

# 基于进化博弈论的产业创新网络中非核心企业演化机制研究

于东平, 张 慧, 胡 鉴, 张俊婕

(云南财经大学 国际工商学院, 昆明 650221)

**摘 要:** 解密产业创新网络中非核心企业的生存之道, 是诸多合作创新弱势群体的迫切需求。为此, 基于进化博弈理论, 构建出产业创新网络中非核心企业与核心企业之间的博弈模型, 并借助 Vensim PLE 软件对其进化过程进行仿真模拟, 挖掘出产业创新网络中非核心企业演化路径。研究结果表明: ①选择不同于彼此的创新策略, 是产业创新网络中非核心企业与核心企业进化博弈的稳定策略; ②各创新主体选择创新策略的初始概率, 将直接决定产业创新网络进化博弈结果; ③创新收益、创新成本及创新冲突收益损失的变动, 会显著干扰非核心企业适应性创新策略的选择。

**关键词:** 进化博弈论; 产业创新网络; 非核心企业; 进化稳定策略

**中图分类号:** F270.7   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1002-980X(2022)5-0052-11

## 一、引言

网络化是当今许多产业尤其是新兴产业创新发展的一个重要趋向。所谓创新网络化, 是指企业通过与其他组织、机构或个人建立合作关系以实现其创新目的的一种形式(Fitjar 和 Rodriguez-Pose, 2013)。由于创新网络化的发展, 一个行业中的企业有了核心与非核心之分。所谓核心企业, 是指在某个产业创新网络中占据引领地位的企业。此类企业往往规模较大, 拥有同行企业难以模仿的核心技术(邓峰, 2015), 因而是该产业创新的引领者; 相比之下, 非核心企业因缺乏核心技术, 行业影响力较弱, 是该行业创新的追随者或参与者。然而尽管如此, 非核心企业的存在却不容小觑, 甚至直接影响着创新网络的生命力(王伟光等, 2017)。更值得关注的是, 相较于一般中小企业低迷的创新意愿(何玉润等, 2015)而言, 产业创新网络中的非核心企业, 则因网络中较多的创新资源和较低的创新风险(樊霞等, 2010), 往往表现出更为活跃的创新行为, 甚至可能逆袭成产业内的主导企业(毛蕴诗和郑奇志, 2016), 从而为我国诸多中小企业的转型升级提供了可见的创造性战略路径。

适者生存, 而非强者生存。在开放式创新背景下, 企业间的竞争关系已逐渐转向竞合共赢的博弈关系, 从而致使处于创新弱势地位的非核心企业更加依赖于其所处的创新网络。创新网络作为一种组织形式, 其本质是联网行为(Kratzer et al, 2005), 一般由节点、联结、资源三要素构成(胡海波等, 2020)。考虑到创新网络节点(创新主体)、联结(各创新主体间关系)这两核心要素对网中非核心企业作用结果的权变性, 作为产业创新网络中的非核心企业, 有必要谙熟自身所处的创新网络节点特征及联结态势, 并据此动态选择适合自身的创新策略, 以期获得更为突出的网络创新绩效。

然而遗憾的是, 以往研究更为关注网络中核心企业相关研究命题, 对网络中非核心企业的发展问题则关注较少(王伟光等, 2017); 即使存在少量的相关研究(张新, 2003; Tomlinson 和 Fai, 2013; 张钟元和李腾, 2019), 也更倾向于主观的、思辨的(Hu, 2014; Yam et al, 2011)、静态的(戚湧等, 2013; 吴洁等, 2019)剖析, 缺乏较为客观的、推理的、动态的系统性刻画与仿真过程。

为解密“产业创新网络背景下非核心企业创新策略选择”这一实践黑箱现象, 本文尝试性应用进化博弈论、系统动力学等理论方法, 对产业创新网络中企业之间的互动关系进行刻画与仿真, 并最终给出网中非核

收稿日期: 2021-10-07

基金项目: 国家自然科学基金地区项目“产业创新网络中非核心企业逆向创新演化机理研究”(71764033)

作者简介: 于东平, 博士, 云南财经大学国际工商学院教授, 硕士研究生导师, 云南省万人计划青年拔尖人才, 研究方向: 中小企业创新管理; 张慧, 云南财经大学国际工商学院硕士研究生, 研究方向: 企业创新管理; 胡鉴, 云南财经大学国际工商学院硕士研究生, 研究方向: 中小企业创新管理; 张俊婕, 博士, 云南财经大学国际工商学院讲师, 硕士研究生导师, 研究方向: 企业可持续性。

心企业创新策略的演化过程。具体而言,本文首先尝试性运用进化博弈论模型,刻画出产业创新网络中非核心企业与核心企业之间的演化历程,进而求解出非核心企业的演化路径及进化博弈后的稳定状态;其次,利用系统动力学 Vensim PLE 软件对产业创新网络中非核心企业进化博弈过程进行仿真模拟,并找出显著影响进化稳定结果的关键要素;最后,结合上述结果给予相关建议。

## 二、产业创新网络中非核心企业与核心企业进化博弈模型构建

由于与一般博弈论(汪旭晖和任晓雪,2020)相比,进化博弈论以有限理性为基础,以群体(而非个体)为研究对象(Friedman,1998),以持续性博弈为演化依据(付晶等,2018),更符合现实经济生活中的博弈情形,故而本文将采用进化博弈论对产业创新网络中非核心企业与核心企业的博弈过程进行刻画。

### (一)基本假设

(1)博弈主体。该进化博弈模型共涉及两类博弈主体,即产业创新网络中的非核心企业与核心企业。核心企业处于主导地位,规模大、实力雄厚,并拥有较多的创新技术;非核心企业处于追随地位,规模小、实力弱,拥有极少量创新技术,但可影响产业创新网络整体绩效。二者均为有限理性的个体,在进行博弈时拥有多种策略选择的机会。在产业创新网络中进行初期博弈时,核心企业与非核心企业各自的策略选择并不一定最优,后期可通过不断试错与学习,博弈各方最终均会稳定于某一相对最优策略上。

(2)博弈策略。考虑到产业创新网络中非核心企业实力较弱,尚不具备突破式或颠覆式创新的能力,故而本文借鉴 Zhou et al(2017)的研究成果,认为产业创新网络中企业可选择边际性创新和适应性创新两种策略。所谓边际性创新,是以现有技术为基础,对产品的特征、功能等方面进行微小的改造(Yuan et al,2009);所谓适应性创新,是为适应消费者行为偏好、政治制度、市场结构、技术水平等环境的变化,通过不断吸收、整合企业内外部资源,进而改进或创造新的产品(Zhou et al,2017)。非核心企业可通过选择强创意弱研发、弱创意弱研发等适应性创新策略获得竞争优势(徐雨森和徐娜娜,2016)。博弈双方可依据现有资源和前一轮博弈结果不断调整博弈策略。

(3)适应度。所谓适应度,原指群体内某种基因存活并遗传给下一代的相对能力(黄凯南和乔元波,2018),本文特指产业创新网络中博弈主体的生存和发展能力。博弈主体所获得的博弈策略收益越高,其所得到的适应度则越大,其所获得的生存与发展机会则越大。对于产业创新网络中的非核心企业而言,一方面,其必须具备一定的适应度,才能存活于产业创新网络;另一方面,产业创新网络本身的权变性及网中强势创新主体(核心企业)创新策略的选择性,均会干扰其适应度。

