

控制与决策

Control and Decision

碳限额与交易机制和消费者低碳偏好下的供应链减排及融资策略

张川, 马慧敏, 郭振

引用本文:

张川, 马慧敏, 郭振. 碳限额与交易机制和消费者低碳偏好下的供应链减排及融资策略[J]. *控制与决策*, 2023, 38(11): 3271–3278.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0115>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[混合碳政策下制造商低碳转型的技术选择策略](#)

Technology selection in low carbon transition of the manufacturer under mixed carbon policy

控制与决策. 2021, 36(7): 1763–1770 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1536>

[考虑企业社会责任和公平偏好的绿色供应链决策](#)

Green supply chain considering fairness preference and corporate social responsibility

控制与决策. 2021, 36(7): 1743–1753 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1102>

[不同担保模式下考虑零售商公平关切的闭环供应链博弈模型](#)

Game models of closed-loop supply chain under different warranty modes considering retailer's fairness concerns

控制与决策. 2021, 36(6): 1489–1498 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1328>

[大数据服务商参与下供应链联合减排的动态协调策略](#)

Dynamic coordination strategy of joint emission reduction in supply chain involving big data service provider

控制与决策. 2021, 36(8): 2013–2022 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1560>

[风险规避制造商市场入侵策略](#)

Market encroachment strategy of risk-averse manufacturer

控制与决策. 2021, 36(10): 2528–2536 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1819>

碳限额与交易机制和消费者低碳偏好下的 供应链减排及融资策略

张川[†], 马慧敏, 郭振

(东北大学 工商管理学院, 沈阳 110169)

摘要: 在碳限额与交易机制和消费者对低碳产品存在偏好的背景下, 考虑由一个资金约束的制造商与一个资金充裕的零售商构成的供应链, 针对银行贷款 (BF)、提前支付折扣 (APD) 和提前支付回购 (APB) 3 种融资方式, 构建制造商主导的以企业利润最大化为目标的博弈模型, 研究不同融资方式下低碳供应链的减排与定价决策, 以及制造商的融资方式选择问题. 研究表明: 1) 在 3 种融资方式下, 减排投资成本系数的增加会降低制造商的最优单位产品碳减排量. 2) 提前支付下制造商的最优单位产品碳减排量始终高于 BF 方式. 当碳交易价格较高或减排投资成本系数较高时, APB 方式下制造商的碳减排量最高; 否则, APD 方式下制造商的碳减排量最高. 3) 与 BF 方式相比, 提前支付更能提升制造商的利润, 且制造商在 APB 方式下获利最多.

关键词: 碳限额与交易机制; 消费者低碳偏好; 碳减排; 资金约束; 融资策略

中图分类号: F274; F832.4

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0115

引用格式: 张川, 马慧敏, 郭振. 碳限额与交易机制和消费者低碳偏好下的供应链减排及融资策略 [J]. 控制与决策, 2023, 38(11): 3271-3278.

Carbon emission reduction and financing strategy for a supply chain under cap-and-trade regulation and consumer's low-carbon preference

ZHANG Chuan[†], MA Hui-min, GUO Zhen

(School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang 110169, China)

Abstract: Under the background of carbon cap-and-trade mechanism and consumer's preference for low-carbon products, we study a supply chain composed of a manufacturer with capital constraints and a retailer, and construct a stackelberg game model dominated by the manufacturer with the goal of maximizing enterprise profits. Considering three financing modes, i.e., bank financing (BF), advance payment discount (APD) and advance payment buy-back (APB), this paper investigates the emission reduction and pricing decisions of a low-carbon supply chain under different financing modes, as well as the manufacturer's financing mode selection. The research shows that: 1) No matter which financing mode the manufacturer chooses, with the increase of emission reduction investment cost coefficient, the optimal per-unit carbon emission reduction decreases. 2) The optimal carbon emission reduction level under the advance payment mode is always higher than the BF mode. When the carbon trading price is relatively high, or the emission reduction investment cost coefficient is relatively high, the manufacturer's carbon emission reduction level is the highest under the APB mode; Otherwise, the manufacturer's carbon emission reduction level is the highest under the APD mode. 3) Compared with the BF mode, advance payment can improve the profit of the manufacturer, and the profit is the highest under the APB mode.

Keywords: cap-and-trade regulation; consumer's low-carbon preference; carbon emission reduction; capital constraint; financing strategy

0 引言

为应对日益严峻的环境问题, 许多国家和地区颁布并实施了相应的政策以限制企业的碳排放, 其中碳限额与交易机制被各国政府普遍采纳^[1]. 在碳

限额与交易机制下, 政府为企业规定碳排放上限, 如果企业在实际生产中产生的碳排放量超过或未达到此限额, 则企业可以在碳交易市场进行排放额度的买卖. 截至 2021 年 4 月 1 日, 中国碳排放交易市场累

收稿日期: 2022-01-16; 录用日期: 2022-05-17.

基金项目: 国家社会科学基金项目 (19GBL229).

责任编委: 唐万生.

[†]通讯作者. E-mail: czhang@mail.neu.edu.cn.

计成交量达24 084.9万吨,累计交易额达586 231.6万元.与此同时,消费者的环保意识不断增强,在购买产品时更倾向于选择低碳产品,并愿意为其支付更高的价格^[2].

