

中国“碳中和”的城市协同路径研究 ——基于“碳达峰”异质性的门限模型

曲 越, 秦晓钰, 汪惠青, 夏友富

摘 要: 随着经济的发展和居民生活水平的提高, 二氧化碳 (CO₂) 排放逐渐成为人类面临的重大环境问题, 本文在中国碳核算数据库 (CEADs) 的基础上, 通过拓展的 EKC 曲线探究了中国 247 个城市的 CO₂ 排放路径问题。研究表明: 人均 GDP 对城市 CO₂ 排放呈现出先上升后下降的非对称倒“U”型关系, 碳达峰点后的 EKC 曲线趋势较缓。城市异质性研究发现: (1) 能源型和重工业型城市是中国 CO₂ 排放的主要来源, 受工业结构的制约, 这两类城市需要在经历两阶段碳排放不断增长的趋势之后, 才能实现碳达峰目标; (2) 轻工业型、技术型和服务型三类城市均在经济发展的第一阶段末期实现了碳达峰目标, 之后两阶段 CO₂ 排放开始呈现递减趋势; (3) 技术型城市较好地协调了经济增长和 CO₂ 排放之间的关系, 轻工业型城市维持了经济发展的低碳运行, 人口集聚使服务型城市面临严峻的生活领域碳排放问题。因此, 中国“双碳”目标的实现需要积极探索城市间的协同路径, 发挥北京和上海等城市的技术引领和辐射作用, 推动轻工业城市的绿色高效发展, 使能源型和重工业型城市加速完成产业转型和升级。

关键词: 碳达峰; 碳中和; 生态补偿; 效率; 公平

中图分类号: F124.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0169(2022)04-0050-14

DOI:10.16493/j.cnki.42-1627/c.2022.04.005

一、引 言

在科技革命的推动下, 世界经济发展进程不断加快, 居民生活水平得到显著提升, 与此同时, 温室气体排放正逐渐成为人类面临的重大环境问题。数据显示, 近 20 年全球 CO₂ 增加了 40%, 2019 年全球碳排放量达到创历史新高的 343.6 亿吨, 2020 年中国碳排放量达到 98.99 亿吨, 占全球的 30.7%, CO₂ 的减排和治理已迫在眉睫。针对这一全球性环境问题, 世界近 200 个国家和地区在 20 世纪 90 年代共同签署了《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC), 具有法律效力的《东京议定书》和《巴黎协议》也相继出台, 在全球共同应对气候变化问题的背景下, 2020 年在第 75 届联合国大会上, 习近平总书记向国际社会做出承诺, 中国力争 CO₂ 排放 2030 年前达到峰值、2060 年前实现碳中和, 《十四五规划和 2035 远景目标》进一步提出, 中国到 2035 年要在碳达峰后实现

基金项目: 山东省自然科学基金项目“山东自贸实验区建设与营商环境优化的互动机制和协同路径研究”(ZR2021QG024)

作者简介: 曲越, 山东科技大学经济管理学院教授 (山东 青岛 266590); 秦晓钰 (通讯作者), 山东科技大学经济管理学院副教授, 673175626@qq.com; 汪惠青, 中国银行研究院、北京大学经济学院博士后 (北京 100032); 夏友富, 对外经济贸易大学全球创新与治理研究院教授、博士生导师 (北京 100029)

CO₂ 排放的稳中有降, 基本形成绿色和谐的生产和生活方式, 2021 年《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》和《2030 年前碳达峰行动方案的通知》相继出台, 把“双碳”目标纳入国家发展全局, 加快经济的绿色低碳转型和高质量发展。

然而, 受地理位置、自然资源和产业结构等因素的影响, 中国区域经济发展呈现出明显的不平衡性, 这种不平衡同样体现在 CO₂ 排放上, 国家在“十四五规划”中也明确鼓励地方根据具体情况制定碳达峰行动方案, 有条件的地方率先达峰。那么, 具有不同经济发展特征的地区和城市, 其差异化碳达峰路径是怎样的? 在碳中和目标的实现过程中如何兼顾效率与公平原则? 不同地区和城市在碳中和中又扮演什么样的角色? 对这些问题的研究在中国致力实现“双碳”目标的背景下具有重要意义, 各地区和城市需要群策群力, 通过技术交流、要素互补和产业合作共同实现“双碳”目标。

二、文献综述

随着世界各国对气候变化的日益关注, CO₂ 排放的研究也逐渐增多, 碳排放核算成为被首先关注的问题。孙建卫等基于联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 的温室气体清查方法, 建立了中国碳排放估算体系^[1]。Shan 等在 IPCC 的基础上将碳排放的测算拓展到省级层面, 采用直观能源消耗方法和更新的排放因子计算中国省级 CO₂ 排放^[2]。Mi 等将 CO₂ 测算理论拓展到城市层面^[3], Shan 等进一步按照 IPCC 地域排放核算方法对排放清单进行重新编制, 并基于能源平衡表提出中国城市 CO₂ 排放清单的构建方法^[4]。另外, 多区域投入产出表也被逐渐应用到碳排放的研究中, 王文举等指出发展中国家为发达国家的消费者排放了大量的 CO₂^[5], Zheng 等认为西南和中部的崛起推动了中国贸易隐含碳的增加^[6]。

在碳排放核算方法的创新过程中, 与 CO₂ 排放有关的经济和社会因素逐渐受到重视。首先, 能源消费和工业生产是 CO₂ 排放的主要来源, 能源强度和能源结构与碳排放呈现直接的相关关系^[7], 人均 GDP 增长是 CO₂ 排放持续增加的最大驱动因素, Panayotou 首次用环境库兹涅茨曲线 (EKC) 来描述人均收入与环境质量之间的关系^[8], EKC 曲线同时也从经济发展水平的角度解释了中国区域 CO₂ 排放不均衡的原因^[9]; 其次, 人口集聚和消费升级使居民在生活中产生的 CO₂ 稳步上升, 生活领域碳排放的快速增长已成为不可忽视的问题^[10], 城市化过程中带来的交通工具数量上升和人口大量聚集正对全球气候变暖产生重要影响^[11]; 最后, 国家的环保和低碳政策对 CO₂ 排放同样起到引导作用, 政策变量是 EKC 曲线拓展研究的重要外生变量^[12], 而区域禀赋、技术进步和产业结构也会对碳排放产生一定影响^[13]。

随着《京都议定书》的逐渐履行和《巴黎协议》的签订, 世界各国开始探索合理的碳达峰路径, 并制定了一系列碳中和的战略规划。在碳达峰路径研究领域, 涂正革指出技术进步推动能源强度下降是中国减少碳排放的核心动力, 促进节能技术与工艺创新、走新型工业化道路是实现中国低碳发展的必经之路^[14], “双碳”目标的具体实施还需要充分考虑区域发展的异质性和区域碳减排的协调性^{[15][16]}; 在碳中和路径研究领域, 毛显强等指出生态补偿是一种使外部成本内部化的环境经济手段, 补偿支付者和接受者、补偿强度以及补偿渠道等核心问题的解决是关键^[17], 伏润民等认为中国财政分权体制下生态转移支付为地方政府环境治理提供了激励创新政策工具^[18], 张希良等认为碳定价机制将在碳中和中发挥关键作用, 为低碳、零碳和负碳技术创新以及产业转型升级提供有效激励^[19]。此外, 碳排放权交易制度已成为中国节能减排的重要环境规制手段^[20], 陆地碳汇被视为燃料转换和减少化石燃料使用的低成本替代品, 碳减排商品化和氢经济发展也逐渐进入碳中和方法和路径的讨论范畴^[21]。

