# 碳交易政策下基于演化博弈的再制造闭环供应链 RFID 投资决策研究

李文川[1]，肖 潇[2]，张安琪[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**：碳交易政策背景下，制造商投入射频识别技术（RFID）可提升碳排放核算精度，零售商投入则能提高废旧产品回收效率。为探究碳约束再制造闭环供应链中双方 RFID 技术投资的行为演化规律，构建了制造商与零售商演化博弈模型，求解复制动态方程得出系统演化稳定策略，剖析投资成本、碳交易价格、回收收益及成本分担系数等关键参数的影响。结果表明，系统存在（投资，投资）与（不投资，不投资）两类稳定均衡；初始投资意愿与协同效应可推动双方共同投资，低成本、高碳价与高回收收益能提升合作概率，合理成本分摊比例亦能促进协同投资。

**关键词**：碳交易政策；RFID 技术；再制造闭环供应链；投资策略；演化博弈

**中图分类号**：F274 **文献标志码**：A **文章编号**：1671－1807(2026)12－0015－11

近年来，温室气体排放加剧全球变暖，各国相继出台减排目标与政策承诺。欧盟通过改革碳排放交易体系对企业设置排放上限，中国也明确提出 2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和的战略目标，并于 2021 年正式启动全国碳交易市场[1]。在碳限额与交易机制下，企业既要为碳排放支付成本，也可将多余碳配额在市场中出售获利[2]。这使得企业的生产运营决策必须将碳排放纳入考量。在此背景下，再制造通过对废旧产品的回收与修复实现资源再利用，能够显著降低生产过程中的碳排放与材料消耗，已成为碳交易政策下企业降低碳排放成本的有效途径[3]。然而，再制造闭环供应链在实际运行中面临两个突出问题：一是碳排放核算主要依赖估算，数据精度不足，难以满足碳交易市场的履约要求；二是废旧产品回收过程信息不透明，回收率难以有效提升，制约了再制造规模的扩大。这两个问题导致再制造的环境效益与经济效益无法充分发挥，迫切需要引入新的技术手段加以解决。

射频识别技术（radio frequency identification，RFID）凭借非接触式自动识别能力，可通过无线电信号实时采集物品的身份、位置及状态信息，为解决上述问题提供新的思路。制造商在产品中嵌入 RFID 标签，可实时精确追踪产品全生命周期的碳排放数据，将传统粗略估算转变为精细核算[4-5]，从而降低履约成本、优化碳资产管理。零售商则利用 RFID 对回流废旧产品进行唯一标识与快速甄别，精准区分可回收件与不可回收件，从而提升有效回收的准确性[6]，进而从再制造活动中获取更高收益。RFID 技术的显著优势推动了企业投资实践的兴起，也引发了学术界的广泛关注与深入研究。喻鸣谦等[7]针对供应链投资 RFID 技术的激励机制选择问题，假设批发价固定，构建了三种激励机制下的决策模型，求解了不同初始批发价与谈判权力情境下，制造商和零售商实现双赢投资的边界条件。王珊珊等[8]从渠道权力差异视角，剖析了双渠道供应链中库存错放下 RFID 采纳的均衡条件。张李浩等[9]研究了资金约束零售商在库存错放情境下的 RFID 投资与融资决策问题，基于报童模型求解了四种组合情境下的均衡策略，发现融资可提高成本承受上限且分摊比例起决定作用。江秋阳等[10]以两条竞争型供应链为对象，考虑 RFID 技术可以提高库存可获得率，研究了供应商成本差异对 RFID 投资均衡的影响。熊雨萱等[11]以装配式建筑为背

**收稿日期**：2026-04-15

**基金项目**：国家自然科学基金（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；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；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。

景，利用仿真对比了 RFID 采纳前后的效率差异，探究投资成本在工厂与工地间的分摊机制。Han 等[12]结合货物追踪与路径优化模块，探究 RFID 技术部署对物流运作效率与成本结构的影响。Shuai 等[13]以单供应商与两零售商构成的主从供应链为对象，分析潜在竞争者进入对 RFID 采纳决策及成员收益的影响。Ilyina 和 Kirina[14]以俄罗斯石油运输企业为案例，探究 RFID 替代条码系统的经济可行性及其与区块链协同应用对运营成本的降低作用。

梳理以上文献可知，现有研究多集中于 RFID 技术在物流追踪和库存管理方面的应用，较少考虑其提高碳排放核算的效用。除此之外，多数研究限于技术投资的成本收益阈值分析，较少纳入碳交易政策约束，以及缺少对成员间动态策略互动的考察。在再制造闭环供应链中，制造商与零售商投资 RFID 的侧重点存在差异。制造商更关注碳排放核算的准确性，以应对碳交易政策的约束；零售商则更关注回收效率的提升，以扩大再制造利润空间。这种差异使得双方在是否投资、何时投资及如何分担成本等问题上反复博弈，而传统的完全理性博弈模型难以刻画这一动态过程。

综上所述，在碳交易政策背景下，再制造闭环供应链中具有不同 RFID 投资动机的制造商和零售商，如何在有限理性下通过动态博弈协调彼此的投资决策问题。为此，本文运用演化博弈理论，考虑到制造商 M 投资 RFID 技术能节省碳排放量，零售商 R 投资 RFID 技术能提高产品回收率，构建了一个针对再制造闭环供应链 RFID 投资的动态演化模型。先从静态博弈视角获取混合策略纳什均衡解，以此作为演化博弈分析的基准和参照；再转入演化博弈分析，获得系统的演化稳定策略(ESS)，同时对其稳定性条件与关键参数的敏感程度加以考查；最后借助数值仿真，模拟系统随时间的演化轨迹，验证模型命题的有效性。

## 1　问题描述与基本假设

### 1.1　问题描述

假设闭环供应链系统存在两个成员，分别为制造商 M 和零售商 R，他们在市场中处于竞争关系，双方围绕 RFID 投资展开多轮博弈。起初因有限理性，初始策略难称最优。但通过持续学习与策略迭代，系统可趋于均衡。

具体模型参数及其释义如表 1 所示。制造商 M 和零售商 R 以追求自身利益最大化为目标，双方收益矩阵如表 2 所示。

**表 1　模型参数及其释义**

| 参数名称 | 参数释义 | 参数名称 | 参数释义 |
|---|---|---|---|
| $\prod_M$ | 制造商 M 不投资 RFID 技术时的收益 | $e_2$ | 投资 RFID 技术后的单位碳排放量 |
| $\prod_R$ | 零售商 R 不投资 RFID 技术时的收益 | $P$ | 单位碳交易价格 |
| $\eta$ | 回收率的增量 | $Q$ | 制造商 M 的产品总产量 |
| $K_1$ | 回收利用率转换收益的敏感系数 | $c_{RFID}$ | 单位投资成本 |
| $e_1$ | 投资 RFID 技术前单位碳排放量 | $\theta$ | 投资成本分担系数 |
| $\Delta e$ | 投资 RFID 技术后节省的单位碳排放量 | $E$ | 政府分配的免费碳配额 |
| $E_{MA}$ | 制造商 M 投资 RFID 技术的期望收益 | $E_{MN}$ | 制造商 M 不投资 RFID 技术的期望收益 |
| $E_{RA}$ | 零售商 R 投资 RFID 技术时的期望收益 | $E_{RN}$ | 零售商 R 不投资 RFID 技术时的期望收益 |
| $\bar{E}_M$ | 制造商 M 的整体期望收益 | $\bar{E}_R$ | 零售商 R 的整体期望收益 |

