

控制与决策

Control and Decision

决策者失望规避下供应链协同产品创新微分对策研究

伊辉勇, 唐玲

引用本文:

伊辉勇,唐玲. 决策者失望规避下供应链协同产品创新微分对策研究[J]. *控制与决策*, 2024, 39(1): 271–280.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0414>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[平台品牌赋能情境下考虑信息不对称的供应链渠道冲突](#)

Supply chain channel conflicts considering asymmetric information under platform brand empowerment

控制与决策. 2021, 36(9): 2123–2132 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0098>

[风险规避制造商市场入侵策略](#)

Market encroachment strategy of risk-averse manufacturer

控制与决策. 2021, 36(10): 2528–2536 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1819>

[大数据服务商参与下供应链联合减排的动态协调策略](#)

Dynamic coordination strategy of joint emission reduction in supply chain involving big data service provider

控制与决策. 2021, 36(8): 2013–2022 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1560>

[考虑扶贫偏好的三级农产品供应链决策及协调](#)

Decision making and contract coordination of three-level agricultural products supply chain with consumer poverty alleviation preference

控制与决策. 2020, 35(11): 2589–2598 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0201>

[低碳环境下双渠道供应链线上线下广告策略的微分博弈分析](#)

Differential game analysis of online and offline advertising strategies in a dual channel supply chain under low-carbon background

控制与决策. 2020, 35(11): 2707–2714 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1721>

决策者失望规避下供应链协同产品创新微分对策研究

伊辉勇[†], 唐玲

(重庆交通大学 经济与管理学院, 重庆 400074)

摘要: 在企业与企业之间竞争日趋激烈的背景下,能否在多个企业紧密联系的供应链中通过收益分配高效赋能上下游企业成为决策者撬动协同优势、凝聚创新合力的关键. 基于失望理论,运用微分博弈方法针对供应链协同产品创新动态改进与协调进行策略挖掘,将产品创新研发商誉和失望规避因素纳入决策行为之中,在此基础上提出产品创新补贴契约和收益配比调节机制,最后对计算结果进行仿真分析. 研究发现:无论在何种博弈情形下,失望规避系数越大,供应链成员目标利润越低;在一定条件下,创新研发及推广补贴契约的设计与实施,能有效提升受补贴方研发和推广水平、最优收益和供应链整体收益,而提供补贴方的研发努力水平保持不变;将收益分配比率约束在特定的范围内,可有效提高供应链系统的总体绩效,实现协同合作下帕累托最优.

关键词: 收益配置; 微分博弈; 协同产品创新; 创新研发商誉; 失望规避; 补贴契约

中图分类号: F272; C934 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0414

引用格式: 伊辉勇,唐玲. 决策者失望规避下供应链协同产品创新微分对策研究[J]. 控制与决策, 2024, 39(1): 271-280.

Differential strategies for collaborative product innovation in supply chain under decision makers' disappointed circumvention

YI Hui-yong[†], TANG Ling

(College of Economics and Management, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Since fierce competition is increasing among enterprises, whether to efficiently empower upstream and downstream enterprises through revenue allocation in the supply chain with multiple enterprises closely linked has become the key for decision-makers to leverage synergistic advantages and gather innovative synergy. Based on the disappointment theory, this study uses the differential game method to explore the strategy of dynamic optimization and coordination of collaborative product innovation in the supply chain. Product innovation R&D goodwill and disappointment avoidance factors are incorporated into the decision-making behavior. On this basis, the product innovation subsidy contract and the revenue matching regulation mechanism are proposed. The simulation results are analyzed in the last step. The results show that the greater the disappointment avoidance coefficient is, the lower the target profit of supply chain members is. Under certain conditions, the design and implementation of subsidy contract for innovation and R&D-promotion can effectively improve the research and development and publicity level, optimal revenue, and overall supply chain revenue of the subsidized party, while the research and development effort level of the subsidized party remains unchanged. Restricting the income distribution ratio of supply chain members to a certain range can effectively improve the present value of supply chain members' utility and realize Pareto optimization under supply chain coordination.

Keywords: revenue allocation; differential game; collaborative product innovation; goodwill for product R&D innovation; disappointed circumvention; subsidy contract

0 引言

顾客需求的持续升级与企业资源的相对稀缺性之间的矛盾迫使企业不断拓展其产品创新的边界和层级. 企业与企业之间的竞争早已从个体企业之间

的竞争延伸至企业所处的供应链和立异产品等之间的竞争. 企业通过新技术跨行业引入和原有技术升级实现横向和纵向创新,皆需要提高供应链协同创新水平. 供应链成员协同行为是提升产品创新绩效、赢

收稿日期: 2022-03-17; 录用日期: 2022-08-02.

基金项目: 国家社会科学基金项目(20XGL030).

[†]通讯作者. E-mail: yihuiyong1977@126.com.

*本文附带电子附录文件,可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

得供应链竞争优势的最有效途径之一。然而,供应链成员参与协同产品创新的前提是满意和接受参与创新过程所获得的收益。事实上,供应链成员在进行产品创新的过程中,会面临失望规避、利益分配不均、独立创新研发收益高于合作创新研发收益等难题,一定程度上弱化了供应链上下游企业资源优势互补与聚合效应,对供应链整体的产品价值创造产生了重要影响。在这种情形下,能否在关系紧密的多方企业中有力推进产品研发协同创新,成为供应链塑造竞争优势、赢得发展先机的关键。因此,如何构建供应链成员协同创新机制以提高单个企业和供应链整体绩效水平一直是学术界和产业界关注的热点议题。

目前,国内外学者们对于供应链产品协同方面的探索较为丰富。文献[1]针对由产品相互竞争的制造商和产能有限的下游供应商组成的二级供应链系统,研究得出每个制造商的产品生产数量均衡决策并设计了供应商的产能投资计划。文献[2]认为供应链产品协同创新已成为企业有前途的产品创新模式,合作伙伴的选择是供应链中协同产品创新的主要环节,并构建出协同产品创新合作伙伴选择指标体系。文献[3]研究了由厂商和零售商组成的二级供应链在合作过程中存在竞争或替代的两种不同产品的最优定价策略。文献[4]主要研究议价能力不同的主产品制造商和副产品处理厂所构成的二级供应链协同生产模式,探讨了议价能力对产品交易价格和均衡利润的作用机理。

影响供应链协同的因素有很多。文献[5]考虑供应链需求、技术规范关系以及潜在的协同效应,研究如何使业务目标和运营决策保持一致。文献[6]考虑了决定交易创新程度的因素,并探讨可持续发展的环境供应链创新如何为决策者提供信息。文献[7]认为,促进供应链协调的因素主要包括交换信息、交换利益和条约精神,并研究这3个因素对商定利益的影响机制。一些学者进一步从制定契约和收益配置角度对供应链协同开展研究。文献[8]基于颠覆性创新和Stackelberg非合作博弈理论,研究区块链技术和随机需求共同作用下的供应链协调问题,结合区块链技术对制造商和零售商供应链协调策略进行计算。文献[9]考虑了部分成员之间的协调(即“次协调”)研究供应链协同问题,发现次协调并不总是有效提高供应链的利润,在某些情况下,次协调甚至会损害供应链成员或整个供应链。文献[10]的研究得出,无论生产者和零售商之间设定了怎样的成本契约,时间的延迟都会抑制企业价值发展和破坏供应链的经济效率这

一结论。

以上有关供应链协同方面的研究均在决策者“完全理性”这一假设前提下进行。然而,现实情况是当供应链协同还未发生时,决策信息通常具有不完全性和不准确性,而且其演变态势具有不确定性^[11]。消费者对企业开发的创新产品偏好程度的未知性,再加上决策者本身的认知能力、情绪和经验等因素^[12],对决策方案的制定和选择都会产生影响,从而间接影响供应链合作方案的实施。文献[13]通过实验证实,在实际决策过程中,决策者表现出失望规避等非理性的行为特点,且以其期望效用最大化为决策目标,而不是以利润最大化为决策目标。这使得基于完全理性决策者的供应链协同创新研究模型与方法并不适用于指导表现出失望规避这一心理行为的供应链协同创新决策。少数学者开始关注失望规避因素对供应链决策行为的影响。文献[14]考虑决策者失望规避行为对供应链总体利润水平的影响,并制定了批发价格契约和价格补贴契约以获取供应链最大利润。文献[15]探讨了消费者对在线渠道的产品价值不确定的情况下所表现出的失望规避行为对线上销售者的定价、订购和快速反应决策的影响,认为消费者失望规避对卖家利润的影响取决于卖家的退货政策,特别是当失望厌恶和残值超过一定的阈值时,采用全额退款政策是有利可图的。文献[16]研究在全渠道环境下,消费者预期失望规避行为对有无库存约束的零售商最优定价决策的影响,并指出零售商制定不同渠道定价策略的阈值与消费者失望规避情绪相关。

