

考虑风险规避和资金约束的低碳供应链决策研究

李莉英, 刘光安, 李小兵, 王博

引用本文

李莉英, 刘光安, 李小兵, 王博. 考虑风险规避和资金约束的低碳供应链决策研究[J]. 计算机科学, 2022, 49(11A): 210900104-6.

LI Li-ying, LIU Guang-an, LI Xiao-bing, WANG Bo. [Study on Decision-making for Low-carbon Supply Chain with Capital Constraint and Risk Aversion](#) [J]. Computer Science, 2022, 49(11A): 210900104-6.

相似文章推荐 (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)

[基于多面体模型的矩阵乘法向量代码生成](#)

Matrix Multiplication Vector Code Generation Based on Polyhedron Model

计算机科学, 2022, 49(10): 44-51. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210800247>

[基于战术关联的网络安全风险评估框架](#)

Network Security Risk Assessment Framework Based on Tactical Correlation

计算机科学, 2022, 49(9): 306-311. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210600171>

[基于回复生成的对话意图预测](#)

Dialogue Act Prediction Based on Response Generation

计算机科学, 2021, 48(2): 212-216. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.200700137>

[基于单通道脑电信号的疲劳检测系统](#)

Fatigue Detection System Based on Single Channel EEG Signal

计算机科学, 2020, 47(5): 225-229. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.190400127>

[高速移动场景下基于贪婪算法的改进模代数预编码](#)

Improved Tomlinson-Harashima Precoding Based on Greedy Algorithm in High-speed Mobile Scenarios

计算机科学, 2019, 46(8): 121-126. <https://doi.org/10.11896/j.issn.1002-137X.2019.08.020>

考虑风险规避和资金约束的低碳供应链决策研究

李莉英 刘光安 李小兵 王 博
重庆交通大学数学与统计学院 重庆 400074
(llying-111@163.com)

摘 要 为了缓解低碳环境下资金约束制造商融资难的问题,在“碳限额与交易”制度下,建立了由风险中性供应商主导、损失规避制造商跟随的 Stackelberg 博弈模型。假设在制造商的融资同时用于订购和减排投资决策的情形下,分别得出了风险中性和损失规避制造商的最优订购和减排决策,以及供应商的最优批发定价决策。理论和算例分析表明,制造商的损失规避度越高,制造商将采取更加保守的订购策略,这会促使供应商提高批发价格,从而使得制造商降低减排水平。制造商的损失规避性对自身期望效用的影响与政府分配的碳排放上限有关。当碳排放上限较大时,具有较高损失规避度的制造商可以在排放权交易市场出售更多剩余的排放许可量来获得额外的收益。

关键词: 碳限额;碳排放权交易;损失规避;供应链融资

中图法分类号 F274

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

LI Li-ying, LIU Guang-an, LI Xiao-bing and WANG Bo
College of Mathematics and Statistics, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

Abstract In order to alleviate the financing difficulties of capital-constrained manufacturers in low-carbon environment, a Stackelberg game model is established in government's cap-and-trade system, which is led by a risk-neutral supplier and followed by a loss-averse manufacturer. Based on the assumption that the manufacturer borrows two loans to execute the ordering decision and make emission reduction investment, the optimal ordering and emission reduction decisions of the risk-neutral and loss-averse manufacturer and the optimal wholesale pricing decision of the supplier are obtained, respectively. Theoretical and numerical analysis show that when the manufacturer is loss-averse, it will make more conservative order decisions, and the supplier will set a higher wholesale price. As a result, the manufacturer reduces the emission reduction level. The impact of loss aversion on the expected utility of the manufacturer is related to carbon cap allocated by the government. When carbon cap is large, the manufacturer with higher loss aversion can earn additional gains by selling more remaining emission permits in the carbon permit trading markets.

Keywords Carbon emission quota, Carbon permit trade, Loss aversion, Supply chain finance

温室效应对全球可持续发展有着重大的负面影响,如海平面上升、自然灾害等,而温室效应主要是由过量的碳排放导致的。因此,越来越多的国家和组织通过碳排放权交易^[1]和环境税^[2]等方式来努力遏制碳排放。根据排放权交易机制^[3],制造商获得政府分配的碳排放限额。如果制造商的碳排放总量超过允许的排放上限,则必须从排放权交易市场购买其所需的碳配额;或者,制造商可以出售多余的排放许可量来获得额外的收益。

迫于环境法规和消费者偏好的压力,很多制造企业开始在生产运营中采取节能减排的措施。但在实际生产中,由于实施节能减排技术改进的成本高、耗时长等,很多企业(尤其中小型企业)往往陷入资金不足的困境^[4]。由于自身信誉低,无充足的抵押品等原因,资金受约束的制造商很难直接获得

银行贷款。此时,考虑供应链贸易信用融资就显得十分必要。常见的贸易信用融资就是供应商允许制造商将采购成本在销售季节末进行延期支付。因此,在“碳限额与交易”制度下,考虑资金约束供应链的减排、生产运营和融资决策问题有着重要的现实意义。

随着各国越来越重视社会经济的可持续发展,近年来很多研究开始关注低碳化供应链管理。关于“碳限额与交易”制度, Kroes 等^[5]指出,对企业的碳排放量加以限制十分必要,但允许企业灵活选择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,即企业必须在碳排放目标与采购碳排放权之间做出权衡。考虑碳排放权交易的情况下, Du 等^[1,3]调查了碳排放限额对排放依赖型供应链均衡策略的影响。 Xu 等^[6]分析了碳排放权交易对供应链生产、定价决策的

基金项目:重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2020jcyj-msxmX0076);重庆市研究生导师团队建设项目(JDDSTD201802)
This work was supported by the Basic and Advanced Research Project of Chongqing(cstc2020jcyjmsxmX0076) and Team Building Project for Graduate Tutors in Chongqing(JDDSTD201802).
通信作者:刘光安(lga120207@163.com)

