



计算机科学

COMPUTER SCIENCE

供需双方均受资金约束的低碳供应链决策研究

汪敏, 李莉英, 周俊

引用本文

汪敏, 李莉英, 周俊. [供需双方均受资金约束的低碳供应链决策研究](#)[J]. 计算机科学, 2023, 50(11A): 221200130-9.

WANG Min, LI Liying, ZHOU Jun. [Study on Decision-making for a Low-carbon Supply Chain with Capital Constraint on Both Supply and Demand Sides](#) [J]. Computer Science, 2023, 50(11A): 221200130-9.

相似文献推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于子图特征的节点排序算法](#)

Node Ranking Algorithm Based on Subgraph Features

计算机科学, 2023, 50(11A): 230100122-7. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230100122>

[考虑风险规避和资金约束的低碳供应链决策研究](#)

Study on Decision-making for Low-carbon Supply Chain with Capital Constraint and Risk Aversion

计算机科学, 2022, 49(11A): 210900104-6. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210900104>

[基于改进哈希时间锁的区块链跨链资产交互协议](#)

Novel Hash-time-lock-contract Based Cross-chain Token Swap Mechanism of Blockchain

计算机科学, 2022, 49(1): 336-344. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210600170>

[基于LSTM神经网络的声发射信号识别研究](#)

Acoustic Emission Signal Recognition Based on Long Short Time Memory Neural Network

计算机科学, 2021, 48(11A): 319-326. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210700034>

[基于小波包分析的虹膜识别研究](#)

Research on Iris Recognition Algorithm Based on Wavelet Packet Decomposition

计算机科学, 2021, 48(6A): 57-62. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.200900218>

供需双方均受资金约束的低碳供应链决策研究

汪敏 李莉英 周俊

重庆交通大学数学与统计学院 重庆 400074

(wangmin898@163.com)

摘要 为了解决低碳环境下受资金约束的供需双方融资难的问题,在“碳限额与交易机制”下,构建了以银行为主领导者、供应商为次领导者和碳排放依赖型制造商为跟随者的双层 Stackelberg 博弈模型。在随机需求情形下,研究了供应商的最优批发价格决策、制造商的最优订购决策和减排决策,以及银行的最优利率决策。通过理论和算例分析表明:当政府分配的排放上限较低时,会增加制造商的破产风险,具有有限责任能力的制造商会采取更加冒进的订购策略;为减少借款方的破产风险带来的损失,银行会加强对整个供应链运作的监管;供应商的自由资金越多,对制造商和整体供应链的绩效越有利。

关键词: 碳限额;低碳供应链;资金约束;随机需求;双层 Stackelberg 博弈

中图分类号 F274

Study on Decision-making for a Low-carbon Supply Chain with Capital Constraint on Both Supply and Demand Sides

WANG Min, LI Liying and ZHOU Jun

College of Mathematics and Statistics, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

Abstract To alleviate the problem of financing difficulties for both the supply and demand sides with capital constraints under the low-carbon environment, a bi-level Stackelberg game model with the bank as the leader, the supplier as the subleader, and the carbon-dependent manufacturer as the follower, is formulated under the government's "carbon cap-and-trade mechanism". In the stochastic demand scenario, the supplier's optimal wholesale price decision, the manufacturer's optimal ordering and emission reduction decisions, and bank's the optimal interest rate decision are investigated. Theoretical and numerical analyses show that, when the emission cap allocated by the government is low, it will increase the bankruptcy risk of the manufacturer, and the manufacturer with limited liability will adopt a more aggressive ordering strategy. In order to reduce losses from the bankruptcy risk of borrowers, the bank will strengthen their regulation of the whole supply chain operation. The more free funds the supplier has, the more beneficial it is for the manufacturer and the overall supply chain performance.

Keywords Carbon emission quota, Low-carbon supply chain, Capital constraints, Demand stochastic, Bi-level Stackelberg game

1 引言

气候变化是事关人类命运的重大问题,温室效应会对全球可持续发展产生重大的负面影响,比如干旱、洪水、全球变暖等,而过度的碳排放是产生温室效应的主要原因。习近平总书记在 2020 年 12 月的气候雄心峰会上大力倡导绿色低碳的生产生活方式^[1],并且在 2022 年 10 月 16 日的中国共产党第二十次全国代表大会上再次强调了要积极稳妥推进碳达峰、碳中和。因此,越来越多的国家和组织通过碳排放交易^[2]和环境税^[3]等方式努力遏制碳排放。在“碳限额与交易机制”下^[4],如果制造商的碳排放总量超过政府分配的排放上限,那么制造商就需要从碳交易市场购买碳排放权;反之,制造商也可以出售多余的碳排放权以获得额外的收入。

由于消费者的低碳偏好和环境法规的压力,很多制造商在生产运营中会采取节能减排的措施,因此,制造商的生产

决策受碳排放成本和产品生产成本的共同影响。同样,供应商的生产决策也受到产品采购成本和产出风险的共同影响,实际上,使用有限资金来生产产品和采购原材料对企业来说是一项非常大的挑战。银行可以向制造商和供应商提供信贷融资,以减轻供需双方的资金约束压力。因此,在“碳限额与交易机制”下考虑资金约束的低碳供应链的生产、运营和融资决策问题具有重要的理论和现实意义。

随着经济全球化的深入发展,越来越多的学者开始研究低碳努力因素影响的排放依赖型供应链的决策问题。Hua 等^[5]最早研究了碳排放交易对零售商订货、定价决策及其利润的影响。Kroes 等^[6]指出,碳限额和交易计划虽然对行业排放施加了限制,但为企业是进行减排投资还是在碳排放权交易市场采购所需的碳配额提供了灵活选择。也就是说,企业必需在碳排放目标与采购碳排放权之间做出权衡。考虑碳限额与交易机制下,Chen 等^[7]以单个制造商和单个零售商组

基金项目:重庆市研究生联合培养基地建设项目(JDLHPYJD2021016);重庆市高校创新研究群体项目(CXQT21021)

This work was supported by the Joint Training Base Construction Project for Graduate Students in Chongqing(JDLHPYJD2021016) and Group Building Scientific Innovation Project for Universities in Chongqing(CXQT21021).

通信作者:李莉英(llying-111@163.com)

成的供应链为研究对象,研究了碳配额交易机制下碳交易价格对供应链碳排放决策的影响。Xia 等^[8]针对一个排放依赖型供应链,探讨了人们的低碳意识和互惠偏好对供应链均衡策略和绩效的影响。Miao 等^[9]在碳税和碳交易机制下研究了制造商的新产品和再制造产品的产量和价格决策。通过研究表明,低碳供应链中各成员的决策与碳排放水平相关。Jin 等^[10]研究了政府支持对有融资需求的制造业企业的生产和绿色投资的影响,并证明了贷款担保政策是否优于利息补贴取决于消费者的绿色意识、绿色投资效率、环境价值以及银行对风险的态度。Wu 等^[11]基于历史排放法和基准法两种碳配额分配方式,构建了碳减排费用不同承担模式的博弈模型,分析了不同碳配额分配方式对减排努力程度、零售价格、销售量和收益的影响。

