

基于前景理论的废旧动力电池非正规回收渠道研究

许礼刚 刘荣福 陈磊 贾扬蕾
(江西理工大学经济管理学院, 江西赣州 341000)

[摘要] 为提高废旧动力电池回收率,解决废旧动力电池流向不明的问题,以奖惩机制为核心,将演化博弈与前景理论耦合,建立动力电池制造商、非正规回收商和政府的三方演化博弈模型,探讨关键参数对博弈主体的影响,并将对应的现实应用场景体现出来。通过改变政府的初始监督概率,判断出消极合作的博弈主体;通过调整补贴或罚款分配比例,优化奖罚机制。研究结果表明,政府提高初始监督意愿,能加速动力电池制造商和非正规回收商之间信息交流;若动力电池制造商为消极合作的企业,政府应侧重于对其进行监督;从长远发展来看,把补贴分配比例集中于动力电池制造商,把罚款分配比例集中于非正规回收商,将更利于非正规回收商主动转型升级;提高风险态度系数和损失规避系数,能加快合作回收。

[关键词] 废旧动力电池;非正规渠道;演化博弈;奖惩机制;前景理论

[中图分类号] F426; X705; TM912 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2024)05-0007-08

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.05.002

0 前言

新能源汽车行业的迅速发展,带动了废旧动力电池市场的迅速繁荣,据有关学者预测,中国废旧动力电池在2030年将达到4.9 Mt^[1]。废旧动力电池若没有及时安全有效处理,极易发生化学反应,将造成自然环境污染和资源浪费,违背设计使用新能源汽车的初衷^[2-3]。对废旧动力电池进行回收利用,可降低新动力电池的生产成本,进一步促进循环经济的可持续发展^[4-5]。

废旧动力电池回收渠道包括正规回收渠道和非

正规回收渠道。正规回收渠道指拥有符合相关规定的设备和技术且能安全高效地回收处理废旧动力电池的再生产新动力电池的企业,代表企业有比亚迪(后续统称“动力电池制造商”)。但由于政府在监管体系和管理制度方面尚未完善,大量非正规回收商出现在废旧动力电池的回收领域中。在废旧动力电池回收领域,非正规回收商通常指那些未获得相应政府或行业认证,且在回收过程中不遵守相关法律法规的个体或企业。中国约有6.4万家废旧动力电池回收商,但只有约5%的回收商获得政府授权,导致近80%的废旧动力电池最终流入非正规回收渠道^[6]。相对于动力电池制造商而言,非正规回收渠道不具备相应资质,没有符合相关规定的回收设备和技术,不能安全和高效地处理废旧动力电池。在存储和运输途中,存在有爆炸的安全风险;在回收处理过程中,对工人有健康隐患;在污染排放处理方面,有毒物质泄漏,将对生态环境和人体安全健康造成危害。2018年,废旧动力电池共74 000 t,但只有5 472 t被回收利用,回收率仅为7.4%^[7]。若使非正规回收商转型升级为正规回收商,则使废旧动力电池进入正规回收渠道,避免流向不明发生,动力电池制造商可获得更多的废旧动力电池,能提高企业自身的利益,同时提高回收率。

目前,已有学者针对废旧动力电池回收利益

[收稿日期] 2024-04-25

[基金项目] 江西省社会科学研究“十四五”(2022年)规划项目:江西省动力电池回收补偿机制及政策优化研究(22GL21)。

[作者简介] 许礼刚(1980—),男,博士,副教授,主要从事资源经济与管理等方面的研究。

[引用格式] 许礼刚,刘荣福,陈磊,等.基于前景理论的废旧动力电池非正规回收渠道研究[J].绿色矿冶,2024,40(5):7-14.

XU Ligang, LIU Rongfu, CHEN Lei, et al. Research on informal recycling channels of spent power battery based on prospect theory [J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(5):7-14.

相关者维度展开研究。彭频等^[8]构建“制造商-政府-消费者”演化博弈模型,发现制造商推动回收体系建设将增加政府的收益。王成功等^[9]构建“回收商-消费者-政府”演化博弈模型,认为政府对回收商实施行政处罚,可以督促其进行合规回收。Guan等^[10]构建“第三方回收商-制造商-梯次利用企业”演化博弈模型,认为政府通过增加补贴金额,可促进供应链的协调发展。在构建模型时,大多数学者仅对正规回收渠道的相关主体进行探讨,有关非正规回收渠道方面的研究较少。在非正规回收渠道维度,已有学者认为政府通过增加补贴金额,能够直接或间接影响非正规回收商转型升级为正规回收商^[11-12]。基于有限理性假设^[13],促使动力电池制造商和非正规回收商进行合作,政府作为第三方对合作回收过程进行监督,废旧动力电池流向如图1所示。

