

有偏技术进步对碳强度的影响及传导机制研究

钱娟, 嵇锐冰

(新疆大学 经济与管理学院, 乌鲁木齐 830046)

摘要: 通过构建包含资本、劳动和碳要素的超越对数函数模型,对中国30个省(市)(因数据缺失,不包含西藏和港澳台地区)技术进步偏向进行判别,通过构建多重中介效应模型,探究其影响碳强度的传导机制,并分析不同资源丰裕度下传导机制的异质性。主要结论:①碳要素偏向型技术进步和碳强度呈显著正相关,技术进步偏向碳节约型有助于推动碳减排;②碳要素偏向型技术进步可通过能源利用效率和经济发展水平中介效应间接影响碳强度;③资源型省(市)主要通过提高经济发展水平路径,而非资源型省(市)主要通过提高能源利用效率路径促进碳要素偏向型技术进步的减排效应;④碳要素偏向型技术进步的减排效应存在显著双门槛效应,能源利用效率越大、经济发展水平越高,碳要素偏向型技术进步对碳强度的影响越大。因此,需加大技术进步偏向碳要素节约的诱导力度,注意不同资源丰裕度下碳减排的不同路径,加强能源利用效率提高,推动经济绿色发展,助力“双碳”目标实现。

关键词: 偏向型技术进步; 碳强度; 多重中介效应; 门槛效应

中图分类号: F120 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002—980X(2022)6—0011—10

一、引言

改革开放以来,我国经济社会高速发展,已跃居成为世界第二大经济体和第一大工业国,但也面临着资源约束、环境恶化压力不断加剧等问题,2020年我国GDP占世界比重约为17.4%,碳排放占世界比重已达到30.7%,碳排放量与能源消耗量均已居世界第一位,但能源利用效率远低于世界发达国家。中央财经委员会第九次会议提出:“要推动绿色低碳技术实现重大突破,抓紧部署低碳前沿技术研究,加快推广应用减污降碳技术”。因此,在国家能源“双控”与“双碳”目标下,探究中国各省(市)技术进步偏向性对碳减排强度的影响及作用机制,推动我国经济发展方式绿色转型具有重要的研究理论意义和实践价值。

目前,国内外学者关于偏向型技术进步对碳排放影响的研究主要包括:一是对偏向型技术进步的研究。Edwin(2008)运用双层嵌套固定替代弹性函数将资本、劳动、能源三要素纳入,发现技术进步偏向于使用能源要素。Hassler et al(2015)使用美国的工业部门数据进行考察,发现美国工业的技术进步方向始终是节约能源要素。何小钢和王自力(2015)测算了中国33个行业的能源偏向型技术进步,发现行业技术进步总体上偏向于能源消耗,高能耗特征明显。杨传明(2020)发现从旧常态到新常态时期,中国产业技术进步碳资源要素偏向度不断波动,进入新常态后逐步呈现出节约碳资源的特征。王晶晶等(2021)发现,中国技术进步总体上呈现资本偏向,偏向程度增速由快转慢,部分地区已出现劳动偏向。二是偏向型技术进步的碳减排效应研究。Carlo和Enrica(2013)从知识、贸易和人力资本三个方面探讨了技术进步的来源,发现不同的驱动力对技术进步的方向会产生不同影响,并非所有的技术进步驱动力都能产生节能减排的效果。郭沛和冯利华(2019)研究发现,能源增强型技术进步导致的资本偏向是碳强度下降的主要原因,通过提高资本能源间替代弹性、升级产业结构可以实现碳强度下降。刘自敏和申颢(2020)发现有偏技术进步存在显著的减排效应,碳排放权交易价格对有偏技术进步的减排作用存在显著的调节效应。王辉等(2020)发现在环境信息披露约束条件下,技术进步对污染物排放存在选择性偏向。刘备和董直庆(2020)研究发现中国技术进步能源偏向性日趋明显并表现出碳排放锁定效应。已有文献在考虑技术进步的要害偏向性时,主要聚集于劳动力、资本、能源等生产要素,未考虑碳要素的偏向性,同时尽管已有文献从不同角度揭示了偏向型技术进步对碳排放的影响,但鲜有文献对碳要素偏向型技术进步促进碳减排的作用机制进行深入探讨。

本文通过构建包含资本、劳动和碳要素的超越对数函数模型,对中国30个省(市)(因数据缺失,不包含

收稿日期:2022-02-10

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金“能源节约偏向型技术进步、节能减排与新疆工业绿色转型升级”(2019D01C032);中国博士后科学基金“统一碳交易市场促进我国工业绿色低碳转型的机理与路径研究”(2021M702603)

作者简介:(通讯作者)钱娟,博士,新疆大学经济与管理学院副教授,研究方向:资源与环境经济学、技术创新;嵇锐冰,新疆大学经济与管理学院硕士研究生,研究方向:环境经济学、技术创新。

西藏和港澳台地区)技术进步偏向性进行判别,进一步考察碳要素偏向型技术进步对碳强度的影响及作用机制,通过构建多重中介效应模型,实证检验能源利用效率和经济发展水平对碳要素偏向型技术进步(DC)影响碳强度的传导机制,并分析不同资源丰裕度下DC对碳强度的不同作用机制。本文的主要贡献在于:①将碳资源作为要素纳入到随机前沿生产函数中测算碳要素偏向型技术进步;②利用中国省级面板数据,通过建立多重中介效应模型,既验证变量间可能存在的中介传导机制,同时辅以中介变量与自变量间调节效应和门槛效应的检验;③根据资源丰裕度的不同,将30个省(市)分为资源型省(市)和非资源型省(市),分别验证碳要素偏向型技术进步对碳强度的影响机制及其差异性。