以上关于碳排放供应链方面的文献大多都假设供应链成员资金是充足的,但在实际生活中,制造商(特别是中小型的制造商)很容易受到资金约束。近年来,部分学者开始研究低碳环境中供应链各成员受资金约束的问题。例如,Cao 等^[12]在碳排放总量管制与交易机制下,研究了由单个制造商和单个资金受限的零售商组成的排放依赖型供应链的交易信用融资决策与协调问题,而受资金约束的零售商通过制造商的贸易信用为其业务提供资金。Qin 等^[13]探讨了受资金约束的制造商碳减排问题,为了缓解制造商资金受限的问题,作者研究了成本分担合同和银行的绿化融资两种合同,并利用 Stackelberg 博弈对以下 4 种情况进行了建模:制造商没有绿化融资,也没有成本分摊;制造商有绿化融资,但没有成本分摊;制造商没有绿化融资,但有成本分摊;制造商有绿化融资和成本分摊。他们采用逆向归纳法,推导并比较了 4 种情况下参与者的均衡决策和收益。Wu 等^[14]考虑了碳减排对供应链运作和融资决策的影响,研究了制造商和资金受限的零售商组成的绿色供应链融资决策问题,他们用到的融资方式包括银行融资和贸易信贷融资。Zhang 等^[15]建立了一个由零售商和受资金约束的制造商组成的二级低碳供应链融资模型,探讨了制造商分别通过银行借贷、股权融资和组合融资的运营决策和融资策略。Xu 等^[16]构建了由单个供应商和单个碳排放依赖且受资金约束的制造商组成的两级供应链融资模型,他们用到的融资方式包括交易信用和部分信用保证,以及两种融资方式的结合。Zhou 等^[17]在碳交易背景下,研究了碳配额充足与不充足的两种情景,同时对无融资决策、零售商分担、碳额度质押贷款和混合融资 4 种融资模型进行了比较分析。Jin 等^[18]针对由单个受资金约束供应商和单个零售商组成的二级供应链,研究了供应商绿色产品的投入和融资决策,并对比分析了银行信贷单一融资渠道和零售商提前支付部分贷款与银行信贷的混合融资渠道下,供应商和零售商的运营和融资策略。Bai 等^[19]建立了一个由供应商和受资金约束的制造商组成的二级供应链融资模型,分析了具有减排约束的财务激励如何影响资金约束供应链的运营决策和环境绩效。

上述文献虽然在低碳背景下考虑了资金约束供应链的情况,但考虑的都是供应链成员单方受资金约束,而没有考虑成员双方受资金约束对供应链运作和减排决策的影响。基于此,本文针对由单个供应商、单个碳排放依赖型制造商和商业银行组成的三级供应链,构建一个双层 Stackelberg 博弈

模型。其中,假定供应商与制造商均受到资金约束,市场需求是随机的且依赖于消费者的低碳意识。与本文相关的研究是文献[20],文献[20]研究了在银行融资模式下供应链买卖双方都受到资金约束的双层 Stackelberg 博弈最优策略问题,但该文没有考虑低碳决策。而本文与国内外关于排放依赖型供应链研究的不同之处主要体现在:1)研究的供应链结构不一样,以往关于排放依赖型供应链的研究大多是两级的,而本文考虑的是三级供应链,银行的贷款利率是内生的;2)供应链中受资金约束的情况不一样,以往关于排放依赖型供应链的研究大多假定制造商单方受到资金约束,而本文的研究假定碳排放依赖型制造商和供应商双方都受到资金约束。

2 问题描述、符号说明和假设

2.1 问题描述

在“碳限额与交易机制”下,考虑由单个商业银行、单个受资金约束供应商和单个受资金约束且碳排放依赖型制造商组成的三级供应链融资系统,其框架结构如图 1 所示。在销售季节前,制造商从供应商处购买原材料,加工处理后将产品销售给具有低碳意识的消费者。在供应链融资系统中,制造商和供应商都受到资金约束,需要从商业银行贷款融资。类似于文献[20],本文假设银行利率是内生的,银行作为供应链成员重要的合作伙伴,为借款人供应商和制造商设定适当的融资利率。在银行融资背景下,受资金约束的制造商在生产前向银行贷款用于减排投资和购买原材料,而受资金约束的供应商向银行贷款用于生产原材料。此外,根据政府分配的碳限额,制造商可以在碳排放权交易市场上出售或购买碳配额。

参考文献[21],假设市场需求 D 是随机的,且依赖于制造商的减排水平 e 。需求函数定义为: $D = \tau e + \epsilon$,其中 $\tau > 0$,表示消费者具有低碳意识, ϵ 为随机需求因子。 ϵ 的概率密度函数和分布函数分别为 $f(x)$ 和 $F(x)$, $x \in [0, +\infty)$ 。假设 ϵ 具有严格递增的失效率(IFR)函数,即 $h(x) = f(x)/\bar{F}(x)$ 关于 x 单调递增,其中 $\bar{F}(x) = 1 - F(x)$ 。许多常见的分布都满足这个假设,例如均匀分布、正态分布、指数分布和伽马分布^[22-23]。

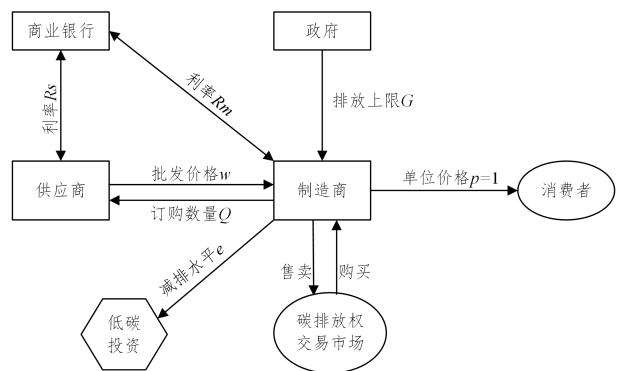


图 1 制造商和供应商都受资金约束的排放依赖型供应链融资系统

Fig. 1 Emission-dependent supply chain financing system where both manufacturers and suppliers are capital-constrained

2.2 符号说明

本文中使用的符号与变量的定义如表 1 所列。

表1 符号与变量说明

Table 1 Description of symbols and variables

符号与决策变量	含义
D	市场需求
τ	消费者低碳意识
ε	需求的随机因素
R_f	无风险利率
v	减排投资成本系数
p_e	单位碳排放权价格
β	单位产品的初始排放量
G	政府分配的碳排放上限
c	供应商的单位生产成本
K_m	制造商的自由资金
K_s	供应商的自由资金
π_s, π_m	供应商、制造商的期望利润
π_b^s, π_b^m	银行贷款给供应商、制造商时所获得的利润
Q	制造商的订购量
e	制造商的低碳减排水平
w	供应商的批发价格
R_m	银行贷款给制造商的利率
R_s	银行贷款给供应商的利率

2.3 问题假设

为了便于建模分析,本文作如下假设:

假设1 为了方便计算,假设零售价格是固定的,并标准化为1,即 $p=1$;

假设2 假设零售价格超过边际成本,即 $[\omega(1+R_m) + p_e\beta] < 1$,且 $\omega > c$;

假设3 假设制造商对碳减排的投资是一次性的短期规划,碳减排的总投资成本为 $ve^2/2$ ^[21];

假设4 假设所有信息(如市场需求和成本结构)对供应链成员来说都是共同知识;

假设5 假设资本市场是完美的,没有税收、交易成本和破产成本;

假设6 假设供应链成员均为风险中性,且制造商具有有限责任能力,这与文献[24]中的假设一致。

3 基准模型

本节首先构建无资金约束的基准模型。在基准模型中,碳排放依赖型制造商有足够的资金作订购决策和低碳投资,而供应商有足够的资金进行生产。制造商和供应商决策间的关系构成一个 Stackelberg 博弈,其中供应商为博弈的领导者,制造商为博弈的跟随者。下面利用逆向归纳法求解该博弈模型的均衡策略。在无资金约束的情况下,记 Q_N 和 e_N 分别表示制造商的订购量和低碳减排水平, w_N 表示供应商的批发价格,考虑资金的时间价值。因此,制造商的期望利润函数可表示为:

$$\pi_m(Q_N, e_N) = E[\min(Q_N, D) - p_e(\beta Q_N - G - e_N) + (K_m - w_N Q_N - \frac{ve_N^2}{2})(1+R_f)] \quad (1)$$

