

不同碳排放政策下基于回购合同的供应链协调策略

鲁力, 陈旭

(电子科技大学 经济与管理学院, 成都 611731)

摘要: 碳排放政策给企业运营和供应链管理带来了新的挑战, 使供应链上企业的管理决策更加复杂. 考虑由一个供应商与一个制造商组成的二级供应链, 研究不同碳排放政策(碳税、限额、限额与交易)下基于回购合同的供应链协调问题, 并与无碳排放约束的情形进行比较. 研究表明, 在不同碳排放政策下, 回购合同均能实现供应链协调, 无碳排放约束、碳限额与交易和碳限额政策下制造商的最优订货量依次减小, 而供应商给出的回购价格依次提高.

关键词: 碳排放政策; 回购合同; 供应链协调

中图分类号: F272

文献标志码: A

Supply chain coordination with buyback contract under different carbon emission policies

LU Li, CHEN Xu

(School of Economic and Management, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China. Correspondent: LU Li, E-mail: luli_rudy@126.com)

Abstract: Carbon emission policies bring new challenges to the enterprise operation and supply chain management, making the decision of management more complicated. With a two-echelon supply chain consisting of one supplier and one manufacturer taken into consideration, the supply chain coordination with buyback contract under different carbon emission policies(carbon emissions tax, mandatory carbon emissions capacity, cap and trade) is researched and compared with the situation of no carbon constrain. The results show that, under different carbon policies, the buyback contract can coordinate the supply chain. The manufacture's optimal order quantity gradually decreases under unconstrained condition, cap and trade, and mandatory carbon emissions capacity, while the buyback price offered by the supplier gradually increase.

Key words: carbon emission policy; buyback contract; supply chain coordination

0 引言

全球气候变暖的趋势已引起各国政府的高度重视, 如何有效地降低碳排放成为各国政府关注的焦点问题. 目前, 各国政府都针对国情制定了相应的碳排放法规政策, 常见的碳排放政策主要包括: 碳税、碳限额和碳限额与交易3种形式^[1]. 最早实施碳限额以及碳限额与交易的欧洲碳排放交易体系(EU ETS)目前已成为世界最大的碳排放交易市场^[2]. 澳大利亚于2012年7月1日起在全国范围征收碳税, 税率为22美元/吨^[3]. 截止2013年底, 我国也已在深圳、北京、上海、广东和天津等城市和地区相继试点实施了碳排放权交易. 通过管制和市场的双重手段制定碳排放政策实现碳减排的目的已成为大势所趋.

然而, 碳排放约束给企业运营带来了新的挑战, 使企业的管理决策更加复杂, 表现为决策目标(提高利润和减少碳排放双重目标)、决策变量(生产、订货等传统决策变量和碳交易决策变量)和决策环境(产能、资金等传统约束和碳限额约束)的复杂. 现有的关于碳排放约束下企业运营管理的文献主要研究单个企业在碳排放政策下的最优决策, 从供应链视角进行研究的文献还相对较少. 然而, 如果只关注单个企业, 而不能有效地解决碳排放约束下供应链上下游企业的协同问题, 则不能从根本上推进碳排放约束的工作. 因此, 从供应链协调的视角进行研究才能实现整体减少碳排放的最终目标^[4].

收稿日期: 2013-10-26; 修回日期: 2014-02-21.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71272128); 国家软科学研究计划项目(2013GXS4D145); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-12-0087); 教育部人文社会科学研究青年基金项目(11YJC630022).

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

在实际生活中,常采用批发价格合同、回购合同、收益共享合同和数量柔性合同实现供应链协调。其中,回购合同作为实现供应链风险有效分担的一种工具,在大量的学术研究和企业实践中被广泛采用。回购是渠道内的上游成员接受下游成员剩余产品的一种承诺^[5]。由于碳排放约束下供应链上的企业受到碳限额限制,其最优订货量往往小于等于无碳排放约束时的情形。为了鼓励受到碳排放约束的企业多订货,可以采用回购合同,从而实现风险分担。因此,研究不同碳排放政策下基于回购合同的供应链协调问题具有重要的现实意义。

在现有的关于碳排放约束下的供应链企业决策行为及协调优化的研究中,典型的代表有: Song等^[6]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,得到了在限额与交易情形下使利润增加、碳排放减小的最优条件; Rosic等^[7]考虑一个面临双源采购(境内和境外)的零售商,在碳限额与交易和碳税政策下研究了最优订货量和最优订货源的选择,并比较了2种碳排放政策对碳排放的控制效果; Toptal等^[1]研究了碳限额、碳税、碳限额与交易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; Du等^[8]考虑了由一个碳排放权供应商和一个碳排放企业构成的两级供应链,在报童模型的框架下研究了供应链双方的博弈过程,设计了实现供应链协调的机制; Jaber等^[9]考虑了由一个制造商与一个零售商构成的两级供应链,在碳限额与交易下研究了由制造商承担碳成本的供应链协调机制; Choi^[10]基于报童模型分析了批发价和价格补贴2种合同下碳限额与交易政策对零售商采购源选择的影响; 谢鑫鹏等^[11]研究了考虑碳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,对企业在减排过程中的相互作用(即一个企业减排促进另一个企业减排)、碳交易价格对减排效果的影响进行了分析; Benjaafar等^[12]将碳排放因素纳入到简单的供应链系统中,在碳限额与交易背景下研究了企业的采购、生产、库存和绿色技术投资决策,在此基础上,分析了供应链中企业合作对运作成本和碳排放降低的影响; 王芹鹏等^[13]在一个由零售商主导的供应链中,运用微分博弈理论,比较了不合作、成本分担契约和合作3个契约对供应链成员的影响。

本文考虑在不同碳排放政策下基于回购合同的

供应链协调策略问题,研究解决以下问题: 1) 在不同碳排放政策下,回购合同能否实现供应链协调; 2) 不同碳排放政策对制造商最优订货量的影响; 3) 不同碳排放政策对供应商回购价格的影响; 4) 不同碳排放政策对制造商期望利润的影响。

1 问题描述与假定

本文考虑由一个受碳政策约束的制造商与一个不受碳政策约束的供应商组成的两级供应链。在销售季之前,制造商以批发价 w 向供应商采购原材料 Q ; 在销售季中,制造商面对的概率密度和分布函数分别为 $f(x)$ 和 $F(x)$,随机需求为 D ,以价格 p 销售产品; 在销售季末,单位产品的残值为 v ,单位缺货成本为 g 。供应商的采购成本为 c_s ,制造商的生产成本为 c_m ,生产单位产品的碳排放量为 e ,单位碳排放量缴纳的碳税为 t ,单位碳排放权的交易价格为 k ,政府给制造商的碳排放限额为 E 。

