授权再制造模式下的闭环供应链 RFID 技术采纳决策研究

李文川[1]，张安琪[2]，肖 潇[2]

（1. 南昌航空大学文法学院，南昌 330063；2. 南昌航空大学经济管理学院，南昌 330063）

摘要：在授权再制造模式下，考虑碳税和消费者低碳偏好双重背景驱动，结合 RFID（射频识别）技术能够消除误回收率这一特性，构建分散决策和集中决策下采纳 RFID 技术前后的 3 个模型。结果表明：当 RFID 单位标签成本高、误回收率低时，只要碳税税率与消费者低碳偏好满足一定条件，原制造商和授权再制造商采纳该技术后的利润仍会高于采纳前。消费者低碳偏好越高，碳税税率上调对新产品产量的抑制作用越强，反之则相对平缓；当低碳偏好趋近 1 时，碳税每增加一个单位，再制品产量会显著提升；碳税与消费者低碳偏好对单位授权费用的影响呈相反作用，且在高偏好场景下，碳税增加对授权费用的削弱效应更显著。供应链总利润较低主要有两种情形：一是高碳税与低偏好并存，企业成本高却缺乏市场收益；二是消费者低碳偏好极低，即便碳税为零，利润也处于低位，企业减排动力不足。

关键词：碳税；消费者低碳偏好；授权再制造；RFID（射频识别）技术；闭环供应链

中图分类号：F274 **文献标志码**：A **文章编号**：1671－1807(2026)17－0192－12

随着全球资源与环境压力的持续加剧，循环经济理念已逐步成为制造业转型升级的核心指引[1]。在此背景下，授权再制造作为闭环供应链中再制造环节的规范化发展形式，依托原始设备制造商的技术与品牌优势，规范再制造活动、挖掘废旧产品残余价值，实现经济效益与环境效益的统一[2]。然而，传统的再制造活动往往面临废旧产品回收效率低、逆向物流信息不对称等问题，尤其是误回收情况频频发生，不仅增加了企业运营成本，也削弱了再制造的环保优势[3]。射频识别（radio frequency identification，RFID）技术通过在产品全生命周期中嵌入标签，能够实时追踪产品使用历史、损耗状态及型号信息，从而在回收环节实现精准筛选[4]，大幅降低误回收率，提高再制造系统运行效率。与此同时，政策与市场的双重驱动，使得闭环供应链向低碳化、规范化升级：政府推广碳税政策提高了企业碳排放成本，促使企业在供应链全环节更加注重低碳化发展[5]；而消费者对低碳产品的偏好，则为再制造产品（以废旧产品为基础，经过专业修复改造后，性能与质量达到原型新产品标准的循环复用产品，后文简称再制品）带来了差异化竞争优势，提升了市场需求潜力[6]。综上，在碳税约束与消费者低碳偏好背景下，闭环供应链高质量发展迫在眉睫。闭环供应链在何时采纳 RFID 技术，协调各要素关联，实现资源循环与经济效益的协同，成为亟待研究的重要课题。

碳税、消费者低碳偏好对闭环供应链成员决策行为的影响研究已成为当前该领域的热点议题。在碳税背景下，王丹等[7]建立了非线性整数规划模型，探讨碳税和排放控制区政策下的集装箱班轮航线配船优化与减排策略选择问题；蒋晓等[8]构建了包含碳排放约束的双寡头 Bertrand 博弈模型，探讨私营企业在碳税和减排补贴政策下的动态竞争行为；Zhao 等[9]构建了一个包含上游废弃物产生制造商和下游废弃物利用制造商的博弈模型，分析了碳税政策下产业共生的经济可行性与环境绩效。在消费者具有低碳偏好背景下，缪文清等[10]以区块链信息传递功能和消费者低碳偏好为双重基础，构建 Stackelberg 博弈模型，探究区块链技术对逆向供应链碳减排和定价的影响；熊波等[11]针对制造商减排

收稿日期：2026-04-15

基金项目：国家自然科学基金项目（71961021）；江西省高校人文社会科学研究规划项目（GL25101）

作者简介：李文川（1983—），男，重庆人，博士，教授，研究方向为智慧物流与低碳闭环供应链管理；张安琪（2000—），女，江西抚州人，硕士研究生，研究方向为闭环供应链管理；肖潇（2001—），女，江西赣州人，硕士研究生，研究方向为闭环供应链管理。

效率信息非对称情景,结合碳配额交易机制和消费者低碳偏好,研究零售商如何通过激励机制设计促使制造商披露真实减排效率;Wang 等[12]明确绿色供应链的决策框架,探讨渠道竞争和消费者低碳偏好如何影响供应链定价和融资决策。然而,针对碳税与消费者低碳偏好的协同影响研究仍较为匮乏。

闭环供应链中废旧产品的回收质量不确定性是再制造产业发展的核心瓶颈,现有研究广泛探讨了 RFID 技术在提升供应链透明度与运营效率方面的价值。Zhou 和 Piramuthu[13]提出 RFID 的单品级自动识别能力能够有效解决回收过程中的信息不对称问题;Usama 和 Ramish[14]进一步强调,RFID 使产品在闭环供应链中的可视性成为可能,有效克服了产品退货过程中的不确定性问题。国内学者在此基础上开展了大量量化研究。张李浩等[15]构建了资金约束零售商的 RFID 投资决策模型,对比贸易信贷和银行融资两种模式,揭示了自有资金、库存错放率与标签成本对供应链均衡策略的影响;杨宏林等[16]量化了 RFID 库存损耗恢复率和标签成本对技术采纳阈值的作用,并设计收益分享契约实现了资金约束供应链的协调;杨惠霄等[17]系统分析了收入共享、谈判批发价等多种协调机制,明确了议价能力对上下游企业 RFID 投资动机的调节效应。近年来,RFID 与新兴技术的融合成为研究热点。陆琪鹏等[18]提出了区块链赋能的 RFID 供应链产品所有权转移方案(blockchain-enabled product ownership transfer scheme,BPOTS);冯颖等[19]对比分析了 RFID 与区块链技术对授权渠道产品价格和需求的差异化影响。上述研究均隐含假设回收质量可被准确识别,未考虑误回收现象的影响。事实上,传统检测的局限性不仅导致误回收普遍存在,增加了一系列不必要的成本,还会造成产能浪费。现有研究忽略这一关键现实问题,其 RFID 采纳决策结论与实际运营场景存在偏差。故将误回收率作为核心参数纳入决策模型,系统分析 RFID 消除误回收的内在机制,弥补了现有研究在回收质量识别准确性维度的理论空白。

因此,在授权再制造模式下,基于政府推行碳税、消费者具备低碳偏好的双重背景,结合 RFID 技术能够有效消除误回收率这一特点,深入探究闭环供应链的 RFID 技术采纳决策问题。运用 Stackelberg 博弈理论和逆向归纳法,分别构建并求解分散决策和集中决策下的采纳决策模型。通过均衡分析和算例仿真,明确闭环供应链采纳 RFID 技术的条件,并进一步剖析单位标签成本、碳税税率和消费者低碳偏好对授权再制造模式下闭环供应链的影响。

1 问题描述与基本假设

以单一原制造商与单一授权再制造商构成的闭环供应链为研究对象,围绕 RFID 技术采纳决策展开分析。该供应链系统形成了明确的专业化分工:原制造商承担新产品的生产与市场销售核心职能,经其授权的专业再制造商,专职负责废旧产品的回收、再制造与再制品销售全流程工作,双方通过原制造商向授权再制造商收取授权费用完成收益分配。从外部约束与市场特征来看,政府对两类主体均征收碳税,消费者群体存在差异化的低碳偏好。在此背景下,原制造商和授权再制造商需共同决策是否同时采纳 RFID 技术,以应对内部分工协作与外部环境约束的双重需求。授权再制造模式流程如图 1 所示。符号及其含义说明见表 1。

为了便于研究,提出如下假设。

(1)针对终端消费者行为,设定如下基础规则:品质一致的新产品与再制品所对应消费者的支付意愿存在差异,新产品支付意愿 V 服从 $[0,Q]$ 的均

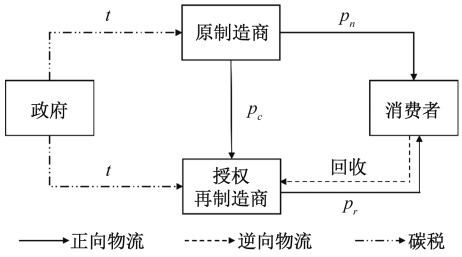


图 1 授权再制造模式流程

表 1 符号及其含义说明

符号	含义	符号	含义
p_n^i	单位新产品的零售价格	p_r^i	单位再制品的零售价格
q_n^i	新产品需求	q_r^i	再制品需求
p_c^i	单位再制品的授权费用	c_n	单位新产品的生产成本
c_r	单位再制品的生产成本($c_n > c_r$)	c_d	单位环保废弃成本
e_n	单位新产品的碳排放量	e_r	单位再制品的碳排放量
Q	市场容量	α	误回收率($0 \le \alpha < 1$)
k	回收的难易程度($k > 0$)	t	碳税税率
γ	消费者低碳偏好系数($0 < \gamma < 1$)	g	单位标签成本
π_j^i	i 模型下企业 j 的利润函数	$M/T/S$	原制造商/授权再制造商/闭环供应链

