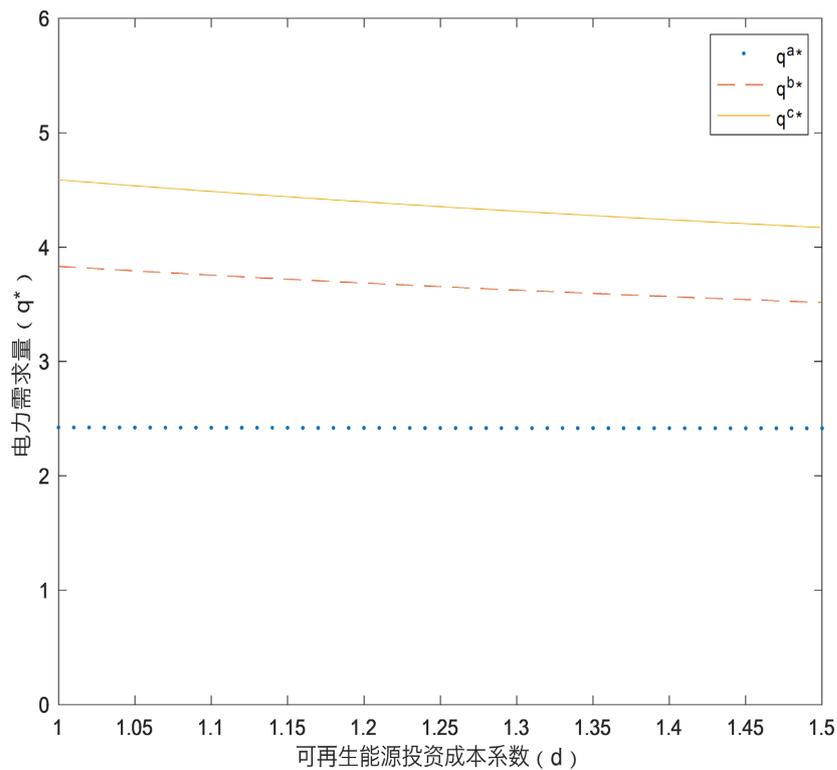


Figure 4. The effect of renewable energy investment cost coefficient on power demand for power demand
图 4. 可再生能源投资成本系数对电力需求量的影响

4) 图 5 表明, 在发电商和售电商均等投资可再生能源的情形下, 此场景的传统方式发电量最低, 此数值实验结果也验证了命题 9。其次三种模型的传统方式发电量均随着可再生能源投资成本系数的增加而增加。

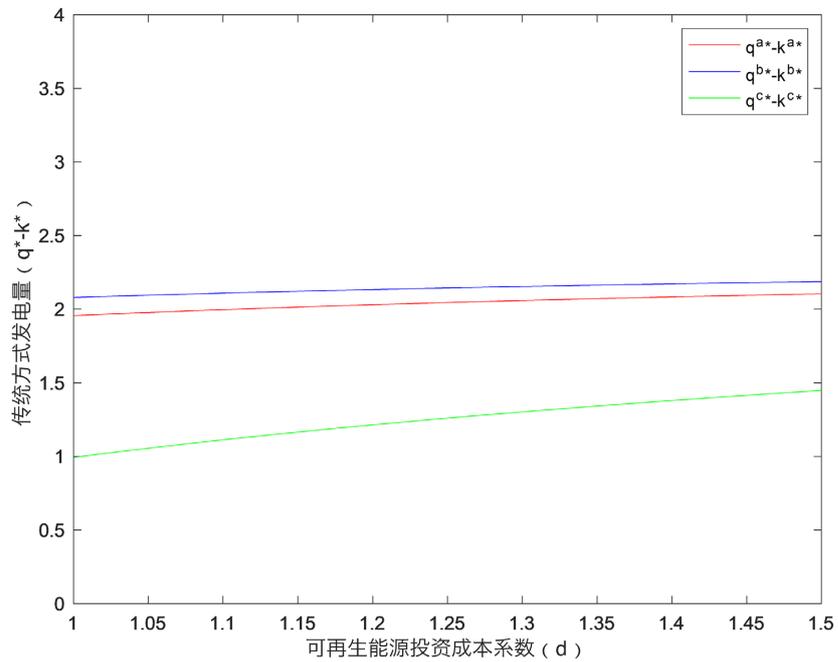


Figure 5. The impact of renewable energy investment cost coefficients on traditional methods of power generation

