齐鲁工业大学学报 第40卷 第4期 2026年8月出版
JOURNAL OF QILU UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Vol.40 No.4 Aug.2026
DOI:10.16442/j.cnki.qlgydxxb.2026.04.007 【数理与统计科学】

数据驱动的磷酸铁锂电池回收经济临界点仿真

耿舒楠[a],陈慧乔[b],陈圣亮[c],朱孟坤[c*]
齐鲁工业大学(山东省科学院) a.经济与管理学部;b.材料科学与工程学部;
c.数学与人工智能学部,山东 济南 250353

摘要:当前新能源汽车产业快速发展,受到政策以及经济的驱动,磷酸铁锂电池的回收利用已经朝着规模化的方向发展。据统计,目前磷酸铁锂电池占我国退役电池总量的60%以上,但回收率低于50%,经济性差是急需突破的瓶颈,所以分析磷酸铁锂电池回收经济临界点对提升磷酸铁锂电池回收率以及构建一个规范、安全、高效的回收利用体系具有重要意义。通过整合2018—2025年政策文本、市场价格的多维度数据,创新性地构建动态分析框架。采用博弈论-系统动力学-贝叶斯混合模型整合分析框架,首先界定政府与回收企业(以格林美、宁德时代为代表)的博弈主体与目标,设计补贴强度与产能策略的策略集,通过支付函数求解不同金属价格区间的子博弈完美纳什均衡。基于此,构建了混合模型量化政策补贴与金属价格的动态交互,并通过蒙特卡洛模拟对极端情景进行描述,经实证校准与收敛验证,明确经济临界点在(7.9~11.5)万元/吨的区间波动,当补贴强度每提升100元/吨时,临界点会下降(0.5~0.8)万元/吨;当锂价波动率每增加10%时,临界点便会上升(0.3~0.5)万元/吨。研究结果可为产业政策优化与企业运营提供量化依据,对增加磷酸铁锂电池的回收率有重要帮助,有助于实现资源安全以及经济可持续发展的双重目标。

关键词:磷酸铁锂电池回收;经济临界点;系统动力学-贝叶斯混合模型;博弈论;纳什均衡
中图分类号:O213.9 **文献标志码**:A **文章编号**:2097-2792(2026)04-62-09

Data-driven simulation of the economic critical point for lithium iron phosphate battery recycling

GENG Shunan[a],CHEN Huiqiao[b],CHEN Shengliang[c],ZHU Mengkun[c*]
a.Faculty of Economics and Management;b.Faculty of Materials Science and Engineering;
c.Faculty of Mathematics and Artificial Intelligence,Qilu University of Technology
(Shandong Academy of Science),Jinan 250353,China

Abstract: The current new energy vehicle industry is developing rapidly.Driven by policies and the economy,the recycling and utilization of lithium iron phosphate batteries have been moving towards a large-scale direction. According to statistics,currently,lithium iron phosphate batteries account for over 60% of the total retired batteries in China,but the recycling rate is less than 50%,and the poor economic performance is a bottleneck that needs to be urgently broken through. Therefore,analyzing the economic critical point of lithium iron phosphate battery recycling is of great significance for improving the recycling rate of lithium iron phosphate batteries and building a standardized,safe and efficient recycling and utilization system. This study integrates multi-dimensional data

收稿日期:2025-11-13 **网络出版时间**:2026-08-31
基金项目:国家自然科学基金项目(12201333);山东省高等学校青创科技计划项目(2023KJ135);山东省自然科学基金面上项目(ZR2026MS0068)
作者简介:耿舒楠,本科生;研究方向:博弈论与产业经济量化分析理论及应用
* **通信作者**:朱孟坤,博士、副教授;研究方向:随机矩阵理论及应用;zmk@qlu.edu.cn

including policy texts and market prices from 2018 to 2025, and constructs a dynamic analysis framework. It adopts an integrated analytical framework of game theory-system dynamics-Bayesian hierarchical hybrid model. First, it defines the game subjects and objectives of the government and recycling enterprises (represented by GEM and CATL), designs strategy sets for subsidy intensity and production capacity strategies, and solves the subgame perfect Nash equilibrium in different metal price ranges through payoff functions. Based on this, a hybrid model is constructed to quantify the dynamic interaction between policy subsidies and metal prices, and describe the extreme scenarios through Monte Carlo simulation. After empirical calibration and convergence validation, it is clarified that the economic threshold fluctuates in the range of 79 000 to 115 000 yuan/ton. For every 100 yuan/ton increase in subsidy intensity, the threshold decreases by 5 000 to 8 000 yuan/ton; while for every 10% increase in lithium price volatility, the threshold rises by 3 000 to 5 000 yuan/ton. The research results can provide a quantitative basis for industrial policy optimization and enterprise operations, play an important role in improving the recycling rate of lithium iron phosphate batteries, and help achieve the dual goals of resource security and economic sustainable development.

