

# 多模型耦合构建海南自贸港创新生态系统的策略分析

——来自邻岛新加坡的经验启示

吕文波, 吴萌, 倪深伟

(三亚学院盛宝金融科技商学院, 海南三亚, 572000)

**[摘要]** 基于自贸港视角的创新生态系统构成主体、相互关系、耦合路径, 类比新加坡的经验证据, 使用熵权法、灰色关联法、耦合协调度模型法以及机器学习评估法进行逐级深入研究, 分析创新生态系统构建水平与“政产学研金服用”七大主体发展指标的相关关系, 证明了产业链是多螺旋中关联度最高的主体, 为构建新型创新生态系统提供借鉴和参考。建议海南自贸港在布局自身产业链时注意构建本土特色创新生态系统, 同时积极利用粤港澳大湾区、东南亚各国优势资源进行联动发展, 将优化产业链结构作为绝对重点环节, 实现经济发展的最优解。

**[关键词]** 创新生态系统; 多螺旋路径; 多模型评价; 联动发展

**[中图分类号]** F275 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1674-893X(2024)04-0090-10

## 一、引言

创新一直是经济高质量发展的第一动力, 参与创新的各主体汇聚成创新生态系统。研究创新生态系统的理论近年来发展迅速, 在实践指导方面价值巨大。创新生态系统是一个高度交互、相互协调的创新支持体系群落, 内部各个主体发挥各自的异质性的同时耦合其他主体协同创新, 形成既相互依赖又相互制约的网络关系。

美国自1862年林肯总统签署通过《土地拨赠法案》起, 依次推出《国防教育法》《高等教育设施法》《退伍军人权利法案》《拜尔-多尔法案》等众多催生创新生态系统形成的政策, 在这些政策措施的引导下, 纽约、洛杉矶、斯坦福等周边区域形成了众多涵盖了政府公共部门、半官方组织、各类研究机构、私营企业以及成熟的市场等要素和主体的创新创业集群, 显示出巨大的创造力, 为美国成为并维持世界第一大经济体贡献了核心的力量。其中比邻斯坦福大学的硅谷创新指

数世界排名第一, 拥有超过40 000家初创企业和1 000家风投公司; 北卡罗来纳州的“研究三角区”举世闻名, 是“产学研”三螺旋理论诞生地。

师夷长技以自强。作为世界第二大经济体的中国, 在全球经济发展不确定性上升的大背景下, 应持续深化改革开放, 闯出一条中国式现代化的创新道路。我国“十四五”规划将“创新”置于全新高度, 要求“坚持创新在我国现代化建设全局中的核心地位, 把科技自立自强作为国家发展的战略支撑”。创新是中国式现代化的重要内涵, 也是新质生产力的核心要素。从空间分布来看, 不同区域的优势资源互补、产业链条搭建逐步形成了典型的区域创新生态系统, 为提升区域内各要素创新效率和发展韧性提供了重要的保障。

以海南省为例, 中共中央、国务院于2020年6月1日印发的《海南自由贸易港建设总体方案》, 将2018年定位的海南自贸区升级为全岛自

**[收稿日期]** 2024-04-23; **[修回日期]** 2024-08-07

**[基金项目]** 海南省哲学社会科学基金项目[HNSK(QN)23-98]; 三亚学院科教融汇转化项目(SYKJRH2023068)

**[作者简介]** 吕文波, 男, 河北邯郸人, 三亚学院盛宝金融科技商学院专任教师, 主要研究方向: 创新生态系统、区域经济, 联系邮箱: wenbolv@sanyau.edu.cn; 吴萌, 女, 天津人, 三亚学院盛宝金融科技商学院副教授, 主要研究方向: 区域经济学; 倪深伟, 男, 浙江温州人, 三亚学院盛宝金融科技商学院本科生, 主要研究方向: 计量经济学

贸港,其发展目标是:2025年初步建立以贸易和投资自由便利为重点的自由贸易港政策制度体系;2035年成为我国开放型经济新高地;到本世纪中叶,全面建成具有国际影响力的高水平自由贸易港。海南自贸港定位于中国跨境经济的创新高地,对标海外先进创新生态系统。海南自贸港建设起步虽晚,但潜力巨大,立足国家顶层设计思维,背靠粤港澳大湾区丰富的资源,又有“邻居”新加坡等国经验作参照,天时地利人和俱全。

## 二、综述

自贸港的建设发展,从创新生态系统的视域来看,应该借鉴发达经济体的发展经验,尤其是多螺旋创新生态系统理论和实践经验。20世纪90年代初,美国学者亨瑞·埃茨科威兹首先提出“三螺旋”创新模式理论,即“大学”“产业”“政府”三方主体在创新活动中相互耦合合作,同时每一主体又都保持自己的独立定位和功能。类比DNA螺旋链的相互关系而引申出的三螺旋理论的提出,标志着多螺旋理论探索的开端。基于三螺旋模型的理论基础,钟德仁<sup>[1]</sup>、邓志新<sup>[2]</sup>将高校产业学院协同创新与三螺旋理论相结合,实证研究了研究型高校向创业型高校模式转变的可靠性和合理性,为市场需求的技能型人才培养方案的制定提供了新视域;同时蔡翔通过产学研三螺旋模型实证分析了三主体的协同创新效率及影响因素,认为三螺旋同步协调发展是生态系统赋能经济长期和谐发展的合理途径<sup>[3]</sup>,进一步拓展了三螺旋创新生态系统模型在经济发展的应用价值。

