

基于微分博弈的三级供应链碳减排协调策略研究

聂秀伍, 姚金鑫, 丁明雷

(哈尔滨理工大学 经济与管理学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 在低碳经济背景下, 为了实现不同合作机制下的供应链协调, 以供应商、制造商和零售商组成的三级供应链为研究对象, 运用博弈论的方法, 求得博弈主体在非合作、成本分担以及协同合作三种机制下的纳什均衡减排策略, 并对这三种机制下的均衡结果和利润最优值进行比较。结果表明: 在协同合作机制下各博弈主体的碳减排努力程度更高, 且产品减排量和利润最优值协同合作决策也均优于非合作和成本分担机制。

关键词: 碳减排; 微分博弈; 三级供应链

中图分类号: F405

文献标志码: A

文章编号: 1007-7375(2022)04-0165-08

A Research on Coordination Strategy of Carbon Emission Reduction in Three-level Supply Chain Based on Differential Game

NIE Xiuwu, YAO Jinxin, DING Minglei

(School of Economics and Management, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: In the context of a low-carbon economy, in order to achieve supply chain coordination under different cooperation mechanisms, a three-level supply chain composed of suppliers, manufacturers, and retailers is used as the research object, and the game theory method is used to find that the game subject under the Nash equilibrium emission reduction strategy in the three mechanisms of non-cooperation, cost sharing and coordination and cooperation. The equilibrium results and optimal profit values under these three mechanisms are compared. The results show that under the cooperative mechanism, each game player has a higher degree of emission reduction efforts, and the cooperative decision-making of product emission reduction and profit optimal value is also superior to non-cooperative and cost-sharing mechanisms.

Key words: carbon missions; differential game; three-level supply chain

2021年中央经济工作会议指出, 我国要在2030年前实现碳达峰, 2060年前实现碳中和, 低碳发展已成为我国未来发展的重要方向^[1]。在降低碳排放方面, 供应链的上下游企业进行合作减排是至关重要的。制造商进行节能减排, 才能生产出低碳产品, 同时也需要供应商提供低碳原材料, 才能进一步提高碳减排的绩效。零售商进行产品销售, 积极对消费者进行低碳宣传, 才能更好地引导消费者购买低碳产品。青岛啤酒就是采用低碳运营模式, 联合上游的供应商和下游的销售商一起探索低碳发展模式, 实现低碳运营。

在低碳经济背景下, 很多学者开始在企业运营管理决策中考虑碳排放问题。杨光勇等^[2]指出, 相比于低环境意识顾客, 当两类碳规制的管制性较高时, 高环境意识顾客有利于企业获得更高的利润。Zhang等^[3]通过报童模型, 建立基于随机需求和碳排放权交易机制的生产与存储优化决策模型。Hua等^[4]则研究在碳排放交易下企业最优的订货批量的问题。王帆等^[5]以碳排放、碳减排和生态文明为准则层, 构建碳排放评价体系, 以此来测算企业的碳排放指数值, 决策企业应该采取何种碳减排策略。这些文献考虑碳排放放在微观层面上的应用, 但是没有从

收稿日期: 2021-04-14

基金项目: 国家社会科学基金资助项目(NS130012); 大学生创新创业资助项目(202110214010x)

作者简介: 聂秀伍(1994—), 男, 山东省人, 讲师, 硕士, 主要研究方向为物流管理、电子商务。

供应链的角度，考虑供应链成员之间的合作关系。

随着低碳经济的发展，将碳排放因素考虑到供应链中的研究也开始取得一些进展。付秋芳等^[6]基于碳减排率和价格敏感型需求，建立由制造商和销售商组成的两级供应链碳减排Stackelberg博弈模型，并分析政府碳排放权免费分配、阈值分配和完全市场交易3种机制对供应链均衡决策的影响。戴卓等^[7]以碳排放最小和成本最低为目标，建立多目标低碳闭环供应链网络优化模型，对闭环供应链网络进行合理规划。姜庆国等^[8]选取电煤供应链的直接碳排放作为研究对象，在对电煤供应链碳排放过程、测度方法和指标等进行全面综述后，确定电煤供应链碳排放的计算方法。

目前也有很多文献将碳排放纳入供应链均衡问题的研究中。如吴海翔等^[9]以多个制造商、零售商和需求市场组成的闭环供应链为研究对象，运用变分不等式理论和拉格朗日对偶理论分析供应链的各级成员基于环保法令下的最优行为。周岩等^[10]考虑政府节能减排宏观政策的影响，建立二层规划Stackelberg-Nash均衡模型，探讨面向能源和低碳发展的多准则供应链均衡条件。李晓婧等^[11]在供应链中考虑碳交易和碳排放，运用变分不等式和Lagrange对偶理论建立供应链均衡模型，研究传统实体店和网上电子商务双渠道下的供应链均衡问题。曹细玉等^[12]研究在碳限额的背景下，制造商减排技术投入和零售商的低碳宣传的双渠道供应链问题。

从以上的研究可知，学者们普遍关注碳排放问

题，特别是将碳排放约束纳入企业和供应链的运营管理中，已取得很大的研究进展。但是，目前缺乏从供应链长期运营的角度研究供应链的碳减排问题。因此本文对实际中较为普遍的现象进行研究，即制造商进行节能减排，供应商提供低碳原材料，零售商进行低碳宣传。本文的创新点主要体现在考虑到企业的碳减排活动是一个长期的动态的过程，运用微分博弈的理论，在连续的时间范围内，动态地分析由供应商、制造商和零售商上下游企业组成的多级供应链，在非合作、成本分担和协同合作3种机制下的博弈均衡减排策略。

