Operations Research and Fuzziology 运筹与模糊学, 2024, 14(2), 536-546
Published Online April 2024 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/orf
https://doi.org/10.12677/orf.2024.142158

Hans汉斯

考虑互惠偏好与回收努力的包装闭环供应链决策研究

徐子阳

江南大学商学院，江苏 无锡

收稿日期：2024年2月17日；录用日期：2024年3月8日；发布日期：2024年4月18日

摘 要

随着全球经济的快速发展和国内电子商务的蓬勃兴起，快递行业已经深深地融入了当今商业生活的方方面面。本文通过构建由快递企业负责回收，快递包装制造商作为领导者、快递企业为追随者的二级供应链。研究结果表明：集中决策下的利润均高于分散决策下快递包装制造商与快递企业的利润。快递包装制造商与快递企业的利润与互惠系数呈正相关关系，快递包装制造商和快递企业的利润与回收努力敏感系数呈正相关关系。

关键词

博弈论，闭环供应链，互惠偏好，回收努力水平

Research on Closed-Loop Supply Chain Decision Making for Product Packaging Considering Reciprocal Preferences and Recycling Efforts

Ziyang Xu

School of Business, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu

Received: Feb. 17th, 2024; accepted: Mar. 8th, 2024; published: Apr. 18th, 2024

Abstract

With the rapid development of the global economy and the flourishing of domestic e-commerce,

文章引用: 徐子阳. 考虑互惠偏好与回收努力的包装闭环供应链决策研究[J]. 运筹与模糊学, 2024, 14(2): 536-546.
DOI: 10.12677/orf.2024.142158

the express delivery industry has deeply integrated into various aspects of modern commercial life. This paper adopts the Stackelberg game method to construct a closed-loop supply chain in which the courier packaging manufacturer is the leader, the express delivery enterprises is the follower, and the express delivery enterprises is responsible for recycling. The results show that the profits under centralised decision-making are higher than those under decentralised decision-making between express packaging manufacturers and express delivery enterprises. The profits of express packaging manufacturers and express delivery enterprises are positively correlated with the reciprocity coefficient, and the profits of express packaging manufacturers and express delivery enterprises are positively correlated with the sensitivity coefficient of recycling efforts.

Keywords

Game Theory, Closed-Loop Supply Chain, Reciprocal Preference, Recycling Effort

1. 引言

2021 年，《“十四五”循环经济发展规划》中明确提到“十四五”期间，快递包装绿色转型推进行动是国家大力发展循环经济的重点行动之一，这对于快递行业与电商行业的绿色发展提出了新的要求。随着全球经济的快速发展和电子商务的蓬勃兴起，快递行业已经深深地融入了当今商业生活的方方面面。随着消费者购物习惯的巨大转变，互联网已经成为获取商品的主要途径，而快递服务则扮演着商品流通的关键角色。从一个小小的网购点击到在家门口收到快递包裹，快递行业无疑成为了现代生活不可或缺的一部分。

然而，随着电商的繁荣，快递包裹数量的急剧增加也引发了一系列与环境相关的问题。其中，快递纸盒的回收和再利用问题尤为突出。快递纸盒作为常见的包装材料之一，在方便快捷的商品配送后，往往被轻易丢弃，而其大量的废弃引发了环境资源的浪费和环境污染的担忧。这种现象不仅影响了生态平衡和资源利用效率，也挑战着人类对可持续发展的追求。在此背景下，关注和解决快递纸盒回收和再利用的问题变得尤为迫切和重要。

在以往关于快递包装回收的研究中，Huabo Duan (2019) [1]提出了建立健全的包装回收制度，并鼓励使用可回收的快递包装的建议。相比之下，刘文良(2018) [2]认为，为了确保快递运营商和消费者正确使用可回收包装，出台法律法规以限制可回收包装的使用和回收标准是必行之举。秦鹏等人(2021) [3]分析了现有快递包装回收制度存在的问题及原因，并提出了更新立法理念和提高政策法规执行力的建议。朱晨等(2020) [4]构建博弈模型，通过讨论线上与线下回收模式共存、并且废旧产品回收质量不同的情形，并比较集中决策与分散决策得出，在由零售商主导下的废旧产品闭环供应链的最优策略，从而进一步通过收益共享—成本共担机制对利润水平进行协调。朱晓东等(2017) [5]通过构建由制造商、零售商以及线上回收商组成的闭环供应链，得出结论：在闭环供应链分散决策模式下会产生双重边际化问题，而通过收益共享—成本共担协调机制能够有效改善双重边际问题。

谢萍萍和李芳(2019) [6]构建了第三方负责回收的闭环供应链模型，并且考虑制造商和零售商之间存在互惠偏好的情况，并探讨了在互惠偏好行为下制造商与零售商利润变化，以及不同的策略选择对整个供应链的影响。田立平等(2020) [7]建议政府可以通过建立生产者责任，从而进一步鼓励快递服务商进行

