

Doi: 10.11835/j.issn.1008-5831.jg.2021.12.002

欢迎按以下格式引用:严太华,朱梦成.技术创新、产业结构升级对环境污染的影响[J].重庆大学学报(社会科学版),2023(5):70-84. Doi:10.11835/j.issn.1008-5831.jg.2021.12.002.



Citation Format: YAN Taihua, ZHU Mengcheng. The impact of technological innovation and industrial structure upgrading on environmental pollution[J]. Journal of Chongqing University(Social Science Edition), 2023(5):70-84. Doi:10.11835/j.issn.1008-5831.jg.2021.12.002.

技术创新、产业结构升级 对环境污染的影响

严太华,朱梦成

(重庆大学经济与工商管理学院,重庆 400044)

摘要:中国经济高速增长的背后是普遍而严峻的环境污染问题,在保证我国经济增速的同时降低环境污染物排放、实现经济的绿色可持续发展已成为当前社会的核心目标之一,而加强技术创新是降低环境污染的根本路径,同时,推动产业结构调整升级是实现绿色经济发展的根本方式。文章将技术创新、产业结构升级与环境污染纳入同一分析框架,尝试从定量的角度研究技术创新、产业结构升级对环境污染的影响效应。文章借助中国2004—2017年各省份(不包括西藏、港澳台)面板数据,构建包含技术创新、产业结构升级以及环境污染的固定效应模型,并提出产业结构升级是技术创新影响环境污染的中介变量,从技术创新、产业结构升级对环境污染影响的直接效应和间接效应进行分析验证,实证探究了技术创新、产业结构升级对环境污染的影响;同时从全国层面以及区域层面进行比较分析,在验证前文假设成立的基础上,对比不同区域的实证检验结果,尝试从中国区域差异性的角度得到更具针对性的研究结论和政策启示。研究表明:从直接效应看,技术创新和产业结构升级可以显著减少环境污染,作用强度与技术创新水平、产业结构升级水平成反比,且分地区检验结果相同;东中西部地区技术创新、产业结构升级降低环境污染的作用大小却表现出了明显的区域差异。从间接效应看,技术创新可以推动产业结构升级降低环境污染,产业结构升级在技术创新降低环境污染的过程中充当中介变量。分区域检验结果显示,东部地区具有完全中介效应,西部地区中介效应占比27.46%,中部地区中介效应不显著。文章的研究结果对我国环境污染治理具有重要的启示:技术创新和产业结构升级对减少污染排放、提升环境质量至关重要,政府需要因地制宜施策,充分发挥技术创新、产业结构升级降低环境污染的直接效应和间接效应,东部地区在追求产业结构高级化的同时,应发挥技术创新在产业结构升级中的核心作用;中西部地区要加快提升企业创新能力,引进生产资本技术密集型产业促进产业结构转型升级。

基金项目:国家社会科学基金后期资助项目“资源型城市产业转型与共享式增长研究”(21FJYB039)

作者简介:严太华,重庆大学经济与工商管理学院教授,Email: yantaihua@cqu.edu.cn。

关键词:技术创新;产业结构升级;环境污染;区域差异;中介效应

中图分类号:X322;F121.3;F124.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1008-5831(2023)05-0070-15

一、研究背景

改革开放以来中国持续的经济增长速度令世界称奇,然而经济高速增长的代价是传统粗放型经济发展模式所引发的普遍而严峻的环境污染。严重的环境污染不仅降低了社会福利,更是对中国的经济造成了约占 GDP 8%~15%的损失^[1]。新时代的生态文明建设强调人与自然和谐共生,融合经济增长、资源节约和环境保护的“绿色经济”增长方式已成为现代中国经济发展的追求目标^[2]。多年来党中央一直在进行经济增长方式调整和政策性改革,旨在打造经济结构与环境体系和谐发展的生态格局。习近平总书记提出的“创新、协调、绿色、开放、共享”新发展理念为我国今后经济社会发展提供了根本遵循。十九大报告提出绿色创新驱动的生产生活方式,深入贯彻“绿水青山就是金山银山”的经济理念。我国已制定并实施了严格的环境保护制度。经济发展的核心动力是技术创新,加强技术创新、推动产业结构转型升级是降低环境污染的根本路径。实现经济的可持续发展需要转变经济发展方式^[3],一方面通过调整升级产业结构,优化转型高消耗、高污染、低效率的重工业支柱产业,另一方面通过创新技术,实现资源开采利用绿色化、废气废水排放低碳化。合理的环境政策引导和激励企业进行技术创新以推动产业结构升级,可以有效促进我国传统经济向绿色经济转型。因此,有必要从定量的角度研究技术创新和产业结构升级如何影响环境污染,探究技术创新、产业结构升级二者对环境污染的内在作用机制,从新的视角为治理环境污染、推动我国经济高质量发展提供理论和现实依据。

二、研究综述

自 20 世纪 90 年代以来,环境污染、技术创新和产业结构逐渐成为国内外学者研究的热点。总结当前与技术创新、产业结构和环境污染相关的文献研究主要集中在三个方向。

第一,研究技术创新与环境污染的关系。多数学者研究认为,技术创新可以显著减少环境污染。Grossman 和 Krueger 在分析环境污染的影响因素时发现,技术创新在改善环境质量中发挥着重要作用,因为越先进的技术往往越能使经济发展更加“绿色”^[4]。Chiou 等利用空间误差模型讨论了创新对绿色发展的影响,认为绿色创新能够显著促进环境绩效的提高^[5]。国内部分学者将技术创新、环境污染与经济增长、产业集聚、环境规制等结合起来分析。董直庆等重点研究技术进步方向变化对环境产生的可能影响,结果发现环境质量和经济增长要想实现相容发展,需要借助技术进步方向的转变以增加清洁技术强度^[6]。原毅军和谢荣辉则重点关注产业集聚、技术创新的内部作用如何影响环境污染,研究发现产业集聚水平与环境污染二者的关系曲线符合倒“U”型,同时“U”型曲线“拐点”的位置受技术创新水平的影响^[7]。范丹、孙晓婷区分市场激励型和命令控制型环境规制手段,在包含绿色技术创新、环境规制以及绿色经济的统一分析框架下,基于动态面板平滑转移模型和中介效应模型实证研究发现:环境规制手段与绿色技术创新是推动绿色经济的两大推手,且市场激励型环境规制政策通过激发绿色技术创新从而促进绿色经济发展^[8]。李斌、赵新华运用中国 37 个工业行业数据实证研究发现环境污染分解效应中,对大气污染减排作用效果最明显的是纯生产技术效应和纯污染治理技术效应,其次,结构生产技术效应、结构治理技术效应对减少污染排

