



Munich Personal RePEc Archive

## **Dual-recycling channel management for WEEE with stochastic demand**

Li, Chuanfa and Feng, Lipan and Wang, Xuehong

School of Management, Tianjin University of Technology, Research  
Department, Shandong Yingcai University

15 August 2014

Online at <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/58142/>  
MPRA Paper No. 58142, posted 29 Aug 2014 14:37 UTC

# 随机需求下的 WEEE 双回收渠道管理研究

李春发<sup>1</sup>, 冯立攀<sup>1</sup>, 王雪红<sup>2</sup>

(1. 天津理工大学 管理学院, 天津, 300384; 2. 山东英才学院 科研处, 山东, 济南)

**摘要:** 随着消费者对在线回收模式认可度的提升, 越来越多的 WEEE 处理企业开始通过在线回收渠道回收废旧电子产品。然而, WEEE 处理企业却面临着一个难题——在线回收渠道在降低企业在回收过程中搜索成本的同时却不得不以高于传统回收渠道的回收价格来吸引消费者。为此, 在考虑产品随机需求条件下, 通过构建依赖于在线回收溢价与传统回收时间或等待成本的消费者回收渠道选择模型, 分析了 WEEE 处理企业在三种不同回收渠道模式下的最优决策、WEEE 回收量及企业利润问题。研究表明: 回收渠道策略依赖于在线回收渠道溢价水平、传统回收渠道等待或时间成本及产品市场需求。此外, 本文还给出了 WEEE 处理企业如何根据产品市场需求和在线回收渠道溢价水平的变化, 在现有的单一回收渠道基础上进一步构建自身的双回收渠道。

**关键字:** 随机需求; WEEE; 双回收渠道; 消费者行为

中图分类号: F274

文献标识码: A

文章编号:

## Dual-recycling channel management for WEEE with stochastic demand

LI Chunfa<sup>1</sup>, FENG Lipan<sup>1</sup>, WANG Xuehong<sup>2</sup>

(1. School of Management, Tianjin University of Technology, Tianjin, 300384, China; 2. Research Department, Shandong Yingcai University, Shandong, Jinan, 250104, China)

**Abstract:** More and more enterprises collecting e-wastes through the online recycling channel as the rapidly improving of the customer acceptance of the online recycling channel. And they are facing a problem, however, that they have to offer a higher price in the online recycling channel than the traditional recycling channel as well as reducing the searching cost by using the online recycling channel. Base on that, we incorporate a detailed consumer recycling channel choice model where the collection quantity faced in each channel relies on both the excessive price level in the online recycling channel and the waiting or timing cost in the traditional recycling channel with stochastic demand. Furthermore, three reverse channel models are addressed to derive the optimal decisions, collection quantities as well as the maximal profits. The result shows that the dual-recycling channel strategies that depends on the excessive price level, searching or timing cost, and the demand of the processed products. Moreover, we also depicted that when these enterprises should establish dual recycling channel if they are already have one of these recycling channel, with the change of the demand and excessive price level.

**Keywords:** stochastic demand; WEEE; dual-recycling channel; consumer behavior

### 1 引言

来自环境、法律、社会及经济等各方面因素, 使逆向物流或闭环供应链管理受到了学者们及业界实践者的广泛关注<sup>[1][2]</sup>。逆向物流是指从消费者手中回收废旧产品从而获得其残余价值, 包括废旧产品回收、再制造、维修及环保处理等一系列活动。为了能够有效地回收这些废旧产品, 企业往往需要投入大量的精力和资金, 如 ReCellular 公司为了保证回收量在回收商身上花费了大量的金钱与时间<sup>[3]</sup>。

随着物联网技术的快速发展, 越来越多的企业开始构建自己的在线回收渠道, 如四川长虹格润构建的在废旧电器电子产品 (WEEE) 线上线下回收渠道, 上海新金桥不仅拥有回收商的传统回收渠道, 同时还依赖于第三方网络回收商上海新锦华提供的在线回收渠道。此外, 北京华新绿源则依托网络回收平台“香

收稿日期:

基金项目: 天津市高等学校创新团队培养计划项目 (TD12-515); 天津市“五个一批”人才资助项目 (2013RC01)

作者简介: 李春发 (1968-), 男, 湖南郴州人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 系统优化与决策分析、供应链管理; 冯立攀 (1990-), 通讯作者, 男, 湖南郴州人, 研究方向: 系统优化与决策分析、供应链管理。

蕉皮”所提供的在线回收渠道进行 WEEE 回收。在线回收渠道的出现有效弥补了传统回收渠道受空间限制的不足,降低了回收方搜索成本的同时也减少了消费者的等待或时间成本,提高了 WEEE 的交易频率与机会<sup>[4]</sup>。因此,在产品需求不确定条件下,WEEE 处理企业如何设计有效的回收渠道策略,成为了逆向供应链管理中企业决策的一个重要问题。

为此,本文考虑了如下三种回收渠道模式:在随机需求条件下,WEEE 处理企业通过单一的传统回收渠道进行 WEEE 回收,或者单独通过自身在线回收渠道回收 WEEE,或者同时通过传统回收渠道及自身在线回收渠道进行 WEEE 回收。在构建消费者回收渠道选择模型的基础上,以博弈论为工具,探究产品需求随机变化下 WEEE 处理企业的最优回收渠道决策问题。

与本文相关的研究主要集中在逆向渠道选择及逆向供应链中企业定价决策。Savaskan 等<sup>[5]</sup>研究了制造商负责回收、零售商负责回收及第三方负责回收三种逆向渠道结构及定价决策,发现由零售商负责回收时制造商利润最大,Atasu 等<sup>[6]</sup>在文献[5]的基础上,进一步讨论回收成本结构对制造商逆向渠道选择的影响。Savaskan 和 Wassenhove<sup>[7]</sup>探究了闭环供应链中零售商之间存在竞争时,制造商的逆向渠道策略选择问题,结果表明当零售商间竞争程度较低时,委托零售商负责回收优于制造商自己负责回收,反之亦然。Chuang 等<sup>[8]</sup>以高科技产品为例,分析了制造商回收规模对其逆向渠道策略选择问题。上述研究为逆向物流及闭环供应链管理研究打下了扎实的基础,也为本文提供了帮助和借鉴。然而,以上研究均为传统回收模式下的单回收渠道策略选择问题,事实上,越来越多的企业开始通过两种或是多种回收渠道进行 WEEE 回收,如 Xerox 不仅委托其零售商进行废旧电子产品的回收,同时还通过自身回收系统回收废旧产品,而 ReCellular 公司同时通过其零售商及第三方逆向物流对其废旧电子产品进行回收<sup>[9]</sup>。

部分学者对上述双回收渠道情形进行了研究,如 Huang 等<sup>[10]</sup>研究闭环供应链中零售商及第三方通过负责废旧电子产品回收时制造商的逆向渠道设计及决策问题,发现当不同回收渠道间竞争程度在一定范围内时双回收渠道策略优于单回收渠道策略。Hong 等<sup>[9]</sup>分析了三种双回收渠道情形,即制造商与零售商同时负责回收、制造商与第三方同时负责回收以及零售商与第三方同时负责回收,得出由制造商与零售商构成的混合双回收渠道策略优于其它两种情形。Jena 等<sup>[11]</sup>研究由一个零售商与两个制造商构成的双闭环供应链中企业间的价格竞争与协调问题。此外,还有学者研究了政府补贴及干涉政策对双回收渠道逆向/闭环供应链的影响<sup>[12][13]</sup>。上述研究均是在假定双回收渠道存在为前提,讨论了制造商的逆向渠道策略决策问题,但研究范围局限于传统回收模式下的双回收渠道情形,这与物流网背景下的线上线下回收渠道模式有所不同,且尚未考虑到回收过程中消费者行为对废旧电子产品回收的影响。另外,以上研究假设处理商所面对的产品市场需求是确定的,且忽略 WEEE 回收过程影响消费者返还决策的非价格因素。

针对供应链中影响消费者决策的非价格性因素的研究目前主要集中在正向供应链或正向物流领域,如 Chen 等<sup>[14]</sup>以交货时间和产品可获得性分别表示在线渠道和零售渠道的服务水平,研究了服务水平对制造商营销策略的影响,许垒等<sup>[15]</sup>通过构建依赖于网络渠道风险和零售渠道搜索成本的消费者选择模型,分析了混合营销渠道结构对供应链效率的影响,并进一步分析了网络营销渠道引入对在位厂商及供应链效率的影响。Chiang 等<sup>[16]</sup>研究了网络渠道风险对制造商营销策略的影响,发现通过引入网络营销渠道可以实现制造商与零售商间的双赢,Xu 等<sup>[17]</sup>在文献[16]的基础上,进一步考虑网络营销渠道的交货时间因素,发现在同时考虑交货时间和网络渠道风险条件下,双营销渠道策略仍能实现供应链中制造商与零售商的双赢。Das 等<sup>[18]</sup>在研究企业促销努力对制造商闭环供应链设计策略的影响。实际上,在逆向物流中,企业也常常面临着一些非价格性因素的影响,如消费者回收意愿、回收品质量、产品返还时间及回收搜索成本等<sup>[2]</sup>。

