

DOI:10.3969/j.issn.1674-8131.2021.06.006

高技术产业创新生态系统耗散演化研究

——运用 Brusselator 模型对中国省级区域的经验分析

伊辉勇, 曾芷墨

(重庆交通大学 经济与管理学院, 重庆 400074)

摘要:高技术产业创新生态系统的耗散演化可以促进创新驱动的高质量发展,并缓解区域创新发展不平衡的问题。对 Brusselator 模型进行经济学转译,构建“创新投入—创新环境”二维框架的评价指标体系,可以推导高技术产业创新生态系统形成耗散结构的判定条件,并可进一步运用“全局熵—突变级数”评价模型刻画系统耗散演化的过程。采用2013—2019年中国30个省级区域高技术产业相应数据的分析表明:北京、天津、上海的高技术产业创新生态系统已形成耗散结构,大部分地区虽未形成耗散结构但正向耗散结构演进;样本地区高技术产业创新生态系统的“创新投入—创新环境”二维框架整体呈现“Ⅲ象限→Ⅱ象限→Ⅰ象限”的演化趋势,且“创新投入—创新环境”的评价价值趋于提高,同时各地也具有不同的耗散演化特征。在增加高技术产业创新投入的同时,更要致力于创新环境的改善,并积极构建创新主体的协同创新网络;各地区既要采取差异化发展策略,也应促进区域间的协调发展,以进一步推动高技术产业创新生态系统的耗散演进。

关键词:创新生态系统;高技术产业;耗散结构;耗散演化;Brusselator 模型;突变级数法

中图分类号:F224.12;O415.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-8131(2021)06-0081-15

一、引言

创新是引领发展的第一动力。在现代经济体系中,不同层面、不同领域、不同类型的创新主体和创新活动之间联系日益紧密,并通过协同创新形成创新网络,驱动经济高质量发展。在创新网络迅猛发展的推动下,中国创新范式从创新体系2.0演变为创新生态系统3.0,演化出具有绝对竞争力的产业创新生态系统是中国未来实现全球创新引领的关键(谭劲松等,2021)^[1]。产业发展是整个国民经济系统进

* 收稿日期:2021-07-22;修回日期:2021-10-19

基金项目:国家社会科学基金西部项目(20XGL030)

作者简介:伊辉勇(1977),男(满族),辽宁盖州人;博士,教授,硕士生导师,主要从事高新技术产业生态学和网络营销研究;Email:yihuiyong1977@126.com。曾芷墨(1997),女,四川广安人,硕士研究生;主要从事高新技术产业研究;Email:momojiang0510@qq.com。

化的基础,产业创新则是产业发展的根本驱动力,因而产业创新系统成为学界研究的热点。其中,从生态学视角对产业创新系统的研究衍生出“产业创新生态系统”的概念。自 Moore (1993) 提出商业生态系统后^[2],国外学者开始研究产业创新生态系统,多种利益相关者被纳入系统以探究其协同演化过程。Gobble (2014) 指出,区域产业创新生态系统是创新群落和创新网络的融合和延伸^[3]; Layton 等 (2016) 将产业生态学和与协同创新理论相结合,进一步分析产业创新生态系统的网络性、自组织性、协同性等特征^[4]; Jacobides 等 (2018) 研究了产业创新生态系统的演化和治理等问题^[5]。

国内学者对产业创新生态系统的研究起步较晚,且大部分文献以高技术产业为切入点对产业创新生态系统进行理论分析和实证检验。高技术产业具有高技术密集、高创新、高附加值等特征,是驱动区域创新发展的核心产业。构建高技术产业创新生态系统能有效激发区域内创新要素合理流动,提高自主创新能力,获取核心竞争优势,进而推动产业结构升级(范德成等,2021)^[6]。高技术产业创新过程的本质是系统内部创新主体不断与创新环境进行物质、能量及信息交换,各种创新资源通过创新网络产生非线性放大作用,形成“1+1>2”的协同效应的动态演化过程(刘和东等,2021)^[7]。高技术产业创新生态系统能否及时调整以适应动态的社会经济环境是决定其能否持续向高层次结构演化的关键所在。高技术产业创新生态系统是一种具有自组织特性的耗散结构,系统的运行容易受到创新政策、创新主体能力和市场竞争态势等因素涨落的影响,当涨落达到一定程度,系统就会通过非线性机制形成“巨涨落”,进而推动系统发生突变和形成耗散结构(梁中,2015)^[8]。因此,从生态学视角分析高技术产业创新生态系统内主体与环境如何通过协同关系促使系统向耗散结构演化,有助于创新资源的优化配置,对推动产业结构升级,最大释放创新潜力和促进高质量发展具有重要意义。

为了适应创新发展的需要,大多学者围绕协同创新、创新机制、治理模式、构成要素等方面对高技术产业创新生态系统进行研究。李红和金左萍(2018)基于价值获取理论,提出知识产权价值获取概念模型,为中国高新技术产业创新生态系统发展提供理论支撑^[9]。吴菲菲等(2020)从创新四螺旋视角分析高技术产业创新生态系统的整体协同性,发现创新具有区域异质性特征,需加大创新政策调控力度,进而实现创新螺旋积极效应最大化^[10]。宋华和陈思洁(2021)基于协调能力、知识触达能力、创新扩散能力构造高技术产业创新生态系统核心能力评价模型,分析表明三种能力对系统的健康性均产生积极作用^[11]。但这些研究大多是从静态视角分析高技术产业创新生态系统,并没有揭示各组成要素间的动态关系。因此,需要从复杂系统角度,通过构建创新过程演化模型来分析高技术产业创新生态系统的演化趋势。

为进一步研究高技术产业创新生态系统的演化机制,学界已衍生出多种复杂系统与生态学评价方法(刘洪久等,2013;汪良兵等,2014)^[12-13]。王宏起等(2016)对新能源汽车创新生态系统演化路径的分析发现,在创新链和采用链的协同作用下系统能实现持续演进^[14]。还有学者利用生态位适宜度对高技术产业创新生态系统演化进行评价,探讨系统发展的可持续性,并为创新资源配置与创新路径提出建议(张贵等,2017;雷雨嫣等,2018)^[15-16]。然而,高技术产业创新生态系统是一个自组织演化的复杂系统,线性静态的演化分析过于简单,难以捕捉深层次演变规律。由于耗散理论在处理复杂系统时具有独特优势,往往被创新领域的学者用来分析复杂系统的演化过程。Deng 等(2017)以电信产业为例,通过构建模型探讨产业创新生态系统演化为耗散结构所需要的动态条件^[17]。Liu 等(2017)等基于熵理论构建利用外资研发的创新生态系统评价体系,进而测度系统演化偏离耗散结构的程度^[18]。吴颖和车林杰(2016)通过对协同创新系统的 Brusselator 模型转译,根据正负熵理论推导协同创新系统形成耗散结构的判定条件,并实证分析重庆自主品牌汽车协同创新的能力^[19]。范德成等(2018)构建区域产业创新系统耗散结构的运行熵、关联熵测度模型,通过有序度实证分析区域产业结构演化的系统运行效率^[20]。

目前大多学者认为系统中总混乱度(熵)是不断增加的,使系统无法形成有序的耗散结构,因此定义系统内部运行产生的矛盾形成正熵,而与外部环境的物质、能量交换形成负熵,并认为当负熵足够大时就能抵消系统在自身发展过程中产生的熵增,实现系统从无序向有序的演化。但耗散理论指出,负熵的增加需要达到一定的量(即阈值)时才能使系统向耗散结构演化(苏屹,2013)^[21]。以往研究往往忽视阈值问题,对“熵”的理解存在偏差,即只考虑到正负熵的抵消作用,偏离复杂系统的科学分析思维,导致分析结果不够严谨。此外,突变理论指出,原有结构在连续时段内突然变化使系统分岔演化,进而形成耗散结构,这是一个动态的过程。然而相关实证研究大多基于自然熵增理论(Prigogine et al,1985)^[22],对某一特定时间段的横截面数据进行分析,缺乏时空维度的全局考量,不能从时空演化视角评价高技术产业创新生态系统的动态变化,在更深层次探索系统耗散演化的影响因素方面也有所欠缺。