### (二)符号说明

(1)基础收益。由于非核心企业与核心企业均隶属于产业创新网络,所以无论两者选择何种创新策略,均会获得一定的基础收益。但考虑到两者在产业创新网络中地位的差异性,其所获得的基础收益应有所差异。故设非核心企业和核心企业选择任一创新策略的基础收益分别为  $U$  和  $R$ 。显然,  $U < R$ 。

(2)创新成本。所谓创新成本,是指概念提出、产品研发、投产销售等产品创新全过程所产生的一切费用(杜传忠等,2017),具体包括基础能力、投入成本和产出成本(由雷和王伟光,2017)。其中,基础能力是指企业自身的自主研发能力、技术水平、知识吸收等(由雷和王伟光,2017);投入成本是指企业进行创新活动时所投入的财力和人力成本;产出成本则指新产品投放所需的营销成本及管理成本(徐立平等,2015)。由于边际性创新策略仅是在现有技术基础上进行微小改进,创新成本较小,可忽略不计。因此此处仅需设非核心企业和核心企业选择适应性创新策略时所产生的创新成本,分别记为  $P_1$  和  $P_2$ 。显然,  $P_1 > P_2$ 。

(3)创新收益。所谓创新收益,是指因创新而获得超出创新成本的收益(Pavlou 和 Sawy,2011)。设非核心企业和核心企业选择边际性创新策略获得的创新收益分别为  $M_1$  和  $M_2$ ,显然  $M_1 < M_2$ ;设非核心企业和核心企业选择适应性创新策略获得的创新收益分别为  $W_1$  和  $W_2$ ,显然  $W_1 < W_2$ 。与此同时,考虑到对于同一创新主体而言,其选择适应性创新策略所获得的创新收益,通常大于其选择边际性创新策略所获得的创新收益(Narula,2004)。因此可知  $M_1 < W_1, M_2 < W_2$ ;又考虑到创新主体在选择适应性创新策略时,其所获得的创新收益常大于其创新成本(Narula,2004)。因此  $W_1 > P_1 > 0, W_2 > P_2 > 0$ 。

(4)创新冲突损失。考虑到产业创新网络中的非核心企业与核心企业同时选择某一相同创新策略时,双方会因创新相似而产生创新冲突,进而损失一定的创新收益(周珊珊和孙玥佳,2019),故而此处设非核心企业和核心企业因同时选择适应性创新策略而造成的创新冲突损失分别为  $V_1$  和  $V_2$ ,显然  $V_1 \geq 0, V_2 \geq 0$ ;由于边

际性创新所实施的创新活动较少,故而本文认为非核心企业与核心企业因同时选择边际性创新策略所产生的创新冲突微乎其微,可记为 0。

(5)创新概率。设非核心企业选择适应性创新策略的概率为  $x$ ,则其选择边际性创新策略的概率为  $1-x$ 。设核心企业选择适应性创新策略的概率为  $y$ ,则其选择边际性创新策略的概率为  $1-y$ 。显然, $0 \leq x \leq 1$ , $0 \leq y \leq 1$ 。

### (三)模型构建

结合上述假设条件,当产业创新网络中非核心企业与核心企业进行博弈时,可产生如下四种博弈方式。

(1)当非核心企业和核心企业同时选择适应性创新策略时,非核心企业和核心企业因此获得的适应度分别为  $U + W_1 - P_1 - V_1$ 和  $R + W_2 - P_2 - V_2$ 。

(2)当非核心企业选择边际性创新策略、核心企业选择适应性创新策略时,非核心企业和核心企业因此获得的适应度分别为  $U$ 和  $R + W_2 - P_2$ 。

(3)当非核心企业选择适应性创新策略、核心企业选择边际性创新策略时,非核心企业和核心企业因此获得的适应度分别为  $U + W_1 - P_1$ 和  $R$ 。

(4)当非核心企业和核心企业同时选择边际性创新策略时,非核心企业和核心企业因此获得的适应度分别为  $U + M_1$ 和  $R + M_2$ 。

基于以上分析,本文最终构建了见表 1 的产业创新网络中非核心企业与核心企业的博弈支付矩阵。

表 1 产业创新网络中非核心企业与核心企业的博弈支付矩阵

博弈主体及策略		核心企业	
		适应性创新( $y$ )	边际性创新( $1-y$ )
非核心企业	适应性创新( $x$ )	$U + W_1 - P_1 - V_1$ 、 $R + W_2 - P_2 - V_2$	$U + W_1 - P_1$ 、 $R$
	边际性创新( $1-x$ )	$U$ 、 $R + W_2 - P_2$	$U + M_1$ 、 $R + M_2$

## 三、产业创新网络中非核心企业与核心企业进化博弈模型分析

### (一)博弈主体行为分析

根据表 1 中的博弈支付矩阵可得:

非核心企业采取适应性创新策略的适应度为

$$E_{x1} = y(U + W_1 - P_1 - V_1) + (1 - y)(U + W_1 - P_1) \quad (1)$$

非核心企业采取边际性创新策略的适应度为

$$E_{x2} = yU + (1 - y)(U + M_1) \quad (2)$$

因此,非核心企业在现有策略组合下的平均适应度为

$$E_x = xE_{x1} + (1 - x)E_{x2} \quad (3)$$

为进一步探究产业创新网络中非核心企业创新策略选择的时变性,本文借鉴 Bach et al(2006)的研究成果,构建出如式(4)所示的非核心企业复制动态方程式:

$$F(x) = \frac{dx}{dt} = x(E_{x1} - E_x) = x(1 - x)(W_1 - P_1 - yV_1 - M_1 + yM_1) \quad (4)$$

依据进化博弈的进化稳定策略性质(Friedman, 1998)可知,只有当  $F(x) = 0, F'(x) < 0$  时,非核心企业才处于进化稳定状态。其中,  $F'(x)$  为复制动态方程  $F(x)$  的偏导方程,具体表达式为

$$F'(x) = (1 - 2x)(W_1 - P_1 - yV_1 - M_1 + yM_1) \quad (5)$$

针对非核心企业的复制动态方程  $F(x)$ ,可进行如下分析:

(1)当  $y = \frac{W_1 - P_1 - M_1}{V_1 - M_1}$  时,  $F(x)$  始终为零,这表明不论非核心企业选择边际性创新策略,亦或是适应性创新策略,其博弈结果均相同,即此时对于非核心企业而言,不存在适应度更高的策略,其在产业创新网络中的既有状态将维持不变。

(2)当  $y > \frac{W_1 - P_1 - M_1}{V_1 - M_1}$  时,  $F(1) = 0, F'(1) > 0$ ,这说明  $x = 1$  并不是非核心企业的进化稳定策略;而  $F(0) = 0, F'(0) < 0$ ,这说明  $x = 0$  是产业创新网络中非核心企业的进化稳定策略,即此时非核心企业选择边际性创新策略所获得的适应度要高于其选择适应性创新策略时的适应度。因此,理性的非核心企业均会选

