

环境规制对碳效率的多重路径及门槛模型研究

江三良, 鹿才保

(安徽大学 经济学院 合肥 230039)

摘要:从结构升级及效率提升两大维度刻画环境规制对碳排放效率的关系及作用机制,研究环境规制是如何提升城市碳排放效率的。基于2006—2019年中国279个城市层面数据,采用非参数百分位自抽法,逐步回归法、Sobel检验和交互调节模型验证影响路径,并利用门槛模型探讨不同路径下环境规制的调节作用。结果表明:①环境规制促进城市碳排放效率提升,但存在区域异质性;②环境规制通过促进产业结构高度化、绿色技术创新和能源效率升级提高碳排放效率,产业结构合理化及产业集聚“遮掩”了环境规制的激励作用;③环境规制对提升碳排放效率存在多种门槛效应和调节机制。发挥环境规制对碳排放效率结构和效率的双重激励时,需注意不同路径的维度问题,以提高准度,把握力度。

关键词:环境规制;碳排放效率;区域异质性;作用机制;门槛模型;

中图分类号: F427; F224; X24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002—980X(2023)1—0117—13

一、引言

工业化时代以来,各类化石能源大量开采燃烧形成的工业发展动力带来世界经济高速发展的同时,也产生了严重的气候问题,尤其是以二氧化碳为主的温室气体排放已经成为威胁全球安全的非传统性挑战之一,成为各国政府治理的首要目标。据世界银行(WB)数据显示,1960—2018年,全球二氧化碳排放已从94.6亿吨增长为340.4亿吨,增长了约260%。尽管2020年受新冠疫情的原因,国际能源署发布《全球能源回顾2021》显示,全球能源消费和碳排放均有明显下滑。但是在后疫情时代下,随着各地复工复产,能源消费弹性上升,围绕能源效率提升,产业结构升级、技术创新驱动仍然是实现碳排放效率的必由之路。

据联合国政府间气候变化专门委员会(IPPC)推测,若全球气温上升不超过1.5摄氏度,那么全球必须在2050年实现碳中和。而中国作为能源消费和“碳排放”最高的最大发展中国家,始终积极担负和履行应尽的义务和责任。2015年,巴黎气候大会上,中国政府郑重承诺碳排放量在2030年前达到峰值,实现“碳达峰”;在第七十五届联合国大会上又提出努力在2060年之前实现碳中和的“绝对减排”目标。表明了中国政府在碳排放治理的决心和毅力。政治承诺体现在国家治理实践中,据国家统计局2020年统计年鉴公布数据,2019年,中国二氧化碳排放强度同比2015年和2005年分别下降了约18.2%和48.1%,远高于2009年中国政府在哥本哈根世界气候大会提出的2020年实现碳排放强度下降40%~45%的政治承诺(王灿和张雅欣,2020)。尽管中国碳排放治理已初见成效,但是面对大规模碳排放问题,仍然任重道远。据《2020世界能源统计》,中国目前能源消费和“碳排放”仍然处于“双上升”阶段,其产业结构依旧处于产业转型升级的关键时期,碳排放治理任重道远。

生态环境绿色发展作为新发展理念的关键一环,是实现中国经济高质量发展的重要底色。

随着美丽中国的不断建设,中国始终履行着“绿水青山就是金山银山”的治理理念。2022年,二十大再次强调环境治理要立足我国能源禀赋优势,积极稳妥推进“碳达峰、碳中和”。完善能源总量和强度控制,逐步控制重点化石能源消费,逐步转向碳排放总量和强度“双控制”制度。围绕碳排放治理,我国已逐步形成了以碳排放权交易制度为主要手段,完善碳排放统计核算制度,提升区域碳汇存量的治理机制。借助有为政府和有效市场协同治理碳排放问题已成为中国环境治理的主要特色。

目前而言,学术界关于环境规制对碳排放效率的作用效果众说纷纭,基于环境规制衡量标准、样本时间、研究对象及模型选择的差异,并未形成统一观点。其观点主要分为“抑制论”“促进论”和“非线性关系”三

收稿日期:2022-01-20

基金项目:国家社会科学基金“‘双循环’新格局下制造业高质量发展的驱动机制、效果测度及提升策略研究”(21CJY050)

作者简介:江三良,博士,安徽大学经济学院教授,博士研究生导师,研究方向:产业经济学;鹿才保,安徽大学经济学院硕士研究生,研究方向:产业经济学。

种。其中,抑制论认为严格的环境规制会加重企业预期成本,当存在政策刚性、不合理的碳税设置并不会引导企业减少化石能源消费,相反还会引起企业产生联盟对抗,加速当期能源消费从而造成更为严重的碳排放即环境规制具有“绿色悖论”效应(Sinn,2008)。对于后果严重的“抑制论”观点,部分学者认为由于化石能源易存储的特点,以及企业对于能源的需求受制于企业内部规模和会计成本,从而并不会盲目扩大能源消费水平。环境规制“绿色悖论”效应在现实实践中较难出现(徐盈之等,2015)。与之对应,以“波特效应”为基础“促进论”认为环境规制会“倒逼”企业通过绿色技术创新将外部成本转化为内部激励(Porter,1995),从而促进地方能源效率提升,提高碳排放效率。史丹通过检验排污权交易制度对于城市能源利用效率的影响证明了环境规制可以有效促进地方能源效率升级(史丹和李少林,2020)。相对于上述两种截然不同的观点,部分学者认为二者间可能存在非线性的过渡阶段(李菁等,2021)。许梦博和潘远超认为环境规制实施效果其本质是政府与企业的长期博弈,严格的行政命令手段会改变企业的投机心理和预期,当罚款费用大于治理成本时,企业会放远长期收益,转向绿色生产技术的创新使用,从而跨过环境规制与绿色全要素生产率的“U型”拐点实现正增长(许梦博和潘远超,2020)。也有学者从产业集聚转移角度分析,认为地方间环境规制实施强度的不同、市场分割及政府有限理性会导致其非完全执行,从而产生“污染天堂”效应(张彩云和苏丹妮,2020)。高强度环境规制可能会诱使企业寻求政策洼地,这就容易使得受经济发展GDP指挥棒引导的其他地区沦为“污染避难所”(Grossman,1991)。对于整体而言,碳排放并未降低而是跨区域的转移。基于上述分析,各学者关于环境规制与碳排放效率的关系讨论莫衷一是。因此,有必要通过理论实证分析进一步厘清二者间的关系。

随着地区产业结构的转型升级、产业集聚规模的不断涌现,绿色技术创新形成及能源效率提升。环境规制对于碳排放效率的影响早已不再局限于传统的企业层面成本收益的考量,而是拓展到地区间产业结构和效率升级层面的研究。目前,针对环境规制对于城市碳排放效率提升的“黑箱问题”,部分学者尝试从结构层面挖掘环境规制促进碳排放效率提升的内生动力源泉,认为“资源诅咒”是阻碍地区产业转型升级的重要障碍,环境规制通过促进产业结构优化能够实现碳排放效率升级(于向宇等,2019)。也有学者从效率层面出发,延展了“波特效应”内涵机制,认为环境规制发挥“波特效应”前提在于可以满足“弱波特效应”条件(屈凯,2021),即形成有效的绿色技术创新,论证了不同类型环境规制对绿色全要素生产效率提升具有偏向性技术进步效应(王林辉等,2020),从而提出差异化的环境规制实施手段是实现经济与生态相容发展的重要举措。

已有文献对于环境规制与碳排放效率的影响研究十分丰富,但仍存在以下几点不足:①对于二者的关系多数文献采用总量分析,并未考虑到中国经济发展水平差异下,环境规制对于碳排放效率的异质性影响;②尽管有少数文献尝试从结构或效率层面说明环境规制的作用机理,但是缺乏统一的框架进行分析,分析结果顾此失彼不够全面;③并未深入探究不同机制路径下,环境规制对与碳排放效率的作用程度是否存在门槛效应,忽视了环境规制与不同路径作用下的相互调节机制。

