

政府补贴对动力电池再生利用技术创新的激励效应*

陈宇科, 童欣

(重庆师范大学 经济与管理学院, 重庆 401331)

摘要:加快动力电池再生利用技术的研发,是实现废旧动力电池规范化回收和资源化再生利用的重要路径,因此,探究激励动力电池再生利用技术创新的政府规制措施具有重要意义。基于生产者责任延伸制度,构建由第三方再制造商、动力电池生产商和政府组成的三方演化博弈模型,运用 Matlab 对三方主体在不同稳定性条件下的演化策略进行仿真,对比分析政府规制措施对第三方再制造商、动力电池生产商策略演化的影响。研究发现:1) 政府实施动力电池再利用技术研发补贴政策,能够有效促进第三方再制造商积极投入,动力电池生产商主动承担生产延伸责任;2) 相对于动力电池生产商,政府补贴第三方再制造商,能够显著提高积极投入研发的意愿;反之,政府对动力电池生产商采取适当的惩罚措施,更加能够激励其主动承担研发再生利用技术的责任。

关键词:动力电池再生利用;补贴激励;技术创新;演化博弈

中图分类号: O225; F124.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2024)04-0068-16

近些年来,中国经济持续高速增长,汽车保有量不断增加,截至 2024 年 6 月底,中国汽车保有量达到 3.45 亿辆,其中燃油车占比 92.8%,成为碳排放的主要来源之一^[1]。2020 年,中国在第 75 届联合国大会上正式提出 2030 年实现碳达峰、2060 年实现碳中和的目标(简称“双碳”目标)。2021 年,国务院印发的《2030 年前碳达峰行动方案》中明确提出,加快形成绿色低碳运输方式,大力推广新能源汽车,逐步降低传统燃油汽车在新车产销和汽车保有量中的占比,推动城市公共服务车辆电动化替代^[2]。比亚迪汽车自 2022 年 3 月起停止生产燃油汽车,长安汽车、北汽集团也公布燃油汽车退出时间表^[3]。基于此,锂电池为动力的新能源汽车被公认为碳减排的主要手段,获得了巨大的发展。

据公安部统计,截至 2024 年 6 月底全国新能源汽车保有量达 2 472 万辆^[1],而锂电池的使用寿命一般在 5~6 年,2023 年中国动力电池累计退役总量超 58 万 t^[4],预计到 2025 年将升至 78 万 t 左右,目前已经迎来动力电池的报废浪潮^[5],如果不能实现动力电池的有效回收,这些废旧动力电池将会对生态环境和身体健康产生较大的影响^[6-7]。为此,工信部等七部委先后发布了《新能源汽车废旧动力蓄电池综合利用行业规范条件》《新能源汽车动力蓄电池回收利用管理暂行办法》规范发展废旧电池回收产业^[8-9]。目前,国内新能源汽车闭环供应链中,第三方再制造商、动力电池生产商等尚未形成有效的合作机制^[10],动力电池生产商拥有一定的技术优势,但仅限于回收自有型号动力电池,缺乏对多种品牌废旧动力电池的综合回收处理能力;整车企业擅长汽车制造,却不擅长废旧动力电池的拆解、冶炼提取等再制造技术;第三方动力电池再制造(简称“第三方再制造商”)对于废旧电池的拆解、冶炼提取技术仍处于“初级”阶段,回收再生利用效率较低。新能源汽车产业仍未建成完整的动力电池回收再生利用体系,无法满足已经到来的动力电池退役浪潮。

因此,本文着重探讨政府通过设计激励机制,促进动力电池产业链相关企业进行动力电池再生利用技术的创新,提高废旧动力电池的再利用效率,对于推动电动汽车产业的绿色发展具有十分重要的战略意义。

1 文献综述

随着绿色发展理念深入人心,新能源汽车被消费者广泛接受,已经成为重要的交通工具。许多学者开始关

* 收稿日期:2023-07-20 修回日期:2024-04-09 网络出版时间:2024-10-11T09:14

资助项目:国家自然科学基金面上项目(No. 72074035);国家社会科学基金面上项目(No. 18BJY093);重庆市社会科学规划重大项目(No. 2020ZDJJ01)

第一作者简介:陈宇科,男,教授,博士,研究方向为技术创新管理、供应链风险管理、产业组织理论,E-mail:cqchenyk@126.com;通信作者:童欣,女,E-mail:13547250619@163.com

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20241010.2001.017

注动力电池的闭环供应链问题,主要从回收主体、回收渠道等方面进行研究。黎宇科等人^[11]、Zeng 等人^[12]建议制定相关的法规政策,完善动力电池回收利用体系。针对动力电池回收主体的问题,谢隽阳等人^[13]基于生产者责任延伸制度,构建第三方回收商、动力电池生产商和整车企业间的三方博弈模型,发现在回收网络中整车企业的策略选择会极大地影响动力电池生产商承担延伸责任的积极性;焦建玲等人^[14]构建动力电池制造商、整车企业和第三方回收企业为回收主体的 Stackelberg 博弈模型,并结合碳排放影响讨论再生利用环节对最优回收模式的影响。关于动力电池回收渠道的相关文献中,马亮等人^[15]构建新能源汽车电池单回收和双回收渠道博弈模型,实施成本分摊契约和责任分摊契约,分析了不同回收契约对回收率、供应链成员利润等相关因素的影响。卢超等人^[16]充分考虑需求和质量双重风险,构建两阶段逆向供应链分散式和集中式定价模型,探讨动力电池回收定价策略和协调机制。谢家平等^[17]从动力电池的正向销售和逆向回收流程着手,探讨在不同回收模式下的契约协调机制。

政府是推动汽车产业绿色发展的重要因素,学术界从对象、策略等方面着手,对政府激励制造商、回收再制造企业、汽车企业的绿色技术创新和碳减排活动进行了广泛研究。张川等人^[18]、夏西强等人^[19]则从补贴对象着手,引入闭环供应链协调机制,构建不同的动力电池回收模型,研究政府补贴对象的选取对最优决策的影响。王文宾等人^[20]基于回收责任分担的视角,分别构建了政府对制造商、回收商、同时对制造商和零售商、同时对制造商和回收商实施奖惩机制的4个博弈模型,对比分析哪种更有利于提升闭环供应链回收率。部分学者基于演化博弈理论,探讨政府采取不同策略对激励效果的影响。方国昌等人^[21]引入碳交易因素,构建政企碳减排的演化博弈模型,并且根据各种演化情景提出促进企业碳减排的相应策略。陈晓红等人^[22]建立了地方政府与企业的演化博弈模型,讨论环境规制对于企业绿色技术选择的影响。胡彪等人^[23]引入EPR制度,通过构建地方政府和动力电池生产商间的演化博弈模型,探究在静态和动态奖惩机制下政府监管对生产商实施EPR制度的影响。李婉红等人^[24]、许杰等人^[25]、郑敏娜等人^[26]分别引入第三方参与者,构建政府、企业和第三方参与者的演化博弈模型,研究3个主体间不同的策略选择对推进企业绿色技术创新的影响。

通过上述文献梳理发现,目前对于动力电池回收渠道、回收政策的研究已经比较深入,但研究对象大多集中在动力电池生产商、整车企业、梯次利用企业,谢隽阳等人^[13]、焦建玲等人^[14]、李婉红等人^[24]虽然将了第三方纳入模型研究中,但并未考虑动力电池再生利用技术的研发。事实上,动力电池再生利用技术的研发是一个复杂过程,相关主体策略行为相互影响、相互依赖,企业间的合作往往是一个动态演化的关系,并且政府作为产业政策制定者,必然会对企业间的研发行为产生重要影响。因此,本文基于利益相关者和演化博弈理论,构建由第三方再制造商、动力电池生产商和政府组成的三方演化博弈模型,研究三者不同演化行为对动力电池再生利用技术创新的影响,并分析政府补贴、惩罚等措施对于动力电池再生利用技术研发的激励效应。

2 模型构建

2.1 模型描述与基本假设

本研究考虑由第三方再制造商、动力电池生产商和政府组成的演化博弈模型。政府负责规制第三方再制造商、动力电池生产商积极进行再生利用技术的研发;动力电池生产商主要负责生产动力电池,积极开设线下网点进行动力电池回收工作,与第三方再制造商针对电池再生利用技术进行合作研发;第三方再制造商主要负责动力电池再生利用技术的研发工作。运用演化博弈模型分析三方主体的稳定策略^[23,27],描述各方策略选择的演化情况,研究第三方再制造商、动力电池生产商和政府的行为选择。模型设计如下:

1) 本文以第三方再制造商、动力电池生产商和政府作为参与主体,构建动力电池再制造技术研发的博弈模型,3个主体均为有限理性个体。每个博弈主体均有2种策略选择:第三方再制造商在再生利用技术研发上选择“积极投入”的概率为 x ,选择“消极投入”的概率为 $1-x$;动力电池生产商选择“承担生产者延伸责任”的概率为 y ,选择“不承担延伸责任”的概率为 $1-y$;政府选择“严格规制”的概率为 z ,选择“不严格规制”的概率为 $1-z$,且 $x, y, z \in [0, 1]$ 。

