

碳价格政策的减排机理

——对技术创新传导渠道的再检验

鄢哲明 杜克锐 杨志明*

摘要:碳价格政策被公认为是解决全球气候变化问题的最重要政策工具之一。尽管已有研究指出了碳价格可通过经济结构和能源结构的优化以实现碳减排,但是技术创新的渠道作用却并未获得一致认可。本文利用全球跨经济体面板数据,实证探讨碳价格政策对碳强度的影响机理。实证结果显示,碳价格政策存在显著的碳强度抑制效应,这种效应通过鼓励低碳技术创新、能源使用结构清洁化和经济结构转换为传导渠道,并且碳价格政策通过低碳技术创新所发挥的间接影响程度相对最高。为了实现碳减排愿景,我国不仅应该注重能源结构和经济结构的调整,更有必要大力鼓励低碳技术创新。

关键词:碳价格政策;低碳技术创新;碳强度;影响机理

一、引言

根据中国向《联合国气候变化框架公约》秘书处提交的《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》,到2030年,中国碳强度将比2005年下降60%~65%。在缓解气候变化压力的紧迫任务中,全球各经济体集思广益,创造出了诸多可行的应对方案。其中,碳价格政策被寄予厚望,它主要包含两大类:一类是碳税,即由政府确定碳价格,另一类是碳交易机制,即构建碳市场,通过碳排放权的供需关系决定碳价格。碳税政策率先在北欧国家兴起,而随着欧洲

*鄢哲明,陕西师范大学国际商学院,邮政编码:710119,电子邮箱:zhemingyan88@163.com;杜克锐(通讯作者),山东大学经济研究院,邮政编码:250100,电子邮箱:kerrydu@sdu.edu.cn;杨志明,北京科技大学东凌经济管理学院,邮政编码:100083,电子邮箱:zhiming0419@126.com。

本文系国家自然科学基金青年项目“异质技术和空间相关下的环境效率测度方法及应用研究”(71603148),陕西省软科学研究计划面上项目“科技创新驱动下陕西省产业结构低碳化转型的机理与政策研究”(2017KRM041)和山东省自然科学基金项目“考虑个体异质性下的山东省环境效率测度及影响因素分析”(ZR2016GB10)的阶段性成果。感谢匿名审稿人提出的宝贵意见。文责自负。

碳排放交易体系的建立与成熟,碳交易机制逐渐成为风向标。中国作为碳排放大国紧随其后,计划筹建全国性碳交易市场,目前正在通过区域性试点的方式探索适合我国国情的碳市场管理制度和市场运行机制(包括交易主体、交易平台安排、交易方法等)。

碳价格政策、技术创新政策、能源结构政策和经济结构政策已成为全球主要经济体应对气候变暖问题的主要工具,其中以碳税或碳交易机制为表现形式的碳价格政策被寄予厚望。对于正在筹建全国性碳排放交易市场的中国来说,探讨碳价格政策对碳排放的影响机理,有利于促进各种政策之间的配合协调,从而充分发挥碳价格政策对碳强度的潜在抑制作用。具体看,由于碳价格政策的直接影响在于为经济活动所产生的碳排放确定一个合理价格,因此它对碳强度的影响是间接的,需要借助碳强度的一些关键影响因素作为传导渠道。在微观层面上,碳强度大小取决于企业的生产技术是否高效,低碳技术创新则被视为解决气候变化问题的最根本途径。国际能源机构定期评估多个关键技术 in 缓解气候变化压力方面具备的潜力,并长期跟踪全球各经济体低碳技术的创新、价格和扩散情况。中国制定了能源技术创新计划,提出在2030年以前迈入全球能源技术强国之列。在中观产业层面上,碳强度大小取决于经济结构的低碳化程度。通过必要的产业政策缩减高能耗和高碳排放行业在经济整体中的比重,是中国、德国和日本等产业政策盛行国家所实施的重要政策工具。在宏观层面上,碳强度大小与化石能源消费结构密切相关。能源结构政策被视为解决气候变化问题的关键途径,中美两国以联合声明的方式提出能源结构优化目标,在全球可持续发展方面许下大国承诺。给定以上渠道存在,碳价格政策能否发挥碳减排效应,主要取决于它能否从微观上改变企业的生产行为和创新活动、居民的消费行为,以及能否从宏观上改变经济结构和能源使用结构。即在理论上,碳价格政策可以通过刺激低碳技术创新、能源使用结构清洁化以及产业结构低碳化等路径产生碳强度抑制效应。那么,在经济现实中,上述传导渠道是否显著存在?哪种路径是碳价格政策发挥碳强度抑制效应的关键传导渠道?面对棘手的气候环境问题和繁杂的政策体系,准确理解和把握碳强度关键影响因素之间的关系,有利于各类政策的配合协调,在缓解气候变化压力的擂台上打出一套漂亮的政策“组合拳”。

二、文献回顾

由于碳税政策的兴起早于碳交易机制,因此早期学者比较关注碳税政策的环境影响。王金南等(2009)利用可计算一般均衡模型,模拟了碳税征收对中国宏观经济、节约能源和抑制二氧化碳排放的影响,并设计了中国碳税征收的实施方案。娄峰(2014)利用动态可计算一般均衡模型,研究了不同碳税水平对碳强度和碳强度边际变化率的影响,其结果表明,随着碳税税率的增加,单位碳税二氧化碳排放强度边际变化率呈现逐渐减小的变化趋势。而伴随着碳交易机制成为国际主流以及我国呼之欲出的全国性碳市场,关于碳交易机制影响的文献迅速

增加。闫云凤(2015)基于Ramsey 最优增长模型和博弈论思想,构建世界诱导技术变化混合(World Induced Technical Change Hybrid,简称WITCH)模型,模拟评估全球碳交易市场对我国经济-能源-气候系统的影响,结果表明:全球碳交易市场可以显著地降低我国能源强度和碳强度。

