

三级低碳供应链联合减排及宣传促销微分博弈研究

向小东[†], 李 翀

(福州大学 经济与管理学院, 福州 350116)

摘要: 低碳环境下, 研究供应商、制造商与零售商组成的三级供应链联合减排及宣传促销微分博弈问题. 首先, 通过两次成本加成, 考虑产品需求受产品减排量、零售商宣传促销努力及产品零售价格的综合影响, 得到供应链分散决策与集中决策情形下的动态均衡策略及减排量的最优轨迹. 然后, 通过数值算例及灵敏度分析比较两种情形下的结果, 研究发现: 无论分散决策还是集中决策, 减排量, 产品批发价, 供应商、制造商、零售商的努力水平都随时间逐渐增加至某一稳定值, 但集中决策的稳定值大于分散决策相应的稳定值; 随着供应商、制造商各自的减排努力对产品减排率的影响系数及零售商的宣传促销努力对产品需求的影响系数的增大, 减排量、产品批发价、供应链成员努力水平、供应链成员利润、供应链总利润都会增加; 集中决策的供应链总利润总是大于分散决策的供应链总利润. 最后, 对集中决策总利润用多人联盟博弈的多目标决策合作博弈方法进行分配, 实现了供应链系统整体绩效的提升.

关键词: 三级低碳供应链; 减排; 促销; 微分博弈; 集中决策; 多目标决策

中图分类号: F272.3

文献标志码: A

Differential game models for joint carbon emission reduction and promotion in three-echelon low carbon supply chain

Xiang Xiao-dong[†], Li chong

(School of Economics and Management, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: This paper studies differential game models for the joint carbon emission reduction and promotion in a three-echelon supply chain consisting of a supplier, a manufacturer and a retailer under the low carbon environment. Based on twice cost accumulation, considering product demand affected by the amount of carbon emission reduction, retailer promotion efforts and product retail prices, the dynamic equilibrium strategy and optimal emission reduction track are obtained under conditions of decentralized manners and centralized manners. Numerical examples and sensitivity analysis show that, the amount of carbon emission reduction, the wholesale price of the product and the effort level of supply chain members will gradually increase to a stable value with time, whether it is under the decentralized manners or the centralized manners, but the stable value under centralized manners is larger than that under the decentralized manners. If the impact coefficients of the supplier's and manufacturer's emission reduction efforts to the rate of emission reduction and the impact coefficient of the retailer's promotion efforts to product demand are increased, the amount of carbon emission reduction, the wholesale price of the product, efforts level of supply chain members, profits of supply chain members and the whole system will increase accordingly. The total profits under centralized decision are larger than that under decentralized manners. Finally, the multi-objective cooperative decision method is used to distribute the total profits in this multi-player alliance game model, which improves the overall performance of the whole supply chain system.

Keywords: three-echelon low carbon supply chain; emission reduction; promotion; differential game; centralized decision; multi-objective decision

0 引言

近年来, 各国政府、企业和学者等社会各界已经形成共识, 温室效应是导致全球气候变化以及极端气候频繁出现的主要原因, 而人类在经济活动中产生的

碳排放是导致温室效应的主要根源之一. 在此背景下, 与政府规制、碳排放或减排等相关的低碳供应链管理成为了近期管理科学研究领域的热点问题之一, 许多学者对其进行了研究. 这些研究可概括为低碳

收稿日期: 2017-12-25; 修回日期: 2018-05-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71401039); 福建省软科学项目(2017R0055).

责任编辑: 刘士新.

[†]通讯作者. E-mail: xiangxiaodong2@163.com.

供应链优化、低碳供应链减排短期博弈、低碳供应链减排长期微分博弈等3大方面的内容。

低碳供应链优化文献通过建立单目标或多目标优化模型从单主体决策而非博弈角度进行理论及数值分析。Benjaafar等^[1]在碳排放限制政策下,通过建立成本最小优化模型,研究了供应链内成员间联合减排对运营成本和碳排放的影响;Shaw等^[2]构建了低碳供应链网络机会约束优化模型;Rahmania等^[3]建立了低碳供应链网络优化模型;戴卓等^[4]以碳排放最少和成本最低作为优化目标,构建了一个双目标的低碳闭环供应链网络优化模型,并给出了新的非劣求解算法;吴义生等^[5]提出了基于供应链各成员企业的单体超网络优化模型,以及基于供应链所有成员企业的整体超网络优化模型;陈玲丽等^[6]在集中决策模式和碳税政策环境下,构建了总成本最低的模糊规划优化模型。

低碳供应链减排短期博弈主要是针对二级供应链,且相关文献较多。在允许碳排放的交易背景下,对于制造商与零售商组成的二级供应链,Lou等^[7]建立了以制造商为先行者,零售商为跟随者的减排投资Stackelberg博弈模型,以及制造商与零售商合作的减排投资集中决策模型。采用Stackelberg博弈模型或思想进行研究的代表性文献还有文献[8-13]。另外,一些学者应用博弈理论设计合约,从协调供应链角度进行了研究,如Yang等^[14]建立了由供应商与零售商组成的二级供应链,比较了4种不同低碳政策及相应合约对供应链协调的影响。在制造商与零售商组成的低碳二级供应链中,在关注公平的情况下,Zhou等^[15]设计了合作广告与减排成本分担合约;Xu等^[16]分析了碳排放总量限制和排放交易规则下,由生产商与零售商构成的二级低碳供应链系统的决策与协调问题。在研发与回收两阶段闭环供应链中,Liu等^[17]考虑到信息不对称,从生产商角度设计了一个动态合约,以激励其合作伙伴选择最优努力减少系统的碳排放。在碳排放总量限制和排放交易政策约束下,赵道致等^[18]应用Stackelberg博弈思想分析了由两个制造商和一个占主导地位的零售商组成的二级供应链中的联合减排问题。应用Stackelberg博弈研究二级供应链减排的代表性中文文献还有文献[19-23]。在协调供应链的角度,针对由低碳产品制造商与零售商组成的二级供应链,考虑需求同时受减排水平和销售价格的影响,徐春明等^[24]分别研究了寄售契约、收益共享契约以及收益共享与减排成本共担3种契约下供应链成员的博弈协调问题。

低碳供应链减排短期博弈也有针对三级供应链进行研究的文献。Sun等^[25]在碳总量约束下,研究了最下游公司占主导的上中下游3家公司组成的供应链Stackelberg型博弈,讨论了供应链最优产量和减排决策问题。在政府补贴下,樊世清等^[26]构建了供应链上企业单独减排、供应商对制造商减排成本进行分担、供应商和零售商均对制造商减排成本进行分担3种减排博弈模型,求解得到不同减排模式下,包括成本分担率和单位减排量在内的三级供应链最优决策。

除了对低碳供应链减排及协调进行短期静态研究,考虑到企业实际的减排行为是个长期的动态过程,不少学者也在长期动态情形下研究了企业减排问题。对于经济与管理中的污染问题,可使用状态空间动态微分博弈进行跨期决策研究,Jørgensen等^[27]对此相关的内容进行了综述;Zhao等^[28]建立了制造商作为领导者,供应商作为跟随者的Stackelberg微分博弈合作减排模型,求得了最优反馈均衡策略;Zhao等^[29]建立了制造商与零售商组成的供应链微分纳什博弈模型以及占主导的制造商与零售商的Stackelberg微分博弈模型,分析了制造商与零售商的低碳研发投资策略;Zu等^[30]在3个渐近环境规制(制造商不承担供应商的减排成本也无政府奖惩,政府对制造商进行减排奖惩,政府对制造商进行奖惩的同时制造商分担部分供应商的减排成本)情况下,利用Stackelberg微分博弈研究了占主导的制造商与供应商组成的,试图通过努力减排增加可持续利润的二级供应链低碳策略。

在市场需求受产品减排量和零售商低碳宣传努力影响的情况下,赵道致等^[31]构建了由单个制造商与两个零售商组成的二级供应链无成本分担的分散式决策、成本分担契约下的分散式决策、协同控制的集中式决策3种微分博弈模型。低碳环境下,对于供应商与制造商构成的二级供应链,在假设需求是产品减排量的线性函数情况下,赵道致等^[32]分别分析了供应链减排中制造商占主导,供应商跟随的Stackelberg微分博弈情形及制造商与供应商长期合作减排的情形。在考虑价格和商誉对市场需求的三重影响情况下,游达明等^[33]建立微分博弈模型比较了分散式和集中式两种决策情形下,由制造商与零售商组成的二级供应链的长期动态均衡策略。假设消费者需求受产品减排量和零售商低碳宣传的影响,徐春秋等^[34]构建并分析了零售商与制造商组成的二级供应链无成本分担的分散式决策、成本分担契约下的分散式决策、协同控制的集中式决策3种微分博弈

模型. 针对由制造商与零售商组成的二级低碳供应链研发、促销与定价问题, 综合考虑价格和非价格因素对市场的影响, 游达明等^[35] 构建了微分博弈模型, 考察并比较了不同情形下供应链的反馈均衡策略. 从供应链可持续发展角度出发, 朱莹等^[36] 建立了二级低碳供应链协同技术创新的随机微分博弈模型, 求得了 Stackelberg 博弈与合作博弈情形下, 供应商和制造商的最优技术创新投入以及 Stackelberg 博弈下技术创新费用承担比例; 叶同等^[37] 以占主导的制造商与供应商所构成的二级供应链为研究对象, 运用微分博弈理论与方法研究了考虑消费者低碳偏好和参考低碳水平效应的供应链联合减排动态优化与协调问题, 发现双边补助契约可以实现制造商和供应商的 pareto 改善. 针对双渠道二级供应链低碳减排、低碳宣传与品牌策略问题, 周熙登^[38] 构建了微分博弈模型, 求得了集中决策和 Stackelberg 博弈下的低碳减排投入、低碳宣传投入和低碳宣传分担率. 在碳交易和消费者具有低碳偏好的环境下, 刘名武等^[39] 建立了二级供应链低碳技术减排投入与合作的微分博弈模型, 得到了实现双赢的低碳技术特征条件.

