

技术进步路径与低碳发展效率：前沿技术差距的解释*

杨刚强 聂一鸣

内容提要：在全球“双碳”目标和技术封锁局势的双重背景下，后发国家该如何选择技术进步模式以谋求低碳经济增长？现有文献存在分歧，且忽视了地区间前沿技术差距的影响。本文基于2000-2019年中国省域面板数据，构建基于总体技术前沿的非角度、非径向方向距离函数模型，测算并分解各省全要素低碳发展效率（*UEI*），检验自主研发、国外技术引进和国内技术购买三种主要技术进步路径如何影响*UEI*，并从前沿技术差距视角揭示技术异质性地区实现经济高质量增长相对更优的技术进步路径。主要结论有：第一，基准回归结果表明，自主研发和国内技术购买从整体上提升了*UEI*。第二，门槛回归结果表明，接近前沿地区的*RD*是提升*UEI*的唯一有效路径；远离前沿地区的国外技术引进（*FTI*）和国内技术购买（*DTP*）是有效路径；第三，进一步分析表明，中国现阶段的技术研发靶向已经初步实现经济和环境友好，对国际政治格局变革和尖端技术封锁形成了一定的“防御力”，但在碳减排领域对国外技术引进仍有部分依赖；此外，国内技术输出（*DTE*）通过竞争机制倒逼接近前沿地区提升研发效率，通过互惠机制激励远离前沿地区提升研发效率。结论具有丰富的政策启发：选择技术进步模式应充分考虑地区技术差距；应加快建成自主可控的低碳技术创新体系、健全并活跃国内技术交易市场，以自主创新系统良性运转带动全国经济的高质量发展。

关键词：低碳发展效率 技术进步路径 前沿技术差距

一、引言

技术进步对实现绿色经济增长具有变革性影响（Acemoglu et al., 2012）。随着气候变暖、能源危机等绿色挑战日益严峻，实现碳达峰与碳中和“双碳”目标已成为全球共识，各国纷纷将技术进步驱动经济增长方式向绿色低碳转型作为参与市场竞争、重塑国家形象的重要战略和关键抓手（Zhang et al., 2021）。机遇与挑战是并存的，对于长期遵循粗放型经济增长模式的后发国家来说，能否充分利用后发优势、选择因地制宜的技术进步路径以实现绿色经济增长，直接影响了其能否在“双碳”背景下获得可持续的竞争优势、刷新国际贸易地位（王林辉等，2022）。然而，作为后发国家的典型代表，同时也是负责任的气候治理大国，中国在自主研发和技术引进两条核心的技术进步路径上都面临着挑战。第一，尽管中国已经跻身于世界高研发投入国家行列，却在文献中受到研发投入数量高、质量低、效率低“一高两低”的质疑（诸竹君，2022），部分地区的自主创新能力薄弱、研发投入错配问题严重（König et al., 2022），进一步影响了绿色绩效的提升（Wang et al., 2021）。第二，中国各地区与发达国家的技术差距从趋于一致演化为高度发散（邵朝对和苏丹妮，2019），使得国内发达地区在国际市场中逐渐失去后发优势；更严峻的是，国际政治环境的变革使得中国不断受到发达经济体的技术封锁和长臂管辖（Petricevic & Teece, 2019），发达地区无法依靠国外技术引进实现关键领域特别是低碳领域的技术突破（Zheng & Wang, 2020）。第三，国内技术交易市场的日益壮大降低了区域间技术流动的贸易壁垒，但是其发挥的效用如何、是否抑制了落后地区研发活力均有待检验。面临这些挑战，有必要回答问题：自主研发、从国外引进技术和从国

* 杨刚强、聂一鸣（通讯作者），武汉大学经济与管理学院，邮政编码：430000，电子信箱：gqyang@whu.edu.cn, ymniejg@whu.edu.cn。

内购买技术，到底怎样的技术进步路径对于中国实现低碳经济发展是可行的？

相关文献可划分为两类。一类文献关注后发国家如何选择技术进步模式以实现技术赶超，主要的观点有鼓励自主研发的“技术赶超论”（Los & Timmer, 2005）、鼓励技术引进的“要素禀赋论”（Acemoglu et al., 2006）和二者双管齐下的“适宜性技术进步论”（于泳泽和张先轶, 2015）等，这类文献将绿色低碳纳入经济发展质量的评估体系。事实上，随着全球经济增速的不断加快，技术进步未必能实现经济增长与碳排放的“脱钩”（Acemoglu et al., 2012），能源成本的降低容易引致“碳反弹”效应（Chen et al., 2021），扩大能耗和碳排放规模。因此，在未考虑节能减排的技术进步目标下得到的结论和政策建议不适用于当前以绿色低碳为核心竞争力的新市场环境。

另一类文献关注不同技术进步路径对节能减排和绿色增长效率的影响，这类文献虽然考虑了环境要素，但结论却存在分歧，譬如“自主研发有效论”（张宁, 2022; Ndlovu & Inglesi-Lotz, 2020）“自主研发无效论”（Li & Jiang, 2020）“相似原则技术引进有效论”（Gu & Wang, 2018）“差异原则技术引进有效论”（Chen & Lee, 2020）等。导致结论差异化的原因可能是，这类文献未考虑省际技术差距，默认后发国家内部各地区与前沿国家的技术差距是等同的。事实上，改革开放以来，中国在经济总量上发展迅猛的同时，区域发展不平衡问题日益突出，譬如广东省 2021 年 GDP 总量已经超过加拿大和韩国，成为“全球前十大经济体”，即便在美国也仅仅次于加州，而甘肃省人均 GDP 还不到广东省的二分之一。发达地区和欠发达地区的研发基础和需求不同，技术吸收的范围和效率亦不同，使得自主研发和技术引进在发达地区和落后地区呈现出不同的节能减排绩效，这意味着两类地区应该遵循“共同但有差异”的技术进步路径。若忽略该因素，研究结论可能会随着样本范围、观察窗口的变化而变化。

很显然，两类文献均未对国内技术购买进行深入研究。事实上，改革开放以来，中国国内技术交易市场规模始终在扩大，买方、卖方及中介等技术交易主体活跃度不断提升，2022 年成交额高达 37294 亿元，同比增长 32%，现已成为科技成果转化的重要战场和推动经济高质量发展的重要途径。因此，仅把技术引进理解为狭义的国外技术引进于当下而言有失偏颇，国内技术购买也是重要的技术进步路径。

针对上述研究缺口，本文希望讨论：以低碳发展效率提升为目标，中国如何在尊重不同地区技术差异性的前提下，在自主研发、国内技术购买、国外技术引进之间确定可行有效的技术进步策略。本文的实证思路是，首先，基于 2009-2019 年中国省域面板数据，利用总体技术前沿与非角度、非径向方向距离函数，测算并分解各省份全要素低碳发展效率（UEI），厘清其时空演变趋势；而后，初步检验上述三种技术进步路径对 UEI 的整体影响，并将前沿技术差距作为门槛变量，揭示技术异质性地区实现经济高质量增长相对更优的技术进步路径；最后，本文还从效率提升靶向和国内技术输出的视角进一步讨论了技术进步与低碳发展效率提升的关系，以使得研究更加完整、结论更加丰富。

基于上述思路，本文在以下四个方面对既有研究进行了补充：第一，在目标选取上，有别于以往研究局限于以未考虑碳的技术追赶为路径选择目标，本文将目标拓展为考虑碳排放约束和能源利用约束的全要素低碳发展效率，加强了技术进步与绿色经济增长的关联；第二，在路径选取上，有别于以往研究大多分析单一技术进步模式对绿色经济增长的影响，本文将三大主要模式——自主研发、国内技术购买、国外技术引进共同纳入分析框架，补充了后发国家如何选择技术进步路径的相关研究；第三，在研究视角上，有别于以往研究仅局限于后发国家的整体技术进步路径，本文基于中美数据测算出各省与综合实力领先的发达经济体之

间的前沿技术差距,以此为视角深入挖掘三种路径的异质性效应及阶段性特征,结论为适宜性技术进步理论在中国的应用提供了新的经验证据;第四,在效率测度上,有别于以往绿色发展效率的测算方法,本文在非角度、非径向 DDF 模型中引入总体技术前沿,并在 VRS 假定下测算省域低碳发展效率,克服了传统效率测算所使用的全局 PPS 存在不可行域的问题,测算结果更真实准确。此外,这项研究还具有丰富的现实意义。本文从技术进步的路径选择角度,为中国差异化省域的低碳经济增长提供更具针对性的政策建议;进一步分析为继续建设自主可控的低碳技术创新体系、壮大国内技术交易市场提供了经验依据。