供应商的期望利润函数可表示为:

$$\pi_s(w_N) = w_N Q_N + (K_s - c Q_N)(1+R_f) \quad (2)$$

引理1 在无资金约束的情况下,碳排放依赖型制造商的最优订购量和减排水平满足:

$$\bar{F}(Q_N^* - \tau e_N^*)[1 - Q_N^* h(Q_N^* - \tau e_N^*)] = p_e \beta + c(1+R_f)^2 \quad (3)$$

$$e_N^* = \frac{\tau - \tau[\beta p_e + w_N(1+R_f)] + p_e}{v(1+R_f)} \quad (4)$$

供应商的最优批发价格满足:

$$w_N^* = \frac{\bar{F}(Q_N^* - \tau e_N^*) - p_e \beta}{1+R_f} \quad (5)$$

证明:分别求 $\pi_m(Q_N, e_N)$ 关于 Q_N 和 e_N 的一阶导数,得到:

$$\frac{\partial \pi_m(Q_N, e_N)}{\partial Q_N} = \bar{F}(Q_N - \tau e_N) - p_e \beta - w_N(1+R_f)$$

$$\frac{\partial \pi_m(Q_N, e_N)}{\partial e_N} = \tau F(Q_N - \tau e_N) + p_e - v e_N(1+R_f)$$

并且,对 $\pi_m(Q_N, e_N)$ 关于 Q_N 和 e_N 分别求二阶偏导数和混合偏导数,得到:

$$\frac{\partial^2 \pi_m(Q_N, e_N)}{\partial Q_N^2} = -f(Q_N - \tau e_N)$$

$$\frac{\partial^2 \pi_m(Q_N, e_N)}{\partial Q_N \partial e_N} = \tau f(Q_N - \tau e_N)$$

$$\frac{\partial^2 \pi_m(Q_N, e_N)}{\partial e_N^2} = -\tau^2 f(Q_N - \tau e_N) - v(1+R_f)$$

从而, Hessian 矩阵 $\mathbf{H}(Q_N, e_N)$, 为:

$$\mathbf{H}(Q_N, e_N) = \begin{bmatrix} -f(Q_N - \tau e_N) & \tau f(Q_N - \tau e_N) \\ \tau f(Q_N - \tau e_N) & -\tau^2 f(Q_N - \tau e_N) - v(1+R_f) \end{bmatrix}$$

易得 $\mathbf{H}(Q_N, e_N)$ 的行列式 $\det \mathbf{H}(Q, e) = v(1+R_f) f(Q_N - \tau e_N) > 0$ 。由于 $-f(Q_N - \tau e_N) < 0$, 因此 $\mathbf{H}(Q_N, e_N)$ 是负定的, 即 $\pi_m(Q_N, e_N)$ 关于 Q_N 和 e_N 是联合凹的。从而, 最优解唯一存在。根据一阶条件 $\partial \pi_m(Q_N, e_N) / \partial Q_N = 0$ 和 $\partial \pi_m(Q_N, e_N) / \partial e_N = 0$, 得到最优的 (Q_N^*, e_N^*) 满足:

$$\bar{F}(Q_N^* - \tau e_N^*) = p_e \beta + w_N(1+R_f)$$

$$e_N^* = \frac{\tau - \tau[\beta p_e + w_N(1+R_f)] + p_e}{v(1+R_f)}$$

供应商的利润函数可表示为:

$$\pi_s(Q_N^*) = w_N Q_N^* + (K_s - c Q_N^*)(1+R_f)$$

将 $w_N^* = [\bar{F}(Q_N^* - \tau e_N^*) - p_e \beta] / (1+R_f)$, 代入 $\pi_s(Q_N^*)$, 则 $\pi_s(Q_N^*)$ 可进一步表示为:

$$\pi_s(Q_N^*) = \left[\frac{\bar{F}(Q_N^* - \tau e_N^*) - p_e \beta}{1+R_f} - c(1+R_f) \right] Q_N^* + K_s(1+R_f)$$

求 $\pi_s(Q_N^*)$ 关于 Q_N^* 的一阶导数, 得到:

$$\frac{d\pi_s(Q_N^*)}{dQ_N^*} = \frac{\bar{F}(Q_N^* - \tau e_N^*) - p_e \beta}{1+R_f} - c(1+R_f) - \frac{Q_N^* f(Q_N^* - \tau e_N^*)}{1+R_f}$$

根据一阶条件 $d\pi_s(Q_N^*) / dQ_N^* = 0$, 得到制造商的最优订购量 Q_N^* 应满足:

$$\bar{F}(Q_N^* - \tau e_N^*)[1 - Q_N^* h(Q_N^* - \tau e_N^*)] = p_e \beta + c(1+R_f)^2$$

同时, 供应商的最优批发价格满足:

$$w_N^* = \frac{\bar{F}(Q_N^* - \tau e_N^*) - p_e \beta}{(1+R_f)}$$

证毕。

引理1表明, 供应商和碳排放依赖型制造商的最优决策与单位碳排放权价格 p_e 、单位产品初始排放量 β 和消费者低碳意识 τ 密切相关。此外, 碳排放依赖型制造商的最优订购量 Q_N^* 和最优低碳减排水平 e_N^* 随批发价格 w_N^* 的增加而降低, 但它们不会受到排放上限 G 的影响。

4 资金约束供应链融资模型

在图 1 所示的供应链融资系统中,将受资金约束且碳排放依赖型制造商、受资金约束供应商和商业银行决策之间的相互关系描述为一个双层的 Stackelberg 博弈模型。在该博弈模型中,假设银行和供应商分别是主领导者和次领导者,制造商为跟随者。博弈顺序如下:首先,商业银行评估制造商和供应商的融资条件(如自有资金、破产风险和采购及生产数量等)并做出决策,分别宣布贷款给制造商和供应商的利率 R_m 和 R_s ;其次,作为对银行的回应,供应商在销售初期,宣布批发价格;最后,作为跟随者的制造商根据银行的利率和供应商宣布的批发价格决定订购量和低碳减排水平。下面采用逆向归纳法求解上述博弈模型的均衡策略。

4.1 制造商的最优决策

在销售初期,制造商以每单位 w 的成本向供应商订购 Q 单位大小的订单。由于制造商的银行贷款主要用于订购产品和减排投资,因此需要从银行借款 $B_m = wQ + ve^2/2 - K_m$, 当对原材料加工处理以后,碳排放依赖型制造商需要在排放权交易市场上购买碳配额的成本为 $p_e(\beta Q - G - e)$ 。在销售末期,当需求实现时,制造商的收益为 $\min(Q, D) - p_e(\beta Q - G - e)$ 。当 $[\min(Q, D) - p_e(\beta Q - G - e)] \geq B_m(1 + R_m)$ 时,制造商的收益可以支付银行贷款,银行还款 $B_m(1 + R_m)$; 当 $[\min(Q, D) - p_e(\beta Q - G - e)] < B_m(1 + R_m)$ 时,则制造商的收益不足以支付银行贷款,制造商将面临破产。根据第 2.3 节的假设 6, 制造商具有有限责任能力,此时,则将收益 $\min(Q, D) - p_e(\beta Q - G - e)$ 全部偿还给银行。因此,制造商的期望利润函数如下:

$$\pi_m(Q, e) = E\{\min(Q, D) - p_e(\beta Q - G - e) - B_m(1 + R_m)\}^+ \quad (6)$$

容易得到,制造商不破产的最低需求,即破产临界值需求为 $\hat{A} = p_e(\beta Q - G - e) + B_m(1 + R_m)$ 。由于 $D = \tau e + \epsilon$, 因而当随机需求因子 $\epsilon > \hat{A} - \tau e$ 时,制造商不会破产。

命题 1 给定银行的贷款利率 R_m 和供应商的批发价格 w , 制造商的最优订购量 Q^* 和减排水平 e^* 满足:

$$\bar{F}(Q^* - \tau e^*) = M\bar{F}(\hat{A} - \tau e^*) \quad (7)$$

$$e^* = \frac{p_e + \tau(1 - M)}{v(1 + R_m)} \quad (8)$$

其中, $M = p_e\beta + w(1 + R_m)$ 。

证明:制造商的期望利润可进一步表示为

$$\pi_m(Q, e) = Q - (wQ + \frac{ve^2}{2} - K_m)(1 + R_m) + p_e(G + e - \beta Q) - \int_{\hat{A} - \tau e}^{Q - \tau e} F(x) dx$$

