

# 碳配额不同分配机制下供应链碳减排优化策略

杨仕辉 余 敏

(暨南大学经济学院,广东 广州 510632)

**[摘要]** 基于碳配额与碳交易政策,建立分散决策下制造商主导的二级供应链碳减排 Stackelberg 博弈模型,采用逆向求解法求解,得出了最优减排率及最优定价。比较初始碳配额免费分配、定价出售和完全市场交易三种机制下分别实行总量控制和目标控制时的实际碳减排效果,并通过算例分析进行验证。研究表明:免费分配机制对供应链碳减排和市场需求的激励效果最佳;目标控制下,免费分配机制最优;总量控制下,减排成本系数大小将影响最优机制的选择。

**[关键词]** 碳配额;分配机制;供应链;碳减排;Stackelberg 博弈

**[DOI 编码]** 10.13962/j.cnki.37-1486/f.2016.06.005

**[中图分类号]** F062.2

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 2095-3410(2016)06-0035-08

联合国政府间气候变化专门委员会的报告指出:人类在生产与生活过程中产生的温室气体排放是极端气候频繁出现和全球气候变暖的主要原因。近年来,控制温室气体排放已经成为全球共识,1992年6月全球150多个国家签署了《联合国气候变化框架公约》(简称 UNFCCC);1997年12月又在公约的基础上通过了《(联合国气候变化框架公约)京都议定书》(Kyoto Protocol)。上述两个公约的生效标志着低碳经济时代的到来,清洁发展(Clean Development Mechanism, CDM)、排放贸易(Emissions Trading, ET)和联合履约(Joint Implementation, JI)是《京都议定书》规定的3种碳交易机制。此外,还有欧盟排放交易体系(EUETS),从而出现了“碳交易”市场机制。2009年12月哥本哈根世界气候大会,各缔约国继续商讨《京都议定书》一期承诺到期后的后续方案,中国政府承诺到2020年中国单位GDP二氧化碳排放将比2005年下降40%~45%(即目标控制)。目前我国已有北京、上海等七个碳排

放交易试点地区,预计在2017年开展全国性碳交易。目前试点市场运行稳定,截至2015年底累计成交量逾4800万吨二氧化碳,累计成交额超14亿元。2015年12月巴黎气候变化大会,史上第一份覆盖近200个国家的全球减排协议——《巴黎协定》达成,中国政府承诺2030年达到碳排放峰值,如何有效减少碳排放将成为各国政府的重要任务。除了目标控制政策外,各国政府碳减排政策中也有的实行总量控制政策。为此,各国政府普遍面临碳排放配额如何分配的问题。碳排放配额初始分配有无偿和有偿方法。无偿分配法要求政府先收集碳排放历史数据,再通过祖父法或基准法来分配碳排放权;有偿分配法则基于排放总量设定和排放者负担原则进行拍卖和定价销售。

在当前低碳经济的背景下,一方面,消费者环保意识逐渐增强,低碳消费理念正在逐渐形成,越来越多消费者愿意购买绿色低碳产品并为之付出额外的费用;但是,另一方面,价格是消费者选择是否购买

**[基金项目]** 本文是国家自然科学基金项目“环境倾销与环境管制的博弈分析、效应比较与策略分析”(项目编号:71273114)的阶段性成果。

**[作者简介]** 杨仕辉(1965- ),男,江西丰城人,暨南大学经济学院教授、博士生导师。主要研究方向:低碳供应链管理与气候政策。

商品的首要因素,对于中等收入的家庭来说,价格便宜,性价比较高的产品才是理想的选择。低碳产品由于技术含量高,附加值高,使得制造成本也高,所以销售价格也相比普通产品高,调查显示,较高的价格是目前低碳产品市场推广的一大瓶颈。考虑到我国处于制度建设阶段,无偿和有偿方法均可能使用,本文考虑初始碳配额三种分配机制:分配机制(政府免费分配)、过渡机制(政府定价出售)、市场机制(完全市场交易机制),并结合消费者低碳偏好,对由制造商和零售商构成的二级供应链中零售商最优定价策略和制造商最优减排策略进行分析,比较三种分配机制对供应链减排和市场需求的激励效果,并从碳排放总量控制和目标控制两个角度比较三种机制下政府的策略选择,为国家政策制定及企业策略选择提供一定的理论参考,同时也为企业面对政府可能实施的低碳政策和消费日趋低碳化的消费偏好,确定最优的定价和减排策略提供借鉴。

