

DOI: 10.3901/JME.2015.02.190

考虑碳排放的闭环供应链收益波动规律分析*

高举红 侯丽婷 王海燕 韩红帅

(天津大学管理与经济学部 天津 300072)

摘要: 在考虑碳排放因子和成本因子下, 构建由单一制造商、零售商和第三方物流服务商组成的闭环供应链系统, 按照回收质量等级和回收商回收处置能力提出三种回收处置情境, 即分别由零售商回收、制造商回收和第三方回收构建成的再制造闭环供应链模式。采用 Stackelberg 博弈论, 在分散决策下比较分析不同情境中排放因子对批发价格、零售价格、回收价格的影响, 进而研究碳排放对闭环供应链收益波动规律的影响。结果表明, 批发价格和零售价格不受回收价格影响, 而回收价格则与回收替代性、排放因子直接相关。通过数值仿真, 分析各种成本因子、碳排放因子及路径长度作用下不同回收模式的总利润和总碳排放波动规律, 从而为核心企业和政府采取积极的减排策略提供依据。

关键词: 分散决策; 回收模式; Stackelberg 博弈; 碳排放; 收益波动

中图分类号: F224; F272

Regularity Research on Revenue Fluctuation Analysis of Closed-loop Supply Chain Considered Carbon Emissions

GAO Juhong HOU Liting WANG Haiyan HAN Hongshuai

(School of Management and Economic, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract: A remanufacturing closed-loop supply chain system is composed by a manufacturer, a retailer and a third-party logistics service provider (3PL) under the consideration of carbon emission and cost. Three recovery scenarios, namely, retailer recovery, manufacturer recovery and 3PL recovery, which consider the recovery quality grades and recycler ability to deal with the disposal, are established. Based on Stackelberg game theory, three recovery modes under decentralized decision-making are compared, and the relationship between recovery modes and price decisions considered wholesale price, selling price and collection price is analyzed. The results show that the wholesale and selling price of remanufactured products is less related to recovery modes, while recycling price is directly related to the recovery quality, recovery path and carbon emissions of different recovery modes. Furthermore, enterprises will shift increased carbon emissions and operating costs to consumers. Finally, fluctuations of revenue and carbon emission are analyzed. The effects of carbon emission and cost factors in the recovery modes are analyzed through the numerical simulation. The recycling quality and recovery modes are related to the level of total profits and carbon emissions directly. It is benefit for the government and core enterprises to take appropriate measures for environmentally friendly models of recycling.

Key words: decentralized decision; recovery modes; Stackelberg game; carbon emissions; revenue fluctuation

0 前言

我国是世界上最大的家电生产和消费国之一。数据表明我国已进入家电报废的高峰期, 每年理论报废量超过 5 000 万台, 报废量年均增长 20%。废旧家电中含有大量可以回收再利用的金属和非金属, 不恰当的回收处理方式不仅会造成资源浪费, 还会增加碳排放。然而由于缺乏相应的回收处理机制, 家电回收一直是不少企业回避甚至忽视的产业。

2012 年商务部将旧家电回收纳入“十二五”规划, 对废弃电器电子产品回收经营活动实行备案制管理, 预示着企业必须寻求一种回收再制造效益高, 环境污染小的回收模式。考虑碳排放因素的闭环供应链^[1-2](Closed-loop supply chain, CLSC)正是在此背景下提出的。

目前, 在 CLSC 回收模式选择中, 相关文献一般将回收模式分为三种: 制造商回收模式、零售商回收模式和第三方回收模式。SAVASKAN 等^[3-5]认为零售商回收或第三方回收模式更为有效, 即更加有利于提高消费者效用和增加整个供应链利润。WEI 等^[6]运用模糊理论, 在市场需求、制造成本和回收成本模糊下, 分析了不同回收模式的期望收益。

* 教育部留学回国人员科研启动基金(580-413007-0301)和科技部科技人员服务企业计划(2009GJA10039)资助项目。20140315 收到初稿, 20140910 收到修改稿

LEE 等^[7]研究了考虑市场主导力量的回收优化决策模型, 识别了影响价格和需求变化的关键因子。上述文献分别从不同角度研究了回收模式选择和回收再制造利润问题, 针对回收努力程度、回收率、消费者环保偏好等问题展开分析, 然而均未考虑回收质量问题。

由于回收质量的不确定性导致可再利用零部件的不确定性, 而不同回收模式对不同质量的回收产品具有不同的适用范围和处置效率。孙浩等^[8-9]探讨了不同回收成本结构对系统决策以及回收渠道选择的影响, 指出再制造生产商应从产品生命周期角度制定回收决策, 避免产品进入衰退期增加处理成本。SAVASKAN^[10]研究了回收质量不确定下不同回收模式的适用条件, 分析了回收数量与批发价格和零售价格的关系。CHEN 等^[11-12]认为再造产品的收益受回收质量、回收数量以及再造产品市场需求的影响, 可以通过控制回收价格提高回收质量和回收数量。多数文献着重于分析回收产品的质量和数量不确定性, 考虑基于回收质量与回收率的回收处置决策问题, 少有文献考虑生产和运输过程的碳排放, 这种单纯以经济利益最大化为目标的回收再造过程可能会造成更大的环境污染。

