

回收商回收模式转型演化分析

张祯祺

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2025年3月29日; 录用日期: 2025年4月22日; 发布日期: 2025年4月30日

摘要

本文研究了新能源汽车废旧动力电池回收过程中, 回收商在正规与非正规回收模式之间的策略选择及其演化路径。通过构建政府、回收商和居民三方演化博弈模型, 分析了各参与主体的决策行为及其影响因素。研究发现, 政府与居民的监督意愿对回收商选择正规回收模式具有显著影响, 尤其是居民的监督效果更为明显。此外, 提高回收商正规回收的收益能够有效促使其转向正规回收, 而降低不正规回收的收益则只能减缓其转向非正规回收的速度。基于此, 本文建议政府应鼓励回收商进行技术升级, 并通过补贴政策支持其转型, 同时构建居民监督平台, 以促进废旧动力电池的可持续回收。

关键词

电池回收, 演化博弈, 转型, 政府补贴

Analysis of the Evolutionary Transformation of Recyclers' Recycling Models

Zhenqi Zhang

Business School, University of Shanghai Science and Technology, Shanghai

Received: Mar. 29th, 2025; accepted: Apr. 22nd, 2025; published: Apr. 30th, 2025

Abstract

This paper investigates the strategic choices and evolutionary paths of recyclers between formal and informal recycling modes in the process of recycling used power batteries from new energy vehicles. By constructing a tripartite evolutionary game model involving the government, recyclers, and residents, the decision-making behaviors of each participant and their influencing factors are analyzed. The study finds that the willingness of the government and residents to supervise significantly influences recyclers' choice of formal recycling modes, with the supervision effect of residents being particularly pronounced. Additionally, increasing the profits from formal recycling can

effectively encourage recyclers to switch to formal recycling, while reducing the profits from informal recycling can only slow down their shift towards informal recycling. Based on these findings, the paper recommends that the government should encourage recyclers to upgrade their technologies and support their transition through subsidy policies, while also establishing resident supervision platforms to promote the sustainable recycling of used power batteries.

Keywords

Battery Recycling, Evolutionary Game Theory, Transformation, Government Subsidies

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

新能源汽车作为我国的新型产业已有了巨大的成就，但许多问题也接踵而来。其中新能源电池的处理已成为目前学者的考虑重点。张英杰等认为动力电池在没有有效的回收处理的情况下会对环境造成很大的危害[1]。张淑英等推测在 2025 年底国内的报废电池数量将达到 131 万吨[2]。

废旧动力电池的有效回收不仅能够实现资源的循环利用，还能减少环境污染，具有显著的经济和环境效益。国内外学者对此展开了广泛研究，主要集中在政策激励和技术创新等方面。在政策激励方面，政府补贴和惩罚政策对回收主体的决策具有重要影响。王文宾等通过构建演化博弈模型，分析了政府补贴和惩罚政策对动力电池生产商和新能源汽车制造商回收决策的影响[3]。谢家平等研究了政府补贴对动力电池回收企业的影响，指出补贴能够提高企业的回收积极性，但过度依赖补贴可能导致企业行为扭曲[4]。何天慧等通过构建题词利用商 - 制造商 - 政府的三方演化博弈，指出了合理的奖惩有利于循环利用水平[5]。

Lu 等人认为补贴强度能够对新能源汽车行业造成多维度的影响[6]。在技术创新方面，徐耀群等通过构建动力电池生产商和回收商的技术创新演化博弈模型，探讨了技术创新对回收效率的影响[7]。陈宇科通过构建第三方制造商 - 动力电池生产商 - 政府的三方模型，得出了技术创兴的提升与政府的激励成正相关[8]。

过往的研究往往局限于生厂商是否实施生产者责任制度，或是生产商的技术提升，关于政府补贴的对象也往往忽略了回收商。

因此本文聚焦于回收商的转型升级，并将居民作为回收参与的一部分纳入考虑。考虑到博弈参与人并非绝对理性而是有限理性，使用演化博弈建立了政府 - 回收商 - 居民三方参与的博弈模型，并通过 matlab 进行数值仿真，验证理论推导。从而给予政府和回收商一定的管理建议。

