

中国碳减排实现的影响因素和当前挑战^{*}

——基于技术进步的视角

杨莉莎 朱俊鹏 贾智杰

内容提要: 在引入指数分解与生产理论分解相结合的综合分解分析框架的基础上, 本文探讨了中国各区域各大产业二氧化碳排放变动的驱动因素, 计算了各驱动因素的碳排放变动效应, 从数量上明确了技术进步在二氧化碳减排过程中的关键性作用。在此基础上, 构建了一致性宏观二氧化碳反弹效应研究框架, 定量分析了中国 30 个省、市、自治区不同产业二氧化碳排放与技术进步之间的关系。主要结论有: (1) 2005—2015 年期间, 二氧化碳减排主要依赖技术进步的推动, 技术进步带来的理论减排率为 5.66%, 能源结构调整、效率提升以及产业结构调整对碳减排的影响并不显著; 资本和劳动力对能源的替代也能够一定程度上实现二氧化碳的减排。(2) 中国宏观经济层面基于技术进步的反弹效应平均为 62%, 实际减排率为 2.1%。(3) 中国二氧化碳排放的反弹效应存在一定的区域性差异, 但差异有逐渐收敛的趋势; 现阶段解决中国碳排放问题需要全面推进, 分步解决。

关键词: 分解分析 技术进步 二氧化碳排放 反弹效应

一、引言

2015 年 6 月 30 日, 中国向《联合国气候变化框架公约》秘书处提交了《强化应对气候变化行动》(INDC), 重申了中国在 2030 年前后达到碳排放峰值以及非化石能源占一次能源消费比重提高到 20% 的自主目标。这表明中国将在工业化城镇化的过程中同时完成低碳绿色转型任务, 这是绿色发展史上的一大壮举, 也是中国区别发达国家实现低碳转型的突出特征。寻找一条兼顾不断扩张的能源需求的低碳转型之路, 实现碳减排的目标, 成为了中国面临的巨大挑战。

一个典型的事实是, 在二氧化碳减排方面, 中国已经做出了巨大的尝试。在传统能源领域, 燃煤电厂超低排放技术和高效煤粉锅炉技术的逐渐推广以及冶金水泥行业生产工艺的改进都对解决中国的环境和碳排放问题做出了贡献。在新能源领域, 近年来中国光伏和风电的装机增长率、组件生产的增长率领跑全球, 加速了中国能源结构调整的进程, 也推进了碳减排的实现。从现实的经验看, 技术进步、效率提升与能源结构调整是中国实现碳减排目标的三大主要手段。从实践效果看, 1998—2015 年期间, 在减排意识逐渐增强的背景下中国二氧化碳排放量增长了 60 亿吨, 超过了美国 2015 年全国的排放量, 其中 2005—2015 年增长了约 31 亿吨, 整体减排形势仍然十分严峻。

学界对于碳减排的关注由来已久, 针对中国二氧化碳减排能否实现既定目标(何建坤, 2015; 林伯强和李江龙, 2015; Elzen et al., 2016) 以及如何实现目标(王锋等, 2013; 莫建雷等, 2018) 展开了广泛的讨论。从减排的驱动因素方面考量, 现阶段普遍的共识是技术进步、效率提升以及能源结

^{*} 杨莉莎, 华侨大学经济发展与改革研究院, 邮政编码: 361021, 电子信箱: frogshasha@foxmail.com; 朱俊鹏、贾智杰(通讯作者), 厦门大学管理学院中国能源政策研究院, 邮政编码: 361005, 电子信箱: junpzh@sina.com, zjjia_cn@163.com。本研究受到国家自然科学基金青年项目(71804048) 以及华侨大学高层次人才科研启动费项目(18SKBS101) 的资助。作者感谢匿名审稿专家的宝贵建议, 文责自负。

构调整仍然是二氧化碳减排的主要驱动因素,但对于三者的重要性,不同的文献从不同的研究视角给出了不同的答案。大部分的研究仍然肯定了技术进步和效率提升在碳减排中的关键性作用(Mizobuchi, 2008; Ang, 2009; Okushima & Tamura, 2010; 魏巍贤和杨芳, 2010; 魏楚等, 2010; 王锋等, 2013; 李凯杰, 2017)。

政策的设计通常需要在不同的政策方向上进行取舍,对于研究者而言,则势必要对不同影响因素所带来的减排效应的具体大小进行测算。在探讨碳排放的影响因素的文献中,以Kaya恒等式和Ang et al. (1998)提出的对数平均Divisia指数(Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI)分解技术为基础(杜刚等, 2012; 王锋等, 2013),经历了从行业到区域、从碳排放总量到碳排放强度等方向的技术发展(Tan et al., 2011; Liu et al., 2012; Yang & Li, 2017),指数分解框架(index decomposition analysis, IDA)成为研究碳排放驱动因素的主流方法。但指数分解方法作为一种经济核算方法难以对经济现象特别是能源强度变化提供合理解释(林伯强和杜克锐, 2013),因此Wang (2007)首次提出了基于生产理论的分解方法(production-theory decomposition analysis, PDA)。尽管PDA框架具有良好的经济解释力,但其在能源消费结构效应和产业结构效应的解释力上不如IDA的分解框架。由于两种框架均存在一定缺陷,林伯强和杜克锐(2014)提出了一种基于两种方法的综合框架用于解释能源强度的变化。因为二氧化碳排放与能源消费之间的内在一致性,本文将这种综合的研究框架扩展到分析二氧化碳减排的影响因素的研究之中,在地区和产业层面将二氧化碳排放的变动进一步扩展到能源结构效应、要素替代效应、效率变动效应、技术进步效应及经济结构效应五个维度,分解的结果证实了技术进步在二氧化碳减排过程中的关键性作用。为了更为准确地讨论技术进步对于二氧化碳减排的作用大小,需要进一步从技术进步对二氧化碳减排的作用机理进行分析。已有文献发现由于经济主体的行为变化,技术进步并不单纯表现为对碳减排的促进作用,同时也体现了促进碳排放增长的作用(即技术进步对碳排放影响的双重性),因此技术进步并不能实现预期的减排量(Brännlund et al., 2007; 杨芳, 2013; 查冬兰等, 2013; Yang & Li, 2017),此即二氧化碳排放反弹效应的涵义。反弹效应的存在,使技术进步对二氧化碳减排的影响并不确定。

理论上,反弹效应的作用主要包括三个方面:直接反弹效应、间接反弹效应以及在经济系统层面的反弹效应。直接反弹效应的作用主要体现在微观层面,技术进步能够通过对能源成本及有效能源服务价格的影响而进一步对能源消费者的实际收入(收入效应)和能源与其他投入要素的替代(替代效应)产生影响,进而对能源消费量和碳排放量产生影响;而经济层面的反弹效应则是通过技术进步对产出增长的作用而引致的反弹(Greening et al., 2000; Sorrell, 2007; Brookes, 2004; Van den Bergh, 2011; 周勇和林源源, 2007; 王群伟和周德群, 2008; 国涓等, 2010; Li & Jiang, 2016; Zhang et al., 2017)。反弹效应的存在,使得技术进步对节能减排的影响变得复杂,在反弹效应足够大的情况下,通过政策手段以促进技术进步而实现的节能减排将变得不确定(Sorrell & Dimitropoulos, 2008)。

那么技术进步对二氧化碳排放影响的双重性是如何引发二氧化碳减排的反弹效应?从理论上讲,技术进步的提升对二氧化碳减排的影响将会首先反映在化石燃料需求的减少,进而实现碳排放效率的提升,这一观点在Brännlund et al. (2007)、杨芳(2013)、查冬兰等(2013)等文献中均有提及。与此同时,技术进步通过影响有效能源服务的价格以及促进经济增长而引致更多的能源消费或者带来要素需求的扩张,从而对二氧化碳排放产生直接和间接的反弹效应。与能源消费的反弹效应不同的是,二氧化碳的排放不仅受到能源效率和技术进步率的影响,还受到能源消费结构的影响。因此,为了更加准确地衡量宏观层面技术进步和能源效率提升对二氧化碳排放的影响,首先要在研究中控制能源结构变化对碳排放的影响。现有的文献已经在这个问题上给了一些思路, Lin & Du (2015)所运用的多层次因素分解方法提供了对能源结构变化影响的分解思路; Li & Lin (2015)