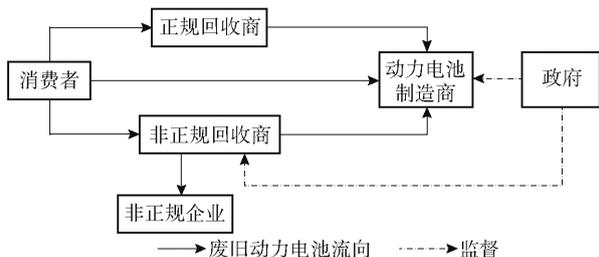


图1 废旧动力电池流向

利用传统的博弈矩阵计算客观收益时,采用期望效用理论,这可能使结果与实际产生偏差^[14-15]。进行有限理性的博弈决策时,主要由参与主体的主观感知价值决定,不能仅由客观实际收益或损失决定,这与前景理论的特征一致^[16]。目前,已有学者在高校高层次人才流动、建筑施工安全管理和动力电池回收等方面,运用前景理论进行分析,使研究过程和内容更加契合实际^[17-19]。鉴于此,本文在构建“动力电池制造商-非正规回收商-政府”的演化博弈模型时,引入前景理论,以期研究过程和内容更加契合实际。

创新点为:①把非正规回收商纳入回收监管体系中,增加逆向供应链中非正规回收渠道的相关研究;②以往学者研究补贴或罚款金额对非正规回收商的影响,本文通过设置不同的补贴与罚款分配比例,探讨对非正规回收商的影响,并增加了奖惩机制对非正规回收商影响的相关研究;③通过改变博弈主体的初始概率,判断出消极合作的企业,以期进一步完善监管体系。

1 模型假设与构建

1.1 模型假设

假设1:假设博弈主体均为有限理性。若存在不确定收益或损失 x_i , 则会有感知价值 $V(x_i)$ 出现; 若存在确定的客观收益或损失, 则实际价值和感知价值上并不存在差距^[20]。

$$V(x_i) = \begin{cases} x_i^\alpha, & x_i \geq 0 \\ -\lambda(-x_i)^\alpha, & x_i < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, λ 为损失的规避系数, λ 数值越大, 表明博弈主体对风险的损失规避性越强 ($\lambda \geq 1$); α 为风险态度系数, α 数值越小, 表明博弈主体对风险越不敏感 ($0 \leq \alpha \leq 1$); x_i 为相对于参照点的损益差, 令该值为 0; 根据相关学者的研究, α 和 λ 取值分别为 0.88 和 2.25^[21]。

假设2:博弈主体的策略选择皆为两种,其中逻辑关系如图2所示。动力电池制造商的策略选择为“合作”或“不合作”,其概率分别对应 x 和 $1-x$; 非正规回收商的策略选择为“转型升级”或“不转型升级”,其概率分别对应 y 和 $1-y$; 政府的策略选择为“监督”或“不监督”,其概率分别对应 z 和 $1-z$ ($x, y, z \in [0, 1]$)。

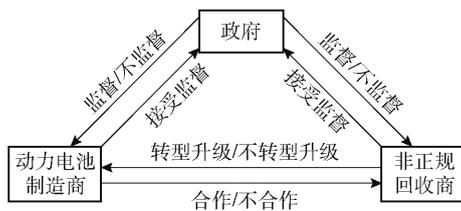


图2 博弈主体的逻辑关系

假设3:从动力电池制造商角度分析,若选择合作且合作达成,能够获得利益 A , 执行成本 C , 获得补贴 F , 动力电池制造商正常运行收益为 J 。

假设4:从非正规回收商角度分析,若选择转型升级且合作达成,能够获得利益 B , 执行成本 D , 获得补贴 G , 动力电池制造商正常运行收益为 K 。

假设5:从政府角度分析,政府监督的执行成本为 L , 若合作达成,则给予补贴 E , 且获得公众提供的正面效益 M ; 若合作未达成,将对动力电池制造商和非正规回收商分别进行罚款 H 和 I , 且要承担环境治理成本 N 。

假设6:在合作回收过程中,博弈主体只要有合作的意愿,无论最终合作是否达成,都将投入成本。

1.2 模型构建

根据以上假设,动力电池制造商的合作成本 C 和正常运营的收益 J ,非正规回收商的合作成本 D 和正常运营的收益 K ,政府的执行成本 L ,仅与自身

相关,均为确定损益^[22]。不确定损益为:动力电池制造商的利益 A 、补贴 F 和罚款 H ,非正规回收商的利益 B 、补贴 G 和罚款 I ,以及政府的补贴 E 、正面效益 M 和成本 N ,由此可得博弈收益矩阵为表 1。

