

信息不对称视角下新能源汽车市场召回的三方演化博弈分析

洪瑶瑶¹, 魏玖长^{1,2}, 田晶晶^{3*}

(1. 中国科学技术大学 管理学院, 安徽 合肥 230026; 2. 中国科学技术大学 公共事务学院, 安徽 合肥 230026;
3. 国家市场监督管理总局 缺陷产品召回技术中心, 北京 100101)

摘要:发展新能源汽车产业已经成为国家战略、社会共识,对实现碳中和目标具有重要意义。新能源汽车召回
是推进产业发展的重要一环,破解软硬件系统信息不对称是完善召回流程的关键。本文认为,政府调查和公众监督
的有效性会影响制造商的策略选择;另外,强调新能源汽车制造商责任意识能够实现政府调查和公众监督下的自主
召回理想状态。本文构建基于信息不对称性下的新能源汽车制造商、政府、公众之间的三方演化博弈模型,并对三
方策略选择进行动态仿真分析。结果表明:(1) 制造商采取“主动召回”策略将有利于其长期目标的实现;(2) 政府
作为新能源汽车市场监管主体,对制造商不能“一罚了之”,采取调查策略是降低市场信息不对称性的关键;(3) 公
众作为有限理性主体,参与监督是其最优选择;(4) 与传统的政府主导监管模式相比,公众参与监管下,制造商实施
自主召回策略的意愿显著增强。本文的研究成果可为降低召回过程的信息不对称性、促进新能源汽车产业可持续
发展提供理论参考。

关键词:三方演化博弈; 信息不对称; 新能源汽车召回; 软硬件系统; 数值仿真

中图分类号: F273

文献标识码: A

文章编号: 1004-6062(2025)05-0214-018

DOI: 10.13587/j.cnki.jieem.2025.05.014

0 引言

我国政府提出在 2030 年实现碳达峰,在 2060 年前实现碳中和的总体目标^[1]。在利好政策激励下,截至 2021 年,我国已经成为全球最大的新能源汽车生产和销售市场。得益于动力电池技术发展和政府财政支持,越来越多的国产造车新势力正在崛起,比亚迪、蔚来等新能源汽车制造商正处于高速发展阶段。截至目前,全球新能源汽车累计销量突破 2,000 万辆,仅 2022 年上半年,全球新能源汽车销量超过 422 万辆,同比增长 66.38%,中国市场新能源汽车销量达到 260 万辆,占全球市场份额 60%以上^[2]。

相较于传统燃油车,新能源汽车拥有更高的智能化程度。软件系统基于数据代码,而代码是制造商的商业秘密,即使这些代码对外公开,没有专业知识的政府监管者和公众也无法获悉软件可能存在的缺陷。这会导致一些尚未成熟的技术被应用于新能源汽车领域,而政府和公众却无从得知。制造商通过炒作人工智能概念吸引意向人群购买,获取超额利润,而车主却承担了安全风险和技术试错损失。目前,部分研究人员主张使用汽车软件开发框架,旨在推动新能源汽车软件标准化建设^[3],协助政府基于标准化开发框架实施监管,降低新能源

汽车软件系统的信息不对称。2021 年 7 月召开的“第七届智能网联汽车技术及标准法规国际交流会”提出,软件缺陷将导致场景识别障碍,且与硬件缺陷相比,软件缺陷不易被政府和公众察觉。当车载软件系统出现问题时,制造商能够识别并获取相关缺陷信息,相较于政府和公众形成信息优势,这种信息不对称将损害政府和公众权益。

产品召回是在制造商违反质量安全标准的情况下自愿或被动采取的行动^[4-5]。当制造商发现产品存在可能引发一系列风险的缺陷时,为了避免公司声誉受损,制造商会选择实施召回策略^[6]。产品召回机制作为汽车售后服务的重要内容,已成为世界各国普遍重视的一项管理机制,在成熟的西方汽车市场得到广泛推行^[7-8]。

为此,本文关注新能源汽车产业智能化进程中一个关键性的理论和现实问题:信息不对称下,如何实施有效的召回监管以保护公共利益,推动我国新能源汽车产业智能化发展?解决这一问题对我国新能源汽车产业健康发展具有重要意义。

一部分学者以供应链为背景进行汽车召回研究。He 等^[9]发现,制造商进行召回活动会威胁其供应链,召回风险与供应中断对制造商决策造成的影

收稿日期: 2023-02-06

基金项目: 中国标准化研究院院长基金项目(282023Y-10409、282022Y-9461);国家自然科学基金项目(72293573)

*** 通讯作者:** 田晶晶(1986—),男,山东潍坊人;国家市场监督管理总局缺陷产品管理中心副研究员;研究方向:缺陷产品召回。

响是不同的。Murphy 等^[10]认为,采用软件辅助驾驶技术的汽车制造商面临的召回风险大于传统制造商,并提出结合保险机制降低召回风险的方法,以此加强供应链应对召回风险的能力。Borah 和 Tellis^[11]发现,召回事件存在一种“负面溢出光环”,负面影响甚至会波及竞争对手的产品,影响行业的销售和资本市场。Byun 等^[12]考查了召回事件发生后顾客的忠诚度,发现顾客的行为特征、促销敏感度以及召回事件本身的特性是影响顾客忠诚度的重要因素。Cavazos 等^[13]和 Gokhale 等^[14]通过调查发现,政府的强力监管可以促进汽车制造商主动召回,并对政府监管如何影响制造商股东权益进行了说明。戴宾等^[15]研究了在供应链中实施产品召回策略对保险合同执行决策的影响。Wang 等^[16]探讨了在召回事件发生后,制造商间的竞争行为对后续销售情况的影响问题,发现制造商间的竞争越少,对销售量的影响越小。

另一部分学者发现,在汽车召回过程中存在博弈关系。Chao 等^[17]基于道德风险构建了制造商和供应商在召回发生后的超模博弈模型,发现可以通过制定合同清单来降低由于信息不对称而产生的成本。Rubel^[18]提出了一个随机微分博弈模型,用以刻画在召回发生时,制造商的最优竞争定价策略。Dai 等^[19]建立了一个博弈模型,用于研究召回在供应链中的可追溯性与产品可靠性之间的相互作用,推导出三种具有内生定价的跟踪模型,论证了两个制造商之间的均衡竞争关系。Mukherjee 和 Chauhan^[20]利用差分博弈模型发现,制造商的任何召回行动都会在短期内对其声誉产生负面影响,但是一次影响不大的召回却能够增加制造商的长期收益。Wang 等^[16]是少数几个通过演化博弈来分析产品召回的研究者,他们探究在产品召回发生时制造商定价策略与政府监管策略的均衡情况。Xia 等^[21]通过演化博弈研究了公众舆论对汽车制造商召回策略以及政府监管策略的影响,发现当公众舆论关注度较低时,制造商总是选择隐瞒缺陷信息。经有国等^[22]引入两阶段动态博弈,研究了信息披露与否对博弈均衡决策的影响。

新能源汽车是一个新兴产业,目前国内外学者对于新能源汽车召回的研究较少,大部分研究集中在传统汽车召回领域。Rupp^[23]将企业的召回策略分为主动召回和被动召回两种类型。Haunschild 和 Rhee^[8]研究主动召回和被动召回带给制造商的压力,探讨了压力如何引起学习行为这一问题。Rhee 和 Haunschild^[7]发现,制造商声誉是组织责任的一种表现,拥有良好声誉的制造商在召回过程中会受到更重的市场惩罚。范建昌等^[24]强调制造商责任

意识,认为被动召回会影响消费者对产品质量的判断。李培功等^[25]研究发现,在汽车召回发生后,资本市场会对制造商进行严厉的惩罚,并且召回公告也会对非召回制造商股价造成影响。Astvansh 等^[26]以美国汽车制造商的缺陷产品为背景进行研究发现,当产品负面报道增多时,制造商自愿召回的意愿也会增强。

Li 等^[27]从中国新能源汽车政策角度进行了研究,发现消费者的意见会影响政府制定新能源汽车政策。目前,学者对信息不对称的研究逐渐深入。黄河和胡旻卉^[28]通过设计契约机制降低合同双方的信息差。李剑等^[29]研究发现,信息共享机制能够有效降低交易损失并提升供应链效率。现有文献对新能源汽车召回的研究有一定的理论贡献,但存在如下问题:第一,现有对新能源汽车召回的研究主要集中在信息对称的条件下进行,鲜有研究者将信息不对称作为研究背景;第二,关于新能源汽车缺陷产品的研究大多忽视召回过程中存在的障碍和问题。第三,研究方法的动态性不足,现有文献聚焦于召回政策本身,将研究重心转向对新能源汽车政策的研究,忽视了公众在召回过程中对缓解信息不对称所起的作用。

本文将重点研究新能源汽车制造商的自主召回行为。引入公众参与监督机制,强化政府调查监管行为,形成制造商主动召回、政府调查、公众监督的良性循环,有效降低新能源汽车市场的信息不对称性,实现新能源汽车产业的可持续健康发展。本文可能的创新点有:首先,区别于以往汽车召回研究未将公众视为利益主体的做法,本文构建制造商、政府和公众三方演化博弈模型。其次,结合信息不对称理论,从新能源汽车制造商信息优势角度出发,研究政府及公众寻求信息平衡的过程。最后,利用演化博弈特点刻画三方主体间合作策略的动态变化过程,并对相关影响因素进行仿真分析。

1 各参与主体利益诉求分析

1.1 制造商利益诉求分析

作为新能源汽车的生产者,制造商是政府监管的主要对象。新能源汽车的智能化程度是决定制造商信息优势的关键因素。制造商通过汽车软件在线升级(over the air, OTA)降低高昂的召回成本,但这种做法同时隐藏着巨大的安全隐患。制造商面临的重要问题是:如何实现新能源汽车有序、可控召回,以降低市场缺陷率并减少缺陷产品对品牌的负面影响。制造商倾向于采取损失最小的策略来处理存在缺陷的新能源汽车。然而,损失最小化并不意味着社会福利最大化。制造商往往会选择

隐瞒缺陷信息,放任缺陷产品在市场流通以转嫁损失。为此,政府依据《缺陷汽车产品召回管理条例》(国令〔2012〕626号),通过调整新能源汽车补贴名单、罚款等方式对制造商行为进行干预和管理,敦促其召回存在缺陷的产品。对制造商来说,主动召回行为会给公众树立负责任的正面形象,能够在一定程度上提升企业品牌声誉。但不可否认的是,召回行为意味着该型号的新能源汽车存在一定问题,会影响制造商股价在资本市场的表现^[25, 30]。在短期利润的诱惑下,制造商会倚仗信息优势,放任存在硬件或软件缺陷的新能源汽车在市场上流通以获取高额回报。当事故率上升、消费者投诉增多,继而引起公众不满与政府调查时,相关部门将发布公告,强制要求制造商召回,并对其进行处罚,惩罚其消极不作为行为。无论是制造商主动召回还是在政府调查后责令召回,都会在不同程度上引起媒体关注,给公众造成一种“低质”的品牌印象^[26, 31]。

