

控制与决策

Control and Decision

成本分担机制下考虑品牌商誉的三级绿色供应链微分博弈

刘丽, 韩同银, 金浩

引用本文:

刘丽, 韩同银, 金浩. 成本分担机制下考虑品牌商誉的三级绿色供应链微分博弈[J]. *控制与决策*, 2024, 39(2): 659–668.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0944>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

模糊环境下考虑零售商风险偏好的绿色供应链博弈模型

Modeling green supply chain games considering retailer's risk preference in fuzzy environment

控制与决策. 2021, 36(3): 711–723 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0646>

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>

考虑企业社会责任和公平偏好的绿色供应链决策

Green supply chain considering fairness preference and corporate social responsibility

控制与决策. 2021, 36(7): 1743–1753 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1102>

信息非对称下考虑制造商回收行为的闭环供应链协调

Coordination of closed supply chain under asymmetric information considering manufacturer's recycling behavior

控制与决策. 2021, 36(7): 1723–1731 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1657>

损失厌恶下考虑参照利润效应的供应链决策模型

Decision model of supply chain considering reference profit under loss aversion

控制与决策. 2020, 35(11): 2810–2816 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0094>

成本分担机制下考虑品牌商誉的三级绿色供应链微分博弈

刘丽, 韩同银[†], 金浩

(河北工业大学 经济管理学院, 天津 300401)

摘要: 考虑产品绿色度和品牌商誉的动态性, 引入价格加成系数刻画采购价格、批发价格和销售价格三者之间的关系, 采用微分博弈研究由供应商、制造商和零售商组成的三级绿色供应链的投资策略与协调问题. 探讨并对比分析集中决策模型、无成本分担契约的分散决策模型和有成本分担契约的分散决策模型的均衡结果, 设计双边成本分担契约对供应链进行协调. 研究表明: 产品绿色度的最优轨迹具有两种变化趋势, 由产品绿色度初始值和稳态值的大小关系决定; 品牌商誉的最优轨迹具有 3 种变化趋势, 由品牌商誉初始值和稳态值的大小关系决定; 集中决策模型最优, 有成本分担契约的分散决策模型对绿色供应链的帕累托改进有限, 而在一定条件下, 双边成本分担契约可以完全协调绿色供应链. 此外, 双边成本分担契约的成立条件和协调性与价格加成系数有关.

关键词: 绿色供应链; 产品绿色度; 品牌商誉; 成本分担机制; 微分博弈

中图分类号: F274

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0944

引用格式: 刘丽, 韩同银, 金浩. 成本分担机制下考虑品牌商誉的三级绿色供应链微分博弈[J]. 控制与决策, 2024, 39(2): 659-668.

Differential game of three-level green supply chain considering brand goodwill under cost sharing mechanism

LIU Li, HAN Tong-yin[†], JIN Hao

(School of Economics and Management, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: Considering the dynamic characteristics of product greenness and brand goodwill, price addition coefficient is introduced to describe the relationship among the purchase price, the wholesale price and the sales price, and the differential game is used to study the investment strategy and coordination of a three-level green supply chain composed of suppliers, manufacturers and retailers. The equilibrium results of the centralized decision model, the decentralized decision model without cost sharing contract and the decentralized decision model with cost sharing contract are compared and analyzed, and bilateral cost sharing contract is designed to coordinate the supply chain. The results show that: The optimal trajectory of product greenness has two variation trends, which are determined by the relationship between the initial value and the steady value of product greenness; The optimal trajectory of brand goodwill has three trends, which are determined by the relationship between the initial value and the steady value of brand goodwill; The centralized decision model is the best, and the decentralized decision model with cost sharing contract has limited Pareto improvement on the green supply chain, while the bilateral cost sharing contract can fully coordinate the green supply chain under certain conditions. In addition, the conditions and compatibility of the bilateral cost sharing contract are related to the price addition coefficients.

Keywords: green supply chain; product greenness; brand goodwill; cost sharing mechanism; differential game

0 引言

在世界各国的工业化进程中, 经济的快速增长往往伴随着大量的石化能源被消耗, 导致严重的生态环境问题^[1]. 目前, 我国已成为世界上最大的能源消费国, 也是全球最大的碳排放国. 在 2020 年, 我国碳排

放量达到 98.99 亿吨, 同比增长 0.6%, 占全球碳排放量的比重也提升至 30.7%. 对此, 我国实施了一系列绿色发展政策, 鼓励绿色技术创新, 降低污染排放, 增强绿色消费, 重视绿色供应链的发展. 例如, 2017 年, 我国首次制定并发布了绿色供应链相关标准《绿色

收稿日期: 2022-05-27; 录用日期: 2022-10-10.

基金项目: 国家社会科学基金青年项目(20CRK010); 国家社会科学基金项目(19BGL054).

责任编辑: 王光臣.

[†]通讯作者. E-mail: 15511336888@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.

制造——制造企业绿色供应链管理导则》；2021年，国务院印发了《加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》。研究表明，越来越多的消费者倾向于购买绿色产品^[2]。然而，绿色消费需求端的扩大无疑会促成新的消费领域产业链和供应链的更新迭代。在工业界，已有诸多企业开始实施绿色供应链管理。例如，工业和信息化部公布的2021年度绿色制造名单包括662家绿色工厂和107家绿色供应链管理企业。事实上，在绿色供应链管理中，供应链上下游企业需要在绿色采购、绿色研发和生产、绿色营销等环节付出绿色努力^[3-4]。因此，研究绿色供应链上下游企业的投资策略及协调具有重要的实践意义。

基于静态框架探讨绿色供应链管理的相关文献众多，学者们主要从政府补贴、供应链渠道、行为因素、成员合作、供应链协调等方面展开研究。例如：曹裕等^[5]研究了不同政府补贴策略下制造商和零售商组成的二级绿色供应链的绿色努力决策；Meng等^[6]研究了政府补贴下双渠道绿色供应链的定价决策；Wang等^[7]研究了制造商公平关切行为对绿色供应链决策的影响；林志炳^[8]和Khosroshahi等^[9]研究了成员CSR行为对绿色供应链的定价和绿色度决策的影响；夏西强等^[4]研究了零部件供应商和生产商之间的研发模式与协调机制；周艳菊等^[10]研究了制造商和零售商的联合研发与协调契约。

一些学者将研究拓展至由供应商、制造商和零售商组成的三级供应链。例如，曹裕等^[11]发现三级供应链在无政府激励情形下主动实施绿色供应链管理是具有可行性的；Zhang等^[12]发现三级绿色供应链在合作博弈情形下最优，并且设计了收益共享契约、夏普利值收益分配和非对称下纳什谈判3种协调机制；刘俊华等^[13]在碳交易背景下，研究了供应链上下游企业的联合减排与销售努力决策，以及成本分担契约选择问题。然而，以上研究均忽略了企业生产运营的长期性和企业绿色投资的持续性。

为了更加贴合实际，还有一些学者基于动态框架探究了绿色供应链管理相关问题。例如：考虑产品绿色度的动态性，朱桂菊等^[14]基于微分博弈研究了供应商与制造商的生态研发策略，并且设计了利润协调契约；李娜等^[15]基于微分博弈探讨了制造商和供应商的利他偏好行为对产品绿色度和供应链绩效的影响；Liu等^[16]基于微分博弈探讨了不同权力结构下收益分享契约和成本分担契约对产品绿色度的提升作用；进一步，向小东等^[17]、姜跃等^[18]将产品减排量作为状态变量，基于微分博弈研究了三级供应链的合作

