

资源型城市碳排放效率评价及其政策启示

张明斗, 席胜杰

(东北财经大学经济学院, 大连 116025)

摘要: 基于资源型城市面临经济转型与节能减排的双重压力, 本文采用三阶段超效率SBM模型, 实证测度了2004—2019年中国114个资源型城市碳排放效率, 并利用Dagum基尼系数、核密度估计、QAP回归分析等方法对效率差异、时空演变以及差异来源进行探讨。研究表明: (1)剔除环境因素和随机干扰后, 资源型城市碳排放效率均值降至0.230, 但整体呈现上升趋势。(2)碳排放效率高值区集中于再生型与成熟型城市, 分布较为分散; 低值区则主要为成长型与衰退型城市, 并于东北、中部等地区呈现集聚性特征。(3)资源型城市碳排放效率差异较大, 其中, 组间差异贡献率最高, 但呈现下降趋势; 再生型和成熟型城市组内差异相对稳定, 成长型和衰退型城市组内差异逐渐扩大。(4)人口密度、居民可支配收入和规模企业数量差异会显著扩大资源型城市碳排放效率差异, 而且人口密度、人口结构以及居民可支配收入差异对不同资源型城市碳排放效率差异呈现显著的异质性影响。基于分析结果, 本文提出三点政策启示: 一是依据资源型城市类型, 采取因地制宜的减排方案; 二是增加低碳创新投入, 促进产业绿色转型; 三是推广绿色消费方式, 加强居民端减排。

关键词: 资源型城市; 碳排放效率; 差异分析; 三阶段超效率SBM模型

2020年9月, 习近平总书记在第七十五届联合国大会上郑重宣布: “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, 二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和”。淘汰高能耗、高排放的落后产能, 提高碳排放效率也就成为国家当前的重要任务。资源型城市作为践行降碳减排政策的重要主体, 面临着更为严峻的挑战。由于资源型城市以自然资源开发、加工为主导产业, 产业结构过于单一, 而且资源型产品生产难以避免较高的碳排放, 因此, 其需要面对经济发展转型与节能减排带来的双重压力, 在落实相关低碳政策时往往力不从心。此种困境下, 从碳排放效率视角出发, 明确其时空演变、内在差异以及影响因素, 也就成为探索资源型城市绿色转型的重要出路。

关于资源型城市, 已有研究主要集中于其演化阶段的识别^[1]、产业结构转型^[2]、资源诅咒^[3]以及生态文明建设^[4]等方面, 低碳经济方面的内容涉及较少。当前, 国内外学者对于低碳经济的研究主要围绕二氧化碳排放的估算方法^[5]、作用机理^[6]、碳交易^[7]以及碳排放效率^[8,9]等视角展开, 其中, 碳排放效率作为环境绩效评估的重要内容, 成为学界关注的焦点。有关碳排放效率的研究主要包含以下三个方面: 一是碳排放效率的测度方法。目前, 数据包络分析是使用最广泛的效率测度方法, 但由于其忽略非期望产出、外生环

收稿日期: 2022-01-24; 修订日期: 2022-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(71804021); 辽宁省“兴辽英才计划”青年拔尖人才项目(XLYC2007123); 东北财经大学省级以上科研平台研究能力提升专项(PT-Y202227)

作者简介: 张明斗(1983-), 男, 山东济宁人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为城市经济。

E-mail: zhangmingdou0537@126.com

境等因素,测度结果存在偏差。对此,部分学者采用SBM(Slack Based Model)模型^[10]、超效率SBM模型^[8]、三阶段DEA(Data Envelopment Analysis)模型^[11]等改进后的测算方法,所得结果更加符合现实状态,尤其是三阶段测度方法与超效率SBM模型的有效结合能够同时消除上述影响^[9,12]。二是碳排放效率的描述性分析。相关研究主要采用马尔可夫链、泰尔指数、基尼系数与核密度指数等方法对碳排放效率的时空特征进行探索分析,并发现中国碳排放效率区域差异较大,而且呈现扩大趋势,上海、广东、福建等东部沿海地区碳排放效率始终较高^[13-15];从长期演变的趋势预测看,碳排放效率整体呈现上升趋势,并逐渐向高值区集中^[8]。三是碳排放效率的影响因素。相关学者采用空间计量、QAP(Quadratic Assignment Procedure)回归以及Tobit回归等分析方法,着重探讨了产业结构、技术创新、经济发展、对外经济等对碳排放效率的影响。结果表明,产业结构升级、技术进步以及公共支出等因素均对碳排放效率产生正向影响,而经济发展差距会减弱碳排放效率的空间联系^[16-20];外商直接投资根据不同地区FDI规模、结构效应和技术溢出对碳排放效率产生异质性影响,进出口贸易则与碳排放效率存在倒“U”型关系^[21,22]。此外,人口特征、基础设施、城镇化等均是碳排放效率的重要影响因素^[23-25]。

综合已有成果可以看出,关于碳排放效率的研究已颇为全面,尤其在定量测度、描述分析、影响因素等方面均开展了一定探索,但少有研究从资源型城市视角出发,探究其碳排放效率的时空演变趋势与机理。此外,由于中国资源型城市拥有的资源类型、所处开发阶段均存在一定差异,同时这种差异形成的现实基础和内在成因并不是完全统一,而是由资源型城市自身经济发展、产业结构特点所导致。因此,实证分析中国资源型城市碳排放效率差异,归纳总结其演化规律,并在此基础上探寻差异成因,不但有助于缩小资源型城市碳排放效率差距,也能够有效提升资源型城市经济环境的协调发展水平,为国家低碳城市建设提供保障。

本文的边际贡献主要体现在以下三个方面:第一,研究样本上,为挖掘资源型城市碳排放效率的基本状况,借助ODIAC数据库克服城市尺度的碳排放数据缺失问题,为研究奠定数据基础。第二,测算方法上,本文借助三阶段超效率SBM模型对资源型城市碳排放效率进行测算,在强调“全要素”思想的基础上,考虑经济生产过程中其他投入要素的替代效应,将资本存量、劳动力、能源消耗作为投入变量,GDP和二氧化碳排放分别作为期望和非期望产出,有效剔除了非期望产出、环境因素以及统计噪声对研究结果的干扰,使得碳排放效率测算更为科学精准。第三,研究视角上,为深入探究资源型城市内在因素对碳排放效率的影响,根据《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020年)》中所划分的成熟型(资源开发处于稳定阶段)、再生型(基本摆脱资源依赖)、成长型(资源开发处于上升阶段)和衰退型(资源开发趋于枯竭)四种资源型城市的分类标准,借助Dagum基尼系数、核密度分析以及QAP回归模型等方法,对中国资源型城市碳排放效率的差异特征、时序演变及其成因进行探讨分析,使得对差异来源的认识更加客观合理。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究方法

1.1.1 三阶段超效率SBM模型

DEA模型是一种线性规划模型,用于评价多投入多产出时各决策单元(Decision

Making Unit, DMU) 的效率状况^[26]。由于传统 DEA 模型受到管理无效率、环境因素以及统计噪声的影响, 所得结果缺乏现实性和精准度, 因此, 本文引入三阶段 DEA 模型, 用以剔除环境因素和随机误差项对决策单元效率的干扰^[27]。

(1) 第一阶段。传统三阶段 DEA 模型一般在第一和第三阶段选取 CCR 或 BCC 模型, 两者均为径向模型, 忽略松弛变量对效率值的影响, 即当存有非零松弛变量时, 径向 DEA 会高估 DMU 的效率值。为克服上述缺陷, Tone^[28,29]先后提出了非径向、非角度的 SBM 模型与包含非期望产出的超效率 SBM 模型, 后者着重考虑了要素投入与非期望污染物产出的同步性特征, 并解决了各 DMU 效率的上限问题。为此, 本文采用基于非期望产出的超效率 SBM 模型进行后续的实证测度与分析。具体计算公式见文献 [8]。

(2) 第二阶段。SFA (Stochastic Frontier Approach) 为随机前沿模型, 可用于剔除环境因素和统计噪声。由于第一阶段各投入变量的松弛值受管理无效率、环境因素以及统计噪声影响, 因此, 此处采用面板 SFA, 对第一阶段得出的松弛变量进行分解^[30]。具体计算公式见文献 [30]。

(3) 第三阶段。利用调整后的投入变量再次进行效率的测算, 模型同第一阶段。

1.1.2 Dagum 基尼系数

Dagum 基尼系数能够考虑子群分布状况, 可将资源型城市碳排放效率分解为组内差异贡献、组间差异贡献以及受组间交叉项影响的超变密度贡献。本文采用 Dagum 基尼系数分解法测度四种类型资源型城市碳排放效率的基尼系数, 并刻画发展差异及其来源。具体计算公式见文献 [14]。