1 问题描述及符号说明

1.1 问题描述

消费者倾向于购买低碳产品，市场上低碳产品更受欢迎。为增加自身竞争力，供应商负责向制造商提供低碳原材料，制造商负责生产低碳化产品，再由零售商销售到市场上。为了更好地引导消费者购买低碳产品，零售商进行低碳产品宣传。为了激励供应商积极减排，以及鼓励零售商积极对产品进行低碳宣传，制造商可以选择向供应商分担一定比例的减排成本，向零售商分担一定的低碳宣传成本。此背景下，在只包含单个供应商s、单个制造商m和单个零售商i的供应链中研究各主体之间的碳减排协调策略，并分析和比较相关参数。

1.2 符号说明

相关的参数定义及说明如表1所示。

表 1 参数定义及说明

Table 1 Parameter definition and description

| 参数 | 参数说明 |
|------------------------|---|
| $\pi_s、\pi_m、\pi_i$ | 供应商、制造商、零售商生产和销售单位产品获得的利润 |
| $x_s(t)、x_m(t)、x_i(t)$ | 供应商、制造商 <i>t</i> 时刻的减排努力程度，零售商 <i>t</i> 时刻的低碳宣传努力程度 |
| $q(t)$ | <i>t</i> 时刻产品的减排量，初始减排量 $q(0)=q_0\geq 0$ |
| $\mu(t)、\phi(t)$ | 制造商分担供应商减排成本的比例、制造商分担零售商低碳宣传成本的比例 |
| $R_s、R_m、R_i$ | 供应商、制造商、零售商长期的总利润 |
| $Z_s、Z_m、Z_i$ | 供应商、制造商和零售商的利润最优值函数 |
| $D(t)$ | 产品市场需求量，初始的市场需求 $D(0)=D_0\geq 0$ |
| $Q(t)$ | 产品市场供给量，初始的供给量 $Q(0)=Q_0\geq 0$ |

1.3 基本假设

本文假设条件如下。

1) 假设供应商和制造商的减排成本是关于减排

努力程度的二次函数^[13]，零售商的低碳宣传成本是关于其低碳宣传努力程度的二次函数^[14]。则*t*时刻供应商s、制造商m的减排成本以及零售商i的低碳宣

传成本可表示为

$$\begin{aligned} C(x_s(t)) &= \frac{\alpha_s}{2} [x_s(t)]^2; \\ C(x_m(t)) &= \frac{\alpha_m}{2} [x_m(t)]^2; \\ C(x_i(t)) &= \frac{\alpha_i}{2} [x_i(t)]^2. \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $C(x_s(t))$ 、 $C(x_m(t))$ 、 $C(x_i(t))$ 为 t 时刻供应商 s 、制造商 m 的减排成本以及零售商 i 的低碳宣传成本; α_s 、 α_m 、 α_i 表示供应商 s 、制造商 m 的减排成本系数, 零售商 i 的低碳宣传成本系数。

2) 产品的减排量是一个动态变化的过程^[15]。

$$\dot{q}(t) = \varepsilon x_s(t) + \theta x_m(t) + \sigma x_i(t) - \delta q(t). \quad (2)$$

其中, ε 、 θ 分别表示供应商、制造商的减排努力程度对产品减排量的影响系数; σ 表示零售商的低碳宣传努力程度对产品减排量的影响系数; δ 表示自然衰退率。

3) 假设产品的市场供给量与减排量成线性关系^[16], $Q(t) = Q_0 + k_1(q_0 + q(t))$ 。其中, k_1 表示减排量对供给量的影响系数; 假设产品的市场需求量与减排量成线性关系, 即 $D(t) = D_0 + k_2(q_0 + q(t))$; k_2 表示减排量对市场需求量的影响系数。

4) 假设供应商、制造商和零售商的贴现率 ρ 相同且 $\rho > 0$, 供应商、制造商和零售商都是以自身利润的最大化为目标, 寻求最优的均衡减排策略。

2 模型构建及求解

分别构建非合作、成本分担以及协同合作3种机制下博弈主体的纳什均衡减排策略, 并对这3种机制下的纳什均衡结果进行比较和分析。

2.1 非合作机制下的博弈均衡减排策略

在非合作机制下, 供应商、制造商和零售商在供应链中是独立平等的个体, 各博弈主体以非合作的方式, 独立决策使自身利润最大化的减排策略, 利润函数如下。

供应商的利润函数为

$$R_{s1} = \int_0^\infty e^{-\rho t} \left\{ \pi_s Q(t) - \frac{\alpha_s}{2} [x_s(t)]^2 \right\} dt. \quad (3)$$

制造商的利润函数为

$$R_{m1} = \int_0^\infty e^{-\rho t} \left\{ \pi_m D(t) - \frac{\alpha_m}{2} [x_m(t)]^2 \right\} dt. \quad (4)$$

零售商的利润函数为

$$R_{i1} = \int_0^\infty e^{-\rho t} \left\{ \pi_i D(t) - \frac{\alpha_i}{2} [x_i(t)]^2 \right\} dt. \quad (5)$$