二、理论分析和研究假设

(一)技术进步偏向性与碳强度

有偏技术进步的减排效应可通过边际生产率提高与边际替代率变化效应实现(刘自敏和申颖,2020)。一方面,地区部分行业存在“碳锁定效应”,偏向型技术进步可以通过提高碳要素的边际生产率,使单位碳投入所带来的产出增加,进一步抵消相应成本,且已有学者证明有偏技术进步存在溢出效应(王林辉等,2019),当该技术扩散到其他行业,地区碳资源使用量就可能逐渐减少,而此时地区的总产出随着碳要素边际生产率的提高而增加,进而推动地区碳强度的降低,这种通过提高边际产出率促使碳强度下降的效应即为边际生产率提高效应;另一方面,偏向型技术进步可以改变碳要素和其他生产要素的投入比,进而使要素间的边际替代率发生改变,由此降低碳要素的使用量和增加总产出,如厂商会在碳要素的成本增加时,选择相对便宜的要素进行替代,从而导致碳要素与其他要素的边际替代率发生改变,即边际替代率变化效应。上述两种效应均可降低碳强度。

基于此,提出假说1:

当技术进步偏向碳要素节约型时,其对碳强度产生显著的减排效应。

(二)碳要素偏向型技术进步、能源利用效率与碳强度

Acemoglu(2012)提出清洁技术与污染技术的差异将导致技术进步出现偏向,进而通过差异性的环境影响结果。周喜君和郭淑芬(2018)也提出中国碳减排显著偏向能源生产技术,提高能源利用效率的技术减排效应明显低于能源生产技术。可见有偏技术进步作为影响能源利用效率的重要因素,对于提高能源利用效率,降低碳强度起着关键作用。首先,碳要素偏向型技术进步能够促进煤、石油等传统能源的升级改造,实现绿色开发,达到清洁化利用水平,提高能源利用率。其次,碳要素偏向型技术进步可以促进新能源的开发,提高每单位能耗的有效利用比例,从而降低单位GDP的碳排放。

基于此,提出假设2:

碳要素偏向型技术进步可通过提高能源利用效率降低碳强度。

(三)碳要素偏向型技术进步、经济发展与碳强度

碳要素偏向型技术进步对于经济发展的影响表现在:第一,随着资源的稀缺,要素价格不断上升,碳要素偏向型技术进步带来了要素生产率的提高,在既定的要素投入不变时,碳要素偏向型技术进步可以增加要素产出,提高企业利润率,并使得企业扩大生产规模实现规模经济,进而促进经济增长。第二,碳要素偏向型技术进步可以逐步改变碳要素与资本、劳动之间的边际替代率,即在要素投入比不变的情况下,提高碳要素的边际产出,使企业生产方式节能化,降低由于要素价格上涨造成的企业生产经营成本,将更多资金投入生产研发,提高综合竞争力,实现规模经济。根据环境库兹涅茨曲线,经济增长与碳排放存在倒U型曲线关系,崔鑫生等(2019)发现包括我国在内的低发展度国家环境库兹涅茨曲线(EKC)在1991—2015年均呈现为倒“U”型,我国已经达到了环境库兹涅茨拐点,所以碳强度随着经济的增长而逐渐降低。

基于此,提出假设3:

碳要素偏向型技术进步可通过提高经济发展水平降低碳强度。

三、模型构建与变量选取

(一)模型构建

1. 随机前沿模型

本文将劳动、资本、碳资源三种要素纳入到超越对数随机前沿生产函数模型,具体形式为

$$\begin{aligned} \ln y = & \alpha_0 + \alpha_1 t + 1/2\alpha_2 t^2 + \alpha_3 \ln L + \alpha_4 \ln K + \alpha_5 \ln C + \alpha_6 t \ln L + \alpha_7 t \ln K + \\ & \alpha_8 t \ln C + 1/2\alpha_9 \ln L \ln K + 1/2\alpha_{10} \ln L \ln C + 1/2\alpha_{11} \ln K \ln C + \\ & 1/2\alpha_{12} (\ln L)^2 + 1/2\alpha_{13} (\ln K)^2 + 1/2\alpha_{14} (\ln C)^2 + v_{it} - \mu_{it} \end{aligned} \quad (1)$$

其中: i 为省(市); t 为年份; y 为各省(市)的产出; K 、 L 、 C 分别为资本投入、劳动投入、碳资源投入(以各省碳排放作为替代指标); $v \sim N(0, \sigma_v^2)$,为随机误差项; μ 为技术无效率。

要素技术进步边际产出比率可表达技术进步偏向的程度(Baron and Kenny, 1986),本研究测算碳要素偏向型技术进步指数的计算公式为

$$DC = \frac{\alpha_8}{\varepsilon_c} \quad (2)$$

其中: DC 为碳要素偏向型技术进步指数; α_8 为式(1)中 $t \ln C$ 的系数; ε_c 为碳要素的产出弹性,其计算公式为

$$\varepsilon_c = \alpha_5 + \alpha_8 t + 1/2\alpha_{10} \ln L + 1/2\alpha_{11} \ln K + \alpha_{14} \ln C \quad (3)$$

$DC > 0$ 时,技术进步偏向碳要素使用型, $DC < 0$ 时,技术进步偏向碳要素节约型,且 DC 值越小,技术进步的碳要素节约偏向程度越高。

2. 中介效应模型

本文借鉴Baron和Kenny(1986)、温忠麟等(2004)的做法,采用层次多元回归法进行中介效应分析。

$$Y = cX + e_1 \quad (4)$$

$$M = aX + e_2 \quad (5)$$

$$Y = c'X + bM + e_3 \quad (6)$$

首先检验自变量 X 对因变量 Y 估计系数 c 的显著性;在 c 显著的前提下,检验自变量 X 对中介变量 M 估计系数 a 的显著性及中介变量 M 对因变量 Y 估计系数 b 的显著性,若两者都显著则存在中介效应,且中介效应为系数 a 、 b 的乘积;最后检验 c' 的显著性,若显著则存在部分中介效应,若不显著则存在完全中介效应。

(1)碳要素偏向型技术进步对碳强度的直接效应。为检验碳要素偏向型技术进步对碳强度的直接影响,构建如下基准回归模型:

$$CI_{it} = a_0 + a_1 DC_{it} + a_2 X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (7)$$

其中: CI 为碳强度; X 为控制变量集合; ε 为随机扰动项。

(2)碳要素偏向型技术进步影响碳强度的机制检验。借鉴屈小娥和骆海燕(2021)的研究成果,建立包含多个中介变量的实证模型,以检验能源利用效率、经济发展对碳强度的中介效应存在与否及其对碳强度的具体影响。因此,构建如下多重中介效应模型:

$$EE_{it}(AGDP_{it}) = b_0 + b_1 DC_{it} + b_2 X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (8)$$

$$CI_{it} = c_0 + c_1 DC_{it} + c_2 EE_{it}(AGDP_{it}) + c_3 X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (9)$$