综上所述, 有关“双碳”方面的国内外研究有了一定的积累, 但城市层面碳排放核算方法的拓

展和核算数据的应用还需要深化,中国城市层面 EKC 曲线的具体形态还有待验证,处于不同经济发展阶段、具有不同产业结构特征的城市群体,如何根据自身的情况制定合理的碳达峰和碳中和路径也需要研究和探讨。与现有文献相比,本文的边际贡献主要体现在:(1)将碳排放的测算从省级拓展到城市层面,下沉了碳排放测度的空间尺度,使碳排放测度结果较为科学全面;(2)放宽了 EKC 曲线的基本假设,拓展了 EKC 曲线在中国城市层面的适用性,并将门限阈值思想融入碳排放机制的研究中,研究方法更加合理;(3)采用 PSTR 模型对碳排放的阈值点进行平滑转换处理,使碳达峰异质性路径的研究更加贴近经济发展现实;(4)从效率与公平的视角,提出中国“双碳”目标实现的城市协调路径,为区域经济和环境经济的交叉研究提供新的思考。

三、理论机制

(一) 经济社会发展与碳排放

在经济社会发展的过程中,CO₂ 作为工业生产和居民生活的产物,其排放数量的变化也逐渐成为衡量经济发展阶段的重要指标。在经济发展的初期,随着工业生产的扩大,经济快速增长的同时,CO₂ 排放呈现快速攀升趋势,此阶段的 CO₂ 排放与经济增长呈现直接的正向关系,伴随着环境问题的日益恶化和经济增长方式的转变,CO₂ 排在第二阶段的增长速度逐渐趋缓,在经济发展的高水平阶段,CO₂ 排放量与经济增长之间呈现较为明显的负相关系,碳排放与经济社会之间实现了和谐发展的目标。

经济增长与 CO₂ 排放之间的关系存在多重作用机制。首先,从经济增长方式角度来看,经济增长方式越合理,CO₂ 排放量越小,在经济发展初期的粗放型增长模式下,对增长速度的追求使经济增长建立在大量资源和要素投入的基础上,当经济增长模式从粗放型转变为集约型时,经济从单纯的高数量和高速度增长转向高质量增长,CO₂ 排放将达到峰值,并逐渐下降,经济增长方式和增长理念的变化直接决定了碳排放的规模^[12];其次,从产业结构视角来看,产业结构的合理与否也直接决定了 CO₂ 排放量,产业结构从一、二产业向第三产业的演变过程,也是碳排放从快速增长到增速放缓再到逐渐下降的转变过程,产业结构的差异性也导致了区域、省际和城市间碳达峰时间和路径的异质性^[22];再次,从技术进步方面来看,技术进步决定了碳排放的强度,经济增长模式的转变和产业结构的优化调整都离不开技术进步的推动,技术进步不仅改变了传统能源和电力等高耗能产业的增长效率,同时也为太阳能、风能和氢燃料等新兴能源产业的兴起提供了重要支撑,技术进步的速度和水平与 CO₂ 排放息息相关^[10]。

综上所述,CO₂ 排放与经济增长在不同发展阶段存在直接的相关关系,这种关系通过经济增长方式的转变、产业结构的调整和技术的进步三种机制发挥着作用,在现实研究的过程中,往往采用 EKC 曲线来描述和刻画环境质量和经济增长之间的关系,EKC 曲线也是本文研究的机制基础,该曲线国别层面的基本公式为:

$$Y_{it} = \alpha_i + \beta_1 X_{it} + \beta_2 X_{it}^2 + \beta_3 X_{it}^3 + \beta_4 Z_{it} + \epsilon_{it} \quad (1)$$

其中, Y_{it} 表示国家*i*在*t*时期的 CO₂ 排放数量, X_{it} 表示国家*i*在*t*时期的经济发展水平, Z_{it} 表示影响国家*i*在*t*时期 CO₂ 排放的其他解释变量,如产业结构和人口规模等。

(二) EKC 曲线的拓展

EKC 曲线在实际应用中也在不断地拓展和完善。一方面,世界各国和地区在经济发展水平和环境质量方面存在较大差异,应用具体国别数据验证 EKC 关系时,还需要考虑政策、人口、基础设施和技术等方面的因素,同时,区域和城市层面的不均衡发展也为 EKC 机制的研究增加了异质性方面的难度;另一方面,EKC 曲线本身的公式和基准研究也存在一定不足,一般意义上的

EKC 曲线标准形式固化地将环境质量和经济发展水平之间的关系确定为二次项或三次项的参数估计形式, 但现实情况中, 经济发展水平和环境质量之间呈现的倒“U”型或者倒“N”型关系并不规则^[7], 更多的 EKC 曲线并非严格的中间对称型, 且拐点转换速度和转换趋势也呈现多样化的特征^[23]。

本文从 EKC 曲线的不足和中国城市层面的经济发展现实出发, 对 EKC 曲线进行了拓展。考虑中国区域经济发展的不平衡性和碳排放水平的阶段性特征, 放宽 EKC 曲线的拐点对称假设, 不再机械地将 EKC 曲线设定为二次或三次项的固化形式, 将对称拐点退化为一般性两阶段之间的平滑拐点, 将经济发展与环境质量之间的关系进行随机化处理, 分阶段来描述经济发展水平和环境质量之间的关系, 并着重分析不同阶段拐点的平滑转换关系, 引入转换函数对不同阶段的曲线特征进行衔接, 最终确定 EKC 曲线的具体形状和转换趋势, 更大限度上描述和分析经济与环境之间的现实关系和一般规律。因此, 在公式 (1) 的基础上, 经济发展水平和环境质量之间的多阶段关系刻画如下:

$$Y_{it} = \begin{cases} \beta_1 X_{it} + \beta_4 Z_{it} & \text{if } X_{\min} < X_{it} \leq c_1 \\ \beta_1 X_{it} + \beta_2 X_{it} + \beta_4 Z_{it} & \text{if } c_1 < X_{it} \leq c_2 \\ \beta_1 X_{it} + \beta_2 X_{it} + \beta_3 X_{it} + \beta_4 Z_{it} & \text{if } c_2 < X_{it} \leq X_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

式 (2) 中, c_1 和 c_2 为 EKC 曲线的两个拐点, 鉴于经济发展与环境质量之间关系的连续性特征, 进一步对拐点按照不同阶段之间的变化速度 ω 进行平滑连续处理, 将影响 EKC 曲线趋势和形状的核心变量 (经济发展水平 X_{it}) 作为转换变量 Q , 并进行滞后一期处理 (X_{it-1}), 同时引入阈值 c 的平滑转换函数 $G(Q; \omega, c)$, 改进后的二阶段 EKC 曲线表达式为:

$$Y_{it} = \alpha_0 + \beta_1 X_{it} [1 - G^1(Q; \omega_1, c_1)] + \beta_2 X_{it} G^1(Q; \omega_1, c_1) + \beta_3 Z_{it} + \epsilon_{it} \quad (3)$$