放也有一定的贡献^[9]。企业技术创新在一定程度上能够促进工业废水、废气、固体废物的强化治理,技术创新对环境污染治理形成的前端预防效果要优于通过控制污染排放物进行的末端治理^[10],企业的绿色技术创新效应主要体现在能源节约和替代能源生产两类专利的申请上^[11]。也有学者研究发现技术创新不一定带来环境质量的改善,技术创新减少环境污染存在条件限制。黄天航等研究发现技术创新能够减少环境污染,但是需要配套环境规制政策,在实现创新转型发展的基础上对环境污染起到减轻作用^[12]。陈阳等借助中国 285 个城市的经验数据亦验证了近年来中国的技术创新能够降低环境污染,但检验结果存在门槛效应,即当技术创新水平低于门槛值时不能起到降低环境污染的作用^[13]。李粉等借助中国 21 个两位数工业行业面板数据研究发现,技术创新反而能够加大环境污染排放,可能的原因是处于产业集聚初、中期的企业更多关注产品本身的生产技术创新而忽视了环保层面的绿色技术创新^[14]。

第二,研究产业结构升级与环境污染的关系。Lindmark^[15]、Pasche^[16]发现产业结构的调整能够带来产业间资源的合理分配,使资源得到充分利用从而降低环境污染。张红凤等基于山东数据研究得出产业结构配置政策的调整可以改变因环境污染物总排放量高而导致的环境规制压力过大的局面^[17]。Grossman 和 Krueger 认为东亚地区适用工业化发展与环境污染程度演变三阶段模型,包括以生产劳动密集型产品为主的轻工业阶段、以生产资源密集型产品为主的重化工业阶段和以生产资本技术密集型产品为主的电子工业阶段,同时针对环境污染的不同阶段做了差异性分析^[4]。关于产业结构升级与环境污染的关系,目前的研究结论不尽相同,多数学者采用国内外数据进行多方面验证,表明产业结构升级是环境污染的重要影响因素。一是研究产业结构升级与环境污染的线性关系。王菲等将中国八大区域工业内部各行业的经济状况纳入环境污染影响因素回归模型进行分析,发现工业结构是影响地区经济增长和环境状况的重要因素,同时也对地区间环境污染排放产生很大影响^[18]。王青等运用 Granger 因果检验方法分析得出三大产业在经济结构中的比例会影响污染排放,各产业产出量与环境污染已经形成长期稳定的协同关系,且工业产业是影响环境污染的最大因素^[19]。原毅军、谢荣辉从规模效应、结构效应和技术效应三个角度出发,分析工业规模变化、工业结构调整和技术进步对污染减排的作用效果,发现技术进步和工业结构调整都对工业废气减排产生贡献,并能在一定程度上弥补工业规模对污染减排的逆向效应^[20]。冯雪艳等利用省级面板数据探究财政分权是否通过影响产业结构来改善环境状况,结果发现财政分权在显著降低本地区及相邻地区环境污染的过程中,产业结构合理化与产业结构高级化的进程也不断加快^[21]。二是研究产业结构与环境污染的非线性关系。产业结构与环境污染之间是否存在倒“U”型曲线关系?李鹏从经济增长速度、产业结构调整幅度两个角度对此进行验证,结果表明产业结构调整幅度和经济增长速度变化并不会改变产业结构以及环境污染排放量本身存在的倒“U”型曲线关系^[22]。

第三,研究技术创新与产业结构升级的关系。Ngai 和 Pissarides 认为技术创新在产业结构升级过程中具有重要作用^[23]。徐康宁和冯伟发现企业具备技术创新能力是中国产业结构升级的核心基础^[24]。许树辉、谷人旭认为技术创新对区域产业结构升级起着重要的支撑和推动作用,创新能力不足是欠发达地区产业结构升级的主要障碍^[25]。部分学者通过实证研究进一步证明了以上结论。时乐乐、赵军通过构建非线性面板门槛模型分析技术创新在环境规制作用下是否能够推动产业结构升级,发现技术创新对产业结构升级的推动作用不受环境规制等其他因素的影响^[26]。刘在洲和汪发元应用空间杜宾模型实证得出绿色科技创新和财政投入分别对产业结构升级有显著的短期正向

效应,应激励绿色技术创新,发挥科技创新在产业结构升级中的核心作用^[27]。

以上文献综述表明,技术创新、产业结构升级是影响环境污染的两个至关重要的因素,但已有研究主要是从技术创新、产业结构升级角度分别考察对环境污染的作用,没有形成一个统一的框架,这一单因素分析模式忽略了技术创新与产业结构升级二者可能存在的交互作用对环境污染的影响;研究地域较多从全国层面考察,较少考察区域差异。

因此,本文借助中国2004—2017年各省份(不包括西藏、港澳台)的面板数据,将技术创新、产业结构升级与环境污染纳入同一分析框架,基于理论和实证研究分析技术创新和产业结构升级对环境污染的直接影响和间接影响,并考察技术创新、产业结构升级在不同区域和时期对环境污染作用的异质性效果,期望比较全面地解析中国的技术创新和产业结构升级如何影响环境污染。

三、理论基础与假设

在前人研究的基础上,综合考虑技术创新和产业结构升级对环境污染的影响时,认为技术创新、产业结构升级能够通过直接效应和间接效应影响环境污染。直接效应是指技术创新、产业结构升级本身能够直接对环境污染产生影响,而间接效应是指技术创新和产业结构升级二者能够相互作用,通过内在作用机制共同对环境污染产生影响。与此同时,还有许多其他诸如经济、城市治理等方面的因素也能影响环境污染^[28-29]。