影响。Yang 等^[7]探讨了竞争性供应链的横向与纵向合作对减排决策的影响。Li 等^[8]考察了制造商的单位产品碳排放量及政府的碳排放规制对供应链绩效的影响。

除了考虑“碳限额与交易”制度对供应链决策的影响,一些作者考虑了企业的低碳努力对供应链决策的影响,如文献[9-12]。然而,目前在企业进行低碳投资的情况下,考虑资金约束问题的研究还较少。在实际问题中,一个碳排放依赖的制造商,特别是中小型企业,往往受到资金的约束。Wu 等^[13]研究了一个绿色供应链的融资选择问题,他们假定进行减排投资的上游制造商有充足的资金,只是下游的零售商受到资金约束。Cao 等^[14]考虑了一个由供应商和排放依赖且受到资金约束的制造商组成的两级供应链的融资决策问题。他们比较了银行贷款和贸易信用两种融资方式,但他们所考虑的融资仅用于订购决策,而没有用于碳减排投资决策。Fang 等^[15]针对一个绿色供应链中的资金约束制造商的融资问题,调查了银行贷款与零售商提前支付的混合融资方式的有效性,但该文献没有考虑“碳限额与交易”制度对供应链决策的影响。在“碳限额与交易”制度下,Xu 等^[16]针对一个由供应商和资金约束的制造商组成的两级供应链的融资问题,调查了信用保证融资及其与贸易信用的组合融资方式的有效性。

以上文献虽然在碳排放依赖型供应链背景下考虑了资金约束这个影响因素,但没有考虑成员的风险规避特性对供应链运作和减排决策的影响。在现实中,供应链成员面临风险时往往表现出不同的风险态度,从而影响其决策。尽管有很多文献在资金约束供应链中考虑了成员的风险规避特性,如文献[17-21],但是,除文献[21]外,极少有研究在碳排放依赖型供应链中同时考虑成员的风险规避特性和资金约束对供应链运作、融资和减排决策的影响。Qi 等^[21]针对一个由排放依赖型制造商和资金约束零售商组成的供应链考察了制造商的风险规避度对低碳决策和融资决策的影响。本文考虑一个由资金充足供应商和面临资金约束且具有损失规避特性制造商组成的两级排放依赖型供应链的运作和融资决策问题。本文的研究与文献[21]的不同之处主要体现在:1)所考虑的供应链结构不一样,本文考虑的是上游供应商向资金约束和进行减排投资的制造商提供融资贷款,而文献[21]研究的是排放依赖型制造商向资金约束零售商提供贸易信用融资;2)用于刻画风险态度的量不一样;本文是利用损失规避效用函数来刻画制造商的风险规避特性,而文献[21]则是利用条件风险价值(CVaR)来刻画零售商的风险规避特性。

1 问题描述与符号说明

在“碳限额与交易”制度下,考虑由一个风险中性的供应商和一个受资金约束且具有损失规避特性的制造商组成的两级排放依赖型供应链。制造商从供应商处购买原材料,加工处理以后将产品出售给具有低碳意识的消费者。如果制造商的碳排放总量超过政府分配的排放限额,则她可以从排放交易权市场购买排放不足的碳配额,同时制造商也可以出售多余的碳配额来赚取额外的收益。本文假定制造商是一个中小型企业,其运营和进行低碳技术改进都面临缺少资金的困境。并且,由于制造商信誉低,违约风险大,很难从外面的金融机构做信贷融资,只能向供应链上游的供应商申请信贷融资,且利率通常低于商业银行等金融机构提供的利率。制造商的

融资贷款分为两部分:一部分资金用于投资减排,另一部分资金用于运营。另外,假定制造商具有有限责任能力。

类似于文献[14,16],假设市场需求 D 具有随机性,且依赖制造商的减排水平 e ,需求函数定义为 $D = \tau e + \epsilon$ 。其中, $\tau > 0$ 为消费者的低碳意识, ϵ 为随机变量,代表没有进行碳减排时的产品需求量。 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(GFR)函数^[22],即 $h(x) = f(x)/\bar{F}(x)$ 关于 x 单调递增,其中 $\bar{F}(x) = 1 - F(x)$ 。

假设制造商对碳减排的投资是一次性的短期规划,总投资成本为 $ve^2/2$ ^[7,14]。其中, v 为减排投资的成本系数。不失一般性,假设单位产品的销售价格 p 为外生常数,且 $p = 1$ 。另外, $p_c\beta + w(1+r) < 1$,即零售价格应大于边际成本^[16]。本文考虑的产品是易逝品,在销售季节末未售完的产品残值为零。另外,假设所有信息对供应链成员来说都是共同知识。

文中用到的相关符号说明如下:

- D 为产品的市场需求;
- c 为供应商的单位生产成本;
- k 为制造商的初始资金;
- τ 为消费者的低碳意识;
- v 为减排投资的成本系数;
- p_e 为单位碳排放权价格;
- β 为单位产品的初始排放量;
- r 为供应商的贷款利率;
- G 为政府分配的排放上限;
- λ 为损失规避系数;
- ϵ 为没有进行碳减排时的产品随机需求;
- e 为制造商的减排水平(决策变量);
- w 为供应商的批发价格(决策变量);
- q 为制造商的订购量(决策变量);

2 模型建立

本文构建了一个 Stackelberg 博弈模型来描述上游供应商和下游制造商之间的关系,其中供应商处于领导者地位,制造商处于跟随者地位。在销售季节初期,供应商宣布批发价格 w ;随后,制造商决定产品订购量 q 和减排水平 e 。供应商向制造商提供的融资金额总量为 $L = wq + ve^2/2 - k$ 。在销售季节末,如果制造商有足够的收益,则将偿还给供应商本金及利息 $L(1+r)$ 。否则,制造商将破产。此时,具有有限责任能力的制造商将所有的收益偿还给供应商。下面利用逆向归纳法来求解上述博弈的均衡策略。

