

EPR 下 WEEE 双渠道回收的模糊定价策略

张 川, 杨淑敏, 梁衍鸣
(东北大学 工商管理学院, 辽宁 沈阳 110169)

摘 要: 针对 WEEE(废弃电器电子设备)处理企业自主回收同时委托回收商回收的双渠道回收逆向供应链系统,在分散决策和集中决策两种情形下,将回收价格视为三角模糊数,运用模糊理论和博弈论的方法研究了处理企业和回收商的模糊回收定价问题,给出了各自回收价格浮动的基准点及浮动范围,并求得了两种情形下模糊利润的期望值.研究表明:在双渠道回收模式下集中决策与分散决策相比,集中决策通过联合定价的方式能使系统的利润达到最大,从而有利于提高系统的整体效率.最后通过算例验证了结论.

关 键 词: 生产者责任延伸制(EPR);废弃电器电子设备(WEEE);双渠道回收;斯坦克尔伯格博弈;模糊定价

中图分类号: F 273; O 225 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2017)06-0886-06

Fuzzy Pricing Strategy for Dual Channel Recycling of WEEE Under EPR

ZHANG Chuan, YANG Shu-min, LIANG Yan-ming
(School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang 110169, China. Corresponding author: ZHANG Chuan, E-mail: czhang@mail.neu.edu.cn)

Abstract: For the reversed supply chain system of dual channel recycling whereby the WEEE (waste electrical and electronic equipment) processor recycles itself and simultaneously commits its recycling partners to recycle, the recycling price is viewed as a triangular fuzzy number, and the fuzzy theory and game theory are applied to study the fuzzy recycling pricing of processing enterprises and recycling businesses under the decentralized strategy and centralized strategy. The floating reference point and the floating ranges of their respective recycling prices under the two mentioned cases are given, and the expected fuzzy profits are derived as well. It is shown that the centralized strategy can maximize the systematic profits by setting prices together, compared with the decentralized strategy under the dual channel recycling mode; thus, the centralized strategy tends to improve the systematic efficiency. Finally, an example is given to verify the conclusions.

Key words: EPR (extended producer responsibility); WEEE (waste electrical and electronic equipment); dual channel recycling; Stackelberg game; fuzzy pricing

目前我国已经进入家用电器电子产品报废的高峰期,废弃电器电子设备(waste electrical and electronic equipment,简称WEEE)的处理问题受到广泛的关注.生产者责任延伸制^[1](extended producer responsibility,简称EPR)是1988年由瑞典经济学家Lindhquist在给瑞典环境署提交的一份报告中首次提出的,它通过使生产者对产品的整个生命周期,特别是对产品的回收、循环和最终处置负责来实现.近几年我国根据EPR的思想,颁布施行了《废弃电器电子产品回收处理管理条例》以及《废弃电器电子产品处理基金征收使用管理办法》等政策,在国家政策的激励下,我国WEEE回收产业已初具规模,针对WEEE回收的逆向供应链的研究具有重要的实际意义.

国内外许多学者从EPR制度的理论体系、废弃产品回收的实践以及逆向物流的组织形式等方

面进行了研究与探讨^[2-5],指出 EPR 制度对于促进废弃产品的回收具有积极的作用.除了 EPR 制度之外,许多学者对逆向供应链的回收定价策略进行了研究^[6-8].Teunter 等^[6]提出将回收的产品按照质量分成若干等级,并对每个等级的产品实行单一定价回收策略;Jayaraman^[7]提出应该对回收的产品按照其质量水平进行分级,建立反映回收价格和回收质量水平关系的数学模型;王喜刚^[8]基于社会福利最大化的视角,建立了斯坦克尔伯格博弈模型来确定逆向供应链分散管理中的回收价格和社会最优补贴费.此外,一些学者也在模糊环境下对逆向供应链的回收定价策略进行了相关研究.