基于上述分析,供应链产品协同创新问题已经受到国内外学者的广泛关注。现有研究主体多为制造商和供应商组成的二级供应链系统,未考虑包含零售商的三级供应链协同。实际上,零售作为将产品推广至消费者的最终企业活动,对供应链产品创新的效应具有不可忽视的影响。此外,现有考虑行为因素的供应链协同创新相关研究,主要从静态协调角度进行。事实上,企业的产品协同创新行为具有长期性、复杂性和动态性,且产品创新所创造的效应会因时空变化、技术发展等因素而逐渐衰减。因此,从动态优化视角考虑供应链产品协同问题更加符合现实情况。微分对策作为一种决策者在动态系统中实现最佳目标的研究理论,可用于探索供应链动态协调问题。少数学者从成本分担或者收益分配微观角度研究供应链协同^[17],但未将两者结合研究。

综上,不同于以往的二级供应链研究,本文以包含单个供应商、单制造商和单个零售商的创新产品

三级供应链为研究对象,并结合动态视角探索失望规避因素影响下的供应链协同产品创新决策问题,探讨供应链成员失望规避行为对其产品创新决策及供应链收益的作用机理,提出可以令供应链成员效益得到帕累托优化、供应链整体总收益上升的产品创新研发推广补贴契约,进一步研究得出合理收益配比下的协同行为调节机制. 研究结果将有助于加深对供应链成员产品研发创新行为的理解,为供应链协同发展模式带来更富洞见的理论认识,对推进供应链协同创新管理实践具有一定程度的参考价值.

1 问题描述与假设

1.1 问题描述

本文考虑以单个制造商企业为核心、单个供应商企业和单个零售商企业所构成的供应链体系. 为了提升上游供应商企业的产品研发创新和下游零售商企业产品推广创新积极性,制造商努力研发新产品的同时,还会给予其上下游企业一定程度上的研发创新和推广创新补贴. 在供应商和制造商努力研发过程中,产品创新知名度上升,消费者对于其好感增强从而购买意愿增强. 这种发生在供应链产品协同创新中,未来有望给企业带来超额利润的潜在经济价值,被称为“供应链产品创新研发商誉”(以下简称“研发商誉”). 在消费者产品创新偏好具有不确定性的情形下,研发商誉所能带来的效益同样具有不确定性,供应链成员均表现出失望规避的行为特征.

1.2 研究假设

为明确本文研究问题,作如下基本假设:

假设1 假设 t 时刻,供应商(S)和制造商(M)研发新产品的努力水平为 $E_S(t)$ 和 $E_M(t)$,研发成本函数是研发努力水平的凹函数,则供应商的研发成本为 $C_S(t) = \frac{\lambda_S}{2} E_S^2(t)$,制造商的研发成本为 $C_M(t) = \frac{\lambda_M}{2} E_M^2(t)$,其中 λ_S 和 λ_M 分别指供应商和制造商的研发成本系数. 与之相似,假设 t 时刻零售商(R)产品推广创新的努力水平为 $E_R(t)$,推广成本函数是产品推广创新的努力水平的凹函数,即 $C_R(t) = \frac{\lambda_R}{2} E_R^2(t)$,其中 λ_R 指零售商的推广成本系数. 假设制造商对供应商产品研发创新提供的补贴比例为 $\varphi_S(t)$,对零售商产品推广创新提供的补贴比例为 $\varphi_R(t)$,且补贴比例均不大于1.

假设2 假设供应链产品创新研发商誉的大小与供应商、制造商的产品创新研发努力程度成正比关系,且技术水平更新、企业之间的竞争等因素会造成研发商誉衰减. 令 $G(t)$ 表示供应链的产品创新

研发商誉,采用以下随机微分方程表示研发商誉 $G(t)$ 随时间的变化:

$$G'(t) = \mu_S E_S(t) + \mu_M E_M(t) - \theta G(t). \quad (1)$$

其中: $G(0) = G_0 \geq 0$, $\mu_S > 0$ 和 $\mu_M > 0$ 分别表示供应商产品创新研发努力水平、制造商产品创新研发努力水平对供应链体系中产品创新研发商誉的影响系数. $\theta > 0$ 表示产品创新研发商誉随时间 t 的衰减系数,如消费者对研发技术不了解、其他企业供应链的竞争等.

假设3 假设市场相对成熟稳定,协同产品创新供应链整体收益和零售商推广努力水平以及产品创新研发商誉正相关,则 t 时刻协同产品创新供应链的整体收益为

$$\pi(t) = x E_R(t) + \sigma G(t). \quad (2)$$

其中 x 、 σ 分别表示零售商推广努力水平以及产品创新研发商誉对总收益的影响率.

假设4 假设协同产品创新供应链总收益在供应链成员之间进行分配,供应商获得的收益比例为 β_S ,制造商获得的收益比例为 β_M ,零售商获得的收益比例为 β_R . 分配比例预先商定且这三者的收益比例之和为1. Π_S 、 Π_M 、 Π_R 为三者的预期收益,贴现率为 r ,均以找到各自利润最大化为目标. 供应商和零售商($i = S, R$)的收益函数为

$$\begin{aligned} \Pi_i &= \beta_i \pi(t) - (1 - \varphi_i(t)) C_i(t) = \\ & \beta_i (x E_R(t) + \sigma G(t)) - (1 - \varphi_i(t)) \frac{\lambda_i}{2} E_i^2(t). \end{aligned} \quad (3)$$

制造商(M)的收益函数为

$$\begin{aligned} \Pi_M &= \\ & \beta_M \pi(t) - C_M(t) - \varphi_S(t) C_S(t) - \varphi_R(t) C_R(t) = \\ & \beta_M (x E_R(t) + \sigma G(t)) - \frac{\lambda_M}{2} E_M^2(t) - \\ & \varphi_S(t) \frac{\lambda_S}{2} E_S^2(t) - \varphi_R(t) \frac{\lambda_R}{2} E_R^2(t). \end{aligned} \quad (4)$$

假设5 假设供应商、制造商和零售商在任何时刻均具有同样的折现系数 $r > 0$,且不存在不对称信息,供应链成员以谋求自身效益最大化为目的. 记 $U_i(\Pi_i(t))$ ($i = S, M, R$)为预期收益 Π_i 下供应链成员 i 的预期效用, J_i ($i = S, M, R$)为预期收益 Π_i 下供应链成员 i 的长期预期效用,有

$$\max J_i = \int_0^{\infty} e^{-rt} U_i(\Pi_i(t)) dt. \quad (5)$$

假设6 假设供应商、制造商和零售商在产品创新研发商誉效应不确定的情况下均呈现避免失望的行为特征. 实验研究已证实,个体在不确定情形

下,会将可能获得的预期结果与心里参考结果进行对比.若预期结果比心里参考结果好,则决策个体会感到愉悦;反之,则会感到失望.这种心理状态将对个体决策产生重要的影响,参考文献[18]的处理方式,将失望规避下的供应链成员效用刻画为

$$U_i = \begin{cases} \Pi_i - l_i(\Pi_i^0 - \Pi_i), & \Pi_i \leq \Pi_i^0; \\ \Pi_i + h_i(\Pi_i - \Pi_i^0), & \Pi_i > \Pi_i^0. \end{cases} \quad (6)$$