图 5. 可再生能源投资成本系数对传统方式发电量的影响

5) 图 6 表明, 发电商和售电商均等投资可再生能源时, 售电商的利润最高, 而其发电商的利润最低。

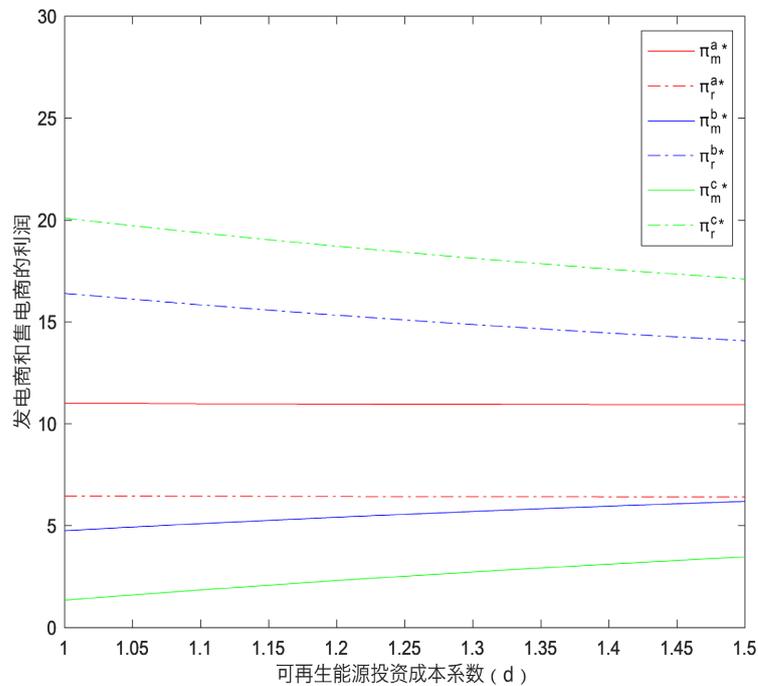


Figure 6. The impact of renewable energy investment cost coefficients on profits

图 6. 可再生能源投资成本系数对利润的影响

在发电商投资可再生能源时，发电商的利润要大于售电商的利润；而在售电商投资可再生能源时，售电商利润要大于发电商。因为在发电商投资可再生能源时，售电商只能从发电商手中进行批发电量，此时发电商依然掌握着发电的渠道，因此占据着绝大部分的利润。在售电商投资可再生能源时，售电商的电量渠道不仅仅只有发电商，还有自身的可再生能源发电，且可再生能源发电受市场的偏好，故此时售电商掌握绝大部分的利润。当发电商和售电商均等投资可再生能源时，发电商的利润随着可再生能源投资成本系数的增加而增加，导致售电商的生产成本增加，此时发电商适当提高批发价来保证自身的利润。图 7 表明，供应链的整体利润随着可再生能源投资成本系数的增加而降低，故政府可以适当引导企业去研发可再生能源技术，降低成本，提高利润。

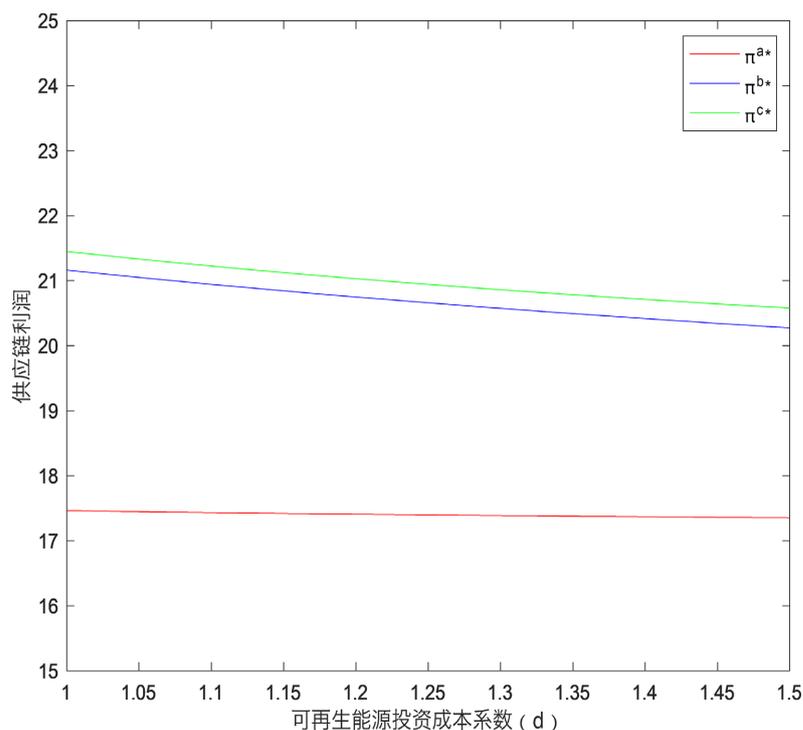


Figure 7. The effect of renewable energy investment cost coefficient on total profit
图 7. 可再生能源投资成本系数对总利润的影响

5.2. 碳成本 c 对利润的影响

接下来分析碳成本 c 对供应链企业利润的影响。首先确定外生变量

$$m=10、b=0.3、\beta=0.2、h=0.1、c=0.1\sim 0.3、\sigma=1、d=1.5$$

观察图 8 得到以下结论：

1) 由图 8 可知，发电商投资可再生能源的情况下，发电商的利润大于售电商的利润；而在售电商投资可再生能源的情况下，售电商的利润大于发电商的利润；在发电商和售电商均等投资可再生能源的情况下，售电商的利润大于发电商。

