

EPR制度下废弃电子产品回收的低碳研发激励机制研究

刘克宁^{1,2}, 宋华明^{1†}

(1. 南京理工大学 经济管理学院, 南京 210094; 2. 鲁东大学 交通学院, 山东 烟台 264025)

摘要: 在由生产者与研发方组成的两阶段闭环供应链体系中, 考察生产者延伸责任制(EPR)对产品低碳研发设计的激励作用以及对废弃电子产品回收的减排效果. 以生产商为Stackelberg博弈领导者, 设计预先承诺收益分配比例的S-S模型和延迟承诺S-N模型, 并给出两种模型的最优契约决策. 研究发现, 研发方的低碳研发技术水平、碳税税率、双方在回收减排中的重要度都会对契约决策和回收减排产生影响, 在系数满足一定条件下, 两种模型的回收减排效果各有优势.

关键词: 生产者延伸责任制; 废弃电子产品回收; 低碳研发; Stackelberg博弈; 激励契约

中图分类号: F273; F224

文献标志码: A

Low-carbon R&D incentive mechanism based on EPR system for E-waste product recycling

LIU Ke-ning^{1,2}, SONG Hua-ming^{1†}

(1. School of Economics and Management, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. School of Transportation, Ludong University, Yantai 264025, China)

Abstract: In the two-stage closed-loop supply chain system between the producer and the R&D supplier, this paper investigates the incentive effects to green R&D designing and the carbon emission reduction by implementing extended producer responsibility(EPR). As the leader of the Stackelberg game, the producer develops two kinds of R&D cooperative contracts to the researcher: The S-S model gives a revenue sharing ratio at the beginning of R&D stage, and the S-N model gives the ratio after observing the real carbon emission of component. And the optimal solutions of each model are given. It is found that, the contract decisions and recycling carbon emissions are affected by the low-carbon R&D technology, the carbon tax and the bargaining powers in the recycling of the two parts, and the carbon emission reduction effects of both models have their own advantages when the factors are satisfied with certain region.

Keywords: extended producer responsibility; E-waste product recycling; low carbon R&D; Stackelberg game; incentive contract

0 引言

据工信部数据统计, 目前我国手机、计算机、彩电等主要电子产品年产量超过20亿台, 每年主要电器电子产品报废超过500万吨, 已经成为世界第一大电器电子产品生产和废弃国. 伴随科学技术的飞速发展, 手机、平板电脑、笔记本等电子产品更新换代加速, 我国每年报废手机约1亿部, 但回收率不足1%, 为此, 国务院批准于2016年3月1日起将手机作为重点项目列入《废弃电器电子产品处理目录》; 但是, 我国对废旧电子产品的回收还处于起步阶段, 缺乏监管和标准, 部分地区肆意地回收处理, 对环境、居民和自然

资源造成了严重危害. 2015年, 工信部等4部委发出通知, 要求从生产者的角度解决电子垃圾回收难的问题, 开展生产者延伸责任制试点工作. 生产者延伸责任制(EPR)是欧盟、美国等发达国家广泛采用的环境治理综合制度体系, 以促进环境外部性内部化, EPR实施的根本目的是激励生产者进行创新研发设计, 从而减少回收处理过程中的碳排放^[1]. 对碳足迹的跟踪包括从产品制造原材料使用到产成品处理、回收全过程的碳排放量, 任何一个企业单独进行减排优化都难以取得理想效果. 因此, 创新型电子企业必须想办法激励其上游供应商以低碳回收为目标进行产品设

收稿日期: 2016-03-23; 修回日期: 2016-07-13.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71172105, 71472089, 71571102).

作者简介: 刘克宁(1981—), 女, 讲师, 博士生, 从事供应链管理、创新研发的研究; 宋华明(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 从事供应链管理、质量管理等研究.

†通讯作者. E-mail: huaming@mail.njust.edu.cn

计研发,鼓励研发方采用循环可利用的原材料及零部件,构建闭环的回收体系以保证废弃产品中有效材料的回收再利用。

生产者延伸责任制的有效实施是一个复杂的运营管理问题^[2]。目前,国际学者对EPR系统实施运营的研究分为两个方向:一是采用集合回收系统^[3-4],研究发现这种方法更多考虑了生产者的回收能力问题,对产品低碳设计的激励效果较差,Gui等^[5]采用非合作和合作的双层博弈模型研究了有效激励的方法;二是采用独立生产者回收责任系统,即每个生产者只承担自身产品回收处理过程的责任,Plambeck等^[6]和Atasu等^[7]认为,每个生产者独立建立回收渠道对低碳设计的激励效果更好。本文的研究延续了独立生产者责任的方法。

EPR制度、回收补贴、碳税等相关政策的试点对我国当前的供应链管理提出了新的挑战。陈剑^[8]认为,低碳问题包括碳排放成本在供应链上的分布,不同回收再制造运作模式,顾客选择行为的影响及不同利益主体的协调优化。其中:曹束等^[9]从政府和企业的层面研究了EPR制度的实施;更多学者的研究则围绕制造商与零售商之间的激励契约^[10],赵道致等^[11]考虑了消费者需求受产品减排量和零售商低碳宣传努力的影响。从废旧产品回收主体看,主要有制造商、零售商和第三方,张汉江等^[12]采用再制造品的最优价格激励契约,发现制造商回收时的努力大于委托第三方回收的努力。夏良杰等^[13]分析了供应商与制造商之间的联合减排问题,指出最优转移支付系数与企业的减排成本系数无关,政府提高碳税能促使企业提高减排量。本文将研发方纳入到低碳回收体系后,将得到不同的研究结果:最优收益比例与减排技术水平相关,一定条件下提高碳税系数反而会降低回收减排效果。

创新产品的纵向研发合作在生产实践和理论研究中都得到了广泛的重视^[14],从契约设计的角度看,包括期权契约^[15]、里程契约^[16]、版税契约^[17]、买断机制^[18]等。Xiao等^[17]在文章中指出,研发方的技术努力是可以被观察的,但研发效果需要被证实。面对研发结果的不确定性,Erat^[19]提出合作研发的签约最好在部分不确定被实现之后。因此,本文假设研发方的努力是不可直接观测的,但低碳设计的转化效果需要被验证,为此设计了预先承诺和延迟承诺两种契约分别进行讨论。

本文的研究目标是在EPR制度下,电子产品企业如何以废旧产品低碳回收为目的,对研发方进行低碳设计激励,构建一个闭环的低碳供应链系统。本文主要研究问题包括:根据EPR制度的本质,将研发供

