

环境政策与技术创新研究述评

王班班*

摘要: 环境政策的技术创新效应对实现长期绿色发展至关重要。由于外部性和路径依赖问题,有助于环境的技术创新活动往往缺乏市场激励,而环境政策可以对此类技术创新活动提供驱动力。因此,对环境政策工具的技术创新效应进行实证检验不仅是经济学界关注的重点议题,其结论还具有较强的政策启示。对此,本文围绕四个方面展开综述:第一,何种技术创新具有积极的环境影响,从而助力社会经济的绿色发展?第二,环境政策对技术创新来说为什么是一种必要的激励措施?第三,不同的环境政策是否产生了积极的技术创新效应?第四,何种政策工具对激励技术创新更为有效?在此基础上,本文对该领域的研究趋势进行了分析,细化技术创新和政策分类,比较不同政策工具的差异化效果都是未来有待研究的方向。

关键词: 环境政策;技术创新;诱发技术创新;波特假说

一、引言

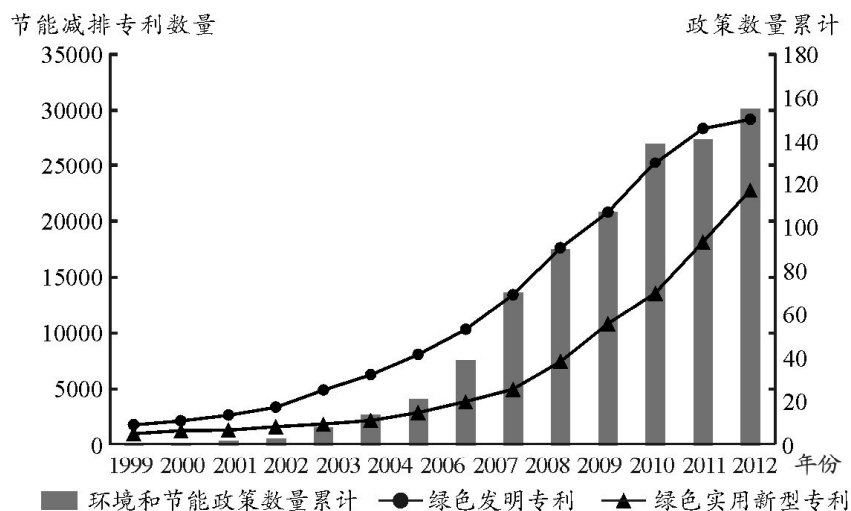
技术创新是实现经济长期绿色发展的关键驱动力。然而,由于技术市场和金融市场的外部性,有助于环境的技术创新活动缺乏市场激励,难以达到满足社会需求的水平,政策干预因而至关重要。相对于更为一般化的科技政策,环境政策对此类技术创新活动的激励更具有针对性。因此,在对环境政策效果进行研究和评估时,除了针对其减排效果和经济影响之外,还应关注政策的技术创新效应。

中国在未来一段时期,一方面亟需协调经济发展空间和节能减排需求,技术创新可以为绿色发展提供新动力;另一方面,国内环境问题和国际气候谈判的压力仍将持续,中国开始采用更为多样化的环境政策工具对污染物排放、温室气体增长、化石能源消耗和可再生能源发展进行政策干预和调控,特别是市场化的环境政策工具被提到了重要的位置。“十一五”期间是中国环境保护和节能减排政策的重要分水岭。自“十一五”期间开始,中国对单位GDP能耗和碳排放设置约束性指标,针对工业行业的具体环境和节能政策的累积数量也呈爆发式增长。与此同时,中国绿色专利申请数量在2006年以后也进入了加速增长阶段(见

* 王班班,华中科技大学经济学院,邮政编码:430074,电子信箱:wangbanban@hust.edu.cn。

本研究受国家自然科学基金青年项目“基于碳价格映射的中国工业能源结构优化研究”(项目批准号:71503087)、碳排放权交易湖北省协同创新中心(培育)重点研究项目“碳价格对中国低碳技术进步的影响研究”(项目编号:15YZTB01)资助。感谢匿名审稿人提出的宝贵修改建议。文责自负。

图1)。上述政策是否是促进绿色技术创新的关键因素?何种政策具有更强的创新效应?在经验观察的基础之上,环境政策工具在中国的技术创新效应还有待评估。



资料来源:中国工业环境和节能政策数量累计数据来自于王班班和齐绍洲(2016);绿色专利申请数据为作者根据世界知识产权组织(WIPO)提供的绿色专利清单(<http://www.wipo.int/classifications/ipc/en/est/>),在中国国家知识产权局(SIPO)数据库(<http://www.sipo.gov.cn/zhfwpt/zljs/>)中检索并整理所得。

图1 中国环境和节能政策及绿色专利申请数量

为此,本文就“环境政策的技术创新效应”这一主题对现有的国内外文献进行了梳理。在环境经济学界这依然是国际主流的研究议题之一;针对中国的研究也在迅速发展,开始呈现更加细致化和微观化的趋势。值得注意的是,这一主题涉及众多研究领域。例如,依据技术创新的不同划分,可以涉及绿色技术的研发投资、专利、生产率绩效、技术的采纳和扩散等;依据研究方法的不同,可以涉及经典环境经济学理论、偏技术进步理论、实证研究、社会经济大型模型研究等。对此,本文难以一一展开,需要对综述的范围进行界定,从而集中研究主题。

首先,对技术创新的研究范围需要进行界定和说明。技术进步一般需经过发明、创新和扩散三个阶段。发明阶段将产生新的技术;而狭义的创新仅指发明转化为具有商业价值产品的过程,主要通过专利保护来实现;扩散则是技术的运用和传播,指微观主体开始利用创新的成果。尽管创新本身只是技术发明的商业化,然而从创新生产的全过程来看,广义应包括创新的投入——研发、创新的产出——专利、创新的绩效——生产率改进三方面。以创新的狭义定义展开综述涉及的范围较为具体,而以广义的定义展开综述则涉及技术进步、技术经济、生产率评估等众多领域,主题过于庞杂。本文采取折中方案:以狭义定义为主,但对与本文主题相关的研发、生产率改进和技术扩散方面的文献均有所涉及,以期对该主题有一个较为整体的把握。

其次,本文重点围绕实证研究展开综述。理论研究的主要结论,如诱发创新、技术生产函数等,将作为实证研究的理论依据予以说明。该议题的实证检验一度受到数据的限制。然而随着专利数据和政策指标的完善,学界对实证研究的兴趣与日俱增,这些结论对政策制定者来说也具有重要的启示,但有关中国的实证研究依然较为缺乏。鉴于此,本文将从实证研究的角度展开本篇综述。当然,理论研究的必要性毋庸置疑,需要另以理论视角进行归

纳。

本文将顺应如下四个问题展开综述(图2)。第一,何种技术创新具有积极的环境影响,助力社会经济的绿色发展?对此,需要对有助于环境的技术创新进行界定,并对不同视角的技术创新指标进行比较。第二,环境政策对技术创新来说为什么是一种必要的激励措施?对此,将对“绿色”技术创新的双重外部性问题、技术进步方向的路径依赖效应、诱发技术创新理论和实证等问题进行综述。第三,不同的环境政策是否产生了积极的技术创新效应?对此,一是要对主流研究中不同的政策变量进行比较,二是分别就本国政策的技术创新和扩散效应、外国政策的技术创新效应、环境政策的创新绩效这三个主题的实证研究进行梳理。第四,何种政策工具对促进技术创新更为有效?对此则涉及政策比较的实证研究。