择边际性创新策略,此时依然感性选择适应性创新策略的非核心企业终将面临被淘汰的局面。

(3) 当  $y < \frac{W_1 - P_1 - M_1}{V_1 - M_1}$  时,  $F(0) = 0, F'(0) > 0$ , 这表明  $x = 0$  并不是非核心企业的进化稳定策略; 而

$F(1) = 0, F'(1) < 0$ , 这说明  $x = 1$  是非核心企业的进化稳定策略, 即此时非核心企业选择适应性创新策略获得的适应度要高于其选择边际性创新策略时的适应度。因此, 理性的非核心企业均会选择适应性创新策略。

同理, 由表 1 中的博弈支付矩阵可知, 核心企业采取适应性创新策略的适应度为

$$E_{y,1} = x(R + W_2 - P_2 - V_2) + (1 - x)(R + W_2 - P_2) \quad (6)$$

核心企业采取边际性创新策略的适应度为

$$E_{y,2} = xR + (1 - x)(R + M_2) \quad (7)$$

因而, 核心企业在现有策略组合下的平均适应度为

$$E_y = yE_{y,1} + (1 - y)E_{y,2} \quad (8)$$

据此, 可以列出如式(9)所示的核心企业的复制动态方程式:

$$F(y) = \frac{dy}{dt} = y(E_{y,1} - E_y) = y(1 - y)(W_2 - P_2 - xV_2 - M_2 + xM_2) \quad (9)$$

复制动态方程  $F(y)$  的偏导方程  $F'(y)$  为

$$F'(y) = (1 - 2y)(W_2 - P_2 - xV_2 - M_2 + xM_2) \quad (10)$$

针对核心企业复制动态方程  $F(y)$ , 可进行如下分析:

(1) 当  $x = \frac{W_2 - P_2 - M_2}{V_2 - M_2}$  时,  $F(y) = 0$ , 这表明核心企业选择适应性创新策略与选择边际性创新策略的适应度相同, 即现有的状态较为稳定, 短期内不会被改变。

(2) 当  $x > \frac{W_2 - P_2 - M_2}{V_2 - M_2}$  时,  $F(1) = 0, F'(1) > 0$ , 这表明  $y = 1$  并不是产业创新网络中核心企业的进化稳定策略; 而  $F(0) = 0, F'(0) < 0$ , 这说明  $y = 0$  才是核心企业的进化稳定策略。也就是说, 此时产业创新网络中的核心企业均应选择边际性创新策略, 从而获得高于选择适应性创新策略时的适应度。

(3) 当  $x < \frac{W_2 - P_2 - M_2}{V_2 - M_2}$  时,  $F(0) = 0, F'(0) > 0$ , 这表明  $y = 0$  并不是核心企业的进化稳定策略; 而  $F(1) = 0, F'(1) < 0$ , 这表明  $y = 1$  是核心企业的进化稳定策略。即此时核心企业选择适应性创新策略将获得更高的适应度, 而选择边际性创新策略的核心企业终将被淘汰或被迫改变策略。

## (二) 进化博弈稳定策略分析

为分析出产业创新网络中创新主体间博弈系统的进化稳定策略, 首先令  $F(x) = 0, F(y) = 0$ , 计算出产业创新网络博弈系统的平衡点; 其次, 借鉴 Luthie et al(2005) 的研究做法, 构建出产业创新网络中创新主体间进化博弈模型的复制动态雅克比矩阵  $J$ ; 最后, 计算出各平衡点的行列式值[记为  $\det(J)$ ]和迹值[记为  $\text{tr}(J)$ ], 并根据 Friedman(1998) 所提出的进化稳定策略(evolutionary stable strategy, ESS)判断标准[平衡点的  $\det(J) > 0$  且  $\text{tr}(J) < 0$ ], 判定各平衡点是否属于 ESS。其中, 产业创新网络中创新主体间进化博弈模型的复制动态雅克比矩阵  $J$  为

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F(x)}{\partial x} & \frac{\partial F(x)}{\partial y} \\ \frac{\partial F(y)}{\partial x} & \frac{\partial F(y)}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中:  $\frac{\partial F(x)}{\partial x} = (1 - 2x)(W_1 - P_1 - M_1 - yV_1 + yM_1)$ ;  $\frac{\partial F(y)}{\partial y} = (1 - 2y)(W_2 - P_2 - M_2 - xV_2 + xM_2)$ ;  $\frac{\partial F(x)}{\partial y} = x(1 - x)(M_1 - V_1)$ ;  $\frac{\partial F(y)}{\partial x} = y(1 - y)(M_2 - V_2)$ 。

利用雅克比矩阵对所计算出的五个平衡点[分别为  $A(0, 1)$ 、 $B(1, 1)$ 、 $C(1, 0)$ 、 $D(x^*, y^*)$ 、 $O(0, 0)$ ], 其中

$$x^* = \frac{W_2 - P_2 - M_2}{V_2 - M_2}, y^* = \frac{W_1 - P_1 - M_1}{V_1 - M_1}$$

分析可知(具体结果见表 2),A 点(非核心企业选择边际性创新而核心企业选择适应性创新)及 C 点(非核心企业选择适应性创新而核心企业选择边际性创新)均为进化稳定策略;B 点(非核心企业和核心企业均选择适应性创新策略)及 O 点(非核心企业和核心企业均选择边际性创新策略)均为不稳定的平衡点;D 点为鞍点。

现以非核心企业选择适应性创新策略的概率  $x$  为横坐标,以核心企业选择适应性创新策略的概率  $y$  为纵坐标,最终可构建出如图 1 所示的两者间的进化博弈动态演化图。

由图 1 可知,创新策略的初始被选概率,决定了产业创新网络中非核心企业和核心企业进化博弈最终收敛的稳定状态。更为确切地说,若初始点  $(x, y)$  位于图形  $BDOA$  范围内,则博弈将最终收敛于 A 点;若初始点  $(x, y)$  位于图形  $BCOD$  范围内,则博弈将最终收敛于 C 点。因此,若图形  $BDOA$  的面积得以扩大,即选择适应性创新策略的核心企业增加,选择适应性创新的非核心企业数量减少,最终则会导致核心企业群实力越来越强,非核心企业群则相对更加弱小。为避免实力差距所导致的各种经济风险(郑焯和吴建南,2017),应尽可能增加图形  $BCOD$  的面积,也即增加选择适应性创新策略的非核心企业的数量。考虑到图 1 中的 A、B、C、O 均为固定点,故而图形  $BCOD$  的面积大小仅取决于 D 点

$\left(\frac{W_2 - P_2 - M_2}{V_2 - M_2}, \frac{W_1 - P_1 - M_1}{V_1 - M_1}\right)$  的位置。故而,当 D 点向左上方移动  $\left(x^* = \frac{W_2 - P_2 - M_2}{V_2 - M_2} \text{ 减小}, y^* = \frac{W_1 - P_1 - M_1}{V_1 - M_1} \text{ 增大}\right)$  时,  $BCOD$  的面积才会增大。也就是说,为保持产业创新网络的均衡发展,必须提高非核心企业选择适应性创新策略的创新收益  $W_1$ , 减少其选择适应性创新策略的创新成本  $P_1$  和创新冲突损失  $V_1$ 。