鉴于上述分析,本文在已有研究的基础上,基于复杂系统观,把高技术产业创新生态系统演化过程看作一种耗散突变过程,对耗散理论的经典模型——Brusselator 模型进行科学转译,将其移植于高技术产业创新生态系统研究中,并进一步利用优化的突变级数法评价系统的耗散演化状态,同时,还对2013—2019年中国30个省级区域的高技术产业创新生态系统进行实证分析,以期为促进高技术产业的创新发展提供经验借鉴和决策启示。本文的边际贡献主要在于:一是将 Brusselator 模型进行经济学转译,促进复杂性科学与产业创新生态系统理论的交叉融合;二是构建高技术产业创新生态系统的演化动力学方程,解决耗散突变阈值确定问题,以明确系统形成耗散结构的判定条件;三是在“创新投入—创新环境”二框架下,构建高技术产业创新生态系统的 Brusselator 模型评价指标体系,并将截面数据与历史数据相结合,利用“全局熵—突变级数”模型动态评价系统耗散演化的过程。上述研究,不但可以为相关研究提供理论参考和方法借鉴,而且动态刻画了中国区域高技术产业创新生态系统的现状和演化趋势,进而为各地区的创新资源优化、创新环境改善以及产业政策制定等提供决策依据。

二、研究设计

耗散结构理论指出:一个开放的复杂系统会不断与外部环境进行物质、信息和能量交换,当系统内部参数突破临界阈值时,系统通过涨落导致突变,此时形成的时间、空间和功能上的有序结构,称为耗散结构。从系统的长期动态演进来看,耗散结构是系统进化的关键节点,是系统从低级向高级进化的结构形态。高技术产业创新生态系统的进化就是一种典型的耗散突变演化:较低级的高技术产业创新生态系统处于无序状态,创新资源的流动与创新环境的改变持续作用于系统结构,当创新投入的累积叠加创新环境的改善达到系统耗散演化的阈值时,系统将突变为耗散结构——新的更高级的有序结构。

1. 基于 Brusselator 模型的系统耗散演化分析

普利高津在研究化学动力学反应过程中总结出的布鲁塞尔模型(Brusselator Model)为研究系统耗散结构的演化过程提供了一种分析工具。该模型通过构建数学模型描述化学反应过程中相关元素的扩散过程,可以定量判定系统是否形成耗散结构,其重要的数学方程组表达如式(1)所示(Schneider, 1985)^[23]:



其中: A 、 B 为反应物,其消耗量由外界持续供应且保持浓度不变; D 、 E 为产物,一旦产生立即去除; x 、 y 是中间生成物,其浓度随时间变化; k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 是反应过程中的催化剂,影响反应速率。系统只有在不稳定的情况才能出现耗散结构,但系统的失稳状态难以分析,所以通常借助稳定性分析识别系统的不稳定点,进而判断系统是否能向耗散结构演化。根据双变量的常微分方程组(任佩瑜 等,2001)^[24],可构建系统变量 x 、 y 的演化动力学方程如式(2)所示:

$$\begin{cases} \frac{\partial x}{\partial t} = k_1 A - k_2 B x - k_4 x + k_3 x^2 y + M_1 \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \\ \frac{\partial y}{\partial t} = k_2 B x - k_3 x^2 y + M_2 \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \end{cases} \quad (2)$$

忽略扩散项 $M_1 \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}$ 、 $M_2 \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$, 令 $\tau = k_4 t$, $x = \sqrt{\frac{k_3}{k_4}} X$, $y = \sqrt{\frac{k_3}{k_4}} Y$, $a = \sqrt{\frac{k_1^2 k_3}{k_4^3}} A$, $b = \frac{k_2}{k_4} B$, 通过坐标变换, 令 $x - x_0 = x - a$, $v = y - y_0 = y - \frac{b}{a}$, 在定态解 (x_0, y_0) 处得到稳态方程如式(3)所示:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial \tau} = (b-1) + a^2 v \\ \frac{\partial v}{\partial \tau} = -b - a^2 v \end{cases} \quad (3)$$

通过上式能解决系统耗散演化过程中的阈值突变问题,进而得出耗散结构的判定条件(具体推导略,备索)。对于社会经济系统而言,在定态解 (x_0, y_0) 周围形成稳态均衡并非最优状态,因为这种稳定是一种低度无序结构,系统缺乏打破稳态的创新活力。因此,需要对系统变量 A 、 B 进行计算,进而判定系统耗散结构的演化方向。这里,利用全局熵值法对变量 A 、 B 进行综合评价(王展昭 等,2021)^[25]。具体方法如下:

设定 n 个评价指标,对 t 年 m 个地区的 j 指标进行评价,得到每年的截面数据 $X^t = (x_{ij})_{m \times n}$;引入全局思想,将 t 张截面表按时间顺序排列,构造 $NT \times M$ 的全局评价矩阵: $X = (X^1, X^2, \dots, X^t)'_{m \times n} = (x_{ij})_{m \times n}$ 。对

数据进行无量纲化处理: $x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}} \times 0.99 + 0.01$, ($1 \leq i \leq mt$, $1 \leq j \leq n$, $1 \leq t \leq T$); 得到:

$p_{ij} = x'_{ij} / \sum_{i=1}^m x'_{ij}$; 用全局熵值法确定指标重要程度: $e_{Aj} = -\frac{1}{\ln(mt)} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}$; 计算指标的差异系数: $g_{Aj} =$

$1 - e_{Aj}$; 进而得到指标 i 的熵权值: $q_{Aj} = \frac{g_{Aj}}{\sum_{i=1}^{m \times n} g_{Aj}}$ 。在此基础上,分别计算系统控制变量 A 、 B 的熵值: $E_A =$

$$\sum_{i=1}^{m \times n} q_{Ai} e_{Ai}, E_B = \sum_{i=1}^{m \times n} q_{Bi} e_{Bi}。$$

设 λ 是稳态方程的特征值, ω 是稳定性参数, 则有 $\omega = b - 1 - a^2$, $\lambda_{1,2} = \frac{1}{2}(\omega \pm \sqrt{\omega^2 - 4a^2})$ 。下面讨论特征方程的求解(参见图1): (1) 当 $\omega < 0$ 且 $\omega^2 > 4a^2$ 时, $\lambda_{1,2}$ 皆是负实根, 大扰动下系统总是稳定, 故定态点 (x_0, y_0) 是稳定节点。(2) 当 $\omega > 0$ 且 $\omega^2 > 4a^2$ 时, $\lambda_{1,2}$ 皆是正实根, 任何扰动都将导致系统偏离定态点 (x_0, y_0) , 从而远离平衡, 故定态点为不稳定节点。(3) 当 $\omega < 0$ 且 $\omega^2 < 4a^2$ 时, $\lambda_{1,2}$ 是实部为负的共轭负根, 在定态点 (x_0, y_0) 附近增量收敛趋近于 0, 故定态点是一个稳定焦点。(4) 当 $\omega > 0$ 且 $\omega^2 < 4a^2$ 时, $\lambda_{1,2}$ 是实部为正的共轭负根, 随着时间变化, v 也变大, 系统失稳并在一定范围内保持振动, 最终生成一个以定态点为中心的极限环, 故定态点是不稳定焦点。(5) 当 $\omega = 0$ 时, 有纯虚根, 故定态点是一个稳定中心, 此时