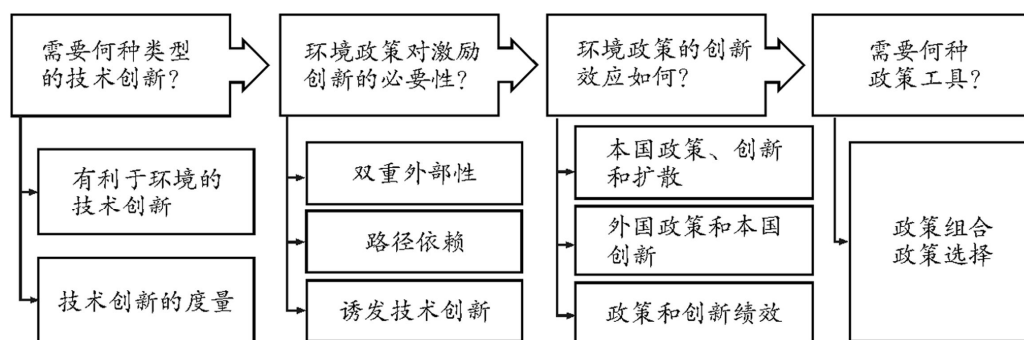


图2 本文研究思路

论文接下来的结构安排如下:第二章将综述技术创新的环境效应,包括有利于环境的技术创新和创新的度量;第三章是环境政策的技术创新效应,将对上述问题二到问题四进行文献回顾,包括环境政策对绿色技术创新的必要性、环境政策强度的测度、环境政策对技术创新的影响及有助于技术创新的政策选择四个部分。最后一部分是该领域的研究趋势分析和未来研究展望。

二、技术创新的环境效应

并不是所有的技术创新都具有积极的能源环境效应。那么,环境政策应促进何种技术创新,从而助力绿色发展?此类技术创新应如何界定和度量?这是相关研究的基础性问题。

(一) 有利于环境的技术创新

1. 偏向型技术进步和中性技术进步

偏向型技术进步可以为创新的环境能源效应提供一种理论解释。Hicks(1932)认为技术创新存在“方向”——节约相对昂贵的生产要素并使用相对便宜的生产要素——第一次提出了偏向型技术进步的思想。大气污染物排放与能源消费之间往往存在较强的相关性,技术进步对污染物排放的影响与其对能源这种生产要素的使用偏向有关。中性技术进步将同比例地提高不同投入要素的边际生产率,并不会改变要素投入的比例或份额。偏向型技术进步则将能源视为一种生产投入要素,如果技术进步降低了能源投入的比重,那么它也有可能降低与之密切相关的污染物排放。

偏向型技术进步的环境能源效应可通过技术进步的方向或其对能源效率的影响得以体现。大部分研究认为,外生能源价格上升、环境政策规制等因素可以诱发提高能源效率的技

术进步。Dowlatabadi 和 Oravetz(2006)通过实证分析发现,在 1974 年以前能源价格下降的阶段,通过促进偏向型技术进步使得能源效率降低了 1.6%,而在随后的能源价格上升阶段则使能源效率提高了 1%。Hassler 等(2012)的模型中包括能源、资本、劳动力三种投入要素。作者发现,能源节约型技术进步受到了 20 世纪 70 年代石油价格冲击的影响,是降低能源强度的重要因素。

当然,也有一些研究认为偏向型技术进步对能源效率的效果比较模糊(Barker et al., 2006),对减排路径的影响效果也存在不确定。Sue Wing(2006)指出,在跨期最优化模型中,外生的偏向型技术模型中微观主体倾向于一种“等等看”的策略,推迟技术创新;而内生的偏向型技术则暗示着微观主体更乐于“马上行动”。Goulder 和 Mathai(2000)发现内生的偏向型技术进步对最优减排路径有很大的影响。如果技术进步来自于 R&D 投资的积累,那么当期的一部分减排被推迟;而当技术进步来自于“干中学”时,则不能得出单一的减排路径变化的规律。

2.“清洁”技术、“污染”技术和“灰色”技术

偏向型技术进步理论并不局限于与能源要素投入相关的污染型技术,其引申的含义是创新存在“方向”——企业可以从事“清洁”的创新(Clean Innovation),也可以选择“污染”的创新(Dirty Innovation)。

Acemoglu 等(2012)将其 2000 年前后建立的偏向型技术进步模型框架运用到环境经济学领域。在这一两部门的模型中,唯一的消费品是由两个部门的中间品生产的,“清洁”部门(Clean Sector)采用对环境无害的要素,而“污染”部门(Dirty Sector)采用损害环境的要素。结果发现,环境政策通过诱发清洁部门的技术进步,可以改变技术进步的方向,从而避免“环境灾难”。^①

在实证研究中,“清洁”技术的定义成为关键性的基础问题之一。“清洁”技术的名称和定义通常根据不同的研究议题而有所差别。一些研究称其为“绿色”创新(OECD^②;世界知识产权组织^③;Ley et al., 2016)、环境友好型技术或环境技术(Lanjouw and Mody, 1996; Brunnermeier and Cohen, 2003; Johnstone et al., 2012)、节能技术(Popp, 2002)、生态创新(Horbach et al., 2012),也有学者聚焦于更细致的技术领域,如减缓气候变化技术(Dechezleprêtre et al., 2011)、可再生能源技术(Johnstone et al., 2010)或电力行业(Popp, 2010)、汽车行业的技术创新(Aghion et al., 2016)等。国际权威机构 OECD 和世界知识产权组织(WIPO)定义的“绿色创新”涉及范围最广,虽然二者的分类略有不同,但均包括了与环境相关的污染物处置和与减缓气候变化相关的技术,并对所有相关技术的专利分类号进行了说明,可供研究者使用。环境相关技术主要为空气、水、垃圾、土壤等的污染物处置技术。减缓气候变化技术则涉及可再生能源、交通、建筑、水泥生产工艺等相关领域。表 1 给出了

①当清洁要素和污染要素之间的替代弹性足够大时,环境政策只需要在短期临时执行就可以达到效果,从而避免牺牲长期经济增长。当然,如果两种要素的替代弹性不够大,则环境政策需要永久执行。此外,如果污染部门采用的是可耗竭资源,也有助于技术进步自发地偏向清洁部门,因为随着资源耗竭,污染部门的要素价格将会提高。

②详见 <http://www.oecd.org/environment/indicators-modelling-outlooks/green-patents.htm>。

③详见 <http://www.wipo.int/classifications/ipc/en/est/>。

主要研究中涉及的“清洁”技术分类。一些研究还将“清洁”技术按照其作用环节划分为终端减排技术(end-of-pipe solution)和生产工艺技术(process change)(Lanjouw and Mody, 1996; Popp, 2006; Horbach et al., 2012)。

在“清洁”技术和“污染”技术之外, Aghion 等(2016)进一步定义了介于二者之间的“灰色”技术, 即能效改进技术。“灰色”技术尽管不能使生产完全转向清洁能源, 但可以通过改进化石能源的使用效率来减少污染物排放, 因此也并不是“污染”型的。Aghion 等(2016)采用汽车行业的数据发现, 碳税等环境政策一方面可能使创新转向完全清洁的技术, 也可能转向灰色技术, 但作者的研究结果发现, 环境政策的技术创新效应对完全清洁型技术的作用要强于灰色技术。

表 1 主要“清洁”技术分类

技术类型	文献	细分技术领域
绿色技术	OECD	环境管理(空气污染、水污染、垃圾、土壤、环境监测) 水的管理相关技术 生物多样性保护和生态系统健康 与减缓气候变化相关的能源生产和输配 温室气体的捕获、封存、沉降或处置 与减缓气候变化相关的交通 与减缓气候变化相关的建筑
	WIPO	替代能源生产 交通运输 节能 垃圾管理 农业和林业 管理、规制和制度设计 核电
环境相关技术	Lanjouw 和 Mody(1996)	工业空气污染处理、水污染处理、汽车空气污染物处理 固体废弃物处理、垃圾焚烧 替代能源 石油泄漏处理 放射性废弃物处理 废弃物的回收和再利用
	Brunnermeier 和 Cohen(2003)	危险及有毒废弃物的分解和封存 废弃物的回收和再利用 酸雨防治 固体废弃物处置 替代能源 空气污染防治 水污染防治
	Johnstone 等(2012)	空气污染处置、水污染处置、固体废弃物处置
减缓气候变化技术	Dechezleprêtre 等(2011)	7种可再生能源技术: 风能、太阳能、地热能、海洋能、水电、生物质能、垃圾发电 甲烷分解 气候友好型水泥 建筑物隔热 供暖 电动和混合动能汽车 节能照明
可再生能源技术	Johnstone 等(2010)	风能、太阳能、地热能、海洋能、生物质能、垃圾发电
电力行业的减少氮氧化物排放技术	Popp(2010)	燃烧技术改进 终端减排
汽车行业的“清洁”技术、“污染”技术、“灰色”技术	Aghion 等(2016)	“清洁”技术: 电动汽车、混合动力汽车、燃料电池汽车 “污染”技术: 内燃机引擎 “灰色”技术: 内燃机的燃料效率改进