其中: U_i 是指决策者 i 的总效用, Π_i 是指决策者 i 预期的实际收益, Π_i^0 是决策者心里的参考收益, $h_i \geq 0$ 表示决策者的愉悦感知系数, $l_i \geq 0$ 表示决策者的失望感知系数.假设决策者的心里参考收益为随机收益函数 Π_i 的数学期望,即 $\Pi_i^0 = E(\Pi_i)$, $f(\sigma)$ 是 σ 的密度函数.供应商、零售商($i = S, R$)和制造商(M)的心里参考收益为

$$\Pi_i^0(\sigma) = E(\Pi_i(\sigma)) = \int_A^B \beta_i(xE_R + \sigma G)f(\sigma)d\sigma - \frac{\lambda_i}{2}(1 - \varphi_i)E_i^2, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Pi_M^0(\sigma) = E(\Pi_M(\sigma)) = & \int_A^B \beta_M(xE_R + \sigma G)f(\sigma)d\sigma - \\ & \frac{\lambda_S}{2}\varphi_S E_S^2 - \frac{\lambda_M}{2}E_M^2 - \frac{\lambda_R}{2}\varphi_R E_R^2. \end{aligned} \quad (8)$$

易知,存在 $\bar{\sigma} = E(\sigma) = \int_A^B \sigma f(\sigma)d\sigma$ 使得 $\Pi_i(\bar{\sigma}) = \Pi_i^0$ ($i = S, M, R$),基于失望理论,将失望规避决策者的效用函数描述为

$$U_i(\sigma) = \begin{cases} \Pi_i(\sigma) - l_i(\Pi_i^0 - \Pi_i(\sigma)), & \sigma \leq \bar{\sigma}; \\ \Pi_i(\sigma) + h_i(\Pi_i(\sigma) - \Pi_i^0), & \sigma > \bar{\sigma}. \end{cases} \quad (9)$$

定义1 失望规避决策者的期望效用函数可以等价表示为

$$\begin{aligned} E(U_i(\sigma)) = & E(\Pi_i(\sigma)) - \xi_i \int_A(\Pi_i^0 - \Pi_i(\sigma))f(\sigma)d\sigma. \end{aligned}$$

其中: $\xi_i = l_i - h_i$, $i = (S, M, R)$.

定义1中,当 $\xi_i = 0$ 时,表明决策者相对理性;当 $\xi_i > 0$ 时,表明决策者更容易受到负面影响带来的失望感知.本文考虑 $\xi_i > 0$ 的情形,失望规避系数越大,表示决策者的失望规避程度越大.

2 博弈模型构建与分析

2.1 Nash非合作博弈

Nash非合作博弈情形下,供应链三方的产品创新研发和推广行为是独立的,制造商对上下游企业不提供任何研发及推广补贴,即 $\varphi_S^*(t) = 0$, $\varphi_R^*(t) = 0$.各自的目标函数为

$$\begin{aligned} \max_{E_i \geq 0} J_i = & \int_0^\infty e^{-rt} \left[\beta_i(xE_R + \bar{\sigma}G) - \frac{\lambda_i}{2}E_i^2 - \right. \\ & \left. \beta_i \xi_i G \int_A^\sigma (\bar{\sigma} - \sigma)f(\sigma)d\sigma \right] dt. \end{aligned}$$

定理1 Nash非合作博弈下,协同产品创新供应链中供应商和制造商的最佳研发策略和零售商的最佳推广策略为

$$\begin{aligned} E_S^* &= \frac{\beta_S \mu_S (\bar{\sigma} - \xi_S F)}{\lambda_S (r + \theta)}, \\ E_M^* &= \frac{\beta_M \mu_M (\bar{\sigma} - \xi_M F)}{\lambda_M (r + \theta)}, \\ E_R^* &= \frac{\beta_R x}{\lambda_R}. \end{aligned}$$

Nash非合作博弈下,产品创新研发商誉最优轨迹为 $G^* = G_{RSS}^* + t(G_0 - G_{RSS}^*)e^{-\theta t}$,其中

$$\begin{aligned} G_{RSS}^* &= \frac{\mu_S E_S^* + \mu_M E_M^*}{\theta} = \\ & \frac{\beta_S \mu_S^2 (\bar{\sigma} - \xi_S F)}{\theta \lambda_S (r + \theta)} + \frac{\beta_M \mu_M^2 (\bar{\sigma} - \xi_M F)}{\theta \lambda_M (r + \theta)}. \end{aligned} \quad (10)$$

证明 假定供应商三方成员的最佳收益函数为 $V_i(G)$ ($i = S, M, R$),收益函数连续、有界且可微分,对所有研发商誉大于0均满足HJB方程式

$$\begin{aligned} rV_i(G) = & \max_{E_i \geq 0} \left\{ \beta_i(xE_R + \bar{\sigma}G) - \frac{\lambda_i}{2}E_i^2 - \right. \\ & \left. \beta_i \xi_i G \int_A^\sigma (\bar{\sigma} - \sigma)f(\sigma)d\sigma + \right. \\ & \left. V_i'(G)(\mu_S E_S + \mu_M E_M - \theta G) \right\}. \end{aligned} \quad (11)$$

为了使式(11)右边最大化,应分别令 E_i ($i = S, M, R$)的一阶偏导数为0,得

$$E_i = \frac{V_i' \mu_i}{\lambda_i}. \quad (12)$$

令 $F = \int_A^{\bar{\sigma}} (\bar{\sigma} - \sigma)f(\sigma)d\sigma$,将所求得的式(12)代入(11)得

$$\begin{aligned} rV_S(G) = & (\beta_S \bar{\sigma} - \theta V_S' - \beta_S \xi_S F)G + \\ & \frac{(V_S' \mu_S)^2}{2\lambda_S} + \frac{V_S' V_M' \mu_M^2}{\lambda_M} + \frac{\beta_S \beta_R x^2}{\lambda_R}. \end{aligned} \quad (13)$$

由式由(11)~(13)可知, $V_S(G)$ 收益函数是关于 G 的线性函数,即

$$V_S(G) = a_1 G + b_1. \quad (14)$$

其中 a_1 、 b_1 是未知常数,求导得 $V_S' = a_1$,代入式(14)得

$$\begin{aligned} r(a_1 G + b_1) = & (\beta_S \bar{\sigma} - \theta a_1 - \beta_S \xi_S F)G + \\ & \frac{(V_S' \mu_S)^2}{2\lambda_S} + \frac{V_S' V_M' \mu_M^2}{\lambda_M} + \frac{\beta_S \beta_R x^2}{\lambda_R}. \end{aligned} \quad (15)$$

为保证 $G \geq 0$ 成立,应使式(15)的一次项和常数项左右两边相等,求得

$$a_1 = \frac{\beta_S(\bar{\sigma} - \xi_S F)}{r + \theta}, \tag{16}$$

$$b_1 = \frac{[\beta_S \mu_S (\bar{\sigma} - \xi_S F)]^2}{2\lambda_S r (r + \theta)^2} + \frac{\beta_S \beta_R x^2}{\lambda_R r (r + \theta)^2} + \frac{\beta_S \beta_M \mu_M^2 (\bar{\sigma} - \xi_S F)(\bar{\sigma} - \xi_M F)}{\lambda_M r (r + \theta)^2}. \tag{17}$$

将式(16)和(17)代入(14),再将 V'_S 代入式(12)可得 E_S^* ,同理可证 E_M^* 和 E_R^* . □

推论1 存在阈值 $\bar{\xi} = \bar{\sigma}/F$,当 $\xi_i < \bar{\xi}$ ($i = S, M, R$)时, $V_i(G)$ 和 G 成正比关系,供应链成员才会进行产品创新合作研发和推广.