进一步, 三阶段的 EKC 曲线表达式为:

$$Y_{it} = \alpha_0 + \beta_1 X_{it} + \beta_2 X_{it} G^1(Q; \omega_1, c_1) + \beta_3 X_{it} G^2(Q; \omega_2, c_2) + \beta_4 Z_{it} + \epsilon_{it} \quad (4)$$

其中, 转换函数 $G(Q; \omega, c)$ 取对数形式, 取值为 0 和 1, 即:

$$G^i(Q; \epsilon, c) = \{1 + \exp[-\omega_i(Q - c)]\}^{-1} \quad \omega_i > 0 \quad (5)$$

各式中, ω_i 为 i 阶段转换函数的转换速度, c_i 为 i 阶段转换变量的位置参数, Q 为转换变量。当 X_{it} 处于最小值和 c_1 之间时, $G^1 = 0$, $G^2 = 0$, 经济发展水平与环境质量之间呈现单一线性关系, 影响度为 β_1 ; 当 X_{it} 处于 c_1 和 c_2 之间时, $G^1 = 1$, $G^2 = 0$, X_{it} 与 Y_{it} 之间呈现“U”型或者倒“U”型关系, 二阶段影响度变为 $\beta_1 + \beta_2$; 当 X_{it} 处于 c_2 和最大值之间时, $G^1 = 1$, $G^2 = 1$, EKC 曲线呈现“N”型或者倒“N”型趋势特征, 三阶段影响度进一步转变为 $\beta_1 + \beta_2 + \beta_3$ 。

四、模型构建与变量选择

(一) 城市级碳排放的核算

目前, 国别层面的碳排放主要由各国统计局或国际机构依据 IPCC 的清单指南和能源统计数据估算, 这一层面的数据相对夯实, 而城市层面碳排放核算的难点在于如何处理各地区的差异性, 同时城市层面数据的获取对统计准确性和处理技术性要求更高, 因而目前城市层面的碳排放核算数据较少。本文依据 CEADs 编纂的中国城市级碳排放清单, 整理计算出中国 247 个代表性城市的 CO_2 排放量。

一般而言, CO_2 排放的核算包括两部分: 能源燃烧相关排放 (CO_2energy), 以及工业生产过程排放 ($\text{CO}_2\text{process}$)^[24]。根据 IPCC 发布的清单编制指南, CO_2 排放量等于不同能源参数下 (NCV、EF、O) 活动水平数据 (AD) 乘以排放因子 (EF)。具体计算方法如下:

$$CO_2 = CO_{2energy} + CO_{2progress} = \sum_i \sum_j (AD_{ij} \times NCV_i \times EF_i \times O_{ij}) + \sum_i (AD_i \times EF_i) \quad (6)$$

其中, AD_{ij} 表示行业 j 使用能源 i 的数量, NCV_i 表示能源 i 的排放净热值, EF_i 表示能源 i 的排放因子, O_{ij} 表示行业 j 使用能源 i 的氧化效率。 AD_i 表示工业产品 t 的产量, EF_i 表示产品 t 的排放因子。根据 CEADs 的方法, 通过收集能源平衡表、工业分行业能源消费数据、工业产品产量, 以及地级市的人口、GDP、重点工业行业产值等社会经济指标, 计算出城市尺度的 CO_2 排放量。

(二) PSTR 模型

通过对 EKC 曲线的分析和拓展可知, 在不同经济发展阶段, CO_2 排放的增长呈现差异化的多机制特征, 同时在不同经济发展阶段之间呈现连续转换的关系, 鉴于此, 本文选用面板平滑转化模型 (PSTR) 来分析中国城市经济发展和 CO_2 排放的非线性关系。PSTR 模型的基本公式为:

$$Y_{it} = \alpha + \beta_0 X_{it} + \sum_{k=1}^n \beta_k X_{it}^k G^k(Q_{it}; \omega_j^k, c_j^k) + \epsilon_{it} \quad (7)$$

转换函数 $G^k(Q_{it}; \omega_j^k, c_j^k)$ 为:

$$G^k(Q_{it}; \omega_j^k, c_j^k) = \{1 + \exp[-\omega_j^k \prod_{j=1}^m (Q_{it} - c_j^k)]\}^{-1} \quad \omega_j > 0 \quad (8)$$

式中, X_{it} 是解释变量, 包含核心解释变量和控制变量两部分, Y_{it} 是被解释变量, β 为自变量的解释系数, $G^k(Q_{it}; \omega_j^k, c_j^k)$ 是转换函数, 采用对数函数形式, 核心解释变量会在不同的阶段受到转换函数的影响, G 在 $[0, 1]$ 之间连续有界, k 为转换函数 G 的个数, 取值为 $[1, n]$, Q_{it} 是转换变量, 是非线性机制存在的引导变量, ω 是平滑转换参数 ($\omega > 0$), ω 越大意味着模型以越快的速度完成机制之间的转换, 反之亦然, c 为门限阈值, 即位置参数, 是机制之间的转换拐点, 且 $c_1 \leq c_2 \leq \dots \leq c_z$, ϵ_{it} 是满足独立同分布的随机干扰项序列, j 是位置参数 c 的个数, 取值为 $[1, m]$ 。

(三) 变量选择

CO_2 排放除了取决于经济发展水平之外, 还受到产业结构、人口密度等因素的影响, 产业结构水平越合理的城市, CO_2 排放相对越低, 第二产业在整个经济中所占的比重与 CO_2 排放有直接关系^[25], 另外, 常住人口密度的高低也从生活层面影响着 CO_2 的排放规模^[26]。鉴于此, 在公式 (7) 的基础上, 构建中国城市层面的 CO_2 增长模型:

$$CO_{2it} = \alpha + \beta_{01} PGDP_{it} + \beta_{02} IP_{it} + \beta_{03} PO_{it} + \sum_{k=1}^n (\beta_{k1} PGDP_{it}^k + \beta_{k2} IP_{it}^k + \beta_{k3} PO_{it}^k) * G^k(Q_{it}; \omega_j^k, c_j^k) + \epsilon_{it} \quad (9)$$

转换函数 $G^k(Q_{it}; \omega_j^k, c_j^k)$ 为:

$$G^k(Q_{it}; \omega_j^k, c_j^k) = \{1 + \exp[-\omega_j^k \prod_{j=1}^m (Q_{it} - c_j^k)]\}^{-1} \quad \omega > 0 \quad (10)$$

转换变量 Q_{it} 为:

$$Q_{it} = [PGDP_{i,t-1}] \quad (11)$$

被解释变量 CO_{2it} 表示城市 i 在 t 年的 CO_2 排放量, 数据来源于 CEADs 的 CO_2 排放清单子库。三个核心解释变量中, 经济发展变量 $PGDP_{it}$ 表示城市 i 在 t 年的人均国内生产总值, 数据通过 2005 年不变价格计算整理后获得, 单位为万元, 产业结构变量 IP_{it} 表示城市 i 在 t 年的工业生产总产值占比, 人口变量 PO_{it} 表示城市 i 在 t 年的常住人口密度, 单位为百人/平方公里, 三个变量数据均来源于中国各城市历年《城市统计年鉴》。考虑到 $PGDP$ 与 CO_2 之间的连续作用关系, 同时为了降低模型的内生性问题, 模型转换变量 $PGDP_{i,t-1}$ 选取的是人均 GDP 的滞后一期数据。

