

基于互信息的四螺旋模型创新协同度研究

肖国华^{1,2,3}, 贺德方^{3,4}, 张 娴^{1,2}, 许海云^{1,2}, 韩 晔^{1,2}

(1. 中国科学院成都文献情报中心, 成都 610041; 2. 中国科学院大学经济与管理学院图书情报与档案管理系, 北京 100190; 3. 南京大学信息管理学院, 南京 210023; 4. 科学技术部, 北京 100862)

摘 要 本文分析了“政-产-研”三螺旋模型的局限性和第四螺旋现有研究的不足之处, 提出了以科技服务机构为第四螺旋, 构建“政-产-研-服”四螺旋模型的观点。本文基于互信息和三螺旋算法设计了四螺旋创新协同度量指标 T_{gias} , 并采用各主体科技论文产出数据作为其创新产出表征, 利用 T_{gias} 指标量化测度了四螺旋各主体间的创新协同程度。量化分析结果表明, 科技服务机构加入螺旋结构后, 全方位提升了政-产、政-研、产-研、政-产-研既有的协同度, 反映出科技服务机构作为第四螺旋对原有三螺旋体系创新发展的催化和促进作用。对四螺旋模型的研究和应用, 有利于提高科技情报、技术转移等方面工作的协同创新效率。

关键词 四螺旋; 三螺旋; 互信息; 创新协同度

Innovation Synergy of a Quadruple-Helix Model Based on Mutual Information

Xiao Guohua^{1,2,3}, He Defang^{3,4}, Zhang Xian^{1,2}, Xu Haiyun^{1,2} and Han Ye^{1,2}

(1. Chengdu Documentation and Information Center, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041; 2. Department of Library, Information and Archives Management, School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190; 3. School of Information Management, Nanjing University, Nanjing 210023; 4. Ministry of Science and Technology of PRC, Beijing 100862)

Abstract: This study analyzes the limitations of the triple-helix model of government-industry-research institution and the shortcomings of the existing research on the fourth helix. It introduces the viewpoint that the science and technology (S&T) service organization should be the fourth helix, and thus builds the quadruple-helix model of government-industry-research institution-service organization. Subsequently, an index of T_{gias} quadruple-helix innovation synergy is designed based on mutual information and the triple-helix algorithm. The output data of scientific and technological papers on each subject are used as its innovation output characterization, and the innovation synergy between and among the quadruple-helix subjects with the index T_{gias} are quantitatively measured. Quantitative analysis reveals that after the S&T service organization joins the helix structure, the existing synergies of government-industry, government-research institution, industry-research institution, and government-industry-research institution are comprehensively improved, reflecting the catalytic and promoting role of such organization as the fourth helix in the innovation and development of the original triple-helix sys-

收稿日期: 2020-06-13; 修回日期: 2020-11-08

基金项目: 国家社科基金项目“‘大众创业、万众创新’背景下的科技成果转化信息服务体系研究”(17BTQ065); 四川省软科学项目“四川创新创业背景下科技成果加速转化模式研究”(18RKX0115)。

作者简介: 肖国华, 男, 1975年生, 博士, 研究员, 硕士生导师, 主要研究领域为情报学理论方法与应用、知识产权与技术转移、科技管理与政策; 贺德方, 男, 1963年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究领域为科技创新政策与法律法规、科技体制改革与创新体系建设、信息资源管理、情报学; 张娴, 女, 1973年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究领域为知识产权情报研究、专利信息分析, E-mail: zhangx@clas.ac.cn; 许海云, 女, 1982年生, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究领域为知识产权情报研究、情报计量学; 韩晔, 女, 1995年生, 硕士研究生, 主要研究领域为情报学理论方法与应用、知识产权与技术转移。

tem. The research and application of the model developed herein is conducive to improving the efficiency of collaborative innovation in S&T intelligence, technology transfer, and other aspects.

Key words: quadruple helix; triple helix; mutual information; innovation synergy

随着科技与经济的规模化发展,协同创新已成为重要的创新模式。“政-产-研”三螺旋模型是一种比较有影响力的协同创新研究范式,但具有一定的局限性。本研究将科技服务机构引入三螺旋,建立四螺旋模型,并对政、产、研、服四大主体之间的创新协同度进行量化分析,为协同创新研究提供基于数据分析的新视角。

1 四螺旋协同创新模型的提出

1.1 三螺旋模型的局限性

“政-产-研”三螺旋模型为若干国家的创新发展提供了理论指导或参考。但是,随着科技与经济的不断发展、社会分工的不断细化,政府(政)、企业(产)、科研机构与高校(研)已经不能代表所有的创新主体,三螺旋模型已经不能圆满诠释政、产、研之外的创新主体在促进社会整体创新发展中的作用以及新兴创新主体与原有的政、产、研三大创新主体之间的互动关系。三螺旋模型的局限性可从两个方面反映。

(1) 主体缺位。信息、金融、中介等主体既未能在三螺旋模型中体现,又不能并入三螺旋中的任一支螺旋。通常被学界或媒体提到的“政产学研军金介”等创新主体中,“军”与“政”的属性相近,可并入“政”;而“学”因其在科技创新和技术转移中主要发挥的是研究的功能,故“学”可与“研”并提;但是金融、中介等都不能再作归纳或合并,其独立或基本独立于政、产、研之外,且发挥着不可忽视的作用。

(2) 信息情报和数据的重要性被忽略或弱化。忽视了信息流在三螺旋模型中对横向循环、纵向进化的促进作用。在信息化和大数据时代,数据信息对于创新发展的影响日益加大,数据作为要素已经被提到了中央政策的高度^[1-2]。信息的功能已经不是政、产、研各自麾下一个相对边缘的小部门可以负载和实现的了,如2019年8月,《中共中央、国务院关于支持深圳建设中国特色社会主义先行示范区的意见》^①中指出的“探索建设国际科技信息中心”,就明确强调了信息的功能。而且,各创新主体间的信息共享不足、数据挖掘不足、对接精准不

足,需要一支相对独立的专业化、复合型的信息服务的力量,并且在现实中,已经存在这样的队伍且力量正在逐渐增强。

实际上,2002年在丹麦哥本哈根召开的第四次世界三螺旋大会上就提出了这样的问题:三螺旋是否可以扩展为四螺旋^[3]?

