

# 基于Kaya模型的碳排放达峰实证研究\*

唐杰 崔文岳 温照杰 曾元 王东

(哈尔滨工业大学(深圳)经济管理学院, 广东 深圳 518055)

**[摘要]**化石能源是推动现代经济增长的重要生产要素,经济生产活动与碳排放活动密切相关。充分认识经济增长与碳排放之间的关系对转变生产方式,确定碳达峰、碳中和路径极为必要。本研究在对经济增长与碳排放关系现有研究梳理的基础上,系统地分析了碳排放达峰过程本质上是由碳排放强度、人均碳排放和碳排放总量三个顺序相连倒U曲线形成的渐次达峰动态过程。即,碳排放水平在经济发展初期会经历一个快速上升的过程,而在经济发展水平到达中高收入阶段后碳排放水平会逐渐降速并最终达峰。同时,研究在静态Kaya模型的基础上,对经济合作与发展组织(OECD)成员国与包括中国在内的非OECD主要经济体的碳排放达峰过程进行了实证比较分析,并对碳排放水平动态变化进行阶段性分析。实证结果表明,中国与OECD成员国均符合经济增长与碳排放达峰的基本发展规律,碳排放达峰与经济发展阶段关系存在一个连续的三个拐点四个阶段的相互关联,达峰顺序依次为碳排放强度、人均碳排放和碳排放总量。在碳排放达峰是应对气候变化的经济高质量发展的必经历程,要坚持市场导向的创新激励手段以及合理有效的政策引导实现绿色发展。

**[关键词]**碳排放 碳达峰拐点 中国 经济合作与发展组织 气候变化 Kaya模型

**[中图分类号]** F062.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 2096-983X(2022)03-0050-10

## 一、引言

习近平主席在第七十五届联合国大会上讲话时指出,“《巴黎协定》代表了全球绿色低碳转型的大方向,是保护地球家园需要采取的最低限度行动,各国必须迈出决定性步伐。中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,CO<sub>2</sub>排放力争于2030年前达到峰值,

努力争取2060年前实现碳中和。各国要树立创新、协调、绿色、开放、共享的新发展理念,抓住新一轮科技革命和产业变革的历史性机遇,推动疫情后世界经济‘绿色复苏’,汇聚起可持续发展的强大合力。”2020年12月12日,习近平主席在气候雄心峰会上宣布,到2030年,中国单位国内生产总值CO<sub>2</sub>排放将比2005年下降65%以上,非化石能源占一次能源消费比重将达到

**收稿日期:** 2021-10-19

**\*基金项目:** 深圳市战略性新兴产业和未来产业发展专项资金2017年第二批扶持计划项目“深圳低碳城市大数据工程实验室”(深发改[2017]1089号文件);深圳市战略性新兴产业和未来产业发展专项资金2017年第三批扶持计划项目“应对气候变化与低碳经济学科建设”(深发改[2018]725号文件)

**作者简介:** 唐杰,教授,博士研究生导师,博士,主要从事低碳经济与政策、创新经济学、空间经济学研究;崔文岳,博士研究生,主要从事经济学、创新与公共政策研究;温照杰,硕士研究生,主要从事低碳经济研究;曾元,博士后,博士,主要从事低碳经济与政策研究;王东(通讯作者),教授,博士研究生导师,博士,主要从事低碳经济与政策研究。

25%左右。早在2014年6月13日,习近平总书记在中央财经领导小组第六次会议上明确提出了“四个革命、一个合作”的重大能源战略思想,即:推动能源消费革命,抑制不合理能源消费;推动能源供给革命,建立多元供应体系;推动能源技术革命,带动产业升级;推动能源体制改革,打通能源发展快车道;全方位加强国际合作,实现开放条件下能源安全。推动能源消费、能源供给、能源技术及能源体制改革,全方位加强国际合作的战略构想。我国人均石油天然气资源不丰富且开采成本高,2017年我国已经超过美国成为世界第一大原油进口国,石油的对外依存度达到70%。大力推动能源革命,发展可再生能源是降低能源对外依存度,是保证国家能源安全和经济安全的重大措施。新能源革命展现出了相关技术与相关产业创新活动的巨大协同性,有可能成长为人类历史上空前的创新产业集群。

能源是推动现代经济增长的重要生产要素,经济生产活动与碳排放活动密切相关。充分认识经济增长与碳排放之间的关系对转变生产方式、确定碳达峰、碳中和路径极为必要。现有的部分研究也对经济增长与碳排放之间的关系进行了研究。例如,武红等基于VAR模型对中国化石能源消费与经济增长之间的关系进行了研究,发现当期GDP对碳排放总量的当期波动有显著性影响,每增加1%的GDP便会增加0.719%的碳排放量<sup>[1]</sup>。杨嵘等对中国西部地区碳排放和经济增长关系进行了探究,结果表明经济规模的高速增长是导致碳排放增加的主要因素,经济结构的调整变化对碳排放的减少有很大潜力<sup>[2]</sup>。Zhang等对中国经济增长和碳排放之间的格兰杰因果关系进行了检验,结果表明从长期来看碳排放并不是经济增长的格兰杰原因,因此中国政府完全有可能在不损害经济增长的同时实现碳达峰<sup>[3]</sup>。已有的研究大多关注某一国家或者特定地区内碳排放与经济增长的关系<sup>[4-6]</sup>。在更宏观的视角下,经济增长与碳排放之间的是否存在特定的关系有待进一步探