**表 2　博弈双方矩阵**

| 博弈主体 | 博弈策略 | 制造商 M | |
|---|---|---|---|
| | | 投资 RFID 技术（A 策略）（$x$） | 不投资 RFID 技术（N 策略）（$1-x$） |
| 零售商 R | 投资 RFID 技术（A 策略）（$y$） | $\prod_M-\theta c_{RFID}-P(Qe_2-E)$<br>$\prod_R+\eta K_1-(1-\theta)c_{RFID}$ | $\prod_M-P(Qe_1-E)$<br>$\prod_R+\eta K_1-c_{RFID}$ |
| | 不投资 RFID 技术（N 策略）（$1-y$） | $\prod_M-c_{RFID}-P(Qe_2-E)$<br>$\prod_R$ | $\prod_M-P(Qe_1-E)$<br>$\prod_R$ |

### 1.2　基本假设

**假设 1：**假设在自然环境下，存在一个运行时长无限的再制造闭环供应链系统，其中博弈主体 1 为该系统内的制造商 M，博弈主体 2 为系统内的零售商 R。两大博弈主体均具备有限理性特征，且各自拥有两种策略可供选择，分别是投资 RFID 技术（记为 A 策略）与不投资 RFID 技术（记为 N 策略）。

**假设 2：**假设制造商 M 不投资 RFID 技术时收益为 $\prod_M$。零售商 R 不投资 RFID 技术时收益为 $\prod_R$，投资 RFID 技术后收益为 $\prod_R+\eta K_1$，其中 $\eta K_1$ 为投资 RFID 技术提高可用于再制造废旧产品回收率所带来的收益，$\eta$ 为回收率的增量，$K_1$ 为零

售商 R 对回收利用率转换收益的敏感系数。

**假设 3**:制造商 M 进行决策需要考虑碳政策的影响。投资 RFID 技术前单位碳排放量为 $e_1$,投资 RFID 技术后节省的单位碳排放量为 $\Delta e$,此时单位碳排放量为 $e_2=e_1-\Delta e(e_2<e_1)$。单位碳交易价格为 $P$,制造商产量为 $Q$,投资 RFID 技术前碳排放总量为 $Qe_1$,投资 RFID 技术后碳排放总量为 $Qe_2$。

**假设 4**:假设再制造闭环供应链系统单个成员投资 RFID 技术需要承担的投资成本为 $c_{\mathrm{RFID}}$。当制造商 M 和零售商 R 选择共同投资 RFID 技术时,制造商 M 需要承担的投资成本为 $\theta c_{\mathrm{RFID}}$,零售商 R 需要承担的投资成本为$(1-\theta)c_{\mathrm{RFID}}$,$\theta$ 为投资成本分担系数。

**假设 5**:博弈伊始,制造商 M 的策略选择概率设定如下:选择 A 策略的概率为 $x(1\geqslant x\geqslant 0)$,选择 N 策略的概率为 $1-x$;对应地,零售商 R 选择 A 策略的概率为 $y(1\geqslant y\geqslant 0)$,选择 N 策略的概率为 $1-y$。

## 2 长期竞争环境下 RMCLSC 的 RFID 投资演化博弈研究

### 2.1 制造商和零售商投资 RFID 的静态博弈模型

静态博弈视角下,参与者被假定为同时决策。即便现实中的决策存在先后顺序,但只要后动者无法观测到先动者的具体选择,该情形仍可归入静态博弈范畴。

制造商 M 选择 A 策略(投资 RFID 技术)和 N 策略(不投资 RFID 技术)的期望收益分别为

$$\begin{aligned}E_{\mathrm{MA}}&=y\left[\prod\nolimits_{\mathrm{M}}-\theta c_{\mathrm{RFID}}-P(Qe_2-E)\right]+\\&\quad(1-y)\left[\prod\nolimits_{\mathrm{M}}-c_{\mathrm{RFID}}-P(Qe_2-E)\right]\\&=\prod\nolimits_{\mathrm{M}}-c_{\mathrm{RFID}}-P(Qe_2-E)+\\&\quad(1-\theta)yc_{\mathrm{RFID}}\end{aligned}\tag{1}$$

$$\begin{aligned}E_{\mathrm{MN}}&=y\left[\prod\nolimits_{\mathrm{M1}}-P(Qe_1-E)\right]+(1-y)\times\\&\quad\left[\prod\nolimits_{\mathrm{M1}}-\mathrm{P}(Qe_1-E)\right]\\&=\prod\nolimits_{\mathrm{M}}-P(Qe_1-E)\end{aligned}\tag{2}$$

制造商 M 的整体期望收益为

$$\begin{aligned}\bar{E}_{\mathrm{M}}&=xE_{\mathrm{MA}}+(1-x)E_{\mathrm{MN}}\\&=\prod\nolimits_{\mathrm{M}}-P(Qe_1-E)+x[(1-\theta)yc_{\mathrm{RFID}}-\\&\quad c_{\mathrm{RFID}}+PQ\Delta e]\end{aligned}\tag{3}$$

零售商 R 选择 A 策略(投资 RFID 技术)和 N 策略(不投资 RFID 技术)的期望收益分别为

$$\begin{aligned}E_{\mathrm{RA}}&=x[\prod\nolimits_{\mathrm{R}}+\eta K_1-(1-\theta)c_{\mathrm{RFID}}]+\\&\quad(1-x)(\prod\nolimits_{\mathrm{R}}+\eta K_1-c_{\mathrm{RFID}})\\&=\prod\nolimits_{\mathrm{R}}+\eta K_1-c_{\mathrm{RFID}}+\theta xc_{\mathrm{RFID}}\end{aligned}\tag{4}$$

$$E_{\mathrm{RN}}=x\prod\nolimits_{\mathrm{R}}+(1-x)\prod\nolimits_{\mathrm{R}}=\prod\nolimits_{\mathrm{R}}\tag{5}$$

零售商 R 的整体期望收益为

$$\begin{aligned}\bar{E}_{\mathrm{R}}&=yE_{\mathrm{RA}}+(1-y)E_{\mathrm{RN}}=\prod\nolimits_{\mathrm{R}}+\\&\quad y(\eta K_1-c_{\mathrm{RFID}}+\theta xc_{\mathrm{RFID}})\end{aligned}\tag{6}$$

纯策略均衡的假设前提是“企业完全理性”,即企业能精准计算所有策略的收益,且必然选择最优策略。但在实际市场中,制造企业的决策往往受“有限理性”影响(如信息不完全、对未来预期模糊),此时混合策略均衡更贴合真实决策逻辑。即制造商 M 和零售商 R 选择 A 策略和 N 策略的概率相等。令 $E_{\mathrm{MA}}=E_{\mathrm{MN}}$,$E_{\mathrm{RA}}=E_{\mathrm{RN}}$,可以得到:$x^*=\dfrac{c_{\mathrm{RFID}}-\eta K_1}{\theta c_{\mathrm{RFID}}}$,$y^*=\dfrac{c_{\mathrm{RFID}}-PQ\Delta e}{(1-\theta)c_{\mathrm{RFID}}}$。

由于制造商 M 和零售商 R 可选择多种不同策略,在静态博弈无决策突变的条件下,为证明 $x^*$、$y^*$ 为该博弈的唯一混合策略纳什均衡,制造商 M 和零售商 R 的整体收益分别对 $x$,$y$ 求偏导。对制造商 M 的整体收益求 $x$ 的偏导,可以得到:$\dfrac{\partial\bar{E}_{\mathrm{M}}}{\partial x}=(1-\theta)yc_{\mathrm{RFID}}-c_{\mathrm{RFID}}+PQ\Delta e$,则制造商 M 获得最大收益的一阶条件为:$y^*=\dfrac{c_{\mathrm{RFID}}-PQ\Delta e}{(1-\theta)c_{\mathrm{RFID}}}$。

