

# 产业结构升级、技术创新与碳排放

——一个有调节的中介模型

孙丽文,李翼凡,任相伟

(河北工业大学 经济管理学院,天津300401)

**摘要:**碳减排是实现环境高质量发展的重要方面,产业结构升级和技术创新是影响碳排放的重要途径。基于一个有调节的中介模型,构建环境规制嵌入下产业结构升级、技术创新与碳排放关系的理论框架,分析并实证检验产业结构升级和技术创新对碳排放以及环境规制在三者间调节效应的作用机理。研究结果表明:产业结构升级和技术创新能显著减少碳排放;技术创新在产业结构升级对碳排放的影响中起部分中介作用;环境规制在产业结构升级对技术创新的影响以及技术创新对碳排放的影响中起显著的正向调节作用。

**关键词:**产业结构升级;技术创新;碳排放;环境规制

**中图分类号:**F205; F121.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1002—980X(2020)6—0001—09

改革开放以来,中国经济飞跃式增长致使能源消耗和碳排放量骤增。而以二氧化碳为首的温室气体过量排放是造成全球生态环境恶化的重要原因,对资源和环境承载力造成较大负担,与我国所提出的“加快生态文明体制改革,建设美丽中国”的目标相悖,严控二氧化碳排放形势十分严峻。作为负责任的大国,中国政府曾在《国家应对气候变化规划》中提到:到2020年,我国单位GDP二氧化碳排放比2005年下降40%~45%,低碳试点示范取得显著进展,将全面实现控制温室气体排放的行动目标。现在已经到了全面检验我国减排成效的关键期。

理论和实践表明,在应对气候变化、减缓气候危害的过程中,产业结构升级和技术创新是影响碳排放的关键因素。一方面,不同产业对能源依赖度存在差异,目前来说第二产业能源消耗大且污染严重,由此我国产业结构亟待升级去改变现有的能耗模式,使资源分配更有效率以减少碳排放;另一方面,技术创新能够改变工艺流程和生产过程,影响化石能源的消耗和碳排放。探究产业结构升级和技术创新在我国现阶段的减排效果可以更好地针对二者进行环境战略调整与布局。另外,当前我国经济发展面临着日益复杂的环境不确定性,政府宏观规制力度不断强化,环境规制对产业结构升级、技术创新和碳排放的发展变化至关重要,且在这三者关系间起着不容忽视的调节作用。在我国经济高质量发展的背景下,研究环境规制约束下产业结构升级、技术创新对碳排放的影响至关重要,对于助力排放污染“阻击战”和生态环境保护具有重要的理论与现实意义。

## 一、文献综述

关于产业结构升级与碳排放的研究,现有学者基于不同的方法证实了产业结构升级能够有效减少碳排放,其思路大致分为三类:第一,应用最广泛的是对数平均迪氏指数(LMDI)分解法<sup>[1-2]</sup>。LMDI分解法可以找到影响环境变化的驱动要素,对碳排放强度进行分解,其中一项为产业结构,进而研究产业结构变动对碳减排的贡献。第二,运用投入产出法<sup>[3-4]</sup>。投入产出模型是经济学家列昂惕夫发明的一种能够反映各产业部门之间相互关系和联系的模型。将其与线性规划模型相结合,可以对区域的产业结构升级优化问题进行剖析,故常用于产业结构和环境问题关系的研究中<sup>[5]</sup>。第三,将产业结构这一要素纳入碳排放驱动因素的研究中<sup>[6-7]</sup>。产业结构的变动尤其是第二产业比重的下降一直以来都是降低碳排放的有效途径,对生态环境的改善起着至关重要的作用。在上述方法的运用中,多数研究通常会考虑到地区异质性,划分不同的区域展开进行研究。

收稿日期:2020—02—14

基金项目:河北省社会科学基金“低碳经济背景下我省工业绿色转型进程及发展路径研究”(HB18YJ021)

作者简介:孙丽文(1964—),女,天津人,博士,河北工业大学经济管理学院教授,博士研究生导师,研究方向:创新与区域产业发展;李翼凡(1996—),女,湖南益阳人,河北工业大学经济管理学院硕士研究生,研究方向:企业与产业绿色转型;任相伟(1993—),男,山东淄博人,河北工业大学经济管理学院博士研究生,研究方向:企业与产业绿色转型。

关于技术创新与碳排放的研究,多从3个方面展开:一是以EKC曲线为基础研究技术创新、经济增长与碳排放的关系。随着收入水平的提高和环保意识的增强,技术创新只为满足经济增长需要的传统观念被摒弃,而是更多地兼顾经济发展与环境保护,后期涌现的低碳技术创新对碳减排具有重要意义,通过技术轨道改变和降低减排成本两种途径可以更好地避免碳锁定,满足现阶段日益强烈的低碳转型需求<sup>[8-9]</sup>;二是运用IPAT方程和STIRPAT模型探究碳排放的驱动因素,研究结果多表明技术创新对于减缓碳排放增速具有重要意义<sup>[10-11]</sup>;三是从不同领域探究技术创新对碳排放的影响,胡中应<sup>[12]</sup>、韩川<sup>[13]</sup>分别从农业、工业等视角切入,均得到技术进步对各自领域碳减排有积极推动作用,尤其是碳排放专有技术进步效果更为显著。