基于此,本文的创新点和边际贡献在于:①通过总样本和异质性分析验证环境规制对于碳排放效率的直接影响及区域差异,丰富了二者间关系的理论研究和实证支撑;②梳理环境规制对于碳排放效率的机制路径,并从结构层面(产业结构升级、产业集聚调整)及效率层面(绿色技术创新和能源效率提升)两个维度七个方向出发,构建较为全面的环境规制与碳排放效率的作用机制框架,拓宽了环境规制对碳排放效率的研究视角;③通过构建门槛模型,较为细致和系统地刻画不同调节机制作用下环境规制对于碳排放效率的影响程度。有助于完善地方政府环境治理逻辑,从而合理实施环境规制手段,实现碳排放效率增质提效。

二、理论机制和假设提出

影响碳排放效率的因素纷繁复杂,从碳排放来源视角看,其效率提升受制于地区经济发展水平、能源消费结构及强度、产业结构及布局、绿色技术创新能力及城市规模、城镇化水平等诸多方面构成多重影响。这些因素既包括来自结构方面也包括技术效率方面。在前人的基础上,本文从结构调整和增质提效两个层面展开分析,其中介机制图如图1所示^①。

① 环境规制影响碳排放效率的机制路径错综复杂,本文主要从产业层和技术效率层两个维度出发,探讨环境规制对碳排放效率机制影响,对于其他路径及链式传递不做主要分析。

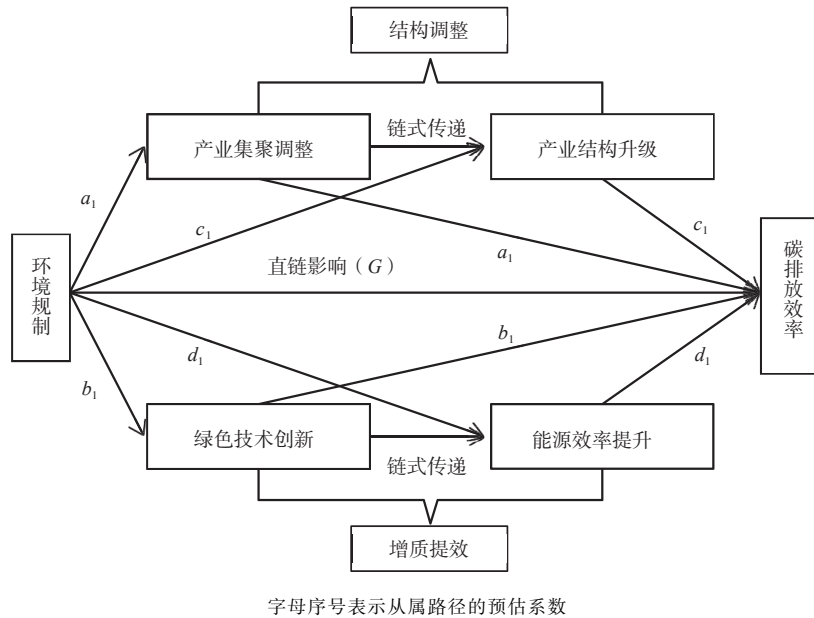


图1 环境规制对城市碳排放效率多重中介传导

（一）结构层面环境规制与碳排放效率路径分析

1. 产业结构升级

产业结构升级不仅包括第二产业向第三产业攀升的高度化递进过程,也包括产业内部分工布局的合理化模式。具体来看,环境规制促进产业结构高度化攀升体现在:①环境规制具有“进入壁垒”效应,对于高耗能重污染产业,通过设置严格的环境税,会增加重污染产业进入的外部成本和政策门槛,不利于高碳排企业进入本地市场,有助于产业结构高度化(黄纪强和祁毓,2022);②环境规制提高了重污染产业“生存成本”,政府严格的环境管控及大众舆论对生态环境讨论,增加了企业的生存压力。面对生存困境,企业要么通过产业转移退出本地市场规避环境管控,要么通过引进清洁的生产方式或是淘汰落后产能以适应当前的行业标准;③环境规制有助于服务业产业集聚,相对于工业产业而言,服务业行业大部分属于清洁型产业,受到环境成本压力较小。随着环境规制影响范围的扩大,全社会环保理念的不断深入,政府在产业引入时会更倾向于绿色产业的外商投资(张丹和李玉双,2021)。同时,居民消费观念和方式的改变也会提高对于服务业的需求水平,提高区域碳排放效率水平。

从产业结构合理化路径来看,环境规制有助于促进产业合理化布局。首先,环境规制通过降低重污染产业产值比重,有助于推动产业转型升级。同时,环境规制作为政府政策传递的信号,具有产业发展的“指引作用”,其强度提升有利于生产资源流向效率更高的部门(肖涵月,2022)。但是,在优化资源配置过程中,地方政府的有限理性及部门间存在的市场分割都会导致环境规制的非完全执行,从而造成政策偏差,不能有效提高区域碳排放效率水平。从产业结构合理化与碳排放效率关系来看,产业结构合理化与碳排放效率之间可能存在耦合关系(张翱翔和邓荣荣,2021)。对于二产主导的产业结构而言,地方政府和企业实施产业合理化布局时往往会更倾向于生产性服务业的大量集聚,以促使传统制造业与服务业融合,跨越产业转型升级的瓶颈。然而,传统制造业在渡过产业转型的“阵痛期”的同时也存在产业结构不合理的趋势,大量中低端生产性服务业集聚也会造成第三产业结构性失衡,并不利于碳排放效率提升(韩峰和阳立高,2020)。

基于此,本文提出假设1:

环境规制通过促进产业结构高度化提升碳排放效率水平,但是,通过加强产业结构合理化布局并不能有效提高碳排放效率水平(H1)。

2. 产业集聚调整

环境规制作为政府宏观调控手段,引导地区不同产业集聚调整,从而实现产业结构高级化目标。目前,依据外部性将产业集聚分为产业专业化集聚和产业多样化集聚已经得到众多学者的认同,Frenken(2007)

在此基础上,根据技术关联程度将产业多样化集聚再次分为产业相关多样化集聚和产业无关多样化集聚^②。产业专业化集聚是指单一产业内部企业规模的不断扩大,表现为产业内部分工的横向深化。环境规制对于区域产业专业化集聚的影响:①对于重污染产业而言,环境规制一方面会提高企业生存成本,迫使企业调整选址策略(王定星和张晶,2019),向规制强度较低地区进行产业转移,从而导致重污染产业内部规模收缩;另一方面,面对高额外部成本,企业也会通过企业联盟的方式对抗,通过发挥产业专业化集聚带来的规模效应,细化产业分工领域,提高创新效率从而适应环境规制降产能的要求(李武艳和周依甸,2022);②对于清洁产业而言,环境规制有助于清洁型产业内部规模的专业化集聚,促使生产要素涌入清洁型企业,培育产业规模实现资源虹吸,提升产业专业化集聚水平。从产业专业化集聚对碳排放效率的影响路径来看,专业化集聚虽然具有规模经济,但是产业内部规模膨胀也存在着无序扩张的失衡问题,产生范围不经济。同时,受制于技术专用性,产业专业化集聚不仅容易使得地区产业结构固化(Feldman, 1998)还会降低地区产业抵抗高风险不确定性环境冲击的经济韧性。由于缺乏相关产业“补链强链”的协同作用,专业化集聚限制了不同领域知识、信息、资本流动,抑制了新技术创新形成,不利于提高企业竞争力和生产效率。

产业相关多样化集聚是指同一产业链上下游产业由于降低市场交易费用、运输成本、信息搜寻成本而在特定空间形成的地方化集聚模式。环境规制通过提高产业准入门槛并不利于产业相关多样化集聚,其原因在于:①对于重污染产业而言,其产业转型升级不仅依赖于内部技术效率变革,同时还需要相关配套生产性服务业集聚融合,提高资本利用效率。“一刀切”式环境规制实施阻碍了产业间的相互融合,重污染产业内部规模降低,但是其产值效率并未提升。②对于处于上下游产业而言,环境规制一方面迫使重污染产业关联度较高产业规模降低,降低产业相关多样化集聚水平;另一方面,地方高污染产业部门退出其产能缺口会由低污染产业部门“填补替代”(罗知和齐博成,2022)。环境规制实施有助于环境友好型产业培育,同时吸引相关产业集聚,优化资源配置,强化产业相关多样化集聚带来的技术溢出效应,促进产业融合从而提升城市碳排放效率。

