

中国碳回弹效应的时空格局、动态演进及驱动因素 ——基于改进的碳排放随机前沿模型的实证考察

贾锐宁¹, 邵 帅², 杜克锐³, 余燕团⁴

(1. 西安电子科技大学经济与管理学院, 陕西 西安 710126; 2. 华东理工大学商学院, 上海 200237;
3. 厦门大学管理学院, 福建 厦门 361005; 4. 广东外语外贸大学经济贸易学院, 广东 广州 510006)

摘 要:在传统碳排放随机前沿(SFA)模型中嵌入回弹效应调整因子,构建基于“一步法”策略的碳回弹效应测算方法,实证考察中国城市碳回弹效应及其驱动因素,并借助核密度估计等方法探究其时空演化特征。研究发现:中国城市碳回弹效应整体处于70%左右的高回弹区间,呈现“东北一家独大、由东至西递减”的空间分布格局;经济增长是碳回弹效应的首要驱动因素,碳排放强度约束政策可以抑制碳回弹效应,但政策效果缺乏持续性;不考虑空间条件时,碳回弹效应具有明显的路径依赖特征,考虑空间条件时,碳回弹效应的空间集聚模式存在极化效应,时间因素的加入会弱化空间相关性并强化极化效应。首次对中国城市层面的碳回弹效应及其驱动因素予以经验考察,有助于通过技术创新和效率改进而推动碳减排的政策有效性,从而为加快实现碳达峰目标和碳中和愿景提供决策参考。

关键词:回弹效应;碳排放;驱动因素;随机前沿模型;核密度估计

中图分类号:F205 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0566(2022)12-0023-12

Spatial-temporal pattern, dynamic evolution, and driving factors of carbon rebound effect in China: Based on improved stochastic frontier model of carbon emission

JIA Ruining¹, SHAO Shuai², DU Kerui³, YU Yantuan⁴

(1. School of Economics and Management, Xidian University, Xi'an 710126, China;
2. School of Business, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;
3. School of Management, Xiamen University, Xiamen 361005, China;
4. School of Economics and Trade, Guangdong University of Foreign Studies, Guangzhou 510006, China)

Abstract: This paper uses a stochastic frontier model combining with an adjustment factor of rebound effect to measure the carbon rebound effect and investigate its driving factors. Furthermore, we adopt the Kernel density to explore the spatial-temporal evolution characteristics of carbon rebound effect. The results are as follows. China's carbon rebound effect remains at a high level of 70%, and presents a spatial distribution pattern of the largest in northeast and decreasing from east to west. Rapid economic development is the primary driving factor of carbon rebound effect. Carbon intensity constraint policy exerts a significant mitigation effect on the rebound, but the effect is unsustainable. Carbon

收稿日期:2022-03-15 修回日期:2022-10-13

基金项目:国家社会科学基金重大项目(21ZDA084);国家自然科学基金项目(71773075,71922015,72203164)。

作者简介:贾锐宁(1990—),男,山西运城人,西安电子科技大学讲师,博士,研究方向为能源与环境经济学。通信作者:邵帅。

rebound effect has the obvious characteristics of path-dependence without considering the spatial conditions. When considering the spatial conditions, the spatial agglomeration mode is characterized by the polarization effect, which is strengthened under dynamic conditions. Meanwhile, the spatial correlation decreases gradually over time. We for the first time measure the carbon rebound effect in urban China and empirically investigate its driving factors. It helps to improve the effectiveness of carbon reduction policies through technological innovation and efficiency improvement, providing policy references for achieving the carbon emission peak and carbon neutralization.

Key words: rebound effect; carbon emissions; driving factors; stochastic frontier analysis; kernel density

2020 年 9 月 22 日,国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上承诺,中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和。中国正处于城市化和工业化深化发展阶段,经济增长对能源资源的刚性需求仍然客观存在,碳达峰和碳中和目标(“双碳”目标)的提出,要求中国必须寻求一条有别于发达国家的低碳发展道路。通常认为,技术进步和效率改进是实现节能减排的基本途径^[1-2]。中国政府在实践中也贯彻了这一思路,在“十二五”规划中将碳排放强度(单位 GDP 的碳排放)作为约束性指标提出。然而,随着碳排放强度的不断下降,中国的碳排放总量并未同步走低,反而伴随出现了碳排放总体攀升的趋势。2011—2020 年,中国的碳排放强度由 2.69 t/万元持续下降至 0.69 t/万元,年均下降率为 4.99%,但碳排放反而以 1.2% 的年均增长率持续攀升^①。

有学者从回弹效应的视角对上述现象进行了探讨,认为碳回弹效应的存在可能是造成中国碳排放效率改进和碳排放总量增长“相伴而行”的深层原因^[3]。所谓回弹效应,是近 20 年来国外能源经济学领域的一个重要发现和热点议题,由 Saunders^[4]在前人学术观点的基础上正式提出,用以研究技术进步、能源效率及能源消费之间的动态关系,因此也被称为“能源回弹效应”。具体而言,能源回弹效应指技术进步虽然能够通过提高能源效率而节约能源,但同时也会引致能源价格下降及社会生产率提高而促进经济增长,随之产生新的能源需求,进而导致能效改善所预期节约的能源消费被额外的能源消费部分甚至全部抵消

的一种经济学现象^[5-7]。遗憾的是,尽管学界在能源回弹效应的理论机制和经验测算方面已经开展了丰富的研究,但对碳回弹效应的研究仍然较为稀缺,针对中国宏观经济开展的相关考察更是寥若晨星。在为数不多的相关文献中,研究内容主要偏重于对碳回弹效应的经验测算,常用的测算方法可以概括为间接测算法和经济核算法两类^[8-11]。其中,间接测算法将碳排放视作能源消费的副产品,并在测算能源回弹效应的基础上,对能源效率改进引起的碳排放增加进行估算,从而实现对碳回弹效应的间接测算^[9]。间接测算法并未就碳回弹效应的定义和发生机理予以深入讨论,因此其测算思路存在显而易见的缺陷。

针对上述问题,部分文献借鉴经济核算法(一种被广泛应用的能源回弹效应测算方法)的研究思路,利用技术进步、经济增长、碳排放强度及碳排放之间的逻辑关系,推演出碳回弹效应的测算模型,并通过估算技术进步对碳排放强度和经济增长的贡献而测算碳回弹效应,从而在一定程度上弥补了间接测算法缺乏理论依据的缺陷^[8]。然而,经济核算法最初仅是在数据可获性限制下而被提出的一种测算能源回弹效应的替代性方法,该方法完全建立于相关经济变量之间的逻辑关系推理之上,其理论基础依然经不起严格的推敲^[12]。具体而言,在能源回弹效应的理论研究中,能源效率仅指能源增进型技术进步,即能源要素本身的“狭义”利用效率,而不包括来自资本、劳动及其他要素增进型技术进步所引起的能源效率的“广义”改进^[13]。由于缺乏严谨的理论基础,经济核算法未能将能源增进型技术进步与其他要素增进型技术进步区分开来,由此得到的测算结果自然在一

