

生产者责任延伸制度下快递包装选择及设计策略

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2022.04.011

罗子灿^{1,2} 童彩吟^{1,2}

罗定提¹

1. 湖南工业大学

商学院

湖南 株洲 412007

2. 湖南工业大学

湖南省包装经济研究基地

湖南 株洲 412007

摘要:以生产者责任延伸制度(EPR)为背景,从包装设计的可回收性和耐用性两个因素建立供应链最优化决策模型,研究和比较了包装生产商仅提供一般快递包装与仅提供可循环快递包装两种模式。研究表明:随着包装回收率的提高,包装生产商提高快递包装的可回收性,但可循环快递包装的耐用性需要考虑耐用性与可回收性之间的关系。当耐用性与可回收性相互促进时,耐用性会随之上升;当耐用性与可回收性相互冲突时,耐用性会随之下落。在仅生产可循环快递包装时,包装生产商的利润与社会福利高于仅生产一般快递包装时的,但对包装生产商进行包装收集的激励要低于仅生产一般快递包装时的。

关键词:生产者责任延伸制度;可循环快递包装;包装回收;包装设计

中图分类号:F274;F224

文献标志码:A

文章编号:1674-7100(2022)04-0080-11

引文格式:罗子灿,童彩吟,罗定提.生产者责任延伸制度下快递包装选择及设计策略[J].包装学报,2022,14(4):80-90.

1 研究背景

随着电子商务的普及,网络购物已经成为了多数人的选择。国家邮政局近十年的数据显示,我国快递业务总量已从2012年的56.9亿件增长到2021年的1083亿件。庞大的快递业务量带来了环境污染、资源浪费等一系列问题。针对以上问题,我国政府于2016年12月25日,发布了《生产者责任延伸制度推行方案》,将生产者的责任从产品的生产环节延伸至产品的整个生命周期,尤其是回收处理环节。在此基础上又于2020年11月30日发布了《关于加快推进快递包装绿色转型的意见》,要求于2022年我国可循环快递包装应用规模应达700万个,且这一数量应在2025年达到1000万个。同时快递企业纷

纷推出了属于自己的可循环快递包装,例如苏宁首先推出了可循环使用的快递包装,并在北京、上海、广州等13个城市推广使用。

在生产者责任延伸制度(extended producer responsibility, EPR)下,包装生产商必须在设计包装时就考虑到包装回收的问题,进而尽可能地减少包装回收所需要的成本,即提升快递包装的可回收性。可循环快递包装的设计与一般快递包装不同,可循环快递包装作为耐用品,在设计时需要考虑耐用性,即可循环快递包装防止物理损坏的能力。但在可循环快递包装的设计中,耐用性和可回收性之间存在相互影响的情况。一方面,耐用性提升时可以促进可回收性的提升,例如包装生产商可以通过增加包装厚度的方式增加可循环快递包装的耐用性,从而使得该可循

收稿日期:2022-02-16

基金项目:湖南省包装经济研究基地项目(2021BZJG08);湖南省社会科学成果评审委员会课题(XSP19YBC214);湖南省哲学社会科学基金资助项目(17JD27)

作者简介:罗子灿(1982-),男,湖南株洲人,湖南工业大学讲师,博士,主要研究方向为运营管理与营销管理,

E-mail: 772358933@qq.com

环快递包装的回收利润上升。另一方面,提升耐用性的同时可回收性会下降。例如包装生产商可能会通过在包装外部增加其他辅助材料的方式来增加可循环快递包装的耐用性,但在对可循环快递包装进行回收时,包装生产商必须对可循环快递包装中不同的部分进行拆解,进而使得该可循环快递包装的回收利润下降。

从包装生产商的利润角度考虑,在EPR下,包装生产商应该选择生产何种类型的包装?又应该如何对包装中的耐用性与可回收性进行设计?不同的包装回收率对社会福利又有何种影响?基于此,EPR下快递包装设计及其选择问题的研究,对于快递包装生产商、快递企业与政府均具有重要意义。

与本研究相关的文献主要包括三个方面:生产者责任延伸制度对包装设计改变的研究、快递包装回收的研究以及可循环快递包装的研究。EPR作为政府保护环境、节约资源的重要政策,主要有两个目标:1)促进生产者在设计产品时就考虑到回收的问题,从而改变其产品设计;2)通过产品的回收处理,最终达到保护环境的目的。而有许多学者对第一个目标能否达成提出了质疑。M. Walls^[1]提出,现行EPR方面的法律法规只能促使生产者部分改变其产品设计,比如产品规模的缩减、产品使用材料的减少等。Gu F.等^[2]认为,EPR法律并没有预期那样有效。A. Atasu^[3]认为,越严格的EPR政策并不一定能带来更好的效果。Huang X.等^[4]在此基础上提出,更严格的收集目标和回收目标,并不能使生产者将产品设计得更加可回收。与Huang X.不同,E. Brouillat等^[5]认为,只有税收补贴制度和严格的规范才能导致根本性创新和产品设计的重大变化。国内也有学者就EPR制度进行了研究,例如:刘克宁等^[6]对EPR制度下电子产品低碳研发设计中的激励与废旧电子产品回收的减排效果进行了研究,建立了预先承诺分配比例与延迟承诺的模型,发现在一定条件下,两种模型的回收减排效果各有优势。户佐安等^[7]对EPR制度下废旧电器闭环供应链进行了研究,发现电器产品的闭环供应链的良好运行需要各利益相关方达到利益均衡。

快递包装的回收作为目前我国亟需解决的一个重点问题,有许多学者对此进行了研究。胡觉亮等^[8]将政府奖惩机制引入快递包装回收中,发现政府奖惩机制有助于提高包装的回收再利用率。许凤莲等^[9]研究了包装尺寸对闭环供应链回收渠道的影响,并探

讨了生产商回收下最优包装尺寸的决策。罗子灿等^[10]在此基础上,将收益共享契约和零售商回收模式纳入考虑范围,对大、小两种产品的包装尺寸与产品线选择的问题进行了研究。

近年来,有学者对共享快递箱即可循环快递包装进行了研究。例如:Jin L.等^[11]对共享快递箱的类型及共享快递箱的业务模式进行了研究,分别从共享快递箱的质量、运输成本、管理费用、生产成本等方面对共享快递箱的租赁模式与自营模式进行了对比。Xu Y.等^[12]针对苏宁所推出的共享快递盒,研究了共享快递盒的发展现状,分析了苏宁共享快递箱运行中存在的问题,并提出了共享快递箱回收模式的优化方案。何波等^[13]对可循环快递包装的回收模式进行了研究,将电商平台回收与物流公司回收两种模式进行了对比。

