

---

# 科学与技术耦合效果评价

## ——科技互补效应和成本效应分析

卢雨婷<sup>1</sup> 周小亮<sup>21</sup>

(1. 福建社会科学院, 福建 福州 350001;

2. 福州大学 经济与管理学院, 福建 福州 350008)

**【摘要】:** 考虑到当前创新环境日益复杂化, 科学与技术耦合系统已成为一个受系统内外因共同影响而发生演化的开放系统。在为耦合系统构建状态空间模型的基础上, 通过求解该模型, 刻画科学技术化强度和技术科学化程度, 据此分析科学与技术互动产生的互补效应和成本效应, 评价 29 个省份的科学与技术耦合效果, 并测度地区科技发展所属耦合路径类型。研究表明, 不同省份推进科学技术化进程和技术科学化进程的差异性显著; 科学与技术耦合效果最佳并不能说明地区科技发展速度最快; 绝大多数省份的科技耦合路径表现为科技中立路径, 占比最小的路径为技术强势路径。基于不同省份的耦合情况差异, 提出针对性建议。

**【关键词】:** 科学与技术耦合 耦合效果评价 科学技术化 技术科学化

**【中图分类号】:** G301 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1001-7348(2021)10-0018-10

### 0 引言

科学与技术耦合已成为科学技术发展的重要途径, 也是实现科学、技术与经济深度融合的一大前提。2018 年 1 月 3 日, 李克强总理主持召开国务院常务会议强调, 不仅要重视基础科学研究, 还要力推应用技术创新, 以促进基础科学与应用技术的融通。然而, 目前科学、技术研究领域的“孤岛现象”仍较严重, 科学、技术研究成果仍倾向于以封闭且自我循环的方式产生, 在一定程度上抑制了科学与技术的融合发展。为此, 科学与技术耦合效果被逐步纳入相关部门科研考核评价体系。为完善科研考评体系, 中央出台了相关政策。全国人大十二届三次会议强调, 要推进协同创新, 加强创新载体和服务平台建设, 加快形成政府推动、市场主导、社会参与的创新服务支撑体系。为落实这一政策的引导作用, 应在注重科学、技术研究各自分工的基础上, 充分挖掘科学与技术耦合对科技和经济发展的促进作用。因此, 从科学与技术的性质及其面临的外部环境入手, 探讨科学与技术的互动效应, 并评价两者的耦合效果, 对加快基础科学与应用技术融合, 实施中长期目标导向的科研考核评价机制, 促进政府研发管理职能向创新服务职能转变, 均具有深远意义。

### 1 文献综述与理论基础

---

**作者简介:** 卢雨婷(1988-), 女, 福建福州人, 博士, 福建社会科学院助理研究员, 研究方向为技术进步与经济增长; 周小亮(1963-), 男, 江西永新人, 博士, 福州大学经济与管理学院教授、博士生导师, 研究方向为制度创新与经济增长。  
**基金项目:** 国家社会科学基金重点项目(16AZD002); 福建省社会科学规划项目(FJ2018C046); 福建省科技厅软科学项目(2019R0116)

## 1.1 文献综述

科学与技术耦合是科学、技术相互作用的产物，其中科学能够反映客观事物的本质和规律，技术是用以提高生产效率的手段和方法总和<sup>[1]</sup>。国内外学者从科学技术史视角探寻科学与技术耦合规律，并形成了一批理论成果，其涵盖的观点主要包括3类。一类观点认为，基于科学的创新是实现科学与技术耦合的前提条件<sup>[2]</sup>。第二类观点认为，基于技术的创新是实现两者耦合的前提条件，这种创新不仅可以通过改进、调整、组合已有技术实现，还能应用已有科学知识并结合相关技术知识进而促进技术发展<sup>[3-4]</sup>。随着后现代范式的莫立，这种创新模式逐渐成为创新的重要路径<sup>[5]</sup>。第三类观点认为，科学与技术耦合是具有应用导向的基础研究与具有基础理论背景的应用研究共同作用产生的，且科学技术化和技术科学化是实现科学与技术耦合的两个重要方面<sup>[6-7]</sup>。林苞和雷家骥(2014)也提出，基于科学的创新与基于技术的创新能共同驱动创新体系完善。科学与技术耦合在实现不同行业创新发展中存在结构性差异：基于科学的创新是促进抗生素行业发展的主导创新路径，而在半导体行业的创新发展中，创新由基于科学的创新逐渐向基于技术的创新转变<sup>[8]</sup>。杨中楷等(2016)强调，一般来说，科学、技术均衡发展有利于科学与技术耦合，如物理学领域，但并不意味着科学、技术非均衡发展就不利于科学与技术耦合，如化学、生理学等领域会出现技术学科发展较快的现象，这些领域的技术发展有利于促进科学与技术耦合。

在现有理论支撑下，出现了大量关于科学与技术耦合效果评价的实证研究。比较有代表性的评价方法是采用与专利、文献互引情况相关的指标评价耦合问题。如 Verbeek 等<sup>[9]</sup>、Guan 等<sup>[10]</sup>采用专利文献和非专利文献交叉引用的绝对数作为科学与技术耦合效果的替代指标，实证发现，科学与技术发生耦合的概率为 80%，且主要集中在生物化学、分子生物学、药理学、药剂学等特定 7%的技术领域，通讯、半导体、光学等领域发生耦合的情况较少见；吴菲菲等<sup>[11]</sup>研究发现，在化学、物理等学科领域，技术具有较高的网络中心性，其科学与应用技术在相互影响过程中也易发生跨领域转移；杜建等<sup>[12]</sup>建议采用基于专利的 ESI 高被引论文共被引聚类 and 基于论文的 OECD 三方专利耦合聚类两条路径，引导科学与技术耦合，从科学与技术交叉角度描绘全球创新前沿及其交叉结构。

