DOI:10.3724/j.issn.1004-3918.2026.082

动静态奖惩机制下新能源汽车供应链绿色协同创新演化博弈研究

刘岩峰， 崔岳彪

（渤海大学 管理学院，辽宁 锦州 121013）

摘 要： 为探讨新能源汽车供应链核心企业的绿色协同创新行为，引入政府静态、动态奖惩机制，构建包含政府、电池供应商和整车制造商的三方演化博弈模型，分析制造商承担供应商研发成本比例、“搭便车”收益及创新风险等因素对博弈主体策略选择的影响。研究结果表明：①当电池供应商和整车制造商开展协同创新的收益与“搭便车”收益之差大于其各自承担的成本时，系统可达到稳定均衡状态，此时政府采取宽松监管策略，电池供应商和整车制造商选择绿色协同创新。②在静态奖惩机制下，整车制造商分担的研发成本比例越高，电池供应商实施绿色协同创新的意愿越强；“搭便车”收益和创新风险的提高，会抑制电池供应商与整车制造商的协同创新行为；政府的奖励与惩罚措施能够有效促进电池供应商与整车制造商的绿色协同创新行为。③在动态奖惩机制下，政府对电池供应商的奖励与惩罚上限越高，电池供应商与整车制造商向绿色协同创新策略收敛的速度越快。④随着政府、电池供应商与整车制造商初始合作意愿的提升，动态奖惩机制在推动系统向绿色协同创新均衡演化方面较静态机制更具优势。本研究为供应链企业绿色协同创新提供了理论参考，有助于推动新能源汽车供应链向低碳化和高效化方向发展。

关键词： 新能源汽车供应链；绿色协同创新；动静态奖惩机制；成本分担；三方演化博弈

中图分类号： F274；F224 **文献标志码：** A **文章编号：** 1004-3918(2026)04-0850-15

Evolutionary Game of Green Collaborative Innovation in New Energy Vehicle Supply Chain Under Dynamic and Static Reward-Penalty Mechanisms

LIU Yanfeng, CUI Yuebiao

（School of Management, Bohai University, Jinzhou 121013, Liaoning China）

Abstract: This study introduces both dynamic and static reward-penalty mechanisms implemented by the government, and constructs a tripartite evolutionary game model involving the government, battery suppliers, and vehicle manufacturers to explore green collaborative innovation behavior of core enterprises in the new energy vehicle supply chain. It further analyzes how the proportion of suppliers' R&D costs shared by manufacturers, free-riding gains, and innovation risks affect the strategic choices of the game participants. The research findings reveal that: ① When the difference between the benefits obtained from collaborative innovation and the payoffs from free-riding for battery suppliers and vehicle manufacturers is greater than the corresponding costs borne by each party, the optimal and stable equilibrium state can be effectively achieved. This equilibrium state is specifically

收稿日期： 2025-12-18 **修回日期：** 2026-04-17 **接受日期：** 2026-04-23

基金项目： 国家自然科学青年基金项目(71401015)；教育部产学合作协同育人项目(231107634084144)；辽宁省教育厅基本科研项目(LJ112510167011)

作者简介： 刘岩峰(1979-)，女，讲师，博士，主要研究方向为供应链创新，E-mail:liuyfmail@126.com

引用格式： 刘岩峰，崔岳彪. 动静态奖惩机制下新能源汽车供应链绿色协同创新演化博弈研究[J]. 河南科学，2026，44(4)：850-864.

Liu Y F，Cui Y B. Evolutionary game of green collaborative innovation in new energy vehicle supply chain under dynamic and static reward-penalty mechanisms[J]. Henan Science，2026，44(4)：850-864.

manifested as follows: the government implements loose regulatory policies, and both battery suppliers and vehicle manufacturers choose to engage in green collaborative innovation strategies. ② Under the static reward-penalty mechanism, the higher the proportion of R&D costs shared by vehicle manufacturers, the stronger the willingness of battery suppliers to engage in green collaborative innovation. Conversely, increases in free-riding payoffs as well as higher levels of innovation risk tend to inhibit collaborative innovation behavior between battery suppliers and vehicle manufacturers. In addition, government reward and penalty measures can promote green collaborative innovation between the two parties. These findings highlight the critical role of economic incentives and risk mitigation in fostering cooperative innovation behavior. ③ Under the dynamic reward-penalty mechanism, the higher the upper limits of the rewards and penalties imposed by the government on battery suppliers, the faster both battery suppliers and vehicle manufacturers converge toward green collaborative innovation strategy. This convergence accelerates as these upper limits increase, demonstrating the effectiveness of adaptive policy instruments in guiding long-term strategic evolution. ④ With the gradual increase of the initial willingness of the government, battery suppliers and vehicle manufacturers to carry out green collaborative innovation, the dynamic reward-penalty mechanism is significantly more effective than the static reward-penalty mechanism in promoting green collaborative innovation. This study provides important theoretical references and practical guidance for green collaborative innovation among supply chain enterprises. It contributes to promoting the development of the new energy vehicle supply chain toward a low-carbon, efficient, intelligent, and sustainable development path, and offers significant implications for industrial upgrading, green transformation as well as the high-quality development of the entire new energy vehicle industry.

Key words: new energy vehicle supply chain; green collaborative innovation; dynamic and static reward- penalty mechanisms; cost sharing; three-party evolutionary game

0 引言

随着“双碳”目标的持续推进和绿色低碳转型的深入实施,绿色技术创新已成为新能源汽车供应链转型升级的核心驱动力,也是推动生态文明建设的重要突破口。2020年,国务院发布的《新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)》明确提出,鼓励新能源汽车供应链上下游协同创新,推动产业链绿色化发展。同时,中国汽车工业协会发布的数据显示,2025年新能源汽车销售量占汽车新车总销售量的比重突破50%。由此可见,新能源汽车产业的发展正受到政策引导与市场需求的双重驱动。在此背景下,推动供应链绿色协同创新成为分摊研发成本、提升创新效率、加快绿色转型的关键路径。然而,当前新能源汽车供应链整体协同能力不足,上下游企业在绿色化发展上存在显著不平衡[1],且单个企业难以通过自主研发有效应对高昂的研发成本与创新风险,亟需整车制造商主动联合供应商开展合作创新[2]。因此,如何引导电池供应商与整车制造商建立长期稳定的协同创新关系并持续提升新能源汽车供应链整体绿色化水平,已成为亟待解决的关键问题。

近年来,众多学者围绕政府对企业的补贴政策、政府对供应链协同创新的影响以及政府奖惩机制在演化博弈中的应用三个方向展开研究。首先,在政府补贴对企业绿色创新决策的影响方面,部分学者考察了政府对供应链单一主体(如核心制造商)的补贴效应[3-5];另一些研究则关注补贴对单个企业绿色创新行为决策的影响[6-8]。其次,在供应链协同创新研究中,部分学者考虑知识共享、失望规避、公平关切、成本分担等因素对供应链企业协同创新行为的影响,未将政府视为关键变量[9-12];另有研究虽引入了政府变量,但仅将其视为外生变量,并未将其作为主体纳入协同创新的动态决策过程[13-14]。最后,现有研究主要集中于三方演化博弈中政府静态奖惩机制的设计与分析,如冉文学和段依婷[15]、张葆艳等[16]分别以农业供应链、电子产品供应链为对象,探讨政府静态奖惩机制对供应链主体策略选择的影响;鉴于动态奖惩机制相比于静态奖惩能够更灵活、更有效地引导多方主体行为,部分研究将其引入三方演化博弈模型[17-18],但针对新能源汽车供应链中绿色协同创新情境下的动态奖惩设计及其激励效果,仍缺乏系统探讨。

基于上述研究现状，本研究聚焦新能源汽车供应链关键环节，重点探讨电池供应商与整车制造商的绿色协同创新行为，并引入政府奖惩机制解决供应链协同创新的不稳定问题，主要贡献如下：①突破现有单边补贴研究的局限，构建政府对电池供应商与整车制造商两类核心主体实施补贴的协同激励框架，揭示多主体补贴政策在提升供应链绿色创新效率与稳定性方面的作用。②将政府视为内生变量纳入新能源汽车供应链绿色协同创新的决策过程，系统比较静态与动态奖惩机制下各利益主体的策略演化路径。③综合考虑绿色技术投入、“搭便车”收益、创新风险以及整车制造商对电池供应商绿色技术创新成本的分担比例等外部因素，系统分析其对双方创新决策的影响，并重点揭示成本分担机制在促进协同创新策略形成中的关键作用。

1 模型建立与假设

本文以新能源汽车供应链为对象，考虑政府奖惩机制，构建政府、电池供应商和整车制造商三方演化博弈模型，具体模型如图1所示。在新能源汽车供应链绿色协同创新过程中，政府承担维护供应链内部成员协同关系稳定的责任，并发挥监管与激励作用。通过实施监管策略和奖惩措施，政府可以抑制供应链企业的“搭便车”行为，进而推动电池供应商和整车制造商开展协同绿色创新。其中，电池供应商侧重提升电池本身的绿色属性，而整车制造商则聚焦于整车性能、零部件优化以及生产过程中的低碳化。由于政府、电池供应商和整车制造商均为有限理性决策者，他们会根据自身利益的变化选择不同策略。因此，可以借助演化博弈方法，刻画策略演化路径，寻求三方稳定均衡点，从而探讨政府、电池供应商和整车制造商的最优策略。

