

碳交易政策下资金约束制造商的低碳供应链融资与运营决策

李 朋

江西理工大学经济管理学院, 江西 赣州

收稿日期: 2026年6月15日; 录用日期: 2026年7月7日; 发布日期: 2026年7月20日

摘 要

从供应链管理工程视角出发, 本文建立由一个资金约束的制造商和一个资金宽裕的零售商构成的低碳供应链融资决策模型, 运用Stackelberg博弈方法, 针对提前支付、股权融资及银行融资三种融资方式, 考虑碳交易价格和碳减排成本系数, 探究低碳产品市场需求量、单位碳减排量和供应链成员利润最优时, 制造商该选择何种融资策略。结果表明: (1) 不论选择何种融资模式, 低碳产品市场需求量与碳交易价格之间呈现“U”型曲线关系, 单位碳减排量、制造商利润与碳交易价格正相关; 碳减排成本系数的提高将会降低低碳产品市场需求量、单位碳减排量和供应链成员利润。(2) 低碳产品市场需求量、单位碳减排量最优时, 制造商应选择股权融资模式, 且供应链成员的利润与各自股权占比正相关; (3) 制造商利润同时受融资利率和碳交易价格的影响, 当提前支付利率不高于银行利率时, 制造商应采用提前支付模式; 否则, 若碳交易价格较低, 制造商应采用提前支付模式, 若碳交易价格较高, 制造商应采用银行融资模式。该研究为资金约束下的低碳供应链运作与融资协同管理提供了工程决策支持。

关键词

供应链决策, 融资与运营策略, 工程经济分析, 碳交易政策, Stackelberg博弈

Funding and Operational Decisions for Low-Carbon Supply Chains of Capital-Constrained Manufacturers under Carbon Trading Policies

Peng Li

School of Economics and Management, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi

Received: June 15, 2026; accepted: July 7, 2026; published: July 20, 2026

Abstract

From the perspective of supply chain management engineering, this study establishes a low-carbon supply chain financing decision model consisting of a capital-constrained manufacturer and a well-capitalized retailer. Using the Stackelberg game approach, it examines three financing methods—advance payment, equity financing, and bank financing—considering carbon trading prices and carbon reduction cost coefficients, to determine which financing strategy the manufacturer should adopt to optimize low-carbon product market demand, unit carbon reduction, and supply chain members' profits. The results show: (1) Regardless of the financing mode chosen, the relationship between low-carbon product market demand and carbon trading price follows a “U”-shaped curve; unit carbon reduction and manufacturer profit are positively correlated with carbon trading price; however, an increase in the carbon reduction cost coefficient reduces low-carbon product market demand, unit carbon reduction, and supply chain members' profits. (2) When low-carbon product market demand and unit carbon reduction are maximized, the manufacturer should choose equity financing, and each member's profit is positively related to their respective equity share. (3) Manufacturer profit is influenced by both financing interest rates and carbon trading prices. If the advance payment rate does not exceed the bank interest rate, the manufacturer should opt for advance payment; otherwise, if carbon trading prices are low, advance payment is preferable, whereas if carbon trading prices are high, bank financing is more favorable. This research provides engineering decision support for integrated operations and financing management in capital-constrained low-carbon supply chains.

Keywords

Supply Chain Decision-Making, Financing and Operational Strategies, Engineering Economic Analysis, Carbon Trading Policies, Stackelberg Game

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

2021年7月,我国正式启动碳交易市场,政府对企业设定碳排放配额,当企业生产过程中产生的碳排放总额超出或低于配额上限时,可通过碳交易市场进行碳排放额度交易活动,这为企业低碳生产提供了政策支持与市场化工具[1]。然而,企业在进行低碳生产的过程中,往往会面临较大的财务负担,为低碳生产带来困难,企业往往会通过内部融资与外部融资两种途径填补低碳生产时的资金缺口[2]。其中,内部融资通常采用提前支付和股权融资两种融资策略,外部融资通常采用银行融资策略,如何选择融资策略,是企业面临的重要问题。为回答以上问题,已有文献已开展大量研究。

与本研究相关的文献可分为两支:第一支是碳交易政策下低碳供应链融资策略。Deng等[3]分析了不同碳减排比例中供应链的融资方案选择,分析结果表明,若实际排放未达限定标准,面对上涨的碳交易价格,制造商往往更偏好零售商融资,但当实际排放超出配额时,随着碳交易价格的升高,制造商则更多选择银行融资。邹清明等[4]在碳交易机制下,分析了低碳供应链的减排与融资策略,结果表明,当银行信贷利率低于贸易信贷的利率时,贸易信贷融资更适合制造商,而当银行信贷利率高于贸易信贷利率时,制造商的融资选择则与初始资金有关。Deng等[5]当考虑碳中和时,研究结果显示,随着碳减排效率

和碳交易价格的提高, 制造商会更倾向于选择零售商融资。Cao 等[6]针对碳交易机制的研究分析了制造商碳减排行为与银行和供应商两种融资方式的关系, 研究表明, 制造商的融资决策独立于碳减排投资。Xu 等[7]对碳交易情境下制造企业绿色信贷策略开展分析, 证实最优融资策略是银行采购贷款与市场减排资金的双轨模式。然而, 上述文献在考虑碳交易政策下低碳供应链融资策略时, 大多仅研究债权融资的利率对制造商的影响, 忽视了股权融资的作用。

第二支是碳交易政策下低碳供应链减排策略。武丹等[8]基于低碳偏好与碳交易的交互研究提出, 供应链在减排方面的努力程度及收益与消费者环保意识正相关, 并论证政府动态更新碳交易制度对企业减排的促进作用。夏良杰等[9]针对碳交易体系下的企业减排决策与定价机制展开研究, 交叉持股被证实能双向提升减排水平与销售规模, 在特定情形下可带动供应链整体利润增长。郭军华等[10]在竞争性制造商背景下, 基于消费者低碳偏好研究了碳交易机制中的定价与协调问题, 认为政府应实施差异化的碳配额政策, 收缩轻度和中间型污染制造商的配额, 放宽重度污染制造商的配额并给予碳减排补贴。赵达等[11]强调, 在碳交易政策背景下, 制造商减排积极性显著增强, 减排成本系数与潜在市场需求的相互作用直接影响最佳交付周期。李飏等[12]证实, 采用碳交易时, 集中决策机制下的碳减排表现更胜分散决策, 在分散决策的框架下, 共同减排模式相较于其他模式能实现更优的减排效果。但是, 上述文献在研究低碳供应链的减排策略时, 以供应链成员有充足的碳减排资金作为研究背景, 忽略了供应链成员低碳生产时的资金问题。

综上所述, 国内外关于碳交易政策下低碳供应链的融资策略和减排策略已有大量研究, 但仍有以下问题: 一是当制造商低碳生产面临资金短缺需要融资时, 现有文献大多聚焦到债权融资方面, 鲜有关注供应链内部企业间的股权融资; 二是鲜少同时考虑碳交易价格和碳减排成本系数, 并分析其对低碳供应链的融资策略影响的研究还比较少。基于此, 本文在碳交易政策背景下, 考虑碳交易价格和碳减排成本系数, 构建提前支付模式、股权融资模式及银行融资模式三种融资模式下的低碳供应链策略模型并求解。与已有文献相比, 本文旨在回答以下问题: (1) 引入股权融资时, 三种融资模式中低碳产品市场需求量、单位碳减排量和供应链成员利润的优劣效果如何? 制造商该选择何种融资模式? (2) 碳交易价格和碳减排成本系数的变化如何影响低碳供应链融资策略?