基于此,本文在考虑到 WEEE 回收过程影响消费者返还决策的非价格因素——在线回收消费者溢价水平和传统回收等待或时间成本以及处理商面临随机需求条件下,并在此基础上构建了传统回收渠道、单在线回收渠道及双回收渠道三种情形,分析了产品需求变化及消费者溢价水平对处理商逆向渠道设计策略决策的影响。

## 2 模型描述

本文考虑由一回收商和处理商构成的两级逆向供应链，假设消费市场中消费者间存在异质性，不同消费者对单位 WEEE 的感知价值（即感知残值或回收意愿） $s$  存在差异，且服从 $[0, 1]$ 上的均匀分布。为计算方便，设市场上消费者潜在数量为 1，传统回收渠道上单位 WEEE 的回收价格为  $p_r$ ，由文献<sup>[19][20]</sup>则消费者通过传统回收渠道返还单位 WEEE 的效用函数为

$$U_r(p_r) = p_r - s - c_0$$

其中： $c_0$  表示消费者返还单位 WEEE 的等待成本或时间成本。

假设传统回收渠道的 WEEE 回收量为  $Q_r$ ，则传统回收渠道上 WEEE 回收量  $Q_r = \int_0^{p_r - c_0} ds = (p_r - c_0)$ 。

对于在线回收渠道模式，设在线回收渠道上单位 WEEE 的回收价格为  $p_d \geq p_r$ <sup>[4]</sup>，那么消费者通过在线回收渠道返还单位 WEEE 的效用函数为

$$U_d(p_d) = p_d - \phi s$$

其中： $\phi$  表示消费者对单位 WEEE 的溢价水平函数，满足  $\phi \geq 1$ 。

这是因为若  $\phi < 1$ ，因为  $p_d \geq p_r$ ，则  $U_d > U_r$  恒成立。此时，传统回收渠道的 WEEE 回收量为零，消费者将只选择在线回收渠道，由于本文研究的重点为双回收渠道结构，为了保证双回收渠道的正常运营，故消费者溢价水平函数必须满足  $\phi \geq 1$ 。

同理，设在线回收渠道的 WEEE 回收量为  $Q_d$ ，在线回收渠道上 WEEE 回收量  $Q_d = \int_0^{p_d/\phi} ds = p_d/\phi$ 。

根据上述对消费者效用函数的分析可知：当  $p_r - c_0 > s$  且  $s > (p_d - p_r + c_0)(\phi - 1)^{-1}$  时，即  $(p_d - p_r + c_0)(\phi - 1)^{-1} < s < p_r - c_0$  时，有  $U_r > U_d$ ，此时所有消费者均选择传统回收渠道将 WEEE 返还给回收方；当  $p_d/\phi > s$  且  $s < (p_d - p_r + c_0)(\phi - 1)^{-1}$  时，也即  $s < \min\{(p_d - p_r + c_0)(\phi - 1)^{-1}, p_d/\phi\}$  时，有  $U_r < U_d$ ，此时所有消费者将选择在线回收渠道将 WEEE 返还给回收方；当  $s = (p_d - p_r + c_0)(\phi - 1)^{-1}$  时，消费者选择两个回收渠道返还 WEEE 的效用相同，即两回收渠道是无差异的；当  $s > \max\{p_r - c_0, p_d/\phi\}$  时，消费者将不会返还其拥有的 WEEE。

由此可得传统回收渠道与在线回收渠道的 WEEE 回收量  $Q_r$ 、 $Q_d$  分别满足

$$Q_r = [(p_r - c_0) - (p_d - p_r + c_0)(\phi - 1)^{-1}] \quad (1)$$

$$Q_d = [\min\{(p_d - p_r + c_0)(\phi - 1)^{-1}, p_d/\phi\}] \quad (2)$$

令  $s^{dr} = (p_d - p_r + c_0)(\phi - 1)^{-1}$ ， $s^r = p_r - c_0$  和  $s^d = p_d/\phi$ ，若  $s^r > s^d$ ，则  $s^r > s^d > s^{dr}$ ，故当感知价值  $s > s^r$  时，消费者将不会选择传统回收渠道和在线回收渠道中任意回收渠道，当感知价值  $s^r > s > s^{dr}$  时，消费者选择传统回收渠道将 WEEE 返还给回收方，当感知价值  $s^{dr} > s$  时，消费者选择在线回收渠道将 WEEE 返还给回收方；若  $s^d > s^r$ ，则  $s^{dr} > s^d > s^r$ ，当感知价值  $s > s^d$  时，两种回收渠道的 WEEE 回收量均为零，感知价值  $s^d > s$  时，消费者只选择在线回收渠道将 WEEE 返还给回收方。由此可得，三种回收渠道模式下各回收渠道的 WEEE 回收量分别为：

单传统回收渠道 (Case A):  $Q_r = \int_0^{p_r - c_0} ds = Q(p_r - c_0)$ ；单传统回收渠道 (Case B):  $Q_d = \int_0^{p_d/\phi} ds = p_d/\phi$ ；

双回收渠道 (Case C):

$$Q_r = \begin{cases} (p_r - c_0) - (p_d - p_r + c_0)(\phi - 1)^{-1}, & p_r - c_0 > p_d/\phi, \\ 0, & p_r - c_0 \leq p_d/\phi. \end{cases} \quad \text{和} \quad Q_d = \begin{cases} (p_d - p_r + c_0)(\phi - 1)^{-1}, & p_r - c_0 > p_d/\phi, \\ p_d/\phi, & p_r - c_0 \leq p_d/\phi. \end{cases}$$

假设处于逆向供应链末端的处理商将得到的 WEEE 进行检测、翻修、深加工及环保处理等工序后，所

得的翻修品、零部件和原材料将销往二手市场、制造商及原材料市场。不失一般性，假设处理后产品市场需求  $X$  为  $[0, +\infty)$  上的随机变量，其分布函数和密度函数分别为  $F(x)$  和  $f(x)$ ，传统回收渠道中单位 WEEE 的转移价格为  $p_t^A$ ，处理商回收处理单位 WEEE 的收益为  $w$ ，回收商回收单位 WEEE 的搜索成本为  $k$ ，未能利用的 WEEE，处理商可获得商品残值  $s$ ，不考虑产品缺货所带来的损失。另外，假设处理商始终处于 Stackelberg 博弈的主导地位，回收商为跟随者。

### 3 不同回收模式下决策分析

#### 3.1 单一传统回收渠道 (Case A)

在单传统回收渠道模式下，处理商只通过传统回收渠道进行 WEEE 回收。此时，逆向供应链不同主体间的决策顺序为：处理商首先决定单位 WEEE 的转移价格  $p_t^A$ ，然后回收商再决定单位 WEEE 的回收价格  $p_r^A$ 。其中，上表“ $A$ ”表示第一种情形，即单传统回收渠道情形。根据上述分析，可得该情形下处理商和回收商的期望利润  $\pi_p^A(p_t^A, X)$  和  $\pi_r^A(p_r^A)$  可分别表示为

$$E[\pi_p^A(p_t^A, X)] = wE[\min(X, Q_r^A)] + s[Q_r^A - X]^+ - p_t^A Q_r^A \quad (3)$$

$$\pi_r^A(p_r^A) = (p_t^A - p_r^A - k)Q_r^A \quad (4)$$

其中： $k$  表示传统回收渠道中单位 WEEE 的搜索成本。

由逆向求解法，在给定单位 WEEE 转移价格  $p_t^A$  的情况下，回收商确定单位 WEEE 回收价格  $p_r^A$ ，以最大化其利润。对此，可得如下定理 1。

**定理 1** 对于给定单位 WEEE 转移价格  $p_t^A$ ，回收商的最优回收价格  $p_r^{A*}$  和最大利润  $\pi_r^{A*}$  为

$$\begin{cases} p_r^{A*} = \frac{p_t^A + c_0 - k}{2} \\ \pi_r^{A*} = \frac{(p_t^A - c_0 - k)^2}{4} \end{cases} \quad (5)$$

