

# 考虑绿色等级和递送时间的双渠道绿色供应链<sup>\*</sup>

颜荣芳, 胡文丰, 王 倩

(西北师范大学 数学与统计学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘 要** 考虑了双渠道绿色供应链的定价决策问题. 在集中式、分散式和协调合同条件下分别建立了双渠道绿色供应链的最优定价模型, 给出了零售商和供应商的最优定价策略. 研究表明, 引入利润共享合同后零售商和供应商都会比在分散式决策下获得更多的利润. 最后通过数值算例对不同条件下的模型进行了比较.

**关键词** 供应链管理; 最优定价决策; 博弈论; 绿色供应链

**中图分类号** F270.7

**文献标识码** A

**DOI:**10.16339/j.cnki.hdjssx.2020.02.006

## Dual-Channel Green Supply Chain under Green Rating and Deliver Time

YAN Rongfang, HU Wenfeng, WANG Qian

(College of Mathematics and Statistics, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract** It considers the pricing decision of dual-channel green supply chain, and establishes the optimal pricing model of dual-channel green supply chain, under the conditions of centralized decision-making, decentralized decision-making and cooperation contracts, respectively, and we get the optimal decisions of the retailer and the supplier. After the introduction of the profit sharing contract, retailers and suppliers will get more profits than in the decentralized model. Finally, the numerical examples are used to compare the models under different conditions.

**Key words** supply chain management; optimal pricing decision; game theory; green supply chain

### 1 引 言

随着消费水平的不断提高, 消费对环境造成的影响越来越严重. 近几年来冰山融化、海平面上升、台风等事件频繁发生使人类意识到保护环境是一件迫在眉睫的事情. 许多公司开始关注对环境友好型产品的生产和管理. 生产绿色产品作为绿色行动的主要内容之一, 对绿色供应链管理的推进具有重要作用. 绿色供应链管理主要包括产品的设计、材料加工、运输、产品的回收和再利用等. 根据欧盟委员会在 2007 年对其 27 个成员国的调查显示, 70% 的受访国承诺会购买对环境友好的绿色产品, 虽然相对于普通产品其价格更高.

\* 收稿日期: 2019-11-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11861058)

作者简介: 颜荣芳(1964—), 男, 甘肃武山, 教授, 博士生导师, 研究方向: 金融数学与金融统计、可靠性理论和可靠性工程、供应链管理

E-mail: yanrf@nwnu.edu.cn

对绿色供应链管理的有效研究对促进资源综合利用、建设资源节约型和环境友好型社会都具有重要的现实意义。

电子商务的出现极大地改变了消费者的购物模式,全球电子商务的销售额正在飞速增长.许多企业例如 IBM、NIKE、华为等已经增加了网络直销渠道的投入.网络直销渠道可以使企业减少销售成本,增加客户数量从而获得更多的利润.相对于传统的零售渠道,网络直销渠道还是有一些弊端的.首先是它无法近距离观察到商品实物,这将影响消费者对商品质量的判断.其次是从消费者订购到货物到消费者手上需要一定的递送时间.在这个追求效率的时代,递送时间会影响消费者对购买渠道的选择,也会是影响企业利润和客户数量的重要参数.

近几年,国内外的学者对绿色供应链管理的决策等问题进行了广泛而深入的研究,一些学者在考虑消费者对绿色产品的喜好程度不同的背景下对绿色供应链的决策进行了研究. Chitra(2007)<sup>[1]</sup>的研究表明,消费者的环保意识越强,以更高价格购买绿色产品的意愿也越来越高,这种意愿与受教育程度、公共自觉环保意识等具有较大的相关性. Moon(2004)<sup>[2]</sup>的研究进一步说明,如果消费者更愿意购买价格更加昂贵的对环境友好的绿色产品,会促使更多企业致力于环保技术的研究和投入.也有一些学者把研究重点关注在产品的再循环利用上,颜荣芳等(2013)<sup>[3]</sup>研究了再制造闭环供应链的最优差别定价问题,并就如何提高闭环供应链的运作效率提出了建议. 权蓉和颜荣芳(2017)<sup>[4]</sup>讨论了再制造闭环供应链中以制造商为领导者、零售商和第三方为跟随者的 Stackelberg 决策模型.

协调合同在供应链中已经有了广泛的应用. Ghosh 和 Shah(2012)<sup>[5]</sup>提出在绿色供应链中引入两部制合同,并指出该协调模型相对于 Stackelberg 模型和垂直化模型可以获得更高的产品绿色等级. Ghosh 和 Shah(2012)<sup>[6]</sup>讨论了消费者对绿色产品需求灵敏度的合作问题. 分析了成本共享合同对供应链的影响. 考虑各供应链成员交易能力的剩余利润共享合同可能也是一种有效的供应链协调方式.

更多的学者研究了具有传统销售渠道和网络直销渠道的双渠道绿色供应链. Li 等(2016)<sup>[7]</sup>利用 Stackelberg 博弈模型来讨论了由一个零售商和一个供应商组成的双渠道供应链的最优定价问题. Jamali 和 Rasti-Barzoki(2018)<sup>[8]</sup>研究了一个具有两个零售商的双渠道供应链,其中一个零售商生产绿色产品而另一个零售商生产非绿色产品与之形成竞争关系. Ranjan 等(2019)<sup>[9]</sup>提出了在考虑产品绿色等级和销售激励情况下的一个双渠道供应链的最优销售价格和协作策略问题. 李一龙和颜荣芳等(2019)<sup>[10]</sup>讨论了在需求中断下具有零售商激励的双渠道供应链价格和生产决策,但没有考虑产品的绿色等级. Rahmani 等(2019)<sup>[11]</sup>假设供应链各销售渠道都出售绿色商品,但是假设零售价格与网络直销价格相同,这在现实生活中往往是不可能的. 放宽假设为两种销售渠道的绿色产品的销售价格各不相同,研究商品绿色等级和递送时间对最优决策的影响也许是有价值的.