关于产业结构升级与技术创新的研究,多数是探究技术创新对产业结构升级的影响,结果显示技术创新的积极作用效果,但是存在地区异质性,随后越来越多的学者聚焦于不同的技术创新路径的研究。卫平和张玲玉<sup>[14]</sup>、林春艳和孔凡超<sup>[15]</sup>将技术创新路径分为自主创新、技术引进和模仿创新,检验不同类型技术创新分别对产业结构合理化和高级化的作用效果。此外部分学者研究产业结构和技术创新之间的耦合关系,探究二者之间的动态交互作用。王鹏和赵捷<sup>[16]</sup>通过构建面板数据模型,研究产业结构调整 and 区域创新之间的相互关系和互动机制;徐晔和陶长琪<sup>[17]</sup>、刘新智和刘娜<sup>[18]</sup>分别以珠三角地区和长江经济带为例,通过构建耦合系统协同关系模型,并利用熵值法研究二者之间的耦合协同关系。除上述研究外,关于直接研究产业结构升级对技术创新影响的文献较少,比较有代表性的是赵庆<sup>[19]</sup>通过验证得到的产业结构优化和技术创新效率之间呈“螺旋上升”关系。李伟庆和聂献忠<sup>[20]</sup>在分析产业升级对技术创新和制度创新影响机理的基础上,对二者之间的关系进行了实证检验。其他多数学者将二者与其他问题相结合进行探讨,如引入金融发展、环境规制、经济增长等要素进行研究<sup>[21-23]</sup>。

综上所述,现有文献大多基于不同的方法研究产业结构升级、技术创新与碳排放两两之间的关系,鲜有文献将三者纳入同一研究框架,并且缺乏对产业结构升级和技术创新发挥碳减排作用机制的深入研究。同时在我国亟待进行绿色低碳转型的背景下,环境规制与低碳减排密不可分,无论是产业转型升级还是技术创新减排效果的发挥都会受到环境规制的影响,据此本文创新性地尝试纳入环境规制作为调节变量,将影响碳排放的这几个重要因素进行整合研究,以期完善产业结构升级作用于碳减排的边界路径,揭开规制碳排放的“暗箱”,为破除碳排放的负面效应、科学有效地制定减排政策提供有价值的参考。

## 二、理论分析与假设提出

### (一)产业结构升级对碳排放的影响

产业结构是指各产业的构成及其在经济结构中所占的比重,产业结构升级则是各产业向合理化和高级化演进和优化的过程。在当前工业化进程中,产业布局不合理以及第二产业“高投入、高污染、低产出”的发展模式会增加排放污染,恶化生态环境。产业结构可以通过以下几种途径作用于碳排放:首先,第二产业集中了大多数的高能耗部门,其所产生的碳排放量在三类产业间也是占比最大的,产业结构的高级化可使经济发展对能源资源消耗的依赖度降低,同时,产业及部门划分的细致程度也会对碳排放强度产生差异<sup>[24]</sup>;其次,产业结构升级能够促使劳动、资本等要素在产业内和产业间进行流转,资源的有效分配和利用有助于提高企业生产效能,加速企业向绿色环保转型,在做优存量、做大增量的同时提升服务质量,宏观上能够提升碳排放绩效,让污染排放也能得到有效抑制;再者,产业结构的演化方向对能源消费的变化趋势起决定作用,同时也是决定碳排放增量变化的一个关键要素,这三者之间具有较强的趋同性,产业结构升级能够有效加快环境库兹涅茨曲线倒“U”型变化拐点的出现,即加快碳排放减少的速度<sup>[25]</sup>。综上分析,提出研究假设1:

产业结构升级对碳排放的影响呈负向显著的抑制作用(H1)。

### (二)技术创新对碳排放的影响

技术创新是低碳经济发展的动力,对碳减排效应的发挥起积极的作用。技术创新可以分为产品创新和过程创新,产品创新是对一些旧产品技术和性能的改进或是持续的研发推出新产品;过程创新是指生产过程中生产要素、工艺和流程的优化与改善等。现有文献多表明技术创新对碳排放起负向的抑制作用<sup>[26-27]</sup>,其作用机制在于:一方面,技术创新通过提升生产技术水平、提高能源利用率、开发清洁可再生能源从而减少社会对传统经济能源的依赖进而减少碳排放;另一方面,技术创新能够改变劳动力就业结构、需求结构、进出口结构等,在此过程中,生产要素的空间适配性增强,要素质量和配置动态效率提高,其不断地优化组合使经济发

展方式由粗放式向集约式发展迈进。技术创新能够使生产要素等各种资源真正转化为经济发展的成果,且对于减缓碳排放增速、提高生态效率、实现绿色发展具有重要意义。另外,技术创新可以增加碳排放的价格弹性,从而减轻了强制性减排负担<sup>[28]</sup>。综上分析,提出研究假设2:

技术创新对碳排放的影响呈负向显著的抑制作用(H2)。

### (三)技术创新在产业结构升级与碳排放关系中的中介效应

上述分析阐述了产业结构升级会对碳排放产生抑制作用,现有学者普遍认同并验证了产业结构升级的有效性,但是缺乏对其作用机理的深入探讨。近年来,产业结构升级对技术创新的影响得到关注。从需求和供给角度来看,不同产业间的创新需求存在差异,产业结构升级能够将创新资源分配到需求更高的产业中,同时也可以通过影响经济发展、收入分配等途径改变要素供给,这都会直接或间接影响技术创新水平<sup>[19]</sup>。从微观、中观和宏观角度来看,微观上产业升级会促进国内外市场的开拓,企业为抢占市场份额会进行技术创新,形成自己的竞争优势;中观上产业结构转型升级必然伴随着产业间的更替,传统产业向高级化改造和变迁,新兴产业和高新技术产业迅猛发展成为新主力,在引发社会资本增加的同时也会推进研发经费的投入和技术创新成果的产出;宏观上政府为提升产业竞争力和促进产业结构升级,会在相关产业政策的制定、完善和实施过程中鼓励自主创新,同时营造协同创新的政策环境,加大财政支出在研发活动上的投入力度,这必然会对技术创新能力提出更高的要求<sup>[20]</sup>。综合参考H2技术创新对碳排放的作用机理,可以厘清三者的关系和演化机制:为达到减少碳排放污染的目标,产业结构需要向高级化迈进,优化资源配置,带动地区之间的竞争与合作,而在这一过程中,必然伴随着创新资源的流转和倾斜,创新资源的空间流转和重置必然对技术创新效率产生影响。技术创新的驱动效应是将产业结构变迁过程中各项战略资源转化为生产力的重要手段,是产业结构高度化演变的内生力量,通过促使生产率 and 产品竞争力的提升,为开辟新市场、拓宽更高层次行业的发展奠基,促进地区间形成协同创新长效发展机制,进而从源头上真正实现碳减排。综上分析,提出研究假设3:

技术创新在产业结构升级和碳排放关系之间发挥显著的中介效应(H3)。

### (四)环境规制的调节效应

从宏观来看,由于存在市场失灵以及环境污染的负外部性特征,使得市场配置资源存在问题,因此政府必须以规制手段加以调控,能否真正解决环境污染问题与政府出台的环境规制政策效果的发挥密不可分。环境规制分别与产业结构升级和技术创新的关系得到部分学者的探讨和验证,因此在之前研究的基础上,本文纳入环境规制这一变量,将三者进行整合研究,进一步完善外部路径边界,可以更加全面地检验碳减排效果。

#### 1. 环境规制在产业结构升级和技术创新之间的调节作用

环境规制可以直接或间接影响产业结构升级和技术创新之间的关系,其直接作用可以通过设定强制性的排污量、增强污染企业的进入壁垒、强化第三产业的比较优势等方式推动产业结构向高级化演变,进而加大对新技术的需求,推动技术创新<sup>[29]</sup>;间接作用通过增加企业的内部成本和刺激绿色消费需求,使企业内部的组织结构、产品结构、运行机制等发生调整,有利于产业部门进行有序的变换,推进传统生产方式的革新,进而倒逼产业结构升级,激发技术创新水平的提升。但是“污染避难所假说”认为,高污染企业会利用国家间规制强度的差异,向规制强度较弱的国家进行转移和投资,这一行为不利于产业结构向高层次演进,阻碍了清洁环保产业的发展 and 生态环境的改善。也有学者研究表明在中国当前的发展阶段,环境规制会促使产业向其他地区转移,而其产业结构升级效应还需要进一步加强<sup>[30]</sup>。综上分析,提出研究假设4a和假设4b:

环境规制正向调节产业结构升级和技术创新之间的关系(H4a);

环境规制负向调节产业结构升级和技术创新之间的关系(H4b)。

#### 2. 环境规制在技术创新和碳排放之间的调节作用

“遵循成本说”认为环境规制会增加企业的生产和运营成本降低利润从而抑制技术创新,不利于减少二氧化碳排放;而“波特假说”认为<sup>[31]</sup>,设计合理的环境规制能够成为企业进行创新的动力,企业技术水平和生产效率提升所带来的经济效益可以抵消制约成本。由于生态环境具有区域系统性特征,环境规制还可以激发技术扩散效应,促进相邻地区的技术引进和借鉴,这种良性循环有利于区域生态保护和经济增长。之后的许多研究对波特假说进行了佐证<sup>[32-33]</sup>,并且发现环境规制还可以通过激发企业的绿色技术创新意愿、增加治

污技术专项经费投入等方式来促进绿色技术创新行为<sup>[34-35]</sup>,且兼顾生态补偿价值,可以正向促进碳减排效应的发挥。结合环境规制可能致使碳排放增加的“绿色悖论”观点<sup>[36]</sup>,因此环境规制在技术创新和碳排放之间的调节作用效果也具有不确定性。综上分析,提出研究假设 5a 和假设 5b:

环境规制正向调节技术创新和碳排放之间的关系(H5a);

环境规制负向调节技术创新和碳排放之间的关系(H5b)。

基于上述研究假设 1~假设 5 构建本文的理论假设模型,如图 1 所示。

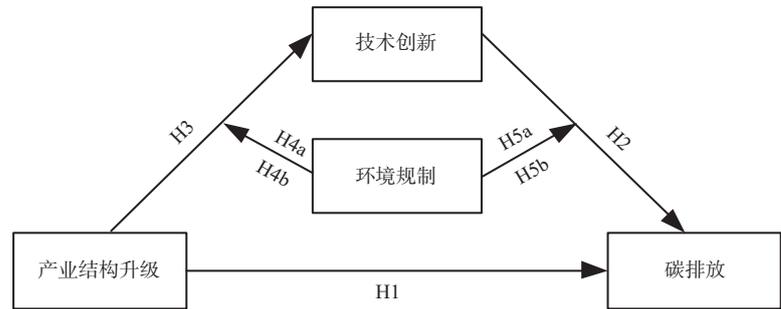


图 1 理论假设模型

### 三、研究设计

#### (一) 变量选取

(1) 碳排放(CI)。本文选用碳排放总量与 GDP 的比值即碳排放强度作为被解释变量的代理指标,其值越小,说明单位产出的 CO<sub>2</sub> 越少,越能反映出当下的低碳经济水平。关于碳排放总量的计算方法,本文采用目前国际上比较通用的 IPCC<sup>[37]</sup>提供的方法,共包括原煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气、液化石油气、电力 10 项能源消耗,具体的测算方法如下:

$$C^i = \sum_j i \sum_j C_{ij}^i \tag{1}$$

$$C_{ij}^i = E_{ij}^i \times r_j \tag{2}$$

$$r_j = F_j \times e \times EF_j \times O_j \times 44/12 \tag{3}$$

其中:C<sup>i</sup>表示各区域产生的 CO<sub>2</sub> 排放总量;C<sub>ij</sub><sup>i</sup>为区域 i 使用能源 j 所产生的 CO<sub>2</sub> 排放量;E<sub>ij</sub><sup>i</sup>表示区域 i 对能源 j 的消耗量;r<sub>j</sub>为能源 j 的碳排放系数;F<sub>j</sub>为标煤转化系数;e 表示标煤热值;EF<sub>j</sub>表示能源 j 的单位热值含碳量;O<sub>j</sub>表示燃料 j 的碳氧化率;44/12 表示将碳元素量转化成 CO<sub>2</sub> 量。各种能源的碳排放系数见表 1。

