

## 要素替代、技术进步偏向与碳生产率增长

孙 猛\*

**摘要:**提高碳生产率不仅是2030年前实现碳达峰的关键所在,也是绿色高质量发展的必然要求。本文通过构建一个集成DEA框架将能源结构、要素替代、全要素生产率与单要素碳生产率统一起来,实证分析了中国碳生产率的驱动因素、演变特征以及动力转换机理。结果表明:中国碳生产率呈现阶段性正向增长态势,资本替代效应持续发挥了主导作用。从地区差异来看,中西部省份要素替代效应的后发优势明显,但是全要素生产率却远远滞后于大多数东部省份。偏向分解显示,中国低碳经济主要以索罗中性技术进步为主,并通过不断提升资本替代边际产出而引致其较高的积累速度,但是资本积累速度持续高于产出增速也造成了大量技术闲置和资源浪费,致使资本替代效应与全要素生产率形成鲜明的反向角力态势。本文建议从优化能源结构、推动资本能源替代转型、构建绿色技术创新体系等方面助力整体碳生产率提升。

**关键词:**碳生产率;要素替代;技术进步偏向;增长动力

### 一、引言

经济活动产生的大量温室气体导致全球气候发生显著变化,给人类赖以生存的自然生态环境和经济社会发展带来诸多不可预测的风险。确保经济稳定增长的同时促进温室气体减排是世界各国应对全球气候变化的共同行动目标,而提高碳生产率则是能够实现二者之间协调发展的有效路径(He et al., 2010)。因为碳生产率能够与劳动生产率、资本生产率等指标相比较,其经济内涵在于衡量了单位碳排放所带来的相应产出(潘家华, 2010)。当前,中国已经成为世界上最大的碳排放国家,为了承担大国减排责任、强化应对气候变化行动,国家主席习近平在气候雄心峰会上进一步提出到2030年中国单位国内生产总值二氧化碳排放量比2005

\*孙猛,吉林大学东北亚学院,吉林大学东北亚研究中心,邮政编码:130012,电子信箱:sunmeng\_meng@163.com。

本文系国家哲学社会科学基金青年项目“中国省域碳生产率增长潜力研究”(17CJY023)的阶段性成果。感谢匿名审稿专家提出的修改建议,文责自负。

年下降65%以上的自主行动减排目标,这意味着碳生产率至少要提升1.86倍。如果二氧化碳排放要在2030年之前达到峰值,那么碳生产率的进一步提高将面临着经济增长方式转变和技术进步偏向调整的严峻挑战。因此,如何科学合理地实现减排目标,需要对要素替代和全要素生产率等动力因素对碳生产率增长的作用机制有更为深刻的认识,这对于探寻稳定增长、促进减排的绿色高质量发展路径具有重要意义。

碳生产率不仅是低碳经济增长来源的主要分析工具,同时也是政府制定长期可持续发展政策的重要依据。现有文献分别从不同视角揭示了一些国家或地区的碳生产率演变规律,其研究内容主要集中在区域增长差异和影响因素识别等方面。在区域差异演变特征的文献中经常采用泰尔指数、脱钩指数和收敛分析等研究方法,重点考察碳生产率增长的地区差异、脱钩状态以及趋同效应(Miketa & Mulder, 2005; 张成等, 2013)。根据方法学不同,碳生产率的影响因素识别文献可以分为数理分解研究和参数检验研究两类。分解研究主要通过对碳生产率公式的数理变换来识别不同驱动因素,进而借助指数方法(IDA)构造的权重系数来实现驱动因素贡献份额的分离(Zhengnan et al., 2014; Ang et al., 2015)。从现有文献的实证结果来看,通常以能源效率、能源结构、产业结构、空间结构等技术因素和结构因素的分解最为常见(Meng & Niu, 2012; 李珊珊、罗良文, 2018; 姚晔等, 2018),而要素投入、效率改善等生产因素却非常少见,其原因在于指数分解方法难以有效反映投入产出关系的具体实现机制。比较而言,参数方法则主要是以扩展生产函数的估计检验为基础,能够借助产出弹性对碳生产率的增长来源做进一步参数分解(李荣杰等, 2016),但是这种方法容易受到参数检验的限制而产生分解不足和高统计误差问题,其更为普遍的研究方式是借助计量检验技术识别相关因素对碳生产率的影响方向。此外,无论是指数分解方法还是统计检验分析,二者均是以参数线性化为强假设前提所进行的分解或识别,这也使得文献中对相关因素作用机制的设定存在较大随意性,因此难以对碳生产率变化提供合理的经济解释。

碳生产率的另外一种研究视角是在全要素框架内考察多种要素综合使用的碳排放效率和全要素碳生产率,这类文献采用的研究方法主要是基于碳排放不同处理形式的数据包络分析(DEA)和随机前沿分析(SFA)。无论是处理为投入要素还是非期望产出(Ramanathan, 2005; Nakano & Managi, 2010),全要素碳生产率都可以进一步分解为技术进步、技术效率和规模效率(Feng & Wang, 2017; Li et al., 2018)。尽管基于联合弱处置性的非期望产出设定似乎更符合实际,但是却陷入了好坏产出同比例增减的“黑箱”困境,无法具体揭示坏产出的减少机制,而且也难与单要素碳生产率的经济内涵进行有效对接。在全要素框架内,DEA技术无需对生产函数的形式和分布进行设定,能够避免较强理论约束所产生的估计偏差。然而,大多数文献都是以单期的生产单元分别构造技术参照集,从而使得技术进步在时序内存在无法连续可比的问题,测算结果缺乏稳定性(Oh, 2010)。相比于单要素碳生产率的因素分解研究,

全要素碳生产率的影响因素主要是基于计量技术的检验识别(李小平等,2020)。现有经验证据表明,经济发展、对外开放、人力资本和技术创新有利于全要素碳生产率提升,但是产业结构重型化和城镇化却弱化了这种上升趋势(李小胜等,2018;王丽等,2020)。服务业发展对全要素碳生产率的推动作用受到地区信息化水平的制约,超过门限水平后的推动作用会显著增强(李博等,2016)。