1.2 第四螺旋的界定与四螺旋模型的构成

鉴于三螺旋模型的局限性,学者们开始研究三螺旋之外的其他螺旋,甚至三螺旋模型的主要阐发者亨利·埃茨科威兹(Henry Etzkowitz)也认为可以有第四螺旋,如风险投资^[4]。现有研究中,主要有“政-产-研-金”^[5]、“政-产-研-介”^[6-10]、“政-产-研-众”^[11-16]等关于四螺旋构成的观点。“政-产-研-金”强调财政、投资、税收、金融、采购的作用;“政-产-研-介”将中介机构作为第四螺旋;“政-产-研-众”引入公众、用户、市民、媒体、民间社会等社会全员参与的机制。各观点均有其科学性和合理性,但从系统性以及实践意义来看,仍存在不足。如果只将资金和金融视为第四螺旋,那么还可以有第五、六、七等更多螺旋,不利于系统化研究;如果将中介机构视为第四螺旋,容易受狭义概念限制,而在广义的概念上将金融机构、投资公司等作为中介机构又容易引起歧义;如果将社会大众视为第四螺旋,虽然理论可行,但是范围过大,模糊了各螺旋本身的相对独立性和“四梁八柱”式的架构性,更似倾向于环境性、生态性的研究角度了,并且减弱了四螺旋模型在实际应用上的可操作性。

鉴于上述情况,本研究认为将第四螺旋界定为科技服务机构更为恰当,具体理由如下。

首先,无论三螺旋还是四螺旋,都是服务于协同创新的组织模式,而“科技创新是核心,抓住了科技创新就抓住了牵动我国发展全局的牛鼻子”^[17],《国家创新驱动发展战略纲要》开宗明义第一句话就是“党的十八大提出实施创新驱动发展战略,强调科技创新是提高社会生产力和综合国力的战略支撑,必须摆在国家发展全局的核心位置”^[18],党的十九届五中全会提出,“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

① http://www.gov.cn/xinwen/2019-08/18/content_5422183.htm

展的战略支撑”^①。因此，第四螺旋应强调是为促进科技创新的科技服务机构，而不是一般性的、泛化的服务机构。

其次，根据《国务院关于加快科技服务业发展的若干意见》^[19]，科技服务业包括了研究开发及其服务、技术转移服务、检验检测认证服务、创业孵化服务、知识产权服务、科技咨询服务、科技金融服务、科学技术普及服务等八大专业科技服务和综合科技服务。国家统计局《国家科技服务业统计分类（2018）》^[20]将科技服务业范围确定为科学研究与试验发展服务、专业化技术服务、科技推广及相关服务、科技信息服务、科技金融服务、科技普及和宣传教育服务、综合科技服务等七大类。这两个文件明确了科技服务既包括了前述涉及第四螺旋的“金”“介”的核心内容和“众”中与媒体有关的内容，又包括了前述论及三螺旋模型缺乏的信息功能，较好地实现了既相对全面又具备明晰边界和相对独立性的范围概括。

综上所述，本研究提出“政-产-研-服”四螺旋协同创新模型，将科技服务机构作为四螺旋模型中的第四螺旋。科技服务机构具体包括：信息情报机构、智库咨询机构、技术转移机构、金融投资机构、专业中介机构（如专利代理事务所、律师事务所、会计事务所、资产评估机构等）、科学传播机构、平台建设机构等，是独立或相对独立于政府部门、产业企业、高校科研机构而发挥支撑、纽带、催化、优化作用的第四股力量，加速创新的发生发展。与产学研协同创新、三螺旋协同创新相比，四螺旋协同创新是更广泛、更深入的协同创新。

2 基于互信息的四螺旋创新协同度量化分析方法

本研究基于互信息对“政-产-研-服”四螺旋模型中各主体的创新协同度展开量化测度，以验证其合理性及有效性。

2.1 三螺旋模型量化分析方法

自2000年Loet Leydesdorff首次运用三螺旋算法（triple helix algorithm, TH）计算政产研之间的协同度以来，国内外学者开展了大量相关研究，包括社会网络分析指标^[21]、基于向量空间模型的指标^[22]、 ψ 系数和偏相关系数^[23]等。有学者提出，现有三螺旋

计量指标可分为两类：基于互信息的指标和基于合作相似度的指标^[24]。

在三螺旋系统中，不同主体的协同与合作，带来不同视角的信息与资源的交叠、碰撞与融合，激发了三螺旋系统的创新潜能，这正是信息熵理论关于不确定性的体现，符合Leydesdorff^[25]认为三螺旋互信息算法中的“信息冗余”能够变不可能为可能的观点。因此，本研究认为，就研究螺旋系统的协同机制与效应而言，TH算法具有独到之处。

三螺旋模型的互信息测度，可应用香农信息熵来计量。根据香农的信息论，信息熵是离散随机事件的出现概率，熵越大，代表事件的不确定性越大。Shannon^[26]将此概率分布定义为

$$E_x = -\sum_x P_x \lg(P_x) \quad (1)$$

在二维变量下，信息熵 E 则为

$$E_{xy} = -\sum_x \sum_y P_{xy} \lg(P_{xy}) \quad (2)$$

其中， P_{xy} 为事件 x 与事件 y 的联合概率分布。

Abramson^[27]借助子系统变量的互信息测度，来计算两个子系统之间的不确定性的转接度（transmission），即协同度（synergy）：

$$T_{xy} = E_x + E_y - E_{xy} \quad (3)$$

对于相互作用的三个子系统，Abramson^[27]将其互信息转接度定义为

$$T_{xyz} = E_x + E_y + E_z - E_{xy} - E_{xz} - E_{yz} + E_{xyz} \quad (4)$$

学者们将上述三维子系统的互信息转接度计算方法公式(4)应用到“政-产-研”创新体系，结合具体分析案例开展了三螺旋关系研究^[24,28]。

2.2 基于互信息的四螺旋创新协同度计量指标设计

基于互信息和TH算法在三螺旋系统协同度方面的理论与应用研究，本研究设计构建了四螺旋创新协同度计量指标。

根据熵的链式法则，有

$$E(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n E(x_i | x_{i-1}, x_{i-2}, \dots, x_1) \quad (5)$$

