

# 中国城市碳排放差距及其技术成因

张彩云 刘乃毓

**摘要** 碳排放总量和强度“双控”是实现“双碳”目标的重要举措。随着中国创新能力不断提升,新技术和新装备层出不穷,在碳排放“双控”的过程中,技术的重要性和关键地位必将愈发凸显。不容忽视的是,中国城市碳排放总量和强度均存在较大差距,具有总量差距大、强度差距增长快的特征,这严重影响到整体推进碳排放“双控”的速度,其背后的成因离不开城市技术进步异质性。中国城市生产型技术进步异质性较弱,绿色型技术进步异质性较强,碳排放差距缩小源于前者,碳排放差距扩大源于后者。技术在减排中的作用与经济发展阶段密切相关,在经济发展水平较高时,技术进步异质性在碳排放差距方面的解释力尤甚,其根本原因在于纯生产型技术进步异质性较弱,而纯绿色型技术进步异质性强。从全国层面布局碳排放“双控”战略,推进“双碳”目标实现,应根据经济发展阶段,具体到区域层面的放矢地发挥不同类型技术进步的作用。

**关键词** 碳排放“双控”;碳排放差距;技术进步异质性;生产型技术进步

**中图分类号** F124 **文献标识码** A **文章编号** 1672-7320(2024)03-0147-13

**基金项目** 国家社会科学基金项目(23BZS161)

科学有序地实现“双碳”目标是高质量发展的内在要求和重要推力,而实现碳排放总量和强度“双控”是完成“双碳”目标的必经之路。在完成“双控”任务的过程中,要做好碳减排任务的分配并积极探索减碳的技术路径。其中,十分重要但容易被忽视的问题是,因城市经济发展水平、人口、技术等因素的差异,城市碳排放基础存在一定差距,这将直接影响到减碳任务的分配及各地区落实减碳任务的积极性。顺利实现“双碳”目标的同时,也要保障经济社会平稳发展,这使得技术发展的关键地位在“双控”战略推进的过程中愈加突出,其目的在于通过生产型技术和绿色型技术的进步来保证“双碳”目标的实现和经济社会平稳发展并行不悖。在这一背景下,本文将对中国城市碳排放差距加以测度,考虑到技术进步在“双控”中的关键作用,本文以生产型技术进步与绿色型技术进步为主要研究对象,探索技术进步异质性<sup>①</sup>对城市碳排放差距的影响,进而对如何制定和推行碳排放“双控”战略提供一些实证依据,以期对实现“双碳”目标有所启发。

## 一、文献综述

已有文献探索了碳排放差距的影响因素。在关于地区间碳排放差距的研究中,有文章认为群体间成分差异在很大程度上解释了整体碳排放差距<sup>[1]</sup>(P1320-1328),地区间经济增长差距也能部分地说明整体碳排放差距<sup>[2]</sup>(P66-73),其他的影响因素还有城镇化水平<sup>[3]</sup>(P79-86, 127)、政府支出差异<sup>[4]</sup>(P1-15)等。与本研究密切相关的技术进步异质性影响碳排放差距的文献表明,生产型技术进步异质性在缩小碳排放差距方面发挥了重要作用,而节能技术进步异质性对碳排放差距的影响较小<sup>[5]</sup>(P1-14)。

<sup>①</sup> 本文中的技术进步异质性内容较为广泛,指的是各城市技术进步速度变化、城市技术进步差距等能够反映个体间技术差异的指标。

尽管上述研究显示技术进步异质性对碳排放及碳排放差距有重要影响,直接相关的研究仍比较匮乏。与本研究间接相关的文献中,技术和碳排放关系的研究比较充分。一方面,部分研究围绕生产型技术进步对碳排放的影响方向和作用渠道进行了讨论。如,Ang结合内生增长理论的研究认为,碳排放与研究强度、技术转移和经济吸收外国技术的能力呈负相关关系<sup>[6]</sup>(P2658-2665)。机制分析表明,碳排放量下降的主要驱动因素是工业部门能源利用效率的提高,而深层原因可能是研发经费支出大幅提高所推动的技术进步和工业企业所有制结构的变化<sup>[7]</sup>(P123-136)。而龚利等研究结果则表明,整体技术进步实现的碳排放的减少量小于其带来的增加量,技术进步水平并未达到使碳排放减少的程度<sup>[8]</sup>(P95-102)。也有研究提供了反弹效应的证据<sup>[9]</sup>(P118-132)。对生产型技术进步的分解及作用渠道的研究表明,技术效率提高可以较大程度抑制碳排放,其次是纯生产技术进步。如,李涛和傅强的研究显示,中国碳排放效率逐步提高,效率改善更大程度上是来自逼近效率前沿的结构性改善,而技术进步效应尚且不足<sup>[10]</sup>(P62-71)。孙焱林和李华磊认为,影响中国碳生产力增长的首要因素是源于技术效率的提高,其次是纯技术进步<sup>[11]</sup>(P63-71)。

另一方面,已有文献还讨论了绿色型技术进步对碳排放的影响及其异质性,并对影响渠道展开了研究。Du等对全球71个经济体的研究表明,绿色型技术进步对碳排放的影响存在单一门槛效应,对于收入水平高于阈值的经济体才显著<sup>[12]</sup>(P297-303)。其中,欠发达经济体采用绿色技术的障碍主要来自政策和公众更愿意提高生活水平而非改善环境,且缺乏其他相关创新的补充支持<sup>[13]</sup>(P240-250)。对绿色型技术进步的分解与作用渠道的研究表明,碳减排技术进步、碳减排技术效率、能源使用技术进步和能源使用技术效率这四个因素对碳减排效率有较强的正向影响<sup>[14]</sup>(P138-150),纯绿色技术进步对低碳经济发展的促进作用显著大于绿色效率的提高<sup>[15]</sup>(P112-120)。可见,生产型技术进步和绿色型技术进步对碳排放的影响方向是不确定的,主要取决于纯生产技术进步、纯绿色技术进步、生产效率提高、绿色效率提高对碳排放的影响。此外,其影响与经济发展阶段有关,这也说明分地区回归是必要的。

综观上述文献,相关研究多集中于碳排放的测度及其影响因素,围绕技术因素的研究是在绿色生产率的测度及分解方法逐渐完善后展开的。当前的研究中,直接测度中国城市碳排放差距的文献十分缺乏,间接相关的文献也仅探讨了行业间碳排放差距、地区间碳排放差距,尚未对城市碳排放差距展开研究。也尚未有研究将技术进步分解,并讨论技术进步异质性对城市碳排放差距的影响。