(2) 产业结构升级(IS)。产业结构升级是本文的解释变量,本文借鉴汪伟等<sup>[38]</sup>的研究,选用包含第一、第二和第三产业的产业结构层次系数作为其代理指标,能全面体现出产业结构的升级和演进。公式如下:

$$IS = \sum_{i=1}^3 x_i \times i \tag{4}$$

其中:x<sub>i</sub>为第 i 产业产值占总产值的比重;i 也是赋予各产业的相应权重。

(3) 技术创新(TE)。本文中技术创新既是解释变量也是中介变量。以往研究关于技术创新指标多选用专利申请量、授权量、研发投入等单一指标,本文采用 Battese 和 Coelli<sup>[39]</sup>所建立的 C-D 函数形式的随机前沿模型对区域技术创新效率进行测度,并将其作为技术创新的代理指标,以规模以上工业企业为研究对象,选取专利申请量(Y)作为产出指标,R&D 投入(X<sub>1</sub>)、R&D 人员全时当量(X<sub>2</sub>)为投入指标,模型函数形式如下:

$$\ln Y = \beta_0 + \beta_1 \ln X_1 + \beta_2 \ln X_2 + v_i - u_i, TE = \exp(-u_i) \tag{5}$$

其中:v<sub>i</sub> - u<sub>i</sub>为复合误差项;v<sub>i</sub>是随机扰动项;u<sub>i</sub>是技术无效率项。

(4) 环境规制(ER)。环境规制是调节变量,本文参考王宇澄<sup>[40]</sup>的研究,选用工业污染治理投资额与排污费征收额之和占工业增加值的比重来表示。工业污染治理投资额和排污费征收额体现了企业在规制约束下

表 1 各种能源的碳排放系数

能源品种	折标煤系数	标煤热值 (kJ/kg)	单位热值含碳量 (t-C/TJ)	碳氧化率	碳排放系数
原煤	0.7143	29307	26.37	0.94	1.9027
焦炭	0.9714	29307	29.50	0.93	2.8638
原油	1.4286	29307	20.10	0.98	3.0240
汽油	1.4714	29307	18.90	0.98	2.9286
煤油	1.4714	29307	19.60	0.98	3.0371
柴油	1.4571	29307	20.20	0.98	3.0996
电力	0.1229	29307	26.37	0.94	0.3274
燃料油	1.4286	29307	21.10	0.98	3.1744
天然气	1.3300	29307	15.30	0.99	2.1648
液化石油气	1.7143	29307	17.2	0.98	3.1052

注:资料来源于《综合能耗计算通则》(GB/T 2589—2008)、《省级温室气体清单编制指南》(发改办气候[2011]1041号)。

解决环境污染问题时不同的抉择方式,综合考量二者能全面地反映环境规制的作用力度。

(5)控制变量。为了让研究结果更加可靠,本文借鉴已有研究,选取以下4个指标作为控制变量:①能源结构( $ES$ ),选用煤炭消耗量占能源消耗总量表征;②城镇化水平( $LU$ ),选用城镇人口占总人口的比重表征;③人口密度( $PD$ ),采用单位面积人口数表征;④外商直接投资( $FDI$ ),采用外商直接投资占GDP的比重表征。

变量汇总和说明见表2。

表2 变量说明汇总

变量类别	变量代码	变量名称	指标选取
被解释变量	$CI$	碳排放	单位GDP二氧化碳排放量
解释变量	$IS$	产业结构升级	计算所得产业结构层次系数
解释变量 (中介变量)	$TE$	技术创新	由专利申请量、R&D投入、R&D人员全时当量计算所得技术创新效率
调节变量	$ER$	环境规制	工业污染治理投资额与排污费征收额之和占工业增加值比重
控制变量	$ES$	能源结构	煤炭消耗量占能源消耗总量比重
	$LU$	城镇化水平	城镇人口占总人口比重
	$PD$	人口密度	单位面积人口数
	$FDI$	外商直接投资	外商直接投资占GDP比重

## (二)数据来源与处理

本文使用的数据是中国30个省市(西藏地区和港澳台地区因部分数据缺失予以剔除)2008—2017年省级层面的面板数据,碳排放量测算中的各项能源消耗以及能源结构相关数据来自《中国能源统计年鉴》中的地区能源平衡表;技术创新相关数据来自《中国科技统计年鉴》;环境规制数据中的工业污染治理投资额来自《中国环境统计年鉴》,排污费征收额来自《中国环境年鉴》以及中国环境保护数据库;其余数据均来自《中国统计年鉴》和国家统计局网站。为了避免数据间量纲不一致对结果带来的不利影响,对所有变量数据进行对数处理。由于外商直接投资数据是美元计价变量,对其采用年平均汇率进行换算。对于个别缺失数据,采用移动平均法进行补齐。