上述方法主要从学科发展视角评价科学与技术耦合。随着科技创新不断复杂化，科学与技术耦合不仅可以表现为学科内部或学科之间的专利、文献互引产生的显性耦合，还可以表现为打破时间、空间界限发生的隐性耦合。为此，有学者通过构建科学与技术关联度指标探讨这一问题。如 Bernardes & Albuquerque<sup>[13]</sup>以单位科学的技术产出弹性为科学与技术耦合效果的替代指标，研究发现，发达国家和发展中国家的耦合效果较好，科学发展促进技术进步的门槛也较高，且科学的基础性作用更突出，欠发达国家的科学与技术耦合效果长期欠佳，基础科学研究环节也较薄弱；Gao<sup>[14]</sup>按科学与技术关系强弱聚类分析了中国各省份科学与技术耦合情况，并据此提出区域差异化的科技创新建议；董珏<sup>[15]</sup>考虑了科学与技术间的时间转化差异以及产出关联性与引用关联性等因素，将能够反映科学与技术耦合效果的指标扩展为 12 项，据此评估科学与技术相互转化效率；杜斌和徐飞<sup>[16]</sup>将论文与专利关联度指标作为耦合强度的替代指标，研究发现，高校的科学研究实力与技术创新能力之间存在正相关关系，具有高关联发展水平的高校能在较高水平科学研究基础上产生更具影响力的技术创新成果；樊霞和宋丽<sup>[17]</sup>以生物技术产业为例，采用专利技术组合分析方法，发现在基于科学的创新模式下，与美国、日本相比，中国生物技术产业在创新特征以及与产业技术能力的匹配度上差距较大。

以上研究均围绕科学与技术耦合的封闭系统展开，还有一类评价是通过构建计量模型探讨科学与技术耦合在开放系统中的评价问题。如 Zhao<sup>[18]</sup>通过构建联立差分方程模型实证探究纳米技术领域科学与技术的互惠依赖关系，发现纳米技术的发展依靠科学推动，而不是技术拉动或需求拉动，相关科学研究体系的完善是纳米技术发展的重要前提；Chaves<sup>[19]</sup>构建联立方程组模型探究科学与技术耦合在国家创新系统和健康创新系统中的表现，研究发现，发达国家和发展中国家在这两个系统中的表现均较好，而欠发达国家的耦合效果欠佳；陈锐等<sup>[20]</sup>从科学与技术交互视角，运用向量自回归模型、脉冲响应函数和方差分解方法，研究发现，科学—技术的交互效应与经济产出之间存在双向影响。

现有研究不仅评价了科学与技术的显性和隐性耦合问题，还评价了在封闭与开放系统中科学与技术的耦合问题。本研究认为，科学与技术互动不仅会产生互补效应，还会产生成本效应，且创新体系就是在一种效应抵消另一种效应的基础上不断得到

完善的<sup>[21]</sup>。因此，科学与技术耦合的实现不仅仅是错综复杂的非线性过程，还是不断演化的动态过程。科学与技术耦合系统是一个受系统内外因共同影响而发生演化的开放系统，有必要在区分影响耦合系统内外因的基础上，刻画科学技术化强度和技术科学化强度的演化情况，并采用科学技术化强度和技术科学化强度共同表征科学与技术的耦合状态。由于科学技术化强度和技术科学化强度是两个不可测控变量，因此本文将这两个变量分别并入两个可测控模型，构建包含科学、技术的投入与产出、人力资本与物质资本投入等因素在内的一组状态空间模型展开分析。

## 1.2 理论基础

依据学界对科学与技术及其耦合概念的理解，本文将科学、技术均看作一种社会现象，两者在相关因素作用下发生相互转化或互动融合形成的系统，即为科学与技术耦合系统。科学与技术在探索思维模式、探索过程、研究活动取向、存在形态、价值表现形式等方面具有互补性和异质性，不仅促使两者有相互融合的吸引力，也有相互排斥的倾向。

一方面，在特定历史背景下，科学与技术作为独立体，各自既是孤立的，又是静止的，但纵观科学技术发展史，科学与技术是在相互间紧密配合、相互转化、互动融合的倾向下发展的，且这一互动行为对两者的融合过程存在正面影响效应。另一方面，科学与技术的性质差异导致两者在融合过程中有相互排斥趋势，为促成两者融合付出的成本，即为科学与技术耦合成本。科学与技术的异质性对两者的融合过程存在负面影响效应。

除科学与技术的自身性质外，创新人才参与、创新资本投入、科技政策等均会对两者的融合过程产生影响。虽然科学与技术异质性产生的负面效应不可避免，但外部因素刺激不仅可以降低科学与技术异质性引发的负面效应，还能提高两者互补带来的正面效应。

综上，科学与技术互补的内生性作用以及创新人才参与、创新资本投入、科技政策扶持等因素的外生性作用，对科学与技术融合过程产生的正面影响效应，即为科学与技术互动产生的互补效应。此处将互补效应界定为，科学与技术的相互促进作用(互补关系)每增强 1%引起的效应水平变化。科学与技术异质的内生性作用以及创新资本不足、创新人才缺乏、科技政策弱视等因素的外生性作用，对科学与技术融合过程产生的负面影响效应，即为科学与技术互动产生的成本效应。此处将成本效应界定为，在考虑科学与技术异质性情形下，两者相互分离倾向每增强 1%引起的效应水平变化。科学与技术耦合效果由科学与技术互动产生的互补效应和成本效应两方面决定，且耦合是在一种效应抵消另一种效应的基础上实现的。

假定在图 1 中，科学与技术互动的互补效应用直线 A 表示，科学与技术互动的成本效应用直线 B 表示。图 1 表示在任意科学与技术互动程度下，效应均衡线 C 以下的效应水平均表现为成本效应，均衡线以上的效应水平均表现为互补效应。即使科学与技术互动程度较高，但若科学与技术的相互分离倾向较两者的相互促进倾向强，则两者的互动仍主要表现为成本效应，如图 1 的长方形 abcd 所示。互补效应越大，互动程度就越高。图 2 表示对于互动程度均衡线 D 而言，均衡线左侧的互动程度均表现为成本效应，均衡线右侧的互动程度均表现为互补效应。只有科学与技术互动程度超过均衡水平，两者的互动才会表现为互补效应，如图 2 的长方形 abcd 所示。互动程度越高，互补效应也越大。