究。此外,现有的研究更多从实证的角度讨论碳排放与经济增长的关系,在理论上厘清二者之间的关系还不是很充分。

经济合作组织(OECD)从20个国家发展为36个国家,近13亿人口,占世界经济总量超过了60%,包括了高收入国家,也有墨西哥和土耳其等中等收入国家,实现了人均碳排放和碳排放总量达峰。实证检验OECD达峰过程阶段性特征,以及经济发展、结构变化以技术创新过程,有助于我们以更宽的视野审视应对气候变化与碳排放达峰的关系。基于此,本文在讨论经济增长与碳排放达峰过程的理论上,实证检验了OECD国家碳排放达峰过程并与以中国为代表的非OECD国家进行对比分析以总结出碳排放达峰过程与经济增长之间关系的阶段性特征。本文相比于已有研究可能的贡献有三个方面:第一,本文在Kaya理论上探究了碳排放过程与经济增长之间的关系。第二,本文并非关注国内特定区域而是在更加宏观的视角下实证检验了碳排放达峰过程与经济增长之间的关系。第三,本文丰富了碳排放与经济增长之间动态关系的研究文献,为该领域的进一步研究做了铺垫。

## 二、Kaya模型动态与碳排放达峰的三重拐点

过去数十年,经济学家和科学家开发了大量碳排放因素与碳排放达峰分析方法,Kaya提出的Kaya恒等式非常简捷,却是有较强可扩展性的核算分析方法<sup>[7]</sup>,具体表述为:

$$C=P\left(\frac{C}{P}\right)\left(\frac{E}{G}\right)\left(\frac{C}{E}\right)=Pg_{ec}=G^* \frac{C}{G}=G^*h \quad (1)$$

式中:

C——碳排放总量

P——总人口数量

G——GDP总量

E——能源消费总量

g——人均GDP

e——能源强度,单位GDP所消耗的能源



$c$ ——能源碳排放强度,单位能源消耗产生的碳排放

$h$ ——碳排放强度,单位GDP所产生的

Kaya模型简捷表现为,我们采用两边对数并对时间进行一阶偏导即得到:碳排放增长率=人口增长率+人均GDP增长率+单位GDP能耗增长率+单位能耗碳排放增长率。当碳排放达峰时,碳排放增长率为0,得到:人口增长率+人均GDP增长率=单位GDP能耗下降率+单位能耗碳排放下降率,即人口和经济增长与碳排放脱钩。脱钩来自于能源效率提高和能源结构从高碳能源向低碳以及零碳能源转型。

国际货币基金组织(International Monetary Fund)在《2019世界经济展望》中采用Kaya分解证实,2013—2017年全球能源强度和碳排放强度下降减缓了碳排放总量增长<sup>[8]</sup>。2018年较低的能源强度降幅无法抵消人口增长和人均收入增长引起的碳排放增加,2017年全球碳排放量较上年增长1%,2018年则比2017年增长了2%。21世纪以来,中国对全球碳排放增长影响发生了重要变化。2015年中国煤炭消费量下降了3.7%,2015年中国能源消耗为43亿吨标准煤,2020年限制目标为50亿吨,大气污染治理与风能、太阳能和核能发展成为强制性目标。根据国家统计局的初步核算,2020年能源消费总量49.8亿吨标准煤,煤炭消费量占能源消费总量的56.8%,比上年下降0.9个百分点<sup>[9]</sup>。Tollefson<sup>[10]</sup>认为,中国有可能会比预计更早达到碳排放总量峰值。但中国电力需求仍将高速增长,需要推动电力行业脱碳,以加快碳排放强度的下降率。<sup>[11-12]</sup>

简捷是Kaya恒等式的优点,但问题在于缺乏有关碳排放趋势变化的动态分析。本研究的起点在于,明确Kaya模型内在的动态含义,从而进行碳排放水平动态变化的阶段性分析。为了避免叙述过于繁琐,我们将Kaya模型中基础变量合并为五个,即碳排放量 $C$ 、总人口 $P$ 、总产出 $Y$ ,人均产出 $Y/P$ 、碳排放强度 $CI$ ,碳排放增长率 $y$ =人口增长率 $n$ +人均产出增长率 $m$ +碳排放强度增长率 $x$ ,由此得到三个动态化方程。

1. 现代经济增长的基本特征是人均产出持续提高,依索洛模型必有经济增长率 $m$ 高于人口增长率 $n$ ,即 $m-n>0$ ;

2. 碳排放强度 $CI=C(1+x)/Y(1+m)$ ,当 $x>m$ 时,碳排放强度上升;

3. 人均碳排放 $PC=C(1+x)/P(1+n)$ ,当 $x>n$ 时,人均碳排放上升;