通过对已有文献的回顾与梳理, 可以看出低碳供应链管理已引起国内外学者的普遍关注, 并涌现了许多相关成果, 这为进一步的研究提供了重要基础与借鉴. 但是, 这些文献的研究对象主要是二级供应链, 大多数是针对制造商与零售商组成的二级供应链系统的减排及销售合作问题, 且产品市场需求的影响因素一般只考虑一个或两个, 考虑不全面. 然而, 低碳环境下, 随着消费者低碳意识的逐渐增强, 这不仅要求制造商进行减排技术投资, 也要求供应商向制造商提供低碳化的原材料, 同时需要零售商积极宣传售卖低碳产品甚至采取一些必要的产品促销策略以实现低碳产品潜在的价值(或利润). 另外, 考虑到供应链实际的减排及销售行为是个长期的动态过程, 因此, 研究由供应商、制造商、零售商组成的“全供应链”系统的联合减排及宣传促销跨期动态行为相比二级供应链的研究更具实践指导意义. 不同于已有文献, 本文在低碳环境下, 考虑产品需求受产品减排量、零售商宣传促销努力及产品零售价格的综合影响, 从动态跨期的角度研究由单个供应商、单个制造商和单个零售商组成的三级供应链中纵向减排合作及宣传促销问题. 文中应用微分博弈模型, 首先分析非合作(分散决策)情形下, 占主导的制造商和跟随的供应商各自的减排决策过程及跟随的零售商的宣传促销决策过程; 随后分析了合作(集中决策)情形下三方的减排决

策过程及宣传促销过程, 并用数值算例及相应的灵敏度分析对两种情形进行比较分析(因本文三级供应链在一般参数模型下很难求出参数形式的解析解), 用多人联盟博弈的多目标决策合作博弈方法对合作总利润进行分配, 实现了供应链系统的 pareto 改进及整体绩效的提升.

1 问题描述与基本假设

1.1 问题描述

2013年3月, 国家发展改革委员会发布了《低碳产品认证管理暂行办法》, 明确了我国低碳产品认证体系的主要内容. 低碳产品认证体系对许多产业的供应链上下游产生了很大的影响, 企业在生产产品过程中会对其上下游的企业提出相应的减排要求. 现实中, 沃尔玛、宜家、IBM 等企业均已要求其供应商提供碳标签. 基于此现实背景, 本文考虑由单个供应商 S 、单个制造商 M 和单个零售商 R 组成的三级低碳供应链. 假设制造商为低碳供应链上的核心企业, 占主导地位, 负责产品生产减排及最终产品的低碳认证申请, 供应商负责原材料的减排, 零售商负责低碳产品的宣传促销. 制造商为激励供应商及零售商, 积极配合减排及低碳产品的宣传促销, 考虑给供应商及零售商提供一定比例的减排和宣传促销成本补贴.

1.2 符号说明

$z_S(t)$: t 时刻供应商 S 的减排努力程度, 是供应商 S 的决策变量.

$z_M(t)$: t 时刻制造商 M 的减排努力程度, 是制造商 M 的决策变量.

$z_R(t)$: t 时刻零售商 R 的宣传促销努力程度, 是零售商 R 的决策变量.

$w(t)$: t 时刻低碳产品的批发价, 是制造商 M 的决策变量.

$x(t)$: t 时刻产品的减排量, 是状态变量.

$\lambda_S(t)$: t 时刻制造商 M 对供应商 S 减排成本的补贴比例, 是制造商 M 的决策变量, $0 \leq \lambda_S(t) \leq 1$.

$\lambda_R(t)$: t 时刻制造商 M 对零售商 R 的宣传促销成本的补贴比例, 是制造商 M 的决策变量, $0 \leq \lambda_R(t) \leq 1$.

J_S, J_M, J_R, J : 分别表示非合作(即分散决策)时供应商、制造商和零售商长期(无限时区内)的总利润以及供应链系统长期(无限时区内)的总利润.

J_S^C, J_M^C, J_R^C, J^C : 分别表示合作(即集中决策)时供应商、制造商和零售商长期(无限时区内)的总利润以及供应链系统长期(无限时区内)的总利润.

1.3 基本假设

1) 供应商、制造商的单位产品生产成本及零售商的单位产品管理成本可视作常数^[40], 方便起见, 简化为0.

2) 低碳产品“零售价”为“批发价”的函数, 借鉴常用成本加成定价法和文献[33, 41]的做法, 设 $p_1(t) = u_1w(t)$, $p_2(t) = u_2w(t)$, $0 < u_1 < 1, u_2 > 1$. $p_1(t)$, $w(t)$ 及 $p_2(t)$ 分别为 t 时刻低碳原材料批发价、低碳产品的批发价及低碳产品的零售价.

3) 产品的减排量是动态变化的, 产品减排量的变化受当期制造商和供应商的减排努力程度及当期产品的减排量影响, 可用下式所示的状态方程(微分方程)表示产品减排量的变化过程:

$$dx/dt = \alpha z_S(t) + \beta z_M(t) - \gamma x(t). \quad (1)$$

其中: $x(t)$ 表示 t 时刻产品的减排量, 且 $x(0) = x_0 \geq 0$; $\alpha > 0, \beta > 0$ 分别表示供应商和制造商各自的减排努力对产品减排率的影响系数, $\gamma > 0$ 表示产品减排量函数的衰减率. 这里假定随着时间的推移, 已投资的减排设备会老化, 减排率存在一个衰减率. 该假设借鉴了文献[27, 32, 35]中的做法.

4) 消费者倾向于购买低碳度高、价格低廉的产品. 参考文献[42], 将市场需求影响因素分为价格因素和非价格因素, 此处假设

$$D(t) = D_0 + \theta_1 x(t) + \theta_2 z_R(t) - \theta_3 u_2 w(t). \quad (2)$$

其中: $D(t)$ 为 t 时刻低碳产品的市场需求; $D_0 \geq 0$ 为常数, 表示产品的初始市场需求; $\theta_1 > 0, \theta_2 > 0, \theta_3 > 0$ 分别表示产品减排量对产品需求的影响系数, 零售商 R 的宣传促销努力程度对产品需求的影响系数, 以及消费者价格敏感系数.

5) 供应商与制造商的减排成本是其减排努力程度的凸函数, 零售商宣传促销成本是其努力程度的凸函数, 即

$$\begin{cases} C_S(t) = \eta_S z_S^2(t)/2, \\ C_M(t) = \eta_M z_M^2(t)/2, \\ C_R(t) = \eta_R z_R^2(t)/2. \end{cases} \quad (3)$$

其中: $C_S(t)$ 、 $C_M(t)$ 分别为 t 时刻供应商与制造商的减排成本, $C_R(t)$ 为零售商宣传促销成本; $\eta_S > 0, \eta_M > 0$ 分别为供应商与制造商的减排成本系数, $\eta_R > 0$ 为零售商宣传促销成本系数.

6) 供应商、制造商和零售商都是基于完全信息进行理性决策, 不计供应链存货成本和缺货成本. 在无限时间范围内, 供应商、制造商和零售商在任意时刻均具有相同的折扣因子 $\rho > 0$.

7) 模型中所有参数 $u_1, u_2, \alpha, \beta, \gamma, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \eta_S,$

η_M, η_R 等都是与时间无关的常数.

2 模型构建及求解

2.1 分散决策情形

该情形下, 制造商 M 作为供应链核心企业, 在供应链中充当领导者角色, 供应商 S 和零售商 R 作为跟随者. 长期以来, 三方积极进行纵向联合减排及宣传促销, 制造商 M 对供应商 S 的减排投资及零售商 R 的宣传促销予以支持, 并为其分担一定比例的成本. 因此, 供应商 S 、制造商 M 、零售商 R 的决策问题分别为

$$\max_{z_S} J_S = \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[u_1 w(D_0 + \theta_1 x + \theta_2 z_R - \theta_3 u_2 w) - \frac{1}{2}(1 - \lambda_S)\eta_S z_S^2 \right] dt, \quad (4)$$

$$\max_{z_M, w, \lambda_S, \lambda_R} J_M = \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[(1 - u_1)w(D_0 + \theta_1 x + \theta_2 z_R - \theta_3 u_2 w) - \frac{1}{2}\eta_M z_M^2 - \frac{1}{2}\lambda_S \eta_S z_S^2 - \frac{1}{2}\lambda_R \eta_R z_R^2 \right] dt. \quad (5)$$

$$\max_{z_R} J_R = \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[(u_2 - 1)w(D_0 + \theta_1 x + \theta_2 z_R - \theta_3 u_2 w) - \frac{1}{2}(1 - \lambda_R)\eta_R z_R^2 \right] dt. \quad (6)$$

采用逆向归纳法求解. 作为跟随方的供应商 S 和零售商 R 将制造商 M 的减排努力程度 z_M 、低碳产品的批发价 w 、成本分担比例 λ_S 和 λ_R 视为给定参数, 以此决策自身的最优减排努力程度 z_S 及宣传促销努力程度 z_R .