快递包装的回收工作。Xia 等(2018) [8]通过引入低碳意识与互惠偏好，得出结论：在决策中最优零售价格与零售商和制造商的互惠性呈负相关，最优批发价格与零售商的互惠性呈正相关关系，与制造商的互惠性成负相关关系。郑克俊等人(2022) [9]通过构建斯坦伯格博弈模型，发现在集中决策模式下的利益要高于分散决策下的利益，并且通过收益共享契约能够明显提升供应链的系统利润。

王秀艳等人(2016) [10]通过构建商户与回收商的博弈模型，表明了回收宣传的重要性，并探讨了不同主体承担回收宣传对上下游企业的影响。王银河和王旭(2013) [11]研究了零售商投入回收努力时，市场规模、再制造成本以及回收努力发生扰动时的最优定价和数量折扣契约协调下的决策结果。张凤鸣(2013) [12]则在零售商负责回收的情况下，考察了销售努力、回收努力以及风险偏好共同作用下闭环供应链的最优努力水平和定价决策，并提出了努力成本共担契约进行协调的方法。

基于此，本文针对快递回收闭环供应链中的问题，以快递包装制造商和快递企业为研究对象，通过引入互惠利他行为与回收努力水平，构建了斯坦伯格博弈模型。并运用逆向归纳法求解，以探讨快递包装制造商和快递企业在闭环供应链中的定价策略和系统最佳盈利策略。

2. 基本假设与模型建立

2.1. 博弈主体及参数设置

快递包装制造商以约定好的批发价格 P_1 将生产出的快递包装批发给快递企业，在使用过程中，快递企业以拟定好的零售价格 P_2 卖给消费者。快递企业会设置各自的快递站点，当消费者取完快递，可以将无用的快递包装盒返还给快递站点，从而获得回收价格 P_3。

其基本假设如下：

假设 H_1：制造商与快递企业之间是以制造商为领导者、快递企业为追随者的 Stackelberg 博弈关系，制造商与快递企业均为独立的决策者，并且均追求自身利益最大化。

假设 H_2：快递包装的市场需求量是快递企业销售单价的线性减函数，快递企业回收快递包装的数量是快递企业支付给消费者回收转移价格的线性增函数。

假设 H_3：考虑到快递企业的回收努力水平，假设快递企业构建互联网回收平台系统、app 维护运营等需要成本，以及为了提高快递包装回收率采用网络宣传、线下宣传等方式产生的成本。快递企业回收努力成本为 C，$C=\frac{1}{2}\beta\varepsilon^2$，$e>0$，表示快递企业付出的回收努力水平，且 $\beta>0$，表示对应的努力因子，因此可以得到回收量与回收努力水平之间的关系，产品包装回收量的表达式为：$G=Q+\alpha P_3+\gamma\varepsilon$。

假设 H_4：假设市场上对于快递包装需求量为 Q，且 $Q=a-bP_2$，a、b 为常数，P_2 为快递企业出售给消费者的零售价。

参数设定见表 1。

2.2. 集中决策下的博弈

在集中决策的模式下，以供应链整体的利益最大化为目标，且各供应链成员不存在互惠偏好，此时快递包装制造商与快递企业是一个利益整体。其中变量上标“d”表示在集中决策下的情形；下标“sc”表示集中决策下整个供应链的利润。那么，供应链节点企业在集中决策的系统下，其供应链总利润的决策模型为：

$$
\begin{aligned}
\Pi_{sc}^{d} &= \left(P_2-P_1\right)\cdot\left(a-b\cdot P_2\right)+\left(P_3-P_4\right)\cdot\left(Q+h\cdot P_4+\gamma\cdot\varepsilon\right)-\frac{1}{2}\cdot\beta\cdot\left(\varepsilon\right)^2 \\
&+\left(P_1-C_1\right)\cdot\left(a-b\cdot P_2\right)+\left(C_1-C_2\right)\cdot\varphi\cdot\left(Q+h\cdot P_4+\gamma\cdot\varepsilon\right) \\
&-\left(1-\varphi\right)\cdot C_5\cdot\left(Q+h\cdot P_4+\gamma\cdot\varepsilon\right)-P_3\cdot\left(Q+h\cdot P_4+\gamma\cdot\varepsilon\right)
\end{aligned}
$$

Table 1. Parameters and their meanings
表 1. 参数设定及含义

参数	意义及说明
P_1	制造商给快递企业的批发价
P_2	快递企业给消费者的零售价
P_3	制造商向快递企业支付的回收价格，且为了保证回收动力，且 $P_3 > P_4$
P_4	快递企业向消费者支付的回收转移价格
C_1	制造商生产新包装付出的成本
C_2	制造商的单位再利用成本
C_5	快递制造商处理不可利用包装的处理成本
C	快递企业搭建回收平台并进行宣传所需的成本， $C=\frac{1}{2}\beta e^2$
β	表示对应的回收成本努力因子，
ε	表示快递企业付出的回收努力水平包括搭建以及维护回收平台系统等做出的努力
Q	没有回收努力下的回收量，即当回收努力 $\gamma e=0$ 时，消费者自愿返还的量
γ	回收努力敏感系数
D	快递包装的市场需求量， $D=a-bP_2$
G	快递包装的回收量 $G=Q+hP_4+\gamma\varepsilon$ 可用的回收量为： φG ，回收量中的不可用的部分： $(1-\varphi)G$
h	回收价格弹性系数，快递包装的回收量为快递企业回收价格的增函数
λ	互惠系数，即因利他而产生的利己回报
a	市场容量，常数，为正数
b	价格敏感系数 >0，常数
φ	回收的快递包装中可再利用的比例，即所回收快递包装的可再利用率