## (三)模型构建

根据上述分析,本文借鉴Baron和Kenny<sup>[41]</sup>、温忠麟等<sup>[42]</sup>研究中关于中介效应和调节效应相关研究方法和检验步骤,采用层次多元回归法对各假设进行验证,所构建的模型如下。

$$CI_{it} = \beta_0 + \beta_1 IS_{it} + \beta_2 X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

$$CI_{it} = \beta_0 + \beta_1 TE_{it} + \beta_2 X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (7)$$

$$TE_{it} = \beta_0 + \beta_1 IS_{it} + \beta_2 X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (8)$$

$$CI_{it} = \beta_0 + \beta_1 IS_{it} + \beta_2 TE_{it} + \beta_3 X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (9)$$

$$TE_{it} = \beta_0 + \beta_1 IS_{it} + \beta_2 ER_{it} + \beta_3 X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (10)$$

$$TE_{it} = \beta_0 + \beta_1 IS_{it} + \beta_2 ER_{it} + \beta_3 IS_{it} \times ER_{it} + \beta_4 X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (11)$$

$$CI_{it} = \beta_0 + \beta_1 TE_{it} + \beta_2 ER_{it} + \beta_3 X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (12)$$

$$CI_{it} = \beta_0 + \beta_1 TE_{it} + \beta_2 ER_{it} + \beta_3 TE_{it} \times ER_{it} + \beta_4 X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (13)$$

其中: $i$ 为个体; $t$ 为时间; $X_{it}$ 为控制变量; $\varepsilon_{it}$ 代表随机扰动项,其余各变量含义已在第一小节进行了说明。

模型(6)、模型(7)分别检验产业结构升级、技术创新这两个自变量对碳排放强度影响的直接效应,在此基础上,模型(8)和模型(9)是对技术创新的中介效应的检验,中介效应的检验需满足3个条件:①模型(6)中产业结构升级对碳排放强度的影响显著;②模型(8)中产业结构升级对技术创新这个中介变量影响显著;③模型(9)在纳入技术创新这一变量后,若技术创新对碳排放强度影响显著,而产业结构升级对碳排放的影响程度降低或者不显著,则技术创新起部分或完全中介作用。调节效应的检验方法也分为三步:首先主效应检验中自变量系数显著;其次纳入调节变量后,自变量和调节变量系数显著;最后将自变量、调节变量以及二者的交互项一同纳入模型中,交互项系数显著即调节效应存在。

## 四、研究结果与分析

### (一)描述性统计及相关性分析

本研究各变量的平均值(MEAN)、标准差(SD)及皮尔逊(Pearson)相关系数值见表3。通过表3可以看

出,产业结构升级、技术创新与碳排放强度呈显著的负相关关系,表明产业结构升级的层次越高,技术创新能力越强,碳排放强度越低。环境规制与碳排放强度呈正相关关系,说明在当前阶段环境规制的减排成效不明显。以上分析为部分假设结果提供了一个初步的验证,接下来需进一步进行回归分析。

表 3 各变量均值、标准差、相关系数矩阵

变量	MEAN	SD	CI	IS	TE	ER	ES	LU	PD	FDI
CI	0.940	0.576	1.000							
IS	0.843	0.053	-0.483***	1.000						
TE	-0.888	0.399	-0.574***	0.381***	1.000					
ER	-5.584	0.646	0.698***	-0.216***	-0.325***	1.000				
ES	-0.147	0.459	0.697***	-0.497***	-0.375***	0.437***	1.000			
LU	-0.630	0.229	-0.527***	0.803***	0.232***	-0.383***	-0.451***	1.000		
PD	-3.758	1.276	-0.613***	0.521***	0.464***	-0.449***	-0.326***	0.534***	1.000	
FDI	-1.437	0.842	-0.544***	0.572***	0.339***	-0.391***	-0.567***	0.727***	0.665***	1.000

注:\*\*\*表示相关系数在1%水平下显著。

### (二)主效应检验

在回归分析前,为避免数据存在多重共线性问题,首先用Stata15.0对各变量的方差膨胀因子(VIF)进行检验和诊断,结果显示所有变量的VIF都小于10,且 $VIF_{max}=5.07$ ,说明数据间不存在严重的多重共线性,可以进行下一步的回归分析。

面板模型主要包括混合回归、随机效应模型以及固定效应模型,通过LM检验和Hausman检验发现应采用固定效应模型(FE)进行参数估计。首先对主效应进行检验,估计结果见表4,为了确保估计结果的稳定性,表4同时列出了随机效应(RE)的估计结果。

由表4可见,模型I是仅对控制变量进行的检验,城镇化水平和人口密度降低了碳排放强度,这是因为随着人口的集中与城镇化水平的提升,资源能够集中统一地进行配置与利用,减少了能源资源的浪费;同时城镇相关管理条例的落实相比农村更为严格,这会影响人们的生活习惯,提高人们的环保意识。能源结构和外商直接投资增加了碳排放强度,说明过度的煤炭消耗会产生大量的碳排放污染,加剧生态恶化程度;外商直接投资则表现出“污染避难所”效应。模型II、模型III检验了主效应,结果显示各解释变量都通过了1%的显著性检验,且系数符号均为负号,表明产业结构升级和技术创新对碳排放强度具有显著的抑制作用,H1和H2成立。说明在中国当前发展阶段,改变以污染密集型企业为主导的第二产业的发展模式,着力提升服务业比重以及加强研发投入,进行生产技术革新,提高技术创新效率是有效解决碳排放污染问题的重要途径。第一产业、第二产业和第三产业布局合理化的过程中,产业联动效应加强,实现优势互补与升级优化,同时要素配置方向更高层次迈进,高技术、高成长和高附加值产业迅速成长,由此带来产业和经济红利,提升了区域生态协调度和环境保护水平。企业进行技术创新,特别是新型绿色与低碳技术的运用,优化了过程工艺,提高了生产效能,增加了清洁产品的产出,为我国节能减排事业带来了新的发展契机。