考虑到既有研究的不足,本文在采用基尼系数测度城市碳排放差距的基础上,结合STIRPAT模型和Grossman和Kruger提出的三大效应理论,重点分析技术进步异质性对城市碳排放差距的影响。首先,针对当前关于城市碳排放差距尚未引起关注的情况,本文采用基尼系数度量城市碳排放总量差距、城市碳排放强度差距,从而实现从碳排放“双控”角度出发,描绘碳排放差距现状的全景图。这也为后续关于碳排放“双控”目标的制定贡献了数据和方法参考,为碳排放差距的测度提供了新角度。其次,针对已有文献在研究技术类型时考虑不够全面的事实,本文将技术进步异质性划分为生产型技术进步速度、绿色型技术进步速度、城市生产型技术进步差距、城市绿色型技术进步差距,从速度和差距两个角度全面反映技术进步异质性的事实。再次,由于技术进步异质性对碳排放差距的影响在全国和在不同经济发展阶段的地区表现不同,本文除了量化分析全国范围内技术进步与碳排放之间的关系,还将样本分为发达地区和欠发达地区,重点分析和总结在不同经济发展阶段技术进步异质性与碳排放差距之间的关系,并针对处于不同发展阶段的地区提出降低碳排放差距的战略,这些工作为后续相关研究提供了新思路。最后,将技术进步细化为纯生产技术进步、生产效率提高、纯绿色技术进步和绿色效率提高四类,一一考察各项技术指标在碳排放差距中的作用,并从中找出影响碳排放差距最重要的技术指标,据此针对碳排放“双控”提出更具体、更具可行性的政策建议,其研究结论对后续相关研究有一定启发。

## 二、模型构建与指标测度

本部分首先构建碳排放影响因素的回归方程；其次，对城市碳排放总量进行测度，并在此基础上构建碳排放总量和碳排放强度的基尼系数，以表征城市碳排放差距；再次，说明生产型技术进步和绿色型技术进步测度方法及其分解原理；最后，介绍数据来源和实证变量。

### （一）模型构建

碳排放的影响因素在国内外有着广泛讨论，除了技术进步外，多数研究更将人口、富裕程度视为影响碳排放的主要驱动力。Dietz和Rosa建立了随机版本的IPAT模型即STIRPAT模型，来估计人口、富裕程度和技术进步对碳排放的影响<sup>[16]</sup>(P175-179)。其中，人口是影响碳排放的基本因素。新增人口带来的能源消费增加和森林破坏，不仅加剧了温室气体排放，还破坏了吸收碳的生态系统，这两方面因素导致碳排放增加<sup>[17]</sup>。也有学者用STIRPAT模型具体测算发现，碳排放对人口总量变化的弹性系数在1左右<sup>[18]</sup>(P29-42)。富裕程度对碳排放的影响直接体现在消费上。城市能源消费是全球碳排放的主要来源<sup>[19]</sup>(P64-76, 221)。其中，消费者行为能够解释能源消费的45%-55%<sup>[20]</sup>(P273-320)。Bin和Dowlatabadi对美国的研究结果显示，消费者的直接、间接需求和支持这些需求的经济活动是能源消耗和碳排放的主要源头<sup>[21]</sup>(P197-208)。Duarte等的研究表明，需求增长进而生产增长造成的碳排放，在很大程度上吸收了技术进步和效率提高的影响<sup>[22]</sup>(P1-13)。

与STIRPAT模型所展示的三大驱动力略有区别的是，Grossman和Krueger认为，影响碳排放的多少取决于经济规模、产业结构以及技术进步，分别称之为规模效应、结构效应和技术效应<sup>[23]</sup>。其中，规模效应和技术效应是STIRPAT模型中财富和技术进步的另一种表达，Grossman和Krueger的研究显示空气污染会随着经济发展水平的升高呈现出先恶化后改善的趋势<sup>[24]</sup>(P353-377)。关于“结构效应”，有学者研究发现不同部门对碳排放增长的贡献不同<sup>[25]</sup>(P106-118)<sup>[26]</sup>(P120-133)。

总结而言，影响碳排放最主要的因素有人口规模、富裕程度、产业结构和技术进步四个。以之为基础，本文在STIRPAT模型基础上结合Grossman和Krueger的三大效应构建如下模型：

$$\ln CO_{2it} = \alpha_{it} + \beta_1 \ln T_{it} + \beta_2 \ln P_{it} + \beta_3 \ln A_{it} + \beta_4 \ln I_{it} + e_{it} \quad (1)$$

其中，下标*i*、*t*分别表示城市和年份，CO<sub>2</sub>为年度碳排放总量或碳排放强度。核心解释变量为技术进步(T)，控制变量包括人口规模(P)、富裕程度(A)、产业结构(I)，分别用年末总人口数、人均可支配收入、第二产业占GDP比重表示。 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 为待估计参数，*e*为随机误差项。实际回归中，采用分位数回归，分别取0.2、0.4、0.6、0.8四个分位点，用 $\tau$ 表示，公式为：

$$Q_{\tau}(\ln CO_{2it}) = \beta_0(\tau) + \beta_1(\tau) \ln T_{it} + \beta_2(\tau) \ln P_{it} + \beta_3(\tau) \ln A_{it} + \beta_4(\tau) \ln I_{it} + e_{it} \quad (2)$$

### （二）指标测度

下文部分将以各城市碳排放总量、碳排放强度为起点，构建碳排放基尼系数表征城市碳排放差距，对生产型技术进步和绿色型技术进步进行测算，并将之分解为四项指标。

#### 1. 碳排放总量测度

参考陈诗一估算二氧化碳排放量的方法，利用地级市数据中的各主要能源消费量乘以相应排放系数估算碳排放总量<sup>[27]</sup>(P41-55)。具体估算方式如下：

$$CO_2 = \sum E_i \times NCV_i \times CEF_i \times COF_i \times (44/12) \quad (3)$$

其中，CO<sub>2</sub>为碳排放总量估计值，*i*表示各种燃料能源，*E*为城市燃料能源消费量，*NCV*为燃料的净发热值，*CEF*为碳排放系数，*COF*为碳氧化因子(煤炭设定为0.99，原油和天然气为1)，44和12分别为二氧化碳和碳的分子量。