首先,对 $\pi_m(Q, e)$ 关于 Q 和 e 分别求一阶偏导数,得到:

$$\frac{\partial \pi_m(Q, e)}{\partial Q} = \bar{F}(Q - \tau e) - M\bar{F}(\hat{A} - \tau e)$$

$$\frac{\partial \pi_m(Q, e)}{\partial e} = -\tau\bar{F}(Q - \tau e) + N\bar{F}(\hat{A} - \tau e)$$

其中, $M = p_e\beta + w(1 + R_m)$, $N = p_e + \tau - ve(1 + R_m)$ 。由一阶条件 $\partial \pi_m(Q, e)/\partial Q = 0$ 和 $\partial \pi_m(Q, e)/\partial e = 0$, 得到:

$$\bar{F}(Q - \tau e) = M\bar{F}(\hat{A} - \tau e), \tau\bar{F}(Q - \tau e) = N\bar{F}(\hat{A} - \tau e)$$

其次,对 $\pi_m(Q, e)$ 关于 Q 和 e 分别求二阶偏导数,得到:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \pi_m(Q, e)}{\partial Q^2} &= -f(Q - \tau e) + M^2 f(\hat{A} - \tau e) \\ &= -\bar{F}(Q - \tau e)h(Q - \tau e) + M^2 \bar{F}(\hat{A} - \tau e)h(\hat{A} - \tau e) \\ &= -M\bar{F}(\hat{A} - \tau e)[h(Q - \tau e) - Mh(\hat{A} - \tau e)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \pi_m(Q, e)}{\partial e^2} &= -\tau^2 f(Q - \tau e) + N^2 f(\hat{A} - \tau e) - v(1 + R_m)\bar{F}(\hat{A} - \tau e) \\ &= -\tau^2 \bar{F}(Q - \tau e)h(Q - \tau e) + N^2 \bar{F}(\hat{A} - \tau e)h(\hat{A} - \tau e) - v(1 + R_m)\bar{F}(\hat{A} - \tau e) \end{aligned}$$

根据一阶条件 $\partial \pi_m(Q, e)/\partial Q = 0$ 和 $\partial \pi_m(Q, e)/\partial e = 0$ 化简得到:

$$\frac{\partial^2 \pi_m(Q, e)}{\partial Q^2} = -\bar{F}(Q - \tau e)[h(Q - \tau e) - Mh(\hat{A} - \tau e)]$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \pi_m(Q, e)}{\partial e^2} &= -\tau N\bar{F}(\hat{A} - \tau e)h(Q - \tau e) + N^2 \bar{F}(\hat{A} - \tau e)h(\hat{A} - \tau e) - v(1 + R_m)\bar{F}(\hat{A} - \tau e) \\ &= N\bar{F}(\hat{A} - \tau e)[Nh(\hat{A} - \tau e) - \tau h(Q - \tau e)] - v(1 + R_m)\bar{F}(\hat{A} - \tau e) \\ &= \tau \bar{F}(Q - \tau e)[Nh(\hat{A} - \tau e) - \tau h(Q - \tau e)] - v(1 + R_m)\bar{F}(\hat{A} - \tau e) \end{aligned}$$

最后,对 $\pi_m(Q, e)$ 关于 Q 和 e 求混合二阶偏导数,得到:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \pi_m(Q, e)}{\partial Q \partial e} &= \tau f(Q - \tau e) - MNf(\hat{A} - \tau e) \\ &= \tau \bar{F}(Q - \tau e)h(Q - \tau e) - MN\bar{F}(\hat{A} - \tau e)h(\hat{A} - \tau e) \end{aligned}$$

结合一阶条件 $\partial \pi_m(Q, e)/\partial Q = 0$ 化简得到:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \pi_m(Q, e)}{\partial Q \partial e} &= \tau \bar{F}(Q - \tau e)h(Q - \tau e) - N\bar{F}(Q - \tau e)h(\hat{A} - \tau e) \\ &= \bar{F}(Q - \tau e)[\tau h(Q - \tau e) - Nh(\hat{A} - \tau e)] \end{aligned}$$

此时,式(6)的 Hessian 矩阵为:

$$\mathbf{H}(Q, e) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \pi_m(Q, e)}{\partial Q^2} & \frac{\partial^2 \pi_m(Q, e)}{\partial Q \partial e} \\ \frac{\partial^2 \pi_m(Q, e)}{\partial e \partial Q} & \frac{\partial^2 \pi_m(Q, e)}{\partial e^2} \end{bmatrix}$$

由 Hessian 矩阵可以得到其行列式为:

$$\det \mathbf{H}(Q, e) = v(1 + R_m)\bar{F}(Q - \tau e)\bar{F}(\hat{A} - \tau e)[h(Q - \tau e) - Mh(\hat{A} - \tau e)]$$

由前面假设知 $M < 1$, 且 $h(x)$ 是严格递增函数,故 $h(Q - \tau e) - Mh(\hat{A} - \tau e) > 0$ 。因此,有 $\det \mathbf{H}(Q, e) > 0$ 。

因为 $\partial^2 \pi_m(Q, e)/\partial Q^2 < 0$ 和 $\det \mathbf{H}(Q, e) > 0$, 所以 Hessian 矩阵是负定的,故 $\pi_m(Q, e)$ 关于 Q 和 e 是联合凹的。此时,存在唯一的最优解 (Q^*, e^*) 满足:

$$\bar{F}(Q^* - \tau e^*) = M\bar{F}(\hat{A} - \tau e^*), \tau \bar{F}(Q^* - \tau e^*) = N\bar{F}(\hat{A} - \tau e^*)$$

由以上两式可解得, $e^* = \frac{p_e + \tau(1 - M)}{v(1 + R_m)}$ 。证毕。

命题 1 表明,受资金约束的制造商在确定最优订购量

Q^* 和最优低碳减排水平 e^* 时,不仅要考虑批发价格 w 、碳排放权价格 p_e 、初始排放量 β 、减排投资成本系数 v ,还要考虑银行贷款给制造商的利率 R_m ,以及政府分配的排放上限 G 。

推论 1 假设需求分布函数满足 IFR 性质,则:1) $dQ^*/dw < 0$, $de^*/dw < 0$; 2) $dQ^*/dG < 0$; 3) 当 $MB_m < wQ$ 时, $dQ^*/dR_m < 0$, $de^*/dR_m < 0$ 。

证明:1)首先,利用隐函数求导法则,在式(7)两边同时对 w 求导,化简整理得到

$$\frac{dQ^*}{dw} = -\frac{\tau^2}{v} \frac{1+R_m}{M} \cdot \frac{1-MQ^*h(\hat{A}-\tau e^*)}{h(Q^*-\tau e^*)-Mh(\hat{A}-\tau e^*)}$$

根据文献[25-27]的证明,可知 $1-Q^*h(Q^*) > 0$ 。由此,可以推出

$$1-MQ^*h(\hat{A}-\tau e^*) > 1-Q^*h(Q^*-\tau e^*) > 1-Q^*h(Q^*) > 0$$

这里用到了失效率函数 $h(\cdot)$ 的单增性质,所以,

$$\frac{1-MQ^*h(\hat{A}-\tau e^*)}{h(Q^*-\tau e^*)-Mh(\hat{A}-\tau e^*)} > 0$$

从而得到 $dQ^*/dw < 0$ 。

其次,根据式(8),易得 $de^*/dw = -\tau/v < 0$ 。

2)在式(7)两边对 G 求导,可得:

$$\frac{dQ^*}{dG} = -\frac{p_e h(\hat{A}-\tau e^*)}{h(Q^*-\tau e^*)-Mh(\hat{A}-\tau e^*)}$$