对 Π_{sc}^d 分别求利润函数关于 P_2 的一阶导数与二阶偏导数，可得： $\frac{\partial\pi_r}{\partial P_2}=(C_1-2P_2)b+a$ ， $\frac{\partial^2\pi_r}{\partial P_2^2}=-2b$

因为 $\frac{\partial^2\pi_r}{\partial P_2^2}=-2b<0$ ，故集中决策下的供应链利润函数是关于销售价格 P_2 的凹函数，因此函数有最大值。求解得到

$$P_2^d=\frac{c_1b+a}{2b}$$

随后，对其利润函数分别求关于 P_4 和 e 的一阶偏导并另其值为零，得到 Hessian 矩阵行列式

$$\begin{vmatrix}\frac{\partial^2\pi_{sc}^d}{\partial P_4^2} & \frac{\partial^2\pi_{sc}^d}{\partial\varepsilon\partial P_4}\\ \frac{\partial^2\pi_{sc}^d}{\partial P_4\partial\varepsilon} & \frac{\partial^2\pi_{sc}^d}{\partial\varepsilon^2}\end{vmatrix}=\begin{vmatrix}-2h & -\gamma\\ -\gamma & -\beta\end{vmatrix}=2\beta h-\gamma^2>0$$

令其一阶导数等于零可求解得出：

$$e^d=-\frac{\gamma\left(h\varphi C_1-h\varphi C_2+h\varphi C_5-C_5h+Q\right)}{-2\beta h+\gamma^2}，\ P_4^d=\frac{\left(C_1-C_2+C_5\right)\left(\beta h-\gamma^2\right)\varphi+\left(-C_5h-Q\right)\beta+C_5\gamma^2}{2\beta h-\gamma^2}$$

将上式代入回收量、需求量以及整体的供应链利润函数可得：

$$\Pi_{sc}^d=\frac{\left(-\left(\left(C_1-C_2+C_5\right)\varphi-C_5\right)^2h^2+\left(-2\left(C_1-C_2+C_5\right)Q\varphi+\left(-4bP_2+4a\right)C_1+4P_2^2b+2C_5Q-4P_2a\right)h-Q^2\right)\beta-2\gamma^2\left(C_1-P_2\right)\left(-bP_2+a\right)}{-4\beta h+2\gamma^2}$$

$$D_{sc}^d=-b\,P_2+a，\ G_{sc}^d=\frac{h\left(\left(\left(C_1-C_2+C_5\right)\varphi-C_5\right)h+Q\right)\beta}{2\beta h-\gamma^2}$$

2.3. 分散决策下的博弈

假设在市场中，快递包装制造商、快递企业均以自身利益最大为目标，闭环供应链各成员博弈满足Stackelberg 结构，制造商作为主导者，快递企业作为跟随者。在该情形下，为了便于区分，对相关变量加上不同上标。其中变量上标“YY”表示同时考虑互惠偏好与回收努力水平的模型。

快递企业与快递包装制造商的利润函数为：

$$\Pi_r^{YY}=\left(P_2-P_1\right)\cdot\left(a-b\cdot P_2\right)+\left(P_3-P_4\right)\cdot\left(Q+h\cdot P_4+\gamma\cdot\varepsilon\right)-\frac{1}{2}\cdot\beta\cdot\left(\varepsilon\right)^2$$

$$\Pi_m^{YY}=\left(P_1-c_1\right)\cdot\left(a-b\cdot P_2\right)+\left(c_1-c_2\right)\cdot\varphi\cdot\left(Q+h\cdot P_4+\gamma\cdot\varepsilon\right)-\left(1-\varphi\right)\cdot c_5\cdot\left(Q+h\cdot P_4+\gamma\cdot\varepsilon\right)-p_3\cdot\left(Q+h\cdot P_4+\gamma\cdot\varepsilon\right)$$

快递包装制造商的效用函数为：$U_m^{YY}=\Pi_m+\lambda\cdot\Pi_r$。

对 Π_r^{YY} 求关于销售价格 P_2^{YY} 的一阶、二阶导数可得：

$$\frac{\partial\pi_r^{YY}}{\partial P_2}=\left(P_1-2P_2\right)b+a，\ \frac{\partial^2\pi_r^{YY}}{\partial P_2^2}=-2b<0$$