CHAABANE 等^[13]采用生命周期评估法计算了各节点碳排放量, 指出有效的碳管理机制有助于企业实现可持续化目标。ABDALLAH 等^[14]证明运输过程中的碳排放成本是产品整个生命周期中碳排放成本的主要来源之一, 指出运输节点的分散程度和节点容量会影响到运输成本。PAKSOY 等^[15]探讨了需求、回收率、回收利润、运量、排放率等因素对供应链运作成本和环境成本的影响。KRIKKE 等^[16-17]认为 CLSC 的替代效应, 即通过回收资源对正向供应链生产资料的替代, 可以大大改善碳足迹, 指出较高的回收质量和再利用性可以获得较高的替代性。上述文献指出了回收再制造过程中的主要碳排放来源, 证明了回收质量高、替代性强的回收品可以有效增加企业利润的同时降低碳排放。从上述文献看出, CLSC 碳排放主要集中于生产、分销和回收运输过程, 而影响这三个环节碳排放的因素包括: 回收品对原材料的替代性、原材料成本、回收路径的优化程度、运输设备的排放情况等, 文献多从产品设计或网络设计的角度考虑 CLSC 的碳排放问题, 少有从回收商回收处置能力与回收质量之间的关系角度以及碳排放和企业运作成本对 CLSC 再制造利润影响的角度进行分析。

基于此, 本文构建三种回收情境, 即制造商回收(Model M), 零售商回收(Model R)和第三方回收(Model 3P)。在考虑供应链碳排放下, 提出将回收

产品按照回收质量进行分级, 并实施不同的再制造工艺流程; 通过数值试验分析生产和运输排放因子对供应链利润的影响。

1 模型描述与基本假设

1.1 问题描述

假设某家电行业的 CLSC 网络由制造商、零售商和第三方组成, 该行业已拥有完善的回收体系和再制造系统, 其产品多为模块化设计, 使用高度可回收再利用的原材料, 再制造流程主要包括三个环节, 即原材料加工环节, 零部件加工环节和最终产品处理环节。原材料加工环节实现将零部件进行完全拆解, 通过机械粉碎和分离技术回收碳氟化物、黑色金属、有色金属、塑料等原材料, 并进行提纯和加工; 零部件加工环节采用再制造技术, 如表明改性、表面处理、表面涂覆等表面工程技术实现零部件修复工作; 最终产品环节实现装配、喷漆、检验、包装等工序。

回收产品通过回收检测中心检测分类, 将回收产品按照质量特性分为三个层级并进行处置决策:

① 质量好(H), 即满足无功能、质量损坏的产品, 该部分产品主要是由消费者偏好变化退货或包装、外壳划损等因素造成, 因此仅需要由零售商负责回收, 直接进入再制造过程的最终产品生产阶段进行简单喷漆、再包装处理即可再出售; ② 质量中(M), 即满足部分功能损坏或质量损失, 且在寿命周期之内的回收产品, 该部分产品属于消费者正常进行产品淘汰, 然而其主要零部件功能未损坏且再制造价值高, 由制造商负责回收, 进入再制造过程的零部件或最终产品生产阶段; ③ 质量差(L), 即进入生命终期的产品, 该部分产品主要零部件已部分或完全损坏, 再制造成本较高, 由专业的第三方进行回收处理, 进入再制造过程的原材料或零部件生产阶段, 对可再造部分进行再制造, 对无再制造价值的部分进行原材料回收再利用。模型中成本包括产品运输成本、运输碳排放成本、再造生产成本以及再造碳排放成本。三种回收模式下的 CLSC 结构如图 1 所示。

1.2 基本假设

假设 1: 不同回收模式下的再造品在质量、功能、效用完全相同, 并且销售价格相同。

假设 2: 制造商为 Stackelberg 领导者, 零售商和第三方物流服务商为跟随者, 供应链各成员均按照自身利益最大化进行决策。

假设 3: 通过文献[13-17], 可以看出再制造过程的成本因素包含生产成本、管理成本和排放成本。

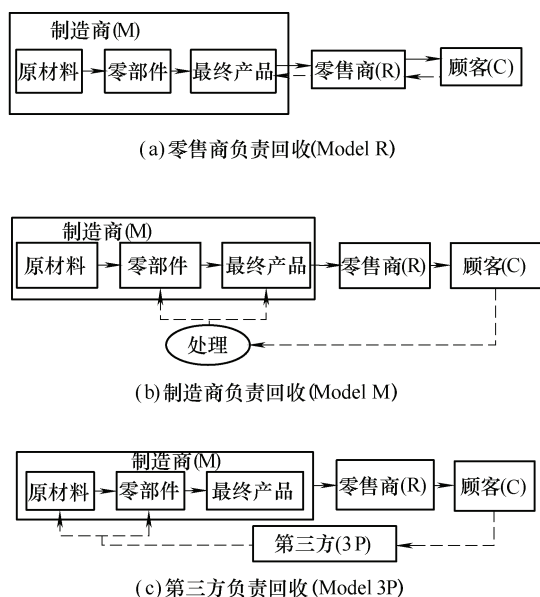


图1 三种回收模式下的CLSC结构简图

生产成本主要指原材料的购置和加工成本,为简化研究管理成本仅考虑运输过程的管理成本。碳排放成本包含生产排放成本和运输排放成本。生产排放成本与回收品可直接进入的再造环节相关(即回收品对再制造原材料的替代性越强,回收品可进入的再制造生产环节越接近成品加工环节),运输碳排放与回收路径长度、运输工具的排放和运力相关,不考虑不同回收模式运输工具的差异,即假设三个质量级别的产品单位运输碳排放成本相同。

假设4:按照回收主体的不同,我们将考虑三种回收模式下的利益均衡和收益波动规律问题,即零售商回收(Model R)、制造商回收(Model M)、第三方回收(Model 3P)。