匀分布，再制品支付意愿为 γV[20]。参考文献[21]，新产品与再制品的消费者效用函数分别为 $U_n = V - p_n^i$ 和 $U_r = \gamma V - p_r^i$。当购买新产品效用更大时（$U_n \geqslant U_r$），消费者选择新产品；反之，则选择再制品。经过计算得到逆需求函数：

$$p_n^i = Q - q_n^i - \gamma q_r^i \tag{1}$$

$$p_r^i = \gamma(Q - q_n^i - q_r^i) \tag{2}$$

(2)在回收过程中，回收方可能会回收不符合再制造标准的废旧产品，造成误回收[3]的现象。当该情况发生时，回收方需支付额外的环保废弃成本 c_d。假设回收方误回收的概率为 α，该情况只发生在采纳 RFID 技术前，理论上采纳 RFID 技术后可以消除误回收率，即闭环供应链采纳 RFID 技术后，$\alpha = 0$。

(3)新产品不存在误回收的情况，故假设新产品需求即为产量，而再制品产量则需排除误回收的情况，为 $q_r^i(1-\alpha)$。

(4)随着回收数量的持续增长，回收的难度也逐渐增强，假设回收成本为 $\frac{1}{2}kq_r^{i2}$[22-23]。

(5)参考文献[24]，当产品产量较大时，采用 RFID 技术的决策主要受变动成本（标签成本）的影响，故而模型仅考虑采纳该技术所花费的标签成本 g，忽略前期固定部署成本 G。由于固定成本属于沉没成本，不影响企业边际定价和产量决策，后续将通过敏感性分析验证模型合理性。

2　模型建立与求解

2.1　分散决策下供应链 RFID 技术采纳前的决策模型（*N* 模型）

分散决策情形下，构建采纳 RFID 技术前的 Stackelberg 博弈模型。具体博弈顺序为：①原制造商先决定新产品的产量（q_n^N）和再制品的单位授权费用（p_c^N）；②根据原制造商的决策，授权再制造商再决定再制品的产量（q_r^N）。

原制造商的利润函数为

$$\max_{q_n^N, p_c^N} \pi_M^N = (p_n^N - c_n - te_n)q_n^N + p_c^N q_r^N(1-\alpha) \tag{3}$$

授权再制造商的利润函数为

$$\max_{q_r^N} \pi_T^N = (p_r^N - p_c^N - c_r - te_r)q_r^N(1-\alpha) - \frac{1}{2}kq^{N2}_r - \alpha q_r^N c_d \tag{4}$$

定理 1：在授权再制造模式下，分散决策下的供应链采纳 RFID 技术前，闭环供应链 N 模型的利润函数为严格凹函数，存在唯一最优解，使得闭环供应链成员利润最大。

原制造商和授权再制造商的最优策略如下：

$$q_n^{N^*} = \{\gamma(2-\alpha)[F-(1-\alpha)\gamma Q] + 2(2\gamma - 2\alpha\gamma + k)(Q - c_n - te_n)\}/[4(2\gamma - 2\alpha\gamma + k) - \gamma^2(2-\alpha)^2] \tag{5}$$

$$q_r^{N^*} = \frac{\gamma(2-\alpha)(c_n + te_n) - \alpha\gamma Q - 2F}{4(2\gamma - 2\alpha\gamma + k) - \gamma^2(2-\alpha)^2} \tag{6}$$

$$p_n^{N^*} = \{[4\gamma - 4\alpha\gamma + 2k - (2-\alpha)\gamma^2](Q + c_n + te_n) + \alpha\gamma(F + \gamma Q)\}/[4(2\gamma - 2\alpha\gamma + k) - \gamma^2(2-\alpha)^2] \tag{7}$$

$$p_r^{N^*} = [\gamma(2\gamma - 3\alpha\gamma + 2k)(Q + c_n + te_n) + \gamma(2 - 2\gamma + \alpha\gamma)(F + \gamma Q)]/[4(2\gamma - 2\alpha\gamma + k) - \gamma^2(2-\alpha)^2] \tag{8}$$

$$p_c^{N^*} = \{\alpha(2-\alpha)\gamma^3 Q - \alpha\gamma(k + 2r - 2\alpha\gamma)(Q + c_n + te_n) + [4\gamma - 4\alpha\gamma + 2k - (2-\alpha)\gamma^2](\gamma Q - F)\}/\{(1-\alpha)[4(2\gamma - 2\alpha\gamma + k) - \gamma^2(2-\alpha)^2]\} \tag{9}$$

式中：$F = (1-\alpha)(c_r + te_r) + \alpha c_d$。

证明：分散决策下，原制造商和授权再制造商分别对新产品产量、再制品产量和单位授权费用进行决策，其中原制造商先决策，授权再制造商后决策。供应链没有采纳 RFID 技术，存在废旧产品误回收的情况。运用 Stackelberg 博弈理论和逆向归纳法求解该模型。

对式(4)求关于 q_r^N 的一阶偏导，得到：

$$\frac{\partial \pi_T^N}{\partial q_r^N} = (\gamma Q - \gamma q_n^N - p_c^N - c_r - te_r)(1-\alpha) - [2\gamma(1-\alpha) + k]q_r^N - \alpha c_d \tag{10}$$

继续对授权再制造商的利润函数求关于再制品产量 q_r^N 的二阶偏导，为 $-2\gamma(1-\alpha) - k$，由于 $0 \leqslant \alpha < 1$，有 $-2\gamma(1-\alpha) - k < 0$，则授权再制造商的利润函数是关于再制品产量 q_r^N 的联合凹函数，存在 q_r^N 的最优策略，使得利润函数取得最大值。

令 $\frac{\partial \pi_T^N}{\partial q_r^N} = 0$，求得 q_r^N 关于 (q_n^N, p_c^N) 的函数表达式为

$$q_r^N = [\gamma(1-\alpha)q_n^N - (1-\alpha)p_c^N + (1-\alpha)(\gamma Q - c_r - te_r) - \alpha c_d]/(2\gamma + k) \tag{11}$$

将式(11)、式(1)、式(2)代入原制造商的利润函数，对其分别求关于 (q_n^N, p_c^N) 的二阶偏导，得到海塞矩阵为

$$\boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} 2\left(-1 + \frac{\gamma^2(1-\alpha)}{D}\right) & \frac{\gamma(1-\alpha)\alpha}{D} \\ \frac{\gamma(1-\alpha)\alpha}{D} & -\frac{2(1-\alpha)^2}{D} \end{bmatrix} \tag{12}$$

式中:$D=2\gamma(1-\alpha)+k>0$。

可知该海塞矩阵一阶顺序主子式为 $2\left[-1+\frac{\gamma^2(1-\alpha)}{D}\right]$,因为 $0<\gamma<1$,$0\leqslant\alpha<1$,$k>0$,则 $2\gamma>\gamma^2$,有 $2\gamma+\frac{k}{1-\alpha}>\gamma^2$,$2\gamma(1-\alpha)+k>\gamma^2(1-\alpha)$,所以 $-1+\frac{\gamma^2(1-\alpha)}{D}<0$,最后得到一阶顺序主子式 $2\left[-1+\frac{\gamma^2(1-\alpha)}{D}\right]<0$。

该矩阵二阶顺序主子式为 $\frac{(1-\alpha)^2}{D^2}[4D-\gamma^2(4(1-\alpha)+\alpha^2)]$,$\frac{(1-\alpha)^2}{D^2}>0$,故要判断其是否大于零,只需要判断 $4D-\gamma^2(4(1-\alpha)+\alpha^2$ 的符号。$4D-\gamma^2[4(1-\alpha)+\alpha^2]=4\gamma(1-\alpha)(2-\gamma)+4k-\gamma^2\alpha^2$,$4\gamma(1-\alpha)(2-\gamma)>0$,判断 $4k-\gamma^2\alpha^2$ 的符号,$0<\gamma<1$,$0\leqslant\alpha<1$,$k>0$,k 表示废旧产品的回收难易程度,一般来说,k 的取值较大,故 $4k-\gamma^2\alpha^2>0$,二阶顺序主子式大于零,海塞矩阵负定,存在 (q_n^N,p_c^N) 的最优策略,使得原制造商的利润函数取得最大值。