之后,随着全球一级市场供需金融的迅猛发展,股权投资融资规模逐渐超越了传统的债务投融资规模。市场上涌现出大量的专业服务机构,帮助产业端实现高效的成果转化和投融资方案的创新,创新生态系统出现了明显的新格局。因此,吴颖将金融服务中介机构作为四大市场参与主体之一,引入多螺旋理论,提出包括知识产权配置机制在内的四螺旋创新生态系统模型<sup>[4]</sup>;之后,郗海霞借鉴市场中四螺旋创新生态系统理论,引出“大学—产业—政府—公民社会”的融合机制并验证了机制的稳健性<sup>[5]</sup>;吴菲菲将“市场采纳

接受程度与公众需求”作为第四螺旋测度指标,进一步拓展了四螺旋模型理论的发展<sup>[6]</sup>。

随着经济全球化的发展,在东西方不同的政治经济环境下,各国经济在全球产业链中逐步产生了细化发展,提示政府层面对经济的宏观把控意义重大。全国人大代表李健于2011年两会上指出,“要将产学研结合扩展为政产学研用结合”,并解释“新加的‘政’指的是政府和政策,新加的‘用’指的是用户和应用”。自此,我国“政产学研用”的五螺旋模式正式从学术层面走向实践层面,多螺旋模型理论得到了进一步的发展。基于五螺旋模型理论,王萍萍认为科技创新必须建立在协同网络基础上,使用“政产学研金服用”七大主体构建的创新共同体概念更符合时代要求<sup>[7]</sup>;王凡进一步指出,制约成果转化的主要原因是多螺旋主体协调度不足,市场缺乏有效润滑剂<sup>[8]</sup>;张宁详细论述了七螺旋创新创业共同体的耦合形成路径,为七螺旋模型进行了理论和实践的多角度提升探索<sup>[9]</sup>。

我国各地经济发展中不乏七螺旋模型的影响,北京中关村、天津港、苏州工业园、深圳高新区等都是多螺旋创新生态系统的实践发展。多螺旋模型的发展历程中有成有败,如何结合各区域特色资源进行优化发展和协调配置,是该领域未来研究的主要方向。

## 三、提出假设

透过现象看本质,单纯地将发达国家生态系统复刻到自贸港建设中来,很容易出现“水土不服”的现象。自贸港的和谐稳健发展应从“政产学研金服用”七大主体入手,既要实现各主体高速发展,更要实现相互耦合协调发展。构建符合本土特色的多螺旋创新生态系统,须按照中国式现代化要求的全体人民共同富裕的国策,结合海南岛美丽富饶的自然和人文资源等基础进行探索。基于上述理论研究,本文提出创新生态系统“政产学研金服用”即“政府”“产业”“学校”“研究机构”“金融体系”“服务机能”“用户效应”的七螺旋模型,各主体的功能<sup>[10]</sup>和螺旋交互关系如图1所示。七主体始终围绕着“人才”这个核心要素<sup>[11]</sup>运转;高校和科研机构等接受着政

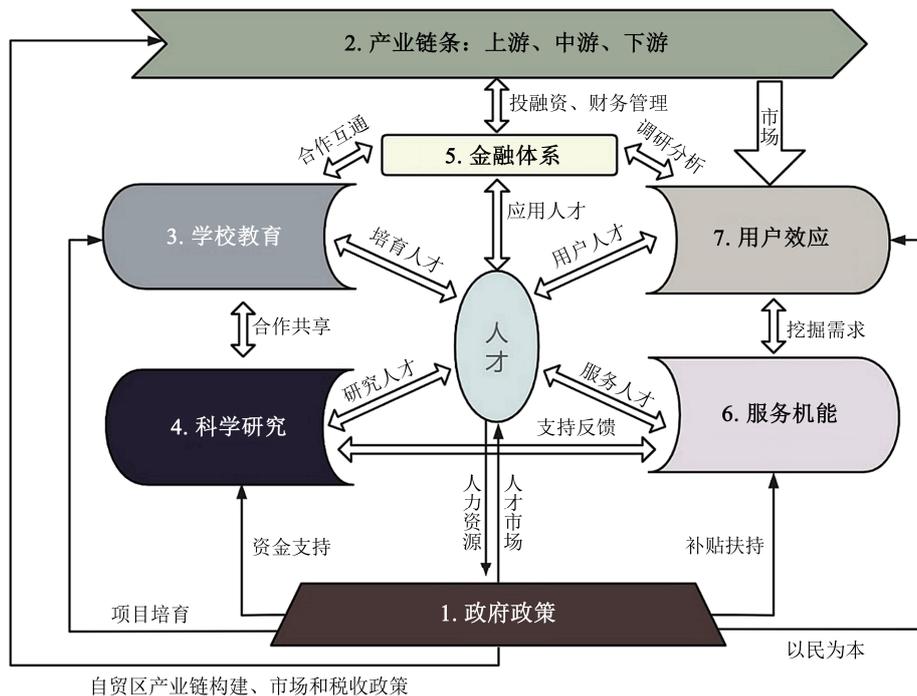


图1 七螺旋模型各主体交互图

府部门的政策和资金支持，培养的人才直接服务产业链的政企部门，为经济运作输送血液；市场发展的趋势和科技发展的方向，既由人才素养决定又决定着人才培养的方向，两者实现了双向增强效应<sup>[12]</sup>；金、服、用等中介转化服务群在各个主体之间发挥润滑剂和孵化催化作用。