2. 问题描述与符号说明

本文考虑由一个资金约束的制造商和一个资金宽裕的零售商组成的低碳供应链, 采用 Stackelberg 博弈, 其中制造商为领导角色, 零售商为跟随者。制造商负责生产一种低碳产品, 其单位生产成本为 c , 产品初始单位碳排放量为 e_0 , 单位碳减排水平为 e , 此项投资所引发的碳减排成本为 $\frac{1}{2}ke^2$, k 为碳减排成本系数。低碳产品市场需求函数为 $D = a - bp + \alpha e$ 。其中 $a(a \geq 0)$ 指代市场基本需求, $b(0 \leq b \leq 1)$ 作为价格敏感系数反映消费行为特性, 该模型中 $\alpha(0 \leq \alpha \leq 1)$ 表征消费者低碳偏好。为保障最优解, a 的取值需大于 bp 与 $be_0\mu$ 相加结果, k 的取值需突破 $\alpha + b\mu$ 边界。根据碳交易政策, 目前我国碳市场的交易周期为一年。制造商在年度生产周期结束后, 若其碳排放总量低于政府设定的配额上限, 可基于碳交易价格 μ 卖出多余配额, 相反则需要通过碳交易市场补足配额缺口(见表 1)。

为简化模型, 本文假设[13]:

- (1) 制造商与零售商皆具备风险中性特质;
- (2) 上下游企业间实现信息无差别互通;
- (3) 制造企业零售终端均展现出出色履约信誉, 违约风险几乎为零;
- (4) 股权融资比例等同于股权分红比例;

(5) 产品订购、生产及物流配送等环节的时间延迟不予考虑。

Table 1. Symbol description

表 1. 符号说明

符号	说明
a	市场基本需求
b	价格敏感系数
α	消费者低碳偏好
k	碳减排成本系数
e	单位碳减排量
e_0	初始单位碳排放量
d	自有资金能够生产低碳产品数量
G	政府碳配额
μ	碳交易价格
c	单位生产成本
w	批发价格
p	销售价格
r	提前支付利率
r_b	银行融资利率
π_o^i	供应链成员的利润
S_h	股权比例

$\pi_o^i (i=1,2,3; j=M,R)$ 对应制造商采取 i 融资形式时供应链中 o 的经济收益, o 对应的 M, R 分别对应制造商与零售商, $i=1,2,3$ 分别对应提前支付、股权融资和银行融资模式。 $S_h (h=m, v)$ 分别代表制造商股权占比和零售商股权占比。

3. 模型建立与求解

3.1. 提前支付模式

制造商向零售商的融资规模 $L = cD + \frac{1}{2}ke^2 - cd$, 即低碳生产资金减去自有额度。在制造商主导的 Stackelberg 博弈框架下, 决策顺序如下: 制造商首先确定单位碳减排量 e 与产品批发价格 w ; 在此基础上, 零售商进一步决定产品的销售价格 p , 并采购产品以满足低碳产品市场需求量 D 。年度销售周期结束后, 制造商需按照利率 r 向零售商偿还融资本息。结合前述运作机制, 制造商与零售商在该融资模式下的利润函数可分别界定为:

$$\pi_M^1 = w(a - bp + \alpha e) + [G - (e_0 - e)D]\mu - \left(cD + \frac{1}{2}ke^2 - cd\right)(1 + r) - cd \quad (1)$$

$$\pi_R^1 = (p - w)(a - bp + \alpha e) + \left(cD + \frac{1}{2}ke^2 - cd\right)r \quad (2)$$

在式(1)中, 第一部分是制造商低碳产品销售利润, 第二部分则是参与碳交易产生的收益或成本, 第三部分为低碳生产成本, 最后一部分为自有资金。

命题 1: 在提前支付中, 供应链系统最优策略是:

$$\text{最优单位碳减排量: } e_1 = \frac{(\alpha + b\mu)[-a + b(c + e_0\mu)]}{(\alpha + b\mu)^2 - 4bk(1+r)};$$

$$\begin{aligned} & \alpha^2(c + e_0\mu + cr) + \alpha\mu[a + b(c + e_0\mu + 2cr)] + b^2c\mu^2r \\ \text{最优批发价格: } w_1 = & \frac{-ab\mu^2 - 2ak(1+r) - 2bck(2r^2 + 3r + 1) + 2be_0k\mu(1+r)}{(\alpha + b\mu)^2 - 4bk(1+r)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & b(a + e_0\alpha)\mu^2 + [\alpha(\alpha e_0 + a + bc) - bke_0(1+r)]\mu \\ \text{最优销售价格: } p_1 = & \frac{+\alpha^2c - k(3a + bc)(1+r)}{(\alpha + b\mu)^2 - 4bk(1+r)}; \end{aligned}$$

$$\text{最优低碳产品市场需求量: } D_1 = \frac{bk[b(c + e_0\mu) - a](1+r)}{(\alpha + b\mu)^2 - 4bk(1+r)}。$$

证明: 利用逆向归纳法求解模型, 首先对 π_R^1 求销售价格 p 的二阶导, $\frac{\partial^2 \pi_R^1}{\partial p^2} = -2b < 0$, 因此 π_R^1 为 p

的凹函数且有极大值, 然后令 $\frac{\partial \pi_R^1}{\partial p} = 0$, 可得 $p(1) = \frac{a + \alpha e + bw - bcr}{2b}$, 接着代回式(1), 可得

$$\begin{aligned} & (w + \mu(e - e_0))(a + \alpha e + bcr - bw) \\ \pi_M^1(1) = & -cd + G\mu + \frac{-(1+r)[ac + e^2k + bc^2r + c(-2d + \alpha e - bw)]}{2}; \text{ 其次对 } \pi_M^1(1) \text{ 求批发价 } w \text{ 的二阶导,} \\ \frac{\partial^2 \pi_M^1(1)}{\partial w^2} = & -b < 0, \text{ 证明 } \pi_M^1(1) \text{ 存在极大值, 然后令 } \frac{\partial \pi_M^1(1)}{\partial w} = 0, \text{ 可得 } w(1) = \frac{a + \alpha e + b(c - e\mu + e_0\mu + 2cr)}{2b}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & a^2 + 2\alpha e + \alpha^2 e^2 - 2ab[c + (e_0 - e)\mu] + b^2[c + (e_0 - e)\mu]^2 \\ \text{接着代回 } \pi_M^1(1) \text{ 得 } \pi_M^1(2) = & \frac{-2b[\alpha(c + (e_0 - e)\mu) + 2e^2k(1+r) - 4(G\mu + cdr)]}{8b}; \text{ 接着, 对 } \pi_M^1(2) \text{ 求单} \end{aligned}$$

位碳减排量 e 的二阶导, 可得 $\frac{\partial^2 \pi_M^1(2)}{\partial e^2} = \frac{(\alpha + b\mu)^2}{4b} - k(1+r)$, 所以当 $(\alpha + b\mu)^2 - 4bk(1+r) < 0$ 时, $\pi_M^1(2)$