## 2 模型假设

考虑了由一个供应商和一个零售商组成双渠道绿色供应链. 供应商生产带有绿色等级  $\theta$  的绿色产品,它提供这种产品给零售商,也直接通过直销渠道出售这种产品给顾客. 顾客可以根据他们的喜好选择零售渠道或者网络直销渠道来获取产品. 供应商以批发价  $w$  把绿色产品批发给零售商,零售商再以零售价  $p_r$  出售给顾客,供应商也可以以价格  $p_o$  在网络销售平台直接提供给顾客. 但是消费者在网络直销平台购买绿色产品需要等待的时长为  $L$  的递送时间,而消费者在传统渠道可以直接拿到产品不需要等待. 在模型中供应商决定的决策变量为网络直销价格  $p_r$ 、递送时间  $L$  和绿色等级  $\theta$ . 零售商决定的决策变量为零售价  $p_r$ .

假设一 市场对于这种绿色产品潜在的需求为  $a$ . 假设两种渠道对于这种绿色产品的需求是确定的,并且它们是关于递送时间  $L$  和绿色等级  $\theta$  的线性函数.

根据 Huang 和 Swaminathin(2009)<sup>[12]</sup>的文献. 在不考虑绿色等级和递送时间情形下,其基本需求函数为:

$$D_r = \rho a - b_1 p_r + b_2 p_o, \quad (1)$$

$$D_m = (1 - \rho)a - b_1 p_o + b_2 p_r. \quad (2)$$

在考虑产品的绿色等级  $\theta$  和递送时间  $L$  后, 各个销售渠道新的需求函数见式(3)~(5).

$$D_r = \rho a - b_1 p_r + b_2 p_o + \alpha_r L + \beta \theta, \tag{3}$$

$$D_m = (1 - \rho)a - b_1 p_o + b_2 p_r - \alpha_o L + \beta_o \theta, \tag{4}$$

$$D_s = D_r + D_m = a + (b_2 - b_1)p_r + (b_2 - b_1)p_o + (\alpha_r - \alpha_o)L + (\beta_r + \beta_o)\theta. \tag{5}$$

其中  $D_r, D_m$  分别为传统零售渠道和网络销售渠道的需求函数,  $D_s$  为整个供应链的需求函数.  $b_1, b_2$  分别为交叉价格敏感系数和自身价格敏感系数,  $\alpha_r, \alpha_o$  分别为传统零售渠道和网络销售渠道对递送时间的敏感系数,  $\beta_r, \beta_o$  分别为传统零售渠道和网络销售渠道对绿色等级的敏感系数.

假设二  $b_1 > b_2, \beta_r > \beta_o$ .

假设三 供应商需要支付绿色产品研发的额外成本, 与 Ghosh 和 Shah(2012)<sup>[5]</sup> 和 Swami 和 Shah (2013)<sup>[13]</sup> 提出的假设一致. 绿色产品的研发成本是一个关于绿色等级  $\theta$  的二次函数  $C(\theta) = \frac{1}{2}\eta\theta^2$ . 且有

$$\frac{(\alpha_r\beta_o + \alpha_o\beta_r)^2}{2b_1(\alpha_o^2 + \alpha_r^2) - 4b_2\alpha_o\alpha_r} > \eta > \frac{\beta_o^2 + \beta_r^2}{2(b_1 - b_2)}.$$

假设四 消费者不承担该绿色产品的递送成本, 递送成本由供应商来承担. 假设递送成本为  $C(L) = (h_0 - h_1L)^2$ , 与 Nikunja 和 Peter (2019)<sup>[14]</sup> 的假设一致. 由于  $L$  增大, 网络直销渠道的需求减少了  $\alpha_o L$ , 一部分转移到线下渠道为  $\alpha_r L$ . 由于 100% 转化是不现实的, 则必有  $\alpha_o > \alpha_r$ , 且  $(\alpha_o - \alpha_r)L$  为整个供应链消失的需求.

零售商和供应商的利润函数  $\pi_r, \pi_m$  可表示为

$$\pi_r = (p_r - w)D_r = (p_r - w)(\rho a - b_1 p_r + b_2 p_o + \alpha_r L + \beta \theta), \tag{6}$$

$$\pi_m = (p_o - c)D_o + (w - c)D_r - \frac{1}{2}\eta\theta^2 - (h_0 - h_1L)^2 = (p_o - c)[(1 - \rho)a - b_1 p_o + b_2 p_r - \alpha_o L + \beta_o \theta] + (w - c)(\rho a - b_1 p_r + b_2 p_o + \alpha_r L + \beta \theta) - \frac{1}{2}\eta\theta^2 - (h_0 - h_1L)^2. \tag{7}$$

所以整个供应链的总利润为

$$\pi_s = \pi_r + \pi_m = (p_o - c)D_o + (w - c)D_r - \frac{1}{2}\eta\theta^2 - (h_0 - h_1L)^2 = (p_o - c)[(1 - \rho)a - b_1 p_o + b_2 p_r - \alpha_o L + \beta_o \theta] + (p_r - c)(\rho a - b_1 p_r + b_2 p_o + \alpha_r L + \beta \theta) - \frac{1}{2}\eta\theta^2 - (h_0 - h_1L)^2. \tag{8}$$

### 3 模型建立和求解

#### 3.1 集中式决策

集中式情形下的双渠道绿色供应链中供应商和零售商被看作一个利益整体. 换句话说, 它们有一个共同的利益决策者并且以整个供应链利润最大为目标. 它决定整个供应链系统所有的决策变量. 在集中式情形下整个供应链的利润函数  $\pi_s^c = \pi_s$ .