2.2 Stackelberg 博弈

Stackelberg 主从博弈情形下以制造商为首,供应商和零售商为追随者,制造商主动向供应商和零售商提供一定比例的研发和推广补贴. 博弈过程为制造商首先确定产品创新研发努力水平 E_M 和提供供应商研发补贴系数 φ_S ,分担零售商推广补贴系数 φ_R ,然后供应商确定产品创新研发努力水平 E_S ,零售商确定产品创新推广努力水平 E_R . 供应商、零售商 ($i = S, R$) 和制造商 (M) 的目标函数为

$$\begin{aligned} \max_{E_i \geq 0} J_i = & \int_0^\infty e^{-rt} \left[\beta_i(xE_R + \bar{\sigma}G) - \frac{\lambda_i}{2}(1 - \varphi_i)E_i^2 - \beta_i \xi_i G \int_A^{\bar{\sigma}} (\bar{\sigma} - \sigma)f(\sigma)d\sigma \right] dt, \\ \max_{E_M \geq 0} J_M = & \int_0^\infty e^{-rt} \left[\beta_M(xE_R + \bar{\sigma}G) - \frac{\lambda_M}{2}E_M^2 - \frac{\lambda_S}{2}\varphi_S E_S^2 - \frac{\lambda_R}{2}\varphi_R E_R^2 - \beta_M \xi_M G \int_A^{\bar{\sigma}} (\bar{\sigma} - \sigma)f(\sigma)d\sigma \right] dt. \end{aligned} \tag{18}$$

定理2 主从博弈下,最优策略为

$$\begin{aligned} E_S^{**} &= \frac{\mu_S[2\beta_M(\bar{\sigma} - \xi_M F) + \beta_S(\bar{\sigma} - \xi_S F)]}{2\lambda_S(r + \theta)}, \\ E_M^{**} &= \frac{\beta_M \mu_M (\bar{\sigma} - \xi_M F)}{\lambda_M(r + \theta)}, \\ E_R^{**} &= \frac{x(2\beta_M + \beta_R)}{2\lambda_R}, \\ \varphi_S^{**} &= \frac{2\beta_M(\bar{\sigma} - \xi_M F) - \beta_S(\bar{\sigma} - \xi_S F)}{2\beta_M(\bar{\sigma} - \xi_M F) + \beta_S(\bar{\sigma} - \xi_S F)}, \\ \varphi_R^{**} &= \frac{2\beta_M - \beta_R}{2\beta_M + \beta_R}. \end{aligned}$$

Stackelberg 下,产品创新研发商誉最优轨迹为

$$\begin{aligned} G^{**} &= G_{RSS}^{**} + (G_0 - G_{RSS}^{**})e^{-\theta t}, \text{ 其中} \\ G_{RSS}^{**} &= \frac{\mu_S^2[\beta_S(\bar{\sigma} - \xi_S F) + 2\beta_M(\bar{\sigma} - \xi_M F)]}{2\theta\lambda_S(r + \theta)} + \frac{\beta_M \mu_M^2 (\bar{\sigma} - \xi_M F)}{\theta\lambda_M(r + \theta)}. \end{aligned}$$

证明 主从博弈情形中,倒推归纳可以首先求解

得出追随者即供应商和零售商的最佳决策,然后求解领导者即制造商的最佳决策. 假设博弈中追随者的最佳收益函数是 $V_i(G)$ ($i = S, R$),且收益函数有界、连续且可微分,对所有创新研发商誉大于0均满足下列微分方程式:

$$\begin{aligned} rV_i(G) = \max_{E_i \geq 0} & \left\{ \beta_i(xE_i + \bar{\sigma}G) - \frac{\lambda_i}{2}(1 - \varphi_i)E_i^2 - \beta_i \xi_i G \int_A^{\bar{\sigma}} (\bar{\sigma} - \sigma)f(\sigma)d\sigma + \right. \\ & \left. V'_i(G)(\mu_S E_S + \mu_M E_M - \theta G) \right\}. \end{aligned} \tag{19}$$

令式(19)关于 E_i 一阶偏导数为0,得

$$E_S = \frac{V'_S \mu_S}{\lambda_S(1 - \varphi_S)}, \tag{20}$$

$$E_R = \frac{\beta_R x}{\lambda_R(1 - \varphi_R)}. \tag{21}$$

核心企业在做出决策之前能够精准判断供应商的产品创新研发努力水平 E_S 和零售商的新产品推广水平 E_R ,从而确定自己的研发努力程度 E_M 和补贴比例 φ_S, φ_R .

$$\begin{aligned} rV_M(G) = \max_{E_M \geq 0} & \left\{ \beta_M(xE_S + \bar{\sigma}G) - \frac{\lambda_M}{2}E_M^2 - \frac{\lambda_S}{2}\varphi_S E_S^2 - \frac{\lambda_R}{2}\varphi_R E_R^2 - \beta_M \xi_M G \int_A^{\bar{\sigma}} (\bar{\sigma} - \sigma)f(\sigma)d\sigma + \right. \\ & \left. V'_M(G)(\mu_S E_S + \mu_M E_M - \theta G) \right\}. \end{aligned} \tag{22}$$

将式(20)和(21)代入(22),再令式(22)关于 $E_M, \varphi_S, \varphi_R$ 的一阶偏导数均为0,得

$$E_M = \frac{\mu_M V'_M}{\lambda_M}. \tag{23}$$

$$\varphi_S = \begin{cases} \frac{2V'_M - V'_S}{2V'_M + V'_S}, & \frac{V'_M}{V'_S} > \frac{1}{2}; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{24}$$

$$\varphi_R = \begin{cases} \frac{2\beta_M - \beta_R}{2\beta_M + \beta_R}, & \frac{\beta_M}{\beta_R} > \frac{1}{2}; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{25}$$

令 $F = \int_A^{\bar{\sigma}} (\bar{\sigma} - \sigma)f(\sigma)d\sigma$,将所求得的 E_S, E_M, E_R, φ_S 和 φ_R 代入式(19)和(22),参照定理1证明思路,可得 E_i^{**} ($i = S, R$), φ_i^{**} ($i = S, R$). □

推论2 Stackelberg 博弈下,供应商作为接受补贴方,其失望规避系数越大,得到的补贴相对越多;制造商作为提供补贴方,其失望规避系数越大,提供的补贴相对越少.

推论3 Stackelberg 博弈下,接受补贴一方的供应链收益分配系数越大,得到来自补贴方提供的补贴比例越小;提供补贴一方的供应链收益分配系数越大,提供给上下游企业的补贴比例越大.

证明

$$\frac{\partial \varphi_S^{**}}{\partial \beta_S} = \frac{-4\beta_M(\bar{\sigma} - \xi_M F)(\bar{\sigma} - \xi_S F)}{[2\beta_M(\bar{\sigma} - \xi_M F) + \beta_S(\bar{\sigma} - \xi_S F)]^2} < 0,$$

$$\frac{\partial \varphi_S^{**}}{\partial \beta_M} = \frac{4\beta_S(\bar{\sigma} - \xi_M F)(\bar{\sigma} - \xi_S F)}{[2\beta_M(\bar{\sigma} - \xi_M F) + \beta_S(\bar{\sigma} - \xi_S F)]^2} > 0,$$

同理, $\frac{\partial \varphi_S^{**}}{\partial \beta_R} < 0, \frac{\partial \varphi_R^{**}}{\partial \beta_M} > 0$. \square

2.3 协同合作博弈

在协同合作博弈情形下,作为一个整体的供应链三方成员共同目的是产品创新供应链整体效益最大化.总体目标利润为

$$J = J_S + J_M + J_R = \int_0^\infty e^{-rt} \left[(xE_R(t) + \bar{\sigma}G(t)) - \frac{\lambda_S}{2} E_S^2 - \frac{\lambda_M}{2} E_M^2 - \frac{\lambda_R}{2} E_R^2 - (\beta_S \xi_S + \beta_M \xi_M + \beta_R \xi_R)G \int_A^{\bar{\sigma}} (\bar{\sigma} - \sigma) f(\sigma) d\sigma \right] dt. \quad (26)$$

定理3 协同合作下,最优策略分别为

$$E_S^{***} = \frac{\mu_S [\bar{\sigma} - (\beta_S \xi_S + \beta_M \xi_M + \beta_R \xi_R)F]}{\lambda_S(r + \theta)},$$

$$E_M^{***} = \frac{\mu_M [\bar{\sigma} - (\beta_S \xi_S + \beta_M \xi_M + \beta_R \xi_R)F]}{\lambda_M(r + \theta)},$$

$$E_R^{***} = \frac{x}{\lambda_R}.$$

协同合作博弈情形下,产品创新最优轨迹

$$G^{***} = G_{RSS}^{***} + (G_0 - G_{RSS}^{***})e^{-\theta t},$$

其中

$$G_{RSS}^{***} = \frac{\mu_S^2 [\bar{\sigma} - (\beta_S \xi_S + \beta_M \xi_M + \beta_R \xi_R)F]}{\theta \lambda_S(r + \theta)} + \frac{\mu_M^2 [\bar{\sigma} - (\beta_S \xi_S + \beta_M \xi_M + \beta_R \xi_R)F]}{\theta \lambda_M(r + \theta)}.$$

