文章编号:1004-8308(2023)05-0150-13
DOI:10.13581/j.cnki.rdm.20221376

如何兼顾降碳约束与经济稳态增长?

——以技术效率为内生转化媒介的动态门槛检验

李勃昕[1], 董 雨[1], 谷 羽[2], 韩先锋[3]
(1.西安财经大学 公共管理学院, 西安 710061; 2.西安外国语大学 商学院, 西安 710128;
3.昆明理工大学 管理与经济学院, 昆明 650093)

摘 要: 全面建设社会主义现代化需要探索一条具有中国特色的包容性降碳路径,兼顾"双碳"目标与经济稳态增长至关重要。以技术效率为内生转化媒介,推导降碳减排与经济增长并行演进的理论机制。进一步以中国省际面板数据实证研究发现:经济产出与碳排放之间存在一定的原生依赖关系,完全"碳脱钩"并不符合中国的现实情境,而技术效率提升为并行推动降碳约束和经济增长提供了内生转化工具。非线性研究还发现:碳排放增速在不同水平时,技术效率提升对经济增长的内生驱动轨迹有所变化,只有合理适度的降碳约束能够撬动技术效率的最佳内生驱动力。此外,降碳约束对技术效率的内生驱动存在时空异质性:过高或过低的碳排放约束在东部地区并不适用,中西部地区需要一定的碳排放容忍度才能释放效率变革与经济增长的共轭红利。研究发现为积极稳妥推进碳达峰碳中和、兼顾经济稳态增长提供了内生转化的理论启示与动态调节的量化依据。

关键词:"双碳"目标;技术效率;经济增长;波特假说
中图分类号:F124.3;X321 **文献标识码**:A

0 引 言

党的二十大报告中将"双碳"战略作为贯彻新发展理念、构建新发展格局、推动高质量发展的绿色指向标。中国作为全球第二大经济体,同时也是碳排放第一大国,面临经济增长与降碳减排的双重约束。显然,经济先行与环境优先的悖论之争不应陷入零和博弈[1],中国式"双碳"推进需要寻求经济稳态增长的包容性路径。西方学者所倡导的"波特假说"认为环境规制有助于加速技术进步与效率变革,从而驱动内生增长,这为推动"双碳"目标与经济绿色转型提供了外部性理论依据[2]。然而,"波特假说"更像是一种逆向解释,环境规制本身存在降碳成本,需要牺牲一定的经济产出,过于严苛的降碳约束会失去效率弹性,不仅无法实现内生驱动和绿色转型,还会反噬经济增长,产生更为严重的涟漪效应。事实上,"波特假说"的规制目的在于通过技术进步和效率提升打通环境规制与经济增长的共轭通道,提高碳排放的经济贡献度,释放双向溢出红利,这为科学推进"双碳"目标、缓解经济下行压力提供了共生互利的解释基础。

国内经济正处于外延式扩张向内生性增长的转型阶段,受新冠疫情及世界格局多变等不利因素影响,绿色高质量发展面临诸多挑战,"双碳"推进将加速供给侧改革,加剧经济增速下行压力。那么,全面现代化进程中亟待破解的难题是:在"双碳"目标推进的同时,保持稳中向好的经济增长趋势,应如何设计合理可行的降碳策略? 针对这一问题,本文展开研究,可能的贡献在于:①通过理论分析揭示碳排放、技术效率与经济增长之间的迭代关系和内生转化机制,构建以降碳约束激励内生驱动的经济稳态增长体系;②借助实证研究判断碳排放与经济增长之间的原生依赖关系,以及技术效率进步对经济增长的内生

收稿日期:2022-11-04;**修改日期**:2023-01-30。
基金项目:国家社会科学基金青年项目"长三角区域一体化下科技资源共享的动态演化机制研究"(20CGL061);陕西省社会科学基金项目"'双碳'战略驱动下陕西绿色创新的内生转化路径研究"(2022D019);陕西省软科学研究计划一般项目"'双碳'战略驱动下陕西省氢能产业发展路径设计与培育政策研究"(2023-CX-RKX-049)。
第一作者:李勃昕(1982—),男,博士,副教授,研究方向为技术经济与创新发展, liboxin@hotmail.com。
通信作者:韩先锋(1984—),男,博士,教授,研究方向为技术创新, 286193453@qq.com。

驱动效应，进一步设计动态门槛计量模型，检验碳排放在不同约束水平时技术效率提升对经济增长的内生驱动轨迹，寻求降碳约束的最优溢出空间；③借助空间异质性分析，对比碳排放增速对技术效率的内生驱动差异，识别不同地区碳排放约束及其内生驱动的时空分异特征；④理论结合实证，为激励效率变革与内生驱动，实现降碳约束与经济稳态增长的双向平衡，提供动静结合的研究参考和多维协同的政策建议。

1　文献回顾和研究假设

1.1　文献述评

工业时代化石能源加速消耗，城市化进程逐步吞噬绿色土地，造成碳排放激增和温室效应恶化，环境规制成为全球最大的外部性议题[3]。1979年世界气象组织召开了第一届世界气候大会，开始在世界范围内倡导降碳减排，到1997年的《京都协议书》，再到2009年的哥本哈根气候大会，气候问题广受关注。2015年巴黎全球气候大会达成全球范围内的降碳共识，诸多国家开启降碳之路[4]。根据世界资源研究所（WRI）统计数据显示，德国、法国等30多个国家早在20世纪90年代就已经实现了碳达峰。进入21世纪以来，意大利、日本和韩国等20多个国家相继实现碳达峰。截至2021年末，已有超过50个国家的碳排放规模开始逐步下降，世界范围内逐渐形成从碳达峰到碳中和的演进趋势。对比发现，已经实现碳达峰的国家中发达国家居多，这反映了世界经济与碳排放的结构性差异[5]。其中，巴西、塔吉克斯坦等一些发展中国家先行实现碳达峰的原因可能是工业结构较为简单[6]。整体来看，发达国家和发展中国家对于降碳约束依然存在理解分歧，印度等一些国家认为过于严苛的降碳计划忽视了发展中国家的现实诉求[7]。经过多年谈判，发展中国家立足自身国情制定了相对合理的降碳目标，中国、墨西哥等诸多发展中国家承诺在2030年以前实现碳达峰。在已经实现碳达峰的国家中，多数发达国家承诺在2050年之前实现碳中和，中国力争在2060年之前实现碳中和。值得关注的是，受到俄乌冲突引发的能源危机影响，一些欧盟国家提出推迟碳中和计划，这在2022年联合国气候变化大会上引发了其他国家诟病[8]。

碳达峰和碳中和的内在含义远远超过了目标本身。欧美等西方国家在高速工业化之后，逐渐转入内生增长轨道，摆脱了资源消耗型扩张模式，在维持经济稳定的同时，先行实现碳达峰，并呼吁全球性降碳规制，加强环境保护[9]。DALY等[10]认为英国的能源结构优化对其实现碳达峰至关重要，这为其他国家提供了经验参照。日本等新兴发达国家的降碳之路更多依赖于技术效率提升，以此摆脱边际投入递减所造成的碳排放规模上升[11]。美国曾被认为是环境保护的示范性国家[12]，通过加强环境规制、开放碳交易市场[13]，实现了经济增长与降碳规制的并行优化，但一些学者认为，美国的降碳减排和能源结构优化提高了全球能源成本，反而不利于其他国家降碳减排[14]。YAN和WHALLEY[15]研究发现，美国的贸易国际化在一定程度转移了碳排放，这给中国等一些发展中国家带来了更大的环境压力。讽刺的是，美国2019年退出《巴黎协定》，引发了世界气象组织和其他国家的谴责。世界经济发展不平衡造成了对绿色经济的理解差异，相对于发达国家所提倡的环境优先论，广大发展中国家关注更多的是生存现状，经济增长被视为解决环境问题的前提条件[16]，在亚非拉等欠发达地区实施严苛的环境规制与降碳约束显然不合时宜。