假设5:假设再制造商首先以价格 ω 满足传统零售商的需求 D ($G \geq D$),当传统零售商需求饱和后,再制造商将剩余的产品($G - D$)以直销价格 p_z 出售到电子渠道,假设电子渠道为完全绿色的渠道,即不考虑电子渠道的运输碳排放。其中 $D = a - bp$,表示传统零售渠道对再造产品的需求, a 为市场潜在规模, b 为价格敏感因子, p 为再造产品零售价格; $G = h + kf$,表示回收数量, h 为消费者的环保行为,即消费者愿意无偿参与回收的回收量, k 为回收价格敏感因子, f 为回收价格。

引理:当形成稳定的再制造市场时,满足 $G \geq D$ 。

证明如下。

假设 $G < D$,则三种回收模式下回收商的利润如下。

零售商负责回收模式下,零售商的利润为

$$\text{s.t. } \max_{p,f} \pi_r = [p - \omega - (x_2 + x_4)(e + c) + A - f]D$$

制造商回收下,制造商利润为

$$\max_{\omega,f} \pi_m = [\omega - (x_1 + x_3)(e + c) - (c_2 + e_2)l_2^M - (c_3 + e_3) - f]D$$

第三方回收下,第三方利润为

$$\max_f \pi_{3p} = [A - f - x_5(e + c)]D$$

通过求解一阶导数可知 $\frac{d\pi_r}{df} = \frac{d\pi_m}{df} = \frac{d\pi_{3p}}{df} = -D$;

可知三种回收模式下,回收商利润均与回收价格负相关,回收商回收动力不足,此时很难形成稳定的再制造市场,因此本文仅研究 $G \geq D$ 的情况。

假设6:市场是完全开放的,CLSC各成员都是在信息对称的情况下做出的决策。

假设7:市场对产品的需求量相对稳定,各周期销售情况相类似,故本文只考虑单周期的情况。

2 分散决策模型

2.1 零售商负责回收

制造商制定批发价格 $M(\omega, A)$ 后,零售商决策销售价格和回收价格 $R(p, f / \omega, A)$ 。制造商的成本包含再造过程的生产和排放成本、从制造商到零售商的运输管理和排放成本;零售商成本包含回收过程的运输管理和排放成本、从零售商到消费者的运输管理和排放成本,则制造商和零售商的利润最大化模型分别如下

$$\begin{aligned} \max_{\omega,A} \pi_m &= \omega D + p_z(G - D) - x_1(e + c)D - (c_3 + e_3)G - AG \\ \text{s.t. } \max_{p,f} \pi_r &= [p - \omega - x_2(e + c)]D + [A - f - x_4(e + c)]G \end{aligned} \quad (1)$$

式中 ω ——批发成本;

A ——制造商向回收商提供的回收转移价格, $p > \omega > p_z > A > f > 0$;

e ——单位产品单位距离的运输碳排放成本;

c ——单位产品单位距离的运输管理成本;

x_1, x_2 ——再造品从制造商到零售商的运输距离和,零售商到顾客的运输距离;

x_4 ——Model R下从顾客到零售商再到制造商的总回收距离;

e_i ——再制造过程不同环节的单位碳排放成本, $i=1, 2, 3$ 分别表示回收产品进入再造过程的原材料生产环节、零部件生产环节、最终产品生产环节;

c_i ——再制造过程不同环节的单位生产成本, $i=1, 2, 3$;

π_j ——利润, $j=m, r, 3p, T$ 分别表示制造商、零

售商、第三方以及供应链整体。

2.2 制造商负责回收

制造商制定批发价格和回收价格 $M(\omega, f)$ 后, 零售商决策销售价格 $R(p/\omega, f)$; 制造商的成本包括回收过程的运输管理和排放成本、再制造过程碳排放生产和排放成本、从制造商到零售商的运输管理和排放成本; 零售商成本包括从零售商到消费者的运输管理和排放成本, 则制造商和零售商的利润最大化模型分别如下

$$\begin{aligned} \max_{\omega, f} \pi_m &= \omega D + p_z(G - D) - x_1(e + c)D - x_3(e + c)G - \\ &\quad [(c_2 + e_2)l_2^M + (c_3 + e_3)]G - fG \\ \text{s.t.} \max_{p, f} \pi_r &= [p - \omega - x_2(e + c)]D \end{aligned} \quad (2)$$

式中 x_3 ——Model M 下从顾客到制造商的回收距离, 且假设同一回收模式的回收距离相同;

l_2^M ——Model M 下回收品可直接进入零部件生产环节的比例。

2.3 第三方负责回收

制造商制定批发价格 $M(\omega, A)$ 后, 零售商和第三方分别决策销售价格和回收价格 $R(p/\omega, A)$,

$3P(f/\omega, A)$, 制造商的成本包括再制造过程的生产成本和排放成本、从制造商到零售商的运输管理和排放成本; 零售商成本包括从零售商到消费者的运输管理和排放成本; 第三方的成本包括回收过程的运输管理和排放成本, 具体模型如下

$$\begin{aligned} \max_{\omega, A} \pi_m &= \omega D + p_z(G - D) - x_1(e + c)D - \\ &\quad [(1 - l_2^{3P})(e_1 + c_1) + (e_2 + c_2) + (e_3 + c_3)]G - AG \\ \text{s.t.} \max_p \pi_r &= [p - \omega - x_2(e + c)]D \\ \max_f \pi_{3p} &= [A - f - x_5(e + c)]G \end{aligned} \quad (3)$$