记 t 时刻以后供应商 S 长期利润的最优价值函数为 $J_S^*(x) = e^{-\rho t} V_S(x)$. 根据最优控制理论, $V_S(x)$ 对于任意 $x \geq 0$ 必须满足哈密顿-雅可比-贝尔曼(HJB)方程

$$\rho V_S(x) = \max_{z_S} \left[u_1 w(D_0 + \theta_1 x + \theta_2 z_R - \theta_3 u_2 w) - \frac{1}{2}(1 - \lambda_S)\eta_S z_S^2 + V_S'(x)(\alpha z_S + \beta z_M - \gamma x) \right]. \quad (7)$$

将式(7)等号右边对 z_S 求一阶偏导, 并令其等于零, 解得

$$z_S = \frac{\alpha V_S'(x)}{\eta_S(1 - \lambda_S)}. \quad (8)$$

同理, 记 t 时刻以后零售商 R 长期利润的最优价值函数为 $J_R^*(x) = e^{-\rho t} V_R(x)$, 则 $V_R(x)$ 对于任意 $x \geq 0$ 必须满足 HJB 方程

$$\rho V_R(x) = \max_{z_R} \left[(u_2 - 1)w(D_0 + \theta_1 x + \theta_2 z_R - \theta_3 u_2 w) - \frac{1}{2}(1 - \lambda_R)\eta_R z_R^2 + V_R'(x)(\alpha z_S + \beta z_M - \gamma x) \right]. \quad (9)$$

将式(9)等号右边对 z_R 求一阶偏导,并令其等于零,解得

$$z_R = \frac{(u_2 - 1)\theta_2 w}{\eta_R(1 - \lambda_R)}. \quad (10)$$

记 t 时刻以后制造商 M 长期利润的最优价值函数为 $J_M^*(x) = e^{-\rho t} V_M(x)$,则 $V_M(x)$ 对于任意 $x \geq 0$ 必须满足HJB方程

$$\begin{aligned} \rho V_M(x) = & \max_{z_M, w, \lambda_S, \lambda_R} \left[(1 - u_1)w(D_0 + \theta_1 x + \theta_2 z_R - \right. \\ & \left. \theta_3 u_2 w) - \frac{1}{2} \eta_M z_M^2 - \frac{1}{2} \lambda_S \eta_S z_S^2 - \frac{1}{2} \lambda_R \eta_R z_R^2 + \right. \\ & \left. V_M'(x)(\alpha z_S + \beta z_M - \gamma x) \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

将式(8)和(10)代入(11),使其分别对 z_M 、 w 、 λ_S 、 λ_R 求一阶偏导数,并令其为零,可解得

$$\begin{aligned} z_M &= \frac{\beta V_M'(x)}{\eta_M}, \\ w &= \frac{4\eta_R(1 - u_1)(D_0 + \theta_1 x)}{8\eta_R u_2 \theta_3(1 - u_1) - \theta_2^2(1 + u_2 - 2u_1)^2}, \\ \lambda_S &= \frac{2V_M'(x) - V_S'(x)}{2V_M'(x) + V_S'(x)}, \\ \lambda_R &= \frac{3 - u_2 - 2u_1}{1 + u_2 - 2u_1}. \end{aligned} \quad (12)$$

将式(8)、(10)和(12)代入(7)、(9)和(11),整理得

$$\begin{aligned} \rho V_S(x) = & 4\eta_R(1 - u_1)(D_0 + \theta_1 x)^2 \times \\ & \frac{4\eta_R u_1 u_2 \theta_3(1 - u_1) - u_1 \theta_2^2(u_2 - 1)(1 + u_2 - 2u_1)}{[8\eta_R u_2 \theta_3(1 - u_1) - \theta_2^2(1 + u_2 - 2u_1)^2]^2} + \\ & \frac{\alpha^2 V_S'(x)[2V_M'(x) + V_S'(x)]}{4\eta_S} + \frac{\beta^2 V_S'(x)V_M'(x)}{\eta_M} - \\ & \gamma x V_S'(x), \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \rho V_R(x) = & 4\eta_R(u_2 - 1)(1 - u_1)(D_0 + \theta_1 x)^2 \times \\ & \frac{4\eta_R u_2 \theta_3(1 - u_1) - \theta_2^2(u_2 - u_1)(1 + u_2 - 2u_1)}{[8\eta_R u_2 \theta_3(1 - u_1) - \theta_2^2(1 + u_2 - 2u_1)^2]^2} + \\ & \frac{\alpha^2 V_R'(x)[2V_M'(x) + V_S'(x)]}{2\eta_S} + \frac{\beta^2 V_M'(x)V_R'(x)}{\eta_M} - \\ & \gamma x V_R'(x), \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \rho V_M(x) = & \frac{2\eta_R(1 - u_1)^2(D_0 + \theta_1 x)^2}{8\eta_R u_2 \theta_3(1 - u_1) - \theta_2^2(1 + u_2 - 2u_1)^2} + \\ & \frac{\beta^2 [V_M'(x)]^2}{2\eta_M} + \frac{\alpha^2 [2V_M'(x) + V_S'(x)]^2}{8\eta_S} - \gamma x V_M'(x). \end{aligned} \quad (15)$$

根据式(13)~(15),假设 $V_S(x)$ 、 $V_M(x)$ 和 $V_R(x)$ 分别为

$$\begin{cases} V_S(x) = a_1 x^2 + b_1 x + c_1, \\ V_M(x) = a_2 x^2 + b_2 x + c_2, \\ V_R(x) = a_3 x^2 + b_3 x + c_3, \end{cases} \quad (16)$$

其中 a_1 、 b_1 、 c_1 、 a_2 、 b_2 、 c_2 、 a_3 、 b_3 、 c_3 为待定参数.将式(16)及其对 x 的导数代入式(13)~(15)中,对比式(13)~(15)等号左右两边的同类项系数,可得关于 a_1 、 b_1 、 c_1 、 a_2 、 b_2 、 c_2 、 a_3 、 b_3 、 c_3 的方程组如下所示:

$$\begin{aligned} \rho a_1 = & 4\eta_R \theta_1^2 (1 - u_1) \times \\ & \frac{4\eta_R u_1 u_2 \theta_3(1 - u_1) - u_1 \theta_2^2(u_2 - 1)(1 + u_2 - 2u_1)}{[8\eta_R u_2 \theta_3(1 - u_1) - \theta_2^2(1 + u_2 - 2u_1)^2]^2} + \\ & \frac{\alpha^2 a_1(a_1 + 2a_2)}{\eta_S} + \frac{4\beta^2 a_1 a_2}{\eta_M} - 2\gamma a_1, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \rho b_1 = & 8\eta_R D_0 \theta_1 (1 - u_1) \times \\ & \frac{4\eta_R u_1 u_2 \theta_3(1 - u_1) - u_1 \theta_2^2(u_2 - 1)(1 + u_2 - 2u_1)}{[8\eta_R u_2 \theta_3(1 - u_1) - \theta_2^2(1 + u_2 - 2u_1)^2]^2} + \\ & \frac{\alpha^2 [a_1(b_1 + 2b_2) + b_1(a_1 + 2a_2)]}{2\eta_S} + \\ & \frac{\beta^2(2a_2 b_1 + 2a_1 b_2)}{\eta_M} - \gamma b_1, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \rho c_1 = & 4\eta_R D_0^2 (1 - u_1) \times \\ & \frac{4\eta_R u_1 u_2 \theta_3(1 - u_1) - u_1 \theta_2^2(u_2 - 1)(1 + u_2 - 2u_1)}{[8\eta_R u_2 \theta_3(1 - u_1) - \theta_2^2(1 + u_2 - 2u_1)^2]^2} + \\ & \frac{\alpha^2 b_1(b_1 + 2b_2)}{4\eta_S} + \frac{\beta^2 b_1 b_2}{\eta_M}, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \rho a_2 = & \frac{2\eta_R \theta_1^2 (1 - u_1)^2}{8\eta_R u_2 \theta_3(1 - u_1) - \theta_2^2(1 + u_2 - 2u_1)^2} + \\ & \frac{\alpha^2 (a_1 + 2a_2)^2}{2\eta_S} + \frac{2\beta^2 a_2^2}{\eta_M} - 2\gamma a_2, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \rho b_2 = & \frac{4\eta_R D_0 \theta_1 (1 - u_1)^2}{8\eta_R u_2 \theta_3(1 - u_1) - \theta_2^2(1 + u_2 - 2u_1)^2} + \\ & \frac{\alpha^2 (a_1 + 2a_2)(b_1 + 2b_2)}{2\eta_S} + \frac{2\beta^2 a_2 b_2}{\eta_M} - \gamma b_2, \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \rho c_2 = & \frac{2\eta_R D_0^2 (1 - u_1)^2}{8\eta_R u_2 \theta_3(1 - u_1) - \theta_2^2(1 + u_2 - 2u_1)^2} + \\ & \frac{\alpha^2 (b_1 + 2b_2)^2}{8\eta_S} + \frac{\beta^2 b_2^2}{2\eta_M}, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \rho a_3 = & 4\eta_R \theta_1^2 (1 - u_1)(u_2 - 1) \times \\ & \frac{4\eta_R u_2 \theta_3(1 - u_1) - \theta_2^2(u_2 - u_1)(1 + u_2 - 2u_1)}{[8\eta_R u_2 \theta_3(1 - u_1) - \theta_2^2(1 + u_2 - 2u_1)^2]^2} + \\ & \frac{2\alpha^2 a_3(a_1 + 2a_2)}{\eta_S} + \frac{4\beta^2 a_2 a_3}{\eta_M} - 2\gamma a_3, \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \rho b_3 = & 8\eta_R D_0 \theta_1 (1 - u_1)(u_2 - 1) \times \\ & \frac{4\eta_R u_2 \theta_3 (1 - u_1) - \theta_2^2 (u_2 - u_1)(1 + u_2 - 2u_1)}{[8\eta_R u_2 \theta_3 (1 - u_1) - \theta_2^2 (1 + u_2 - 2u_1)]^2} + \\ & \frac{\alpha^2 [a_3 (b_1 + 2b_2) + b_3 (a_1 + 2a_2)]}{\eta_S} + \\ & \frac{\beta^2 (2a_2 b_3 + 2a_3 b_2)}{\eta_M} - \gamma b_3, \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \rho c_3 = & 4\eta_R D_0^2 (1 - u_1)(u_2 - 1) \times \\ & \frac{4\eta_R u_2 \theta_3 (1 - u_1) - \theta_2^2 (u_2 - u_1)(1 + u_2 - 2u_1)}{[8\eta_R u_2 \theta_3 (1 - u_1) - \theta_2^2 (1 + u_2 - 2u_1)]^2} + \\ & \frac{\alpha^2 b_3 (b_1 + 2b_2)}{2\eta_S} + \frac{\beta^2 b_2 b_3}{\eta_M}. \end{aligned} \quad (25)$$