故快递公司的利润函数是关于销售价格 P_2 的凹函数，因此存在唯一销售价格 P_2 使得电商平台的利润最大。令 $\frac{\partial\pi_r^{YY}}{\partial P_2}=0$ 求解得到：$P_2^{YY}=\frac{P_1b+a}{2b}$。

对回收转移价格 p_4^{YY} 和回收努力水平 ε^{YY} 求一阶导数和二阶偏导数，可求得海塞矩阵为：

$H_r=\begin{bmatrix}\frac{\partial^2\Pi_r^{YY}}{\partial P_4{}^2} & \frac{\partial^2\Pi_r^{YY}}{\partial\varepsilon\partial P_4}\\ \frac{\partial^2\Pi_r^{YY}}{\partial P_4^{YY}\partial\varepsilon} & \frac{\partial^2\Pi_r^{YY}}{\partial\varepsilon^2}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-2\,h & -\gamma\\ -\gamma & -\beta\end{bmatrix}=2h\beta-\gamma^2$，当 $2h\beta-\gamma^2>0$ 时，是负定矩阵，因此，即当前模型存在唯一最优解。令 $\frac{\partial\Pi_r^{YY}}{\partial P_4}=0$，$\frac{\partial\Pi_r^{YY}}{\partial\varepsilon^{YY}}=0$，联立求解可得：

$$\varepsilon^{YY}=\frac{\gamma\left(p_3h+Q\right)}{-2\beta h+\gamma^2}，\ P_4^{YY}=\frac{-\beta hp_3+\gamma^2p_3+Q\beta}{-2\beta h+\gamma^2}$$

将 ε^{YY}、p_2^{YY} 与 p_4^{YY} 代入快递包装制造商的效用函数 $U_m^{YY}=\Pi_m+\lambda\cdot\Pi_r$，对 p_1^{YY} 和 p_3^{YY} 求一阶导数与二阶偏导数，可得出海塞矩阵为：$H_m=\begin{bmatrix}\frac{\left(\lambda-2\right)b}{2} & 0\\ 0 & \frac{\left(\lambda-2\right)h^2\beta}{2\beta h-\gamma^2}\end{bmatrix}=\frac{\left(\lambda-2\right)^2bh^2\beta}{2\left(2\beta h-\gamma^2\right)}>0$，由于其海塞矩阵为负

定，因此可令其一阶导数为零，并且联立求解可得

$$P_1^{YY}=\frac{a\lambda-c_1b-a}{b(\lambda-2)},\quad P_3^{YY}=\frac{\left(\left(-c_1+c_2-c_5\right)\varphi+c_5\right)h-Q(\lambda-1)}{h(\lambda-2)}$$

将批发价格 P_1 和回收转移价格 P_3 回代至 ε^{YY} 、 p_2^{YY} 与 p_4^{YY} 和可得

$$P_2^{YY}=\frac{2a\lambda-c_1b-3a}{2b(\lambda-2)},\quad \varepsilon^{YY}=\frac{\left(\left(\left(c_1-c_2+c_5\right)\varphi-c_5\right)h+Q\right)\gamma}{(\lambda-2)\left(2\beta h-\gamma^2\right)}$$

$$p_4^{YY}=\frac{-\beta\left(\left(c_1-c_2+c_5\right)\varphi-c_5\right)h^2+\left(\left(\left(c_1-c_2+c_5\right)\varphi-c_5\right)\gamma^2-2\left(\lambda-\frac{3}{2}\right)Q\beta\right)h+Q\gamma^2(\lambda-1)}{(\lambda-2)h\left(2\beta h-\gamma^2\right)}$$

此时最优回收量与市场需求量分别为：

$$D^{YY}=\frac{\left(a-bC_1\right)\left(-(1+\lambda)^2+\left(\lambda\sigma_m+\sigma_r\right)\left(\sigma_m+\lambda\sigma_r\right)\right)}{-4(1+\lambda)^2+2\left(1+\lambda+\lambda\sigma_m+\sigma_r\right)\left(\sigma_m+\lambda\sigma_r\right)}$$

$$G^{YY}=\frac{\left(Q+e\gamma+h\varphi\left(C_1-C_2\right)+h(-1+\varphi)C_5\right)\left(-(1+\lambda)^2+\left(\lambda\sigma_m+\sigma_r\right)\left(\sigma_m+\lambda\sigma_r\right)\right)}{-4(1+\lambda)^2+2\left(1+\lambda+\lambda\sigma_m+\sigma_r\right)\left(\sigma_m+\lambda\sigma_r\right)}$$