根据互信息的链式法则，有

$$T(x_1, x_2, \dots, x_n; y) = E(x_1, x_2, \dots, x_n) - E(x_1, x_2, \dots, x_n | y) \quad (6)$$

则，具体到“政-产-研-服”四螺旋创新系统，其协同度 T_{gias} 可定义为

$$T_{\text{gias}} = E_g + E_i + E_a + E_s - E_{gi} - E_{ga} - E_{gs} - E_{ia} - E_{is} - E_{as} + E_{gia} + E_{gis} + E_{gas} + E_{ias} - E_{\text{gias}} \quad (7)$$

① <http://cpc.people.com.cn/n1/2020/1030/c64094-31911721.html>

公式(7)为可测度四螺旋模型的创新协同度。 T_{gias} 作为量化分析四螺旋的有效指标,本质上是通过互信息来测度政府部门、产业界、高校和科研机构、科技服务机构之间的交互作用的不确定性,以此反映四类主体之间的协同与合作程度。 T_{gias} 为正向指标, T_{gias} 值越大,表明四螺旋系统中四类主体的创新协同度越强。

3 基于互信息的四螺旋创新协同度测度

3.1 数据来源与采集规则

理论上,凡是能够有效区分政、产、研、服四类主体的创新产出含义的可比数据,都可作为四螺旋互信息测度的分析数据对象,如论文产出、专利申请、技术合同、合作项目等。由于数据的规范性、可获得性原因,论文、专利仍然是当前大多数相关研究主要采用的数据来源。此外,四螺旋创新体系中,政府部门往往是以提供基金项目等研究资助的形式参与其间,并非体现为成果的直接产出者,而现阶段的专利数据尚缺乏相关的政府资助信息,论文数据的相关资助信息则相对完备。因此,尽管国内发表的科研论文对创新产出的表征意义并不全面,但并不影响对创新主体之间协同度的测度。本研究采用中国知网(CNKI)论文数据作为协同度指标计量数据。

CNKI的中文学术期刊、会议论文数据提供了规范详细的基金(项目、计划)资助信息。检索数据的时间跨度不宜太小,以免趋势不明,本研究初步考虑在10年以上;由于2003年我国科技政策的重点和方向包括了中长期科技规划、国家创新体系、科技评价体系、高新技术产业化等相关内容^[29],本研究选择了从2003年开始数据分析。CNKI列出的文献分类包括基础科学、工程科技、农业科技、医药卫生科技、哲学与人文科学、社会科学、信息科技、经济与管理科学,鉴于本文主要研究政、产、研、服之间的协同关系,故未选择与产业界、科研界、科技服务业关联相对较小的哲学与人文科学、社会科学两类,而保留了其他六类。本研究以政府(government, G)、产业(industry, I)、科研(academy, A)、科技服务(service, S)四类主体的论文产出数据,作为四螺旋模型创新协同度测度的基础数据。

数据检索源:中国知网(CNKI);数据类型:学术期刊、会议论文;时间范围:论文发表日期

2003年1月1日—2018年12月31日;学科领域:基础科学、工程科技、农业科技、医药卫生科技、信息科技、经济与管理科学;数据抽取规则:如表1所示。

3.2 四螺旋主体论文产出特征比较

检索得到政、产、研、服4类创新主体的独立产出与合作产出论文数量,如表2所示。

分析四螺旋创新主体的论文产出数量及其增长形态,可以揭示四螺旋各主体的一些合作行为特征以及创新体系的内部增长机制,主要特点如下。

(1)科研机构是创新产出的绝对主体。从论文产出的绝对数量可以看出,科研机构(A)论文产出是我国四类创新主体论文产出的主要来源,科研机构在四类主体独立论文产出总量中的所占的比例为68%,是产业机构(I)的2.7倍,是科技服务机构(S)的16.8倍。

(2)科研机构与其他主体的合作大幅提升。四螺旋创新主体的独立论文产出增长趋势如图1所示,尽管科研机构的独立产出总量占据绝对优势,然而自2008年始,科研机构独立产出呈现负增长,尤其自2013年始下滑势头加剧。与此同时,科研机构与其他创新主体的合作产出增长迅速(图2),其中,科研机构受政府资助(GA)、科研机构与产业界的合作(GI)都分别保持着对数级的高速增长。政府资助力度向科研机构大幅倾斜,从政府资助产出量来看,科研机构是产业机构的82倍。相对而言,科研机构与科技服务业(AS)的合作增长则非常缓慢,呈线性增长趋势。

(3)科技服务业在创新系统中活跃度提升。尽管科技服务业的创新产出量相对较少,但科技服务业与其他创新主体的合作产出趋势体现出,科技服务业在四螺旋创新系统中的活跃度一直保持着高速增长。从图3可以看出,科技服务业与产业界的合作(IS)一直保持着大幅增长,“产-研-服”合作(IAS)也始终保持着相似的增长趋势,而科技服务业与科研机构的合作(AS)增长则保持低迷,两相对照,在一定程度上反映出当前我国“产-研-服”合作(IAS),极有可能主要是由“产-服”合作(IS)带动的,科技服务业在我国的科研机构、产业界之间,较好地发挥了纽带作用,为科技成果的产业化应用,发挥了积极的促进作用。科技服务机构的政府资助产出(GS)增长较快,然而“政-产-服”系统的合作产出(GIS)增长缓慢。对比