#### 四、产业创新网络中非核心企业与核心企业进化博弈的模拟

考虑到系统动力学(system dynamics, SD)在推演不完全信息系统时的理论优势(邓建高等,2020)及其在刻画创新博弈行为时的方法优势(郑彤和谢科范,2015),将应用其对产业创新网络中非核心企业与核心企业创新策略选择的博弈过程进行仿真模拟,具体如图 2 所示。其中,涉及 2 个水平变量(非核心企业选择适应性创新策略的概率  $x$ ,核心企业选择适应性创新策略的概率  $y$ )、2 个速率变量[流速  $F(x)$ 、流速  $F(y)$ ]、4 个辅助变量(分别为非核心企业选择适应性创新策略和边际性创新策略的适应度  $E_{x1}$  和  $E_{x2}$ ,核心企业选择适应性创新策略和边际性创新策略的适应度  $E_{y1}$  和  $E_{y2}$ )及 10 个常量(分别为非核心企业和核心企业创新的基础收益  $U$  和  $R$ ,适应性创新收益  $W_1$  和  $W_2$ ,适应性创新成本  $P_1$  和  $P_2$ ,创新冲突收益损失  $V_1$  和  $V_2$ ,边际性创新收益  $M_1$  和  $M_2$ )。

结合前文所推演的博弈过程及已有文献中的初始值设定方法(具体赋值情况见表 3),借鉴流率基本人树建模法(冷碧滨等,2017)对产业创新网络中非核心企业与核心企业的博弈过程进行仿真(具体如图 3 所示)。设定仿真模型初始时间为 0,结束时间为 30,时间单位为年。

表 2 博弈均衡点分析

平衡点	det(J)	tr(J)	结论
A(0,1)	+	-	ESS
B(1,1)	+	+	不稳定
C(1,0)	+	-	ESS
O(0,0)	+	+	不稳定
D(x*, y*)	0	0	鞍点

注: + 表示对应数值大于零; - 表示对应数值小于零; 0 表示对应数值等于零。

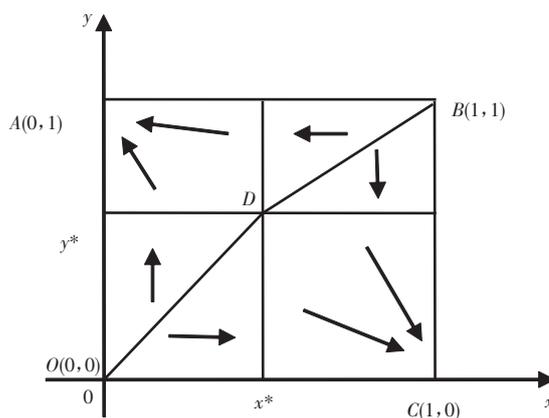


图 1 非核心企业与核心企业进化博弈动态演化图

表 3 仿真模型的变量初始值

变量名称	企业类型	
	非核心企业	核心企业
基础收益	$U=15$	$R=30$
适应性创新成本	$P_1=9.8$	$P_2=10$
适应性创新收益	$W_1=28$	$W_2=40$
适应性创新冲突损失	$V_1=19.3$	$V_2=32$
边际性创新收益	$M_1=9$	$M_2=14$
适应性创新策略概率	$x=0.5$	$y=0.5$

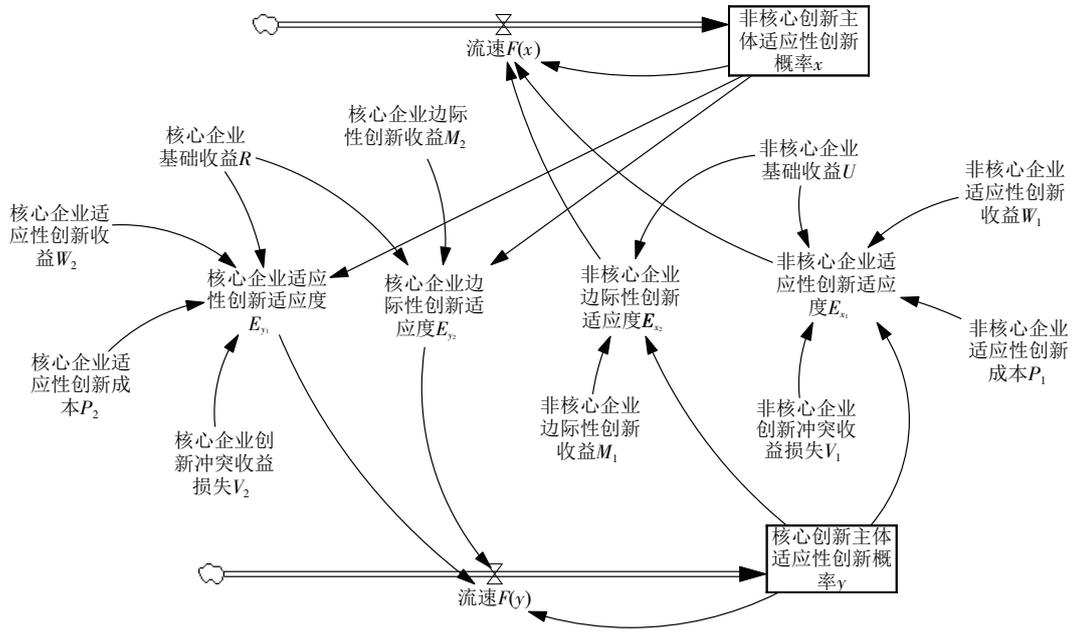


图2 产业创新网络中非核心企业与核心企业SD仿真演化模型

(一) 产业创新网络系统动态仿真

由图3可知,在短期内非核心企业选择适应性创新的概率从初始值0.5迅速上升至最高点(0.7左右),后快速下降至0,并从第6年开始一直保持在0的状态;而核心企业选择适应性创新策略的概率则由初始点0.5急剧上升至1,后一直保持在1。针对这一现象可能的解释是,考虑到适应性创新策略收益性较高,故而在初次博弈时非核心企业与核心企业均倾向于选择此创新策略,进而表现出短期内此策略选择概率迅速升高的表象。然而数次博弈后,非核心企业逐渐发现其选择适应性创新策略的收益小于其选择边际性创新收益策略的收益,故而随后逐渐转向选择边际性创新策略。然而,与非核心企业相反的是,核心企业在前期的多次博弈中,明显感知到选择适应性创新策略时的良好收益,故而后期会逐渐固定在此策略上。

通过计算可得, D点的坐标为  $(\frac{W_2 - P_2 - M_2}{V_2 - M_2} = 0.889, \frac{W_1 - P_1 - M_1}{V_1 - M_1} = 0.893)$ 。将 D点带入图1所示的进化博弈动态演化图中可知,初始点(0.5, 0.5)位于BCOD范围内。

结合前文的ESS分析结果可知,产业创新网络系统理应最终收敛于C点(非核心企业选择适应性创新,而核心企业选择边际性创新),这恰好与图3所示的演化结果相悖。为解释其原因,应用系统动力学软件,最终给出了如图4所示的理论与实际演化差异图。从中可以看出,实际演化中的ODB为一条平滑向上的曲线,初始点(0.5, 0.5)位于BAOD范围内(而非理论上认为的BCOD范围内),故而最终收敛于A点(而非理论上认为的C点)。