处于临界状态。

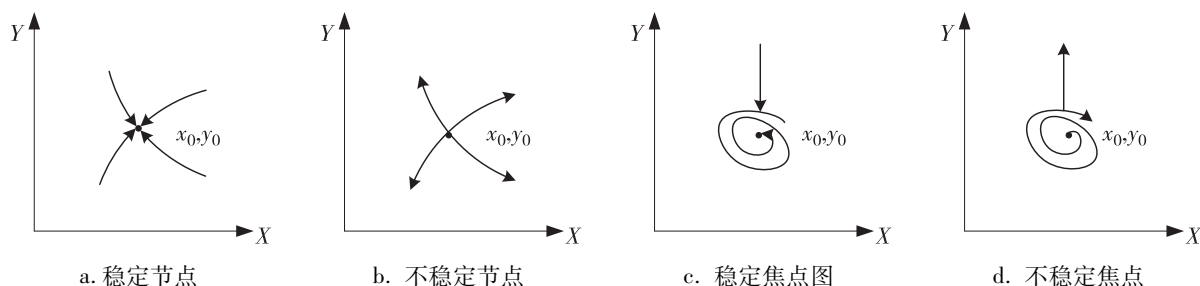


图1 系统耗散演化状态

当 $\omega \leq 0$ 时,说明系统处于稳定状态,是低效率无序结构;当 $\omega > 0$ 时,系统失稳演化为更高级有序的耗散结构。在 k 值固定的情况下,若 $a = \sqrt{\frac{k_1^2 k_3}{k_4^3}} A, b = \frac{k_2}{k_4} B, \omega = b - 1 - a^2 > 0$,系统形成耗散结构;若 $\omega = b - 1 - a^2 < 0$,则系统未形成耗散结构。据此,可得出系统耗散结构判定条件如式(4)所示:

$$\begin{cases} k_2 k_4^2 B < k_4^3 + k_1^2 k_3 A^2 & \text{系统稳定,非耗散结构} \\ k_2 k_4^2 B = k_4^3 + k_1^2 k_3 A^2 & \text{系统处于临界状态} \\ k_2 k_4^2 B > k_4^3 + k_1^2 k_3 A^2 & \text{系统失稳,形成耗散结构} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)的系统耗散结构判定条件,只是判定系统是否形成耗散结构,并不能明确控制变量 A (如创新投入)和 B (如创新环境)两者如何影响系统形成耗散结构,无法在更深层次探究系统耗散演化的规律。突变是复杂系统演化的一种方式,突变理论认为,通过调整控制变量,可以使稳定无序的系统突变为耗散结构。因此,从本质上讲,系统的耗散演化是“均衡—非均衡—动态平衡”的过程,适合突变理论的应用。进一步利用突变级数法用来分析复杂系统的动态演化过程,构建“全局熵—突变级数”评价模型,能在耗散结构判定条件的基础上,进一步明确控制变量 A 和 B 如何影响系统耗散演化(李柏洲等, 2012)^[26]。

常见的突变系统模型如表1所示,其中 x 为阶段变量, a, b, c, d 为指标变量。同层的评价指标间存在互补和非互补的两种关系,明显相关则下级指标间是互补的,无明显相关性则下级指标间是非互补的。例如尖点突变系统,评价对象 N 有2个评价指标 a 和 b ,权重 $q_a > q_b$,则:互补型指标取均值,即 $x_N = \frac{1}{2}(\sqrt{a} + \sqrt[3]{b})$;非互补型指标按“大中取小”进行取值,即 $x_N = \text{MIN}(\sqrt{a}, \sqrt[3]{b})$ 。

表1 突变系统评价模型的势函数、归一化公式

突变类型	指标个数	势函数	归一公式
折叠突变	1	$f(x) = \frac{1}{3}x^3 + ax$	$x_a = \sqrt{a}$
尖点突变	2	$f(x) = x^4 + ax^2 + bx$	$x_a = \sqrt{a}, x_b = \sqrt[3]{b}$
燕尾突变	3	$f(x) = x^5 + \frac{1}{3}ax^3 + \frac{1}{2}bx^2 + cx$	$x_a = \sqrt{a}, x_b = \sqrt[3]{b}, x_c = \sqrt[4]{c}$
蝴蝶突变	4	$f(x) = \frac{1}{6}x^6 + \frac{1}{4}ax^4 + \frac{1}{3}bx^3 + \frac{1}{2}cx^2 + dx$	$x_a = \sqrt{a}, x_b = \sqrt[3]{b}, x_c = \sqrt[4]{c}, x_d = \sqrt[5]{d}$

2. Brusselator 模型的高技术产业创新生态系统转译

根据普利高津关于耗散理论的阐述,耗散结构的形成需要系统具备开放性、非线性、远离平衡态及

涨落 4 个基本条件。高技术产业创新生态系统具有形成耗散结构的 4 个基本条件: (1) 高技术产业创新生态系统是开放系统, 创新主体和创新环境间通过知识流动、创新资源交换和科技信息传递等进行物质、能量及信息交换。(2) 不同的创新主体间形成错综复杂的创新网络, 创新资源流动于创新网络中, 创新产出并非随创新投入成比例地增长。(3) 不同创新主体拥有各自优势, 创新资源、信息和技术能力以及创新成果等处于不均衡分布状态。(4) 外部政策变革和内部技术革新等扰动时有发生, 创新突变不断叠加达到一定阈值时, 系统结构将产生根本性变化, 形成新的有序结构。因此, 针对高技术产业创新生态系统, 可以从耗散结构角度分析其时空演化规律。

Brusselator 模型产生于化学领域, 将其应用于经济学领域时需要对其进行相应的经济学转译。对于高技术产业创新生态系统, A 和 B 代表系统演化过程中的控制变量, 比如“创新投入”和“创新环境”; D 和 E 代表创新活动的产出, 比如“创新绩效”和“耗散结构”; x 和 y 代表状态变量(反应的中间生成物), 比如“创新成果”和“创新成果转化能力”。进而, 高技术产业创新生态系统中的 Brusselator 模型结构可以描述为:

A (创新投入) $\xrightarrow{k_1}$ x (创新成果)。该反应表示从创新投入到产出的非线性动态过程。加大产业科技创新投入能促进创新成果的产出, 并具有改善创新环境的外部效应, 有利于降低创新要素流动的阻碍和增强产业创新能力, 从而提升系统的创新成果浓度。

B (创新环境) $+ x \xrightarrow{k_2}$ y (创新成果转化能力) $+ D$ (创新绩效)。该反应表示创新环境对创新成果的转化作用。创新资源的投入产生一定数量创新成果后, 在系统中与创新环境交流互动, 完成创新成果的市场化转换, 不仅使系统的科技转化能力增强, 还带来技术创新的收益。

$2x + y \xrightarrow{k_3}$ $3x$ (创新成果的自催化反应)。该反应表示创新成果转化能力的市场正反馈效应。在市场经济的正反馈机制作用下, 创新成果转化促使市场需求不断增长和升级, 市场需求又促进企业加大创新投入, 从而进一步提升创新成果的质量和数量。

$x \xrightarrow{k_4}$ E (耗散结构)。该反应表示在创新投入和创新环境的共同作用下, 创新成果产出推动系统向更高级的耗散结构演化。系统中各经济主体之间是相互关联的, 创新主体通过创新投入产生的创新成果及其转化带来整个系统技术水平的提升和系统结构的演化。一方面, 创新主体基于共同利益的技术合作(如协同创新)以及经济交往带来的技术溢出(如产品贸易、学习交流等)将加速创新成果在整个系统的扩散, 提升系统的技术水平和创新能力; 另一方面, 一旦创新成果转化为产品, 就可能被市场上的其他经济主体模仿, 而模仿创新带来的竞争效应又将推动形成新的创新成果。与此同时, 创新环境也得到改善, 创新转化和扩散速度不断加快, 进而推动系统向更高级有序的耗散结构演化。

