

碳中和背景下中国城市绿色发展效率研究

何宇 田杰鑫 陈珍珍¹

(三峡大学 经济与管理学院, 湖北 宜昌 443002)

【摘要】: 创新性地使用碳中和量作为非期望产出, 利用非径向非角度 SBM 模型与 Global Malmquist-Luenberger 指数测算绿色发展效率。基于 2004—2017 年 276 个地级市面板数据研究发现: 传统 GTFP 核算框架对城市总额碳排放量造成了高估, 忽略了城市通过植物碳汇的间接减排方式实现主动环境治理。无论是东中西部地区分组还是五大城市群分组, 城市绿色发展存在显著的区域异质性。西部地区城市生态环境综合治理与区域经济绿色转型对于西部城市绿色发展效率提升起到了很大的促进作用。绿色技术进步是提升中国城市绿色全要素生产率的主要因素, 并且在考虑碳固量水平后, 绿色技术进步对中国城市绿色发展的促进效应更加显著。

【关键词】: 碳达峰 碳中和 绿色全要素生产率 绿色发展

【中图分类号】: F290; F062.2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2022)07-092-07

0 引言

2020 年 9 月, 国家主席习近平在第 75 届联合国大会一般性辩论中向全世界庄严宣布, 中国力争 2030 年前二氧化碳排放达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和目标。这意味着在未来中长期范围内碳达峰和碳中和将是中国经济社会发展过程中的重点内容。碳达峰和碳中和目标, 不仅体现了中国作为世界第二经济体的责任和担当, 也对未来中国城市推进低碳、零碳高质量发展指出了政策方向。根据碳中和定义, 推进社会经济实现碳中和的零碳目标并不能单纯依靠碳减排, 必须在加强碳减排的同时, 推进碳汇和碳捕集进而实现净零碳排放^[1]。在此背景下, 建立城市碳达峰和碳中和目标的绿色发展效率测度与评价体系, 对于优化碳中和背景下绿色全要素生产率(green total factor productivity, 以下简称 GTFP)核算框架具有理论贡献, 对中国推进碳达峰和碳中和的实践具有重要的现实政策参考意义。

产出效率核算的基本理论分析框架起源于 Chung 等^[2]和 Färe 等^[3]的开创性研究。在传统基于索罗余值的全要素生产率核算(以下简称 TFP)模型中, 投入要素包括资本投入和劳动投入, 产出则由经济实际总产出表示^[4]。该 TFP 核算模型测度了资本和劳动组合转化为经济实际总产出的效率。Chung 等^[2]认为, 社会经济生产活动的产出结果往往与社会预期存在偏差。在产生期望产出的同时, 也会产生非期望产出(如废气、废水等), 单纯使用期望产出并不能很好地衡量企业在生产过程中由于非期望产出外部性造成的总体社会生产效率损失。随着中国经济发展过程中的环境问题凸显, 基于非期望产出的绿色发展效率核算体系开始广泛应用到中国 GTFP 的核算研究中^[5, 6, 7, 8]。现有文献关于 GTFP 的研究已经比较丰富, 相关领域的学者们也进行了比较深入的研究, 但传统 GTFP 指数核算框架中非期望产出仅包含二氧化碳或二氧化硫的排放量。关注一个地区的被动式环境治理效率, 忽略了该地区主动参与碳汇和碳捕集的行为对环境治理效率的影响。因此, 传统 GTFP 核算方法不适用于碳达峰和碳中和背景下的绿色发

¹作者简介: 何宇, 博士, 讲师, 研究方向为环境经济学。陈珍珍, 博士, 讲师, 研究方向为创新管理与政策。E-mail: gvc_research@163.com

基金项目: 能源基金会项目“碳中和背景下低碳消费模式和低碳社会建设研究”(G-2106-33000); 国家社会科学基金应急管理体系建设研究专项项目“我国生物安全治理体系构建中部门权责划分及协调机制建设研究”(20VYJ053); 三峡大学青年科学基金项目“面向‘双碳战略’的科研方向建议—碳经济”(2021KJ003)

展效率测度和评价，并且预计会对区域绿色发展效率造成低估。

基于以上考虑，本文的主要边际贡献如下：第一，考虑到碳达峰和碳中和背景下城市需要同时从碳减排和碳吸收两个方面来降低净碳排放量，因此，提出改进的非期望产出概念，使用净碳排放量作为改进后非期望产出替代传统非期望产出，优化了现有 GTFP 核算框架。第二，使用改进后 GTFP 核算框架，对中国地级市层面的绿色全要素生产率指数进行核算和评价，深入分析碳达峰和碳中和背景下中国地级市绿色发展效率的时空演变特征和影响因素。

