

押金制度下的动力电池回收动态演化博弈研究

崔梦煥

江南大学商学院，江苏 无锡

收稿日期：2025年3月18日；录用日期：2025年4月15日；发布日期：2025年4月22日

摘要

随着动力电池退役量持续攀升，其回收问题已成为行业关注的焦点。本文基于演化博弈理论，构建了押金制度下汽车制造商与消费者之间的演化博弈模型，分析了系统的演化均衡点，并引入动态押金额度机制对押金制度进行优化。通过Matlab仿真分析发现，固定押金额度难以使系统达到理想的稳定均衡状态，而动态调整押金制度能够有效引导系统向稳定均衡点演化。研究结果为押金制度的优化设计与政策完善提供了理论依据和实践参考。

关键词

动力电池回收，押金制度，演化博弈，动态调整

Research on the Dynamic Evolution Game of Power Battery Recycling under the Deposit System

Mengyang Cui

Business School, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu

Received: Mar. 18th, 2025; accepted: Apr. 15th, 2025; published: Apr. 22nd, 2025

Abstract

As the retirement volume of power batteries continues to rise, their recycling has become a focus of industry attention. Based on evolutionary game theory, this article constructs an evolutionary game model between automobile manufacturers and consumers under the deposit system, analyzes the system's evolutionary equilibrium point, and introduces a dynamic deposit limit mechanism to optimize the deposit system. Through Matlab simulation analysis, it was found that a fixed deposit amount makes it difficult to achieve the ideal stable equilibrium state of the system, while dynamically

adjusting the deposit system can effectively guide the system to evolve towards a stable equilibrium point. The research results provide a theoretical basis and practical reference for the optimization design and policy improvement of the deposit system.

Keywords

Power Battery Recycling, Deposit System, Evolutionary Game, Dynamic Adjustment

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来，新能源汽车行业经历了快速发展，清洁能源已成为全球汽车产业转型的重要方向。2024年，中国新能源汽车产销量分别达到1288.8万辆和1286.6万辆，市场占有率达到40.9% [1]。然而，随着新能源汽车保有量的快速增长，动力电池的退役量也在逐年攀升，预计到2025年将有78万吨动力电池面临退役问题[2]。如此庞大的回收市场催生了大量回收企业，但如果不能实现有效回收，将会造成资源浪费并加剧碳排放。针对动力电池规模化退役阶段中存在的问题，国家出台了相关政策。2025年2月21日，国务院审议通过《健全新能源汽车动力电池回收利用体系行动方案》，指出应规范当前电池回收利用，并对产品碳足迹进行核算，实现从生产到回收利用过程可追溯，避免非法回收和环境污染。政策的出台体现了国家对资源回收产业链的重视，规范化、绿色化回收也是未来动力电池回收产业链的发展方向。

目前，新能源汽车动力电池回收存在回收责任不清晰、回收积极性不高、规范化回收率低等问题[3]。焦建玲等探讨了动力电池制造商、新能源汽车制造商和第三方回收企业三种回收模式的最优决策和最大利润，在考虑经济与碳排放的情况下对回收模式进行选择[4]。胡文婕等探讨了以上三种回收模式下闭环供应链的策略，探讨政府补贴对供应链成员策略的影响[5]。Zhang 等探讨了三种回收模式下的政府干预的影响，并对经济效益、环境效益和消费者剩余等指标进行对比分析[6]。Zhou 等[7]基于区块链技术分别对电池制造商主导、车企主导、回收协会主导和第三方主导的回收模式进行探讨，并借助 DEA 模型对各回收模式的效率进行评估。以上学者都是对目前动力电池的回收途径选择进行讨论。事实上，2018年2月，工信部、科技部、交通部等七部委就联合印发了《新能源汽车动力蓄电池回收利用管理暂行办法》，首次明确了汽车生产企业应建立动力蓄电池回收渠道，负责回收新能源汽车使用及报废后产生的废旧动力蓄电池。车企作为电动汽车的生产者，对电池溯源可以掌握更多的数据，更易获取较稳定的退役动力电池来源，因此汽车制造企业回收模式具有更大的布局优势[8][9]。危浪等[10]以整车企业回收模式为主体，通过演化博弈的方法探讨政府监管策略对回收结果的影响；王文宾等[11]将动力电池的回收决策主体定为汽车制造商，并探讨政府的补贴-罚金政策对回收策略的影响。杜冰冰等[12]指出，当前回收模式下的利益相关者只关注利益最大化，对于回收电池的积极性不高。因此，若想要整车企业更大发挥其回收功能，需要规范回收市场，鼓励正规回收。高艳红、Wang 等[13][14]学者研究了大量废旧动力电池被非正规组织私自拆解倒卖现象，设计了责任企业与非正规企业合作的模式，对各主体的策略进行分析。Fan 等[15]探讨了在有非正规回收商参与的回收市场中，消费者环保意识如何影响动力电池的回收利用。Li [16]等针对目前动力电池规范化回收率不足、大量退役电池流入非正规回收企业的现象，研究押金制度、消费者补贴等政策对推动动力电池正规回收的作用。

