

限额与交易下考虑战略顾客行为的供应链决策与协调

江文, 陈旭

(电子科技大学 经济与管理学院, 成都 611731)

摘要: 研究由一个受限额与交易政策约束的制造商和一个面临同质战略顾客的零售商组成的两级供应链决策与协调问题. 分别研究得到了限额与交易政策下一体化(包括理性预期均衡和数量承诺两种情形)和分散化供应链最优决策和最大期望利润, 并与不考虑限额与交易政策的情形进行对比分析, 发现限额与交易政策使得供应链最优产量降低、最优价格升高、碳排放量减少. 最后, 以数量承诺情形为基准, 基于收益分享合同设计了供应链协调策略.

关键词: 限额与交易; 战略顾客行为; 供应链协调; 理性预期均衡; 收益分享合同

中图分类号: F272.3

文献标志码: A

Supply chain decisions and coordination with strategic customer behavior under cap-and-trade policy

JIANG Wen, CHEN Xu

(School of Management and Economics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China. Correspondent: JIANG Wen, E-mail: jiangwen921@gmail.com)

Abstract: With a two-echelon manufacturer chain consisting of one supplier constrained by cap-and-trade policy and one retailer facing homogeneous strategic customers taken into consideration, the supply chain decision-making and coordination are studied. The optimal decisions and maximum expected profit of centralized supply chain including two scenarios of rational expectation equilibrium and quantity commitment and decentralized supply chain are derived. Compared with the scenario of no cap-and-trade policy, the results indicate that the cap-and-trade policy makes the supply chain's optimal production quantity reduce, the optimal price increase and the carbon emission quantity reduce. Finally, taking the quantity commitment scenario as the benchmark, the supply chain coordination strategy is designed based on the revenue sharing contract.

Keywords: cap-and-trade; strategic customer behavior; supply chain coordination; rational expectation equilibrium; revenue sharing contract

0 引言

随着竞争加剧、科技更新加快和市场环境快速多变, 易逝品(短生命周期产品)正变得越来越普遍. 除传统的服务(如航空、酒店)、农产品、时装等, 越来越多的高科技产品也具有易逝品特征. 在易逝品销售过程中, 为了避免产品剩余产生损失, 企业经常通过打折的方式来处理剩余产品, 使得顾客常常不在全价阶段购买产品, 而是选择等待产品降价再购买. 这种顾客等待行为被学术界称为战略顾客行为并受到了广泛关注. 战略顾客行为在易逝品销售过程中已经成

为普遍现象, 绝大部分顾客都表现出战略等待的行为, 从而使得战略顾客行为成为运营管理领域研究的基本假设之一.

近年来, 由于过度碳排放导致的全球气候变暖严重威胁着人类的生存与发展. 如何节能减排成为了各国政府面临的重要难题. 同时结合行政与市场双重手段的限额与交易政策, 作为最有效的减排方法受到了包括中国在内的众多国家的关注和采用. 中国已经在北京、上海、天津、重庆、深圳、广东和湖北等省市进行了限额与交易政策试点. 限额与交易政策在全国铺

收稿日期: 2014-12-15; 修回日期: 2015-03-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71432003, 71272128); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-12-0087); 高等学校博士学科点专项科研项目(20130185110006).

作者简介: 江文(1985-), 男, 博士生, 从事运营管理、供应链管理的研究; 陈旭(1973-), 男, 教授, 博士生导师, 从事运营管理、供应链管理等研究.

开实施,已成为可预期的发展方向. 限额与交易政策的实施,在降低碳排放的同时,也改变了企业的决策环境,给企业运营带来了严峻的挑战. 本文在传统考虑战略顾客行为研究的基础上,将限额与交易政策纳入模型,研究限额与交易政策和战略顾客行为集成环境下易逝品供应链的决策与协调问题.

考虑战略顾客行为的易逝品供应链决策与协调的研究非常广泛,典型的有: Su等^[1]采用理性预期均衡分析方法,研究了同质战略顾客环境下战略顾客行为对供应链绩效的影响,并提出通过承诺可以提高销售商的利润. Cachon等^[2]将同质战略顾客假设拓宽至混合顾客假设,采用理性预期均衡分析方法研究了一个零售商在一个销售季节销售一种产品的库存与降价策略. Whang^[3]则考虑具有不同保留价值的异质战略顾客,研究了需求不确定性对零售商的降价策略的影响. Parlaktürk^[4]将销售单产品拓展至销售两个纵向(质量)差异化产品的环境,采用子博弈纳什均衡(SPNE)方法分析得到了企业面临战略顾客行为时的动态定价策略. Liu等^[5]将单个企业销售两个纵向差异化的产品转化为两个企业销售两个纵向差异化产品,研究了存在战略顾客行为时这两个企业的动态定价策略. 上述文献针对不同情境下战略顾客行为对企业和供应链的不利影响进行了研究,与此同时,许多学者为了应对战略顾客行为的不利影响开展了广泛研究. Lai等^[6]定义事后价格匹配策略为销售商承诺当产品价格下降时进行差价返还的策略. 研究发现,销售商面临战略顾客行为时,价格匹配策略能够消除战略顾客等待的激励并使得销售商能够提高常规销售期的价格. Cachon等^[7]定义快速时尚系统为同时具有快速反应生产能力和增强产品设计能力的系统,使得既能通过抓住流行趋势设计出热门产品又能利用最小生产提前期来匹配供应和不确定需求. 研究表明,快速时尚系统能够极大地降低战略顾客的等待程度. Mersereau等^[8]在假定销售商了解累积需求曲线,但不清楚战略顾客比例的条件下,提出了一种健壮的定价策略,使得企业在不了解战略顾客行为信息时仍然运行良好.