2. 模型构建与策略分析

2.1. 纸型

在回收电池的过程中共有三个参与者分别是政府、回收商、居民。其分别具有有限理性。

假设 1: 政府积极监督的概率为 x ，政府不监督的概率为 $1-x$ 。回收商正规回收的概率为 y ，回收商不正规回收的概率为 $1-y$ 。居民积极监督的概率为 z ，居民不参与监督的概率为 $1-z$ 。

假设 2: 政府积极监管时需要耗费的成本为 $C1$ ，若回收商进行正规回收将给予补贴 $S1$ ，若回收商进行不正规回收将给予回收商罚款 F 。政府积极监管时，可以创造一定的就业机会带来社会效益 M 。当政

府不积极监管时,若居民参与监管,则会对政府失去信心从而损失政府形象 $M1$ 。当回收商不正规回收时,无论政府是否监督都需要花费治理成本 Ce 来弥补回收商不正规回收造成的环境损失。

假设 3: 回收商不正规回收所需要的成本为 $C2$, 正规回收需要升级技术因此需要额外付出成本 C 。不正规回收时可以获得利润为 $M2$, 但因为是暴力拆解因此有一定的折损率 B , 当回收商进行正规回收时可以获得利润为 $M3$ 。当回收商不正规回收时,若此时居民参与监管时,则会对回收商产生恶感,从而损失回收商形象 $M4$ 。

假设 4: 居民参与监督需要花费的时间成本为 $C4$, 若举报成功可以获得政府给予的奖励 $S2$ 以及回收商的罚款的一部分, 比例为 A 。在政府积极监管时若消费者未能举报居民不参与监督, 会导致回收商无需担心被举报, 从而造成环境恶化需要付出额外的医疗成本 $C5$ 。根据上述假设可以得到三方收益矩阵, 具体内容见表 1。

Table 1. Three-party's benefit matrix

表 1. 三方收益矩阵

收益矩阵	政府	回收商	居民
X, Y, Z	$M - C1 - S1$	$M3 - C2 - C + S1$	$-C4$
$X, 1 - Y, Z$	$M - C1 + (1 - A) * F - Ce - S2$	$(1 - B) * M2 - C2 - F - M3$	$-C4 + A * F + S2$
$X, Y, 1 - Z$	$M - C1 - S1$	$M3 - C2 - C + S1$	0
$X, 1 - Y, 1 - Z$	$M - C1 - Ce$	$(1 - B) * M2 - C2$	$-C5$
$1 - X, Y, Z$	$-M1$	$M3 - C2 - C$	$-C4$
$1 - X, 1 - Y, Z$	$-M1 - Ce + (1 - A) * F$	$(1 - B) * M2 - C2 - F - M4$	$-C4 + A * F$
$1 - X, Y, 1 - Z$	0	$M3 - C2 - C$	0

2.2. 三方稳定性分析

基于收益矩阵可以得到政府、回收商、居民各自的期望收益:

1) 政府稳定性分析

设政府积极监管的收益为 $E11$, 消极监管的收益为 $E12$, 平均收益为 $E1$:

$$E11 = y * z * (-C1 + M - S1) + y * (1 - z) * (-C1 + M - S1) \\ + z * (1 - y) * (-C1 - Ce + F * (1 - A) + M - S2) + (1 - y) * (1 - z) * (-C1 - Ce + M)$$

$$E12 = -Ce * (1 - y) * (1 - z) - M1 * y * z + z * (1 - y) * (-Ce + F * (1 - A) - M1)$$

$$E1 = x * E11 + (1 - x) * E12$$

可以得到政府的复制动态方程为:

$$F(x) = dx/dt = x(E11 - E1) = -x * (x - 1) * (-C1 + M + M1 * z - S1 * y + S2 * y * z - S2 * z)$$

对 $F(x)$ 求一阶导可得 $dF(x)/dx = -(2 * x - 1) * (-C1 + M + M1 * z - S1 * y + S2 * y * z - S2 * z)$

