

## 绿色供应链背景下互补品定价策略

马 鹏<sup>†</sup>, 张 晨

(南京信息工程大学 管理工程学院, 南京 210044)

**摘要:** 考虑绿色供应链背景下由两个制造商和一个零售商组成的二级供应链定价策略问题, 其中两个制造商生产两种互补品, 且制造商1进行绿色制造投入. 分别研究集中式、MS-Bertrand、MS-Stackelberg、RS-Bertrand和RS-Stackelberg五种模型. 结论表明: 1) 绿色制造水平随着绿色投入系数的增加而减少, 且绿色制造水平在集中式情形最高, 分散式决策下产品1和产品2的最优零售价格高于集中决策; 2) 只有制造商1进行绿色制造时, 绿色投入会影响其最终的收益, 但是互补品的性质会使采取传统制造的制造商从中获利; 3) 在分散式决策情形下, 产品1(产品2)的零售价格会随着产品1(产品2)的交叉价格敏感程度的增加而降低, 而随着产品2(产品1)的交叉价格敏感程度的增加而升高.

**关键词:** 绿色供应链; 互补品; 定价策略; Stackelberg博弈; 绿色制造水平

**中图分类号:** F224

**文献标志码:** A

### Pricing strategies for complementary products in green supply chain

MA Peng<sup>†</sup>, ZHANG Chen

(School of Management Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** Considering the problem that two complementary products are exploited in a two-stage green supply chain with two manufacturers and a retailer, and the manufacturer 1 exerts the green manufacturing level to influence and increase the demand, the paper establishes and investigates following five different pricing models, i.e., the centralized model, the MS-Bertrand model, the MS-Stackelberg model, the RS-Bertrand model, and the RS-Stackelberg model. The results show that, 1) the green manufacturing level decrease with the green investment, the centralized supply chain model is the most favorable for the green manufacturing level, and the retail prices of the products are higher under the decentralized models than these under the centralized model, 2) the green investment impacts on the manufacturer 1's profit, and the manufacturer 2 will benefit from the manufacturer 1's green investment because of the nature of the complementary product, 3) under the decentralized models, the retail prices of the product 1(product 2) decrease with the cross-price sensitivity of the product 1(product 2), and increase with the cross-price sensitivity of the product 2(product 1).

**Keywords:** green supply chain; complementary products; pricing strategies; Stackelberg game; green manufacturing level

## 0 引言

绿色发展理念是经济社会发展到一定阶段的必然选择, 也是当今世界发展的最新潮流和重要趋势. 世界资源研究所对美国经济刺激方案的评价结果显示, 向绿色领域每投入10亿美元, 可以创造3万个就业岗位, 取得4.5亿美元的节能效果, 可见绿色领域投资带来的社会经济效益十分明显<sup>[1]</sup>. 2015年, 中国国务院发布“中国制造2025”, 同时将“绿色制造

工程”作为重点实施的五大工程之一, 部署全面推行绿色制造, 努力构建高效、清洁、低碳、循环的绿色制造体系<sup>[2]</sup>. 绿色制造将会给国家经济社会各个方面带来很大的变化, 本文用绿色制造水平来衡量产品绿色制造的程度. 绿色制造水平, 即以低碳经济为目标, 在可持续发展理念的指导下, 企业通过技术创新等多种方式使产品从设计生产到消费直至退出市场的整个产品生命周期中, 生态效益、企业经济效益和社会效

收稿日期: 2017-06-02; 修回日期: 2017-09-03.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71601099); 江苏省自然科学基金项目(BK20160973); 教育部人文社会科学研究青年基金项目(15YJC630091).

作者简介: 马鹏(1981—), 男, 副教授, 博士, 从事物流与供应链管理、行为运作管理等研究; 张晨(1994—), 女, 硕士生, 从事物流与供应链管理的研究.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: mapeng88@126.com

益3者协调达到最优的状态。

当今世界竞争日益激烈,产品的更新换代变得越来越快。作为具有销售依存关系的互补品而言,一个产品的更新对互补品的发展也将产生较大的影响,而互补品之间的这种关系使得供应链系统的定价变得比较复杂。互补品不但涉及到供应链成员竞争范围的广度问题,还涉及供应链成员之间如何开展竞争的问题。在“绿色制造”的大背景下,传统制造商要想在今后的发展中立于不败之地,必须走上可持续发展之路,而制造商将面临在产品绿色生产制造的过程中所使用的自然要素、人类劳动资源和资本的投入决策,即本文所说的绿色投入。有的企业绿色生产投入早,而有的企业绿色生产投入晚,这种发展的不对称性必然对互补产品供应链系统的定价决策产生重要的影响。比如,制造商的绿色投入如何对其绿色制造水平以及供应链绩效产生影响?互补产品的交叉价格敏感程度分别对互补产品的定价策略产生什么影响?能否很好地应对以上问题,将对供应链成员的发展产生重大的影响,这些都是值得研究且有意义的问题。

本文将绿色投入系数和绿色制造水平引入二级供应链系统中,重点研究绿色投入系数对绿色制造水平和供应链各成员利润的影响,并探讨互补产品的交叉价格弹性系数对互补产品的定价策略的影响。

## 1 相关研究评述

### 1.1 互补品在供应链中最优定价策略的相关研究

近年来,很多国内外学者通过构建具体的定价模型并进行求解分析,研究了互补品的定价策略问题<sup>[3-8]</sup>。Mukhopadhyay等<sup>[9]</sup>在信息不对称的环境下,采用Stackelberg博弈对互补品的定价策略进行了研究;Shao等<sup>[10]</sup>根据不同的销售策略和产品质量战略,研究了两阶段供应链中的捆绑策略对竞争对手策略和企业利润的影响;但斌等<sup>[11]</sup>建立了考虑溢出效应的互补品企业间广告决策的信号博弈模型,在分离均衡和混同均衡情况下讨论了企业的最优广告策略和收益;易余胤等<sup>[12]</sup>运用演化博弈理论,针对具有有限理性的零售商在长期的市场演化中会如何选择最适合其生存的市场策略这一问题进行了深入探讨;Yan等<sup>[13]</sup>建立一个利润优化模型来研究互补品无捆绑及有捆绑时的最优定价策略,以及捆绑策略对企业的价值;Xia等<sup>[14]</sup>考虑了一个生产两种互补品的在位制造商的分销渠道策略,并研究了是否需要另外的公司来销售它的产品;Ende等<sup>[15]</sup>基于产品的生命周期,研究了核心产品和互补产品的新颖性对系统公司参与补充产品开发的工作绩效的影响程度。以上文献均未

考虑绿色制造的大背景。

### 1.2 绿色供应链背景下产品定价策略的相关研究

绿色供应链管理已成为供应链管理研究的热点问题。目前很多学者以绿色供应链为背景,研究产品的最优定价策略问题。Li等<sup>[16]</sup>将制造商生产的绿色环保产品作为研究对象,研究该产品在双渠道供应链中的定价策略;Yang等<sup>[17]</sup>引入绿色级别的敏感度和模糊度,研究了产品价格、绿色水平和预期利润如何受到渠道领导者和政府干预的影响;江世英等<sup>[18]</sup>将风险规避度、产品绿色度和消费者偏好等因素融入到决策模型中,建立了集中式决策和制造商领导的Stackelberg博弈模型;Zhang等<sup>[19]</sup>重点研究了混合生产模式下绿色供应链的合作博弈和非合作博弈,通过Rubinstein讨价还价协调模型,制定不同生产模式的帕累托优化合作定价策略;李芹芹<sup>[20]</sup>针对制造商进行绿色工艺创新以降低产品生产成本的这一行为,分别探讨了制造商Stackelberg、零售商Stackelberg和Nash均衡下的均衡策略;Cao等<sup>[21]</sup>基于绿色产品效用的多样性,研究了Stackelberg博弈和合作决策下制造商与上游供应商之间的协调策略;Ma等<sup>[22]</sup>考虑了顾客策略行为,研究了垄断市场绿色供应链的定价策略和政府干预机制,并讨论了包括指导价格和财政支出在内的政府干预措施对绿色产品销售的影响。