2) 由图 8 可知，在发电商和售电商均等投资可再生能源的情况下，售电商的利润最高，发电商的利润最低。这是由于，售电商有对个渠道可以购买电量，并且自身还生产可再生能源电量，因此会占据更多的利润。

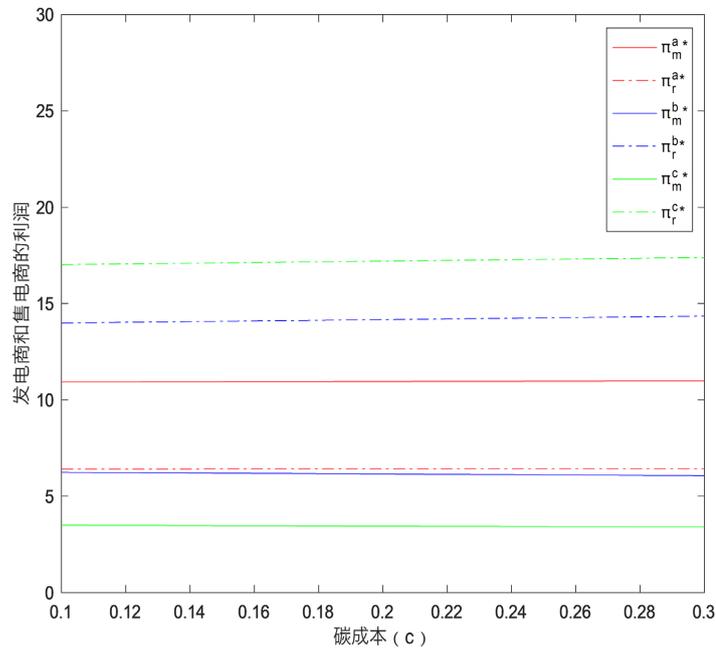


Figure 8. The impact of carbon cost on profits
图 8. 碳成本对利润的影响

5.3. 可再生能源偏好系数对供应链企业利润的影响

接下来分析可再生能源偏好系数对供应链企业利润的影响。首先确定外生变量

$$m=10、b=0.3、\beta=0\sim 0.2、h=0.1、c=0.15、\sigma=1、d=1.5$$

观察图 9 得到以下结论：

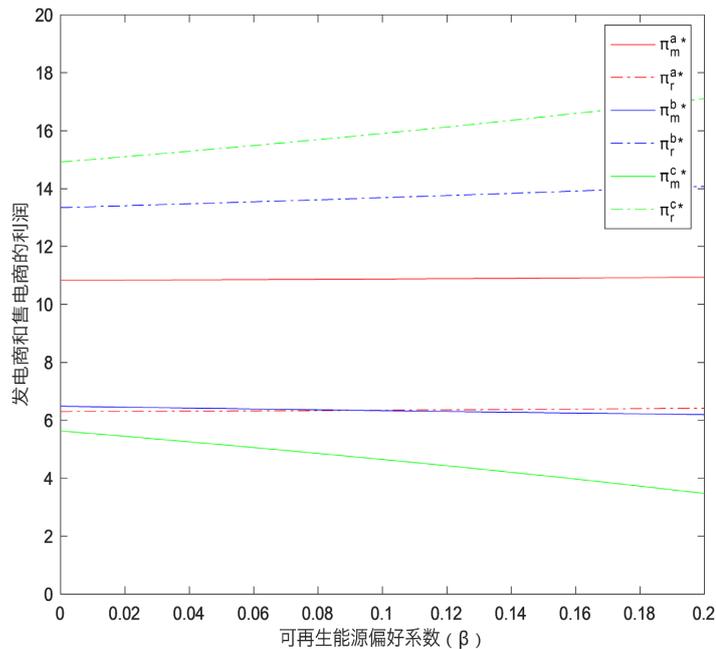


Figure 9. The effect of renewable energy preference coefficient on profit
图 9. 可再生能源偏好系数对利润的影响

1) 由图9可知,发电商投资可再生能源的情况下,发电商的利润大于售电商的利润;而在售电商投资可再生能源的情况下,售电商的利润大于发电商的利润;在发电商和售电商均等投资可再生能源的情况下,售电商的利润大于发电商。

2) 由图9可知,在发电商投资可再生能源的情形下,发电商和售电商的利润随着可再生能源偏好系数的增加而增加,主要原因是偏好系数增加导致,可再生能源发电量和电力需求量的增加。从而使发电商和售电商获得更多的利润。

3) 在售电商透支可再生能源的情况下,发电商的利润随着可再生能源偏好系数的增加而降低,售电商的利润随着可再生能源偏好系数的增加而增加。主要原因是,售电商参与了电量的供给,可再生能源系数的增加促使售电商更加依赖自身的发电,自然发电商的利润被压缩了。在发电商和售电商均等投资可再生能源的情况下,其可再生能源系数对供应链利润的影响与售电商投资可再生能源情况类似。但其售电商的利润在三种投资里最高,发电商的利润最低。