同理对零售商 R 的整体收益求 $y$ 的偏导,可以得到:$\dfrac{\partial\bar{E}_{\mathrm{R}}}{\partial y}=\eta K_1-c_{\mathrm{RFID}}+\theta xc_{\mathrm{RFID}}$,则零售商 R 获得最大收益的一阶条件为:$x^*=\dfrac{c_{\mathrm{RFID}}-\eta K_1}{\theta c_{\mathrm{RFID}}}$。

根据该混合策略可得,当 $y^*<\dfrac{c_{\mathrm{RFID}}-PQ\Delta e}{(1-\theta)c_{\mathrm{RFID}}}$时,制造商 M 选择不投资 RFID 技术,能够获得最佳收益;当 $y^*>\dfrac{c_{\mathrm{RFID}}-PQ\Delta e}{(1-\theta)c_{\mathrm{RFID}}}$时,制造商 M 选择投资 RFID 技术,能够获得最佳收益。当 $x^*<\dfrac{c_{\mathrm{RFID}}-\eta K_1}{\theta c_{\mathrm{RFID}}}$时,零售商 R 选择不投资 RFID 技术,能够获得最佳收益;当 $x^*>\dfrac{c_{\mathrm{RFID}}-\eta K_1}{\theta c_{\mathrm{RFID}}}$时,零售商 R 选择投资 RFID 技术,能够获得最佳收益。

在上述静态博弈的混合纳什均衡情境下,制造商 M 的静态反应函数为

$$x=\begin{cases}0, & y<\dfrac{c_{RFID}-PQ\Delta e}{(1-\theta)c_{RFID}}\\ (0,1), & y=\dfrac{c_{RFID}-PQ\Delta e}{(1-\theta)c_{RFID}}\\ 1, & y>\dfrac{c_{RFID}-PQ\Delta e}{(1-\theta)c_{RFID}}\end{cases}\tag{7}$$

制造商 M2 的静态反应函数为

$$y=\begin{cases}0, & x<\dfrac{c_{RFID}-\eta K_1}{\theta c_{RFID}}\\ (0,1), & x=\dfrac{c_{RFID}-\eta K_1}{\theta c_{RFID}}\\ 1, & x>\dfrac{c_{RFID}-\eta K_1}{\theta c_{RFID}}\end{cases}\tag{8}$$

### 2.2　制造商和零售商投资 RFID 的演化博弈模型

再制造闭环供应链并非孤立系统，而是受多种外界因素作用的有机整体。在上述静态博弈中，制造商和零售商的决策呈现动态特征：他们依据阶段性博弈结果迭代下一轮策略，通过学习和效仿对手的优势决策，并借助行业信息的持续积累来调整博弈策略，最终获取竞争优势。这意味着，供应链成员是否投资 RFID 技术，其决策会随时间的推进而发生适应性改变。

演化博弈是静态博弈的一种动态拓展。在演化博弈中，博弈方通过不断地试错和学习来调整自己的策略，以适应环境的变化。随着时间的推移，那些能够带来更高收益的策略会逐渐被更多的博弈方所采用，而收益较低的策略则会逐渐被淘汰，最终达到一种动态的均衡状态。这种理论强调了博弈过程的动态性和策略的演化性，更符合现实中经济主体的决策行为。基于此，对两制造投资 RFID 技术行为进行动态分析。

制造商 M 选择 A 策略（投资 RFID 技术）的复制动态方程为

$$F(x)=\frac{\partial x}{\partial t}=x(E_{MA}-\bar{E}_M)=x(1-x)(E_{MA}-E_{MN})==x(1-x)[-c_{RFID}+(1-\theta)\times yc_{RFID}+PQ\Delta e]\tag{9}$$

零售商 R 选择 A 策略（投资 RFID 技术）的复制动态方程为

$$F(y)=\frac{\partial y}{\partial t}=y(E_{RA}-\bar{E}_R)=y(1-y)(E_{RA}-E_{RN})==y(1-y)(\eta K_1-c_{RFID}+\theta xc_{RFID})\tag{10}$$

令式(9)和式(10)等于零，得到 5 个均衡点，分别为 $A_1(0,0)$、$A_2(0,1)$、$A_3(1,0)$、$A_4(1,1)$、$A_5(x^*,y^*)$，其中 $x^*=\dfrac{c_{RFID}-\eta K_1}{\theta c_{RFID}}$，$y^*=\dfrac{c_{RFID}-PQ\Delta e}{(1-\theta)c_{RFID}}$，且 $0<x^*,y^*<1$。

#### 2.2.1　制造商 M1 的投资策略演化稳定性分析

**情况 1：**当 $y^*=\dfrac{c_{RFID}-PQ\Delta e}{(1-\theta)c_{RFID}}$ 时，总有 $\dfrac{\partial F(x)}{\partial x}=0$，此时，对任意 $x$ 来说均是稳定状态。即如果零售商 R 以比率 $\dfrac{c_{RFID}-PQ\Delta e}{(1-\theta)c_{RFID}}$ 进行投资 RFID 技术时，制造商 M 的任意状态都是稳定状态。

**情况 2：**当 $y^*>\dfrac{c_{RFID}-PQ\Delta e}{(1-\theta)c_{RFID}}$ 时，$\left.\dfrac{\partial F(x)}{\partial x}\right|_{x=1}<0$，此时，$x=1$ 是制造商 M 的演化稳定策略。即如果零售商 R 以高于 $\dfrac{c_{RFID}-PQ\Delta e}{(1-\theta)c_{RFID}}$ 的比率进行投资 RFID 技术，制造商 M 的稳定状态是不投资 RFID 技术。

**情况 3：**当 $y^*<\dfrac{c_{RFID}-PQ\Delta e}{(1-\theta)c_{RFID}}$ 时，$\dfrac{\partial F(x)}{\partial x}<0$，此时，$x=0$ 是制造商 M 的演化稳定策略。即如果零售商 R 以高于 $\dfrac{c_{RFID}-PQ\Delta e}{(1-\theta)c_{RFID}}$ 的比率进行投资 RFID 技术，制造商 M 的稳定状态是投资 RFID 技术。

#### 2.2.2　零售商 R 的投资策略演化稳定性分析

**情况 1：**当 $x^*=\dfrac{c_{RFID}-\eta K_1}{\theta c_{RFID}}$ 时，总有 $\dfrac{\partial F(y)}{\partial y}=0$，此时，对任意 $y$ 来说均是稳定状态。即如果制造商 M 以比率 $\dfrac{c_{RFID}-\eta K_1}{\theta c_{RFID}}$ 进行投资 RFID 技术时，零售商 R 的任意状态都是稳定状态。

**情况 2：**当 $x^*>\dfrac{c_{RFID}-\eta K_1}{\theta c_{RFID}}$ 时，$\dfrac{\partial F(y)}{\partial y}<0$，此时，$y=1$ 是零售商 R 的演化稳定策略。即如果制造商 M 以高于 $\dfrac{c_{RFID}-\eta K_1}{\theta c_{RFID}}$ 的比率进行投资 RFID 技术，零售商 R 的稳定状态是不投资 RFID 技术。

**情况 3：**当 $x^*<\dfrac{c_{RFID}-\eta K_1}{\theta c_{RFID}}$ 时，$\dfrac{\partial F(y)}{\partial y}<0$，此时，$y=0$ 是零售商 R 的演化稳定策略。即如果制造商 M 以高于 $\dfrac{c_{RFID}-\eta K_1}{\theta c_{RFID}}$ 的比率进行投资 RFID 技术，零售商 R 的稳定状态是投资 RFID 技术。