1.1.3 核密度估计

核密度估计属于非参数检验方法, 可以直观揭示资源型城市碳排放效率的演变特征。本文以资源型城市碳排放效率测度值为基础, 选用高斯核函数, 并通过考察主峰的位置、形状及其延展性等来揭示资源型城市碳排放效率的时序演进特征。具体计算公式见文献 [15]。

1.1.4 QAP 回归模型

QAP 回归模型是研究一个矩阵与多个矩阵因果效应的分析方法, 其采用重排法对矩阵的各行各列同时随机置换, 再进行回归检验, 多次重复以估计统计量的标准误。而且, QAP 回归分析不需要自变量之间相互独立的假设条件, 能减少多重共线性问题对实证的影响, 回归结果更加稳健。本文采用差值矩阵进行回归分析, 能有效探索资源型城市碳排放效率的差异来源^[31]。

1.2 变量选取

1.2.1 投入变量

(1) 资本存量 (K)。本文采用永续盘存法进行估算, 其中, 基期资本存量参考张军等^[32]的研究, 并按照 2004 年城市固定资产投资占比对省级资本存量进行分配。资本折旧借鉴张少辉等^[33]的做法, 将相对效率定义为 4.00%, 将建筑和设备的使用寿命分别定义为 38 年和 16 年, 其他类型投资假定为 25 年, 计算所得折旧率分别为 8.12%、18.22%、12.08%。在此基础上, 再根据各年度各省份建筑、设备器具和其他费用的固定资产投资所占比例估算该省份的加权折旧率, 得到分年度差异化折旧率。城市固定资产投资则按照 2004 年价格为基准进行平减, 并参考柯善咨等^[34]的做法, 引入固定资产平均建设周期

概念,将周期设定为三年。具体计算公式见文献 [32-34]。

(2) 就业人数 (L)。本文选取城镇单位就业与私营个体从业人数之和进行来衡量。

(3) 能源投入 (E)。由于中国在城市能耗统计层面缺少统一规范,故选取市辖区全社会用电量、天然气以及液化石油气使用量表示城市能耗数据,并根据 IPCC 提供的各燃料与标准煤的转换系数,换算为统一单位(吨标准煤)计算能源消耗总量^[8,35]。

1.2.2 产出变量

(1) 期望产出。选取城市 GDP 作为期望产出,并以 2004 年为基准进行平减。

(2) 非期望产出。将二氧化碳排放量视为经济活动的非期望产出。由于中国城市尺度的能源消耗数据不够全面,无法进行二氧化碳排放核算。为分析城市这一微观层面的碳排放效率,本文采用 ODIAC 数据库对中国资源型城市碳排放进行提取。原始 ODIAC 是一个全球高分辨率(约 1 km)月排放数据集,其使用点源概况(发电厂排放量估计和地理定位剖面相结合)和卫星观测的夜间灯光数据对二氧化碳排放量进行估计^[36]。该数据集具备较高精度且有利于以一致的方式追溯碳排放的历史特征,目前被广泛应用于碳排放测度、反演建模等多方面研究^[37,38]。由于该数据统计具有统一尺度,其处理过程主要包含月度数据加总、中国区域掩膜处理以及进行表格分区统计。

1.2.3 环境变量

外部环境变量选取要求对二氧化碳排放效率具有显著性影响,同时又无法主观可控。

(1) 产业结构。产业结构影响能源消耗总量,从而间接影响二氧化碳排放,因此,地区产业结构优化与其碳排放效率关联密切。同时考虑到第二产业对碳排放影响较大,第三产业减排效应并不明显^[39],故采用第二产业产值占 GDP 比例来衡量资源型城市产业结构。

(2) 科技投入水平。技术进步能够提高能源利用效率,促进清洁能源的发展,从而改善能源结构,有利于降碳减排。同时,科技发展阶段决定各类要素投入强度,在技术发展初期,会形成巨大的要素需求,而在后期,则能够通过享受技术红利提升碳排放效率。本文采用科学支出占财政支出比例衡量科技投入水平。

(3) 环境规制水平。波特假说认为环境规制会刺激企业进行技术创新,从而提高能源利用效率,降低碳排放。成本约束理论则认为环境规制会增加企业生产成本,降低企业在行业中竞争能力,这可能会降低碳排放强度,却不具备可持续性^[41]。根据数据的可得性,本文参考叶琴等^[40]的做法,采用命令型环境规制,即计算城市废水和二氧化硫排放量的综合指数来表示城市的环境规制强度。考虑到当年环境规制强度受上年污染物排放的影响,且政策落实具有一定滞后性,故将上年综合指标定义为当年环境规制强度。具体计算公式见文献 [40]。

(4) 经济开放水平。污染天堂假说认为发达国家或地区会通过向欠发达国家或地区转移高污染产业而降低规制成本,从而引起东道国环境污染,造成碳排放增强。污染光环假说则认为投资国会为东道国带来绿色清洁的生产技术,并通过示范、竞争效应提升东道国的环境保护水平,进而可能降低碳排放强度^[21]。本文选取外国直接投资与 GDP 比值来衡量经济开放水平。

1.3 数据来源

资源型城市共包含 116 个地级市,由于莱芜、毕节行政区划的调整,本文最终以 114 个地级市为研究样本,研究时段为 2004—2019 年。相关数据主要来源于 2003—2020 年《中国城市统计年鉴》《中国固定资产投资统计年鉴》、ODIAC 数据库以及统计

公报,其中,二氧化碳排放数据来自ODIAC数据库,不同构成的固定资产投资数据来自2005—2020年《中国固定资产投资统计年鉴》,对于缺失的2017—2019年城市固定资产投资数据借助统计公报补齐。

2 结果分析

2.1 资源型城市碳排放效率分析

2.1.1 第一阶段超效率SBM测度结果

第一阶段超效率SBM的测算结果显示,中国资源型城市碳排放效率的中位数均处于0.550以下(图1),总体水平较低,仍有较大的降碳减排空间。结合中位数变化过程可知,2004—2007年资源型城市碳排放效率呈现上升趋势,并于2007年达到峰值0.527,随后,2007—2015年下降至0.443,基本又回归到2004年水平,而2015—2019年再次恢复上升趋势,但表现为波动上涨,且涨幅较小。由此可见,2008—2015年作为金融危机的恢复期,资源型产业面临较多经营困境,低碳建设逐渐让步于经济发展;2015—2019年,随着国家对降碳减排的重视程度提高,政府相关政策开始生效,促使资源型城市持续进行产业绿色转型升级,从而提升了碳排放效率。

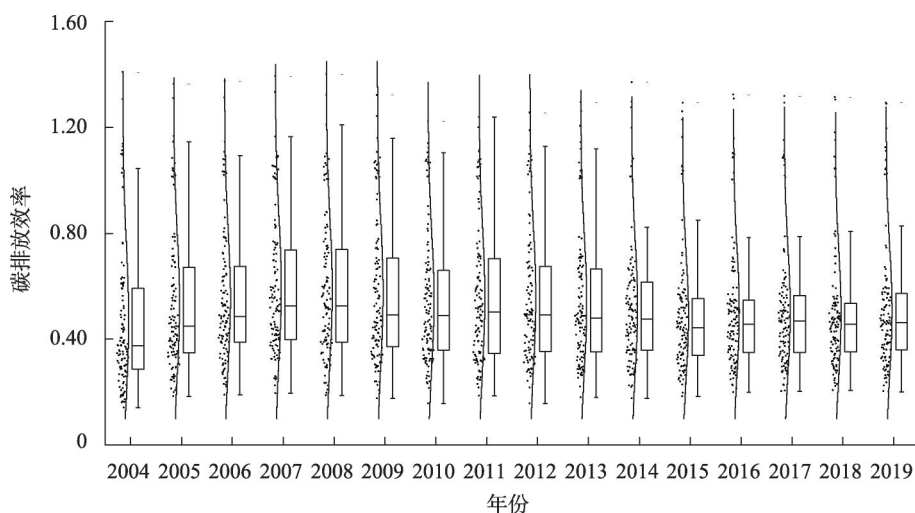


图1 资源型城市第一阶段碳排放效率箱线图

Fig. 1 The box diagram of carbon emission efficiency of resource-based cities in the first stage