对方程1~3联立求解后,我们可以发现Kaya模型动态化的结论是,碳排放达峰过程应当表现为与四个发展阶段相一致的三个内生的碳排放拐点。

拐点1为碳排放强度拐点,能源边际效率稳定。经济增长的规模效应对偶为碳排放量增长及环境生态压力累积。碳强度 $CI$ 上升,单位产出的碳排放量上升,等价于能源作为生产要素的边际效率递减;能源结构不变时,技术改进使能源边际效率从递减走向稳定,碳强度拐点为 $\Delta CI=0$ , $CI$ 为常数, $x=m$ 时,碳排放增长决定于人口和经济增长率。

拐点2为人均碳排放拐点,经济增长对碳排放量影响从规模效应转向收入效应。现代经济增长创造了更高的要素效率,生产过程中单位产出碳排放水平下降,人均收入提高引起了更高的人均能源消费以及更高的人均碳排放量,有 $x<m>n$ 转变为 $m>x>n$ 。经济增长率 $m$ 高于碳排放增长率 $x$ 对应能源结构不变时,能源产出边际效率上升;经济增长率和碳排放增长率高于人口增长率 $n$ 决定了更高人均收入对应着更高的人均碳排放量 $PC$ 。在图1中,从 $PC_0$ 上升至 $PC_1$ , $PC_1*P(1+n)>Ct_0$ ,碳排放总量上升。人均碳排放量 $PC$ 不变, $\Delta PC=0$ 时达到第二个拐点。由 $m>n>x$ ,人均收入水平提高与人均碳排放增长脱钩。在人口增长率 $n>0$ 时,碳排放总量继续上升。

拐点3为碳排放总量达峰。经济发展达到更高的人均收入水平,要素边际收益增长率高于人口增长率,碳排放的收入效应消失,碳排放总量达峰,构成第三个拐点。作为经济增长转型的重要标志,能源效率持续提高使人均碳

排放下降率超过人口增长率,即 $PC_0/PC_1>n$ 。

由此,Kaya恒等式动态化可表达为,在一个封闭区间内,人均收入水平提高对应着更高

要素边际收益水平,在经济发展的四个阶段中,依次达到碳排放强度、人均碳排放和碳排放总量三个拐点,形成了顺序相接的三个倒U曲线。

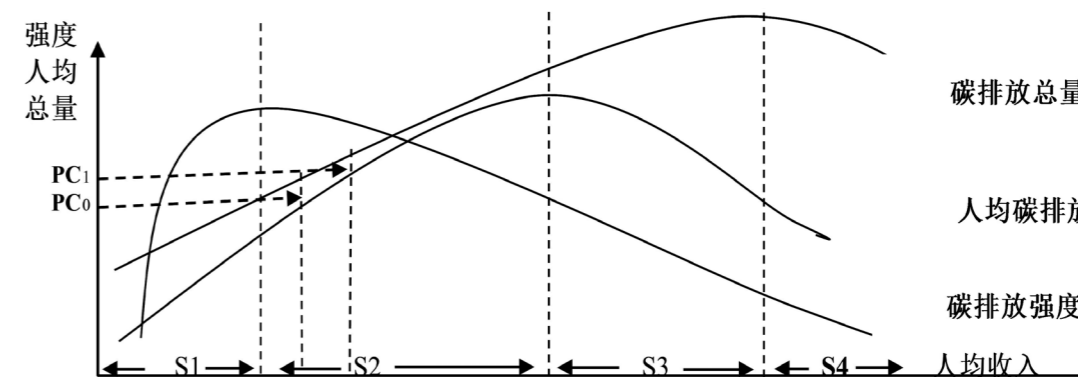


图1 碳排放达峰三个拐点与四个阶段的倒U型曲线演化过程

在图1中,S1阶段表达了现代工业文明起源于化石能源大量广泛使用,工业化和城市化加快,产出规模迅速扩大。经济增长与高碳依赖同时发生,生态环境恶化,碳排放强度、人均碳排放及碳排放总量均处在上升期。进入S2阶段,经济增长方式在碳强度达峰与人均碳排放达峰之间转换,碳排放总量增长率从放缓转向下降,产业结构调整和技术创新逐渐构成了新的增长方式,但因排放的累积效应,往往会出现一定时期内环境污染和生态环境突发性恶化。S3阶段是人均碳排放峰值和碳排放总量峰值之间的转换阶段,产业结构、能源结构高级化和新技术更加广泛的使用,碳排放的收入效应逐渐弱化,更高的人均收入对应了人均碳排放增长放缓,但只要人均碳排放下降速度低于人口增长速度,碳排放总量仍然上升。S4阶段碳排放总量达峰,碳排放与经济增长脱钩,人均收入持续提高,人均碳排放量加快下降,经济增长与碳排放量逆向变化。产业升级能力越强,技术进步速度越快,能源革命引发的能源结构变化就越显著,化石能源占比下降,电力成为主

体能源,可再生能源发电成为电力的主体<sup>[8]</sup>。这个阶段不是约束经济增长,而是一个以创新、以更高的要素效率,取代传统的高度依赖要素数量型投入的增长过程,也是对传统工业化和城市化、过度消耗自然资源和过度依赖化石能源的生产与生活方式的反思与遏制。<sup>①</sup>