#### 2. 碳排放差距测度

衡量碳排放差距的方法有多种，其中的集中度指标在测度个体差距方面的应用十分广泛。基尼系

数可表示集中程度,其值越大代表个体之间差距越大。该系数简明直观地体现了差距程度,Heil和Wodon通过基尼系数的分组分解测算了化石燃料使用和水泥生产的人均碳排放的差距,并对全球135个国家的人均碳排放差距做出了预测<sup>[28]</sup>(P163-181)。下文延续这种测算方式,采用基尼系数衡量城市碳排放差距。具体以各城市碳排放总量、碳排放强度两个“双控”指标为基础,计算每年的碳排放基尼系数:

$$G = \frac{1}{2n_d^2 \mu_{d1}} \sum_i \sum_j |CO_{2i} - CO_{2j}| \quad (4)$$

$$G_{pgdp} = \frac{1}{2n_d^2 \mu_{d2}} \sum_i \sum_j |CO_{2pgdp_i} - CO_{2pgdp_j}| \quad (5)$$

其中,式(4)为城市碳排放总量基尼系数的计算公式,式(5)为城市碳排放强度基尼系数的计算公式。下标d表示全国、发达地区、欠发达地区, $n_d$ 为城市数量, $\mu_d$ 为碳排放因素的平均值。 $i, j$ 表示城市, $CO_{2i}$ 为碳排放总量, $CO_{2pgdp_i}$ 为单位GDP碳排放。

### 3. 技术进步测度

广义的技术进步可用生产率(生产型技术进步)和绿色生产率(绿色型技术进步)代表。现实中纯技术进步和资源配置效率的提高均可认作技术进步,故生产率和绿色生产率指标不仅包括纯技术进步,效率提高也在其中。因此,我们将生产型技术进步与绿色型技术进步划分为纯生产技术进步、生产效率提高、纯绿色技术进步和绿色效率提高四类指标。

与多数研究一样,选择非参数数据包络分析法(Data Envelope Analyse)确定生产技术前沿。关于方向性距离函数,在Tone提出的SBM方法(Slacks-Based Measure)基础上,Fukuyama和Weber提出了非径向、非角度的解决松弛问题的方向性距离函数,并构造了测度方法SBI(Slacks-Based Inefficiency)测算生产率<sup>[29]</sup>(P498-509)<sup>[30]</sup>(P274-287)。

Caves等引入了Malmquist指数,Färe等使用了一种非参数规划方法(活动分析)计算Malmquist生产率指数,并将其分解为技术变化和效率变化<sup>[31]</sup>(P1393-1414)<sup>[32]</sup>(P66-83)。Chung等构建了Malmquist-Luenberger(ML)生产率指数,该指数纳入了环境污染等非合意产出且不需要影子价格的信息<sup>[33]</sup>(P229-240)。Chambers等则基于Luenberger短函数的一个版本,推广了输入和输出距离函数<sup>[34]</sup>(P181-190)。

Luenberger生产率指数将生产率分解为四个分指标:纯效率变化(LPEC)、纯技术进步(LPTP)、规模效率变化(LSEC)和技术规模变化(LTPSC)。其中,纯效率变化和规模效率变化合为生产效率提高(EC),纯技术进步和技术规模变化合为纯生产技术进步(PC)。相应公式为:

$$LTFP = LPEC + LSEC + LPTP + LTPSC = EC + PC \quad (6)$$

Luenberger生产率指数通过要素投入和要素产出进行计算。资本投入依照普遍做法用资本存量代替,具体测算方法为“永续盘存法”,即资本存量等于上年全社会资本存量扣除折旧与当年新增固定资产投资之和<sup>[35]</sup>(P35-44):

$$K_{it} = K_{i,t-1}(1 - \delta) + I_{it} \quad (7)$$

式(7)为资本投入的计算公式, $K_{it}$ 为*i*城市在*t*年的资本存量,按照余泳泽等对生产率的核算方法估计了所需的实际资本存量<sup>[36]</sup>(P26-42, 202)。实际资本存量计算包含四项要素: $K_{i,t-1}$ 需要以城市基期固定资本存量为基础进行计算,基期固定资本存量由2006年各地级市占2006年各省级全社会固定资产投资的比例来确定,各省2006年资本存量运用单豪杰计算的结果<sup>[37]</sup>(P17-31);与大多数文献一样, $\delta$ 为5%的折旧率; $I_{it}$ 为*i*城市在*t*年的新增固定资产投资,按照地级市的全社会固定资产投资总额占省级全社会新增固定资产投资的比重,乘以各省新增固定资产投资来确定;固定资产价格指数以2006年为基期各年各省固定资产价格指数计算得出。通过这些工作,得到了以2006年为基期的各地级市资本存量。劳动力指标采用全社会从业人员表示。

产出指标分为两类：“好的”产出，采用地级市实际GDP表示，该指标采用了地级市所在省份的GDP平减指数进行平减，并以2006年不变价格进行了处理；“坏的”产出采用地级市碳排放表示。

### (三) 数据来源及处理

原始数据分别来源于《中国统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《2006年IPCC国家温室气体清单指南》。测算中选取了2006-2019年中国282个地级市的面板数据，剔除了数据缺失较为严重的地区，并对GDP和固定资产投资的指标以2006年为基年进行了不变价处理。因省级层面全社会固定资产投资、新增固定资产、地级市全社会固定资产投资在2017年及其之后有大量缺失值，与技术相关的指标数据年份区间为2007-2016年。但因本文的研究对象是技术进步异质性对碳排放差距的影响，这种影响具有规律性，不会因年份而发生变化，且对这一因果关系的验证采用了10年的面板数据，与碳排放差距涉及的年份相比，仅缺失四年。因而，关于因果关系研究的结论将不会受到数据期限影响。

### (四) 变量符号

二氧化碳排放总量和二氧化碳排放强度分别用 $CO_2$ 和 $CO_2pgdp$ 表示，生产率、绿色生产率、纯生产技术进步、生产效率提高、纯绿色技术进步、绿色效率提高分别标为T、GT、PC、EC、GPC、GEC，其他各变量如年末总人口、人均可支配收入、第二产业占GDP的比重分别用P、A、I代表。