6. 结束语

在碳限额与交易机制的背景下,现有的文献主要研究碳限额与交易机制对发电商投资决策的研究,少有文献会研究售电商投资可再生能源的研究。为此本文构建了由发电商与售电商组成的二级电力供应链,分别考虑了发电商投资可再生能源、售电商投资可再生能源以及发电商和售电商共同投资可再生能源的情形。当售电商投资可再生能源时,增加电力的渠道,减少售电商对发电商的依赖,并研究了电价决策对可再生能源投资的影响,得到以下结论:1) 相对于发电商投资可再生能源的情况,在售电商投资可再生能源将有更多的投资量、更多的电力需求和更低的价格,同时在发电商和售电商均等投资可再生能源时,进一步拉低电价,增加电力需求量,并减少了传统发电量。2) 在发电商投资可再生能源的情况,发电商利润大于售电商,但在售电商投资可再生能源情况下,售电商利润大于发电商,在发电商和售电商均等投资可再生能源情况下,售电商利润大于发电商,此时的售电商利润为三种投资情形下最高,发电商利润最低。3) 随着再生能源投资成本系数的增加,会导致可再生能源电量和需求电量的降低,并且会导致批发价和零售价的上升,导致售电商的利润收入下降。4) 可再生能源偏好系数会导致售电商的利润增加,但发电商利润降低。

以上结论给政府、供应链企业、消费者均有一定启示。从政府角度来看,首先若政府鼓励售电商参与可再生能源的投资,则会促进可再生能源的需求,也会加大市场的电量需求,其次提高碳价会增加可再生能源的投资,但是会提高零售价格,民众的用电成本会增加。政府应当在注意碳价政策。最后政府应当加大低碳能源的宣传,培养民众的环保意识。从供应链角度来看,售电商参与可再生能源投资的情况,可增加电力来源,售电商会更好的控制自身利润。从消费者角度来看,售电商参与投资可再生能源时,会增加零售价格,此时消费者的用电成本提高,但是可再生能源的电量也随之提高了。消费者也应该培养和加强宣传低碳环保意识。

电力供应链的研究未来会从以下几个方面,首先本文在信息对称条件下考虑电力供应链企业的决策,未来会考虑信息不对称的背景。其次,本文只考虑一个发电商和一个售电商,未来会考虑多个发电商和多个售电商。最后本文考虑的是可再生能源稳定输出,未来会把间歇性纳入考虑范围。

参考文献

- [1] 杨磊,张琴,张智勇. 碳交易机制下供应链渠道选择与减排策略[J]. 管理科学学报, 2017, 20(11): 75-87.
- [2] Zhou, P. and Wang, M. (2016) Carbon Dioxide Emissions Allocation: A Review. *Ecological Economics*, **125**, 47-59. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.03.001>
- [3] Vithayasrichareon, P. and MacGill, I.F. (2013) Assessing the Value of Wind Generation in Future Carbon Constrained

- Electricity Industries. *Energy Policy*, **53**, 400-412. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.11.002>
- [4] 赵冉. 可再生能源发电量同比增长 12.7% [N]. 中国电力报, 2021-12-23(002). <https://doi.org/10.28061/n.cnki.ncdlb.2021.002200>
- [5] 丁志刚, 徐琪. 碳限额与交易政策下供应链低碳技术投资时机研究[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2015, 17(5): 9-14. <https://doi.org/10.15918/j.jbitss1009-3370.2015.0502>
- [6] Du, S., Ma, F., Fu, Z., Zhu, L. and Zhang, J. (2015) Game-Theoretic Analysis for an Emission-Dependent Supply Chain in a 'Cap-and-Trade' System. *Annals of Operations Research*, **228**, 135-149. <https://doi.org/10.1007/s10479-011-0964-6>
- [7] Xu, X., He, P., Xu, H. and Zhang, Q. (2017) Supply Chain Coordination with Green Technology under Cap-and-Trade Regulation. *International Journal of Production Economics*, **183**, 433-442. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.08.029>
- [8] 向小东. 碳限额与交易政策下三级供应链减排微分博弈及协调研究[J]. 福州大学学报(哲学社会科学版), 2020, 34(3): 35-43.
- [9] Dong, C., Shen, B., Chow, P.-S., Yang, L. and Ng, C.T. (2016) Sustainability Investment under Cap-and-Trade Regulation. *Annals of Operations Research*, **240**, 509-531. <https://doi.org/10.1007/s10479-013-1514-1>
- [10] 周艳菊, 吴龙健. 碳限额交易机制下碳信息不对称对供应链的影响研究[J]. 工业工程与管理, 2017, 22(4): 68-78. <https://doi.org/10.19495/j.cnki.1007-5429.2017.04.0010>
- [11] 郭军华, 孙林洋, 张诚, 倪明, 朱佳翔. 碳限额交易政策下考虑消费者低碳偏好的供应链定价与协调[J]. 工业工程与管理, 2020, 25(2): 134-145. <https://doi.org/10.19495/j.cnki.1007-5429.2020.02.018>
- [12] 王志远, 周泽辉, 牟宗玉. 碳限额与交易政策下低碳供应链微分博弈模型研究[J]. 青岛大学学报(自然科学版), 2021, 34(4): 86-93+102.
- [13] Cohen, J.J., Azarova, V., Kollmann, A. and Reichl, J. (2021) Preferences for Community Renewable Energy Investments in Europe. *Energy Economics*, **100**, Article ID: 105386. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105386>
- [14] 公丕芹, 李昕昉. 碳交易机制下可再生能源投资价值与投资时机研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(3): 22-29.
- [15] 陈威, 马永开, 白春光. 基于碳限额与交易机制的上下游企业可再生能源投资策略研究[J]. 中国管理科学, 2023, 31(1): 70-80. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2020.1017>
- [16] Requate, T. (2015) Green Tradable Certificates versus Feed-in Tariffs in the Promotion of Renewable Energy Shares. *Environmental Economics and Policy Studies*, **17**, 211-239. <https://doi.org/10.1007/s10018-014-0096-8>