当我们把碳排放达峰过程纳入经济增长动态优化框架时,可知,索洛模型定义了满足要素投入获得最优经济增长的条件和路径。采用CD函数并经过人均化处理,有人均产出 $y$ 的增长决定于人均资本量 $f(k)$ 增长, $y=Af(K/L,1)=f(k)$ , $f$ 表示一定时间 $t$ 的技术水平,人均资本量增长的条件是,人均边际产出增长大于人口增长。要素边际产出递减时, $f'(k)>0$ , $f''(k)<0$ ;满足稻田条件: $f(0)=0$ , $f'(0)=\infty$ , $f'(\infty)=0$ 。经济增长初期,人均资本量较低, $\Delta k$ 的人均产出增长快, $k$ 不断积累, $\Delta k$ 对人均产出增长贡献减弱。达到拐点后,持续的经济增长依赖于全要素生产率 $A$ 的提高。动态最优解可简捷地表达为:效用函数为 $u(c_t)$ ,行为人在时间 $t$ 的消费 $c_t$ , $t \in [0, \infty]$ , $\theta$ 为时间偏好率,跨

①理性经济人既是生产者也是消费者,人均碳排放量乘以总人口是全部物质产品和服务需求中所包含的碳排放总量。在封闭条件下,经济体的供给端和需求端产生的碳排放应相等。开放条件下,双边或多边的贸易结构存在差别,一国生产与需求的碳排放量不一致是常态。我们可简捷地表达为,高收入经济体对应着单位产出能耗效率高和碳排放水平低的高级产业形态,生产的碳排放总量会低于需求的碳排放总量;中低收入国家的产业结构水平较低,生产的碳排放会高于消费碳排放。本文中我们聚焦在封闭经济的碳排放达峰过程。



期最优化为,  $\text{Max } U_0 = \int u(c_t)e^{-\rho t} dt$ ,  $\Delta k$  写为:  $dk_t/dt = f(k_t) - nk_t - c_t$ , 即对于所有时间  $t$ ,  $k_0 > 0$ ,  $k_t > 0$ ,  $c_t > 0$ , 由Hamilton方程有  $dk_t/dt = f(k_t) - nk_t - c_t$ , 即人均资本量增长减去人口增长率与消费增长率构成一条倒U曲线。一阶条件为, 要素边际收益增长率等于消费增长率+时间偏好率,  $(n + \rho - f'(k_t) = 0)$ , 横截条件  $\lim_{t \rightarrow \infty} k_t u'(c_t) e^{-\rho t} = 0$ , 两条线的相交点即为动态最优均衡点。当期时间偏好  $\theta$  越高, 未来效用越低。对当期增长过度关注, 过度储蓄也会因边际收益递减, 损失长期增长利益。创新与新技术采用提高了要素效率, 人均产出的倒U曲线向上方移动, 同样的储蓄水平生成的人均资本能够创造出更高的人均产出。

在跨期动态最优中引入能源与碳排放影响对经济增长影响。采用Acemoglu等<sup>[13]</sup>的假设,  $f(k)$ 中的 $k$ 为包括了不同技术水平的产业部门矩阵。技术条件不变的资源优化配置表现为, 高污染、高排放的低端落后产能退出, 有限资源再配置到高能源效率部门。这显然是我国环境治理与应对气候变化协同方案得到实现的情景。一项有关我国超大城市实证研究证实, 协同战略可以有效推动环境达标、碳排放达峰和产业结构高级化之间的协同。依据对环境污染与碳排放溯源和政策效果标准化比较发现, 环境防治对碳减排影响达到75%以上, 碳减排措施对环境污染防治贡献影响更显著, 超过86%。环境污染防治和碳减排与产业结构高级化之间存在相互推动关系<sup>[14]</sup>。<sup>①</sup>

市场粘性程度高时, 碳减排政策可能引起当期经济增长率下降。政府面对这种退出效应, 若是选择坚持, 可能会经过一个时滞后, 实现资源再配置于高效率部门的转型。更完整的表达是, 高市场粘性对应着低结构转换率; 低市场粘性对应着高结构转换率和高全要素生产率。聪明的政府不是推动更多的要素投入, 而是通过政策法规和标准引导鼓励要素的动态高端聚集引发新一轮增长。以 $f(\cdot)$ 为代表性企业的技术水平, 高于其上的企业可以获利, 与之相当的企业能够生存, 低于其下的企业会走向消亡。企业要在市场中竞争生存必须不断地创新和采用新的技术, 在现实生活中这种竞争生存的市场激励驱动企业不断改进技术, 不断演绎着知识创造知识、知识积累推动高质量增长<sup>[15]</sup>。能源消费部门使用效率和能源供给部门的生产效率的双重提高的效应, 有助于消除碳排放减排约束当期经济增长的忧虑, 构成跨期技术进步和创新的推动力。<sup>②</sup>