在政府的排放规制和消费者环保意识提高的双重推动下,越来越多的制造企业研发低碳产品,投资减排技术^[3-4].然而,投资碳减排技术需投入大量资金,导致企业面临融资问题.例如,特斯拉作为新能源汽车行业的领先者,因减排投资陷入资金困境而不得不寻求融资.目前,制造企业解决资金约束问题的方式主要包括银行贷款融资(外部融资方式)和提前支付融资(内部融资方式).例如:2014年,湖北宜化集团从中国兴业银行获得4 000万贷款;苹果公司于2005年向三星、英特尔等企业预付12.5亿美元的货款;永乐电器在平板电视投放市场初期,向主要供应企业一次性预付20亿元人民币^[5].在提前支付融资方式下,制造企业通常会给予零售企业批发价格折扣或者向零售企业承诺回购期末未销售的产品,以增加零售企业提前支付货款的意愿.此外,提前支付还有利于零售企业获得货源优势、抢占销售渠道、规避缺货风险.基于此,在碳限额与交易机制和消费者低碳偏好背景下,研究资金约束制造企业的融资方式选择具有重要的现实意义^[6].

与本文研究问题相关的文献主要集中在两个方面:一是碳限额与交易机制下低碳供应链中企业的运营决策;二是供应链中资金约束企业的融资方式选择.

在研究碳限额与交易机制下低碳供应链中企业的运营决策的文献中:Drake等^[7]发现与碳税政策相比,碳限额与交易机制能使企业获得更高的期望利润;Cao等^[8]发现碳减排水平随着碳交易价格的增加而增加.由于消费者低碳偏好会影响企业的碳减排决策^[9],一些学者在对低碳供应链运营决策展开研究时考虑了消费者的低碳偏好,比如Ghosh等^[10].陈晓红等^[11]研究了碳交易价格和消费者低碳偏好对供应链碳排放量的影响,结果表明这种影响与制造商碳减排成本相关;郭军华等^[12]在碳限额与交易机制下构建了双寡头企业的减排动态演化博弈模型,发现系统的均衡结果受企业单位碳减排成本和消费者碳排放敏感系数的双重影响.然而,上述文献没有考虑供应链的资金约束问题.

在研究供应链中资金约束企业的融资方式选择的文献中,一些研究只关注融资均衡,忽视了碳排放的影响,例如文献[13-14].鉴于现实中企业投资低碳

技术会陷入资金不足的困境,一些学者开始关注碳减排对融资均衡的影响.李波等^[15]考虑了银行信贷和贸易信贷两种融资方式,研究了低碳供应链中资金约束制造商的融资策略,研究表明,低碳投资成本和供应商的生产成本是影响制造商均衡融资策略的重要因素;Xia等^[16]在链与链竞争环境下研究了资金约束制造商的融资策略选择和碳减排决策,发现内部融资比银行融资更有利于提高减排水平.由于碳限额与交易机制会对低碳供应链企业的融资决策产生重大影响^[17],Cao等^[18]在碳限额与交易机制下探讨了资金约束制造商的最优融资决策,研究表明,供应商贸易信贷融资是唯一的融资均衡;Tang等^[19]发现在零售商主导和制造商主导两种权力结构下,与银行贷款相比,提前支付融资都是均衡.

综上,与低碳供应链运营决策相关的研究虽然已经取得一些成果,但考虑上游制造企业存在资金和碳排放双重约束的研究还不多.本文以资金约束的制造商与资金充足的零售商组成的供应链为研究对象,同时考虑碳限额与交易机制和消费者低碳偏好,针对银行贷款、提前支付折扣和提前支付回购3种融资方式,研究供应链成员的定价与减排决策,并给出制造商的融资方式选择策略.

1 问题描述

考虑由一个资金约束的制造商与一个资金充裕的零售商组成的两级供应链,在碳限额与交易机制和消费者低碳偏好的双重影响下,通过制造商投资减排技术进行低碳生产.零售商从制造商处以价格 w 订购 q 单位的低碳产品并销往市场.假设单一周期内制造商获得的碳配额为 G ,制造商未投资减排技术时生产单位产品的碳排放量为 e_0 ,生产成本为 c .制造商进行减排投资后生产单位产品的碳减排量为 e ($e < e_0$),碳减排投资成本为 $\frac{1}{2}\epsilon e^2$,其中 ϵ 是减排投资成本系数.在生产周期结束后,若制造商的碳排放总量 $(e_0 - e)q$ 小于政府给的碳限额 G ,则制造商可以在碳交易市场以单位碳排放权交易价格 p_e 出售剩余的碳排放权,反之制造商需要以 p_e 购买超出的碳排放权.

考虑到消费者具有低碳偏好,其对低碳产品的偏好程度和制造商单位产品的碳减排量会对市场需求产生正向影响.因此,根据文献[18,20],设产品市场需求函数为 $d = D + ke$.其中: $k > 0$ 表示消费者的低碳偏好系数; D 表示不受碳减排决策影响的随机需求,服从0到 n 的均匀分布.

为满足零售商的订单需求, 制造商必须进行融资. 除了选择银行贷款融资(BF)方式外, 作为供应链主导者, 制造商也可以要求下游零售商提前支付货款. 提前支付融资包括提前支付折扣融资(APD)方式或提前支付回购融资(APB)方式. 在APD方式下, 制造商会给下游零售商提供批发价格折扣作为回报; 在APB方式下, 制造商通过制定回购条款激励零售商. 3种融资方式下博弈的时间顺序为: 制造商先决定批发价格 w 和单位产品碳减排量 e ; 然后零售商决定订货量 q , 并以零售价格 $p(p > w)$ 向消费者进行销售.

为了简化模型, 本文假设: 1) 制造商的初始资本和产品的剩余价值均为0, 并且制造商和零售商的资金机会成本也为0; 2) 制造商和零售商都是风险中性的理性决策者, 以自身的利润最大化为目标; 3) 供应链企业之间的信息完全对称.