减排和宣传促销策略。

事实上，品牌商誉同样具有动态性，是影响消费者需求的重要因素之一。Nerlove等^[19]提出广告投资可以视为一项特定资产的投资，即品牌商誉的积累；Pnevmatikos等^[20]考虑消费者需求受价格和品牌商誉的影响，研究发现零售商对品牌商誉的广告投资不仅能够提高供应链绩效，还能增加消费者剩余；王一雷等^[21]考虑品牌商誉受碳减排水平和低碳宣传水平的共同影响，基于微分博弈研究了制造商的碳减排水平和零售商的低碳宣传水平；于荣等^[22]考虑食品绿色度和品牌商誉的动态性，基于微分博弈研究了绿色食品供应链的最优策略及利润。

合作是绿色供应链管理的基础。在学术界，成本分担契约常用于解决供应链协调问题，是供应链企业紧密合作的一种有效工具^[23]。例如：Ghosh等^[24]提出的成本分担契约能够提高产品绿色度和供应链绩效；徐春秋等^[25]研究发现，在一定条件下，成本分担契约可以实现低碳供应链整体及成员利润的帕累托改进；许格妮等^[26]在链-链竞争环境下，研究了竞争性供应链的绿色成本分担策略选择。

综上所述，绿色供应链管理的相关研究大多是基于静态环境，少量文献研究了动态环境下两级绿色供应链的优化策略。仅有少数文献基于动态环境研究了由供应商、制造商和零售商组成的三级绿色供应链，但未考虑品牌商誉和供应链协调。因此，本文基于微分博弈探讨由供应商、制造商和零售商组成的三级绿色供应链的投资策略与协调问题。与现有研究相比，本文的创新点在于：1) 引入品牌商誉，以产品绿色度和品牌商誉为状态变量，研究三级绿色供应链的投资策略；2) 设计双边成本分担契约以协调三级绿色供应链；3) 探讨产品绿色度和品牌商誉的变化轨迹；4) 利用价格加成系数刻画采购价格、批发价格与销售价格之间的关系，并分析价格加成系数对双边成本分担契约协调性的影响。

1 问题描述与基本假设

1.1 问题描述

本文以单个供应商 S 、单个制造商 M 和单个零售商 R 组成的三级绿色供应链为研究对象，如图1所示。其中：供应商负责生产绿色零部件并提供给制造商，制造商采用绿色零部件加工生产绿色产品并批发给零售商，最终零售商将绿色产品销售给消费者。在实际购买过程中，消费者的购买行为受销售价格、产品绿色度和品牌商誉等因素的共同影响。

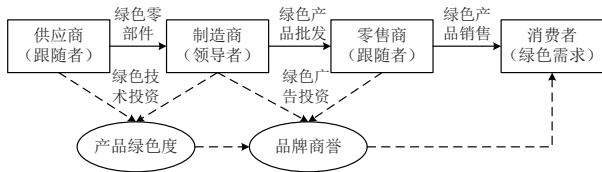


图1 三级绿色供应链结构

1.2 基本假设

本文的基本假设如下。

假设1 借鉴常用成本加成定价法^[17], 本文假设 $p_S(t) = \Delta_1 w(t)$, $p(t) = \Delta_2 w(t)$, $0 < \Delta_1 < 1$, $\Delta_2 > 1$. 其中: $p_S(t)$ 表示 t 时刻绿色零部件的采购价格, $w(t)$ 表示 t 时刻绿色产品的批发价格, $p(t)$ 表示 t 时刻绿色产品的销售价格, Δ_1 表示采购环节的价格加成系数, Δ_2 表示销售环节的价格加成系数。

假设2 假设 t 时刻供应商和制造商的绿色技术投资水平分别为 $Z_S(t)$ 和 $Z_M(t)$, 制造商和零售商的绿色广告投资水平分别为 $A_M(t)$ 和 $A_R(t)$. 供应商和制造商的绿色技术投资成本分别为 $k_S Z_S^2(t)/2$ 和 $k_M Z_M^2(t)/2$, 制造商和零售商的绿色广告投资成本分别为 $h_M A_M^2(t)/2$ 和 $h_R A_R^2(t)/2$ ^[10,22]. 其中: $k_S > 0$ 和 $k_M > 0$ 分别表示供应商和制造商的绿色技术投资成本系数, $h_M > 0$ 和 $h_R > 0$ 分别表示制造商和零售商的绿色广告投资成本系数。

假设3 制造企业增加绿色技术投资, 可以正向作用于产品绿色度; 然而随着绿色技术发展, 绿色标准提高, 以及已有投资设备的老化和落后, 产品绿色度存在自然衰减现象^[16]. 因此, 假设产品绿色度受供应商绿色技术投资水平、制造商绿色技术投资水平和自然衰减的共同影响, 其动态变化过程表示为

$$\dot{g}(t) = \alpha_S Z_S(t) + \alpha_M Z_M(t) - \delta g(t). \quad (1)$$

其中: $g(t)$ 表示 t 时刻绿色产品的绿色度, $g(0) = g_0$ 表示产品绿色度的初始值; $\alpha_S > 0$ 和 $\alpha_M > 0$ 分别表示供应商和制造商的绿色技术投资水平对产品绿色度的影响系数; $\delta > 0$ 表示产品绿色度的衰减系数。

假设4 绿色产品的品牌商誉受产品绿色度和绿色广告投资水平的正向影响, 但也随着消费者遗忘或转移等而存在自然衰减现象^[21-22]. 因此, 假设品牌商誉的动态变化过程可以表示为

$$\dot{G}(t) = \phi_M A_M(t) + \phi_R A_R(t) + \gamma g(t) - \varepsilon G(t). \quad (2)$$

其中: $G(t)$ 表示 t 时刻绿色产品的品牌商誉, $G(0) = G_0$ 表示品牌商誉的初始值; $\phi_M > 0$ 和 $\phi_R > 0$ 分别表示制造商的绿色广告投资水平和零售商的绿色广告投资水平对品牌商誉的影响系数; $\gamma > 0$ 表示产品绿色度对品牌商誉的影响系数; $\varepsilon > 0$ 表示品牌商誉

的衰减系数。

假设5 El Ouardighi^[27] 指出市场需求受价格因素和非价格因素的影响, 可以采用分离相乘的形式进行表达. 在借鉴文献^[14, 27]的基础上, 本文假设绿色产品的市场需求受销售价格和品牌商誉的共同影响, 并将绿色产品的市场需求函数刻画为

$$D(t) = (D_0 - \beta p(t))\theta G(t). \quad (3)$$

其中: $D(t)$ 表示 t 时刻绿色产品的市场需求, D_0 表示潜在市场需求, $\beta > 0$ 表示需求价格弹性系数, $\theta > 0$ 表示消费者的绿色品牌偏好系数. 另外, 为保证绿色产品需求不为负值, 不妨假设 $0 < p(t) < D_0/\beta$.