从已有文献可以看出,关于逆向供应链回收问题的研究,多年来一直备受关注,特别是在理论方面取得了丰硕的研究成果.但针对双渠道回收模式下差别回收定价问题的研究成果还不多见.需要指出的是实际中 WEEE 的回收活动往往采取双渠道回收的模式以及差别定价的回收定价方式.本文针对现有研究的不足,鉴于模糊数能够在一定程度上保留主观判断造成的数据不确定性,可以在定价过程中尽可能多地保留信息,避免用期望值代替而导致的信息损失,从而提高定价的可靠性,将回收价格视为三角模糊数,结合我国施行的相关 EPR 政策,运用博弈论的方法,研究分散决策和集中决策下 WEEE 双渠道回收的逆向供应链系统的定价策略.

1 预备知识

由于本文将回收价格视为三角模糊数,所以对模糊相关理论进行简要的介绍.

假设 Θ 是一个非空集合, $P(\Theta)$ 为 Θ 的幂集,Pos 为可能性测度,则称 $(\Theta,P(\Theta),\text{Pos})$ 为可能性空间. $P(\Theta)$ 的元素称为事件,对于任意事件 A , $\text{Pos}(A)$ 表示事件 A 发生的可能性.

Liu^[9]给出了如下公理:

公理 1 $\text{Pos}(\Theta) = 1$;

公理 2 $\text{Pos}(\varnothing) = 0$, \varnothing 表示空集;

公理 3 对于任意 $A_i \subset P(\Theta)$ 有 $\text{Pos}(\bigcup_{i=1}^n A_i) = \sup_{1 \leq i \leq n} \text{Pos}(A_i)$;

公理 4 令 Θ 为非空集合, Pos_i 表示满足上述三个条件的可能性测度, $i = 1, 2, \cdots, n$,并且 $\Theta = \prod_{i=1}^n \Theta_i$,则对于任意 $A_i \subset P(\Theta)$,有 $\sup_{(\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_n) \in A} \text{Pos}_1(\theta_1) \wedge \text{Pos}_2(\theta_2) \wedge \cdots \wedge \text{Pos}_n(\theta_n)$.

利用可能性测度,定义集函数:

$$\text{Nec}(A) = 1 - \text{Pos}(A^c) \quad (1)$$

称为必要性测度^[10],其中 A^c 为集合 A 的补集.可能性测度 Pos 和必要性测度 Nec 为一对对偶的模糊测度.

为了定义一个自对偶的集函数,引入可信性测度 Cr.设 $(\Theta,P(\Theta),\text{Pos})$ 为一个可能性空间,Cr 是定义在 A 上的集函数,称它为一个可信性测度^[11].对于任意 $A \subset P(\Theta)$,有

$$\text{Cr}(A) = \frac{1}{2}(\text{Pos}(A) + \text{Nec}(A)). \quad (2)$$

容易证得 Cr 满足下列条件:

1) $\text{Cr}(\Theta) = 1, \text{Cr}(\varnothing) = 0$;

2) 如果 $A, B \subset P(\Theta)$,且 $A \subset B$,则 $\text{Cr}(A) \leq \text{Cr}(B)$;

3) 对于任意 $A \subset P(\Theta)$ 有 $\text{Cr}(A) + \text{Cr}(A^c) = 1$;

4) 对于任意 $A, B \subset P(\Theta)$ 有 $\text{Cr}(A \cup B) \leq \text{Cr}(A) + \text{Cr}(B)$.

定义 1^[11] 一个模糊变量是一个定义在可信性空间 $(\Theta,P(\Theta),\text{Cr})$ 上的实值函数.

定义 2^[11] 设 $\tilde{\xi}$ 为一个模糊变量,则函数 $\Theta: R \rightarrow [0, 1]$,

$$\Phi(x) = \text{Cr}\{\theta \in \Theta | \tilde{\xi} \leq x\} \quad (3)$$

称为 $\tilde{\xi}$ 的可信性分布.