应方引入回收体系中,分析研发方在低碳设计和低碳回收两个阶段的努力决策;考虑产品低碳性及生产商的宣传回收策略对消费者偏好的影响;考虑低碳研发结果的不确定性对决策的影响,在不同模型下,分析参数变化对供应链期望利润和总体减排量的影响。

1 问题描述与假设

1.1 问题描述

某电子产品生产企业计划在新系列产品中采用一种轻薄、含较少化学危害物并利于回收处理的电子显示屏。将产品从研发到回收的整个生命周期分为两个阶段:

第1阶段是零部件到产成品的创新研发阶段,该生产者寻找具有低碳研发能力水平的研发方合作提供该显示屏,由生产方提供包含预先支付 ω 和销售收入分成比例 α 的收益共享契约,研发企业根据自身的减排技术水平 g 决定低碳研发的努力 e_1 (本文不讨论生产者在产品组装中减排努力);

第2阶段是产品销售和回收阶段,待新技术研发成功后,生产企业检测创新产品的低碳水平,并决定其在市场推广和回收渠道建设中的努力 e_m ,废弃产品回收后将拆卸的显示屏交给研发方进行提炼、粉碎、再利用、掩埋等处理工作,研发方依据契约决定回收过程的努力 e_2 。

在生产者延伸责任制下,生产企业应向政府组织缴纳回收处理的碳排放费用。

以生产者作为研发合作Stackelberg博弈的领导者,研发方的低碳研发技术水平对双方而言是已知信息;由于创新研发本身具有风险性,依据生产者是否在检测到新产品的低碳水平之后再给出收入分配比例 α 。本文设计了两种博弈模型:预先承诺收入分配比例 α 的低碳研发S-S模型和延迟承诺 α 的低碳研发S-N模型,两种模型下的合作过程如图1所示。

1.2 基本假设

假设1 研发方的成本函数。因研发前期的边际成本相对较低,后期边际成本逐渐增加,故假设研发方低碳研发的成本函数二次连续可微,且严格递增并具有凸性^[20],即

$$c_{r1}(e_1) = \frac{e_1^2}{2g}$$

其中: e_1 为研发方在研发阶段的低碳努力; $g \in (0, 1]$ 表示研发方的低碳研发技术水平, g 越大说明研发方的减排技术越先进。在相同的努力水平下,低碳研发技术水平 g 较高的企业付出研发成本较低。假定研发方在回收处理阶段与低碳研发阶段使用同样的技术

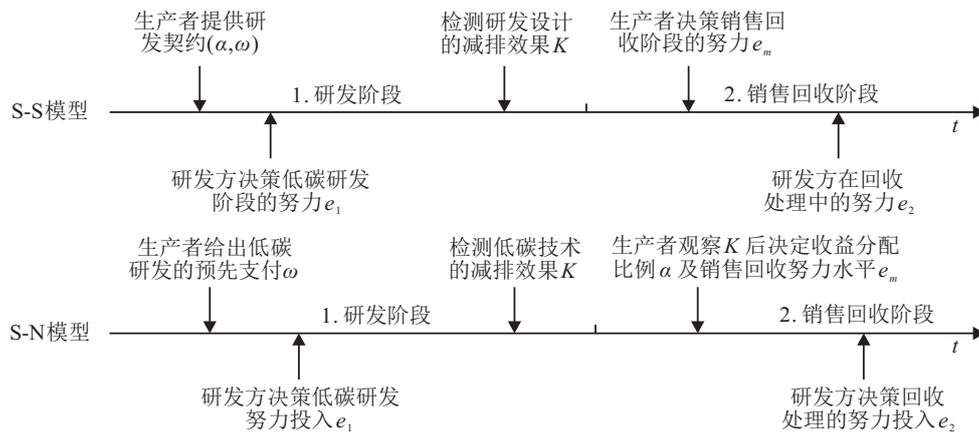


图1 两种模型下的契约合作时间序列

规模和技术水平,且边际成本递增,不失一般性,研发方在回收阶段的拆解、翻新等回收处理成本函数为

$$c_{r2}(e_2) = \frac{e_2^2}{2g},$$

其中 e_2 为研发方在回收处理过程的低碳努力水平。

假设2 生产者的销售回收成本. 已有文献分别研究了废旧产品的回收由制造商、零售商或第三方承担的情况,本文假设制造商负责低碳回收宣传、回收策略制定(如以旧换新、废旧品兑现等)、回收渠道布局等,其回收成本为投入 e_m 的增函数,即

$$c_m(e_m) = \frac{e_m^2}{2}.$$

假设3 低碳研发设计的减排效果. 在研发设计过程中,研发方的努力难以被直接观测,低碳技术的转化效果需要经过检测得到证实^[18]. 本文用 $K = e_1\eta$ 表示低碳研发设计的减排效果^[17],即经过检测在回收处理过程中可以减少的碳排放量,其中 η 表示技术转化效果的随机因素,是均值为1且可行域为 $[0, \infty)$ 的随机变量。

假设4 基于EPR的碳税征收. 根据生产者延伸责任制,政府对回收过程征收的碳税采用从量支付的方法,用 p 表示碳排放从量税税率. 电子产品废弃回收过程的碳排放量 V 与研发设计的减排效果、市场销售、回收处理中双方的努力成正向关系,可记为

$$V = K + \sigma e_2 + \nu e_m.$$

因此,通过低碳研发可节省的碳税表示为

$$\Delta t_c = pV = p(K + \sigma e_2 + \nu e_m).$$

其中: σ 表示研发方的回收处理投入对碳排放的影响系数, $\sigma > 0$; ν 表示生产者的市场推广和回收努力政策投入对碳排放的影响系数, $\nu > 0$. 最终生产者延伸责任所缴纳的碳税为

$$T = t_0 - \Delta t_c,$$

其中 t_0 表示产品未进行低碳设计研发时生产者所要缴纳的废弃产品处理碳税. 为了使模型更具直观性,本文假设 $t_0 = 0$.