Key words: recycling of lithium iron phosphate batteries; economic critical point; system dynamics-Bayesian hybrid model; game theory; Nash equilibrium

当今随着新能源汽车产业的快速发展,磷酸铁锂电池作为新能源汽车核心部件的动力电池,具有安全性高、循环寿命长和成本低的优势[1]。在 2025 年 1—2 月,我国的动力电池累计装车量达 73.6 GWh,其中磷酸铁锂电池累计装车量 58.6 吉瓦时,占总装车量的 79.6%,累计同比增长 199.9%;而三元锂电池装车量仅占 20.4%,累计同比下降 23.3%[2]。由此可见,目前磷酸铁锂电池在市场中占据主导地位,应用前景广阔。数据显示磷酸铁锂电池在多个领域都具有突出的优势,比如在乘用车领域、商用车领域、5G 通信、船舶领域等都发挥着突出性的作用[3]。因此,当下随着首批大规模磷酸铁锂电池的退役,由于金属价格的波动、政策补贴的问题,它回收利用的经济性矛盾日益凸显,经济性差成为亟待解决的关键瓶颈。

现有数据统计,碳酸锂作为锂离子电池的核心原材料,其价格由 2020 年 12 月 3 日的 4.4 万元/吨涨至 2022 年 11 月 9 日的 56.76 万元/吨,后又跌至 2024 年 8 月 21 日的 7.49 万元/吨,跌幅高达 86.8%[4],企业陷入投产即亏损的困境,碳酸锂价格大幅波动情况如图 1 所示。并且磷酸铁锂电池的正规渠道回收率低,目前中国已建有回收服务网点 1.5 万个,但大约 75%的废旧电池流入了一些“小作坊”以及尚未进入白名单的企业进行回收处理,大量退役电池通过非正规渠道被回收,亟需政府通过政策手段强化监管[5]。

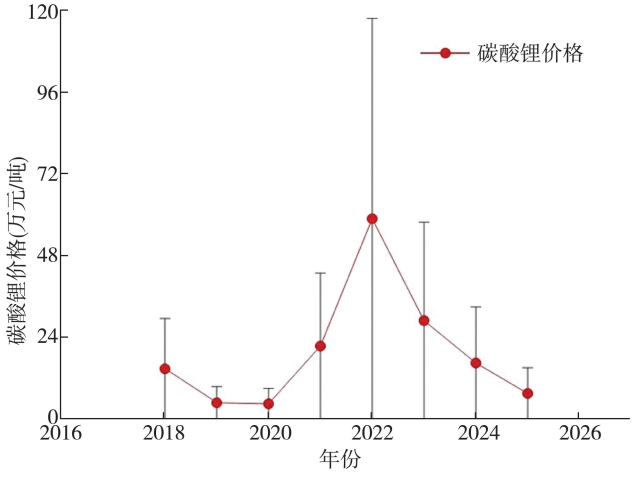


图 1　碳酸锂价格变化折线图

现有政策表明,在国内 2018—2022 年,以《新能源汽车动力蓄电池回收利用管理暂行办法》为代表,建立了生产者责任延伸制度,将补贴的力度与回收规模相联系,以此来鼓励企业提高回收效率,但由于政策执行效能不足的影响,导致非正规回收渠道呈现无序扩张的态势;2025 年国务院通过《行动方案》,提出到 2027 年规范回收率提升至 70%[6],建立一个覆盖全生命周期的回收利用体系。

系统动力学是一种用于理解复杂系统随时间变化的建模方法,它通过识别系统中的反馈回路、时间延迟和非线性关系来分析系统的动态行为[7],刻画要素间的动态交互作用,即便在数据不完整的情况下,也可

以通过分析系统的因果关系,来推断系统的行为[8]。Tvkm 等[9]利用系统动力学模型来评估锂离子电池回收的循环经济策略,旨在从报废电池中回收原材料;Cui 等[10]通过使用系统动力学商业模型来预测日本废旧汽车锂离子电池处理行业的经济影响,包括材料的回收、梯次利用等。这些研究在宏观层面强调了系统动力学分析电池回收生态系统动态行为的有效性,但通常侧重于技术可行性、政策评估等,较少深入探讨经济临界点和不确定性分析。贝叶斯统计在处理不确定性问题上具有显著优势,它可以不断的更新先验信息,来准确的反映出市场波动带来的不确定性[11],能有效融合先验知识与观测数据,在电池回收这类数据不完整、不确定性强的场景中,提供更稳健的预测结果。