本文剩余章节的结构安排如下:第二章为文献综述,第三章为研究设计,第四章为实证结果分析,第五章为进一步分析,第六章为结论与建议。

二、文献综述

(一) 绿色发展效率及其测算

绿色发展效率是决定经济增长向绿色转型的内生动力,指在资源环境约束条件下社会经济投入和非期望产出能减少、期望产出所能增加的最大化程度(Verfaillie & Bidwell, 2010),本文在“双碳”背景下将其引申为低碳发展效率,即将资源环境约束细化为碳排放约束和能源要素约束。绿色发展效率的测度始终是文献追逐的热点话题,现有研究大多使用包含非期望产出的改进 DEA 模型进行测度,其中以基于全局 PPS 的非径向方向距离函数(DDF)模型居多(Zhang et al., 2014)。DDF 模型是 DEA 效率测算的主流方法之一,其概念最早在 Luenberger(1996)生产理论中的短缺函数和消费者理论中的收益函数出现,Chambers et al.(1996)将其发展完善为径向 DEA 模型的一般化表达,随后经历了考虑环境污染物副产品的 DDF(Chung et al., 1997)、考虑非零松弛的 SBM-DDF(Fukuyama & Weber, 2009)、非角度和非径向 DDF(Zhou et al., 2012)等一系列迭代优化。全局 PPS 框架由 Pastor & Lovell(2005)提出,将多期技术前沿的凸包作为统一的技术前沿面,克服了当期 PPS 下效率值不可传递、不可积累的缺陷,因此成为文献中 DEA 模型运行主流基础(Oh & Dong-hyun, 2010; Song et al., 2020; Gao et al., 2021)。然而, Afsharian et al.(2015)提出了该模型存在的问题——将多期技术前沿的凸包作为技术前沿面未考虑每一期技术水平对最终技术前沿面形成的“约束”作用,使得在全局 PPS 中存在不可行的投入产出组合,测算结果不精确,并进一步提出了总体 PPS 框架,以使得效率值在可传递、可积累的同时剔除全局 PPS 中的不可行部分。目前,这种更优的总体 PPS 在绿色发展效率测算的实证应用较为稀缺,仅在 CRS 假定下有少量实践(邵帅等, 2022),但真实情境下,大多数生产单位并未处于最优规模的生产状态(Ray & Desli, 1997)。因此,如何选择更优的模型测度低碳发展效率仍有较大的完善空间。

(二) 技术进步路径的选择

技术源于自主研发,亦可以在企业与个体(Lucas & Moll, 2014; Perla & Tonetti, 2014)、国家之间(Buera & Oberfield, 2020)扩散,由此形成自主研发和技术引进两大模式。如何选择技术进步路径以提升区域技术创新水平、实现技术追赶是学术界一直热议的话题。早期文献涌现出两类观点,首先是基于比较优势理论的“要素禀赋论”,该理论以林毅夫和张鹏飞(2005)、Acemoglu et al.(2006)为代表,认为技术进步模式的选择应该与地区的要素禀赋和比较优势相匹配。落后地区的经济发展起步晚,其研发基础和成果转化水平较发达地区差距较大,应该充分利用技术后发优势,引进并积累发达地区先进技术以规避自主创新的高风

险，最终实现技术蛙跳，成为下一代的技术领导者（Mukoyama, 2003）。从全球的角度，这种从发达国家向贫穷国家的强大技术扩散最终促进了各国技术水平的趋同性（Keller, 2004）。然而，与之较为对立的“技术赶超论”认为，并非所有技术引进都能有效帮助落后地区。世界各国的劳动生产率存在客观上的差异，落后国家的技术引进成本高、周期长（Los & Timmer, 2005），且全球的前沿技术可能并不适配本国的技术基础条件和产业发展模式；在以全球贸易为核心联结的技术溢出网络中，落后地区的初始比较优势进一步强化，长期只能生产技术含量低的产品（Lucas, 1988）；此外，发达国家对高端技术的封锁使得借助技术引进实现突破性创新变得困难。上述机制下，依赖引进技术的落后地区可能落入“引进-落后-再引进-再落后”的低端技术陷阱，而自主研发对全要素生产率的提升空间更大，且更能发展适合本国经济增长阶段的技术，因此是落后地区应该采取的技术进步模式（孙早和许薛璐, 2017）。总体来说，两种理论较为对立，认为落后地区只能在自主研发和技术引进中选择一个。

随着研究的深入，学者们开始关注两种模式之间的内在逻辑关系，从而应运而出生更加中庸的“适宜性技术进步理论”。该理论认为，自主研发和技术引进并非对立，而是互为补充的关系。不同地区可根据自身在特定发展阶段下的要素禀赋、制度环境、经济发展阶段等特征，选择相对有效的技术进步模式（于泳泽和张先轸, 2015）。在这些特征中，与前沿国家的技术差距被普遍认为是后发国家选择创新模式的重要依据（王林辉等, 2022；König et al., 2022）。Acemoglu et al.（2006）提出了以“前沿差距”为核心概念的理论框架，分析了前沿差距的动态变化与经济体技术进步模式选择之间的关系，认为当技术差距比较大时，后发国家引进、消化和吸收先进生产技术，加之其更为廉价的劳动力优势，能在短时间内积累巨额的技术后发利益，为孕育和发展本地的创新环境奠定了资本基础（欧阳峒和汤凌霄, 2017）。当后发国家的技术水平逐渐接近先进国家，能够依靠自身力量独立研发，此时应将技术进步来源从“模仿主导”转换为“研发驱动”，以此开发突破性技术。若后发国家的政策更加优越，甚至会出现与先进国家的技术交互跟进的情形。也就是说，前沿技术差距为“适宜性技术进步”理论的应用提供了有力的视角。然而，无论是早期的“要素禀赋论”“技术赶超论”，还是后来的“适宜性技术进步论”，相关文献的路径选择依据均未考虑碳减排和能源节约等环境约束，这是不合适的，因为技术进步可能具有潜在的非环境友好性（Acemoglu et al., 2012；Churchill et al., 2019）。因此，上述文献的结论并无法为后发经济体追求绿色低碳的高质量发展提供足够的参考价值。

（三）技术进步路径与绿色经济增长

随着全球工业化的加速发展，温室气体的持续增加给农业生产、社会经济活动和人类生活带来了负面影响，阻碍了全球可持续发展的进程，学术界开始认识到技术进步对实现可持续发展的重要性，并加强了对技术进步路径与绿色经济增长的研究。“自主研发有效论”认为，增加 R&D 支出进行低碳技术创新以减少对能源的需求是解决气候变化问题的重要路径（张宁, 2022）。“自主研发无效论”认为研发对低碳的无效传导机制具有异质性：对发达国家来说，研发效率是实现“脱钩”的主要驱动力，而随着经济体知识存量的增加，研发获得新突破变得困难，使经济增长不得不以环境为代价（Li & Jiang, 2020）；对发展中国家来说，绿色增长效应来自于研发投入与现有技术能力的协调，而过度投入下的“R&D 崇拜”是落后地区存在的普遍问题（Gu & Wang, 2018）。相比较之下，技术引进被普遍认为能够提升区域绿色增长效率，但关于引进方向存在争议。部分学者认为，发展中国家应善于学习发达国家先进的低碳技术，虽然存在模仿阈值，但模仿引进获取技术进步的速度比独立研发高四倍（Gu & Wang, 2018），即“差异引进”原则；另一部分学者认为，在技术水平相近的经济体

之间，技术创新相关的生产要素流动更加频繁，对环境技术的相似需求引致的技术溢出效应更加有效（Chen & Lee, 2020），即“相似引进”原则。综上所述，学术界普遍认为技术进步路径的选择能够影响区域绿色经济增长，然而，这些观点并未达成一致，且仅对单一技术进步路径，即自主创新或技术引进的绿色增长效应进行了初步探索，很少有文献将两类路径同时纳入经济体低碳经济增长的实证检验框架，回答“到底怎样的路径战略对亟待实现低碳转型的后发国家来说更有帮助”，尽管这一问题具有更加深刻的现实意义。

我们认为，技术差距理论或许可以为解决上述分歧、回答多路径选择问题提供新的探索思路。由 2.2 章节可知，技术差距理论是适宜性技术进步理论的重要延伸。在这篇文章中，我们结合中国区域发展不平衡不充分的现实背景，将文献中大多采取的国别间技术差距视角分化为中国内部各省与发达国家之间的差距。我们的观点是，前沿技术差距对技术进步路径的低碳发展效应可能存在门槛作用。对于接近前沿省份，这类地区迫切需要高精尖的低碳技术以实现突破式发展，但技术复杂性、学习成本的提升以及愈演愈烈的技术出口管控使得这类地区难以有效汲取国外技术；此外，前沿地区具备更优渥的技术研发环境和应对研发风险的能力，这意味着这类地区应采取以自主创新为主的技术进步策略。而对于远离前沿省份，他们迫切需要适宜本地发展条件的技术而非高精尖，这类省份的技术研发环境尚不成熟，一味投入研发资金容易陷入“R&D”陷阱；应该充分利用后发优势，积极引入国内外先进技术，特别是，中国技术交易市场的建立和运营大大减弱了技术和要素在区域间流动的交易壁垒，为落后省份承接接近前沿省份的先进技术提供了重要桥梁。

因此，本文的实证思路是，基于各省低碳发展效率的测算结果，先初步检验各路径对低碳发展效率的整体影响，后以前沿技术差距为门槛变量，检验其是否对各路径的低碳发展效率效应有门槛作用。

三、研究设计

（一）模型设定与研究假设

1、基准回归模型

为初步探究自主创新、国外技术引进及国内技术购买三类技术进步路径对各省低碳发展效率及其分解项的影响，本文设定如下面板数据模型：

$$UEI_{i,t} = \alpha_0 + \alpha_1 RD_{i,t-1} + \alpha_2 FTI_{i,t-1} + \alpha_3 DTI_{i,t-1} + X_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (1)$$