式中 x_5 ——Model 3P 下从顾客到第三方再到制造商的总回收距离;

l_2^{3P} ——Model 3P 下回收品可直接进入零部件生产环节的比例。

由于上述三个博弈模型均为完全信息下的动态博弈, 因此可以采用逆向归纳法来求解模型。分散决策下 CLSC 三种回收模式最优定价和利润策略如表 1 所示。表中, E 为碳排放成本, 由运输碳排放和再造碳排放组成; 下角标 $R, M, 3P$ 表示 Model R, Model M, Model 3P; 上标 “*” 为均衡解。

表 1 分散决策下 CLSC 三种回收模式最优定价和利润策略求解

参数	Model R	Model M	Model 3P
ω	$\frac{a}{2b} + \frac{p_z + (e+c)(x_1 - x_2)}{2}$	$\frac{a}{2b} + \frac{p_z + (e+c)(x_1 - x_2)}{2}$	$\frac{a}{2b} + \frac{p_z + (e+c)(x_1 - x_2)}{2}$
p	$\frac{3a}{4b} + \frac{p_z + (e+c)(x_1 + x_2)}{4}$	$\frac{3a}{4b} + \frac{p_z + (e+c)(x_1 + x_2)}{4}$	$\frac{3a}{4b} + \frac{p_z + (e+c)(x_1 + x_2)}{4}$
f	$\frac{L}{4} - \frac{3h}{4k}$	$\frac{M}{2} - \frac{h}{2k}$	$\frac{N}{4} - \frac{3h}{4k}$
A	$\frac{L}{2} - \frac{h}{2k}$	—	$\frac{N}{2} - \frac{h}{2k}$
D	$\frac{a - b[p_z + (e+c)(x_1 + x_2)]}{4}$	$\frac{a - b[p_z + (e+c)(x_1 + x_2)]}{4}$	$\frac{a - b[p_z + (e+c)(x_1 + x_2)]}{4}$
G	$\frac{h + kL}{4}$	$\frac{h + kM}{2}$	$\frac{h + kN}{4}$
π_r	$\frac{1}{b}D_R^{*2} + \frac{1}{k}G_R^{*2}$	$\frac{1}{b}D_M^{*2}$	$\frac{1}{b}D_{3P}^{*2}$
π_{3p}	—	—	$\frac{1}{k}G_{3P}^{*2}$
π_m	$\frac{2}{b}D_R^{*2} + \frac{2}{k}G_R^{*2}$	$\frac{2}{b}D_M^{*2} + \frac{1}{k}G_M^{*2}$	$\frac{2}{b}D_{3P}^{*2} + \frac{2}{k}G_{3P}^{*2}$
π_T	$\frac{3}{b}D_R^{*2} + \frac{3}{k}G_R^{*2}$	$\frac{3}{b}D_M^{*2} + \frac{1}{k}G_M^{*2}$	$\frac{3}{b}D_{3P}^{*2} + \frac{3}{k}G_{3P}^{*2}$
E	$XD_R^* + Y_1G_R^*$	$XD_M^* + Y_2\frac{G_M^*}{2}$	$XD_{3P}^* + Y_3G_{3P}^*$

$$L = p_z - [e_3 + c_3 + (e + c)x_4]$$

$$M = p_z - [e_3 + c_3 + (e_2 + c_2)l_2^M + (e + c)x_3]$$

$$N = p_z - [\sum_{i=1}^3(e_i + c_i) - (e_1 + c_1)l_2^{3P} + (e + c)x_5]$$

$$X = (x_1 + x_2)e$$

$$Y_1 = e_3 + x_4e$$

$$Y_2 = 2(x_3e + l_2^M e_2 + e_3)$$

$$Y_3 = \sum_{i=1}^3 e_i - l_2^{3P} e_1 + x_5 e;$$

3 三种回收模式下收益波动规律分析

本节将在三种回收模式的分散决策下, 研究各成员的定价决策和利润波动及其影响因素。

结论 1: 当不考虑成本因子和碳排放因子, 即 $e=0, c=0, e_i=0, c_i=0, i=1,2,3$ 时, $\omega_R^* = \omega_M^* = \omega_{3P}^*$, $p_R^* = p_M^* = p_{3P}^*$, $f_M^* > f_R^* = f_{3P}^*$, $f_M^* = A_R^* = A_{3P}^*$, $\pi_{TM}^* > \pi_{TR}^* = \pi_{T3P}^*$ 。

证明: 根据表 1, 取 $e=0, c=0, e_i=0, c_i=0, i=1,2,3$, 可以得出

$$\omega_R^* = \omega_M^* = \omega_{3P}^* = (a + bp_z) / 2b$$

$$p_R^* = p_M^* = p_{3P}^* = (3a + bp_z) / 4b$$

$$(f_M^* = (kp_z - h) / 2k) > (f_R^* = f_{3P}^* = (kp_z - 3h) / 4k)$$

$$f_M^* = A_R^* = A_{3P}^* = (kp_z - h) / 2k$$

$$D = D_R^* = D_M^* = D_{3P}^* = (a - bp_z) / 4$$

$$G = G_R^* = G_{3P}^* = G_M^* / 2 = (h + kp_z) / 4$$

$$\pi_{TM}^* = \frac{3}{b} D_M^{*2} + \frac{1}{k} G_M^{*2} = \frac{3}{b} D^2 + \frac{1}{k} (2G)^2 = \frac{3}{b} D^2 + \frac{4}{k} G^2$$

$$\pi_{TR}^* = \pi_{T3P}^* = \frac{3}{b} D_R^{*2} + \frac{3}{k} G_R^{*2} = \frac{3}{b} D^2 + \frac{3}{k} G^2$$