式(7)~式(9)中: a_0 为核心解释变量 DC 对碳强度的总效应; EE 和 $AGDP$ 分别为中介变量能源利用效率和经济发展水平; b_1 为 DC 对能源利用效率(经济发展水平)的影响系数; c_1 为 DC 对碳强度的直接效应。

3. 调节效应模型

$$CI_{it} = d_0 + d_1 DC_{it} \times EE_{it} + d_2 DC_{it} \times AGDP_{it} + d_3 X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (10)$$

其中: d_1 、 d_2 为 DC 与两个中介变量的交互项(调节效应)的回归估计系数。

4. 门槛效应模型

为了深入研究碳要素偏向型技术进步对碳强度的影响是否会随着能源利用效率和经济发展水平的不同而有所差异,参考学习Hansen(1999)提出的面板门槛模型,从时间序列和截面个体两个维度来确定门槛值,模型设定为

$$\begin{aligned} CI_{i,t} = & \beta_0 + \beta_1 DC_{i,t} (thr \leq \gamma_1) + \beta_2 DC_{i,t} (\gamma_1 \leq thr \leq \gamma_2) + \dots + \\ & \beta_n DC_{i,t} (thr \geq \gamma_n) + \sum \theta X_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \end{aligned} \quad (11)$$

其中: $CI_{i,t}$ 和 $DC_{i,t}$ 分别为被解释变量和解释变量;括号内为示性函数,满足条件取1,不满足取0; thr 为门槛变量,包括能源利用效率 EE 和经济发展水平 $AGDP$; $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ 为要测算的门槛值; $X_{i,t}$ 为其他影响碳强度的控制变量。

(二) 变量选取

本研究样本为 2005—2018 年中国 30 个省(市)面板数据, 西藏自治区及港澳台地区由于数据缺失未包含在内。数据主要来自《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》和 wind 数据库等。

(1) 产出(Y): 以 2005—2018 年 30 个省(市)的 GDP 来衡量, 并折算成 2000 年不变价格。

(2) 资本(K): 用永续盘存法对各省(市)的资本存量进行估计, 具体方法为

$$K_{i,t} = I_{i,t} + (1 - \delta_{i,t})K_{i,t-1} \quad (12)$$

其中: $K_{i,t}$ 为各省(市)在第 t 期的资本存量; $K_{i,t-1}$ 为其前一期资本存量,并以 2000 年固定资产净值作为基年资本存量; $I_{i,t}$ 为第 t 期的固定资本形成总额; $\delta_{i,t}$ 为固定资产折旧率,借鉴张军等(2004)的测算结果,取值为 9.6%。

(3) 劳动(L): 选取年末城镇人口就业人员数。

(4) 碳资源(C): 参考杨传明(2020)的研究成果,采用碳排放量进行衡量,数据来自 wind 数据库。

(5) 碳强度(CI): 用碳排放总量与 GDP 比值衡量。

(6) 能源利用效率(EE): 借鉴 Lyubich et al(2018),以能源生产率(GDP/能源消耗量)来衡量。

(7) 经济发展水平($AGDP$): 以人均 GDP 来衡量。

(8) 人口(P): 用各省(市)人口/全国人口表示。

(9) 产业结构(IS): 用第二产业/国内生产总值衡量。

(10) 能源结构(ECS): 用煤炭/能源消耗总量衡量。

(11) 投资(FI): 用固定资产投资/GDP 表示。

四、碳要素偏向型技术进步的测算与特征分析

(一) 模型识别和检验

利用数据对式(1)参数进行估计检验结果可知(表 1), γ 值为 0.962 且在 1% 水平下显著,证明采用随机前沿生产函数模型是有效的;同时对随机前沿的适用函数和是否存在偏向型技术进步进行检验,结果发现采用超越对数函数的随机前沿模型是适合的^①。估计结果中大部分参数均是显著的,总方差数值为 0.040,显示技术无效率和误差项波动幅度较小。因此,模型具有良好的估计结果。

(二) 中国要素偏向型技术进步测算

根据式(1)~式(3)对中国要素偏向型技术进步指数进行测算(图 1),2005—2018 年中国 DC 均为负且整体呈现下降趋势,说明中国技术进步偏向于碳要素节约型,且随着时间推移,偏向碳要素节约型的程度逐渐增强。说明我国 2009 年哥本哈根世界气候会议后制定的一系列约束碳减排政策及能耗总量和强度“双控”政策得到有效实施,导致碳强度的降低,诱发技术进步逐步偏向碳要素节约型。技术进步逐渐偏向碳要素节约型也与碳要素产出弹性的降低有关,中国的碳要素产出弹性由 2005 年的 0.94 下降为 2018 年的 0.78,降低了 17.02%,由于单位碳要素投入所带来的产出较小,因而技术进步更偏向于使用产出弹性较大的要素,从而节约碳资源。

表 1 超越对数随机前沿生产函数估计结果

参数	系数	T	参数	系数	T
α_0	11.613***	10.963	α_9	-0.186*	-1.849
α_1	0.288***	10.739	α_{10}	-0.009	-0.150
α_2	-0.001	-1.537	α_{11}	0.446***	4.485
α_3	1.954***	7.703	α_{12}	-0.129**	-2.183
α_4	-2.091***	7.927	α_{13}	0.075**	2.109
α_5	-0.516**	2.421	α_{14}	-0.117**	-2.195
α_6	0.011**	2.183	σ^2	0.040***	11.516
α_7	0.006	1.339	γ	0.962***	156.93
α_8	-0.036***	-7.217	μ	0.391***	8.230
log likelihood function			637.141		
LR 检验值			773.271		