与本文研究相关的另一类文献是限额与交易下企业和供应链决策的研究. 关于限额与交易政策下单个企业的决策行为研究,何大义等^[9]运用库存理论,建立限额与交易下企业生产与库存决策模型,得出了企业的最优生产、碳交易和减排策略. Song等^[10]将碳排放约束纳入单周期报童模型中,比较分析了不同碳排放政策对企业订货策略的影响. Jiang等^[11]研究了面临碳排放约束时,考虑战略顾客行为的制造商

生产与定价决策问题. Toptal等^[12]研究了碳限额、碳税、限额与交易3种政策下企业采购和绿色技术投资的联合决策,并比较了不同政策对企业最优订货量和绿色技术投资决策的影响. 关于限额与交易下供应链企业决策行为及协调优化研究, Wahab等^[13]考虑了由一个供应商和一个零售商构成的两级供应链,在限额与交易政策下以成本最小化为目标建立经济订货批量模型,并给出了零售商的最优订货策略. Benjaafar等^[14]将碳排放约束纳入到供应链系统中,分别考虑了碳税、碳限额、限额与交易3种碳排放政策对企业投资、生产、库存和订货决策的影响. Jaber等^[15]考虑由一个制造商和一个零售商构成的两级供应链,在限额与交易政策下研究了由制造商承担碳成本的供应链协调机制. 谢鑫鹏等^[16]研究了考虑限额与交易的供应链上下游企业在不合作、半合作和合作3种情况下的减排效果和利润. 赵道致等^[17]考虑一个供应商和一个制造商组成的低碳供应链,基于微分博弈研究了纵向合作减排的动态优化问题. Tseng等^[18]考虑碳排放的社会成本,研究了限额与交易下可持续供应链的战略决策制定. 鲁力等^[19]考虑一个供应商和一个制造商组成的供应链,研究了不同碳排放政策(碳税、限额、限额与交易)下基于回购合同的供应链协调策略.

上述文献分别对考虑战略顾客行为和考虑限额与交易政策的企业和供应链决策以及供应链协调进行了研究,为本文开展研究奠定了基础. 本文在传统关于战略顾客行为研究的基础上,考虑碳限额与交易政策,研究集成环境下供应链决策和协调问题. 该研究解决了3个问题:

- 1) 考虑战略顾客行为时,限额与交易政策下供应链企业如何决策以及限额与交易政策对供应链企业最优决策的影响;
- 2) 限额与交易政策下考虑战略顾客行为时,批发价格合同能否实现供应链协调;
- 3) 传统的收益分享合同,能否实现集成环境下供应链协调.

1 问题描述与假设

本文研究由一个制造商和一个零售商组成的两级供应链系统. 制造商在限额与交易政策下生产一种产品并通过零售商销售给顾客. 生产期初,制造商会收到政府分配的免费碳排放权,如果生产时碳排放权不足则需从外部市场购买;如果碳排放权剩余则可向外部市场出售^[10,19]. 至生产期末,制造商的碳排放量不允许超过其持有的碳排放权. 制造商的决策包括生产决策和碳交易决策. 零售商向制造商订购产品并销

售给同质的战略顾客. 零售商在给定批发价的基础上决策产品的订货量和零售价格. 假设在整个供应链系统, 制造商占主导地位, 零售商是跟随者^[20]. 假定每位顾客最多购买一个产品. 事件的顺序如下: 首先, 制造商制定产品的批发价格; 其次, 零售商形成顾客保留价格的预期并在此基础上制定产品订货量和零售价格; 再次, 制造商在限额与交易下生产产品并交付给零售商; 然后, 顾客根据市场价格信息估计产品清仓销售的可能性并形成保留价格; 最后, 随机需求实现, 产品以正常价格售出, 剩余产品在销售期末以清仓价格出售.

本文采用的符号定义如表1所示.

表1 变量和参数的符号定义

符号	定义
D	顾客的随机需求, $D \geq 0$
$F(x)$	随机需求 D 的概率分布函数, 令 $\bar{F} = 1 - F$
$f(x)$	随机需求 D 的概率密度函数, 假定 $f(x)$ 连续, 且 D 的分布具有递增故障率 (IFR), 即 $f(x)/1 - F(x)$ 随着 x 的增大而增大
c	单位产品生产成成本
p	单位产品零售价, 可被顾客观察
q	制造商的产品生产量或者零售商的订货量, 本文假设其不可被顾客观察
w	制造商制定的单位产品批发价格
s	单位产品清仓销售价格
v	单位产品在顾客心目中的价值, 即顾客消费单位产品获得的效用
r	顾客保留价格, 即顾客购买每单位产品愿意支付的最高价格. 本文假设其不可被零售商观察.
ξ_r	制造商对顾客保留价格的预期
ξ_{prob}	顾客对产品期末的可获得性的预期
E	限额与交易政策下政府分配的初始碳排放限额, 不失一般性, 本文假设生产单位产品的碳排放量为1个单位
k	单位碳排放权的交易价格.
e	与外部市场的碳交易量, 如果 $e > 0$, 则制造商从外部市场买入; 如果 $e = 0$, 则制造商与外部市场没有交易; 如果 $e < 0$, 则制造商向外部市场出售

模型参数必须满足一定条件才能成立, 故本文假设:

1) $p \leq r$. 只有零售价不大于顾客的保留价格时, 顾客才有可能全价购买产品.

2) $v > p > w > c > s > 0$. 本条件表明产品从制造商到零售商再到顾客的过程中, 制造商、零售商和顾客都有正的边际利润. 另外, 生产成本大于清仓价格表明产品未能全价出售则会产生一定损失, 这促使制造商和零售商均会按照顾客需求来进行生产和订

货, 一旦库存过剩将会产生损失.

3) $k < w - c$. 本条件表明制造商生产产品有利可图, 否则制造商将不生产, 而是通过向外部市场出售碳排放权获利.

2 限额与交易下一体化供应链决策模型

本部分构建限额与交易政策下一体化供应链决策模型, 并进行求解和分析. 本部分研究是后续研究的基准模型.

2.1 理性预期均衡的情形

在一体化供应链决策模型中, 集中决策者面临的决策问题是在限额与交易政策下, 以利润最大化为目标来确定产品的产量、零售价格和最优碳交易量.

