

政府奖惩下双渠道供应链减排时滞微分博弈研究

李卓君, 杨梅, 程贞敏

贵州大学数学与统计学院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2023年2月4日; 录用日期: 2023年4月1日; 发布日期: 2023年4月7日

摘要

基于政府奖惩针对单制造商、单供应商和单零售商组成的三级供应链, 考虑技术与宣传的多时滞效应以及消费者线上渠道偏好, 建立两种奖惩机制结合两种双渠道结构的四类模型, 利用微分博弈理论和连续型动态规划理论得到不同模型的减排决策以及最优利润, 并结合算例对模型进行对比分析以及关键参数敏感性分析。研究发现, 时滞存在阈值, 只有低于阈值时利润才会随时滞延长而提高, 政府奖惩力度和消费者渠道偏好都会因所处不同时滞期而对收益产生不同的影响, 因此政府和企业做决策时要综合考虑滞后期以及市场环境, 进行动态调整和及时优化。不仅如此, 时滞较短时政府只奖惩供应商和制造商且制造商开辟线上渠道情形下供应链减排量、低碳商誉水平以及利润都相对较高。

关键词

奖惩机制, 三级供应链, 双渠道供应链, 时滞效应, 微分博弈

Time Lag Differential Game Study of Two-Channel Supply Chain Emission Reduction under Premium and Penalty of Government

Zhoujun Li, Mei Yang, Zhenmin Cheng

School of Mathematics and Statistics, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: Feb. 4th, 2023; accepted: Apr. 1st, 2023; published: Apr. 7th, 2023

Abstract

Based on the three-level supply chain composed of a single manufacturer, a single supplier, and a

single retailer with premium and penalty of government, considering the multi-lag effect of technology and publicity as well as the preference of consumers' online channel, four models of two reward-penalty mechanisms combined with two dual-channel structures are established. The differential game theory and continuous dynamic programming theory are used to obtain the emission reduction decisions and the optimal profits of different models, the comparative analysis of the models and sensitivity analysis of key parameters are also carried out with the examples. The study found that there is a threshold for the time lag. Only below the threshold, the profit will increase with the extension of the time lag. The government's reward and punishment intensity and consumer channel preference will have different effects on the income due to different time lag periods. Therefore, the government and enterprises should comprehensively consider the lag period and the market environment when making decisions, and make dynamic adjustments and timely optimization. Moreover, when the time lag is short, the government only rewards and punishes suppliers and manufacturers and manufacturers open up online channels, the supply chain emission reduction, low-carbon goodwill level, and profit are relatively high.

Keywords

Reward-Penalty Mechanism, Three-Level Supply Chain, Dual-Channel Supply Chains, Time Lag Effect, Differential Game

Copyright © 2023 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,全球能源部门二氧化碳排放量达到363亿吨,同比增长6%,超过COVID-19爆发前的水平,创下历史新高[1]。其中,企业是碳排放主体,《中国上市公司碳排放量排行榜(2021)》中提及的100家上市公司的二氧化碳排放总量为44.24亿吨,约占全国总量的44.7%,占全球总量的13.7%,同时,企业销售渠道的选择对环境也有一定的影响[2];不仅如此,企业的行为往往是对政府环保监管政策的回应[3]。因此,本文的研究领域主要涉及双渠道供应链、政府奖惩机制以及低碳减排及宣传存在多时滞的动态过程三方面内容,相关的文献综述也从这三个方面开展。表1列出了三个领域中比较有代表性的文章,并进行了对比分析。

企业的减排决策已经成为学术界的热点话题。徐春秋等研究了在政府参与下二级供应链的低碳微分博弈模型[4]。然而产品减排不能仅依靠制造商,还需要供应商和零售商的紧密合作。向小东等、姜跃等和聂秀伍等都陆续研究了三级供应链的减排微分博弈分析[5][6][7]。与此同时,随着电商的发展,许多商家都开通了线上的销售渠道,形成双渠道供应链结构。Matsui K和Meng Qingfeng等都对双渠道供应链展开了研究[8][9]。陈静等基于微分博弈下对单结构双渠道供应链进行了减排研究[10]。杨磊等和梁喜等研究了不同结构方式下双渠道供应链渠道选择策略[11][12]。随着传统零售商涉足网络渠道越来越普遍,零售商开辟线上渠道的相关研究也逐渐增多[13][14][15][16]。遗憾的是,极少有文献研究制造商/零售商分别拥有线上渠道开辟权时对企业减排决策的影响。

此外,节能减排是与政府和企业密切相关的社会性问题,政府有必要以引导者身份对企业实施监管。其中政府奖惩是降低碳排放的有效手段之一。付秋芳等和焦建玲等人在惩罚机制下对供应链企业减排投入进行演化博弈分析[17][18]。王道平等通过研究具有政府奖惩下的供应链减排证实了采取政府奖惩机制

能激励企业减排投资的积极性[19]。王道平等研究了政府采取不同奖惩机制下考虑回收率动态随机的闭环供应链微分博弈模型[20]。

不仅如此，现实中无论是低碳减排还是进行低碳宣传，总是无法立即产生效果，具有时滞效应。Chen等构建了一个金融供应链中具有连续时滞的风险规避报童模型的动态模型[21]。陈东彦等、Sun等和卓四清等研究了减排效果存在时滞现象的博弈模型[22] [23] [24]。刘虹等对减排和宣传都存在时滞下的供应链决策进行了研究[25]。

Table 1. Comparison of some important literature

表 1. 一些重要文献的比较

文献	微分博弈	三级供应链	时滞 (单/多时滞)	双渠道 (单/多结构)	政府奖惩 (单/多机制)	线上渠道偏好
徐春秋等[4]	√					
向小东等[5]	√	√				
聂秀伍等[7]	√	√				
姜跃等[6]	√	√				
陈东彦等[22]	√		单时滞			
卓四清等[24]	√		单时滞			
刘虹等[25]	√		多时滞			
陈静等[10]	√	√		单结构		
杨磊等[11]				不同结构		
胡劲松等[16]				不同结构		√
王道平等[19]	√				单机制	
王道平等[20]	√				不同机制	
本文	√	√	多时滞	不同结构	不同机制	√

回顾上述文献可以发现：1) 上述文献大部分都只涉及单个线上渠道模式或者政府采取某一种奖惩机制对企业减排及供应链绩效影响，很少有文献将不同结构双渠道模式及不同奖惩机制结合对比研究对企业减排及供应链绩效的影响效果；2) 很少有研究将时滞以及消费者渠道偏好综合考虑进双渠道供应链减排的情形；3) 大多数文章缺乏从供应链长期、动态的角度研究供应链的碳减排问题，而企业减排是一个长期动态过程。并且多数都是以两级供应链减排作为研究对象，忽略了产品减排不能仅依靠制造商，还需要供应商和零售商的紧密合作。

