

基于 SBM-DEA 浙江省碳排放效率时空演变研究

成远^{1a,2} 乔观民^{1a,2} 梅思雨^{1a,2} 宁爱凤^{1b1}

(1. 宁波大学 a. 地理与空间信息技术系/

陆海国土空间利用与治理研究中心;b. 法学院, 浙江 宁波 315211;

2. 浙江省新型重点专业智库/宁波大学东海研究院, 浙江 宁波 315211)

【摘要】: 推进高质量绿色发展, 碳减排治理需要综合考量碳排放效率。运用 Undesired-super efficiency SBM 模型与 Malmquist 指数模型对 2010—2019 年浙江省 11 个地级市的碳排放效率进行测算, 在此基础上, 运用固定效应分析影响该省碳排放效率的因素。结果表明: (1) 浙江省碳排放效率受规模效率制约, 空间上具有分异性且固化效应明显。(2) 浙江碳排放冗余量大、减排潜力高, 可减排规模、相对减排潜力与碳排放纯技术效率呈反向变化。(3) 浙江省碳排放效率与经济发展水平、对外开放程度呈正相关关系, 与要素禀赋、能源结构、产业结构和技术水平呈负相关关系, 产业结构对碳排放效率影响最大。

【关键词】: SBM-DEA 模型 Malmquist 指数 碳排放效率 碳减排

【中图分类号】: F301.24; X321 **【文献标志码】:** A **【文章编号】:** 1005-8141(2022)03-0272-08

2009 年, 哥本哈根世界气候大会达成全球碳减排协议, 我国明确提出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。削减碳排放的关键是提高碳排放效率, 实现既承担全球环境责任, 又推动经济可持续发展。在经济新常态下, 加快经济增长与碳排放“脱钩”, 有助于实现优化能源等资源配置, 增加经济发展新动能。碳排放测算主要采用《IPCC 国家温室气体清单指南》的算法, 碳排放效率测算与评估模型主要包括随机前沿分析^[1,2]、ZSG-DEA 模型^[3,4]、三阶段 DEA 模型^[5]、SBM-DEA 模型^[6]、社会网络分析 (SNA)^[7]、Malmquist 指数法^[8]等。在此基础上, 研究影响碳排放效率因素, 验证了区域产业结构、能源结构、科技水平、环保政策与碳排放效率具有显著相关性^[9,10], 城市化水平^[11]与自然资源丰度^[12]也是重要影响因素。从地区公平角度考量, 历史排放责任和地区转移责任^[13]也应纳入划定排放量中。我国碳排放效率呈现空间非均衡格局^[14], 在此基础上, 划定优先度^[15], 着重解决“高量低效”区域^[16]。当前研究多基于减少碳排放量视角或提高碳排放效率视角, 而对于碳减排量—碳排放效率纳入统一框架的研究很少。本文运用 SBM-DEA 模型计算碳排放效率和可减排规模, 深入探讨碳减排效率与公平关系, 在总量控制下达成碳减排目标, 为区域绿色高质量发展提供新思路, 同时实现空间效率与公平的统一。

浙江省作为我国沿海开放经济的先行区, 政府长期坚持发展低碳经济。关于浙江省的碳排放及碳排放效率研究也较多, 主要包括碳排放空间分布格局^[17]、碳排放效率测度^[6,18]、经济发展与碳排放的脱钩^[19]、影响因素探究^[20]。其中, 碳排放效率集中于浙江省在长三角中的比较。DEA 模型受决策单元影响大, 以浙江省为研究单元可更准确地反映省级行政区内碳排放效率差异。“十

作者简介: 成远 (1997-), 男, 山西省太原人, 硕士研究生, 研究方向为区域经济与发展规划。乔观民 (1971-), 男, 安徽省庐江人, 博士, 副教授, 长期从事区域发展研究。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 41976209); 浙江省软科学基金项目 (编号: 2019C35038)

四五”期间，浙江省碳减排治理进入改革深水阶段，如何高效进行碳排放治理成为关注的热点。本文运用 SBM-DEA 模型，以浙江省 11 个地级市作为研究单元，对 2010—2019 年浙江省碳排放效率时空变化进行了测度及成因分析，廓清浙江省碳减排的发展规律，为进一步探究省域碳排放治理，实现区域高质量发展提供理论支撑。