押金返还制度作为一种约束经济行为的手段，起初被用于饮料瓶回收领域。零售商和其他终端经销商向消费者收取押金，在消费者完成回收任务之后返还押金。Dimitrios [17]研究了多国在汽车回收领域的押金制度，发现对消费者采用押金制度使得回收率高达 80%~90%。目前已有不少国家将其应用到电池回收行业。美国通过电池协会制定了押金制度，以促使消费者主动上交废旧电池产品；德国规定制造商必须在政府备案，消费者在购买动力电池时需要缴纳押金，并且有义务将退役电池进行规范移交[18]。

演化博弈通常用于闭环供应链的回收领域研究。王慧敏等[19]人基于演化博弈理论研究动力电池回收商的投资模式，分析电池再生利用率对回收商决策的影响。Li Yan 等[20]构建了政府参与的演化博弈模型，用于分析动力电池回收中的低碳创新行为。但演化博弈结果经常会出现无均衡策略或者策略组合呈现周期变化无法收敛的情况，这是因为博弈方的决策会随着市场的变动而变动，静态的演化博弈无法满足均衡策略组合。

基于以上文献分析可以发现，目前国内外学者对动力电池回收领域进行了广泛研究，但还存在以下不足：(1) 动力电池回收领域涉及到的押金制度研究较少考虑有消费者参与，而事实上消费者的行为会对企业回收行为起着关键的作用；(2) 动力电池流向大多是考虑流入到电池生产商、整车企业和第三方回收企业手中，但市场中非正规回收企业占据了大部分电池，目前文献研究时较少考虑非正规回收企业的影响。基于此，本文构建汽车企业和消费者之间的演化博弈模型，分析押金制度下的双方策略变化，并进行仿真分析。此外，本文还进一步优化了押金制度设计，通过动态调整押金金额，分析其对企业和消费者策略演化的影响，为构建高效、可持续的动力电池回收体系提供理论依据与实践指导。

2. 问题描述与参数设定

2.1. 模型描述

新能源汽车制造企业为响应循环经济理念下的动力电池回收要求，可以选择是否构建与消费者相关的押金制度。这种市场驱动型押金制度是企业为提高回收率或提升品牌效应而自发实施的一种策略[21]。作为回收业务的主体，汽车制造企业以利润最大化为决策目标，而消费者作为“经济人”，在处置动力电池时倾向于选择市场回收价格更高的非正规回收商。本文旨在探讨回收方(汽车制造企业)与消费者在“契约式”押金制度下的决策行为，并分析双方如何通过博弈达到稳定的均衡策略。

2.2. 基本假设

假设 1 博弈的参与主体为回收商和消费者群体，双方均为有限理性个体，其策略选择并非一成不变，而是通过反复学习和调整，逐步寻求稳定的策略组合。

假设 2 汽车制造企业在回收策略上可以选择积极回收或消极回收。设企业选择积极回收的概率为 $x (0 < x < 1)$ ，选择消极回收的概率为 $1-x$ 。如果企业选择实施押金制度，积极和消费者协商，收取押金 D ，可能会面临销量减少的风险，这会给企业带来一定的利润损失 L ，并且企业实施押金制度应承担一定的运营成本 C_o 。如果消费者通过正规回收渠道交换电池，企业能够得到回收利润 P_1 ，如果消费者没有把电池交还给企业，企业得到的利润为 P_2 ，且 $P_1 > P_2$ 。在我国，动力电池的梯次利用和拆解利用受到政策倡导，企业需履行生产者责任延伸制的要求。若企业选择消极回收，且消费者未将电池返还给企业，则企业将面临碳排放超标带来的惩罚 C_{EN} 。此外，积极参与回收的企业将获得潜在收益 P_b ，例如品牌口碑的提升和市场形象的改善，且 $P_b < P_2$ 。

假设 3 消费者以自身利益最大化为目标，作为市场中的理性决策者，倾向于将动力电池交还给回收

价格最高的一方。消费者选择通过正规渠道回收电池的概率为 $y(0 < y < 1)$ ，选择通过非正规渠道回收的概率为 $1 - y$ 。非正规回收企业在市场上由于投入技术成本低、污染处理费用低，往往会采用高额的回收价格 B_2 。如果企业积极参与回收制度建设，并与消费者签订押金制度，消费者若未通过正规渠道返还电池，将失去押金 D ；若消费者选择将电池交还给企业，则可获得收益，同时因参与了绿色回收行动，消费者还能获得额外的环保收益 C_{EN} ， δ 反映了消费者的环保意识且 $0 < \delta < 1$ 。值得注意的是，由于非正规回收企业提供的高额回收价格，通常满足 $B_1 < B_2$ 。