### 一、文献综述

碳配额与交易已经成为全球普遍公认的减排机制,国内外已有很多学者把这一机制引入到供应链的运营管理与策略选择的研究中。赵道致等<sup>[1]</sup>考虑了碳排放权限制和交易的影响,构建了供应链整体低碳化减排优化模型,定量地解决了供应链整体最有减排方案。王楚格等<sup>[2]</sup>假设制造商为领导者,建立了供应商-制造商的二级供应链在新形势下的利润优化模型,采用逆向求解法求解,得出了企业的最优减排量及最优产量。马秋卓等<sup>[3]</sup>在碳配额与交易背景下,基于政府免费分配初始碳配额,研究了单个企业低碳产品最优定价及碳排放策略。Zhang等<sup>[4]</sup>研究了碳配额与交易政策下,制造商生产多种产品的最优生产和减排策略,并与碳税政策进行了比较。杜少甫等<sup>[5]</sup>基于确定需求,考虑企业依赖碳减排配额与交易机制且拥有多种排放权获取渠道,研究了企业的生产优化模型。Zhang等<sup>[6]</sup>基于随机需求做了相关的研究,建立了企业依赖碳配额与交易机制的生产与存储的优化决策模型。Song等<sup>[7]</sup>借助报童模型,研究了强制减排、碳税及碳配额与交易三种政策下企业的最优决策问题。Du等<sup>[8-9]</sup>考虑碳排放依赖性供应链问题,建立了制造商为领导者的二级供应链 Stackelberg 博弈模型,研究了碳配额与

交易机制下排放权供应商和制造商的博弈均衡。

低碳经济时代,消费者的低碳行为也引起了国内外学者的关注,李友东等<sup>[10]</sup>考虑消费者低碳偏好,建立了供应链两阶段动态博弈模型,指出较高的消费者低碳偏好使得低碳产品需求增加,从而增强企业的减排研发和低碳技术创新投资的积极性。汪兴东等<sup>[11]</sup>实证分析了城市居民的低碳购买行为,指出消费者的个人因素(低碳认知、低碳情感)和文化因素(集体主义、天人合一)会对其低碳购买态度产生积极的正向作用。Li等<sup>[12]</sup>指出低碳背景下,消费者越来越关注企业在环境保护方面的表现,在考虑购买决策时会更加注重企业的环境记录。

对于碳排放权配额分配策略,大多数学者认为主要有免费分配、定价出售和公开拍卖三种机制。孙丹等<sup>[13]</sup>定性地探讨了现有初始分配方式的优缺点,并分析了目前世界上主要碳交易所采用的碳配额的分配方法,以此作为借鉴,为中国在建立碳配额交易市场的初始阶段提出了可行性建议。李昊等<sup>[14]</sup>在没有考虑消费者低碳偏好的情况下,采用基于 Agent 的动态演化仿真方法对多级供应链进行了仿真研究,验证了免费分配、阈值分配、定价出售以及公开拍卖四种初始碳配额分配方式对企业环保优先或价格优先策略选择的影响,但未对企业的减排率进行定量的分析。Sven<sup>[15]</sup>以欧洲电力行业这为研究背景,考虑了多周期、有排放许可与交易情况下的排放权分配策略问题。Leimbach<sup>[16]</sup>运用 ICLIPS 模型探讨了碳排放权的合理分配问题。Sijm等<sup>[17]</sup>、Fischer等<sup>[18]</sup>、Zhao等<sup>[19]</sup>分别从经济效应、环保激励、政治可接受性、创新驱动等方面对碳排放权免费分配和拍卖方式进行了比较。

从上述文献回顾中可以发现,现有研究大多是以政府免费分配定量的初始碳排放权为前提,探讨碳配额与交易对供应链中企业策略选择的影响;有些学者定性研究了政府实施不同的初始碳配额分配机制,对供应链策略选择的影响,但是少有学者考虑供应链中上下游企业的相互影响,定量分析不同的初始碳配额分配机制对供应链企业定价、减排策略及市场需求的影响,并分别分析不同分配机制下碳排放总量控制和目标控制的实际减排效果。基于现有文献的不足,本文的主要贡献是:(1)建立分散决

策下由一个制造商和一个零售商构成的二级供应链减排 Stackelberg 博弈模型,定量分析政府可能实施的碳排放权免费分配、定价出售和完全市场交易三种机制下,供应链的定价和减排策略,以及市场需求情况;(2)将消费者的低碳偏好纳入到需求函数中。考虑低碳经济背景下,低碳消费理念正在逐渐形成,越来越多的消费者愿意购买绿色低碳产品并为之付出额外的费用,而企业生产产品也要低碳化,本文在构造需求函数时,同时考虑了低碳产品的价格和低碳产品减排率对需求的影响;(3)从碳排放总量控制和目标控制两个角度比较初始碳排放权免费分配、定价出售和完全市场交易三种机制的政府策略选择。