表 1 博弈收益矩阵

博弈主体	非正规回收商				
	转型升级(y)		不转型升级($1-y$)		
	政府监督(z)	政府不监督($1-z$)	政府监督(z)	政府不监督($1-z$)	
正规企业	合作(x)	$J+V(A)-C+V(F)$ $K+V(B)-D+V(G)$ $-L+V(M)+V(-E)$	$J+V(A)-C$ $K+V(B)-D$ 0	$J-C$ $K+V(-I)$ $V(I)-L+V(-N)$	$J-C$ K $V(-N)$
	不合作($1-x$)	$J+V(-H)$ $K-D$ $V(H)-L+V(-N)$	J $K-D$ $V(-N)$	$J+V(-H)$ $K+V(-I)$ $V(H)+V(I)-L+V(-N)$	J K $V(-N)$

2 博弈主体策略选择与稳定性分析

2.1 博弈主体的策略选择

2.1.1 动力电池制造商的策略选择

假设动力电池制造商平均收益为 N_1 ,策略选择为“合作”的期望收益为 N_{11} ,策略选择为“不合作”的期望收益为 N_{12} ,则可得:

$$N_{11} = yz[J+V(A)-C+V(F)] + y(1-z)[J+V(A)-C] + (1-y)z(J-C) + (1-y)(1-z)(J-C) \quad (2)$$

$$N_{12} = yz[J+V(-H)] + y(1-z)J + (1-y)z[J+V(-H)] + (1-y)(1-z)J \quad (3)$$

$$N_1 = xN_{11} + (1-x)N_{12} \quad (4)$$

通过联立公式(2)、(3)和(4),则可得动态复制方程 $F(x)$:

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(N_{11} - N_1) = x(x-1)[C-V(A)y+V(-H)z-V(F)yz] \quad (5)$$

2.1.2 非正规回收商的策略选择

假设非正规回收商平均期望收益为 N_2 ,策略选择为“转型升级”的期望收益为 N_{21} ,策略选择为“不转型升级”的期望收益 N_{22} ,则可得:

$$N_{21} = xz[K+V(B)-D+G] + x(1-z)[K+V(B)-D] + (1-x)z(K-D) + (1-x)(1-z)(K-D) \quad (6)$$

$$N_{22} = xz[K+V(-I)] + x(1-z)K + (1-x)z[K+V(-I)] + (1-x)(1-z)K \quad (7)$$

$$N_2 = yN_{21} + (1-y)N_{22} \quad (8)$$

通过联立公式(6)、(7)和(8),则可得动态复制方程 $F(y)$:

$$F(y) = \frac{dy}{dt} = y(N_{21} - N_2) = y(y-1)[D-V(B)x+V(-I)z-V(G)xz] \quad (9)$$

2.1.3 政府的策略选择

假设政府平均期望收益为 N_3 ,策略选择为“监督”的期望收益为 N_{31} ,策略选择为“不监督”的期望收益为 N_{32} ,则可得:

$$N_{31} = xy[-L+V(M)+V(-E)] + x(1-y)[V(I)-L+V(-N)] + (1-x)y[V(H)-L+V(-N)] + (1-x)(1-y)[V(H)+V(I)-L+V(-N)] \quad (10)$$

$$N_{32} = xy0 + x(1-y)V(-N) + (1-x)yV(-N) + (1-x)(1-y)V(-N) \quad (11)$$

$$N_3 = zN_{31} + (1-z)N_{32} \quad (12)$$

通过联立公式(10)、(11)和(12),则可得动态复制方程 $F(z)$:

$$F(z) = \frac{dz}{dt} = z(N_{31} - N_3) = z(z-1)[L-V(I)-V(H)+V(H)x+V(I)y-V(-E)xy-V(M)xy] \quad (13)$$