的研究则发现结合方向距离函数对产出和能源强度进行分解能够实现技术进步的准确度量,并在一定程度上解决框架一致性的问题; Yang & Li (2017) 则进一步对方向距离函数进行了扩展,解决了传统 DEA 方法可能出现技术倒退的问题,但其中技术进步对经济增长的贡献以及对能源效率提升的贡献是用不同的方法计算得到,二者具有不同的含义,在框架的一致性上存在一定的逻辑缺陷。因此,本文拟从研究方法和研究框架上对现有的研究进行补充,贡献主要体现在以下几个方面:首先,文章将能源强度变化的综合分解框架拓展到碳强度变化的分解研究中,并将分解结果扩展到区域和产业层面,从更细致的维度考察不同驱动因素引致的二氧化碳强度的变化,并据此计算出不同驱动因素带来的理论减排效果;更进一步地,为了讨论技术进步对中国二氧化碳减排的作用效果,本文还从反弹效应的视角出发,构建宏观层面中国二氧化碳排放的反弹效应的研究框架,进一步提升现有研究中技术进步率的测算精度并改进研究框架的一致性;通过具体测算中国宏观层面 30 个省市,三大产业中技术进步引致的二氧化碳排放的反弹效应值,分区域、分产业探讨中国二氧化碳减排的真实效果。对政策制定者而言,研究经济系统层面的二氧化碳减排能够从整体效率和最终目标的实现等方面为节能减排的政策制定提供思路并做出正确的导向,从而最大限度地实现碳减排目标。

二、二氧化碳排放变动的驱动因素分析

本部分首先从碳排放效率^①的影响因素分解入手,厘清技术进步、效率提升、能源结构变动及要素替代和经济结构变动对二氧化碳排放的作用方向和作用程度。在对效率指标和经济增长指标的影响因素进行分解的研究中,IDA 与 PDA 是两种常用的方法,但二者各有优缺点。具体而言,IDA 分解成分的定义直观,本质上属于一种经济核算的方法,因而其在测度结构性因素如产业结构、能源结构效应方面有较好的运用;而 PDA 的分解基于生产理论,为能源强度的变化提供了更好的经济学解释(林伯强和杜克锐,2014)。结合研究目标,本文选用 IDA 与 PDA 相结合的两阶段分解模型对碳排放效率进行分解,以便更加准确地度量各驱动因素的影响效应。

(一) 第一阶段分解: IDA 模型

利用对数平均迪式分解法(LMDI)对碳排放强度进行分解,该方法具有时间可逆、因素可逆、聚合性和零值稳健等良好性质。

$$\begin{aligned}
 CI^i &= \frac{CO_2^i}{GDP^i} = \frac{CO_2^i}{E^i} \times \frac{E^i}{GDP^i} = \frac{CO_2^i}{GDP^i} \times \frac{\sum_k E_k^i}{\sum_k Y_k^i} = \frac{CO_2^i}{GDP^i} \times \sum_k \left[\frac{E_k^i}{Y_k^i} \times \frac{Y_k^i}{\sum_k Y_k^i} \right] \\
 &= CC^i \times \sum_k [EI_k^i \times y_k^i] \quad (1)
 \end{aligned}$$

其中 k 表示三次产业, i 表示本文选取的中国的 30 个省、市、自治区。 CC^i 代表第 i 个地区的能源综合排放系数,由于在本文的测算中,设定每种能源的碳排放系数在研究区间内为常数,因此综合排放系数的变化能够反映能源消费结构的变化。 EI_k^i 表示第 i 个地区第 k 产业的能源强度的变化,代表的是效率变动效应; y_k^i 代表第 i 个地区的第 k 产业总产值在国内生产总值的比重,代表产业结构效应。采用 LMDI 分解碳排放强度,碳排放强度的增量可以表示为:

$$\begin{aligned}
 \Delta CI_{i,k} &= \Delta CI_{i,k}^{cc} + \Delta CI_{i,k}^{ei} + \Delta CI_{i,k}^{y} \\
 &= \sum_k L(W_{k,\sigma}^i, W_{k,l}^i) \ln(CC_{k,\sigma}^i / CC_{k,l}^i) + \sum_k L(W_{k,\sigma}^i, W_{k,l}^i) \ln(EI_{k,\sigma}^i / EI_{k,l}^i)
 \end{aligned}$$

^① 本文用碳排放强度作为衡量碳排放效率的指标。

$$+ \sum_k L(W_{k\sigma}^i, W_{k\tau}^i) \ln(y_{k\sigma}^i/y_{k\tau}^i) \quad (2)$$

其中 $L(\cdot, \cdot)$ 为权重函数, 其具体形式为:

$$L(x, y) = \begin{cases} (x - y) / (\ln x - \ln y) & x \neq y \\ x & x = y \end{cases} \quad (3)$$

其中 $W_{k\sigma}^i = CC_{k\sigma}^i \times [EI_{k\sigma}^i \times y_{k\sigma}^i] \Delta CI_{ik}^{ec}$ 表示能源结构变化带来的碳强度的变化; ΔCI_{ik}^{ec} 表示经济结构变化带来的碳强度变化; ΔCI_{ik}^{ei} 表示能源效率带来的碳强度变化, 部分研究直接用能源强度的变动代表技术进步的影响 (Lin & Liu, 2012), 但实际上能源强度的变动还受到技术进步、效率变化以及投入要素变动等因素的影响, 而这样的设定并没有将技术进步的影响完全剥离出来。因此在下一阶段对能源强度的变化做进一步的分解, 以求得真实的技术进步、效率变动以及要素替代驱动的碳排放效率变化。

(二) 第二阶段分解: PDA 模型

PDA 模型建立在 Shephard 产出距离函数的基础上, 考虑到产业部门之间生产技术的异质性, 设定产业部门 k 的产出的距离函数基于以下的生产技术集:

$$T_{k,t} = \{ (K_{k,t}, L_{k,t}, E_{k,t}; Y_{k,t}) : (K_{k,t}, L_{k,t}, E_{k,t}) \text{ 可以生产 } (Y_{k,t}) \} \quad (4)$$

其中投入变量为资本 $K_{k,t}$, 劳动 $L_{k,t}$, 产出 $Y_{k,t}$ 。产出距离函数中的生产技术集 T 满足标准假设, 因此 i 地区 k 产业在时期 t 产出距离函数定义为:

$$D_{k,t}^i(K_{k,t}, L_{k,t}, E_{k,t}; Y_{k,t}) = \inf\{\theta : (K_{k,t}, L_{k,t}, E_{k,t}, Y_{k,t}/\theta) \in T_{k,t}\} \quad (5)$$

进一步定义在两个不同时期的产出距离函数为如下形式:

$$D_{k,\sigma}^i(K_{k,\sigma}, L_{k,\sigma}, E_{k,\sigma}; Y_{k,\sigma}) = \inf\{\theta : (K_{k,\sigma}, L_{k,\sigma}, E_{k,\sigma}, Y_{k,\sigma}/\theta) \in T_{k,\sigma}\} \quad (6)$$

基于此, t 与 τ 时期的产业部门 k 的能源强度变动可以通过如下的方法进行分解:^①

$$\begin{aligned} \frac{EI_{k\sigma}^i}{EI_{k\tau}^i} &= \left\{ \frac{E_{k\sigma}^i / [Y_{k\sigma}^i / D_{k\sigma}^i(K_{k\sigma}^i, L_{k\sigma}^i, E_{k\sigma}^i; Y_{k\sigma}^i)]}{E_{k\tau}^i / [Y_{k\tau}^i / D_{k\tau}^i(K_{k\tau}^i, L_{k\tau}^i, E_{k\tau}^i; Y_{k\tau}^i)]} \times \frac{E_{k\sigma}^i / [Y_{k\sigma}^i / D_{k\sigma}^i(K_{k\sigma}^i, L_{k\sigma}^i, E_{k\sigma}^i; Y_{k\sigma}^i)]}{E_{k\tau}^i / [Y_{k\tau}^i / D_{k\tau}^i(K_{k\tau}^i, L_{k\tau}^i, E_{k\tau}^i; Y_{k\tau}^i)]} \right\}^{\frac{1}{2}} \\ &\times \left[\frac{D_{k\sigma}^i(K_{k\sigma}^i, L_{k\sigma}^i, E_{k\sigma}^i; Y_{k\sigma}^i)}{D_{k\tau}^i(K_{k\tau}^i, L_{k\tau}^i, E_{k\tau}^i; Y_{k\tau}^i)} \right]^{-1} \\ &\times \left\{ \frac{D_{k\tau}^i(K_{k\tau}^i, L_{k\tau}^i, E_{k\tau}^i; Y_{k\tau}^i)}{D_{k\sigma}^i(K_{k\sigma}^i, L_{k\sigma}^i, E_{k\sigma}^i; Y_{k\sigma}^i)} \times \frac{D_{k\tau}^i(K_{k\tau}^i, L_{k\tau}^i, E_{k\tau}^i; Y_{k\tau}^i)}{D_{k\sigma}^i(K_{k\sigma}^i, L_{k\sigma}^i, E_{k\sigma}^i; Y_{k\sigma}^i)} \right\}^{-\frac{1}{2}} \\ &\equiv PEC_k^i \times \frac{1}{EFF_k^i} \times \frac{1}{TEC_k^i} \quad (7) \end{aligned}$$