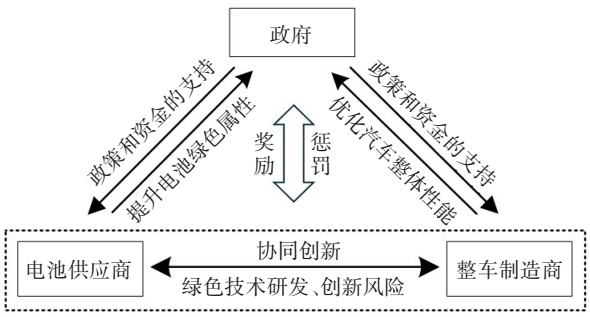


图1 政府、电池供应商和整车制造商三方博弈模型

Fig.1 Three-party evolutionary game model of the government, battery suppliers, and vehicle manufacturers

假设1：政府在新能源汽车供应链监管策略上有两种选择，即选择严格监管的比例为x，选择宽松监管的比例为$1-x$；电池供应商的策略为绿色协同创新和非绿色协同创新，选择绿色协同创新的比例为y，选择非绿色协同创新的比例为$1-y$；整车制造商的选择策略为绿色协同创新和非绿色协同创新，选择绿色协同创新的比例为z，选择非绿色协同创新的比例为$1-z$。

假设2：政府基本税收收益为R_1，在严格监管情况下，政策成本为C_1，并对选择绿色协同创新的电池供应商与整车制造商分别给予奖励H_1和H_2，主要包括补贴和碳税减免等支持政策；而选择非绿色协同创新的电池供应商与整车制造商将会分别受到惩罚F_1和F_2，主要包括罚款、停产等措施。在宽松监管情况下，政府政策成本为C_2，且不实施任何奖惩措施。若电池供应商与整车制造商均选择绿色协同创新，政府可获得社会收益G；反之，若二者均未开展绿色协同创新，政府会因社会声誉下降和环境污染等问题，承担经济损失L。

假设3：电池供应商和整车制造商的基本收益分别为R_2和R_3。随着绿色技术创新水平的不断提升，其边际创新成本呈递增趋势，因此绿色技术创新投入成本可表示为各自绿色创新投入水平的二次函数[19]，即电池供应商的绿色创新成本为$C_s=\frac{1}{2}k_1v_1^2$[20-21]，整车制造商的绿色创新成本为$C_m=\frac{1}{2}k_2v_2^2$[21]，其中，$k_i(i=1,2)$为绿色技术创新需要投入的成本系数，$v_j(j=1,2)$为绿色技术创新提升水平。其绿色技术投入生产可给电池供应商和整车制造商分别带来的额外收益为q_1v_1和q_2v_2，其中q_1和q_2分别为电池供应商和整车制造商绿色技术投入的收益转化系数。

假设4：当电池供应商选择绿色协同创新，而整车制造商选择不参与时，电池供应商在获得额外收益q_1v_1的同时，还需承担技术溢出和创新风险成本B_1，此时整车制造商可以获得“搭便车”收益T_1；当整车制造商选择绿色协同创新，而电池供应商选择不参与时，整车制造商获得额外收益q_2v_2的同时，也需承担技术溢出和创新风险成本B_2，此时电池供应商可以获得“搭便车”收益T_2。

假设5：当电池供应商和整车制造商均选择绿色协同创新时，双方企业往往通过签订联合研发协议，为了激励电池供应商对绿色技术进行投入与研发，整车制造商会选择分担其比例为α的绿色创新成本，即整车制造商承担的成本为$C_m+\alpha C_s$，电池供

应商承担成本为$(1-\alpha)C_s$。此时，由于整车制造商作为主导企业，积极参与协同创新可全面提升产品整体质量，树立绿色环保企业形象，从而获得额外协同收益为Q，而电池供应商在此过程中仅完成自身创新，无额外协同收益，因此，电池供应商的创新收益仍为q_1v_1。若电池供应商和整车制造商中任何一方不选择绿色协同创新，则双方需要各自承担绿色技术创新成本。

2 静态奖惩机制下演化博弈模型构建与分析

2.1 模型构建

根据上述假设，得到政府、电池供应商和整车制造商的策略组合及收益矩阵，具体情况如表1所示。

2.2 模型分析

2.2.1 政府策略稳定性分析

若政府对新能源汽车供应链实施严格监管策略，则期望收益为E_1；若实施宽松监管策略，则期望收益为E_2；政府对新能源汽车供应链监管策略选择的平均期望收益为$\overline{E}$。

$$\begin{aligned}E_1=&yz(R_1+G-C_1-H_1-H_2)+\\&y(1-z)(R_1+F_2-C_1-H_1)+\\&(1-y)z(R_1+F_1-C_1-H_2)+\\&(1-y)(1-z)(R_1+F_1+F_2-C_1-L),\end{aligned}\tag{1}$$

$$\begin{aligned}E_2=&yz(R_1+G-C_2)+y(1-z)(R_1-C_2)+\\&(1-y)z(R_1-C_2)+(1-y)(1-z)(R_1-C_2-L),\end{aligned}\tag{2}$$

$$\overline{E}=xE_1+(1-x)E_2。\tag{3}$$

政府对新能源汽车供应链绿色协同创新行为实施“严格监管”策略的复制动态方程和一阶导数分别为：

$$\begin{aligned}F(x)=&x(E_1-\overline{E})=x(1-x)(E_1-E_2)\\=&x(x-1)(C_1-C_2-F_1-F_2+\\&F_1y+F_2z+H_1y+H_2z),\end{aligned}\tag{4}$$

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}(F(x))}{\mathrm{d}x}=&(2x-1)(C_1-C_2-F_1-F_2+\\&F_1y+F_2z+H_1y+H_2z)。\end{aligned}\tag{5}$$

根据微分方程稳定性定理可知，当$F(x)=0$且$\mathrm{d}(F(x))/\mathrm{d}x<0$时，政府对新能源汽车供应链企业趋于严格监管稳定状态。设$D(y)=C_1-C_2-F_1-F_2+F_1y+F_2z+H_1y+H_2z$，由于$\mathrm{d}(D(y))/\mathrm{d}y>0$，即$D(y)$是关于$y$的增函数。令$y^*=(C_2+F_1+F_2-C_1-F_2z-H_2z)/(F_1+H_1)$，当$y=y^*$时，$F(x)=0$，$\mathrm{d}(F(x))/\mathrm{d}x=0$，稳定性策略无法确定；当$y>y^*$时，$D(y)>0$，$\mathrm{d}(F(x))/\mathrm{d}x|_{x=0}<0$，故$x=0$为政府部门的演化稳定策略（Evolutionarily Stable Strategy，ESS）；反之，当$y<y^*$时，$D(y)<0$，$\mathrm{d}(F(x))/\mathrm{d}x|_{x=1}<0$，故$x=1$为政府部门的演化稳定策略。

由图2可知，当电池供应商选择绿色协同创新的概率增加时，政府趋向于宽松监管状态，此时政府可以付出较少的监管成本，推动新能源汽车供应链相关企业实现绿色协同创新；而当电池供应商选择绿色协同创新的概率降低时，政府趋向于严格监管，此时加大惩罚力度将提高政府严格监管的概率，而奖励金额与监管成本的持续增加会使政府选择严格监管的概率有所下降。

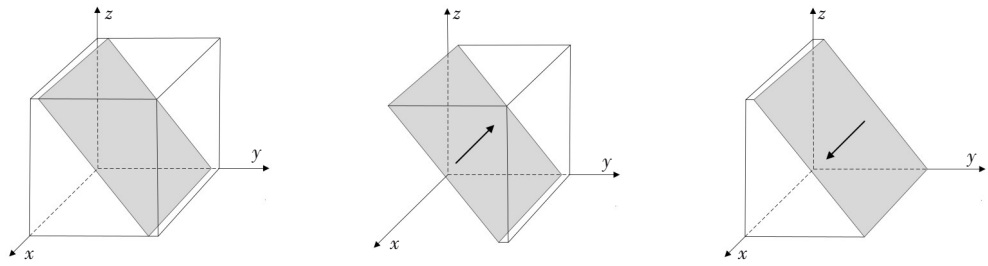
2.2.2 电池供应商策略稳定性分析

电池供应商选择绿色协同创新与非绿色协同创新策略的期望收益分别为U_1、U_2，其群体平均期望收益为$\overline{U}$。

表1 静态奖惩机制下三方主体混合策略博弈矩阵

Tab.1 Mixed-strategy game matrix of three parties under static reward-penalty mechanism

供应商	制造商	收益主体	收益	
			政府严格监管x	政府宽松监管$1-x$
绿色协同创新y	绿色协同创新z	政府	$R_1+G-C_1-H_1-H_2$	R_1+G-C_2
		供应商	$R_2+H_1+q_1v_1-(1-\alpha)C_s$	$R_2+q_1v_1-(1-\alpha)C_s$
		制造商	$R_3+H_2+q_2v_2+Q-\alpha C_s-C_m$	$R_3+q_2v_2+Q-\alpha C_s-C_m$
	非绿色协同创新$1-z$	政府	$R_1+F_2-C_1-H_1$	R_1-C_2
		供应商	$R_2+H_1+q_1v_1-B_1-C_s$	$R_2+q_1v_1-B_1-C_s$
		制造商	$R_3+T_1-F_2$	R_3+T_1
非绿色协同创新$1-y$	绿色协同创新z	政府	$R_1+F_1-C_1-H_2$	R_1-C_2
		供应商	$R_2+T_2-F_1$	R_2+T_2
		制造商	$R_3+H_2+q_2v_2-B_2-C_m$	$R_3+q_2v_2-B_2-C_m$
	非绿色协同创新$1-z$	政府	$R_1+F_1+F_2-C_1-L$	R_1-C_2-L
		供应商	R_2-F_1	R_2
		制造商	R_3-F_2	R_3



