

# 基于结构方程的中国省域技术创新能力评价

陈阳, 易平涛, 李伟伟  
(东北大学工商管理学院, 辽宁沈阳 110169)

**摘 要:** 从创新环境、创新投入和创新产出三个维度选取指标,构建技术创新能力评价指标体系. 针对指标体系具有递阶结构特征及存在相关关系问题,提出一种融合指标间接重要性的 SEM-G 评价模型,并对中国 2009—2017 年 30 省份的技术创新能力进行了评价分析. 评价结果表明:中国 30 省份的技术创新能力相对较弱,大部分省份的技术创新能力发展势头不足;创新环境、创新投入和创新产出之间水平差距显著,且不同创新要素之间的均衡性偏低,并在此基础上给出了相应的建议.

**关 键 词:** 创新能力;结构方程;序关系分析法;综合评价;创新评价

中图分类号: F 224      文献标志码: A      文章编号: 1005-3026(2020)04-0599-06

## Evaluation of Technological Innovation Capability in China's Provinces Based on Structural Equation

CHEN Yang, YI Ping-tao, LI Wei-wei  
(School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang 110169, China. Corresponding author: CHEN Yang, E-mail: chenyang@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** Selecting indicators from the three dimensions of innovation environment, innovation investment and innovation output, an evaluation index system for technological innovation capability was constructed. Aiming at the problem that the index system is characterized by hierarchical structures and has existing correlations, a SEM-G evaluation model was proposed for the indirect importance of the fusion index, and the technological innovation capability of 30 provinces in China from 2009 to 2017 was evaluated and analyzed. It was found that the technological innovation capability of 30 provinces in China is relatively weak, and the development of technological innovation capability in most provinces is insufficient. The level gap between innovation environment, innovation investment and innovation output is significant, and the balance between different innovation elements is low. On this basis, corresponding suggestions were given.

**Key words:** innovation capacity; structural equation; order relation analysis; comprehensive evaluation; innovation evaluation

面对日益激烈的国际竞争形势和国内转型升级压力,坚持创新驱动战略、不断提升自主创新能力是实现新时代高质量发展的动力所在. 通过测算技术创新能力,不仅能够明晰技术创新能力的强弱定位,而且能够有的放矢强化创新薄弱环节,从而为系统配置创新资源、巩固创新政策效果提供有益参考.

关于技术创新能力评价问题,已有文献主要

从创新指标体系搭建和评价模型选择两方面研究. 首先,创新指标体系的搭建,已有研究大多遵循投入—产出的逻辑关系,构建包含创新投入、产出、环境三个维度的创新指标体系. Yam 等<sup>[1]</sup>从技术创新的资产、过程和功能出发构建企业技术创新能力指标体系;Furman 等<sup>[2]</sup>开发了包含创新基础设施、集聚创新环境和研发与产业紧密程度的创新体系;陈劲等<sup>[3]</sup>遵循技术创新要素、过程

和绩效的思路,从理论上提出了问题驱动、前瞻性思考、多样化知识、创新文化、利益相关者协同、经济价值和社会价值 6 个方面的技术创新评价体系.其次,对于选择技术创新能力评价模型, TOPSIS<sup>[4]</sup>、数据包络法<sup>[5]</sup>、模糊综合评价<sup>[6]</sup>、因子分析法<sup>[7]</sup>、随机模拟等方法成为主要选择.在涉及到的权重测算方法中,德尔菲法、熵值法<sup>[8]</sup>、变异系数法<sup>[9]</sup>、层次分析法<sup>[10]</sup>成为主、客观赋权的典型方法.鉴于主观赋权过多依赖于专家判断,主观干扰因素较大;而客观赋权法则依赖于原始数据,注重指标原始信息量的差异,因而本文将采用客观权重测算方法.

基于已有研究可知:①忽略创新指标体系中具有的递阶结构特征,将引起原始信息的大量丢失,导致二次信息集结果出现较大偏差;②权重测算过程中,抛弃指标体系存在的间接联系,使得权重的精确性受到干扰,造成实际权重偏离真实权重.因此,本文构建创新投入、创新产出、创新环境组成的技术创新能力指标体系.在指标权重测算中,充分考虑到指标体系的递阶结构特征,采用有效衡量不同指标间接联系的结构方程模型(structural equation modeling, SEM),并结合序关系分析法,构建 SEM - G 评价模型.基于上述评价模型,对中国 2009 ~ 2017 年 30 省份的技术创新能力进行评价分析,并据此给出相关的政策建议.