考虑到能源-经济-环境系统的密切联系,学者倾向于改进研究方法,综合探讨碳价格政策的环境影响与经济影响。(1)关于碳价格政策与经济系统的联系。一方面,不少学者倾向于探讨碳价格的“双重红利”,即关注碳价格政策在提升环境绩效的同时,是否产生正面的经济影响。刘洁和李文(2011)利用中国省级面板数据分析,认为征收碳税在短期会降低社会总产出,但碳税税率提高会减小劳动和资本要素之间的收入分配差距,即具有要素间收入分配调节作用。时佳瑞等(2015)构建了碳交易机制仿真CGE模型,其研究发现:碳交易机制能有效地降低碳强度和能源强度,促进我国节能减排进程,但同时经济产出有一定的负面影响。另一方面,诸多研究文献关注碳价格政策在行业或区域层面的异质性影响。朱永彬等(2010)利用可计算一般均衡模型,研究了碳税对各产业部门的影响。结果表明,碳税的征收有效地降低了高碳含量的能源产品的供给和需求,同时也对非能源部门造成一定的影响,其中,玩具体育娱乐用品和针编织及其制品等制造业部门受到的负面影响较大,而通讯设备和电子设备元器件制造等部门所受的正面作用较为明显。李继峰等(2013)测算出不同碳价格导致的不同行业的碳成本及占增加值的比重,从而研究碳市场对中国行业竞争力的影响。其研究发现:如果我国碳价格水平与发达国家目前的碳价格相近,那么中国的额外碳成本比欧美发达国家高出10倍以上。潘文卿(2015)研究了碳税征收对地区和相关产业竞争力的影响,其结果发现,考虑到中国跨区域间存在的“碳泄漏”问题,与从生产者责任方征税相比,从消费者责任方征收碳税,可以较大幅度地减轻对西北、东北等欠发达地区及相关产业竞争力带来的负面影响。傅京燕和冯会芳(2015)创新地构建了反映我国碳减排政策强度的指标,其研究表明:碳价冲击有助于提高制造业整体的增长水平,减少生产过程中对能源要素的需求。(2)关于碳价格政策与能源系统的联系。张晓娣和刘学悦(2015)基于可计算一般均衡的情景模拟,比较了碳税政策与可再生能源发展政策在未来35年对经济增长及居民福利的动态影响。赵文会等(2016)利用可计算一般均衡模型的模拟结果表明,实施碳税不仅能够有效提高可再生能源占比、促进能源结构优化,而且有利于加速可再生能源替代,完善能源消费模式。(3)关于碳价格政策与科技系统的联系。Borghesi等(2015)利用意大利制造业的微观数据,发现欧洲碳交易机制对环境技术创新的影响效果并不明确。Aghion等(2016)利用汽车行业的企业专利数据,对环境技术创新进行了深入细分,研究了碳税政策对清洁技术创新、灰色技术创新和污染技术创新的影响,结果发现当汽车企业面临的碳税水平越高时,越有可能在清洁技术上尝试更多的创新活动。Calel和Dechezleprêtre(2016)利用设施层面的数据,研究

了欧洲碳交易体系对技术创新的影响。结果显示:一方面,碳交易机制能够显著刺激碳市场参与企业的低碳技术创新,同时对其他门类的技术创新并不存在挤出效应;另一方面,碳交易机制对非碳市场参与企业的创新刺激效应并不明显。

综上,从研究方法与视角看,现有文献集中地利用可计算一般均衡方法探讨碳价格政策的经济与环境影响程度,为我们判断碳价格政策在缓解气候变化中的作用大小提供了科学的方法和精准的数据支持;从研究结论看,研究文献多肯定了碳价格政策的作用,认为无论是碳税,还是碳交易机制,都能够显著地引起碳强度降低。尽管已有文献为我们提供了诸多富有洞见的思路和结论,但是相关研究在研究内容与结论观点上仍存在以下可拓展之处:(1)现有文献聚焦于对碳价格政策直接影响程度的测算,对碳价格政策的直接与间接影响机理探讨则相对稀缺,而后者在理论上是不可忽略的;(2)已有文献指出了碳价格政策对能源消费、经济产出和科技创新的影响,尽管这些影响关系在理论上存在彼此交叉或相互影响,但相关研究内容却彼此割裂。因此,为了更加全面地理解碳价格政策的环境绩效,本文将着重实证探讨碳价格政策的直接和间接影响机理,结合理论上碳价格对能源系统、经济系统和科技创新系统的可能影响作用,从实证角度分析这些影响关系是否以及在多大程度上成为碳价格政策发挥环境效应的中介渠道。对于碳价格政策的环境绩效相关文献,本文的贡献主要在于以下两点:第一,相比于既有研究重视碳价格政策的效果评价,本文更加重视其影响机理,而后者对于我们把握碳价格政策的运行规律、保障碳价格政策试点工作的顺利开展具有重要指导意义;第二,相比于以往研究关注广义的技术进步,本文分析了细分的低碳技术创新,有助于更加科学合理地评价技术创新因素的环境绩效、认识碳价格政策效应发挥过程中技术创新传导渠道的潜在重要性。

三、碳价格政策发挥碳减排效应的理论机理

置身于3E系统中,碳排放的变动与3E系统的众多关键变量均存在不可忽视的理论联系。这些与碳排放水平密切相关的变量,通常包括了能源需求与使用、经济产出、经济结构和技术进步等。碳价格政策外生于3E系统,必然会通过对上述碳排放水平的关键动因产生影响,才能进一步发挥其碳减排潜在效应。本文综合能源需求理论与偏向性技术进步理论,尝试解释碳价格政策发挥碳减排效应的理论机理。

从能源需求理论看(Medlock, 2009),碳价格政策旨在提升清洁能源和低碳基能源的相对需求,从而具备碳减排潜力。具体看,碳排放水平与人类生产和生活所使用的能源商品直接相关,高碳基能源(例如煤炭和石油)、低碳基能源(例如天然气)和清洁能源(例如风能和光伏发电)在等量消耗下所释放的二氧化碳水平依次递减。造成全球二氧化碳水平剧增的直接原因在于高碳基能源的大量使用,而主要动因则在于大规模低成本采掘之下高碳基能源的低价