其中，被解释变量 $UEI_{i,t}$ 表示*i*省份在*t*年的低碳发展效率。核心解释变量 $RD_{i,t}$ 表示*i*省份在*t*年的自主创新程度， $FTI_{i,t}$ 表示国外技术引进程度， $DTI_{i,t}$ 表示国内技术购买程度。考虑技术研发和技术吸收的周期性可能对回归结果造成影响，本文将三个解释变量做滞后一期处理。 $X_{i,t}$ 为其他可能影响地区各效率指标的一系列控制变量， $\varepsilon_{i,t}$ 为扰动项。为了获得更加稳健的结果，所有回归方程默认采用 cluster 聚类到省级层面的稳健标准误调整的*t*统计量。在回归系数中，本文重点关注 α_1 、 α_2 、 α_3 在被解释变量为全要素低碳发展效率（UEI）时的回归系数及其显著性，以此反映三类技术进步路径对地区低碳经济发展与节能减排表现的总体影响。

2、门槛回归模型

进一步考虑技术差距的影响，为探究不同的技术差距下，三种技术进步路径对地区低碳发展效率的异质性作用，本文将技术差距作为门限变量，设定如下门限回归模型：

$$UEI_{i,t} = \beta_0 + (\beta_1 RD_{i,t-1} + \beta_2 FTI_{i,t-1} + \beta_3 DTI_{i,t-1}) \times I(Gap_{i,t} < \theta) + (\beta'_1 RD_{i,t-1} + \beta'_2 FTI_{i,t-1} + \beta'_3 DTI_{i,t-1}) \times I(Gap_{i,t} \geq \theta) + X_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (2)$$

其中, $I(\cdot)$ 为示性函数; $Gap_{i,t}$ 是门槛变量, 表示 i 省份在 t 年与前沿经济体之间的技术差距, 为了使结果更具稳健性, 本文考虑了从技术进步角度、以 TFP 差距测算的技术差距 Gap_tfp , 和从技术产出角度、以 GDP 差距测算技术差距 Gap_gdp ; θ 是门槛值。本文假设对低碳发展效率 UEI, 存在对应门槛值 θ , 使得三种技术进步路径对特定效率值下的“靠近前沿”省域和“远离前沿”省域具有异质性影响, 本文重点关注该门槛回归的显著性, 以及门槛变量在 θ 值左右两侧时的核心解释变量的系数。基于第二章的分析, 我们提出第二个假设:

(二) 变量选取与数据说明

1、被解释变量

本文的核心被解释变量为全要素低碳发展效率 (UEI) (Unified Efficiency index)。通过构建基于总体技术前沿的非角度、非径向 DDF 效率模型, 将能源约束和碳排放约束纳入其中, 由于现行主流数据包络分析软件 MaxDEA、IDEA 等尚未写入总体技术前沿的模型, 本文使用 MATLAB 软件编程以实现建模和计算。假定每个决策单元 (DMU) 使用 P 种投入要素 $x = (x_1, x_2, \dots, x_p) \in R_p^+$, 生产 Q 种期望产出 $y = (y_1, y_2, \dots, y_q) \in R_q^+$ 和 I 种非期望产出 $b = (b_1, b_2, \dots, b_i) \in R_i^+$, 将第 k 个决策单元 DMU_k ($k = 1, 2, \dots, K$) 在 t 时期 ($t = 1, 2, \dots, T$) 的投入产出向量记为 (x_k^t, b_k^t, y_k^t) 。

定义总体 PPS 为:

$$T^a(x^t) = \left\{ \begin{array}{l} (y, b): \left(\sum_{k=1}^K z_k^t y_{kq}^t \geq y_{kq}^t, \sum_{k=1}^K z_k^t b_{ki}^t = b_{ki}^t, \sum_{k=1}^K z_k^t x_{kp}^t \geq x_{kp}^t \right) \text{ or } \dots \text{ or} \\ \left(\sum_{k=1}^K z_k^t y_{kq}^t \geq y_{kq}^t, \sum_{k=1}^K z_k^t b_{ki}^t = b_{ki}^t, \sum_{k=1}^K z_k^t x_{kp}^t \geq x_{kp}^t \right); \\ z_k^t \geq 0, \text{ 且 } \sum_{k=1}^K z_k^t = 1; \forall p, \forall q, \forall i, \forall k \end{array} \right. \quad (3)$$

z_k^t 是构造前沿面时各横截面观测值的权重, $\sum_{k=1}^K z_k^t = 1$, 则表示具有规模报酬可变 (VRS) 特征, 上述可行性集满足闭集和有界集的假定。

定义方向向量为:

$$\vec{D}(x, y, b; g) = \sup \{w^T \beta: (y, b, x) + g * \text{diag}(\beta) \in T^a(x)\} \quad (4)$$

其中, $w = (w_q^y, w_i^b, w_p^x)$ 为投入和产出要素数量上的归一化权重向量, 允许投入和产出不成比例地调整; $g = (g_y, -g_b, -g_x)$ 为方向向量, 表明效率改进的方向为期望产出增加、非期望产出减少、投入要素节约; $\beta = (\beta_{qy}, \beta_{ib}, \beta_{px})^T \geq 0$ 是比例因子 (Scaling Factors), 表示 DMU 在 $T^a(x)$ 中期望产出能增加、非期望产出能减少、投入要素能节约的比例。因此, $\vec{D}(x, y, b; g)$ 表示经投入产出特定权重调整后的 DMU 与总体技术前沿相比的最大改进空间, 即为非效率值, 该值越大, 效率越低, 若该值为 0 表示此时 DMU 正处于技术前沿。

本文选取中国 30 个省、自治区、直辖市作为决策单元, 剔除了数据缺失较多的西藏自治区, 选择本省碳排放量 (C) 作为非期望产出, 实际 GDP (Y) 作为期望产出; 考虑能源与其他投入要素间的替代效应, 选择劳动 (L)、资本 (K)、能源 (E) 作为投入要素。对于期望产出 Y, 本文使用以 2000 年不变价的省域地区生产总值表示; 对于非期望产出 C, 基于省级 17 类化石能源消费数据, 采用碳排放系数法计算各省二氧化碳排放量 (IPCC, 2007)。投入要素群中, 资本投入为基于张军和金煜 (2005) 的永续盘存法、以 2000 年为基期测算得到的省级资本存量, 劳动投入为各省年末从业人员数量, 能源投入为折算为标准煤的能源消耗总量。除此之外, 本文参考邵帅等 (2022)、Zhou et al. (2012), 设定 $g =$

$(Y, -C, -K, -L, -E)$; 参考 Barros et al. (2012)、Zhang et al. (2014) 等, 相应权重向量 $w = (\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9})$ 。代入各参数, 定义第 i 个省份 j 年的投入产出数据为 $(Y_{ij}, C_{ij}, K_{ij}, L_{ij}, E_{ij})$, 得到如下线性规划模型:

$$\overrightarrow{D_{ij}} = \max \left\{ \begin{array}{l} \max \left(\frac{1}{3}\beta_{Y_{ij}} + \frac{1}{3}\beta_{C_{ij}} + \frac{1}{9}\beta_{K_{ij}} + \frac{1}{9}\beta_{L_{ij}} + \frac{1}{9}\beta_{E_{ij}} \right) \\ \text{s.t. } \sum_{k=1}^K z_k^t Y_k^t \geq Y_{ij}(1 + \beta_{Y_{ij}}) \\ \sum_{k=1}^K z_k^t C_k^t = C_{ij}(1 + \beta_{C_{ij}}) \\ \sum_{k=1}^K z_k^t K_k^t \leq K_{ij}(1 + \beta_{K_{ij}}) \\ \sum_{k=1}^K z_k^t L_k^t \leq L_{ij}(1 + \beta_{L_{ij}}) \\ \sum_{k=1}^K z_k^t E_k^t \leq E_{ij}(1 + \beta_{E_{ij}}) \\ z_k^t \geq 0, \text{ 且 } \sum_{k=1}^K z_k^t = 1 \end{array} \right. \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (5)$$

通过求解上述线性规划, 得到第 i 个省份 j 年的各投入产出向总体技术前沿面改进的最大比例因子向量 $\overrightarrow{\beta_{ij}^*} = (\beta_{Y_{ij}}^*, \beta_{C_{ij}}^*, \beta_{K_{ij}}^*, \beta_{L_{ij}}^*, \beta_{E_{ij}}^*)$, 参考林伯强 (2015), 定义各省全要素低碳经济增长指数如下式所示:

$$UEI_{ij} = \frac{1}{4} \left[\frac{Y_{ij}}{K_{ij}} / \left(\frac{Y_{ij} + \beta_{Y_{ij}}^* Y_{ij}}{K_{ij} + \beta_{K_{ij}}^* K_{ij}} \right) + \frac{Y_{ij}}{L_{ij}} / \left(\frac{Y_{ij} + \beta_{Y_{ij}}^* Y_{ij}}{L_{ij} + \beta_{L_{ij}}^* L_{ij}} \right) + \frac{Y_{ij}}{E_{ij}} / \left(\frac{Y_{ij} + \beta_{Y_{ij}}^* Y_{ij}}{E_{ij} + \beta_{E_{ij}}^* E_{ij}} \right) + \frac{Y_{ij}}{C_{ij}} / \left(\frac{Y_{ij} + \beta_{Y_{ij}}^* Y_{ij}}{C_{ij} + \beta_{C_{ij}}^* C_{ij}} \right) \right] = \frac{1}{4} \{ [(1 - \beta_{K_{ij}}^*) + (1 - \beta_{L_{ij}}^*) + (1 - \beta_{E_{ij}}^*) + (1 - \beta_{C_{ij}}^*)] / (1 - \beta_{Y_{ij}}^*) \} = [1 - \frac{1}{4} (\beta_{K_{ij}}^* + \beta_{L_{ij}}^* + \beta_{E_{ij}}^* + \beta_{C_{ij}}^*)] / (1 + \beta_{Y_{ij}}^*) \quad (6)$$