多螺旋理论模型是一种创新机制设计的方法论。运用多螺旋理论模型设计的创新生态系统中，培育、引进、留用人才是多螺旋主体网络路径塑造的核心；政府政策是引导路径发展的关键力量；产业链是吸纳人才和创造价值的实质性载体。不难发现，凡有先进创新生态系统的地方，不仅产业景气度高，而且均有知名高等学府或科研院所，例如北京中关村紧邻清华、北大和中科院；苏州产业园近邻上海交大、复旦等。创新生态系统中，高校及科研院所和政府政策、产业链等各主体的逻辑主次关系值得探究<sup>[13]</sup>。

本文以新加坡为例进行实证研究。新加坡是毗邻海南自贸港的岛国，两者地理位置和自然环境相似度高，前者发达的经济状态和先进的政策模式具有较强的可复制性。本文基于图1模型路径，使用熵权法、灰色关联法、耦合协调度模型

法以及深度学习网络法进行逐级深入的研究，分析生态系统构建水平与七大主体发展指标的相关关系，为自贸港构建新型创新生态系统提供借鉴和参考。

基于以上理论分析和实践经验，本文提出以下假设：

H0：多螺旋路径可以赋能经济高质量发展，并且主要通过产业链的构建来实现。

H1：七主体的耦合协调度对生态系统稳健性具有重大意义，在经济复苏的大背景下耦合度优于协调度，政策资源应优先向产业链倾斜以获得更快复苏。

H2：七螺旋模型是评估创新生态系统构建水平和状态的重要依据。

#### 四、实证分析

为了从实证的角度实现对假设的证明，使用计量经济学中的多模型耦合方法进行实证论证。多模型耦合方法适用于探索多个子系统之间的复杂关系。首先，使用“灰色关联法”找到影响创新生态系统的主体间关联度和影响权重规律；然后，使用“耦合协调度法”找到七主体在经济高速、健康发展中的彼此和谐的规律；最后，使用“神

经网络法”对创新生态系统七主体多螺旋模型的有效性和稳健性进行验证评估。灰色关联度模型、耦合协调度模型、神经网络模型三个模型的逻辑关系是由浅入深,逐级量化重要性权重和协调性关系,在此基础上,通过机器学习中的深度学习网络方法实现训练集和测试集之间的验证,以此评估本文七螺旋模型的稳健性。本文数据来源于新加坡政府官网、QS 官网、NTU 官网、NUS 官网以及 Bloomberg、Wind 等第三方数据库。

### (一) 模型建立

设立“多螺旋水平”得分,作为因变量  $L$ 。另从创新生态系统“政产学研金服用”七螺旋模型出发,建立“政府”“企业”“学校”“科研机

构”“金融资本”“中介服务”“用户效应”7个一级自变量;每个一级自变量再按照“资金量”“项目数量”和“受众数量”3个维度设立3个二级自变量,变量名称和解析见表1。

### (二) 指标计算

各二级指标之间相对独立且均为连续变量,通过熵权法来求取权重进而获取一级指标得分,其中  $F$ 、 $P$ 、 $N$ 、 $G$  均为正向变量,  $C$  为负向变量。二级指标的数据从新加坡政府官网、新加坡行业企业官网、知名大学(例如 NTU 和 NUS)官网以及 BLOOMBERG 等第三方数据库获取,个别缺失值用均数补充(按 Landerman 等文献建议)。熵权法权重结果见表2。

表1 七螺旋创新生态系统评估指标表

主要指标	一级变量	二级维度	二级指标	变量
政府	$U_1$	资金量	政府对高校科研项目的资金投入量	$F_1$
		项目数量	政府同高校合作搭建的实验室数量和规模	$P_1$
		受众数量	政府对创新型人才培育的直接受众人数	$N_1$
产业	$U_2$	资金量	企业对高校直接资助和合作的资金量	$F_2$
		项目数量	企业与高校联合进行横向研究的资金规模	$P_2$
		受众数量	产业链向高校专业直接对口招聘的人数	$N_2$
学校	$U_3$	资金量	智慧课堂的投资规模	$F_3$
		项目数量	智慧课堂跨校跨国跨境合作项目数量	$P_3$
		受众数量	智慧课堂高水平跨学科教学受益人数	$N_3$
科研机构	$U_4$	资金量	科研机构和高校共同研究的项目资金规模	$F_4$
		项目数量	联合研究的成果数量和等级	$P_4$
		受众数量	科研机构和高校双向人才流动的直接数量	$N_4$
金融资本	$U_5$	资金量	跨境资本参与的融资规模	$F_5$
		项目数量	高校技术转移公司的投融资项目数量	$P_5$
		受众数量	高校对 PEVC 输出的毕业生数量	$N_5$
中介服务	$U_6$	资金量	加速器、孵化器等衔接性机构的资金投入规模	$F_6$
		项目数量	中介服务完成技术转移的项目数量	$P_6$
		受众数量	高校技术转移办公室的设立情况和受众人数	$N_6$
用户效应	$U_7$	资金量	高校师生创新项目获得的市场盈利或收益水平	$F_7$
		项目数量	校企联合实验室数目(位于校内)	$P_7$
		受众数量	联合辅助教研受益项目数量	$N_7$
$GDP$	$G$			
$CPI$	$C$			
多螺旋水平	$L$		创业基因公司(Startup Genome)联合全球创业网络(Global Entrepreneurship Network)与伦敦发展促进署(London & Partners)发布的每年度 The Global Innovation Index (GII)	