1 SEM - G 评价模型

1.1 结构方程模型

结构方程模型(SEM)主要是基于变量之间的协方差矩阵来分析变量关系的多元统计分析方法,将因子分析和路径分析相融合,以衡量实践中不能直接测量的研究变量(称为“潜变量”)间的关系.结构方程模型主要分为测量模型和结构模型,其中测量模型主要以因子分析方式描述潜变量与观测变量之间的关系,而结构模型则利用路径关系分析来衡量潜变量间的关系.测量模型为

X = A\_x ζ + δ, Y = A\_y η + ε. (1)

式中:ζ 为外生潜变量矩阵;η 为内生潜变量矩阵;X 为外生观测变量矩阵;Y 为内生观测变量矩阵;A\_x 为外生观测变量关于外生潜变量的负载矩阵;A\_y 为内生观测变量关于内生潜变量的负载矩阵;δ 为外生观测变量的测量误差;ε 为内生观测变量的测量误差.测量模型主要衡量外生潜变量与外生观测变量之间的关系及内生潜变量与内生

观测变量之间的关系.

结构模型为

η = Bη + Γζ + ξ. (2)

式中:B 为内生潜变量间关系的系数矩阵;Γ 为外生潜变量对内生潜变量影响的系数矩阵;ξ 为结构误差向量.结构模型定义了外生潜变量与内生潜变量之间的关系.

1.2 序关系分析法

将结构方程模型获得的指标重要性排序后,采用序关系分析法测算指标的权重大小,计算过程如下.

1) 指标重要性排序.根据结构方程模型得到路径系数,若 ω\_j > ω\_s,则指标 x\_j 的重要性优于 x\_s,即 x\_j^\* > x\_s^\*.依据路径系数得到指标序关系为 x\_1^\* > x\_2^\* > x\_3^\* > ... > x\_m^\*, x\_j^\* 为按照路径系数排序后第 j 个指标.

2) 给出相邻指标 x\_{k-1}^\* 和 x\_k^\* 相对重要性比值 r\_k.将排序后的相邻指标的路径系数相比(m 为指标个数, w\_k 为与 x\_k^\* 相对应的指标 k 的权重),得到

w\_{k-1} / w\_k = x\_{k-1}^\* / x\_k^\* = r\_k, k = m, m-1, ..., 3, 2. (3)

3) 计算权重 w\_k 的大小.依据文献[11]中的计算方法,求得指标权重为

w\_m = (1 + ∑\_{k=2}^m ∏\_{i=k}^m r\_i) - 1, w\_{k-1} = r\_k w\_k, k = m, m-1, ..., 3, 2. (4)

1.3 SEM - G 评价模型构建

将结构方程模型和序关系分析法结合,提出 SEM - G 技术创新能力评价模型.不失一般性,假设 x'\_{ij} 为 t 时期评价对象 o\_i 在指标 x\_j 上的原始数值(t = 1, 2, ..., T; i = 1, 2, ..., n; j = 1, 2, ..., m), SEM - G 评价模型的具体步骤如下所示.

步骤 1 指标无量纲化:对指标出现的异常值,本文采用极值处理法进行处理,公式为

x'\_{ij} = { x'\_{ij} - m\_j / M\_j - m\_j, x'\_{ij} 为极大型指标; M\_j - x'\_{ij} / M\_j - m\_j, x'\_{ij} 为极小型指标. (5)

式中:x'\_{ij} 为无量纲化后的指标值;M\_j 为 T 个时期内指标 j 的最大值;m\_j 为 T 个时期内指标 j 的最小值.