证明：显然， $\pi_r^A(p_r^A)$  是关于  $p_r^A$  的凹函数，由一阶导条件可求得  $p_r^{A*} = \frac{p_t^A + c_0 - k}{2}$ ，将  $p_r^{A*}$  带入式 (4) 可知定理 1。

由定理 1 可知，处理商要使回收商以单位 WEEE 回收价格  $p_r^{A*}$  从消费者手中回购 WEEE，那么单位 WEEE 的转移价格  $p_t^A$  需满足  $p_t^A = 2p_r^{A*} - c_0$ 。进一步可求得单传统回收渠道模式下，处理商和回收商的最优决策，如定理 2 所示。

**定理 2** 在单传统回收渠道模式下，存在唯一的最优转移价格  $p_t^{A*}$  和最优回收价格  $p_r^{A*}$ ，使处理商和回收商的利润均达到最大化，且最优决策  $\{p_t^{A*}, p_r^{A*}\}$  由下式唯一决定。

$$\begin{cases} p_t^{A*} = 2p_r^{A*} - c_0 + k \\ (w + c_0 + k) - (w - s)F\left(\frac{p_t^{A*} - c_0 - k}{2}\right) = 2p_r^{A*} \end{cases} \quad (6)$$

证明：对式 (3) 关于  $p_t^A$  求一阶和二阶偏导数，可得

$$\frac{\partial \pi_p^A(p_t^A, X)}{\partial p_t^A} = \frac{(w-s)}{2} [1 - F\left(\frac{p_t^A - c_0 - k}{2}\right)] - \frac{2p_t^A - c_0 - k - s}{2} \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 \pi_p^A(p_t^A, X)}{\partial (p_t^A)^2} = -\frac{(w-s)}{4} f\left(\frac{p_t^A - c_0 - k}{2}\right) - 1 < 0 \quad (8)$$

因此， $\pi_p^A(p_t^A, X)$  是关于转移价格  $p_t^A$  的凹函数，令其一阶导数等于零，则有

$$(w + c_0 + k) - (w - s)F\left(\frac{p_i^{A*} - c_0 - k}{2}\right) = 2p_i^{A*} \quad (9)$$

又因为式 (8) 的左边是关于  $p_i^A$  单调减函数，而右边是关于  $p_i^A$  的严格单调增函数。因此，存在唯一的最优解  $p_i^{A*}$  使式 (8) 成立，从而易得定理 2。

**推论 1** 转移价格  $p_i^{A*}$  是关于  $(c_0 + k)$  的严格单调增函数，回收价格  $p_r^{A*}$  关于  $(c_0 + k)$  单调增加。

**证明：**由定理 2 知，单传统回收渠道模式下处理商最优转移价格  $p_i^{A*}$  满足

$$(w + c_0 + k) - (w - s)F\left(\frac{p_i^{A*} - c_0 - k}{2}\right) = 2p_i^{A*}$$

对上式两边关于  $(c_0 + k)$  求导，可得  $\frac{\partial p_i^{A*}}{\partial (c_0 + k)} = [2 + (w - s)f\left(\frac{p_i^{A*} - c_0 - k}{2}\right)][4 + (w - s)f\left(\frac{p_i^{A*} - c_0 - k}{2}\right)]^{-1} > 0$ ，

进一步可得， $\frac{\partial p_r^{A*}}{\partial (c_0 + k)} = [3 + (w - s)f\left(\frac{p_i^{A*} - c_0 - k}{2}\right)][4 + (w - s)f\left(\frac{p_i^{A*} - c_0 - k}{2}\right)]^{-1} > 0$ ，从而可得推理 1。

由推论 1 可知，在单传统回收渠道策略下，随着边际成本  $(c_0 + k)$  增加时，回收价格及转移价格也随着增加，且回收价格的增加量大于转移价格的增加量。推理 1 进一步表明：在单传统回收渠道策略下，消费者的等待或时间成本及回收商的搜索成本将由回收商与处理商共同承担。

### 3.2 单一在线回收渠道 (Case B)

当处理商只通过在线回收渠道回收 WEEE 时，则逆向供应链中只有处理商一个成员，此时，处理商只需要决策在线回收渠道上单位 WEEE 的回收价格  $p_d^{B*}$ ，以使其期望利润最大化。由前面的分析可得，单在线回收渠道模式下处理商的期望利润  $\pi_p^B(p_d^B, X)$  可表示为

$$E[\pi_p^B(p_d^B, X)] = wE[\min(X, Q_d^B)] + s[Q_d^B - X]^+ - p_d^B Q_d^B \quad (10)$$

对此，可得下面定理 3。

**定理 3** 在单在线回收渠道模式下，处理商的最优决策  $p_d^{B*}$  由式 (11) 唯一确定。

$$w - (w - s)F\left(\frac{p_d^{B*}}{\phi}\right) = 2p_d^{B*} \quad (11)$$

**证明：**对式 (10) 化简整理可得

$$\pi_p^B(p_d^B) = (w - s)\left[\frac{p_d^B}{\phi} - \int_0^{\frac{p_d^B}{\phi}} F(x)dx\right] - (p_d^B - s)\frac{p_d^B}{\phi} \quad (12)$$

对式 (12) 关于  $p_d^B$  求一阶和二阶导数可得

$$\frac{\partial \pi_p^B(p_d^B)}{\partial p_d^B} = \frac{w - s}{\phi} \left[1 - F\left(\frac{p_d^B}{\phi}\right)\right] - \frac{2p_d^B - s}{\phi} \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 \pi_p^B(p_d^B)}{\partial (p_d^B)^2} = -\frac{w - s}{\phi^2} f\left(\frac{p_d^B}{\phi}\right) - \frac{2}{\phi} < 0 \quad (14)$$

易知，式 (11) 是关于  $p_d^B$  的凹函数，故式 (11) 存在最优解。令式 (13) 等于零，化简可得式 (11)。类似于定理 2，可知存在唯一最优解  $p_d^{B*}$  使式 (11) 成立。

**推论 2** 在单在线回收渠道模式下，最优回收价格  $p_d^{B*}$  是关于溢价函数  $\phi$  的严格单调增函数。

**证明：**对式 (11) 两边关于  $\phi$  求导，得  $\frac{\partial p_d^{B*}}{\partial \phi} = \frac{(w - s)p_d^{B*}}{\phi^2} f\left(\frac{p_d^{B*}}{\phi}\right) \left[2 + \frac{(w - s)}{\phi} f\left(\frac{p_d^{B*}}{\phi}\right)\right]^{-1} > 0$ ，故推理 2 成立。

推论 2 表明：在单在线回收渠道模式下，随着消费者溢价水平的上升，处理商对单位 WEEE 所支付的价格也上升，反之，当消费者溢价水平下降时，单位 WEEE 的回收价格将下降。这也表明当消费者对通过在线回收渠道返还单位 WEEE 的溢价较高时，处理商回收单位 WEEE 需要以更高的回收价格。

### 3.3 双回收渠道 (Case C)

当处理商通过传统回收渠道和在线回收渠道同时进行 WEEE 回收时, 消费者根据不同回收渠道返还单位 WEEE 所得到的效用大小来决定回收渠道。此时, Stackelberg 博弈的决策顺序为: 处理商首先确定传统回收渠道转移价格  $p_t^{C*}$  和在线回收渠道回收价格  $p_d^C$ , 回收商根据处理商的决策确定传统回收渠道单位 WEEE 的回收价格  $p_r^{C*}$ 。由逆向求解法可确定双方的最优决策。

根据双回收渠道下各回收渠道的回收量, 则回收商的利润可表示为

$$\begin{aligned} \pi_r^C(p_r^C) &= (p_t^C - p_r^C - k)[(p_r^C - c_0) - \frac{p_d^C - p_r^C + c_0}{\phi - 1}] \\ \text{s.t. } p_r^C - c_0 &> p_d^C / \phi \end{aligned} \quad (15)$$

显然,  $\pi_r^C(p_r^C)$  是关于  $p_r^C$  的凹函数, 由式 (15) 的一阶条件, 可得回收商的最优决策  $p_r^{C*} = [\phi(p_t^C + c_0 - k) + p_d^C](2\phi)^{-1}$ 。

此外, 在双回收渠道模式下, 处理商的期望利润  $\pi_p^C(p_d^C, p_t^C, X)$  可表示为

$$\begin{aligned} \pi_p^C(p_d^C, p_t^C, X) &= wE[\min(X, Q_r^C + Q_d^C)] + s[Q_r^C + Q_d^C - X]^+ - p_t^C Q_r^C - p_d^C Q_d^C \\ \text{s.t. } p_r^C - c_0 &> p_d^C / \phi \end{aligned} \quad (16)$$