以NORDHAUS[17]为代表的西方经济学家将碳排放的负面影响纳入经济评价指标，推崇绿色增长体系，以此作为环境优化和经济增长的和谐之道。低碳经济体系中，最为核心的关系是碳排放与经济增长之间的相互影响。按照古典经济增长模型，资源投入和能源消耗是经济增长之本源，碳排放和经济增长具有孪生关系[18]，降碳减排与经济增长不可兼得。然而，GROSSMAN和KRUEGER[19]认为碳排放与经济增长之间并非简单的静态关系，而是具有类似库兹涅茨曲线的动态演进规律，称之为ECK曲线。DANISH等[20]的实证研究验证了这一观点，环境规制有助于降低碳排放，加快倒U形曲线蔓延，形成正向降碳趋势。国内学者王菲等[21]将我国分为了东中西3个地区，分别研究2009—2014年各地区人均GDP与碳排放的关系，认为这3个地区的ECK曲线都存在，只是拐点有所不同。YANG等[22]基于经济增长与碳排放的动态演进关系提出，西方发达国家碳排放逐步达到峰值，而主要发展中国家的碳排放总量和人均碳排放水平依然处于上升态势，尚未达到峰值门槛[23]。像印度这样的发展中国家正处于高碳增长期，不应以降碳规制“吞噬”经济增长空间[24]。

西方发达国家在碳达峰过程中经济并未明显衰退，这一现象值得关注。新古典经济增长模型提供了更为合理的解释，技术进步和效率提升改变了固有的生产关系，为经济增长注入内生动力[25]，这被认为是打破边际递减规律和降碳约束的理论基础。中国经济发展具有自身特殊性，改革开放初期经济高速增长更多依赖于外延式扩张，能源结构中化石能源占比较重，碳排放规模激增[26]，但随着发展水平提升，人口红利难以为继，经济高速增长的延续性受到质疑[27-28]。国内经济正在从高速增长阶段转向高质量发展阶段，转型动力源于技术进步所释放的效率变革[29]，这一点国内学界做了大量的分析论证[30-31]。然而，经济转型并非一蹴而就，程名望等[32]指出中国经济增长依赖于“汗水”和“灵感”的双重驱动，“灵感”的驱动效应逐渐加强，技术效率提升对中国经济增长的内生转化存在渐进规律，这为降碳约束提供了内生解释空间[33]。

“波特假说”成为平衡环境规制与经济增长的理论工具，提倡通过降碳约束提高技术效率，实现内生增长与绿色驱动的共轭模式。但在初始投入产出模型中，技术效率水平可能较低，无法作为影响碳排放的解释变量和内生因子[34]，只有在一定的技术水平之上，碳排放与技术效率之间才会发生转化关系[35]。BRÄNNLUND等[36]通过推演能源消耗与投入产出模型发现，技术效率提升会降低资源投入与能源消耗，提高二氧化碳的经济贡献，从而降低生产活动对化石能源的需求。杨莉莎等[37]基于指数分解与生产理论分解两种方法量化测算中国工业产业二氧化碳排放的影响因素，发现技术效率提升能够显著降低我国工业二氧化碳排放。张兵兵等[38]进一步提出，技术效率提升包括新技术应用和效率变革。随着中国经济转型和产业结构升级，技术效率提升将成为中国低碳经济高质量发展的内生驱动力。可见，技术效率提升是ECK曲线拐点的关键撬动因素，这是实现降碳约束与经济增长的平衡支点。

综上所述，已有文献深入揭示了碳排放、技术效率与经济增长之间的两两关系。事实上，基于“波特假说”的降碳预期需要包容三者之间的迭代影响。中国经济向高质量迈进过程中，保持经济稳态增长是降碳减排的约束性条件，而效率变革为“双碳”推进和经济增长提供了内生转化空间。但到底如何缓释降碳，实现内生驱动与经济稳态增长，依然需要深入研究。本文在现有研究基础上，尝试厘清碳排放、技术效率与经济增长之间的迭代关系，建立三者之间的传导驱动机制，通过量化研究识别碳排放增速与技术效率提升对经济增长的动态溢出轨迹，从而提出科学降碳与经济稳态增长的并行启示。

1.2 理论假设

以C-D函数为基础构建包含能源消耗的投入产出函数：$Q=f(L,K,E)$，其中，将能源消耗E独立于资本投入K。初始阶段，能源消耗以化石能源为主[39]，产生碳排放：$E\sim CO_2$。由此进一步将投入产出模型转换为碳排放的贡献关系$Q=f(L,K,CO_2)$，假设资本和劳动力投入产出关系保持恒定，则碳排放与经济产出之间的关系演化过程如图1所示。有碳排放对经济产出的初始线性贡献影响为Ⅰ：$Q=\alpha CO_2+\varepsilon$，这时碳排放与经济产出之间存在原生正向关系。按照动态均衡规律，随着生产规模扩张，化石能源消耗逐渐上升，天然稀缺性导致效率更高的优质化石能源价格不断上涨，生产环节投入大量低效能源，产生更多碳排放[40]，即单位碳排放的产出贡献率有所下降，即Ⅱ：$Q=\alpha_1 CO_2+\varepsilon_1$；且$\alpha_1<\alpha$；出现了碳排放对经济产出的边际递减，若要维持经济扩张，需要加大能源投入，这会导致碳排放激增。反之，如果强化降碳约束，则会进一步挤压生产关系，造成对经济增长的抑制性影响。

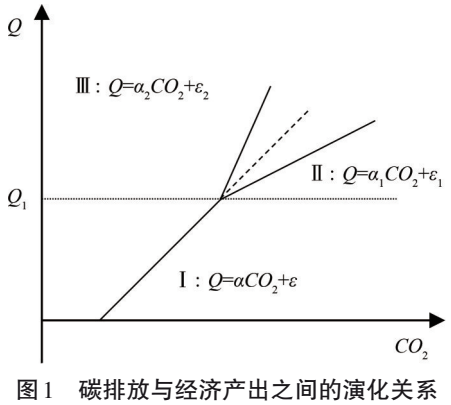

图1 碳排放与经济产出之间的演化关系

Fig. 1 Evolutionary relationship between carbon emissions and economic output

H1 碳排放与经济增长之间存在原生依赖关系，在外延式经济扩张阶段，降碳约束可能会抑制经济增长空间。

从日本、韩国等新兴碳达峰国家的历史演化轨迹来看[41]，经济发展初期，产业结构以中低端价值链为主，经济高速增长依赖于要素投入和人口红利，外延式扩张导致高能耗和高污染，同时碳排放规模激增，

经济增长和环境优化存在共轭矛盾[42]。随着经济发展水平提升，内生增长理论给予一剂良方：以技术进步和效率提升优化投入产出矩阵，打破边际递减规律，从而转轨内涵式增长模式。效率变革同时改变了碳排放与经济产出之间的演进关系，即Ⅲ：$Q = \alpha_2 CO_2 + \varepsilon_2, \alpha_2 > \alpha$。技术进步和效率提升能够提高单位碳排放的经济产出贡献水平，EKC曲线呈现为从Ⅰ到Ⅲ的转化过渡。