(a)$y=y^*$ (b)$y>y^*$ (c)$y<y^*$

图 2 政府策略演化相位图

Fig.2 Government strategy evolution phase diagram

$$\begin{aligned}U_1=&xz[R_2+H_1+q_1v_1-(1-\alpha)C_s]+x(1-z)\\&(R_2+H_1+q_1v_1-B_1-C_s)+\\&(1-x)z[R_2+q_1v_1-(1-\alpha)C_s]+\\&(1-x)(1-z)(R_2+q_1v_1-B_1-C_s),\end{aligned}\tag{6}$$

$$\begin{aligned}U_2=&xz(R_2+T_2-F_1)+x(1-z)(R_2-F_1)+\\&(1-x)z(R_2+T_2)+(1-x)(1-z)R_2,\end{aligned}\tag{7}$$

$$\overline{U}=yU_1+(1-y)U_2。\tag{8}$$

电池供应商选择“绿色协同创新”的复制动态方程和一阶导数分别为：

$$\begin{aligned}F(y)=&y(U_1-\overline{U})=y(1-y)(U_1-U_2)=y(1-y)\\&(B_1z-C_s-B_1+F_1x+H_1x-T_2z+q_1v_1+\alpha C_sz),\end{aligned}\tag{9}$$

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}(F(y))}{\mathrm{d}y}=&(1-2y)(B_1z-C_s-B_1+\\&F_1x+H_1x-T_2z+q_1v_1+\alpha C_sz)。\end{aligned}\tag{10}$$

根据微分方程稳定性定理可知，当$F(y)=0$且$\mathrm{d}(F(y))/\mathrm{d}y<0$时，才满足电池供应商选择绿色协同创新处于稳定状态。设$I(z)=B_1z-C_s-B_1+F_1x+H_1x-T_2z+q_1v_1+\alpha C_sz$，由于$\mathrm{d}(I(z))/\mathrm{d}z>0$，即$I(z)$是关于$z$的增函数。令$z^*=(B_1+C_s-F_1x-H_1x-q_1v_1)/(B_1-T_2+\alpha C_s)$，当$z=z^*$时，$F(y)=0$，$\mathrm{d}(F(y))/\mathrm{d}y=0$，则不能确定稳定性策略。当$z>z^*$时，即$I(z)>0$，$\mathrm{d}(F(y))/\mathrm{d}y|_{y=1}<0$，故$y=1$为电池供应商的演化稳定策略。反之，当$z<z^*$时，即$I(z)<0$，$\mathrm{d}(F(y))/\mathrm{d}y|_{y=0}<0$，故$y=0$为电池供应商的演化稳定策略。

由图3可知，当整车制造商选择绿色协同创新的概率增加时，电池供应商会更倾向于绿色协同创新，此时随着政府奖惩金额的提高，政府会趋向于宽松监管；而当整车制造商选择绿色协同创新的概率降低时，电池供应商会更倾向于非绿色协同创新，但随着“搭便车”收益的减少、创新风险的降低和创新收益的增加，电池供应商选择协同创新的概率会增加。

2.2.3 整车制造商策略稳定性分析

整车制造商选择绿色协同创新与非绿色协同创新的期望收益分别为N_1、N_2，其群体平均期望收益为$\overline{N}$。

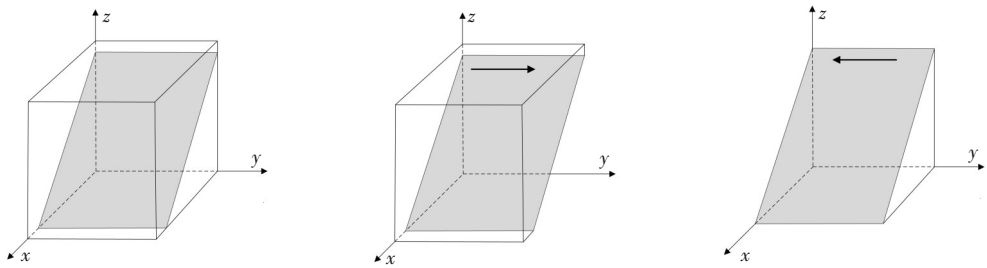
$$\begin{aligned}N_1=&xy(R_3+H_2+q_2v_2+Q-\alpha C_s-C_m)+\\&x(1-y)(R_3+H_2+q_2v_2-B_2-C_m)+\\&(1-x)y(R_3+q_2v_2+Q-\alpha C_s-C_m)+\\&(1-x)(1-y)(R_3+q_2v_2-B_2-C_m),\end{aligned}\tag{11}$$

$$\begin{aligned}N_2=&xy(R_3+T_1-F_2)+x(1-y)(R_3-F_2)+\\&(1-x)y(R_3+T_1)+(1-x)(1-y)R_3,\end{aligned}\tag{12}$$

$$\overline{N}=zN_1+(1-z)N_2。\tag{13}$$

整车制造商选择“绿色协同创新”的复制动态方程和一阶导数分别为：

$$\begin{aligned}F(z)=&z(N_1-\overline{N})=z(1-z)(N_1-N_2)\\=&z(1-z)(B_2y-C_m-B_2+F_2x+\\&H_2x-T_1y+q_2v_2+Qy-\alpha C_sy),\end{aligned}\tag{14}$$



(a)$z=z^*$ (b)$z>z^*$ (c)$z<z^*$

图 3 电池供应商策略演化相位图

Fig.3 Battery supplier strategy evolution phase diagram

$$\frac{\mathrm{d}(F(z))}{\mathrm{d}z}=(1-2z)(B_2y-C_m-B_2+F_2x+H_2x-T_1y+q_2v_2+Qy-\alpha C_sy)。\tag{15}$$

根据微分方程稳定性定理可知，当$F(z)=0$且$\mathrm{d}(F(z))/\mathrm{d}z<0$时，才满足整车制造商选择绿色协同创新处于稳定状态。设$J(x)=B_2y-C_m-B_2+F_2x+H_2x-T_1y+q_2v_2+Qy-\alpha C_sy$，由于$\mathrm{d}(J(x))/\mathrm{d}x>0$，即$J(x)$是关于$x$的增函数。令$x^*=(C_m+B_2+T_1y-B_2y-q_2v_2-Qy+\alpha C_sy)/(F_2+H_2)$，当$x=x^*$时，$F(z)=0$，$\mathrm{d}(F(z))/\mathrm{d}z=0$，则不能确定稳定性策略。当$x>x^*$时，即$J(x)>0$，$\mathrm{d}(F(z))/\mathrm{d}z|_{z=1}<0$，故$z=1$为整车制造商的演化稳定策略。反之，当$x<x^*$时，即$J(x)<0$，$\mathrm{d}(F(z))/\mathrm{d}z|_{z=0}<0$，故$z=0$为整车制造商的演化稳定策略。

由图4可知，当政府实行严格监管的概率增加时，整车制造商更倾向于绿色协同创新，此时随着政府奖惩金额的提高，政府会逐渐趋向于宽松监管；当政府实行严格监管的概率降低时，整车制造商更倾向于非绿色协同创新，但随着“搭便车”收益的减少、创新风险的降低和创新收益的增加，整车制造商选择协同创新的概率会逐步增加。

2.3 模型稳定性分析

由$F(x)=0$、$F(y)=0$、$F(z)=0$可以得到8个系统均衡点，即$E_1(0,0,0)$、$E_2(1,0,0)$、$E_3(0,1,0)$、$E_4(0,0,1)$、$E_5(1,1,0)$、$E_6(1,0,1)$、$E_7(0,1,1)$、$E_8(1,1,1)$。通过李雅普诺夫(Lyapunov)理论[22]判断均衡点的稳定性，构建如下雅可比(Jacobian)矩阵$\boldsymbol{J}$。

$$\boldsymbol{J}=\begin{bmatrix}\partial F(x)/\partial x & \partial F(x)/\partial y & \partial F(x)/\partial z\\ \partial F(y)/\partial x & \partial F(y)/\partial y & \partial F(y)/\partial z\\ \partial F(z)/\partial x & \partial F(z)/\partial y & \partial F(z)/\partial z\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}a_{11} & a_{12} & a_{13}\\ a_{21} & a_{22} & a_{23}\\ a_{31} & a_{32} & a_{33}\end{bmatrix}。\tag{16}$$

其中：

$$a_{11}=(2x-1)(C_1-C_2-F_1-F_2+F_1y+F_2z+H_1y+H_2z),\tag{17}$$

$$a_{12}=x(x-1)(F_1+H_1),\tag{18}$$

$$a_{13}=x(x-1)(F_2+H_2),\tag{19}$$

$$a_{21}=y(1-y)(F_1+H_1),\tag{20}$$

$$a_{22}=(1-2y)(B_1z-C_s-B_1+F_1x+H_1x-T_2z+q_1v_1+\alpha C_sz),\tag{21}$$

$$a_{23}=y(1-y)(B_1-T_2+\alpha C_s),\tag{22}$$

$$a_{31}=z(1-z)(F_2+H_2),\tag{23}$$

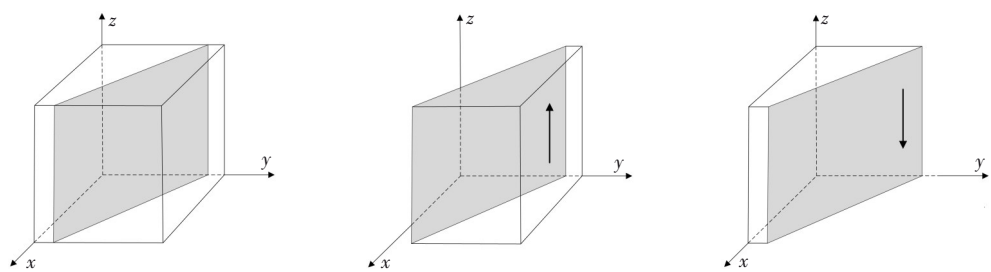
$$a_{32}=z(1-z)(B_2-T_1+Q-\alpha C_s),\tag{24}$$

$$a_{33}=(1-2z)(B_2y-C_m-B_2+F_2x+H_2x-T_1y+q_2v_2+Qy-\alpha C_sy)。\tag{25}$$

由Lyapunov第一法可知，当Jacobian矩阵所有特征值的实部均为负时，此时的均衡点为渐近稳定点；至少有一个特征值的实部为正时，均衡点为不稳定点；当特征值的实部有正有负时，均衡点为鞍点[23]。表2为各均衡点的稳定性分析，其中λ_1、λ_2、λ_3代表不同均衡点的特征值。