综上所述，本文将不同结构双渠道模式及不同奖惩机制结合，并且考虑减排和宣传都存在时滞现象以及消费者不同渠道偏好的三级供应链，构造四类双渠道供应链微分博弈模型，研究政府采取不同奖惩机制下对具有多时滞效应的三级双渠道供应链选择何种渠道结构才会更利于企业减排和获利，由“奖惩机制 + 渠道模式”的搭配优劣提供一种“政府 + 企业”携手减排的可能性。

2. 模型构建与相关假设

本文假设企业均有权开设线上渠道。在不考虑展厅现象下，三级供应链由一个供应商，一个制造商

和一个零售商组成，制造商和零售商在网络渠道和传统渠道销售的均为同类同质的商品。制造商为领导者，主要负责最终产品的减排工作，供应商和零售商为跟随者，分别负责原材料减排和低碳产品宣传与促销，供应商、制造商和零售商的决策目标都是自身利润的最大化。根据政府奖惩方式(只奖惩制造商和供应商/三者都奖惩)以及不同渠道结构(制造商双渠道/零售商双渠道)组合成四种模型，如图 1 所示。

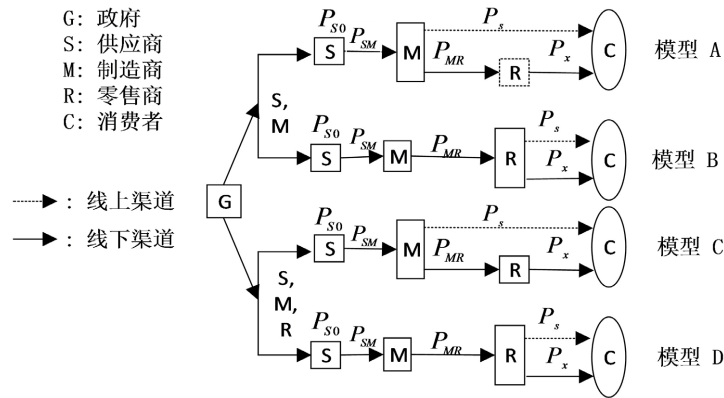


Figure 1. Four model structure diagrams
图 1. 四种模型结构图

假设 1 考虑到减排成本和低碳宣传成本均为各自努力水平的凸函数[26]，则 t 时刻各成本为：

$$C_M(t) = \frac{1}{2}k_M e_M^2(t), C_S(t) = \frac{1}{2}k_S e_S^2(t), C_R(t) = \frac{1}{2}k_R e_R^2(t), \quad (1)$$

其中， $k_i (i = M, S, R)$ 分别为各自的减排成本以及宣传成本系数。将供应商与制造商的制造成本和零售商的管理成本均视为 0。

假设 2 由于低碳技术存在时滞效应，参考陈东彦等和卓四清等的模型[22] [24]，减排量的微分演化过程为：

$$\dot{X}(t) = \alpha_M e_M(t - d_M) + \alpha_S e_S(t - d_S) - \beta X(t), X(0) = X_0, \quad (2)$$

其中 $X(t)$ 为 t 时刻的减排量， $X(0) = 0$ ， α_M, α_S 分别是制造商和供应商减排努力对减排量的影响系数。 d_M, d_S 分别是各自的减排技术的滞后时间， $t \leq d$ 时， $X(t - d) = 0$ ， β 是减排衰减率。

假设 3 零售商的低碳宣传效果具有时滞效应，参考陈东彦等和卓四清等的模型[22] [24]，零售商的低碳宣传努力会对商誉产生正向作用。商誉的初始值为 0，其微分演化过程为：

$$\dot{G}(t) = cX(t) + \zeta e_R(t - d_R) - \delta G(t), G(0) = G_0, \quad (3)$$

其中 ζ 是零售商宣传努力对商誉的影响系数， δ 是商誉的衰减系数。

假设 4 借鉴 Ouardighi 的研究[27]，设产品需求受价格和商誉的双重影响，因此线上线下不同渠道的需求函数分别为：

$$\begin{aligned} Q_s(t) &= (\lambda a - bP_s) fG(t) \\ Q_x(t) &= ((1 - \lambda)a - bP_x) fG(t) \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $a > 0$ 为低碳产品原始市场需求， $\lambda > 0$ 为消费者对线上渠道的偏好， $b > 0$ 为需求的价格弹性系数， $f > 0$ 为消费者对商誉的感知度。

3. 模型分析

本节将分别探讨四种模型下制造商与供应商的减排努力策略、零售商的低碳宣传努力策略、产品减排水平、品牌商誉的变化规律以及供应链利润。为区别起见，下文用下标 M, S, R 分别表示供应链决策主体制造商、供应商和零售商，用下标 A, B, C, D 分别代表四类情况下的模型。

3.1. 政府只奖惩制造商和供应商下制造商双渠道模型(模型 A)

如图 1 所示，当制造商拥有线上渠道开辟权时，制造商首先确定自身减排努力程度，并在线下渠道以批发价格 P_{MR} 将商品销售给零售商，在线上以价格 P_s 直接销售给消费者；然后供应商和零售商分别确定减排努力程度和低碳产品宣传与促销努力程度并且零售商在线下直接以价格 P_x 销售给消费者；为了便于表示，假设制造商承担的比例为 u ，则制造商的奖励(惩罚)为 $u\mu|X(t) - X_1|$ ，供应商承担的奖励(惩罚)为 $(1-u)\mu|X(t) - X_1|$ ；考虑减排量连续动态性构建供应链的 Stackelberg 微分博弈模型如下：

$$\begin{aligned} \max & \left\{ J_M^M = \int_0^{+\infty} e^{-\rho t} \left[P_s Q_s(t) + P_{MR} Q_x(t) - P_{SM} (Q_s(t) + Q_x(t)) + u\mu(X(t) - X_1) - \frac{1}{2} k_M e_M^2(t) \right] dt \right\}, \\ \max & \left\{ J_S^M = \int_0^{+\infty} e^{-\rho t} \left[(P_{SM} - P_{S0})(Q_s(t) + Q_x(t)) + (1-u)\mu(X(t) - X_1) - \frac{1}{2} k_S e_S^2(t) \right] dt \right\}, \\ \max & \left\{ J_R^M = \int_0^{+\infty} e^{-\rho t} \left[(P_x - P_{MR}) Q_x(t) - \frac{1}{2} k_R e_R^2(t) \right] dt \right\}. \end{aligned} \tag{5}$$