## 三、城市碳排放差距与技术进步异质性的特征描述

从图1的趋势可以发现，中国城市碳排放差距在经历了近十年的逐步缩小后，近年来开始呈现扩大趋势。主要体现在两方面：第一，碳排放总量基尼系数呈现平缓下降的趋势，近几年虽有小幅上扬，但始终维持在0.6附近。第二，与碳排放总量基尼系数相比，碳排放强度基尼系数较小，从2016年开始，该指数才开始上升，2019年超过了碳排放总量基尼系数，即城市碳排放强度差距超过了城市碳排放总量差距。碳排放强度基尼系数增长较快的原因可能是2015年之后，碳排放强度变为约束性指标，技术进步速度快的地区或城市有压力和动力推动碳排放强度下降，而技术较为落后的地区或城市会因技术水平所限，很难在短期内降低碳排放强度。两项指标分别从差距大和增长快两个角度反映出城市碳排放差距问题。

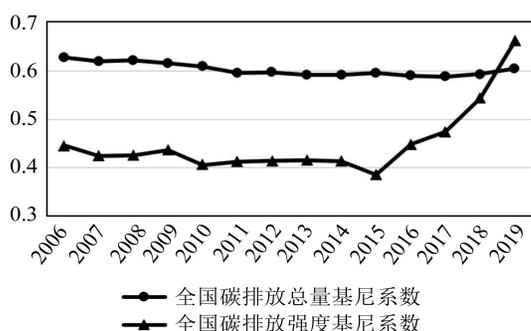


图1 城市碳排放基尼系数

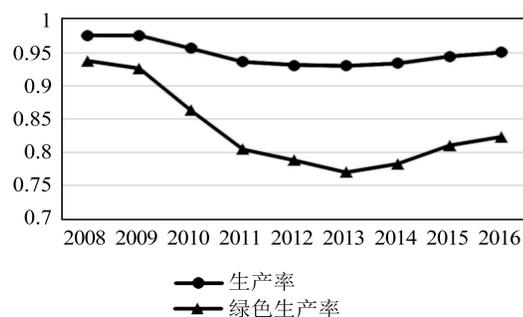


图2 生产率和绿色生产率变化

考虑到技术进步异质性对碳减排的影响，图2-6从技术进步速度和技术进步差距两个方面对城市技术进步异质性进行统计描述。图2显示了历年生产型技术进步速度和绿色型技术进步速度，可以发现，生产型技术进步较匀速，而绿色型技术进步速度变化幅度较大。图3分解两个技术进步指标可见，纯生产技术和生产效率的进步较匀速，纯绿色技术和绿色效率的进步速度波动较大，这种结果从技术进步速度角度印证了生产型技术进步异质性较弱，而绿色型技术进步异质性较强这一事实。图4-6则从城市生产型技术进步差距和城市绿色型技术进步差距角度展示了技术进步异质性，6项关于技术进步差距的指

标均显示城市技术进步差距在扩大。指标分解的数据显示,绿色生产率、纯绿色技术进步、绿色效率提高在城市差距较大,生产率、纯生产型技术进步、生产效率提高在城市差距较小。这种结果意味着,城市绿色型技术进步异质性较强,而城市生产型技术进步异质性较弱。仅通过描述统计进行因果推断是不够的,下文将通过计量回归的方式加以验证两组因果关系,技术进步异质性是否影响到城市碳排放差距的扩大?如果是,技术进步异质性对城市碳排放总量差距和城市碳排放强度差距的影响是否不同?

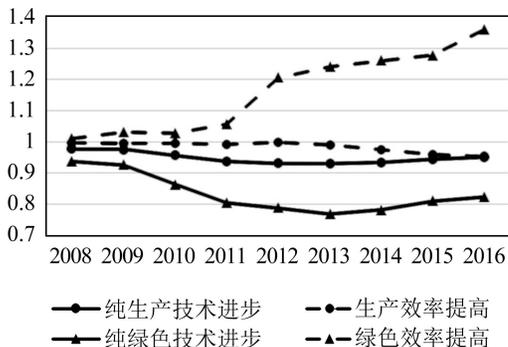


图3 生产率和绿色生产率各组成部分变化



图4 生产率和绿色生产率的基尼系数

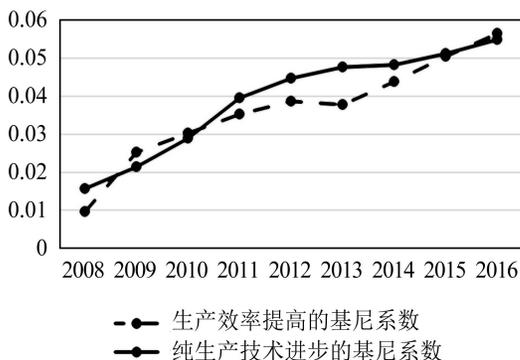


图5 生产效率提高和纯生产型技术进步的基尼系数

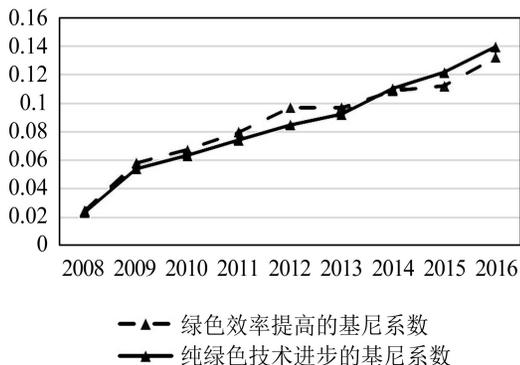


图6 绿色效率提高和纯绿色型技术进步的基尼系数

### 四、技术进步异质性对城市碳排放差距影响的基准回归

为进一步分析各因素尤其是技术进步异质性对城市碳排放差距的影响,采用分位数回归方法对式(2)进行回归。如表1所示,初步回归得到了在0.2分位、0.4分位、0.6分位和0.8分位处各因素对碳排放总量的影响系数。可以看出,在各分位点上,人口规模、富裕程度、产业结构和技术进步对碳排放总量的影响都显著为正,同样,表2也发现,在绝大多数分位数上,人口规模、富裕程度、产业结构和技术进步对碳排放强度的影响都显著为正。两个表格的结果均表示这些因素的增长都会促进碳排放,同时验证了规模效应、结构效应是成立的,而技术效应还需要进一步讨论。