2 模型构建与求解

2.1 银行贷款融资(BF)方式

在BF方式下, 资金约束的低碳制造商向银行申请贷款, 并在期末偿还借贷本息. 设银行贷款利率为 $r > 0$, 银行在博弈过程中不参与决策.

零售商的利润函数为

$$\pi_r^{BF} = p \min(d, q) - wq; \quad (1)$$

制造商的利润函数为

$$\pi_m^{BF} = wq - \left(cq + \frac{1}{2} \epsilon e^2 \right) (1+r) - [(e_0 - e)q - G] p_e. \quad (2)$$

式(2)右边第1部分表示制造商销售产品获得的收益, 第2部分表示需要偿还给银行的本息和, 第3部分表示进行碳交易获得的收益. 为保证制造商和零售商都有利可图且解可行, 应满足条件 $c(1+r) + e_0 p_e < w < p$ 和 $e < e_0$. 因此碳交易价格 p_e 应满足 $p_e < \frac{p - c(1+r)}{e_0}$ 且减排投资成本系数 ϵ 应满足

$$\epsilon > \epsilon_{BF} = \max \left(\frac{k(np_e + kp)}{n(1+r)}, \frac{p_e(np_e + kp)}{p(1+r)}, \frac{[kpe_0 + np - nc(1+r)](np_e + kp)}{2npe_0(1+r)} \right).$$

这种模型设置是合理且符合实际的, 它表明碳交易市场中的碳交易价格不能太高, 且制造商进行单位产品的碳减排投资成本不会太低.

采用逆向求解法求解BF方式下供应链中成员的融资均衡, 得到如下命题.

命题1 在BF方式下, 有

$$q_{BF}^* = \frac{n^2 \epsilon (1+r)[c(1+r) + e_0 p_e - p]}{(np_e + kp)^2 - 2np\epsilon(1+r)},$$

$$w_{BF}^* = \frac{1}{(np_e + kp)^2 - 2np\epsilon(1+r)} \cdot \{ p(np_e + kp)[np_e + kc(1+r) + ke_0 p_e] - np\epsilon(1+r)[c(1+r) + e_0 p_e + p] \},$$

$$e_{BF}^* = \frac{n(np_e + kp)[c(1+r) + e_0 p_e - p]}{(np_e + kp)^2 - 2np\epsilon(1+r)},$$

$$\pi_r^{BF*} = np[c(1+r) + e_0 p_e - p]^2.$$

$$\frac{[n^2 \epsilon^2 (1+r)^2 - k^2 (np_e + kp)^2]}{2[(np_e + kp)^2 - 2np\epsilon(1+r)]^2},$$

$$\pi_m^{BF*} = p_e G - \frac{[c(1+r) + e_0 p_e - p]^2 n^2 \epsilon (1+r)}{2[(np_e + kp)^2 - 2np\epsilon(1+r)]}.$$

2.2 提前支付折扣融资(APD)方式

在APD方式下, 制造商要求零售商提前支付全部货款来满足其生产需要, 同时制造商也给予零售商批发价格折扣作为回报, 设折扣率为 $\lambda(0 < \lambda < 1)$.

零售商的利润函数为

$$\pi_r^{APD} = p \min(d, q) - (1-\lambda)wq; \quad (3)$$

制造商的利润函数为

$$\pi_m^{APD} = (1-\lambda)wq - \left(cq + \frac{1}{2} \epsilon e^2 \right) - [(e_0 - e)q - G] p_e. \quad (4)$$

为保证制造商和零售商都有利可图且解可行, 应满足条件 $c + e_0 p_e < (1-\lambda)w < p$ 和 $e < e_0$. 因此碳交易价格 p_e 应满足 $p_e < \frac{p - c}{e_0}$, 减排投资成本系数 ϵ 应满足

$$\epsilon > \epsilon_{APD} = \max \left(\frac{k(np_e + kp)}{n}, \frac{p_e(np_e + kp)}{p}, \frac{(np_e + kp)(kpe_0 + np - nc)}{2npe_0} \right).$$

采用逆向求解法求解APD方式下供应链中成员的融资均衡, 得到如下命题.

命题2 在APD方式下, 有

$$q_{APD}^* = \frac{n^2 \epsilon (c + e_0 p_e - p)}{(np_e + kp)^2 - 2np\epsilon},$$

$$w_{APD}^* = \frac{p[(np_e + kp)(np_e + kc + ke_0 p_e) - n\epsilon(c + e_0 p_e + p)]}{(1-\lambda)[(np_e + kp)^2 - 2np\epsilon]},$$

$$e_{APD}^* = \frac{n(np_e + kp)(c + e_0 p_e - p)}{(np_e + kp)^2 - 2np\epsilon},$$

$$\pi_r^{APD*} = \frac{np[n^2 \epsilon^2 - k^2 (np_e + kp)^2]}{2[(np_e + kp)^2 - 2np\epsilon]^2} \cdot (c + e_0 p_e - p)^2,$$

$$\pi_m^{APD*} = p_e G - \frac{(c + e_0 p_e - p)^2 n^2 \epsilon}{2[(np_e + kp)^2 - 2np\epsilon]}$$

2.3 提前支付回购融资(APB)方式

在APB方式下,制造商要求零售商提前支付全部货款来满足其生产需要,同时在销售期末,制造商与零售商核实剩余产品数量后,以回购价格 b ($0 < b < c + e_0 p_e$) 回购未销售的产品.