有极大值, 随后令 $\frac{\partial \pi_M^1(2)}{\partial e} = 0$, 得 $e = \frac{(\alpha + b\mu)[-a + b(c + e_0\mu)]}{(\alpha + b\mu)^2 - 4bk(1+r)}$, 最后把 e 分别代回各项式, 依次可得

w_1 、 p_1 、 D_1 。

推论 1:

$$\begin{aligned} & (1) \frac{\partial D_1}{\partial r} < 0; (2) 0 < \mu < \mu_1, \frac{\partial D_1}{\partial \mu} < 0, \mu_1 < \mu < \mu_2, \frac{\partial D_1}{\partial \mu} > 0; (3) \frac{\partial D_1}{\partial k} < 0; (4) \frac{\partial e_1}{\partial r} < 0; (5) \frac{\partial e_1}{\partial \mu} > 0; \\ & (6) \frac{\partial e_1}{\partial k} < 0。 \end{aligned}$$

$$\text{其中, } \mu_1 = \frac{a + e_0\alpha - bc - \sqrt{(bc - a - e_0\alpha)^2 - 4e_0^2bk(1+r)}}{be_0} - \frac{\alpha}{b}, \quad \mu_2 = \frac{\sqrt{4bk(1+r)} - \alpha}{b}。$$

$$\text{证明: } \frac{\partial D_1}{\partial r} = \frac{bk[b(c+e_0\mu)-a](\alpha+b\mu)^2}{[(\alpha+b\mu)^2-4bk(1+r)]^2} < 0;$$

$$\text{当 } 0 < \mu < \mu_1 \text{ 时, } \frac{\partial D_1}{\partial \mu} = -\frac{b^2k(1+r)[e_0(\alpha+b\mu)^2+2(\alpha+b\mu)(bc-a-e_0\alpha)+4e_0bk(1+r)]}{[(\alpha+b\mu)^2-4bk(1+r)]^2} < 0,$$

$$\text{当 } \mu_1 < \mu < \mu_2 \text{ 时, } \frac{\partial D_1}{\partial \mu} = -\frac{b^2k(1+r)[e_0(\alpha+b\mu)^2+2(\alpha+b\mu)(bc-a-e_0\alpha)+4e_0bk(1+r)]}{[(\alpha+b\mu)^2-4bk(1+r)]^2} > 0;$$

$$\frac{\partial D_1}{\partial k} = \frac{b[b(c+e_0\mu)-a](1+r)(\alpha+b\mu)^2}{[(\alpha+b\mu)^2-4bk(1+r)]^2} < 0;$$

$$\frac{\partial e_1}{\partial r} = \frac{4bk[b(c+e_0\mu)-a](\alpha+b\mu)}{[(\alpha+b\mu)^2-4bk(1+r)]^2} < 0;$$

$$\frac{\partial e_1}{\partial \mu} = \frac{b[-a+bc+2be_0\mu+\alpha e_0][(1+r)(\alpha+b\mu)^2-4bk(1+r)]-2(\alpha+b\mu)^2(b(c+e_0\mu)-a)}{[(\alpha+b\mu)^2-4bk(1+r)]^2} > 0;$$

$$\frac{\partial e_1}{\partial k} = \frac{4b[b(c+e_0\mu)-a](1+r)(\alpha+b\mu)}{[(\alpha+b\mu)^2-4bk(1+r)]^2} < 0。$$

推论 1 表明, 当提前支付利率升高时, 会同时降低最优单位碳减排量和最优低碳产品市场需求量。碳交易价格的提高将鼓励制造商进行低碳生产, 但并不会持续增加最优低碳产品市场需求量, 而是存在一个临界值。若碳交易价格低于该临界值, 最优低碳产品市场需求量随碳交易价格的提高呈现递减趋势; 若碳交易成本突破该临界值, 最优低碳产品市场需求量随碳交易价格的提高而扩大。碳减排成本系数与最优单位碳减排量和最优低碳产品市场需求量均呈负相关。

通过命题 1 可知, 制造商和零售商的最优利润分别为:

$$\pi_M^1 = \frac{[2abk(c+e_0\mu)-a^2k](1+r)+2\alpha^2(G\mu+cdr)+4b(G\mu+cdr)(\alpha\mu-2k(1+r))-b^2[c^2k(1+r)+2c\mu(-d\mu r+e_0k(1+r))+\mu^2(-2G\mu+e_0^2k(1+r))]}{2[(\alpha+b\mu)^2-4bk(1+r)]}$$

$$\pi_R^1 = -cdr + \frac{k(a-b(c+e_0\mu))^2(r(\alpha+b\mu)^2+2bk(1+r))^2}{2[(\alpha+b\mu)^2-4bk(1+r)]^2}$$

3.2. 股权融资模式

制造商向零售商的融资额度 $L = cD + \frac{1}{2}ke^2 - cd$, 制造商股权占比 $S_m = \frac{cd}{L+cd} = \frac{cd}{cD + \frac{1}{2}ke^2}$, 零售商股

权占比 $S_v = 1 - S_m$ 。在年度销售周期结束后, 制造商根据零售商股权占比 S_v , 将其部分经营收益作为投资回报支付给零售商。此时, 制造商与零售商之间的博弈机制与提前支付融资模式具有相似性, 结合上述

运作流程, 可分别界定制造商与零售商在股权融资模式下的利润函数如下:

$$\pi_M^2 = S_m \left[(w-c)D + (G-(e_0-e)D)\mu - \frac{1}{2}ke^2 \right] - cd \quad (3)$$

$$\pi_R^2 = S_v \left[(w-c)D + (G-(e_0-e)D)\mu - \frac{1}{2}ke^2 \right] + (p-w)D \quad (4)$$

在式(3)中, S_m 为制造商融资后所拥有的股权占比, $(w-c)D$ 为制造商的销售利润, $(G-(e_0-e)D)\mu$ 为碳交易中获得或支出的利润, $\frac{1}{2}ke^2$ 为碳减排成本, cd 为自有资金。

命题 2: 在股权融资中, 供应链系统最优策略是:

$$\text{最优单位碳减排量: } e_2 = \frac{(\alpha+b\mu)[b(c+e_0\mu)-a]}{(\alpha+b\mu)^2 - 4bkS_m};$$

$$\text{最优批发价格: } w_2 = \frac{\alpha^2(c+e_0\mu) + a(b\mu^2 - 2k) + a\mu[a+b(c+e_0\mu)] + 2bk(c+e_0\mu)(1-2S_m)}{(\alpha+b\mu)^2 - 4bkS_m};$$

$$\text{最优销售价格: } p_2 = \frac{ab\mu^2 + \alpha^2(c+e_0\mu) + a\mu[a+b(c+e_0\mu)] - S_m(3ak + bk(c+e_0\mu))}{(\alpha+b\mu)^2 - 4bkS_m};$$

$$\text{最优低碳产品市场需求量: } D_2 = \frac{bk(b(c+e_0\mu)-a)S_m}{(\alpha+b\mu)^2 - 4bkS_m}。$$

推论 2:

$$(1) \frac{\partial D_2}{\partial S_m} < 0; (2) 0 < \mu < \mu_1, \frac{\partial D_2}{\partial \mu} < 0, \mu_1 < \mu < \mu_2, \frac{\partial D_2}{\partial \mu} > 0; (3) \frac{\partial D_2}{\partial k} < 0; (4) \frac{\partial e_2}{\partial S_m} < 0; (5) \frac{\partial e_2}{\partial \mu} > 0; (6) \frac{\partial e_2}{\partial k} < 0。$$

$$\text{其中, } \mu_1 = \frac{A - \sqrt{A^2 - B}}{2b}, \mu_2 = \frac{\sqrt{4bkS_m} - a}{b}, A = \frac{2(a-bc)}{e_0} + 2\alpha, B = -16bkS_m - 2\alpha。$$

$$\text{证明: } \frac{\partial D_2}{\partial S_m} = \frac{bk(b(c+e_0\mu)-a)(\alpha+b\mu)^2}{[(\alpha+b\mu)^2 - 4bkS_m]^2} < 0;$$