基于上述假设, 在整个运营期间内, 供应商、制造商和零售商的目标泛函分别为

$$J_S = \int_0^\infty e^{-\rho t} [\Delta_1 w(t)(D_0 - \beta \Delta_2 w(t))\theta G(t) - k_S Z_S^2(t)/2] dt, \quad (4)$$

$$J_M = \int_0^\infty e^{-\rho t} [w(t)(1 - \Delta_1)(D_0 - \beta \Delta_2 w(t))\theta G(t) - k_M Z_M^2(t)/2 - h_M A_M^2(t)/2] dt, \quad (5)$$

$$J_R = \int_0^\infty e^{-\rho t} [w(t)(\Delta_2 - 1)(D_0 - \beta \Delta_2 w(t))\theta G(t) - h_R A_R^2(t)/2] dt. \quad (6)$$

为方便书写, 模型部分将 t 省略。

2 模型构建与求解

2.1 集中决策模型(C模型)

在集中决策模型中, 供应商、制造商和零售商作为一个整体, 以绿色供应链系统的利润最大化为目标, 共同决策批发价格 w 、供应商的绿色技术投资水平 Z_S 、制造商的绿色技术投资水平 Z_M 和绿色广告投资水平 A_M 以及零售商的绿色广告投资水平 A_R . 此时, 绿色供应链系统的决策目标函数为

$$\max_{w, Z_S, Z_M, A_M, A_R} J_{SC} = \int_0^\infty e^{-\rho t} [\Delta_2 w(D_0 - \beta \Delta_2 w)\theta G - k_S Z_S^2/2 - k_M Z_M^2/2 - h_M A_M^2/2 - h_R A_R^2/2] dt. \quad (7)$$

命题1 在C模型中, 有:

1) 供应商的最优绿色技术投资水平为

$$Z_S^{C*} = \frac{\gamma \theta D_0^2 \alpha_S}{4\beta k_S (\delta + \rho)(\varepsilon + \rho)};$$

产品的最优批发价格为

$$w^{C*} = \frac{D_0}{2\beta \Delta_2};$$

制造商的最优绿色技术投资水平和绿色广告投资水平分别为

$$Z_M^{C*} = \frac{\gamma\theta D_0^2 \alpha_M}{4\beta k_M(\delta + \rho)(\varepsilon + \rho)},$$

$$A_M^{C*} = \frac{\theta D_0^2 \phi_M}{4\beta h_M(\varepsilon + \rho)};$$

零售商的最优绿色广告投资水平为

$$A_R^{C*} = \frac{\theta D_0^2 \phi_R}{4\beta h_R(\varepsilon + \rho)}.$$

2) 产品绿色度的最优轨迹为

$$g^{C*} = g_\infty^{C*} + (g_0 - g_\infty^{C*})e^{-\delta t},$$

其中

$$g_\infty^{C*} = \frac{\gamma\theta D_0^2(k_M\alpha_S^2 + k_S\alpha_M^2)}{4\beta\delta(\delta + \rho)(\varepsilon + \rho)k_Mk_S}$$

为C模型下产品绿色度的稳态值.

3) 品牌商誉的最优轨迹为

$$G^{C*} = \left[G_0 - G_\infty^{C*} - \frac{\gamma(g_0 - g_\infty^{C*})}{\varepsilon - \delta} \right] e^{-\varepsilon t} + \frac{\gamma(g_0 - g_\infty^{C*})}{\varepsilon - \delta} e^{-\delta t} + G_\infty^{C*},$$

其中

$$G_\infty^{C*} = \frac{\theta D_0^2(h_R\phi_M^2 + h_M\phi_R^2)}{4\beta\varepsilon(\varepsilon + \rho)h_Mh_R} + \frac{\gamma g_\infty^{C*}}{\varepsilon}$$

为C模型下品牌商誉的稳态值.

4) 绿色供应链系统的利润最优值函数为

$$V_{SC}^{C*} = a_1^{C*} g^{C*} + a_2^{C*} G^{C*} + a_3^{C*}.$$

推论1 Z_S^{C*} 、 Z_M^{C*} 、 A_M^{C*} 、 A_R^{C*} 与相关的主要参数有如下关系:

$$\frac{\partial Z_S^{C*}}{\partial \alpha_S} > 0, \frac{\partial Z_S^{C*}}{\partial \gamma} > 0, \frac{\partial Z_S^{C*}}{\partial \theta} > 0;$$

$$\frac{\partial Z_M^{C*}}{\partial \alpha_M} > 0, \frac{\partial Z_M^{C*}}{\partial \gamma} > 0, \frac{\partial Z_M^{C*}}{\partial \theta} > 0;$$

$$\frac{\partial A_M^{C*}}{\partial \phi_M} > 0, \frac{\partial A_M^{C*}}{\partial \theta} > 0;$$

$$\frac{\partial A_R^{C*}}{\partial \phi_R} > 0, \frac{\partial A_R^{C*}}{\partial \theta} > 0.$$

从推论1可以看出:当参数 $\alpha_S(\alpha_M)$ 较大时,即供应商(制造商)的绿色技术投资水平对产品绿色度的贡献较大时,可以刺激决策者增加绿色技术投资,从而得到更高的产品绿色度;当参数 γ 较大时,即产品绿色度对品牌商誉的贡献较大时,会激励决策者更多地关注产品本身,通过增加绿色技术投资来提高产品绿色度,进而提升品牌商誉;当参数 $\phi_M(\phi_R)$ 较大时,即制造商(零售商)的广告投资水平对品牌商誉的贡献较大时,会刺激决策者投入更多的广告投资,进而获得更高的品牌商誉;较大的参数 θ 意味着品牌商誉对市场需求具有较大的影响力,即消费者的绿色品牌

偏好较强时,决策者为了满足消费者对绿色产品的青睐,会增加绿色技术投资和广告投资.

2.2 无成本分担契约的决策模型(ND模型)

在无成本分担契约的分散决策模型中,制造商是领导者,首先决策批发价格 w 、绿色技术投资水平 Z_M 和绿色广告投资水平 A_M ;而供应商和零售商是跟随者(二者进行Nash博弈),分别决策绿色技术水平 Z_S 和绿色广告投资水平 A_R .因此,供应商、制造商和零售商的决策目标函数分别为

$$\max_{Z_S} J_S = \int_0^\infty e^{-\rho t} [\Delta_1 w(D_0 - \beta \Delta_2 w)\theta G - k_S Z_S^2/2] dt, \tag{8}$$

$$\max_{w, Z_M, A_M} J_M = \int_0^\infty e^{-\rho t} [(w - \Delta_1 w)(D_0 - \beta \Delta_2 w)\theta G - k_M Z_M^2/2 - h_M A_M^2/2] dt, \tag{9}$$

$$\max_{A_R} J_R = \int_0^\infty e^{-\rho t} [(\Delta_2 w - w)(D_0 - \beta \Delta_2 w)\theta G - h_R A_R^2/2] dt. \tag{10}$$

命题2 在ND模型中,有:

1) 供应商的最优绿色技术投资水平为

$$Z_S^{ND*} = \frac{\gamma\theta D_0^2 \alpha_S \Delta_1}{4\beta(\delta + \rho)(\varepsilon + \rho)k_S \Delta_2};$$

绿色产品的最优批发价格为

$$w^{ND*} = \frac{D_0}{2\beta \Delta_2};$$

制造商的最优绿色技术投资水平为

$$Z_M^{ND*} = \frac{\gamma\theta D_0^2 \alpha_M (1 - \Delta_1)}{4\beta(\delta + \rho)(\varepsilon + \rho)k_M \Delta_2};$$

制造商和零售商的最优绿色广告投资水平分别为

$$A_M^{ND*} = \frac{\theta D_0^2 \phi_M (1 - \Delta_1)}{4\beta(\varepsilon + \rho)h_M \Delta_2},$$

$$A_R^{ND*} = \frac{\theta D_0^2 \phi_R (\Delta_2 - 1)}{4\beta(\varepsilon + \rho)h_R \Delta_2}.$$

2) 产品绿色度的最优轨迹为

$$g^{ND*} = g_\infty^{ND*} + (g_0 - g_\infty^{ND*})e^{-\delta t},$$

其中

$$g_\infty^{ND*} = \frac{\gamma\theta D_0^2 [k_M \alpha_S^2 \Delta_1 + k_S \alpha_M^2 (1 - \Delta_1)]}{4\beta\delta(\delta + \rho)(\varepsilon + \rho)k_M k_S \Delta_2}$$

为ND模型下产品绿色度的稳态值.