在此基础上, 对 UEI_{ij} 进行分解, 得到各投入产出要素效率值, 具体地: 碳减排效率 $CEI_{ij} = 1 - \beta_{C_{ij}}^*$, 经济产出效率 $YEI_{ij} = 1 / (1 + \beta_{Y_{ij}}^*)$, 能源节约效率 $E EI_{ij} = 1 - \beta_{E_{ij}}^*$, 资本节约效率 $KEI_{ij} = 1 - \beta_{K_{ij}}^*$, 劳动节约效率 $LEI_{ij} = 1 - \beta_{L_{ij}}^*$ 。

2、解释变量

自主创新程度 (RD)。自主创新指以内部技术突破为核心驱动力的独立研发活动, 该类活动不依赖于外部技术, 研发成果具有自主知识产权。现有研究主要从产出端和投入端两种视角计算经济主体的自主创新程度, 前者以专利数量 (Wang et al., 2019) 和出版物 (Wong et al., 2014) 为代表, 后者以研发支出 (Yang et al., 2014) 为代表。由于专利指标存在成果质量差异化无法度量、无法囊括全部创新活动 (Albino et al., 2014) 等缺陷, 本文采用各省研究与试验发展 (R&D) 经费支出 (Expenditure on R&D by Region) 占 GDP 比重衡量自主创新程度。

国外技术引进程度 (FTI)。国外技术引进指技术需求方从国外其他企业、研究单位、机构直接获得先进技术的行为, 是快速获取国外成熟技术成果的重要方式。文献对该变量的度量集中于工业企业引进国外技术经费支出 (张杰等, 2021)、永续盘存法估算国外技术引进

存量（刘思明等，2014）、国外技术引进合同交易额（李勃昕等，2021）、FDI 占社会固定资产投资比例（Broom et al., 2016）等，考虑到国家科学技术部、商务部及国家统计局对国外技术引进合同涵盖范围及数据统计较为详尽，包括中国为从国外获取专利技术许可、技术咨询与服务、计算机软件、合资生产与合作生产、关键设备与生产线而签订合约所涵盖的交易额，比较全面、直接地体现了各省市当年对国外的技术与物化技术的引进程度，因此本文采用各省国外技术引进合同金额（亿美元）换算成人民币（万元）占当年 GDP 比重衡量国外技术引进程度。

国内技术购买程度（DTP）。国内技术购买指技术通过国内技术交易市场流向技术需求方的活动，由于国内地区间贸易壁垒小于国际间贸易，因此省域内技术流动通常比国际间技术流动更容易。由于国内技术交易涵盖了本省从其他省在研发、生产、设计、成果转化、设备、服务、人才等各方面的流通情况，能够较为全面地体现本省对其他省的技术引进情况，因此本文参考 Lin & Ma (2022)，采用流入各省的国内技术市场合同交易额（Value of Contract Inflows to Domestic Technical Markets by Region）占当年 GDP 比重衡量国内技术购买程度。

3、门限变量

前沿技术差距（Gaptfp、Gapgdp）。现有文献中出现的的技术差距测算方法有三种：侧重技术进步差距的指标，如全要素生产率；侧重技术产出差距的指标，如人均 GDP、专利数量等；侧重技术投入差距的指标，如 R&D 投入等。采用不同方法测度前沿技术差距可以检验模型结果是否具有稳健性。结合指标的数据可得性和应用广泛性，本文借鉴郑江淮和荆晶（2021）采用各省份 TFP 与美国 TFP 之比表征前沿技术差距，TFP 是基于 CD 生产函数计算的索罗余值，即对 C-D 生产函数两边同取对数得如下生产函数，其中， i 表示省份或国家， t 表示年份， α 为资本产出贡献率， β 为劳动产出贡献率， Y 、 K 、 L 分别表示增加值、资本存量和劳动投入， A 表示 TFP。同时，本文采用各省实际人均 GDP 和与美国实际人均 GDP 的比值进行稳健性检验，各省人均 GDP 经过价格指标及汇率调整为 2010 年美元不变价，指标计算公式如下，其中 RGDP 表示实际 GDP，PE 表示年平均人口。

$$\ln\left(\frac{Y_{it}}{L_{it}}\right) = \ln A_{it} + \alpha \ln\left(\frac{K_{it}}{L_{it}}\right) + (\alpha + \beta - 1)\ln L_{it} \quad (7)$$

$$Gapgdp = \frac{RGDP_{USA}/PE_{USA}}{RGDP_{CHN}/PE_{CHN}} \quad (8)$$

4、控制变量

为剔除各省份宏观经济和社会发展状况对低碳发展效率的影响，提升研究精度，本文参考宋马林和刘贯春（2021）、邵帅等（2022）引入如下控制变量：产业结构（indus），采用各省第三产业产值占 GDP 比重进行度量；要素结构（endm），采用劳均资本存量，即实际资本存量与年均劳动人口的比值进行度量，其中，劳动人口数的计算源于《中国人口和就业统计年鉴》公布的人口变动情况抽样调查数据，通过各地区适龄劳动力人口（15 至 65 岁）比重乘以各省份人口总量得到。城镇化水平（urban），采用城镇人口占总人口比重进行度量；环境规制强度（envir），采用环境规制综合指数进行度量，该指数的计算过程为，对各省三废排放量（工业废水、工业 SO2、工业烟尘）进行标准化处理，采用熵值法测算所得。教育水平（educ），采用各省接受高等教育人数占 6 岁以上人口总数的比重对其进行度量，以此控制教育水平对地区低碳发展效率的影响。所有制结构（state），采用各省国有固定资产投资占总固定资产投资的比重对所有制结构进行度量。政府干预程度（gov），采用各省一般预算支出占 GDP 比重进行度量。

5、数据来源与描述性统计

本文采用 2000-2019 年间中国 30 个省、自治区及直辖市作为研究样本，共计 600 个观测值，属于平衡面板数据。其中，西藏自治区因数据存在大量缺失未纳入样本。自主创新、国外引进和国内转移指标的相关数据来源于《中国科技统计年鉴》，效率值测算的投入产出数据来源于《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》、IPCC（2007）、国家气候变化协调小组第三小组。门槛变量美国相关数据来源于世界银行（WB）、CEIC 数据库。控制变量相关数据来源于各省历年统计年鉴、《中国统计年鉴》、《中国固定资产投资统计年鉴》、《中国劳动统计年鉴》、国泰安数据库（CSMAR）及中国研究数据服务平台（CNRDS）。所有财务数据按价格指数平减为 2000 年不变价，部分缺失数据通过线性插值法填补得到。

变量描述性统计如下表所示。核心被解释变量的方差较小，数据围绕均值小范围波动。为进一步了解 UEI 及各分解项的演变特征，本文将全国效率均值在 2000-2019 年的时间序列绘制为图 1，容易看出，中国省域低碳发展效率及其在投入端和产出端的分解呈现出明显的“三阶段”特征。第一阶段为 2000-2008 年，UEI 和 YEI 上升，但 CEI、EEI 和 LEI 明显下降，该阶段低碳发展效率的提升主要来源于经济产出和资本投入效率的拉动，具有明显的“经济不低碳”特征。第二阶段为 2009-2012 年，UEI 和 YEI 略有下降，CEI 降速变缓，EEI 和 LEI 出现上升趋势。“十一五”规划后期，我国政府开始重视并制定政策以缓解环境问题，此时环境规制以对污染企业进行关停并转的控制命令型政策为主，可能存在一定的经济代价；另一方面，随着发达国家技术获取成本的上升和技术壁垒的限制，我国开始自主研发技术，基于本国市场和资源禀赋逐渐向劳动节约型技术偏移，因此劳动利用效率提升而资本利用效率下降（郑江淮和荆晶，2022）。第三阶段为 2013-2019 年，UEI 及各分解项均稳步上升，这说明从“十二五”中后期到 2019 年，我国生产技术向经济产出更高、碳排放更少、资源投入更节约的方向不断进步。

核心解释变量即三种技术进步路径的方差也较小，起伏较为平稳。图 2 和图 3 直观地呈现了中国 2000-2019 年三种技术进步路径的演变趋势，由于国外技术引进合同金额自 2002 年开始发布，因此下图从 2001 年开始绘制。中国技术进步路径主要经过了两个阶段的变迁。第一阶段为 2001-2008 年，核心特征表现为 FTI 占比高，这与中国 2001 年加入 WTO 后扩大国际贸易规模和技术交易体量有关。对应图 2 可知，该阶段中国对发达国家资本增强型技术的不断进口在整体上提升了 UEI。第二阶段为 2009-2019 年，核心特征表现为 DTP 和 RD 以较高速增长，FTI 占比逐年递减，该阶段国外技术引进成本升高，自主研发体系和国内技术交易市场开始建设。对应图 1 可知，该技术进步策略转变在经过短暂过渡期后最终促使 UEI 呈上升趋势。上述分析可知，中国虽然通过参与全球经济一体化扩大了外部技术虹吸通道，但核心的技术进步来源已经逐渐从依赖于国外引进转变为自主研发与国内技术购买并举，且当下模式更有益于促进经济的健康增长。