对政府碳减排政策有效性的评价标准是, 提高或降低了跨期的社会有效产出, 当期用于减排的投资, 是否有效降低了环境损害、增加了未来消费。碳排放成本是动态变化的, 经济发展水平提高, 碳排放社会成本(SCC)上升。Nordhaus<sup>[16]</sup>将每公吨碳排放具体化为2010年不变价美元, 降低碳排放水平使美国获得了超过1万亿美元的收益。长期最优经济增长的研究, 因此有了新的含意, 气候变化政策效果可以观测、可以评估, 可依据经济增长的绩效变

①《深圳市碳排放达峰、空气质量达标、经济高质量增长协同“三达”研究报告》由能源基金会资助, 总报告执笔蒋晶晶等人, 参加单位有哈尔滨工业大学(深圳)、深圳市城市发展研究中心、深圳市环境科学研究院、北京大学深圳研究生院、深圳市建筑科学研究院、深圳市都市交通规划设计研究院、劳伦斯伯克利国家实验室中国能源组。2019年6月完成报告, 并于当年8月通过专家评审。

②诺德豪斯指出, 经济活动碳排放提高了大气CO<sub>2</sub>浓度, 碳浓度引起全球变暖, 造成长期经济损失, 是典型的影响巨大的市场失灵。基于社会净产出概念, Nordhaus(2011)将碳排放的社会福利损害 $\Omega$ 引入动态最优模型,  $\Lambda$ 为降低碳排放所需要的社会投入, 写为:  $Q = \Omega(1 - \Lambda)AF(K, L)$  其中:  $\Omega$ 具体化为碳排放量累积造成温度上升的负效用,  $\Lambda$ 是碳减排的函数。当碳减排负效用可以量化时, 政府对市场失灵采取的干预措施就具备了成本收益评价标准, 写为 $\mu$ 。政府采取降低碳排放的政策, 会使碳排放强度下降, 改变社会的时间偏好, 引导创新转向低碳排放技术。对加入了碳排放因素的动态均衡模型求解, 可得碳排放的社会成本是一个增量比, 即碳排放边际增量与边际社会消费下降之比。

化进行调整。最优投资选择的核心在于实现有效市场与有为政府协同, 依靠市场机制和政策导向推动全社会识别和追踪引领未来的创新发展方向。

### 三、OECD国家碳排放达峰阶段趋势实证检验

#### (一)方法与模型

$$\ln(C_{it}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(\text{pgdp}_{it}) + \beta_2 [\ln(\text{pgdp}_{it})]^2 + \beta_3 X_{it} + \alpha_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

其中,  $C_{it}$ 代表本文所要检测的碳排放强度、人均碳排放以及碳排放总量。 $\text{pgdp}_{it}$ 代表人均GDP。 $X_{it}$ 代表一系列控制变量, 包括产业结构、技术进步、社会就业情况以及研发支出情况。 $\beta_0$ 是基础常量,  $\alpha_i$ 代表个体固定效应,  $\gamma_t$ 时间固定效应,  $\varepsilon_{it}$ 代表随机误差项。接下来将代入具体的数据检验模型。

#### (二)数据说明

本文所使用CO<sub>2</sub>排放数据来自美国橡树岭国家实验室信息分析中心(CDIAC), 其余数据来自OECD官方数据库<sup>①</sup>, 共包括36个成员国国家。数据时间跨度为1950年至2018年。数据描述性统计如表1所示。本文所有价值数据均以2011年为基期进行平减处理。

表1 描述性统计

变量	变量描述	观测值	均值	标准差	最小值	最大值
Log (Co <sub>2</sub> )	碳排放总量	2088	23.77	1.65	18.98	28.08
Log (CI)	碳排放强度	2088	-9.11	0.55	-10.88	-7.37
Log (Co <sub>2</sub> pc)	人均碳排放	2088	0.57	0.76	-3.55	2.40
Log (GDPpc)	人均GDP	2088	9.82	0.67	6.98	11.34
Log (Patent)	专利数	2470	2.93	2.63	0.69	6.90
Log (R&D)	研发支出	2470	5.84	0.96	0.69	6.84
EMPLOY	雇佣率	931	0.65	0.68	0.44	0.85
PropIndus	工业增加值占比	2470	57.58	2.70	6.15	45.63

#### (三)实证结果及达峰过程分析

##### 1. 实证结果

如表2所示, 为OECD国家碳排放强度、人均碳排放以及碳排放总量与人均GDP的实证检验结果。其中模型1、模型2为碳排放强度与人均GDP回归结果, 模型3、模型4为人均碳排放与人均GDP回归结果, 模型5、模型6为碳排放总量与人均GDP回归结果。从回归结果来看, 人均GDP

的平方项与一次项的系数均是显著的, 即三个指标与人均GDP的关系均呈现出显著的“倒U”形态, 与本文前述理论相符。根据模型1、模型2的回归结果来看, OECD国家碳排放强度峰值是在人均GDP约14, 000美元附近实现的。根据模型3、模型4的回归结果来看, OECD国家人均碳排放峰值实在人均GDP大约36, 000美元附近实现的。根据模型5、模型6的回归结果来看,

①数据库网站: <https://stats.oecd.org/Index.aspx>.