现有文献表明,在电池回收领域,系统动力学模型已被广泛应用,但将其与贝叶斯方法结合以探究磷酸铁锂电池回收经济临界点的研究相对较少。基于此,本研究创新性地构建系统动力学-贝叶斯混合模型:系统动力学模型能够描述磷酸铁锂电池回收市场和政府政策发展的宏观动态趋势,而贝叶斯方法可以有效地处理数据中的不确定性、噪声,并结合先验知识对模型参数进行估计和更新,从而提高经济临界点预测的精确性和鲁棒性[12]。通过二者的结合,可以更全面的捕捉到磷酸铁锂电池回收的经济临界点,既考虑了宏观层面的复杂相互作用,又量化了参数和预测结果的不确定性;并且传统的系统动力学模型在参数校准上可能依赖专家经验,而贝叶斯方法可以通过整合实际回收数据,对系统动力学模型的关键参数进行更精准的数据驱动校准[13],这使得模型能够更准确地识别磷酸铁锂电池回收的经济临界点。通过整合近几年政策文本、金属价格等多源数据,构建博弈论-系统动力学-贝叶斯混合一体化分析框架,并通过蒙特卡洛模拟对极端情景进行描述,精准界定政策与企业的动态博弈均衡,为磷酸铁锂电池回收产业提供了兼具理论性与实操性的量化决策依据。

1 政策杠杆与金属价格的博弈论分析

1.1 博弈主体界定与核心目标设定[14]

1.1.1 博弈主体参与者

本研究聚焦磷酸铁锂电池回收产业中的“政策调控-市场响应”的核心互动关系,则研究中存在着两个博弈主体:

甲方:即政策的制定者,以中央政府、地方发改委及工信部为代表,拥有政策制定、补贴发放、监管执行的主导权,是政策杠杆的实施主体。

乙方:即市场的参与者,是以格林美[15]、宁德时代[16]两个正规回收企业作为代表,企业拥有回收产能配置、投资决策的自主权,是金属价格波动的直接响应者。

1.1.2 参与者追求的目标以及利益冲突

政府目标:采用最低的财政补贴成本,实现“2027 年规范回收率提升至 70%”的政策目标。

企业目标:在金属价格波动大的环境下,通过政策补贴来帮助企业补上金属再生收益与回收总成本之间的差额,让企业的回收业务不亏损,能盈利。

利益冲突:政府的核心目标为“低补贴-高回收”,企业的核心目标为“高补贴-稳价格”,二者构成追求利益共赢的非零和博弈。核心矛盾在于补贴强度与金属价格的动态匹配度:政策补贴要随着金属价格的波动灵活调控,精准覆盖企业盈利缺口,在激励企业主动参与回收的同时,实现政府低成本补贴的目标,最终通过策略调整达成二者的利益平衡。

1.2 策略构建

1.2.1 政策策略集(G)

参考工信部补贴的标准与金属再生收益的比例,将补贴强度划分为 3 类:

高补贴(G_1):补贴金额占金属再生收益的 30%,即中央补贴要大于 300 元/吨;

中补贴(G_2):补贴金额占金属再生收益的 20%,即中央补贴处于 200~300 元/吨;

低补贴(G_3):补贴金额占金属再生收益的 10%,即中央补贴要低于 200 元/吨。

1.2.2 企业市场响应策略集(E)

企业策略是基于市场金属价格的波动来进行回收产能的调整,参考行业产能 60%的利用率标准,设定

如下:

扩大产能(E_1):产能利用率>85%,当金属综合价格高于经济临界点时,回收盈利空间显著。

维持产能(E_2):产能利用率处于 60%~85%,当金属综合价格在临界点的±15%区间波动时,需要依赖补贴来维持盈利。

收缩产能(E_3):产能利用率<60%,当金属综合价格低于经济临界点的 30%以上,回收业务将陷入持续性亏损。

1.3　支付函数

政府支付函数:公式的核心思想是收益-成本。

$$U_G = \alpha \times R(S,P) - \beta \times C(S), \tag{1}$$

$$C(S) = S \times Q_{\text{total}}, \tag{2}$$

其中,$R(S,P)$是规范回收率,补贴强度 S 越高,金属价格 P 越高,企业回收的积极性就越强,回收率就越高;$C(S)$是政策补贴总成本,满足上述第二个式子:其中的 Q_{total}是退役电池总处理量;α 是回收率权重,取值为 0.6;β 为补贴成本权重,取值为 0.4。

企业支付函数:公式的核心思想是收入-成本+补贴。

$$U_E = P \times Q \times r - C_{\text{fixed}} - C_{\text{variable}} + S \times Q, \tag{3}$$