由此, 可得定理 4。

**定理 4** 在双回收渠道模式下, 在线回收渠道的最优回收价格  $p_d^{C*}$  和传统回收渠道的最优转移价格  $p_t^{C*}$  由式 (17) 和 (18) 唯一确定。

$$2p_t^{C*} = 2p_d^{C*} + (c_0 + k) \quad (17)$$

$$w - (w - s)F\left(\frac{\phi(p_d^{C*} - c_0 - k) + 2p_d^{C*}}{4\phi}\right) = 2p_d^{C*} \quad (18)$$

**证明:** 将  $p_r^{C*}$  代入式 (16), 则可转化为如下最优化问题

$$\begin{aligned} \max_{(p_d^C, p_t^C)} \pi_p^C(p_d^C, p_t^C, X) &= (w - s)[(Q_r^C + Q_d^C) - \int_0^{Q_r^C + Q_d^C} F(x)dx] - p_t^C Q_r^C - p_d^C Q_d^C + s(Q_r^C + Q_d^C) \\ \text{s.t. } \frac{\phi(p_t^C + c_0 - k) + p_d^C}{2\phi} - c_0 &> \frac{p_d^C}{\phi} \end{aligned} \quad (19)$$

对式 (19) 运用 K-T 条件, 可得

$$\begin{aligned} \frac{(w-s)}{2} [1 - F(\frac{\phi(p_t^C - c_0 - k) + p_d^C}{2\phi})] - \frac{\phi(p_t^C - c_0 - k) + p_d^C}{2\phi} - \frac{p_t^C - s}{2} + \frac{(3\phi - 1)p_d^C - \phi(2p_t^C - c_0 - k)}{2\phi(\phi - 1)} &= -\frac{\lambda}{2} \\ \frac{w-s}{2\phi} [1 - F(\frac{\phi(p_t^C - c_0 - k) + p_d^C}{2\phi})] - \frac{p_t^C - s}{2\phi} + \frac{(2\phi - 1)p_t^C}{2\phi(\phi - 1)} - \frac{2(2\phi - 1)p_d^C - \phi(p_t^C - c_0 - k)}{2\phi(\phi - 1)} &= \frac{\lambda}{2\phi} \\ \lambda [\frac{\phi(p_t^C - c_0 - k) - p_d^C}{2\phi}] &= 0 \\ \lambda &\geq 0 \end{aligned}$$

根据 K-T 条件可知, 当  $\lambda \neq 0$  时, 则  $\phi(p_t^C - c_0 - k) - p_d^C = 0$ , 此时, 传统回收渠道的 WEEE 回收量为零, 即为单在线回收渠道模式; 当  $\lambda = 0$  时, 则有

$$\begin{aligned} (w-s)[1 - F(\frac{\phi(p_t^{C*} - c_0 - k) + p_d^{C*}}{2\phi})] &= (p_t^{C*} - s) + \frac{\phi(p_t^{C*} - c_0 - k) + p_t^{C*} - 2p_d^{C*}}{(\phi - 1)} \\ (w-s)[1 - F(\frac{\phi(p_t^{C*} - c_0 - k) + p_d^{C*}}{2\phi})] &= (p_t^{C*} - s) + \frac{2(2\phi - 1)p_d^{C*} - (3\phi - 1)p_t^{C*} + \phi(c_0 + k)}{(\phi - 1)} \end{aligned}$$

化简整理可得式 (17) 和 (18), 从而易得定理 4 成立。由定理 4 可得以下推论 3。

**推论 3** 在双回收渠道模式下，在线回收渠道的最优回收价格  $p_d^{C^*}$  是关于  $(c_0 + k)$  的严格单调增函数，关于  $\phi$  的严格单调增函数。

**证明：**对式 (18) 两边关于  $(c_0 + k)$  求偏导，可得

$$\frac{\partial p_d^{C^*}}{\partial (c_0 + k)} = (w-s)f\left(\frac{\phi(p_d^{C^*} - c_0 - k) + 2p_d^{C^*}}{4\phi}\right)[8\phi + (w-s)(\phi+2)f\left(\frac{\phi(p_d^{C^*} - c_0 - k) + 2p_d^{C^*}}{4\phi}\right)]^{-1} > 0$$

从而可知，在线回收渠道最优回收价格  $p_d^{C^*}$  是关于  $(c_0 + k)$  的严格单调增函数。同理对式 (18) 两边关于  $\phi$  求偏导，可得

$$\frac{\partial p_d^{C^*}}{\partial \phi} = 2p_d^{C^*}(w-s)f\left(\frac{\phi(p_d^{C^*} - c_0 - k) + 2p_d^{C^*}}{4\phi}\right)[8\phi^2 + \phi(w-s)(\phi+2)f\left(\frac{\phi(p_d^{C^*} - c_0 - k) + 2p_d^{C^*}}{4\phi}\right)]^{-1} > 0$$

由此，可推出推论 2。

**推论 4** 在双回收渠道模式下，最优转移价格  $p_i^{C^*}$  是关于  $\phi$  的严格单调增函数，传统回收渠道  $p_r^{C^*}$  的最优回收价格是关于  $\phi$  的严格单调减函数。

**证明：**由式 (17) 可知， $\partial p_i^{C^*} / \partial \phi = \partial p_d^{C^*} / \partial \phi > 0$ ，故最优转移价格  $p_i^{C^*}$  是关于  $\phi$  的严格单调增函数。

由定理 4 亦可得，在双回收渠道模式下，传统回收渠道的最优回收价格与在线回收渠道的最优回收价格满足： $p_r^{C^*} = [\phi(p_d^{C^*} - c_0 - k) + 2p_d^{C^*}](4\phi)^{-1} + c_0$ ，两边关于  $\phi$  求偏导，则有

$$\frac{\partial p_r^{C^*}}{\partial \phi} = -4p_d^{C^*}[8\phi^2 + \phi(w-s)(\phi+2)f\left(\frac{\phi(p_d^{C^*} - c_0 - k) + 2p_d^{C^*}}{4\phi}\right)]^{-1} < 0$$

从而，可得传统回收渠道  $p_r^{C^*}$  的最优回收价格是关于  $\phi$  的严格单调减函数。

由推论 3 和 4 可知，在双回收渠道策略下，当边际成本  $(c_0 + k)$  上升时，在线回收渠道上单位 WEEE 回收价格增加；同时，当消费者溢价水平  $\phi$  增加，在线回收渠道上单位 WEEE 的回收价格及传统回收渠道的转移价格也增加，但传统回收渠道的回收价格却减少。虽然这与一般常识相违背，但却是正确的，这是因为当在线回收渠道的消费者溢价水平  $\phi$  的增加，使得即使处理商在提高在线回收渠道回收价格以及回收商降低传统回收渠道回收价格后，通过传统回收渠道返还单位 WEEE 的消费者效用大于在线回收渠道上的消费者效用。

#### 4 均衡结果分析

下面我们将首先分析上述三类回收渠道模式下处理商及回收商最优决策、WEEE 的总回收量及渠道利润之间的关系，并进一步分析处理商回收渠道策略选择。

##### 4.1 不同模式下的定价和回收量分析

**性质 1** 在单在线回收渠道和双回收渠道模式下，在线回收渠道的最优回收价格满足以下关系：

1) 当  $\phi > 2p_d^{C^*}(p_d^{C^*} - c_0 - k)^{-1}$  时，则  $p_d^{C^*} < p_d^{B^*}$ ；2) 当  $\phi = 2p_d^{C^*}(p_d^{C^*} - c_0 - k)^{-1}$  时，则  $p_d^{C^*} = p_d^{B^*}$ ；3) 当  $1 \leq \phi < 2p_d^{C^*}(p_d^{C^*} - c_0 - k)^{-1}$  时，则  $p_d^{C^*} > p_d^{B^*}$ 。

**证明：**令  $G_1(t) = w - (w-s)F\left(\frac{t}{\phi}\right) - 2t$ ， $G_2(t) = w - (w-s)F\left(\frac{\phi(t - c_0 - k) + 2t}{4\phi}\right) - 2t$ ，则  $p_d^{B^*}$  和  $p_d^{C^*}$  分别是  $G_1(t)$

和  $G_2(t)$  的零点。又因为  $F\left(\frac{\phi(t - c_0 - k) + 2t}{4\phi}\right)$  是关于  $t$  的增函数，因此，当  $\phi > \frac{2p_d^{C^*}}{p_d^{C^*} - c_0 - k}$  时，有

$$F\left(\frac{\phi(p_d^{C^*} - c_0 - k) + 2p_d^{C^*}}{4\phi}\right) > F\left(\frac{p_d^{C^*}}{\phi}\right)，那么 w - (w-s)F\left(\frac{\phi(p_d^{C^*} - c_0 - k) + 2p_d^{C^*}}{4\phi}\right) - 2p_d^{C^*} < w - (w-s)F\left(\frac{p_d^{C^*}}{\phi}\right) - 2p_d^{C^*}，$$