将以上求出的最优批发价格、零售价格、快递包装制造商的回收转移价格、快递企业的回收努力水平以及快递企业的回收转移价格分别代入利润函数 Π_m 与 Π_r 中，可得到快递包装制造商与快递企业的利润表达式：

$$\Pi_r^{YY}=\frac{c_1^2\left(2\beta h-\gamma^2\right)b^2+2\left(\left(\left(\left(\left(c_1-c_2+c_5\right)\varphi-c_5\right)^2h^2+2\left(\left(c_1-c_2+c_5\right)Q\varphi-Qc_5-ac_1\right)h+Q^2\right)\beta+ac_1\gamma^2\right)b+2a^2\beta h-a^2\gamma^2\right)}{8(\lambda-2)^2b\left(\beta h-\frac{\gamma^2}{2}\right)}$$

$$\Pi_m^{YY}=-\frac{\left(c_1^2\left(\beta h-\frac{\gamma^2}{2}\right)b^2+\left(\left(\left(\left(c_1-c_2+c_5\right)\varphi-c_5\right)^2h^2+\left(2\left(c_1-c_2+c_5\right)Q\varphi-2Qc_5-2ac_1\right)h+Q^2\right)\beta+ac_1\gamma^2\right)b+a^2\left(\beta h-\frac{\gamma^2}{2}\right)\right)(\lambda-1)}{2(\lambda-2)^2b\left(\beta h-\frac{\gamma^2}{2}\right)}$$

最终可求出快递包装制造商与快递企业的效用函数为：

$$U_m^{YY}=\frac{c_1^2\left(-2\beta h+\gamma^2\right)b^2+2\left(\left(-\left(\left(c_1-c_2+c_5\right)\varphi-c_5\right)^2h^2+2\left(-\left(c_1-c_2+c_5\right)Q\varphi+Qc_5+ac_1\right)h-Q^2\right)\beta-ac_1\gamma^2\right)b-2a^2\beta h+a^2\gamma^2}{8(\lambda-2)b\left(\beta h-\frac{\gamma^2}{2}\right)}$$

2.4. 引入成本共担契约协调

基于上述研究结论，在由快递包装制造商和快递企业组成的二级供应链系统中，一方面分散决策情况中各成员追求自身利益最大化。另一方面由于不共享信息与资源，会使得分散决策的利润低于集中决策的利润，并且快递包装制造商的利润要高于快递企业的利润。

因此为提高分散决策下各成员与供应链系统的整体利润，引入了成本共担契约，以契约的形式约束双方展开深度合作，该契约强制作为主导角色的快递包装制造商协助快递企业共担回收努力成本，设快

递企业分摊回收努力成本比例为 θ，即成本共担系数，快递包装制造商协助快递企业分摊的促销努力成本为$(1-\theta)$，满足$0<\theta<1$。

此时，快递包装制造商和快递企业的利润函数分别为：

$$\Pi_r^D=(P_2-P_1)\cdot(a-b\cdot P_2)+(P_3-\theta\cdot P_4)\cdot(Q+h\cdot P_4+\gamma\cdot\varepsilon)-\theta\cdot\frac{1}{2}\cdot\beta\cdot(\varepsilon)^2$$

$$U_m^D=\left((P_2-P_1)(-bP_2+a)+(-\theta P_4+P_3)(\gamma\varepsilon+hP_4+Q)-\frac{\theta\beta\varepsilon^2}{2}\right)\lambda+(P_1-P_1)(-bP_2+a)+(c_1-c_2)\varphi(\gamma\varepsilon+hP_4+Q)$$
$$-(1-\varphi)c_5(\gamma\varepsilon+hP_4+Q)-p_3(\gamma\varepsilon+hP_4+Q)-(1-\theta)P_4(\gamma\varepsilon+hP_4+Q)-\frac{(1-\theta)\beta\varepsilon^2}{2}$$

对Π_r^D求关于P_2、P_4和ε的一阶导数得到：

$$\frac{\partial\pi_r^D}{\partial P_2}=(P_1-2P_2)b+a,\quad\frac{\partial\pi_r^D}{\partial P_4}=(-\gamma\varepsilon-2hP_4-Q)\theta+P_3h,\quad\frac{\partial\pi_r^D}{\partial\varepsilon}=(-\theta P_4+P_3)\gamma-\theta\beta\varepsilon$$

可判断存在目标函数海塞矩阵负定，因此令一阶导数等于零并求解可得：

$$P_2^D=\frac{P_1b+a}{2b},\quad P_4^D=\frac{\theta Q\beta-p_3h\beta+\gamma^2p_3}{\theta(-2\beta h+\gamma^2)},\quad\varepsilon^D=\frac{\gamma(\theta Q+P_3h)}{\theta(-2\beta h+\gamma^2)}$$

为了使得成本共担协调机制能够尽量达到集中决策时的水平，所以令$P_2^D=P_2^{SC}$、$P_4^D=P_4^{SC}$、$\varepsilon^D=\varepsilon^{SC}$。

可得：$P_2^D=\dfrac{c_1b+a}{2b}$，$\varepsilon^D=\dfrac{\gamma\left(\left((c_1-c_2+c_5)\varphi-c_5\right)h+Q\right)}{2\beta h-\gamma^2}$

$$P_4^D=\frac{(c_1-c_2+c_5)(\beta h-\gamma^2)\varphi+(-c_5h-Q)\beta+c_5\gamma^2}{2\beta h-\gamma^2}$$