定义 3^[11] 设 $\tilde{\xi}$ 为可信性空间 (Θ,P,Cr) 上的模糊变量,它的期望值为

$$E[\tilde{\xi}] = \int_0^{+\infty} \text{Cr}(\tilde{\xi} \geq r) dr - \int_0^{-\infty} \text{Cr}(\tilde{\xi} \leq r) dr. \quad (4)$$

这里要求上式等号右边的两个积分中至少有一个为有限的.

下面以三角模糊变量为例,求其期望值.设 $\tilde{\xi}$ 为定义在从 (Θ,P,Cr) 到 R 的一个三角模糊变量,其可能性分布为

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 - \frac{a-x}{L}, & a-L \leq x \leq a; \\ 1 - \frac{t-a}{R}, & a < x \leq a+R; \\ 0, & \text{其他}. \end{cases} \quad (5)$$

将 $\tilde{\xi}$ 记为 $\tilde{\xi} = (a-L, a, a+R)$,根据式(3)可得 $\tilde{\xi}$ 的可信度分布计算公式如下:

$$\Phi(x) = \text{Cr}\{\theta \in \Theta | \tilde{\xi} \leq x\} = \frac{\sup_{y \leq x} \mu(y) + 1 - \sup_{y > x} \mu(y)}{2}. \quad (6)$$

因此, $\tilde{\xi}$ 的可信度分布可以写成

$$\Phi(x) = \text{Cr}\{\theta \in \Theta | \tilde{\xi} \leq x\} = \frac{\sup_{y \leq x} \mu(y) + 1 - \sup_{y > x} \mu(y)}{2} = \begin{cases} \frac{x - a + L}{2L}, & a - L \leq x \leq a; \\ 1 + \frac{x - a - R}{2R}, & a < x \leq a + R; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (7)$$

因此, 可以得出模糊变量 $\tilde{\xi}$ 的期望值:

$$E[\tilde{\xi}] = \int_{-\infty}^{+\infty} x d\Phi(x) = \int_{a-L}^a x d \frac{x - a + L}{2L} + \int_a^{a+R} x d (1 + \frac{x - a - R}{2R}) = \frac{a^2 - (a - l)^2}{4L} + \frac{(a + R)^2 - a^2}{4R} =$$

$$a + \frac{R - L}{4}. \quad (8)$$

2 模型描述

2.1 问题说明与假设

WEEE 处理企业对废弃电器电子产品进行回收的渠道有两种: 直接回收渠道; 间接回收渠道. 企业将回收来的产品进行拆解, 提取出其中有用的资源物进行销售, 对不能再利用的物质进行处置, 特别是对于有毒有害的物质需要进行无害化处理. 并且, 按照我国《废弃电器电子产品回收处理管理条例》的规定, 符合国家相关处理标准的企业, 每处理一台产品都会获得国家“废弃电器电子产品处理基金”的定额补贴^[8]. 系统的运作模式如图 1 所示.

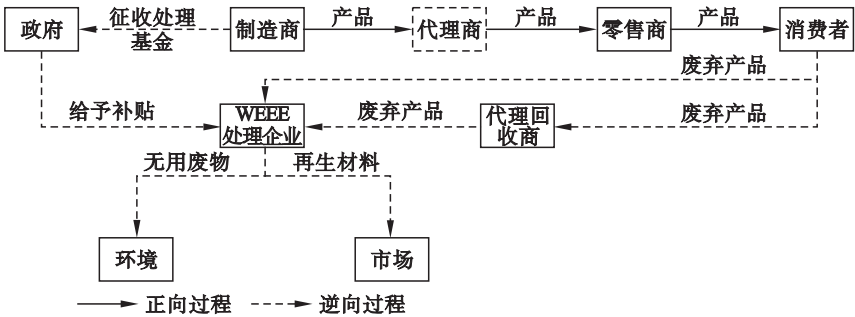


图 1 双渠道回收系统的运作模式
Fig. 1 Operation mode of the dual channel recycling system

模型假设如下:

- 1) 假设 WEEE 处理企业仅对回收来的废弃电器电子产品进行拆解, 并出售再生材料, 处理废物, 不考虑企业对废弃电器电子产品进行再制造以及翻新再销售的过程.
- 2) 政府征收的处理基金足以用来支付给 WEEE 处理企业的补贴.
- 3) WEEE 处理企业以及代理回收商作为独立的决策者, 其决策目标是模糊利润的期望值最大化.
- 4) WEEE 处理企业的处理能力无限, 可以对所有回收来的废弃电器电子产品进行拆解处理.
- 5) 在回收过程中回收价格不是一个确定的值, 回收价格根据回收产品的质量差异, 围绕一个基准点在一定范围内浮动.

2.2 模型符号说明

由于废旧产品的质量存在很大差异, 消费者往往希望回收商能够根据产品的品质给予相应的回收价格, 而不是所有该类型产品都按照同一价

格回收. 实际中, 产品的回收过程可以看作是一个贸易谈判过程, 在产品成交之前, 买方的出价与卖方的售价都可以看作论域 U 上的一个模糊集, 而商品的成交价格就是两个模糊集的交集. 因此, 本文将产品的成交价格即回收价格视为三角模糊数进行研究.

\bar{p}_o : 间接回收渠道下该类产品的回收价格转移, 其变动范围为 $(p_o - L_o, p_o, p_o + R_o)$;

\bar{p}_r : 间接回收渠道下该类产品的回收价格, 其变动范围为 $(p_r - L_r, p_r, p_r + R_r)$;

\bar{p}_m : 直接回收渠道下该类产品的回收价格, 其变动范围为 $(p_m - L_m, p_m, p_m + R_m)$;

c_r : 代理回收商和处理企业回收每件产品的平均成本;

c_m : 处理企业回收每件产品的平均成本;

c_o : 每件产品的平均拆解和处置成本;

w : 每件该类产品中的再生材料的平均价值;

g : 政府对处理企业处理每件该类型产品的补贴;

G_m :直接渠道中该类型废弃产品的回收量;
 G_r :间接渠道中该类型废弃产品的回收量;
 a_m :直接回收渠道的基础回收量;
 a_r :间接回收渠道的基础回收量;
 b_m :直接回收渠道的价格弹性系数;
 b_r :间接回收渠道的价格弹性系数;
 β :渠道价格冲突敏感系数^[6-7].

其中: p_o, p_r, p_m 分别是 $\tilde{p}_o, \tilde{p}_r, \tilde{p}_m$ 的基准点. 这里 L 和 R 的具体值可以通过专家估计来确定.

根据式(8),可知下列模糊变量的期望:

$$\begin{aligned}
 E[\tilde{p}_o] &= p_o + \frac{R_o - L_o}{4} = p_o + \Delta_o, \\
 E[\tilde{p}_r] &= p_r + \frac{R_r - L_r}{4} = p_r + \Delta_r, \\
 E[\tilde{p}_m] &= p_m + \frac{R_m - L_m}{4} = p_m + \Delta_m.
 \end{aligned}$$

另外,有 $E[\tilde{p}_o] > E[\tilde{p}_r] + c_r, E[\tilde{p}_o] + c_o < g + w, E[\tilde{p}_m] + c_m + c_o < g + w$ 以保证代理回收商和处理企业均有利可图.