命题 1 在政府同时奖惩三者且制造商拥有线上渠道开辟权时，供应链绩效指标如下：

3.1.1. 制造商、供应商和零售商各自的减排努力及低碳宣传努力

$$\begin{aligned} e_{RA} &= \frac{f(P_{MR} - P_x)(a\lambda + bP_x - a)\zeta}{k_R(\delta + \rho)} \cdot e^{\delta a_R}, \\ e_{SA} &= -\frac{((P_{S0} - P_{SM})((-P_s - P_x)b + a)fc + \mu(-1+u)(\delta + \rho))\alpha_S}{k_S(\beta + \rho)(\delta + \rho)} \cdot e^{\beta d_S}, \\ e_{MA} &= -\frac{(f(((\lambda - 1)P_{MR} - P_s\lambda + P_{SM}))a + (P_x P_{MR} + (-P_s - P_x)P_{SM} + P_s^2)b)c - u\mu(\delta + \rho)\alpha_M}{k_M(\beta + \rho)(\delta + \rho)} \cdot e^{\beta d_M}. \end{aligned} \tag{6}$$

3.1.2. 产品减排水平、品牌商誉的时间演变规律

$$\begin{aligned} X_A^* &= \left(X_0 - \frac{\alpha_M e_{MA} + \alpha_S e_{SA}}{\beta} \right) e^{-\beta t} + \frac{\alpha_M e_{MA} + \alpha_S e_{SA}}{\beta}, \\ G_A^* &= \left(G_0 - \frac{X_A^* c + e_{RA} k_R}{\delta} \right) e^{-\delta t} + \frac{X_A^* c + e_{RA} k_R}{\delta}. \end{aligned} \tag{7}$$

3.1.3. 利润函数

$$\begin{aligned} V_{MA}^* &= k_{1A} X + k_{2A} G + k_{3A}, \\ V_{SA}^* &= k_{4A} X + k_{5A} G + k_{6A}, \\ V_{RA}^* &= k_{7A} X + k_{8A} G + k_{9A}, \end{aligned} \tag{8}$$

其中

$$\begin{aligned}
k_{1,A} &= \frac{-ac\lambda P_{MR} + acf\lambda P_s - bcfP_{MR}P_x + bcfP_{SM}P_s + bcfP_{SM}P_x - bcfP_s^2 + acfP_{MR} - acfP_{SM} + \delta\mu + \mu\rho}{(\beta + \rho)(\delta + \rho)}, \\
k_{2,A} &= \frac{-af\lambda P_{MR} + af\lambda P_s - bcfP_{MR}P_x + bcfP_{SM}P_s + bcfP_{SM}P_x - bcfP_s^2 + acfP_{MR} - afP_{SM}}{\delta + \rho}, \\
k_{3,A} &= \frac{-ac\lambda P_{MR} + acf\lambda P_s - bcfP_{MR}P_x + bcfP_{SM}P_s + bcfP_{SM}P_x - bcfP_s^2 + acfP_{MR} - acfP_{SM} + \delta\mu + \mu\rho}{(\beta + \rho)(\delta + \rho)} \\
&\quad \cdot (\alpha_M e_{MA} + \alpha_S e_{SA}) + \frac{-af\lambda P_{MR} + af\lambda P_s - bcfP_{MR}P_x + bcfP_{SM}P_s + bcfP_{SM}P_x - bcfP_s^2 + acfP_{MR} - afP_{SM}}{\delta + \rho} \zeta e_{RA} \\
&\quad - \frac{e_{MA}^2 k_M}{2} - X_1 \mu u, \\
k_{4,A} &= \frac{bcfP_{S0}P_s + bcfP_{S0}P_x - bcfP_{SM}P_s - bcfP_{SM}P_x - acfP_{S0} + acfP_{SM} - \delta\mu - \mu\rho + \delta\mu + \mu\rho}{(\beta + \rho)(\delta + \rho)}, \\
k_{5,A} &= \frac{f(bP_s + bP_x - a)(P_{S0} - P_{SM})}{\delta + \rho}, \\
k_{6,A} &= \frac{bcfP_{S0}P_s + bcfP_{S0}P_x - bcfP_{SM}P_s - bcfP_{SM}P_x - acfP_{S0} + acfP_{SM} - \delta\mu - \mu\rho + \delta\mu + \mu\rho}{(\beta + \rho)(\delta + \rho)} \cdot (\alpha_M e_{MA} + \alpha_S e_{SA}) \\
&\quad + \frac{f(bP_s + bP_x - a)(P_{S0} - P_{SM})}{\delta + \rho} \zeta e_{RA} - \frac{e_{SA}^2 k_S}{2} + X_1 \mu (u - 1), \\
k_{7,A} &= \frac{cf(P_{MR} - P_x)(a\lambda + bP_x - a)}{(\beta + \rho)(\delta + \rho)}, \\
k_{8,A} &= \frac{f(P_{MR} - P_x)(a\lambda + bP_x - a)}{(\delta + \rho)}, \\
k_{9,A} &= \frac{cf(P_{MR} - P_x)(a\lambda + bP_x - a)}{(\beta + \rho)(\delta + \rho)} (\alpha_M e_{MA} + \alpha_S e_{SA}) + \frac{f(P_{MR} - P_x)(a\lambda + bP_x - a)}{\delta + \rho} \zeta e_{RA} - \frac{e_{RA}^2 k_R}{2}.
\end{aligned}$$

证明: 为简化起见, 下面过程省略 t , 同时下面命题证明类似, 因此证明过程只写一次, 设 $V_{RA}^M, V_{SA}^M, V_{MA}^M$ 分别为 t 时刻后零售商、供应商和制造商的利润当值函数, 则三者在 t 时间后的总利润现值函数分别为:

$$\begin{aligned}
J_{RA}^M(X, G, t) &= e^{-\rho t} V_{RA}^M(X, G, t), \\
J_{SA}^M(X, G, t) &= e^{-\rho t} V_{SA}^M(X, G, t), \\
J_{MA}^M(X, G, t) &= e^{-\rho t} V_{MA}^M(X, G, t),
\end{aligned} \tag{9}$$