1 研究方法

1.1 SBM 模型

数据包络分析 (Data Envelopment Analysis, DEA) 是对具有多项投入、多项产出指标的复杂决策单元进行线性规划，是一种非参数评估方法^[21]。Tone^[22]提出了非径向且基于松弛变量的超效率 DEA 模型 (Slacks-Based Measure, SBM)，该模型直接将松弛变量加入目标函数，其结果可以在实际利润的最大化基础上展现效益比例结构优化，以较好地地区分不同决策单元的效率，评价非期望产出下的生产部门效率。通过 SBM 模型可测算出生产部门的规模效率和纯技术效率，综合两者可得到综合技术效率，即为碳排放效率。模型假设有 n 个决策单元，每个决策单元由投入 m 、期望产出 r_1 和非期望产出 r_2 构成，则含有非期望产出的超效率 SBM 模型为：

$$\rho^* = \min \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{\bar{x}}{x_{ik}} \right)}{\frac{1}{r_1 + r_2} \times \left(\sum_{s=1}^{r_1} \frac{y^d}{y_{sk}^d} + \sum_{q=1}^{r_2} \frac{y^u}{y_{qk}^u} \right)}$$

$$\begin{cases} \bar{x} \geq \sum_{j=1, j \neq k}^n x_{ij} \sigma_j \quad (i = 1, 2, \dots, m) \\ \bar{y}^d \leq \sum_{j=1, j \neq k}^n y_{sj}^d \sigma_j \quad (s = 1, 2, \dots, r_1) \\ \bar{y}^u \geq \sum_{j=1, j \neq k}^n y_{qj}^u \sigma_j \quad (q = 1, 2, \dots, r_2) \\ \sigma_j \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n) \\ \bar{x} \geq x_k \quad (j = 1, 2, \dots, m) \\ \bar{y}^d \leq y_k^d \quad (s = 1, 2, \dots, r_1) \\ \bar{y}^u \leq y_k^u \quad (u = 1, 2, \dots, r_2) \end{cases} \dots\dots (1)$$

式中， ρ^* 为目标碳排放效率值； \bar{x} 、 y_s^d 和 y_q^u 分别为投入、期望产出和非期望产出；向量 \bar{x} 、 y^d 和 y^u 分别为投入松弛量、期望的产出松弛量和非期望产出的松弛量。

1.2 Malmquist 指数模型

本文采用 RolfFare 等提出的 Malmquist 生产指数^[23]测算浙江省全要素碳排放效率动态变化，该指数方法可以分析出各区域生产的技术进步和技术效率。其中，技术效率指数反映管理方法、管理结构的优劣和决策的正确与否等问题，而技术进步指数表征节能减排技术进步。计算公式为：

$$M(x^{t+1}, y^{t+1}, x^t, y^t) = \sqrt{\frac{D^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D^t(x^t, y^t)} \times \frac{D^t(x^t, y^t)}{D^{t+1}(x^t, y^t)}} \dots \dots \dots (2)$$

式中， $D^t(x^t, y^t)$ 、 $D^{t+1}(x^t, y^t)$ 表示以 t 年技术水平为参考， t 和 $t+1$ 年决策单元的距离函数。

1.3 面板数据模型

面板数据 (Panel data) 模型可以反映变量在截面上和时间上的变化规律及其特征^[24]。式 (3) 为面板回归模型，式 (4) 为面板回归的 LLC 检验，计算公式为：

$$y_{it} = \alpha_i + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ijt} + v_{it} \dots \dots \dots (3)$$

$$\Delta y_{it} = \rho y_{it-1} + \sum_{j=1}^k \gamma_j \Delta y_{it-j} + X'_{it} \beta + \mu_{it} \dots \dots (4)$$