2.1 风险中性制造商的最优决策

首先考虑制造商是风险中性的情形,即她选择最优的订购量 q^* 和减排水平 e^* 来最大化期望利润。由于需求的不确定性,制造商破产存在一个需求阈值。为了向供应商偿还借款及利息,制造商不破产的最低需求阈值为 $\hat{A}_1 = p_c(\beta q - e - G) + L(1+r)$,而最小随机需求应满足 $\hat{\epsilon} \geq \hat{A}_1 - \tau e$ 。

在风险中性下,制造商的期望利润函数为:

$$\Pi_m(q, e) = E \{ \min[D, q] - \hat{A}_1 \}^+ - k \quad (1)$$

式(1)进一步可表示为:

$$\Pi_m(q, e) = \int_{\hat{A}_1 - \tau e}^{\hat{A}_2 - \tau e} \bar{F}(x) dx - k \quad (2)$$

命题 1 给定供应商的批发价 w , 风险中性制造商的最优订购量 q^* 和减排水平 e^* 满足:

$$\bar{F}(q^* - \tau e^*) = [p_e \beta + w(1+r)] \bar{F}(\hat{A}_1 - \tau e^*) \quad (3)$$

$$\tau \bar{F}(q^* - \tau e^*) = [p_e + \tau - v e^* (1+r)] \bar{F}(\hat{A}_1 - \tau e^*) \quad (4)$$

命题 1 的证明与命题 2 的证明类似, 故此省略。联立式(3)和式(4)可得:

$$e^* = \frac{p_e + [1 - p_e \beta - w(1+r)] \tau}{v(1+r)} \quad (5)$$

命题 1 表明, 风险中性制造商的最优订购量和减排水平都受到融资利率的反向影响, 而融资利率反映了资金成本和制造商的破产风险。由式(5)可看出, 最优减排水平不直接依赖于最优订购量, 但它依赖于批发价格, 而批发价格与订购量是相互依赖的。因此, 在本文所考虑的供应链背景下, 运营、融资和减排策略是密切相关的。

2.2 损失规避制造商的最优决策

当制造商具有损失规避偏好时, 其最低目标是在销售季节保留其初始资金, 在这种情况下, 最小需求阈值为 $\hat{A}_2 = p_e(\beta q - e - G) + L(1+r) + k$ 。制造商的损失规避效用函数可用如下分段函数来刻画^[23]:

$$U_m(\Pi_m) = \begin{cases} \Pi_m - \Pi_0, & \text{当 } \Pi_m \geq \Pi_0 \text{ 时} \\ \lambda(\Pi_m - \Pi_0), & \text{当 } \Pi_m < \Pi_0 \text{ 时} \end{cases} \quad (6)$$

其中, Π_0 表示制造商的参考利润水平, 不失一般性, 不妨假设 $\Pi_0 = 0$ 。 $\lambda \geq 1$ 表示制造商的损失规避度。 λ 越大, 表示制造商越害怕损失。特别地, 当 $\lambda = 1$ 时即表示制造商是风险中性的。

将式(1)代入式(6), 得到损失规避制造商的期望效用函数为:

$$\begin{aligned} \max U_m(q_\lambda, e_\lambda) &= \Pi_m(q_\lambda, e_\lambda) + (\lambda - 1) \left[\int_0^{\hat{A}_2 - \tau e_\lambda} (-k) \cdot \right. \\ &\quad \left. f(x) dx + \int_{\hat{A}_1 - \tau e_\lambda}^{\hat{A}_2 - \tau e_\lambda} (x + \tau e_\lambda - \hat{A}_1) f(x) dx \right] \end{aligned} \quad (7)$$

命题 2 给定供应商的批发价格 w , 损失规避制造商的最优订购量 q_λ^* 和最优减排水平 e_λ^* 满足:

$$\lambda N \bar{F}(\hat{A}_1 - \tau e_\lambda^*) = \bar{F}(q_\lambda^* - \tau e_\lambda^*) + (\lambda - 1) N \bar{F}(\hat{A}_2 - \tau e_\lambda^*) \quad (8)$$

$$\lambda M \bar{F}(\hat{A}_1 - \tau e_\lambda^*) = \tau \bar{F}(q_\lambda^* - \tau e_\lambda^*) + (\lambda - 1) M \bar{F}(\hat{A}_2 - \tau e_\lambda^*) \quad (9)$$

其中, $N = p_e \beta + w(1+r)$, $M = p_e + \tau - v e_\lambda(1+r)$ 。

证明: 损失规避制造商的效用函数 $U_m(q_\lambda, e_\lambda)$ 可进一步表示为:

$$U_m(q_\lambda, e_\lambda) = \int_{\hat{A}_1 - \tau e_\lambda}^{\hat{A}_2 - \tau e_\lambda} \bar{F}(x) dx - \lambda k + (\lambda - 1) \int_{\hat{A}_1 - \tau e_\lambda}^{\hat{A}_2 - \tau e_\lambda} \bar{F}(x) dx$$

记 $U_m = U_m(q_\lambda, e_\lambda)$, 对 U_m 关于 q_λ 和 e_λ 分别求一阶偏导数, 得到:

$$\begin{aligned} \partial U_m / \partial q_\lambda &= \bar{F}(q_\lambda - \tau e_\lambda) + [p_e \beta + w(1+r)] \cdot \\ &\quad [(\lambda - 1) \bar{F}(\hat{A}_2 - \tau e_\lambda) - \lambda \bar{F}(\hat{A}_1 - \tau e_\lambda)] \\ \partial U_m / \partial e_\lambda &= -\tau \bar{F}(q_\lambda - \tau e_\lambda) + [p_e + \tau - v e_\lambda(1+r)] \cdot \\ &\quad [(1 - \lambda) \bar{F}(\hat{A}_2 - \tau e_\lambda) + \lambda \bar{F}(\hat{A}_1 - \tau e_\lambda)] \end{aligned}$$