推论1：当$F_1+H_1+q_1v_1<C_s+B_1$，且$F_2+H_2+q_2v_2<C_m+B_2$时，$E_1(0,0,0)$和$E_2(1,0,0)$可能为演化稳定均衡点，即电池供应商与整车制造商选择绿色协同创新产生的额外收益与政府奖惩金额之和小于自身承担的成本与研发风险成本之和。此时，电池供应商和整车制造商均选择非绿色协同创新策略，政府的最优策略取决于其净收益：若$C_1-C_2>F_1+F_2$，即惩罚收益之和小于监管成本之差，则$E_1(0,0,0)$为稳定均衡点，政府趋向于宽松监管；反之，若$C_1-C_2<F_1+F_2$，则$E_2(1,0,0)$为稳定均衡点，政府会更趋向于严格监管。

推论2：当$q_1v_1>C_s+B_1$，且$F_2+H_2+q_2v_2+Q<C_m+\alpha C_s+T_1$时，$E_3(0,1,0)$和$E_5(1,1,0)$可能为演化稳定均衡点，即电池供应商选择绿色协同创新的收



(a)$x=x^*$　(b)$x>x^*$　(c)$x<x^*$

图4　整车制造商策略演化相位图

Fig.4　Automobile manufacturer strategy evolution phase diagram

表2 均衡点稳定性分析

Tab.2 Stability analysis of equilibrium points

均衡点	特征值	稳定性条件
$E_1(0,0,0)$	$\lambda_1=C_2-C_1+F_1+F_2$ $\lambda_2=q_1v_1-B_1-C_s$ $\lambda_3=q_2v_2-B_2-C_m$	$C_1-C_2>F_1+F_2$ $q_1v_1-B_1<C_s$ $q_2v_2-B_2<C_m$
$E_2(1,0,0)$	$\lambda_1=C_1-C_2-F_1-F_2$ $\lambda_2=F_1-B_1+H_1+q_1v_1-C_s$ $\lambda_3=F_2-B_2+H_2+q_2v_2-C_m$	$C_1-C_2<F_1+F_2$ $F_1+H_1+q_1v_1-B_1<C_s$ $F_2+H_2+q_2v_2-B_2<C_m$
$E_3(0,1,0)$	$\lambda_1=C_2-C_1+F_2-H_1$ $\lambda_2=B_1-q_1v_1+C_s$ $\lambda_3=q_2v_2-T_1-C_m+Q-\alpha C_s$	$C_1-C_2>F_2-H_1$ $q_1v_1-B_1>C_s$ $q_2v_2+Q-T_1<C_m+\alpha C_s$
$E_4(0,0,1)$	$\lambda_1=C_2-C_1+F_1-H_2$ $\lambda_2=q_1v_1-T_2+\alpha C_s-C_s$ $\lambda_3=B_2-q_2v_2+C_m$	$C_1-C_2>F_1-H_2$ $q_1v_1-T_2<(1-\alpha)C_s$ $q_2v_2-B_2>C_m$
$E_5(1,1,0)$	$\lambda_1=C_1-C_2-F_2+H_1$ $\lambda_2=B_1-F_1-H_1-q_1v_1+C_s$ $\lambda_3=F_2+H_2-T_1+q_2v_2-C_m+Q-\alpha C_s$	$C_1-C_2<F_2-H_1$ $F_1+H_1+q_1v_1-B_1>C_s$ $F_2+H_2+q_2v_2+Q-T_1<C_m+\alpha C_s$
$E_6(1,0,1)$	$\lambda_1=C_1-C_2-F_1+H_2$ $\lambda_2=F_1+H_1-T_2+q_1v_1+\alpha C_s-C_s$ $\lambda_3=B_2-F_2-H_2-q_2v_2+C_m$	$C_1-C_2<F_1-H_2$ $F_1+H_1+q_1v_1-T_2<(1-\alpha)C_s$ $F_2+H_2+q_2v_2-B_2>C_m$
$E_7(0,1,1)$	$\lambda_1=C_2-C_1-H_1-H_2$ $\lambda_2=T_2-q_1v_1+C_s-\alpha C_s$ $\lambda_3=T_1-q_2v_2-Q+C_m+\alpha C_s$	$q_1v_1-T_2>(1-\alpha)C_s$ $q_2v_2+Q-\mathrm{T}_1>C_m+\alpha C_s$
$E_8(1,1,1)$	$\lambda_1=C_1-C_2+H_1+H_2$ $\lambda_2=T_2-F_1-H_1-q_1v_1+C_s-\alpha C_s$ $\lambda_3=T_1-F_2-H_2-q_2v_2-Q+C_m+\alpha C_s$	不稳定点或鞍点

益大于自身承担的成本与研发风险成本之和，且整车制造商选择绿色协同创新的收益与政府奖惩金额之和小于自身承担的成本与“搭便车”的收益之和。此时，电池供应商选择绿色协同创新策略，整车制造商选择非绿色协同创新策略，政府的最优策略取决于其净收益：若$C_1-C_2>F_2-H_1$，即奖惩收益之差小于监管成本之差，则$E_3(0,1,0)$为稳定均衡点，政府趋向于宽松监管；反之，若$C_1-C_2<F_2-H_1$，则$E_5(1,1,0)$为稳定均衡点，政府会更趋向于严格监管。

推论3：当$F_1+H_1+q_1v_1<(1-\alpha)C_s+T_2$，且$q_2v_2>C_m+B_2$时，$E_4(0,0,1)$和$E_6(1,0,1)$可能为演化稳定均衡点，即电池供应商选择绿色协同创新的收益与政府奖惩金额之和小于自身承担的成本与“搭便车”收益之和，且整车制造商选择绿色协同创新的收益大于自身承担的成本与研发风险成本之和。此时，电池供应商选择非绿色协同创新策略，整车制造商选择绿色协同创新策略，政府的最优策略取决于其净收益：若$C_1-C_2>F_1-H_2$，即奖惩收益之差小于监管成本之差，则$E_4(0,0,1)$为稳定均衡点，政府趋向于宽松监管；反之，若$C_1-C_2<F_1-H_2$，则$E_6(1,0,1)$为稳定均衡点，政府会更趋向于严格监管。

推论4：当$q_1v_1-T_2>(1-\alpha)C_s$且$q_2v_2+Q-\mathrm{T}_1>C_m+\alpha C_s$时，$E_7(0,1,1)$为演化稳定均衡点，即电池供应商和整车制造商进行协同创新的收益与“搭便车”的收益之差大于各自承担的成本。此时，政府选择宽松监管策略，电池供应商和整车制造商均选择绿色协同创新策略。

3 动态奖惩机制下演化博弈模型构建与分析

3.1 模型构建

动态奖惩机制是指政府根据电池供应商和整车制造商选择绿色协同创新的概率变化，动态调整奖惩金额上限值[24]。在动态奖惩机制下，政府对电池供应商的奖励和惩罚分别为$h_s(y)=(1-y)H_s$和$f_s(y)=(1-y)F_s$，H_s、F_s分别为奖励值和惩罚值的上限；政府对整车制造商的奖励和惩罚分别为$h_m(z)=(1-z)H_m$和$f_m(z)=(1-z)F_m$，H_m、F_m分别为奖励值和惩罚值的上限。政府通过动态调整奖励值和惩罚值，推动电池供应商与整车制造商共同研发绿色技术，从而全面提升新能源汽车供应链的绿色协同创新水平。动态奖惩机制下政府、电池供应商和整车制造商的收益矩阵情况如表3所示。

表3　动态奖惩机制下三方主体混合策略博弈矩阵

Tab.3　Mixed-strategy game matrix of three parties under dynamic reward-penalty mechanism

供应商	制造商	收益主体	收益	
			政府严格监管x	政府宽松监管$1-x$
绿色协同创新y	绿色协同创新z	政府	$R_1+G-C_1-h_s(y)-h_m(z)$	R_1+G-C_2
		供应商	$R_2+h_s(y)+q_1v_1-(1-\alpha)C_s$	$R_2+q_1v_1-(1-\alpha)C_s$
		制造商	$R_3+h_m(z)+q_2v_2+Q-\alpha C_s-C_m$	$R_3+q_2v_2+Q-\alpha C_s-C_m$
	非绿色协同创新$1-z$	政府	$R_1+f_m(z)-C_1-h_s(y)$	R_1-C_2
		供应商	$R_2+h_s(y)+q_1v_1-B_1-C_s$	$R_2+q_1v_1-B_1-C_s$
		制造商	$R_3+T_1-f_m(z)$	R_3+T_1
非绿色协同创新$1-y$	绿色协同创新z	政府	$R_1+f_s(y)-C_1-h_m(z)$	R_1-C_2
		供应商	$R_2+T_2-f_s(y)$	R_2+T_2
		制造商	$R_3+h_m(z)+q_2v_2-B_2-C_m$	$R_3+q_2v_2-B_2-C_m$
	非绿色协同创新$1-z$	政府	$R_1+f_s(y)+f_m(z)-C_1-L$	R_1-C_2-L
		供应商	$R_2-f_s(y)$	R_2
		制造商	$R_3-f_m(z)$	R_3