零售商的利润函数为

$$\pi_r^{APB} = p \min(d, q) - wq + b \max(q - d, 0); \quad (5)$$

制造商的利润函数为

$$\pi_m^{APB} = wq - \left(cq + \frac{1}{2}\epsilon e^2\right) - [(e_0 - e)q - G]p_e - b \max(q - d, 0). \quad (6)$$

为保证制造商和零售商都有利可图且解可行,应满足条件 $b < c + e_0 p_e < w < p$ 和 $e < e_0$. 因此碳交易价格 p_e 应满足 $\max\left(\frac{b-c}{e_0}, 0\right) < p_e < \frac{p-c}{e_0}$, 减排投资成本系数 ϵ 应满足

$$\begin{aligned} \epsilon > \epsilon_{APB} = & \\ \max\left(\frac{k[np_e + k(p-b)]}{n}, \frac{p_e[np_e + k(p+b)]}{p}\right), & \\ \frac{1}{n e_0(2p-b)}[(np_e + kp)(kpe_0 + np - nc) - & \\ k^2 b e_0(2p-b)] & \end{aligned}$$

采用逆向求解法求解APB方式下供应链中成员的融资均衡,得到如下命题.

命题3 在APB方式下,有

$$\begin{aligned} q_{APB}^* &= n(c + e_0 p_e - p) \frac{(k^2 b + n\epsilon)}{C}, \\ w_{APB}^* &= \{(c + e_0 p_e)k^2(p-b)^2 + kp_e A + np_e^2 B - \\ & \quad n\epsilon[p(c+p+e_0 p_e) - b(c+e_0 p_e)]\} \frac{1}{C}, \\ e_{APB}^* &= \frac{n(np_e + kp)(c + e_0 p_e - p)}{C}, \\ \pi_r^{APB*} &= \frac{n(b-p)}{2C^2}(c + e_0 p_e - p)^2 [knp_e + \\ & \quad k^2(p-b) - n\epsilon][knp_e + k^2(p+b) + n\epsilon], \\ \pi_m^{APB*} &= p_e G - \frac{n(c + e_0 p_e - p)^2 (k^2 b + n\epsilon)}{2C}. \end{aligned}$$

其中: $A = nb(p-c) + np(p+c)$, $B = np + ke_0(p-b)$, $C = n^2 p_e^2 + 2np_e kp + k^2(p-b)^2 + n\epsilon(b-2p)$.

3 均衡分析

为保证3种融资方式具有可比性,本节基于 $\max\left(\frac{b-c}{e_0}, 0\right) < p_e < \frac{p-c(1+r)}{e_0}$ 且 $\epsilon > \max(\epsilon_{BF},$

$\epsilon_{APD}, \epsilon_{APB})$ 进行分析.

推论1 1) $\frac{\partial e_i^*}{\partial \epsilon} < 0$. 2) $\frac{\partial q_i^*}{\partial \epsilon} < 0$. 3) 当 $p_e > p_1^i$ 时, $\frac{\partial w_i^*}{\partial \epsilon} > 0$; 当 $p_e < p_1^i$ 时, $\frac{\partial w_i^*}{\partial \epsilon} < 0$. 4) $\frac{\partial \pi_m^{i*}}{\partial \epsilon} < 0$. 5) 当 $p_e > p_2^i$ 时, $\frac{\partial \pi_r^{i*}}{\partial \epsilon} < 0$; 当 $p_e < p_2^i$ 时, 如果 $\epsilon > \epsilon_1^i > \epsilon_i$, 则 $\frac{\partial \pi_r^{i*}}{\partial \epsilon} < 0$, 如果 $\epsilon_i < \epsilon < \epsilon_1^i$, 则 $\frac{\partial \pi_r^{i*}}{\partial \epsilon} > 0$. 其中

$$\begin{aligned} p_1^i &= \begin{cases} \frac{kp}{n}, & i \in \{BF, APD\}; \\ \frac{k(p-b)}{n}, & i = APB. \end{cases} \\ \epsilon_1^i &= \begin{cases} \frac{2k^2 p}{n(1+r)}, & i = BF; \\ \frac{2k^2 p}{n}, & i = APD; \\ \frac{2k^2(p-b)}{n}, & i = APB. \end{cases} \\ p_2^i &= \begin{cases} \frac{kp[n(c+cr-p) + 3kpe_0]}{n[p(n+ke_0) - nc(1+r)]}, & i = BF; \\ \frac{kp[n(c-p) + 3kpe_0]}{n[p(n+ke_0) - nc]}, & i = APD; \\ \frac{k[np(c-p) + ke_0(3p-b)(p-b)]}{n[p(n+ke_0) - nc]}, & i = APB. \end{cases} \end{aligned}$$