对经过上述转译后的 Brusselator 模型进行动力学运算, 得到控制变量 A 、 B 影响状态变量 x 、 y 的演化动力学方程, 能够进一步分析高技术产业创新生态系统的耗散演化趋势。

3. 模型构建、指标选取与数据来源

本文借鉴李柏洲和苏屹(2012)的研究^[26], 构建“全局熵—突变级数”评价模型来分析高技术产业创新生态系统的耗散演化。具体评价步骤如下: 首先, 基于“ A (创新投入)— B (创新环境)”二维框架, 构建高技术产业创新生态系统耗散演化的评价指标体系; 然后, 对指标进行无量纲化处理, 并利用全局熵值法确定各指标的相对重要性; 接着, 对各样本系统是否形成耗散结构进行判定; 最后, 采用突变级数法进行耗散结构演化分析。

根据转译后的 Brusselator 模型, 高技术产业创新生态系统的耗散演化主要取决于 A (创新投入) 和 B

(创新环境)两方面,因而本文基于“创新投入—创新环境”二维框架,按照科学性、合理性、简明性、通达性、可操作性的原则,构建高技术产业创新生态系统耗散演化评价指标体系(见表2)。目标层“创新投入”和“创新环境”分别包含3个变量、10个指标。其中:创新投入主要包括经费投入、研发投入和设施投入,具体的评价指标多为投入性指标,主要评估系统的创新发展潜力;创新环境主要包括经济环境、文化环境和技术市场环境,具体的评价指标多为存量性指标,主要评估系统的创新环境现状。

表2 高技术产业创新生态系统的 Brusselator 模型评价指标体系

目标层	变量层	指标层	目标层	变量层	指标层
		产业投资额 X_{11}			居民人均消费支出 Y_{11}
	经费投入 X_1	产业技术升级经费 X_{12}		经济环境 Y_1	居民人均可支配收入 Y_{12}
		地方科技财政支出 X_{13}			各地区人均国内生产总值 Y_{13}
		研发内部经费支出 X_{21}			市场化指数 Y_{14}
A	研发投入 X_2	研发人员全时当量 X_{22}	B		公共图书馆流通人次 Y_{21}
创新投入		新产品研发经费支出 X_{23}	创新环境	文化环境 Y_2	公共预算教育经费 Y_{22}
		研发项目数 X_{31}			文化产业法人单位数量 Y_{23}
	设施投入 X_3	研发机构企业高校总量 X_{32}			科普科技活动当年参观人数 Y_{31}
		科技服务业固定资产投资 X_{33}		技术市场环境 Y_3	技术市场成交额 Y_{32}
		科技企业孵化器个数 X_{34}			技术市场合同数 Y_{33}

基于数据的一致性和可获得性,本文以中国大陆的30个省区市(不包括港澳台地区和西藏)为研究样本。在政策引导下,2013年后各地区开始大力培育和发展高技术产业;在2013年前后,居民人均消费支出、居民人均可支配收入等指标的调查方法有所不同。因此,本文将数据样本期设定为2013—2019年。对高技术产业的界定,本文参考经济合作与发展组织(OECD, Organization for Economic Cooperation and Development)的划分标准,同时考虑统计口径一致性和数据可获得性,将航空航天与装备制造业、计算机与办公设备制造业、医药制造业、医疗设备与仪器仪表制造业、电子与通信设备制造业五个产业归为高技术产业。分析所用数据来源于相应年度的《中国统计年鉴》《中国科技统计年鉴》《中国高技术产业统计年鉴》《中国火炬统计年鉴》以及相应地区的《科技统计年鉴》。

三、实证分析与结果讨论

1. 系统耗散结构判定

本文利用 Matlab 2019b 计算样本地区高技术产业创新生态系统的 A 、 B 值,进而根据式(4)进行耗散结构判定。对投入产出滞后期的选择不宜过长(Fang et al, 2016; Ali, 2020)^[27-28],本文设置为1年(李新等, 2016)^[29]。 k_1 为高技术产业研发投入平均滞后期的倒数, k_2 为创新成果市场化时间的倒数, k_3 为市场对创新成果促进作用时间的倒数, k_4 为技术外溢时间的倒数,本文设定如下: $k_1 = 1$ 、 $k_2 = 1$ 、 $k_3 = \frac{1}{2}$ 、 $k_4 = \frac{1}{5}$ 。具体分析结果见表3和图2。

表3 样本地区高技术产业创新生态系统耗散结构判定结果

地区	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
北京	0.005 4	0.003 5	0.003 5	0.005 3	0.005 9	0.004 9	0.006 6
天津	0.000 3	0.000 8	-0.000 4	0.001 1	0.001 5	0.003 0	0.003 4
河北	-0.004 7	-0.004 5	-0.005 3	-0.004 4	-0.004 2	-0.005 0	-0.003 3
山西	-0.005 2	-0.005 0	-0.005 1	-0.004 0	-0.003 5	-0.003 7	-0.002 6
内蒙古	-0.003 5	-0.003 2	-0.003 5	-0.002 6	-0.002 4	-0.002 6	-0.001 6
辽宁	-0.002 6	-0.003 8	-0.002 9	-0.001 3	-0.000 9	-0.001 5	-0.000 1
吉林	-0.004 9	-0.003 9	-0.004 1	-0.003 1	-0.002 6	-0.002 8	-0.002 0
黑龙江	-0.004 7	-0.004 2	-0.004 9	-0.004 2	-0.004 0	-0.003 6	-0.003 0
上海	0.001 4	0.002 8	0.001 0	0.002 4	0.002 0	0.002 0	0.003 6
江苏	-0.047 1	-0.048 6	-0.058 9	-0.066 8	-0.074 1	-0.082 7	-0.117 6
浙江	-0.004 6	-0.007 4	-0.010 8	-0.010 6	-0.012 1	-0.021 1	-0.028 0
安徽	-0.005 0	-0.005 4	-0.006 3	-0.006 3	-0.006 9	-0.009 1	-0.009 7
福建	-0.003 0	-0.002 9	-0.003 4	-0.007 2	-0.006 3	-0.007 5	-0.004 6
江西	-0.005 3	-0.004 6	-0.005 4	-0.003 9	-0.004 3	-0.006 5	-0.006 6
山东	-0.011 9	-0.012 3	-0.019 4	-0.017 4	-0.019 7	-0.018 0	-0.013 1
河南	-0.004 7	-0.004 9	-0.006 3	-0.004 7	-0.004 8	-0.006 0	-0.004 0
湖北	-0.004 2	-0.003 7	-0.005 3	-0.003 5	-0.004 8	-0.006 6	-0.006 5
湖南	-0.004 7	-0.004 5	-0.006 4	-0.005 3	-0.006 0	-0.005 7	-0.004 6
广东	-0.065 2	-0.062 2	-0.083 9	-0.125 4	-0.189 7	-0.119 7	-0.097 2
广西	-0.004 5	-0.003 5	-0.004 6	-0.003 3	-0.003 0	-0.003 6	-0.002 2
海南	-0.005 1	-0.004 6	-0.004 7	-0.004 2	-0.003 7	-0.003 4	-0.002 6
重庆	-0.003 1	-0.002 8	-0.003 4	-0.002 4	-0.002 0	-0.002 5	-0.001 6
四川	-0.005 7	-0.004 6	-0.006 2	-0.004 8	-0.006 8	-0.009 0	-0.007 8
贵州	-0.006 5	-0.006 0	-0.006 4	-0.005 0	-0.004 6	-0.005 1	-0.003 9
云南	-0.005 7	-0.004 7	-0.005 8	-0.004 5	-0.004 1	-0.004 7	-0.002 7
陕西	-0.004 8	-0.004 4	-0.005 1	-0.003 7	-0.002 6	-0.002 1	-0.000 7
甘肃	-0.006 5	-0.005 8	-0.005 9	-0.005 1	-0.004 7	-0.004 9	-0.004 0
青海	-0.006 6	-0.006 3	-0.005 9	-0.005 3	-0.005 0	-0.004 8	-0.004 5
宁夏	-0.005 6	-0.004 8	-0.004 9	-0.004 3	-0.003 9	-0.003 6	-0.002 9
新疆	-0.006 2	-0.005 1	-0.005 5	-0.004 6	-0.004 2	-0.004 4	-0.003 1