产业无关多样化集聚是指由于部门之间存在较强的技术壁垒,而无法形成相关联的技术创新,相对而言无关的多样化集聚模式。目前,关于产业无关多样化集聚的相关研究并不多见,有学者认为产业无关多样化集聚增加了地方产业信息交流成本,尽管短期内产业无关多样化集聚凭借规模效应优势提升区域全要素效率水平,但长期来看,提高了产业链关联成本,降低了城市经济韧性(陈奕玮和吴维库,2021),不利于效率提升。也有学者从颠覆性技术创新形成认为,产业无关多样化集聚有助于促进完全不同领域技术人才跨领域跨学科跨行业的交流碰撞,打破固化的技术创新路线,拓宽了创新形成节点,容易形成颠覆性的新技术和新业态(Carolina, 2014)。环境规制一方面通过设置进入壁垒,提升了产业关联成本,限制了产业无关多样化的集聚;另一方面地方政府为权衡经济发展和生态发展,往往倾向于关联度较高的高附加值的绿色产业,尽管产业无关多样化集聚可能会带来颠覆式技术创新,但是也面临着极高的风险和市场不确定性。因此,环境规制实施有助于提升城市间的产业融合度,从而促进城市碳排放效率提升。

基于此,本文提出假设2:

环境规制具有产业集聚调整的中介效应机制,但依据集聚模式不同呈现而呈现差异化路径传导(H2)。

(二)效率层面环境规制对碳排放效率的路径分析

1. 绿色技术创新

碳排放效率的提升离不开技术创新的内生动力驱动。“波特假说”认为环境规制可以通过成本压力迫使企业通过绿色技术创新,采用新流程、新工艺、新材料实现生产方式变革从而提高生产效率,实现绿色发展。目前,学术界对于环境规制可以促进绿色技术创新以达成普遍共识,认为环境规制具有绿色技术创新补偿激励的作用(李青原和肖泽华,2020),但对于其绿色技术创新是否有助于碳排放效率提升仍莫衷一是。围绕的关键问题在于环境规制是否满足“弱波特效应”前提。绿色技术专利的形成到市场化应用,最后走向规模化产业化发展本身需要较长的时间积累和市场检验。与此同时,为获取政府绿色补贴及良好的社会形象,企业也存在策略性技术创新倾向(陶锋等,2021),即围绕产品外观包装设计进行专利研发投入,对于生产环节的

② 严格来说,绝对“无关”是不存在的,但为分析方便,可以依据关联高低相对区分为“无关”和“相关”。

核心技术升级投入较低,不利于提升绿色技术创新质量。然而,受制于技术瓶颈限制,技术创新往往遵循着量变到质变的基本规律,随着技术积累的不断突破,环境标准的引入,企业员工“干中学”效应的不断扩大增长,环境规制通过绿色技术创新最终有助于提高区域碳排放效率水平。

基于此,本文提出假设3:

环境规制通过绿色技术创新有助于提升城市碳排放效率(H3)。

2. 能源效率提升

节能减排作为经济可持续发展的重要目标,不仅意味着碳排放的降低,同时也要求能源生产方式的迭代升级,以提升能源效率水平。环境规制一方面通过成本压力,迫使企业将生产经营资金转向生态污染治理,减低区域碳排放水平;另一方面通过绿色技术创新的激励补偿有助于促进企业生产方式变革,提升区域能源利用效率。与此同时,作为绿色发展的两大系统,节能减排“双提升”提升的关键在于节能生产效率提升足以弥补经济发展过程中的效率损失(王兵和刘光天,2015)。能源利用效率的提升是企业减排目标实现的主要推动力。环境规制通过促进能源技术效率变革引致的能源利用效率的提升可以实现经济发展过程中的“自净”,从而实现区域碳排放效率的提升。

基于此,本文提出假设4:

环境规制通过促进能源效率升级有助于提升城市碳排放效率(H4)。

三、变量测度及模型设置

(一)变量测度与数据来源

1. 被解释变量和解释变量

对于被解释变量碳排放效率的研究,本文参考多数学者的做法(于克美等,2020),通过数据包络分析,采用规模报酬不变的 Undesirable-Slacks-Based Measure 模型测度,如式(1)所示。

$$\min \rho = \frac{1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{s_i^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{i=1}^{s_1} \frac{s_i^h}{y_{i0}^h} + \sum_{i=1}^{s_2} \frac{s_i^m}{y_{i0}^m} \right)} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} x_0 = \beta X + s^- \\ y_0^h = \beta Y^h - s^h \\ y_0^m = \beta Y^m + s^m \\ s_i^- \geq 0, \quad s_i^h \geq 0, \quad s_i^m \geq 0, \quad \beta \geq 0 \end{cases}$$

其中: ρ 为本文所研究的城市二氧化碳碳排放效率; n 为投入要素种类,本文取值3种; h 和 m 为期望产出和非期望产出符号; x_{i0} 、 y_{i0}^h 、 y_{i0}^m 分别为决策单位 i 的要素总投入、期望和非期望产出; s_i 为决策单位 i 的单要素投入包括(劳动力、能源和资本投入); s^- 、 s^h 、 s^m 为投入变量、期望产出和非期望产出的松弛变量,本文期望产出测度以地区生产总值为衡量,以地区二氧化碳排放量衡量非期望产出; X 为要素总投入; Y^m 和 Y^h 分别为总体非期望和期望产出; β 为决策单位权重。

对于解释变量环境规制指标测度,参考多数学者的研究,根据工业废水排放量、工业二氧化硫排放量及固体废弃物产生量,利用熵值法进行综合表示(汪海凤等,2022)。

2. 中介变量

产业结构高级化包括产业结构高度化和产业布局结构合理化两个维度。其中,产业结构高度化采用二产比GDP表示,用符号 ist 表示。产业结构合理化采用泰尔指数进行衡量,计算公式见式(2):

$$isr_{it} = \frac{1}{\sum_{i=1}^3 \frac{Y_i}{Y} \times \ln \left(\frac{Y_i/L_i}{Y/L} - 1 \right)} \quad (2)$$

其中: Y_i 和 Y 以此表示第 i 产业产值和地区总产值; L_i 和 L 依次表示第 i 产业就业人口数和年末就业人口数;

isr_{it} 为产业结构合理化指数,该指数越大表明该地区产业结构越不合理,该指数越小表明,产业结构越合理。

对于产业集聚调整指标的测度,本文从产业专业化集聚、产业相关多样化集聚及产业无关多样化集聚三个层面进行衡量。对于产业专业化指数的测算,本文采用 Krugman 专业化指数进行衡量,利用公式: $R_{zi} = \sum_{i=1}^n |P_i - \bar{P}_i|$ 计算得出其中, P_i 为该地区第 i 产业的就业比重, $\bar{P}_i$ 为其他地区 i 产业就业比重的均值, R_{zi} 为地区 i 的产业专业化集聚指数。对于产业相关多样化集聚指数和无关多样化集聚指数测算,参考其他学者研究(周国富等, 2019), 以各大部门内部技术关联性较强的细分产业集聚水平衡量^③。首先将 19 类产业就业比重归入五大部门: 有 $P_m = \sum_{i \in m} P_i$ (P_m 为各部门的就业比重)。其次计算每大部门内部产业多样化指数, 计算公式如下: $V_m = \sum_{i \in m} \left(\frac{P_i}{P_m} \right) \ln \left(\frac{P_m}{P_i} \right)$, V_m 为熵值。最后, 依据熵值得出相关多样化集聚指数 (R_{di}): $R_{di} = \sum_{m=1}^M P_m V_m$; 利用公式: $R_{wi} = \sum_{m=1}^M P_m \ln \left(\frac{1}{P_m} \right)$ 计算产业无关多样化集聚指数 (R_{wi})。