## 二、问题描述与模型假设

### (一)问题描述

考虑由一个制造商和一个零售商构成的单周期二级供应链,并且假设制造商为主导者,零售商为跟随者,制造商具有较强的议价权,根据自身目标率先

决定批发价格和减排率,以实现自身利益最大化;零售商在制造商决策的基础上制定销售策略,决定销售价格。假设供应链中信息完全共享,且市场出清,即零售商不存在库存与缺货,制造商能够生产按市场所需足量生产。

为简化问题,假设供应链只对消费者提供一种低碳产品,且其需求对价格和碳减排率敏感,其碳排放主要源于制造环节,制造商可以通过优化制造环节减少碳排放,制造商和零售商物流环节产生少量碳排放可以忽略不计。为了比较三种分配机制,本文将之模型化为政府依据各排放主体的历史排放量分配碳排放权(出售价格为  $p_0$ ,当  $p_0=0$  时为免费分配机制,当  $p_0$  等于碳交易价格时为完全市场交易分配机制,当  $p_0$  小于碳交易价格且不为 0 时为定价出售机制),这样可以很好地满足企业的排放需求,如果企业实现超额碳减排,可以将多余的碳排放权拿到市场上进行交易,获得额外的收益。本文定义变量见表 1。

表 1 符号定义表

变量	含义	变量	含义
$p$	零售商单位低碳产品的价格	$E$	减排后整个供应链的总排放量
$w$	制造商单位低碳产品的批发价格	$\Delta E$	整个供应链的绝对减排量
$v$	制造商单位产品的碳减排率	$c$	单位低碳产品的生产成本
$D$	低碳产品的需求量	$p_1$	碳交易市场中碳排放权的价格
$Q$	低碳产品的产量	$p_0$	政府出售初始碳配额的价格
$\pi_m$	制造商的利润	$s$	需求对产品减排率的弹性系数
$\pi_r$	零售商的利润	$k$	制造商碳减排率系数
$\pi$	供应链利润, $\pi = \pi_r + \pi_m$	$e$	减排前生产单位产品的排放量

### (二)模型假设

- 1.研究对象为一个制造商和一个零售商构成的单周期二级供应链系统;
- 2.供应链只对消费者提供一种的低碳产品;
- 3.制造商具有较强的议价能力,成为供应链的领导者,零售商为追随者;
- 4.政府出售初始碳配额的价格不能大于碳交易市场中碳排放权的价格,否则企业将不接收政府分配,全部从碳交易市场购买,即  $0 \leq p_0 \leq p_1$ 。
- 5.低碳产品需求  $D$  与低碳产品价格  $p$  和制造商的减排率  $v$  呈线性关系,即  $D = a - bp + sv$ ,假设供应链信息充分共享,且市场出清,即  $Q = D$ 。
- 6.制造商减排成本为  $kv^2/2$ ,与减排率正相关,且随着减排率的增加而迅速增加,在产品研发领域,这个研发成本模型已经被众多中外学者广泛应用。

7.为简化模型,假设只有制造商会发生成本,单位产品的成本为  $c$ ,零售商不发生成本。

8.供应链的碳排放主要来自制造商的生产环节,制造商和零售商物流环节产生的碳排放忽略不计,供应链可以通过制造商优化生产环节减少碳排放。

## 三、模型构建与求解

Stackelberg 博弈模型是一种动态的双寡头博弈模型,较强的一方具有优先选择权,较弱的一方根据较强一方的选择进行决策。本文研究的对象是由一个制造商和一个零售商构成的单周期二级供应链,假设制造商为领导者,零售商为跟随者。制造商具有较强的议价能力,能够率先决定批发价格和减排率,随后零售商根据制造商的选择做出决策,决定销售价格。使用逆向求解法求解:

零售商最大化问题:  $\text{Max } \pi_r = (p-w)(a-bp+sv)$

$$(1)$$

制造商最大化问题:  $\text{Max } \pi_m = (w-c-ep_0+evp_1)$

$$(a-bp+sv)-kv^2/2 \quad (2)$$

(1)由(1)式得:  $\partial^2 \pi_r / \partial p^2 = -2b < 0$ , 存在最优解, 由一阶条件得:  $p = (a+sv+bw)/(2b)$  (3)

由(2)式得:  $\partial^2 \pi_m / \partial w^2 = -b, \partial^2 \pi_m / \partial v^2 = esp_1 - k,$

$$\partial^2 \pi_m / \partial w \partial v = (s - bep_1)/2, \text{ 有 } H = \begin{bmatrix} -b(s-bep_1)/2 \\ (s-bep_1)/2 \quad esp_1 - k \end{bmatrix}, \text{ 当 } H \text{ 为负定矩阵时即 } \Delta =$$