记 $N = [p_e \beta + w(1+r)]$, $M = [p_e + \tau - v e_\lambda(1+r)]$ 。由一阶条件 $\partial U_m / \partial q_\lambda = 0$ 和 $\partial U_m / \partial e_\lambda = 0$, 得到最优订购量 q_λ^* 和最优减排水平 e_λ^* 分别满足式(8)和(9)。

下面证明最优解 $(q_\lambda^*, e_\lambda^*)$ 的唯一性。

对 U_m 关于 q_λ 求二阶偏导数, 得到:

$$\begin{aligned} \partial^2 U_m / \partial q_\lambda^2 &= -f(q_\lambda - \tau e_\lambda) + N^2 [\lambda f(\hat{A}_1 - \tau e_\lambda) + \\ &\quad (1 - \lambda) f(\hat{A}_2 - \tau e_\lambda)] \\ \text{由一阶条件 } \partial U_m / \partial q_\lambda &= 0 \text{ 和失效率函数 } h(x) \text{ 的定义, 得到:} \\ \partial^2 U_m / \partial q_\lambda^2 &= (\lambda - 1) N^2 \bar{F}(\hat{A}_2 - \tau e_\lambda) [h(\hat{A}_1 - \tau e_\lambda) - \\ &\quad h(\hat{A}_2 - \tau e_\lambda)] - \bar{F}(q_\lambda - \tau e_\lambda) [h(q_\lambda - \tau e_\lambda) - \\ &\quad N h(\hat{A}_1 - \tau e_\lambda)] \end{aligned}$$

由于 $\hat{A}_1 < \hat{A}_2 < q_\lambda$, 并且 $h(x)$ 是严格递增函数, 故 $h(\hat{A}_1 - \tau e_\lambda) - h(\hat{A}_2 - \tau e_\lambda) < 0$ 。另外, 由前面假定知 $N < 1$, 故 $h(q_\lambda - \tau e_\lambda) - N h(\hat{A}_1 - \tau e_\lambda) > 0$ 。因此, 有 $\partial^2 U_m / \partial q_\lambda^2 < 0$ 。

对 U_m 关于 e_λ 和 q_λ 求混合二阶偏导数, 得到:

$$\begin{aligned} \partial^2 U_m / \partial q_\lambda \partial e_\lambda &= \tau f(q_\lambda - \tau e_\lambda) + M N [\lambda f(\hat{A}_1 - \tau e_\lambda) + \\ &\quad (1 - \lambda) f(\hat{A}_2 - \tau e_\lambda)] \\ \text{对 } U_m \text{ 关于 } e_\lambda \text{ 求二阶偏导数, 得到:} \\ \partial^2 U_m / \partial e_\lambda^2 &= -\tau^2 f(q_\lambda - \tau e_\lambda) - v(1+r) [\lambda \bar{F}(\hat{A}_1 - \tau e_\lambda) + \\ &\quad (1 - \lambda) \bar{F}(\hat{A}_2 - \tau e_\lambda)] + M^2 [\lambda f(\hat{A}_1 - \tau e_\lambda) + \\ &\quad (1 - \lambda) f(\hat{A}_2 - \tau e_\lambda)] \end{aligned}$$

记 $\partial^2 U_m / \partial q_\lambda^2 = \Omega$, $\partial^2 U_m / \partial q_\lambda \partial e_\lambda = B$, $\partial^2 U_m / \partial e_\lambda^2 = \Phi$, 则式(7)的海塞矩阵为:

$$\mathbf{H}(q, e) = \begin{pmatrix} \Omega & B \\ B & \Phi \end{pmatrix}$$

$\mathbf{H}(q, e)$ 的行列式为:

$$\begin{aligned} |\mathbf{H}(q, e)| &= v(1+r) [\bar{F}(\hat{A}_2 - \tau e_\lambda) + \lambda \bar{F}(\hat{A}_1 - \tau e_\lambda) - \\ &\quad \bar{F}(\hat{A}_2 - \tau e_\lambda)] \cdot \{ N^2 (\lambda - 1) \bar{F}(\hat{A}_2 - \tau e_\lambda) \\ &\quad [h(\hat{A}_2 - \tau e_\lambda) - h(\hat{A}_1 - \tau e_\lambda)] + \bar{F}(q_\lambda - \tau e_\lambda) [h(q_\lambda - \tau e_\lambda) - N h(\hat{A}_1 - \tau e_\lambda)] \} \end{aligned}$$

由 $F(x)$ 和 $h(x)$ 的严格递增性质, 可知 $\bar{F}(\hat{A}_1 - \tau e_\lambda) > \bar{F}(\hat{A}_2 - \tau e_\lambda)$, $h(\hat{A}_2 - \tau e_\lambda) > h(\hat{A}_1 - \tau e_\lambda)$, $h(q_\lambda - \tau e_\lambda) > N h(\hat{A}_1 - \tau e_\lambda)$ 。因此, 有 $|\mathbf{H}(q, e)| > 0$, 即海塞矩阵 $\mathbf{H}(q, e)$ 为负定矩阵。因此, 最优解 $(q_\lambda^*, e_\lambda^*)$ 唯一存在。证毕。

