

专题：统计物理和复杂系统

## 相对性区域创新指数与经济周期挖掘\*

方学进 崔俊英 胡淡淡 韩筱璞†

(杭州师范大学, 阿里巴巴复杂科学研究中心, 杭州 311121)

(2019年12月16日收到; 2020年3月16日收到修改稿)

提出了一类新的相对性区域创新指数, 并采用世界专利申请数据对其进行了具体计算. 基于区域创新同经济发展水平之间的超线性关系, 该指数消除了经济发展水平对创新能力的影响, 可以实现对不同发展水平的经济体之间进行有效的创新能力横纵对比. 该创新指数尽管极其简单, 却揭示出一系列迥异于传统认知的现象, 例如中国大陆地区的技术创新能力在1980年代就已经位居世界前列. 采用该指数, 不但可以在较高水平上解释世界各国的经济增长, 还发现它同经济增长率之间的相关性存在一个20年的经济周期. 这些结果显示, 该指数作为一个单一性指标, 以极小的数据依赖就实现了较高程度的解释性, 不但重新定位了世界各经济体的创新能力, 对深入理解创新同经济发展之间的关系提供了新的角度, 而且暗示着这类相对性经济指标的发展潜力与应用空间.

**关键词:** 区域创新指数, 经济周期, 相对性经济指标, 经济复杂性

**PACS:** 89.65.Gh, 89.75.-k, 89.65.-s

**DOI:** 10.7498/aps.69.20191970

## 1 引言

创新是社会经济发展的关键驱动力之一. 对于一个经济体, 其社会创新能力正日益成为获取经济竞争优势的决定性因素, 对其经济发展有着长期而深刻的影响<sup>[1-3]</sup>. 为了能够准确地评估一个经济体的社会创新能力, 研究者充分挖掘了各类社会创新相关因素, 从不同视角构建了大量的评价指标, 并基于这些指标来进行经济形态与产业政策等方面的分析<sup>[4-9]</sup>. 一般而言, 根据指标所依据的因素结构, 这些区域创新指标通常可分为单一性指标和综合性指标两大类. 单一性指标一般是用来衡量有关社会创新的某一单项维度的发展程度, 例如研究与发展类(R&D)指标<sup>[10]</sup>、专利类指标<sup>[11,12]</sup>、科技论文类指标<sup>[13,14]</sup>、区域创新效率指标<sup>[15]</sup>. 例如自然指数(nature index), 它依据各国的学术组织在82种

顶级学术期刊上的论文发表信息所构建, 是一个典型的科技论文类单一性指标, 在衡量基础科研产出方面有着重要价值<sup>[16,17]</sup>. 综合性指标往往包含了涉及多个维度的衡量项目, 可以从多个角度对地区创新水平进行综合性的判断. 例如, 由四川省社会科学院和中国科学院成都文献情报中心发布的中国区域创新指数, 所包含的评价维度涉及创新环境、创新投入和创新产出三个方面<sup>[18]</sup>; 又如由世界知识产权组织所发布的全球创新指数(global innovation index, GII), 综合了80项指标, 可以对各国的创新能力、创新环境、创新效率等多个方面进行相当全面的评估和比较<sup>[8,9]</sup>.

需要指出的是, 以上这些区域创新指标中, 绝大多数属于绝对性指标, 即它们所衡量的是一个地区在社会创新方面的产出或投入的绝对量, 或是人均绝对量, 或绝对性的投入产出比. 这种绝对性指标虽然可以为度量社会创新相关的各类因素提供

\* 国家自然科学基金(批准号: 61873081, 11622538, 61673150, 61673151)、浙江省自然科学基金(批准号: LGF18F030007, LR16A050001)和浙江省新苗人才计划项目(批准号: 2019R426070)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xp@hznu.edu.cn

直接计量,但是它们一般不能直接反映各个经济体之间巨大的发展不平衡所带来的结构性差异.换句话说,对于一个经济体,在不同的经济发展水平与外部环境下,往往有着与之相适应的不同的经济结构、创新水平等;而使用绝对性指标对处在不同发展水平的经济体进行直接对比,则会掩盖这种依赖于经济发展程度的结构性差异.

为了克服绝对性指标的这一缺陷,一种思路是,首先为处在不同经济发展水平下的各个经济体分别寻找到各自的参照,用各个经济体相对它们各自的参照的差异作为指标的构建基础.这一类指标则可称之为相对性指标.本文将基于这一思路,采用世界专利申请数据,提出一种新型的相对性指标来衡量各经济体的技术创新能力,并通过分析该指标同世界经济增长之间的关系来论证其有效性.

## 2 数据来源

本文所使用的数据是自1980年至2017年世界各经济体在各年份的人均国民生产总值(GDP)、专利申请数和人口数,以及世界总GDP、世界专利申请总数和世界总人口,均从世界银行网站(<https://www.worldbank.org/>)获取得到.该数据共包含264个国家、地区和组织,其中国家实体或地区共217个.在这217个经济体中,同时包含人均GDP信息和专利申请信息者,共148个.由于1985年前的各国信息缺失严重,因此在实际分析中我们使用的是1985年至2017年的数据.这148个经济体自1985年后的GDP和专利申请数就是我们构建区域创新指数的数据支撑.由于在这期间仍然有部分经济体的部分年份信息缺失,在实际计算中涉及每一年份时,所统计的范围是这148个经济体中所有具有该年份信息者.

## 3 区域创新指数的构建

在提出本文所述的区域创新指数之前,首先观察世界各国的专利申请数同其经济发展水平的关系.我们采用人均GDP作为各国经济发展水平的测度.由于汇率的变化,不同年份的人均GDP之间进行直接对比往往会引入较大误差,因此,在我们的后续分析中所采用的是“相对人均GDP”,其定义是:一个经济体在某一年份的相对人均GDP,

是该经济体的人均GDP相对该年份世界人均GDP的比值.其计算公式为

$$G_Y^i = \frac{\text{GDP}_Y^i}{\langle \text{GDP}_Y \rangle}, \quad (1)$$

其中 $G_Y^i$ 为经济体*i*的在年份*Y*的相对人均GDP, $\text{GDP}_Y^i$ 为经济体*i*在年份*Y*的人均GDP,尖括号表示在年份*Y*的世界人均GDP均值.我们也采用了“相对人均专利申请数”作为专利申请的主要分析对象,即该年份该经济体的人均专利申请数与世界人均专利申请数的比值:

$$n_Y^i = \frac{N_Y^i}{\langle N_Y \rangle}, \quad (2)$$

其中 $n_Y^i$ 为经济体*i*在年份*Y*的相对人均专利申请数, $N_Y^i$ 为经济体*i*在年份*Y*的人均专利申请数,尖括号表示在年份*Y*的人均专利申请数的世界均值.通过这两个相对性的人均指标,世界各经济体在不同年份的人均GDP和人均专利数都被纳入了一个可有效比较的范畴中.

图1显示了各个经济体自1985年以来在由相对人均GDP的对数值 $g$ (例如对经济体*i*,有 $g^i = \log_{10}(G^i)$ )和相对人均专利申请数的对数值 $n_p$ (对经济体*i*,有 $n_p^i = \log_{10}(n^i)$ )所构成的空间中的变化曲线.可以看到,发达经济体同发展中经济体之间有着较为明显的分离,其分离区域大致如图1点划线所示.中国大陆地区的曲线在 $g$ 和 $n_p$ 两者都呈现出稳定而快速的增长趋势,而韩国是极少数已经实现了从发展中经济体区域向发达经济体区域大幅度跨越的经济体之一.