H2　通过技术进步和效率提升能够加快内生驱动，提高单位碳排放的经济贡献。

虽然内生增长理论广为推崇，但不同国家发展水平和进化轨迹不尽相同。英国、德国等西方发达国家由于科技革命历史漫长[43]，早在20世纪中叶就踏上了工业化道路，以技术创新和效率提升推动产业结构升级，摆脱了要素投入的边际递减约束，嵌入内生增长轨道，因此能够不断降低能源消耗，优化能源结构，嵌入EKC曲线的碳达峰轨迹[44]。理论推导发现，只有$Q > Q_1$且$\alpha_2 > \alpha$时，才能开启降碳约束与经济增长的并行模式。美国等一些西方国家在碳达峰之前同样经历了高耗能、高污染的外延式增长模式[12]，造成了严峻的环境污染问题。可见，从资源消耗的外延式扩张转轨内生增长并非一蹴而就，如果没有高碳阶段的工业化进程，科技革命可能难以实现绿色转型[45]。顺利从外延式扩张转轨内涵式增长，是跨越EKC拐点的关键一跃。多数发展中国家依然处于经济增长的初级阶段（$Q < Q_1$且$\alpha_1 < \alpha$时），甚至仍在努力摆脱贫困，尚不具备以技术效率驱动内生降碳条件，严苛的降碳约束在初级外延式扩张阶段将产生更为严重的反噬效应。

H3　经济发展过程中，由于技术水平差异，降碳约束在不同强度时对内生驱动的激励效应呈现出非线性溢出轨迹。

中国改革开放初期生产制造业依赖于人口红利和资源投入，生产技术水平偏低，呈现出高耗能、高污染特征，碳排放规模呈现急剧增长趋势。一些发达国家为了逃避本国环境规制，将一些高碳行业嫁接至中国，在产业导入的同时加剧了碳排放压力[46]。随着改革开放深入，一方面通过学习模仿外资企业提高自身产业技术水平，另一方面鼓励国内企业参与全球化市场竞争，以技术创新加速效率变革和内生转型，降低产业能耗并优化能源结构，摆脱过去粗放式增长模式，这为降碳约束和绿色增长释放了转轨动能[47]。中国正处于从高速增长向高质量发展的转型调整期，虽然内生驱动不断加速，但效率变革与结构优化是一个周期性迭代过程[48]。这一情境下，环境规制更像是一把“双刃剑”，既能够撬动内生增长，也会抑制外延式经济扩张。

H4　中国经济结构处于外延式扩张向内生性增长的转型阶段，“双碳”推进要与技术效率的动态演进相匹配，才能实现科学降碳与经济稳态增长。

2　研究设计

2.1　数据检验

本文选择了中国2000—2019年的省际面板数据，考虑数据的可获得性和一致性，剔除了我国香港、澳门、台湾、西藏4个省区，最终获得包括30个省区的600个面板数据。原始数据来自《中国统计年鉴》《中国科技统计年鉴》、中国碳排放数据库（CEADs）、各省区统计年鉴、Wind数据库等。

2.2　变量说明

2.2.1　经济增长水平（*Eco*）　GDP反映各省区经济发展基本面，相对于规模性指标，GDP增长率在一定程度能够降低宏观时间序列数据的内生性干扰，本文以此评估不同省份的经济增长水平。

2.2.2　碳排放增速（CO_2）　碳排放度量包括规模性指标和增速指标[49]，“双碳”目标并非简单的规模控制，而应是一种动态约束，本文以各省份二氧化碳排放总量的增长率作为碳排放增速的评价指标。

2.2.3　技术效率（*Tec*）　借鉴FARE等[51]的研究，测算各地区技术效率水平：以劳动力投入和资本投入作为社会生产活动的投入指标x_i^t，以各地区生产总值为社会生产活动的产出指标y_i^t。规模报酬不变的情况下，令(x^t, y^t)在t期的距离函数为$D_c^t(x^t, y^t)$，在$t+1$期的距离函数为$D_c^{t+1}(x^t, y^t)$；(x^{t+1}, y^{t+1})在t期的距离函数为$D_c^t(x^{t+1}, y^{t+1})$，在$t+1$期的距离函数为$D_c^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})$。规模报酬可变情况下，令$(x^t, y^t)$在$t$期的距离函数为$D_v^t(x^t, y^t)$，在$t+1$期的距离函数为$D_v^{t+1}(x^t, y^t)$；$(x^{t+1}, y^{t+1})$在$t$期的距离函数为$D_v^t(x^{t+1}, y^{t+1})$，在$t+1$期的距离函数为$D_v^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})$。在$t$期和$t+1$期的技术条件下，从$t$期到$t+1$期技术效率的变

化值分别为

$$Tec^{t}=\frac{D_c^{t}(x^{t+1},y^{t+1})}{D_c^{t}(x^{t},y^{t})} \tag{1}$$

$$Tec^{t+1}=\frac{D_c^{t+1}(x^{t+1},y^{t+1})}{D_c^{t+1}(x^{t},y^{t})} \tag{2}$$

通过计算以上两项的几何平均值得到从t期到$t+1$期技术效率进步指数为

$$Tec(x^{t},y^{t},x^{t+1},y^{t+1})=(Tec^{t}\times Tec^{t+1})^{1/2}=\left[\frac{D_c^{t}(x^{t+1},y^{t+1})}{D_c^{t}(x^{t},y^{t})}\times\frac{D_c^{t+1}(x^{t+1},y^{t+1})}{D_c^{t+1}(x^{t},y^{t})}\right]^{1/2} \tag{3}$$

当$Tec>1$时，表示技术效率提升；当$Tec=1$时，技术效率不变；当$Tec<1$时，技术效率下降。

2.2.4 控制变量 为了尽可能降低宏观面板数据估计过程中的内生性干扰，获取无偏检验结果，选取的关键控制变量如下。①人口规模（*Pop*）。人口和资本是生产模型的基本投入因素[52]，由此将人口因素作为计量模型控制变量，测算时取人口规模的增长率作为量化指标。②固定资产投资水平（*Inv*）。经济增长的“三驾马车”中，投资是基本要素，测算时以全社会固定资产投资额的增长率作为评价依据。③进出口贸易水平（*Tra*）。开放经济体系中，进出口贸易是影响地区经济增长的核心因素，以各省区进出口贸易总额占GDP的比重为评价基础，检验其对经济增长的影响。④消费水平（*Con*）。消费行为及其乘数效应是刺激经济增长的重要因素，以各省区家庭人均消费支出增长率为评价指标。⑤市场化程度（*Mar*）。市场化程度对要素流动和经济增长具有重要影响[53]，以非国有经济固定资产投资占全社会固定资产投资比重衡量该地区经济发展的市场化程度。⑥技术创新能力（*Inn*）。技术创新是驱动经济增长的内生动力来源，取各地区专利授权量的增长率作为衡量指标。⑦国外技术引进含量（*Tei*）。外部技术引进同样能够带动技术进步和效率提升[54]，从而激励内生增长，因此计量模型中将国外技术引进含量作为控制变量，测算时以技术引进合同额与地区生产总值的比重衡量。

2.3 计量模型

2.3.1 碳排放对经济增长的线性影响估计模型 以碳排放增速为解释变量，以经济增长水平为被解释变量，设计线性估计模型，检验经济增长对碳排放的依赖性。

$$Eco_{it}=\alpha CO_{2it}+\theta_n C_{it}+\mu_i+\upsilon_t+\varepsilon_{it} \tag{4}$$

其中，α是碳排放增速对经济增长的影响弹性系数，C_{it}为降低内生性干扰的各项控制变量，θ_n为控制变量影响弹性系数，i表示各省份，t表示不同年度，μ_i表示不随时间变化的样本个体效应，υ_t为时间效应，误差项$\varepsilon_{it}\sim N(0,\sigma^2)$。

2.3.2 技术效率对经济增长的线性影响估计模型 以技术效率为解释变量，经济增长水平为被解释变量，设计线性估计模型，检验技术效率提升对经济增长的内生驱动影响。

$$Eco_{it}=\beta Tec_{it}+\theta_n C_{it}+\mu_i+\upsilon_t+\varepsilon_{it} \tag{5}$$

