



OSID

# 碳交易政策下双渠道闭环供应链 决策模型研究

陈章跃, 程月, 弓宪文

(重庆第二师范学院 经济与工商管理学院, 重庆 400065)

**摘要:**随着环境保护意识的增强,我国陆续开展碳排放权交易试点工作。以碳交易机制为基础,构建了由一个制造商和一个零售商组成的双渠道闭环供应链系统,制造商通过传统的实体销售渠道和网络直销渠道销售产品,利用 Stackelberg 博弈理论探讨无碳交易政策和有碳交易政策两种情形下双渠道闭环供应链的最优决策。研究发现,在有碳交易政策下,双渠道闭环供应链传统销售渠道的批发价、零售价和直销渠道的零售价会更高,各个主体的利润会降低,总体碳排放量会降低。

**关键词:**碳交易政策;双渠道闭环供应链;碳交易价格;Stackelberg 博弈

**中图分类号:**F272

**文献标识码:**A

**文章编号:**1008-6390(2021)01-0013-04

2012年,我国在上海、北京、深圳和重庆等七个城市进行碳排放交易试点,截至2019年12月,七个试点碳市场已经累计完成了1.8亿吨线上配额交易量,达成线上交易额41.3亿元。在碳排放政策的要求和约束下,闭环供应链的意义显得尤为重要。闭环供应链是指产品由生产地到消费地,之后废旧产品由消费地返回至生产地而形成的一个封闭的供应链。废旧产品返回生产地后采用专门的工艺和技术进行再制造,再制造产品在性能和质量上都达到了新产品的标准。根据统计,旧产品的再制造可以实现节能60%、节约材料70%、减少气体和水污染近80%。近年来,研究者已经对闭环供应链的最优决策进行了分析,比如:Savaskan等<sup>[1]</sup>、Ferguson和Toktay<sup>[2]</sup>、Bakal和Akcali<sup>[3]</sup>、熊中楷等<sup>[4]</sup>、王文宾和达庆利<sup>[5]</sup>等。

为了提高产品的市场占有率以及增加企业自身的利润,闭环供应链中制造商除了通过传统的实体零售渠道销售产品,还大力通过网络直销渠道来销售产品,例如IBM、三星和索尼等<sup>[6]</sup>,这就是双渠道闭环供应链。双渠道闭环供应链已经成为社会关注的热点问题,许多学者对双渠道闭环供应链进行了研究。徐兵和吴明<sup>[7]</sup>、许茂增和唐飞<sup>[8]</sup>、赵静和肖

亚倩<sup>[9]</sup>研究了双渠道闭环供应链的最优决策问题。陈晓红等<sup>[10]</sup>、王哲等<sup>[11]</sup>、李芳<sup>[12]</sup>分析了政府介入对双渠道供应链决策的影响。郑本荣等<sup>[13]</sup>、唐飞和许茂增<sup>[14]</sup>研究了专利保护对双渠道闭环供应链定价与协调决策的影响。唐秋生等<sup>[15]</sup>从准时制生产模式角度研究了双渠道闭环供应链库存模型。曹晓刚<sup>[16]</sup>分析了双渠道闭环供应链的协调问题。李向荣和张克勇<sup>[17]</sup>从双渠道会增加市场需求的角度构建了双渠道闭环供应链决策模型。周义廷和刘丽文<sup>[18]</sup>分析了公平关切程度对双渠道供应链决策和协调的影响。于春海等<sup>[19]</sup>研究了两阶段双渠道闭环供应链协调问题。郭金森<sup>[20]</sup>分析了不同的回收再制造模式下双渠道供应链的运作决策。司凤山<sup>[21]</sup>探讨了双渠道闭环供应链静态博弈模型和时滞动态博弈模型。

以上有关双渠道闭环供应链的文献,都没有涉及碳交易政策。本文试图在碳交易政策背景下分析双渠道闭环供应链最优决策问题,利用Stackelberg博弈方法分析碳交易政策下双渠道闭环供应链的最优定价策略,以期为企业决策管理和政府碳政策的制定提供参考借鉴。

收稿日期:2020-09-12

基金项目:教育部人文社科规划项目“乡村振兴中兼顾效率与公平的西部城乡物流协调发展研究”(19YJA790015);重庆第二师范学院校级项目“碳交易政策下闭环供应链的回收模式选择研究”(KY201714B)