2 基本模型

2.1 研发方和生产者的决策目标

讨论在垄断市场中研发单位产品的情景下,随着消费者低碳意识的不断增强,创新产品低碳度的提高可以提升产品价格^[11,21]. 借鉴Xiao等^[18]的收入模型,品牌生产商出售单位产品的销售收入可写为

$$R = K + \theta e_2 + \lambda e_m + \varepsilon.$$

其中: K 表示研发设计的减排效果; θ 表示研发方在回收处理阶段的努力对收益 R 的影响系数,且 $\theta > 0$; λ 表示生产者在市场销售和回收阶段的努力对收益的影响系数,且 $\lambda > 0$; ε 表示其他不确定性因素对收益的影响,假定 ε 服从 $N(0, \sigma^2)$ 的正态分布. 生产者和研发方都是风险中性的,生产者的期望利润为

$$\pi_M = (1 - \alpha)E(R) - E(T) - c_m(e_m) - \omega. \quad (1)$$

其中:第1项是销售收入中生产者的分配比例,第2项是回收处理过程中生产者应缴纳的碳税,第3项是生产者的销售回收努力成本,第4项是给予研发方的预先支付. 生产者的决策是确定最优的 α 、 ω 和 e_m . 研发方的期望利润为

$$\pi_R = \alpha E(R) - c_{r1}(e_1) - c_{r2}(e_2) + \omega. \quad (2)$$

其中:第1项是销售收入中研发方的分配比例,第2项是低碳研发阶段的投入,第3项是回收处理阶段的投入,第4项是研发方收到的预先支付. 研发方的决策是在给定的契约条款下,确定最优的低碳研发努力和回收处理努力。

2.2 低碳研发的集中决策模型(C模型)

首先考虑研发方和生产者作为供应链利益整体、信息共享的集中决策模型,将其作为一个基准模型. 假设存在以最大化整体利益为目标为中心决策者,其决策问题为

$$\max_{(e_1, e_2, e_m)} \pi^c = E(R) - E(T) - c(e_1) - c(e_2) - c(e_m) =$$

$$(e_1 + \theta e_2 + \lambda e_m) + p(e_1 + \sigma e_2 + \nu e_m) - \frac{e_1^2}{2g} - \frac{e_2^2}{2g} - \frac{e_m^2}{2}. \quad (3)$$

显然,目标函数是关于努力投入的凹函数,一阶条件下的解即为目标问题的全局最优解. 令 $\frac{\partial \pi_s}{\partial e} = 0$, 则研发方的低碳研发投入、回收处理投入及生产者的销售回收投入分别为

$$e_1^c = g(p + 1), e_2^c = g(p\sigma + 1), e_m^c = p\nu + \lambda.$$

因此,求得合作研发集中决策下的总体利润为

$$\pi^c = \frac{1}{2}[(p\nu + \lambda)^2 + g(p + 1)^2 + g(p\sigma + \theta)^2]. \quad (4)$$

定理1 集中式决策下,研发方与生产者之间达成可执行的合作协议,不需要生产者的低碳激励,双方会自行按照最优的产出原则选择努力投入 (e_1^c, e_2^c, e_m^c), 供应链的总体利润为 π^c .

3 低碳研发的Stackelberg模型

3.1 预先承诺 α 的低碳研发Stackelberg模型(S-S模型)

在预先承诺收益分配比例的S-S模型中,生产商在研发之初给出契约 (α, ω) , 研发方根据契约条款决定低碳研发努力. 在新产品投入市场之前,生产者将检测创新部件的减排水平,以此作为可观察信号决定其在第2阶段市场推广和回收布局的努力投入,因此,S-S模型可以写为

$$\max_{(\alpha, \omega, e_m)} \pi_M^s = (1 - \alpha)(e_1 + \theta e_2 + \lambda e_m) + p(e_1 + \sigma e_2 + \nu e_m) - \frac{e_m^2}{2} - \omega; \quad (5)$$

$$\text{s.t. } e_1, e_2 \in \arg \max \alpha(e_1 + \theta e_2 + \lambda e_m) - \frac{e_1^2}{2g} - \frac{e_2^2}{2g} + \omega, \quad (6)$$

$$\alpha(e_1 + \theta e_2 + \lambda e_m) - \frac{e_1^2}{2g} - \frac{e_2^2}{2g} + \omega \geq 0. \quad (7)$$

定理2 在预先承诺收益分配比例Stackelberg模型中,生产者在合作契约中给予研发方的最优收益分配比例为

$$\alpha_s^* = \frac{1 + \theta^2 + p + p\sigma\theta}{1 + \theta^2 + \lambda^2/g},$$

最优预先支付为

$$\omega_s^* = \frac{e_1^{s2}}{2g} + \frac{e_2^{s2}}{2g} - \alpha_s^*(e_1^s + \theta e_2^s + \lambda e_m^s).$$

证明 分散决策下研发方和生产者的博弈过程是两阶段动态博弈,其均衡是子博弈精炼纳什均衡,可以采用逆向求解法. 在第2阶段,研发方和生产者各自决定努力投入,可以证明式(5)和(6)都是关于努力的凹函数,根据一阶最优条件可得第2阶段各自努力的反应函数为

$$e_m^s = (1 - \alpha)\lambda + p\nu, e_2^s = \alpha\theta g.$$

回到低碳研发第1阶段,研发方在给定契约参数的情况下决定低碳研发的投入

$$e_1^s = \alpha g.$$

在以生产者为主导的Stackelberg博弈中,对研发方的参与激励约束必将为紧约束,故式(7)取等号,可得研发契约中的预先支付为

$$\omega_s^* = \frac{e_1^{s2}}{2g} + \frac{e_2^{s2}}{2g} - \alpha_s^*(e_1^s + \theta e_2^s + \lambda e_m^s). \quad (8)$$

将最优的努力投入及式(8)代入目标函数中,根据最优一阶条件可得分配给研发方的收益贡献比例为

$$\alpha_s^* = \frac{1 + \theta^2 + p + p\sigma\theta}{1 + \theta^2 + \lambda^2/g}. \quad (9)$$

由此,定理2得证. \square

推论1 S-S模型中,最优收益共享比例 α_s^* 随低碳研发技术水平 g 的提升而增加,且增加的速度逐渐减缓;最优预先支付 ω_s^* 随低碳研发技术水平 g 的提升而降低.

证明 令 $B = 1 + \theta^2 + p + p\sigma\theta$, 由式(9)可求得

$$\frac{\partial \alpha_s^*}{\partial g} = \frac{B\lambda^2}{(g + \theta^2 g + \lambda^2)^2} > 0, \quad \frac{\partial^2 \alpha_s^*}{\partial g^2} = -\frac{2B\lambda^2(1 + \theta^2)}{(g + \theta^2 g + \lambda^2)^3} < 0,$$

在其他参数给定的情况下, α^s 与 g 成正相关关系. 随着技术水平的逐渐增大,生产者的收益共享激励效果逐渐降低,并趋向于一固定值 $\frac{B}{1 + \theta^2 + \lambda^2}$. 最优预先支付

$$\omega_s^* = \frac{e_1^{s2}}{2g} + \frac{e_2^{s2}}{2g} - \alpha(e_1^s + \theta e_2^s + \lambda e_m^s) = -\alpha^2 \left(\frac{g}{2} + \theta^2 g + \lambda^2 + \frac{\theta^2 g}{2} \right) - \alpha(p\nu\lambda + \lambda^2),$$

对 g 求一阶导数,可证

$$\frac{\partial \omega_s^*}{\partial g} = -\alpha \frac{\partial \alpha}{\partial g} (g + 2\theta^2 g + 2\lambda^2 + \theta^2 g) - \frac{\alpha^2(1 + 3\theta^2)}{2} - \frac{\partial \alpha}{\partial g} (p\nu\lambda + \lambda^2) < 0.$$

因此,最优预先支付随低碳研发技术水平的提高而逐渐降低. \square

推论2 S-S模型中,随着研发方低碳技术水平 g 的提升,低碳设计引发的减排转化度 $K(e_1^s)$ 逐渐增大,研发方在回收阶段的努力投入 e_2^s 逐渐增大,生产者的低碳投入 e_m^s 逐渐降低.