本文考虑包装生产商仅提供一般快递包装与仅提供可循环快递包装两种情形,研究当生产包装类型不同时,EPR制度的严格程度对包装设计,包装生产商利润以及社会福利的影响,以期能为相关政府部门和包装企业提供一定的决策参考。

2 问题描述与基本假设

本研究建立由包装生产商、快递企业、消费者构成的闭环供应链模型,如图1所示。

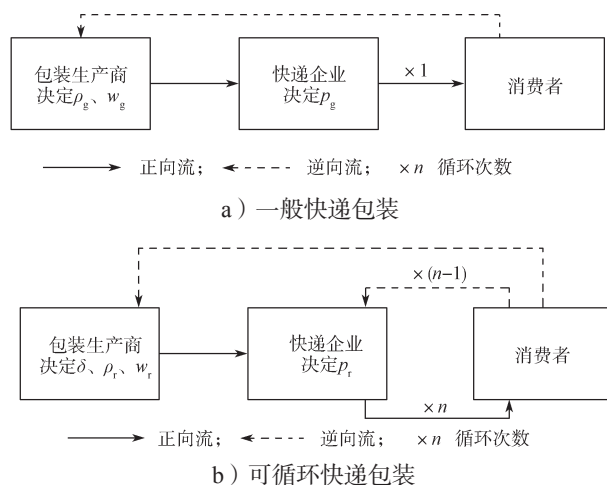


图1 闭环供应链模型

Fig. 1 Closed loop supply chains model

根据EPR的原则,包装生产商作为快递包装的生产者,需要对回收处理环节进行负责。当包装生产商仅生产一般快递包装时,首先由包装生产商决定快

递包装的可回收性 ρ_g ，并按 w_g 的价格将快递包装批发给快递企业；其次由快递企业以 p_g 的价格将快递服务与快递包装提供给消费者；最后由包装生产商从消费者处收集废弃快递包装并回收。与仅生产一般快递包装时不同，在包装生产商仅生产可循环快递包装时，需要对可循环快递包装的耐用性 δ 与可回收性 ρ_r 同时进行设计，且可循环快递包装会在快递企业与消费者之间循环使用（循环使用次数为 n ）。

模型假设如下：

假设 1 假设包装生产商与快递企业完全信息对称，两者均按照利润最大化的目标进行决策。

假设 2 假设一般快递包装的最大可使用次数为 1，可循环快递包装的最大可使用次数为正整数 $n \in [1, +\infty)$ 。

假设 3 为了不失一般性且聚焦于所研究的问题，假设快递企业提供运输及其他服务的成本为零。

假设 4 包装回收率 r 为政府所决定的单位包装中需要被回收的比率， $r \in [0, 1]$ 。假设包装生产商能从包装回收中获得的边际利润^[4]为

$$f(r) = \alpha + \rho_j - \beta r,$$

其中： α 为包装回收中最具有回收价值的部分，随着 α 的增加，包装生产商能从包装回收中获得的利润越高； β 为随着包装回收率 r 的上升，快递包装边际回收价值的下降程度； ρ_j 为可回收性， $\rho_j \in [0, 1]$ ，是包装生产商仅生产类型 j ($j=g$ 表示一般快递包装， $j=r$ 表示可循环快递包装) 时，包装回收边际回收价值增加部分。因此，快递包装的单位回收价值为

$$v(\rho_j) = \int_0^r (\alpha + \rho_j - \beta r) dr = \frac{-\beta r^2}{2} + (\alpha + \rho_j)r.$$

假设 5 假设 $\lambda_j \in (0, 1]$ 为快递包装的收集率，即销售总量中被收集至包装生产商处的比率。

假设 6 假设生产一件无可回收性、无耐用性的快递包装成本为 m 。

生产一件仅具有可回收性的一般快递包装的成本为 $g(\rho_g) = m + \tau\rho_g^2$ 。

生产一件具有可回收性和耐用性的可循环快递包装的成本^①为

$$g(\delta, \rho_r) = m + \tau\rho_r^2 + \eta\delta^2 + d\delta\rho_r.$$

其中： τ 为提升可回收性的成本系数； η 为提升耐用性的成本系数； δ 为包装的耐用性， $\delta \in [-1, 1]$ ； d 为

耐用性和可回收性之间的关系系数，当 $d=0$ 时，表示耐用性和可回收性之间无相互影响关系，当 $d<0$ 时，表示耐用性和可回收性是相互促进的，当 $d>0$ 时，表示耐用性和可回收性是相互冲突的^[4, 14]。

假设 7 假设生产商提供不同类型快递包装时，消费者需求的变动均仅与价格相关，设为

$$Q_j = a - bp_j. \quad (1)$$

其中： Q_j 表示包装生产商仅提供类型 j 的包装时消费者的需求； p_j 为包装生产商仅提供一般快递包装与仅提供可循环快递包装时，消费者获取该类型快递包装与快递服务的价格（以下简称为快递价格）； a 为潜在的市场容量； b 为价格敏感系数，表示消费者对价格的敏感程度。

3 模型构建与求解

3.1 生产商仅提供一般快递包装

由于可循环快递包装的最大可使用次数为 n ，且本研究以包装生产商生产-销售-回收可循环快递包装为一个周期，因此仅生产一般快递的包装生产商利润函数为

$$\max_{\rho_g, w_g} P = (Q_g(w_g - g(\rho_g)) + Q_g v(\rho_g) \lambda_g) n. \quad (2)$$

其中：第一部分 $Q_g(w_g - g(\rho_g))$ 是由一般快递包装批发价格减去制造成本所得的销售利润；第二部分 $Q_g v(\rho_g) \lambda_g$ 为一般快递包装回收所得的残值（可为负）。

此时，快递企业的利润函数为

$$\max_{p_g} E = Q_g(p_g - w_g) n. \quad (3)$$

由于政府需要同时考虑到包装生产商、快递企业及消费者的利益，因此本研究利用加法型社会福利函数可得，当包装生产商仅提供一般快递包装时的社会福利为

$$W_g(Q_g) = P_g + E_g + U_g^c(Q_g). \quad (4)$$

其中： P_g 为包装生产商所能获得的利润； E_g 为快递企业所能获得的利润； $U_g^c(Q_g)$ 为消费者剩余。

采用逆向归纳法对模型进行求解，可得定理 1。

定理 1 包装生产商在仅提供一般快递包装时，包装的最佳可回收性、最佳批发价格、最佳快递价格

①由于耐用性和可回收性的回报是递减的，因此用二次函数形式来刻画其与成本的关系。

分别为

$$\rho_g^* = \frac{r\lambda_g}{2\tau},$$

$$w_g^* = \frac{4a\tau + 4bm\tau - 4bra\tau\lambda_g + 2br^2\beta\tau\lambda_g - br^2\lambda_g^2}{8b\tau},$$

$$p_g^{**} = \frac{1}{16} \left(4 \left(\frac{3a}{b} + m \right) + 2r(-2\alpha + r\beta)\lambda_g - \frac{r^2\lambda_g^2}{\tau} \right);$$