求解式(17)~(25),可得参数 a_1 、 b_1 、 c_1 、 a_2 、 b_2 、 c_2 、 a_3 、 b_3 、 c_3 的值. 求解思路如下:

1) 联立式(17)和(20),解出 a_1 、 a_2 的值;

2) 解出 a_1 、 a_2 的值后,联立式(18)和(21),解出 b_1 、 b_2 的值;

3) 根据 b_1 、 b_2 的值,由式(19)解出 c_1 的值,由式(22)解出 c_2 的值;

4) 根据 a_1 、 a_2 的值,由式(23)解出 a_3 的值;

5) 根据 a_1 、 a_2 、 a_3 的值及 b_1 、 b_2 的值,由式(24)解出 b_3 的值;

6) 根据 b_1 、 b_2 、 b_3 的值,由式(25)解出 c_3 的值.

设由式(17)~(25)解出的参数值用 a_1^* 、 b_1^* 、 c_1^* 、 a_2^* 、 b_2^* 、 c_2^* 、 a_3^* 、 b_3^* 、 c_3^* 表示.

得到 a_1^* 、 b_1^* 、 c_1^* 、 a_2^* 、 b_2^* 、 c_2^* 、 a_3^* 、 b_3^* 、 c_3^* 的值后,由式(8)、(10)、(12)和(16)可得到分散式决策下的三级低碳供应链长期动态均衡策略如下所示(要求 $8\eta_R u_2 \theta_3 (1 - u_1) - \theta_2^2 (1 + u_2 - 2u_1)^2 > 0$):

$$z_S^* = \frac{\alpha [2(a_1^* + 2a_2^*)x + (b_1^* + 2b_2^*)]}{2\eta_S}; \quad (26)$$

$$z_R^* = \frac{2\theta_2 (1 - u_1)(1 + u_2 - 2u_1)(D_0 + \theta_1 x)}{8\eta_R u_2 \theta_3 (1 - u_1) - \theta_2^2 (1 + u_2 - 2u_1)^2}; \quad (27)$$

$$z_M^* = \frac{\beta (2a_2^* x + b_2^*)}{\eta_M}; \quad (28)$$

$$w^* = \frac{4\eta_R (1 - u_1)(D_0 + \theta_1 x)}{8\eta_R u_2 \theta_3 (1 - u_1) - \theta_2^2 (1 + u_2 - 2u_1)^2}; \quad (29)$$

$$\lambda_S^* = \frac{2(2a_2^* - a_1^*)x + (2b_2^* - b_1^*)}{2(2a_2^* + a_1^*)x + (2b_2^* + b_1^*)}; \quad (30)$$

$$\lambda_R^* = \begin{cases} \frac{3 - u_2 - 2u_1}{1 + u_2 - 2u_1}, & u_2 + 2u_1 \leq 3; \\ 0, & u_2 + 2u_1 > 3. \end{cases} \quad (31)$$

由式(26)~(31)可知:

1) 供应商和制造商的减排努力程度与供应商和

制造商的减排成本系数 η_S 、 η_M 负相关,与供应商和制造商的减排努力对产品减排率的影响系数 α 、 β 正相关;零售商的宣传促销努力程度与零售商宣传促销成本系数 η_R 、消费者价格敏感系数 θ_3 负相关,与其宣传促销努力对产品需求的影响系数 θ_2 、初始市场需求 D_0 、减排量对产品需求的影响系数 θ_1 正相关;供应商、制造商和零售商3者的努力程度都随减排量 x 的变化动态变化.

2) 低碳产品的批发价与初始市场需求 D_0 、减排量对产品需求的影响系数 θ_1 、零售商的宣传促销努力程度对产品需求的影响系数 θ_2 正相关,与消费者价格敏感系数 θ_3 、零售商宣传促销成本系数 η_R 负相关,且低碳产品批发价也随产品减排量 x 的变化动态变化.

3) 制造商为供应商分担的减排成本 λ_S 随减排量 x 的变化动态变化,制造商为零售商分担的宣传促销成本 λ_R 不随时间变化,且 λ_R 与 u_1 、 u_2 负相关(需满足条件 $u_2 + 2u_1 \leq 3$). 此处均衡策略是随时间变化而变化的真正的动态策略,而已有文献中二级低碳供应链微分博弈均衡策略大多数是不随时间变化的静态策略,少部分文献(如文献[30])含有动态成分的策略,但策略的影响因素也明显不一样. 导致这一差异的原因是本文的研究对象和研究假设与已有文献不一样,但某些方面更接近实际(如,研究对象是三级供应链,产品需求的影响因素考虑得更全面等).

将式(26)和(28)代入状态方程式(1),可求得分散式决策下低碳供应链减排量 x 的最优轨迹

$$x(t) = (x_0 + \Delta_2/\Delta_1)e^{\Delta_1 t} - \Delta_2/\Delta_1. \quad (32)$$

其中

$$\Delta_1 = \frac{\alpha^2 (a_1^* + 2a_2^*)}{\eta_S} + \frac{2\beta^2 a_2^*}{\eta_M} - \gamma,$$

$$\Delta_2 = \frac{\alpha^2 (b_1^* + 2b_2^*)}{2\eta_S} + \frac{\beta^2 b_2^*}{\eta_M}.$$

由式(16)、(32)及 $J_S^*(x) = e^{-\rho t} V_S(x)$ 可得最优利润值函数

$$J_S^*(x) = e^{-\rho t} V_S(x) = e^{-\rho t} (a_1^* x^2 + b_1^* x + c_1^*). \quad (33)$$

同理可得

$$J_M^*(x) = e^{-\rho t} V_M(x) = e^{-\rho t} (a_2^* x^2 + b_2^* x + c_2^*), \quad (34)$$

$$J_R^*(x) = e^{-\rho t} V_R(x) = e^{-\rho t} (a_3^* x^2 + b_3^* x + c_3^*). \quad (35)$$

式(33)~(35)中的 x 由式(32)确定.

综上,分散决策情形下的供应链系统总利润值函数为

$$J^*(x) = J_S^*(x) + J_M^*(x) + J_R^*(x). \quad (36)$$

2.2 集中决策情形

此情形下,三方以供应链系统总利润最优为原则,共同确定 z_S 、 z_M 、 z_R 和 w 的值. 此时供应链系统的决策问题为

$$\max_{z_S, z_M, z_R, w} J^C = \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[u_2 w (D_0 + \theta_1 x + \theta_2 z_R - \theta_3 u_2 w) - \frac{1}{2} \eta_S z_S^2 - \frac{1}{2} \eta_M z_M^2 - \frac{1}{2} \eta_R z_R^2 \right] dt. \quad (37)$$

记 t 时刻以后供应链系统长期利润的最优价值函数为 $J^{C*}(x) = e^{-\rho t} V(x)$, 则 $V(x)$ 对于任意 $x \geq 0$ 必须满足 HJB 方程

$$\rho V(x) = \max_{z_S, z_M, z_R, w} \left[u_2 w (D_0 + \theta_1 x + \theta_2 z_R - \theta_3 u_2 w) - \frac{1}{2} \eta_S z_S^2 - \frac{1}{2} \eta_M z_M^2 - \frac{1}{2} \eta_R z_R^2 + V'(x)(\alpha z_S + \beta z_M - \gamma x) \right]. \quad (38)$$

式(38)分别对 z_S 、 z_M 、 z_R 、 w 求一阶偏导数,并令其为零,可解得

$$\begin{aligned} z_S &= \frac{\alpha V'(x)}{\eta_S}, \\ z_M &= \frac{\beta V'(x)}{\eta_M}, \\ z_R &= \frac{u_2 \theta_2 w}{\eta_R}, \\ w &= \frac{D_0 + \theta_1 x + \theta_2 z_R}{2\theta_3 u_2}. \end{aligned} \quad (39)$$

由式(39)中 z_R 和 w 的表达式,可得

$$\begin{aligned} z_R &= \frac{\theta_2 (D_0 + \theta_1 x)}{2\eta_R \theta_3 - \theta_2^2}, \\ w &= \frac{\eta_R (D_0 + \theta_1 x)}{u_2 (2\eta_R \theta_3 - \theta_2^2)}. \end{aligned} \quad (40)$$