根据反馈纳什均衡条件, 设供应商、制造商和零售商的利润最优值函数分别为 Z_{s1} 、 Z_{m1} 和 Z_{i1} , 且满足如下的Hamilton-Jacobi-Bellman(HJB)方程。

$$\rho Z_{s1} = \max_{x_s(t)} \left\{ \pi_s Q(t) - \frac{\alpha_s}{2} [x_s(t)]^2 + Z'_{s1} q(t) \right\}; \quad (6)$$

$$\rho Z_{m1} = \max_{x_m(t)} \left\{ \pi_m Q(t) - \frac{\alpha_m}{2} [x_m(t)]^2 + Z'_{m1} q(t) \right\}; \quad (7)$$

$$\rho Z_{i1} = \max_{x_i(t)} \left\{ \pi_i D(t) - \frac{\alpha_i}{2} [x_i(t)]^2 + Z'_{i1} q(t) \right\}. \quad (8)$$

对HJB方程右边求偏导并整理, 得到供应商、制造商和零售商在非合作机制下的反馈纳什均衡减排策略。

$$\begin{aligned} x_{s1}^*(t) &= \frac{\varepsilon \pi_s k_1}{\alpha_s(\delta - \rho)}; \\ x_{m1}^*(t) &= \frac{\theta \pi_m k_2}{\alpha_m(\delta - \rho)}; \\ x_{i1}^*(t) &= \frac{\sigma \pi_i k_2}{\alpha_i(\delta - \rho)}. \end{aligned} \quad (9)$$

产品减排量运动曲线为

$$\begin{aligned} q^*(t) &= (q_0 + \frac{B_1}{A_1}) e^{A_1 t} - \frac{B_1}{A_1}; \\ A_1 &= -\delta; \\ B_1 &= \frac{\varepsilon^2 \pi_s k_1}{\alpha_s(\delta - \rho)} + \frac{\theta^2 \pi_m k_2}{\alpha_m(\delta - \rho)} + \frac{\sigma^2 \pi_i k_2}{\alpha_i(\delta - \rho)}. \end{aligned}$$

该纳什均衡下的供应商、制造商和零售商的利润最优值分别是

$$\begin{aligned} Z_{s1}^* &= \frac{1}{\rho} \left[\pi_s (Q_0 + k_1 q_0) + \frac{1}{(\rho - \delta)^2} \left(\frac{\varepsilon^2 \pi_s^2 k_1^2}{2 \alpha_s} + \frac{\theta^2 \pi_s \pi_m k_1 k_2}{\alpha_m} + \frac{\sigma^2 \pi_s \pi_i k_1 k_2}{\alpha_i} \right) \right] + \frac{\pi_s k_1}{\rho - \delta} q(t); \\ Z_{m1}^* &= \frac{1}{\rho} \left[\pi_m (D_0 + k_2 q_0) + \frac{1}{(\rho - \delta)^2} \left(\frac{\varepsilon^2 \pi_s \pi_m k_1 k_2}{\alpha_s} + \frac{\theta^2 \pi_m^2 k_2^2}{2 \alpha_m} + \frac{\sigma^2 \pi_m \pi_i k_2^2}{\alpha_i} \right) \right] + \frac{\pi_m k_2}{\rho - \delta} q(t); \\ Z_{i1}^* &= \frac{1}{\rho} \left[\pi_i (D_0 + k_2 q_0) + \frac{1}{(\rho - \delta)^2} \left(\frac{\varepsilon^2 \pi_s \pi_i k_1 k_2}{\alpha_s} + \frac{\theta^2 \pi_m \pi_i k_2^2}{\alpha_m} + \frac{\sigma^2 \pi_i^2 k_2^2}{2 \alpha_i} \right) \right] + \frac{\pi_i k_2}{\rho - \delta} q(t). \end{aligned} \quad (10)$$

令 Z_1^* 表示此时整个供应链的利润, 则

$$Z_1^* = Z_{s1}^* + Z_{m1}^* + Z_{i1}^*.$$

由反馈纳什均衡减排策略可知, 供应商、制造商和零售商的减排努力程度 $x_s(t)$ 、 $x_m(t)$ 、 $x_i(t)$ 均与各自对减排量的影响系数、单位获得的利润、减排量对供给量、需求量的影响系数以及贴现率正相关, 而与减排成本系数、自然衰退率负相关。

2.2 成本分担合作机制下的博弈均衡减排策略

为了扩大消费者对低碳产品的需求, 制造商与供应商、零售商进行纵向合作。制造商为了鼓励供应商积极提供低碳原材料, 向供应商承担一定比例的减排成本, 设为 $u(t)$, $0 < u(t) < 1$ 。同时, 制造商为了鼓励零售商积极进行低碳宣传, 也向零售商承担一定比例的低碳宣传成本, 设为 $\varphi(t)$, $0 < \varphi(t) < 1$ 。在成本分担合作机制下, 制造商作为主导方, 首先根据供应商和零售商的最优减排决策, 来决定自己的最优减排决策。

供应商的利润函数为

$$R_{s2} = \int_0^{\infty} e^{-\rho t} \left\{ \pi_s [Q_0 + k_1(q_0 + q(t))] - (1 - u(t)) \frac{\alpha_s}{2} [x_s(t)]^2 \right\} dt. \quad (11)$$

零售商的利润函数为

$$R_{i2} = \int_0^{\infty} e^{-\rho t} \left\{ \pi_i [D_0 + k_2(q_0 + q(t))] - (1 - \varphi(t)) \frac{\alpha_i}{2} [x_i(t)]^2 \right\} dt. \quad (12)$$