包装生产商与快递企业的最佳利润分别为

$$P^* = \frac{n(4(a-bm)\tau - 2br(-2\alpha + r\beta)\tau\lambda_g + br^2\lambda_g^2)^2}{128b\tau^2},$$

$$E^* = \frac{n(4(a-bm)\tau - 2br(-2\alpha + r\beta)\tau\lambda_g + br^2\lambda_g^2)^2}{256b\tau^2}。$$

证明 将式(1)代入式(3)可得

$$\max_{p_g} E = (a - bp_g)(p_g - w_g)n,$$

对 p_g 求一阶导数并令其等于零, 可得

$$p_g^* = \frac{a + bw_g}{2b}。$$

将 p_g^* 与式(1)代入式(2)得

$$\max_{p_g, w_g} P =$$

$$\frac{1}{4}n(a - bw_g)(2w_g + r\lambda_g(2\alpha - r\beta + 2\rho_g) - 2(m + \tau\rho_g^2))。$$

对 ρ_g 、 w_g 分别求一阶偏导数, 并令其等于零, 可得

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial \rho_g} = \frac{1}{4}n(a - bw_g)(-4\rho_g\tau + 2r\lambda_g) = 0, \\ \frac{\partial P}{\partial w_g} = \frac{1}{2}n(a + bm + b\tau\rho_g^2) - \\ \frac{1}{4}n(-4bw_g + br\lambda_g(-2\alpha + r\beta - 2\rho_g)) = 0。 \end{cases}$$

解得

$$\begin{cases} \rho_{g1}^* = \frac{r\lambda_g}{2\tau}, \\ w_{g1}^* = \frac{4a\tau + 4bm\tau - 4bra\tau\lambda_g + 2br^2\beta\tau\lambda_g - br^2\lambda_g^2}{8b\tau}; \\ \rho_{g2}^* = \frac{2br\lambda_g - \sqrt{4b^2r^2\lambda_g^2 + 8b\tau(2a - 2bm + 2bra\lambda_g - br^2\beta\lambda_g)}}{4b\tau}, \\ w_{g2}^* = \frac{a}{b}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \rho_{g3}^* = \frac{2br\lambda_g + \sqrt{4b^2r^2\lambda_g^2 + 8b\tau(2a - 2bm + 2bra\lambda_g - br^2\beta\lambda_g)}}{4b\tau}, \\ w_{g3}^* = \frac{a}{b}。 \end{cases}$$

将第二组与第三组代入式(3), 得包装生产商的最优利润为零, 不符合条件舍去。因此, 第一组解为包装生产商仅生产一般快递包装的最优解 ρ_g^* 、 w_g^* 。

将 w_g^* 代入 p_g^* 可得 p_g^{**} , 再分别将 ρ_g^* 、 w_g^* 、 p_g^{**} 代入式(2)和式(3)可得包装生产商与快递企业的最佳利润。定理1证毕。

3.2 包装生产商仅提供可循环快递包装

包装生产商仅提供可循环快递包装时, 其利润函数为

$$\max_{\delta, \rho_r, w_r} P = Q_r(w_r - g(\delta, \rho_r)) + Q_r v(\rho_r)\lambda_r。 \quad (5)$$

其中: 第一部分 $Q_r(w_r - g(\delta, \rho_r))$ 是由可循环快递包装批发价格减去制造成本所得的销售利润; 第二部分 $Q_r v(\rho_r)\lambda_r$ 为可循环快递包装回收所得的残值。

此时, 快递企业的利润函数为

$$\max_{p_r} E = Q_r \left(p_r - \frac{w_r}{n} \right) n。 \quad (6)$$

包装生产商仅提供可循环快递包装时的社会福利为

$$W_r(Q_r) = P_r + E_r + U_r^c(Q_r)。 \quad (7)$$

其中: P_r 为包装生产商所能获得的利润; E_r 为快递企业所能获得的利润; $U_r^c(Q_r)$ 为消费者剩余。

通过逆向归纳法对模型进行求解, 可得定理2。

定理2 包装生产商在仅提供可循环快递包装时, 包装的最佳耐用性、最佳可回收性、最佳批发价格、最佳快递价格分别为

$$\delta^* = \frac{dr\lambda_r}{d^2 - 4\eta\tau},$$

$$\rho_r^* = \frac{2r\eta\lambda_r}{-d^2 + 4\eta\tau},$$

$$w_r^* = \frac{1}{4} \left(2 \left(m + \frac{an}{b} \right) + r(-2\alpha + r\beta)\lambda_r + \frac{2r^2\eta\lambda_r^2}{d^2 - 4\eta\tau} \right),$$

$$P_r^{**} = \frac{(d^2 - 4\eta\tau)((2m - r(r\beta + 2\alpha)\lambda_r)b + 6an) + 2br^2\eta\lambda_r^2}{8bn(d^2 - 4\eta\tau)};$$

包装生产商与快递企业的最佳利润分别为

$$P^* = \frac{(2(bm - an)(d^2 - 4\eta\tau) + \leftarrow \frac{br(-2\alpha + r\beta)(d^2 - 4\eta\tau)\lambda_r + 2br^2\eta\lambda_r^2}{(d^2 - 4\eta\tau)^2}}{32bn} \rightarrow$$

$$E^* = \frac{(2(bm - an)(d^2 - 4\eta\tau) + \leftarrow \frac{br(-2\alpha + r\beta)(d^2 - 4\eta\tau)\lambda_r + 2br^2\eta\lambda_r^2}{(d^2 - 4\eta\tau)^2}}{64bn} \rightarrow$$

证明 将式(1)代入式(6)得

$$\max_{p_r} E = (a - bp_r) \left(p_r - \frac{w_r}{n} \right) n,$$

对 p_r 求一阶导数并令其等于零, 从而求得快递企业提供服务给消费者的最佳价格

$$p_r^* = \frac{an + bw_r}{2bn}.$$

将 p_r^* 代入式(1)后并代入式(5)可得

$$\max_{\delta, \rho_r, w_r} P = \frac{(an - bw_r)(2w_r + r\lambda_r(2\alpha - r\beta + 2\rho_r))}{4n} - \frac{2(an - bw_r)(m + \delta^2\eta + d\delta\rho_r + \tau\rho_r^2)}{4n}.$$