表 1 “政-产-研-服”创新协同度测度变量及数据抽取规则

序号	测度变量	含义	数据抽取规则
#1	A	科研机构(包括高校)的独立学术产出	作者机构中仅包含科研机构(包括高校)类,不包含其他类型主体,且未受到政府资助的论文量
#2	I	产业机构的独立学术产出	作者机构中仅包含产业类,不包含其他类型主体,且未受到政府资助的论文量
#3	S	科技服务机构的独立学术产出	作者机构中仅包含科技服务机构类,不包含其他类型主体,且未受到政府资助的论文量
#4	G	政府部门资助的非产研服的学术产出	作者机构中不包含产业、科研(含高校)、科技服务等类型机构,且受到政府资助的论文量
#5	IA	仅科研机构(含高校)与产业机构的合作学术产出	作者机构中包含科研机构(含高校)、产业机构,不包含其他类型主体,且未受到政府资助的论文量
#6	AS	仅科研机构(含高校)与科技服务机构的合作学术产出	作者机构中包含科研机构(含高校)、科技服务机构,不包含其他类型主体,且未受到政府资助的论文量
#7	IS	仅产业机构与科技服务机构的合作学术产出	作者机构中包含产业机构、科技服务机构,不包含其他类型主体,且未受到政府资助的论文量
#8	GA	仅科研机构(含高校)受政府部门资助的学术产出	作者机构中仅包含科研机构(高校),不包含其他类型主体,受到政府资助的论文量
#9	GI	仅产业机构受政府部门资助的学术产出	作者机构中仅包含产业机构,不包含其他类型主体,且受到政府资助的论文量
#10	GS	仅科技服务机构受政府部门资助的学术产出	作者机构中仅包含科技服务机构,不包含其他类型主体,且受到政府资助的论文量
#11	IAS	仅科研机构(含高校)、产业机构与科技服务机构的合作学术产出	作者机构中包含科研机构、产业机构、科技服务机构,且未受到政府资助的论文量
#12	GIA	仅科研机构(含高校)与产业机构受政府部门资助的合作学术产出	作者机构中包含科研机构、产业机构,不包含其他类型主体,且受到政府资助的论文量
#13	GAS	仅科研机构(含高校)与科技服务机构受政府部门资助的合作学术产出	作者机构中包含科研机构、科技服务机构,不包含其他类型主体,且受到政府资助的论文量
#14	GIS	仅产业机构与科技服务机构受政府部门资助的合作学术产出	作者机构中包含产业机构、科技服务机构,不包含其他类型主体,且受到政府资助的论文量
#15	GIAS	科研机构(含高校)、产业机构与科技服务机构受政府部门资助的合作学术产出	作者机构中包含科研机构、产业机构、科技服务机构,且受到政府资助的论文量

表 2 “政-产-研-服”四螺旋主体论文产出数量(篇)

主体	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	合计
A	390952	443822	493846	566402	584455	586207	573327	552512	540166	580612	483494	461307	452362	441482	400737	376418	7928101
I	99031	105291	110154	119629	137694	154779	170655	181516	196118	220643	244404	244363	228885	226865	242604	238409	2921040
S	19977	21187	22525	25308	27316	29514	30251	30855	32496	33827	34244	34015	33829	34131	32911	29449	471835
G	5718	6872	8155	9961	11350	13551	16199	18636	21689	25223	30846	36758	41765	44289	46153	45955	383120
IA	25682	28483	31545	35302	38457	41262	44168	45642	46015	49707	52215	51161	50489	48527	47973	46102	682730
AS	5627	6200	7567	8300	9248	10005	10635	10654	10586	10860	10848	11067	11260	11908	12011	10968	157744
IS	3742	4131	4844	5716	7333	8471	9989	10446	11168	12407	13614	13933	13326	14142	16454	17689	167405
GA	119705	152751	186097	224709	257771	291822	326478	351580	366188	380665	402672	418382	437258	443984	432976	438524	5231562
GI	478	584	679	818	1113	1386	1832	2732	3467	4282	5340	6553	7314	8053	8898	10072	63601
GS	274	333	473	628	811	1076	1349	1537	1914	2139	2510	2857	3210	3199	3047	2970	28327
IAS	815	955	1152	1505	1828	1968	2415	2481	2365	2648	2785	2787	2734	2818	3105	3215	35576
GIA	4573	5968	7574	9834	11695	14195	17688	20957	23715	26910	30330	34905	32755	37803	40138	42523	361563
GAS	1209	1630	2246	3041	3777	4945	6231	7037	7582	8161	9181	11893	15044	17567	18473	18309	136326
GIS	15	29	42	42	91	96	150	204	248	336	451	513	516	634	678	719	4764
GIAS	97	149	236	323	447	561	834	941	1122	1259	1537	1868	2268	2694	3139	3668	21143