制造商根据供应商的最优减排策略和零售商的最优减排策略来决定自己的最优减排策略。制造商的利润函数为

$$R_{m2} = \int_0^{\infty} e^{-\rho t} \left\{ \pi_m [D_0 + k_2(q_0 + q(t))] - \frac{\alpha_m}{2} [x_m(t)]^2 - u(t) \times \frac{\alpha_s}{2} [x_s(t)]^2 - \varphi(t) \frac{\alpha_i}{2} [x_i(t)]^2 \right\} dt. \quad (13)$$

求解供应商、零售商和制造商各自满足的HJB方程, 得到均衡策略及制造商对供应商和零售商成本的分担比例。

$$\begin{aligned} x_{s2}^*(t) &= \frac{\varepsilon(2\pi_m k_2 + \pi_s k_1)}{2\alpha_s(\delta - \rho)}; \\ x_{m2}^*(t) &= \frac{\theta\pi_m k_2}{\alpha_m(\delta - \rho)}; \\ x_{i2}^*(t) &= \frac{\sigma(2\pi_m k_2 + \pi_i k_2)}{2\alpha_i(\delta - \rho)}. \end{aligned} \quad (14)$$

产品减排量运动曲线为

$$\begin{aligned} q^*(t) &= \left(q_0 + \frac{B_2}{A_2} \right) e^{A_2 t} - \frac{B_2}{A_2}; \\ A_2 &= -\delta; \end{aligned}$$

$$B_2 = \frac{\varepsilon^2(2\pi_m k_2 + \pi_s k_1)}{2\alpha_s(\delta - \rho)} + \frac{\theta^2\pi_m k_2}{\alpha_m(\delta - \rho)} + \frac{\sigma^2(2\pi_m k_2 + \pi_i k_1)}{2\alpha_i(\delta - \rho)}.$$

该纳什均衡下的供应商、制造商和零售商的利润最优值分别是

$$\begin{aligned} Z_{s2}^* &= \frac{1}{\rho} \left\{ \pi_s (Q_0 + k_1 q_0) + \frac{\pi_s k_1}{(\rho - \delta)^2} \left[\frac{\varepsilon^2(2\pi_m k_2 + \pi_s k_1)}{4\alpha_s} + \frac{\theta^2\pi_m k_2}{\alpha_m} + \frac{\sigma^2(2\pi_m k_2 + \pi_i k_2)}{2\alpha_i} \right] \right\} + \frac{\pi_s k_1}{\rho - \delta} q(t); \\ Z_{m2}^* &= \frac{1}{\rho} \left\{ \pi_m (D_0 + k_2 q_0) + \frac{1}{(\rho - \delta)^2} \left[\frac{\theta^2\pi_m^2 k_2^2}{2\alpha_m} + \frac{\varepsilon^2(2\pi_m k_2 + \pi_s k_1)}{2\alpha_s} \left(\frac{1}{4}\pi_s k_1 - \frac{1}{2}\pi_m k_2 \right) + \frac{\sigma^2(2\pi_m k_2 + \pi_i k_2)}{2\alpha_i} \left(\frac{1}{4}\pi_i k_2 - \frac{1}{2}\pi_m k_2 \right) \right] \right\} + \frac{\pi_m k_2}{\rho - \delta} q(t); \\ Z_{i2}^* &= \frac{1}{\rho} \left\{ \pi_i (D_0 + k_2 q_0) + \frac{\pi_i k_2}{(\rho - \delta)^2} \left[\frac{\sigma^2(2\pi_m k_2 + \pi_i k_2)}{4\alpha_i} + \frac{\theta^2\pi_m k_2}{\alpha_m} + \frac{\varepsilon^2(2\pi_m k_2 + \pi_s k_1)}{2\alpha_s} \right] \right\} + \frac{\pi_i k_2}{\rho - \delta} q(t). \end{aligned} \quad (15)$$

令 Z_2^* 表示此时整个供应链的利润, 则

$$Z_2^* = Z_{s2}^* + Z_{m2}^* + Z_{i2}^*.$$

由反馈纳什均衡减排策略可知, 供应商的减排努力程度不仅与自身利润 π_s 正相关, 还与制造商利润 π_m 正相关, 且后者具有双倍的促进作用, 表明成本分担合作机制能有效协调供应商、制造商和零售商之间的利益分配并提高整个供应链的利润。

2.3 协同合作机制下的博弈均衡减排策略

在协同合作机制下, 三级供应链的各博弈主体成为一个整体, 形成长期合作伙伴关系, 以三级供应链的利润最大化为目标, 共同决定减排努力程度。以 R 表示供应链整体利润, 则供应链的利润函数可表示为

$$R = \int_0^{\infty} e^{-\rho t} \left\{ \pi_s [Q_0 + k_1(q_0 + q(t))] + (\pi_m + \pi_i) [D_0 + k_2(q_0 + q(t))] - \frac{\alpha_s}{2} [x_s(t)]^2 - \frac{\alpha_m}{2} [x_m(t)]^2 - \frac{\alpha_i}{2} [x_i(t)]^2 \right\} dt. \quad (16)$$

求解其满足的HJB方程, 得到供应商、制造商和零售商在协同合作机制下的反馈纳什均衡减排策略。

$$\begin{aligned} x_{s3}^*(t) &= \frac{\varepsilon[\pi_s k_1 + (\pi_m + \pi_i) k_2]}{\alpha_s(\delta - \rho)}; \\ x_{m3}^*(t) &= \frac{\theta[\pi_s k_1 + (\pi_m + \pi_i) k_2]}{\alpha_m(\delta - \rho)}; \end{aligned}$$

$$x_{i3}^*(t) = \frac{\sigma[\pi_s k_1 + (\pi_m + \pi_i) k_2]}{\alpha_i(\delta - \rho)}.$$