联立式(8)和式(9), 得到:

$$e_\lambda^* = \frac{p_e + [1 - p_e \beta - w(1+r)] \tau}{v(1+r)} \quad (10)$$

给定供应商的批发价格, 命题 2 给出了损失规避制造商的最优反应函数。从式(8)可看出, 制造商的订购决策除了与批发价格、单位碳排放权价格、融资利率、消费者的低碳意识、破产风险等因素有关以外, 还与自身的损失规避度有关。式(10)说明, 在风险中性和损失规避下制造商的减排水平的表达式相同, 即损失规避性不直接影响减排水平。不过, 由于订购量影响批发价格, 而减排水平依赖批发价格, 从而损失规避性也会间接影响减排水平。

推论 1 $de_{\lambda}^*/d\omega < 0$, $dq_{\lambda}^*/d\omega < 0$; (2) $de_{\lambda}^*/dr < 0$, $dq_{\lambda}^*/dr < 0$; (3) $dq_{\lambda}^*/d\lambda < 0$ 。

证明:

(1) 首先, 在式(10)两边对 ω 求导, 得到 $de_{\lambda}^*/d\omega = -\tau/v < 0$ 。

其次, 在式(8)两边对 ω 求导, 得到:

$$\lambda(1+r)\bar{F}(\hat{A}_1 - \tau e_{\lambda}^*) - \lambda N f(\hat{A}_1 - \tau e_{\lambda}^*) d(\hat{A}_1 - \tau e_{\lambda}^*)/d\omega = -f(q_{\lambda} - \tau e_{\lambda}^*) (dq_{\lambda}^*/d\omega + \tau^2/v) - (1-\lambda)(1+r)\bar{F}(\hat{A}_2 - \tau e_{\lambda}^*) + (1-\lambda)N f(\hat{A}_2 - \tau e_{\lambda}^*) d(\hat{A}_2 - \tau e_{\lambda}^*)/d\omega$$

由式(8)和式(9), 可得 $M = \tau N$ 。综合以上各式, 解得 $dq_{\lambda}^*/d\omega = \Omega_1/\Omega - \tau^2/v$, 其中:

$$\begin{aligned} \Omega_1 = & (1+r) \{ \lambda \bar{F}(\hat{A}_1 - \tau e_{\lambda}^*) [1 - N q_{\lambda}^* h(\hat{A}_1 - \tau e_{\lambda}^*)] - \\ & (\lambda-1) \bar{F}(\hat{A}_2 - \tau e_{\lambda}^*) [1 - N q_{\lambda}^* h(\hat{A}_2 - \tau e_{\lambda}^*)] \} \\ \text{由于 } 1 - q^* h(q^*) > 0 & \text{ (参考文献[24-25])}, \text{ 于是有} \\ 1 - N q_{\lambda}^* h(\hat{A}_1 - \tau e_{\lambda}^*) > 1 - N q_{\lambda}^* h(\hat{A}_2 - \tau e_{\lambda}^*) > \\ 1 - q_{\lambda}^* h(q_{\lambda}^*) > 0 \end{aligned}$$

并且 $\bar{F}(\hat{A}_1 - \tau e_{\lambda}^*) > \bar{F}(\hat{A}_2 - \tau e_{\lambda}^*)$, 从而得到 $\Omega_1 > 0$ 。由命题 2 的证明可知, $\Omega < 0$ 。因此, 有 $dq_{\lambda}^*/d\omega < 0$ 。

推论 2 首先, 在式(10)两边对 r 求导, 可得 $de_{\lambda}^*/dr = -[p_e + (1-p_e\beta)\tau]/v(1+r)^2$, 易知 $de_{\lambda}^*/dr < 0$ 。

其次, 在式(8)两边对 r 求导, 得到:

$$\begin{aligned} \lambda \omega \bar{F}(\hat{A}_1 - \tau e_{\lambda}^*) - \lambda N f(\hat{A}_1 - \tau e_{\lambda}^*) d(\hat{A}_1 - \tau e_{\lambda}^*)/dr = & -f(q_{\lambda}^* - \tau e_{\lambda}^*) [dq_{\lambda}^*/dr - \tau de_{\lambda}^*/dr] - (1-\lambda) \omega \bar{F}(\hat{A}_2 - \tau e_{\lambda}^*) + (1-\lambda) N f(\hat{A}_2 - \tau e_{\lambda}^*) d(\hat{A}_2 - \tau e_{\lambda}^*)/dr \end{aligned}$$

综合以上各式解得 $dq_{\lambda}^*/dr = \Omega_2/\Omega - \tau[p_e + (1-p_e\beta)\tau]/v(1+r)^2$ 。其中,

$$\begin{aligned} \Omega_2 = & \lambda \bar{F}(\hat{A}_1 - \tau e_{\lambda}^*) [\omega - N L_{\lambda} h(\hat{A}_1 - \tau e_{\lambda}^*)] - \\ & (\lambda-1) \bar{F}(\hat{A}_2 - \tau e_{\lambda}^*) [\omega - N L_{\lambda} h(\hat{A}_2 - \tau e_{\lambda}^*)] \end{aligned}$$

再次利用 $F(x)$ 和 $h(x)$ 的严格递增性质, 可得 $\Omega_2 > 0$ 。由于 $\Omega < 0$, 于是得到 $dq_{\lambda}^*/dr < 0$ 。

推论 3 在式(8)两边对 λ 求导, 得到:

$$\begin{aligned} f(q_{\lambda}^* - \tau e_{\lambda}^*) dq_{\lambda}^*/d\lambda = & N \{ \bar{F}(\hat{A}_2 - \tau e_{\lambda}^*) - \bar{F}(\hat{A}_1 - \tau e_{\lambda}^*) + \\ & N [\lambda f(\hat{A}_1 - \tau e_{\lambda}^*) + (1-\lambda) f(\hat{A}_2 - \tau e_{\lambda}^*)] dq_{\lambda}^*/d\lambda \} \end{aligned}$$