2.2 稳定性分析

把不确定损益 x_i 带到公式(1)中,结合复制动态方程计算,则可得雅克比矩阵 ν 。

$$v = \begin{bmatrix} (2x-1) \begin{pmatrix} C - Fyz - \\ A^\alpha y - \lambda H^\alpha z \end{pmatrix} & x(x-1) (-A^\alpha - F^\alpha z) & x(x-1) (-\lambda H^\alpha - F^\alpha y) \\ y(y-1) (-B^\alpha - G^\alpha z) & (2y-1) \begin{pmatrix} D - G^\alpha xz - \\ B^\alpha x - \lambda I^\alpha z \end{pmatrix} & y(y-1) (-\lambda I^\alpha - G^\alpha x) \\ z(z-1) \begin{pmatrix} H^\alpha + \lambda E^\alpha y \\ -M^\alpha y \end{pmatrix} & z(z-1) \begin{pmatrix} I^\alpha + \lambda E^\alpha x \\ -M^\alpha x \end{pmatrix} & (2z-1) \begin{pmatrix} L + H^\alpha x + I^\alpha y \\ + \lambda E^\alpha xy - I^\alpha \\ -M^\alpha xy - H^\alpha \end{pmatrix} \end{bmatrix} \quad (14)$$

令 $F(x) = F(y) = F(z) = 0$, 则可以得到 $E_1(0, 0, 0)$ 、 $E_2(1, 0, 0)$ 、 $E_3(0, 1, 0)$ 、 $E_4(0, 0, 1)$ 、 $E_5(1, 1, 0)$ 、 $E_6(1, 0, 1)$ 、 $E_7(0, 1, 1)$ 和 $E_8(1, 1, 1)$ 共 8 个特殊均衡点, 并把 8 个特殊的均衡点依次带入矩阵 v , 则可得特征值(表 2)。

表 2 各个均衡点的特征值

均衡点	特征值 λ_1	特征值 λ_2	特征值 λ_3
$E_1(0, 0, 0)$	$-C$	$-D$	$H^\alpha + I^\alpha - L$
$E_2(1, 0, 0)$	C	$B^\alpha - D$	$I^\alpha - L$
$E_3(0, 1, 0)$	D	$A^\alpha - C$	$H^\alpha - L$
$E_4(0, 0, 1)$	$-C + \lambda H^\alpha$	$-D + \lambda I^\alpha$	$L - H^\alpha - I^\alpha$
$E_5(1, 1, 0)$	$C - A^\alpha$	$D - B^\alpha$	$M^\alpha - \lambda E^\alpha - L$
$E_6(1, 0, 1)$	$C - \lambda H^\alpha$	$L - I^\alpha$	$B^\alpha - D + G^\alpha + \lambda I^\alpha$
$E_7(0, 1, 1)$	$D - \lambda I^\alpha$	$L - H^\alpha$	$A^\alpha - C + F^\alpha + \lambda H^\alpha$
$E_8(1, 1, 1)$	$\lambda E^\alpha + L - M^\alpha$	$C - A^\alpha - F^\alpha - \lambda H^\alpha$	$-B^\alpha + D - G^\alpha - \lambda I^\alpha$

由李雅普诺夫稳定性定理可得, 若 $\lambda_1 < 0$ 、 $\lambda_2 < 0$ 、 $\lambda_3 < 0$, 则可以将该策略视为演化稳定策略(ESS)。其中, 均衡点 $E_2(1, 0, 0)$ 和 $E_3(0, 1, 0)$ 中的 λ_1 为正值, 故均衡点 $E_2(1, 0, 0)$ 和 $E_3(0, 1, 0)$ 在任何情景下均无法成为渐进稳定点。

3 仿真分析

通过 Matlab2016a 数值模拟仿真, 能观测到博弈主体的演化趋势, 对均衡点 $E_5(1, 1, 0)$ 进行研究, 其对应的策略组合为(合作、转型升级、不监督)。

考虑到在现实情况下, 奖惩机制开始设置时具有不确定性, 故起始阶段对企业的补贴($F = G$)和罚款($H = I$)相等, 且确保罚款总额大于补贴总额($H + I > E$)。假设在博弈开始时, 博弈主体的意愿相同, 且均为 0.5($x = y = 0.5$)。依据相关学者计算的收益表^[23](表 3), 得到动力电池制造商和非正规回收商的平均收益比例为 $A : B \approx 8$ (情景 1: 无政府干预下; 情景 2: 政府对动力电池制造商补贴, 比例计算

取整)。满足 $C - A^\alpha < 0$ 、 $D - B^\alpha < 0$ 和 $M^\alpha - \lambda E^\alpha - L < 0$ 的基础上, 初始参数值设定为: $\alpha = 0.88$, $\lambda = 2.25$, $A = 8$, $B = 1$, $C = 4$, $D = 0.5$, $E = 0.4$, $F = 0.2$, $G = 0.2$, $H = 0.8$, $I = 0.8$, $L = 1.5$, $M = 1.5$, $x = y = 0.5$ 。