2014年后,箱线图中箱体与拖尾明显缩短,资源型城市碳排放效率分异特征有所减弱,自2013年《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020年)》下发后,资源型城市低碳经济建设可能具有趋同特征,使得碳排放效率离散程度缩小。同时,2014年后,破坏箱体上下限的离群值有所增多,资源型城市碳排放效率存在极点,这与中国对资源型城市的分类情况相契合,成熟型和再生型城市一般具有较高的碳排放效率,反观成长型和衰退型城市的碳排放效率较低,其在政策落实、技术普及以及产业转型等方面还有较大提升空间。

2.1.2 第二阶段SFA回归结果

将第一阶段所求投入变量的松弛值作为被解释变量,将四个环境变量作为解释变量,

表1 第二阶段SFA回归结果
Table 1 Second stage SFA regression results

变量	资本存量松弛量	就业人数松弛量	能源投入松弛量
常数项	-525.046*** (-8.190)	-3.292 (-1.214)	275.703*** (15.631)
产业结构	678.162*** (5.628)	12.788*** (2.767)	-11.597 (-0.496)
科技投入水平	19341.987*** (16.094)	152.493*** (3.090)	994.766*** (664.017)
环境规制水平	-34.888** (-2.553)	0.237 (0.493)	14.955*** (9.237)
经济开放水平	18.909*** (3.707)	0.072 (0.462)	-0.730 (-1.102)
σ^2	2787277.900*** (238411.520)	1161.639*** (8.339)	21086.387*** (18927.674)
γ	0.920*** (362.727)	0.766*** (26.415)	0.777*** (106.443)
对数似然函数值	-14385.034	-7817.007	-10643.103
LR单边检验	2826.814***	560.952***	866.380***

注：*、**、***分别表示10%、5%、1%显著性水平，括号内为T统计量。

并使用Frontier 4.1进行SFA分析。结果显示，三组回归 γ 值均较大且接近1，这说明管理无效率在复合误差项中占主导作用。因此，实际投入值和目标投入值之间的差距受外部环境因素的影响，借助SFA模型对要素投入进行调整具备较高适用性，实证结果见表1。

产业结构对资本和劳动投入松弛值的影响均为1%水平显著正相关，表明中国资源型城市第二产业的发展对资本和劳动仍具有较高依赖性，还未进入人力资本和知识资本赋能生产效率的发展阶段，不利于碳排放效率的提升。而能源投入系数非显著为负，表明资源型城市清洁能源的使用未对化石燃料呈现明显替代作用。

科技投入水平对资本、劳动和能源投入松弛值的影响均为1%水平显著正相关，表明中国资源型城市技术创新处于对研发资本、技术人才以及能源的高需求阶段，更多要素投入虽可以有效适配创新水平，但会拉低资源型城市碳排放效率。

环境规制水平对资本投入松弛值的影响为5%水平显著负相关，对劳动和能源投入则分别为非显著和显著性正相关，表明现阶段中国资源型城市对环境污染治理未过度依赖资本投入。而且，环境规制没有对节省能源消耗产生积极影响，一方面资源型城市可能通过相关技术创新，在不减少能源投入基础上，降低碳排放强度，另一方面环境规制可能还未呈现较好效果，清洁能源未真正替代传统能源并占据主导地位。

经济开放水平对资本投入松弛值的影响为1%水平显著正相关，对劳动和能源投入分别为非显著正相关和负相关，表明外资进入带来的生产、环境等问题可能造成更高的国内规制成本（污染天堂假说），不利于提升碳排放效率。能源方面则可能由于政府对外资进入能源板块进行管控，故回归系数未显著。

2.1.3 第三阶段超效率SBM测度结果

基于第二段SFA分析对投入变量做出的处理，本文利用调整后的投入变量再次计算资源型城市碳排放效率，图2为第一和第三阶段碳排放效率均值的折线图。由图2可知，

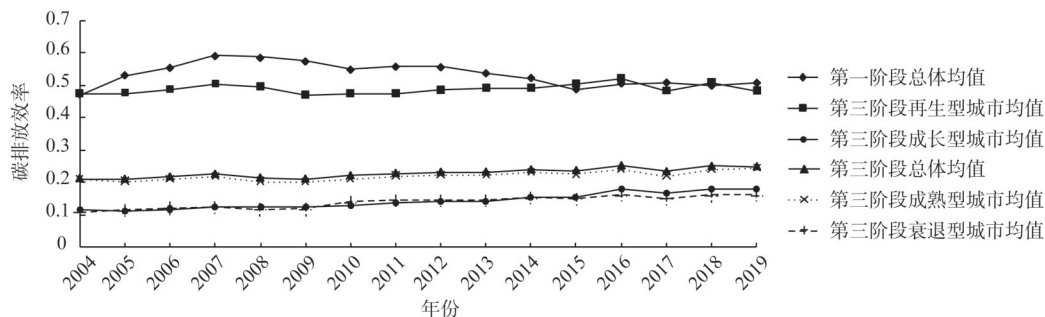


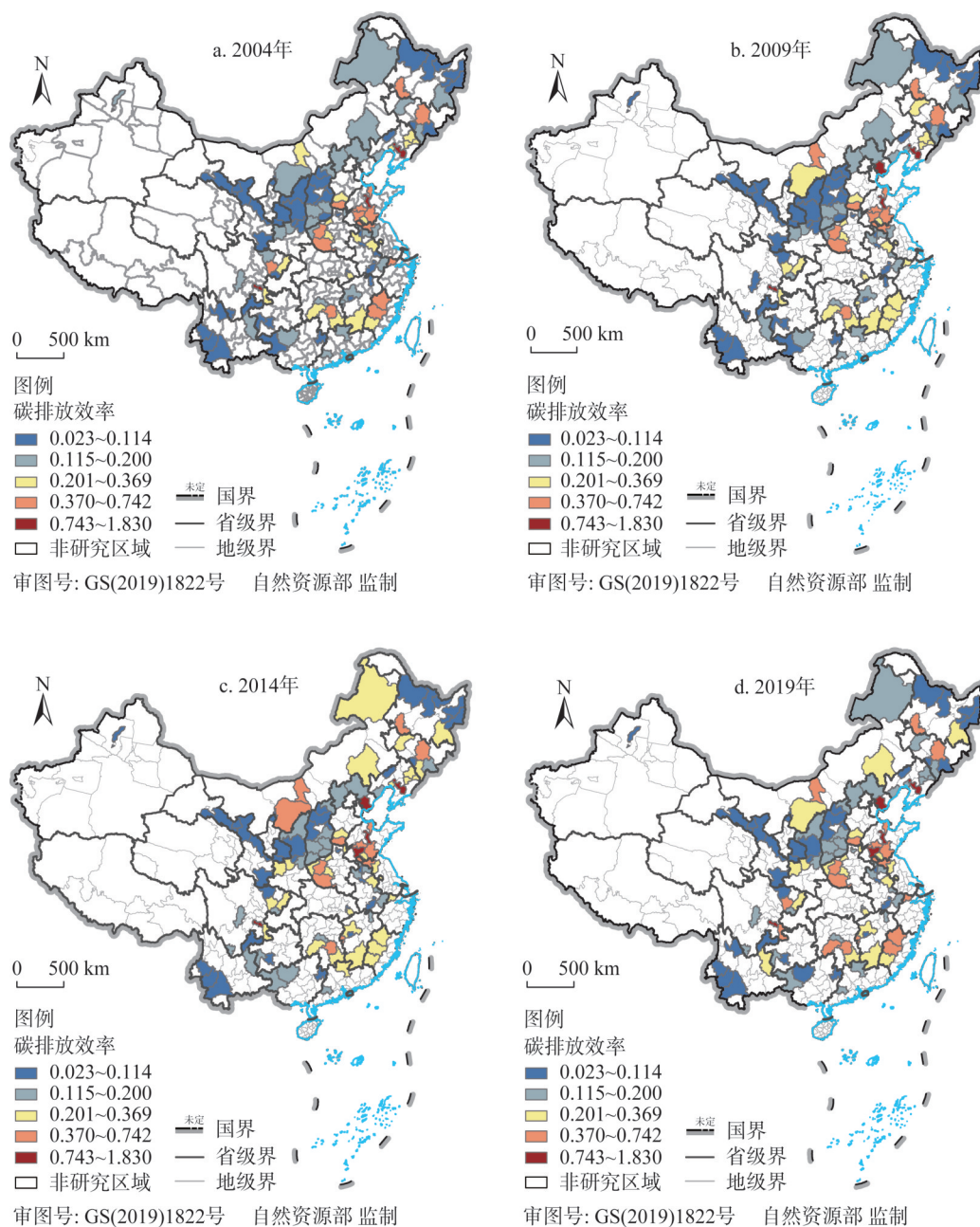
图2 资源型城市第一和第三阶段碳排放效率均值

Fig. 2 The average carbon emission efficiency of resource-based cities in the first and third stages