对于绿色技术创新的衡量, 本文用各地区的绿色发明专利申请数衡量; 对于能源利用效率的测度, 本文从能源效率的投入产出角度出发, 利用式 (1) 非期望产出 SBM 模型计算。投入指标选择人均资本、各地区能源消耗及城市人口数; 期望产出指标选择地区生产总值; 非期望产出包括工业废水排放量、工业二氧化硫排放量及固体废弃物产生量。

3. 控制变量

城市碳排放效率提升受到多方面因素的作用。基于此, 本文分别以地区生产总值代表经济发展水平; 城市人口数比行政面积表示城市人口密集度; 地区固定资产投资控制城市资本规模; 地区城镇常住人口数比总人数代表城镇化率水平及地区电力消费占总能源消耗比重衡量区域能源消费结构共计 5 个变量从不同层面控制城市碳排放效率的影响因素。

4. 数据来源及说明

本文以 2006—2019 年全国范围内除港澳台及西藏地区、剔除行政规划调整城市后共计 279 个地级市行政单位为研究对象。所选取的数据来源《中国城市统计年鉴》《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国环境年鉴》《中国城建统计年鉴》《中国区域统计年鉴》及 IPO 绿色专利数据库。各变量的描述性统计见表 1。

(二) 模型设置

1. 中介效应模型

本文参考多数学者做法, 采用逐步回归模型探究环境规制对于碳排放效率的中介作用, 同时为检验系数有效性, 依次采用了 Bootstrap 检验、Sobel 检验加以论证。其模型设置如下所示。

$$\ln c_{it} = \alpha_{it} + \beta_1 \ln er_{it} + \beta_2 \ln est_{it} + \beta_3 \ln urb_{it} + \beta_4 \ln pd_{it} + \beta_5 \ln gdp_{it} + \beta_6 \ln cs_{it} + \mu_i + \gamma_t + \sigma_{it} \quad (1)$$

$$\ln M_{it} = \alpha_{it} + \beta_1 \ln er_{it} + \sum_{j=1}^5 \beta_j X_{it,j} + \mu_i + \gamma_t + \sigma_{it} \quad (2)$$

$$\ln c_{it} = \alpha_{it} + \beta_1 \ln er_{it} + \beta_2 \ln M_{it} + \sum_{j=1}^5 \beta_j X_{it,j} + \mu_i + \gamma_t + \sigma_{it} \quad (3)$$

③ 对于产业行业的划分, 本文将统计年鉴中 19 个产业划分为五大类 (M) 包括第一产业; 第二产业具体涵盖采矿业、制造业、电力热力燃气及水生产和供应业以及建筑业四小类; 生产性服务业具体包含交通运输及仓储邮政业、信息传输计算机服务和软件业、金融业、租赁和商务服务业以及科研综合技术服务业五小类; 生活性服务业囊括批发和零售业、住宿和餐饮业、房地产业、居民服务修理和其他服务业四小类; 公共服务业包括水利环境和公共设施管理业、教育、卫生和社会工作、文化体育和娱乐业以及公共管理社会保障和社会组织五小类。根据五大部门 (M) 内 19 类 (n) 行业从业人口数依次计算产业专业化集聚指数、产业相关多样化集聚以及无关多样化集聚指数。

其中： μ_i 为固定城市效应； γ_t 为固定时间效应； σ_{it} 为随机误差项； $X_{it,j}$ 为一组控制变量； M_{it} 为一组中介变量。

模型(1)主要用来检验环境规制对于碳排放效率的总影响即图1中直接影响G的系数,而模型(2)主要验证环境规制对中介变量的直接作用即图1中 a_1 、 b_1 、 c_1 、 d_1 的路径系数

模型(3)主要探究环境规制通过各路径对于碳排放效率间接影响即图1中 a_1a_2 、 b_1b_2 、 c_1c_2 、 d_1d_2 的联合系数值,并通过Bootstrap检验验证系数有效性。

2. 调节效应和门槛模型

中介效应模型主要探究环境规制的中介路径,但是未对其作用程度展开研究。基于此,本文首先通过构建调节效应模型以初判在不同路径作用场景下,环境规制是否具有不同程度的调节效应。其次,构建门槛模型以验证本文所探究的中介变量是否具有门槛效应,最后针对有门槛效应的变量,利用门槛模型分析其具体门限值区间及与环境规制的调节系数,为政策制定和实施提供实证研究基础支撑,具体模型设置见式(4)和式(5)。其中,式(4)中主要观察系数 β_1 显著水平,表示环境规制与中介变量的调节程度;式(5)中 τ 、 ε 为中介变量不同门限值, β_1 、 β_2 和 β_3 为不同门槛值水平下,环境规制对碳排放效率的弹性系数。

$$\ln c x_{it} = \alpha_{it} + \beta_1 \ln er_{it} \times \ln M_{it} + \beta_2 \ln er_{it} + \beta_3 \ln M_{it} + \sum_{j=1}^5 \beta_j X_{it,j} + \mu_i + \gamma_t + \sigma_{it} \quad (4)$$

$$\ln c x_{it} = \alpha_{it} + \beta_1 \ln er_{it} (\ln M_{it} \leq \tau) + \beta_2 \ln er_{it} (\tau < \ln M_{it} \leq \varepsilon) + \beta_3 \ln er_{it} (\varepsilon < \ln M_{it}) + \beta_2 \ln er_{it} + \beta_4 \ln M_{it} + \sum_{j=1}^5 \beta_j X_{it,j} + \mu_i + \gamma_t + \sigma_{it} \quad (5)$$

四、实证分析

(一)基准回归

1. 主回归分析

表2展示环境规制与碳排放效率的主回归结果,总体来说,环境规制实施可以显著促进地区碳排放效率水平,系数为正,表明以三废控制为主要手段的环境规制并不存在“绿色悖论”效应,或者说我国目前环境治理模式已经跨越了“U型”拐点。对比列(1)普通最小二乘法模型,列(2)双固定效应模型的系数明显降低,效应值为0.13,意味着当环境规制每上升1个百分点,对碳排放效率的促进作用将上升0.13个百分点。为缓解模型存在的内生性问题,本文依次以环境规制一阶滞后项及空气流通系数(HERING L, 2014)作为工具变量进行二阶段最小二乘法回归(2SLS),如列(3)、列(4)所示,其结果结论保持一致。其中,拉格朗日乘数检验(LM检验) P 值显著,表明不存在弱工具变量,Sargan工具变量过度识别检验 P 值不显著,说明工具变量有效,其检验结果符合统计条件。与此同时,由于碳排放效率提升可能会随着技术创新积累带来的“干中学”影响形成“滚雪球”效应,列(5)通过动态系统Generalized Method of Moment回归显示(系统GMM模型),地区碳排放效率的确存在正向动态滞后效应,在考虑动态因素后,环境规制对碳排放效率的影响进一步降低为0.078,但仍然显著为正。

从外部影响而言,碳排放效率提升同样受制于地方经济发展水平及资源禀赋丰裕的影响,而不同地区环境规制差异化实施亦会影响碳排放效率的提升。为进一步揭示二者间的异质影响,本文依据经济发展和资源禀赋将全国样本分为东、中、西、南、北五个区域进行异质性分析作为实证补充。从回归结果看:①对于经济发展较为发达的东部地区和南部地区而言,环境规制的实施对碳排放效率的作用并不明显,其原因一方面在于本文选取的环境规制指标聚焦于工业三废排放等强制性措施,而东部、南部地区大部分城市工业清洁化转型程度较高,产业高度化程度较高,环境规制对于碳排放效率的作用并不明显;另一方面在于单纯的强制性环境管控的激励作用可能存在政策上限,对于经济发展程度较高地区而言,地方政府在制定环境政策时需要借助多种政策协同才能进一步发挥制度创新的驱动作用。②对于以工业为主的中部、北部地区而言,环境规制实施促进了地方工业产业转型升级,倒逼绿色技术创新形成有效地提升了地方能源利用效率水平,促进碳排放效率的提升。其蕴含的政策意义表明,对于中、北部地区而言,面对产业转型升级的困境,伴随着“中部崛起”及“东北老工业基地振兴”战略的政策落地,需进一步加强环境规制的实施力度,尤其是强化对工业排放的环境治理措施,通过强制手段提高碳排放效率水平。③对于资源较为丰富的西部地区而言,环境规制