关注到技术进步异质性对碳排放差距的影响,从表1的回归结果可以发现,在各分位点上,生产率对碳排放总量的影响系数都大于1。在0.2分位点上,技术进步速度每增加1%,碳排放总量增加约5.7%。这表明碳排放总量对生产型技术进步的弹性较大,这种影响在碳排放总量越低的城市越明显。在0.4分位上,这一数值下降到5.2%,到了0.6和0.8分位,该数值分别下降至5.1%和4.5%。这说明,随着碳排放总量的增加,生产型技术进步对其影响逐渐减弱,这会在一定程度上缩小了城市碳排放总量差距。与之不同的是,从后四列的回归结果可以看到,绿色生产率对碳排放总量影响的系数在0.2分位、0.4分位、0.6分位上分别为0.860、0.734和0.779,在0.8分位上大于1,这意味着绿色生产率对碳排放总量的影响在碳

表1 碳排放总量影响因素的分位数回归结果

| 变量   | ln CO <sub>2</sub>  |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
|------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|      | 生产型技术进步             |                     |                     |                     | 绿色型技术进步             |                     |                     |                     |
|      | 0.2分位数              | 0.4分位数              | 0.6分位数              | 0.8分位数              | 0.2分位数              | 0.4分位数              | 0.6分位数              | 0.8分位数              |
| lnT  | 5.693***<br>(0.369) | 5.236***<br>(0.254) | 5.078***<br>(0.350) | 4.505***<br>(0.517) |                     |                     |                     |                     |
| lnGT |                     |                     |                     |                     | 0.860***<br>(0.184) | 0.734***<br>(0.115) | 0.779***<br>(0.180) | 1.216***<br>(0.226) |
| lnP  | 0.241***<br>(0.042) | 0.172***<br>(0.029) | 0.093**<br>(0.040)  | 0.242***<br>(0.059) | 0.216***<br>(0.045) | 0.306***<br>(0.028) | 0.274***<br>(0.044) | 0.412***<br>(0.055) |
| lnA  | 1.214***<br>(0.086) | 1.013***<br>(0.059) | 0.943***<br>(0.082) | 1.049***<br>(0.121) | 1.172***<br>(0.100) | 1.021***<br>(0.063) | 1.020***<br>(0.098) | 1.128***<br>(0.123) |
| lnI  | 1.772***<br>(0.128) | 1.602***<br>(0.088) | 1.207***<br>(0.121) | 0.884***<br>(0.180) | 2.073***<br>(0.139) | 1.786***<br>(0.087) | 1.180***<br>(0.135) | 0.953***<br>(0.171) |
| N    | 2350                | 2350                | 2350                | 2350                | 2350                | 2350                | 2350                | 2350                |

注：括号内为标准误；\*表示10%的显著水平，\*\*表示5%的显著水平，\*\*\*表示1%的显著水平。以下各表同。

表2 碳排放强度影响因素的分位数回归结果

| 变量   | ln CO <sub>2</sub> /pgdp |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |
|------|--------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|      | 生产型技术进步                  |                      |                      |                      | 绿色型技术进步              |                      |                      |                      |
|      | 0.2分位数                   | 0.4分位数               | 0.6分位数               | 0.8分位数               | 0.2分位数               | 0.4分位数               | 0.6分位数               | 0.8分位数               |
| lnT  | 2.442***<br>(0.267)      | 2.539***<br>(0.239)  | 1.771***<br>(0.220)  | 1.518***<br>(0.258)  |                      |                      |                      |                      |
| lnGT |                          |                      |                      |                      | 0.014<br>(0.117)     | 0.082<br>(0.108)     | -0.021<br>(0.091)    | 0.381***<br>(0.117)  |
| lnP  | -0.301***<br>(0.030)     | -0.414***<br>(0.027) | -0.455***<br>(0.025) | -0.490***<br>(0.029) | -0.277***<br>(0.030) | -0.332***<br>(0.028) | -0.393***<br>(0.024) | -0.446***<br>(0.031) |
| lnI  | 0.398***<br>(0.094)      | 0.174**<br>(0.084)   | 0.089<br>(0.077)     | 0.081<br>(0.091)     | 0.559***<br>(0.095)  | 0.216**<br>(0.088)   | 0.167**<br>(0.074)   | 0.103<br>(0.096)     |
| N    | 2350                     | 2350                 | 2350                 | 2350                 | 2350                 | 2350                 | 2350                 | 2350                 |

排放总量中等的城市较小，在碳排放总量最低和最高的城市均较大，且后者尤为突出，说明绿色生产率会在一定程度上扩大了城市碳排放总量差距。

同样，表2也反映出和表1类似的规律，随着碳排放强度增加，生产率对碳排放强度的影响系数均显著为正，且在逐渐减小，说明生产型技术进步起到了缩小城市碳排放强度差距的作用。绿色生产率对碳排放强度的影响在中间分位数较小或者不显著，在碳排放总量大的城市该系数较大，这说明绿色型技术进步会扩大城市碳排放强度差距，但这一影响很微弱。

总之，表1和表2所显示的内容证明，无论以碳排放总量还是碳排放强度来表征碳排放，技术进步速度加快都会增加碳排放，即技术进步异质性增加了碳排放。要想降低碳排放，应保证技术进步的稳定性，而非盲目追求速度，这也是图2和图3得到的结论。不同类型技术进步异质性对城市碳排放差距的影响不同，生产型技术进步异质性缩小了城市碳排放差距，绿色型技术进步异质性扩大了城市碳排放差距。其原因可能在于，一方面，生产型技术进步在城市差距较小，绿色型技术进步在城市差距较大，这也是图4-6得到的结论；另一方面，在碳排放较大的区间，绿色型技术进步在城市的差距太大。因而，各城市不仅要保证技术进步的稳定性，技术进步速度较低的城市也要稳步追赶技术进步速度较高的城市。

## 五、技术进步异质性对城市碳排放差距影响的阶段性回归

本部分从经济发展阶段视角对全国城市碳排放差距的技术成因进行具体考察,即根据经济发展水平将城市划分为发达地区和欠发达地区进行回归<sup>①</sup>。前者体现了经济发展水平较高的阶段,后者可反映经济发展水平较低的阶段。从中可以发现,技术进步异质性的作用在经济发展水平较高的地区尤为明显,这与Du等的研究结论是一致的<sup>[12]</sup>(P297-303)。