2) 当动力电池生产商积极承担延伸责任时,第三方再制造商会因为在电池再生利用技术研发投入方面表现消极而造成机会损失。当政府进行严格规制时,第三方再制造商会因为积极进行技术创新而获得政府补贴;动力电池生产商会主动承担延伸责任,从而获得政府补贴,而如果不承担延伸责任则会受到惩罚。

3) 假设第三方再制造商最终回收废旧动力电池的数量为 $Q(\text{kW} \cdot \text{h})$,废旧动力电池中的金属原材料可以被100%回收利用^[11];经过回收的动力电池中,无法梯次利用只能拆解再制造的比例为 θ 。第三方再制造商按每单

位 P_1 (元 $\cdot$ (kW $\cdot$ h) $^{-1}$) 价格回收废旧动力电池;同时第三方再制造商积极投入再生利用技术的创新,成本记作 C_1 ;因第三方再制造商采取“消极投入”策略,而产生的机会损失记作 H ;部分废旧动力电池卖给梯次利用企业,每单位可获利 A (元 $\cdot$ (kW $\cdot$ h) $^{-1}$);第三方再制造商因积极投入而获得的收益为 E_1 ;与动力电池生产商进行合作,第三方再制造商获得的增值收益为 ΔE_1 ;同时,政府会向积极进行再生利用技术研发的第三方再制造商提供补贴 S_1 。

4) 假设动力电池生产商购买动力电池生产新生原材料平均价格为 P_2 (元 $\cdot$ (kW $\cdot$ h) $^{-1}$),购买再制造原材料平均价格 P_3 (元 $\cdot$ (kW $\cdot$ h) $^{-1}$),动力电池生产活动成本为 C_2 ;生产商主动承担生产者延伸责任,成本记为 B_1 ;动力电池生产商积极开设线下动力电池回收网点,所付出的成本记为 B_2 ;动力电池生产商积极承担生产者延伸责任,所获得的社会效益记作 E_2 ;因动力电池回收率提升且再利用技术水平得到提高,进一步降低了动力电池的生产成本,由此带来的增值收益 ΔE_2 ;政府会向积极承担生产者延伸责任的动力电池生产商提供补贴 S_2 。

5) 假设政府积极进行监督,付出的规制成本为 C_3 ;同时政府会向积极从事动力电池再制造技术研发的企业提供补贴 $S=S_1+S_2$;政府因为严格规制,所获得的社会收益为 E_3 ;因企业积极进行动力电池再生利用技术创新,政府所获得的社会效益记作 ΔE_3 ;动力电池生产商如果不承担生产者延伸责任,政府则会对它进行处罚,罚款记为 F 。

2.2 支付矩阵和复制动态方程

根据上述变量,得出各方博弈主体的收入情况如表 1 所示。

表 1 第三方再制造商、动力电池生产商和政府三方支付矩阵

Tab. 1 Tripartite payment matrix for third-party remanufacturers, power cell producers and governments

策略选择		动力电池生产商	
		承担延伸责任(y)	不承担延伸责任($1-y$)
第三方再制造商	积极投入(x)	$AQ(1-\theta)+E_1+\Delta E_1+S_1-P_1Q-C_1$	$AQ(1-\theta)+E_1+S_1-P_1Q-C_1$
		$(P_2-P_3)Q\theta+E_2+\Delta E_2+S_2-C_2-B_1-B_2$	$(P_2-P_3)Q\theta+\Delta E_2-C_2-F$
		$E_3+\Delta E_3-S_1-S_2-C_3$	$E_3+F-S_1-C_3$
	政府严格规制(z)	$AQ(1-\theta)+E_1+\Delta E_1-P_1Q-C_1$	$AQ(1-\theta)+E_1-P_1Q-C_1$
第三方再制造商	消极投入($1-x$)	$(P_2-P_3)Q\theta+E_2+\Delta E_2-C_2-B_1-B_2$	$(P_2-P_3)Q\theta+\Delta E_2-C_2$
		ΔE_3	0
		$AQ(1-\theta)-H-P_1Q$	$AQ(1-\theta)-P_1Q$
	政府严格规制(z)	$(P_2-P_3)Q\theta+E_2+S_2-C_2-B_2$	$(P_2-P_3)Q\theta-C_2-F$
第三方再制造商	积极投入(x)	$E_3-S_2-C_3$	E_3+F-C_3
		$AQ(1-\theta)-H-P_1Q$	$AQ(1-\theta)-P_1Q$
		$(P_2-P_3)Q\theta+E_2-C_2-B_2$	$(P_2-P_3)Q\theta-C_2$
	政府不严格规制($1-z$)	0	0

由表 1 可得到各博弈主体行为策略的期望收益情况。

1) 第三方再制造商的期望收益。假设第三方再制造商选择“积极投入”策略的期望收益为 W_{1p} ,第三方再制造商选择“消极投入”策略的期望收益为 W_{2p} ,平均收益为 W_p ,则有:

$$W_{1p}=y\Delta E_1+zS_1+AQ(1-\theta)+E_1-P_1Q-C_1, \quad (1)$$

$$W_{2p}=AQ(1-\theta)-P_1Q-yH, \quad (2)$$

$$W_p=xW_{1p}+(1-x)W_{2p}=x[y(\Delta E_1+H)+zS_1+E_1-C_1]+[AQ(1-\theta)-P_1Q-yH]。 \quad (3)$$

2) 动力电池生产商的期望收益。假设动力电池生产商选择“承担生产者延伸责任”策略的期望为 W_{1s} ,电池生产商选择“不承担延伸责任”策略的期望收益为 W_{2s} ,平均收益为 W_s ,则有:

$$W_{1s}=x(\Delta E_2-B_1)+zS_2+(P_2-P_3)Q\theta+E_2-C_2-B_2, \quad (4)$$

$$W_{2s}=x\Delta E_2-zF+(P_2-P_3)Q\theta-C_2, \quad (5)$$

$$W_s=yW_{1s}+(1-y)W_{2s}=y[z(S_2+F)-xB_1+E_2-B_2]+[x\Delta E_2-zF+(P_2-P_3)Q\theta-C_2]。 \quad (6)$$

3) 政府的期望收益。假设政府选择“严格规制”策略的期望收益为 W_{1g} , 政府选择“不严格规制”策略的期望收益为 W_{2g} , 平均收益为 W_g , 则有:

$$W_{1g} = xy\Delta E_3 - xS_1 - y(S_2 + F) + (E_3 - C_3 + F), \quad (7)$$

$$W_{2g} = xy\Delta E_3, \quad (8)$$

$$W_g = zW_{1g} + (1-z)W_{2g} = xy\Delta E_3 + z[E_3 - C_3 + F - xS_1 - y(S_2 + F)]. \quad (9)$$

根据以上假设, 对第三方再制造商采取“积极投入”策略比例 x 、动力电池生产商采取“承担生产者延伸责任”策略比例 y 和政府采取“严格规制”策略的比例 z 进行复制动态分析。第三方再制造商的复制动态方程为:

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(W_{1p} - W_p) = x(1-x)[y(\Delta E_1 + H) + zS_1 + E_1 - C_1]; \quad (10)$$

动力电池生产商的复制动态方程为:

$$F(y) = \frac{dy}{dt} = y(W_{1s} - W_s) = y(1-y)[z(S_2 + F) - xB_1 + E_2 - B_2]; \quad (11)$$

政府的复制动态方程为:

$$F(z) = \frac{dz}{dt} = z(W_{1g} - W_g) = z(1-z)[(E_3 - C_3 + F) - y(S_2 + F) - xS_1]. \quad (12)$$

3 演化稳定策略分析

3.1 不同主体的演化稳定策略分析

3.1.1 第三方再制造商的演化稳定策略分析

根据第三方再制造商复制动态方程(10), 令:

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = 0, F'(x) = (1-2x)[y(\Delta E_1 + H) + zS_1 + E_1 - C_1],$$

第三方再制造商在采取博弈策略时有以下几种情况。

1) 当 $y = y^* = \frac{C_1 - zS_1 - E_1}{\Delta E_1 + H}$ 时, $F(x) \equiv 0$, 此时无论 x 取何值, 第三方再制造商的策略选择均处于稳定状态。即当动力电池生产商选择承担延伸责任策略的比例为 y^* (承担延伸责任比例临界值) 时, 则任何水平的第三方再制造商积极合作比例都可以达到稳定状态。

2) 当 $y \neq y^*$ 时, 存在 $x_1^* = 0, x_2^* = 1$ 这 2 个演化稳定点。由微分方程的稳定性定理可知, $F'(x) < 0$ 时, x 为演化稳定点, 则:

若 $y^* < y < 1$ 时, 存在

$$F'(0) = y(\Delta E_1 + H) + zS_1 + E_1 - C_1 > 0, F'(1) = C_1 - y(\Delta E_1 + H) - zS_1 - E_1 < 0,$$

则 $x_2^* = 1$ 为稳定策略。即当动力电池生产商选择“承担生产者延伸责任”策略的比例 $\frac{C_1 - zS_1 - E_1}{\Delta E_1 + H} < y < 1$ 时,

动力电池生产商积极与第三方再制造商合作, 且政府提供研发补贴, 此时第三方再制造商可以预见采取“积极投入”策略的总收益将会大于采取“消极投入”策略的总收益, 因此会选择采取“积极投入”策略。