其中，β是技术效率对经济增长水平的影响弹性系数。

2.3.3 碳排放增速对技术效率驱动经济增长的非线性门槛调节模型 以HANSEN[50]的门槛检验方法设计动态调节模型，考察碳排放增速在不同水平时，技术效率提升对经济增长的内生溢出差异。

$$\begin{aligned}Eco_{it}=&\omega_1 Tec_{it}\cdot I(CO_{2it}\le\eta_1)+\omega_2 Tec_{it}\cdot I(CO_{2it}>\eta_1)+\cdots+\omega_{2n-1}Tec_{it}\cdot I(CO_{2it}\le\eta_n)+\\&\omega_{2n}Tec_{it}\cdot I(CO_{2it}>\eta_n)+\theta_n C_{it}+\mu_i+\upsilon_t+\varepsilon_{it}\end{aligned} \tag{6}$$

其中，碳排放增速为门槛调节变量，ω是技术效率对经济增长的影响弹性系数，η为检验碳排放增速的动态门槛阈值，$I(\cdot)$为检验碳排放门槛阈值是否存在的假设函数。

3 实证结果分析

3.1 数据描述和检验

本文各主要变量的描述性统计结果如表1所示。由于实证研究中选择省际面板数据，为了有效避免估计过程中可能存在的时间趋势干扰，本文对变量做了数据平稳性检验。在具体检验技术上，采用假设

存在同质面板单位根的LLC方法和Breitung t-stat方法，以及假设存在异质面板单位根的IPS方法、ADF-Fisher方法和PP-Fisher方法。5种检验结果显示面板数据一阶平稳。为了避免出现伪回归现象，本文进一步选择KAO[55]的残差协整检验工具，通过10个协整统计量检验变量数据的协整关系。结果显示统计量ADF通过了1%显著性水平检验，由此判断各个变量之间存在长期稳定的均衡关系。研究设计中为了消除内生性影响，选取的控制变量较多，进一步对控制变量做多重共线性检验，结果显示Mean VIF为1.2，远小于10，由此判定模型设计在一定程度控制了多重共线性干扰。

表1　变量描述性统计

Tab. 1　Descriptive statistics of variables

变量	最大值	最小值	均值	标准差	平稳性	变量	最大值	最小值	均值	标准差	平稳性
Eco	29.809	−3.950	13.251	5.732	一阶	*Tra*	1.722	0.017	0.306	0.373	一阶
CO_2	1.493	−0.971	0.088	0.186	一阶	*Con*	6.280	−0.552	0.180	0.516	一阶
Tec	2.980	−0.638	0.205	0.265	一阶	*Mar*	0.904	0.059	0.611	0.214	一阶
Pop	0.199	−0.104	0.008	0.022	一阶	*Inn*	2.709	0.051	1.515	0.753	一阶
Inv	0.659	−0.627	0.187	0.129	一阶	*Tei*	0.223	0.000	0.004	0.012	一阶

3.2　碳排放与经济增长之间的线性关系

经Hausman检验，采用固定效应模型考察碳排放增速对经济增长的线性影响，结果如表2模型L1所示。可以看出，碳排放增速对经济增长的影响弹性系数为4.084，并通过了5%显著性水平检验，反映经济增长对碳排放依然存在正向依赖关系。线性估计结果与H1相符，说明在经济增长过程中，外延式扩张依赖于碳排放。这与“双碳”目标并不矛盾，随着技术进步和产业升级，将加速外延式扩张向内生性增长转变，效率变革推动碳排放边际递减，逐渐形成碳达峰。因此，降碳规制要充分考虑经济增长与碳排放之间的原生依赖关系，单向强调降碳约束反而会吞噬经济增长空间，衍生更为复杂的不利影响。

表2　对经济增长的线性影响估计结果

Tab. 2　Estimates of the linear impact on economic growth

变量	FE模型L1	差分GMM模型L2	FGLS模型L3	FE模型L4	差分GMM模型L5	差分GMM模型L6	FGLS模型L7
Eco(−1)		0.237***(0.039)			0.093(0.124)	0.215***(0.055)	
Eco(−2)						−0.196***(0.049)	
CO_2	4.084**(1.741)	0.220*(0.114)	3.034***(0.172)				
Tec				1.481***(0.229)	0.388(0.679)	0.714**(0.360)	1.000***(0.174)
Pop	18.252***(4.531)	7.239(13.196)	22.221***(1.658)	17.357***(4.368)	−0.109(36.211)	19.631(27.975)	24.390***(3.870)
Inv	14.097***(2.264)	9.072**(4.005)	10.212***(0.386)	16.547***(2.283)	23.311**(9.285)	18.750***(5.175)	11.650***(0.767)
Tra	6.487**(2.455)	14.330***(3.755)	−0.121(0.213)	6.273**(2.451)	37.499**(16.600)	24.005*(10.412)	0.642(0.415)
Con	1.346**(0.598)	4.443***(1.614)	0.825***(0.110)	1.409**(0.639)	8.325*(4.331)	5.276**(2.227)	0.414**(0.197)
Mar	5.718***(1.090)	5.866***(1.261)	5.243***(0.379)	4.948***(1.038)	−0.434(3.937)	4.454**(1.908)	5.012***(0.587)
Inn	0.518(0.585)	−1.537(1.533)	−0.131(0.129)	0.487(0.534)	−1.007(1.509)	0.126(0.703)	0.024(0.210)
Tei	18.225(14.817)	103.436***(18.645)	7.222*(3.891)	18.377(15.127)	77.121(77.047)	122.683***(25.206)	6.606(7.317)
C	4.207***(0.965)	—	7.779***(0.367)	2.401**(0.974)	—	—	6.070***(0.626)
R^2	0.285	—	—	0.305	—	—	—
J-statistic Prob	—	28.870(0.117)	—	—	23.446(0.321)	24.440(0.152)	—

注：*、**、***分别表示在10%、5%、1%的显著水平拒绝原假设，括号内为标准误。

表2模型L1中的控制变量结果显示：人口增长对经济发展至关重要，但随着人口结构老龄化加剧，青年劳动力比重下降，对经济增长将造成一定降速压力；“三驾马车”依然是经济增长的中坚力量，固定资产投资是经济增长的基础动力，对外贸易能够释放开放经济活力，消费升级有助于加速经济增长与结构优化；市场化程度同样显著促进了经济增长。需要关注的是，技术创新水平对经济增长的影响并不显著，说明两者之间缺乏耦合机制，在夯实技术创新能力的同时，应注重技术转化和市场应用，为内生增长提供“即插即用”的内生源动力。同时，国外技术引进对国内经济增长的影响不显著，随着中国经济发展水平提升，

内外技术势差有所弱化，单纯依赖招商引资和技术引进的驱动模式难以为继，应逐步转向自主创新道路。

3.3 技术效率提升与经济增长水平之间的线性关系

以固定效应模型考察技术效率对经济增长的线性影响（见表2中模型L4），结果发现：技术效率提升对经济增长水平的影响弹性系数为1.481，且通过了1%显著性水平检验，说明技术效率提升显著加速了经济增长。这一结果符合内生增长理论，效率变革是经济增长的内生驱动器，技术进步和效率提升能够改变投入产出系数，打破古典经济增长模型的边际递减约束，从而扩大投入产出水平，推动经济增长。另一方面，效率变革有利于促进产业结构升级，引导生产要素从低附加值产业流转至高附加值产业，优化资源配置，赋能经济高质量发展。虽然外延式扩张依然是经济增长的重要支撑，但技术效率提升能够作为“波特假说”的传导媒介，为降碳约束和经济增长提供平衡支点。当降碳约束挤压外延式扩张的增长空间时，技术效率提升能够加速内生转化，弥补经济增长损失，释放缓释动能，从而验证了H2的合理性。