纵观近年来国内外学者对于互补品定价策略以及绿色供应链背景下的产品定价策略研究,互补品产品的定价策略问题尚没有在绿色供应链的背景下考虑,而绿色供应链背景下的产品定价问题没有涉及互补产品,因此,将制造商的绿色生产投入融入到互补品定价模型之中的相关研究,将是本文的创新点之一。鉴于此,本文考虑两个制造商中的一个制造商进行绿色生产投入,研究制造商的绿色投入对绿色制造水平及供应链绩效的影响,这也是本文的创新点之一。研究互补产品的交叉弹性系数对互补产品定价策略的影响,是本文重点研究的内容,同时也是本文的创新点。

## 2 模型描述

考虑由一个采取绿色生产的制造商1(标记为 $M_1$ )、一个采取传统生产的制造商2(标记为 $M_2$ )和一个零售商( $R$ )组成的供应链系统,如图1所示。

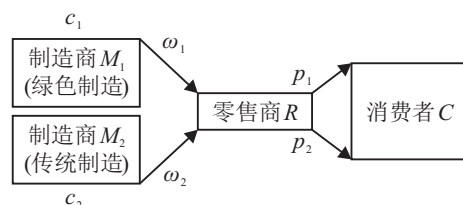


图1 供应链结构模型

制造商  $i$  ( $i = 1, 2$ ) 以单位制造成本  $c_i$  生产产品  $i$ , 并以单位批发价格  $\omega_i$  卖给零售商; 随后, 零售商以单位零售价格  $p_i$  将产品  $i$  销售给消费者. 假设产品 1 和产品 2 为互补产品, 市场上有 3 组消费者, 第 1 组只购买产品 1, 第 2 组只购买产品 2, 第 3 组同时购买产品 1 和产品 2. 此外, 假设 3 组消费者之间没有价格歧视, 零售商的订货数量与制造商的生产数量和消费者的需求数量一致, 所有活动都发生在一个时期, 且两家制造商和零售商都是风险中性的.

在绿色供应链的背景下, 为了较为全面地讨论互补品的最优定价策略, 本文分别探讨了集中式和分散式两种决策情况 5 种定价模型下供应链上各成员的博弈情况, 即集中式模型、MS-Bertrand 模型、MS-Stackelberg 模型、RS-Bertrand 模型和 RS-Stackelberg 模型 (如图 2 所示).

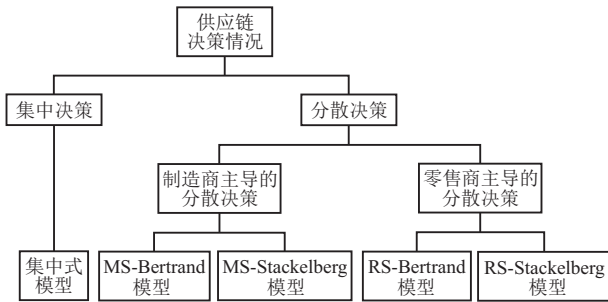


图 2 5 种模型的联系与区别

对第 1 组产品 1 的需求定义如下:

$$D_{11} = a_1 - \alpha p_1 + \gamma_1 \theta. \tag{1}$$

其中:  $a_1$  为第 1 组产品的市场规模,  $\alpha$  为产品 1 需求的价格弹性系数,  $\gamma_1$  为绿色制造水平系数.

对第 2 组产品 2 的需求定义如下:

$$D_{22} = a_2 - \beta p_2. \tag{2}$$

其中:  $a_2$  为第 2 组产品的市场规模,  $\beta$  为产品 2 需求的价格弹性系数.

对第 3 组产品 1 和产品 2 的需求分别定义如下:

$$D_{13} = a_3 - \alpha_1 p_1 - \alpha_2 p_2 + \gamma_2 \theta, \tag{3}$$

$$D_{23} = a_3 - \beta_2 p_2 - \beta_1 p_1. \tag{4}$$

其中:  $a_3$  为第 3 组产品的市场规模,  $\alpha_1$  为产品 1 的需求对其自身价格的敏感程度,  $\alpha_2$  为产品 1 的需求对其互补品价格的交叉价格敏感程度,  $\gamma_2$  为绿色制造水平系数,  $\beta_2$  为产品 2 的需求对其自身价格的敏感程度,  $\beta_1$  为产品 2 的需求对其互补品价格的交叉价格敏感程度.

为了便于研究分析, 将产品 1 和产品 2 的需求函数设置如下:

$$D_1(p_1, p_2, \theta) = \Phi_1 - A p_1 - \alpha_2 p_2 + \Gamma \theta, \tag{5}$$

$$D_2(p_1, p_2) = \Phi_2 - B p_2 - \beta_1 p_1. \tag{6}$$

其中:  $\Phi_1 = a_1 + a_3$  为产品 1 的市场规模,  $\Phi_2 = a_2 + a_3$  为产品 2 的市场规模,  $A = \alpha + \alpha_1$  为产品 1 的需求对自身价格的敏感程度,  $\Gamma = \gamma_1 + \gamma_2$  为产品 1 的绿色制造水平系数,  $B = \beta + \beta_2$  为产品 2 的需求对自身价格的敏感程度.

制造商 1 ( $M_1$ )、制造商 2 ( $M_2$ ) 和零售商 ( $R$ ) 的利润分别为

$$\Pi_{M_1} = (\omega_1 - c_1)(\Phi_1 - A p_1 - \alpha_2 p_2 + \Gamma \theta) - I \theta^2, \tag{7}$$

$$\Pi_{M_2} = (\omega_2 - c_2)(\Phi_2 - B p_2 - \beta_1 p_1), \tag{8}$$

$$\Pi_R = (p_1 - \omega_1)(\Phi_1 - A p_1 - \alpha_2 p_2 + \Gamma \theta) + (p_2 - \omega_2)(\Phi_2 - B p_2 - \beta_1 p_1). \tag{9}$$

其中:  $I$  表示产品 1 的绿色投入系数,  $\theta$  表示产品 1 的绿色制造水平,  $I \theta^2$  表示制造商 1 进行绿色制造的投入成本<sup>[3,16,23-24]</sup>.

### 3 集中式决策下供应链各成员的决策分析 (模型 I)

在集中式决策情形下, 供应链系统由一个决策者进行决策, 以使整个供应链利润最大化. 因此, 在集中式决策下供应链的利润函数可以表示为

$$\Pi_{SC} = (p_1 - c_1)(\Phi_1 - A p_1 - \alpha_2 p_2 + \Gamma \theta) + (p_2 - c_2)(\Phi_2 - B p_2 - \beta_1 p_1) - I \theta^2. \tag{10}$$

如下定理给出了集中式决策下供应链系统的最优解.

**定理 1** 如果

$$-2(4AB - E_1^2)I + 2B\Gamma^2 < 0,$$

$$4AB - E_1^2 > 0,$$

则在集中式决策下, 零售商的最优零售价格、制造商 1 的最优绿色制造水平以及供应链的最优利润分别为

$$p_1^* = \frac{2BE_2I + E_1E_3I - Bc_1\Gamma^2}{(4AB - E_1^2)I - B\Gamma^2},$$

$$p_2^* = \frac{2E_1E_5I + (4AI - \Gamma^2)E_4}{2(4AB - E_1^2)I - 2B\Gamma^2},$$

$$\theta^* = -\frac{\Gamma(2BE_5 + E_1E_4)}{2(4AB - E_1^2)I - 2B\Gamma^2},$$

$$\Pi_{SC}^* = \frac{1}{4(4AB - E_1^2)I - 4B\Gamma^2} \times [4(E_1E_8 + E_{11} + E_9E_{10} - A\Phi_2E_6 - B\Phi_1E_7)I - (E_6\Gamma)^2].$$

其中

$$E_1 = \alpha_2 + \beta_1, E_2 = Ac_1 - \alpha_2c_2 + \Phi_1,$$

$$\begin{aligned}
 E_3 &= Bc_2 - \alpha_2c_1 - \Phi_2, E_4 = Bc_2 - \beta_1c_1 + \Phi_2, \\
 E_5 &= Ac_1 - \beta_1c_2 - \Phi_1, E_6 = Bc_2 + \beta_1c_1 - \Phi_2, \\
 E_7 &= Ac_1 + \alpha_2c_2 - \Phi_1, \\
 E_8 &= \beta_1c_1\Phi_1 + \alpha_2c_2\Phi_2 - \Phi_1\Phi_2, \\
 E_9 &= AB - \alpha_2\beta_1, E_{12} = \alpha_2 - \beta_1 \\
 E_{10} &= Ac_1^2 + Bc_2^2 + (\alpha_2 + \beta_1)c_1c_2, \\
 E_{11} &= A\Phi_2(\alpha_2c_1 - Bc_2) + B\Phi_1(\beta_1c_2 - Ac_1).
 \end{aligned}$$