(17)

求得供应链产品减排量的运动曲线为

$$q^*(t) = \left(q_0 + \frac{B_3}{A_3} \right) e^{At} - \frac{B_3}{A_3}.$$

则该纳什均衡下的供应链的利润最优值为

$$Z^* = \frac{1}{\rho} \left\{ \pi_s (Q_0 + k_1 q_0) + (\pi_m + \pi_i) (D_0 + k_2 q_0) + \frac{[\pi_s k_1 + (\pi_m + \pi_i) k_2]^2}{(\rho - \delta)^2} \left(\frac{\varepsilon^2}{2\alpha_s} + \frac{\theta^2}{2\alpha_m} + \frac{\sigma^2}{2\alpha_i} \right) \right\} + \left[\frac{\pi_s k_1 + (\pi_m + \pi_i) k_2}{\rho - \delta} \right] q(t).$$

(18)

从反馈纳什均衡减排策略可知, 在协同合作机制下, 供应商、制造商和零售商的最优减排策略 $x_s(t)$ 、 $x_m(t)$ 、 $x_i(t)$, 与三者的单位利润均相关, 且呈正相关关系。表明在协同合作机制下, 供应商、制造商和零售商组成一个整体, 所有的均衡减排策略不是取决于某个主体自身的收益, 而是取决于所有主体的综合收益, 实现整个供应链的目标一致性协调。

3 均衡结果比较分析

探讨供应商、制造商和零售商组成的三级供应链, 在非合作、成本分担和协同合作3种机制下, 各博弈主体的均衡减排策略和利润最优值。为了判断哪种机制能更有效地协调供应链的利润, 实现三级供应链的最优均衡, 对3种机制下取得的均衡减排策略和利润最优值进行比较和分析。

3.1 均衡策略比较

不同机制下博弈主体的策略选择比较结果如表2所示。

由表2可知如下结果。

1) 在非合作决策和成本分担机制下, 当 $\delta > \rho$ 且 $\pi_m k_2 > \frac{1}{2} \pi_s k_1$ 时, $x_{s2}^*(t) > x_{s1}^*(t)$; 当 $\delta > \rho$ 且 $\pi_m > \frac{1}{2} \pi_i$ 时, $x_{i2}^*(t) > x_{i1}^*(t)$ 。即通过对参数的调整, 使得上述条件满足, 则供应商和零售商都会选择制造商作为主导方, 即采用成本分担机制, 此时供应商和零售商的均衡减排策略是最优的。

2) 在非合作决策和协同合作机制下, 当 $\delta > \rho$ 时, $x_{s3}^*(t) > x_{s1}^*(t)$, $x_{m3}^*(t) > x_{m1}^*(t)$, $x_{i3}^*(t) > x_{i1}^*(t)$, 也即满足自然衰退率大于贴现率时, 供应链的各博弈主体均会选择协同合作减排策略, 此时, 各主体的均衡决策水平均高于非合作策略。

表 2 不同机制下策略比较

Table 2 Comparison of strategies under different mechanisms

| 策略选择 | | 比较结果 |
|------------------------|-----|---|
| 非合作决策 与成本分担 机制比较 | 供应商 | $x_{s2}^*(t) - x_{s1}^*(t) = \frac{\varepsilon(\pi_m k_2 - 0.5\pi_s k_1)}{\alpha_s(\delta - \rho)}$ |
| | 制造商 | $x_{m2}^*(t) - x_{m1}^*(t) = 0$ |
| | 零售商 | $x_{i2}^*(t) - x_{i1}^*(t) = \frac{\sigma k_2(\pi_m - 0.5\pi_i)}{\alpha_i(\delta - \rho)}$ |
| 非合作决策 和协同合作 机制比较 | 供应商 | $x_{s3}^*(t) - x_{s1}^*(t) = \frac{\varepsilon(\pi_m + \pi_i) k_2}{\alpha_s(\delta - \rho)}$ |
| | 制造商 | $x_{m3}^*(t) - x_{m1}^*(t) = \frac{\theta(\pi_s k_1 + \pi_i k_2)}{\alpha_m(\delta - \rho)}$ |
| | 零售商 | $x_{i3}^*(t) - x_{i1}^*(t) = \frac{\theta(\pi_s k_1 + \pi_m k_2)}{\alpha_i(\delta - \rho)}$ |
| 成本分担 和协同合作 机制比较 | 供应商 | $x_{s3}^*(t) - x_{s2}^*(t) = \frac{\varepsilon(\pi_s k_1 + 2\pi_i k_2)}{2\alpha_s(\delta - \rho)}$ |
| | 制造商 | $x_{m3}^*(t) - x_{m2}^*(t) = \frac{\theta(\pi_s k_1 + \pi_i k_2)}{\alpha_m(\delta - \rho)}$ |
| | 零售商 | $x_{i3}^*(t) - x_{i1}^*(t) = \frac{\sigma(\pi_i k_2 + 2\pi_s k_1)}{2\alpha_i(\delta - \rho)}$ |

3) 在成本分担和协同合作机制下, 当 $\delta > \rho$ 时, 也即满足自然衰退率大于贴现率时, 供应商、制造商和零售商均会选择协同合作减排, 此时三者的均衡决策水平最高。