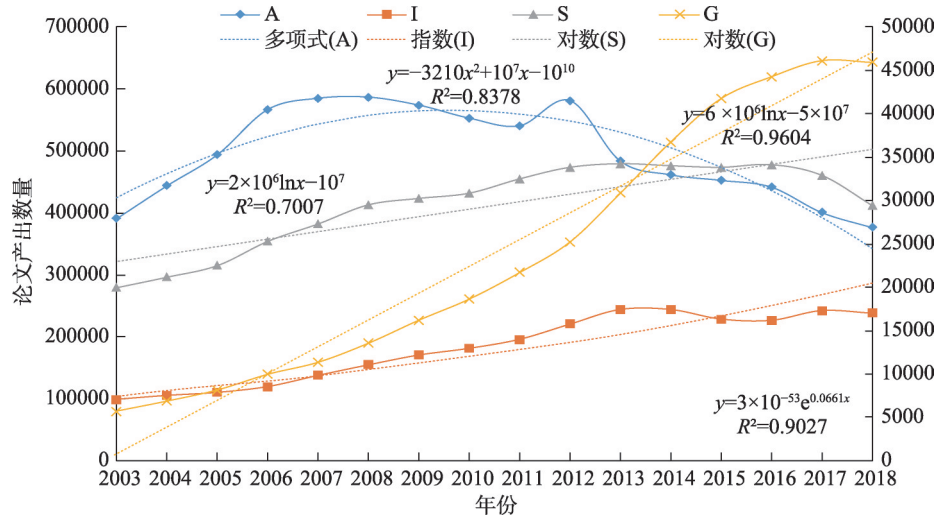


图1 四螺旋创新主体的独立论文产出趋势

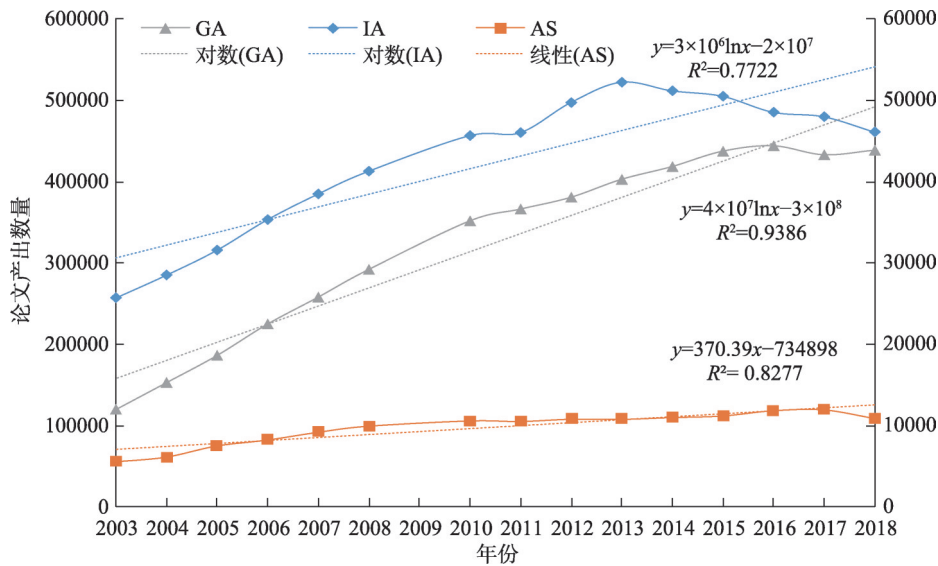


图2 科研机构(A)的合作论文产出趋势

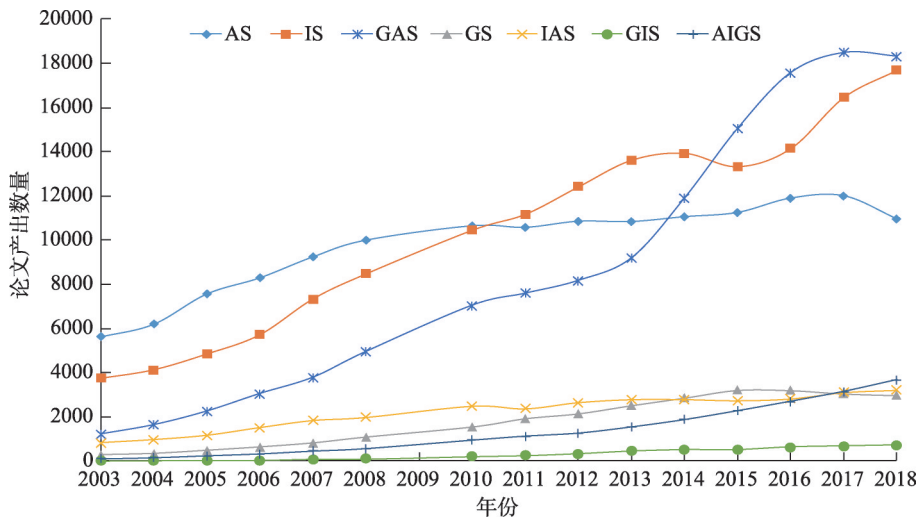


图3 科技服务机构(S)的合作论文产出数量趋势

IS、GS、GIS 可知，目前政府资助在科技服务业与产业界的合作中，并未发挥积极促进作用。相反地，对比 AS、GAS 可知，政府资助在科技服务业与科研界的合作中，发挥了明显的正向促进作用。

3.3 四螺旋系统的创新协同度测度

要深入探测创新系统内部的协同与合作机制，不仅仅是分析合作科研产出的外在数量形态，更需要基于系统内部互信息特征开展系统内里机制研究。本文利用四螺旋模型创新协同度测度指标 T_{gias} (公式(7)) 计算“政-产-研-服”四螺旋创新系统的创新协同度，计算结果如表 3 所示。

3.3.1 四螺旋系统的合作产出与创新协同度对比

对比分析四螺旋系统的合作产出、创新协同度(图 4)，可发现如下主要特点。

(1) 科研机构是政府资助接受主体，但“政-

研”创新协同度最低。科研机构受政府资助产出数量是四螺旋创新系统产出的绝对主体，然而“政-研”子系统(GA)的创新协同度，在各个创新子系统中却处于最低水平。这在一定程度上说明政府对科研系统的投入尚未发挥足够的效力，结合政府职能来看，应该加强投入之后的组织协调、监管评估与反馈机制。结合前文数据，可通过科技服务机构来提升高校科研机构与政府部门的协同度。

(2) “产-研-服”子系统体现出协同发展机制。尽管合作产出数量较少，但“产-研-服”子系统(IAS)的创新协同度表现是各子系统最高水平。并且，“产-研”子系统(IA)、“研-服”子系统(AS)、“产-服”子系统(IS)的创新协同度，均居于较高水平。可以认为，目前我国的产业界、科研界、科技服务界创新合作机制已有较好的协同融合。科研机构创造知识与技术、产业界生产财富，二者分别从技术供给、市场需求出发；科技服务机