证明 假设供应链最佳总收益函数 $V(G)$ 连续、有界且可微,则 $G \geq 0$ 时满足 HJB 方程

$$rV(G) = \max_{E_S \geq 0, E_M \geq 0, E_R \geq 0} \left\{ (xE_R + \bar{\sigma}G) - \frac{\lambda_S}{2} E_S^2 - \frac{\lambda_M}{2} E_M^2 - \frac{\lambda_R}{2} E_R^2 + V'(G)(\mu_S E_S + \mu_M E_M - \theta G) - (\beta_S \xi_S + \beta_M \xi_M + \beta_R \xi_R)G \int_A^{\bar{\sigma}} (\bar{\sigma} - \sigma) f(\sigma) d\sigma \right\}. \quad (27)$$

令式(27)关于 E_S 、 E_M 和 E_R 的一阶偏导数为0,参照定理1证明过程,可解出 $E_i^{***}(i = S, M, R)$,定理3得证. \square

3 均衡结果比较分析

Nash非合作博弈下供应链成员($i = S, M, R$)的目标利润全局均衡解为

$$J_i^* = e^{-rt} V_i^*,$$

其中

$$V_S^* = \frac{\beta_S(\bar{\sigma} - \xi_S F)}{r + \theta} G^* + \frac{[\beta_S \mu_S(\bar{\sigma} - \xi_S F)]^2}{2\lambda_S r(r + \theta)^2} + \frac{\beta_S \beta_M \mu_M^2(\bar{\sigma} - \xi_S F)(\bar{\sigma} - \xi_M F)}{\lambda_M r(r + \theta)^2} + \frac{\beta_S \beta_R x^2}{\lambda_R r},$$

$$V_M^* = \frac{\beta_M(\bar{\sigma} - \xi_M F)}{r + \theta} G^* + \frac{[\mu_M \beta_M(\bar{\sigma} - \xi_M F)]^2}{2\lambda_M r(r + \theta)^2} + \frac{\beta_S \beta_M \mu_S^2(\bar{\sigma} - \xi_M F)(\bar{\sigma} - \xi_S F)}{\lambda_S r(r + \theta)^2} + \frac{\beta_R \beta_M x^2}{\lambda_R r},$$

$$V_R^* = \frac{\beta_R(\bar{\sigma} - \xi_R F)}{r + \theta} G^* + \frac{\beta_S \beta_R \mu_S^2(\bar{\sigma} - \xi_R F)(\bar{\sigma} - \xi_S F)}{\lambda_S r(r + \theta)^2} + \frac{\beta_S \beta_M \mu_M^2(\bar{\sigma} - \xi_R F)(\bar{\sigma} - \xi_M F)}{\lambda_M r(r + \theta)^2} + \frac{\beta_R^2 x^2}{2\lambda_R r}.$$

$$V_S^{**} = \frac{\beta_S \mu_S^2(\bar{\sigma} - \xi_S F)[\beta_S(\bar{\sigma} - \xi_S F) + 2\beta_M(\bar{\sigma} - \xi_M F)]}{4\lambda_S r(r + \theta)^2} + \frac{\beta_S \beta_M \mu_M^2(\bar{\sigma} - \xi_S F)(\bar{\sigma} - \xi_M F)}{\lambda_M r(r + \theta)^2} + \frac{\beta_S x^2(2\beta_M + \beta_R)}{2\lambda_R} + \frac{\beta_S(\bar{\sigma} - \xi_S F)}{r + \theta} G^{**},$$

主从博弈情形下供应链成员($i = S, M, R$)的目标利润全局均衡解为 $J_i^* = e^{-rt} V_i^*$,其中

$$V_S^{**} = \frac{\beta_S \mu_S^2(\bar{\sigma} - \xi_S F)[\beta_S(\bar{\sigma} - \xi_S F) + 2\beta_M(\bar{\sigma} - \xi_M F)]}{4\lambda_S r(r + \theta)^2} + \frac{\beta_S \beta_M \mu_M^2(\bar{\sigma} - \xi_S F)(\bar{\sigma} - \xi_M F)}{\lambda_M r(r + \theta)^2} + \frac{\beta_S x^2(2\beta_M + \beta_R)}{2\lambda_R} + \frac{\beta_S(\bar{\sigma} - \xi_S F)}{r + \theta} G^{**},$$

$$V_M^{**} = \frac{\beta_M(\bar{\sigma} - \xi_M F)}{r + \theta} G^{**} + \frac{x^2(2\beta_M + \beta_R)^2}{8\lambda_R r} + \frac{[\beta_M \mu_M(\bar{\sigma} - \xi_M F)]^2}{2\lambda_M r(r + \theta)^2} + \frac{\mu_S^2 [\beta_S(\bar{\sigma} - \xi_S F) + 2\beta_M(\bar{\sigma} - \xi_M F)]^2}{8\lambda_S r(r + \theta)^2},$$

$$V_R^{**} = \frac{\mu_S^2 \beta_R(\bar{\sigma} - \xi_R F)[\beta_S(\bar{\sigma} - \xi_S F) + 2\beta_M(\bar{\sigma} - \xi_M F)]}{2\lambda_S r(r + \theta)^2} + \frac{\beta_R(\bar{\sigma} - \xi_R F)}{r + \theta} G^{**} + \frac{\beta_R x^2(2\beta_M + \beta_R)}{4\lambda_R r} + \frac{\mu_M^2 \beta_R(\bar{\sigma} - \xi_R F)\beta_M(\bar{\sigma} - \xi_M F)}{\lambda_M r(r + \theta)^2}.$$

$$V_S^{***} = \frac{\beta_S \mu_S^2(\bar{\sigma} - \xi_S F)[\beta_S(\bar{\sigma} - \xi_S F) + 2\beta_M(\bar{\sigma} - \xi_M F)]}{4\lambda_S r(r + \theta)^2} + \frac{\beta_S \beta_M \mu_M^2(\bar{\sigma} - \xi_S F)(\bar{\sigma} - \xi_M F)}{\lambda_M r(r + \theta)^2} + \frac{\beta_S x^2(2\beta_M + \beta_R)}{2\lambda_R} + \frac{\beta_S(\bar{\sigma} - \xi_S F)}{r + \theta} G^{***},$$

$$V_M^{***} = \frac{\beta_M(\bar{\sigma} - \xi_M F)}{r + \theta} G^{***} + \frac{x^2(2\beta_M + \beta_R)^2}{8\lambda_R r} + \frac{[\beta_M \mu_M(\bar{\sigma} - \xi_M F)]^2}{2\lambda_M r(r + \theta)^2} + \frac{\mu_S^2 [\beta_S(\bar{\sigma} - \xi_S F) + 2\beta_M(\bar{\sigma} - \xi_M F)]^2}{8\lambda_S r(r + \theta)^2},$$

$$V_R^{***} = \frac{\mu_S^2 \beta_R(\bar{\sigma} - \xi_R F)[\beta_S(\bar{\sigma} - \xi_S F) + 2\beta_M(\bar{\sigma} - \xi_M F)]}{2\lambda_S r(r + \theta)^2} + \frac{\beta_R(\bar{\sigma} - \xi_R F)}{r + \theta} G^{***} + \frac{\beta_R x^2(2\beta_M + \beta_R)}{4\lambda_R r} + \frac{\mu_M^2 \beta_R(\bar{\sigma} - \xi_R F)\beta_M(\bar{\sigma} - \xi_M F)}{\lambda_M r(r + \theta)^2}.$$

$$V_S^{****} = \frac{\beta_S \mu_S^2(\bar{\sigma} - \xi_S F)[\beta_S(\bar{\sigma} - \xi_S F) + 2\beta_M(\bar{\sigma} - \xi_M F)]}{4\lambda_S r(r + \theta)^2} + \frac{\beta_S \beta_M \mu_M^2(\bar{\sigma} - \xi_S F)(\bar{\sigma} - \xi_M F)}{\lambda_M r(r + \theta)^2} + \frac{\beta_S x^2(2\beta_M + \beta_R)}{2\lambda_R} + \frac{\beta_S(\bar{\sigma} - \xi_S F)}{r + \theta} G^{****},$$

$$V_M^{****} = \frac{\beta_M(\bar{\sigma} - \xi_M F)}{r + \theta} G^{****} + \frac{x^2(2\beta_M + \beta_R)^2}{8\lambda_R r} + \frac{[\beta_M \mu_M(\bar{\sigma} - \xi_M F)]^2}{2\lambda_M r(r + \theta)^2} + \frac{\mu_S^2 [\beta_S(\bar{\sigma} - \xi_S F) + 2\beta_M(\bar{\sigma} - \xi_M F)]^2}{8\lambda_S r(r + \theta)^2},$$

$$V_R^{****} = \frac{\mu_S^2 \beta_R(\bar{\sigma} - \xi_R F)[\beta_S(\bar{\sigma} - \xi_S F) + 2\beta_M(\bar{\sigma} - \xi_M F)]}{2\lambda_S r(r + \theta)^2} + \frac{\beta_R(\bar{\sigma} - \xi_R F)}{r + \theta} G^{****} + \frac{\beta_R x^2(2\beta_M + \beta_R)}{4\lambda_R r} + \frac{\mu_M^2 \beta_R(\bar{\sigma} - \xi_R F)\beta_M(\bar{\sigma} - \xi_M F)}{\lambda_M r(r + \theta)^2}.$$