表2 二级指标熵权法结果

项	信息熵值 $e$	信息效用值 $d$	权重(%)
$F_1$	0.759	0.241	4.51
$P_1$	0.804	0.196	3.675
$N_1$	0.645	0.355	6.644
$F_2$	0.828	0.172	3.220
$P_2$	0.755	0.245	4.597
$N_2$	0.789	0.211	3.947
$F_3$	0.834	0.166	3.118
$P_3$	0.799	0.201	3.763
$N_3$	0.858	0.142	2.668
$F_4$	0.751	0.249	4.669
$P_4$	0.800	0.200	3.745
$N_4$	0.663	0.337	6.305
$F_5$	0.662	0.338	6.333
$P_5$	0.839	0.161	3.009
$N_5$	0.796	0.204	3.824
$F_6$	0.646	0.354	6.622
$P_6$	0.749	0.251	4.700
$N_6$	0.755	0.245	4.598
$F_7$	0.607	0.393	7.366
$P_7$	0.858	0.142	2.663
$N_7$	0.861	0.139	2.597
$G$	0.752	0.248	4.653
$C$	0.852	0.148	2.774

按照表2相应权重综合计算可得一级指标  $U$  值, 其描述性统计结果见表3。

(三) 模型分析

为了较全面地分析系统内各主体的主次前后关系、相互和谐特征、模型有效性等, 本文依

次采取灰色关联度模型、耦合协调度模型和神经网络模型进行分析。用灰色关联度模型可以有效发掘出各主体之间的关联程度, 对权重进行评估和排序。得到权重数据后, 可以对各主体的重要性、耦合性和协调性进行分析, 评估各主体发展的和谐程度。为了验证和保障七主体螺旋模型的有效性和稳健性, 运用强大的神经网络方法, 利用机器学习原理, 可对大量其他创新区域的同类数据进行训练学习, 并对训练得出的模型进行计算, 得出预测值与实际值对比的结果, 以此进一步确定模型的有效性和稳健性。

1. 灰色关联度模型分析

灰色关联度模型分析是基于灰色关联度指标, 通过对数据序列几何关系和曲线几何形状的相似程度进行比较, 来分析系统各因素之间的关联程度。本文采用灰色关联法评估七主体螺旋模型的一级指标对因变量的重要性和关联度变化趋势。

首先, 确定特征数列和母序列, 对指标数据进行均值化量纲统一。

特征数列为:

$$[X'_1 X'_2 \dots X'_n] = \begin{bmatrix} x'_1(1) & x'_2(1) & \dots & x'_n(1) \\ x'_1(2) & x'_2(2) & \dots & x'_n(2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x'_1(m) & x'_2(m) & \dots & x'_n(m) \end{bmatrix}$$

母序列(即评价标准)为:

$$X'_0 = (x'_0(1), x'_0(2), \dots, x'_0(m))^T$$

然后, 分别计算每个比较序列与参考序列对

表3 一级指标描述性统计

变量名	样本量	最大值	最小值	平均值	标准差	中位数	方差	峰度	偏度	变异系数(CV)
$L$	5	3.989	3.792	3.851	0.085	3.799	0.007	1.403	1.459	0.022
$U_1$	5	668.128	540.118	594.746	58.827	568.373	3 460.646	-2.773	0.549	0.099
$U_2$	5	1 604.256	1 545.996	1 579.583	24.918	1 588.831	620.904	-1.94	-0.604	0.016
$U_3$	5	198.969	171.284	191.737	11.622	197.128	135.06	4.336	-2.067	0.061
$U_4$	5	228.337	202.108	210.385	11.325	204.041	128.251	0.693	1.312	0.054
$U_5$	5	1.598	0.916	1.325	0.264	1.357	0.069	0.887	-0.969	0.199
$U_6$	5	2 184.776	1 190.291	1 715.575	452.516	1 961.944	20 4771.14	-2.887	-0.441	0.264
$U_7$	5	10.246	9.315	9.847	0.38	9.957	0.144	-1.192	-0.62	0.039