其中,P 是金属的综合价格,基于磷酸铁锂电池再生价值的贡献度,综合考量各金属的市场价格,按锂价 70%的权重、铁价 20%的权重、磷价 10%的权重加权计算;Q 是企业回收处理量;r 是金属的综合回收率,固定为 75%;C_{fixed}为固定成本,包括设备折旧、厂房租赁等,取值为 800 万元;C_{variable}为可变成本,包括运输、能耗等,取值为 1 200 元/吨;S 为单位电池的补贴金额。α、β 的取值参考政策权重设定,固定成本与可变成本的取值基于格林美企业的运营数据校准。

1.4　子博弈完美[17]纳什均衡[18]验证

在进行纳什均衡求解时,要分 3 个金属价格区间进行验证,即高价格区间($P \geqslant 15$ 万元/吨)、中等价格区间[(10≤P<15)万元/吨]、低价格区间(P<10 万元/吨)。以高价格区间为例,计算结果如表 1。

表 1　高价格区间纳什均衡求解

政府补贴	U_{E_1}	U_{E_2}	U_{E_3}
U_{G_1}	(0.05,20.86)	(0.03,18.72)	(-0.02,11.30)
U_{G2}	(0.10,21.12)	(0.08,19.05)	(-0.01,11.58)
U_{G_3}	(0.15,21.46)	(0.12,19.32)	(0.04,11.85)

综合表 1 可以看出,当政府选择 G_3 低补贴时,成本最低且回收率达标;当企业选择扩大产能 E_1 时,利润是最高的,所以可以得出结论(G_3,E_1)为纳什均衡。同理,当为低价格区间时,(G_1,E_2)为纳什均衡;中等价格区间时,(G_2,E_2)为纳什均衡。

2　系统动力学-贝叶斯混合模型构建

博弈论分析可以从理论上得出在不同金属价格区间与补贴强度的纳什均衡策略,基于这个理论,把政策补贴以及金属价格波动作为关键因素,构建系统动力学-贝叶斯混合模型,实现从理论博弈到量化仿真验证的逻辑链接,为后续的实证检验提供可操作的模型框架。

2.1　系统动力学模型

系统动力学模型聚焦政策与价格的动态交互,构建了两大核心的反馈思路,量化二者对回收产能、收益的实时影响。其一为政策激励正反馈回路:政策补贴会刺激企业扩大磷酸铁锂电池的回收规模,促进企业产能的提升,实现回收率与回收收益的同步增长;其二为价格风险负反馈回路:锂价的大幅下跌将导致金属再生收益下降,企业现金流减少,回收产业的投入减少,造成回收率下降。

产能投资函数构建如下,核心思想是补贴强度-锂价波动率:

$$I_t = I_{t-1} \times (1+\gamma \times S_t) - \delta \times \sigma_t, \tag{4}$$

其中 I_t表示的是在 t 时刻的产能投资;γ 表示的是政策敏感系数,基于格林美企业的相关数据拟合测算得出,

取值为 0.2,是用来衡量政策补贴的强度对产能投资的影响程度;S_t表示的是 t 时刻的政策强度指数;γ 是用来衡量单位波动率带来的产能投资减少额,通过 GARCH 模型进行残差校准,取值为 0.1;σ_t反映的是 t 时刻的锂价波动率。

金属再生收益函数构建如下:

$$R_t = P_t \times Q_t \times r。 \tag{5}$$

基于净利润为 0 的盈亏平衡条件来进行经济临界点的推导,定义其公式为:

$$P = \frac{C_{\text{fixed}} + C_{\text{variable}} \times Q_t - S_t \times Q_t / 10\ 000}{Q_t \times r}。 \tag{6}$$

通过该公式,可以直接体现出补贴强度与回收处理量对临界点的影响,其中 Q_t是由金属价格区间所决定,本质上是政策与价格共同作用的结果。

2.2 贝叶斯层次模型

由于金属价格的波动存在着显著的不确定性,贝叶斯层次模型通过先验分布反应先验信息,再进行后验概率分布,以此来量化经济临界点的概率分布,提升经济临界点预测结果的可靠性与稳健性,基于贝叶斯定理进行统计推断的基本形式如图 2 所示。

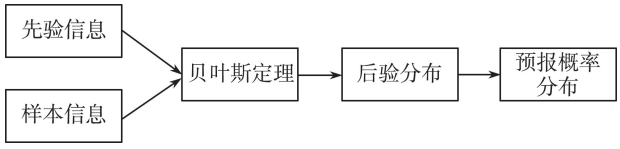


图 2 贝叶斯统计推断的基本形式[13]

2.2.1 先验分布设定

补贴强度系数先验:$\beta_1 \sim N(0.02, 0.01^2)$,反映了补贴强度对临界点的负向影响,当补贴越高时,临界点就越低。

锂价波动率系数先验:$\beta_2 \sim N(0.5, 0.1^2)$,反映了锂价波动率对临界点的正向影响,当波动越大时,临界点就越高。

2.2.2 后验概率推断

构建以经济临界点为因变量,补贴强度以及锂价波动率为自变量的贝叶斯回归模型,定义其公式为:

$$P_{BE,j} = \beta_0 + \beta_1 \times S_j + \beta_2 \times \sigma_j + \varepsilon_j, \tag{7}$$