1 理论模型与测算方法

1.1 产出效率核算基准模型

根据 Tone^[9]的包含非期望产出的基于松弛的测度方法(slack based measure, 简称 SBM)，假定经济系统中有 i 个决策单元，每个决策单元包括投入、期望产出和非期望产出。企业投入 N 种要素进行生产，投入向量为 X ， $X=\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ ，企业的生产结果会产生 M 种期望产出(desirable outputs)，期望产出向量为 Y ， $Y=\{y_1, y_2, \dots, y_M\}$ ，与此同时生产结果还会产生 K 种非期望产出(undesirable outputs)，非期望产出向量为 B ， $B=\{b_1, b_2, \dots, b_K\}$ ，非期望产出概念的提出，在理论上优化了社会环保意识提升背景下的投入产出分析模型，在实践应用上也对企业和区域绿色发展提供了更好的测度方法^[10]。使用 $P(x)$ 表示环境技术函数的生产可能性集合：

$$P(x)=\{(y,b)|x\rightarrow(y,b)\}, x\in R_N^+ \quad (1)$$

为了保证生产可能性集的封闭性和有界性，要求投入要素和期望产出具有自由可处置性质。因此，这里对生产可能性集合施加两个公理性约束条件：第一，如果有 $(y,b)\in P(x)$ 且 $b=0$ ，那么可以得到 $y=0$ ，这表示如果没有非期望产出，就没有期望产出，两者伴随产生。第二，如果 $(y,b)\in P(x)$ 且 $0\leq\theta\leq1$ ，那么可以得到 $(y\theta, b\theta)\in P(x)$ ，这表示减少非期望产出是具有成本的，将直接引起期望产出的减少。定义效率指数 eff ，DEA 模型最优解 Φ ，初始投入和产出分别为 x_0 和 y_0 ，投入和产出的松弛变量分别为 S^- 和 S^+ 。效率指数 eff 的计算等价于求解以下线性规划问题：

$$\begin{aligned} eff &= \max \Phi \\ \text{s.t.} &\begin{cases} \sum x\lambda + S^- = x_0 \\ \sum y\lambda + S^+ = y_0 \\ \sum \lambda = 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

式中： λ 为权重向量。

1.2 碳中和背景下改进的产出效率核算

在传统 GTFP 核算框架下，学者们普遍使用二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物、污水等污染性排放作为非期望产出的衡量指标。如余奕杉和卫平^[11]利用包含非期望产出的 SBM 模型，使用劳动、资本和能源作为投入要素，使用地区产出水平作为期望产出，使用二氧化碳的总排放作为非期望产出。自党的十八大以来，中国经济社会发展经历了全面绿色转型，环境治理体系和生态文明建设取得了诸多成效。中国在推进全面节能减排、降低温室气体排放的同时，也在通过植树造林、生态修复等手段推进自然碳汇和碳捕集。基于 Tone^[9]的产出效率核算理论框架并不能很好地体现中国大力推进生态文明建设过程中，经济高质量发展的生态保护和经济发展的双重内涵^[2,3]。因此有必要使用改进的非期望产出(improved undesirable output)概念，把净碳排放量作为改进

后非期望产出替代传统非期望产出，得到改进后的绿色全要素生产率(以下简称 IGTFP)指数。

记区域 i 的碳排放量为 b_i ，区域 i 的碳吸收量(碳汇量和碳捕集量)为 h_i ，则区域 i 改进后的非期望产出(即净碳排放)为 $\tilde{b}_i = b_i - h_i$ 。当 $\tilde{b}_i = 0$ 时表示区域 i 实现碳中和，为了保证生产可能性边界的封闭性和有界性，并满足公理性约束条件，这里假定 $\tilde{b}_i \geq 0$ 。

在碳中和背景下，生产可能性集合由公式(3)定义：

$$p(x) = \left\{ (y, b, h) \mid x \rightarrow (y, b, h), x \in R_N^+ \right\} \quad (3)$$

根据 $\tilde{b}_i = b_i - h_i$ ，利用数据包络分析方法(DEA)，满足上述两条公理性约束条件的生产可能性集可以表示为：

$$p(x) = \left\{ (x, y, \tilde{b}_i) \mid x \geq X\theta, y \geq Y\theta, \tilde{b}_i \geq \tilde{B}_i\theta, \theta \geq 0 \right\} \quad (4)$$

包含非期望产出的 SBM 模型改进了 DEA 测算过程中来自径向和角度的偏差，根据生产可能性集合，可以通过以下公式计算包含非期望产出的 SBM 模型：

$$\rho = \min \frac{1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N \frac{S^-}{x_{i0}}}{1 + \frac{1}{S_1 + S_2} \left(\sum_{m=1}^{S_1} \frac{S_m^g}{y_{m0}} + \sum_{k=1}^{S_2} \frac{S_k^b}{b_{k0}} \right)} \quad (5)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum x\theta + S^- = x_0 \\ \sum y\theta - S^g = y_0 \\ \sum b\theta + S^b = b_0 \end{cases}$$

式中： S^- 、 S^g 和 S^b 分别表示投入要素、期望产出和非期望产出的松弛量，常数 θ 表示决策单元的权重并且有 $S^- \geq 0$ ， $S^g \geq 0$ ， $S^b \geq 0$ 和 $\theta \geq 0$ 成立； x_0 、 y_0 和 b_0 分别表示被评价单元投入产出的投影值， $\sum x\theta$ 、 $\sum y\theta$ 和 $\sum b\theta$ 分别表示被评价单元加权后的投入产出之和。