若 $0 < y < y^*$ 时, 存在

$$F'(0) = y(\Delta E_1 + H) + zS_1 + E_1 - C_1 < 0,$$

$$F'(1) = C_1 - y(\Delta E_1 + H) - zS_1 - E_1 > 0,$$

则 $x_1^* = 0$ 为稳定策略。即当动力电池生产商选择“承担延伸责任”策略的比例 $0 < y < \frac{C_1 - zS_1 - E_1}{\Delta E_1 + H}$ 时, 动力电池

生产商大概率不会对第三方再制造商提供支持, 且政府不会提供绿色创新补贴, 此时第三方再制造商积极进行再生利用技术创新所得收益不足以支撑研发工作, 故会选择采取“消极投入”策略。

依据以上过程, 第三方再制造商主体决策动态演化如图 1 所示。

3.1.2 动力电池生产商的演化稳定策略分析

根据动力电池生产商复制动态方程(11), 令 $F(y) = \frac{dy}{dt} = 0, F'(y) = (1-2y)[z(S_2 + F) - xB_1 + E_2 - B_2]$,

动力电池生产商在采取博弈策略时有以下几种情况:

1) 当 $z = z^* = \frac{xB_1 + B_2 - E_2}{S_2 + F}$ 时, $F(y) \equiv 0$, 此时无论 y 取何值, 动力电池生产商的策略选择均处于稳定状态。即当政府选择严格规制策略的比例为 z^* (严格规制比例临界值) 时, 则动力电池生产商承担延伸责任的比例处于任何水平都可以达到稳定状态。

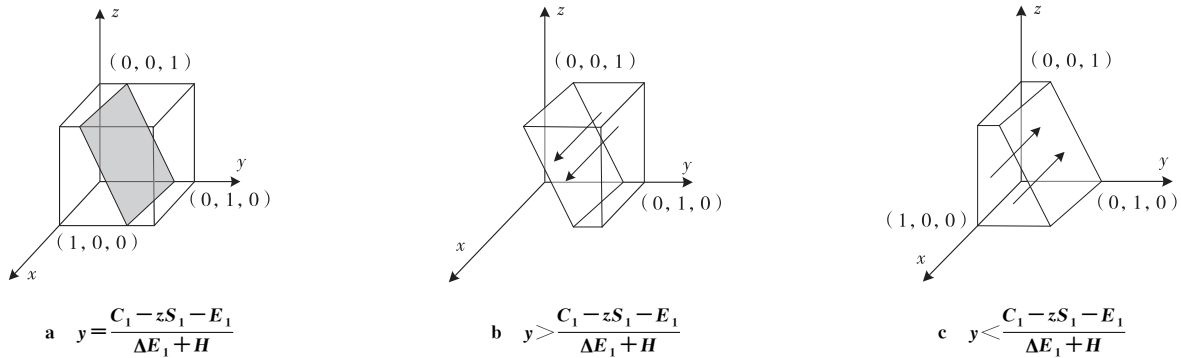


图 1 第三方再制造商动态演化

Fig. 1 Dynamic evolution diagram of a third-party recycling enterprise

2) 当 $z \neq z^*$ 时, 存在 $y_1^* = 0, y_2^* = 1$ 这 2 个演化稳定点。由微分方程稳定性定理可知, $F'(y) < 0$ 时, y 为演化稳定点, 则:

若 $z^* < z < 1$ 时, 存在

$$\begin{aligned} F'(0) &= z(S_2 + F) - xB_1 + E_2 - B_2 > 0, \\ F'(1) &= xB_1 - z(S_2 + F) - E_2 + B_2 < 0, \end{aligned}$$

则 $y_2^* = 1$ 为演化稳定策略, 当政府选择“严格规制”策略的比例 $\frac{xB_1 + B_2 - E_2}{S_2 + F} < z < 1$ 时, 动力电池生产商预见到如果积极承担生产者延伸责任, 政府会直接监督并提供补贴, 因此动力电池生产商会倾向于选择“承担延伸责任”策略。

若 $0 < z < z^*$ 时, 存在

$$\begin{aligned} F'(0) &= z(S_2 + F) - xB_1 + E_2 - B_2 < 0, \\ F'(1) &= xB_1 - z(S_2 + F) - E_2 + B_2 > 0, \end{aligned}$$

则 $y_1^* = 0$ 为演化稳定策略。即当政府选择“严格规制”策略的概率 $0 < z < \frac{xB_1 + B_2 - E_2}{S_2 + F}$ 时, 动力电池生产商会认为政府提供资金补贴的可能性较小, 此时生产商承担生产者延伸责任的收益小于成本, 因此动力电池生产商大概率会选择“不承担延伸责任”策略。

根据以上过程, 动力电池生产商主体决策动态演化如图 2 所示。

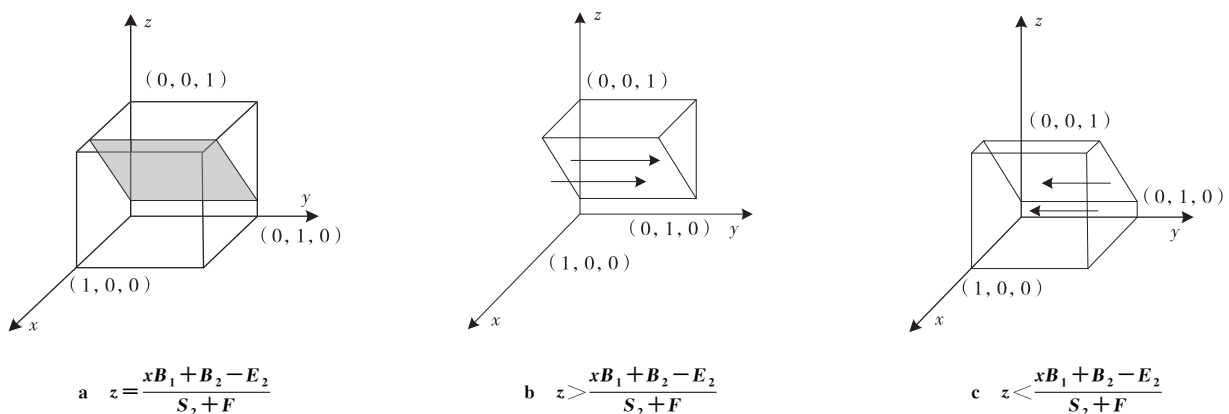


图 2 动力电池生产商动态演化

Fig. 2 Dynamic evolution diagram of power battery production enterprises

3.1.3 政府的演化稳定策略分析

根据政府复制动态方程(12),令 $F(z) = \frac{dz}{dt} = 0$, $F'(z) = (1-2z)[(E_3 - C_3 + F) - y(S_2 + F) - xS_1]$, 政府在采取博弈策略时有以下几种情况:

1) 当 $x = x^* = \frac{(E_3 - C_3 + F) - y(S_2 + F)}{S_1}$ 时, $F(z) \equiv 0$, 此时无论 z 取何值, 政府的策略选择均处于稳定状态。即当第三方再制造商选择积极投入策略的比例为 x^* (积极投入比例临界值) 时, 则任何水平的政府严格規制比例都可以达到稳定状态。

2) 当 $x \neq x^*$ 时, 存在 $z_1^* = 0, z_2^* = 1$ 这 2 个演化稳定点。由微分方程的稳定性定理可知, $F'(z) < 0$ 时, z 为演化稳定点, 则:

若 $x^* < x < 1$ 时, 存在

$$F'(0) = (E_3 - C_3 + F) - y(S_2 + F) - xS_1 < 0,$$

$$F'(1) = y(S_2 + F) - (E_3 - C_3 + F) + xS_1 > 0,$$

则 $z_1^* = 0$ 为演化稳定策略。即当第三方再制造商选择“积极投入”策略的概率 $\frac{(E_3 - C_3 + F) - y(S_2 + F)}{S_1} < x < 1$ 时, 即使政府不严格規制, 第三方再制造商也会在动力电池再生利用技术创新方面进行积极投入, 提高自身的竞争力, 因此政府会倾向于选择“不严格規制”策略。

若 $0 < x < x^*$ 时, 存在

$$F'(0) = (E_3 - C_3 + F) - y(S_2 + F) - xS_1 > 0,$$

$$F'(1) = y(S_2 + F) - (E_3 - C_3 + F) + xS_1 < 0,$$

则 $z_2^* = 1$ 为演化稳定策略, 当第三方再制造商选择“积极投入”策略的概率 $0 < x < \frac{(E_3 - C_3 + F) - y(S_2 + F)}{S_1}$ 时, 第三方再制造商保持原样, 不积极进行绿色技术创新, 导致动力电池再利用率大大降低, 对环境造成极大的危害, 因此政府只有选择“严格規制”策略, 才可以对第三方再制造商进行及时規制, 减少污染。依据以上过程, 政府主体决策动态演化如图 3 所示。