注:表中数值为 $k_2k_4^2B-k_4^3-k_1^2k_3A^2$, 大于0表示形成耗散结构, 小于0则未形成。

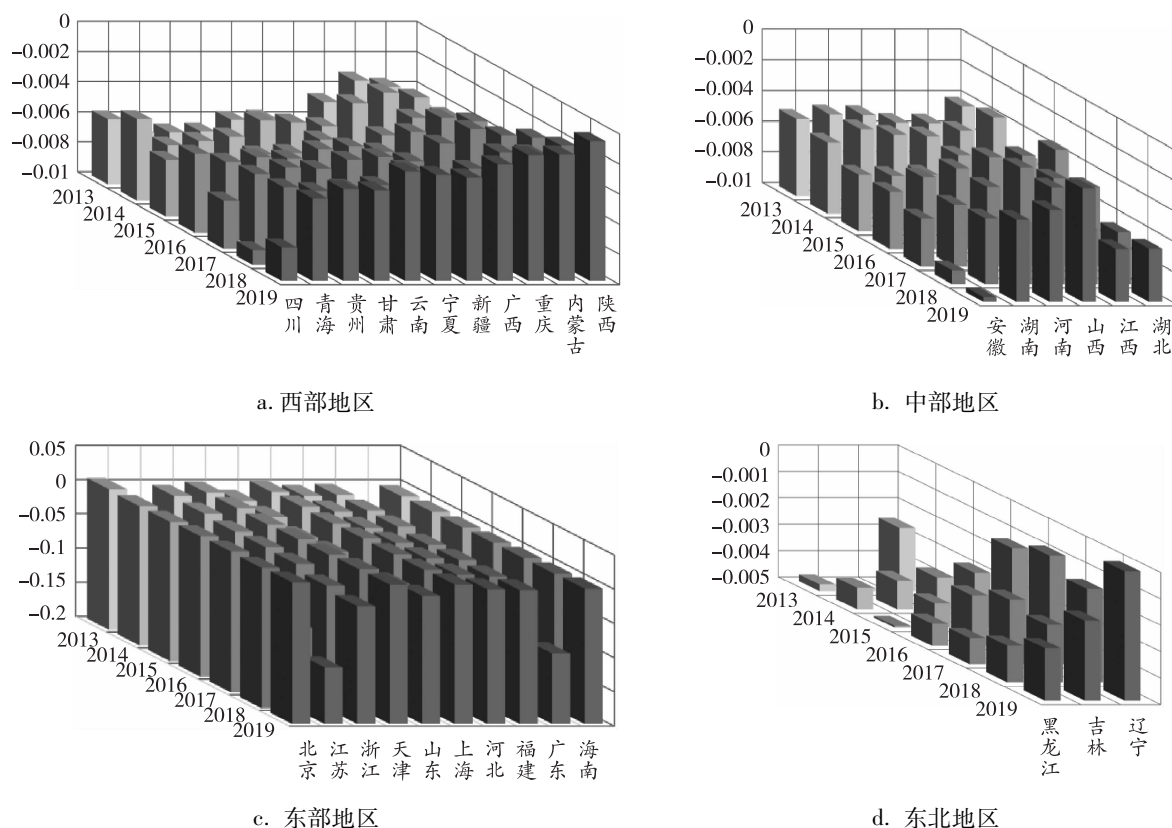


图2 区域高技术产业创新生态系统耗散结构评价示意图

从耗散结构的判定结果来看,大部分地区的高技术产业创新生态系统还未形成耗散结构。仅北京、天津、上海的高技术产业创新生态系统形成耗散结构,由演化动力学方程稳态分析可知,系统失稳形成耗散结构后将处于随时间周期保持振动的状态,因此,这些地区的高技术产业创新生态系统在接下来的一段时间内将保持耗散结构。从耗散结构的形成趋势来看,大部分地区的耗散结构评价价值呈现逐年上升的趋势。特别是西部地区高技术产业创新生态系统的评价价值上升较快,赶超势头明显,而东部地区的增长趋势缓慢,中部地区则呈现摆动趋势。随着中国发展方式的转变和创新驱动发展战略的推进,将有更多地区的高技术产业创新生态系统形成耗散结构。

2. 系统耗散演化评价

为进一步探究系统耗散演化的过程,利用突变级数模型对创新投入和创新环境进行评价。对所有数据进行无量纲化处理,再利用全局熵值法确定指标权重。按照指标数量对各变量层进行分类:1 个子指标为折叠突变,2 个子指标为尖点突,3 个子指标为燕尾突,4 个子指标为蝴蝶突。根据 SPSS 25.0 的分析结果,子指标有明显关联的为互补型关系,无明显关联的则为非互补型关系。分析结果如表 4 所示。

根据表 4 确定的突变和互补类型,可得:(1) $q_{12} > q_{13} > q_{11}$, $X_1 = (X_{12}^{\frac{1}{2}} + X_{13}^{\frac{1}{3}} + X_{11}^{\frac{1}{4}}) / 3$; (2) $q_{23} > q_{21} > q_{22}$, $X_2 = (X_{23}^{\frac{1}{2}} + X_{21}^{\frac{1}{3}} + X_{22}^{\frac{1}{4}}) / 3$; (3) $q_{31} > q_{34} > q_{33} > q_{32}$, $X_3 = \min(X_{31}^{\frac{1}{2}}, X_{34}^{\frac{1}{3}}, X_{33}^{\frac{1}{4}}, X_{32}^{\frac{1}{4}})$ 。进而可得出 A(创新投入)的评价值: $q_2 > q_3 > q_1$, $A = (X_2^{\frac{1}{2}} + X_3^{\frac{1}{3}} + X_1^{\frac{1}{4}}) / 3$ 。同理可计算出 B(创新环境)的评价值。具体计算结果见表 5 和图 3。

表4 突变类型、互补类型及指标权重

目标层	变量层	指标层	目标层	变量层	指标层
A (燕尾突变) (互补型)	X_1 (燕尾突变) (互补型) 0.284 9	X_{11} 0.076 6	B (燕尾突变) (互补型)	Y_1	Y_{11} 0.1034
		X_{12} 0.125 0		(蝴蝶突变) (互补型) 0.414 4	Y_{12} 0.103 2
		X_{13} 0.083 4			Y_{13} 0.103 2
	X_2 (燕尾突变) (互补型) 0.380 5	X_{21} 0.124 5		Y_2	Y_{21} 0.101 6
		X_{22} 0.121 6		(蝴蝶突变) (非互补型) 0.387 5	Y_{22} 0.097 7
		X_{23} 0.134 3			Y_{23} 0.096 0
	X_3 (蝴蝶突变) (非互补型) 0.334 6	X_{31} 0.099 0		Y_3	Y_{31} 0.098 3
		X_{32} 0.105 2		(尖点突变) (互补型) 0.198 1	Y_{32} 0.099 8
		X_{33} 0.039 9			
X_{33} 0.090 5					