证明 当 $i = BF$ 时, 有

$$\begin{aligned} 1) \frac{\partial e_{BF}^*}{\partial \epsilon} &= \frac{2n^2 p(1+r)(np_e + kp)}{[(np_e + kp)^2 - 2np\epsilon(1+r)]^2} \cdot [c(1+r) + e_0 p_e - p] < 0. \\ 2) \frac{\partial q_{BF}^*}{\partial \epsilon} &= \frac{n^2(1+r)[c(1+r) + e_0 p_e - p]}{[(np_e + kp)^2 - 2np\epsilon(1+r)]^2} \cdot (np_e + kp)^2 < 0. \\ 3) \frac{\partial w_{BF}^*}{\partial \epsilon} &= \frac{-np(1+r)[c(1+r) + e_0 p_e - p]}{[(np_e + kp)^2 - 2np\epsilon(1+r)]^2} \cdot (np_e + kp)(np_e - kp). \text{ 当 } p_e > \frac{kp}{n} \text{ 时, } \frac{\partial w_{BF}^*}{\partial \epsilon} > 0; \\ & \text{ 当 } p_e < \frac{kp}{n} \text{ 时, } \frac{\partial w_{BF}^*}{\partial \epsilon} < 0. \\ 4) \frac{\partial \pi_m^{BF*}}{\partial \epsilon} &= \frac{-n^2(1+r)[c(1+r) + e_0 p_e - p]^2}{2[(np_e + kp)^2 - 2np\epsilon(1+r)]^2} \cdot (np_e + kp)^2 < 0. \\ 5) \frac{\partial \pi_r^{BF*}}{\partial \epsilon} &= \frac{n^2 p(1+r)[c(1+r) + e_0 p_e - p]^2}{[(np_e + kp)^2 - 2np\epsilon(1+r)]^3} \cdot (np_e + kp)^2 [n\epsilon(1+r) - 2k^2 p]. \text{ 当 } p_e > \frac{2k^2 p}{n[p(n+ke_0) - nc(1+r)]} \text{ 时, 有 } \epsilon > \frac{2k^2 p}{n(1+r)} > \epsilon_1 \text{ 恒成立, 此时有 } \frac{\partial \pi_r^{BF*}}{\partial \epsilon} < 0; \text{ 当 } p_e < \frac{2k^2 p}{n(1+r)} \text{ 时, 若 } \epsilon_{BF} < \epsilon < \frac{2k^2 p}{n(1+r)}, \text{ 则 } \frac{\partial \pi_r^{BF*}}{\partial \epsilon} > 0, \text{ 若 } \epsilon > \frac{2k^2 p}{n(1+r)}, \text{ 则 } \frac{\partial \pi_r^{BF*}}{\partial \epsilon} < 0. \end{aligned}$$

当 $i = APD$ 或 $i = APB$ 时, 证明过程与 $i = BF$ 类似, 故略. \square

推论 1 的 1) 和 2) 表明在 3 种融资方式下, 制造商的最优单位产品碳减排量和零售商的最优订货量随着减排投资成本系数的增加而减少. 这是因为较高的减排成本降低了制造商碳减排的积极性, 因此制造商的单位产品碳减排量减少. 由于碳减排量减少导致市场需求降低, 从而零售商订货量下降.

推论 1 的 3) 表明, 在 3 种融资方式下, 碳减排投资成本系数对制造商最优批发价格的影响与碳交易价格有关. 具体地: 当碳交易价格较高时, 随减排投资成本系数增加, 制造商会提高产品批发价格; 当碳交易价格较低时, 则相反. 这一结果背后的逻辑是制造商在产品销售市场收益与碳排放权交易市场收益之间的权衡. 当碳交易价格较低时, 制造商从产品销售中获得的收益高于交易碳排放权获得的收益, 因此, 为了激励零售商订购更多的产品, 制造商会降低产品的批发价格. 而当碳交易价格较高时, 为了追求更高的碳排放权收益, 制造商会提高产品的批发价格以降低零售商的订货意愿并控制碳排放总量.

推论 1 的 4) 表明, 在 3 种融资方式下, 制造商的利润随减排投资成本系数的增加而降低. 减排成本的增加降低了制造商的减排动力, 导致产品市场需求降低, 零售商订货量减少. 在成本增加和订货量减少的双重作用下, 制造商的利润减少.

推论 1 的 5) 表明, 在 3 种融资方式下, 碳减排投资成本系数对零售商最优利润的影响与碳交易价格有关. 具体地: 当碳交易价格较高时, 零售商的利润随减排投资成本系数的增加而降低; 当碳交易价格较低时, 零售商的利润随减排投资成本系数的增加先增加后减少. 这是因为当碳交易价格较高时, 产品批发价格较高, 而减排投资成本系数的增加又减少了制造商单位产品的碳减排量, 导致市场需求减少, 故而零售商利润降低. 当碳交易价格较低时, 随着减排投资成本系数的增加, 制造商会降低批发价格, 零售商销售单位产品的利润增加, 然而随着减排投资成本系数进一步增加并超过一定阈值后, 极少的单位产品碳减排量导致市场需求极度低迷, 进而零售商的利润减少.

命题 4 1) $e_{APD}^* > e_{BF}^*, e_{APB}^* > e_{BF}^*$.

2) 当 $p_e > \frac{kp[np(c-p) - ke_0(2b-3p)]}{n[p(n+ke_0) - nc]}$ 时, $e_{APD}^* < e_{APB}^*$; 当 $p_e < \frac{kp[np(c-p) - ke_0(2b-3p)]}{n[p(n+ke_0) - nc]}$ 时, 如果 $\epsilon > \frac{k^2(2p-b)}{n}$, 则 $e_{APD}^* < e_{APB}^*$, 如果 $\epsilon < \frac{k^2(2p-b)}{n}$, 则 $e_{APD}^* > e_{APB}^*$.

证明 1) 有

$$e_{APD}^* - e_{BF}^* = \frac{2np\epsilon(p - e_0p_e) - c(np_e + kp)^2}{(np_e + kp)^2 - 2np\epsilon(1+r)} - \frac{nr(np_e + kp)}{(np_e + kp)^2 - 2np\epsilon}$$

因为 $\epsilon > \frac{c(np_e + kp)^2}{2np(p - e_0p_e)}$, 所以 $e_{APD}^* > e_{BF}^*$. 同理可证 $e_{APB}^* > e_{BF}^*$.