根据复制动态方程稳定性定理, 当 $y = y0 = (-C1 + M + M1 * z - S2 * z) / (S1 - S2 * z)$ 时, 无论 x 取何值均是稳定状态, 即政府的监管策略保持稳定, 当 $0 < y < (-C1 + M + M1 * z - S2 * z) / (S1 - S2 * z)$ 时, 政府选择监督的概率会趋向于 $x = 0$, 即政府消极监督, 当 $(-C1 + M + M1 * z - S2 * z) / (S1 - S2 * z) < y < 1$ 时, 政府选择监督的概率会趋向于 $x = 1$, 即政府积极监督。

其相位图如下图 1:

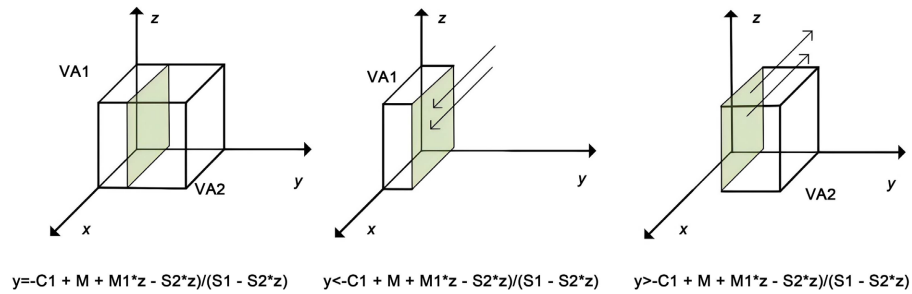


Figure 1. Phase diagram of governments' willingness

图 1. 政府意愿相位图

推论 1: 政府选择监管的概率与回收商的升级意愿成负相关。

造成这一结果的可能原因是当回收商已有了较高的升级意愿时，政府无需在支付额外的精力与财力督促回收商升级。

2) 回收商稳定性分析

设回收商正规回收的收益为 $E21$ ，不正规回收的收益为 $E22$ ，平均收益为 $E2$ ：

$$E21 = x * z * (-C - C2 + M3 + S1) + x * (1 - z) * (-C - C2 + M3 + S1) + z * (1 - x) * (-C - C2 + M3) + (1 - x) * (1 - z) * (-C - C2 + M3)$$

$$E22 = x * z * (-C2 - F + M2 * (1 - B) - M3) + x * (1 - z) * (-C2 + M2 * (1 - B)) + z * (1 - x) * (-C2 - F + M2 * (1 - B) - M4) + (1 - x) * (1 - z) * (-C2 + M2 * (1 - B))$$

$$E2 = y * E21 + (1 - y) * E22$$

可以得到回收商的复制动态方程为：

$$F(y) = dy/dt = -y * (y - 1) * (B * M2 - C + F * z - M2 + M3 * x * z + M3 - M4 * x * z + M4 * z + S1 * x)$$

对 $F(y)$ 求一阶导可得

$$dF(y)/dy = -(2 * y - 1) * (B * M2 - C + F * z - M2 + M3 * x * z + M3 - M4 * x * z + M4 * z + S1 * x)$$

根据复制动态方程稳定性定理，当 $z = (-B * M2 + C + M2 - M3 - S1 * x) / (F + M3 * x - M4 * x + M4)$ 时，无论 y 取何值均是稳定状态，即回收商的回收策略保持稳定，当

$0 < z < (-B * M2 + C + M2 - M3 - S1 * x) / (F + M3 * x - M4 * x + M4)$ 时，回收商的回收策略会趋向于 $y = 0$ 即回收商不正规回收，当 $(-B * M2 + C + M2 - M3 - S1 * x) / (F + M3 * x - M4 * x + M4) < z < 1$ 时，回收商的回收策略会趋向于 $y = 1$ 即回收商正规回收。