进一步,通过对全部148个经济体的所有数据点进行线性回归,得到拟合直线,如图1中虚线所示,其斜率为1.12.该拟合直线所表征的是,在不同的相对经济水平下,世界平均意义上的相对人均专利申请数.其斜率大于1,表示相对人均专利申请数的增长快于相对人均GDP的增长,满足近似为幂次形式的超线性关系<sup>[19-21]</sup>.该超线性关系说明一个经济体的经济发展水平是决定其创新水平的最核心因素.因此,如果采用建立在绝对数量意义上的创新指标,对处在不同经济发展水平的经济体的创新能力进行直接比较,那么发达经济体的指标往往会明显占据相当大的优势,从而可能掩盖一些发展中经济体内部所隐藏的有利于社会创新的因素或效应.因此,为了有效地进行这一跨越经济发展程度的比较,首先需要排除其经济发展水平的影

响, 为不同经济发展水平的经济体寻找到各自的创新水平基准. 图 1 中的拟合直线, 已经给出了不同的相对人均 GDP 水平下的相对人均专利申请数量的期望值, 它所反映的是在不同经济发展水平下一个经济体在世界平均意义上的创新能力. 或者说, 假如一个经济体的创新能力始终保持在其当前经济发展水平下的平均值, 那么伴随其经济发展, 它在图 1 中的轨迹将沿着这条拟合直线增长. 因此, 这条拟合直线实际上给出了创新能力在同等经济发展水平的经济体中处于中游的经济体的相对人均专利申请数.

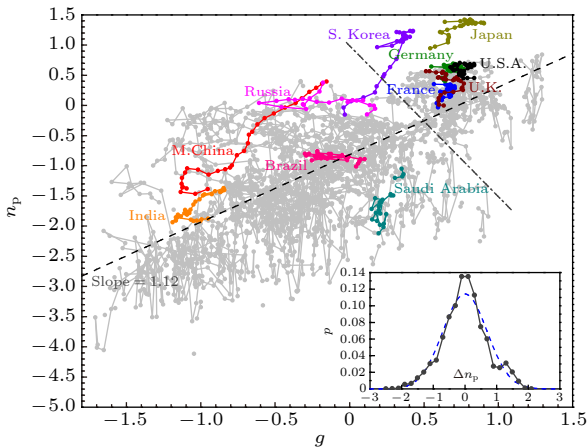


图 1 世界各经济体在由相对人均 GDP 的对数  $g$  和相对人均专利申请数的对数  $n_p$  (两者均以 10 为底数) 所构成的空间中的变化轨迹. 彩色曲线为 11 个代表性经济体在该空间的轨迹, 灰色曲线为其他经济体. 灰色虚线为拟合直线  $n_p = 1.12g - 0.82$ . 灰色点划线大致区分了发达经济体的轨迹所在区域和发展中经济体所在区域, 右上方主要为发达经济体, 左下方主要为发展中经济体. 插图显示了各个数据点相对拟合直线的离差  $\Delta n_p$  的概率分布, 蓝色虚线为其高斯函数拟合

Fig. 1. The trajectories of economies from 1985 to 2017 in the space of the logarithmic relative GDP per capita ( $g$ ) and the logarithmic relative number of patent applications per capita ( $n_p$ ). The colored curves and gray curves represent the trajectory of 11 representative economies and the remain economies, respectively. The gray dashed line is the fitting function  $n_p = 1.12g - 0.82$  of all data points. The gray dot dash line roughly distinguishes between the developed economies and the developing economies. Developed economies are mainly in the upper right area, while developing economies are in the lower left. The inset plots the distribution of the deviation  $\Delta n_p$  of each data point from the fitting line, in which the blue dashed line is its Gaussian fitting.

我们把该拟合直线作为各经济体进行对比的基准, 把各个数据点相对该拟合直线的离差  $\Delta n_p$  作为不同经济发展水平的经济体之间进行创

新能力对比的依据, 从而基本消除了经济发展水平的不同所带来的影响. 我们观察了各个数据点相对该拟合直线的离差  $\Delta n_p$  的分布. 如图 1 插图所示, 该离差分布近似为期望值为 0 的正态分布.

我们基于该离差定义出一个经济体在某一年份的区域创新指数  $I$ , 其计算方法如下: 在图 1 中, 若某经济体 (例如经济体  $i$ ) 在某个年份所对应的数据点坐标为  $(g^i, n_p^i)$ , 它相对拟合直线的离差为  $\Delta n_p^i = n_p^i - h(g^i)$ , 其中  $h(g^i) = 1.12g^i - 0.82$  为拟合直线方程, 则该经济体在该年份的区域创新指数为  $I^i = P(\Delta n_p < \Delta n_p^i)$ , 即在所有经济体所有年份的数据点的离差值中, 小于该数据点的离差的比例. 需要注意, 这一比例的计算并非进行同等经济发展水平的经济体之间的对比, 而是涉及所有纳入统计的经济体和所有纳入统计的年份, 也就是说图 1 中的所有数据点. 这是因为, 经济发展水平的不同所带来的影响已经基本通过拟合直线所剔除, 不同经济发展水平的经济体相对拟合线的离差之间已经具备了可比较性. 这种基于离差的比较, 其意义在于: 假如某个发展中经济体具有较高的正向离差, 则说明它的绝对意义的技术创新能力相对同等经济水平的经济体已经处在较高位置; 而且, 如果它保持其离差不变, 沿着平行于拟合直线的方向发展, 那么当它经济发展达到发达经济体水平时, 其绝对意义上的技术创新能力也将超过大部分发达经济体.

区域创新指数  $I$  是一个介于 0 到 1 的值, 其表示的意义是: 一个经济体的相对人均专利申请数, 相对其当前经济发展水平下的期望数的偏离量的累积概率. 如果该指数为 0.5, 表示其相对专利申请数量等于其经济发展水平下的期望数量, 处在世界平均水平; 如果该指数趋向于 1, 则表示该国的相对人均专利申请数远远高于期望数量, 意味着极高的创新水平; 若该指数趋向于 0, 则说明其相对人均专利申请数量严重低于期望. 这里需要强调, 该指数是建立在相对意义上的区域创新指数, 它的关注点并非一个经济体的创新的绝对量或者人均量, 而是关注这个经济体的创新能否超出其所处的经济发展水平下的世界期望. 由于经济发展水平是决定区域创新能力的最主要因素, 如果某经济体的创新能够获得超过其经济发展水平下的世界期望, 则说明该经济体极可能存在某种能够有效促进创新的机制或环境. 因此, 该指数实际上反映的是经



济体中那些有利于技术创新的结构性因素的影响强弱.

图 2 显示了各经济体的区域创新指数  $I$  随年份的变化. 我们重点观察了 11 个代表性经济体, 包括美国、日本、德国、英国、法国等发达经济体, 中国、俄罗斯、巴西、印度等“金砖国家”, “亚洲四小龙”之一的韩国, 以及石油输出国沙特阿拉伯. 可以看出, 在 20 世纪 80 年代中国大陆地区的  $I$  值就已经超过 0.8, 位居世界前列, 而自 2016 年起更是高居世界首位, 意味着中国大陆地区事实上早已经步入创新型国家行列.

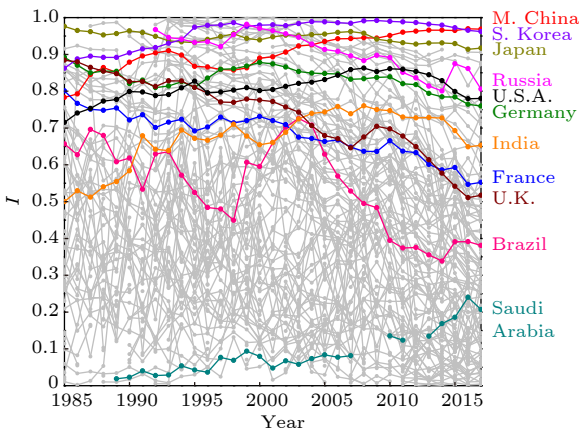


图 2 各经济体的区域创新指数  $I$  随年份的变化, 彩色线为 11 个代表性经济体, 灰色线为其他经济体

Fig. 2. The change of the regional innovation index  $I$  of each economy with the years. The colored curves and gray curves represent 11 representative economies and the remain economies, respectively.