将式(39)中的 z_S 、 z_M 及式(40)代入(38),整理得

$$\rho V(x) = \frac{\eta_R (D_0 + \theta_1 x)^2}{2(2\eta_R \theta_3 - \theta_2^2)} + \frac{\alpha^2 [V'(x)]^2}{2\eta_S} + \frac{\beta^2 [V'(x)]^2}{2\eta_M} - \gamma x V'(x). \quad (41)$$

根据式(41),假设

$$V(x) = ax^2 + bx + c, \quad (42)$$

其中 a 、 b 、 c 为待定系数. 将式(42)及其对 x 的导数代入式(41)中,对比式(41)等号左右两边的同类项系数,可得关于 a 、 b 、 c 的方程组如下所示:

$$\rho a = \frac{\eta_R \theta_1^2}{2(2\eta_R \theta_3 - \theta_2^2)} + \frac{2\alpha^2 a^2}{\eta_S} + \frac{2\beta^2 a^2}{\eta_M} - 2\gamma a, \quad (43)$$

$$\rho b = \frac{\eta_R \theta_1 D_0}{2\eta_R \theta_3 - \theta_2^2} + \frac{2\alpha^2 ab}{\eta_S} + \frac{2\beta^2 ab}{\eta_M} - \gamma b, \quad (44)$$

$$\rho c = \frac{\eta_R D_0^2}{2(2\eta_R \theta_3 - \theta_2^2)} + \frac{\alpha^2 b^2}{2\eta_S} + \frac{\beta^2 b^2}{2\eta_M}. \quad (45)$$

求解式(43)~(45),可得参数 a 、 b 、 c 的值. 求解思路如下:

- 1) 由式(43)解出 a 的值;
- 2) 解出 a 的值后,可根据式(44)解出 b 的值;
- 3) 得到 b 值后,由式(45)可解出 c 的值.

设由式(43)~(45)解出的参数值用 a^* 、 b^* 、 c^* 表示.

得到 a^* 、 b^* 、 c^* 的值后,由式(39)、(40)和(42)可得集中决策下的三级低碳供应链长期动态均衡策略如下所示(要求 $2\eta_R \theta_3 - \theta_2^2 > 0$):

$$z_S^* = \frac{\alpha(2a^*x + b^*)}{\eta_S}, \quad (46)$$

$$z_M^* = \frac{\beta(2a^*x + b^*)}{\eta_M}, \quad (47)$$

$$z_R^* = \frac{\theta_2(D_0 + \theta_1 x)}{2\eta_R \theta_3 - \theta_2^2}, \quad (48)$$

$$w^* = \frac{\eta_R(D_0 + \theta_1 x)}{u_2(2\eta_R \theta_3 - \theta_2^2)}. \quad (49)$$

由式(46)~(49)可知:

1) 供应商、制造商、零售商的努力程度及低碳产品的批发价都随减排量 x 的变化动态变化,这也与已有文献中二级低碳供应链合作微分博弈(集中决策情形)均衡策略不随时间变化的静态策略不同(文献[30]分散决策时有动态策略,但没有集中决策内容,故参考文献中有集中决策内容的都为静态策略).

2) 供应商、制造商的减排努力程度与供应商、制造商的减排成本系数 η_S 、 η_M 负相关,与供应商、制造商的减排努力对产品减排率的影响系数 α 、 β 正相关;零售商的宣传促销努力程度与零售商宣传促销成本系数 η_R 、消费者价格敏感系数 θ_3 负相关,与零售商宣传促销努力对产品需求的影响系数 θ_2 、初始市场需求 D_0 、减排量对产品需求的影响系数 θ_1 正相关.

3) 低碳产品的批发价与初始市场需求 D_0 、减排量对产品需求的影响系数 θ_1 、零售商的宣传促销努力程度对产品需求的影响系数 θ_2 正相关,与消费者价格敏感系数 θ_3 、零售商宣传促销成本系数 η_R 、批发产品加成系数 u_2 负相关.

4) 低碳产品的批发价与 u_1 无关,即与低碳原材料批发价无关,这是因为,该种决策模式下,低碳原材料批发价可以看作是供应链成员之间的转移支付,对决策不产生影响,低碳产品零售价(即 $u_2 w$)才是影响供应链决策的重要因素.

将式(46)和(47)代入状态方程式(1),可求得集中决策下低碳供应链减排量 x 的最优轨迹

$$x(t) = (x_0 + \Pi_2/\Pi_1)e^{\Pi_1 t} - \Pi_2/\Pi_1. \quad (50)$$

其中

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{2\alpha^2 a^*}{\eta_S} + \frac{2\beta^2 a^*}{\eta_M} - \gamma, \\ \Pi_2 &= \frac{\alpha^2 b^*}{\eta_S} + \frac{\beta^2 b^*}{\eta_M}. \end{aligned}$$

由式(42)、(50)及 $J^{C^*}(x) = e^{-\rho t}V(x)$ 可得供应链系统最优利润值函数

$$J^{C^*}(x) = e^{-\rho t}V(x) = e^{-\rho t}(a^*x^2 + b^*x + c^*).$$

3 算例分析

3.1 两种情形下模型的求解及灵敏度分析

由于前文模型中涉及较多的参数,导致一些变量的求解较麻烦,给进一步的分析带来了一定的困难.下面通过为相关参数赋值,对分散决策和集中决策的情形进行对比分析.设 $u_1 = 0.6, u_2 = 1.2, x_0 = 0, \alpha = \beta = 0.5, \gamma = 0.8, D_0 = 10, \theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 1, \eta_S = \eta_M = \eta_R = 1, \rho = 0.8$. 将这些参数代入前述两种决策情形,可得到三级供应链微分博弈相关变量的取值及均衡策略.

对于分散决策情形,舍弃减排量小于等于0、利润为负和努力水平为负的3种情况,可得到

$$\begin{aligned} a_1^* &= 0.0888, a_2^* = 0.0484, a_3^* = 0.0232, \\ b_1^* &= 2.7216, b_2^* = 1.5147, b_3^* = 0.7182, \\ c_1^* &= 28.1011, c_2^* = 15.7350, c_3^* = 7.5318, \\ \lambda_R^* &= 0.6, \\ x(t) &= 1.5048 - 1.5048e^{-0.7294t}, \\ z_S^* &= 1.5774 - 0.1396e^{-0.7294t}, \\ z_M^* &= 0.8302 - 0.0728e^{-0.7294t}, \\ z_R^* &= 3.2409 - 0.4239e^{-0.7294t}, \\ w^* &= 6.4818 - 0.8478e^{-0.7294t}, \\ \lambda_S^* &= \frac{0.3319 - 0.0241e^{-0.7294t}}{6.3096 - 0.5586e^{-0.7294t}}. \end{aligned}$$

因此有

$$\begin{aligned} V_S(x(t)) &= 32.3977 + 0.2011e^{-1.4588t} - 4.4977e^{-0.7294t}, \\ V_M(x(t)) &= 18.1239 + 0.1096e^{-1.4588t} - 2.4985e^{-0.7294t}, \\ V_R(x(t)) &= 8.6650 + 0.0525e^{-1.4588t} - 1.1857e^{-0.7294t}. \end{aligned}$$

进而,有 $J_S^*(x_0) = 28.1011, J_M^*(x_0) = 15.7350, J_R^*(x_0) = 7.5318$. 故有

$$J^*(x_0) = J_S^*(x_0) + J_M^*(x_0) + J_R^*(x_0) = 51.3679.$$

对于集中决策情形,舍弃减排量小于等于0的一种情况,可得到

$$\begin{aligned} a^* &= 0.2305, b^* = 7.3019, c^* = 79.1618, \\ x(t) &= 6.4109 - 6.4109e^{-0.5695t}, \\ z_S^* &= 5.1287 - 1.4777e^{-0.5695t}, \\ z_M^* &= 5.1287 - 1.4777e^{-0.5695t}, \\ z_R^* &= 16.4109 - 6.4109e^{-0.5695t}, \\ w^* &= 13.6758 - 5.3424e^{-0.5695t}. \end{aligned}$$

因此有

$$\begin{aligned} V(x(t)) &= 135.4471 + 9.4735e^{-1.1390t} - 65.7587e^{-0.5695t}. \end{aligned}$$

故有 $J^{C^*}(x_0) = 79.1618$.

由上述结果可知:

1) 无论是分散决策情形还是集中决策情形,供应链减排量都随时间推移逐渐增大到一稳定值,但集中决策情形的减排量稳定值明显高于分散决策情形的减排量稳定值,这表明集中决策(即三方合作)有利于供应链减排,与已有二级低碳供应链文献的结论类似;

2) 无论是分散决策情形还是集中决策情形,供应商、制造商、零售商的 effort 水平都随时间推移逐渐增大到一稳定值,但供应链中三方各自在集中决策情形的 effort 水平稳定值明显高于分散决策情形相应的 effort 水平稳定值;

3) 无论是分散决策情形还是集中决策情形,低碳产品的批发价 w^* 及低碳产品的零售价 u_2w^* 都随时间推移逐渐增大到一稳定值,但集中决策情形的稳定值明显高于分散决策情形相应的稳定值;

4) 分散决策情形下,制造商为供应商分担的 effort 成本随时间动态变化,而制造商为零售商分担的 effort 成本是一常数,这与已有二级低碳供应链文献中分担比例不随时间变化的结论不完全相同;

5) 分散决策情形下的供应链总利润 $J^*(x_0)$ 明显小于集中决策情形下的供应链总利润 $J^{C^*}(x_0)$,这与已有二级低碳供应链文献的结论类似.