$$\text{当 } 0 < \mu < \mu_1 \text{ 时, } \frac{\partial D_2}{\partial \mu} = \frac{b^2kS_m[e_0((\alpha+b\mu)^2 - 4bkS_m) - 2(\alpha+b\mu)(b(c+e_0\mu)-a)]}{[(\alpha+b\mu)^2 - 4bkS_m]^2} < 0,$$

$$\text{当 } \mu_1 < \mu < \mu_2 \text{ 时, } \frac{\partial D_2}{\partial \mu} = \frac{b^2kS_m[e_0((\alpha+b\mu)^2 - 4bkS_m) - 2(\alpha+b\mu)(b(c+e_0\mu)-a)]}{[(\alpha+b\mu)^2 - 4bkS_m]^2} > 0;$$

$$\frac{\partial D_2}{\partial k} = \frac{bS_m(b(c+e_0\mu)-a)(\alpha+b\mu)^2}{[(\alpha+b\mu)^2 - 4bkS_m]^2} < 0;$$

$$\frac{\partial e_2}{\partial S_m} = \frac{4bk(b(c+e_0\mu)-a)(\alpha+b\mu)}{[(\alpha+b\mu)^2 - 4bkS_m]^2} < 0;$$

$$\frac{\partial e_2}{\partial \mu} = \frac{b \left[(-a + b(c + 3e_0\mu))((\alpha + b\mu)^2 - 4bkS_m) - 2(\alpha + b\mu)^2(-a + bc + be_0\mu) \right]}{\left[(\alpha + b\mu)^2 - 4bkS_m \right]^2} > 0;$$

$$\frac{\partial e_2}{\partial k} = \frac{4bS_m(b(c + e_0\mu) - a)(\alpha + b\mu)}{\left[(\alpha + b\mu)^2 - 4bkS_m \right]^2} < 0。$$

从推论 2 可见, 制造商持股比例增大时, 会同时减少最优单位碳减排量和最优低碳产品市场需求量。而碳交易价格和碳减排成本系数对供应链的最优低碳产品市场需求量和最优单位碳减排量的影响与提前支付模式类似。

根据命题 2 可知, 制造商和零售商的最优利润分别为:

$$\pi_M = G\mu S_m - cd - \frac{kS_m(a - b(c + e_0\mu))^2}{2(\alpha + b\mu)^2 - 8bkS_m}$$

$$\pi_R = \frac{\alpha k \left[b^2 k(c + e_0\mu)^2 + 8bG\mu(k + \alpha\mu + b\mu^2 - 2kS_m) + 4\alpha^2 G\mu + \alpha(c + e_0\mu)((\alpha + b\mu)^2(S_m - 1) + bkS_m^2) \right]}{2 \left[(\alpha + b\mu)^2 - 4bkS_m \right]^2}$$

3.3. 银行融资模式

制造商向银行的融资额度 $L = cD + \frac{1}{2}ke^2 - cd$, 年度销售周期结束后, 需偿还银行本息 $L(1 + r_b)$, 此时供应链上下游企业的博弈行为与提前支付模式类似。结合上述, 制造商及零售商在此模式中的利润函数可分别定义为:

$$\pi_M^3 = w(a - bp + \alpha e) + [G - (e_0 - e)D]\mu - \left(cD + \frac{1}{2}ke^2 - cd \right)(1 + r_b) - cd \quad (5)$$

$$\pi_R^3 = (p - w)(a - bp + \alpha e) \quad (6)$$

在式(5)中, 第一部分是低碳产品销售利润, 第二部分则是参与碳交易产生的收益或成本, 第三部分为低碳生产成本, 最后一部分为自有资金。

命题三: 在银行融资中, 供应链系统最优策略是:

$$\text{最优单位碳减排量: } e_3 = \frac{(\alpha + b\mu)[-a + be_0\mu + bc(1 + r_b)]}{(\alpha + b\mu)^2 - 4bk(1 + r_b)};$$

$$\text{最优批发价格: } w_3 = \frac{\left[\alpha^2 - 2bk(1 + r_b) \right] (c + e_0\mu + cr_b) + \alpha\mu(a + b(c + e_0\mu + cr_b)) + b^2c\mu^2r - ab\mu^2 - 2ak(1 + r_b)}{(\alpha + b\mu)^2 - 4bk(1 + r_b)};$$

$$\text{最优销售价格: } p_3 = \frac{ab\mu^2 + a\alpha\mu + (\alpha\mu b + \alpha^2)(c + e_0\mu + cr_b) - (bk(c + e_0\mu + cr_b) + 3ak)(1 + r_b)}{(\alpha + b\mu)^2 - 4bk(1 + r_b)};$$

$$\text{最优低碳产品市场需求量: } D_3 = \frac{bk(b(c + e_0\mu + cr_b) - a)(1 + r_b)}{(\alpha + b\mu)^2 - 4bk(1 + r_b)}。$$

推论 3:

(1) $\frac{\partial D_3}{\partial r} < 0$; (2) $0 < \mu < \mu_1$, $\frac{\partial D_3}{\partial \mu} < 0$, $\mu_1 < \mu < \mu_2$, $\frac{\partial D_3}{\partial \mu} > 0$; (3) $\frac{\partial D_3}{\partial k} < 0$; (4) $\frac{\partial e_3}{\partial r} < 0$; (5) $\frac{\partial e_3}{\partial \mu} > 0$;
(6) $\frac{\partial e_3}{\partial k} < 0$ 。

其中, $\mu_1 = \frac{a-bc(1+r_b)-\sqrt{\Delta_1}}{be_0}$, $\mu_2 = \frac{\sqrt{4bk(1+r_b)}-\alpha}{b}$, $\Delta_1 = (a-bc(1+r_b)+e_0\alpha)^2 - 4e_0^2bk(1+r_b)$ 。

$$\text{证明: } \frac{\partial D_3}{\partial r} = \frac{bk \left((b(2c+e_0\mu+cr_b)-a)(\alpha+b\mu)^2 - 4b^2ck(1+r_b) \right)}{\left[(\alpha+b\mu)^2 - 4bk(1+r_b) \right]^2} < 0;$$

$$\text{当 } 0 < \mu < \mu_1 \text{ 时, } \frac{\partial D_3}{\partial \mu} = \frac{b^2k(1+r_b) \left[e_0(\alpha+b\mu)^2 - 2(\alpha+b\mu) \right]}{\left[(\alpha+b\mu)^2 - 4bk(1+r_b) \right]^2} < 0,$$

$$\text{当 } \mu_1 < \mu < \mu_2 \text{ 时, } \frac{\partial D_3}{\partial \mu} = \frac{b^2k(1+r_b) \left[e_0(\alpha+b\mu)^2 - 2(\alpha+b\mu) \right]}{\left[(\alpha+b\mu)^2 - 4bk(1+r_b) \right]^2} > 0;$$

$$\frac{\partial D_3}{\partial k} = \frac{b(b(c+e_0\mu+cr_b)-a)(1+r_b)(\alpha+b\mu)^2}{\left[(\alpha+b\mu)^2 - 4bk(1+r_b) \right]^2} < 0;$$

$$\frac{\partial e_3}{\partial r} = \frac{b(\alpha+b\mu) \left(c(\alpha+b\mu)^2 + 4k(be_0\mu-a) \right)}{\left[(\alpha+b\mu)^2 - 4bk(1+r_b) \right]^2} < 0;$$

$$\frac{\partial e_3}{\partial \mu} = \frac{b \left[(b(c+e_0\mu+cr_b)-a)(\alpha+b\mu) + be_0(\alpha+b\mu)^2 \right] \left((\alpha+b\mu)^2 - 4bk(1+r_b) \right)}{\left[(\alpha+b\mu)^2 - 4bk(1+r_b) \right]^2} > 0;$$

$$\frac{\partial e_3}{\partial k} = \frac{4b(b(c+e_0\mu+cr_b)-a)(1+r_b)(\alpha+b\mu)}{\left[(\alpha+b\mu)^2 - 4bk(1+(c+e_0\mu+cr_b)) \right]^2} < 0。$$