$4bk - (s+bep_1)^2 > 0$  时, (2)式有最优解, 可得条件:  $k > (s+bep_1)^2/(4b)$ 。由(2)式一阶条件解得:

$$\begin{cases} w = [2k(a+bc+bep_0) - (bep_1+s)(sc+ae_{p_1}+esp_0)]/\Delta \\ v = (bep_1+s)(a-bc-bep_0)/\Delta \end{cases} \quad (4)$$

将(4)式代入(3)式得:  $p = [k(3a+bc+bep_0) - (bep_1+s)(sc+ae_{p_1}+esp_0)]/\Delta$  (5)

进而求得:

$$\begin{cases} D=Q=a-bp+sv=bk(a-bc-bep_0)/\Delta \\ \pi = \pi_r + \pi_m = k(a-bc-bep_0)^2[6bk - (s+bep_1)^2]/\Delta \end{cases} \quad (6)$$

#### 四、政策分析

在免费分配机制下, 政府根据企业的历史排放量, 免费给企业分配初始碳排放权, 即  $p_0 = 0$ ; 在定价出售机制下, 政府以低于市场交易价格的价格, 以历史排放量为限, 向企业定价分配初始碳排放权, 即  $0 < p_0 < p_1$ ; 在完全市场交易机制下, 政府以交易市场的价格向企业分配碳排放权, 相当于政府不向企业分配碳排放权, 企业的排放权全部在交易市场购买, 即  $p_0 = p_1$ 。

##### (一) 碳减排优化策略分析

##### 1. 总量控制向下碳配额分配机制策略

总量控制背景下政府设定碳排放总量目标, 并制定实施相关减排政策, 使得一定时期内生产生活产生的碳排放总量不得超过设定的目标。具体到供应链, 则追求企业减排后供应链总排放量最小。

记  $G = (bep_1 + s)(2a - 2bc + s - bep_0)/(4b)$ ,  $R = (bep_1 + s)(2a - 2bc + s)/4b < G$ ,  $J = [2(bep_1 + s)(a - bc) - 4bk + (bep_1 + s)^2]/[2be(bep_1 + s)]$ , 可求得:

$$E = (1-v)eQ = bek(a-bc-bep_0)/\Delta - bek(bep_1 + s)(a-bc-bep_0)^2/\Delta^2 \quad (7)$$

$$\text{可得: } \partial E / \partial p_0 = 4b(bke)^2(G-k)/\Delta^2 \quad (8)$$

(1)当  $k > G$  时,  $\partial E / \partial p_0 < 0$  恒成立, 即  $E$  是单调递减的;

(2)当  $0 < k < G$  时, 如果  $0 < p_0 < J$ ,  $\partial E / \partial p_0 > 0$ ; 如果  $p_0 > J$ ,  $\partial E / \partial p_0 < 0$ ; 如果  $p_0 = J$ ,  $\partial E / \partial p_0 = 0$ , 即  $E$  在  $p_0 \in [0, J]$  递增, 在  $p_0 \in [J, p_1]$  递减, 在  $p_0 = J$  处取得最大值。

由  $E(0) - E(p_1) = b^2ke^2p_1[4bk - (bep_1 + s)^2 - (bep_1 + s)(2a - 2bc - bep_1)]/\Delta^2$ , 可得:

当  $k \in (0, R)$  时,  $E(0) < E(p_1)$ , 此时  $E(0)$  最小; 当  $k \in (R, G)$  时,  $E(0) > E(p_1)$ , 此时  $E(p_1)$  最小; 当  $k = R$  时,  $E(0) = E(p_1)$  为最小值。综合以上讨论, 有:

命题1 在总量控制下, 供应链实现最优均衡时, (1)当  $k \in (0, R)$ , 免费分配下供应链碳排放总量最小; (2)当  $k = R$  时, 免费分配机制和完全市场交易机制下供应链碳排放总量相等且最小; (3)当  $k > R$  时, 完全市场交易机制下供应链碳排放总量最小。

命题1的政策含义是: 如果要对供应链企业实施碳减排总量控制, 政府要慎重选择相关政策。当  $k < R$  时, 政府要优先选择免费分配机制, 当  $k = R$  时, 政府可选择免费分配机制和完全市场交易机制, 当  $k > R$  时, 政府可选择完全市场交易机制。

##### 2. 目标控制向下碳配额分配机制策略

目标控制背景下政府设定碳减排绝对量目标, 并制定实施相关的减排政策, 使得一定时期内减排的绝对量不得小于设定的目标。具体到供应链, 则要求企业减排的绝对量最大。可求得:

$$\Delta E = veQ = bek(bep_1 + s)(a-bc-bep_0)^2/\Delta^2 \quad (9)$$

则有:  $\partial E / \partial p_0 = -2b^2e^2k(bep_1 + s)(a-bc-bep_0)/\Delta^2 < 0$ 。