其中,j 为观测样本;β_0 为截距项;$\varepsilon_j \sim N(0, \sigma^2)$为误差项,通过马尔科夫链蒙特卡洛方法进行抽样求解:抽样的次数为 2 000 次,燃烧期为 500 次,确保参数收敛。

2.3 模型协同

系统动力学模型刻画了补贴强度-金属价格-回收收益的动态演化,输出在不同金属价格区间情境下的经济临界点均值;贝叶斯层次模型基于金属价格波动的不确定性,对临界点均值进行概率修正,输出 95%置信区间,二者协同混合实现动态趋势+不确定性的双重刻画,不仅呼应了博弈论的均衡策略,同时又为实证检验提供了量化的基础。

3 实证检验

3.1 数据介绍

本文数据包括 2018—2025 年锂、铁、磷 3 种金属的月度价格与加权综合价格以及 2018—2025 年的政策补贴数据、格林美和宁德时代企业的磷酸铁锂电池回收率、现金流等运营数据,用于模型的校准、收敛判断以及博弈论均衡策略的验证。其中,金属综合价格的月度数据与回收政策补贴强度的年度数据见表 2~3。

2018—2024 年的数据均为公开统计数据,来源于行业报告、政府统计以及企业运营的公开数据;2025 年的数据为 1—8 月的公开统计数据与 9—12 月的模拟数据的结合,其中 1—8 月的数据来源于中国有色金属工业网锂业分会等行业数据库[19],而 9—12 月的数据通过系统动力学-贝叶斯混合模型基于历史趋势模拟生成,旨在保证研究数据的连续性,相关模拟已通过实证校准(误差≤5%)。

表 2　金属综合价格月度数据信息表

数据名	数据 1	数据 2	…	数据 36	数据 37	数据 38	…	数据 59	数据 60	…	数据 91	数据 92
年份	2018	2018	…	2020	2021	2021	…	2022	2022	…	2025	2025
月份	1	2	…	12	1	2	…	11	12	…	7	8
锂价/(万元/吨)	14.8	14.5	…	4.8	5.2	5.5	…	60.0	58.5	…	5.95	5.92
铁价/(万元/吨)	0.45	0.44	…	0.42	0.43	0.44	…	0.48	0.47	…	0.41	0.40
磷价/(万元/吨)	0.78	0.77	…	0.75	0.76	0.77	…	0.85	0.84	…	0.93	0.94
金属综合价格/(万元/吨)	10.53	10.31	…	3.69	3.96	4.24	…	42.13	41.03	…	4.55	4.53
价格区间	中区间	中区间	…	低区间	低区间	低区间	…	高区间	高区间	…	低区间	低区间
锂价波动率(月均)	8.2%	6.5%	…	3.2%	4.1%	5.3%	…	18.7%	16.5%	…	1.8%	1.5%

表 3　回收政策补贴强度年度数据信息总表

数据名	数据 1	数据 2	数据 3	数据 4	数据 5	数据 6	数据 7	数据 8
年份	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
月份	全年	全年	全年	全年	全年	全年	全年	1—8
中央政策补贴标准	无明确补贴	无明确补贴	无明确补贴	无明确补贴	无明确补贴	300~800(试点补贴)	800~1 000(全国推广)	1 000~1 500(《管理办法》)
政策依据与说明	政策空白期	政策空白期	政策空白期	政策空白期	政策聚焦生产者责任延伸制度,未出台直接补贴	工信部 2023 年启动试点	中央政策延续并提高补贴标准	《动力电池综合管理办法》定稿,补贴标准提升,地方政策同步调整

3.2　实验方法

3.2.1　数据预处理

在磷酸铁锂电池经济临界点问题的研究中,由于经济数据呈现偏态分布,所以在异常值修正上,采用箱型图法剔除锂价的极端异常值,使得修正后的数据更贴合产业实际运营场景。再对变量进行标准化处理,对金属综合价格采用 Z-score 标准化,消除变量量级差异对模型拟合效果的干扰,利用公式:

$$x^{*}=\frac{x-\mu}{\sigma}。\tag{8}$$

对于定性指标,采用 Min-Max 归一化,利用公式:

$$x'=\frac{x-x_{\min}}{x_{\max}-x_{\min}}。\tag{9}$$

3.2.2　系统动力学模型校准

选取格林美锂回收率的数据,进行政策敏感系数和价格风险系数的调整,使得模型模拟的回收率与实际值误差≤5%,校准公式为:

$$\delta_{\mathrm{RE}}=\frac{\left|r_{\mathrm{Li,sim}}-r_{\mathrm{Li,real}}\right|}{r_{\mathrm{Li,real}}}\leqslant 5\%,\tag{10}$$

