引用格式：张桂阳，贾玉财，戚湧，等. 异质复杂网络下产业共性技术创新扩散的两阶段博弈分析[J]. 技术经济，2025，44(9)：1-13.
Zhang Guiyang，Jia Yucai，Qi Yong，et al. Two-stage same analysis of industrial general purpose technology innovation diffusion based on heterogeneous complex networks[J]. Journal of Technology Economics，2025，44(9)：1-13.

教育科技人才一体化主题专栏

异质复杂网络下产业共性技术创新扩散的两阶段博弈分析

张桂阳[1]，贾玉财[1]，戚 湧[2]，董 丰[3]
（1. 南京理工大学经济管理学院，南京 210094；2. 南京理工大学知识产权学院，南京 210094；
3. 安徽工程大学经济与管理学院，芜湖 241000）

摘 要：基于演化博弈理论和复杂网络理论，构建产业共性技术创新扩散的演化博弈模型，系统分析其在企业群体间二次开发及在消费者群体间附随产品购买两个阶段的扩散机制。模型考虑扩散群体的异质性复杂网络拓扑特征，涵盖博弈主体、演化规则和网络结构三要素，旨在刻画技术在供给侧和需求侧的扩散路径，并探索政府在产业共性技术创新扩散两阶段中的最优激励策略。研究发现：政府补贴对产业共性技术创新扩散具有倒U型激励效应，过高或过低的补贴力度均削弱资源配置效率；边缘企业比核心企业更关注共性技术二次开发后的技术成熟度和政府补贴力度；在消费者群体间的扩散遵循价格机制，降低技术附随产品价格及提升其技术成熟度有助于市场渗透；共性技术创新扩散稳定性受群体网络结构影响显著，降低技术成本或产品价格有助于提升扩散稳定性。研究揭示了产业共性技术扩散的多主体协同机制与政策激励的边界效应，为政府优化政策工具、提升共性技术推广效率提供理论支撑。

关键词：产业共性技术；创新扩散；异质复杂网络；两阶段演化博弈
中图分类号：F273.1 **文献标志码**：A **文章编号**：1002-980X(2025)09-0001-13
DOI：10.12404/j.issn.1002-980X.J24110303

一、引言

产业共性技术作为很多领域内已经或未来可能被广泛应用的一类技术，主要解决的是产业发展中基础性的、关键性的问题，其具有使能、应用前景广泛和服务多用户的“平台技术”特性，通常处于产业技术创新链的基础环节[1-2]。党的二十届三中全会指出，要加强关键共性技术创新，加强新领域新赛道制度供给，建立未来产业投入增长机制，完善推动战略性产业发展政策和治理体系，引导新兴产业健康有序发展。《产业关键共性技术发展指南(2024年)》中确定优先发展的产业关键共性技术共216项，涉及新一代信息技术、人工智能、航空航天、新能源、新材料、高端装备、生物医药、量子科技等八大产业。例如，通信技术、纳米技术、计算机辅助设计等关键共性技术，能够应用于多个不同产业领域，优化产业结构，提高产业竞争力，发挥了巨大的经济与社会发展正外部性[3]。但是，产业共性技术既不属于纯粹经济学意义上的公共物品，也不具有商业应用上的独占性。相对于完全市场化的技术供给，产业共性技术呈现出明显的“毛坯”属性和准公共品特征，其潜在价值的实现依赖于企业的二次开发及市场的有效扩散[4]。

收稿日期：2025-02-24
基金项目：国家社会科学基金“基于专利文本和复杂网络的关键共性技术识别框架、研发模式及扩散路径研究”(21CGL004)
作者简介：张桂阳(1991—)，南京理工大学经济与管理学院副教授，硕士研究生导师，研究方向：技术创新管理；(通信作者)贾玉财(1998—)，南京理工大学经济与管理学院博士研究生，研究方向：演化博弈；戚湧(1970—)，博士，南京理工大学知识产权学院教授，院长，博士研究生导师，研究方向：知识管理；董丰(1990—)，博士，安徽工程大学经济与管理学院讲师，硕士研究生导师，研究方向：技术创新管理。

基于技术生命周期理论,产业共性技术在全社会范围内的创新扩散可划分为两个阶段:一是技术供给端,即在企业群体间扩散;二是产品需求侧,即在消费者群体间扩散[5]。在第一阶段,产业共性技术扩散呈现为扩散对象企业对该技术进行针对性改造,形成满足自身特点的专有技术[6]。作为技术基础设施重要构成部分,产业共性技术处于基础研究向应用研究的过度阶段[7],此时,产业共性技术扩散实质是二次创新过程,扩散对象企业采纳量变化起着决定性作用,政府则提供制度保障并通过技术研发补贴等方式激励二次创新[8]。第二阶段则真正进入市场阶段,产业共性技术附随在具体产品中,在产品市场实现最终的商业化扩散。此时,随附产品生产技术的成熟度及其市场价格是影响消费者购买决策的重要因素[9]。研究和实践表明,产业共性技术的扩散存在壁垒。一方面,产业共性技术价值创造依赖于其他企业二次开发。这一过程中,互补技术开发、配套资产投入、组织变革和机会成本及技术的不确定性导致其他企业不愿意采纳或无能力开展二次创新。同时,共性技术基础性、风险性和关联性的特征导致其交易成本较高,进一步加剧了企业在市场交易中获取共性技术的难度[10],从而削弱了其在企业群体间的扩散效果[11]。另一方面,产业共性技术的公共产品属性及新技术存在高昂的创新溢价,消费者不愿为创新产品支付额外的产品溢价[12]。同时,新技术的创新成熟度不高、稳定性较弱进一步加剧了市场需求的疲软态势,使得随附产品在需求端的价值释放受阻,技术扩散动力不足[13]。

针对以上产业共性技术创新扩散在企业群体和消费者群体中所面临的挑战,本文主要探究:①企业群体和消费者群体内部因素如何影响产业共性技术的创新扩散;②产业共性技术创新扩散的供需端之间如何相互作用;③政府补贴如何激励企业群体采纳产业共性技术并开展二次创新,如何解决消费者因创新产品额外的产品溢价导致的消费意愿不足问题。

二、文献回顾

产业共性技术的扩散一直是学界关注的热点问题。学者基于多个视角,如技术特征(新技术优势、技术准备度、采用成本、不确定风险等)、供需主体特征及其双方竞争合作关系,以及扩散环境(政府补贴、知识产权制度、服务体系等)等,分析了影响产业共性技术扩散的关键因素[10,14-16]。一些学者特别关注市场机制下产业共性技术扩散存在的制度失灵和市场失灵现象,并指出政府制度支持可以减少市场机制无效波动产生的负外部性,从而缓解产业共性技术扩散失灵[17]。然而,单一政策工具激励作用有限,推动产业共性技术创新扩散不仅需要发挥政策调控作用,还要遵循市场导向原则并发挥协同效应。本文根据研究需要,重点梳理了产业共性技术创新扩散跨阶段交互过程及网络效应相关文献,具体如下。

第一,产业共性技术创新扩散的多阶段过程具有扩散对象利益交互复杂化的特征[8]。企业群体采纳新的技术能够提高产品质量和生产效率,并促进创新产品在消费者群体间的扩散[18]。然而,由于共性技术二次开发的高难度、高成本及潜在需求不足等负外部性因素,企业群体基于共性技术形成的专有技术产生的外部效益若不能被转化为内部收益,其技术采纳的意愿积极性将会降低[19]。此时,市场消费者对创新产品的需求能够反向激励企业群体采纳共性技术并开展二次创新[20]。尽管质量是决定创新产品能否长期持续扩散的关键,但短期内,价格和公众认知偏好显著影响创新产品扩散效果。竞争市场下,创新产品由于高成本难以取得显著竞争优势,只有不断提升技术成熟度保障创新产品质量才能有效撬动普通产品的市场份额[21],推动创新产品在消费者群体间的扩散,进而拉动共性技术在企业群体间的扩散。由此可见,市场机制是企业群体间产业共性技术创新扩散的重要拉动力。企业群体、消费者群体间的创新扩散相互作用形成正向的反馈循环,构成了技术创新扩散的内在动力机制[22]。

第二,产业共性技术创新扩散具有鲜明的人际效应、网络效应及激化效应[23]。个体对新技术的相对优势、兼容性、复杂性、可试验性及可观察性的认知受群体中其它成员的影响,并通过模仿学习采取和群体中多数个体一致的扩散决策[24]。演化博弈虽然能刻画个体之间的利益交互关系及个体决策行为的互动因素[25],但是不能阐释群体决策情境下的共性技术扩散机制[26]。基于复杂网络的演化博弈能够模拟种群中个体行为到群体行为演化趋势及稳定状态[27],较好地适应了技术扩散的群体行为研究。现实中,群体间就产业共性技术创新扩散的博弈演化也往往形成具有拓扑统计特征的复杂扩散网络。在企业端,企业集聚形