格优势。相比于选择昂贵且可得性较弱的清洁能源或低碳基能源,高碳基能源是预算约束下厂商或居民为了实现高效生产或节约生活的最优选择。而相比于上述无干预的政策环境,碳价格政策可以为碳排放贴上合理的价格标签。经过价格传导机制,碳价格政策可以改变高化石能源消耗商品(如燃煤发电)和低化石能源消耗商品(如天然气或光伏发电)的相对价格,以价格为杠杆改变上述商品的相对市场需求。随着低化石能源商品需求的相对上升,低碳基能源和清洁能源的相对需求也会随之上升,这种能源结构的持续优化将会传导至环境系统,进而在碳强度抑制方面发挥潜力。据此,本文提出有待检验的理论假说1。

假说1:碳价格政策的存在,有助于优化能源结构,并以此为渠道促进碳强度下降。

从偏向性技术进步理论看,碳价格政策在供给侧具备经济结构低碳化潜力。在偏向性技术进步理论应用于环境问题的经典研究文献中(Acemoglu et al., 2012),该理论假定经济中存在两个相互竞争性地提供同一类产品的部门:清洁部门和污染部门;两个部门在相对产品价格、相对技术水平和相对市场规模等方面的权衡,将决定整个经济中污染部门的比重,并进一步决定了整个经济的污染排放强度。运用相似的逻辑,在合理的碳价格水平下,高化石能源消耗的行业或产业将会面临生产成本的显著提升。尽管这些产业可以通过价格转嫁的方式让消费者承担上升的成本,但是替代性产品的崛起和消费者需求结构的改变仍然会大大增加高化石能源消耗行业的成本压力,并使之面临两条退路:一是压缩高化石能源消耗的产能,二是转型为低化石能源消耗行业。因此,在合理的碳价格政策下,经济中的产业结构低碳化水平将上升,从而具备碳减排的可能性。据此,本文提出有待检验的理论假说2。

假说2:碳价格政策的存在,有助于促进产业结构调整,并以此为渠道促进碳强度下降。

从偏向性技术进步理论看,碳价格政策在需求侧具备低碳技术创新激励效应。在合理的碳价格水平下,低碳技术相关行业的竞争优势逐渐上升,能够吸引更多的稀缺性研发资源。偏向性技术进步理论假定所有的研发活动都是逐利的:在一个经济体中,能够引起技术进步的研发资源(如科学家)有限,如果一个行业的期望利润水平越高,那么它越能够吸引到技术投资者和科学家的关注。在合理的碳价格水平下,高化石能源消耗行业将同时面临生产成本上升和需求萎缩,故而面临期望利润的缩减;低化石能源消耗行业则反之,其相对期望利润将上升,那么可以引导技术研发者将资本和人员投入至低碳技术研究活动中。因此,碳价格政策作用下低碳技术创新水平的上升,将通过经济生产函数进一步推动低碳行业产出增长,并可能在技术层面提供碳减排的可行方案,从而发挥碳减排效应。据此,本文提出有待检验的理论假说3。

假说3:碳价格政策的存在,能够引致低碳技术创新,并以此为渠道促进碳强度下降。

综上,结合能源需求理论与偏向性技术进步理论,碳价格政策可以通过刺激低碳技术创新、能源使用结构清洁化以及产业结构低碳化等路径产生碳减排效应。本文将在后文构建计

量模型,实证检验碳价格政策的碳减排机理。

四、方法与数据

(一)实证模型设定

为了检验碳价格政策的碳减排机理,本文构建以下基本实证模型:

$$\ln c_{it} = \alpha_0 + \beta_1 Dummy_{it} + \beta_j Z_{j,it} + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

其中,被解释变量 c 表示碳强度,核心解释变量 $Dummy$ 代表碳排放价格政策, Z 代表控制变量。 α 为截距项, β 为对应变量的影响系数, ε 为模型的随机误差项。符号“ln”代表指标的对数化处理,下标 i 对应于各个经济体的截面单位,下标 t 则代表年份。

除了碳价格政策之外,经济结构、能源结构、技术创新等都可能成为决定碳强度变动的关键影响因素。据此,本文对控制变量集进行具体化设定,构建以下包含所有指标的实证模型:

$$\ln c_{it} = \alpha_0 + \beta_1 Dummy + \beta_2 \ln inno_{it} + \beta_3 energystruc_{it} + \beta_4 \ln econstruc_{it} + \beta_5 rdintens_{it} + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

式(2)中,除了与式(1)相同之处, $\ln inno$ 代表低碳技术创新, $\ln econstruc$ 代表经济结构变动, $energystruc$ 代表能源结构, $rdintens$ 代表研发支出占 GDP 比重。本文放入两个技术创新变量 ($\ln inno$ 和 $rdintens$) 的原因在于以下两点。首先,两者在知识生产过程中所处的位置存在差异,将两者放置于回归模型中可以方便从不同角度观察技术创新的作用。基于专利统计的低碳技术创新变量 ($\ln inno$) 是从知识生产的产出角度观察技术创新,而基于研发支出水平统计的研发强度变量 ($rdintens$) 是从知识生产的投入角度观察技术创新。两者之间并不必然存在关联,即技术研发存在不确定性,研发支出上升并不必然导致低碳专利数量增加,而低碳专利数量上升可以在研发支出总量不变、低碳研发水平和效率提升的情况下实现。其次,两者在技术范畴上存在差异,其影响系数描述了不同范围技术创新的作用。低碳技术创新变量 ($\ln inno$) 所描述的是具体的低碳技术,正如后文的指标介绍,它专指在建筑、能源、温室气体以及交通等关键领域内具有缓解气候变化问题潜力的特定技术;相比之下,研发强度变量 ($rdintens$) 所描述的是广义技术,因为研发支出指标是所有领域内的研发支出水平加总,所以它并不特指任何一类技术。从偏向性技术进步理论看,研发强度变量 ($rdintens$) 所代表的加总技术进步既可能是清洁偏向型,也可能是污染偏向型,它并不必然导致碳减排;而低碳技术创新 ($\ln inno$) 则更具针对性,它可能产生直接的碳强度抑制作用。关于计量分析方法,考虑到数据结构特征,本文拟使用面板数据回归方法中的固定效应模型 (FE) 和随机效应模型 (RE) 开展实证分析,具体的模型选择采用 Hausman 检验方法确定。