对 δ 、 ρ_r 、 w_r 分别求一阶偏导数并令其等于零, 可得

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial \delta} = -\frac{(an - bw_r)(2\delta\eta + d\rho_r)}{2n} = 0, \\ \frac{\partial P}{\partial \rho_r} = \frac{(an - bw_r)(2r\lambda_r - 2(d\delta + 2\tau\rho_r))}{4n} = 0, \\ \frac{\partial P}{\partial w_r} = \frac{bm + an + b\delta^2\eta + bd\delta\rho_r + b\tau\rho_r^2}{2n} - \frac{4bw_r + br\lambda_r(-2\alpha + r\beta - 2\rho_r)}{4n} = 0. \end{cases}$$

解得包装生产商在提供可循环快递包装时, 所决策的包装最佳耐用性、最佳可回收性以及最佳批发价格 δ^* 、 ρ_r^* 、 w_r^* 。

将 w_r^* 代入 p_r^* 可得 p_r^{**} 。再分别将 δ^* 、 ρ_r^* 、 w_r^* 、 p_r^{**} 代入式(5)和式(6)可得包装生产商与快递企业的最佳利润。定理2证毕。

根据定理1与定理2可得:

推论1 $P^* = 2E^*$ 。

推论1说明, 在包装生产商仅提供一般快递包装与包装生产商仅提供可循环快递包装两种情况下, 且在不考虑快递企业提供其他服务的成本时, 包装生产商作为博弈领导者, 其利润大于作为追随者的快递企业, 两者之间的利润为两倍关系。

该结果符合 Stackelberg 博弈中博弈领导者处于主导地位的特性。

4 相关结论与分析

推论2 ρ_j^* 是关于 r 和 λ_j 的增函数。

证明 将 ρ_g^* 分别对 r 和 λ_g 求一阶偏导数, 得

$$\frac{\partial \rho_g^*}{\partial r} = \frac{\lambda_g}{2\tau}, \quad \frac{\partial \rho_g^*}{\partial \lambda_g} = \frac{r}{2\tau};$$

将 ρ_r^* 分别对 r 和 λ_r 求一阶偏导数, 得

$$\frac{\partial \rho_r^*}{\partial r} = \frac{2\eta\lambda_r}{-d^2 + 4\eta\tau}, \quad \frac{\partial \rho_r^*}{\partial \lambda_r} = \frac{2\eta r}{-d^2 + 4\eta\tau}.$$

因为 $\lambda_g > 0$, $\lambda_r > 0$, $r > 0$, $\eta > 0$, $\tau > 0$, $4\eta\tau > d^2$, 所以 $\frac{\partial \rho_g^*}{\partial r} > 0$, $\frac{\partial \rho_g^*}{\partial \lambda_g} > 0$, $\frac{\partial \rho_r^*}{\partial r} > 0$, $\frac{\partial \rho_r^*}{\partial \lambda_r} > 0$ 。

推论2得证。

推论2说明, 随着包装回收率或包装收集率的上升, 包装生产商均会选择提高包装的可回收性。该结论与现实相符。例如在大部分实施EPR制度的国家, 牙膏只在其单独的容器中出售, 并无外包装^[15]。因此, 牙膏生产商在对牙膏包装进行回收时, 并不需要花费额外的成本来回收外包装, 从而降低了回收成本, 提高了可回收性。而包装回收率与包装收集率的上升, 对包装生产商来说需要回收的总量上升, 包装生产商为了提高包装回收的边际利润, 会选择提升包装的可回收性。

推论3 在 $d > 0$ 时, δ^* 是关于 r 与 λ_r 的减函数; 在 $d = 0$ 时, δ^* 的增减与 r 、 λ_r 无关; 在 $d < 0$ 时, δ^* 是关于 r 与 λ_r 的增函数。

证明 将 δ^* 分别对 r 、 λ_r 求一阶偏导数, 有

$$\frac{\partial \delta^*}{\partial r} = \frac{d\lambda_r}{d^2 - 4\eta\tau}, \quad \frac{\partial \delta^*}{\partial \lambda_r} = \frac{dr}{d^2 - 4\eta\tau},$$

其中, $4\eta\tau > d^2$ 。

当 $d = 0$ 时, $\frac{\partial \delta^*}{\partial r} = \frac{\partial \delta^*}{\partial \lambda_r} = 0$;

当 $d > 0$ 时, $\frac{\partial \delta^*}{\partial r} < 0$, $\frac{\partial \delta^*}{\partial \lambda_r} < 0$;

当 $d < 0$ 时, $\frac{\partial \delta^*}{\partial r} > 0$, $\frac{\partial \delta^*}{\partial \lambda_r} > 0$ 。

推论 3 得证。

推论 3 说明, 当耐用性和可回收性相互冲突时, 随着包装回收率与包装收集率的提高, 包装生产商会更倾向于提升包装的可回收性, 降低包装的耐用性。这是因为包装的可回收性与生产商利润之间有直接影响的关系——随着包装可回收性的提高, 包装生产商能从包装回收中获得更高的利润。例如包装生产商采用在包装外增加辅助材料的方式以增加包装的耐用性, 那么在 EPR 下, 包装生产商需要花费额外的人工成本将辅助材料与快递本身进行分离, 增加了回收的成本。包装回收率与包装收集率的提高即回收总量的提高, 包装生产商需要花费更高的成本对可循环快递包装进行回收, 此时, 包装生产商会更倾向于提高包装的可回收性, 降低包装的耐用性。

当耐用性与可回收性相互促进时, 随着包装回收率与包装收集率的提高, 包装生产商会同时提升包装的耐用性与可回收性。这是因为, 随着回收总量的提高, 包装生产商会优先选择提高包装的可回收性以降低回收成本, 而可回收性的提升会带动耐用性的提升。例如包装生产商采用增加包装厚度的方式提高包装的耐用性, 在提升耐用性的同时也会提高包装的可回收性。

推论 4

1) 当 $\alpha + \frac{r\lambda_g}{2\tau} > r\beta$ 时, w_g^* 与 p_g^{**} 是关于 r 的减函数。

2) 当 $\alpha + \frac{r\lambda_g}{2\tau} < r\beta$ 时, w_g^* 与 p_g^{**} 是关于 r 的增函数。

3) 当 $\alpha + \frac{r\lambda_g}{2\tau} > \frac{r\beta}{2}$ 时, w_g^* 与 p_g^{**} 是关于 λ_g 的减函数。

4) 当 $\alpha + \frac{r\lambda_g}{2\tau} < \frac{r\beta}{2}$ 时, w_g^* 与 p_g^{**} 是关于 λ_g 的增函数。

5) 当 $\alpha + \frac{2r\eta\lambda_r}{4\eta\tau - d^2} > r\beta$ 时, w_r^* 与 p_r^{**} 是关于 r 的