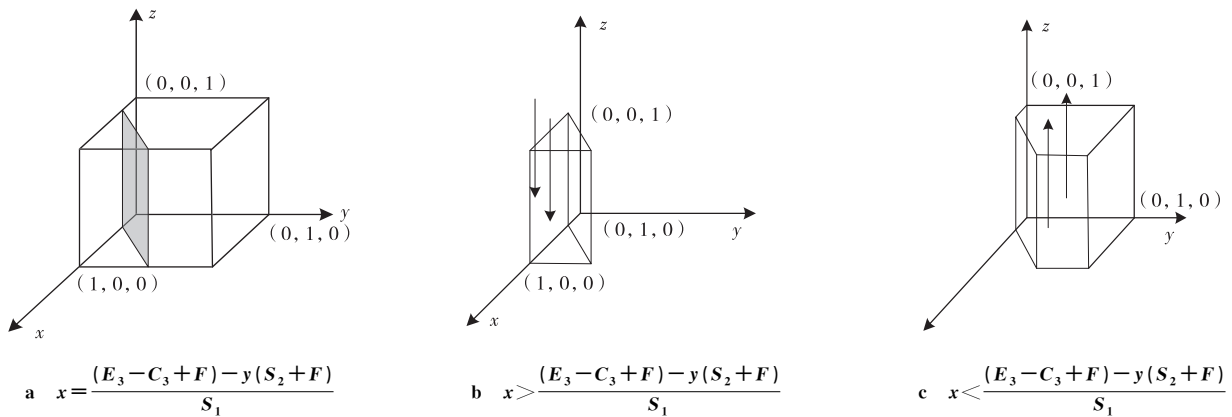


图3 政府动态演化

Fig. 3 Dynamic evolution of government

3.2 三方演化博弈的稳定策略分析

3.2.1 第三方再制造商与动力电池生产商的演化稳定策略分析

前文分别对第三方再制造商、动力电池生产商和政府的演化稳定策略进行分析。本节针对三维动力系统的混合策略进行分析, 首先将政府组织相关的变量当作常量, 分析第三方再制造商与动力电池生产商 2 个博弈主体的演化稳定策略, 根据第三方再制造商与动力电池生产商的复制动态方程, 令 $\frac{dx}{dt} = 0, \frac{dy}{dt} = 0$, 可以得到 5 个均

衡点: $(0,0)$ 、 $(0,1)$ 、 $(1,0)$ 、 $(1,1)$ 、 (x^*, y^*) 。根据 Friedman^[28]提出的方法,对 5 个均衡点进行分析。

$$J_1 = \begin{pmatrix} \frac{\partial F(x)}{\partial x} & \frac{\partial F(x)}{\partial y} \\ \frac{\partial F(y)}{\partial x} & \frac{\partial F(y)}{\partial y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1-2x)[y(\Delta E_1 + H) + zS_1 + E_1 - C_1] & x(1-x)(\Delta E_1 + H) \\ -B_1y(1-y) & (2y-1)[xB_1 - z(S_2 + F) - E_2 + B_2] \end{pmatrix}. \quad (13)$$

根据上述雅可比矩阵可以得到,矩阵 J_1 的行列式为:

$$\det J_1 = (1-2x)[y(\Delta E_1 + H) + zS_1 + E_1 - C_1](2y-1)[xB_1 - z(S_2 + F) - E_2 + B_2] - x(1-x)(\Delta E_1 + H)[-B_1y(1-y)], \quad (14)$$

矩阵 J_1 的迹为:

$$\text{tr} J_1 = (1-2x)[y(\Delta E_1 + H) + zS_1 + E_1 - C_1] + (2y-1)[xB_1 - z(S_2 + F) - E_2 + B_2]. \quad (15)$$

分别将 5 个均衡点数值代入,整理后可以得到用于均衡点稳定性分析的矩阵行列式和迹的表达式如表 2 所示。

表 2 第三方再制造商、动力电池生产商均衡点对应的行列式和迹的表达式
Tab. 2 Expressions of determinants and traces corresponding to equilibrium points of third-party recycling enterprises and power battery production enterprises

均衡点 (x, y)	$\det J_1$
$(0, 0)$	$(zS_1 + E_1 - C_1)[z(S_2 + F) + E_2 - B_2]$
$(0, 1)$	$(\Delta E_1 + H + zS_1 + E_1 - C_1)[-z(S_2 + F) - E_2 + B_2]$
$(1, 0)$	$(zS_1 + E_1 - C_1)[B_1 - z(S_2 + F) - E_2 + B_2]$
$(1, 1)$	$(\Delta E_1 + H + zS_1 + E_1 - C_1)[B_1 - z(S_2 + F) - E_2 + B_2]$
(x^*, y^*)	$\frac{(\Delta E_1 + H + zS_1 + E_1 - C_1)[B_1 - z(S_2 + F) - E_2 + B_2](C_1 - zS_1 - E_1)[z(S_2 + F) + E_2 - B_2]}{B_1(\Delta E_1 + H)}$
均衡点 (x, y)	$\text{tr} J_1$
$(0, 0)$	$(zS_1 + E_1 - C_1) + [z(S_2 + F) + E_2 - B_2]$
$(0, 1)$	$(\Delta E_1 + H + zS_1 + E_1 - C_1) - [z(S_2 + F) + E_2 - B_2]$
$(1, 0)$	$(zS_1 + E_1 - C_1) - [B_1 - z(S_2 + F) - E_2 + B_2]$
$(1, 1)$	$(\Delta E_1 + H + zS_1 + E_1 - C_1) + [B_1 - z(S_2 + F) - E_2 + B_2]$
(x^*, y^*)	0

如果某均衡点满足 $\det J_1 > 0$, $\text{tr} J_1 < 0$ 这 2 个条件,该均衡点将被判定为演化稳定点,其中:

$$x^* = \frac{z(S_2 + F) + E_2 - B_2}{B_1}, y^* = \frac{C_1 - E_1 - zS_1}{\Delta E_1 + H}.$$

根据表 2 分析可得,均衡点 (x^*, y^*) 处的 $\text{tr} J_1 = 0$, 不满足迹小于 0 的条件,因此 (x^*, y^*) 不是演化稳定策略。为方便后续分析,令:

$$a = zS_1 + E_1 - C_1, b = \Delta E_1 + H + zS_1 + E_1 - C_1, \\ c = z(S_2 + F) + E_2 - B_2, d = -B_1 + z(S_2 + F) + E_2 - B_2,$$

系统演化稳定将取决于对 a, b, c, d 这 4 个表达式的符号判断,同时用相对净收入^[29]进行分析。其中: a, b 分别代表在动力电池生产商选择不承担、积极承担延伸责任策略时,再制造商积极投入的相对净支付; c, d 分别代表在第三方再制造商选择不积极、积极投入策略时,动力电池生产商的相对净支付。由此可见 $a < b, c > d$ 。以下将分析不同情形下的系统演化稳定点。

命题 1 第三方再制造商与动力电池生产商的策略选择取决于不同策略的相对净支付。基于该结论可以得

出,如果第三方再制造商积极投入的相对净支付 a, b 增加了,则第三方再制造商更倾向于选择积极投入;如果动力电池生产商主动承担延伸责任的相对净支付 c, d 增加了,则动力电池生产商会更加倾向于积极承担生产延伸责任。

均衡点 $(0, 0)$ 表示第三方再制造商积极进行技术创新与政府补贴总和小于投入成本,同时动力电池生产商承担延伸责任所付出的成本高于收益,此时两者最终趋向于 $(0, 0)$ 。均衡点 $(0, 1)$ 表示第三方再制造商技术研发成本过高,超过了政府补贴与一系列收益的总和,但动力电池生产商承担延伸责任所付出的成本要小于收益与政府所提供补贴之和,此时两者最终趋向于 $(0, 1)$ 。均衡点 $(1, 0)$ 表示第三方再制造商在积极投入技术创新过程中,能够获得正收益,同时动力电池生产商承担延伸责任所付出的成本要高于收益,此时两者最终趋向于 $(1, 0)$ 。均衡点 $(1, 1)$ 表示第三方再制造商在积极投入技术研发过程中,获得的收益和政府补贴能够满足动力电池再生利用技术创新上的投入,同时动力电池生产商承担延伸责任所付出的成本要低于收益,此时两者最终趋向于 $(1, 1)$ 。

证明 根据演化博弈稳定性分析方法,计算雅可比矩阵 J_1 各个平衡点的 $\det J_1$ 和 $\text{tr} J_1$,以此判断 9 种情形下的演化稳定性。

情形 1, $a > 0, b > 0, c > 0, d > 0$, 对应的演化稳定点为 $(1, 1)$;

情形 2, $a > 0, b > 0, c > 0, d < 0$, 对应的演化稳定点为 $(1, 0)$;

情形 3, $a > 0, b > 0, c < 0, d < 0$, 对应的演化稳定点为 $(1, 0)$ 。

以上 3 种情形的分析结果见表 3。

表 3 情形 1~3 下第三方再制造商与动力电池生产商的均衡点局部稳定性

Tab. 3 Local stability of equilibrium points between third-party recycling enterprises and power battery production enterprises

均衡点	情形 1			情形 2			情形 3		
	$\det J_1$	$\text{tr} J_1$	稳定性	$\det J_1$	$\text{tr} J_1$	稳定性	$\det J_1$	$\text{tr} J_1$	稳定性
$(0, 0)$	+	+	不稳定点	+	+	不稳定点	—	不定	鞍点
$(0, 1)$	—	不定	鞍点	—	不定	鞍点	+	+	不稳定点
$(1, 0)$	—	不定	鞍点	+	—	ESS	+	—	ESS
$(1, 1)$	+	—	ESS	—	不定	鞍点	—	不定	鞍点