(四) 数据描述性统计

基于中国城市 CO_2 数据的可得性, 在 CEADs 数据库的基础上, 选取 2005 至 2017 年共 13 年

为模型的时间跨度, 选取中国 247 个代表性城市为模型的研究对象, 在数据处理过程中对个别数据的缺失问题采取了递归处理, 最终模型 3 211 个样本数据的描述性统计如表 1 所示。

表 1 PSTR 模型的全样本描述性统计

指标	样本量	均值	标准差	最小值	最大值
CO ₂ (百万吨)	3 211	35. 95	37. 59	0. 73	436. 25
PGDP (万元)	3 211	4. 15	3. 71	0. 24	29. 12
IP (%)	3 211	48. 93	10. 50	14. 84	85. 92
PO (百人/平方公里)	3 211	4. 50	3. 77	0. 10	38. 26

数据来源: 根据中国碳排放数据库、中国城市统计年鉴。

五、机制检验与模型结果

(一) 机制的非线性检验

PSTR 模型运行首先要满足非线性的前提假设, 即检验模型 (9) 中的转换效应是否存在, 若不存在 ($\omega=0$), 则自变量和因变量之间为单一线性关系, 若存在 ($\omega\neq0$), 则自变量和因变量之间为至少存在两个机制的非线性关系。因此, 设立模型非线性检验的原假设 $H_0: \omega=0$, 备择假设 $H_1: \omega\neq0$, 并分别在转换函数的门限参数数量 m 为 1 和 2 的识别机制下, 对 PSTR 模型进行 Wald、Fisher 和 LRT 检验。另外, 在 $\omega\neq0$ 的备择假设下模型存在非线性机制, 不满足三个检验的经典假设, 在检验过程中存在参数识别问题无法解决, 影响检验结果的真实性。鉴于此, 在非线性的检验过程中构造辅助函数来替换原转换函数, 辅助函数选用转换函数在 $\omega=0$ 处的泰勒展开式, 具体形式为:

$$G_{it}=\alpha_i+\beta_0^{*'}T_{it}+\beta_1^{*'}T_{it}Q_{it}^1+\beta_2^{*'}T_{it}Q_{it}^2+\cdots+\beta_m^{*'}T_{it}Q_{it}^m+\epsilon_{it}^{*}$$
 (12)

$$\epsilon_{it}^{*}=\epsilon_{it}+R_m\left(Q_{it}; \omega, \pi\right)$$
 (13)

其中, $(\beta_0^{*}, \beta_1^{*}, \beta_2^{*}, \cdots, \beta_m^{*})'$ 为转换函数 G 的系数矩阵, R_m 是泰勒展开式的余项。非线性检验结果显示, 模型在 $m=1$ 和 $m=2$ 的识别机制下, Wald、Fisher 和 LRT 检验值足够大, 且 P 值均为 0, 模型能够在 1% 的显著性水平下拒绝线性原假设, 说明经济发展水平、产业结构和人口密度与 CO₂ 排放之间存在显著的非线性关系, 满足 PSTR 的基本条件, 关系识别存在较强合理性。

(二) 模型的剩余机制检验——转换函数个数 n

非线性检验结果表明 PSTR 模型至少存在两个机制, 但转换函数的个数 n 以及门限参数的数量 m 需要进一步确定。首先确定转换函数的个数 n , 依然采用 Wald、Fisher 和 LRT 三个检验, 从 $n=1$ 开始依次进行检验, 直到检验结果接受原假设为止, 设定原假设 $H_{10}: n=1$, 备择假设 $H_{11}: n=2$, 然后检验两个模型参数是否拒绝原假设, 如果拒绝则进一步设定原假设 $H_{20}: n=2$, 备择假设 $H_{21}: n=3$, 直到三个检验均接受原假设为止, 此时的 n 数量即为转换函数的最优数量。

如表 2 所示, PSTR 模型在 $m=1$ 和 $m=2$ 的识别机制下均无法通过 Wald、Fisher 和 LRT 三个检验, 不能拒绝 $n=1$ 的原假设, 由此可以确定转换函数 G 的数量为 1, 模型至少存在两个转换机制。

(三) 模型剩余机制的进一步检验——位置参数个数 m

进一步对转换函数 G 中的位置参数个数 m 进行检验, 从而确定 m 的具体数量, m 通过 PSTR 模型的 AIC (赤池信息) 准则和 BIC (贝叶斯信息) 准则来确定, 采用纵向比较法, 将三组假设检验 ($H_{10}: m=1$ 和 $H_{11}: m=2$; $H_{20}: m=2$ 和 $H_{21}: m=3$; $H_{30}: m=3$ 和 $H_{31}: m=4$) 下的 AIC 和 BIC 值进行纵向比较。结果显示, PSTR 模型在 $n=1$ 的情况下, 当 m 取 1 时, AIC 和 BIC 值均

普遍小于 m 取 2 和 3 的情况，因此可以确定模型的最佳机制组合为 1 个转换函数和 1 个位置参数，即 $n=1$ ， $m=1$ 。综上所述，非线性和剩余机制的系列检验最终确定模型（9）存在一个转换函数和两个机制的非线性特征。

表 2 剩余机制检验

假设	检验工具	$m=1$		$m=2$	
		Value	P	Value	P
$H_{10}: n=1$	Wald	4.137	0.681	1.849	0.707
	Fisher	2.194	0.870	2.750	0.511
$H_{11}: n=2$	LRT	3.145	0.675	1.899	0.648

（四）PSTR 结果

由于分段转移机制的存在，使 c 和 ω 依然存在参数识别问题，因此，位置参数 c 和转换速度 ω 的确定采用网络格点法，分别对不同 c 和 ω 的组合进行检验，以寻找与 PSTR 模型变化趋势一致的最优组合，并采用去组内均值的方法确定转换函数 G 的最终形式，并求出不同机制下的拟合参数。结果如表 3 所示。

表 3 PSTR 模型的基准结果

变量	一机制				二机制			
	系数	Value	T	P	系数	Value	T	P
PGDP	β_{01}	4.442***	17.849	0.000	β_{11}	-1.954***	-5.874	0.002
IP	β_{02}	9.691***	4.925	0.003	β_{12}	38.451**	2.224	0.034
PO	β_{03}	0.704**	2.893	0.049	β_{13}	-0.970**	-2.447	0.017
c						5.962		
ω						11.962		

表 3 的结果表明，PGDP、IP 和 PO 三个解释变量与城市 CO_2 排放之间呈现显著的两机制非线性关系，两机制结果的显著性水平均能达到 5% 及以上，且以人均 GDP 等于 5.962 万元为拐点，两机制之间以 11.962 的速度实现了快速平滑转换。一机制为不含转换效应的线性机制，此时人均 GDP 的取值区间为 $[0.240, 5.962]$ ，转换函数 $G=0$ ，PGDP 的影响系数为 4.442，表明人均 GDP 每增加 1 单位， CO_2 排放量会增长 4.442 单位，IP 和 PO 两个变量的线性影响系数也分别达到 9.691 和 0.704，说明人均 GDP 和产业结构是影响城市 CO_2 排放的主要因素。二机制增加了转换函数的转换效应，此时人均 GDP 的取值区间为 $[5.962, 29.124]$ ，转换函数 $G=1$ ，当转换变量超过临界值时，人均 GDP 对城市 CO_2 的影响系数从 4.442 下降了 1.954，此时随着经济发展， CO_2 的排放量开始越过峰值呈现递减趋势。二机制下产业结构的影响系数进一步扩大了 38.451，而常住人口密度对 CO_2 排放的影响在这一阶段也呈现下降趋势。综合 PSTR 的两阶段机制结果来看，人均 GDP 对城市 CO_2 排放的影响呈现出先上升后下降的倒“U”型关系，两阶段非线性机制的拐点即为碳峰值点，这与 EKC 曲线的关系描述一致。