定理 1 当  $\frac{(\alpha_r\beta_o + \alpha_o\beta_r)^2}{2b_1(\alpha_o^2 + \alpha_r^2) - 4b_2\alpha_o\alpha_r} > \eta > \frac{\beta_o^2 + \beta_r^2}{2(b_1 - b_2)}$  时, 双渠道绿色供应链总利润  $\pi_s^c$  关于  $p_r, p_o, \theta$  和  $L$  是联合凹的, 最优价格由  $\pi_s^c$  最大化的一阶条件给出.

证明 要证明  $\pi_s^c$  关于  $p_r, p_o, \theta$  和  $L$  是联合凹的, 就是要证明关于  $\pi_s^c$  的黑塞矩阵

$$H[\pi_s^c] = \begin{pmatrix} \frac{d^2 \pi^c}{dp_o^2} & \frac{d^2 \pi^c}{dp_o d\theta} & \frac{d^2 \pi^c}{dp_o dp_r} & \frac{d^2 \pi^c}{dp_o dL} \\ \frac{d^2 \pi^c}{d\theta dp_o} & \frac{d^2 \pi^c}{d\theta^2} & \frac{d^2 \pi^c}{d\theta dp_r} & \frac{d^2 \pi^c}{d\theta dL} \\ \frac{d^2 \pi^c}{dp_r dp_o} & \frac{d^2 \pi^c}{dp_r d\theta} & \frac{d^2 \pi^c}{dp_r^2} & \frac{d^2 \pi^c}{dp_r dL} \\ \frac{d^2 \pi^c}{dL dp_o} & \frac{d^2 \pi^c}{dL d\theta} & \frac{d^2 \pi^c}{dL dp_r} & \frac{d^2 \pi^c}{dL^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2b_1 & 2b_2 & \beta_o & -\alpha_o \\ 2b_2 & -2b_1 & \beta_r & \alpha_r \\ \beta_o & \beta_r & -\eta & 0 \\ -\alpha_o & \alpha_r & 0 & -2h_1^2 \end{pmatrix}$$

是负定的. 记  $H_i (1 \leq i \leq 4)$  为  $H[\pi^c]$  的第  $i$  个顺序主子式, 由  $b_1 > b_2 > 0$  得到  $H_1 < 0, H_2 > 0$ .

$$H_3 = 4\eta(b_2^2 - b_1^2) + 2b_1(\beta_r^2 + \beta_o^2) + 4b_2\beta_o\beta_r < 0,$$

得  $\eta > \frac{b_1(\beta_r^2 + \beta_o^2) + 2b_2\beta_o\beta_r}{2(b_1^2 - b_2^2)}$ , 考虑到  $\beta_r^2 + \beta_o^2 \geq 2\beta_o\beta_r$ , 因此

$$\eta > \frac{\beta_o^2 + \beta_r^2}{2(b_1 - b_2)} = \frac{(b_1 + b_2)(\beta_r^2 + \beta_o^2)}{2(b_1^2 - b_2^2)} = \frac{b_1(\beta_r^2 + \beta_o^2) + b_2(\beta_r^2 + \beta_o^2)}{2(b_1^2 - b_2^2)} > \frac{b_1(\beta_r^2 + \beta_o^2) + 2b_2\beta_o\beta_r}{2(b_1^2 - b_2^2)},$$

由条件可得  $H_3 < 0$  成立. 最后证明  $H_4 > 0$  成立即可, 由

$$H_4 = 8b_1^2\eta h_1^2 - 8b_2^2\eta h_1^2 + 4b_2(\alpha_o\eta\alpha_r - 2h_1^2\beta_o\beta_r) - 2b_1(2h_1^2(\beta_o^2 + \beta_r^2) + \eta(\alpha_o^2 + \alpha_r^2)) + (\alpha_r\beta_o + \alpha_o\beta_r)^2,$$

要使上式大于零只需

$$8\eta h_1^2 h_1^2 - 8\eta h_2^2 h_1^2 - 8b_2 h_1^2 \beta_o \beta_r - 4b_1 h_1^2 (\beta_o^2 + \beta_r^2) > 0, (\alpha_r \beta_o + \alpha_o \beta_r)^2 + 4b_2 \eta \alpha_o \alpha_r - 2b_1 \eta (\alpha_o^2 + \alpha_r^2) > 0,$$

同时成立即可.

$$8\eta h_1^2 h_1^2 - 8\eta h_2^2 h_1^2 - 8b_2 h_1^2 \beta_o \beta_r - 4b_1 h_1^2 (\beta_o^2 + \beta_r^2) = 8h_1^2 (\eta (b_1^2 - b_2^2) - b_2 \beta_o \beta_r - \frac{\beta_r^2 + \beta_o^2}{2}),$$

又  $\eta > \frac{b_1(\beta_r^2 + \beta_o^2) + 2b_2\beta_o\beta_r}{2(b_1^2 - b_2^2)}$ , 于是有

$$8h_1^2 (\eta (b_1^2 - b_2^2) - b_2 \beta_o \beta_r - \frac{\beta_r^2 + \beta_o^2}{2}) > 8h_1^2 (\frac{(b_1(\beta_r^2 + \beta_o^2) + 2b_2\beta_o\beta_r)(b_1^2 - b_2^2)}{2(b_1^2 - b_2^2)} - \frac{2b_2\beta_o\beta_r + b_1(\beta_r^2 + \beta_o^2)}{2}) = 0.$$

由  $\frac{(\alpha_r\beta_o + \alpha_o\beta_r)^2}{2b_1(\alpha_o^2 + \alpha_r^2) - 4b_2\alpha_o\alpha_r} > \eta$ , 可知

$$(\alpha_r\beta_o + \alpha_o\beta_r)^2 + 4b_2\eta\alpha_o\alpha_r - 2b_1\eta(\alpha_o^2 + \alpha_r^2) > 0,$$

于是  $H_4 > 0$  成立. 即黑塞矩阵是负定的, 所以该利润函数存在最大值.