1.3 GML 生产率指数

由于 Chung 等^[2]构建的 Malmquist Luenberger 指数具有非循环传递性、线性规划可能无解等缺点，Oh^[12]将全部当期基准包络进来，测算 t 期和 $t+1$ 期之间的 GTFP 增长(下降)，得到具有单一生产前沿、全局可比的 Global Malmquist Luenberger(简称 GML)指数。

$$GML^{t,t+1} = \frac{1 + D_G(x^t, y^t, \tilde{b}^t)}{1 + D_G(x^{t+1}, y^{t+1}, \tilde{b}^{t+1})} \quad (6)$$

式中： $D_G(x^t, y^t, \tilde{b}^t)$ 与 $D_G(x^{t+1}, y^{t+1}, \tilde{b}^{t+1})$ 分别表示 t 期和 t+1 期基于产出的距离函数。

进一步地，可以将 GML 指数按照技术进步 (TECH) 和技术效率 (EFFCH) 进行分解：

$$TECH = \frac{1 + D^t(x^t, y^t, \tilde{b}^t)}{1 + D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, \tilde{b}^{t+1})} \quad (7)$$

$$EFFCH = \frac{1 + D_G(x^t, y^t, \tilde{b}^t)}{1 + D_G(x^{t+1}, y^{t+1}, \tilde{b}^{t+1})} \cdot \frac{1 + D^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, \tilde{b}^{t+1})}{1 + D^t(x^t, y^t, \tilde{b}^t)} \quad (8)$$

2 变量设定与数据来源

2.1 变量设定

根据碳中和背景下改进的产出效率核算框架，在对碳中和背景下中国城市绿色发展效率的实际测算过程中，需要使用到劳动投入、资本存量、能源投入、实际 GDP、碳排放量和碳吸收量。以上相关变量的设定与数据处理过程如下：

劳动投入。劳动投入指企业生产活动中所雇佣的劳动人员，使用中国各个地级市单位从业人员和私营与个体从业人员的总和作为劳动投入。

资本投入。在企业生产活动中，实际使用的资本为存量资本，因此这里使用资本存量作为资本投入。资本存量的核算方法借鉴单豪杰^[13]的永续盘存法进行计算，基期资本存量参照 Hall & Jones^[14]的估算方法，即 $K_0 = I_0 / (g + \sigma)$ ，其中， I_0 表示基期的固定资产投资， g 表示以基期为不变价格的固定资产投资平均增长率， σ 表示固定资产投资的平均折旧率，这里选择 10.96%。

期望产出。期望产出由实际 GDP 定义。根据各省市 GDP 平减指数将各个地级市的名义 GDP 调整为以 2004 年为基期的不变价格，然后对各地级市的名义 GDP 进行平减得到实际 GDP。

改进后非期望产出。区别于现有文献仅使用二氧化碳排放或二氧化硫排放作为非期望产出的代理变量，这里考虑碳达峰和碳中和背景下，减排与捕碳两措并举情形下的净碳排放问题。因此使用净碳排放（即碳排放减去碳吸收）作为改进后非期望产出的代理变量。

碳达峰和碳中和背景下中国城市绿色全要素生产率核算指标的相关变量设定和变量的描述性统计结果如表 1 所示。

表 1 变量设定与变量的描述性统计结果

一级指标	二级指标	指标含义	样本量	均值	标准差
投入	劳动	从业人员数(万人)	5138	86.85	126.72
	资本	资本存量(亿元)	5154	3240	6560

	能源	能源消耗总量(百万焦耳)	3548	1033.52	1960.17
期望产出	实际 GDP	实际 GDP(亿元)	5158	970.07	1620
改进后非期望产出	碳排放	二氧化碳总排放量(百万吨)	5238	18.90	20.10
	碳吸收	二氧化碳总吸收量(百万吨)	5238	0.28	0.33

2.2 数据来源

从中国地级市层面研究碳中和背景下中国城市绿色发展效率测度与评价议题。由于地级市层面存在一定的数据缺失问题，因此在时间范围选取上，选择 2004—2017 年作为研究的样本区间，在空间范围的选取上，目前还缺乏西藏及港澳台地区的相关数据。此外，在 2004—2017 年期间，巢湖市、三沙市、海东市存在城市撤销、城市新增和地区改地级市的变更，因此，这些地级市均不在样本选择范围内，最终得到 276 个来自全国 30 个省份的地级市样本。

关于地级市的劳动投入、固定资产投资、名义 GDP 等数据来源于相关年份的《中国城市统计年鉴》，对于部分数据缺失的城市，利用对应城市的地方统计年鉴进行插值补齐。关于地级市层面的碳排放和碳吸收数据，根据中国排放核算数据库(China Emission Accounts and Datasets)提供的中国县级别的二氧化碳排放量和植被二氧化碳吸收量数据，按照各个县所对应的地级市加总，得到地级市级别的碳排放和碳吸收数据。