命题2 在目标控制背景下, 供应链碳减排绝对量单调递减, 即免费分配机制下供应链碳减排绝对量最大, 定价出售机制次之, 完全市场交易机制最小。

命题2的政策含义是: 如果要对供应链企业实

施碳减排目标控制,则政府应优先免费分配机制,其次是定价出售机制,完全市场交易机制效果则最差。

## (二)碳配额分配机制影响分析

### 1.减排率

由(4)式得: $\partial v/\partial p_0 = -be(bep_1 + s)/\Delta < 0$ ,即供应链中制造商的减排率是单调递减的,可得:

命题3 如果  $k > (s + bep_1)^2 / (4b)$ , 则  $\partial v/\partial p_0 < 0$  恒成立。

命题3的政策含义是:如果  $k > (s + bep_1)^2 / (4b)$ ,从激励供应链碳减排率来看,政府采取初始碳排放权免费分配机制最好,定价出售机制时次之,完全市场交易机制最差。

### 2.定价

由(5)式得: $\partial p/\partial p_0 = e[b(k - esp_1) - s^2]/\Delta$ ,由于  $k > (s + bep_1)^2 / (4b)$ ,代入得: $bk - besp_1 > (s + bep_1)^2 / 4 - besp_1 = (s - bep_1)^2 / 4 \geq 0$ ,即  $k > esp_1$ ,故当  $b < s^2 / (k - esp_1)$  时,有  $\partial p/\partial p_0 < 0$ ,反之则反。从而有如下命题:

命题4 当  $k > (s + bep_1)^2 / (4b)$  时,如果:(1)当  $0 < b < s^2 / (k - esp_1)$  时,有  $\partial p/\partial p_0 < 0$ ;(2)当  $b > s^2 / (k - esp_1)$  时,有  $\partial p/\partial p_0 > 0$ ;(3)当  $b = s^2 / (k - esp_1)$  时,有  $\partial p/\partial p_0 = 0$ 。

命题4的政策含义是:(1)当  $k > (s + bep_1)^2 / (4b)$  且  $0 < b < s^2 / (k - esp_1)$  时,政府分别采取免费分配机制、固定价格销售机制和完全市场交易机制,零售商的定价依次降低;(2)当  $k > (s + bep_1)^2 / (4b)$  且  $b > s^2 / (k - esp_1)$  时,政府分别采取免费分配机制、固定价格销售机制和完全市场交易机制,零售商的定价依次升高;(3)当  $k > (s + bep_1)^2 / (4b)$  且  $b = s^2 / (k - esp_1)$  时,政府初始碳配额分配机制不会影响零售商的定价。

### 3.低碳产品市场需求

由(6)式得: $\partial D/\partial p_0 = -b^2ek/\Delta < 0$ ,即低碳产品的市场需求是单调递减的,可得:

命题5 如果  $k > (s + bep_1)^2 / (4b)$ , 则  $\partial D/\partial p_0 < 0$  恒成立。

命题5的政策含义是:如果  $k > (s + bep_1)^2 / (4b)$ ,从影响消费者需求来看,政府免费分配机制下市场需求最大;定价出售机制下次之;完全市场交

易机制下市场需求最小。

## 4.供应链总收益

由(6)式得: $\partial \pi/\partial p_0 = bek(a - bc - bep_0) [(s + bep_1)^2 - 6bk]/\Delta < 0$ ,故有:

命题6 如果  $k > (s + bep_1)^2 / (4b)$ , 则  $\partial \pi/\partial p_0 < 0$  恒成立。

命题6的政策含义是:如果  $k > (s + bep_1)^2 / (4b)$ ,在免费分配机制下供应链总收益最大;定价出售机制下次之;完全市场交易机制下供应链的总收益最小。

## 五、算例分析

碳交易市场价格参考2015年深圳碳交易市场均价( $p_1 = 40$ )。对三种初始碳配额分配机制下碳减排效果及碳减排率、低碳产品市场定价、低碳产品市场需求、供应链总利润进行计算,结果如下:

### (一)碳减排优化效果

由图1可以看出,总量控制下,当减排成本系数不同时,政府的最优策略选择不同,当  $k > R$  时,完全市场交易机制下碳排放总量最小;当  $k < R$  时,免费分配机制下碳排放总量最小;当  $k = R$  时,完全市场交易机制和免费分配机制下碳排放总量一样,进而验证了命题1。由图2可以看出,目标控制下,碳减排绝对量与碳配额价格成负相关,即免费分配机制下碳减排绝对量最大,完全市场交易机制下最小,进而验证了命题2。