六、城市异质性分析

（一）城市聚类分析

K-means 分析法是一种迭代求解的综合聚类分析算法，具有数据迭代、自动识别和强关系簇的

显著特征,能够将样本数据按照一定属性关联度进行聚类划分^[27],很好地满足了本文对中国不同城市类别的精准分类。在聚类分析过程中,以产业发展阶段作为数据簇类划分的指标依据,以相对成熟的欧几里得距离函数来描述数据之间的相似度,通过以产业发展为基准数据的依次迭代分类,最终达到标准函数最优或迭代次数最大为止,函数表达式为:

$$F(C_j, X) = \min \sum_{j=1}^K \sum_{X \in K_j} Dis(C_j, X)^2 \quad (14)$$

式中, $(X^1, X^2, \dots, X^n)^T$ 表述无标签的样本数据矩阵, $X \in R_j^n$ 表示数据的 n 维向量, K 为数据簇数量, C_j 为第 j 个数据簇的中心点, $Dis(C_j, X)$ 表示 X 到中心 C 的距离,距离越近,数据和中心质点的相似度越高。

另外,本文在对中国 247 个代表性城市按照产业发展阶段进行分类时,还汲取了 GDP 占比分类法的优势^[28],并应用到 K-means 聚类分析中。首先,以中国 247 个城市的部门工业总产出数据为依托,将工业生产部门分为能源行业、重工业、轻工业和高科技工业四类^[29],分别计算各城市四类工业部门的产出占比;然后,按照四类工业占比对 247 个城市分别进行排序,由此获得每个城市在不同工业类别中的排名;接着将城市的具体排名转化为百分位,由此得到各城市的工业结构指标,并根据各城市不同工业类别的数值进行聚类区分;最后,从高新技术工业类别的城市群当中,提取服务业占 GDP 比重大于 50% 的城市,并划分为服务业主导型城市群。

最终,通过 K-means 聚类分析将 247 个城市划分为五个数据簇群,其中以大庆和鄂尔多斯等为代表的能源型城市 32 个,以马鞍山和包头为代表的重工业型城市 81 个,以汕头和绍兴为代表的轻工业型城市 68 个,以宁波和扬州为代表的技术型城市 37 个,以北京和上海为代表的服务型城市 29 个。

(二) 城市异质性模型的机制检验

首先,对五个城市异质性模型分别在门限参数数量 m 为 1 和 2 的识别机制下进行非线性检验,结果显示,五个模型在 $m=1$ 和 $m=2$ 的识别机制下, P 值均等于或接近 0, Wald、Fisher 和 LRT 检验值足够大,模型能够在 1% 的显著性水平下拒绝线性原假设,说明五类子样本城市群的发展水平、产业结构和常住人口密度与 CO_2 排放之间存在显著非线性关系,满足 PSTR 的基本条件。其次,继续采用 Wald、Fisher 和 LRT 三个检验,分别设定原假设 $H_{10}: n=1$,备择假设 $H_{11}: n=2$,然后检验两个模型参数是否拒绝原假设,如果拒绝则进一步设定原假设 $H_{20}: n=2$,备择假设 $H_{21}: n=3$,然后再次进行检验,直到三个检验均接受原假设为止,此时的 n 数量即为模型转换函数的最优数量(如表 4 所示)。

由表 4 的剩余机制检验结果可知,技术型和服务型城市在 $m=1$ 和 $m=2$ 的识别机制下均无法通过检验,不能拒绝 $n=1$ 的原假设,由此可以确定这两类模型转换函数 G 的数量为 1,模型至少存在两个转换机制。能源型、重工业型和轻工业型城市在三个检验下均显著拒绝 $n=1$ 的原假设,三类城市同时接受 $n=2$ 的原假设,由此可以确定这三类城市模型转换函数 G 的数量为 2,模型至少存在三个转换机制。进一步,通过 PSTR 模型的 AIC 准则和 BIC 准则来确定位置参数的数量 m ,检验结果显示,能源型、重工业型和轻工业型三类城市在 $m=1$ 时的 AIC 和 BIC 值明显小于 $m=2$ 和 $m=3$ 的情况,因此可以确定这三类城市群的每个转换函数 G 中只存在一个位置参数 c ,技术型和服务型城市的 AIC 和 BIC 值在 $m=2$ 的情况下达到最小,因此这两类城市的转换函数 G 中存在两个不同的位置参数 c_1 和 c_2 。

综合以上对五类不同城市群的非线性机制检验结果,可以确定不同城市群的异质性机制数量,即能源型、重工业型和轻工业型城市为 $m=1, n=2$,技术型和服务型城市为 $m=2, n=1$,说明在不同转换函数和位置参数下,五类城市的 CO_2 排放均呈现三机制的非线性特征。

表 4 城市异质性 PSTR 模型的剩余机制检验（转换函数个数 n ）

城市类型	检验工具	$H_{10}: n=1; H_{11}: n=2$				$H_{20}: n=2; H_{21}: n=3$			
		$m=1$		$m=2$		$m=1$		$m=2$	
		Value	P	Value	P	Value	P	Value	P
能源型	Wald	51.328***	0.000	17.849***	0.000	0.255	0.968	18.295*	0.060
	Fisher	17.594***	0.000	2.750***	0.000	0.076	0.973	2.816	0.101
	LRT	54.782***	0.000	17.899***	0.000	0.256	0.968	18.348	0.150
重工业型	Wald	37.868***	0.000	57.451***	0.000	9.220	0.270	9.223	0.278
	Fisher	11.974***	0.000	9.233***	0.000	2.827*	0.058	6.171	0.246
	LRT	38.566***	0.000	59.078***	0.000	9.260	0.263	9.972	0.167
轻工业型	Wald	28.559***	0.000	41.010***	0.000	7.884	0.193	8.806	0.254
	Fisher	8.981***	0.000	6.519***	0.000	5.534	0.503	6.130	0.215
	LRT	29.030***	0.000	41.991***	0.000	8.067	0.843	9.684	0.776
技术型	Wald	2.842	0.417	1.969	0.923				
	Fisher	0.856	0.464	0.294	0.940				
	LRT	2.850	0.415	1.973	0.922				
服务型	Wald	7.153	0.418	4.865	0.115				
	Fisher	9.285	0.693	6.996	0.407				
	LRT	5.937	0.336	4.378	0.462				