证明 将式(9)代入 e_1^s 和 e_2^s 中,可以求得

$$\frac{\partial e_1^s}{\partial g} = \frac{Bg^2(1 + \theta^2) + 2Bg\lambda^2}{(g + \theta^2 g + \lambda^2)^2} > 0, \quad \frac{\partial e_2^s}{\partial g} = \frac{Bg^2\theta(1 + \theta^2) + 2Bg\theta\lambda^2}{(g + \theta^2 g + \lambda^2)^2} > 0,$$

因而低碳设计在废旧产品回收中的减排效果随着研发方的低碳设计水平提升而增加. 生产者的最优努力投入为 $e_m^s = (1 - \alpha_s^*)\lambda + p\nu$, 与 α_s^* 成反向关系,

而 α_s^* 与 g 成正向关系, 故可得 e_m^s 随 g 增加而减小. \square

3.2 延迟承诺 α 的低碳研发 Stackelberg 模型 (S-N 模型)

由于低碳研发具有不确定性, 在 S-N 模型中, 生产者在研发阶段结束检测到创新产品的低碳回收效果之后, 再给定收益分配比例. 两阶段的决策过程如下:

第1阶段. 合作之初生产者给出预先支付 ω , 研发方投入努力 e_1 进行产品的低碳设计, 决策模型为

$$\max_{\omega} \pi_M^n = (1 - \alpha)(e_1 + \theta e_2 + \lambda e_m) + p(e_1 + \sigma e_2 + \nu e_m) - e_m^2/2 - \omega; \quad (10)$$

$$\text{s.t. } e_1 \in \arg \max \pi_R^n = \alpha(e_1 + \theta e_2 + \lambda e_m) - \frac{e_1^2}{2g} - \frac{e_2^2}{2g} + \omega, \quad (11)$$

$$\pi_R^n \geq 0. \quad (12)$$

第2阶段. 生产者根据检测的实际低碳度信息设计分配比例 α 及确定销售回收中的努力 e_m , 研发者依据给出的 α 决定自己在回收过程的努力 e_2 . 这一过程的决策模型为

$$\max_{(\alpha, e_m)} \pi_M^{n2} = (1 - \alpha)(e_1^n + \theta e_2 + \lambda e_m) + p(e_1^n + \sigma e_2 + \nu e_m) - e_m^2/2; \quad (13)$$

$$\text{s.t. } e_2 \in \arg \max \pi_R^{n2} = \alpha(e_1^n + \theta e_2 + \lambda e_m) - \frac{e_2^2}{2g}. \quad (14)$$

定理3 满足 $(\lambda/\theta)^2 \neq 2g$ 的条件下, 延迟承诺收益分配比例的 Stackelberg 模型中, 生产者的预先支付为

$$\omega_n^* = \frac{e_1^{n2}}{2g} + \frac{e_2^{n2}}{2g} - \alpha_n^*(e_1^n + \theta e_2^n + \lambda e_m^n),$$

在研发阶段结束后, 根据检测的低碳研发效果给出最优的收益分配比例为

$$\alpha_n^* = \frac{e_1^n + p\nu\lambda + \lambda^2 - \theta^2g - p\sigma\theta g}{\lambda^2 - 2\theta^2g}.$$

证明 在 S-N 模型的两阶段动态博弈过程中, 仍然采用逆向求解法.

在第2阶段给定契约参数的情境下, 由式(14)得到双方的努力水平

$$e_m^n = (1 - \alpha)\lambda + p\nu, \quad e_2^n = \alpha\theta g.$$

在得到创新产品的低碳技术转化度 $K(e_1^n)$ 之后, 生产者根据研发方的低碳技术能力决策收益分配的比例. 将 e_m^n 、 e_2^n 代入式(13), 可证明 π_M^{n2} 是关于 α 的凹函数. 根据一阶最优原则, 令 $\partial\pi_M^{n2}(e_1^n)/\partial\alpha = 0$, 可得当 $(\lambda/\theta)^2 \neq 2g$ 时, 最优的分配收益比例为

$$\alpha_n^* = \frac{e_1^n + p\nu\lambda + \lambda^2 - \theta^2g - p\sigma\theta g}{\lambda^2 - 2\theta^2g}. \quad (15)$$

回到研发阶段, 将式(15)代入(11)研发方的期望利润函数, 令 $\partial\pi_R^n/\partial e_1 = 0$, 求得研发阶段的低碳努力投入为

$$e_1^n = \frac{(\theta^2g + p\sigma\theta g)(\lambda^2 + \theta^2g) - 3\theta^2g(\lambda^2 + p\nu\lambda)}{3\theta^2g + (\lambda^2 - 2\theta^2g)^2/g}.$$

同样, 约束方程(12)为研发方的参与约束, 作为 Stackelberg 博弈的领导者, 生产者在满足研发方保留利润的基础上获取最大利润, 因此, 约束(12)为紧约束. 在研发之初的契约中规定的最优预先支付为

$$\omega_n^* = \frac{e_1^{n2}}{2g} + \frac{e_2^{n2}}{2g} - \alpha_n^*(e_1^n + \theta e_2^n + \lambda e_m^n). \quad (16)$$