步骤 2 指标重要性求解:鉴于技术创新评价指标体系是一个多维随机变量集合,其指标之间必然存在跨层次的相关联系,因而,采用融合路径系数和相关系数的方式求解指标重要性系数,具体过程如图 1 所示.将结构方程模型得到的路

径系数定义为直接重要性系数 (即图 1 中的  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ ), 将指标相关系数定义为间接重要性系数 (即图 1 中的  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ ), 进而得到递阶结构特征下指标重要性系数。

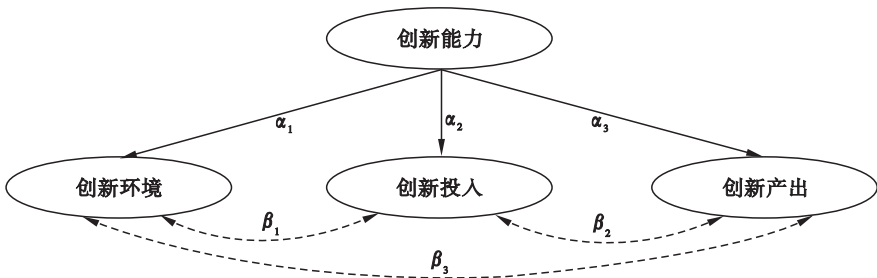


图 1 指标间相关情形  
Fig. 1 Correlation situation between indicators

鉴于指标存在负相关情况,采用指数函数形式( $y = e^x$ )对路径系数和相关系数进行平滑处理,因而,创新环境指标的重要性系数为  $IE = \theta \times e^{\alpha_1} + \mu \times (e^{\beta_1\alpha_2} + e^{\beta_3\alpha_3})$ , 创新投入指标的重要性系数为  $\Pi = \theta \times e^{\alpha_2} + \mu \times (e^{\beta_1\alpha_1} + e^{\beta_2\alpha_3})$ , 创新产出指标的重要性系数为  $IO = \theta \times e^{\alpha_3} + \mu \times (e^{\beta_2\alpha_1} + e^{\beta_3\alpha_2})$ . 其中  $\theta$  为路径系数的偏好大小;  $\mu$  为相关系数的偏好大小,在无特殊要求的情形下,可令  $\theta = \mu = 0.5$ .

步骤 3 确定指标权重大小:根据指标重要性系数,采用序关系分析法获得不同层级内指标的权重大小。

步骤 4 信息集结:采用线性加权集结算子

求得技术创新能力评价值,公式为

$$y_i^t = \sum_{j=1}^m w_j x_{ij}^t, t = 1, 2, \cdots, T, i = 1, 2, \cdots, n. \quad (6)$$

式中: $y_i^t$  为  $t$  时期评价对象  $o_i$  的技术创新能力评价值;  $w_j$  为指标权重。

2 评价结果及分析

2.1 评价指标体系

综合已有技术创新能力评价指标体系,并兼顾数据可获得性及可度量性,从创新投入、创新产出、创新环境 3 个维度选取 11 项指标构建技术创新能力指标体系,详见表 1。

表 1 技术创新能力评价指标  
Table 1 Evaluation indexes of technological innovation capacity

目标层	维度层	指标层	计算方法	权重	数据来源
技术创新 评价体系	创新环境 (0.341 1)	政府支持	科教支出/财政收入	0.054 6	中国科技统计年鉴 中国统计年鉴
		对外开放	FDI/全社会固定资产投资	0.162 1	
		产业结构	技术市场交易额/GDP	0.208 4	
		支撑环境	人均教育经费	0.085 1	
		发展水平	人均 GDP	0.489 9	
	创新投入 (0.339 2)	经费强度	RD 经费投入强度	0.403 7	
		人员强度	RD 人员/地区人口	0.396 4	
		投入强度	RD 人员全时当量/RD 人员	0.199 8	
	创新产出 (0.319 7)	创新新颖性	专利授权量/专利申请量	0.097 6	
		创新绩效	新产品销售收入/地区 GDP	0.023 0	
		创新转化率	发明授权量/专利授权量	0.879 4	

2.2 创新态势分析

依据上述模型对中国 30 省份 2009—2017 年技术创新能力进行测算,所得结果如表 2 所示.由表 2 可知:①中国技术创新能力最强的 3 个省份分别为北京(0.820 6)、上海(0.773 7)、广东(0.772 6),最差的 3 个省份为新疆(0.163 3)、海