（三）城市异质性的 PSTR 结果

能源型城市的 CO_2 排放人均 GDP 为 5.839 万元和 12.391 万元处实现了两次平滑转换，两次转换的速度分别为 1.707 和 0.322，以两个位置参数为拐点，能源型城市经济发展对 CO_2 排放的影响主要存在三个不同的作用机制，该类城市的 CO_2 排放呈现前两阶段上升、第三阶段下降的明显倒“U”型特征，在人均 GDP 为 12.391 万元左右时达到碳排放峰值点。一机制为初始线性阶段，当人均 GDP 介于 0.32 万元和 5.839 万元之间时，两个转换函数 G_1 和 G_2 的取值均为 0，此时经济发展水平对 CO_2 排放产生了显著影响，影响系数在 1% 的显著性水平下达到 13.809，工业结构对 CO_2 排放的影响系数也达到 22.305；随着经济的不断发展，当人均 GDP 介于 5.839 万元和 12.391 万元之间时，转换函数 G_1 取值为 1，人均 GDP 对 CO_2 排放的影响开始出现转换趋势，从 13.809 减缓为 10.496，工业结构对 CO_2 排放的影响也下降为 15.553，但经济发展水平和工业结构对 CO_2 排放的影响仍然显著为正，二机制相对于一机制来说仍然处于 EKC 曲线的拐点前端；当人均 GDP 超过 12.391 万元时，在两个转换函数 G_1 和 G_2 的共同作用下，能源型城市的 CO_2 排放超过峰值点，开始出现下降趋势，经济发展水平和工业结构的影响系数变为 -15.129 和 -27.159，此时的经济发展状态已经达到 EKC 曲线的拐点后端（如表 5 所示）。综合来看，工业结构决定了能源型城市的 CO_2 排放路径，该类城市要实现碳达峰目标还需要一个较长的过程，常住人口密度对能源型城市 CO_2 排放的影响并不显著，产业结构调整是能源型城市发展的必经之路。

重工业型城市经济发展与 CO_2 排放之间的关系趋势与能源型比较相似， CO_2 的排放路径呈现出前两阶段上升、第三阶段下降的三阶段倒“U”型特征，两个人均 GDP 拐点分别为 6.340 万元和 21.404 万元，转换速度分别为 5.057 和 0.07，说明重工业城市在一个相对较高的经济发展水平上达到碳峰值点。经济发展水平和工业结构仍然是影响重工业型城市 CO_2 排放的主要因素，人均 GDP 在三个不同作用机制下显著性水平均能达到 1%，影响系数分别为 30.803、0.692 和 -34.766，从作用度上领先于其他各类城市，工业结构对 CO_2 的影响也分别为 26.202、7.37 和 -49.287，影响度同样位列各城市类型中的第一位，常住人口密度的影响相对于能源型城市有了一定程度上升，但显著性总体不强（如表 5 所示）。综合来看，重工业型城市虽然在 CO_2 排放总量上

略低于能源型城市,但是高污染、高排放的重工业结构对该类城市的持续碳排放产生了显著性影响,如何将固化的产业结构进行改造和升级成为重工业型城市的主要问题,要实现碳达峰和碳中和目标任重而道远。

表5 城市异质性的 PSTR 结果

机制	变量	系数	能源型	重工业型	轻工业型	技术型	服务型
			Value	Value	Value	Value	Value
一机制	PGDP	β_{01}	13.809*** (1.771)	30.803*** (10.731)	5.386** (3.287)	6.626*** (1.584)	6.246*** (1.904)
	IP	β_{02}	22.305** (2.836)	26.202*** (6.612)	22.309* (7.695)	23.758** (13.946)	6.241** (1.919)
	PO	β_{03}	-8.006* (2.764)	4.699* (7.587)	1.256*** (0.985)	3.564** (1.033)	7.652*** (3.839)
二机制	PGDP	β_{01}	10.496*** (3.168)	0.692*** (0.472)	-0.823** (0.287)	-0.402*** (1.258)	-3.721*** (1.496)
	IP	β_{02}	15.553** (6.038)	7.370** (6.093)	-14.956*** (1.455)	-14.792** (4.748)	0.060** (0.005)
	PO	β_{03}	-6.545 (1.283)	1.259** (0.802)	7.059** (1.089)	6.426* (1.179)	0.015** (0.010)
	c_1		5.839	6.340	4.892	5.421	6.146
	ω_1		1.707	5.057	7.121	1.232	0.393
三机制	PGDP	β_{01}	-15.129*** (3.441)	-34.766*** (10.726)	-2.330** (0.428)	-5.293*** (1.805)	-0.115*** (0.016)
	IP	β_{02}	-27.159** (7.822)	-49.287** (14.625)	-18.581** (6.145)	22.987** (3.179)	-0.091** (0.012)
	PO	β_{03}	12.512* (2.718)	-4.483 (2.632)	-11.348** (4.117)	-4.933* (1.779)	-6.846** (5.271)
	c_2		12.391	21.404	9.013	8.923	11.518
	ω_2		0.322	0.070	0.513		

轻工业型城市虽然 CO_2 的排放路径也呈现明显的倒“U”型趋势,但碳峰值出现在第一个拐点,即人均 GDP 为 4.892 万元时,之后出现了先缓后急的两阶段下降趋势,另一个拐点为 9.013 万元,两个转换函数的转换速度分别为 7.121 和 0.513,说明轻工业城市在较低经济发展水平上实现了碳达峰目标。当人均 GDP 水平处于 0.24 万元和 4.892 万元之间时,经济发展水平、工业结构和常住人口密度对 CO_2 排放的影响均显著为正,系数值分别为 5.386、22.309 和 1.256,常住人口密度的显著性相对于前两类城市有了较大增强;当人均 GDP 水平处于 4.892 万元和 9.013 万元之间时,人均 GDP 和工业结构对 CO_2 排放的影响转为负向,常住人口密度的影响度进一步上升到 7.059;在第三机制下,即人均 GDP 超过第二个拐点之后,各解释变量的影响度均为负向(如表 5 所示)。综合来看,轻工业城市相对于能源型和重工业型城市较早实现了碳达峰目标,但这一目标是在一种低经济发展水平下实现的,且日益增加的常住人口密度将从生活领域逐渐对轻工业城市的碳排放产生影响,因此,在正确处理 CO_2 排放与经济发展之间关系的同时,寻找新的经济增长点成为轻工业城市的发展重心。

技术型城市的 CO_2 排放以 1.232 的速度在人均 GDP 为 5.421 万元和 8.923 万元两个拐点实现了不同机制之间的转化,在人均 GDP 达到 5.421 万元之后,经济发展与 CO_2 排放的关系达到了 EKC 曲线的下降部分。在一机制和三机制中,转换函数 G 取值为 1,人均 GDP 的影响系数分别在

1%的显著性水平下达到 6.626 和 -5.293, 工业结构的影响度也达到 23.758 和 22.987, 当模型处于中间机制时, 转换函数 G 取值为 0, 两个解释变量的显著性水平也达到 5%, 说明人均 GDP 和工业结构对技术型城市 CO_2 排放的影响依然稳健; 与此同时, 随着人口在技术型城市的集聚, 常住人口密度对 CO_2 的影响度正在逐步上升, 三个机制的影响系数分别为 3.564、6.426 和 -4.933 (如表 5 所示)。综合来看, 在技术型城市发展中, 虽然生产性碳排放仍然是 CO_2 的主要来源, 但生活领域的碳排放也逐渐成为不可忽视的问题, 在维持稳健 CO_2 排放水平的前提下实现高质量生产和生活的平衡是技术型城市的发展目标。