(一) 技术创新、产业结构升级对环境污染的直接影响

1. 技术创新对环境污染的直接效应

技术创新可以通过生产技术和污染治理技术的共同进步影响环境质量^[9]。当前我国主要采取两种方式降低环境污染:一是形成前端防御,通过优化生产方式减少污染物的产生;二是加强终端治理,提高污染物的处理效率。为了从根本上减少环境污染,企业往往通过提高生产技术来降低单位产出的生产能耗,生产技术创新水平越高越有利于生产过程中节能减排。同时技术创新水平的提升有利于清洁生产工艺的产生,加大清洁能源、污染处理设备投入使用。通过先进技术打造清洁能源,提高污染治理技术解决污染废弃物的循环利用问题,达到减少环境污染物排放的目的。因此,提出假设1。

假设 H1:技术创新有利于减少环境污染

2. 产业结构升级对环境污染的直接效应

产业结构升级也是影响环境污染的重要因素。现代产业结构升级的实质是改变经济增长方式和经济增长动力,资本密集型和知识密集型逐步替代劳动密集型的经济增长方式,投资驱动和创新驱动成为现代经济增长的动力。在经济发展前期,以重工业为主的第二产业在经济结构中占比较大,对环境的污染性较强;在经济发展中后期,逐渐发展以高新技术为核心的技术密集型产业,环境污染强度明显下降。经济结构的优化升级使环境污染的压力得到缓解^[9],开始控制和淘汰污染密集型的第二产业,发展重心转向以现代服务业和高新技术为核心的第三产业,产业结构向合理化和高级化演变。不同产业的规模比例决定着各种污染排放物的产出量和种类,且环境污染的产生与产业结构的变动、产业规模的调整以及产业发展速率的变化息息相关^[19]。因此,环境污染的治理需要配合产业结构规制政策,通过优化调整各产业比例规模、严格控制污染密集型产业达到节能减排的目的^[17]。据此,提出假设2。

假设 H2: 产业结构升级有利于减少环境污染

(二) 技术创新、产业结构升级对环境污染的间接影响

技术创新和产业结构升级二者之间可能存在相互作用关系,若假设 H1、H2 成立,技术创新、产业结构升级如何影响环境污染?

技术创新除了通过提高生产技术和治污技术直接减少环境污染,还可以推动产业结构升级,间接达到减少环境污染的效果。技术创新主要通过就业结构、需求结构以及产业关联性推动产业结构升级:(1)改变劳动力就业结构,技术创新促使劳动力资源在各行业各企业间得到优化配置;(2)改变消费者需求结构,产品技术创新引致消费市场的变化,利用消费需求带动产业结构升级;(3)加强产业间关联性,技术创新刺激供给端产品融合发展,从而打造更加完善的供应链。

本文认为只考虑技术创新或产业结构升级单因素如何影响环境污染,构成“直接效应”;而将技术创新和产业结构升级的内在关系综合考虑后发现,产业结构升级在技术创新影响环境污染的过程中充当“中介桥梁”,具体的作用路径:技术创新推动产业结构升级,再通过产业结构升级进一步影响环境污染,可以看作是“间接效应”,对此类现象的解释,由“中介作用”机制加以量化评价。因此,提出假设 3。

假设 H3: 技术创新推动产业结构升级,产业结构升级在技术创新影响环境污染的过程中起中介作用。

综上所述,技术创新、产业结构升级对环境污染的影响路径可以归纳为“技术创新→产业结构升级→环境污染减少”的正向传导机制,研究逻辑模型如图 1 所示。

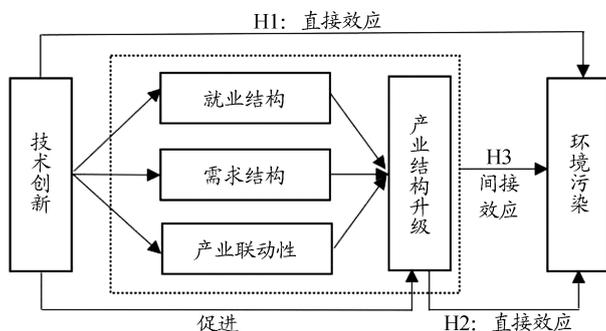


图 1 研究逻辑模型

四、研究设计

(一) 变量选取

本文从各省市层面研究技术创新、产业结构升级对环境污染的影响,因此,被解释变量是环境污染水平,核心解释变量是技术创新水平及产业结构升级水平,控制变量为对环境污染产生影响的其他因素。具体的变量指标选择如下。

1. 被解释变量

工业废水、工业烟尘、工业二氧化硫排放量常被用来衡量环境污染水平。纵观学术界,目前用来反映环境污染状况的指标标准不一,多数学者认为“废水、废气、烟尘”指标中的某个或全部指标最具代表性^[20,22]。由于采用污染排放总量指标存在异方差,而废气中的二氧化硫(SO₂)是环境污染的主要来源物质,又是工业污染排放中最典型的排放物,本文选取二氧化硫的排放量作为环境污染

的代理指标。同时为消除模型估计的异方差,被解释变量指标在进行模型估计时取对数($\ln\text{SO}_2$)。在后续稳健性检验中,替换环境污染指标,选取工业废水排放量作为被解释变量,检验结果作为判别模型稳健性的依据。

2. 解释变量

技术创新、产业结构升级为本文的核心解释变量。通常用技术创新投入和技术创新产出两种指标来表征技术创新水平:创新投入指标一般包括科技经费投入、研发投入强度以及研发支出占 GDP 的比例等^[28-29];创新产出指标中多数学者认为国内专利申请数、授权数最具代表性^[12]。在前人研究的基础上,本文认为我国技术创新指标的选取应首先考虑技术创新产出,并且国内专利受理量比申请数说明效果更好。因此,技术创新指标选取国内专利申请受理量(项),用对数 $\ln\text{tech}$ 表示。参照吴敬琏^[30]的研究,在产业结构升级的过程中,经济结构不断趋向服务化,且第三产业增长率明显快于第二产业增长率。本文产业结构升级指标采用第三产业增加值与第二产业增加值之比(%),用对数 $\ln\text{indus}$ 表示,该指标的上升表明产业结构升级。