表 3 收益表

情景	动力电池制造商收益(A)	非正规回收商收益(B)
情景 1	1.99×10^7	1.68×10^6
情景 2	1.99×10^6	1.08×10^6

3.1 初始概率对博弈主体的影响

3.1.1 初始监督概率 z 值对博弈主体的影响

改变政府的初始监督概率, 则可得演化轨迹(图 3)。由图 3 可知, 当初始监督概率 z 值增加时, 动力电池制造商和非正规回收商均加快演化至 1, 即有利于合作回收。政府在合作回收初期, 对于废旧动力电池的危害不重视, 常消极监督。面对这种情况, 动力电池制造商和非正规回收商将不积极进行信息交流, 故合作回收延缓。随时间推移, 政府意识到废旧动力电池的危害, 会积极监督是否合作回收。此时, 动力电池制造商和非正规回收商获得补贴的可能性增大, 增加了感知补贴收益, 极大提高信息交流的积极性, 故加快合作回收。

3.1.2 x 值或 y 值对博弈主体的影响

改变 x 值或 y 值, 则可得演化轨迹(图 4)。由图 4(a)可知, 当非正规回收商的初始转型升级概率低于 0.2 时, 动力电池制造商的策略就会从合作转变为不合作, 即相对非正规回收商, 动力电池制造商对于合作回收更为消极。

在合作回收初期, 动力电池制造商和非正规回收商之间的信息交流较少。动力电池制造商无法充分了解非正规回收商的策略, 且前期通常投入更多的成本, 因此, 动力电池制造商在无法获得足够的感知收益的情景下, 产生消极心理, 动力电池制造商为防止投入沉没, 最终选择不合作。随时间推移, 动力

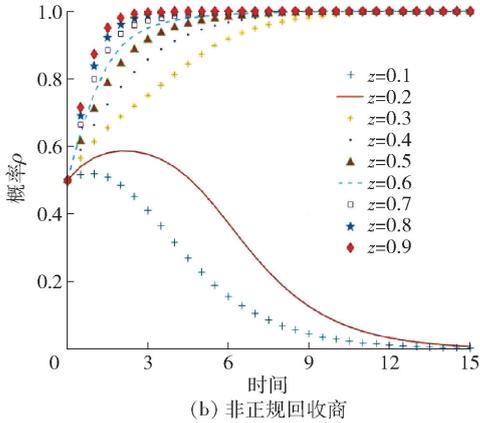
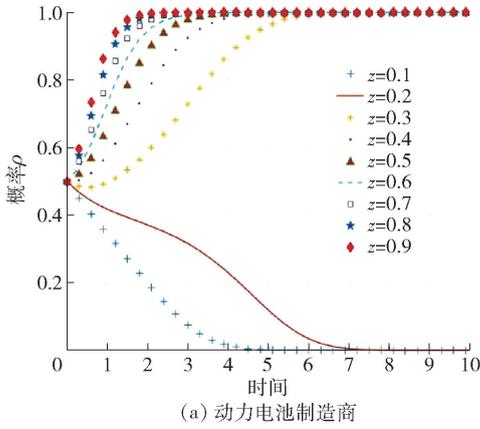


图3 z值改变下的演化轨迹

电池制造商和非正规回收商之间的信息交流增多,逐渐了解彼此的策略选择,动力电池制造商愿意投入前期成本,故最终达成合作共识。

3.2 奖惩机制对博弈主体的影响

3.2.1 补贴分配比例对博弈主体的影响

改变 F 和 G 的值,且维持 F 与 G 之和不变,则可得演化轨迹(图5)。由图5可知,当补贴分配比例集中于动力电池制造商时,动力电池制造商和非正规回收商均加快了演化至1,即有利于合作回收。当补贴分配比例集中于动力电池制造商时,其最终感知收益增加,动力电池制造商表现出更高的合作意愿,将更快地投入前期成本。此时,动力电池制造商较高的合作意愿,能够提高非正规回收商的合作积极性,确保前期投入不会沉没,故非正规回收商加快转型升级。

3.2.2 罚款分配比例对博弈主体的影响

改变 H 和 I 的值,且维持 H 与 I 之和不变,则可得演化轨迹(图6)。由图6可知,当罚款分配比例集中于非正规回收商时,动力电池制造商和非正规回收商均加快了演化至1,即有利于合作回收。在合作回收过程中,非正规回收商作为合作回收中的