根据以上假设，构建汽车制造商与消费者之间的演化博弈收益矩阵，如表 1 所示。

Table 1. Profit matrix for both enterprises and consumers

表 1. 企业与消费者双方收益矩阵

		消费者	
		正规回收渠道 (y)	非正规回收渠道 ($1 - y$)
积极回收 (x)	汽车制造企业	$P_1 - L - C_o + P_b$ $B_1 + \delta C_{EN}$	$P_2 - L + C_o + D + P_b$ $B_2 - D$
	消极回收 ($1 - x$)	P_1 B_1	$P_2 - C_{EN}$ B_2

3. 模型构建与稳定性分析

3.1. 复制动态方程计算

对于汽车制造企业来说，选择积极回收、消极回收策略的期望收益为：

$$\begin{aligned} E_1 &= y(P_1 - L - C_o + P_b) + (1 - y)(-L - C_o + d + P_b) \\ E_2 &= yP_1 + (1 - y)(-C_{EN}) \end{aligned}$$

企业的平均收益： $E = xE_1 + (1 - x)E_2$

企业选择实施押金制度的复制动态方程为：

$$F_1(x) = \frac{dx}{dt} = x(E_1 - E) = x(1 - x)(E_1 - E_2) = x(x - 1)(L + C_o - D - P_b + Dy + C_{EN}(1 - y))$$

同理，用 E_3 、 E_4 来表示消费者参与正规回收与不参与正规回收的期望收益， E' 表示消费者的平均收益，则消费者选择正规渠道回收的复制动态方程为：

$$F_2(y) = \frac{dy}{dt} = y(E_3 - E') = y(1 - y)(E_3 - E_4) = (1 - y)y(B_1 - B_2 + x(D + \delta C_{EN}))$$

3.2. 均衡点求解与稳定性分析

联立方程组 $\begin{cases} F_1(x) = 0 \\ F_2(y) = 0 \end{cases}$ 可以得到 5 个均衡点： $(0,0)$ 、 $(0,1)$ 、 $(1,0)$ 、 $(1,1)$ 、 (x^*, y^*) ，其中

$$x^* = \frac{-B_1 + B_2}{D + \delta C_{EN}}, y^* = \frac{-L - C_o + C_{EN} + D + P_b}{D + C_{EN}}$$

通过分析系统的雅可比矩阵，可以得到进化系统的局部稳定性。该两方博弈系统下的雅可比矩阵为：

$$\begin{aligned}
J &= \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1(x)}{\partial x} & \frac{\partial F_1(x)}{\partial y} \\ \frac{\partial F_2(y)}{\partial x} & \frac{\partial F_2(y)}{\partial y} \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} (-1+2x)(L+C_o-P_b-D+C_{EN}(y-1)+Dy) & (D+C_{EN})(-1+x)x \\ (D+\delta C_{EN})(1-y)y & (1-2y)(B_1-B_2+x(D+\delta C_{EN})) \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

$\text{Det}(J)$ 和 $\text{Tr}(J)$ 分别为矩阵 J_1 的行列式和迹:

$$\begin{aligned}
\text{Det}(J) &= (-1+2x)(L+C_o-P_b-D+C_{EN}(y-1)+Dy)(1-2y)(B_1-B_2+x(D+\delta C_{EN})) \\
&\quad - (D+C_{EN})(-1+x)x(D+\delta C_{EN})(1-y)y \\
\text{Tr}(J) &= (-1+2x)(L+C_o-P_b-D+C_{EN}(y-1)+Dy) + (1-2y)(B_1-B_2+x(D+\delta C_{EN}))
\end{aligned}$$

根据 Friedman 判别法, 对雅各比矩阵 J 的局部稳定性进行判别: 当均衡解处的 $\text{Det}(J) > 0$ 且 $\text{Tr}(J) < 0$ 时, 该均衡解为稳定策略(ESS); 当 $\text{Det}(J) > 0$ 且 $\text{Tr}(J) > 0$ 时, 该均衡解为不稳定点; 当 $\text{Det}(J) < 0$ 时, 该均衡解为鞍点。系统的均衡点分析结果如表 2 所示。