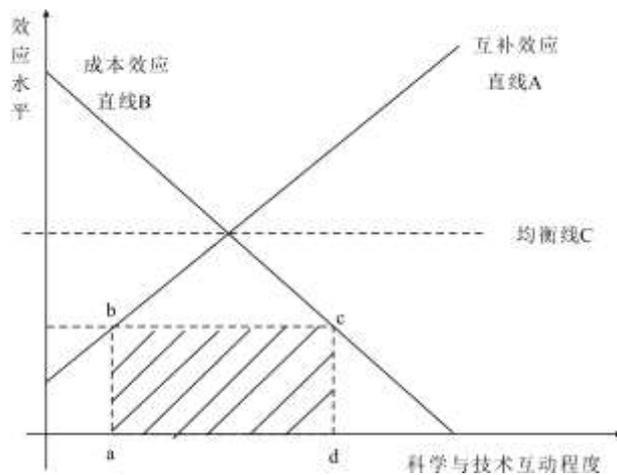


图1 固定效应水平下的成本效应

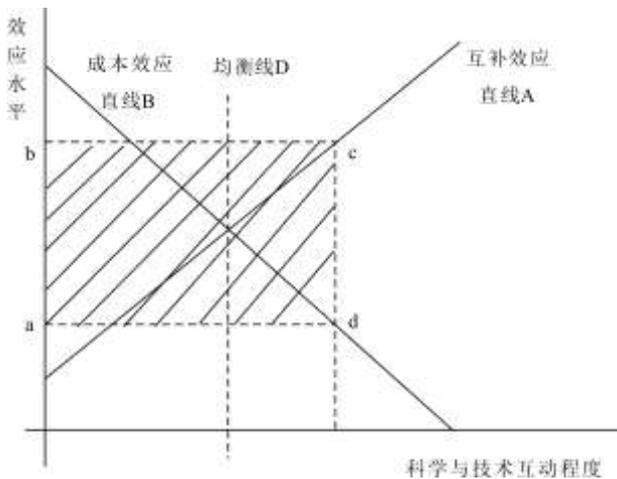


图2 固定科学与技术互动程度下的互补效应

## 2 研究设计

### 2.1 研究假设与模型构建

科学与技术耦合系统由科学技术化子系统(记为  $S_1$ )和技术科学化子系统(记为  $S_2$ )构成,且这两个子系统与科学系统、技术系统存在如图3所示的关系,互不包含且部分重叠。同时,假定:

(1) 不仅技术研究活动的物质资本投入和人力资本参与  $I_T$  会对技术产出  $T$  有影响,而且科学技术化进程也会影响技术产出  $T$ ; 不仅科学研究活动的资本投入  $I_S$  会对科学产出  $S$  有影响,而且技术科学化进程也会影响科学产出  $S$ 。

(2) 科学技术化强度  $X_T$  和技术科学化强度  $X_S$  均是不可观测变量,难以控制其变化过程。

(3) 科学技术化强度  $X_T(t)$  和技术科学化强度  $X_S(t)$  一方面会受各自前期状态  $X_T(t-1)$ 、 $X_S(t-1)$  影响,另一方面还会受地区人

口、贸易开放度等外界因素  $U$  干扰。

(4)  $S_1$  和  $S_2$  状态不具有连续性，呈离散化特点。 $t$  期  $S_1$  状态会受  $t-1$  期科学技术化过程影响而发生演化，并进一步对科学投入促进技术产出水平的提升过程产生增强效应； $S_2$  状态在系统内外因素影响下，会进一步对技术投入促进科学产出水平的提升过程产生增强效应。

为探究各子系统分别对耦合系统的作用，本文为两个子系统分别构建状态空间模型，以反映变量间的非线性关系。

式(1)为  $S_1$  的状态空间模型，表示  $t$  期技术产出水平不仅受  $t$  期  $S_1$  状态影响，还受  $t$  期技术投入水平影响。

$$\begin{cases} X_T(t) = A_T X_T(t-1) + B_T U_T(t-1) \\ T(t) = S(t) \cdot X_T(t) + C_T I_T \end{cases} \quad (1)$$

其中， $X_T(t)$  为  $t$  期具有可变影响效应的  $S_1$  状态矩阵； $A_T$ 、 $B_T$  分别是内生变量和外生变量系数矩阵； $C_T$  为单位资本投入的技术产出弹性矩阵，具有不变影响效应； $I_T$  为资本投入，可能包括参与技术研究的科学家与工程师数、投入技术研究的科技经费以及有技术开发机构的企业数。 $S_1$  的状态空间模型可界定为  $(A_T, B_T, C_T, X_T)$ ，由  $S_1$  系统的产出方程和状态方程构成。

同理，构建  $S_2$  的状态空间模型，如式(2)所示。

$$\begin{cases} X_S(t) = A_S X_S(t-1) + B_S U_S(t-1) \\ S(t) = T(t) \cdot X_S(t) + C_S I_S \end{cases} \quad (2)$$

其中， $X_S(t)$  为  $t$  期具有可变影响效应的  $S_2$  状态矩阵； $A_S$ 、 $B_S$  为实数矩阵； $C_S$  为单位资本投入的科学产出弹性矩阵，具有不变影响效应； $I_S$  为资本投入矩阵。 $S_2$  的状态空间模型可界定为  $(A_S, B_S, C_S, X_S)$ 。

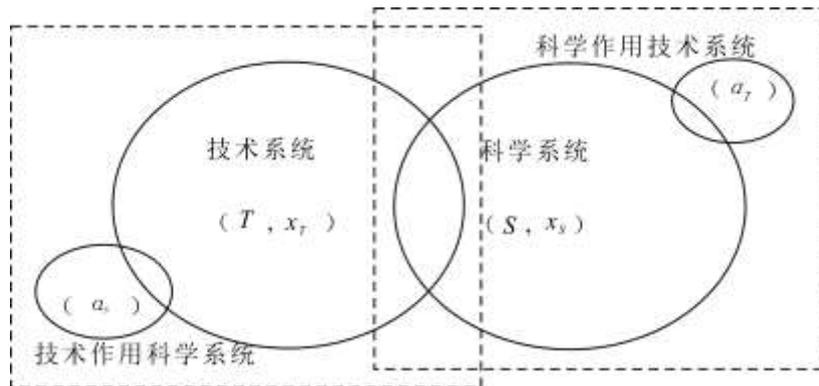


图3 科学系统、技术系统、科学技术化子系统与技术科学化子系统之间关系

## 2.2 耦合效果评价标准设定

假定变量  $u(t-1)$  外生于系统状态变化，设定  $\Delta x(t)$  为  $t$  期  $S_1$  或  $S_2$  状态值的平均变动百分比，可以表示为：

$$\begin{aligned} \Delta x(t) &= \sum_{i=2}^{t-1} \frac{x(t,i) - x(t,i-1)}{x(t,i-1)} \\ &= \sum_{i=2}^{t-1} \frac{[a_1 x(t-1,i) - a_2 x(t-1,i-1)] + [b_1 u(t-1,i) - b_2 u(t-1,i-1)]}{a_1 x(t-1,i) + b_1 u(t-1,i)} \end{aligned} \quad (3)$$