3) 品牌商誉的最优轨迹为

$$G^{ND*} = \left[G_0 - G_\infty^{ND*} - \frac{\gamma(g_0 - g_\infty^{ND*})}{\varepsilon - \delta} \right] e^{-\varepsilon t} + \frac{\gamma(g_0 - g_\infty^{ND*})}{\varepsilon - \delta} e^{-\delta t} + G_\infty^{ND*},$$

其中

$$G_{\infty}^{ND*} = \frac{\theta D_0^2 [h_R(1 - \Delta_1)\phi_M^2 + h_M(\Delta_2 - 1)\phi_R^2]}{4\beta\varepsilon(\varepsilon + \rho)h_M h_R \Delta_2} + \frac{\gamma g_{\infty}^{ND*}}{\varepsilon}$$

为ND模型下品牌商誉的稳态值。

4) 供应商、制造商、零售商和绿色供应链系统的利润最优值函数分别为

$$\begin{aligned} V_S^{ND*} &= b_1^{ND*} g^{ND*} + b_2^{ND*} G^{ND*} + b_3^{ND*}, \\ V_M^{ND*} &= b_4^{ND*} g^{ND*} + b_5^{ND*} G^{ND*} + b_6^{ND*}, \\ V_R^{ND*} &= b_7^{ND*} g^{ND*} + b_8^{ND*} G^{ND*} + b_9^{ND*}, \\ V_{SC}^{ND*} &= V_S^{ND*} + V_M^{ND*} + V_R^{ND*}. \end{aligned}$$

推论2 Z_S^{ND*} 、 Z_M^{ND*} 、 A_M^{ND*} 和 A_R^{ND*} 与重要参数 Δ_1 和 Δ_2 具有如下关系:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Z_S^{ND*}}{\partial \Delta_1} &> 0, \quad \frac{\partial Z_S^{ND*}}{\partial \Delta_2} < 0; \\ \frac{\partial Z_M^{ND*}}{\partial \Delta_1} &< 0, \quad \frac{\partial Z_M^{ND*}}{\partial \Delta_2} < 0; \\ \frac{\partial A_M^{ND*}}{\partial \Delta_1} &< 0, \quad \frac{\partial A_M^{ND*}}{\partial \Delta_2} < 0; \\ \frac{\partial A_R^{ND*}}{\partial \Delta_1} &= 0, \quad \frac{\partial A_R^{ND*}}{\partial \Delta_2} > 0. \end{aligned}$$

推论2表明:供应商的绿色技术投资水平与 Δ_1 正相关,与 Δ_2 负相关;制造商的绿色技术投资水平和绿色广告投资水平与 Δ_1 和 Δ_2 均负相关;零售商绿色广告投资水平与 Δ_1 无关,与 Δ_2 正相关.这是因为,在批发价格一定的情况下, Δ_1 越大意味着绿色零部件的采购价格越高, Δ_2 越大意味着绿色产品的销售价格越高.供应链上游绿色零部件的采购价格增加,虽然可以刺激供应商增加绿色技术投资,但会导致制造商减少绿色技术投资和绿色广告投资.供应链下游绿色产品的销售价格增加,可以刺激零售商增加绿色广告投资,然而过高的销售价格会影响绿色产品的推广,进而打击上游供应商绿色技术投资的积极性,也会导致制造商减少绿色技术投资和绿色广告投资.因此,为了绿色供应链的稳定发展,供应链成员在中间环节需要谨慎、合理地加价。

2.3 有成本分担契约的决策模型(YD模型)

在有成本分担契约的分散决策模型中,制造商作为领导者,为了提高产品绿色度和品牌商誉,分别向上游供应商和下游零售商提供绿色投资激励.具体而言,制造商分担上游供应商一定比例(记为 μ_M)的绿色技术投资成本,并且分担下游零售商一定比例(记为 η_M)的绿色广告投资成本.决策顺序:首先,制造商决定其分担供应商绿色技术投资成本的比例 μ_M 和分担零售商绿色广告投资成本的比例 η_M ,以及

批发价格 w 、绿色技术投资水平 Z_M 和绿色广告投资水平 A_M ;然后,供应商决定绿色技术投资水平 Z_S ,同时零售商决定绿色广告投资水平 A_R .此时,供应商、制造商和零售商的决策目标函数分别为

$$\max_{Z_S} J_S = \int_0^{\infty} e^{-\rho t} [\Delta_1 w (D_0 - \beta \Delta_2 w) \theta G - (1 - \mu_M) k_S Z_S^2 / 2] dt, \tag{11}$$

$$\begin{aligned} \max_{w, Z_M, A_M, \mu_M, \eta_M} J_M &= \\ \int_0^{\infty} e^{-\rho t} [(w - \Delta_1 w) (D_0 - \beta \Delta_2 w) \theta G - & \\ k_M Z_M^2 / 2 - h_M A_M^2 / 2 - & \\ \mu_M k_S Z_S^2 / 2 - \eta_M h_R A_R^2 / 2] dt, & \tag{12} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \max_{A_R} J_R &= \\ \int_0^{\infty} e^{-\rho t} [(\Delta_2 w - w) (D_0 - \beta \Delta_2 w) \theta G - & \\ (1 - \eta_M) h_R A_R^2 / 2] dt. & \tag{13} \end{aligned}$$

命题3 在YD模型中,有:

1) 供应商的最优绿色技术投资水平为

$$Z_S^{YD*} = \frac{\gamma \theta D_0^2 \alpha_S (2 - \Delta_1)}{8\beta k_S \Delta_2 (\delta + \rho) (\varepsilon + \rho)};$$

零售商的最优绿色广告投资水平为

$$A_R^{YD*} = \frac{\theta D_0^2 (1 - 2\Delta_1 + \Delta_2) \phi_R}{8\beta h_R \Delta_2 (\varepsilon + \rho)};$$

最优批发价格为

$$w^{YD*} = \frac{D_0}{2\beta \Delta_2};$$

制造商的最优绿色技术投资水平为

$$Z_M^{YD*} = \frac{\gamma \theta D_0^2 \alpha_M (1 - \Delta_1)}{4\beta k_M \Delta_2 (\delta + \rho) (\varepsilon + \rho)};$$

制造商的最优绿色广告投资水平为

$$A_M^{YD*} = \frac{\theta D_0^2 \phi_M (1 - \Delta_1)}{4\beta h_M \Delta_2 (\varepsilon + \rho)};$$

制造商分担供应商绿色技术投资成本的比例为

$$\mu_M^{YD*} = \frac{2 - 3\Delta_1}{2 - \Delta_1};$$

制造商分担零售商绿色广告投资成本的比例为

$$\eta_M^{YD*} = \frac{3 - 2\Delta_1 - \Delta_2}{1 - 2\Delta_1 + \Delta_2}.$$

2) 产品绿色度的最优轨迹为

$$g^{YD*} = g_{\infty}^{YD*} + (g_0 - g_{\infty}^{YD*}) e^{-\delta t},$$

其中

$$g_{\infty}^{YD*} = \frac{\gamma \theta D_0^2 [k_M \alpha_S^2 (2 - \Delta_1) + 2k_S \alpha_M^2 (1 - \Delta_1)]}{8\beta \delta k_M k_S \Delta_2 (\delta + \rho) (\varepsilon + \rho)}$$