Table 2. System stability results

表 2. 系统稳定性结果

均衡点	$\text{Det}(J)$	$\text{Tr}(J)$
(0,0)	$-(L+C_o-C_{EN}-D-P_b)(B_1-B_2)$	$-C_o-L+C_{EN}+D+P_b+B_1-B_2$
(1,0)	$(L+C_o-C_{EN}-D-P_b)(D+B_1-B_2+\delta C_{EN})$	$L+C_o-P_b+B_1-B_2+C_{EN}(-1+\delta)$
(0,1)	$(L+C_o-P_b)(B_1-B_2)$	$-L-C_o+P_b-B_1+B_2$
(1,1)	$-(L+C_o-P_b)(D+B_1-B_2+\delta C_{EN})$	$L+C_o-D-P_b-B_1+B_2-\delta C_{EN}$
(x^*, y^*)	$(L+C_o-P_b)(D+B_1-B_2+\delta C_{EN})x^*y^*$	0

由表 2 可得, 均衡点的稳定性与 D 相关, 当 $D < \min\{L+C_o-P_b-C_{EN}, B_2-B_1-\delta C_{EN}\}$ 时, 此时 $(0,0)$ 的 $\text{Det} > 0$ 且 $\text{Tr} < 0$, 为演化均衡策略(ESS), 当 $\min\{L+C_o-P_b-C_{EN}, B_2-B_1-\delta C_{EN}\} < D < \max\{L+C_o-P_b-C_{EN}, B_2-B_1-\delta C_{EN}\}$ 时, $(1,0)$ 或 $(0,0)$ 为演化稳定策略, 当 $D > \max\{L+C_o-P_b-C_{EN}, B_2-B_1-\delta C_{EN}\}$ 时, 系统不存在演化稳定点, 整车企业和消费者的策略呈现周期变化, 如图 1 所示。从社会效益最大化的角度来看, 理想的策略组合应避免任何一方群体完全选择消极回收(即 $x=0$)或完全依赖非正规回收渠道(即 $y=0$)。因此, 为实现这一目标, 下面需对押金制度进行优化调整, 通过动态调整押金 D 的取值或动态惩罚机制, 以引导系统向更优的均衡点演化。

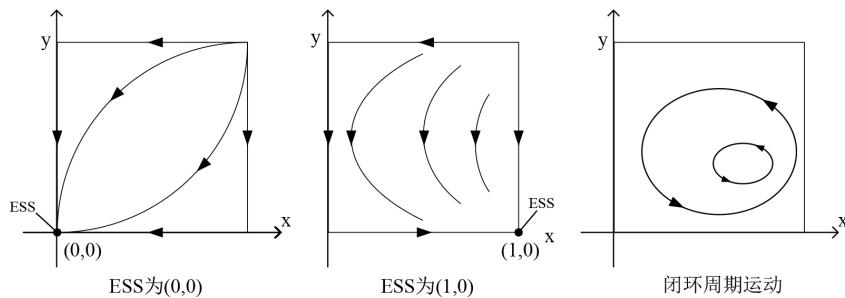


Figure 1. Three scenarios of system evolution trajectory under fixed deposit amount
图 1. 固定押金金额下系统演化轨迹的三种情况

4. 动态押金下的演化博弈分析

由于市场环境具有动态性和不确定性，企业和消费者的决策在演化过程中会受到多种外部和内部因素的影响。因此，为了更贴近现实情况，本研究将动态因素引入演化系统中，对模型进行进一步优化。在前述模型中，押金金额 D 被设定为固定值，而实际中押金制度的有效性可能随消费者策略的变化而动态调整。因此，本部分将探讨押金金额 D 随消费者策略 y 动态变化的情况，以更准确地刻画系统的演化行为。

接下来企业考虑对押金实施动态调整策略，企业会根据消费者群体的回收倾向，动态调整押金金额。使企业向消费者收取的押金 $D(y)$ 替换原来的固定值 D ，即 $D(y) = (1-y)D$ ，表示如果消费者越倾向于正规回收，那么押金制度的押金金额越低。此时环境治理惩罚成本仍然为 C_{EN} 。此时的复制动态方程为：

$$F_1'(x) = x(x-1)(L + C_o - (1-y)D - P_b + (1-y)Dy + C_{EN}(1-y))$$

$$F_2'(y) = (1-y)y(B_1 - B_2 + x((1-y)D + \delta C_{EN}))$$

令 $F_1'(y) = 0$ ， $F_2'(y) = 0$ ，此时系统存在四个均衡点：(0,0)、(0,1)、(1,0)、(1,1)，当 $0 \leq \frac{-B_1 + B_2}{(1-y)D + \delta C_{EN}} \leq 1$ 且 $0 \leq \frac{-L - C_o + C_{EN} + D + P_b}{(1-y)D + C_{EN}} \leq 1$ 时，存在另一个均衡点 (x_1^*, y_1^*) 且 $x_1^* = \frac{-B_1 + B_2}{(1-y)D + \delta C_{EN}}$, $y_1^* = \frac{-L - C_o + C_{EN} + D + P_b}{(1-y)D + C_{EN}}$ 。此时系统的雅可比矩阵为

