

## 考虑公平的绿色供应链定价与产品绿色度决策

石平<sup>1</sup>, 颜波<sup>2</sup>, 石松<sup>2</sup>

(1. 广东工业大学 管理学院, 广州 510520; 2. 华南理工大学 经济与贸易学院, 广州 510006)

**摘要** 绿色供应链中制造商进行产品绿色化投资付出大量的研发成本, 将会更加关注渠道利润分配的公平. 建立博弈模型研究公平关切行为和产品绿色化效率对绿色供应链定价策略、产品绿色度、供应链各方利润以及整体利润的影响. 研究发现: 产品绿色度和供应链利润在分散式决策下都会低于集中式决策, 且随着产品绿色化效率的提高, 差距也变得越来越小, 然而绿色产品销售价格在不同供应链决策模式下大小关系的比较, 具体取决于产品绿色化效率; 产品绿色化效率较低时, 公平关切行为会加重供应链“双重边际效应”; 公平关切制造商做出的决策在损害下游零售商利益的同时也损害了己方利益, 需要注意的是, 虽然制造商的利润也在遭受损失, 但是其利润所占渠道总利润的份额却在不断增大.

**关键词** 绿色供应链; 产品绿色度; 定价; 公平关切; 行为运筹

## Pricing and product green degree decisions in green supply chains with fairness concerns

SHI Ping<sup>1</sup>, YAN Bo<sup>2</sup>, SHI Song<sup>2</sup>

(1. School of Management, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510520, China; 2. School of Economics and Commerce, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract** We incorporate the concept of fairness in a green product supply chain which consists of one manufacturer and one retailer to investigate how fairness concerns and green efficiency may affect retail price, product green degree, profits of channel members, and total channel profit by establishing game theoretical models of the green supply chain. In the green supply chain, the manufacturer puts in some effort for greening the product and distributes the green product to the end customers through an independent retailer channel. The research finds that: 1) The profits and product green degree are higher in the case of integrated channel compared to the decentralized channel. As the value of greening effectiveness coefficient increases, the performance gap between integrated and decentralized channel widens. However, the retail prices may be higher or lower in the integrated channel depending on the value of greening effectiveness coefficient; 2) The manufacturer's behavior of fairness concerns aggravates the "double marginalization" issue in the distribution channels if the greening effectiveness coefficient is below a certain threshold; 3) The manufacturer's behavior of fairness concerns not only be harmful to the retailer's profit and total channel profit, but also harmful to herself profit. Interestingly, although the manufacturer's profits are coming down, the relative share of manufacturer's profit in the total channel are rising.

收稿日期: 2014-12-31

**作者简介:** 石平 (1989-), 男, 安徽宿松人, 讲师, 博士, 研究方向: 运营与供应链管理, 决策优化与博弈分析; 颜波 (1970-), 男, 湖南怀化人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 物流与供应链管理, E-mail: yanbo@scut.edu.cn; 石松 (1988-), 男, 安徽宿松人, 博士研究生, 研究方向: 运营与供应链管理, 优化与规划.

**基金项目:** 广东省自然科学基金 (2016A030313485); 广东省哲学社会科学“十二五”规划项目 (GD15CGL15); 广东省软科学研究计划项目 (2013B070206013, 2015A070704005); 中央高校基本科研业务费专项资金 (2015XZD14, 2015KXKYJ02)

**Foundation item:** Guangdong Natural Science Foundation (2016A030313485); Guangdong "12th Five-Year" Philosophy and Social Sciences Planning Project (GD15CGL15); Guangdong Soft Science Research Project (2013B070206013, 2015A070704005); Fundamental Research Funds for the Central Universities (2015XZD14, 2015KXKYJ02)

**中文引用格式:** 石平, 颜波, 石松. 考虑公平的绿色供应链定价与产品绿色度决策 [J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(8): 1937-1950.

**英文引用格式:** Shi P, Yan B, Shi S. Pricing and product green degree decisions in green supply chains with fairness concerns[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2016, 36(8): 1937-1950.

**Keywords** green supply chain; product green degree; pricing; fairness concerns; behavioral operations

## 1 引言

绿色供应链将是未来供应链发展的主要方向,建立并实践绿色供应链已经成为各国工业发展的一个战略性任务<sup>[1]</sup>。在人类日益重视环境保护和可持续发展的背景下,由于受到来自政府规制和国际绿色壁垒的压力以及消费者绿色环保意识的逐渐增强,为赢得持续的竞争优势,企业长远的选择是积极承担社会和环境责任,采取积极措施投入力量到产品绿色化行动中,向市场提供资源节约型和环境友好型的绿色产品,保持长期的市场竞争力<sup>[2-4]</sup>。一些制造企业开始考虑将绿色技术作为产品差异化的手段,以此开辟新的市场,提高企业竞争力,并且已经获得了良好的商业实践<sup>[5]</sup>。现实商业实践中已经有很多企业从绿色行动中获得了利好,不管是在盈利能力上还是企业声誉上已经得到了市场和社会的认可<sup>[6-7]</sup>。

无论是从营销的视角还是从供应链的视角,绿色供应链给学术界和企业界提出了很多值得思考、富有挑战性的问题。为了回答这些问题,在绿色供应链方面出现了很多的研究成果。Fahimnia 等<sup>[8]</sup>和 Gunasekaran 等<sup>[9]</sup>介绍了绿色供应链管理的研究进展,并分析了现有研究的特征、研究趋势以及有待深入研究的问题。Shi 等<sup>[10]</sup>针对绿色供应链的采购环节提出了绿色供应商选择的基本流程,构建了一套完整的绿色供应商评估与选择的指标体系,并提供了一种系统化的 DEA 方法对绿色供应商进行客观的定量评价。曹束等<sup>[11]</sup>则针对采购环节中原材料绿色度隐匿的逆向选择问题,研究了不对称信息下制造商的激励契约设计。周永圣等<sup>[12]</sup>将银行绿色信贷引入到政府促进企业实施绿色供应链中,通过建立政府与银行之间的进化博弈模型,分析了两方参与主体的进化稳定策略。江世英和李随成<sup>[13]</sup>建立了考虑产品绿色度的四种绿色供应链博弈模型,在产品绿色度、产品价格等方面对四种博弈模型进行了对比分析。朱庆华和窦一杰<sup>[14]</sup>则考虑产品绿色度和政府补贴建立绿色供应链博弈模型,分析了政府的最优补贴策略以及制造商的最优产品绿色度水平。熊中楷等<sup>[15]</sup>分析了碳税和消费者环保意识对单位产品碳排放量和供应链成员利润的影响。Liu 等<sup>[16]</sup>和 Zhang 等<sup>[17]</sup>则分析了消费者环保意识和产品替代性对绿色供应链均衡策略以及利润的影响。Xi 和 Lee<sup>[18]</sup>考虑到绿色产品的市场需求由产品绿色度水平以及零售价格共同决定,分析了绿色供应链的产品绿色化投资策略问题。Swami 和 Shah<sup>[19]</sup>重点关注绿色供应链中制造商与零售商之间的渠道冲突,研究绿色供应链成员之间的协调问题。Zhang 和 Liu<sup>[20]</sup>进一步将两级供应链扩展到三级供应链,研究了三级绿色供应链成员之间的协调问题。Ghosh 和 Shah<sup>[21]</sup>则提出了两种类型的成本共享契约以协调绿色供应链成员之间的渠道冲突问题。

以上研究均假设决策者是完全理性的,决策者总以自身利益最大化作为决策准则。但是,行为经济学研究却发现,在现实生活中决策者不仅仅关注自身的利益,而有可能在感到不公平时以己方利益受损为代价采取行动达到惩罚对方的目的以期实现更为公平的结果。许多实证研究以及行为经济学实验均证实了公平关切行为的存在<sup>[22-23]</sup>。营销学调查也表明,公平因素在发展和维持渠道伙伴关系时发挥着至关重要的作用<sup>[24]</sup>。目前,把公平关切行为引入供应链决策中展开行为运筹分析的文献还很少。Cui 等<sup>[25]</sup>在确定性需求下发现,如果渠道成员关注公平,那么只需要设置适当的批发价格就可以使得供应链协调。杜少甫等<sup>[26]</sup>则在随机需求下分析公平关切行为对供应链契约的影响,发现公平关切行为不会改变供应链契约的协调状态。马利军等<sup>[27]</sup>研究了幂函数需求形式下具有公平偏好的供应链的协调问题。王宁宁等<sup>[28]</sup>研究了模糊需求环境下具有公平偏好的两级供应链的收益共享契约与协调问题。浦徐进等<sup>[29]</sup>在制造商主导的二级供应链框架下分析零售商的公平偏好对促销努力和供应链运作效率的影响,发现零售商的公平偏好有利于提高自身的效用水平,但会降低制造商和供应链整体的效用水平。Wu 和 Niederhoffs<sup>[30]</sup>通过拓展参照体系改进了传统的公平偏好效用函数,并在报童模型的框架下分析了公平偏好对二级供应链运作效率的影响。浦徐进和金德龙<sup>[31]</sup>在此基础上进一步分析了公平偏好对三级供应链运作效率的影响。但是,上述研究是以对方利润作为判断得失的公平参考点,要求的是渠道利润分配的绝对公平性。在现实情况中,公平具有相对性,供应链各方的实力与贡献会影响到渠道利润分配的公平性,文献<sup>[32-33]</sup>则以纳什讨价还价解作为公平参考值,反映的是相对公平,更加符合真实的决策环境。

综上所述,现有研究绿色供应链的文献大部分是基于决策者完全理性的假设,而在现实情况中绿色供应链成员在遭受到渠道利润分配不公平时可能会以己方利润受损为代价采取行动达到惩罚对方的目的以期实现更为公平的结果。从研究发展和成果补充的角度来看,目前尚缺乏考虑公平关切行为的绿色供应链研究文献。与现有研究不同,本文考虑由制造商和零售商组成的两级绿色供应链,制造商生产绿色产品并通过零售

商向市场进行销售, 由于制造商进行产品绿色化投资付出了大量的研发成本, 因此制造商将会更加关注自身在渠道利润分配上的公平性, 分别在考虑与不考虑制造商公平关切行为特性的情形下对绿色供应链进行定量建模分析, 研究公平关切行为和产品绿色化效率对绿色供应链定价策略、产品绿色度水平、供应链各方利润以及供应链整体利润的影响.