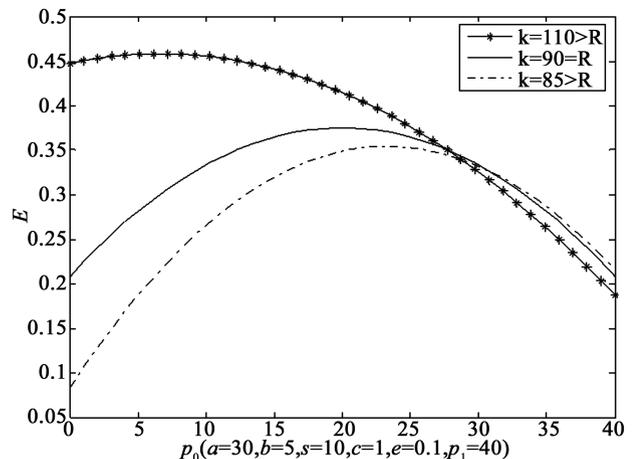


图1 碳排放总量与碳配额价格关系

(二)碳减排率、市场定价、市场需求及供应链总利润

记  $I = s^2 / (k - esp_1)$ , 由图3可以看出,当需求价

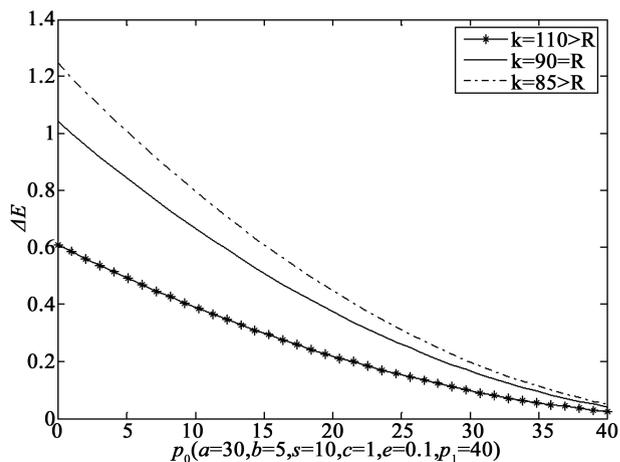


图2 碳减排绝对量与碳配额价格关系

格弹性取不同的值时,低碳产品市场定价与初始碳配额价格关系不同,当  $b>1$  时成正相关,此时免费分配机制下定价最低,完全市场交易机制下定价最高;当  $b=1$  时,三种机制下定价策略相同,当  $0<b<1$  时成负相关,此时免费分配机制下定价最高,完全市场交易机制下定价最低;进而验证了命题4。由图4~图6可以看出,供应链碳减排率、低碳产品市场需求和供应链总利润均与初始碳配额价格成负相关,即政府实施初始碳配额免费分配机制对供应链减排和市场需求的激励效果最佳,此时供应链的总收益最大,进而验证了命题3、命题5和命题6。

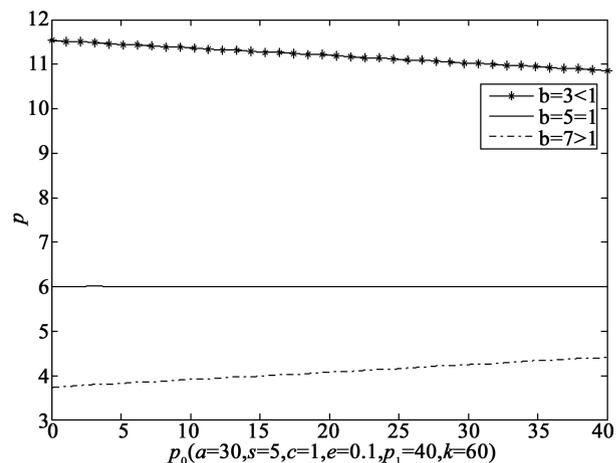


图3 市场价格与碳配额价格关系

### 六、结论与政策选择

本文假设制造商为核心企业,建立分散决策下由一个制造商和一个零售商构成的二级供应链减排 Stackelberg 博弈模型,采用逆向求解法求解,得出了制造商的最优减排率,分析了碳配额免费分配、定价出售和完全市场交易三种机制对供应链碳减排、低