以上述参数取值为基准,对供应商和制造商各自的减排努力对产品减排率的影响系数 α, β (α, β 的基准值都为0.5)和零售商宣传促销努力对产品需求的影响系数 θ_2 (θ_2 基准值为1)进行灵敏度分析,结果如表1所示(λ_R 的值为0.6,且不随 α, β, θ_2 值的变化而变化,故没有在表1中显示).

表1 灵敏度分析计算结果

参数	$z_{S\infty}/z_{S\infty}^C$	$z_{M\infty}/z_{M\infty}^C$	$z_{R\infty}/z_{R\infty}^C$	w_∞/w_∞^C	$\lambda_{S\infty}$	x_∞/x_∞^C	J^*/J^{C*}
基准	1.58/5.13	0.83/5.13	3.24/16.41	6.48/13.68	5.26%	1.50/6.41	51.37/79.16
$\alpha = 0.3$	0.88/2.55	0.77/4.26	3.05/13.62	6.09/11.35	4.44%	0.81/3.62	49.15/72.62
$\alpha = 0.4$	1.20/3.68	0.79/4.60	3.12/14.71	6.25/12.26	4.33%	1.09/4.71	50.05/75.30
$\alpha = 0.6$	2.00/7.16	0.88/5.97	3.39/19.10	6.79/15.92	5.90%	2.05/9.10	53.06/84.68
$\alpha = 0.7$	2.49/10.37	0.95/7.41	3.60/23.70	7.20/19.75	6.67%	2.77/13.70	55.27/92.74
$\beta = 0.3$	1.52/4.26	0.48/2.55	3.14/13.62	6.27/11.35	5.73%	1.13/3.62	49.97/72.62
$\beta = 0.4$	1.55/4.60	0.65/3.68	3.18/14.71	6.36/12.26	5.13%	1.29/4.71	50.60/75.30
$\beta = 0.6$	1.62/5.97	1.02/7.16	3.32/19.10	6.64/15.92	4.98%	1.78/9.10	52.39/84.68
$\beta = 0.7$	1.68/7.41	1.23/10.37	3.42/23.70	6.83/19.75	4.64%	2.12/13.70	53.66/92.74
$\theta_2 = 0.8$	1.32/3.22	0.72/3.22	2.25/8.25	5.64/8.60	9.03%	1.27/4.03	43.23/54.15
$\theta_2 = 0.9$	1.43/3.91	0.77/3.91	2.70/11.26	6.01/10.42	7.30%	1.37/4.89	46.74/63.62
$\theta_2 = 1.1$	1.78/7.82	0.92/7.82	3.91/27.54	7.11/20.87	2.90%	1.69/9.78	57.60/108.82
$\theta_2 = 1.2$	2.07/18.45	1.03/18.45	4.77/70.85	7.96/49.20	0	1.94/23.06	66.27/188.32

表1中： $z_{S\infty}$ 、 $z_{M\infty}$ 、 $z_{R\infty}$ 分别表示分散决策情形下，当 $t \rightarrow \infty$ 时，供应商、制造商、零售商最优努力水平的稳定值； w_∞ 、 $\lambda_{S\infty}$ 、 x_∞ 和 J^* 分别表示分散决策情形下，当 $t \rightarrow \infty$ 时，产品最优批发价的稳定值、制造商为供应商分担的最优成本比利的稳定值、最优碳减排量的稳定值和供应链最优总利润（即 $J^*(x_0)$ ）； $z_{S\infty}^C$ 、 $z_{M\infty}^C$ 、 $z_{R\infty}^C$ 分别表示集中决策情形下，当 $t \rightarrow \infty$ 时，供应商、制造商、零售商最优努力水平的稳定值； w_∞^C 、 x_∞^C 和 J^{C*} 分别表示集中决策情形下，当 $t \rightarrow \infty$ 时，产品最优批发价的稳定值、最优碳减排量的稳定值和供应链最优总利润（即 $J^{C*}(x_0)$ ）。

由表1可得如下结论。

1) 无论分散决策情形还是集中决策情形，随着 α 、 β 、 θ_2 值的增加，供应链成员最优利润（这由计算过程得到）及供应链整体最优利润都在增加。这是因为： α 、 β 增加，减排努力的效率提高，可导致减排量增加，从而使市场需求增加； θ_2 增加，宣传促销的效率提高，也可使市场需求增加，而市场需求的增加，对供应链系统及供应链成员会带来好处。

2) 无论分散决策情形还是集中决策情形，随着 α 、 β 、 θ_2 值的增加，供应链减排量的稳定值都在增加。这是由于， θ_2 增加，宣传促销的效率提高，使市场需求增加，为维持系统博弈关系的平衡，这反过来刺激了供应链上游成员的减排努力，这一点由表1可以得到证实，进而使减排量增加。 α 、 β 对减排量的影响机制在第1)点已涉及，不再赘述。

3) 随着 α 、 β 值的增加，分散决策情形下的制造商为供应商分担的最优成本比利的稳定值 $\lambda_{S\infty}$ 并非单调变化，但随着 θ_2 的值增加，稳定值 $\lambda_{S\infty}$ 单调减少直至0。这是因为， θ_2 增加，宣传促销的效率提高，供应链中零售商的相对功劳更大，在 λ_R 为常数的情况下，供应商被分担的减排成本比例就应相对减少。

4) 无论分散决策情形还是集中决策情形，随着

α 、 β 、 θ_2 值增加，供应商、制造商、零售商最优努力水平的稳定值和产品最优批发价的稳定值都单调增加，这进一步验证了第2节的部分结论，同时发现集中决策情形的稳定值总是大于分散决策情形相应的稳定值。

3.2 算例中集中决策总利润的分配

由算例分析及灵敏度分析可知，如果集中式决策下供应商、制造商和零售商在事先达成的协议中合理分配利润，将有机会促使三者分得的利润均大于等于分散式决策下的各自最优利润，实现供应链系统的帕累托改善。下面以前述算例中的基准参数取值情况阐述集中决策总利润分配的问题。

集中决策总利润的分配可应用合作博弈方法来解。本文考虑文献[43]中的多人联盟博弈的多目标决策方法，此方法吸收了核(心)方法、 τ 值法的思想，是一种在距离意义上离理想分配向量最近的一种方法。要用此方法进行总利润分配，关键是要先找出博弈的特征函数 $V(\cdot)$ 。下面应用最大最小思想求解特征函数 $V(\cdot)$ 。最大最小化的特征函数体现了联盟成员在面临最猛烈攻击时总收益或总利润的“底线”，这样定义的 $V(\cdot)$ 自动脱离了联盟外成员的干扰，也符合特征函数的定义。

对于供应商 S ，在式(1)的约束下，有

$$g_S = \max_{z_S} \min_{w, z_M, z_R, \lambda_S} \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[u_1 w (D_0 + \theta_1 x + \theta_2 z_R - \theta_3 u_2 w) - \frac{1}{2} (1 - \lambda_S) \eta_S z_S^2 \right] dt.$$

将前面的参数值代入，可得解

$$v(S) = g_S(x_0) = 0.$$

同理，对于制造商 M 和零售商 R ，有

$$g_M = \max_{z_M, w, \lambda_S, \lambda_R} \min_{z_S, z_R} \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[(1 - u_1) w (D_0 + \theta_1 x + \theta_2 z_R - \theta_3 u_2 w) - \frac{1}{2} \eta_M z_M^2 \right] dt.$$

$$\begin{aligned} & \theta_1 x + \theta_2 z_R - \theta_3 u_2 w) - \frac{1}{2} \eta_M z_M^2 - \\ & \frac{1}{2} \lambda_S \eta_S z_S^2 - \frac{1}{2} \lambda_R \eta_R z_R^2] dt, \\ g_R = & \\ & \max_{z_R} \min_{w, z_S, z_M, \lambda_R} \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[(u_2 - 1) w (D_0 + \right. \\ & \left. \theta_1 x + \theta_2 z_R - \theta_3 u_2 w) - \frac{1}{2} (1 - \lambda_R) \eta_R z_R^2 \right] dt. \end{aligned}$$

可解得

$$\begin{aligned} v(M) &= g_M(x_0) = 10.5900, \\ v(R) &= g_R(x_0) = 0. \end{aligned}$$

类似地, 对于供应商 S 与制造商 M , 供应商 S 与零售商 R , 制造商 M 与零售商 R , 分别有

$$\begin{aligned} g_{SM} = & \\ & \max_{z_S, z_M, w, \lambda_R} \min_{z_R} \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[w (D_0 + \theta_1 x + \theta_2 z_R - \right. \\ & \left. \theta_3 u_2 w) - \frac{1}{2} \eta_M z_M^2 - \frac{1}{2} \eta_S z_S^2 - \frac{1}{2} \lambda_R \eta_R z_R^2 \right] dt, \\ g_{SR} = & \\ & \max_{z_S, z_R} \min_{w, z_M, \lambda_S, \lambda_R} \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[(u_1 + u_2 - \right. \\ & \left. 1) w (D_0 + \theta_1 x + \theta_2 z_R - \theta_3 u_2 w) - \frac{1}{2} (1 - \right. \\ & \left. \lambda_S) \eta_S z_S^2 - \frac{1}{2} (1 - \lambda_R) \eta_R z_R^2 \right] dt, \\ g_{MR} = & \\ & \max_{z_M, z_R, w, \lambda_S} \min_{z_S} \int_0^\infty e^{-\rho t} \left[(u_2 - u_1) w (D_0 + \right. \\ & \left. \theta_1 x + \theta_2 z_R - \theta_3 u_2 w) - \frac{1}{2} \eta_M z_M^2 - \right. \\ & \left. \frac{1}{2} \eta_R z_R^2 - \frac{1}{2} \lambda_S \eta_S z_S^2 \right] dt. \end{aligned}$$

可解得

$$\begin{aligned} v(S, M) &= g_{SM}(x_0) = 28.4217, \\ v(S, R) &= g_{SR}(x_0) = 0, \\ v(M, R) &= g_{MR}(x_0) = 21.5425. \end{aligned}$$

另外, 有 $v(\phi) = 0, v(S, M, R) = 79.1618$.