除中国大陆地区之外, 日本和韩国也一直保持很高的创新水平. 德国和美国等国则位居第二梯队, 也一直稳定保持在一个较高的水平, 其  $I$  值起伏于 0.8 附近. 然而, 虽然同为发达经济体, 英国和法国的  $I$  值则处于持续下降中, 2016 年后已经下降到 0.5—0.6 附近, 仅居世界中等水平, 甚至低于印度.

从图 2 中也可以看出, 虽然和中国同为“金砖”国家, 但是印度和巴西的创新指数仅仅处在中等水平, 其中印度的  $I$  值在 0.7 上下浮动, 巴西则在 0.4—0.7 之间剧烈波动. 而以俄罗斯为代表的原苏联国家, 在 20 世纪 90 年代其  $I$  值普遍处于较高水平, 但在随后的 20 多年中持续性下降. 沙特阿拉伯的  $I$  值则长期处于很低的水平, 但在最近十年中出现了明显的提升.

通过对各代表性经济体的趋势的分析可以看出, 该区域创新指数  $I$  所显示的各经济体的技术创新能力截然不同于基于各类绝对性创新指标所构建的传统认知<sup>[22]</sup>. 以中国大陆地区为代表的一批发展中经济体, 在绝对性创新指标之下一般并不处于领先地位, 而在该指数下则水平很高. 同时, 以英国、法国为代表的一些在传统认知中有着高度创新能力的发达国家, 在该指标下却仅仅处在世界中游. 附表 A1 中完整显示了各个经济体在 2016 年的指数  $I$  值. 而图 3 则对比了各个经济体的指数  $I$  值与该经济体的全球创新指数 (GII)<sup>[8,9]</sup>. 不难发现 GI 作为代表性的绝对性区域创新指数, 它同经济发展水平的密切依赖; 而指数  $I$  则同 GI 的结果大相径庭, 同经济发展水平基本无关.

#### 4 区域创新同经济增长的关系中的周期性

由于观察到一些长期保持了经济高速发展的经济体其指数  $I$  往往较高, 我们进一步通过挖掘该指数  $I$  同经济增长的关系, 来验证这一指数的有效性.

考虑到创新对经济发展的影响往往具有长期性, 我们首先观察了各经济体的指数  $I$  的 20 年均值 (从 1998 年到 2017 年), 同该时间段的相对人均 GDP 的平均增长率  $\langle \Delta g \rangle$  的相关性. 这里 (也包括此后的全部计算), 对某经济体  $i$ , 在从年份  $Y$  开始的  $m$  年的期间, 相对人均 GDP 的  $m$  年平均增长率  $\langle \Delta g \rangle^i$  的计算方式是

$$\langle \Delta g \rangle_{Y \rightarrow Y+m-1}^i = \sqrt[m]{\frac{G_{Y+m-1}^i}{G_Y^i}} - 1, \quad (3)$$

其中  $G_{Y-1}^i$  是该经济体在年份  $Y-1$  的相对人均 GDP 值, 同样  $G_{Y+m-1}^i$  对应年份  $Y+m-1$ . 从 1998 年到 2017 年的 20 年期间, 各经济体  $I$  的 20 年均值  $\langle I \rangle$  同各经济体相对人均 GDP 的 20 年平均增长率  $\langle \Delta g \rangle$  的相关性如图 4 所示. 其中, 直接计算  $\langle I \rangle$  同  $\langle \Delta g \rangle$  之间的相关性, 所得的 Pearson 相关性系数  $r$  为 0.220 (图 4(a) 的插入图, 图中  $P$  为相关性的显著性值); 进一步计算  $\langle I \rangle^\beta$  同  $\langle \Delta g \rangle$  之间的相关性, 所得的最高 Pearson 相关性系数为 0.294, 此时对应指数  $\beta$  值为 3.80, 如图 4(a) 所示.

在此基础上, 由于经济增长率同时同经济发展水平本身存在依赖性, 我们进一步通过各经济体的

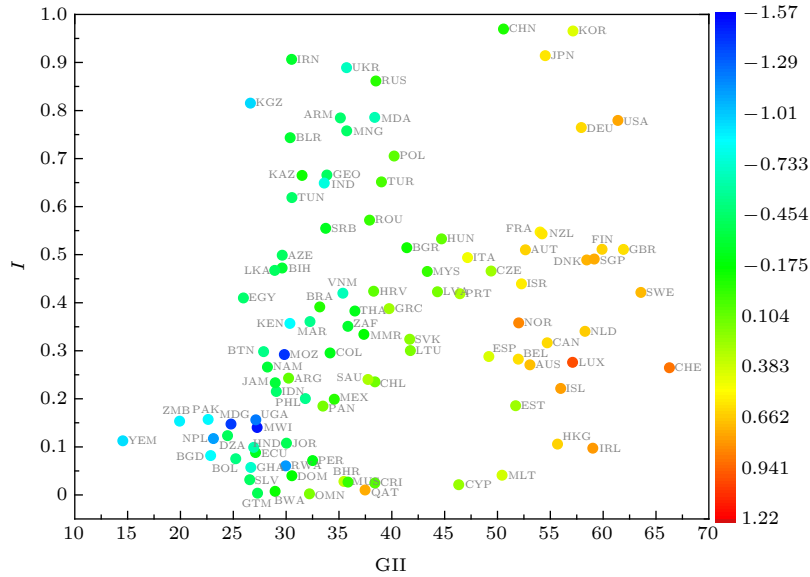


图 3 各经济体在 2016 年的区域创新指数  $I$  与该年份的全球创新指数 (GII) 的关系. 数据点的颜色表示该年份各经济体的相对人均 GDP 的对数值  $g$

Fig. 3. The regional innovation index  $I$  vs. global innovation index (GII) for each economy at 2016. The color of each data point shows the logarithmic relative GDP per capita ( $g$ ) of each economy.