其中 δ_{RE} 为锂回收率模拟值与实际值的相对误差,$r_{\mathrm{Li,sim}}$ 为模型模拟得到的锂回收率,$r_{\mathrm{Li,real}}$ 为格林美锂回收率的实际统计值。

最终校准结果显示:政策敏感系数为 0.2。当补贴每提升 100 元/吨,回收率将提升 8%~10%,价格风险系数为 0.1;当锂价波动率每增加 10%,回收率将下降 3%~5%。以 2021 年为例,模拟回收率为 75.2%,实际值为 74.8%,误差满足模型精度要求。上述模型校准后回收率的模拟精度与逐年拟合效果,如图 3 所示。

再选取宁德时代的回收业务现金流为基准进行现金流的拟合，调整产能投资函数中的滞后项系数，使得模拟现金流与实际数据的决定系数 $R^2 \geqslant 0.9$，最终拟合结果为 $R^2 = 0.92$。以 2022 年的数据为例，模拟现金流为 0.68 亿元，实际值为 0.70 亿元，残差 0.02 亿元，说明系统动力学模型能够有效地刻画补贴–价格–现金流之间的动态关联机制。

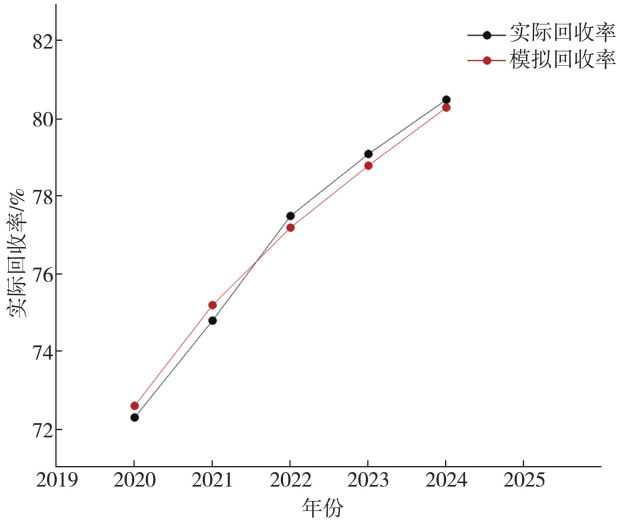


图 3　系统动力学模型回收率模拟值与实际值的校准对比

3.2.3　贝叶斯层次模型收敛判断

在潜在尺度缩减因子 R-hat 的理想值为 1 的前提下，所有的核心参数的 R-hat 值均<1.1，其中补贴强度系数的 R-hat 值=1.02，锂价波动率系数的 R-hat 值=1.03，截距项 R-hat=1.01，满足收敛标准，表明马尔科夫链已经达到平稳分布，后验推断结果可靠。基于该收敛可靠的贝叶斯层次模型，政策强度与金属价格对经济临界点的协同影响规律，如图 4 所示。

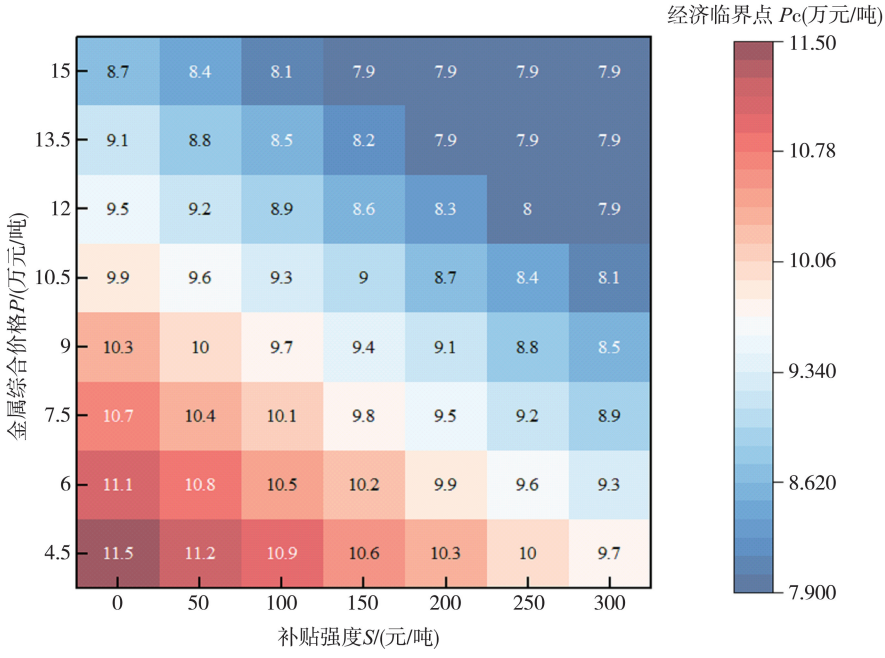


图 4　政策强度与金属价格对经济临界点的协同影响

3.2.4　多情景模拟与均衡验证

基于博弈论划分了 3 大价格区间，设置了不同的补贴强度情景，要通过系统动力学–贝叶斯混合模型来进行经济临界点与盈利概率的输出，验证价格–补贴均衡策略的有效性，以高价格区间为例：