1.2 政府利益诉求分析

作为召回政策的主要制定者和执行者,政府一方面肩负着完善相关政策法规的职责,另一方面要履行新能源汽车市场的监督管理职能,对存在软硬件问题的新能源汽车开展调查,并制定相关的政策。这一过程需要投入大量的人力、物力和财力。若政府忽视对缺陷新能源汽车的监管,则会损害消费者权益。新能源汽车产业链庞大,包含诸多零部件供应商与上下游“配套”企业。制造商在本地区投资建厂,带动整个供应链协同发展,为地区经济发展注入活力。在博弈过程中,制造商会积极寻求与政府的政治联系,存在寻租的可能性^[32],这加大了政府对制造商的监管难度。政府的调查监管有助于降低新能源汽车市场的信息不对称程度,从而赢得公众信任和社会认可,提升社会公信力。在现实中,当面对区域经济效益和政绩考核时,地方政府作为利益主体存在自利行为,使得其政策制定和执行不一定完全契合社会福利最大化目标。此外,政府基于招商引资的考虑,不愿对辖区内的制造商实施过于严苛的管理,通常会营造较为宽松的监管环境来吸引新能源汽车制造商投资设厂。因此,地方政府面临着一个收益均衡的挑战,一方面,地方政府期望营造较为宽松的监管环境以吸引新能源汽车制造商;另一方面,又希望对新能源汽车制造商实施有效约束,降低市场上的缺陷产品率,实现收益最大化。

1.3 公众利益诉求分析

作为制造商隐瞒质量缺陷信息的主要受害者,公众参与监督新能源汽车召回过程,一方面可以提高政府监管的效率,为政府调查提供额外信息,降

低政府监管成本;另一方面,公众参与监督可以降低新能源汽车市场信息不对称程度,使得公众在进行购买决策时能够更容易地获取所需信息。例如,公众通过对新能源汽车进行产品评测,将信息公布在社交媒体上,能够降低新能源汽车市场信息不对称性。同时,公众在参与监督的过程中能够获得更多有效信息,帮助参与者获得购买决策的局部信息优势。因此,通过公众监督的方式来制约制造商的行为,能够在不影响地区经济发展的情况下,推动制造商采取主动召回策略。由于公众大多没有专业知识,因而参与监督的有效性显得尤为重要。现实情况下,一些关注新能源汽车市场发展的自媒体从业者才是公众监督的主体。

综上所述,通过厘清不同主体的诉求,挖掘各博弈主体间的相互关系,可为实现新能源汽车市场召回的自监督奠定理论基础。各主体间的博弈关系如图1所示。

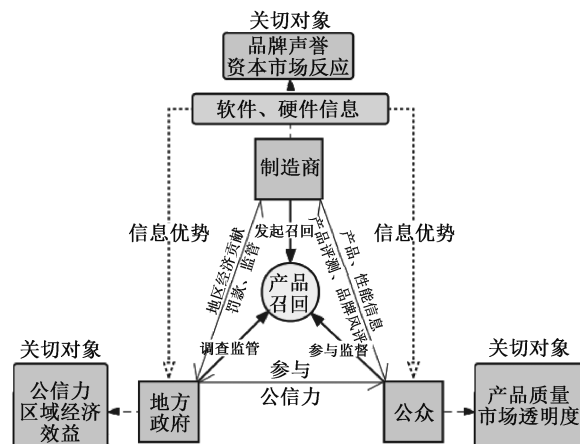


图1 各博弈主体利益关切

Figure 1 The interests of each game player are concerned

2 演化博弈模型构建与求解

2.1 模型假设

为降低市场上的新能源汽车缺陷率,制造商必须严格遵照《缺陷汽车产品召回管理条例》的相关规定执行召回程序,从而保护消费者的各项基本权益。新能源汽车制造商的召回行为不能仅考虑制造商的利益诉求,还应重视政府、公众的利益诉求。基于此,本文假定模型中包括制造商、政府和公众三个利益主体。其中,制造商指新能源汽车制造商,政府指地方政府,公众指参与监督、评测的普通民众。模型参数与表达含义如表1所示。为便于研究,作出如下假设。

H1 制造商、政府、公众的策略选择取决于各自的成本收益分析,在没有政府调查和公众监督的情况下,制造商拥有完全信息优势;政府调查后,对

表 1 模型参数和含义
Table 1 Model parameters and implications

博弈主体	参数	含义
制造商	B_1	制造商的基本利润
	C_1	制造商主动召回成本
	C_2	制造商被动召回成本
	Q_1	制造商软件系统信息优势带来的超额收益
	Q_2	制造商硬件系统信息优势带来的超额收益
	T	公众参与监督, 制造商主动召回获得的收益(市场缺陷率降低, 制造商获得良好声誉)
	J_1	主动召回资本市场损失
	J_2	被动召回资本市场损失(责令召回)
	H	制造商主动召回, 政府发起调查后制造商的损失(扩大召回范围)
	x	制造商发起主动召回概率
	$1-x$	制造商不发起主动召回概率(政府调查后仍发起被动召回)
政府	B_2	地方政府基本收益(公信力、新能源汽车产业税收收入)
	C_3	政府发起调查成本(人工费、设备费、市场秩序维护和相关文件发布等)
	C_4	政府不调查成本(维护市场秩序、发布相关文件等)
	P_1	软件系统信息不对称给政府造成的损失
	P_2	硬件系统信息不对称给政府造成的损失
	a_1	政府调查能够降低软件系统信息不对称的比例
	a_2	政府调查能够降低硬件系统信息不对称的比例
	F	调查发起后对制造商未主动召回的罚款
	G	制造商未召回(主动/被动)给政府造成的损失(汽车市场仍有较高缺陷率, 公信力降低)
	y	政府调查概率
	$1-y$	政府不调查概率
公众	C_5	公众参与监督的成本
	S	政府不调查, 公众监督获得的收益(获得额外产品信息)
	M	制造商召回(主动/被动)后公众获得的收益(产品质量提升)
	D_1	软件系统信息不对称给公众造成的损失
	D_2	硬件系统信息不对称给公众造成的损失
	b_1	公众参与监督能够降低软件系统信息不对称的比例
	b_2	公众参与监督能够降低硬件系统信息不对称的比例
	z	公众监督概率
	$1-z$	公众不监督概率

制造商进行强制召回。

H2 制造商有两种策略选择, 一是主动召回, 指的是无论政府调查与否, 制造商都进行召回, 概率为 x ($0 \leq x \leq 1$); 二是不主动召回, 如果政府对其进行调查, 发布责令召回公告, 制造商被动召回, 如果政府不调查, 则制造商不召回, 概率为 $1-x$ 。

H3 政府有两种策略选择, 一是对制造商发起调查(以下简称“调查”), 选择调查策略的概率为 y ($0 \leq y \leq 1$); 二是不发起调查(以下简称“不调查”), 选择不调查的概率为 $1-y$ 。

H4 公众有两种策略选择, 一是参与对新能源汽车软硬件系统缺陷、召回过程的监督(以下简称“监督”), 进行产品评测, 其概率为 z ($0 \leq z \leq 1$); 二是不参与监督(以下简称“不监督”), 不关注市场上的新能源汽车, 其概率为 $1-z$ 。

H5 新能源汽车制造商为上市公司, 主动召回后的资本市场损失为 J_1 , 小于被动召回后的资本市场损失 J_2 , 即 $J_1 < J_2$ 。制造商在拥有软件、硬件系统信息优势的情况下, 分别获得超额收益 Q_1 、 Q_2 。制造商主动召回时, 若公众参与监督评测, 制造商获得声誉收益 T ; 若政府调查, 会使制造商扩大召回范围, 产生损失 H , 制造商拥有基本利润 B_1 。

H6 政府有基础公信力 B_2 。调查后, 对存在严重质量缺陷又不积极主动召回的制造商, 政府发布责令召回公告, 并进行处罚 F 。软件、硬件系统信息不对称给政府造成的损失分别为 P_1 、 P_2 。政府发起调查的成本 C_3 高于不调查成本 C_4 , 即 $C_3 > C_4$ 。调查后, 软件、硬件系统信息不对称的降低度分别为 a_1 、 a_2 , 且 $a_1 < a_2$ 。政府对制造商被动召回的惩罚为 F , 制造商因召回给政府带来的损失为 G 。

H7 公众参与监督的成本为 C_5 , 获得的额外信息补偿为 S 。当制造商发起召回后, 公众获得产品质量提升收益 M , 软件、硬件系统信息不对称给公众造成的损失分别为 D_1 、 D_1 。公众参与监督软件、硬件系统信息后, 信息不对称降低度分别为 b_1 、 b_2 , 且 $b_1 < b_2$ 。

H8 即使政府进行调查、公众参与监督, 新能源汽车市场信息不对称情况仍始终存在, 即 $a_1 + b_1 < 1$, $a_2 + b_2 < 1$ 。

2.2 模型分析

根据模型假设和参数设定, 得到制造商、政府和公众的三方演化博弈收益矩阵, 如下表 2 所示。

表 2 制造商、政府和公众三方演化博弈收益矩阵
Table 2 Tripartite evolutionary game income matrix of manufacturers, government and public

编号	决策组合	收益矩阵		
		制造商	政府	公众
(1,1,1)	主动召回, 调查, 监督	$B_1 - C_1 + (1 - a_1 - b_1)Q_1 + (1 - a_2 - b_2)Q_2 + T - J_1 - H$	$B_2 - C_3 - (1 - a_1 - b_1)P_1 - (1 - a_2 - b_2)P_2$	$-C_5 + M - (1 - a_1 - b_1)D_1 - (1 - a_2 - b_2)D_2$
(1,1,0)	主动召回, 调查, 不监督	$B_1 - C_1 + (1 - a_1)Q_1 + (1 - a_2)Q_2 - J_1 - H$	$B_2 - C_3 - (1 - a_1)P_1 - (1 - a_2)P_2$	$M - (1 - a_1)D_1 - (1 - a_2)D_2$
(1,0,1)	主动召回, 不调查, 监督	$B_1 - C_1 + (1 - b_1)Q_1 + (1 - b_2)Q_2 + T - J_1$	$B_2 - C_4 - (1 - b_1)P_1 - (1 - b_2)P_2$	$-C_5 + S + M - (1 - b_1)D_1 - (1 - b_2)D_2$
(1,0,0)	主动召回, 不调查, 不监督	$B_1 - C_1 + Q_1 + Q_2 - J_1$	$B_2 - C_4 - P_1 - P_2$	$M - D_1 - D_2$
(0,1,1)	不主动召回, 调查, 监督	$B_1 - C_2 + (1 - a_1 - b_1)Q_1 + (1 - a_2 - b_2)Q_2 - J_2 - F$	$B_2 - C_3 - (1 - a_1 - b_1)P_1 - (1 - a_2 - b_2)P_2 + F$	$-C_5 + M - (1 - a_1 - b_1)D_1 - (1 - a_2 - b_2)D_2$
(0,1,0)	不主动召回, 调查, 不监督	$B_1 - C_2 + (1 - a_1)Q_1 + (1 - a_2)Q_2 - J_2 - F$	$B_2 - C_3 - (1 - a_1)P_1 - (1 - a_2)P_2 + F$	$M - (1 - a_1)D_1 - (1 - a_2)D_2$
(0,0,1)	不主动召回, 不调查, 监督	$B_1 + (1 - b_1)Q_1 + (1 - b_2)Q_2$	$B_2 - C_4 - (1 - b_1)P_1 - (1 - b_2)P_2 - G$	$-C_5 + S - (1 - b_1)D_1 - (1 - b_2)D_2$
(0,0,0)	不主动召回, 不调查, 不监督	$B_1 + Q_1 + Q_2$	$B_2 - C_4 - P_1 - P_2 - G$	$-D_1 - D_2$