表 2 基准回归检验结果

变量	普通最小二乘法	双固定效应模型	2SLS(1)	2SLS(2)	系统 GMM 估计
<i>L.lncx</i>					0.704*** (0.00576)
<i>lner</i>	0.158*** (0.0359)	0.130*** (0.0378)	0.194** (0.0881)	0.197*** (0.0882)	0.078*** (0.00626)
<i>lngdp</i>	0.363*** (0.00884)	0.576*** (0.0262)	0.689*** (0.0279)	0.689*** (0.0279)	0.162*** (0.00475)
<i>lnpop</i>	-0.0452*** (0.00711)	-0.191** (0.0871)	-0.103 (0.0863)	-0.103 (0.0863)	-0.0360*** (0.00509)
<i>lncx</i>	-0.183*** (0.00797)	-0.362*** (0.0210)	-0.349*** (0.0158)	-0.349*** (0.0158)	-0.122*** (0.00608)
<i>lnurb</i>	-0.361*** (0.0196)	-0.185*** (0.0218)	-0.181*** (0.0374)	-0.181*** (0.0374)	-0.103*** (0.00870)
<i>lnest</i>	0.0988*** (0.0207)	-0.0444* (0.0228)	-0.194*** (0.0371)	-0.194*** (0.0371)	0.00481* (0.00613)
<i>_cons</i>	-3.987*** (0.203)	-4.842*** (0.645)			-1.038*** (0.0600)
时空效应		控制	控制	控制	控制
LM 检验 <i>P</i> 值			0.000	0.000	0.000
Sargan 检验 <i>P</i> 值				0.17	0.256
AR(1) <i>P</i> 值					0.000
AR(2) <i>P</i> 值					0.907
<i>N</i>	3906	3906	3627	3627	3627
<i>R</i> ²	0.409	0.299	0.216	0.216	0.306
变量	东部地区	中部地区	西部地区	南部地区	北部地区
<i>ler</i>	0.0367 (0.107)	0.370*** (0.0756)	-0.261*** (0.0656)	-0.133 (0.115)	0.245*** (0.0702)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制
时空效应	控制	控制	控制	控制	控制
<i>_cons</i>	-14.27*** (1.972)	-8.239*** (1.377)	-16.56*** (4.875)	-14.80*** (3.356)	-1.555 (1.052)
<i>N</i>	795	1120	266	322	1393
<i>R</i> ²	0.255	0.373	0.551	0.414	0.364

实施反而抑制了碳排放效率水平提升。其原因可能在于一方面随着“西部大开发”战略的递进深化,西部地区凭借煤矿资源禀赋优势承接了中、东部地区大量的工业基地,工业占比逐年提升,正处于产业集聚的快速增长阶段。而强制性环境规制的实施可能会诱发地方企业“抱团取暖”通过规模效应抵消环境规制外部成本,进一步扩大了“资源诅咒”效应影响;另一方面,强制性的环境规制实施也会增加地方企业的预期成本,加快煤炭资源采集存储利用,以期在政策“空窗期”通过资源积累快速实现产业转型过渡。这表明,对于西部地区而言,地方政府应审慎推动环境规制实施,建立合理的产业制度,合理布局产业规模,避免陷入“千城一面”“大而不强”的被动局面。

从控制变量回归系数来看,经济发展水平促进碳排放效率提升,表明我国并不存在或跨越了“环境库伦涅茨”曲线“U型”拐点;城市规模扩张会降低碳排放效率水平,表明现阶段,我国人口密度提升并未形成高质量的人力资本积累,存在范围不经济的外部影响;城市资本积累和城镇化水平同样未能提升碳排放效率水平,具体体现在我国仍然存在资本无序扩张及城市城镇化发展失调的问题,未能实现内生集约式发展。能源消费结构升级并未有效提升碳排放效率相反还会带来效率损失,但长期来看,能源清洁化有助于提升区域碳排放效率。

2. 稳健性检验

虽然本文采用了工具变量法及系统 GMM 估计一定程度上缓解了模型内生性问题,但模型仍然可能存在自选择、遗漏变量及多重共线性造成的有偏估计问题。基于此,本文依次采用了倾向评分匹配(PSM)估计、更换被解释变量及更换模型采用分位数回归再次进行稳健性分析,结果见表 3。借助 PSM 的非参数估计,以控制变量为协变量采用 0.05 半径匹配的方式,使模型更近似于随机试验,从而降低传统线性估计的条件约束。本文通过对连续变量环境规制采用平均数进行离散转化,再次估计,其结果显示再次验证了前文假说成立。通过对二氧化碳排放总量的回归,可以得出,环境规制主要通过降低碳排放总量从而实现碳排放效率的提升,并且作用效果相对于碳排放效率更为明显。除此之外,从 25%、50% 和 75% 的分位数回归结果看,环境规制对与碳排放效率的提升作用存在依次递减的趋势,其结果佐证了环境规制实施存在边际效用递减的趋势,政策激励存在上限,在环境治理过程中地方政府应注重多种政策的协同作用。综合而言,本文通过内生性处理及稳健性检验认为环境规制的确显著提升区域碳排放效率水平,其结果具有可靠性。

表 3 基准回归稳健性检验

变量	倾向评分匹配估计	替换被解释变量	25% 的分位数回归结果	50% 的分位数回归结果	75% 的分位数回归结果
<i>lner</i>	0.0212** (0.00969)	-0.325*** (0.0676)	0.344*** (0.0432)	0.274*** (0.0628)	0.114* (0.0636)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制

续表

变量	倾向评分匹配估计	替换被解释变量	25%的分位数回归结果	50%的分位数回归结果	75%的分位数回归结果
时空效应	控制	控制	控制	控制	控制
$_cons$	-5.548*** (0.602)	-5.353*** (1.158)	-3.701*** (0.231)	-3.632*** (0.358)	-3.742*** (0.243)
N	3896	3896	3896	3896	3896
R^2	0.300	0.605			

(二) 机制检验

1. 中介效应机制检验

前文基于现有基础和理论分析探究了环境规制与碳排放效率的理论机制,并刻画了机制传导图1。但是,并未对系数 $a_1 \sim d_1$ 、 $a_2 \sim d_2$ 及中介效应 $a_1 \times a_2 \sim d_1 \times d_2$ 的效应值进行分析测度。基于此,本文依次采用逐步回归检验、Bootstrap联合显著性检验及Sobel检验对于模型(2)和模型(3)展开机制验证。见表4,逐步回归结果表明对于产业结构高级化而言,环境规制通过提高工业产业门槛、倒逼地方工业转型转移显著降低了工业产值占比,优化地区产业结构,从而促进碳排放效率提高。通过Bootstrap联合显著检验显示,其间接效应值为0.013,置信区间未包括0,系数显著有效。从Sobel检验来看,其中介效应值占比为9.94%,验证了环境规制产业结构高度化机制途径的合理性。而相对而言,产业结构合理化路径则呈现“遮掩”效果。其中,环境规制实施有利于产业结构的合理化布局,但是目前来看,我国产业结构合理化并不能提高区域碳排放效率水平,其原因可能在于我国目前产业结构仍然以传统工业制造业为主导,虽然受到第四次工业革命带来的技术红利影响,部分产业处于产业智能化、数字化、清洁化转型升级的关键期,但尚未实现规模效应。在高耗能产业占主导产业模式下,严格的环境规制通过促进产业结构合理化带来的绿色效率提升可能难以弥补产业结构转型造成的经济发展效率损失,最终遮掩了环境规制对于碳排放效率的直接影响。从Bootstrap联合检验看,遮掩系数为0.006,绝对值占比为4.92%,相对于产业结构高度化并不高。表明,目前来看,我国环境规制实施主要通过产业结构高度化升级促进碳排放效率提升。