式中， $i=1, 2, \dots, N$ 表示浙江省地区城市； $t=1, 2, \dots, t$ 表示时间，2010—2019 年时间跨度是 10 年； x_{it} 表示 t 年的 i 城市因变量。非观测效应 α_i 与误差项 v_{it} 相关。同时， $\alpha_i = \bar{\alpha} + \alpha^*$ 。其中， $\bar{\alpha}$ 表示均值截距项，即该项相同时间不同成员的截面； α^* 表示截面个体成员截距项，为成员的截距对整体截距的偏离； X'_{it} 表示外生变量。 $|\rho_i| < 1$ ，则序列 y_{it} 是弱平稳序列； $|\rho_i| = 1$ ，则序列 y_{it} 包括 1 个单位根。

2 指标选取与数据来源

2.1 投入产出指标选取

碳排放效率研究中投入变量一般包括能源消耗、资本和劳动力，产出变量选取地区生产总值作为期望产出，碳排放量为非期望产出^[25, 26, 27]。具体为：(1) 能源消耗量。能源消耗量是将原化石能源按照标准系数折算成标准煤^[19, 28]。(2) 劳动力。劳动力投入以全社会就业人数代替。(3) 资本存量。采用永续盘存法 (PIM)^[29]，按不变价格计算浙江省各个地级市的资本存量，计算公式为： $K_{it} = K_{it-1}(1 - \sigma_{it}) + I_{it}$ 。式中， K_{it} 为第 i 省第 t 年的资本存量； σ_{it} 为经济折旧率； I_{it} 为第 i 省第 t 年的固定资产投资总额。固定资产的经济折旧率选取为 0.096^[30]。(4) GDP。国内生产总值以 2010 年为基期进行物价指数平整，获得实际的 GDP 值。(5) 碳排放量。其计算公式为： $C = \sum A_i B_i$ 。式中， C 为碳排放总量； A_i 为各种能源消费量； B_i 为能源的碳排放系数。其中，碳排放系数取 2.499tCO₂/tce^[31]。

2.2 影响因素指标

基于已有的文献^[32, 33, 34]，本文结合浙江省的发展实际情况，综合考虑碳排放效率的经济、社会、技术、政策等因素，解释变量选取能源结构 (ES)、经济发展水平 (EDL)、城市化水平 (UD)、产业结构 (IS)、要素禀赋 (CL)、技术水平 (TL)、对外开放度 (OP) 等。解释变量表征为：(1) 能源结构。根据《IPCC 国家温室气体清单指南》，原煤、洗精煤、焦炭、液化石油气、天然气、原油、汽油、煤油、柴油、油燃料等化石能源对应的碳排放量是不同的，采用原煤消费量占能源消费总量的比重表征能源结构。通常，原煤消费量比重越高，碳排放越多，能源的利用水平越低。(2) 经济发展水平。经济活动需要能源支撑，经济发展水平与碳排放、碳排放效率具有很强的相关性。区域经济发展水平采用人均实际 GDP 表示。(3) 城市化水平。城市化整体提升了居民的消费水平和基础设施利用，影响了碳排放及碳排放效率。一般城市化水平越高，碳排放量越大。城市化水平采用非农业就业

人数比重与非农产值占 GDP 的比重二者平均值来表征。(4)产业结构。产业结构调整影响能源利用量和能源利用结构,并进一步影响碳排放水平。第三产业既反映了产业结构高度化水平,也有利降低碳排放,提高了碳排放效率,因此用第三产业占 GDP 的比重来表示产业结构。(5)要素禀赋。在全要素框架下,资本、劳动和能源之间具有约翰·希克斯的替代效应,要素组合、替代对碳排放、碳排放效率具有影响。碳排放主要来源于第二产业,因此用第二产业的资本有机构成来表征要素禀赋,即第二产业资本量与从业人员比值(人均资本占有量)。(6)技术水平。科技是第一生产力,科技进步可降低碳排放,提高碳排放效率。采用专利授权数表征地区技术水平。(7)对外开放度。浙江省地处沿海开放前沿地带,对外开放度扩大了碳足迹,增加了碳排放,同时积极引进新技术、新管理等,提高了碳排放效率。对外开放度一般用外贸依存度表征,即进出口贸易总额占 GDP 的比重。

2.3 数据来源

本文数据主要来源于 2011—2020 年《浙江省统计年鉴》、浙江省各地级市统计年鉴和各地级市统计公报。

3 结果及分析

3.1 时间变化特征

本文运用 Undesired-super efficiency SBM 模型测算了 2010—2019 年浙江省碳排放的综合技术效率、纯技术效率和规模效率,结果发现三者均呈现下降的态势(图 1)。