若  $b_1 u(t-1,i) - b_2 u(t-1,i-1) \approx 0$ , 则  $\Delta x(t)$  可以反映  $S_1$  或  $S_2$  状态受内生变量的影响情况, 且随着科学、技术产出增加, 存在以下两种情形: ①若  $\Delta x(t) \geq 0$ , 科学技术化或技术科学化强度逐渐增大, 表现为科技互补效应增大; ②若  $\Delta x(t) < 0$ , 科学技术化或技术科学化强度逐渐减小, 表现为成本效应增大。

本文将科学与技术耦合效果的表现形式划分为 4 类, 即技术化进程的互补效应 ( $\Delta x_t(t) > 0$ )、技术化进程的成本效应 ( $\Delta x_t(t) < 0$ )、科学化进程的互补效应 ( $\Delta x_s(t) > 0$ ) 和科学化进程的成本效应 ( $\Delta x_s(t) < 0$ )。互补效应意味着科学与技术之间存在相互促进作用, 成本效应则意味着两者融合过程中的排斥倾向产生了互动成本。

科学与技术耦合效果是由两者互动产生的互补效应和成本效应决定的。成本效应意味着科学与技术存在分离倾向, 会削弱科学与技术的互补效应, 减弱两者的耦合效果。为进一步评价科学与技术的耦合效果, 根据技术化进程和科学化进程的互补效应或成本效应变动, 本文将科学与技术耦合效果划分为 5 个等级, 即优质耦合、良好耦合、中级耦合、初级耦合和无耦合, 如表 1 所示。

表 1 科学与技术耦合效果等级划分

耦合效果等级	科学技术化进程	技术科学化进程
优质耦合	互补效应增大	互补效应增大
良好耦合	互补效应增大	互补效应减小
	互补效应减小	互补效应增大
	互补效应增大	成本效应减小
	成本效应减小	互补效应增大
中级耦合	互补效应增大	成本效应增大
	成本效应增大	互补效应增大
	互补效应减小	成本效应减小
	成本效应减小	互补效应减小
初级耦合	成本效应增大	成本效应减小
	成本效应减小	成本效应增大
	互补效应减小	成本效应增大
	成本效应增大	互补效应减小
无耦合	成本效应增大	成本效应增大

## 2.3 耦合的进一步探讨

在构建科学与技术耦合效果评价等级的基础上,为进一步明确科学与技术的发展路径,本文继续探讨耦合系统的状态演化过程。为分析状态演化的主导路径,首先界定耦合强度的概念,即技术化强度与科学化强度之差( $x_T(t) - x_S(t)$ )。记耦合强度的临界值为  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$ ,且  $\gamma_2 < \gamma_1$ 。若  $x_T(t) - x_S(t) > \gamma_1$ ,则演化路径以科学技术化为主导,形成科学强势耦合路径;若  $x_T(t) - x_S(t) < \gamma_2$ ,形成技术强势耦合路径;若  $\gamma_2 \leq |x_T(t) - x_S(t)| \leq \gamma_1$ ,形成科技中立耦合路径。具体地,科学强势耦合路径是指在特定时段内,科学与技术发展主要通过结合已有知识基础,并依赖于新技术发明的创新过程。相反地,技术强势耦合路径则反映科学与技术发展主要依赖于新科学发现的创新过程。若时间段足够长或对某些高科技产业而言,科学与技术耦合的发生需要同时依赖新科学发现和新技术发明,此时科学与技术发展表现为科技中立路径。

## 3 案例分析

由于重庆和西藏自治区数据不全,不纳入统计,因此本文以我国内地 29 个省份为研究对象,采用前文设计的评价方法探讨科学与技术耦合效果问题。

### 3.1 数据来源

#### 3.1.1 产出指标

关于科学变量的选取,本文采用国内外科技论文发表量、科技著作量以及研究与发展课题(项目)数 3 个指标作为科学的衡量指标。国内外学术论文发表能够体现全人类共同财富增量,符合科学发现特征;著作也是科学创新累积的重要成果,能够体现人类知识财富累积状况;研发课题(项目)是开展科学创新的重要方式,一般而言,研发课题(项目)数越多,科学创新活动就越多。

关于技术变量的选取,本文采用发明、实用新型、外观设计专利数作为技术的衡量指标。申请授权后的专利便会受到法律保护,具有独享性,具备技术特征。但通用技术属于公共物品,不是本文关注重点。

#### 3.1.2 投入指标

本研究以科学家与工程师数作为科学、技术人员投入的替代指标,以 R&D 经费内部支出作为科学、技术研究资本投入的替代指标,这两类数据均由大中型工业企业、科研院所和高等院校 3 类机构的投入份额构成。

首先,由于 1993—2000 年与 2001—2009 年对科学、技术人员统计口径不一致,因此有必要对 1993—2000 年及 2010 年以后参与科学、技术研究的科学家、工程师数进行估计。由于 2008、2009 年《中国科技统计年鉴》同时统计了大中型工业企业和规上工业企业的科学家、工程师数和 R&D 人员数,本文采用式(4)对 1993—2000 年及 2010 年以后的大中型工业企业科学家、工程师数进行估计。

$$X \text{ 年大中型工业企业数据} = \frac{2009 \text{ 年大中型工业企业数据}}{2009 \text{ 年规上工业企业数据}} * X \text{ 年规上工业企业数据} \quad (4)$$