推论 3 表明: 在制造商银行融资模式中利率、碳交易价格和碳减排成本系数对最优低碳产品市场需求量和最优单位碳减排量的影响与提前支付模式类似。

制造商和零售商的利润分别为:

$$\pi_M^3 = \frac{-a^2k(1+r_b) + 2abk(1+r_b)(c+e_0\mu+cr_b) + 2\alpha^2(G\mu+cd_r_b) + 4b(G\mu+cd_r_b)(\alpha\mu-2k(1+r_b)) - b^2 \left[c^2k(1+r_b)^3 + \mu^2(-2G\mu+e_0^2k(1+r_b)) + 2c\mu(-d\mu r_b+e_0k(1+r_b)^2) \right]}{2 \left[(\alpha+b\mu)^2 - 4bk(1+r_b) \right]}$$

$$\pi_R^3 = \frac{bk^2(1+r_b)^2(b(c+e_0\mu+cr_b)-a)^2}{\left[(\alpha+b\mu)^2 - 4bk(1+r_b) \right]^2}$$

4. 制造商融资渠道的选择策略

通过对比最优低碳产品市场需求量、最优单位碳减排量和最优制造商利润，从而得出制造商融资渠道的选择策略。

命题四：对比三种融资模式下的最优低碳产品市场需求量：

(1) $0.5 \leq S_m \leq 1, 0 < r \leq r_b$ 时, $D_2 > D_1 > D_3$;

(2) $0.5 \leq S_m \leq 1, r_b < r < 1$ 时, $D_2 > D_3 > D_1$ 。

证明：当 $r = r_b = 0, S_m = 1$ 时, $D_1 = D_2 = D_3$ 。对比 D_1 与 D_2 ，可以看出 D_2 的分子始终大于 D_1 的分子，而分母相反，但由于 D_1 和 D_2 的分子分母均为负值，因此 D_2 始终大于 D_1 ，同理 D_2 始终大于 D_3 。对比 D_1 与 D_3 ，当 $r = r_b \neq 0$ 时, $D_1 - D_3 = \frac{bk(b(c+e_0\mu)-a)(1+r)}{(\alpha+b\mu)^2-4bk(1+r)} - \frac{bk(b(c+e_0\mu+cr_b)-a)(1+r_b)}{(\alpha+b\mu)^2-4bk(1+r_b)}$ ，分子小于 0，而分母同样小于 0，所以当 $0 < r \leq r_b$ 时, $D_1 > D_3$ ，又因为 $\frac{\partial D}{\partial r} < 0, \frac{\partial D}{\partial r_b} < 0$ ，所以当 $r_b < r$ 时, $D_3 > D_1$ 。

从命题四可以看出，当低碳产品市场需求量最优时，无论提前支付模式和银行融资模式中的利率如何变化，制造商的最优选择都是股权融资模式。当银行利率大于等于提前支付利率时，提前支付模式下的最优低碳产品市场需求量高于银行融资模式；反之，银行融资模式下的最优低碳产品市场需求量更高。

命题五：对比不同情形下的最优单位碳减排量：

(1) 当 $0.5 \leq S_m \leq 1, 0 < r \leq r_b$ 时, $e_2 > e_1 > e_3$;

(2) 当 $0.5 \leq S_m \leq 1, r_b < r < 1$ 时, $e_2 > e_3 > e_1$ 。

证明：当 $r = r_b = 0, S_m = 1$ 时, $e_1 = e_2 = e_3$ 。对比 e_1 与 e_3 ，由于 $\frac{\partial e}{\partial r} < 0, \frac{\partial e}{\partial r_b} < 0$ ，所以当 $r = r_b \neq 0$ 时, $e_1 - e_3 = \frac{(\alpha+b\mu)(-a+b(c+e_0\mu))}{(\alpha+b\mu)^2-4bk(1+r)} - \frac{(\alpha+b\mu)(-a+be_0\mu+bc(1+r_b))}{(\alpha+b\mu)^2-4bk(1+r_b)} \geq 0$ ，所以当 $0 < r \leq r_b$ 时, $e_1 > e_3$ 。对比 e_1 与 e_2 ，虽然 $\frac{\partial e}{\partial r} < 0, \frac{\partial e}{\partial S_m} < 0$ ，但 e_2 的分母始终大于 e_1 的分母，而分子相等且分子分母均为负值，所以 $e_2 > e_1$ 。而当 $r_b < r$ 时, $e_3 > e_1$ ；对比 e_3 与 e_2 ，可以发现 e_2 的分子始终小于 e_3 的分子，而 e_2 的分母始终大于 e_3 的分母，但由于 e_2 和 e_3 的分子分母均为负值，所以 e_2 始终大于 e_3 。

命题五证明，当单位碳减排量最优时，制造商应选择股权融资模式。低碳产品的单位碳减排量同样受融资利率的影响，当银行利率大于等于提前支付利率时，提前支付模式下的最优单位碳减排量高于银行融资模式；相反，提前支付模式下的最优单位碳减排量低于银行融资模式。

命题六：对比最优制造商利润：

(1) 当 $0.5 \leq S_m \leq 1, 0 < r \leq r_b$ 时, $\pi_M^1 > \pi_M^3 > \pi_M^2$;

(2) 当 $0.5 \leq S_m \leq 1, r_b < r < 1$ 时, $\pi_M^3 > \pi_M^1 > \pi_M^2$ 。

证明： $\frac{\partial \pi_M^1}{\partial S_m} = \frac{-a^2k+2abk(c+e\mu)+2a^2cd+4bcd(a\mu-2k(1+r))-8bk(G\mu+cdr)}{[2(\alpha+b\mu)^2-8bk(1+r)]^2}$ ， $N(r)$ 为原始表达

式的分子。

当 $r = r_b = 0, S_m = 1$ 时, $\pi_M^1 = \pi_M^3 > \pi_M^2$ ；当 $r = r_b \neq 0$ 时, $\pi_M^1 - \pi_M^3$ 中，分子为 $-2abk(1+r)cr_1 + b^2c^2k((1+r_b)^3 - (1+r)) - 2c\mu e_0k((1+r_b)^2 - (1+r)) < 0$ ，根据命题 1 和命题 3，分母小于 0，

$\pi_M^1 - \pi_M^3 > 0$ 。为简化模型, 当 $r = 0, S_m = 1$ 时,

$$\pi_M^1 - \pi_M^2 = G\mu - \frac{k(a-bc-be_0\mu)^2}{2(\alpha+b\mu)^2-8bk} - \left(G\mu - cd - \frac{k(a-bc-be_0\mu)^2}{2(\alpha+b\mu)^2-8bk} \right) = cd > 0, \text{ 因此 } \pi_M^1 > \pi_M^2, \text{ 同理 } \pi_M^3 > \pi_M^2。$$

从命题六可以看出, 制造商利润受融资利率影响, 提前支付利率或者银行融资利率越高, 越不利于制造商盈利。并且股权融资模式下利润水平最低, 因为在股权融资模式中, 制造商不仅要割让销售利润, 也要分出部分碳交易收益。