由命题 1 的证明可知, $h(Q^*-\tau e^*)-Mh(\hat{A}-\tau e^*) > 0$, 因此,可以得到 $dQ^*/dG < 0$ 。

3)首先,在式(7)两边同时对 R_m 求导,化简整理得到:

$$\frac{dQ^*}{dR_m} = -\frac{\tau[p_e + (1-\beta p_e)\tau]}{v(1+R_m)^2} \frac{w\bar{F}(\hat{A}-\tau e^*) - MB_m f(\hat{A}-\tau e^*)}{f(Q^*-\tau e^*) - M^2 f(\hat{A}-\tau e^*)}$$

结合式(7),

$$f(Q^*-\tau e^*) - M^2 f(\hat{A}-\tau e^*) = \bar{F}(Q^*-\tau e^*) [h(Q^*-\tau e^*) - Mh(\hat{A}-\tau e^*)] > 0$$

又因为,

$$w\bar{F}(\hat{A}-\tau e^*) - MB_m f(\hat{A}-\tau e^*) = \bar{F}(\hat{A}-\tau e^*) [w - MB_m h(\hat{A}-\tau e^*)]$$

当 $MB_m < wQ$ 时,即当碳排放投资成本不是很大时,有

$$w - MB_m h(\hat{A}-\tau e^*) > w - wQ^* h(\hat{A}-\tau e^*) > w[1 - Q^* h(Q^*-\tau e^*)] > 0$$

此时,

$$\frac{w\bar{F}(\hat{A}-\tau e^*) - MB_m f(\hat{A}-\tau e^*)}{f(Q^*-\tau e^*) - M^2 f(\hat{A}-\tau e^*)} > 0$$

综合上面的分析,可得到 $dQ^*/dR_m < 0$ 。

其次,在式(8)两边同时对 R_m 求导,得到:

$$\frac{de^*}{dR_m} = -\frac{p_e + (1-\beta p_e)\tau}{v(1+R_m)^2} < 0$$

证毕。

推论 1 表明,批发价格增加使得制造商的运营成本增加,因而制造商会降低订购量和减排水平。推论 2)表明,制造商的最优订购量与碳排放上限呈反比的关系,当政府降低碳排放上限时,制造商的破产风险增加(由 \hat{A} 的定义),而这种破产风险由银行承担。因此,制造商会增加订购量来提高其利润。而政府分配的碳排放上限不直接影响减排水平,但由于排放上限影响订购量从而也影响批发价格,故它会间接影响减排水平。推论 3)表明,当碳排放投资成本不是很大时,银行会提高贷款利率,则制造商的融资成本增加,因而制造商会降低订购量和减排水平。

4.2 供应商的最优定价决策

作为 Stackelberg 博弈的次领导者,供应商根据制造商关于订购量的最优反应函数来决定批发价格。供应商从制造商获得的收益为 wQ^* ,则向银行借款为 $B_s = cQ^* - K_s$ 。因此,供应商的期望利润函数为:

$$\pi_s(w) = wQ^* - B_s(1+R_s) \quad (9)$$

命题 2 给定银行的贷款利率 R_s ,则供应商的最优批发价格 w^* 满足:

$$w^* = c(1+R_s) - \frac{Q^*}{dQ^*/dw} \quad (10)$$

其中:

$$\frac{dQ^*}{dw} = -\frac{\tau^2}{v} \frac{1+R_m}{M} \cdot \frac{1-MQ^*h(\hat{A}-\tau e^*)}{h(Q^*-\tau e^*)-Mh(\hat{A}-\tau e^*)}$$

证明:供应商的期望利润函数可进一步表示为

$$\pi_s(w) = [w - c(1+R_s)]Q^* + k_s(1+R_s)$$

对 $\pi_s(w)$ 关于 w 求一阶导数,得到:

$$\frac{d\pi_s(w)}{dw} = Q^* + [w - c(1+R_s)] \frac{dQ^*}{dw}$$

由一阶条件 $d\pi_s(w)/dw = 0$,得到最优批发价格满足式(10)。其中, dQ^*/dw 的表达式见推论 1) 的证明过程。证毕。

命题 2 表明,供应商的定价决策比传统供应链更加复杂,传统供应链的批发价格仅需要考虑订购量和生产成本等运营参数。然而,本文研究的碳排放依赖型供应链融资策略中,供应商需要考虑银行的融资利率、制造商的减排水平和破产风险等因素。供应商的最优批发价格不仅与银行贷款给自身的利率 R_s 有关,且与银行贷款给制造商的利率 R_m 有关,随着贷款利率 R_s 的增加,供应商会提高批发价格。

4.3 银行的最优利率决策

在确定了制造商和供应商的最优反应决策之后,下面分析银行分别贷款给受资金约束的制造商和供应商的最优利率决策问题。

4.3.1 银行融资制造商的利率决策

在销售期末,制造商的收益为 $\min(Q, D) - p_e(\beta Q - G - e)$ 。当 $[\min(Q, D) - p_e(\beta Q - G - e)] > B_m(1+R_m)$ 时,制造商的收益可以支付银行贷款的本金和利息为 $B_m(1+R_m)$; 当 $[\min(Q, D) - p_e(\beta Q - G - e)] < B_m(1+R_m)$ 时,制造商的收益不足以支付银行贷款的本金和利息,将面临破产。由于制造商具有有限责任能力,则将收益 $\min(Q, D) - p_e(\beta Q - G - e)$ 全部偿还给银行。因此,银行融资制造商的期望利润函数为:

$$\pi_m^*(R_m) = E\{\min[B_m(1+R_m), (\min(Q, D) - p_e(\beta Q - G - e))]\} - B_m(1+R_f) \quad (11)$$

命题 3 银行融资制造商的最优利率 R_m^* 满足:

$$[M\bar{F}(\hat{A}-\tau e^*)-T]\frac{dQ^*}{dR_m}-[N\bar{F}(\hat{A}-\tau e^*)-S]\frac{de^*}{dR_m}+B_m\bar{F}(\hat{A}-\tau e^*)=0 \quad (12)$$

其中, $S=p_e+\tau-ve(1+R_f)$, $T=\beta p_e+\omega(1+R_f)$, $\frac{de^*}{dR_m}=-\frac{p_e+(1-\beta p_e)\tau}{v(1+R_m)^2}$, $\frac{dQ^*}{dR_m}=-\frac{\tau[p_e+(1-\beta p_e)\tau]}{v(1+R_m)^2}-\frac{\bar{w}F(\hat{A}-\tau e^*)-MB_m f(\hat{A}-\tau e^*)}{f(Q^*-\tau e^*)-M^2 f(\hat{A}-\tau e^*)}$.

证明: 银行融资制造商的期望利润可进一步表示为

$$\pi_b^m(R_m)=\int_0^{\hat{A}-\tau e^*}\bar{F}(x)dx+\tau e^*-p_e(\beta Q^*-G-e^*)-\left(\omega Q^*+\frac{v(e^*)^2}{2}-K_m\right)(1+R_f)$$

对 $\pi_b^m(R_m)$ 关于 R_m 求一阶导数, 化简整理得到:

$$\frac{d\pi_b^m(R_m)}{dR_m}=[M\bar{F}(\hat{A}-\tau e^*)-T]\frac{dQ^*}{dR_m}-[N\bar{F}(\hat{A}-\tau e^*)-S]\frac{de^*}{dR_m}+B_m\bar{F}(\hat{A}-\tau e^*)$$

根据一阶条件 $d\pi_b^m(R_m)/dR_m=0$, 得到银行融资制造商的最优利率 R_m^* 满足式 (12), 其中 de^*/dR_m 与 dQ^*/dR_m 的表达式见推论 3) 的证明过程。证毕。

命题 3 表明, 银行贷款给受资金约束制造商的最优融资率表达式很复杂, 取决于借款人的财务状况 (即自有资金) 以及各种运营参数。命题 3 还表明, 整个供应链的减排决策、运营决策和融资决策之间存在着紧密的联系。