由于 1993—2016 年科研院所和高等院校的科学家、工程师数统计口径一致，因此不需要对其进行估计。不论是大中型工业企业还是科研院所、高等院校，其研究人员均由科学研究人员和技术研究人员构成，差异在于人员占比。假定大中型工业企业、科研院所和高等院校的科学、技术研究人员占比分别为 2：8、2：8 和 8：2，由此可以估计得到参与科学与技术研究的科学家与工程师数。

其次，有必要对科学、技术研究活动的 R&D 经费内部支出进行估计。由于 2008、2009 年《中国科技统计年鉴》同时统计了大中型工业企业和规上工业企业的 R&D 经费内部支出，本文采用式 (4) 对 1993—2007 年及 2011 年以后的大中型工业企业 R&D 经费内部支出进行估计。科研院所和高等院校的 R&D 经费内部支出由基础研究、应用研究和试验发展三大研发活动经费支出构成。徐庆瑞<sup>[22]</sup>指出，基础研究和试验发展分别围绕科学研究活动、技术创新活动展开，而应用研究则同时包含科学研究和技术研究两种创新活动。假定在应用研究的经费投入中，科学、技术研究活动的经费投入比例各自为 50%，科学研究经费包含了所有基础研究经费投入，技术研究经费包含了全部试验发展经费投入。据此，可以估计得到科学、技术研究的 R&D 经费内部支出。

此外，对于科学研究而言，参与研究活动的研究生数一定程度上也能反映科学研究投入水平；对于技术研究而言，有技术开发机构的企业数某种程度上也能反映地区技术创新水平。

### 3.1.3 外生变量选取

外生变量是指对系统状态具有外生影响的变量，可用于控制除内生变量外的外部因素变化。本文外生变量包括人口数、固定资产投资额和开放度。

卢馨<sup>[23]</sup>研究发现，创新资本投入到获得科技产出的 1 年滞后期相较于 2 年滞后期，滞后期取 1 年时相关系数更为显著。这与逢淑媛等<sup>[24]</sup>、梁莱歆等<sup>[25]</sup>的研究结论一致，因此本文假定从创新资本投入到取得创新产出的滞后期是 1 年。本文数据来源于 1994—2017 年《中国统计年鉴》和《中国科技统计年鉴》。

## 3.2 科学与技术耦合效果评价

在求解状态空间模型的基础上，计算得到  $t-1$  期和  $t$  期两系统的状态值，即技术化强度  $x_t(t)$ ,  $x_t(t-1)$  和科学化强度  $x_s(t)$ ,  $x_s(t-1)$ 。系统状态值  $x(t)$  和  $x(t-1)$  的变动特征包括强度均提高、强度均减弱以及强度同时出现提高和减弱 3 种情形，由此可分别将技术化子系统和科学化子系统的状态变动特征划分为 3 类，如表 2 所示。

### 3.2.1 科学技术化过程分析

第一类， $S_t$  系统状态特征表现为  $t-1$  期和  $t$  期科学技术化强度均提高。一方面，以浙江、河南、四川等地区为代表的技术化进程互补效应不断增强 ( $x_t(t-1) > 0$ ,  $x_t(t) > 0$ )，表明这些地区的科学发展能够有效促进技术创新能力提升；另一方面，以福建、广西为代表的科学技术化进程成本效应逐渐减小 ( $x_t(t-1) < 0$ ,  $x_t(t) < 0$ )，即科学技术化强度为负且不断降低。当前，福建、广西的科学、技术研究活动仍存在显著“孤岛现象”，校企合作进程推进缓慢，导致科学与技术互动的成本效应仍覆盖互补效应，科学促进技术的门槛较高。但从成本效应逐渐减小看，科技人才不断引入以及资本投资等科技政策不断落实已有效降低科学与技术融合发生的成本。

第二类， $S_t$  系统状态特征表现为  $t-1$  期和  $t$  期科学技术化强度均减弱。一方面，以吉林、江苏等地区为代表的科学技术化进程互补效应不断减小，这些地区技术水平不断提高使得科学促进技术的门槛也不断提高；另一方面，以河北、贵州等地区为代表的科学技术化进程成本效应增大，即科学技术化强度为负且不断降低，同时，以云南、辽宁为代表的科学技术化进程成本效应逐渐增大，且互补效应不断减小。河北、贵州、云南等地区的科学水平逐渐落后于其技术水平，使得科学促进技术的门槛不

断提高，科学与技术互动成本也逐渐增加。

第三类,  $S_1$  系统状态特征表现为  $t-1$  期和  $t$  期科学技术化强度同时出现提高和减弱两种情形, 科学技术发展出现集群差异化, 并表现为 4 种情形。第一种情形是以北京、黑龙江为代表的技术化进程成本效应在  $t-1$  期减小, 并在  $t$  期增大; 第二种情形是以山东、湖北为代表的技术化进程互补效应在  $t-1$  期减小, 并在  $t$  期增大; 第三种情形是以广东为代表的互补效应和成本效应均减小; 第四种情形是以陕西和甘肃为代表的科学与技术的互补效应和成本效应均增大。上述情形反映地区科学对技术的影响效应仍不稳定, 地区科技发展出现了内部分化, 部分地区科学的影响门槛提高了, 另有部分地区科学的影响门槛降低了。这可能是由不同领域科技差异化发展引起的。

表 2  $t-1$  期与  $t$  期技术化强度变化 3 类趋势

$S_1$ 系统状态趋势	省份	$x_T(t-1)$	$x_T(t)$	互补效应	成本效应
t-1 期和 t 期科学技术化强度提高	浙江、上海、四川、河南、山西、湖南	>0	>0	增大	无
	福建、广西、江西	<0	<0	无	减小
t-1 期和 t 期科学技术化强度减弱	吉林、江苏、内蒙古	>0	>0	减小	无
	河北、贵州、天津	<0	<0	无	增大
t-1 期和 t 期科学技术化强度同时出现提高和减弱的情况	云南、辽宁			减小	增大
	北京、黑龙江、安徽	<0	<0	无	减小/增大
	山东、湖北、海南	>0	>0	减小/增大	无
	广东	>0	<0	减小	减小
	陕西	<0	>0	增大	增大
	甘肃、青海、宁夏、新疆	>0	<0	增大	增大