成多个集群，少数企业在各自的集群中处于核心地位，节点度较高，多数企业在集群中处于边缘位置，节点度较低[31]。集群中企业度的分布关系反映了“无标度”网络的幂分布特征，构成了企业端的无标度扩散网络[18]。而在需求端，消费者往往抱有从众心理，其购买决策行为呈聚类分布特征，创新扩散拓扑呈现“小世界”网络[30]。现有创新扩散复杂网络博弈研究在解释主体决策行为影响机理时未将群体异质性网络拓扑特征纳入进来，因而无法模拟不同群体决策行为的演化过程[27,32]。

通过梳理，既有研究存在以下不足：第一，产业共性技术扩散理论机制研究局限于企业技术采纳单一环节，并未充分考虑企业产业参与二次创新的过程，也忽视了随附产品在市场需求端的扩散特点，从而弱化了研究成果对产业共性技术扩散的实践指导意义。第二，既有研究应用网络拓扑结构构建技术扩散的演化博弈模型时未考虑企业主体的复杂性，忽略了企业群体中的核心企业和边缘企业在促进产业共性技术创新扩散中的异质行为[33]。第三，既有网络演化博弈模型未区分产业共性技术扩散两阶段不同扩散对象所处的异质性空间网络环境，即企业群体扩散关系构成的无标度网络及消费者群体扩散关系构成的“小世界”网络，从而未能充分解析网络对产业共性技术创新扩散的驱动机制。

本文的创新之处在于：第一，考虑多主体之间的复杂利益交互行为，将产业共性技术创新扩散分为在企业群体采纳、二次开发过程及消费者购买附随产品两个阶段，进一步深化对市场需求驱动的产业共性技术创新扩散机制的理解。第二，考虑企业发展水平的异质性，将企业群体划分为核心企业与边缘企业，探讨企业在共性技术采纳及二次开发决策行为的异质性；同时，针对企业和市场消费者异质性网络拓扑特征，分别构建企业群体无标度扩散网络和消费者群体小世界扩散网络，探讨两阶段中网络拓扑结构对于产业技术创新扩散的异质效应。第三，考虑市场机制与政策机制的协调互补，提出由博弈主体、演化规则和网络结构三要素组成的产业共性技术创新扩散博弈模型，通过调控反馈仿真探索企业和消费者博弈策略动态调整过程及实现自身最优的稳定性条件，为建立遵循市场导向原则下具有政府政策协调作用的产业共性技术创新扩散机制提供理论依据。

三、问题描述与研究假设

（一）问题描述

产业共性技术扩散的“制度失灵”和“市场失灵”决定了政府应发挥积极引导作用[17]。政府可以通过制定顶层战略、设立专项计划、加强相关立法等政策，干预关键共性技术发展。然而，不同政策发挥的激励效用在本质上存在差异性。例如，基于惩罚性质的产品税，虽然能够作为外部推力驱动企业群体采纳一项技术，但无法改变企业主观决策意识，相比之下，政府若能给予恰当的如鼓励多主体协同参与后续开发、给予补贴等支持，更能提高企业的技术采纳意愿，从而推动产业共性技术的有效扩散[25]。本文充分考虑政府对企业群体和消费者群体双边补贴的积极效应，构建两阶段演化博弈模型来分析产业共性技术从创新激发到市场融入的完整扩散闭环系统。第一阶段为产业共性技术在企业群体间的扩散阶段，在政府补贴与企业自身发展需求综合影响下，企业采纳产业共性技术，产业共性技术在企业群体之间扩散，并对其进行二次创新，形成专有化技术为消费者需求市场生产创新产品。第二阶段产业共性技术附随产品面向市场消费者群体间的扩散，在政府补贴干预下消费者基于附随产品的综合效益对比做出购买决策，驱动产业共性技术创新在市场需求端的广泛采纳，为产业共性技术创新扩散提供拉力。针对产业共性技术创新两阶段扩散对象群体网络拓扑特征结构，本文分别构建无标度网络扩散模型和小世界网络扩散模型。拟解决以下问题：①基于不同的网络拓扑特征，企业群体和消费者群体内部因素如何影响产业共性技术的扩散路径？②产业共性技术创新两阶段扩散对象群体之间的相互作用机理如何？③考虑市场机制与政策机制的协调互补，政府补贴如何影响产业共性技术创新扩散？

（二）模型假设

本文构建研究模型的基本假设阐释如下。

假设 1（企业创新策略相关假设）：假设从事相同生产经营活动的企业数量为 m。m 个企业中部分企业选择保守策略，不采纳新的产业共性技术，依然使用传统技术生产产品；部分企业为抢占未来市场，采纳新

的产业共性技术并投入资金进行二次创新，选择“采纳”产业共性技术的比例为 φ，这部分企业中核心企业占比 x，边缘企业占比 y，$x+y=1$。

假设2（政府决策行为相关假设）：由于核心企业和边缘企业创新能力不同，企业选择不同产业共性技术推动了社会的发展进步，产生正向的社会效应 η_g。而不选择产业共性技术则导致其无法得到有效扩散，产业共性技术发展的长期缺失会导致社会边际效益递减，科技发展滞后，产生的负向社会效应为 η_t。针对负外部性，政府会以征收产品税收的形式进行处罚，假设政府对非产业共性技术生产的产品征税额为 v。针对正外部性，政府为激励产业共性技术创新的扩散，对采纳产业共性技术的企业设置补贴政策，补贴率为生产成本的 t_e。

假设3（消费者决策行为相关假设）：假设具有产业共性技术创新附随产品偏好的消费者比例为 η，消费者购买附随产品获得自身需求满足感为 k，附随产品与普通产品市场价格受成本影响而不同，分别为 P_g 和 P_t，政府对产业共性技术附随产品的价格为 t_c，附随产品对消费者和社会释放一定的经济与技术效益 w[34]。

假设4（成本与风险损失相关假设）：企业使用传统技术生产的产品基本成本为 C_t，使用新的产业共性技术生产的产品基本成本为 C_g，产业共性技术附随产品生产成本受企业对其进行二次开发应用的技术成熟度的影响[34]。假设核心企业和边缘企业对产业共性技术进行二次开发后的技术成熟度分别为 δ_c 和 δ_m，企业采纳产业共性技术并进行二次开发的风险损失随二次开发的技术成熟度呈非线性变化 $fe^{-\delta}$[35]，其中 f 为风险损失系数。产品的市场逆需求函数为：$P=a-b(q_1+q_2)$，其中 P 为产品价格，a 为产品价格上限，b 为市场需求的价格弹性系数[30]。因此，核心企业与边缘企业选择采纳产业共性技术策略生产产品的成本函数分别为 $C_c^g=(C_g+f)e^{-\delta_c}-t_eC_g$ 和 $C_m^g=(C_g+f)e^{-\delta_m}-t_eC_g$。由于传统技术趋于成熟，生产成本受企业发展水平影响较小，因而核心企业与边缘企业选择传统技术策略生产普通产品的成本函数均为 $C=C_t+\mu$，其中，μ 为政府征收的产品税。

四、模型构建

（一）产业共性技术创新扩散阶段模型

假设核心企业和边缘企业生产产业共性技术附随产品的利润函数分别为 Π_c^{gg} 和 Π_m^{gg}，其中 q_c^{gg} 和 q_m^{gg} 分别为核心企业与边缘企业选择相应创新策略下的古诺均衡产出量，则有

$$\Pi_c^{gg}=[a-b(q_c^{gg}+q_m^{gg})-(C_g+f)e^{-\delta_c}+t_eC_g]q_c^{gg} \tag{1}$$

$$\Pi_m^{gg}=[a-b(q_c^{gg}+q_m^{gg})-(C_g+f)e^{-\delta_m}+t_eC_g]q_m^{gg} \tag{2}$$

企业通过定价获取最大化利润，由此可以得到古诺均衡条件则有：

$$\begin{cases}\dfrac{\partial\Pi_c^{gg}}{\partial q_c^{gg}}=a-2bq_c^{gg}-bq_m^{gg}-(C_g+f)e^{-\delta_c}+t_eC_g=0\\[2ex]\dfrac{\partial\Pi_m^{gg}}{\partial q_m^{gg}}=a-2bq_m^{gg}-bq_c^{gg}-(C_g+f)e^{-\delta_m}+t_eC_g=0\end{cases} \tag{3}$$