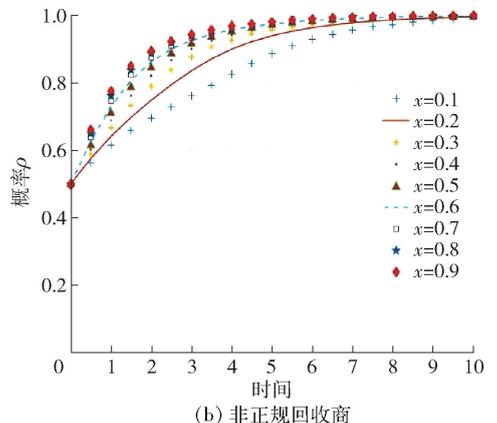
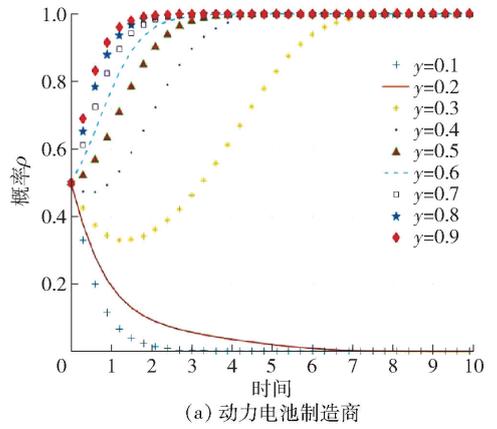


图4 y值或x值改变下的演化轨迹

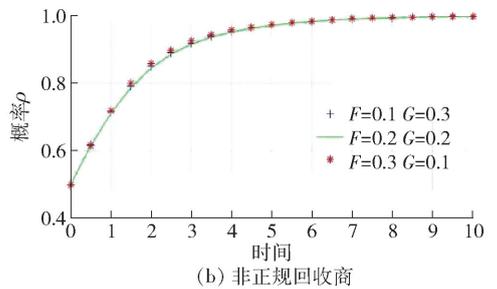
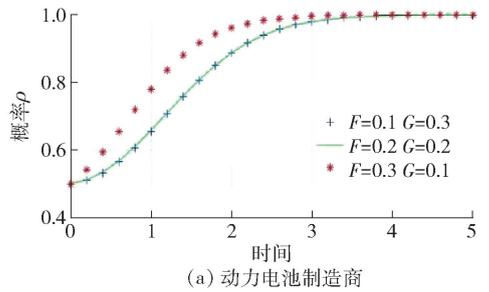


图5 补贴分配比例改变下的演化轨迹

获利小者,合作意愿更低。当罚款分配比例集中于非正规回收商时,使其感知罚款损失增加,能够极大消除侥幸心理。为避免被政府罚款,非正规回收商会积极主动转型升级,向动力电池制造商提出合作,提升自身的合作倾向。此时,动力电池制造商作为

合作回收中的获利大者,在了解到非正规回收商的合作倾向后,为追求更大的利益而选择合作,故动力电池制造商加快了合作回收。

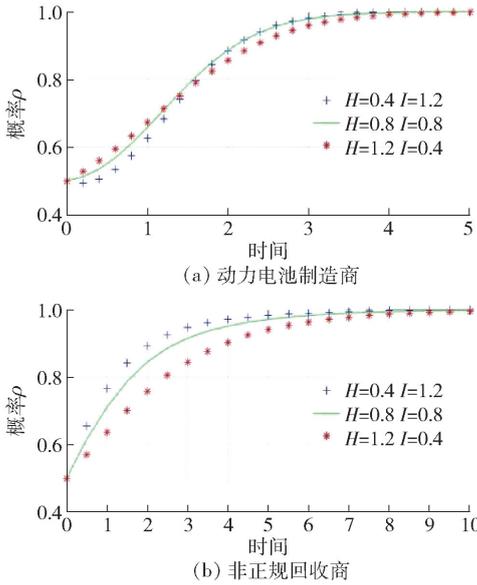


图6 罚款分配比例改变下的演化轨迹

3.3 α 和 λ 值对博弈主体的影响

3.3.1 α 值对博弈主体的影响

改变 α 的初始值,则可得演化轨迹(图7)。由图7可知,当 α 值增加时,动力电池制造商和非正规回收商均加快演化至1,即有利于合作回收。在合作回收初期,动力电池制造商往往由于回收数量不足和回收技术水平较低,对项目盈利信心不足,产生短视和短期主义,而选择延缓合作回收;随时间推移,动力电池制造商的回收数量增加和回收技术水