3.2 利润最优值比较

不同机制下供应链利润值比较结果如表3所示。

表 3 不同机制下利润值比较

Table 3 Comparison of profit values under different mechanisms

| 策略选择 | 利润值比较结果 |
|---------------|-------------------|
| 非合作和协同合作机制比较 | $Z^* - Z_1^* > 0$ |
| 成本分担和协同合作机制比较 | $Z^* - Z_2^* > 0$ |

由表3可知, 供应链的各博弈主体在选择协同合作机制下供应链的利润最优值要优于非合作的协同和成本分担, 即在三级供应链中, 供应商、制造商和零售商进行协同合作减排时供应链的利润要优于非合作和成本分担机制下的利润。

4 算例分析

为了进一步分析相关参数对产品减排量的影响, 使用算例分析来分析产品减排量的变化情况。TS公司为山东省一家农副渔精加工的公司, 公司上游为农副渔产品供应商, 下游为精加工产品零售商。假设生产和销售一单位产品, 供应商、制造商(TS公司)、零售商获得利润分别为 $\pi_s = 4$, $\pi_m = 6$, $\pi_i = 5$ 。

为实现节能减排，各自的减排努力程度为 $\varepsilon=2$ ， $\theta=3$ ， $\sigma=3$ 。节能减排付出的成本系数为 $\alpha_s=22$ ， $\alpha_m=18$ ， $\alpha_i=12$ 。自然衰退率 $\delta=1$ ，贴现率 $\rho=0.8$ 。减排量对市场供给量和需求量的影响 $k_1=2$ ， $k_2=3$ ，初始减排量 $q(0)=0$ 。

采用Python进行仿真实验，不同时间状态下产品减排量的变化如图1所示。

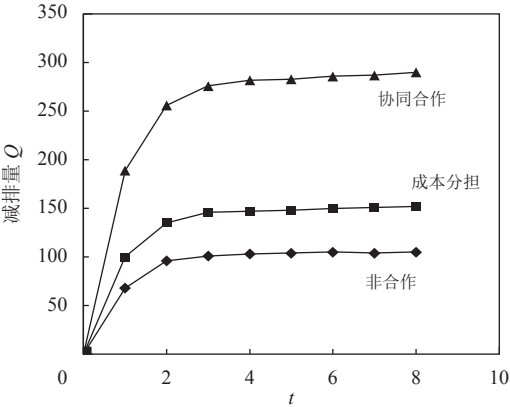


图 1 不同时间状态下减排量的变化曲线

Figure 1 Curves of emission reductions in different time states

从图1可以看出，在协同合作的状态下，产品减排量要高于非合作和成本分担，同时无论哪种状态下，随着时间的变化，产品的减排量呈逐步上升，但是上升的速度越来越慢，最后趋向于稳定。这表明产品减排量受外界因素的影响会发生一定的变化，但随着时间的发展最后返回均衡状态。