为了获得最优定价, 得到  $\pi^c$  最大值的一阶条件

$$\begin{cases} \frac{\partial \pi^c}{\partial p_o} = -b_1(p_o - c) + (1 - \rho)a - b_1 p_o + b_2 p_r - \alpha_o L + \beta_o \theta + b_2(p_r - c) = 0, \\ \frac{\partial \pi^c}{\partial p_r} = b_2(p_o - c) - b_1(p_r - c) + \rho a - b_1 p_r + b_2 p_o + \alpha_r L + \beta_r \theta = 0, \\ \frac{\partial \pi^c}{\partial \theta} = \beta_o(p_o - c) + \beta_r(p_r - c) - \eta \theta = 0, \\ \frac{\partial \pi^c}{\partial L} = -\alpha_o(p_o - c) + \alpha_r(p_r - c) + 2(h_o h_1 - h_1^2 L) = 0. \end{cases}$$

联立解这个方程组, 可得

$$p_o^* = [(4\eta h_1^2 h_1^2 + \eta \alpha_r^2 + 2h_1^2 \beta_r^2)(-2\eta h_1 h_o \alpha_o + c\eta \alpha_o(\alpha_r - \alpha_o) - 2h_1^2(a\eta(\rho - 1) + c(\eta p_2 - \eta p_1 + \beta_o^2 + \beta_o \beta_r)) - (4\eta h_2^2 h_1^2 - \eta \alpha_o \alpha_r + 2h_1^2 \beta_o \beta_r)(2\eta h_1 h_o \alpha_r + c\eta \alpha_r(\alpha_o - \alpha_r) + 2h_1^2(a\eta \rho + c\eta b_1 - c(\eta p_2 + \beta_r^2 + \beta_o \beta_r))))] / [(4\eta h_2^2 h_1^2 - \eta \alpha_o \alpha_r + 2h_1^2 \beta_o \beta_r)^2 - (4\eta h_1^2 h_1^2 - \eta \alpha_r^2 - 2h_1^2 \beta_r^2)],$$

$$p_r^* = [4c\eta h_1^2 (b_1^2 - b_2^2) - a\eta \alpha_o (\rho \alpha_o + \alpha_r - \rho \alpha_r) - 2h_1 \beta_o^2 (a\eta h_1 + h_o \alpha_r) + \alpha_r^2 \beta_o^2 + 2\beta_o \beta_r (a\eta h_1^2 - a\eta h_1^2 - h_1 h_o \alpha_o + \alpha_o \alpha_r) + \alpha_o^2 \beta_r^2 - b_2 (4\eta h_1 h_o \alpha_r + c\eta \alpha_o (\alpha_o - 3\alpha_r) + 2h_1^2 (2a\eta \rho - 2a\eta + c\beta_o^2 + 3c\beta_o \beta_r)) + b_1 (4\eta h_1 h_o \alpha_r - c\eta (\alpha_o^2 - \alpha_o \alpha_r + 2\alpha_r^2) + h_1^2 (4a\eta \rho - 2c\beta_o^2 - 2c\beta_o \beta_r - 4c\beta_r^2))] / [8\eta h_1^2 (b_1^2 - b_2^2) + (\alpha_r \beta_o + \alpha_o \beta_r)^2 + 4b_2 (\eta \alpha_o \alpha_r - 2h_1^2 \beta_o \beta_r) - 2b_1 (\eta (\alpha_o^2 + \alpha_r^2) + 2h_1^2 (\beta_o^2 + \beta_r^2))],$$

$$\theta^* = [4ch_1^2 (\beta_o + \beta_r) (b_2^2 - b_1^2) - a(\rho \alpha_o - (\rho - 1)\alpha) (\alpha_r \beta_o + \alpha_o \beta_r) + b_1 (4ah_1^2 (\beta_o - \rho \beta_o + \rho \beta_r) + c(\alpha_o + \alpha_r) (\alpha_r \beta_o + \alpha_o \beta_r) + 4h_1 h_o (\alpha_r \beta_r - \alpha_o \beta_o)) + b_2 (4ah_1^2 (\rho \beta_o + \beta_r - \rho \beta_r) + 4h_1 h_o (\alpha_r \beta_o - \alpha_o \beta_r) - c(\alpha_o + \alpha_r) (\alpha_r \beta_o + \alpha_o \beta_r))] / [8\eta h_1^2 (b_1^2 - b_2^2) + (\alpha_r \beta_o + \alpha_o \beta_r)^2 + 4b_2 (\eta \alpha_o \alpha_r - 2h_1^2 \beta_o \beta_r) - 2b_1 (\eta (\alpha_o^2 + \alpha_r^2) + 2h_1^2 (\beta_o^2 + \beta_r^2))],$$