① 数据来源:《中国统计年鉴》和《BP 世界能源统计年鉴》。基期为 2000 年,增长率按几何增长计算。

定程度上是存在偏误的。类似地,碳回弹效应也应该源于碳排放效率的“狭义”改进,即有效碳排放与实际碳排放比率的增加,但是经济核算法却将由各类技术进步引致的碳排放效率的“广义”改进视为碳回弹效应的诱因,从而难以保证测算模型的合理性。因此,经济核算法在理论基础和测算思路方面也存在重要局限,因而并非测算碳回弹效应的理想方法,其测算结果同样缺乏足够的说服力。

值得一提的是,部分学者严格遵循能源回弹效应的理论内涵,采用了基于“两步法”策略的能源回弹效应测算模型,即首先采用能源需求随机前沿(SFA)模型测算“狭义”能源效率,再通过估计能源需求的能效弹性来衡量回弹效应^[14]。而Orea等^[15]进一步规避了“两步法”策略可能存在的测算偏误,将能源回弹效应直接嵌入能源需求SFA模型,从而提出了基于“一步法”策略的能源回弹效应测算方法。由于具备定义的严谨性以及模型设定的合理性等优势,Orea等^[15]的测算方法可以在很大程度上解决经济核算法的缺陷,从而能够保证测算结果的准确性,因此该方法已经得到后续很多文献的采用和改进^[16],这也为本文科学测算碳回弹效应提供了延伸创新的基础。

鉴于此,本文基于2003—2017年中国251个城市的面板数据,采用“一步法”策略首次对中国城市层面的碳回弹效应进行测算,并对其驱动因素、时空格局及动态演进开展综合考察。与现有研究相比,本文的边际贡献包含如下3个方面:一是在研究方法上,本文严格遵循回弹效应的理论内涵,对碳回弹效应的定义及发生机理进行系统剖析,进而提出一种基于改进的碳排放SFA模型的碳回弹效应测算方法,从而为准确测算碳回弹效应奠定了更为严谨的方法基础;二是在研究内容上,本文提出的碳回弹效应测算方法在本质上属于“一步法”SFA模型,这允许我们在准确测算碳回弹效应的同时,也能够对其驱动因素予以经验考察,从而可以为中国碳回弹效应的抑制及减

排政策的优化调整提供实证依据;三是在研究对象方面,与现有研究主要关注国家或省级层面的回弹效应不同^[17],本文从城市层面对中国碳回弹效应进行经验测算,并采用核密度估计等方法,更加系统地揭示了中国碳回弹效应的时空格局及动态演进特征。

一、模型构建、指标选取与数据说明

(一)碳回弹效应的定义及发生机理

既有研究对碳回弹效应的定义仍莫衷一是,考虑到能源回弹效应和碳回弹效应具有较强的相似性,本文将从能源回弹效应的理论内涵出发,对碳回弹效应的定义和发生机理进行分析。在各类宏观经济层面的能源回弹效应定义中,Saunders^[18]的界定形式因其规范性较强而被现有文献广泛采用,他将能源回弹效应表示为1加上能源消费对能源效率的弹性。参考上述定义,不难得到碳回弹效应(CE)的严谨界定形式:

$$CE = 1 + \eta_c = 1 + \frac{d \ln C}{d \ln \varphi} = 1 + \frac{dC}{C} \frac{\varphi}{d\varphi} \quad (1)$$

式中, η_c 代表碳排放对碳排放效率的弹性; C 代表碳排放; φ 代表碳排放效率。据此,碳回弹效应实质上反映了碳排放对碳排放效率变化的敏感程度。一般而言,能源回弹效应包括逆反效应、完全回弹、部分回弹、零回弹与超级节能五种类型^[19]。类似地,碳回弹效应也可以相应地被分为以下5种类型:第一,逆反效应: $\eta_c > 0$, $CE > 1$,碳排放效率改进不仅未能实现碳减排,反而增加了碳排放;第二,完全回弹: $\eta_c = 0$, $CE = 1$,碳排放效率改进对碳排放没有产生实质影响;第三,部分回弹: $0 > \eta_c > -1$, $1 > CE > 0$,碳排放效率改进可以产生一定的碳减排效应,但减排效果小于预期程度;第四,零回弹: $\eta_c = -1$, $CE = 0$,碳排放效率改进引起的碳减排效果与预期完全一致;第五,超级减排^②: $-1 > \eta_c$, $0 > CE$,碳排放效率改进引起的碳减排效果大于预期程度。

在对碳回弹效应进行规范定义之后,一个新的问题随之产生:碳排放效率改进是如何引起碳

② 现有研究将能源回弹效应小于0的状态称为“超级节能”,类似地,本文将碳回弹效应小于0的状态称为“超级减排”。

排放回弹的呢? 同样地, 也可以从能源回弹效应的发生机理入手对该问题予以解答。能源回弹效应的发生机制通常可以从产出效应和替代效应两个方面予以解释^[20]。首先, 能源效率改进可以降低企业的能源投入成本, 有助于扩大企业的生产可能性边界, 从而促使企业追加包括能源在内的生产要素以扩大生产规模, 这种由生产规模扩张引起的能源消费增加被称为产出效应。其次, 能源效率改进也可以降低能源服务的实际价格, 在利润最大化的驱使下, 企业更倾向于采用相对廉价的能源要素来替代资本和劳动要素进行生产, 这种由要素替代引起的能源消费增加被称为替代效应。由此可见, 能源的生产要素性质是能源回弹效应得以产生的关键条件, 能源效率改进正是通过促使企业对包括能源在内的生产要素进行优化调整, 从而引起能源消费回弹。

事实上, 环境污染也可以被视作一种影响企业资源配置的特殊“生产要素”^[21]。通常认为, 自然环境在现代生产过程中扮演着环境资本的角色^[22], 因此企业需要采取相关措施对生态环境进行保护, 这意味着企业会因为污染排放而承担必要的经济成本。换言之, 企业由于污染排放而支付了减排成本, 从而导致其期望产出下降, 这使得污染排放在一定程度上具备了生产要素的性质。基于此, 黄茂兴等^[21]将污染排放作为一种投入要素纳入了生产函数, 从而对生态环境和经济增长的关系进行了更为合理的刻画。上述理论假设对中国的碳排放问题也同样适用。中国一直以来均对节能减排问题高度关注, 特别是 2007 年党的十七大报告首次列入气候变化议题以来, 中国政府出台实施了一系列的碳减排政策, 从而对企业的生产过程施加了严格的约束。尤其地, 北京、天津、上海、重庆、湖北、广东及深圳等 7 个试点, 于 2013 年起相继开展了碳交易, 全国碳交易市场也在 2021 年 7 月 16 日正式启动, 这使得碳排放获得了实际的市场价格, 从而成为名副其实的“生产要素”。