由此, 定理3得证. \square

推论3 在延迟承诺 α 的 S-N 模型中, 受低碳研发技术水平 g 的影响, 收益共享比例的最优解 α_n^* 在不同区间有如下变化: 1) 当 $\sigma < Z$ 时, 若 $\Delta > 0$, 则在 $g \in (g_1, g_2]$ 上, α_n^* 与 g 负相关, 其他情况下 α_n^* 与 g 正相关. 2) 当 $\sigma > Z$ 时, 若 $\Delta > 0$, 则与1)的情况相反. 3) 当 $\sigma = Z$ 时, 若 $\lambda^4 > DC/A$, 则在 $g \in (0, g_3]$ 上 α_n^* 与 g 有负相关关系, 在 $g \in (g_3, 1]$ 上 α_n^* 与 g 正相关; 若 $\lambda^4 < DC/A$, 则情况相反; 若 $\lambda^4 = DC/A$, 则当 $v < M$ 时 α_n^* 与 g 正相关, 当 $v > M$ 时 α_n^* 与 g 负相关, 当 $v = M$ 时 α_n^* 不随 g 的变化发生变动. 其中

$$A = \theta(\theta + p\sigma)(1 + 2\theta^2),$$

$$G = 3\lambda^2\theta^2 + \lambda^2\theta p\sigma + 2\theta^2 p\nu\lambda,$$

$$C = (p\nu\lambda + \lambda^2)^2\lambda^2,$$

$$D = 3\theta^2 + 4\theta^4,$$

$$H = 4\theta^2\lambda^2,$$

$$Z = \frac{4\theta\lambda + 4\theta p\nu + \theta(\lambda + 2p\nu)(1 + 4\theta^2)}{\lambda p(1 + 4\theta^2)},$$

$$M = \frac{p\sigma\lambda + 4p\sigma\lambda\theta^2 - 5\lambda\theta - 4\lambda\theta^3}{6\theta p + 8p\theta^3}.$$

证明 将 e_1^n 代入式(15), 得到化简的最优收益比例 $\alpha = \frac{Ag^2 - Gg + C}{Dg^2 - Hg + \lambda^4}$, 令

$$\frac{\partial\alpha}{\partial g} =$$

$$\frac{(GD - AH)g^2 + 2(A\lambda^4 - DC)g - G\lambda^4 + CH}{(Dg^2 - Hg + \lambda^4)^2} = 0,$$

求解关于 g 的一元二次方程

$$(GD - AH)g^2 + 2(A\lambda^4 - DC)g - G\lambda^4 + CH = 0,$$

有以下3种情况:

1) 若系数 $GD - AH > 0$, 则可推出 $\sigma < Z$. 当满足 $\Delta = (A\lambda^4 - DC)^2 - (GD - AH)(CH - G\lambda^4) > 0$ 时, 方程的两个解为

$$g_1 = \frac{DC - A\lambda^4 - \sqrt{\Delta}}{GD - AH},$$

$$g_2 = \frac{DC - A\lambda^4 + \sqrt{\Delta}}{GD - AH}.$$

根据极值判别的第一充分条件,在区间 $g \in (g_1 - \delta, g_1)$ 时,有 $f(g) > 0$, 即 $\partial\alpha/\partial g > 0$; 当 $g \in (g_1, g_1 + \delta)$ 时,有 $f(g) < 0$, 即 $\partial\alpha/\partial g < 0$, 原函数 $\alpha(g)$ 在 g_1 点取得最大值. 同理可证,在 g_2 点取得极小值. 当 $\Delta \leq 0$ 时,一阶导数非负,因此最优收益共享比例随 g 的增大而上升.

2)若系数 $GD - AH < 0$, 即 $\sigma < Z$, 则可证与上述结果相反.

3)若系数 $GD - AH = 0$, 即 $\sigma = Z$, 则令 $2(A\lambda^4 - DC)g - G\lambda^4 + CH = 0$, 可得

$$g_3 = \frac{G\lambda^4 - CH}{2(A\lambda^4 - DC)}.$$

因此,当 $\lambda^4 > DC/A$ 时,在 $g \in (0, g_3]$ 区间上有 $\frac{\partial\alpha}{\partial g} \leq 0$, 在 $g \in (g_3, 1]$ 上有 $\frac{\partial\alpha}{\partial g} > 0$. 当 $\lambda^4 < DC/A$ 时,与上述情况相反. 当 $\lambda^4 = DC/A$ 时,若 $v < M$, 则一阶导数为正;若 $v > M$, 则一阶导数为负;若 $v = M$, 则一阶导数为零. α^* 不随 g 的变化而发生改变. □

将推论1与推论3进行对比可以发现,在延迟契约中收益共享比例 α 与 g 的关系更为复杂,受其他参数的影响可能出现负相关性.

4 模型参数性质分析

本节主要分析采用S-S模型和S-N模型时,研发方的低碳研发技术水平、碳税税率以及双方在减排中的重要度对废旧电子产品减排效果的影响和意义.

4.1 低碳研发技术水平对减排的影响

性质1 在S-S契约模型下,低碳研发技术水平 g 存在一个阈值 g' : 当 $g < g'$ 时,废旧产品回收处理过程的总碳减排量 V^s 随 g 的增大逐渐降低;当 $g > g'$ 时,总碳减排量 V^s 随 g 的增大逐渐提高;当 $g = g'$ 时,回收处理的总减排效果最低. 其中

$$g' = \frac{\lambda\sqrt{\lambda^2(1+\theta\sigma)^2 + (1+\theta^2)(1+\theta\sigma)\lambda\nu} - \lambda^2(1+\theta\sigma)}{(1+\theta^2)(1+\theta\sigma)}.$$

证明 根据假设4,废旧产品回收的碳减排量为 $V = K + \sigma e_2 + \nu e_m$, 将双方各自的最优努力代入,得

$$V(g) = \frac{1 + \theta^2 + p + p\sigma\theta^2}{1 + \theta^2 + \lambda^2/g} (g + \sigma\theta g - \lambda\nu) + \lambda\nu + p\nu,$$

在 $g \in (0, 1]$ 上可导,令 $\frac{\partial V}{\partial g} = 0$, 可得关于 g 的一元二次方程 $g^2(1+\theta^2)(1+\theta\sigma) + 2g\lambda^2(1+\theta\sigma) - \lambda^3\nu = 0$,

利用求根公式,得

$$g' = \frac{\lambda\sqrt{\lambda^2(1+\theta\sigma)^2 + (1+\theta^2)(1+\theta\sigma)\lambda\nu} - \lambda^2(1+\theta\sigma)}{(1+\theta^2)(1+\theta\sigma)}.$$

可证在 g' 点的二阶导数 $\frac{\partial^2 V}{\partial g^2} > 0$. 根据极值判断第二充分条件, $V(g)$ 在 g' 处连续可导,且 $V'(g') = 0, V''(g') < 0$, 则在 g' 点取极小值. 在定义域 $g \in (0, 1]$ 上有唯一驻点,因此 g' 点也是全局最小值. 当研发方的低碳研发技术水平为 g' 时,废弃产品回收的碳减排量最低. □

从这一性质可以发现:让研发供应商参与到电子废弃产品回收的闭环系统中,其会根据自身真实的低碳技术水平选择在两个阶段的努力投入决策,因而废旧电子产品回收过程的减排量与研发方低碳技术水平并非呈简单的线性关系,生产商不能仅凭低碳研发水平而判断回收减排效果. 在S-N模型中两者的变化情况更为复杂.