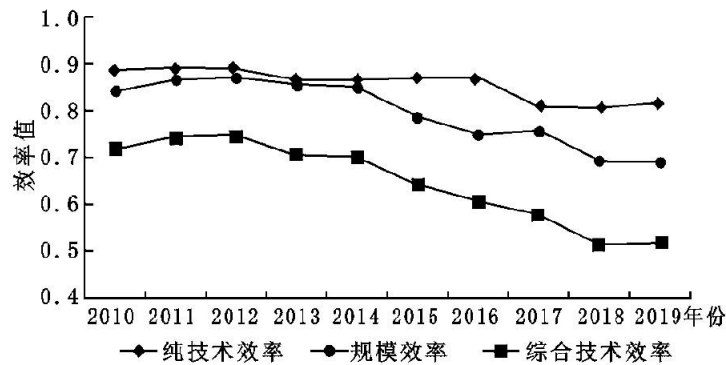


图 1 2010—2019 年浙江省碳排放效率变化水平

2010—2019 年,浙江省碳排放综合技术效率、纯技术效率、规模效率的均值分别为 0.646、0.855、0.795,碳排放综合技术效率、纯技术效率、规模效率均没有达到生产前沿面。纯技术效率处于较高水平,碳排放综合技术效率主要取决于规模效率。2010—2014 年综合技术效率均值为 0.722,变化平缓,2014 年后综合技术效率急剧下降,到 2019 年综合技术效率为 0.519,与生产前沿面差距很大。整体上,浙江省纯技术效率下降幅度较小,但在 2012—2013 年和 2016—2017 年出现明显的下降态势。规模效率可划分为两个阶段,即 2010—2012 年呈上升趋势,2013 年—2019 年呈下降趋势,说明在当前情况下,浙江省具有较大,碳减排空间。2010—2019 年,浙江省碳排放效率由 0.719 降至 0.519,年均下降了 3.55%,能源、劳动力、资本投入等投入要素呈现冗余状态,生产效率下降。2010—2019 年,浙江省单位 GDP 碳排放(碳排放强度)的降低较为明显,由 1.469t/万元下降至 0.895t/万元,年均下降了 5.35%,说明在走绿色发展之路,实现碳减排过程中,浙江省全要素生产效率受到了一定程度的影响。因此,浙江省高质量发展必须把碳减排与提高碳排放效率有机统一起来。

3.2 空间分异特征

浙江省碳排放效率存在着空间分异性。整体上,浙江省碳排放效率以杭州市为高值中心区,向外围不断降低,呈现环状分布特征。具体特征为:(1)碳排放效率区域极化效应显著。2010—2019年,杭州市碳排放效率由1.140上升至1.314,年均增长了1.59%,综合技术效率大于1,处于技术前沿面,在全省排名第一;碳排放强度从0.682t/万元降低到0.197t/万元,实现了碳减排与碳减排效率提升的“双赢”局面。2010—2019年,衢州市碳排放效率由0.31下降至0.304,碳排放强度由2.505t/万元降低到1.246t/万元,综合技术效率始终低于0.5,碳减排明显而碳排放效率略有下降,是浙江碳减排效率最低的地级市。(2)碳排放效率大幅度下降,主要城市包括温州市、舟山市、金华市。以温州市为例,2010—2019年碳排放效率从1.089降低到0.421,碳排放强度由0.648t/万元降低到0.452t/万元。该类城市的碳减排具有差异性,碳排放效率由超效率大幅度降低到低效率区。特别需要指出的是,舟山市碳排放效率从1.094降低到0.379,但碳排放强度从0.513t/万元增加到0.622t/万元,导致非期望产出增加而碳排放效率降低,没有实现碳减排,说明碳减排影响了生产效率的命题需要综合考虑,进一步进行要素分析。(3)碳排放效率缓慢下降,主要城市有绍兴市、丽水市、台州市。代表城市台州市,2010—2019年碳排放效率从0.582降低到0.431,碳排放强度由1.270t/万元降低到0.771t/万元,碳减排明显,而碳排放效率具有一定的下降,规模效率大幅下降,与纯技术效率水平差距增大,碳排放效率主要受到规模效率下降影响。(4)碳排放效率长期处于低水平且波动不大的城市主要有宁波市、嘉兴市、湖州市,最典型的是宁波市。2019年宁波市碳排放量为1.85亿t,约占浙江省碳排放总量的46.1%。2010—2019年,宁波市碳排放效率由0.503降低至0.474,年均下降了0.66%,属于小幅波动,而碳排放强度由3.6t/万元降至1.72t/万元,碳减排明显。该类城市是浙江省碳减排重点地区。