由上式解得 $dq_{\lambda}^*(\omega)/d\lambda = \Omega_3/\Omega$, 其中 $\Omega_3 = N[\bar{F}(\hat{A}_1 - \tau e_{\lambda}^*) - \bar{F}(\hat{A}_2 - \tau e_{\lambda}^*)]$ 。由于 $\bar{F}(\hat{A}_1 - \tau e_{\lambda}^*) > \bar{F}(\hat{A}_2 - \tau e_{\lambda}^*)$, 故 $\Omega_3 > 0$ 。又因为 $\Omega < 0$, 故得到 $dq_{\lambda}^*(\omega)/d\lambda < 0$ 。证毕。

推论 1 表明, 当供应商提高批发价格时, 由于制造商的运营成本增加, 他会减少订购量并降低减排水平。推论 2 表明, 当供应商提高贷款利率时, 制造商的融资成本增加, 会促使其减少订购量并降低减排水平。因为, 制造商的融资不仅用于订购决策, 而且也用于减排投资决策。推论 3 表明, 制造商的损失规避度越高, 他将采用更为保守的订购策略。

2.3 供应商的最优决策

损失规避制造商向供应商的借款量为 $L_{\lambda} = \omega q_{\lambda} +$

$ve_{\lambda}^2/2 - k$, 到销售季节末, 若市场需求量大, 制造商的收益足够支付全部贷款和利息, 则供应商获得利润为 $L_{\lambda}r + (\omega - c)q_{\lambda}$; 否则, 制造商将破产, 供应商将损失 $\hat{A}_1 - \min[D, q]$ 。从而, 风险中性供应商的期望利润函数为:

$$\Pi_s(\omega) = (\omega q_{\lambda}^* + ve_{\lambda}^{*2}/2 - k)r + (\omega - c)q_{\lambda}^* - E[\hat{A}_1 - \min(D, q_{\lambda}^*)]^+ \quad (11)$$

命题 3 风险中性供应商的最优批发价为:

$$\begin{aligned} \omega^* = & \frac{c + p_e\beta}{(1+r)\bar{F}(\hat{A}_1 - \tau e_{\lambda}^*)} - \frac{p_e\beta}{1+r} - \frac{q_{\lambda}^*}{\Omega_4} + \\ & \frac{\tau[MF(\hat{A}_1 - \tau e_{\lambda}^*) + v re_{\lambda}^*]}{v(1+r)\bar{F}(\hat{A}_1 - \tau e_{\lambda}^*)\Omega_4} \end{aligned} \quad (12)$$

其中, $\Omega_4 = dq_{\lambda}^*/d\omega$ 。

证明: 供应商的期望利润函数可进一步表示为:

$$\begin{aligned} \Pi_s(\omega) = & (\omega q_{\lambda}^* + ve_{\lambda}^{*2}/2 - k)(1+r) + k - ve_{\lambda}^{*2}/2 - c q_{\lambda}^* - \\ & \int_0^{\hat{A}_1 - \tau e_{\lambda}^*} F(x) dx \end{aligned}$$

求 $\Pi_s(\omega)$ 关于 ω 的一阶导数, 得到:

$$\begin{aligned} d\Pi_s/d\omega = & -(c + p_e\beta) dq_{\lambda}^*/d\omega + (p_e + \tau) de_{\lambda}^*/d\omega + \\ & \bar{F}(\hat{A}_1 - \tau e_{\lambda}^*) d(\hat{A}_1 - \tau e_{\lambda}^*)/d\omega - ve_{\lambda}^* de_{\lambda}^*/d\omega \end{aligned}$$

而 $de_{\lambda}^*/d\omega = -\tau/v$, $d(\hat{A}_1 - \tau e_{\lambda}^*)/d\omega = N \cdot dq_{\lambda}^*/d\omega + M\tau/v + (1+r)q_{\lambda}^*$ 。若记 $\Omega_4 = dq_{\lambda}^*/d\omega$, 则:

$$\begin{aligned} d\Pi_s/d\omega = & [-(c + p_e\beta) + N\bar{F}(\hat{A}_1 - \tau e_{\lambda}^*)]\Omega_4 + \\ & (1+r)q_{\lambda}^* \bar{F}(\hat{A}_1 - \tau e_{\lambda}^*) - [p_e + \tau - ve_{\lambda}^* - \\ & M\bar{F}(\hat{A}_1 - \tau e_{\lambda}^*)](\tau/v) \end{aligned}$$

由一阶条件 $d\Pi_s(\omega)/d\omega = 0$, 即可得到最优批发价格 ω^* 满足式(12)。证毕。

命题 3 表明, 供应商的定价策略比传统供应链更加复杂, 传统的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, 本文考虑的碳排放依赖型供应链融资策略中, 管理者需要考虑融资利率、制造商的减排水平和破产风险等因素。我们注意到, $dq_{\lambda}^*(\omega)/d\lambda < 0$, 且 $dq_{\lambda}^*/d\omega < 0$, 从而有 $d\omega/d\lambda > 0$ 。因此, 供应商的定价策略也高度依赖制造商的损失规避态度。制造商的损失规避度越高, 供应商制定的批发价格就越高。

3 算例分析

为了验证前文有关结论, 并得到更多的管理视野, 下面进行算例分析。假定产品的市场需求 D 服从均值 $\mu = 0.01$ 的指数分布, 其他参数取值如下: $c = 0.25$, $v = 0.5$, $\tau = 0.2$, $r = 0.08$, $G = 100$, $k = 10$, $\lambda = 2.5$, $\beta = 0.05$, $p_e = 0.15$ 。