应元素的关联度:

$$\gamma(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\Delta \min + \rho \Delta \max}{\Delta_{ik} + \rho \Delta \max}$$

$$\Delta \min = \min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)|$$

$$\Delta \max = \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|$$

$$\Delta_{ik} = |x_0(k) - x_i(k)|$$

式中:  $\rho$  为分辨系数, 在(0, 1)内取值, 分辨系数与系数间差异和区分能力呈反比关系, 通常取 0.5。关联度由下式可得:

$$r_{0i} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m W_k \zeta_i(k)$$

依据计算结果对灰色加权关联度进行大小排序, 其中数值越大表示其重要性越大, 反之越小。计算结果见图 2。

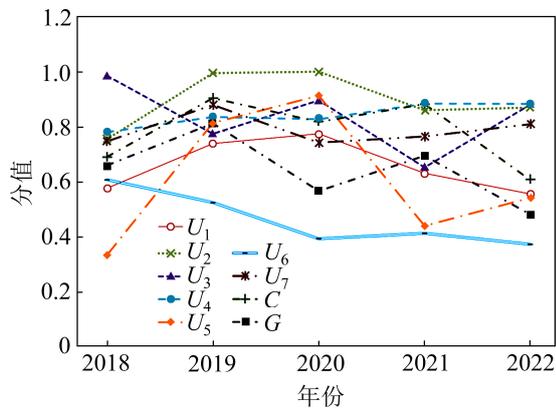


图 2 关联度分值走势图

从表 4 可以看出: 抛开 CPI 和 GDP 社会整体性因素的影响,  $U_2$  的关联度最大, 其次是  $U_4$ 。特别值得注意的是,  $U_3$  是振幅最大、上升最快的关联变量。至此 H0 假设得到了验证。

最后, 了解了各一级指标的关联度排名后, 进一步研究这个生态系统中各指标的耦合协调度, 以此了解构建新型生态系统时各主体的关系。研究系统中多子系统的情况, 使用的模型是非线性的, 利用灰色关联模型实现了各子系统的重要性权重测度和排序, 对“政产学研金服用”各主体地位和功能给出了实证佐证。其中, 政府

表 4 灰色关联度评价表

评价项	关联度	排名
$U_2$	0.896	1
$U_4$	0.842	2
$U_3$	0.838	3
$U_7$	0.789	4
$C$	0.781	5
$U_1$	0.656	6
$G$	0.644	7
$U_5$	0.609	8
$U_6$	0.463	9

决策是引导方向的角色, 产业是实现系统价值的主要主体, 多螺旋路径可以赋能区域的高质量发展, 并且主要通过产业链的构建来实现。

结果显示“ $U_2$ ”(产业)是优秀、发达的创新生态系统中权重最大的主体变量, 可以说一个区域的产业链如果不能发展起来, 其他主体的发展和投入都将变得事倍功半。在经济高速发展的时期, 产业链的设计和构建是工作重点; 在经济受到不确定因素冲击的时候, 产业又发挥着定海神针的作用。稳产业就是稳经济, 稳经济就是稳产业。学校和研究机构的主体地位随着经济的发展而正向增强, 进一步佐证了科研实力与当地产业发展的水平直接挂钩。

## 2. 耦合协调度模型

耦合原指物理学中多个电路间传输能量的关联与配合, 后逐渐用来形容多个系统间相互影响、相互作用的程度。在灰色关联度模型分析中获取了七主体的关联度排名后(表 4), 得知“ $U_2$ ”(“产业”)是创新生态系统中关联度最高的主体, 权重系数达到了 0.896, 这提示了构建创新生态系统时各主体的主次关系。接下来进一步研究七主体一级指标之间的耦合协调度, 探索各主体和谐发展的规律。结合实际需要构建 7 个子系统之间的耦合度模型, 具体公式如下:

$$C = \left[ \frac{U_1 \times U_2 \times U_3 \times U_4 \times U_5 \times U_6 \times U_7}{(U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 + U_6 + U_7) / 7} \right]^{1/7} = \frac{\sqrt[7]{U_1 \times U_2 \times U_3 \times U_4 \times U_5 \times U_6 \times U_7}}{U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 + U_6 + U_7}$$

根据耦合度模型可知，系统的耦合度大小与各子系统之间的综合发展水平指数有关。 $U_i$ 能有效反映各子系统的发展水平及相对发展程度，体现系统内指标对于系统整体功能的贡献程度。在测算  $U_i$  之前，默认各指数权重占比一致。

耦合度模型可以反映各系统之间的耦合作用程度，但当多个系统之间发展水平同时偏高或偏低时，也会表现出整体耦合度高的现象，存在一定弊端。因此，引入更为科学严谨的耦合协调度模型进一步测算系统之间的协同创新程度。

$$D = (C \times T)^{1/2}$$

$$\begin{cases} T = \alpha U_1 + \beta U_2 + \chi U_3 + \delta U_4 + \varepsilon U_5 + \zeta U_6 + \eta U_7 \\ \alpha = \beta = \chi = \delta = \varepsilon = \zeta = \eta = 1/7 \end{cases}$$

其中， $D$  表示创新生态系统耦合协调度， $T$  表示各子系统综合发展水平指数对整体协调度的综合影响程度， $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\chi$ 、 $\delta$ 、 $\varepsilon$ 、 $\zeta$ 、 $\eta$  为待定系数，创新生态七个子系统设为同等重要，故均等于  $1/7$ ，总和为  $1$ 。

计算结果见图 3。新加坡七螺旋创新生态系统原本处于较高的协调水平，各主体发展较均衡，系统运行良好。但从 2020 年开始，由于疫情影响，各指标迅速下滑，疫情放开后进入较长复苏阶段，至今仍未完全恢复到疫情前水平。复苏过程中，耦合度优于协调度，说明政府复苏政策有所侧重，对产业链的扶持复苏优先级最高，这与生态系统的构建和维护逻辑一致，进一步支撑了“ $U_2$  灰色关联度最大”的结论，H1 假设得到了验证。