服务型城市的 CO_2 排放趋势与技术型城市类似, 但碳峰值点的人均 GDP 水平更高, 不同机制之间的转换速度相对缓慢, 以人均 GDP 6.146 万元和 11.518 万元为阈值, 以 0.393 为转换速度, 服务型城市的 CO_2 排放呈现一机制上升、二和三机制逐渐下降的三机制倒“U”型特征。当人均 GDP 处于 0.908 万元和 6.146 万元之间时, 人均 GDP、工业结构和常住人口密度对 CO_2 的排放均有显著性影响, 影响度分别达到 6.246、6.241 和 7.652, 常住人口密度的影响大于其他各类城市, 成为影响碳排放的重要指标; 当人均 GDP 处于 6.146 万元和 11.518 万元之间时, 转换函数 G 的取值为 0, 转换效应在二机制中不发生作用, 经济发展水平的影响度变为 -3.721; 在第三机制中, 转换效应继续发挥作用, 当人均 GDP 超过 11.518 万元时, 三个解释变量的影响度转变为 -0.115、-0.091 和 -6.846, 常住人口密度成为三机制中的主导变量 (如表 5 所示)。由此可见, 服务型城市在一个较高的经济发展水平上实现碳达峰目标, 受到常住人口密度所带来的生活碳排放的影响, CO_2 的峰值水平也相对较高, 在实现经济高水平、低碳发展的基础上, 降低生活中的碳排放成为服务型城市下一步的发展重心。

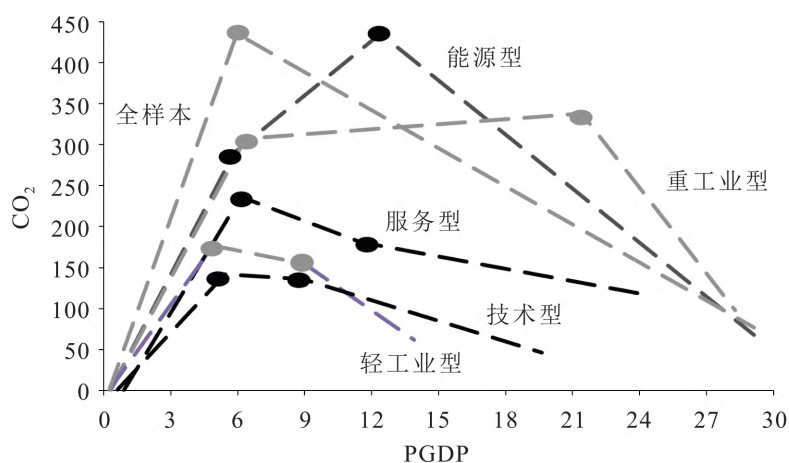


图 1 五类城市的人均 GDP (万元) 与 CO_2 (百万吨) 非线性趋势的异质性比较

综合五类城市的 CO_2 排放路径来看 (如图 1 所示), 均符合 EKC 曲线的倒“U”型特征, 但受经济发展水平、产业结构和常住人口密度的影响, 不同类型城市碳达峰目标的实现路径差异性非常明显。首先, 能源型和重工业型城市碳达峰点的 CO_2 数值相对较高, 是中国 CO_2 的主要来源, 且受工业结构的制约, 这两类城市需要在经历两阶段 CO_2 排放不断增长的趋势之后, 才能实现碳达峰目标; 其次, 轻工业型、技术型和服务型三类城市的碳峰值点明显优于全国的平均碳峰值水平, 且三类城市均在经济发展的第一阶段末期实现了碳达峰目标, 之后两阶段 CO_2 排放开始呈现递减趋势, 但随着经济发展水平的提升, 生活领域逐渐成为三类城市中 CO_2 不可忽视的来源; 最后, 技术型城市较好地协调了经济发展和 CO_2 排放之间的关系, 轻工业型城市在维持 CO_2 较低水平同

时,经济发展水平也相对滞后,人口的大量积聚使服务型城市保持较高经济发展水平的同时,也面临较为严峻的生活领域碳排放问题。

七、结论与政策建议

(一) 研究结论

通过文章的理论和实证分析,得出如下研究结论:

1. 经济发展水平决定了城市 CO₂ 排放的规模 and 变化轨迹。人均 GDP 对中国城市 CO₂ 排放的影响呈现出先上升后下降的倒“U”型特征,曲线的拐点即为碳峰值点,碳峰值点之前,人均 GDP 与 CO₂ 排放呈现明显的正向关系,碳峰值点之后,CO₂ 的排放量开始越过峰值呈现递减趋势。

2. 产业结构和常住人口密度也是影响中国各城市 CO₂ 排放的主要因素。产业结构对城市 CO₂ 排放的影响在倒“U”型曲线的拐点前后均较为显著,产业结构转型和升级也是 CO₂ 排放轨迹转移的重要驱动力;常住人口的集聚和城市化进程的加快正从生活领域对 CO₂ 排放产生影响。

3. 受经济社会因素的影响,中国不同类型城市的碳达峰路径存在明显异质性。能源型和重工业型城市碳达峰点的 CO₂ 数值相对较高,是中国 CO₂ 的主要来源,且受工业结构制约,这两类城市需要在经历两阶段 CO₂ 排放不断增长的趋势之后,才能实现碳达峰目标;轻工业型、技术型和服务型三类城市的碳峰值点明显优于全国的平均碳峰值水平,且三类城市均在经济发展的第一阶段末期实现了碳达峰目标,之后两阶段 CO₂ 排放开始呈现递减趋势,但随着经济发展水平的逐渐提升,生活领域逐渐成为三类城市中 CO₂ 不可忽视的来源;技术型城市较好地协调了经济增长和 CO₂ 排放之间的关系,轻工业型城市在维持 CO₂ 较低水平的同时经济发展水平也相对滞后,人口的大量集聚使服务型城市保持较高经济发展水平的同时,也面临较为严峻的生活领域碳排放问题。

(二) 政策建议

基于以上研究结论,文章针对中国城市“双碳”目标的实现路径给出政策启示:

1. 各城市应当因地制宜,分梯次有序实现碳达峰目标。在碳达峰目标的实现过程中,不能一刀切,需要针对各城市的具体经济发展水平和 CO₂ 排放情况,结合本地区资源环境禀赋、产业布局、发展阶段等因素,科学合理制定差异化的碳达峰时间表,并采取适当的整合力度和有针对性的实现路径,坚持分类施策、因地制宜、上下联动、梯次有序推进碳达峰。

2. 国家碳中和目标的实现需要各城市准确定位、协同推进。不同城市群应根据自身技术、经济和社会发展情况找准在碳中和目标实现过程中的角色定位,既要追求效率也要兼顾公平,各城市要优势互补、资源共享,在区域统筹协调下坚持全国一盘棋,共同实现碳中和目标。

3. 碳排放情况比较乐观的发达地区要巩固碳减排成果,在率先实现碳达峰的基础上进一步降低碳排放。技术型和服务型城市在“双碳”目标的实现中需要扮演主导者的角色,这两类城市是碳补偿过程中的“补偿主体”,在控制生活领域 CO₂ 排放的基础上率先实现碳达峰目标,同时还要为其他城市群提供 CO₂ 减排领域的技术支撑,碳中和领域新技术、新方法和新手段的研究和开发是技术型和服务型城市的重点发展目标。