为YD模型下产品绿色度的稳态值。

3) 品牌商誉的最优轨迹为

$$G^{YD*} = \left[G_0 - G_{\infty}^{YD*} - \frac{\gamma (g_0 - g_{\infty}^{YD*})}{\varepsilon - \delta} \right] e^{-\varepsilon t} +$$

$$\frac{\gamma(g_0 - g_\infty^{YD*})}{\varepsilon - \delta} e^{-\delta t} + G_\infty^{YD*},$$

其中

$$G_\infty^{YD*} = \frac{\gamma g_\infty^{YD*}}{\varepsilon} + \frac{\theta D_0^2(1 - \Delta_1)\phi_M^2}{4\beta\varepsilon h_M \Delta_2(\varepsilon + \rho)} + \frac{\theta D_0^2(1 - 2\Delta_1 + \Delta_2)\phi_R^2}{8\beta\varepsilon h_R \Delta_2(\varepsilon + \rho)}$$

为YD模型下品牌商誉的稳态值。

4) 供应商、制造商、零售商和绿色供应链系统的利润最优值函数分别为

$$\begin{aligned} V_S^{YD*} &= c_1^{YD*} g^{YD*} + c_2^{YD*} G^{YD*} + c_3^{YD*}, \\ V_M^{YD*} &= c_4^{YD*} g^{YD*} + c_5^{YD*} G^{YD*} + c_6^{YD*}, \\ V_R^{YD*} &= c_7^{YD*} g^{YD*} + c_8^{YD*} G^{YD*} + c_9^{YD*}, \\ V_{SC}^{YD*} &= V_S^{YD*} + V_M^{YD*} + V_R^{YD*}. \end{aligned}$$

推论3 在有成本分担契约的分散决策模型中, 制造商向上游供应商提供绿色技术投资激励的条件是 $2 - 3\Delta_1 > 0$, 而向下游零售商提供绿色广告投资激励的条件是 $3 - 2\Delta_1 - \Delta_2 > 0$.

推论3表明, 作为绿色供应链的领导者, 制造商向供应商和零售商提供绿色投资激励的前提条件与价格加成系数 Δ_1 和 Δ_2 有关. 这意味着, 制定合理的中间环节加价对于绿色供应链的发展具有重要意义.

推论4 Z_S^{YD*} 和 A_R^{YD*} 与参数 Δ_1 和 Δ_2 具有如下关系:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Z_S^{YD*}}{\partial \Delta_1} < 0, \quad \frac{\partial Z_S^{YD*}}{\partial \Delta_2} < 0; \\ \frac{\partial A_R^{YD*}}{\partial \Delta_1} < 0, \quad \frac{\partial A_R^{YD*}}{\partial \Delta_2} \begin{cases} \leq 0, & 1 - 2\Delta_1 \geq 0; \\ > 0, & 1 - 2\Delta_1 < 0. \end{cases} \end{aligned}$$

推论4表明: 供应商的绿色技术投资水平与 Δ_1 和 Δ_2 均负相关; 而零售商的绿色广告投资水平与 Δ_1 负相关, 与 Δ_2 的相关性依赖于 $1 - 2\Delta_1$. 即当 $1 - 2\Delta_1 \geq 0$ 时, 零售商的绿色广告投资水平与 Δ_2 负相关; 而当 $1 - 2\Delta_1 < 0$ 时, 零售商的绿色广告投资水平与 Δ_2 正相关. 这意味着, 制造商向上下游企业提供绿色投资激励会改变上游供应商和下游零售商的绿色投资决策, 其原因是制造商提高绿色投资激励的前提条件与价格加成系数 Δ_1 和 Δ_2 有关.

3 对比分析

本节对比3种决策模型下的绿色技术投资水平、绿色广告投资水平、产品绿色度、品牌商誉和绿色供应链系统利润, 得到如下结论:

推论5 在3种决策模型下, 供应商的绿色技术投资水平、制造商的绿色技术投资水平和绿色广告投资水平以及零售商的绿色广告投资水平具有如下

关系:

$$\begin{aligned} Z_S^{C*} > Z_S^{YD*} > Z_S^{ND*}, \quad Z_M^{C*} > Z_M^{YD*} = Z_M^{ND*}, \\ A_M^{C*} > A_M^{YD*} = A_M^{ND*}, \quad A_R^{C*} > A_R^{YD*} > A_R^{ND*}. \end{aligned}$$

推论5表明, 在3种决策模型中, 供应商的绿色技术投资水平、制造商的绿色技术投资水平和绿色广告投资水平以及零售商的绿色广告投资水平在集中决策模型下最高, 这是因为在分散决策模型下存在双重边际效应. 与无成本分担契约的分散决策模型相比, 有成本分担契约的分散决策模型下的供应商的绿色技术投资水平和零售商的绿色广告投资水平得到改进, 而制造商的绿色技术投资水平和绿色广告投资水平不变. 这意味着, 制造商向上下游企业提供绿色投资激励确实可以激励供应商(零售商)增加绿色技术(广告)投资, 但自身的投资行为并不会因为提供绿色投资激励而发生改变.

推论6 在3种决策模型下, 产品绿色度、品牌商誉和绿色供应链系统利润具有如下关系:

$$\begin{aligned} g_\infty^{C*} > g_\infty^{YD*} > g_\infty^{ND*}, \\ G_\infty^{C*} > G_\infty^{YD*} > G_\infty^{ND*}, \\ V_{SC}^{C*} > V_{SC}^{YD*} > V_{SC}^{ND*}. \end{aligned}$$

推论6表明, 集中决策模型下的产品绿色度、品牌商誉和绿色供应链系统利润最高, 其次是有成本分担契约的分散决策模型, 最后是无成本分担契约的分散决策模型. 即集中决策模型最优.

4 双边成本分担契约(CS契约)

基于上述研究结论可知, 集中决策模型可以实现更高的产品绿色度、品牌商誉和绿色供应链系统利润. 然而, 在现实中企业往往以自身利润最大化为目标, 难以实现集中决策. 因此, 结合实践, 本节设计双边成本分担契约(用上标CS表示)来协调绿色供应链, 即: 供应商分担制造商一定比例(记为 η_S)的绿色广告投资成本, 制造商分担供应商一定比例(记为 μ_M)的绿色技术投资成本以及分担零售商一定比例(记为 η_M)的绿色广告投资成本, 零售商分担制造商一定比例(记为 μ_R)的绿色技术投资成本. 此时, 供应商、制造商和零售商的决策目标函数分别为

$$\begin{aligned} \max_{Z_S, \eta_S} J_S &= \int_0^\infty e^{-\rho t} [\Delta_1 w (D_0 - \beta \Delta_2 w) \theta G - \\ &\quad (1 - \mu_M) k_S Z_S^2 / 2 - \eta_S h_M A_M^2 / 2] dt, \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned} \max_{w, Z_M, A_M, \mu_M, \eta_M} J_M &= \\ &\int_0^\infty e^{-\rho t} [w(1 - \Delta_1)(D_0 - \beta \Delta_2 w) \theta G - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \mu_M k_S Z_S^2/2 - (1 - \mu_R) k_M Z_M^2/2 - \\ & \eta_M h_R A_R^2/2 - (1 - \eta_S) h_M A_M^2/2] dt, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \max_{A_R, \mu_R} J_R = & \int_0^\infty e^{-\rho t} [w(\Delta_2 - 1)(D_0 - \beta \Delta_2 w)\theta G - \\ & (1 - \eta_M) h_R A_R^2/2 - \mu_R k_M Z_M^2/2] dt. \end{aligned} \quad (16)$$