对原制造商的利润函数求关于 (q_n^N,p_c^N) 的一阶偏导,分别令其等于零,联立求解得到最优策略 $(q_n^{N^*},p_c^{N^*})$。将 $(q_n^{N^*},p_c^{N^*})$ 代入 q_r^N 关于 (q_n^N,p_c^N) 的表达式和逆需求函数,求得再制品产量、新产品/再制品零售价格的最优策略 $q_r^{N^*}$、$p_n^{N^*}$ 和 $p_r^{N^*}$。再将 $q_n^{N^*}$、$q_r^{N^*}$、$p_c^{N^*}$、$p_n^{N^*}$、$p_r^{N^*}$ 代入原制造商和授权再制造商的利润函数,求得最优利润分别为 $\pi_M^{N^*}$ 和 $\pi_T^{N^*}$,由于表达式过于复杂,本章不详细展开 $\pi_M^{N^*}$ 和 $\pi_T^{N^*}$ 的具体函数表达式。

2.2 分散决策下供应链 RFID 技术采纳后的决策模型(*Y* 模型)

与 N 模型类似,原制造商先决定新产品的产量 (q_n^Y) 和再制品的单位授权费用 (p^Y),授权再制造商再根据原制造商的决策,决定再制品的产量 (q_r^Y)。此时供应链企业同时采纳 RFID 技术,消除了误回收率,即误回收率 $\alpha=0$。

原制造商的利润函数为

$$\max_{q_n^Y,p_c^Y}\pi_M^Y=(p_n^Y-c_n-te_n-g)q_n^Y+p_c^Yq_r^Y \tag{13}$$

授权再制造商的利润函数为

$$\max_{q_r^Y}\pi_T^Y=(p_r^Y-p_c^Y-c_r-te_r-g)q_r^Y-\frac{1}{2}kq_r^{Y2} \tag{14}$$

定理 2:在授权再制造模式下,分散决策下的供应链采纳 RFID 技术时,闭环供应链 Y 模型的利润函数为严格凹函数,存在唯一最优解,使得闭环供应链成员利润最大。

原制造商和授权再制造商的最优策略为

$$q_n^{Y^*}=[(\gamma+k)(Q-c_n-te_n-g)+\gamma(Q-c_n-te_n-\gamma Q+c_r+te_r)]/[2(2\gamma-\gamma^2+k)] \tag{15}$$

$$q_r^{Y^*}=\frac{\gamma(c_n+te_n+g)-c_r-te_r-g}{2(2\gamma-\gamma^2+k)} \tag{16}$$

$$p_n^{Y^*}=\frac{Q+c_n+te_n+g}{2} \tag{17}$$

$$p_r^{Y^*}=\{\gamma[(\gamma+k)(Q+c_n+te_n+g)+(1-\gamma)(\gamma Q+c_r+te_r+g)]\}/[2(2\gamma-\gamma^2+k)] \tag{18}$$

$$p_c^{Y^*}=\frac{\gamma Q-c_r-te_r-g}{2} \tag{19}$$

$$\pi_M^{Y^*}=\{(2\gamma-\gamma^2+k)(Q-c_n-te_n-g)^2+[\gamma(c_n+te_n+g)-c_r-te_r-g]^2\}/[4(2\gamma-\gamma^2+k)] \tag{20}$$

$$\pi_T^{Y^*}=\frac{(2\gamma+k)[\gamma(c_n+te_n+g)-c_r-te_r-g]^2}{8(2\gamma-\gamma^2+k)^2} \tag{21}$$

证明过程与以上模型类似。

2.3 集中决策下供应链 RFID 技术采纳后的决策模型(*C* 模型)

原制造商和授权再制造商以闭环供应链整体利益最大化为目标,同时决定新产品的产量 (q_n^C) 和再制品的产量 (q_r^C),并且选择采纳 RFID 技术。

闭环供应链的总利润为

$$\max_{q_n^C,q_r^C}\pi_S^C=(p_n^C-c_n-te_n-g)q_n^C+(p_r^C-c_r-te_r-g)q_r^C-\frac{1}{2}kq^{C2}_r \tag{22}$$

定理 3:在授权再制造模式下,集中决策下的供应链采纳 RFID 技术时,闭环供应链 C 模型的利润函数为严格凹函数,存在唯一最优解,使得闭环供应链总利润最大。

授权再制造模式下的闭环供应链最优策略为

$$q_n^{C^*}=[k(Q-c_n-te_n-g)+2\gamma(Q-c_n-te_n-\gamma Q+c_r+te_r)]/[2(2\gamma-2\gamma^2+k)] \tag{23}$$

$$q_r^{C^*}=\frac{\gamma(c_n+te_n+g)-c_r-te_r-g}{2\gamma-2\gamma^2+k} \tag{24}$$

$$p_n^{C^*}=\frac{Q+c_n+te_n+g}{2} \tag{25}$$

$$p_r^{C^*}=[2\gamma(1-\gamma)(\gamma Q+c_r+te_r+g)+k\gamma(Q+c_n+te_n+g)]/[2(2\gamma-2\gamma^2+k)] \quad (26)$$

$$\pi_S^{C^*}=\{(k+2\gamma)(Q-c_n-te_n-g)^2+2(c_r+te_r+g-\gamma Q)[c_r+te_r+g+\gamma Q-2\gamma(c_n+te_n+g)]\}/[4(2\gamma-2\gamma^2+k)] \quad (27)$$

证明过程与前文类似。

3　均衡分析与比较

定理 4:新产品产量会随着碳税税率的提高而直接减少;再制品产量的变化则更为复杂,需结合消费者低碳偏好系数与再制品、新产品单位碳排放量的比值判断。当消费者低碳偏好系数大于该临界比值时,碳税税率的提升会推动再制品生产规模的扩大,使其产量随税率上升而上升;当消费者低碳偏好系数小于该临界比值时,碳税税率的提升将直接抑制再制品的生产规模,使其产量随税率上升而下降。新产品与再制品的零售价格始终随着碳税税率的提升呈上涨趋势,而单位授权费用则会随着碳税税率增加而下降。原制造商的利润会随碳税税率提高而减少;授权再制造商的利润变化方向则与再制品产量的变化方向保持一致。

证明:(1) $\frac{\partial q_n^{Y^*}}{\partial t}=\frac{-(\gamma+k)e_n+\gamma(e_r-e_n)}{2(2\gamma-2\gamma^2+k)}$,因为 $e_n>e_r$,所以 $\frac{\partial q_n^{Y^*}}{\partial t}<0$。$\frac{\partial q_r^{Y^*}}{\partial t}=\frac{\gamma e_n-e_r}{2(2\gamma-2\gamma^2+k)}$。当 $\gamma>\frac{e_r}{e_n}$ 时,$\frac{\partial q_r^{Y^*}}{\partial t}>0$;当 $\gamma<\frac{e_r}{e_n}$ 时,$\frac{\partial q_r^{Y^*}}{\partial t}<0$。

(2) $\frac{\partial p_n^{Y^*}}{\partial t}=\frac{e_n}{2}>0$,$\frac{\partial p_r^{Y^*}}{\partial t}=\frac{\gamma[(\gamma+k)e_n+(1-\gamma)e_r]}{2(2\gamma-2\gamma^2+k)}>0$,$\frac{\partial p_c^{Y^*}}{\partial t}=-\frac{e_r}{2}<0$。

(3) $\frac{\partial \pi_M^{Y^*}}{\partial t}=\{-e_n[(\gamma+k)(Q-c_n-te_n-g)+\gamma(Q-c_n-te_n-\gamma Q+c_r+te_r)]-e_r[\gamma(c_n+te_n+g)-c_r-te_r-g]\}/[2(2\gamma-2\gamma^2+k)]$,$\frac{\partial \pi_T^{Y^*}}{\partial t}=\frac{(2\gamma+k)(\gamma e_n-e_r)[\gamma(c_n+te_n+g)-c_r-te_r-g]}{4(2\gamma-\gamma^2+k)^2}$。由于 $q_n^{Y^*}>0$,$q_r^{Y^*}>0$,有 $(\gamma+k)(Q-c_n-te_n-g)+\gamma(Q-c_n-te_n-\gamma Q+c_r+te_r)>0$,$\gamma(c_n+te_n+g)-c_r-te_r-g>0$,所以 $\frac{\partial \pi_M^{Y^*}}{\partial t}<0$,当 $\gamma>\frac{e_r}{e_n}$ 时,$\frac{\partial \pi_T^{Y^*}}{\partial t}>0$,当 $\gamma<\frac{e_r}{e_n}$ 时,$\frac{\partial \pi_T^{Y^*}}{\partial t}<0$。