首先, 考虑战略顾客的决策行为. 顾客需要选择全价阶段购买还是等到清仓阶段购买来最大化个人期望剩余. 全价阶段购买时顾客剩余为 $v - p$, 清仓阶段购买时顾客剩余为 $(v - s)\xi_{\text{prob}}$. 因此, 顾客的最大期望剩余为 $\max\{v - p, (v - s)\xi_{\text{prob}}\}$. 当且仅当 $v - p \geq (v - s)\xi_{\text{prob}}$ 时, 顾客才会以价格 p 购买商品, 所以, 当顾客对产品期末可获得性的预期 ξ_{prob} 给定时, 顾客的保留价格为

$$r(\xi_{\text{prob}}) = v - (v - s)\xi_{\text{prob}}.$$

然后, 考虑集中决策者的决策问题. 集中决策者需要决策产品产量 q , 全价阶段的价格 p 和碳交易量 e . 限额与交易政策下, 碳交易量可表示为

$$e = q - E, \tag{1}$$

代入集中决策者的利润函数, 化简得到

$$\Pi_I(q, p) = (p - s)\left(q - \int_0^q F(x)dx\right) - (c - s)q - k(q - E). \tag{2}$$

集中决策者估计顾客保留价格的预期为 ξ_r . 显然, 制造商会设定 $p = \xi_r$, q 为 $q(p) = \arg \max_q \Pi_I(q, p)$. 根据文献[1]有关理性预期均衡的定义, 理性预期均衡 $(p, q, r, \xi_r, \xi_{\text{prob}})$ 需满足以下条件:

- 1) $r = v - (v - s)\xi_{\text{prob}}$;
- 2) $p = \xi_r$;
- 3) $q = \arg \max_q \Pi_I(q, p)$;
- 4) $\xi_{\text{prob}} = F(q)$;
- 5) $\xi_r = r$.

条件1)~条件3)表明, 集中决策者和顾客均会理性选择使自己效用最大化的行动, 条件4)和条件5)保证该均衡满足理性预期假设, 即经济运行实际情况与人们的预期一致. 上述问题的本质是双方同时行动的静态博弈, 其中集中决策者以利润最大化为目标确定存货数量, 战略顾客则以最大化个人剩余为目标确

定顾客保留价格. 文献 [1] 指出, 满足上述定义的理性预期均衡解是上述博弈的纳什均衡解.

命题 1 理性预期均衡情形, 限额与交易下考虑战略顾客行为的集中决策者最优决策为

$$q_I = \bar{F}^{-1}\left(\sqrt{\frac{c-s+k}{v-s}}\right), \quad (3)$$

$$p_I = s + \sqrt{(c-s+k)(v-s)}, \quad (4)$$

$$e_I = \bar{F}^{-1}\left(\sqrt{\frac{c-s+k}{v-s}}\right) - E. \quad (5)$$

证明 在理性预期均衡下, 可以得到

$$p = v - (v-s)F(q). \quad (6)$$

对 $\Pi_I(q, p)$ 关于 q 求一阶和二阶偏导数, 得到

$$\frac{\partial \Pi_I(q, p)}{\partial q} = (p-s)\bar{F}(q) - (c-s+k),$$

$$\frac{\partial^2 \Pi_I(q, p)}{\partial q^2} = -(p-s)f(q) < 0.$$

可知理性预期均衡条件 $q = \arg \max_q \Pi_I(q, p)$ 有唯一最优解. 令 $\partial \Pi_I(q, p)/\partial q = 0$ 并与式 (6) 和 (1) 联立方程组, 求解得到限额与交易下集中决策者的最优产量为

$$q_I = \bar{F}^{-1}\left(\sqrt{\frac{c-s+k}{v-s}}\right),$$

最优价格为

$$p_I = s + \sqrt{(c-s+k)(v-s)},$$

最优碳交易量为

$$e_I = \bar{F}^{-1}\left(\sqrt{\frac{c-s+k}{v-s}}\right) - E. \quad \square$$

命题 1 表明, 在理性预期均衡情形, 限额与交易下考虑战略顾客行为时集中决策者有唯一最优决策. 集中决策者最优产量和最优价格均与单位碳排放权交易价格相关, 与初始碳排放限额无关. 单位碳排放权交易价格越高(低), 集中决策者的最优产量越低(高), 最优价格就越高(低).

将 q_I 和 p_I 代入式 (2), 可得供应链最大期望利润为

$$\begin{aligned} \Pi_I(q_I, p_I) = & \\ & (p_I - s)\left(q_I - \int_0^{q_I} F(x)dx\right) - \\ & (c-s+k)q_I + kE. \end{aligned}$$

不考虑限额与交易政策是考虑时的特例, 令 $k = 0, E = 0$, 则可得到不考虑限额与交易政策时, 面临战略顾客行为集中决策者的最优产量(以 \bar{q}_I 表示)

$$\bar{q}_I = \bar{F}^{-1}\left(\sqrt{\frac{c-s}{v-s}}\right),$$

最优价格(以 \bar{p}_I 表示)

$$\bar{p}_I = s + \sqrt{(c-s)(v-s)},$$

最大期望利润(以 $\bar{\Pi}_I(\bar{q}_I, \bar{p}_I)$ 表示)

$$\begin{aligned} \bar{\Pi}_I(\bar{q}_I, \bar{p}_I) = & \\ & (\bar{p}_I - s)\left(\bar{q}_I - \int_0^{\bar{q}_I} F(x)dx\right) - (c-s)\bar{q}_I. \end{aligned}$$

为了分析限额与交易政策影响, 对考虑和不考虑限额与交易政策两种情形下集中决策者的最优决策和最大期望利润进行比较, 得到以下命题.

命题 2 1) $q_I < \bar{q}_I; p_I > \bar{p}_I$.

2) 当 $E > E_n$ 时, 有

$$\Pi_I(q_I, p_I) > \bar{\Pi}_I(\bar{q}_I, \bar{p}_I);$$

当 $E = E_n$ 时, 有

$$\Pi_I(q_I, p_I) = \bar{\Pi}_I(\bar{q}_I, \bar{p}_I);$$

当 $E < E_n$ 时, 有

$$\Pi_I(q_I, p_I) < \bar{\Pi}_I(\bar{q}_I, \bar{p}_I).$$

其中 $E_n = q_I - (\bar{\Pi}_I(q_I, p_I) - \bar{\Pi}_I(\bar{q}_I, \bar{p}_I))/k$.