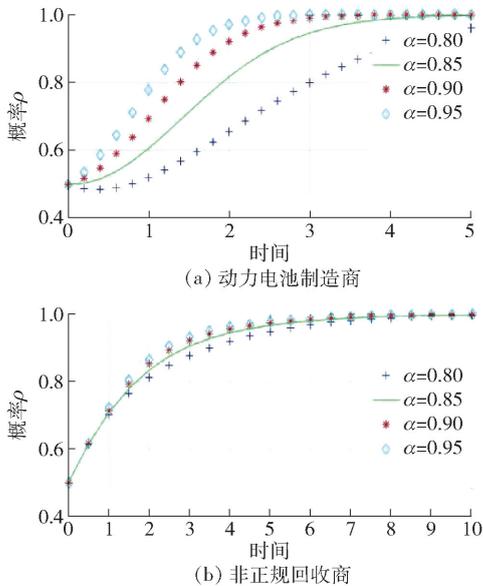


图7 α 值改变下的演化轨迹

平提高,增加了合作回收项目的盈利信心,加速了非正规回收商转型升级,故最终加快合作回收。

3.3.2 λ 值对博弈主体的影响

单独改变 λ 的初始值,则可得演化轨迹(图8)。由图8可知,当 λ 值增加时,动力电池制造商和非正规回收商均加快演化至1,即有利于合作回收。在合作回收初期,政府对废旧动力电池交易过程了解不足,导致政府无法有效监管市场,非正规回收商面临罚款的可能性很小,将产生侥幸心理,最终延缓转型升级;随时间推移,交易过程和信息交流逐渐透明化,政府能够更好地监管市场运行,增加非正规回收商被罚款的可能性;非正规回收商为避免罚款,会积极转型升级,故最终加快合作回收。

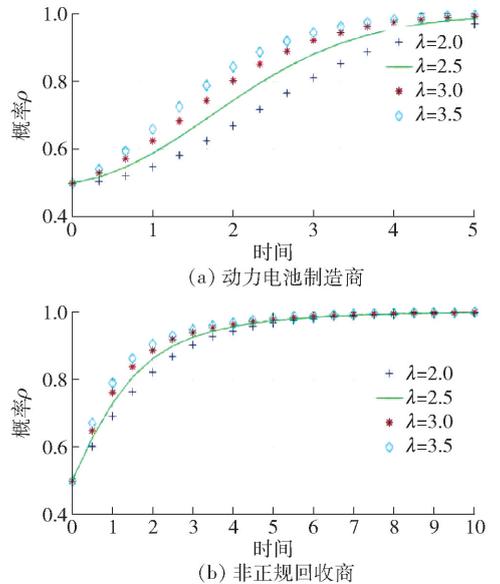


图8 λ 值改变下的演化轨迹

4 结论与建议

4.1 结论

1) 政府提高初始监督意愿,能增进动力电池制造商和非正规回收商之间的信息交流;动力电池制造商为消极合作的企业,政府应侧重于对其进行监督。

2) 从长远发展来看,把补贴分配比例集中于动力电池制造商,把罚款分配比例集中于非正规回收商,将更利于非正规回收商主动转型升级。

3) 提高损失规避系数和风险态度系数,能加快合作回收。

4.2 建议

1) 政府通过建立和完善信息共享平台,激励动

力电池制造商和非正规回收商之间进行资源共享,推动信息交流,确保对市场运行和合作回收过程进行有效监管。政府应侧重于对动力电池制造商进行监督,以消除动力电池制造商的消极心理,以确保动力电池制造商能积极寻求合作。

2)政府在补贴分配方面,可以集中补贴动力电池制造商,激励其进行合作回收。在罚款分配方面,政府可以针对非正规回收商进行罚款,依据违规状况差异化判断,进一步完善监管体系和评估体系,确保相关政策能够有效执行,使其积极主动转型升级。

3)政府要充分发挥好监督者这一角色的作用,使信息交流和合作回收过程透明化,严厉打击非正规回收商,增加被罚款的纪律,消除其侥幸心理。同时,通过制定税收减免和财政补贴的相关政策,以增加动力电池制造商的盈利信心,加速回收体系的发展。

[参考文献]