资料来源: 作者整理。

(二) 技术创新的度量

技术创新难以被直接度量,常用的指标有三类:第一类衡量技术创新的投入,即 R&D;第二类衡量技术创新的产出,即专利;第三类衡量技术创新的绩效,即全要素生产率(TFP)(Keller,2009)。在评价环境政策的技术创新效应时,也可以采用以上三类指标对技术创新进行度量。然而,这些指标中只有专利数据能提供充足的微观信息,使研究者可以细致划分创新的技术领域,并识别发明人的详细情况和技术的应用领域。

1. R&D

研究与开发(R&D)费用衡量创新的投入,是评估环境政策技术创新效应的最直接指标。然而,大部分国家的 R&D 数据无法细分至不同的技术领域,研究者因而难以区分哪些研发主体投入了多少研发支出在绿色技术领域,仅能通过判断 R&D 的技术进步偏向或通过 R&D 的环境能源效应来间接判断 R&D 是否“清洁”。例如,Zhang 等(2017)发现中国的大多数创新指标,如 R&D 等,均可以显著降低二氧化碳排放。因此,采用 R&D 数据时,一般仅检验环境政策对所有领域整体创新活动的影响(Jaffe and Palmer,1997;蒋伏心等,2013)。

2. 专利

专利反映了技术创新的产出。随着研究者对专利数据的挖掘,环境政策对技术创新的影响评估已经深入至不同的技术领域,并能通过发明者信息、专利引用信息等衡量技术扩散情况。从这一角度看,专利数据具有如下优点(Dechezleprêtre et al.,2011)。首先也是最为重要的一点,专利数据可以细分至不同的技术领域,更细致地定义绿色技术创新,这直接促进了绿色创新的实证研究发展。Popp 等(2010)发现,相对于全部领域的创新活动,环境政策对绿色创新的促进作用更强且更显著。其次,专利和 R&D 之间有很强的相关性。Hall 等(1986)发现 R&D 和专利申请之间几乎是同期的,仅存在很小的滞后效应。这意味着专利作为创新的代理变量是合适的。三是专利数据提供了发明人和申请人的详细信息,可以和企业的经济数据合并。四是专利数据不仅包含了新技术的发明国,还揭示了这些技术的使用国,可以衡量技术扩散效应。

当然,专利数据也存在一定局限,但不一定影响实证结论。通过合理的指标和实证设计可以避免由这些局限带来的偏误。

第一个局限是申请专利保护的倾向在国家 and 行业之间存在差异,这取决于一国专利保护制度的完善程度,还与技术被模仿的风险有关。在采用国家或行业面板数据进行研究时,可以通过引入国家、行业等层面的虚拟变量来控制这种国家或行业的异质性。此外,专利宽度(patent breadth)也可以用来衡量一国的专利保护倾向(Dechezleprêtre et al.,2011);还可以用各国绿色专利占总专利的比重作为指标,这种简便的处理方法亦可减少国家间专利宽度差异对实证研究系数的影响(Lanjouw and Mody,1996;Popp,2002;Ley et al.,2016)。

第二个局限是不同专利的价值存在差异。研究中一般采用两种方法来处理这一问题。一是采用专利引用量(citation)指标。一条专利的引用量越大,说明该条专利价值越大(Popp,2002)。二是以国际专利家族(patent families)作为高质量专利的代表。若同一项发明在多个国家申请专利,则将该项发明在不同国家申请的所有专利作为一个家族。由于专利的申请和维护费用可观,发明者一般仅在可以实现商业价值的国家寻求专利保护,因此这

一指标可以反映出发明的商业价值(Lanjouw and Mody, 1996; Dechezleprêtre et al., 2011; Aghion et al., 2016)。此外,一些发展中国家,如韩国、墨西哥、中国的专利体系中存在“小型专利”(petty patents)或“实用新型专利”(utility patents),大多是发明的本地化改造,内含的创新程度较低(Lanjouw and Mody, 1996)。^①在这些国家可以通过区分发明专利和实用新型(小型)专利对专利的价值进行划分。

3. 生产率

创新的绩效一般用生产率来度量。对于绿色创新的绩效,一方面可以在生产率度量时纳入“非期望产出”,即把污染物排放视为产出的副产品;另一方面可以在投入要素中纳入能源要素,甚至更细致地区分清洁能源投入和非清洁能源投入。尽管有关“绿色生产率”测度的文献非常丰富,但由于其包含的信息也不及专利丰富,在研究环境政策的技术创新时,采用该指标的国外文献较为有限,但在国内研究中此类指标应用得比较广泛。国外研究方面,Kumar 和 Managi(2009)采用全球 80 个国家(地区)1971–2000 年的数据,利用包含能源投入和污染物排放副产品的方向距离函数对技术进步方向进行分解,包括外生的技术进步效应和能源价格诱发的内生技术进步效应。国内研究中,景维民和张璐(2014)构造出基于 SBM 模型的全局 Luenberger 指数度量中国工业的绿色技术进步,并测度环境规制的影响。尤济红和王鹏(2016)采用 SBM 方法测算中国省级层面的工业部门绿色技术进步。亦有研究通过在生产率测算时加入环境规制约束条件来模拟环境规制的生产率效应(如王兵等,2008;白雪洁、宋莹,2009;宋马林、王舒鸿,2013)。

三、环境政策的技术创新效应

为了实现长期节能减排和可持续发展,促进绿色创新也是环境政策的目标之一。因此在实证研究中,下述问题尤为重要:一是根据现有数据,环境政策是否有效促进了绿色技术创新?二是环境政策如何度量,什么类型的环境政策工具有更强的技术创新效应?

(一) 环境政策对绿色技术创新的必要性

由于外部性问题和路径依赖效应,绿色技术创新更需要政策支持才能达到社会最优水平。促进绿色创新依赖两种政策,一类是环境政策,用以纠正环境外部性;另一类是科技政策,用以纠正技术市场的失灵。尽管科技政策有助于激发创新行为,但其对绿色创新的促进效果不及更有针对性的环境政策(Popp et al., 2010)。有效的环境政策将对企业产生减排压力,形成排放的影子价格,有助于诱发绿色技术创新,是一种必要的政府干预。

1. 绿色技术创新的“双重外部性”问题

如果缺乏政策干预,私人部门一般没有动力投资绿色技术创新,这主要是由“双重外部性”问题所致(Hall and Helmers, 2011; Ley et al., 2016)。第一个外部性问题在于金融市场对创新活动的支持是不完全的,这在绿色创新领域尤其严重。绿色创新活动通常不属于企业的传统技术领域,并伴随着较高的不确定性。因此,金融市场几乎没有动力对这样高风险的创新项目进行投融资。第二是治理污染本身的外部性问题。由于绿色创新产生的主要是社

^①例如,中国的专利分为三类:发明专利、实用新型专利和外观设计专利,内含的创新程度依次降低。

会而非私人收益,因此私人部门没有动力为其承担成本。有效的环境政策有助于提高绿色技术创新的预期收益。鉴于此,环境政策对促进绿色创新来说是一种必要的政府干预,市场力量无法使绿色创新达到社会最优水平。