$$L^* = [2\rho(b_1^2 - b_2^2)(4h_1 h_o + \alpha_o - \alpha_r) - a(\rho \beta_o + \rho \beta_r - \beta_r) (\alpha_r \beta_o + \alpha_o \beta_r) + b_1 (\alpha_r (2a\eta \rho + c\beta_o (\beta_o - \beta_r)) + \alpha (2a\eta (\rho - 1) + c\beta_r (\beta_o - \beta_r)) - 4h_1 h_o (\beta_o^2 + \beta_r^2)) + b_2 (\alpha_r (c\beta_o (\beta_r - \beta_o) - 2a\eta (\rho - 1)) + \alpha_o (c\beta_r (\beta_r - \beta_o) - 2a\eta \rho) - 8h_1 h_o \beta_o \beta_r)] / [8\eta h_1^2 (b_1^2 - b_2^2) + (\alpha_r \beta_o + \alpha_o \beta_r)^2 + 4b_2 (\eta \alpha_o \alpha_r - 2h_1^2 \beta_o \beta_r) - 2b_1 (\eta (\alpha_o^2 + \alpha_r^2) + 2h_1^2 (\beta_o^2 + \beta_r^2))].$$

把  $p_r^*, p_o^*, \theta^*$  和  $L^*$  分别代入式(3)和(4), 可得集中式决策下供应商和零售商的需求  $D_m^*, D_r^*$ . 把

$p_r^{c^*}, p_0^{c^*}, \theta^{c^*}$  和  $L^{c^*}$  分别代入式(6)~(8), 可得集中式决策下  $\pi_m^{c^*}, \pi_r^{c^*}, \pi_s^{c^*}$

$$\pi_r^{c^*} = (p_r^{c^*} - w)(\rho\alpha - b_1 p_r^{c^*} + b_2 p_0^{c^*} + \alpha_r L^{c^*} + \beta_r \theta^{c^*}),$$

$$\pi_m^{c^*} = (p_0^{c^*} - c)[(1 - \rho)a - b_1 p_0^{c^*} + b_2 p_r^{c^*} - \alpha_0 L^{c^*} + \beta_0 \theta^{c^*}] + (\omega - c)(\rho\alpha - b_1 p_r^{c^*} + b_2 p_0^{c^*} + \alpha_r L^{c^*} + \beta_r \theta^{c^*}) - \frac{1}{2} \eta \theta^{c^* 2} - (h_0 - h_1 L^{c^*})^2,$$

$$\pi_s^{c^*} = \pi_r^{c^*} + \pi_m^{c^*}.$$

### 3.2 分散式决策

在分散式决策中, 供应链各成员都做出对自己最优的决策. 领导者会预测跟随者对他们定价策略的相机行动规则, 从而做出对自己最优的策略选择. 各渠道成员在供应链中扮演的角色取决于他在整个供应链中展现出的影响力和掌控力(Gao 等(2016)<sup>[15]</sup>). 在模型中供应商决定的变量不仅有  $p_0$  和  $L$ , 还有该绿色供应链最重要的参数绿色等级  $\theta$ , 而零售商决定的变量只有  $p_r$ , 所以供应商的渠道影响力和掌控力更大, 于是假设供应商作为 Stackelberg 博弈的领导者, 零售商为跟随者. 这与 Yang 和 Xiao (2017)<sup>[16]</sup>、Ali 等(2018)<sup>[17]</sup> 提出的假设相同.

零售商的利润函数为

$$\pi_r^d = (p_r - w)D_r = (p_r - w)(\rho\alpha - b_1 p_r + b_2 p_0 + \alpha_r L + \beta_r \theta). \quad (9)$$

在式(9)中, 假定供应商的决策变量  $p_0, \theta, L$  为定值, 则零售商的利润函数是一个关于变量  $p_r$  开口向下的二次函数. 于是有

$$\frac{\partial \pi_r^d}{\partial p_r} = -2b_1 p_r + (\rho\alpha + b_2 p_0 + \alpha_r L + \beta_r \theta + \omega b_1),$$

令  $\frac{d\pi_r^d}{dp_r} = 0$ , 可得

$$p_r^d = \frac{\rho\alpha + b_2 p_0 + \alpha_r L + \beta_r \theta + \omega b_1}{2b_1}, \quad (10)$$

把  $p_r^d$  代入供应商的利润函数可得

$$\begin{aligned} \pi_m^d &= (p_0 - c)((1 - \rho)a - b_1 p_0 - \alpha_0 L + \beta_0 \theta) + (\omega - c)(\rho\alpha + b_2 p_0 + \alpha_r L + \beta_r \theta) + \\ &\quad ((p_0 - c)b_2 + (\omega - c)b_1)p_r^d - \frac{1}{2} \eta \theta^2 - (h_0 - h_1 L)^2 \\ &= (p_0 - c)((1 - \rho)a - b_1 p_0 - \alpha_0 L + \beta_0 \theta) + (\omega - c)(\rho\alpha + b_2 p_0 + \alpha_r L + \beta_r \theta) + \\ &\quad ((p_0 - c)b_2 + (\omega - c)b_1) \frac{\rho\alpha + b_2 p_0 + \alpha_r L + \beta_r \theta + \omega b_1}{2b_1} - \frac{1}{2} \eta \theta^2 - (h_0 - h_1 L)^2, \end{aligned}$$