- [1] TAN Q Y, LI J H, YANG L Y, et al. Cascade use potential of retired traction batteries for renewable energy storage in China under carbon peak vision[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 412: 137379.
- [2] 费子桐, 周思源, 董鹏, 等. 退役钴酸锂电池材料回收利用研究趋势[J]. *有色设备*, 2021, 35(4): 1-6.
- [3] 刘诚, 陈宋璇, 吕东, 等. 废旧动力电池回收关键技术讨论[J]. *中国有色冶金*, 2018, 47(4): 44-48, 62.
- [4] HEYMANS C, WALKER S B, YOUNG S B, et al. Economic analysis of second use electric vehicle batteries for residential energy storage and load-levelling[J]. *Energy Policy*, 2014, 71: 22-30.
- [5] 曾思慧. 基于循环经济视角的新能源汽车动力电池回收利用分析[J]. *中国资源综合利用*, 2022, 40(12): 94-96.
- [6] LI Z H, ZHONG X B, XU X Y. The mechanism of retired power batteries recycling through blockchain token incentives[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 415: 137560.
- [7] LI X, MU D, DU J, et al. Game-based system dynamics simulation of deposit-refund scheme for electric vehicle battery recycling in China[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2020, 157: 104788.
- [8] 彭频, 何旭, 刘怡君, 等. 基于博弈分析的车用动力电池回收问题研究[J]. *江西理工大学学报*, 2020, 41(2): 47-50, 89.
- [9] 王成功, 刘娟娟. 考虑政府奖惩的动力电池回收利益相关者决策行为演化博弈分析[J]. *生态经济*, 2023, 39(4): 205-213.
- [10] GUAN Y, HE T H, HOU Q. Tripartite evolutionary game analysis of power battery cascade utilization under government subsidies[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 66382-66399.
- [11] JOSHI B V, VIPIN B, Ramkumar J, et al. Impact of policy instruments on lead-acid battery recycling: A system dynamics approach[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2021, 169: 105528.
- [12] 孙嘉楠, 肖忠东. 政府规制下废旧汽车非正规回收渠道的演化博弈[J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2018, 20(5): 26-36.
- [13] 张应青, 范如国, 罗明, 等. 企业技术创新短视行为的演化——基于前景理论的分析[J]. *技术经济与管理研究*, 2022(6): 58-63.
- [14] 刘亦晴, 陈成, 梁雁茹, 等. 百万扩招下高职校企合作演化稳定性分析[J]. *江西理工大学学报*, 2022, 43(2): 58-66.
- [15] 方云飞, 郝丽君, 田丽君. 信用监管背景下共享单车治理的演化博弈分析与仿真[J]. *江西理工大学学报*, 2022, 43(3): 55-62.
- [16] 张在旭, 刘志阳, 马莹莹. 政府监管下的企业安全生产行为研究——基于前景理论的演化博弈分析[J]. *数学的实践与认识*, 2018, 48(4): 70-78.
- [17] 刘峰. “双一流”建设背景下高校高层次人才的非正常流动监管——基于前景理论的演化博弈分析[J]. *科技管理研究*, 2020, 40(20): 99-104.
- [18] 成连华, 王晨, 李树刚, 等. 基于前景理论的建筑施工安全管理多主体演化博弈研究[J]. *安全与环境学报*, 2023, 23(9): 3286-3297.
- [19] 许礼刚, 刘荣福, 陈磊, 等. 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.
- [20] KAHNEMAN D, TVERSKY A. Prospect theory: an analysis of decision under risk[J]. *Econometrica*, 1979, 47(2): 263-291.
- [21] TVERSKY A, KAHNEMAN D. Advances in prospect theory: cumulative representation of uncertainty[J]. *Journal of Risk and Uncertainty*, 1992, 5(4): 297-323.
- [22] 许杰, 陈富坚, 马刘昕, 等. 前景理论视角下新能源汽车推广政策三方演化博弈分析[J]. *科技管理研究*, 2022, 42(11): 66-72.
- [23] CHENG Y J, HAO H, TAO S P, et al. Traceability management strategy of the EV power battery based on the blockchain[J]. *Scientific Programming*, 2021, 2021: 1-17.

Research on Informal Recycling Channels of Spent Power Battery Based on Prospect Theory

XU Ligang, LIU Rongfu, CHEN Lei, JIA Yanglei

(School of Economics and Management, Jiangxi University of Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: In order to improve the recovery rate of waste power batteries and solve the problem of unknown flow direction of spent power batteries, taking the reward and punishment mechanism as the core, the evolutionary game and prospect theory were coupled to construct a tripartite evolutionary game model of power battery manufacturers, informal recyclers and the government. The influence of key parameters on the game subject was discussed, and the corresponding practical application scenarios were reflected. By change the initial supervision probability of government, the game subject of negative cooperation was judged; By adjusting the distribution proportion of subsidies or fines, the reward and punishment mechanism were optimized. The results show that the government's willingness to improve the initial supervision can accelerate the information exchange between power battery manufacturers and informal recyclers; the power battery manufacturers are passive cooperative enterprises, and the government should focus on supervising them; in the long run, it will be more conducive to the active transformation and upgrading of informal recyclers to focus the distribution proportion of subsidies on power battery manufacturers and the distribution proportion of fines on informal recyclers; increasing the risk attitude coefficient and loss aversion coefficient can speed up cooperative recovery.

Key words: spent power battery; informal channels; evolutionary game; reward and punishment mechanism; prospect theory