因此，可得在核心企业与边缘企业均采纳产业共性技术策略下的古诺均衡产出量分别为

$$\begin{cases}q_c^{gg}=\dfrac{a+(C_g+f)(e^{-\delta_m}-2e^{-\delta_c})+t_eC_g}{3b}\\[2ex]q_m^{gg}=\dfrac{a+(C_g+f)(e^{-\delta_c}-2e^{-\delta_m})+t_eC_g}{3b}\end{cases} \tag{4}$$

因此，企业均衡利润 Π_c^{gg*} 和 Π_m^{gg*} 分别为

$$\Pi_c^{gg*}=\frac{[a+(C_g+f)(e^{-\delta_m}-2e^{-\delta_c})+t_eC_g]^2}{9b} \tag{5}$$

$$\Pi_{\mathrm{m}}^{\mathrm{gg}*}=\frac{\left[a+(C_{\mathrm{g}}+f)\left(\mathrm{e}^{-\delta_{\mathrm{c}}}-2\mathrm{e}^{-\delta_{\mathrm{m}}}\right)+t_{\mathrm{e}}C_{\mathrm{g}}\right]^{2}}{9b} \tag{6}$$

当核心企业和边缘企业均选择传统技术生产普通产品，利润函数分别为 $\Pi_{\mathrm{c}}^{\mathrm{tt}}$ 和 $\Pi_{\mathrm{m}}^{\mathrm{tt}}$，其中 $q_{\mathrm{c}}^{\mathrm{tt}}$ 和 $q_{\mathrm{m}}^{\mathrm{tt}}$ 分别为核心企业与边缘企业选择相应创新策略下的古诺均衡产出量，则有

$$\Pi_{\mathrm{c}}^{\mathrm{tt}}=\left[a-b\left(q_{\mathrm{c}}^{\mathrm{tt}}+q_{\mathrm{m}}^{\mathrm{tt}}\right)-C_{t}-v\right]q_{\mathrm{c}}^{\mathrm{tt}} \tag{7}$$

$$\Pi_{\mathrm{m}}^{\mathrm{tt}}=\left[a-b\left(q_{\mathrm{m}}^{\mathrm{tt}}+q_{\mathrm{c}}^{\mathrm{tt}}\right)-C_{t}-v\right]q_{\mathrm{m}}^{\mathrm{tt}} \tag{8}$$

同理，可得：

$$\begin{cases}\dfrac{\partial\Pi_{\mathrm{c}}^{\mathrm{tt}}}{\partial q_{\mathrm{c}}^{\mathrm{tt}}}=a-2bq_{\mathrm{c}}^{\mathrm{tt}}-bq_{\mathrm{m}}^{\mathrm{tt}}-C_{\mathrm{t}}-v=0\\ \dfrac{\partial\Pi_{\mathrm{m}}^{\mathrm{tt}}}{\partial q_{\mathrm{m}}^{\mathrm{tt}}}=a-2bq_{\mathrm{m}}^{\mathrm{tt}}-bq_{\mathrm{c}}^{\mathrm{tt}}-C_{\mathrm{t}}-v=0\end{cases} \tag{9}$$

因此，可解得：

$$q_{\mathrm{c}}^{\mathrm{tt}}=q_{\mathrm{m}}^{\mathrm{tt}}=\frac{a-C_{\mathrm{t}}-v}{3b} \tag{10}$$

$$\Pi_{\mathrm{c}}^{\mathrm{tt}}=\Pi_{\mathrm{m}}^{\mathrm{tt}}=\frac{(a-C_{\mathrm{t}}-v)^{2}}{9b} \tag{11}$$

当核心企业采纳产业共性技术生产创新产品，边缘企业采纳传统技术生产普通产品，此时核心企业与边缘企业的利润函数分别为 $\Pi_{\mathrm{c}}^{\mathrm{gt}}$ 和 $\Pi_{\mathrm{m}}^{\mathrm{gt}}$，其中 $q_{\mathrm{c}}^{\mathrm{gt}}$ 和 $q_{\mathrm{m}}^{\mathrm{gt}}$ 分别为核心企业与边缘企业选择相应创新策略下的古诺均衡产出量。

$$\Pi_{\mathrm{c}}^{\mathrm{gt}}=\left[a-b\left(q_{\mathrm{c}}^{\mathrm{gt}}+q_{\mathrm{m}}^{\mathrm{gt}}\right)-(C_{\mathrm{g}}+f)\mathrm{e}^{-\delta_{\mathrm{c}}}+t_{\mathrm{e}}C_{\mathrm{g}}\right]q_{\mathrm{c}}^{\mathrm{gt}} \tag{12}$$

$$\Pi_{\mathrm{m}}^{\mathrm{gt}}=\left[a-b\left(q_{\mathrm{c}}^{\mathrm{gt}}+q_{\mathrm{m}}^{\mathrm{gt}}\right)-C_{\mathrm{t}}-v\right]q_{\mathrm{m}}^{\mathrm{gt}} \tag{13}$$

同理，可得核心企业与边缘企业的均衡利润 $\Pi_{\mathrm{c}}^{\mathrm{gt}*}$ 和 $\Pi_{\mathrm{m}}^{\mathrm{gt}*}$ 分别为

$$\Pi_{\mathrm{c}}^{\mathrm{gt}*}=\frac{\left\{a-2\left[(C_{\mathrm{g}}+f)\mathrm{e}^{-\delta_{\mathrm{c}}}-t_{\mathrm{e}}C_{\mathrm{g}}\right]+C_{\mathrm{t}}+v\right\}^{2}}{9b} \tag{14}$$

$$\Pi_{\mathrm{m}}^{\mathrm{gt}*}=\frac{\left[a+(C_{\mathrm{g}}+f)\mathrm{e}^{-\delta_{\mathrm{c}}}-t_{\mathrm{e}}C_{\mathrm{g}}-2(C_{\mathrm{t}}+v)\right]^{2}}{9b} \tag{15}$$

当核心企业选择采纳传统技术生产普通产品，边缘企业采纳产业共性技术生产创新产品，此时，核心企业与边缘企业的利润函数分别为 $\Pi_{\mathrm{c}}^{\mathrm{tg}}$ 和 $\Pi_{\mathrm{m}}^{\mathrm{tg}}$，其中 $q_{\mathrm{c}}^{\mathrm{tg}}$ 和 $q_{\mathrm{m}}^{\mathrm{tg}}$ 分别为核心企业与边缘企业选择相应创新策略下的古诺均衡产出量。

$$\Pi_{\mathrm{c}}^{\mathrm{tg}}=\left[a-b\left(q_{\mathrm{c}}^{\mathrm{tg}}+q_{\mathrm{m}}^{\mathrm{tg}}\right)-C_{\mathrm{t}}-v\right]q_{\mathrm{c}}^{\mathrm{tg}} \tag{16}$$

$$\Pi_{\mathrm{m}}^{\mathrm{tg}}=\left[a-b\left(q_{\mathrm{c}}^{\mathrm{tg}}+q_{\mathrm{m}}^{\mathrm{tg}}\right)-(C_{\mathrm{g}}+f)\mathrm{e}^{-\delta_{\mathrm{m}}}+t_{\mathrm{e}}C_{\mathrm{g}}\right]q_{\mathrm{m}}^{\mathrm{tg}} \tag{17}$$

同理，可得核心企业与边缘企业的均衡利润 $\Pi_{\mathrm{c}}^{\mathrm{tg}*}$ 和 $\Pi_{\mathrm{m}}^{\mathrm{tg}*}$ 分别为

$$\Pi_{\mathrm{c}}^{\mathrm{tg}*}=\frac{\left[a+(C_{\mathrm{g}}+f)\mathrm{e}^{-\delta_{\mathrm{m}}}-t_{\mathrm{e}}C_{\mathrm{g}}-2(C_{\mathrm{t}}+v)\right]^{2}}{9b} \tag{18}$$

$$\Pi_{\mathrm{m}}^{\mathrm{tg}*}=\frac{\left\{a-2\left[(C_{\mathrm{g}}+f)\mathrm{e}^{-\delta_{\mathrm{m}}}-t_{\mathrm{e}}C_{\mathrm{g}}\right]+C_{\mathrm{t}}+v\right\}^{2}}{9b} \tag{19}$$

基于上述分析，企业群体中核心企业与边缘企业采纳不同技术生产策略的收益支付矩阵，如表 1 所示。

根据表 1,核心企业选择产业共性技术进行生产的期望收益为 E_c^g,选择传统技术进行生产的期望收益为 E_c^t,平均期望收益为 $\overline{E_c}$,分别如式(20)和式(21)所示。