则 $\pi_{TR}^* = \pi_{T3P}^* < \pi_{TM}^*$, 即有上述结论。

结论 1 表明, 在不考虑 CLSC 碳排放下: ① 三种回收模式的批发价格和零售价格是相同的, 说明回收模式的不同不会影响正向供应链的定价; ② 由于制造商是市场的主导者, 其愿意支付的回收价格或回收转移价格是一定的, 在此条件下, 制造商会选择回收成本低, 回收质量高的回收模式; ③ 零售商回收模式与制造商回收模式相比, 回收质量高且回收成本低, 零售商回收模式更有效; ④ 制造商直接回收的利润要高于其间接回收(Model R 或 Model 3P)的利润, 显然在不考虑运输碳排放的情况下制造商会选择直接回收的方式。

结论 2: 当同时考虑成本因子和碳排放因子时, 即 $e>0, c>0, e_i>0, c_i>0, i=1,2,3$ 时, 有 $\omega_R^* = \omega_M^* = \omega_{3P}^*$, $p_R^* = p_M^* = p_{3P}^*$ 。

结论 2 表明, 不论是否考虑运作成本或碳排放成本, 再造品正向销售过程不受回收模式的影响。与结论 1 相比, 考虑碳排放成本会抬高零售价, 说

明生产商将碳排放成本转嫁于消费者。该结论从侧面反映出政府通过征收碳税对高排企业进行限制可能损害到消费者的利益, 证明与结论 1 一致。

结论 3: 当同时考虑成本因子和碳排放因子时, 回收价格或回收转移价格与出售到电子市场的价格正相关, 与碳排放和成本负相关, 且满足 $L > M > N$ 。

证明: 从表 1 易知 $\partial f / \partial p_z > 0$, $\partial f / \partial e_i < 0$, $\partial f / \partial c_i < 0$, $\partial f / \partial x_j < 0$, $i=1,2,3$; $j=3,4,5$; $\partial A / \partial p_z > 0$, $\partial A / \partial e_i < 0$, $\partial A / \partial c_i < 0$, $\partial A / \partial x_j < 0$, $i=1,2,3$; $j=3,4,5$ 。

由假设知零售商、制造商、第三方的回收质量依次降低, 因此需要满足 $A_R^* > f_M^* > A_{3P}^*$ 。

有 $(kL-h)/2k > (kM-h)/2k > (kN-h)/2k$, 即 $L > M > N$ 。

结论 3 表明, 不同回收模式下, 回收价格的差异不仅与回收质量相关, 还与回收再造过程的不同碳排放和成本相关。回收商会把回收成本和碳排放成本转嫁给消费者, 且只有 $A_R^* > f_M^* > A_{3P}^*$ 时, 成员才会有回收动力, 回收质量才会较高, 文献[16-17]已证明提高回收质量可以提高供应链整体利润并降低碳排放。

结论 4: 当同时考虑成本因子和碳排放因子时,

① 当 $G_M^* > 1.5D_M^*$ 且 $\frac{k}{b} \leq \frac{X}{Y_i}, i=1,2,3$ 时, 提高 p_z 促进不同回收模式总利润增加的同时降低了碳排放;

② 当 $G_M^* > 1.5D_M^*$ 且 $\frac{k}{b} > \frac{X}{Y_i}, i=1,2,3$ 时, 提高 p_z 促进不同回收模式总利润增加的同时会增加碳排放;

③ 当 $G_M^* \leq 1.5D_M^*$ 且 $\frac{k}{b} \leq \frac{X}{Y_i}, i=1,2,3$ 时, 提高 p_z 促进 Model R 和 Model 3P 总利润增加, 而 Model M 总利润和不同回收模式的碳排放均降低; ④ 当 $G_M^* \leq 1.5D_M^*$ 且 $\frac{k}{b} > \frac{X}{Y_i}, i=1,2,3$ 时, 提高 p_z 促进 Model R 和 Model 3P 总利润增加, Model M 总利润降低, 不同回收模式的碳排放增加。

证明结论 4 中的①。

$$\frac{\partial \pi_{TR}^*}{\partial p_z} = \frac{3}{b} \times 2D_R^* \times \left(-\frac{b}{4} \right) + \frac{3}{k} \times 2G_R^* \times \frac{k}{4} = \frac{3(G_R^* - D_R^*)}{2}$$

由假设 5 知 $G_R^* > D_R^*$, 从而 $\frac{\partial \pi_{TR}^*}{\partial p_z} > 0$, 同理有

$$\frac{\partial \pi_{T3P}^*}{\partial p_z} > 0; \frac{\partial \pi_{TM}^*}{\partial p_z} = \frac{3}{b} \times 2D_M^* \times \left(-\frac{b}{4} \right) + \frac{1}{k} \times 2G_M^* \times \frac{k}{2} = \frac{2G_M^* - 3D_M^*}{2}$$

当 $G_M^* > 1.5D_M^*$ 时, $\frac{\partial \pi_{TM}^*}{\partial p_z} > 0$; 当 $G_M^* \leq 1.5D_M^*$ 时,

$$\frac{\partial \pi_{TM}^*}{\partial p_z} \leq 0; \quad \frac{\partial E_R^*}{\partial p_z} = X(-\frac{b}{4}) + Y_1 \frac{k}{4} = \frac{kY_1 - bX}{4}.$$

当 $\frac{k}{b} > \frac{X}{Y_1}$ 时, $\frac{\partial E_R^*}{\partial p_z} > 0$, 对 $\frac{\partial E_M^*}{\partial p_z}$ 和 $\frac{\partial E_{3P}^*}{\partial p_z}$ 的证明与对 $\frac{\partial E_R^*}{\partial p_z}$ 的证明类似。