即  $G_1(p_d^{C^*}) > G_2(p_d^{C^*}) = 0$ ，又因为  $G_1(p_d^{B^*}) = w - (w-s)F\left(\frac{p_d^{B^*}}{\phi}\right) - 2p_d^{B^*} = 0$ ，则有  $G_1(p_d^{C^*}) > G_1(p_d^{B^*})$ 。显然， $G_1(t)$



是关于  $t$  的严格单调减函数，故  $p_d^{C^*} < p_d^{B^*}$ 。同理，可证结论 2) 和结论 3) 成立。

性质 1 表明当消费者溢价水平超过某阈值时，双回收渠道策略下在线回收渠道的单位 WEEE 回收价格低于单在线回收渠道策略下单位 WEEE 的回收价格；当消费者溢价水平低于该阈值时，双回收渠道策略下在线回收渠道的回收价格高于单在线回收渠道策略下的回收价格。这是因为在消费者溢价水平较高时，双回收渠道策略下处理商通过开辟在线回收渠道，从而促使回收商提高传统回收渠道的回收价格以满足市场需求，然而，在单在线回收渠道策略下，处理商回收单位 WEEE 需要支付更高的价格。相反，当消费者溢价水平较低时，通过在线回收渠道回收单位 WEEE 的成本较低，在双回收渠道策略下，处理商将不得不提高在线回收渠道价格来吸引更多的消费者选择在线回收渠道，以达到利润的最大化。

性质 2 在单传统回收渠道和双回收渠道模式下，传统回收渠道的最优转移价格满足  $p_i^{C^*} < p_i^{A^*}$ ，传统回收渠道的最优回收价格满足  $p_i^{A^*} < p_i^{C^*}$ 。

证明：由式 (17) (18) 可得  $p_i^{C^*}$  满足  $(w+c_0+k)-(w-s)F(\frac{2\phi(p_i^{C^*}-c_0-k)+(2p_i^{C^*}-c_0-k)}{4\phi})=2p_i^{C^*}$ ，令

$G(t)=(w+c_0+k)-(w-s)F(\frac{2\phi(t-c_0-k)+(2t-c_0-k)}{4\phi})-2t$ ， $\varphi(t)=(w+c_0+k)-(w-s)F(\frac{t-c_0-k}{2})-2t$ ，显然， $G(t)$ 、 $\varphi(t)$  均是关于  $t$  的单调递减函数，且  $p_i^{C^*}$ 、 $p_i^{A^*}$  分别是  $G(t)$ 、 $\varphi(t)$  的零点。又因为  $F(\frac{2\phi(t-c_0-k)+(2t-c_0-k)}{4\phi})$  是关于  $t$  的增函数，则  $F(\frac{2\phi(p_i^{C^*}-c_0-k)+(2p_i^{C^*}-c_0-k)}{4\phi}) > F(\frac{(p_i^{C^*}-c_0-k)}{2})$ ，那么  $G(p_i^{C^*}) < \varphi(p_i^{C^*})$ ，即  $\varphi(p_i^{C^*}) > \varphi(p_i^{A^*})$ ，从而得出  $p_i^{C^*} < p_i^{A^*}$ 。

进一步可知， $F(\frac{(p_i^{A^*}-c_0-k)}{2}) < F(\frac{2\phi(p_i^{C^*}-c_0-k)+(2p_i^{C^*}-c_0-k)}{4\phi})$ ，因为  $F(\frac{(p_i^{A^*}-c_0-k)}{2}) = \frac{(w+c_0+k)-2p_i^{A^*}}{(w-s)}$ ，

而  $F(\frac{2\phi(p_i^{C^*}-c_0-k)+(2p_i^{C^*}-c_0-k)}{4\phi}) = \frac{(w+c_0+k)-2p_i^{C^*}}{(w-s)}$ ，由  $p_i^{C^*} < p_i^{A^*}$  可得  $\frac{(w+c_0+k)-2p_i^{C^*}}{(w-s)} < \frac{(w+c_0+k)-2p_i^{A^*}}{(w-s)}$ ，

故有  $\frac{(p_i^{A^*}-c_0-k)}{2} < \frac{2\phi(p_i^{C^*}-c_0-k)+(2p_i^{C^*}-c_0-k)}{4\phi}$ ，从而易知  $p_i^{A^*} < p_i^{C^*}$ 。

性质 2 表明在处理商拥有单传统回收渠道情形下，增加在线回收渠道可以促使回收商提高传统回收渠道的单位 WEEE 的回收价格同时降低转移价格。这是因为在线回收渠道的增加将导致不同回收渠道间的价格竞争，从而促使回收商提高传统回收渠道上单位 WEEE 的回收价格。此外，性质 2 也表明通过双回收渠道策略，处理商可以降低回收商在传统回收渠道上的讨价能力，减少对回收商的依赖程度。

性质 3 在单传统回收渠道、单在线回收渠道及双回收渠道模式下，逆向供应链中 WEEE 的总回收量满足以下关系：

1)  $Q_r^{A^*} < Q_r^{C^*}$ ；2) 当  $\phi \geq \max\left\{\frac{2p_d^{C^*}}{p_d^{C^*}-c_0-k}, \frac{4p_d^{B^*}-2p_d^{C^*}}{2p_d^{C^*}-c_0-k}\right\}$  或  $\frac{2p_d^{C^*}}{p_d^{C^*}-c_0-k} \geq \phi \geq \max\left\{\frac{4p_d^{B^*}-2p_d^{C^*}}{2p_d^{C^*}-c_0-k}, 1\right\}$  时，

$Q_r^{B^*} \leq Q_r^{C^*}$ ；3) 当  $\max\left\{\frac{2p_d^{C^*}}{p_d^{C^*}-c_0-k}, \frac{4p_d^{B^*}-2p_d^{C^*}}{2p_d^{C^*}-c_0-k}\right\} > \phi > \frac{2p_d^{C^*}}{p_d^{C^*}-c_0-k}$  或  $\max\left\{\frac{4p_d^{B^*}-2p_d^{C^*}}{2p_d^{C^*}-c_0-k}, 1\right\} > \phi \geq 1$  时， $Q_r^{B^*} > Q_r^{C^*}$ 。

证明：由  $p_i^{A^*} < p_i^{C^*}$  易知  $Q_r^{A^*} < Q_r^{C^*}$ 。由前面分析可知， $Q_r^{C^*} = \frac{\phi(p_d^{C^*}-c_0-k)-2p_d^{C^*}}{4\phi} + \frac{p_d^{C^*}}{\phi}$  和  $Q_r^{B^*} = \frac{p_d^{C^*}}{\phi}$ ，则

$Q_r^{C^*} - Q_r^{B^*} = \frac{\phi(p_d^{C^*}-c_0-k)-2p_d^{C^*}}{4\phi}$ ，显然，当  $\phi \geq \frac{4p_d^{B^*}-2p_d^{C^*}}{2p_d^{C^*}-c_0-k}$  时，有  $Q_r^{C^*} \geq Q_r^{B^*}$ ，当  $\phi < \frac{4p_d^{B^*}-2p_d^{C^*}}{2p_d^{C^*}-c_0-k}$  时，有

$Q_r^{C^*} < Q_r^{B^*}$ 。结合性质 1，易得结论 2) 和 3) 成立。

性质 3 表明与单传统回收渠道策略相比，双回收渠道策略能有效提高 WEEE 的回收量。而单在线回收

渠道策略与双回收渠道策略下的 WEEE 回收量大小受消费者溢价水平的影响，当消费者溢价水平较高时，双回收渠道策略下 WEEE 回收量较高，反之，单在线回收渠道策略下的 WEEE 回收量较高。

#### 4.2 处理商回收渠道策略分析

本节内容将探讨回收处理后的电子产品市场需求及消费者对在线回收渠道的单位 WEEE 的溢价水平函数对处理商回收渠道策略的影响。设参数  $w=1.6$ ， $s=0.4$ ， $c_0=0.35$ ， $k=0.25$ ，处理后所得产品的市场需求  $X$  满足均匀分布  $U(0, \eta)$ 。根据溢价水平函数  $\phi$  与经处理后所得产品市场需求  $X$  之间的关系，可得处理商的最优回收渠道策略决策，如表 1 所示。