## 2 问题描述与符号说明

在绿色可持续发展的背景下, 由于受到来自政府规制和国际绿色壁垒的压力以及消费者绿色环保意识的逐渐增强, 为赢得持续的竞争优势, 制造企业长远的选择是积极承担社会和环境责任, 采取积极措施投入力量到产品绿色化行动中, 向市场提供资源节约型和环境友好型的绿色产品, 保持长期的市场竞争力. 本文考虑由一个制造商与一个零售商所构成的绿色供应链, 制造商生产某种绿色产品并通过零售商向市场进行销售. 绿色产品制造商通过在产品的设计研发以及生产制造环节改进技术手段和更新设施设备, 投入一定程度的产品绿色化投资成本, 从而降低产品使用及废弃处理过程中的能源消耗和污染物排放. 在该背景下, 绿色产品制造商由于在向消费市场提供绿色产品的过程中进行产品绿色化投资付出了大量的研发成本, 因此制造商将会更加关注渠道利润分配的公平性. 绿色产品制造商作为博弈的领导者先行动, 其决策包括选择合适的产品绿色度水平, 向下游零售商提供合适的绿色产品批发价格. 处于下游位置的零售商则会根据上游制造商提供的批发价格和产品绿色度水平以自身利益最大化作为决策准则确定绿色产品最优的零售价格. 绿色产品的市场需求由产品绿色度水平以及零售价格共同决定.

在上述背景下, 本文研究绿色供应链定价以及产品绿色度水平的均衡策略, 并分析产品绿色化效率、制造商公平关切程度等参数对绿色供应链定价策略、产品绿色度水平、供应链各方利润以及供应链整体利润的影响.

本文用到的符号说明如下:

$a$  为市场基础需求规模;

$c$  为制造商单位产品的生产成本;

$w$  为制造商提供给零售商的单位产品批发价格;

$p$  为绿色产品零售价格;

$\tau$  为产品绿色度水平;

$\alpha$  为消费者绿色偏好系数;

$\beta$  为制造商绿色产品研发成本系数;

$I$  为制造商绿色产品研发投资成本;

$\lambda$  为制造商公平关切系数, 且  $\lambda > 0$ ;

$\pi_m$  为制造商的利润;

$\pi_r$  为零售商的利润;

$\pi$  为供应链整体的利润.

## 3 模型构建

制造商向市场提供绿色产品需要在前期投入一定的产品绿色化研发投资成本, 该研发投资成本与产品绿色度水平正相关, 是产品绿色度水平的单调连续增函数, 且是加速递增过程, 绿色产品研发投资成本随着产品绿色度水平的提高而迅速增加. 借鉴文献 [16, 19] 的处理方法, 假定制造商前期投入的产品绿色化研发投资成本  $I$  与产品绿色度水平  $\tau$  成二次方关系, 即:

$$I = \beta\tau^2 \quad (1)$$

其中,  $\beta$  为制造商绿色产品研发成本系数.

绿色产品的市场需求由产品绿色度水平以及零售价格共同决定, 随着零售价格的升高而减小, 随着产品绿色度水平的升高而增大. 借鉴文献 [16, 19] 的处理方法, 设定绿色供应链面临的市场需求是产品绿色度水平以及零售价格的线性函数, 即:

$$D = a - p + \alpha\tau \quad (2)$$

上式中:  $a$  为市场基础需求规模,  $p$  为绿色产品零售价格,  $\tau$  为产品绿色度水平,  $\alpha$  为消费者绿色偏好系数. 为简化分析, 这里构建的需求函数没有加入专门的价格敏感系数, 而是将其进行归一化处理, 价格敏感系数取值为 1.

需要注意的是, 消费者绿色偏好系数  $\alpha$  表示绿色产品对市场需求的扩张效应, 这也是本文之所以将  $a$  称之为“基础需求规模”的原因. 另外, 需要说明的是, 与产品绿色化相关的消费者绿色偏好系数  $\alpha$  和制造商绿色产品研发成本系数  $\beta$  可以通过实证研究得到.

绿色产品制造商和零售商的利润函数分别为:

$$\pi_m = (w - c)D - I = (w - c)(a - p + \alpha\tau) - \beta\tau^2 \quad (3)$$

$$\pi_r = (p - w)D = (p - w)(a - p + \alpha\tau) \quad (4)$$

进一步, 得到绿色供应链整体的利润函数为:

$$\pi = \pi_m + \pi_r = (p - c)(a - p + \alpha\tau) - \beta\tau^2 \quad (5)$$

绿色供应链中, 当绿色产品制造商具有公平关切特性时, 制造商进行决策不仅仅关注自身的利润  $\pi_m$ , 同时还会关切渠道利润分配的公平性, 此时制造商决策的目标是考虑到公平关切的自身效用  $u_m$  最大化, 尽管某些措施可能会降低其利润水平. 下面求解绿色产品制造商具有公平关切特性时的效用函数  $u_m$ .

制造商所认为的渠道利润分配的公平性是相对于公平参考点而言的, 利润差异会带来效用的变化. 当制造商的利润低于其所认为的公平利润时, 制造商考虑到公平关切的效用降低; 反之, 效用增加.

关于公平参考点, 很多已有的研究以对方的利润作为判断是否达到公平的参考点, 己方利润高于对方利润时, 效用增加, 反之, 效用降低, 只考虑到渠道利润分配的绝对公平, 而忽视了客观的供应链各方实力与贡献. 然而, 在现实情况中, 公平具有相对性, 供应链各方的实力与贡献会影响到渠道利润分配的公平性, 合作博弈理论中的诸多博弈解概念 (如纳什讨价还价) 分别从各利益主体的实力与贡献角度提出了均衡的利益分配方案. 本文借鉴文献 [32-33] 的处理方法, 以供应链各方的纳什讨价还价解作为公平参考点, 据此来刻画绿色产品制造商对公平的感知, 反映的是相对公平, 更加符合真实的决策环境.

假设绿色供应链各方的纳什讨价还价公平参考解为  $(\bar{\pi}_m, \bar{\pi}_r)$ , 显然有  $\bar{\pi}_m + \bar{\pi}_r = \pi$ . 引入公平关切系数的概念来描述供应链成员具有公平关切特性时的效用函数. 在不影响研究科学性的基础上, 为了能突出研究重点并简化分析过程, 本文仅考虑绿色产品制造商的公平关切特性, 而设定零售商为公平中性的情形 (即  $\lambda_m = \lambda > 0, \lambda_r = 0$ ). 利润差异会带来效用的变化, 当绿色产品制造商的利润低于纳什讨价还价公平参考解时, 制造商考虑到公平关切的效用降低; 反之, 效用增加. 因此, 得到公平关切制造商和公平中性零售商的效用函数分别为:

$$u_m = \pi_m - \lambda(\bar{\pi}_m - \pi_m) \quad (6)$$

$$u_r = \pi_r \quad (7)$$

根据纳什公理化定义 [34-36] 可知, 供应链各方的纳什讨价还价公平参考解  $(\bar{\pi}_m, \bar{\pi}_r)$  即为最优的制造商与零售商双方利润分配组合  $(\pi_m^*, \pi_r^*)$ , 该利润分配组合能够使得下列模型取得最优值.

$$\begin{aligned} \max_{\pi_m, \pi_r} \psi &\equiv u_m u_r \\ \text{s.t. } \pi_m + \pi_r &= \pi \\ \pi_m, \pi_r &\in [0, \pi] \\ u_m, u_r &> 0 \end{aligned} \quad (8)$$

下面对该最优化模型进行求解. 将  $\bar{\pi}_m + \bar{\pi}_r = \pi$  和  $\pi_m + \pi_r = \pi$  代入 (6) 式得到:

$$u_m = (\pi - \pi_r) - \lambda((\pi - \bar{\pi}_r) - (\pi - \pi_r)) = (1 + \lambda)(\pi - \pi_r) - \lambda(\pi - \bar{\pi}_r) \quad (9)$$

进一步, 将 (9) 式和 (7) 式代入最优化模型 (8) 的目标函数, 得到:

$$\psi(\pi, \pi_r) \equiv u_m u_r = [(1 + \lambda)(\pi - \pi_r) - \lambda(\pi - \bar{\pi}_r)] \times \pi_r \quad (10)$$

求  $\psi(\pi, \pi_r)$  关于  $\pi_r$  的二阶偏导数, 得到  $\frac{\partial^2 \psi}{\partial \pi_r^2} = -2(1 + \lambda) < 0$ , 因此  $\psi(\pi, \pi_r)$  是关于  $\pi_r$  的严格凹函数. 故存在唯一的最优值  $\pi_r^*$  使得目标函数  $\psi(\pi, \pi_r)$  取得最大值, 同时该最优值  $\pi_r^*$  必然满足如下一阶条件:

$$\frac{\partial \psi(\pi, \pi_r^*)}{\partial \pi_r} = \pi - 2(1 + \lambda)\pi_r^* + \lambda\bar{\pi}_r = 0 \quad (11)$$

根据不动点定理可知纳什讨价还价解即为所求的公平参考解, 即  $\pi_r^* = \bar{\pi}_r$ . 因此, 将  $\pi_r^* = \bar{\pi}_r$  代入 (11) 式可以得到零售商的纳什讨价还价公平参考解为:

$$\bar{\pi}_r = \frac{1}{2 + \lambda} \pi \tag{12}$$

因为  $\bar{\pi}_m + \bar{\pi}_r = \pi$ , 结合 (12) 式可以得到制造商的纳什讨价还价公平参考解为:

$$\bar{\pi}_m = \frac{1 + \lambda}{2 + \lambda} \pi \tag{13}$$

将 (13) 式代入 (6) 式得到相对公平下绿色产品制造商具有公平关切特性时的效用函数为:

$$u_m = (1 + \lambda)\pi_m - \frac{\lambda(1 + \lambda)}{2 + \lambda} \pi \tag{14}$$

### 4 均衡结果

本节分别在集中式决策、制造商公平中性的分散式决策、制造商公平关切的分散式决策三种供应链决策情形下计算出绿色供应链各方的均衡策略以及供应链整体的利润.