3. 控制变量

为了缓解模型遗漏变量导致回归结果产生偏误问题,参考陈诗一和陈登科^[31]、上官绪明和葛斌华^[32]的研究,本文将经济因素、人口因素以及治理因素作为控制变量综合纳入环境污染研究模型中。经济因素包括经济发展水平和固定资产投资,衡量指标选取地区人均 GDP、全社会固定资产投资,分别用对数 $\ln\text{gdp}$ 、 $\ln\text{invest}$ 表示。同时需要考虑环境库兹涅茨倒“U”型曲线的影响^[33],本文将经济发展水平的平方项($\ln\text{gdp}^2$)引入模型。参考陈阳等^[13]的研究,人口因素包括人口规模和人口素质,人口规模指标选取年末常住人口的对数值($\ln\text{pop}$),预期人口规模扩大将带来环境污染的加剧;人口素质用普通高等学校在校学生数(student)来表征,人口素质提升则环境污染减少。治理因素包括城市绿化与政府管制。人均城市绿地面积(green)越大,越有利于吸收部分污染源排放,对环境污染的减轻作用越大;同时政府财政支出占 GDP 比重(govern)越高,说明政府管控力度越强,对环境污染的规制作用越大也越有利于降低环境污染。各变量的具体符号及解释说明见表 1。

表 1 相关变量说明

变量指标		符号	单位(原始值)	
被解释变量	二氧化硫排放量对数值	$\ln\text{SO}_2$	吨	
核心解释变量	国内专利申请受理量对数值	$\ln\text{tech}$	项	
	第三产业增加值与第二产业增加值之比	$\ln\text{indus}$	/	
控制变量	经济因素	地区人均 GDP 对数值	$\ln\text{gdp}$	元
		全社会固定资产投资对数值	$\ln\text{invest}$	亿元
	人口因素	年末常住人口对数值	$\ln\text{pop}$	万人
		普通高等学校在校学生数	student	万人
	治理因素	人均城市绿地面积	green	公顷/万人
		地方财政支出占 GDP 比重	govern	/
中介变量	产业结构升级(第三产业增加值与第二产业增加值之比)			

(二) 数据说明与描述性统计

本文各指标数据均出自《中国统计年鉴》以及《国家统计局》,年限区间均选自 2004—2017 年(环境污染指标数据参考《国家统计局》,数据来源于 2017 年第二次全国污染源普查),将中国 30 个省份做样本分析,地区划分按照中国区域划分三分法,西藏、港澳台因其特殊性暂不列入。因数据

量纲不同在实证过程中可能会产生异方差,因此为确保输出结果的准确性,本文将关键变量对数化。全国及区域层面各变量的描述性统计结果见表2。

表2 各变量的描述性统计

变量	平均值				标准差	最小值	最大值
	全国	东部	中部	西部			
	N=420	N=154	N=112	N=154			
lnSO ₂	13.133	12.875	13.316	13.257	0.939	9.566	14.510
lnitech	9.727	10.671	9.732	8.781	1.630	4.820	13.350
lnindus	4.527	4.671	4.388	4.484	0.365	3.968	6.049
lngdp	10.317	10.766	10.112	10.017	0.679	8.370	11.768
lngdp ²	106.900	116.234	102.539	100.739	13.914	70.062	138.475
lninvest	8.794	9.068	8.998	8.371	1.070	5.667	10.919
lnpop	8.171	8.237	8.507	7.859	0.749	6.290	9.321
student	73.013	87.493	90.174	46.053	45.587	2.950	201.530
govern	23.736	22.434	18.838	28.600	21.435	7.548	214.320
green	16.327	24.119	11.194	12.267	11.572	2.650	57.558

描述性统计分析显示,被解释变量具有较大的变动范围;不同地区环境污染的程度明显不同,环境污染的全国均值为13.133,中西部地区的环境污染均值明显高于东部地区的12.875。观察核心解释变量指标,技术创新水平的全国均值为9.727,其中东部地区均值为10.671,显著大于中部地区的9.732和西部地区的8.781;从产业结构升级水平来看,全国均值为4.527,其中东部地区均值最高,中西部地区均值在全国平均水平以下。以上数据说明东部地区技术创新和产业结构升级平均水平均高于中西部地区,环境污染程度东部地区最低,与假设H1、H2相符合。技术创新的标准差较大,表明各个区域之间技术的研发与运用不平衡。从相关控制变量来看,经济因素、人口因素以及治理因素各变量指标也都存在明显的区域差异。

(三) 实证分析

1. 计量模型设定

依据前文理论分析和有关变量选取的说明,本文将环境污染与各变量的函数关系界定如下(各变量的具体含义前文已有说明):

$$Y = f(\text{lnitech}, \text{lnindus}, \text{lngdp}, \text{lngdp}^2, \text{lninvest}, \text{lnpop}, \text{student}, \text{govern}, \text{green}) \quad (1)$$

据此可设定基础回归方程(2)进行基准回归,其主要讨论技术创新和产业结构升级对环境污染的影响。其中, i 代表地区省份, t 代表时间年限, C 为截距, X_{it} 表示其他控制变量, ε_{it} 为随机扰动项。

$$\ln\text{SO}_{2it} = C_0 + \alpha_1 \text{lnitech}_{it} + \alpha_2 \text{lnindus}_{it} + \alpha_3 X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

为进一步验证技术创新能否通过促进产业结构升级对环境污染产生影响,本文采用温忠麟等^[34]的中介效应检验程序三步法,将产业结构升级作为中介变量,设定了如下方程:

$$\ln\text{SO}_{2it} = C_1 + \beta_1 \text{lnitech}_{it} + \beta_2 X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

$$\ln\text{indus}_{it} = C_2 + \gamma_1 \text{Intech}_{it} + \gamma_2 X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