2) 有

$$e_{APD}^* - e_{APB}^* = (c + e_0p_e - p) \cdot \frac{nb(np_e + kp)[n\epsilon - k^2(2p-b)]}{[(np_e + kp)^2 - 2np\epsilon]C}$$

当 $p_e > \frac{kp[np(c-p) - ke_0(2b-3p)]}{n[p(n+ke_0) - nc]}$ 时, $\epsilon > \frac{k^2(2p-b)}{n}$ 恒成立, 此时 $e_{APD}^* < e_{APB}^*$.

当 $p_e < \frac{kp[np(c-p) - ke_0(2b-3p)]}{n[p(n+ke_0) - nc]}$ 时: 如果 $\max(\epsilon_{APB}, \epsilon_{APD}) < \epsilon < \frac{k^2(2p-b)}{n}$, 则 $e_{APD}^* > e_{APB}^*$; 如果 $\epsilon > \frac{k^2(2p-b)}{n}$, 则 $e_{APD}^* < e_{APB}^*$. \square

命题 4 的 1) 表明, 提前支付融资方式下制造商的最优单位产品碳减排量总是高于 BF 方式. 这是因为与 BF 方式相比, 提前支付具有更高的供应链协作能力, 因而能够更好地增强制造商进行碳减排投资的意愿. 命题 4 的 2) 表明制造商的单位产品碳减排量在 APD 方式和 APB 方式间的大小关系依赖于碳交易价格和减排投资成本系数. 当碳交易价格或减排投资成本系数较高时, APB 方式更能激励制造商提高单位产品碳减排量, 而当碳交易价格和减排投资成本系数都较低时, APD 方式下制造商的最优单位产品碳减排量更高.

命题 5 $q_{APB}^* > q_{APD}^* > q_{BF}^*$.

证明 易知: 当 $r = 0$ 时, $q_{APD}^* = q_{BF}^*$; 当 $b = 0$ 时, $q_{APD}^* = q_{APB}^*$. 又

$$\frac{d(q_{APD}^* - q_{BF}^*)}{dr} = n^2\epsilon \frac{[p - e_0p_e - c(1+r)](np_e + kp)^2}{[(np_e + kp)^2 - 2np\epsilon(1+r)]^2} - n^2\epsilon \frac{c(1+r)[(np_e + kp)^2 - 2np\epsilon(1+r)]}{[(np_e + kp)^2 - 2np\epsilon(1+r)]^2} > 0,$$

$$\frac{d(q_{APD}^* - q_{APB}^*)}{db} = -\frac{n(c + e_0p_e - p)}{C^2} [np_ek + k^2(p-b) - n\epsilon][np_ek + k^2(p+b) + n\epsilon] < 0.$$

故当 $r > 0$ 时, $q_{APD}^* > q_{BF}^*$; 当 $b > 0$ 时, $q_{APB}^* >$

q_{APD}^* . □

命题5表明,提前支付融资方式下零售商的最优订货量总是高于BF方式,且APB方式下的订货量最高.由命题4的1)可得,提前支付下制造商的单位产品碳减排量总是高于BF方式,从而提前支付方式下的市场需求更高,零售商的订货量更高.进一步地,由于APD方式和APB方式会对零售商产生不同的订货激励作用,零售商的订货量在两种融资方式下存在差异.具体而言,在APB方式下,制造商向零售商承诺在销售期末回购其未售出的产品,这降低了零售商的库存积压风险,从某种意义上实现了供应链的风险共担.与APD方式下零售商获得的批发价格折扣相比,回购对零售商的订货激励作用更显著.

命题6 $\pi_m^{APB*} > \pi_m^{APD*} > \pi_m^{BF*}$.

证明 易知:当 $r = 0$ 时, $\pi_m^{APD*} = \pi_m^{BF*}$; 当 $b = 0$ 时, $\pi_m^{APB*} = \pi_m^{APD*}$. 又

$$\frac{d(\pi_m^{APD*} - \pi_m^{BF*})}{dr} = \frac{n^2\epsilon[c(1+r) + e_0p_e - p]}{2[(np_e + kp)^2 - 2np\epsilon(1+r)]^2} \cdot \{[c(1+r) + e_0p_e - p](np_e + kp)^2 + 2c(1+r) \cdot [(np_e + kp)^2 - 2np\epsilon(1+r)]\} > 0,$$

$$\frac{d(\pi_m^{APD*} - \pi_m^{APB*})}{db} = \frac{n(c + e_0p_e - p)}{2C^2} [np_ek + k^2(p - b) - n\epsilon] \cdot [np_ek + k^2(p + b) + n\epsilon] < 0.$$

故当 $r > 0$ 时, $\pi_m^{APD*} > \pi_m^{BF*}$; 当 $b > 0$ 时, $\pi_m^{APB*} > \pi_m^{APD*}$. □

命题6表明,制造商的利润在提前支付融资方式下总是高于BF方式,且制造商在APB方式下的利润最高.这是因为,与APD方式和APB方式相比,BF方式下制造商的单位产品碳减排数量最少,市场需求最低,零售商订货量最少,因此制造商获利最低.而在APB方式下,相对于APD方式,较高的碳减排水平吸引了更多的低碳偏好型消费者,极大地刺激了市场需求,进而导致零售商订货量增加.最终,制造商从产品订单中获得的收益远远超过其回购成本,因此制造商在APB方式下获利最高.

4 数值分析

本节通过数值实验分析3种融资方式下碳减排投资成本系数 ϵ 对最优单位产品碳减排量、最优订货量和制造商最优利润的影响.设定参数 $G = 100, n = 100, e_0 = 1.5, c = 100, r = 0.05, d = 0.1, b = 10, k =$

$15, p = 200$, 结果如图1~图3所示.