2.3 模型构建与求解

根据表 2, 计算制造商、政府和公众三方主体选择策略的期望收益和平均期望收益, 进而构建各主体的复制动态方程。

2.3.1 制造商“主动召回”策略的复制动态方程及其均衡点

依据制造商演化博弈收益矩阵和采取不同策略的概率假设, 计算得到制造商选择“主动召回”策略和“不主动召回”(被动召回)策略的期望收益、决策行为的平均期望收益, 得出制造商演化博弈的复制动态方程及其一阶导数。

制造商选择“主动召回”策略的期望收益 U_{x1} :

$$U_{x1} = y \{ z [B_1 - C_1 + (1 - a_1 - b_1)Q_1 + (1 - a_2 - b_2)Q_2 + T - J_1 - H] + (1 - z) [B_1 - C_1 + (1 - a_1)Q_1 + (1 - a_2)Q_2 - J_1 - H] \} + (1 - y) \{ z [B_1 - C_1 + (1 - b_1)Q_1 + (1 - b_2)Q_2 + T - J_1] + (1 - z) [B_1 - C_1 + Q_1 + Q_2 - J_1] \} \quad (1)$$

制造商选择“不主动召回”策略的期望收益

U_{x0} :

$$U_{x0} = y \{ z [B_1 - C_2 + (1 - a_1 - b_1)Q_1 + (1 - a_2 - b_2)Q_2 - J_2 - F] + (1 - z) \times [B_1 - C_2 + (1 - a_1)Q_1 + (1 - a_2)Q_2 - J_2 - F] \} + (1 - y) \{ z [B_1 + (1 - b_1)Q_1 + (1 - b_2)Q_2] + (1 - z) [B_1 + Q_1 + Q_2] \} \quad (2)$$

制造商决策行为的平均期望收益 $\bar{U}_x$:

$$\bar{U}_x = xU_{x1} + (1 - x)U_{x2} \quad (3)$$

根据 Gates 和 Weibull 对演化博弈理论系统的总结^[33], 制造商“主动召回”策略的复制动态方程 $F(x)$ 为

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(U_{x1} - \bar{U}_x) = x(1 - x)(U_{x1} - U_{x2}) = x(1 - x) [y(J_2 + C_2 - H + F) + zT - (J_1 + C_1)] \quad (4)$$

复制动态方程 $F(x)$ 的一阶导数 $F'(x)$

$$F'(x) = (1 - 2x)[y(J_2 + C_2 - H + F) + zT - (J_1 + C_1)] \quad (5)$$

根据微分方程稳定性定理可知,要实现策略稳定,需要满足 $F(x) = \frac{dx}{dt} = 0, F'(x) = \frac{dF(x)}{dx} < 0$, 此时该点为演化均衡点 ESS (Evolutionary Stable Strategy)。

(1) 当 $y = y^* = \frac{(J_1 + C_1) - zT}{-H + J_2 + C_2 + F}$ 时, $F(x) \equiv 0$, 该结果意味着 x 轴上的点均处于稳定状态, 即制造商的策略选择不随时间的变化而改变。

(2) 当 $y \neq \frac{(J_1 + C_1) - zT}{-H + J_2 + C_2 + F}$ 时, 得 $x = 0$ 与 $x = 1$ 为 $F(x)$ 的两个可能的均衡点。根据复制动态方程的稳定性定理可知, 当 $\frac{dF(x)}{dx} < 0$ 时, 该点为演

化均衡点 ESS。

1) 当 $0 < y < \frac{(J_1 + C_1) - zT}{-H + J_2 + C_2 + F}$ 时, $\frac{dF(x)}{dx} \Big|_{x=0} < 0, \frac{dF(x)}{dx} \Big|_{x=1} > 0$, 得到 $x = 0$ 为制造商行为的演化均衡点, 此时制造商倾向于选择“不主动召回”策略。

2) 当 $\frac{(J_1 + C_1) - zT}{-H + J_2 + C_2 + F} < y < 1$ 时, $\frac{dF(x)}{dx} \Big|_{x=0} > 0, \frac{dF(x)}{dx} \Big|_{x=1} < 0$, 得到 $x = 1$ 为制造商行为的演化均衡点, 此时制造商倾向于选择“主动召回”策略。

根据以上分析, 将上述结论在三维立体相位中进行呈现, 可以得到制造商行为的动态演化相位图, 如下图 2 所示。

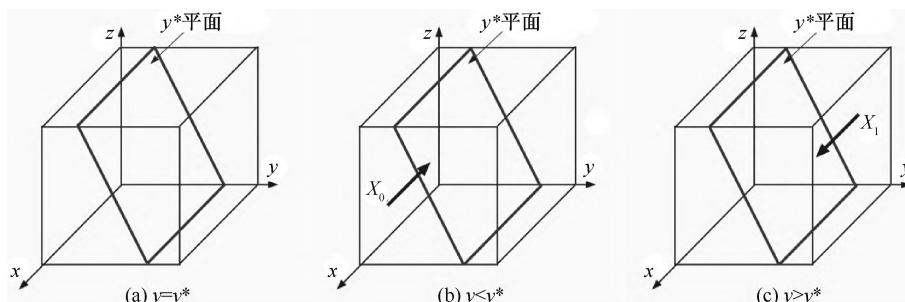


图 2 制造商动态演化相位

Figure 2 Manufacturer dynamic evolution phase diagram

图 2 中, 制造商选择“不主动召回”策略的概率对应于正方体在 y^* 平面左侧部分 X_0 的体积 V_{X_0} ; 而选择“主动召回”策略的概率对应于正方体在 y^* 平面右侧部分 X_1 的体积 V_{X_1} , 计算得:

$$V_{X_0} = \int_0^1 \int_0^1 \frac{(J_1 + C_1) - zT}{-H + J_2 + C_2 + F} dz dx = \frac{2(J_1 + C_1) - T}{2(-H + J_2 + C_2 + F)} \quad (6)$$

$$V_{X_1} = 1 - V_{X_0} = \frac{T + 2(C_2 - H + J_2 - J_1 - C_1 + F)}{2(-H + J_2 + C_2 + F)} \quad (7)$$

命题 1 制造商选择“主动召回”策略的概率会随着公众参与监督情况下制造商主动召回的收益 T 、政府对制造商的罚款 F 、被动召回的资本市场损失 J_2 和成本 C_2 的增加而提高; 同时, 制造商选择“主动召回”策略的概率会随着制造商主动召回的资本市场损失 J_1 、成本 C_1 、扩大召回范围的损失 H 的增加而降低。

证明: 对 V_{X_1} 各参数分别求一阶偏导数, 得到

$$\frac{\partial V_{X_1}}{\partial T} > 0, \frac{\partial V_{X_1}}{\partial J_2} > 0, \frac{\partial V_{X_1}}{\partial C_2} > 0, \frac{\partial V_{X_1}}{\partial F} > 0, \frac{\partial V_{X_1}}{\partial H} < 0, \frac{\partial V_{X_1}}{\partial C_1} < 0, \frac{\partial V_{X_1}}{\partial J_1} < 0. \text{ 因此, 当 } T, J_2, J_2, F \text{ 上升或 } H, C_1, J_1 \text{ 下降时, 都将使新能源汽车制造商选择“主动召回”策略的概率增加。}$$

由命题 1 可知, 政府对新能源汽车制造商不合规行为的监管能够有效促使制造商采取措施控制新能源汽车质量, 且政府处罚力度越大, 制造商越倾向于采取主动召回策略。同时, 资本市场反应是影响新能源汽车制造商行为的重要因素。相较于主动召回, 强制召回对制造商股价的打击更大。为规避股价下跌风险并维护股东权益, 新能源汽车制造商更倾向于采取主动召回策略。公众监督对于制造商的行为也有一定约束作用, 能够促使制造商采取主动召回策略从而降低市场缺陷率。公众通过测评给予正面评价, 帮助制造商建立声誉优势。不可否认的是, 召回成本是制造商在决定是否采取召回时首要考虑的因素。现实情况下, 被动召回的

成本要远高于主动召回。新能源汽车制造商从规避风险的角度考虑,会更倾向于采取主动召回策略。因此,为促进制造商对缺陷新能源汽车进行主动召回,政府调查和公众监督必不可少。

2.3.2 政府“调查”策略的复制动态方程及其均衡点

依据政府是否进行调查的演化博弈收益矩阵和采取不同策略的概率假设,计算得到政府选择“调查”策略和“不调查”策略的期望收益、决策行为的平均期望收益,进而得出政府演化博弈的复制动态方程及其一阶导数。

政府选择“调查”策略的期望收益 U_{y1} :

$$U_{y1} = x\{z[B_2 - C_3 - (1 - a_1 - b_1)P_1 - (1 - a_2 - b_2)P_2] + (1 - z)[B_2 - C_3 - (1 - a_1)P_1 - (1 - a_2)P_2]\} + (1 - x)\{z[B_2 - C_3 - (1 - a_1 - b_1)P_1 - (1 - a_2 - b_2)P_2 + F] + (1 - z)[B_2 - C_3 - (1 - a_1)P_1 - (1 - a_2)P_2 + F]\} \quad (8)$$

政府选择“不调查”策略的期望收益 U_{y0} :

$$U_{y0} = x\{z[B_2 - C_4 - (1 - b_1)P_1 - (1 - b_2)P_2] + (1 - z)[B_2 - C_4 - P_1 - P_2]\} + (1 - x)\{z[B_2 - C_4 - (1 - b_1)P_1 - (1 - b_2)P_2 - G] + (1 - z)[B_2 - C_4 - P_1 - P_2 - G]\} \quad (9)$$

制造商决策行为的平均期望收益 $\bar{U}_y$:

$$\bar{U}_y = yU_{y1} + (1 - y)U_{y0} \quad (10)$$

根据演化博弈理论,政府“调查”策略的复制动态方程 $F(y)$ 为

$$\begin{aligned} F(y) &= \frac{dy}{dt} = y(U_{y1} - \bar{U}_y) = y(1 - y)(U_{y1} - U_{y0}) \\ &= y(1 - y)[-x(F + G) - C_3 + C_4 + a_1P_1 + a_2P_2 + F + G] \end{aligned} \quad (11)$$

复制动态方程 $F(y)$ 的一阶导数 $F'(y)$ 为

$$F'(y) = (1 - 2y)[-x(F + G) - C_3 + C_4 + a_1P_1 + a_2P_2 + F + G] \quad (12)$$

根据微分方程稳定性定理,要实现策略稳定,

需要满足 $F(y) = \frac{dy}{dt} = 0, F'(y) = \frac{dF(y)}{dy} < 0$, 此时该点为演化均衡点 ESS。

(1) 当 $x = x^* = \frac{-C_3 + C_4 + a_1P_1 + a_2P_2 + F + G}{F + G}$ 时,

$F(y) \equiv 0$, 该结果表示 y 轴上的点均处于稳定状态, 即政府的策略选择不随时间的变化而改变。

(2) 当 $x \neq x^* = \frac{-C_3 + C_4 + a_1P_1 + a_2P_2 + F + G}{F + G}$ 时, 得

$y=0$ 与 $y=1$ 为 $F(y)$ 的两个可能的均衡状态点。根据复制动态方程的稳定性定理可知, 当 $\frac{dF(y)}{dy} < 0$ 时, 该点为演化均衡点 ESS。