3 测算结果与数据分析

3.1 碳中和背景下 IGTFP 与传统 GTFP 对比

在碳中和的零碳目标下，城市绿色发展效率不仅包括碳减排效率，还应包括碳吸收效率。因此，与传统 GTFP 核算框架相比，基于净碳排放概念的 IGTFP 核算框架能够更加真实地反映城市在碳中和背景下的绿色发展效率。鉴于此，接下来同时使用 IGTFP 核算框架和 GTFP 核算框架对城市绿色发展效率进行测算，测算结果如表 2 所示。限于篇幅，表 2 仅显示了 26 个省会城市和 4 个直辖市的绿色发展效率测算结果。研究表明，在 IGTFP 的核算框架下，城市的绿色发展效率均大于基于 GTFP 核算框架下的城市绿色发展效率。对此的解释是，在传统 GTFP 核算框架下，使用碳排放计算口径对城市净碳排放量造成了高估，忽略了城市推进碳减排这类被动环境治理的同时，也在通过植物碳汇的间接减排方式实现主动环境治理。这也意味着，传统 GTFP 核算框架本质上是被动式环境治理的绿色发展效率评价，缺乏对城市主动式环境治理行为的考察，最终造成对城市绿色发展效率的低估。

表 2 中国省会城市(直辖市)IGTFP 与 GTFP 对比

城市	IGTFP	GTFP	城市	IGTFP	GTFP
北京	1.064	1.008	郑州	0.977	0.883
天津	1.024	0.936	武汉	1.011	0.935
石家庄	1.052	0.912	长沙	0.986	0.897
太原	1.013	0.922	广州	1.018	0.940
呼和浩特	1.096	0.939	南宁	0.992	0.895

沈阳	0.986	0.905	海口	0.988	0.944
长春	0.974	0.872	重庆	0.996	0.903
哈尔滨	1.030	0.939	成都	0.984	0.878
上海	1.044	0.967	贵阳	1.060	0.919
南京	1.027	0.935	昆明	0.945	0.870
杭州	0.998	0.911	西安	1.011	0.929
合肥	0.968	0.857	兰州	1.023	0.906
福州	0.861	0.809	西宁	0.994	0.891
南昌	0.970	0.888	银川	0.976	0.904
济南	0.986	0.899	乌鲁木齐	1.010	0.904

3.2 城市异质性分析

各个城市在经济发展、产业政策、气候环境、地理区位等方面存在一定差异^[15, 16, 17, 18]。鉴于此，接下来通过区分城市异质性探索中国城市绿色发展效率的区域特征。首先，将样本城市按照东部地区、中部地区和西部地区进行划分，再根据东部样本、中部样本和西部样本对区域 IGTFP 指数进行测算，得到 2004—2017 年中国东中西部地区的 IGTFP 指数测算结果。然后，为深入研究中国东中西部地区 IGTFP 指数的区域性差异，对 IGTFP 指数按照效率变化指数 (TECCH) 和技术变化指数 (TECH) 进行分解。最终得到碳中和背景下中国东中西部地区 IGTFP 指数对比结果，如表 3 所示。

表 3 碳中和背景下中国东中西部地区 IGTFP 对比

年份	东部地区			中部地区			西部地区		
	IGTFP	TECH	EFFCH	IGTFP	TECH	EFFCH	IGTFP	TECH	EFFCH
2004	1.008	1.049	0.965	0.999	1.018	0.985	1.011	1.042	0.983
2005	1.009	0.957	1.066	1.027	0.966	1.080	1.026	0.986	1.047
2006	1.043	1.074	0.992	1.006	1.087	0.947	1.044	1.085	0.982
2007	1.019	0.981	1.040	1.027	0.981	1.047	1.003	0.966	1.041
2008	1.045	0.990	1.057	1.013	0.971	1.044	1.038	0.989	1.049
2009	1.043	1.024	1.017	1.103	1.045	1.059	1.015	0.999	1.018
2010	1.016	1.017	1.000	0.978	0.978	1.003	1.045	1.031	1.014
2011	0.992	0.999	0.994	0.999	0.999	1.003	1.032	1.028	1.005

2012	1.007	1.011	0.996	1.007	0.995	1.014	1.015	1.014	1.001
2013	0.968	0.958	1.012	0.997	0.987	1.013	0.980	0.961	1.020
2014	1.000	1.010	0.991	0.996	1.028	0.970	1.046	1.068	0.979
2015	1.005	1.027	0.985	0.990	1.007	0.992	0.999	1.036	0.970
2016	0.981	0.962	1.021	1.000	0.985	1.020	1.014	1.008	1.009
2017	0.971	0.964	1.007	0.920	0.837	1.099	0.969	0.921	1.052
均值	0.986	1.002	0.988	0.983	0.992	0.994	1.017	1.010	1.012