证明 求式(10)关于  $p_1, p_2, \theta$  的一阶导数, 可得

$$\frac{\partial \Pi_{SC}}{\partial p_1} = -Ap_1 - \alpha_2p_2 - A(p_1 - c_1) - \beta_1(p_2 - c_2) + \Gamma\theta + \Phi_1 = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial \Pi_{SC}}{\partial p_2} = -Bp_2 - \beta_1p_1 - \alpha_2(p_1 - c_1) - B(p_2 - c_2) + \Phi_2 = 0, \quad (12)$$

$$\frac{\partial \Pi_{SC}}{\partial \theta} = (p_1 - c_1)\Gamma - 2I\theta = 0. \quad (13)$$

由式(10)可以计算  $\Pi_{SC}$  的海塞矩阵  $H_1$  为

$$H_1(p_1, p_2, \theta) = \begin{bmatrix} -2A & -E_1 & \Gamma \\ -E_1 & -2B & 0 \\ \Gamma & 0 & -2I \end{bmatrix}. \quad (14)$$

为使  $\Pi_{SC}^*$  存在唯一解, 海塞矩阵  $H_1$  须为负定, 则令

$$\begin{aligned}
 4AB - E_1^2 &> 0, \\
 -2(4AB - E_1^2)I + 2B\Gamma^2 &< 0.
 \end{aligned}$$

联立式(11)~(13), 可得

$$p_1^{I*} = \frac{2BE_2I + E_1E_3I - Bc_1\Gamma^2}{(4AB - E_1^2)I - B\Gamma^2}, \quad (15)$$

$$p_2^{I*} = \frac{2E_1E_5I + (4AI - \Gamma^2)E_4}{2(4AB - E_1^2)I - 2B\Gamma^2}, \quad (16)$$

$$\theta^{I*} = -\frac{\Gamma(2BE_5 + E_1E_4)}{2(4AB - E_1^2)I - 2B\Gamma^2}. \quad (17)$$

将式(15)~(17)代入(10), 可得供应链最优利润

$$\begin{aligned}
 \Pi_{SC}^{I*} &= \\
 &\frac{1}{4(4AB - E_1^2)I - 4B\Gamma^2} \times [4(E_1E_8 + E_{11} + \\
 &E_9E_{10} - A\Phi_2E_6 - B\Phi_1E_7)I - (E_6\Gamma)^2]. \quad (18)
 \end{aligned}$$

由此, 定理1得证.  $\square$

## 4 分散式决策下供应链各成员的决策分析

### 4.1 制造商主导的分散式决策

制造商主导的分散决策(标记为MS)是由两个势力较大的制造商和一个势力相对较小的零售商组成的市场. 该市场由两个制造商控制, 制造商和零售商之间的关系被模拟为一个顺序的非合作博弈, 其中两个制造商是领导者, 零售商是追随者.

#### 4.1.1 制造商主导的Bertrand博弈(模型II)

在MS-Bertrand模型中, 两个制造商首先同时公布其决策信息, 绿色生产的制造商1和传统生产的制造商2同时进行决策, 即绿色生产的制造商1决定产品1的批发价格和绿色制造水平, 而传统生产的制造商2决定产品2的批发价格, 然后零售商根据两个制造商决策情况再决定两个互补品的零售价格. 将MS-Bertrand模型描述为

$$\begin{cases} \max_{\omega_1, \theta} \Pi_{M_1}(\omega_1, p_1^*(\omega_1, \omega_2, \theta), p_2^*(\omega_1, \omega_2, \theta), \theta), \\ \max_{\omega_2} \Pi_{M_2}(\omega_2, p_1^*(\omega_1, \omega_2, \theta), p_2^*(\omega_1, \omega_2, \theta)), \end{cases} \quad (19)$$

其中  $p_1^*(\omega_1, \omega_2, \theta)$ 、 $p_2^*(\omega_1, \omega_2, \theta)$  由下面问题求解得出:

$$\max_{p_1, p_2} \Pi_R(p_1, p_2).$$

采用逆向归纳法求解MS-Bertrand模型, 得到如下定理.

定理2 如果

$$\begin{aligned}
 4AB - E_1^2 &> 0, \\
 \frac{-F_1F_9I - F_3^2}{(4AB - E_1^2)^2} &> 0, \quad -\frac{F_6}{4AB - E_1^2} < 0,
 \end{aligned}$$

则在MS-Bertrand模型下, 制造商1和制造商2的最优批发价格、零售商的最优零售价格、制造商1的最优绿色制造水平、产品1和产品2的最优需求量分别为

$$\begin{aligned}
 \omega_1^{\Pi*} &= \frac{G_3I + G_2c_1}{G_1I + G_2}, \quad \omega_2^{\Pi*} = \frac{G_4I + G_5}{G_1I + G_2}, \\
 p_1^{\Pi*} &= \frac{H_1I + H_2}{(G_1I + G_2)F_9}, \quad p_2^{\Pi*} = \frac{H_3I + H_4}{(G_1I + G_2)F_9}, \\
 \theta^{\Pi*} &= \frac{G_6}{G_1I + G_2}, \\
 D_1^{\Pi*} &= \frac{J_1I + J_2}{(G_1I + G_2)F_9}, \quad D_2^{\Pi*} = \frac{J_3I + J_4}{(G_1I + G_2)F_9}.
 \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned}
 E_{13} &= 2AB - \alpha_2^2 - \alpha_2\beta_1, \quad E_{14} = 2AB - \alpha_2\beta_1 - \beta_1^2, \\
 E_{15} &= 2B\Gamma, \quad E_{16} = (\alpha_2 + \beta_1)\Gamma, \\
 E_{17} &= 2B\Phi_1 - (\alpha_2 + \beta_1)\Phi_2, \\
 E_{18} &= 2A\Phi_2 - (\alpha_2 + \beta_1)\Phi_1, \\
 F_1 &= -(2A\alpha_2E_{12} + 2AE_{13}), \quad F_2 = ABE_{12} - \alpha_2E_{14}, \\
 F_3 &= -4AB\Gamma + \alpha_2E_{16} - E_1^2\Gamma - AE_{15}, \\
 F_4 &= 4AB\Phi_1 - E_1^2\Phi_1 + A\alpha_2E_{12}c_1 + \\
 &\quad AE_{13}c_1 - AE_{17} - \alpha_2E_{18}, \\
 F_5 &= ABE_{12} + \beta_1E_{13}, \quad F_9 = 8AB - 2E_1^2 \\
 F_6 &= -2B\beta_1E_{12} + 2BE_{14}, \quad F_7 = -BE_{16} + \beta_1E_{15}, \\
 F_8 &= -4AB\Phi_2 + E_1^2\Phi_2 + B\beta_1E_{12}c_2 - \\
 &\quad BE_{14}c_2 + \beta_1E_{17} + BE_{18}, \\
 G_1 &= F_1F_6F_9 - F_2F_5F_9, \quad G_2 = F_2F_3F_7 - F_3^2F_6,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 G_3 &= F_2 F_8 F_9 - F_4 F_6 F_9, \quad G_4 = F_4 F_5 F_9 - F_1 F_8 F_9, \\
 G_5 &= -F_1 F_3 F_7 c_1 + F_3^2 F_5 c_1 - F_3 F_4 F_7 + F_3^2 F_8, \\
 G_6 &= -F_3(-F_1 F_6 c_1 + F_2 F_5 c_1 + F_2 F_8 - F_4 F_6), \\
 H_1 &= 2(E_{13} G_3 + E_{17} G_1 - B E_{12} G_4), \\
 H_2 &= 2(E_{13} G_2 c_1 + E_{15} G_6 + E_{17} G_2 - B E_{12} G_5), \\
 H_3 &= 2(E_{14} G_4 + E_{18} G_1 + A E_{12} G_3), \\
 H_4 &= 2(A E_{12} G_2 c_1 + E_{14} G_5 + E_{18} G_2 - E_{16} G_6), \\
 J_1 &= \Phi_1 F_9 G_1 - A H_1 - \alpha_2 H_3, \\
 J_2 &= \Phi_1 F_9 G_2 + F_9 G_6 \Gamma - A H_2 - \alpha_2 H_4, \\
 J_3 &= \Phi_2 F_9 G_2 - B H_3 - \beta_1 H_1, \\
 J_4 &= \Phi_2 F_9 G_2 - B H_4 - \beta_1 H_2.
 \end{aligned}$$