表 1 处理商的最优回收渠道策略

$\phi$ $\eta$	1.2	1.3	1.4	2.4	4	8	11.2	16	32	40	48	64	80	100
2	CB	CB	CB	CB	CC	CC	CC	CC	CC	CA	CA	CA	CA	CA
1.9	CB	CB	CB	CB	CC	CC	CC	CC	CC	CA	CA	CA	CA	CA
1.8	CB	CB	CB	CB	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CA	CA	CA	CA
1.7	CB	CB	CB	CB	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CA	CA	CA	CA
1.6	CB	CB	CB	CB	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CA	CA	CA	CA
1.5	CB	CB	CB	CB	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CA	CA	CA	CA
1.4	CB	CB	CB	CB	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CA	CA	CA	CA
1.3	CB	CB	CB	CB	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CA	CA	CA	CA
1.2	CB	CB	CB	CB	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CA	CA	CA
1.1	CB	CB	CB	CB	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CA	CA	CA
1	CB	CB	CB	CB	CB	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CA	CA	CA
0.9	CC	CB	CB	CB	CB	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CA	CA
0.8	CC	CB	CB	CB	CB	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CA	CA
0.7	CC	CB	CB	CB	CB	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CA
0.6	CC	CB	CB	CB	CB	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CA	CA
0.5	CC	CB	CB	CB	CB	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CA	CA	CA
0.4	CC	CC	CB	CB	CB	CC	CC	CC	CC	CA	CA	CA	CA	CA
0.3	CC	CC	CB	CB	CB	CC	CC	CC	CA	CA	CA	CA	CA	CA
0.2	CC	CC	CC	CB	CB	CB	CA	CA	CA	CA	CA	CA	CA	CA
0.1	CC	CC	CC	CB	CB	CB	CB	CA	CA	CA	CA	CA	CA	CA

注：CA 表示单一传统回收渠道模式，CB 表示单一在线回收渠道模式，CC 表示双回收渠道模式。

从上述结果可得以下结论：

1) 当消费者对单位 WEEE 通过在线回收渠道返还给回收方（处理商）的溢价水平  $\phi$  的值足够小时，若经处理后的产品市场需求  $X$  的期望较小时，双回收渠道策略要优于单回收渠道策略（包括单传统、在线回收渠道策略），反之，若经处理后的产品市场需求  $X$  的期望较大时，则单在线回收渠道策略优于双回收渠道策略和单传统回收渠道策略。

2) 随着消费者溢价水平  $\phi$  的值的逐步增大，当  $\phi$  增加一定范围时，若经处理后的产品市场需求  $X$  的期望较小时，则处理商的最优策略是选择单在线回收渠道策略，相反，若产品市场需求  $X$  的期望较大时，此时，处理商的最优策略为双回收渠道策略。

3) 存在消费者溢价水平  $\phi$  的的一个区间，使得当产品需求  $X$  的期望及其波动均足够小时，单在线回收渠道策略优于单传统回收渠道策略和双回收渠道策略，当产品需求  $X$  的期望逐渐变大时，单传统回收渠道策略优于单在线回收渠道和双回收渠道策略，而当产品需求  $X$  的期望超过某临界值时，双回收渠道策略为处理商的最优策略。

4) 当消费者溢价水平  $\phi$  的值较大时, 处理商的最优决策为单传统回收渠道或者双回收渠道策略。具体表现为: 当产品需求  $X$  的期望较小时, 处理商应选择单传统回收渠道策略, 当产品需求  $X$  的期望较大时, 则处理商将选择双回收渠道策略。

5) 随着消费者溢价水平  $\phi$  的值继续增大, 即当消费者溢价水平  $\phi$  的值在一个较大值的邻域范围内时, 此时, 当产品需求  $X$  的期望较小或产品需求  $X$  的期望均较大时, 则单传统回收渠道策略优于双回收渠道策略, 否则, 单传统回收渠道策略劣于双回收渠道策略。

6) 当消费者溢价水平  $\phi$  的值足够大时, 此时, 单回收渠道策略为处理商的最优策略, 如图 6 所示。这是因为当消费者溢价水平很大时, 处理商通过在线回收渠道回收单位 WEEE 将不得不支付非常高的费用, 在此情形下, 开辟在线回收渠道将使处理商陷入“入不敷出”的状态。因此, 对于追求利润最大化的处理商而言, 其最优逆向渠道策略应为单传统回收渠道策略。

此外, 根据产品市场需求和消费者溢价水平的相对大小, 给出了处理商最优回收渠道策略结构, 如图 1 所示。

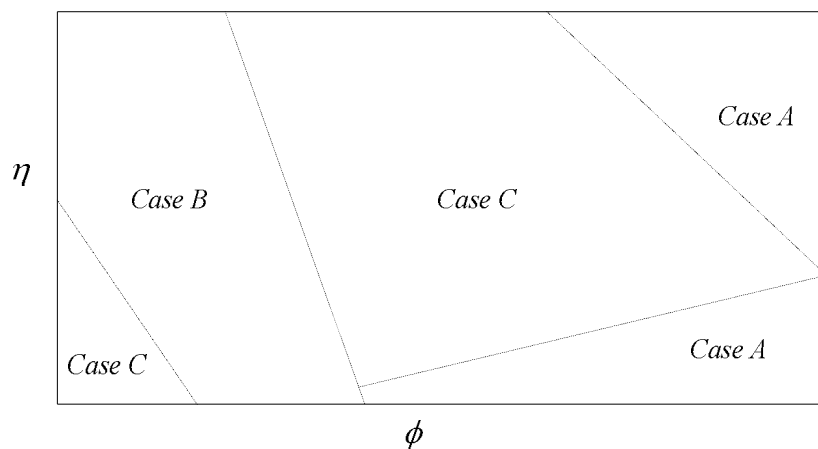


图 1 处理商最优回收渠道策略情景图

#### 4.3 决策影响分析

在前面分析的基础上, 我们将继续探讨在处理商因消费者溢价水平函数  $\phi$  及产品市场需求  $X$  变化而采取不同回收渠道策略下其最优决策的变化情况。对应上述所归纳总结的处理商六种回收渠道策略, 分别取消费者溢价水平函数  $\phi$  为 1.2、4、11.2、32、48、100。图 2-7 表示处理商在不同情形下在线回收渠道的单位 WEEE 的最优回收价格与产品市场需求  $X$  之间的关系。

在消费者溢价水平  $\phi$  的值足够小的情况下, 若产品市场需求  $X$  的期望较小时, 处理商通过设置一个较低的在线回收价格可以有效地促使回收商提高传统回收渠道的回收价格, 进而提高 WEEE 的回收量并增加自身的利润; 反之, 当产品市场需求  $X$  的期望较大时, 处理商将采取单在线回收渠道策略, 并通过设置一个较高的在线回收价格来避免不同回收渠道间的激烈竞争以及由需求的不确定性所带来的风险。

随消费者溢价水平  $\phi$  的增加, 如  $\phi = 4$  时, 此时, 处理商根据对产品市场需求  $X$  的期望大小的情况确定其回收渠道策略为单在线回收渠道或双回收渠道策略。当产品市场需求  $X$  的期望较小时, 由于消费者溢价水平  $\phi$  增加, 通过在线回收渠道回收单位 WEEE 的价格上升, 若处理商开辟双回收渠道将加大不同回收渠道间的价格竞争, 导致单位 WEEE 回收成本的增加, 故选择单在线回收渠道为处理商的最优策略。相反, 当产品市场需求  $X$  的期望较大时, 若单独依赖在线回收渠道来满足市场需求则处理商需要进一步提高回收价格, 此时, 单在线回收渠道策略下的回收成本将高于双回收渠道策略下的回收成本, 因此, 在双回收渠道策略下, 处理商只需一个较低的在线回收渠道价格将能促使回收商以较高的回收价格通过传统回收渠道来增加 WEEE 的回收量以产品满足市场需求。

此外，当消费者溢价水平  $\phi$  足够大时，通过在线回收渠道回收单位 WEEE 的成本将急剧上升，并可能使处理商陷入“入不敷出”的困境，因此，舍弃在线回收渠道而选择单传统回收渠道将成为处理商的最优策略。如图 6-7 所示，随着消费者溢价水平  $\phi$  的快速增加，双回收渠道或在线回收渠道的适应范围越来越小，直到“消失”。