将能源强度的分解结果带入方程 (2) 碳排放强度分解的能源强度效应项, 可得:

$$\begin{aligned} \Delta CI_{ik}^{ei} &= \sum_k L(W_{k\sigma}^i, W_{k\tau}^i) \ln(EI_{k\sigma}^i/EI_{k\tau}^i) \\ &= \sum_k L(W_{k\sigma}^i, W_{k\tau}^i) \ln(PEC_k^i \times \frac{1}{EFF_k^i} \times \frac{1}{TEC_k^i}) \\ &= \sum_k L(W_{ik}^\sigma, W_{ik}^\tau) \ln PEC_{ik} + \sum_k L(W_{ik}^\sigma, W_{ik}^\tau) \ln \frac{1}{EFF_{ik}^\sigma} + \sum_k L(W_{ik}^\sigma, W_{ik}^\tau) \ln \frac{1}{TEC_{ik}^\sigma} \\ &= \Delta CI_{ik}^{pe} + \Delta CI_{ik}^{eff} + \Delta CI_{ik}^{te} \quad (8) \end{aligned}$$

据此, 碳排放强度的变动被分解为五个部分:

^① 为了避免不同的生产技术基准水平对分解结果产生影响, 分解时采用其几何平均数, 具体的展开过程见孙广生等 (2012) 以及林伯强和杜克锐 (2014)。(7) 式将能源强度的变动分解为投入要素变动、技术效率变动的倒数和技术进步变动的倒数 (倒数说明能源强度的变动与技术效率和技术进步的变动方向相反), 分别刻画了在不存在技术非效率的情形下最优碳强度的变动以及技术效率变化和技术进步变化所导致的产业 i 的能源强度的变动。

$$\Delta CI_{i,k} = \Delta CI_{i,k}^{cc} + \Delta CI_{i,k}^{pe} + \Delta CI_{i,k}^{eff} + \Delta CI_{i,k}^{te} + \Delta CI_{i,k}^y \quad (9)$$

第一部分 $\Delta CI_{i,k}^{cc}$ 表示能源结构变化带来的碳强度的变化; $\Delta CI_{i,k}^{pe}$ 包含了潜在的最优碳排放强度的变动, 它的变动取决于资本 - 能源比, 劳动力 - 能源比 (Wang 2011; 林伯强和杜克锐, 2014)。 $\Delta CI_{i,k}^{eff}$ 表明技术效率变动^①带来的碳排放强度的变动, $\Delta CI_{i,k}^{te}$ 表示纯粹技术进步^②带来的碳排放强度的变化, $\Delta CI_{i,k}^y$ 为经济结构变化带来的碳强度变化。在此分解的基础上, 可以得到能源结构变动、投入要素变动、技术效率变动、技术进步以及产业结构变化对二氧化碳减排的影响, 进而判断各因素对二氧化碳减排的影响方向 and 影响程度。

基于上述的分解公式, 可得由各驱动因素引致的二氧化碳排放的变化量, 具体见表 1。

表 1 碳排放变动的各驱动因素效应的计算公式

	碳排放变动的效应	碳强度变动的效应参数
碳排放变动的能源结构效应	$Y_{k,\sigma}^i \times (CI_{k,\sigma}^i - CI_{k,t}^i) \times \eta_{k,\sigma}^i$ (10)	$\eta_k^i = \Delta CI_{i,k}^{cc} / \Delta CI_{i,k}^i$ (11)
碳排放变动的经济结构效应	$Y_{k,\sigma}^i \times (CI_{k,\sigma}^i - CI_{k,t}^i) \times \rho_{k,\sigma}^i$ (12)	$\rho_k^i = \Delta CI_{i,k}^y / \Delta CI_{i,k}^i$ (13)
碳排放变动的要素替代效应	$Y_{k,\sigma}^i \times (CI_{k,\sigma}^i - CI_{k,t}^i) \times \zeta_{k,\sigma}^i$ (14)	$\zeta_k^i = \Delta CI_{i,k}^{pe} / \Delta CI_{i,k}^i$ (15)
碳排放变动的效率变动效应	$Y_{k,\sigma}^i \times (CI_{k,\sigma}^i - CI_{k,t}^i) \times \xi_{k,\sigma}^i$ (16)	$\xi_k^i = \Delta CI_{i,k}^{eff} / \Delta CI_{i,k}^i$ (17)
碳排放变动的技术进步效应	$Y_{k,\sigma}^i \times (CI_{k,\sigma}^i - CI_{k,t}^i) \times \gamma_{k,\sigma}^i$ (18)	$\gamma_k^i = \Delta CI_{i,k}^{te} / \Delta CI_{i,k}^i$ (19)

三、数据和模型结果

(一) 数据来源和处理

一般而言, 技术进步对能源消费和二氧化碳排放的影响多体现在产业部门, 结合数据的可获得性, 本文以 2005—2015 年中国内地 30 个省、市、自治区及三次产业为研究对象。^③ 各省区三大产业的劳动力投入 (L) 以年末从业人员数量来衡量, 数据来源于 2006—2016 年的中国省级统计年鉴。各地区三大产业的产出以产业 GDP 衡量, 并利用各地区三大产业的国内生产总值指数进行基期换算, 最后与各省 GDP 总量进行横向比对, 确认数据有效性, 数据均来自 CEIC 中国数据库。资本投入以资本存量作为代理变量。现有的关于产业资本存量计算的文献包括徐现祥 (2007)、Wu (2009) 以及宗振利和廖直东 (2014), 三者均采用永续盘存法计算资本存量, 区别在于对资本折旧率和资本平减方法的选择。结合数据可获得性, 在对三者进行比较的基础上, 本文选择采用宗振利和廖直东 (2014) 的方法将各地区三大产业的资本存量进一步延伸到 2015 年, 并转化为 2005 年的不变价格水平。地区的能源消费数据来源于 2006—2016 年的《中国能源统计年鉴》中的各地区能源平衡表, 按中国行业分类将能源消费量合并为三大产业^④的消费量 (不包括生活部门), 并把各产业的终端能源消费合并为煤、石油、天然气、热力和电力五个能源品种, 转化为标准煤消费量。二氧化碳排放数据按中国《省级温室气体编制清单编制指南》的方法,^⑤ 计算出 2005—2015 年各地区三大产业二氧化碳排放量。最终计算得到的 2015 年中国各省平均碳强度, 及 2005—2015 年碳强度变化的绝对值, 如图 1 所示。

① 技术效率指既定技术水平下企业通过组织和管理等多方面努力所能发挥的技术潜在效能。

② 纯粹的技术进步率衡量了生产前沿面的移动, 这些移动通常代表着技术的创新和技术引进。

③ 由于西藏能源数据严重缺失, 且其能源消费量在全国占比极小可以忽略不记, 因此西藏不在本文的研究范围之内。

④ 第一产业包括“农、林、牧、渔业”, 第二产业包括“工业”和“建筑业”, 第三产业包括“交通运输、仓储和邮政业”、“批发零售业和住宿餐饮业”、“其他”。

⑤ 按每种能源的平均低位发热量、单位热值含碳量、碳氧化率进行折算。

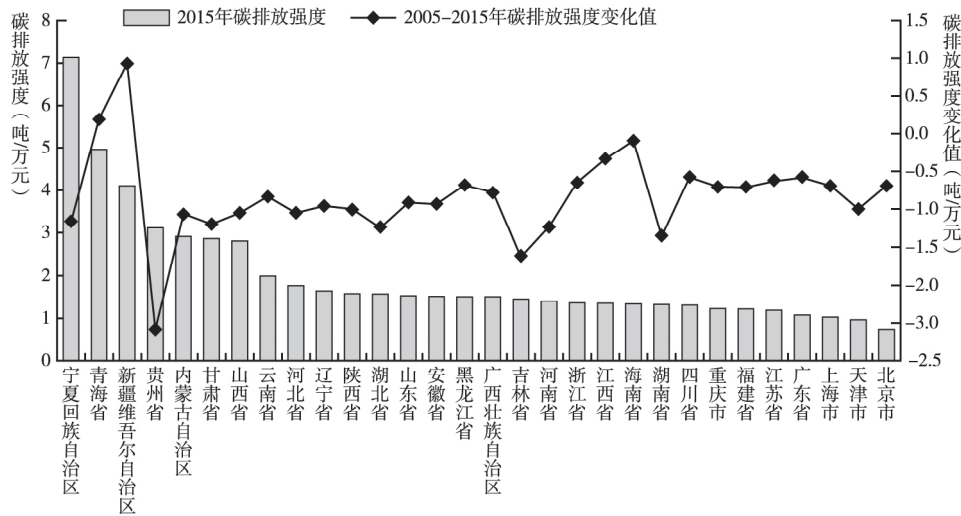


图1 中国各省碳排放强度的基本情况

从图1可以看出,2015年,二氧化碳排放强度较高的地区包括宁夏、青海、新疆等西部地区,相对较低的区域包括北京、天津、上海、江苏、广东等东部较发达的地区。在2005—2015年之间,除青海和新疆,中国各省碳排放强度均呈现下降的趋势,但下降的幅度各有不同。^①