参考邵帅(2010)的实证分析策略,本文假定式(2)中的其余四个自变量都可能是碳价格政策发挥碳强度抑制作用的传导途径,而这些传导渠道可以通过各个变量与低碳技术创新变

量之间的关系被体现出来。具体步骤为,计算碳价格政策对各个传导途径的影响作用(记为 A_i),结合各个可能传导途径对碳强度的影响系数(记为 B_i),然后用 $A_i \times B_i$ 表征各个传导途径下碳价格政策的间接影响作用。

(二)变量与指标选择

(1)被解释变量的指标选择。关于碳强度($\ln c$),使用每单位GDP的二氧化碳排放量为表征指标。

(2)核心解释变量的指标选择。关于碳排放价格政策变量($Dummy$),参考 Borghesi 等(2015),本文使用虚拟变量,即当第 i 个经济体在第 t 年实施碳税政策,或者参与全国性或区域性碳排放交易市场(如EU ETS),则 $Dummy_{it}$ 取值为1,否则为0。

(3)低碳技术创新变量的指标选择。关于低碳技术创新变量($\ln inno$),本文使用低碳技术知识存量作为表征指标。在技术创新的环境绩效研究中,早期文献多从加总层面上关注于广义技术进步的影响。随着低碳技术重要性的日益凸显,研究文献逐渐开始关注不同门类技术创新的环境绩效差异(Costantini et al., 2017)。由于专利统计在数据可得性以及依据专利分类号进行分门别类创新测算等方面的优越性,基于专利申请数量的技术创新指标已成为宏观或者产业层面上相关研究的重要选择(OECD, 2009)。本文主要使用专利统计方法,统计各个经济体在低碳技术领域的专利数量,并参考 Verdolini 和 Galeotti(2011),利用永续盘存法测算低碳技术的知识存量:

$$K_{i,t} = PAT_{i,t} + (1 - \delta)K_{i,t-1} \quad (3)$$

其中, K 代表低碳技术的知识存量, PAT 代表经济体当年在低碳技术领域的优先权专利申请数量。一方面,每年的新专利申请数量可以持续提升知识存量,另一方面,由于旧知识会被新知识替代,因此本文假设知识存量会按照一个固定的折旧率(δ)持续缩减。为了满足永续盘存法的计算原理,本文假定知识存量的初期值为:

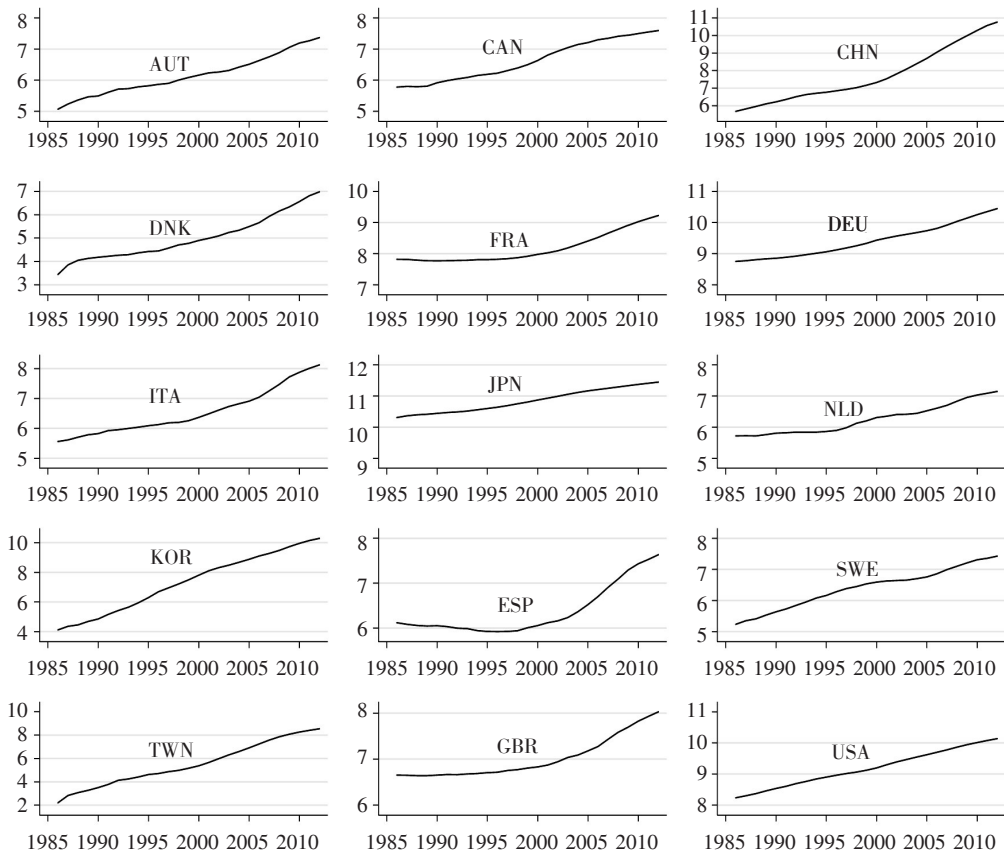
$$K_{i,t_0} = \frac{PAT_{i,t_0}}{(\bar{g}_s + \gamma)} \quad (4)$$

其中, t_0 代表初始时期, \bar{g}_s 为从 t_0 年到 $t_0 + 5$ 年的五年间专利数量的平均增长率,参考相关文献,本文将 γ 设定为0.1(Keller, 2002; Bottazzi & Peri, 2007; Verdolini & Galeotti, 2011)。本文对低碳技术专利的定义来源于CPC专利分类系统中Y02大类,该专利号类别提供了目前最为精确的低碳专利标签,正成为低碳创新测算研究的国际标准(Calel & Dechezleprêtre, 2016)。在本文使用的2015 Autumn版本的PATSTAT全球专利数据库中,如表1所示,低碳专利主要包含在建筑、能源和交通等领域具有缓解气候变化问题潜力的技术专利,以及直接对温室气体进行控制和处理的相关技术专利。图1报告了15个经济体的低碳技术知识存量。