第三阶段资源型城市碳排放效率显著低于第一阶段，均值由0.534降至0.230，这是因为在第二阶段SFA分析中，环境变量系数多为正数，整体提升了要素投入水平。由此可见，忽略环境因素及随机误差项的干扰，造成对资源型城市碳排放效率的高估。在第三阶段，资源型城市碳排放效率呈现再生型>成熟型>衰退型和成长型（两者基本相同）的发展格局，表明再生型城市通过产业结构转型，在低碳经济建设方面具备一定优势，而衰退型和成长型城市有必要继续加大在减碳工作方面的投入。时序上，第一阶段碳排放效率表现为先上升再下降，最后逐渐平稳的发展趋势；而第三阶段碳排放效率则整体为上升趋势，涨幅达17.56%，其中，94个城市出现增长，仅少数城市出现下降的情况。因此，第一阶段的实证测算低估了中国资源型城市碳排放效率的提升速度，也再次说明借助三阶段分析方法排除环境因素及随机干扰的必要性。此外，四大类型资源型城市碳排放效率均表现为上升趋势，再生型城市提升最为缓慢，衰退型和成长型城市上升较快，表明成长型城市在加快能源开发的同时，能有效控制碳排放强度，而衰退型城市得利于国家的大力扶持，在降碳减排方面已初见成效。

为更深入地分析资源型城市碳排放效率的空间演变特征，本文使用ArcGIS 10.3软件将第三阶段测算的碳排放效率可视化，得到空间分布图（图3）。图3根据时间中心对称原则列出2004年、2009年、2014年和2019年碳排放效率分布图，并利用自然断点法对2004—2019年碳排放效率均值进行分类，以此为依据展开各年份分析。

由图3可知，资源型城市碳排放效率高值区较为分散，仅存在区域性“极点”，未出现高值集聚特征，这与资源型城市改革困境密切相关，单点城市的“爆发”，并没有足够“能量”带动周边资源型城市共同发展。而低值区在东北、中部等地区存在广泛的集聚特性，诸多资源型城市在低碳经济建设方面无法做到兼顾经济发展与降碳减排，甚至部分城市两方面均发展受阻，可见资源型城市还需在两者的协调性方面寻找突破口。4个年份中，淄博、唐山、自贡、鞍山、济宁、临沂碳排放效率均处于前10名，其中，淄博、唐山、临沂和鞍山为再生型城市；济宁、自贡为成熟型城市，在经济发展、能源利用效率、控制碳排放强度等方面具备优势。后10名多为衰退型城市，资源枯竭、经济发展放缓以及产业转型困难是其碳排放效率水平较低的主要原因。此外，观察期内，部分城市碳排放效率变化较大，如萍乡、六盘水、鄂尔多斯等城市出现明显上涨，唐山、本溪、克拉玛依等城市则下降较多。其中，萍乡为衰退型城市，自身碳排放效率水平较低，近几年随着相关政策的落实，在节能减排方面有所进步。六盘水、鄂尔多斯作为成长型城



注：本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作，底图无修改。

图3 资源型城市第三阶段碳排放效率

Fig. 3 The carbon emission efficiency of resource-based cities in the third stage

市，处于资源开发的增速期，碳排放效率上升表明其在发展资源型产业的同时，十分重视碳排放强度，能够做到统筹兼顾。唐山为再生型城市，虽摆脱了资源依赖，却还没有形成真正的低碳经济发展模式，一方面部分高排放产业仍未淘汰，另一方面相关新兴产业可能依然会造成较高的碳排放。本溪和克拉玛依均为成熟型城市，其具备相对完善的资源型产业链，在资源开采、加工、制造等方面基础良好，但是成熟的发展模式并不一

定符合低碳经济的标准,成熟型城市仍需寻找接续替代产业,探索新的发展路径。

2.2 资源型城市碳排放效率差异分析

2.2.1 资源型城市碳排放效率总体及组内差异分析

由图4可知,资源型城市碳排放效率总体差异呈波动下降趋势,并于2014年达到最低点0.451,2014—2019年则基本趋于稳定,整体下降幅度为9.69%,但由于其均值为0.475,数值偏大,碳排放效率的非均衡特征显著。从四大城市类型的对比分析可以看出,2015年前,资源型城市碳排放效率差异的层级特征明显,表现为再生型>成熟型>衰退型>成长型;而2015年后,成长型和衰退型城市差异有所上升,再生型和成熟型则分别出现不同程度的下降,并于2019年最终形成衰退型>再生型>成长型>成熟型的发展格局。国家于2013年下达有关资源型城市的发展规划后,再生型和成熟型城市能够借助自身发展优势和基础,不断缩小碳排放效率差异。衰退型城市则面临产业结构方面的改革困境,组内差异难以有效改善,而成长型城市处于资源开发的上升阶段,由于其资源型产业的准入门槛、排放标准、能源禀赋等方面存有差异,故于2015—2017年基尼系数出现较大幅度上升。

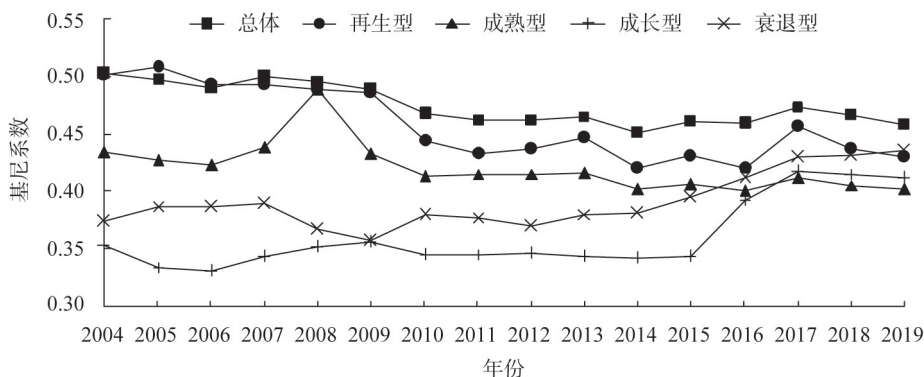


图4 资源型城市碳排放效率的总体及组内基尼系数

Fig. 4 The overall and intra-group Gini coefficient of carbon emission efficiency of resource-based cities

2.2.2 资源型城市碳排放效率组间差异分析

由表2可知,再生型城市分别与衰退型、成长型以及成熟型城市形成了较高的组间差异,其基尼系数均值分别为0.632、0.626和0.543,而成熟型—成长型、成熟型—衰退型城市基尼系数分别为0.429、0.442,处于中间位置,成长型—衰退型城市之间差异最小,基尼系数均值仅为0.383。由此可见,资源型城市碳排放效率与其成长阶段显著相关,成长型城市处于资源开发上升期,资源保障潜力大,对低碳经济建设还处于摸索阶段,碳排放效率较低;而成熟型城市资源开发处于稳定阶段,资源保障能力强,经济社会发展水平较高,能够有效控制碳排放,与其他类型城市碳排放效率形成差异。在资源开发后期,经济转型成功的再生型城市基本摆脱了资源依赖,经济社会发展步入良性轨道,能够在不断培育战略新兴产业的同时,有效兼顾降碳减排工作,从而与其他类型城市形成较大的碳排放效率差距,而转型受阻的衰退型城市则存在经济发展滞后、生态环境压力大等发展难题,碳排放效率水平较低。

2.2.3 资源型城市碳排放效率差异来源分解

由表3可知,资源型城市组间差异贡献率均值高达44.51%,组内差异和超变密度平均贡献率分别为31.25%和24.25%,表明组间差异是资源型城市碳排放效率差异的主要来

表2 资源型城市碳排放效率的组间基尼系数

Table 2 Inter-regional Gini coefficient of carbon emission efficiency of resource-based cities