方程(3)、(4)结合基础回归方程(2)共同构成了中介效应检验方程式。产业结构升级是否在技术创新影响环境污染过程中充当中介变量? 第一步,对式(3)进行估计,检验在不包括产业结构升级变量的情况下技术创新对环境污染的总体影响,如果 β_1 显著,表明技术创新对环境污染影响的总体效应是存在的。第二步,对式(4)进行回归,判断技术创新的回归系数 γ_1 ,若 γ_1 为正数,表明技术创新对产业结构升级产生正向影响;若 γ_1 为负数,表明技术创新能够负向作用于产业结构升级。第三步,对式(2)进行回归,检验纳入产业结构升级变量后技术创新对环境污染的影响大小是否改变。若系数 β_1 显著,且 γ_1 和 α_2 均显著,证明存在中介效应;若系数 β_1 不显著则结束检验程序,表明不存在中介效应。在 β_1 显著的前提下:若 α_1 不显著,表明存在完全中介效应;若 α_1 显著,表明存在部分中介效应,该中介效应占总效应的比重为 $\frac{\gamma_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \gamma_1 \alpha_2}$;若 γ_1 与 α_2 不全显著,则需要采用 Sobel 统计量继续检验:

$$Z = (\gamma_1 \alpha_2) / \sqrt{\gamma_1^2 S_{\alpha_2}^2 + \alpha_2^2 S_{\gamma_1}^2}$$

计算出 Z 值,若 Z 值大于其在5%显著性水平上的临界值0.97,则拒绝原假设认为中介效应显著存在。

2. 基准回归分析

根据已设定的模型,对式(2)分别进行混合回归、固定效应回归估计,输出F检验的 p 值为0.0000,可判断固定效应模型比混合回归模型拟合效果更好;其次,豪斯曼检验结果显示 p 值为0.0100,应当拒绝“选择随机效应模型”原假设,因此,本文选取固定效应模型进行回归分析。由于各地区的环境政策有所不同,技术创新、产业结构升级对环境污染的影响结果可能呈现地区差异性。因此,将分区域考察技术创新、产业结构升级对环境污染的作用效果。

表3列出了根据式(2)展开的全国样本以及分区域样本的回归估计结果。首先,选择全国样本进行逐步回归,考察技术创新、产业结构升级同时出现在模型中时是否会导致模型的非显著。表中模型1考察了技术创新对环境污染的影响,结果表明技术创新对环境污染的影响呈现显著的负向作用。模型2考察了产业结构升级对环境污染的影响,根据系数判断产业结构升级能够显著降低环境污染。基准回归结果如模型3所示,在模型1、模型2的基础上将技术创新和产业结构升级同时作为解释变量进行回归,考虑二者对环境污染的综合影响。其次,分区域进行考察,模型3检验了东、中、西部地区技术创新、产业结构升级对环境污染影响的区域差异,结果显示,全国层面及区域层面的技术创新和产业结构升级都能显著降低环境污染。具体地,从全国层面看,模型3解释变量回归系数分别为-0.250和-0.603,意味着技术创新指标增加1%,环境污染会降低0.250%,产业结构升级指标提高1%,环境污染水平将降低0.603%,验证了假设H1和假设H2中技术创新和产业结构升级有利于减少环境污染的观点。从区域层面看,模型3技术创新回归系数分别为-0.164、-0.176、-0.251,表示技术创新指标提升1%,东、中、西部区域环境污染值分别降低0.164%、0.176%、0.251%,且均在1%显著性水平上显著,说明西部地区技术创新对环境污染的减轻作用明显大于中、东部地区;同时东、中、西部省份产业结构升级的回归系数分别为-1.245、-0.462、-0.521,东部地区产业结构升级对环境污染的减轻作用明显大于中、西部地区,说明东部地区产业结构升级更能有效降低环境污染。进一步,从逐步回归结果看,模型1—模型3的回归系数大小、方

向和符号均无明显差异,表明参数估计较为稳健。

观察控制变量对环境污染的影响系数,其中经济因素的作用强度大于人口因素,治理因素的作用强度最小。从经济因素看,人均国内生产总值($\ln gdp$)符号显著为正,平方项符号显著为负,检验结果符合倒“U”型假说;全社会固定资产投资($\ln invest$)符号显著为正,加剧了环境污染,证明投资增长在拉动经济发展的同时也增加了环境污染物排放。从人口因素看,年末常住人口数($\ln pop$)回归系数为正,表明人口数量越多,环境污染越严重。普通高等学校在校生数($student$)的回归系数为负,说明提升人口素质能够降低环境污染,这可能与人们保护环境的意识和自觉性增强有关。人均城市绿地面积($green$)与环境污染呈负向相关关系,与预期相同;地方财政支出占GDP比重($govern$)对环境污染的影响与预期相反,这可能受地方财政政策的影响。因此可以认为,治理因素在一定程度上也对环境污染产生作用。

表3 基准回归、固定效应回归结果

变量	模型 1	模型 2	模型 3			
	(全国)	(全国)	(全国)	东部地区	中部地区	西部地区
	$\ln SO_2$	$\ln SO_2$	$\ln SO_2$	$\ln SO_2$	$\ln SO_2$	$\ln SO_2$
$\ln tech$	-0.355*** (-6.968)		-0.250*** (-4.935)	-0.164 (-1.423)	-0.176*** (-2.701)	-0.251*** (-3.486)
$\ln indus$		-0.738*** (-8.432)	-0.603*** (-6.752)	-1.245*** (-5.721)	-0.462*** (-3.029)	-0.521*** (-3.775)
$\ln gdp$	5.135*** (6.102)	3.020*** (3.508)	3.363*** (4.011)	9.744*** (5.370)	7.200*** (3.052)	3.573*** (3.070)
$\ln gdp^2$	-0.264*** (-6.537)	-0.178*** (-4.328)	-0.184*** (-4.591)	-0.458*** (-5.364)	-0.367*** (-3.283)	-0.170*** (-2.970)
$\ln invest$	0.374*** (4.122)	0.327*** (3.742)	0.400*** (4.652)	0.0219 (0.160)	0.144 (0.923)	0.180 (1.119)
$\ln pop$	0.0262 (0.0595)	-0.0250 (-0.0585)	0.181 (0.433)	0.634 (1.111)	-3.339*** (-2.768)	4.252*** (4.206)
$student$	-0.00470*** (-3.381)	-0.00629*** (-4.786)	-0.00469*** (-3.565)	0.000270 (0.132)	-0.00916*** (-3.800)	-0.0140*** (-4.558)
$govern$	0.000434 (0.514)	0.000168 (0.204)	0.000327 (0.409)	-0.00125 (-1.444)	0.0403** (2.085)	0.00334 (0.550)
$green$	-0.00411* (-1.731)	-0.00342 (-1.476)	-0.00342 (-1.519)	-0.00566** (-2.125)	-0.000355 (-0.0755)	-0.0264*** (-2.834)
Constant	-11.31 (-1.623)	2.212 (0.320)	-1.392 (-0.206)	-36.48*** (-2.926)	9.042 (0.548)	-34.90*** (-2.970)
Province/Year	yes	yes	yes	yes	yes	yes
Observations	420	420	420	154	112	154
R-squared	0.525	0.549	0.576	0.701	0.699	0.658
Number of province	30	30	30	11	8	11