由  $\omega_1^{II*}$ 、 $\omega_2^{II*}$ 、 $\theta^{II*}$ 、 $p_1^{II*}$ 、 $p_2^{II*}$ 、 $D_1^{II*}$  和  $D_2^{II*}$  可以计算出制造商 1 和制造商 2 的最优利润、零售商的最优利润  $\Pi_R^{II*}$  以及供应链的最优利润  $\Pi_{SC}^{II*}$  分别为

$$\begin{aligned}
 \Pi_{M_1}^{II*} &= (\omega_1^{II*} - c_1) D_1^{II*} - I(\theta^{II*})^2, \\
 \Pi_{M_2}^{II*} &= (\omega_2^{II*} - c_2) D_2^{II*}, \\
 \Pi_R^{II*} &= (p_1^{II*} - \omega_1^{II*}) D_1^{II*} + (p_2^{II*} - \omega_2^{II*}) D_2^{II*}, \\
 \Pi_{SC}^{II*} &= \Pi_{M_1}^{II*} + \Pi_{M_2}^{II*} + \Pi_R^{II*}.
 \end{aligned}$$

**证明** 由式(9)可得  $\Pi_R$  的海塞矩阵  $H_2$  为

$$H_2(p_1, p_2) = \begin{bmatrix} -2A & -E_1 \\ -E_1 & -2B \end{bmatrix}. \quad (20)$$

为使最优  $\Pi_R$  存在唯一解,海塞矩阵  $H_2$  须为负定,则令  $4AB - E_1^2 > 0$ . 分别求  $\Pi_R$  对  $p_1$  和  $p_2$  的一阶导数,可得

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \Pi_R}{\partial p_1} &= -A p_1 - \alpha_2 p_2 - A(p_1 - \omega_1) - \\
 &\quad \beta_2(p_2 - \omega_2) + \Gamma \theta + \Phi_1 = 0, \quad (21)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \Pi_R}{\partial p_2} &= -B p_2 - \beta_1 p_1 - \alpha_2(p_1 - \omega_1) - \\
 &\quad B(p_2 - \omega_2) + \Phi_2 = 0. \quad (22)
 \end{aligned}$$

由式(21)和(22)可得

$$p_1 = \frac{E_{13} \omega_1 - B E_{12} \omega_2 + E_{15} \theta + E_{17}}{4AB - E_1^2}, \quad (23)$$

$$p_2 = \frac{E_{14} \omega_2 + A E_{12} \omega_1 - E_{16} \theta + E_{18}}{4AB - E_1^2}. \quad (24)$$

将式(23)和(24)代入制造商 1 和制造商 2 的利润函数中,可得关于  $\Pi_{M_1}$  的海塞矩阵  $H_3$  以及  $\Pi_{M_2}$  关于  $\omega_2$  的二阶偏导数

$$H_3(\omega_1, \theta) = \begin{bmatrix} \frac{F_1}{4AB - E_1^2} & \frac{F_3}{4AB - E_1^2} \\ F_3 & -F_9 I \\ \frac{F_1}{4AB - E_1^2} & \frac{F_3}{4AB - E_1^2} \end{bmatrix}, \quad (25)$$

$$\frac{\partial^2 \Pi_{M_2}}{\partial \omega_2^2} = -\frac{F_6}{4AB - E_1^2}. \quad (26)$$

为使最优  $\Pi_{M_1}$  和  $\Pi_{M_2}$  存在唯一解,海塞矩阵  $H_3$  须为负定,关于  $\omega_2$  的二阶偏导数也须为负,则令

$$\begin{aligned}
 &\frac{-F_1 F_9 I - F_3^2}{(4AB - E_1^2)^2} > 0, \\
 &-\frac{F_6}{4AB - E_1^2} < 0.
 \end{aligned}$$

因此,求  $\Pi_{M_1}$  对  $\omega_1$  和  $\theta$  的一阶导数,以及  $\Pi_{M_2}$  对  $\omega_2$  的一阶导数,可得

$$\frac{\partial \Pi_{M_1}}{\partial \omega_1} = \frac{F_1 \omega_1 + F_2 \omega_2 + F_3 \theta + F_4}{4AB - E_1^2} = 0, \quad (27)$$

$$\frac{\partial \Pi_{M_1}}{\partial \theta} = -\frac{F_3 \omega_1 + F_9 I \theta - F_3 c_1}{4AB - E_1^2} = 0, \quad (28)$$

$$\frac{\partial \Pi_{M_2}}{\partial \omega_2} = -\frac{F_5 \omega_1 + F_6 \omega_2 + F_7 \theta + F_8}{4AB - E_1^2} = 0. \quad (29)$$

联立式(27)~(29),可得  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  和  $\theta$  的最优解如下:

$$\omega_1^{II*} = \frac{G_3 I + G_2 c_1}{G_1 I + G_2}, \quad (30)$$

$$\omega_2^{II*} = \frac{G_4 I + G_5}{G_1 I + G_2}, \quad (31)$$

$$\theta^{II*} = \frac{G_6}{G_1 I + G_2}. \quad (32)$$

将式(30)~(32)代入(23)和(24),可得产品 1 和产品 2 的最优零售价格为

$$p_1^{II*} = \frac{H_1 I + H_2}{(G_1 I + G_2) F_9}, \quad (33)$$

$$p_2^{II*} = \frac{H_3 I + H_4}{(G_1 I + G_2) F_9}. \quad (34)$$

进而得到产品 1 和产品 2 的最优需求量

$$D_1^{II*} = \frac{J_1 I + J_2}{(G_1 I + G_2) F_9}, \quad (35)$$

$$D_2^{II*} = \frac{J_3 I + J_4}{(G_1 I + G_2) F_9}. \quad (36)$$

故 MS-Bertrand 模型下制造商 1、制造商 2、零售商以及供应链的最优利润为

$$\Pi_{M_1}^{II*} = (\omega_1^{II*} - c_1) D_1^{II*} - I(\theta^{II*})^2,$$

$$\Pi_{M_2}^{II*} = (\omega_2^{II*} - c_2) D_2^{II*},$$

$$\Pi_R^{II*} = (p_1^{II*} - \omega_1^{II*}) D_1^{II*} + (p_2^{II*} - \omega_2^{II*}) D_2^{II*},$$

$$\Pi_{SC}^{II*} = \Pi_{M_1}^{II*} + \Pi_{M_2}^{II*} + \Pi_R^{II*}. \quad \square$$

#### 4.1.2 制造商主导的 Stackelberg 博弈(模型 III)

当两个制造商依次采取行动时,假设制造商 1 充当领导者,制造商 2 充当追随者. 制造商 1 首先决定产品 1 的批发价格和绿色制造水平,然后制造商 2 决定产品 2 的批发价格以使其达到最大化利润,最后零售商再根据两个制造商的决策决定两种产品的零售价

格. 将MS-Stackelberg模型描述为

$$\begin{aligned} \max_{\omega_1, \theta} \quad & \Pi_{M_1}(\omega_1, p_1^*(\omega_1, \omega_2^*(\omega_1, \theta), \theta), \\ & p_2^*(\omega_1, \omega_2^*(\omega_1, \theta), \theta), \theta), \end{aligned} \quad (37)$$

其中 $\omega_2^*(\omega_1, \theta)$ 是由下面问题求解得出:

$$\max_{\omega_2} \Pi_{M_2}(\omega_2, p_1^*(\omega_1, \omega_2, \theta), p_2^*(\omega_1, \omega_2, \theta)),$$

$p_1^*(\omega_1, \omega_2, \theta), p_2^*(\omega_1, \omega_2, \theta)$ 由问题 $\max_{p_1, p_2} \Pi_R(p_1, p_2)$ 求解得出.

采用逆向归纳法的求解思路,得到如下定理.