#### 2.2.3　制造商 M 和零售商 R 的系统演化稳定分析

根据 Fredman[15] 提出的局部稳定性分析理论，系统平衡点的稳定特性可通过雅可比矩阵的局部

稳定性分析予以确定。具体判定准则如下:如果雅可比矩阵的行列式 $\mathrm{Det}(\boldsymbol{J})>0$ 并且迹 $\mathrm{Tr}(\boldsymbol{J})<0$,则该平衡点为演化稳定策略点;若 $\mathrm{Det}(\boldsymbol{J})>0$ 并且迹 $\mathrm{Tr}(\boldsymbol{J})>0$,则该平衡点为不稳定状态;若 $\mathrm{Det}(\boldsymbol{J})<0$ 并且迹 $\mathrm{Tr}(\boldsymbol{J})=0$ 或不确定,则该平衡点为鞍点。通过复制动态方程,可以得到雅可比矩阵为

$$\boldsymbol{J}=\begin{pmatrix}(1-2x)[-c_{\mathrm{RFID}}+(1-\theta)yc_{\mathrm{RFID}}+PQ\Delta e] & x(1-x)(1-\theta)c_{\mathrm{RFID}}\\ y(1-y)\theta c_{\mathrm{RFID}} & (1-2y)(\eta K_1-c_{\mathrm{RFID}}+\theta xc_{\mathrm{RFID}})\end{pmatrix} \tag{11}$$

各均衡点的行列式和迹值如表 3 所示。

因为 $0<x^*,y^*<1$,$0<\theta<1$,$c_{\mathrm{RFID}}>0$,所以 $c_{\mathrm{RFID}}-\eta K_1>0$,$c_{\mathrm{RFID}}-PQ\Delta e>0$。令 $B_1=-\theta c_{\mathrm{RFID}}+PQ\Delta e$,$B_2=\eta K_1-c_{\mathrm{RFID}}+\theta c_{\mathrm{RFID}}$,对四种情形的均衡点稳定性结果进行分析(表 4)。

**情形 1**:当 $B_1>0$,$B_2>0$ 同时成立时,系统的稳定策略为(0,0),(1,1)。此时节省的碳成本和提高产品回收率的收益均大于制造商 M 和零售商 R 合作投资 RFID 技术的成本,表示合作投资 RFID 技术均能获益。但最终策略与初始选择概率和临界点 $A_5(x^*,y^*)$ 有关,演化过程如图 1 情形 1 所示。分界线 $A_2A_5A_3$ 将图形面积分为两部分,即面积 $A_1A_2A_5A_3$ 和面积 $A_2A_5A_3A_4$。其中面积 $A_1A_2A_5A_3$ 的大小表示决策主体双方均不投资 RFID 技术的概率,其面积越大,决策主体不投资 RFID 技术的概率越大,系统最终演化结果可能为(不投资,不投资);面积 $A_2A_5A_3A_4$ 的大小表示决策主体双方均投资 RFID 技术的概率,其面积越大,决策主体投资 RFID 技术的概率越大,系统最终演化结果可能为(投资,投资)。

**情形 2**:当 $B_1>0$,$B_2<0$ 同时成立时,系统的稳定策略为(0,0)。此时节省的碳成本大于两者合作投资 RFID 技术的成本,制造商 M 可获利;而提高产品回收率的收益小于两者合作投资 RFID 技术的成本时,零售商 R 无利可图,因此其稳定策略为不投资,随着系统不断演化,最终稳定策略为双方均不投资,演化过程如图 1 情形 2 所示。

**情形 3**:当 $B_1<0$,$B_2>0$ 同时成立时,系统的稳定策略为(0,0)。此时节省的碳成本小于两者合作投资 RFID 技术的成本,制造商 M 无利可图,因此其稳定策略为不投资;而提高产品回收率的收益大于两者合作投资 RFID 技术的成本时,零售商 R 可以获利。随着系统不断演化,最终稳定策略为双方均不投资,演化过程如图 1 情形 3 所示。

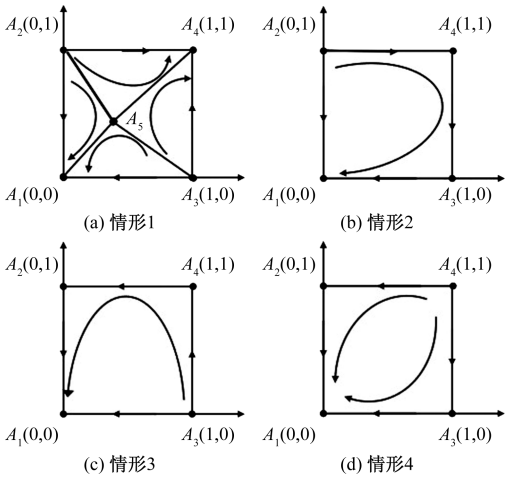



**图 1　不同情形下相位演化**

**表 3　不同均衡点的雅可比矩阵行列式和迹值情况**

| 均衡点 | $\mathrm{Det}(\boldsymbol{J})$ | $\mathrm{Tr}(\boldsymbol{J})$ |
|---|---|---|
| $A_1(0,0)$ | $(-c_{\mathrm{RFID}}+PQ\Delta e)(\eta K_1-c_{\mathrm{RFID}})$ | $-2c_{\mathrm{RFID}}+PQ\Delta e+\eta K_1$ |
| $A_2(0,1)$ | $(-\theta c_{\mathrm{RFID}}+PQ\Delta e)[-(\eta K_1-c_{\mathrm{RFID}})]$ | $-\eta K_1+PQ\Delta e+(1-\theta)c_{\mathrm{RFID}}$ |
| $A_3(1,0)$ | $[-(-c_{\mathrm{RFID}}+PQ\Delta e)](\eta K_1-c_{\mathrm{RFID}}+\theta c_{\mathrm{RFID}})$ | $\theta c_{\mathrm{RFID}}+\eta K_1-PQ\Delta e$ |
| $A_4(1,1)$ | $[-(-\theta c_{\mathrm{RFID}}+PQ\Delta e)][-(\eta K_1-c_{\mathrm{RFID}}+\theta c_{\mathrm{RFID}})]$ | $\eta K_1-c_{\mathrm{RFID}}+PQ\Delta e$ |
| $A_5(x^*,y^*)$ | $-x^*(1-x^*)y^*(1-y^*)(1-\theta)\theta c_{\mathrm{RFID}}{}^2$ | 0 |

**表 4　不同情形的均衡点稳定性分析结果**

| 均衡点 | 情形 1 | | | 情形 2 | | | 情形 3 | | | 情形 4 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $B_1>0,B_2>0$ | | | $B_1>0,B_2<0$ | | | $B_1<0,B_2>0$ | | | $B_1<0,B_2<0$ | | |
| | $\mathrm{Det}(\boldsymbol{J})$ | $\mathrm{Tr}(\boldsymbol{J})$ | 稳定性 | $\mathrm{Det}(\boldsymbol{J})$ | $\mathrm{Tr}(\boldsymbol{J})$ | 稳定性 | $\mathrm{Det}(\boldsymbol{J})$ | $\mathrm{Tr}(\boldsymbol{J})$ | 稳定性 | $\mathrm{Det}(\boldsymbol{J})$ | $\mathrm{Tr}(\boldsymbol{J})$ | 稳定性 |
| $A_1(0,0)$ | + | − | 稳定 | + | − | 稳定 | + | − | 稳定 | + | − | 稳定 |
| $A_2(0,1)$ | + | + | 不稳定 | + | + | 不稳定 | − | ± | 鞍点 | − | ± | 鞍点 |
| $A_3(1,0)$ | + | + | 不稳定 | − | ± | 鞍点 | + | + | 不稳定 | − | ± | 鞍点 |
| $A_4(1,1)$ | + | − | 稳定 | − | ± | 鞍点 | − | ± | 鞍点 | + | + | 不稳定 |
| $A_5(x^*,y^*)$ | − | 0 | 鞍点 | − | 0 | 鞍点 | − | 0 | 鞍点 | − | 0 | 鞍点 |