3.2　模型分析

在动态奖惩机制下,基于收益矩阵的推导可得到政府、电池供应商和整车制造商策略选择的新复制动态方程。

3.2.1　政府策略稳定性分析

若政府对新能源汽车供应链实施严格监管策略,则期望收益为E_1^d;若实施宽松监管策略,则期望收益为E_2^d;政府对新能源汽车供应链监管策略选择的平均期望收益为$\overline{E_d}$。

$$\begin{aligned}E_1^d=&yz\left[R_1+G-C_1-h_s(y)-h_m(z)\right]+\\&y(1-z)\left[R_1+f_m(z)-C_1-h_s(y)\right]+\\&(1-y)z\left[R_1+f_s(y)-C_1-h_m(z)\right]+\\&(1-y)(1-z)\left[R_1+f_s(y)+f_m(z)-C_1-L\right],\end{aligned}\tag{26}$$

$$\begin{aligned}E_2^d=&yz(R_1+G-C_2)+y(1-z)(R_1-C_2)+\\&(1-y)z(R_1-C_2)+(1-y)(1-z)(R_1-C_2-L),\end{aligned}\tag{27}$$

$$\overline{E_d}=xE_1^d+(1-x)E_2^d。\tag{28}$$

政府对新能源汽车供应链绿色协同创新行为实施“严格监管”策略的复制动态方程为:

$$\begin{aligned}F_d(x)=&x(x-1)\left[C_1-C_2-(1-y)F_s-\right.\\&(1-z)F_m+y(1-y)F_s+z(1-z)F_m+\\&\left.y(1-y)H_s+z(1-z)H_m\right]。\end{aligned}\tag{29}$$

3.2.2　电池供应商策略稳定性分析

电池供应商选择绿色协同创新与非绿色协同创新策略的期望收益分别为U_1^d、U_2^d,其群体平均期望收益为$\overline{U_d}$。

$$\begin{aligned}U_1^d=&xz\left[R_2+h_s(y)+q_1v_1-(1-\alpha)C_s\right]+\\&x(1-z)\left[R_2+h_s(y)+q_1v_1-B_1-C_s\right]+\\&(1-x)z\left[R_2+q_1v_1-(1-\alpha)C_s\right]+\\&(1-x)(1-z)(R_2+q_1v_1-B_1-C_s),\end{aligned}\tag{30}$$

$$\begin{aligned}U_2^d=&xz\left[R_2+T_2-f_s(y)\right]+x(1-z)\left[R_2-f_s(y)\right]+\\&(1-x)z(R_2+T_2)+(1-x)(1-z)R_2,\end{aligned}\tag{31}$$

$$\overline{U_d}=yU_1^d+(1-y)U_2^d。\tag{32}$$

电池供应商选择“绿色协同创新”的复制动态方程为:

$$\begin{aligned}F_d(y)=&y(1-y)\left[B_1z-C_s-B_1+x(1-y)F_s+\right.\\&\left.x(1-y)H_s-T_2z+q_1v_1+\alpha C_sz\right]。\end{aligned}\tag{33}$$

3.2.3　整车制造商策略稳定性分析

整车制造商选择绿色协同创新与非绿色协同创新的期望收益分别为N_1^d、N_2^d,其群体平均期望收益为$\overline{N_d}$。

$$\begin{aligned}N_1^d=&xy\left[R_3+h_m(z)+q_2v_2+Q-\alpha C_s-C_m\right]+\\&x(1-y)\left[R_3+h_m(z)+q_2v_2-B_2-C_m\right]+\\&(1-x)y(R_3+q_2v_2+Q-\alpha C_s-C_m)+\\&(1-x)(1-y)(R_3+q_2v_2-B_2-C_m),\end{aligned}\tag{34}$$

$$\begin{aligned}N_2^d=&xy\left[R_3+T_1-f_m(z)\right]+x(1-y)\left[R_3-f_m(z)\right]+\\&(1-x)y(R_3+T_1)+(1-x)(1-y)R_3,\end{aligned}\tag{35}$$

$$\overline{N_d}=zN_1^d+(1-z)N_2^d。\tag{36}$$

整车制造商选择“绿色协同创新”的复制动态方程为:

$$\begin{aligned}F_d(z)=&z(1-z)\left[B_2y-C_m-B_2+x(1-z)F_m+\right.\\&\left.x(1-z)H_m-T_1y+q_2v_2+Qy-\alpha C_sy\right]。\end{aligned}\tag{37}$$

4 数值仿真

4.1 静态奖惩机制下数值模拟与仿真分析

4.1.1 数值模拟与仿真分析

参考相关文献[25-27]并结合现实情况对模型参数进行赋值，并运用MATLAB软件进行仿真模拟，具体参数如表4所示。

表4 仿真参数值

Tab.4 Simulation parameter values

参数	数值	参数	数值	参数	数值
C_1	4	k_1	0.2	T_1	1
C_2	2	k_2	0.2	T_2	2
H_1	1	v_1	6	B_1	1.5
H_2	1.5	v_2	5	B_2	1
F_1	2	q_1	0.8	Q	2
F_2	2	q_2	0.8	α	0.3

由图5可知，系统的稳定均衡点为$E_7(0,1,1)$，即政府、电池供应商和整车制造商的策略组合为：宽松监管，绿色协同创新，绿色协同创新，与推论4结果一致。其中，x轴代表政府监管的概率，y轴代表电池供应商绿色协同创新的概率，z轴代表整车制造商绿色协同创新的概率，无论三方的初始概率如何变化，最终都会趋向于(0,1,1)点，故本文以均衡点(0,1,1)为理想状态。

4.1.2 不同参数变化对系统演化的影响

基于$E_7(0,1,1)$稳定均衡点，分析整车制造商分担电池供应商成本比例、政府奖励和惩罚，以及创新风险和“搭便车”收益变化对系统演化路径的影响。

1)制造商分担供应商研发成本比例对三方策略影响

在其他参数不变的情况下，令$\alpha=0.1$、$\alpha=0.2$、$\alpha=0.3$、$\alpha=0.4$、$\alpha=0.5$、$\alpha=0.6$，观察成本分担比例α的变化对政府、电池供应商和整车制造商演化策略的影响。

由图6可知，随着成本分担比例α的不断增加，政府逐渐趋向于宽松监管，整车制造商逐渐趋向于绿色协同创新，而电池供应商的选择策略随整车制造商主动分担的成本比例变化。当α不低于0.3时，电池供应商逐渐趋向于绿色协同创新，且成本分担比例越大，其趋向于绿色协同创新的速度越快。因此，整车制造商可以适当分担电池供应商进行绿色技术研发的成本比例，从而激发电池供应商的绿色协同创新行为。

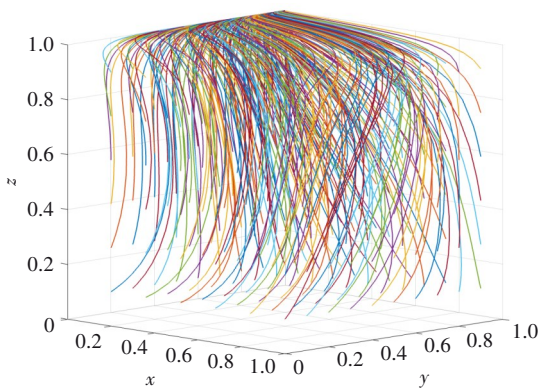
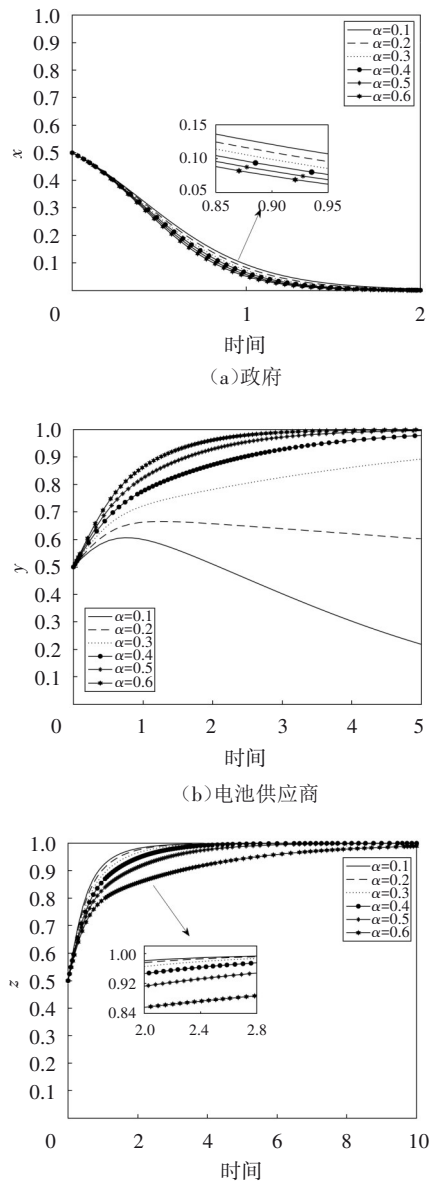