注:1. *、**、*** 分别表示在 10%、5%和 1%的显著性水平下显著(下同);2. 括号内数值为 t 值。

3. 中介机制解析

为考察技术创新能否通过促进产业结构升级从而对环境污染起到降低作用,本文将产业结构

升级作为中介变量,下面进行中介效应检验。

首先对全国样本进行检验,检验结果如表 4 所示。中介效应模型的第一步检验技术创新对环境污染的总体影响,与上述模型 1 的回归结果一致,回归系数为-0.355,在 1%显著性水平上显著,表明技术创新能够显著降低环境污染。第二步检验技术创新是否影响产业结构升级,检验结果显示,技术创新对产业结构升级的回归系数为 0.174,说明技术创新每提高 1%,产业结构升级提升 0.174%,且在 1%的显著性水平上显著,说明技术创新能够显著推动产业结构升级。第三步检验技术创新、产业结构升级对环境污染的综合影响,结果与模型 3 一致:产业结构升级对环境污染影响显著,影响系数为-0.603,表明产业结构升级每提高 1%,环境污染能够降低 0.603%;技术创新的影响系数为-0.250,其绝对值显著低于第一步中总体影响系数 0.355,说明产业结构升级在技术创新减少环境污染过程中发挥的部分中介效应显著存在。进一步分析影响系数可得出,技术创新每提高 1 个单位,通过产业结构升级促进环境污染减少 0.105 个单位,根据公式计算出产业结构升级的中介效应占比为 29.58%,表明在技术创新影响环境污染的过程中,有 29.58%是通过间接作用于产业结构升级来实现的。此外,二次检验 Sobel 统计量的 Z 值为 4.553,远高于临界值 0.97,进一步说明产业结构升级的中介效应显著存在。

表 4 全国范围内产业结构升级中介效应检验

变量	第一步	第二步	第三步
	lnSO ₂	lnindus	lnSO ₂
Intech	-0.355 *** (-6.968)	0.174 *** (6.304)	-0.250 *** (-4.935)
lnindus			-0.603 *** (-6.752)
lngdp	5.135 *** (6.102)	-2.938 *** (-6.440)	3.363 *** (4.011)
lngdp ²	-0.264 *** (-6.537)	0.133 *** (6.077)	-0.184 *** (-4.591)
lninvest	0.374 *** (4.122)	0.042 8 (0.869)	0.400 *** (4.652)
lnpop	0.026 2 (0.059 5)	0.257 (1.074)	0.181 (0.433)
student	-0.004 70 *** (-3.381)	1.84e-05 (0.024 4)	-0.004 69 *** (-3.565)
govern	0.000 434 (0.514)	-0.000 177 (-0.386)	0.000 327 (0.409)
green	-0.004 11 * (-1.731)	0.001 15 (0.893)	-0.003 42 (-1.519)
Constant	-11.31 (-1.623)	16.45 *** (4.353)	-1.392 (-0.206)
Observations	420	420	420
R-squared	0.525	0.394	0.576
Number of province	30	30	30

注:同表 3。

进一步对我国东部、中部、西部三个区域产业结构升级进行中介效应检验。结果统计如表 5 所示。

表5 东、中、西部地区产业结构升级中介效应检验

地区	变量	第一步	第二步	第三步
东部		$\ln\text{SO}_2$	$\ln\text{indus}$	$\ln\text{SO}_2$
	$\ln\text{tech}$	-0.394*** (-3.279)	0.185*** (4.318)	-0.164 (-1.423)
	$\ln\text{indus}$			-1.245*** (-5.721)
	控制变量	yes	yes	yes
	Observations	154	154	154
	R-squared	0.628	0.715	0.701
中部	$\ln\text{tech}$	-0.186*** (-2.742)	0.0214 (0.493)	-0.176*** (-2.701)
	$\ln\text{indus}$			-0.462*** (-3.029)
	控制变量	yes	yes	yes
	Observations	112	112	112
	R-squared	0.670	0.670	0.699
西部	$\ln\text{tech}$	-0.346*** (-4.900)	0.183*** (4.347)	-0.251*** (-3.486)
	$\ln\text{indus}$			-0.521*** (-3.775)
	控制变量	yes	yes	yes
	Observations	154	154	154
	R-squared	0.621	0.390	0.658

注:同表3。

第一步显示了各地区技术创新对环境污染不同程度的影响。第二步的检验结果发现,东、西部地区技术创新对产业结构升级的影响均在1%水平上显著,中部地区作用效果不显著。第三步的回归结果与模型3的回归结果一致,同第一步回归结果相比较,引入产业结构升级变量后,各地区技术创新的影响系数均有所降低,其中东部地区技术创新系数下降幅度大于西部地区,中部地区变化最小。继续观察第三步,东部地区产业结构升级解释系数显著,而技术创新解释系数并不显著,说明存在完全中介效应。第二步结果显示,中部地区技术创新对产业结构升级的作用关系不显著,且Sobel检验的Z值为0.426,小于临界值0.97,表明不具有中介效应,可能由实证误差导致结果不显著。西部地区技术创新每增加1个单位,环境污染总体减少0.346个单位,结合第三步中技术创新直接促进环境污染降低0.251个单位,得出技术创新通过促进产业结构升级使环境污染减少0.095个单位,中介效应占总效应的27.46%。从分地区检验结果看,技术创新能够通过促进产业结构升级从而减少环境污染,即产业结构升级在技术创新减少环境污染的过程中发挥了中介作用。