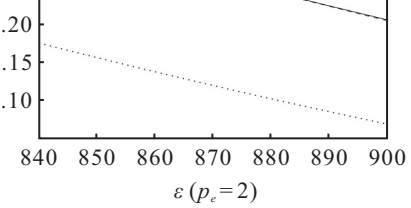
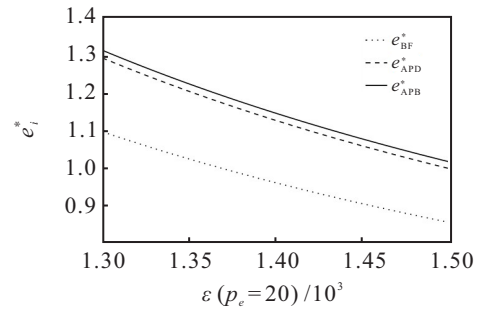


图1 不同融资方式下 e_i^* 的比较

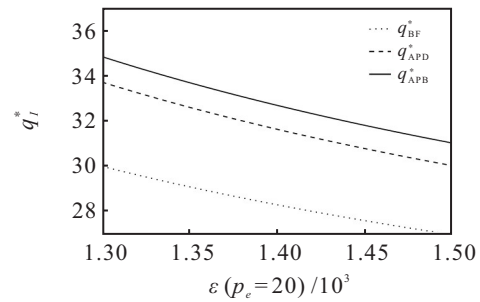


图2 不同融资方式下 q_i^* 的比较

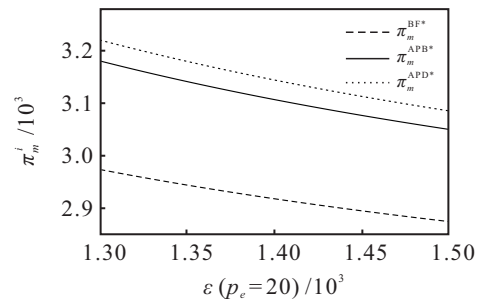


图3 不同融资方式下 π_m^{i*} 的比较

从图1中可以看到,提前支付下制造商最优单位产品碳减排量总是高于BF方式.当 p_e 较高或 ϵ 较高时,APB方式下制造商最优单位产品碳减排量最高,产品更加绿色低碳.当 p_e 和 ϵ 都较低时,APD方式下制造商最优单位产品碳减排量最高.

从图2中可以看到,零售商的订货量在APB方式下最高,在BF方式下最低.

从图3中可以看到,制造商在提前支付下获得的利润总是高于BF方式下获得的利润,且在APB方式下获得的利润最高.这与命题4~命题6一致.

上述结果说明,在碳限额与交易机制下,对有

资金约束的制造商而言,内部融资总是优于外部融资.而且从环境的角度考虑,内部融资总是能实现更高的碳减排目标.因此,制造商应通过内部融资解决资金问题,促进供应链内部的资本运作和环境目标的实现.

5 结论

本文在碳限额与交易机制和消费者对低碳产品存在偏好的背景下,考虑资金约束的制造商和资金充足的零售商组成的二级供应链,针对银行贷款(BF)、提前支付折扣(APD)和提前支付回购(APB)3种融资方式,分别求得不同融资方式下制造商的最优批发价格与单位产品碳减排量、零售商的最优订货量和二者的最优利润.通过比较和分析均衡结果,得到了制造商的融资策略,并给出了相应的管理启示.

研究表明,在3种融资方式下,减排投资成本系数的增加导致制造商的最优单位产品碳减排量、零售商的最优订货量和制造商的最优利润减少,而其对制造商的最优批发价格和零售商的最优利润的影响与碳交易价格有关.具体而言:当碳交易价格较高时,随着减排投资成本系数的增加,制造商的最优批发价格增加,零售商的最优利润减少;当碳交易价格较低时,随着减排投资成本系数的增加,制造商的最优批发价格减少,零售商的最优利润先增加后减少.

制造商的最优单位产品碳减排量和利润在提前支付下总是高于BF方式.当碳交易价格较高或减排投资成本系数较大时,APB方式下制造商的最优单位产品碳减排量最高;否则,APD方式下制造商的最优单位产品碳减排量最高.APB方式对零售商的订货激励最显著,在该融资方式下零售商的订货量最多,制造商获得的利润最高.

本文的管理启示如下:在碳限额与交易机制下,供应链企业在投资减排技术之前,应该根据实际情况全面考虑减排成本与碳交易价格,仔细权衡产品销售带来的收益和碳排放权交易带来的收益,以确保资金使用的合理性和利润目标的实现.无论哪种融资方式,随着碳减排投资系数的增大,制造商应该减少单位产品的碳减排量来控制减排成本.当碳交易价格较高时,制造商应重点关注碳排放权交易市场而不是产品销售市场,提高产品的批发价格来减少零售商的订货量,进而在碳交易市场获得更多的利润.当碳交易价格较低时,制造商应该重点关注产品销售市场,降低产品的批发价格来刺激零售商订货.而对于零售商,为了应对制造商碳减排量减少而导致的市场需

求降低,应该减少订货量.此外,从环境和制造商的盈利性角度,提前支付融资总是优于银行贷款.进一步地,提前支付回购融资方式能在一定意义上实现供应链企业之间的风险共担,作为供应链主导者的制造商应该通过制定并实施合适的回购条款有效地激励下游零售商,实现自己的利润目标.

本文存在一定的局限性.首先,本文假设制造商和零售商都是风险中性的,且信息是完全对称的.在实践中,企业间信息不对称广泛存在,不同的企业有不同的风险态度;其次,本文研究基于单一的融资模型,混合融资模型或创新融资模型(文献[21])值得深入探讨.