### 3.2.2 技术科学化过程分析

技术科学化子系统的系统状态也可以分为 3 类, 如表 3 所示。

第一类,  $S_2$  系统状态特征表现为  $t-1$  期和  $t$  期技术科学化强度均提高。以天津、河北等地区为代表的科学化进程互补效应增大 ( $x_s(t-1) > 0, x_s(t) > 0$ ), 表明这些地区的技术创新能够有效提高科学产出水平。

第二类,  $S_2$  系统状态特征表现为  $t-1$  期和  $t$  期技术科学化强度均减弱。以山东、河南等地区为代表的科学化进程成本效应增大 ( $x_s(t-1) < 0, x_s(t) < 0$ ), 表明这些地区的技术水平逐渐落后于其科学水平, 使得技术促进科学的门槛不断提高, 且科学与技术互动活动逐渐减少。

第三类,  $S_2$  系统特征表现为  $t-1$  期和  $t$  期技术科学化强度同时出现提高和减弱两种情况。以北京、浙江为代表的科学化进程在  $t-1$  期逐渐减缓, 在  $t$  期逐渐加快。在  $t-1$  期和  $t$  期, 上述地区技术促进科学的门槛变化方向存在差异, 即地区科技发展出

现了内部分化，部分地区技术影响门槛提高了，另有部分地区技术影响门槛降低了。这可能是由不同领域科技差异化发展引起的。

表 3t-1 期与 t 期科学化强度 3 类趋势

$S_2$ 系统状态趋势	省份	$x_s(t-1)$	$x_s(t)$	互补效应	成本效应
t-1 期和 t 期技术科学化强度提高	天津、河北、山西、安徽、湖北、江苏、湖南、福建、广东、广西、四川、贵州、黑龙江、吉林	>0	>0	增大	无
t-1 期和 t 期技术科学化强度减弱	内蒙古、上海、河南、山东、辽宁、云南、江西、陕西、甘肃、海南、青海、宁夏、新疆	<0	<0	无	增大
t-1 期和 t 期技术科学化强度同时出现提高和减弱的情况	北京	>0	>0	减小/增大	无
	浙江		>0	减小/增大	增大

### 3.2.3 科学与技术耦合效果评价

山西、湖南、四川的科学与技术耦合效果最好，其技术化进程和科学化进程的互补效应均增大。而科学与技术创新程度较高的江苏、福建、吉林等地区，其科学与技术耦合效果仅呈现为良好耦合，在技术化进程和科学化进程中，一项进程的互补效应增大，另一项进程的成本效应则在减弱。这是因为，虽然山西、湖南、四川的科学技术发展并不是最快的，但凭借其科学的快速累积及其对技术开发的驱动，现有科学、技术水平在当前产业化状态下，科学与技术之间的距离逐渐缩短，进而实现有效融合。江苏、福建、吉林等地区虽然也很重视科学、技术研发活动的开展，但科学技术转化平台构建仍不能完全适应现有科学技术水平，在探寻科学与技术耦合的新增长点过程中，转化平台构建仍需进一步加强。

同时，科技创新程度较高的上海，其科学技术互动仅表现为中级耦合，技术化进程的互补效应增大，而科学化进程的成本效应却减小。这是由于，虽然上海的科学技术发展很快，但当前科学技术转化平台仍不能适应科学技术化和技术科学化的推进要求，导致其创新水平提高拉大了科学与技术之间的距离。与上海同为中级耦合效果的天津、河北、贵州等地区，其技术化进程的成本效应和科学化进程的互补效应均增大。一方面，在技术化进程中，上述地区的科学与技术发展存在分离倾向，导致产业化水平较低；另一方面，科学化进程脱离了产业化轨道，使得上述地区难以模仿上海快速实现产业转型。

科学与技术耦合效果呈现初级耦合状态的省份包括内蒙古、青海、宁夏、新疆等地区。上述地区不仅科技发展较为落后，而且其科技发展主要依赖单一科学或技术研究部门的创新模式，导致科学与技术发展易出现脱钩现象。

此外，部分地区技术化进程和科学化进程可能出现多重效应叠加现象。如北京的科学与技术发展呈现的效应具有不确定性，不仅技术化进程的成本效应可能增大或减小，而且科学化进程的互补效应也可能增大或减小，因此北京的科学与技术耦合效果可能由良好耦合状态演变为初级耦合状态，也可能由初级耦合状态演变为良好耦合状态。对于浙江而言，科学与技术耦合效果可能由优质耦合状态演变为中级耦合状态，也可能由中级耦合状态演变为优质耦合状态。耦合效果之所以存在动态演变过程，是因为在当前国家政策提倡科学与技术相互融合的背景下，随着各产业不断转型升级，地区产业结构的差异性导致科学与技术互动在不同产业所处周期可能存在差异，不同地区不同产业的科学与技术耦合效果也会存在差异。

### 3.3 耦合的进一步实证分析

本文进一步探讨不同省份所属的耦合路径类型，首先求取临界值  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$ ，包括以下步骤：①依据  $[\sum_{i=1}^n (x_1(t,i) - x_2(t,i))] / n$  的取值，将 29 个省份划分为两组，分别为  $[\sum_{i=1}^n (x_1(t,i) - x_2(t,i))] / n < 0$  和  $[\sum_{i=1}^n (x_1(t,i) - x_2(t,i))] / n > 0$  和  $[\sum_{i=1}^n (x_1(t,i) - x_2(t,i))] / n < 0$  组中，剔除强度最高省份和强度最低省份后，求得该组平均耦合强度  $\bar{x}(t)$ ，即为  $\gamma_1$  的取值， $\gamma_1(t) = -156.00, \gamma_1(t-1) = -367.80$ ，③在  $[\sum_{i=1}^n (x_1(t,i) - x_2(t,i))] / n > 0$  组中，剔除强度最高省份和强度最低省份后，求得该组平均耦合强度  $\bar{x}(t)$ ，即为  $\gamma_2$  的取值， $\gamma_2(t) = 3880.10, \gamma_2(t-1) = 4042.80$ 。