表 3 “政-产-研-服”四螺旋模型创新协同度

维	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	平均
T_{ia}	0.2060	0.2041	0.2017	0.1998	0.2076	0.2150	0.2258	0.2310	0.2334	0.2398	0.2402	0.2368	0.2373	0.2404	0.2401	0.2239
T_{as}	0.1657	0.1650	0.1635	0.1640	0.1679	0.1725	0.1786	0.1813	0.1810	0.1837	0.1829	0.1823	0.1813	0.1789	0.1761	0.1750
T_{is}	0.1649	0.1578	0.1516	0.1472	0.1503	0.1538	0.1564	0.1594	0.1602	0.1668	0.1644	0.1595	0.1579	0.1611	0.1568	0.1579
T_{ga}	0.0224	0.0185	0.0165	0.0156	0.0181	0.0216	0.0285	0.0322	0.0351	0.0406	0.0445	0.0476	0.0489	0.0497	0.0486	0.0326
T_{gi}	0.1373	0.1333	0.1296	0.1269	0.1309	0.1358	0.1438	0.1488	0.1524	0.1638	0.1668	0.1661	0.1663	0.1721	0.1710	0.1497
T_{gs}	0.0612	0.0593	0.0580	0.0578	0.0583	0.0603	0.0638	0.0669	0.0676	0.0739	0.0780	0.0813	0.0834	0.0853	0.0832	0.0692
T_{ias}	0.2249	0.2215	0.2160	0.2143	0.2202	0.2268	0.2359	0.2414	0.2432	0.2490	0.2485	0.2453	0.2445	0.2443	0.2409	0.2344
T_{gia}	0.1030	0.0973	0.0931	0.0915	0.0983	0.1067	0.1221	0.1307	0.1366	0.1486	0.1554	0.1523	0.1577	0.1644	0.1650	0.1282
T_{gas}	0.0537	0.0485	0.0444	0.0442	0.0467	0.0516	0.0599	0.0648	0.0672	0.0743	0.0805	0.0863	0.0897	0.0912	0.0887	0.0661
T_{gis}	0.1687	0.1626	0.1565	0.1525	0.1543	0.1583	0.1633	0.1680	0.1702	0.1804	0.1823	0.1816	0.1814	0.1840	0.1786	0.1695
T_{gias}	0.1249	0.1183	0.1116	0.1106	0.1160	0.1246	0.1396	0.1483	0.1534	0.1653	0.1735	0.1731	0.1795	0.1836	0.1805	0.1469

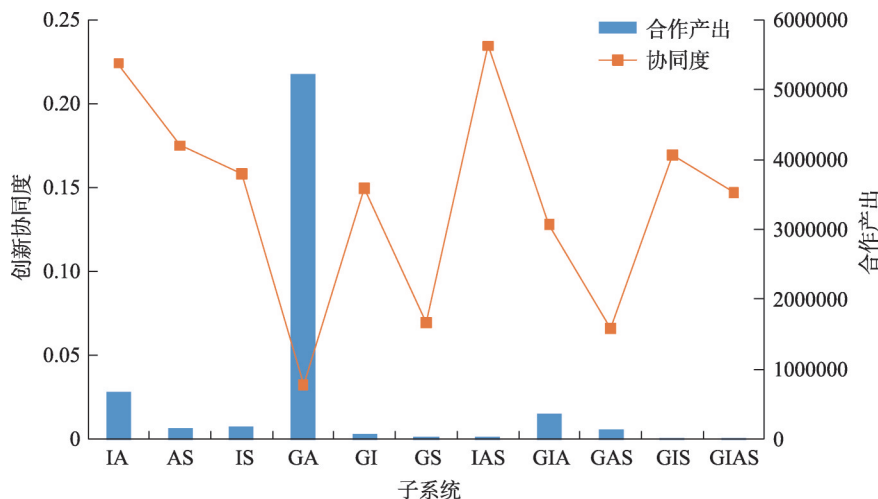


图 4 四螺旋系统的合作产出与创新协同度

构则负责为技术和市场之间提供中介桥梁,促成创新成果在产业的转化应用。受内生需求驱动,我国“产-研-服”子系统(IAS)已经体现出“螺旋”型的协同发展机制。

(3) 政府资助未能明显提升创新协同度,产业界对协同度的提升作用明显。“政-研”(GA)、“政-服”(GS)的创新协同度都相对较低。但是,当有产业界加入时,政府合作系统的创新协同度居于中上水平,这从图4中GI、GIA、GIS、GIAS子系统的表现即可看出。

3.3.2 科技服务业有效发挥了螺旋作用

科技服务业(S)的参与,无一例外地提升了

其他各创新主体组成的双螺旋系统的创新协同度,共同打造了更具有创新效率的三螺旋系统,如图5所示。以科技服务业为第四螺旋构成的“政-产-研-服”四螺旋系统(GIAS),有效提升了原“政-产-研”三螺旋系统(GIA)的创新协同度,如图6所示。由此可见,在四螺旋系统中,科技服务业与其余三支螺旋都能够高效协同,在系统中发挥螺旋的催化作用,对促进整个四螺旋系统的协同发展发挥了明显的正向作用。