5. 数值仿真分析

5.1. 碳减排成本系数的影响

分析碳减排成本系数 $k \in [100, 200]$ 对最优单位碳减排量 e 、低碳产品市场需求量 D 、制造商利润 π_M 和零售商利润 π_R 的影响。设置参数: $a = 200$; $b = 3$; $c = 6$; $d = 25$; $\alpha = 5$; $G = 200$; $e_0 = 4$; $\mu = 5$; $S_m = 0.75$; $r = r_b = 0.05$ 。

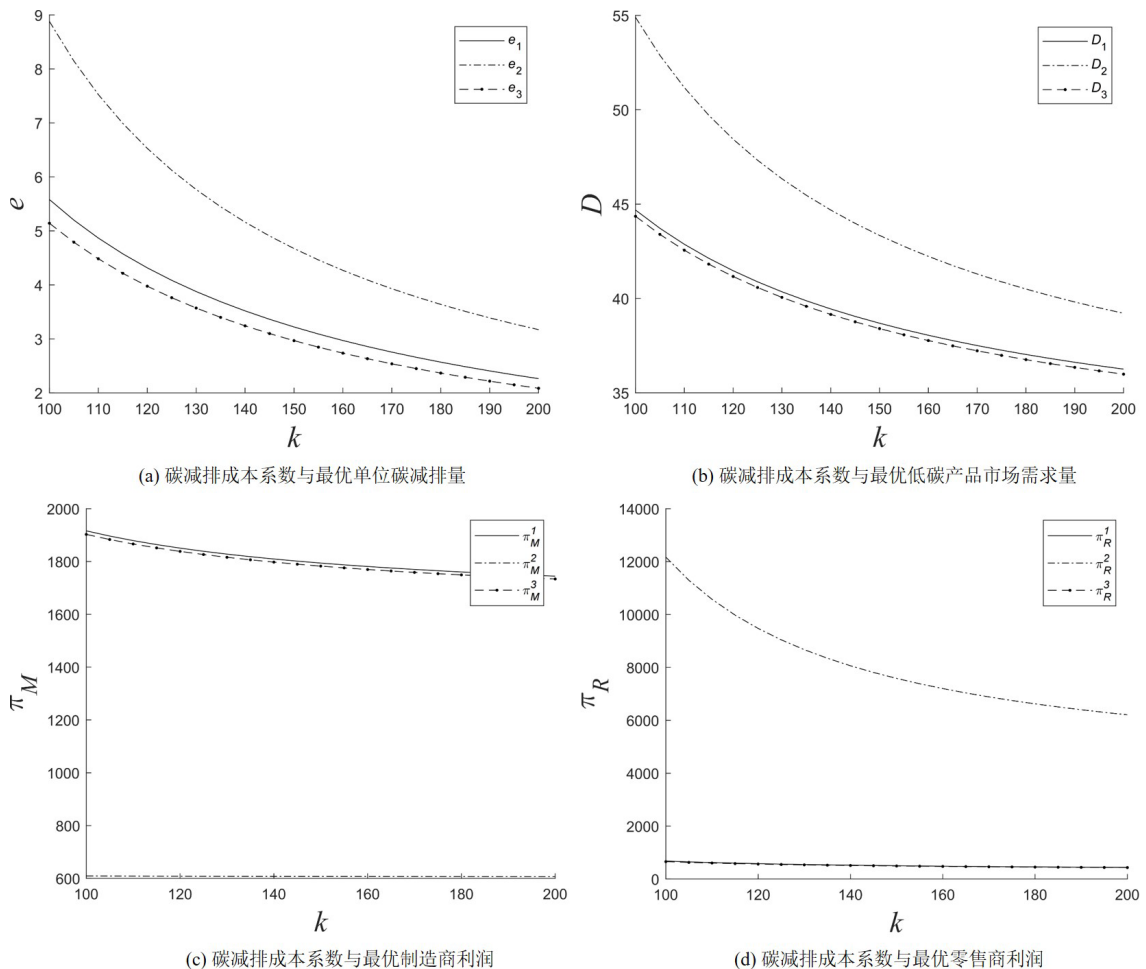


Figure 1. The impact of carbon emission reduction cost coefficient on optimal decision-making

图 1. 碳减排成本系数对最优决策的影响

从图 1 可以看出, 在三种融资策略中, 最优低碳产品市场需求量、单位碳减排量、制造商利润和零

售商利润均随着碳减排成本系数的增长而下降,这说明碳减排成本系数的提高会限制制造商进行低碳生产,与推论 1 的结论相符。原因是制造商投入的碳减排成本与碳减排成本系数和单位碳减排量均呈正相关,因此在碳减排成本系数提高增加制造商的碳减排成本时,制造商为控制成本,会减少单位碳减排量。又通过低碳产品市场需求函数可知,单位碳减排量的减少会降低低碳产品市场需求量。制造商利润由碳交易收入和销售收入构成,因此单位碳减排量的减少和低碳产品市场需求量的降低均会影响制造商的利润。零售商利润同样随低碳产品市场需求量的降低而减少。

5.2. 碳交易价格的影响

下面分析碳交易价格 $\mu \in [0, 10]$ 对最优低碳产品市场需求量 D 、单位碳减排量 e 、制造商利润 π_M 和零售商利润 π_R 的影响。设置参数: $a = 200$; $b = 3$; $c = 6$; $d = 25$; $\alpha = 5$; $G = 200$; $e_0 = 4$; $k = 150$; $S_m = 0.75$; $r \in [0.05, 0.1]$; $r_b \in [0.05, 0.1]$ 。

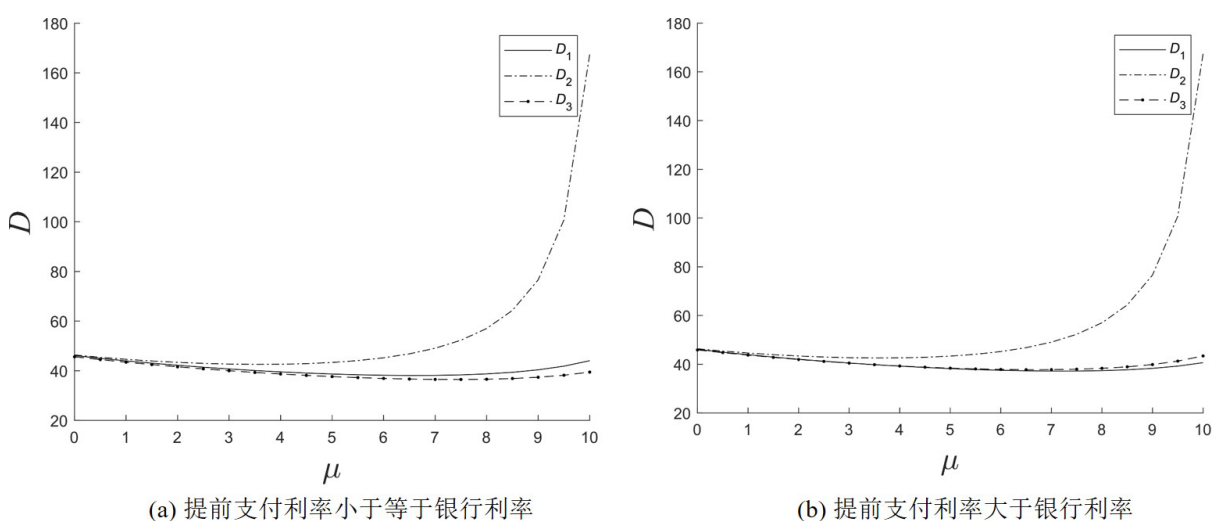


Figure 2. The impact of carbon trading prices on the market demand for optimal low-carbon products