求出了特征函数 $V(\cdot)$ 以后, 可确定理想分配向量

$$U = (u_S, u_M, u_R),$$

其中 $u_i (i = S, M, R)$ 为局中人 i 的理想分配数. 以局中人 i 在大联盟中的边际贡献值作为 u_i , 有

$$\begin{aligned} u_S &= v(S, M, R) - v(M, R) = 57.6193, \\ u_M &= v(S, M, R) - v(S, R) = 79.1618, \\ u_R &= v(S, M, R) - v(S, M) = 50.7401. \end{aligned}$$

求出了理想分配向量后, 根据文献[43]中多人联

盟博弈的多目标决策方法, 同时将分散决策的结果作为参与约束, 可得如下二次规划模型(其中 x_S 、 x_M 、 x_R 为供应商、制造商、零售商的最终分配值):

$$\begin{aligned} & \min (x_S - u_S)^2 + (x_M - u_M)^2 + (x_R - u_R)^2; \\ & \text{s.t. } x_S + x_M + x_R = v(S, M, R), \\ & \quad x_S + x_M \geq v(S, M), \\ & \quad x_S + x_R \geq v(S, R), \\ & \quad x_M + x_R \geq v(M, R), \\ & \quad x_S \geq v(S), \\ & \quad x_M \geq v(M), \\ & \quad x_R \geq v(R), \\ & \quad x_S \geq J_S^*(x_0), \\ & \quad x_M \geq J_M^*(x_0), \\ & \quad x_R \geq J_R^*(x_0). \end{aligned}$$

将相应的值代入上面的模型并求解, 可得 $x_S = 28.1011, x_M = 39.7403, x_R = 11.3204$, 即 $J_S^*(x_0) = 28.1011, J_M^*(x_0) = 39.7403, J_R^*(x_0) = 11.3204$.

4 结论

通过成本加成定价思想, 考虑产品需求受产品减排量、零售商宣传促销努力及产品零售价格的综合影响, 从动态跨期的角度研究了由单个供应商、单个制造商和单个零售商组成的三级供应链中纵向减排合作及宣传促销问题. 借助微分博弈模型得到了分散决策和集中决策两种情形下的动态均衡策略及减排量的最优轨迹, 主要研究结论如下.

1) 无论分散决策还是集中决策情形, 供应商、制造商的减排努力, 零售商的宣传促销努力, 低碳产品的批发价都随减排量 x 的变化动态变化.

2) 分散决策情形下, 制造商为供应商分担的减排成本 λ_S 随减排量 x 的变化动态变化, 而制造商为零售商分担的宣传促销成本 λ_R 不随时间变化, 且 λ_R 与 u_1, u_2 负相关(需满足条件 $u_2 + 2u_1 \leq 3$).

3) 无论分散决策还是集中决策, 本文均衡策略是随时间变化而变化的真正的动态策略, 这与已有文献中二级低碳供应链微分博弈均衡策略大多数都是不随时间变化的静态策略不同. 策略的动态性意味着供应链成员应关注时间因素, 不同时间应采取不同的行动.

另外, 考虑到参数形式三级供应链微分博弈模型中变量的求解较麻烦, 给进一步的分析带来了一定的困难, 文中通过为参数赋值的方式及灵敏度分析得到了供应链成员分散决策和集中决策两种情形下具体

的均衡策略及减排量的最优轨迹,并进一步得到如下结论.

1) 无论是分散决策情形还是集中决策情形,供应链减排量都随时间动态变化(随时间逐渐增加到稳定值),但集中决策情形的减排量稳定值明显高于分散决策情形的减排量稳定值,表明集中决策(即三方合作)有利于供应链减排.

2) 无论是分散决策情形还是集中决策情形,供应商、制造商、零售商的努力水平都随时间动态变化(随时间逐渐增加到稳定值),但供应链中三方各自在集中决策情形的努力水平稳定值明显高于分散决策情形相应的努力水平稳定值.

3) 无论是分散决策情形还是集中决策情形,低碳产品的批发价 w^* 及低碳产品的零售价 $u_2 w^*$ 都随时间推移逐渐增大到一稳定值,但集中决策情形的稳定值明显高于分散决策情形相应的稳定值,这与部分二级低碳供应链文献^[33]两者相等且不随时间变化的结论不同,这意味着制造商和零售商除了应关注时间因素,不同时间选择不同价格外,还应区分供应链成员间是分散决策的博弈关系还是集中决策的合作关系.

4) 分散决策情形下的供应链总利润明显小于集中决策情形的供应链总利润.

5) 无论是分散决策情形还是集中决策情形,随着 α 、 β 、 θ_2 值的增加(即努力的效率提高),供应链成员最优利润及供应链整体最优利润都会增加,且供应链减排量的稳定值也会增加,这表明供应链成员努力的效率提高有利于供应链减排.

6) 随着 θ_2 值的增加,分散决策情形下的制造商为供应商分担的最优成本比例的稳定值 $\lambda_{S\infty}$ 单调减少直至0.

上述这些结论对供应链企业的启示:

1) 供应商、制造商、零售商应尽可能实现合作,这需要供应链企业合理分配合作利润,在实践中企业可以根据参数取值情况采取前述的多人联盟博弈的多目标决策方法进行分配.

2) 供应链企业应尽可能提高参数 α 、 β 、 θ_2 取值,即应提高供应链企业减排努力与促销努力的效率,这一方面可使供应链合作总利润增加,也会使碳减排量增加,实现供应链企业经济效益与社会效益的双改善.

有关三级低碳供应链长期动态博弈的研究,总体而言还处于起步阶段,值得进一步研究的问题还有许多:

1) 在低碳供应链中同时考虑原材料批发价和产品零售价的最优定价,这需要在本文基础上增加决策

变量,计算量更大,也更复杂,但更接近现实.

2) 考虑产品需求与产品减排量、零售商宣传促销努力及产品零售价格间的非线性关系.

3) 考虑引入政府环境规制因素对低碳减排的影响,比如减排博弈中可考虑碳税、碳补贴、碳交易等政策因素的影响.

4) 考虑引入不确定性,比如减排率的不确定性,建立随机微分博弈模型.

5) 可考虑引入供应链成员的私有信息,比如供应链成员努力成本的私有信息,进一步研究低碳供应链减排不完全信息微分博弈问题.

6) 前述几方面内容的综合研究,比如低碳政策下三级供应链减排不完全信息微分博弈研究.

参考文献(References)

- [1] Benjaafar S, Li Y Z, Daskin M. Carbon footprint and the management of supply chains: Insights from simple models[J]. IEEE Trans on Automation Science and Engineering, 2013, 10(1): 99-116.
- [2] Shaw K, Irfan M, Shankar R, et al. Low carbon chance constrained supply chain network design problem: A benders decomposition based approach[J]. Computers & Industrial Engineering, 2016, 98: 483-497.
- [3] Rahmania D, Mahoodian V. Strategic and operational supply chain network design to reduce carbon emission considering reliability and robustness[J]. J of Cleaner Production, 2017, 149: 607-620.
- [4] 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. (Dai Z, Hu K. Multi-objective low carbon loop supply chain network optimization model and algorithm[J]. Application Research of Computers, 2014, 31(6): 1648-1653.)
- [5] 吴文生, 吴顺祥, 白少布, 等. 面向网购的低碳供应链超网络优化模型及其应用[J]. 中国管理科学, 2017, 25(6): 111-120. (Wu Y S, Wu S X, Bai S B, et al. The supernetwork optimization model for the low-carbon supply chain and its application based on online shopping[J]. Chinese J of Management Science, 2017, 25(6): 111-120.)
- [6] 陈玲丽, 郭鹏, 韩二东. 碳税下基于模糊理论的供应链决策优化模型[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(4): 860-866. (Chen L L, Guo P, Han E D. Optimal decision model for supply chain under carbon tax based on fuzzy theory[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(4): 860-866.)
- [7] Lou G X, Xia H Y, Zhang J Q, et al. Investment strategy of emission-reduction technology in a supply chain[J].