1) 当 $0 < x < \frac{-C_3 + C_4 + a_1P_1 + a_2P_2 + F + G}{F + G}$ 时,

$\left. \frac{dF(y)}{dy} \right|_{y=0} > 0, \left. \frac{dF(y)}{dy} \right|_{y=1} < 0$, 得到 $y=1$ 为政府行为演化的均衡点, 此时政府倾向于选择“调查”策略。

2) 当 $\frac{-C_3 + C_4 + a_1P_1 + a_2P_2 + F + G}{F + G} < x < 1$ 时,

$\left. \frac{dF(y)}{dy} \right|_{y=0} < 0, \left. \frac{dF(y)}{dy} \right|_{y=1} > 0$, 得到 $y=0$ 为政府行为的演化均衡点, 此时政府倾向于选择“不调查”策略。

根据以上分析, 将上述结论在三维立体相位中进行可视化呈现, 可以得到政府行为的动态演化相位图, 如下图 3 所示。

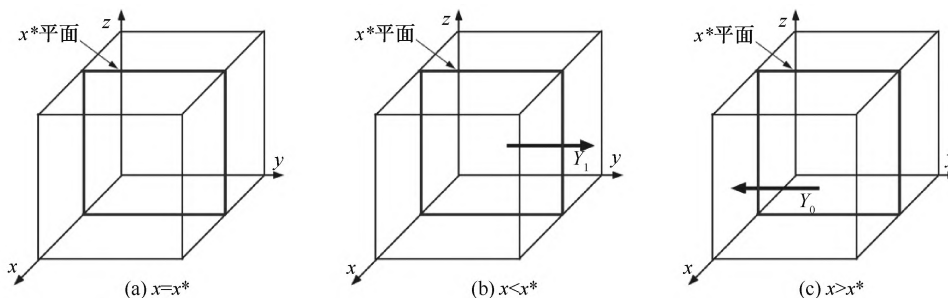


图3 政府动态演化相位

Figure 3 Government dynamic evolution phase diagram

图3中, 政府“调查”策略的概率对应于正方体在 x^* 平面后侧部分 Y_1 的体积 V_{Y_1} , “不调查”策略的概率对应于正方体在 x^* 平面前侧部分 Y_0 的体积 V_{Y_0} , 计算得:

$$\begin{aligned} V_{Y_1} &= \int_0^1 \int_0^1 \frac{-C_3 + C_4 + a_1P_1 + a_2P_2 + F + G}{F + G} dy dz \\ &= \frac{-C_3 + C_4 + a_1P_1 + a_2P_2 + F + G}{F + G} \end{aligned} \quad (13)$$

$$V_{y_0} = 1 - V_{y_1} = \frac{C_3 - C_4 - a_1 P_1 - a_2 P_2}{F + G} \quad (14)$$

命题 2 政府选择“调查”策略的概率会随着政府不调查的成本 C_4 、软件系统信息不对称降低比例 a_1 和硬件系统信息不对称降低比例 a_2 、软件系统信息不对称给政府造成的损失 P_1 、硬件系统信息不对称给政府造成的损失 P_2 的增加而提升;同时,政府选择“调查”策略的概率会随着政府发起调查成本 C_3 、罚款 F 、制造商未召回给政府造成的损失 G 的增加而降低。

证明:对 V_{y_1} 各参数分别求一阶偏导数,得到

$$\frac{\partial V_{y_1}}{\partial C_4} > 0, \frac{\partial V_{y_1}}{\partial P_1} > 0, \frac{\partial V_{y_1}}{\partial P_2} > 0, \frac{\partial V_{y_1}}{\partial a_1} > 0, \frac{\partial V_{y_1}}{\partial a_2} > 0,$$

$\frac{\partial V_{y_1}}{\partial C_3} < 0, \frac{\partial V_{y_1}}{\partial F} < 0, \frac{\partial V_{y_1}}{\partial G} < 0$ 。因此,当 C_4, P_1, P_2, a_1, a_2 增加或 C_3, F, G 减少时,都将使政府选择“调查”策略的概率增加。

由命题 2 可知,调查成本是影响政府决策的重要因素。较高的调查成本会抑制政府调查的积极性。若发起调查后增加的成本较少,那么政府很乐意通过发起调查来规范新能源汽车市场。由于软硬件信息的不对称性,政府难以对新能源汽车市场实施有效监管,而调查行为能够通过降低信息不对称性,减少其对新能源汽车产业发展的不利影响。政府基于地区经济发展考虑,将采取“调查”策略来规范市场秩序。此外,罚款作为一种直接监管工具,能够通过经济惩罚促使制造商主动召回,有效遏制制造商生产缺陷新能源汽车而又故意不发起召回的行为。因此,要促使政府采取“调查”策略,需要综合考虑区域经济效益、调查发起成本、软硬件信息不对称等情况。

2.3.3 公众“监督”策略的复制动态方程及其均衡点

依据公众是否进行监督的演化博弈收益矩阵和采取不同策略的概率假设,计算得到公众选择“监督”策略和“不监督”策略的期望收益、决策行为的平均期望收益,得出公众演化博弈的复制动态方程及其一阶导数。

公众选择“监督”策略的期望收益 U_{z1} :

$$\begin{aligned} U_{z1} = & x \{ y [-C_5 + M - (1 - a_1 - b_1) D_1 \\ & - (1 - a_2 - b_2) D_2] + (1 - y) [-C_5 \\ & + S + M - (1 - b_1) D_1 - (1 - b_2) D_2] \} \\ & + (1 - x) \{ y [-C_5 + M - (1 - a_1 - b_1) D_1 \\ & - (1 - a_2 - b_2) D_2] + (1 - y) [-C_5 \\ & + S - (1 - b_1) D_1 - (1 - b_2) D_2] \} \end{aligned} \quad (15)$$

公众选择“不监督”策略的期望收益 U_{z0} :

$$\begin{aligned} U_{z0} = & x \{ y [M - (1 - a_1) D_1 - (1 - a_2) D_2] \\ & + (1 - y) [M - D_1 - D_2] \} + (1 - x) \\ & \times \{ y [M - (1 - a_1) D_1 - (1 - a_2) D_2] \\ & + (1 - y) [-D_1 - D_2] \} \end{aligned} \quad (16)$$

公众决策行为的平均期望收益 $\bar{U}_z$:

$$\bar{U}_z = z U_{z1} + (1 - z) U_{z0} \quad (17)$$

根据演化博弈理论,政府“调查”策略的复制动态方程 $F(z)$ 为

$$\begin{aligned} F(z) = & \frac{dz}{dt} = z(U_{z1} - \bar{U}_z) = z(1 - z)(U_{z1} - U_{z0}) \\ = & z(1 - z) [-yS - C_5 + b_1 D_1 + b_2 D_2 + S] \end{aligned} \quad (18)$$

复制动态方程 $F(z)$ 的一阶导数 $F'(z)$ 为

$$F'(z) = (1 - 2z) [-yS - C_5 + b_1 D_1 + b_2 D_2 + S] \quad (19)$$

根据微分方程稳定性定理可知,要实现策略稳定,需要满足 $F(z) = \frac{dz}{dt} = 0, F'(z) = \frac{dF(z)}{dz} < 0$, 此时该点为演化均衡点 ESS。

(1) 当 $y = y^* = \frac{-C_5 + b_1 D_1 + b_2 D_2 + S}{S}$ 时,

$F(z) = 0$, 该结果表示 z 轴上的点均处于稳定状态,即此时公众的策略选择不随时间的变化而改变。

(2) 当 $y \neq \frac{-C_5 + b_1 D_1 + b_2 D_2 + S}{S}$ 时,得 $z = 0$

与 $z = 1$ 为 $F(z)$ 的两个可能的均衡点。根据复制动态方程的稳定性定理可知,当 $\frac{dF(z)}{dz} < 0$ 时,该点为演化均衡点 ESS。

1) 当 $0 < y < \frac{-C_5 + b_1 D_1 + b_2 D_2 + S}{S}$ 时,

$\left. \frac{dF(z)}{dz} \right|_{z=0} > 0, \left. \frac{dF(z)}{dz} \right|_{z=1} < 0$, 得到 $z = 1$ 为公众行为的演化均衡点,此时公众倾向于选择“监督”策略。

2) 当 $\frac{-C_5 + b_1 D_1 + b_2 D_2 + S}{S} < y < 1$ 时,

$\left. \frac{dF(z)}{dz} \right|_{z=0} < 0, \left. \frac{dF(z)}{dz} \right|_{z=1} > 0$, 得到 $z = 0$ 为公众行为的演化均衡点,此时公众倾向于选择“不监督”策略。

根据以上分析,将上述结论在三维立体相位中进行可视化呈现,可以得到公众行为的动态演化相位图,如下图 4 所示。

图 4 中,公众“监督”策略的概率对应于正方体在 y^* 平面左侧部分 Z_1 的体积 V_{z1} ,“不监督”策略的概率对应于正方体在 y^* 平面右侧部分 Z_0 的体积

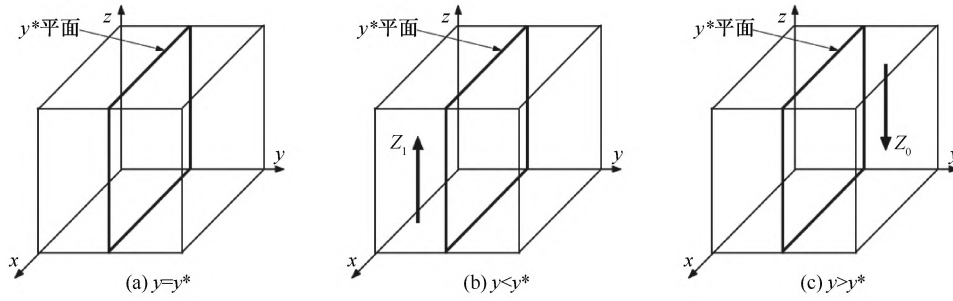


图4 公众动态演化相位

Figure 4 Public dynamic evolution phase diagram

V_0 , 计算得:

$$V_{z_1} = \int_0^1 \int_0^1 \frac{-C_5 + b_1 D_1 + b_2 D_2 + S}{S} dx dz = \frac{-C_5 + b_1 D_1 + b_2 D_2 + S}{S} \quad (20)$$

$$V_{z_0} = 1 - V_{z_1} = \frac{C_5 - b_1 D_1 - b_2 D_2}{S} \quad (21)$$

命题3 公众“监督”策略概率会随着公众参与监督获得的额外收益 S 、公众参与监督后软硬件系统信息不对称降低的比例 b_1 和 b_2 、信息不对称给公众造成的损失 D_1 和 D_2 的增加而提高;同时,公众“监督”策略的概率会随着其参与监督的成本 C_5 的增加而降低。

证明: 由于 $0 < \frac{-C_5 + b_1 D_1 + b_2 D_2 + S}{S} < 1$, 因此 $\frac{-C_5 + b_1 D_1 + b_2 D_2}{S} < 0$, 对 V_{z_1} 各参数分别求一阶偏导数, 得到 $\frac{\partial V_{z_1}}{\partial S} > 0$, $\frac{\partial V_{z_1}}{\partial b_1} > 0$, $\frac{\partial V_{z_1}}{\partial b_2} > 0$, $\frac{\partial V_{z_1}}{\partial D_1} > 0$, $\frac{\partial V_{z_1}}{\partial D_2} > 0$, $\frac{\partial V_{z_1}}{\partial C_5} < 0$ 。因此, 当 S 、 b_1 、 b_2 、 D_1 、 D_2 上升或 C_5 下降时都将使公众选择“监督”策略的概率增加。