**情形 4**：当 $B_1<0$，$B_2<0$ 同时成立时，系统的稳定策略为(0，0)。此时节省的碳成本和提高产品回收率的收益均小于制造商 M 和零售商 R 合作投资 RFID 技术的成本，表示合作投资 RFID 技术双方均无利可图。随着系统不断演化，最终稳定策略为双方均不投资，演化过程如图 1 情形 4 所示。

## 3　影响因素分析

根据上述分析可知，再制造闭环供应链系统成员的策略选择与投资成本、碳排放节省量和产品回收率等多个因素有关，同时通过对图形 $A_1A_2A_5A_3$ 和图形 $A_2A_5A_3A_4$ 的面积进行分析，得到以下命题。

**命题 1**：制造商 M 和零售商 R 合作投资 RFID 技术的概率随着投资成本增加而减小。

**证明**：根据上节情形 1 的分析可知，再制造闭环供应链成员策略选择与图形面积有关，其中图形 $A_1A_2A_5A_3$ 的面积越大，表示系统成员均不投资 RFID 技术的概率越大，令其为 $S_1$，图形 $A_2A_5A_3A_4$ 的面积越大，表示系统成员均投资 RFID 技术的概率越大，令其为 $S_2$，$S_1$ 的表达式为

$$S_1=\frac{1}{2}(1\times y^*)+\frac{1}{2}(1\times x^*)=\frac{1}{2}\left[\frac{c_{\mathrm{RFID}}-PQ\Delta e}{(1-\theta)c_{\mathrm{RFID}}}+\frac{c_{\mathrm{RFID}}-\eta K_1}{\theta c_{\mathrm{RFID}}}\right] \tag{12}$$

令 $S_1$ 对投资成本 $c_{\mathrm{RFID}}$ 求一阶偏导，可得

$$\frac{\partial S_1}{\partial c_{\mathrm{RFID}}}=\frac{1}{2}\frac{{c_{\mathrm{RFID}}}^2+PQ\Delta e}{(1-\theta){c_{\mathrm{RFID}}}^2}+\frac{1}{2}\frac{{c_{\mathrm{RFID}}}^2+\eta K_1}{\theta {c_{\mathrm{RFID}}}^2}>0 \tag{13}$$

$S_1$ 对投资成本 $c_{\mathrm{RFID}}$ 的一阶偏导数大于零，$S_1$ 是 $c_{\mathrm{RFID}}$ 的单调增函数，表明 $S_1$ 随着 $c_{\mathrm{RFID}}$ 的增大而增大，而 $S_2$ 随着 $c_{\mathrm{RFID}}$ 的增大而减小；$S_1$ 随着 $c_{\mathrm{RFID}}$ 减小而减小，而 $S_2$ 随着 $c_{\mathrm{RFID}}$ 的减小而增大。即再制造闭环供应链的成员投资 RFID 技术的概率随着 RFID 技术投资成本的增加而减小，随着 RFID 技术投资成本减小而增加。因为 RFID 技术投资成本越高，系统成员从该技术中获得的净收益越小，投资意愿自然降低；反之，成本越低，净收益越高，投资意愿上升。

**命题 2**：制造商 M 和零售商 R 合作投资 RFID 技术的概率随着单位碳排放节省量和产品回收率增量增加而增加。

**证明**：令 $S_1$ 对单位碳排放节省量 $\Delta e$ 和产品回收率增量 $\eta$ 分别求一阶偏导，可得：

$$\frac{\partial S_1}{\partial \Delta e}=-\frac{PQ\Delta e}{2(1-\theta)c_{\mathrm{RFID}}}<0 \tag{14}$$

$$\frac{\partial S_1}{\partial \eta}=-\frac{\eta K_1}{2\theta c_{\mathrm{RFID}}}<0 \tag{15}$$

$S_1$ 对单位碳排放节省量 $\Delta e$ 和回收率增量 $\eta$ 的一阶偏导数均小于零，$S_1$ 是 $\Delta e$、$\eta$ 的单调减函数，表明 $S_1$ 随着 $\Delta e$、$\eta$ 的增大而减小，而 $S_2$ 随着 $\Delta e$、$\eta$ 的增大而增大；$S_1$ 随着 $\Delta e$、$\eta$ 减小而增大，而 $S_2$ 随着 $\Delta e$、$\eta$ 的减小而减小。即再制造闭环供应链的成员投资 RFID 技术的概率随着单位碳排放节省量和回收率增量的增加而增加，随着单位碳排放节省量和回收率增量的减小而减小。因为单位碳排放节省量和回收率增量越大，带来的收益越大可以覆盖投资 RFID 技术的成本，系统成员从该技术中获得的净收益越大，投资意愿上升；反之，投资意愿降低。

**命题 3**：制造商 M 和零售商 R 合作投资 RFID 技术的概率随着单位碳交易价格和回收利用率转换收益敏感系数增加而增加。

**证明**：令 $S_1$ 对单位碳交易价格 $P$ 和回收利用率转换收益敏感系数 $K_1$ 分别求一阶偏导，可得

$$\frac{\partial S_1}{\partial P}=-\frac{Q\Delta e}{2(1-\theta)c_{\mathrm{RFID}}}<0 \tag{16}$$

$$\frac{\partial S_1}{\partial K_1}=-\frac{-\eta}{2\theta c_{\mathrm{RFID}}}<0 \tag{17}$$

$S_1$ 对单位碳交易价格 $P$ 和回收利用率转换收益敏感系数 $K_1$ 的一阶偏导数均小于零，$S_1$ 是 $P$、$K_1$ 的单调减函数，表明 $S_1$ 随着 $P$、$K_1$ 的增大而减小，而 $S_2$ 随着 $P$、$K_1$ 的增大而增大；$S_1$ 随着 $P$、$K_1$ 减小而增大，而 $S_2$ 随着 $P$、$K_1$ 的减小而减小。即再制造闭环供应链的成员投资 RFID 技术的概率随着单位碳交易价格和回收利用率转换收益敏感系数的增加而增加，随着单位碳交易价格和回收利用率转换收益敏感系数的减小而减小。因为单位碳交易价格上升，企业碳交易成本上升，投资 RFID 技术带来的收益能冲抵碳交易成本，投资意愿上升；回收利用率转换收益敏感系数上升，回收效益显著增大，投资意愿也上升；反之，投资意愿降低。

**命题 4**：当 $\frac{c_{\mathrm{RFID}}-PQ\Delta e}{(1-\theta)^2}>\frac{c_{\mathrm{RFID}}-\eta K_1}{\theta^2}$ 时，制造商 M 和零售商 R 合作投资 RFID 技术的概率随着投资成本分担系数增加而增加；当 $\frac{c_{\mathrm{RFID}}-PQ\Delta e}{(1-\theta)^2}<\frac{c_{\mathrm{RFID}}-\eta K_1}{\theta^2}$ 时，制造商 M 和零售商 R 合作投资 RFID 技术的概率随着投资成本分担系数增加而减小。

**证明**:令 $S_1$ 对投资成本分担系数 $\theta$ 求一阶偏导,可得

$$\frac{\partial S_1}{\partial \theta}=\frac{c_{\mathrm{RFID}}-PQ\Delta e}{2c_{\mathrm{RFID}}(1-\theta)^2}-\frac{c_{\mathrm{RFID}}-\eta K_1}{2c_{\mathrm{RFID}}\theta^2} \tag{18}$$

$S_1$ 对投资成本分担系数 $\theta$ 的一阶偏导数大小需要根据投资成本和投资 RFID 技术后节省碳成本和提高产品回收率的收益决定,不是简单的单调函数关系。当 $\frac{c_{\mathrm{RFID}}-PQ\Delta e}{(1-\theta)^2}>\frac{c_{\mathrm{RFID}}-\eta K_1}{\theta^2}$ 时,$S_1$ 是 $\theta$ 的单调增函数,表明 $S_1$ 随着 $\theta$ 的增大而增大,此时双方不投资 RFID 技术的概率增加;当 $\frac{c_{\mathrm{RFID}}-PQ\Delta e}{(1-\theta)^2}<\frac{c_{\mathrm{RFID}}-\eta K_1}{\theta^2}$ 时,$S_1$ 是 $\theta$ 的单调减函数,表明 $S_1$ 随着 $\theta$ 的增大而减小,此时双方不投资 RFID 技术的概率减小,投资概率增加。