纵观已有研究,大多数文献都只是单独探讨单要素碳生产率或全要素碳生产率,并没有进一步详细考察二者之间的相互关系和作用机理。有鉴于此,本文以单要素碳生产率为研究对象,试图在以下两个方面作出边际贡献:第一,在理论分析上,本文立足于投入产出关系视角,构建了IDA方法与DEA模型相结合的综合分解框架,进一步将单要素碳生产率与能源结构、要素替代、全要素碳生产率统一起来,厘清了多种动力因素对碳生产率增长的作用机制,并重点分析了技术进步引致增长动力转换的内生机理;第二,在实证分析上,进一步结合中国经济结构转型和宏观政策调整,深入探讨了要素替代与技术进步对低碳经济高质量发展的作用机理和协同路径,为中国推动碳生产率增长、完成碳强度减排目标、实现低碳经济转型发展提供科学参考。本文剩余内容的结构安排如下:第二部分为基于非参数前沿生产函数的碳生产率增长动力分解框架设计;第三部分为增长动力核算结果的实证分析;第四部分为技术进步偏向评估与增长动力转换机理分析;第五部分为全文结论与政策启示。

## 二、碳生产率增长动力的分解设计

### (一)分解框架设计

一定时期内的经济产出与碳排放量之比即为单要素碳生产率。那么,在此定义基础上进一步引入能源消费,通过恒等变换就可以得到IDA方法的基本分解因式为:

$$cp_t = \frac{Y_t}{C_t} = \frac{E_t}{C_t} \times \frac{Y_t}{E_t} \quad (1)$$

式(1)中,  $cp$  表示第  $t$  期的碳生产率,  $Y$  为经济产出,  $C$  为碳排放,  $E$  为能源消费。引入向量  $k=K/E$ 、 $l=L/E$  和  $y=Y/E$ , 分别表示单位能源的资本投入、劳动投入和产出水平,根据生产理论可以构成投入产出关系,由此便为单位能源产出的增长核算提供了依据。为了实现增长动力的完全分解与技术进步的连续可比性,这里采用全局共同前沿技术参照的DEA模型,进一步分离出要素替代效应与全要素生产率的增长贡献。令  $d_c^g$  为规模报酬不变(CRS)条件下的产出导向距离函数,那么,给定生产单元在第  $t$  期要素投入下对应的全局最优产出则为  $\bar{y}_t(k_t, l_t) = y_t \times d_c^g(k_t, l_t, y_t)$ , 由此可以得到单位能源产出的增长分解式为:

$$yec_t^{t+1} = \frac{y_{t+1}}{y_t} = \frac{d_c^g(k_t, l_t, y_t)}{d_c^g(k_{t+1}, l_{t+1}, y_{t+1})} \times \frac{\bar{y}_{t+1}(k_{t+1}, l_{t+1})}{\bar{y}_t(k_t, l_t)} = tfp_t^{t+1} \times xec_t^{t+1} \quad (2)$$

式(2)中,  $yec$ 、 $tfp$  和  $xec$  分别表示能源生产率变化、全要素生产率和要素替代效应。根据 DEA 原理, 产出导向距离函数的倒数与技术效率在 CRS 条件下具有等价性, 因此这里的全要素生产率被定义为相邻两期的全局技术效率之比, 要素替代效应定义为全局最优单位能源产出之比。进一步取相邻两期的式(1)之比, 并将式(2)带入可得:

$$cpc_t^{t+1} = esc_t^{t+1} \times yec_t^{t+1} = esc_t^{t+1} \times tfp_t^{t+1} \times xec_t^{t+1} \quad (3)$$

式(3)的分解结果表明, 碳生产率增长  $cpc$  的动力来源主要由三个部分构成: 一是能源结构调整  $esc$ , 即低碳能源对高碳能源替代所引致的碳排放增量减少; 二是全要素生产率  $tfp$ , 即相邻两期全局技术效率改善所引致的单位能源产出提高; 三是要素替代效应  $xec$ , 即在全局共同前沿技术水平下, 由要素累积替代变化所引致的最优单位能源产出增长。要素替代包括资本和劳动对能源的替代, 这里分别简称为资本替代效应  $kec$  和劳动替代效应  $lec$ 。为了避免固定要素参照的随意性, 本文选取两期参照下的几何平均值进行测算, 于是有:

$$kec_t^{t+1} = \sqrt{\frac{\bar{y}_{t+1}(k_{t+1}, l_{t+1})}{\bar{y}_{t+1}(k_t, l_{t+1})} \times \frac{\bar{y}_t(k_{t+1}, l_t)}{\bar{y}_t(k_t, l_t)}} \quad (4)$$

$$lec_t^{t+1} = \sqrt{\frac{\bar{y}_{t+1}(k_{t+1}, l_{t+1})}{\bar{y}_{t+1}(k_{t+1}, l_t)} \times \frac{\bar{y}_t(k_t, l_{t+1})}{\bar{y}_t(k_t, l_t)}} \quad (5)$$

由全局 DEA 模型的前沿面投影性质可知, 相同要素投入生产单元在共同前沿面上的投影也相同, 即有全局交叉投入的最优产出  $\bar{y}_t(k_{t+1}, l_t) = \bar{y}_{t+1}(k_{t+1}, l_t)$ 、 $\bar{y}_t(k_t, l_{t+1}) = \bar{y}_{t+1}(k_t, l_{t+1})$  成立, 因此资本替代效应与劳动替代效应的乘积便为要素替代总效应的完全分解式。进一步把式(4)、式(5)代入式(3), 那么碳生产率的增长动力构成便可扩展为如下分解形式:

$$cpc_t^{t+1} = esc_t^{t+1} \times kec_t^{t+1} \times lec_t^{t+1} \times tfp_t^{t+1} \quad (6)$$

$$\Delta cp_d = \frac{cp_{t+1} - cp_t}{\ln cp_{t+1} - \ln cp_t} \times \ln d_t^{t+1} \quad (7)$$

其中,  $d$  为式(6)中任意一个动力因素乘法形式的增长效应,  $\Delta cp_d$  则为加法形式的增量效应。同时, 基于 DEA 分解的式(6)与满足“聚合一致性”的 IDA 分解具有相同的乘法表达形式 (Ang, 2004), 因此可进一步采用对数平均权重转换为等价的加法形式即公式(7)。

## (二)变量及其数据

基于数据的可获得性和口径一致性, 本文选取 1997—2017 年全国 30 个省级行政区 (不包含西藏和港澳台地区) 的面板数据作为研究样本, 共计 630 个观测值。涉及的五个变量指标均可根据基础统计数据予以构造, 分别为碳生产率、单位能源产出、化石能源结构、单位能源资本投入和单位能源劳动投入, 具体变量测度和数据说明如下。

### 1. 产出变量指标

这里的产出变量分别为碳生产率和单位能源产出, 其中后者可根据分解因式结构定义为中间产出变量。碳生产率变量为地区生产总值 (GDP) 与能源消费碳排放之比, 单位能源产出