由命题3可知, 公众作为理性个体, 有较高的购买新能源汽车的意愿时, 即参与监督能够获得更多的额外收益(不同个体的效用函数不一致)时, 便会通过各种形式参与监督, 以获取更多新能源汽车的质量信息。当新能源汽车市场上的信息不对称程度较高时, 公众会不由自主地关注这一现象。越来越多的公众将参与到监督活动中来, 并且监督的有效性将带给公众更高的参与热情。但是较高的监督成本也会降低公众参与监督的积极性。另外, “搭便车现象”广泛存在于公众对新能源汽车软硬件系统的监督活动中, 公众更愿意成为质量信息接受者, 而非发布者。因此, 在没有外部激励的情况下, 公众参与监督更多是一种自发的自利行为。

2.4 演化博弈模型均衡策略分析

在对新能源汽车制造商、政府和公众主体策略稳定性分析的基础上, 进一步对三方系统进行整体分析, 得到演化博弈三维动力系统:

$$\begin{cases} F_x(x, y, z) = x(1-x)[y(J_2 + C_2 - H + F) + zT - (J_1 + C_1)] \\ F_y(x, y, z) = y(1-y)[-x(F + G) - C_3 + C_4 + a_1 P_1 + a_2 P_2 + F + G] \\ F_z(x, y, z) = z(1-z)[-yS - C_5 + b_1 D_1 + b_2 D_2 + S] \end{cases} \quad (22)$$

由 $F_x(x, y, z) = 0$, $F_y(x, y, z) = 0$, $F_z(x, y, z) = 0$ 可得13个系统均衡点 $E_1 \sim E_{12}$, 其中8个系统均衡点 $E_1 \sim E_8$ 为

$$E_1(0, 0, 0), E_2(1, 0, 0), E_3(0, 1, 0), E_4(0, 0, 1), E_5(1, 1, 0), E_6(0, 1, 1), E_7(1, 0, 1), E_8(1, 1, 1)$$

三方演化博弈的 Jacobian 矩阵为

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

其中,

$$\begin{aligned} a_{11} &= (1-2x)[y(C_2 + F - H + J_2) + zT - (C_1 + J_1)], \\ a_{12} &= x(1-x)(C_2 - H + F + J_2), \\ a_{13} &= x(1-x)T, \\ a_{21} &= -y(1-y)(zF + G), \\ a_{22} &= (1-2y)[-x(G + zF) + (a_1 P_1 + a_2 P_2 + F + P_1 + C_4 + G - C_3)], \\ a_{23} &= -y(1-y)xF, \\ a_{31} &= 0, \\ a_{32} &= -z(1-z)S, \\ a_{33} &= (1-2z)[-Sy + (b_1 D_1 + b_2 D_2 + S - C_5)]. \end{aligned}$$

根据 Lyapunov 间接法^[34], 雅可比矩阵的特征

根实部均为负数,则均衡点是渐进稳定的;雅可比矩阵的特征根中有正实部,则均衡点是不稳定的;雅可比矩阵的特征根无实部且为正数,则均衡点的

稳定性不能判定。由于 $E_9 \sim E_{12}$ 存在符号相异的特征值,因而均衡点 $E_9 \sim E_{12}$ 是不稳定的。 $E_1 \sim E_8$ 均衡点的稳定性分析如表 3 所示。

表 3 均衡点稳定性分析
Table 3 Stability analysis of equilibrium points

均衡点	Jacobian 矩阵特征值		
	λ_1	λ_2	λ_3
$E_1(0,0,0)$	$-C_1 - J_1$	$S - C_5 + b_1D_1 + b_2D_2$	$C_4 - C_3 + F + G + a_1P_1 + a_2P_2$
$E_2(1,0,0)$	$C_1 + J_1$	$S - C_5 + b_1D_1 + b_2D_2$	$C_4 - C_3 + F + G + a_1P_1 + a_2P_2$
$E_3(0,1,0)$	$-C_5 + b_1D_1 + b_2D_2$	$C_2 - C_1 + F - H - J_1 + J_2$	$C_3 - C_4 - F - G - a_1P_1 - a_2P_2$
$E_4(0,0,1)$	$T - C_1 - J_1$	$C_5 - S - b_1D_1 - b_2D_2$	$C_4 - C_3 + F + G + a_1P_1 + a_2P_2$
$E_5(1,1,0)$	$-C_5 + b_1D_1 + b_2D_2$	$C_3 - C_4 - F - a_1P_1 - a_2P_2$	$C_1 - C_2 - F + H + J_1 - J_2$
$E_6(1,0,1)$	$-T + C_1 + J_1$	$C_5 - S - b_1D_1 - b_2D_2$	$C_4 - C_3 + a_1P_1 + a_2P_2$
$E_7(0,1,1)$	$C_5 - b_1D_1 - b_2D_2$	$C_3 - C_4 - F - a_1P_1 - a_2P_2$	$-C_1 + C_2 + F - H - J_1 + J_2 + T$
$E_8(1,1,1)$	$C_5 - b_1D_1 - b_2D_2$	$C_3 - C_4 - a_1P_1 - a_2P_2$	$C_1 - C_2 - F + H + J_1 - J_2 - T$

由上述 8 个均衡点的稳定性条件可知,制造商、政府和公众的策略选择是由其各自的收益与成本决定的。政府对新能源汽车制造商的监管是其职责所在,发起调查能够降低新能源汽车市场的信息不对称性。借助公众监督力量,政府可以更好地解决这一问题。因此,在理想状态下,制造商主动召回,政府进行调查、公众积极监督。本文将三方主体召回过程中的策略演变分为 3 个阶段:初始阶段、发展阶段、成熟阶段。

初始阶段(0,0,0):制造商的目标是利润最大化,而召回事件会消耗大量企业资源并且对新能源汽车制

造商的社会声誉造成影响。因此,在没有政府调查和公众监督的情况下,制造商倾向于借助绝对的信息优势来获取最大收益,从而采取“不主动召回”策略。新能源汽车作为新兴产业,在其发展初期,由于相关法律政策和行业规范不健全,政府为了扶持其成长,并带动地区经济的发展,倾向于采取“不调查”的策略。相较于传统燃油车,新能源汽车在市场上的占有率相对较低。此外,公众普遍持有“政府是市场监管的第一责任人”的观念,因此更倾向于采取“不监督”的策略。综上所述,该阶段的对应均衡点为 $E_1(0,0,0)$,稳定性条件见表 4,系统演化路径见图 5(a) 所示。

表 4 均衡点稳定性条件
Table 4 Stability condition of equilibrium point

均衡点	稳定性条件
$E_1(0,0,0)$	$S + b_1D_1 + b_2D_2 < C_5, C_4 + F + G + a_1P_1 + a_2P_2 < C_3$
$E_2(1,0,0)$	不稳定点
$E_3(0,1,0)$	$b_1D_1 + b_2D_2 < C_5, C_2 + F + J_2 < C_1 + H + J_1, C_3 < C_4 + F + G + a_1P_1 + a_2P_2$
$E_4(0,0,1)$	$T < C_1 + J_1, C_5 < S + b_1D_1 + b_2D_2, C_4 + F + G + a_1P_1 + a_2P_2 < C_3$
$E_5(1,1,0)$	$b_1D_1 + b_2D_2 < C_5, C_3 < C_4 + F + a_1P_1 + a_2P_2, C_1 + H + J_1 < J_2 + C_2 + F$
$E_6(1,0,1)$	$C_1 + J_1 < T, C_5 < S + b_1D_1 + b_2D_2, C_4 + a_1P_1 + a_2P_2 < C_3$
$E_7(0,1,1)$	$C_5 < b_1D_1 + b_2D_2, C_3 < C_4 + F + a_1P_1 + a_2P_2, C_2 + F + J_2 + T < C_1 + H + J_1$
$E_8(1,1,1)$	$C_5 < b_1D_1 + b_2D_2, C_3 < C_4 + a_1P_1 + a_2P_2, C_1 + H < C_2 + F + J_1 + J_2 + T$

发展阶段 1(0,0,1):公众是最先对新能源汽车市场信息不对称做出反应的一方。作为产品的购买者和使用者,他们能够第一时间发现软硬件系统中存在的缺陷。公众通过社交媒体发布自己的使用体验和感受,在互联网上发布关于新能源汽车缺陷信息^[35]。这些信息的传播会引起更多人的关注,并促使他们加入到对新能源汽车的监督过程中,从而部分降低了新能源汽车市场的信息不对称性。

因此,该阶段的对应均衡点为 $E_4(0,0,1)$,系统演化路径见图 5(b) 所示。舆情传播同时能够引起政府对于新能源汽车问题的关注。

发展阶段 2(0,1,1):政府是市场监管的第一责任人。公众对新能源汽车市场存在的信息不对称问题反应强烈。政府担心自身公信力会因此受损,并可能进一步引发更大的舆论压力,倾向于采取较为严厉的监管措施。具体而言,政府会对公

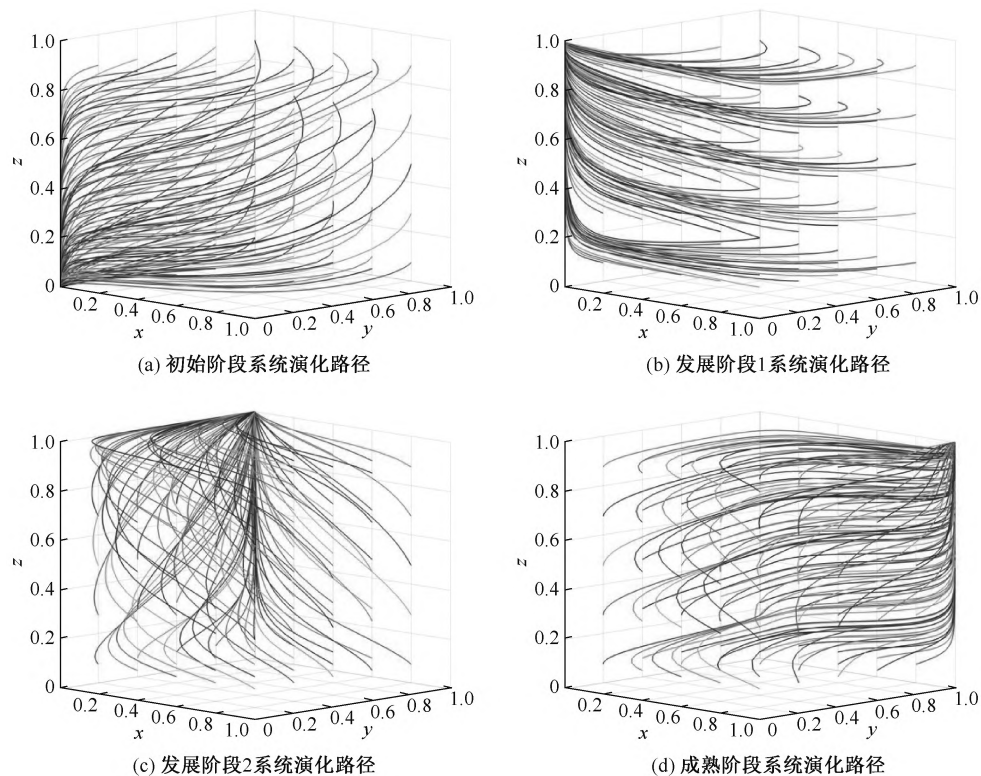


图5 系统演化路径

Figure 5 System evolution path

众反应强烈的新能源汽车产品发起深入调查,并依据调查结果对制造商进行惩罚,包括发布强制召回公告并实施处罚。这些举措旨在规范汽车市场秩序,形成对制造商行为的强有力约束。在这一过程中,政府从硬件和软件方面对新能源汽车制造商进行了全面监管。因此,该阶段对应均衡点 $E_7(0,1,1)$,系统演化路径见图 5(c)。在政府严格的监管措施推动下,制造商易加强自我监督。