减函数。

6) 当 $\alpha + \frac{2r\eta\lambda_r}{4\eta\tau - d^2} < r\beta$ 时, w_r^* 与 p_r^{**} 是关于 r 的增函数。

7) 当 $2\alpha + \frac{4r\eta\lambda_r}{4\eta\tau - d^2} > r\beta$ 时, w_r^* 与 p_r^{**} 是关于 λ_r 的减函数。

8) 当 $2\alpha + \frac{4r\eta\lambda_r}{4\eta\tau - d^2} < r\beta$ 时, w_r^* 与 p_r^{**} 是关于 λ_r 的增函数。

证明 将 w_g^* 、 p_g^{**} 分别对 r 求一阶偏导数, 有

$$\frac{\partial w_g^*}{\partial r} = -\frac{\lambda_g(2(\alpha - r\beta)\tau + r\lambda_g)}{4\tau} = -\frac{\lambda_g}{2} \left(\alpha - r\beta + \frac{r\lambda_g}{2\tau} \right),$$

$$\frac{\partial p_g^{**}}{\partial r} = -\frac{\lambda_g(2(\alpha - r\beta)\tau + r\lambda_g)}{8\tau} = -\frac{\lambda_g}{4} \left(\alpha - r\beta + \frac{r\lambda_g}{2\tau} \right)。$$

当 $\alpha + \frac{r\lambda_g}{2\tau} > r\beta$ 时, $\frac{\partial w_g^*}{\partial r} < 0$, $\frac{\partial p_g^{**}}{\partial r} < 0$;

当 $\alpha + \frac{r\lambda_g}{2\tau} < r\beta$ 时, $\frac{\partial w_g^*}{\partial r} > 0$, $\frac{\partial p_g^{**}}{\partial r} > 0$ 。

将 w_g^* 、 p_g^{**} 分别对 λ_g 求一阶偏导数, 有

$$\frac{\partial w_g^*}{\partial \lambda_g} = \frac{r(-2\alpha\tau + r\beta\tau - r\lambda_g)}{4\tau} = -\frac{r}{2} \left(\alpha - \frac{r\beta}{2} + \frac{r\lambda_g}{2\tau} \right),$$

$$\frac{\partial p_g^{**}}{\partial \lambda_g} = \frac{r(-2\alpha\tau + r\beta\tau - r\lambda_g)}{8\tau} = -\frac{r}{4} \left(\alpha - \frac{r\beta}{2} + \frac{r\lambda_g}{2\tau} \right)。$$

当 $\alpha + \frac{r\lambda_g}{2\tau} > \frac{r\beta}{2}$ 时, $\frac{\partial w_g^*}{\partial \lambda_g} < 0$, $\frac{\partial p_g^{**}}{\partial \lambda_g} < 0$;

当 $\alpha + \frac{r\lambda_g}{2\tau} < \frac{r\beta}{2}$ 时, $\frac{\partial w_g^*}{\partial \lambda_g} > 0$, $\frac{\partial p_g^{**}}{\partial \lambda_g} > 0$ 。

将 w_r^* 、 p_r^{**} 分别对 r 求一阶偏导数, 有

$$\frac{\partial w_r^*}{\partial r} = \frac{\lambda_r}{2} \left(-\alpha + r\beta - \frac{2r\eta\lambda_r}{4\eta\tau - d^2} \right),$$

$$\frac{\partial p_r^{**}}{\partial r} = \frac{\lambda_r}{4n} \left(-\alpha + r\beta - \frac{2r\eta\lambda_r}{4\eta\tau - d^2} \right)。$$

当 $\alpha + \frac{2r\eta\lambda_r}{4\eta\tau - d^2} > r\beta$ 时, $\frac{\partial w_r^*}{\partial r} < 0$, $\frac{\partial p_r^{**}}{\partial r} < 0$;

当 $\alpha + \frac{2r\eta\lambda_r}{4\eta\tau - d^2} < r\beta$ 时, $\frac{\partial w_r^*}{\partial r} > 0$, $\frac{\partial p_r^{**}}{\partial r} > 0$ 。

将 w_r^* 、 p_r^{**} 分别对 λ_r 求一阶偏导数, 有

$$\frac{\partial w_r^*}{\partial \lambda_r} = \frac{r}{4} \left(-2\alpha + r\beta - \frac{4r\eta\lambda_r}{4\eta\tau - d^2} \right),$$

$$\frac{\partial p_r^{**}}{\partial \lambda_r} = \frac{r}{8n} \left(-2\alpha + r\beta - \frac{4r\eta\lambda_r}{4\eta\tau - d^2} \right).$$

当 $2\alpha + \frac{4r\eta\lambda_r}{4\eta\tau - d^2} > r\beta$ 时, $\frac{\partial w_r^*}{\partial \lambda_r} < 0$, $\frac{\partial p_r^{**}}{\partial \lambda_r} < 0$;

当 $2\alpha + \frac{2r\eta\lambda_r}{4\eta\tau - d^2} < r\beta$ 时, $\frac{\partial w_r^*}{\partial \lambda_r} > 0$, $\frac{\partial p_r^{**}}{\partial \lambda_r} > 0$ 。

推论 4 得证。

推论 4 说明, 随着包装回收率与包装收集率的上升, 包装生产商与快递企业对批发价格和快递价格的改变, 取决于包装中最有价值的部分 α 、包装可回收性 ρ_j , 以及随着包装回收率 (r) 的上升快递包装边际回收价值的下降程度 β 之间的关系。

当包装的总回收价值大于 0 时, 随着包装回收率与包装收集率的上升, 包装生产商与快递企业会倾向于降低价格, 提升销量。因为在此时, 包装生产商与快递企业还是有利可图的, 即可以通过回收总量的上升提高回收所得利润。

但当包装的总回收价值小于 0 时, 随着包装回收率与包装收集率的上升, 包装生产商与快递企业会倾向于提高批发价格和快递价格。因为在此时, 包装生产商与快递企业不仅无法从包装回收中获取更多的利润, 而且从包装回收中获得的利润还在持续下降, 因此, 在此时包装生产商与快递企业会倾向于提高批发价格和快递价格。

该结论与部分学者的结论相反, 如胡觉亮等^[8]认为, 随着政府所设定的回收再利用率的提升, 快递包装的批发价格会上升。这是因为本研究考虑了产品设计, 包装生产商可根据政府所设定的回收率改变其产品的可回收性, 而大部分研究中并没有考虑此因素。

5 数值算例

由于包装生产商的利润式过于复杂, 因此利用 Mathematica 软件对各个方程求近似解。又由于包装生产商利润是快递企业利润的两倍, 因此下文不对快递企业利润的变化进行具体分析。