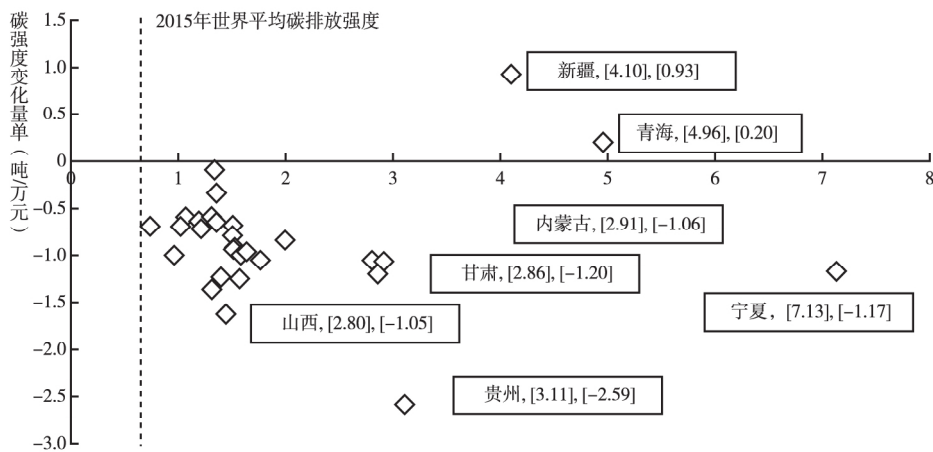


图2 2015年各省碳排放强度及2005—2015年的变化的分布情况^①

图2是以碳排放强度变化值与碳排放强度实际值构成的平面上各省、市、自治区的分布情况。从图中分布情况来看,大部分省份碳排放强度的绝对值和变化值均在2吨/万元以内,变化相对比较平稳。但如果与世界碳排放强度的平均水平相比,大部分省份碳排放效率仍然较低。部分省份如山西、甘肃、内蒙古,则位于碳排放强度较高,而变动程度较小的区域。新疆、青海、宁夏碳排放强度较大,且在2005—2015年间碳排放效率提升不显著,新疆和青海两个地区甚至出现了小幅上升的情况。这表明在2005—2015年的样本区间内,这些省份的减排执行效率较低。贵州省在2005—2015期间,实现了较大的碳强度水平的降低,但碳强度仍然处于较高水平,说明其碳强度仍有较大的下降空间。

① 横轴代表2015年能源强度的绝对值,纵轴代表2005—2015年能源强度的变化值。

(二) 二氧化碳减排的影响因素分析

根据(1)式—(9)式,可以通过碳强度的分解得到2005—2015期间技术进步、效率变动、能源结构调整、产业结构调整以及投入要素的变动对二氧化碳排放的影响。

表2分区域展示了2005—2015年间二氧化碳变动的各种效应值。样本期内,技术进步仍然是二氧化碳减排的主要驱动力,效率提升和能源结构变化虽然能在一定程度上作用于二氧化碳减排,但影响并不确定;投入要素的变动也能在一定程度上实现二氧化碳的减排,但程度不及技术进步效应,并且随着时间的推移,作用效果减弱。在2005—2010年期间,中国地区投入替代效应实现的二氧化碳减排量甚至高于技术进步实现的减排量,^①同时中部和西部地区在2005—2010年期间的投入替代效应均高于东部地区的投入替代效应。一个可能的解释在于“十一五”期间(2005—2010年)中部和西部地区不断承接东部的产业转移,大量的投资加快了中、西部区域的资本积累,实现了资本对能源的替代,从而实现了二氧化碳排放的降低。

表2 2005—2015年中国各省碳排放变化的分解结果^② (单位:百万吨)

	2005—2010年					2011—2015年				
	效率 改进效应	技术 进步效应	投入 替代效应	能源 结构效应	产业 结构效应	效率 改进效应	技术 进步效应	投入 替代效应	能源 结构效应	产业 结构效应
东部地区	-187.68	-600.33	-116.77	196.19	80.27	632.47	-1682.37	-268.84	209.79	5.45
中部地区	-37.03	-232.24	-357.30	114.65	132.77	346.60	-889.63	-261.51	73.22	52.53
西部地区	73.30	-268.27	-217.87	95.74	116.78	142.07	-657.74	-112.01	134.74	95.53
总计	-151.41	-1100.85	-691.94	406.59	329.83	1121.14	-3229.73	-642.37	417.75	153.51

图3展示了二氧化碳变动分解效应的逐年变动情况。在2006—2009年期间,技术进步带来的二氧化碳减排的绝对量较低。考察这一时期的经济发展特征,我们发现2006—2009年期间中国经济的平均增速达到13%,资本形成对经济增长的贡献率高达50%以上,能源消费量增长迅速。这一时期技术进步对二氧化碳减排的贡献并不显著,体现在数据上就是较低的平均减排率。从图中可以看到2011—2015年间,整体的技术进步减排率出现了较大幅度的上升。在这一时期,国务院发布了《工业转型升级规划(2011—2015年)》,对“十二五”期间推动工业转型升级的各项工作做了统筹规划,把发展“资源节约型、环境友好型工业”作为转型升级的重要着力点,并把二氧化碳的减排作为目标之一。从实证结果看这一计划的推行在一定程度上促进了节能减排。2013年技术进步的减排率达到12%。2013年以后,技术进步促进二氧化碳减排的绝对量呈现逐渐下降的趋势,而能源结构调整和效率提升对二氧化碳减排的作用尚未得到体现。

理论上,在不考虑反弹效应的前提下,2005—2015年间,技术进步实现的二氧化碳平均减排率为5.66%,减排总量约为43.30亿吨(超过欧盟2015年的碳排放总量34.90亿吨)。其中,第一产业、第二产业和第三产业由技术进步实现的碳减排量分别为1.26、39.12、2.93亿吨(见图4)。2005—2015年期间,技术进步的减排贡献主要体现在第二产业。

分区域考察技术进步带来的二氧化碳减排,一个显著的特征在于东部地区的减排量明显高于中部和西部地区(见图5)。这一结论与中国区域发展的实际布局情况结构相符合。东部地区集中了大量的优势企业,是中国技术水平发展最快、最为先进的区域,在低碳创新技术的运用方面走在