表 3 结果表明，中国东中西部地区 IGTFP 指数出现组间分化。其中，东部地区平均 IGTFP 指数为 0.986，中部地区平均 IGTFP 指数为 0.983，西部地区平均 IGTFP 指数为 1.017。数值结果表现为西部地区>东部地区>中部地区，即在 2004—2017 年期间，西部地区在生态环境保护和修复方面的成效大于东部地区 and 中部地区，中国整体 IGTFP 指数的下降在很大程度上是由东部地区 and 中部地区的绿色生态治理相对不足造成的。将 IGTFP 指数按照 TECH 指数和 EFFCH 指数进行分解，进一步研究发现东部地区 and 中部地区的绿色技术进步和绿色效率变化均低于西部地区。这表明虽然东部和中部城市在综合技术水平和经济发展水平方面领先于西部城市，但在绿色发展效率方面与西部城市还存在较大差距，同时，也意味着东部和中部城市与西部城市之间存在一定的碳互补，这也为区域互补性碳中和提供了政策空间。

在城市的发展过程中，由于产业关联、地理区位和要素分工等综合因素导致在一定区域范围内，以区域网络化组织为纽带，若干个密集分布的不同等级的城市及其腹地通过空间相互作用组成城市—区域系统^[18]。因此，城市群作为区域经济发展过程中促进要素分工高效配置的区域复杂系统，其绿色发展效率既存在区域共性，也存在区域间的异质性^[15]。鉴于此，接下来选取全国主要五个区域性城市群（京津冀、长三角、珠三角、长江中游和成渝城市群），研究碳中和背景下中国主要城市群 IGTFP 指数的异质性，其数据结果如表 4 所示。

表 4 碳中和背景下中国城市群 IGTFP 对比

年份	京津冀	长三角	珠三角	长江中游	成渝
2004	0.934	0.999	1.018	0.994	1.052
2005	1.116	1.018	1.018	0.979	0.956
2006	1.096	1.015	1.007	0.991	1.018
2007	1.040	0.987	1.004	1.002	1.000
2008	1.058	0.980	1.014	1.063	0.985
2009	1.033	1.091	1.043	1.169	1.019
2010	1.050	0.972	1.033	0.982	1.036
2011	0.999	1.014	1.045	0.974	0.994

2012	0.972	1.012	1.003	1.012	0.988
2013	1.057	0.918	0.953	0.971	0.957
2014	1.036	1.011	1.002	0.985	1.031
2015	1.056	0.987	0.988	1.005	0.974
2016	1.028	0.972	0.857	0.987	0.977
2017	0.945	0.972	0.948	0.907	0.975
均值	1.030	0.996	0.995	1.002	0.997

表 4 中显示了碳中和背景下中国五大城市群 IGTFP 指数核算结果。关于各个城市群 IGTFP 指数的核算过程如下：首先根据城市群分组划定样本城市，然后根据分组样本进行 IGTFP 核算，最后根据分组样本计算区域 IGTFP 指数的几何均值。数据结果表明：在 2004—2017 年期间，京津冀城市群 IGTFP 指数平均为 1.030，长三角城市群 IGTFP 指数平均为 0.996，珠三角城市群 IGTFP 指数平均为 0.995，长江中游城市群 IGTFP 指数平均为 1.002，成渝城市群 IGTFP 指数平均为 0.997，五大城市群 IGTFP 指数均值排名为京津冀>长江中游>成渝>长三角>珠三角。在此期间，京津冀城市群和长江中游城市群的绿色发展效率得到了提升，但从整体城市群层面来看，中国 IGTFP 指数依然存在较大的区域性结构差异。

3.3 碳中和背景下城市 IGTFP 影响因素分析

接下来将对碳中和背景下城市 IGTFP 的影响因素展开分析。从理论机制上而言，技术创新、产业结构和环境规制强度等因素均会对 IGTFP 造成影响，基于此构建如下计量模型：

$$GTFP_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot innovation_{it} + \alpha_2 \cdot X_{it} + \mu_i + \mu_t + \varepsilon_{it} \quad (9)$$

$$IGTFP_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot innovation_{it} + \alpha_2 \cdot X_{it} + \mu_i + \mu_t + \varepsilon_{it} \quad (10)$$

式中： $GTFP_{it}$ 和 $IGTFP_{it}$ 分别表示不考虑碳固量的绿色全要素生产率指数和考虑碳固量的绿色全要素生产率指数； $innovation_{it}$ 表示技术创新能力； X_{it} 表示控制变量，包括产业结构、健康医疗水平、区域科技政策等因素； μ_i 和 μ_t 分别表示城市和时间固定效应； ε_{it} 为残差项。数据主要来源于《中国城市统计年鉴》，绿色专利数据来自中国研究数据服务平台(CNRDS)数据库，国家自主创新示范区等区域科技政策依据政府文件手工整理，具体包括绿色发明专利(千件)、绿色实用新型专利(千件)、是否被设立为综合性国家科学中心、绿化覆盖率(在城市建成区的绿化覆盖面积占建成区的比值)、第三产业就业人员占比、是否为国家自主创新示范区和城市医院卫生院数(加 1 后取自然对数)。