表 1 变量描述性统计

变量	观测值	平均值	标准差	最小值	最大值
UEI	600	0.57	0.19	0.18	1
RD	600	13.32	1.60	9.01	16.70
FTI	600	7.57	1.94	2.31	11.54
DTP	600	12.79	1.46	7.69	17.03
Gap_gdp	600	20.57	17.47	2.25	113.0

<i>Gap_tfp</i>	600	2.18	8.06	1.25	11.86
<i>indus</i>	600	42.41	9.01	28.60	83.50
<i>endm</i>	600	10.31	7.34	1.90	41.38
<i>urban</i>	600	51.35	15.26	21.25	89.60
<i>envir</i>	600	0.53	0.54	0.01	2.59
<i>educ</i>	600	0.10	0.07	0.06	0.51
<i>state</i>	600	0.33	0.13	0.10	0.70
<i>gov</i>	600	0.20	0.11	0.01	0.63

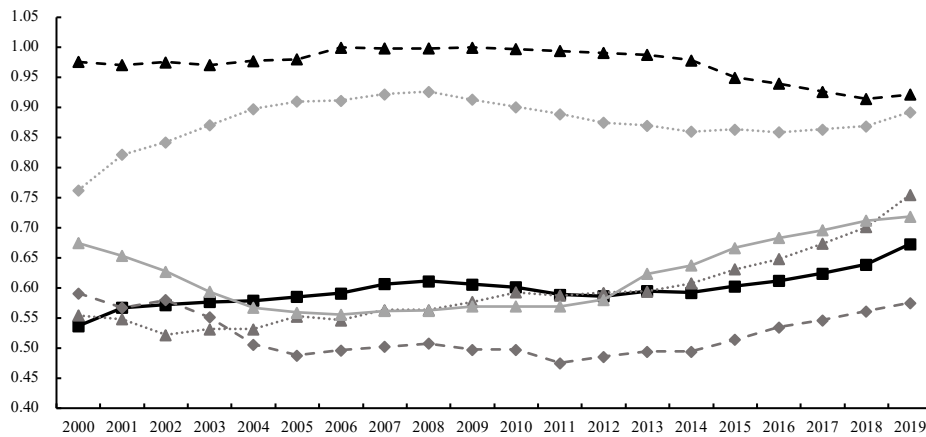


图 1 低碳发展效率及其分解效率的逐年走势（全国）

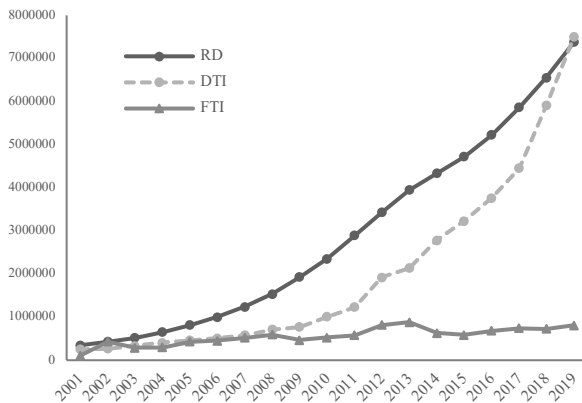


图 2 三种路径的逐年走势

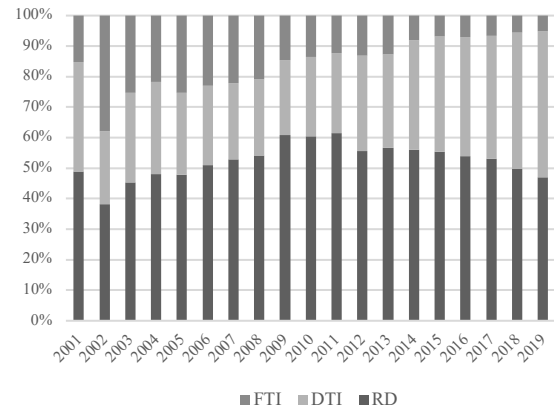


图 3 三种路径的百分比堆积柱状图

四、实证结果分析

（一）基准回归结果

1、回归结果分析

基于模型（1），对自主创新、国外引进、国内转移三种技术进步路径关于各省份低碳发展效率做回归，结果如表 2 所示。随着控制变量和固定效应的加入，如列（3）（4）所示，RD 和 FTI 在整体上对低碳发展效率有显著提升作用，而 DTP 的作用并不显著。该结果说

明,在不区分省域技术差距的前提下,各省的自主研发活动有利于促进本地区全要素低碳经济效率的提升。同时,通过全球技术交易市场引进先进技术、软硬件设备、生产线等有助于在碳排放和能源约束条件下提升整体的经济运行效率,佐证了中国在过去二十年发展中具备一定的技术后发优势,能够依托国外技术引进较快地提升效率。这说明,尽管中国通过引进国外技术在过去20年提升了低碳发展效率,但中国正在努力培养自主创新能力,为应对当下全球政治格局变革和发达国家技术封锁打造“防御力”。意外的是,国内技术交易市场促成的省域间技术转移尚未表现出显著的低碳经济增长效应,这与中国近年来不断扩大的国内技术交易额占比的事实不符,该结果有待进一步讨论。此外,控制变量回归结果表明,产业结构中第三产业占比越高则低碳发展效率越高,这说明促进第三产业发展是各地区节能降耗的重要方向;城镇化水平越高则低碳发展效率越高,这说明由经济集聚产生的产出规模效应和集约经济效应为提升低碳发展效率发挥了重要作用;地区教育水平越高则低碳发展效率越高,这说明高教育水平地区具有更高质量的人力资源,其劳动力市场供给效率更高,对提升经济整体生产效率、推动经济向低碳转型发展更具活力。

表 2 基准回归结果-双向固定效应模型

	(1)	(2)	(3)	(4)
变量	<i>UEI</i>	<i>UEI</i>	<i>UEI</i>	<i>UEI</i>
<i>RD</i>	0.076*** (8.708)	-0.016 (-1.602)	0.094*** (2.997)	0.094*** (2.997)
<i>FTI</i>	0.007** (2.002)	0.006** (2.056)	0.003** (2.276)	0.003** (2.276)
<i>DTI</i>	0.003 (0.439)	0.004 (0.700)	0.005 (0.592)	0.005 (0.592)
<i>envir</i>		-0.094*** (-7.438)	0.001 (0.026)	0.001 (0.026)
<i>indus</i>		0.011*** (9.508)	0.006*** (3.408)	0.006*** (3.408)
<i>endm</i>		-0.005*** (-3.810)	-0.006 (-1.563)	-0.006 (-1.563)
<i>urban</i>		0.005*** (6.488)	-0.003* (-1.842)	0.003* (1.842)
<i>educ</i>		-0.690*** (-2.993)	0.622* (1.762)	0.622* (1.762)
<i>state</i>		-0.405*** (-7.123)	0.017 (0.140)	0.017 (0.140)
<i>gov</i>		-0.427*** (-7.157)	-0.038 (-0.244)	-0.038 (-0.244)
常数项	0.471*** (42.404)	0.258*** (4.497)	0.347** (2.645)	0.347** (2.645)
观测值	600	600	600	600

R方	0.207	0.524	0.855	0.335
控制变量	No	Yes	Yes	Yes
年份固定效应	No	No	Yes	Yes
省份固定效应	No	No	No	Yes

注：*、**、***分别代表在 10%、5%和 1%的水平上显著；括号内为 t 值，下同。

2、稳健性检验

为了验证基准回归结果的稳健性，本文在以下几个方面补充了稳健性检验：

(1) 剔除外生事件的影响。2008-2009 年的全球金融危机对中国工业和节能减排造成了很大的冲击，本文剔除 2008-2009 年的样本再次进行回归，以剔除金融危机的潜在影响。2008 年北京奥运会前几年，北京启动了周边省市联防联控，实施蓝天工程、清洁能源建设等，践行绿色奥运原则，本文剔除 2006-2008 年北京、天津、河北、山西、内蒙古、辽宁的样本进行回归，以消除“奥林匹克模式”的影响。(2) 剔除国家政策的影响。中央政府颁布的技术引进政策会影响回归结果，在本文 2000-2019 年样本观察期内，中国分别在 2007 年、2009 年、2011 年、2014 年和 2016 年发生了五次国家机构关于鼓励进口技术和产品目录调整，调整年份对下一年地方政府政策制定和企业技术引进行为产生激励和导向作用，为剔除这类外生政策的潜在影响，本文剔除调整年份的下一年（2008 年、2010 年、2012 年、2015 年、2017 年）涵盖的样本，对其余样本进行回归。(3) 替换解释变量。为了剔除地区经济规模潜在的影响，本文将三类技术进步支出的规模变量替换为强度变量，即研发支出、国外技术引进支出、国内技术市场交易额占该省份 GDP 的比重，以此进行回归；此外，选择其他度量方式，替换 RD 为规模以上工业企业 R&D 发明专利数 (Patent)，替换 FTI 为国外技术购买经费支出 (FTI_E)，替换 DTP 为境内技术购买消费支出 (DTP_E)，由于后两个变量自 2010 年开始发布，因此缩短样本期为 2009-2019 年进行回归。(4) 替换回归模型。由于使用 OLS 和固定效应回归可能存在同期相关、自相关和异方差等问题，为了尽可能消除这种潜在影响，本文使用面板校正标准误 (PCSE) 和可行的广义最小二乘 (FGLS) 再次回归。(5) 考虑内生性问题，使用技术进步路径的 2 年和 3 年的移动平均值来重新估计方程。稳健性检验结果被展示在表 3，易得与表 2 相似，说明基准回归结果具有一定稳健性。