^① 为了表达简练,在后文中,部分地方用“技术减排”表示“技术进步实现的二氧化碳减排”。

^② 因为篇幅限制,文章仅分区域汇报2005—2010年和2011—2015年两个时间段的累计效应。

全国前列,也取得了比较突出的效果。在2013年之后,东部区域的优势不再突出,三大区域技术减排量呈现收敛的趋势。

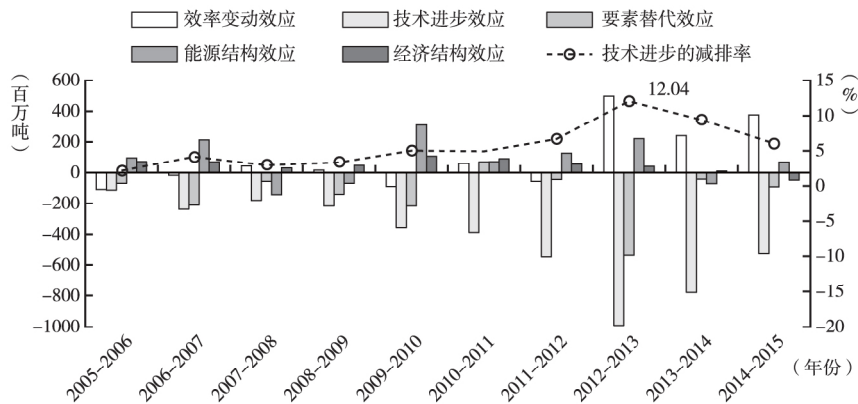


图3 二氧化碳排放变动的分解效应

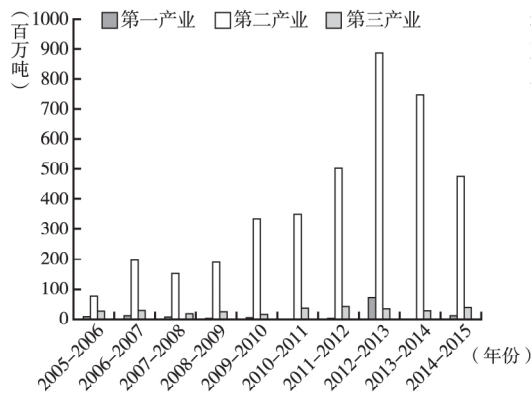


图4 2005—2015年技术减排的产业分布

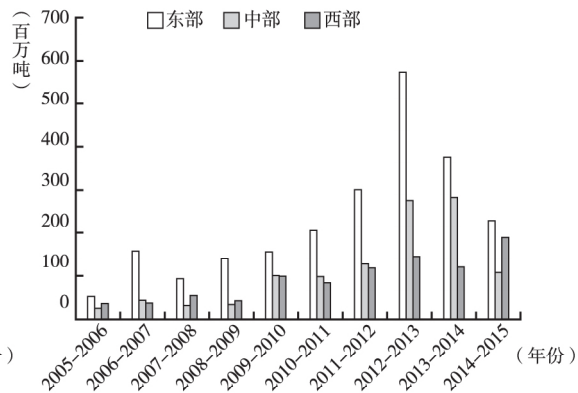


图5 2005—2015年技术减排的区域分布

通过对二氧化碳排放的变动的驱动因素进行分解,本文计算得到了技术进步的二氧化理论减排量,从数据上论证了技术进步对二氧化碳减排的积极作用。考虑到中国仍然处于工业化发展的关键阶段,大部分工业行业仍然处于扩张时期,要素投入的增长不可避免,由此引发的二氧化碳排放的增长也不能忽视。因此接下来的部分将在考虑技术进步对产出增长的促进作用的基础上,计算出宏观层面二氧化碳排放的反弹效应值,对技术进步与二氧化碳排放之间的相互关系做更深入的讨论。

四、进一步的讨论:反弹效应与中国碳减排的当前挑战

第三部分的分解结果表明,效率变化和能源结构变化对减排的贡献有限,二氧化碳减排主要依赖于技术进步。但现实的情况是,由于反弹效应的存在,技术进步可能会引致更多的能源消费,从而增加二氧化碳的排放,这将导致技术进步对二氧化碳的实际减排效果变得不确定。这种不确定性成为了中国实现碳减排目标面临的巨大挑战。因此,本部分将对技术进步的反弹效应进行定量刻画,并从区域、产业和时间视角分析中国碳减排的当前挑战。

(一) 技术进步的反弹效应测算

理论上,技术进步对于二氧化碳排放的作用体现在两个方面:碳排放效率的提高和产出的增长。提高二氧化碳排放的效率能直接实现二氧化碳排放的减少,也会通过降低有效能源服务的价

格引致更多的能源消费从而增加碳排放, 而产出增长则会通过能源投入要素的增加而提高碳排放。技术进步对二氧化碳排放的双重影响, 将使得技术进步实现减排总量被部分甚至完全抵消, 这就是宏观层面碳排放反弹效应的作用机理。

在前文已经计算出技术进步的理论减排量的基础上, 本部分内容继续对产出增长的变化进行分解, 以准确测度技术进步的反弹效应。在基于 Shephard 产出距离函数的基础上的一致性框架下, 同样对产出的增长做分解。设定产业部门 k 的产出生产技术集:

$$T_{k,t} = \{ (K_{k,t}, L_{k,t}, E_{k,t}; Y_{k,t}) : (K_{k,t}, L_{k,t}, E_{k,t}) \text{ 可以生产 } (Y_{k,t}) \} \quad (10)$$

与方程 (6) 相似, 各省三大产业的产出的增长变动可以分解为三部分:

$$\begin{aligned} \frac{Y_{k,\sigma}^i}{Y_{k,t}^i} &= \left[\frac{Y_{k,\sigma}^i / D_{k,\sigma}^i(K_{k,\sigma}^i, L_{k,\sigma}^i, E_{k,\sigma}^i; Y_{k,\sigma}^i)}{Y_{k,t}^i / D_{k,t}^i(K_{k,t}^i, L_{k,t}^i, E_{k,t}^i; Y_{k,t}^i)} \times \frac{Y_{k,\sigma}^i / D_{k,\sigma}^i(K_{k,\sigma}^i, L_{k,\sigma}^i, E_{k,\sigma}^i; Y_{k,\sigma}^i)}{Y_{k,t}^i / D_{k,t}^i(K_{k,t}^i, L_{k,t}^i, E_{k,t}^i; Y_{k,t}^i)} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &\times \frac{D_{k,\sigma}^i(K_{k,\sigma}^i, L_{k,\sigma}^i, E_{k,\sigma}^i; Y_{k,\sigma}^i)}{D_{k,t}^i(K_{k,t}^i, L_{k,t}^i, E_{k,t}^i; Y_{k,t}^i)} \\ &\times \left[\frac{D_{k,t}^i(K_{k,t}^i, L_{k,t}^i, E_{k,t}^i; Y_{k,t}^i)}{D_{k,\sigma}^i(K_{k,\sigma}^i, L_{k,\sigma}^i, E_{k,\sigma}^i; Y_{k,\sigma}^i)} \times \frac{D_{k,t}^i(K_{k,t}^i, L_{k,t}^i, E_{k,t}^i; Y_{k,t}^i)}{D_{k,\sigma}^i(K_{k,\sigma}^i, L_{k,\sigma}^i, E_{k,\sigma}^i; Y_{k,\sigma}^i)} \right]^{\frac{1}{2}} \\ &\equiv PYC_k^i \times EFF_k^i \times TEC_k^i \end{aligned} \quad (11)$$

方程表明产出增长的变动可以分解为三个部分: 投入变动率 (PYC)、效率变动率 (EFF) 和技术变动率 (TEC)。纯粹的技术进步对经济增长的贡献可以表示为 (12) 式, 记为 $\beta_{k,\sigma}^i$:

$$\beta_{k,\sigma}^i = \frac{\ln TEC_k^i}{\ln(Y_{k,\sigma}^i / Y_{k,t}^i)} \quad (12)$$

据此, 可以计算出 i 地区产业部门 k 由技术进步带来的二氧化碳排放增加量为:

$$\Delta CO2_{k,\sigma}^i = \beta_{k,\sigma}^i \times (Y_{k,\sigma}^i - Y_{k,t}^i) \times CI_{k,\sigma}^i \quad (13)$$

根据宏观层面反弹效应的定义, 二氧化碳排放的反弹效应可以表示为:

$$RE_{k,\sigma}^i = \frac{\beta_{k,\sigma}^i \times (Y_{k,\sigma}^i - Y_{k,t}^i) \times CI_{k,\sigma}^i}{-Y_{k,t}^i \times (CI_{k,\sigma}^i - CI_{k,t}^i) \times \gamma_{k,\sigma}^i} \quad (14)$$

(二) 技术进步的反弹效应分析

根据 (10) 式—(14) 式, 本文计算得到样本期内全国 30 个省、市、自治区基于技术进步的二氧化碳排放反弹效应值 (图 6)。平均而言, 2005—2015 年期间, 中国的整体二氧化碳排放反弹效应约为 0.62。这意味着依靠技术进步实现的节能减排总共有 62% 被削减, 在此期间真正依靠技术进步实现的减排量仅为 16.39 百万吨, 实际减排率约为 2.1%。

动态考察中国宏观层面二氧化碳反弹效应的变动趋势 (图 7), 可以发现 2005—2015 年期间, 中国整体的反弹效应值呈现高位波动状态, 特别在 2008—2009 年期间反弹效应值呈现较大的上升。究其原因在于 2008 年经济危机后, 恢复经济为第一要务, 在这一时期, 技术进步更多作用于产出增长, 这意味着更多的能源要素投入, 从而导致更多的碳排放, 使得反弹效应大幅上升。为了更好地理解中国宏观层面的反弹效应, 本文对第二产业的二氧化碳排放情况做进一步的分析。

从图 8 可以看出, 在技术进步双重作用的影响下, 第二产业技术进步实现的减排大多被削减, 整体而言第二产业依靠技术进步实现二氧化碳减排的效果并不理想。导致第二产业整体反弹效应较高的主要原因包括较低的能源转换率以及中国以煤为主的能源消费结构, 这使得第二产业无法摆脱高碳能源的供给。第二产业包括工业和建筑业, 其中工业包括全部的高耗能行业如电力、钢铁、水泥、化工行业等, 因此第二产业行业往以“高污染、高能耗”而著称。在技术进步使得实际能源价格 (单位使用成本) 不断下降的情况下, 生产者将改变生产决策, 使用更多的能源要素

替代其他要素投入,导致能源要素投入的增加。由于中国第二产业能源消费结构以煤炭、石油等高碳能源为主,因此由技术进步导致的能源消费的提高将增加二氧化碳的排放,反映在数据上则表现为反弹效应居高不下。现阶段,第二产业在节能减排中占据了主导地位,是节能减排的重点关注对象。