为了便于描述,令 Q_0^* 、 Q_1^* 、 Q_2^* 和 Q_3^* 分别表示无碳排放约束、碳税、限额、限额与交易情形下集中决策供应链的最优订货量; 令 Q_{m0}^* 、 Q_{m1}^* 、 Q_{m2}^* 和 Q_{m3}^* 分别表示无碳排放约束、碳税、限额、限额与交易情形下分散决策制造商的最优订货量; 令 Q_{b0}^* 、 Q_{b1}^* 、 Q_{b2}^* 和 Q_{b3}^* 分别表示考虑回购合同时,无碳排放约束、碳税、限额、限额与交易情形下分散决策制造商的最优订货量; b_0 、 b_1 、 b_2 和 b_3 分别表示无碳排放约束、碳税、限额、限额与交易情形下供应商给予制造商的回购价格。

为了便于研究,作出以下假设:

- 1) 供应商和制造商是风险中性和完全理性的,且信息完全对称;
- 2) 产品是短周期销售产品,市场较稳定,产品在销售期内价格不变;
- 3) $p > w + c_m$ 表明产品的销售价格始终大于制造商的生产成本,制造商有利可图;
- 4) $w > c_s$ 表明供应商制定的批发价始终大于供应商的成本,供应商有利可图;
- 5) $b > v$ 表明供应商提供的回购价格始终大于产品的残值,制造商乐于将产品进行全部回购。

2 模型建立与分析

2.1 无碳排放约束下的情形

无碳排放约束是指制造企业在生产过程中不受碳排放政策的约束。制造企业将按照期望利润最大化的产量向供应商购买原材料。因此,集中决策下供应链的期望利润为

$$E[\pi_{T0}(Q_0)] =$$

$$pS(Q_0) + vI(Q_0) - gL(Q_0) - (c_s + c_m)Q_0. \quad (1)$$

其中: $S(Q_0) = Q - \int_0^{Q_0} F(x)dx$ 为期望销售量; $I(Q_0) = \int_0^{Q_0} (Q_0 - x)f(x)dx$ 为销售季末的期望库存量; $L(Q_0) = \int_{Q_0}^{+\infty} (x - Q_0)f(x)dx$ 为期望缺货量; $(c_s + c_m)Q_0$ 为供应链的总成本, 由供应商成本和制造商成本 2 部分构成. 化简式 (1) 可得

$$E[\pi_{T0}(Q_0)] =$$

$$(p + g - v)S(Q_0) - (c_s + c_m - v)Q_0 - gu. \quad (2)$$

问题转化为经典的报童模型问题, 由 Cachon^[14] 的结论可得使供应链整体期望利润最大化的最优订货量

$$Q_0^* = F^{-1}\left(\frac{p + g - c_s - c_m}{p + g - v}\right).$$

在分散决策下, 制造商的期望利润为

$$E[\pi_{m0}(Q_{m0})] = pS(Q_{m0}) + vI(Q_{m0}) - gL(Q_{m0}) - (w + c_m)Q_{m0}. \quad (3)$$

同理, 由 Cachon^[14] 的结论可知, 分散决策下使制造商整体期望利润最大的订货量存在且唯一, 且最优订货量为

$$Q_{m0}^* = F^{-1}\left(\frac{p + g - w - c_m}{p + g - v}\right).$$

比较 Q_0^* 与 Q_{m0}^* , 由于 $w > c_s$, $F(x)$ 单调递增, 有 $F^{-1}\left(\frac{p + g - c_s - c_m}{p + g - v}\right) > F^{-1}\left(\frac{p + g - w - c_m}{p + g - v}\right)$, 即, 在无碳排放约束的情况下, 集中决策下制造商的最优订货量始终大于分散决策的情形, 表明传统的批发价合同无法协调供应链.

引入回购合同进行供应链协调. 当销售季末出现存货时, 制造商按照回购价格 b_0 将未销售的产品退回给供应商获得收入. 此时, 分散决策下制造商的期望利润变为

$$E[\pi_{b0}(Q_{b0})] = pS(Q_{b0}) + vI(Q_{b0}) - gL(Q_{b0}) - [(w + c_m)Q_{b0} - b_0(Q_{b0} - S(Q_{b0}))], \quad (4)$$

其中 $b_0(Q_{b0} - S(Q_{b0}))$ 为制造商按照回购价格 b_0 将未销售的产品退回给供应商所获得的收入. 化简式 (4) 可得

$$E[\pi_{b0}(Q_{b0})] = (p + g - v - b_0)S(Q_{b0}) - (w + c_m - b_0 - v)Q_{b0} - gu. \quad (5)$$

由于

$$\frac{dE[\pi_{b0}(Q_{b0})]}{dQ_{b0}} =$$

$$(p + g - v - b_0)[1 - F(Q_{b0})] - (w + c_m - b_0 - v),$$

$$\frac{d^2E[\pi_{b0}(Q_{b0})]}{d^2Q_{b0}} = -(p + g - v - b_0)f(Q_{b0}) < 0,$$

分散决策下使制造商期望利润最大的订货量存在且唯一.

令 $\frac{dE[\pi_{b0}(Q_{b0})]}{dQ_{b0}} = 0$, 分散决策下使制造商期望利润最大化的最优订货量为

$$Q_{b0}^* = F^{-1}\left(\frac{p + g - w - c_m}{p + g - v - b_0}\right).$$

为了实现供应链协调, 必须使得 $Q_0^* = Q_{b0}^*$, 即

$$F^{-1}\left(\frac{p + g - c_s - c_m}{p + g - v}\right) = F^{-1}\left(\frac{p + g - w - c_m}{p + g - v - b_0}\right),$$

化简可得

$$\frac{p + g - c_s - c_m}{p + g - v} = \frac{p + g - w - c_m}{p + g - v - b_0},$$

可求得

$$b_0 = \frac{(p + g - v)(w - c_s)}{p + g - c_s - c_m}.$$

该结论表明, 无碳排放约束时, 供应链可以通过满足 $b_0 = \frac{(p + g - v)(w - c_s)}{p + g - c_s - c_m}$ 条件的回购合同来实现协调.

2.2 碳税的情形

碳税是指制造企业在生产过程中按照碳排放量征收一定的碳排放税的政府政策. 制造商每生产单位产品都需缴纳碳税 te , 对于制造商乃至整个供应链而言, 增加了运营成本. 此时, 集中决策下供应链的期望利润为

$$E[\pi_{T1}(Q_1)] = pS(Q_1) + vI(Q_1) - gL(Q_1) - (c_s + c_m + te)Q_1. \quad (6)$$

其中: $S(Q_1)$ 为期望销售量; $I(Q_1)$ 为销售季末的期望库存量; $L(Q_1)$ 为期望缺货量; $(c_s + c_m + te)Q_1$ 为供应链的总成本, 由供应商成本、制造商成本和碳税成本 3 部分构成. 关于集中决策下制造商的最优订货量有如下命题.