OECD国家碳排放总量在人均GDP大约42,000美元附近达到峰值的。此外,在加入可能影响碳排放的相关控制变量后,实证检验结果表明人均GDP每增加1个百分点,将会引发碳排放强度、人均碳排放以及碳排放总量降低0.25至0.35个百分点。

### 2. 达峰过程分析

从碳排放强度方面来看,目前36个OECD成员国国家均已实现了碳排放强度达峰。事实上,人类大规模碳排放从工业革命开始,碳排放强度受能源结构及产业结构、技术水平等多种因素影响,工业化进程开始越早,碳排放强度峰值出现的时间越早,如英国在1883年就达到了峰值。从具体国家来看,达到碳排放强度峰值的人均GDP略有不同,英国、美国在人均GDP 6000美元和8000美元左右达到峰值,意大利、澳大利亚则在20,000美元和26,000美元左右实现碳排放强度达峰。尽管不同国家达到碳排放强度峰值的人均GDP水平和峰值水平存在差异,但碳排放强度达峰后服从于趋同分布。2014年,

除爱沙尼亚外的其余OECD国家碳排放强度均低于0.3KgCO<sub>2</sub>/US\$。

人均碳排放“倒U”型曲线存在可以观测的S2区间,但各国时间长度不一致。人均碳排放峰值13.7tCO<sub>2</sub>/人,人均GDP均值约为36,000美元,分布范围比碳排放强度更宽,在3000~81,000美元之间。12个国家在17,000美元以下达到人均碳排放峰值,15个国家在17,000~34,000美元达峰,6个国家在34,000~51,000美元达峰,挪威在80,000美元以上实现人均碳排放达峰,跨过高收入门槛后实现人均碳排放达峰是普遍现象。<sup>①</sup>

从碳排放总量达峰全过程来看,在碳排放达峰的四个阶段中,S1—S2时间最长。碳排放强度峰值与人均碳排放峰值之间的时间间隔平均为45年。人均碳排放峰值与碳排放总量峰值之间的间隔,即S2—S3的时间较短,平均为9年。从碳排放达峰的四个阶段来看,每一个阶段达到峰值的时间整体呈现越来越短,碳排放达峰具有内在的加速趋势。

表2 OECD国家碳排放与人均GDP (1950—2018)

	碳排放强度 (FE)		人均碳排放 (FE)		碳排放总量 (FE)	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Log (GDPpc) <sup>2</sup>	-0.25*** (0.01)	-0.25*** (0.01)	-0.33*** (0.01)	-0.28*** (0.01)	-0.35*** (0.12)	-0.34*** (0.01)
Log (GDPpc)	4.73*** (0.18)	4.81*** (0.19)	7.05*** (0.19)	6.04*** (0.19)	7.49*** (0.22)	7.39*** (0.23)
控制变量	NO	YES	NO	YES	NO	YES
个体固定效应	YES	YES	YES	YES	YES	YES
时间固定效应	YES	YES	YES	YES	YES	YES
常数项	YES	YES	YES	YES	YES	YES
R <sup>2</sup>	0.70	0.71	0.78	0.77	0.82	0.82
F	72.26	69.84	109.88	141.94	137.99	138.35
观测值	2088	2088	2088	2088	2088	2088
峰值人均GDP	约14,000美元		约36,000美元		约42,000美元	

注:\*\*\*、\*\*和\*分别为1%、5%和10%水平上显著;括号内为聚类稳健标准误,标准误聚类到国家层面。

①低于17,000美元实现人均碳排放达峰多与经济衰退相关,如爱沙尼亚、拉脱维亚、立陶宛等国家。

### (四) 非OECD主要经济体与中国碳排放趋势实证检验

基于回归模型4我们对非OECD成员主要经济体进行了实证检验,样本国家包括中国、俄罗斯、巴西、南非、印度尼西亚、秘鲁以及印度七个国家,数据时间范围为1970年至2018年。同时作为对照,我们单独对中国碳排放的时间序列进行了分析。相关数据来自OECD官方数据库网站。<sup>①</sup>

7个非OECD国家的碳排放回归结果如表3所示。从具体实证结果来看,模型7列为碳排放强度与人均GDP的回归结果,结果表明这7国总体上在人均GDP达到3000美元附近实现了碳排放强度达峰。模型8列为人均碳排放与人均GDP的回归结果,结果表明人均碳排放与人均GDP达到35,000美元附近实现达峰。模型9列为碳排放总量与人均GDP回归结果,结果表明碳排放总量在人均GDP达到48,000美元附近实现达峰。总体上来看,这7个国家的碳排放强度、人均碳排放以及碳排放总量与人均GDP之间的关系均呈现出显著的“倒U”形态,且各指标达峰点与理论部分的描述基本吻合。