命题4 基于给定的契约参数 $(\eta_S, \mu_M, \eta_M, \mu_R)$, 批发价格为

$$w^{CS*} = \frac{D_0}{2\beta\Delta_2};$$

供应商的绿色技术投资水平为

$$Z_S^{CS*} = \frac{\gamma\theta D_0^2 \alpha_S \Delta_1}{4\beta k_S (\delta + \rho)(\varepsilon + \rho)\Delta_2(1 - \mu_M)};$$

制造商的绿色技术投资水平和绿色广告投资水平分别为

$$Z_M^{CS*} = \frac{\gamma\theta D_0^2 \alpha_M (1 - \Delta_1)}{4\beta k_M (\delta + \rho)(\varepsilon + \rho)\Delta_2(1 - \mu_R)},$$

$$A_M^{CS*} = \frac{\theta D_0^2 \phi_M (1 - \Delta_1)}{4\beta h_M (\varepsilon + \rho)\Delta_2(1 - \eta_S)};$$

零售商的绿色广告投资水平为

$$A_R^{CS*} = \frac{\theta D_0^2 \phi_R (\Delta_2 - 1)}{4\beta h_R (\varepsilon + \rho)\Delta_2(1 - \eta_M)}.$$

命题5 当契约参数 $(\eta_S, \mu_M, \eta_M, \mu_R)$ 满足下列条件时:

$$\begin{cases} \eta_S^{CS*} = \frac{\Delta_1 + \Delta_2 - 1}{\Delta_2}, \mu_M^{CS*} = \frac{\Delta_2 - \Delta_1}{\Delta_2}; \\ \eta_M^{CS*} = \frac{1}{\Delta_2}, \mu_R^{CS*} = \frac{\Delta_1 + \Delta_2 - 1}{\Delta_2}. \end{cases}$$

双边成本分担契约可以完全协调绿色供应链。

命题6 在双边成本分担契约下, 供应商、制造商、零售商和绿色供应链系统的利润最优值函数分别为

$$V_S^{CS*} = d_1^{CS*} g^{CS*} + d_2^{CS*} G^{CS*} + d_3^{CS*},$$

$$V_M^{CS*} = d_4^{CS*} g^{CS*} + d_5^{CS*} G^{CS*} + d_6^{CS*},$$

$$V_R^{CS*} = d_7^{CS*} g^{CS*} + d_8^{CS*} G^{CS*} + d_9^{CS*},$$

$$V_{SC}^{CS*} = V_S^{CS*} + V_M^{CS*} + V_R^{CS*}.$$

综上所述, 双边成本分担契约可以达到集中决策的效果, 但为了使每个成员都能够接受该契约, 还需要满足 $V_S^{CS*} \geq V_S^{ND*}, V_M^{CS*} \geq V_M^{ND*}, V_R^{CS*} \geq V_R^{ND*}$, 即绿色供应链各成员在双边成本分担契约下的利润均不低于在无成本分担契约的分散决策模型下的利润。然而, 由于这两种决策模型下的利润函数较为复杂, 难以直接比较, 本文将在数值算例部分, 通过赋值的方法对上述条件进行求解分析。

5 数值分析

本节通过数值算例对比分析不同决策模型的均衡结果, 分析产品绿色度和品牌商誉的最优轨迹, 以及探讨双边成本分担契约的有效性。借鉴文献[15, 22]的参数设置, 设定 $D_0 = 20, \beta = 1, \theta = 0.4, \alpha_S = 0.8, \alpha_M = 0.6, \delta = 0.3, \phi_M = 0.6, \phi_R = 0.6, \gamma = 0.8, \varepsilon = 0.4, k_S = 15, k_M = 15, h_M = 12, h_R = 12, \rho = 0.3, g_0 = 0, G_0 = 0$ 。参考文献[18], 将价格加成系数设定为 $\Delta_1 = 0, \Delta_2 = 1.4$ 。

5.1 各决策模型的均衡结果对比

如表1所示, C模型下的均衡策略显著高于ND模型和YD模型下的对应值。与ND模型相比, YD模型下的供应商的绿色技术投资水平和零售商的绿色广告投资水平分别提高了50%和75%, 但制造商的绿色技术投资水平和绿色广告投资水平不变。此外, CS契约下的均衡策略与C模型的均衡策略相同, 并且供应商的绿色技术投资水平、制造商的绿色技术投资水平和广告投资水平相较于ND模型下的对应值均提高了180%左右, 甚至零售商的广告投资水平提高了250%左右。因此, 仅依靠制造商对上下游企业进行绿色投资激励的作用是有限的, 应该采用CS契约促进绿色供应链上下游企业间的双向合作。

表1 不同决策模型下的均衡策略对比

均衡策略	C模型	ND模型	YD模型	CS契约
w^*	7.1429	7.1429	7.1429	7.1429
Z_S^*	4.0635	1.4513	2.1769	4.0635
Z_M^*	3.0476	1.0884	1.0884	3.0476
A_M^*	2.8571	1.0204	1.0204	2.8571
A_R^*	2.8571	0.8163	1.4286	2.8571
η_S^*	—	—	—	0.6429
μ_M^*	—	—	0.3333	0.6429
η_M^*	—	—	0.4286	0.7143
μ_R^*	—	—	—	0.6429

从表2可以看出, C模型下的供应链绩效显著高于ND模型和YD模型下的对应值。与ND模型相比, YD模型下的产品绿色度、品牌商誉和绿色供应链系统利润分别增长了32%、32.25%和29.26%, 并且供应链成员的利润均得到了提高。因此, YD模型可以消除部分双重边际效应, 实现绿色供应链帕累托改进。CS契约下的产品绿色度、品牌商誉和绿色供应链系统利润可以达到与C模型相同的效果, 即完全消除双重边际效应, 并且与ND模型相比分别增长了180%、185.77%和151.49%。此外, 供应商、制造商和零售商的利润分别增长了170.20%、128.04%和157.20%。因此, CS契约不仅能够完全协调绿色供应链, 而且能够使供应链成员均实现帕累托改进。

表2 不同决策模型下的供应链绩效对比

供应链绩效	C模型	ND模型	YD模型	CS契约
g_{∞}^*	16.9312	6.0469	7.9819	16.9312
G_{∞}^*	42.4339	14.8488	19.6372	42.4339
V_S^*	—	654.4341	856.1248	1768.2756
V_M^*	—	656.6451	827.6798	1497.4337
V_R^*	—	552.3419	724.7598	1420.6097
V_{SC}^*	4686.3190	1863.4211	2408.5644	4686.3190

5.2 产品绿色度和品牌商誉的最优轨迹分析

如图2所示,产品绿色度随着时间增长具有两种变化趋势:一是在产品绿色度初始值较低($g_0 = 0$)时,产品绿色度随着时间增长而递增并逐渐趋于稳定状态;二是在产品绿色度初始值较高($g_0 = 30$)时,产品绿色度随着时间增长而递减并逐渐趋于稳定状态.这意味着,产品绿色度最优轨迹的变化趋势由产品绿色度的初始值 g_0 和稳态值 g_{∞}^* 的大小关系决定.