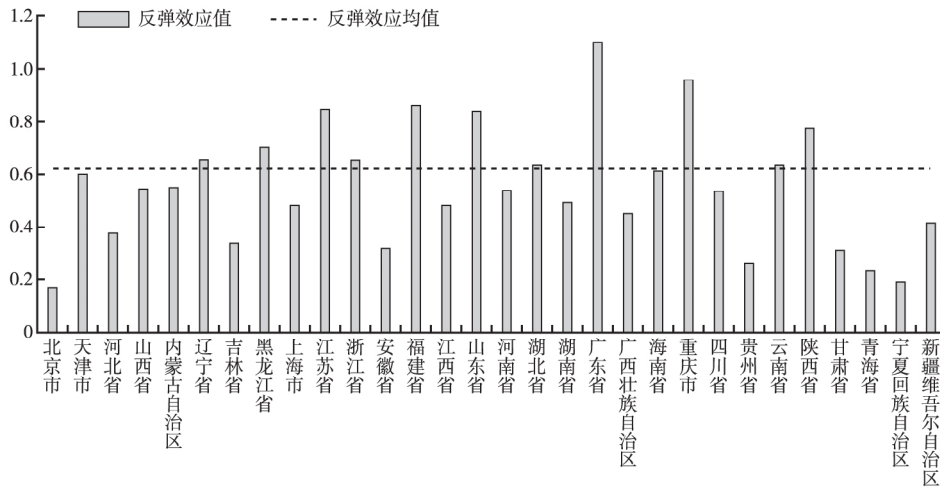


图6 2005—2015年中国各省二氧化碳反弹效应值

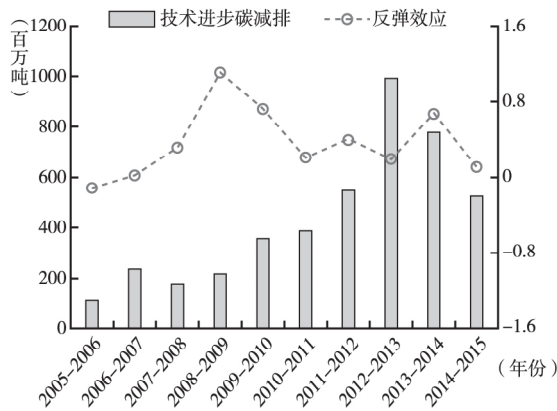


图7 2005—2015年中国宏观层面二氧化碳反弹效应

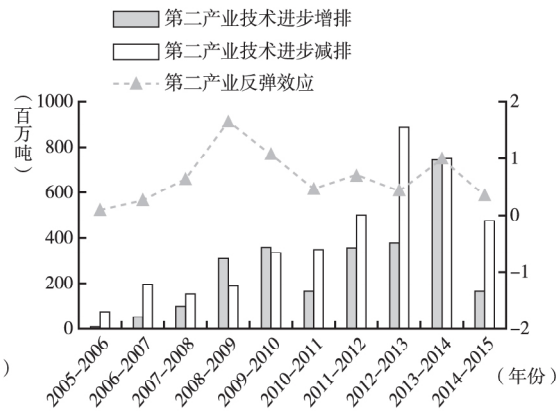


图8 2005—2015年中国宏观层面第二产业的反弹效应

进一步地,分区域对二氧化碳排放的反弹效应值进行讨论。如图9所示,2005—2015年,三大区域二氧化碳排放的反弹效应整体呈现出较大的波动形态,尤其在2008年和2014年前后;相对而言,东部地区整体高于中部和西部地区,但区域之间的差异逐渐收敛。

2006—2010年期间三大区域的反弹效应值共同呈现出了比较明显的“倒V型”变化趋势。这一时期(“第十一个五年规划”)是中国淘汰落后产能、推进行业节能减排和产业结构优化的重点时期。这一时期,技术减排在行业内的推广并不普及,直接实现的碳减排量较少,相对在产出增长方面的作用更大。加之中国在经历了2008年全球金融危机的之后,恢复经济是当时的第一要务,技术进步更多地作用于产出和经济增长。因此在2006—2009年之间,三大区域的反弹效应值均呈现逐渐上升的趋势。进一步比较2008—2009年反弹效应值的变动趋势,可以发现中部和东部地区的变动程度更大,也从另一个侧面反映了中、东部地区受外围经济影响较大。

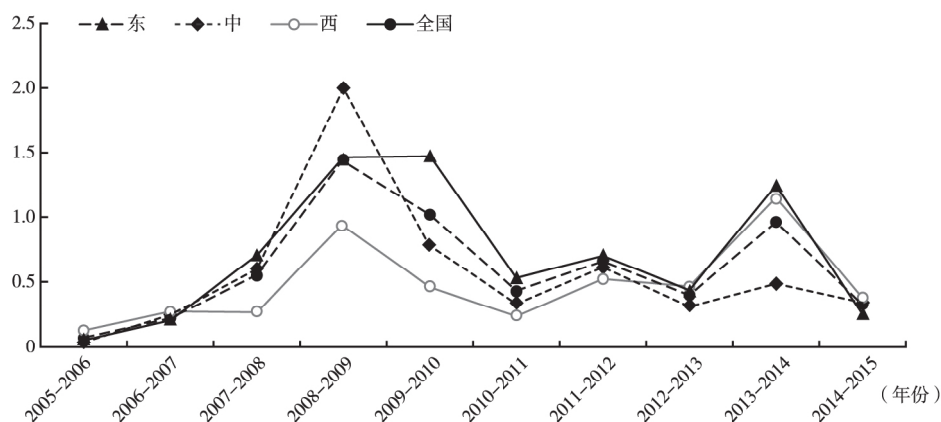


图9 2005—2015年中国宏观反弹效应的区域分布

2011—2015年(“第十二个五年规划”)期间,国务院发布了《“十二五”控制温室气体排放方案》,明确提出了“到2015年全国单位GDP二氧化碳排放比2010年下降17%”的约束性指标,并且在这一时期加大了低碳技术的推广力度。因此与“十一五”相比,“十二五”期间的反弹效应值变动较为平缓,但也出现了小幅波动的情况。2013年至2014年期间,中国水泥、钢铁等高耗能产业产能大幅增长,部分落后产能甚至出现反弹迹象,导致反弹效应出现回升,甚至完全抵消了技术进步实现的二氧化碳减排的贡献。至2014年国务院又发布相关政策,加大淘汰落后产能的力度,使反弹效应得到了有效的控制。

整体而言,东部、中部、西部三大区域的反弹效应存在一定的差异,而这种差异呈现波动收敛的状态。在受到外部冲击较大的情况下(例如2008—2010年金融危机带来的经济环境冲击;2013—2014年产业产能波动带来的用能环境冲击),区域间反弹效应的差异增加;而外部环境趋稳时,这种差异逐渐收敛。具体而言,样本期内,反弹效应的均值呈现东部>中部>西部的特点,而波动幅度则呈现中部>东部>西部的特点。

中国幅员辽阔,东、中、西三大区域在资源禀赋、产业构成、经济发展阶段、技术水平、市场环境等诸多方面均存在较大的差异。从技术的角度看,基本的共识是东部区域走在前列,属于技术发展较为成熟的区域,中部地区则处于技术迅速崛起的阶段,而在长期的历史进程中西部地区是技术水平相对落后的区域。反弹效应的区域间差异也说明,在不同的经济、产业构成和不同的市场营商环境中推动技术减排,其实现效果对外界波动的反应的敏感度不同(也可理解为弹性不同)。“十一五”、“十二五”是中国大力推进低碳转型的重点时期,同时也是西部地区大量承接东部产业转移的重要时期,这一时期,西部的经济水平、社会发展水平以及市场化程度均处于起步发展的阶段,经济增长仍然以资本驱动为主,技术进步的影响相对其他区域较小,这也意味着在西部区域推动技术减排受到外界冲击的影响较小,因此西部地区反弹效应值维持在一个相对比较平稳的状态。而与西部地区有所不同的是,中部地区在这一阶段是技术高速发展的阶段。对于中部区域而言,技术的偏向性选择是这一阶段的重点,因此在外部冲击的影响下,中部区域可能会对技术的选择做出较快的调整,使其在经济增长和低碳转型两个方面做出选择,从而技术减排的效果出现较大的波动,反弹效应值也呈现较大的波动。东部区域是整体技术水平最为成熟的区域,相对中部区域而言,技术的偏向性选择已经基本完成,因此外界波动对于东部地区的技术减排整体呈现较大的影响(即反弹效应的绝对值较大),但波动相对中部区域较小,因此,东部地区的反弹效应值呈现高位小幅波动的状态。当冲击来临时,东、中、西三大区域的技术减排以不同的敏感度(或者弹性)应对冲击,必然会产生差异的扩大。当然,随着技术发展阶段的逐渐趋同,2013年之后三大区域的反弹