表 3 稳健性检验

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	
	金融危机	奥运会	引进清单	专利和经费	PSCE	FGLS	两年移动平均值	三年移动平均值
变量	UEI	UEI	UEI	UEI	UEI	UEI	UEI	UEI
RD	0.096***	0.094***	0.087***		0.093***	0.021***		
	(3.061)	(2.996)	(2.805)		(7.799)	(6.907)		
FTI	0.003**	0.003**	0.003**		0.002	0.002***		
	(2.161)	(2.197)	(2.222)		(1.288)	(6.803)		
DTI	0.006	0.005	0.005		0.004	0.005***		
	(0.641)	(0.574)	(0.444)		(0.940)	(4.929)		
patent				0.042***				

				(4.520)				
<i>FTI_E</i>				0.001				
				(0.647)				
<i>DTP_E</i>				-0.001				
				(-0.416)				
<i>A2_RD</i>							0.111***	
							(3.369)	
<i>A2_FTI</i>							0.003*	
							(1.726)	
<i>A2_DTI</i>							0.007	
							(0.901)	
<i>A3_RD</i>								0.100***
								(2.868)
<i>A3_FTI</i>								0.005**
								(2.460)
<i>A3_DTI</i>								0.006
								(0.983)
观测值	540	582	450	263	600	600	540	504
R方	0.359		0.345	0.767	0.866		0.312	0.318
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
年份固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
省份	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

(二) 门限回归结果

1、门槛效应检验

本文通过门槛效应自举抽样(Bootstrap)检验法进行检验,分别在 400 次格点搜索和 300 次自举抽样对门槛值进行检验,得到 F 统计量的渐进值和 P 值,相关结果见表 4 前五列。在各效率值作为被解释变量的门槛效应模型中,UEI 的 P 值均小于 0.1,其单一门槛假设下的门槛效应在 10%及以下的置信水平上显著。

表 4 门槛效应自抽样检验结果

	因变量	RSS	MSE	F 统计量	P 值	门槛估计值	置信区间
<i>Gap_tfp</i>	UEI	2.7892	0.0048	89.63**	0.0433	2.4253**	[2.4096, 2.4341]
<i>Gap_gdp</i>	UEI	2.9247	0.0050	58.62*	0.0900	4.9907***	[4.9627, 4.9978]

2、回归结果分析

基于模型(2),将两个技术差距作为门槛变量、三种技术进步路径作为被门槛变量,对全要素低碳发展效率进行回归,发现无论是侧重技术进步的 TFP 差距还是注重技术产出的人均 GDP 差距,门槛回归的结果是相似的,这也证明了结论的稳健性。如表 5 所示,根据

模型识别出的门槛值将样本分为接近前沿地区和远离前沿地区，发现对于接近前沿地区，自主创新是促进低碳发展效率提升的唯一有效路径，而国外技术引进和国内技术购买对低碳发展效率并不显著，可能的原因有三点：第一，随着本地区技术发展逐渐接近世界前沿水平，发达国家高精尖技术的技术复杂性和学习成本随之上升，引进国外技术对本地区生产效率的提升空间缩减，前沿地区只能通过自主研发实现关键领域的核心技术突破，最终实现技术赶超（孙早和宋炜，2013）；第二，在低碳生产成为新兴竞争力的国际背景下，当后发国家不断进行技术进步和技术追赶，发达国家会封锁关键领域的高端技术，其技术出口以通用技术或过期技术为主，含金量和市场竞争迭代价值不足，难以有效带动低碳发展效率值提升。第三，由于前沿地区已经具备了适合当地发展特征和要素禀赋的先进技术及其成熟的应用模式，再吸收其他地区的技术对本地低碳经济增长的提升空间有限，因此国内技术购买发挥的作用并不显著。

相反，对远离技术前沿地区，自主研发不再对提升 UEI 起作用，技术引进包含的国外技术引进和国内技术购买是促进地区经济低碳转型的有效路径，二者均能从总体上提升地区低碳发展效率。该结果说明，基准回归中显著提升 UEI 的自主研发实则并非对所有地区都起作用，远离前沿地区的自主研发也可能是“资源浪费”，两个原因可以解释：第一，中国自 2001 年加入 WTO 后能以更低的价格引进国外先进技术，挤出了部分创新基础薄弱的欠发达地区的自主研发活动（Liu & Qiu, 2016；张杰，2015），抑制了研发动机和创新活力，研发效率低下；第二，部分落后地区投资资源错配，过度盲目地大规模投资于研发活动，限于当地研发能力仅能产出低附加值的产品和技术，而原本作为后发地区进行模仿所具有的很高的经济增长潜力成为了机会成本，且这项成本高于创新带来的收益（König et al., 2022）。与此相反，国外技术引进被证明对远离前沿地区来说是“捷径”，发达国家出口的通用技术的获取成本低、吸收速度快，能在短时间内促进效率进步。尽管大量学者认为引进技术有效的前提是与本地资源禀赋特点和技术吸收能力相匹配，但本文的实验证明，中国落后地区在平均水平上具备“技术吸收自信”。最后，国内技术购买为提升落后地区 UEI 发挥了非常关键的作用，国内技术交易相较于国外技术交易的交易成本更低，技术普适性更高，且随着接近前沿省份的技术研发能力逐渐增强，在促进本地效率进步的同时能够有效释放内部技术价值溢出，带动落后地区的效率提升。前文指出，中国 20 年来表现出国内技术交易市场日益蓬勃、甚至比肩自主研发的发展趋势，本节的回归结果证明了这种转变并非如基准回归结果那样不起作用。国内技术交易市场承担了帮助落后地区提升经济效率、缩小区域间技术差距与发展不平衡的重要责任，是前沿地区发挥技术辐射作用、带动落后地区的重要途径，也是在全国范围内将深度的知识创造转化为广度的技术应用的关键桥梁。

综合来看，在以节能减排和绿色经济增长为目标的国际技术竞争赛道上，中国的自主创新、国外技术引进和国内技术购买并非是取舍关系，而是在不同技术差距地区互为补充，最终实现技术研发与溢出的良性循环，这符合中国的基本国情与经济发展特征，为适宜性技术进步理论在中国成立提供了精细的证据，也为全球发展中国家实现技术赶超与绿色低碳转型提供了不菲的借鉴价值。

表 5 门槛回归结果

	(1)	(2)
门槛变量	<i>Gap_tfp</i>	<i>Gap_gdp</i>
被解释变量	<i>UEI</i>	<i>UEI</i>

<i>RD</i>	0.144***	0.122***
(区间1)	(4.770)	(4.473)
<i>RD</i>	0.043	0.062
(区间2)	(1.545)	(1.572)
<i>FTI</i>	0.004	-0.002
(区间1)	(1.555)	(-0.212)
<i>FTI</i>	0.002*	0.003***
(区间2)	(1.778)	(2.786)
<i>DTP</i>	0.002	-0.002
(区间1)	(0.482)	(-0.424)
<i>DTP</i>	0.084***	0.041*
(区间2)	(2.890)	(2.040)
观测值	600	600
R方	0.423	0.395
控制变量	Yes	Yes

五、进一步分析

(一) 技术进步路径与效率提升靶向

前文从各省前沿技术差距的纵向视角剖析了三类技术进步路径对 UEI 的作用。然而，由于 UEI 是涵盖了五种要素投入或产出效率的综合指标，单纯把 UEI 作为被解释变量可能会消释掉各路径对不同分解方向的异质性效应。为了进一步探明各路径究竟从哪些方向作用于 UEI，本文对三种技术进步路径关于 UEI 及五类分解效率均在双向固定模型下回归，以从分解效率值的横向视角进行补充探索。表 6 的回归结果表明，三类技术进步模式对我国整体实现绿色发展扮演了不同的角色。第一，RD 对 UEI 的提升几乎是“全要素”的，能够有效节约能源要素投入、劳动要素投入，减少碳排放，扩大经济产出，这表明中国在整体上初步建成了既经济又环境友好的技术创新体系，这在一定程度上反驳了文献关于中国自主创新能力薄弱的论断。尽管中国的后发优势逐渐弱化、发达国家的技术封锁日益强烈，中国正在努力向研发强国转型，脱离对国外技术引进的依赖。RD 并未提升资本利用效率，这是因为中国的自主研发重点转为更适合本国市场和资源禀赋的劳动节约型技术。第二，FTI 通过降低碳排放、提升资本利用效率而提升 UEI，且对 CEI 的系数显著性非常强，这说明中国目前在实现“双碳”目标的道路上对国外技术仍有部分依赖，这并不奇怪，因为发达经济体工业化与城镇化起步更早，更早开始节能减碳政策推行与低碳技术研发，特别是欧盟对氢能核能、节能储能等低碳技术的探索始终位于全球前沿。然而，RD 的回归结果说明，即使发达国家在低碳领域采取技术封锁，中国仍能实现碳减排的自立自强。第三，DTP 仅能通过提升经济产出效率提升 UEI，这说明国内技术交易市场有巨大的潜力待挖掘，也说明中国的自主创新需要不断夯实以为交易市场提供更高水平的原创技术。