表 5 显示了中国城市绿色全要素生产率影响因素的回归结果。结果表明，考虑城市固定效应、年份固定效应、省份一年份固定效应和城市一年份固定效应，绿色发明数量对中国城市 GTFP 具有显著的正向影响，并且在考虑碳固量后，绿色发明专利的回归系数更大。可能原因在于，绿色发明专利提升了区域技术前沿性，也促进了区域绿色技术对非绿色技术的替代，同时从技术水平和绿色发展效率两个方面提升了城市 IGTFP 指数。此外，综合性国家科学中心建设、绿化覆盖率、第三产业从业人员比重、国家自主创新示范区建设、医院卫生院数等因素对城市 IGTFP 也具有正向影响，而绿色实用新型专利数则表现出显著的负向影响，其原因可能是绿色实用新型专利的创新质量偏低，并且由于“泡沫专利”的泛滥导致对实际绿色创新资源配置的扭曲^[19]。

表 5 城市绿色全要素生产率的影响因素

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	GTFP	GTFP	GTFP	IGTFP	IGTFP	IGTFP
绿色发明专利	0.1487** (0.0637)	0.1484** (0.0637)	0.1450** (0.0612)	0.1681*** (0.0595)	0.1687*** (0.0595)	0.1581*** (0.0566)
绿色实用新型	-0.1386* (0.0739)	-0.1398* (0.0734)	-0.1391* (0.0717)	-0.1338* (0.0688)	-0.1361** (0.0685)	-0.1274* (0.0659)
综合性国家科学中心	0.2303* (0.1359)	0.2418* (0.1422)	0.2129 (0.1312)	0.2570* (0.1388)	0.2680* (0.1450)	0.2447* (0.1359)
绿化覆盖率	0.0005** (0.0002)	0.0005** (0.0002)	0.0006** (0.0003)	0.0005** (0.0002)	0.0005** (0.0002)	0.0006** (0.0003)
第三产业从业人员比重	0.2887*** (0.0779)	0.2889*** (0.0781)	0.2758*** (0.0801)	0.2728*** (0.0751)	0.2808*** (0.0762)	0.2582*** (0.0781)
国家自主创新示范区	0.0778** (0.0365)	0.0776** (0.0370)	0.0796** (0.0358)	0.0968** (0.0378)	0.0957** (0.0383)	0.0996*** (0.0369)
医院卫生院数	0.0264** (0.0124)	0.0277** (0.0128)	0.0245* (0.0126)	0.0292** (0.0128)	0.0307** (0.0130)	0.0275** (0.0124)
城市固定效应	Y	Y	Y	Y	Y	Y
年份固定效应	Y	Y	Y	Y	Y	Y
省份固定效应	N	Y	Y	N	Y	Y
省份一年份固定效应	N	Y	N	N	Y	N
城市一年份固定效应	N	N	Y	N	N	Y
Observations	2540	2540	2540	2545	2545	2545
R ²	0.4712	0.9801	0.9801	0.5012	0.9789	0.9790

注：上角标***、**、*分别表示 $P < 0.01$ 、 $P < 0.05$ 、 $P < 0.1$ ，括号中所有标准误均为聚类到城市层面的稳健标准误。后表同。

利用 GML 指数计算的绿色全要素生产率包含了 TECH 和 EFFCH，接下来利用 TECH 和 EFFCH 计算中国城市绿色全要素生产率的影响路径，回归结果如表 6 所示。列(1)和(2)分别表示不考虑碳固量情形下的绿色技术进步和绿色技术效率变化，列(3)和(4)分别表示考虑碳固量情形下的绿色技术进步和绿色技术效率变化，列(5)表示以碳固量作为被解释变量的回归结果。结果表明，不论是考虑碳固量和不考虑碳固量情形下，使用 TECH 作为被解释变量的回归系数均大于使用 EFFCH 作为被解释变量的回归系数，表明相关变量提升中国城市绿色全要素生产率指数的主要途径是通过绿色技术进步来实现的。

在表 5 和表 6 的回归结果中，均使用城市各年的相对绿色全要素生产率指数作为被解释变量。聂长飞等^[20]认为 GML 指数计算的是全要素生产率每年增长的相对大小，而非绝对大小，因此可以通过设定基期指数值为 1，并对 GML 指数进行累乘得到城市

绿色全要素生产率的累积值。鉴于此，接下来使用 GML 指数的累积值进行稳健性检验，结果如表 7 所示。结果表明：与表 5 的回归结果相比，在使用累积绿色全要素生产率指数替代相对绿色全要素生产率指数后，绿色发明专利、综合性国家科学中心建设、绿化覆盖率、第三产业从业人员比重、国家自主创新示范区建设和医院卫生院数等指标的回归系数依然具有同等的解释力度，这意味着关于绿色全要素生产率影响因素的结论具有稳健性。