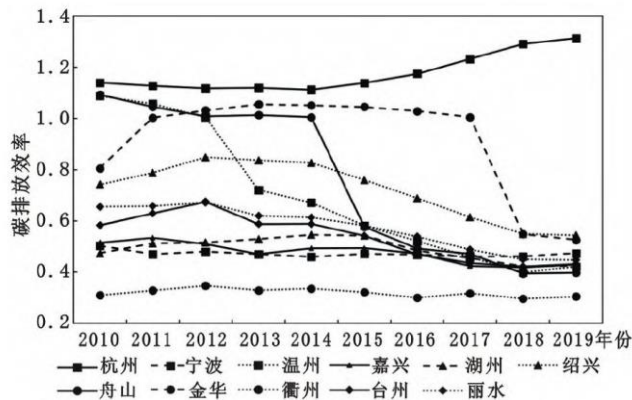


图2 2010—2019年浙江省11个地级市碳排放效率水平

3.3 碳排放 Malmquist 指数空间分异

本文利用 Malmquist 模型计算技术效率指数、技术进步指数和全要素生产率变化指数 (TFP 指数) 进一步测算了相邻年份间碳排放的动态变化可见,2010—2019年浙江省 TFP 指数皆小于1,全要素生产率有待提升;技术效率变化指数在2012—2013年、2015—2016年、2016—2017年与2017—2018年指数小于1,表明这些时段技术效率下降;技术进步指数仅2017—2018年大于1,其他年份均小于1。总体上,浙江省全要素生产率受技术进步指数制约,因此应大力发展低碳技术,运用技术创新来提高全要素生产率。

2010—2019年浙江省 Malmquist 生产率指数也具有很强的区域差异性。总体全要素生产率指数大于1的城市有杭州、宁波,这两座城市的碳排放效率持续改善。其中,杭州是管理水平、技术进步双改善;宁波属于管理水平高,技术进步水平没有实现持续提高,但总体水平达到了持续改善。杭州市的技术效率与技术进步效率、全要素生产率都大于1,区域碳排放效率水平不断加强。2010—2019年杭州市碳排放强度下降了71.06%,区域新兴互联网经济发达、高新科技园区众多、产业轻型化。宁波市、湖州市、丽水市、衢州市和台州市技术效率大于1,区域碳排放的管理、决策水平持续进步,而技术进步指数小于1,制约了全要素生产率的提高。以宁波市为例,2010—2019年该市碳排放强度下降了52.2%,但碳排放量却上涨了21.7%,说明碳排放还没

有进入峰顶，碳减排对全要素生产效率具有一定的影响。这些城市的全要素生产率主要受技术效率制约，发展重点是加强科技研发投入，引进先进生产技术改善当地生产技术，提高能源利用效率。嘉兴市、绍兴市、金华市和温州市技术效率与技术进步均小于1，全要素生产率呈现下降趋势。温州市具有典型性，2010—2019年该市碳排放强度下降了33.3%，碳排放增加了58.5%。这些城市的碳减排对于全要素生产率负面影响比较显著。舟山市技术效率指数小于1，而技术进步指数大于1，全要素生产率受到技术效率制约。2010—2019年，舟山市碳排放强度上涨了17.1%，主要是由于舟山大力发展港口重化工业造成的，说明产业结构对于碳排放、碳排放效率具有显著影响。

总体上，2010—2019年浙江省Malmquist生产率指数均有所提高。该省技术效率平均值与生产前沿面相比提高了0.2%，区域内部各城长的增长速率差距缩小，表明2010—2019年经济较为落后、基础设施较为薄弱的城市技术效率不断提高。同时，浙江省的技术指数没有提高，说明技术进步指数的提升是全要素生产率增长的主要因素。