表 1　企业博弈策略的收益支付矩阵

类型		边缘企业	
		产业共性技术(y)	传统技术($1-y$)
核心企业	产业共性技术(x)	Π_c^{gg}; Π_m^{gg}	Π_c^{gt}; Π_m^{gt}
	传统技术($1-x$)	Π_c^{tg}; Π_m^{tg}	Π_c^{tt}; Π_m^{tt}

$$E_c^g = y\Pi_c^{gg} + (1-y)\Pi_c^{gt} \tag{20}$$

$$E_c^t = y\Pi_c^{tg} + (1-y)\Pi_c^{tt} \tag{21}$$

$$\overline{E_c} = xE_c^g + (1-x)E_c^t = xy\Pi_c^{gg} + x(1-y)\Pi_c^{gt} + (1-x)y\Pi_c^{tg} + (1-x)(1-y)\Pi_c^{tt} \tag{22}$$

边缘企业选择产业共性技术进行生产的期望收益为 E_m^g,选择传统技术进行生产的期望收益则为 E_m^t,平均期望收益为 $\overline{E_m}$,分别如式(23)和式(24)所示。

$$E_m^g = x\Pi_m^{gg} + (1-x)\Pi_m^{tg} \tag{23}$$

$$E_m^t = x\Pi_m^{gt} + (1-x)\Pi_m^{tt} \tag{24}$$

$$\overline{E_m} = yE_m^g + (1-y)E_m^t = xy\Pi_m^{gg} + (1-x)y\Pi_m^{tg} + x(1-y)\Pi_m^{gt} + (1-x)(1-y)\Pi_m^{tt} \tag{25}$$

根据式(24)~式(26),可得核心企业的博弈复制动态方程为

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(E_c^g - \overline{E_c}) = x(1-x)[y(\Pi_c^{gg} - \Pi_c^{tg}) + (1-y)(\Pi_c^{gt} - \Pi_c^{tt})] \tag{26}$$

同理,根据式(27)~式(29),可得边缘企业的博弈复制动态方程为

$$F(y) = \frac{dy}{dt} = y(E_m^g - \overline{E_m}) = y(1-y)[x(\Pi_m^{gg} - \Pi_m^{gt}) + (1-x)(\Pi_m^{tg} - \Pi_m^{tt})] \tag{27}$$

(二)创新产品扩散阶段模型

消费者群体在购买产品时有两种决策行为,分别为购买“产业共性技术附随产品”和购买“传统产品”。不同产品的市场价格、使用效益等属性不同,从而对消费者购买产品的期望收益产生影响。企业群体中核心企业与边缘企业采纳不同的生产技术策略组合下,消费者 α 和消费者 β 购买产品的收益支付矩阵见表 2 和表 3。

为方便计算,令:$P^{gg} = a - b(q_c^{gg} + q_m^{gg})a$,$P^{gt} = a - b(q_c^{gt} + q_m^{gt})$,$P^{tg} = a - b(q_c^{tg} + q_m^{tg})$,$P^{tt} = a - b(q_c^{tt} + q_m^{tt})$。

假设消费者 α 购买产业共性技术附随产品和传统产品的期望收益分别为 Π_α^g、Π_α^t:

$$\begin{aligned}\Pi_\alpha^g = {} & (x+y)[k+w-(1-t_c)P^{gt}] + xy[(1-t_c)(P^{gt} + P^{tg} - P^{gg}) - k - w] + \\ & (x+y-xy)\eta_g e^{-(1-\varphi)} + (xy-1)\eta_t e^{-\varphi}\end{aligned} \tag{28}$$

$$\begin{aligned}\Pi_\alpha^t = {} & k - P^{tt} + (x+y)[\eta_g e^{-(1-\varphi)} + P^{tt}] - xP^{gt} - yP^{tg} + xy[P^{gt} + P^{tg} - P^{tt} - \\ & \eta_g e^{-(1-\varphi)} - k] + \eta_t e^{-\varphi}(xy-1)\end{aligned} \tag{29}$$

表 2　消费者 α 购买产业共性技术附随产品时核心企业和边缘企业收益支付矩阵

类型				消费者 α	
				产业共性技术附随产品(η)	传统产品($1-\eta$)
核心企业	产业共性技术(x)	边缘企业	产业共性技术(y)	$k+w-(1-t_c)P^{gg}+\eta_g e^{-(1-\varphi)}$ $k+w-(1-t_c)P^{gg}+\eta_g e^{-(1-\varphi)}$	$k+w-(1-t_c)P^{gg}+\eta_g e^{-(1-\varphi)}$ $\eta_g e^{-(1-\varphi)}$
			传统技术($1-y$)	$k+w-(1-t_c)P_{gt}+\eta_g e^{-(1-\varphi)}-\eta_t e^{-\varphi}$ $k+w-(1-t_c)P^{gt}+\eta_g e^{-(1-\varphi)}-\eta_t e^{-\varphi}$	$k+w-(1-t_c)P^{gt}+\eta_g e^{-(1-\varphi)}-\eta_t e^{-\varphi}$ $k-P^{gt}+\eta_g e^{-(1-\varphi)}-\eta_t e^{-\varphi}$
	传统技术($1-x$)	边缘企业	产业共性技术(y)	$k+w-(1-t_c)P^{tg}+\eta_g e^{-(1-\varphi)}-\eta_t e^{-\varphi}$ $k+w-(1-t_c)P^{tg}+\eta_g e^{-(1-\varphi)}-\eta_t e^{-\varphi}$	$k+w-(1-t_c)P^{tg}+\eta_g e^{-(1-\varphi)}-\eta_t e^{-\varphi}$ $k-P^{tg}+\eta_g e^{-(1-\varphi)}-\eta_t e^{-\varphi}$
			传统技术($1-y$)	$-\eta_t e^{-\varphi}$ $-\eta_t e^{-\varphi}$	$-\eta_t e^{-\varphi}$ $k-P^{tt}-\eta_t e^{-\varphi}$

表 3　消费者 α 购买传统产品时核心企业和边缘企业收益支付矩阵

类型				消费者 β	
				产业共性技术附随产品（η）	普通产品（$1-\eta$）
核心企业	产业共性技术（x）	边缘企业	产业共性技术（y）	$\eta_g e^{-(1-\varphi)}$ $k+w-(1-t_c)P^{gg}+\eta_g e^{-(1-\varphi)}$	$\eta_g e^{-(1-\varphi)}$ $\eta_g e^{-(1-\varphi)}$
			传统技术（$1-y$）	$k-P^{gt}+\eta_g e^{-(1-\varphi)}-\eta_t e^{-\varphi}$ $k+w-(1-t_c)P^{gt}+\eta_g e^{-(1-\varphi)}-\eta_t e^{-\varphi}$	$k-P^{gt}+\eta_g e^{-(1-\varphi)}-\eta_t e^{-\varphi}$ $k-P^{gt}+\eta_g e^{-(1-\varphi)}-\eta_t e^{-\varphi}$
	传统技术（$1-x$）	边缘企业	产业共性技术（y）	$k-P^{tg}+\eta_g e^{-(1-\varphi)}-\eta_t e^{-\varphi}$ $k+w-(1-t_c)P^{tg}+\eta_g e^{-(1-\varphi)}-\eta_t e^{-\varphi}$	$k-P^{tg}+\eta_g e^{-(1-\varphi)}-\eta_t e^{-\varphi}$ $k-P^{tg}+\eta_g e^{-(1-\varphi)}-\eta_t e^{-\varphi}$
			传统技术（$1-y$）	$k-P^{tt}-\eta_t e^{-\varphi}$ $-\eta_t e^{-\varphi}$	$k-P^{tt}-\eta_t e^{-\varphi}$ $k-P^{tt}-\eta_t e^{-\varphi}$

消费者 β 购买产业共性技术附随产品和传统产品的期望收益分别为 Π_β^g 、Π_β^t ：

$$\Pi_\beta^g = (x+y)[k+w-(1-s_c)P^{gt}] + xy[(1-t_c)(P^{gt}+P^{tg}-P^{gg})-k-w] + (x+y-xy)\eta_g e^{-(1-\varphi)} + (xy-1)\eta_t e^{-\varphi} \tag{30}$$

$$\Pi_\beta^t = k-P^{tt}+(x+y)[\eta_g e^{-(1-\varphi)}+P^{tt}] - xP^{gt}-yP^{tg}+xy[P^{gt}+P^{tg}-P^{tt}-\eta_g e^{-(1-\varphi)}-k]+\eta_t e^{-\varphi}(xy-1) \tag{31}$$