4 研究结论与政策建议

4.1 研究结论

2021 年中央政府工作报告将碳达峰和碳中和纳入生态文明建设整体布局，意味着在未来中长期范围内碳达峰和碳中和将是中国经济社会发展过程中的重点内容。这也对中国城市推进绿色高质量发展提出了更高要求。如何科学测度和评价碳中和背景下城市绿色发展效率对于正确推进碳达峰和碳中和政策具有重要的政策参考意义。在此背景下，本文利用 2004—2017 年中国 276 个城市面板数据，基于传统产出效率基准模型，创新性地提出主动式环境治理效率评价体系，构建碳中和背景下的改进后产出效率核算框架。

表 6 绿色全要素生产率的影响路径：基于 TECH 和 EFFCH 分解

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	TECHA	EFFCHA	TECHB	EFFCHB	carbon
绿色发明	0.1833** (0.0759)	0.0312 (0.0327)	0.1400* (0.0874)	0.0791** (0.0322)	1.9230* (1.0733)
绿色实用新型	-0.1796** (0.0826)	-0.0651 (0.0408)	-0.0611 (0.1010)	-0.1100*** (0.0377)	-4.2659*** (1.1540)
综合性国家科学中心	0.1666 (0.1758)	0.1071 (0.1037)	0.3581 (0.2209)	0.0192 (0.0246)	0.5011 (1.2595)
绿化覆盖率	0.0007** (0.0003)	0.0002 (0.0001)	0.0009* (0.0005)	0.0002 (0.0001)	0.0178*** (0.0060)
第三产业从业人员比重	0.1812** (0.0841)	0.1527*** (0.0518)	0.1264 (0.0855)	0.1700*** (0.0471)	1.1324 (0.9116)
国家自主创新示范区	0.0754* (0.0453)	0.0292* (0.0153)	0.1077** (0.0478)	0.0393** (0.0185)	-0.0740 (0.4313)
医院卫生数	0.0219* (0.0128)	0.0145 (0.0095)	0.0377*** (0.0137)	0.0043 (0.0069)	-0.2398 (0.1989)
城市固定效应	Y	Y	Y	Y	Y
年份固定效应	Y	Y	Y	Y	Y
省份固定效应	Y	Y	Y	Y	Y
省-年固定效应	N	N	N	N	N
城市-年固定效应	Y	Y	Y	Y	Y
Observations	2545	2540	2545	2545	4423
R ²	0.9768	0.9905	0.9751	0.9899	0.9942

表 7 绿色全要素生产率的影响因素：稳健性检验

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	GTFP	IGTFP	GTFP	IGTFP	GTFP	IGTFP
绿色发明	0.1704** (0.0835)	0.1934*** (0.0724)	0.1720** (0.0817)	0.1903*** (0.0708)	0.1666** (0.0801)	0.1803*** (0.0675)
绿色实用新型	-0.1271 (0.0976)	-0.1411 (0.0861)	-0.1286 (0.0954)	-0.1371 (0.0847)	-0.1256 (0.0953)	-0.1270 (0.0818)
综合性国家科学 中心	0.5624* (0.3248)	0.4228* (0.2463)	0.5774* (0.3331)	0.4334* (0.2532)	0.5499* (0.3183)	0.4293* (0.2505)
绿化覆盖率	0.0007*** (0.0002)	0.0007*** (0.0002)	0.0007*** (0.0002)	0.0007*** (0.0002)	0.0007*** (0.0003)	0.0006** (0.0002)
第三产业从业人 员比重	0.3767*** (0.0883)	0.3235*** (0.0833)	0.3765*** (0.0886)	0.3282*** (0.0848)	0.3681*** (0.0898)	0.3245*** (0.0855)
国家自主创新示 范区	0.0394 (0.0528)	0.0582 (0.0481)	0.0384 (0.0531)	0.0567 (0.0482)	0.0413 (0.0507)	0.0617 (0.0454)
医院卫生院数	0.0250* (0.0148)	0.0148 (0.0163)	0.0253* (0.0150)	0.0152 (0.0168)	0.0240 (0.0150)	0.0164 (0.0149)
城市固定效应	Y	Y	Y	Y	Y	Y
年份固定效应	Y	Y	Y	Y	Y	Y
省份固定效应	N	N	Y	Y	Y	Y
省-年固定效应	N	N	Y	Y	N	N
城市-年固定效 应	N	N	N	N	Y	Y
Observations	2498	2503	2498	2503	2498	2503
R ²	0.4038	0.4674	0.9642	0.9691	0.9643	0.9694

研究结论体现在以下三个方面：

第一，在传统 GTFP 核算框架下，使用碳排放计算口径对城市总额碳排放量造成了高估，忽略了城市在推进碳减排这类被动环境治理的同时，也在通过植物碳汇的间接减排方式实现主动环境治理。传统 GTFP 核算框架缺乏对城市主动式环境治理行为的考察，最终造成对城市绿色发展效率的低估。