其相位图如下图 2。

推论 2: 回收商的升级意愿与居民的监督意愿成正相关。

造成这一现象的可能原因是当居民的监督意愿较高时，回收商若不升级将会收到高额的惩罚，因此为了避免这一支出其转型升级的意愿也随之提升。

3) 居民稳定性分析

设居民参与监督的收益为 $E31$ ，不参与监督的收益为 $E32$ ，平均收益为 $E3$ ：

$$E31 = -C4 * x * y - C4 * y * (1 - x) + x * (1 - y) * (A * F - C4 + S2) + (1 - x) * (1 - y) * (A * F - C4)$$

$$E32 = -C5 * x * (1 - y) - C5 * (1 - x) * (1 - y) E3 = z * E31 + (1 - z) * E32$$

$$E3 = z * E31 + (1 - z) * E32$$

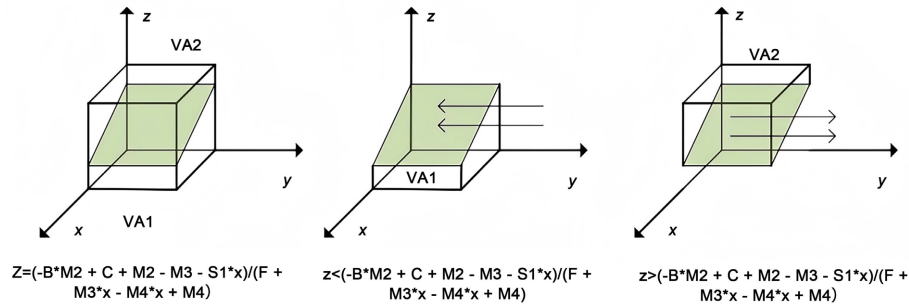


Figure 2. Phase diagram of recyclers' willingness

图 2. 回收商意愿相位图

可以得到居民的复制动态方程为:

$$F(z) = dz/dt = z * (E31 - E3) = z * (z - 1) * (A * F * y - A * F + C4 + C5 * y - C5 + S2 * x * y - S2 * x)$$

对 $F(z)$ 求一阶导可得 $dF(z)/dz = (2 * z - 1) * (A * F * y - A * F + C4 + C5 * y - C5 + S2 * x * y - S2 * x)$

根据复制动态方程稳定性定理, 当 $x = (-A * F * y + A * F - C4 - C5 * y + C5) / (S2 * (y - 1))$ 时, 无论 x 取何值均是稳定状态, 即居民的监管策略保持稳定, 当

$0 < x < (-A * F * y + A * F - C4 - C5 * y + C5) / (S2 * (y - 1))$ 时, 居民的监管策略会趋向于 $z = 0$, 即居民不参与监督, 当 $(-A * F * y + A * F - C4 - C5 * y + C5) / (S2 * (y - 1)) < x < 1$ 时, 居民的监管策略会趋向于 $z = 1$, 即居民积极参与监管。

其相位图如下图 3:

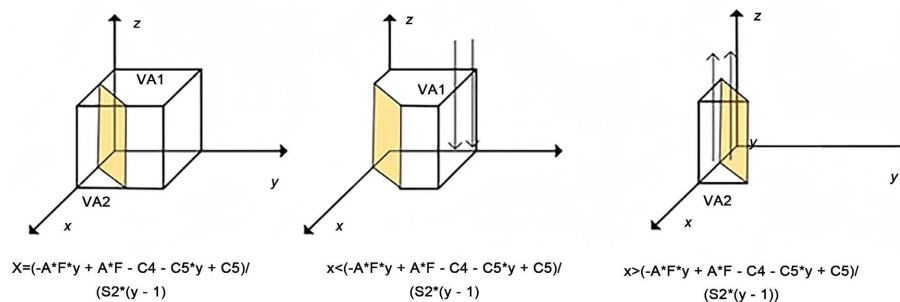


Figure 3. Phase diagram of residents' willingness

图 3. 居民意愿相位图

推论 3: 居民的监督意愿与政府的监督力度成正相关。

造成这一现象的可能原因是, 当政府积极参与监督时, 会对居民给予一部分的监督奖励, 为了获得这一部分现金, 居民会积极参与到监督回收商的行列中。

4) 系统均衡点稳定性分析

将政府, 回收商, 居民三者的复制动态方程连理, 可以得到三方演化博弈的复制动力方程。根据 Frideman 提出的方法, 可以通过雅可比矩阵的成绩复制动力方程的稳定点。该系统的雅可比矩阵如下:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F(x)}{\partial x} & \frac{\partial F(x)}{\partial y} & \frac{\partial F(x)}{\partial z} \\ \frac{\partial F(y)}{\partial x} & \frac{\partial F(y)}{\partial y} & \frac{\partial F(y)}{\partial z} \\ \frac{\partial F(z)}{\partial x} & \frac{\partial F(z)}{\partial y} & \frac{\partial F(z)}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{pmatrix}$$