定理 4 表明,碳税直接针对产品碳排放征收,新产品的碳排放量高于再制品,碳税提高会显著增加原制造商的生产边际成本。在分散决策中,原制造商为保障自身收益,会通过减少新产品产量来缓解成本压力,避免因成本上升导致利润过度压缩。再制品产量变化取决于消费者低碳偏好与再制品、新产品单位碳排放量比值的大小,这是因为碳税提高会强化消费者对低碳再制品的偏好,再制品需求增长幅度超过成本上升幅度,授权再制造商因此扩大产量;而当消费者对再制品的低碳偏好较低时,碳税带来的再制品成本上升无法通过需求增长抵消,授权再制造商为减少亏损会减少再制品产量。

碳税增加了原制造商、授权再制造商的生产与运营成本,在分散决策中,双方均没有动力独自承担额外成本,会通过提高零售价格将部分成本转移给消费者,从而维持自身的利润水平,因此新产品和再制品的零售价格均随碳税上升。碳税提高会削弱授权再制造商的利润空间,尤其当再制品产量可能减少时,授权再制造商的议价能力下降,同时,原制造商为避免授权再制造商退出授权合作(原制造商随之损失授权带来的收入),会主动降低单位授权费用,以维持长期合作关系,保障长久授权收益。

原制造商面临双重压力:一是缴纳碳税直接使得新产品生产成本增加,二是再制品市场波动导致授权带来的收入减少(单位授权费用下降+再制造商退出授权合作)。尽管新产品零售价格上涨,但产量减少+成本上升的负面影响更大,最终导致原制造商利润减少。再制品产量是授权再制造商利润的核心影响因素:当再制品产量增加时,规模效应与需求增长会带动收入增长,抵消部分成本上升,授权再制造商利润随之增加;当再制品产量减少时,收入下降幅度超过成本控制幅度,授权再制造商利润随之减少,因此其利润变化与再制品产量变化方向一致。

定理 5:新产品产量与消费者低碳偏好呈负向变动,随低碳偏好水平的提升而减少;再制品产量则呈相反的正向变动趋势,随低碳偏好水平的提升而增加。新产品零售价格与消费者低碳偏好无关联,不受其变动影响;再制品零售价格与单位授权费用,均随消费者低碳偏好的增大而上升。消费者低碳偏好程度的提升,将同步推动原制造商与授权再制造商的利润水平上涨。

证明:(1) $\frac{\partial q_n^{Y^*}}{\partial \gamma}=\{-\gamma^2(2c_n+2te_n+g-c_r-$

$te_r)-k\gamma(c_n+te_n+g)-k[\gamma(c_n+te_n+g)-c_r-te_r-g]\}/[2(2\gamma-\gamma^2+k)^2]$，$\frac{\partial q_r^{Y^*}}{\partial\gamma}=\frac{(k+\gamma^2)(c_n+te_n+g)+2(1-\gamma)(c_r+te_r+g)}{2(2\gamma-\gamma^2+k)^2}$。由于 $q_r^{Y^*}>0$，有 $\gamma(c_n+te_n+g)-c_r-te_r-g>0$，且 $e_n>e_r$，$c_n>c_r$，$0<\gamma<1$，$k>0$，故 $\frac{\partial q_n^{Y^*}}{\partial\gamma}<0$，$\frac{\partial q_r^{Y^*}}{\partial\gamma}>0$。

(2) $\frac{\partial p_n^{Y^*}}{\partial\gamma}=0$，$\frac{\partial p_c^{Y^*}}{\partial\gamma}=\frac{Q}{2}>0$，$\frac{\partial p_r^{Y^*}}{\partial\gamma}=\{[4\gamma^2(1-\gamma)+2k(2-\gamma^2)+\gamma^4+k^2]Q+(k+\gamma^2)[(2+k)(c_n+te_n+g)-c_r-te_r-g]\}/[2(2\gamma-\gamma^2+k)^2]$。因为 $e_n>e_r$，$c_n>c_r$，$0<\gamma<1$，$k>0$，所以 $\frac{\partial p_r^{Y^*}}{\partial\gamma}>0$。

(3) $\frac{\partial\pi_M^{Y^*}}{\partial\gamma}=\{[\gamma(c_n+te_n+g)-c_r-te_r-g][(k+\gamma)(c_n+te_n+g)+(1-\gamma)(c_r+te_r+g)]\}/[2(2\gamma-\gamma^2+k)^2]$，$\frac{\partial\pi_T^{Y^*}}{\partial\gamma}=\{[\gamma(c_n+te_n+g)-c_r-te_r-g][2\gamma(k+\gamma)(c_n+te_n-c_r-te_r)+\gamma^2(\gamma c_n+\gamma te_n+\gamma g-c_r-te_r-g)+k(k+\gamma+\gamma^2)(c_n+te_n+g)-(k+2\gamma)(c_r+te_r+g)]\}/[4(2\gamma-\gamma^2+k)^3]$。由于 $q_r^{Y^*}>0$，有 $\gamma(c_n+te_n+g)-c_r-te_r-g>0$，且 $e_n>e_r$，$c_n>c_r$，$0<\gamma<1$，$k>0$，故 $\frac{\partial\pi_M^{Y^*}}{\partial\gamma}>0$，$\frac{\partial\pi_T^{Y^*}}{\partial\gamma}>0$。

定理 5 表明，消费者低碳偏好增强，会使得低碳再制品的市场需求增长，而高碳排放的新产品需求则相应萎缩。在分散决策中，以利润最大化为目标的原制造商，将缩减新产品生产投入，通过授权再制造商扩大再制品供给以适配市场低碳需求，最终导致新产品产量下降；而需求端的直接拉动，也让授权再制造商获得更高销量预期，主动扩大再制品生产规模，以抢占市场、提升利润。

新产品的核心价值更多依赖于其新品属性（如性能、外观、技术迭代等），而非低碳属性，消费者对新产品零售价格的敏感度受产品本身的功能影响更大。同时，原制造商在新产品生产中的原材料、研发成本占比高，消费者低碳偏好不会直接改变其核心成本与定价逻辑，因此新产品零售价格保持稳定。再制品的核心竞争优势是其低碳属性，消费者低碳偏好水平上升时，对再制品的低碳溢价接受度显著提高，愿意为低碳排放的再制品支付更高价格，因此再制品零售价格随着低碳偏好的增强而上升。消费者低碳偏好增强使再制造市场的盈利空间扩大，授权再制造商对授权资格的需求意愿更强，议价能力相对减弱；同时，原制造商作为授权方，会通过提高单位授权费用，分享再制造市场因低碳偏好增强带来的额外收益，因此单位授权费用会随着低碳偏好的增强而上升。

原制造商的利润增长来源于两方面：一方面是授权产生的收益提升——单位授权费用提高，且再制造商扩大生产规模使得授权总量增加，授权收入显著增长；另一方面是成本优化带来的间接收益——新产品产量减少降低了高碳排放带来的生产边际成本（原料消耗）。两者叠加，最终推动原制造商利润上升。尽管授权再制造商需要支付更高的单位授权费用，但收入增长幅度远高于成本增长幅度：一方面，消费者低碳偏好增强导致再制品销量上升、零售价格提高，直接拉动授权再制造商收入增长；另一方面，RFID 技术的采纳减少了回收过程中的误回收问题，从而减少了环保废弃成本。收入的显著增长覆盖了授权费用等成本的上升，最终实现授权再制造商的利润增长。

定理 6：受单位标签成本上涨带来的成本压力影响，新产品产量与再制品产量一致呈现出下降的趋势，即新产品、再制品产量均随着 RFID 技术的单位标签成本的增加而减少。新产品、再制品零售价格与单位授权费用的变动趋势存在明显差异：前两者均随着单位标签成本的上升而同步上涨，而单位授权费用则呈反方向变化，表现为随着单位标签成本的上升而降低。闭环供应链双方的利润变化趋势一致，原制造商的利润与授权再制造商的利润会随着 RFID 技术的单位标签成本的增加而减少。

证明：(1) $\frac{\partial q_n^{Y^*}}{\partial g}=-\frac{k+\gamma}{2(2\gamma-\gamma^2+k)}$，$\frac{\partial q_r^{Y^*}}{\partial g}=-\frac{1-\gamma}{2(2\gamma-\gamma^2+k)}$。因为 $k>0$，$0<\gamma<1$，所以 $\frac{\partial q_n^{Y^*}}{\partial g}<0$，$\frac{\partial q_r^{Y^*}}{\partial g}<0$。