第二，无论是东中西部地区还是五大城市群分组，城市绿色发展存在显著的区域异质性，东部和中部城市的 IGTFP 指数低于西部城市的 IGTFP 指数，表明西部地区生态环境综合治理与区域经济绿色转型对于西部城市绿色发展效率提升起到了很大的促

进作用。

第三,绿色技术进步是提升中国城市绿色全要素生产率的主要因素,并且在考虑碳固量水平后,绿色技术进步对中国城市绿色发展的促进效应更加显著。

4.2 政策建议

根据以上研究结果,从以下四个方面提出碳中和背景下推进中国城市绿色高质量发展的政策建议:

第一,建立健全碳排放、碳捕集数据的统计核算体系。未来在中长期范围内,碳达峰和碳中和将是中国产业发展政策关注的重点内容,在对企业实行“碳考核”的过程中,不仅需要关注企业碳减排行为,也需要关注企业碳捕集行为对净碳排放的影响。在健全的碳排放、碳捕集数据的统计核算体系基础上,再进一步对全社会生产活动进行精准化的“碳治理”。

第二,优化城市绿色发展考核的激励与约束机制。从理论上而言,实现碳中和目标不仅需要推进全社会实现温室气体减排,还需要加快建立健全完善的碳汇和碳捕集政策和机制,促进城市从被动式碳治理政策向主动式碳治理政策转变。

第三,统筹促进经济发展、保护生态环境与应对气候变化,提升中国城市的生态韧性、创新韧性和产业韧性。多渠道建立政府、企业和公众广泛参与应对气候变化的协同机制,探索“链长制”治理模式在碳治理方面的应用,从生态链与产业链层面夯实碳中和背景下城市绿色发展新空间。

第四,优化区域经济空间布局,推进中国区域绿色协同发展迈上新台阶。在政策上充分挖掘区域性中心城市的辐射带动潜力,促进绿色资源要素跨区域有序自由流动,加强区域之间的政策互补性和协同性。

参考文献:

- [1]张苗,陈银蓉.经济增长、人口变化与土地利用净碳通量关系研究——中美两国45年历史数据的实证分析[J].生态经济,2020(6):34-38.
- [2]Chung Y H,Färe R,Grosskopf S.Productivity and undesirable outputs:A directional distance function approach [J].Journal of Environmental Management,1997(3):229-240.
- [3]Färe R,Grosskopf S,Pasurka C.Accounting for air pollution emissions in measures of state manufacturing productivity growth[J].Journal of Regional Science 2001,41(3):381-409.
- [4]王永进,刘灿雷.国有企业上游垄断阻碍了中国的经济增长?——基于制造业数据的微观考察[J].管理世界,2016(6):10-21.
- [5]陈诗一.中国的绿色工业革命:基于环境全要素生产率视角的解释(1980—2008)[J].经济研究,2010(11):21-34.
- [6]王兵,刘光天.节能减排与中国绿色经济增长——基于全要素生产率的视角[J].中国工业经济,2015(5):57-69.
- [7]李玲,陶锋.中国制造业最优环境规制强度的选择——基于绿色全要素生产率的视角[J].中国工业经济,2012(5):70-82.

-
- [8]陈闻君,徐阳,张旭东.中国“一带一路”沿线地区绿色发展的空间特征与影响因素研究[J].生态经济,2021(2):41-47.
- [9]Tone K.A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis[J].European Journal of Operational Research,2002,143(1):32-41.
- [10]张建华,何宇,陈珍珍.长江经济带城市协同发展水平测度[J].城市问题,2019(3):60-66.
- [11]余奕杉,卫平.中国城市绿色全要素生产率测度研究[J].生态经济,2021(3):43-52.
- [12]Oh D.A global Malmquist-Luenberger productivity index[J].Journal of Productivity Analysis,2010,34(3):183-197.
- [13]单豪杰.中国资本存量K的再估算:1952—2006年[J].数量经济技术经济研究,2008(10):18-32.
- [14]Hall R E,Jones C I.Why do some countries produce so much more output per worker than others?[J].The Quarterly Journal of Economics,1999,114(1):83-116.
- [15]余奕杉,高兴民,卫平.生产性服务业集聚对城市群经济高质量发展的影响——以长江经济带三大城市群为例[J].城市问题,2020(7):56-65.
- [16]张豪,何宇,张建华.绿色增长效率及其空间溢出——基于中国主要城市的经验分析[J].贵州财经大学学报,2016(6):82-90.
- [17]张治栋,王亭亭.产业集群、城市群及其互动对区域经济增长的影响——以长江经济带城市群为例[J].城市问题,2019(1):55-62.
- [18]王文彬,许冉.城市群视角下黄河流域生态效率时空格局演化及溢出效应研究[J].生态经济,2021(5):27-33.
- [19]徐长生,陈珍珍,何宇.专利能否提升企业TFP:基于A股上市公司研究[J].科研管理,2020(2):123-132.
- [20]聂长飞,卢建新,冯苑,等.创新型城市建设对绿色全要素生产率的影响[J].中国人口·资源与环境,2021(3):117-127.