结论 4 中①得证。同理可证结论 4 中②~④得证。

结论 4 说明分析回收市场和销售市场的需求结构, 通过调节 p_z 可以控制碳排放量, 然而这种行为可能会损害到相关企业的利益, 政府或核心企业可以通过回购、补贴等形式实现调节 p_z 的同时又与这些企业共担风险。

4 算例分析

接下来本文将研究不同排放因子(单位再制造成本、单位运输排放成本、单位运输管理成本、回收替代性)对供应链利润的影响。在以制造商(如 Apple 公司)为核心企业的电子行业构建的 CLSC 体系中。针对不同回收质量的产品(如计算机)具有不同的回收机制, 制造商拥有自己的回收团队, 同时在某些情况下也会选择第三方回收。参照文献[15]对生产和运输排放数据的获取和分析方法, 给出以下试验数据。

假设 $a=200$, $b=1.5$, $h=10$, $k=1.5$, $p_z=80$, $x_1=50$, $x_2=30$, $x_3=10$, $x_4=3$, $x_5=2$, $c=80$, $c_1=25$, $c_2=15$, $c_3=5$, $e=0.04$, $e_1=2.5$, $e_2=1.5$, $e_3=0.5$, $l_2^M=0.5$, $l_2^{3P}=0.5$, 则三种回收模式下, 随不同因子变化的总利润和碳排放波动情况如图 2~5 所示。图 2~5 中 TM、TR、T3P、EM、ER、E3P 分别表示 Model M 的总利润、Model R 的总利润、Model 3P 的总利润、Model M 的碳排放、Model R 的碳排放、Model 3P 的碳排放。

由图 2a 可知, 随单位运输碳排放成本(e)增加, 三种回收模式下的总利润均将减少, 由于制造商的回收路径较长, 因此其利润下降速度更快; 随 e 增加, 三种回收模式下的总碳排放量呈先增加后减少的趋势, 这是由于 e 增加会导致市场对再造品的需求和回收量降低, 当 CLSC 承受的碳排放成本达到最大值后, 市场需求急剧下降, 即使 e 很大, 总碳排放量也呈下降趋势, 本算例中当 $e > 0.46$ 时, 市场需求几乎为 0。

图 2b 说明再制造碳排放增加时, Model M 碳排放随 e_3 变化波动最快, Model 3P 随 e_3 变化波动

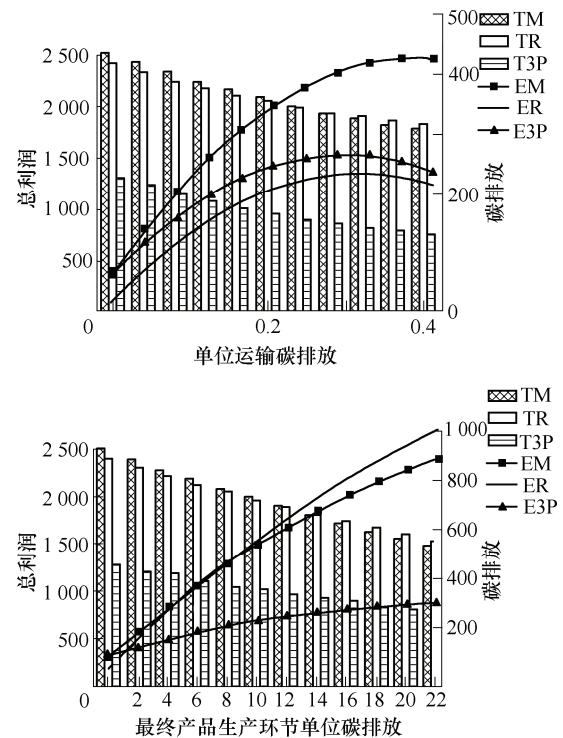


图 2 三种回收模式下总利润和总排放随 e 和 e_3 变化的波动趋势

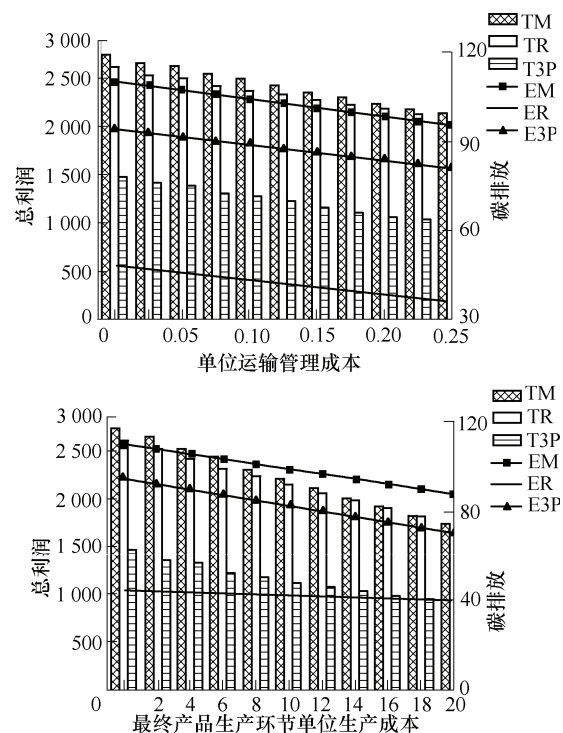


图 3 三种回收模式下的总利润和碳排放随 c 和 c_3 变化的波动趋势

最慢, 且 Model 3P 的 e_3 波动范围最小, Model M 的 e_3 波动范围最大。这是 Model 3P 的回收价格波动区间小于 Model M 的回收价格波动区间造成的(即需满足回收价格非负性: f_{3P}^* 趋于零时, $e_3 \approx 24.3$, 即 Model 3P 下 e_3 的取值范围为 $[0, 24.3]$; 同理有 Model R 下 e_3 的取值范围为 $[0, 54.5]$; Model M 下

e_3 的取值范围为 $[0, 57.7]$ 。不同回收模式下, 图 3b 中 c_3 的取值范围, 图 4b 中 $x_3/x_4/x_5$ 的波动范围均应考虑回收价格非负的约束。