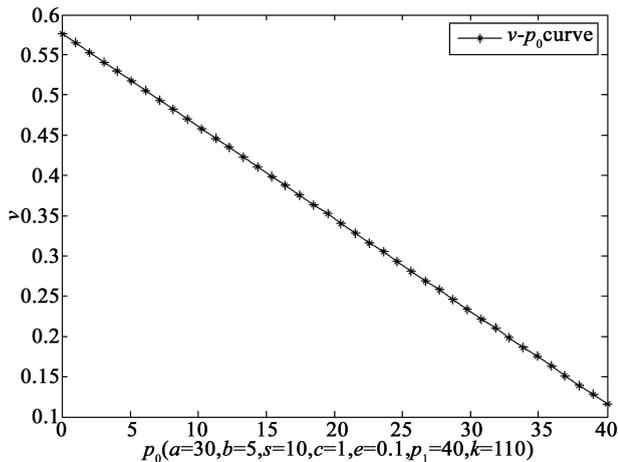


图4 碳减排率与碳配额价格关系

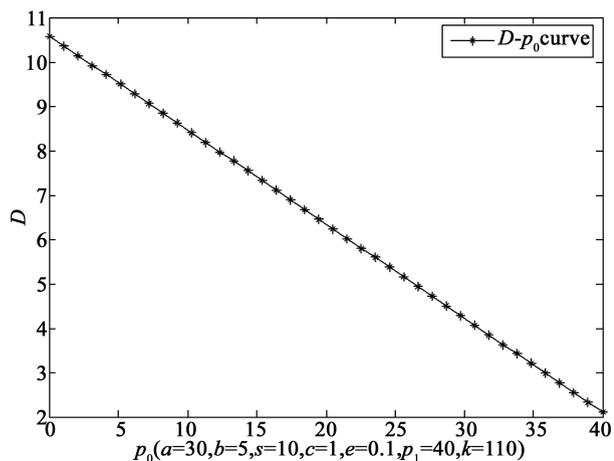


图5 市场需求与碳配额价格关系

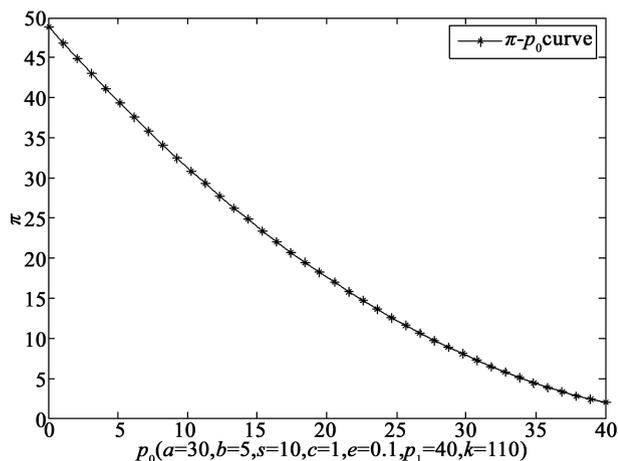


图6 供应链总利润与碳配额价格关系

碳产品定价和市场需求的激励效果,比较了碳减排总量控制和目标控制下三种机制的优劣,并通过算例分析验证相关结论。研究表明:

政府实施初始碳配额免费分配机制对供应链减排和市场需求的激励效果最佳,此时供应链的总收

益最大。总量控制下,当减排成本系数较大时,完全市场交易机制最优;当减排成本系数较小时,免费分配机制最优;减排成本系数存在一个临界值,使得免费分配机制和完全市场交易机制减排效果相同。目标控制下,免费分配机制实现的绝对减排量最大。虽然免费分配能够最大地调动企业减排积极性,但是免费分配机制显失公平且可能造成市场扭曲,目前各国的分配机制逐渐由免费分配转向有偿分配,初始碳配额有偿分配势必会使低碳产品的成本和价格提高,所以一方面为了保证企业减排的积极性,政府在实施免费分配向有偿分配转变时,不可操之过急,要以混合分配机制作为跳板,保留部分免费分配配额,逐步转向有偿分配,削弱企业家的抵触情绪,同时完善碳交易体系;另一方面政府要加大对低碳产品的宣传,进一步增强消费者对低碳产品的偏好。从而避免完全市场交易给企业带来的由于成本增加和利润减少而造成的冲击,最终实现碳排放权的有效配置。

三种初始碳配额分配机制下零售商定价策略的选择与市场的需求价格弹性有关:(1)当需求价格弹性较大时,虽然提高减排率将带来成本的增加,但此时价格的提高将会大幅度削减需求,为了追求收益最大化,在减排率最高时零售商的最优策略依然会选择较低的定价,此时免费分配机制下定价最低,定价出售机制下略高之,完全市场交易机制下定价最高;(2)当需求价格弹性较小时,免费分配机制下较高的减排率会提高成本,此时价格的变化对市场需求影响较小,为了追求收益最大化,在减排率最高时零售商的最优策略应该选择较高的定价,即免费分配机制下定价最高,定价出售机制下略低之,完全市场交易机制下定价最低;(3)需求价格弹性存在一个临界值,此时三种分配机制下最优定价策略相同。