证明 1) 由于

$$q_I = \bar{F}^{-1}\left(\sqrt{\frac{c-s+k}{v-s}}\right) < \bar{F}^{-1}\left(\sqrt{\frac{c-s}{v-s}}\right) = \bar{q}_I,$$

可得 $q_I < \bar{q}_I$ 成立. 在理性预期均衡条件下 p 和 q 满足式 (6), 即 p 关于 q 递减, 可得到 $p_I < \bar{p}_I$.

2) 对比不考虑与考虑限额与交易政策两种情形下集中决策者的最大期望利润, 可得

$$\Pi_I(q_I, p_I) = \bar{\Pi}_I(q_I, p_I) - k(q_I - E).$$

当 $E > q_I - (\bar{\Pi}_I(q_I, p_I) - \bar{\Pi}_I(\bar{q}_I, \bar{p}_I))/k \equiv E_n$ 时, 化简得到 $\bar{\Pi}_I(q_I, p_I) - k(q_I - E) > \bar{\Pi}_I(\bar{q}_I, \bar{p}_I)$, 即

$$\Pi_I(q_I, p_I) > \bar{\Pi}_I(\bar{q}_I, \bar{p}_I).$$

同理可证: 当 $E = E_n$ 时, 有

$$\Pi_I(q_I, p_I) = \bar{\Pi}_I(\bar{q}_I, \bar{p}_I);$$

当 $E < E_n$ 时, 有

$$\Pi_I(q_I, p_I) < \bar{\Pi}_I(\bar{q}_I, \bar{p}_I). \quad \square$$

命题 2 的第 1 条表明: 与不考虑限额与交易政策情形相比, 考虑限额与交易政策情形下集中决策者最优产量降低, 最优价格升高. 即政府一旦实施限额与交易政策, 将使得集中决策者降低产量并提高价格. 本文假定生产单位产品释放一单位的碳排放量, 则命题同时可以表明, 限额与交易政策的实施, 可以降低集中决策者的碳排放量.

命题 2 的第 2 条给出了限额与交易政策对集中决策者最大期望利润的影响. 研究表明, 不考虑与考虑限额与交易政策两种情形下集中决策者最大期望利润的大小取决于政府设定的初始碳排放限额. 当初始碳排放限额设定较高时, 集中决策者不但不会因为限额与交易政策的实施而损失部分利润, 还会因此而获利.

2.2 数量承诺的情形

上述理性预期均衡是在集中决策者没有承诺存货数量时的纳什均衡. 通过向顾客承诺存货数量, 集中决策者可以改变上述理性预期均衡, 从而获得更大的利润^[1]. 假定集中决策者能够通过恰当的手段向顾客承诺整个销售期内的存货数量为 q , 售完即止. 此时, 战略顾客将不再需要对在清仓阶段获得产品的可能性作出预期. 因为, 根据上述理性预期均衡条件, 当存货数量给定为 q 时, 可以确定顾客能够在清仓阶段获得产品的可能性为 $F(q)$. 战略顾客的保留价格(也是集中决策者的最优定价)为

$$p(q) = v - (v - s)F(q). \quad (7)$$

因为 $e = q - E$, 得到集中决策者关于承诺数量 q 的利润函数为

$$\begin{aligned} \Pi_{IC}(q) = & (p(q) - s)E[\min(D, q)] - (c - s)q - k(q - E) = \\ & (v - s)\bar{F}(q)\left(q - \int_0^q F(x)dx\right) - (c - s + k)q + kE, \end{aligned} \quad (8)$$

其中下标 IC 表示集中决策下数量承诺的情形. 因此, 数量承诺时集中决策者的最优存货数量为

$$q_{IC}^* = \arg \max_{q \geq 0} \Pi_{IC}(q),$$

最优销售价格为

$$p_{IC}^* = v - (v - s)F(q_{IC}^*),$$

最优碳交易量为

$$e_{IC}^* = q_{IC}^* - E.$$

命题 3 1) 实现集中决策者期望利润函数 $\Pi_{IC}(q)$ 最大化的最优解 q_{IC}^* 存在且唯一; 2) $q_{IC}^* < q_I$, $p_{IC}^* > p_I$; 3) $\Pi_{IC}(q_{IC}^*) > \Pi_I(q_I, p_I)$.

证明 1) 对式(8)求导, 得

$$\begin{aligned} \Pi'_{IC}(q) = & (v - s)\left[\bar{F}^2(q) - f(q)\left(q - \int_0^q F(x)dx\right)\right] - (c - s + k). \\ & \text{令 } \Pi'_{IC}(q) = 0, \text{ 可得} \\ & \frac{c - s + k}{\bar{F}(q)} + (v - s)\frac{f(q)}{\bar{F}(q)}\left(q - \int_0^q F(x)dx\right) = (v - s)\bar{F}(q). \end{aligned}$$

显然, 等式左边的表达式关于 q 递增(因为 F 满足 IFR), 等式右边的表达式关于 q 递减, 故该等式有唯一解. 另外, 有

$$\Pi'_{IC}(0) = v - c - k > 0,$$

并且

$$\lim_{q \rightarrow +\infty} \Pi'_{IC}(q) = -(c - s + k) < 0.$$

所以, $\Pi_{IC}(q)$ 是关于 q 的拟凹函数, 且具有唯一实现利润最大化的解 q_{IC}^* .

2) 集中决策者的期望利润函数 $\Pi_{IC}(q)$ 在 $q = q_I$ 处的一阶导数为

$$\begin{aligned} \Pi'_{IC}(q_I) = & (v - s)\bar{F}^2(q_I) - (c - s + k) - \\ & (v - s)f(q_I)\left(q_I - \int_0^{q_I} F(x)dx\right). \end{aligned}$$

因为

$$(v - s)\bar{F}^2(q_I) - (c - s + k) = 0,$$

所以

$$\Pi'_{IC}(q_I) = -(v - s)f(q_I)\left(q_I - \int_0^{q_I} F(x)dx\right) < 0.$$

由前面分析可知, $\Pi_{IC}(q)$ 关于 q 先递增后递减, 则可得 $q_{IC}^* < q_I$. 由于两种情形下均存在 $p = v - (v - s)F(q)$, 可得 $p_{IC}^* > p_I$.