3.4 碳排放调节下技术效率对经济增长的门槛溢出效应

表3模型T1为迭代Bootstrap500次的门槛调节模型估计结果，可以看出，碳排放增速对技术效率驱动经济增长的动态调节影响存在显著三重门槛特征①。当碳排放增速低于0.040时，技术效率提升对经济增长影响弹性系数ω_1为−0.004，但并不显著，说明此时的内生驱动无效。当碳排放增速提升至第二门槛区间[0.040, 0.079]时，技术效率提升对经济增长的影响弹性系数变负为正(0.012)，且通过了1%著性水平检验，内生驱动变为积极有效。当碳排放增速提升至第三门槛区间[0.079, 0.295]时，技术效率提升对经济增长的影响弹性系数提升至0.022，通过了1%显著性水平检验，此时内生驱动效应最佳。然而，当碳排放增速超过最高门槛阈值0.295后，技术效率提升对经济增长的影响弹性系数回落至0.010，内生驱动有所弱化。

表3 碳排放增速调节下技术效率对经济增长的非线性影响估计结果

Tab. 3 Estimation results of the nonlinear impact of technological efficiency on economic growth under the moderation of carbon emission growth rate

变量/系数	门槛调节检验 模型T1	内生性检验 模型T2	稳健性检验 模型T3	空间异质性检验		
				东部模型T4	中部模型T5	西部模型T6
γ_1	0.040***(56.736)	0.040***(65.299)	0.040***(53.364)	0.039***(34.717)	0.079***(20.474)	0.042***(12.131)
CO_2−1	[0,0.040]	[0,0.040]	[0,0.040]	[0,0.039]	[0,0.079]	[0,0.042]
ω_1	−0.004(0.003)	−0.003(0.003)	−0.004(0.003)	−0.008(0.005)	0.003(0.005)	−0.001(0.007)
γ_2	0.079*(4.675)	0.170**(5.277)	0.079**(3.994)	0.065***(12.446)	—	—
CO_2−2	[0.040,0.079]	[0.040,0.170]	[0.040,0.079]	[0.039,0.065]	[0.079,+∞)	[0.042,+∞)
ω_2	0.012***(0.004)	0.019***(0.004)	0.012***(0.004)	0.009(0.006)	0.026***(0.006)	0.018***(0.006)
γ_3	0.295**(6.200)	0.350***(7.898)	0.295**(5.659)	0.297**(4.459)	—	—
CO_2−3	[0.079,0.295]	[0.170,0.350]	[0.079,0.295]	[0.065,0.297]	—	—
ω_3	0.022***(0.003)	0.037***(0.006)	0.022***(0.003)	0.022***(0.004)	—	—
CO_2−4	[0.295,+∞)	[0.350,+∞)	[0.295,+∞)	[0.297,+∞)	—	—
ω_4	0.010**(0.005)	0.012(0.008)	0.010**(0.005)	−0.002(0.005)	—	—

注：γ_n为门槛估计值，其下方括号内为F检验值；CO_2−n为二氧化碳增长水平的不同门槛区间；ω_n为在CO_2不同门槛区间下技术效率提升对经济增长水平的影响弹性系数，其下方括号内为标准误。控制变量估计结果略。

非线性检验结果说明，碳排放增速在不同区间时，技术效率对经济增长的内生溢出存在较为复杂的动态演化规律，这一结果符合H3。当碳排放增速处于低门槛区间时，虽然有效抑制了碳排放增长，但同时也失去了内生驱动力，说明经济结构较为复杂，外延式扩张与内生性增长处于并行转化阶段，需要一定的碳排放容忍度，才能驱动内生转化与经济增长。同时，碳排放增速处于适度有效的第三门槛区间时，技术效率提升对经济增长的内生驱动效应最佳，能够最大化激励外延式扩张向内生性增长转轨，这与H4相似；而碳排放增速过高时，技术效率提升的内生驱动效应有所弱化，外延式扩张获得了相对更高的碳容忍空间，反而不利于内生转型。由此来看，降碳约束与技术效率的双向调节对经济稳态增长至关重要，降碳

①Hansen的门槛回归技术最多可以检验至三重门槛，经检验发现，碳排放增长对经济增长的三个门槛均显著有效，如表3所示。

减排不应“一刀切”，要采取动态调节策略，将碳排放增速控制在合理区间，才能撬动技术创新的最佳内生驱动力，逐步释放绿色增长空间。

3.5　内生性控制与稳健性检验

3.5.1　内生性控制　线性计量研究时，为尽可能降低内生性干扰，引入诸多控制变量。为进一步检验实证结论的可靠性，本文在固定效应模型中逐一添加控制变量，碳排放增速和技术效率提升对经济增长的影响弹性系数始终显著为正，在一定程度控制了模型输出的内生性干扰。同时，借助差分GMM模型排除回归结果的内生性影响，结果显示，在引入经济增长水平的滞后一阶项后，碳排放增速对经济增长的线性影响依然显著为正（见表2中模型L2）；技术效率提升对经济增长的影响在引入滞后二阶项后显著为正（见表2中模型L6），由此验证了线性模型回归结果的可信度。

传统的内生性检验方法并不适用于动态门槛估计模型，因此，借鉴LUCCHETTI和PALOMBA[56]的研究，将解释变量滞后一阶，表3模型T2的结果显示：碳排放增速对技术效率提升的动态经济溢出依然存在显著三重门槛特征（0.040，0.170，0.350）。具体来看，当碳排放增速低于0.040时，技术效率提升对经济增长的内生驱动效应并不显著；碳排放增速处于第二门槛区间[0.040，0.170]和第三门槛区间[0.170，0.350]时，技术效率提升对经济增长的影响弹性系数显著为正，且在第三门槛区间时影响弹性系数最大（0.037）；当碳排放增速超过最高门槛阈值0.350后，技术效率提升对经济增长的影响弱化为不显著。上述估计结果和门槛模型T1基本类似，差异在于碳排放增速在最高区间时的内生驱动有所弱化，但整体规律依然说明碳排放增速过高或过低均不科学，合理适度的降碳约束才能释放最佳内生驱动力。

3.5.2　稳健性检验　线性估计模型往往容易产生组间干扰，为了进一步检验模型输出的稳健性，本文以FGLS模型排除面板数据组内自相关、组间异方差以及同期相关的多重干扰，估计结果显示，碳排放增速（见表2模型L3）和技术效率提升（见表2模型L7）对经济增长的影响依然保持正向有效，这和基础模型L1和L4结果一致，从而验证了线性估计结果的合理性。

在门槛调节模型的稳健性检验时，剔除了面板数据中经济增长水平最高和最低的两个省区，以排除极值数据干扰。基于28个省区的面板数据检验，表3模型T3的结果显示，碳排放增速对技术效率提升的内生溢出影响较为复杂，当碳排放增速小于0.040时，技术效率提升对经济增长的驱动效应并不显著；碳排放增速处于第二门槛区间[0.040，0.079]和第三门槛区间[0.079，0.295]时，技术效率提升对经济增长的影响弹性系数均显著为正，且通过了1%显著性检验，其中第三门槛区间的影响弹性系数最大（0.022）；当碳排放增速超过最高门槛阈值0.295后，技术效率提升对经济增长的影响弹性系数有所回落（0.010），显著性降为5%水平。上述规律和门槛调节模型T1高度相似，从而验证了非线性研究结论的稳健性。

3.6　空间异质性检验

中国地域辽阔，不同区域产业结构、资源禀赋和技术水平差异较大，容易造成环境规制与经济增长之间的不平衡[57]，进一步将全国30个省区面板数据划分为东、中和西部地区，以检验不同地区碳排放增速对技术效率提升及其经济溢出的空间异质性。