这里 a, b, β 均为正数,且有 $\beta < \min(a, b)$,代表渠道内部的价格影响因素大于渠道外部的价格影响因素. 直接回收渠道和间接回收渠道下该产品的回收量与回收价格服从下述线性关系:

$$G_m = a_m + b_m \tilde{p}_m - \beta \tilde{p}_r, G_r = a_r + b_r \tilde{p}_r - \beta \tilde{p}_m.$$

因此,处理企业的利润可以表示为

$$\begin{aligned}
 \tilde{\Pi}_m &= (a_m + b_m \tilde{p}_m - \beta \tilde{p}_r) \times (g + w - c_m - c_o - \tilde{p}_m) + \\
 &\quad (a_r + b_r \tilde{p}_r - \beta \tilde{p}_m) \times (g + w - c_o - \tilde{p}_o).
 \end{aligned} \tag{9}$$

代理回收商的利润可以表示为

$$\tilde{\Pi}_r = (a_r + b_r \tilde{p}_r - \beta \tilde{p}_m) \times (\tilde{p}_o - \tilde{p}_r - c_r). \tag{10}$$

根据式(8)可得处理企业和代理回收商各自的模糊利润期望值为

$$\begin{aligned}
 E[\tilde{\Pi}_m] &= [a_m + b_m(p_m + \Delta_m) - \beta(p_r + \Delta_r)] \times \\
 &\quad [g + w - c_m - c_o - p_m - \Delta_m] + \\
 &\quad [a_r + b_r(p_r + \Delta_r) - \beta(p_m + \Delta_m)] \times \\
 &\quad [g + w - c_o - p_o - \Delta_o].
 \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
 E[\tilde{\Pi}_r] &= [a_r + b_r(p_r + \Delta_r) - \beta(p_m + \Delta_m)] \times \\
 &\quad [p_o + \Delta_o - p_r - \Delta_r - c_r].
 \end{aligned} \tag{12}$$

3 模型解析

3.1 分散决策模型

在分散决策中,假设处理企业和代理回收商的关系为处理企业为主导者,代理回收商为跟随

者的非合作博弈. 其决策顺序为:处理企业根据自身对回收市场的预测制定回收价格转移 \tilde{p}_o 以及回收价格 \tilde{p}_m ,之后代理回收商根据处理企业制定的 \tilde{p}_o 和 \tilde{p}_m 来确定自己的回收价格 \tilde{p}_r . 这种情况下应该用斯坦克尔伯格博弈模型进行研究.

模型求解过程如下:

首先,对回收商的利润函数求导,令 $\frac{dE[\tilde{\Pi}_r]}{dp_r} = 0$,求解得

$$p_r^* = \frac{1}{2}(p_o + \Delta_o - c_r - 2\Delta_r) - \frac{a_r - \beta(p_m + \Delta_m)}{2b_r}. \tag{13}$$

将 p_r^* 代入式(11)并分别对处理企业利润函数中的两个决策变量求导,令其导数为 0 得到处理企业最优回收价格转移和最优回收价格的基准点:

$$p_o^{**} = \frac{1}{2}(g + w - c_o - c_r - 2\Delta_o) - \frac{a_m\beta + b_m a_r}{2(b_m b_r - \beta^2)}, \tag{14}$$

$$p_m^{**} = \frac{1}{2}(g + w - c_o - c_m - 2\Delta_m) - \frac{a_m b_r + a_r \beta}{2(b_m b_r - \beta^2)}. \tag{15}$$

将 p_o^{**}, p_m^{**} 代入式(13)可得回收商的最优回收价格基准点:

$$\begin{aligned}
 p_r^{**} &= \frac{1}{4}(g + wz + 2\Delta_o - c_o - 3c_r - 6\Delta_r) + \\
 &\quad \frac{\beta(g + w - c_m - c_o) - a_r}{4b_r} - \frac{a_m\beta + b_m a_r}{2(b_m b_r - \beta^2)}.
 \end{aligned} \tag{16}$$

结论 1 斯坦克尔伯格博弈下价格基准点的均衡解为 $(p_r^{**}, p_o^{**}, p_m^{**})$.