附录

命题 4 的证明:

在发电商和售电商均等投资可再生能源的情形下, 均衡可再生能源投资量 k^{c*} 对碳成本一阶条件为:

$$\frac{\partial k^{c*}}{\partial c} = \frac{\sigma \left[(d+1-2\beta)(d-\beta^2) + \frac{d}{2}(1-\beta)^2 \right] - \frac{d}{2}(1-\beta)^2 \sigma}{\left[(d+1-2\beta)(d-\beta^2) + \frac{d}{2}(1-\beta)^2 \right] (d-\beta^2)} > 0.$$

在发电商和售电商均等投资可再生能源的情形下, 均衡电力需求量 q^{c*} 对碳成本一阶条件为:

$$\frac{\partial q^{c*}}{\partial c} = \frac{\frac{\beta}{2} \sigma^* \left[(d+1-2\beta)(d-\beta^2) + \frac{d}{2}(1-\beta)^2 \right] + \frac{1}{2}(d-\beta) \frac{d}{2}(1-\beta) \sigma}{\left[(d+1-2\beta)(d-\beta^2) + \frac{d}{2}(1-\beta)^2 \right] (d-\beta^2)} > 0.$$

在发电商和售电商均等投资可再生能源的情形下, 均衡电力批发价 w^{c*} 对碳成本一阶条件为:

$$\frac{\partial w^{c*}}{\partial c} = \frac{-\frac{d}{2}(1-\beta) \sigma}{\left[(d+1-2\beta)(d-\beta^2) + \frac{d}{2}(1-\beta)^2 \right]} < 0.$$

命题 5 的证明:

在发电商和售电商均等投资可再生能源的情形下, 均衡可再生能源投资量 k^{c*} 对可再生能源偏好系数 β 的一阶条件为:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial k^{c*}}{\partial \beta} > 0. \\ & \left\{ (m-h)y_4 + x_5 y_4' - x_4 y_3 + (1-\beta) \left[\frac{d}{2} x_5 - 2\beta x_4 - \frac{1}{2} y_3 (m-h+b) + \frac{dx_5}{2} - \frac{d}{2} (1-\beta)(m-h) \right] \right\}^* y_3 y_4 \\ & \frac{\partial k^{c*}}{\partial \beta} = \frac{+(2\beta y_4 - y_3 y_4')^* \left[x_5 y_4 + (1-\beta) y_3 x_4 - \frac{d}{2} (1-\beta)^2 x_5 \right]}{y_3^2 * y_4^2} \\ & = \frac{1}{y_3^2 * y_4^2} \left\{ \frac{1}{2} (m-h-b) y_4 (d^3 + d^2 + 2d\beta^2 + 6\beta^5 - 6d\beta^3 - d\beta^4 - 3\beta^4) \right. \\ & \quad + \frac{b}{2} (d^3 + 2d^2 + d\beta^2 + 2d\beta + 7\beta^2 + 6\beta^5 - 3d - 2\beta - 6d\beta^3 - 4\beta^3 - d\beta^4 - 3\beta^4) \\ & \quad \left. + (d^2 + d\beta^2 - d^2\beta - d\beta) y_4 c_{ce} \sigma + (-y_4' y_3) \left[(1-\beta) y_3 x_4 - \frac{d}{2} (1-\beta)^2 x_5 \right] \right\} \\ & > 0. \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} x_4 &= \frac{1}{2} (d-\beta)(m-h-b) + b(1-\beta). \quad x_5 = (\beta m - \beta h + c_{ce} \sigma). \\ y_3 &= d - \beta^2. \quad y_4 = (d+1-2\beta)(d-\beta^2) + \frac{d}{2}(1-\beta)^2. \quad y_4' = \frac{\partial y_4}{\partial \beta} = -d\beta - 3d - 2\beta + 6\beta^2 < 0. \end{aligned}$$