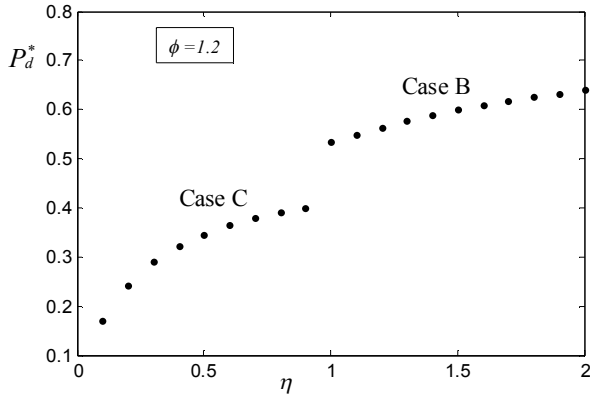


图 2 给定  $\phi = 1.2$ ，回收价格  $p_d^*$  与市场需求  $X$  之间的关系

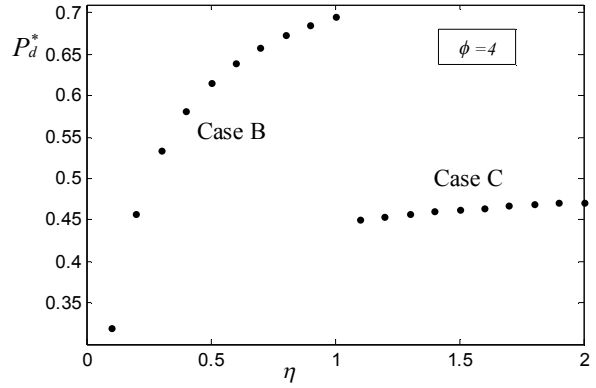


图 3 给定  $\phi = 4$ ，回收价格  $p_d^*$  与市场需求  $X$  之间的关系

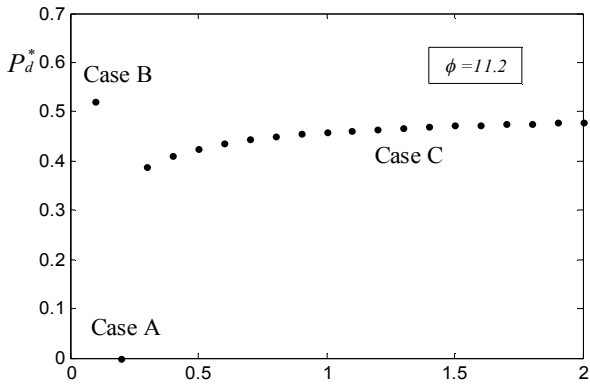


图 4 给定  $\phi = 11.2$ ，回收价格  $p_d^*$  与市场需求  $X$  之间的关系

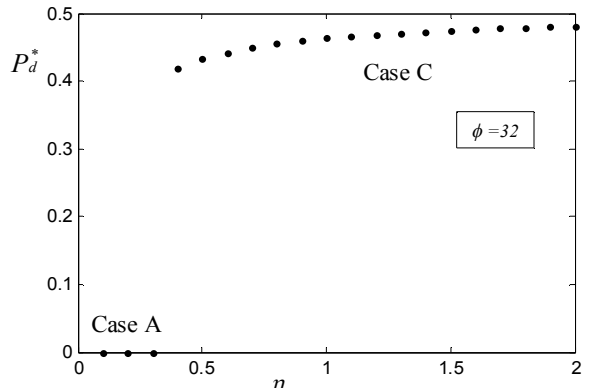


图 5 给定  $\phi = 32$ ，回收价格  $p_d^*$  与市场需求  $X$  之间的关系

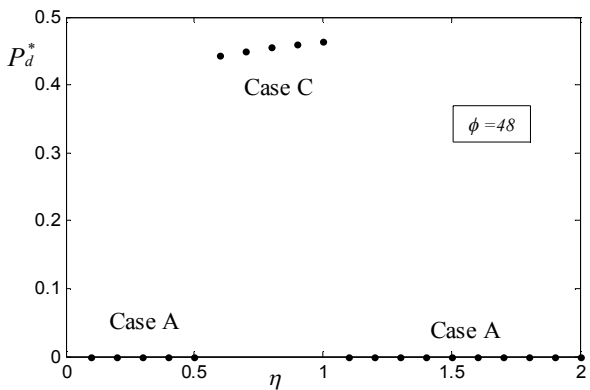


图 6 给定  $\phi = 48$ ，回收价格  $p_d^*$  与市场需求  $X$  之间的关系

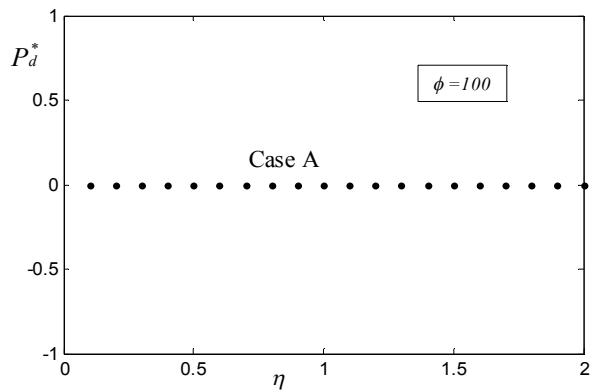


图 7 给定  $\phi = 100$ ，回收价格  $p_d^*$  与市场需求  $X$  之间的关系

与图 2-7 所对应，图 8-13 表示随着产品市场需求  $X$  的变化处理商在采取不同回收渠道策略时，其在传统回收渠道的最优转移价格决策。从图 8-13 可知，双回收渠道策略下单位 WEEE 的转移价格始终低于单传统回收渠道策略下单位 WEEE 的转移价格，这是因为在线回收渠道的开辟增加不同回收渠道间的竞争，从而削弱了回收商的市场势力及要价能力。然而，随着消费者溢价水平及产品市场需求的变化，双回收渠道策略在一定条件下仍然是处理商的最优策略选择。