（三）网络演化动力模型

1. 产业共性技术扩散网络演化动力模型

以企业为网络节点构建企业采纳产业共性技术策略的无标度网络模型 $G_1(M,E)$。M 为无标度网络节点企业集合，即企业集群中采纳产业共性技术的企业集合；E 为边集，表示无标度网络中节点间的联系，即采纳产业共性技术的企业之间关系的集合。企业内最初有 m_0 个企业采纳产业共性技术，每经过时间 t，新加入的企业节点 M_2 与网络中某企业节点 M_1 连接的概率如式（32）所示（新增节点 M_2 与企业节点 M_1 连接不存在重复现象）[36]。

$$P(M_1) = \sum_{i=1}^{m} \frac{K_{M_2}(t)}{K_i(t)} \tag{32}$$

其中：$K_i(t)$ 为 t 时刻网络内 i 个企业节点边的总和；$K_{M_2}(t)$ 为新增企业节点 M_2 在 t 时刻的边数。

处于企业群体创新网络环境中的企业，选择生产技术策略的决策行为受到网络中相邻企业节点影响。当创新网络中节点企业 M_1 随机与一个相邻节点 M_2 进行收益比较，若自己当前采纳的生产技术策略收益小于邻居节点企业收益，在随后的时间里，企业 M_1 将以概率 τ 模仿企业 M_2 的创新策略。

$$\tau(M_1 \to M_2) = \frac{1}{1+\exp[(U_{M_2}-U_{M_1})/\upsilon]} \tag{33}$$

其中：U_{M_1}、U_{M_2} 分别为企业 M_1 和企业 M_2 当前生产策略的收益；υ 为企业所处外部环境的噪声强度，即外部环境的不确定性。υ 越大，外部环境的不确定性对企业模仿或学习邻居节点企业创新策略的干扰越大。

2. 产业共性技术附随产品扩散网络演化动力模型

市场上的消费者群体符合“小世界”网络结构特征，将特定的市场消费者群体看作一个由 N 个节点组成的最近邻耦合网络，网络中任意节点 N_1 与其左右相邻的 $k/2$ 节点产生连接（k 为偶数，且 $1<k/2<N$）。节点 N_1 完成某种特定连接后会以概率 ϖ 与另一节点 N_2 随机连接（无重复和自环现象），构成小世界网络模型。

$$\varpi(N_1 \to N_2) = \sum \frac{U_{N_2}^p}{U_{N_1}^p} \tag{34}$$

其中：p 为消费者群体购买不同的产品偏好；$U_{N_1}^p$ 和 $U_{N_2}^p$ 分别为消费者 N_1 和消费者 N_2 对于产品偏好为 p 时的期望收益。消费者根据对自身和邻接消费者节点购买产品的收益进行比较，依据式（34）的规则调整自身博弈策略。

当处于不同网络拓扑结构的企业与市场消费者分别按照上述规则学习和调整策略时，随着迭代次数的增加，网络结构由动态变化逐渐趋于平衡稳定状态，实现产业共性技术的创新扩散。

五、企业博弈策略的演化稳定性分析

根据式(26)与式(27)，企业博弈的复制动态方程为

$$\begin{cases} F(x)=x(E_c^g-\overline{E_c})=x(1-x)[y(\Pi_c^{gg}-\Pi_c^{tg})+(1-y)(\Pi_c^{gt}-\Pi_c^{tt})] \\ F(y)=y(E_m^g-\overline{E_m})=y(1-y)[x(\Pi_m^{gg}-\Pi_m^{gt})+(1-x)(\Pi_m^{tg}-\Pi_m^{tt})] \end{cases} \tag{35}$$

命题 1：根据企业选择生产技术决策行为的复制动态方程系统，可得点(0,0)、(0,1)、(1,0)、(1,1)为系统的演化平衡点；当且$[(\Pi_c^{gg}-\Pi_c^{tg})(\Pi_c^{gt}-\Pi_c^{tt})]<0$时，$(x^*,y^*)$也为系统一个演化平衡点。其中：

$$x^*=\frac{a-(C_g+f)e^{-\delta_m}+t_eC_g}{C_t+\mu-(C_g+f)e^{-\delta_c}+t_eC_g},\quad y^*=\frac{a-(C_g+f)e^{-\delta_c}+t_eC_g}{C_t+v-(C_g+f)e^{-\delta_m}+t_eC_g} \tag{36}$$

证明：令$\begin{cases}F(x)=0\\F(y)=0\end{cases}$，易得(0,0)、(0,1)、(1,0)、(1,1)和$\left(\frac{\Pi_m^{tt}-\Pi_m^{tg}}{\Pi_m^{gg}-\Pi_m^{gt}-\Pi_m^{tg}+\Pi_m^{tt}},\frac{\Pi_c^{tt}-\Pi_c^{gt}}{\Pi_c^{gg}-\Pi_c^{tg}-\Pi_c^{gt}+\Pi_c^{tt}}\right)$均为$\begin{cases}F(x)=0\\F(y)=0\end{cases}$的解。令$x^*=\frac{\Pi_m^{tt}-\Pi_m^{tg}}{\Pi_m^{gg}-\Pi_m^{gt}-\Pi_m^{tg}+\Pi_m^{tt}}$，$y^*=\frac{\Pi_c^{tt}-\Pi_c^{gt}}{\Pi_c^{gg}-\Pi_c^{tg}-\Pi_c^{gt}+\Pi_c^{tt}}$。由于$x,y\in[0,1]$，所以$0<x^*=\frac{\Pi_m^{tt}-\Pi_m^{tg}}{\Pi_m^{gg}-\Pi_m^{gt}-\Pi_m^{tg}+\Pi_m^{tt}}<1$且$0<y^*=\frac{\Pi_c^{tt}-\Pi_c^{gt}}{\Pi_c^{gg}-\Pi_c^{tg}-\Pi_c^{gt}+\Pi_c^{tt}}<1$。当$(\Pi_m^{gg}-\Pi_m^{gt})(\Pi_m^{tg}-\Pi_m^{tt})<0$时，$0<x^*<1$。$(\Pi_c^{gg}-\Pi_c^{tg})(\Pi_c^{gt}-\Pi_c^{tt})<0$时，$0<y^*<1$。因此，当$(\Pi_m^{gg}-\Pi_m^{gt})(\Pi_m^{tg}-\Pi_m^{tt})<0$且$(\Pi_c^{gg}-\Pi_c^{tg})(\Pi_c^{gt}-\Pi_c^{tt})<0$时，$(x^*,y^*)$也是系统演化平衡点。带入利润函数，可得$x^*=\frac{a-(C_g+f)e^{-\delta_m}+t_eC_g}{C_t+v-(C_g+f)e^{-\delta_c}+t_eC_g}$，$y^*=\frac{a-(C_g+f)e^{-\delta_c}+t_eC_g}{C_t+v-(C_g+f)e^{-\delta_m}+t_eC_g}$。

复制动态系统的平衡点未必是主体博弈的演化稳定策略(ESS)，根据演化博弈渐进稳定性条件判断*ESS*，满足博弈动态系统雅克比矩阵(Jacobian)行列式 det>0 且迹 tr<0 的平衡点为博弈系统的*ESS*。

根据式(35)可得企业采纳技术创新策略动态演化系统的 Jacobian 矩阵为：$J=\begin{bmatrix}\partial F(x)/\partial x & \partial F(x)/\partial y\\ \partial F(y)/\partial x & \partial F(y)/\partial y\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}r_{11} & r_{12}\\ r_{21} & r_{22}\end{bmatrix}$。根据行列式与迹的计算公式：$\det(J)=r_{11}r_{22}-r_{12}r_{21}$，$\mathrm{tr}(J)=r_{11}+r_{22}$。得出不同平衡点下 Jacobian 矩阵行列式与迹的值，如表 4 所示。