情景设置：补贴强度为低补贴 $S=100$ 元/吨，企业处理量为扩大产能 $Q=2$ 万吨。

模拟结果：系统动力学模型输出的经济临界点为 8.2 万元/吨，贝叶斯模型输出的后验均值为 8.1 万元/吨，盈利的概率达 92.3%。

综上可得,在低补贴下企业仍能实现高盈利,与纳什均衡(G_3,E_1)的策略一致,验证了该策略的可行性。

3.3　结果与讨论

本文进行了博弈论分析与系统动力学-贝叶斯混合模型的构建。在博弈论层面,高价格区间对应低补贴与扩大产能(G_3,E_1)的均衡;中等价格区间对应适配中补贴与维持产能(G_2,E_2)均衡;低价格区间对应高补贴与维持产能(G_1,E_2)均衡,三者均满足子博弈完美纳什均衡的条件。基于上述构建的博弈均衡分析与混合模型,政策强度、金属价格与经济临界点三者的关系如图 5 所示。

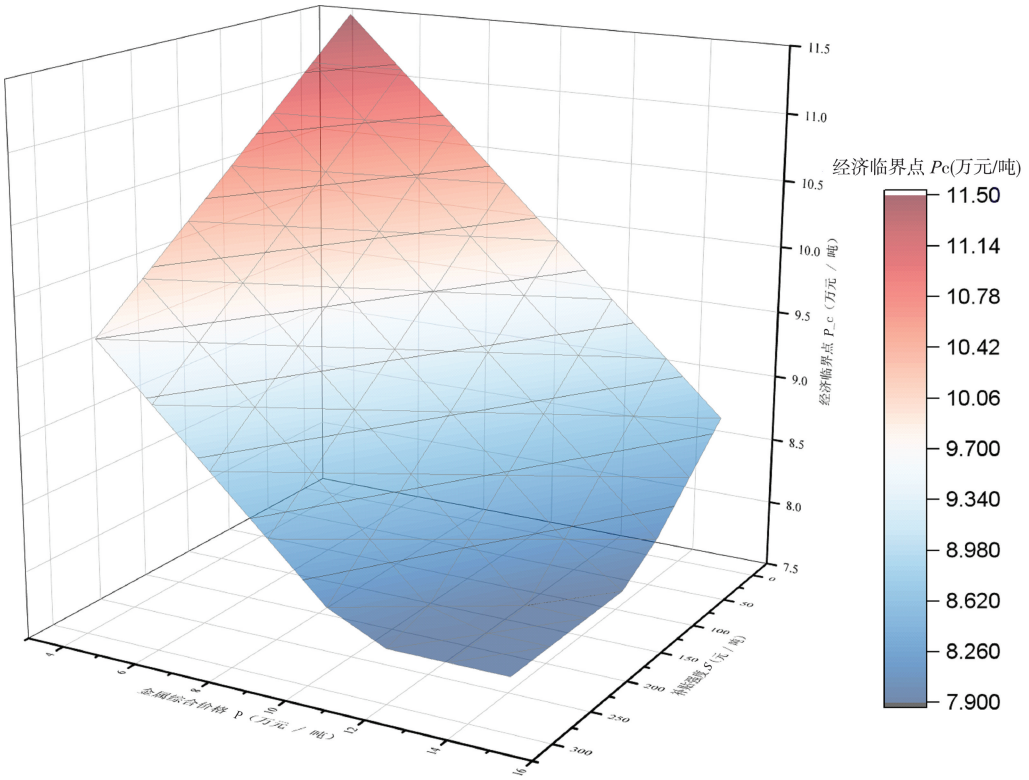


图 5　政策强度、金属价格、经济临界点的三维关系

在实证检验层面,通过混合模型的校准,得出回收率模拟误差≤0.54%,现金流拟合 $R^2=0.92$,量化得出经济临界点在(7.9~11.5)万元/吨区间波动。当补贴强度每提升 100 元/吨,经济临界点将下降(0.5~0.8)万元/吨;当锂价波动率每增加 10%,经济临界点将上升(0.3~0.5)万元/吨。本次实证校准的回收率精度明细与不同情景下经济临界点的量化结果,分别详见表 4~5。