东部地区门槛模型估计结果显示（见表3模型T4）：碳排放增速的三项调节门槛分别为0.039，0.065和0.297，碳排放增速处于第一门槛区间（0，0.039]、第二门槛区间[0.039，0.065]与第四门槛区间[0.297，+∞]时，技术效率提升对经济增长的影响并不显著；当且仅当碳排放增速处于第三门槛区间[0.065，0.297]时，技术效率提升才能驱动经济增长，释放积极的内生溢出效应。中部地区碳排放增速对技术效率提升的内生驱动存在单一门槛特征（见表3模型T5）②，当碳排放增速低于门槛阈值0.079时，技术效率提升对经济增长的影响并不显著，难以撬动内生驱动转型；只有碳排放增速超过0.079后，技术效率提升才能释放正向经济溢出，驱动内生增长。西部地区碳排放增速对技术效率提升的经济溢出同样具有单一门槛规律（见表3模型T6），当碳排放增速低于门槛阈值0.042时，技术效率提升对经济增长的影响并不显著；当碳排放增速超过0.042后，技术效率提升对经济增长具有显著内生溢出效应。

②中部地区和西部地区碳排放增速对技术效率的经济溢出影响并未通过双重门槛和三重门槛的显著性检验，而单一门槛通过了1%显著性水平，由此判断为单一门槛有效。

横向对比发现，过低或过高的碳排放增速在东部地区并未释放正向溢出效应，只有合理适度的碳排放增速才能撬动技术效率的内生驱动效应，东部地区正处于内生加速和绿色转型的关键阶段，需要借助精准调节的降碳约束实现环境优化与经济增长的共轭驱动。中部地区和西部地区的技术效率提升依然需要一定的碳排放容忍度，才能有效激励内生转型和经济增长。相较而言，中部地区的碳排放增速门槛阈值更高，说明其经济结构较为复杂，传统的外延式扩张向内生增长转型过程中，需要一定的碳排放容忍度。西部地区经济发展水平偏低，供给侧改革负担小，能够承担更为严格的降碳约束。

4 结论与启示

4.1 研究结论

“双碳”目标推动下，亟待破解的是如何实现科学降碳与经济稳态增长的双向平衡。本文通过理论模型揭示碳排放、技术效率提升与经济增长三者之间的迭代关系，基于30个省区的面板数据进行实证检验，得到以下主要结论。①碳排放对经济增长具有显著正向影响，这反映了两者之间存在原生依赖关系，在经济增长趋势下完全“碳脱钩”并不现实。②技术效率提升对经济增长具有显著内生驱动效应，这为实施包容性降碳策略并维持经济稳态增长提供了转化条件，绿色转型必须建立在内生驱动之上。③碳排放增速在不同水平时，技术效率提升驱动经济增长的内生溢出效应具有较为复杂的非线性演化规律，过低的降碳约束无法释放正向激励作用，只有合理适度的降碳约束能够撬动技术效率的最佳内生驱动力，进而实现经济稳态增长。④碳排放增速对技术效率提升的内生驱动影响存在时空异质性，过高或过低的降碳约束在东部地区无法释放正向溢出效应，适度的降碳约束乃是最佳选择，而中西部地区需要一定的碳排放容忍空间才能释放技术效率的内生驱动效应。

4.2 理论贡献

本文的核心理论贡献在于以技术效率为转化支点，探索降碳约束与经济稳态增长的包容性演化路径，具体包括以下三个方面。第一，党的二十大提出要积极稳妥推进碳达峰碳中和，那么如何实现积极稳妥地推进“双碳”目标？本文基于中国的现实情境和相关数据检验发现，碳排放与经济增长之间存在正向影响，这是经济发展过程中的原生关系。因此，降碳并不等于除碳，一些观点将“双碳”战略刻画为碳排放规模的正态分布预期，这显然不符合经济规律。本文认为，“双碳”推进要尊重碳排放与经济增长之间的原生关系，降碳减排应包容于经济增长之中，以技术效率为转化支点，重在释放内生动力，才能合理兼顾“双碳”推进与经济稳态增长，推动绿色高质量发展。

第二，“波特假说”被认为是西方环境规制理论的核心依据，本文认为，“波特假说”对“双碳”推进具有重要参考价值，通过降碳约束能够激励效率提升与内生增长，这也正是本文的理论起点。但“波特假说”对于中国情境的解释依然存在一定局限，其行之有效的前提条件是存在弹性技术溢出空间，显然这一假设只在内生增长模型中成立。中国经济结构演进较为复杂，外延式扩张与内生性增长处于并行转化阶段，一味强化环境规制不仅难以撬动技术进步和效率提升，反而会吞噬经济增长空间，这显然并非“双碳”目标的初衷。本文研究发现，降碳约束在一定程度能够激励效率提升与内生增长，这证实了“波特假说”的合理性，但同时，本文还发现，降碳约束并非越强越好，存在动态适度有效性，这一结论扩展了“波特假说”在中国的实践解释，从而提出符合中国现实情境的降碳依据。

第三，传统计量研究关注更多的是两因素之间的线性关系，本文将碳排放、技术效率与经济增长纳入统一的研究框架，通过理论分析揭示三者之间的迭代转化关系，进一步设计非线性门槛计量模型，刻画碳排放约束在不同水平时技术效率对经济增长的动态驱动轨迹，进而量化识别碳排放约束的最佳溢出区间和无效溢出区间，这为动态调节降碳规制强度、科学释放技术效率的内生驱动力、保持经济稳态增长提供了系统优化的经验依据和量化可循的决策参考。

4.3 政策启示

第一，“双碳”目标为全面建设社会主义现代化注入绿色基因，要通过降碳减排加快绿色经济转型，推动高质量发展。相应的现实困境在于，经济产出与碳排放之间存在原生依赖关系，碳排放与经济增长不可能完全“脱钩”。中国作为全球经济体量最大的发展中国家，经济结构演化过程中外延式扩张占比依然

较大，导致传统化石能源消耗量长期居高不下，这为经济增长提供原生能源动力的同时衍生了大量碳排放。中国式“双碳”推进不能照搬西方经验，要立足中国国情，兼顾经济稳态增长。在制订降碳减排措施时，要以综合效益为目标，合理评估降碳减排贡献和经济产出之间的均衡关系，切不可因为单纯追求降碳减排而牺牲经济增长，要避免本末倒置。环境规制必须尊重基本的经济规律和现实情境，根据能源结构和业态差异实施有针对性的降碳策略，逐步将外延式扩张向内生性增长转化，缓解碳排放压力的同时保持经济增长动力，科学推进碳达峰与碳中和。中国的包容性降碳路径一定是兼顾环境优化与经济增长，这将化解发达国家与发展中国家的悖论之争，从发展的视角推动经济增长与降碳减排协同并进，为广大发展中国家提供可参照、可复制的经验依据。

第二，碳达峰和碳中和是长期而复杂的系统工程，“双碳”推进不能仅仅关注碳排放指标，而要在经济稳态增长预期下寻求内生转型与效率变革，在落实碳达峰碳中和目标任务过程中加速技术创新，以系统优化实现有序降碳。能源化工产业是降碳减排的重点领域，国家发改委等四部门联合发布的《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南（2022年版）》中提出，现代煤化工行业先进与落后产能并存，企业能效差异显著，反映了我国能源化工产业的现实情况。2020年，中国煤制甲醇、煤制烯烃和煤制乙二醇三者碳排放合计约2.4亿吨，煤化工行业约35%，降碳减排压力较重。事实上，我国当前煤制甲醇行业能效低于基准水平的产能依然占比25%；煤制乙二醇行业能效低于基准水平的产能约占40%，存在巨大的效率优化空间。降碳减排应与技术效率相结合，不断提高科技创新水平，将降碳约束转化为内生动力，通过效率变革长效驱动经济增长与绿色转型；与此同时，在产业升级和能源结构优化过程中，强化单位碳排放的经济贡献度，弱化经济增长对碳排放的边际依赖，实现降碳减排与经济稳态增长的共轭驱动模式。