此时可求出批发价格与快递包装制造商给予快递企业的回收转移价格为：

$$P_1^D=c_1,\quad P_3^D=(c_1\varphi-c_2\varphi+c_5\varphi-c_5)\theta$$

将以上求出的最优批发价格、零售价格、快递包装制造商的回收转移价格、快递企业的回收努力水平以及快递企业的回收转移价格分别代入快递包装制造商U_m^D与Π_r^D中，可得到快递包装制造商与快递企业的利润表达式：

$$\Pi_r^D=\frac{\left(\left(b^2hc_1^2+\left(\theta\left((c_1-c_2+c_5)\varphi-c_5\right)^2h^2+\left(2Q\left((c_1-c_2+c_5)\varphi-c_5\right)\theta-2ac_1\right)h+Q^2\theta\right)b+a^2h\right)\beta-\frac{\gamma^2(-c_1b+a)^2}{2}\right)\left(\beta h-\frac{\gamma^2}{2}\right)}{b(2\beta h-\gamma^2)^2}$$

$$\Pi_m^D=-\frac{\left(\left((c_1-c_2+c_5)\varphi-c_5\right)h+Q\right)^2\beta(-1+\theta)}{4\beta h-2\gamma^2}$$

3. 仿真分析

为了验证结论，进行数值验算。结合快递包装回收的实际状况并参考文献[13]，将部分参数设定为固定值，可得到如下结论。

3.1. 互惠系数 λ 与回收努力敏感系数 γ 对利润的影响

根据图 1 可知，同时考虑快递包装制造商互惠偏好和快递企业回收努力的情况下，快递包装制造商

的互惠偏好始终会使得双方的收益保持上升趋势，快递包装制造商与快递企业的利润随着互惠偏好程度的增加而增加，然而快递包装制造商的利润要始终高于快递企业，并且快递企业的利润随着制造商互惠偏好增长而增长的幅度并不明显。在此种情况下，互惠偏好会使得快递包装制造商再考虑自身利益的同时，也关注快递企业的利润。

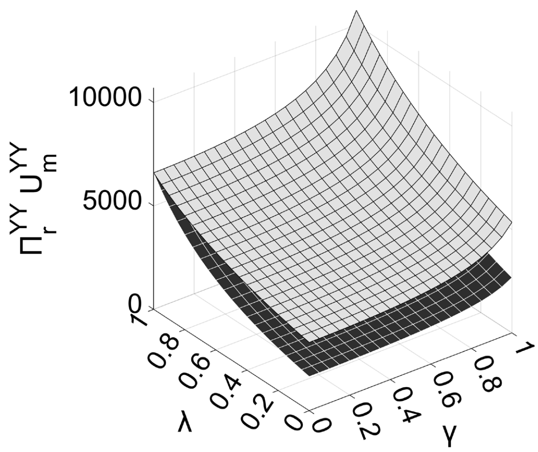

Figure 1. Impact of reciprocity coefficient λ and recycling effort sensitivity coefficient γ on express firms and express packaging manufacturers
图 1. 互惠系数 λ 与回收努力敏感系数 γ 对快递企业与快递包装制造商的影响

3.2. 回收努力敏感系数 γ 对快递包装制造商和快递企业利润的影响

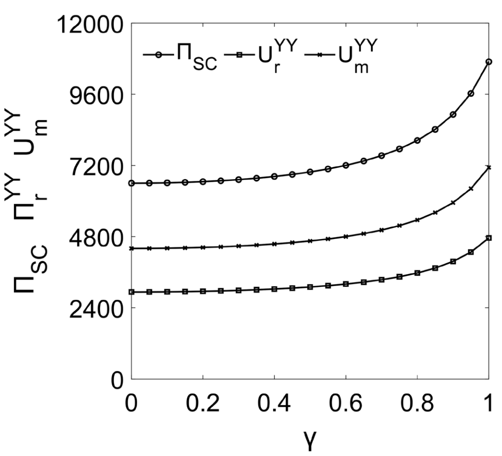

Figure 2. The impact of the sensitivity coefficient of recycling effort γ on the profits of express delivery companies and express packaging manufacturers
图 2. 回收努力敏感系数 γ 对快递企业与快递包装制造商利润的影响

由图 2 可知，其他参数不变，随着回收价格敏感系数的增大，集中决策下供应链的利润、分散决策下快递包装制造商与快递企业的利润都呈上升趋势。

增大回收价格敏感系数可能会提高快递包装的回收价格，从而激发了整个供应链对回收的积极性。在集中决策下，供应链的整体效益随之增加，因为更高的回收价格刺激了更多的快递包装回流到回收系统中。而在分散决策模型中，快递包装制造商和快递企业可能更积极合作以追求更高的回收价格。回收价格敏感系数的增大使得双方在决策过程中更关注回收价值，促进了彼此的合作，最终提高了整体利润。