供应商、制造商和零售商的努力程度对减排量的影响系数 ε 、 θ 、 σ ，以及自然衰退率 δ 对减排量的影响如图2~5所示。

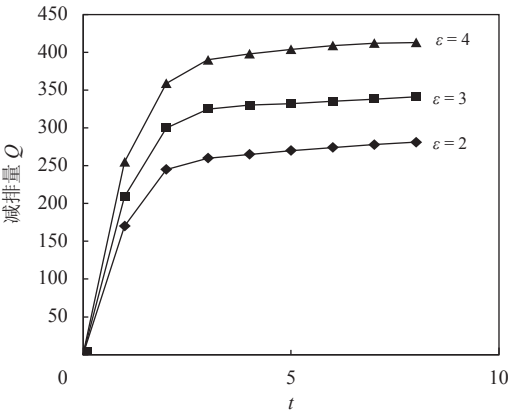


图 2 ε 对减排量的影响

Figure 2 The impact of ε on emission reductions

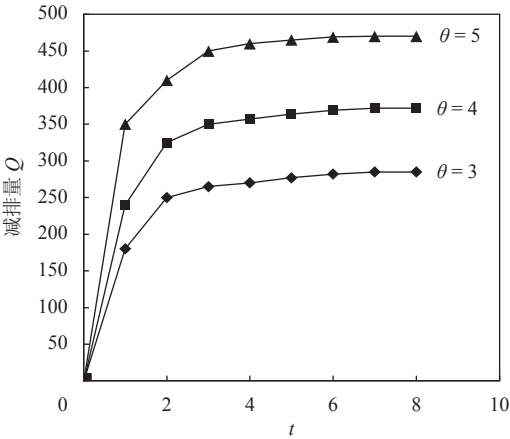


图 3 θ 对减排量的影响

Figure 3 The impact of θ on emission reductions

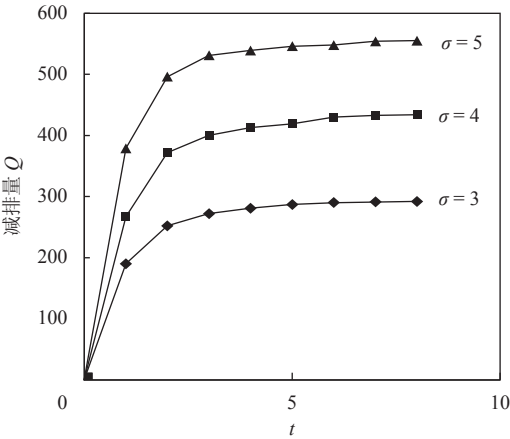


图 4 σ 对减排量的影响

Figure 4 The impact of σ on emission reductions

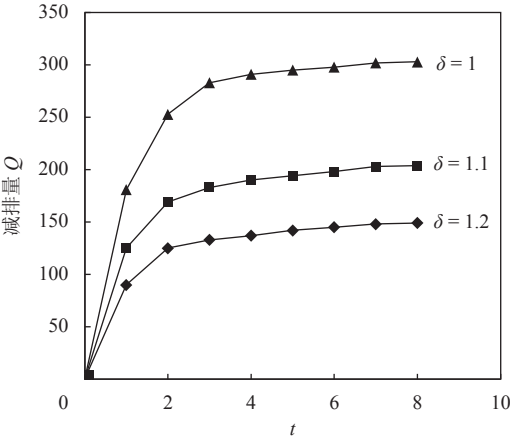


图 5 δ 对减排量的影响

Figure 5 The impact of δ on emission reductions

从图2~4可以看出，随着供应商、制造商和零售商努力程度对减排量系数的增加，产品减排量逐渐增加。这主要是因为随着系数的增大，供应商、

制造商和零售商为减排付出的努力越大, 从而越容易实现减排目标, 长期减排效果越显著。

从图5中可以看出, 随着自然衰退率的增加, 产品减排量不断下降, 这表明当自然衰退率越大, 企业减排成本越高, 长期减排效果越差。

5 结论和展望

考虑由供应商、制造商和零售商组成的三级供应链减排模型, 分别探讨了非合作、成本分担和协同合作机制下的均衡结果, 通过模型求解得到以下结论。

1) 在协同合作机制下, 供应链的各博弈主体以供应链整体利润最大化为目标进行决策, 无论是供应商和制造商的减排努力程度、零售商的低碳宣传努力程度, 还是利润最优值, 协同合作决策均优于非合作和成本分担机制。因此为实现协同合作, 不能完全依靠制造商的主导, 更多的是需要上下游的主动配合和积极协同, 只有供应商积极提供低碳原材料, 零售商积极进行低碳宣传, 制造商积极进行节能减排, 才能有效实现协同合作。

2) 在协同合作的状态下, 产品减排量要高于非合作和成本分担, 同时无论哪种状态下, 随着时间的变化, 产品的减排量呈逐步上升, 但是上升的速度越来越慢, 最后趋向于稳定。

3) 供应商、制造商和零售商努力程度对减排量影响系数越大, 产品长期减排效果越好; 产品自然衰退率越大, 长期减排效果越差。

本文分别构建了非合作、成本分担和协同合作机制下, 由供应商、制造商和零售商组成的三级供应链微分博弈模型, 求解3种机制下不同的博弈均衡结果, 并进行比较和分析, 得出系列结论。但是, 本文也存在不足之处。由于讨论的是由单个供应商、单个制造商和单个零售商组成的三级供应链, 如何将其扩展到多个供应商、多个制造商和多个零售商, 甚至三级以上的供应链, 将有待于进一步的研究。

参考文献:

[1] 申成然, 刘小媛. 碳标签制度下供应商参与碳减排的供应链决策研究[J]. 工业工程, 2018, 21(6): 72-80.

SHEN Chengran, LIU Xiaoyuan. Decision of supply chain with supplier participating in carbon emission reduction under carbon labelling system[J]. Industrial Engineering Journal, 2018,

21(6): 72-80.

[2] 杨光勇, 计国君. 碳排放规制与顾客环境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 Guangyong, JI Guojun. Impacts of carbon emission regulation and consumer environmental consciousness on green innovation[J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2021, 41(3): 702-712.

[3] ZHANG J, NIE T, DU S. Optimal emission-dependent production policy with stochastic demand[J]. International Journal of Society Systems Science, 2011, 3(1/2): 21-39.

[4] HUA G, CHENG T, WANG S. Managing carbon footprints in inventory management[J]. International Journal of Production Economics, 2011, 132(2): 178-185.

[5] 王帆, 倪娟. 企业碳排放影响因素研究-基于浙江企业的调研分析[J]. 商业经济与管理, 2016, 29(1): 71-80.

WANG Fan, NI Juan. Study on the influencing factors of enterprises' carbon emission-an empirical analysis of Zhejiang enterprises[J]. Journal of Business Economics, 2016, 29(1): 71-80.

[6] 付秋芳, 忻莉燕, 马健瑛. 考虑碳排放权的二级供应链碳减排 Stackelberg模型[J]. 工业工程, 2013, 16(2): 41-47.

FU Qiufang, XIN Liyan, MA Jianying. Stackelberg game model for two-level supply chain with allocation mechanism of carbon emission permit[J]. Industrial Engineering Journal, 2013, 16(2): 41-47.

[7] 戴卓, 胡凯. 多目标低碳闭环供应链网络优化模型及算法[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(6): 1648-1653, 1660.

DAI Zhuo, HU Kai. Multi-objective low-carbon loop supply chain network optimization model and algorithm[J]. Application Research of Computers, 2014, 31(6): 1648-1653, 1660.

[8] 姜庆国, 穆东, 王立海, 等. 电煤供应链碳排放的经济测度研究[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2012, 11(4): 45-50.

JIANG Qingguo, MU Dong, WANG Lihai, et al. A study on carbon emission's economic measurement of thermal coal supply chain[J]. Journal of Beijing Jiaotong University(Social Sciences Edition), 2012, 11(4): 45-50.

[9] 吴海翔, 孙浩, 胡劲松. 基于环保法令的多层闭环供应链网络均衡[J]. 软科学, 2013, 27(6): 15-19.