(2) $\frac{\partial p_n^{Y^*}}{\partial g}=\frac{1}{2}>0$，$\frac{\partial p_r^{Y^*}}{\partial g}=\frac{\gamma(k+1)}{2(2\gamma-\gamma^2+k)}$，$\frac{\partial p_c^{Y^*}}{\partial\gamma}=-\frac{1}{2}<0$。因为 $k>0$，$0<\gamma<1$，所以 $\frac{\partial p_r^{Y^*}}{\partial g}>0$。

(3) $\frac{\partial\pi_M^{Y^*}}{\partial g}=-\{(2\gamma-\gamma^2+k)(Q-c_n-te_n-g)$

$+(1-\gamma)[\gamma(c_n+te_n+g)-c_r-te_r-g]\}/[2(2\gamma-\gamma^2+k)]$，$\frac{\partial\pi_T^{Y^*}}{\partial g}=-\{(1-\gamma)(k+2\gamma)[\gamma(c_n+te_n+g)-c_r-te_r-g]\}/[2(2\gamma-\gamma^2+k)]$。由于 $q_r^{Y^*}>0$，有 $\gamma(c_n+te_n+g)-c_r-te_r-g>0$，且 $e_n>e_r$，$c_n>c_r$，$0<\gamma<1$，$k>0$，故 $\frac{\partial\pi_T^{Y^*}}{\partial\gamma}<0$。一般来说，市场容量 Q 都足够大，所以 $Q-c_n-te_n-g>0$，即 $\frac{\partial\pi_M^{Y^*}}{\partial g}<0$。

定理 6 表明，无论是新产品的生产还是再制品的生产，RFID 技术的单位标签成本上升都会直接增加产品的技术投入成本。在分散决策下，原制造商和授权再制造商均以自身利益最大化为目标。当标签成本上升导致产品边际利润下降时，企业考虑消费者价格敏感度，均不会通过无限制提价转移成本，而是选择减少产量以控制总成本规模，通过降低生产总量，减少 RFID 标签的整体采购与使用量，从而缓解成本压力、避免利润过度压缩，因此新产品和再制品产量均随着单位标签成本的增加而减少。

标签成本需要通过产品销售实现成本回收。对于原制造商而言，新产品的生产与流通环节需投入标签，成本增加后会通过提高零售价格，让消费者来承担部分成本；对于授权再制造商而言，废旧产品的回收识别、质量追溯更依赖 RFID 标签，标签成本占比可能更高，同样需要提高零售价格来分摊成本。提高价格虽然会抑制部分消费需求，但标签成本属于刚性支出，无法避免，提价是企业维持基本利润的必要选择，因此新产品、再制品的零售价格均会随着标签成本的增加而上涨。单位授权费用的变动源于双方议价能力的动态调整：标签成本上升会加大授权再制造商的成本压力、压缩利润，使其对授权费用的支付意愿下降，原制造商若维持或提高授权费用，可能导致合作方因盈利困难退出合作。为避免失去授权带来的部分收益，原制造商会主动降低单位授权费用，以维持与授权再制造商的长期合作关系，保证授权收益。因此，单位授权费用随着单位标签成本的增加而下降。

原制造商面临双重成本压力：一是新产品端需承担更高的标签成本，为控制成本选择减产，导致销售收入增长受限；二是为维系与授权再制造商的合作下调单位授权费用，造成授权收入缩水。即便原制造商通过提高价格、减少产量的举措控制成本，但标签成本的上涨叠加授权收入的下降，仍打破了收支平衡，利润随单位标签成本的增加而下降。授权再制造商的利润受成本、收入、授权费用三重因素影响：虽然通过提高再制品零售价格可以分摊部分标签成本，且单位授权费用有所下降，但标签成本的增幅远超提价与授权费用下降带来的收益增量。同时，授权再制造商因成本压力减少产量，进一步导致销售收入增长受限。多重因素叠加下，授权再制造商的利润被持续挤压，最终随着单位标签成本的增加而减少。

定理 7：在产量配置上，集中决策更偏向低碳排放量的再制品生产，集中决策下的新产品产量低于分散决策，再制品产量则与之相反。两类决策模式对产品零售价格的影响存在显著差异：一方面，新产品零售价格在两种决策下保持一致，不受决策模式差异影响；另一方面，再制品零售价格受决策模式影响明显，集中决策下的水平低于分散决策。从供应链整体利润来看，集中决策具备明显优势——其供应链总利润始终高于分散决策。

证明：(1) $q_n^{C^*}-q_n^{Y^*}=-\{\gamma(k+2\gamma)[\gamma(c_n+te_n+g)-c_r-te_r-g]\}/[2(2\gamma-\gamma^2+k)(2\gamma-2\gamma^2+k)]$，$q_r^{C^*}-q_r^{Y^*}=\frac{\gamma(c_n+te_n+g)-c_r-te_r-g}{2\gamma-2\gamma^2+k}-\frac{\gamma(c_n+te_n+g)-c_r-te_r-g}{2(2\gamma-\gamma^2+k)}$。由于 $q_r^{Y^*}>0$，有 $\gamma(c_n+te_n+g)-c_r-te_r-g>0$，且 $e_n>e_r$，$c_n>c_r$，$0<\gamma<1$，$k>0$，故 $q_n^{C^*}-q_n^{Y^*}<0$，即 $q_n^{C^*}<q_n^{Y^*}$。由于 $q_r^{C^*}$ 和 $q_r^{Y^*}$ 的分子相同，故只需比较二者的分母大小，可知 $2\gamma-2\gamma^2+k<2(2\gamma-\gamma^2+k)$，则有 $q_r^{C^*}>q_r^{Y^*}$。

(2) $p_n^{C^*}=p_n^{Y^*}=\frac{Q+c_n+te_n+g}{2}$，$p_r^{C^*}-p_r^{Y^*}=-\frac{\gamma(1-\gamma)(k+2\gamma)[\gamma(c_n+te_n+g)-c_r-te_r-g]}{2(2\gamma-\gamma^2+k)(2\gamma-2\gamma^2+k)}$。由于 $q_r^{Y^*}>0$，有 $\gamma(c_n+te_n+g)-c_r-te_r-g>0$，且 $0<\gamma<1$，$k>0$，则有 $p_r^{C^*}-p_r^{Y^*}<0$，即 $p_r^{C^*}<p_r^{Y^*}$。

(3) $\pi_S^{C^*}-\pi_S^{Y^*}=\pi_S^{C^*}-(\pi_M^{Y^*}+\pi_T^{Y^*})=\{[4(2\gamma-\gamma^2+k)^2-(6\gamma-2\gamma^2+3k)(2\gamma-2\gamma^2+k)][\gamma(c_n+te_n+g)-c_r-te_r-g]^2\}/[8(2\gamma-\gamma^2+k)^2(2\gamma-2\gamma^2+k)]$。由于 $0<\gamma<1$，$k>0$，故要比较 $\pi_S^{C^*}$ 和 $\pi_S^{Y^*}$ 的大小，只需比较 $4(2\gamma-\gamma^2+k)^2-(6\gamma-2\gamma^2+3k)(2\gamma-2\gamma^2+k)$ 的大小。

令 $Z=4(2\gamma-\gamma^2+k)^2-(6\gamma-2\gamma^2+3k)(2\gamma-$

$2\gamma^2+k)$，$X=2\gamma-\gamma^2+k$，则有 $Z=4X^2-(3X+\gamma^2)(X-\gamma^2)=X^2+2\gamma^2X+\gamma^4$，其中 $X>0$，故 $Z>0$。又因为表达式的分母大于零，$[\gamma(c_n+te_n+g)-c_r-te_r-g]^2>0$，所以 $\pi_S^{C^*}-\pi_S^{Y^*}>0$，即 $\pi_S^{C^*}>\pi_S^{Y^*}$。

定理 7 表明，集中决策与分散决策的产量差异，本质上是整体效益最优与个体成本最优的资源分配逻辑冲突。集中决策的核心目标是优化供应链整体收益与成本，再制品的碳排放量更低，生产成本更低，且消费者具备低碳偏好，扩大再制品产量能同时降低供应链整体碳成本、提升市场需求匹配度。因此，集中决策下供应链企业会主动减少高成本、高碳排放量的新产品生产，将资源倾斜至更具性价比的再制品，实现供应链整体产量配置最优。分散决策下，新产品的定价权、利润空间由原制造商完全掌握，且无须依赖授权再制造商的合作，即使新产品成本更高，也会优先保障自身主导的新产品产量，避免因再制品扩张压缩自身收益；而对于授权再制造商，其受限于授权费用与个体成本控制，难以精准判断再制品的最优产量，为规避风险会保守控制再制品产量。二者共同作用下，分散决策下的新产品产量偏高、再制品产量偏低，偏离供应链整体最优的产量比例。