**定理3** 如果

$$\begin{aligned} 4AB - E_1^2 > 0, \quad \frac{-F_1 F_9 I - F_3^2}{(4AB - E_1^2)^2} > 0, \\ -\frac{F_6}{4AB - E_1^2} < 0, \quad \frac{-2H_5 F_6 F_9 I - H_6^2}{F_6^2 F_9^2} > 0, \end{aligned}$$

则在MS-Stackelberg模型下,制造商1和制造商2的最优批发价格、零售商的最优零售价格、制造商1的最优绿色制造水平以及产品1和产品2的最优需求量分别为

$$\begin{aligned} \omega_1^{\text{III}*} &= \frac{-H_7 H_8 I - H_6^2 c}{H_5 H_8 I - H_6^2}, \\ \omega_2^{\text{III}*} &= \frac{1}{(H_5 H_8 I - H_6^2) F_6} \times [F_6 H_6^2 c_1 + F_8 H_6^2 + \\ & (F_5 H_7 H_8 - F_8 H_5 H_8) I - F_7 H_5 H_6 c_1 - F_7 H_6 H_7], \\ p_1^{\text{III}*} &= \frac{1}{(H_5 H_8 I - H_6^2) F_6 F_9} \times [G_8 H_5 H_6 c_1 - G_7 H_6^2 c_1 + \\ & (G_9 H_5 H_8 - G_7 H_7 H_8) I + G_8 H_6 H_7 - G_9 H_6^2], \\ p_2^{\text{III}*} &= \frac{1}{(H_5 H_8 I - H_6^2) F_6 F_9} \times [G_{11} H_5 H_6 c_1 - G_{10} H_6^2 c_1 + \\ & (G_{12} H_5 H_8 - G_{10} H_7 H_8) I + G_{11} H_6 H_7 - G_{12} H_6^2], \\ \theta^{\text{III}*} &= \frac{H_6(H_5 c_1 + H_7)}{H_5 H_8 I - H_6^2}, \\ D_1^{\text{III}*} &= \frac{J_5 I + J_6}{(H_5 H_8 I - H_6^2) F_6 F_9}, \\ D_2^{\text{III}*} &= \frac{J_7 I + J_8}{(H_5 H_8 I - H_6^2) F_6 F_9}. \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} G_7 &= 2(E_{13} F_6 + B E_{12} F_5), \\ G_8 &= 2(E_{15} F_6 + B E_{12} F_7), \\ G_9 &= 2(E_{17} F_6 + B E_{12} F_8), \\ G_{10} &= 2(A E_{12} F_6 - E_{14} F_5), \\ G_{11} &= 2(-E_{14} F_7 - E_{16} F_6), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_{12} &= 2(-E_{14} F_8 + E_{18} F_6), \\ H_5 &= -2AG_7 - 2\alpha_2 G_{10}, \quad H_8 = -2F_6 F_9, \\ H_6 &= F_6 F_9 \Gamma - AG_8 - \alpha_2 G_{11}, \\ H_7 &= F_6 F_9 \Phi_1 + AG_7 c_1 + \alpha_2 G_{10} c_1 - AG_9 - \alpha_2 G_{12}, \\ J_5 &= F_6 F_9 H_5 H_8 \Phi_1 + AG_7 H_7 H_8 - AG_9 H_5 H_8 + \\ & \alpha_2 G_{10} H_7 H_8 - \alpha_2 G_{12} H_5 H_8, \\ J_6 &= F_6 F_9 H_5 H_6 \Gamma c_1 - \alpha_2 G_{11} H_5 H_6 c_1 + AG_7 H_6^2 c_1 - \\ & AG_8 H_5 H_6 c_1 - F_6 F_9 H_6^2 \Phi_1 + F_6 F_9 H_6 H_7 \Gamma + \\ & AG_9 H_6^2 + \alpha_2 G_{10} H_6^2 c_1 - AG_8 H_6 H_7 - \\ & \alpha_2 G_{11} H_6 H_7 + \alpha_2 G_{12} H_6^2, \\ J_7 &= F_6 F_9 H_5 H_8 \Phi_2 + BG_{10} H_7 H_8 - BG_{12} H_5 H_8 + \\ & \beta_1 G_7 H_7 H_8 - \beta_1 G_9 H_5 H_8, \\ J_8 &= BG_{10} H_6^2 c_1 - BG_{11} H_5 H_6 c_1 - \beta_1 G_8 H_5 H_6 c_1 - \\ & F_6 F_9 H_6^2 \Phi_2 + \beta_1 G_7 H_6^2 c_1 - BG_{11} H_6 H_7 + \\ & BG_{12} H_6^2 - \beta_1 G_8 H_6 H_7 + \beta_1 G_9 H_6^2. \end{aligned}$$

由 $\omega_1^{\text{III}*}, \omega_2^{\text{III}*}, \theta^{\text{III}*}, p_1^{\text{III}*}, p_2^{\text{III}*}, D_1^{\text{III}*}$ 和 $D_2^{\text{III}*}$ 可以计算制造商1和制造商2的最优利润、零售商的最优利润以及供应链的最优利润分别为

$$\begin{aligned} \Pi_{M_1}^{\text{III}*} &= (\omega_1^{\text{III}*} - c_1) D_1^{\text{III}*} - I(\theta^{\text{III}*})^2, \\ \Pi_{M_2}^{\text{III}*} &= (\omega_2^{\text{III}*} - c_2) D_2^{\text{III}*}, \\ \Pi_R^{\text{III}*} &= (p_1^{\text{III}*} - \omega_1^{\text{III}*}) D_1^{\text{III}*} + (p_2^{\text{III}*} - \omega_2^{\text{III}*}) D_2^{\text{III}*}, \\ \Pi_{\text{SC}}^{\text{III}*} &= \Pi_{M_1}^{\text{III}*} + \Pi_{M_2}^{\text{III}*} + \Pi_R^{\text{III}*}. \end{aligned}$$

证明过程与定理2类似,故在此省略.

## 4.2 零售商主导的分散决策

零售商主导的分散决策(标记为RS)出现在两个制造商规模较小而零售商规模较大的市场.该市场由零售商控制,制造商和零售商之间的关系被模拟为一个顺序的非合作博弈,零售商是领导者,两个制造商是追随者.零售商可以通过降低价格来影响每个产品的销售,同时通过挤压制造商的利润来维持销售利润.

### 4.2.1 零售商主导的Bertrand博弈(模型IV)

当两个制造商进行Bertrand竞争时,零售商首先决定两个互补品的零售价格,然后两个制造商观察其零售价格后,同时作出决策,即制造商1给出产品1的批发价格和绿色制造水平,制造商2给出产品2的批发价格.将RS-Bertrand模型表达为

$$\max_{p_1, p_2} \Pi_R(p_1, p_2, \omega_1^*(p_1, p_2), \omega_2^*(p_1, p_2), \theta^*(p_1, p_2)), \quad (38)$$

其中 $\omega_1^*(p_1, p_2), \omega_2^*(p_1, p_2), \theta^*(p_1, p_2)$ 是由下面问题求解得出:

$$\begin{cases} \max_{\omega_1, \theta} \Pi_{M_1}(\omega_1, \theta), \\ \max_{\omega_2} \Pi_{M_2}(\omega_2). \end{cases}$$

求解RS-Bertrand模型, 可得如下定理.