$$J' = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1'(x)}{\partial x} & \frac{\partial F_1'(x)}{\partial y} \\ \frac{\partial F_2'(y)}{\partial x} & \frac{\partial F_2'(y)}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (-1+2x)(L+C_o-P_b-(1-y)D+C_{EN}(y-1)+(1-y)Dy) & ((1-y)D+C_{EN})(-1+x)x \\ ((1-y)D+\delta C_{EN})(1-y)y & (1-2y)(B_1-B_2+x((1-y)D+\delta C_{EN})) \end{bmatrix}$$

同上一节分析，将均衡点带入到雅可比矩阵 J' 中，计算 $\text{Det}(J')$ 和 $\text{Tr}(J')$ ，判断其正负性。可得到根据 D 值变化，将会出现(0,0)、(1,0)两种均衡点，此时 $\text{Det}(J') < 0$ 且 $\text{Tr}(J') > 0$ ，理想均衡点(1,1)为演化稳定均衡点的情况并未出现。计算 (x_1^*, y_1^*) 的特征根 $\begin{bmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{bmatrix} - J' = 0$ ， λ_1 和 λ_2 是一对有负实数的特征复根，此时演化系统具有渐进稳定性。

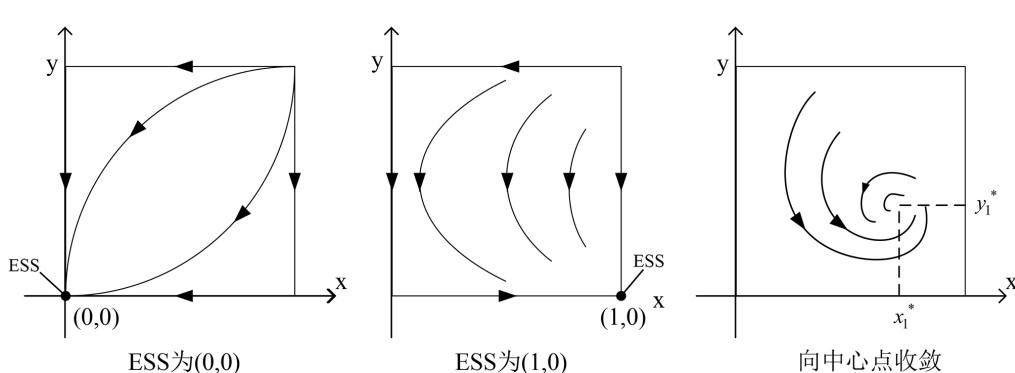


Figure 2. Three scenarios of system evolution trajectory under dynamic deposit amount
图 2. 动态押金金额下系统演化轨迹的三种情况

此时系统的演化相位图如图 2 所示, 此时系统中随着 D 值变化可能出现三种演化均衡点, $(0,0)$ 、 $(1,0)$ 并不是我们想要达到的期望均衡点; (x_1^*, y_1^*) 呈现出收敛现象, 双方的策略成混合策略, 此时的演化系统具有稳定性。

5. 仿真分析

在满足模型条件 $B_1 < B_2$ 、 $P_b < P_1 < P_2$ 、 $0 < \delta < 1$, 且参考中国目前中国新能源汽车动力电池回收市场的回收现实情况, 结合文献对参数进行赋值, 令 $P_1 = 40$ 、 $P_2 = 40$ 、 $L = 8$ 、 $C_o = 12$ 、 $B_1 = 8$ 、 $B_2 = 12$ 、 $D = 5$ 、 $P_b = 6$ 、 $C_{EN} = 10$, 这里消费者环保意识 δ 取平均水平 0.5, 使用 Matlab 软件模拟演化系统轨迹。