## 4 数值算例分析

前文已讨论各参数对博弈主体及策略选择的影响。为直观地展示 RFID 投资在再制造闭环供应链中的演化规律,基于 MATLAB 软件进行仿真,各参数初始赋值如下:$c_{\mathrm{RFID}}=2.75$,$\eta=0.2$,$K_1=10$,$\theta=0.4$,$P=2$,$Q=4$,$\Delta e=0.25$,$x=0.6$,$y=0.6$。

### 4.1 博弈主体投资概率变化的仿真分析

4.1.1 博弈主体投资策略的概率变化。

如图 2 所示,制造商 M 和零售商 R 采用不同初始概率进入系统时,最终都收敛到(0,0)或(1,1)两个稳定状态。通过计算可知鞍点 $A_5$ 为(0.681 8,0.454 5)。当制造商 M 投资 RFID 技术的概率小于 0.681 8 时,制造商 M 选择不投资的策略,若投资概率大于 0.681 8,制造商 M 选择投资的策略;当零售商 R 投资 RFID 技术的概率小于 0.454 5 时,零售商 R 选择不投资的策略,若投资概率大于 0.454 5,零售商 R 选择投资的策略。此外,当制造商 M 和零售商 R 的投资概率超过某个临界值后,系统会迅速向均投资或均不投资均衡收敛。同时,系统成员在 RFID 技术投资决策上呈现明显的协同演化特征,当制造商 M 投资概率较低时,零售商 R 往往也倾向于不投资,形成(不投资,不投资)的稳定状态;而当制造商 M 投资意愿增强时,会带动零售商 R 跟进投资,形成(投资,投资)的稳定状态。

4.1.2 保持零售商 R 初始状态,探讨制造商 M 的不同投资概率下投资策略选择

当 $0<y<\frac{c_{\mathrm{RFID}}-PQ\Delta e}{(1-\theta)c_{\mathrm{RFID}}}$ 时,$x=0$ 是制造商 M 的

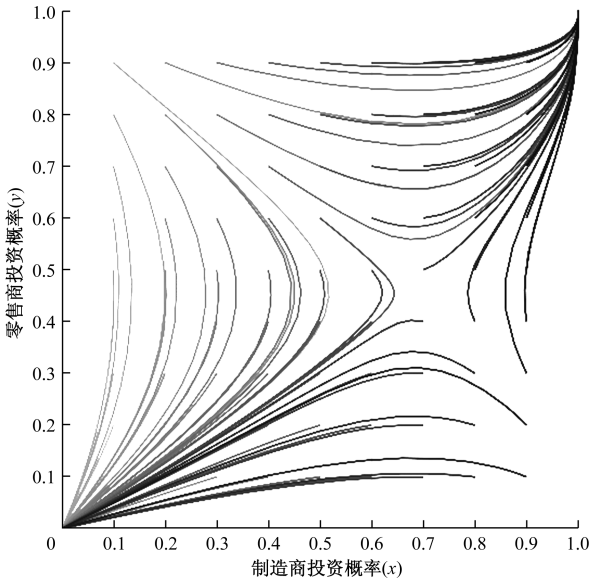



**图 2 不同初始概率动态演化过程**

演化稳定策略;当 $\frac{c_{\mathrm{RFID}}-PQ\Delta e}{(1-\theta)c_{\mathrm{RFID}}}<y<1$ 时,$x=1$ 是制造商 M 的演化稳定策略;通过前文可知,$\frac{c_{\mathrm{RFID}}-PQ\Delta e}{(1-\theta)c_{\mathrm{RFID}}}=0.454\ 5$,假设零售商 R 分别保持 $y=0.40$ 和 $y=0.55$ 两个初始状态,制造商 M 的初始状态为 $x=0.25$,再以 0.1 的步长保持增长,对模型仿真 6 次,观察系统成员策略选择的变化,如图 3 和图 4 所示。

根据图 3 和图 4 对比可知,保持零售商 R 初始投资概率不变,随着制造商 M 投资概率的增加,系统演化路径呈现一致性规律:曲线始终朝向(不投资,不投资)或(投资,投资)两种均衡状态收敛,且制造商 M 投资概率越高,系统向(不投资,不投资)均衡收敛的速度越慢。当零售商 R 投资概率为 0.40 时,制造商 M 需将投资概率提高至 0.75 才能实现(投资,投资)的均衡;而当零售商 R 投资概率

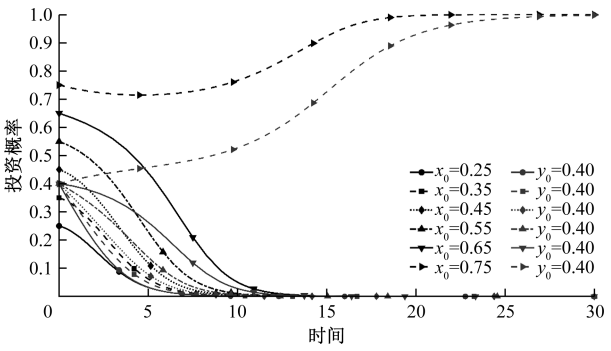



**图 3 $y=0.40$,制造商 M 不同投资概率时,系统策略选择演化**

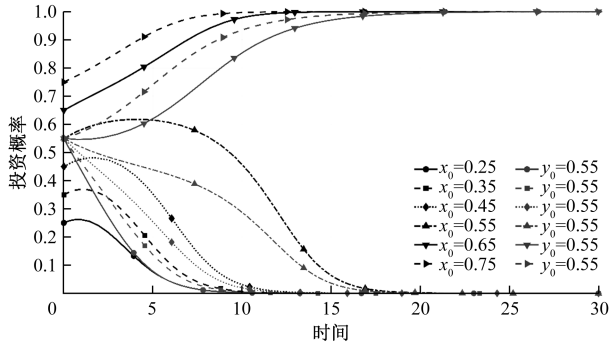



**图 4　$y$=0.55，制造商 M 不同投资概率时，系统策略选择演化**

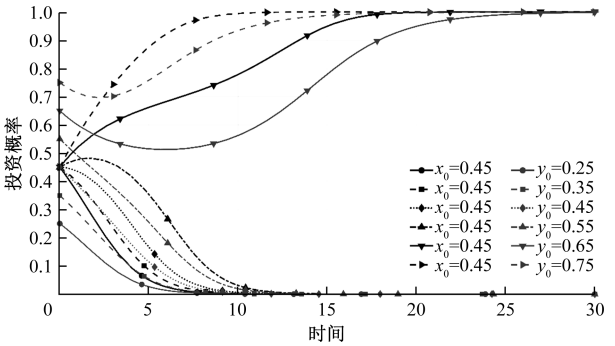



**图 5　$x$=0.45，零售商 R 不同投资概率时，系统策略选择演化**

增加至 0.55 时，制造商 M 仅需 0.65 的投资概率即可达到(投资，投资)的均衡，说明了零售商 R 投资意愿增加时，再制造闭环供应链系统更容易向(投资，投资)的均衡演化。