基于上述分析, 可以推断, 产出效应和替代效应很可能也是碳排放效率改进引致碳回弹效应产

生的主要机制。从产出效应来看, 碳排放效率改进有助于弱化企业实际面临的环境约束, 根据遵循成本理论, 这可以推动企业的生产可能性边界向外扩张, 从而促使企业扩大生产规模而增加碳排放。现有研究表明, 碳规制政策会在一定程度上对企业的产出规模产生负面影响^[23], 而碳排放效率改善显然可以缓解这种约束而有利于企业增加产出, 进而对碳排放产生促增作用。从替代效应来看, 碳排放效率改进伴随着单位化石能源投入所产生的碳排放的减少, 在我国环境规制趋严和化石能源价格尚未完全市场化的背景下, 这会降低企业使用化石能源的单位成本。此时, 企业会倾向于投入更多的化石能源而减少清洁能源或劳动力等其他要素投入, 从而抵消预期减少的碳排放。如果将碳排放视作一种生产要素, 上述情形实质上就是碳排放“生产要素”对其他生产要素的替代。

(二) 碳回弹效应的测算模型

参考 Orea 等^[15]的能源回弹效应测算思路, 本文在碳排放 SFA 模型中嵌入碳回弹效应调整因子, 从而构建基于“一步法”策略的碳回弹效应测算模型。首先, 考虑如下的标准碳排放 SFA 模型:

$$\ln C = \ln f(X; \beta) + v + u \quad (2)$$

式中, C 代表碳排放; $f(X; \beta)$ 为由影响碳排放的相关向量 X 构成的函数, β 是相应的待估系数向量; v 是常规的随机干扰项, 通常假定其服从正态分布 $v \sim N(0, \sigma_v^2)$; $u = -\ln \varphi \geq 0$ 为非效率项, φ 是碳排放效率。由于式(2)包含了 v 和 u 两个随机项, 为了在实证研究中对二者进行有效识别, 现有研究通常参考 Aigner 等^[24]的设定, 假设 u 服从半正态分布 $u \sim N^+(0, \sigma_u^2)$, 且 $\sigma_u = e^{\delta_0}$ 。由式(1)可知, 式(2)所示的标准碳排放 SFA 模型实质上隐含了碳回弹效应恒为 0 的不合理假设, 即 $CE = 1 + d\ln C / d\ln \varphi = 1 - d\ln C / du = 0$, 这意味着碳排放将随着碳排放效率改进等比例下降。

为解决上述问题, 本文借鉴 Orea 等^[15]的思路, 将碳回弹效应 R 表示为一组驱动因素的函数 $R(Z; \lambda)$, 并将其作为调整因子嵌入式(2), 从而得

到如下改进的碳排放 SFA 模型:

$$\ln C = \ln f(X; \beta) + v + (1 - R(Z; \lambda))u \quad (3)$$

式中, Z 是由一组影响碳回弹效应的变量构成的向量; λ 是待估系数向量。此时, 根据式(1)计算得到的碳回弹效应将变为 R , 说明碳排放将不再与碳排放效率等比例变化, 从而克服了标准碳排放 SFA 模型中碳回弹效应恒等于 0 的关键局限。此外, 为采用极大似然法 (MLE) 对式(3)进行估计, 参考既有研究采用了如下的回弹效应函数形式^[15]:

$$R(Z; \lambda) = \frac{\exp(\lambda'Z)}{1 + \exp(\lambda'Z)} \quad (4)$$

(三) 指标选择

1. 碳排放的驱动因素选择

由 Dietz 等^[25]提出的 STIRPAT 模型是被普遍用于环境压力驱动因素分析的理论模型, 本文也以 STIRPAT 模型为基本框架来选择碳排放的驱动因素, 从而将式(3)扩展为如下面板数据形式:

$$\ln C_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln pop_{it} + \beta_2 \ln gdp_{it} + \beta_3 \ln tec_{it} + \beta_4 D_t + \beta_5 D_r + (1 - R(Z_{it}; \lambda))u_{it} + v_{it} \quad (5)$$

式中, i 和 t 分别代表城市和年份; STIRPAT 模型中的环境影响 I 被表示为碳排放 (C), 人口 P 、人均财富 A 和技术水平 T 则分别由人口密度 (pop)、经济增长 (gdp) 和技术水平 (tec) 表征; D_t 和 D_r 分别代表年度虚拟变量和“八大经济区”的地区虚拟变量, 用以控制不可观测的时间和区域异质性。此外, 为了保证实证结果的稳健性, 本文还根据 EKC 假说^[26], 以及“污染晕轮”和“污染避难所”两个竞争性假说^[27], 在式(5)中进一步加入了经济增长 (gdp) 的二次项和以外商直接投资 (FDI) 表征的对外开放 (fdi) 两个变量。

本文的碳排放数据来源于 Chen 等^[28], 碳排放驱动因素变量的选取说明如下。①人口密度 (pop): 参考 Jia 等^[29], 采用单位面积的人口数予以度量。②经济增长 (gdp): 采用人均 GDP 度量, 并将其一次项和二次项同时引入模型。③技术水平 (tec): 采用人均专利授权数量度量。④对外开放 (fdi): 采用 FDI 占 GDP 的比重度量。

2. 碳回弹效应的驱动因素选择

由于碳排放主要来源于人类对化石能源的消

费, 因此本文从现有文献对限制能源回弹效应的思路, 以及碳回弹效应的作用机制、经济变量之间的逻辑关系和中国经济的实际情况出发, 选择了如下的碳回弹效应驱动因素。

①经济增长 (gdp): 采用人均 GDP 予以度量。②产业结构 (ind): 为综合刻画中国的产业结构特征, 本文参考张华等^[30]的做法, 采用产业结构综合指数衡量产业结构优化水平。③人力资本 (hum): 采用高等学校在校学生人数占总人口的比重衡量。④能源结构 (es): 采用用电量占总能耗的比重衡量^[31]。⑤碳减排政策 (ctp 和 ccp): 本文构建了一个刻画碳交易是否实施的政策虚拟变量 (ctp)^[32], 用以反映碳价格对回弹效应的抑制作用。此外, 本文还构建了一个时间虚拟变量 (2011 年之后为 1) 与各城市碳排放强度的交乘项 (ccp) 来刻画碳排放强度约束政策^[33]。⑥时间趋势 (tt): 由于难以对各类影响碳回弹效应的宏观经济因素予以完整考虑和控制, 本文参照既有文献的做法^[34], 将一个时间趋势项作为控制变量引入回归模型, 从而形成如下碳回弹效应函数的表达式:

$$\lambda'Z_{it} = \lambda_0 + \lambda_1 \ln gdp + \lambda_2 \ln ind + \lambda_3 \ln hum + \lambda_4 \ln es + \lambda_5 ctp + \lambda_6 \ln ccp + \lambda_7 tt \quad (6)$$