变量则为地区GDP与能源消费总量之比。根据2006年联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)制定的指南,碳排放数据主要依据参考法和部门法进行估算获得。其中,参考法主要以化石能源生产基地为基准进行核算,但是很多一次能源并未进入本地的最终消费,这也导致其存在严重的高估风险(Shan et al., 2018)。因此,本文选择行业细分、能源分类的部门法核算结果,具体数据序列根据中国碳核算数据库(CEADs)中的化石能源省级二氧化碳排放清单进行构造。地区GDP指标采用平减指数调整为2000年可比价格,能源消费指标采用化石能源的标准煤消费总量来测度,相关基础数据主要来源于国家统计局的地区数据库和历年的《中国能源统计年鉴》。

2. 投入变量指标

化石能源结构可视为分解函数中的直接投入变量,本文用碳生产率与单位能源产出之比来测度,其含义为单位碳排放所消耗的化石能源数量,数值越大说明能源消费结构的低碳化程度越高。单位能源的资本投入和劳动投入为DEA模型的输入变量,二者均根据相应的存量指标与能源消费之比来构造。其中,资本投入采用物质资本存量,具体细节以单豪杰(2008)的方法为参照,采用10.96%的折旧率对资本存量进行永续盘存核算,同时以固定资产投资价格指数将其平减至2000年为基期的可比序列。劳动投入采用全社会从业人员总量来测度,包括城镇从业人员和农村从业人员,相关数据来源于各省级统计年鉴。各变量的描述性统计结果见表1所示。

表 1		描述性统计					
符号	含义	单位	观测数	平均值	标准差	最小值	最大值
<i>cp</i>	碳生产率	万元/吨碳	630	1.536	0.888	0.257	6.704
<i>y</i>	单位能源产出	万元/吨标煤	630	0.813	0.379	0.157	2.179
<i>e</i>	化石能源结构	/	630	1.856	0.399	1.019	3.570
<i>k</i>	单位能源资本投入	万元/吨标煤	630	1.874	1.031	0.349	5.855
<i>l</i>	单位能源劳动投入	人/吨标煤	630	0.310	0.198	0.057	1.046

三、增长动力实证分解与结果分析

(一)整体动力构成与阶段变迁

基于式(6)的方法原理,本文对1997—2017年中国各省区市的碳生产率增长动力进行了DEA分解核算,并利用GDP加权测度了全国整体的动力构成与阶段变迁。测算结果显示,1997年的全国碳生产率水平为1.186万元/吨碳,至2017年累积增长了1.738万元,年均增速为4.77%。为了平滑个别年份增长突变所产生的影响,进一步根据式(7)转换为加法形式的累积增量效应,并绘制于图1。1997—2017年的中国碳生产率累积总效应呈现正向增长态势,能

源结构效应、资本替代效应、劳动替代效应以及全要素生产率这四重动力的构成变化,决定了碳生产率增长的演化路径和阶段特征。

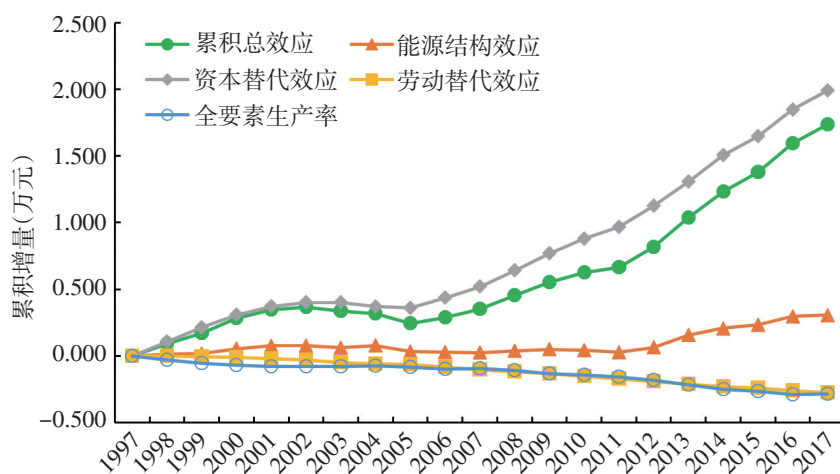


图1 中国碳生产率及其动力因素的累积增长效应

从增长动力构成来看,资本替代效应和能源结构效应对全国碳生产率增长起到了正向的驱动作用,其中资本替代效应的主导性动力作用最为明显。1997—2017年资本替代效应共推动1.992万元的碳生产率水平提升,累计贡献率高达114.61%,因此全国整体属于典型的资本替代驱动型低碳经济,这也与中国的资本驱动型经济增长方式具有协调一致性,二者之间的差别在于能源要素的过快积累会导致碳生产率增长滞后于产出增长。能源结构效应体现了低碳能源替代高碳能源对碳排放增量的抑制作用,然而中国“以煤为主”的能源禀赋却制约着整体的低碳化调整进程,因此能源结构效应在此期间仅仅推动碳生产率水平提高了0.305万元,累积贡献率也只达到17.55%,致使能源结构调整的驱动效应居于次要地位。劳动替代效应和全要素生产率对整体碳生产率增长起到了抑制作用,但是二者的减量效应还不足以抵消资本替代和能源结构的增量效应。1997—2017年劳动替代效应引致碳生产率下降了0.275万元,累积贡献率为-15.82%,相比于资本要素对能源要素的替代,以能源替代劳动的产业结构调整则会抑制整体碳生产率水平的提升。全要素生产率的变化与劳动替代效应具有相似性,期间致使碳生产率累积下降0.285万元,贡献份额达到-16.40%。抑制因素的趋同性变化与全国低碳经济的技术进步偏向不无关系,不同要素投入规模的此消彼长主要来自偏向性技术进步对边际产出的影响,同时,偏向要素投入过度也会造成其他类型的技术退步和技术效率恶化,后文将对这种技术进步的内生性机理做进一步实证考察。

虽然全国碳生产率的正向增长态势非常明显,但是在个别年份却出现较大的波动调整,进而呈现出明显的阶段性特征,这从图1所展示的累积增长路径变化可以看出。自上世纪90年代末以来,中国碳生产率的演变轨迹大致可以分为三个时期,即亚洲金融危机后的改革期

(1998—2001年)、加入WTO后的适应期(2002—2007年)以及国际金融危机后的转型期(2008—2017年),相应时期的增长动力转换无不体现出市场倾向和政策调整的阶段性变迁,表2分别报告了三个时期碳生产率增长动力的年均效应核算结果。

表2 中国碳生产率增长动力转换的阶段性特征 (单位:%)