第三，通过非线性研究发现，不同碳排放水平下技术效率对经济增长的内生溢出效应有所差异，因此不能以静态标准约束碳排放。从美国、日本等西方国家的发展轨迹来看，碳排放规模伴随着工业化进程加速上升，而降碳减排则依赖于产业升级、技术进步和能源结构优化，是一个循序渐进的过程。国务院印发的《2030年前碳达峰行动方案》提出了具体的降碳目标：2025年，单位GDP能源消耗相比2020年下降13.5%，单位GDP碳排放下降18%；2030年，单位GDP碳排放比2005年下降65%以上，2030年前实现碳达峰目标。可见，国家层面对“双碳”目标提出了积极稳妥地推进计划，从时间维度来看，降碳策略并非线性均等化，第一个五年的降碳空间压缩相对有限，第二个五年加强降碳约束，顺利实现碳达峰，这符合我国的经济发展现状，为绿色转型提供了充分的缓释空间，但同时也明确了“双碳”推进的阶段性要求和终极目标。虽然当前中国经济规模已经跃居全球前列，但依然是发展中国家，各地降碳减排不能简单“一刀切”，而要打破静态视角局限，在经济发展过程中设计动态可调的约束机制，选择降碳减排与技术效率双向匹配的最优策略，做到稳中有降、边降边调，合理控制碳排放增速的同时激励最佳内生驱动力。

第四，环境规制与降碳减排不应忽视区域异质性，要因地制宜推动“双碳”目标。东部地区承载了经济发展的龙头驱动作用，但整体能源消耗水平依然处于上升势态，面临严峻的降碳减排压力，一方面，可参照京津冀地区的发展经验，通过产业结构转型升级将资源消耗较大的传统重工业逐步转移至能源供给相对集中的中西部地区，降低现代化工业发展对传统化石能源的依赖，优化自身能源结构，推动降碳减排；另一方面，采取更为精准的弹性降碳约束，通过动态调节机制激励技术进步与效率变革，发挥东部地区的创新资源优势，推动技术进步和效率优化，赋能经济绿色增长。中部地区经济结构较为复杂，技术进步和效率变革依然需要一定的碳排放容忍度，对于金属冶炼、汽车制造、机械加工这样的传统工业，既要给予一定的碳排放空间，保障企业正常生产运行，同时也要鼓励企业加快技术升级和效能优化，在合理的碳排放门槛约束下提质增效，科学做好降碳减排。西部地区经济基础薄弱，技术效率水平不高，但化石能源储量丰富，尤其是陕西、宁夏、新疆等省区，煤化工产业已经成为地方经济发展的支柱性行业，可根据能源行业集中度较高的特点，以中石油、华能集团等大型国有企业为切入点，制订系统科学的行业降碳约束机制，倒逼企业提高技术效率，加快绿色转型升级；对于经济贡献较低的双高企业，要加快供给侧改革，做到应减尽减，为绿色转型升级腾出空间；在新兴行业市场准入标准设计时，要引入科学合理的降碳约束机制，为地方经济高质量发展划定绿色起跑线。

参 考 文 献

[1] 邬彩霞. 中国低碳经济发展的协同效应研究[J]. 管理世界, 2021, 37(8): 105－117.

[2] PORTER M E, LINDE C V D. Towards a new conception of the environment-competitiveness relationship [J]. Journal of Economic Perspectives, 1995, 4(4): 97－118.

[3] 杨博文. 习近平新发展理念下碳达峰、碳中和目标战略实现的系统思维、经济理路与科学路径[J]. 经济学家, 2021(9): 5－12.

[4] ESPARCIA A C, GÓMEZ S L. Public opinion about climate change in United States, partisan view and media coverage of the 2019 United Nations Climate Change Conference (COP 25) in Madrid[J]. Sustainability, 2021, 13(7): 1－19.

[5] 刘宏笪, 张济建, 张茜. 全球供应链视角下的中国碳排放责任与形象[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 652－668.

[6] BANK W. Brazil low carbon country case study [J]. Intelligence & National Security, 2010, 86(1/2): 57－83.

[7] MURTHY N S, PANDA M, PARIKH J. Economic development, poverty reduction and carbon emissions in India [J]. Energy Economics, 2004, 19(3): 327－354.

[8] 连俊. 对欧洲碳中和的考验刚刚开始[N]. 经济日报, 2022-08-30(4).

[9] SHAHBAZ M, HYE Q M A, TIWARIK K, et al. Economic growth, energy consumption, financial development, international trade and CO_2 emissions in Indonesia [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 25: 109－121.

[10] DALY H E, SCOTT K, STRACHAN N, et al. Indirect CO_2 emission implications of energy system pathways: linking IO and TIMES models for the UK [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(17): 10701－10709.

[11] NAKANO M, MANAGI S. Productivity analysis with CO_2 emissions in Japan [J]. Pacific Economic Review, 2010, 15(5): 708－718.

[12] MEIER P J, WILSON P, KULCINSKI G L, et al. US electric industry response to carbon constraint: a life-cycle assessment of supply side alternatives [J]. Energy Policy, 2005, 33(9): 1099－1108.

[13] 苏涛永, 孟丽, 张金涛. 中国碳市场试点与企业绿色转型:作用效果与机理分析[J]. 研究与发展管理, 2022, 34(4): 81－96.

[14] DAVIS W B, SANSTAD A H, KOOMEY J G. Contributions of weather and fuel mix to recent declines in US energy and carbon intensity [J]. Energy Economics, 2003, 25(4): 375－396.

[15] YAN D, WHALLEY J. Carbon, trade policy and carbon free trade areas [J]. World Economy, 2010, 33(9): 1073－1094.

[16] NARAYAN P K, NARAYAN S. Carbon dioxide emissions and economic growth: panel data evidence from developing countries [J]. Energy Policy, 2010, 38(1): 661－666.

[17] NORDHAUS W. Climate change: the ultimate challenge for economics [J]. American Economic Review, 2019, 109(6): 1991－2014.

[18] ALAM M J, BEGUM I A, BUYSSE J, et al. Energy consumption, carbon emissions and economic growth nexus in Bangladesh: cointegration and dynamic causality analysis [J]. Energy Policy, 2012, 45(none): 217－225.

[19] GROSSMAN G M, KRUEGER A B. Environmental impacts of a North American free trade agreement [R]. Cambridge: NBER Working Paper No. 3914, 1991.

[20] DANISH, RECEP U, SALAH U K, et al. Mitigation pathways toward sustainable development: is there any trade-off between environmental regulation and carbon emissions reduction? [J]. Sustainable Development, 2020, 28(4): 813－822.

[21] 王菲, 杨雪, 田阳, 等. 基于EKC假说的碳排放与经济增长关系实证研究[J]. 生态经济, 2018, 34(10): 19－23.

[22] YANG H, SHAHZADI I, HUSSAIN M. USA carbon neutrality target: evaluating the role of environmentally adjusted multifactor productivity growth in limiting carbon emissions [J/OL]. Journal of Environmental Management, 2021, 298(2021-11-15)[2023-01-30]. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113385.

[23] 朱欢, 郑洁, 赵秋运, 等. 经济增长、能源结构转型与二氧化碳排放——基于面板数据的经验分析[J]. 经济与管理研究, 2020, 41(11): 19－34.

[24] HASAN A, USMANI R, AKHTR R. Analysing nexus between economic growth, GHG emissions, and energy consumption for India [J]. Journal of Resources, Energy and Development, 2021, 17(1): 1－16.