式中, $\lambda_0 - \lambda_7$ 为待估系数, 其它变量如前文所述。需要说明的是, 将式(6)代入式(5)后可以发现, $(1 - R(Z_{it}; \lambda))u$ 的常数项 θ_0 实际上可能包含了 δ_0 和 λ_0 两项, 从而导致 λ_0 难以唯一识别。为此, 后文将按照 Orea 等^[15]提出的截距调整公式得到 λ_0 。

(四) 数据来源

本文选择 2003—2017 年中国 251 个城市的面板数据作为研究样本。其中, 城市专利授权数量来源于国家知识产权局。由于中国城市的能源消费数据并未公开发布, 本文从相关统计年鉴或社会发展统计公报中手动搜集了城市能源强度指标, 再将其与各城市 GDP 相乘而还原出能源消费总量数据。本文使用的其它数据主要来源于《中国城市统计年鉴》《中国统计年鉴》及各省市历年统计年鉴, 并将名义变量按 2003 年不变价进行了

平减。上述各变量的描述性统计见表 1。

表 1 变量的描述性统计

变量	单位	均值	标准差	最小值	最大值
碳排放(<i>C</i>)	百万吨	26.547	23.905	1.529	230.712
人口密度(<i>pop</i>)	万人/平方公里	0.046	0.034	0.000	0.266
经济增长(<i>gdp</i>)	万元/人	2.794	2.227	0.233	16.778
技术水平(<i>tec</i>)	件/万人	6.077	15.591	0.011	215.676
对外开放(<i>fdi</i>)	%	2.182	2.481	0.000	37.579
产业结构(<i>ind</i>)	%	224.607	15.027	182.060	280.130
人力资本(<i>hum</i>)	%	1.685	2.256	0.000	13.112
能源结构(<i>es</i>)	%	12.448	6.641	0.905	70.573

二、中国碳回弹效应的驱动因素及时空格局

(一) 计量模型的估计结果

表 2 汇报了碳排放 SFA 模型的估计结果,其中模型(1)和模型(2)为基于式(2)的估计结果,模型(3)和模型(4)为基于式(3)的估计结果。表 2 显示,模型(2)和(4)中经济增长的二次项及对外开放的估计系数均在 1% 的水平上显著,说明有必要对 STIRPAT 模型的控制变量进行扩展,因此下文将根据模型(2)和模型(4)的结果进行分析和测算。

从碳回弹效应的驱动因素来看,人均 GDP 的系数显著为正,说明经济增长会对碳排放效率改进引致的产出效应产生促增作用,从而促进碳回弹效应。产业结构的系数显著为负,意味着产业结构的优化可以促使生产资源流向低碳行业,进而限制碳回弹效应。由于人力资本水平的提高有助于转变居民的节能减排意识^[29],人力资本的系数显著为负表明,绿色消费观念可以在一定程度上限制碳回弹效应。能源结构的系数显著为正,说明电力消费比重的增加对碳回弹效应产生了显著的促增效应。中国的能源禀赋主要以煤炭为主,在本文的样本期内,中国的煤电装机容量占比一直维持在 50% 以上的较高水平^③,这意味着电力在消费端虽然属于清洁能源,但是在生产端却是中国碳排放的主要来源。因此,用电量占总能耗的比重可以在一定程度上反映煤炭消费在各地区能源结构中的地位,因而以电力消费占比衡量的能源结构成为中国碳回弹效应的促增因素也就不

难理解。

表 2 碳排放随机前沿模型估计结果

	变量	模型(1)	模型(2)	模型(3)	模型(4)
碳排放	$\ln pop$	0.101 *** (0.013)	0.094 *** (0.013)	0.116 *** (0.014)	0.111 *** (0.013)
	$\ln gdp$	0.302 *** (0.028)	-0.725 ** (0.286)	0.378 *** (0.046)	-1.082 *** (0.281)
	$\ln tec$	0.131 *** (0.014)	0.122 *** (0.014)	0.054 *** (0.015)	0.051 *** (0.015)
	$(\ln gdp)^2$	—	0.050 *** (0.014)	—	0.072 *** (0.014)
	$\ln fdi$	—	3.244 *** (0.534)	—	2.244 *** (0.524)
	常数项(β_0)	0.123 (0.961)	5.209 *** (1.542)	-0.855 * (0.467)	6.370 *** (1.430)
	$\ln \sigma_v$	-1.125 *** (0.023)	-1.137 *** (0.023)	-1.350 *** (0.032)	-1.357 *** (0.031)
	区域固定效应	是	是	是	是
碳回弹效应	时间固定效应	是	是	是	是
	$\ln gdp$	—	—	1.247 *** (0.295)	1.237 *** (0.247)
	$\ln ind$	—	—	-12.602 *** (1.951)	-11.969 *** (1.923)
	$\ln hum$	—	—	-0.627 *** (0.091)	-0.632 *** (0.091)
	$\ln es$	—	—	0.453 *** (0.151)	0.423 *** (0.148)
	ctp	—	—	-1.272 *** (0.269)	-1.365 *** (0.276)
	$\ln cep$	—	—	-2.120 *** (0.264)	-2.212 *** (0.264)
	tt	—	—	0.206 *** (0.042)	0.222 *** (0.042)
	常数项(θ_0)	—	—	-409.969 *** (82.657)	-443.568 *** (83.389)
	$\ln \sigma_u(\delta_0)$	-14.169 (2 751.561)	-12.317 (665.569)	—	—
	Log-L	-3 224.741	-3 201.662	-3 065.092	-3 043.399
	观测值	3 765	3 765	3 765	3 765

注:***、**、* 分别表示 1%、5% 和 10% 有统计学意义。

此外,碳交易试点政策和碳排放强度约束政策均对碳回弹效应表现出了显著的促降效应,这无疑是一个利好消息,说明中国实施的碳减排政策至少在控制碳回弹效应方面是卓有成效的。对于时间趋势变量,本文发现其系数显著为正,说明随着时间的推移,各种内外经济环境总体上对碳回弹效应发挥了明显的促增效应。