其中: $A_{11} = (2 * x - 1) * (C1 - M - M1 * z + S1 * y - S2 * y * z + S2 * z)$

$$A_{12} = x * (S1 - S2 * z) * (x - 1)$$

$$A_{13} = -x * (x - 1) * (M1 + S2 * y - S2)$$

$$A_{21} = -y * (y - 1) * (M3 * z - M4 * z + S1)$$

$$A_{22} = (1 - 2 * y) * (B * M2 - C + F * z - M2 + M3 * x * z + M3 - M4 * x * z + M4 * z + S1 * x)$$

$$A_{23} = -y * (y - 1) * (F + M3 * x - M4 * x + M4)$$

$$A_{31} = S2 * z * (y - 1) * (z - 1)$$

$$A_{32} = z * (z - 1) * (A * F + C5 + S2 * x)$$

$$A_{33} = (2 * z - 1) * (A * F * y - A * F + C4 + C5 * y - C5 + S2 * x * y - S2 * x)$$

根据李雅普诺夫间接法, 当雅可比矩阵的所有特征值均具有负实部时, 该均衡点才是稳定点。因此将 $E1(0, 0, 0)$ 、 $E2(0, 0, 1)$ 、 $E3(0, 1, 0)$ 、 $E4(0, 1, 1)$ 、 $E5(1, 0, 0)$ 、 $E6(1, 0, 1)$ 、 $E7(1, 1, 0)$ 、 $E8(1, 1, 1)$ 分别带入到上文的雅可比矩阵中, 可以得到如下结果即表 2, 可根据结果求得博弈三方各状态的均衡条件。

Table 2. Stable point analysis

表 2. 稳定点分析

局部均衡点	特征值 λ_1	特征值 λ_2	特征值 λ_3
$E1$	$-C1 + M$	$B * M2 - C - M2 + M3$	$A * F - C4 + C5$
$E2$	$C1 - M$	$B * M2 - C - M2 + M3 + S1$	$A * F - C4 + C5 + S2$
$E3$	$-C1 + M - S1$	$-B * M2 + C + M2 - M3$	$-C4$
$E4$	$-C1 + M + M1 - S2$	$B * M2 - C + F - M2 + M3 + M4$	$-A * F + C4 - C5$
$E5$	$C1 - M + S1$	$-B * M2 + C + M2 - M3 - S1$	$-C4$
$E6$	$C1 - M - M1 + S2$	$B * M2 - C + F - M2 + 2 * M3 + S1$	$-A * F + C4 - C5 - S2$
$E7$	$-C1 + M + M1 - S1$	$-B * M2 + C - F + M2 - M3 - M4$	$C4$

通过表格可知, $E7$, $E8$ 确定不是稳定渐进点。其余 6 点为 Ess 。

各点稳定情况如下,

$$E1: -C1 + M < 0, B * M2 - C - M2 + M3 < 0, A * F - C4 + C5 < 0;$$

$$E2: C1 - M < 0, B * M2 - C - M2 + M3 + S1 < 0, A * F - C4 + C5 + S2 < 0;$$

$$E3: -C1 + M - S1 < 0, -B * M2 + C + M2 - M3 < 0;$$

$$E4: -C1 + M + M1 - S2 < 0, B * M2 - C + F - M2 + M3 + M4 < 0, -A * F + C4 - C5 < 0;$$

$$E5: C1 - M + S1 < 0, -B * M2 + C + M2 - M3 - S1 < 0;$$

$$E6: C1 - M - M1 + S2 < 0, B * M2 - C + F - M2 + 2 * M3 + S1 < 0, -A * F + C4 - C5 - S2 < 0。$$

3. 仿真分析

为能更好的分析各参数对演化路径的影响, 本文利用 matlab2020b 结合均衡条件及许礼刚[9]等人的文献进行参数设置, 对 $E6(1, 0, 1)$ 进行研究, 其对应的组合为政府积极监管, 回收商不正规回收, 居民积极监督。