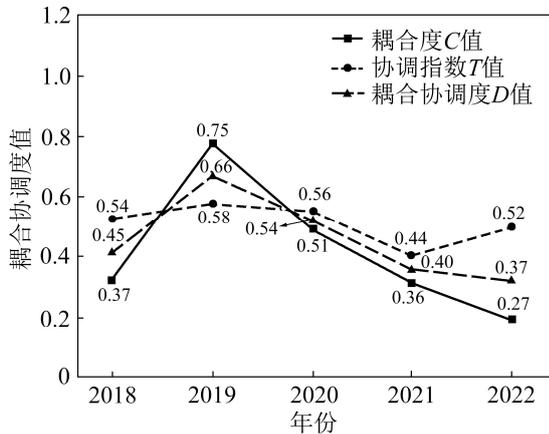


图 3 新加坡七主体耦合协调度时序图

通过耦合协调度测度了七个子系统的相互耦合协调关系。在突发因素对经济波动产生影响时，政府决策首先是加大对产业的稳定作用，产业链条的全要素有序流通是经济维稳的关键。所以新加坡政府快速响应新冠疫情的影响，果断加大了对产业的资金扶持，较短的时间内出现了耦合度高于协调度的情况，这种失调是短期快速发展的权宜之策。后期随着经济的复苏，耦合度逐渐低于协调度，各主体的协调关系恢复。对新加坡常规年份和疫情影响年份的数据分析显示，在重大宏观突发因素影响下，为保持创新生态系统的和谐健康发展，须将保护七主体的耦合度放在首位，政府宏观调控时优先将资金、人才、渠道等资源倾斜到产业链中，其他六主体重要性暂时放低，而且保产业、保营收、保贸易是重要的手段，即使牺牲税收等也利大于弊；在突发事件冲击逐渐弱化后，再逐步提升七主体的协调度地位。

### 3. 神经网络模型

通过灰色关联度模型和耦合协调度模型的分析，量化了创新生态系统“政产学研金服用”七螺旋模型的七主体主次关系及和谐关系。进一步，按照 BP 神经网络学习方法对更多创新生态系统数据进行训练和评估，以此验证本研究中模型的稳健性和可靠性。

BP 神经网络模型是基于多层次网络算法模型，模拟的是信号正向迭代，误差向后传递。本研究设置 1 000 层隐藏层，学习算法主要分为两个部分：第一部分是数据的正向传递，从输入层进入隐藏层再迭代到输出层；第二部分是误差的反向回馈，顺序刚好与第一部分相反，实现依次调节输入层、隐藏层、输出层之间的权重和偏置的功能，令输出结果更加精确。

隐含层的输出量设为  $F_j$ ，输出层的  $m$  量设为  $O_k$ ，激励函数设为  $G$ ，学习速率设为  $\beta$ ，三个层之间的关系如下：

$$\begin{cases} F_j = G \left( \sum_{i=1}^m \omega_{ij} x_i + a_j \right) \\ O_k = \sum_{j=1}^l F_j \omega_{jk} + b_k \end{cases}$$

系统期望的输出量设为  $T_k$ , 则系统的误差  $E$  可由实际输出值和期望目标值的方差表示, 表达式如下:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (T_k - O_k)^2$$

并令  $e_k = T_k - O_k$ , 利用梯度下降原理, 则系统权重和偏置的更新公式如下:

$$\begin{cases} \omega_{ij} = \omega_{ij} + \beta F_j (1 - F_j) x_i \sum_{k=1}^n \omega_{jk} e_k \\ \omega_{jk} = \omega_{jk} + \beta F_k e_k \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_j = a_j + \beta F_j (1 - F_j) x_i \sum_{k=1}^n \omega_{jk} e_k \\ b_k = b_k + \beta e_k \end{cases}$$

BP 神经网络原理图见图 4。

BP 神经网络要求较大的数据量, 而新加坡单一区域数据有限, 故选择欧美和中国其他创新生态系统的指标作为训练集, 将新加坡数据作为

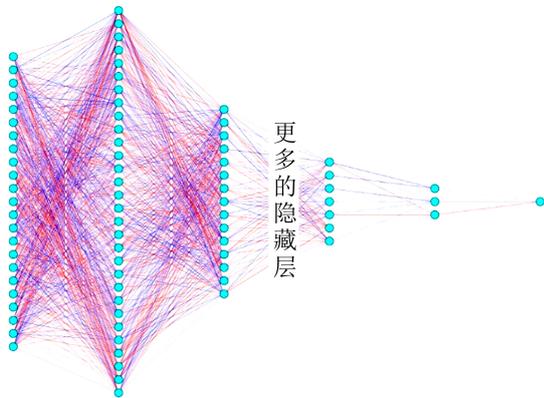


图 4 BP 神经网络原理示意图

测试集进行模型的验证。得到机器学习的模型评估结果, 见表 5。结果显示  $MSE$ (均方误差)、 $RMSE$ (均方根误差)、 $MAE$ (平均绝对误差)的数值均小, 说明模型精确度较高, 预测值和训练值之间的拟合优度较好。