阶段	碳生产率增长	能源结构	资本替代	劳动替代	全要素生产率
1998—2001年	6.91	1.49	7.40	-0.39	-1.60
	100.00	21.56	107.09	-5.64	-23.15
2002—2007年	0.31	-0.64	2.36	-1.16	-0.24
	100.00	-206.45	761.29	-374.19	-77.42
2008—2017年	6.58	1.46	6.55	-0.65	-0.78
	100.00	22.19	99.54	-9.88	-11.85

注:每个时期的第一行代表各自年均增长率,第二行代表贡献份额。

第一阶段为亚洲金融危机后的改革调整期,碳生产率累积增长持续向高位拉升,年均增速6.91%。资本替代效应是该阶段低碳经济增长的主导性动力,贡献率高达107.09%;能源结构效应表现为第二大动力,年均贡献份额也达到21.56%。这一时期以去产能和国企改革为重点的一系列政策调整助推了低碳经济的快速增长,但是下岗分流冲击和能源消耗提速却加快了能源密集型产业对劳动密集型产业的替代,致使劳动替代效应对碳生产率增长呈现出微弱的抑制作用,而这种粗放型的增长方式也为全要素生产率的持续恶化埋下了隐患。第二阶段为加入WTO后的市场化适应期,也是中国经济实现双位数增长的黄金期。但是这一阶段的外向型经济主要向国际分工体系下的产业链末端聚集,从而进一步加剧了粗放型增长方式,致使整体碳生产率的年均增速仅为0.31%,累积增长轨迹以2005年为拐点先降至低位后快速回升,这主要得益于2006年能源强度约束政策对其过快积累的限制。尽管这一时期的资本和劳动积累速度都在向高位攀升,但是能源消费提速更快,致使产业结构向资本密集型调整的趋势明显迟缓,而劳动密集型产业被能源密集型产业替代的进程却显著加快。资本替代效应引致的年均增长率较上一时期显著下滑至2.36个百分点,成为碳生产率增长的唯一动力。能源结构效应由正转负,劳动替代效应进一步走低,全要素生产率(TFP)虽有所改善却未能扭转持续恶化态势,三者分别引致碳生产率年均损失0.64、1.16和0.24个增长点。第三阶段为国际金融危机后的转型升级期,碳生产率年均增长率显著回升至6.58%,但是受2011年经济增长进入下行通道的影响,其增速逐年下滑的趋势也开始显现。从增长动力来看,资本替代效应虽然依旧发挥着主导性作用,但是贡献份额却较上一期回落至99.54%,且有逐年下降的趋势。能源结构调整的动力效应在这一阶段进一步显现,贡献份额强势增加到22.19%,且逐年上升趋势明显。劳动替代效应的下降趋势有所改善,但全要素生产率则进一步恶化,二者分别引致碳生产率增速下降了0.65和0.78个百分点。

## (二)地区增长差异与动力成因

表3报告了各个省份的碳生产率累积增长核算结果,而无论是从绝对水平还是相对增速来看,地区间的差距都十分显著且呈现扩大趋势。其中,碳生产率绝对水平的变异系数由1997年的51.58%增至2017年的55.03%,北京的累积增长速度最快,宁夏是唯一出现负增长的省份,前者是后者的6.42倍,其原因主要来自地区间低碳经济增长方式的显著差异。

表3 中国省级碳生产率及其动力因素的累积增长指数

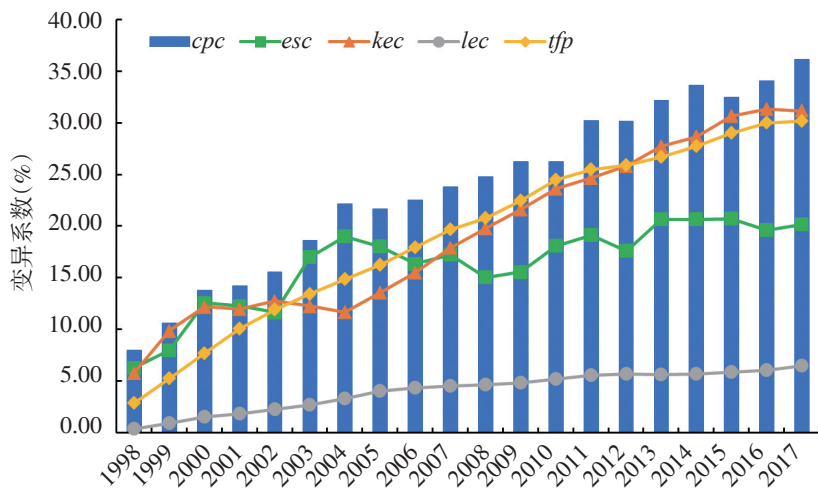
地区	<i>cp_97</i>	<i>cp_17</i>	<i>cpc</i>	<i>esc</i>	<i>kec</i>	<i>lec</i>	<i>tfp</i>
北京	1.426	6.704	4.703	1.352	2.845	0.979	1.249
天津	0.922	3.658	3.967	1.185	2.682	0.924	1.349
河北	0.695	1.334	1.919	0.967	3.016	0.871	0.756
山西	0.363	0.726	2.001	0.889	3.688	0.883	0.691
内蒙古	0.442	0.810	1.831	1.097	3.679	0.744	0.610
辽宁	0.687	1.759	2.562	1.123	2.940	0.849	0.913
吉林	0.573	2.155	3.758	0.957	7.144	0.895	0.614
黑龙江	0.722	2.168	3.002	1.084	3.368	0.895	0.918
上海	1.266	4.463	3.524	1.297	2.114	0.909	1.414
江苏	1.347	2.891	2.146	0.987	2.693	0.796	1.013
浙江	1.588	3.573	2.250	1.166	2.266	0.841	1.013
安徽	0.809	1.956	2.418	0.917	3.402	0.922	0.840
福建	2.606	4.130	1.585	0.975	2.694	0.835	0.723
江西	1.207	2.330	1.930	1.040	3.034	0.880	0.696
山东	1.247	2.487	1.995	1.015	2.661	0.812	0.910
河南	0.996	2.379	2.388	1.095	4.374	0.944	0.528
湖北	0.800	2.659	3.323	1.491	3.669	0.835	0.728
湖南	1.109	2.827	2.549	1.182	3.188	0.893	0.757
广东	1.929	4.586	2.377	1.302	2.432	0.853	0.880
广西	1.313	2.451	1.866	1.100	3.671	0.863	0.535
海南	2.247	2.912	1.296	1.004	1.380	0.820	1.141
重庆	0.983	3.507	3.569	1.679	2.234	0.804	1.183
四川	0.976	3.353	3.435	1.362	3.178	0.903	0.879
贵州	0.419	1.086	2.591	1.148	4.036	0.909	0.615
云南	1.093	2.463	2.253	1.214	3.790	0.905	0.541
陕西	0.743	1.855	2.497	1.082	3.699	0.805	0.775
甘肃	0.607	1.447	2.384	1.035	3.907	0.941	0.626
青海	0.667	1.236	1.852	1.371	3.172	0.782	0.544
宁夏	0.498	0.365	0.733	0.444	3.759	0.800	0.548
新疆	0.649	0.658	1.014	0.851	2.113	0.796	0.709
变异系数	51.58	55.03	36.15	20.17	31.19	6.51	30.19