具体参数设置如下: $A = 0.05$; $B = 0.05$; $C = 11$; $C1 = 5$; $C2 = 5$; $C4 = 3$; $C5 = 4$; $CE = 5$; $F = 4$; $M1 = 3$; $M4 = 3$; $M = 5$; $M2 = 12$; $M3 = 8$; $S1 = 2$; $S2 = 0.5$ 。

初始演化路径分析图 4 所示, 三方演化路径最终趋向于 $(1, 0, 1)$, 与上文理论分析中得出的结果相一致。

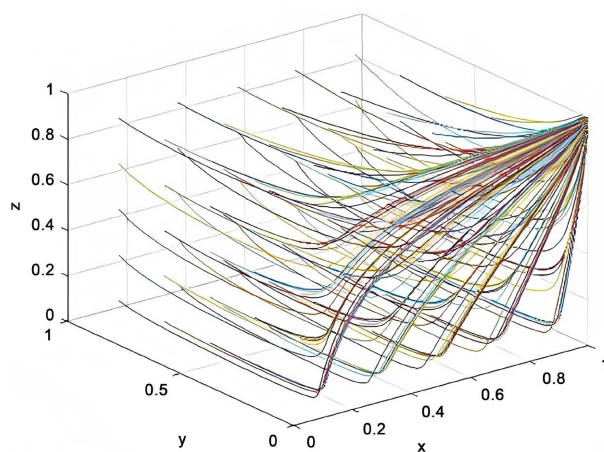


Figure 4. Diagram of the practical teaching system of automation major
图 4. 演化路径图

3.1. 初始概率对演化路径的影响

在保持其它参数设置不变的情况下, 改变政府以及居民的初始意愿。随着政府监管概率的提升以及居民监管概率的提升, 回收商趋向不正规回收的意愿逐渐放缓。在回收商的回收过程中, 居民与政府在初期并没有参与其中, 因此回收商收到举报并因此收到经济损失或形象损失的概率很小, 其为了追求更高的利益快速地趋向与不正规回收。但随着政府与居民的初始意愿不断提高, 回收商收到罚款或是坏名声的概率也不断增大。面对这种情况, 回收商为了减缓损失的速度, 也会放缓趋向于不正规回收的时间。

因此, 提高政府与居民的参与度可以更好地减缓回收商趋向于不正规回收的速度。并且从图 5、图 6 中可以看出提高居民的参与度的减缓速度比提高政府的参与度的减缓速度更为有效。

3.2. 各参数对演化路径的影响

3.2.1. 回收商正规收益

在保持其它参数不变的情况下, 只改变 $M3$ 即回收商正规回收的收益。从图 7 中可以看出, 当回收商正规回收的利润不断增加时, 回收商趋向不正规回收的速度放缓, 当超过某一阈值时最终会趋向正规回收。同时政府的监督意愿也随着回收商正规回收的收益增加而降低, 这表示当正规回收成为回收商的

第一选择后，政府无需花费额外的财力监督回收商从事正规回收，能够极大地减少政府支出。此外，回收商的正规收益对于居民的监督意愿并无直接关联。

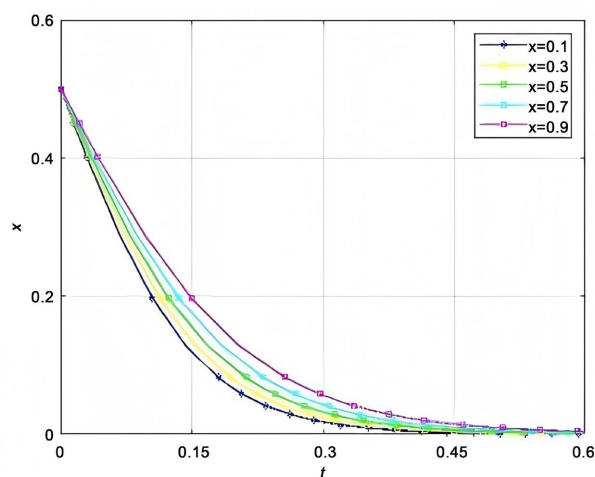


Figure 5. The impact of government regulatory probability on recyclers' strategies