南(0.233 5)、青海(0.240 0),且新疆和海南在创新环境、创新投入、创新产出上均不理想,青海在创新投入和创新产出表现较差,但创新环境相对较好.②不同省份技术创新能力差距明显,如 2009 年技术创新能力最强的北京(0.803 5)是最差省份新疆(0.120 9)的 6.65 倍,而 2017 年此差

距为 4.59 倍(北京 0.834 0, 新疆 0.181 7)。  
③从演变趋势来看,2009—2017 年中国 30 省份的技术创新能力均得到了明显改善,但增长幅度呈现一定差异,其中技术创新能力改善最显著的

是安徽(0.279 1)、河南(0.223 5)、河北(0.198 4),而提升相对缓慢的为黑龙江(0.005 9)、天津(0.009 7)、吉林(0.016 5)。

表 2 中国技术创新能力评价结果(2009—2017)  
Table 2 Evaluation results of technological innovation capacity in China(2009—2017)

省份	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	均值
北京	0.803 5	0.800 0	0.814 3	0.818 6	0.824 6	0.829 3	0.830 5	0.830 9	0.834 0	0.820 6
天津	0.696 7	0.682 4	0.685 7	0.723 4	0.739 9	0.746 3	0.750 2	0.737 9	0.706 4	0.718 8
河北	0.283 9	0.294 9	0.319 4	0.362 3	0.391 5	0.414 3	0.442 1	0.465 2	0.482 2	0.384 0
山西	0.323 1	0.333 1	0.320 3	0.335 0	0.363 8	0.378 2	0.359 7	0.339 9	0.417 3	0.352 3
内蒙古	0.208 1	0.250 9	0.259 1	0.313 2	0.309 6	0.284 7	0.320 2	0.361 0	0.370 3	0.297 5
辽宁	0.522 6	0.535 6	0.561 7	0.572 6	0.582 3	0.569 0	0.555 1	0.605 7	0.614 9	0.568 8
吉林	0.413 5	0.354 0	0.373 1	0.406 2	0.418 8	0.408 4	0.407 4	0.464 7	0.430 0	0.408 4
黑龙江	0.390 3	0.391 4	0.389 3	0.404 0	0.400 6	0.417 6	0.420 2	0.422 1	0.396 3	0.403 5
上海	0.758 6	0.756 4	0.767 6	0.771 2	0.764 7	0.779 3	0.787 0	0.794 7	0.783 7	0.773 7
江苏	0.702 3	0.719 0	0.740 3	0.749 9	0.757 2	0.764 7	0.780 1	0.786 8	0.791 9	0.754 7
浙江	0.641 7	0.645 2	0.680 8	0.690 7	0.705 0	0.712 1	0.721 8	0.729 1	0.734 6	0.695 7
安徽	0.385 6	0.380 8	0.483 2	0.543 0	0.565 5	0.585 2	0.641 1	0.656 4	0.664 7	0.545 1
福建	0.549 4	0.585 4	0.622 2	0.643 6	0.646 0	0.646 1	0.645 8	0.632 5	0.661 7	0.625 9
江西	0.330 6	0.350 2	0.361 8	0.391 1	0.399 3	0.406 4	0.439 1	0.478 7	0.514 0	0.407 9
山东	0.578 2	0.596 2	0.633 6	0.639 9	0.641 3	0.643 4	0.677 2	0.683 7	0.685 1	0.642 1
河南	0.348 3	0.357 7	0.390 0	0.393 0	0.565 7	0.565 0	0.560 9	0.577 3	0.571 8	0.481 1
湖北	0.517 4	0.531 4	0.558 6	0.584 3	0.615 5	0.635 0	0.649 1	0.636 2	0.652 0	0.597 7
湖南	0.411 1	0.394 1	0.460 7	0.493 1	0.546 9	0.559 8	0.592 8	0.584 5	0.607 4	0.516 7
广东	0.710 0	0.740 9	0.763 5	0.779 5	0.784 5	0.776 7	0.796 4	0.805 6	0.796 3	0.772 6
广西	0.197 0	0.203 1	0.259 7	0.275 1	0.296 5	0.303 8	0.289 7	0.317 3	0.327 1	0.274 4
海南	0.215 8	0.222 3	0.228 6	0.237 6	0.267 7	0.227 5	0.233 7	0.221 4	0.246 4	0.233 5
重庆	0.451 2	0.440 0	0.515 1	0.479 5	0.473 4	0.561 5	0.598 4	0.629 7	0.644 8	0.532 6
四川	0.519 2	0.403 7	0.485 1	0.515 4	0.541 7	0.571 0	0.576 8	0.581 6	0.611 7	0.534 0
贵州	0.262 6	0.287 1	0.272 0	0.257 7	0.286 1	0.284 7	0.277 5	0.306 5	0.352 0	0.287 4
云南	0.214 3	0.199 7	0.227 6	0.249 0	0.264 2	0.267 1	0.278 4	0.290 6	0.340 8	0.259 1
陕西	0.514 1	0.534 2	0.552 5	0.576 0	0.596 2	0.620 7	0.628 2	0.634 0	0.628 8	0.587 2
甘肃	0.292 7	0.306 0	0.295 0	0.328 9	0.321 9	0.342 3	0.356 4	0.366 9	0.367 4	0.330 8
青海	0.207 0	0.230 3	0.241 6	0.242 4	0.215 9	0.216 5	0.212 9	0.293 0	0.300 4	0.240 0
宁夏	0.318 3	0.293 8	0.311 5	0.297 7	0.274 4	0.309 3	0.381 8	0.397 7	0.414 9	0.333 3
新疆	0.120 9	0.168 7	0.176 8	0.149 4	0.146 8	0.145 1	0.180 8	0.199 8	0.181 7	0.163 3