(二) 中国碳回弹效应的时空格局

1. 中国碳回弹效应的时序演进特征

基于表 2 的估计结果对碳回弹效应进行测算后发现,中国城市碳回弹效应整体介于 0.014 至 0.998 之间,且均值为 0.697,说明中国碳排放

③ 数据来源: http://www.gov.cn/xinwen/2021-02/07/content_5585511.htm。

效率改进仅实现了 30% 左右的预期减排效果。图 1 显示,中国的碳回弹效应主要表现出围绕碳排放强度约束政策周期性波动的特征,其变化趋势整体呈“M”型,从而可以将其分为如下四个阶段。第一阶段,2003—2010 年,中国碳回弹效应均值由 0.593 持续上升至 0.880,年均增长率达到 5.81%。“十五”中后期开始,中国经济在亚洲金融危机的余波中逐渐恢复,从而进入新一轮的高速增长阶段。该阶段的显著特征为,能耗更高和污染更密集的重工业产值占工业总产值的比重,在经历改革开放以来近 30 年的相对稳定后开始持续提高,从而将 2003—2010 年的碳回弹效应推至历史高位。第二阶段,2010—2011 年,中国碳回弹效应应在一年的时间内出现大幅下降,回弹效应均值跌至 0.491 的历史低位。2011 年中国首次提出碳排放强度约束政策,由前文驱动因素分析可知,该政策可以显著限制碳回弹效应攀升,从而使得回弹效应均值于 2011 年急转直下。

第三阶段,2011—2016 年,中国碳回弹效应出现反弹,从而再度呈现出年均增长率为 8.73% 的逐年上升趋势。正如 Shao 等^[35]所指出,尽管中国实施的碳排放强度约束政策在节能减排方面取得了预期效果,但由于其并非以市场机制为基础的经济激励手段,企业只能被动地扭曲要素投入结构来应付考核,因此其政策效果通常是不可持续的。本文也发现了类似现象,虽然碳排放强度约束政策在短期内可以通过扭曲资源配置而极大地抑制企业的碳排放需求,从而引起碳回弹效应骤然下降。但是,随着政策的不断深入,企业合理的碳排放需求将得到重新释放,碳回弹效应自然也会逐渐恢复到较高水平。第四阶段,2016—2017 年,中国碳回弹效应再次出现下降迹象。中国在“十三五”再次提出碳排放强度下降 18% 的约束性指标,这可能是该时期碳回弹效应再次回落的主要原因。同时,碳回弹效应在第四阶段的降幅远不如第二阶段,从而表明碳排放强度约束政策对碳回弹效应的抑制作用呈边际效应递减状态。

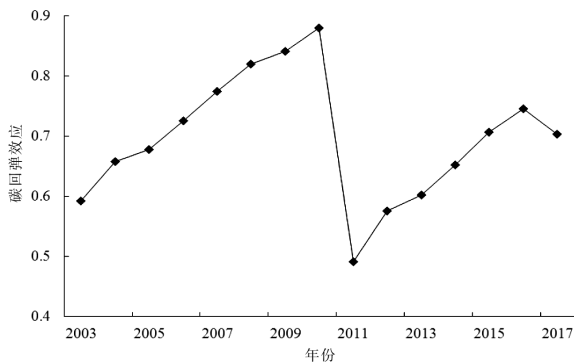


图 1 中国碳回弹效应均值的时变趋势

2. 中国碳回弹效应的空间分布特征

表 3 报告了各区域在各五年规划时期的碳回弹效应均值。可以发现,各省份在各五年规划时期的时变趋势基本与全国一致,表现出先上升、后下降、再反弹的时期走势。具体而言,“十五”时期(2003—2005 年)至“十一五”时期(2006—2010 年),除海南以外,其他省份的碳回弹效应均出现了不同程度的增长,平均增长率为 32.2%;“十一五”时期(2006—2010 年)至“十二五”时期(2011—2015 年),在碳排放强度约束政策的影响下,所有省份的碳回弹效应均出现了下降,平均下降率为 31.9%;“十二五”时期(2011—2015 年)至“十三五”时期(2016—2017 年),除黑龙江省外,其他省份的碳回弹效应均出现了反弹,平均增长率为 32.2%。可见,仅从增长率来看,2011 年实施的碳排放强度约束政策对碳回弹效应的促降作用,在“十三五”初期几乎完全消失殆尽。

整体来看,中国区域碳回弹效应均值的排序为:东北地区 > 南部沿海地区 > 东部沿海地区 > 北部沿海地区 > 大西南地区 > 长江中游地区 > 黄河中游地区 > 大西北地区,呈现出“东北一家独大、由东至西递减”的分布特征,这与中国改革开放以来逐渐出现的东、中、西部区域发展差距的分布特征较为吻合,从而说明经济增长是本文样本期内碳回弹效应的首要驱动因素。值得一提的是,东北地区是一个较为例外的情形,当前该区域资源枯竭问题严重、产业结构升级换代较缓慢,因此其经济长期处于低迷状态,但是由表 3 可知,近年来东北地区的碳回弹效应却一直位于全国前列。上述结果表明,虽然经济增长主导着碳回弹

效应的长期走势,但并不能因此因噎废食地通过放弃经济发展来限制回弹效应,产业结构和能源结构的优化转型同样是合理规避回弹效应的基本途径。

表 3 分区域碳回弹效应的测算结果

区域 (排名)	省份 (排名)	“十五” 时期	“十一五” 时期	“十二五” 时期	“十三五” 时期	均值
		2003— 2005 年	2006— 2010 年	2011— 2015 年	2016— 2017 年	
东北 (1)	黑龙江(4)	0.701	0.865	0.794	0.775	0.797
	吉林(9)	0.612	0.819	0.705	0.788	0.736
	辽宁(10)	0.564	0.801	0.730	0.805	0.730
	区域	0.653	0.842	0.764	0.785	0.771
北部 沿海 (4)	北京(28)	0.225	0.419	0.310	0.490	0.353
	河北(15)	0.640	0.834	0.516	0.676	0.668
	山东(6)	0.702	0.862	0.718	0.861	0.782
	天津(22)	0.460	0.726	0.381	0.458	0.522
东部 沿海 (3)	江苏(8)	0.684	0.833	0.676	0.871	0.756
	上海(23)	0.517	0.682	0.336	0.492	0.508
	浙江(3)	0.710	0.849	0.758	0.903	0.798
	区域	0.689	0.834	0.698	0.870	0.764
南部 沿海 (2)	福建(1)	0.753	0.877	0.837	0.933	0.846
	广东(7)	0.797	0.869	0.667	0.741	0.770
	海南(29)	0.536	0.427	0.162	0.319	0.346
	区域	0.768	0.844	0.683	0.769	0.765
黄河 中游 (7)	河南(5)	0.743	0.889	0.707	0.784	0.785
	内蒙古(19)	0.653	0.824	0.443	0.588	0.631
	山西(26)	0.487	0.687	0.169	0.175	0.406
	陕西(20)	0.477	0.736	0.453	0.650	0.578
长江 中游 (6)	安徽(16)	0.579	0.773	0.552	0.732	0.655
	湖北(12)	0.615	0.804	0.584	0.672	0.675
	湖南(13)	0.540	0.767	0.632	0.756	0.675
	江西(11)	0.587	0.794	0.624	0.774	0.693
大西南 (5)	广西(18)	0.537	0.722	0.570	0.728	0.635
	贵州(25)	0.442	0.625	0.223	0.506	0.439
	四川(2)	0.705	0.864	0.781	0.889	0.808
	云南(14)	0.626	0.791	0.573	0.683	0.671
大西北 (8)	重庆(24)	0.441	0.666	0.293	0.469	0.471
	区域	0.630	0.798	0.631	0.768	0.705
	甘肃(17)	0.735	0.812	0.464	0.593	0.651
	宁夏(27)	0.578	0.665	0.108	0.183	0.398
	青海(30)	0.213	0.507	0.202	0.450	0.339
	新疆(21)	0.504	0.638	0.401	0.564	0.522
	区域	0.605	0.717	0.354	0.491	0.544