4.3.2 银行融资供应商的利率决策

接下来, 讨论银行融资受资金约束供应商的利率决策。因为 $K_s < cQ$, 所以供应商在生产初期选择从商业银行贷款 $B_s=cQ-K_s$ 。由命题 2 可知, $\omega^* \geq c(1+R_s)$, 该不等式意味着供应商可以在不破产的情况下融资。因此, 银行融资供应商的期望利润函数为:

$$\pi_b^s(R_s)=B_s(1+R_s)-B_s(1+R_f) \quad (13)$$

命题 4 银行融资供应商的最优利率 R_s^* 满足:

$$R_s^*=R_f-\frac{(cQ^*-K_s)}{c^2 \cdot dQ^*/d\tau} \quad (14)$$

证明: 银行贷款给供应商的期望利润可进一步表示为

$$\pi_b^s(R_s)=(cQ^*-K_s)(R_s-R_f)$$

对 $\pi_b^s(R_s)$ 关于 R_s 求一阶导数, 得到:

$$\frac{d\pi_b^s(R_s)}{dR_s}=c(R_s-R_f)\frac{dQ^*}{dR_s}+cQ^*-K_s$$

因为

$$\frac{dQ^*}{dR_s}=\frac{dQ^*}{d\tau} \cdot \frac{d\tau}{dR_s}=c \frac{dQ^*}{d\tau}$$

所以

$$\frac{d\pi_b^s(R_s)}{dR_s}=c^2(R_s-R_f)\frac{dQ^*}{d\tau}+cQ^*-K_s$$

由一阶条件 $d\pi_b^s(R_s)/dR_s=0$, 可得式 (14)。证毕。

命题 4 表明, 银行贷款给供应商的融资利率取决于供应商的财务状况、信誉及各种运营参数。实际上, 作为双层 Stackelberg 博弈的主领导者, 为了避免借款方的破产风险, 银行要额外注意调查和监管整个供应链的运作, 包括库存水平、减排水平、批发价格等。

5 算例分析

为了进一步分析最优决策的参数敏感性, 下面将通过数值实验来模拟供应链金融系统中的 Stackelberg 博弈模型, 以获得更多的管理意义。假设市场需求 D 服从均值为 λ 的指数分布, 按照文献 [20] 和 [28] 的参数设置, 本文的参数取值如表 2 所列。

表 2 模型参数取值

Table 2 Model parameter values

参数符号	参数值	参数符号	参数值
c	0.2	p_e	0.12
v	2.2	G	100
τ	8	K_m	6
β	0.3	K_s	3
λ	0.01	R_f	0.05

表 3 列出了排放上限 G 对供应链成员最优决策和利润的影响。其中, G 的取值范围为 $[50, 150]$, 其余参数取值如表 2 所列。从表 3 可以看出, 随着排放上限的增加, 最优订购量和最优减排水平都在降低, 而最优批发价格在增加, 这与推论 2) 中的结论一致。这是因为, 如果政府分配较低的排放上限, 给定利率和批发价格, 制造商的破产风险将增加 (由 \hat{A} 的定义知), 而破产风险将由银行承担。此时, 制造商会采取更加冒进的订购策略, 以最大限度地提高自身的预期利润。并且, 制造商会降低减排水平, 以减少碳排放权交易成本。由于制造商订购量的减少, 供应商将会提高批发价格, 而银行也会提高贷款利率。由此看出, 政府对企业碳排放量的控制, 不仅影响企业的排放决策, 同时也影响企业的运作决策与银行的利率决策。从表 3 还可以看出, 制造商和银行的利润与排放上限呈正相关, 而供应商的利润与排放上限呈负相关。政府对排放上限的控制, 对制造商利润的影响最大。

表 3 政府的排放上限 G 对供应链成员最优决策和利润的影响

Table 3 Impact of government's emission cap G on supply chain members' optimal decisions and profits

G	Q^*	e^*	ω^*	R_m^*	R_s^*	π_m^*	π_s^*	π_b^{m*}	π_b^{s*}
50	60.4535	0.6315	0.5123	0.4254	0.6350	18.6700	16.1070	6.1379	5.3183
60	59.8246	0.5999	0.5160	0.4276	0.6702	19.3070	15.8974	6.4003	5.5601
70	59.2247	0.5697	0.5194	0.4296	0.7057	19.9794	15.6757	6.6518	5.7995
80	58.6512	0.5408	0.5225	0.4315	0.7414	20.6865	15.4426	6.8915	6.0365
90	58.1013	0.5131	0.5253	0.4332	0.7775	21.4278	15.1988	7.1188	6.2711
100	57.5728	0.4865	0.5278	0.4348	0.8138	22.2029	14.9446	7.3329	6.5031
110	57.0637	0.4610	0.5300	0.4363	0.8503	23.0116	14.6808	7.5332	6.7325
120	56.5722	0.4365	0.5320	0.4376	0.8870	23.8538	14.4076	7.7189	6.9591
130	56.0967	0.4130	0.5337	0.4388	0.9239	24.7293	14.1255	7.8893	7.1829
140	55.6356	0.3903	0.5351	0.4399	0.9610	25.6384	13.8350	8.0435	7.4037
150	55.1877	0.3686	0.5363	0.4408	0.9982	26.5811	13.5365	8.1807	7.6215

表4列出了单位产品的初始排放量 β 对供应链成员最优决策和利润的影响。其中, β 的取值范围为 $[0.1, 1.0]$,其余参数取值如表2所列。由表4可以看出,随着初始排放量的增加,最优订购量、最优减排水平和最优批发价格都在降低,银行贷款给制造商和供应商的利率也在下降。这是因为,初

始排放量的增加会导致制造商的减排成本增加,从而制造商会减少订购量。为了刺激制造商增加订购量,供应商会降低批发价格。为了让制造商增加贷款量,银行会降低贷款利率。从表4还可以看出,制造商的利润与初始排放量呈正相关,而供应商和银行的利润与初始排放量呈负相关。

表4 单位产品的初始排放量 β 对供应链成员最优决策和利润的影响Table 4 Effect of initial emissions per unit of product β on supply chain members' optimal decisions and profits

β	Q^*	e^*	w^*	R_m^*	R_s^*	π_m^*	π_s^*	π_b^{m*}	π_b^s*
0.1	59.0067	0.4971	0.5499	0.4440	0.8215	21.5746	16.4143	8.0220	6.7906
0.2	58.2914	0.4919	0.5388	0.4394	0.8176	21.8955	15.6708	7.6740	6.6462
0.3	57.5728	0.4865	0.5278	0.4348	0.8138	22.2029	14.9446	7.3329	6.5031
0.4	56.8508	0.4809	0.5169	0.4302	0.8100	22.4966	14.2359	6.9988	6.3613
0.5	56.1254	0.4751	0.5060	0.4257	0.8063	22.7765	13.5445	6.6719	6.2207
0.6	55.3964	0.4690	0.4953	0.4212	0.8027	23.0426	12.8706	6.3522	6.0814
0.7	54.6638	0.4628	0.4845	0.4167	0.7992	23.2947	12.2142	6.0399	5.9433
0.8	53.9275	0.4562	0.4739	0.4122	0.7958	23.5329	11.5753	5.7350	5.8064
0.9	53.1875	0.4495	0.4633	0.4078	0.7925	23.7572	10.9540	5.4375	5.6707
1.0	52.4436	0.4425	0.4529	0.4034	0.7893	23.9674	10.3501	5.1476	5.5361

表5列出了制造商的自由资金对供应链成员最优决策和利润的影响。当 $K_m \geq 10$ 时,得到 $R_m > 1$,不满足利率小于1的条件,所以 K_m 的取值范围为 $[0, 9]$,其余参数取值如表2所列。