合作博弈情形下供应链成员($i = S, M, R$)的目标利润全局均衡解为

$$J_i^{***} = e^{-rt} \beta_i V^{***},$$

其中

$$V^{***} = \frac{\bar{\sigma} - (\beta_S \xi_S + \beta_M \xi_M + \beta_R \xi_R)F}{r + \theta} G^{***} + \frac{\{\mu_S [\bar{\sigma} - (\beta_S \xi_S + \beta_M \xi_M + \beta_R \xi_R)F]\}^2}{2r \lambda_S (r + \theta)^2} + \frac{\{\mu_M [\bar{\sigma} - (\beta_S \xi_S + \beta_M \xi_M + \beta_R \xi_R)F]\}^2}{2r \lambda_M (r + \theta)^2} + \frac{x^2}{2r \lambda_R}.$$

推论4 Nash非合作博弈和Stackelberg主从博弈下, 供应链三方的收益分配系数越大, 在产品创新研发和创新推广方面的努力水平越高; 协同合作博弈下, 供应链成员收益分配系数越大, 其产品创新研发努力水平越低, 推广的努力水平保持不变。

证明 因为

$$\frac{\partial E_S^*}{\partial \beta_S} = \frac{\mu_S(\bar{\sigma} - \xi_S F)}{\lambda_S(r + \theta)} > 0,$$

同理计算得 $\frac{\partial E_M^*}{\partial \beta_M} > 0, \frac{\partial E_R^*}{\partial \beta_R} > 0, \frac{\partial E_i^{**}}{\partial \beta_i} > 0 (i = S, M, R), \frac{\partial E_S^{***}}{\partial \beta_S} < 0, \frac{\partial E_M^{***}}{\partial \beta_M} < 0, \frac{\partial E_R^{***}}{\partial \beta_R} = 0. \square$

推论5 无论在何种博弈情形下, 供应商和制造商失望规避系数越大, 产品创新研发的努力水平越低, 零售商的推广努力水平与其失望规避系数无关。

推论6 协同合作博弈情形下供应链成员的产品创新研发或推广努力水平最高, 供应商创新产品研发努力水平和零售商创新产品推广努力水平在非协同合作博弈情形下最低, 制造商创新产品研发努力水平在主从博弈情形下和Nash非合作博弈情形下相等. 各自努力水平全局均衡解的大小比较如下:

$$\begin{aligned} E_S^{**} &> E_S^{***} > E_S^*, \\ E_M^{**} &> E_M^{***} = E_M^*, \\ E_R^{**} &> E_R^{***} > E_R^*. \end{aligned}$$

证明 计算得

$$E_S^{**} - E_S^* = \frac{\mu_S[2\beta_M(\bar{\sigma} - \xi_M F) - \beta_S(\bar{\sigma} - \xi_S F)]}{2\lambda_S(r + \theta)}.$$

由式(24)可知 $V'_M/V'_S > 1/2$, 则有 $2\beta_M(\bar{\sigma} - \xi_M F) > \beta_S(\bar{\sigma} - \xi_S F)$, 故 $E_S^{**} - E_S^* > 0$. 同理计算可得 $E_S^{***} - E_S^{**} > 0, E_M^{***} - E_M^* > 0, E_M^* = E_M^{**} < E_M^{***}, E_R^{**} - E_R^* > 0, E_R^{***} - E_R^{**} > 0. \square$

推论7 供应链产品创新研发商誉的最优轨迹在Nash非合作博弈下最差, 主从博弈下中等, 协同合作博弈下最优。

推论8 协同合作博弈情形下, 供应链的总收益最大, 达到系统帕累托最优状态. 供应链整体收益水平全局均衡解的大小比较如下:

$$\begin{aligned} V^{***} &> (V_S^* + V_M^* + V_R^*), \\ V^{***} &> (V_S^{**} + V_M^{**} + V_R^{**}). \end{aligned}$$

4 创新协同合作行为协调机制

由模型假设可知, 创新产品供应链总收益以 β_S, β_M 和 β_R 的分配系数在三方中分配, 协同合作博弈下三方的最佳收益函数依次为

$$V_S^{***} =$$

$$\begin{aligned} &\beta_S \frac{\bar{\sigma} - (\beta_S \xi_S + \beta_M \xi_M + \beta_R \xi_R)F}{r + \theta} G^{***} + \\ &\frac{\beta_S x^2}{2\lambda_R r} + \frac{\beta_S \mu_S^2 [\bar{\sigma} - (\beta_S \xi_S + \beta_M \xi_M + \beta_R \xi_R)F]^2}{2\lambda_S r (r + \theta)^2} + \\ &\frac{\beta_S \mu_M^2 [\bar{\sigma} - (\beta_S \xi_S + \beta_M \xi_M + \beta_R \xi_R)F]^2}{2\lambda_M r (r + \theta)^2}, \end{aligned}$$

$$V_M^{***} =$$

$$\begin{aligned} &\beta_M \frac{\bar{\sigma} - (\beta_S \xi_S + \beta_M \xi_M + \beta_R \xi_R)F}{r + \theta} G^{***} + \\ &\frac{\beta_M x^2}{2\lambda_R r} + \frac{\beta_M \mu_S^2 [\bar{\sigma} - (\beta_S \xi_S + \beta_M \xi_M + \beta_R \xi_R)F]^2}{2\lambda_S r (r + \theta)^2} + \\ &\frac{\beta_M \mu_M^2 [\bar{\sigma} - (\beta_S \xi_S + \beta_M \xi_M + \beta_R \xi_R)F]^2}{2\lambda_M r (r + \theta)^2}, \end{aligned}$$

$$V_R^{***} =$$

$$\begin{aligned} &\beta_R \frac{\bar{\sigma} - (\beta_S \xi_S + \beta_M \xi_M + \beta_R \xi_R)F}{r + \theta} G^{***} + \\ &\frac{\beta_R x^2}{2\lambda_R r} + \frac{\beta_R \mu_S^2 [\bar{\sigma} - (\beta_S \xi_S + \beta_M \xi_M + \beta_R \xi_R)F]^2}{2\lambda_S r (r + \theta)^2}. \end{aligned}$$

由推论8可知, 协同合作博弈下的产品创新供应链整体收益达到帕累托整体最优, 但供应链各方收益并不一定达到个体帕累托最优, 理性决策者不会加入供应链协作. 因此, 可以通过设定供应链收益分配范围, 使得协同合作博弈下个体和整体的收益水平均高于非合作博弈情形, 从而协调三方产品创新研发和推广合作行为. 由于

$$V_S^{**} - V_S^* =$$

$$\begin{aligned} &\frac{\beta_S(\bar{\sigma} - \xi_S F)}{r + \theta} (G^{**} - G^*) + \frac{\beta_S x^2 (2\beta_M - \beta_R)}{2\lambda_R r} + \\ &\frac{\beta_S \mu_S^2 (\bar{\sigma} - \xi_S F) [2\beta_M(\bar{\sigma} - \xi_M F) - \beta_S(\bar{\sigma} - \xi_S F)]}{4\lambda_S r (r + \theta)^2} + \\ &\frac{\beta_S \beta_M \mu_M^2 (\bar{\sigma} - \xi_S F) (\bar{\sigma} - \xi_M F) - \lambda_M r (r + \theta)^2}{\lambda_M r (r + \theta)^2} \times \end{aligned}$$

$$\beta_S \beta_M \mu_M^2 (\bar{\sigma} - \xi_S F) (\bar{\sigma} - \xi_M F) \lambda_M r (r + \theta)^2,$$