注:变量 *cp\_97*、*cp\_17* 分别为1997年和2017年的碳生产率绝对水平,单位是万元/吨碳;其他变量分别对应碳生产率及其动力因素的增长指数;变异系数的单位是百分比。



资本替代效应在所有省份的碳生产率增长中均表现为主导性作用,而且远远高于其他动力效应,其中吉林、海南两省分居首位和末位,前者的累积增长效应是后者的5.18倍。与资本替代效应相反,所有省份的劳动替代效应均表现为缓慢的恶化趋势,但是地区差异相对较小,大多数省份的累积增长指数均在0.8以上,最高的北京与最低的内蒙古相差也不到0.235。样本考察期内,所有地区的资本能源比、劳动能源比增长轨迹与其对应的替代效应完全吻合,体现了全国整体以资本密集型快速替代能源密集型、能源密集型逐步替代劳动密集型的产业结构调整趋势,这与张成等(2014)基于参数生产函数的分解结果相一致,二者此消彼长的转换特征体现了技术进步的偏向性影响。能源结构调整的正向驱动效应并未统一出现在所有省份,而是呈现出明显的正负两极分化特征。北京、天津、上海等22个省份的能源结构效应实现了显著的正向增长,宁夏、新疆等8个省份则出现了不同程度的恶化,其中累积增长效应最高的重庆达到了1.679,而最低的宁夏却仅为0.444。全要素生产率的地区差异同样表现为突出的两极分化特征,在此期间内实现累积正向驱动效应的仅为北京、上海、江苏等少数东部发达省份,而大多数地区的全要素生产率都要远远小于资本替代效应,低碳经济的内涵式增长动力显著不足。其中,全要素生产率动力效应表现最佳的是上海,恶化程度最为严重的是河南,累积增长指数分别为1.414和0.528。综上可知,虽然中西部大多数省份在绿色转型发展中的后发优势更为明显,但是只表现为要素替代效应的边际优势,全要素生产率依然远低于东部发达省份,其要素替代与全要素生产率的协同发展显著滞后,成为当前阶段推动低碳经济高质量发展的工作重点。

从差异演变来看,动力因素在地区间的分化趋势决定了碳生产率增长的趋异效应,这可以通过考察相关指标变异系数的时间分布特征进行验证(见图2)。



注: *cpc*、*esc*、*kec*、*lec* 和 *tfp* 分别表示碳生产率、能源结构、资本替代、劳动替代和全要素生产率累积增长效应的变异系数。

图2 中国省级碳生产率及其动力因素的累积增长效应差异演变

首先,碳生产率累积增长的变异系数在1998—2017年间表现为波动上升趋势,正是增长速度演变的累积效应致使碳生产率绝对水平的地区差距同样在逐年扩大。能源结构、资本替代、劳动替代和全要素生产率的累积增长效应分化均呈现持续扩大趋势,但是整体变异程度却存在显著差异,由此构成了碳生产率地区增长差异的动力效应成因。其中,劳动替代效应的变异程度在2007年之前呈快速上升趋势,而之后的演化路径则趋于平稳,整体变异增幅相对较小。能源结构效应的地区分化程度在2003—2005年陡然加剧,这主要由河北、山西、宁夏等少数省份高碳能源消费的大幅反弹所致。资本替代效应的地区差异整体呈现扩大趋势,自2008年开始其变异程度持续高于能源结构效应和劳动替代效应。全要素生产率的地区差异同样经历了不断扩大的演进路径,整体变异程度与资本替代效应相当,只是其波动性更小、持续性更强。截至到2017年,地区碳生产率累积增长的变异系数已上升至36.15%,其中由能源结构、资本替代、劳动替代和全要素生产率所贡献增长指数的变异系数也分别提高到20.17%、31.19%、6.51%和30.19%。总体而言,中国低碳经济增长的地区差异主要归因于资本替代效应和全要素生产率,其次是能源结构效应,而劳动替代效应的贡献并不大。

#### 四、增长动力转换的内在机理分析

##### (一)技术进步的内生机制

理论上,全要素生产率的增长可以归结为技术进步  $tpc$ 、技术效率  $tec$  和规模效率  $sec$  的改进,而技术进步又会通过影响要素边际产出来改变投入结构,进而推动要素替代与效率改善之间的动力转换。因此,本节通过在全局 DEA 框架内集成单期 DEA 对全要素生产率做进一步分解,重点考察技术进步引致碳生产率增长动力转换的内生机制。令  $d'_c$ 、 $d'_v$  分别表示不变规模报酬(CRS)和可变规模报酬(VRS)下的单期产出距离函数,那么集成框架下的技术进步可定义为生产单元向单期前沿面和全局前沿面的相对移动距离之比,技术效率和规模效率则依然定义为单期 DEA 技术下的效率改善程度,比值大于1时表明存在技术进步和效率改善,若小于1则表明不存在技术进步和效率改善。由此,全要素生产率的完全分解形式为:

$$tec_t^{t+1} = \frac{d'_v(k_t, l_t, y_t)}{d_v^{t+1}(k_{t+1}, l_{t+1}, y_{t+1})} \quad (8)$$

$$sec_t^{t+1} = \frac{d'_c(k_t, l_t, y_t)/d'_v(k_t, l_t, y_t)}{d_c^{t+1}(k_{t+1}, l_{t+1}, y_{t+1})/d_v^{t+1}(k_{t+1}, l_{t+1}, y_{t+1})} \quad (9)$$

$$tpc_t^{t+1} = \frac{d'_c(k_t, l_t, y_t)/d'_v(k_t, l_t, y_t)}{d_c^g(k_{t+1}, l_{t+1}, y_{t+1})/d_c^{t+1}(k_{t+1}, l_{t+1}, y_{t+1})} \quad (10)$$