针对包装生产商仅生产一般快递包装与仅生产可循环快递包装两种情况, 对可循环包装可使用次数 n 、包装回收率 r 和包装收集率 λ_j 的变化进行分析。其

中, g 代表仅生产一般快递包装的情况, r 代表仅生产可循环快递包装的情况。

根据各参数的实际意义和推论 4 的结论, 对相关参数进行设置, 如表 1 所示。

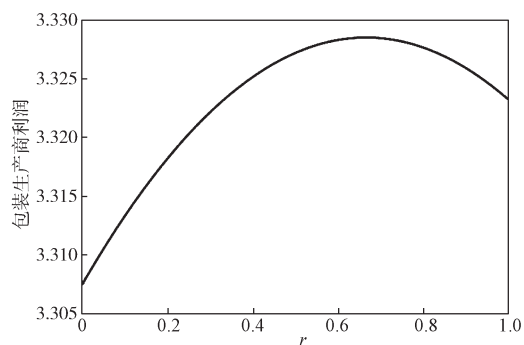
表 1 参数设置

Table 1 Parameters setting

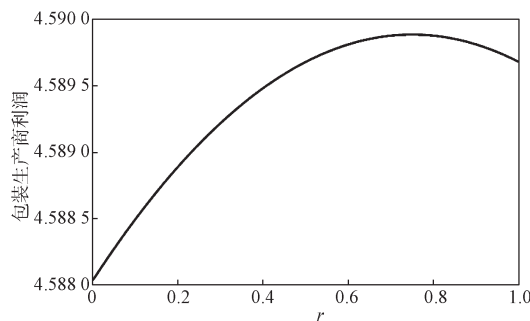
参数	a	b	α	β	η	τ	m	d	λ	n	r
取值	1	0.4	0.2	0.4	0.5	0.5	0.4	0.5	0.1	15	0.1

5.1 包装回收率变化

包装回收率 r 对包装生产商利润、社会福利的影响分别如图 2 和图 3 所示。



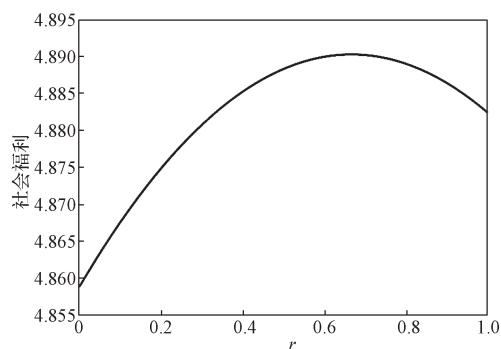
a) 情形 g



b) 情形 r

图 2 包装回收率对包装生产商利润的影响

Fig. 2 Impact of packaging recovery rate on the profits of packaging manufacturers



a) 情形 g

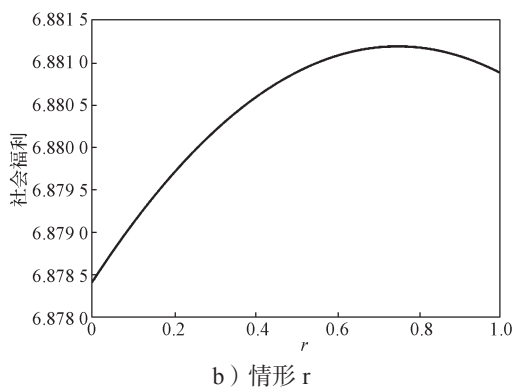


图3 包装回收率对社会福利的影响
Fig. 3 Impact of packaging recovery rate on social welfare

由图2可知,随着包装回收率的提高,包装生产商的利润在情形g和情形r下均呈先上升后下降的趋势,并在 $r=0.75$ 时到达利润的最大值;且在仅生产可循环快递包装时所能获得的利润比仅生产一般快递包装时的高。

由图3可知,随着包装回收率的提高,社会福利在情形g和情形r下的变化趋势与包装生产商利润变化的趋势相同,也呈先上升后下降的趋势。

因此,从企业利润、环境保护以及社会福利的角度来看,生产可循环快递包装都是最优的选择。且由图2和图3可知,政府在设定包装回收率时,不应一味地追求高回收率以达到环境保护的最终目的,而应该综合考虑企业利润与社会福利,以在实现环境保护的同时达到消费者、政府与企业的三赢局面。

5.2 包装可使用次数变化

包装可使用次数对包装生产商利润的影响如图4所示。

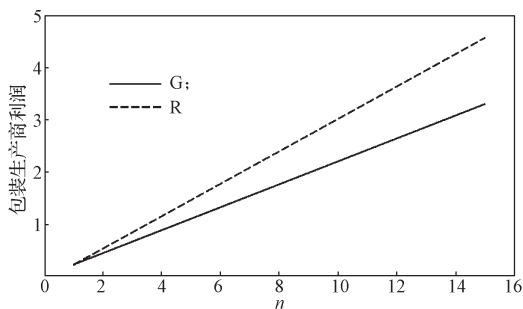


图4 包装可使用次数对包装生产商利润的影响
Fig. 4 Impact of packaging usable times on the profits of packaging manufacturers

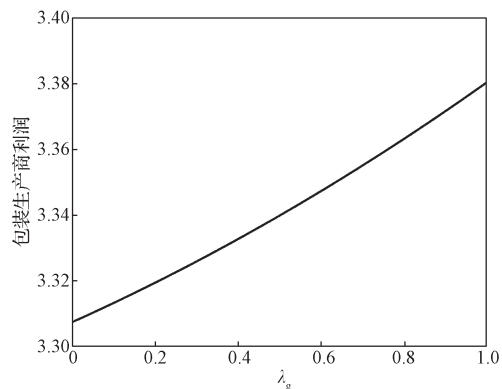
由图4可知,随着可循环快递包装可使用次数的增加,情形g和情形r下的包装生产商利润均得到

了提高。但情形r下包装生产商的利润显然高于情形g下的,且二者之间的差距随着可使用次数的增大而增大。这是因为,随着可循环快递包装的可使用次数增加,情形r下的包装生产商只需要支付一次的生产成本,而情形g下的包装生产商需要支付多次的生产成本。