由表5可以看出,随着制造商的自由资金的增加,其最优订购量和最优减排水平都在降低,银行贷款给制造商的最优利率在增加,供应商的最优批发价格会提高。这是因为,随着制造商自由资金的增加,贷款量会减少,库存风险会增加,所

产生的损失是由自己承担。此时,制造商会减少订购量,以此来减少自由资金的损失。因为制造商减少贷款量,所以银行贷款给制造商的利率会上升。制造商订购量的减少,会导致供应商提高批发价格,制造商也会降低减排水平。从表5还可以看出,供应商和银行的利润与制造商的自由资金呈正相关。当制造商的自由资金较少时,制造商的利润随自由资金的增加而下降;当制造商的自由资金较多时,制造商的利润随自由资金的增加而增加。

表5 制造商的自由资金 K_m 对供应链成员最优决策和利润的影响Table 5 Impact of manufacturer's free capital K_m on supply chain members' optimal decisions and profits

K_m	Q^*	e^*	w^*	R_m^*	R_s^*	π_m^*	π_s^*	π_b^{m*}	π_b^s*
0	60.9132	0.9361	0.4215	0.3829	0.4465	23.7302	12.3921	7.0962	3.6409
1	59.9413	0.8286	0.4435	0.3937	0.5154	23.0829	12.9640	7.1538	4.1827
2	59.2195	0.7394	0.4631	0.4033	0.5801	22.6587	13.4520	7.2022	4.6886
3	58.6629	0.6634	0.4810	0.4120	0.6419	22.3909	13.8820	7.2435	5.1685
4	58.2220	0.5972	0.4976	0.4201	0.7011	22.2407	14.2685	7.2789	5.6284
5	57.8655	0.5388	0.5132	0.4277	0.7583	22.1836	14.6207	7.3086	6.0724
6	57.5728	0.4865	0.5278	0.4348	0.8138	22.2029	14.9446	7.3329	6.5031
7	57.3292	0.4394	0.5417	0.4415	0.8677	22.2870	15.2445	7.3517	6.9225
8	57.1245	0.3965	0.5550	0.4479	0.9203	22.4271	15.5236	7.3649	7.3322
9	56.9508	0.3573	0.5676	0.4541	0.9717	22.6168	15.7842	7.3722	7.7333

表6列出了供应商的自由资金 K_s 对供应链成员最优决策和利润的影响。当 $K_s \geq 7$ 时,得出 $w^* \geq c(1+R_s^*)$ 不满足,即不满足供应商不会破产的条件,所以 K_s 的取值范围为 $[0, 6]$,其余参数取值如表2所列。

由表6可以看出,随着供应商的自由资金 K_s 的增加,最优批发价格在降低,制造商的最优订购量和减排水平都在上升,此时,银行贷款给供应商的利率在上升,而银行贷款给制造商的利率在下降。这是因为,随着自由资金的增加,供应商

的融资成本会减少,从而供应商会降低批发价格,这促使制造商增加订购量,并提高减排水平。另外,随着自由资金的增加,供应商的贷款量减少,从而银行会提高贷款给供应商的利率。此时,制造商的订购量增加,贷款量增加,所以银行会降低贷款给制造商的利率。从表6还可以看出,制造商的利润与供应商的自由资金呈正相关,而供应商和银行的利润与供应商的自由资金呈负相关。供应商的自由资金越多,对制造商越有利,对整体供应链绩效也越有利。

表6 供应商的自由资金 K_s 对供应链成员最优决策和利润的影响Table 6 Impact of suppliers' free capital K_s on supply chain members' optimal decisions and profits

K_s	Q^*	e^*	w^*	R_m^*	R_s^*	π_m^*	π_s^*	π_b^{m*}	π_b^s*
0	55.0719	0.4441	0.6633	0.4553	0.8096	13.5186	16.5963	8.0844	8.3662
1	55.8963	0.4579	0.6184	0.4485	0.8110	16.2610	16.1304	7.8958	7.7462
2	56.7299	0.4720	0.5732	0.4417	0.8124	19.1529	15.5801	7.6480	7.1251
3	57.5728	0.4865	0.5278	0.4348	0.8138	20.2029	14.9446	7.3329	6.5031
4	58.4251	0.5015	0.4822	0.4279	0.8151	25.4203	14.2236	6.9418	5.8800
5	59.2868	0.5168	0.4364	0.4209	0.8165	28.8146	13.4166	6.4652	5.2561
6	60.1582	0.5325	0.3904	0.4139	0.8178	32.3958	12.5237	5.8932	4.6312

表 7 列出了消费者低碳意识 τ 对供应链成员最优决策和利润的影响。当 $\tau \leq 2$ 或 $\tau \geq 10$ 时, 不满足 $0 \leq R_s^* \leq 1$ 的条件, 所以 τ 的取值范围为 $[3, 9]$, 其余参数取值如表 2 所列。

由表 7 可以看出, 随着消费者低碳意识 τ 的提升, 最优减排水平在下降, 而最优订购量、最优批发价格及银行贷款给制造商和供应商的利率都在上升。这是因为, 随着低碳意识的增加, 消费者更倾向于购买低碳产品, 即产品的需求量增加,

表 7 消费者低碳意识 τ 对供应链成员最优决策和利润的影响Table 7 Impact of consumers' low-carbon awareness τ on supply chain members' optimal decisions and profits

τ	Q^*	e^*	w^*	R_m^*	R_s^*	π_m^*	π_s^*	π_b^{m*}	π_b^s
3	54.8085	0.5207	0.4997	0.4238	0.3224	23.7956	16.8583	6.3704	2.1691
4	55.1674	0.5157	0.5036	0.4253	0.4191	23.6268	16.3836	6.5328	2.9648
5	55.6245	0.5096	0.5085	0.4273	0.5164	23.3805	15.9635	6.7122	3.7896
6	56.1787	0.5026	0.5142	0.4295	0.6146	23.0582	15.5897	6.9070	4.6502
7	56.8289	0.4948	0.5207	0.4320	0.7138	22.6636	15.2535	7.1150	5.5528
8	57.5728	0.4865	0.5278	0.4348	0.8138	22.2029	14.9446	7.3329	6.5031
9	58.4070	0.4779	0.5354	0.4377	0.9146	21.6861	14.6515	7.5565	7.5057

表 8 列出了单位碳排放权价格 p_e 对供应链成员最优决策和利润的影响。当 $p_e \geq 0.18$ 时, 得到 $R_s^* > 1$, 不满足利率小于 1 的条件, 所以 p_e 的取值范围为 $[0.10, 0.17]$, 其余参数取值如表 2 所列。

由表 8 可以看出, 随着单位碳排放权价格的增加, 制造商的最优订购量、最优减排水平以及供应商的最优批发价格都在降低, 银行贷款给制造商的利率变化不大, 供应商的利率在上升。这是因为, 碳排放权交易成本的增加导致制造商的初始减排成本增加, 从而制造商会减少订购量和减排水平。为

表 8 单位碳排放权价格 p_e 对供应链成员最优决策和利润的影响Table 8 Impact of unit carbon credit price p_e on supply chain members' optimal decisions and profits

p_e	Q^*	e^*	w^*	R_m^*	R_s^*	π_m^*	π_s^*	π_b^{m*}	π_b^s
0.10	58.8125	0.5343	0.5288	0.4343	0.7493	20.7885	15.7716	7.1277	6.1280
0.11	58.1862	0.5101	0.5284	0.4346	0.7814	21.4856	15.3580	7.2359	6.3170
0.12	57.5728	0.4865	0.5278	0.4348	0.8138	22.2029	14.9446	7.3329	6.5031
0.13	56.9709	0.4635	0.5271	0.4350	0.8465	22.9408	14.5314	7.4185	6.6861
0.14	56.3796	0.4410	0.5263	0.4351	0.8796	23.6993	14.1181	7.4922	6.8661
0.15	55.7977	0.4190	0.5254	0.4351	0.9132	24.4789	13.7047	7.5536	7.0429
0.16	55.2243	0.3975	0.5243	0.4351	0.9470	25.2799	13.2910	7.6023	7.2166
0.17	54.6585	0.3765	0.5231	0.4350	0.9813	26.1026	12.8768	7.6377	7.3869