成熟阶段(1,1,1):考虑到公众的舆论压力和政府的行政压力,制造商倾向于进行自我监管以避免更大损失,即新能源汽车制造商采取“主动召回”策略。在这一阶段,公众积极参与监督,对新能源汽车的质量进行评测,并通过社交媒体传播关于新能源汽车的硬件质量信息。政府则通过深入调查,收集新能源汽车软硬件系统缺陷信息,并以公告形式向公众公布。若制造商未主动召回,政府将强制责令其召回;若制造商已发起主动召回,政府则会进一步调查,以发现更多制造商可能未提及的问题,并据此扩大召回范围。在公众选择“监督”策略、政府采取“调查”策略的情况下,制造商的最优

选择是“自主召回”,从而避免声誉受损、资本市场损失以及来自政府的处罚,同时树立起“负责任”的企业正面形象。因此,该阶段对应均衡点 $E_8(1,1,1)$ 。系统演化路径如图 5(d)所示。

以上四个阶段的演化时间均为 50。

3 演化博弈模型数值仿真分析

为了验证上述理论推演出的系统稳定性结果,并进一步探讨各主体初始意愿和模型的主要参数对系统稳定性的影响,本文借助 Matlab2021a 对博弈三方的演化行为进行数值仿真。为使系统最终达到理想状态,即 $E_8(1,1,1)$ 成为系统的演化稳定策略,需满足以下三个条件: $C_5 < b_1 D_1 + b_2 D_2$, $C_3 < C_4 + a_1 P_1 + a_2 P_2$, $C_1 + H < C_2 + F + J_1 + J_2 + T$ 。考虑我国新能源汽车召回监管的现实情况,并参考新能源汽车产业政策^[27, 36-38]、汽车召回过程^[39-40]等文献,设定模型参数的初始值如表 5 所示。

3.1 初始策略仿真分析

根据参数初始值,探讨不同初始策略对三方演化结果的影响,如图 6 所示。由图 6(a)、6(b)、6(c)、6(d)可知,制造商、政府和公众的策略选择曲

表5 参数初始值

Table 5 Initial value of parameter

B_1	C_1	C_2	Q_1	Q_2	T	J_1	J_2	H	B_2	C_3	C_4	P_1	P_2	a_1	a_2	F	G	C_5	S	M	D_1	D_2	b_1	b_2
20	10	15	15	10	5	10	20	5	20	15	5	10	10	0.4	0.8	10	15	5	10	5	10	10	0.3	0.5

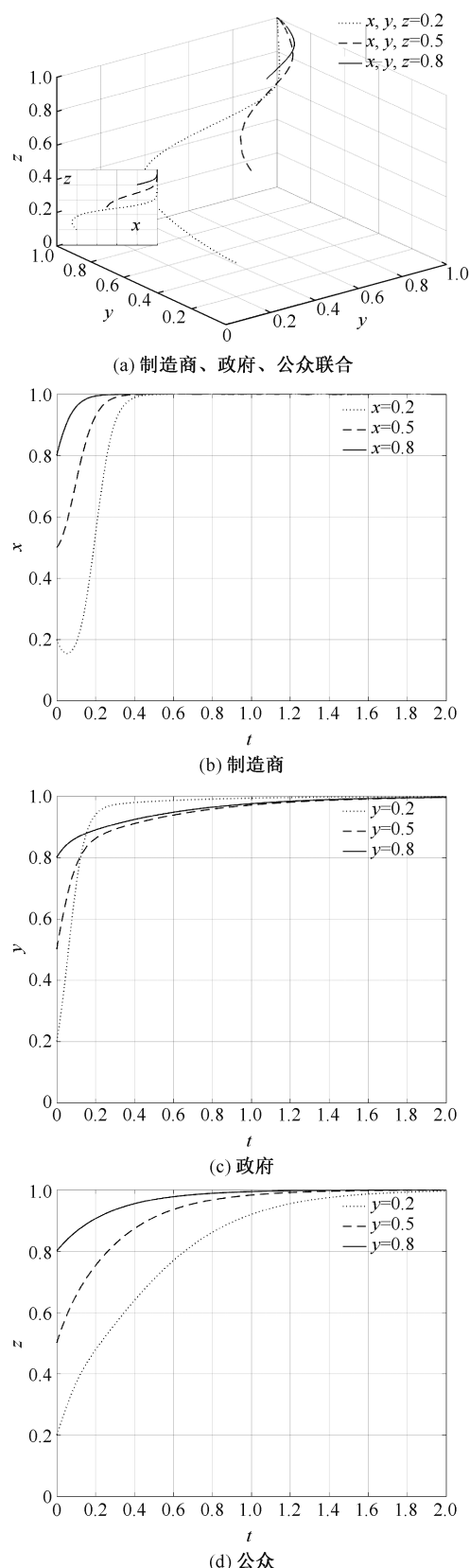


图6 初始策略对系统演化结果的影响

Figure 6 The effect of initial strategy on system evolution

线在演化稳定前均不会发生重叠,并且路径依赖。三方主体初始意愿均对收敛速度产生影响。具体而言,制造商和公众策略选择曲线的收敛速度随初

始策略比例的提升而加快,即当初始策略选择越接近均衡点时,系统的收敛速度越快。这说明初始策略的选择对制造商和公众达到演化均衡的速度至关重要。值得注意的是,制造商的收敛速度明显快于公众,这表明制造商作为市场竞争中的积极参与者,对市场具有较高的敏感度。相比之下,公众对市场的关注度相对较弱,对市场变化的反应较迟缓,更多时候扮演着策略跟随者的角色。政府的情况则有所不同,当初始意愿较低时,其反应速度最迅速;而随着初始意愿的增加,其反应速度逐渐变慢。总体而言,政府的反应速度明显快于制造商和公众。作为行政管理机构,政府对社会舆论反映强烈的问题往往会采取“雷霆手段”。当初始调查概率较低时,市场信息不对称性较高,容易引发强烈的社会不满,此时政府的反应尤为迅速。而在较高的初始调查概率下,市场信息不对称性降低,舆论反应不明显,政府反应速度则会减慢,甚至可能出现消极应对的情况。因此,政府调查、公众积极参与监管对制造商采取“主动召回”策略有积极的推动作用,能够迅速降低市场信息不对称性,推动新能源汽车市场系统进入良性循环状态。

3.2 敏感性分析

为保证仿真结果的科学性,将三方主体的初始策略概率 x, y, z 均设置为 0.5。相较于硬件系统缺陷,软件系统缺陷更加不易被发现。本文始终认为,无论是政府调查还是公众监督,对软件系统的信息不对称性降低程度始终低于对硬件系统的信息不对称性降低程度,即 $a_1 < a_2, b_1 < b_2$ 。

3.2.1 政府调查有效性对演化结果的影响

为分析政府调查有效性对演化博弈过程和结果的影响,将 a_1 和 a_2 分别赋值为 0.3 和 0.5、0.7 和 0.4、0.6 和 0.8,演化系统中三方决策变化如图 7(a)、7(b)、7(c) 所示。仿真结果显示,政府调查有效性越高,制造商执行“主动召回”策略越积极;当政府调查有效性较低时,制造商在采取“主动召回”策略一段时间后会有所松懈,即仿真曲线在 $x = 1$ 处保持一段时间的稳定后会发生短暂震荡。调查有效性也会影响政府采取“调查”策略的积极性,当调查有效性较高时,政府的调查策略将更快达到稳定状态;当调查有效性较低时,政府对是否有必要采取调查策略持观望态度,其仿真曲线在 0.1 与 0.7 之间震荡。公众始终是政府采取调查策略的受益者。由于调查有效性较低,新能源汽车市场信息高度不对称,这促使公众采取监督策略,以削弱制造商的信息优势,即仿真曲线更快地趋近于 $x = 1$ 。以上结果说明,有效的政府调查能够迫使制造商积极采取主动召回策略,政府也更有动力采取行动以减

少因信息不对称导致的社会福利损失,而较低政府调查有效性则迫使公众自发采取监督策略以维护自身权益。因此,政府调查有效性均会对制造商、政府和公众策略产生影响。

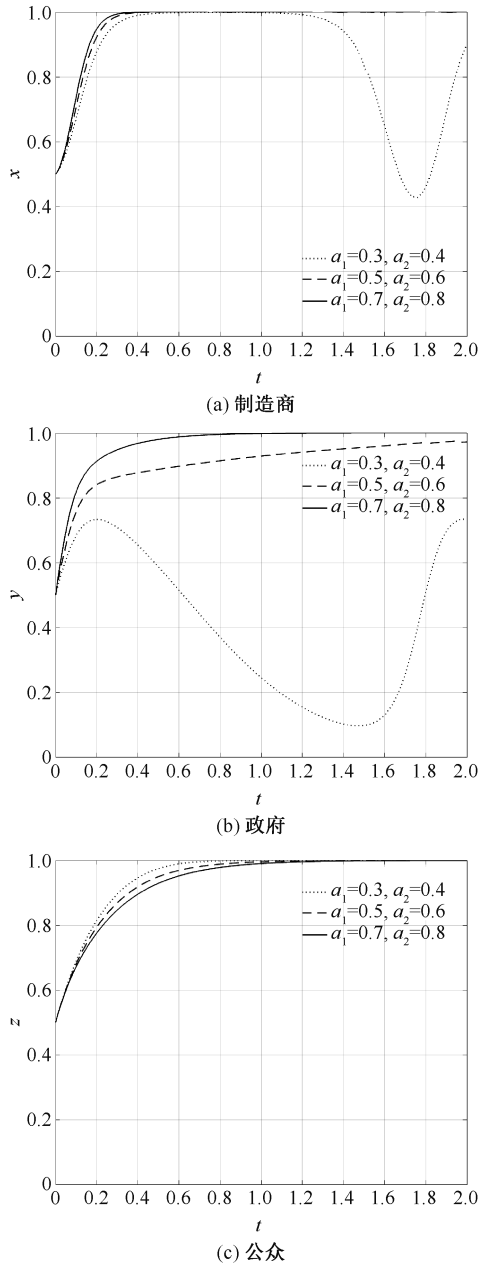


图7 政府调查对演化结果的影响
Figure 7 The influence of government investigation intensity on the outcome of evolution

3.2.2 公众监督有效性对演化结果的影响

为分析公众监督有效性对演化博弈过程和结果的影响,将 b_1 和 b_2 分别赋值为 0.1 和 0.4、0.6 和 0.2、0.5 和 0.7,演化系统中三方决策变化如图 8 (a)、8(b)、8(c) 所示。演化结果显示,公众监督有效性对于制造商和政府的演化策略影响有限,制造商和政府始终会采取主动召回和调查策略。公众监督有效性越低,制造商采取自主召回策略的演化