三、中国碳回弹效应的动态演进

本文利用空间核密度估计方法^[36],分别考察了中国碳回弹效应在时间条件下的非空间动态核密度,在空间条件下的空间静态核密度,以及在时空条件下的空间动态核密度,从而系统揭示城市碳回弹效应的空间分布形态和动态演进过程。

(一)非空间动态核密度估计

在图 2a 所示的核密度图中,X 轴为 t 年碳回弹效应,Y 轴为 $t+3$ 年碳回弹效应,Z 轴为条件核密度。在图 2b 所示的密度等高线图中,X 轴和 Y 轴的含义与核密度图相同,其中越是内部的密度等高线表示概率越大,而等高线越密集,说明概率变化越大,对应的密度图越陡峭。图 2 显示,非空间动态核密度估计的概率主体大致分布于正 45 度对角线附近,从而说明中国的城市碳回弹效应具有较强的路径依赖特征。

同时,在碳回弹效应低于 0.8 的中低区间内,概率主体呈现出略微的向上偏移倾向,从而表明中国城市碳回弹效应整体上在持续走高,这与前文的研究结论一致。同时,在碳回弹效应高于 0.8 的区间内,概率主体则出现了一定的向下拖尾现象,说明在碳规制政策不断趋紧的背景下,较高的碳回弹效应也对少部分城市形成了倒逼作用,从而使其逐渐摆脱了高排放的发展路径。鉴于经济增长是中国城市碳回弹效应的首要驱动因素,上述拖尾现象也表明,碳回弹效应提高并非经济增长的必然结果,二者的脱钩在一定条件下是可以实现的。

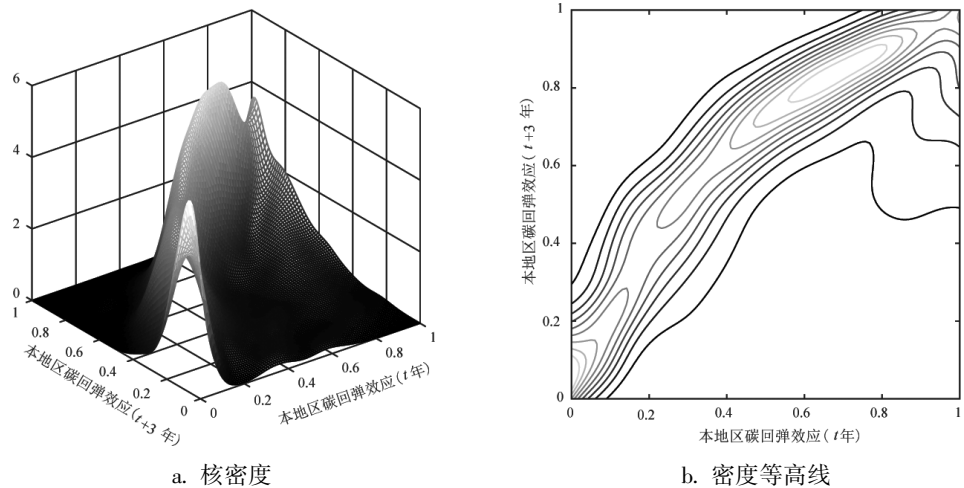
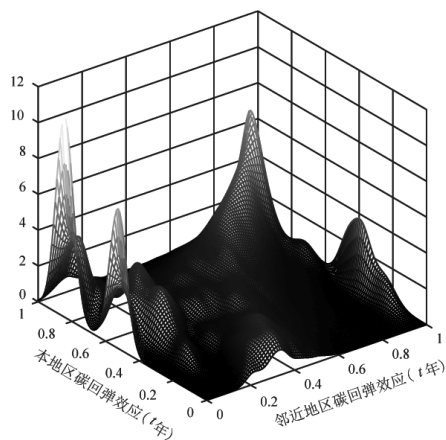


图 2 中国碳回弹效应的非空间动态核密度及密度等高线

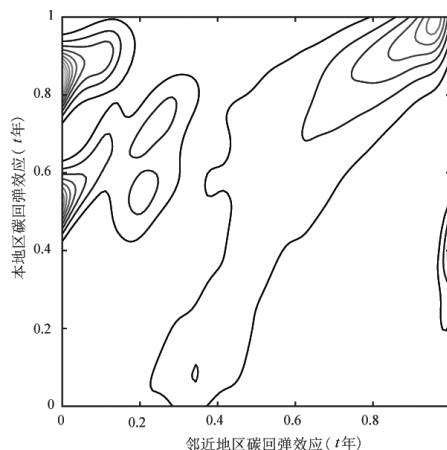
(二) 空间静态核密度估计

在图 3a 和 3b 中, X 轴和 Y 轴分别表示同一年度邻近地区的碳回弹效应和本地区的碳回弹效应^④, 图中其余要素含义与图 2 类似。由图 3 可知, 中国碳回弹效应在空间静态条件下的分布特征, 表现出明显的以 0.3 作为 X 轴分界点的分段特征。当邻近地区碳回弹效应小于 0.3 时, 概率主体大致位于负 45 度对角线附近, 呈现出低—高集聚的空间负

相关性。当邻近地区碳回弹效应大于 0.3 时, 概率主体则集中分布于正 45 度对角线附近, 说明此时碳回弹效应表现出高—高集聚的正向空间相关性。上述空间集聚模式表明, 中国城市碳回弹效应存在一定的极化效应, 具体表现为高回弹效应城市会推高邻近城市的回弹效应, 而低回弹效应城市却难以很好地带动邻近城市实现回弹效应的协同规避, 这可能与区域碳减排的协调机制不健全有关。



a. 核密度



b. 密度等高线

图 3 中国碳回弹效应的空间静态核密度及密度等高线

(三) 空间动态核密度估计

与空间静态核密度估计相比, 图 4a 和 4b 所示的空间动态核密度估计进一步考虑了时间因素对碳回弹效应空间关联特征的影响, 因此图 4 与图 3 的主要区别在于, Y 轴由本地区 t 年的碳回弹效应被替换为本地区 $t+3$ 年的碳回弹效应。与图 3 相比, 图 4 中概率主体的分布特征发生了明显变化, 从而说明时间因素对于城市间碳回弹效应的空间交互关系具有重要影响。具体而言, 空间动态条件下的概率主体均大致平行于 X 轴, 表明在考虑 3 年时间滞后的条件下, 中国城市碳回弹效应的空间溢出效应几乎消失殆尽, 城市之间难以在碳回弹效应的治理方面形成有效的空间协作关系。同时, 概率主体主要分布于 Y 轴的 0.6 至 1 之间, 意味着碳回弹效应的极化现象在长期中得到了进一步加强。