4.2 双方减排重要度对收益分配比例和减排的影响

性质2 在预先承诺收益分配比例的S-S契约中,当研发方对回收减排的重要度相对较高时 ($I_R > I_M$), 生产者提高收益分配比例 α 有助于提高整体减排效果;但是,当生产者在回收减排中的重要度相对较高时 ($I_R < I_M$), 生产者提高收益分配的比例 α 反而使回收处理的碳排放量增加.

根据假设4,低碳设计的总减排量为

$$V = K + \sigma e_2 + \nu e_m = \alpha(g + \sigma\theta g - \lambda\nu) + \lambda\nu + p\nu^2,$$

V 是关于 α 的线性函数,当系数 $g + \sigma\theta g - \lambda\nu > 0$ 时,呈递增关系,反之呈递减关系. 生产商在决策 α 时,要考虑到双方在减排中的贡献度. 观察系数可以发现: $g(1 + \theta\sigma)$ 中 σ 是关于研发方在回收处理阶段的努力对减排的影响系数, θ 是研发方在回收中的努力对销售收入的影响系数, g 是研发方的低碳技术水平,因此定义 $I_R = g(1 + \theta\sigma)$ 为研发方在创新减排中的重要度;而 $\lambda\nu$ 中的 ν 是生产商的销售回收努力对减排的影响系数, λ 表示生产商在销售回收阶段的努力对收入的影响,因此,将 $I_M = \lambda\nu$ 定义为生产商在创新减排中的重要度.

管理意义: 为降低供应链整体的碳排放量,当 $I_R > I_M$, 即研发方对回收减排的重要度相对较高时,生产者应提高收益分配比例 α , 激励研发方的减排投入;当 $I_R < I_M$, 即生产者在回收减排中的重要度相对较高时,为达到较好的减排效果,生产者应降低给予研发方的收益分配比例.

4.3 碳税系数 p 和低碳技术水平 g 对减排的影响

性质3 考虑废弃产品回收征收的碳税系数 p 不同,在延迟承诺收益分配比例的S-N模型中,一定条件下,研发方的低碳研发技术水平 g 存在一个阈值 κ : 当 $\kappa < g \leq 1$ 时,碳减排量随碳税系数 p 的增加而增大;当 $0 < g \leq \kappa$ 时,碳减排量随碳税系数 p 的增加而降低。

证明 将S-N模型中的最优解代入 $V^n = e_1^n + \sigma e_2^n + \nu e_m^n$ 中,可得减排量是关于碳税系数的一次函数,令 $\frac{\partial V^n}{\partial p} = 0$, 有

$$\frac{(B+1)}{C}(\sigma\theta^3g^3 + \sigma\theta g^2\lambda^2 - 3\theta^2g^2\nu\lambda) + B(\nu\lambda - \sigma\theta g) + \nu^2 = 0.$$

其中: $B = \frac{\theta g\sigma - \nu\lambda}{\lambda^2 - 2\theta^2g}$, $C = 3\theta^2g^2 + (\lambda^2 - 2\theta^2g)^2$.

讨论:当方程在 $(0, 1]$ 有解时,记 $g' = \kappa$, 则在 $\kappa < g \leq 1$ 时, $\frac{\partial V^n}{\partial p} > 0$, 减排量 V^n 随 p 的增加而增大;在 $0 < g \leq \kappa$ 时, $\frac{\partial V^n}{\partial p} \leq 0$, 减排量 V^n 随 p 的增加反而降低。□

性质4 碳税系数 p 和研发技术水平 g 同时变化时,两种模型的减排效果比较:当 $p > \tau$ 时,预先承诺收益比例的S-S模型减排效果较好;当 $p < \tau$ 时,延迟承诺收益比例的S-N模型减排效果较好。

证明 将两种模型下的双方最优努力代入减排量公式 $V^s = e_1^s + \sigma e_2^s + \nu e_m^s$, 令 $V^s > V^n$, 可以求得 $Wp > Q$. 其中

$$W = \frac{(g + \sigma\theta g)(g + \theta g\sigma - \nu\lambda)}{g(1 + \theta^2) + \lambda^2} - \frac{(\sigma\theta g^2\lambda^2 + \sigma\theta^3g^3 - 3\theta^2g^2\nu\lambda)(\lambda^2 - 2\theta^2g - \theta\sigma g + \nu\lambda)}{[3\theta^2g^2 + (\lambda^2 - 2\theta^2g)^2](\lambda^2 - 2\theta^2g)} + \frac{(\nu\lambda - \sigma\theta g)^2}{\lambda^2 - 2\theta^2g},$$

$$Q = \frac{(\theta^4g^3 - 2\theta^2g^2\lambda^2)(\lambda^2 - 2\theta^2g - \theta\sigma g + \nu\lambda)}{[3\theta^2g^2 + (\lambda^2 - 2\theta^2g)^2](\lambda^2 - 2\theta^2g)} - \frac{(g + \theta^2g)(g + \theta g\sigma - \nu\lambda)}{g(1 + \theta^2) + \lambda^2} + \frac{\lambda^2 - \theta^2g}{\lambda^2 - 2\theta^2g}.$$

令 $\tau = Q/W$, 则在 $W \neq 0$ 且 $p > \tau$ 时,采用S-S模型的减排量大于S-N模型,反之亦然。□

管理意义: 企业进行低碳研发合作,不仅要考虑合作方的真实研发技术水平,还要考虑政府设置的碳税政策. 在延迟契约中,当 g 在一个较低的范围内时,提高碳税税率反而会容易导致碳排放量的增加,对减排产生负面作用. 从两种契约的比较看,在一个较高的碳

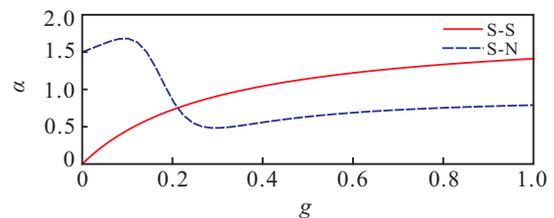
税水平下,生产者责任风险较大,要实现预期的减排效果,就需要在研发初期与供应商签订完整的合作契约,采用S-S模型;而若在较低的碳税水平下,生产者后期责任风险较小,更具有谈判优势,因此,采用S-N延迟模型的减排效果更好。