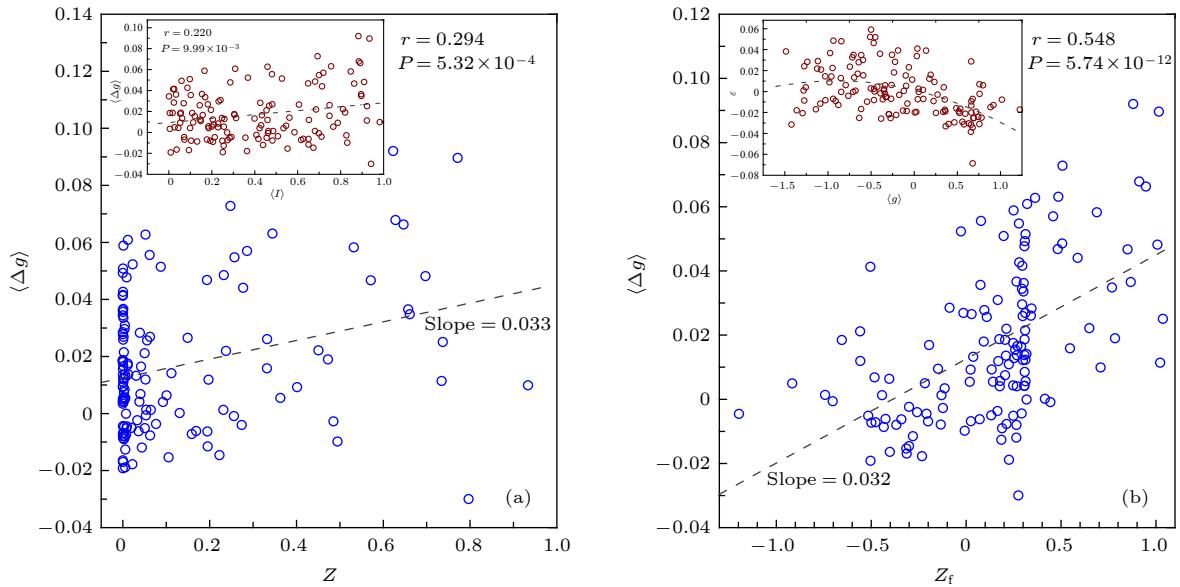


图 4 20 年时间段 (1998 年至 2017 年) 内各经济体平均区域创新指数  $\langle I \rangle$  与相对人均 GDP 的平均增长率  $\langle \Delta g \rangle$  之间的相关性 (a)  $Z = \langle I \rangle^\beta$ , 其中  $\beta = 3.80$  为相关性最强时所对应  $\beta$  值, 直线为拟合直线; 插图显示为  $\langle I \rangle$  同  $\langle \Delta g \rangle$  之间的相关性 (即设定  $\beta = 1.0$  时); (b) 通过相对人均 GDP 进行修正后的相关性,  $Z_f = \langle I \rangle^\beta + (a \langle g \rangle^2 + b \langle g \rangle + c)/k$ , 其中  $\langle g \rangle$  为各经济体的相对人均 GDP 的对数值  $g$  的 20 年均值, 其中  $\beta = 3.80$ ,  $a = -0.011$ ,  $b = -0.020$ ,  $c = 0.0013$ , 而  $k = 0.033$  为图 (a) 的拟合直线斜率; 插图显示了修正函数  $f(\langle g \rangle) = a \langle g \rangle^2 + b \langle g \rangle + c$  的获得, 即对图 (a) 的回归残差  $\varepsilon$  同  $\langle g \rangle$  的关系进行拟合所得

Fig. 4. The correlations between the average regional innovation index of each country  $\langle I \rangle$  and the average growth rate of relative per capita GDP  $\langle \Delta g \rangle$  in the period from 1998 to 2017: (a)  $Z = \langle I \rangle^\beta$ , where  $\beta = 3.80$  corresponding to the strongest correlation between  $\langle \Delta g \rangle$  and  $Z$ , and the dashed line is the fitting line. The inset of panel (a) shows the correlation between  $\langle I \rangle$  and  $\langle \Delta g \rangle$  (setting  $\beta = 1.0$ ); (b) the correlation between  $\langle \Delta g \rangle$  and the corrected prediction value  $Z_f$  of each economy, where  $Z_f = \langle I \rangle^\beta + (a \langle g \rangle^2 + b \langle g \rangle + c)/k$ ,  $\langle g \rangle$  is the 20-year average of the logarithmic relative GDP per capita  $g$  of each economy, and  $\beta = 3.80$ ,  $a = -0.011$ ,  $b = -0.020$ ,  $c = 0.0013$ , and  $k = 0.033$  is the slope of the fitting line in Fig.(a). The dashed line in the inset of Fig. (b) shows the correction function  $f(\langle g \rangle) = a \langle g \rangle^2 + b \langle g \rangle + c$ , which is obtained by the fitting for the correlation between  $\varepsilon$  and  $\langle g \rangle$ , where  $\varepsilon$  is the regression residuals in the linear regression shown in Fig. (a).

相对人均 GDP 进行修正. 修正的方法是, 首先对  $\langle I \rangle^\beta$  同  $\langle \Delta g \rangle$  的关系进行线性回归, 观察各经济体的数据点相对拟合直线的回归残差  $\varepsilon$  同各经济体相对人均 GDP 的对数值  $g$  的 20 年均值  $\langle g \rangle$  的关系, 如图 4(b) 插图所示, 该离差分布近似可用二次函数  $f(\langle g \rangle) = a \langle g \rangle^2 + b \langle g \rangle + c$  拟合, 表示经济发展水平较高和较低的经济体都容易出现相对较低的增长率. 随后构建新的预测指标  $Z_f = \langle I \rangle^\beta + f(\langle g \rangle)/k$ , 其中  $k$  为  $\langle I \rangle^\beta$  同  $\langle \Delta g \rangle$  的拟合直线斜率. 如图 4(b) 所示, 预测指标  $Z_f$  同  $\langle \Delta g \rangle$  之间的相关性高达 0.548, 说明仅仅通过指数  $I$  并结合各经济体的相对人均 GDP, 就已经可以在较高程度上解释各经

济体长时期的经济发展速度同其创新能力之间的关系, 表明了指数  $I$  在预测经济发展速度方面的有效性. 同时, 该正相关特性也说明, 从长时期来看, 创新能力较强的经济体往往具有更快的经济发展速度.

进一步, 我们挖掘指数  $I$  和各经济体经济短期发展速度的关系. 首先设置一个长度为  $m$  年的滑动窗口, 计算各经济体的创新指数在该窗口期内的平均值  $\langle I \rangle$  与相对人均 GDP 的年度增长率在该窗口期内的平均值  $\langle \Delta g \rangle$  之间的 Pearson 相关性系数  $r_I$ . 图 5 显示了滑动窗口长度  $m$  为 1 年、3 年、5 年时该相关性随年份的变化, 其中年份标定为每个滑

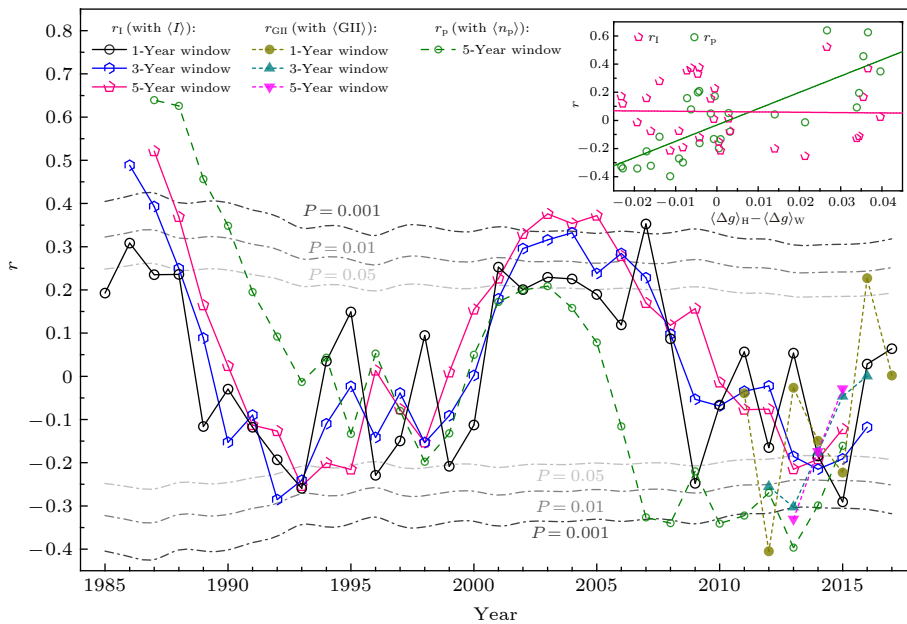


图 5 以 1 年期、3 年期和 5 年期为滑动窗口长度, 各类指标在滑动窗口期内各经济体的均值同相对人均 GDP 增长率的平均值  $\langle \Delta g \rangle$  之间的相关性随年份的变化. 黑色、蓝色和粉色实线及其空心数据点对应指标为创新指数 (该相关性表示为  $r_I$ ); 其中不同灰度的虚线标志出相关性  $r_I$  在最低限度情况下 (即有效数据点最少的情况, 对应滑动窗口长度为 1 年时) 的不同显著性水平的边界, 浅灰、中灰和深灰虚线分别对应  $P = 0.05, 0.01, 0.001$  的  $r_I$  值. 深黄、深青色、品红虚线及其实心数据点对应指标为全球创新指数 GII (该相关性表示为  $r_{GII}$ ). 橄榄绿色虚线及其空心数据点对应指标为相对人均专利申请数的对数值  $n_p$  (该相关性表示为  $r_p$ , 只显示了滑动窗口为 5 年期的情况). 插图显示的是, 采用 5 年期滑动窗口, 高收入经济体的相对人均 GDP 的平均增长率  $\langle \Delta g \rangle_H$  与所有经济体的相对人均 GDP 增长率的均值  $\langle \Delta g \rangle_W$  的差值  $(\langle \Delta g \rangle_H - \langle \Delta g \rangle_W)$ , 同相关性  $r_I$  (粉色点) 和相关性  $r_p$  (橄榄绿色点) 的相关性; 实线分别为同色数据点的拟合直线