图 5. 政府监管概率对回收商策略的影响

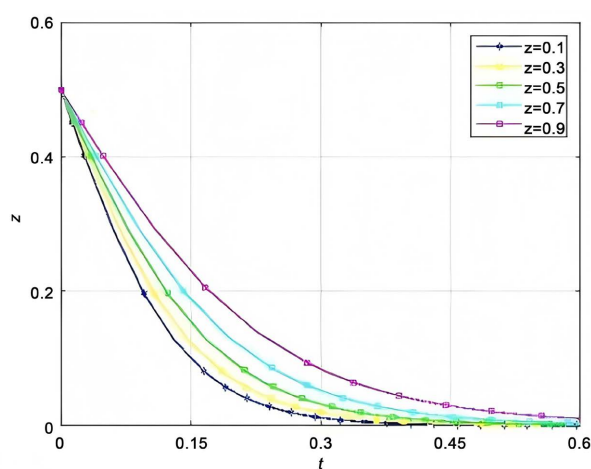


Figure 6. The impact of resident regulatory probability on recyclers' strategies

图 6. 居民监管概率对回收商策略的影响

因此，发展更好的回收技术从而提高回收商的回收利润是必要的。政府可以出台相关政策鼓励回收商提升回收技术，从而达到减少监管压力并提高回收商回收意愿。

3.2.2. 回收商不正规回收收益

在保持其他参数不变的情况下，只改变 $M2$ 即回收商不正规回收的收益。从图 8 中可以看出，当回收商不正规回收的利润减少时，其趋向于不正规回收的速度放缓，但很难趋向于正规回收，同时政府的监管意愿始终保持在趋向于积极监管。