年份	再生型— 成熟型	再生型— 成长型	再生型— 衰退型	成熟型— 成长型	成熟型— 衰退型	成长型— 衰退型
2004	0.563	0.674	0.683	0.465	0.477	0.385
2005	0.567	0.672	0.673	0.446	0.464	0.372
2006	0.559	0.663	0.662	0.440	0.457	0.370
2007	0.568	0.665	0.667	0.449	0.465	0.374
2008	0.576	0.664	0.673	0.438	0.450	0.365
2009	0.562	0.648	0.655	0.440	0.444	0.363
2010	0.539	0.632	0.618	0.424	0.427	0.366
2011	0.528	0.617	0.606	0.422	0.426	0.365
2012	0.531	0.616	0.610	0.420	0.423	0.362
2013	0.535	0.616	0.614	0.417	0.428	0.366
2014	0.516	0.591	0.599	0.404	0.421	0.366
2015	0.534	0.607	0.616	0.404	0.427	0.374
2016	0.526	0.587	0.610	0.415	0.431	0.408
2017	0.542	0.603	0.621	0.432	0.444	0.429
2018	0.528	0.591	0.614	0.427	0.444	0.430
2019	0.507	0.574	0.596	0.426	0.445	0.430
均值	0.543	0.626	0.632	0.429	0.442	0.383

源。研究期内，组间差异和超变密度贡献率分别呈现下降和上升趋势，变动幅度为10.15%和9.52%，而组内差异贡献基本稳定。说明资源型城市碳排放效率组间差异总体在缩小，主要在于成熟型、成长型、衰退型城市碳排放效率增长速率超过再生型城市，从而减小了与再生型城市之间的差距，导致再生型—成熟型、再生型—成长型以及再生型—衰退型城市的基尼系数下降。

2.3 资源型城市碳排放效率动态演进分析

本文通过观测核密度分析中主峰的中心位置、形状及其延展性等来探究资源型城市碳排放效率的时序演变特征，如图5所示。

从分布位置看，资源型城市整体以及成熟型、成长型和衰退型城市的主峰位置均出现一定程度右移，碳排放效率得到明显提升，这与前文客观事实相符。再生型城市主峰位置变化不大，碳排放效率趋于稳定。

从主峰形态看，资源型城市整体的主峰经历了持续缓慢下降的演变过程，宽度基本不变。成长型和衰退型城市则形态相仿，自2009年开始，其主峰高度明显下降，宽度也有所增大，这意味着资源型城市整体以及成长型和衰退型城市碳排放效率绝对差异呈现扩大趋势。再生型和成熟型城市主峰演进规律基本一致，其主峰高度于2009年、2017年等多个年份出现波动，但总体稳定，而且再生型和成熟型城市主峰宽度基本恒定，组内绝对差异趋于稳态。

从分布延展性看，资源型城市整体及四大类型城市碳排放效率分布曲线均呈现向右拖尾现象，碳排放效率差异较大。此外，资源型城市整体以及再生型和成熟型城市碳排放效率均呈现收敛趋势，这表明组内碳排放效率较高的城市与平均水平更加接近。而成

表3 资源型城市碳排放效率差异来源分解

Table 3 Source decomposition of carbon emission efficiency difference in resource-based cities

年份	区域内	贡献率/%	区域间	贡献率/%	超变密度	贡献率/%
2004	0.157	31.24	0.245	48.73	0.101	20.03
2005	0.153	30.89	0.241	48.62	0.102	20.49
2006	0.152	30.99	0.235	47.99	0.103	21.02
2007	0.156	31.28	0.235	47.17	0.108	21.55
2008	0.151	30.48	0.241	48.64	0.104	20.88
2009	0.153	31.27	0.230	47.06	0.106	21.67
2010	0.146	31.22	0.210	44.96	0.111	23.82
2011	0.147	31.77	0.202	43.66	0.114	24.58
2012	0.147	31.72	0.203	43.99	0.112	24.30
2013	0.147	31.61	0.205	44.04	0.113	24.35
2014	0.143	31.67	0.194	43.05	0.114	25.28
2015	0.143	31.07	0.202	43.88	0.115	25.05
2016	0.142	30.88	0.190	41.44	0.127	27.68
2017	0.147	30.93	0.191	40.21	0.137	28.85
2018	0.145	31.10	0.187	40.08	0.134	28.83
2019	0.146	31.87	0.177	38.58	0.135	29.55
均值	0.148	31.25	0.212	44.51	0.115	24.25

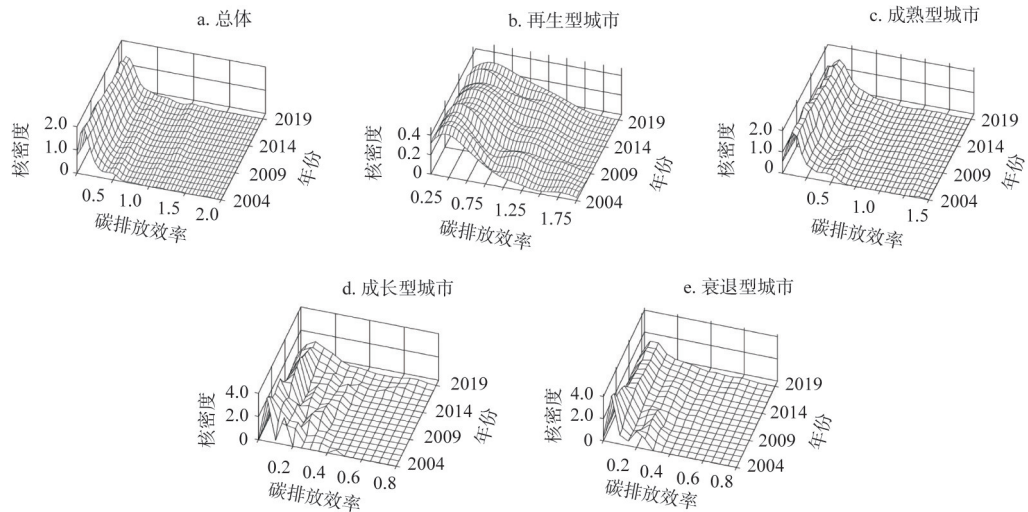


图5 资源型城市碳排放效率核密度估计结果

Fig. 5 The estimation results of carbon emission efficiency and kernel density of resource-based cities

长型和衰退型城市碳排放效率延展性具有拓宽特征，组内差异逐渐扩大。

从极化趋势看，资源型城市整体以及再生型和成熟型城市分布主要呈现单峰特征，侧峰隆起幅度较小，表明碳排放效率均未出现明显的多极化现象。2015年前，成长型城市碳排放效率由多峰构成，且多个侧峰变化幅度较大，并于2015年后逐渐演变为单峰。衰退型城市则在2009年之前由主峰和侧峰构成，2009年后，侧峰逐渐消失，这表明衰退

型城市呈现由两极化向单极化演变的发展趋势。

2.4 资源型城市碳排放效率差异来源分析

2.4.1 变量选取与模型构建

为探寻资源型城市碳排放效率的差异来源，本文借助非参数方法 QAP 对城市碳排放效率差异矩阵进行回归分析，并参考相关文献^[16,23-25,41]，选取六个影响因素展开讨论。其中，人口因素造成的集聚效应与拥挤效应是影响碳排放效率的正反两面，而人口结构的年轻化更为产业发展和城市人力资本补给提供可能性支撑，尤其 0~14 岁少年儿童比例是反映人口年轻化结构与社会经济发展的重要潜在指标（受限于数据，选用中小学生在人数替代），因此，选取人口密度和人口结构同时表征资源型城市的人口特征。

居民消费行为作为碳排放的重要来源，对碳排放效率产生特定影响，本文选取居民可支配收入表示居民消费能力；政府行为和公共服务环境对碳排放效率的影响则分别使用财政支出和基础设施建设表示；规模企业数量则强调企业主体在碳排放效率中的影响作用。具体回归模型如下：

$$R=f(Pop, Ps, Dpi, Fis, Road, Co)$$
(1)

式中： R 表示资源型城市碳排放效率差异关系矩阵； Pop 、 Ps 、 Dpi 、 Fis 、 $Road$ 和 Co 分别为人口密度差异、人口结构差异、居民可支配收入差异、财政支出差异、基础设施差异和规模企业数量差异，具体变量说明如表 4 所示。

2.4.2 基准回归分析

由表 5 可知，（1）研究期间内，人口密度差异和规模企业数量差异系数显著为正，

表 4 资源型城市碳排放效率差异的影响因素及变量说明

Table 4 The description of influencing factors and variables of carbon emission efficiency difference in resource-based cities