#### 4.1 集中式决策

集中式决策的目标是使得供应链整体的利润最大化, 对 (5) 式求函数关于  $\tau$  和  $p$  的二阶导数得到:  $\frac{\partial^2 \pi}{\partial \tau^2} = -2\beta < 0$ ,  $\frac{\partial^2 \pi}{\partial p \partial \tau} = \frac{\partial^2 \pi}{\partial \tau \partial p} = \alpha$ ,  $\frac{\partial^2 \pi}{\partial p^2} = -2 < 0$ . 要想使得绿色供应链整体的利润函数  $\pi$  能取得极大值, 必须有:

$$\left(\frac{\partial^2 \pi}{\partial p \partial \tau}\right)^2 - \left(\frac{\partial^2 \pi}{\partial p^2}\right)\left(\frac{\partial^2 \pi}{\partial \tau^2}\right) = \alpha^2 - 4\beta < 0 \tag{15}$$

当  $\alpha^2 - 4\beta < 0$ , 也即  $0 < \frac{\alpha^2}{\beta} < 4$  时, 绿色供应链整体的利润  $\pi$  是绿色产品零售价格  $p$  和产品绿色度水平  $\tau$  的联合凹函数, 因而存在唯一确定的  $p^*$  和  $\tau^*$  使得供应链整体的利润函数  $\pi$  取得极大值  $\pi^*$ ; 否则, 当  $\alpha^2 - 4\beta \geq 0$  时, 供应链整体的利润函数  $\pi$  无极大值点. 最大化 (5) 式, 令  $\pi$  关于  $p$  和  $\tau$  的一阶偏导数等于 0, 得到绿色供应链整体利润最大时的绿色产品最优零售价格和绿色度水平分别为:

$$p^* = c + \frac{2\beta}{(4\beta - \alpha^2)} \times (a - c) \tag{16}$$

$$\tau^* = \frac{\alpha}{(4\beta - \alpha^2)} \times (a - c) \tag{17}$$

将 (16) 式和 (17) 式代入 (5) 式, 得到集中式决策模式下绿色供应链整体的利润为:

$$\pi^* = \frac{\beta}{(4\beta - \alpha^2)} \times (a - c)^2 \tag{18}$$

#### 4.2 制造商公平中性的分散式决策

绿色产品制造商公平中性的分散式决策情形下, 制造商先行动, 根据自身对市场情况的了解以及从零售商处获得的信息, 制造商以自身利润最大化作为决策准则确定合适的绿色产品批发价格和绿色度水平. 零售商则根据上游制造商给定的批发价格和绿色度水平做出反应, 以自身利润最大化作为决策准则确定最优的绿色产品零售价格. 这是一个典型的完全信息动态博弈, 在该动态博弈过程中, 绿色产品制造商作为 Stackelberg 博弈的领导者, 而零售商作为 Stackelberg 博弈的跟随者. 下面采用逆向归纳法求解该动态博弈.

在 Stackelberg 博弈的第二阶段, 作为跟随者的下游零售商根据上游绿色产品制造商给定的批发价格和绿色度水平, 以自身利润最大化作为决策准则做出反应, 选择最优的绿色产品零售价格. 通过最大化 (4) 式, 得到零售商最优零售价格的反应函数为:

$$p = \frac{a + w + \alpha\tau}{2} \tag{19}$$

将 (19) 式代入 (3) 式, 容易判断  $\pi_m$  是关于  $w$  和  $\tau$  的联合凹函数, 最大化 (3) 式, 令  $\pi_m$  关于  $w$  和  $\tau$  的一阶偏导数等于 0, 得到制造商公平中性的分散式决策情形下制造商确定的绿色产品最优批发价格和绿色度水平分别为:

$$w^D = c + \frac{4\beta}{(8\beta - \alpha^2)} \times (a - c) \tag{20}$$

$$\tau^D = \frac{\alpha}{(8\beta - \alpha^2)} \times (a - c) \tag{21}$$

将 (20) 式和 (21) 式代入 (19) 式, 得到制造商公平中性的分散式决策情形下零售商制定的绿色产品最优零售价格为:

$$p^D = c + \frac{6\beta}{(8\beta - \alpha^2)} \times (a - c) \quad (22)$$

进一步, 将 (21) 式和 (22) 式代入 (5) 式, 得到制造商公平中性的分散式决策情形下绿色供应链整体的利润为:

$$\pi^D = \frac{\beta(12\beta - \alpha^2)}{(8\beta - \alpha^2)^2} \times (a - c)^2 \quad (23)$$

#### 4.3 制造商公平关切的分散式决策

绿色供应链中, 制造商生产绿色产品并通过零售商向市场进行销售, 由于绿色产品制造商进行产品绿色化投资付出了大量的研发成本, 因此制造商将会更加关注渠道利润分配的公平性. 当绿色产品制造商具有公平关切特性时, 制造商进行决策不仅仅关注自身的利润  $\pi_m$ , 同时还会关切渠道利润分配的公平性. 此时, 绿色产品制造商决策的目标是考虑到公平关切的自身效用  $u_m$  最大化, 尽管某些措施可能会降低其利润水平, 而下游零售商的决策目标仍然是自身利润  $\pi_r$  最大化. 依然采用逆向归纳法进行求解.

在 Stackelberg 博弈的第二阶段, 作为跟随者的下游零售商依然是以自身利润最大化作为决策准则做出反应, 通过最大化自身利润  $\pi_r$  来确定最优的绿色产品零售价格, 即在绿色产品制造商具有公平关切特性的情况下, 零售商最优零售价格的反应函数与制造商公平中性的分散式决策情形相一致.

在 Stackelberg 博弈的第一阶段, 绿色产品制造商决策的目标是考虑到公平关切的自身效用  $u_m$  最大化, 以此确定最优批发价格和产品绿色度水平. 将 (3) 式、(5) 式以及 (19) 式代入 (14) 式, 容易判断制造商效用函数  $u_m$  是关于  $w$  和  $\tau$  的联合凹函数, 最大化 (14) 式, 令  $u_m$  关于  $w$  和  $\tau$  的一阶偏导数等于 0, 得到绿色产品制造商公平关切的分散式决策情形下制造商确定的最优批发价格和产品绿色度水平分别为:

$$w_\lambda^D = c + \frac{2\beta(2 + \lambda)}{(8\beta + 2\beta\lambda - \alpha^2)} \times (a - c) \quad (24)$$

$$\tau_\lambda^D = \frac{\alpha}{(8\beta + 2\beta\lambda - \alpha^2)} \times (a - c) \quad (25)$$

类似于上一节的处理过程, 将 (24) 式和 (25) 式代入 (19) 式, 得到制造商公平关切的分散式决策情形下零售商制定的绿色产品最优零售价格为:

$$p_\lambda^D = c + \frac{2\beta(\lambda + 3)}{(8\beta + 2\beta\lambda - \alpha^2)} \times (a - c) \quad (26)$$

将 (24) 式、(25) 式以及 (26) 式分别代入 (3) 式和 (4) 式, 得到绿色产品制造商制造商公平关切的分散式决策情形下制造商和零售商的利润分别为:

$$\pi_{m\lambda}^D = \frac{\beta(8\beta + 4\beta\lambda - \alpha^2)}{(8\beta + 2\beta\lambda - \alpha^2)^2} \times (a - c)^2 \quad (27)$$

$$\pi_{r\lambda}^D = \frac{4\beta^2}{(8\beta + 2\beta\lambda - \alpha^2)^2} \times (a - c)^2 \quad (28)$$

同理, 将 (25) 式和 (26) 式代入 (5) 式, 得到绿色产品制造商公平关切的分散式决策情形下绿色供应链整体的利润为:

$$\pi_\lambda^D = \frac{\beta(12\beta + 4\beta\lambda - \alpha^2)}{(8\beta + 2\beta\lambda - \alpha^2)^2} \times (a - c)^2 \quad (29)$$

#### 4.4 可行性条件

通过观察分别在三种供应链决策情形下计算得出的绿色供应链各方均衡策略, 可以很直观地看到一些很有趣的规律. 首先, 批发价格和零售价格的表达式都可以通过简单的变形进一步表示为边际利润的形式, 即批发价格和零售价格的均衡结果表达式可以通过简单的移项变形为制造商的边际利润  $w - c$  和供应链的边际利润  $p - c$  的形式. 并且, 可以很直观地看出制造商的边际利润和供应链的边际利润都是产品绿色化相关的参数  $\alpha$  和  $\beta$  表示的分式与  $(a - c)$  乘积的形式. 其中,  $(a - c)$  可以直观地理解为补偿生产成本后能够剩余的市场基础需求规模. 接下来分析与产品绿色化相关的参数的可行性条件.