作者简介:陈章跃,博士,研究方向:物流与供应链管理。

## 一、问题描述与基本假设

假设双渠道闭环供应链由一个制造商和一个零售商组成,其中制造商使用新的原材料生产新产品,同时委托零售商负责回收废旧产品,并以一定价格购买零售商回收的废旧产品从而进行再制造。制造商的产品可以通过传统零售渠道销售给消费者,也可以通过网络直销渠道销售给消费者,如图 1 所示。

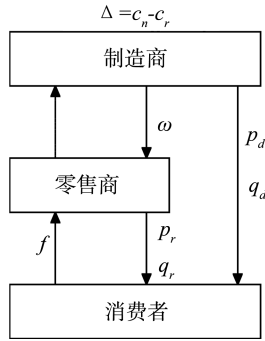


图 1 双渠道闭环供应链

(1) 制造商通过双渠道销售新产品:在传统零售渠道中将新产品批发给零售商时的单位批发价为  $\omega$ ,零售商销售给消费者时产品的单位售价为  $p_r$ ,需求量为  $q_r$ ;网络直销渠道的单位销售价格为  $p_d$ ,需求量为  $q_d$ 。

(2) 零售商负责回收废旧产品,其单位回收价为  $f$ ,再将回收的旧产品提供给制造商;制造商支付给零售商的单位产品回收转移价格为  $b$ ,制造商负责产品的再制造。

(3) 新产品的单位生产成本为  $c_n$ ,再制造产品的单位生产成本为  $c_r$ ,其中  $\Delta = c_n - c_r > 0$ 。

(4)  $a$  为潜在市场需求规模 ( $a > 0$ ),  $\varphi$  为实体渠道需求占市场总需求的比例,  $1 - \varphi$  为网络渠道需求占市场总需求的比例 ( $0 < \varphi < 1$ ),  $\theta$  为渠道价格的敏感系数 ( $0 < \theta < 1$ )。参考郭金森等<sup>[20]</sup>和 Mukhopadhyay<sup>[22]</sup>的研究,可得:

实体渠道的需求:  $q_r = \varphi a - p_r + \theta p_d$

网络渠道的需求:  $q_d = (1 - \varphi)a - p_d + \theta p_r$

(5) 类似于 Bakal 等<sup>[3]</sup>和熊中楷等<sup>[4]</sup>的研究,假设废旧产品的回收量为  $S = g + hf$ 。其中,  $g, h$  是常数且  $g > 0, h > 0$ ,  $g$  可以看作是度量社会环保意识的指标,  $h$  为消费者对回收价格的敏感系数。

(6) 假设制造商可以免费获得碳排放配额  $G$ ,当制造商的碳排放量超过碳排放配额  $G$  时,则超过部分要从碳交易市场购买,每单位碳排放量交易价格

为  $\lambda$ ;当制造商的碳排放量低于碳排放配额  $G$  时,多余部分可以在碳交易市场进行交易从而获利。

(7)  $\Pi_j^i$  表示  $j$  情形下  $i$  的利润函数,其中  $i = M, R$  分别表示制造商、零售商,  $j = N, E$  分别表示无碳交易政策时的情形和有碳交易政策时的情形。

## 二、碳交易政策下双渠道闭环供应链决策模型

在制造商为领导者的 Stackelberg 博弈中,制造商先决定其批发价  $\omega$  和零售价  $p_d$ ,然后零售商决定其  $p_r$  和回收价  $f$ 。

制造商和零售商的利润函数分别为:

$$\begin{aligned} \text{Max}_{\omega, p_d} \Pi_M^E = & (p_r - \omega)q_r + (p_d - c_n)q_d + (b - f) \\ & (g + hf) - \lambda \{ [q_r + q_d - (g + hf)]e_n + \\ & (g + hf)e_r - G \} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{Max}_{p_r, f} \Pi_R^E = (p_r - \omega)q_r + (b - f)(g + hf) \quad (2)$$

式(1)的第一项、第二项、第三项和第四项分别表示制造商从实体渠道、网络直销渠道、废旧产品回收再制造、碳交易市场获取的利润。

采用逆向求解法,首先考虑零售商的决策。由式(2)可得零售商的反应函数:

$$p_r = \frac{1}{2}(\varphi a + \theta p_d + \omega) \quad (3)$$

$$f = \frac{hb - g}{2h} \quad (4)$$

将式(3)、(4)代入式(1)可以得到制造商的最优决策:

$$p_d^E = \frac{1}{2(1 - \theta^2)}(-\theta^2 c_n - \theta^2 e_n \lambda + \theta \varphi a + a - \varphi a + c_n + e_n \lambda) \quad (5)$$

$$\omega^E = \frac{1}{2(1 - \theta^2)}(-\theta^2 c_n - \theta^2 e_n \lambda + \theta a - \theta \varphi a + c_n + \varphi a + e_n \lambda) \quad (6)$$