5.1. 复制动态方程计算

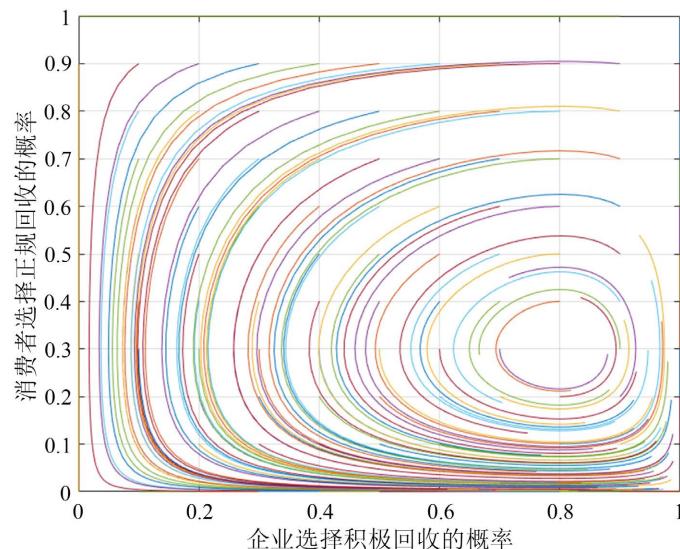


Figure 3. Evolution trajectory diagram under fixed deposit amount
图 3. 固定押金金额下演化轨迹图

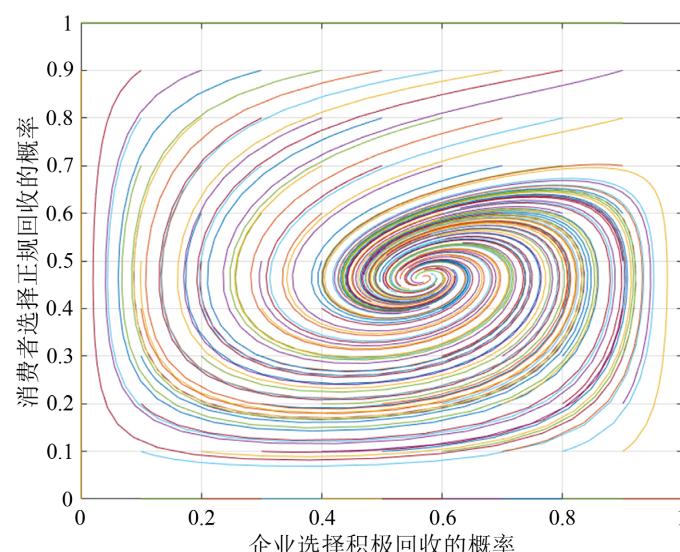


Figure 4. Evolution trajectory diagram of dynamic deposit amount
图 4. 动态押金金额下演化轨迹图

图 3 展示了在固定押金金额度下系统的动态行为，其表现为闭环周期运动，双方的策略组合围绕中心点 (x^*, y^*) 振荡。在此阶段，企业和消费者的决策会随着市场环境的变化不断调整，无法形成稳定的策略组合。这种周期性波动表明，固定押金制度难以引导系统达到长期均衡状态，因此需要对押金金额进行动态调整。如图 4 所示，在引入动态押金机制后，系统的演化轨迹逐渐向中心点收敛，表明企业和消费者的策略组合趋于稳定，双方均呈现出混合策略。与固定押金制度相比，动态调整押金金额能够有效优化回收市场，提升系统的稳定性和效率。

5.2. 初始押金金额对演化均衡点的影响分析

在动态押金金额的体系中，通过对初始押金金额进行调整，令 D 分别为 3、5、7，如图 5 所示，可以观察到企业和消费者的决策概率波峰与波谷发生显著变化，这表明初始押金金额的设置对系统的演化路径具有重要影响。此外，初始押金金额的改变还会影响系统的收敛速度和时间。具体而言，初始押金金额越大，系统的收敛时间越短，但同时也带来了一定的权衡效应。随着初始押金金额的增大，企业选择积极回收的概率稳定点逐渐下降。这一现象可以从两方面解释：一方面，较高的押金金额可能导致汽车销量下降，企业需要权衡销量减少带来的利润损失与回收目标之间的利弊；另一方面，押金金额的增大确实显著促进了消费者通过正规渠道回收电池，从而帮助企业实现回收目标。因此企业在制定押金策略时，需要在促进回收与维持销量之间找到平衡点，以实现经济效益和环境效益的双重优化。

同时，消费者选择正规回收渠道的概率收敛到 0~1 之间，且随着初始押金金额的增大，这一概率显著提升，收敛速度也逐渐加快。如图 6 所示，这一现象表明押金制度确实能够有效促进消费者选择正规回收渠道。然而，消费者并未完全放弃非正规回收渠道，主要原因在于非正规回收商提供的高额回收收益对其具有较强吸引力，或者由于消费者的环保意识较为薄弱，对环境污染的成本感知力较低，导致其无法形成纯策略(即完全选择正规回收渠道)。因此，仅依靠押金制度可能无法完全实现消费者行为的规范化。为进一步提升消费者参与正规回收的积极性，建议通过调整其他关键参数(如提高环保收益 C_{EN} 、加强环保宣传教育 δ 、或引入额外的激励措施)来增强消费者对正规回收渠道的偏好，从而推动动力电池回收体系的进一步完善。