变量名称	变量含义	指标计算	数据来源
<i>Pop</i>	人口密度差异	城市 <i>i</i> 和城市 <i>j</i> 户籍人数与行政区域面积比值差值矩阵	中国城市统计年鉴
<i>Ps</i>	人口结构差异	城市 <i>i</i> 和城市 <i>j</i> 中小學生人数占户籍人口比例差值矩阵	中国区域经濟统计年鉴
<i>Dpi</i>	居民可支配收入差异	城市 <i>i</i> 和城市 <i>j</i> 城镇居民可支配收入差值矩阵	中国区域经濟统计年鉴
<i>Fis</i>	财政支出差异	城市 <i>i</i> 和城市 <i>j</i> 财政支出占 GDP 比例差值矩阵	中国城市统计年鉴
<i>Road</i>	基础设施建设差异	城市 <i>i</i> 和城市 <i>j</i> 公路里程与行政区域面积比值差值矩阵	中国区域经濟统计年鉴
<i>Co</i>	规模企业数量差异	城市 <i>i</i> 和城市 <i>j</i> 规模以上工业企业数量差值矩阵	中国城市统计年鉴

表 5 基准回归结果

Table 5 Benchmark regression results

变量名称	2004 年	2009 年	2014 年	2019 年
<i>Intercept</i>	-0.272***	-0.261***	-0.312***	-0.219***
<i>Pop</i>	1.132**	1.432**	1.256**	3.028***
<i>Ps</i>	0.051	0.286	-0.304	-0.525*
<i>Dpi</i>	0.017**	0.006	0.123***	0.021***
<i>Fis</i>	0.108	0.050	-0.494	-0.035
<i>Road</i>	-0.027	-0.093**	-0.045	-0.114***
<i>Co</i>	0.059***	0.064***	0.054***	0.041***
<i>R</i> ²	0.194	0.231	0.215	0.195
随机置换次数/次	5000	5000	5000	5000

表明两者均为资源型城市碳排放效率差异的重要来源。其中，人口密度差异系数最大，人口密度虽然可通过人口集聚效应和规模效应提升公共服务共享价值，发挥人力资本优势，形成技术创新，进而提高能源利用效率，但也会形成集聚不经济，人类活动会直接或间接产生大量碳排放，因此，人口密度的悬殊会明显扩大碳排放效率的差距。作为碳排放的重要主体，企业的用能、技术创新等行为均会影响碳排放强度，故规模企业数量差异扩大了资源型城市碳排放效率差异。(2) 人口结构差异仅2019年系数负向显著，说明2019年人口结构差异有利于缩小资源型城市碳排放效率差异。年轻化的人口结构是吸引产业的关键区位因素，也是重要的潜在人力资本，由于资源型城市自身发展受阻与人口流失，其未真正通过人口结构年轻化水平形成有效的产业吸引力和人力资本积累，进而未形成正向影响。(3) 2009年居民可支配收入差异系数正向非显著，其余年份均为正向显著，表明居民可支配收入差异会扩大资源型城市碳排放效率差异。居民可支配收入增加，会提高商品服务消费水平，进而提升各类消费性碳排放，从而造成差异扩大化。(4) 基础设施建设差异系数均为负向，且仅有2009年和2019年系数显著，这说明基础设施差异会缩小碳排放效率差异。基础设施差异会形成公共服务环境异质化，这种异质化一般会导致碳排放差异化，因此负向系数可能是由于资源型城市基础设施建设差异化程度较低，且对产业吸引能力总体偏弱。(5) 政府财政支出差异系数各年份均不显著，表明政府财政支出差异与资源型城市碳排放效率差异无明显关系。这可能是由于财政支出对碳排放效率的影响主要来自于环境规制强度，本文所测算的碳排放效率已将环境规制这一环境因素剔除，导致两者差异不具备相关性。

2.4.3 异质性回归分析

由表6可知，(1) 再生型、成熟型以及成长型城市的人口密度差异回归系数显著为正，衰退型城市则显著为负，表明人口密度与碳排放效率关系密切，但其差异水平并非衰退型城市碳排放效率差异的主要来源，人口的集聚效应所产生的环境外部性对衰退型城市作用不明显。(2) 人口结构差异与再生型城市碳排放效率差异显著负相关，其他类型城市回归系数均不显著，这与基准回归解释类似，再生型城市未通过人口结构年轻化水平形成有效的产业吸引力和人力资本积累。(3) 居民可支配收入差异与成熟型城市碳排放效率差异显著正相关，其他类型城市回归系数均不显著，表明居民可支配收入所导致的消费性碳排放差异会在成熟型城市中体现，这可能与成熟型城市资源开发稳定，经

表6 异质性回归结果
Table 6 Heterogeneous regression results

变量名称	再生型	成熟型	成长型	衰退型
<i>Intercept</i>	-0.056***	-0.095***	-0.217***	0.036***
<i>Pop</i>	4.928**	5.182***	6.978**	-1.159**
<i>Ps</i>	-0.353**	-0.577	0.710	0.171
<i>Dpi</i>	0.019	0.017**	0.017	-0.008
<i>Fis</i>	0.124	0.092	-0.159	-0.186
<i>Road</i>	-0.309**	-0.249***	-0.134***	-0.254***
<i>Co</i>	0.037*	0.021***	0.030***	0.016**
<i>R</i> ²	0.175	0.213	0.381	0.338
随机置换次数/次	5000	5000	5000	5000

济社会发展水平相对较高有关。(4) 财政支出差异、基础设施建设差异以及规模企业数量差异的回归系数基本与基准回归相同,且不存在明显异质性特征。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文以中国114个资源型城市为研究样本,在“全要素”视角下,运用三阶段超效率SBM模型实证测度了2004—2019年的碳排放效率,并利用Dagum基尼系数、核密度分析、QAP回归等方法对效率差异、演变趋势以及成因来源进行深入探讨。结果表明:

(1) 剔除环境因素和随机干扰后,资源型城市碳排放效率均值降至0.230,但整体呈现上升趋势。第一阶段中,资源型城市碳排放效率具有较强的分异特征,且未呈现特定发展趋势。第二阶段SFA回归分析表明,产业结构、科技投入水平、环境规制水平以及经济开放水平对投入要素的松弛变量多为正向影响,总体需求更高的要素投入来适配外部环境造成的冲击,故第三阶段碳排放效率下降明显,且效率均值降为0.230,呈现较低的碳排放效率水平。第三阶段剔除外生环境因素和随机干扰后,资源型城市碳排放效率总体转变为上升趋势,且高值区呈现“零星”分布,低值区在东北、中部地区存在集聚性特征。此外,高值区主要集中于再生型与成熟型城市,低值区则集中于衰退型与成长型城市,其中,再生型城市碳排放效率增长缓慢,成熟型、成长型以及衰退型城市则呈现较快增长。

(2) 不同类型的资源型城市碳排放效率呈现显著分异特征。资源型城市碳排放效率总体差异波动式下降。2015年之前,四大类型城市碳排放效率呈现再生型城市差异>成熟型>衰退型>成长型的分布格局;2015年之后,逐渐向衰退型城市差异>再生型>成长型>成熟型的分布格局转变。组间差异主要来源于再生型城市与其他类型城市碳排放效率发展差距。从贡献率大小看,组间差异贡献率最大,且呈现下降趋势,超变密度贡献率最低,并有所上升,组内差异贡献则基本恒定。

(3) 成长型和衰退型城市碳排放效率内部差异化特征扩大,再生型和成熟型城市差异化趋于稳定。资源型城市整体以及四大类型资源型城市碳排放效率呈现上升趋势,且存在极化现象。其中,再生型和成熟型城市碳排放效率表现为“单极”结构,组内绝对差异相对稳定,而成长型和衰退型城市则逐渐由多极向单极演进,组内绝对差异逐渐扩大。

(4) 人口密度、居民可支配收入和规模企业数量差异是资源型城市碳排放效率分异的重要来源。人口密度、居民可支配收入和规模企业数量差异会显著扩大资源型城市碳排放效率差异,人口结构和基础设施建设差异则会有效降低碳排放效率差异。而且人口密度、人口结构以及居民可支配收入差异对不同类型资源型城市碳排放效率差异呈现显著的异质性影响。

3.2 讨论

结合中国双碳战略背景,并考虑资源型城市碳排放效率特征,提出如下政策启示:

(1) 依据资源型城市类型,采取因地制宜的减排方案。不同类型资源型城市的资源特征与发展阶段存在差异,因地制宜地采取减排方案势在必行。结合资源型城市碳排放效率测度结果,成长型和衰退型城市始终是碳排放效率的低值区,其中,成长型城市应重视资源开发增速阶段的减排工作,着力提升资源深加工、绿色加工水平,同时严控资