目前我国初始碳配额分配机制和碳交易体系正处于不断摸索和完善的阶段,本文的研究结果为企业在不同的碳配额分配与交易机制下选择最优定价和减排策略提供依据;同时,对政府如何选择碳配额与交易机制也具有一定的参考意义,对企业的低碳化战略和国家减排任务的实现均有重要的理论意义和现实意义。但是本文未对拍卖机制进行分析,今

后可以对初始碳配额拍卖机制进行研究。

#### 参考文献:

- [1] 赵道致,吕金鑫.考虑碳排放权限制与交易的供应链整体低碳化策略[J].工业工程与管理,2012,(05):65-71.
- [2] 王楚格,赵道致.考虑低碳政策的供应链企业减排决策研究[J].工业工程,2014,(01):105-110.
- [3] 马秋卓,宋海清,陈功玉.碳配额交易体系下企业低碳产品定价及最优碳排放策略[J].管理工程学报,2014,(02):127-136.
- [4] ZHANG B, XU L. Multi-item Production Planning with Carbon Cap and Trade Mechanism[J]. Int. J. Production Economics, 2013, 144(01):118-127.
- [5] 杜少甫,董骏峰,梁樑,等.考虑排放许可与交易的生产优化[J].中国管理科学,2009,(03):81-86.
- [6] ZHANG J J, NIE T F, DU S F. Optimal Emission-dependent Production Policy with Stochastic Demand[J]. Journal International Journal of Society Systems Science, 2011, 3(01):21-39.
- [7] SONG J P, LI M M. Analysis of the Single-period Problem under Carbon Emission Policies[J]. International Series in Operations Research & Management Science, 2012, 176(02):297-312.
- [8] DU S F, MA F, FU Z L. Game-theoretic Analysis for An Emission-dependent Supply Chain in a 'cap and trade' System[J]. Annals of Operations Research, 2015, 228(01):135-149.
- [9] DU S F, ZHI L L, LIANG L, et al. Emission-dependent Supply Chain and Environment-policy-making in the 'cap-and-trade' System[J]. Energy Policy, 2013(57):61-67.
- [10] 李友东,赵道致,谢鑫鹏.考虑消费者低碳偏好的两级供应链博弈分析[J].内蒙古大学学报,2013,(05):64-69.
- [11] 汪兴东,景奉杰.城市居民低碳购买行为模型研究——基于五个城市的调研数据[J].中国人口·资源与环境,2012,(02):47-55.
- [12] LI F, DONG S C, XUE L, et al. Energy Consumption-economic Growth Relationship and Carbon Dioxide Emissions in China[J]. Energy Policy, 2011, 39(02):568-574.
- [13] 孙丹,马晓明.碳配额初始分配方法研究[J].生态经济,2013,(02):81-85.
- [14] 李昊,赵道致.碳排放权交易机制对供应链影响的仿真研究[J].科学与科学技术管理,2012,(11):117-123.

[15]SVEN B.Multi-period Emissions Trading in the Electricity Sector—winners and Losers[J].Energy Policy, 2006, 34(06): 680-691.

[16]LEIMBACH M.Equity and Carbon Emissions Trading: a Model Analysis[J].Energy Policy, 2003, 31(10): 1033-1044.

[17]SIJM J P M, BERK M M, DEN ELZEN, et al.Options for Post-2012 EU Burden Sharing and EUETS Allocation[R].Bilthoven; Netherlands Environmental Assessment Agency, 2007.

[18]FISCHER C, PARRY I W H, PIZER W A.Instrument Choice for Environmental Protection when Technological Innovation Is Endogenous[J].Journal of Environmental Economics and Management, 2003, 45(03): 523-545.

[19]ZHAO J Y, BENJAMIN S F, Pang J S.Long-Run Equilibrium Modeling of Emissions Allowance Allocation Systems in Electric Power Markets[J].Operations Research, 2010, 58(03):529-548.

(责任编辑:杨 磊)

## Optimal Carbon Emission Reduction Decisions in Supply Chain under Different Allocation Mechanism of Carbon Quota

YANG Shihui, YU Min

(School of Economics, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

**Abstract:** Based on carbon quota and carbon trading policy, this paper constructed the Stackelberg game model of two-echelon supply chain under decentralized decision making, used inverse solution method to solve the problem, and finally obtained the manufacturer's optimal reduction rate and the retailer's optimal price. Then it compared the actual effect of carbon emissions reduction under target control and cap control when implementing free allocation mechanism, fixed-price selling mechanism and full market trading mechanism respectively, and applied a numerical analysis to verify the results. The research shows that: The carbon emission reduction rate and demand of low-carbon products were the biggest under free allocation mechanism; Under target control, the free allocation mechanism was optimal; Under cap control, the cost coefficient of carbon emission reduction would influence the option of the optimal mechanism.

**Key Words:** Carbon quota; Allocation mechanism; Supply chain; Carbon emission reduction; Stackelberg game