3.4 碳排放冗余量分析

根据刘文君、刘秀春^[35]的研究，本文设置了3个碳减排指标：(1)可减排规模。区域碳排放的冗余量绝对值是指在产出指标一定时，相对于现有技术水平的最合理投入指标下可降低的碳排放量。(2)相对减排潜力。区域碳排放冗余量（可减排规模）与排放量的比值表示在现有碳排放规模下降低碳排放的潜力。(3)减排重要性。区域可减排规模与可减排总量比值体现了区域在完成全省碳减排任务中的重要性。为了推进碳排放交易实践，本文再设置了两个指标：(1)平均承担碳排放量。按照绝对公平的角度，2010—2019年浙江省碳排放总量均值为37649t，其中可减排规模12732万t，平均减排潜力32.86%，把平均减排潜力分配到各地级市，获得平均承担碳排放量。(2)交易指标。交易指标指可减排规模与平均承担碳排放量之间的差值。交易指标为正时，该城市为碳排放交易的卖方是最优选择；交易指标为负时，代表该城市为碳排放交易的买方是最优选择。本文依据5个碳减排指标计算了浙江省11个地级市碳减排潜力。

从相对减排潜力视角来看，衢州市和嘉兴市的减排潜力最大，相对减排潜力均超过了0.5，分别为0.691和0.598；湖州市、台州市、宁波市、绍兴市、温州市的碳减排潜力为0.242—0.466；金华市、杭州市、丽水市和舟山市相对碳减排潜力较小，除金华市外，其他城市的减排潜力为0，但在实际生产生活中仍然具有改善碳排放效率的空间。减排重要性以宁波市为最大，重要性为0.488；其次是嘉兴市、台州市、衢州市，减排重要性分别为0.156、0.111、0.094；其他城市对于浙江省整体的碳排放效率影响较小。

在总量控制碳减排基础上，完善碳排放交易体系。2010—2019年浙江省碳排放可减排平均规模为12372万t，说明该省碳排放冗余量较大，具有很高的减排潜力。因此，应充分发挥碳排放交易市场对控制温室气体排放的作用，降低全社会减排成本。以杭州市为例，在当前技术水平下，碳可减排规模为零，内部减排困难较大，进入技术瓶颈期。为落实公平原则，分担责任为1074.57万t，可通过购买碳减排潜力大地区碳排放量。如嘉兴等城市，在当前技术水平下，利用杭州的碳产权交易获得的经济利益，加强科技投入，实现碳减排目标，这样买卖双方实现双赢，整个社会的运行效率最高。

4 浙江省碳排放效率影响因素分析

城市碳排放效率与冗余量具有明显的地域分异特征。按照可减排规模、碳排放效率年均值（1124.73, 0.65）作为临界点，浙江省可减排规模—碳排放效率可以组合为4种类型（图3）。(1)大规模—高效率。目前无此类型城市。(2)低规模—高效率。包括杭州市、金华市、舟山市、绍兴市与温州市，该类城市具有碳排放效率高而碳减排潜力较小特征；低规模—低效率，代表城市为丽水市与湖州市，该类型城市具有碳排放效率和减排潜力双低的特点。(3)大规模—低效率。包括台州市、嘉兴市、衢州市与宁波市4个城市，该类城市具有碳排放效率低而减排潜力大的特点，是碳排放改进的重点地区。