表5 样本地区高技术产业创新生态系统“创新投入-创新环境”耗散演化评价结果

地区	创新投入评价价值							创新环境评价价值							
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
北京	0.729 3	0.721 1	0.713 3	0.716 5	0.723 0	0.718 0	0.725 7	0.869 9	0.876 9	0.882 1	0.890 3	0.898 5	0.904 1	0.914 2	
江苏	0.844 9	0.849 8	0.852 3	0.865 9	0.875 2	0.859 5	0.869 4	0.818 1	0.817 1	0.826 6	0.830 0	0.841 7	0.851 4	0.863 1	
浙江	0.753 5	0.753 5	0.753 5	0.753 5	0.753 5	0.753 5	0.753 5	0.789 1	0.794 9	0.799 3	0.812 7	0.820 5	0.834 4	0.847 1	
天津	0.676 9	0.683 7	0.687 3	0.683 7	0.691 9	0.678 4	0.679 1	0.807 2	0.813 2	0.817 0	0.823 8	0.827 9	0.833 2	0.838 2	
东部地区	山东	0.764 5	0.770 1	0.780 1	0.788 5	0.799 7	0.797 5	0.789 1	0.764 5	0.751 2	0.788 4	0.797 4	0.807 5	0.822 3	0.828 1
	上海	0.715 6	0.718 6	0.713 7	0.716 2	0.723 4	0.722 1	0.733 2	0.834 2	0.841 1	0.843 7	0.850 0	0.855 3	0.865 0	0.881 4
	河北	0.647 3	0.662 1	0.656 9	0.664 0	0.672 1	0.666 8	0.668 4	0.710 3	0.715 7	0.723 4	0.733 4	0.743 1	0.761 9	0.770 4
	福建	0.690 8	0.692 8	0.697 0	0.730 3	0.743 2	0.757 6	0.760 5	0.751 9	0.754 9	0.765 3	0.772 4	0.782 6	0.792 8	0.805 2
	广东	0.853 1	0.858 2	0.882 9	0.896 4	0.913 5	0.915 6	0.928 2	0.799 3	0.803 0	0.812 4	0.819 9	0.827 6	0.841 9	0.859 7
海南	0.577 9	0.577 6	0.568 6	0.568 6	0.564 5	0.568 9	0.566 1	0.660 0	0.670 7	0.688 6	0.690 0	0.706 3	0.717 4	0.716 3	
安徽	0.674 8	0.682 3	0.687 1	0.707 5	0.726 0	0.731 2	0.757 9	0.723 4	0.738 7	0.751 8	0.761 7	0.774 9	0.785 4	0.796 9	
湖南	0.659 2	0.676 7	0.683 2	0.690 8	0.708 3	0.715 3	0.734 2	0.724 9	0.735 3	0.739 4	0.746 1	0.762 0	0.772 0	0.789 2	
中部地区	河南	0.661 0	0.673 5	0.679 5	0.686 2	0.701 5	0.706 5	0.725 2	0.706 9	0.714 6	0.723 7	0.733 3	0.745 5	0.759 4	0.772 9
	山西	0.588 5	0.587 9	0.578 7	0.588 0	0.601 2	0.600 5	0.604 9	0.688 4	0.694 4	0.701 4	0.706 5	0.720 9	0.732 3	0.733 6
	江西	0.645 0	0.644 8	0.662 0	0.661 4	0.680 1	0.716 6	0.738 3	0.696 7	0.709 1	0.716 7	0.728 9	0.738 8	0.749 0	0.757 9
	湖北	0.692 8	0.706 9	0.706 6	0.708 4	0.719 9	0.731 2	0.748 8	0.758 2	0.778 3	0.789 5	0.798 7	0.806 6	0.818 9	0.834 6

续表

地区	创新投入评价价值							创新环境评价价值						
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
四川	0.709 0	0.690 3	0.692 6	0.708 4	0.734 9	0.746 5	0.760 0	0.732 2	0.743 7	0.754 4	0.761 9	0.773 7	0.792 8	0.800 6
青海	0.535 9	0.537 0	0.538 9	0.541 8	0.544 9	0.546 5	0.556 0	0.617 2	0.621 3	0.642 3	0.652 7	0.666 4	0.673 8	0.670 1
贵州	0.611 9	0.618 2	0.617 1	0.618 9	0.633 9	0.634 4	0.642 6	0.623 3	0.656 4	0.673 1	0.688 9	0.714 2	0.726 4	0.736 8
甘肃	0.559 8	0.568 3	0.562 5	0.567 6	0.565 7	0.568 4	0.610 3	0.652 8	0.675 9	0.695 3	0.707 3	0.716 1	0.724 6	0.733 9
云南	0.577 3	0.582 9	0.593 3	0.590 8	0.600 2	0.602 0	0.606 6	0.667 8	0.684 0	0.690 8	0.699 7	0.712 5	0.721 0	0.730 2
宁夏	0.554 9	0.554 4	0.562 0	0.569 2	0.569 6	0.570 4	0.561 0	0.652 7	0.670 2	0.677 4	0.689 9	0.706 3	0.713 8	0.727 2
新疆	0.546 4	0.547 5	0.552 9	0.556 0	0.564 6	0.563 2	0.568 0	0.658 2	0.673 5	0.681 0	0.689 5	0.696 4	0.703 1	0.712 0
广西	0.594 6	0.597 2	0.592 4	0.593 2	0.595 3	0.597 1	0.602 1	0.682 6	0.700 9	0.703 0	0.715 1	0.721 5	0.731 1	0.739 7
重庆	0.625 3	0.640 8	0.651 3	0.665 7	0.680 1	0.687 8	0.702 2	0.736 1	0.747 2	0.741 6	0.754 0	0.753 2	0.770 9	0.771 3
内蒙古	0.562 0	0.567 3	0.573 4	0.576 6	0.573 8	0.576 8	0.570 1	0.718 0	0.719 7	0.721 9	0.724 7	0.726 7	0.731 4	0.736 4
陕西	0.678 0	0.688 4	0.673 4	0.678 3	0.683 1	0.680 7	0.691 3	0.754 8	0.773 1	0.776 0	0.782 9	0.799 3	0.812 4	0.827 3
黑龙江	0.624 5	0.625 0	0.618 9	0.616 2	0.626 4	0.594 8	0.613 1	0.718 4	0.723 2	0.724 8	0.728 9	0.739 4	0.747 3	0.751 4
吉林	0.633 1	0.715 8	0.633 1	0.715 8	0.633 1	0.715 8	0.633 1	0.715 8	0.633 1	0.715 8	0.633 1	0.715 8	0.633 1	0.715 8
辽宁	0.656 7	0.672 1	0.645 1	0.639 5	0.651 4	0.661 2	0.653 5	0.768 3	0.751 0	0.778 6	0.781 4	0.788 3	0.796 7	0.799 2

(1)从表5的评价结果来看:在样本期间的初期,多数样本地区忽视创新环境的作用(创新环境评价价值普遍低于创新投入评价价值),创新环境较差导致创新成果转化率偏低,而创新转化效益低下会造成高技术产业创新生态系统处于无序状态,进而不能形成耗散结构。随着各地对创新环境的日益重视,多数地区高技术产业创新生态系统的创新环境持续优化,极大释放了创新活力,并加快创新成果转化,“创新投入—创新环境”评价价值正向演化,系统逐步向耗散结构演进(趋近于判定值)。

(2)从图3的演变趋势来看:“创新投入-创新环境”二维框架整体呈现出“Ⅲ象限→Ⅱ象限→Ⅰ象限”的演化趋势,多数地区的“创新投入—创新环境”评价价值趋于提高。同时,样本地区高技术产业创新生态系统的耗散演化也各具特色。东北地区的创新投入较低且变化不大,基本处于Ⅱ象限,急需增加创新投入。广东在创新投入方面名列前茅,但创新环境评价价值较低(相对与其创新投入评价价值),需要进一步改善创新环境。而上海和北京高技术产业创新生态系统耗散结构的形成,得益于其较好的创新环境。进一步对广东与北京和上海进行比较,广东的创新投入评价价值远高于北京和上海,而创新环境评价价值略低于北京和上海。可见,仅仅依靠增加创新投入是不能形成耗散结构的,创新环境的改善在高技术产业创新生态系统耗散演化中起到更为重要的作用。