5 数值算例

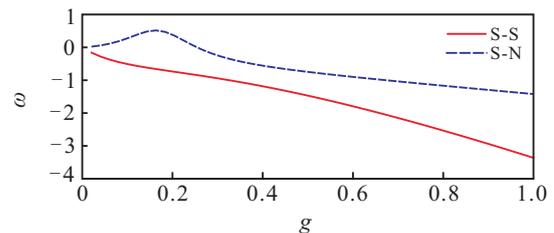
在满足上述定理和推论的取值范围内给参数赋值. 令 $\theta = 1.5, \lambda = 1, p = 0.5, \sigma = 3, \nu = 1$ 或 $\sigma = 1, \nu = 3$ 进行数值算例的分析。

1) g 的变化对契约决策变量的影响。

如图2所示,两种契约模型中的比较:当研发方的低碳技术水平较低时,有 $\alpha^n > \alpha^s$; 当低碳技术水平较高时, $\alpha^s > \alpha^n$. 随着 g 在定义域内变化,有 $\omega^n > \omega^s$, 且在S-S模型中预先支付 ω^s 为负值. 随着研发方低碳技术水平的提高,在S-S模型中收益分配比例逐渐增加,从0增加到1.41,这是由于生产者将后期减少的碳税作为给研发方的特殊激励. 但是,预先支付为负值且绝对值逐渐增加,这表明在项目研发之初,由于对项目低碳预期的不确定性,生产者会要求研发方缴纳一定的合作定金,技术水平越高的企业越愿意缴纳更多的定金,以显示自身对该合作项目的信心和实力。



(a) 对收益分配比例的影响



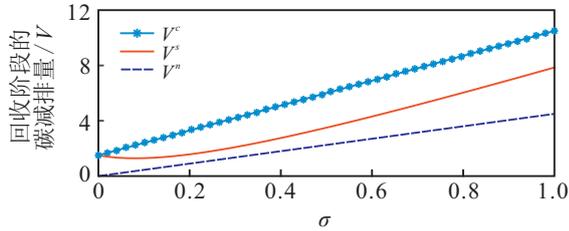
(b) 对预先支付的影响

图2 低碳研发技术水平 g 对收益分配比例和预先支付的影响

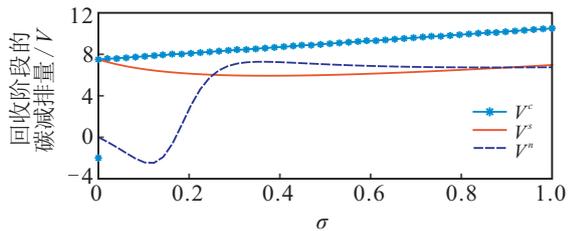
2) g 变化对废弃电子产品回收减排效果的影响。

图3显示了回收过程中减排量与研发方技术水平 g 、双方对回收减排的影响系数 σ, ν 之间关系. 在图3(a)中 $\sigma = 3, \nu = 1$, 表明研发方回收处理的努力对回收减排的影响较大,有 $V^c > V^s > V^n$; 在图3(b)中 $\sigma = 1, \nu = 3$, 表明生产者的投入对回收减排的影响较大,这时 g 的取值在一定范围内存在 $V^s < V^n$. 原因在于: 当研发方减排贡献较大时,研发契约的激

励机制将发挥作用,生产者选择减少投入;而当生产者在减排中的贡献较大时,其会降低在契约激励中的投入,转而加大自身在销售回收中的努力,从而减小EPR的回收责任.因此,当系数在一定取值范围内时,S-N模型能产生更好的减排效果.



(a) $\sigma=1$ 时3种契约下碳排放量比较



(b) $\sigma=3$ 时3种契约下碳排放量比较

图3 低碳研发技术水平 g 变化对回收减排的影响

值得注意的是图3(b)中 V^n 的曲线,当研发技术水平非常低, $g \in (0, g') = (0, 0.08)$ 时, g 的增加却使得整体的减排效果变差.因为 g 非常低,研发方在减排设计的边际成本会较高,因此研发方会选择将投入放在回收阶段.生产者根据所观察的 K 可得知减排效果较差,也不会销售回收中投入更多渠道宣传.由此可见,研发方所具有的低碳研发技术能力对供应链决策有重要影响.

3) 供应链总期望利润的对比.

在S-S模型中,供应链的总利润为 π_{all} ,对 g 求一阶导数,可证得 $\frac{\partial \pi_{all}}{\partial g} > 0$.而在S-N模型中,总期望利润对 g 求导非常复杂,通过Matlab实现求导计算,经过多次数值验证可得:当 g 在较小范围内时,总利润具有先减小后增加的趋势.

表1给出了3种模型下供应链总利润的变化.其中: π^c 、 π^s 、 π^n 分别表示在集中决策模型、S-S模型、S-N模型下供应链的总期望利润; $\Delta\pi$ 表示生产者获取确定性信息的费用.数值分析表明:在集中决策模型C和预先承诺模型S-S中,总期望利润随 g 的增大而增加;在延迟承诺模型S-N中,总期望利润随 g 的增大出现先下降再增长的趋势.为获得确定的研发信息,生产者要付出相应的信息费用 $\Delta\pi = \pi_m^s - \pi_m^n$,随着 g 的增大, $\Delta\pi$ 的值会发生上下波动(如表1所示).在S-N模型中,当 g 的取值在一个较小范围内($g \in [0.05, 0.20]$)时,生产者的期望利润为负.因此,

采用延迟承诺机制时,生产者要避免与低碳研发技术水平处于这一区间的企业合作.

表1 3种模型下供应链总利润的变化

	g						
	0.05	0.15	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9
π^c	1.41	1.97	2.25	2.81	3.94	5.06	6.19
π^s	1.16	1.39	1.56	1.94	2.84	3.82	4.84
π^n	-0.003	-0.25	-0.07	0.93	2.05	2.86	3.62
$\Delta\pi$	1.163	1.64	1.63	1.01	0.79	0.96	1.22

4) p 和 g 同时变化对减排的影响.

表2分析了当碳税系数 p 在(0,1)之间的不同取值时,随着研发方低碳研发技术水平 g 的增长,采用S-N契约研发回收的整体减排量变化.根据性质3计算得到研发技术水平 g 的阈值 $\kappa = 0.1752$.从表2中也可以看出:在 $0.1752 < g < 1$ 时,减排量随着 p 的增大逐渐提升;在 $0 < g \leq 0.1752$ 时,减排量随着 p 的增大反而降低.