新产品的原材料成本、研发成本占比高，且市场需求对新产品的性能、技术属性的敏感度远高于决策模式；同时，无论集中决策还是分散决策，新产品的目标客户群体、生产工艺相对固定，成本结构与市场定价区间受行业竞争、消费者价格敏感度约束，难以通过决策模式调整改变。因此，两类决策下新产品零售价格保持一致。分散决策下，授权再制造商为覆盖“授权费用＋自身成本”，会将个体成本全部转移至再制品零售价格，导致定价偏高；集中决策下，供应链统筹原制造商的授权收益与授权再制造商的生产成本，通过降低再制品零售价格吸引更多消费者，扩大销量，最终实现“低价＋高销量”的组合，推动供应链整体利润增长。因此，集中决策下的再制品零售价格更低。

集中决策下的供应链总利润始终高于分散决策，核心是解决了分散决策下的 3 大效率损耗：①分散决策下，原制造商与授权再制造商会各自加价转移成本，导致产品价格叠涨、抑制需求，压缩整体利润；集中决策可统筹供应链全链条定价，通过控制再制品加价幅度，避免价格过度上涨，刺激需求以提升整体收入。②分散决策下，供应链双方无法共享全链条数据，易出现原制造商过度生产新产品、再制品制造商保守生产再制品的情况，导致产量与需求错配，产生库存或缺货浪费；集中决策下，供应链企业共同决策，精准匹配产需，降低相关成本，提升运营效率。③分散决策下，原制造商利用授权方优势提高授权费用，将更多成本转移给授权再制造商，导致授权再制造商因成本过高减少再制品产量，最终影响原制造商的授权收入；集中决策下，供应链企业按各环节成本贡献与收益潜力，合理分摊成本，避免单一主体成本过载，保障合作积极性，实现供应链总体利润的提升。

4 算例分析

使用数值算例分析方法，借鉴文献[25-26]所用数值参数，以便更明确地阐释结论。

4.1 授权再制造模式下的 RFID 技术采纳分析

在分散决策下，供应链企业有两种选择：采纳或者不采纳 RFID 技术。不采纳 RFID 技术会产生误回收率，随之产生一系列的成本浪费，而采纳 RFID 技术能消除误回收率，但同时要支付标签成本。为了分析分散决策下的供应链企业采纳 RFID 技术的条件，令 $Q=1\ 000$，$c_n=600$，$c_r=200$，$c_d=50$，$e_n=5$，$e_r=3$，$\alpha=0.06$，$k=1$，$g=15$，其中 $\gamma\in[0,1]$，$t\in[0,30]$，则原制造商和授权再制造商的利润变化如图 2、图 3 所示。

由图 2、图 3 可以看出，无论是原制造商还是授权再制造商，当误回收率较低且 RFID 技术的单位标签成本较高时，只要碳税税率和消费者低碳偏好系数达到某一特定条件，采纳 RFID 技术后的原制造商和授权再制造商利润也会高于采纳前，此时原制造商和授权再制造商均会选择采纳 RFID 技术。

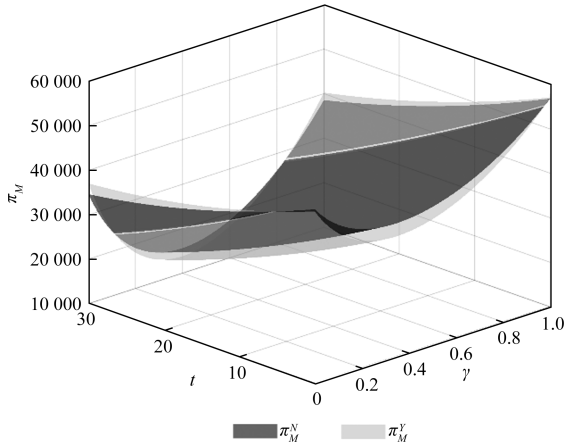


图 2 授权再制造模式下原制造商利润对比

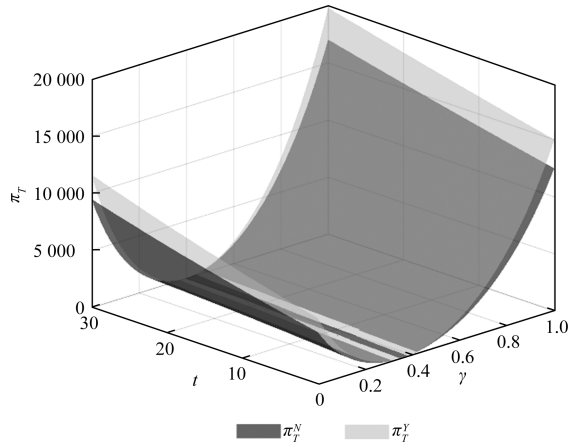


图 3　授权再制造模式下再制造商利润对比

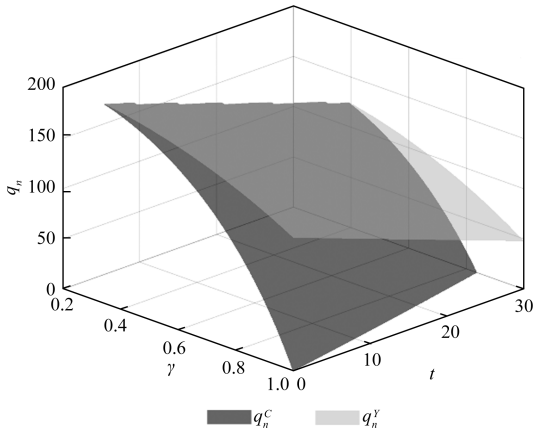


图 4　授权再制造模式下新产品产量对比

4.2　碳税和消费者低碳偏好对授权再制造模式下策略的影响分析

授权再制造模式下，供应链采纳 RFID 技术消除了废旧产品的误回收率，但同时增加了供应链的变动成本。为了明确碳税和消费者低碳偏好共同对供应链均衡策略的影响，取 $Q = 1\ 000$，$c_n = 600$，$c_r = 200$，$e_n = 5$，$e_r = 3$，$k = 2$，$g = 1$，$\gamma \in [0,1]$，$t \in [0,30]$，则原制造商和授权再制造商的最优策略变化如图 4 所示。

由图 4 可知，无论是集中决策还是分散决策，新产品产量均随着碳税的增加而降低。当消费者低碳偏好越大时，两种决策下的新产品产量越低，且随着碳税税率提升，新产品产量的下降速率越快；当消费者低碳偏好越小时，两种决策下的新产品产量越高，且随着碳税税率提升，新产品产量的下降趋势越平缓。无论低碳偏好处于何种水平，分散决策下的新产品产量始终高于集中决策。

由图 5 可知，在两种决策模式下，再制品产量均随消费者低碳偏好的增强而呈现单调上升的趋势，且集中决策始终高于分散决策。当消费者低碳偏好很大时（接近 1），碳税每增加一个单位，再制品产量都会快速增加。相较于分散决策，集中决策情形下碳税和消费者低碳偏好的协同作用效应更突出，同等参数条件下再制品产量始终处于更高水平；分散决策下再制品产量呈现与集中决策同向的增长趋势，但整体增幅更平缓。

由图 6 可知，新产品零售价格在集中决策与分散决策场景下完全重合：该价格与碳税税率呈稳定的单调递增关系，随税率上调持续上升，但不受消费者低碳偏好影响，这与均衡分析结果一致。