由式(24)、(25)和推论7可知 $2\beta_M(\bar{\sigma} - \xi_M F) > \beta_S(\bar{\sigma} - \xi_S F), 2\beta_M > \beta_R, G^{**} - G^* > 0$, 则有 $V_S^{**} > V_S^*$, 同理 $V_R^{**} > V_R^*$, 则为了实现供应链协同合作, 需要设置以下供应链契约

$$V_S^{***} - V_S^{**} > 0, V_M^{***} - V_M^{**} > 0, V_R^{***} - V_R^{**} > 0.$$

计算整理得以下约束条件:

$$\begin{cases} 2\beta_S > 2\beta_M > \beta_R, \\ \beta_S(\bar{\sigma} - \xi_S F) < 2\beta_M(\bar{\sigma} - \xi_M F), \\ 2\beta_M(\bar{\sigma} - \xi_M F) < 2\beta_R(\bar{\sigma} - \xi_R F) - \beta_S(\bar{\sigma} - \xi_S F), \\ 16\beta_M(\bar{\sigma} - \xi_M F)(\bar{\sigma} - \xi_R F) < 25\beta_S^2(\bar{\sigma} - \xi_S F)^2. \end{cases} \quad (28)$$

当式(28)成立时,协同合作博弈情形下不仅产品创新供应链整体收益达到最大化,供应链各方收益也达到了个体帕累托最优状态,从而有效协调了三方产品创新研发和推广合作行为.

5 算例分析

上述分析表明,不同的博弈情形中,供应商、制造商和零售商最佳创新研发和创新推广努力策略以及它们各自的最佳收益、供应链系统的整体收益状况取决于相关参数的设置. 如果参数赋值满足式(28)的供应链契约条件,则可以实现协同合作下个体帕累托最优. 若 $\xi_S = \xi_M = \xi_R = 1$, σ 服从 $U(0, 2)$ 的均匀分布, 则可以得出满足式(28)的收益分配系数解集,

如图1的阴影部分所示.

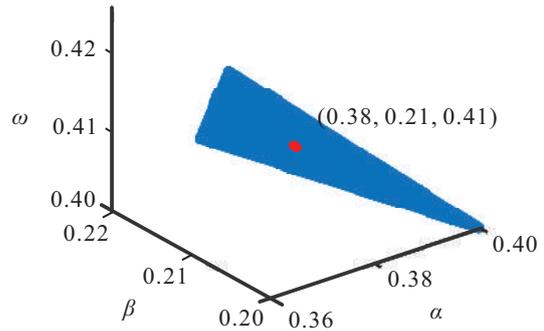


图1 部分系数赋值下的收益分配系数解集

在合理范围内对其他参数取值, 整理得表1, 并借助Matlab软件进行仿真分析.

表1 模型参数赋值表

参数名称	值
成本系数	$\lambda_S = 1, \lambda_M = 1, \lambda_R = 1$
努力程度对创新研发商誉影响系数	$\mu_S = 1, \mu_M = 2$
努力程度对总收益影响系数	$x = 2$
失望规避系数	$\xi_S = 1, \xi_M = 1, \xi_R = 1$
收益分配系数	$\beta_S = 0.38, \beta_M = 0.21, \beta_R = 0.41$
贴现因子	$r = 0.1$
创新研发商誉自然衰减系数	$\theta = 0.8$
创新研发商誉对总收益影响系数	σ 服从 $U(0, 2)$ 的均匀分布
初始创新研发商誉	$G(0) = 0$
时间	$t = 10$

由此解得 $E_S^* = 0.32, E_S^{**} = 0.33, E_S^{***} = 0.83, E_M^* = E_M^{**} = 0.35, E_M^{***} = 1.67, E_R^* = 0.82, E_R^{**} = 0.83, E_R^{***} = 2$. 可知供应链上的核心成员(M)在协同合作博弈情形下的产品创新研发努力水平最高, 在Nash非合作博弈情形和主从博弈两种情形下的产品创新研发努力水平相等, 供应链上的非核心成员(S, R)产品创新研发和推广努力水平在合作博弈下最高, 主从博弈下次之, Nash非合作博弈下最小.

图2显示了由供应链成员失望规避系数 $\mu_i (i = S, M)$ 引起的创新研发和推广补贴系数 $\varphi_i^{**} (i = S, R)$ 的变化情况, 可知越不害怕失望的供应链核心成员越愿意去提供产品创新研发补贴, 激励上游进行创新研发; 对于害怕失望的供应链非核心成员而言, 产品创新研发及推广补贴契约可以有效促进供应链上下游企业合作. 仿真结果验证了推论2和推论3.

由图3(a)、图3(b)和图3(c)可知: Nash非合作博弈和Stackelberg博弈下, 供应链成员的收益分配系数越大, 其产品创新研发和推广的努力水平越高; 协同合作博弈下, 供应链成员的收益分配系数越大, 其产品创新研发和推广的努力程度越低. 以制造商为例,

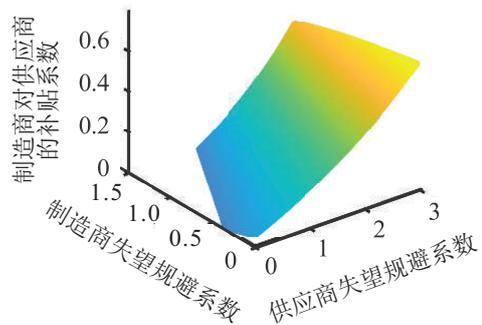


图2 失望规避系数对补贴系数的影响

图3(d)显示了无论在何种博弈情形下, 制造商的失望规避系数越大, 其创新产品研发努力水平越低, 从而导致制造商的目标利润减小. 如图3(e), 不考虑其他外界因素影响下, 产品创新研发商誉动态最优轨迹在协同合作博弈下最优, 主从博弈下次之, Nash非合作博弈下最小. 协同合作博弈情形下产品创新研发商誉明显高于Nash非合作博弈和Stackelberg主从博弈情形. 如图3(f), 仅考虑时间因素, 协同产品创新体系的整体收益最佳水平会随着时间的推移而不断增长, 并趋于恒定值. 协同合作博弈下的总效用现值