命题 1 在碳税情形下, 使集中决策供应链期望利润最大的最优订货量存在且唯一, 最优订货量为

$$Q_1^* = F^{-1}\left(\frac{p + g - c_s - c_m - te}{p + g - v}\right).$$

证明 化简式 (6) 可得

$$E[\pi_{T1}(Q_1)] =$$

$$(p + g - v)S(Q_1) - (c_s + c_m + te - v)Q_1 - gu.$$

由于

$$\frac{dE[\pi_{T1}(Q_1)]}{dQ_1} =$$

$$(p + g - v)[1 - F(Q_1)] - (c_s + c_m + te - v),$$

$$\frac{d^2E[\pi_{T1}(Q_1)]}{d^2Q_1} = -(p + g - v)f(Q_1) < 0,$$

表明集中决策下供应链的期望利润函数为凹函数, 存在使得供应链整体利润最大化的最优订货量并且唯一。

$$\text{令 } \frac{dE[\pi_{T1}(Q_1)]}{dQ_1} = 0, \text{ 可得}$$

$$Q_1^* = F^{-1}\left(\frac{p + g - c_s - c_m - te}{p + g - v}\right). \quad \square$$

在分散决策下, 制造商的期望利润为

$$E[\pi_{m1}(Q_{m1})] = pS(Q_{m1}) + vI(Q_{m1}) - gL(Q_{m1}) - (w + c_m + te)Q_{m1}. \quad (7)$$

$E[\pi_{T1}(Q_1)]$ 与 $E[\pi_{m1}(Q_{m1})]$ 相比, 仅成本由 $(c_s + c_m + te)$ 变为 $(w + c_m + te)$. 采用与集中决策的情形相同的方法, 可以证明分散决策下使制造商期望利润最大的订货量存在且唯一, 且最优订货量为

$$Q_{m1}^* = F^{-1}\left(\frac{p + g - w - c_m - te}{p + g - v}\right).$$

比较 Q_1^* 与 Q_{m1}^* , 由于 $w > c_s$, $F(x)$ 单调递增, 有

$$F^{-1}\left(\frac{p + g - c_s - c_m - te}{p + g - v}\right) > F^{-1}\left(\frac{p + g - w - c_m - te}{p + g - v}\right),$$

即在碳税情形下, 集中决策下制造商的最优订货量始终大于分散决策的情形, 表明传统的批发价合同无法协调供应链。

引入回购合同进行供应链协调. 当销售季末出现存货时, 制造商按照回购价格 b_1 将未销售的产品退回给供应商并获得收入. 此时, 分散决策下制造商的期望利润为

$$E[\pi_{b1}(Q_{b1})] = pS(Q_{b1}) + vI(Q_{b1}) - gL(Q_{b1}) - [(w + c_m + te)Q_{b1} - b_1(Q_{b1} - S(Q_{b1}))]. \quad (8)$$

其中 $b_1(Q_{b1} - S(Q_{b1}))$ 为制造商按照回购价格 b_1 将未销售的产品退回给供应商所获得的收入, 可得以下命题。

命题 2 在碳税情形下, 供应链可以通过满足 $b_1 = \frac{(p + g - v)(w - c_s)}{p + g - c_s - c_m - te}$ 条件的回购合同实现协调。

证明 化简式 (8) 可得

$$E[\pi_{b1}(Q_{b1})] = (p + g - v - b_1)S(Q_{b1}) - (w + c_m + te - b_1 - v)Q_{b1} - gu.$$

由于

$$\frac{dE[\pi_{b1}(Q_{b1})]}{dQ_{b1}} = (p + g - v - b_1)[1 - F(Q_{b1})] - (w + c_m + te - b_1 - v),$$

$$\frac{d^2E[\pi_{b1}(Q_{b1})]}{d^2Q_{b1}} = -(p + g - v - b_1)f(Q_{b1}) < 0,$$

此时, 分散决策下使制造商期望利润最大的订货量存在且唯一。

令 $\frac{dE[\pi_{b1}(Q_{b1})]}{dQ_{b1}} = 0$, 可得使制造商期望利润最大化的最优订货量为

$$Q_{b1}^* = F^{-1}\left(\frac{p + g - w - c_m - te}{p + g - v - b_1}\right).$$

为了实现供应链协调, 必须使得 $Q_1^* = Q_{b1}^*$, 即

$$F^{-1}\left(\frac{p + g - c_s - c_m - te}{p + g - v}\right) = F^{-1}\left(\frac{p + g - w - c_m - te}{p + g - v - b_1}\right),$$

化简可得

$$\frac{p + g - c_s - c_m - te}{p + g - v} = \frac{p + g - w - c_m - te}{p + g - v - b_1},$$

可求得

$$b_1 = \frac{(p + g - v)(w - c_s)}{p + g - c_s - c_m - te}. \quad \square$$

2.3 限额的情形

限额是指制造企业按照政府限定的碳排放配额进行生产. 当碳排放配额不够或过剩时, 制造商不可以去碳交易市场购买或销售碳排放权. 集中决策下供应链的期望利润为

$$\begin{aligned} E[\pi_{T2}(Q_2)] &= pS(Q_2) + vI(Q_2) - gL(Q_2) - (c_s + c_m)Q_2, \\ \text{s.t. } Q_2 &\leq \frac{E}{e}. \end{aligned} \quad (9)$$

其中: $S(Q_2)$ 为期望销售量; $I(Q_2)$ 为销售季末的期望库存量; $L(Q_2)$ 为期望缺货量; $(c_s + c_m)Q$ 为供应链的总成本, 由供应商成本和制造商成本 2 部分构成. 关于集中决策下供应链的最优订货量有如下命题。

命题 3 在碳限额情形下, 使集中决策供应链期望利润最大化的最优订货量存在且唯一. 当 $Q_2^* \leq \frac{E}{e}$ 时, 最优订货量为 $Q_2^* = F^{-1}\left(\frac{p + g - c_s - c_m}{p + g - v}\right)$; 当 $Q_2^* > \frac{E}{e}$ 时, 最优订货量为 $Q_2^* = \frac{E}{e}$.