Fig. 5. Designing the moving window length of 1 year, 3 years and 5 years, for given index, the correlation between the average value of the index of each economy and the average growth rate  $\langle \Delta g \rangle$  of the relative GDP per capita within the moving window are shown by curves and data points. The black, blue and pink lines and hollow data points show correlation  $r_I$ , corresponding to the index  $I$ . The different gray dashed lines show the thresholds of the correlation  $r_I$  for different level of significance in the case with the minimum data points (corresponding to the case with 1-year moving window length), and the light gray, medium gray and dark gray dashed lines correspond to the significance  $P = 0.05, 0.01$  and  $0.001$ , respectively. The dark yellow, dark cyan, magenta dashed lines and solid data points show correlation  $r_{GII}$ , corresponding to global innovation index (GII). The olive dashed line and hollow data points show correlation  $r_p$ , corresponding to the index of the logarithmic relative number of patent applications per capita ( $n_p$ ) (5-year-moving-window only). The inset shows the correlations between  $(\langle \Delta g \rangle_H - \langle \Delta g \rangle_W)$  and  $r_I$ , and the correlation between  $(\langle \Delta g \rangle_H - \langle \Delta g \rangle_W)$  and  $r_p$ , where  $\langle \Delta g \rangle_H$  and  $\langle \Delta g \rangle_W$  is the average growth rate of the relative GDP per capita within the moving window for high-income economies and all economies, respectively, and the solid lines respectively are the fitting curve for the data points with the same color.



动窗口期的中间年份. 对于不同长度的滑动窗口, 该相关性随年份的变化都呈现出较为明显的长周期波动现象, 其周期约为 20 年. 以 5 年滑动窗口的情况为例, 在该周期性波动中, 峰值处的相关性系数在 0.4 左右, 显著性  $P$  值可以低于 0.001, 一般强于谷值处 (谷值处相关性系数在  $-0.2$  左右,  $P$  值在 0.01—0.05 之间), 如图 5 所示. 这也使得在前述的 20 年时间段内  $\langle I \rangle$  同  $\langle \Delta g \rangle$  之间的相关性仍然呈现为正.

图 5 还显示了各经济体自 2011 年到 2017 年的全球创新指数 GII 的窗口期均值同  $\langle \Delta g \rangle$  的相关性. 为了同指数  $I$  作进一步的对比, 图 5 还展示了一个假定的绝对性指标的结果, 即直接把相对人均专利申请数的对数  $n_p$  作为指标, 各经济体的  $n_p$  在各窗口期的均值同  $\langle \Delta g \rangle$  的 Pearson 相关性系数  $r_p$  随年份的变化 (图 5 橄榄绿色虚线). 可以看出,  $r_p$  也存在波动, 但总体呈下降趋势. 根据图 1 中发达经济体与发展中经济体的大致分区, 我们把相对人均 GDP 的对数  $g$  大于 0.5 的经济体视作高收入经济体, 计算了每一年份高收入经济体的相对人均 GDP 增长率的均值  $\langle \Delta g \rangle_H$ , 以及该年份所有经济体的相对人均 GDP 增长率的均值  $\langle \Delta g \rangle_W$ , 观察其差值  $(\langle \Delta g \rangle_H - \langle \Delta g \rangle_W)$  同  $r_p$  和  $r_I$  的关系. 如图 5 插入图所示,  $r_p$  强烈正相关于该差值 (Pearson 相关性系数为 0.781, 显著性  $P$  值为  $5.85 \times 10^{-7}$ ), 而  $r_I$  和该差值基本没有相关性 (Pearson 相关性系数为 0.020,  $P$  值为 0.917). 这说明,  $n_p$  对经济增长的解释性强烈依赖于高收入经济体的增长率, 一旦高收入经济体的增长放缓,  $r_p$  就呈现为负值, 因此作为绝对性指标的  $n_p$  并不能真正反映创新对经济增长的作用; 然而, 作为相对性指标, 本文所提出的指数  $I$  的相关性  $r_I$  仅是平稳波动, 几乎不存在这种依赖性. 这一结果也暗示着, 如果某个创新指标呈现出同经济发展水平的强烈相关, 那么类似  $n_p$  的这种解释性依赖的问题它同样是难以避免的; 而相对性指标则可以有效避开此问题.

进一步, 为了寻找  $r_I$  所体现的这种周期性的成因, 我们采用 5 年滑动窗口, 选取了处于谷值的 1994 年和 2014 年, 以及处于峰值的 2004 年, 来对比其相关关系. 2004 年和 1994 年的  $\langle I \rangle$  与  $\langle \Delta g \rangle$  的关系对比如图 6(a) 所示, 可以观察到一些具有较高  $\langle I \rangle$  值的经济体, 其相对人均 GDP 的年度增长率均值  $\langle \Delta g \rangle$  在这期间出现了较大幅度的提升, 直接改变了  $\langle I \rangle$  与  $\langle \Delta g \rangle$  的相关性的方向. 类似的现象

也在 2014 年和 2004 年的对比中被观察到, 只是其经济增长率变化方向同 2004 年和 1994 年的对比是相反的, 如图 6(b) 所示.

通过观察各经济体在这期间的  $\langle I \rangle$  的改变量和  $\langle \Delta g \rangle$  的改变量, 发现在相邻谷峰处经济增长率发生较大变化的经济体, 主要是在前一谷值或峰值处出现极端性经济增长率的经济体. 例如, 一些在 2004 年窗口内具有很高的经济增长率的经济体, 在 2014 年窗口内经济增长率骤然降低 (图 6(a) 和图 6(b)). 进一步观察还发现, 在 1994 年—2004 年的谷峰转变阶段, 及 2004 年—2014 年的峰谷转变中, 发生经济增长率骤然变化的经济体有着较高的重合度, 而且多为高  $\langle I \rangle$  值经济体. 例如, 在 2004 年窗口的  $\langle \Delta g \rangle$  相对 1994 年窗口的增加幅度最大的 20 个经济体中, 同时位列 2014 年窗口的  $\langle \Delta g \rangle$  相对 2004 年窗口的下降幅度最大的 20 个经济体者, 共有 12 个经济体, 而其中在 1994 年窗口和 2004 年窗口的  $\langle I \rangle$  值均超过 0.80 的经济体就有 8 个 (阿塞拜疆、哈萨克斯坦、俄罗斯联邦、乌克兰、白俄罗斯、亚美尼亚、罗马尼亚、保加利亚), 除了俄罗斯联邦, 它们大多属于中小规模的经济体, 并主要集中在东欧、中亚等地区. 这一现象在图 6(c) 中得到了确认: 该图显示了 1994 年至 2004 年的谷峰变换中各经济体的相对人均 GDP 年度增长率均值  $\langle \Delta g \rangle$  的改变量  $(\langle \Delta g \rangle_{2004} - \langle \Delta g \rangle_{1994})$  同 2004 年至 2014 年的峰谷变换中的改变量  $(\langle \Delta g \rangle_{2014} - \langle \Delta g \rangle_{2004})$  的关系, 呈现出较为强烈的负相关特性 (其相关性  $r_g = -0.725$ ), 而且变化最为剧烈的经济体 (如图 6(c) 右下角各经济体) 大多具有相当高的  $\langle I \rangle$  值. 这些现象表示, 这种周期性的驱动力, 主要来自于一些创新能力较高但经济发展速度很不稳定的中小规模经济体的强烈的同步性经济波动.