表 4 产业结构升级、技术创新分别对碳排放影响的主效应回归结果

被解释变量	CI					
	模型 I		模型 II		模型 III	
	FE	RE	FE	RE	FE	RE
IS			-0.824** (-2.14)	-1.385*** (-3.53)		
TE					-0.267*** (-3.83)	-0.420*** (-6.81)
ES	0.541*** (12.65)	0.627*** (14.67)	0.537*** (12.62)	0.601*** (14.03)	0.555*** (13.27)	0.611*** (15.39)
LU	-1.962*** (-25.06)	-2.046*** (-26.61)	-1.821*** (-17.85)	-1.763*** (-16.20)	-1.635*** (-14.27)	-1.499*** (-13.88)
PD	-1.244*** (-5.73)	-0.116** (-2.33)	-1.078*** (-4.70)	-0.103** (-2.20)	-0.940*** (-4.15)	-0.079* (-1.67)
FDI	0.099*** (4.73)	0.127*** (5.60)	0.104*** (4.96)	0.132*** (5.88)	0.089*** (4.28)	0.100*** (4.70)
-cons	-4.749*** (-5.93)	-0.509*** (-2.66)	-3.335** (-3.22)	0.888** (2.06)	-3.652*** (-4.39)	-0.441** (-2.42)
Adj_R <sup>2</sup>	0.852	0.836	0.855	0.844	0.860	0.851
F	383.14***		311.53***		325.16***	
N	300		300		300	

注:\*\*\*表示相关系数在1%水平下显著;\*\*表示相关系数在5%水平下显著;\*表示相关系数在10%水平下显著,括号里面为t检验值;表中回归系数均为非标准化回归系数。

### (三)中介效应检验

在对主效应检验完成后,将对技术创新的中介效应进行检验。参考陈瑞等<sup>[43]</sup>的研究,鉴于逐步回归分析进行中介检验的缺点,本文采用Bootstrap方法<sup>[44]</sup>。Bootstrap依据95%置信水平的临界值判定中介效应是否存在,将通过PROCESS宏程序设定5000次重复取样并构建误差修正置信区间(CI)。具体结果见表5。

通过表5可以看出,在95%置信区间下,产业结构升级通过倒逼技术创新影响碳排放强度的间接效应是-1.882(CI=[-2.449,-1.392]),置信区间不含0,说明中介效应存在;同时产业结构升级影响碳排放强度的直接效应是-3.362(CI=[-4.390,-2.334]),置信区间也不含0,说明控制了中介变量之后,自变量对因变量有显著的影响,这表示技术创新在产业结构升级和碳排放之间起部分中介作用。整体而言,在产业结构升级抑制碳排放的作用过程中,技术创新具有重要的传导机制。因此,一方面,产业结构升级过程本身具备重置要素和资源优势,能够减少碳排放;另一方面,主导产业向高级化演进过程中技术创新的驱动效应发挥重要作用,企业需不断增加研发投入,加大创新力度,提高外来新技术的消化吸收能力与自主研发能力,提升节能减排技术水平,促进技术创新效率的提升,为抑制碳排放强度奠定基础。综上,H3成立。

#### (四)调节效应检验

根据调节效应的检验步骤,本文已经对第一步自变量对因变量影响的主效应进行了检验并且结果显著,表6报告了检验方法中后两步的结果。

模型IV和模型VI中,纳入环境规制变量后,产业结构升级、技术创新和环境规制变量系数均显著,同时模型V、模型VII的回归结果中环境规制分别与产业结构升级( $IS \times ER$ )以及技术创新( $TE \times ER$ )的交互项均显著且为正,说明环境规制在这两个过程中起显著的正向调节作用,环境规制的力度越大,产业结构升级对技术创新的促进作用越强,且技术创新对碳排放强度的抑制作用越大。这证实在我国发展的现阶段,政府通过对化石能源企业征收排污费或对环保清洁型企业进行补贴等规制政策的有效性,可以倒逼产业结构升级和技术创新。在前半段的调节过程中,企业不断向产业价值链高端环节迈进才能达到强制性环境规制的政策目标,为减缓环境规制带来的污染治理等各项成本支出的增加,甚至减少治理费用,必须大力推进技术的革新;在后半段的调节过程中,环境规制可以强化技术创新带来的生态效益的累积效应,加快了碳减排技术的进步,降低了污染副产品出现的机率,低碳新技术的循环与发展真正实现了绿色低碳转型。综上,政府制定适宜的环境规制将有利于提升企业技术创新效率进而为减排降碳和解决环境污染问题提供有力保障,H4a和H5a成立。

表5 技术创新中介效应的Bootstrap分析结果

因变量	中介变量	效应类别	效应大小	95% 误差修正置信区间		
				标准误差	下限(LLCI)	上限(ULCI)
CI	TE	直接效应	-3.362	0.522	-4.390	-2.334
		间接效应	-1.882	0.269	-2.449	-1.392
		总效应	-5.244	0.550	-6.327	-4.161

表6 环境规制的调节效应回归结果

被解释变量	TE		CI	
	模型IV	模型V	模型VI	模型VII
IS	2.276*** (7.51)			
TE			-0.307*** (-4.27)	
ER	0.029*** (2.66)		0.030** (2.14)	
IS×ER		0.505*** (3.68)		
TE×ER				0.106*** (3.37)
ES	0.081** (2.48)	0.116*** (3.49)	0.573*** (13.52)	0.570*** (13.72)
LU	0.876*** (10.59)	0.841*** (10.34)	-1.543*** (-12.70)	-1.516*** (-12.69)
PD	0.683*** (3.90)	0.728*** (4.25)	-0.891*** (-3.95)	-0.911*** (-4.11)
FDI	-0.049*** (-3.05)	-0.059*** (-3.69)	0.092*** (4.45)	0.092*** (4.58)
_cons	0.413 (0.51)	-1.969* (-1.92)	-3.271*** (-3.87)	-2.848*** (-3.40)
Adj_R <sup>2</sup>	0.771	0.783	0.862	0.868
F	148.50***	135.29***	275.41***	246.97***
N	300	300	300	300