在静态反馈均衡的充分条件基础上, 假设连续有界的微分函数 V_{iA}^M , 对 $\forall X \geq 0, G \geq 0$ 都满足 HJB 方程

$$\begin{aligned}
\rho V_{MA}^M &= \max \left\{ \left[P_s(a\lambda - bP_s)fG + P_{MR}((1-\lambda)a - bP_x)fG - P_{SM}(-bP_s - bP_x + a)fG + u\mu(X - X_1) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - \frac{k_M e_{MA}^2}{2} \right] + V_{MX}(\alpha_M e_{MA}(t - d_M) + \alpha_S e_{SA}(t - d_S) - \beta X) + V_{MG}(cX + \zeta e_{RA}(t - d_R) - \delta G) \right\}, \\
\rho V_{SA}^M &= \max \left\{ \left[(P_{SM} - P_{S0})(-bP_s - bP_x + a)fG + (1-u)\mu(X - X_1) - \frac{k_S e_{SA}^2}{2} \right] \right. \\
&\quad \left. + V_{SX}(\alpha_M e_{MA}(t - d_M) + \alpha_S e_{SA}(t - d_S) - \beta X) + V_{SG}(cX + \zeta e_{RA}(t - d_R) - \delta G) \right\},
\end{aligned}$$

$$\rho V_{RA}^M = \max \left\{ \left[(P_x - P_{MR})((1-\lambda)a - bP_x) fG - \frac{k_R e_{RA}^2}{2} \right] + V_{RX} (\alpha_M e_{MA} (t-d_M) + \alpha_S e_{SA} (t-d_S) - \beta X) + V_{RG} (cX + \zeta e_{RA} (t-d_R) - \delta G) \right\}, \tag{10}$$

其中, $V_{MX}, V_{MG}, V_{SX}, V_{SG}, V_{RX}, V_{RG}$ 分别表示 V_M, V_S, V_R 关于 X 和 G 的偏导。对式(10)求 e_{RA} 的一阶条件, 得

$$e_{RA} = \frac{V_{RG} \zeta \frac{\partial e_{RA} (t-d_R)}{\partial e_{RA}}}{k_R},$$

根据 Basin 的研究[28], 令 $\frac{\partial e_{RA} (t-d_R)}{\partial e_{RA}} = e^{\delta d_R}$, 代入上式, 可得

$$e_{RA} = \frac{V_{RG} \zeta}{k_R} \cdot e^{\delta d_R}, \tag{11}$$

同理可得,

$$e_{SA} = \frac{V_{SX} \alpha_S}{k_S} \cdot e^{\beta d_S}, \tag{12}$$

$$e_{MA} = \frac{V_{MX} \alpha_M}{k_M} \cdot e^{\beta d_M}.$$

将式(11)、(12)代入(10)中并合并同类项, 根据微分方程的阶数特点, 推测关于 X, G 的线性最优值函数是 HJB 方程的解

$$V_{MA}^* = k_{1,A} X + k_{2,A} G + k_{3,A},$$

$$V_{SA}^* = k_{4,A} X + k_{5,A} G + k_{6,A},$$

$$V_{RA}^* = k_{7,A} X + k_{8,A} G + k_{9,A}.$$

对上式分别求一阶导数, 再结合上述整理的微分方程求解合并可得 $k_{iA} (i=1, \dots, 9)$, 代入即求出利润函数; 将式(11)、(12)代入(2)、(3)求解即可得减排量和商誉的运动曲线 X_A^* 和 G_A^* 。

命题 1 得证。

3.2. 政府只奖惩制造商和供应商下零售商双渠道模型(模型 B)

如图 1 所示, 零售商拥有线上渠道开辟权时, 制造商首先确定自身减排努力程度以及将商品以价格 P_{MR} 批发给零售商; 供应商和零售商分别确定自身减排努力程度和低碳宣传努力程度, 并且零售商将产品分别在线上以销售价格 P_s 、线下销售价格 P_x 卖给消费者。考虑减排量连续动态性构建供应链的 Stackelberg 微分博弈模型如下:

$$\max \left\{ J_M^M = \int_0^{+\infty} e^{-\rho t} \left[(P_{MR} - P_{SM})(Q_s(t) + Q_x(t)) + u\mu(X(t) - X_1) - \frac{1}{2} k_M e_M^2(t) \right] dt \right\},$$

$$\max \left\{ J_S^M = \int_0^{+\infty} e^{-\rho t} \left[(P_{SM} - P_{S0})(Q_s(t) + Q_x(t)) + (1-u)\mu(X(t) - X_1) - \frac{1}{2} k_S e_S^2(t) \right] dt \right\},$$

$$\max \left\{ J_R^M = \int_0^{+\infty} e^{-\rho t} \left[P_s Q_s(t) + P_x Q_x(t) - P_{MR}(Q_s(t) + Q_x(t)) - \frac{1}{2} k_R e_R^2(t) \right] dt \right\}.$$

命题 2 在政府同时奖惩三者且零售商拥有线上渠道开辟权时, 供应链绩效指标如下:

3.2.1. 制造商、供应商和零售商各自的减排努力及低碳宣传努力

$$e_{RB} = \frac{f(-bP_x^2 + ((-\lambda + 1)a + bP_{MR})P_x + (\lambda P_s - P_{MR})a - bP_s(P_s - P_{MR}))\zeta}{k_R(\delta + \rho)} \cdot e^{\delta d_R},$$

$$e_{SB} = -\frac{(P_{S0} - P_{SM})((-P_s - P_x)b + a)fc + \mu(-1 + u)(\delta + \rho)\alpha_S}{k_S(\beta + \rho)(\delta + \rho)} \cdot e^{\beta d_S},$$

$$e_{MB} = -\frac{(P_{MR} - P_{SM})((-P_s - P_x)b + a)fc + u\mu(\delta + \rho)\alpha_M}{k_M(\beta + \rho)(\delta + \rho)} \cdot e^{\beta d_M}.$$

3.2.2. 产品减排水平、品牌商誉的时间演变规律

$$X_B^* = \left(X_0 - \frac{\alpha_M e_{MB} + \alpha_S e_{SB}}{\beta} \right) e^{-\beta t} + \frac{\alpha_M e_{MB} + \alpha_S e_{SB}}{\beta},$$

$$G_B^* = \left(G_0 - \frac{X_B^* c + e_{RB} k_R}{\delta} \right) e^{-\delta t} + \frac{X_B^* c + e_{RB} k_R}{\delta}.$$

3.2.3. 利润函数

$$V_{MB}^* = k_{1B}X + k_{2B}G + k_{3B},$$

$$V_{SB}^* = k_{4B}X + k_{5B}G + k_{6B},$$

$$V_{RB}^* = k_{7B}X + k_{8B}G + k_{9B}.$$

3.3. 政府同时奖惩制造商、供应商和零售商下制造商双渠道模型(模型 C)