结合式(3)、(4)、(5)、(6),可以得到零售商的最优决策:

$$p_r^E = \frac{1}{4(1 - \theta^2)}(-\theta^3 c_n - \theta^3 e_n \lambda - \theta^2 c_n - \theta^2 e_n \lambda - \theta^2 \varphi a + \theta c_n + \theta e_n \lambda + 2\theta a - 2\theta \varphi a + 3\varphi a + c_n + e_n \lambda) \quad (7)$$

$$f^E = \frac{hb - g}{2h} \quad (8)$$

然后,根据制造商和零售商的最优决策函数式可以得到碳交易政策下的产品需求量  $D^E$ 、废旧产品的回收量  $S^E$ 、制造商和零售商的利润,以及碳排放量  $E^E$ 。

$$E^E = \frac{1}{4(1-\theta^2)} \{ e_n [ -\theta^4 c_n - \theta^4 e_n \lambda - 2\theta^3 c_n - 2\theta^3 e_n \lambda - \theta^3 \varphi a + 4\theta^2 c_n + \theta^2 \varphi a + 4\theta^2 e_n \lambda - 2\theta^2 a + 2\theta c_n + 2\theta e_n \lambda + \theta \varphi a - 3c_n - 3e_n \lambda - \varphi a + 2a - 2(1-\theta^2)(hb+g) ] + 2e_r(1-\theta^2)(hb+g) \} \quad (9)$$

令上述各式中的  $\lambda=0$ , 可以得到在没有碳交易政策时制造商和零售商的最优决策  $p_d^N, \omega^N, p_r^N, f^N$ , 以及产品的需求量  $D^N$ 、废旧产品的回收量  $S^N$ 、制造商和零售商的利润、碳排放量  $E^N$ 。

$$E^N = \frac{1}{4(1-\theta^2)} \{ e_n [ -\theta^4 c_n - 2\theta^3 c_n - \theta^3 \varphi a + 4\theta^2 c_n + \theta^2 \varphi a - 2\theta^2 a + 2\theta c_n + \theta \varphi a - 3c_n - \varphi a + 2a - 2(1-\theta^2)(hb+g) ] + 2e_r(1-\theta^2)(hb+g) \} \quad (10)$$

**定理 1**  $\frac{\partial \omega^E}{\partial \lambda} > 0, \frac{\partial p_r^E}{\partial \lambda} > 0, \frac{\partial p_d^E}{\partial \lambda} > 0$

**证明:**  $\frac{\partial \omega^E}{\partial \lambda} = \frac{1}{2} e_n > 0, \frac{\partial p_r^E}{\partial \lambda} = \frac{1}{4} e_n (\theta + 1) > 0, \frac{\partial p_d^E}{\partial \lambda} = \frac{1}{2} e_n > 0.$

定理 1 表明碳排放交易价格越高, 产品在实体渠道的批发价和零售价越高, 产品在网络直销渠道的零售价越高。这是因为有碳交易政策时, 产品的碳排放要收费, 在一定程度上相当于增加了产品的生产成本。相应地, 传统实体渠道的批发价、零售价和网络直销渠道的零售价就会增加。

**定理 2**  $\frac{\partial D^E}{\partial \lambda} < 0$

**证明:** 因为  $0 < \theta < 1$ , 所以  $\frac{\partial D^E}{\partial \lambda} = \frac{1}{4} e_n (\theta - 1) (\theta + 3) < 0.$

定理 2 表明碳排放交易价格越高, 产品的需求量越低。这是因为碳排放交易价格越高, 制造商和零售商为了增加各自利润都会提高单位批发价和单位销售价, 在正常市场情况下, 产品单位价格增加, 消费者会减少产品的购买量, 从而导致产品的需求量降低。

**定理 3**  $\frac{\partial E^E}{\partial \lambda} < 0$

**证明:**  $\frac{\partial E^E}{\partial \lambda} = \frac{1}{4} e_n (\theta - 1) (\theta + 3) < 0.$

定理 3 表明碳排放交易价格越高, 碳排放量越低。碳排放交易价格越高, 产品的单位成本越高, 制造商为了确保自身利润, 会控制碳排放量不超过免费碳排放配额, 减少多余的碳配额交易成本, 同时制