$$d^3 + d^2 + 2d\beta^2 + 6\beta^5 - 6d\beta^3 - d\beta^4 - 3\beta^4 > 0.$$

$$d^3 + 2d^2 + d\beta^2 + 2d\beta + 7\beta^2 + 6\beta^5 - 3d - 2\beta - 6d\beta^3 - 4\beta^3 - d\beta^4 - 3\beta^4 > 0.$$

$$d^2 + d\beta^2 - d^2\beta - d\beta > 0.$$

$$(-y'_4 y_3) \left[(1-\beta)y_3 x_4 - \frac{d}{2}(1-\beta)^2 x_5 \right] > 0.$$

所以: $\frac{\partial k^{c*}}{\partial \beta} > 0$

在发电商和售电商均等投资可再生能源的情形下, 均衡电力零售价 p^{c*} 对可再生能源偏好系数 β 的一阶条件为:

$$\frac{\partial p^{c*}}{\partial \beta} > 0.$$

$$\begin{aligned} & y_3 y_4 \left[x'_7 y_4 + x_7 y'_4 + \frac{1}{2}(d - 6d\beta - 3\beta^2 + 8\beta^3)x_4 + \frac{1}{2}(d\beta + d^2 + 2\beta^4 - 3d\beta^2 - \beta^3)x'_4 \right. \\ & \left. - \frac{1}{4}(d^2 + d\beta - 3d\beta^2 - d^2\beta + 2d\beta^2)x'_5 + \frac{1}{4}(d^2 - d + 6d\beta - 6d\beta^2)x_5 \right] \\ \frac{\partial p^{c*}}{\partial \beta} = & \frac{+(2\beta y_4 - y_3 y'_4) * \left[x_7 y_4 + \frac{1}{2}(d\beta + d^2 + 2\beta^4 - 3d\beta^2 - \beta^3)x_4 - \frac{1}{4}(d^2 + d\beta - 3d\beta^2 - d^2\beta + 2d\beta^3)x_5 \right]}{y_3^2 * y_4^2} > 0. \end{aligned}$$

$$x_7 = \frac{1}{2}d(m-h) + \frac{1}{2}\beta c\sigma - h\beta^2.$$

在发电商和售电商均等投资可再生能源的情形下, 均衡电力需求量 q^{c*} 对可再生能源偏好系数 β 的一阶条件为:

$$\frac{\partial q^{c*}}{\partial \beta} > 0.$$

$$\begin{aligned} & \left\{ \frac{1}{2}c\sigma y_4 + \left[\frac{d}{2}(m+h) + \frac{\beta}{2}c\sigma \right] * y'_4 - \frac{1}{2}x'_6 x_4 - \frac{1}{2}x_6 x'_4 - \frac{d}{4}(d+1-2\beta)x_5 + \frac{d}{4}(m-h)(1-\beta)(d-\beta) \right\} * y_3 y_4 \\ \frac{\partial q^{c*}}{\partial \beta} = & \frac{+(2\beta y_4 - y_3 y'_4) * \left\{ \left[\frac{d}{2}(m+h) + \frac{\beta}{2}c\sigma \right] y_4 - \frac{1}{2}x_6 x_4 + \frac{d}{4}(d-\beta)(1-\beta)x_5 \right\}}{y_3^2 * y_4^2} \\ = & \left\{ \frac{1}{y_3^2 * y_4^2} \frac{1}{4}(m-h) \left\{ y_4 * \left[(4d^2\beta + 3d^2 + 4\beta^3 - 11d\beta^2)(d-\beta^2) + 2d^2\beta(1-\beta)^2 \right] \right. \right. \\ & \left. \left. + (d^2\beta - d^2\beta^2 - d^2 + d\beta^3 + d\beta - \beta^3) \left[y_3(3d + 3d\beta + 4\beta - 10\beta^2) + d\beta(1-\beta)^2 \right] \right\} \right. \\ & \left. + \frac{1}{y_3^2 * y_4^2} \left[\frac{1}{2}c\sigma y_3 y_4^2 + 2hd\beta y_4^2 + \beta^2 c\sigma y_4^2 + \frac{d}{4}(d-\beta)(1-\beta)c\sigma(2\beta y_4 - y_3 y'_4) + \frac{b}{4}(x_8 + x_9) \right] \right\} \\ > & 0. \end{aligned}$$

其中

$$x_6 = (d-\beta) * (d-\beta^2). \quad x'_4 = -\frac{1}{2}(m-h+b). \quad x'_6 = -2d\beta - d + 3\beta^2.$$

$$x_8 = (d-1)(d^2 - d\beta^2 + \beta^3 - d\beta) \left[(d-\beta^2)(3d+3d\beta+4\beta-10\beta^2) + d\beta(1-\beta)^2 \right].$$

$$x_9 = (d-\beta^2)(2d\beta-2d^2\beta+2d+4\beta^3-6\beta^2) \left[(d+1-2\beta)(d-\beta^2) + \frac{d}{2}(1-\beta)^2 \right].$$