情形 4, $a < 0, b > 0, c > 0, d > 0$, 对应的演化稳定点为 $(1, 1)$;

情形 5, $a < 0, b > 0, c > 0, d < 0$, 无演化稳定点;

情形 6, $a < 0, b > 0, c < 0, d < 0$, 对应的演化稳定点为 $(0, 0)$ 。

以上 3 种情形的分析结果见表 4。

表 4 情形 4~6 下第三方再制造商与动力电池生产商的均衡点局部稳定性

Tab. 4 Local stability of equilibrium points between third-party recycling enterprises and power battery manufacturers

均衡点	情形 4			情形 5			情形 6		
	$\det J_1$	$\text{tr} J_1$	稳定性	$\det J_1$	$\text{tr} J_1$	稳定性	$\det J_1$	$\text{tr} J_1$	稳定性
$(0, 0)$	—	不定	鞍点	—	不定	鞍点	+	—	ESS
$(0, 1)$	—	不定	鞍点	—	不定	鞍点	+	+	不稳定点
$(1, 0)$	+	+	不稳定点	—	不定	鞍点	—	不定	鞍点
$(1, 1)$	+	—	ESS	—	不定	鞍点	—	不定	鞍点

情形 7, $a < 0, b < 0, c > 0, d > 0$, 对应的演化稳定点为 $(0, 1)$;

情形 8, $a < 0, b < 0, c > 0, d < 0$, 对应的演化稳定点为 $(0, 1)$;

情形 9, $a < 0, b < 0, c < 0, d < 0$, 对应的演化稳定点为 $(0, 0)$ 。

以上 3 种情形的分析结果见表 5。

表 5 情形 7~9 下第三方再制造商与动力电池生产商的均衡点局部稳定性

Tab. 5 Local stability of equilibrium points between third-party recycling enterprises and power battery manufacturers

均衡点	情形 7			情形 8			情形 9		
	detJ ₁	trJ ₁	稳定性	detJ ₁	trJ ₁	稳定性	detJ ₁	trJ ₁	稳定性
(0,0)	—	不定	鞍点	—	不定	鞍点	+	—	ESS
(0,1)	+	—	ESS	+	—	ESS	—	不定	鞍点
(1,0)	+	+	不稳定点	—	不定	鞍点	—	不定	鞍点
(1,1)	—	不定	鞍点	+	+	不稳定点	+	+	不稳定点

证毕

3.2.2 动力电池生产商与政府的演化稳定策略分析

分析动力电池生产商和政府主体的演化稳定策略,根据电池生产商与政府 2 个博弈主体的复制动态方程,令 $\frac{dy}{dt}=0, \frac{dz}{dt}=0$,可以得到 5 个均衡点,分别为:

$(0,0)、(0,1)、(1,0)、(1,1)、\left(\frac{E_3-C_3+F-xS_1}{S_2+F}, \frac{xB_1+B_2-E_2}{S_2+F}\right)。$

根据 Friedman^[28]提出的方法,对 5 个均衡点进行分析。

$$J_2 = \begin{pmatrix} \frac{\partial F(y)}{\partial y} & \frac{\partial F(y)}{\partial z} \\ \frac{\partial F(z)}{\partial y} & \frac{\partial F(z)}{\partial z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1-2y)[z(S_2+F)-xB_1+E_2-B_2] & y(1-y)(S_2+F) \\ -z(1-z)(S_2+F) & (1-2z)[(E_3-C_3+F)-y(S_2+F)-xS_1] \end{pmatrix}。 \tag{16}$$

根据上述雅可比矩阵可以得到,矩阵 J₂ 的行列式为:

$$\det J_2 = (1-2y)[z(S_2+F)-xB_1+E_2-B_2](1-2z)[(E_3-C_3+F)-y(S_2+F)-xS_1] + y(1-y)(S_2+F)z(1-z)(S_2+F), \tag{17}$$

矩阵 J₂ 的迹为:

$$\text{tr} J_2 = (1-2y)[z(S_2+F)-xB_1+E_2-B_2] + (1-2z)[(E_3-C_3+F)-y(S_2+F)-xS_1]。 \tag{18}$$

分别将 5 个均衡点数值代入,整理后可以得到用于均衡稳定性分析的矩阵行列式和迹的表达式如表 6 所示。

表 6 动力电池生产商和政府均衡点对应的行列式和迹的表达式

Tab. 6 Expression of determinant and trace corresponding to equilibrium point of power battery manufacturer and government

均衡点(y,z)	detJ ₂
(0,0)	(E ₂ -xB ₁ -B ₂)(E ₃ -C ₃ +F-xS ₁)
(0,1)	(S ₂ +F+E ₂ -xB ₁ -B ₂)(E ₃ -C ₃ +F-xS ₁)
(1,0)	(xB ₁ -E ₂ +B ₂)(E ₃ -C ₃ -S ₂ -xS ₁)
(1,1)	(S ₂ +F+E ₂ -xB ₁ -B ₂)(E ₃ -C ₃ -S ₂ -xS ₁)
(y [*] ,z [*])	$\frac{(E_3-C_3+F-xS_1)(xB_1+B_2-E_2)(S_2+F+E_2-xB_1-B_2)(S_2-E_3+C_3+xS_1)}{(S_2+F)^2}$
均衡点(y,z)	trJ ₂
(0,0)	(E ₂ -xB ₁ -B ₂)+(E ₃ -C ₃ +F-xS ₁)
(0,1)	(S ₂ +F+E ₂ -xB ₁ -B ₂)-(E ₃ -C ₃ +F-xS ₁)
(1,0)	(xB ₁ -E ₂ +B ₂)+(E ₃ -C ₃ -S ₂ -xS ₁)
(1,1)	(S ₂ +F+E ₂ -xB ₁ -B ₂)-(E ₃ -C ₃ -S ₂ -xS ₁)
(y [*] ,z [*])	0

如果某均衡点满足 $\det \mathbf{J}_2 > 0, \text{tr} \mathbf{J}_2 < 0$ 这 2 个条件,则均衡点是演化稳定策略,其中:

$$y^* = \frac{E_3 - C_3 + F - xS_1}{S_2 + F}, z^* = \frac{xB_1 + B_2 - E_2}{S_2 + F}。$$

根据表 6 分析可得,均衡点 (y^*, z^*) 处的 $\text{tr} \mathbf{J}_2 = 0$, 不满足迹小于 0 的条件,因此 (y^*, z^*) 不是演化稳定策略。为方便后续分析,令 $e = S_2 + F + E_2 - xB_1 - B_2, f = E_2 - xB_1 - B_2, g = E_3 - C_3 - S_2 - xS_1, h = E_3 - C_3 + F - xS_1$, 系统演化稳定将取决于对 e, f, g, h 这 4 个表达式的符号判断,同时用相对净收入^[29]进行分析。其中 e, f 分别代表在政府选择严格规则、不严格规制策略的状态下,动力电池生产商的相对净支付; g, h 分别代表动力电池生产商选择积极承担、不承担延伸责任的状态下,政府的相对净支付。由此可见, $e > f, g < h$ 。以下将分析不同情形下的系统演化稳定点。

命题 2 动力电池生产商与政府的策略选择取决于不同策略的相对净支付。基于该结论可以得出,如果动力电池生产商积极投入的相对净支付 e, f 增加了,则生产商更倾向于选择积极承担延伸责任;如果政府严格监督的相对净支付 g, h 增加了,则政府则会更加倾向于严格监督。

均衡点 $(0, 0)$ 表示,在承担延伸责任过程中,若动力电池生产商的支付成本过高,超过了收益;同时政府在规制过程中,管理成本和对第三方再制造商技术创新的补贴过高,超过了政府收益,此时两者最终趋向于 $(0, 0)$ 。均衡点 $(0, 1)$ 表示,动力电池生产商承担延伸责任过程中所付出的成本超过了收益和政府提供补贴之和;同时政府严格的规制收益和收取的罚款高于规制成本与提供给第三方再制造商的补贴,此时两者最终趋向于 $(0, 1)$ 。均衡点 $(1, 0)$ 表示,动力电池生产商在承担生产者延伸责任过程中,能够获得正收益;同时政府严格规制所付出的成本要高于收益,此时两者最终趋向于 $(1, 0)$ 。均衡点 $(1, 1)$ 表示,动力电池生产商在承担延伸责任过程中,获得的收益和政府补贴能够满足在动力电池回收过程中的投入;同时政府严格规制所付出的成本及提供给第三方再制造商和动力电池生产商的补贴之和要低于收益,此时两者最终趋向于 $(1, 1)$ 。

证明 根据演化博弈稳定性分析方法,计算雅可比矩阵 $\mathbf{J}_2$ 各个平衡点的 $\det \mathbf{J}_2$ 和 $\text{tr} \mathbf{J}_2$, 以此判断 9 种情形下的演化稳定性。

情形 1, $e > 0, f > 0, g > 0, h > 0$, 对应的演化稳定点为 $(1, 1)$;

情形 2, $e > 0, f > 0, g < 0, h > 0$, 对应的演化稳定点为 $(1, 0)$;

情形 3, $e > 0, f > 0, g < 0, h < 0$, 对应的演化稳定点为 $(1, 0)$ 。

以上 3 种情形的分析结果见表 7。

表 7 情形 1~3 下动力电池生产商和政府的均衡点局部稳定性

Tab. 7 Local stability of equilibrium points of power battery manufacturers and governments