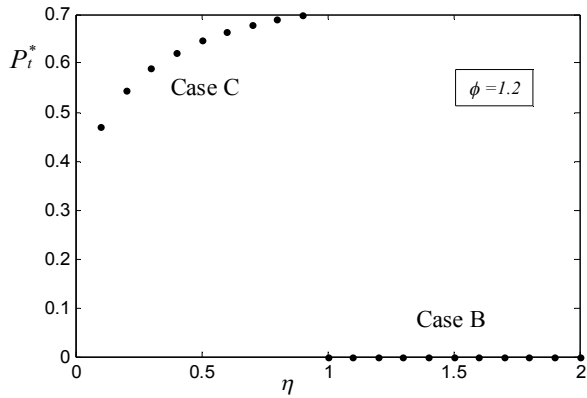


图 8 给定  $\phi = 1.2$ ，转移价格  $p_t^*$  与市场需求  $X$  之间的关系

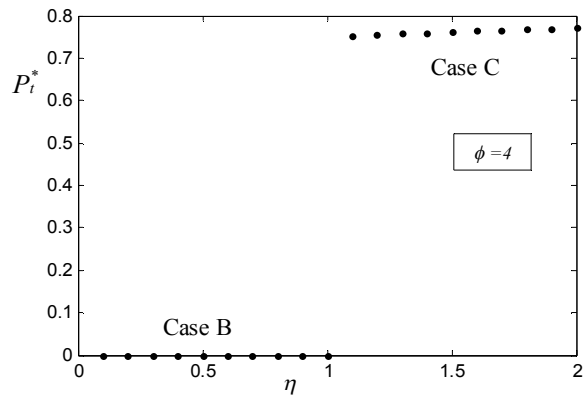


图 9 给定  $\phi = 4$ ，转移价格  $p_t^*$  与市场需求  $X$  之间的关系

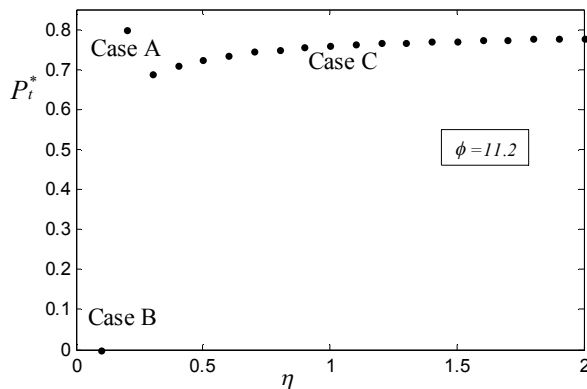


图 10 给定  $\phi = 11.2$ ，转移价格  $p_t^*$  与市场需求  $X$  之间的关系

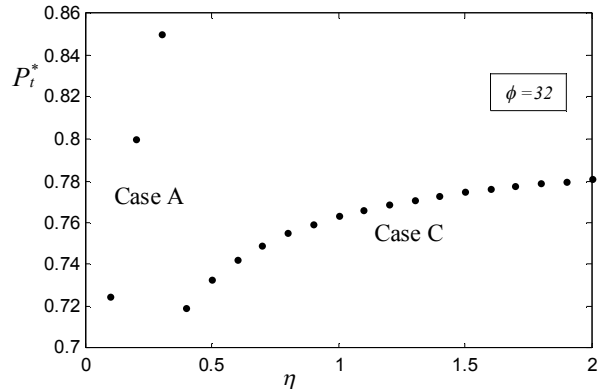


图 11 给定  $\phi = 32$ ，转移价格  $p_t^*$  与市场需求  $X$  之间的关系

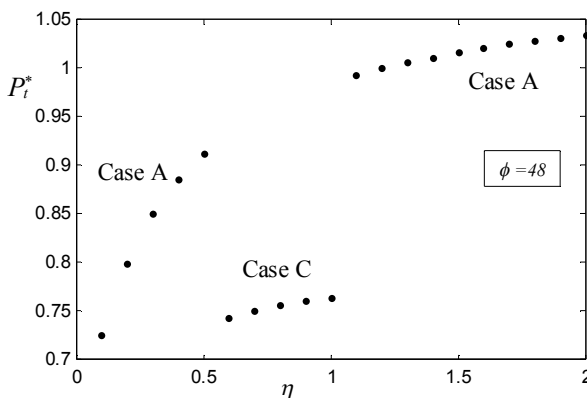


图 12 给定  $\phi = 48$ ，转移价格  $p_t^*$  与市场需求  $X$  之间的关系

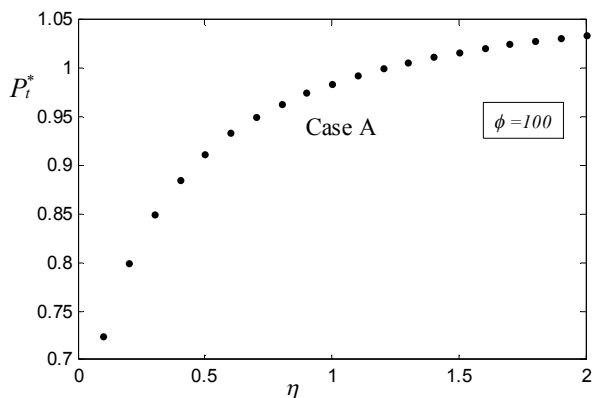


图 13 给定  $\phi = 100$ ，转移价格  $p_t^*$  与市场需求  $X$  之间的关系

## 5 结论

在消费者对在线回收渠道认可度的日益提高的背景下，尽管在线回收渠道比传统回收渠道更有优势更加明显，但 WEEE 处理企业需要面对的残酷现实是其不得不通过高回收价格来吸引消费者选择在线回收渠道<sup>[4][21]</sup>。然而，与在线回收渠道相比，传统回收渠道受空间及时空限制所引起的消费者的等待或时间成本以及回收商自身的搜索成本。通过构建消费者回收渠道选择模型，对随机需求条件下处理商和回收商回收定价决策进行了分析，并以具体算例进行了验证。在考虑在线回收渠道中消费者溢价水平、传统回收渠道消费者等待或时间成本及最终产品需求随机变化条件下，通过构建了消费者回收渠道选择模型得到了处理商和回收商的最优定价决策。分析结果表明双回收渠道结构有助于处理商获取竞争优势。

1) 根据消费者溢价水平及等待意愿或时间敏感性，处理商可对消费者实施价格歧视。处理商可通过在线回收渠道从消费者溢价水平低或时间敏感性高的消费者手中回收 WEEE，并同传统回收渠道从消费者

溢价水平高或时间敏感性低的消费者手中回收 WEEE。

2) 通过双回收渠道策略与回收商共同分担因产品需求不确定所带来的风险平衡自身利润。在线回收渠道的增加能够促使回收商提高传统回收渠道单位 WEEE 回收价格, 增加 WEEE 回收量, 减少因回收量不足所产生的缺货损失, 且在线回收渠道能够减少单位 WEEE 的搜索成本, 提高单位 WEEE 的边际利润。

## 参考文献

- [1] Kannan G, Hamed S, Devika K. Reverse logistics and closed-loop supply chain: a comprehensive review to explore the future [J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.012>.
- [2] Guide, V D R, Wassenhove L N V. OR FORUM—The evolution of closed-loop supply chain research [J]. *Operations Research*, 2009, 57(1): 10-18.
- [3] Guide V D R, Wassenhove L N V. Managing product returns for remanufacturing [J]. *Production and Operations Management*, 2001, 10(2): 142-155.
- [4] 火养. 爱回收: 做好电子“垃圾”这盘生意[N]. *深圳青年·创业板*, 2012, (10): 8-9.  
Huo Yang. Aihuishou: Do a good job in e-wastes [N]. *Shenzhen Youth? Second board*, 2012, (10): 8-9. (in Chinese)
- [5] Savaskan R C. Closed-loop supply chain models with product remanufacturing [J]. *Management Science*, 2004, 50(2): 239-252.
- [6] Atasu A, Toktay L B, Wassenhove L N V. How collection cost structure drives a manufacturer's reverse channel choice[J]. *Production and Operations Management*, 2013, 22(5): 1089-1102.
- [7] Savaskan R C, Wassenhove L N V. Reverse channel design: the case of competing retailers [J]. *Management Science*, 2006, 52(1): 1-14.
- [8] Chuang C H, Wang C X, Zhao Y B. Closed-loop supply chain models for a high-tech product under alternative reverse channel and collections cost structures [J]. *International Journal of Production Economics*, 2014, 156: 108-123.
- [9] Hong X P, Wang Z J, Wang D Z, Zhang H G. Decision models of closed-loop supply chain with remanufacturing under hybrid dual-channel collection [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 68(5-8): 1851-1865.
- [10] Huang M, Song M, Lee, L H, Ching W H. Analysis for strategy of closed-loop supply chain with dual recycling channel[J]. *International Journal of Production Economics*, 2013, 144(2), 510-520.
- [11] Jena S K, Sarmah S P. Price competition and cooperation in a duopoly closed-loop supply chain [J]. *International Journal of Production Economics*, 2014, DOI: <http://dx.doi.org/10/1016/j.ijpe.2014.06.018>.
- [12] 刘慧慧, 黄涛, 雷明. 废旧电器电子产品双渠道回收模型及政府补贴作用研究[J]. *中国管理科学*, 2013, 21(2): 123-131.  
Liu Huihui, Huang Tao, Lei Ming. Dual-channel recycling model of waste electrical and electronic equipment and research on effects of government subsidy[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2013, 21(2): 123-131. (in Chinese)
- [13] 王玉燕. 政府干涉下双渠道回收的闭环供应链模型分析[J]. *运筹与管理*, 2012, 21(3): 250-256.  
Wang Yuyan. The closed-loop supply chain models analysis based on dual channel taking-back under government intervention[J]. *Operations research and Management Science*, 2012, 21(3): 250-256. (in Chinese)
- [14] Chen K Y, Kaya M, Özer Ö. Dual sales channel management with service competition [J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2008, 10(4): 654-675.
- [15] 许垒, 李勇建. 考虑消费者行为的供应链混合营销渠道结构研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33 (7): 1672-1681.  
Xu Lei, Li Yongjian. On supply chain mixed channel problem considering consumer behavior [J]. *Systems Engineering - Theory & Practice*, 2013, 33(7): 1672-1682.
- [16] Chiang W K, Chhajed D, Hess J D. Direct marketing, indirect profits: a strategic analysis of dual-channel supply chain design [J]. *Management Science*, 2003, 49(1): 1-20.
- [17] Xu H, Liu Z Z, Zhang S H. A strategic analysis of dual-channel supply chain design with price and delivery lead time considerations [J]. *International Journal of Production Economics*, 2012, 139(2): 654-663.
- [18] Das D, Dutta P. Design and analysis of a closed-loop supply chain in presence of promotional offer [J]. *International Journal of Production Research*, 2014, DOI: 10.1080/00207543.2014.942007.
- [19] Hammond D, Beullens P. Closed-loop supply chain network equilibrium under legislation [J]. *European Journal of Operation Research*, 2007, 183(2): 895-908.
- [20] Qiang Q, Ke K, Anderson T, Dong, J. The closed-loop supply chain network with competition, distribution channel investment, and uncertainties [J]. *Omega*, 2013, 41(2): 186-194.
- [21] 王阳. 挖掘废旧电子产品的“金矿” [N]. *新财富*, 2013, (10): 27-30.  
Wang Yang. Excavating the “gold” of waste electronic products[J]. *New Fortune*, 2013, (10): 27-30. (in Chinese)