WU Haixiang, SUN Hao, HU Jinsong. A multi-tier closed-loop supply chain network equilibrium under environmental protection legislation[J]. Soft Science, 2013, 27(6): 15-19.

[10] 周岩, 蒋京龙, 孙浩. 面向能源和低碳发展的多准则供应链网络均衡[J]. 系统工程学报, 2014, 29(5): 652-660.

ZHOU Yan, JIANG Jinglong, SUN Hao. Multicriteria supply chain network equilibrium with energy and low carbon development[J]. Journal of Systems Engineering, 2014, 29(5): 652-660.

[11] 李晓婧, 郭春芳, 兰洪杰. 低碳经济环境下双渠道闭环供应链网络均衡模型[J]. 统计与决策, 2016(17): 173-178.

LI Xiaojing, GUO Chunfang, LAN Hongjie. A dual-channel closed-loop supply chain network equilibrium model in a low-carbon economy environment[J]. Statistics and Decision, 2016(17): 173-178.

[12] 曹细玉, 覃艳华, 王静, 等. 碳限额及交易下零售商低碳宣传

- 的双渠道供应链决策与协调[J]. 数学的实践与认识, 2021, 51(7): 280-289.
- CAO Xiyu, QIN Yanhua, WANG Jing, et al. Decision and coordination of dual-channel supply chain considering retailer's low-carbon promotion in the carbon cap and trade mechanism[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2021, 51(7): 280-289.
- [13] 姜跃, 韩水华, 赵洋. 低碳经济下三级供应链动态减排的微分博弈分析[J]. 运筹与管理, 2020, 29(12): 89-97.
- JIANG Yue, HAN Shuihua, ZHAO Yang. Differential game analysis of dynamic carbon emission reduction strategy of three-echelon supply chain under low-carbon economy[J]. *Operations Research and Management Science*, 2020, 29(12): 89-97.
- [14] 魏守道. 碳交易政策下供应链减排研发的微分博弈研究[J]. 管理学报, 2018, 15(5): 782-790.
- WEI Shoudao. Differential game analysis on supply chain's strategy of carbon emission reduction R&D under carbon trading policy[J]. *Chinese Journal of Management*, 2018, 15(5): 782-790.
- [15] 曹英, 杨晓艳. 不同环境规制下基于微分博弈的供应链低碳协调策略研究[J]. 生态经济, 2020, 36(8): 41-48.
- CAO Ying, YANG Xiaoyan. Research on low carbon coordination strategy of supply chain based on differential game under different environmental regulations[J]. *Ecological Economy*, 2020, 36(8): 41-48.
- [16] 陈喆芝, 赵黎明, 许静. 基于微分博弈的旅游供应链低碳合作研究[J]. 旅游学刊, 2016, 31(6): 38-49.
- CHEN Zhezhi, ZHAO Liming, XU Jing. Cooperative strategies of low-carbon differential game in tourism supply chain in China[J]. *Tourism Tribune*, 2016, 31(6): 38-49.

(责任编辑: 郑穗华)

(上接第150页)

- [8] ZHU H B, ZHOU M C. Roles in information systems: a survey[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, 2008, 38(3): 377-396.
- [9] CHOPRA S, NOTARSTEFANO G, RICE M, et al. A Distributed version of the Hungarian method for multirobot assignment[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 33(4): 932-947.
- [10] LIU D N, YUAN Y Y, ZHU H B, et al. Balance preferences with performance in group role assignment[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, 48(6): 1800-1813.
- [11] 刘冬宁, 袁云钊, 黄宝莹, 等. 基于E-CARGO模型的志愿型偏好平衡性指派[J]. 工业工程, 2018, 21(2): 71-77.
- LIU Dongning, YUAN Yunyi, HUANG Baoying, et al. Balanced assignment of voluntary type's preference based on E-CARGO[J]. *Industrial Engineering Journal*, 2018, 21(2): 71-77.
- [12] 户佐安, 贾叶子, 李博威, 等. 考虑客户满意度的车辆路径优化研究[J]. 工业工程, 2019, 22(1): 100-107.
- HU Zuoan, JIA Yezi, LI Bowei, et al. An optimization of the vehicle routing problem based on customer satisfaction[J]. *Industrial Engineering Journal*, 2019, 22(1): 100-107.
- [13] ZHU H B, ZHOU M C. Role-based collaboration and its kernel mechanisms[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 2006, 36(4): 578-589.
- [14] ZHU H B, ZHOU M C, Alkins R. Group role assignment via a Kuhn-Munkres algorithm-based solution[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 2012, 42(3): 739-750.
- [15] ZHU H B, SHENG Y, ZHOU X Z, et al. Group role assignment with cooperation and conflict factors[J]. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Systems*, 2018, 48(6): 1-13.
- [16] ZHU H B. Role-based collaboration and the E-CARGO: revisiting the developments of the last decade[J]. *IEEE Systems, Man, and Cybernetics Magazine*, 2015, 1(3): 27-36.
- [17] ZHU H B. Avoiding conflicts by group role assignment[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Systems*, 2016, 46(4): 535-547.
- [18] 郑金华, 蒋浩, 邝达, 等. 用擂台赛法则构造多目标Pareto最优解集的方法[J]. 软件学报, 2007, 18(6): 1287-1297.
- ZHENG Jinhua, JIANG Hao, KUANG Da, et al. An approach of constructing multi-objective Pareto optimal solutions using Arena's principle[J]. *Journal of Software*, 2007, 18(6): 1287-1297.

(责任编辑: 郑穗华)