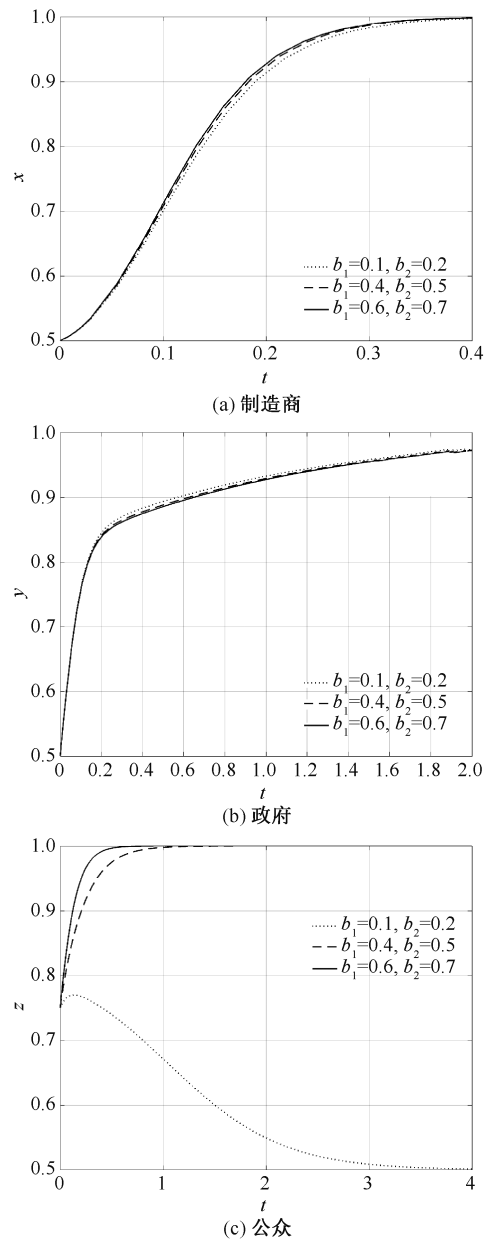


图8 公众监督对演化结果的影响
Figure 8 The influence of public supervision on the outcome of evolution

时间越长。此时,由于新能源汽车市场信息高度不对称,对政府公信力产生不利影响,因而政府会积极采取调查策略以减少社会福利损失。而监督有效性对公众自身策略选择影响较大。当监督有效性越高,仿真曲线在更短时间内趋向于 $z=1$,表现为公众将更积极地采取监督策略;较低的调查有效性则会改变公众的策略选择,仿真曲线趋向于 $z=0$,表示公众从监督中所获得的收益不足以抵消为此付出的成本。作为理性个体,公众将会放弃监督策略,转而寄希望于政府调查。因此,公众监督有效性对制造商和政府策略选择的影响有限,仅对其演化时间有影响;而对公众影响较大,不仅能够影

响其演化时间,甚至可能改变公众的策略选择。

3.2.3 政府处罚对演化结果的影响

为分析地方政府处罚 F 对演化博弈过程和结果的影响,将处罚 F 分别赋值为 5、10、15,演化系统三方决策变化如图 9(a)、9(b)、9(c) 所示。对制造商而言,较高的政府处罚能够显著缩短其策略达到稳定状态的时间。这是因为,尽管制造商可能因信息优势而获得超额收益,但这些收益无法抵消巨额罚单带来的损失。除此之外,制造商还面临品牌声誉受损、股价波动等不利因素的影响。因此,当面临高额政府处罚时,制造商会迅速做出反应,以避免不必要的损失。对于政府而言,其仿真曲线在不

同的演化阶段有不同的表现。具体而言,当演化时间 t 在 $[0, 0.2]$ 范围内时,罚款的增加会促使仿真曲线更快地趋向于均衡状态。当演化时间 $t > 0.2$ 时,较低的罚款反而更有利于缩短达到均衡状态的时间。这说明在短期内,罚款是政府有效应对新能源汽车市场不确定性的手段;但长期来讲,政府更倾向于采用调查策略来规制制造商行为。对于公众而言,政府罚款数额的高低对其策略选择和演化时间影响有限。从仿真曲线来看,无论罚款多少,高、中、低三条曲线几乎重合。因此,不同数额的政府罚款仅影响制造商和政府的演化时间,而公众策略几乎不受政府罚款的影响。

4 研究结论与政策建议

本文基于新能源汽车召回中各主体利益的视角,运用演化博弈理论,对新能源汽车制造商、地方政府和社会公众三方主体的演化均衡结果进行分析,并且对各主体之间的利益诉求、演化行为和影响因素进行了详细分析,得出如下研究结论:第一,当制造商自主召回的收益大于不自主召回的收益时,制造商自主召回的意愿将变强,会对已经出售的缺陷新能源汽车进行主动召回,并且选择主动降低信息不对称性,树立企业负责任的正面形象,以获取良好的品牌声誉和高额的资本市场回报,在长期内获得最大收益;第二,当政府积极调查的收益大于不调查的收益时,政府将加大监管力度,降低新能源汽车市场信息不对称性,同时借助社会公众参与监督的力量以降低自身监管成本,引导制造商实施自主召回策略,助力新能源汽车产业可持续健康发展;第三,当公众参与监督新能源汽车召回的收益大于不参与的收益时,公众将积极参与监督,以降低市场信息不对称性,保护自身权益。最后,政府调查和公众监督的有效性影响三方主体的策略选择,而政府罚款只是规制制造商行为的一个短期手段。

为促进新能源汽车召回三方主体的协同,本文提出如下建议:

作为新能源汽车召回的当事方和软硬件质量把控的第一责任单位,制造商应当增强社会责任意识,正视因信息优势而获得的短期超额收益,将树立企业形象、获得品牌声誉和资本市场回报作为长期发展目标,解决政府调查和公众监督过程中发现的问题,提升软硬件系统的信息透明度,公开可能存在的问题并实施主动召回,并对生产过程加强管理,同时带动供应链上下游零部件企业协同发展,促进地方经济转型升级。

政府是实施监管的主要角色。在政府的工作

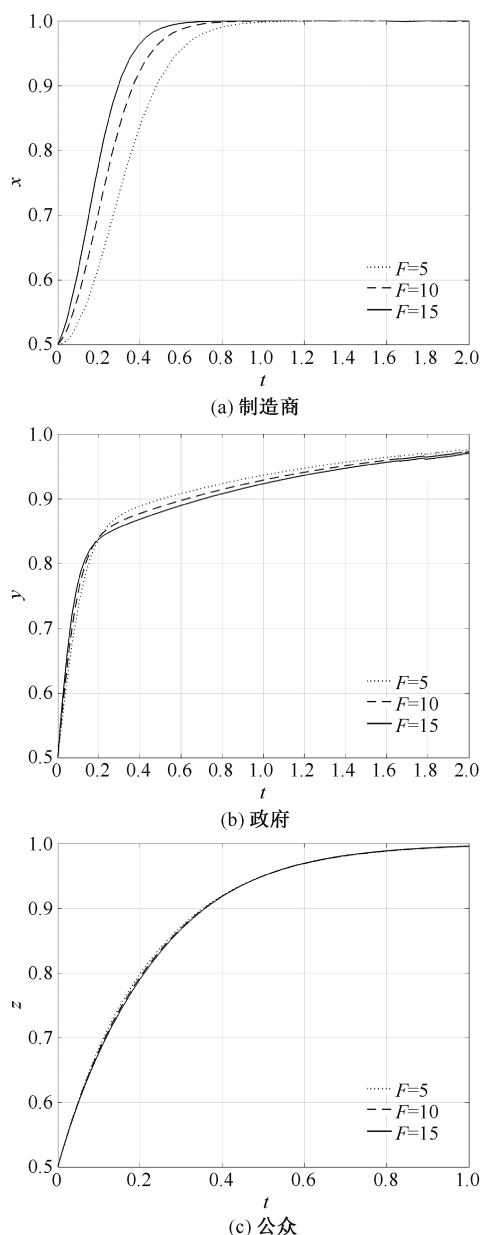


图 9 政府处罚对系统演化结果的影响

Figure 9 The effect of government incentive and punishment on the outcome of system evolution

中,面对“调查取证难”问题,不能“一罚了之”。政府对新能源汽车制造商的监管应当是引导性的,即以产业扶持、政策支持为主,消极处罚为辅。相关部门应优化营商环境,加快健全新能源汽车产业监管制度,完善软硬件系统体系标准,尽快落实对新能源汽车产业的支持政策,通过“以奖代罚”支持技术发展,切实助力新能源汽车产业有序健康发展。政府需兼顾支持者和监管者的角色,并适当寻找监管合作者,引导社会力量参与对新能源汽车产业的监管,从而降低市场信息不对称性,维护政府公信力。

公众作为新能源汽车市场信息不对称的直接受害者,在新能源汽车召回过程中往往因自身参与意识不足而处于信息劣势的被动地位。同时,公众又是新能源汽车的使用者,他们拥有得天独厚的条件来参与监督。通过对软硬件系统存在缺陷的新能源汽车进行评测,借助社交媒体向制造商施加舆论压力,公众能够降低市场信息不对称性。综上所述,为了构建新能源汽车产业新业态,需要政府积极调查、公众参与监督、制造商主动召回这三方面的努力。

参 考 文 献

- [1] 林伯强. 碳中和进程中的中国经济高质量增长[J]. 经济研究, 2022, 57(1): 56-71.
LIN B Q. China's high-quality economic growth in the process of carbon neutrality [J]. Economic research Journal, 2022, 57(1): 56-71.
- [2] 杨天悦, 赵语涵, 夏骅. 2022 世界新能源汽车大会圆满落幕[N]. 北京日报, 2022-8-29(2).
YANG T R, ZHAO Y H, XIA H. 2022 World new energy vehicle conference concludes successfully [N]. Beijing Daily, 2022-8-29(2).
- [3] KHAN A M, BLACKBURN T D. AUTILE Framework: An AUTOSAR driven agile development methodology to reduce automotive software defects[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 15(3): 3283-3290.
- [4] SHUGAN S M. Brand loyalty programs: Are they shams? [J]. Marketing Science, 2005, 24(2): 185-193.
- [5] 熊中楷, 刘学勇, 郭年. 缺陷汽车召回所需安排的最优维修店数目[J]. 管理工程学报, 2012, 26(1): 156-161.
XIONG Z K, LIU X Y, GUO N. Optimal allocation of repair shops in the automobile recall[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2012, 26(1): 156-161.
- [6] LIU A X, LIU Y, LUO T. What drives a firm's choice of product recall remedy? The impact of remedy cost, product hazard, and the CEO[J]. Journal of Marketing, 2016, 80(3): 79-95.
- [7] RHEE M, HAUNSCHILD P R. The liability of good reputation: A study of product recalls in the US automobile industry[J]. Organization Science, 2006, 17(1): 101-117.
- [8] HAUNSCHILD P R, RHEE M. The role of volition in organizational learning: The case of automotive product recalls[J]. Management Science, 2004, 50(11): 1545-1560.
- [9] HE L, RONG Y, SHEN Z-J M. Product sourcing and distribution strategies under supply disruption and recall risks [J]. Production and Operations Management, 2020, 29(1): 9-23.
- [10] MURPHY F, PÜTZ F, MULLINS M, et al. The impact of autonomous vehicle technologies on product recall risk[J]. International Journal of Production Research, 2019, 57(20): 6264-6277.
- [11] BORAH A, TELLIS G J. Halo (spillover) effects in social media: Do product recalls of one brand hurt or help rival brands? [J]. Journal of Marketing Research, 2016, 53(2): 143-160.
- [12] BYUN K-A (K), DUHAN D F, DASS M. The preservation of loyalty halo effects: An investigation of the post-product-recall behavior of loyal customers [J]. Journal of Business Research, 2020, 116: 163-175.
- [13] CAVAZOS D E, RUTHERFORD M, BERMAN S L. Assessing the effect of government surveillance on firm super-erogation: The case of the US automobile industry [J]. Business Ethics-A European Review, 2018, 27(2): 156-163.
- [14] GOKHALE J, BROOKS R M, TREMBLAY V J. The effect on stockholder wealth of product recalls and government action: The case of Toyota's accelerator pedal recall [J]. The Quarterly Review of Economics and Finance, 2014, 54(4): 521-528.
- [15] 戴宾, 苏洋洋, 李建斌. 产品召回供应链中线性保险合同与订货决策[J]. 管理工程学报, 2020, 34(2): 145-155.
DAI B, SU Y Y, LI J B. Linear insurance contracting and ordering strategies in a supply chain with product recall [J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2020, 34(2): 145-155.
- [16] WANG C, SONG C, XU L. Evolutionary strategies of consumer federation and manufacturer under recall mechanism[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2021, 41(1): 2403-2415.
- [17] CHAO G H, IRAVANI S M R, SAVASKAN R C. Quality improvement incentives and product recall cost sharing contracts [J]. Management Science, 2009, 55(7): 1122-1138.
- [18] RUBEL O. Profiting from product-harm crises in competitive markets[J]. European Journal of Operational