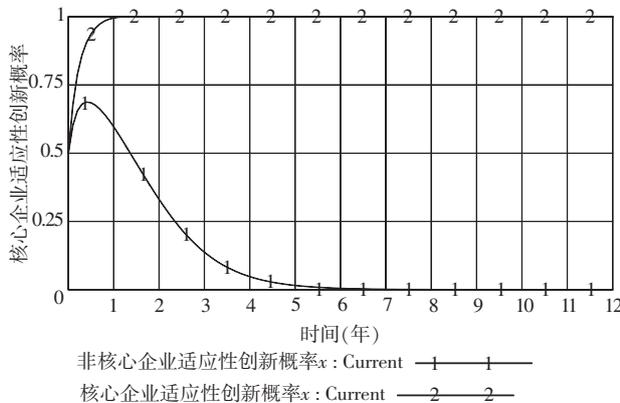


图3 初始状态下非核心企业与核心企业适应性创新概率演化图

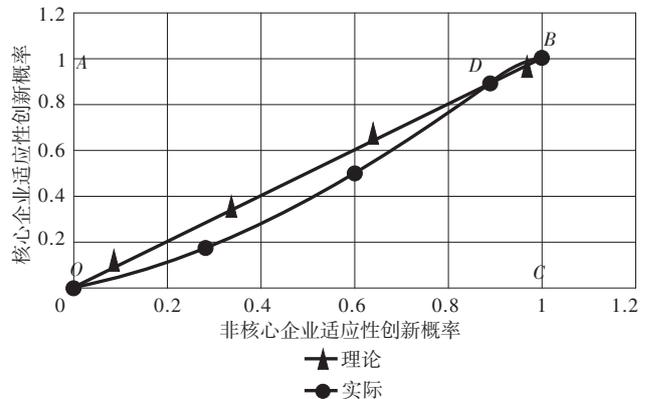


图4 理论较实际演化差异图

## (二)策略被选初始概率对演化结果的影响分析

为判别策略被选初始概率对产业创新网络系统演化结果的差异性影响,尝试性对两种情况下的系统演化结果进行比较,最终得到了图5~图8所示的演化路径图。

情况一:保持核心企业适应性创新策略被选概率 $y$ 初始值0.5不变,判断非核心企业适应性创新策略被选概率 $x$ 初始值对系统演化结果的影响。

如图5和图6所示,当 $x$ 的初始值分别为0.1、0.3、0.5(分别对应 $x$ -Current1、 $x$ -Current2、Current)时,概率 $x$ 则表现出先短暂上升后下降,最终稳定于0的演化趋势,而概率 $y$ 则表现出先急速上升,后收敛于1的演化趋势,并且 $x$ 初始值越小, $y$ 的收敛速度越快;当 $x$ 的初始值分别为0.7、0.9(分别对应 $x$ -Current3、 $x$ -Current4)时,概率 $x$ 则表现出先迅速上升后稳定于1的演变趋势,而概率 $y$ 则表现出先上升后急剧下降,最终稳定于0的演变趋势,并且 $x$ 初始值越大, $y$ 的收敛速度越快。综上可知,非核心企业选择适应性创新策略的概率对系统演化结果影响较大。更为确切地说,当 $x > 0.5$ 时,系统演化结果将最终稳定在非核心企业选择适应性创新而核心企业选择边际性创新的状态;当 $x \leq 0.5$ 时,系统将最终稳定在非核心企业选择边际性创新而核心企业选择适应性创新的状态。

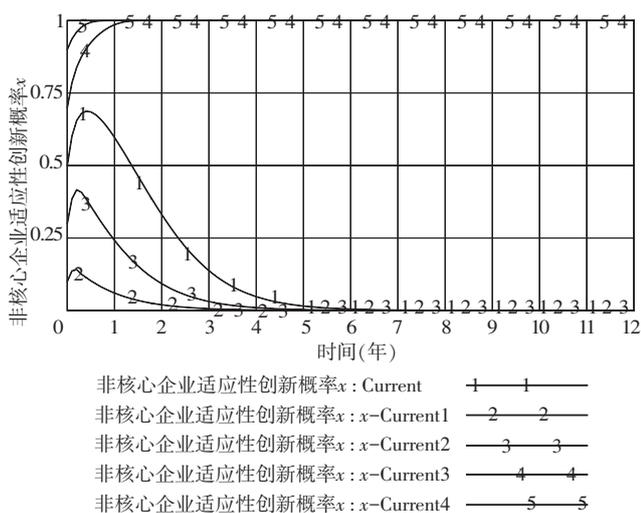


图5  $x$ 初始值的变化对概率 $x$ 的演变影响

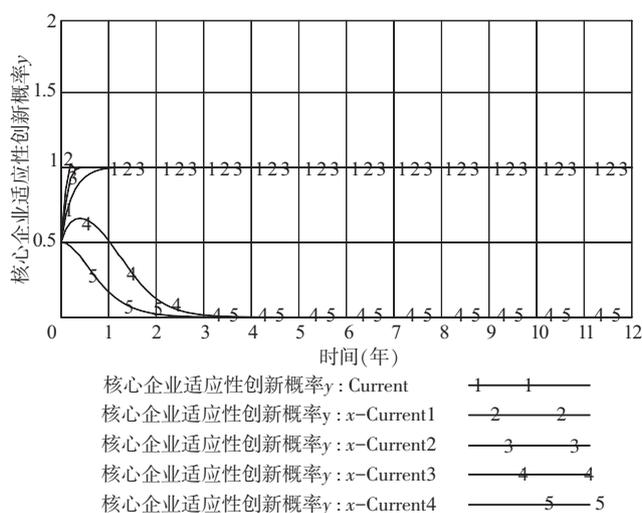


图6  $x$ 初始值的变化对概率 $y$ 的演变影响

情况二:保持非核心企业适应性创新策略被选概率 $x$ 初始值0.5不变,判断核心企业适应性创新策略被选概率 $y$ 初始值对系统演化结果的影响。

如图7和图8所示,当 $y$ 的初始值分别为0.1、0.3(对应 $y$ -Current1、 $y$ -Current2)时,概率 $x$ 则表现出急剧上升后稳定于1的状态,而概率 $y$ 则表现出先上升后骤降至0并保持稳定的状态;当 $y$ 的初始值分别为0.5、0.7、0.9(对应Current、 $y$ -Current3、 $y$ -Current4)时,概率 $x$ 则表现出先上升后骤降至0并保持稳定的状态,而概率 $y$ 则表现出急剧上升后稳定于1的状态,并且 $y$ 值越大, $x$ 的收敛速度则越快。综上可知,核心企业选择适应性创新策略的概率初始值对博弈系统进化结果影响显著,即当 $y \geq 0.5$ 时,系统演化结果将最终稳定在核心企业选择适应性创新而非核心企业选择边际性创新的状态;而当 $y < 0.5$ 时,系统将最终稳定在核心企业选择边际性创新而非核心企业选择适应性创新的状态。