### (一) 各地区生产型技术进步异质性对城市碳排放差距的影响

从表3的回归结果中可发现,在发达地区,随着碳排放总量的增加,生产型技术进步对碳排放总量的正向影响有所减弱。其表现为,T的影响系数从0.2分位数的11.130降为0.8分位的6.926。这一回归结果不仅说明,生产型技术进步速度越快,碳排放总量越大,还说明生产型技术进步缩小了发达地区城市碳排放总量差距。与该结论相同的是,在欠发达地区,生产型技术进步增加了碳排放总量,不同的是,生产型技术进步扩大了城市碳排放总量差距。其证据是,生产型技术进步对城市碳排放总量差距的影响随着分位数的提高在逐渐增加,在0.2分位上,生产型技术进步对碳排放总量的影响系数为2.177,在0.4分位上,该系数值稍有增加变为2.204;随着分位数增加到0.6,该系数值增加到2.671,到了0.8分位,该系数值变为3.219。表3的回归结果意味着,生产型技术进步缩小了发达地区城市碳排放总量差距,扩大了欠发达地区城市碳排放总量差距。

表3 不同地区生产型技术进步对碳排放总量的影响

| 变量   | ln CO <sub>2</sub>   |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
|------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|      | 发达地区                 |                     |                     |                     | 欠发达地区               |                     |                     |                     |
|      | 0.2分位数               | 0.4分位数              | 0.6分位数              | 0.8分位数              | 0.2分位数              | 0.4分位数              | 0.6分位数              | 0.8分位数              |
| lnT  | 11.130***<br>(0.603) | 7.738***<br>(0.748) | 9.498***<br>(1.138) | 6.926***<br>(0.987) | 2.177***<br>(0.418) | 2.204***<br>(0.457) | 2.671***<br>(0.540) | 3.219***<br>(0.814) |
| 控制变量 | YES                  | YES                 | YES                 | YES                 | YES                 | YES                 | YES                 | YES                 |
| N    | 891                  | 891                 | 891                 | 891                 | 605                 | 605                 | 605                 | 605                 |

表4的回归结果显示,生产型技术进步提高了两类地区的碳排放强度,缩小了两类地区城市碳排放强度差距,其表现为T的影响系数从0.2分位的3.034降低为0.8分位的2.218。

表4 不同地区生产型技术进步对碳排放强度的影响

| 变量   | ln CO <sub>2</sub> /pgdp |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                  |
|------|--------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|
|      | 发达地区                     |                     |                     |                     | 欠发达地区               |                     |                     |                  |
|      | 0.2分位数                   | 0.4分位数              | 0.6分位数              | 0.8分位数              | 0.2分位数              | 0.4分位数              | 0.6分位数              | 0.8分位数           |
| lnT  | 3.034***<br>(0.566)      | 4.446***<br>(0.471) | 2.409***<br>(0.606) | 2.218***<br>(0.828) | 1.666***<br>(0.372) | 1.636***<br>(0.468) | 1.520***<br>(0.450) | 0.698<br>(0.452) |
| 控制变量 | YES                      | YES                 | YES                 | YES                 | YES                 | YES                 | YES                 | YES              |
| N    | 891                      | 891                 | 891                 | 891                 | 605                 | 605                 | 605                 | 605              |

生产型技术进步也缩小了欠发达地区城市碳排放强度的差距,其表现为T的影响系数从0.2分位的1.666降低为0.6分位的1.520,到了0.8分位,该系数变得不再显著。

总之,与表1和表2的回归结果相似,碳排放增加的一个原因是生产型技术进步速度较快,在经济发展水平较高的地区,城市碳排放差距缩小的一个原因是生产型技术进步在不同区间差距较小。在经济

① 发达地区包括北京、天津、河北、辽宁、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东、海南;欠发达地区包括内蒙古、广西、重庆、四川、贵州、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆。

发展水平较低的地区,技术在缩小碳排放差距中的作用不突出。

### (二) 各地区绿色型技术进步异质性对城市碳排放差距的影响

从表5前四列回归结果发现,在发达地区,绿色型技术进步的影响系数从0.2分位的0.738提升为0.8分位的2.053,说明绿色型技术进步对发达地区碳排放总量的正向影响在逐渐增强,意味着绿色型技术进步异质性扩大了发达地区城市碳排放总量差距。表5最后四列表明绿色型技术进步难以对欠发达地区城市碳排放总量差距产生显著影响,因为在各个分位上,绿色型技术进步均未对碳排放总量产生显著影响。

表5 不同地区绿色型技术进步对碳排放总量的影响

| 变量          | ln CO <sub>2</sub>  |                     |                     |                     |                  |                  |                  |                   |
|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
|             | 发达地区                |                     |                     |                     | 欠发达地区            |                  |                  |                   |
|             | 0.2分位数              | 0.4分位数              | 0.6分位数              | 0.8分位数              | 0.2分位数           | 0.4分位数           | 0.6分位数           | 0.8分位数            |
| <i>lnGT</i> | 0.738***<br>(0.259) | 0.613***<br>(0.222) | 1.374***<br>(0.365) | 2.053***<br>(0.359) | 0.193<br>(0.209) | 0.360<br>(0.258) | 0.116<br>(0.264) | -0.032<br>(0.374) |
| 控制变量        | YES                 | YES                 | YES                 | YES                 | YES              | YES              | YES              | YES               |
| N           | 891                 | 891                 | 891                 | 891                 | 605              | 605              | 605              | 605               |

表6的回归结果则发现,绿色型技术进步扩大了发达地区城市碳排放强度的差距。其表现为,绿色型技术进步的影响系数从0.2分位上的负数变为0.8分位上的正数,与此不同的是,绿色型技术进步对欠发达地区城市碳排放强度差距无显著影响。

表6 不同地区绿色型技术进步对碳排放强度的影响

| 变量          | ln CO <sub>2</sub> ,pgdp |                     |                   |                    |                   |                  |                  |                   |
|-------------|--------------------------|---------------------|-------------------|--------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|
|             | 发达地区                     |                     |                   |                    | 欠发达地区             |                  |                  |                   |
|             | 0.2分位数                   | 0.4分位数              | 0.6分位数            | 0.8分位数             | 0.2分位数            | 0.4分位数           | 0.6分位数           | 0.8分位数            |
| <i>lnGT</i> | -0.236*<br>(0.135)       | -0.344**<br>(0.156) | -0.228<br>(0.152) | 0.423**<br>(0.207) | -0.050<br>(0.192) | 0.301<br>(0.218) | 0.346<br>(0.232) | -0.267<br>(0.185) |
| 控制变量        | YES                      | YES                 | YES               | YES                | YES               | YES              | YES              | YES               |
| N           | 891                      | 891                 | 891               | 891                | 605               | 605              | 605              | 605               |