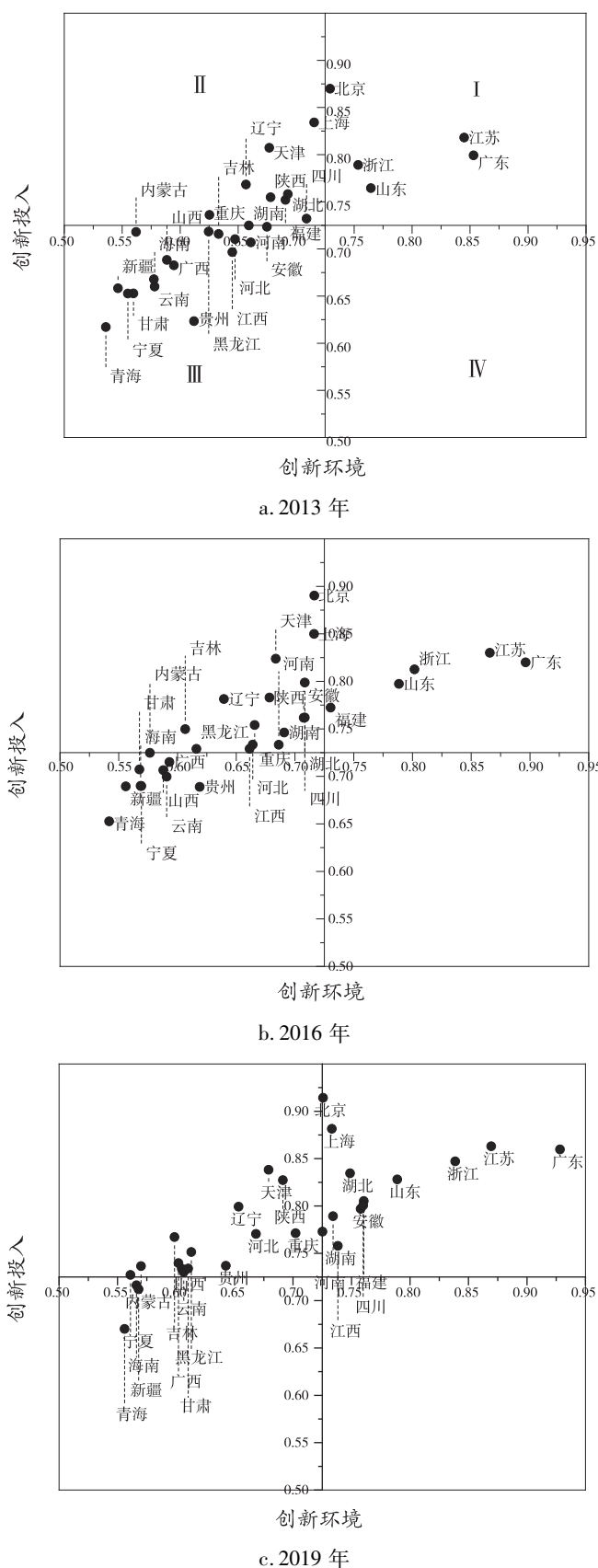


图3 2013、2016、2019年样本地区高技术产业创新生态系统的“创新投入—创新环境”二维框架

四、研究结论与启示

本文基于耗散结构理论研究高技术产业创新生态系统的演化进程,通过经济学转译构建高技术产业创新生态系统的 Brusselator 模型,采用演化动力学的稳定性分析得出耗散结构的判定条件,进而在“创新投入—创新环境”二维框架下引入系统突变理论,构建“全局熵—突变级数”评价模型刻画系统的耗散演化状态,为进一步深入研究社会经济系统的耗散演化提供新的视角和方法启示。同时,本文还采用 2013—2019 年中国 30 个样本地区高技术产业的相应数据进行了实证分析,结果表明:(1)北京、天津、上海的高技术产业创新生态系统形成耗散结构,大部分地区的高技术产业创新生态系统未形成耗散结构;但大部分地区的高技术产业创新生态系统正向耗散结构演进,且演进进程整体上呈现“东先西后”的态势,不过近年来西部地区赶超势头明显,而东部地区演进相对缓慢。(2)样本地区高技术产业创新生态系统的“创新投入-创新环境”二维框架整体呈现出“Ⅲ象限→Ⅱ象限→Ⅰ象限”的演化趋势,“创新投入-创新环境”评价价值趋于提高。(3)各地区的高技术产业创新生态系统具有不同的耗散演化特征。比如,广东的创新投入水平很高,但其创新环境还不能很好地促进其成果转化和创新溢出,阻碍了耗散结构的形成,而东北地区的创新投入水平亟待提高。随着中国发展方式的转变和创新驱动发展战略的推进,将有更多地区的高技术产业创新生态系统形成耗散结构。为进一步推动高技术产业创新生态系统的耗散演化,基于上述结论本文提出如下政策启示:

第一,各地应继续增加高技术产业的创新投入,不断提升创新主体的自主创新能力。但是,创新投入在促进高技术产业创新生态系统耗散演化时会受到创新环境的制约,因而不能只考虑增加研发投入,还应着力于创新环境的改善,要使政策调控满足系统耗散演化的要求。要完善相关法律法规,增强对知识产权的保护;要营造良好的创新环境,使创新投入更快地产出更多的创新成果,促进创新成果更快地转化为更高的生产力;要加大人才引进力度,推动产学研创新合作,为高技术产业的高质量发展提供创新源泉;要整合创新资源,优化创新资源配置方式,从而防止系统长期处于低级无序状态,突破耗散演化过程中的瓶颈约束。

第二,创新主体应构建协同创新网络,实现创新绩效的最大化,促进系统结构向高级状态演进。在创新成果的生产、转化和扩散过程中,创新主体间的协同创新网络能够产生非线性放大作用,使知识和技术在系统内快速扩散,促进系统结构升级,形成耗散结构。知识和技术相关的活动具有显著的空间外溢效应,创新主体间的技术交流可提高网络中各主体的创新能力,形成创新示范作用和辐射带动效应,进而改善高技术产业创新生态,实现系统内外联动的协同创新。创新网络的构建,不仅能有效降低知识流动和技术获取成本,实现创新资源和成果的高效流动,还能使微小的创新活动在网络结构下扩散到整个系统,并带来系统涨落波动,进而突破耗散限制,促进高技术产业创新生态系统向耗散结构演化。

第三,各地区高技术产业创新生态系统的创新投入水平和创新环境条件各不相同,需要采取差异化策略,营造适宜的创新环境,使创新投入与创新环境间协调发展,为系统的耗散演化提供源源不断的驱动力。比如:东部地区应积极探索创新驱动发展的新路径,克服原有路径依赖,形成创新高地;东北地区应以深层次解决体制机制问题和推动区域产业升级为政策导向;中部地区要将“后发优势”转化为“厚发效应”,继续增加创新投入和改善创新环境;西部地区应积极打造引领西部高质量发展的创新极核,带动周围地区高技术产业的发展 and 升级,形成创新网络和创新共同体。

第四,促进地区间高技术产业创新生态系统的协调发展,缓解区域经济发展的不平衡,寻求系统耗散演化过程中创新驱动经济发展的新路径。目前,各地区高技术产业创新生态系统的创新资源流动存在区域集聚现象,系统耗散演化呈现“马太效应”。因此,系统的耗散演化需要突破“路径依赖”,不能仅仅依赖于本地的经济结构和创新资源禀赋,既要考虑区域差异问题,也要加强区域间的协调。资源和环境的异质性使得创新资源和创新活动具有明显的集聚效应,但在创新生态系统的支撑作用下,创新主体