表 6 三种路径的效率提升靶向

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
变量	<i>UEI</i>	<i>CEI</i>	<i>EEI</i>	<i>YEI</i>	<i>LEI</i>	<i>KEI</i>

<i>RD</i>	0.094***	0.099**	0.057*	0.051***	0.088***	0.001
	(2.997)	(2.567)	(1.807)	(4.392)	(5.069)	(0.040)
<i>FTI</i>	0.003**	0.005***	0.001	0.002	0.002	0.003***
	(2.276)	(3.476)	(0.924)	(0.880)	(0.586)	(5.363)
<i>DTP</i>	0.005	0.004	0.001	0.007*	0.004	-0.001
	(0.592)	(0.400)	(0.097)	(1.907)	(0.747)	(-0.376)
观测值	600	600	600	600	600	600
R方	0.335	0.294	0.421	0.209	0.303	0.283
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
年份固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
省份	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

（二）国内技术输出（DTE）的影响

国内技术购买是技术创新的拓展延伸，发挥着将新技术及时有效转移转化、促进自主创新系统良性运转的重要功能。然而，模型（2）的回归结果显示，国内技术引进（DTP）仅对落后地区 UEI 有显著提升，对接近前沿地区并未发挥作用，这似乎暗示着（1）接近前沿地区参与国内技术交易市场仅获取了创新收益，并未从实质上带动本地经济增长模式转型升级，其承担技术供给方的角色似乎缺乏有效激励；（2）欠发达地区只需做好技术承接就能提升效率，无需向外地输出本地技术。在该部分，本文关注国内技术购买的另一面——技术输出的影响，以期对接近前沿地区和远离前沿地区均有必要扮演好技术供给者的角色提供证据。本文认为，一方面，接近前沿地区存在竞争机制，将本地付诸了长周期和高投入成本的原创技术转移至落后地区，使得落后地区在短期内提升技术进步速度，进而倒逼接近前沿地区加快自主研发效率以维持领先地位。另一方面，远离前沿地区存在互惠机制，由高位势向低位势的技术传播路径存在更强的信息不对称，甚至过大的技术势差会阻碍技术转移（Porter, 1985），这进一步引致了低势位之间为降低交易成本进行知识互惠分享最终共生演化的行为逻辑，因此远离前沿地区向外输出本地技术能够通过技术互惠机制积累本地知识存量，为缩小技术差距、向自主研发路径平稳过渡夯实基础。基于上述分析，本文在模型（1）中引入国内技术输出合同额（DTE）与研发（RD）的交互项，分别对全样本、接近和远离前沿地区样本进行回归。如下表所示，三类地区的交互项系数均显著为正，证明技术输出正向调节了研发对 UEI 的提升作用，即积极承担技术输出角色的发达和欠发达地区更能通过竞争机制和互惠机制提升研发的效果。上述结论说明，共建国内技术交易市场、激发技术交易活力、打通技术交易路径，对于实现更高质量的经济增长模式和更具效能的自主创新道路至关重要。

表 7 *DTE* 对 *RD* 的正向调节作用

变量	(1)	(2)	(3)	(5)	(6)
	全样本	<i>Gap_tfp</i>		<i>Gap_gdp</i>	
		接近前沿	远离前沿	接近前沿	远离前沿
	<i>UEI</i>	<i>UEI</i>	<i>UEI</i>	<i>UEI</i>	<i>UEI</i>
<i>RD</i>	0.135***	-0.279***	0.099***	0.005	0.118***

	(8.478)	(-6.392)	(4.726)	(0.127)	(6.560)
<i>DTI</i>	-0.008	0.040	-0.008*	-0.008**	-0.017*
	(-1.620)	(1.362)	(-1.683)	(-2.222)	(-1.719)
<i>FTI</i>	0.005	-0.011	0.009**	-0.025	0.009**
	(1.449)	(-0.513)	(2.444)	(-1.339)	(2.464)
<i>DTE</i>	0.001***	-0.003***	0.001***	-0.000	0.001***
	(4.873)	(-7.786)	(4.821)	(-0.137)	(3.866)
<i>DTE*RD</i>	0.006**	0.072***	0.005**	0.000*	0.006*
	(2.351)	(5.044)	(2.043)	(1.716)	(1.724)
观测值	440	58	382	38	402
R方	0.333	0.843	0.224	0.929	0.253
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
年份固定效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
省份	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

六、结论与启示

在“双碳”背景下，各国愈发重视技术进步在低碳经济发展中的作用，后发国家该如何选择技术进步模式以谋求低碳经济增长？利用 2000-2019 年中国省域面板数据，本文构建基于总体技术前沿的非角度、非径向方向距离函数模型，测算并分解各省全要素低碳发展效率（UEI），检验自主研发、国外技术引进和国内技术购买三种主要技术进步路径如何影响 UEI，并从前沿技术差距视角揭示技术异质性地区实现经济高质量增长相对更优的技术进步路径。本文的研究结论有：第一，基准回归结果表明，自主研发（RD）和国外技术进口（FTI）从整体上提升了 UEI，经过一系列稳健性检验后该结论仍然成立。第二，门槛回归结果表明，接近前沿地区的 RD 是提升 UEI 的唯一有效路径；远离前沿地区的国外技术引进（FTI）和国内技术购买（DTP）是有效路径；第三，进一步分析表明，中国现阶段已经初步建成了既经济又环境友好的技术创新体系，对国际政治格局变革和尖端技术封锁形成了一定的“防御力”，但该体系仍有待夯实以为国内技术交易市场提供更高水平的技术要素，加快摆脱对国外尖端低碳技术的依赖；此外，国内技术输出（DTE）通过竞争机制倒逼接近前沿地区提升研发效率，通过互惠机制激励远离前沿地区提升研发效率，这说明成为技术供给者至关重要。

本文的研究具有丰富的政策启示。第一，中国地域广博、发展多元，各地区绝不应按同一赛道发展技术水平，而应充分利用技术差距带来的机遇，接近前沿地区把重点放在自主研发，远离前沿地区要积极参与国内外技术交易市场，借助后发优势发展绿色经济。第二，自主研发应该成为发达地区带动落后地区实现技术驱动绿色经济增长的源动力，在节能减排领域的技术创新仍需完善，建成自主可控的低碳技术创新体系；出台科技支撑碳达峰碳中和的相关方案，完善顶层设计，明确企业、高校、科研院所等主体的创新定位，形成有效合力。第三，辩证看待国外技术引进的作用。对于低碳发展效率的提升，中国仍对国外技术有较大依赖，但由于发达国家尖端技术封锁日益紧迫、后发技术吸收门槛日渐升高，这种引进类投资并不能提升发达地区的发展效率。因此，发达地区政府必须转变观念，认识到自主创新才是突破关键低碳技术、解决尖端技术“卡脖子”问题的动力和保障，力求从长期以来的技术

模仿、吸收和整合向技术研发、创造转变。对于引进国外技术应甄别成本、把握力度，同时要积极转型，通过未来产业的创新建设突破国外技术封锁困境。第四，国内技术购买在提升整体低碳发展效率、缩小地区差距的方面发挥着重要功能，虽然随着中国市场化程度和科技水平的不断提高，国内技术交易规模日益扩大，但总体来说仍处于初级阶段，存在诸多问题，譬如研发主体脱节导致有效供给不足、技术估值等价格形成机制不成熟、环节缺失导致资金链断裂等。应加快壮大国内技术交易市场，提升科技水平、细化交易主体、完善市场机制、汲取国际经验，健全技术供给方的激励机制，提升技术附加值。

本文的研究存在一定的局限性。第一，政府法规可能会影响到回归结果，中国政府在2000-2019年期间就创新发展和环境保护发布了多项政策，这些政策会干预各地区的研发投资行为与投资导向，进而对本文回归结果产生难以量化和剔除的影响。第二，地方政府的策略性行为也会影响回归结果，由于研发具有周期性，地方政府为了在晋升锦标赛中既能响应中央政府的自主创新政策，又能获得更快的经济绩效，有动机将名义上的研发投资实际用于生产性建设，而这对于本文的回归结果亦产生了隐形且不易剔除的影响。综上，有必要继续拓展和深化该选题的研究。

参考文献

李勃昕、董雨、韩先锋：《技术封锁是否会抑制中国创新发展？——基于国外技术引进和国内技术购买的对冲效应解释》，《统计研究》第10期。

林伯强、刘泓汛，2015：《对外贸易是否有利于提高能源环境效率——以中国工业行业为例》，《经济研究》第9期。

刘思明、侯鹏、赵彦云：《知识产权保护与中国工业创新能力——来自省级大中型工业企业面板数据的实证研究》，《数量经济技术经济研究》第3期。

林毅夫、张鹏飞，2005：《后发优势、技术引进和落后国家的经济增长》，《经济学（季刊）》第4期。

邵朝对、苏丹妮，2019：《国内价值链与技术差距——来自中国省际的经验证据》，《中国工业经济》第6期。

邵帅、范美婷、杨莉莉，2022：《经济结构调整、绿色技术进步与中国低碳转型发展——基于总体技术前沿和空间溢出效应视角的经验考察》，《管理世界》第2期。

孙早、许薛璐，2017：《前沿技术差距与科学研究的创新效应——基础研究与应用研究谁扮演了更重要的角色》，《中国工业经济》第2期。

王林辉、王辉、董直庆，2022：《技术创新方向、均衡技术差距与技术追赶周期》，《世界经济》第3期。

余泳泽、张先轾，2015：《要素禀赋、适宜性创新模式选择与全要素生产率提升》，《管理世界》第9期。

张杰：《进口对中国制造业企业专利活动的抑制效应研究》，《中国工业经济》第7期。

张杰、陈志远、吴书凤、孙文浩：《对外技术引进与中国本土企业自主创新》，《经济研究》第7期。

张军、金煜：《中国的金融深化和生产率关系的再检测：1987~2001》，《经济研究》，2005年第11期。

郑江淮、荆晶：《技术差距与中国工业技术进步方向的变迁》，《经济研究》第7期。

张宁，2022：《碳全要素生产率、低碳技术创新和节能减排效率追赶——来自中国火力发电企业的证据》，《经济研究》第2期。

诸竹君、袁逸铭、焦嘉嘉，2022：《工业自动化与制造业创新行为》，《中国工业经济》第7期。

Acemoglu, D., Aghion, P., Bursztyn, L., and Hemous, D. 2012. "The Environment and Directed Technical Change". *American Economic Review*, 102(1), 131-166.