结论 2 斯坦克尔伯格博弈下代理回收商与处理企业最优定价决策的浮动范围分别为

代理回收商的最优回收价格浮动范围:

$$\begin{aligned}
 &(\frac{1}{4}(g + w + 2\Delta_o - c_o - 3c_r) + \frac{\beta(g + w - c_m - c_o) - a_r}{4b_r} - \\
 &\quad \frac{a_m\beta + b_m a_r}{2(b_m b_r - \beta^2)} - \frac{5L_r + 3R_r}{8}, \\
 &\quad \frac{1}{4}(g + w + 2\Delta_o - c_o - 3c_r) + \frac{\beta(g + w - c_m - c_o) - a_r}{4b_r} - \\
 &\quad \frac{a_m\beta + b_m a_r}{2(b_m b_r - \beta^2)} + \frac{3L_r + 5R_r}{8}).
 \end{aligned}$$

处理企业的最优回收价格转移范围:

$$\begin{aligned}
 &(\frac{1}{2}(g + w - c_o - c_r) - \frac{a_m\beta + b_m a_r}{2(b_m b_r - \beta^2)} - \\
 &\quad \frac{R_o + 3L_o}{4}, \frac{1}{2}(g + w - c_o - c_r) - \frac{a_m\beta + b_m a_r}{2(b_m b_r - \beta^2)} +
 \end{aligned}$$

$$\frac{3R_o + L_o}{4}) .$$

处理企业的最优回收价格浮动范围:

$$\left(\frac{1}{2} (g + w - c_o - c_m) - \frac{a_m b_r + a_r \beta}{2(b_m b_r - \beta^2)} - \frac{R_m + 3L_m}{4}, \frac{1}{2} (g + w - c_o - c_m) - \frac{a_m b_r + a_r \beta}{2(b_m b_r - \beta^2)} + \frac{3R_m + L_m}{4} \right) .$$

将 $(p_r^{**}, p_o^{**}, p_m^{**})$ 代入式(11), (12), 得到处理企业和代理回收商及系统总的模糊利润的估计值.

$$E[\tilde{\Pi}_m]^* = [a_m + b_m(p_m^{**} + \Delta_m) - \beta(p_r^{**} + \Delta_r)] \times [g + w - c_m - c_o - p_m^{**} - \Delta_m] + [a_r + b_r(p_r^{**} + \Delta_r) - \beta(p_m^{**} + \Delta_m)] \times [g + w - c_o - p_o^{**} - \Delta_o] . \quad (17)$$

$$E[\tilde{\Pi}_r]^* = [a_r + b_r(p_r^{**} + \Delta_r) - \beta(p_m^{**} + \Delta_m)] \times [p_o^{**} + \Delta_o - p_r^{**} - \Delta_r - c_r] . \quad (18)$$

$$E[\tilde{\Pi}]^* = [a_m + b_m(p_m^{**} + \Delta_m) - \beta(p_r^{**} + \Delta_r)] \times [g + w - c_m - c_o - p_m^{**} - \Delta_m] . \quad (19)$$

3.2 集中决策模型

集中决策又称联合定价决策是将处理企业与代理回收商看作一个整体, 其决策目标是总体模糊利润期望值最大化. 这时, 产品的回收价格转移 \bar{p}_o 称为系统的内部变量, 可由处理企业与代理回收商通过商议来确定.

系统的总利润 $\tilde{\Pi} = \tilde{\Pi}_m + \tilde{\Pi}_r$.

因此系统总利润的估计值:

$$E[\tilde{\Pi}] = E[\tilde{\Pi}_m] + E[\tilde{\Pi}_r] = [a_m + b_m(p_m + \Delta_m) - \beta(p_r + \Delta_r)] \times [g + w - c_m - c_o - p_m - \Delta_m] + [a_r + b_r(p_r + \Delta_r) - \beta(p_m + \Delta_m)] \times [g + w - c_o - p_r - \Delta_r - c_r] . \quad (20)$$