高回收价格敏感系数会对闭环回收供应链产生积极影响。制造商和快递企业可能更倾向于投资于回收设施、提高回收效率，以应对高回收价格的激励。

3.3. 分析与讨论

命题一：无论何种决策模型，快递企业以及快递包装制造商的利润、快递企业向消费者支付的回收转移价格 P_4、快递企业付出的回收努力水平 ε、回收量 G、集中决策下供应链整体利润均与回收的快递包装中可再利用的比例 φ 呈正相关。即随着回收快递包装中可再利用的比例 φ 的增加，P_4^{SC}、P_4^{YY}、ε^{SC}、ε^{YY}、G^{SC}、G^{YY}、$\prod_{SC}$、$\prod_r^{YY}$、U_m^{YY} 均增加。

证明：不同决策模型下，快递企业向消费者支付的回收转移价格、回收努力水平、回收量、供应链整体利润、快递包装制造商利润、快递企业利润对可再利用的比例 φ 求一阶偏导数为：

$$\frac{\partial P_4^{SC}}{\partial\varphi}=\frac{(c_1-c_2+c_5)(\beta h-\gamma^2)}{2\beta h-\gamma^2}>0,\quad \frac{\partial P_4^{YY}}{\partial\varphi}=\frac{-\beta(c_1-c_2+c_5)h^2+(c_1-c_2+c_5)\gamma^2 h}{(\lambda-2)h(2\beta h-\gamma^2)}>0,$$

$$\frac{\partial\varepsilon^{SC}}{\partial\varphi}=\frac{\gamma(c_1-c_2+c_5)h}{2\beta h-\gamma^2}>0,\quad \frac{\partial\varepsilon^{YY}}{\partial\varphi}=-\frac{(c_1-c_2+c_5)h\gamma}{(\lambda-2)(2\beta h-\gamma^2)}>0,$$

$$\frac{\partial G^{SC}}{\partial\varphi}=\frac{\beta(c_1-c_2+c_5)h^2}{2\beta h-\gamma^2}>0,\quad \frac{\partial G^{YY}}{\partial\varphi}=-\frac{(c_1-c_2+c_5)(-\beta h+\gamma^2)}{(\lambda-2)(-2\beta h+\gamma^2)}>0$$

$$\frac{\partial\prod_{SC}}{\partial\varphi}=\frac{\left(2\left((c_1-c_2+c_5)\varphi-c_5\right)h^2(c_1-c_2+c_5)+2(c_1-c_2+c_5)Qh\right)\beta}{4\left(\beta h-\frac{\gamma^2}{2}\right)}>0,$$

$$\frac{\partial\prod_r^{YY}}{\partial\varphi}=\frac{\left(2\left((c_1-c_2+c_5)\varphi-c_5\right)h^2(c_1-c_2+c_5)+2(c_1-c_2+c_5)Qh\right)\beta}{4(\lambda-2)^2\left(\beta h-\frac{\gamma^2}{2}\right)}>0,$$

命题二：无论何种决策模型，快递企业付出的回收努力水平 ε、回收量 G、集中决策下供应链整体利润、快递企业的利润以及快递包装制造商的利润均与回收努力成本因子 β 呈负相关。即随着回收努力因子 β 增加，P_4^{SC}、P_4^{YY}、ε^{SC}、ε^{YY}、G^{SC}、G^{YY}、$\prod_{SC}$、$\prod_r^{YY}$、U_m^{YY} 均减少。快递企业向消费者支付的回收转移价格 P_4 与回收努力成本因子 β 呈正相关。

证明：

$$\frac{\partial P_4^{SC}}{\partial\beta}=-\frac{\left(\left((c_1-c_2+c_5)\varphi-c_5\right)h+Q\right)\gamma^2}{(\lambda-2)(2\beta h-\gamma^2)^2}>0,\quad \frac{\partial P_4^{YY}}{\partial\beta}=-\frac{\left(\left((c_1-c_2+c_5)\varphi-c_5\right)h+Q\right)\gamma^2}{(\lambda-2)(2\beta h-\gamma^2)^2}>0,$$

$$\frac{\partial\varepsilon^{SC}}{\partial\beta}=-\frac{2\gamma\left(\left((c_1-c_2+c_5)\varphi-c_5\right)h+Q\right)h}{(2\beta h-\gamma^2)^2}<0,\quad \frac{\partial\varepsilon^{YY}}{\partial\beta}=\frac{2\left(\left((c_1-c_2+c_5)\varphi-c_5\right)h+Q\right)\gamma h}{(\lambda-2)(2\beta h-\gamma^2)^2}<0,$$

$$\frac{\partial G^{SC}}{\partial\beta}=-\frac{2\gamma\left(\left((c_1-c_2+c_5)\varphi-c_5\right)h+Q\right)h}{(2\beta h-\gamma^2)^2}<0,$$