注:\*\*\*表示相关系数在1%水平下显著;\*\*表示相关系数在5%水平下显著;\*表示相关系数在10%水平下显著。括号里面为t检验值,表中回归系数均为非标准化回归系数。

## 五、结论与政策建议

本文运用2008—2017年中国30个省市的面板数据,通过研究产业结构升级、技术创新与碳排放之间的关系,得到以下几个结论:①产业结构升级和技术创新能够显著抑制碳排放;②技术创新在产业结构升级对碳排放的影响间起到部分中介作用;③环境规制在产业结构升级对技术创新的影响间起显著的正向调节作用,同时也在技术创新对碳排放的影响间起显著的正向调节作用。这说明环境规制能够增进产业结构升级对技术创新的促进作用,强化技术创新对碳排放的抑制作用。

基于上述结论提出如下政策建议:

(1)大力推进产业结构升级,促进产业间的协调发展。政府应促进产业合理布局,低端产业应变革发展模式向高端迈进,促进要素的有效空间流转,为解决资源错配问题提供对策。另外,我国应实施创新驱动型

产业优化升级发展战略,打开产业结构升级的碳减排效应中的技术窗口,鼓励企业进行自主研发与创新,加强绿色技术的应用和推广,为我国减排事业带来新的发展契机。

(2)建立促进技术创新的有效机制,从源头治理环境污染问题。政府为鼓励技术创新应加大研发投入,强调研发投入的科技成果转化,注重研发成果的实用性,加大兼顾商业价值和环境价值产品的产出。技术创新能从源头解决环境污染问题,为提高技术创新效率应加强尖端技术和人才引进,形成创新驱动发展的长效机制。

(3)加强环境规制的治理力度,实施区域联合治理。环境规制政策的制定必须要因地制宜,充分考虑当地的实际情况,在保护地方发展特色的同时实现资源能源效益的最大化。不同类型的规制工具应合理使用,充分发挥出命令控制型和市场激励型环境规制工具各自的优势,对于无法实现达标排放、治理无望的企业要坚决依法关停,同时应对使用环保清洁型低碳技术的企业及时给予奖励和补贴。另外,为防止单一地区规制政策带来的污染产业转移,应提高区域之间的联合治理能力,促进区域生态环境形成良性循环系统。

### 参考文献

- [ 1 ] MA C, STERN D I. China's changing energy intensity trend: A decomposition analysis[J]. *Energy Economics*, 2007, 30(3): 1037-1053.
- [ 2 ] AL-GHANDOOR A, AL-HINTI I, MUKATTASH A, et al. Decomposition analysis of electricity use in the Jordanian industrial sector[J]. *International Journal of Sustainable Energy*, 2010, 29(4): 233-244.
- [ 3 ] 王文举, 向其凤. 中国产业结构调整及其节能减排潜力评估[J]. *中国工业经济*, 2014(1): 44-56.
- [ 4 ] 严春晓, 宋辉, 张润清. 新常态下能源-环境治理投入产出模型的构建与应用探索[J]. *管理评论*, 2018, 30(5): 84-94.
- [ 5 ] 宋涛, 董冠鹏, 唐志鹏, 等. 能源-环境-就业三重约束下的京津冀产业结构优化[J]. *地理研究*, 2017, 36(11): 2184-2196.
- [ 6 ] 冯宗宪, 高赢. 中国区域碳排放驱动因素、减排贡献及潜力探究[J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2019, 21(4): 13-20.
- [ 7 ] 王少剑, 黄永源. 中国城市碳排放强度的空间溢出效应及驱动因素[J]. *地理学报*, 2019, 74(6): 1131-1148.
- [ 8 ] 许广月, 宋德勇. 中国碳排放环境库兹涅茨曲线的实证研究——基于省域面板数据[J]. *中国工业经济*, 2010(5): 37-47.
- [ 9 ] 卢娜, 王为东, 王淼, 等. 突破性低碳技术创新与碳排放: 直接影响与空间溢出[J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(5): 30-39.
- [ 10 ] 肖宏伟, 易丹辉, 张亚雄. 中国区域碳排放空间计量研究[J]. *经济与管理*, 2013, 27(12): 53-62.
- [ 11 ] MIAO L, GU H J, ZHANG X W, et al. Factors causing regional differences in China's residential CO<sub>2</sub> emissions-evidence from provincial data[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 224(3): 852-863.
- [ 12 ] 胡中应. 技术进步、技术效率与中国农业碳排放[J]. *华东经济管理*, 2018, 32(6): 100-105.
- [ 13 ] 韩川. 技术进步对中国工业碳排放的影响分析[J]. *大连理工大学学报(社会科学版)*, 2018, 39(2): 65-73.
- [ 14 ] 卫平, 张玲玉. 不同的技术创新路径对产业结构的影响[J]. *城市问题*, 2016(4): 52-59.
- [ 15 ] 林春艳, 孔凡超. 技术创新、模仿创新及技术引进与产业结构转型升级——基于动态空间 Durbin 模型的研究[J]. *宏观经济研究*, 2016(5): 106-118.
- [ 16 ] 王鹏, 赵捷. 产业结构调整与区域创新互动关系研究——基于我国 2002—2008 年的省际数据[J]. *产业经济研究*, 2011(4): 53-60.
- [ 17 ] 徐晔, 陶长琪, 丁晖. 区域产业创新与产业升级耦合的实证研究——以珠三角地区为例[J]. *科研管理*, 2015, 36(4): 109-117.
- [ 18 ] 刘新智, 刘娜. 长江经济带技术创新与产业结构优化协同性研究[J]. *宏观经济研究*, 2019(10): 35-48.
- [ 19 ] 赵庆. 产业结构优化升级能否促进技术创新效率?[J]. *科学学研究*, 2018, 36(2): 239-248.
- [ 20 ] 李伟庆, 聂献忠. 产业升级与自主创新: 机理分析与实证研究[J]. *科学学研究*, 2015, 33(7): 1008-1016.
- [ 21 ] 易信, 刘凤良. 金融发展、技术创新与产业结构转型——多部门内生增长理论分析框架[J]. *管理世界*, 2015(10): 24-39, 90.
- [ 22 ] 谢婷婷, 郭艳芳. 环境规制、技术创新与产业结构升级[J]. *工业技术经济*, 2016, 35(9): 135-145.
- [ 23 ] 刘伟, 张辉. 中国经济增长中的产业结构变迁和技术进步[J]. *经济研究*, 2008, 43(11): 4-15.
- [ 24 ] 顾阿伦, 何崇恺, 吕志强. 基于 LMDI 方法分析中国产业结构变动对碳排放的影响[J]. *资源科学*, 2016, 38(10): 1861-1870.
- [ 25 ] 张雷, 黄园渐, 李艳梅, 等. 中国碳排放区域格局变化与减排途径分析[J]. *资源科学*, 2010, 32(2): 211-217.
- [ 26 ] DURO J A, VICENT A, PADILLA E. International inequality in energy intensity levels and the role of production composition and energy efficiency: An analysis of OECD countries[J]. *Ecological Economics*, 2010, 69(12): 2468-2474.