全要素生产率对碳生产率增长的贡献并不仅仅局限于直接效应,同时还会通过技术进步的偏向性影响要素投入的规模和结构。因此,技术进步与要素禀赋的匹配程度才是决定其推

动碳生产率增长的关键所在,这种内生性机制在市场失衡条件下的偏差,便会引致要素驱动与效率改善出现此消彼长的变化。基于此,本文进一步引入偏向性指数来考察技术进步的具体方向,并将资本替代偏向指数  $kpc$  和劳动替代偏向指数  $lpc$  定义如下:

$$kpc_t^{t+1} = \sqrt{\frac{d_c^g(k_t, l_t, y_{t+1})/d_c^{t+1}(k_t, l_t, y_{t+1})}{d_c^g(k_{t+1}, l_t, y_{t+1})/d_c^{t+1}(k_{t+1}, l_t, y_{t+1})} \times \frac{d_c^g(k_t, l_{t+1}, y_{t+1})/d_c^{t+1}(k_t, l_{t+1}, y_{t+1})}{d_c^g(k_{t+1}, l_{t+1}, y_{t+1})/d_c^{t+1}(k_{t+1}, l_{t+1}, y_{t+1})}} \quad (11)$$

$$lpc_t^{t+1} = \sqrt{\frac{d_c^g(k_t, l_t, y_{t+1})/d_c^{t+1}(k_t, l_t, y_{t+1})}{d_c^g(k_t, l_{t+1}, y_{t+1})/d_c^{t+1}(k_t, l_{t+1}, y_{t+1})} \times \frac{d_c^g(k_{t+1}, l_t, y_{t+1})/d_c^{t+1}(k_{t+1}, l_t, y_{t+1})}{d_c^g(k_{t+1}, l_{t+1}, y_{t+1})/d_c^{t+1}(k_{t+1}, l_{t+1}, y_{t+1})}} \quad (12)$$

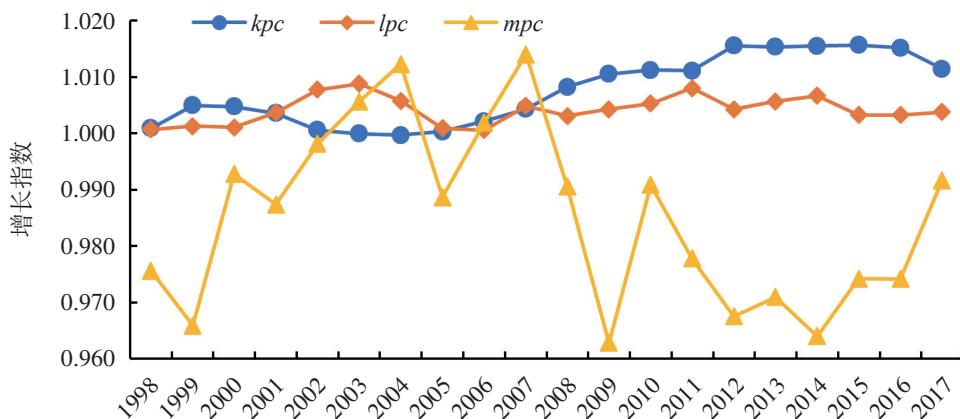
由此,结合式(10)、(11)和(12),技术进步可进一步转换成如下分解形式:

$$tpc_t^{t+1} = kpc_t^{t+1} \times lpc_t^{t+1} \times \frac{d_c^g(k_t, l_t, y_t)/d_c^t(k_t, l_t, y_t)}{d_c^g(k_t, l_t, y_{t+1})/d_c^{t+1}(k_t, l_t, y_{t+1})} \quad (13)$$

其中,式(13)右边第三项衡量了要素替代水平不变时的产出前沿增幅,可称为产出增进型技术进步  $mpc$ ;  $kpc$  衡量了给定劳动替代水平,由资本替代变化所引致的产出前沿进一步增幅;  $lpc$  衡量了给定资本替代水平,由劳动替代变化所引致的产出前沿进一步增幅。为了避免固定要素参照的随意性,这里依然选取两期参照的几何平均值进行测度。 $kpc = lpc$  表明低碳经济以希克斯中性技术进步为主,  $kpc > lpc$  表明以索罗中性技术进步为主,  $lpc > kpc$  表明以哈罗德中性技术进步为主。不难看出,如果要素替代的积累速度超过了技术进步的偏向程度,过度投入便会引起技术效率恶化,全要素生产率的直接贡献也就相应被削弱。

## (二)要素替代与全要素生产率变化

根据式(13)的测算结果,进一步采用省级GDP加权获得全国整体的技术进步偏向指数,并绘制于图3。可以发现,两类要素替代偏向指数均显著大于1,成为推动整体全要素生产率

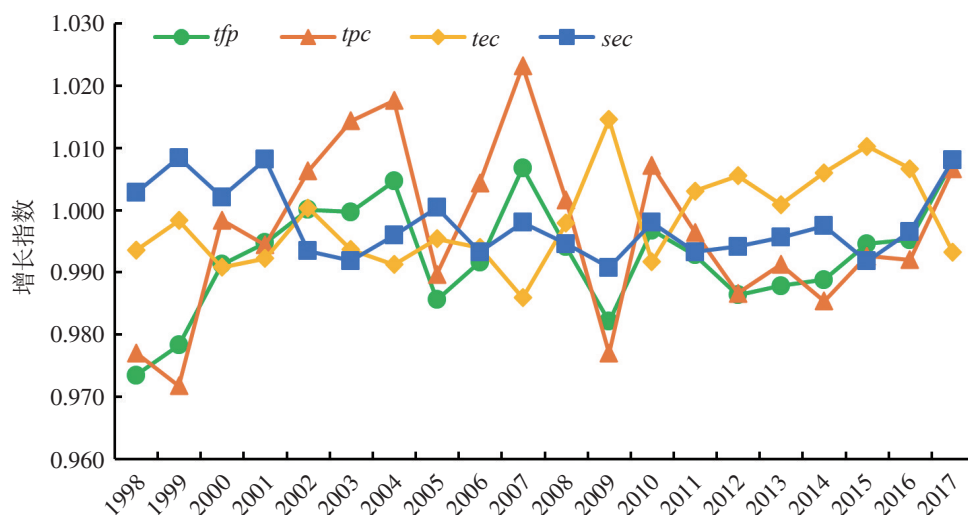


注:  $kpc$ 、 $lpc$  和  $mpc$  分别表示资本替代偏向、劳动替代偏向和产出增进型技术进步指数。

图3 中国碳生产率增长中的技术进步方向演变

增长的中坚力量,同时大多数年份的资本替代偏向指数都要明显高于劳动替代偏向指数,这说明上世纪90年代末以来的中国低碳经济主要以索罗中性技术进步为主。其原因在于,中国在较长时期内主要通过引进设备和购买专利来获取先进技术,而国外技术多为内嵌于资本品的物化技术,那么这种外生技术进步方式便必然会偏向于资本,从而持续提升了资本替代的边际产出水平,并引致其较高的积累速度。2002—2004年的哈罗德中性技术进步则主要来自加入WTO的冲击,劳动要素在出口行业的快速聚集引致了偏向技术的短期反转。