均衡点	情形 1			情形 2			情形 3		
	$\det \mathbf{J}_2$	$\text{tr} \mathbf{J}_2$	稳定性	$\det \mathbf{J}_2$	$\text{tr} \mathbf{J}_2$	稳定性	$\det \mathbf{J}_2$	$\text{tr} \mathbf{J}_2$	稳定性
$(0, 0)$	+	+	不稳定点	+	+	不稳定点	-	不定	鞍点
$(0, 1)$	-	不定	鞍点	-	不定	鞍点	+	+	不稳定点
$(1, 0)$	-	不定	鞍点	+	-	ESS	+	-	ESS
$(1, 1)$	+	-	ESS	-	不定	鞍点	-	不定	鞍点

情形 4, $e > 0, f < 0, g > 0, h > 0$, 对应的演化稳定点为 $(1, 1)$;

情形 5, $e > 0, f < 0, g < 0, h > 0$, 无演化稳定点;

情形 6, $e > 0, f < 0, g < 0, h < 0$, 对应的演化稳定点为 $(0, 0)$ 。

以上 3 种情形的分析结果见表 8。

情形 7, $e < 0, f < 0, g > 0, h > 0$, 对应的演化稳定点为 $(0, 1)$;

情形 8, $e < 0, f < 0, g < 0, h > 0$, 对应的演化稳定点为 $(0, 1)$;

情形 9, $e < 0, f < 0, g < 0, h < 0$, 对应的演化稳定点为 $(0, 0)$ 。

以上 3 种情形的分析结果见表 9。

表 8 情形 4~6 下动力电池生产商和政府的均衡点局部稳定性

Tab. 8 Local stability of equilibrium points of power battery manufacturers and governments

均衡点	情形 4			情形 5			情形 6		
	$\det J_2$	$\text{tr} J_2$	稳定性	$\det J_2$	$\text{tr} J_2$	稳定性	$\det J_2$	$\text{tr} J_2$	稳定性
(0,0)	—	不定	鞍点	—	不定	鞍点	+	—	ESS
(0,1)	—	不定	鞍点	—	不定	鞍点	+	+	不稳定点
(1,0)	+	+	不稳定点	—	不定	鞍点	—	不定	鞍点
(1,1)	+	—	ESS	—	不定	鞍点	—	不定	鞍点

表 9 情形 7~9 下动力电池生产商和政府的均衡点局部稳定性

Tab. 9 Local stability of equilibrium points of power battery manufacturers and governments

均衡点	情形 7			情形 8			情形 9		
	$\det J_2$	$\text{tr} J_2$	稳定性	$\det J_2$	$\text{tr} J_2$	稳定性	$\det J_2$	$\text{tr} J_2$	稳定性
(0,0)	—	不定	鞍点	—	不定	鞍点	+	—	ESS
(0,1)	+	—	ESS	+	—	ESS	—	不定	鞍点
(1,0)	+	+	不稳定点	—	不定	鞍点	—	不定	鞍点
(1,1)	—	不定	鞍点	+	+	不稳定点	+	+	不稳定点

证毕

4 仿真分析

为验证模型的可靠性并且更加直观地说明博弈参与方策略的演化稳定性,本文采用 Matlab(2016a)对模型进行数字模拟仿真分析,进一步分析政府激励措施对于企业进行动力电池再生利用技术创新的影响。基于生产者责任延伸责任政策,动力电池生产商和第三方再制造商应该尽可能参与到废旧动力电池回收再制造过程中,如,格林美作为动力电池回收行业的龙头企业,积极布局动力电池回收产业,2021 年与动力电池生产商亿纬锂电合作,签署《10 000 t 回收镍产品定向循环供应合作备忘录》。参考已有文献^[13,24],基于 $zS_1 + E_1 + \Delta E_1 + H > C_1, z(S_2 + F) + E_2 > B_1 + B_2; S_2 + F + E_2 > xB_1 + B_2, E_3 > C_3 + xS_1 + S_2$ 条件下对参数进行赋值及仿真分析,初始赋值情况详见表 10 所示。

表 10 参数初始赋值情况

Tab. 10 Initial parameter assignment

参数	S_1	E_1	ΔE_1	H	C_1	B_1
赋值	2	9	4	3	10	6
参数	S_2	F	B_2	E_2	E_3	C_3
赋值	2	5	6	10	13	6

4.1 x, y, z 初始值对策略演化的影响

根据表 10 中参数赋值情况,采用 Matlab 软件分析第三方再制造商、动力电池生产商和政府选择策略概率变化的演化情况。分别使第三方再制造商积极投入的概率为 0.1、0.3、0.5、0.7 和 0.9 时,三方主体策略选择的演化路径如图 4 所示。

在国家实施“双碳”目标战略背景下,妥善处理废旧动力电池具有极大的环保价值和经济效益,因此政府有很强的动机严格规制动力电池回收市场;目前电池生产原材料价格波动较大,积极研发废旧电池再利用技术作为一个降低生产成本的好方法,因此动力电池生产商会倾向于积极承担延伸责任;但是当前由于动力电池再利

用技术水平不高,第三方再制造商必须要积极投入,加快动力电池再利用技术创新,提升企业竞争力,实现自身的长远发展,并且政府补贴能够激励第三方再制造商的积极性。图4仿真结果表明,为降低动力电池生产成本,提高动力电池再利用效率,电池生产商会主动承担延伸责任,政府也会严格监督相关企业,同时第三方再制造商为了实现自身长远发展也会积极投入再利用技术研发,系统演化趋向于(1,1,1)状态,即第三方再制造商选择“积极投入”,动力电池生产商选择“积极承担延伸责任”,政府选择“严格规制”。

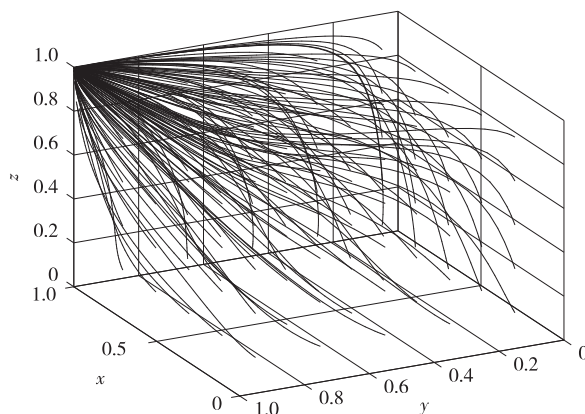


图4 初始参数情况下系统演化动态的仿真结果

Fig. 4 Simulation results of system evolution dynamics with initial parameters

4.2 政府规制措施对策略演化的影响分析

在参数初始赋值条件下,设定 x, y, z 的初始值为(0.3, 0.5, 0.8),将激励补贴 S_1, S_2 分别取值2、6、10,代表逐步提高政府激励补贴力度。下面讨论政府激励对第三方再制造商和动力电池生产商策略选择的演化轨迹及影响程度。

4.2.1 参数 S_1, S_2 分别对策略演化的影响分析

提高政府激励补贴对于第三方再制造商的演化路径如图5所示。设置 $S_1 = 2 : 4 : 10$,不会改变第三方再制造商的演化状态。同时随着政府激励补贴 S_1 的增加,第三方再制造商选择积极投入策略的比例逐渐上升,且比例收敛至1的速度逐渐加快,表明政府补贴能够显著促进第三方再制造商的积极投入行为。

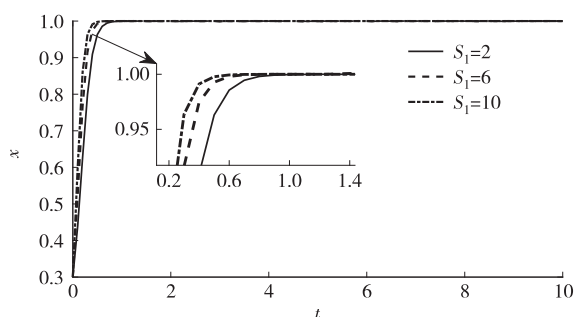


图5 S_1 对 x 的演化轨迹影响

Fig. 5 Influence of S_1 on the evolution trajectory of x

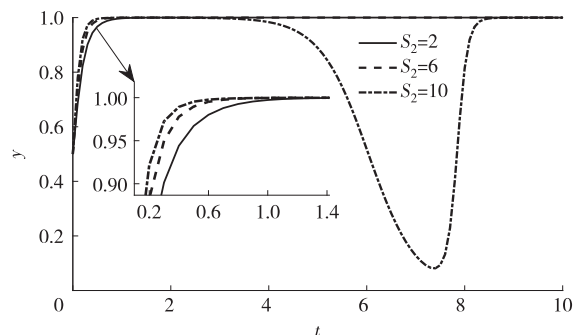


图6 S_2 对 y 的演化轨迹影响

Fig. 6 Influence of S_2 on the evolution trajectory of y

当政府激励补贴 S_2 分别取值2、6、10时,提高政府补贴对于动力电池生产商承担生产者延伸责任的作用如图6所示。随着政府补贴的逐渐提升,动力电池生产商收敛至承担延伸责任的速度逐渐加快;当补贴力度提高到10时,短期内动力电池生产商主体承担生产延伸责任的概率逐渐增加,直至 y 值达到理想状态,随即 y 值快速下降,但最终趋于选择“承担延伸责任”策略。表明政府在适当范围内提高补贴力度,会促进电池生产商承担延伸责任;如果补贴力度过大,即便短期内能够快速提高动力电池生产商承担延伸责任的积极性,但随着时间推移,生产商会逐渐对政府补贴产生依赖,承担生产者延伸责任的意愿会减弱,但后续考虑到EPR的政策规制,动力电池生产商最终会选择积极承担延伸责任。