注:***、**和*分别表示 1%、5% 和 10% 的显著性水平。

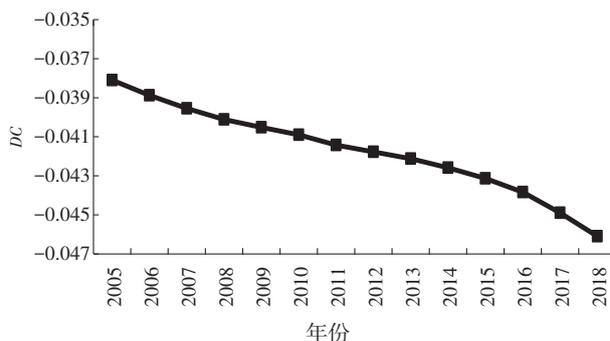


图 1 2005—2018 年中国整体碳要素偏向型技术进步指数变动趋势

① 由于篇幅原因检验结果未在文中标明,如有需要可向作者索取。

(三)不同资源丰裕度下偏向型技术进步特征

考虑到技术进步偏向性可能因资源丰裕程度不同呈现异质性,参考阎晓等(2020)分类标准,将中国30个省(市)分为资源型省(市)和非资源型省(市)^②分析偏向型技术进步的区域特征(表2),两区域技术进步指数均为负表现出明显要素偏向性,技术进步呈现碳要素节约型偏向。从时间趋势来看,2005—2018年两区域的 DC 呈下降趋势,其中非资源型省(市)下降21.5%,资源型省(市)下降19.6%,说明技术进步偏向碳要素节约型的程度逐渐加深,与2006年中国开始加大节能减排力度,制定了一系列减排政策有关,各省(市)加快绿色技术研发与推广,促进了技术进步偏向碳要素节约型。

综上可知,2005—2018年中国碳要素偏向型技术进步指数均为负且整体呈现下降趋势,我国技术进步偏向于碳要素节约型,资源型省(市)与非资源型省(市)均呈现碳要素节约型技术进步,且随着时间推移,偏向程度逐渐加深。

五、碳要素偏向型技术进步对碳强度的作用机制

(一)基准回归

为探究碳要素偏向型技术进步对碳强度的影响,根据式(7)进行基准回归(表3),(1)列不加入任何控制变量、固定效应,结果显示碳要素偏向型技术进步对碳强度有显著的正向作用;(2)列、(3)列则分别加入了一系列控制变量的固定效应模型、随机效应模型,Hausman检验的 P 值为0.0000,表明选取固定效应对模型进行回归是合理的。实证结果表明:碳要素偏向型技术进步每降低1个单位,碳强度降低1.858个单位,且在1%的水平上通过显著性检验,即碳要素偏向型技术进步与碳强度呈现显著的正相关关系,说明技术进步越偏向碳节约型,单位GDP所产生的碳排放就越少。碳要素偏向型技术进步可通过提高碳要素生产率,降低碳资源的使用量,从而降低碳强度,假说1成立。

从控制变量来看,人口(P)的估计系数在1%水平上显著为正,说明人口规模的扩大不利于碳减排,较多人口易产生更多的能源消费需求,以及人的生产生活活动会打破周围生态环境的承载能力,如造成水资源短缺、森林资源破坏,土地利用方式的改变,导致碳强度的增加;产业结构(IS)的估计系数为负但不显著,说明当前产业结构调整减排效应尚不明显,产业结构呈现被“锁定”特征;能源结构(ECS)的估计系数显著为正,说明降低能源结构中的煤炭消耗调整有利于降低碳强度;投资水平(FI)的估计系数显著为负,说明固定资产投资规模的扩大有利于降低碳强度。

综上可知,技术进步偏向碳要素节约型的程度越深,越有利于降低碳强度,碳要素偏向型技术进步可通过提高碳要素生产率,降低碳资源的使用量,从而降低碳强度。

(二)中介效应检验

以上研究表明,碳要素偏向型技术进步与碳强度之间存在正向线性关系,但碳要素偏向型技术进步影响

表2 基于资源丰裕度分类的偏向型技术进步测算结果

年份	非资源型省(市)		资源型省(市)	
	ε_C	DC	ε_C	DC
2005	0.9943	-0.0362	0.8295	-0.0434
2006	0.9759	-0.0369	0.8093	-0.0445
2007	0.9603	-0.0375	0.7939	-0.0453
2008	0.9482	-0.0380	0.7790	-0.0462
2009	0.9390	-0.0383	0.7709	-0.0467
2010	0.9290	-0.0388	0.7662	-0.0470
2011	0.9177	-0.0392	0.7554	-0.0477
2012	0.9095	-0.0396	0.7503	-0.0480
2013	0.9000	-0.0400	0.7489	-0.0481
2014	0.8882	-0.0405	0.7456	-0.0483
2015	0.8748	-0.0412	0.7408	-0.0486
2016	0.8607	-0.0418	0.7293	-0.0494
2017	0.8407	-0.0428	0.7110	-0.0506
2018	0.8186	-0.0440	0.6931	-0.0519

表3 基准回归结果

变量	(1)	(2)	(3)
	OLS	FE	RE
DC	1.515*** (13.46)	1.858*** (14.83)	0.970*** (7.25)
P		0.843*** (3.30)	-0.473*** (-7.02)
IS		-0.003 (-0.54)	0.016** (2.30)
ECS		0.006*** (2.78)	0.014*** (6.67)
FI		-0.019*** (-7.61)	-0.016*** (-5.40)
Constant	0.087*** (16.65)	0.080*** (7.26)	0.069*** (8.19)
控制变量	否	是	是
观测值	420	420	420
R^2	0.460	0.552	0.447

注:括号内为 z 统计量;***、**和*分别表示1%、5%和10%的显著性水平。

^② 资源型省(市)包括山西、内蒙古、黑龙江、贵州、云南、陕西、青海、宁夏和新疆;非资源型省(市)包括北京、天津、河北、山东、福建、广东、海南、河南、湖北、湖南、江西、安徽、四川、重庆、广西、甘肃、辽宁、吉林。