依据上文对耦合路径的判定准则，可以得到 29 个省份的耦合路径类型。由表 4 可知，各省份科学与技术耦合路径存在两个特征。

(1) 62% 的省份耦合路径表现为科技中立路径，其中东部地区省份占比较高，为 26.92%，其次是中部地区，占比为 23.08%，最小的是西部地区，占比为 16%。科学与技术耦合表现为科学强势路径和技术强势路径的省份占比分别为 27% 和 23%，即技术强势路径的省份占比最小，如表 5 所示。一般地，科学与技术互动发展的初始阶段主要表现为技术对科学的推动，后来则表现为科学对技术的推动。科学在技术上的应用是从市场化制度开始的<sup>[26]</sup>，市场化制度的完善解放了人们的思想，提高了人们对物质需求的消费欲望。因此，为增加生产环节的产品供给，提高技术水平的需求就变得更迫切，从而加快了科学对技术的推动作用。对东部地区而言，较为完善的市场化制度使得科学与技术互动更为频繁，但在发展中国家国情背景下，政策导向驱使中国科学与技术互动发展较为均衡，即耦合路径表现为科技中立路径的省份较多。同时，中国市场化制度的不断完善也刺激了科学在技术上的应用，由此提高了科学强势路径占比。

(2) 绝大多数省份的科技耦合路径较为稳定，而广东、江西和安徽 3 省在 t-1 期和 t 期的耦合路径存在差异，科技发展路径较不稳定。广东的科技在 t-1 期表现为科学强势路径，在 t 期则表现为科技中立路径；江西的科技在 t-1 期表现为技术强势路径，在 t 期则表现为科技中立路径。因此，科学与技术发展在广东、江西内部存在有效的周期性互动。这一实证结果也证实了科学对技术的推动是从市场化制度开始的。广东更为完善的市场化制度促进了科学对技术的推动作用，生产消费水平较为落后的江西，其科技互动更多表现在第一层面上，即技术对科学的推动，因此上述两个地区 t-1 期的主导耦合路径表现形式不同。不稳定的科技发展路径表明广东、江西的科技互动较为紧密，但不同经济环境导致驱动科技发展的主导路径不同。

## 4 结论与建议

### 4.1 研究结论

随着经济社会环境日益复杂，科学与技术耦合系统已成为一个受系统内外因共同影响而演化的开放系统，且耦合系统状态在系统内外因共同影响下会产生多变量控制问题(难测控问题)，因此本文为耦合系统构建了状态空间模型。通过模型求解，对中国内地 29 个省份的科学技术化强度和技术科学化强度进行表征，从这两方面评价科学与技术的耦合效果，并测度各地区科学与技术发展所属的耦合路径类型。本文得出以下结论：

(1) 不同省份的科学技术化进程和技术科学化进程演化效应差异化显著。在科学技术化进程中，各省份科学与技术耦合表现出的互补效应和成本效应差异化较为均衡；在技术科学化进程中，各省份科学与技术耦合主要表现为互补效应增大或成本效应增大。

表 4 科学与技术耦合路径判定

省份(市)		$\gamma_1(t)$	$\gamma_2(t)$		$\gamma_1(t-1)$	$\gamma_2(t-1)$	耦合路径类型
-------	--	---------------	---------------	--	-----------------	-----------------	--------

北京	-20.20			-15.59			
天津	-36.28			-36.96			
江苏	339.67			339.34			
浙江	254.21			276.92			
山东	623.21			2607.60			
海南	47.81			47.92			
吉林	214.99	-756.00	3880.10	217.68	-367.90	4042.80	科技中立
山西	-80.20			-81.86			
黑龙江	-306.87			-307.41			
湖北	-75.69			-72.22			
湖南	-1.99			16.26			
甘肃	-206.12			-302.78			
陕西	71.26			188.32			
四川	38.51			43.99			
福建	-1790.60			-1875.20			
河北	-35367	-756.00	3880.10	-33967	-367.90	4042.80	技术强势
广西	-2711.30			-2744.20			
贵州	-1575.60			-1587.30			
辽宁	7209.97			7170.83			
上海	18724.30			18574			
河南	1714368.00	-756.00	3880.10	1703303	-367.90	4042.80	科学强势
云南	6631.93			6624.24			
内蒙古	4518.31			4603.42			
广东	-102.28			4423.05			
江西	-226.95	-756.00	3880.10	-479.26	-367.90	4042.80	多种路径并存
安徽	-1939.60			1940.20			

表 5 东、中、西部 3 类耦合路径占比 (%)

路径	东部地区	中部地区	西部地区
科技中立路径	26.92	23.08	16
技术强势路径	7.69	7.69	7.69
科学强势路径	11.54	7.69	7.69

(2) 科学与技术之间发生优质耦合并不意味着地区科技发展最快，如湖南、四川等。虽然江苏、福建、天津、上海等地区科技发展速度较快，但科学与技术耦合仅达到良好或一般程度。一些地区不同产业交替更新促使其产业结构不同，科学与技术互动在不同产业所处周期也可能存在差异，使得不同地区不同产业的科学与技术耦合出现多重效应叠加现象，如北京等。

(3) 大多数省份的科学与技术耦合路径表现为科技中立路径，其中东部省份比例较高，其次是中部省份，最小的是西部省份。科学与技术耦合表现为科学强势路径和技术强势路径的省份占比分别为 27%和 23%，即技术强势路径的省份占比最小。绝大多数省份的科学与技术耦合路径较为稳定，而广东、江西和安徽 3 省在 t-1 期和 t 期的耦合路径存在差异，科技发展路径较不稳定。

#### 4.2 建议

(1) 对于科学化进程表现为成本效应增大的省份，如上海、浙江、辽宁、海南、山东等，政府应通过转变科研政策导向，消解科学、技术研究活动分离倾向。一方面，政府需要调整研发投入结构，提高科学研究在 GDP 中的比重，充分发挥科学研究对技术突破与创新增长的支撑作用；另一方面，从人力资本投入着手，为科研人员提供更多设备、资金支持，提高科研人员的研究热情。

(2) 对于科学化进程表现为互补效应减小的省份，如浙江、北京，政府应制定更有针对性的科研和产业政策，进一步打通科学研究与技术研究联系的纽带，使科学研究与相关产业(企业)的对接模式更多元化，提高科学研究成果在科技成果产业化中的利用效率。