## 5 结 论

综上所述, 本文所提出的区域创新指数  $I$  是一种相对性的指标, 它从专利申请角度对世界经济体的技术创新能力进行了度量. 这里首先需要说明的是, 本文对指数  $I$  的计算全部基于国家或地区层面, 即每个  $I$  值所表征的“区域”指的是国家或地区经济实体. 但是, 指数  $I$  本身并不局限于这一层面, 其计算方法可以拓展到对任意区域层面的技术创新能力的衡量, 例如省份、城市等. 但是, 在拓展到

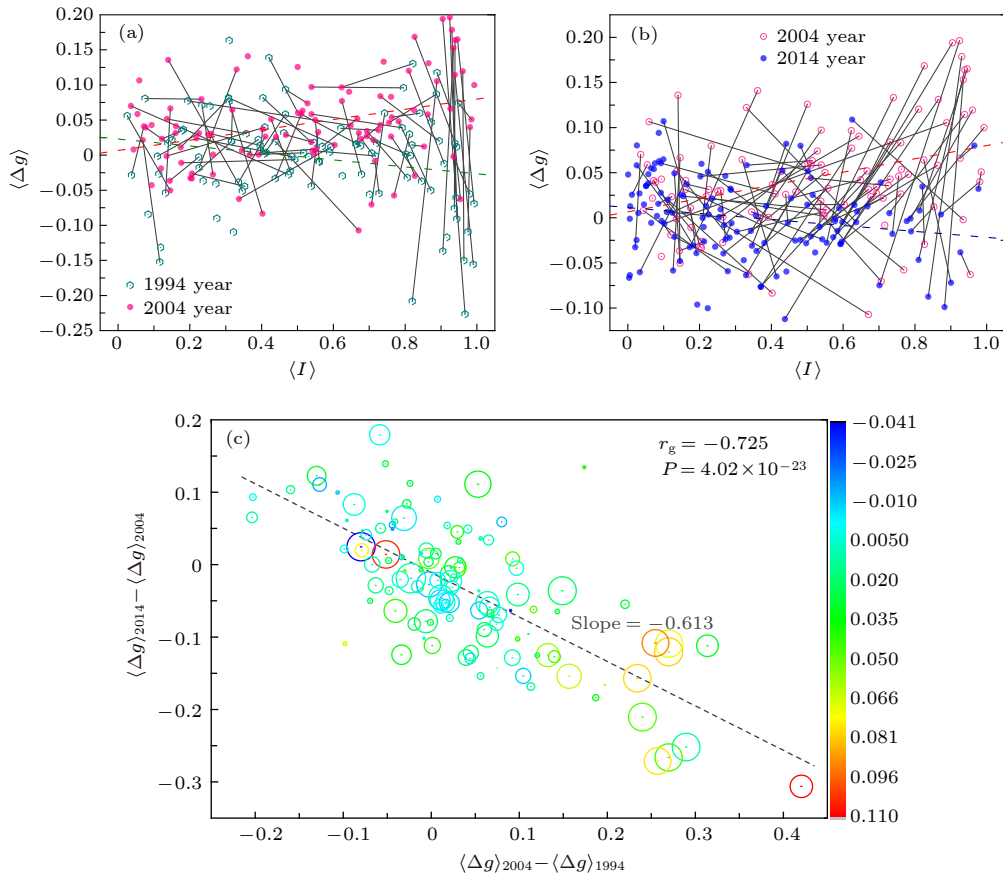


图 6 (a) 和 (b) 分别对比了在谷-峰变换和峰-谷变换前后的两个典型年份的 5 年滑动窗口内各经济体的创新指数  $\langle I \rangle$  的平均值与相对人均 GDP 增长率  $\langle \Delta g \rangle$  的平均值之间的相关性。(a) 青色六角圈对应 1994 年 ( $r_I$  值谷值), 桃红色圆点对应 2004 年 ( $r_I$  值峰值), 同一经济体由灰色线连接, 绿色虚线和桃红色虚线分别为 1994 年和 2004 年数据点的拟合直线, 斜率分别为  $-0.050$  和  $0.073$ ; (b) 桃红色圈和蓝色圆点分别对应 2004 年 ( $r_I$  值峰值) 和 2014 年 ( $r_I$  值谷值) 的数据点, 同一经济体由灰色线连接, 桃红色虚线 (斜率  $0.073$ ) 和蓝色虚线 (斜率  $-0.033$ ) 分别为 2004 年和 2014 年数据点的拟合直线; (c) 1994 年至 2004 年的谷-峰变换中各国的  $\langle \Delta g \rangle$  改变量 ( $\langle \Delta g \rangle_{2004} - \langle \Delta g \rangle_{1994}$ ) 同 2004 年至 2014 年的峰-谷变换中各经济体的  $\langle \Delta g \rangle$  改变量 ( $\langle \Delta g \rangle_{2014} - \langle \Delta g \rangle_{2004}$ ) 的关系, 其中各数据点的直径正比于该经济体自 1995 至 2014 年间的创新指数  $I$  的 20 年平均值, 颜色对应于该期间各经济体的相对人均 GDP 增长率  $\Delta g$  的 20 年平均值, 虚线为拟合直线

Fig. 6. (a) and (b) respectively compare the correlations between the average value of the index  $I$  of each economy  $\langle I \rangle$  and the average growth rate  $\langle \Delta g \rangle$  of the relative GDP per capita at the 5-year moving windows before and after the transition from bottom on  $r_I$  wave to peak and the one from peak to bottom. Fig. (a) shows the comparison between 1994 (the cyan hexagons, at the bottom) and 2004 (the pink dots, at the peak), where the data points of the same economy are connected by gray lines, and the green dashed line and the pink dashed line respectively show the linear fittings of 1994 (with a slope of  $-0.050$ ) and the one of 2004 (with a slope of  $0.073$ ); Fig. (b) shows the comparison between 2004 (the pink circles, at the peak) and 2014 (the blue dots, at the valley), where the data points of the same economy are connected by gray lines, and the pink dashed line (with a slope  $0.073$ ) and the blue dashed line (with a slope of  $-0.033$ ) show the linear fittings of 2004 and 2014, respectively; Panel (c) plots the relationship between the change ( $\langle \Delta g \rangle_{2004} - \langle \Delta g \rangle_{1994}$ ) in the valley-peak transition and the change ( $\langle \Delta g \rangle_{2014} - \langle \Delta g \rangle_{2004}$ ) in the peak-valley transition, where the diameter of each circle is proportional to the 20 year average  $\langle I \rangle$  of the economy's index, and the color corresponds to the 20-year average growth rate  $\langle \Delta g \rangle$  of the economy's relative GDP per capita.

其他区域层面时, 为了保证该指数的统一性, 计算基准需要固定在图 1 所示的拟合直线上, 即依据国家或地区经济实体层面所得到的相对人均专利申请数和相对人均 GDP 之间关系的拟合线; 也就是说, 不论进行什么层面的计算, 所参考的都是通过世界拟合线所得的期望值。

另一点需要强调的是, 由于地区经济发展水平

是影响创新产出绝对量的首要因素, 而指数  $I$  基本排除了地区经济发展水平的影响, 所表示的既非一个经济体的创新产出总量, 也非人均意义上的绝对总量, 而是其创新产出同其经济发展水平下的期望的相对量, 即一个地区在多大程度上能够超越其经济发展水平的制约而去促进其创新, 因此, 指数  $I$  虽然不论在形式上还是在数据基础上都是一个纯



粹的宏观指标,但它所揭示的则是区域经济中所隐藏的可促进创新的结构性的因素的强弱.