对上式中的  $\pi_m^d$  分别关于  $p_0, \theta, L$  求导, 可得

$$\begin{cases} \frac{\partial \pi_m^d}{\partial p_0} = (1 - \rho)a - b_1 p_0 - \alpha_0 L + \beta_0 \theta - b_1(p_0 - c) + b_2(\omega - c) + \\ \quad \frac{b_2(\rho\alpha + 2b_2 p_0 + \alpha_r L + \beta_r \theta + c(b_1 - b_2))}{2b_1} = 0, \\ \frac{\partial \pi_m^d}{\partial \theta} = \beta_0(p_0 - c) + \beta_r(\omega - c) + \frac{\beta_r(b_2(p_0 - c) + b_1(\omega - c))}{2b_1} - \eta \theta = 0, \\ \frac{\partial \pi_m^d}{\partial L} = -\alpha_0(p_0 - c) + \alpha_r(\omega - c) + \frac{\alpha_r(b_2(p_0 - c) + b_1(\omega - c))}{2b_1} + 2(h_0 h_1 - h_1^2 L) = 0. \end{cases}$$

联立方程组解出最优的  $p_0^d, \theta^d$  和  $L^d$ , 它们为

$$\begin{aligned} p_0^d &= 4b_1 \eta h_1^2 (2b_1(a - \rho a + cb_1) + b_2(a\rho - cb_1 + 2\omega b_1) - ch_1^2) - \eta(2b_1\alpha_0 - b_2\alpha) [(b_1(4h_0 h_1 + 2c\alpha + \alpha_r(\omega - c) - ch_1^2) - 2h_1^2(2b_1\beta_0 + b_2\beta_r)(cb_2\beta_r + b_1(2c\beta_0 + \beta_r c - \beta_r \omega)))] / [4b_1^2(2\rho(\frac{b_2^2}{b_1} - 2b_1) + \rho(\alpha_0 - \frac{b_2\alpha_r}{2b_1})^2 + 2h_1^2(\alpha_0 + \frac{b_2\beta_r}{2b_1}))], \\ \theta^d &= [2b_2^2 h_1 \beta_r (a\rho h_1 + cb_2 b_1 + h_0 \alpha_r) - 8b_1^3 h_1^2 (c\beta_0 + c\beta_r - \omega\beta_r) - 8b_1^2 h_0 h_1 \alpha_0 \beta_0 - 4b_1^2 h_1^2 (2\beta_0(\rho - 1) + \beta_0 \beta_r (2\omega \end{aligned}$$

$-c) + cb_2\beta_r) + 2h_1^2(c - w)(\alpha_r\beta_0 + \alpha_0\beta_r) + b_1b_2(2h_1^2(2\beta_0(a\rho + cb_2) + \beta_r(2a - 2a\rho + cb_r)) + 4h_1h_2(\alpha_r\beta_0 - \alpha_0\beta_r) + \alpha_r(w - c)(\alpha_r\beta_0 + \alpha_0\beta_r))]/[16\eta^3h_1^2 - 4b_1^2(\eta^2\alpha_0 + 2h_1^2\beta_0^2) + 4b_1b_2(\eta(\alpha_0\alpha_r - 2b_2h_1^2) - 2h_1^2\beta_0\beta_r) - b_2^2(\eta^2\alpha_r + 2h_1^2\beta_r^2)]$ ,

$L^{d^*} = [4\eta^3(4h_1h_0 + (\alpha_0 + \alpha_r(w - c)) + b_2^2(\eta\alpha_r(a\rho + cb_2) - 2h_1h_0\beta_r^2) + b_1b_2(\eta^2(\alpha_r - 8h_1h_0 - 2c\alpha_0) - 2a\eta(\alpha_0 + \alpha_r(\rho - 1)) + \beta_r\beta_0(\alpha_r(c - w) - 8h_1h_0) + \alpha_0\beta_r^2(c - w)) + 2b_1^2(\alpha_0(2a\eta(\rho - 1) + \eta^2(-2w) + \beta_0\beta_r(c - w)) + \beta_0^2(\alpha_r(c - w) - 4h_1h_0) - c\eta b_2\alpha_r)]/[16\eta^3h_1^2 - 4b_1^2(\eta^2\alpha_0 + 2h_1^2\beta_0^2) + 4b_1b_2(\eta(\alpha_0\alpha_r - 2b_2h_1^2) - 2h_1^2\beta_0\beta_r) - b_2^2(\eta^2\alpha_r + 2h_1^2\beta_r^2)]$ .

把  $p_0^{d^*}, \theta^{d^*}$  和  $L^{d^*}$  代入式(10)中得

$$p_r^{d^*} = \frac{\rho\alpha + b_2p_0^{d^*} + \alpha_rL^{d^*} + \beta\theta^{d^*} + \omega b_1}{2b_1}$$

把  $p_r^{d^*}, p_0^{d^*}, \theta^{d^*}$  和  $L^{d^*}$  代入式(3)和式(4),得到供应商和零售商的需求  $D_m^{d^*}, D_r^{d^*}$ . 把  $p_r^{d^*}, p_0^{d^*}, \theta^{d^*}$  和  $L^{d^*}$  分别代入式(6)、式(7)和式(8)中,得到供应商、零售商的最大利润  $\pi_m^{d^*}, \pi_r^{d^*}$ , 整个供应链的最大利润  $\pi_{sc}^{d^*}$ .

$$\pi_r^{d^*} = (p_r^{d^*} - w)(\rho\alpha - b_1p_r^{d^*} + b_2p_0^{d^*} + \alpha_rL^{d^*} + \beta\theta^{d^*}),$$

$$\pi_m^{d^*} = (p_0^{d^*} - c)[(1 - \rho)a - b_1p_0^{d^*} + b_2p_r^{d^*} - \alpha_0L^{d^*} + \beta_0\theta^{d^*}] + (w - c)(\rho\alpha - b_1p_r^{d^*} + b_2p_0^{d^*} + \alpha_rL^{d^*} + \beta_r\theta^{d^*}) - \frac{1}{2}\eta^2p^{d^*2} - (h_0 - h_1L^{d^*})^2,$$

$$\pi_{sc}^{d^*} = \pi_r^{d^*} + \pi_m^{d^*}.$$

### 3.3 供应链协调

引入一个合同使供应链各成员变成合作关系从而协调整个供应链. 这个合同将会分享一定的激励给供应链各成员, 创造一个双赢的局面. 一些学者如 Basiri 和 Heydari(2017)<sup>[18]</sup>、Chen 等(2012)<sup>[19]</sup> 已经对各种类型的合作关系进行了研究, 例如: 数量折扣合同、两部制合同、利润共享合同等.