[25] SOLOW R M. Neoclassical growth theory [M]// TAYLOR J B, WOODFORD M. Handbook of Macroeconomics. New York: North-Holland, 1999: 637 - 667.
[26] KRUGMAN P. The myth of Asia's miracle [J]. Foreign Affairs, 1994, 73(6): 62 - 78.
[27] YOUNG A. Gold into base metals: productivity growth in the People's Republic of China during the reform period [J]. Journal of Political Economy, 2003, 111(6): 1220 - 1261.
[28] OZYURT S. Total factor productivity growth in Chinese industry: 1952-2005 [J]. Oxford Development Studies, 2009, 37(1): 1 - 17.
[29] CHOW G, LIN A. Accounting for economic growth in Taiwan and Mainland China: a comparative analysis [J]. Journal of Comparative Economics, 2002, 30(3): 507 - 530.
[30] 范合君，吴婷. 数字化能否促进经济增长与高质量发展——来自中国省级面板数据的经验证据[J]. 管理学刊，2021，34(3)：36 - 53.
[31] 邵帅，范美婷，杨莉莉. 经济结构调整、绿色技术效率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[J]. 管理世界，2022，38(2)：46 - 69.
[32] 程名望，贾晓佳，仇焕广. 中国经济增长(1978—2015)：灵感还是汗水？[J]. 经济研究，2019，54(7)：30 - 46.
[33] 张宁. 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[J]. 经济研究，2022，57(2)：158 - 174.
[34] MIZOBUCHI K. An empirical study on the rebound effect considering capital costs [J]. Energy Economics, 2008, 30(5): 2486 - 2516.
[35] 汤学良，顾斌贤，康志勇，等. 环境规制与中国企业全要素生产率——基于"节能减碳"政策的检验[J]. 研究与发展管理，2019，31(3)：47 - 58.
[36] BRANNLUND R, GHALWASH T, NORDSTROM J. Increased energy efficiency and the rebound effect: effects on consumption and emissions [J]. Energy Economics, 2007, 29(1): 1 - 17.
[37] 杨莉莎，朱俊鹏，贾智杰. 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[J]. 经济研究，2019，54(11)：118 - 132.
[38] 张兵兵，朱晶，全晓云. 技术进步与二氧化碳排放强度：理论与实证分析[J]. 科研管理，2017，38(12)：41 - 48.
[39] CLARKE H. Some basic economics of carbon taxes [J]. Australian Economic Review, 2011, 44(2): 123 - 136.
[40] ASAFU-ADJAVE J. The relationship between energy consumption, energy prices and economic growth: time series evidence from Asian developing countries [J]. Energy Economics, 2000, 22(6): 615 - 625.
[41] JEONG S J, KIM K S, PARK J W, et al. Economic comparison between coal-fired and liquefied natural gas combined cycle power plants considering carbon tax: Korean case[J]. Energy, 2008, 33(8): 1320 - 1330.
[42] FRANK A, FELDE R. Carbon capture and storage: technologies, policies, economics, and implementation strategies [J]. Energy Journal, 2013, 34(4): 229 - 231.
[43] KOASIDIS K, NIKAS A, NEOFYTOU H, et al. The UK and German low-carbon industry transitions from a sectoral innovation and system failures perspective [J]. Energies, 2020, 13(19): 1 - 34.
[44] GREEENSTONE M, KOPITS E, WOLVERTON A. Developing a social cost of carbon for US regulatory analysis: a methodology and interpretation [J]. Review of Environmental Economics & Policy, 2013, 7(1): 23 - 46.
[45] STIGLITZ J E, NICHOLAS S, DUAN M, et al. Report of the high-level commission on carbon prices [R]. Washington, DC: World Bank, 2017.
[46] 王慧，孙慧，肖涵月，等. 环境政策不确定性、双向FDI与低碳全要素生产率的关系[J]. 中国人口·资源与环境，2020，30(11)：75 - 86.
[47] 林伯强. 碳中和进程中的中国经济高质量增长[J]. 经济研究，2022，56(1)：56 - 71.
[48] 赵志耘，李芳. 碳中和技术经济学的理论与实践研究[J]. 中国软科学，2021(9)：1 - 13.
[49] 刘元欣，邓欣蕊. 我国碳排放影响因素的实证研究——基于固定效应面板分位数回归模型[J]. 山西大学学报(哲学社会科学版)，2021，44(6)：86 - 96.
[50] HANSEN B. Threshold effects in non-dynamic panels: estimation, testing, and inference [J]. Journal of Econometrics, 1999, 93(2): 345 - 368.

[51] FARE R, SHAWNA G, MARY N, et al. Productivity growth, technical progress, and efficiency change in industrialized countries [J]. American Economic Review, 1994, 84(1): 66 - 83.
[52] 陶涛, 金光照, 郭亚隆. 两种人口负增长的比较:内涵界定、人口学意义和经济影响[J]. 人口研究, 2021, 45(6): 14 - 28.
[53] 苏丹妮, 盛斌, 邵朝对. 国内价值链、市场化程度与经济增长的溢出效应[J]. 世界经济, 2019, 42(10): 143 - 168.
[54] 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[J]. 统计研究, 2021, 38(10): 23 - 37.
[55] KAO C. Spurious regression and residual-based tests for cointegration in panel data [J]. Journal of Econometrics, 1999, 90(1): 1 - 44.
[56] LUCCHETTI R, PALOMBA B. Nonlinear adjustment in US bond yields: an empirical analysis with conditional heteroskedasticity [J]. Economic Modelling, 2009, 26(3): 659 - 667.
[57] 张卓群, 张涛, 冯冬发. 中国碳排放强度的区域差异、动态演进及收敛性研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2022, 39(4): 67 - 87.

How to Promote Carbon Reduction Constraints and Steady Economic Growth Mutually?
—Dynamic Threshold Test with Technical Efficiency as Endogenous Transformation Medium

LI Bo-xin[1], DONG Yu[1], GU Yu[2], HAN Xian-feng[3]
(1. *School of Public Administration, Xi'an University of Finance and Economics, Xi'an* 710061, *China*;
2. *Business School, Xi'an International Studies University, Xi'an* 710128, *China*;
3. *School of Management and Economics, Kunming University of Science and Technology, Kunming* 650093, *China*)

Abstract: To build socialist modernization comprehensively, it is necessary to explore the inclusive carbon reduction path with Chinese characteristics, and it is essential to give consideration to "dual carbon" goal and steady economic growth. Taking technical efficiency as the endogenous transformation medium, it deduced the theoretical mechanism of the parallel evolution of carbon emission reduction and economic growth. Further empirical research based on Chinese provincial panel data shows that: there is a certain primary dependence between economic output and carbon emissions currently, and "carbon decoupling" does not conform to the reality situation of China, while technical efficiency improvement provides an endogenous transformation tool for carbon reduction constraints and economic growth parallelly. The nonlinear research also finds that: when carbon emission growth rate is at different levels, the endogenous driving track of economic growth is changed due to technical efficiency improvement. Only reasonable and appropriate carbon reduction constraints could leverage the optimal endogenous driving force of technical efficiency. In additionally, the endogenous drive of carbon reduction constraints on technical efficiency is spatiotemporal heterogeneity, excessive or low carbon emission constraints are not applicable in the eastern regions, and the central and western regions need a certain tolerance of carbon emissions to release the conjugate dividend of efficiency change and economic growth. The above findings provide theoretical enlightenment of endogenous transformation and quantitative basis of dynamic regulation, which are helpful to promoting carbon peak and carbon neutralization actively and steadily, as well as giving consideration to steady economic growth.

Keywords: "Double Carbon" target; technical efficiency; economic growth; Porter Hypothesis