表 1 低碳技术专利的专利号分类

专利分类号 (大组)	专利类别	专利分类号 (大组)	专利类别
Y02B	在建筑领域具有缓解气候变化问题潜力的技术	Y02C	温室气体处理的相关技术
Y02E	在能源领域具有缓解气候变化问题潜力的技术	Y02T	在交通领域具有缓解气候变化问题潜力的技术

注:关于Y02大类中更加细分的大组、小组和具体专利号等细节,请查阅CPC网站;CPC分类官方网站,<http://www.cooperativepatentclassification.org/>。



注:纵坐标为 $\ln inno$,横坐标为年份,三位字母ISO代码表征各经济体。

图 1 各经济体的低碳技术知识存量

(4)其他控制变量的指标选择。①关于经济结构变量($\ln econstruc$),使用劳均资本指标表征,即资本存量除以就业人数,该指标可以反映经济中资本对劳动的相对替代(即资本深化过程),表示经济结构的高级化变动(王兵等,2008)。②关于能源结构变量($energystruc$),使用各经济体能源消费中的非化石能源比重来表征。③关于研发支出强度变量($rdintens$),使用各经济体研究与发展支出金额与GDP之比来表征。

(三)数据来源

囿于数据的可得性,本文的研究样本限定于1986至2012年间全球15个主要的低碳技术发明来源经济体,包括:奥地利、丹麦、德国、法国、韩国、荷兰、加拿大、美国、日本、瑞典、西班牙、意大利、英国、中国和中国台湾省。低碳技术创新变量($\ln inno$)的基础数据来源于欧洲专利局的PATSTAT数据库,本文采用专利统计方法,利用MySQL语句查询和统计专利信息。各经济体的实际GDP数据、就业人数和可比价格下资本存量的数据来自佩恩表(Penn World Table, version 9.0,以下简称PWT90);一次能源使用量、分种类的能源消费量和碳排放总量的数据来自“2014BP全球能源统计”。表2报告了所有变量的描述性统计结果,表3则报告了主要解释变量的相关系数统计结果。

表2 描述性统计

变量	样本	平均值	标准误	最小值	最大值
$\ln c$	405	-7.9243	0.3786	-8.9434	-7.0068
<i>Dummy</i>	405	0.3086	0.4625	0.0000	1.0000
$\ln inno$	405	7.2351	1.8096	2.1928	11.4476
<i>energystruc</i>	405	0.1068	0.1286	0.0017	0.5646
$\ln econstruc$	405	12.3282	0.7600	8.9446	13.0985
<i>rdintens</i>	405	2.1337	0.7392	0.4227	3.9872

表3 主要解释变量的相关系数统计

	<i>Dummy</i>	$\ln inno$	<i>energystruc</i>	$\ln econstruc$	<i>rdintens</i>
<i>Dummy</i>	1				
$\ln inno$	-0.0463	1			
<i>energystruc</i>	0.1192	-0.2357	1		
$\ln econstruc$	0.3334	-0.1163	0.1588	1	
<i>rdintens</i>	0.2110	0.4076	0.2725	0.3048	1

五、实证结果分析

(一)碳强度的影响因素

根据实证模型构建思路,本文分三步研究碳价格政策的具体影响机理:第一步是探讨碳价格政策本身是否具有显著的碳强度抑制效果,以及各个潜在传导渠道本身的碳强度影响是否显著;第二步是研究碳价格政策对潜在传导渠道的影响是否显著;第三步是筛选显著的传导渠道,并计算其对碳价格政策影响效应的贡献大小。为了实现第一步分析,本文通过依次增加控制变量的方式,在表4中报告了式(1)的计量回归结果。从整体上看,各个模型的 R^2 在0.4以上,F统计量或Wald统计量显著,各解释变量系数的大小和显著性稳定,因此式(1)的回

归模型具有良好的解释力。

表4 碳强度影响因素的实证结果

变量	模型1	模型2	模型3	模型4	模型5
<i>Dummy</i>	-0.3576*** (0.0219)	-0.2888*** (0.0212)	-0.2168*** (0.0191)	-0.2169*** (0.0190)	-0.1465*** (0.0176)
<i>ln inno</i>		-0.0703*** (0.0076)	-0.0532*** (0.0068)	-0.0314** (0.0140)	-0.1293*** (0.0135)
<i>energystruc</i>			-3.4449*** (0.2855)	-3.5388*** (0.2895)	-2.7527*** (0.2335)
<i>ln econstruc</i>				-0.0808* (0.0452)	-0.1017*** (0.0380)
<i>rdintens</i>					0.2214*** (0.0219)
<i>cons</i>	-7.8139*** (0.0819)	-7.3269*** (0.1004)	-7.1044*** (0.0495)	-6.2566*** (0.4770)	-5.8450*** (0.4169)
R ²	0.4037	0.5130	0.6462	0.6491	0.7511
F/Wald 统计量	266.55***	408.36***	235.60***	178.50***	1074.31***
Hausman 检验统计量	0.07	2.58	8.10**	25.98***	7.36
方法	RE	RE	FE	FE	RE
样本数量	405	405	405	405	405

注：***、**和*分别代表显著性水平为1%、5%和10%，括号内报告的是标准误。

碳价格政策变量 (*Dummy*) 与碳强度变量之间存在显著的负向关系。结合碳价格政策的理论影响机理,我们认为碳价格政策的存在可以改变与碳排放相关商品的市场价格,从需求侧方面提升低碳含量商品(及无碳含量商品)的相对购买需求,并从供给侧方面提升低碳含量商品的相对期望利润并以此鼓励其研发活动和生产决策,从而使得低碳含量商品的市场占比提升,引起碳强度下降。

低碳技术创新 (*ln inno*) 能够显著地抑制碳强度。关于碳强度影响,在模型3和模型4中,低碳技术创新变量系数均显著为负数,表明低碳技术创新能够降低单位产值的碳排放量。本文解释如下:从低碳技术的内在组成看,清洁技术创新能够在碳排放不变的情况下驱动经济增长;灰色技术创新旨在降低单位产品的碳排放,相比于创新发生以前,它可以相对更低的碳排放增长实现相同的产出增长,此即碳强度下降。