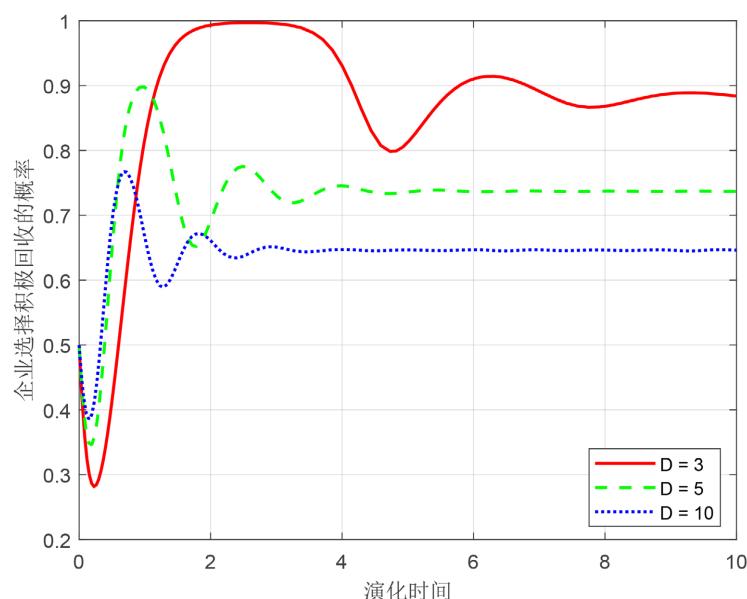


Figure 5. Evolution trajectory diagram of dynamic deposit amount

图 5. 动态押金金额下演化轨迹图

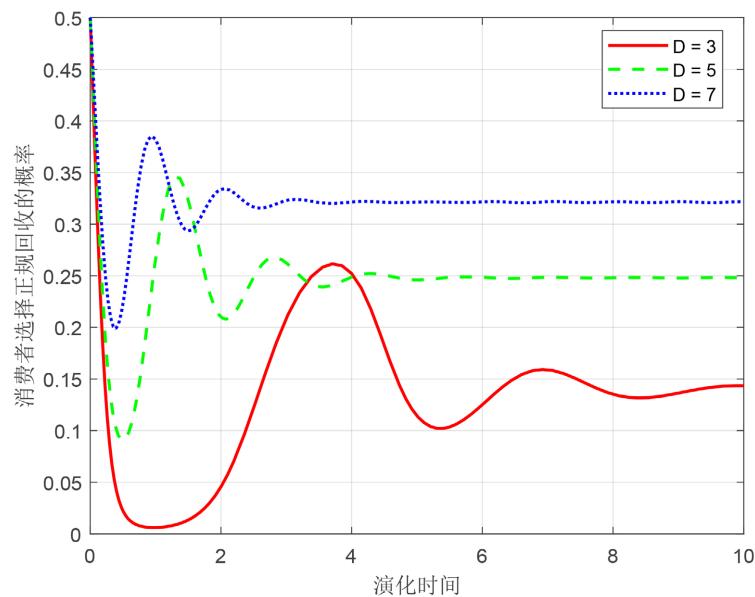


Figure 6. Evolution trajectory diagram of dynamic deposit amount
图 6. 动态押金金额下演化轨迹图

6. 结论

本文构建了汽车制造业主导下回收方与消费者之间的演化博弈研究，探讨了押金制度下双方的策略如何变化，并考虑加入随消费者策略变化的动态押金金额度对系统进行优化，最后通过仿真分析对双方的演化轨迹进行分析。结果表明：(1) 在固定押金金额下，系统的演化轨迹表现为闭环周期运动，企业和消费者的策略组合围绕中心点振荡，无法形成稳定的策略组合。这表明固定押金制度难以引导系统达到长期均衡状态；(2) 初始押金金额的设置对系统的演化路径具有重要影响。较高的押金金额能够显著促进消费者选择正规回收渠道，但同时也可能导致汽车销量下降。因此，企业在制定押金策略时需要在促进回收与维持销量之间找到平衡点；(3) 尽管押金制度能够有效促进消费者选择正规回收渠道，但消费者并未完全放弃非正规回收渠道。这表明仅依靠押金制度可能无法完全实现消费者行为的规范化，需要结合其他激励措施来进一步提升消费者参与正规回收的积极性。

本文的研究仍存在一定的局限性。废旧动力电池的回收不仅取决于消费者的环保意识与企业的决策行为，还与政府在市场调节中的角色密切相关。未来研究应进一步探讨如何通过政策设计与制度完善来优化押金制度的实施效果，同时需要政府、企业及消费者等多方主体的协同参与，以推动动力电池回收市场的规范化与可持续发展。

基金项目

本论文得到了江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX24_1338)的资助。

参考文献

- [1] 管歆格, 田泽, 斯洪诚, 等. 面向碳中和的我国新能源汽车碳减排效应及其影响因素研究[J/OL]. 软科学, 1-18. <https://link.cnki.net/urlid/51.1268.g3.20250310.1757.010>, 2025-03-13.
- [2] 陈向国. 新能源汽车退役电池安全回收难题仍然待解[J]. 节能与环保, 2021(5): 22-23.
- [3] 谢隽阳, 乐为, 郭本海. 基于生产者责任延伸的新能源动力电池回收帕累托均衡[J]. 中国管理科学, 2022, 30(11): 309-320.