Acemoglu, D., Aghion, P., and Zilibotti, F. 2006. "Distance to Frontier, Selection, and Economic

Growth". *Journal of the European Economic Association*, 41, 37-74.

Afsharian, M., and Ahn, H. 2015. "The Overall Malmquist Index: A New Approach for Measuring Productivity Changes Over Time". *Annals of Operations Research*, 226, 1-27.

Albino, V., Ardito, L., Dangelico, R. M., and Petruzzelli, A. M. 2014. "Understanding the Development Trends of Low-Carbon Energy Technologies: A Patent Analysis". *Applied Energy*, 135, 836-854.

Barros, C. P., Managi, S., and Matousek, R. 2012. "The Technical Efficiency of the Japanese Banks: Non-Radial Directional Performance Measurement with Undesirable Output". *Omega*, 40(1), 1-8.

Bloom, N., Draca, M., and Van Reenen, J. 2016. "Trade Induced Technical Change? the Impact of Chinese Imports on Innovation, IT and Productivity". *the Review of Economic Studies*, 831, 87-117.

Buera, F. J., and Oberfield, E. 2020. "The Global Diffusion of Ideas". *Econometrica*, 881, 83-114.

Chambers, R. G., Chung, Y., and Färe, R. 1996. "Benefit and Distance Functions". *Journal of Economic theory*, 702, 407-419.

Chen, Y., and Lee, C. C. 2020. "Does Technological Innovation Reduce CO2 Emissions? Cross-Country Evidence". *Journal of Cleaner Production*, 263, 121550.

Chen, Z., Song, P., and Wang, B. 2021. "Carbon Emissions Trading Scheme, Energy Efficiency and Rebound Effect—Evidence from China's Provincial Data". *Energy Policy*, 157, 112507.

Chung, Y. H., Färe, R., and Grosskopf, S. 1997. "Productivity and Undesirable Outputs: A Directional Distance Function Approach". *Journal of Environmental Management*, 513, 229-240.

Churchill, S. A., Inekwe, J., Smyth, R., and Zhang, X. 2019. "R&D Intensity and Carbon Emissions in the G7: 1870–2014". *Energy Economics*, 80, 30-37.

Fukuyama, H., and Weber, W. L. 2009. "A Directional Slacks-Based Measure of Technical Inefficiency". *Socio-Economic Planning Sciences*, 434, 274-287.

Gao, Y., Zhang, M., and Zheng, J. 2021. "Accounting and Determinants Analysis of China's Provincial total Factor Productivity Considering Carbon Emissions". *China Economic Review*, 65, 101576.

Gu, G., and Wang, Z. 2018. "Research on Global Carbon Abatement Driven By R&D Investment in the Context of Indcs". *Energy*, 148, 662-675.

Heller, P. B. 1985. "Technology Transfer and Human Values: Concepts, Applications, Cases". *No Title*.

Keller, W. 2004. "International Technology Diffusion". *Journal of Economic Literature*, 423, 752-782.

IPCC. 2021. "Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2021: Impacts, Adaptation, and Vulnerability".

König, M., Storesletten, K., Song, Z., and Zilibotti, F. 2022. "From Imitation to Innovation: Where Is All That Chinese R&D Going?" *Econometrica*, 904, 1615-1654.

Li, K., Qi, S., and Shi, X. 2023. "Environmental Policies and Low-Carbon Industrial Upgrading: Heterogenous Effects Among Policies, Sectors, and Technologies in China". *Technological forecasting and Social Change*, 191, 122468.

Li, R., and Jiang, R. 2020. "Investigating Effect of R&D Investment on Decoupling Environmental Pressure from Economic Growth in the Global top Six Carbon Dioxide Emitters". *Science of the total Environment*, 740, 140053.

Lin, B., and Ma, R. 2022. "Towards Carbon Neutrality: The Role of Different Paths of Technological Progress in Mitigating China's CO2 Emissions". *Science of the total Environment*, 813, 152588.

Luenberger, D. G. 1992. "Benefit Functions and Duality". *Journal of Mathematical Economics*, 215, 461-481.

- Liu, Q., and Qiu, L. D. 2016. "Intermediate Input Imports and Innovations: Evidence from Chinese Firms' Patent Filings". *Journal of International Economics*, 103, 166-183.
- Los, B., and Timmer, M. P. 2005. "the 'Appropriate Technology' Explanation of Productivity Growth Differentials: An Empirical Approach". *Journal of Development Economics*, 772, 517-531.
- Lucas Jr, R. E. 1993. "Making A Miracle". *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 251-272.
- Lucas Jr, R. E., and Moll, B. 2014. "Knowledge Growth and the Allocation of Time". *Journal of Political Economy*, 1221, 1-51.
- Mukoyama, T. 2003. "Innovation, Imitation, and Growth with Cumulative Technology". *Journal of Monetary Economics*, 502, 361-380.
- Ndlovu, V., and Inglesi-Lotz, R. 2020. "The Causal Relationship Between Energy and Economic Growth Through Research and Development R&D: the Case of BRICS and Lessons for South Africa". *Energy*, 199, 117428.
- Oh, D. H. 2010. "A Global Malmquist-Luenberger Productivity Index". *Journal of Productivity Analysis*, 34, 183-197.
- Pastor, J. T., and Lovell, C. K. 2005. "A Global Malmquist Productivity Index". *Economics Letters*, 882, 266-271.
- Petricevic, O., and Teece, D. J. 2019. "The Structural Reshaping of Globalization: Implications for Strategic Sectors, Profiting from Innovation, and the Multinational Enterprise". *Journal of International Business Studies*, 50, 1487-1512.
- Peters, G. P., Marland, G., Le Qu  r  , C., Boden, T., Canadell, J. G., and Raupach, M. R. 2012. "Rapid Growth in CO2 Emissions After the 2008–2009 Global Financial Crisis". *Nature Climate Change*, 21, 2-4.
- Perla, J., and tonetti, C. 2014. "Equilibrium Imitation and Growth". *Journal of Political Economy*, 1221, 52-76.
- Ray, S. C., and Desli, E. 1997. "Productivity Growth, Technical Progress, and Efficiency Change in Industrialized Countries: Comment". *the American Economic Review*, 875, 1033-1039.
- Song, M., Zhu, S., Wang, J., and Zhao, J. 2020. "Share Green Growth: Regional Evaluation of Green Output Performance in China". *International Journal of Production Economics*, 219, 152-163.
- Verfaillie, H. A. 2000. "Measuring Eco-Efficiency: A Guide to Reporting Company Performance". *World Business Council for Sustainable Development*, 2000.
- Wang, K. H., Umar, M., Akram, R., and Caglar, E. 2021. "Is Technological Innovation Making World "Greener"? An Evidence from Changing Growth Story of China". *Technological forecasting and Social Change*, 165, 120516.
- Wang, S., Zeng, J., and Liu, X. 2019. "Examining the Multiple Impacts of Technological Progress on CO2 Emissions in China: A Panel Quantile Regression Approach". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103, 140-150.
- Wong, C. Y., Mohamad, Z. F., Keng, Z. X., and Azizan, S. A. 2014. "Examining the Patterns of Innovation in Low Carbon Energy Science and Technology: Publications and Patents of Asian Emerging Economies". *Energy Policy*, 73, 789-802.
- Yang, Y., Cai, W., and Wang, C. 2014. "Industrial CO2 Intensity, Indigenous Innovation and R&D Spillovers in China's Provinces". *Applied Energy*, 131, 117-127.
- Zhang, J., Lyu, Y., Li, Y., and Geng, Y. 2022. "Digital Economy: An Innovation Driving Factor for Low-Carbon Development". *Environmental Impact Assessment Review*, 96, 106821.
- Zhang, N., Kong, F., Choi, Y., and Zhou, P. 2014. "The Effect of Size-Control Policy on Unified Energy and

Carbon Efficiency for Chinese Fossil Fuel Power Plants". *Energy Policy*, 70, 193-200.

Zheng, Y., and Wang, Q. 2020. "Shadow of the Great Firewall: The Impact of Google Blockade on Innovation in China". *Strategic Management Journal*, 41(12), 2234-2260.

Zhou, P., Ang, B. W., and Wang, H. 2012. "Energy and CO2 Emission Performance in Electricity Generation: A Non-Radial Directional Distance Function Approach". *European Journal of Operational Research*, 221(3), 625-635.