效应值出现逐渐收敛的状态。

东、中、西三大区域在二氧化碳排放方面的共性和差异性证实了中国区域之间经济和技术水平发展的不平衡以及逐渐趋同的变化趋势。此外,区域间反弹效应的差距也可部分用不同地区间差异化的市场化水平进行解释。技术进步可以降低实际能源价格,在市场化水平较高的地区,生产者可以较为灵活的对生产决策进行调整,由于能源要素价格降低,生产者将使用更多的能源替代其它要素投入(Li et al., 2019)。考虑到中国以煤为主的能源消费结构,能源投入的增加将导致更多的碳排放,由于中东部地区相对西部地区具有更高的市场化水平,因此中东部地区的反弹效应值相对更大,而随着不同地区间市场化水平差距的缩小,反弹效应则呈现逐渐趋同的变化趋势。

(三) 碳减排的当前挑战

对于中国而言,当前二氧化碳减排的挑战来自各个方面。普遍认同的挑战包括以下两个方面:低碳转型是现阶段中国的必经之路,与其他发达国家实现低碳转型的不同,中国的低碳转型需要在实现节能减排的过程中,兼顾保障不断扩张的能源需求。因此国外低碳转型的成功经验无法在中国复制,中国需要寻找一条适合国情的低碳转型道路,实现二氧化碳减排达峰的需求,此为第一重挑战。能源体系的变化往往具有时滞性,以中国为例,现有的11.5亿火电装机对于煤炭仍然有30—50年的锁定期。在用电需求大幅增加时,火电仍然是最安全可靠的能源供给方式,因此在中国实现碳减排目标的过程中,需要权衡传统化石能源与可再生能源发展的关系,此为第二重挑战。具体到碳减排实现的手段和方法,本文从技术进步的角度进一步提出以下两点挑战:技术进步是目前中国二氧化碳减排的主要驱动力,但是由于技术进步对于碳排放作用的双重性,中国的技术减排存在反弹效应,技术进步的减排收益有一半以上被抵消(根据本文测算的结果),因此仅仅依靠技术进步进行减排,很难在2030年左右达到碳排放峰值,此即第三重挑战。与此同时,反弹效应还会因为经济环境和政策环境的变化产生较大的波动,从而影响碳减排的整体效果;而中国复杂的地理区位和经济发展状况,也使得不同区域间技术减排应对外部冲击的表现不同,从而给碳减排的持续性和稳定性造成影响,对中国碳减排的实现施加更大的压力,对政策制定者而言,提出了更高的要求,此即第四重挑战。

整体来看,中国经济发展的现状、特殊的资源禀赋、反弹效应的存在以及外部环境的变化使得中国为实现碳减排目标面临着巨大的挑战,中国在解决能源与环境问题上不能单纯寄希望于技术进步,应当在大力推动技术发展的基础上充分考虑各区域的经济和技术发展阶段性特征,配合行政手段,分区域、有步骤全面推进。

五、结论和政策建议

主要结论包括:第一,在不考虑反弹效应的前提下,技术进步是现阶段二氧化碳减排的主要驱动因素,而效率改进和能源结构调整因素的影响并不确定,技术进步带来的理论减排率为5.66%。第二,分区域看,技术进步带来的二氧化碳的减排主要集中在东部地区;分产业讨论,则主要集中在第二产业。第三,2005—2015年期间,中国宏观层面二氧化碳减排的反弹效应平均为62%。虽然现阶段技术进步是碳减排的主要驱动力,但整体的减排效果被大幅削减(实际减排率约为2.1%)。第四,中国宏观层面技术减排的反弹效应受外部环境影响呈现出波动的特征;区域间技术水平的差异也使不同区域的反弹效应存在差异,这种差异呈现波动收敛的特征。

反弹效应的存在,说明在宏观经济层面单纯依靠技术进步来实现减排,很难在维持经济增长和实现二氧化碳减排两个方面实现平衡;反弹效应的波动性则证实了技术进步实现的二氧化碳减排(技术减排)对于外部环境的变动有较高的敏感性。基于上述结论,本文从技术减排的整体局限性

(即存在反弹效应)、波动性和区域异质性等方面提出了现阶段中国碳减排面临的具体挑战。基于这些挑战,本文进一步提出了针对性的政策建议。

现阶段,技术进步仍然是碳减排的主要驱动力,能源结构调整、效率提升及产业结构调整等因素对二氧化碳减排的积极作用尚未显现。这既说明了当前中国二氧化碳减排存在的问题,也指明了未来发展的方向:要实现二氧化碳的有效减排,除了要加强核心低碳技术的开发、掌握和规模化利用,也应当注重效率的提升以及能源结构的优化。受能源资源禀赋的制约,中国电力、钢铁、水泥等重点耗能行业仍然以高碳能源的供给为主。对比发达国家的能源消费结果已经逐步实现从化石能源向核电和可再生能源等低碳能源的转变,中国以煤为主的消费结构却在短时间内难以改变。因此,在考虑到技术减排存在反弹效应的前提下,中国更应该在效率提升和能源结构政策上做更多的政策引导,比如建立完善的碳交易市场(或者是碳税、资源税体系),以提高火力发电企业、高能耗企业的能源生产和使用效率;同时,利用碳交易市场或碳税、资源税的政府所得,支持新能源技术的研发投入,补贴新能源企业的发展,以促进能源结构调整等。推动碳交易市场的建立,还能进一步推动节能减排的市场化进程,在外界波动发生的时候,能够借助市场的力量,避免技术减排效果的大幅波动,助推碳减排的持续性发展。

区域发展的差异会导致技术减排的实现效果呈现差异。进一步结合地理区位和历史发展的原因,中国东西部之间存在明显的经济发展和技术水平差异,遵循贸易的基本规律,东部高耗能产业和高排放产业将逐步向西部转移(林伯强和邹楚沅,2014),东部的能源改革和减排措施会加速这一过程。考虑到产业转移有利于中西部经济发展,也有利于东部地区经济结构调整,因此中国应该在支持产业战略转移以平衡经济的基础上,充分考虑各区域的技术水平发展特征,有针对性地支持东部地区低碳基础技术研发和中西部地区的低碳应用技术研发,保护知识产权的同时提高技术向产业和区域间渗透的能力,加强东部科研的溢出效应,为西部减排提供知识储备与提升空间,最终达到全国减排的目的。

党的十八大召开以来,习近平总书记不断加强生态文明建设,实现绿色高质量发展的建设目标。作为生态文明建设和绿色经济增长的重要一环,在工业化和城市化的进程中成功应对气候变化的影响,实现碳减排的目标,是当前时间节点上必须应对的重大挑战。为了实现这一目标,在今后对二氧化碳减排的推动过程中,应当充分考虑技术进步带来的双重性,结合政策引导和行政措施全面实现技术进步、效率提升与能源结构调整的有效减排。同时应当意识到,在低碳全球化的大背景下,全面推进低碳经济转型是顺应世界经济发展潮流和历史发展趋势的,不仅能为中国经济带来新的增长动力,也能在未来“碳秩序”的竞争中抢得先机,争得更多的话语权。

参考文献

- 查冬兰、周德群、孙元 2013 《为什么能源效率与碳排放同步增长——基于回弹效应的解释》,《系统工程》第10期。
- 杜刚、孙作人、苗建军 2012 《基于文献计量的碳排放强度研究前沿理论综述》,《经济学动态》第4期。
- 国涓、凌煜、郭崇慧 2010 《中国工业部门能源消费反弹效应的估算——基于技术进步视角的实证研究》,《资源科学》第10期。
- 何建坤 2015 《推动能源革命实现国家自主决定贡献目标》,《光明日报》7月2日。
- 李凯杰 2017 《技术进步、经济增长和碳排放》,中国经济出版社。
- 林伯强、杜克锐 2013 《我国能源生产率增长的动力何在——基于距离函数的分解》,《金融研究》第9期。
- 林伯强、杜克锐 2014 《理解中国能源强度的变化:一个综合的分解框架》,《世界经济》第4期。
- 林伯强、邹楚沅 2014 《发展阶段变迁与中国环境政策选择》,《中国社会科学》第5期。
- 林伯强、李江龙 2015 《环境治理约束下的中国能源结构转变——基于煤炭和二氧化碳峰值的分析》,《中国社会科学》第9期。
- 莫建雷、段宏波、范英、汪寿阳 2019 《〈巴黎协定〉中我国能源和气候政策目标:综合评估和政策选择》,《经济研究》第3期。
- 孙广生、黄祎、田海峰 2012 《全要素生产率、投入替代与地区间的能源效率》,《经济研究》第9期。