图 2. 碳交易价格对最优低碳产品市场需求量的影响

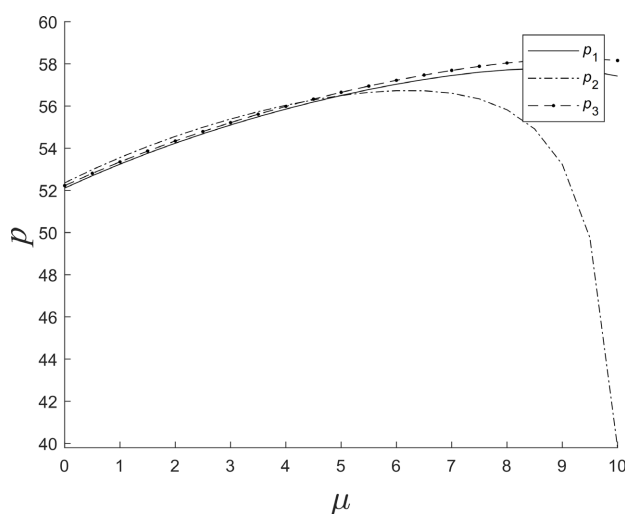


Figure 3. The impact of carbon trading prices on optimal selling prices

图 3. 碳交易价格对最优销售价格的影响

由图2与图3可知,随着碳交易价格的上升,最优低碳产品市场需求量先降低后增加,而最优销售价格则先上升后下降。说明在碳交易价格上升初期,节省的碳配额价值不足以弥补低碳生产成本,制造商提价转嫁成本,导致低碳产品需求下降。而当碳交易价格较高时,制造商为避免支付高昂的超额排放费用,便更愿意加大碳减排力度,此举也会为企业剩余碳配额。而通过出售多余的碳配额获得合适的利润后,便可通过降低销售价格的方式增加低碳产品市场需求量。进一步观察图2(a)和图2(b)可以发现,股权融资模式下最优低碳产品市场需求量明显多于提前支付和银行融资模式。原因是零售商在获得销售利润的同时,还能从制造商的碳交易收益中获得分红。因此,零售商更愿意在股权投资中促使制造商降低产品的碳排放量,以此扩大市场需求和收益。而在债权融资中,随着提前支付利率或银行利率的增加,最优低碳产品市场需求量减少。这是因为较高的利息增加了制造商的融资成本,抑制了制造商的生产规模,从而降低了低碳产品市场需求量,该现象符合命题4的预期。

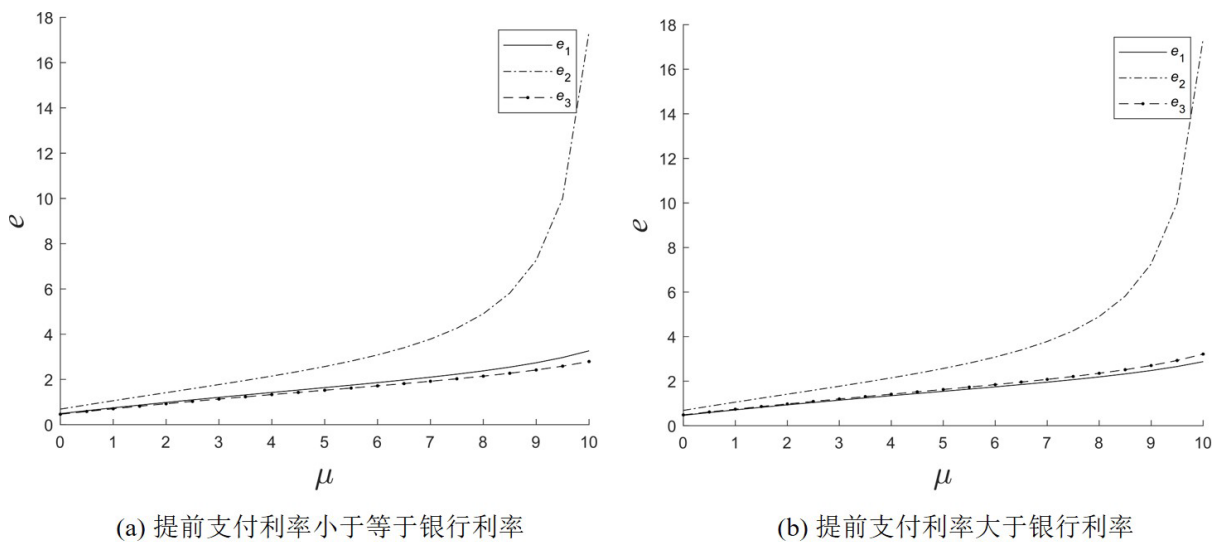


Figure 4. The impact of carbon trading prices on the optimal unit carbon reduction

图 4. 碳交易价格对最优单位碳减排量的影响

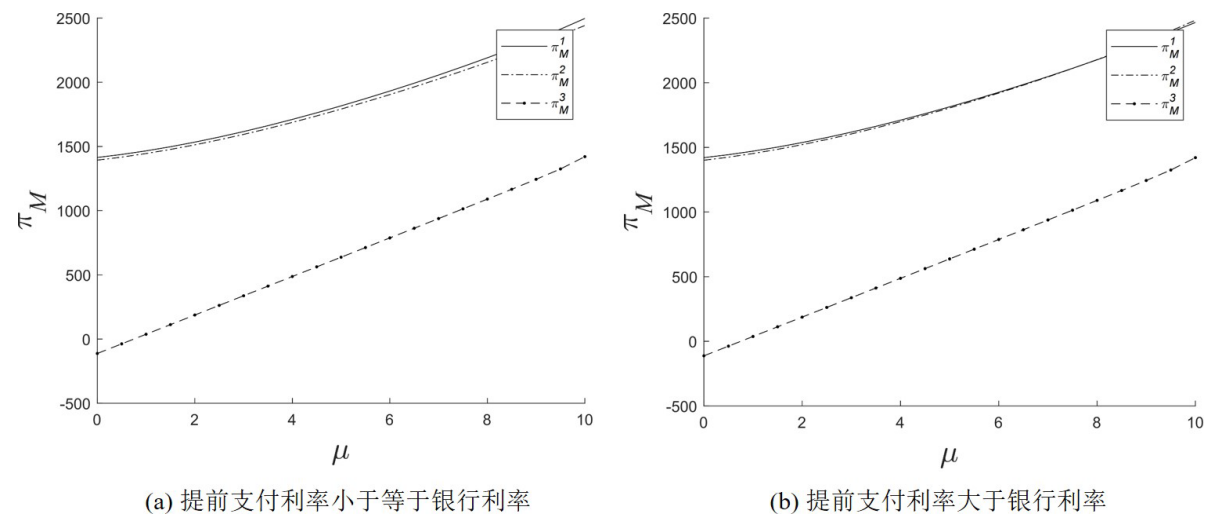


Figure 5. The impact of carbon trading prices on optimal manufacturer profits

图 5. 碳交易价格对最优制造商利润的影响

从图4可以看出,单位碳减排量总是随着碳交易价格的上升而增加,这说明碳交易价格的上升会刺激制造商进行低碳生产。原因可从经济效益和低碳产品市场需求量两个方面解释。在经济效益方面,制造商在低碳生产时,如果其碳排放总量低于政府分配的配额上限,则可以将剩余的碳配额在碳交易市场上出售,获得更高收益。在低碳产品市场需求函数中,单位碳减排量与低碳产品市场需求量正相关,因此单位碳减排量升高时会增加碳产品市场需求量。同样可以明显看出,股权融资模式下的单位碳减排量高于提前支付和银行融资。并且从图3和图4发现,利率大小与单位碳减排量呈负相关,当提前支付利率不高于银行利率时,提前支付模式下的最优单位碳减排量多于银行融资,反之银行融资模式更多。因为融资成本上升抑制了低碳生产投入,进而拉低了产品的单位碳减排量,这与命题5相一致。