3) 将 q_I 和 p_I 代入式(2), 得

$$\begin{aligned} \Pi_I(q_I, p_I) = & (v - s)\bar{F}(q_I)\left(q_I - \int_0^{q_I} F(x)dx\right) - \\ & (c - s + k)q_I + kE. \end{aligned}$$

将 q_{IC}^* 代入式(8), 得

$$\begin{aligned} \Pi_{IC}(q_{IC}^*) = & (v - s)\bar{F}(q_{IC}^*)\left(q_{IC}^* - \int_0^{q_{IC}^*} F(x)dx\right) - \\ & (c - s + k)q_{IC}^* + kE. \end{aligned}$$

由上面分析得出 $\Pi_{IC}(q)$ 有最大值 q_{IC}^* , 故

$$\Pi_{IC}(q_{IC}^*) > \Pi_{IC}(q_I) = \Pi_I(q_I, p_I). \quad \square$$

命题3表明, 在限额与交易下考虑战略顾客行为时, 存在唯一最优数量承诺策略使得集中决策者的利润最大化. 集中决策者采用数量承诺策略会降低最优存货数量, 这是因为集中决策者限制存货数量能够降低产品的可获得性, 从而使得战略顾客会更加倾向于立即购买, 而不是选择等待来延迟购买. 这样, 不仅提高了顾客的购买意愿, 还提高了整个供应链的利润. 采用数量承诺, 使得顾客购买产品的价格提高了. 因此, 虽然数量承诺能够提高供应链的利润, 但对顾客不利.

3 限额与交易下分散化供应链决策模型

本部分研究限额与交易下考虑战略顾客行为时, 采用批发价格合同的分散化供应链如何决策.

3.1 分散化供应链最优决策

首先, 研究零售商的决策问题. 当制造商的批发价格为 w 时, 零售商的期望利润函数为

$$\Pi_r(q, p) = (p - s)E[\min(D, q)] - (w - s)q. \quad (9)$$

理性预期均衡下, 可以得到零售商关于 w 的反应函数为

$$q(w) = \bar{F}^{-1}\left(\sqrt{\frac{w - s}{v - s}}\right), \quad (10)$$

$$p(w) = s + \sqrt{(w - s)(v - s)}. \quad (11)$$

然后, 研究制造商的决策问题. 限额与交易政策下制

造商的利润函数为

$$\Pi_m(w, e) = (w - c)q - ke. \quad (12)$$

关于分散化供应链最优决策, 可以得到如下命题.

命题 4 在限额与交易下, 采用批发价格合同时分散化供应链中零售商最优订货量 (q_0^*) 满足

$$1 - \frac{c - s + k}{(v - s)\bar{F}^2(q)} = \frac{2qf(q)}{\bar{F}(q)}, \quad (13)$$

最优价格

$$p_0^* = s + \sqrt{(w_0^* - s)(v - s)}, \quad (14)$$

其中 w_0^* 代表制造商的最优批发价格. 制造商的最优批发价及最优碳交易量为

$$w_0^* = s + (v - s)\bar{F}^2(q_0^*), \quad (15)$$

$$e_0^* = q_0^* - E. \quad (16)$$

证明 首先, 求解制造商的最优决策在知道零售商最优反应函数时, 制造商的利润函数可变化为

$$\Pi_m(q) = [(v - s)\bar{F}^2(q) - (c - s + k)]q + kE.$$

令 $\Pi'_m(q) = 0$, 可以得到

$$1 - \frac{c - s + k}{(v - s)\bar{F}^2(q)} = \frac{2qf(q)}{\bar{F}(q)}.$$

显然, 等式右边的表达式关于 q 递增 (因为 F 满足 **IFR**), 等式左边的表达式关于 q 递减, 故该等式有唯一解. 另外, 有

$$\Pi'_m(0) = v - c - k > 0,$$

并且

$$\lim_{q \rightarrow +\infty} \Pi'_m(q) = -(c - s + k) < 0,$$

所以 $\Pi_m(q)$ 是关于 q 的拟凹函数, 且具有唯一使利润最大化的解 q_0^* . 由式 (10) 可知, q 与 w 有严格的一一对应关系, 则存在唯一 w_0^* 使得制造商利润最大化. 根据上述分析以及式 (1)、(10)、(11) 可得命题所示结果. \square

命题 4 表明, 在限额与交易下考虑战略顾客行为时, 采用批发价格合同的分散化供应链的零售商和制造商均有唯一最优决策. 零售商和制造商的最优决策均与单位碳排放权交易价格相关, 而与政府设定的初始碳排放限额无关. 单位碳排放权交易价格越高 (低), 制造商最优批发价越高 (低), 零售商最优订货量越低 (高), 零售商最优零售价越高 (低).

与集中决策情形一致, 令 $k = 0, E = 0$, 可以得到在不考虑限额与交易政策时, 分散化情形下零售商最优订货量 (以 q_0^* 表示) 满足

$$1 - \frac{c - s}{(v - s)\bar{F}^2(q)} = \frac{2qf(q)}{\bar{F}(q)}, \quad (17)$$

最优价格 (以 \bar{p}_0^* 表示)

$$\bar{p}_0^* = s + \sqrt{(\bar{w}_0^* - s)(v - s)},$$

其中制造商的最优批发价格 $\bar{w}_0^* = s + (v - s)\bar{F}^2(\bar{q}_0^*)$.

为了分析限额与交易政策的影响, 在考虑和不考虑限额与交易政策两种情形下, 对分散化供应链上零售商和制造商的最优决策进行比较, 得到以下命题.

命题 5 1) $q_0^* < \bar{q}_0^*, p_0^* > \bar{p}_0^*$; 2) $w_0^* > \bar{w}_0^*$.

证明 1) 因 $k > 0$, 可知

$$1 - \frac{c - s + k}{(v - s)\bar{F}^2(q_0^*)} < 1 - \frac{c - s}{(v - s)\bar{F}^2(q_0^*)}.$$

由命题 4 的证明可知, 式 (17) 左边关于 q 递减, 右边关于 q 递增. 对比式 (17) 与 (13) 可知, 为了使得式 (17) 中的等号成立, 必须在 $q = q_0^*$ 的基础上提高 q , 则可得到 $q_0^* < \bar{q}_0^*$. 在理性预期均衡下, p 和 q 满足 $p = v - (v - s)F(q)$, 则 $p_0^* > \bar{p}_0^*$.