结合上述两种情况可知,产业创新网络中非核心企业与核心企业进化博弈的稳定策略为(适应性创新, 边际性创新)或(边际性创新, 适应性创新)。具体而言,当初始点为( $x \leq 0.5, y = 0.5$ )或( $x = 0.5, y \geq 0.5$ )时,由于其均位于图形BDOA范围内。因此系统最终将稳定在非核心企业选择边际性创新而核心企业选择适应性创新的状态,并且 $x$ 值越小、 $y$ 值越大,系统收敛的速度则越快;当初始点为( $x > 0.5, y = 0.5$ )或( $x = 0.5, y < 0.5$ )时,由于其均落在图形BCOD范围内。因此系统最终将收敛于非核心企业选择适应性创新而核心企业选择边际性创新的状态,并且 $x$ 值越大、 $y$ 值越小,系统收敛速度则越快。

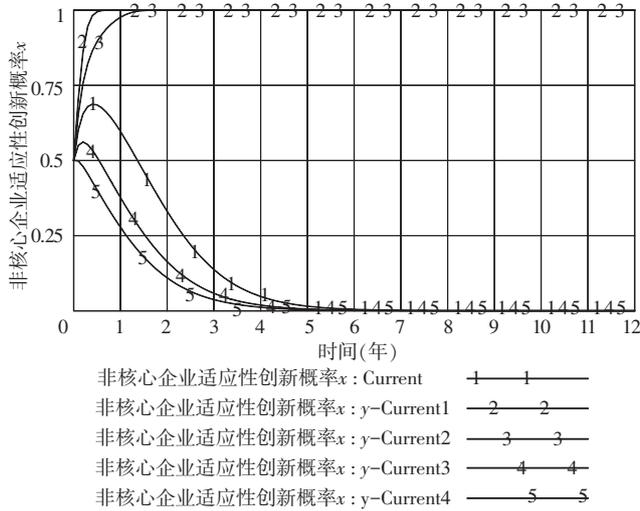


图7 y初始值的变化对概率x的演变影响

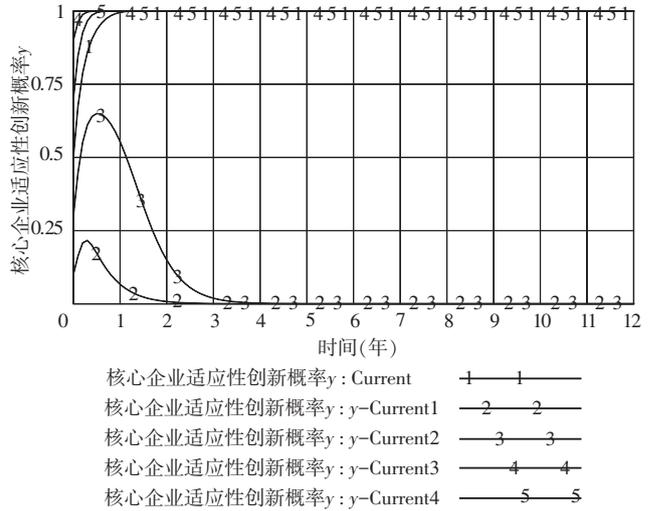


图8 y初始值的变化对概率y的演变影响

### (三)敏感性分析

为判断产业创新网络中非核心企业演化结果的敏感性,将分别调整适应性创新收益、适应性创新成本及创新冲突损失这三个变量的取值,以观察其对演化结果的影响程度。

图9展示了不同创新收益  $W_1$  水平下非核心企业选择适应性创新策略概率  $x$  的敏感性。其中,曲线 Current表示创新收益为初始状态( $W_1 = 28$ )时概率  $x$  的演化结果,曲线 Current1表示创新收益减1( $W_1 = 27$ )时概率  $x$  的演化结果,曲线 Current2表示创新收益增1( $W_1 = 29$ )时概率  $x$  的演化结果,曲线 Current3表示创新收益增2( $W_1 = 30$ )时概率  $x$  的演化结果。与曲线 Current对比可知,当创新收益微减时,非核心企业选择适应性创新策略的概率  $x$  将以更快的速度收敛于0(非核心企业最终收敛于选择边际性创新策略),而当创新收益增1时,非核心企业选择适应性创新策略的概率  $x$  则将以较快速度收敛于1,而当创新收益增2时,非核心企业选择适应性创新策略的概率  $x$  则将以更快速度收敛于1。由此可知,非核心企业选择适应性创新策略的决策受创新收益的影响较为敏感。当创新收益降低时,非核心企业将最终收敛于选择边际性创新策略;但只要创新收益有所提升,非核心企业则将快速选择适应性创新策略。

图10则给出了不同创新成本取值(分别赋值为7.8、8.8、9.8、10.8,对应于曲线 Current2、Current1、Current、Current3)时非核心企业适应性创新策略被选概率  $x$  的演化路径。由图10可知,与初始状态(创新成本为9.8时)相比,创新成本每减少1,非核心企业选择适应性创新策略的概率  $x$  则以更快速度收敛于1;然而,当创新成本增加1时,非核心企业选择适应性创新策略的概率  $x$  则以较快速度收敛于0,并最终稳定在边际性创新策略的状态。由此可知,创新成本的变动对非核心企业选择适应性创新策略的决策影响也较为显著。当创新成本降低时,非核心企业将以较快速度收敛于选择适应性创新策略;但只要创新成本有所上涨,非核心企业则将快速收敛于选择边际性创新策略。

图11则展示了不同创新冲突损失取值(分别为17.3、18.3、19.3、20.3,对应曲线 Current3、Current2、Current、Current1)下非核心企业选择适应性创新策略概率  $x$  的演化趋势。由图11可知,与初始状态(创新冲突损失为19.3时)相比,当创新冲突损失增加1时,非核心企业选择适应性创新策略的概率  $x$  将以较快速度聚敛于0;而当创新冲突损失值逐渐缩减时,非核心企业选择适应性创新策略的概率  $x$  收敛于1的速度则将大大加快。由此可知,非核心企业选择

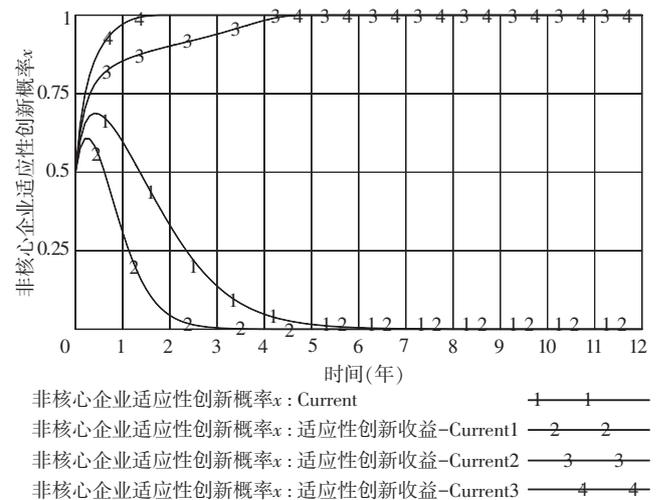


图9 创新收益变动对概率x的敏感性

适应性创新策略的决策行为也受创新冲突损失影响。当创新冲突损失有所增加时,非核心企业则将快速收敛于选择边际性创新策略;但只有当创新冲突损失减少至足够多时,非核心企业才会最终收敛于适应性创新策略。