2.技术创新方向的路径依赖效应

技术创新的方向亦可能存在路径依赖,其本质是经济系统针对不同的要素价格和要素供给比例,对不同类型技术的一种均衡选择。因此,技术创新的方向依赖于过去的积累,当前盛行的技术和知识也将影响未来的技术选择。如果规模报酬递增且不存在外因驱动,甚至会产生“技术锁定”现象(Ruttan, 1997)。这一发现对于绿色创新同样适用:路径依赖可能导致市场自发力量不足以激发足够的绿色技术创新,使大量研发资源仍然流向污染型技术。这时就需要恰当的政府干预来改变技术创新的方向。技术创新方向的路径依赖效应也得到了实证研究结论的支持。Aghion 等(2016)发现,企业的清洁技术存量将促进更多的清洁技术创新活动,污染技术存量的效果则相反。尽管如此,以能源税为代表的环境政策甚至可以改变技术创新的方向,促进企业更多从事清洁技术创新活动。

3.诱发技术进步

诱发技术进步(Induced Technical Change, ITC)最早由 Hicks 提出(Hicks, 1932),是研究环境政策技术创新效应的重要理论基础。ITC 理论认为,R&D 是一种受利润驱动的投资行为,因此技术创新的方向会受要素相对价格变化的影响。由于环境政策将显性或隐性的形成企业排放的影子价格,环境政策的技术创新效应也可以纳入 ITC 的理论框架(Newell et al., 1999)。

实证结果显示,绿色技术创新对诱因的反应非常迅速(Popp, 2005)。Popp(2002)采用分布滞后模型估计了节能专利对能源价格变化的反应,发现能源价格促进节能技术创新一半以上的效应在五年之内就能达成。Brunnermeier 和 Cohen(2003)则发现环境规制对环境技术创新的诱发作用甚至不存在滞后效应。Dechezleprêtre 等(2011)通过低碳专利和国际油价的趋势比较发现,1990 年以前,低碳专利占全部专利的比例对油价的反应几乎是同期的,这似乎有违直觉。作者给出的可能解释是,创新活动本身是“超前”的,一些低碳技术已被研发,当市场环境使其更容易盈利时,发明者才申请专利保护。

(二) 环境政策强度的测度

由于数据的局限,环境政策创新效应的实证研究一度落后于理论研究。尽管专利数据的应用解决了早期 R&D 作为创新指标的局限,环境政策的度量指标依然是实证研究的难题。早期研究经常采用污染减排和排放控制支出作为环境规制强度的指标。能源价格也是一个重要的代理变量。除此之外,亦有越来越多的研究从不同的政策特征出发构造政策指标,或仅对单项政策的创新效果进行评估。

1.污染治理支出

环境政策将对企业的污染物排放带来成本压力,因此,衡量环境政策强度的一项传统指标是污染减排和排放控制支出(Pollution Abatement and Control Expenditure, 简称 PACE)(Brunnermeier and Cohen, 2003)。该指标的优势是其不仅反映了政策规制,还体现了监测和执行的力度,在早期的研究中被使用。与之类似的指标还包括污染排放治理费用率(景维

民、张璐,2014;童健等,2016)、工业部门污染控制资本性投资和污染减排费用及日常支出(魏楚等,2015)、污染投资占工业总产值的比重(张成等,2011)、工业污染治理项目本年完成投资额占规模以上工业企业主营业务成本(收入)比重(张成等,2011;尤济红、王鹏,2016)等。为了简便起见,本文将此类指标统称为“PACE”。

然而,PACE数据作为环境政策强度的代理变量也存在两点问题。一是该指标的定义和统计口径在国家间存在较大差异,因此进行跨国比较研究时需谨慎(Lanjouw and Mody, 1996)。二是PACE数据存在内生性问题。一方面,企业对污染排放的治理和控制支出取决于企业对政策的回应;另一方面,如果企业进行了根本上的绿色创新活动,反而会使该项支出降低,从而带来偏误(Jaffe and Palmer, 1997; Johnstone et al., 2012)。

此外, Brunnermeier 和 Cohen(2003)认为PACE并不能完全反映政府的环境监测力度。因此,在PACE指标的基础上还对政府的环境监测执行指标进行了检验。相关数据来自作者对美国环保署的信息公开申请。然而,研究结果发现更严格的监督执行并未显著促进环境技术创新。

2. 能源价格

能源价格可以作为衡量环境政策强度的代理变量(Newell et al., 1999; Popp, 2002; Aghion et al., 2016; Ley et al., 2016)。目前,发达国家相关研究的能源价格数据均来自国际能源署(IEA)。在其主要发达国家“能源价格和能源税统计”数据库中,能源价格指标体现为附加能源税后的最终能源价格,包含两部分信息:一是价格信息,反映价格本身的波动,主要受到国际油价变化的影响;二是政策信息,主要是由各国能源税的差异所致(Ley et al., 2016),这也是导致各国最终能源价格差异的主要因素(Aghion et al., 2016)。因此,采用能源价格进行跨国研究时,其对技术创新的效应可以近似地看做以能源税为代表的环境政策的影响。

在实证研究中,也有学者在IEA能源价格数据的基础上构造加权指标,从而使能源价格所反映的环境规制力度在企业、行业间形成差异。Aghion等(2016)采用企业样本期之前在各国申请的专利数量对能源价格进行加权,以反映企业不同目标市场的重要性;Ley等(2016)采用行业主要能源品种的消费量对不同能源价格进行加权平均,以反映环境政策成本的行业异质性。

此外,亦有研究将能源价格作为国内市场化环境政策的代理变量。由于相当一部分空气污染问题和碳排放问题都与能源使用有关,这些政策相当于在能源价格之上外生增加一部分加价。一些能源经济领域的研究利用了这种关系,将碳税、二氧化硫配额价格等视为能源价格的加价,从而在以能源价格为自变量的实证结果的基础上展开分析(王班班、齐绍洲, 2016)。

3. 不同政策的特征

亦有一些研究从不同政策的特征出发,构造环境政策指标。

一方面,一些研究涉及了多种政策的比较,或考察环境政策的总体强度。Johnstone等(2010)是为数不多的实证研究之一。该研究的政策变量数据来源于IEA数据库,包括七种与绿色创新相关的政策类型:研发支持、投资激励(如风险保障、授权、低息贷款)、税收激励

(如加速折旧)、上网电价补贴、自愿项目、义务履行(如生产配额)、可交易许可证。对于可以横向比较的政策,采用连续变量作为政策指标,包括研发支出、上网电价补贴和可再生能源许可;而对于难以用统一尺度度量的政策,则用虚拟变量表示,包括投资激励、税收激励、价格保障政策、自愿项目和义务履行政策。Albrizio 等(2017)则采用 OECD 数据库的环境政策强度(Environmental Policy Stringency)指标。该指标涵盖 24 个 OECD 国家 1990–2012 年的综合环境政策强度指数,考虑了市场型和非市场型大类政策,在国家间具有可比性。

Popp(2010)聚焦于美国的氮氧化物规制政策。政策变量分为三类:一是发电厂可能面对联邦、州和地方三个层面的规制政策,由于这些规制政策强度不一,故分别采用虚拟变量表示。二是发电厂面临的排放约束,采用连续变量表示。三是“臭氧传输委员会”(Ozone Transport Commission, OTC)和“州实施计划”(NO_x SIP Call)的不同阶段,也分别设置虚拟变量予以表示。

在中国的环境政策度量方面,张国兴等(2014)构造了中国节能减排政策指标,对国家及各部委颁布的所有与节能减排相关的政策,从政策力度、政策措施和政策目标三个维度进行打分并构造政策总效力指标。借鉴这一打分方法,王班班和齐绍洲(2016)在研究中国工业节能减排政策执行对节能减排技术创新的影响时,对工业行业相关政策进行打分,并分行业逐年累积,构造“累积政策强度”作为行业节能减排政策执行的指标。