单独从我国发展阶段转换的时间点看,1977

年我国在0.8KgCO<sub>2</sub>/US\$的水平上经历了第一次碳排放强度峰值,21世纪初经历了一轮上升过程,目前已回落到了0.62KgCO<sub>2</sub>/US\$。与OECD碳排放强度平均达峰值为0.9KgCO<sub>2</sub>/US\$相比较,以1977年为碳排放收入效应阶段S2的起点至今为43年,接近OECD平均45年的时间跨度。目前,我国人均碳排放水平为8吨/人,与目前OECD人均碳排放达峰时13.7吨/人平均水平还大距离。预计到2030年,我国人均碳排放量会超过9吨,OECD人均碳排放水平在可能降至11吨,我国实现碳排放达峰的条件是现实的。届时,我国人均GDP折合为2010年不变价美元会超过15,000美元,仍然明显低于OECD人均碳排放达峰的平均水平。过去20年,产业技术和可再生能源等低碳技术发生了革命性的变化。但我国在2030年的人均GDP水平仍然明显低于OECD实现碳排放达峰时水平,从这一点看,这是我国对人类可持续发展的重大贡献。不过从供给侧结构性改革看,2030年实现碳排放达峰,将对我国加快产业结构升级,采用更多提高能源效率、减少碳排放的新技术和新产业组织方式有显著的促进作用,会提高我国经济的运行效率,也是加快生态文明建设的重大成就。

表3 非OECD成员主要经济体回归结果 (1970—2018)

	碳排放强度 (FE)	人均碳排放 (FE)	碳排放总量 (FE)
	(7)	(8)	(9)
Log (GDPpc) <sup>2</sup>	-0.11*** (0.02)	-0.12*** (0.02)	-0.09*** (0.03)
Log (GDPpc)	1.62*** (0.47)	2.51*** (0.47)	1.94*** (0.48)
控制变量	YES	YES	YES
个体固定效应	YES	YES	YES
时间固定效应	YES	YES	YES
常数项	YES	YES	YES
R <sup>2</sup>	0.75	0.72	0.75
F	52.13	29.70	47.69
观测值	116	116	116
峰值人均GDP	约3000美元	约35,000美元	约48,000美元

注:\*\*\*、\*\*和\*分别为1%、5%和10%水平上显著;括号内为聚类稳健标准误,标准误聚类到国家层面。

①数据库网站: <https://stats.oecd.org/Index.aspx>.



#### 四、结论与建议

本文基于Kaya模型讨论了碳排放达峰过程与经济增长之间的动态关系。在此基础上,我们对OECD国家碳排放过程与经济增长之间的关系进行了实证检验,同时与非OECD主要经济体进行了对比研究。研究发现:第一,碳排放达峰是由碳排放强度、人均碳排放和碳排放总量三个顺序相连倒U曲线形成的渐次达峰动态过程。这表明碳排放水平在经济起飞初期会快速上升,随着经济发展水平的提升碳排放水平逐渐降速并最终实现排放达峰。第二,实证结果支持碳排放达峰过程具有EKC式的倒U曲线的一般特征,碳排放达峰与经济发展阶段关系表现为,一个连续的三个拐点四个阶段的相互关联,达峰顺序依次为碳排放强度、人均碳排放和碳排放总量。第三,OECD经济体实现碳排放强度、人均碳排放和碳排放总量达峰具有统计支持的经济发展阶段对应性,可以观察到三个拐点间的平均时间长度。与OECD比较,我国碳排放达峰在碳排放强度达峰后,在远低于OECD人均GDP水平时,已经接近了人均碳排放峰值。需要综合考虑的问题是,目前我国碳排放强度超过OECD平均水平的两倍,人口增长率很低,在我国转向质量型增长时,有可能出现S2和S3合并为一个阶段,人均碳排放量与碳排放总量几乎同时达峰,这是部分OECD国家也曾经经历过的。这要求,碳排放强度下降速度高于人均收入增长速度,从 $m > x > n$ ,转向 $m > n > x$ ,碳排放增长率 $x$ 逼近人口增长率 $n$ 。加快经济增长模式转变是实现我国碳排放强度更快下降的基础条件,2030年我国实现碳达峰是经过努力能够实现的目标。

根据研究发现,我们提出以下几点建议:首先,应重新认识经济增长与碳排放之间的关系,要坚定地推动我国碳排放达峰进程。目前 有观点认为限制碳排放会损害经济增长。我们不否定短期内碳排放约束会对经济增长产生影响,但长期来看碳排放会随着经济增长逐渐达峰,

本研究也支持这一观点。因此,不应当片面地认为碳排放约束一定损害经济增长,应该形成“减排”的统一共识,促进社会经济高质量发展。其次,应注重培育新的可持续的经济增长动能。欧盟在发展节能技术,提高能源效率,改变能源结构,提高可再生能源比例方面已经形成了领先并不断扩大的技术和体制创新优势。以能源革命推进产业技术颠覆性革命,有可能创造科技革命推动经济转型的新辉煌。人类历史上重复发生的错误就是低估科技创新对成本降低的影响,对技术突破的心理预期过于保守,这些都需要我们转变意识,更好得看待新技术的发展及其带来的收益。新能源革命创新的产业链条生长与延伸过程中,智能化、网络化大规模计算是创新基础,也会不断推动创新。最后,应针对不同领域完善可量化政策体系。各国政府在不同领域的碳排放政策设计,如碳税或碳排放配额交易等,对长期增长产生可以量化的政策效应。例如,欧盟通过碳税/补贴政策实施建筑节能减排,将碳税与碳排放价格挂钩从而和欧盟碳排放交易体系关联,形成了良好的效果<sup>[17]</sup>。美国在促进碳排放交易市场健康发展方面实施的一系列税收政策在极大地激发了碳交易市场活跃度对同时又保障了碳排放主体税收公平<sup>[18]</sup>。这些经验值得我们借鉴并转化,形成更加有利于碳排放达峰并迈向碳中和的体制机制。