2) 由零售商的反应函数 $q(w) = \bar{F}^{-1}\left(\sqrt{\frac{w - s}{v - s}}\right)$ 可知, q 关于 w 递减, 因为 $q_0^* < \bar{q}_0^*$, 则有 $w_0^* > \bar{w}_0^*$. \square

命题 5 中 1) 表明: 分散化决策时, 与不考虑限额与交易政策情形相比, 在考虑限额与交易政策时的零售商最优产量下降, 最优价格升高. 因为零售商在供应链上处于跟随者地位, 所以当制造商批发价格升高 (本命题 2) 已证明) 时, 零售商为应对批发价格升高, 会选择降低订货量, 提高零售价.

命题 5 中 2) 表明: 分散化决策时, 与不考虑限额与交易政策情形相比, 在考虑限额与交易政策时的制造商批发价格升高. 当政府实施限额与交易政策时, 制造商生产单位产品的成本上升. 为了实现利润最大化, 制造商可通过提升批发价来应对边际成本的上升.

3.2 与集中决策情形比较

通过与集中决策情形对比来分析分散化如何影响供应链的最优决策及最大期望利润, 可以得到如下两个命题.

命题 6 $q_{IC}^* < q_0^* < q_I, p_{IC}^* > p_0^* > p_I$.

证明 由命题 4 的证明可知

$$(v - s)\bar{F}^2(q_0^*) - (c - s + k) = (v - s)q_0^*f(q_0^*)\bar{F}(q_0^*).$$

将 q_0^* 代入 $\Pi'_{sc}(q)$, 得到

$$\begin{aligned} \Pi'_{sc}(q_0^*) &= \\ & (v - s)\bar{F}^2(q_0^*) - (c - s + k) - \\ & (v - s)f(q_0^*)\left(q_0^* - \int_0^{q_0^*} F(x)dx\right) = \\ & (v - s)f(q_0^*)\left[q_0^*\bar{F}(q_0^*) - \left(q_0^* - \int_0^{q_0^*} F(x)dx\right)\right]. \end{aligned}$$

令

$$g(q) = q\bar{F}(q) - \left(q - \int_0^q F(x)dx\right),$$

有

$$g'(q) = -qf(q) < 0.$$

因此, $g(q)$ 关于 q 递减. 由 $g(0) = 0$ 可知 $g(q_0^*) < 0$, 即 $\Pi'_{sc}(q_0^*) < 0$. 在批发价格合同下, 供应链的总利润等于零售商与供应商两者的利润之和, 可以表示为

$$\Pi_{sc}(q) = \Pi_r(q, p) + \Pi_m(w, e) = (v-s)\bar{F}(q)\left(q - \int_0^q F(x)dx\right) - (c-s+k)q + kE.$$

此表达式与数量承诺情形下集中决策者的利润表达式相同, 故可知 $\Pi_{sc}(q)$ 是关于 q 的拟凹函数, 可得 $q_0^* > q_{IC}^*$.

再由命题4的证明可知, $\Pi_m(q)$ 是关于 q 的拟凹函数, 有 $\Pi'_m(q_0^*) = 0$, 且

$$\Pi'_m(q) = (v-s)\bar{F}^2(q) - 2(v-s)qf(q)\bar{F}(q) - (c-s+k),$$

则

$$\Pi'_m(q_I) = -2(v-s)q_I f(q_I)\bar{F}(q_I) < 0,$$

可得 $q_0^* < q_I$.

综上, 可得 $q_{IC}^* < q_0^* < q_I$. 因为在3种情形下都存在 $p = v - (v-s)F(q)$, 因此 $p_{IC}^* > p_0^* > p_I$. \square

命题6表明, 分散化供应链下的最优订货量比集中决策者理性预期均衡情形下的要低, 但是仍然高于集中决策者采取数量承诺的情形. 这说明分散化使得整个供应链的订货量降低, 但是仍然没有低到供应链绩效最优的水平. 与此同时, 零售商制定的零售价格要高于集中决策者理性预期均衡的情形, 而低于集中决策者数量承诺的情形. 这是因为与集中决策者理性预期均衡情形相比, 分散化的双重边际效应使得零售商订货量减少, 从而提高了顾客的购买意愿, 促使了零售商能够进一步提高零售价格(之所以提高价格可行, 是因为此时提高了战略顾客的保留价格).

命题7 $\Pi_I(q_I, p_I) < \Pi_{sc}(q_0^*, p_0^*) < \Pi_{IC}(q_{IC}^*)$.

命题7的证明可由命题6的证明直接推出, 此处省略.

命题7表明, 分散化供应链总利润要高于集中决策者理性预期均衡的情形, 但是要低于集中决策者采取数量承诺的情形. 这表明, 分散化使得供应链绩效有所提高, 但是在分散化供应链下, 制造商的最优批发价格决策并不能使得供应链绩效达到数量承诺的情形.

4 供应链协调策略

因为数量承诺情形下供应链利润更大, 所以本文协调的基准不是满足理性预期均衡的最优解, 而是数量承诺情形下一体化供应链决策的最优解.

4.1 批发价格合同协调

关于批发价格合同协调可以得到如下命题.

命题8 1) 批发价格合同下存在唯一的 $w = w^*$, 使得 $\Pi_{sc}(q(w^*)) = \Pi_{IC}(q_{IC}^*)$; 2) $w_0^* < w^*$.

证明 1) 批发价格合同下, 供应链的总利润表达式与数量承诺情形下集中决策者的利润表达式相同, 则必然存在唯一的 $q = q_{IC}^*$, 使得批发价格合同下的供应链利润达到数量承诺情形下集中决策者的最大利润, 记为 q_{\max} . 在分散化供应链中, 由零售商的最优反应函数可知 q 与 w 存在一一对应关系, 则必然存在唯一 $w = w^*$, 使得 $\Pi_{sc}(q(w^*)) = \Pi_{sc}(q_{\max}) = \Pi_{IC}(q_{IC}^*)$.