证明 化简式 (9) 可得

$$E[\pi_{T2}(Q_2)] = (p + g - v)S(Q_2) - (c_s + c_m - v)Q_2 - gu. \quad (10)$$

由于

$$\begin{aligned} \frac{dE[\pi_{T2}(Q_2)]}{dQ_2} &= (p + g - v)[1 - F(Q_2)] - (c_s + c_m - v), \\ \frac{d^2E[\pi_{T2}(Q_2)]}{d^2Q_2} &= -(p + g - v)f(Q_2) < 0, \end{aligned}$$

表明集中决策下供应链的期望利润函数为凹函数, 存在使得供应链整体利润最大化的最优订货量, 并且该订货量唯一。

令 $\frac{dE[\pi_{T2}(Q_2)]}{dQ_2} = 0$, 可得使供应链整体期望利润最大化的最优订货量

$$Q_2^* = F^{-1}\left(\frac{p+g-c_s-c_m}{p+g-v}\right).$$

当 $Q_2^* \leq \frac{E}{e}$ 时, 碳限额政策对供应链不起作用. 此时, 使得供应链整体利润最大化的最优订货量为 $Q_2^* = F^{-1}\left(\frac{p+g-c_s-c_m}{p+g-v}\right)$. 当 $Q_2^* > \frac{E}{e}$ 时, 碳限额政策对供应链起作用. 由于此时供应链整体的利润函数为凹函数, 在 Q_2^* 的左侧单调递增, 使供应链整体最优的订货量变为 $Q_2^* = \frac{E}{e}$. \square

在分散决策下, 制造商的期望利润为

$$\begin{aligned} E[\pi_{m2}(Q_{m2})] = & pS(Q_{m2}) + vI(Q_{m2}) - gL(Q_{m2}) - (w+c_m)Q_{m2}, \\ \text{s.t. } Q_{m2} \leq & \frac{E}{e}. \end{aligned} \quad (11)$$

$E[\pi_{T2}(Q)]$ 与 $E[\pi_{m2}(Q_{m2})]$ 相比, 只是成本由 $(c_s + c_m)$ 变为 $(w + c_m)$.

采用与集中决策的情形相同的方法, 可以得到使分散决策制造商期望利润最大化的最优订货量存在且唯一. 当 $Q_{m2}^* \leq \frac{E}{e}$ 时, 最优订货量为 $Q_{m2}^* = F^{-1}\left(\frac{p+g-w-c_m}{p+g-v}\right)$; 当 $Q_{m2}^* > \frac{E}{e}$ 时, 最优订货量为 $Q_{m2}^* = \frac{E}{e}$.

比较 Q_2^* 与 Q_{m2}^* , 分为以下 3 种情形:

1) 当 $Q_2^* \leq \frac{E}{e}$ 且 $Q_{m2}^* \leq \frac{E}{e}$ 时, 碳排放限额不起作用. 由于 $w > c_s$, $F(x)$ 单调递增, 有

$$F^{-1}\left(\frac{p+g-c_s-c_m}{p+g-v}\right) > F^{-1}\left(\frac{p+g-w-c_m}{p+g-v}\right),$$

$$Q_2^* > Q_{m2}^*.$$

表明在碳限额不起作用的情况下, 集中化决策下的制造商最优订货量始终大于分散化的情形.

2) 当 $Q_{m2}^* \leq \frac{E}{e} < Q_2^*$ 时, 碳排放限额起作用. 由于 $E[\pi_{T2}(Q_2)]$ 和 $E[\pi_{m2}(Q_{m2})]$ 均为凹函数, 在 Q_2^* 和 Q_{m2}^* 的左侧单调递增, 易得 $Q_2^* = \frac{E}{e} > Q_{m2}^*$.

3) 当 $Q_2 > Q_{m2} > \frac{E}{e}$ 时, 碳排放限额起作用. 由于 $E[\pi_{T2}(Q_2)]$ 和 $E[\pi_{m2}(Q_{m2})]$ 均为凹函数, 在 Q_2^* 和 Q_{m2}^* 的左侧单调递增, 易得 $Q_2^* = Q_{m2}^* = \frac{E}{e}$.

通过上述比较发现, 在碳限额情形下: 当 $Q_2^* \leq \frac{E}{e}$ 且 $Q_{m2}^* \leq \frac{E}{e}$ 时, 以及当 $Q_{m2}^* \leq \frac{E}{e} < Q_2^*$ 时, 集中决策下制造商的最优订货量始终大于分散决策的情形; 而当 $Q_2 > Q_{m2} > \frac{E}{e}$ 时, 集中决策下制造商的最优订货量等于分散决策的情形.

引入回购合同进行供应链协调, 当销售季末出现存货时, 制造商按照回购价格 b_2 将未销售的产品退回

给供应商并获得收入. 此时分散决策下制造商的期望利润为

$$\begin{aligned} E[\pi_{b2}(Q_{b2})] = & pS(Q_{b2}) + vI(Q_{b2}) - gL(Q_{b2}) - \\ & [(w+c_m)Q_{b2} - b_2(Q_{b2} - S(Q_{b2}))], \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $b_2(Q_{b2} - S(Q_{b2}))$ 为制造商按照回购价格 b_2 将未销售的产品退回给供应商获得的收入. 此时有以下命题.

命题 4 在碳限额情形下: 当 $Q_2^* \leq \frac{E}{e}$ 且 $Q_{m2}^* \leq \frac{E}{e}$ 时, 供应链可以通过满足

$$b_2 = b_0 = \frac{(p+g-v)(w-c_s)}{p+g-c_s-c_m}$$

条件的回购合同来实现协调; 当 $Q_{m2}^* \leq \frac{E}{e} < Q_2^*$ 时, 供应链可以通过满足

$$b_2 = (p+g-v) - \frac{p+g-c_s-c_m}{F\left(\frac{E}{e}\right)}$$

条件的回购合同来实现协调; 当 $Q_2 > Q_{m2} > \frac{E}{e}$ 时, 供应链可以通过满足 $b_2 = 0$ 条件的回购合同来实现协调.

证明 1) 当 $Q_2^* \leq \frac{E}{e}$ 且 $Q_{m2}^* \leq \frac{E}{e}$ 时, 碳排放限额不起作用, 与无碳排放约束的情形相同, 供应链可以通过满足 $b_2 = b_0 = \frac{(p+g-v)(w-c_s)}{p+g-c_s-c_m}$ 条件的回购合同来实现协调, 证明略.