双渠道绿色供应链的合作可以利用剩余利润共享合同来构建模型. 在合同里供应链各成员分享剩余利润的数量取决于它们的交易能力, 令供应商和零售商的交易能力分别为  $\phi, \varphi$ . 相应的有  $0 < \phi + \varphi \leq 1$ . 当  $\phi > \varphi$  时, 说明供应商在供应链中更占优势, 则它获得的剩余利润更多, 反之亦然. 由前面的分析可知供应链各成员接受共享合同的前提是签订合同后获得的利润会大于在分散式情形下获得的利润. 于是在签订共享合同后, 相对于分散式供应商增加的利润为  $\phi(\pi_{sc}^{c^*} - \pi_{sc}^{d^*})$ , 这保证了供应商可以获得足够多的刺激去与零售商合作. 相似的  $\varphi(\pi_{sc}^{c^*} - \pi_{sc}^{d^*})$  为零售商获得的刺激. 这也保证了零售商获得足够多的刺激与供应商合作. 因此合作模型的表达式为

$$\begin{cases} \max \pi_{sc}^{\omega} = (p_0 - c)((1 - \rho)a - b_1p_0 + b_2p_r - \alpha_0L + \beta_0\theta) + (p_r - c)(\rho\alpha - b_1p_r + b_2p_0 + \alpha_rL + \beta\theta) - \frac{1}{2}\eta^2p^2 - (h_0 - h_1L)^2 \\ \text{s. t.} \begin{cases} \pi_m^{\omega} = (p_0 - c)((1 - \rho)a - b_1p_0 + b_2p_r - \alpha_0L + \beta_0\theta) + (w - c)(\rho\alpha - b_1p_r + b_2p_0 + \alpha_rL + \beta\theta) - \frac{1}{2}\eta^2p^2 - (h_0 - h_1L)^2 \geq \pi_m^{d^*} + \phi(\pi_{sc}^{c^*} - \pi_{sc}^{d^*}), \\ \pi_r^{\omega} = (p_r - w)(\rho\alpha - b_1p_r + b_2p_0 + \alpha_rL + \beta\theta) \geq \pi_r^{d^*} + \varphi(\pi_{sc}^{c^*} - \pi_{sc}^{d^*}). \end{cases} \end{cases}$$

其中  $0 < \phi + \varphi \leq 1$ , 并且  $p_0, p_r, \theta, L \geq 0$ .

供应链协调的结果将利用 Mathematica 中的方法来求解其数值解.

## 4 数值算例

在本节将给出一些数值算例, 并利用 Mathematica, Matlab 等数学软件计算出相应的数值结果, 以此来分析一些关键数据的影响. 为了更好地进行数值分析给出了大小不同的 3 组数据, 在表 1 中给出的数据是以

Basiri 等(2017)<sup>[18]</sup>和 Amit 等(2019)<sup>[9]</sup>的数据为基础得到的. 将数据代入前面得到的算式, 将它们在集中式、分散式和供应链协调情形得到的结果分别记录在表 2~表 4 中.

表 1 给定的数值例子所用到的数据

数据	$a$	$\rho$	$b_1$	$b_2$	$\omega$	$\alpha_0$	$\alpha_r$	$\beta_0$	$\beta_r$	$h_0$	$h_1$	$c$	$\eta$
一	60	0.25	0.65	0.4	31.5	1.5	0.6	0.6	0.75	70	10	4	3.5
二	100	0.65	0.94	0.6	25	2	0.8	0.6	0.83	60	10	2	4
三	130	0.45	1.8	1.6	45	1.6	1.2	0.5	0.7	70	10	5.5	4.5

表 2 集中式决策下的最优解

数据	$p_0^*$	$p_r^*$	$\theta^*$	$L^c$	$D_m^*$	$D_r^*$	$\pi_m^*$	$\pi_r^*$	$\pi_{sc}^*$
一	114.95	110.23	41.76	6.48	29.67	26.60	889.52	1934.30	2823.83
二	102.56	120.65	39.59	5.46	23.58	50.72	367.73	4830.83	5198.55
三	265.08	267.89	69.66	6.49	47.57	56.84	3645.42	12669.10	16314.50

表 3 分散式决策下的最优解

数据	$p_0^d$	$p_r^d$	$\theta^d$	$L^d$	$D_m^d$	$D_r^d$	$\pi_m^d$	$\pi_r^d$	$\pi_{sc}^d$
一	65.90	68.98	17.63	6.63	30.39	13.72	1700.82	514.22	2215.04
二	48.46	70.42	12.43	5.64	27.87	42.71	1955.20	1939.89	3898.09
三	81.52	80.47	16.77	6.71	51.16	63.87	5770.86	2265.47	8036.33

### 4.1 供应链协调数值验证

供应链协调的数值是以表 1 中的数据二为基础得出的. 在这里选取了三组不同的  $\phi, \varphi$  的值, 并且令  $\phi + \varphi$  等于定值 0.85. 于是得到合作模型的数值结果在表 4 中, 在表 5 中分析了相对于分散式决策, 供应链协调中的零售商和供应商利润变化量. 在引入供应链协调合同后, 零售商和供应商的利润都增加了. 供应商获得的剩余利润的大小将会随着供应商的交易能力  $\phi$  的增加而增加, 零售商获得利润也会随着零售商的交易能力  $\varphi$  的增加而增加. 引入供应链协调合同后的确实能使零售商和供应商都获得更多的利润, 从而达到双赢的状态.