结束语 在“碳限额与交易机制”下, 本文从考虑供应商和碳排放依赖型制造商双方都受到资金约束的问题出发, 建立了由商业银行为主导者、供应商为次领导者以及制造商为跟随者的双层 Stackelberg 博弈模型。在随机需求的情形下, 研究了供应商的最优批发价格决策、制造商的最优订购和减排决策及银行的最优利率决策。本文研究得出的结论如下: 1) 作为双层 Stackelberg 博弈的主导者, 为了减少借款方的破产风险带来的损失, 银行要注意监管整个供应链的运作, 包括库存水平、减排水平和批发价格等; 2) 当政府给制造商分配较低的碳排放上限时, 会增加制造商的破产风险, 当制造商具有有限责任能力时, 将会采用更加冒进的订购策略来最大化自身的利润; 3) 制造商的利润与排放上限呈正相关, 这是因为制造商可以在碳排放权交易市场出售多余的碳配额, 以获得额外收入, 因此, 政府需要合理分配碳排放权, 防止制造商恶意通过碳排放权交易市场牟利; 4) 供应商的自由资金的多少, 不仅影响着自身利润, 而且极大地影响着制造商和供应链利润。供应商的自由资金越多, 对制造商

从而制造商的最优订购量会增加。为了降低排放成本与融资成本, 制造商会降低减排水平。

此时, 供应商会提高批发价格。由于制造商和供应商的贷款量增加, 其违约风险也增加, 从而银行会提高贷款利率。从表 7 还可以看出, 银行的利润与消费者低碳意识呈正相关, 而制造商和供应商的利润与消费者低碳意识呈负相关。

了刺激制造商增加订购量, 供应商会降低批发价格。此时, 制造商和供应商的贷款量也会减少, 则银行会提高贷款利率。由此看出, 企业单位碳排放权价格的高低, 不仅影响企业的排放决策, 同时也影响企业的运营决策与银行的利率决策。从表 8 还可以看出, 制造商和银行的利润与单位碳排放权价格呈正相关, 而供应商的利润与单位碳排放权价格呈负相关。单位碳排放权价格的高低, 对制造商利润的影响最大。这是因为, 制造商可以通过碳减排投资在排放权交易市场上获得更多的收益。

和整体供应链绩效也越有利。

本文只考虑了银行融资模式, 未来可以考虑不同的融资模式对供应链成员均衡决策的影响并进行对比分析; 未来还可以考虑供应链成员具有风险规避性对均衡决策的影响。

参 考 文 献

- [1] XU D, WU J. Building a low-carbon supply chain with a dual-carbon goal[N]. China Social Science Journal, 2022-08-03(003).
- [2] DU S, ZHU L, LIANG L, et al. Emission-dependent supply chain and environment-policy-making in the 'cap-and-trade' system[J]. Energy Policy, 2013, 57: 61-67.
- [3] CHAN H L, CHOI T M, CAI Y J, et al. Environmental taxes in newsvendor supply chains: A mean-downside-risk analysis[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2018, 50(12): 4856-4869.
- [4] DU S, MA F, FU Z, et al. Game-theoretic analysis for an emission-dependent supply chain in a 'cap-and-trade' system[J]. An-

- nals of Operations Research, 2015, 228(1): 135-149.
- [5] HUA G, QIAO H, JIAN L. Optimal order lot sizing and pricing with carbon trade[C]// Proceedings of the 13th International Conference on Enterprise Information Systems(DMLSC'2011). 2011:533-536.
- [6] KROES J, SUBRAMANIAN R, SUBRAMANYAM R. Operational compliance levers, environmental performance, and firm performance under cap and trade regulation[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2012, 14(2): 186-201.
- [7] CHEN X H, ZENG X Y, WANG F Q. Impact of carbon trading price on supply chain carbon emissions under carbon cap-and-trade mechanism[J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2016, 36(10): 2562-2571.
- [8] XIA L, GUO T, QIN 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): 149-175.
- [9] MIAO Z, MAO H, FU K, et al. Remanufacturing with trade-ins under carbon regulations[J]. Computers & Operations Research, 2018, 89: 253-268.
- [10] JIN W, DING W, YANG J. Impact of financial incentives on green manufacturing: Loan guarantee vs. interest subsidy[J]. European Journal of Operational Research, 2022, 300(3): 1067-1080.
- [11] WU R, XIA X Q, ZENG Q L. Comparative analysis of the impact of carbon quota allocation on carbon emission reduction[J]. Industrial Technology Economics, 2023, 42(2): 37-47.
- [12] CAO E, YU M. Trade credit financing and coordination for an emission-dependent supply chain[J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 119: 50-62.
- [13] QIN J, ZHAO Y, XIA L. Carbon emission reduction with capital constraint under greening financing and cost sharing contract [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(4): 750.
- [14] WU D D, YANG L, OLSON D L. Green supply chain management under capital constraint[J]. International Journal of Production Economics, 2019, 215: 3-10.
- [15] ZHANG K Y, LI C X, YAO J M. Low carbon supply chain financing decision considering carbon limit and sales effort[J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(22): 256-263.
- [16] XU S, FANG L. Partial credit guarantee and trade credit in an emission-dependent supply chain with capital constraint [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2020, 135: 101859.
- [17] ZHOU T, TAO M, MENG X Q. A study on low carbon financing strategies for manufacturers considering financial constraints under carbon trading regulation[J]. Financial Theory and Practice, 2022(9): 44-56.
- [18] JIN Y Q, ZHAN J Z, WANG Y H. Research on Green Supply Chain Financing Strategy Constrained by Supplier Funds[J]. Practice and Understanding of Mathematics, 2022, 52(11): 21-32.
- [19] BAI S, WU D, YAN Z. Operational decisions of green supply chain under financial incentives with emission constraints[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 389: 1-15.
- [20] YAN N, DAI H, SUN B. Optimal bi-level Stackelberg strategies for supply chain financing with both capital-constrained buyers and sellers[J]. Applied Stochastic Models in Business and Industry, 2014, 30(6): 783-796.
- [21] CAO E, DU L, RUAN J. Financing preferences and performance for an emission-dependent supply chain: Supplier vs. bank[J]. International Journal of Production Economics, 2019, 208: 383-399.
- [22] LARIVIERE M A, PORTEUSE L. Selling to the newsvendor: An analysis of price-only contracts[J]. Manufacturing & service operations management, 2001, 3(4): 293-305.
- [23] LARIVIERE M A. A note on probability distributions with increasing generalized failure rates [J]. Operations Research, 2006, 54(3): 602-604.
- [24] JING B, CHEN X, CAI G. Equilibrium financing in a distribution channel with capital constraint[J]. Production and Operations Management, 2012, 21(6): 1090-1101.
- [25] KOUVELIS P, ZHAO W. Financing the newsvendor : supplier vs. bank, and the structure of optimal trade credit contracts[J]. Operations research, 2012, 60(3): 566-580.
- [26] CHEN X, CAI G G. Joint logistics and financial services by a 3PL firm[J]. European Journal of Operational Research, 2011, 214(3): 579-587.
- [27] GAO G X, FAN Z P, FANG X, et al. Optimal Stackelberg strategies for financing a supply chain through online peer-to-peer lending[J]. Eur. J. Oper. Res. , 2018, 267(2): 585-597.
- [28] LI L Y, LIU G A, LI X B, et al. Research on low-carbon supply chain decision considering risk aversion and capital constraint [J]. Computer Science, 2022, 49(S2): 950-955.



WANG Min, born in 1993, postgraduate. Her main research interests include logistics and supply chain management.



LI Liying, born in 1975, Ph.D, associate professor. Her main research interests include logistics and supply chain management.