依据技术创新能力排名变化,将中国 30 省份划分为 4 种类型:第一种稳定型(30%):该模式的省份技术创新能力演变趋势平稳,主要包含北京、山东、陕西、湖南、山西、宁夏、云南、青海、新疆.第二种改进型(23.33%):该模式的省份技术创新能力呈现逐年提升的态势,主要为重庆、河南、江西、广西、内蒙古、河北、安徽.第三种波动型(23.33%):该模式的省份技术创新能力排名波动较大,但创新能力提升幅度较小,主要是天津、福建、贵州、广东、江苏、浙江、湖北.第四种倒退型(23.33%):该模式的省份技术创新能力排名出现下降倾向,主要有黑龙江、吉林、辽宁、四川、海

南、上海、甘肃.

由表 2 可以得出以下结论:①2009—2017 年中国省域技术创新能力并不理想,只有 13 个省份的增长幅度大于 0.1,且多数省份呈现波动性变化,技术创新能力改进的持续性欠缺.②东北三省技术创新能力排名持续下降,其中黑龙江下降 6 个名次、吉林下降 5 个名次、辽宁下降 4 个名次.③2009—2017 年,安徽技术创新能力呈现逐年提升的态势,发展趋势向好(平均排第 12 名,2009 年排第 17 名,2017 年排第 8 名).④海南、甘肃、贵州等省份的技术创新能力水平较低,且不断出现下滑趋势.



2.3 创新要素分析

创新要素评价结果比较如图 2 所示,对比不同创新要素发展水平,可以看出:①创新要素均衡性最优的是吉林(0.035 0),但创新能力相对较弱,其次为安徽(0.054 1)、甘肃(0.062 4);创新要素均衡性最差的是贵州(0.244 2),其创新产出为 0.406 0,但创新投入只有 0.161 8,过大的创新要素水平差距限制了创新能力的提升. ②创新环

境水平最高的是上海(0.734 1)、最弱的是新疆(0.243 0),创新投入最高的是北京(0.929 6)、最低的是新疆(0.145 6),创新产出最优的是广东(0.862 2)、最差的是新疆(0.097 1). 从上述可知,新疆技术创新能力落后是全方位不足造成的,而创新能力改善的关键在于创新要素间的相互协调和互相补充.