对系统总利润函数中的两个决策变量求导, 令其导数为 0, 可求得系统最优的回收商回收价格基准点以及处理企业回收价格基准点:

$$\bar{p}_r^{**} = \frac{1}{2} (g + w - c_o - c_r - 2\Delta_o) - \frac{a_m \beta + b_m a_r}{2(b_m b_r - \beta^2)} . \quad (21)$$

$$\bar{p}_m^{**} = \frac{1}{2} (g + w - c_o - c_m - 2\Delta_m) - \frac{a_m b_r + a_r \beta}{2(b_m b_r - \beta^2)} . \quad (22)$$

结论 3 联合定价决策下代理回收商与处理企业的最优价格基准点为 $(\bar{p}_r^{**}, \bar{p}_m^{**})$.

结论 4 联合定价决策下代理回收商与处理企业的最优定价决策浮动范围分别为

代理回收商的最优回收价格浮动范围:

$$\left(\frac{1}{2} (g + w - c_o - c_r - \frac{L_o - R_o}{2}) - \frac{a_m \beta + b_m a_r}{2(b_m b_r - \beta^2)} - L_r, \frac{1}{2} (g + w - c_o - c_r - \frac{L_o - R_o}{2}) - \frac{a_m \beta + b_m a_r}{2(b_m b_r - \beta^2)} + R_r \right) .$$

处理企业的最优回收价格浮动范围:

$$\left(\frac{1}{2} (g + w - c_o - c_m) - \frac{a_m b_r + a_r \beta}{2(b_m b_r - \beta^2)} - \frac{R_m + 3L_m}{4}, \frac{1}{2} (g + w - c_o - c_m) - \frac{a_m b_r + a_r \beta}{2(b_m b_r - \beta^2)} + \frac{3R_m + L_m}{4} \right) .$$

此时系统的模糊利润估计值为

$$E[\tilde{\Pi}]^* = [a_m + b_m(\bar{p}_m + \Delta_m) - \beta(\bar{p}_r + \Delta_r)] \times [g + w - c_m - c_o - \bar{p}_m - \Delta_m] + [a_r + b_r(\bar{p}_r + \Delta_r) - \beta(\bar{p}_m + \Delta_m)] \times [g + w - c_o - \bar{p}_r - \Delta_r - c_r] . \quad (23)$$

根据式(15), (22)可知: $p_m^{**} = \bar{p}_m^{**}$.

结论 5 分散决策和集中决策情况下处理企业直接回收渠道的最优回收价格基准点相等.

用集中决策下系统的最大模糊利润期望值减去分散决策下系统的最大模糊利润期望值可以得到

$$E[\tilde{\Pi}]^* - E[\tilde{\Pi}]^* = \frac{[a_r + b_r(g + w + c_r + 2\Delta_r - c_o) - \beta(g + w - c_m - c_o)]^2}{16b_r} . \quad (24)$$

由于 $b_r > 0$, 由式(24)可知, 集中决策与分散决策下系统的最大模糊利润期望值之差为一个非负实数, 所以集中决策下系统的最大模糊利润期望值始终大于分散决策下系统的最大模糊利润期望值.

结论 6 分散决策时, 系统存在双边际效应, 系统的总体利润的期望值不能达到最大.

4 数值实验

为了更直观地对比两种模型的结果, 对模型进行数值分析. 取 $a_m = a_r = 100$; $b_m = b_r = 200$; $\beta = 50$; $L = 2, R = 6$ 即 $\Delta_o = \Delta_r = \Delta_m = 1$; $c_r = 2$; $c_m = 3$; $c_o = 5$; $g = 10$; $w = 15$; p_r, p_m, p_o 为决策变量.

将上述取值代入式(14) ~ (22), 求得结果见

表 1. 通过表 1 的数据可知,分散决策下回收价格基准点低于集中决策下的回收价格基准点. 分散决策下系统的总利润期望值小于集中决策下系统的总利润期望值. 基于数值分析结果可知,分散决策下系统的双重边际化效应使得分散决策不能使

系统的利润达到最大化,造成系统的利润损失. 因此,在现实中,处理企业与代理回收商应尽最大可能创造相互合作的机会,从而提升系统的利润,且进一步通过设置一个便于实际操作的协调机制,可实现处理企业与代理回收商的双赢.