4. 稳健性检验

替换环境污染代理变量进行稳健性检验:将工业废水排放量作为被解释变量指标重新回归,各变量估计结果见表6。从全国层面看,替换被解释变量后的回归系数与表3中基准回归模型3回归

系数的作用方向相同,且均在小于5%的显著性水平上显著;从区域层面看,三大地区的检验结果显示解释变量系数的方向与基准回归模型3基本一致,证明本文基准回归、固定效应回归模型的设定及结果是稳健可靠的。

表6 稳健性检验结果

变量	全国	东部	中部	西部
	lnwater	lnwater	lnwater	lnwater
lnitech	-0.235** (-2.058)	-0.183 (-1.628)	-0.100 (-0.687)	-0.474* (-1.986)
lnindus	-0.265** (-2.212)	-0.201 (-1.090)	-0.692** (-2.753)	0.0448 (0.106)
lngdp	2.233* (1.893)	2.492 (1.217)	-4.809 (-0.762)	0.964 (0.361)
lngdp ²	-0.0918 (-1.569)	-0.107 (-1.211)	0.234 (0.720)	-0.0128 (-0.0900)
lninvest	0.00758 (0.0542)	-0.120 (-0.651)	0.287 (1.354)	0.306 (0.665)
lnpop	0.260 (0.519)	0.611 (1.570)	-1.189 (-0.430)	0.811 (0.379)
student	-8.88e-06 (-0.00358)	0.00213 (0.958)	-0.00547** (-2.832)	-0.00367 (-0.251)
govern	0.000485** (2.620)	0.000434 (1.785)	0.0264 (0.732)	-0.00510 (-0.529)
green	-0.00385** (-2.169)	-0.00226* (-2.106)	-0.00153 (-0.467)	-0.0448** (-2.326)
Constant	-1.057 (-0.114)	-4.525 (-0.340)	47.36 (1.004)	-2.133 (-0.0825)
Observations	420	154	112	154
R-squared	0.179	0.456	0.234	0.239
Number of province	30	11	8	11

注:同表3。

五、结论与启示

本文从技术创新、产业结构升级两个维度出发,将技术创新、产业结构升级的相互关系考虑在内,结合中国实际,采用中国2004—2017年各省市面板数据实证分析了技术创新、产业结构升级对我国环境污染的影响,结果表明产业结构升级在技术创新影响环境污染的过程中发挥了中介作用。主要研究结论:(1)固定效应模型证实了技术创新、产业结构升级能够显著降低环境污染,二者对环境污染产生负向的线性影响,同时,西部地区技术创新降低环境污染的作用明显大于中、东部地区,东部地区的产业结构升级比中西部地区更能有效降低环境污染。(2)中介效应检验结果证实了技术创新通过产业结构升级对环境污染产生间接作用,分地区检验结果表明产业结构升级的中介效应区域差异明显,其中东部地区具有完全中介效应,西部地区中介效应占比为27.46%,而中部地区中介效应不显著。

本文的研究结果对我国的环境污染治理具有重要的启示。第一,技术创新会改进生产技术和污染治理技术,从而降低环境污染。尤其对于生态环境脆弱的西部地区而言,更要通过创新生产工艺、改造升级生产设备等方式,加强工业生产过程中的节能减排。第二,产业结构升级对环境污染减排至关重要。加快工业转型与升级,实现对传统制造业的更替改造和高新技术产业发展。中西部地区逐步淘汰落后产能,加快高污染、高耗能产业的转型升级;东部地区则需进一步发展高新技术产业,努力推动产业链迈向中高端,通过产业结构升级降低环境污染。第三,技术创新、产业结构升级两者相互作用共同减少环境污染。东部地区在追求产业结构高级化的同时,应充分发挥技术创新在产业结构升级中的核心作用;中西部地区加快提升企业创新能力,注重引进生产资本技术密集型产业,以技术带动产业结构转型升级。各地区技术创新和产业结构升级协同发展,是污染防治取得重大成效、实现经济高效高质量发展的必然选择。

参考文献:

- [1] 韩超,胡浩然. 清洁生产标准规制如何动态影响全要素生产率:剔除其他政策干扰的准自然实验分析[J]. 中国工业经济,2015(5):70-82.
- [2] 林伯强,谭睿鹏. 中国经济集聚与绿色经济效率[J]. 经济研究,2019(2):119-132.
- [3] 辜胜阻,吴华君,吴沁沁,等. 创新驱动与核心技术突破是高质量发展的基石[J]. 中国软科学,2018(10):9-18.
- [4] GROSSMAN G M, KRUEGER A B. Economic growth and the environment[J]. The Quarterly Journal of Economics, 1995, 110(2):353-377.
- [5] CHIOU T Y, CHAN H K, LETTICE F, et al. The influence of greening the suppliers and green innovation on environmental performance and competitive advantage in Taiwan[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2011, 47(6):822-836.
- [6] 董直庆,蔡啸,王林辉. 技术进步方向、城市用地规模和环境质量[J]. 经济研究,2014(10):111-124.
- [7] 原毅军,谢荣辉. 产业集聚、技术创新与环境污染的内在联系[J]. 科学学研究,2015(9):1340-1347.
- [8] 范丹,孙晓婷. 环境规制、绿色技术创新与绿色经济增长[J]. 中国人口·资源与环境,2020(6):105-115.
- [9] 李斌,赵新华. 经济结构、技术进步与环境污染:基于中国工业行业数据的分析[J]. 财经研究,2011(4):112-122.
- [10] 王鹏,谢丽文. 污染治理投资、企业技术创新与污染治理效率[J]. 中国人口·资源与环境,2014(9):51-58.
- [11] 徐佳,崔静波. 低碳城市和企业绿色技术创新[J]. 中国工业经济,2020(12):178-196.
- [12] 黄天航,赵小渝,陈凯华. 技术创新、环境污染和规制政策:转型创新政策的视角[J]. 科学学与科学技术管理,2020(1):49-65.
- [13] 陈阳,逯进,于平. 技术创新减少环境污染了吗:来自中国285个城市的经验证据[J]. 西安交通大学学报(社会科学版),2019(1):73-84.
- [14] 李粉,孙祥栋,张亮亮. 产业集聚、技术创新与环境污染:基于中国工业行业面板数据的实证分析[J]. 技术经济,2017(3):1-7.
- [15] LINDMARK M. An EKC-pattern in historical perspective: carbon dioxide emissions, technology, fuel prices and growth in Sweden 1870-1997[J]. Ecological Economics, 2002, 42(1/2):333-347.
- [16] PASCHE M. Technical progress, structural change, and the environmental Kuznets curve[J]. Ecological Economics, 2002, 42(3):381-389.
- [17] 张红凤,周峰,杨慧,等. 环境保护与经济发展双赢的规制绩效实证分析[J]. 经济研究,2009(3):14-26,67.
- [18] 王菲,董锁成,毛琦梁. 中国工业结构演变及其环境效应时空分异[J]. 地理研究,2014(10):1793-1806.
- [19] 王青,赵景兰,包艳龙. 产业结构与环境污染关系的实证分析:基于1995—2009年的数据[J]. 南京社会科学,2012