- [27] SUN J W. The decrease in the difference of energy intensities between OECD countries from 1971 to 1998[J]. *Energy Policy*, 2002, 30(8): 631-635.
- [28] GERLAGH R. Measuring the value of induced technological change[J]. *Energy Policy*, 2006, 35(11): 5287-5297.
- [29] 郑加梅. 环境规制产业结构调整效应与作用机制分析[J]. *财贸研究*, 2018, 29(3): 21-29.
- [30] 钟茂初, 李梦洁, 杜威剑. 环境规制能否倒逼产业结构调整——基于中国省际面板数据的实证检验[J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(8): 107-115.
- [31] PORTER M E, LINDE C V D. Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship [J]. *Journal of Econometrics*, 1995, 94(4): 97.
- [32] POPP D. Pollution control innovations and the clean air act of 1990[J]. *Journal of Policy Analysis and Management*, 2003, 22(4): 641-660.
- [33] REQUATE T. Dynamic incentives by environmental policy instruments-A survey[J]. *Ecological Economics*, 2005, 54(2): 175-195.
- [34] 王娟茹, 张渝. 环境规制、绿色技术创新意愿与绿色技术创新行为[J]. *科学学研究*, 2018, 36(2): 352-360.
- [35] NANDAKUMAR M K, JHARKHARIA S, NAIR A. Environmental uncertainty and flexibility[J]. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 2012, 13(3): 121-122.
- [36] SINN H W. Public policies against global warming: A supply side approach[J]. *International Tax Public Finance*, 2008, 15(4): 360-394.
- [37] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE(IPCC). IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. London: Cambridge University Press, 2006: 6-10.
- [38] 汪伟, 刘玉飞, 彭冬冬. 人口老龄化的产业结构升级效应研究[J]. *中国工业经济*, 2015(11): 47-61.
- [39] BATTESE G E, COELLI T J. A model for technical inefficiency effects in a stochastic frontier production function for panel data[J]. *Empirical Economics*, 1995, 20(2): 325-332.
- [40] 王宇澄. 基于空间面板模型的我国地方政府环境规制竞争研究[J]. *管理评论*, 2015, 27(8): 23-32.
- [41] BAERON R M, KENNT D A. The moderator-mediator variable distinction in social psychological research: Conceptual, strategic, and statistical considerations[J]. *Journal of Personality and Social Psychology*, 1986, 51(6): 1173-1182.
- [42] 温忠麟, 张雷, 侯杰泰. 有中介的调节变量和有调节的中介变量[J]. *心理学报*, 2006(3): 448-452.
- [43] 陈瑞, 郑毓煌, 刘文静. 中介效应分析: 原理、程序、Bootstrap方法及其应用[J]. *营销科学学报*, 2013, 9(4): 120-135.
- [44] MACKINNON D P, LOCKWOOD C M, WILLIAMS J. Confidence limits for the indirect effect: Distribution of the product and resampling methods[J]. *Multivariate Behavioral Research*, 2004, 39(1): 99-128.

## Upgrading Industrial Structure, Technological Innovation and Carbon Emission: A Moderated Mediation Model

Sun Liwen, Li Yifan, Ren Xiangwei

(School of Economics and Management, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

**Abstract:** Carbon emission reduction is an important aspect to achieve high-quality development of the environment, upgrading industrial structure and technological innovation are key ways to affect carbon emission. Based on a moderated mediation model, this paper builds a theoretical framework of the relationship among upgrading industrial structure, technological innovation and carbon emission under the embedding of environmental regulation, analyzes and empirically tests the mechanism of upgrading industrial structure and technological innovation on carbon emission and the moderating effect of environmental regulation among the three variables. The results show as follows. Upgrading industrial structure and technological innovation can significantly reduce carbon emission. Technological innovation plays a partial mediating role in the impact of upgrading industrial structure on carbon emission. Environmental regulation plays a significant positive moderating role in the impact of upgrading industrial structure on technological innovation and the impact of technological innovation on carbon emission.

**Keywords:** upgrading industrial structure; technological innovation; carbon emission; environmental regulation