4.1.3　保持制造商 M 初始状态，探讨零售商 R 的不同投资概率下投资策略选择

当 $0<x<\frac{c_{\mathrm{RFID}}-\eta K_1}{\theta c_{\mathrm{RFID}}}$ 时，$y=0$ 是零售商 R 的演化稳定策略；当 $\frac{c_{\mathrm{RFID}}-\eta K_1}{\theta c_{\mathrm{RFID}}}<x<1$ 时，$y=1$ 是零售商 R 的演化稳定策略；通过前文可知，$\frac{c_{\mathrm{RFID}}-\eta K_1}{\theta c_{\mathrm{RFID}}}=0.681\ 8$，假设制造商 M 分别保持 $x=0.45$ 和 $x=0.75$ 两个初始状态，零售商 R 的初始状态为 $y=0.25$，再以 0.1 的步长保持增长，对模型仿真 6 次，观察系统成员策略选择的变化，如图 5 和图 6 所示。

根据图 5 和图 6 对比可知，保持制造商 M 初始投资概率不变，随着零售商 R 投资概率的增加，系统演化呈现共同规律：曲线均朝向(不投资，不投资)或(投资，投资)两种均衡状态收敛，且零售商 R 投资概率越高，系统向(不投资，不投资)均衡收敛的速度越慢。当制造商 M 投资概率为 0.45 时，零售商 R 需将投资概率提高至 0.65 才能实现(投资，投资)的均衡；而当制造商 M 投资概率增加至 0.75 时，零售商 R 仅需 0.45 的投资概率即可达到(投资，投资)的均衡，说明了制造商 M 投资意愿增加时，再制造闭环供应链系统更容易向(投资，投资)的均衡演化。

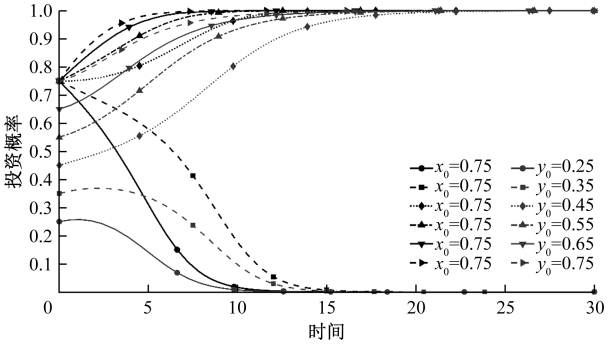



**图 6　$x$=0.75，零售商 R 不同投资概率时，系统策略选择演化**

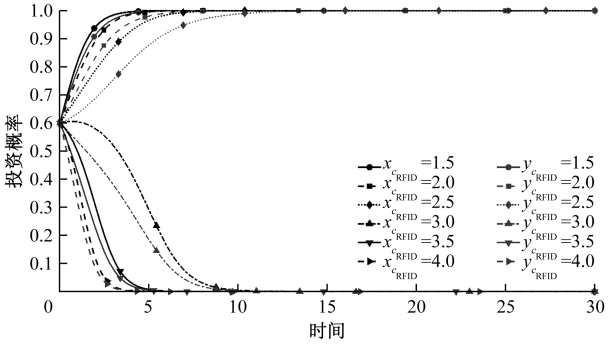



**图 7　投资成本对系统成员策略选择影响演化**

保持其他条件不变，随着投资成本增加，曲线由向坐标轴 $x=1$ 靠近演化至向坐标轴 $x=0$ 靠近，即再制造闭环供应链系统成员的策略选择由(投资，投资)转向(不投资，不投资)，验证了命题 1。

### 4.2　投资成本对博弈双方演化结果的仿真分析

保持其他参数不变，只考虑投资成本的影响，假设 RFID 初始投资成本 $c_{\mathrm{RFID}}=1.5$，并且以 0.5 的步长逐渐增长，进行 6 次仿真，观察系统成员策略选择的变化，如图 7 所示。

### 4.3　单位碳交易成本对博弈双方演化结果的仿真分析

保持其他参数不变，只考虑单位碳交易成本的影响，假设单位碳交易成本初始值为 $P=1.2$，并且以 0.2 的步长逐渐增长，进行 6 次仿真，观察系统成

员策略选择的变化,如图 8 所示。

保持其他条件不变,随着单位碳交易成本增加,曲线由向坐标轴 $x=0$ 靠近演化至向坐标轴 $x=1$ 靠近,即再制造闭环供应链系统成员的策略选择由(不投资,不投资)转向(投资,投资),验证了命题 3。

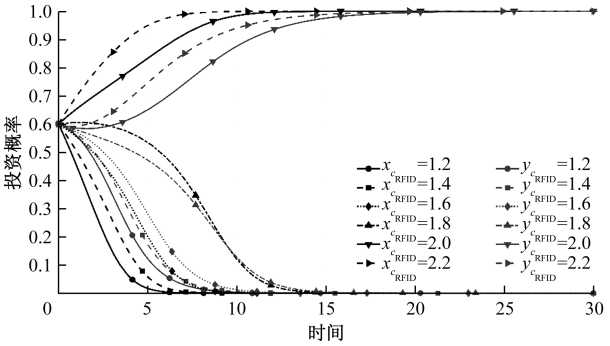



**图 8　单位碳交易成本对系统成员策略选择影响演化**

### 4.4　投资成本分摊系数对博弈双方演化结果的仿真分析

保持其他参数不变,只考虑投资成本分摊系数的影响,假设投资成本分摊系数初始值为 $\theta=0.1$,并且以 0.15 的步长逐渐增长,进行 6 次仿真,观察系统成员策略选择的变化,如图 9 所示。

保持其他条件不变,不同投资成本分摊系数的系统成员策略选择结果也不同。当投资成本分摊系数为 0.1 或 0.85 时,曲线向坐标轴$x=0$ 靠近,即制造商 M 和零售商 R 均选择不投资,这表明当投资成本分摊系数较高或者较低时,系统策略向(不投资,不投资)演化。而当投资成本分摊系数为 0.4 或 0.55 时,曲线向坐标轴 $x=1$ 靠近,即制造商 M 和零售商 R 均选择投资,系统策略向(不投资,不投资)演化。

当投资成本分摊系数较高或较低时,系统成员

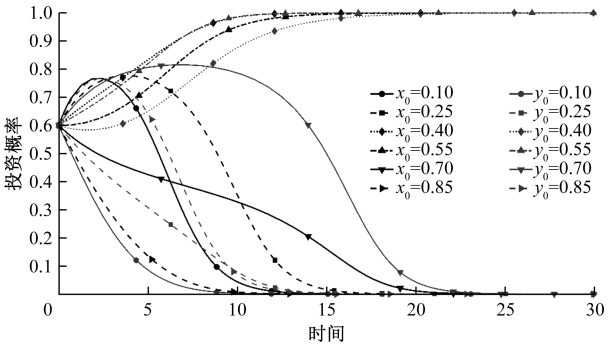



**图 9　投资成本分摊系数对系统成员策略选择影响演化**

某一方需要承担更多投资成本,而另一方存在搭便车的行为,因此最终向(不投资,不投资)演化,验证了命题 4。

### 4.5　投资收益对博弈双方演化结果的仿真分析

当制造商 M 和零售商 R 投资 RFID 技术时,制造商 M 可以获得碳排放节省收益,零售商 R 可以获得提高产品回收率的收益,在此统一理解为投资收益。保持其他参数不变,只考虑制造商 M 和零售商 R 投资 RFID 技术获得的收益影响。首先假设零售商 R 投资收益 $\eta K_1=2$ 保持不变,而制造商 M 的初始投资收益为 $PQ\Delta e=1$,以 0.5 的步长逐渐增长,进行 6 次仿真,观察系统成员策略选择的变化;然后,假设制造商 M 投资收益 $PQ\Delta e=2$ 保持不变,而零售商 R 的初始投资收益为 $\eta K_1=1$,以 0.5 的步长逐渐增长,进行 6 次仿真,观察系统成员策略选择的变化,如图 10 和图 11 所示。