亦有研究采用了一些创新性的环境政策指标。如 Johnstone 等(2012)采用企业管理人员对环境政策强度的主观感受指数作为环境政策的度量。“环境规制严格指数”(Environmental Stringency Index)来自世界经济论坛(World Economic Forum, WEF)的执行董事意见调查(Executive Opinion Survey),包含来自 100 多个国家(地区)的 8 000 至 10 000 家企业的反馈问卷。

另一方面,越来越多的文献对单项环境政策的绿色创新效应评估。重要的案例包括欧洲碳排放交易体系(EU ETS)(Calel and Dechezleprêtre, 2016; Schmidt et al., 2012)、中国的《大气污染防治法》修订(李树、陈刚, 2013)、“两控区”政策(Jefferson et al., 2013)、二氧化硫交易体系(涂正革、谌仁俊, 2015)、清洁生产体系(韩超、胡浩然, 2015)等。对单项政策的评估大多采用准自然实验的方法,可以更好地识别政策和绿色创新之间的因果关系。

(三) 环境政策对技术创新的影响

总体而言,实证研究为环境政策的技术创新效应提供了较为丰富的证据。当然,该效应的大小和显著性也依据研究对象而有所差异。一般而言,本国政策的技术创新效应较之外国政策的影响更为显著,政策对绿色技术创新的效应相比对技术创新的总效应来说更为明显。单项政策评估的结果则受政策的制度设计和执行效果影响,现有研究并未得出一致的结论。

1. 本国政策的技术创新和扩散效应

在环境政策对绿色技术创新的影响研究中,早期文献受制于数据,无法从技术变量中区分出“绿色技术创新”或“环境创新”。为此,一类文献从偏向型技术进步理论和生产前沿面估计出发,研究能源价格诱发的技术进步是否具有节能减排效应。例如,Newell 等(1999)在产品创新的模型框架下对这一问题进行了实证检验。利用产品生产边界的参数估计方法将

创新分解为总体技术进步、偏向型技术进步和产品模式替代三种效应。结果发现,尽管能源价格变化对总体创新的速率没有影响,但是对部分产品上的创新方向有显著影响。该影响在产品能效标签政策出台之后变得更为重要。Taheri 和 Stevenson(2002)采用 1974–1991 年 SIC 二位数行业的面板数据,利用能源价格和要素份额联立方程组对能源价格诱发的偏向型技术进步进行了分解研究,发现能源相对价格的提高有助于诱发节约能源的偏向型技术进步。另一类文献则用非参数方法对技术创新的方向进行度量,并研究能源价格的诱发效应。Kumar 和 Managi(2009)研究发现,能源价格提高有助于诱发技术进步,特别是节约能源偏向的技术进步。尤济红和王鹏(2016)采用类似的方法认为环境规制只有通过引导 R&D 偏向绿色技术进步,才能对工业部门的绿色技术进步产生积极的作用。

近期研究采用专利数据对绿色技术创新进行细致的分类,大部分实证研究均发现本国的环境政策对绿色技术创新有积极的促进作用。以 PACE 为政策代理变量的研究中,Brunnermeier 和 Cohen(2003)发现 PACE 对美国制造业企业环境创新的影响显著为正,但政府的监测及执行的影响并不显著。以能源价格作为能源税政策代理变量的研究中,Popp(2002)采用专利引用数据以同时考虑市场需求和技术供给,发现能源价格和现有知识存量对节能技术创新有显著的正向作用。Ley 等(2016)通过对 18 个 OECD 国家的专利数据研究发现,能源价格对绿色创新有积极的影响,五年平均能源价格每提高 10%,可以促使绿色创新数量和占比分别提高 3.4%和 4.8%。Aghion 等(2016)通过构建全球 80 个国家汽车企业的数据库发现,能源价格显著促进了清洁技术创新和能效改进类的“灰色”创新,且对前者的影响程度大于后者。杨芳(2013)采用中国各类能源技术专利数据,利用几何分布滞后模型进行实证研究,发现能源价格对节能技术创新有积极的促进作用。

此外,观察数据和调查数据的研究也得到了类似的结论。Dechezleprêtre 等(2011)对全球专利数据的趋势观察发现,1990 年以前,减缓气候变化方面的技术创新与石油价格的变动趋势基本一致,可以支持价格诱发的技术进步。1990 年以后石油价格保持稳定,但减缓气候变化方面的技术创新数量依然在增加,作者认为这是低碳政策的诱发造成的。Johnstone 等(2012)采用专利和企业对环境政策力度感知的调查数据研究发现,环境规制力度对清洁技术创新有积极的诱发作用。Horbach 等(2012)利用德国的调查数据发现,当期和预期的政府环境规制对企业的生态创新具有显著的促进作用。

除了绿色技术创新,亦有学者指出,技术创新和技术扩散之间存在紧密的相互关系,应在研究中予以考虑。外国技术一般通过两种渠道向国内扩散,一是被国内厂商直接采纳,二是影响国内研发的生产率。对于前者,可以观察到外国的现有专利迅速被国内使用;对于后者,外国技术一般都需经过国内研发使之本土化,这可以通过专利的国际引用来观察(Popp et al.,2010)。

Popp(2006)发现主要是国内政策影响技术创新和扩散,并通过美、日、德的数据研究上述效应。尽管美国很早就实行二氧化硫规制政策,但对氮氧化物的规制政策要晚于日本和德国。从相关技术的专利数量趋势和政策时点观察来看,发明者仅对国内政策有迅速地反应,但并不会因外国的规制而增加创新活动。国际间技术转移主要是通过专利引用间接发生的。企业对创新技术的采纳是技术扩散的重要体现。Popp(2010)进一步利用美国发电厂

的专利数据对此进行了研究。^①结果发现,氮氧化物规制政策是促进微观主体采纳减排技术,即技术扩散的主导因素。

然而,对单项政策的检验往往并未发现明显的诱发绿色创新效应。一个重要的案例是对欧洲碳排放交易体系(EU ETS)的研究。实证研究发现 EU ETS 诱发清洁技术的效果似乎非常有限,甚至作用可能是负面的。Calel 和 Dechezleprêtre(2016)构建了 850 万个 EU ETS 公司及其专利的数据库,发现尽管在 EU ETS 的第二阶段之后低碳技术专利有明显的上升,但通过匹配法、倍差法比较纳入和未纳入 EU ETS 的企业发现,欧盟碳交易体系充其量只对低碳技术创新起到非常有限的作用。Schmidt 等(2012)的研究结果更加负面,其研究基于演化理论框架,采用作者问卷调查获得的数据。结果发现,在 EU ETS 的前两个阶段,该政策对技术创新诱发的偏向有误,导致创新更倾向高排放技术。他们认为欧盟碳交易体系应设置更严格的总量目标。

2. 外国政策和本国技术创新

外国的环境规制也可能促进本国的技术创新。然而,相关的实证证据多为基于专利趋势的经验观察,缺乏严谨的实证检验结果。例如 Lanjouw 和 Mody(1996)发现,在美国注册的、由德国和日本发明的汽车尾气排放控制专利比例异常之高。美国是第一个对汽车尾气排放实行严格规制的国家,而德国和日本又大量向美国出口汽车,因而这一政策可能促进了德、日汽车制造商对相关技术的研发。Dechezleprêtre 等(2011)发现中国的低碳专利占比在 2000 年以后有大幅增长,作者认为这一方面受到中国国内环境政策变化的影响,特别是 1998 年中国将原国家环境保护局(副部级)升级为国家环保总局(正部级),意味着中国对环境政策的重视程度有所提高。另一方面,一些低碳技术也受到《京都议定书》附件 I 国家政策的影响。尽管在《京都议定书》框架下中国并无强制减排义务,但发达国家的气候政策也使得一些清洁技术产业,如光伏产业在中国快速增长,从而促进了中国光伏相关技术的发展。