2) 当 $Q_{m2}^* \leq \frac{E}{e} < Q_2^*$ 时, 化简式 (12) 可得

$$\begin{aligned} E[\pi_{b2}(Q_{b2})] = & (p+g-v-b_2)S(Q_{b2}) - (w+c_m-b_2-v)Q_{b2} - gu. \end{aligned}$$

由于

$$\begin{aligned} \frac{dE[\pi_{b2}(Q_{b2})]}{dQ_{b2}} = & (p+g-v-b_2)[1-F(Q_{b2})] - (w+c_m-b_2-v), \\ \frac{d^2E[\pi_{b2}(Q_{b2})]}{d^2Q_{b2}} = & -(p+g-v-b_2)f(Q_{b2}) < 0, \end{aligned}$$

此时, 制造商的期望利润最大化的最优订货量存在且唯一. 令 $\frac{dE[\pi_{b2}(Q_{b2})]}{dQ_{b2}} = 0$, 可得使制造商期望利润最大化的最优订货量为

$$Q_{b2}^* = F^{-1}\left(\frac{p+g-w-c_m}{p+g-v-b_2}\right).$$

为了实现供应链协调, 必须使得 $Q_2^* = Q_{b2}^*$, 即

$$\frac{E}{e} = F^{-1}\left(\frac{p+g-w-c_m}{p+g-v-b_2}\right),$$

化简可得

$$F\left(\frac{E}{e}\right) = \frac{p+g-w-c_m}{p+g-v-b_2},$$

可求得

$$b_2 = (p+g-v) - \frac{p+g-c_s-c_m}{F\left(\frac{E}{e}\right)}.$$

3) 当 $Q_2 > Q_{m2} > \frac{E}{e}$ 时, 由于 $Q_2^* = Q_{m2}^* = \frac{E}{e}$, 集中决策下制造商的最优订货量等于分散决策的情形, 传统的批发价合同可以实现供应链协调. 此时 $b_2 = 0$. \square

2.4 限额与交易的情形

碳限额与交易是指制造商的碳排放受到政府碳排放限额的控制, 但当碳排放配额不够时, 制造商可以去碳交易市场购买碳排放权, 对供应链整体而言, 增加了碳排放成本. 同时, 当碳排放配额过剩时, 制造商可以去碳交易市场销售多余的碳排放权, 获得额外收益, 对供应链整体而言, 增加了碳销售收入. 集中决策下供应链的期望利润为

$$E[\pi_{T3}(Q_3)] = pS(Q_3) + vI(Q_3) - gL(Q_3) - (c_s + c_m)Q_3 - k(eQ_3 - E). \quad (13)$$

其中: $S(Q_3)$ 为期望销售量; $I(Q_3)$ 为销售季末的期望库存量; $L(Q_3)$ 为期望缺货量; $(c_s + c_m)Q$ 为供应链的总成本; $k(eQ_3 - E)$ 为碳交易成本, $eQ_3 > E$ 表示购买碳排放权的成本, $eQ_3 < E$ 表示销售碳排放权获得的收益. 关于集中决策下制造商的最优订货量有如下命题.

命题 5 在碳限额与交易情形下, 使集中决策供应链期望利润最大化的最优订货量存在且唯一, 最优订货量为

$$Q_3^* = F^{-1}\left(\frac{p + g - c_s - c_m - ke}{p + g - v}\right).$$

证明 化简式 (13) 可得

$$E[\pi_{T3}(Q_3)] = (p + g - v)S(Q_3) - (c_s + c_m + ke - v)Q_3 - gu + kE.$$

$$\begin{aligned} & \text{由于} \\ & \frac{dE[\pi_{T3}(Q_3)]}{dQ_3} = (p + g - v)[1 - F(Q_3)] - (c_s + c_m + ke - v), \\ & \frac{d^2E[\pi_{T3}(Q_3)]}{d^2Q_3} = -(p + g - v)f(Q_3) < 0, \end{aligned}$$

表明集中决策下供应链的期望利润函数为凹函数, 存在使得供应链整体利润最大化的最优订货量并且唯一.

令 $\frac{dE[\pi_{T3}(Q_3)]}{dQ_3} = 0$, 可得

$$Q_3^* = F^{-1}\left(\frac{p + g - c_s - c_m - ke}{p + g - v}\right). \quad \square$$

在分散决策下, 制造商的期望利润为

$$E[\pi_{m3}(Q_{m3})] = pS(Q_3) + vI(Q_3) - gL(Q_3) - (w + c_m)Q_3 - k(eQ_3 - E). \quad (14)$$

$E[\pi_{T3}(Q_3)]$ 与 $E[\pi_{m3}(Q_{m3})]$ 相比, 仅成本由 $(c_s + c_m)$ 变为 $(w + c_m)$. 采用与集中决策的情形相同的方法, 可以证明分散决策下使制造商整体期望利润最大的订货量存在且唯一, 且最优订货量为

$$Q_{m3}^* = F^{-1}\left(\frac{p + g - w - c_m - ke}{p + g - v}\right).$$

比较 Q_3^* 与 Q_{m3}^* , 由于 $w > c_s$, $F(x)$ 单调递增, 有

$$F^{-1}\left(\frac{p + g - c_s - c_m - ke}{p + g - v}\right) > F^{-1}\left(\frac{p + g - w - c_m - ke}{p + g - v}\right),$$

即在碳限额与交易情形下, 集中决策下制造商的最优订货量始终大于分散决策的情形, 表明传统的批发价合同无法协调供应链.

引入回购合同进行供应链协调. 当销售季末出现存货时, 制造商按照回购价格 b_3 将未销售的产品退回给供应商并获得收入. 此时分散决策下制造商的期望利润为

$$E[\pi_{b3}(Q_{b3})] = pS(Q_{b3}) + vI(Q_{b3}) - gL(Q_{b3}) - (w + c_m)Q_{b3} - k(eQ_3 - E) + b_3(Q - S(Q_{b3})), \quad (15)$$

其中 $b_3(Q_{b3} - S(Q_{b3}))$ 为制造商按照回购价格 b_3 将未销售的产品退回给供应商所获得的收入. 此时有以下命题.

命题 6 在碳限额与交易情形下, 供应链可以通过满足 $b_3 = \frac{(p + g - v)(w - c_s)}{p + g - c_s - c_m - ke}$ 条件的回购合同来实现协调.

证明 化简式 (15) 可得

$$E[\pi_{b3}(Q_{b3})] = (p + g - v - b_3)S(Q_{b3}) - (w + c_m + ke - b_3 - v)Q_{b3} - gu - kE.$$

$$\begin{aligned} & \text{由于} \\ & \frac{dE[\pi_{b3}(Q_{b3})]}{dQ_{b3}} = (p + g - v - b_3)[1 - F(Q_{b3})] - (w + c_m + ke - b_3 - v), \\ & \frac{d^2E[\pi_{b3}(Q_{b3})]}{d^2Q_{b3}} = -(p + g - v - b_3)f(Q_{b3}) < 0, \end{aligned}$$

此时, 分散决策下使制造商期望利润最大的订货量存在且唯一.