4.2.2 政府补贴对策略演化的影响分析

同时提高政府补贴措施对第三方再制造商、动力电池生产商行为策略的影响如图 7 所示。当政府补贴 S_1 , S_2 取值均为 10, 即政府激励补贴力度相同的情况下, 第三方再制造商策略演化轨迹会趋向于理想状态, 而动力电池生产商则会收敛于不承担延伸责任。由此表明, 相较于动力电池生产商, 政府向第三方再制造商提供补贴能够达到积极投入的决策均衡, 有效动力电池再生利用技术的研发水平。

4.2.3 政府奖惩对动力电池生产商策略演化的影响分析

提高政府激励补贴、惩罚行为对于动力电池生产商演化轨迹的影响如图 8 所示。当政府补贴与惩罚的值 S_2 取 2 和 6, F 取 5 和 10, 对比补贴与惩罚初始赋值曲线, 政府分别提高补贴支持和罚款, 及同时提高政府补贴和罚款, 动力电池生产商均会收敛于承担延伸责任, 且收敛速度均加快; 相比较提高政府补贴, 提升罚款力度能够显著加快电池生产商收敛于承担延伸责任的速度。由此表明, 提高政府罚款力度, 可以促进动力电池生产商达到理想状态。

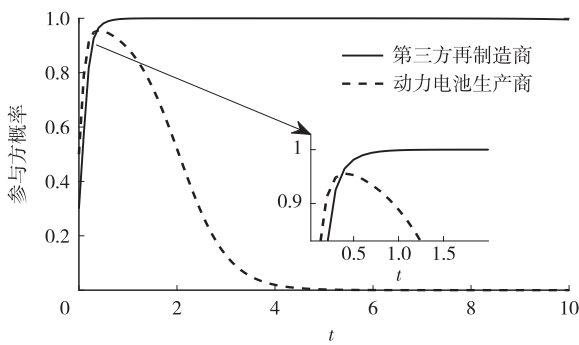


图 7 政府补贴对 x 与 y 的演化轨迹影响
Fig. 7 Influence of government subsidies on x and y

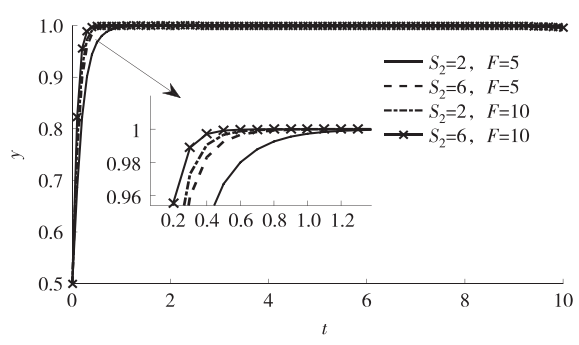


图 8 政府补贴与惩罚对 y 的演化轨迹影响
Fig. 8 The effect of government subsidies and penalties on the evolutionary trajectory of y

5 结论与建议

5.1 结论

本文运用演化博弈理论, 构建由第三方再制造商、动力电池生产商和政府组成的三方演化博弈模型, 研究第三方再制造商、动力电池生产商和政府的三方主体演化稳定策略, 运用数值仿真刻画了三方博弈主体策略选择的动态演化过程, 进一步分析了政府补贴激励、监管处罚力度对相关主体的影响。综合上述分析, 得到以下结论:

1) 动力电池再利用技术研发过程中, 第三方再制造商、动力电池生产商和政府三方主体间的策略选择相互影响。当演化条件同时满足下列条件: i) 第三方再制造商积极投入进行技术创新的收益、潜在收益、政府补贴及消极投入的机会损失大于投入成本; ii) 动力电池生产商承担延伸责任的收益、政府补贴及不承担延伸责任的罚款高于总的投入成本; iii) 政府严格规制的社会收益大于规制成本、提供给企业的补贴之和; 系统最终会演化达到理想状态。

2) 政府激励补贴明显能够影响第三方再制造商、动力电池生产商的策略选择, 促进两者推进动力电池的再生利用技术研发工作, 加快进行电池再利用技术的创新工作。但政府激励补贴在适当范围内可以有效促进动力电池生产商承担延伸责任, 但并非一直是正向影响。因此就补贴对象而言, 相较于提高动力电池生产商的政府激励补贴, 提高对第三方再制造商的激励补贴, 更能够加快动力电池再生利用的技术研发工作。

3) 政府提高监管惩罚明显能够影响动力电池生产商的策略选择, 促进动力电池生产商积极承担延伸责任。动力电池生产商主动承担生产者延伸责任策略主要受第三方再制造商积极投入比例、政府补贴、罚款、政府严格规制比例、动力电池生产商承担生产者延伸责任的成本和收益等因素的影响。针对动力电池生产商的规制措施而言, 相较于政府提高补贴激励力度, 提高监管惩罚力度更加能够促进动力电池再生利用技术的创新。

5.2 建议

根据上述结论,为提高废旧动力电池回收率和再利用率,促进动力电池再制造技术的创新,本文提出如下建议:

培养第三方再制造商的核心竞争力,提高危机意识。第三方再制造商作为动力电池再制造的专业机构,废旧动力电池拆解、冶炼技术是核心竞争力,也是提升中国废旧动力电池再利用效率的关键一步;同时,随着动力电池退役的高潮来临,第三方再制造商不断加强再制造动力电池技术的创新,有利于扩大市场份额,不断边缘化现有市场上的回收小作坊,有利于规范回收拆解动力电池的流程。因此第三方再制造商须加大对废旧动力电池拆解、冶炼提取等一系列再制造技术创新的投入,同时加强与动力电池生产商的信息沟通及合作研发。

明确定位动力电池生产商在回收再制造中的角色,充分发挥技术优势。动力电池生产商作为电池回收的源头主体,具有较强的技术优势,对于动力电池的拆解等再生利用技术的研发工作可以起到极大的推动作用。为此,动力电池生产商应该清楚意识到自己在废旧动力电池回收再制造过程中的角色,积极承担延伸责任,与第三方再制造商进行合作研发,同时转变生产观念,大力发展绿色生产,不断完善电池的溯源管理。

政府发挥引导作用,完善动力电池回收行业相应的政策法规。动力电池产业发展迅速,导致动力电池回收市场模式混乱,相关企业的责任划分不够明确,回收路径不够清晰,回收再制造水平亟待提高,市面上存在暴力拆解动力电池的小作坊,既没有动力电池回收的专业设备也没有专业人才,更缺乏有效的监管,不利于规范化回收再利用动力电池。政府应该出台相应的动力电池回收管理办法,明确动力电池回收再制造产业链上各个主体的责任,采取适当的激励和惩罚措施,促进动力电池回收行业的发展。首先,就激励措施而言,在政府提供相同补贴的情况下,第三方再制造商可以产生更大的收益,即可以更快促进动力电池的回收再利用。其次,就惩罚措施而言,向动力电池生产商实施惩罚措施会比提供补贴更快促进动力电池的回收再利用。

参考文献:

- [1] 新华社.全国机动车达4.4亿辆 驾驶人达5.32亿人[EB/OL]. (2024-07-08)[2024-07-25]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202407/content_6961935.htm.
Xinhua News Agency. Motor vehicles reach 440 million nationwide, drivers reach 532 million [EB/OL]. (2024-07-08)[2024-07-25]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202407/content_6961935.htm.
- [2] 国务院.国务院关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2021(31):48-58.
The State Council. Circular of the State Council on the issuance of the action programme for peak carbon by 2030[J]. Bulletin of the State Council of the People's Republic of China, 2021(31):48-58.
- [3] 王彤旭. 官宣燃油车停售时间表[J]. 中国商界, 2022(5):58-60.
WANG T X. Official announcement: timetable for the fuel vehicle moratorium[J]. China Business, 2022(5):58-60.
- [4] 新华网. 2023年我国退役动力电池总量超58万吨,动力电池回收产业“加速跑”[EB/OL]. (2024-05-16)[2024-07-25]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1799166304318971166&wfr=spider&for=pc>.
Xinhua News Agency. 2023 China's total retired power battery over 580,000 tons, power battery recycling industry "accelerated run" [EB/OL]. (2024-05-16)[2024-07-25]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1799166304318971166&wfr=spider&for=pc>.
- [5] 吕江涛, 宋杰. 新能源汽车电池去哪儿? [J]. 中国经济周刊, 2022(1):38-43.
LÜ J T, SONG J. Where do new energy vehicle batteries go? [J]. China Economic Weekly, 2022(1):38-43.
- [6] 王佳, 黄秀蓉. 废旧动力电池的危害与回收[J]. 生态经济, 2021, 37(12):5-8.
WANG J, HUANG X R. Hazards and recycling of waste power batteries[J]. Ecological Economy, 2021, 37(12):5-8.
- [7] KANG D H P, CHEN M, OGUNSEITAN O A. Potential environmental and human health impacts of rechargeable lithium batteries in electronic waste[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(10):5495-5503.
- [8] 工业和信息化部.《新能源汽车废旧动力蓄电池综合利用行业规范条件》发布[J]. 资源再生, 2016(2):60-63.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Normative conditions for the comprehensive utilisation of new energy vehicle waste power batteries in the industry issued[J]. Resource Regeneration, 2016(2):60-63.
- [9] 中国再生资源回收利协会.《新能源汽车动力蓄电池回收利用管理暂行办法》发布[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(2):1-3.
China Resource Recycling Association. Interim measures for the management of power battery recycling for new energy vehicles issued[J]. China Resources Comprehensive Utilisation, 2018, 36(2):1-3.
- [10] 邓毅, 韦洪莲. 我国废动力锂电池回收利用环境管理新模式探析[J]. 环境保护, 2022, 50(22):46-51.