博弈过程与 3.1 情况类似，政府同时对三者进行奖惩，零售商也需分担奖惩，假设制造商和供应商分别分担比例 u_M 和 u_S ，则制造商承担的奖励(惩罚)为 $u_M \mu |X(t) - X_1|$ ，供应商承担的奖励(惩罚)为 $u_S \mu |X(t) - X_1|$ ，零售商承担的惩罚为 $(1 - u_M - u_S) \mu |X(t) - X_1|$ ；考虑减排量连续动态性构建供应链的 Stackelberg 微分博弈模型如下：

$$\max \left\{ J_M^M = \int_0^{+\infty} e^{-\rho t} \left[P_s Q_s(t) + P_{MR} Q_x(t) - P_{SM} (Q_s(t) + Q_x(t)) + u_M \mu (X(t) - X_1) - \frac{1}{2} k_M e_M^2(t) \right] dt \right\},$$

$$\max \left\{ J_S^M = \int_0^{+\infty} e^{-\rho t} \left[(P_{SM} - P_{S0}) (Q_s(t) + Q_x(t)) + u_S \mu (X(t) - X_1) - \frac{1}{2} k_S e_S^2(t) \right] dt \right\},$$

$$\max \left\{ J_R^M = \int_0^{+\infty} e^{-\rho t} \left[(P_x - P_{MR}) Q_x(t) + (1 - u_M - u_S) \mu (X(t) - X_1) - \frac{1}{2} k_R e_R^2(t) \right] dt \right\}.$$

命题 3 在政府只奖惩制造商和供应商且制造商拥有线上渠道开辟权时，供应链绩效指标如下：

3.3.1. 制造商、供应商和零售商各自的减排努力及低碳宣传努力

$$e_{RC} = \frac{f(P_{MR} - P_x)(a\lambda + bP_x - a)\zeta}{k_R(\delta + \rho)} \cdot e^{\delta d_R},$$

$$e_{SC} = -\frac{(P_{S0} - P_{SM})((-P_s - P_x)b + a)fc - u_S \mu (\delta + \rho) \alpha_S}{k_S(\beta + \rho)(\delta + \rho)} \cdot e^{\beta d_S},$$

$$e_{MC} = -\frac{\left(f \left(((\lambda - 1)P_{MR} - P_s \lambda + P_{SM})a + (P_x P_{MR} + (-P_s - P_x)P_{SM} + P_s^2)b \right) c - u_M \mu (\delta + \rho) \right) \alpha_M}{k_M(\beta + \rho)(\delta + \rho)} \cdot e^{\beta d_M}.$$

3.3.2. 产品减排水平、品牌商誉和消费者参考低碳水平的时时间演变规律

$$X_C^* = \left(X_0 - \frac{\alpha_M e_{MC} + \alpha_S e_{SC}}{\beta} \right) e^{-\beta t} + \frac{\alpha_M e_{MC} + \alpha_S e_{SC}}{\beta},$$

$$G_C^* = \left(G_0 - \frac{X_C^* c + e_{RC} k_R}{\delta} \right) e^{-\delta t} + \frac{X_C^* c + e_{RC} k_R}{\delta}.$$

3.3.3. 利润函数

$$V_{MC}^* = k_{1C} X + k_{2C} G + k_{3C},$$

$$V_{SC}^* = k_{4C} X + k_{5C} G + k_{6C},$$

$$V_{RC}^* = k_{7C} X + k_{8C} G + k_{9C}.$$

3.4. 政府同时奖惩制造商、供应商和零售商下零售商双渠道模型(模型 D)

博弈过程与 3.2 情况类似，政府奖惩同 3.3 类似。考虑减排量连续动态性构建供应链的 Stackelberg 微分博弈模型如下：

$$\max \left\{ J_M^R = \int_0^{+\infty} e^{-\rho t} \left[(P_{MR} - P_{SM})(Q_s(t) + Q_x(t)) + u_M \mu(X(t) - X_1) - \frac{1}{2} k_M e_M^2(t) \right] dt \right\},$$

$$\max \left\{ J_S^R = \int_0^{+\infty} e^{-\rho t} \left[(P_{SM} - P_{S0})(Q_s(t) + Q_x(t)) + u_S \mu(X(t) - X_1) - \frac{1}{2} k_S e_S^2(t) \right] dt \right\},$$

$$\max \left\{ J_R^R = \int_0^{+\infty} e^{-\rho t} \left[P_s Q_s(t) + P_x Q_x(t) - P_{MR}(Q_s(t) + Q_x(t)) + (1 - u_S - u_M) \mu(X(t) - X_1) - \frac{1}{2} k_R e_R^2(t) \right] dt \right\}.$$

命题 4 在政府只奖惩制造商和供应商且零售商拥有线上渠道开辟权时，供应链绩效指标如下：

3.4.1. 制造商、供应商和零售商各自的减排努力及低碳宣传努力

$$e_{RD} = \frac{f(-bP_x^2 + ((-\lambda + 1)a + bP_{MR})P_x + (\lambda P_s - P_{MR})a - bP_s(P_s - P_{MR}))\zeta}{k_R(\delta + \rho)} \cdot e^{\delta d_R},$$

$$e_{SD} = -\frac{(P_{S0} - P_{SM})((-P_s - P_x)b + a)fc - u_S \mu(\delta + \rho)\alpha_S}{k_S(\beta + \rho)(\delta + \rho)} \cdot e^{\beta d_S},$$

$$e_{MD} = -\frac{(P_{MR} - P_{SM})((-P_s - P_x)b + a)fc + u_M \mu(\delta + \rho)\alpha_M}{k_M(\beta + \rho)(\delta + \rho)} \cdot e^{\beta d_M}.$$

3.4.2. 产品减排水平、品牌商誉和消费者参考低碳水平的时时间演变规律

$$X_D^* = \left(X_0 - \frac{\alpha_M e_{MD} + \alpha_S e_{SD}}{\beta} \right) e^{-\beta t} + \frac{\alpha_M e_{MD} + \alpha_S e_{SD}}{\beta},$$

$$G_D^* = \left(G_0 - \frac{X_D^* c + e_{RD} k_R}{\delta} \right) e^{-\delta t} + \frac{X_D^* c + e_{RD} k_R}{\delta}.$$

3.4.3. 利润函数

$$V_{MD}^* = k_{1D} X + k_{2D} G + k_{3D},$$

$$V_{SD}^* = k_{4D} X + k_{5D} G + k_{6D},$$

$$V_{RD}^* = k_{7D} X + k_{8D} G + k_{9D}.$$

4. 算例仿真分析

本文将借助 MATLAB 分别对 A、B、C、D 这四种博弈情形做算例分析。给定各参数值分别为：

$$\begin{aligned} k_M = 6, k_S = 5, k_R = 4, \alpha_M = 6, \alpha_S = 5, \zeta = 2, \eta = 3, b = 2, c = 3, f = 0.5, \gamma = 2, u_M = 0.5, \\ u_S = 0.3, u = 0.6, \rho = 0.7, \beta = 2, \delta = 0.5, a = 40, X_1 = 15, X_0 = 0, G_0 = 0, P_s = 6, P_x = 7, \\ P_{SM} = 3, P_{MR} = 5, P_{S0} = 1 \end{aligned}$$