2) 由命题6可知

$$q_0^* > q_{\max} = q_{IC}^*.$$

由零售商的最优反应函数可知

$$\frac{dq}{dw} = -\frac{1}{2\sqrt{(v-s)(w-s)}f(q)} < 0,$$

则可以得到 $w_0^* < w^*$. \square

命题8的1)说明在限额与交易政策下考虑战略顾客行为时, 批发价格合同能够实现供应链协调. 在不考虑碳限额与交易政策情形时, 文献[1]已证明了批发价格合同能够实现供应链协调. 原因是在双重边际效应之上存在战略顾客行为, 而批发价格合同则成为了平衡这两种力量的工具. 本文的研究表明, 考虑限额与交易政策, 仍然没有改变这个特性, 即批发价格合同仍然能够作为平衡战略顾客行为和双重边际效应的工具, 实现供应链绩效最优.

命题8的2)则在1)的基础上更进了一步, 由于实现供应链的最优批发价格与实现制造商利润最大化的最优批发价格不相等, 可知在批发价格协调供应链时不能实现利润的任意分配. 这也意味着仅仅实施批发价格合同难以实现供应链协调. 制造商倾向于降低批发价格来获得更多的利润, 即使这样会使得零售商的利润大大降低.

如何才能既实现供应链协调使得供应链总体利润最大, 又能够保证制造商的最优决策与供应链最优决策一致. 本文接下来采用收益分享合同来实现此目的.

4.2 收益分享合同协调策略

收益分享合同是传统供应链协调的常用合同, 本文利用收益分享合同作为实现数量承诺的工具, 使得供应链绩效能够达到数量承诺时的水平. 在收益分享合同下, 假定 ϕ ($0 \leq \phi \leq 1$) 表示零售商保留收益的比例, 则 $(1-\phi)$ 代表分享给制造商的收益.

在收益分享合同下, 零售商、制造商以及整个供应链的期望利润函数分别为

$$\begin{aligned} \Pi_r^s(q, p) = & \\ \phi p E[\min(D, q)] + \phi s E[(q - D)^+] - wq, & \quad (18) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi_m^s(w, e) = & \\ (w - c)q + (1 - \phi)(pE[\min(D, q)] + & \\ sE[(q - D)^+]) - ke, & \quad (19) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi_{sc}^s(q, p) = & \\ (p - s)E[\min(D, q)] - (c - s + k)q + kE. & \quad (20) \end{aligned}$$

其中: 上标 s 表示使用收益分享合同协调供应链的情形, 下标 r 表示零售商, 下标 m 表示制造商, 下标 sc 表示整个供应链.

采用收益分享合同时, 零售商理性预期均衡下的最优反应函数为

$$\bar{F}(q(w)) = \sqrt{\frac{w - \phi s}{\phi(v - s)}}, \quad (21)$$

$$p(w) = s + \sqrt{\frac{(v - s)(w - \phi s)}{\phi}}. \quad (22)$$

命题 9 当 $0 \leq \lambda \leq 1$ 时, 收益分享合同的参数 (w, ϕ) 满足如下关系:

$$\begin{cases} \phi = \lambda, \\ w - \phi s = \lambda(c - s + k). \end{cases} \quad (23)$$

使用收益分享合同可以实现供应链协调, 供应链最优期望利润 $\Pi_{sc}^s(q_r^{s*}, p_r^{s*}) = \Pi_{IC}(q_{IC}^*)$, 并且供应链利润能够在制造商和零售商之间实现任意比例的划分.

证明 当收益分享合同参数 (w, ϕ) 满足式 (23) 时, 化简式 (18) 和 (19) 得

$$\Pi_r^s(q, p) = \lambda \Pi_{sc}^s(q, p) - \lambda k E, \quad (24)$$

$$\Pi_m^s(w, e) = (1 - \lambda) \Pi_{sc}^s(q, p) + \lambda k E. \quad (25)$$

此时零售商的最优订货量 q_r^{s*} 等于一体化供应链采取数量承诺时的最优存货数量 q_{IC}^* . 由于理性预期均衡时零售商最优定价满足 $p_r^{s*} = v - (v - s)F(q_r^{s*})$, 化简式 (20) 可得

$$\begin{aligned} \Pi_{sc}^s(q_r^{s*}, p_r^{s*}) = & \\ (v - s)\bar{F}(q_r^{s*})\left(q_r^{s*} - \int_0^{q_r^{s*}} F(x)dx\right) - & \\ (c - s + k)q_r^{s*} + kE. & \end{aligned}$$

与式 (8) 比较可得, 供应链最优存货量等于数量承诺时零售商的最优订货量 q_{IC}^* . 所以, 当收益分享合同参数满足式 (23) 时, 供应链最优期望利润 $\Pi_{sc}^s(q_r^{s*}, p_r^{s*}) = \Pi_{IC}(q_{IC}^*)$, 分散化供应链可以协调. 当 $\lambda = 0$ 时, 制造商获得全部利润; 当 $\lambda = \frac{1}{\Pi_{sc}^s(q_r^{s*}, p_r^{s*}) - kE}$ 时, 零售商获得全部利润. 供应链的利润可以在制造商和零售商之间任意分配. \square

命题 9 表明, 收益分享合同能够实现供应链协调, 且供应链利润能够在制造商和零售商之间任意分配. 采用收益分享合同之所以能够达到数量承诺情形下的最大期望利润, 是因为分散化的供应链使得零售商进行数量承诺变得可信. 战略顾客清楚知道, 如果零售商偏离最优订货量决策, 则零售商会蒙受损失, 而理性零售商一定会选择不偏离最优订货量. 最优订货量的进一步减少, 提高了战略顾客的购买意愿, 从而进一步增加了整个供应链的绩效, 并使其达到最优. 分析可知, 采用收益分享合同协调供应链, 可以降低整个供应链的碳排放 (因为产量降低了).

命题 9 还表明, 采用收益分享合同实现供应链协调, 虽然提高了供应链绩效 (对制造商和零售商有利), 也降低了供应链的碳排放 (对社会有利), 但是对顾客并不利 (顾客购买产品的价格提高了).