图5 仿真模拟图

Fig.5 Simulation diagram



(a)政府

(b)电池供应商

(c)整车制造商

图6 成本分担比例对三方策略演化的影响

Fig.6 Impact of cost-sharing ratio on tripartite strategy evolution

2）政府奖励对三方策略的影响

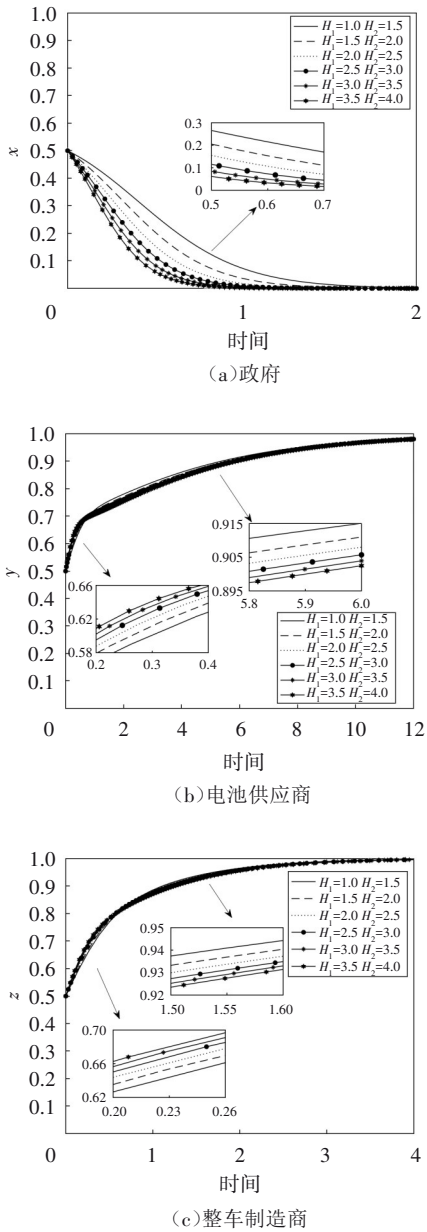
在其他参数不变的情况下，令$H_1=1$、$H_2=1.5$，$H_1=1.5$、$H_2=2$，$H_1=2$、$H_2=2.5$，$H_1=2.5$、$H_2=3$，$H_1=3$、$H_2=3.5$，$H_1=3.5$、$H_2=4$，观察政府奖励金额的变化对政府、电池供应商和整车制造商演化策略的影响。

由图7可知，随着奖励金额H_1和H_2的不断增加，政府逐渐趋向于宽松监管，电池供应商和整车制造商逐渐趋向于绿色协同创新。可见，政府加大奖励力度对电池供应商和整车制造商最初具有正向激励作用，但从长期来看，静态奖励的激励效用逐渐减弱。

3）政府惩罚对三方策略的影响

在其他参数不变的情况下，令$F_1=1$、$F_2=1$，$F_1=1.5$、$F_2=1.5$，$F_1=2$、$F_2=2$，$F_1=2.5$、$F_2=2.5$，$F_1=3$、$F_2=3$，$F_1=3.5$、$F_2=3.5$，观察不同惩罚金额对政府、电池供应商和整车制造商演化策略的影响。

由图8可知，随着惩罚金额F_1和F_2的不断增加，政府逐渐趋向于宽松监管，电池供应商和整车制造商逐渐趋向于绿色协同创新。可见，当供应商和制造商不选择绿色协同创新时，政府可以通过加大惩罚力度提高供应商和制造商积极合作创新的意愿。



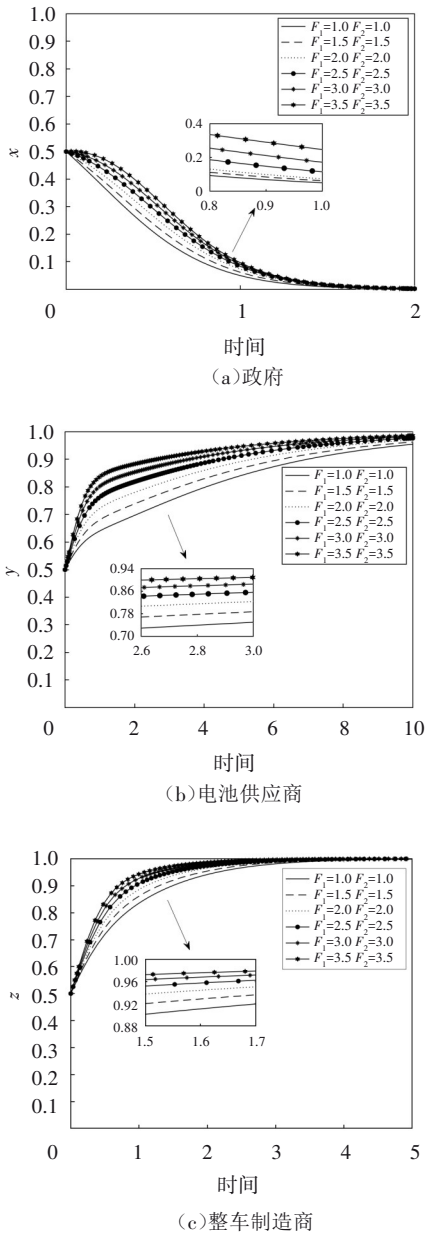
（a）政府

（b）电池供应商

（c）整车制造商

图7　政府奖励对三方策略演化的影响

Fig.7　Impact of government rewards on tripartite strategy evolution



（a）政府

（b）电池供应商

（c）整车制造商

图8　政府惩罚对三方策略演化的影响

Fig.8　Impact of government penalties on tripartite strategy evolution

4）创新风险和“搭便车”收益对电池供应商和整车制造商的策略影响

在其他参数不变的情况下，令$B_1=1.5$、$T_2=1.5$，$B_1=2$、$T_2=2$，$B_1=2.5$、$T_2=2.5$，$B_1=3$、$T_2=3$，$B_1=3.5$、$T_2=3.5$，$B_1=4$、$T_2=4$；$B_2=1$、$T_1=1$，$B_2=1.5$、$T_1=1.5$，$B_2=2$、$T_1=2$，$B_2=2.5$、$T_1=2.5$，$B_2=3$、$T_1=3$，$B_2=3.5$、$T_1=3.5$，观察创新风险和“搭便车”收益的变化对电池供应商和整车制造商演化策略的影响。

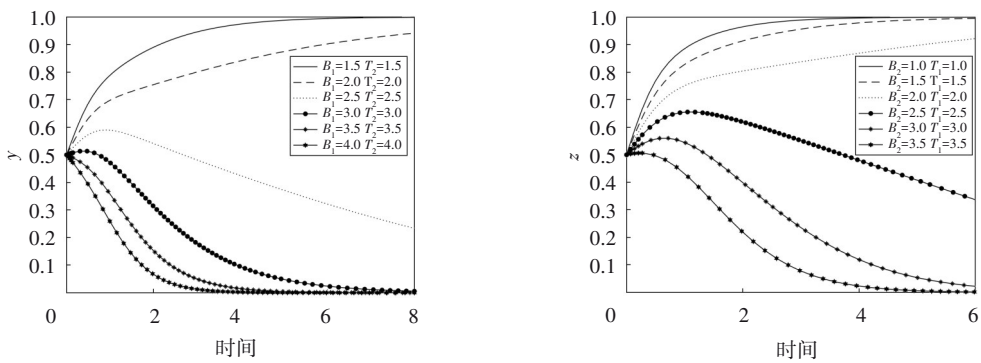
由图9可知，当创新风险和“搭便车”收益处于较低水平时，电池供应商和整车制造商趋向于绿色协同创新策略，但随着创新风险和“搭便车”收益的增加，非绿色协同创新策略的相对收益优势逐渐显现，导致双方最终趋向于不选择绿色协同创新。

4.2　动态奖惩机制下数值模拟与仿真分析

参考相关文献[25-28]，本文设定参数初始值如下：$C_1=4$、$C_2=2$、$H_s=4$、$H_m=5$、$F_s=4$、$F_m=4$、$k_1=0.2$、$k_2=0.2$、$v_1=6$、$v_2=5$、$q_1=0.8$、$q_2=0.8$、$T_1=1$、$T_2=2$、$B_1=1.5$、$B_2=1$、$Q=2$、$\alpha=0.3$。

图10（a）为政府对电池供应商实施动态奖励、对整车制造商采用固定奖励的情形，即$H_m=5$，令$H_s=4$、$H_s=10$、$H_s=18$；图10（b）则为政府对整车制造商实施动态奖励，而对电池供应商采用固定奖励的情形，即$H_s=4$，令$H_m=5$、$H_m=10$、$H_m=20$。仿真结果表明，当动态奖励作用于电池供应商时，双方选择绿色协同创新策略的概率显著提升；而当动态奖励作用于整车制造商时，协同创新的演化速度反而下降。这一非对称效应说明，对上游供应商施加动态奖励更能有效驱动全链条绿色协作。因此，政府应优先对电池供应商设计合理的动态奖励机制，促使其主动配合整车制造商开展协同创新。