因 $y_4 > -(d^2\beta - d^2\beta^2 - d^2 + d\beta^3 + d\beta - \beta^3)$.

$$(4d^2\beta + 3d^2 + 4\beta^3 - 11d\beta^2)(d-\beta^2) + 2d^2\beta(1-\beta)^2 > y_3(3d+3d\beta+4\beta-10\beta^2) + d\beta(1-\beta)^2.$$

故

$$y_4 * \left[(4d^2\beta + 3d^2 + 4\beta^3 - 11d\beta^2)(d-\beta^2) + 2d^2\beta(1-\beta)^2 \right] + (d^2\beta - d^2\beta^2 - d^2 + d\beta^3 + d\beta - \beta^3) \left[y_3(3d+3d\beta+4\beta-10\beta^2) + d\beta(1-\beta)^2 \right] > 0.$$

$x_8 + x_9 > 0$. 故 $\frac{\partial q^{c*}}{\partial \beta} > 0$.

在发电商投资可再生能源的情形下，均衡电力批发价 w^{c*} 对可再生能源偏好系数 β 的一阶条件为：

$$\frac{\partial w^{c*}}{\partial \beta} > 0.$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w^{c*}}{\partial \beta} &= \frac{\left[x'_4 y_3 + x_4 y'_3 + \frac{d}{2} x_5 - \frac{d}{2} (1-\beta)(m-h) \right] * y_3 y_4 + (2\beta y_4 - y_3 y'_4) \left[x_4 y_3 - \frac{d}{2} (1-\beta) x_5 \right]}{y_3^2 * y_4^2} \\ &= \frac{1}{y_3^2 * y_4^2} \left\{ \frac{(m-h-b)}{2} \left[(-2d+3\beta^2) y_3 y_4 + (d^2 + \beta^3 - 2d\beta)(2\beta y_4 - y_3 y'_4) \right] \right. \\ &\quad + b \left[\left(-\frac{d}{2} + \frac{3}{2} \beta^2 + d\beta - 2\beta \right) y_3 y_4 + \frac{1}{2} (2d-3d\beta-2\beta^2+2\beta^3+d\beta^2)(2\beta y_4 - y_3 y'_4) \right] \\ &\quad \left. + \frac{d}{2} c\sigma \left[y_3 y_4 - (1-\beta)(2\beta y_4 - y_3 y'_4) \right] \right\} \\ &> 0. \end{aligned}$$

其中 $\left[(-2d+3\beta^2) y_3 y_4 + (d^2 + \beta^3 - 2d\beta)(2\beta y_4 - y_3 y'_4) \right] > 0$.

$$\frac{1}{2} \left[(-d+3\beta^2+2d\beta-4\beta) y_3 y_4 + (2d-3d\beta-2\beta^2+2\beta^3+d\beta^2)(2\beta y_4 - y_3 y'_4) \right] > 0.$$

$y_3 y_4 - (1-\beta)(2\beta y_4 - y_3 y'_4) > 0$. 故 $\frac{\partial w^{c*}}{\partial \beta} > 0$.

命题 6 的证明：

$$k^{b*} - k^{a*} = \frac{(m-h-b)x_{10} + b^* x_{11} + c\sigma^* x_{12}}{(8d-\beta^2)^* y_1 y_2} > 0$$

其中：

$$x_{10} = (8d\beta - \beta^3) y_2 + (4d - 2d\beta - 2\beta + \beta^2)(8d - \beta^2) - \beta y_1 y_2$$

$$x_{11} = (8d\beta - \beta^3) y_2 + (2 + 4d - 3\beta)^* (8d - \beta^2) - 4y_1 y_2$$

$$x_{12} = (16d - 2\beta^2) y_2 - (2 - \beta)^2 (8d - \beta^2) - 4y_1 y_2$$

$$k^{c^*} - k^{b^*} = \frac{(m-h-b)x_{13} + b^*x_{14} + c\sigma^*x_{15}}{y_1y_2^*y_3y_4} > 0$$

其中:

$$\begin{aligned} x_{13} &= \left[(d\beta - \beta^3)(d+1-2\beta) + \frac{1}{2}(d-\beta)(d-\beta^2)(1-\beta) \right] y_1y_2 \\ &\quad - \left[\beta y_2 + (4d - 2d\beta - 2\beta + \beta^2) \right] y_3y_4 \\ x_{14} &= \left[(d\beta - \beta^3)(d+1-2\beta) + (d-\beta^2)(1-\beta)^2 \right] y_1y_2 \\ &\quad - \left[\beta y_2 + (2+4d-3\beta) \right] y_3y_4 \\ x_{15} &= (d-\beta^2)(d+1-2\beta)y_1y_2 - \left[(16d-2\beta^2)y_2 - (2-\beta)^2(8d-\beta^2) \right] y_3y_4 \end{aligned}$$

命题 7 的证明:

$$w^{a^*} - w^{b^*} = \frac{(m-h-b)x_{16} + b^*x_{17} + c\sigma^*x_{18}}{(8d-\beta^2)y_2} > 0$$