表 5 模型评估结果对比表

	$MSE$	$RMSE$	$MAE$	$MAPE$	$R^2$
训练集	0.001	0.038	0.015	0.472	0.998
测试集	0.003	0.051	0.018	0.556	0.995

测试数据的真实值和预测值的对比结果图见图 5, 模型效果表现优秀, 七主体指标对创新生态系统的表征显著, 七螺旋模型是一种有效测度和评估创新生态系统发展水平的模型, 具有较大的应用推广价值。至此假设 H2 得到验证。

通过神经网络学习方法, 实现了对更多生态系统的七主体数据的学习, 在训练集和测试集中获得了较好的模型收敛效果, 进一步佐证了模型的可靠性, 这也提示了地方政府在构建创新生态系统的过程中完全可以从七主体的方向入手, 扬长补短, 协调发展, 更高效地实现区域经济发展, 成为新兴创新生态系统的典范。该模型不仅是发展创新生态系统的方法, 也是评估创新生态系统水平的方法之一。本文基于模型方法, 以 2023 年北上广和海口为例得到表 6 结果。这四个城市都在积极发展创新生态系统, 评分均超过 0.8, 但也有所不同。其中, 海口评分远低于其他三个城市, 当前处于良好发展的状态, 说明自贸港建

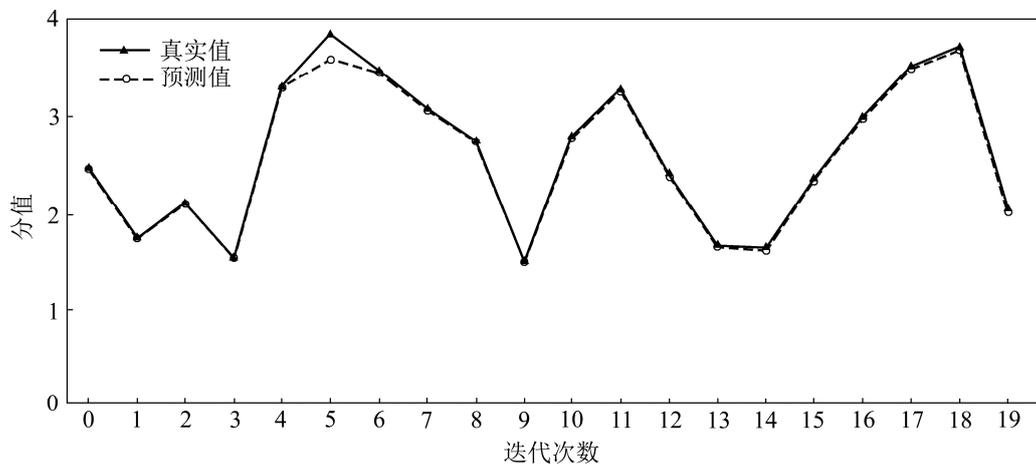


图 5 模型预测优度图

表6 四大城市创新生态系统七主体螺旋模型得分

城市	得分值	评价
北京	0.95	创新生态系统发展成熟
上海	0.96	创新生态系统发展成熟
广州	0.91	创新生态系统发展成熟
海口	0.81	创新生态系统发展良好

设进程中资源配比和整合方面的工作上升空间还很大。

创新生态系统模型中最核心的是人才，引入和培养人才并引导人才发挥能量，为社会和经济发展做出最大程度的贡献，是政策管理者的长期目标。这提示了自贸港建设工作中，应该加大出台更多对产业链人才吸引、保留、培育以及激励等方面的针对性政策，尽快提升七主体螺旋模型的得分。

## 五、结果和讨论

成熟稳健的创新生态系统是区域经济协调发展的直接体现。我国目前对于创新生态系统“政产学研金服用”七主体螺旋模型的实践探索仍处于快速发展阶段。自贸港对本土创新生态系统的构建，可参照多螺旋理论，哪里薄弱补哪里，重点立足产业链布局以实现高质量发展。

由实证分析结果可见，本文的三个假设均得到了实证验证。区域经济的整体产业发展水平——“ $U_2$ ”（“产业”）是关联度最高的变量，说明了创新生态系统的构建是空间区域经济体的整体改革提升。没有发达稳健的本土产业链支撑以及源源不断的科研创新引领，创新生态系统政策改革就会脱实向虚。这给了“ $U_1$ ”（“地方政府”）更多的要求和压力，各部门（包括  $U_3$  和  $U_4$ ）应出台配套组合政策，发挥提纲挈领、指引方向的决定性作用<sup>[14]</sup>，“ $U_5$ ”“ $U_6$ ”“ $U_7$ ”金、服、用部门应配合好政策执行，发挥加速和润滑的作用，共同构建良好有序的整体多螺旋系统。在地方政府构建本地创新生态系统的过程中，按照 H2 假设的验证结果，可以将“耦合度”优先级放到“协调度”之前，政策资源、人才资金等优先倾斜到“产业链”的构建中，确保产业在市场中迅速发展，短期内的税收减免、人才引进、

PEVC 等金融市场的配套扶持、重点产业的补贴奖励、研发项目的配套引领、技能人才的培养支持、科技成果转化便利等都是这个逻辑下的具体举措。总之，优秀稳健的产业链，会催生也需要其他主体的高度和谐发展。