5 结论与展望

本文在传统考虑战略顾客行为的供应链决策与协调研究的基础上, 引入限额与交易政策, 研究集成环境下供应链决策与协调问题. 首先, 在限额与交易政策下, 采用理性预期均衡分析方法研究得到了一体化供应链最优决策, 并与不考虑限额与交易政策情形对比, 分析发现限额与交易政策使得集中决策者最优产量降低、最优价格升高、碳排放量减少、最大期望利润增大还是减小取决于政府设定的初始碳排放限额; 其次, 研究了集中决策者进行数量承诺的情形, 研究表明集中决策者进行数量承诺时的最优库存量降低, 最优价格升高且绩效上升; 再次, 研究得到了分散化供应链的零售商定零售价、订货和制造商定批发价、碳交易的最优决策, 分析发现分散化供应链最优决策和最大期望利润均介于集中决策者理性预期均衡情形与数量承诺情形之间; 然后, 与不考虑限额与交易政策情形对比, 分析发现限额与交易政策使得制造商批发价格升高、碳排放量减少, 使得零售商订货量减少、零售价上升; 最后, 以数量承诺情形为协调基准, 研究了限额与交易政策下考虑战略顾客行为的供应链协调策略. 研究表明批发价格能够使得供应链利润达到数量承诺的情形, 但是无法实现利润任意分配. 收益分享合同能够实现供应链协调且允许利润任意分配.

本文研究了制造商面临限额与交易政策和零售面临战略顾客行为的供应链决策与协调模型, 拓展了限额与交易政策规制下供应链管理的研究范围, 丰富了供应链协调的内涵. 但是, 本文仅仅将限额与交易政策作为外生约束来对待, 而没有考虑碳排放对顾客

需求的影响。随着顾客环保意识的加强,碳排放的高低对消费者决策会产生重要影响。在模型中考虑碳排放敏感型需求将使得研究更加贴近实践,将是本文的进一步研究方向。

参考文献(References)

- [1] Su X, Zhang F. Strategic customer behavior, commitment, and supply chain performance[J]. *Management Science*, 2008, 54(10): 1759-1773.
- [2] Cachon G P, Swinney R. Purchasing, pricing, and quick response in the presence of strategic consumers[J]. *Management Science*, 2009, 55(3): 497-511.
- [3] Whang S. Demand uncertainty and the bayesian effect in markdown pricing with strategic customers[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2014, 17(1): 66-77.
- [4] Parlaktürk A K. The value of product variety when selling to strategic consumers[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2012, 14(3): 371-385.
- [5] Liu Q, Zhang D. Dynamic pricing competition with strategic customers under vertical product differentiation[J]. *Management Science*, 2013, 59(1): 84-101.
- [6] Lai G, Debo L G, Sycara K. Buy now and match later: Impact of posterior price matching on profit with strategic consumers[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2010, 12(1): 33-55.
- [7] Cachon G P, Swinney R. The value of fast fashion: Quick response, enhanced design, and strategic consumer behavior[J]. *Management Science*, 2011, 57(4): 778-795.
- [8] Mersereau A J, Zhang D. Markdown pricing with unknown fraction of strategic customers[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2012, 14(3): 355-370.
- [9] 何大义, 马洪云. 碳排放约束下企业生产与存储策略研究[J]. *资源与产业*, 2011, 13(2): 63-68.
(He D Y, Ma H Y. Strategy of enterprise production and store under constraints of carbon emission[J]. *Resources & Industries*, 2011, 13(2): 63-68.)
- [10] Song J, Leng M. Analysis of the single-period problem under carbon emissions policies[M]. New York: Springer, 2012: 297-313.
- [11] Jiang W, Chen X. Manufacturer's production and pricing policy with carbon constraint and strategic Customer Behavior[J]. *Advances in Information Sciences and Service Sciences*, 2012, 4(23): 231-238.
- [12] Toptal A, Özlü, Konur D. Joint decisions on inventory replenishment and emission reduction investment under different emission regulations[J]. *Int J of Production Research*, 2014, 52(1): 243-269.
- [13] Wahab M I M, Mamun S M H, Ongkunaruk P. EOQ models for a coordinated two-level international supply chain considering imperfect items and environmental impact[J]. *Int J of Production Economics*, 2011, 134(1): 151-158.
- [14] Benjaafar S, Li Y, Daskin M. Carbon footprint and the management of supply chains: Insights from simple models[J]. *IEEE Trans on Automation Science and Engineering*, 2013, 10(1): 99-116.
- [15] Jaber M Y, Glock C H, El Saadany A M A. Supply chain coordination with emissions reduction incentives[J]. *Int J of Production Research*, 2013, 51(1): 69-82.
- [16] 谢鑫鹏, 赵道致. 低碳供应链企业减排合作策略研究[J]. *管理科学*, 2013, 26 (3): 108-119.
(Xie X P, Zhao D Z. Research on cooperation strategy of enterprise' carbon emission reduction in low carbon supply chain[J]. *J of Management Science*, 2013, 26(3): 108-119.)
- [17] 赵道致, 原白云, 徐春明. 低碳供应链纵向合作减排的动态优化[J]. *控制与决策*, 2014, 29(7): 1340-1344.
(Zhao D Z, Yuan B Y, Xu C M. Dynamic optimization about vertical cooperation on carbon emissions reduction in low-carbon supply chain[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(7): 1340-1344.)
- [18] Tseng S C, Hung S W. A strategic decision-making model considering the social costs of carbon dioxide emissions for sustainable supply chain management[J]. *J of Environmental Management*, 2014, 133: 315-322.
- [19] 鲁力, 陈旭. 不同碳排放政策下基于回购合同的供应链协调策略[J]. *控制与决策*, 2014, 29(12): 2212-2220.
(Lu L, Chen X. Supply chain coordination with buyback contract under different carbon emission policies[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(12): 2212-2220.)
- [20] Chen J. Returns with wholesale-price-discount contract in a newsvendor problem[J]. *Int J of Production Economics*, 2011, 130(1): 104-111.

(责任编辑: 孙艺红)