这表示打击回收商非正规仅能做到减缓的作用但无法起到完全改变回收商回收模式的选择。而政府也必须时刻提防回收商的不正规回收造成的污染。

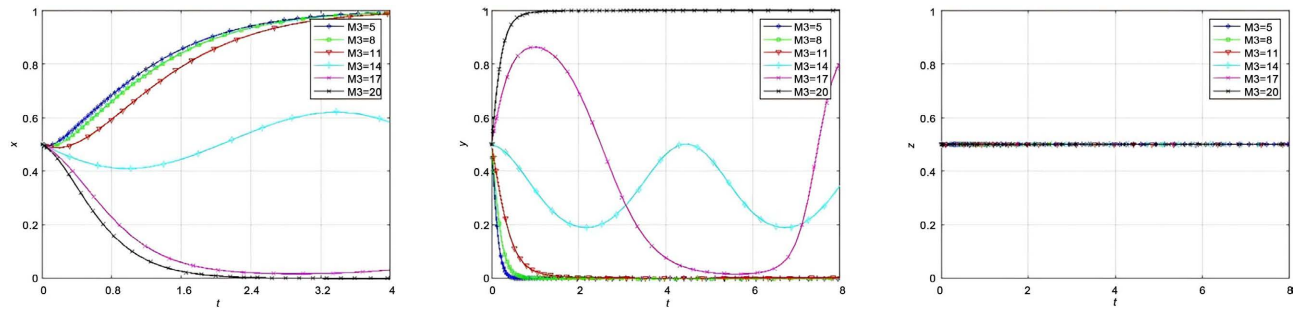


Figure 7. Regular income of recyclers
图 7. 回收商正规收益

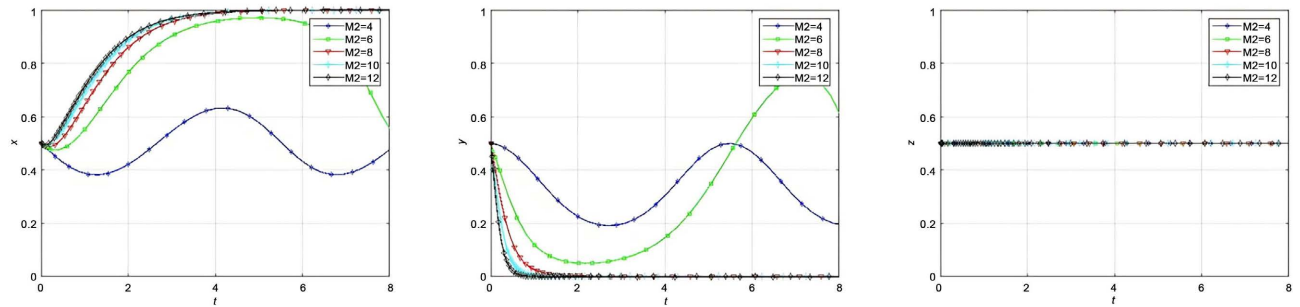


Figure 8. Irregular income of recyclers
图 8. 居民意愿相位图

4. 结论与建议

4.1. 结论

- 1) 政府与居民提高初始监督意愿能够减缓回收商转向非正规回收的时间，并且居民的监督比政府对于回收商更为有效。
- 2) 回收商良好的正规收入能够完全改变回收模式选择，从而放弃非正规回收选择正规回收。非正规回收收入只能减缓回收商趋向非正规回收的速度，但在经历过一段时间后仍会选择不正规回收。

4.2. 建议

- 1) 回收商的正规回收收入与政府和电池生厂商等机构有着直接的相关联，当电池制造商更多地选择再回收材料作为生产的主要原料时，可以极大地提升回收商的正规收入。政府也可以适当地对于回收商给予一定的技术补贴，鼓励回收商进行更好的技术升级，从而减少其升级成本。并且政府应当严格打击不正规小作坊，从而降低回收商的不正当收益，其也能帮助回收商转型。
- 2) 政府可以在初期通过给予居民现金奖励或是其他方式带动其对于回收商的监督意愿，从而变相提高回收商对于转型的意愿，但长期的财政补贴也会对自身造成一定的负担，因此可以在回收商转型，居民积极参与与稳定之后慢慢降低补贴。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(72271164)，上海市软科学研究重点项目(19692104000)。

参考文献

- [1] 张英杰, 许斌, 梁风, 等. 废旧磷酸铁锂电池正极材料的回收研究现状[J]. 人工晶体学报, 2019, 48(5): 800-808.

-
- [2] 张淑英, 李天钰. 中国新能源汽车废旧动力电池报废量预测与对策建议——基于蒙特卡洛模拟的测算[J]. 环境与可持续发展, 2019, 44(6): 101-105.
 - [3] 王文宾, 刘业, 钟罗升, 戚金钰, 仝鹏. 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.
 - [4] 谢家平, 李璟, 杨非凡, 梁玲. 新能源汽车闭环供应链的多级契约决策优化[J]. 管理工程学报, 2020, 34(2): 180-193.
 - [5] 何天慧. 政府监管下动力电池梯次利用闭环供应链三方演化博弈分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(社会科学版), 2024, 26(3): 184-191.
 - [6] Lu, J.Z. (2023) New Energy Subsidies, Green Innovation, and State-Owned Enterprise Shareholding Reform:A Study Based on Oligopoly Competition Model. *Journal of Global Economy, Business and Finance*, 5, 71-74.
 - [7] 徐耀群, 许楠, 郑艺. 基于演化博弈的动力电池逆向供应链技术创新研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(社会科学版), 2023(1): 101-116+128.
 - [8] 陈宇科, 童欣. 政府补贴对动力电池再生利用技术创新的激励效应[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2024, 41(4): 68-83.
 - [9] 许礼刚, 刘荣福, 陈磊, 倪俊. 前景理论视角下废旧动力电池回收监管演化博弈分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2024, 38(1): 290-297.