虽然资本替代偏向型技术进步有利于提高全要素生产率,但是要素过快积累和不合理流动也会影响产出增进型技术进步和效率改善,这从图3、图4中揭示的  $mpc$ 、 $tec$  和  $sec$  变动趋势便可以得到验证。从效率改善来看,1998—2001年,大量政府投资流向东部基础设施建设,释放了规模效应,但技术效率低下,前者累积增长2.13%,后者则持续下降2.51%。2002—2007年,WTO的加入和区域发展战略的实施推动了资本和能源要素快速集聚,但是这一时期的粗放型增长方式更甚,致使技术效率的恶化态势并未获得扭转,规模效率甚至降为负增长。2008年之后,随着经济转型升级步伐加快,技术效率显著改善并保持了正增长,规模效率的下降幅度也有所缓解。产出增进型技术进步在两次金融危机后均出现了严重倒退,但是2008年的影响更为持久,产能利用率一直处于较低水平且造成了大量技术闲置。这是由于中国的资本积累速度长期高于产出增速,而在需求侧冲击下无法实现更高产出增长时,大多数省份的产出-投入比就会以较快的速度下降,那么生产前沿面内陷便会引致产出增进型技术倒退。比较来看,技术效率和规模效率恶化对全要素生产率的减量效应相对较小,尚不足以抵消偏向技术的增量效应,产出增进型技术倒退问题更为突出,甚至主导了全要素生产率走向,三者的根源主要在于要素增长过快所引发的累积效应。



注:  $tfp$ 、 $tpc$ 、 $tec$  和  $sec$  分别表示全要素生产率、技术进步、技术效率和规模效率的年均增长指数。

图4 中国碳生产率增长的全要素生产率指数及其构成变化



进一步分析可以发现,中国资本替代效应与要素偏向型技术进步存在正向协同,但是却与产出增进型技术进步和综合技术效率产生负向协同,也正是技术进步偏向的内生性才引发了增长动力的此消彼长。经济体制改革打破了要素流动壁垒,极大释放了经济活力,但是持续的投资刺激政策却容易忽视市场导向,造成资本流动在区域间和部门间出现低效配置,致使大多数省份技术利用与要素禀赋的匹配程度严重失衡,这也成为中国2030年前实现碳达峰的关键问题之一。破解低碳经济增长动力负向协同的困境,需要深度推进以要素替代为特征的结构调整,充分发挥国内大循环优势以提高产能利用。随着中国经济进入高质量发展阶段,改革重点应着眼于增强供给结构对需求变化适应的灵活性。实现低碳经济转型发展,还需要时刻警惕能源密集型产业的反弹,适时引导技术进步偏向逐步向低碳能源要素倾斜,进而为2060年前实现碳中和的远景目标探索可行路径。

## 五、结论与政策启示

本文分析了1997—2017年中国碳生产率的演变历程和动力效应,并通过引入技术偏向的内生性,进一步考察了中国碳生产率增长动力的转换机理,得出如下主要结论。

第一,中国碳生产率整体呈现阶段性的正向增长态势,资本替代效应持续发挥了主导作用,累计贡献率高达114.67%,属于典型的资本替代型增长模式。中国“以煤为主”的能源禀赋制约着低碳化调整速度,因此能源结构的动力效应居于次要地位。劳动替代效应和全要素生产率表现为抑制作用,但二者的减量效应还不足以抵消资本替代和能源结构的增量效应。尤其是2008年国际金融危机以来,国内产能利用率持续走低,全要素生产率也显著回落甚至持续为负增长,这与资本替代效应的持续上升形成鲜明的反向角力态势。

第二,中国碳生产率增长的地区差异非常显著,主要归因于资本替代效应和全要素生产率的地区分化,能源结构效应次之,劳动替代效应贡献不大。随着全国绿色转型发展的稳步推进,中西部省份的后发优势得以显现,但是只表现出要素结构调整的边际替代优势,全要素生产率依然远远滞后于大多数东部省份。因此,不仅资本替代效应的地区差异呈现逐年扩大趋势,而且全要素生产率的分化程度与资本替代效应相当,甚至两极分化更为严重。此外,宁夏、新疆等少数省份的能源结构低碳化调整进程显著滞后,乃至出现了不同程度的恶化,由此也进一步造成了碳生产率地区增长差距的扩大。

第三,中国低碳经济增长动力转换的根本原因在于技术进步偏向的内生性影响。上世纪90年代末以来,中国低碳经济主要以索罗中性技术进步为主,并通过持续提升资本替代的边际产出而引致其较高的积累速度,反过来又进一步强化资本替代偏向的技术进步。然而,强刺激政策的引导却容易忽视市场机制,造成资本积累速度持续高于产出增速,外部市场需求冲击则会进一步加剧这种累积效应爆发,大量技术闲置和资源浪费致使全要素生产率的动力



贡献不断下降乃至转向抑制。高质量发展阶段应注重增长动力的协同推进,深化以要素替代为特征的结构改革,提高产能利用,引导技术进步偏向逐步转向低碳能源要素。

上述研究结论对中国经济低碳和高质量发展具有重要政策启示:

首先,逐步由能源消费的总量控制转向结构控制。随着能源强度政策的深度实施,现有技术条件下的节能降耗空间将变得越来越小,而推动能源结构低碳化、提升能源利用效率依然有较大潜力。这也是国家自主贡献的主要目标之一,即到2030年非化石能源占一次能源消费比重将达到25%左右。因此,东部沿海和西部地区应发挥自身能源禀赋优势,积极发展风能、太阳能和水能等非化石能源。经济发达地区,应大力实施“煤改油”“煤改气”“煤改电”等能源优化项目,加快推动生产生活方式的绿色转型发展。

其次,重视以资本使用效率调控投资规模和结构,将政府投资更多转向新业态升级和新技术研发,避免低技术水平的重复建设,实现资本要素对能源要素替代的有序性和有效性。促进以资本、能源要素流动为特征的产业结构转型升级,进一步释放结构减排潜力,发挥碳生产率增长的结构动力。东部发达省份应利用资本优势率先推动绿色转型发展,壮大节能环保、清洁生产和清洁能源等绿色产业,深入推进工业、建筑、交通等领域低碳转型,坚决遏制高能耗、高排放行业的盲目发展。