由图 7 可知，在低碳偏好系数保持恒定时，再制品零售价格随着碳税税率的增大单调上升，说明碳

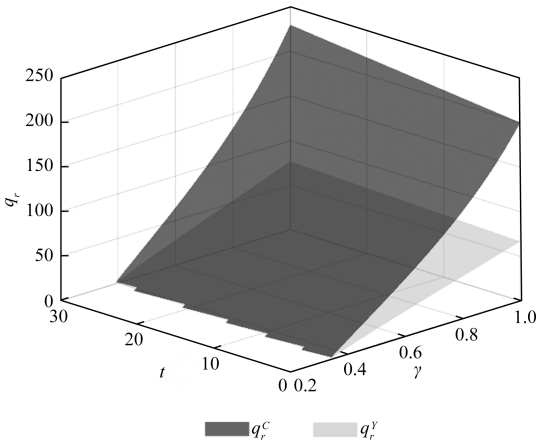


图 5　授权再制造模式下再制品产量对比

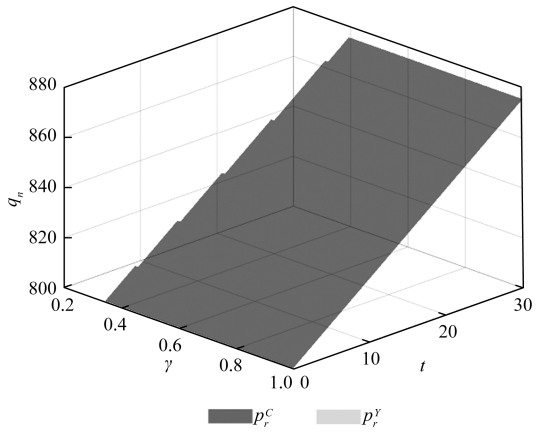


图 6　授权再制造模式下新产品零售价格对比图

税税率是正向累积驱动变量，税率越高，再制品零售价格越高；当碳税税率保持恒定时，再制品零售价格随消费者低碳偏好系数的增大呈现单调上升的变动特征，二者存在显著的正向关联，充分表明消费者低碳偏好对再制品定价具有稳定的正向增强效应。无论在何种碳税税率和低碳偏好系数条件下，集中决策情形下的再制品零售价格始终低于

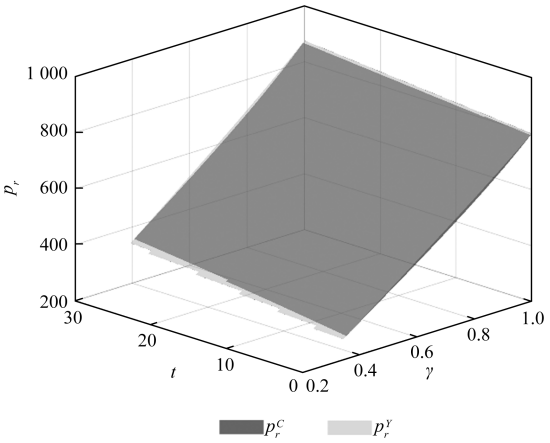


图 7　授权再制造模式下再制品零售价格对比

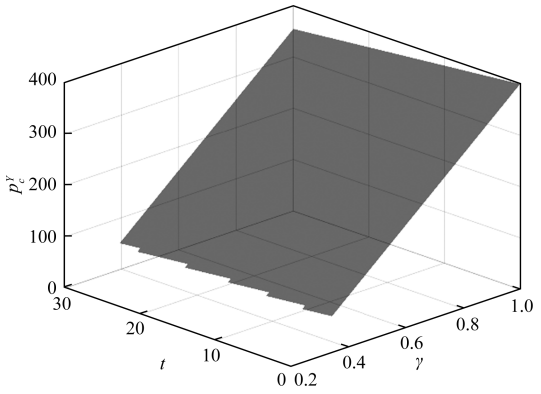


图 8　授权再制造模式下单位授权费用变化

分散决策。

由图 8 可知,在任意固定的低碳偏好系数下,单位授权费用随着碳税税率的增大呈现下降趋势,说明碳税对单位授权费用存在负向影响,税率越高,单位授权费用越低;在任意固定的碳税税率下,单位授权费用随着低碳偏好系数的增大呈现上升趋势,说明低碳偏好程度对单位授权费用存在正向影响,消费者低碳偏好程度越高,单位授权费用越高。图中整个曲面沿碳税方向向下倾斜,沿消费者低碳偏好方向向上倾斜,这体现了二者的拮抗关系,并且在高低碳偏好时,碳税增加对于单位授权费用的衰减作用更明显。

图 8 表明,碳税与消费者低碳偏好通过重塑原制造商和授权再制造商"纵向收益分配+横向市场竞争"的双重关系,改变双方议价能力,最终影响单位授权费用的定价。①碳税上升对企业产生非对称成本冲击:新产品单位碳排放远高于再制品,原制造商核心业务利润被大幅挤压,其战略重心从"遏制再制品蚕食新产品市场"转向"最大化再制造授权总收入";同时原制造商谈判破裂后的保留利润显著坍塌,对授权合作的依赖度上升,议价能力削弱,因此主动降低授权费用以刺激再制品销量。②低碳偏好增强使得单位授权费用升高:再制品需求溢价和市场规模扩大带来超额利润,原制造商凭借知识产权准入权掌握利润分配主导权;且高偏好下授权再制造商失去授权的机会成本剧增,议价能力大幅弱化,原制造商通过提高授权费用,将再制造环境溢价尽可能转化为自身收入,同时弥补新产品被分流的利润损失。两者对原制造商议价能力的作用完全相反,形成拮抗关系。高低碳偏好下,原制造商收入结构已以授权费用为主,碳税上升会使得新产品利润被大幅挤压,原制造商会更大幅度降低单位授权费用,充分释放再制品的市场潜力,通过销量爆发式增长实现总收益最大化,因此碳税对授权费用的衰减作用更显著。

由图 9 可知,闭环供应链总利润由碳税和消费者低碳偏好共同决定,该利润平面呈现出一个先减少后增加的形态。利润峰值出现在低碳税率和高低碳偏好结合的区域:当消费者低碳偏好系数较高时,即使政府征收一定碳税,供应链总利润仍能达到较大值。这是因为高低碳偏好带来的市场需求为企业提供了绿色溢价,使其能够将碳税增量成本转移给环保支付意愿强的消费者,还能通过扩大再制品市场份额弥补成本,实现高额利润。

除此之外,图 9 还揭示了两种导致利润下降的风险区域。一方面,是高碳税与低偏好并存的场景:当碳税税率较高(接近 30),而消费者低碳偏好较低(低于 0.4)时,利润曲面处于较低水平。此时,企业面临高额碳税成本却无法获得市场回报,利润被严重挤压。另一方面,是消费者低碳偏好极低的场景:当 γ 接近 0 时,无论碳税税率降至多低,供应链总利润始终处于低位。这说明在一个消费者对环境毫不关心的市场中,企业会缺乏降碳的根本动力。

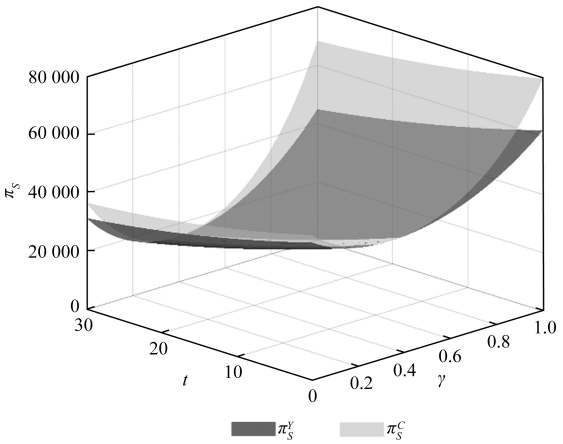


图 9　授权再制造模式下闭环供应链总利润对比

4.3　关于固定成本 G 的敏感性分析

RFID 固定成本投入属于一次性沉没成本，不影响企业边际收益和边际成本，原制造商和授权再制造商在决策产品定价、产量、再制造授权费用时，仅依据边际成本和市场需求决策，与固定投入大小无关，因此敏感性分析固定其余参数与均衡决策变量，仅通过 G 的变动来观察企业利润变化。引入固定成本 G 后的企业利润分别为 $\pi'_M=\pi^Y_M-G$ 和 $\pi'_T=\pi^Y_T-G$，取 $Q=1\ 000$，$c_n=600$，$c_r=200$，$e_n=5$，$e_r=3$，$k=2$，$g=1$，$\gamma=0.7$，$t=10$，$G\in[0,500]$，则原制造商和授权再制造商利润关于 G 的变化如图 10 所示。

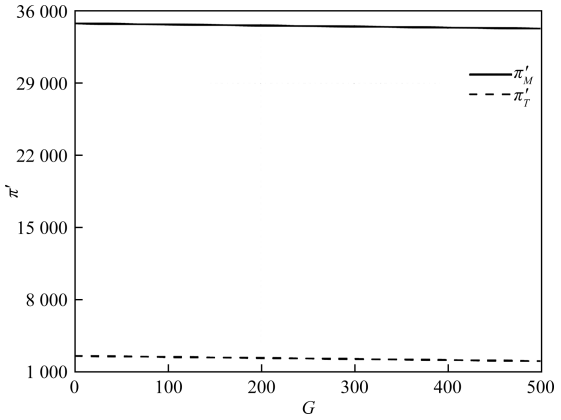


图 10　固定成本 G 的敏感性分析

从图 10 可以看出，原制造商和授权再制造商利润水平均随着固定成本增加呈现微弱线性下降趋势，这表明 RFID 固定成本仅通过线性扣除方式压缩企业利润水平，对产品定价、产量及授权费用等边际决策变量无显著扰动，验证了基准模型简化假设的合理性与研究结论的稳健性；同时，该线性下降特征也反映出固定成本的沉没成本属性，其对利润的影响仅为一次性扣除，不会改变供应链均衡决策的核心逻辑。当企业采纳 RFID 技术后的净利润 π'_M 和 π'_T 大于零且大于采纳 RFID 前的利润时，采纳该技术具备经济可行性，反之则选择不采纳。