海南自贸港的 11 大重点园区布局不仅从地理位置角度对各地优势资源进行整合，实现特色发展，而且从产业链角度对全域进行优化布局<sup>[15]</sup>，实现政府政策设计的最优引导，非常具有前瞻性。例如三亚布局高新技术产业园、陵水发展国际教育产业等，因地制宜探索建设各具特色的创新创业共同体<sup>[16]</sup>、开展与境外大学合作办学项目，实现“学在海南=留学国外”的愿景，都是特色生态系统的优秀案例。海南自贸港实施高质量发展战略，持续在高端购物、医疗、教育“三大境外消费回流”方面进行探索，不断扩大消费新场景，对标国际先进新型消费中心。

进一步，应将联动发展视域放大到岛外。粤港澳大湾区拥有丰富的人才储备和技术基础，高新技术产业方面可与之联动发展，参照新加坡经验，以引进高水平人才为核心、落地高新产业为目标，尤其是将产业链中价值创造最高的科研人才和机构引入岛内来落户“安家”，让本岛优异的自然环境、气候条件、发展潜力发挥留住人才、产业创新的作用。

在经济发展的过程中，市场可以使用创新生态系统七主体螺旋模型对发展程度和现状进行量化评估，通过神经网络评估，可以较好地当前经济数据进行量化，以此了解当前发展所处的阶段，进一步扬长避短，让当地创新生态系统发展更加高效。

## 参考文献：

- [1] 钟德仁, 张晓秀, 高芳凝, 等. 产业学院协同创新三螺旋理论分析[J]. 洛阳师范学院学报, 2020, 39(10): 51-55.
- [2] 邓志新. 三螺旋理论下现代产业学院协同创新: 困境根源、逻辑机理与实践路径[J]. 中国职业技术教育, 2021(31): 45-52.
- [3] 蔡翔, 赵娟. 大学—企业—政府协同创新效率及其影

- 响因素研究[J]. 软科学, 2019, 32(2): 56-60.
- [4] 吴颖, 廖玲艳. 协同创新培育知识产权市场主体[J]. 知识产权, 2014(4): 76-79.
- [5] 郝海霞, 李欣旖, 王世斌. 四螺旋创新生态: 研究型大学引导区域协同创新机制探析——以苏黎世联邦理工学院为例[J]. 高等工程教育研究, 2020(2): 190-196, 200.
- [6] 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, 37(5): 67-76.
- [7] 王萍萍. “政产学研金服用”创新共同体协同机制研究——基于协同创新网络的视角[J]. 上海市经济管理干部学院学报, 2019, 17(4): 1-9.
- [8] 王凡. 高校科技成果转化中“政产学研金服用”模式探讨[J]. 中国高校科技, 2021(6): 92-96.
- [9] 张宁, 孙龙, 钟安原. 创新创业共同体: 形成·架构·评价——以“政产学研金服用”为观照点[J]. 中国高校科技, 2022(10): 60-68.
- [10] 乔治·凯勒. 大学战略与规划: 美国高等教育管理革命[M]. 别敦荣, 译. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005.
- [11] 边婧, 李成超. 南洋理工大学现代化办学理念及实践路径研究[J]. 教育教学论坛, 2020(47): 191-192.
- [12] 史铭之. 一流本科教育的建设理路——南洋理工大学的启示[J]. 河北师范大学学报(教育科学版), 2021, 23(5): 122-129.
- [13] 梁树广, 臧文嘉, 张芑芑, 等. 创新链产业链资金链耦合的机制与路径探究[J]. 财会月刊, 2023, 44(13): 118-124.
- [14] 沈佳坤. 北京城市副中心参与跨城区政产学研金服用融通创新体系研究[J]. 中国商论, 2023(18): 118-121.
- [15] CHAND V, MISRA S. Teachers as educational-social entrepreneurs: The innovation-social entrepreneurship spiral[J]. The Journal of Entrepreneurship, 2009, 18(2): 219-228.
- [16] WONGP K, HO Y P, SINGH A. Towards an “entrepreneurial university” model to support knowledge based economic development: The case of the National University of Singapore[J]. World Development, 2007, 35(6): 941-958.

## Strategic analysis of Hainan free trade port's coupling multi-model construction of innovation ecosystem—From the experience of Singapore

LYU Wenbo, WU Meng, NI Shenwei

(Saxo Fintech Business School, University of Sanya, Sanya 572000, China)

**Abstract:** This article analogizes empirical evidence from Singapore based on the components, interrelationships, and coupling paths of the innovation ecosystem from the perspective of the Hainan Free Trade Port. Using the entropy weight method, grey correlation method, coupling coordination model method and machine learning evaluation method for in-depth research step by step, it finds the correlation between the level of innovation ecosystem construction and the development indicators of the seven major subjects of ‘government, industry, academia, research, finance and service’. Furthermore, it proves that the industrial chain is the subject with the highest correlation in the multi-helix. It is recommended that the Hainan Free Trade Port should pay attention to building a local innovation ecosystem when laying out its own industrial chain, and actively use the advantageous resources of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and Southeast Asian countries for interactive development via focusing on optimizing the industrial chain structure.

**Key Words:** innovation ecosystem; multi-spiral path; multi-model evaluation; interactive development

[编辑: 陈雪萍]