最后,推动技术进步由外生转向内生,提高自主创新能力。创新是经济高质量发展的首要驱动力,当前经济增长失速、碳生产率提升迟缓,其根源主要在于现有技术的开发利用已逐渐逼近“S型曲线”顶端,传统刺激政策效果也不再明显,甚至会导致技术倒退和效率恶化,新产品、新能源等技术创新将有助于新旧动能转换,能够为2060年实现碳中和目标提前进行技术积累。因此,需要进一步完善科技创新体制机制,加快建立健全以市场为导向的绿色技术创新体系,激发人才创新活力,鼓励绿色低碳技术研发,加速科技成果转化。

## 参考文献:

- [1] 李博,张文忠,余建辉. 服务业发展、信息化水平与全要素碳生产率增长——基于门限效应的实证研究[J]. 地理研究,2016,35(5):953-965.
- [2] 李荣杰,张磊,赵领娣. 中国清洁能源使用、要素配置结构与碳生产率增长——基于引入能源和人力资本的生产函数[J]. 资源科学,2016,38(4):645-657.
- [3] 李珊珊,罗良文. “十二五”时期中国碳生产率的因素分解与增长动力——基于LMDI-PDA分解法[J]. 技术经济,2018,37(8):77-86.
- [4] 李小平,余东升,余娟娟. 异质性环境规制对碳生产率的空间溢出效应——基于空间杜宾模型[J]. 中国软科学,2020,(04):82-96.
- [5] 李小红,胡正陶,张娜,宋马林. “十二五”时期中国碳排放全要素生产率及其影响因素研究[J]. 南开经济研究,2018,(5):76-94.
- [6] 潘家华. 怎样发展中国的低碳经济[J]. 中国市场,2010,(11):61-65.

- [7] 单豪杰. 中国资本存量K的再估算:1952~2006年[J]. 数量经济技术经济研究, 2008, 25(10): 17-31.
- [8] 王丽, 张岩, 高国伦. 环境规制、技术创新与碳生产率[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(03): 1-6.
- [9] 姚晔, 夏炎, 范英, 蒋茂荣. 基于空间比较路径选择模型的碳生产率区域差异性研究[J]. 中国管理科学, 2018, 26(7): 170-178.
- [10] 张成, 蔡万焕, 于同申. 区域经济增长与碳生产率——基于收敛及脱钩指数的分析[J]. 中国工业经济, 2013, (5): 18-30.
- [11] 张成, 王建科, 史文悦, 李远. 中国区域碳生产率波动的因素分解[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(10): 41-47.
- [12] Ang, B. W. Decomposition Analysis for Policymaking in Energy: Which Is the Preferred Method? [J]. Energy Policy, 2004, 32(9): 1131-1139.
- [13] Ang, B. W., X. Y. Xu, and B. Su. Multi-Country Comparisons of Energy Performance: The Index Decomposition Analysis Approach[J]. Energy Economics, 2015, (47): 68-76.
- [14] Feng C. and M. Wang. Analysis of Energy Efficiency and Energy Savings Potential in China's Provincial Industrial Sectors[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 164: 1531-1541.
- [15] He, J., J. Deng, and M. Su. CO<sub>2</sub> Emission from China's Energy Sector and Strategy for Its Control[J]. Energy, 2010, 35(11): 4494-4498.
- [16] Li, W., W. Wang, Y. Wang, et al. Historical Growth in Total Factor Carbon Productivity of the Chinese Industry—A Comprehensive Analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 170: 471-485.
- [17] Meng, M. and D. Niu. Three-Dimensional Decomposition Models for Carbon Productivity[J]. Energy, 2012, 46(1): 179-187.
- [18] Miketa, A. and P. Mulder. Energy Productivity across Developed and Developing Countries in 10 Manufacturing Sectors: Patterns of Growth and Convergence[J]. Energy Economics, 2005, 27(3): 429-453.
- [19] Nakano, M. and S. Managi. Productivity Analysis with CO<sub>2</sub> Emissions in Japan[J]. Pacific Economic Review, 2010, 15(5): 708-718.
- [20] Oh, D. A Metafrontier Approach for Measuring an Environmentally Sensitive Productivity Growth Index[J]. Energy Economics, 2010, 32(1): 146-157.
- [21] Ramanathan, R. An Analysis of Energy Consumption and Carbon Dioxide Emissions in Countries of The Middle East and North Africa[J]. Energy, 2005, 30(15): 2831-2842.
- [22] Shan, Y., D. Guan, H. Zheng, et al. China CO<sub>2</sub> Emission Accounts 1997-2015[J]. Scientific Data, 2018, (5): 170201.
- [23] Zhengnan, L., Y. Yang, W. Jian. Factor Decomposition of Carbon Productivity Chang in China's Main Industries: Based on the Laspeyres Decomposition Method[J]. Energy Procedia, 2014, 61: 1893-1896.

# Factor Substitution, Technological Progress Bias and Carbon Productivity Growth

Sun Meng<sup>a,b</sup>

(a: Northeast Asian Studies College of Jilin University; b: Northeast Asian Research Center of Jilin University)

**Abstract:** Increasing carbon productivity is not only the key to achieving carbon peak by 2030, but also an inevitable requirement for green and high-quality development. This paper unifies the energy structure, factor substitution, total factor productivity and single factor carbon productivity by constructing an integrated DEA framework, and empirically analyzes the driving factors, evolution characteristics and power conversion mechanism of China's carbon productivity. The results show that China's carbon productivity has shown a phased positive growth trend, and the capital substitution effect continues to play a leading role. From the perspective of regional differences, the mid-western provinces have obvious late-comer advantages in factor substitution effects, but their total factor productivity lags far behind most eastern provinces. The decomposition of bias shows that China's low-carbon economy is mainly based on Solow's neutral technological progress, which has led to a higher accumulation rate through the continuous improvement of capital substitution for marginal output, but the continuous increase in capital accumulation rate than output growth rate has also caused a large amount of idle technology and waste of resources have resulted in a sharp contradictory situation between the capital substitution effect and total factor productivity. This article proposes to improve the overall carbon productivity by optimizing the control of the energy structure, promoting the transformation of capital energy substitution, and building a green technology innovation system.

**Keywords:** Carbon Productivity; Element Substitution; Technological Progress Bias; Growth Momentum

**JEL Classification:** C67, O47, Q43

(责任编辑:朱静静)