- Research, 2018, 265(1): 219-227.
- [19] DAI B, NU Y, XIE X, et al. Interactions of traceability and reliability optimization in a competitive supply chain with product recall[J]. *European Journal of Operational Research*, 2021, 290(1): 116-131.
- [20] MUKHERJEE A, CHAUHAN S S. The impact of product recall on advertising decisions and firm profit while envisioning crisis or being hazard myopic[J]. *European Journal of Operational Research*, 2021, 288(3): 953-970.
- [21] XIA P, LIU Z, QING Q. An evolutionary game analysis of vehicle recall supervision considering the impact of public opinion[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2023, 74(7): 1640-1653.
- [22] 经有国, 宋榭, 刘震. 需求信息不对称下基于战略库存的信息披露与契约选择[J]. *中国管理科学*, 2022, 30(7): 47-58.
- JING Y G, SONG J, LIU Z. Information disclosure and contract selection under asymmetric information with strategic inventory[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2022, 30(7): 47-58.
- [23] RUPP N G. Are government initiated recalls more damaging for shareholders? Evidence from automotive recalls, 1973-1998 [J]. *Economics Letters*, 2001, 71(2): 265-270.
- [24] 范建昌, 倪得兵, 唐小我. 产品责任、责令召回与供应链中的产品质量选择[J]. *管理工程学报*, 2018, 32(4): 101-109.
- FAN J C, NI D B, TANG X W. Product liability, mandatory recall and quality choices in supply chains[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2018, 32(4): 101-109.
- [25] 李培功, 酷卫华, 肖珉. 资本市场对缺陷产品的惩戒效应——基于我国汽车行业召回事件的研究[J]. *经济管理*, 2011, 33(4): 118-124.
- LI P G, CU W H, XIAO M. The punishment effect of capital market on the automotive-recall firms—Evidence from automobile industry[J]. *Business and Management Journal*, 2011, 33(4): 118-124.
- [26] ASTVANS V, WANG Y-Y, SHI W. The effects of the news media on a firm's voluntary product recalls[J]. *Production and Operations Management*, 2022, 31(11): 4223-4244.
- [27] LI W, LONG R, CHEN H. Consumers' evaluation of national new energy vehicle policy in China: An analysis based on a four paradigm model[J]. *Energy Policy*, 2016, 99: 33-41.
- [28] 黄河, 胡晏升. 不对称信息下信息技术服务外包合同设计[J]. *中国管理科学*, 2022, 30(4): 144-154.
- HUANG H, HU Min-hui. Contract design for IT outsourcing under asymmetric information[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2022, 30(4): 144-154.
- [29] 李剑, 易兰, 肖瑶. 信息不对称下基于区块链驱动的供应链减排信息共享机制研究[J]. *中国管理科学*, 2021, 29(10): 131-139.
- LI J, YI L, XIAO Y. Research on information sharing mechanism of emission reduction in supply chain based on blockchain under information asymmetry [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2021, 29(10): 131-139.
- [30] LEE L F, HUTTON A P, SHU S. The role of social media in the capital market: Evidence from consumer product recalls [J]. *Journal of Accounting Research*, 2015, 53(2): 367-404.
- [31] BEATTIE G, DURANTE R, KNIGHT B, et al. Advertising spending and media bias: Evidence from news coverage of car safety recalls[J]. *Management Science*, 2021, 67(2): 698-719.
- [32] 魏江, 赵齐禹, 刘洋. 新型政商关系和企业业绩稳健性:来自上市公司的证据[J]. *管理工程学报*, 2021, 35(4): 1-13.
- WEI J, ZHAO Q Y, LIU Y. The new type of government-business relationship and corporate performance stability: Evidence from Chinese listed companies [J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2021, 35(4): 1-13.
- [33] GATES J M, WEIBULL J W. Evolutionary game theory-Weibull, JW [J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 1996, 78(3): 850-853.
- [34] FREIDOVICH L B, KHALIL H K. Lyapunov-based switching control of nonlinear systems using high-gain observers[J]. *Automatica*, 2007, 43(1): 150-157.
- [35] ZHU L, WANG B. Stability analysis of a SAIR rumor spreading model with control strategies in online social networks[J]. *Information Sciences*, 2020, 526: 1-19.
- [36] 朱艳阳, 卢君生, 张顺明. 智能化能对冲新能源汽车补贴退坡的影响吗?——基于 CGE 模型的分析[J]. *系统工程理论与实践*, 2022, 42(9): 2426-2446.
- ZHU Y Y, LU J S, ZHANG S M. Can intelligentization hedge the effect of purchase subsidy decrease for new energy vehicle? Based on computable general equilibrium (CGE) approach [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2022, 42(9): 2426-2446.
- [37] 李创, 叶露露, 王丽萍. 新能源汽车消费促进政策对潜在消费者购买意愿的影响[J]. *中国管理科学*, 2021, 29(10): 151-164.
- LI C, YE L L, WANG L P. The influence of new energy vehicle consumption promotion policy on the purchase intention of potential consumers[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2021, 29(10): 2426-2446.
- [38] 袭希, 侯永, 赵健宇. 低碳技术在市场中扩散的逾渗模型——基于新能源乘用车产业的仿真分析[J]. *系统工程*, 2020, 38(5): 46-54.
- XI X, HOU Y, ZHAO J Y. A percolation model on diffusion of low-carbon technology in the market—Simulation

- analysis on new-energy passenger vehicle industry [J].
Systems Engineering, 2020, 38(5): 46-54.
- [39] PAGIAVLAS S, KALAINANAM K, GILL M, et al.
Regulating product recall compliance in the digital age:
Evidence from the “safe cars save lives” campaign[J].
Journal of Marketing, 2022, 86(5): 135-152.
- [40] WANG Y-Y, WANG T, CALANTONE R. The effect of
competitive actions and social media perceptions on offline
car sales after automobile recalls [J]. International
Journal of Information Management, 2021, 56:102257.

A three-way evolutionary game analysis of new energy vehicle market recall under the perspective of information asymmetry

HONG Yaoyao¹, WEI Jiuchang^{1,2}, TIAN Jingjing^{3*}

(1. School of Management, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 2. School of Public Affairs, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. Samr Defective Product Recall Technical Center, Beijing 100101, China)

Abstract: The development of new energy automobile industry has become a national strategy and social consensus, which is of great significance in promoting regional economic development, economic structure transformation and upgrading, and reaching the goal of “double carbon”. Intelligent and networked new energy vehicles have brought convenience and speed to travel, and more and more consumers have begun to favor new energy vehicles. However, with the increasing penetration of new energy vehicles, new energy vehicles relying on complex hardware and software systems are prone to quality defects, and like traditional fuel vehicles, new energy vehicles are also facing the problem of defective product recalls.

Compared with traditional fuel vehicles, new energy vehicles have a higher degree of intelligent networking. Complex hardware and software systems give new energy vehicle manufacturers an absolute information advantage, both in the automotive market and in the recall process. New energy vehicle manufacturers can gain excessive returns through information asymmetry, while uninformed vehicle owners suffer losses. Reducing information asymmetry in the recall process is essential for the sustainable development of the new energy vehicle industry. Manufacturer-initiated recalls can minimize information asymmetry, but they also face high recall costs, and in the absence of external monitors, manufacturers will choose to conceal information about quality defects. However, existing studies mainly focus on the study of manufacturers’ behavior in the recall process, and the game relationship between parties in the automotive recall process has rarely been mentioned. Therefore, this study combines finite rationality and information asymmetry to study the recall process in the new energy vehicle market, and proposes effective measures to reduce information asymmetry and promote the sustainable development of the new energy vehicle industry.

the first part, the current situation of the new energy vehicle industry, the background of the study and the general framework are introduced. In the second part, the interests of each recall participating subject are analyzed. In the third part, firstly, taking information asymmetry as the entry point, a three-party evolutionary game model involving manufacturers, government and the public is constructed. Secondly, the three-party benefit matrix is calculated, the strategy game phase diagram is constructed, and the model is solved and the corresponding conclusions are obtained. Further, the three-party evolutionary dynamics system is established, and the equilibrium strategy analysis is based on Jacobian matrix to obtain the stability conditions of the equilibrium point. Finally, four possible evolutionary paths in the initial stage, developmental stage and maturity stage are simulated. In the fourth part, numerical simulation is used to explore the evolution paths of the system under different combinations of initial strategies, and sensitivity analysis is conducted on the efforts of the government and the public to reduce information asymmetry. In the fifth part, the research conclusions of this paper are drawn and policy recommendations are made.

The following conclusions and managerial insights are obtained from this study. I. Manufacturers consider strategy selection more from a cost-benefit perspective, and only if it is more in line with the long-term profitability of new energy vehicle manufacturers, manufacturers will choose active recall strategies to reduce market information asymmetry. The main purpose of government regulation is to guide manufacturers to initiate recalls. Whether or not the public participates in the regulation depends on the asymmetric information in the market, and the public will participate in the regulation when the public interest is jeopardized. Manufacturers should focus on

brand building, abandon short-term thinking, and aim for capital market returns and long-term market returns as the goal of corporate development. The government should focus on guiding rather than penalizing, and support the development of the new energy vehicle industry by providing incentives instead of penalties, with industry support and policy support as the main focus. The public should actively defend their rights and voice their opinions, respond to quality defects to the regulatory authorities, safeguard their rights and interests, and reduce market information asymmetry. In conclusion, this study uses the theory of finite rationality to construct an evolutionary game model to study the information asymmetry in the recall process of new energy vehicles, which provides a new idea for the regulation of new energy vehicle recalls, and the conclusions obtained can provide a theoretical basis for the healthy development of the new energy vehicle industry.

Key words: Three-way evolutionary game; Information asymmetry; New energy vehicle recalls; Software and hardware system; Numerical simulation

Received Date: 2023-02-06

Funded Project: The China National Institute of Standardization (CNIS) Director's Fund Project (282023Y-10409, 282022Y-9461); The Major Programs of the National Natural Science Foundation of China (72293573)

* Corresponding author