表 4　不同均衡点对应的博弈系统 Jacobian 矩阵行列式与迹的值

均衡点	det(*J*)	tr(*J*)
$E_1(0,0)$	$(\Pi_c^{gt}-\Pi_c^{tt})(\Pi_m^{tg}-\Pi_m^{tt})$	$(\Pi_c^{gt}-\Pi_c^{tt})+(\Pi_m^{tg}-\Pi_m^{tt})$
$E_2(1,0)$	$-(\Pi_c^{gt}-\Pi_c^{tt})(\Pi_m^{gg}-\Pi_m^{gt})$	$(\Pi_m^{gg}-\Pi_m^{gt})-(\Pi_c^{gt}-\Pi_c^{tt})$
$E_3(0,1)$	$-(\Pi_c^{gt}-\Pi_c^{tt})(\Pi_m^{gg}-\Pi_m^{gt})$	$(\Pi_m^{gg}-\Pi_m^{gt})-(\Pi_c^{gt}-\Pi_c^{tt})$
$E_4(1,1)$	$(\Pi_c^{gg}-\Pi_c^{tg})(\Pi_m^{gg}-\Pi_m^{gt})$	$-(\Pi_c^{gg}-\Pi_c^{tg})-(\Pi_m^{gg}-\Pi_m^{gt})$
$E_5(x^*,y^*)$	$(1-x^*)(1-y^*)(\Pi_c^{tt}-\Pi_c^{tg})(\Pi_m^{tt}-\Pi_m^{gt})$	0

命题 2：核心企业与边缘企业选择生产技术决策行为的演化过程中存在两个阈值t_e^1和t_e^2，当政府对企业采纳产业共性技术的补贴率处于不同的阈值区间时，系统的*ESS*不同。当$t_e>\max\{t_e^1,t_e^2\}$时，*ESS*为(1,1)；当$t_e^2>t_e>t_e^1$时，*ESS*为(0,1)；当$t_e^1>t_e>t_e^2$时，*ESS*为(1,0)；当$t_e<\min\{t_e^1,t_e^2\}$时，*ESS*为(0,0)。其中t_e^1和t_e^2的值分别为：$t_e^1=\frac{(C_g+f)e^{-\delta_m}-C_t-v}{C_g}$，$t_e^2=\frac{(C_g+f)e^{-\delta_c}-C_t-v}{C_g}$。

证明：政府对产业共性技术的补贴率处于不同阈值区间时，影响博弈主体决策稳定性，证明过程如表 5 所示，不同补贴率下的系统演化过程如图 2 所示。

在现实情景中，由于核心企业创新能力大于边缘企业，即 $\delta_c > \delta_m$，因此 $t_e^1 > t_e^2$，所以平衡点(0,1)作为博弈系统的 ESS 不具现实意义。结合命题 2 可知，政府补贴力度影响企业采纳产业共性技术决策的稳定性，而边缘企业由于自身知识容量、创新资源等的缺失，采纳产业共性技术还需进行二次创新以形成专有生产应用技术，成本与风险较高。因此，对政府补贴力度更为敏感。只有当政府补贴率较高且满足边缘企业群体的期望时，边缘企业才会稳定于选择产业共性技术作为生产技术。鉴于此，当政府补贴资金有限时，为实现补贴效益化最大，可针对核心企业制定补贴措施，培养产业共性技术创新领军企业，推动产业共性技术的扩散。

推论 1：边缘企业创新能力较弱，这导致创新成本和风险较高，对于政府补贴的依赖性更强，只有在补贴率较高时才会选择采用共性技术。因此，在补贴资金有限的情况下，政府应将补贴重点放在核心企业上，以培养创新领军企业，促进产业共性技术的扩散。

表 5　不同补贴率下博弈系统平衡点稳定性分析

条件	(x,y)	$\det(J)$	$\mathrm{tr}(J)$	稳定性
$t_e > \max\{t_e^1, t_e^2\}$	(0,0)	+	+	不稳定点
	(0,1)	−	N	鞍点
	(1,0)	−	N	鞍点
	(1,1)	+	−	*ESS*
	(x^*, y^*)	N	N	非均衡点
$t_e^2 > t_e > t_e^1$	(0,0)	−	N	鞍点
	(0,1)	+	−	*ESS*
	(1,0)	+	+	不稳定点
	(1,1)	−	N	鞍点
	(x^*, y^*)	N	N	非均衡点
$t_e^1 > t_e > t_e^2$	(0,0)	−	N	鞍点
	(0,1)	+	+	不稳定点
	(1,0)	+	−	*ESS*
	(1,1)	−	N	鞍点
	(x^*, y^*)	N	N	非均衡点
$t_e < \min\{t_e^1, t_e^2\}$	(0,0)	+	−	*ESS*
	(0,1)	−	N	鞍点
	(1,0)	−	N	鞍点
	(1,1)	+	+	不稳定点
	(x^*, y^*)	N	N	非均衡点

注：N 表示根据条件无法判定符号正负。

六、仿真分析

(一)参数初始化设置

为了清晰观察内外部因素对产业共性技术创新扩散的影响，本文使用 MATLAB 软件进行数值模拟分析，参数数值设定参考相关文献的研究数据[18,28,30]。对参数初始值设定如表 6 所示。

表 6　参数仿真赋值

参数	C_g	t_e	C_t	v	η	m	φ	x	y	t_c	a	b	δ_c	δ_m	f	η_g	η_t	k	w
赋值	15.5	14.67	12	1.5	0.2	300	0.3	0.64	0.36	0.1	20	1	0.45	0.3	6	2	2	24	0.6

(二)产业共性技术在企业群体间扩散仿真分析

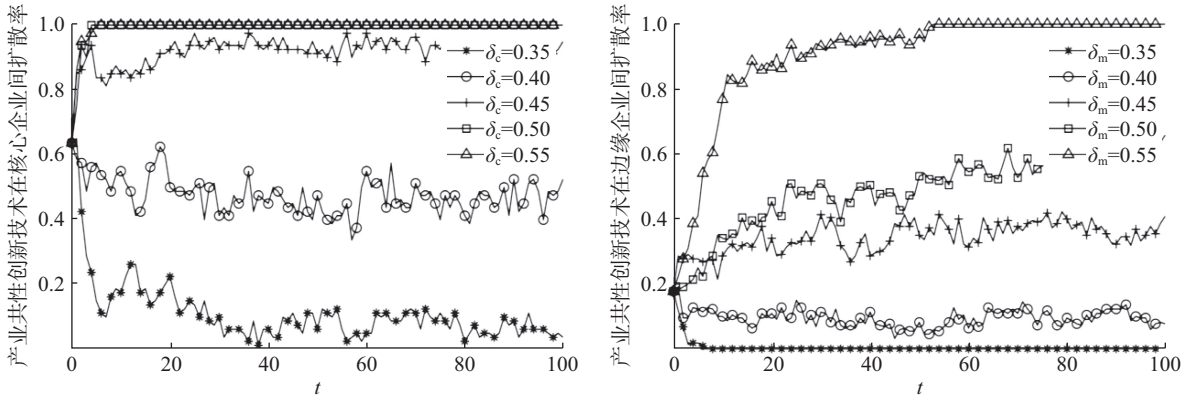
1. 产业共性技术成熟度对产业共性技术创新扩散影响

设置核心企业与边缘企业产业共性创新技术成熟度分别为 $\delta_c = \{0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5\}$、$\delta_m = \{0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5\}$，探究产业共性创新技术成熟度对产业共性技术创新在企业群体间扩散的影响关系。从图 1 可以看出，提升产业共性创新技术成熟度能够显著提高产业共性技术创新在核心企业与边缘企业间的扩散深度，当技术成熟度较低时，采纳产业共性创新技术的企业比例逐渐降低并趋于 0。企业如果掌握的产业共性创新技术成熟度较低，则生产产品的潜在风险损失大于期望收益，因此不愿采纳产业共性创新技术作为生产技术。

推论 2：技术成熟度提升有助于推进共性技术在企业间的扩散；反之，当技术成熟度较低时，风险损失大于期望收益，企业则不愿意采纳该共性技术。

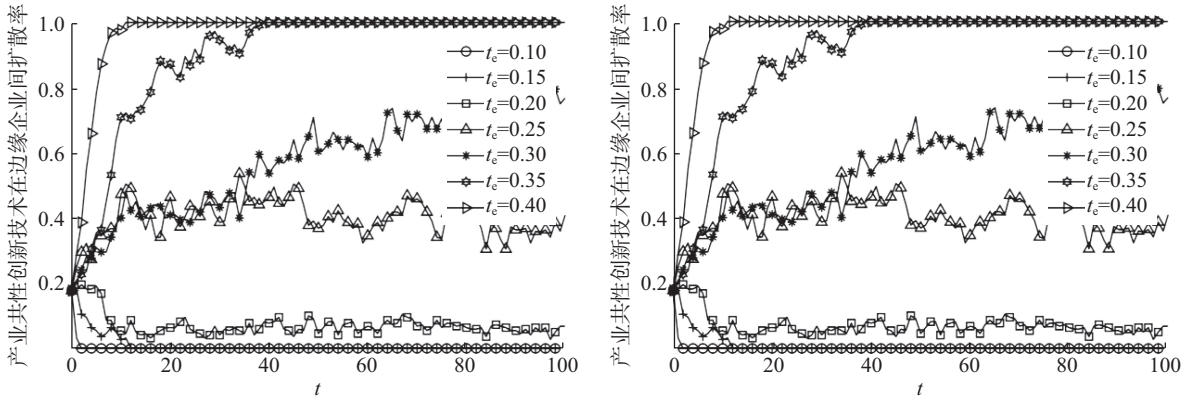
2. 政府补贴对产业共性技术创新扩散影响

政府补贴是影响产业共性技术创新扩散的重要外部因素。令 t_e 在区间[0.10, 0.40]取值。如图 2 所示，若补贴水平未达企业期望值，技术创新在企业间的扩散率会随时间演化逐渐下降并趋于零；随着政府补贴力度加强，企业群体中的扩散逐渐增强。同时，核心企业与边缘企业对不同补贴水平的敏感度存在差异：当补贴率 $t_e = 0.1$ 时，核心企业已表现出较高积极性；而边缘企业要在补贴率达 0.25 时才能维持中等扩散水平，超过 0.35 才能显著促进技术采纳。图 2(a)与图 2(b)的对比还显示，发展水平较高的企业对补贴依赖较低，而发展水平较低的企业对补贴力度更为敏感。