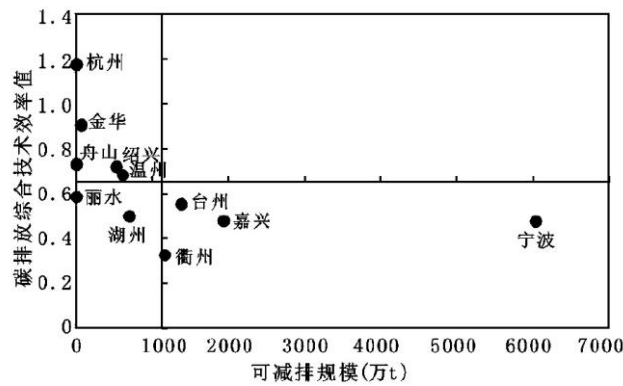


图 3 浙江省 11 个地级市可减排规模—碳排放效率组合

2010—2019 年浙江省碳排放效率为因变量，影响因素为自变量，形成面板数据。建立回归模型，运用 Eviews10.0 软件对浙江省碳排放效率与影响因素进行了单位根平稳性检验。一阶差分中影响因素的 LLC 检验 P 值均小于 0.05, ES、EDL、UD、IS、CL、TL 与 OP 等因素属于平稳序列。模型的 Hausman 检验估计，统计量为 27.627，伴随概率为 0.0003，小于 0.05，因此拒绝随机效应模型原假设，建立固定效应模型。

总体上，浙江省碳排放效率与经济发展水平、对外开放度之间具有显著的正相关关系，相关系数分别为 0.033、0.230，表明碳排放效率与经济发展水平之间存在相互促进关系。对外开放程度即贸易依存度越高，碳排放效率越高，这是由于许多发达国家在进出口贸易时都建立了“绿色壁垒”，ISO14000 环境管理系列标准体现了外部约束对于碳排放效率的促进作用。要素禀赋、能源结构、产业结构和技术水平对浙江省碳排放效率具有显著的负面影响，相关系数为-0.034、-0.463、-1.052 与-0.199。要素禀赋提高代表第二产业资本有机构成提高，浙江省在机器换人的产业类型转变过程中降低了碳排放效率；化石能源等在能源结构中比例越高，碳排放效率越低；第三产业产值占 GDP 比重越高，碳排放效率越低，这主要是当前浙江省除杭州市外，整体处于工业化中期向后期迈进阶段，第三产业比重难以撼动重化工业深化局面；技术进步对于碳排放效率降低，这是由于技术进步降低了碳排放强度，而对于全要素生产率影响呈现下降趋势，这是碳减排到深水区存在的现象。

对于低规模—高效率类型城市而言，经济发展水平、要素禀赋、产业结构、技术水平对碳排放效率具有显著相关性。经济发展水平对该类型城市具有显著正面影响，系数为 0.086，提高该类型城市的经济发展水平，有利于碳排放效率的提高；要素禀赋、产业结构和技术水平对该类城市具有显著负面影响，系数分别为-0.037、-2.556 和-0.408。对于低规模—低效率类型城市而言，产业结构对该类城市具有显著负面影响，影响系数为-1.864，当地第三产业的发展并没有降低碳排放效率。对于大规模—低效率类型城市而言，对外开放程度与技术水平对碳排放效率具有显著影响。对外开放对于碳排放效率具有显著正面影响，系数为 0.222，外贸是碳排放正向驱动力；技术水平具有显著负面影响，系数为-0.067。对于大规模—低效率类型城市而言，继续扩大开放水平是提高碳排放效率的重要路径。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文运用 Undesired-super efficiency SBM 模型与 Malmquist 指数模型对 2010—2019 年浙江省 11 个地级市的碳排放效率进行了测算，并在此基础上，运用固定效应分析了影响该省碳排放效率的因素，结论如下：(1)浙江省碳减排全要素效率受到边际报酬递减规律制约。新阶段，碳减排应与提高碳排放效率有机统一起来，规模、技术紧密结合，以提高综合效率。从尺度分析发现，杭州市实现碳排放强度、碳排放总量均实现了大幅度下降，而碳排放效率却在上升，说明具有实现碳减排且提高全要素生