表4 中介效应逐步回归、非参数百分位bootstrap检验和Sobel检验结果

模型检验	机制检验	产业结构高度化	产业结构合理化	产业专业化集聚	产业相关多样化集聚	产业无关多样化集聚	绿色技术创新	能源效率提升
逐步回归	$\ln er \rightarrow M$ ($a_1 \sim d_1$)	-0.040* (0.027)	-0.364*** (0.096)	0.175*** (0.035)	-0.024* (0.013)	-0.023* (0.012)	705.069*** (77.081)	0.682*** (0.060)
	$M \rightarrow \ln x$ ($a_2 \sim d_2$)	-0.325*** (0.023)	0.018*** (0.007)	-0.106*** (0.018)	0.787* (0.045)	0.374*** (0.053)	0.0004*** (0.000)	0.236*** (0.010)
Bootstrap联合显著检验	间接效应 ($a_1 \times a_2 \sim d_1 \times d_2$)	0.013** (0.006, 0.002, 0.026)	-0.006** (0.004, -0.015, -0.002)	-0.019** (0.004, -0.026, -0.011)	-0.019** (0.009, -0.036, -0.001)	-0.008* (0.005, -0.019, -0.002)	0.033*** (0.008, 0.018, 0.048)	0.161*** (0.017, 0.128, 0.194)
	直接效应	0.117** (0.057, 0.004, 0.229)	0.136*** (0.047, 0.044, 0.228)	0.148* (0.045, 0.059, 0.237)	0.148*** (0.043, 0.063, 0.233)	0.138*** (0.035, 0.069, 0.207)	0.097* (0.054, 0.009, 0.202)	-0.032 (0.043, -0.116, 0.005)
	总效应	0.130*** (0.038, 0.056, 0.204)	0.130*** (0.038, 0.056, 0.204)	0.130*** (0.038, 0.056, 0.204)	0.130*** (0.038, 0.056, 0.204)	0.130*** (0.038, 0.056, 0.204)	0.130*** (0.038, 0.056, 0.204)	0.130*** (0.038, 0.056, 0.204)
Sobel检验	Sobel text	0.013* (0.009)	-0.006** (0.003)	-0.019*** (0.005)	-0.019* (0.011)	-0.008* (0.005)	0.033*** (0.007)	0.161*** (0.016)
	Mediated / Total	9.94%	4.92%	14.35%	14.37%	6.52%	25.51%	1.24

与此同时,对于产业集聚而言:①专业化集聚而言,环境规制促进了产业专业化集聚即环境规制通过外部成本压力深化产业内部分工,扩大了产业内部规模,同时,产业内部规模扩大形成的规模效应、技术溢出及市场交易成本降低也有助于企业通过抵消外部成本压力。但这种“抱团取暖”的产业专业化集聚相反会降低碳排放效率水平,具体体现在,我国产业链价值水平仍处于“微笑曲线”组装加工阶段,产品附加值低的同时环境污染成本也较高。城市产业内部规模扩大并未形成产业内部专业化集群,存在无序扩张的问题。因此,通过产业专业化集聚同样遮掩了环境规制的总效应值,遮掩系数为0.019,绝对值占比为14.35。②多样化集聚而言,无论是相关多样化还是无关多样化集聚,环境规制均并不利于产业多样化集聚,而产业多样化集聚却有助于完善产业链纵向延伸,提高地方产业抗风险能力和经济韧性,相关产业集聚多样化集聚有助于不同

领域技术溢出、人才交流碰撞转化形成突破式技术创新从而提高区域碳排放效率。而无关产业的多样化集聚也有利于地方分散风险压力,寻求突破式的产业发展路径,发挥多样化集聚带来的规模效应提高碳排放效率水平。从环境规制间接效应值来看,均呈现不同程度遮掩效果。表明,目前我国环境规制实施,特别是以排放量作为控制目标的政策手段并不利于产业多样化集聚,相反还会进一步促进城市产业内部无序扩张,最终削弱环境规制对碳排放效率的促进作用。

效率层面来看:①对于绿色技术创新而言,环境规制促进了绿色技术创新形成,而绿色技术创新有助于提高区域碳排放效率水平,其结果验证了中国城市层面,环境规制对于碳排放效率提升具有“波特效应”。其效应值为 0.033,联合显著有效,并且效应占比为 25.51%;②对于能源效率升级而言,逐步回归结果显示,环境规制促进了能源效率提升,能源效率提升也有助于碳排放效率提升,说明我国环境规制实施具有“节能减排”的双重属性优势,其效应值为 0.161,远高于环境规制对于碳排放效率的总效应影响,同时直接效应中环境规制对碳排放效率并不显著。这意味着环境规制对于碳排放效率的提升具有能源效率升级的完全中介效应,其占比高达 1.24。综上所述,相对于结构层面而言,环境规制主要通过能源效率提升和绿色技术创新实现区域碳排放效率的提质提效。未来,促进产业结构优化、能源效率提升及绿色技术创新是我国充分发挥环境规制激励作用的重要途径。

2. 调节效应检验

中介机制检验目的在于验证环境规制具有何种途径的路径影响,但是未考虑在不同路径调节作用下,环境规制对于碳排放效率的强弱关系。基于中介变量也可能存在调节变量影响环境规制对碳排放效率的因果关系。本文通过构建交互项模型进行探讨分析,其检验结果见表 5。

从不同路径的调节效果来看,产业结构高度化、产业专业化集聚、相关多样化集聚和无关多样化集聚及绿色技术创新与环境规制的交互作用较为显著,而其他变量并不具有统计学意义。具体来看,在工业产值占比较高地区,随着实施环境规制实施力度提升,其对碳排放效率的促进作用将得到加强,意味着在二产占比较高地区,应加强环境规制的实施力度。产业专业化集聚提升有助于环境规制促进作用的发挥,即在专业化程度较高地区实施环境规制可能有助于地方产业内部向专业化集群过渡,有助于发挥产业规模经济效应。而对于产业多样化集聚较高地区,则应审慎推进环境规制实施,以防止环境规制门槛效应阻碍产业多样化集聚带来的技术效应溢出和交易成本降低。绿色技术创新有助于环境规制激励效果的进一步释放,但是调节作用程度相对较低。综合而言,从调节路径来看,环境规制从结构层面的调节作用更为明显,针对不同地区产业结构和产业集聚模式,实施差异化的环境规制手段才能有效发挥环境规制的不同作用路径促进作用,最终提升区域碳排放效率水平。

表 5 调节效应检验

变量	产业结构高度化	产业结构合理化	产业专业化集聚	产业相关多样化集聚	产业无关多样化集聚	绿色技术创新	能源效率提升
$\ln \text{er} \times M$	0.083 ^{***} (0.119)	-0.001(0.027)	0.320 ^{***} (0.070)	-0.640 ^{***} (0.177)	-1.526 ^{***} (0.287)	0.001 ^{***} (0.000)	0.047(0.034)
$\ln \text{er}$	0.111 ^{***} (0.038)	0.136 ^{***} (0.038)	0.197 ^{***} (0.039)	0.164 ^{***} (0.037)	0.152 ^{***} (0.038)	0.098 ^{**} (0.038)	-0.018(0.037)
M	-0.329 ^{***} (0.0237)	0.018 ^{***} (0.007)	-0.108 ^{***} (0.018)	0.781 ^{***} (0.045)	0.386 ^{***} (0.053)	0.001 ^{***} (0.000)	0.235 ^{***} (0.010)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制
时空变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制
$_cons$	-7.322 ^{***} (0.597)	-5.715 ^{***} (0.602)	-5.673 ^{***} (0.596)	-6.732 ^{***} (0.579)	-5.634 ^{***} (0.597)	-4.772 ^{***} (0.608)	-3.586 ^{***} (0.562)
N	3906	3906	3906	3906	3906	3906	3906
R^2	0.336	0.300	0.310	0.356	0.314	0.308	0.398