#### 参考文献:

- [1]武红,谷树忠,关兴良,等.中国化石能源消费碳排放与经济增长关系研究[J].自然资源学报,2013(3):381-390.
- [2]杨嵘,常焜钰.西部地区碳排放与经济增长关系的脱钩及驱动因素[J].经济地理,2012(12):34-39.
- [3]Zhang X P, Cheng X M. Energy consumption, carbon emissions, and economic growth in China[J]. Ecological Economics, 2009, 68(10): 2706-2712.
- [4]Ghosh S. Examining carbon emissions economic growth nexus for India: A multivariate cointegration approach[J]. Energy Policy, 2010, 38(6): 3008-3014.
- [5]Uddin M G S, Bidisha S H, Ozturk I. Carbon emissions, energy consumption, and economic growth

- relationship in Sri Lanka[J]. Energy Sources Part B Economics Planning & Policy, 2016, 11(3): 282-287.
- [6]Godwin, Effiong, Akpan, et al. Electricity consumption, carbon emissions and economic growth in Nigeria[J]. International Journal of Energy Economics & Policy, 2012, 2(4): 292-300.
- [7]Kaya Y. Impact of carbon dioxide emission control on GNP growth: Interpretation of proposed scenarios, 2019, IPCC Response Strategies Working Group Memorandum.
- [8]IMF. World Economic Outlook. [EB/OL] (2020-10-07) [2021-08-06] <https://www.imf.org/en/publications/weo?page=1>.
- [9]中华人民共和国2020年国民经济和社会发展统计公报[R].北京:国家统计局,2021.
- [10]Tollefson J. China's carbon emissions could peak sooner than forecast[J]. Nature News, 2016, 531(7595): 425.
- [11]韩梦瑶,刘卫东,唐志鹏等.世界主要国家碳排放影响因素分析——基于变系数面板模型[J].资源科学,2017(12):2420-2429.
- [12]Chen, J. An empirical study on China's energy

- Supply-and-Demand model considering carbon emission peak constraints in 2030 [J]. Engineering, 2017, 3(4): 512-517.
- [13]Acemoglu D, Aghion, P, Bursztyn L, & Hemous D. The environment and directed technical change[J]. American Economic Review, 2012(102): 131-166.
- [14]唐杰等.深圳市碳排放达峰、空气质量达标、经济高质量增长协同“三达”研究报告[R].北京:能源基金会,2019.
- [15]唐杰,戴欣.深圳力争成为全球创新标杆城市[J].中国发展观察,2020(17):10-12.
- [16]Nordhaus W D. Revisiting the social cost of carbon[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2017, 114(7): 1518-1523.
- [17]陈小龙,刘小兵.基于碳税/补贴的建筑碳排放管制政策研究——以欧盟的建筑碳排放政策为例[J].城市发展研究,2013(10):21-27.
- [18]马海涛,刘金科.碳排放权交易市场税收政策:国际经验与完善建议[J].税务研究,2021(8):5-11.

【责任编辑 史敏】

#### An Empirical Study on the Peaking of Carbon Emissions Based on the Kaya Model

TANG Jie, CUI Wenyue, WEN Zhaojie, ZENG Yuan & WANG Dong

**Abstract:** Fully understanding the relationship between economic growth and carbon emissions is extremely necessary to transform production methods and determine carbon peaking and carbon neutrality paths. Based on a brief review of the existing research on the relationship between economic growth and carbon emissions, this paper systematically analyzes that the process of peaking carbon emissions is essentially connected by three sequences of carbon emission intensity, per capita carbon emissions, and total carbon emissions. The gradual peak dynamic process of curve formation. That is, the carbon emission level will experience a rapid increase in the early stage of economic take-off, and after the economic development level reaches the middle and high income stage, the carbon emission level will gradually slow down and finally reach a peak. Secondly, based on the static Kaya model, it conducts an empirical comparative analysis on the peaking process of carbon emissions between OECD member countries and non-OECD major economies including China, and conducts a periodic analysis of the dynamic changes in carbon emissions levels. The empirical results show that China and other economies and OECD member countries are in line with the basic development law of economic growth and carbon emission peaking, and the relationship between carbon emission peaking and economic development stages has a continuous three inflection points and four stages. The peak order is carbon emission intensity, per capita carbon emission and total carbon emission. Finally, based on the understanding that the peaking of carbon emissions is the expression of high-quality economic development in response to climate change, this study proposes to adhere to market-oriented innovative incentives and reasonable and effective policy guidance.

**Keywords:** carbon emissions; turning point of carbon emissions peak; China; OECD; climate change; Kaya model