(a) 核心企业　　(b) 边缘企业

图 1　产业共性技术成熟度对产业共性技术创新扩散的影响



(a) 核心企业　　(b) 边缘企业

图 2　政府补贴对产业共性技术创新扩散的影响

推论 3：核心企业对补贴率要求较低就能保持高积极性，而边缘企业需要更高的补贴才能维持中等乃至显著的采纳水平，且发展水平越低的企业对补贴越敏感。

推论 4：通过图 1 与图 2 的对比可知，核心企业在无标度网络中的节点度更高、信息交流更频繁，导致其对产业共性技术创新的采纳更为快捷、扩散速率更快。相比之下，边缘企业由于连接度较低，调整策略的速度相对滞后。

(三)产业共性技术附随产品在消费者群体间扩散仿真分析

1. 产业共性技术成熟度对附随产品扩散影响

令产业共性技术成熟度 $\delta=\{0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8\}$，分析产业共性技术成熟度对附随产品在消费者群体间扩散的影响关系。如图 3 所示，当附随产品的生产技术成熟度较低时，出于对创新产品质量安全问题的担忧，消费者不愿购买产业共性技术附随产品，同时，产业共性技术不成熟情况下生产的附随产品也难以实现其“技术先进”的核心竞争优势，无法使消费者获得足够使用效益，导致附随产品无法有效扩散。当产业共性技术成熟度逐渐提升到一定程度，即当 $\delta>0.7$ 时，才能有效实现产业共性技术附随产品在消费者间的显著扩散。这说明消费者对于产品质量安全问题较为敏感，对于产品生产技术的成熟度要求高于企业。因此，提高产业共性技术成熟度是驱动产业共性技术创新扩散的关键途径之一。

推论 5：消费者对产品质量安全的敏感度高于企业，只有当产业共性技术达到足够的成熟度时，附随产品才能发挥技术优势并在消费者群体中有效扩散，因此提升技术成熟度是推动创新扩散的关键。

2. 政府补贴对产业共性技术附随产品扩散影响

令政府对消费者的补贴 $t_c\in[0.05,0.10,0.15,0.20,0.25,0.30]$，观察不同程度的消费补贴对产业共性

技术附随产品在消费者群体间扩散的演化过程及结果。如图 4 所示，消费者的消费决策对政府补贴较为敏感，且不同程度补贴的激励效用存在异质性。当 t_c<0. 15，政府补贴难以提高产业共性技术附随产品的市场占有率。当 t_c>0. 15 时，政府补贴对附随产品的扩散呈现显著的正向激励作用，有利于提高附随产品的市场占有率。政府补贴率在 0. 10<t_c<0. 20，该阈值内的政府补贴率的提高对随产品扩散产生驱动作用的边际效应呈现递增趋势。

推论 6：政府补贴对消费者决策有显著影响。补贴率低于 0. 15 时难以提升附随产品市场占有率，超过 0. 15 后则产生明显的正向激励作用，且在特定区间内补贴率的提高会产生递增的边际效应。

推论 7：通过图 3 与图 4 的对比可知，由于消费者之间的社会关系多样化且复杂，形成具有小世界特征的扩散网络，消费者会根据周围环境不断调整策略以寻求最佳利益，导致产业共性技术附随产品在消费者群体间的扩散呈现较大的演化波动。

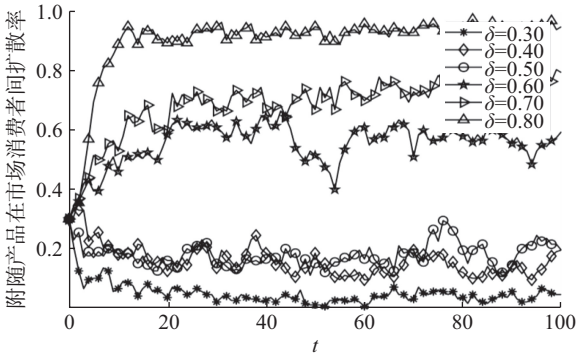


图 3　产业共性技术成熟度例对附随产品扩散影响

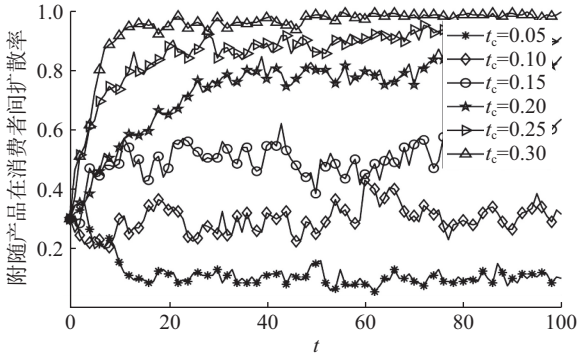


图 4　政府补贴对产业共性技术附随产品扩散的影响

七、主要结论

本文基于演化博弈理论和复杂网络理论，构建由演化博弈模型、演化规则和网络结构三要素组成的产业共性技术创新两阶段扩散博弈模型，探索企业与消费者在政策机制与市场机制协调互补作用下采纳产业共性技术创新策略的动态调整过程，并通过仿真模拟进一步分析外部因素影响下产业共性技术创新在扩散两阶段不同网络拓扑结构中的扩散机制，主要研究结论如下。

第一，政府对产业共性技术创新扩散补贴发挥的激励效用呈现倒 U 型趋势。政府为推动产业共性技术创新扩散对企业和消费者进行补贴，补贴力度较低难以提高企业采纳产业共性技术生产产品的积极性。因此，力度较低的补贴措施对于产业共性技术创新扩散发挥的激励效用不足，而补贴率达到最优补贴阈值时，再持续追加补贴则造成财政浪费，且经济补贴高于最优补贴阈值的激励效用也呈现出边际递减现象，导致政府财政资源配置效率较低，对于消费者补贴政策发挥的激励效用变化趋势同样如此。

第二，产业共性技术成熟度和政府补贴对产业共性技术在边缘企业群体间扩散起促进作用的临界阈值高于核心企业。这是由于边缘企业在企业群体创新网络中节点度较低，表现出较强依附性，自身创新能力与承担创新风险能力均较弱。因此，相比于核心企业，在采纳产业共性技术的决策时更为关注产业共性技术成熟度以及政府补贴力度。

第三，市场价格、产品质量和使用效益是影响产业共性技术附随产品在消费者群体间扩散的核心要素。消费者更注重生产技术带来的产品差异，高价格往往使他们转向普通产品，不利于附随产品的推广，而政府补贴能有效降低价格并提升价格竞争力。同时，若技术尚不成熟，产品质量与使用效益难以保障，将进一步阻碍产业共性技术在消费者中的扩散。

第四，产业共性技术创新扩散的稳定性受扩散网络结构的影响，网络的差异会带来不同的负外部性。企业与消费者作为理性主体，不断以自身利益最大化为目标调整策略，从而引发扩散路径的波动。由于消费者的社会关系更为多样，扩散稳定性所面临的干扰因素也更复杂。降低创新成本与产品价格有助于引导

企业与消费者共同采纳产业共性技术,从而增强创新扩散的稳定性。

本文研究仍存在一定局限。一是,模型主要聚焦于企业群体与消费者群体,未能涵盖产业链上下游的纵向扩散机制;二是,区域与行业差异未予比较。未来研究应拓展至产业协同创新机制,并加强跨区域、跨行业的比较研究,以提升理论模型的普适性与政策适配性。

参考文献

[1] 唐广波. 借鉴国外经验增强我国重点产业关键共性技术供给[J]. 科技中国, 2024(1): 5-8.