造商的多余的碳排放量还可以通过碳交易市场进行碳交易从而获利, 所以碳排放交易价格越高, 制造商越趋于减少碳排放。

**定理 4**  $\omega^E > \omega^N, p_r^E > p_r^N, p_d^E > p_d^N$

**证明:**  $\omega^E - \omega^N = \frac{1}{2} e_n \lambda > 0, p_r^E - p_r^N = \frac{1}{4} e_n \lambda (1 + \theta) > 0, p_d^E - p_d^N = \frac{1}{2} e_n \lambda > 0.$

定理 4 表明, 制造商在实体零售渠道的产品批发价、零售价和网络直销渠道的销售价都高于无碳交易政策时相对应的价格。这是由于碳交易政策的实施使得企业的生产成本增加, 使得批发价、零售价高于无碳交易政策时的相应价格。

**定理 5**  $E^E < E^N$

**证明:** 因为  $0 < \theta < 1$ , 所以有  $E^E - E^N = -\frac{1}{4} e_n^2 \lambda (3 + \theta)(1 - \theta) < 0$ , 即  $E^E < E^N$ 。

定理 5 表明有碳交易政策时的碳排放量低于没有碳交易政策时的碳排放量。这说明政府对碳交易价格进行合适的干预和管控可以有效地减少碳排放量, 这也与我国现阶段以政府为主导的碳交易价格的实际情况相吻合, 我国七个碳交易试点城市均设置了价格涨跌幅制度以直接调控价格。

### 三、数值算例分析

结合数值算例对模型进行相关分析, 假设相关参数的值为:  $c_n = 60, c_r = 30, e_n = 20, e_r = 10, a = 700, \varphi = 0.7, \theta = 0.2, \lambda = 2, b = 15, h = 0.4, g = 5, G = 100$ 。

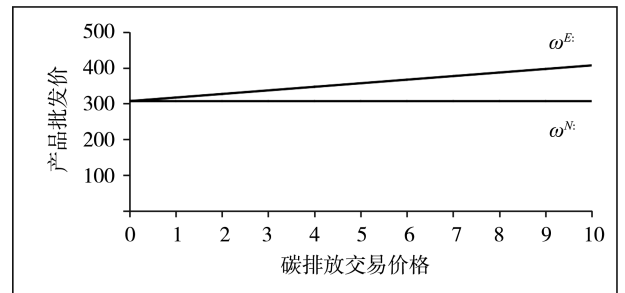


图 2 碳排放交易价格  $\lambda$  对产品批发价的影响

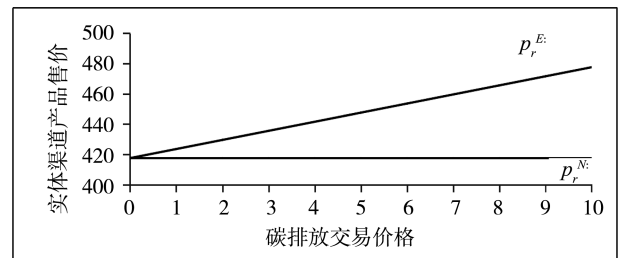


图 3 碳排放交易价格  $\lambda$  对实体渠道产品售价的影响

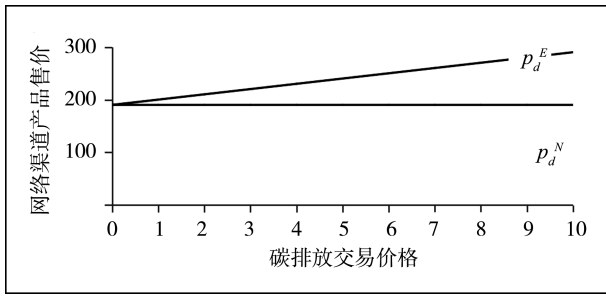


图4 碳排放交易价格  $\lambda$  对网络渠道产品售价的影响

图2至图4显示,碳排放交易价格越高,传统销售渠道的批发价、零售价和网络直销渠道的价格就越高,并且都高于没有碳交易政策时的相应价格。这是由于碳交易政策的实施在一定程度上增加了企业的生产成本。这与定理1、定理4是相符合的。