令 $\frac{dE[\pi_{b3}(Q_{b3})]}{dQ_{b3}} = 0$, 可得使制造商期望利润最大化的最优订货量为

$$Q_{b3}^* = F^{-1}\left(\frac{p + g - w - c_m - ke}{p + g - v - b_2}\right).$$

为了实现供应链协调, 必须使得 $Q_3^* = Q_{b3}^*$, 即

$$F^{-1}\left(\frac{p + g - c_s - c_m - ke}{p + g - v}\right) =$$

$$F^{-1}\left(\frac{p+g-w-c_m-ke}{p+g-v-b_2}\right),$$

化简可得

$$\frac{p+g-c_s-c_m-ke}{p+g-v} = \frac{p+g-w-c_m-ke}{p+g-v-b_2},$$

可求得

$$b_3 = \frac{(p+g-v)(w-c_s)}{p+g-c_s-c_m-ke}. \quad \square$$

3 讨 论

通过上述分析可知,在碳税、碳限额以及碳限额与交易情形下,供应链都可以通过回购合同实现协调.下面将讨论不同政策对制造商最优订货量、期望利润和供应商回购价格的影响,并对上述回购合同的可行性进行分析.

3.1 碳排放政策对制造商最优订货量的影响

命题 7 当 $k > t$ 时, $Q_{m0}^* > Q_{m1}^* > Q_{m3}^*$; 当 $k \leq t$ 时, $Q_{m0}^* > Q_{m3}^* > Q_{m1}^*$.

证明 根据第 2.1 节、2.2 节和 2.4 节的结论可得

$$\begin{aligned} Q_{m0}^* &= F^{-1}\left(\frac{p+g-w-c_m}{p+g-v}\right), \\ Q_{m1}^* &= F^{-1}\left(\frac{p+g-w-c_m-te}{p+g-v}\right), \\ Q_{m3}^* &= F^{-1}\left(\frac{p+g-w-c_m-ke}{p+g-v}\right). \end{aligned}$$

由于 $F(x)$ 单调递增,问题可以转化为比较 $\frac{p+g-w-c_m}{p+g-v}$, $\frac{p+g-w-c_m-te}{p+g-v}$ 和 $\frac{p+g-w-c_m-ke}{p+g-v}$ 的大小.

当 $k > t$ 时,可得

$$\begin{aligned} \frac{p+g-w-c_m}{p+g-v} - \frac{p+g-w-c_m-te}{p+g-v} &> 0, \\ \frac{p+g-w-c_m-te}{p+g-v} - \frac{p+g-w-c_m-ke}{p+g-v} &= \\ \frac{ke-te}{p+g-v} &> 0, \end{aligned}$$

因此, $Q_{m0}^* > Q_{m1}^* > Q_{m3}^*$;

当 $k \leq t$ 时,可得

$$\begin{aligned} \frac{p+g-w-c_m}{p+g-v} - \frac{p+g-w-c_m-ke}{p+g-v} &> 0, \\ \frac{p+g-w-c_m-te}{p+g-v} - \frac{p+g-w-c_m-ke}{p+g-v} &= \\ \frac{ke-te}{p+g-v} &\leq 0, \end{aligned}$$

因此, $Q_{m0}^* > Q_{m3}^* \geq Q_{m1}^*$. \square

该命题表明,碳排放政策下制造商的最优订货量总是小于无碳排放政策的情形.而当购买单位碳排放权的价格大于单位碳排放量缴纳的碳税时,碳税情形下的制造商最优订货量大于碳限额与交易的情形,反之亦然.

命题 8 当 $Q_{m3}^* > \frac{E}{e}$ 且 $Q_{m2}^* > \frac{E}{e}$ 时,有 $Q_{m0}^* > Q_{m3}^* > Q_{m2}^*$; 当 $Q_{m2}^* \leq \frac{E}{e}$ 时,有 $Q_{m0}^* = Q_{m2}^* >$

Q_{m3}^* .

证明 根据第 2.1 节、2.3 节和 2.4 节的结论可得

$$Q_{m0}^* = F^{-1}\left(\frac{p+g-w-c_m}{p+g-v}\right),$$

$$Q_{m3}^* = F^{-1}\left(\frac{p+g-w-c_m-ke}{p+g-v}\right).$$

当 $Q_{m2}^* > \frac{E}{e}$ 时, $Q_{m2}^* = \frac{E}{e}$; 当 $Q_{m2}^* \leq \frac{E}{e}$ 时, $Q_{m2}^* = F^{-1}\left(\frac{p+g-w-c_m}{p+g-v}\right)$.

由于 $F(x)$ 为单调递增,问题可以转化为比较 $\frac{p+g-w-c_m}{p+g-v}$ 和 $\frac{p+g-w-c_m-ke}{p+g-v}$ 的大小.显然有 $\frac{p+g-w-c_m}{p+g-v} > \frac{p+g-w-c_m-ke}{p+g-v}$, 因此有 $Q_{m0}^* > Q_{m3}^*$.

当 $Q_{m2}^* > \frac{E}{e}$ 时, $Q_{m2}^* = \frac{E}{e}$, 此时假设 $Q_{m3}^* > \frac{E}{e}$, 因此有 $Q_{m0}^* > Q_{m3}^* > Q_{m2}^*$.

当 $Q_{m2}^* \leq \frac{E}{e}$ 时, $Q_{m2}^* = F^{-1}\left(\frac{p+g-w-c_m}{p+g-v}\right) = Q_{m0}^*$, 因此有 $Q_{m0}^* = Q_{m2}^* > Q_{m3}^*$. \square

该命题表明:当政府设定的碳排放限额不起作用时,限额与无碳排放约束下制造商的最优订货量相等,并且大于限额与交易的情形;当政府设定的碳排放限额起作用时(同时小于碳限额和碳限额与交易情形的最优订货量需求),无碳排放约束、碳限额与交易、碳限额情形下制造商的最优订货量依次减少.该命题还表明,无论碳排放约束是否起作用,限额与交易情形下制造商的最优订货量始终小于无碳排放约束的情形.即当碳排放权足够多时,制造商也不会按照无碳排放约束情形下的最优订货量进行订货.原因在于在制造商订货进行生产中存在边际利润,当边际利润与碳排放权市场交易价格相等时,制造商实现利润最大化,而当继续生产带来的利润小于销售碳排放权获得的收益时,制造商会停止订货用于生产.

3.2 碳政策对供应商回购价格的影响

命题 9 当 $k > t$ 时, $b_3 > b_1 > b_0$; 当 $k \leq t$ 时, $b_1 \geq b_3 > b_0$.

证明 根据 2.1 节、2.2 节和 2.4 节的结论,已知 $b_0 = \frac{(p+g-v)(w-c_s)}{p+g-c_s-c_m}$, $b_1 = \frac{(p+g-v)(w-c_s)}{p+g-c_s-c_m-te}$, $b_3 = \frac{(p+g-v)(w-c_s)}{p+g-c_s-c_m-ke}$.

比较 b_0 与 b_1 , 由于 $p+g-c_s-c_m > p+g-c_s-c_m-te$, $b_0 < b_1$.