3.3.3 四螺旋创新系统协同度快速增长

自2006年以来,我国四螺旋创新系统协同度(T_{gias})保持着快速的增长(图7)。

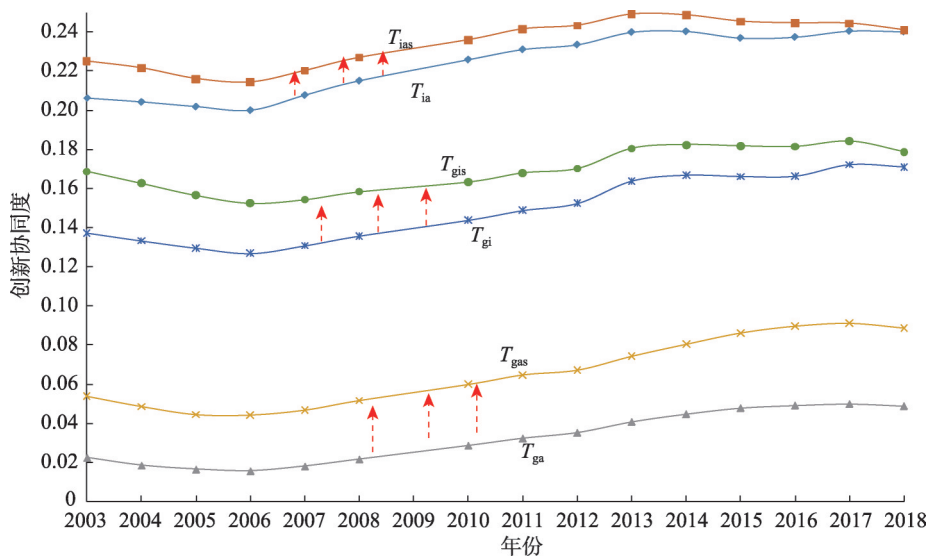


图5 科技服务业(S)提升双螺旋系统创新协同度

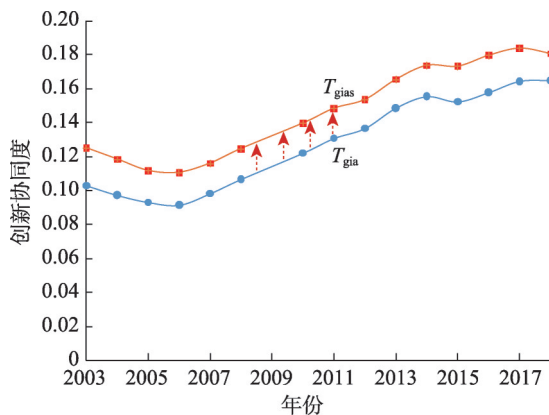


图6 科技服务业(S)提升三螺旋系统创新协同度

首先,四螺旋总体的协同度增长率最快,显示科技服务与政-产-研日益形成更有效的协同创新体系,科技服务已经比较深入地融入创新体系中。

其次,各螺旋主体的创新协同度间存在较大差异。一方面,“产-研-服”系统的创新协同度(T_{ias})最高,科技服务业已较好地融入产业界、科研界之间,在我国的科技研发创新(科研院所)和产业应用实施(公司企业)中发挥着重要的对接服务价值。另一方面,科技服务机构受政府部门资助的产出、高校科研机构与科技服务机构受政府部门资助的合作产出,协同度最低,这说明我国科技服务机构在高校科研机构与政府部门之间尚未发挥明显的衔接作用。究其原因,政府资助的科研产出往往属于国家科技重点或是前沿项目,或许当前我国科技服务机构还不能很好地服务于这类创新工作;同时,也可能因为前沿项目产出缺少可比较性,产业化与市场成熟度还不高,因此,科技服务机构介入的难度较大,不易推动其实现产业对接与落地。综

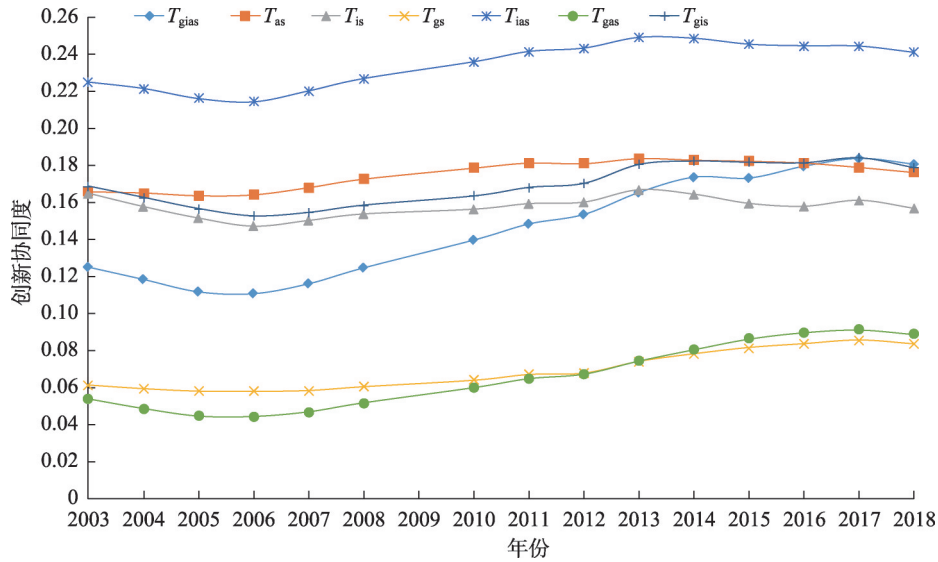


图7 科技服务业(S)创新协同度

上所述，这些情况可能正是科技服务机构未来更好发挥螺旋催化作用所需要重点加强之处。

基于互信息的四螺旋协同创新测度中的信息冗余反映了信息与资源整合的必要性，反映了各螺旋之间的互补融合蕴藏着新的创新可能性，其计量原理上属于非线性计量，有自身的动力学机制。基于信息熵的合作创新是对协同创新的完美追求。四支螺旋两两间需要均形成良性螺旋，四螺旋系统整体才能达到更高的创新协同度。互信息测度结果反映了当前我国四螺旋创新中的强项和短板，必须坚持问题导向，有的放矢，才能更好地推动四螺旋协同创新水平的提升。

对比当前四螺旋系统的创新绝对产出数量与互信息（图8）可见，近16年来“政-产-研-服”四螺旋系统的创新合作产出（GIAS）一直保持着指数形态的增长趋势（ $R^2=0.9729$ ），而互信息则呈现线性增长趋势（ $R^2=0.9112$ ），在某些年份还出现下滑，

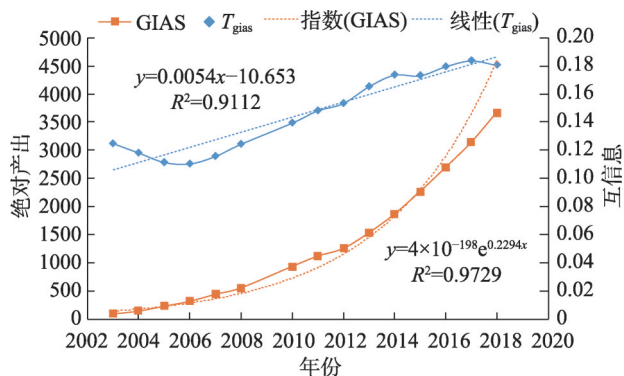


图8 四螺旋创新系统互信息与绝对产出

可见其中的协同机制尚有不足。

研究结果发现，我国四螺旋创新发展迅速，科技服务业与科研、产业界的协同合作已有较好成效，在科技创新与技术转移中发挥着纽带与桥梁作用。作为第四螺旋，科技服务业还发挥了“催化”作用，促进了系统整体创新协同度的提升。总体而言，我国四螺旋创新系统的协同度增长水平，与创新系统的规模增长水平仍然还不匹配，系统整体的创新效率仍有较大的上升空间，政府部门在四螺旋系统中的协同力可进一步加强。