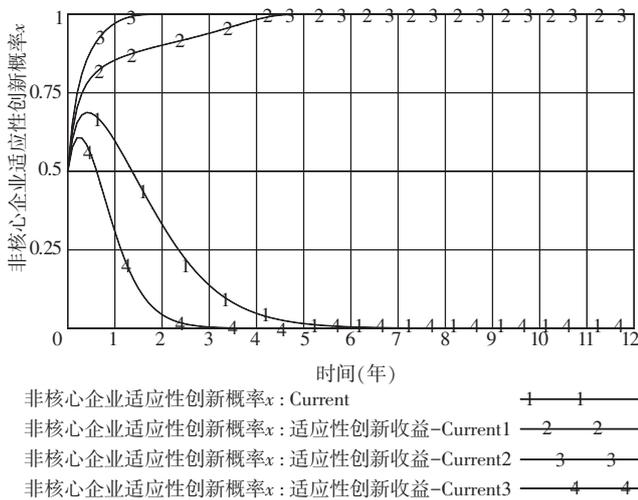


图 10 创新成本变动对概率  $x$  的敏感性

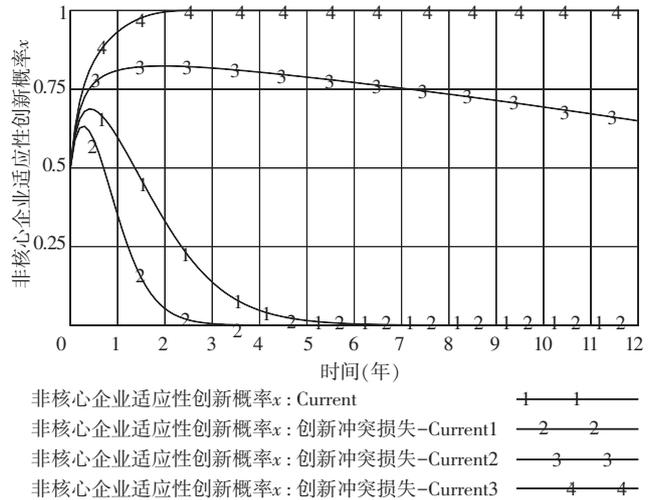


图 11 创新冲突损失变动对概率  $x$  的敏感性

## 五、结论与讨论

### (一) 研究结论

为解密“产业创新网络背景下非核心企业创新策略选择”这一实践黑箱现象,尝试性应用了进化博弈论、系统动力学等理论方法,对产业创新网络中非核心企业与核心企业之间创新策略选择的博弈过程进行了刻画与仿真,并最终得出了如下结论:

第一,选择不同于彼此的创新策略,是产业创新网络中非核心企业与核心企业进化博弈的稳定策略。通过对比  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $O$  五个平衡点可知,仅  $A$  点(核心企业选择适应性创新、非核心企业选择边际性创新)和  $C$  点(核心企业选择边际性创新、非核心企业选择适应性创新)为进化稳定策略,即双方需选择不同于彼此的创新策略,才能实现产业创新网络的均衡发展。

第二,各创新主体选择创新策略的初始概率,将直接决定产业创新网络进化博弈结果。如前所述,当非核心企业和核心企业选择适应性创新策略的初始概率  $(x, y)$  位于图形  $BCOD$  内时,则系统最终将收敛于非核心企业选择适应性创新而核心企业选择边际性创新的状态;而当初始概率  $(x, y)$  位于图形  $BDOA$  内时,则系统最终收敛于非核心企业选择边际性创新而核心企业选择适应性创新的状态。

第三,创新收益、创新成本及创新冲突损失的变动,均会显著干扰非核心企业适应性创新策略的选择。敏感性分析结果显示,创新收益、创新成本和冲突损失的变动,均对产业创新网络中非核心企业选择适应性创新策略的概率  $x$  具有显著影响。

### (二) 创新点

围绕“产业创新网络背景下非核心企业创新策略选择”这一切入点,应用进化博弈论、系统动力学等方法,以期剖析其在与核心企业进化博弈中的创新策略动态选择过程,其创新点主要体现在选题视角的新颖性上。尽管近年来学者们已逐渐认知到创新网络化现象的存在及其价值,并纷纷围绕创新网络的整体特征刻画、网内核心企业的识别、评价及优势等内容开展了大量的研究工作,但对网内非核心企业及其相关发展问题缺乏系统性关注。紧扣这一特殊群体,分析其在与网内核心企业进化博弈中的创新策略动态选择过程,以期为我国诸多中小企业的转型升级提供创造性战略路径。

### (三) 研究启示

一是积极发挥市场及政府调节作用,引导非核心企业选择合适的创新策略。如前所述,产业创新网络中非核心企业与核心企业之间的进化博弈结果将最终收敛于双方选择不同于彼此的创新策略。为此,为促进

产业创新网络和谐、健康、持续发展,还应充分发挥市场及政府部门的调节作用,适时引导网中企业的创新策略选择行为。当网中核心企业适应性创新积极性不高,产出能力不足时,可适当采用税收优惠政策、创新激励制度、技术扶持政策等手段,激励网中非核心企业适时开展适应性创新行为;而当网中核心企业适应性创新氛围活跃,产出较高时,则可适当引导非核心企业选择边际性创新策略,以合理规避创新冲突损失,并为后续博弈储备力量。

二是集多方力量,切实加强非核心企业适应性创新能力建设工作。如前所述,非核心企业选择适应性创新的决策行为受创新收益、创新成本及创新冲突损失显著影响,这一定程度上反映出非核心企业选择适应性创新策略的步伐并不坚定,易受外界因素干扰,也从另一侧面映射出其尚未成熟的适应性创新能力。故而,政府部门应集结多方力量,切实有效地加强网中非核心企业适应性创新能力建设工作。具体而言,除给予必要的财务、技术等扶持性政策外,政府部门还应对部分典型非核心企业进行实地调研,切实了解其发展困境,并可集结网中核心企业、社会组织等多方力量及时开展更具针对性的帮扶工作。

#### (四)研究展望

为深入挖掘出产业创新网络中非核心企业的生存之道,以便为诸多中小企业创新转型提供路径参考,结合进化博弈论和系统动力学相关知识,系统刻画并仿真了产业创新网络背景下非核心企业与核心企业互动下的创新策略进化博弈过程。当然,仍存在以下不足,望后期能进一步探讨:一是研究内容上并未考虑多元化网络情境对非核心企业创新策略选择的权变影响。由于非核心企业的创新策略选择一定程度上也受制于产业创新网络系统本身状态特征的动态变化,因此后期可尝试性探讨非核心企业在与多元网络情境互动下的创新策略权变选择机制。二是研究方法上侧重于模拟仿真,欠缺实证研究或案例研究结果的互证。为刻画非核心企业与核心企业的进化博弈过程,采用了进化博弈论及系统动力学相关知识,但仍缺乏更有力的实践资料进行互证。为此,后期可增加规范式实证研究或扎根式案例研究,从而充分夯实所研内容的科学性。