比较 b_0 与 b_3 , 由于 $p+g-c_s-c_m > p+g-c_s-c_m-ke$, $b_0 < b_3$.

比较 b_1 与 b_3 , 当 $k > t$ 时, 由于 $p+g-c_s-c_m-te > p+g-c_s-c_m-ke$, $b_1 < b_3$; 当 $k \leq t$ 时, $b_1 \geq b_3$. \square

该命题表明,碳排放政策下使供应链协调的回购

参数总是大于无碳排放政策的情形. 而当购买单位碳排放权的价格大于单位碳排放量缴纳的碳税时, 碳限额与交易情形下使供应链协调的回购参数大于碳税的情形, 反之亦然.

命题 10 当 $Q_3^* > \frac{E}{e}$ 且 $Q_2^* > \frac{E}{e}$ 时, 有 $b_2 > b_3 > b_0$; 当 $Q_2^* \leq \frac{E}{e}$ 时, 有 $b_3 > b_0 = b_2$.

证明 根据 2.1 节、2.3 节和 2.4 节的结论, 已知 $b_0 = \frac{(p+g-v)(w-c_s)}{p+g-c_s-c_m}$, $b_3 = \frac{(p+g-v)(w-c_s)}{p+g-c_s-c_m-ke}$. 当 $Q_2^* > \frac{E}{e}$ 时, $b_2 = (p+g-v) - \frac{p+g-c_s-c_m}{F(\frac{E}{e})}$; 当 $Q_2^* \leq \frac{E}{e}$ 时, $b_2 = b_0 = \frac{(p+g-v)(w-c_s)}{p+g-c_s-c_m}$.

根据命题 9 可以直接得出 $b_3 > b_0$. 再对 b_2 和 b_3 进行比较, 显然无法直接比较 b_2 与 b_3 , 考虑采用替代的方法进行比较.

根据回购价格的求解方法有

$$\frac{E}{e} = F^{-1}\left(\frac{p+g-w-c_m}{p+g-v-b_3}\right),$$

根据 $Q_2^* > \frac{E}{e}$, 可得

$$F^{-1}\left(\frac{p+g-c_s-c_m-ke}{p+g-v}\right) = F^{-1}\left(\frac{p+g-w-c_m-ke}{p+g-v-b_2}\right) > F^{-1}\left(\frac{p+g-w-c_m}{p+g-v-b_3}\right).$$

因此, 当 $Q_2^* > \frac{E}{e}$ 时, $b_2 > b_3 > b_0$. \square

该命题表明, 无碳排放约束、碳限额与交易和碳限额政策下供应商给出的回购价格依次提高. 随着碳排放限制程度的增加, 由于成本的增加, 制造商的订货量不断降低, 为了鼓励制造商订货, 供应商不得不不断提高回购价格.

3.3 碳政策对制造商期望利润的影响

命题 11 当 $Q_{m2}^* \leq \frac{E}{e}$ 时, $E[\pi_{m0}(Q_{m0}^*)] = E[\pi_{m2}(Q_{m2}^*)]$; 当 $Q_{m2}^* > \frac{E}{e}$ 时, 存在 $E[\pi_{m0}(Q_{m0}^*)] > E[\pi_{m2}(Q_{m2}^*)]$.

证明 根据第 2.1 节和 2.3 节所得的结论, 对比 $E[\pi_{m0}(Q_{m0})]$ 与 $E[\pi_{m2}(Q_{m2})]$ 可知, 二者的目标函数一致. 根据前面命题的证明可知, 二者都存在唯一极值点 $Q_{m0}^* = Q_{m2}^* = F^{-1}\left(\frac{p+g-w-c_m}{p+g-v}\right)$.

当 $Q_{m2}^* \leq \frac{E}{e}$ 时, 碳限额政策对供应链不起作用, 函数在极值点 $Q_{m2}^* = F^{-1}\left(\frac{p+g-w-c_m}{p+g-v}\right)$ 取值, 因此 $E[\pi_{m0}(Q_{m0}^*)] = E[\pi_{m2}(Q_{m2}^*)]$.

当 $Q_{m2}^* > \frac{E}{e}$ 时, 碳限额政策对制造商起作用. 由于制造商的利润函数为凹函数, 在 Q_{m2}^* 的左侧

单调递增, 函数在极值点左侧取值, $E[\pi_{m0}(Q_{m0}^*)] > E[\pi_{m2}(Q_{m2}^*)]$. \square

另外, 根据函数性质很容易证明 $E[\pi_{m0}(Q_{m0}^*)] > E[\pi_{m1}(Q_{m1}^*)]$, 即无碳排放约束下制造商的期望利润始终大于碳税的情形. 综合命题 11 不难发现, 碳税和碳限额下制造商的期望利润总是小于等于无碳排放约束的情形.

命题 12 当 $E > E^*$ 时, 存在 $E[\pi_{m3}(Q_{m3}^*)] > E[\pi_{m0}(Q_{m0}^*)]$; 当 $E = E^*$ 时, 存在 $E[\pi_{m3}(Q_{m3}^*)] = E[\pi_{m0}(Q_{m0}^*)]$; 当 $E < E^*$ 时, 存在 $E[\pi_{m3}(Q_{m3}^*)] < E[\pi_{m0}(Q_{m0}^*)]$. 其中 $E^* = eQ_{m3}^* + \frac{1}{k}[E[\pi_{m0}(Q_{m0}^*)] - E[\pi_{m0}(Q_{m3}^*)]]$.

证明 根据第 2.1 节和 2.4 节所得的结论, 对比 $E[\pi_{m0}(Q_{m0})]$ 与 $E[\pi_{m3}(Q_{m3})]$.

如果 $E \leq eQ_{m3}^*$, $E[\pi_{m3}(Q_{m3}^*)] = E[\pi_{m0}(Q_{m3}^*)] - k(eQ_{m3}^* - E) \leq E[\pi_{m0}(Q_{m3}^*)] < E[\pi_{m0}(Q_{m0}^*)]$, 则有 $E[\pi_{m3}(Q_{m3}^*)] < E[\pi_{m0}(Q_{m0}^*)]$;

如果 $E \geq eQ_{m3}^*$, $E[\pi_{m3}(Q_{m3}^*)] = E[\pi_{m0}(Q_{m0}^*)] - k(eQ_{m0}^* - E) > E[\pi_{m0}(Q_{m0}^*)]$, 则有 $E[\pi_{m3}(Q_{m3}^*)] > E[\pi_{m0}(Q_{m0}^*)]$.

综上所述, 总存在 $E^* \in (eQ_{m3}^*, eQ_{m0}^*)$, 满足 $E[\pi_{m3}(Q_{m3}^*)] = E[\pi_{m0}(Q_{m0}^*)]$, 即 $E[\pi_{m0}(Q_{m3}^*)] - k(eQ_{m3}^* - E) = E[\pi_{m0}(Q_{m0}^*)]$.