值得注意的是, 当邻近地区碳回弹效应大于 0.8 时, 概率主体还呈现出一定的双峰分布特征, 即部分城市的碳回弹效应落入了低回弹区间, 这可能与部分发达城市在节能减排中扮演的“领头羊”角色有关。如表 3 显示, 在高速经济增长的驱动下, 东部沿海地区的碳回弹效应在八大经济区中位列第 3 位, 而上海作为该区域的中心城市, 却凭借其技术和制度优势率先实现了经济增长和碳排放的脱钩, 从而使其碳回弹效应远低于该区域的其他城市。但是, 由于长期中空间协作关系的缺失, 这类城市仅能在回弹效应规避方面做到独善其身, 难以发挥中心城市在环境治理领域的带动引领作用。总体来看, 随着时间因素的加入, 中国城市碳回弹效应的空间关联关系将明显降低, 从而进一步加剧回弹效应向高水平跃迁的极化效应。

^④ 邻近地区碳回弹效应即碳回弹效应的空间滞后项, 本文采用基于地理距离的 0-1 空间权重矩阵对其进行计算。

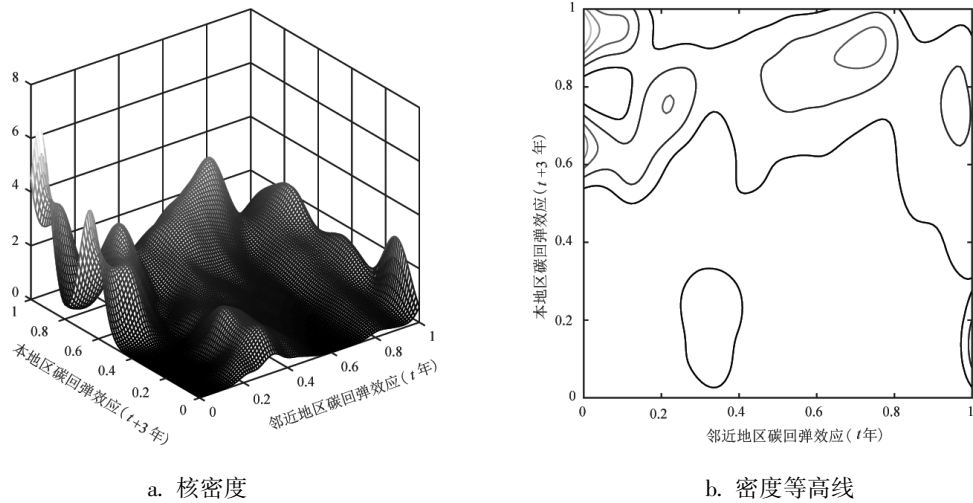


图4 中国碳回弹效应的空间动态核密度及密度等高线

四、结论与政策建议

(一) 主要结论

第一,中国城市碳回弹效应整体偏高,均值为0.697,从而表明中国实施的碳排放效率政策的有效程度偏低,碳排放效率改进的潜在减排效果中仅有一小部分被实现。

第二,快速的经济增长是中国城市碳回弹效应的首要驱动因素,以煤为主的能源结构进一步强化了经济发展对碳回弹效应的促增作用,而产业结构优化、人力资本积累及碳交易试点政策对碳回弹效应具有明显的抑制作用。此外,虽然碳排放强度约束政策也可以限制碳回弹效应攀升,但其政策效果缺乏持续性。

第三,在时间维度上,中国城市碳回弹效应在碳排放强度约束政策调整时期会出现短暂下降,其余时段则处于逐年上升状态,从而表现出围绕碳排放强度约束政策周期性波动的特征。在空间维度上,碳回弹效应呈现出“东北一家独大,由东至西递减”的区域分布特征。

第四,核密度估计表明,在非空间条件下,中国城市碳回弹效应具有较强的路径依赖特征,当期较高的碳回弹效应可能推动后期回弹效应的持续走高;在空间条件下,静态与动态估计结果存在明显差异,静态条件下碳回弹效应的空间集聚模式不利于区域回弹效应的协同规避,从而表现出一定的极化效应;随着时间因素的加入,碳回弹效应的空间溢出效应会明显衰减,并进一步加剧回

弹效应向高水平跃迁的极化效应。

(二) 对策建议

第一,应尽快将碳回弹效应问题纳入政策决策视野,以保障碳排放效率改进政策的潜在减排效果最大程度地实现。我国的碳回弹效应整体处于70%左右的高回弹区间,表明碳排放效率改进并未充分实现预期的减排效果,这说明当前实施的碳排放强度约束政策对于限制碳排放的作用十分有限。因此,在保持现有碳减排思路不变的条件下,我国还应该着力通过一系列的辅助性政策组合对碳回弹效应加以限制,从而推动碳排放强度和碳排放总量的同步下降,这也与目前我国正在探索实施的碳排放总量和强度“双控”政策的执行目标相契合。

第二,应加快产业结构和居民消费绿色升级,推动生产生活方式转变。本文研究发现,产业结构优化和以人力资本衡量的绿色消费升级可以显著抑制碳回弹效应。因此,建议以高新技术产业发展引领产业结构优化,以能源定价机制改革倒逼居民消费模式转变,从而推动生产生活方式绿色转型。

第三,应以可再生能源消纳为抓手,促进能源消费结构低碳化。本文分析表明,以煤为主的能源结构和以煤电为主的电源结构为我国碳回弹效应的恶化提供了“温床”,因此发展可再生能源成为抑制碳回弹效应的有效途径。鉴于电网对可再生能源的消纳能力是制约能源结构绿色转型的主

要瓶颈,建议依托公共政策建立可再生能源电力消纳保障机制,有效化解可再生能源发展难题。

第四,应构建市场机制与行政机制相耦合的碳减排政策体系,为碳回弹效应治理提供长效激励。如前文所述,我国实行的碳排放强度约束政策主要由行政命令推动,虽然在短期内可以对碳回弹效应起到抑制作用,但是政策效果缺乏持续性。因此,在发挥行政力量“掌舵领航”作用的同时,还需通过逐步补齐碳交易市场的短板,充分发挥市场机制在碳价格发现和传导中的基础作用,从而完善市场化的低碳发展机制,促进各类市场主体形成“众人划桨”的合力。