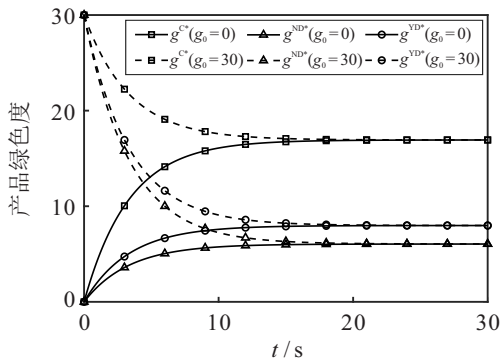


图2 产品绿色度的最优轨迹

如图3所示,品牌商誉随着时间增长具有3种变化趋势:1)品牌商誉随着时间增长具有递增趋势且趋于稳定状态;2)品牌商誉随着时间增长具有先递减后递增的趋势且趋于稳定状态;3)品牌商誉随着时间增长具有递减趋势且趋于稳定状态.具体而言, $G_0 = 0$ 时,3种决策模型下的品牌商誉随时间递增;分别在 $G_0 = 50$ 、 $G_0 = 20$ 和 $G_0 = 30$ 时,C模型、ND模型和YD模型下的品牌商誉随时间先递减后递增;分别在 $G_0 = 300$ 、 $G_0 = 100$ 和 $G_0 = 150$

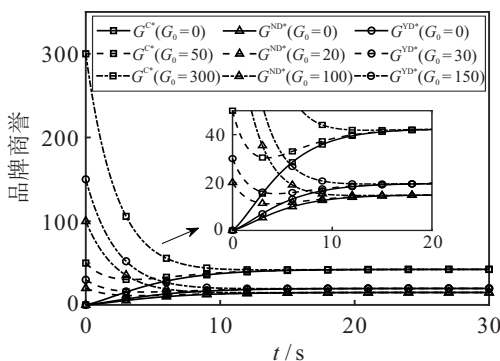


图3 品牌商誉的最优轨迹

时,3种决策模型下的品牌商誉随时间递减.这表明,品牌商誉最优轨迹的变化趋势由品牌商誉的初始值 G_0 和稳态值 G_{∞}^* 的大小关系决定.

5.3 双边成本分担契约的有效性分析

如图4所示,从供应商利润来看,两条供应商利润曲线相交于A点.在A点的右侧, $V_S^{CS*} > V_S^{ND*}$,并且 V_S^{CS*} 和 V_S^{ND*} 随着 Δ_1 的增大而增大,同时 V_S^{CS*} 越来越大于 V_S^{ND*} .从制造商利润来看,两条制造商利润曲线相交于B点.在B点的左侧, $V_M^{CS*} > V_M^{ND*}$,并且 V_M^{CS*} 和 V_M^{ND*} 随着 Δ_1 的增大而减小,同时二者的差值逐渐缩小.从零售商利润来看, $V_R^{CS*} > V_R^{ND*}$,并且 V_R^{CS*} 和 V_R^{ND*} 随着 Δ_1 的增大而减小,同时二者的差值逐渐缩小.综合来看, Δ_1 越大,CS契约对供应商利润的改进效果越明显,但对制造商和零售商的改进效果越小.因此,要想供应商和制造商接受CS契约,需要满足 $\Delta_1 \in [0.02, 0.88]$.

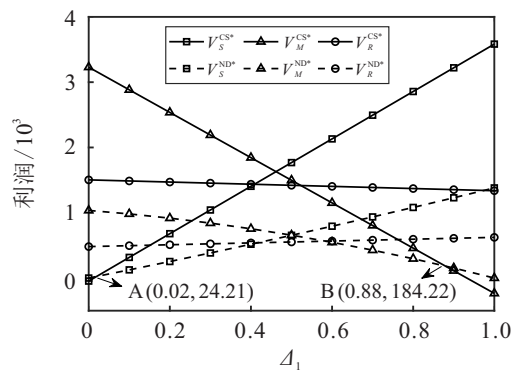


图4 Δ_1 对CS契约和ND模型下利润的影响

如图5所示,从供应商利润来看, $V_S^{CS*} > V_S^{ND*}$,并且 V_S^{CS*} 和 V_S^{ND*} 随着 Δ_2 的增大而减小,同时二者的差值逐渐缩小.从制造商利润来看, $V_M^{CS*} > V_M^{ND*}$,并且 V_M^{CS*} 和 V_M^{ND*} 随着 Δ_2 的增大而减小,但二者差值几乎无变化.从零售商利润来看,两条零售商利润曲线相交于C点.在C点的右侧, $V_R^{CS*} > V_R^{ND*}$,并且 V_R^{CS*} 和 V_R^{ND*} 随着 Δ_2 的增大而增大,同时二者的差值逐渐增大.综合来看, Δ_2 越大,CS契约对零售商利

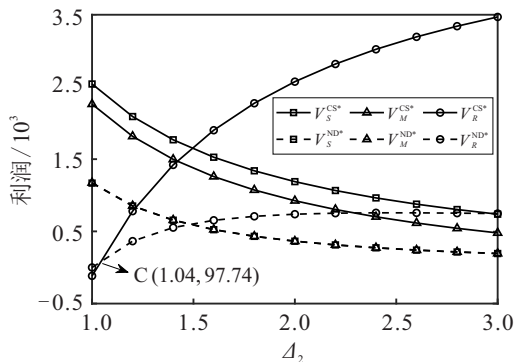


图5 Δ_2 对CS契约和ND模型下利润的影响

利润的改进效果越明显,但对供应商利润和制造商利润的改进效果越小.此外,要想零售商接受CS契约,需要满足 $\Delta_2 > 1.04$.

从上述结论可知,供应商、制造商和零售商能否接受CS契约与 Δ_1 和 Δ_2 的取值有关.因此,根据条件 $V_S^{CS*} \geq V_S^{ND*}, V_M^{CS*} \geq V_M^{ND*}, V_R^{CS*} \geq V_R^{ND*}$ 可以得出,当 Δ_1 和 Δ_2 的取值位于阴影区域D时,绿色供应链成员均能接受CS契约,如图6所示.

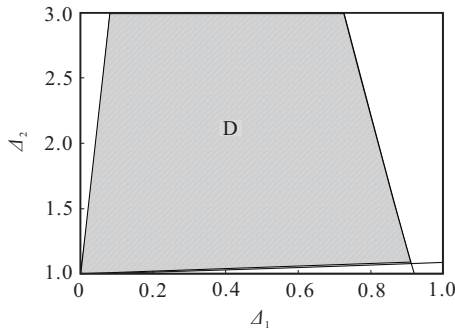


图6 Δ_1 和 Δ_2 的取值范围

6 结论

本文考虑了产品绿色度和品牌商誉的动态性,构建了由供应商、制造商和零售商组成的三级绿色供应链,基于微分博弈研究了3种决策模型下的均衡结果,得到了产品绿色度和品牌商誉的最优轨迹,设计了双边成本分担契约协调供应链,以及通过数值算例验证和分析了均衡结果.本文主要结论如下:

1) 产品绿色度最优轨迹的变化趋势有两种,并且由产品绿色度的初始值 g_0 和稳态值 g_∞^* 的大小关系决定.即:当初始值 g_0 较低时,产品绿色度随着时间增长单调递增;当初始值 g_0 较高时,产品绿色度随着时间增长单调递减.但是,不管是哪种变化趋势,产品绿色度均随着时间变化逐渐趋于稳定状态.

2) 品牌商誉最优轨迹的变化趋势有3种,并且由品牌商誉的初始值 G_0 和稳态值 G_∞^* 的大小关系决定.具体而言:当初始值 G_0 较低时,品牌商誉随时间增长单调递增;当初始值 G_0 较高时,品牌商誉随时间增长先递减后递增;当初始值 G_0 特别高时,品牌商誉随时间增长单调递减.但是,不管是哪种变化趋势,品牌商誉均随着时间变化逐渐趋于稳定状态.

3) 集中决策模型显著优于两种分散决策模型.有成本分担契约的分散决策模型可以实现绿色供应链的帕累托改进,但无法达到完全协调.在一定条件下,双边成本分担契约可以完全协调绿色供应链,并且可以实现绿色供应链各成员利润帕累托改进,但改进效果与 Δ_1 和 Δ_2 有关.