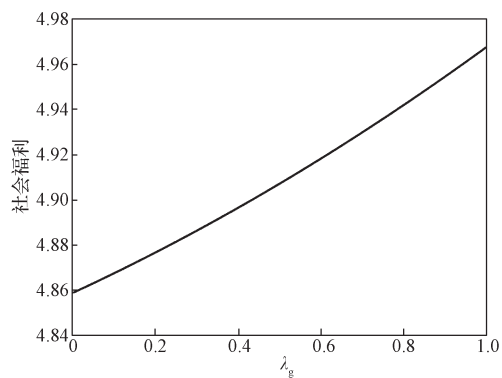
5.3 包装收集率变化

包装生产商仅生产一般快递包装时,包装收集率对包装生产商利润和社会福利的影响如图5所示。

由图5可知,随着包装收集率的上升,包装生产商利润与社会福利都呈上升趋势。



a) 包装生产商利润



b) 社会福利

图5 情形g下包装收集率对包装生产商利润与社会福利的影响

Fig. 5 Impact of packaging collection rate on the profit of packaging manufacturers and social welfare in case g

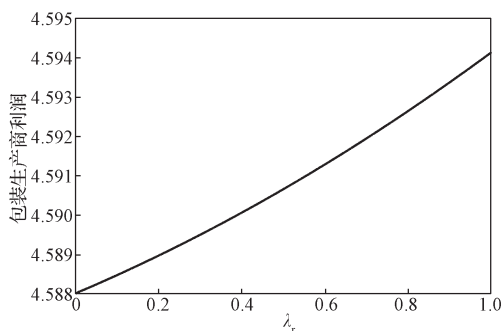
包装生产商仅提供可循环快递包装时,包装收集率对包装生产商利润和社会福利的影响如图6所示。

由图6可知,在情形r下,包装收集率的上升会导致包装生产商利润与社会福利的上升。

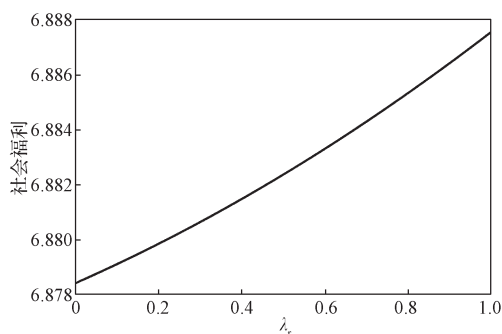
对比图5和图6可知,随着一般快递包装与可循环快递包装的包装收集率的上升,包装生产商利润与

社会福利均会上升；但一般快递包装收集率的上升对利润与社会福利的影响更大。当 λ_g 从0上升到1时，包装生产商的利润从3.307 50上升至3.380 35；而当 λ_r 从0上升到1时，包装生产商的利润仅从4.588 03上升至4.594 14。仅生产一般快递包装时，包装生产商对快递包装的收集意愿会高于仅生产可循环快递包装时的。

因此，从包装总回收量的角度来看，政府如果想引导包装生产商生产可循环快递包装，则需要采取一定措施来保证包装收集率。



a) 包装生产商利润



b) 社会福利

图6 情形r下包装收集率对包装生产商与社会福利的影响

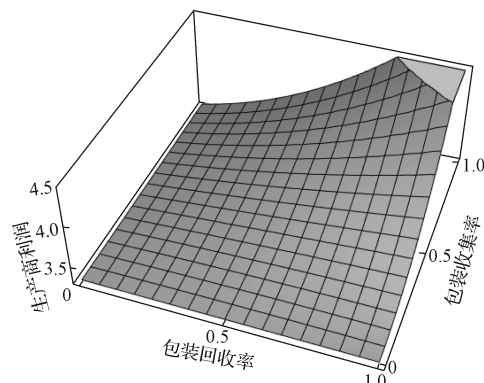
Fig. 6 Impact of packaging collection rate on the profit of packaging manufacturers and social welfare in case r

5.4 包装回收率与包装收集率同时变化

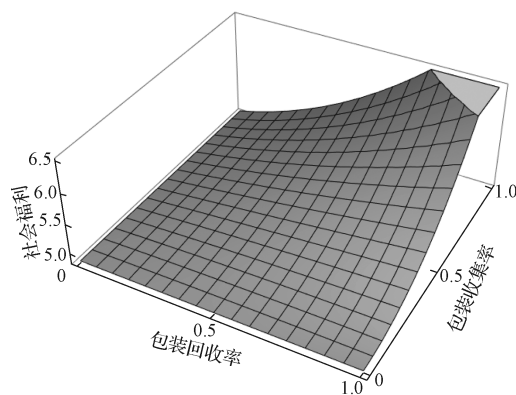
由于包装回收总量同时受到包装回收率与包装收集率的影响，因此需研究包装回收率与包装收集率，对包装生产商利润与社会福利的联合影响。结果如图7和图8所示。

由图7和图8可知，无论在情形g或情形r下，当包装回收率或包装收集率为0时，包装生产商利润和社会福利均不会发生改变。这是因为，包装回收总

量同时由这两个变量控制，当其中一个变量为0时，包装回收总量即为0。



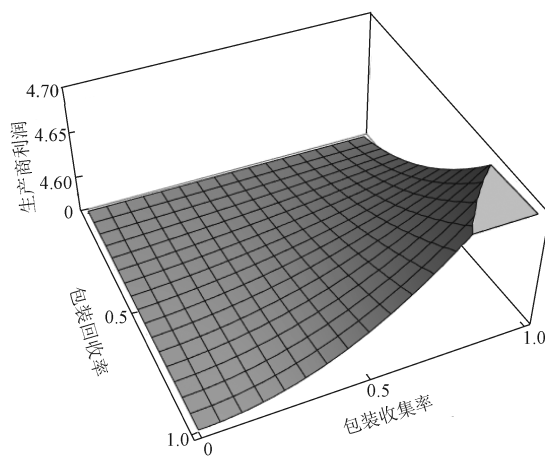
a) 包装生产商利润



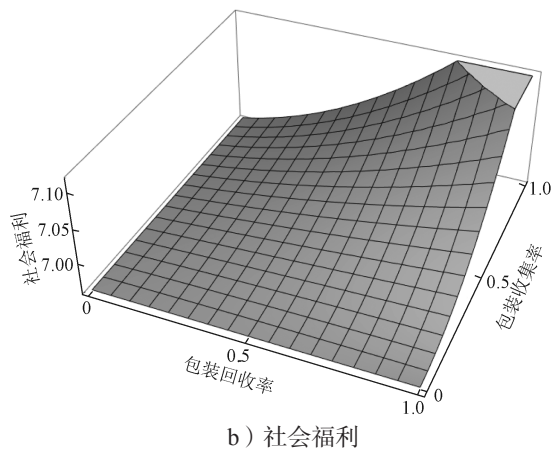
b) 社会福利

图7 情形g下包装回收率与包装收集率对包装生产商利润与社会福利的联合影响

Fig. 7 Combined impact of packaging recovery rate and packaging collection rate on the profits of packaging manufacturers and social welfare in case g



a) 包装生产商利润



b) 社会福利

图 8 情形 r 下包装回收率与包装收集率对包装生产商利润与社会福利的联合影响

Fig. 8 Combined impact of packaging recovery rate and packaging collection rate on the profits of packaging manufacturers and social welfare in case r