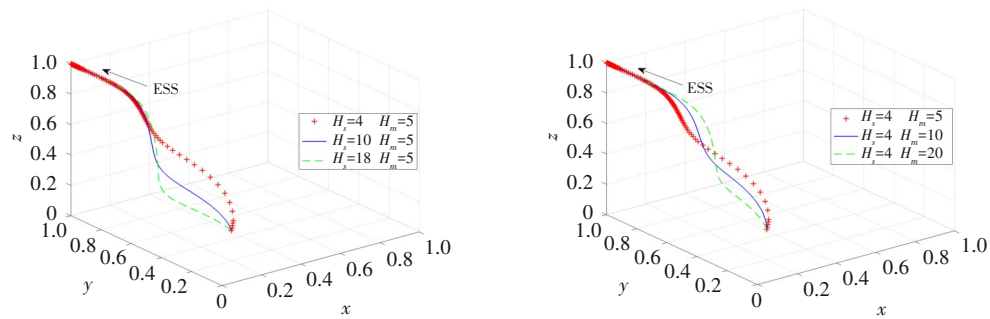
图11（a）为政府对电池供应商实施动态惩罚、对整车制造商采用固定惩罚的情形，即$F_m=4$，令$F_s=4$、$F_s=10$、$F_s=18$；图11（b）则为政府对整车制造商实施动态惩罚、对电池供应商采用固定惩罚的情形，即$F_s=4$，令$F_m=4$、$F_m=8$、$F_m=10$。仿真结果表明，当动态惩罚作用于电池供应商时，双方选择绿色协同创新策略的概率下降；而当动态惩罚作用于整车制造商时，协同创新的收敛速度显著加快。这一非对称效应说明，动态惩罚对主导企业（整车制造商）的约束效果更强。因此，政府应优先对整车制造



（a）电池供应商　　（b）整车制造商

图9　创新风险和“搭便车”收益对电池供应商和整车制造商策略演化的影响

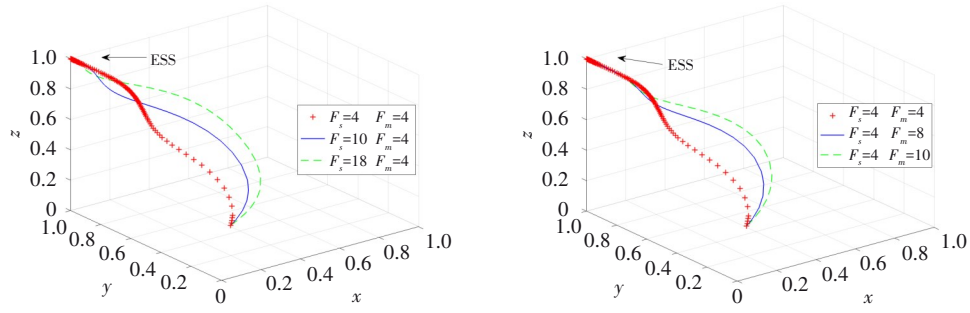
Fig.9　Impact of innovation risks and free-riding benefits on the strategies evolution of battery suppliers and automobile manufacturers



（a）电池供应商　　（b）整车制造商

图10　政府动态奖励对电池供应商和整车制造商的决策影响

Fig.10　Impact of dynamic government rewards on the decision-making of battery suppliers and automobile manufacturers



（a）电池供应商　　（b）整车制造商

图11　政府动态惩罚对电池供应商和整车制造商的决策影响

Fig.11　Impact of dynamic government penalties on the decision-making of battery suppliers and automobile manufacturers

商设计合理的动态惩罚机制，以有效驱动其支持电池供应商开展绿色协同创新。

图12（a）为政府对电池供应商实施动态奖惩机制的情形，令 $H_s=4$、$H_s=10$、$H_s=18$；$F_s=4$、$F_s=10$、$F_s=18$；图12（b）则为政府对整车制造商实施动态奖惩机制的情形，令 $H_m=5$、$H_m=10$、$H_m=20$；$F_m=4$、$F_m=8$、$F_m=10$。仿真结果表明，当动态奖惩作用于电池供应商时，双方选择绿色协同创新策略的概率显著提升；而当动态奖惩作用于整车制造商时，系统向协同均衡的收敛速度反而减缓。这一非对称效应说明，在当前供应链结构下，对上游电池供应商施加动态奖惩更能有效激发全链条协同动力。因此，政府应优先针对电池供应商设计动态奖惩机制，以增强其参与绿色创新的主动性，并带动整车制造商形成稳定的合作预期。

4.3　静态与动态奖惩机制下创新初始意愿影响对比分析

基于静态与动态奖惩机制的数值模拟，将政府、电池供应商和整车制造商的初始意愿分别设为0.2、0.5、0.7，对比不同奖惩机制下初始意愿的取值对三方策略演化的影响。

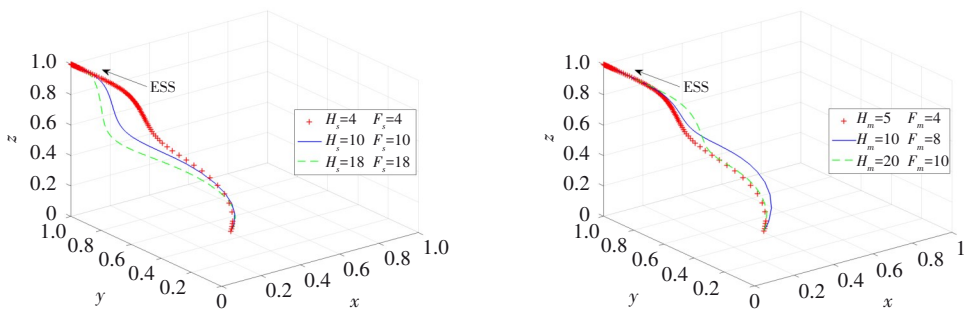
由图13可知，当政府、电池供应商和整车制造商的初始意愿均为0.2时，静态与动态奖惩机制下三方向均衡点（0，1，1）的收敛速度没有明显差异；但随着初始意愿的增加，动态奖惩机制下三方的收敛速度明显高于静态奖惩机制。仿真结果表明，在三方初始意愿相同且较高的情况下，政府实施动态奖惩机制能够更有效地引导电池供应商与整车制造商达成绿色协同创新的演化稳定策略。

5　研究结论与启示

本文针对新能源汽车供应链绿色协同创新问题，构建了政府、电池供应商和整车制造商三方演化博弈模型，并通过数值模拟分析成本分担比例、政府奖惩金额、“搭便车”收益和创新风险等关键参数对策略演化的影响，研究结果表明：

1）当电池供应商和整车制造商进行协同创新的收益与“搭便车”的收益之差大于各自承担的成本时，系统达到稳定均衡状态，此时政府选择宽松监管策略，供应商和制造商均选择绿色协同创新策略。

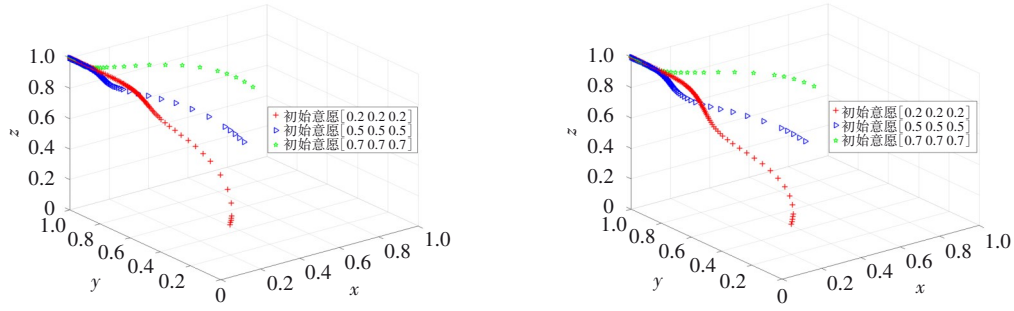
2）整车制造商分担电池供应商的绿色技术研发



（a）电池供应商　　（b）整车制造商

图12　政府动态奖励和惩罚对电池供应商和整车制造商的决策影响

Fig.12　Impact of dynamic government rewards and penalties on the decision-making of battery suppliers and automobile manufacturers



（a）静态奖惩机制 （b）动态奖惩机制

图13 静态与动态奖惩机制下初始意愿影响对比

Fig.13 Comparison of initial willingness impacts under static and dynamic reward-penalty mechanisms

成本比例不低于0.3时，才能激发其协同意愿；成本分担比例越高，合作意愿越强。然而，创新风险与“搭便车”收益的上升将驱动双方转向非绿色协同创新。

3）在静态奖惩机制下，政府提高奖惩力度可以促进电池供应商和整车制造商绿色协同创新，但最终策略向宽松监管方向收敛。

4）在动态奖惩机制下，政府对电池供应商奖励与惩罚的上限越高，整车制造商与电池供应商的绿色协同创新的概率就越高。同时，政府增加整车制造商惩罚的上限，能够加快电池供应商与整车制造商的合作意愿。

5）政府、电池供应商与整车制造商的初始意愿较低时，静态和动态奖惩机制向稳定均衡点的收敛速度没有较大的变化，但随着初始意愿的增加，动态机制的收敛速度会明显加快，优势凸显。

基于上述研究结论，可以得出以下管理启示：

1）政府应制定动态的奖励与惩罚机制，根据电池供应商与整车制造商对供应链绿色创新的实际投入水平与合作意愿实施阶梯式补贴和惩罚。相比静态奖惩机制，动态奖惩机制对双方行为的激励与约束效果更加明显，但需要设置在合理的范围内，以保证电池供应商和整车制造商合作创新的投入动力。此外，政府还要履行好监管的职责，减少供应链相关企业的“搭便车”行为，营造良好的市场生态环境。

2）整车制造商作为新能源汽车供应链绿色技术创新的主要参与者，应与电池供应商建立有效的沟通机制。双方可以定期召开绿色协同创新的专项会议，及时进行绿色技术的共享与研发协同，向其传达明确的绿色创新需求，并给予相应的研发资金支持。同时，整车制造商需要整合供应链资源，提高双方创新过程中的研发效率，通过签订契约维护电池供应商和整车制造商的自身利益，促进双方关系的稳定发展。

3）电池供应商作为新能源汽车供应链的重要组成部分，应以提高电池绿色属性为目标，积极跟随整车制造商选择绿色协同创新。在协同创新的过程中，电池供应商应从源头上抑制废旧电池对环境的污染，优先选择可回收的绿色原材料，减少有害物质的使用与排放，并主动向整车制造商提出成本分担方案，降低研发成本压力和创新风险，将绿色技术创新打造成新能源汽车供应链的核心竞争力，从而获得消费者的支持与青睐。

参考文献：

[1] 张野南，裘文意，楼乔奇. 新能源汽车绿色供应链构建路径研究[J]. 环境污染与防治，2025，47（8）：122-130.
Zhang Y N，Qiu W Y，Lou Q Q. The construction path of green supply chain for the new energy vehicle industry[J]. Environmental Pollution & Control，2025，47（8）：122-130.