与产品绿色化相关的参数  $\alpha$  和  $\beta$  分别表示绿色产品对市场需求的扩张效应和制造商为产品绿色化投入的研发成本系数, 这里进一步定义  $\frac{\alpha^2}{\beta}$  为产品绿色化效率系数.

注意到 (16) 式可以通过简单移项进一步变形为:

$$p^* - c = \frac{2\beta}{(4\beta - \alpha^2)} \times (a - c) = \frac{2}{(4 - \frac{\alpha^2}{\beta})} \times (a - c) \quad (30)$$

由于  $p^* - c$  代表了供应链的边际利润, 只有当  $p^* - c$  大于 0 时供应链才有运营的可能. 而  $(a - c)$  直观地理解为补偿生产成本后能够剩余的市场基础需求规模, 也必定大于 0. 因此, 得到  $(4 - \frac{\alpha^2}{\beta}) > 0$ , 即  $\frac{\alpha^2}{\beta} < 4$ . 进一步, 由于  $\alpha$  和  $\beta$  均为正数, 得到产品绿色化效率系数的可行范围为:  $0 < \frac{\alpha^2}{\beta} < 4$ .

结合约束条件 (15) 式, 得到产品绿色化效率系数的可行性条件为:

$$0 < \frac{\alpha^2}{\beta} < 4 \quad (31)$$

### 5 分析与讨论

本节对前面理论建模得到的均衡结果进行分析与讨论, 以期能更好地分析与解释一些现实商业现象背后的内在原因, 并尽量挖掘出一些有创新性和参考价值的管理启示.

集中式决策、制造商公平中性的分散式决策、制造商公平关切的分散式决策三种供应链决策情形下绿色供应链各方均衡策略以及供应链整体利润对比如表 1 所示. 接下来, 根据表 1 对三种不同供应链决策情形下的绿色产品零售价格、产品绿色度水平、供应链利润进行对比与分析.

表 1 不同供应链决策情形下绿色供应链各方均衡策略以及供应链整体利润

	制造商公平关切的分散式决策	制造商公平中性的分散式决策	集中式决策
产品绿色度水平	$\tau_\lambda^D = \frac{\alpha}{(8\beta + 2\beta\lambda - \alpha^2)} \times (a - c)$	$\tau^D = \frac{\alpha}{(8\beta - \alpha^2)} \times (a - c)$	$\tau^* = \frac{\alpha}{(4\beta - \alpha^2)} \times (a - c)$
批发价格	$w_\lambda^D = c + \frac{2\beta(2 + \lambda)}{(8\beta + 2\beta\lambda - \alpha^2)} \times (a - c)$	$w^D = c + \frac{4\beta}{(8\beta - \alpha^2)} \times (a - c)$	-
零售价格	$p_\lambda^D = c + \frac{2\beta(\lambda + 3)}{(8\beta + 2\beta\lambda - \alpha^2)} \times (a - c)$	$p^D = c + \frac{6\beta}{(8\beta - \alpha^2)} \times (a - c)$	$p^* = c + \frac{2\beta}{(4\beta - \alpha^2)} \times (a - c)$
供应链整体利润	$\pi_\lambda^D = \frac{\beta(12\beta + 4\beta\lambda - \alpha^2)}{(8\beta + 2\beta\lambda - \alpha^2)^2} \times (a - c)^2$	$\pi^D = \frac{\beta(12\beta - \alpha^2)}{(8\beta - \alpha^2)^2} \times (a - c)^2$	$\pi^* = \frac{\beta}{(4\beta - \alpha^2)} \times (a - c)^2$

**命题 1** 集中式决策下绿色供应链的产品绿色度水平是分散式决策供应链中制造商提供的产品绿色度水平的两倍以上, 并且这种差距会随着产品绿色化效率的提高而增大; 在制造商具有公平关切特性的情况下, 其提供的产品绿色度水平进一步降低.

**证明** 根据表 1 有  $\frac{\tau^*}{\tau^D} = \frac{(8\beta - \alpha^2)}{(4\beta - \alpha^2)} = \frac{2(4\beta - \alpha^2) + \alpha^2}{(4\beta - \alpha^2)} = \frac{2(4 - \frac{\alpha^2}{\beta}) + \frac{\alpha^2}{\beta}}{(4 - \frac{\alpha^2}{\beta})} > 2$ ,  $\frac{\tau^D}{\tau_\lambda^D} = \frac{(8\beta - \alpha^2 + 2\beta\lambda)}{(8\beta - \alpha^2)} = \frac{(8 - \frac{\alpha^2}{\beta} + 2\lambda)}{(8 - \frac{\alpha^2}{\beta})} = \frac{(8 - \frac{\alpha^2}{\beta}) + 2\lambda}{(8 - \frac{\alpha^2}{\beta})} > 1$ . 命题 1 证毕.

下面的性质 1 进一步分析了制造商公平关切程度对其提供的绿色产品批发价格和产品绿色度水平的影响.

**性质 1** 在绿色产品制造商客观存在公平关切特性的情况下, 随着其公平关切程度的增大, 其制定的绿色产品批发价格在不断提高, 然而其提供的产品绿色度水平却在不断降低.

**证明** 对 (24) 式求  $w_\lambda^D$  关于  $\lambda$  的一阶偏导数得到  $\frac{\partial w_\lambda^D}{\partial \lambda} = \frac{-2\beta(\alpha^2 - 4\beta)}{(8\beta + 2\beta\lambda - \alpha^2)^2} \times (a - c)$ , 由产品绿色化效率系数的可行性条件  $0 < \frac{\alpha^2}{\beta} < 4$  可知  $(\alpha^2 - 4\beta) < 0$ , 因此得到  $\frac{\partial w_\lambda^D}{\partial \lambda} > 0$ . 故制造商具有公平关切特性时, 其制定的批发价格随着自身公平关切程度的增大而提高.

同样地, 对 (25) 式求  $\tau_\lambda^D$  关于  $\lambda$  的一阶偏导数得到  $\frac{\partial \tau_\lambda^D}{\partial \lambda} = \frac{-2\alpha\beta}{(8\beta + 2\beta\lambda - \alpha^2)^2} \times (a - c) < 0$ . 故制造商具有公平关切特性时, 其提供的产品绿色度水平随着自身公平关切程度的增大而降低. 性质 1 证毕.

命题 1 表明, 绿色供应链在集中式决策下将会向市场提供绿色度水平更高的绿色产品, 并且集中式决策下的产品绿色度水平至少是分散式决策供应链的两倍以上. 进一步, 随着产品绿色化效率的提高, 两种决策模式下产品绿色度水平的差距也会变得越来越大. 另外, 命题 1 还表明, 在绿色产品制造商客观存在公平关切特性的情况下, 绿色供应链向市场提供的产品绿色度水平更低. 性质 1 则说明了, 与只关注利润的绿色供应链相比, 绿色产品制造商具有公平关切特性时, 其制定的批发价格和产品绿色度水平趋于保守. 并且, 随着制造商公平关切程度的增大, 其做出的决策越来越趋于保守. 也即随着  $\lambda$  的增大, 制造商制定的绿色产品批

发价格  $w^D$  在不断提高, 其提供的产品绿色度水平  $\tau_\lambda^D$  却在不断降低, 并且越来越偏离供应链系统的最优值. 这就说明绿色产品制造商越是关注公平, 其做出的决策就越是趋于保守. 背后的原因是, 由于绿色产品制造商进行产品绿色化投资需要付出大量的研发成本, 因此制造商将会更加关注渠道利润分配的公平性, 制造商公平关切特性的客观存在使得其出于公平关切倾向做出的决策趋于保守, 更注重眼前利益 (提高批发价格使得产品边际利润提高, 降低产品绿色度水平从而降低研发成本), 使得其决策偏离理性的最优决策.

通过上述对命题 1 和性质 1 的分析, 这也就从侧面说明, 绿色供应链上下游企业通过合作形成“超组织”联盟的形式 (即集中式决策) 能够带来产品绿色度水平的提升, 并且当产品绿色化效率越高时, 通过合作形成“超组织”联盟能够带来的产品绿色度水平的提升空间将会越大. 进一步, 随着绿色产品制造商公平关切程度的增大, 通过合作形成“超组织”联盟能够带来的产品绿色度水平的提升空间也将会越大. 这就说明, 在绿色产品制造商客观存在公平关切特性的情况下, 制造商公平关切程度越大, 绿色供应链上下游企业通过合作形成“超组织”联盟的作用就越是明显.

**命题 2** 集中式决策下绿色供应链整体利润至少高出分散式决策供应链整体利润的  $\frac{4}{3}$  倍; 在制造商具有公平关切特性的情况下, 分散式决策供应链的整体利润进一步降低.

**证明** 根据表 1 可以得到  $\frac{\pi^*}{\pi^D} = \frac{(8\beta - \alpha^2)^2}{(4\beta - \alpha^2)(12\beta - \alpha^2)} = \frac{(8 - \frac{\alpha^2}{\beta})^2}{(4 - \frac{\alpha^2}{\beta})(12 - \frac{\alpha^2}{\beta})} = \frac{(8 - \frac{\alpha^2}{\beta})^2}{\frac{3}{4}(8 - \frac{\alpha^2}{\beta})^2 - \frac{\alpha^2}{\beta}(4 - \frac{1}{4}\frac{\alpha^2}{\beta})}$ . 由可行性条件  $0 < \frac{\alpha^2}{\beta} < 4$  得到  $\frac{\alpha^2}{\beta}(4 - \frac{1}{4}\frac{\alpha^2}{\beta}) > 0$ , 因此  $\frac{\pi^*}{\pi^D} > \frac{(8 - \frac{\alpha^2}{\beta})^2}{\frac{3}{4}(8 - \frac{\alpha^2}{\beta})^2}$ , 即  $\frac{\pi^*}{\pi^D} > \frac{4}{3}$ .