表 1 列出了融资利率对供应链成员最优决策、利润及效用的影响, 其中 r 的变化范围 $[0.05, 0.10]$, 其余参数取值同上。由表 1 可知, 随着利率的增加, 最优订购量、减排水平和批发价格都在减少; 且随着利率的增加, 制造商的最优效用在增加, 而供应商的最优利润在减少。在实践中, 当供应商提高利率时, 制造商的融资成本增加, 促使其降低订购量和减排水平。因为本文所考虑的融资不仅用于订购决策, 还用于减排投资决策。因此, 为了激励制造商增加订购量和减排投资, 供应商将降低批发价格。

表 1 利率对供应链成员最优决策、利润及效用的影响
Table 1 Impact of interest rate on optimal decision, profit and utility of supply chain members

r	q_{λ}^*	e_{λ}^*	ω^*	U_m	Π_s
0.05	62.1386	0.4649	0.4779	28.8080	31.5066
0.06	62.1185	0.4599	0.4736	28.8980	31.4302
0.07	62.0985	0.4550	0.4694	28.9882	31.3536
0.08	62.0786	0.4502	0.4653	29.0786	31.2769
0.09	62.0587	0.4455	0.4613	29.1691	31.2000
0.10	62.0388	0.4408	0.4573	29.2597	31.1230

表 2 列出了损失规避系数与排放上限对供应链成员最优决策、利润及效用的影响,其中 λ 的变化范围 $[1.0,5.0]$,其余参数取值同上。从表 2 可以看出,随着损失规避系数的增大,最优订购量和减排水平都有所降低,而批发价格增加。这说明,制造商的损失规避度越高,他将采取更加保守的订购策略。制造商降低订购量会促使供应商提高批发价格,从而使得制造商降低减排水平。随着损失规避系数的增大,供应商的最优利润逐渐减少,而制造商的最优效用的变化与排放上限的取值有关。当排放上限取值较小时,制造商的最优效用与损失规避系数呈负相关;当排放上限取值较大时,制造商的最优效用与损失规避系数呈正相关。这是因为,当排放上限取值较大时,制造商可以在碳排放权交易市场出售更多剩余的排放许可量来获得额外的收益。

表 2 损失规避系数与排放上限对供应链成员决策、效用和利润的影响

Table 2 Impact of loss aversion coefficient and emission cap on decision-making,utility and profit of supply chain members

G	λ	q_{λ}^*	e_{λ}^*	ω^*	U_m	Π_s
100	1.0	69.1178	0.5268	0.4347	33.0367	31.9839
	1.5	66.5771	0.4972	0.4465	31.5349	31.9400
	2.0	64.2470	0.4720	0.4566	30.2258	31.6863
	2.5	62.0786	0.4502	0.4653	29.0786	31.2769
	3.0	60.0396	0.4310	0.4730	28.0725	30.7488
	3.5	58.1078	0.4139	0.4798	27.1928	30.1286
	4.0	56.2666	0.3987	0.4859	26.4285	29.4362
	4.5	54.5040	0.3849	0.4914	25.7713	28.6862
	5.0	52.8101	0.3724	0.4964	25.2146	27.8903
	1.0	64.4569	0.3876	0.4903	52.2437	13.2481
250	1.5	62.4554	0.3694	0.4976	52.3449	12.5117
	2.0	60.5492	0.3534	0.5040	52.5898	11.6698
	2.5	58.7248	0.3391	0.5097	52.9678	10.7464
	3.0	56.9722	0.3263	0.5149	53.4709	9.7594
	3.5	55.2834	0.3147	0.5195	54.0924	8.7226
	4.0	53.6519	0.3042	0.5237	54.8271	7.6465
	4.5	52.0724	0.2947	0.5275	55.6704	6.5396
	5.0	50.5405	0.2859	0.5310	56.6185	5.4087

从表 2 还可以看出,随着排放上限的增大,最优订购量和减排水平都减小,而批发价格增加,制造商的效用和供应商的利润与排放上限都呈正相关。这说明,当政府分配给制造商一个较低的排放上限时,制造商将采取一个冒进的订购策略。这是因为,当排放限额较低时,制造商的破产风险将增加(由前面 L 的定义)。在给定批发价格和利率的情况下,这种破产风险是由供应商来承担。因此,制造商会增加订购量来最大化期望利润。

表 3 列出了制造商的初始资金对供应链成员最优决策、效用和利润的影响。从表 3 可以看出,随着制造商初始资金的增大,最优订购量和减排水平都减小,而批发价格增加,制造商的期望效用先减少后增大,而供应商的利润先增加后

减少。当初始资金较小时,由于制造商具有有限责任能力,由供应商承担库存风险,制造商会采用冒进的订购策略。

表 3 初始资金对供应链成员决策、效用和利润的影响

Table 3 Impact of initial capital on decision,utility and profit of supply chain members

k	q_{λ}^*	e_{λ}^*	ω^*	U_m	Π_s
2	70.2471	0.5775	0.4144	34.3084	29.5435
4	67.7876	0.5386	0.4299	32.5665	30.3306
6	65.6625	0.5053	0.4433	31.1422	30.8468
8	63.7785	0.4761	0.4549	29.9890	31.1497
10	62.0786	0.4502	0.4653	29.0786	31.2769
12	60.5250	0.4269	0.4746	28.3928	31.2541
14	59.0915	0.4059	0.4830	27.9196	31.1000
16	57.7589	0.3868	0.4907	27.6508	30.8279
18	56.5129	0.3692	0.4977	27.5811	30.4481
20	55.3421	0.3530	0.5042	27.7067	29.9683
22	54.2376	0.3380	0.5102	28.0254	29.3943
24	53.1923	0.3240	0.5158	28.5361	28.7304
26	52.2002	0.3110	0.5210	29.2384	27.9803
28	51.2562	0.2989	0.5258	30.1324	27.1463