该指数  $I$  作为一个单一性的宏观指标,其数据依赖性极低,在仅仅包含专利申请信息而尚未引入更多信息的情况下,就已经展示出对地区经济发展的较高水平的解释性,有助于挖掘技术创新对经济增长的长期促进作用.而且,该指数还揭示出若干新的发现,它们迥异于传统的基于绝对性指标的认知,主要包括以下两点.

第一,该指数重构了世界各经济体的技术创新能力排序,指出中国大陆地区最迟在 20 世纪 80 年代后期,技术创新就已经远远超越了经济发展水平下的期望而位居世界前列,并且长期处在稳步提高中,自 2016 年后更是冠居世界首位,大大超过了众多传统认知中的创新强国.这一发现重新定位了中国大陆地区的技术创新水平,暗示着中国大陆经济有着强大的内生驱动力,早已形成稳定的创新驱动机制,为从社会创新角度来理解中国大陆地区经济的高速增长提供了全新的支撑.

第二,通过该指数同经济增长的相关性分析,我们发现技术创新同经济增长之间可能存在一个长度约为 20 年的经济周期.进一步的挖掘发现,该经济周期主要受到一些创新能力较高但经济发展速度不稳定的经济体的影响.这里也引发一系列

新的有待进一步研究的问题,特别是在社会创新同其经济波动的关联性方面<sup>[23-25]</sup>.

这些发现说明了这一简单指数在衡量区域技术创新能力、挖掘创新和经济增长的关系方面的有效性,同时也暗示着,这一类以揭示经济体内部结构性因素为核心目标的相对性经济指标在区域经济分析方面可能有着很大的应用潜力.此外还需指出的是,该指数的构建考虑了创新与经济增长的超线性关系,这一点也是复杂性科学视角的体现.近年来,基于复杂性科学视角的新型宏观经济指标研究层出不穷<sup>[26]</sup>,例如经济复杂性指标和适应度指标等<sup>[27-30]</sup>.相比传统的经济指标,这类新型指标的构建一般建立在对经济系统的结构性分析基础之上,往往贯通从微观到宏观的不同层面,可以更为直接和精准地反映出经济体的结构性调整,在挖掘经济结构、解释和预测经济增长方面体现出相当的优势<sup>[31,32]</sup>.在后继研究中,将进一步结合经济大数据,构建出可以贯通微观与宏观的更具有解释性的创新指标.

感谢北京师范大学王有贵教授、电子科技大学吕琳媛教授的有益讨论.

附录

表 A1 148 个经济体在 2016 年的区域创新指数  $I$  值  
Table A1 The index  $I$  of 148 economies at 2016.

排序	经济体名称	英文名称	2016年指数I	排序	经济体名称	英文名称	2016年指数I
1	中国大陆地区	Mainland China	0.969	75	墨西哥	Mexico	0.199
2	韩国	Republic of Korea	0.965	76	爱沙尼亚	Estonia	0.185
3	日本	Japan	0.914	77	巴拿马	Panama	0.185
4	伊朗伊斯兰共和国	Islamic Republic of Iran	0.906	78	巴基斯坦	Pakistan	0.157
5	乌克兰	Ukraine	0.889	79	乌干达	Uganda	0.156
6	俄罗斯联邦	The Russian Federation	0.861	80	赞比亚	Zambia	0.153
7	吉尔吉斯斯坦	Kyrgyzstan	0.815	81	马达加斯加	Madagascar	0.147
8	摩尔多瓦	Moldova	0.786	82	马拉维	Malawi	0.140
9	亚美尼亚	Armenia	0.784	83	摩纳哥	Monaco	0.131
10	美国	USA	0.779	84	阿尔及利亚	Algeria	0.123
11	德国	Germany	0.764	85	尼泊尔	Nepal	0.117
12	蒙古	Mongolia	0.758	86	也门共和国	Republic of Yemen	0.112
13	白俄罗斯	Belarus	0.743	87	约旦	Jordan	0.108
14	波兰	Poland	0.705	88	中国香港特别行政区	Hong Kong of China	0.106
15	格鲁吉亚	Georgia	0.666	89	洪都拉斯	Honduras	0.099
16	哈萨克斯坦	Kazakhstan	0.665	90	爱尔兰	Ireland	0.097
17	土耳其	Turkey	0.651	91	津巴布韦	Zimbabwe	0.089

表 A1 (续) 148 个经济体在 2016 年的区域创新指数  $I$  值  
Table A1 (continued). The index  $I$  of 148 economies at 2016.

排序	经济体名称	英文名称	2016年指数 $I$	排序	经济体名称	英文名称	2016年指数 $I$
18	印度	India	0.649	92	厄瓜多尔	Ecuador	0.088
19	突尼斯	Tunisia	0.619	93	孟加拉国	Bangladesh	0.082
20	罗马尼亚	Romania	0.572	94	玻利维亚	Bolivia	0.075
21	乌兹别克斯坦	Uzbekistan	0.556	95	秘鲁	Peru	0.071
22	塞尔维亚	Serbia	0.555	96	古巴	Cuba	0.068
23	法国	France	0.547	97	卢旺达	Rwanda	0.060
24	新西兰	new Zealand	0.543	98	加纳	Ghana	0.057
25	匈牙利	Hungary	0.533	99	马耳他	Malta	0.041
26	保加利亚	Bulgaria	0.514	100	多米尼加共和国	Dominican Republic	0.040
27	芬兰	Finland	0.511	101	巴哈马	Bahamas	0.039
28	英国	Britain	0.511	102	萨尔瓦多	El Salvador	0.032
29	奥地利	Austria	0.510	103	巴林	Bahrain	0.028
30	阿塞拜疆	Azerbaijan	0.499	104	毛里求斯	Mauritius	0.026
31	意大利	Italy	0.494	105	哥斯达黎加	Costa Rica	0.025
32	新加坡	Singapore	0.491	106	塞浦路斯	Cyprus	0.021
33	丹麦	Denmark	0.489	107	特立尼达和多巴哥	Trinidad and Tobago	0.019
34	波斯尼亚和黑塞哥维那	Bosnia and Herzegovina	0.472	108	卡塔尔	Qatar	0.010
35	斯里兰卡	Sri Lanka	0.467	109	博茨瓦纳	Botswana	0.007
36	捷克共和国	Czech Republic	0.466	110	危地马拉	Guatemala	0.003
37	马来西亚	Malaysia	0.465	111	阿曼	Oman	0.002
38	苏丹	Sudan	0.441	—	阿鲁巴	Aruba	—
39	以色列	Israel	0.439	—	安哥拉	Angola	—
40	克罗地亚	Croatia	0.424	—	阿尔巴尼亚	Albania	—
41	拉脱维亚	Latvia	0.423	—	阿拉伯联合酋长国	United Arab Emirates	—
42	瑞典	Sweden	0.421	—	布隆迪	Burundi	—
43	越南	Vietnam	0.420	—	布基纳法索	Burkina Faso	—
44	葡萄牙	Portugal	0.419	—	伯利兹	Belize	—
45	阿拉伯埃及共和国	Arab Republic of Egypt	0.410	—	巴巴多斯	Barbados	—
46	巴西	Brazil	0.391	—	文莱达鲁萨兰国	Brunei Darussalam	—
47	希腊	Greece	0.387	—	科特迪瓦	Ivory Coast	—
48	泰国	Thailand	0.383	—	刚果(金)	The Democratic Republic of Congo	—
49	摩洛哥	Morocco	0.361	—	刚果(布)	The Republic of Congo	—
50	挪威	Norway	0.358	—	吉布提	Djibouti	—
51	肯尼亚	Kenya	0.357	—	埃塞俄比亚	Ethiopia	—
52	南非	South Africa	0.351	—	斐济	Fiji	—
53	荷兰	Netherlands	0.340	—	圭亚那	Guyana	—
54	黑山	Montenegro	0.334	—	海地	Haiti	—
55	斯洛伐克共和国	Slovak Republic	0.324	—	伊拉克	Iraq	—
56	加拿大	Canada	0.316	—	柬埔寨	Cambodia	—
57	圣马力诺	San Marino	0.305	—	黎巴嫩	Lebanon	—
58	立陶宛	Lithuania	0.300	—	利比亚	Libya	—
59	不丹	Bhutan	0.298	—	莱索托	Lesotho	—
60	哥伦比亚	Colombia	0.295	—	中国澳门特别行政区	Macau of China	—

表 A1 (续) 148 个经济体在 2016 年的区域创新指数  $I$  值  
Table A1 (continued). The index  $I$  of 148 economies at 2016.