同样地, 根据表 1 可以得到  $\frac{\pi^D}{\pi_\lambda^D} = \frac{(12\beta - \alpha^2)(8\beta + 2\beta\lambda - \alpha^2)^2}{(12\beta + 4\beta\lambda - \alpha^2)(8\beta - \alpha^2)^2} = \frac{(12 - \frac{\alpha^2}{\beta})(8 + 2\lambda - \frac{\alpha^2}{\beta})^2}{(12 + 4\lambda - \frac{\alpha^2}{\beta})(8 - \frac{\alpha^2}{\beta})^2}$ , 该式可以进一步变形为  $\frac{(12 + 4\lambda - \frac{\alpha^2}{\beta})(8 - \frac{\alpha^2}{\beta})^2 + 4\lambda[12\lambda + 32 - (\lambda + 4)\frac{\alpha^2}{\beta}]}{(12 + 4\lambda - \frac{\alpha^2}{\beta})(8 - \frac{\alpha^2}{\beta})^2}$ . 由可行性条件  $0 < \frac{\alpha^2}{\beta} < 4$ , 另外  $\lambda > 0$ , 可以推知  $[12\lambda + 32 - (\lambda + 4)\frac{\alpha^2}{\beta}]$  属于开区间  $(8\lambda + 16, 12\lambda + 32)$ . 因此, 得到  $\frac{\pi^D}{\pi_\lambda^D} > 1$ . 命题 2 证毕.

下面的性质 2 则进一步分析了制造商公平关切程度对绿色供应链各方利润以及供应链整体利润的影响.

**性质 2** 在绿色产品制造商客观存在公平关切特性的情况下, 制造商的利润、零售商的利润以及绿色供应链整体的利润都随着制造商公平关切程度的增大而降低.

**证明** 对 (27) 式求  $\pi_{m\lambda}^D$  关于  $\lambda$  的一阶偏导数得到  $\frac{\partial \pi_{m\lambda}^D}{\partial \lambda} = \frac{8\beta^3\lambda}{(\alpha^2 - 8\beta - 2\beta\lambda)^3} \times (a - c)^2$ . 由产品绿色化效率系数的可行区间  $0 < \frac{\alpha^2}{\beta} < 4$  可知  $(\alpha^2 - 8\beta - 2\beta\lambda) < 0$ , 因此得到  $\frac{\partial \pi_{m\lambda}^D}{\partial \lambda} < 0$ . 故制造商具有公平关切特性时, 其利润随着自身公平关切程度的增大而降低.

对 (28) 式求  $\pi_{r\lambda}^D$  关于  $\lambda$  的一阶偏导数得到  $\frac{\partial \pi_{r\lambda}^D}{\partial \lambda} = \frac{16\beta^3}{(\alpha^2 - 8\beta - 2\beta\lambda)^3} \times (a - c)^2 < 0$ . 故制造商具有公平关切特性时, 处于下游的零售商的利润随着上游制造商公平关切程度的增大而降低.

同样地, 对 (29) 式求  $\pi_\lambda^D$  关于  $\lambda$  的一阶偏导数得到  $\frac{\partial \pi_\lambda^D}{\partial \lambda} = \frac{8\beta^3(\lambda + 2)}{(\alpha^2 - 8\beta - 2\beta\lambda)^3} \times (a - c)^2 < 0$ . 故制造商具有公平关切特性时, 绿色供应链整体的利润随着制造商公平关切程度的增大而降低. 性质 2 证毕.

命题 2 表明, 绿色供应链在集中式决策模式下的利润要大于分散式决策供应链的整体利润, 这与供应链领域已有文献的研究结论相一致. 这是由于分散式决策情形下供应链各方成员均以自身利益最大化为目标做出决策, 使得绿色供应链系统不能得到协调, 无法达到绿色供应链系统的整体最优. 从另外一个角度则说明, 绿色供应链上下游企业可以通过合作形成“超组织”联盟来协调供应链, 并且这种协调至少能够使得绿色供应链整体的利润提高 33.33%.

性质 2 则表明, 与只关注利润的绿色供应链相比, 绿色产品制造商公平关切特性的客观存在使得其出于公平关切倾向做出的决策在损害下游零售商利益的同时也损害了己方利益, 并且, 随着制造商公平关切程度的增大, 这种损害也会越来越严重. 但是, 需要注意的是, 随着制造商公平关切程度的增大, 虽然其利润也在遭受损失, 但是其利润所占渠道总利润的份额却在不断增大. 当制造商极度关注渠道利润分配的公平性 (即  $\lambda \rightarrow +\infty$ ), 制造商所占渠道利润分配比例将会趋近于公平参考利润份额. 这就说明, 绿色产品制造商客观存在的公平关切特性使得制造商为了能尽力确保获得渠道利润分配的公平性, 宁愿牺牲一部分自己的利益采取行动达到惩罚对方的目的, 用抗议的传声筒谋求更为公平的结果.

另外, 从供应链整体利润的角度可以看到, 集中式决策供应链的效率最高, 制造商公平关切的分散式决策供应链效率最低. 这就说明, 绿色供应链中绿色产品制造商公平关切特性的客观存在, 对供应链的效率造成了损害, 使得绿色供应链的效率进一步降低.



结合前面的命题 1 和性质 1 以及命题 2 和性质 2 可以看出, 绿色供应链中产品绿色度水平、供应链整体利润在分散式决策情形下均要低于集中式决策. 在绿色产品制造商客观存在公平关切特性的情况下, 产品绿色度水平、供应链整体利润又会进一步降低. 绿色供应链中绿色产品制造商公平关切特性的客观存在, 总是使得产品绿色度水平、供应链利润在下降, 这是因为, 公平关切特性是现实生活中决策者客观存在的一种个体属性. 如风险规避、过度自信等决策者个体属性一样, 影响着决策者的理性决策行为. 正是由于公平关切个体属性的客观存在影响了决策者在做出决策时的绝对理性, 导致决策者不能总是做出绝对理性的“最优决策”. 绿色供应链中绿色产品制造商客观存在的公平关切特性使得其出于公平关切倾向做出的决策趋于保守, 偏离理性的最优决策, 从而使得产品绿色度水平以及供应链利润下降, 偏离系统最优值, 对供应链效率造成了损害. 由于绿色供应链上下游企业通过合作形成“超组织”联盟的形式(即集中式决策)能够带来产品绿色度水平、供应链利润的提升, 并且随着绿色产品制造商公平关切程度的增大, 通过合作形成“超组织”联盟能够带来的产品绿色度水平、供应链利润的提升空间将会越大. 这也就从侧面说明, 在绿色产品制造商客观存在公平关切特性的情况下, 制造商公平关切程度越大, 绿色供应链上下游企业通过合作形成“超组织”联盟就越是迫切.

下面的命题 3 则说明, 绿色供应链中绿色产品的市场销售价格有三种不同供应链决策情形下大小关系的比较, 还要具体取决于产品绿色化效率.

**命题 3** 当产品绿色化效率较低时 ( $\frac{\alpha^2}{\beta} < 2$ ), 绿色供应链在集中式决策下确定的绿色产品零售价格低于制造商公平中性的分散式决策情形下零售商制定的零售价格, 而后者又低于制造商公平关切时零售商制定的零售价格; 当产品绿色化效率较高时 ( $2 < \frac{\alpha^2}{\beta} < 4$ ), 绿色供应链在集中式决策下确定的绿色产品零售价格高于制造商公平中性的分散式决策情形下零售商制定的零售价格, 而后者又高于制造商公平关切时零售商制定的零售价格; 当产品绿色化效率刚好等于某一中间临界值时 ( $\frac{\alpha^2}{\beta} = 2$ ), 三种不同供应链决策情形下绿色产品市场销售价格相等.

**证明** 由  $p^* = c + \frac{2\beta}{(4\beta - \alpha^2)} \times (a - c)$ , 得到  $p^* - c = \frac{2\beta}{(4\beta - \alpha^2)} \times (a - c)$ ; 由  $p^D = c + \frac{6\beta}{(8\beta - \alpha^2)} \times (a - c)$ , 得到  $p^D - c = \frac{6\beta}{(8\beta - \alpha^2)} \times (a - c)$ . 因此,  $\frac{p^* - c}{p^D - c} = \frac{(8\beta - \alpha^2)}{3(4\beta - \alpha^2)} = \frac{(8 - \frac{\alpha^2}{\beta})}{(12 - 3\frac{\alpha^2}{\beta})} = \frac{(8 - \frac{\alpha^2}{\beta})}{(8 - \frac{\alpha^2}{\beta} + 4 - 2\frac{\alpha^2}{\beta})}$ . 分以下三种情况进行讨论: 1) 当  $\frac{\alpha^2}{\beta} < 2$  时,  $p^* < p^D$ ; 2) 当  $\frac{\alpha^2}{\beta} > 2$  时,  $p^* > p^D$ ; 3) 当  $\frac{\alpha^2}{\beta} = 2$  时,  $p^* = p^D = a$ .