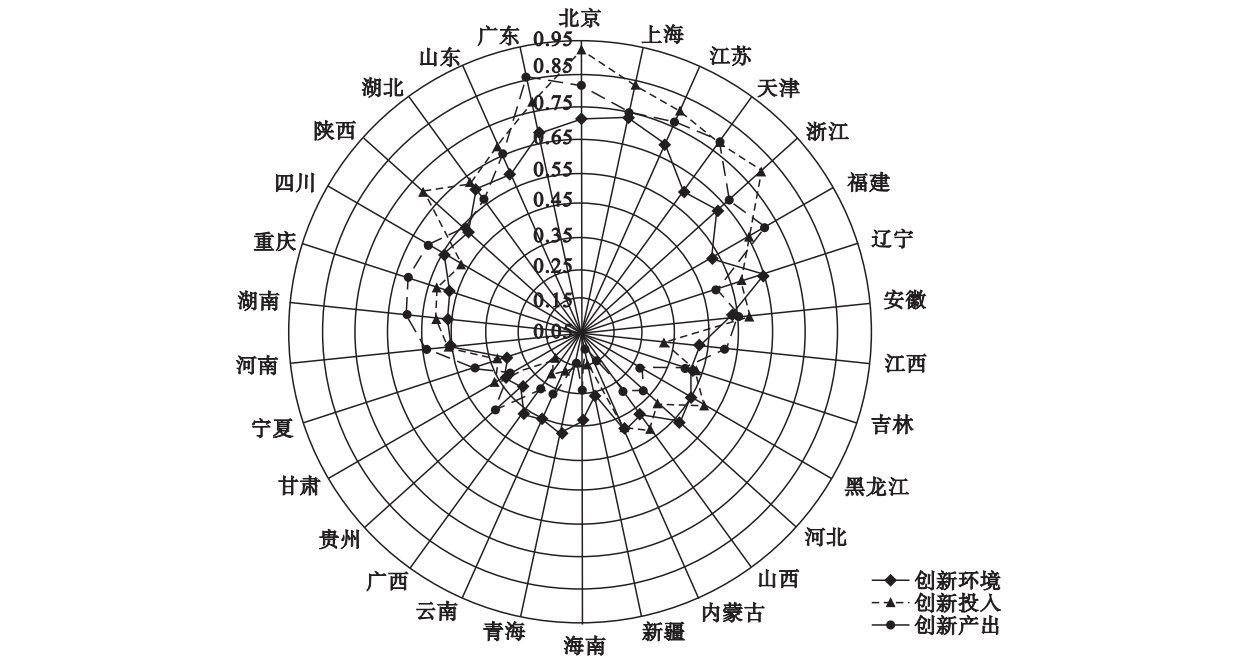


图 2 创新要素评价结果比较  
Fig. 2 Comparison of evaluation results of innovation elements

2.4 不同方法对比

将非递阶结构(拉开档次法)、不考虑相关关系(指标之间不存在相关关系,借鉴结构方程模型和序关系分析法)的结果与 SEM-G 模型结果进行对比,不同方法的排名如表 3 所示. 由表 3 可

以看出,SEM-G 模型与非递阶结构、非相关关系方法的排名均有较大幅度变化,说明本文 SEM-G 模型能够改变评价对象之间的优劣关系,更加准确地反映评价对象之间的发展关系,使得评价结果更加接近实际情形.

表 3 不同方法结果对比											
Table 3 Comparison of evaluation results obtained with different methods											
省份	非递阶	非相关	SEM-G	省份	非递阶	非相关	SEM-G	省份	非递阶	非相关	SEM-G
北京	1	1	1	浙江	5	5	6	海南	26	29	29
天津	6	6	5	安徽	12	12	12	重庆	14	13	14
河北	19	20	20	福建	8	9	8	四川	13	15	13
山西	21	19	21	江西	20	22	18	贵州	27	27	25
内蒙古	24	23	24	山东	7	7	7	云南	29	28	27
辽宁	10	11	11	河南	16	16	16	陕西	11	8	10
吉林	18	18	17	湖北	9	10	9	甘肃	23	21	23
黑龙江	17	17	19	湖南	15	14	15	青海	28	26	28
上海	2	2	2	广东	3	4	3	宁夏	22	24	22
江苏	4	3	4	广西	25	25	26	新疆	30	30	30