- Sustainability, 2015, 7(8): 10684-10708.
- [8] Yang S H, Yu J. Low-carbonization game analysis and optimization in a two-echelon supply chain under the carbon-tax policy[J]. *J of Chinese Economic and Foreign Trade Studies*, 2016, 9(2): 113-130.
- [9] Wang Q P, Zhao D Z, He L F. Contracting emission reduction for supply chains considering market low-carbon preference[J]. *J of Cleaner Production*, 2016, 120: 72-84.
- [10] Madani S R, Rasti-Barzoki M. Sustainable supply chain management with pricing, greening and governmental tariffs determining strategies: A game-theoretic approach[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2017, 105: 287-298.
- [11] Ji J N, Zhang Z Y, Yang L. Carbon emission reduction decisions in the retail/dual-channel supply chain with consumers' preference[J]. *J of Cleaner Production*, 2017, 141: 852-867.
- [12] Du S F, Hu L, Wang L. Low-carbon supply policies and supply chain performance with carbon concerned demand[J]. *Annals of Operations Research*, 2017, 255(1): 569-590.
- [13] Cheng Y W, Mu D, Zhang Y. Mixed carbon policies based on cooperation of carbon emission reduction in supply chain[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2017, 2017: 1-11.
- [14] Yang L, Zheng C S, Xu M H. Comparisons of low carbon policies in supply chain coordination[J]. *J of Systems Science and Systems Engineering*, 2014, 23(3): 342-361.
- [15] Zhou Y J, Bao M J, Chen X H, et al. Co-op advertising and emission reduction cost sharing contract and coordination in low-carbon supply chain based on fairness concerns[J]. *J of Cleaner Production*, 2016, 133: 402-413.
- [16] Xu J T, Chen Y Y, Bai Q G. A two-echelon sustainable supply chain coordination under cap-and-trade regulation[J]. *J of Cleaner Production*, 2016, 135: 42-56.
- [17] Liu K N, Song H M. Contract and incentive mechanism in low-carbon R&D cooperation[J]. *Supply Chain Management*, 2017, 22(3): 270-283.
- [18] 赵道致, 原白云, 夏良杰, 等. 碳排放约束下考虑制造商竞争的供应链动态博弈[J]. *工业工程与管理*, 2014, 19(1): 65-71.
(Zhao D Z, Yuan B Y, Xia L J, et al. Dynamic game study in supply chain with manufacturers' competition under the constraint of productions' emission[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2014, 19(1): 65-71.)
- [19] 刘超, 慕静. 随机需求与政府补贴条件下的低碳供应链协调[J]. *运筹与管理*, 2016, 25(4): 142-149.
(Liu C, Mu J. Coordination of low-carbon supply chain under the condition of stochastic demand and government's subsidy[J]. *Operations Research and Management Science*, 2016, 25(4): 142-149.)
- [20] 张学龙, 王军进, 沈瑶婷. 考虑碳排放权交易的低碳供应链批发价格协调研究[J]. *数学的实践与认识*, 2016, 46(5): 95-101.
(Zhang X L, Wang J J, Shen Y T. The wholesale price coordination in low-carbonization supply chain considering the trading of carbon emissions[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2016, 46(5): 95-101.)
- [21] 石松, 颜波, 石平. 考虑公平关切的自主减排低碳供应链决策研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(12): 3079-3091.
(Shi S, Yan B, Shi P. Pricing and coordination decisions in autonomous reduction low-carbon supply chain with fairness concerns[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2016, 36(12): 3079-3091.)
- [22] 杨仕辉, 王平. 基于碳配额政策的两级低碳供应链博弈与优化[J]. *控制与决策*, 2016, 31(5): 924-928.
(Yang S H, Wang P. Game and optimization of a two-level low-carbon supply chain under the carbon quota policy[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(5): 924-928.)
- [23] 黄书真, 徐福缘, 何建佳, 等. 双渠道低碳供应链合作减排与促销决策模型[J]. *科技管理研究*, 2017(17): 246-256.
(Huang S Z, Xu F Y, He J J, et al. Cooperative reduction and promotion decision model in dual channel supply chain[J]. *Science and Technology Management Research*, 2017(17): 246-256.)
- [24] 徐春明, 赵道致, 杜其光. 需求依赖减排水平和价格的供应链决策与协调机制[J]. *控制与决策*, 2016, 31(3): 486-492.
(Xu C M, Zhao D Z, Du Q G. Decision and coordination models for supply chain with carbon emissions reduction level and price dependent demand[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(3): 486-492.)
- [25] Sun Y L, Mu D, Zhang Q. Research on emission reduction decisions in multi-echelon supply chain with low-carbon policy considered[C]. *Int Conf on Logistics. IEEE*, 2016: 1-6.
- [26] 樊世清, 汪晴, 陈莉. 政府补贴下的三级低碳供应链减排博弈研究[J]. *工业技术经济*, 2017(11): 12-20.
(Fan S Q, Wang Q, Chen L. A study on emission reduction game of three level low carbon supply chain under government subsidies[J]. *J of Industrial Technological Economics*, 2017(11): 12-20.)
- [27] Jørgensen S, Martín-Herrán G, Zaccour G. Dynamic games in the economics and management of pollution[J]. *Environmental Modeling and Assessment*, 2010, 15(6): 433-467.

- [28] 赵道致, 原白云, 徐春明. 低碳供应链纵向合作减排的动态优化[J]. 控制与决策, 2014, 29(7): 1340-1344. (Zhao D Z, Yuan B Y, Xu C M. Dynamic optimization about vertical cooperation on carbon emissions reduction in low-carbon supply chain[J]. Control and Decision, 2014, 29(7): 1340-1344.)
- [29] Zhao H J, Li Z. Dynamic game analysis of R&D investment in low carbon supply chain[C]. The 28th Chinese Control and Decision Conf. Yinchuan: IEEE, 2016: 4570-4573.
- [30] Zu Y F, Chen L H, Fan Y. Research on low-carbon strategies in supply chain with environmental regulations based on differential game[J]. J of Cleaner Production, 2018, 177: 527-546.
- [31] 赵道致, 徐春秋, 王芹鹏. 考虑零售商竞争的联合减排与低碳宣传微分对策[J]. 控制与决策, 2014, 29(10): 1809-1815. (Zhao D Z, Xu C Q, Wang Q P. Differential strategies of joint emission reductions and low-carbon promotion considering competing retailers[J]. Control and Decision, 2014, 29(10): 1809-1815.)
- [32] 赵道致, 原白云, 徐春秋. 低碳环境下供应链纵向减排合作的动态协调策略[J]. 管理工程学报, 2016, 30(1): 147-154. (Zhao D Z, Yuan B Y, Xu C Q. Dynamic coordination strategy of vertical cooperative on carbon emission reduction in supply chain under low-carbon era[J]. J of Industrial Engineering and Engineering Management, 2016, 30(1): 147-154.)
- [33] 游达明, 朱桂菊, 岳柳青. 加成定价下低碳供应链生态研发与促销的微分博弈分析[J]. 软科学, 2016, 30(2): 102-106. (You D M, Zhu G J, Yue L Q. Differential game analysis of ecological R & D and promotion in the low-carbon supply chain with mark-up pricing[J]. Soft Science, 2016, 30(2): 102-106.)
- [34] 徐春秋, 赵道致, 原白云, 等. 上下游联合减排与低碳宣传的微分博弈模型[J]. 管理科学学报, 2016, 19(2): 53-65. (Xu C Q, Zhao D Z, Yuan B Y, et al. Differential game model on joint carbon emission reduction and low-carbon promotion in supply chains[J]. J of Management Sciences in China, 2016, 19(2): 53-65.)
- [35] 游达明, 朱桂菊. 低碳供应链生态研发、合作促销与定价的微分博弈分析[J]. 控制与决策, 2016, 31(6): 1047-1056. (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.)
- [36] 朱莹, 朱怀念, 方小林. 基于随机微分博弈的低碳供应链协同技术创新[J]. 企业经济, 2017, 36(2): 29-36. (Zhu Y, Zhu H N, Fang X L. Low-carbon supply chain collaboration technology innovation based on stochastic differential game[J]. Enterprise Economy, 2017, 36(2): 29-36.)
- [37] 叶同, 关志民, 陶瑾, 等. 考虑消费者低碳偏好和参考低碳水平效应的供应链联合减排动态优化与协调[J]. 中国管理科学, 2017, 25(10): 52-61. (Ye T, Guan Z M, Tao J, et al. Dynamic optimization and coordination about joint emission reduction in a supply chain considering consumer preference to low carbon and reference low carbon level effect[J]. Chinese J of Management Science, 2017, 25(10): 52-61.)
- [38] 周熙登. 考虑品牌差异的双渠道供应链减排与低碳宣传策略[J]. 运筹与管理, 2017, 26(11): 93-99. (Zhou X D. Strategy on low carbon emission reduction, promotion in dual channel supply chain considering brand differentiation[J]. Operations Research and Management Science, 2017, 26(11): 93-99.)
- [39] 刘名武, 万溢宇, 付红. 碳交易和低碳偏好下供应链低碳技术选择研究[J]. 中国管理科学, 2018, 26(1): 152-162. (Liu M W, Wan M Y, Fu H. Low carbon technology selection for supply chain under cap and trade mechanism with low carbon preference[J]. Chinese J of Management Science, 2018, 26(1): 152-162.)
- [40] Xie J X, Wei J C. Coordinating advertising and pricing in a manufacturer-retailer channel[J]. European J of Operational Research, 2009, 197(2): 785-791.
- [41] Giovanni P D. Quality improvement vs. advertising support: Which strategy works better for a manufacturer?[J]. European J of Operational Research, 2011, 208(2): 119-130.
- [42] Ouardighi F E, Kogan K. Dynamic conformance and design quality in a supply chain: An assessment of contracts' coordinating power[J]. Annals of Operations Research, 2013, 211(1): 137-166.
- [43] 吴育华, 刘喜华, 郭均鹏. 经济管理中的数量方法[M]. 北京: 经济科学出版社, 2008: 169-174. (Wu Y H, Liu X H, Guo J P. Quantitative methods in economic and management[M]. BeiJing: Economic Science Press, 2008: 169-174.)

作者简介

向小东(1973—), 男, 教授, 博士, 从事供应链管理、系统评价与决策等研究, E-mail: xiangxiaodong2@163.com;

李翀(1983—), 女, 副教授, 博士, 从事供应链管理的研究, E-mail: butterfly44@126.com.

(责任编辑: 齐 霖)