- (3):14-19.
- [20]原毅军,谢荣辉. 产业结构调整、技术进步与污染减排[J]. 中国人口·资源与环境,2012(S2):144-147.
- [21]冯雪艳,师磊,凌鸿程. 财政分权、产业结构与环境污染[J]. 软科学,2018(11):25-28.
- [22]李鹏. 产业结构与环境污染之间倒“U”型曲线关系的检验:基于产业结构调整幅度和经济增长速度共同影响视角的分析[J]. 经济问题,2016(10):21-26,109.
- [23]NGAI L R,PISSARIDES C. Structural change in a multi-sector model of growth[J/OL]. SSRN Electronic Journal, 2005. DOI:10. 2139/ssrn. 827367.
- [24]徐康宁,冯伟. 基于本土市场规模的内生化产业升级:技术创新的第三条道路[J]. 中国工业经济,2010(11):58-67.
- [25]许树辉,谷人旭. 欠发达地区技术创新的产业升级效应研究:以韶关制造业为例[J]. 世界地理研究,2013(2):61-68.
- [26]时乐乐,赵军. 环境规制、技术创新与产业结构升级[J]. 科研管理,2018(1):119-125.
- [27]刘在洲,汪发元. 绿色科技创新、财政投入对产业结构升级的影响:基于长江经济带 2003—2019 年数据的实证分析[J/OL]. 2021-02-06]. 科技进步与对策,2021. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42. 1224. G3. 20210105. 0935. 002.html>.
- [28]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.
- [29]唐未兵,傅元海,王展祥. 技术创新、技术引进与经济增长方式转变[J]. 经济研究,2014(7):31-43.
- [30]吴敬琏. 中国增长模式抉择[M]. 上海:上海远东出版社,2013.
- [31]陈诗一,陈登科. 雾霾污染、政府治理与经济高质量发展[J]. 经济研究,2018(2):20-34.
- [32]上官绪明,葛斌华. 地方政府税收竞争、环境治理与雾霾污染[J]. 当代财经,2019(5):27-36.
- [33]包群,彭水军. 经济增长与环境污染:基于面板数据的联立方程估计[J]. 世界经济,2006(11):48-58.
- [34]温忠麟,张雷,侯杰泰,等. 中介效应检验程序及其应用[J]. 心理学报,2004(5):614-620.

The impact of technological innovation and industrial structure upgrading on environmental pollution

YAN Taihua, ZHU Mengcheng

(School of Economics and Business Administration, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Behind China's rapid economic growth is the widespread and severe environmental pollution problem. While ensuring my country's economic growth, reducing environmental pollutant emissions and achieving green and sustainable economic development have become one of the core goals of the current society, and strengthening technological innovation is the fundamental way to reduce environmental pollution. At the same time, promoting the adjustment and upgrading of industrial structure is the fundamental way to realize the development of green economy. This article puts technological innovation, industrial structure upgrading and environmental pollution into the same analytical framework, and attempts to study the impact of technological innovation and industrial structure upgrading on environmental pollution from a quantitative perspective. Based on the panel data of various provinces and cities in China (excluding Tibet, Hong Kong, Macao and Taiwan) from 2004 to 2017, the article constructs a fixed effect model that includes technological innovation, industrial structure upgrading, and environmental pollution, and proposes that industrial structure upgrading is an intermediary variable of technological innovation affecting environmental pollution. It analyzes and verifies the direct and indirect effects of technological innovation and industrial structure upgrading on

environmental pollution, and empirically explores the impact of technological innovation and industrial structure upgrading on environmental pollution. At the same time, comparative analysis is carried out at the national and regional levels. On the basis of verifying the validity of the previous hypothesis, comparing the empirical test results of different regions, we try to obtain more targeted research conclusions and policy enlightenment from the perspective of regional differences in China. The research results show that: from the perspective of direct effects, technological innovation and industrial structure upgrading can significantly reduce environmental pollution, and the intensity of the effect is inversely proportional to the level of technological innovation and industrial structure upgrading, and the results of the sub-regional tests are the same; the effect of technological innovation and industrial structure upgrading on reducing environmental pollution has shown obvious regional differences among the eastern, central and western regions. From the perspective of indirect effects, technological innovation can promote the upgrading of industrial structure to reduce environmental pollution, and the upgrading of industrial structure acts as an intermediary variable in the process of technological innovation to reduce environmental pollution. The sub-regional test results show that the eastern region has a complete mediation effect, the western region accounts for 27.46% of the mediation effect, and the central region has no significant mediation effect. The research results of the article have important implications for China's environmental pollution control: technological innovation and industrial structure upgrading are essential to reduce pollution emissions and improve environmental quality. The government needs to implement policies based on local conditions and give full play the direct and indirect effects of technological innovation and industrial structure upgrading to reduce environmental pollution. While pursuing advanced industrial structure, the eastern region should play the core role of technological innovation in the upgrading of industrial structure; the central and western regions should accelerate the improvement of enterprise innovation capabilities and introduce production capital and technology-intensive industries to promote the transformation of industrial structure upgrading.

Key words: technological innovation; industrial structure upgrading; environmental pollution; regional difference; intermediary effect

(责任编辑 傅旭东)