$$\frac{\partial G^{YY}}{\partial \beta}=-\frac{2\left(\left(\frac{(c_1-c_2+c_5)\varphi}{2}-\frac{c_5}{2}+p_3\lambda-2p_3\right)h+Q\left(\lambda-\frac{3}{2}\right)\right)\gamma^2 h}{(\lambda-2)\left(2\beta h-\gamma^2\right)^2}<0$$

$$\frac{\partial \Pi_{SC}}{\partial \beta}=-\frac{\gamma^2\left(\left((c_1-c_2+c_5)\varphi-c_5\right)h+Q\right)^2}{2\left(2\beta h-\gamma^2\right)^2}<0,\quad \frac{\partial \Pi_r^{YY}}{\partial \beta}=-\frac{\left(\left((c_1-c_2+c_5)\varphi-c_5\right)h+Q\right)^2\gamma^2}{8\left(\beta h-\frac{\gamma^2}{2}\right)^2(\lambda-2)^2}<0,$$

$$\frac{\partial U_m^{YY}}{\partial \beta}=\frac{\left(\left((c_1-c_2+c_5)\varphi-c_5\right)h+Q\right)^2\gamma^2}{8\left(\beta h-\frac{\gamma^2}{2}\right)^2(\lambda-2)}<0$$，证毕。

4. 结论与启示

本文通过构建由快递企业负责回收，快递包装制造商作为领导者、快递企业为追随者的闭环供应链，得出在集中决策下供应链整体的利润最高，且互惠偏好与回收努力水平均对供应链成员的利益有正向影响。

以往运用博弈论研究供应链相关问题的文献中，通常假设供应链成员均为完全理性，忽略了决策者在制定策略时的非理性因素。因此本文的创新点在于引入了互惠偏好，决策者在做决定时，除了关注自身得失外，还会考虑互惠偏好的行为动机。并且引入回收方的回收努力水平，同时考虑互惠偏好与回收努力水平对非理性情境下的博弈，使得博弈情境更加符合实际决策者的心理状态与快递包装回收市场现状，对于闭环供应链中的决策制定提供更全面、更贴近实际情况的视角。

然而，本研究仍存在一些研究不足。首先，本文的模型构建基于市场需求稳定的假设，而实际情况中，快递包装的市场需求常受到随机波动的影响。其次，本文深入研究了零售商，但未对回收渠道的细节进行深入研究，这在实践中可能会带来局限性。

未来的研究可以在以下方面展开：首先，在考虑市场需求时，应添加随机扰动项以反映市场需求的不确定性，从而使模型更加贴近实际情况。其次，可以探讨互惠闭环供应链的定价策略和协调方法，以更全面地应对市场的不稳定性，并促进闭环供应链的可持续发展。

参考文献

[1] Duan, H.B., *et al*. (2019) Post-Consumer Packaging Waste from Express Delivery in China. *Resources*, *Conservation and Recycling*, **144**, 137-143. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.037

[2] 刘文良. 推进我国快递包装立法的思考[J]. 中州学刊, 2018(3): 62-66.

[3] 秦鹏, 徐海俊. 快递包装物回收利用的制度困境与规范进路[J]. 南通大学学报(社会科学版), 2021, 37(2): 109-121.

[4] 朱晨, 张骥骧. 考虑零售商双渠道和回收品质量的闭环供应链定价与协调[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(11): 3318-3328. https://doi.org/10.13196/j.cims.2021.11.024

[5] 朱晓东, 吴冰冰, 王哲. 双渠道回收成本差异下的闭环供应链定价策略与协调机制[J]. 中国管理科学, 2017, 25(12): 188-196.

[6] 谢萍萍, 李芳. 基于第三方回收模式考虑互惠偏好的闭环供应链决策分析[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(8): 2359-2362, 2387.

[7] 田立平, 孙群, 李文龙. 基于系统动力学的促进废旧家电环保化回收的策略模型[J]. 中国管理科学, 2020, 28(5): 167-175.

[8] Xia, L., Guo, T., Qin, J., *et al*. (2018) Carbon Emission Reduction and Pricing Policies of a Supply Chain Considering Reciprocal Preferences in Cap-and-Trade System. *Annals of Operations Research*, **268**, 149-175. https://doi.org/10.1007/s10479-017-2657-2

[9] 郑克俊, 翟小可, 李锦莹. 快递包装混合回收闭环供应链决策与协调[J]. 包装工程, 2022, 43(21): 224-231.

[10] 王秀艳, 曲英, 武春友. 基于回收宣传与回收努力下上下游联合回收微分博弈模型研究[J]. 软科学, 2016, 30(5): 119-124.

[11] 王银河, 王旭. 需求和回收努力扰动下闭环供应链定价与协调[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(7): 1975-1978, 1982.

[12] 张凤鸣. 基于零售商努力和风险偏好的闭环供应链协调研究[J]. 商业时代, 2013(7): 28-30.

[13] 吴洁, 车晓静, 盛永祥, 等. 基于三方演化博弈的政产学研协同创新机制研究[J]. 中国管理科学, 2019, 27(1): 162-173.