**定理4** 如果

$$2AI - \Gamma^2 > 0, B > 0, \frac{L_1L_4 - L_2^2}{4K_1^2} > 0,$$

则在RS-Bertrand模型下, 制造商1和制造商2的最优批发价格、零售商的最优零售价格和制造商1的最优绿色制造水平分别为

$$\begin{aligned} \omega_1^{IV*} &= \frac{1}{(L_1L_4 - L_2^2)K_1} \times (K_2L_2L_5 - K_2L_3L_4 - \\ &\quad K_3L_1L_5 + K_3L_2L_3 + K_4L_1L_4 - K_4L_2^2), \\ \omega_2^{IV*} &= \frac{1}{2(L_1L_4 - L_2^2)K_1} \times (K_5L_2L_5 - K_5L_3L_4 - \\ &\quad K_6L_1L_5 + K_6L_2L_3 + K_7L_1L_4 - K_7L_2^2), \\ p_1^{IV*} &= \frac{1}{(L_1L_4 - L_2^2)K_1} \times (K_1L_2L_5 - \\ &\quad K_1L_3L_4 + K_2L_2L_5 - K_2L_3L_4 - \\ &\quad K_3L_1L_5 + K_3L_2L_3 + K_4L_1L_4 - K_4L_2^2), \\ p_2^{IV*} &= \frac{1}{2(L_1L_4 - L_2^2)K_1} \times (2K_1L_2L_3 + \\ &\quad K_5L_2L_5 - 2K_1L_1L_5 - K_7L_2^2 - \\ &\quad K_5L_3L_4 - K_6L_1L_5 + K_6L_2L_3 + K_7L_1L_4), \\ \theta^{IV*} &= \frac{1}{2(L_1L_4 - L_2^2)K_1} \times (E_{19}L_2L_5 - E_{19}L_3L_4 - \\ &\quad E_{20}L_1L_5 + E_{20}L_2L_3 + E_{21}L_1L_4 - E_{21}L_2^2). \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} E_{19} &= \Gamma(-2AB + \alpha_2\beta_1), E_{20} = -\alpha_2B\Gamma, \\ E_{21} &= \Gamma(-2ABc_1 + \alpha_2\beta_1c_1 - \\ &\quad B\alpha_2c_2 + 2B\Phi_1 - \alpha_2\Phi_2), \\ K_1 &= 4ABI - \alpha_2\beta_1I - B\Gamma^2, \\ K_2 &= -2ABI + \alpha_2\beta_1I, \\ K_3 &= -\alpha_2BI, K_5 = -2A\beta_1I + \beta_1\Gamma^2, \\ K_4 &= 2ABc_1I - B\Gamma^2c_1 - B\alpha_2c_2I + \\ &\quad 2B\Phi_1I - \alpha_2\Phi_2I, \\ K_6 &= -4ABI + B\Gamma^2 + 2\alpha_2\beta_1I, \\ K_7 &= 4ABc_2I - 2A\beta_1c_1I - B\Gamma^2c_2 + \beta_1\Gamma^2c_1 + \\ &\quad 4AI\Phi_2 - \Gamma^2\Phi_2 - 2\beta_1I\Phi_1, \\ L_1 &= 4AK_1 + 4AK_2 + 2\alpha_2K_5 - 2E_{19}\Gamma, \\ L_2 &= 2AK_3 + BK_5 + 2\alpha_2K_1 + 2\beta_1K_1 + \\ &\quad 2\beta_1K_2 + \alpha_2K_6 - E_{20}\Gamma, \\ L_3 &= 2AK_4 - 2K_1\Phi_1 + \alpha_2K_7 - E_{21}\Gamma, \\ L_4 &= 4BK_1 + 2BK_6 + 4\beta_1K_3, \end{aligned}$$

$$L_5 = BK_7 - 2K_1\Phi_2 + 2\beta_1K_4,$$

由 $\omega_1^{IV*}$ 、 $\omega_2^{IV*}$ 、 $\theta^{IV*}$ 、 $p_1^{IV*}$ 和 $p_2^{IV*}$ 可以计算制造商1和制造商2的最优利润、零售商的最优利润以及供应链的最优利润分别为

$$\begin{aligned} \Pi_{M_1}^{IV*} &= (\omega_1^{IV*} - c_1)(\Phi_1 - Ap_1^{IV*} - \\ &\quad \alpha_2p_2^{IV*} + \Gamma\theta^{IV*}) - I(\theta^{IV*})^2, \\ \Pi_{M_2}^{IV*} &= (\omega_2^{IV*} - c_1)(\Phi_2 - Bp_2^{IV*} - \beta_1p_1^{IV*}), \\ \Pi_R^{IV*} &= (p_2^{IV*} - \omega_2^{IV*})(\Phi_2 - Bp_2^{IV*} - \beta_1p_1^{IV*}) + \\ &\quad (p_1^{IV*} - \omega_1^{IV*})(\Phi_1 - Ap_1^{IV*} - \alpha_2p_2^{IV*} + \Gamma\theta^{IV*}), \\ \Pi_{SC}^{IV*} &= \Pi_{M_1}^{IV*} + \Pi_{M_2}^{IV*} + \Pi_R^{IV*}. \end{aligned}$$

证明过程与定理2类似, 故在此省略.

#### 4.2.2 零售商主导的Stackelberg博弈(模型V)

在这种决策情况下, 假定采取绿色制造的制造商1充当领导者, 传统制造商2充当追随者. 零售商首先决定零售价格, 然后制造商1决定产品1的批发价格和绿色制造水平以使其利润达到最大化, 最后制造商2决定产品2的批发价格. 将RS-Stackelberg模型表达为

$$\max_{p_1, p_2} \Pi_R(p_1, p_2, \omega_1^*(p_1, p_2), \omega_2^*(p_1, p_2), \theta^*(p_1, p_2)), \tag{39}$$

其中 $\omega_1^*(p_1, p_2)$ 、 $\omega_2^*(p_1, p_2)$ 、 $\theta^*(p_1, p_2)$ 由下面问题求解得出:

$$\max_{\omega_1, \theta} \Pi_{M_1}(\omega_1, \theta, p_1, p_2), \tag{40}$$

$\omega_2^*(p_1, p_2)$ 由问题 $\max_{\omega_2} \Pi_{M_2}(\omega_2, p_1, p_2)$ 求解得出.

在RS-Stackelberg模型中, 通过主从博弈和逆向归纳法求解, 得到如下定理.

**定理5** 如果

$$\begin{aligned} B > 0, \frac{4ABI - B\Gamma^2 - 2\alpha_2\beta_1I}{B} > 0, \\ 2AI - \Gamma^2 > 0, \frac{N_1N_4 - N_2^2}{4B^2K_8^2} > 0, \end{aligned}$$

则在MS-Stackelberg模型下, 制造商1和制造商2的最优批发价格、零售商的最优零售价格和制造商1的最优绿色制造水平分别为

$$\begin{aligned} \omega_1^{V*} &= \frac{1}{(N_1N_4 - N_2^2)K_8} \times (K_2N_2N_5 - K_2N_3N_4 - \\ &\quad K_3N_1N_5 + K_3N_2N_3 + K_4N_1N_4 - K_4N_2^2), \\ \omega_2^{V*} &= \frac{1}{2(N_1N_9 - N_2^2)BK_8} \times (L_6N_2N_5 - L_6N_3N_4 - \\ &\quad L_7N_1N_5 + L_7N_2N_3 + L_8N_1N_4 - L_8N_2^2), \\ p_1^{V*} &= \frac{1}{(N_1N_4 - N_2^2)K_8} \times (K_2N_2N_5 - \\ &\quad K_2N_3N_4 - K_3N_1N_5 + K_3N_2N_3 + \end{aligned}$$

$$K_4 N_1 N_4 - K_4 N_2^2 + K_8 N_2 N_5 - K_8 N_3 N_4),$$

$$p_2^{V*} = \frac{1}{2(N_1 N_4 - N_2^2)BK_8} \times (-2BK_8 N_1 N_5 +$$

$$2BK_8 N_2 N_3 + L_6 N_2 N_5 - L_7 N_1 N_5 -$$

$$L_7 N_2 N_3 + L_8 N_1 N_4 - L_6 N_3 N_4 - L_8 N_2^2),$$

$$\theta^{V*} = \frac{1}{2(N_1 N_4 - N_2^2)K_8} \times (E_{19} N_2 N_5 - E_{19} N_3 N_4 -$$

$$E_{20} N_1 N_5 + E_{20} N_2 N_3 + E_{21} N_1 N_4 - E_{21} N_2^2).$$

其中

$$K_8 = 4AB\Gamma - B\Gamma^2 - 2\alpha_2\beta_1 I,$$

$$L_6 = -\beta_1 K_2 - \beta_1 K_8, L_7 = -BK_8 - \beta_1 K_3,$$

$$L_8 = -BK_8 c_2 - \beta_1 K_4 + \Phi_2 K_8,$$

$$N_1 = 4ABK_2 + 4ABK_8 - 2BE_{19}\Gamma + 2\alpha_2 L_6,$$

$$N_2 = 2ABK_3 - BE_{20}\Gamma + 2\beta_1 BK_2 + 2\alpha_2 BK_8 +$$

$$2\beta_1 BK_8 + BL_6 + \alpha_2 L_7,$$

$$N_3 = 2ABK_4 - BE_{21}\Gamma - 2B\Phi_1 K_8 + \alpha_2 L_8,$$

$$N_4 = 4B^2 K_8 + 4\beta_1 BK_3 + 2BL_7,$$

$$N_5 = -2\beta_1 BK_4 - 2B\Phi_2 K_8 + BL_8.$$

由  $\omega_1^{V*}$ 、 $\omega_2^{V*}$ 、 $\theta^{V*}$ 、 $p_1^{V*}$  和  $p_2^{V*}$  可得制造商1和制造商2的最优利润、零售商的最优利润以及供应链的最优利润分别为