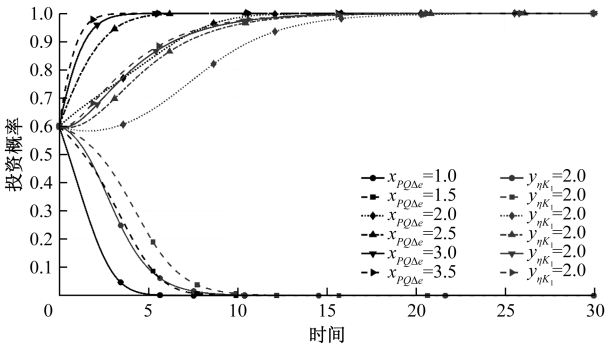



**图 10　固定零售商 R 收益,系统策略选择演化**

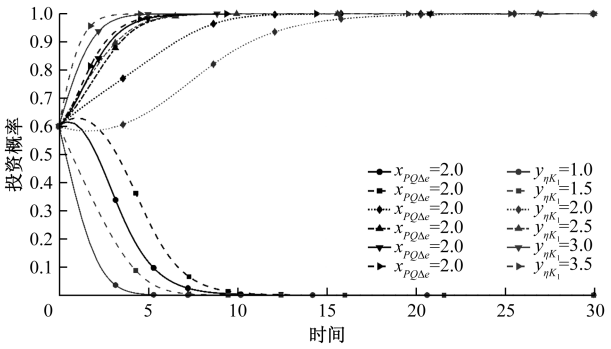



**图 11　固定制造商 M 收益,系统策略选择演化**

固定零售商 R 或制造商 M 的投资收益,随着另一方的投资收益增加,曲线由向坐标轴 $x=0$ 靠近演化至向坐标轴 $x=1$ 靠近,表明双方策略选择由均不进行投资向均进行投资转变,即系统策略由(不投资,不投资)向(投资,投资)演化。

## 5 结论与启示

基于碳交易政策，以一个制造商和一个零售商组成的再制造闭环供应链为研究对象，考虑RFID技术精准核算碳排放及提高产品回收率的特性，构建了演化博弈。依据前文的研究，得出以下结论：①分析再制造闭环供应链RFID投资的演化博弈，结果表明系统存在两条演化路径。基于复制动态方程的求解结果，该系统拥有两个演化稳定策略(ESS)，即博弈双方均投资RFID技术(投资，投资)和双方均不投资(不投资，不投资)。②在动态博弈的演化过程中，若双方的初始策略状态被设定为固定值，则时间推移所引发的策略变动会对最终决策产生作用。参与者通过汲取当前阶段的经验来优化自身策略，从而达成协同演进。当制造商或零售商的初始投资倾向处于较低水平时，另一方通过释放强烈的投资信号，可引导系统朝向共同投资RFID技术的演化稳定策略发展。③再制造闭环供应链成员在动态演化博弈中是否投资RFID技术，受双方初始状态、投资成本、单位碳交易成本、投资成本分摊系数和投资收益因素影响。双方初始状态越高，投资成本越低，单位碳交易成本越高，投资成本分摊系数适中，投资收益越高均可促进再制造闭环供应链成员投资RFID技术。

根据研究结论，提出以下几点管理启示。

(1)降低技术成本，善用碳交易政策。降低RFID成本是推动技术普及最直接的方式。碳交易价格走高虽增加企业压力，但投资RFID可将其转化为碳资产收益。企业应将RFID纳入碳资产管理，政府则可以通过补贴或税收优惠降低初期门槛。

(2)设计合理的成本分摊机制。成本分摊比例存在最优区间，过高或过低都不利于合作。供应链核心企业设计契约时，应基于双方实际收益核算，找到公平共赢的分摊点，而非单方面压价。这要求双方共享成本与收益数据。

(3)发挥先行者的示范带动作用。一方的积极投入能通过信号效应带动另一方跟进。技术领先企业主动制定RFID实施路线图，向合作伙伴传递确定性信号，扮演技术倡导者角色，引领供应链低碳转型，并借此构建长期的绿色竞争优势。

## 参考文献


[1] 仝鹏，丁翔，王文宾，等. 碳交易机制下考虑零售商信息分享策略的供应链决策研究[J]. 中国管理科学，2026，34(4)：287-297.

[2] 王梦垚，王文宾. 碳限额交易机制下考虑企业环保意识的碳减排决策研究[J]. 系统科学与数学，2026，46(2)：388-405.

[3] 周福礼，陈天赋. 碳交易政策下考虑废旧产品质量异质性的闭环供应链决策与协调研究[J]. 运筹与管理，2025，34(4)：163-169.

[4] HARDGRAVE C B，ALOYSIUS A J，GOYAL S. RFID-enabled visibility and retail inventory record inaccuracy：experiments in the field[J]. Production and Operations Management，2013，22(4)：843-856.

[5] LI X J，JIANG M，LIN C X，et al. Integrated BIM-IoT platform forcarbon emission assessment and tracking inprefabricated building materialization[J]. Resources，Conservation & Recycling，2025，215(4)：108122.

[6] 景熠，李文川，宋寒. 基于RFID技术的闭环供应链投资决策及协调策略[J]. 计算机集成制造系统，2018，24(9)：2341-2348.

[7] 喻鸣谦，骆建文，杨惠霄. 供应链成员企业投资RFID技术的激励机制：共享收入与谈判批发价的比较[J]. 商业经济与管理，2022(8)：41-57.

[8] 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.

[9] 张李浩，王嘉燕，陈靖. 基于零售商资金约束供应链采用RFID技术的决策及融资分析[J]. 控制与决策，2022，37(3)：701-711.

[10] 江秋阳，陶峰，范体军，等. 基于RFID技术的双供应链投资决策研究[J]. 中国管理科学，2020，28(11)：120-129.

[11] 熊雨萱，商铤洲，陈奕雯. 基于Arena仿真的建筑供应链投资RFID成本分摊研究[J]. 工程管理学报，2019，33(4)：127-131.

[12] HAN J，AI H，LI R，et al. Investment feasibility and optimization strategies of RFID technology in logistics field[J]. Scientific Reports，2025，15(1)：27500.

[13] SHUAI D，YU G，QIONG T，et al. An item-level RFID investment decision in green supply chain considering information leakage[J]. International Journal of Information Systems and Supply Chain Management (IJISSCM)，2025，18(1)：1-28.

[14] ILYINA T A，KIRINA D N. Logistic processes digitalization of Russian companies based on implementation of RFID technology[J]. St. Petersburg State Polytechnical University Journal：Economics，2020，13(84)：36-45.

[15] FRIEDMAN A. A simple testable model of double auction markets[J]. Journal of Economic Behavior and Organization，1991，15(1)：47-70.

# Research on RFID Investment Decision in Remanufacturing Closed-loop Supply Chain Based on Evolutionary Game under Carbon Trading Policy

LI Wenchuan[1], XIAO Xiao[2], ZHANG Anqi[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 the background of carbon trading policies, manufacturers' investment in RFID can enhance the accuracy of carbon emission accounting, while retailers' investment can improve the efficiency of recycling of used products. To explore the behavioral evolution law of RFID technology investment by both parties in a carbon-constrained remanufacturing closed-loop supply chain, an evolutionary game model of manufacturers and retailers was constructed. By solving the replicator dynamic equation, the stable strategies of the system evolution were obtained, and the influences of key parameters such as investment cost, carbon trading price, recycling revenue and cost-sharing coefficient were analyzed. The results show that there are two types of stable equilibria in the system such as (investment, investment) and (no investment, no investment). Initial investment willingness and synergy effects can promote both parties to invest together. Low investment cost, high carbon price and high recycling revenue can increase the probability of cooperation. A reasonable cost-sharing ratio can also promote collaborative investment.

**Keywords**: carbon trading policy; RFID technology; remanufacturing closed-loop supply chain; investment strategy; evolutionary game