表 4 列出了单位产品的初始碳排放量对供应链成员决策、效用和利润的影响。从表 4 可以看出,随着制造商初始排放量的增大,制造商的最优订购量、减排水平,以及供应商的批发价格都在减小。同时,制造商的效用和供应商的利润与单位产品的初始碳排放量呈负相关。这说明,当产品的初始排放量较高时,制造商的减排成本较大,使得制造商减少订购量。为了吸引制造商加大减排投资,给定融资利率保持不变时,供应商会降低批发价格。

表 4 初始碳排放量对供应链成员决策、效用和利润的影响

Table 4 Impact of initial carbon emission on decision,utility and profit of supply chain members

β	q_{λ}^*	e_{λ}^*	ω^*	U_m	Π_s
0.05	62.0786	0.4502	0.4653	29.0786	31.2769
0.10	61.1844	0.4462	0.4641	28.6772	30.9010
0.15	60.2965	0.4422	0.4629	28.2826	30.5231
0.20	59.4144	0.4382	0.4618	27.8948	30.1429
0.25	58.5381	0.4341	0.4606	27.5137	29.7601
0.30	57.6672	0.4300	0.4595	27.1394	29.3747
0.35	56.8016	0.4259	0.4583	26.7719	28.9863
0.40	55.9412	0.4218	0.4572	26.4112	28.5949
0.45	55.0856	0.4176	0.4561	26.0572	28.2003
0.50	54.2348	0.4134	0.4550	25.7102	27.8023

结束语 本文从考虑具有损失规避风险偏好的低碳制造商面临的资金约束问题出发,在“碳限额与交易”制度下,建立了由供应商主导、制造商跟随的 Stackelberg 博弈模型,得出了风险中性和损失规避制造商的最优订购和减排决策,以及风险中性供应商的最优批发定价决策。通过理论和算例分析得出,制造商的损失规避度越高,他越会采用更加保守的订购策略。然而,制造商的期望效用随着损失规避系数的变化与政府分配的碳排放上限有关。尤其是当排放上限较大时,制造商可以在排放权交易市场出售更多剩余的排放许可量来获得额外的收益。因此,政府需要合理分配排放权,防止制造商恶意通过排放权交易市场来牟利。算例分析还表明,当制造商的初始资金增多时,其会减少订购量并降低减排水平,因为此时制造商自身会承担更多的库存风险。另外,制造商的订购量和减排水平都与单位产品的初始排放量和融资利率呈负相关。不过,融资利率对供应链成员的最优决策、效用和利润

的影响不是很明显。

本文研究了供应商向面临受资金约束且具有损失规避特性的低碳制造商提供贷款融资的供应链决策问题,未与其他融资模式进行比较,这可作为下一步的研究方向。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] DU S, MA F, FU Z, et al. Game-theoretic analysis for an emission-dependent supply chain in a ‘cap-and-trade’ system[J]. *Annals of Operations Research*, 2015, 228(1): 135-149.
- [4] CAO E, MAN Y. Trade credit financing and coordination for an emission-dependent supply chain[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, 119: 50-62.
- [5] 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.
- [6] XU X, ZHANG W, HE P, et al. Production and pricing problems in make-to-order supply chain with cap-and-trade regulation[J]. *Omega*, 2017, 66: 248-257.
- [7] YANG L, ZHANG Q, JI J. Pricing and carbon emission reduction decisions in supply chains with vertical and horizontal cooperation[J]. *International Journal of Production Economics*, 2017, 191: 286-297.
- [8] LI Y D, XIE X P, WANG F Z, et al. Emission-dependent supply chain low-carbonization based behavior of enterprise operation decision under cap-and-trade environment[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(9): 2236-2244.
- [9] ZHANG Q, TANG W, ZHANG J. Who should determine energy efficiency level in a green cost-sharing supply chain with learning effect? [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, 115: 226-239.
- [10] LEE H H, ZHOU J, WANG J. Trade credit financing under competition and its impact on firm performance in supply chains [J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2017, 20(1): 36-52.
- [11] YOU D M, ZHU G J. Differential game analysis of ecological R&D, cooperative promotion and pricing in the low-carbon supply chain[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(6): 1047-1056.
- [12] SHI P, YAN B, SHI S. Pricing and product green degree decisions in green supply chains with fairness concerns[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2016, 36(8): 1937-1950.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] FANG L, XU S. Financing equilibrium in a green supply chain with capital constraint [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 143: 1-18.
- [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*, 2020, 135: 1-29.
- [17] JIN W, LUO J W. Optimal credit contract design for a capital-constrained supply chain incorporating into risk aversion[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2018, 26(1): 35-46.
- [18] LI R, LIU L. Decision-making and coordination of the supply chain with a delay in payment under Mean-CVaR criterion[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2017, 32(3): 370-384.
- [19] YAN N, HE X, LIU Y. Financing the capital-constrained supply chain with loss aversion: supplier finance vs. supplier investment [J]. *Omega*, 2019, 88: 162-178.
- [20] YAN N, JIN X, ZHONG H, et al. Loss-averse retailers’ financial offerings to capital-constrained suppliers: loan vs. investment [J]. *International Journal of Production Economics*, 2020, 227: 1-15.
- [21] QI L, LIU L, JIANG L, et al. Optimal operation strategies under a carbon cap-and-trade mechanism: a capital-constrained supply chain incorporating risk aversion[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2020: 1-17.
- [22] LARIVIERE M A, PORTEUS E L. Selling to the newsvendor: an analysis of price only contracts[J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2011, 3(4): 293-305.
- [23] WANG C X, WEBSTER S. Channel coordination for a supply chain with a risk-neutral manufacturer and a loss-averse retailer [J]. *Decision Sciences*, 2007, 38(3): 361-389.
- [24] 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.
- [25] 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]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 267(2): 585-597.



LI Li-ying, born in 1975, Ph.D, associate professor. His main research interests include logistics and supply chain management.



LIU Guang-an, born in 1996, postgraduate. His main research interests include logistics and supply chain management.