$$\Pi_{M_1}^{V*} = (\omega_1^{V*} - c_1)(\Phi_1 - Ap_1^{V*} - \alpha_2 p_2^{V*} +$$

$$\Gamma\theta^{V*}) - I(\theta^{V*})^2,$$

$$\Pi_{M_2}^{V*} = (\omega_2^{V*} - c_2)(\Phi_2 - Bp_2^{V*} - \beta_1 p_1^{V*}),$$

$$\Pi_R^{V*} = (p_2^{V*} - \omega_2^{V*})(\Phi_2 - Bp_2^{V*} - \beta_1 p_1^{V*}) +$$

$$(p_1^{V*} - \omega_1^{V*})(\Phi_1 - Ap_1^{V*} - \alpha_2 p_2^{V*} + \Gamma\theta^{V*}),$$

$$\Pi_{SC}^{V*} = \Pi_{M_1}^{V*} + \Pi_{M_2}^{V*} + \Pi_R^{V*}.$$

证明过程与定理2类似,故在此省略.

### 5 算例分析

分析集中式决策和分散式决策两种决策在5种模型下,绿色投入系数( $I$ )对绿色制造水平( $\theta$ )、制造商1利润、制造商2利润、零售商利润以及供应链总利润的影响;产品1的需求对其互补品价格的交叉价格敏感程度( $\alpha_2$ ),以及产品2的需求对其互补品价格的交叉价格敏感程度( $\beta_1$ )分别对产品1和产品2最优零售价格的影响.假定参数设置为: $\Phi_1 = \Phi_2 = 500, A = 0.9, B = 1.1, \Gamma = 0.8, c_1 = 30, c_2 = 10$ .

#### 5.1 绿色投入系数( $I$ )对绿色制造水平( $\theta$ )和供应链利润的影响

研究绿色投入系数( $I$ )对绿色制造水平( $\theta$ )、制造商1利润、制造商2利润、零售商利润以及供应链总利润的影响时,令  $\alpha_2 = \beta_1 = 0.3, I \in [0.4, 1]$ . 首先,研

究绿色投入系数( $I$ )对绿色制造水平( $\theta$ )的影响.由图3可知,绿色制造水平随绿色投入系数呈递减趋势,且集中式决策下的绿色制造水平高于分散式决策,零售商主导的分散式决策下的绿色制造水平高于制造商主导的分散式决策,而绿色制造水平在Bertrand模型和Stackelberg模型中几乎无明显差别.

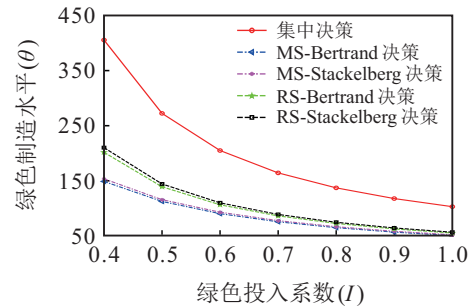


图3 绿色投入系数  $I$  对绿色制造水平  $\theta$  的影响

对于企业而言,进行绿色制造势必会产生投入成本,且会带来未知的风险,即投入和产出不一定成正比.经济学中著名的“理性人”假设使得供应链上各成员会趋利避害,如前期投入较少,对绿色生产制造采取观望态度等.因此,同样进行绿色投入,集中式决策更有利于提升绿色制造水平.

其次,研究绿色投入系数  $I$  对供应链上各成员最优利润的影响.图4~图7描述了绿色投入系数与制造商、零售商以及供应链的最优利润的关系.不难发现,随着绿色投入系数的增加,制造商1、零售商以及供应链的最优利润都在逐渐减少,而制造商2的利润却呈增长趋势,且在以制造商为主导的市场结构中较为明显.

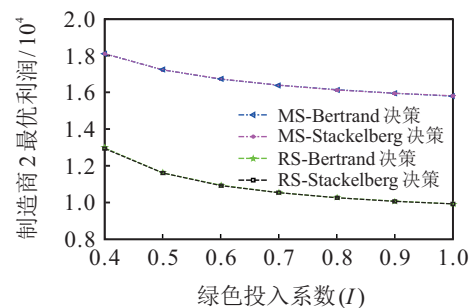


图4 绿色投入系数  $I$  对制造商1最优利润的影响

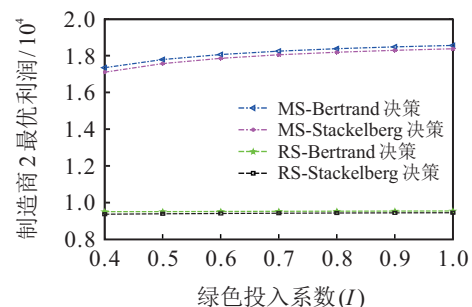


图5 绿色投入系数  $I$  对制造商2最优利润的影响

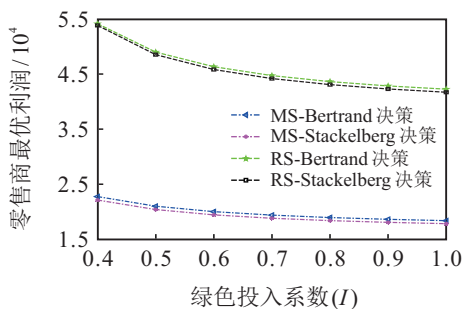


图6 绿色投入系数 I 对零售商最优利润的影响

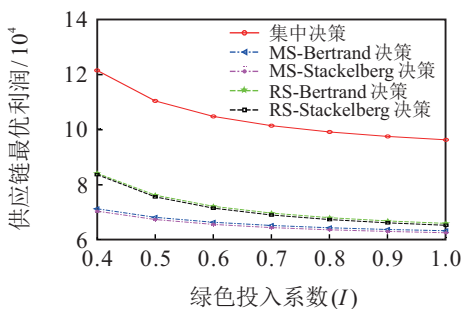


图7 绿色投入系数 I 对供应链最优利润的影响

### 5.2 产品1的需求对其互补品价格的交叉价格敏感程度(α<sub>2</sub>)对互补品零售价格的影响

研究  $\alpha_2$  对  $p_1$ 、 $p_2$  的影响时,令  $\beta_1 = 0.3, I = 0.6, \alpha_2 \in [0.2, 0.8]$ . 由图8和图9可知,在分散式决策下,随着产品1的需求对其互补品价格的交叉价格敏感程度的增加,产品1的零售价格会下降;相反地,产品2的零售价格会随之上升. 在集中式决策下,随着产品1的需求对其互补品价格的交叉价格敏感程度的增加,产品1的零售价格先下降再上升;随着产品1的需求对其互补品价格的交叉价格敏感程度的增加,产品2的零售价格下降.

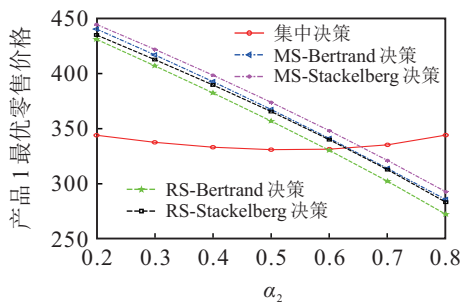


图8 α<sub>2</sub> 对 p<sub>1</sub> 的影响

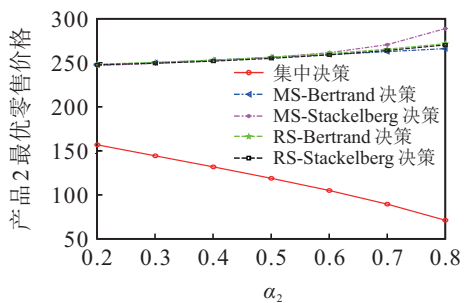


图9 α<sub>2</sub> 对 p<sub>2</sub> 的影响

### 5.3 产品2的需求对其互补品价格的交叉价格敏感程度(β<sub>1</sub>)对互补品零售价格的影响

探讨  $\beta_1$  对  $p_1$ 、 $p_2$  的影响时,令  $\alpha_2 = 0.3, I = 0.6, \beta_1 \in [0.2, 0.8]$ . 由图10和图11可知,无论决策方式和市场势力如何,随着产品2的需求对其互补品价格的交叉价格敏感程度的增加,产品1的零售价格大致都上升;相反地,产品2的零售价格会随之下降.