4. 产业结构较轻、能源结构较优的轻工业型地区要坚持绿色低碳发展,力争率先实现碳达峰。以汕头和绍兴为代表的轻工业型城市,要在保持 CO₂ 低水平排放的同时,通过与技术型和服务型城市的产业合作和交流,寻找绿色经济的新增长点,推进经济社会发展的全面绿色转型,加快发展循环经济,提升资源综合利用效率和绿色低碳发展水平,扩大绿色产品供给和消费,倡导低碳生活方式。

5. 产业结构偏重、资源主导型的中西部地区要把节能降碳摆在突出位置,大力优化产业结构

和能源结构。工业结构决定了能源型和重工业型城市的碳达峰目标任重道远,产业结构的转型和升级迫在眉睫,这两类城市是碳补偿过程中的“受偿主体”,主要任务是通过技术型和服务型城市在技术、资金方面的支持,尽快完成对高污染、高排放产业的转型和升级,同时利用自身资源优势,发展新能源和绿色环保产业,逐步实现碳排放与经济增长脱钩,力争与全国同步实现碳达峰。

参考文献

- [1] 孙建卫,赵荣钦,黄贤金,等. 1995—2005 年中国碳排放核算及其因素分解研究[J]. 自然资源学报,2010(8).
- [2] Shan, Y., J. Liu, Z. Liu, et al. New provincial CO₂ emission inventories in China based on apparent energy consumption data and updated emission factors[J]. *Applied Energy*, 2016, 184.
- [3] Mi, Z., Y. Zhang, D. Guan, et al. Consumption-based emission accounting for Chinese cities[J]. *Applied energy*, 2016, 184.
- [4] Shan, Y., D. Guan, J. Liu, et al. Methodology and applications of city level CO₂ emission accounts in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 161.
- [5] 王文举,向其凤. 国际贸易中的隐含碳排放核算及责任分配[J]. 中国工业经济, 2011(10).
- [6] Zheng, H., Z. Zhang, W. Wei, et al. Regional determinants of China's consumption-based emissions in the economic transition[J]. *Environmental Research Letters*, 2020(7).
- [7] 林伯强,蒋竺均. 中国二氧化碳的环境库兹涅茨曲线预测及影响因素分析[J]. 管理世界, 2009(4).
- [8] Panayotou, T. Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stage of economic development[R]. *International Labor Office, Technology and Employment Program, Working paper*, 1993.
- [9] 谭丹,黄贤金. 我国东、中、西部地区经济发展与碳排放的关联分析及比较[J]. 中国人口·资源与环境, 2008(3).
- [10] 王锋,吴丽华,杨超. 中国经济发展中碳排放增长的驱动因素研究[J]. 经济研究, 2010(2).
- [11] 林伯强,刘希颖. 中国城市化阶段的碳排放:影响因素和减排策略[J]. 经济研究, 2010(1).
- [12] 包群,彭水军. 经济增长与环境污染:基于面板数据的联立方程估计[J]. 世界经济, 2006(11).
- [13] 孙耀华,李忠民. 中国各省区经济发展与碳排放脱钩关系研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2011(5).
- [14] 涂正革. 中国的碳减排路径与战略选择[J]. 中国社会科学, 2012(3).
- [15] 曲越,秦晓钰,黄海刚,等. 碳达峰碳中和的区域协调:实证与路径[J]. 财经科学, 2022(01).
- [16] 张诗卉,李明煜,王灿,等. 中国省级碳排放趋势及差异化达峰路径[J]. 中国人口·资源与环境, 2021(9).
- [17] 毛显强,钟瑜,张胜. 生态补偿的理论探讨[J]. 中国人口·资源与环境, 2002(4).
- [18] 伏润民,缪小林. 中国生态功能区财政转移支付制度体系重构——基于拓展的能值模型衡量的生态外溢价值[J]. 经济研究, 2015(3).
- [19] 张希良,黄晓丹,张达,等. 碳中和目标下的能源经济转型路径与政策研究[J]. 管理世界, 2022(1).
- [20] 安虎森,周亚雄. 区际生态补偿主体的研究:基于新经济地理学的分析[J]. 世界经济, 2013(2).
- [21] Bumpus, A. G. The matter of carbon: Understanding the materiality of tCO₂e in carbon offsets[J]. *Antipode*, 2011(3).
- [22] 余东华,张明志. “异质性难题”化解与碳排放 EKC 再检验——基于门限回归的国别分组研究[J]. 中国工业经济, 2016(7).
- [23] Narayan, P. K., B. Saboori, A. Soleymani. Economic growth and carbon emissions[J]. *Economic Modelling*, 2016, 53.
- [24] Liu, Z., D. Guan, W. Wei, et al. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China[J]. *Nature*, 2015(7565).
- [25] 彭水军,包群. 中国经济增长与环境污染——基于广义脉冲响应函数法的实证研究[J]. 中国工业经济, 2006(5).

- [26]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).
- [27]倪鹏飞,刘高军,宋璇涛.中国城市竞争力聚类分析[J].中国工业经济,2003(7).
- [28]Ramaswami,A.,D. Jiang,K. Tong,et al. Impact of the economic structure of cities on urban scaling factors: Implications for urban material and energy flows in China[J]. *Journal of Industrial Ecology*,2018(2).
- [29]Shan,Y.,D. Guan,K. Hubacek,et al. City-level climate change mitigation in China[J]. *Science Advances*,2018(6).

A Study on the Urban Synergy Path of Carbon Neutrality in China

— Threshold Model Based on Carbon Peak Heterogeneity

QU Yue, QIN Xiao-yu, WANG Hui-qing, XIA You-fu

Abstract: With the development of economy and the improvement of residents' living standards, the emission of carbon dioxide (CO₂) has gradually become a major environmental problem facing human beings. Based on China Urban Carbon Emission Database (CEADs), this paper explores the CO₂ emission paths of 247 cities in China through the extended EKC curve. The results show that: The impact of per capita GDP on urban CO₂ emissions presents an asymmetrical inverted “U” shaped relationship with first upward and then downward trend, and the trend of EKC curve is slow after the carbon reaches the peak. Based on the heterogeneity of cities, it is found that: (1) energy and heavy industrial cities are the main sources of CO₂ emissions in China. Restricted by the industrial structure, these two types of cities need to experience the trend of increasing carbon emissions in two stages before they can reach the carbon peak; (2) The light industrial, technology-oriented and service-oriented cities all reached the carbon peak at the end of the first stage of economic development, and then the CO₂ emissions in the two stages began to show a decreasing trend; (3) Technology-based cities coordinate the relationship between economic growth and CO₂ emissions; light industrial cities maintain low carbon operation of economic development, and population accumulation makes service cities face severe carbon emission problems in the field of life. Therefore, to achieve China's “dual carbon” goal, it is necessary to actively explore synergistic paths between cities, give full play to the technology-leading and radiating role of cities such as Beijing and Shanghai, promote the green and efficient development of light industry cities, and accelerate the industrial transformation and upgrading of energy and heavy industry cities.

Key words: carbon peak; carbon neutralization; ecological compensation; efficiency; equity

(责任编辑 孙 洁)