(3) 对于技术化进程表现为互补效应减小的省份，如吉林、江苏、内蒙古、辽宁、广东等，政府应充分考虑不同地区(高校、科研院所)科学研究特点，提高科学研究与先进技术的耦合程度，进一步提升企业技术再造和自主创新水平。为提高企业整体科研实力和创新水平，科研投入政策应围绕优势基础学科制定，依托各地区(高校、科研院所)科研优势和优势基础学科，尽可能使有限资源利用效率最大化，发挥优势学科与企业技术吸收能力的互补作用。同时，政府应在打通科学研究与技术升级的连接渠道中发挥重要作用，为实现突破式创新与产业转型升级奠定基础。

(4) 对于技术化进程表现为成本效应的省份，如福建、天津、河北、广东、辽宁、甘肃等，政府应着手巩固高校、科研院所与企业之间的沟通平台，制定相关科研政策，鼓励企业与相关基础学科带头人建立长期合作关系，从而有效降低企业获取论文、实验报告等书面科技成果的成本，也能够帮助企业快速高效吸收、运用前沿知识，激发企业自主创新热情，提高科学研究成果向产业化生产转化的速度。

#### 4.3 研究展望

当然，本文还存在可以继续深入研究的地方。由于不同类型产业在科学与技术耦合中的职责和作用各不相同，科学与技术耦合度较高的产业要充分发挥政策性带头参与和示范作用，包括生物化学、分子生物学、药理学、药剂学等产业，同时，鼓励和引导耦合度较低产业积极挖掘科学与技术耦合潜力。因此，科学与技术耦合环节的细化不仅可以从地区层面着手，还能进

---

一步从产业层面着手。

**参考文献:**

- [1] AGHION P, HOWITT P. Research and development in the growth process[J]. *Journal of Economic Growth*, 1996, 1(1): 49-73.
- [2] BUSH V. *Science: the endless frontier*[M]. Washington D C: National Science, 1945.
- [3] 巴萨拉. 技术发展简史[M]. 周光发, 译. 上海: 复旦大学出版社, 2000.
- [4] MUNOS B. Lessons from 60 years of pharmaceutical innovation[J]. *Nature Reviews Drug Discovery*, 2009, 8(12): 959-967.
- [5] 马琳. 海德格尔论现代性纪元中科学与技术逆转的关系[J]. *学术月刊*, 2015, 47(6): 42-50.
- [6] 刘则渊, 陈悦. 新巴斯德象限: 高科技政策的新范式[J]. *管理学报*, 2007, 4(3): 346-353.
- [7] 毛建儒, 王颖斌. 论文艺复兴与科学技术发展的“隐路径”[J]. *自然辩证法研究*, 2012, 28(12): 80-85.
- [8] 林苞. 科学—技术的汇合与分离: 演化的视角[J]. *科学学研究*, 2014, 32(7): 970-975.
- [9] VERBEEK A, DEBACKERE K, LUWEL M, et al. Linking science to technology: using bibliographic references in patents to build linkage schemes[J]. *Scientometrics*, 2002, 54(3): 399-420.
- [10] GUAN J C, HE Y. Patent-bibliometric analysis on the Chinese science-technology linkages[J]. *Scientometrics*, 2007, 72(3): 403-425.
- [11] 吴菲菲, 黄鲁成, 石媛媛. 基于文献和专利相互引用的科学与技术关系分析[J]. *科学学与科学技术管理*, 2013, 34(10): 13-20.
- [12] 杜建, 孙轶楠, 李永洁, 等. 从科学—技术交叉处识别创新前沿: 方法与实证[J]. *情报理论与实践*, 2019, 42(1): 94-99.
- [13] BERNARDES A T, ALBUQUERQUE E. Cross-over, thresholds, and interactions between science and technology lessons for less-developed countries[J]. *Research Policy*, 2003, 32(5): 865-885.
- [14] GAO X, GUAN J. Networks of scientific journals: an exploration of Chinese patent data[J]. *Scientometrics*, 2009, 80(1): 285-304.
- [15] 董珏, 杨眉, 郭晶, 等. 面向高校科技转化效率评估的“科学—技术”关联性实证研究[J]. *大学图书馆学报*, 2016, 34(5): 38-45.
- [16] 杜斌, 徐飞. 中美大学科学研究与技术创新关联度的差异分析及启示[J]. *科技进步与对策*, 2016, 33(23): 149-154.

- 
- [17]樊霞, 宋丽. 基于科学的创新与产业技术能力构建——基于中日美生物技术产业的比较分析[J]. 科学学与科学技术管理, 2017, 38(3):3-11.
- [18]ZHAO Q J, GUAN J C. Love dynamics between science and technology:some evidences in nanoscience and nanotechnology[J]. Scientometrics, 2013, 94(1):113-132.
- [19]CHAVES C V, MORO S. Investigating the interaction and mutual dependence between science and technology[J]. Research Policy, 2007, 36(8):1204-1220.
- [20]陈悦, 宋超, 徐芳. 我国“科学-技术-经济”产出的动态关系测度研究——基于“科学-技术”交互的视角[J]. 科研管理, 2019, 40(1):12-21.
- [21]李醒民. 科学和技术关系的历史演变[J]. 科学, 2007, 59(6):28-32.
- [22]徐庆瑞. 研究、发展与技术创新管理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010:5-6.
- [23]卢馨. 企业人力资本、R&D 与自主创新——基于高新技术上市企业的经验证据[J]. 暨南学报(哲学社会科学版), 2013, 35(1):104-117.
- [24]逢淑媛, 陈德智. 专利与研发经费的相关性研究: 基于全球研发顶尖公司 10 年面板数据的研究[J]. 科学学研究, 2009, 27(10):1500-1505.
- [25]梁莱歆, 马如飞. R&D 资金管理与企业自主创新——基于我国信息技术类上市公司的实证分析[J]. 财经研究, 2009, 35(8):49-59.
- [26]毛建儒, 王颖斌. 论文艺复兴与科学技术发展的“隐路径”[J]. 自然辩证法研究, 2012, 28(12):80-85.