清洁能源比例 (*energystruc*) 上升能够显著抑制碳强度。化石能源消费与碳排放直接联系,化石能源比重的上升抑制了无碳能源或清洁能源的普及,使得经济产出增加难以与碳排放“脱钩”,因此不利于碳排放的稳定或下降。反之,清洁能源比例上升,可以降低相同经济产出下的化石能源消耗量,从而引起碳强度下降。

经济结构变动(*ln econstruc*)对碳强度均具有显著抑制作用。可能的原因是,资本深化过程通常反映了机器对劳动的替代过程,也代表了劳动生产率的提升。通常情况下,更加高效的生产方式源自于对成本控制的精细化追求,也伴随着对化石能源的节约使用,因此能够引起碳强度的下降。

研发强度(*rdintens*)的提升对碳强度具有显著的正向影响。根据 Acemoglu 等(2012)的偏向性技术进步理论,一个经济体研发强度的上升并不必然意味着低碳技术水平的上升。原因在于,经济中的研发资源有限,它既可能配置于高能耗高碳排放的技术,也可能配置于低能耗低碳排放的技术,而不同技术的价格、市场规模和技术水平决定了具体的技术进步方向。当高能耗高碳排放的技术更加有利可图时,研究资金和研发人员会更加倾向于配置其中,由此将导致碳强度上升。在本文实证结果中,在研究期间内,给定高化石能源消耗技术在价格和市场规模方面的优势,若样本经济体的研发强度越高,那么其技术进步越可能偏向于高碳强度的污染技术,则不利于碳强度下降。因此,有必要通过政策工具培育低碳或者无碳技术的创新活动,扭转技术进步方向以促进碳减排。

(二)碳价格政策影响碳强度的传导渠道分析

在表4的结果中,低碳技术创新、能源结构、经济结构和研发强度都是碳强度的显著影响因素。倘若碳价格政策与这四个因素之间分别存在如前文理论所述的显著影响关系,那么这四个因素就可能成为碳价格政策发挥碳强度抑制效应的传导渠道。按照既定的实证分析思路,表5依次报告了碳价格政策与四个碳强度影响因素之间的计量回归结果。从总体上看,除了研发强度变量外,其余三个自变量与碳价格政策变量之间均呈现显著的正相关关系。

表5 碳价格政策的传导途径分析

变量	<i>ln inno</i>	<i>ln econstruc</i>	<i>energystruc</i>	<i>rdintens</i>
<i>Dummy</i>	0.9882*** (0.1309)	0.2411*** (0.0396)	0.0254*** (0.0030)	0.0484 (0.0469)
常数项	6.9301*** (0.0609)	12.2538*** (0.1769)	0.0989*** (0.0347)	2.1065*** (0.1733)
F/Wald 统计量	57.03***	37.14***	67.49***	1.06
R ²	0.1279	0.1181	0.1472	0.1145
Hausman	4.59**	2.67	0.02	1.80
方法	FE	RE	RE	RE
样本数量	405	405	405	405

注:***、**和*分别代表显著性水平为1%、5%和10%,括号内报告的是标准误;主要采用FE或RE方法,并依据Hausman检验结果选择具体方法,出于简洁性,表5中仅报告了经FE/RE选择后的模型结果。

碳价格政策变量与低碳技术创新变量显著正相关的内在逻辑是,碳价格政策的存在可以

为产生碳排放的商品贴上价格标签,改变有碳商品和无碳商品的相对价格及高碳商品和低碳商品的相对价格,以价格为杠杆调节这些商品的相对市场需求。具体看,无碳商品或者低碳商品的相对市场需求越高,越容易激励研发活动主体(如科学家)向这类领域流动,从而引起低碳技术创新水平上升。

碳价格政策变量与清洁能源比重变量正相关的内在逻辑是,碳价格政策的存在使得以化石能源为代表的污染能源变得相对昂贵,从而调节清洁能源与污染能源的相对市场需求,有利于清洁能源比重上升。

碳价格政策变量与经济结构变量正相关的内在逻辑是,碳价格政策将增加高碳行业或高碳企业的成本,从而改变其市场竞争力,导致行业间和行业内的结构发生转变。考虑到本文以资本劳动比为经济结构的表征指标,可以举例阐释上述结果:以发电企业为代表的碳价格政策影响对象会采用更加节约成本的生产方式,以应对碳价格政策下生产成本的提升,而这种生产方式主要体现为机器或资本对劳动力的替代。

碳价格政策变量与研发支出强度变量之间并无显著的影响关系。对比碳价格政策变量与低碳技术创新变量之间的显著正相关关系,可以概括出以下现象:碳价格政策的存在,能够以价格为杠杆激励碳市场参与主体或者受到碳税影响的主体开展低碳技术创新活动;但这种刺激作用更多的反映为经济总体中研发结构的优化,它并不必然引起研发支出水平的上升。考虑到碳价格政策的参与主体和直接影响对象有限,可以预见它对宏观加总研发水平的推动程度也有限。本文在宏观经济层面的结果与 Calel 和 Dechezleprêtre(2016)在微观企业层面的实证研究结果相吻合。Calel 和 Dechezleprêtre(2016)认为,碳交易机制的创新刺激效应仅限于碳市场参与者,但并不存在于数量庞大的非碳市场参与者。因此,尽管研发强度上升具有潜在的碳强度刺激效应,但是由于碳价格政策对加总研发强度的影响不显著,那么后者并未成为碳价格政策影响碳强度的显著传导渠道。

总结起来,碳价格政策可以提高低碳技术创新水平和清洁能源使用结构,并优化经济结构,这三个因素是碳价格政策发挥碳强度抑制作用的传导渠道;而碳价格政策并不能显著引起研发强度上升,即研发强度变动并不是碳价格政策削减碳强度的渠道。