表 1 决策变量取值
Table 1 Decision variable values

决策	p_r	\tilde{p}_r	p_m	\tilde{p}_m	p_o	\tilde{p}_o	$E[\hat{\Pi}_m]$	$E[\hat{\Pi}_r]$	$E[\hat{\Pi}]$
分散决策	3.1	(1.1,9.1)	7.2	(5.2,13.2)	7.7	(5.7,13.7)	19 307	1 313	20 620
集中决策	7.7	(5.7,13.7)	7.2	(5.2,13.2)	*	*	*	*	24 783

5 结 论

本文针对由一个 WEEE 处理企业和一个代理回收商组成的双渠道回收逆向供应链系统,考虑了回收产品质量不确定导致回收价格不确定的情形,将回收价格视为三角模糊数,在分散决策和集中决策两种情形下,运用博弈论的方法研究了 WEEE 处理企业和代理回收商应该如何制定各自回收价格浮动的基准点和浮动范围的问题,并得到了两种情形下 WEEE 处理企业和代理回收商的模糊期望利润值. 研究表明:在双渠道的回收模式下,分散决策下系统的双重边际化效应使得分散决策不能使系统的利润达到最大化,造成系统的利润损失,而集中决策通过联合定价的方式则能够使系统的利润达到最大. 此外,如何在回收价格不确定的情形下消除分散决策下系统的双重边际化效应并使逆向供应链达到协调是值得进一步研究的问题.

参考文献:

[1] Lindhquist T. Extended producer responsibility in cleaner production[D]. Lund:Lund University,2000.
[2] Lifset R, Lindhquist T. Trust, but verify [J]. *Journal of Industrial Ecology*,2001,5(2):9-11.
[3] Castell A, Clift R, Francae C. Extended producer responsibility policy in the European Union: a horse or a

camel[J]. *Journal of Industrial Ecology*,2004,8(12):4-7.
[4] Lindhqvist T, Lifset R. Can we take the concept of individual producer responsibility from theory to practice[J]. *Journal of Industrial Ecology*,2003,7(2):3-6.
[5] Spicer A J, Johnson M R. Third-party demanufacturing as a solution for extended producer responsibility[J]. *Journal of Cleaner Production*,2004,12(1):37-45.
[6] Teunter R, Guide D Jr, Van Wassenhove L. Matching supply and demand to maximize profits from remanufacturing[J]. *Operations Management*,2003,21(5):303-316.
[7] Jayaraman V. Production planning for closed-loop supply chains with product recovery and reuse: an analytical approach[J]. *International Journal of Production Research*,2006,44(5):981-998.
[8] 王喜刚. 逆向供应链中电子废弃产品回收定价和补贴策略研究[J]. *中国管理科学*,2016,24(8):107-115.
(Wang Xi-gang. The research on recycling product pricing and subsidy policy of e-waste in reverse supply chain[J]. *Chinese Journal of Management Science*,2016,24(8):107-115.)
[9] Liu B. Theory and practice of uncertain programming[M]. Heidelberg:Physica-Verlag,2002.
[10] 方述诚,汪定伟. 模糊数学与模糊优化[M]. 北京:科学出版社,1997.
(Fang Shu-cheng, Wang Ding-wei. Fuzzy mathematics and fuzzy optimization[M]. Beijing:Science Press,1997.)
[11] 刘彦奎,王曙明. 模糊随机优化理论[M]. 北京:中国农业大学出版社,2006.
(Liu Yan-kui, Wang Shu-ming. Fuzzy stochastic optimization theory[M]. Beijing:China Agricultural University Press,2006.)