[2] 刘丛，刘洁，邵路路，等.“双积分”政策下新能源汽车制造商激励供应商创新的契约选择研究[J]. 管理学报，2022，19（6）：928-937.
Liu C，Liu J，Shao L L，et al. Contract design to incentive supplier innovation under dual-credit policy[J]. Chinese Journal of Management，2022，19（6）：928-937.

[3] Meng Q C，Wang Y T，Zhang Z，et al. Supply chain green innovation subsidy strategy considering consumer heterogeneity[J]. Journal of Cleaner Production，2021，281：125199.

[4] 魏静怡. 政策趋同与效能分化视域下的科技成果转化测度研究——以河南省新能源汽车产业为例[J]. 创新科技，2026，26（5）：16-32.
Wei J Y. Measuring the Transformation of scientific and technological achievements from the perspective of policy

convergence and efficiency divergence—A case study of the new energy vehicle industry in Henan Province[J]. Innovation Science and Technology,2026,26(5):16-32.

[5] Mao Y F,Li P S,Li Y. Exploring the promotion of green technology innovation in the new energy vehicle industry: An evolutionary game analysis[J]. Environmental Science and Pollution Research,2023,30(33):81038-81054.

[6] Ji G D,Wang Q S,Chang Q,et al. Evolutionary game analysis of government regulation on green innovation behavior decision-making of energy enterprises[J]. Sustainability,2024,16(17):7542.

[7] 孟展,戴建广,杨锴,等.产业集群视角下中小企业绿色技术创新协同策略博弈研究[J].科技管理研究,2023,43(16):158-168.
Meng Z,Dai J G,Yang K,et al. Research on collaborative strategy of green technology innovation of SMEs from the perspective of industrial clusters based on game theory[J]. Science and Technology Management Research,2023,43(16):158-168.

[8] 曹柳,谭清美,梁爽.政府激励与市场竞争双重驱动下企业绿色技术创新决策Moran分析[J].工业工程与管理,2025,30(6):37-49.
Cao L,Tan Q M,Liang S. Moran analysis of corporate green technology innovation decisions driven by government incentives and market competition[J]. Industrial Engineering and Management,2025,30(6):37-49.

[9] Wang F Q,Li H M,Cao Y C,et al. Knowledge sharing strategy and emission reduction benefits of low carbon technology collaborative innovation in the green supply chain[J]. Frontiers in Environmental Science,2022,9:783835.

[10] 伊辉勇,唐玲.决策者失望规避下供应链协同产品创新微分对策研究[J].控制与决策,2024,39(1):271-280.
Yi H Y,Tang L. Differential strategies for collaborative product innovation in supply chain under decision makers' disappointed circumvention[J]. Control and Decision,2024,39(1):271-280.

[11] Liu H M,Hao H,Wei Z Q,et al. The effects of different fairness reference points on supply chain members' collaborative innovation[J]. Annals of Operations Research,2025,355(1):1069-1098.

[12] Wang Y C,Wang Z L,Cai H C. Cost-sharing incentive for collaborative innovation between main manufacturer-core supplier based on risk factors[J]. RAIRO-Operations Research,2024,58(4):2907-2925.

[13] Ding C,Liu H,Chen Y H,et al. Collaborative innovation in construction supply chain under digital construction: Evolutionary game analysis based on prospect theory[J]. Buildings,2024,14(7):2019.

[14] 杨国忠,周午阳.基于供应链视角的企业协同生态创新演化博弈[J].复杂系统与复杂性科学,2024,21(2):120-128.
Yang G Z,Zhou W Y. Evolutionary game of enterprises' collaborative ecological innovation based on the perspective of supply chain[J]. Complex Systems and Complexity Science,2024,21(2):120-128.

[15] 冉文学,段依婷.政府奖惩机制下农业供应链平台生态系统演化博弈[J].工业工程与管理,2025,30(6):120-133.
Ran W X,Duan Y T. Evolutionary game of agricultural supply chain platform ecosystem under the government reward and punishment mechanism[J]. Industrial Engineering and Management,2025,30(6):120-133.

[16] 张葆艳,来敬欣,储涛,等."以旧换新"下电器电子产品供应链碳减排协同机制研究[J/OL].复杂系统与复杂性科学,2025.https://link.cnki.net/urlid/37.1402.n.20251029.1833.002.
Zhang B Y,Lai J X,Chu T,et al. Research on the collaborative mechanism of carbon emission reduction in the supply chain of electrical and electronic equipment under the "trade in" policy[J/OL]. Complex Systems and Complexity Science,2025. https://link.cnki.net/urlid/37.1402.n.20251029.1833.002.

[17] 臧誉琪,费晓香,梁迈.政府干预突发事件信息共享的动态奖惩机制研究[J].数学的实践与认识,2023,53(10):32-41.
Zang Y Q,Fei X X,Liang M. Research on dynamic reward and punishment mechanism of government intervention in emergency information sharing[J]. Mathematics in Practice and Theory,2023,53(10):32-41.

[18] 史俊伟,钱浙安,叶雨晴,等.政府奖惩机制下港口危化品储存安全监管博弈分析与仿真[J].安全与环境学报,2025,25(3):1045-1056.
Shi J W,Qian Z A,Ye Y Q,et al. Evolutionary game analysis and simulation of port hazardous chemical storage safety supervision under a governmental reward and punishment mechanism[J]. Journal of Safety and Environment,2025,25(3):1045-1056.

[19] 孙健慧,张海波.绿色供应链协同创新合作策略研究[J].工业工程,2020,23(4):53-60.
Sun J H,Zhang H B. A research on collaborative innovation cooperation strategy of green supply chain[J]. Industrial Engineering Journal,2020,23(4):53-60.

[20] Hu J,Wu J,Zhuang F,et al. Contract selection for collaborative innovation in the new energy vehicle supply chain under the dual credit policy:Cost sharing and benefit shar-

ing[J]. International Journal of Industrial Engineering Computations,2024,15(1):209-222.

[21] 刘娟娟,谢加孙,张为四.考虑动力电池回收的新能源汽车供应链生态设计模式研究[J].运筹与管理,2024,33(12):69-76.
Liu J J, Xie J S, Zhang W S. Research on ecological design mode of new energy vehicle supply chain considering power battery recycling[J]. Operations Research and Management Science,2024,33(12):69-76.

[22] Lyapunov A M. The general problem of the stability of motion[J]. International Journal of Control,1992,55(3):531-534.

[23] 顾翠伶,王先甲,常文可.战略性新兴产业供应链企业协同创新演化分析[J].系统工程学报,2024,39(6):937-954.
Gu C L, Wang X J, Chang W K. Evolutionary analysis on collaborative innovation of supply chain enterprises of strategic emerging industries[J]. Journal of Systems Engineering,2024,39(6):937-954.

[24] 梁喜,陈清卿.政府动态奖惩机制下重大疫情防控演化博弈研究[J].中国管理科学,2023,31(3):277-286.
Liang X, Chen Q Q. Study on the major epidemic prevention and control under the mechanism of government dynamic reward and punishment[J]. Chinese Journal of Management Science,2023,31(3):277-286.

[25] 和征,曲姣姣,李勃.考虑政府奖惩的绿色供应链企业合作创新行为的演化博弈分析[J].生态经济,2021,37(11):62-70.
He Z, Qu J J, Li B. Evolutionary game analysis of cooperative innovation behaviors of green supply chain enterprises considering government rewards and punishments[J]. Ecological Economy,2021,37(11):62-70.

[26] 赵丹,严啸宸,汪和平,等.双积分政策下汽车企业合作创新演化博弈分析[J].中国管理科学,2024,32(4):279-292.
Zhao D, Yan X C, Wang H P, et al. Evolutionary game analysis of cooperative innovation of automakers under dual-credit policy[J]. Chinese Journal of Management Science,2024,32(4):279-292.

[27] 陈志新,王源,焦德颖.政府监管下“农超对接”供应链韧性投入行为与治理研究[J].管理评论,2025,37(2):249-262.
Chen Z X, Wang Y, Jiao D Y. Research on the resilience investment behavior and governance of the supply chain in the “farming-supermarket” docking under government regulation[J]. Management Review, 2025, 37(2): 249-262.

[28] 邵舒羽,王晴,刘艳.政府动态奖惩机制下中小型制造企业绿色转型研究[J/OL].中国管理科学,2025.https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2024.0001.
Shao S Y, Wang Q, Liu Y. Green transformation of small and medium-sized manufacturing enterprises under the dynamic government reward and punishment mechanism [J/OL]. Chinese Journal of Management Science, 2025. https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2024.0001.

（编辑 关欣佳）