#### 参考文献

- [ 1 ] 邓峰. 2015. 核心企业网络权力对产业集群创新绩效的影响——基于网络运行效率的中介作用[J]. 科技进步与对策, 32(18): 58-64.
- [ 2 ] 邓建高, 张璇, 傅柱, 等. 2020. 基于系统动力学的突发事件网络舆情传播研究: 以“江苏响水爆炸事故”为例[J]. 数据分析与知识发现, 4(2/3): 110-121.
- [ 3 ] 杜传忠, 杜新建, 晁世娟. 2017. 我国生产性服务业促进技术创新的机制及效应分析[J]. 经济与管理, 31(6): 39-44.
- [ 4 ] 樊霞, 胡军燕, 赵丹萍. 2010. 中小企业渐进性创新技术属性及其产学研合作模式选择[J]. 中国科技论坛, 26(8): 20-25.
- [ 5 ] 付晶, 王学东, 李延晖, 等. 2018. RFID 跨企业集成中供应链上下游企业的进化博弈[J]. 系统管理学报, 27(5): 998-1007.
- [ 6 ] 何玉润, 林慧婷, 王茂林. 2015. 产品市场竞争、高管激励与企业创新——基于中国上市公司的经验证据[J]. 财贸经济, 36(2): 125-135.
- [ 7 ] 胡海波, 管永红, 费梅菊, 等. 2020. 企业创新网络演化机制双案例研究: 企业家精神与关系嵌入驱动[J]. 科技进步与对策, 37(4): 89-98.
- [ 8 ] 黄凯南, 乔元波. 2018. 产业技术与制度的共同演化分析——基于多主体的学习过程[J]. 经济研究, 64(12): 161-176.
- [ 9 ] 冷碧滨, 涂国平, 贾仁安, 等. 2017. 系统动力学演化博弈流率基本人树模型的构建及应用——基于生猪规模养殖生态能源系统稳定性的反馈仿真[J]. 系统工程理论与实践, 37(5): 1360-1372.
- [ 10 ] 毛蕴诗, 郑奇志. 2016. 论国际分工市场失效与重构全球价值链——新兴经济体的企业升级理论构建[J]. 中山大学学报(社会科学版), 2(56): 175-187.
- [ 11 ] 戚湧, 张明, 丁刚. 2013. 基于博弈理论的协同创新主体资源共享策略研究[J]. 中国软科学, 28(1): 149-154.
- [ 12 ] 汪旭晖, 任晓雪. 2020. 基于演化博弈的平台电商信用监管机制研究[J]. 系统工程理论与实践, 40(10): 2617-2630.
- [ 13 ] 王伟光, 由雷, 臧红敏. 2017. 高技术产业创新网络中非核心企业技术创新能力研究——以沈阳市为例[J]. 科技进步与对策, 34(2): 45-50.
- [ 14 ] 吴洁, 车晓静, 盛永祥, 等. 2019. 基于三方演化博弈的政产学研协同创新机制研究[J]. 中国管理科学, 27(1): 162-173.
- [ 15 ] 徐立平, 姜向荣, 尹翀. 2015. 企业创新能力评价指标体系研究[J]. 科研管理, 36(1): 122-126.
- [ 16 ] 徐雨森, 徐娜娜. 2016. 后发企业逆向创新的类型与策略组合研究[J]. 科研管理, 37(10): 35-42.
- [ 17 ] 由雷, 王伟光. 2017. 创新网络中非核心企业技术创新能力评价[J]. 经济问题探索, 38(7): 54-63.

- [18] 张新. 2003. 供应链中非核心企业的发展选择[J]. 科技进步与对策, 20(12): 126-127.
- [19] 张钟元, 李腾. 2019. 非核心企业知识增长效应研究——基于 IVC 与 IONE 二元结构视角的系统仿真分析[J]. 科技进步与对策, 36(24): 118-127.
- [20] 郑彤彤, 谢科范. 2015. 基于系统动力学的用户创新行为演化分析[J]. 管理学报, 12(12): 1824-1831.
- [21] 郑焯, 吴建南. 2017. 政府支持行为何以促进中小企业创新绩效? ——一项基于扎根理论的多案例研究[J]. 科学与科学技术管理, 38(10): 41-54.
- [22] 周珊珊, 孙玥佳. 2019. 政府补贴与高技术产业持续适应性创新演化[J]. 科研管理, 40(10): 58-72.
- [23] BACH L A, HELVIKE T, CHRISTIANSEN F B. 2006. The evolution of n-player cooperation: Threshold games and ESS bifurcations[J]. Journal of Theoretical Biology, 238(2): 426-434.
- [24] FITIAR R D, RODRIGUEZ-POSE A. 2013. Firm collaboration and modes of innovation in Norway[J]. Research Policy, 42(1): 128-138.
- [25] FRIEDMAN D, 1998. On economic applications of evolutionary game theory[J]. Journal of Evolutionary Economics, 8(1): 15-43.
- [26] HU X L, 2014. Collaborative innovation path selection of universities industry-university-research[J]. International Journal of Digital Content Technology and Its Applications, 8(1): 104.
- [27] KRATZER J, LEENDERS R T A J, VAN ENGELEN J M L, 2005. Informal contacts and performance in innovation teams [J]. International Journal of Manpower, 26(6): 513-528.
- [28] LUTHIE C, HERSTATT C, VON HIPPEL E. 2005. User-Innovators and “Local” information: The case of mountain biking [J]. Research Policy, 34(6): 951-965.
- [29] NARULA R. 2004. R&D collaboration by SMEs: New opportunities and limitations in the face of globalization [J]. Technovation, 24(2): 153-161.
- [30] PAVLOU P A, SAWY O A, 2011. Understanding the elusive black box of dynamic capabilities[J]. Decision Sciences, 42(1): 239-273.
- [31] TOMLINSON P R, FAI F M, 2013. The nature of SME cooperation and innovation: A multi-scalar and multi-dimensional analysis[J]. International Journal of Production Economics, 141(1): 316-326.
- [32] YAM R C, LO W, TANG E P, et al, 2011. Analysis of sources of innovation, technological innovation capabilities, and performance: An empirical study of Hong Kong manufacturing industries[J]. Research Policy, 40(3): 391-402.
- [33] HUANG Y, CHUNG H J, LIN C, 2009. R&D sourcing strategies: Determinants and consequences[J]. Technovation, 29(3): 155-169.
- [34] ZHOU S, BASKARAN A, TANG M, et al, 2017. Adaptive innovation in the evolution of a latecomer firm: The case of asialnfo China[J]. Institutions and Economics, 9(2): 75-108.

## Research on the Evolutionary Mechanism of Non-core Enterprises in the Industrial Innovation Network Based on Evolutionary Game Theory

Yu Dongping, Zhang Hui, Hu Jian, Zhang Junjie

(International Business School, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming 650221, China)

**Abstract:** It is an urgent need for many weak groups of cooperative innovation to decipher the way of survival of non-core enterprises in the industrial innovation network. Therefore, a game model between core and non-core enterprises in the industrial innovation network was built based on the evolutionary game theory, and then the evolution process was simulated by using Vensim PLE software to discover the evolution path of non-core enterprises in the industrial innovation network. It is found that choosing an innovation strategy which is different from the one of core enterprises, is the evolutionary stable strategy for non-core enterprises in the industrial innovation network. The initial probability for each innovation subject to choose a certain innovation strategy directly determines the evolutionary result of industrial innovation network. The change of innovation revenue, innovation cost and innovation conflict revenue loss, significantly influences the decision for non-core enterprises to choose the adaptive innovation strategy.

**Keywords:** evolutionary game theory; industrial innovation network; non-core enterprise; evolutionary stable strategy