第五,应建立健全碳减排的区域协作机制,形成碳回弹效应规避的区域合力。由于区域环境协同治理机制的不完善,我国碳回弹效应缺乏稳定的空间关联关系,且空间集聚模式存在明显的极化效应,不利于区域碳回弹效应的协同规避。因此,应通过跨区域联盟的模式建立区域协商机制,优化城市间的多维利益分配机制,促进产业资本、技术及劳动力的跨区域合理流动,以此更好地发挥中心城市及城市群在区域碳回弹效应协同规避中的带动引领作用。

参考文献:

- [1]王锋,冯根福,吴丽华. 中国经济增长中碳强度下降的省区贡献分解[J]. 经济研究,2013(8):143-155.
- [2]查冬兰,陈倩,王群伟. 能源回弹效应最新研究进展:理论与方法[J]. 环境经济研究,2021(1):182-203.
- [3]WU L P, CHEN Y, FEYLIZADEH M R, et al. Estimation of China's macro-carbon rebound effect: method of integrating data envelopment analysis production model and sequential malmquist-luenberger index[J]. Journal of cleaner production, 2018(198):1431-1442.
- [4]SAUNDERS H D. The Khazzoom-Brookes postulate and neoclassical growth [J]. Energy journal, 1992, 13 (4): 131-148.
- [5]AMJADI G, LUNDGREN T, PERSSON L. The rebound effect in Swedish heavy industry[J]. Energy economics, 2018 (71):140-148.
- [6]FULLERTON D, TA C L. Costs of energy efficiency mandates can reverse the sign of rebound [J]. Journal of public economics, 2020(188):104-225.

[7]冯峰. 能效改善与能源节约:助力还是阻力——基于中国20个行业能源回弹效应的分析[J]. 数量经济技术经济研究,2018(2):82-98.

[8]YANG L S, LI Z. Technology advance and the carbon dioxide emission in China – empirical research based on the rebound effect[J]. Energy policy, 2017(101):150-161.

[9]SHAO S, GUO L F, YU M L, et al. Does the rebound effect matter in energy import-dependent mega-cities? evidence from Shanghai (China) [J]. Applied energy, 2019(241):212-228.

[10]查冬兰,周德群,孙元. 为什么能源效率与碳排放同步增长——基于回弹效应的解释[J]. 系统工程, 2013 (10):105-111.

[11]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(11):118-132.

[12]SHAO S, HUANG T, YANG L L. Using latent variable approach to estimate China's economy-wide energy rebound effect over 1954-2010 [J]. Energy policy, 2014 (72): 235-248.

[13]杨莉莉,邵帅. 能源回弹效应的理论演进与经验证据:一个文献述评[J]. 财经研究,2015(8):19-38.

[14]ADETUTU M O, GLASS A J, WEYMAN-JONES T G. Economy-wide estimates of rebound effects: evidence from panel data[J]. Energy journal, 2016, 37(3):251-269.

[15]OREA L, LLORCA M, FILIPPINI M. A new approach to measuring the rebound effect associated to energy efficiency improvements: an application to the US residential energy demand[J]. Energy economics, 2015(49):599-609.

[16]DU K R, SHAO S, YAN Z M. Urban residential energy demand and rebound effect in China: a stochastic energy demand frontier approach[J]. Energy journal, 2021, 42(4): 175-194.

[17]YAN Z M, OUYANG X L, DU K R. Economy-wide estimates of energy rebound effect: evidence from China's provinces[J]. Energy economics, 2019(83):389-401.

[18]SAUNDERS H D. A view from the macro side: rebound, backfire, and Khazzoom-Brookes[J]. Energy policy, 2000, 28 (6):439-449.

[19]邵帅,杨莉莉,黄涛. 能源回弹效应的理论模型与中国经验[J]. 经济研究,2013(2):96-109.

[20]SAUNDERS H D. Fuel conserving (and using) production functions[J]. Energy economics, 2008, 30(5): 2184-2235.

- [21] 黄茂兴, 林寿富. 污染损害、环境管理与经济可持续增长——基于五部门内生经济增长模型的分析[J]. 经济研究, 2013(12): 30-41.
- [22] ANDREONI J, LEVINSON A. The simple analytics of the environmental Kuznets curve[J]. Journal of public economics, 2001, 80(2): 269-286.
- [23] CAO J, HO M S, MA R, et al. When carbon emission trading meets a regulated industry: evidence from the electricity sector of China [J]. Journal of public economics, 2021(200): 104470.
- [24] AIGNER D, LOVELL C A K, SCHMIDT P. Formulation and estimation of stochastic frontier production function models [J]. Journal of econometrics, 1977, 6(1): 21-37.
- [25] DIETZ T, ROSA E A. Rethinking the environmental impacts of population, affluence and technology [J]. Human ecology review, 1994(1): 277-300.
- [26] GROSSMAN G M, KRUEGER A B. Economic growth and the environment[J]. The quarterly journal of economics, 1995, 110(2): 353-377.
- [27] 邵帅, 李欣, 曹建华, 等. 中国雾霾污染治理的经济政策选择——基于空间溢出效应的视角[J]. 经济研究, 2016(9): 73-88.
- [28] CHEN J D, GAO M, CHENG S L, et al. County-level CO₂ emissions and sequestration in China during 1997-2017 [J]. Scientific data, 2020, 7(1): 391.
- [29] JIA R N, FAN M T, SHAO S, et al. Urbanization and haze-governance performance: evidence from China's 248 cities [J]. Journal of environmental management, 2021(288): 112436.
- [30] 张华, 冯烽. 绿色高铁: 高铁开通能降低雾霾污染吗? [J]. 经济学报, 2019(3): 114-147.
- [31] XU L, FAN M T, YANG L L, et al. Heterogeneous green innovations and carbon emission performance: evidence at China's city level [J]. Energy economics, 2021(99): 105269.
- [32] BO S Y, WU Y P, ZHONG L N. Flattening of government hierarchies and misuse of public funds: evidence from audit programs in China [J]. Journal of economic behavior and organization, 2020(179): 141-151.
- [33] YANG Z B, FAN M T, SHAO S, et al. Does carbon intensity constraint policy improve industrial green production performance in China? a quasi-DID analysis [J]. Energy economics, 2017(68): 271-282.
- [34] 陈诗一. 边际减排成本与中国环境税改革 [J]. 中国社会科学, 2011(3): 85-100, 222.
- [35] SHAO S, YANG Z B, YANG L L, et al. Can China's energy intensity constraint policy promote total factor energy efficiency? evidence from the industrial sector [J]. Energy journal, 2018(40): 101-128.
- [36] 刘华军, 郭立祥, 乔列成, 等. 中国物流业效率的时空格局及动态演进 [J]. 数量经济技术经济研究, 2021(5): 57-74.

(本文责编: 王延芳)