上述结果说明,绿色型技术进步异质性太强是扩大城市碳排放差距的重要原因,这一规律在经济发展水平较高的地区尤为明显,在经济发展水平较低的地区不明显。

总结表1-6的内容可以看到,生产型技术进步异质性缩小了城市碳排放差距,绿色型技术进步异质性扩大了城市碳排放差距,技术进步异质性的这种作用在经济发展水平较高的地区尤为突出。因此,一方面,要在保持两种类型技术进步速度平稳的基础上,尤其关注碳排放量大且绿色型技术进步速度慢的城市,缩小其与绿色型技术进步速度快的城市的技术进步差距;另一方面,经济发展水平提高后,要愈发重视技术在减排中的作用。

## 六、进一步讨论

本部分将技术进步细化为纯生产技术进步、生产效率提高、纯绿色技术进步和绿色效率提高四项,针对技术进步异质性发挥作用更为显著的经济水平较高的地区加以回归,以探究碳排放差距的根本成因。

### (一) 生产型技术进步异质性缩小城市碳排放差距的机理

如表7前四列所示,纯生产技术进步对各分位数上碳排放总量的影响系数多显著为正,但随着分位



产技术进步速度平缓且在城市差距较小,绿色型技术进步扩大碳排放差距的原因是纯绿色技术进步速度快且在城市差距较大,因此,随着经济发展水平的提高,要格外关注纯生产技术进步的作用。

## 七、研究结论与政策建议

“推进碳达峰碳中和是党中央经过深思熟虑作出的重大战略决策,是我们对国际社会的庄严承诺,也是推动高质量发展的内在要求。”<sup>[38]</sup>(P4-9)具体到实践层面,2021年中央经济工作会议提到,要正确认识和把握碳达峰碳中和,创造条件尽早实现能耗“双控”向碳排放总量和强度“双控”转变。从全局范围看,城市碳排放差距是全国碳排放居高不下的重要原因,而城市技术进步异质性是碳排放差距的关键诱因。本文旨在厘清技术进步影响碳排放差距的表现及成因,以为碳排放“双控”战略的推进和“双碳”目标的实现提供一定对策。本文的主要结论是:中国的碳排放差距体现为,城市碳排放总量差距较大,城市碳排放强度差距增长较快;城市碳排放差距大,主要归因于绿色型技术进步速度变化大,且城市绿色型技术进步差距大,与之相反,生产型技术进步则缩小了城市碳排放差距;随着经济发展水平提高,技术进步异质性在减排中的作用越来越大;绿色型技术进步异质性扩大城市碳排放差距归因于纯绿色技术进步异质性较强,而生产型技术进步异质性缩小城市碳排放差距的原因在于纯生产技术进步异质性较弱。根据以上结论,提出如下建议:

第一,既要从全局出发制定碳排放“双控”战略,也要考虑各城市经济社会发展的具体情况,从战略上做好“双控”的整体和细微布局,通过制定和落实一系列战略规划来缩小城市碳排放差距。一是要根据各地区自身条件做好“双控”的整体规划,在此基础上,城市要根据自身发展目标和比较优势,推进生产活动的深度融合,优化产业布局,在进行产业有序转移的同时,也要协助对方做好节能减排工作。二是各地区要加强有关部门要统筹做好“双控”的规划和实施工作,既不能“各自为政”,也不能职责不清,要在“双控”责任分配清晰的基础上,各部门之间相互协作,联防联控,确保部门间同时推进减碳工作。

第二,加强技术交流合作,不断缩小城市技术进步差距,尤其是绿色型技术进步差距。一是城市要加强技术合作,共同研发、推广新技术。二是多与国家实验室、国家科研机构、高水平研究型大学、科技领军企业展开交流合作,掌握国内前沿的生产技术和绿色技术。三是顺应国际技术进步趋势,引进国外先进技术和设备,并多与国际机构和企业展开技术交流合作,掌握国际前沿的生产技术和绿色技术。四是采用先进技术设备,引进高层次人才,并改进管理技术,通过这一系列举措整体提升资源配置效率。五是狠抓绿色低碳技术攻关,加快先进绿色技术的推广应用,要通过给予企业补贴、税收优惠等方式直接或间接支持绿色低碳技术的研发。六是要提供交流、宣传、推广、应用绿色低碳技术的平台,所有地区共同提高绿色低碳技术水平。

第三,充分发挥出绿色技术创新对碳排放“双控”的关键支撑作用。要强化企业主体地位,激发企业绿色技术创新的内生动力,激励企业主动创新。一是继续健全绿色专利保护制度,提高企业从绿色专利中的收益,继续构建并推广碳交易市场,提高企业从碳交易中获得的收益,这样才能更好激励企业研发绿色技术。二是应完善绿色技术激励及监督考核等各项制度,让一些有绿色技术创新能力和意愿的企业,在金融、财政、土地等方面享受到更多优惠政策,尤其是通过这些制度及优惠政策激励企业在节能减排、清洁生产等领域布局做具有国际先进水平的技术研发,进而产生高质量的绿色技术。

## 参考文献

- [1] E. Padilla, J. A. Duro. Explanatory Factors of CO<sub>2</sub> Per Capita Emission Inequality in the European Union. *Energy Policy*, 2013, 62.
- [2] 周杰琦,汪同三.地区经济增长与碳强度差异的收敛性及其机理:基于中国省际面板数据的实证分析. *社会科学研究*, 2014, (5).
- [3] 焦高乐,严明义.中国城镇化进程对碳强度的影响研究——基于脱钩指数与关联规则分析. *当代经济科学*, 2017, (4).