源开发型企业的进入门槛,控制资源开发强度,形成开发、治理同步进行的发展模式;而衰退型城市则需借助技术创新、财政转移支付等手段,通过向再生型城市学习改革经验,实现完全替代或链条延伸式的产业转型升级。

(2) 增加低碳创新投入,促进产业绿色转型。对于资源型城市而言,其自身科研基础薄弱,因此,可通过模仿创新的方式增加研发投入,使得低碳创新更具方向性和针对性。同时资源型城市应激励企业主体进行绿色化的技术改造和升级,推广清洁的生产工艺、技术和生产设备,并加强产学研深度合作,深化科技成果转化,进而实现资源开发数字化、智能化以及低碳化的转变,促进产业的绿色转型升级。

(3) 推广绿色消费方式,加强居民端减排。政府应提升居民端对消费减排能力的认知水平,从气候变化、高碳消费的影响结果着手进行宣传教育,鼓励消费者进行低碳消费。此外,政府还应探索绿色金融创新,建立个人碳信用、碳账户体系,对购买节能产品的消费行为提供优惠的信贷支持,以此提升居民绿色金融市场的参与度。同时,政府还需提供各类低碳消费的应用场景,在绿色出行、低碳产品在线购买等方面提供智慧化、便民化服务。

参考文献(References):

- [1] 卢硕,张文忠,余建辉,等.资源型城市演化阶段识别及其发展特征.地理学报,2020,75(10):2180-2191. [LU S, ZHANG W Z, YU J H, et al. The identification of spatial evolution stage of resource-based cities and its development characteristics. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(10): 2180-2191.]
- [2] 李虹,邹庆.环境规制、资源禀赋与城市产业转型升级研究:基于资源型城市与非资源型城市的对比分析.经济研究,2018,53(11):182-198. [LI H, ZOU Q. Environmental regulations, resource endowments and urban industry transformation: Comparative analysis of resource-based and non-resource-based cities. *Economic Research Journal*, 2018, 53(11): 182-198.]
- [3] 李江龙,徐斌.“诅咒”还是“福音”:资源丰裕程度如何影响中国绿色经济增长?.经济研究,2018,53(9):151-167. [LI J L, XU B. Curse or blessing: How does natural resource abundance affect green economic growth in China?. *Economic Research Journal*, 2018, 53(9): 151-167.]
- [4] 阎晓,涂建军.黄河流域资源型城市生态效率时空演变及驱动因素.自然资源学报,2021,36(1):223-239. [YAN X, TU J J. The spatio-temporal evolution and driving factors of eco-efficiency of resource-based cities in the Yellow River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(1): 223-239.]
- [5] 刘竹,耿涌,薛冰,等.城市能源消费碳排放核算方法.资源科学,2011,33(7):1325-1330. [LIU Z, GENG Y, XUE B, et al. A calculation method of CO₂ emission from urban energy consumption. *Resources Science*, 2011, 33(7): 1325-1330.]
- [6] 程叶青,王哲野,张守志,等.中国能源消费碳排放强度及其影响因素的空间计量.地理学报,2013,68(10):1418-1431. [CHENG Y Q, WANG Z Y, ZHANG S Z, et al. Spatial econometric analysis of carbon emission intensity and its driving factors from energy consumption in China. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(10): 1418-1431.]
- [7] 耿文欣,范英.碳交易政策是否促进了能源强度的下降?基于湖北试点碳市场的实证.中国人口·资源与环境,2021,31(9):104-113. [GENG W X, FAN Y. Does a carbon trading policy contribute to energy intensity reduction? Evidence from the Hubei carbon trading pilot. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(9): 104-113.]
- [8] 王少剑,高爽,黄永源,等.基于超效率SBM模型的中国城市碳排放绩效时空演变格局及预测.地理学报,2020,75(6):1316-1330. [WANG S J, GAO S, HUANG Y Y, et al. Spatio-temporal evolution and trend prediction of urban carbon emission performance in China based on super-efficiency SBM model. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(6): 1316-1330.]
- [9] 李金铠,马静静,魏伟.中国八大综合经济区能源碳排放效率的区域差异研究.数量经济技术经济研究,2020,37(6):109-129. [LI J K, MA J J, WEI W. Study on regional differences of energy carbon emission efficiency in eight economic areas of China. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2020, 37(6): 109-129.]
- [10] 王凯,张淑文,甘畅,等.中国旅游业碳排放效率的空间网络结构及其效应研究.地理科学,2020,40(3):344-353. [WANG K, ZHANG S W, GAN C, et al. Study on spatial network structure and effect of carbon emission efficiency of

- China's tourism industry. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(3): 344-353.]
- [11] 胡剑波, 闫烁, 韩君. 中国产业部门隐含碳排放效率研究: 基于三阶段DEA模型与非竞争型I-O模型的实证分析. 统计研究, 2021, 38(6): 30-43. [HU J B, YAN S, HAN J. Study on the carbon emissions efficiency embodied in China's industrial sector-empirical analysis based on three-stage DEA model and non-competitive I-O model. *Statistical Research*, 2021, 38(6): 30-43.]
- [12] 盖美, 朱静敏, 孙才志, 等. 中国沿海地区海洋经济效率时空演化及影响因素分析. 资源科学, 2018, 40(10): 1966-1979. [GAI M, ZHU J M, SUN C Z, et al. Spatio-temporal evolution and influencing factors of marine economic efficiency in coastal areas of China. *Resources Science*, 2018, 40(10): 1966-1979.]
- [13] 李博, 张文忠, 余建辉. 碳排放约束下的中国农业生产效率地区差异分解与影响因素. 经济地理, 2016, 36(9): 150-157. [LI B, ZHANG W Z, YU J H. Decomposition and influence factors of district difference of China agricultural production efficiency under the constraint of carbon emission. *Economic Geography*, 2016, 36(9): 150-157.]
- [14] 张卓群, 张涛, 冯冬发. 中国碳排放强度的区域差异、动态演进及收敛性研究. 数量经济技术经济研究, 2022, 39(4): 67-87. [ZHANG Z Q, ZHANG T, FENG D F. Study on regional differences, dynamic evolution and convergence of carbon emission intensity in China. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2022, 39(4): 67-87.]
- [15] 屈小娥. 中国省际全要素CO₂排放效率差异及驱动因素: 基于1995—2010年的实证研究. 南开经济研究, 2012, 28(3): 128-141. [QU X E. Total factor efficiency differences of CO₂ emissions and driving factors in China's inter-provincial: Based on the 1995-2010 years of empirical research. *Nankai Economic Studies*, 2012, 28(3): 128-141.]
- [16] 莫惠斌, 王少剑. 黄河流域县域碳排放的时空格局演变及空间效应机制. 地理科学, 2021, 41(8): 1324-1335. [MO H B, WANG S J. Spatio-temporal evolution and spatial effect mechanism of carbon emission at county level in the Yellow River Basin. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(8): 1324-1335.]
- [17] 李顺成, 肖卫东, 王志宝. 家庭部门能源消费影响因素及碳排放结构研究: 基于PLS结构方程模型的实证解析. 软科学, 2020, 34(2): 117-123. [LI S C, XIAO W D, WANG Z B. Study on factors affecting energy consumption and CO₂ emissions structure in household sector: An empirical analysis based on mode of PLS-SEM. *Soft Science*, 2020, 34(2): 117-123.]
- [18] 刘志华, 徐军委, 张彩虹. 科技创新、产业结构升级与碳排放效率: 基于省际面板数据的PVAR分析. 自然资源学报, 2022, 37(2): 508-520. [LIU Z H, XU J W, ZHANG C H. Technological innovation, industrial structure upgrading and carbon emissions efficiency: An analysis based on PVAR model of panel data at provincial level. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(2): 508-520.]
- [19] 禹湘, 陈楠, 李曼琪. 中国低碳试点城市的碳排放特征与碳减排路径研究. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(7): 1-9. [YU X, CHEN N, LI M Q. Research on carbon emission characteristics and reduction pathways of low-carbon pilot cities in China. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(7): 1-9.]
- [20] 邵海琴, 王兆峰. 中国交通碳排放效率的空间关联网络结构及其影响因素. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(4): 32-41. [SHAO H Q, WANG Z F. Spatial network structure of transportation carbon emissions efficiency in China and its influencing factors. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(4): 32-41.]
- [21] 周杰琦, 韩颖, 林洪. FDI对中国工业碳排放效率的影响机理及其效应: 理论构建与经验分析. 软科学, 2016, 30(1): 76-80. [ZHOU J Q, HAN Y, LIN H. The effects and mechanisms of FDI on industrial carbon efficiency of China: Theory and empirical research. *Soft Science*, 2016, 30(1): 76-80.]
- [22] 朱德进, 杜克锐. 对外贸易、经济增长与中国二氧化碳排放效率. 山西财经大学学报, 2013, 35(5): 1-11. [ZHU D J, DU K R. Foreign trade, economic growth and the efficiency of carbon emission in China. *Journal of Shanxi University of Finance and Economics*, 2013, 35(5): 1-11.]
- [23] 何文举, 张华峰, 陈雄超, 等. 中国省域人口密度、产业集聚与碳排放的实证研究: 基于集聚经济、拥挤效应及空间效应的视角. 南开经济研究, 2019, 35(2): 207-225. [HE W J, ZHANG H F, CHEN X C, et al. An empirical study about population density, economic agglomeration and carbon emission state of Chinese provinces: Based on the perspective of agglomeration economy effects, congestion effects and spatial effects. *Nankai Economic Studies*, 2019, 35(2): 207-225.]
- [24] 李在军, 尹上岗, 姜友雪, 等. 长三角经济增长与碳排放异速关系及形成机制. 自然资源学报, 2022, 37(6): 1507-1523. [LI Z J, YIN S G, JIANG Y X, et al. Analysis of allometric relationship and formation mechanism between economic growth and carbon emissions in the Yangtze River Delta. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(6): 1507-1523.]
- [25] 王睿, 张赫, 强文丽, 等. 基于城镇化的中国县级城市碳排放空间分布特征及影响因素. 地理科学进展, 2021, 40