类似地, 由  $p^D = c + \frac{6\beta}{(8\beta - \alpha^2)} \times (a - c)$ , 得到  $p^D - c = \frac{6\beta}{(8\beta - \alpha^2)} \times (a - c)$ ; 由  $p_\lambda^D = c + \frac{2\beta(\lambda+3)}{(8\beta+2\beta\lambda-\alpha^2)} \times (a - c)$ , 得到  $p_\lambda^D - c = \frac{2\beta(\lambda+3)}{(8\beta+2\beta\lambda-\alpha^2)} \times (a - c)$ . 因此,  $\frac{p^D - c}{p_\lambda^D - c} = \frac{3(8\beta - \alpha^2 + 2\beta\lambda)}{(\lambda+3)(8\beta - \alpha^2)} = \frac{3(8 - \frac{\alpha^2}{\beta} + 2\lambda)}{(\lambda+3)(8 - \frac{\alpha^2}{\beta})} = \frac{(\lambda+3)(8 - \frac{\alpha^2}{\beta}) + \lambda(\frac{\alpha^2}{\beta} - 2)}{(\lambda+3)(8 - \frac{\alpha^2}{\beta})}$ . 分以下三种情况进行讨论: 1) 当  $\frac{\alpha^2}{\beta} < 2$  时,  $p^D < p_\lambda^D$ ; 2) 当  $\frac{\alpha^2}{\beta} > 2$  时,  $p^D > p_\lambda^D$ ; 3) 当  $\frac{\alpha^2}{\beta} = 2$  时,  $p^D = p_\lambda^D = a$ .

对前面的证明过程进行整合, 得到: 1) 当  $\frac{\alpha^2}{\beta} < 2$  时,  $p^* < p^D < p_\lambda^D$ ; 2) 当  $\frac{\alpha^2}{\beta} > 2$  时,  $p^* > p^D > p_\lambda^D$ ; 3) 当  $\frac{\alpha^2}{\beta} = 2$  时,  $p^* = p^D = p_\lambda^D = a$ . 命题 3 证毕.

由命题 3 可以看出: 1) 在产品绿色化效率较低的情况下, 分散式决策供应链零售商制定的绿色产品零售价格比集中式决策模式下要高, 即传统非绿色供应链的“双重边际效应”(double marginalization), 这与营销和供应链领域已有文献的研究结论相一致. 背后的原因是, 在产品绿色化效率较低的情况下, 虽然绿色产品的市场需求是由绿色产品市场销售价格和产品绿色度水平共同影响, 但是此时绿色产品对市场需求的扩张效应不够明显, 导致绿色供应链的博弈结果与传统非绿色供应链相似. 在绿色产品制造商客观存在公平关切特性的情况下, 零售商制定的绿色产品市场销售价格又会进一步提高, 这表明在产品绿色化效率较低的情况下绿色产品制造商客观存在的公平关切特性会进一步加重供应链的“双重边际效应”. 2) 然而, 当产品绿色化效率高于某一临界值时, 绿色供应链在集中式决策下制定的绿色产品市场销售价格将会高于分散式决策供应链. 这是因为, 绿色产品市场需求受绿色产品市场销售价格和产品绿色度水平的共同影响, 在产品绿色化效率较高的情况下, 消费者有相当高的绿色环保意识以及对绿色产品的偏好, 以至于绿色产品对市场需求的扩张效应对冲了绿色产品市场销售价格略微提高对市场需求的负向作用, 此时的绿色产品市场需求主要来自于绿色产品对市场需求的扩张效应. 3) 最后, 当产品绿色化效率刚好等于某一中间临界值时, 三种不同供应链决策情形下绿色产品的市场销售价格一致, 并且此时的绿色产品市场销售价格刚好等于消费者无绿色偏好情形下的市场出清价格.

**性质 3** 当产品绿色化效率较低时 ( $\frac{\alpha^2}{\beta} < 2$ ), 零售商制定的绿色产品市场销售价格随着上游制造商公平关切程度的增大而提高; 当产品绿色化效率较高时 ( $2 < \frac{\alpha^2}{\beta} < 4$ ), 零售商制定的绿色产品市场销售价格随着

上游制造商公平关切程度的增大而降低;当产品绿色化效率刚好等于某个临界值时 ( $\frac{\alpha^2}{\beta} = 2$ ),零售商制定的绿色产品市场销售价格与上游制造商公平关切程度无关。

**证明** 对 (26) 式求  $p_\lambda^D$  关于  $\lambda$  的一阶偏导数得到  $\frac{\partial p_\lambda^D}{\partial \lambda} = \frac{-2\beta(\alpha^2-2\beta)}{(8\beta+2\beta\lambda-\alpha^2)^2} \times (a-c)$ . 分以下三种情况进行讨论: 1) 当  $\frac{\alpha^2}{\beta} < 2$  时,  $\frac{\partial p_\lambda^D}{\partial \lambda} > 0$ , 零售商制定的绿色产品市场销售价格随着上游制造商公平关切程度的增大而提高; 2) 当  $\frac{\alpha^2}{\beta} > 2$  时,  $\frac{\partial p_\lambda^D}{\partial \lambda} < 0$ , 零售商制定的绿色产品市场销售价格随着上游制造商公平关切程度的增大而降低; 3) 当  $\frac{\alpha^2}{\beta} = 2$  时,  $\frac{\partial p_\lambda^D}{\partial \lambda} = 0$ , 零售商制定的绿色产品市场销售价格与上游制造商公平关切程度无关. 性质 3 证毕。

性质 3 背后的原因是, 由于在绿色产品制造商客观存在公平关切特性的情况下, 随着制造商公平关切程度的增大, 制造商制定的批发价格在不断提高, 其提供的产品绿色度水平却在不断降低, 并且越来越偏离供应链系统的最优值. 绿色产品制造商公平关切特性的客观存在使得其出于公平关切倾向做出的决策趋于保守 (提高批发价格使得产品边际收益提高, 降低产品绿色度水平从而降低研发成本), 偏离理性的最优决策, 而制造商的这种保守决策行为对处于下游的零售商的利益造成了损害, 并且这种损害随着制造商公平关切程度的增大变得越来越严重. 因此, 处于下游的零售商为了能缓解上游制造商出于公平关切倾向而做出的越来越保守的决策对处于下游位置自身利益的损害, 处于下游的零售商做出以下应对: 1) 当产品绿色化效率较低时, 零售商选择提高绿色产品市场销售价格通过增大边际收益的方式来缓解上游制造商越来越保守的决策对处于下游位置自身利益的损害. 2) 当产品绿色化效率较高时, 零售商选择降低绿色产品市场销售价格通过提升绿色产品市场销售量的方式来缓解上游制造商越来越保守的决策对处于下游位置自身利益的损害. 3) 当产品绿色化效率刚好等于某一中间临界值时, 处于下游位置的零售商别无选择, 会继续将绿色产品市场销售价格保持为原来的销售价格不变. 这是由于, 当产品绿色化效率刚好等于某一中间临界值时, 零售商通过提高绿色产品市场销售价格以增大边际收益或者通过降低绿色产品市场销售价格以提升绿色产品市场销售量这两种方式对零售商自身利益带来的影响此消彼长相互对冲, 此时零售商别无选择, 唯有保持原来的市场销售价格不变。

### 6 数值分析

下面通过数值分析的方法来直观地阐述和解释前面的一些结果, 并且试图发现一些在理论建模分析过程中尚未能发现的规律. 假设供应链参数分别为:  $a = 120, c = 20, \beta = 10$ .

首先, 在产品绿色化效率系数的可行区间内分析产品绿色化效率对绿色供应链定价策略、产品绿色度水平以及供应链整体利润的影响. 令  $\lambda = 1$ , 产品绿色化效率系数  $\frac{\alpha^2}{\beta}$  在可行区间  $(0, 4)$  内变化, 三种供应链决策情形下产品绿色度水平、市场销售价格、供应链整体利润的变化情况分别如表 2、表 3 和表 4 所示。

**表 2 产品绿色化效率对绿色供应链产品绿色度水平的影响**

$\alpha$	$\beta$	$\frac{\alpha^2}{\beta}$	$\tau^*$	$\tau^D$	$\tau_\lambda^D$
2.000	10.0	0.4	5.556	2.632	2.083
2.828	10.0	0.8	8.839	3.928	3.074
3.464	10.0	1.2	12.372	5.094	3.9364
4.000	10.0	1.6	16.667	6.250	4.762
4.472	10.0	2.0	22.361	7.454	5.590
4.899	10.0	2.4	30.619	8.748	6.446
5.292	10.0	2.8	44.096	10.176	7.349
5.657	10.0	3.2	70.711	11.785	8.319
6.000	10.0	3.6	150.000	13.636	9.375

**表 3 产品绿色化效率对绿色供应链市场销售价格的影响**

$\alpha$	$\beta$	$\frac{\alpha^2}{\beta}$	$p^*$	$p^D$	$p_\lambda^D$
2.000	10.0	0.4	75.556	98.947	103.333
2.828	10.0	0.8	82.500	103.333	106.957
3.464	10.0	1.2	91.429	108.235	110.909
4.000	10.0	1.6	103.333	113.750	115.238
4.472	10.0	2.0	120.000	120.000	120.000
4.899	10.0	2.4	145.000	127.143	125.263
5.292	10.0	2.8	186.667	135.385	131.111
5.657	10.0	3.2	270.000	145.000	137.647
6.000	10.0	3.6	520.000	156.364	145.000

分析表 2 可以看出, 绿色供应链在集中式决策下提供的产品绿色度水平至少是分散式决策供应链的两倍以上, 并且这种差距随着产品绿色化效率的提高而迅速扩大, 在绿色产品制造商客观存在公平关切特性的情况下, 其提供的产品绿色度水平进一步降低, 更加偏离供应链系统的最优值, 与命题 1 的表述相一致. 通过表 2, 还可以发现三种不同供应链决策情形下产品绿色度水平都是随着产品绿色化效率的提高而提高, 并且集中式决策下产品绿色度水平的增长速度明显高于分散式决策供应链。

分析表 3 可以看出, 当产品绿色化效率系数  $\frac{\alpha^2}{\beta} < 2$  时  $p^* < p^D < p_\lambda^D$ , 这表明在产品绿色化效率较低的

情况下绿色产品制造商客观存在的公平关切特性会进一步加重供应链的“双重边际效应”; 当产品绿色化效率系数  $\frac{\alpha^2}{\beta} > 2$  时  $p^* > p^D > p_\lambda^D$ ; 当产品绿色化效率系数  $\frac{\alpha^2}{\beta} = 2$  时,  $p^* = p^D = p_\lambda^D = 120 = a$ , 即此时的绿色产品市场销售价格等于消费者无绿色偏好情形下的市场出清价格. 通过表 3, 还可以发现三种供应链决策情形下绿色产品市场销售价格都是随着产品绿色化效率的提高而提高, 但是由于集中式决策下绿色产品市场销售价格的增长速度高于制造商公平中性的分散式决策情形, 而后者又高于制造商公平关切的分散式决策情形下绿色产品市场销售价格的增长速度, 以至于绿色产品市场销售价格在三种不同供应链决策情形下大小关系的比较, 由一开始的  $p^* < p^D < p_\lambda^D$  转变为  $p^* = p^D = p_\lambda^D$ , 再到后来的  $p^* > p^D > p_\lambda^D$ .