5　结论与启示

研究得到如下结论：①当 RFID 技术的单位标签成本较高且误回收率较低时，只要碳税税率和消费者低碳偏好系数达到一定条件，采纳 RFID 技术后的原制造商和授权再制造商利润也会高于采纳前。②消费者低碳偏好越高，碳税税率上升会使新产品产量加速下降，偏好越低，碳税对其产量的抑制作用则相对平缓；当消费者低碳偏好很大时（接近 1），碳税每增加一个单位，再制品产量会显著上升；碳税和消费者低碳偏好对单位授权费用的作用相反，在高低碳偏好时，碳税增加对单位授权费用的削弱作用更明显。③供应链总利润较低的情形包括两种：一是高碳税与低偏好并存，企业承担高成本却无法获得市场回报，二是消费者低碳偏好极低，此时即使碳税税率为零，利润也处于低位，企业缺乏减排动力。

基于研究结论，提出如下管理启示：①企业应结合碳税政策和消费者低碳偏好动态评估 RFID 技术采纳价值，重点关注标签成本与误回收率的协同管控，通过规模化效应降低标签成本，优化回收流程提升回收准确率；②企业需根据市场偏好调整生产与授权策略，在高偏好市场扩大再制造布局，同时主动降低再制造授权费用，引导再制造商参与生产；③为规避两种低利润陷阱，企业可以通过营销引导、绿色认证等方式提升消费者低碳偏好，培育可持续的市场需求。

参考文献

[1] 赵浩坤. “双碳”目标背景下我国装备制造业循环经济发展路径研究[J]. 生态经济，2026，42(4)：227-228.

[2] LI B，GENG Y，XIA X Q，et al. Comparatively analyzing the impact of government subsidy and carbon tax policy on authorizedremanufacturing[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health，2021，18(16)：82-93.

[3] 李文川，章鑫，高思源. 制造/再制造企业 RFID 技术采纳的投资决策分析[J]. 计算机集成制造系统，2019，25(8)：2079-2086.

[4] 季杰，刘志峰，黄海鸿，等. 基于 RFID 技术的废旧家电质量评估[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版)，2016，39(2)：145-149.

[5] JIANG K，XU L，ZHANG J. Carbon taxes vs. cap-and-trade：do policy choices influence enterprise emissions dynamics and strategic responses?[J]. Technological Forecasting & Social Change，2025，220(11)：124318.

[6] 刘峥，杨天辰，夏西强，等. 碳税政策下考虑消费需求的区块链引入策略研究[J/OL]. 中国管理科学，1-17[2026-04-12]. https://doi. org/10. 16381/j. cnki. issn1003-207x. 2024. 2344.

[7] 王丹，张衡，李国庆，等. 碳税和 ECA 政策下集装箱班轮航线配船优化与减排策略选择[J]. 上海海事大学学报，2026，47(1)：78-86，103.

[8] 蒋晓，邱燕红，田宝单. 考虑碳排放因素的双寡头 Bertrand 博弈模型[J/OL]. 复杂系统与复杂性科学，1-8[2026-04-12]. https：//link. cnki. net/urlid/37. 1402. n. 20260323. 1907. 002.

[9] ZHAO M，LIU C，DONG Y. Manufacturers’ adoption of industrial symbiosis under carbon taxation：environmental

performance and the role of green technology[J]. Journal of Cleaner Production, 2026, 554(17): 147986.

[10] 缪文清, 沈炳良, 邵瑜, 等. 区块链应用对再制造供应链碳减排及产品定价的影响研究: 基于区块链信息传递和消费者低碳偏好视角的分析[J]. 价格理论与实践, 2025(3): 233-238, 263.

[11] 熊波, 黄晨星, 朱小武, 等. 非对称信息下零售商主导供应链的碳减排合同激励与协调[J]. 系统管理学报, 2025, 34(4): 980-993.

[12] WANG L, ZHU G, PENG K. Financing decisions for a green supply chain considering channel competition and consumers' low-carbon preference[J]. Expert Systems With Applications, 2026, 316(22): 131875.

[13] ZHOU W, PIRAMUTHU S. Remanufacturing with RFID item-level information: optimization, waste reduction and quality improvement[J]. International Journal of Production Economics, 2013, 145(2): 647-657.

[14] USAMA M, RAMISH A. Towards a sustainable reverse logistics framework/typologies based on radio frequency identification (RFID)[J]. Operations and Supply Chain Management, 2020, 13(3): 222-232.

[15] 张李浩, 常陆雨, 范体军. 资金约束供应链 RFID 投资决策与融资优化[J]. 中国管理科学, 2021, 29(5): 45-54.

[16] 杨宏林, 窦甜丹, 高明运. 考虑 RFID 应用的资金约束供应链订购决策研究[J]. 运筹与管理, 2021, 30(8): 93-98.

[17] 杨惠霄, 姜晨琪, 弋泽龙. 考虑库存损耗的供应链投资 RFID 技术决策与协调机制设计[J/OL]. 系统管理学报, 1-20[2026-04-10]. https://link.cnki.net/urlid/31.1977.n.20241024.1140.002.

[18] 陆琪鹏, 刘亚丽, 刘长庚, 等. 基于区块链的 RFID 供应链产品所有权转移方案[J]. 电子学报, 2025, 53(2): 451-459.

[19] 冯颖, 宣彪, 许蓉, 等. 考虑灰市产品信息追溯的灰市供应链定价决策[J]. 运筹与管理, 2025, 34(1): 156-163.

[20] JUNG K S, HWANG H. Competition and cooperation in a remanufacturing system with take-back requirement[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2011, 22(3): 427-433.

[21] 许茂增, 唐飞. 考虑消费者偏好的闭环供应链差别定价模型[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(4): 945-954.

[22] SAVASKAN R C, BHATTACHARYA S, VAN WASSENHOVE L N. Closed-loop supply chain models with product remanufacturing[J]. Management Science, 2004, 50(2): 239-252.

[23] ATASU A, SOUZA G C. How does productrecovery affect quality choice?[J]. Production and Operations Management, 2013, 22(4): 991-1010.

[24] FAN T, CHANG X, GU C, et al. Benefits of RFID technology for reducing inventory shrinkage[J]. International Journal of Production Economics, 2014, 147(1): 659-665.

[25] 王娜, 张玉林. 专利保护下闭环供应链碳减排及协调决策[J]. 控制与决策, 2022, 37(5): 1378-1388.

[26] 王珊珊, 范小军, 郭鑫. 考虑不同渠道优势的 RFID 技术的投资均衡策略[J]. 管理学报, 2022, 19(6): 919-927.

Research on Adoption Decision of RFID Technology in Closed-loop Supply Chain under Authorization Remanufacturing Model

LI Wenchuan[1], ZHANG Anqi[2], XIAO Xiao[2]

(1. School of Humanities and Law, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;
2. School of Economics and Management, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Under an authorized remanufacturing model, driven by both carbon tax and consumers' low-carbon preferences, and leveraging RFID technology's capability to eliminate the error recovery rate, three models were constructed to capture the scenarios before and after RFID adoption under decentralized and centralized decision-making. It is found that when the RFID unit tag cost is high and the error recovery rate is low, the profits of the original manufacturer and the authorized remanufacturer after technology adoption can still be higher than those before adoption, provided that the carbon tax rate and consumers' low-carbon preferences meet certain conditions. It is revealed that the inhibitory effect of a carbon tax rate increase on new product output is intensified by higher consumers' low-carbon preferences; otherwise, it becomes relatively mild. When low-carbon preferences approach 1, the output of remanufactured products is significantly boosted by each unit increase in the carbon tax. Opposite effects on the unit authorization fee are exerted by carbon tax and consumers' low-carbon preferences, and the weakening effect of a carbon tax increase on the fee is more pronounced under high-preference scenarios. It is shown that low total supply chain profit is mainly caused by two situations: the coexistence of a high carbon tax and low preferences, where high enterprise costs are incurred but market returns are insufficient, and extremely low consumers' low-carbon preferences, where profit remains low even with a zero carbon tax, and emission reduction incentives are observed to be weak.

Keywords: carbon tax; consumers' low-carbon preference; authorized remanufacturing; RFID(radio frequency identification) technology; closed-loop supply chain