从图 3 看出增加运输管理成本或再制造成本, 三种回收模式下的总利润和总排放均会降低。这是由于成本增加, 市场需求量和回收量降低。当 $c > 0.62$ 时, 市场需求量趋于 0。虽然增加成本可以降低碳排放, 但是利润下降更快, 这是企业不愿见到的。

从图 4a 看出随 CLSC 正向销售渠道的路径延长, 三种回收模式的利润均减小, 碳排放先增加后减少。这是由于随着路径的延长, 转嫁到消费者身上的成本增加, 导致市场需求量降低, 正向渠道运量减少造成的。

图 4b 看出随着 CLSC 逆向销售渠道的路径延长, 三种回收模式的利润均减小, 碳排放先增加后减少。这是由于随着回收路径的延长, 回收价格降低, 回收量减少, 逆向渠道运量降低造成的。

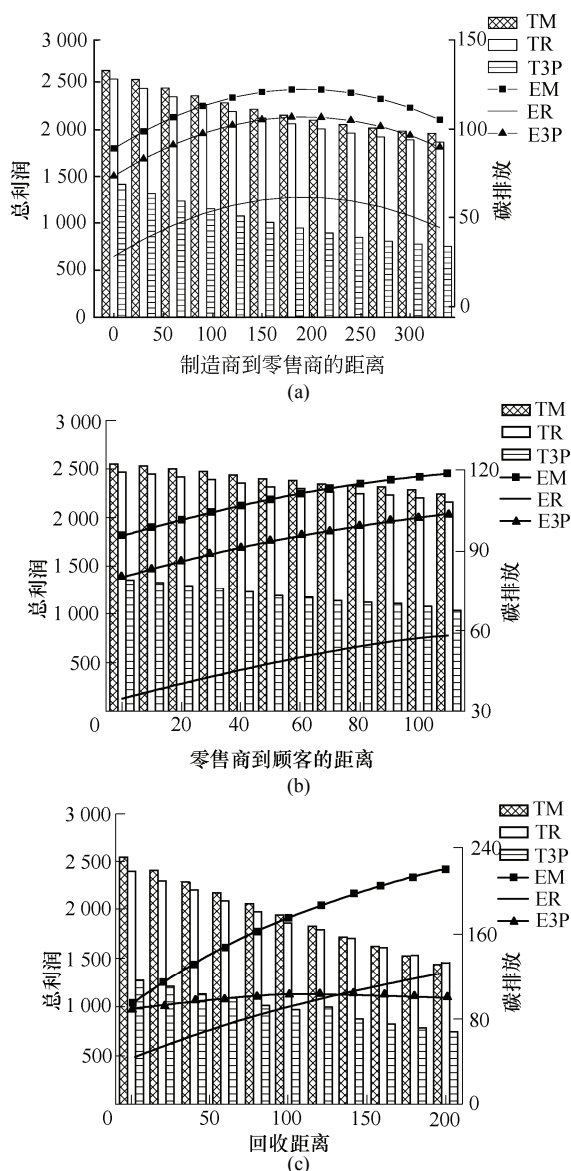


图4 三种回收模式下的总利润随运输路径变化的波动趋势

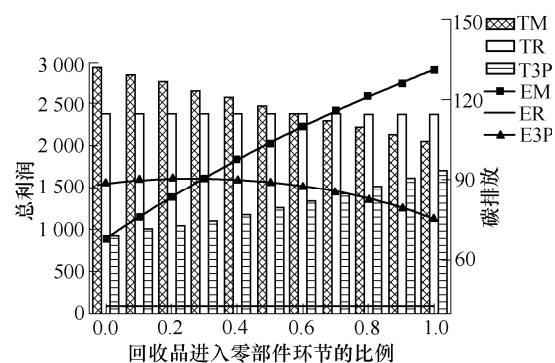


图5 三种回收模式下总利润随 l_2^M/l_2^{3P} 变化的波动趋势

如图 5 所示, Model M 中, l_2^M 比例增加, 即 $1-l_2^M$ 降低(制造商回收质量降低)时, 制造商回收产品可以直接进入最终产品生产环节的比例降低(即文献[16-17]中所指的回收替代性降低), Model M 的利润降低, 碳排放增加; Model 3P 中, l_2^{3P} 比例增加, (第三方的回收质量提升), 第三方的回收产品可以直接进入零部件生产环节的比例增加, Model 3P 的利润增加, 碳排放降低。CISC 回收制造质量越高, 回收总利润越高, 总碳排放越低。

当 $l_2^M=1$, $l_2^{3P}=1$ 时, Model M 与 Model 3P 的回收质量相同, 回收产品均进入再制造过程的零部件生产环节, 此时 Model M 的利润高于 Model 3P, Model M 的碳排放也高于 Model 3P。当 $l_2^M=0$ 时, Model R 与 Model M 的回收质量相同, 回收产品全部进入再造过程的最终产品生产环节, 此时 Model M 的利润高于 Model R, Model M 的碳排放也高于 Model R。回收总利润和碳排放还与回收模式相关。