其中:

$$\begin{aligned} x_{16} &= 4dy_2 - (2d-\beta)(8d-\beta^2) \\ x_{17} &= (8d+2\beta-\beta^2)y_2 - (4d+2-3\beta)(8d-\beta^2) \\ x_{18} &= 2\beta y_2 + (2-\beta)(8d-\beta^2) \\ w^{b^*} - w^{c^*} &= \frac{(m-h-b)x_{19} + b^*x_{20} + c\sigma^*x_{21}}{y_2y_4} > 0 \end{aligned}$$

其中:

$$\begin{aligned} x_{19} &= (2d-\beta)y_4 - \left[\frac{1}{2}(d-\beta)y_3 - \frac{1}{2}(d\beta-d\beta^2) \right] y_2 \\ x_{20} &= (2+4d-3\beta)y_4 - \left[(1-\beta)y_3 - \frac{1}{2}d\beta(1-\beta) \right] y_2 \\ x_{21} &= \frac{1}{2}d\beta(1-\beta)y_2 - (2-\beta)y_4 \end{aligned}$$

命题 8 的证明:

$$q^{b^*} - q^{a^*} = \frac{(m-h-b)x_{22} + b^*x_{23} + c\sigma^*x_{24}}{(8d-\beta^2)y_1y_2} > 0$$

其中:

$$\begin{aligned} x_{22} &= \left[2dy_2 - (2d-\beta)^2 \right] (8d-\beta^2) - 2dy_1y_2 \\ x_{23} &= \left[2dy_2 - (2d-\beta)(2+4d-3\beta) \right] (8d-\beta^2) - \beta y_1y_2 \\ x_{24} &= \left[\beta y_2 + (2d-\beta)(2-\beta) \right] (8d-\beta^2) - \beta y_1y_2 \end{aligned}$$

$$q^{c^*} - q^{b^*} = \frac{(m-h-b)x_{25} + b^*x_{26} + c\sigma^*x_{27} + hdy_4}{y_1y_2^*y_3y_4} > 0$$

其中:

$$\begin{aligned} x_{25} &= \left[\frac{d}{2}y_4 - \frac{1}{4}(d-\beta)^2y_3 + \frac{d\beta}{4}(d-\beta)(1-\beta) \right] y_1y_2 - \left[2dy_2 - (2d-\beta)^2 \right] y_3y_4 \\ x_{26} &= \left[\frac{d}{2}y_4 + \frac{1}{2}(1-\beta)(d-\beta) \left(\frac{d\beta}{2} - y_3 \right) \right] y_1y_2 - \left[2dy_2 - (2+4d-3\beta)(2d-\beta) \right] y_3y_4 \\ x_{27} &= \left[\frac{\beta}{2}y_4 + \frac{d}{4}(d-\beta)(1-\beta) \right] y_1y_2 - \left[\beta y_2 + (2d-\beta)(2-\beta) \right] y_3y_4 \end{aligned}$$

命题 9 的证明:

$$(q^{b^*} - k^{b^*}) - (q^{a^*} - k^{a^*}) = \frac{(m-h-b)x_{28} + b^*x_{29} + c\sigma^*x_{30}}{(8d-\beta^2)^*y_1y_2} > 0$$

其中:

$$\begin{aligned} x_{28} &= (2d-\beta)(y_2-2d+2)(8d-\beta^2) - (2d-\beta)y_1y_2 \\ x_{29} &= \left[(2d-\beta)y_2 - (2+4d-3\beta)(2d+2-2\beta) \right] (8d-\beta^2) + (4-\beta)y_1y_2 \\ x_{30} &= \left[(\beta-2)y_2 + (2d+2-2\beta)(2-\beta) \right] (8d-\beta^2) + (4-\beta)y_1y_2 \\ &= \frac{(q^{a^*} - k^{a^*}) - (q^{c^*} - k^{c^*})}{(8d-\beta^2)^*y_3y_4} > 0 \end{aligned}$$

其中:

$$\begin{aligned} x_{31} &= (2d-\beta)y_3y_4 \\ &\quad - \left\{ \frac{d}{2}y_4 + \frac{1}{4}(d-\beta) \left[(1-\beta)(d\beta-2y_3) - (d-\beta)y_3 \right] - \beta y_3(d+1-2\beta) \right\} (8d-\beta^2) \\ x_{32} &= (\beta-4)y_3y_4 \\ &\quad - \left\{ \frac{d}{2}y_4 + \frac{1}{4}(1-\beta) \left[(d-\beta)(d\beta-2y_3) - 4(1-\beta)y_3 \right] - \beta y_3(d+1-2\beta) \right\} (8d-\beta^2) \\ x_{33} &= (\beta-4)y_3y_4 - \left[\frac{\beta}{4}y_4 + \frac{d}{4}(d-\beta(1-\beta) - (d+1-2\beta)y_3) \right] (8d-\beta^2) \end{aligned}$$