- [4] W. Fan, L. Li, F. Wang, D. Li. Driving Factors of CO<sub>2</sub> Emission Inequality in China: The Role of Government Expenditure. *China Economic Review*, 2020, 64.
- [5] M. Wang, C. Feng. Tracking the Inequalities of Global Per Capita Carbon Emissions from Perspectives of Technological and Economic Gaps. *Journal of Environmental Management*, 2022, 315.
- [6] J. B. Ang. CO<sub>2</sub> Emissions, Research and Technology Transfer in China. *Ecological Economics*, 2009, 68(10).
- [7] 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. *经济研究*, 2010, (2).
- [8] 龚利, 屠红洲, 龚存. 基于STIRPAT模型的能源消费碳排放的影响因素研究——以长三角地区为例. *工业技术经济*, 2018, 37(8).
- [9] 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. *经济研究*, 2019, (11).
- [10] 李涛, 傅强. 中国省际碳排放效率研究. *统计研究*, 2011, (7).
- [11] 孙焱林, 李华磊. 中国消减碳强度的路径选择: 国际比较的视角. *经济学家*, 2015, (2).
- [12] K. Du, P. Li, Z. Yan. Do Green Technology Innovations Contribute to Carbon Dioxide Emission Reduction? Empirical Evidence from Patent Data. *Technological Forecasting and Social Change*, 2019, 146.
- [13] K. Du, J. Li. Towards a Green World: How Do Green Technology Innovations Affect Total-factor Carbon Productivity. *Energy Policy*, 2019, 131.
- [14] 张伟, 朱启贵, 李汉文. 能源使用、碳排放与我国全要素碳减排效率. *经济研究*, 2013, (10).
- [15] 吴英姿, 闻岳春. 绿色生产率及其对工业低碳发展的影响研究. *管理科学*, 2013, (1).
- [16] T. Dietz, E. A. Rosa. Effects of Population and Affluence on CO<sub>2</sub> Emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1997, 94(1).
- [17] N. Birdsall. Another Look at Population and Global Warming: Population, Health and Nutrition Policy Research. *World Bank Policy Research Working Paper*, 1992, (1020).
- [18] A. Shi. The Impact of Population Pressure on Global Carbon Dioxide Emissions, 1975-1996: Evidence From Pooled Cross-country Data. *Ecological Economics*, 2003, 44(1).
- [19] 林伯强, 孙传旺. 如何在保障中国经济增长前提下完成碳减排目标. *中国社会科学*, 2011, (1).
- [20] L. B. S. Schipper. Linking Lifestyle and Energy Use: A Matter of Time? *Annual Review of Energy*, 1989, 14(1).
- [21] S. Bin, H. Dowlatabadi. Consumer Lifestyle Approach to US Energy Use and the Related CO<sub>2</sub> Emissions. *Energy Policy*, 2005, 33(2).
- [22] R. Duarte, A. Mainar, J. Sánchez-Chóliz. The Role of Consumption Patterns, Demand and Technological Factors on the Recent Evolution of CO<sub>2</sub> Emissions in a Group of Advanced Economies. *Ecological Economics*, 2013, 96.
- [23] G. M. Grossman, A. B. Krueger. Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement. *NBER Working Paper*, 1991, No.3914.
- [24] G. M. Grossman, A. B. Krueger. Economic Growth and the Environment. *The Quarterly Journal of Economics*, 1995, 110(2).
- [25] 鲁万波, 仇婷婷, 杜磊. 中国不同经济增长阶段碳排放影响因素研究. *经济研究*, 2013, (4).
- [26] 张友国. 经济发展方式变化对中国碳排放强度的影响. *经济研究*, 2010, (4).
- [27] 陈诗一. 能源消耗、二氧化碳排放与中国工业的可持续发展. *经济研究*, 2009, (4).
- [28] M. T. Heil, Q. T. Wodon. Future Inequality in CO<sub>2</sub> Emissions and the Impact of Abatement Proposals. *Environmental and Resource Economics*, 2000, 17.
- [29] K. Tone. A Slacks-based Measure of Efficiency in Data Envelopment Analysis. *European Journal of Operational Research*, 2001, 130(3).
- [30] H. Fukuyama, W. L. Weber. A Directional Slacks-based Measure of Technical Inefficiency. *Socio-economic Planning Sciences*, 2009, 43(4).
- [31] D. W. Caves, L. R. Christensen, W. E. Diewert. The Economic Theory of Index Numbers and the Measurement of Input, Output, and Productivity. *Econometrica*, 1982, 50(6).
- [32] R. Färe, S. Grosskopf, M. Norris, etc. Productivity Growth, Technical Progress, and Efficiency Change in Industrialized Countries. *The American Economic Review*, 1994, 84(1).

- [33] Y. H. Chung, R. Färe, S. Grosskopf. Productivity and Undesirable Outputs: A Directional Distance Function Approach. *Journal of Environmental Management*, 1997, 51(3).
- [34] R. G. Chambers, R. Färe, S. Grosskopf. Productivity Growth in APEC Countries. *Pacific Economic Review*, 1996, 1(3).
- [35] 张军, 吴桂英, 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算: 1952-2000. *经济研究*, 2004, (10).
- [36] 余泳泽, 刘大勇, 龚宇. 过犹不及事缓则圆: 地方经济增长目标约束与全要素生产率. *管理世界*, 2019, (7).
- [37] 单豪杰. 中国资本存量K的再估算: 1952-2006年. *数量经济技术经济研究*, 2008, (10).
- [38] 习近平. 正确认识和把握我国发展重大理论和实践问题. *求是*, 2022, (4).

## China's Urban Carbon Emission Gap and Its Technical Causes

Zhang Caiyun (Chinese Academy of Social Sciences)

Liu Naiyu (University of Chinese Academy of Social Sciences)

**Abstract** China's pursuit of "dual carbon" goals through the "dual control" of both the amount and intensity of carbon emissions necessitates a keen focus on the pivotal role of technology. With China's burgeoning innovation capacity, a steady stream of new technologies and equipment continues to emerge. As this unfolds, the significance and centrality of technology in the carbon emissions control process are increasingly underscored. However, a notable challenge arises from the substantial gap between inter-city carbon emissions' total volume and intensity within China, which manifests as a significant disparity in total emissions and a widening gap in intensity, profoundly impacting the overall pace of advancing carbon emissions control. This phenomenon is intricately linked to the heterogeneity of inter-city technological progress. Weak heterogeneity characterizes China's inter-city production-oriented technical progress while green technical progress exhibits strong heterogeneity. Consequently, the carbon emission gap narrows due to the former and widens due to the latter. The efficacy of technology in emission reduction correlates closely with the stage of economic development. Notably, in advanced economic stages, the explanatory power of technological progress heterogeneity in the carbon emission gap is particularly pronounced. This is primarily due to the weak heterogeneity of pure production technology and the overwhelming strength of pure green technology heterogeneity. To effectively outline a national-level "dual control" strategy for carbon emissions and facilitate the realization of the "dual carbon" goals, it is imperative to strategically harness different types of technological progress tailored to the stage of economic development and specific regional contexts.

**Key words** "dual control" of carbon emissions; carbon emission gap; heterogeneity of technological progress; production-oriented technical progress

- 
- 作者简介 张彩云, 中国社会科学院经济研究所副研究员, 北京 100836;  
刘乃毓(通讯作者), 中国社会科学院大学经济学院博士研究生, 北京 102488。
- 责任编辑 何坤翁