- (12): 1999-2010. [WANG R, ZHANG H, QIANG W L, et al. Spatial characteristics and influencing factors of carbon emissions in county-level cities of China based on urbanization. *Progress in Geography*, 2021, 40(12): 1999-2010.]
- [26] CHARNES A, COOPER W W, RHODES E. Measuring the efficiency of decision-making units. *European Journal of Operational Research*, 1978, 2(6): 429-444.
- [27] FRIED H O, LOVELL C A K, SCHMIDT S S, et al. Accounting for environmental effects and statistical noise in data envelopment analysis. *Journal of Productivity Analysis*, 2002, 17(1): 157-174.
- [28] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 2001, 3: 498-509.
- [29] TONE K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 2002, 1: 32-41.
- [30] 罗登跃. 三阶段DEA模型管理无效率估计注记. *统计研究*, 2012, 29(4): 104-107. [LUO D Y. A note on estimating managerial inefficiency of three-stage DEA model. *Statistical Research*, 2012, 29(4): 104-107.]
- [31] 孙亚男, 杨名彦. 中国绿色全要素生产率的俱乐部收敛及地区差距来源研究. *数量经济技术经济研究*, 2020, 37(6): 47-69. [SUN Y N, YANG M Y. Research on club convergence and the source of regional gaps of green total factor productivity in China. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2020, 37(6): 47-69.]
- [32] 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, 39(10): 35-44. [ZHANG J, WU G Y, ZHANG J P. The estimation of China's provincial capital stock: 1952-2000. *Economic Research Journal*, 2004, 39(10): 35-44.]
- [33] 张少辉, 余泳泽, 杨晓章. 中国城市固定资本存量估算与生产率收敛分析: 1988—2015. *中国软科学*, 2021, 36(7): 74-86. [ZHANG S H, YU Y Z, YANG X Z. Estimation of China's urban fixed capital stock and productivity convergence analysis: 1988-2015. *China Soft Science*, 2021, 36(7): 74-86.]
- [34] 柯善咨, 向娟. 1996—2009年中国城市固定资本存量估算. *统计研究*, 2012, 29(7): 19-24. [KE S Z, XIANG J. Estimation of the fixed capital stocks in Chinese cities for 1996-2009. *Statistical Research*, 2012, 29(7): 19-24.]
- [35] 韩刚, 袁家冬, 张轩, 等. 紧凑城市空间结构对城市能耗的作用机制: 基于江苏省的实证研究. *地理科学*, 2019, 39(7): 1147-1154. [HAN G, YUAN J D, ZHANG X, et al. The mechanism of compact city spatial structure on energy consumption: An empirical research based on Jiangsu province. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(7): 1147-1154.]
- [36] ODA T, MAKSYUTOV S, ANDRES R J. The open-source data inventory for anthropogenic CO₂, version 2016 (ODI-AC2016): A global monthly fossil fuel CO₂ gridded emissions data product for tracer transport simulations and surface flux inversions. *Earth System Science Data*, 2018, 10(1): 87-107.
- [37] LAUVAUX T, MILES N L, DENG A, et al. High-resolution atmospheric inversion of urban CO₂ emissions during the dormant season of the Indianapolis Flux Experiment (INFLUX). *Journal of Geophysical Research*, 2016, 121(10): 5213-5236.
- [38] YANG S, LEI L, ZENG Z, et al. An assessment of anthropogenic CO₂ emissions by satellite-based observations in China. *Sensors*, 2019, 19(5): 1118, Doi: 10.3390/s19051118.
- [39] 李健, 周慧. 中国碳排放强度与产业结构的关联分析. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(1): 7-14. [LI J, ZHOU H. Correlation analysis of carbon emission intensity and industrial structure in China. *China Population, Resources and Environment*, 2012, 22(1): 7-14.]
- [40] 叶琴, 曾刚, 戴劲劼, 等. 不同环境规制工具对中国节能减排技术创新的影响: 基于285个地级市面板数据. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(2): 115-122. [YE Q, ZENG G, DAI S Q, et al. Research on the effects of different policy tools on China's emissions reduction innovation: Based on the panel data of 285 prefectural-level municipalities. *China Population, Resources and Environment*, 2018, 28(2): 115-122.]
- [41] 王兴民, 吴静, 白冰, 等. 中国CO₂排放的空间分异与驱动因素: 基于198个地级及以上城市数据的分析. *经济地理*, 2020, 40(11): 29-38. [WANG X M, WU J, BAI B, et al. Spatial differentiation and driving factors of CO₂ emissions: Analysis based on 198 cities at prefecture level and above in China. *Economic Geography*, 2020, 40(11): 29-38.]

Evaluation of carbon emission efficiency of resource-based cities and its policy enlightenment

ZHANG Ming-dou, XI Sheng-jie

(School of Economics, Dongbei University of Finance and Economics, Dalian 116025, Liaoning, China)

Abstract: Based on the dual pressures of economic transformation and energy conservation and emission reduction faced by resource-based cities, this paper empirically measures the carbon emission efficiency of 114 resource-based cities in China from 2004 to 2019 by using a three-stage super-efficiency SBM model, and discusses the efficiency differences, spatio-temporal evolution and sources of differences by using the methods of Dagum Gini coefficient, kernel density estimation and QAP regression analysis. The results show that: (1) After the environmental factors and random interference is removed, the average carbon emission efficiency of resource-based cities decreases to 0.230, but the overall trend is on the rise. (2) The areas with high carbon emission efficiency are concentrated in regenerating and mature cities, and the distribution is relatively scattered. The low value areas are mainly growing and declining cities, and they are clustered in northeast, central and other regions. (3) The carbon emission efficiency of resource-based cities varies greatly, among which the contribution rate of inter-group difference is the highest, but it shows a downward trend; The differences within the groups of regenerating and mature cities are relatively stable, while the differences within the groups of growing and declining cities are gradually expanding. (4) The differences of population density, per capita disposable income and the number of large-scale enterprises will significantly expand the differences of carbon emission efficiency of resource-based cities, and the differences in population density, population structure and disposable income of residents have a significant heterogeneous impact on the differences in carbon emission efficiency of different types of resource-based cities. Considering the characteristics of carbon emission efficiency of resource-based cities, this paper puts forward the following policy implications: Firstly, according to the types of resource-based cities, we should adopt emission reduction schemes that suit local conditions. Secondly, we should increase investment in low-carbon innovation and promote green transformation of industry. Resource-based cities can increase R&D investment by imitating innovation, and make low-carbon innovation more directional and targeted. At the same time, resource-based cities should encourage enterprises to carry out green technological transformation and upgrading. Thirdly, we will promote green consumption mode and strengthen emission reduction of residents. The government should enhance residents' cognitive level of consumption emission reduction ability and encourage consumers to make low-carbon consumption. Moreover, the government should explore green financial innovation, establish individual carbon credit and carbon account system, and encourage residents' participation in green financial market.

Keywords: resource-based cities; carbon emission efficiency; source of difference; three stage super-efficiency SBM model