4.1. 四类模型的产品减排量以及商誉分析

假设此时 $d_M = d_S = d_R = 0.2, \mu = 1, \lambda = 0.6$ ，观察减排量以及商誉随时间的变化规律，由图 2 可知，四种模型下产品减排水平以及商誉随着时间增加而增加并趋于稳定值，且 $X_A > X_C > X_B > X_D$ ， $G_A > G_C > G_B > G_D$ ；时滞越大，最优努力越大，因此减排努力使得减排水平提高，宣传努力带来更高的商誉；A、C 模型的减排水平和商誉水平更高，且 A 模型的商誉最高。因此从企业声誉和低碳减排的角度选择 A 模型为最优选择。

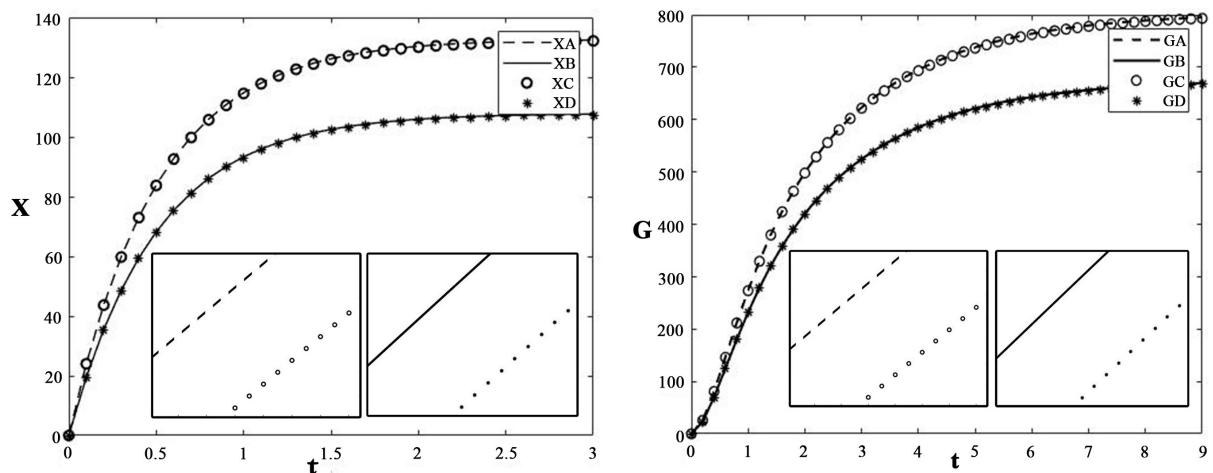


Figure 2. In the four categories, emission reduction and goodwill change with time

图 2. 四类中减排量及商誉随时间变化规律

4.2. 四类模型的供应链利润分析

4.2.1. 时滞对供应链利润影响

假设此时 $\mu = 1, \lambda = 0.6, t = 1000$ 时观察供应链总利润随时滞的变化规律，如图 3 所示，再假设 $\mu = 1, \lambda = 0.6$ 时滞分别为 0.2 以及 2 时的供应链利润随时间的变化规律，如图 4 所示。由图 3、图 4 可知，四种模型中供应链总利润都会随着时间的增高趋于稳定值，并且时滞存在阈值，当低于阈值即时滞较短时，供应链利润随着时滞逐渐增高并且此时供应链总利润 $J_A > J_C > J_B > J_D$ ；当超过阈值即时滞较长时，供应链利润随着时滞逐渐降低；因此，当处于较短时滞期内，A 模型为最优选择。

4.2.2. 政府奖惩对供应链利润影响

由图 5 可知，当时滞较短时，随着政府奖惩力度越大供应链的总利润越高，并且供应链总利润 $J_A > J_C > J_B > J_D$ 。这是因为企业能通过努力减排获得更多的奖励，因此正向激励制造商、供应商进行低碳减排，提高供应链总利润；而当时滞较长时，此时过长的时滞导致企业入不敷出，政府的监督无法具备激励的作用。