参考文献(References)

- [1] 杨光勇, 计国君. 碳排放规制与顾客环保意识对绿色创新的影响[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(3): 702-712.
(Yang G Y, Ji G J. Impacts of carbon emission regulation and consumer environmental consciousness on green innovation[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2021, 41(3): 702-712.)
- [2] Zhu W G, He Y J. Green product design in supply chains under competition[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 258(1): 165-180.
- [3] Dong G S, Liang L, Wei L H, et al. Optimization model of trade credit and asset-based securitization financing in carbon emission reduction supply chain[J]. Annals of Operations Research, 2021: 1-50.
- [4] 杨惠霄, 欧锦文. 收入共享与谈判权力对供应链碳减排决策的影响[J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40(9): 2379-2390.
(Yang H X, Ou J W. The effect of revenue sharing and bargaining power on carbon emission reduction in a supply chain[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2020, 40(9): 2379-2390.)
- [5] 李超, 骆建文. 基于预付款的资金约束供应链收益共享协调机制[J]. 管理学报, 2016, 13(5): 763-771.
(Li C, Luo J W. Revenue-sharing coordination mechanism for a financial constrained supply chain based on advance payment[J]. Chinese Journal of Management, 2016, 13(5): 763-771.)
- [6] 代建生, 牛清洁. 资金约束零售商订购、促销与融资协同决策分析[J]. 系统工程学报, 2021, 36(2): 171-189.
(Dai J S, Niu Q J. Joint decision-making of a capital-constrained retailer on ordering, promotion and financing[J]. Journal of Systems Engineering, 2021, 36(2): 171-189.)
- [7] Drake D F, Kleindorfer P R, van Wassenhove L N. Technology choice and capacity portfolios under

- emissions regulation[J]. *Production and Operations Management*, 2016, 25(6): 1006-1025.
- [8] Cao K Y, Xu X P, Wu Q, et al. Optimal production and carbon emission reduction level under cap-and-trade and low carbon subsidy policies[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 167: 505-513.
- [9] Xia L J, Guo T T, Qin J J, et al. Carbon emission reduction and pricing policies of a supply chain considering reciprocal preferences in cap-and-trade system[J]. *Annals of Operations Research*, 2018, 268(1/2): 149-175.
- [10] Ghosh S K, Seikh M R, Chakraborty M. Analyzing a stochastic dual-channel supply chain under consumers' low carbon preferences and cap-and-trade regulation[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 149: 106765.
- [11] 陈晓红, 曾祥宇, 王傅强. 碳限额交易机制下碳交易价格对供应链碳排放的影响[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(10): 2562-2571.
(Chen X H, Zeng X Y, Wang F Q. Impacts of carbon trading price on carbon emission in supply chain under the cap-and-trade system[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2016, 36(10): 2562-2571.)
- [12] 郭军华, 孙林洋, 张诚, 等. 碳限额交易政策下双寡头企业碳减排决策的演化博弈分析[J]. *软科学*, 2019, 33(3): 54-60.
(Guo J H, Sun L Y, Zhang C, et al. Evolutionary game analysis of duopoly enterprise's emission reduction decision under cap-and-trade mechanism[J]. *Soft Science*, 2019, 33(3): 54-60.)
- [13] 陈祥锋, 朱道立, 应雯珺. 资金约束与供应链中的融资和运营综合决策研究[J]. *管理科学学报*, 2008, 11(3): 70-77.
(Chen X F, Zhu D L, Ying W J. Financial and operation decisions in budget-constrained supply chain[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2008, 11(3): 70-77.)
- [14] 王文利, 骆建文. 基于价格折扣的供应链预付款融资策略研究[J]. *管理科学学报*, 2014, 17(11): 20-32.
(Wang W L, Luo J W. Advance payment financing strategies of supply chains based on price discount[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2014, 17(11): 20-32.)
- [15] 李波, 王敏学, 安思敏. 低碳努力下资金约束供应链的融资选择策略研究[J]. *管理工程学报*, 2021, 35(2): 211-220.
(Li B, Wang M X, An S M. Research on financing selection strategies in a capital-constrained supply chain under low carbon effort[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2021, 35(2): 211-220.)
- [16] Xia T S, Wang Y Y, Lv L X, et al. Financing decisions of low-carbon supply chain under chain-to-chain competition[J]. *International Journal of Production Research*, 2022: 1-24.
- [17] Yu Y G, Li X, Xu X P. Reselling or marketplace mode for an online platform: The choice between cap-and-trade and carbon tax regulation[J]. *Annals of Operations Research*, 2022, 310(1): 293-329.
- [18] Cao E B, Du L X, Ruan J H. Financing preferences and performance for an emission-dependent supply chain: Supplier vs. bank[J]. *International Journal of Production Economics*, 2019, 208: 383-399.
- [19] Tang R H, Yang L. Impacts of financing mechanism and power structure on supply chains under cap-and-trade regulation[J]. *Transportation Research — Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, 139: 101957.
- [20] Dash Wu D, Yang L P, Olson D L. Green supply chain management under capital constraint[J]. *International Journal of Production Economics*, 2019, 215: 3-10.
- [21] Bi C, Zhang B F, Yang F, et al. Selling to the newsvendor through debt-shared bank financing[J]. *European Journal of Operational Research*, 2022, 296(1): 116-130.

作者简介

张川(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 从事供应链金融、大数据管理决策等研究, E-mail: czhang@mail.neu.edu.cn;

马慧敏(1996—), 女, 博士生, 从事平台经济、共享经济等研究, E-mail: sxy_mhm@163.com;

郭振(1994—), 男, 硕士, 从事供应链金融的研究, E-mail: 510635061@qq.com.