5 结论

本文建立了一个由制造商、零售商、第三方回收商组成的考虑碳排放的 CLSC 系统。根据回收产品质量特性制定了三种回收模式, 进行定价决策, 实施总利润和碳排放波动分析, 从而得出以下结论。

(1) 正向销售渠道价格决策不受回收模式影响, 企业会将碳排放成本和运作成本转嫁于消费者。

(2) 不同回收模式改善利润和碳排放的效率不同, 当二者出现矛盾时, 政府应通过补贴、技术支持和政策优惠等方式引导企业选择排放较低的回收模式, 推动企业实现利润增值的同时降低碳排放。

(3) 较高的回收质量可以在实现 CISC 利润提高的同时降低碳排放, 核心企业可以通过按照回收质量定级的方式制定有效的回收定价机制, 以引导回收商提高回收质量。

(4) 制造商应根据回收质量设定不同的回收转移价格以促进回收商提供更多更优质的回收品。同时政府或核心企业应采取补贴或利益共享等手段促

进更加环保的回收模式发展。

(5) 较低的碳排放水平可以获得较高的回收再制造利润, 然而企业实施环保投入的成本很高。如何促进企业实现经济利益与环境利益并重是核心企业或政府今后思考的问题。

本文设计模型将进一步考虑回收市场需求多周期且需求不确定的情况, 研究考虑消费者参与回收的 CLSC 收益波动规律。

参 考 文 献

- [1] GEORGIADIS P, BESIOU M. Environmental and economical sustainability of WEEE closed-loop supply chains with recycling: A system dynamics analysis [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010, 47(5-8): 475-493.
- [2] SUBRAMANIAN P, RAMKUMAR N, NARENDHAN T T, et al. PRISM: PRIority based SiMulated annealing for a closed loop supply chain network design problem [J]. *Applied Soft Computing*. 2013, 13(2): 1121-1135.
- [3] SAVASKAN R C, van WASSENHOVE L N. Closed-loop supply chain models with product remanufacturing [J]. *Management Science*, 2004, 50(2): 239-252.
- [4] 易余胤. 不同主导力量下的闭环供应链模型[J]. *系统管理学报*, 2010, 19(4): 389-396.
YI Yuyin. Study on closed-loop supply chain models under different market power [J]. *Journal of Systems & Management*, 2010, 19(4): 389-396.
- [5] 公彦德, 李帮义, 刘涛. 基于物流费用分摊比例的闭环供应链模型[J]. *系统工程学报*, 2011, 26(1): 39-49.
GONG Yande, LI Bangyi, LIU Tao. Model for closed-loop supply chain based on the loading ratio of logistics cost [J]. *Journal of Systems Engineering*, 2011, 26(1): 39-49.
- [6] WEI Jie, ZHAO Jing. Reverse channel decisions for a fuzzy closed-loop supply chain [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(3): 1502-1513.
- [7] LEE C, REALFF M, AMMONS J. Integration of channel decisions in a decentralized reverse production system with retailer collection under deterministic non-stationary demands [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2011, 25(1): 88-102.
- [8] 孙浩, 达庆利. 回收成本结构对需求不确定闭环供应链系统决策的影响分析[J]. *软科学*, 2011, 25(2): 47-52.
SUN Hao, DA Qingli. Analysis of the Impact of collection cost structure on the strategy of closed-loop supply chain system with uncertain demand [J]. *Soft Science*, 2011, 25(2): 47-52.
- [9] GUIDE J R, JAYARAMAN V, LINTON J D. Building contingency planning for closed-loop supply chains with product recovery [J]. *Journal of Operations Management*, 2003, 21(3): 259-279.
- [10] SAVASKAN R C. Reverse channel design: The case of competing retailers [J]. *Management Science*, 2006, 52(1): 1-14.
- [11] CHEN J M, CHANG C I. The co-opetitive strategy of a closed-loop supply chain with remanufacturing [J]. *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, 2012, 48(2): 387-400.
- [12] ZEBALLOS L J, GOMES M I, BARBOSA-POVOA A P. Addressing the uncertain quality and quantity of returns in closed-loop supply chains [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2012: 237-247.
- [13] CHAABANE A, RAMUDHIN A, PAQUET M. Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme [J]. *International Journal of Production Economics*. 2012, 135(1): 37-49.
- [14] ABDALLAH T, FARHAT A, DIABAT A, et al. Green supply chains with carbon trading and environmental sourcing: Formulation and life cycle assessment [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2012, 36(9): 4271-4285.
- [15] PAKSOY T, BEKTAS T, OZCEYLAN E. Operational and environmental performance measures in a multi-product closed-loop supply chain [J]. *Transportation Research Part E-logistics and Transportation Review*, 2011, 47(4): 532-546.
- [16] KRIKKE H. Impact of closed-loop network configurations on carbon footprints: A case study in copiers[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2011, 55(12): 1196-1205.
- [17] WU Chenghan. OEM product design in a price competition with remanufactured product [J]. *Omega*, 2013, 41(2): 287-298.

作者简介: 高举红, 女, 1966 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为物流工程与供应链管理。
E-mail: gaojuhong@tju.edu.cn
侯丽婷(通信作者), 女, 1989 年出生。主要研究方向为物流工程与供应链管理。
E-mail: houlit1989@163.com
王海燕, 女, 1988 年出生。主要研究方向为物流工程与供应链管理。
E-mail: haiyanwang666@163.com
韩红帅, 女, 1990 年出生。主要研究方向为物流工程与供应链管理。
E-mail: hanhongshuai@yeah.net