[2] 张艺, 陈凯华, 周志勇. 后发国家产业核心技术追赶的产学研合作创新机制——基于中国高铁产业的案例分析[J]. 管理世界, 2024, 40(11): 20-48.

[3] 王韬钦. 以关键共性技术推动区域间共同富裕的实现机制与路径分析[J]. 当代经济研究, 2024(3): 37-48, 129.

[4] 李冬冬, 李春发. 产业共性技术创新扩散机理建模与仿真分析[J]. 技术经济与管理研究, 2021(3): 3-9.

[5] HANSEN H F, LILLESUND E, MIKALEF P, et al. Understanding artificial intelligence diffusion through an AI capability maturity model[J]. Information Systems Frontiers, 2024, 26(12): 2147-2163.

[6] ZHANG F, ZHU J D, ZHANG L. R&D Strategy of general-purpose technologies under the multi-agent participating mode based on dynamic games [J]. Transformation in Business & Economics, 2022, 21(1): 53-82.

[7] HEIKKILA J, RISSANEN J, ALI-VEHMAS T. Coopetition, standardization and general-purpose technologies: A framework and an application [J]. Telecommunications Policy, 2023, 47(4): 102488.

[8] 苏鑫, 赵越. 产业共性技术扩散三阶段模型构建与仿真研究[J]. 科技进步与对策, 2019, 36(12): 71-79.

[9] ERDMANN A, MAS J M, DE OBESSO M. Disruptive technologies: How to influence price sensitivity triggering consumers' behavioural beliefs [J]. Journal of Business Research, 2023, 158: 113645.

[10] WANG F, XIE R, HU W. The influencing factors and promotion countermeasures of industrial generic technology diffusion based on differential game[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2021(1): 6643922.

[11] 朱桂龙, 朱明晶, 尹潇, 等. 知识扩散视角下共性技术的商业化评价——基于多层网络的反向识别方法[J]. 科学学与科学技术管理, 2019, 40(2): 16-25.

[12] ZIMMERMANN L, SOMASUNDARAM J, SAHA B. Adoption of new technology vaccines[J]. Journal of Marketing, 2024, 88(4): 1-21.

[13] LADU L, KOCH C, ASHARI P, et al. Technology adoption and digital maturity in the conformity assessment industry: Empirical evidence from an international study[J]. Technology in Society, 2024, 77: 102564.

[14] AMMANN J, UMSTTER C, El BENNI N. The adoption of precision agriculture enabling technologies in Swiss outdoor vegetable production: A Delphi study[J]. Precision Agriculture, 2022, 23(4): 1354-1374.

[15] 周源. 制造范式升级期共性使能技术扩散的影响因素分析与实证研究[J]. 中国软科学, 2018(1): 19-32.

[16] 郑月龙, 秦国静, 白春光, 等. 产业共性技术研发失灵类型、演化及影响机制[J]. 系统工程, 2021, 39(5): 30-40.

[17] 李纪珍, 邓衢文. 产业共性技术供给和扩散的多重失灵[J]. 科学学与科学技术管理, 2011, 32(7): 5-10.

[18] 陈恒, 彭程, 郭爽, 等. 基于复杂市场网络绿色技术创新扩散的两阶段演化分析[J]. 中国管理科学, 2024, 32(3): 135-144.

[19] LUO G, LIU Y, ZHANG L, et al. Do governmental subsidies improve the financial performance of China's new energy power generation enterprises [J]. Energy, 2021, 227: 120432.

[20] LIU Z, PRAJOGO D, OKE A. Supply chain technologies: Linking adoption, utilization, and performance [J]. Journal of Supply Chain Management, 2016, 52(4): 22-41.

[21] KIECKHAFER K, WACHTER K, SPENGLER T S. Analyzing manufacturers' impact on green products' market diffusion—The case of electric vehicles[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 162: S11-S25.

[22] DEMIREL P, KESIDOU E. Sustainability-oriented capabilities for eco-innovation: Meeting the regulatory, technology, and market demands[J]. Business Strategy and the Environment, 2019, 28(5): 847-857.

[23] 邹樵, 吴丁佳宝, 姜杰, 等. 共性技术扩散的网络与外溢效应[J]. 管理世界, 2011, 27(1): 182-183.

[24] BUSTAMANTE M C, FRESARD L. Does firm investment respond to peers' investment[J]. Management Science, 2021, 67(8): 4703-4724.

[25] 周珊珊, 孙玥佳. 政府补贴与高技术产业持续适应性创新演化[J]. 科研管理, 2019, 40(10): 58-72.

[26] 王宇, 李琳娜, 王鹏飞. 制度压力与企业绿色技术扩散群体行为研究[J]. 中国软科学, 2024(5): 197-209.

[27] HAN J, GUO J E, CAI X, et al. An analysis on strategy evolution of research & development in cooperative innovation network of new energy vehicle within policy transition period[J]. Omega, 2022, 112: 102686.

[28] 杜慧滨, 邹宏阳, 张永杰, 等. 异质行为下新能源汽车的技术采纳与扩散[J]. 管理科学学报, 2021, 24(12): 62-76.

[29] 杨乃定, 王郁, 王琰, 等. 复杂产品研发网络中企业技术创新行为演化博弈研究[J]. 中国管理科学, 2024, 32(2): 242-253.

[30] ZHAO D, JI S F, WANG H P, et al. How do government subsidies promote new energy vehicle diffusion in the complex network context? A three-stage evolutionary game model[J]. Energy, 2021, 230: 120899.

[31] 谭劲松，赵晓阳. 创新生态系统主体技术策略研究——基于核心企业与边缘企业的演化博弈与仿真[J]. 管理科学学报，2022，25(5)：13-28.
[32] LI F，CAO X，OU R. A network-based evolutionary analysis of the diffusion of cleaner energy substitution in enterprises：The roles of PEST factors [J]. Energy Policy，2021，156：112385.
[33] ADNER R，EUCHNER J. Innovating in ecosystems[J]. Research-Technology Management，2022，65(6)：11-17.
[34] CORIA J. Taxes，permits，and the diffusion of a new technology[J]. Resource and Energy Economics，2009，31(4)：249-271.
[35] FAN R，WANG Y，CHEN F，et al. How do government policies affect the diffusion of green innovation among peer enterprises：An evolutionary-game model in complex networks[J]. Journal of Cleaner Production，2022，364：132711.
[36] CHEN L，GAO M. Novel information interaction rule for municipal household waste classification behavior based on an evolving scale-free network [J]. Resources，Conservation and Recycling，2021，168：105445.

Two-stage Game Analysis of Industrial General Purpose Technology Innovation Diffusion Based on Heterogeneous Complex Networks

Zhang Guiyang[1]，Jia Yucai[1]，Qi Yong[2]，Dong Feng[3]
(1. School of Economics & Management，Nanjing University of Science and Technology，Nanjing 210094，China；
2. School of Intellectual Property，Nanjing University of Science and Technology，Nanjing 210094，China；
3. School of Economics & Management，Anhui Polytechnic University，Wugu 241000，China)

Abstract：An evolutionary game model was constructed based on evolutionary game theory and complex network theory to analyze the two-stage diffusion mechanism of industrial general purpose technologies (GPTs)：secondary development among enterprise groups and complementary product purchases among consumer groups. The model incorporated the heterogeneity and complex network topology of diffusion groups and included three elements：game subjects，evolution rules，and network structures. The diffusion paths on the supply side and demand side were depicted，and the optimal government incentive strategies in the two diffusion stages were explored. The results show that the incentive effect of government subsidies on the diffusion of industrial GPTs follows an inverted U-shaped trend. Both excessive and insufficient subsidies reduce resource allocation efficiency. Peripheral enterprises are more concerned than core enterprises with the technical maturity after secondary development and the intensity of government subsidies. Consumer diffusion follows price-based mechanisms. Lowering the price of complementary products and improving their technical maturity significantly promote market penetration. In addition，the stability of GPT diffusion is significantly influenced by the network structure of diffusion groups. Reducing innovation costs or product prices helps enhance the stability of industrial GPT diffusion. These findings reveal the multi-agent coordination mechanism and the boundary effect of policy incentives in the diffusion of industrial GPTs and provide theoretical support for optimizing policy tools and improving diffusion efficiency.

Keywords：industrial general purpose technology；innovation diffusion；heterogeneous complex networks；two-stage game