与创新环境之间的有效协同有助于突破后发地区的发展瓶颈,使系统演化为更加高级有序的结构。所以,在各地地区推进各具特色的高技术产业创新生态系统耗散演化的同时,也应促进地区间的协调发展。

对系统耗散演化进行精确刻画、科学判定是当前和未来复杂系统研究的一个重要方向。本文从理论上探究了高技术产业创新生态系统的耗散演化机制,并进行了实证分析,但仍然存在不足。比如,囿于系统耗散演化评价中的4种突变类型,评价指标的个数受到限制,可能会使耗散结构的判定结果不够精确,同时本文也未对不同地区高技术产业创新生态系统耗散演化的影响因素进行进一步的探讨。因此,在未来的研究中,可进一步细化评价指标,并从指标层维度探究系统耗散演化的影响因素,进而提高耗散结构判定结果的可靠性,也能得出更有价值的结论,并提出更具有针对性的政策建议。

参考文献:

- [1] 谭劲松,宋娟,陈晓红. 产业创新生态系统的形成与演进:“架构者”变迁及其战略行为演变[J]. 管理世界,2021(9):167-191.
- [2] MOORE J F. Predators and prey: A new ecology of competition[J]. Harvard business review,1993:75-83.
- [3] GOBBLE M A M. Resources: Charting the innovation ecosystem[J]. Research Technology Management, 2014,57(4):55-59.
- [4] LAYTON A, BRAS B, WEISSBURG M. Industrial ecosystems and food webs: An expansion and update of existing Data for eco-industrial parks and understanding the ecological food webs they wish to mimic[J]. Journal of Industrial Ecology, 2016,20(1):85-98.
- [5] JACOBIDES M G, CENNAMO C, GAWER A. Towards a theory of ecosystems[J]. Strategic Management Journal,2018,39(1):2255-2276.
- [6] 范德成,谷晓梅. 高技术产业技术创新生态系统健康性评价及关键影响因素分析——基于改进熵值-DEMATEL-ISM组合方法的实证研究[J]. 运筹与管理,2021(7):167-174.
- [7] 刘和东,刘权. 高新技术产业生态系统的演化效应与协同机制[J]. 技术经济,2021(1):99-106.
- [8] 梁中. 基于生态学视角的区域主导产业协同创新机制研究[J]. 经济问题探索,2015(6):157-161.
- [9] 李红,左金萍. 高新技术产业创新生态系统的知识产权价值获取模型设计——基于IMEC的案例分析[J]. 中国科技论坛,2018(10):93-100.
- [10] 吴菲菲,童奕铭,黄鲁成. 中国高技术产业创新生态系统有机性评价——创新四螺旋视角[J]. 科技进步与对策,2020(5):67-76.
- [11] 宋华,陈思洁. 高新技术产业如何打造健康的创新生态系统:基于核心能力的观点[J]. 管理评论,2021(6):76-84.
- [12] 刘洪久,胡彦蓉,马卫民. 区域创新生态系统适宜度与经济发展的关系研究[J]. 中国管理科学,2013(S2):764-770.
- [13] 汪良兵,洪进,赵定涛,等. 中国高技术产业创新系统协同度[J]. 系统工程,2014(3):1-7.
- [14] 王宏起,汪英华,武建龙,等. 新能源汽车创新生态系统演进机理——基于比亚迪新能源汽车的案例研究[J]. 中国软科学,2016(4):81-94.
- [15] 张贵,吕长青. 基于生态位适宜度的区域创新生态系统与创新效率研究[J]. 工业技术经济,2017(10):12-21.
- [16] 雷雨嫣,陈关聚,刘启雷. 高技术产业创新生态系统的创新生态位适宜度及演化[J]. 系统工程,2018(2):103-111.
- [17] DENG X, ZHENG S, XU P, et al. Study on dissipative structure of China's building energy service industry system based on brusselator model[J]. Journal of Cleaner Production,2017,150(MAY1):112-122.
- [18] LIU Q, GUO P, LEI Y, et al. Research on foreign capital R&D ecosystem in China based on dissipative structure theory [C]//2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM),2017.
- [19] 吴颖,车林杰. 耗散结构理论视角下的协同创新系统耗散结构判定研究[J]. 科技管理研究,2016,36(10):186-190.
- [20] 范德成,刘贇,李昊. 基于耗散结构的产业结构演化系统熵变研究[J]. 中国科技论坛,2018(1):83-92.
- [21] 苏屹. 耗散结构理论视角下大中型企业技术创新研究[J]. 管理工程学报,2013(2):107-114.
- [22] PRIGOGINE I, NICOLIS G. Self-organisation in nonequilibrium systems; Towards a dynamics of complexity[M]. Springer Netherlands,1985.
- [23] SCHNEIDER W F. Periodic Perturbations of Chemical Oscillators: Experiments[J]. Annual Review of Physical Chemistry, 94

1985,36(1):347-378.

- [24] 任佩瑜,张莉,宋勇.基于复杂性科学的管理熵、管理耗散结构理论及其在企业组织与决策中的作用[J].管理世界,2001(6):142-147.
- [25] 王展昭,唐朝阳.区域创新生态系统耗散结构研究[J].科学学研究,2021(1):170-179.
- [26] 李柏洲,苏屹.基于改进突变级数的区域科技创新能力评价研究[J].中国软科学,2012(6):90-101.
- [27] FANG Z,GALLAGHER K S. Innovation and technology transfer through global value chains; Evidence from China's PV industry[J]. Energy Policy,2016,94:191-203.
- [28] ALI M. Imitation or innovation: To what extent do exploitative learning and exploratory learning foster imitation strategy and innovation strategy for sustained competitive advantage? [J]. Technological Forecasting and Social Change,2020,165(5): 120527-120544.
- [29] 李新,李柏洲,苏屹.基于 Brusselator 模型的我国企业技术获取系统耗散结构研究[J].科技进步与对策,2016(20): 91-96.

Research on the Dissipative Evolution of Innovation Ecosystem in High-Tech Industry: Experience Analysis of Provincial Regions in China with Brusselator Model

YI Hui-yong, ZENG Zhi-mo

(School of Economics and Management, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The dissipative evolution of the innovation ecosystem in the high-tech industry can promote innovation-driven high-quality development and alleviate the problem of unbalanced regional innovation development. The Brusselator model is interpreted in an economic way, and the evaluation index system of "innovation input-innovation environment" framework is constructed, which can deduce the judgment conditions of the formation of the dissipative structure of the innovation ecosystem of high-tech industry, and describe the process of the system dissipation evolution by using the "global entropy-catastrophe series" evaluation model. Based on the data of 30 provincial high-tech industries in China from 2013 to 2019, the analysis shows that the high-tech industry innovation ecosystem in Beijing, Tianjin and Shanghai has formed a dissipative structure, and most of the regions have not formed a dissipative structure, but are evolving toward the dissipative structure. The two-dimensional framework of "innovation input-innovation environment" of the high-tech industry innovation ecosystem in the sample areas presents an overall evolution trend of "Quadrant III \rightarrow Quadrant II \rightarrow Quadrant I", and the evaluation value of "innovation input-innovation environment" tends to increase, and different regions have different characteristics of dissipative evolution. While increasing investment in high-tech industry innovation, it is necessary to devote ourselves to improving the innovation environment, and actively build a collaborative innovation network of innovation subjects. In order to further promote the dissipative evolution of the high-tech industry innovation ecosystem, each region should not only adopt differentiated development strategies, but also promote the coordinated development among regions.

Key words: innovation ecosystem; high-tech industry; dissipative structure; dissipative evolution; Brusselator model; catastrophe progression method

CLC number: F224.12; O415.3

Document code: A

Article ID: 1674-8131(2021)06-0081-15

(编辑:刘仁芳)