3. 门槛模型分析

前文调节效应检验主要就不同调节路径下,环境规制对碳排放效率的影响符号做了初步的分析判断。但是就其调节程度未展开分析。基于此,本文通过构建门槛模型以探讨,在环境规制的调节效应是否会随着调节变量程度的不同而产生非线性的影响关系,见表 6。从门槛模型检验结果来看,环境规制与产业结构高度化、产业相关多样化集聚、能源效率提升具有双重门槛效应;与产业专业化集聚、无关多样化集聚及绿色技术创新具有单一门槛效应;而与产业结构合理化布局并不具有门槛效应。从 P 值显著水平来看,经过 300 次自抽法回归后, F 统计量显著有效,置信区间在 1%~10% 水平下依次递减,且不包括 0 值,表明统计结果具有真实性。其门槛检验结果与调节效应的判断基本保持一致,其差别在于环境规制与能源利用效率的调节系数并不显著,但是却具备双重门槛效应。因此,为检验其系数显著水平,同时揭示环境规制与不同变量的调节程度、探究门限值大小,本文对于门槛系数进行了有效性分析,见表 7。

表6 环境规制多种中介路径门槛回归结果

机制	门槛模型	<i>F</i>	<i>P</i>	BS次数	95% 置信区间		
					1%	5%	10%
产业结构高度化	单一门槛	78.34	0.000	300	35.844	26.252	21.600
	双重门槛	67.27	0.000	300	31.800	21.976	18.487
	三重门槛	46.07	0.31	300	79.057	67.216	60.427
产业结构合理化	单一门槛	13.60	0.347	300	32.567	28.856	21.778
产业专业化集聚	单一门槛	65.53	0.000	300	28.065	23.564	19.422
	双重门槛	3.98	0.76	300	41.906	19.582	15.079
产业相关多样化集聚	单一门槛	94.73	0.000	300	34.302	23.152	18.624
	双重门槛	56.01	0.000	300	28.187	20.490	16.983
	三重门槛	13.06	0.477	300	48.940	40.157	35.560
产业无关多样化集聚	单一门槛	44.73	0.000	300	25.600	18.577	15.178
	双重门槛	4.51	0.707	300	31.741	20.301	15.585
绿色技术创新	单一门槛	50.12	0.000	300	33.880	23.095	18.434
	双重门槛	-12.85	0.980	300	31.805	22.563	18.170
能源效率提升	单一门槛	240.06	0.000	300	23.578	18.724	14.814
	双重门槛	193.47	0.000	300	21.997	16.571	13.254
	三重门槛	48.89	0.490	300	98.138	86.843	75.705

从表7结果来看,环境规制与能源利用效率的门槛系数逐步降低,但并不显著,置信区间范围包括0,表明环境规制与能源利用效率的门槛效应系数并不具有统计学意义。除此之外,其他结果与调节效应回归初判保持一致。具体而言:

①当产业结构高度化(对数值)^④低于-1.151时,环境规制对于碳排放效率的促进作用为0.087,随着产业结构高度化跨越第一门槛,处于区间[-1.151,-0.876]范围时,其促进作用将进一步提升为0.105,当产业结构高度化跨越第二门槛高于-0.876时,环境规制的促进作用将再次提高为0.118。其结果验证了工业占比较高地区而言,实施严格的环境规制可以强化其激励作用,实现碳排放效率提升;②随着产业专业化集聚跨越门限值-1.05时,环境规制的激励作用由0.144轻微下降至0.141,变动程度不高。而对于产业相关多样化集聚而言,随着其集聚程度依次跨越第一门槛-0.151和第二门槛0.01时,其环境规制的调节作用依次降低。说明对于相关多样化集聚程度较高地区应适时降低强制性环境规制实施。同样,当产业无关多样化集聚跨越门槛值0.01时,环境规制的调节作用也呈现下降趋势;③对于绿色技术创新而言,当年均绿色专利数低于5时,环境规制对于碳排放效率的促进作用为0.123,而当绿色技术专利数高于5时,环境规制的“波特效应”进一步得到释放,效应值为0.21。这也说明了随着绿色技术创新成果的积累转化,将有助于环境规制“弱波特效应”的实现,提升区域碳排放效率水平。

表7 门槛回归系数检验

机制	门槛值区间	系数	置信区间
产业结构高度化	$\ln er \times I(\ln ist \leq -1.151)$	0.087**	(0.014, 0.160)
	$\ln er \times I(-1.151 \leq \ln ist \leq -0.876)$	0.105***	(0.032, 0.177)
	$\ln er \times I(-0.876 \leq \ln ist)$	0.118***	(0.046, 0.191)
产业专业化集聚	$\ln er \times I(\ln rzi \leq -1.05)$	0.144***	(0.071, 0.218)
	$\ln er \times I(-1.05 \leq \ln rzi)$	0.141***	(0.067, 0.214)
产业相关多样化集聚	$\ln er \times I(\ln rdi \leq -0.151)$	0.166***	(0.093, 0.239)
	$\ln er \times I(-0.151 \leq \ln rdi \leq 0.01)$	0.137***	(0.064, 0.210)
	$\ln er \times I(0.01 \leq \ln rdi)$	0.122***	(0.049, 0.195)
产业无关多样化集聚	$\ln er \times I(\ln rwi \leq 0.01)$	0.160***	(0.086, 0.234)
	$\ln er \times I(0.01 \leq \ln rwi)$	0.148***	(0.074, 0.222)
绿色技术创新	$\ln er \times I(gte \leq 5)$	0.123***	(0.048, 0.200)
	$\ln er \times I(5 \leq gte)$	0.21***	(0.108, 0.313)
能源效率提升	$\ln er \times I(\ln eff \leq 2.002)$	0.034	(-0.038, 0.103)
	$\ln er \times I(-2.002 \leq \ln eff \leq -1.723)$	0.017	(-0.053, 0.080)
	$\ln er \times I(-1.723 \leq \ln eff)$	-0.001	(-0.071, 0.070)

注:*表示*P*值在10%水平显著;**表示*P*值在5%水平显著;***表示*P*值在1%水平显著。

降至0.141,变动程度不高。而对于产业相关多样化集聚而言,随着其集聚程度依次跨越第一门槛-0.151和第二门槛0.01时,其环境规制的调节作用依次降低。说明对于相关多样化集聚程度较高地区应适时降低强制性环境规制实施。同样,当产业无关多样化集聚跨越门槛值0.01时,环境规制的调节作用也呈现下降趋势;③对于绿色技术创新而言,当年均绿色专利数低于5时,环境规制对于碳排放效率的促进作用为0.123,而当绿色技术专利数高于5时,环境规制的“波特效应”进一步得到释放,效应值为0.21。这也说明了随着绿色技术创新成果的积累转化,将有助于环境规制“弱波特效应”的实现,提升区域碳排放效率水平。

五、结论和政策建议

本文基于2006—2019年城市层面数据探究了环境规制对与碳排放效率多重路径下的作用效果。通过多重中介效应模型验证了环境规制与城市碳排放效率之间具有产业结构升级,产业集聚调整,绿色技术创新及能源效率提升的多维中介影响,同时,借助调节效应和门槛效应模型更深层次分析了不同路径和门槛值范围下,环境规制如何促进城市碳排放效率提升。研究结论如下:①总体而言,环境规制促进城市碳排放效率水平提升,但是具有区域异质性影响,对于中部和北部地区的促进作用相对明显,而对于西部地区则会产生“绿色悖论”影响,加深“资源诅咒”的负面作用;②环境规制通过促进产业结构高度化、绿色技术创新和能源

④ 为不引起歧义,本文后续数值解释均以各中介变量的对数形式加以比较论述。

效率提升正向促进碳排放效率,但是通过产业集聚调整遮掩了环境规制对于碳排放效率的促进作用;相对于结构调整,环境规制更多地从效率层面提升碳排放效率水平,能源效率升级是重要途径之一;③不同中介机制下,环境规制的调节促进程度存在门槛效应。基于产业结构和集聚模式阈值的差异,环境规制对碳排放效率的提升存在异质影响。

基于此本文提出的政策建议如下:

(1)注意环境规制“结构和效率”的维度问题,完善环境规制的多维激励渠道,提高能源利用效率,有助于发挥环境规制“节能减排”的双重属性优势。除此之外,对于不同地区需分类施策,避免“一刀切”的环境管控;对于西部地区,需审慎推进环境规制落实,谨防环境规制“绿色悖论”效应,避免西部地区陷入“资源诅咒”的困境。