碳强度的作用路径仍有待进一步挖掘,基于假设进一步探讨是否能通过提高能源利用效率和经济发展水平两条路径影响碳强度。从中介效应检验结果来看(表4),(2)列结果显示碳要素偏向型技术进步与能源利用效率呈显著负相关,说明DC越小,技术进步越偏向于碳节约型,能源利用效率越高;(3)列显示能源利用效率和碳强度显著负相关,即能源利用效率越高,碳强度越低。此外,(1)列和(3)列均显示碳要素偏向型技术进步与碳强度之间呈显著正相关,且(3)列DC估计系数的绝对值小于(1)列的,说明能源利用效率部分中介效应存在,即技术进步越偏向碳要素节约型,能源利用效率越高,碳强度越低。同时Sobel检验中的Z统计量为-2.905,小于5%显著性水平上的临界值-0.97,验证了碳要素偏向型技术进步可通过能源利用效率降低碳强度的传导机制,假设2成立。

从(1)列、(4)列和(5)列反映经济发展的中介效应检验结果来看,(4)列结果显示碳要素偏向型技术进步与经济发展显著负效应,说明DC越小,技术进步越偏向于碳节约型,经济发展水平越高;(5)列显示经济发展水平和碳强度显著负相关,即经济发展水平越高,碳强度越低。此外,(1)列和(5)列均显示碳要素偏向型技术进步与碳强度之间呈显著正相关,且(5)列DC估计系数的绝对值小于(1)列,说明经济发展水平部分中介效应存在,即技术进步越偏向碳要素节约型,经济发展水平越高,碳强度越低。同时Sobel检验中的z统计量为-4.876,小于5%显著性水平上的临界值-0.97,验证了碳要素偏向型技术进步通过提高经济发展水平降低碳强度的传导机制,假设3成立。

为确保上述结论的可靠性,参考Diamond(1965)做法计算碳要素、劳动边际产出增长率之差(DCL)作为DC的替代要素进行稳健性检验。从检验结果来看(表5),(1)列~(5)列均表明碳要素偏向型技术进步与碳强度呈显著正相关,DCL的降低对降低碳强度有促进作用;从间接影响来看,(1)列~(3)列表明DC的降低会提高能源利用效率,进而降低碳强度;(4)列、(5)列表明经济发展与碳强度呈负相关,经济发展水平提高会降低碳强度,碳要素偏向型技术进步可通过提高经济发展水平进而影响碳强度。本文还通过用碳排放替代碳强度、缩短时间年限等方式进行了稳健性检验,稳健性分析结果和上述一致^③。

综上可知,碳要素偏向型技术进步可通过提高能源利用效率和经济发展水平间接影响碳强度,技术进步越偏向碳要素节约型,越能通过提高能源利用效率和经济发展水平,降低碳强度。

(三)不同资源丰裕度下传导机制异质性分析

从不同资源丰裕度下能源利用效率的中介效应检验结果来看(表6),资源型省(市)和非资源型省(市)的碳要素偏向型技术进步均能通过能源利用效率对碳强度产生显著效应,但资源型省(市)的碳要素偏向型

表4 中介效应检验

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	CI	EE	CI	AGDP	CI
DC	1.858*** (14.83)	-1.250*** (-19.90)	0.680*** (4.32)	-0.461*** (-19.36)	0.618*** (4.08)
EE			-0.943*** (-10.51)		
AGDP					-2.693*** (-11.67)
P	0.843*** (3.30)	0.484*** (3.78)	1.299*** (5.67)	0.279*** (5.75)	1.593*** (6.97)
IS	-0.003 (-0.54)	-0.000 (-0.06)	-0.004 (-0.65)	-0.002 (-1.54)	-0.008 (-1.54)
ECS	0.006*** (2.78)	-0.013*** (-11.72)	-0.006*** (-2.69)	-0.003*** (-6.91)	-0.002 (-0.83)
FI	-0.019*** (-7.61)	0.000 (0.01)	-0.019*** (-8.62)	0.002*** (4.06)	-0.014*** (-6.30)
常数项	0.080*** (7.26)	-0.044*** (-7.90)	0.039*** (3.70)	-0.022*** (-10.65)	0.020* (1.85)
检测值	420	420	420	420	420
R ²	0.552	0.686	0.652	0.699	0.669
Sobel 检验	Z=-2.905 < -0.97, 中介效应显著		Z=-4.876 < -0.97, 中介效应显著		
	中介效应/总效应=63.42%		中介效应/总效应=66.76%		

注:***、**和*分别表示1%、5%和10%的显著性水平;括号内为t值。

表5 中介效应稳健性检验

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	CI	EE	CI	AGDP	CI
DCL	1.908*** (17.67)	-1.271*** (-24.66)	0.927*** (5.74)	-0.473*** (-24.35)	0.820*** (5.23)
EE			-0.772*** (-7.77)		
AGDP					-2.302*** (-8.91)
常数项	0.110*** (10.03)	-0.063*** (-12.04)	0.061*** (5.12)	-0.030*** (-15.08)	0.041*** (3.29)
控制变量	是	是	是	是	是
检测值	420	420	420	420	420
R ²	0.611	0.753	0.664	0.766	0.678

注:***、**和*分别表示1%、5%和10%的显著性水平;括号内为t值。

③ 由于篇幅原因未在文中展示,需要者可联系作者。

技术进步对碳强度的直接效应系数更大(1.247),非资源型省(市)的碳要素偏向型技术进步对碳强度的中介效应影响贡献更大(56.03%),表明在资源型省(市)通过碳要素节约型技术进步直接降低碳减排强度的方式更为有效,而在非资源省(市)通过提高能源利用效率的传导机制更为有效。这可能由于资源型省(市)长期依赖资源禀赋比较优势发展模式,产业结构被“锁定”下转型发展较滞后,对服务业和新兴产业发展产生挤出效应,促使资本更多地流向具有比较优势的资源型产业,产业结构日趋单一化,资源型省(市)发展模式形成“路径依赖”,对高投入、高排放的粗放式发展模式形成了较为严重的“锁定效应”,碳要素节约型技术进步则能通过改变要素之间的替代率,减少碳资源的消耗量,有效缓解“碳锁定效应”,从而降低碳强度;非资源型省(市)由于缺少资源,企业使用能源成本较高,基于利益最大化目标的约束,大多数企业注重对能源消费的节约或强化对能源利用技术的研发投入,通过开发新技术以提高能源利用效率,在相同产出的前提下投入较少能源,弥补其资源不足的缺点,从而达到节能减排目的,所以碳要素技术进步更优先于通过提高其能源利用效率的方式降低碳强度。