结合图 2 和图 3、图 5 和图 6 可知, 在情形 g 和情形 r 下, 包装回收率与包装收集率的提升均会导致包装生产商利润与社会福利的提升, 且这一点在图 7 和图 8 中也得到了体现——随着包装回收率与包装收集率的上升, 包装生产商利润与社会福利都得到了提高。

6 结论

综上所述可得以下结论:

1) 包装回收率上升, 包装的最佳可回收性上升。最佳耐用性的改变取决于耐用性与可回收性之间的关系: 当耐用性与可回收性相互冲突时, 包装回收率上升, 最佳耐用性下降; 当耐用性与可回收性无关时, 包装回收率不影响最佳耐用性的改变; 当耐用性与可回收性相互促进时, 包装回收率上升最佳耐用性上升。

2) 包装收集率的改变对包装设计的影响与包装回收率相同, 两者的上升均代表着需要回收总量上升。

3) 仅生产可循环快递包装时, 包装生产商的利润与社会福利高于仅生产一般快递包装时的; 但包装生产商对包装的收集意愿低于仅生产一般快递包装时的。

参考文献:

- [1] WALLS M. Extended Producer Responsibility and Product Design: Economic Theory and Selected Case Studies[EB/OL]. [2022-01-02]. <https://www.semanticscholar.org/paper/Extended-Producer-Responsibility-and-Product-Theory-Walls/bf7484164191b567557cf994a8d867b304510ec1>.
- [2] GU F, GUO J F, HALL P, et al. An Integrated Architecture for Implementing Extended Producer Responsibility in the Context of Industry 4.0[J]. International Journal of Production Research, 2019, 57(5): 1458-1477.
- [3] ATASU A. Operational Perspectives on Extended Producer Responsibility[J]. Journal of Industrial Ecology, 2019, 23(4): 744-750.
- [4] HUANG X, ATASU A, TOKTAY L B. Design Implications of Extended Producer Responsibility for Durable Products[J]. Management Science, 2019, 65(6): 2573-2590.
- [5] BROUILLAT E, OLTRA V. Extended Producer Responsibility Instruments and Innovation in Eco-Design: An Exploration Through a Simulation Model[J]. Ecological Economics, 2012, 83: 236-245.
- [6] 刘克宁, 宋华明. EPR 制度下废弃电子产品回收的低碳研发激励机制研究[J]. 控制与决策, 2017, 32(4): 656-664.
LIU Kening, SONG Huaming. Low-Carbon R & D Incentive Mechanism Based on EPR System for E-Waste Product Recycling[J]. Control and Decision, 2017, 32(4): 656-664.
- [7] 户佐安, 贾叶子. 基于 EPR 的废旧电器闭环供应链博弈分析[J]. 工业工程, 2020, 23(6): 35-41, 67.
HU Zuoan, JIA Yezi. A Game Analysis of Closed-Loop Supply Chain of Waste Electrical Appliances Based on EPR[J]. Industrial Engineering Journal, 2020, 23(6): 35-41, 67.
- [8] 胡觉亮, 钱聪丽, 韩曙光. 政府奖惩机制下的快递包装回收问题研究[J]. 浙江理工大学学报(社会科学版), 2019, 42(3): 223-231.
HU Jueliang, QIAN Congli, HAN Shuguang. Research on Express Packaging Recovery Under the Government Reward-Punishment Mechanism[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Social Sciences Edition), 2019, 42(3): 223-231.
- [9] 许凤连, 罗子灿, 罗定提. 生产商回收下包装尺寸决策研究[J]. 包装学报, 2019, 11(4): 53-61.
XU Fenglian, LUO Zican, LUO Dingti. Study on Decision-Making of Package Size Under Manufacturer Recovery[J]. Packaging Journal, 2019, 11(4): 53-61.
- [10] 罗子灿, 崔杰, 罗定提, 等. 零售商回收模式下

- 收益共享契约和包装尺寸决策研究 [J]. 包装学报, 2020, 12(6): 59-69.
- LUO Zican, CUI Jie, LUO Dingti, et al. Revenue Sharing Contract and Packaging Size Decision Under Retailer Recycling Model[J]. Packaging Journal, 2020, 12(6): 59-69.
- [11] JIN L, KIM B C. An Essay on Sharing Express Box Under Sharing Logistics[J]. Journal of Information and Operations Management, 2019, 29(2): 9-36.
- [12] XU Y, ZHAO P T, LIU P Q, et al. Study on Optimization of Recycling Mode of Shared Express Box[J]. Journal of Applied Science and Engineering Innovation, 2020, 7(2): 81-83.
- [13] 何 波, 段雪苇. 可重复利用的快递包装回收模式研究 [J]. 包装学报, 2021, 13(5): 27-34.
- HE Bo, DUAN Xuewei. Research on Recycling Mode of Reusable Express Packaging[J]. Packaging Journal, 2021, 13(5): 27-34.
- [14] KRISHNAN V, ZHU W. Designing a Family of Development-Intensive Products[J]. Operations Research: Management Science, 2007, 47(2): 133-135.
- [15] Adele Peters. Companies in Maine will Now Have to Pay to Help Fix the Broken Recycling System[EB/OL]. [2022-01-14]. <https://www.fastcompany.com/90655072/maine-companies-will-now-have-to-pay-to-help-fix-the-broken-recycling-system>.
- (责任编辑: 邓光辉)

Selection and Design Strategy of Express Packaging under Extended Producer Responsibility

LUO Zican^{1,2}, TONG Caiyin^{1,2}, LUO Dingti¹

(1. College of Business, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Hunan Province Packaging Economy Research Base, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Based on the extended producer responsibility (EPR), a supply chain optimization decision-making model is established from two factors of recyclability and durability in packaging design. Two modes of packaging are studied and compared, one is that packaging manufacturers only provide general express packaging or only provide recyclable express packaging. The results show that with the improvement in packaging recovery rate, packaging manufacturers will improve the recyclability of express packaging, while the durability of recyclable express packaging needs to take into consideration of the relationship between durability and recyclability. When durability and recyclability are synergistic, durability will rise accordingly, while durability will decline when durability and recyclability conflict with each other. When only producing recyclable express packaging, the profit of packaging manufacturers and social welfare are always higher than those when only producing general express packaging, but the incentive for packaging collection for packaging manufacturers is lower than that when only producing general express packaging.

Keywords: extended producer responsibility; recyclable express packaging; packaging recycling; packaging design