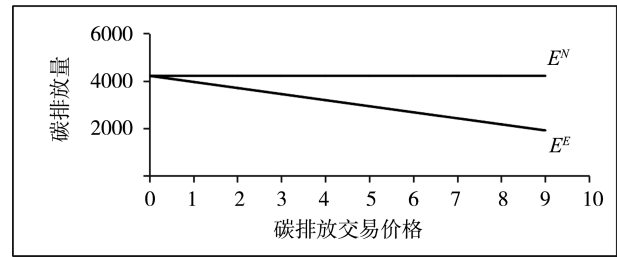


图5 碳排放交易价格  $\lambda$  对不同碳交易政策下碳排放量的影响

由图5可知,碳排放交易价格越高,碳排放量越低,且低于没有碳排放政策时的碳排放量,这与定理5是相符合的。这也说明碳交易政策的实施可以有效降低碳排放量。另一方面,碳交易政策的实施增加了企业的生产成本,降低了企业的利润,政府应从社会总福利最大化角度来制定具体的碳交易政策。

表1 碳排放交易价格  $\lambda$  对各主体利润的影响

碳交易价格	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
制造商利润	40831	36842	33109	29632	26411	23446	20737	18284	16087	14146
零售商利润	12286	11418	10582	9778	9006	8266	7558	6882	6238	5626

由表1可知,在有碳交易政策情况下,制造商的利润始终高于零售商,且碳交易价格越高,制造商和零售商的利润越低。这是因为碳交易政策的实施在一定程度上增加了企业的生产成本。当碳交易价格增加到一定程度时,企业的利润会变得很低,企业可能会退出市场,这也是碳交易政策制定者应该考虑的问题。合适的碳交易政策可以使企业有利润,又能控制碳排放量,消费者的需求又能得到有效满足,达到帕累托最优,实现多赢的局面。

#### 四、结论

本文研究了碳交易政策背景下双渠道闭环供应链的最优决策问题,并与无碳交易政策时的情形进行了比较分析。研究表明:在有碳交易政策时,双渠道闭环供应链传统销售渠道的批发价、零售价和直销渠道的零售价会更高,各个主体的利润会降低,总体碳排放量会降低。今后还可以从以下三个方面进一步深入研究:一是考虑消费者对新产品有更高的接受度;二是考虑制造商采取减排措施;三是考虑随机需求。

#### 参考文献:

[1] Savaskan R C, Bhattacharya S, Wassenhove L N. Closed-loop supply chain models with product remanufacturing [J].

Management science, 2004, 50(2): 239-252.

[2] Ferguson M E, Toktay L B. The effect of competition on recovery strategies [J]. Production and operations management, 2006, 15(3): 351-368.

[3] Bakal I S, Akcali E. Effects of random yield in remanufacturing with price-sensitive supply and demand [J]. Production and operations management, 2010, 15(3): 407-420.

[4] 熊中楷,申成然,彭志强. 专利保护下再制造闭环供应链协调机制研究 [J]. 管理科学学报, 2011, 14(6): 76-85.

[5] 王文宾,达庆利. 奖惩机制下具竞争制造商的废旧产品回收决策模型 [J]. 中国管理科学, 2013, 21(5): 50-56.

[6] Mukhopadhyay S K, Yao D Q, Yue X H. Information sharing of value-adding retailer in a mixed channel hi-tech supply chain [J]. Journal of Business Research, 2006, 61(9): 950-958.

[7] 徐兵,吴明. 双渠道闭环供应链的三种回收模式的建模分析 [J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(11): 10-19.

[8] 许茂增,唐飞. 基于第三方回收的双渠道闭环供应链协调机制 [J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(8): 2083-2089.

[9] 赵静,肖亚倩. 不同渠道偏好和运营成本下双渠道闭环供应链定价决策研究 [J]. 运筹与管理, 2018, 27(12): 108-114.

[10] 陈晓红,汪继,王傅强. 消费者偏好和政府补贴下双渠道闭环供应链决策研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(12): 3111-3122.