由此可知, 此时 E^* 满足

$$E^* = eQ_{m3}^* + \frac{1}{k}[E[\pi_{m0}(Q_{m0}^*)] - E[\pi_{m0}(Q_{m3}^*)]].$$

因此, 当 $E > E^*$ 时, 存在 $E[\pi_{m3}(Q_{m3}^*)] > E[\pi_{m0}(Q_{m0}^*)]$; 当 $E = E^*$ 时, 存在 $E[\pi_{m3}(Q_{m3}^*)] = E[\pi_{m0}(Q_{m0}^*)]$; 当 $E < E^*$ 时, 存在 $E[\pi_{m3}(Q_{m3}^*)] < E[\pi_{m0}(Q_{m0}^*)]$. \square

上述命题表明, 碳限额与交易在某种条件下可以使制造商分散决策的期望利润比无碳排放约束时的情形大. 这是因为碳限额与交易是一种市场与政府規制相结合的混合策略, 既能发挥限制碳排放的作用, 又能使企业通过买卖碳排放权获得收益或保证生产. 命题 12 同时还表明, 碳限额与交易政策下的制造商分散决策的期望利润与无碳排放约束情形时的大小关系取决于政府制定的碳限额 E . 因此, 本文的研究结论同样可以为政府制定碳限额标准提供依据.

3.4 回购合同实施的可行性分析

回购合同实施的关键在于可以通过回购价格在供应链上下游企业间自由分配供应链可协调利润. 这里讨论上述回购合同的可行性.

以无碳排放约束的情形为例, 假设 $\Delta\pi = E[\pi_{T0}(Q_0)] - E[\pi_{b0}(Q_{b0})]$ 表示可协调利润, 由 $b_0 = \frac{(p+g-v)(w-c_s)}{p+g-c_s-c_m}$ 可以推导出 $w = p+g-c_m -$

$$\frac{(p+g-c_s-c_m)(p+g-v-b_0)}{p+g-v}$$

将 w 代入 $E[\pi_{b_0}(Q_{b_0})]$ 可得

$$E[\pi_{b_0}(Q_{b_0})] = \frac{p+g-v-b_0}{p+g-v} E[\pi_{T_0}(Q_0)] - \frac{b_0}{p+g-v} gu.$$

因此

$$\Delta\pi = E[\pi_{T_0}(Q_0)] - E[\pi_{b_0}(Q_{b_0})] = \frac{b_0}{p+g-v} (E[\pi_{T_0}(Q_0)] - gu).$$

其中, 令 $\lambda = \frac{b_0}{p+g-v}$, 易知 $0 < \lambda < 1$. 因此, 回购合同可以实现供应链协调, 供应商根据自身在供应链中的地位确定供应链可协调利润的分配比例.

验证碳税、碳限额和碳限额与交易的情形, 同样可以得到上述结论, 说明上述回购合同均能实现供应链协调, 并且可按任意比例分配供应链可协调利润, 而利润分享的比例主要受供应商和制造商在整个供应链中的竞争地位影响.

4 结 论

本文考虑由一个制造商与一个供应商组成的二级供应链, 研究不同碳约束下基于回购合同的供应链协调问题. 研究表明: 1) 不同碳排放政策下, 利用回购合同都能使供应链协调, 并且实现可协调利润的自由分配. 2) 当碳排放约束起作用时, 无约束、碳限额与交易和碳限额政策供应链集中决策下的最优订货量依次减少, 而供应商给出的回购价格依次提高. 3) 当购买单位碳排放权的价格大于单位碳排放量缴纳的碳税时, 碳税情形下制造商的最优订货量总是大于碳限额与交易的情形, 而供应商提供的回购价格总是小于碳限额与交易的情形, 反之亦然. 4) 碳税和碳限额情形下制造商分散决策的期望利润总是小于等于无碳排放约束的情形, 而碳限额与交易情形可在一定条件下实现制造商分散决策期望利润大于无碳排放约束的情形.

本文的研究不仅可以为碳排放约束下供应链企业提供决策指导, 也可以为政府碳排放政策制定提供理论依据, 但仍存在一定的局限. 首先, 短期内碳排放政策在行业和地区存在差异, 本文只考虑了制造商所受的碳政策约束, 然而就实际和长远的角度而言, 供应链上下游企业都会受到碳政策约束. 因此, 在未来研究中, 应在回购模型的基础上, 进一步研究企业间碳成本分担的问题. 其次, 本文没有考虑回购合同中常考虑的促销努力和其他复杂因素的影响, 在未来研究中可在模型中考虑相关因素, 也可以将一对一的两级供应链拓展到一对多或者三级供应链, 或尝试以其他的合同进行供应链协调研究.

参考文献(References)

- [1] Toptal A, Özlü H, 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.
- [2] Böhringer C. Two decades of european climate policy: A critical appraisal[J]. *Review of Environmental Economics and Policy*, 2014, 8(1): 1-17.
- [3] Robson A. Australia's carbon tax: An economic evaluation[J]. *Economic Affairs*, 2014, 34(1): 35-45.
- [4] Matthews H D, Gillett N, Stott P, et al. The proportionality of global warming to cumulative carbon emissions[J]. *Nature*, 2009, 459(7248): 829-832.
- [5] Padmanabhan V, Png I P L. Returns policies: Make money by making good[J]. *Sloan Management Review*, 1995, 37(1): 65-72.
- [6] Song J, Leng M. Analysis of the single-period problem under carbon emissions policies[M]. New York: Springer, 2012: 297-313.
- [7] Rosic H, Jammernegg W. The economic and environmental performance of dual sourcing: A newsvendor approach[J]. *Int J of Production Economics*, 2013, 143(1): 109-119.
- [8] Du S, Zhu L, Liang L. Emission-dependent supply chain and environment-policy-making in the 'cap-and-trade' system[J]. *Energy Policy*, 2013, 57(6): 61-67.
- [9] 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.
- [10] Choi T M. Carbon footprint tax on fashion supply chain systems[J]. *The Int J of Advanced Manufacturing*, 2013, 68(4): 835-847.
- [11] 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.)
- [12] 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.
- [13] 王芹鹏, 赵道致. 两级供应链减排与促销的合作策略[J]. *控制与决策*, 2014, 29(2): 307-314.
(Wang Q P, Zhao D Z. Cooperative strategy of carbon emissions reduction and promotion in a two-echelon supply chain[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(2): 307-314.)
- [14] Cachon G P. Supply chain coordination with contracts[M]. Amsterdam: North Holland, 2003: 227-339.

(责任编辑: 闫 妍)