- 王锋等 2013 《中国经济增长中碳强度下降的省区贡献分解》,《经济研究》第 8 期。
- 王群伟、周德群 2008 《能源回弹效应测算的改进模型及其实证研究》,《管理学报》第 5 期。
- 魏楚、杜立民、沈满洪 2010 《中国能否实现节能减排目标: 基于 DEA 方法的评价与模拟》,《世界经济》第 3 期。
- 魏巍贤、杨芳 2010 《技术进步对中国二氧化碳排放的影响》,《统计研究》第 7 期。
- 徐现祥等 2007 《中国省区三次产业资本存量估计》,《统计研究》第 5 期。
- 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。
- 周勇、林源源 2007 《技术进步对能源消费回报效应的估算》,《经济学家》第 2 期。
- 宗振利、廖直东 2014 《中国省际三次产业资本存量再估算: 1978—2011》,《贵州财经大学学报》第 3 期。
- Ang, J. B. , 2005, “CO₂ Emissions, Research and Technology Transfer in China”, *Ecological Economics* , 68 (10) , 2658—2665.
- Brännlund, R. , T. Ghalwash, and J. Nordström, 2007, “Increased Energy Efficiency and the Rebound Effect: Effects on Consumption and Emissions”, *Energy Economics* , 29(1) , 1—17.
- Brookes, L. 2004, “Energy Efficiency Fallacies—A Postscript”, *Energy Policy* , 32(8) , 945—947.
- Elzen, M. , H. Fekete, N. Höhne, A. Admiraal, N. Forsell, A. F. Hof, J. G. J. Olivier, M. Roelfsema, and H. Van Soest, 2016, “Greenhouse Gas Emissions from Current and Enhanced Policies of China Until 2030: Can Emissions Peak before 2030?”, *Energy Policy* , 89 , 224—236.
- Greening, L. A. , D. L. Greene, and C. Difioglio, 2000, “Energy Efficiency and Consumption—The Rebound Effect—A Survey”, *Energy Policy* , 28(6) , 389—401.
- Jeroen, C. J. M. van den Bergh. , 2011, “Energy Conservation More Effective with Rebound Policy”, *Environmental & Resource Economics* , 48(1) , 43—58.
- Li, J. , H. Liu, and K. Du, 2019, “Does Market-oriented Reform Increase Energy Rebound Effect? Evidence from China’s Regional Development”, *China Economic Review* , 56 , 101304.
- Li, K. , and Z. Jiang, 2016, “The Impacts of Removing Energy Subsidies on Economy-wide Rebound Effects in China: An Input-output Analysis”, *Energy Policy* , 98 , 62—72.
- Li, K. , and B. Lin, 2015, “Heterogeneity in Rebound Effects: Estimated Results and Impact of China’s Fossil-fuel Subsidies”. *Applied Energy* , 149 , 148—160.
- Lin, B. , and K. Du, 2015, “Measuring Energy Rebound Effect in the Chinese Economy: An Economic Accounting Approach”, *Energy Economics* , 50 , 96—104.
- Lin, B. , and X. Liu, 2012, “Dilemma between Economic Development and Energy Conservation: Energy Rebound Effect in China”, *Energy* , 45(1) , 867—873.
- Liu, Z. , Y. Geng, S. Linder, and D. Guan, 2012, “Uncovering China’s Greenhouse Gas Emission From Regional and Sectoral Perspectives”, *Energy* , 45(1) , 1059—1068.
- Mizobuchi, K. , 2008, “An Empirical Study on the Rebound Effect Considering Capital Costs”, *Energy Economics* , 30 (5) , 2486—2516.
- Okushima, S. and M. Tamura, 2010, “What Causes the Change in Energy Demand in the Economy? The Role of Technological Change”, *Energy Economics* , 32 , S41—S46.
- Sorrell, S. , 2007, “Evidence from Energy, Productivity and Economic Growth Studies. In: Sorrell, S. (Ed.) , The Rebound Effect: An Assessment of the Evidence for Economy-wide Energy Savings from Improved Energy Efficiency”. Working Paper, Technical Report, vol. 5. UK Energy Research Centre.
- Sorrell, S. and J. Dimitropoulos, 2008, “The Rebound Effect: Microeconomic Definitions, Limitations and Extensions”, *Ecological Economics* , 65(3) , 636—649.
- Tan, Z. , L. Li, and J. Wang, 2011, “Examining the Driving Forces for Improving China’s CO₂ Emission Intensity Using the Decomposing Method”, *Applied Energy* , 88(12) , 4496—4504.
- Wang, H. , P. Zhou, and D. Q. Zhou, 2011, “An Empirical Study of Direct Rebound Effect for Passenger Transport in Urban China”, *Energy Economics* , 34 , 452—460.
- Wu, Y. , 2009, “China’s Capital Stock Series by Region and Sector.” , Discussion Paper, University of Western Australia.
- Yang, L. and Z. Li, 2017, “Technology Advance and the Carbon Dioxide Emission in China: Empirical Research Based on the Rebound Effect”, *Energy Policy* , 101 , 150—161.
- Zhang, Y. , H. Peng, and B. Su, 2017, “Energy Rebound Effect in China’s Industry: An Aggregate and Disaggregate Analysis”, *Energy Economics* , 61 , 199—208.

Influencing Factors and Current Challenges of CO₂ Emission Reduction in China: A Perspective Based on Technological Progress

YANG Lisha^a, ZHU Junpeng^b and JIA Zhijie^b

(a: Academy of Economic Development and Reform, Huaqiao University;

b: School of Management, China Institute for Studies in Energy Policy,

Collaborative Innovation Center for Energy Economics and Energy Policy, Xiamen University)

Summary: On June 30, 2015, China promoted its Intended Nationally Determined Contributions (INDC), which reiterated the independent goal of achieving peak CO₂ emissions by 2030 and increasing the proportion of non-fossil energy in primary energy consumption to 20%. This is a great challenge for China in the processes of industrialization and urbanization, as China's overall situation with regard to reducing emissions is still very serious. Thus, this paper attempts to answer the following questions. 1. What are the main factors influencing the reduction of CO₂ emissions in China and how do they work? 2. What is the real reduction in CO₂ emissions induced by technological progress in China, given the existence of the rebound effect?

Previous studies mainly adopt index decomposition analysis (IDA) and production theory decomposition analysis (PDA; Wang, 2007) to explore the factors affecting CO₂ emissions. As these methods have shortcomings, this paper innovatively introduces a comprehensive framework based on the two methods proposed by Lin & Du (2014) to explain the change in CO₂ emission intensity. As a result, the decomposition of CO₂ emission changes is extended to five dimensions: the energy structure effect, the factor substitution effect, the efficiency change effect, the technological progress effect, and the economic structure effect.

The findings of the decomposition confirm the key role of technological progress in the process of CO₂ emission reduction. At the same time, technological progress has a direct and indirect rebound effect on CO₂ emissions by affecting the price of effective energy services and promoting economic growth, resulting in increased energy consumption or increased demand. Considering the existence of the rebound effect, which can make the emission reduction effect driven by technological progress uncertain, this paper also constructs a consistent theoretical framework for the rebound effect of CO₂ emissions at the macro level in China. Compared with previous studies, the framework improves the accuracy of the measurement of technological progress, resolves the inconsistency of the connotation of technological progress, and can thus calculate the specific value of the rebound effect of CO₂ emissions at the macro level in China.

The main conclusions are drawn from data from 3 industries in 30 provinces in mainland China from 2005 to 2015. (1) Between 2005 and 2015, the reduction of CO₂ emissions mainly relied on technological progress, whose reduction rate was 5.66%. (2) The average rebound effect of China's CO₂ emission reduction at the macro level was 62% during the study period, and the actual reduction rate was about 2.1%. (3) There were clear regional differences in the rebound effect of China's CO₂ emissions, but these differences are gradually converging. (4) The reduction effect of technological progress was greatly affected by fluctuations in the macroeconomic environment and policy guidance.

This paper offers the following recommendations to better achieve the emission reduction targets. (1) China's emission reduction mainly depends on technological progress, and the effect of energy structure adjustment and efficiency improvement on CO₂ emission reduction is not significant. Therefore, this paper suggests that low-carbon policies, such as the carbon trading market, can be used to improve the overall efficiency of the energy market. Then, the income from these policies can be used to subsidize the development of new energy and accelerate the adjustment of the energy structure. (2) The gradual transfer of high-energy consumption and emission-intensive industries from eastern China to western China has worsened the emission reduction situation in western China. Therefore, China should support research and development (R&D) on basic technologies in eastern China and R&D on applied technologies in central and western China to improve the spillover effect of low-carbon technology.

Keywords: Decomposition Analysis; Technological Progress; CO₂ Emissions; Rebound Effect

JEL Classification: Q50, Q54, Q55

(责任编辑: 陈 辉)(校对: 南 山)