表 4　系统动力学回收率校准数据　　单位:%

年份	回收率实际值	模型模拟值	绝对误差	误差率
2020	72.3	72.6	0.3	0.41
2021	74.8	75.2	0.4	0.54
2022	77.5	77.2	0.3	0.39

表 5　磷酸铁锂电池回收经济临界点量化结果表

情景分类	补贴强度/(元/吨)	锂价波动率/%	经济临界点范围/万元
基准情景	200	15	10.2
高补贴	300	10	7.9~8.4
中补贴	200	20	10.7~11.0
低补贴	100	15	11.5
极端情景[20]	300	25	8.1~8.7

本研究通过理论博弈-量化模型-实证检验,揭示了补贴强度与金属价格的动态耦合匹配规律,为动力电池回收产业的政策优化与企业决策提供了量化支撑依据,也为同类资源循环利用产业的政策设计提供了可借鉴的分析框架。

4 总 结

本研究以磷酸铁锂电池回收为研究对象,通过博弈论明确了不同金属价格区间与补贴强度,产能策略的纳什均衡,构建系统动力学-贝叶斯混合模型量化了经济临界点及政策补贴、金属价格波动率的影响,通过实证验证了动态匹配的补贴机制可以实现企业盈利、政府低成本调控与电池高效回收的多目标协同。

参考文献:

[1] 孙大明,崔洁,王晓杰,等.磷酸铁锂在锂离子电池中的研究进展[J].工程科学学报,2025,47(5):1055-1066.

[2] 姚美娇.磷酸铁锂电池市场热潮涌动[N].中国能源报,2025-04-14(12).

[3] 刘兰胜.磷酸铁锂电池应用现状及发展趋势[J].电池工业,2021,25(5):263-265.

[4] 罗良清,黄婷,杨君.中国碳酸锂期货市场的价格发现功能研究[J].价格月刊,2024(11):1006-2025.

[5] 孔泽思.动力电池回收之乱:隐蔽"小作坊"如何对抗"正规军"[N].每日经济新闻,2024-07-02(08).

[6] 倪晶.新能源汽车动力电池"退役"后何去何从?[N].湖州日报,2025-04-11(A05).

[7] Pratap B,Mohan T V K,Amit R K,et al.Evaluating circular economy strategies for raw material recovery from end-of-life lithium-ion batteries:A system dynamics model [J].Sustainable Production and Consumption,2024,50:191-204.

[8] 孔彬彬.新能源汽车供应链电池竞合与回收策略研究[D].哈尔滨:哈尔滨商业大学,2024.

[9] Krishna M T V,Pratap B,Amit R K,et al.A road map to sustainable mobility:analyzing the dynamics of lithium-ion battery recycling[C]//2021 IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC-India),New Delhi:2021:1-4.

[10] Cui Yue,Teah H Y,Dou Yi,et al.Design and assessment of sustainable spent automobile lithium-ion battery industries in Japan:A system dynamic business model approach [J].Journal of Cleaner Production,2024,479:144078.

[11] 李明亮.基于贝叶斯统计的水文模型不确定性研究[D].北京:清华大学,2012.

[12] Valizadeh A,Amirhosseini M H,Ghorbani Y.Predictive precision in battery recycling:Unveiling lithium battery recycling potential through machine learning [J].Computers & Chemical Engineering,2024,183:108623.

[13] Zhang Jie.Economic benefit analysis of lithium battery recycling based on machine learning algorithm [J].PLOS ONE,2024,19(6):e0303933.

[14] 毛克,刘颜楷.以营销为导向的手机游戏评价系统设计研究:以博弈四要素为基础[J].设计,2017(11):48-49.

[15] 覃毅.格林美绑定巨头[J].21 世纪商业评论,2025(5):70-71.

[16] 雷珂馨.双轮驱动增势强劲宁德时代三季报亮眼[N].中国商报,2025-10-24(04).

[17] 余超,刘宗凯,胡超豪,等.非完美信息博弈综述:对抗求解方法与对比分析[J].计算机学报.2024,47(9):2211-2246.

[18] 林琳.家校合作的困境与反思:基于纳什均衡理论视角[J].湖南第一师范学院学报,2023,23(3):46-52.

[19] 中国有色金属工业协会.中国有色金属工业网锂业分会行业数据库[DB/OL].北京:中国有色金属工业协会,[2025-11-06].https://www.chinania.org.cn.

[20] 张敬轩,石顺祥,李亚萍.基于蒙特卡洛概率模型的多连接体碰撞检测[J].科技创新与应用,2025,15(29):54-57.

(责任编辑:孙洪清;校 对:徐学友)