- DENG Y, WEI H L. Exploration of a new environmental management model for the recycling of waste lithium batteries in China[J]. *Environmental Protection*, 2022, 50(22): 46-51.
- [11] 黎宇科, 周玮, 黄永和. 建立我国新能源汽车动力电池回收利用体系的设想[J]. *资源再生*, 2012(1): 28-30.
- LI Y K, ZHOU Wei, HUANG Y H. Establishment of power battery recycling system for new energy vehicles in China[J]. *Resource Recycling*, 2012(1): 28-30.
- [12] ZENG X, LI J, LIU L. Solving spent lithium-ion battery problems in China: opportunities and challenges[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 52: 1759-1767.
- [13] 谢隽阳, 乐为, 郭北海. 基于生产者责任延伸的新能源汽车动力电池回收帕累托均衡[J]. *中国管理科学*, 2022, 30(11): 309-320.
- XIE J Y, LE W, GUO B H. Pareto equilibrium of power battery recycling for new energy vehicles based on extended producer responsibility[J]. *China Management Science*, 2022, 30(11): 309-320.
- [14] 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/OL]. *中国管理科学*, 1-16. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2021.2731>.
- JIAO J L, PAN Z T, LI J J. Selection of power battery recycling model considering economic benefits of reuse and emission efficiency[J/OL]. *China Management Science*, 1-16. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2021.2731>.
- [15] 马亮, 刘玉洁, 朱浩. 闭环供应链视角下新能源汽车电池双渠道回收契约设计[J]. *科技管理研究*, 2021, 41(20): 184-193.
- MA L, LIU Y J, ZHU H. Design of a dual-channel recycling contract for new energy vehicle batteries from a closed-loop supply chain perspective[J]. *Science and Technology Management Research*, 2021, 41(20): 184-193.
- [16] 卢超, 赵梦园, 陶杰, 等. 考虑需求和质量双重风险的动力电池回收定价策略和协调机制研究[J]. *运筹与管理*, 2020, 29(4): 195-203.
- LU C, ZHAO M Y, TAO J, et al. Research on the pricing strategy and coordination mechanism of power battery recycling considering the dual risks of demand and quality[J]. *Operations Research and Management*, 2020, 29(4): 195-203.
- [17] 谢家平, 李璟, 杨非凡, 等. 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.
- XIE J P, LI J, YANG F F, et al. Multi-level contract decision optimisation for closed-loop supply chain of new energy vehicles[J]. *Journal of Management Engineering*, 2020, 34(2): 180-193.
- [18] 张川, 陈宇潇. 政府补贴下考虑规模效应的动力电池梯次利用闭环供应链决策与协调[J]. *运筹与管理*, 2021, 30(12): 72-77.
- ZHANG C, CHEN Y X. Decision-making and coordination of closed-loop supply chain for power battery reuse under government subsidy considering scale effect[J]. *Operations Research and Management*, 2021, 30(12): 72-77.
- [19] 夏西强, 朱庆华. 政府不同补贴策略对单/双渠道回收影响研究[J]. *中国管理科学*, 2021, 29(11): 88-98.
- XIA X Q, ZHU Q H. Research on the impact of different government subsidy strategies on single/dual channel recycling[J]. *China Management Science*, 2021, 29(11): 88-98.
- [20] 王文宾, 丁军飞, 王智慧, 等. 回收责任分担视角下零售商主导闭环供应链的政府奖惩机制研究[J]. *中国管理科学*, 2019, 27(7): 127-136.
- WANG W B, DING J F, WANG Z H, et al. Research on government reward and punishment mechanism of retailer-led closed-loop supply chain under the perspective of recycling responsibility sharing[J]. *China Management Science*, 2019, 27(7): 127-136.
- [21] 方国昌, 何宇, 田立新. 碳交易驱动下的政企碳减排演化博弈分析[J]. *中国管理科学*, 2024, 32(5): 196-206.
- FANG G C, HE Y, TIAN L X. Evolutionary game analysis of carbon emission reduction by government and enterprises driven by carbon trading[J]. *China Management Science*, 2024, 32(5): 196-206.
- [22] 陈晓红, 王钰, 李喜华. 环境规制下区域间企业绿色技术转型策略演化稳定性研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2021, 41(7): 1732-1749.
- CHEN X H, WANG Y, LI X H. A study on the stability of the evolution of green technology transition strategies of inter-regional enterprises under environmental regulation[J]. *Systems Engineering Theory and Practice*, 2021, 41(7): 1732-1749.
- [23] 胡彪, 马俊. 奖惩机制下铅蓄电池生产商实施 EPR 的演化博弈分析[J]. *安全与环境学报*, 2022, 22(2): 962-971.
- HU B, MA J. Evolutionary game analysis of lead battery manufacturers' EPR implementation under reward and punishment mechanism[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2022, 22(2): 962-971.
- [24] 李婉红, 李娜, 刘芳. 绿色技术创新利益相关者的三群体演化博弈及其仿真[J]. *运筹与管理*, 2021, 30(9): 216-224.
- LI W H, LI N, LIU F. A three-group evolutionary game of green technology innovation stakeholders and its simulation[J]. *Operations Research and Management*, 2021, 30(9): 216-224.

- [25] 许杰,陈富坚,刘国平. 机动车碳税政策下政府、企业与出行者的三方演化博弈模型研究[J]. 运筹与管理,2021,30(9):9-16.
XU J, CHEN F J, LIU G P. A tripartite evolutionary game model of government, enterprises and travellers under motor vehicle carbon tax policy[J]. Operations Research and Management, 2021, 30(9): 9-16.
- [26] 郑敏娜,任广乾. 企业绿色创新行为的演化博弈分析:基于环保社会组织参与的视角[J]. 运筹与管理,2021,30(3):15-21.
ZHENG M N, REN G Q. Evolutionary game analysis of corporate green innovation behaviours-A perspective based on the participation of environmental protection social organisations[J]. Operations Research and Management, 2021, 30(3): 15-21.
- [27] 吴丰,徐顽强. 政府主导型校地共建新型研发机构市场化转型演化研究:基于资源依赖视角[J]. 科技进步与对策,2024,41(1):1-12.
WU F, XU W Q. Study on the evolution of market transformation of government-led university-land jointly-built new R&D institutions based on the perspective of resource dependence[J]. Science and Technology Progress and Countermeasures, 2024, 41(1): 1-12.
- [28] FRIEDMAN D. Evolutionary games in economics[J]. Econometrica, 1991, 59(3): 637.
- [29] 潘峰,王琳. 演化博弈视角下地方环境规制部门执法策略研究[J]. 管理工程学报,2020,34(3):65-73.
PAN F, WANG L. Enforcement strategies of local environmental regulatory authorities under the perspective of evolutionary game[J]. Journal of Management Engineering, 2020, 34(3): 65-73.

Operations Research and Cybernetics

The Incentive Effect of Government Subsidies on Technological Innovation of Power Battery Recycling

CHEN Yuke, TONG Xin

(School of Economics and Management, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: Accelerating the research and development of power battery recycling technology is an important path to achieve the standardised recovery and resourceful recycling of waste power batteries, therefore, it is of great significance to explore the government regulatory measures to stimulate the technological innovation of power battery recycling. Based on the Extended Producer Responsibility (EPR) system, a three-party evolutionary game model is constructed consisting of third-party remanufacturers, power battery producers and the government, and the evolutionary strategies of the three parties under different stability conditions is simulated by using Matlab, and the impact of government regulatory measures is compared and analyzed on the evolution of strategies of third-party remanufacturers and power battery producers. It is found that: 1) the government's implementation of power battery reuse technology R&D subsidy policy can effectively promote the third-party remanufacturers to actively invest in the power battery manufacturers to take the initiative to assume the responsibility of production extension; 2) the government's subsidy to the third-party remanufacturers can significantly increase the willingness to actively invest in the R&D relative to the power battery manufacturers; on the contrary, the government adopts the appropriate punitive measures for the power battery producers, which is more capable of motivating them to take the initiative to undertake R&D. In contrast, the government's adoption of appropriate penalties for power battery manufacturers is more likely to incentivise them to take the initiative to undertake the responsibility of R&D of recycling technologies.

Keywords: power battery recycling; subsidy incentives; technological innovation; evolutionary game

(责任编辑 黄 颖)