3. 环境政策和创新绩效——“波特假说”

环境政策对企业的整体创新绩效是否能产生积极影响?这一命题是“波特假说”的主要内容。哈佛商学院迈克尔·波特教授认为环境规制将促进企业的创新活动,甚至提高企业的竞争力,并以商业案例对此进行了说明(Porter and van der Linder, 1995),形成著名的“波特假说”。“波特假说”意味着环境政策将诱发技术创新,甚至可以使企业从中获得收益。从宏观经济的角度来看,经济增长和环境治理的“鱼与熊掌”可以因技术创新效应兼而得之。

“波特假说”并没有为实证经济学家提供清晰的理论界定。Jaffe 和 Palmer(1997)因而进一步将其分为三个层次。一是“狭义波特假说”,根据波特的原意,特定类型的环境规制有助于促进创新,这些环境政策应该强调结果而非过程。二是“弱波特假说”,认为环境规制为追求利润最大化的企业施加了额外约束,企业可能改变原有行为、开展创新,从而在新的约束下降低成本。在利润最大化的框架下,“弱波特假说”也意味着环境规制将促进特定类型

^①发电厂层面的数据来自美国能源情报署(Energy Information Administration, EIA)对发电厂的调查数据,其中包括了电厂采纳的氮氧化物技术类型。

的创新活动,而这些活动从机会成本的角度来看是有代价的。三是“强波特假说”,其跳出了“利润最大化”范式,认为环境规制的冲击将促使企业打破原有生产经营模式,寻找新产品和新工艺带来的获利机会。环境规制引发的创新收益大于成本,企业由此而开展的创新活动已超出了解决环境问题本身。

“波特假说”的实证检验往往聚焦于环境规制是否能促进企业整体的创新活动(“弱波特假说”)乃至全要素生产率的提升(“强波特假说”)。

对“弱波特假说”,Jaffe 和 Palmer(1997)采用美国的行业数据进行研究,以公共研发支出和专利申请量作为企业创新的指标,发现以 PACE 表征的环境规制强度对研发支出具有显著的促进作用,但对专利申请指标的影响不显著。而蒋伏心等(2013)检验环境规制强度对中国江苏省制造业 R&D 的影响,结果发现环境规制与企业 R&D 之间呈现 U 型关系。Milani(2016)则通过 28 个 OECD 国家 2000–2007 年的研发数据发现,不易转移的产业在面对更强的环境规制时将开展更多的研发活动,以作为对产业重新选址的替代。

对“强波特假说”的检验结果也存在很大差异。Greenstone 等(2012)、Harrison 等(2015)分别采用美国和印度的数据,研究均发现环境管制对 TFP 的影响为负。中国的研究也大多基于“强波特假说”进行检验,但研究结论存在支持、部分支持或不支持“波特假说”的差别。甚至有一些研究认为环境政策和 TFP 之间存在非线性关系。李树和陈刚(2013)利用 2000 年中国对《大气污染防治法》进行修订作为自然实验,发现环境管制可以显著提高污染密集型行业的 TFP。而魏楚等(2015)利用中国的 PACE 数据研究环境管制是否会影响工业部门的研发、经济绩效和环境绩效,结果部分地支持了“波特假说”。涂正革和谌仁俊(2015)未发现显著的波特效应。作者利用中国的二氧化硫交易试点政策,采用倍差法和 DEA 模型对短期和潜在的波特效应进行了检验,认为波特效应体现为产出和减排的协调发展,而实证结果表明二氧化硫交易试点政策并未实现波特效应。张成等(2011)、韩超和胡浩然(2015)、童健等(2016)、王杰和刘斌(2014)、李斌等(2013)则认为环境政策和 TFP 之间存在非线性效应:环境规制强度对 TFP 的影响可能呈 U 型、J 型、倒 N 型特征,或存在门槛效应。Albrizio 等(2017)从新熊彼特生产率模型出发,对此有新的解释:严格的环境规制在短期会使更接近技术前沿的国家在行业层面的 TFP 有所提高,但这一效应随着一国技术水平和技术前沿差距的扩大而减弱,最终变得不显著。

(四) 有助于技术创新的政策选择

对不同环境政策组合和政策选择的技术创新效应进行比较和评估是颇具政策意义的研究议题。但这方面的现有文献大多为理论研究。一般认为,市场化的环境政策工具相比命令–控制型的管制工具对创新的激励效果更为明显。当然,也有研究认为环境政策的创新效应不能简单排序。在理论模型的设置中,环境政策工具将通过三种效应影响企业的创新行为,一是减排成本效应,即创新有助于降低减排成本;二是模仿效应,将减少环境政策对创新的激励;三是排放支付效应,创新可能使企业对超额排放的支付减少,则其对创新的激励程度也将下降。三种效应的权衡使得不同政策工具对创新的激励有所区别(Popp et al., 2010)。

在为数不多的实证研究中,Johnstone 等(2010)利用 1978–2003 年 25 国的专利数据研究

发现,在所有与可再生能源技术创新相关的政策工具中,涉及面更广的政策,如可交易能源许可证制度最有助于诱发与化石能源直接竞争的技术创新;更具体的补贴政策,如上网电价补贴有助于促进研发成本更高的新能源技术创新。Schmidt 等(2012)采用调查数据研究 EU ETS 及其他科技政策对发电企业低碳研发投资的影响。结果发现,EU ETS 由于制度上的不足并未促进发电企业的低碳研发,反而使企业更多投向高碳排放技术。与之相对,科技政策对低碳技术研发的影响是积极的。Veugelers(2012)采用欧洲企业生态创新调查数据发现,政府干预确实能增加企业的生态创新。作者特别强调了政策组合的必要性,研发补贴政策只有和碳税政策配合使用,才能对企业的生态创新活动产生积极的影响。王班班和齐绍洲(2016)对比了市场型和命令型减排政策工具对中国工业行业节能减排技术创新的影响,结果发现市场型和命令型政策工具均有助于诱发节能减排技术创新,但其诱发效应各有特点:市场型工具存在外溢性,除了节能减排技术创新之外,还有助于其他类别技术创新的共同增长,为企业提供更灵活的选择;命令型工具的诱发效应则对创新含量更高的发明专利更强,并且有赖于政策的有效执行。彭星和李斌(2016)则将环境规制分为命令控制型、经济激励型和自愿意识型,发现经济激励型和自愿意识型环境规制对绿色技术创新的影响在东部地区显著为正,但在中西部地区不显著;而命令控制型环境规制在中西部地区影响为负,在东部地区则未发现显著的影响。张平等(2016)采用中国省级面板数据对比了费用型和投资型两种类型的环境规制,发现费用型环境规制将“挤出”企业创新,而投资型规制对技术创新存在促进作用。

四、研究趋势

技术创新是协调环境治理、气候变化与经济发展之间最重要的解决方案。鉴于此,学界日益重视环境政策的技术创新效应。综观该领域实证研究的发展,可以发现如下特征和趋势。

第一,实证研究受数据可得性的推动。绿色技术创新和环境政策的指标度量都曾经制约着实证研究的发展。早期,学者仅能检验环境规制对创新总效应的影响,因为可得性较高的 R&D 指标难以细化至不同的技术领域。Lanjouw 和 Mody(1996)开创性地将专利数据引入清洁技术创新的研究。在此之后,学者才得以对绿色创新、环境创新、生态创新、减缓气候变化创新活动的促进因素进行实证分析,并评估环境政策对这些绿色技术的激励作用。中国的相关研究也受到了数据的制约。由于中国直至 1985 年才有正式的专利数据,而且数据的可得性受限,国内学者因而大多采用了全要素生产率指数来度量创新。全要素生产率是创新的绩效指标,亦可以通过加入约束条件来构造“绿色”全要素生产率,但其依然无法像专利数据一样细化至不同的技术领域。专利数据已成为绿色技术创新研究中的主流指标。