(三)关于碳价格政策传导作用的讨论

将表4与表5的回归结果相结合,可以计算三种传导途径的绝对影响程度和相对影响程度。表6第4列报告了绝对影响程度,第5列报告了相对影响程度。结果显示,以低碳技术创新为传导渠道的相对影响程度最大,达到57.50%,其后是清洁能源比重和经济结构,相对影响分别为31.47%和11.03%,因此,相比于既有研究重视碳价格政策通过影响能源使用结构进而发生碳减排作用,本文认为应该格外重视碳价格政策通过刺激低碳技术创新从而呈现的碳强度抑制效果。关于上述结果,本文拟从以下两点展开讨论。

表 6 碳价格政策传导途径的影响程度分析

传导渠道	A_i	B_i	绝对影响(A_i*B_i)	相对影响(%)
$\ln inno$	0.9882	-0.1293	-0.1278	57.50
$energystruc$	0.0254	-2.7527	-0.0700	31.47
$\ln econstruc$	0.2411	-0.1017	-0.0245	11.03
总计	—	—	-0.2223	100.00

注： A_i 来自于表5， B_i 来自于表4。

首先,关于已有文献认为技术创新的政策传导作用不确定的讨论。相比于既有文献关于碳价格政策的技术创新影响不明确的判断(Borghesi et al., 2015),本文认为其可能忽略了技术创新的内部细节,尤其是在低碳发展的背景下,这种忽略很容易造成对低碳技术创新渠道的遗漏和对碳价格政策影响效果的低估。但是,本文的结果并不是为了证明已有文献存在错误,而重点在于指出他们对具体技术创新因素的忽略和低估。经过表4和表5的实证分析,我们发现碳价格政策难以显著地推动研发支出上升,难以推动广义技术进步,因此广义技术进步就无法成为碳价格政策发挥碳减排作用的重要传导渠道。从这个角度看,已有文献关于广义技术创新的政策传导作用不确定的结论具有一定的理论逻辑基础,但不能以此断定技术创新的角色与作用,而应该通过更加深入细节的分析(以本文为例)来获得更加精确的结论。

其次,对低碳技术创新渠道相对重要性的讨论。在本文的实证结果中,碳价格通过刺激低碳技术创新所发挥的间接影响相对最大,超过了它通过优化能源结构和优化产业结果两种渠道所引起的间接影响总和。本文认为各个渠道的相对重要性并非一成不变,它在一定程度上与研究样本密切相关,并且对于不同的经济体,具体各个渠道的相对重要性大小也可能存在差异。本文也曾尝试通过改变截面个数和时间长短的方式,观察各个传导途径的相对影响大小是否发生改变,结果显示能源结构渠道在一些研究样本下的相对重要性高于低碳技术创新渠道。无论如何,相比于既有研究,本文研究旨在重新审视技术创新渠道,并特别指出了低碳技术创新渠道的相对重要性不可忽视。

总之,尽管碳价格政策难以显著地鼓励广义的研发支出上升,但是它能够特征鲜明地促进低碳技术创新,而后者是碳价格政策发挥碳强度影响作用的关键渠道之一。在讨论碳价格政策的环境影响后果时,有必要加倍重视低碳技术创新活动的影响。

六、结论与政策建议

本文主要利用1986年至2012年间全球15个主要经济体的面板数据,研究碳价格政策对碳强度的影响关系,探讨这种影响关系的具体传导渠道,本文的主要结论和对应建议如下:

第一,碳价格政策能够显著导致碳强度下降。根据本文实证结果,碳价格政策的存在能

够显著地抑制碳强度。为了实现中国的气候环境目标,未来全国性碳市场的建立是必要之举。一方面,应该加强碳交易的法律支撑,构建完善的法律法规体系以提供制度基础;另一方面,针对当前碳交易试点地区表现出的流动性低和活跃度弱等问题,应当提高信息透明度,增强控排企业和投资者对碳市场的信心,加强宣传并提升非履约企业对碳交易机制的了解程度和参与热情,鼓励更多的中间机构开展碳交易相关产品创新。

第二,低碳技术创新是碳价格政策发挥碳强度抑制作用的关键传导渠道。在利润导向下的市场机制下,技术研发主体可以在低碳技术和非低碳技术之间进行选择,经济中研发强度的上升并不必然导致低碳技术创新。本文认为,低碳技术创新并不完全等同于加总技术创新,而后者甚至可能引起碳强度上升,对两者差异性的忽略,使得低碳技术创新因素在碳市场相关研究中被边缘化对待。为了充分发挥低碳技术创新的渠道作用,中国的技术创新策略,不应该仅仅致力于提高研发投入,而应当实施必要的政策干预,让研究活动的重心偏向于低碳技术。不仅如此,为了配合和巩固全国性碳交易市场的低碳技术创新激励效果,未来中国还应该构建内容丰富的政策工具包,包含:全国性碳交易市场、低碳技术研发补贴和低碳技术产品应用及推广补贴等。在上述政策组合的实施过程中,一方面需要把握财政政策中性原则,让具有缓解气候变化潜力的技术都能获得足够的发展机会,另一方面有必要相机抉择地支持突破性的低碳技术创新,使缺乏市场关注但又具备卓越碳减排能力的技术获得充分支持。

第三,能源结构和经济结构都是碳价格政策发挥碳强度抑制作用的重要传导渠道。对于旨在构建全国统一碳市场的中国来说,为了充分发挥政策的碳强度抑制作用,在理想的情形下,能源结构应该逐渐优化并呈现出清洁能源使用比例逐渐上升的局面,经济结构应该逐渐优化并呈现出产业结构低碳化的局面。然而,现实中能源结构和经济结构的转换常面临市场垄断力量或行政保护力量的阻碍。针对于此,一方面,应该推动能源价格市场化,使碳价格政策能够顺利地通过能源价格变化撬动能源需求结构变动;另一方面,应该避免过多的关停或限产等行政干预,通过市场方式实现对高碳行业的控制;最后,在通过市场方式推动碳价格上升的过程中,高碳行业必然会阵痛和调整,此时亦应该减少行政干预,让经济结构顺利地实现向低碳化转换。