4 结 语

在科技经济社会发展中，“政-产-研”三螺旋模型已不能完全代表所有的创新主体，本研究将三螺旋模型扩展为“政-产-研-服”四螺旋模型，并率先提出了以包括技术转移、信息咨询、知识产权、科技金融等服务功能的科技服务机构为第四螺旋；基于互信息和三螺旋算法，设计构建了四螺旋创新协同度计量指标 T_{gias} ，用以量化测度四螺旋主体之间的创新协同度，证实了科技服务机构参与协同创新的积极作用。本研究通过量化分析发现，科技服务机构加入“政-产-研”三螺旋结构并形成四螺旋结构后，全方位显著提升了“政-产”“政-研”“产-研”“政-产-研”既有的协同度，充分反映出科技服务机构作为第四螺旋对原有三螺旋模型和体系的催化和促进作用；“政-产-研-服”四螺旋的协同度在近十多年从总体上呈现稳步上升的趋势，其中，“产-研-服”的协同度表现最佳，“政-产-服”协同

度表现次之,“政-研-服”的协同度暂居最末。四螺旋之间的协同度越高,越有利于提高科技情报、智库咨询、技术转移、创业投资等方面工作的协同创新效率。

参 考 文 献

- [1] 中共中央、国务院关于构建更加完善的要素市场化配置体制机制的意见[EB/OL]. (2020-03-30) [2020-04-09]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2020/content_5503537.htm.
- [2] 中共中央、国务院关于新时代加快完善社会主义市场经济体制的意见[EB/OL]. (2020-05-11) [2020-05-18]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2020/content_5515273.htm.
- [3] Leydesdorff L, Etzkowitz H. Is there a fourth helix?[J]. *Science and Public Policy*, 2003, 30(1): 55-61.
- [4] 亨利·埃茨科威兹. 国家创新模式——大学、产业、政府“三螺旋”创新战略[M]. 周春彦, 译. 北京: 东方出版社, 2006: 236-237.
- [5] 吴卫红, 陈高翔, 张爱美. 基于状态空间模型的政产学研协同创新四螺旋影响因素实证研究[J]. *科技进步与对策*, 2018, 35(14): 22-29.
- [6] 杨敬华, 蒋和平. 农业科技园区创业与创新发展的四螺旋分析[J]. *科技与经济*, 2005, 18(2): 38-40.
- [7] 赵立雨, 任静. R&D创新活动中知识共享的四螺旋模型研究[J]. *图书情报工作*, 2010, 54(22): 66-69.
- [8] 金潇明. 产业集群知识共享的四螺旋结构模型[J]. *系统工程*, 2010, 28(1): 90-94.
- [9] 任怡. 加强“四螺旋”互动提高产学研合作中的知识转移效率[J]. *中国高校科技*, 2014(11): 40-41.
- [10] 张秀萍, 卢小君, 黄晓颖. 基于三螺旋理论的区域协同创新网络结构分析[J]. *中国科技论坛*, 2016(11): 82-88.
- [11] Carayannis E G, Campbell D F J. Triple helix, quadruple helix and quintuple helix and how do knowledge, innovation and the environment relate to each other?[J]. *International Journal of Social Ecology and Sustainable Development*, 2010, 1(1): 41-69.
- [12] 尹彦. 区域协同创新能力成熟度评价[J]. *统计与决策*, 2017(4): 62-66.
- [13] Kriz A, Bankins S, Molloy C. Readyng a region: Temporally exploring the development of an Australian regional quadruple helix[J]. *R&D Management*, 2018, 48(1): 25-43.
- [14] Höglund L, Linton G. Smart specialization in regional innovation systems: A quadruple helix perspective[J]. *R&D Management*, 2018, 48(1): 60-72.
- [15] McAdam M, Miller K, McAdam R. Understanding quadruple helix relationships of university technology commercialisation: A micro-level approach[J]. *Studies in Higher Education*, 2018, 43(6): 1058-1073.
- [16] 黄瑶, 王铭. “三螺旋”到“四螺旋”: 知识生产模式的动力机制演变[J]. *教育发展研究*, 2018, 38(1): 69-75.
- [17] 习近平. 为建设世界科技强国而奋斗——在全国科技创新大会、两院院士大会、中国科协第九次全国代表大会上的讲话[EB/OL]. (2016-05-31). http://news.xinhuanet.com/politics/2016-05/31/c_1118965169.htm.
- [18] 中共中央、国务院印发《国家创新驱动发展战略纲要》[EB/OL]. (2016-05-19). http://www.gov.cn/zhengce/2016-05/19/content_5074812.htm.
- [19] 国务院关于加快科技服务业发展的若干意见[EB/OL]. (2014-10-28). http://www.gov.cn/zhengce/content/2014-10/28/content_9173.htm.
- [20] 国家统计局关于印发《国家科技服务业统计分类(2018)》的通知[EB/OL]. [2018-12-14]. http://www.stats.gov.cn/tjgz/tzgb/201812/t20181218_1640075.html.
- [21] Swar B, Khan G F. An analysis of the information technology outsourcing domain: A social network and Triple helix approach[J]. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2013, 64(11): 2366-2378.
- [22] Priego J L O. A Vector Space Model as a methodological approach to the triple helix dimensionality: a comparative study of Biology and Biomedicine Centres of two European National Research Councils from a webometric view[J]. *Scientometrics*, 2003, 58(2): 429-443.
- [23] Sun Y, Negishi M. Measuring the relationships among university, industry and other sectors in Japan's national innovation system: a comparison of new approaches with mutual information indicators[J]. *Scientometrics*, 2010, 82(3): 677-685.
- [24] 许海云, 齐燕, 岳增慧, 等. 三螺旋模型在协同创新管理中的计量方法和应用研究[J]. *情报学报*, 2015, 34(3): 236-246.
- [25] Leydesdorff L. Synergy in knowledge-based innovation systems at national and regional levels: The triple-helix model and the fourth industrial revolution[J]. *Journal of Open Innovation: Technology, Market and Complexity*, 2018, 4(2): 16.
- [26] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. *The Bell System Technical Journal*, 1948, 27(3): 379-423.
- [27] Abramson N. *Information theory and coding*[M]. McGraw-Hill, 1963.
- [28] 叶鹰, 鲁特·莱兹多夫, 武夷山. 三螺旋模型及其量化分析方法研讨[J]. *中国软科学*, 2014(11): 131-139.
- [29] 徐冠华. 2003年我国科技政策的重点与方向[J]. *中国创业投资与高科技*, 2003(3): 4-7.

(责任编辑 魏瑞斌)