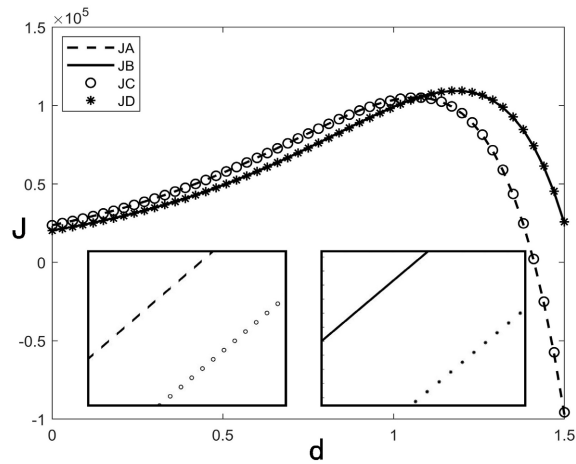


Figure 3. The change law of profit with the time lag
图 3. 利润随时滞的变化规律

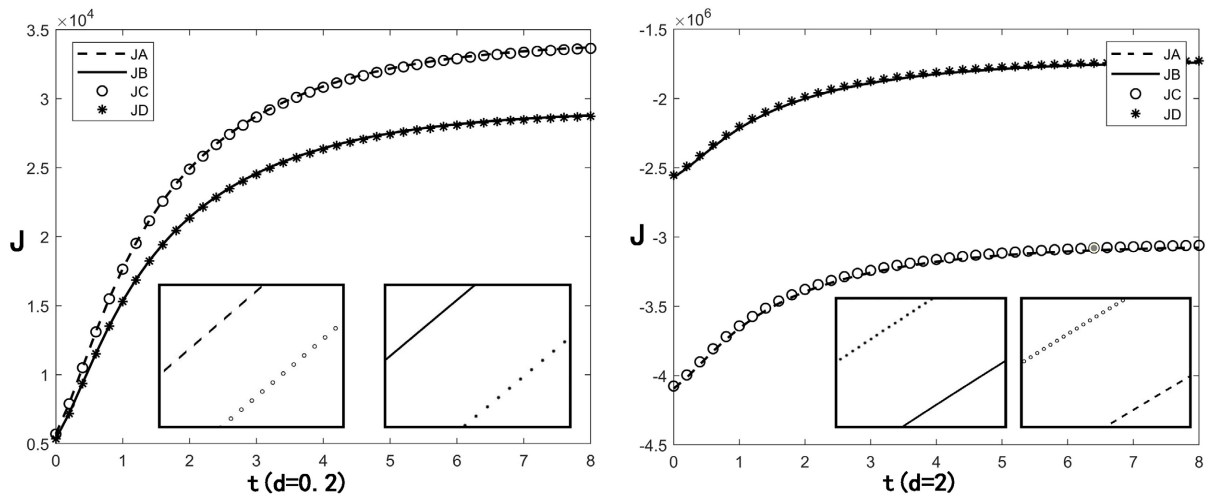


Figure 4. The change law of profit over time
图 4. 利润随时间的变化规律

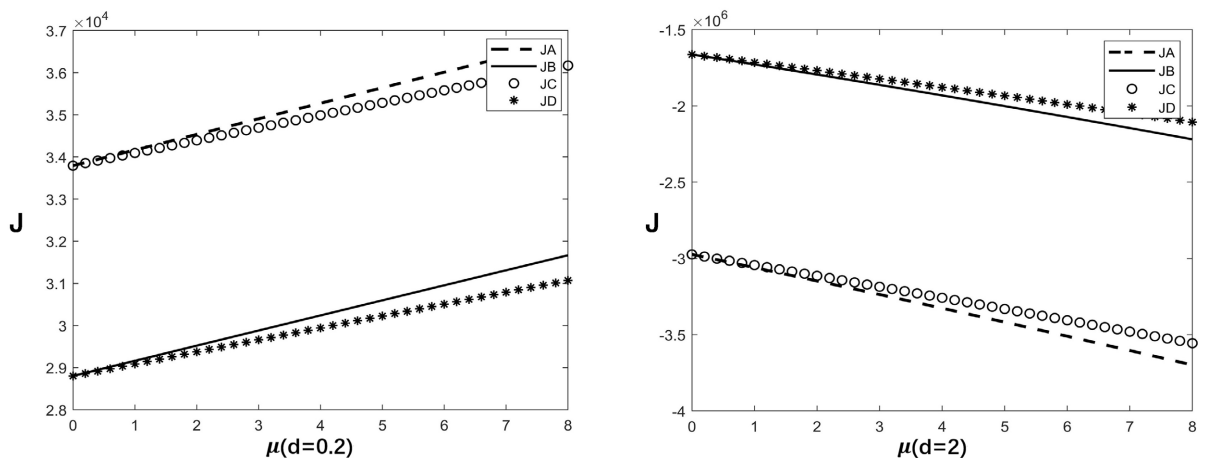


Figure 5. The change law of profit with the intensity of rewards and punishments
图 5. 利润随奖惩力度的变化规律

4.2.3. 消费者渠道偏好对利润的影响

由图6可知,当制造商开辟线上渠道且时滞较短时,消费者线上渠道偏好对供应链利润存在阈值,因为当制造商开辟线上渠道时随着 λ 升高制造商和供应商的利润会升高,但是会损害零售商的利润,因此无法持续提高供应链利润。当时滞较短且消费者线上偏好较低时,零售商开辟线上渠道模型的利润更高,反之制造商双渠道模式利润更高。而当时滞较长时,结果又是相反的。因此,当消费者线上偏好和时滞共同变化时,最优模型的选择是相对的,因此企业做决策前一定要提前评估市场环境以及自身所处时滞期。

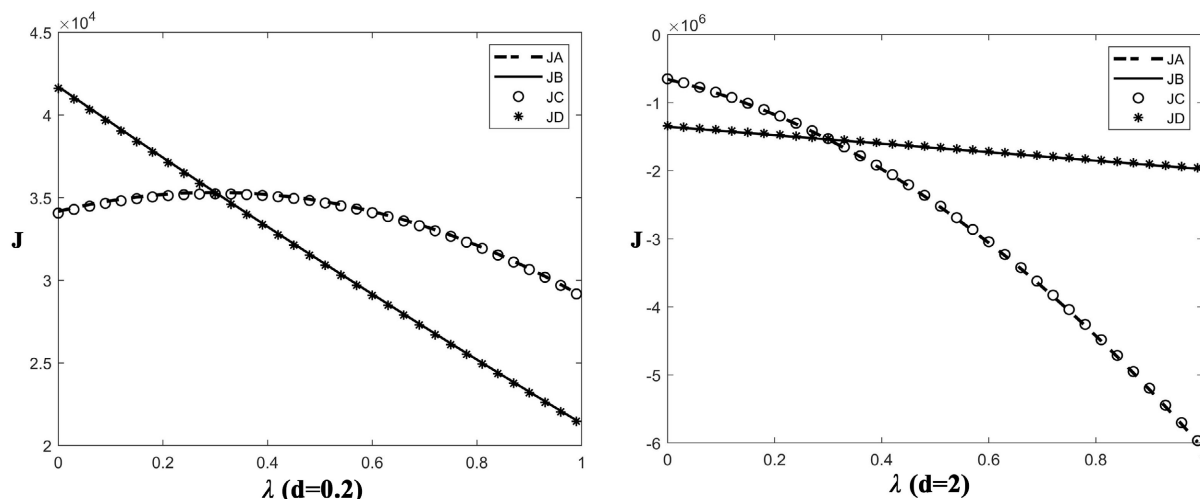


Figure 6. The change law of profit with the channel preference

图6. 利润随渠道偏好的变化规律

5. 结束语

本文考虑减排和低碳宣传效果存在多时滞效应,将政府采取不同奖惩机制下搭配不同的双渠道结构模式相结合,通过构建制造商、供应商和零售商的时滞微分博弈模型,分别计算了四种不同模型的最优减排决策以及企业的最优利润,并将供应链的减排量和利润作对比,以分析时滞对供应链减排的影响以及给出政府采取不同奖惩机制下双渠道供应链的最优结构策略。通过综合比较和分析,在本文的模型假设以及研究框架下得到以下启示:

政府只对制造商和供应商进行奖惩时,有利于激励制造商和供应商投入更多的减排努力;而当政府同时对三者都进行奖惩时,此时零售商需分担减排责任,打击了零售商积极性的同时也削减了政府对制造商和供应商的激励作用,因此整体劣于只奖惩供应商和制造商的情况。除此之外,制造商开辟线上渠道总能为供应链带来更高的减排量和利润。因此,从长期来看,当时滞较短时政府只奖惩供应商和制造商的同时制造商开辟线上渠道的模式是最优选择,可以同时提高经济和环保双重效益。

减排效果和宣传效果的滞后时间较短时会激励成员减排以及利润上升,当时滞过长时投资所得利润将难以弥补成本,造成资源浪费,损害供应链成员利润;同时政府奖惩和消费者渠道偏好的改变都会因时滞不同而对各模型产生不同程度的影响。因此政府要对绿色技术的先进性、可操作性、实际施工进度以及市场环境做好合理评估,根据企业所处不同的时滞期以及不同的渠道模式进行“动态奖惩”,即力度和机制的动态调整,加强和企业的沟通交流,携手共创经济、绿色低碳的商业模式。