从不同资源丰裕度下经济发展的中介效应检验结果来看(表7),无论是资源型省(市)还是非资源型省(市),碳要素偏向型技术进步对经济发展水平、经济发展水平对碳强度的估计系数均在1%水平下显著,碳要素偏向型技术进步可通过提高经济发展水平降低碳强度,该条传导机制在不同资源丰裕度省(市)中均较为有效。其中资源型省(市)的经济发展水平表现出较强的中介效应,可能原因在于碳要素节约型技术进步可通过优化资源型省(市)生产要素的投入结构,推动经济发展模式从粗放型向集约型转变,提高要素配置效率,在一定程度上缓解“资源诅咒”问题(邵帅和杨莉莉,2011),从而降低碳强度。

综上所述,对于资源型省(市)与非资源型省(市),碳要素偏向型技术进步均可通过能源利用效率和经济发展水平两种传导机制影响碳强度,其中能源利用效率的传导效应在非资源型省(市)中较高,经济发展水平的传导效应在资源型省(市)中较高。

(四)调节效应检验

与中介效应不同,调节效应在于研究自变量和因变量原有的因果链关系在调节变量的影响下发生何种变动。根据温忠麟等(2004)的研究,有的变量既可作为中介变量,也可为调节变量,进一步分析在已具有中介效应的同时,能源利用效率和经济发展水平如何在碳要素偏向型技术进步对碳强度的影响中发挥调节作用。从调节检验结果来看(表8),(1)列、(2)列依次加入解释变量和中介变量的交乘项检验,由于

表6 资源丰裕度异质性地能源利用效率的中介效应检验

变量	资源型省(市)		非资源型省(市)	
	(1)	(2)	(3)	(4)
	EE	CI	EE	CI
DC	-0.296*** (-3.10)	1.247*** (3.77)	-1.212*** (-17.66)	0.642*** (5.22)
EE		-2.570*** (-8.18)		-0.675*** (-9.06)
P	-1.553*** (-5.51)	1.758* (1.66)	0.555*** (4.68)	0.629*** (4.18)
IS	-0.004 (-1.18)	-0.029** (-2.43)	0.006* (1.72)	-0.003 (-0.67)
ECS	0.001 (0.89)	0.002 (0.58)	-0.026*** (-13.62)	0.002 (0.78)
FI	0.005*** (3.59)	-0.008* (-1.83)	0.008*** (4.05)	-0.018*** (-7.00)
常数项	0.023*** (3.07)	0.093*** (3.64)	-0.041*** (-6.53)	0.037*** (4.58)
观测值	126	126	294	294
R ²	0.543	0.719	0.824	0.790
	中介效应/总效应=37.89%		中介效应/总效应=56.03%	

注:***、**和*分别表示1%、5%和10%的显著性水平;括号内为t值。

表7 不同资源丰裕度下经济发展的中介效应检验

变量	资源型省(市)		非资源型省(市)	
	(1)	(2)	(3)	(4)
	AGDP	CI	AGDP	CI
DC	-0.182*** (-4.44)	0.888*** (2.63)	-0.397*** (-15.47)	0.693*** (6.16)
AGDP		-6.159*** (-8.59)		-1.930*** (-9.92)
P	-0.340*** (-2.81)	3.655*** (3.84)	0.274*** (6.17)	0.783*** (5.18)
IS	0.001 (0.39)	-0.015 (-1.25)	-0.001 (-0.92)	-0.010** (-2.21)
ECS	0.002*** (4.56)	0.015*** (3.30)	-0.009*** (-12.27)	0.003 (1.06)
FI	0.004*** (7.20)	0.004 (0.86)	0.004*** (5.77)	-0.015*** (-5.83)
Constant	-0.005 (-1.56)	0.004 (0.18)	-0.017*** (-7.16)	0.033*** (4.04)
观测值	126	126	294	294
R ²	0.715	0.729	0.817	0.799
	中介效应/总效应=55.80%		中介效应/总效应=52.51%	

注:***、**和*分别表示1%、5%和10%的显著性水平;括号内为t值。

表8 调节效应检验结果

变量	(1)	(2)
	CI	CI
DC×EE	25.229***(18.44)	7.801**(2.40)
DC×AGDP		53.056***(5.87)
Constant	0.015*(1.71)	0.000(0.04)
控制变量	是	是
观测值	420	420
R ²	0.626	0.657

注:***、**和*分别表示1%、5%和10%的显著性水平;括号内为t值。

(2)列的拟合优度更高,分析以(2)列为主,DC与能源利用效率和经济发展水平的交叉项均显著为正,说明能源利用效率和经济发展水平均能调节碳要素偏向型技术进步对碳强度的影响效应,即在更高的能源利用效率和经济发展水平下,碳要素偏向型技术进步对碳强度的作用更强。

六、碳要素偏向型技术进步对碳强度的门槛效应检验

基于上述研究结果,为深入探究在不同的能源利用效率和经济发展水平调节下碳要素偏向型技术进步对碳强度的影响有何不同?分别将能源利用效率和经济发展水平作为门槛变量进行检验。

(一)门槛效应检验

从门槛效应检验结果来看(表 9),以能源利用效率和经济发展水平作为门槛变量,单、双门槛均通过了显著性检验,三门槛未通过,说明基于能源利用效率和经济发展水平碳要素偏向型技术进步的减排效应存在显著双门槛效应。

进一步估计两个门槛值及其对应的置信区间(表 10)可知,能源利用效率双重门槛的上下限分别为 0.0042 和 0.0079,经济发展水平的双重门槛的上下限分别为 0.0007 和 0.0021,且两个门槛均落在 95% 置信区间内。

表 9 门槛效应检验结果

门槛变量	模型	F	P	临界值		
				10%	5%	1%
能源利用效率	单一门槛	110.85	0.0000	47.8094	55.6926	77.7020
	双重门槛	144.18	0.0000	38.1951	44.4870	61.8328
	三重门槛	111.88	0.8867	368.2926	436.9897	539.2819
经济发展水平	单一门槛	88.23	0.0000	36.2845	45.0888	67.3222
	双重门槛	91.63	0.0000	32.7702	40.6469	58.5305
	三重门槛	73.12	0.7333	153.4687	172.7334	201.5390