近期研究的发展则主要受政策指标的推动。早期研究采用 PACE 作为环境政策力度的代理变量,但已被证明具有较强的内生性。因此,近期研究开始采用两类指标:一是用包含能源税的能源价格作为碳税等市场化工具的代理变量,二是根据不同的环境政策特征设置虚拟变量或连续变量指标。在政策指标方面,实证研究依然处于发展阶段,并未达成共识。

第二,政策评估和规律研究相互补充。近年来,越来越多的文献对单项政策的创新效应

进行准自然实验评估,从而避免政策指标选择的内生性和主观性,有助于得到更准确的因果关系识别。然而单项政策评估有时并未发现环境政策对技术创新的显著效应。与之相对,一些研究采用更一般的环境政策指标,并对环境政策和技术创新之间的规律进行实证研究,似乎更容易发现显著为正的诱发技术创新效应。究其可能的原因,一方面是在单项政策评估时采用的准自然实验方法可以有效纠正内生性偏误,而在规律性研究中这种偏误往往不可避免;另一方面,政策评估的结论受所研究的政策对象影响。政策制度设计缺陷、政策执行不充分都有可能影响政策效果,如欧盟的排放权交易体系、中国的二氧化硫交易试点等。政策评估的结论只能非常谨慎的进行解释,难以做一般性的推广。因此,尽管政策评估更有利于因果关系的识别,其并不能代替更一般的规律性研究。

第三,政策选择的实证研究亟待发展。对政策制定者来说,比较不同类型环境政策工具的创新效应具有很强的政策启示。然而,不同类型的政策难以进行横向比较。现有研究中,一般对可以比较的定量指标,如具体的环境目标、配额市场规模等,依据政策特征设计连续变量,而对无法进行横向比较的指标则采用虚拟变量矩阵。但这些指标对政策特征的把握依然较为粗略,更缺少对政策法律约束效力、执行力度等方面的综合考量。对中国等发展中国家而言这种差异尤为重要。除此之外,不同政策工具的作用对象有差异,针对的是有区别的排放主体或污染物,因而也会促进不同类型的技术创新活动,实证研究在这些方面也有待细化和深入。

中国将在未来一段时期集中面对空气污染治理、温室气体排放控制、生态环境保护等多层次的、复杂的环境问题,迫切需要以技术创新协调经济发展和节能减排。相应的,中国的环境规制也开始由较单一的命令控制型政策转向多层次的市场激励型政策。这一政策实践的变革亟需实证研究的检验。在针对中国的未来研究中,一是需要进一步厘清环境政策对企业技术创新的微观动力机制,这就要求在企业层面采用细分领域的专利数据展开实证分析;二是需要进一步区分不同政策类型的影响,包括不同层次和类型的命令控制政策、税收政策、补贴政策等,并设计良好的准自然实验以更好地进行因果推断。此外,中国的环境政策强度区域差异明显,技术创新的资源 and 动力也因创新主体的所有制而异,行业和区域环境政策交叠,这些都可以为该领域的实证研究提供丰富的素材。

参考文献:

- 1.白雪洁、宋莹,2009:《环境规制、技术创新与中国火电行业的效率提升》,《中国工业经济》第8期。
- 2.韩超、胡浩然,2015:《清洁生产标准规制如何动态影响全要素生产率》,《中国工业经济》第5期。
- 3.蒋伏心、王竹君、白俊红,2013:《环境规制对技术创新影响的双重效应》,《中国工业经济》第7期。
- 4.景维民、张璐,2014:《环境管制、对外开放与中国工业的绿色技术进步》,《经济研究》第9期。
- 5.李斌、彭星、欧阳铭珂,2013:《环境规制、绿色全要素生产率与中国工业发展方式转变——基于36个工业行业数据的实证研究》,《中国工业经济》第4期。
- 6.李树、陈刚,2013:《环境管制与生产率增长——以APPCL2000的修订为例》,《经济研究》第1期。
- 7.彭星、李斌,2016:《不同类型环境规制下中国工业绿色转型问题研究》,《财经研究》第7期。
- 8.宋马林、王舒鸿,2013:《环境规制、技术进步与经济增长》,《经济研究》第3期。
- 9.童健、刘伟、薛景,2016:《环境规制、要素投入结构与工业行业转型升级》,《经济研究》第7期。
- 10.涂正革、谌仁俊,2015:《排污权交易机制在中国能否实现波特效应》,《经济研究》第7期。

- 11.王班班、齐绍洲,2016:《市场型和命令型政策工具的节能减排技术创新效应》,《中国工业经济》第6期。
- 12.王兵、吴延瑞、颜鹏飞,2008:《环境管制与全要素生产率增长:APEC的实证研究》,《经济研究》第5期。
- 13.王杰、刘斌,2014:《环境规制与企业全要素生产率——基于中国工业企业数据的经验分析》,《中国工业经济》第3期。
- 14.魏楚、黄磊、沈满洪,2015:《鱼与熊掌可以兼得么?——对我国环境管制波特假说的检验》,《世界经济文汇》第1期。
- 15.杨芳,2013:《技术进步对中国二氧化碳排放的影响及政策研究》,经济科学出版社,第94-125页。
- 16.尤济红、王鹏,2016:《环境规制能否促进R&D偏向于绿色技术研发》,《经济评论》第3期。
- 17.张成、陆旻、郭路、于同申,2011:《环境规制强度和生产技术进步》,《经济研究》第2期。
- 18.张平、张鹏鹏、蔡国庆,2016:《不同类型环境规制对企业技术创新影响比较研究》,《中国人口·资源与环境》第4期。
- 19.张国兴、高秀林、汪应洛、郭菊娥、汪寿阳,2014:《中国节能减排政策的测量、协同与演变——基于1978-2013年政策数据的研究》,《中国人口·资源与环境》第12期。
- 20.Acemoglu, D., P. Aghion, L. Bursztyn, and D. Hemous. 2012. "The Environment and Directed Technical Change." *The American Economic Review* 102(1): 131-166.
- 21.Aghion, P., A. Dechezleprêtre, D. Hemous, R. Martin, and J. V. Reenen. 2016. "Carbon Taxes, Path Dependency and Directed Technical Change: Evidence from the Auto Industry." *Journal of Political Economy* 124(1): 1-51.
- 22.Albrizio, S., T. Kozluk, and V. Zipperer. 2017. "Environmental Policies and Productivity Growth: Evidence across Industries and Firms." *Journal of Environmental Economics and Management* 81: 209-226.
- 23.Barker, T., H. Pan, J. Köhler, R. Warren, and S. Winne. 2006. "Decarbonizing the Global Economy with Induced Technological Change: Scenarios to 2100 Using E3MG." *Energy Journal* 27: 241-258.
- 24.Brunnermeier, S. B., and M. A. Cohen. 2003. "Determinants of Environmental Innovation in US Manufacturing Industries." *Journal of Environmental Economics and Management* 45(2): 278-293.
- 25.Calel, R., and A. Dechezleprêtre. 2016. "Environmental Policy and Directed Technological Change: Evidence from the European Carbon Market." *The Review of Economics and Statistics* 98(1): 173-191.
- 26.Dechezleprêtre, A., M. Glachant, I. Haščič, N. Johnstone, and Y. Ménière. 2011. "Invention and Transfer of Climate Change-Mitigation Technologies: A Global Analysis." *Review of Environmental Economics and Policy* 5(1): 109-130.
- 27.Dowlatabadi, H., and M. A. Oravetz. 2006. "US Long-term Energy Intensity: Backcast Projection." *Energy Policy* 34(17): 3245-3256.
- 28.Goulder, L. H., and K. Mathai. 2000. "Optimal CO₂ Abatement in the Presence of Induced Technological Change." *Journal of Environmental Economics and Management* 39(1): 1-38.
- 29.Greenstone, M., J. A. List, and C. Syverson. 2012. "The Effect of Environmental Regulation on the Competitiveness of U.S. Manufacturing." NBER Working Paper 18392.
- 30.Hall, B. H., Z. Griliches, and J. A. Hausman. 1986. "Patents and R&D: Is There a Lag?" *International Economic Review* 27(2): 265-283.
- 31.Hall, B. H., and C. Helmers. 2011. "Innovation and Diffusion of Clean/Green Technology: Can Patent Commons Help?" *Journal of Environmental Economics and Management* 66: 33-51.
- 32.Harrison, A., B. Hyman, L. Martin, and S. Nataraj. 2015. "When Do Firms Go Green? Comparing Price Incentives with Command and Control Regulations in India." NBER Working Paper 21763.
- 33.Hassler, J., P. Krusell, and C. Olovsson. 2012. "Energy-saving Technical Change." NBER Working Paper 18456.
- 34.Hicks, J. 1932. *The Theory of Wage*. London: McMillan.
- 35.Horbach, J., C. Rammer, and K. Rennings. 2012. "Determinants of Eco-innovations by Type of Environmental Impact-The Role of Regulatory Push/Pull, Technology Push and Market Pull." *Ecological Economics* 78: 112-122.
- 36.Jaffe, A. B., and K. Palmer. 1997. "Environmental Regulation and Innovation: A Panel Data Study." *Review of*