- [4] 焦建玲, 潘正涛, 李晶晶. 考虑再利用的经济效益与排放效率的动力电池回收模式选择[J]. 中国管理科学, 2024, 32(11): 201-213.
- [5] 胡文婕, 周佳, 马成霖, 等. 双渠道退役动力电池回收闭环供应链模式选择[J]. 系统工程理论与实践, 2024, 44(8): 2572-2595.
- [6] Zhang, M., Wu, W. and Song, Y. (2023) Study on the Impact of Government Policies on Power Battery Recycling under Different Recycling Models. *Journal of Cleaner Production*, **413**, Article 137492. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137492>
- [7] Zhou, X., Li, J., Li, F. and Deng, X. (2023) Recycling Supply Chain Mode of New Energy Vehicle Power Battery Based on Blockchain Technology. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, **29**, 1386-1398.
- [8] 伊辉勇, 刘佳. 碳交易政策下动力电池闭环供应链定价决策[J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(6): 2228-2240.
- [9] 冯中伟, 晁乾坤, 谭春桥. 考虑动力电池回收的电动汽车制造商竞争与竞合策略选择[J]. 系统工程理论与实践, 2024, 44(2): 625-653.
- [10] 危浪, 王翠霞. 基于 SD 演化博弈的新能源车动力电池回收监管策略研究[J]. 系统科学与数学, 2023, 43(5): 1314-1330.
- [11] 王文宾, 刘业, 钟罗升, 等. 补贴-惩罚政策下废旧动力电池的回收决策研究[J]. 中国管理科学, 2023, 31(11): 90-102.
- [12] 杜冰冰, 侯慧敏, 侯琼, 等. 基于演化博弈视角的中国废铅蓄电池回收利用过程主要问题分析和对策研究[J]. 环境工程学报, 2023, 17(12): 3832-3842.
- [13] Wang, Z., Wang, Y., Gong, Y. and Zhan, J. (2024) Cooperate or Not? Strategic Analysis of Formal and Informal Recyclers under Different Retired Power Battery Recycling Market Structures. *Computers & Industrial Engineering*, **193**, Article 110294. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110294>
- [14] 高艳红, 黎振东. 考虑非正式组织的动力电池生产者责任延伸回收模式研究[J]. 管理评论, 2024, 36(3): 225-236.
- [15] Fan, J., Teng, H. and Wang, Y. (2022) Research on Recycling Strategies for New Energy Vehicle Waste Power Batteries Based on Consumer Responsibility Awareness. *Sustainability*, **14**, Article 10016. <https://doi.org/10.3390/su141610016>
- [16] Zhou, G., Gu, Y., Wu, Y., Gong, Y., Mu, X., Han, H., et al. (2020) A Systematic Review of the Deposit-Refund System for Beverage Packaging: Operating Mode, Key Parameter and Development Trend. *Journal of Cleaner Production*, **251**, Article 119660. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119660>
- [17] Georgakellos, D.A. (2007) The Use of the Deposit-Refund Framework in Port Reception Facilities Charging Systems. *Marine Pollution Bulletin*, **54**, 508-520. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.02.005>
- [18] 韩帅帅, 邓毅, 侯贵光, 等. 废旧动力电池回收利用的国际经验及借鉴意义[J]. 环境保护, 2023, 51(Z3): 83-86.
- [19] 王慧敏, 刘畅, 钟永光, 李保勇. 基于演化博弈的动力电池回收商投资模式选择研究[J]. 工业工程与管理, 2021, 26(2): 161-170.
- [20] Li, Y. and Zhang, J. (2024) Evolutionary Game Analysis of Low-Carbon Incentive Behaviour of Power Battery Recycling Based on Prospect Theory. *Sustainability*, **16**, Article 2793. <https://doi.org/10.3390/su16072793>
- [21] 黄燕婷, 刘艺, 郑本荣. 基于政府驱动与市场驱动的押金返还制度研究——考虑闭环供应链竞争的回收决策分析[J]. 运筹与管理, 2024, 33(1): 51-56.