表 10 门槛值估计和置信区间

门槛变量	第一个门槛值		第二个门槛值	
	估计值	95% 置信区间	估计值	95% 置信区间
能源利用效率	0.0042	[0.0037, 0.0046]	0.0079	[0.0077, 0.0081]
经济发展水平	0.0007	[0.0005, 0.0010]	0.0021	[0.0020, 0.0022]

(二)门槛模型回归结果

从双重门槛的回归结果看(表 11),在能源利用效率处于第 1 阶段时($EE < 0.0042$),碳要素偏向型技术进步对碳强度有显著的正向作用,其系数为 0.612,但是当经济发展水平处于第 1 阶段时($AGDP < 0.0007$),碳要素偏向型技术进步对碳强度的系数虽然为正但是并不显著,说明在较低经济发展水平下,碳要素偏向型技术进步对碳强度的影响并不明显,主要通过提高能源利用效率调节碳要素偏向型技术进步对碳强度的影响作用;当能源利用效率和经济发展水平处于第 2 阶段($0.0042 < EE < 0.0079, 0.0007 < AGDP < 0.0021$)时,能源利用效率和经济发展水平均能调节碳要素偏向型技术进步对碳强度的影响作用,且调节作用大于第 1 阶段,两门槛变量下的系数分别为 0.913 和 0.687;当能源利用效率和经济发展水平处于第 3 阶段时($EE > 0.0079, AGDP > 0.0021$),能源利用效率和经济发展水平调节碳要素偏向型技术进步对碳强度的影响作用更大,门槛变量下的系数高达 1.142 和 0.882。可见,在不同能源利用效率和经济发展水平下,碳要素偏向型技术进步对碳强度的影响作用存在差异性,能源利用效率和经济发展水平越高,调节碳要素偏向型技术进步对碳强度的影响作用越大。

综上所述,基于能源利用效率和经济发展水平的碳要素偏向型技术进步的减排效应存在显著双门槛效应,能源利用效率位于 1~3 阶段,经济发展水平高于第 2 阶段($AGDP > 0.0007$)时,能有效促进碳要素偏向型技术进步的减排效应,能源利用效率和经济发展水平越高,调节碳要素偏向型技术进步对碳强度的影响作用越大。

表 11 双重门槛回归结果

变量	(1)	(2)
	能源利用效率	经济发展水平
Stage1	0.612***(2.80)	0.056(0.24)
Stage2	0.913***(5.03)	0.687***(3.12)
Stage3	1.142***(6.71)	0.882***(4.25)
Constant	0.057***(3.50)	0.057***(2.82)
控制变量	是	是
观测值	420	420
R ²	0.738	0.715

注:***、**和*分别表示 1%、5% 和 10% 的显著性水平;括号内为 t 值。

七、结论与政策

(一)主要结论

本文考察碳要素偏向型技术进步对碳强度的影响及作用机制,通过构建多重中介效应模型,实证检验能源利用效率和经济发展水平对碳要素偏向型技术进步影响碳强度的传导机制及门槛效应。主要结论如下:

(1)2005—2018年中国碳要素偏向型技术进步指数均为负且整体呈现下降趋势,我国技术进步偏向于碳要素节约型,资源型省(市)与非资源型省(市)均呈现碳要素节约型技术进步,且随着时间推移,偏向程度逐渐加深。

(2)碳要素偏向型技术进步对碳强度之间呈现显著正相关关系,技术进步偏向碳要素节约型的程度越深,单位GDP所产生的碳排放越少,碳要素节约偏向型技术进步可有效促进碳减排。

(3)碳要素偏向型技术进步不仅直接对碳强度产生影响,还可通过提高能源利用效率和经济发展水平间接降低碳强度,技术进步越偏向碳要素节约型,越能通过提高能源利用效率和经济发展水平,降低碳强度。资源型省(市)的碳要素偏向型技术进步对碳强度的直接效应更大,非资源型省(市)的碳要素偏向型技术进步对碳强度的中介效应影响贡献更大,且能源利用效率的传导效应在非资源型省(市)中较高,经济发展水平的传导效应在资源型省(市)中较高。

(4)能源利用效率和经济发展水平均能调节碳要素偏向型技术进步对碳强度的影响,即在更高的能源利用效率和经济发展水平下,碳要素偏向型技术进步对碳强度的影响效应更强。

(5)基于能源利用效率和经济发展水平的碳要素偏向型技术进步的减排效应存在显著双门槛效应,能源利用效率位于1~3阶段经济发展水平高于第2阶段($AGDP > 0.0007$)时,能有效促进碳要素偏向型技术进步的减排效应,能源利用效率和经济发展水平越高,调节碳要素偏向型技术进步对碳强度的影响作用越大。

(二)政策建议

(1)加大对低碳技术的研发推广支持力度。碳要素节约型技术进步能有效促进碳减排,应加大政策支持力度,从完善科研平台、加大研发(技术)政策和引导等方面加大对低碳技术的供给,通过实施征收环保税、将税收中特定比例用于技术研发补贴、给予绿色创新企业税后优惠等方式提高企业对低碳节能技术的研发积极性,诱发技术进步向碳节约型转变。

(2)着力提高能源利用效率。碳要素偏向型技术进步除本身直接对碳强度影响外,还通过能源利用效率间接对碳强度产生影响。应加快能源供给侧结构性改革,调整和优化能源结构,开发可再生能源,逐步降低煤炭消费占能源消费比重,提高优质能源和替代能源的比例;加大工业行业的能效对标,提升工艺水平,加强对“两高”行业的节能改造力度等,提高能源利用效率。

(3)加快推进经济绿色转型发展。经济发展水平对碳要素偏向型技术进步影响碳强度也具有显著调节作用,应加快构建绿色、循环、低碳的现代产业体系,推动产业结构转型升级,加快技术创新,提升环境治理水平,推进节能降耗,通过加大绿色信贷支持力度,创新绿色金融产品和服务模式,推动经济绿色高质量发展。