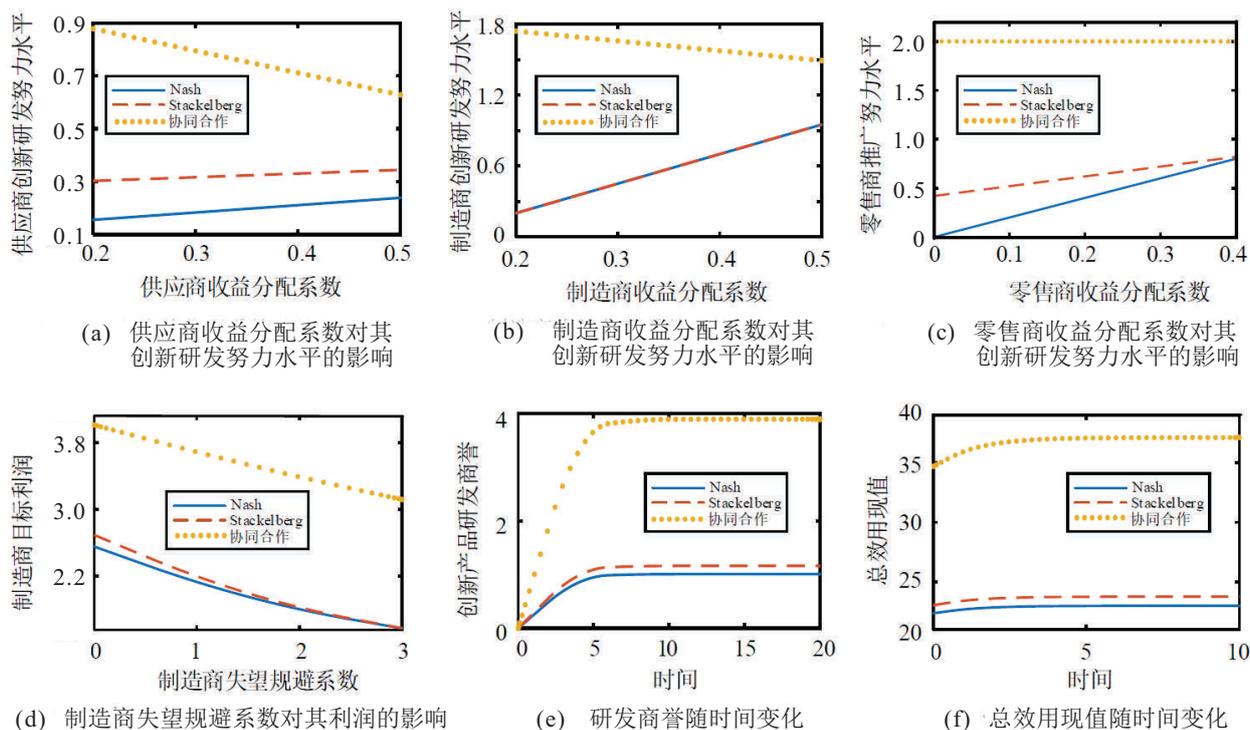


图3 算例分析仿真

远大于其余两种博弈情形,这表明收益分配约束范围合理,可以使供应链收益达到整体帕累托最优。而 Stackelberg 博弈情形下的效用现值高于 Nash 非合作博弈情形,这表明主从博弈下产品创新研发和推广补贴方案是有效的。

6 结论

针对目前市场上供应链协同创新体系中存在的三方协同产品创新和推广问题,本文运用微分博弈理论,研究 Nash 非合作博弈、Stackelberg 主从博弈和协同合作博弈情形下供应链成员的最优产品创新研发和推广努力决策,产品创新研发商誉最优轨迹以及各方目标收益。本文的研究结论可应用于企业供应链管理实践:

1) 聚焦影响供应链成员努力水平的关键因素。企业产品创新研发和推广成本系数、失望规避系数、收益分配比例、产品创新研发商誉衰减系数、努力行为对整体收益的影响系数是影响制造商和上下游供应链成员产品创新研发和推广行为的关键因素,合理考量这些因素是决策者撬动协同优势、凝聚创新合力的关键。企业的产品创新研发和推广努力水平会随这些影响系数的改变而发生波动,管理者可以采用针对性的措施以提高供应链成员产品创新研发和推广努力水平。

2) 对上下游企业给予适当程度的补贴。相较于产品创新研发和推广相互独立模式,当制造商为上

下游供应链成员提供产品创新研发和推广补贴时,能够有效提升三方的个体最佳收益及供应链整体收益。因此,产品创新研发和产品创新推广补贴作为一种帕累托改进办法,能够有效提升个体收益水平,还能提升整体收益水平。核心企业通过为上下游供应链成员分担产品创新研发和推广成本,可在产品创新研发和推广工作中使上下游供应链成员按照制造商的意图付出更多的努力,改善强度正好为核心企业对上下游供应链成员的成本补贴比例。

3) 降低失望规避对决策的影响。首先,企业自身应加强企业内部管理,通过优化决策者薪酬结构等方式抑制决策者失望规避行为;其次,企业在选择供应链合作伙伴时,可通过提前测量合作成员的失望规避程度,避免因合作成员失望规避程度较大而影响供应链整体收益。

4) 协同合作,共创收益。协同合作博弈情形下,供应链成员的整体收益达到最大化,所以合作作为理想的供应链协同方案可以发挥产品创新供应链的最大优势。创新产品协同模式应当以现实情况为基础,当满足某阈值时,合作行为才可能发生。

5) 合理设置供应链收益配比。尽管协同合作博弈情形下体系总体收益远远超过非协同合作情形,依然存在因收益分配不合理导致供应链成员在协同合作下的最佳收益低于非协同合作情形的风险,降低参与人合作的积极性。所以为实现供应链产品创新研

发和推广行为的协调发展,降低此类风险以达到个体和整体帕累托最优,应在合理取值范围内设置供应链成员的收益分配系数.

参考文献(References)

- [1] Zhou P, Xu H, Wang H W. Value of by-product synergy: A supply chain perspective[J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 285(3): 941-954.
- [2] Lv B, Qi X G. Research on partner combination selection of the supply chain collaborative product innovation based on product innovative resources[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 128: 245-253.
- [3] 刁心薇, 曾珍香, 孙丞. 混合碳政策下两产品供应链的协同研究[J]. *中国管理科学*, 2021, 29(2): 149-159.
(Diao X W, Zeng Z X, Sun C. Research on coordination of supply chain with two products based on mix carbon policy[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2021, 29(2): 149-159.)
- [4] 周品, 徐和, 陆芬. 存在议价能力和副产品协同生产的制造商最优产量决策[J]. *中国管理科学*, 2020, 28(7): 156-163.
(Zhou P, Xu H, Lu F. The optimal production decision with by-product synergy and bargaining[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2020, 28(7): 156-163.)
- [5] Romero-Hernandez O, Romero-Hernandez S, Shivaani M V. A supply chain selection method for early-stage companies based on an adapted quality function deployment optimization approach[J]. *Operations and Supply Chain Management: An International Journal*, 2021, 14(2): 133-147.
- [6] Manocha P, Srari J S. Exploring environmental supply chain innovation in M&A[J]. *Sustainability*, 2020, 12(23): 10105.
- [7] 贺金霞. 全渠道供应链协同要素关系模型实证研究[J]. *技术经济*, 2020, 39(9): 44-50.
(He J X. Empirical study on collaborative model of omni-channel supply chain[J]. *Journal of Technology Economics*, 2020, 39(9): 44-50.)
- [8] Li Y F, Wang B, Yang D. Research on supply chain coordination based on block chain technology and customer random demand[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2019, 2019: 1-10.
- [9] Jiang L, Guo Y, Su J F, et al. Sub-coordination in a competing supply chain with a 3PL provider[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 158148-158159.
- [10] 马德青, 胡劲松. 考虑延迟现象的质量改进投入和营销努力动态协同策略[J]. *运筹与管理*, 2021, 30(6): 181-190.
(Ma D Q, Hu J S. Dynamic quality improvement input and marketing effort coordination strategies considering delay phenomenon[J]. *Operations Research and Management Science*, 2021, 30(6): 181-190.)
- [11] Liu J G, Zhang X, Li J. Research on retailer's fairness preference mechanism and strategic behaviour under demand uncertainty[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2021, 41(17): 1794-1805.
- [12] Li J T, Liu P F. Modeling green supply chain games with governmental interventions and risk preferences under fuzzy uncertainties[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2022, 192: 182-200.
- [13] Bell D E. Disappointment in decision making under uncertainty[J]. *Operations Research*, 1985, 33(1): 1-27.
- [14] Quan J, Wang X F, Wang X J, et al. Performance optimization of supply chain based on cooperative contract with disappointment-aversion strategic consumers[J]. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2022, 34(2): 408-428.
- [15] Xu J, Duan Y R. Pricing, ordering, and quick response for online sellers in the presence of consumer disappointment aversion[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, 137: 101925.
- [16] Du S F, Wang L, Hu L. Omnichannel management with consumer disappointment aversion[J]. *International Journal of Production Economics*, 2019, 215: 84-101.
- [17] 关志民, 曲优, 赵莹. 考虑决策者失望规避的供应链协同绿色创新动态优化与协调研究[J]. *运筹与管理*, 2020, 29(5): 96-107.
(Guan Z M, Qu Y, Zhao Y. Dynamic optimization and coordination on joint green innovation in a supply chain considering disappointment aversion[J]. *Operations Research and Management Science*, 2020, 29(5): 96-107.)
- [18] Delquíe P, Cillo A. Expectations, disappointment, and rank-dependent probability weighting[J]. *Theory and Decision*, 2006, 60(2): 193-206.

作者简介

伊辉勇(1977—),男,教授,博士,从事企业管理决策、供应链管理研究, E-mail: yihuiyong1977@126.com;

唐玲(1995—),女,硕士生,从事企业管理决策、供应链管理研究, E-mail: 921651637@qq.com.