- Economics and Statistics* 79(4) : 19–610.
37. Johnstone, N., I. Haščič, and D. Popp. 2010. “Renewable Energy Policies and Technological Innovation: Evidence Based on Patent Counts.” *Environmental and Resource Economics* 45(1) : 133–155.
 38. Johnstone, N., I. Haščič, J. Poirier, M. Hemar, and C. Michel. 2012. “Environmental Policy Stringency and Technological Innovation: Evidence from Survey Data and Patent Counts.” *Applied Economics* 44(17) : 2157–2170.
 39. Keller, W. 2009. “International Trade, Foreign Direct Investment, and Technology Spillovers.” NBER Working Paper 15442.
 40. Kumar, S., and S. Managi. 2009. “Energy Price-induced and Exogenous Technological Change: Assessing the Economic and Environmental Outcomes.” *Resource and Energy Economics* 31(4) : 334–353.
 41. Lanjouw, J. O., and A. Mody. 1996. “Innovation and the International Diffusion of Environmentally Responsive Technology.” *Research Policy* 25(4) : 549–571.
 42. Ley, M., T. Stucki, and M. Woerter. 2016. “The Impact of Energy Prices on Green Innovation.” *The Energy Journal* 37(1) : 41–75.
 43. Milani, S. 2016. “The Impact of Environmental Policy Stringency on Industrial R&D Conditional on Pollution Intensity and Relocation Costs.” *Environmental and Resource Economics*. doi:10.1007/s10640-016-0034-2.
 44. Newell, R. G., A. B. Jaffe, and R. N. Stavins. 1999. “The Induced Innovation Hypothesis and Energy-Saving Technological Change.” *The Quarterly Journal of Economics* 114(3) : 941–975.
 45. Popp, D. 2002. “Induced Innovation and Energy Prices.” *The American Economic Review* 92(1) : 160–180.
 46. Popp, D. 2005. “Lessons from Patents: Using Patents to Measure Technological Change in Environmental Models.” *Ecological Economics* 54(2–3) : 209–226.
 47. Popp, D. 2006. “International Innovation and Diffusion of Air Pollution Control Technologies: The Effects of NO_x and SO₂ Regulation in the US, Japan, and Germany.” *Journal of Environmental Economics and Management* 51(1) : 46–71.
 48. Popp, D. 2010. “Exploring Links between Innovation and Diffusion: Adoption of NO_x Control Technologies at US Coal-fired Power Plants.” *Environmental and Resource Economics* 45(3) : 319–352.
 49. Popp, D., R. G. Newell, and A. B. Jaffe, 2010. “Energy, the Environment, and Technological Change.” In *Handbook of the Economics of Innovation*, Vol. II. Edited by B. H. Halland and N. Rosenberg, 873–937. Burlington: Academic Press.
 50. Porter, M. E., and C. van der Linder. 1995. “Toward A New Concept of the Environment – Competitiveness Relationship.” *Journal of Economic Perspectives* 9(4) : 97–118.
 51. Ruttan, V. W. 1997. “Induced Innovation, Evolutionary Theory and Path Dependence: Sources of Technical Change.” *The Economic Journal* 107(444) : 1520–1529.
 52. Schmidt, T. S., M. Schneider, K. S. Rogge, M. J. A. Schuetz, and V. H. Hoffmann. 2012. “The Effects of Climate Policy on the Rate and Direction of Innovation: A Survey of the EU ETS and the Electricity Sector.” *Environmental Innovation and Societal Transitions* 2 : 23–48.
 53. Sue Wing, I. 2006. “Representing Induced Technological Change in Models for Climate Policy Analysis.” *Energy Economics* 28(5–6) : 539–562.
 54. Taheri, A. A., and R. Stevenson. 2002. “Energy Price, Environmental Policy, and Technological Bias.” *The Energy Journal* 23(4) : 85–107.
 55. Jefferson, G., S. Tanaka, and Y. Wesley. 2013. “Environmental Regulation and Industrial Performance: Evidence from Unexpected Externalities in China.” <https://ssrn.com/abstract=2216220>.
 56. Veugelers, R. 2012. “Which Policy Instruments to Induce Clean Innovation?” *Research Policy* 41(10) : 1770–1778.
 57. Zhang, Y., Y. Peng, C. Ma, and B. Shen. 2017. “Can Environmental Innovation Facilitate Carbon Emissions Reduction? Evidence from China.” *Energy Policy* 100 : 18–28.

Review of Environmental Policy and Technological Innovation

Wang Banban

(School of Economics, Huazhong University of Science and Technology)

Abstract: The technological innovation generated by environmental policy is the key for China achieving its long-term green development. Due to the externality problems and path-dependency effects, the market driven force for environmental-friendly innovation activities is lacked, whereas environmental policy can provide motivation. In this sense, the empirical test of the technological innovation induced by environmental policy is not only among the key interests of academics, but also has strong policy implications. This paper reviews the current literatures around the following four issues. First, what kinds of technological innovation have positive environmental effects and contribute to the green development? Second, why the environmental policies are necessary for motivating such innovation activities? Third, have environmental policies generate technological innovation? Fourth, what types of environmental policies are more effective? This paper also analyzes the research trend in this field and suggests some issues for future researches, such as detailing the classification of innovation and policy indicators, comparing the effects of policy types, etc.

Keywords: Environmental Policy, Technological Innovation, Induced Innovation, Porter Hypothesis

JEL Classification: Q55, Q31

(责任编辑:彭爽)

(上接第 14 页)

Structure Transformation and Economic Growth: Based on Dynamic Spatial Model with China Samples

Hou Xinshuo

(Business School of Xiangtan University)

Abstract: Discussing the topic of growth caused by economic structure again, we built a spatial dynamic model, with province-level data of China from 1978–2015, to investigate the long-run and short-run, direct and indirect effects, and recognize the mechanism acting in growth. Results show that, in spatial scale, effects of economic structure are of systematic space-time correlation; in time series, there are significant difference of long-run and short-run spatial effects, and in the past forty years, “the rich get richer” trend still exists, the relationship between growth and structure needs to be straighten out; in time-space section, the dynamic spatial spillover effects analysis indicates that the performance of the economic structure variables is more short-run rather than long-run, the long-run stability may have not appear, discusses on economic growth should focus more on short-run. The dynamic and complex nature of influence mechanism reminds practitioners to systematically consider economic structure changes’ coordination in time and space.

Keywords: New Structural Economics, Short-run and Long-run Effects, Dynamic Interaction, Dynamic Space Model

JEL Classification: R12, R58, O11

(责任编辑:陈永清)