相比于以上研究内容与结论,本文仍然至少存在以下三点有待提升之处。首先,本文的实证分析建立在跨经济体面板数据基础上,尽管得到了碳价格政策可以通过刺激低碳技术创新从而发挥碳减排效应,但是在微观企业层面是否存在证据,还有待更加深入的数据准备和微观实证。其次,在本文的跨经济体面板数据结构中,碳价格政策是一种区域性的气候政策,而一个国家或地区的气候政策和碳排放水平可能对相邻地区的政策和环境绩效造成外溢影响,对应的空间计量分析是未来研究的一个值得拓展的方向。再次,有必要使用更加科学的

因果判断方法,综合考虑和甄别碳价格政策之外的一系列政策所造成的环境影响,例如能效奖励或补贴、节能创新、技改鼓励、落后产能淘汰、产业环境准入制度等政策。

参考文献:

- [1] 傅京燕,冯会芳. 碳价冲击对我国制造业发展的影响分析——基于分行业面板数据的实证研究[J]. 产经评论,2015,(1):5-15.
- [2] 李继峰,张沁,张亚雄,王鑫. 碳市场对中国行业竞争力的影响及政策建议[J]. 中国人口·资源与环境,2013,23(3):118-124.
- [3] 刘洁,李文. 征收碳税对中国经济影响的实证[J]. 中国人口·资源与环境,2011,21(9):99-104.
- [4] 娄峰. 碳税征收对我国宏观经济及碳减排影响的模拟研究[J]. 数量经济技术经济研究,2014,(10):84-96.
- [5] 潘文卿. 碳税对中国产业与地区竞争力的影响:基于CO₂排放责任的视角[J]. 数量经济技术经济研究,2015,(6):3-20.
- [6] 邵帅. 煤炭资源开发对中国煤炭城市经济增长的影响——基于资源诅咒学说的经验研究[J]. 财经研究,2010,36(3):90-101.
- [7] 时佳瑞,蔡海琳,汤铃,余乐安. 基于CGE模型的碳交易机制对我国经济环境影响研究[J]. 中国管理科学,2015,(s1):801-806.
- [8] 王兵,吴延瑞,颜鹏飞. 环境管制与全要素生产率增长:APEC的实证研究[J]. 经济研究,2008,(5):19-32.
- [9] 王金南,严刚,姜克隽,刘兰翠,杨金田,葛察忠. 应对气候变化的中国碳税政策研究[J]. 中国环境科学,2009,29(1):101-105.
- [10] 闫云凤. 全球碳交易市场对中国经济-能源-气候系统的影响评估[J]. 中国人口·资源与环境,2015,25(1):32-39.
- [11] 张晓娣,刘学悦. 征收碳税和发展可再生能源研究——基于OLG—CGE模型的增长及福利效应分析[J]. 中国工业经济,2015,(3):18-30.
- [12] 赵文会,毛璐,王辉,章斌,钟孔露. 征收碳税对可再生能源在能源结构中占比的影响——基于CGE模型的分析[J]. 可再生能源,2016,34(7):1086-1095.
- [13] 朱永彬,刘晓,王铮. 碳税政策的减排效果及其对我国经济的影响分析[J]. 中国软科学,2010,(4):1-9.
- [14] Acemoglu, D., P. Aghion, L. Bursztyn, and D. Hemous. The Environment and Directed Technical Change[J]. American Economic Review, 2012, 102(1): 131-166.
- [15] Aghion, P., A. Dechezleprêtre, D. Hemous, R. Martin., and J. V. Reenen . Carbon Taxes, Path Dependency and Directed Technical Change: Evidence from the Auto Industry[J]. Journal of Political Economy, 2016,124(1):1-51.
- [16] Borghesi, S., G. Cainelli., and M. Mazzanti. Linking Emission Trading to Environmental Innovation: Evidence from the Italian Manufacturing Industry[J]. Research Policy, 2015, 44(3): 669-683.
- [17] Bottazzi, L. and G. Peri. The International Dynamics of R&D and Innovation in the Long Run and in the Short Run[J]. The Economic Journal, 2007, 117(3): 486-511.
- [18] Calel, R. and A. Dechezleprêtre. Environmental Policy and Directed Technological Change: Evidence from the European Carbon Market[J]. Review of Economics and Statistics, 2016, 98(1): 173-191.
- [19] Costantini, V., F. Crespi, G. Marin., and E. Paglialonga.. Eco-innovation, Eustainable Supply Chains and Environmental Performance in European Industries[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 154: 141-154.
- [20] Keller, W. Geographic Localization of International Technology Diffusion[J]. The American Economic Re-

view, 2002, 92:120–142.

[21] Medlock, K. B. Energy Demand Theory[M]//Evans, J. and L. C. Hunt. International Handbook on the Economics of Energy. Cheltenham: Edward Elgar Publishing Limited, 2009.

[22] OECD. OECD Patent Statistics Manual[M]. Paris: OECD Publishing, 2009.

[23] Verdolini, E. and M. Galeotti. At Home and Abroad: An Empirical Analysis of Innovation and Diffusion in Energy Technologies[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2011, 61(2):119–134.

Impact Mechanism of Carbon Price Policy on Carbon Emissions: A Re-examination of the Channel of Technological Innovation

Yan Zheming^a, Du Kerui^b and Yang Zhiming^c

(a: International Business School of Shaanxi Normal University; b: The Center for Economic Research Shandong University; c: University of Science & Technology Beijing)

Abstract: Carbon price policy is one of the most well-known policies for global climate change mitigation. While most existing studies have shown that carbon price can cause carbon reduction by various mechanisms like industrial structure change or optimization of energy structure, there is no consensus in the channel role played by technological innovation. This paper empirically investigates the impact mechanism of carbon price policy on carbon intensity by using a cross-regional data panel. The empirical results showed a significant and negative impact of carbon price policy on carbon intensity. Moreover, the results also showed the impact mechanism; that is, carbon price policy can encourage low-carbon innovation, cause the ratio of clean energy increase and optimize the economic structure. Among all these three channels, the indirect impact of carbon price policy through the channel of technological innovation is the largest. For realizing the promise of carbon reduction, China should not only take measures in changes of energy structure and industrial structure, but also pay more attention to encourage low-carbon innovation.

Keywords: Carbon Price Policy; Low-carbon Technological Innovation; Carbon Intensity; Impact Mechanism

JEL Classification: Q5

(责任编辑:卢玲)