(下转第21页)

进行债券融资,用好用足发债规模。在鼓励企业发行债券的基础上建立相应的债券违约风险监测预警、债券违约风险分担、债务违约处置等机制,保障债券融资的安全性、合理性、合规性、合法性;建立政府融资担保机构为发行债券的企业增信和担保服务机制。加强与中国银行间市场交易商协会等债券市场自律组织的沟通协调,通过培育和引进银行、证券、保险、基金、信托等债券机构投资者参与债券交易来解决债券的交易、流通问题,增强债券的市场吸引力,通过繁荣债券市场来刺激企业扩大债券融资规模、优化融资结构、降低融资成本。

## 2. 积极寻求股权融资

大力实施“培企上市”工程。政府要成立帮助企业上市的专门机构,建立上市后备企业、拟上市企业、已上市企业分层服务机制,实行“一类一策”“一企一策”,强化对企业上市融资的辅导,加强对企业的“贴身”服务,鼓励企业选择不同板块、不同路径、不同市场进行融资。将经营状况良好、潜力较大的企业尤其是高科技企业培育为上市后备企业,并给予政策优惠鼓励其做大做强,增强企业主观上市融资的意愿和意识,通过内外结合增加企业上市融资的可能性。尤其是要帮扶成长性、自主创新性强的战略新兴产业企业到中小板、创业板、新三板和港交所上市。帮助基本或者已经具备上市条件的企业寻

求战略合作方,实现股权的多元化和合理化,帮助企业与国内外各种证券市场对接,尽快实现企业上市融资。鼓励主业突出、资产规模大、盈利水平高、竞争力强的企业加快改制重组步伐,利用资产证券化盘活存量资产,通过 IPO 或借壳等方式实现主板市场上市。给予已上市企业奖励,鼓励其通过行业整合、交流合作、并购重组、产业升级、资本对接做大做强,争当行业龙头,鼓励企业通过配股、增发、发行可转化债券等实现再融资。

## 参考文献:

- [1]遂宁市金融工作局营造多元包容的融资环境[EB/OL]. (2020-03-27)[2020-10-11]. <http://www.suining.gov.cn>.
- [2]2020年5月遂宁金融运行情况[EB/OL]. (2020-06-22)[2020-10-09]. <http://www.suining.gov.cn>.
- [3]董鹏.直融“追赶者”资本川军谋雄起:2020年末150家企业欲登陆A股[N].21世纪经济报道,2018-03-13(14).
- [4]漆明春.加快成都经济区节点城市现代金融业发展研究——以遂宁市为例[J].阿坝师范学院学报,2020,37(3):86-92.
- [5]四川省人民政府办公厅关于印发四川省推进普惠金融发展规划(2016—2020年)的通知[EB/OL]. (2017-01-13)[2020-10-09]. <http://www.sc.gov.cn/>.

[责任编辑 乡 下]

(上接第16页)

- [11]王哲,李帮义,刘志,等.政府规制对双责任双渠道闭环供应链的影响[J].计算机集成制造系统,2017,23(10):2260-2268.
- [12]李芳,马鑫,洪佳.考虑质量不确定的双渠道闭环供应链契约协调研究[J].统计与决策,2020,36(9):176-180.
- [13]郑本荣,杨超,杨璐.专利保护下双渠道闭环供应链的定价与协调决策[J].系统工程学报,2017,32(1):103-113.
- [14]唐飞,许茂增.考虑专利保护和渠道偏好的再制造双渠道闭环供应链决策与协调[J].运筹与管理,2019,28(6):61-69.
- [15]唐秋生,任玉琰,王勇,等.需求不确定的双源双渠道闭环供应链库存优化模型[J].预测,2011,30(4):30-35.
- [16]曹晓刚,郑本荣,闻卉.考虑顾客偏好的双渠道闭环供应链定价与协调决策[J].中国管理科学,2015,23(6):107-117.
- [17]李向荣,张克勇.基于市场需求增加的双渠道闭环供应链定价机制研究[J].运筹与管理,2015,24(4):58-67.
- [18]周义廷,刘丽文.考虑零售商公平关切的双渠道闭环供应链决策与协调研究[J].系统科学与数学,2017,37(9):1930-1948.
- [19]于春海,刘姗姗,荣冬玲,等.考虑再制造回收率的两阶段双渠道闭环供应链协调契约设计[J].东北大学学报(自然科学版),2018,39(5):756-760.
- [20]郭金森,周永务,任鸣鸣,等.基于风险厌恶零售商的双渠道闭环供应链运作策略[J].运筹与管理,2018,27(8):32-40.
- [21]司凤山,王晶,戴道明.基于制造商回收的双渠道闭环供应链博弈分析[J].计算机集成制造系统,2020,26(3):849-859.
- [22]Mukhopadhyay S K, Zhu X W, Yue X H. Optimal Contract Design for Mixed Channels Under Information Asymmetry[J]. Production and Operations Management,2008,17(6):641-650.

[责任编辑 乡 下]