本文的管理启示:1)在实践中,供应链企业独立

决策会导致产品绿色度、品牌商誉及利润处于较低水平,需要通过协调契约来消除双重边际效应;2)仅依靠核心企业(制造商)为其他企业提供绿色投资激励,难以消除双重边际效应,需要依靠上下游企业的双向合作;3)合理、稳定的价格加成有利于企业科学制定投资策略和签订契约合同,实现供应链协调.

参考文献(References)

- [1] Xu L L, Wang A H, Yu W, et al. Hot spots of extreme precipitation change under 1.5 and 2 global warming scenarios[J]. *Weather and Climate Extremes*, 2021, 33: 100357.
- [2] Chitra K. In search of the green consumers: A perceptual study[J]. *Journal of Services Research*, 2007, 7(1): 173-191.
- [3] Zhu Q H, Sarkis J. Relationships between operational practices and performance among early adopters of green supply chain management practices in Chinese manufacturing enterprises[J]. *Journal of Operations Management*, 2004, 22(3): 265-289.
- [4] 夏西强, 朱庆华, 刘军军. 上下游绿色研发模式对比分析及协调机制研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2021, 41(12): 3336-3348.
(Xia X Q, Zhu Q H, Liu J J. Comparative analysis and research coordination mechanism of upstream and downstream green R & D models[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2021, 41(12): 3336-3348.)
- [5] 曹裕, 寻静雅, 李青松. 基于不同政府补贴策略的供应链绿色努力决策比较研究[J]. *运筹与管理*, 2020, 29(5): 108-118.
(Cao Y, Xun J Y, Li Q S. A comparative study of green efforts in supply chain based on different government subsidy strategies[J]. *Operations Research and Management Science*, 2020, 29(5): 108-118.)
- [6] Meng Q F, Li M W, Liu W Y, et al. Pricing policies of dual-channel green supply chain: Considering government subsidies and consumers' dual preferences[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2021, 26: 1021-1030.
- [7] Wang Y Y, Fan R J, Shen L, et al. Decisions and coordination of green e-commerce supply chain considering green manufacturer's fairness concerns[J]. *International Journal of Production Research*, 2020, 58(24): 7471-7489.
- [8] 林志炳. 考虑企业社会责任的绿色供应链定价与制造策略研究[J]. *管理工程学报*, 2022, 36(3): 131-138.
(Lin Z B. Research on pricing and manufacturing strategies in a green supply chain considering corporate social responsibility[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2022, 36(3): 131-138.)
- [9] Khosroshahi H, Dimitrov S, Hejazi S R. Pricing, greening, and transparency decisions considering the

- impact of government subsidies and CSR behavior in supply chain decisions[J]. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 2021, 60: 102485.
- [10] 周艳菊, 胡凤英, 周正龙. 零售商主导下促进绿色产品需求的联合研发契约协调研究[J]. *管理工程学报*, 2020, 34(2): 194-204.
(Zhou Y J, Hu F Y, Zhou Z L. Study on joint contract coordination to promote green product demand under the retailer-dominance[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2020, 34(2): 194-204.)
- [11] 曹裕, 刘子豪. 无政府激励的绿色供应链管理的可行性分析[J]. *管理工程学报*, 2017, 31(2): 119-127.
(Cao Y, Liu Z H. A feasibility analysis for practicing green supply chain management without government policy incentives[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2017, 31(2): 119-127.)
- [12] Zhang C T, Liu L P. Research on coordination mechanism in three-level green supply chain under non-cooperative game[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(5): 3369-3379.
- [13] 刘俊华, 黄悦, 王福. 基于联合减排与销售努力的三级低碳供应链成本分担契约选择[J]. *商业研究*, 2022(1): 123-132.
(Liu J H, Huang Y, Wang F. Three-level supply chain cost sharing contract selection based on joint carbon emission reduction and sales efforts[J]. *Commercial Research*, 2022(1): 123-132.)
- [14] 朱桂菊, 游达明. 基于微分对策的绿色供应链生态研发策略与协调机制[J]. *运筹与管理*, 2017, 26(6): 62-69.
(Zhu G J, You D M. Ecological R & D strategy and coordination mechanism in the green supply chain based on differential games[J]. *Operations Research and Management Science*, 2017, 26(6): 62-69.)
- [15] 李娜, 马德青, 胡劲松. 基于利他偏好的绿色供应链动态均衡分析[J]. *系统工程学报*, 2021, 36(6): 798-816.
(Li N, Ma D Q, Hu J S. Dynamic equilibrium analysis of green supply chain based on altruistic preferences[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2021, 36(6): 798-816.)
- [16] Liu G W, Yang H F, Dai R. Which contract is more effective in improving product greenness under different power structures: Revenue sharing or cost sharing?[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 148: 106701.
- [17] 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.
(Xiang X D, Li C. Differential game models for joint carbon emission reduction and promotion in three-echelon low carbon supply chain[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(8): 1776-1788.)
- [18] 姜跃, 韩水华, 赵洋. 低碳经济下三级供应链动态减排的微分博弈分析[J]. *运筹与管理*, 2020, 29(12): 89-97.
(Jiang Y, Han S H, Zhao Y. Differential game analysis of dynamic carbon emission reduction strategy of three-echelon supply chain under low-carbon economy[J]. *Operations Research and Management Science*, 2020, 29(12): 89-97.)
- [19] Nerlove M, Arrow K J. Optimal advertising policy under dynamic conditions[J]. *Economica*, 1962, 29(114): 129.
- [20] Pnevmatikos N, Vardar B, Zaccour G. When should a retailer invest in brand advertising?[J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 267(2): 754-764.
- [21] 王一雷, 夏西强, 张言. 碳交易政策下供应链碳减排与低碳宣传的微分对策研究[J]. *中国管理科学*, 2022, 30(4): 155-166.
(Wang Y L, Xia X Q, Zhang Y. Differential strategies of carbon emission reduction and low-carbon promotion of the supply chain under cap-and-trade policy[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2022, 30(4): 155-166.)
- [22] 于荣, 裴小伟, 唐润. 基于食品绿色度和声誉的绿色食品供应链主体协同模式研究[J]. *软科学*, 2018, 32(1): 130-135.
(Yu R, Pei X W, Tang R. Research on green food supply chain agents coordination mode based on food green and reputation[J]. *Soft Science*, 2018, 32(1): 130-135.)
- [23] Hong Z F, Guo X L. Green product supply chain contracts considering environmental responsibilities[J]. *Omega*, 2019, 83: 155-166.
- [24] Ghosh D, Shah J. Supply chain analysis under green sensitive consumer demand and cost sharing contract[J]. *International Journal of Production Economics*, 2015, 164: 319-329.
- [25] 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]. *Journal of Management Sciences in China*, 2016, 19(2): 53-65.)
- [26] 许格妮, 陈惠汝, 武晓莉, 等. 竞争供应链中绿色成本分担博弈分析[J]. *系统工程学报*, 2020, 35(2): 244-256.
(Xu G N, Chen H R, Wu X L, et al. Game analysis on green cost-sharing between competing supply chains[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2020, 35(2): 244-256.)
- [27] El Ouardighi F. Supply quality management with optimal wholesale price and revenue sharing contracts: A two-stage game approach[J]. *International Journal of Production Economics*, 2014, 156: 260-268.

作者简介

刘丽(1995—), 女, 博士生, 从事物流与供应链管理的研究, E-mail: liulibsok@163.com;

韩同银(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事建筑经济与项目管理、物流与供应链管理等研究, E-mail: 15511336888@126.com;

金浩(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 从事区域经济、物流与供应链管理等研究, E-mail: jgjbsh@hebut.edu.cn.