(4)制定不同地区差异化碳减排目标和路径。对于资源型省(市)应加快推动“粗放型”经济发展模式向“高效、清洁、低碳”模式转变,重点通过加快推进经济发展水平提高,推动低碳、清洁技术研发推广应用,加快调整和优化能源结构,促进技术进步低碳偏向进而带动碳减排。对于非资源型省(市)应结合区域产业特征和要素禀赋,大力推进能源科技发展,发展高新技术产业,加快调整和优化产业结构,更多通过提高能源利用效率促进碳减排。

参考文献

- [1] 崔鑫生,韩萌,方志,2019.动态演进的倒“U”型环境库兹涅茨曲线[J].中国人口·资源与环境,29(9):74-82.
- [2] 郭沛,冯利华,2019.有偏技术进步、要素替代和碳排放强度——基于要素增强型CES生产函数的门限回归[J].经济问题,(7):95-103.
- [3] 何小钢,王自力,2015.能源偏向型技术进步与绿色增长转型——基于中国33个行业的实证考察[J].中国工业经济,(2):50-62.
- [4] 刘备,董直庆,2020.技术进步的能源偏向诱发“碳锁定效应”了吗?[J].产经评论,11(4):133-148.
- [5] 刘自敏,申颖,2020.有偏技术进步与中国城市碳排放强度下降[J].科学学研究,38(12):2150-2160.
- [6] 罗慧,赵芝俊,2020.偏向性技术进步视角下中国水稻技术进步方向及其时空演进规律[J].农业技术经济,(3):42-55.
- [7] 屈小娥,骆海燕,2021.中国对外直接投资对碳排放的影响及传导机制——基于多重中介模型的实证[J].中国人口·

- 资源与环境, 31(7): 1-14.
- [8] 邵帅, 杨莉莉, 2011. 自然资源开发、内生技术进步与区域经济增长[J]. 经济研究, 46(S2): 112-123.
- [9] 王辉, 董直庆, 杨洒洒, 2020. 技术进步对污染物排放会存在选择性偏向吗? ——来自环境信息视角的城市层面经验证据[J]. 苏州大学学报(哲学社会科学版), 41(2): 114-122.
- [10] 王晶晶, 焦勇, 江三良, 2021. 中国八大综合经济区技术进步方向的区域差异与动态演进: 1978—2017[J]. 数量经济技术经济研究, 38(4): 3-21.
- [11] 王林辉, 杨博, 董直庆, 2019. 技术进步偏向性跨国传递和不同传递路径异质性效应检验[J]. 数量经济技术经济研究, 36(4): 82-100.
- [12] 温忠麟, 张雷, 侯杰泰, 等, 2004. 中介效应检验程序及其应用[J]. 心理学报, (5): 614-620.
- [13] 阎晓, 田钰, 李荣杰, 2020. 资源型地区工业集聚对生态效率的影响——基于我国 9 个典型资源型省份的实证研究[J]. 应用生态学报, 31(6): 2039-2048.
- [14] 杨传明, 2020. 中国产业技术进步碳资源要素偏向性测度[J]. 统计与决策, 36(14): 49-54.
- [15] 张军, 吴桂英, 张吉鹏, 2004. 中国省际物质资本存量估算: 1952—2000[J]. 经济研究, (10): 35-44.
- [16] 周喜君, 郭淑芬, 2018. 中国二氧化碳减排过程中的技术偏向研究[J]. 科研管理, 39(5): 29-37.
- [17] ACEMOGLU D P, AGHION G, BURSZTYN L, et al, 2012. The environment and directed technical change[J]. American Economic Review, 102(1): 131-166.
- [18] BARON R M, KENNY D A, 1986. The moderator-mediator variable distinction in social psychological research: Conceptual, strategic and statistical considerations[J]. Journal of Personality and Social Psychology, 51(6): 1173-1182.
- [19] CARLO C, ENRICA C, 2013. Factor-augmenting technical change: An empirical assessment[J]. Environmental Modeling & Assessment, 18(1): 4-23.
- [20] DIAMOND P A, 1965. Disembodied technical change in a two-sector model[J]. Review of Economic Studies, 32(2): 61-168.
- [21] EDWIN V D W, 2008. Production functions for climate policy modeling: An empirical analysis [J]. Social Science Electronic Publishing, 30(6): 2964-2979.
- [22] HANSEN B G, 1999. Threshold effects in non-dynamic panels: Estimation, testing, and inference [J]. Journal of Econometrics, 93(2): 345-368.
- [23] HASSLER J, KRUSELL P, OLOVSSON C, 2015. Energy-saving technical change[R]. America: America Cepr Discussion Papers, 1-40.
- [24] LYUBICH E J, SHAPIR O, WALKER R, 2018. Regulating mismeasured pollution: Implications of firm heterogeneity for environmental policy[J]. AEA Papers and Proceedings, (108): 136-142.

Study on the Influence of Biased Technological Progress on Carbon Intensity and Its Transmission Mechanism

Qian Juan, Ji Ruibing

(School of Economics and Management, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: The technological progress bias of 30 provinces (cities) in China was discriminated by constructing a transcendental logarithmic function model including capital, labor and carbon elements, and the transmission mechanism that affects carbon emission intensity was explored by constructing a multiple intermediary effect model, and the heterogeneity of the transmission mechanism under different resource abundance was analyzed. Main conclusions are as follows. There is a significant positive correlation between carbon element biased technological progress and carbon emission intensity, and technological progress biased towards carbon saving type helps to promote carbon emission reduction. The carbon factor biased technological progress can indirectly affect the carbon emission intensity through the intermediary effect of energy use efficiency and economic development level. Resource-based provinces (cities) mainly promote the emission reduction effect of carbon-biased technological progress through the path of improving the level of economic development, while non-resource-based provinces (cities) mainly promote the emission reduction effect of carbon-biased technological progress through the path of improving energy efficiency. The emission reduction effect of carbon element biased technological progress has a significant double threshold effect. The greater the energy use efficiency and the higher the level of economic development, the greater the impact of carbon element biased technological progress on carbon emission intensity. Therefore, it is necessary to increase the induction of technological progress towards carbon saving, pay attention to different paths of carbon emission reduction under different resource abundance, strengthen the improvement of energy use efficiency, promote the green development of economy, and help to achieve the goal of “double carbon”.

Keywords: biased technological progress; carbon emission intensity; multiple intermediary effect; threshold effect