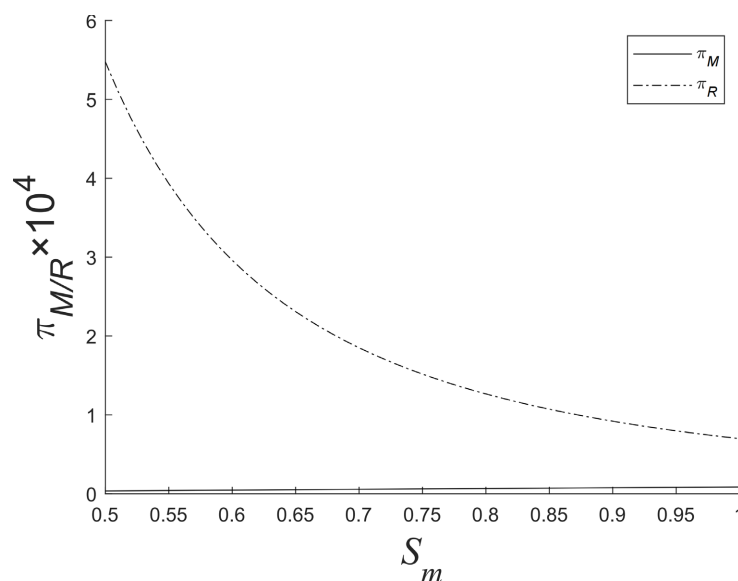


Figure 6. The impact of manufacturer equity shares on supply chain profits
图6. 制造商股权占比对供应链利润的影响

图5描绘了三种融资模式中制造商利润的变化,可以看出制造商利润均随碳交易价格的上升而增大。图5(a)显示,当提前支付利率不高于银行利率时,制造商在提前支付模式下利润最大。说明较低的利率减少了利息支出,降低了制造商的融资成本,并且随着利率的降低,低碳产品市场需求量增多。图5(b)显示,当银行利率小于提前支付利率时,制造商的利润并不总是在银行融资模式下占优。当碳交易价格较低时,制造商利润水平在提前支付模式中更高;当碳交易价格较高时,银行融资模式下制造商的利润水平更高。由此可见,制造商的利润同时受利率与碳交易价格的影响。由图6可知,当制造商股权占比增大时,其利润缓慢上升,零售商利润大幅下跌,这也说明零售商利润也与其股权比例正相关。然而制造商利润始终不及零售商,说明股权融资方模式下制造商的利润最小,与命题6一致。

6. 结语

本研究探讨了在碳交易政策背景下,由一个资金约束的制造商和一个资金宽裕的零售商组成的二级低碳供应链的融资策略问题。研究构建了三种融资模式下的Stackelberg博弈模型,其中制造商为领导者,零售商为跟随者。通过求解模型,研究分析了碳交易价格和碳减排成本系数对最优决策和系统绩效的影响。最终,通过对比三种模式下的最优解和数值仿真,研究为资金约束的制造商在不同条件下选择何种融资策略提供了理论依据和管理启示。主要研究结论如下:

(1) 在三种融资模式中, 无论选择哪种融资模式, 低碳产品市场需求量都随碳交易价格先缓慢下降后迅速上升, 制造商的单位碳减排水平随碳交易价格的上涨而升高, 同样制造商利润也与碳交易价格呈正相关; 而低碳产品市场需求量、单位碳减排量及供应链成员利润均随碳减排成本系数的升高而下降。

(2) 低碳产品市场需求量、单位碳减排量最优时, 股权融资模式的效果优于提前支付模式和银行融资模式。同时, 制造商利润随股权占比的增多缓慢上升, 零售商利润随股权占比的增多迅速上涨。

(3) 制造商的利润受融资利率和碳交易价格的影响。当提前支付利率低于银行利率时, 提前支付模式下制造商的盈利水平高于银行融资和股权融资模式。当提前支付利率高于银行利率时, 若碳交易价格较低, 则制造商在提前支付模式的利润水平高于银行融资和股权融资模式; 若碳交易价格较高, 则制造商在银行融资模式的利润水平高于提前支付和股权融资模式。

本文为资金约束制造商的融资策略提供了一定的理论依据。然而文中采用信息对称假设处理制造商及零售商, 但在实际的经济活动中, 信息不对称现象屡见不鲜, 可以拓展探讨在信息不对称下如何设计包含抵押、担保或筛选机制的融资契约。或者, 可以考虑需求不确定性, 运用随机规划或实物期权等方法, 分析风险对融资决策的影响。同时针对模型中出现的“利润”与“市场或减排”目标不一致的权衡问题, 可以拓展探讨是否存在一种混合契约, 能够实现激励相容, 使得制造商在追求更高市场需求和减排量的同时, 其自身利润也能得到保障, 从而实现供应链整体的帕累托改进。

参考文献

- [1] 许海娟, 叶春明, 李芳. 碳配额交易下供应链企业碳减排策略演化与协调[J/OL]. 西安理工大学学报: 1-10. <https://link.cnki.net/urlid/61.1294.N.20251022.0930.002>, 2026-06-26.
- [2] 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.
- [3] Deng, L., Cao, C. and Li, W. (2023) Impacts of Carbon Emission Trading Prices on Financing Decision of Green Supply Chain under Carbon Emission Reduction Percentage Measure. *IEEE Access*, **11**, 75929-75944. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3297649>
- [4] 邹清明, 刘春, 曹裕. 碳交易机制下考虑公平关切产出不确定的低碳供应链减排与融资策略研究[J]. 中国管理科学, 2024, 32(9): 248-259.
- [5] Deng, L.R., Cao, C. and Dai, J.W. (2023) How Do the Carbon Emission Trading Prices Affect the Financing Decision of the Supply Chain Considering Carbon Neutrality? *Environmental Science and Pollution Research*, **30**, 76171-76191. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27448-6>
- [6] Cao, E.B., Du, L.X. and Ruan, J.H. (2018) Financing Preferences and Performance for an Emission-Dependent Supply Chain: Supplier vs. Bank. *International Journal of Production Economics*, **208**, 383-399. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.001>
- [7] Xu, S. and Fang, L. (2020) Partial Credit Guarantee and Trade Credit in an Emission-Dependent Supply Chain with Capital Constraint. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **135**, Article ID: 101859. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.101859>
- [8] 武丹, 杨玉香. 考虑消费者低碳偏好的供应链减排微分博弈模型研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(4): 126-137.
- [9] 夏良杰, 孔清逸, 李友东, 等. 考虑交叉持股的低碳供应链减排与定价决策研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(4): 70-81.
- [10] 郭军华, 孙林洋, 张诚, 等. 碳限额交易政策下考虑消费者低碳偏好的供应链定价与协调[J]. 工业工程与管理, 2020, 25(2): 134-145.
- [11] 赵达, 朱少棠, 胡祥培. 碳限额与交易政策下考虑双敏感消费者的双渠道供应链决策研究[J]. 管理工程学报, 2025, 39(6): 163-177.
- [12] 李飏, 夏西强, 李秋月. 碳配额下碳交易对碳减排效应的影响及协调机制研究[J]. 中国管理科学, 2024, 32(8): 250-261.
- [13] 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.