排序	经济体名称	英文名称	2016年指数 $I$	排序	经济体名称	英文名称	2016年指数 $I$
61	莫桑比克	Mozambique	0.292	—	北马其顿	North Macedonia	—
62	西班牙	Spain	0.288	—	马里	Mali	—
63	比利时	Belgium	0.283	—	尼日利亚	Nigeria	—
64	卢森堡	Luxembourg	0.276	—	尼加拉瓜	Nicaragua	—
65	澳大利亚	Australia	0.271	—	巴布亚新几内亚	Papua New Guinea	—
66	纳米比亚	Namibia	0.266	—	巴拉圭	Paraguay	—
67	瑞士	Switzerland	0.265	—	斯洛文尼亚	Slovenia	—
68	阿根廷	Argentina	0.243	—	阿拉伯叙利亚共和国	Syrian Arab Republic	—
69	沙特阿拉伯	Saudi Arabia	0.240	—	塔吉克斯坦	Tajikistan	—
70	智利	Chile	0.235	—	土库曼斯坦	Turkmenistan	—
71	牙买加	Jamaica	0.233	—	坦桑尼亚	Tanzania	—
72	冰岛	Iceland	0.221	—	乌拉圭	Uruguay	—
73	印度尼西亚	Indonesia	0.215	—	委内瑞拉玻利瓦尔共和国	Bolivarian Republic of Venezuela	—
74	菲律宾	Philippines	0.200	—	萨摩亚	Samoa	—

注: “—”说明该年份的该经济体的数据缺失, 相应也没有其排序序号.

## 参考文献

- [1] Hansen T, Winther L 2011 *Eur. Urban Reg. Stud.* **18** 321
- [2] Fagerberg J E, Srholec M 2008 *Res. Policy* **37** 1417
- [3] Wignaraja G 2012 *J. Asian Econ.* **23** 224
- [4] Mohnen P, Dagenais M 2002 *Towards an Innovation Intensity Index: The Case of CIS 1 in Denmark and Ireland* In: *Innovation and Firm Performance* (London: Kleinknecht A, Mohnen P, eds.) pp3–30
- [5] Slaper T F, Hart N R, Hall T J, Thompson M F 2011 *Econ. Dev. Q.* **25** 36
- [6] Clayton T, Borgo M D, Haskel J 2009 <https://ssrn.com/abstract=1345684>
- [7] Żelazny R, Pietrucha J 2017 *Q. J. Econ. Econ. Policy* **12** 43
- [8] Crespo N F, Crespo C F 2016 *J. Bus. Res.* **69** 5265
- [9] Sohn S Y, Kim D H, Jeon S Y 2016 *Technol. Anal. Strateg. Manag.* **28** 492
- [10] McGrath M E, Romeri M N 1994 *J. Prod. Innov. Manag.* **11** 213
- [11] Narin F, Olivastro D 1988 *Technology Indicators Based On Patents And Patent Citations* In: *Handbook of Quantitative Studies of Science and Technology* (Amsterdam: Van Raan A F J, eds.) pp465–507
- [12] Guan J C, Gao X 2009 *J. Associat. Inf. Sci. Technol.* **60** 35
- [13] Csajbók E, Berhidi A, Vasas L, et al. 2007 *Scientometrics* **73** 91
- [14] Mester G 2016 *Interdiscipl. Descript. Compl. Syst.* **14** 1
- [15] Gao H 2014 *Internat. J. Adv. Manag. Sci.* **3** 128
- [16] May M, Brody H 2015 *Nature* **522** S1
- [17] Haunschild R, Bornmann L 2015 *Scientometrics* **102** 1829
- [18] Report of China Regional Innovation Index Research Group 2019 *Western China 2019 19* (in Chinese) [中国区域创新指数报告课题组 2019 中国西部 2019 19]
- [19] Bettencourt L M A, Lobo J, Helbing D, Kühnert C, West G B 2007 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **104** 7301
- [20] Bettencourt L M A, West G B 2010 *Nature* **467** 912
- [21] Arbesman S, Kleinberg J M, Strogatz S H 2009 *Phys. Rev. E* **79** 16115
- [22] Wunsch-Vincent S, Lanvin B, Dutta S 2015 *eSocialSciences Working Paper* id: 7491
- [23] Hirooka M 2003 *J. Evol. Econ.* **13** 549
- [24] Groot B de, Franses P H 2009 *Technol. Forecast. Social Chang.* **76** 1021
- [25] Hausman A, Johnston W J 2014 *J. Bus. Res.* **67** 2720
- [26] Gao J, Zhang Y C, Zhou T 2019 *Phys. Rep.* **817** 1
- [27] Hidalgo C A, Klinger B, Barabási A L, Hausmann R 2007 *Science* **317** 482
- [28] Hidalgo C A, Hausmann R 2009 *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **106** 10570
- [29] Caldarelli G, Cristelli M, Gabrielli A, Pietronero L, Scala A, Tacchella A 2012 *PLoS ONE* **7** e47278
- [30] Cristelli M, Gabrielli A, Tacchella A, Caldarelli G, Pietronero L 2013 *PLoS ONE* **8** e70726
- [31] Neffke F, Henning M, Boschma R 2011 *Econ. Geogr.* **87** 237
- [32] Tacchella A, Mazzilli D, Pietronero L 2018 *Nat. Phys.* **14** 861



SPECIAL TOPIC—Statistical physics and complex systems

# Relativistic regional innovation index and novel business cycle<sup>\*</sup>

Fang Xue-Jin   Cui Jun-Ying   Hu Dan-Dan   Han Xiao-Pu<sup>†</sup>*(Alibaba Research Center for Complexity Sciences, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China)*

( Received 16 December 2019; revised manuscript received 16 March 2020 )

## Abstract

In this paper, we propose a new type of relativistic regional innovation index by using the international patent application data. Based on the super-linear relationship between regional innovation and economic development, the new index can eliminate the influence of economic development level on innovation capabilities, and can effectively achieve the comparison of innovation capabilities among economies at different economic development levels. This new index is quite simple, and points out a series of new findings that are sharply different from the traditional cognitive phenomena, e.g. the index shows that the technological innovation capabilities of mainland China are among the highest in the world in 1980s. Moreover, the use of this new index not only can efficiently explain the economic growth of countries in the world at a higher level, but also find that there is a novel 20-year business cycle in the correlation between the index and economic growth rate. These results show that the index, as a simple single indicator, can achieve a higher degree of explanatory ability with minimal data dependence. This new index not only repositions the innovation capacity of world's economies, but also provides a new insight into an in-depth understanding of the relationship between innovation and economic development, and implies the development potential and application space such a kind of relativistic economic indicator.

**Keywords:** regional innovation index, business cycle, relativistic economic indicator, complexity in economy**PACS:** 89.65.Gh, 89.75.-k, 89.65.-s**DOI:** 10.7498/aps.69.20191970

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61873081, 11622538, 61673150, 61673151), the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (Grant Nos. LGF18F030007, LR16A050001), and the Ximmiao Talent Program of Zhejiang Province, China (Grant No. 2019R426070).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [xp@hznu.edu.cn](mailto:xp@hznu.edu.cn)