(2)重视不同路径下环境规制的准度影响,加快区域产业结构转型和生产模式变革,提升产业多样化集聚程度,推动产业由专业化集聚向专业化集群转变。地方政府在培育新兴产业规模的同时,应建立健全环境规制的实施标准,针对不同产业集聚模式完善行业准入标准,提升环境政策的精准度,从而提高相关产业的多样化集聚程度,促进传统产业融合升级。与此同时,加强绿色技术创新研发投入,推动能源利用向内生集约式发展过渡,以降低环境规制产业集聚调整的“遮掩作用”。

(3)把握环境问题及其治理的力度水平,对于工业程度较高地区,应加强环境规制的实施力度,通过降低高耗能产值规模,释放环境规制促进碳排放效率提升潜能;但是对于产业多样化集聚较高地区应实施谨慎的环境政策,尤其对于相关多样化集聚程度较高地区,注重高附加值相关联的产业的培育,从而提高传统产业的价值链嵌入度,增强产业链韧性,实现产业转型和节能减排的双重目标。同时,加快区域绿色创新成果转化,充分发挥环境规制与绿色技术创新的正向调节作用,突破绿色技术创新瓶颈,实现结构和效率层的双向减排。

参考文献

- [1] 陈奕玮, 吴维库, 2021. 产业集聚、产业多样化与城市经济韧性关系研究[J]. 科技进步与对策, 38(18): 64-73, 1.
- [2] 韩峰, 阳立高, 2020. 生产性服务业集聚如何影响制造业结构升级? ——一个集聚经济与熊彼特内生增长理论的综合框架[J]. 管理世界, 36(2): 72-94, 219.
- [3] 黄纪强, 祁毓, 2022. 环境税能否倒逼产业结构优化与升级? ——基于环境“费改税”的准自然实验[J]. 产业经济研究, (2): 1-13.
- [4] 李菁, 李小平, 郝良峰, 2021. 技术创新约束下双重环境规制对碳排放强度的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 31(9): 34-44.
- [5] 李青原, 肖泽华, 2020. 异质性环境规制工具与企业绿色创新激励——来自上市企业绿色专利的证据[J]. 经济研究, 55(9): 192-208.
- [6] 李武艳, 周依甸, 2022. 产业集聚、空间溢出与区域创新效率——以长江经济带为例[J]. 技术经济, 41(8): 11-22.
- [7] 罗知, 齐博成, 2021. 环境规制的产业转移升级效应与银行协同发展效应——来自长江流域水污染治理的证据[J]. 经济研究, 56(2): 174-189.
- [8] 屈凯, 2021. 环境规制的企业绿色技术创新效应研究[J]. 湖南科技大学学报(社会科学版), 24(6): 90-99.
- [9] 史丹, 李少林, 2020. 排污权交易制度与能源利用效率——对地级及以上城市的测度与实证[J]. 中国工业经济, (9): 5-23.
- [10] 陶锋, 赵锦瑜, 周浩, 2021. 环境规制实现了绿色技术创新的“增量提质”吗——来自环保目标责任制的证据[J]. 中国工业经济, (2): 136-154.
- [11] 汪海风, 李修玉, 马志琴, 2022. 环境规制、劳动生产率与企业工资水平——基于 223 个地级及以上城市 A 股工业上市公司的实证分析[J]. 技术经济, 41(3): 115-127.
- [12] 王兵, 刘光天, 2015. 节能减排与中国绿色经济增长——基于全要素生产率的视角[J]. 中国工业经济, (5): 57-69.
- [13] 王灿, 张雅欣, 2020. 碳中和愿景的实现路径与政策体系[J]. 中国环境管理, 12(6): 58-64.
- [14] 王定星, 张晶, 2019. 环境规制对现存企业迁移行为的影响研究[J]. 技术经济, 38(12): 31-41.
- [15] 王林辉, 王辉, 董直庆, 2020. 经济增长和环境质量相容性政策条件——环境技术进步方向视角下的政策偏向效应检验[J]. 管理世界, 36(3): 39-60.
- [16] 肖涵月, 孙慧, 王慧, 等, 2022. 创新抑或资源再配置: 环境规制如何影响总生产率增长?[J]. 生态经济, 38(4): 128-136, 153.
- [17] 徐盈之, 杨英超, 郭进, 2015. 环境规制对碳减排的作用路径及效应——基于中国省级数据的实证分析[J]. 科学学与科学技术管理, 36(10): 135-146.
- [18] 许梦博, 潘远超, 2020. 环境规制对中国地区工业绿色生产率的影响研究——基于动态空间面板模型的分析[J]. 工

- 业技术经济, 39(12): 54-61.
- [19] 于克美, 武剑红, 李红昌, 2020. 我国铁路运输业碳排放效率与影响因素分析[J]. 技术经济, 39(11): 70-76, 86.
- [20] 于向宇, 李跃, 陈会英, 等, 2019. “资源诅咒”视角下环境规制、能源禀赋对区域碳排放的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 29(5): 52-60.
- [21] 张彩云, 苏丹妮, 2020. 环境规制、要素禀赋与企业选址——兼论“污染避难所效应”和“要素禀赋假说”[J]. 产业经济研究, (3): 43-56.
- [22] 张丹, 李玉双, 2021. 异质性环境规制、外商直接投资与经济波动——基于动态空间面板模型的实证研究[J]. 财经理论与实践, 42(3): 65-70.
- [23] 张翔祥, 邓荣荣, 2021. 中部六省碳排放效率与产业结构优化的耦合协调度及影响因素分析[J]. 生态经济, 37(3): 31-37.
- [24] 周国富, 白士杰, 王溪, 2019. 产业的多样化、专业化与环境污染的相关性研究[J]. 软科学, 33(1): 81-86.
- [25] CAROLINA C, KOEN F, BART L, 2014. Related variety, unrelated variety and technological breakthroughs: An analysis of US state-level patenting[J]. *Regional Studies*, 49(5): 1-15.
- [26] FELDMAN M P, AUDRETSCH D B. 1998. Innovation in cities: Science-based diversity, specialization and localized competition[J]. *European Economic Review*, 43(2): 409-429.
- [27] FRENKEN K, VAN O F, VERBURG T, 2007. Related variety and regional economic growth[J]. *Regional Studies*, 41(5): 685-697.
- [28] GROSSMAN G M, KRUEGER A B, 1991. Environmental impacts of the north american free trade agreement[Z]. Working Paper: 3914. NBER, Cambridge MA.
- [29] HERING L, PONCET S, 2014. Environmental policy and exports: Evidence from Chinese cities [J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 68(2): 296-318.
- [30] PORTER M E, VAN DER LINDE C, 1995. Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship[J]. *Journal of Economic Perspectives*, 9: 97-118.
- [31] SINN H W, 2008. Public policies against global warming: A supply side approach[J]. *International Tax Public Finance*, 15: 360-394.

Study on Multiple Paths and Threshold Model of Environmental Regulation on Carbon Efficiency

Jiang Sanliang, Lu Caibao

(Economics School, Anhui University, Hefei 230039, China)

Abstract: The relationship and mechanism of environmental regulations on carbon emission efficiency from the two dimensions of structural upgrading and efficiency improvement were described. How environmental regulations improve urban carbon emission efficiency was studied. Based on the data of 279 cities in China from 2006 to 2019, non-parametric percentile self-extraction method, stepwise regression method, Sobel test and interactive regulation model were used to verify the influence paths. Threshold model was used to explore the regulatory effects of environmental regulations under different paths. The results show as follows. Firstly, environmental regulations promote urban carbon emission efficiency, but there is regional heterogeneity. Secondly, environmental regulations improve carbon emission efficiency by promoting industrial structure upgrading, green technology innovation and energy efficiency upgrading, industrial structure rationalization and industrial agglomeration “mask” the incentive effect of environmental regulations. Thirdly, environmental regulations have various threshold effects and regulatory mechanisms for improving carbon emission efficiency. When giving play to the dual incentives of environmental regulation on carbon emission efficiency structure and efficiency, it is necessary to pay attention to the dimensions of different paths in order to improve the accuracy and grasp the intensity.

Keywords: environmental regulation; carbon emission efficiency; regional heterogeneity; mechanism of action; threshold model