企业在对低碳技术、低碳宣传进行投资以及选择不同的渠道模式时要着重考察滞后期、市场环境以

及政府制度；若减排效果以及宣传效果滞后时间出现过长的情况时，制造商和供应商应及时采取措施把控减排效果延迟时间，如改进减排工序、革新减排技术等。零售商可以通过宣传促销的同时提升客户体验、改善售后服务等来提升自身利润。因此，企业应强化主人翁意识，实时监控、及时调整减排策略，有效提升营销活动效率，洞察营销效果，及时优化。

本文未考虑随机性因素，同时企业之间隐瞒信息导致在信息不对称下做决策是常有的事情，将是以后需要继续挖掘的课题。

基金项目

贵州省哲学社会科学规划一般课题“新时代贵州经济高质量发展与绿色发展耦合协调机制研究”（21GZYB13）。

参考文献

- [1] 国际能源署. 全球能源评论: 2021 年的二氧化碳排放量[EB/OL]. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/global-energy-review-co2-emissions-in-2021>, 2022-08-03.
- [2] Carrillo, J.E., Vakharia, A.J. and Wang, R. (2014) Environmental Implications for Online Retailing. *European Journal of Operational Research*, **239**, 744-755. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.05.038>
- [3] 张世平, 卜少少. 环境监管、环保投资与生产力——基于中国企业问卷的实证研究[J]. 南开经济研究, 2011(2): 129-146.
- [4] 徐春秋, 王芹鹏. 考虑政府参与方式的供应链低碳商誉微分博弈模型[J]. 运筹与管理, 2020, 29(8): 35-44.
- [5] 向小东, 李翀. 三级低碳供应链联合减排及宣传促销微分博弈研究[J]. 控制与决策, 2019, 34(8): 1776-1788.
- [6] 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.
- [7] 聂秀伍, 姚金鑫, 丁明雷. 基于微分博弈的三级供应链碳减排协调策略研究[J]. 工业工程, 2022, 25(4): 165-172.
- [8] Matsui, K. (2021) Should a Retailer Bargain over a Wholesale Price with a Manufacturer Using a Dual-Channel Supply Chain? *European Journal of Operational Research*, **300**, 1050-1066. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.09.012>
- [9] Meng, Q.F., Li, M.W., Liu, W.Y., et al. (2021) Pricing Policies of Dual-Channel Green Supply Chain: Considering Government Subsidies and Consumers' Dual Preferences. *Sustainable Production and Consumption*, **26**, 1021-1030. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.01.012>
- [10] 陈静, 赵灿红, 高歌, 赵志港. 碳限额及交易背景下双渠道供应链纵向合作动态减排研究[J/OL]. 中国管理科学: 1-15. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.0571>, 2022-09-16.
- [11] 杨磊, 张琴, 张智勇. 碳交易机制下供应链渠道选择与减排策略[J]. 管理科学学报, 2017, 20(11): 75-87.
- [12] 梁喜, 蒋琼, 郭瑾. 不同双渠道结构下制造商的定价决策与渠道选择[J]. 中国管理科学, 2018, 26(7): 97-107.
- [13] Jia, D.F. and Li, S.J. (2020) Optimal Decisions and Distribution Channel Choice of Closed-Loop Supply Chain When e-Retailer Offers Online Marketplace. *Journal of Cleaner Production*, **265**, Article ID: 121767. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121767>
- [14] Sun, Y.H., Wang, Z.H. and Han, X.H. (2020) Supply Chain Channel Strategies for Online Retailers: Whether to Introduce Web Showrooms? *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **144**, Article ID: 102122. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102122>
- [15] 曹晓宁, 刘晓冰. 权力结构影响下考虑预售的双渠道供应链决策研究[J]. 运筹与管理, 2021, 30(9): 93-99.
- [16] 胡劲松, 纪雅杰, 马德青. 基于消费者效用的电商供应链企业的产品质量和服务策略研究[J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40(10): 2602-2616.
- [17] 付秋芳, 忻莉燕, 马士华. 惩罚机制下供应链企业碳减排投入的演化博弈[J]. 管理科学学报, 2016, 19(4): 56-70.
- [18] 焦建玲, 陈洁, 李兰兰, 等. 碳减排奖惩机制下地方政府和企业行为演化博弈分析[J]. 中国管理科学, 2017, 25(10): 140-150.
- [19] 王道平, 王婷婷. 政府奖惩下供应链合作减排与低碳宣传的动态优化[J]. 运筹与管理, 2020, 29(4): 113-120.
- [20] 王道平, 张可, 周玉. 政府奖惩下考虑回收率动态随机的闭环供应链微分博弈[J/OL]. 中国管理科学: 1-15. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2021.1138>, 2022-07-14.

-
- [21] Chen, J., Zhang, T. and Zhou, Y. (2020) Dynamics of a Risk-Averse Newsvendor Model with Continuous-Time Delay in Supply Chain Financing. *Mathematics and Computers in Simulation*, **169**, 133-148. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2019.09.009>
- [22] 陈东彦, 黄春丽. 滞后效应影响下低碳供应链减排投入与零售定价[J]. 控制与决策, 2018, 33(9): 1686-1692.
- [23] Sun, L., Cao, X., Alharthi, M., *et al.* (2020) Carbon Emission Transfer Strategies in Supply Chain with Lag Time of Emission Reduction Technologies and Low-Carbon Preference of Consumers. *Journal of Cleaner Production*, **264**, Article ID: 121664. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121664>
- [24] 卓四清, 韩雪. 碳补贴和时滞效应下低碳供应链微分博弈研究[J]. 运筹与管理, 2022, 31(8): 7-14.
- [25] 刘虹, 林敏. 减排和宣传的时延与低碳参考双重效应影响下供应链决策研究[J]. 工业工程, 2021, 24(4): 56-66+99.
- [26] Giovanni, P.D. (2011) Quality Improvement vs. Advertising Support: Which Strategy Works Better for a Manufacturer? *European Journal of Operational Research*, **208**, 119-130. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.08.003>
- [27] El Ouardighi, F. and Kogan, K. (2013) Dynamic Conformance and Design Quality in a Supply Chain: An Assessment of Contracts' Coordinating Power. *Annals of Operations Research*, **211**, 137-166. <https://doi.org/10.1007/s10479-013-1414-4>
- [28] Basin, M. and Gonzalez, J.R. (2006) Optimal Control for Linear Systems with Multiple Time Delays in Control Input. *IEEE Transaction on Automatic Control*, **51**, 91-97. <https://doi.org/10.1109/TAC.2005.861718>