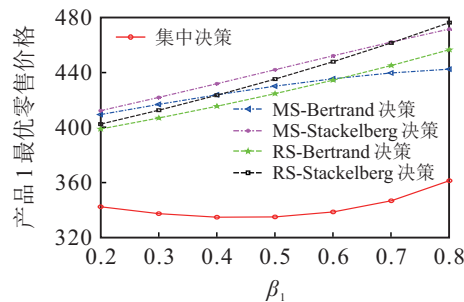


图10 β<sub>1</sub> 对 p<sub>1</sub> 的影响

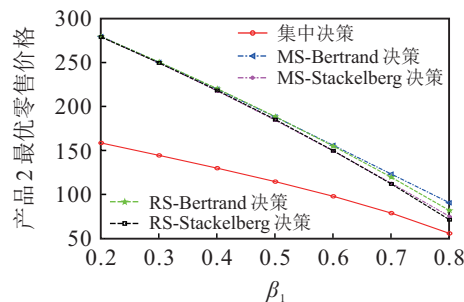


图11 β<sub>1</sub> 对 p<sub>2</sub> 的影响

## 6 结论

本文将绿色投入系数和绿色制造水平引入到二级供应链系统中,研究了绿色投入系数对绿色制造水平、制造商1和制造商2的利润、零售商的利润以及供应链总利润的影响. 研究了产品1和产品2的互补品价格的交叉价格敏感程度对产品1和产品2最优零售价格的影响. 首先,给出5种供应链结构模型下,制造商1、制造商2和零售商的最优批发价格、制造商1的绿色制造水平、制造商利润、零售商利润以及供应链利润. 其次,研究了模型参数对绿色制造水平、供应链绩效以及零售价格的影响,发现绿色制造水平随着绿色投入系数的增加而减少,且集中式决策对于绿色制造水平最为有利,分散式决策下产品1和产品2的最优零售价格高于集中决策等. 再次,研究了绿色投入系数对绿色制造水平和供应链各成员绩效的影响,发现当只有制造商1进行绿色制造时,绿色投入会影响其最终的收益,但是互补品的性质会使采取传统制造的制造商从中获利. 最后,探讨了两种产品的需求对其互补品价格的交叉价格敏感程度对最优零售价格的影响,发现在分散式决策情形下,产品1的零售价格会随着产品1的交叉价格弹性系数的增加而下

降,而随着产品2的交叉价格敏感程度的增加而上升,对产品2也有类似的结论。

本文只探讨了一个制造商进行绿色制造时供应链各成员的定价策略,如果两个制造商同时进行绿色制造,供应链各成员如何决策也是值得深入研究的问题。此外,本文假设绿色制造投入成本完全由制造商来承担,但在实际中,还可能存在制造商和零售商按一定的比例进行成本共担的情况。因此,考虑在该绿色供应链上如何进行契约设计,使得供应链达到协调也是后续的研究方向。

#### 参考文献(References)

- [1] 卢伟. 绿色经济发展的国际经验及启示[J]. 中国经贸导刊, 2012(16): 40-42.  
(Lu W. International experiences and enlightenment of green economy development[J]. China Economic Trade Herald, 2012(16): 40-42.)
- [2] 中国制造2025. 中国电子报[R]. 北京: 中国电子报社, 2015.  
(Made in China 2025. China Electronics News[R]. Beijing: Electronic Newspaper of China, 2015.)
- [3] Wei J, Zhao J, Li Y J. Pricing decisions for complementary products with firms' different market powers[J]. European J of Operational Research, 2013, 224(3): 507-519.
- [4] Wei J, Zhao J, Li Y J. Price and warranty period decisions for complementary products with horizontal firms' cooperation or noncooperation strategies[J]. J of Cleaner Production, 2015, 105: 86-102.
- [5] 张玉忠, 楚永杰, 刘层层. 二级供应链上不完备互补产品的定价决策[J]. 运筹与管理, 2016, 25(3): 57-64.  
(Zhang Y Z, Chu Y J, Liu C C. Pricing decisions in two-level supply chain of imperfect complementary products[J]. Operations Research and Management Science, 2016, 25(3): 57-64.)
- [6] Giri R N, Mondal S K, Maiti M. Analysis of pricing decision for substitutable and complementary products with a common retailer[J]. Pacific Science Review A: Natural Science and Engineering, 2016, 18(3): 190-202.
- [7] Wang L, Song H, Wang Y. Pricing and service decisions of complementary products in a dual-channel supply chain[J]. Computers and Industrial Engineering, 2017, 105: 223-233.
- [8] Dehghanbaghi N, Sajadieh M S. Joint optimization of production, transportation and pricing policies of complementary products in a supply chain[J]. Computers and Industrial Engineering, 2017, 107: 150-157.
- [9] Mukhopadhyay S K, Yue X, Zhu X. A Stackelberg model of pricing of complementary goods under information asymmetry[J]. Int J of Production Economics, 2011, 134(2): 424-433.
- [10] Shao L, Li S. Bundling and product strategy in channel competition[J]. Int Trans in Operational Research, 2017, 24: 1-22.
- [11] 但斌, 田丽娜, 董绍辉. 考虑溢出效应的互补品企业间广告决策模型研究[J]. 中国管理科学, 2013, 21(2): 64-75.
- [12] 易余胤, 张显玲. 网络外部性下零售商市场策略演化博弈分析[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(9): 2251-2261.  
(Yi Y Y, Zhang X L. Evolutionary game analysis of market strategy of retailers under network externality[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2015, 35(9): 2251-2261.)
- [13] Yan R, Bandyopadhyay S. The profit benefits of bundle pricing of complementary products[J]. J of Retailing and Consumer Services, 2011, 18(4): 355-361.
- [14] Xia Y, Xiao T, Zhang G P. Distribution channel strategies for a manufacturer with complementary products[J]. Decision Sciences, 2013, 44(1): 39-56.
- [15] Ende J, Jaspers F, Rijdsdijk S A. Should system firms develop complementary products? A dynamic model and an empirical test[J]. Product Development and Management Association, 2013, 30(6): 1178-1198.
- [16] Li B, Zhu M, Jiang Y, et al. Pricing policies of a competitive dual-channel green supply chain[J]. J of Cleaner Production, 2016, 112: 2029-2042.
- [17] Yang D, Xiao T. Pricing and green level decisions of a green supply chain with governmental interventions under fuzzy uncertainties[J]. J of Cleaner Production, 2017, 149(15): 1174-1187.
- [18] 江世英, 李随成, 王欢. 考虑风险规避的绿色供应链定价策略[J]. 系统工程, 2016, 34(3): 94-100.  
(Jiang S Y, Li S C, Wang H. Pricing decision of green supply chain considering risk aversion[J]. Systems Engineering, 2016, 34(3): 94-100.)
- [19] Zhang C, Wang H, Ren M. Research on pricing and coordination strategy of green supply chain under hybrid production mode[J]. Computers and Industrial Engineering, 2014, 72: 24-31.
- [20] 李芹芹. 绿色供应链企业的定价与绿色创新决策研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学管理学院, 2015.  
(Li Q Q. Research on pricing and green innovation decisions of green supply chain[D]. Heifei: The School of Management, University of Science and Technology of China, 2015.)
- [21] Cao J, Zhang X. Coordination strategy of green supply chain under the free market mechanism[J]. Energy Procedia, 2013, 36: 1130-1137.
- [22] Ma C, Li T, Li C, et al. Pricing strategy and governments intervention for green supply chain with strategic customer behavior[J]. J of Systems Science and Information, 2014, 2(3): 206-216.
- [23] Ghosh D, Shah J. Supply chain analysis under green sensitive consumer demand and cost sharing contract[J]. Int J of Production Economics, 2015, 164: 319-329.
- [24] Zhu W, He Y. Green product design in supply chains under competition[J]. European J of Operational Research, 2017, 258: 165-180.