表 4 产品绿色化效率对绿色供应链整体利润的影响

$\alpha$	$\beta$	$\frac{\alpha^2}{\beta}$	$\pi^*$	$\pi^D$	$\pi_\lambda^D$
2.000	10.0	0.4	2777.778	2008.31	1692.708
2.828	10.0	0.8	3125.000	2160.494	1795.841
3.464	10.0	1.2	3571.429	2335.640	1911.157
4.000	10.0	1.6	4166.667	2539.063	2040.816
4.472	10.0	2.0	5000.000	2777.778	2187.500
4.899	10.0	2.4	6250.000	3061.224	2354.571
5.292	10.0	2.8	8333.333	3402.367	2546.296
5.657	10.0	3.2	12500.000	3819.444	2768.166
6.000	10.0	3.6	25000.000	4338.843	3027.344

由表 4 可见  $\pi^* > \pi^D > \pi_\lambda^D$ , 且绿色供应链在集中式决策下供应链整体利润至少高出分散式决策供应链整体利润 33.33%, 并且这种差距随着产品绿色化效率的提高而迅速扩大. 通过表 4, 还可以发现三种不同供应链决策情形下供应链整体利润都是随着产品绿色化效率的提高而增大, 并且绿色供应链在集中式决策下供应链整体利润的增长速度明显高于分散式决策供应链.

结合表 2、表 3 和表 4 可以看出, 绿色供应链中产品绿色度水平、供应链整体利润在分散式决策情形下均要低于集中式决策, 在绿色产品制造商客观存在公平关切特性的情况下, 产品绿色度水平、供应链整体利润又会进一步降低. 然而, 绿色产品市场销售价格在三种不同供应链决策情形下大小关系的比较, 还具体取决于产品绿色化效率. 另外, 还可以发现在产品绿色化效率较高时 ( $\frac{\alpha^2}{\beta} > 2$ ), 分散式决策供应链的绿色产品市场销售价格、产品绿色度水平、供应链整体利润与集中式决策下的差距变得越大. 这就说明, 随着产品绿色化效率的提高, 绿色供应链上下游企业通过合作形成“超组织”联盟所能带来的效益以指数倍增加.

然后, 分别在产品绿色化效率较低和较高的情形下进一步分析绿色产品制造商公平关切程度对绿色供应链定价策略、供应链各方利润以及供应链整体利润的影响. 令  $\alpha = 2$ , 则  $\frac{\alpha^2}{\beta} = 0.4$ , 产品绿色化效率较低时, 绿色供应链定价策略、供应链各方利润以及供应链整体利润与制造商公平关切程度 ( $\lambda$ ) 的关系分别如图 1 和图 2 所示; 令  $\alpha = 6$ , 则  $\frac{\alpha^2}{\beta} = 3.6$ , 产品绿色化效率较高时, 绿色供应链定价策略、供应链各方利润以及供应链整体利润与制造商公平关切程度 ( $\lambda$ ) 的关系分别如图 3 和图 4 所示.

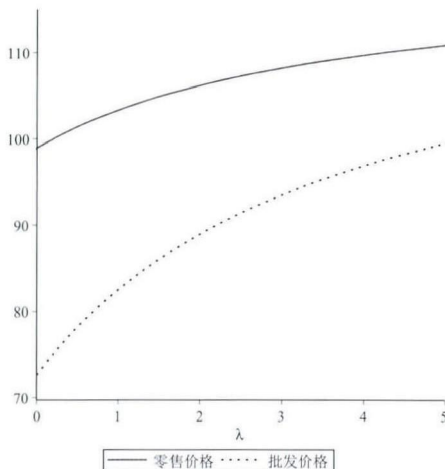


图 1 产品绿色化效率较低时公平关切程度对价格的影响

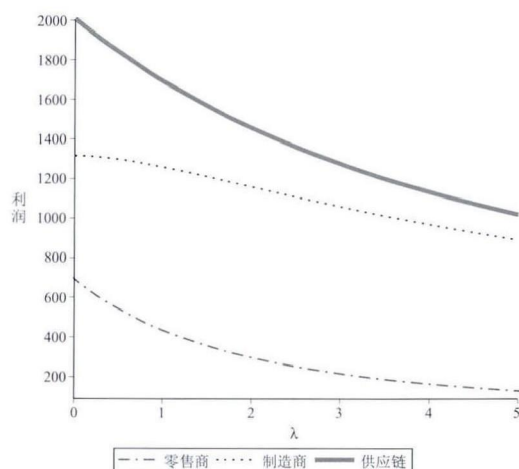


图 2 产品绿色化效率较低时公平关切程度对利润的影响

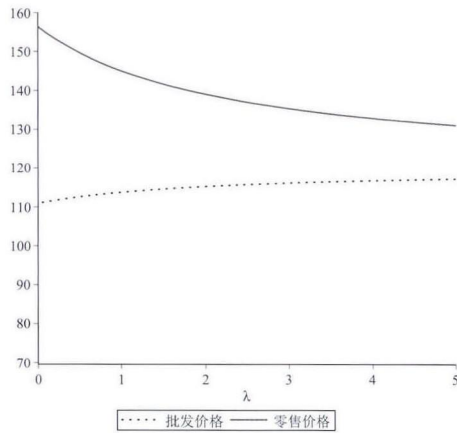


图 3 产品绿色化效率较高时公平关切程度对价格的影响

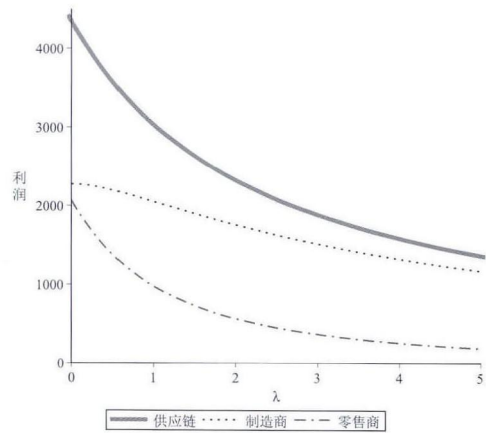


图 4 产品绿色化效率较高时公平关切程度对利润的影响

由图 1 可见, 产品绿色化效率较低时, 绿色产品零售价格和批发价格都随着制造商公平关切程度的增大而提高, 但是零售价格与批发价格的差值却在不断减小. 由图 3 可以看到, 产品绿色化效率较高时, 随着制造商公平关切程度的增大, 批发价格在不断提高, 而零售价格却在不断降低, 并且还可以发现零售价格与批发价格的差值也在不断减小. 结合图 1 和图 3 可以看出, 无论产品绿色化效率是高还是低, 随着制造商公平关切程度的增大, 零售商的边际利润都是在不断地降低.

结合图 2 和图 4 可以看到, 在绿色产品制造商客观存在公平关切特性的情况下, 无论产品绿色化效率是高还是低, 制造商的利润、零售商的利润以及供应链整体的利润都随着制造商公平关切程度的增大而降低. 这就表明, 制造商基于公平关切倾向做出的决策在损害下游零售商利益的同时也损害了己方利益, 并且, 随着制造商公平关切程度的增大, 这种损害就会越来越严重. 通过图 2 和图 4 还可以进一步发现, 随着制造商公平关切程度的增大, 虽然制造商的利润也在遭受损失, 但是其利润所占渠道总利润的份额却在不断增大. 这就说明, 在绿色产品制造商客观存在公平关切特性的情况下, 制造商为了能尽力确保获得渠道利润分配的公平性, 宁愿牺牲一部分自己的利益采取行动达到惩罚对方的目的, 用抗议的传声筒谋求更为公平的结果.

### 7 结束语

在绿色可持续发展的背景下, 由于受到来自政府规制和国际绿色壁垒的压力以及消费者绿色环保意识的逐渐增强, 为赢得持续的竞争优势, 制造企业长远的选择是积极承担社会和环境责任, 采取积极措施投入力量到产品绿色化行动中, 向市场提供资源节约型和环境友好型的绿色产品. 绿色供应链中, 由于绿色产品制造商进行产品绿色化投资付出了大量的研发成本, 因此制造商将会更加关注渠道利润分配的公平性. 本文考虑由制造商和零售商组成的两级绿色供应链, 制造商生产绿色产品并通过零售商向市场进行销售, 分别在考虑与不考虑制造商公平关切行为特性的情形下对绿色供应链进行定量建模分析, 研究公平关切行为和产品绿色化效率对绿色供应链定价策略、产品绿色度水平、供应链各方利润以及供应链整体利润的影响, 得到以下研究结论.

1) 绿色供应链中产品绿色度水平、供应链整体利润在分散式决策情形下均会低于集中式决策, 并且, 随着产品绿色化效率的提高, 它们之间的差距也将会变得越来越大. 当绿色产品制造商具有公平关切行为倾向时, 绿色供应链中产品绿色度水平、供应链整体利润又会进一步降低. 然而, 绿色产品市场销售价格在这三种不同供应链决策情形下大小关系的比较, 还具体取决于产品绿色化效率.