表 4 基于数据二的供应链协调的最优值

$\phi, \varphi$	$p_0^{co}$	$p_r^{co}$	$\theta^{co}$	$L^{co}$	$D_m^{co}$	$D_r^{co}$	$\pi_m^{co}$	$\pi_r^{co}$	$\pi_{sc}^{co}$
$\phi = 0.15, \varphi = 0.70$	78.09	118.87	24.86	5.49	36.85	24.14	2120.09	2359.09	4479.98
$\phi = 0.45, \varphi = 0.40$	77.11	116.91	23.33	5.48	35.70	25.11	2143.34	2307.34	4451.20
$\phi = 0.70, \varphi = 0.15$	78.04	122.27	22.90	5.46	37.82	20.26	2263.83	1970.69	4234.52

表 5 基于数据二的供应链协调和分散式决策的数据对比

$\phi, \varphi$	$\Delta\pi_m^*$	$\Delta\pi_r^*$	$\Delta\pi_{sc}^*$
$\phi = 0.15, \varphi = 0.70$	164.89	420.00	584.89
$\phi = 0.45, \varphi = 0.40$	188.14	367.97	556.11
$\phi = 0.70, \varphi = 0.15$	308.63	39.08	339.43

## 5 结 论

研究了在考虑产品绿色等级和递送时间下的双渠道绿色供应链的最优定价问题,分别计算在集中式决策、分散式决策和供应链协调下零售商和供应商的最优策略.发现随着绿色等级增加和递送时间减少,市场对绿色产品的需求增大,但它们对需求的影响没有价格变化对需求影响大.在零售商和供应商之间引入利润共享合同,可以使零售商和供应商都获得更多的利润,从而使它们达到双赢的状态.未来的研究方向可以为增加另一种可替代的绿色产品作为竞争者出现在模型中.另外,如果在模型中增加需求中断也将是一个十分有趣的研究课题.

## 参考文献

- [1] CHITRA K. In search of the green consumers : A perceptual study[J]. *Journal of Services Research*, 2007, 7(1): 173—191.
- [2] MOON W, FLORKOWSKI W J, BERNHARD B, *et al.* Willingness to pay for environmental practices: Implications for eco-labeling[J]. *Land Economics*, 2002, 78(1): 88—102.
- [3] 颜荣芳,程永宏,王彩霞.再制造闭环供应链最优差别定价模型[J]. *中国管理科学*, 2013, 21(1): 90—97.
- [4] 权蓉,颜荣芳.随机中断和随机需求下闭环供应链最优回收定价模型[J]. *经济数学*, 2017, 34(3): 59—65.
- [5] GHOSH D, SHAH J. A comparative analysis of greening policies across supply chain structures[J]. *International Journal of Production Economics*, 2012, 135(2): 568—583.
- [6] GHOSH D, SHAH J. Supply chain analysis under green sensitive consumer demand and cost sharing contract[J]. *International Journal of Production Economics*, 2015, 164(1): 319—329.
- [7] LI B, ZHU M, JIANG Y, *et al.* Pricing policies of a competitive dual-channel green supply chain[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112(3): 2029—2042.
- [8] JAMALI M B, RASTI-BARZOLI M. A game theoretic approach for green and non-green product pricing in chain-to-chain competitive sustainable and regular dual-channel supply chains[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 170(1): 1029—1043.
- [9] RANJAN A, JHA J K. Pricing and coordination strategies of a dual-channel supply chain considering green quality and sales effort[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 218(1): 409—424.
- [10] 李一龙,颜荣芳.需求中断下具零售商激励的双渠道供应链价格与生产决策[J]. *经济数学*, 2019, 36(2): 77—84.
- [11] RAHMANI K, YAVARI M. Pricing policies for a dual-channel green supply chain under demand disruptions[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 127(1): 493—510.
- [12] HUANG W, SWAMINATHAN J M. Introduction of a second channel: Implications for pricing and profits[J]. *European Journal of Operational Research*, 2009, 194(1): 258—279.
- [13] SWAMI S, SHAH J. Channel coordination in green supply chain management[J]. *Journal of the operational research society*, 2013, 64(3): 336—351.
- [14] NIKUNJA M M, PETER K. Managing a dual-channel supply chain under price and delivery-time dependent stochastic demand[J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 272(1): 147—161.
- [15] GAQ J, HAN H, HOU L, *et al.* Pricing and effort decisions in a closed-loop supply chain under different channel power structures[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112(3): 2043—2057.
- [16] YANG D, XIAO T. Pricing and green level decisions of a green supply chain with governmental interventions under fuzzy uncertainties [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 149(2): 1174—1187.
- [17] ALI S M, AHMAN M H, TUMPA T J, *et al.* Examining price and service competition among retailers in a supply chain under potential demand disruption[J]. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 2018, 40(1): 40—47.
- [18] BASITI Z, HERDARI J. A mathematical model for green supply chain coordination with substitutable products[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 145(1): 232—249.
- [19] CHEN J, ZHANG H, SUN Y. Implementing coordination contracts in a manufacturer Stackelberg dual—channel supply chain[J]. *Omega*, 2012, 40(5): 571—583.