表2 S-N模型中碳减排量的变化($\sigma = 1, v = 3$)

p	g					
	0.15	0.17	0.1752	0.2	0.5	0.8
0.1	-0.46	0.21	0.42	1.43	3.29	3.27
0.2	-0.73	0.15	0.42	1.75	4.23	4.14
0.3	-1.00	0.08	0.42	2.07	5.16	5.01
0.4	-1.26	0.02	0.42	2.40	6.10	5.87
0.5	-1.53	-0.05	0.41	2.72	7.04	6.74
0.6	-1.80	-0.11	0.41	3.05	7.98	7.61
0.7	-2.07	-0.18	0.41	3.37	8.91	8.48
0.8	-2.33	-0.24	0.41	3.69	9.85	9.34
0.9	-2.60	-0.31	0.41	4.02	10.79	10.21
1.0	-2.87	-0.37	0.41	4.34	11.73	11.08

6 结论

考虑废旧电子产品回收问题时,有必要将供应链上游的供应商、生产商纳入到低碳的闭环供应链体系中,从产品的低碳研发入手,考虑消费者的绿色环保意愿.电子产品的创新研发结果具有不确定性,因此本文设计了两种合作契约模型,区别在于生产者是否在观察到一定信号之后再行进行契约决策,因而产生了信息的价值.研究发现:

1) 在一定参数取值区间内,预先约定收益分配比例会给供应链带来更多利润,但减排效果却不如延迟承诺模型.

2) 双方减排的贡献度对低碳回收有影响,当零部件的绿色设计对产品回收减排起关键作用时,减排量随低碳技术水平的提高而增大,S-S模型的减排效果

较好;当生产者的回收策略、渠道投入起重要作用时,其降低了对研发方设计激励的投入,采用S-N模型在一定区间减排效果较好。

3)在EPR制度中,生产者不仅要考虑研发方的低碳技术水平,还要考虑政府设置的碳税水平。当研发方的研发技术水平较低时,较高的碳税反而对供应链整体的减排产生负面作用。

我国对EPR制度的实施仍在讨论中,本文尚有以下内容需要进一步深入研究:如何在产品竞争市场的环境中采用EPR制度;探讨在研发方信息不对称情景下,生产者激励契约机制的设计。

参考文献(References)

- [1] Lifset R J, Lindhqvist T. Producer responsibility at a turning point?[J]. *J of Industrial Ecology*, 2008, 12(2): 144-147.
- [2] Toyasaki F, Boyact T, Verter V. An analysis of monopolistic and competitive take-back schemes for WEEE recycling[J]. *Production and Operations Management*, 2011, 20(6): 805-823.
- [3] Atasu A, Van Wassenhove L N, Sarvary M. Efficient take-back legislation[J]. *Production and Operations Management*, 2009, 18(3): 243-258.
- [4] Islegen O, Plambeck E L, Taylor T. Variability in emissions cost: Implications for facility location, production and shipping[C]. *Environmentally Responsible Supply Chains*. Switzerland: Springer International Publishing, 2016: 283-382.
- [5] Gui L Y, Atasu A, Ergun Ö, et al. Efficient implementation of collective extended producer responsibility legislation[J]. *Management Science*, 2015, 62(4): 1098-1123.
- [6] Plambeck E, Wang Q. Effects of e-waste regulation on new product introduction[J]. *Management Science*, 2009, 55(3): 333-347.
- [7] Atasu A, Subramanian R. Extended producer responsibility for e-waste: Individual or collective producer responsibility?[J]. *Production and Operations Management*, 2012, 21(6): 1042-1059.
- [8] 陈剑. 低碳供应链管理研究[J]. *系统管理学报*, 2012, 21(6): 721-728.
(Chen J. Study on supply chain management in a low-carbon era[J]. *J of Systems & Management*, 2012, 21(6): 721-728.)
- [9] 曹柬, 胡强, 吴晓波, 等. 基于EPR制度的政府与制造商激励契约设计[J]. *系统工程理论实践*, 2013, 33(3): 610-621.
(Cao J, Hu Q, Wu X B, et al. Incentive mechanism between government and manufacturers based on EPR system[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2013, 33(3): 610-621.)
- [10] 白少布, 刘洪. EPR制度意义下制造商和零售商激励契约研究[J]. *中国管理科学*, 2012, 30(3): 122-130.
(Bai S B, Liu H. Incentive contract between manufacturer and dealers with EPR[J]. *Chinese J of Management Science*, 2012, 30(3): 122-130.)
- [11] 赵道致, 徐春秋, 王芹鹏. 考虑零售商竞争的联合减排与低碳宣传微分对策[J]. *控制与决策*, 2014, 29(10): 1809-1815.
(Zhao D Z, Xu C Q, Wang Q P. Differential strategies of joint emission reductions and low-carbon promotion considering competing retailers[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(10): 1809-1815.)
- [12] 张汉江, 甘兴, 赖明勇. 最优价格与回收努力激励的闭环供应链协调[J]. *系统工程学报*, 2015, 30(2): 202-209.
(Zhang H J, Gan X, Lai M Y. Coordination of closed-loop supply chain with the optimal price and recycle effort incentive contract[J]. *J of Systems Engineering*, 2015, 30(2): 202-209.)
- [13] 夏良杰, 郝旺强, 吴梦娇. 碳税规制下基于转移支付的供应链减排优化研究[J]. *经济经纬*, 2015, 32(4): 114-120.
(Xia L J, Hao W Q, Wu M J. Supply chain optimization of emission reduction based on transfer payment under carbon tax system[J]. *Economic Survey*, 2015, 32(4): 114-120.)
- [14] Ge Z, Hu Q, Xia Y. Firms' R&D cooperation behavior in a supply chain[J]. *Production and Operations Management*, 2014, 23(4): 599-609.
- [15] Gilbert S M, Cvsa V. Strategic commitment to price to stimulate downstream innovation in a supply chain[J]. *European J of Operational Research*, 2003, 150(3): 617-639.
- [16] Crama P, Reyck B D, Degraeve Z. Milestone payments or royalties? Contract design for R&D licensing[J]. *Operations Research*, 2008, 56(6): 1539-1552.
- [17] Xiao W, Xu Y. The impact of royalty contract revision in a multistage strategic R&D alliance[J]. *Management Science*, 2012, 58(12): 2251-2271.
- [18] Bhattacharya S, Gaba V, Hasija S. A comparison of milestone-based and buyout options contracts for coordinating R&D partnerships[J]. *Management Science*, 2015, 61(5): 963-978.
- [19] Erat S. Joint product development and inter-firm innovation[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2006.
- [20] Che Y K, Gale I. Optimal design of research contests[J]. *The American Economic Review*, 2003, 93(3): 646-671.
- [21] Chitra K. In search of the green consumers: A perceptual study[J]. *J of Services Research*, 2007, 7(1): 173-191.

(责任编辑: 曹洪武)