2) 在产品绿色化效率较低的情况下, 绿色产品制造商客观存在的公平关切特性会进一步加重供应链的“双重边际效应”.

3) 当产品绿色化效率刚好等于某一临界值时, 不同供应链决策情形下绿色产品市场销售价格相等, 此时的绿色产品市场销售价格刚好等于消费者无绿色偏好情形下的市场出清价格. 并且, 此时制造商的公平关切行为对绿色产品市场销售价格没有影响.

4) 在绿色产品制造商客观存在公平关切特性的情况下, 随着其公平关切程度的增大, 其制定的绿色产品批发价格在不断提高, 其提供的产品绿色度水平却在不断降低, 并且越来越偏离供应链系统的最优值, 制造商基于公平关切倾向做出的决策在损害下游零售商利益的同时也损害了己方利益. 并且, 随着制造商公平关

切程度的增大, 这种损害就会越来越严重. 但是, 需要注意的是, 随着制造商公平关切程度的增大, 虽然其利润也在遭受损失, 但是其利润所占渠道总利润的份额却在不断增大. 制造商为了能尽力确保获得渠道利润分配的公平性, 宁愿牺牲一部分自己的利益采取行动达到惩罚对方的目的, 用抗议的传声筒谋求更为公平的结果. 同时, 这也说明了绿色供应链中绿色产品制造商客观存在的公平关切特性使得其出于公平关切倾向做出的决策趋于保守, 偏离理性的最优决策, 对供应链效率造成了损害.

现实生活中决策者可能同时受到多种行为倾向的影响, 进一步的研究可以引入更多的行为特性, 考虑多种行为特性对决策者的组合影响或交叉影响. 另外, 还可以通过扩展供应链结构的复杂性来展开更深入的研究, 使得建立的模型能更加符合真实的决策环境, 更好地揭示经济社会中的现象和规律.

## 参考文献

- [1] O'Rourke D. The science of sustainable supply chains[J]. *Science*, 2014, 344(6188): 1124-1127.
- [2] Lash J, Wellington F. Competitive advantage on a warming planet[J]. *Harvard Business Review*, 2007, 85(3): 94-102.
- [3] Golden J S, Subramanian V, Zimmerman J B. Sustainability and commerce trends[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2011, 15(6): 821-824.
- [4] 潘峰, 西宝, 王琳. 基于演化博弈的地方政府环境规制策略分析 [J]. *系统工程理论与实践*, 2015, 35(6): 1393-1404.  
Pan F, Xi B, Wang L. Analysis on environmental regulation strategy of local government based on evolutionary game theory[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2015, 35(6): 1393-1404.
- [5] Dangelico R, Pujari D. Mainstreaming green product innovation: Why and how companies integrate environmental sustainability[J]. *Journal of Business Ethics*, 2010, 95(3): 471-486.
- [6] Rao P, Holt D. Do green supply chains lead to competitiveness and economic performance?[J]. *International Journal of Operations & Production Management*, 2005, 25(9): 898-916.
- [7] Jayaram J, Avittathur B. Green supply chains: A perspective from an emerging economy[J]. *International Journal of Production Economics*, 2015, 164: 234-244.
- [8] Fahimnia B, Sarkis J, Davarzani H. Green supply chain management: A review and bibliometric analysis[J]. *International Journal of Production Economics*, 2015, 162: 101-114.
- [9] Gunasekaran A, Subramanian N, Rahman S. Green supply chain collaboration and incentives: Current trends and future directions[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2015, 74: 1-10.
- [10] Shi P, Yan B, Shi S, et al. A decision support system to select suppliers for a sustainable supply chain based on a systematic DEA approach[J]. *Information Technology & Management*, 2015, 16(1): 39-49.
- [11] 曹柬, 吴晓波, 周根贵. 不对称信息下绿色采购激励机制设计 [J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(1): 106-116.  
Cao J, Wu X B, Zhou G G. Design of incentive mechanism for green purchasing with asymmetric information[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2013, 33(1): 106-116.
- [12] 周永圣, 刘巧荣, 李健, 等. 基于绿色信贷的政府促进银行实施代理监督权的博弈研究 [J]. *系统工程理论与实践*, 2015, 35(7): 1744-1751.  
Zhou Y S, Liu Q R, Li J, et al. Game model for governments to promote banks as the agency to supervise the implementation of green supply chain based on green credit[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2015, 35(7): 1744-1751.
- [13] 江世英, 李随成. 考虑产品绿色度的绿色供应链博弈模型及收益共享契约 [J]. *中国管理科学*, 2015, 23(6): 169-176.  
Jiang S Y, Li S C. Green supply chain game models and revenue sharing contract with product green degree[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2015, 23(6): 169-176.
- [14] 朱庆华, 窦一杰. 基于政府补贴分析的绿色供应链管理博弈模型 [J]. *管理科学学报*, 2011, 14(6): 86-95.  
Zhu Q H, Dou Y J. A game model for green supply chain management based on government subsidies[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2011, 14(6): 86-95.
- [15] 熊中楷, 张盼, 郭年. 供应链中碳税和消费者环保意识对碳排放影响 [J]. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(9): 2245-2252.  
Xiong Z K, Zhang P, Guo N. Impact of carbon tax and consumers' environmental awareness on carbon emissions in supply chains[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2014, 34(9): 2245-2252.
- [16] Liu Z L, Anderson T D, Cruz J M. Consumer environmental awareness and competition in two-stage supply chains[J]. *European Journal of Operational Research*, 2012, 218(3): 602-613.
- [17] Zhang L, Wang J, You J. Consumer environmental awareness and channel coordination with two substitutable products[J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 241(1): 63-73.
- [18] Xi S, Lee C. A game theoretic approach for the optimal investment decisions of green innovation in a manufacturer-retailer supply chain[J]. *International Journal of Industrial Engineering*, 2015, 22(1): 147-158.
- [19] Swami S, Shah J. Channel coordination in green supply chain management[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2013, 64(3): 336-351.

- [20] Zhang C, Liu L. Research on coordination mechanism in three-level green supply chain under non-cooperative game[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(5): 3369–3379.
- [21] 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.
- [22] Loch C H, Wu Y Z. Social preferences and supply chain performance: An experimental study[J]. *Management Science*, 2008, 54(11): 1835–1849.
- [23] Katok E, Pavlov V. Fairness in supply chain contracts: A laboratory study[J]. *Journal of Operations Management*, 2013, 31(3): 129–137.
- [24] Kumar N, Scheer L K, Steenkamp J-B E M. The effects of supplier fairness on vulnerable resellers[J]. *Journal of Marketing Research*, 1995, 32(1): 54–65.
- [25] Cui T H, Raju J S, Zhang Z J. Fairness and channel coordination[J]. *Management Science*, 2007, 53(8): 1303–1314.
- [26] 杜少甫, 杜婵, 梁樛, 等. 考虑公平关切的供应链契约与协调 [J]. *管理科学学报*, 2010, 13(11): 41–48.  
Du S F, Du C, Liang L, et al. Supply chain coordination considering fairness concerns[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2010, 13(11): 41–48.
- [27] 马利军, 曾清华, 邵新建. 幂函数需求模式下具有公平偏好的供应链协调 [J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(12): 3009–3019.  
Ma L J, Zeng Q H, Shao X J. Channel coordination with fairness concerns under power-form demand[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2013, 33(12): 3009–3019.
- [28] 王宁宁, 王晓欢, 樊治平. 模糊需求下考虑公平关切的收益共享契约与协调 [J]. *中国管理科学*, 2015, 23(8): 139–147.  
Wang N N, Wang X H, Fan Z P. Supply chain coordination by revenue-sharing contract under fairness concerns with fuzzy demand[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2015, 23(8): 139–147.
- [29] 浦徐进, 龚磊, 张兴. 考虑零售商公平偏好的促销努力激励机制设计 [J]. *系统工程理论与实践*, 2015, 35(9): 2271–2279.  
Pu X J, Gong L, Zhang X. The incentive mechanism design for promotion effort considering the retailer's fairness preference[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2015, 35(9): 2271–2279.
- [30] Wu X, Niederhoff J A. Fairness in selling to the Newsvendor[J]. *Production and Operations Management*, 2014, 23(11): 2002–2022.
- [31] 浦徐进, 金德龙. 公平偏好、参照点效应和三级供应链的运作 [J]. *控制与决策*, 2015, 30(5): 859–864.  
Pu X J, Jin D L. Fairness preference, reference point effect and operation research in three layer supply chains[J]. *Control and Decision*, 2015, 30(5): 859–864.
- [32] 杜少甫, 朱贾昂, 高冬, 等. Nash 讨价还价公平参考下的供应链优化决策 [J]. *管理科学学报*, 2013, 16(3): 68–72.  
Du S F, Zhu J A, Gao D, et al. Optimal decision-making for Nash bargaining fairness concerned newsvendor in two-level supply chain[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2013, 16(3): 68–72.
- [33] Du S, Nie T, Chu C, et al. Newsvendor model for a dyadic supply chain with Nash bargaining fairness concerns[J]. *International Journal of Production Research*, 2014, 52(17): 5070–5085.
- [34] Nash J F. The bargaining problem[J]. *Econometrica*, 1950, 18(2): 155–162.
- [35] Nash J F. Two-person cooperative games[J]. *Econometrica*, 1953, 21(1): 128–140.
- [36] Binmore K, Rubinstein A, Wolinsky A. The Nash bargaining solution in economic modeling[J]. *The RAND Journal of Economics*, 1986, 17(2): 176–188.