产率的路径是大力发展信息产业集群、文化创意产业、旅游休闲产业、金融服务产业、健康产业、时尚产业、高端装备制造等产业，推动区域高质量发展。(2)浙江省碳排放效率空间分异大，区域固化效应明显。通过 Malmquist 指数测算发现，技术效率达到了前沿面，因此技术进步是影响浙江省全要素生产效率的关键。碳排放效率不同等级地区之间流动性不高，呈现固化现象，各地区 TFP 指数动态变化出现“强者愈强，弱者愈弱”的马太效应。杭州市领先发展，而其他城市碳排放效率呈现普遍下降的现象，这是由于当前整个浙江省产业演进进入重化工业阶段，而杭州进入后工业化阶段形成的碳排放格局。(3)浙江省碳减排潜力高，产业结构是制约碳排放效率的关键因素。整体上，浙江省碳排放冗余量较大，具有很高的减排潜力。衢州和嘉兴减排潜力最大，应加大关注其碳排放效率与技术；宁波是减排最重要的城市，对浙江省碳排放总量具有显著影响。各个城市的碳排放纯技术效率变化趋势同可减排规模、相对减排潜力呈相反的关系，纯技术效率高的地区可减排规模与相对减排潜力相对较低。从面板数据回归结果发现，浙江省碳排放效率与经济发展水平、对外开放程度呈现显著性正相关关系，与要素禀赋、能源结构、产业结构、技术水平具有显著性负相关关系。其中，产业结构的相关系数最大，是影响碳排放效率的关键因素。

5.2 讨论

本文拟通过“碳排放冗余量+碳排放效率”组合分类指导，实现公平与效率的统一。当前碳排放“公平”视角的研究主要是区域排放量差异的绝对公平^[17]。“公平”兼顾“效率”采用“碳排放量+碳排放效率”^[36]来追求相对公平，而运用“碳排放冗余量+碳排放效率”侧重于碳减排，兼顾经济总量，对经济体量较大地区更为公平，建立碳交易体系，实现全社会的帕累托改进。

完善多层次的碳排放交易体系：浙江省碳排放交易体系—长三角碳排放交易体系—全国碳排放交易体系进行层级制管理，因地制宜推动区域减排任务与长期发展目标并重。低规模—高效率、低规模—低效率、大规模—低效率 3 种类型的地区应利用各自优势实现减排，达到高质量发展。(1)“大规模—低效率”地区是浙江省实现碳减排，提高碳排放效率的重点地区。该类地区碳排放效率主要受到对外开放程度和技术水平制约，因此进一步提高地区开放水平，优化出口产品结构，鼓励出口高附加值、低能源强度的产品与服务；大力发展新能源、新材料、现代装备制造业等新兴工业，加快循环经济建设，推动港口大工业的 ISO14000 认证等措施来提高碳排放效率；积极引导与鼓励企业发展低碳、绿色、循环、生态产业，大力发展提高能源利用效率的技术，对高能耗的企业进行规制，实现碳减排和碳排放效率的双改善。(2)“低规模—低效率”地区碳排放效率更多受到产业结构制约，重工业比例高，因此应积极推动产业结构升级，充分发挥技术进步作用，提高全要素生产率，从而提升碳排放效率水平，缩小城市之间碳排放效率差距。(3)“低规模—高效率”类型地区处于碳减排较为领先的地位，可以尝试转变以化石能源为主导的能源体系，探索以风能、太阳能、水能、氢能等清洁能源为主体的非碳能源结构，更加注重当地产业集聚对于周边地区、城市的辐射带动作用，引领全省发展，带来更大范围的产业变革。

在碳排放量的分配上，首先考虑在相对公平的基础上合理配置各地级市碳排放配额，并在此基础上，进一步推动“效率”优先的配额体系，特别是“大规模—低效率”的地区应当打破碳排放配额交易的障碍，建立相应的碳排放交易所和地方政府配额交易制度，推动碳排放权在各区域间进行充分的流动，与企业间的碳排放交易所进行协同，对实现碳达峰与碳中和实现积极作用。SBM—DEA 实现了决策单元的碳排放效率测算，可进行尺度空间的横向比较，而 Malmquist 指数实现了碳排放效率各地级市的纵向比较，对碳排放效率的刻画更加具体。运用碳减排—碳排放效率组合分析，初步建立了一个帕累托优化的碳减排产权交易框架，如果能够建立多情景下的“碳减排—碳排放效率”交易框架，实践意义可能更大，这是今后研究的一个方向。

参考文献：

- [1]余敦涌,张雪花,刘文莹.基于随机前沿分析方法的碳排放效率分析[J].中国人口·资源与环境,2015,25(S2):21-24.
- [2]张丽峰.碳排放约束下中国全要素生产率测算与分解研究——基于随机前沿分析(SFA)方法[J].干旱区资源与环境,2013,27(12):20-24.

-
- [3]郭茹,吕爽,曹晓静,等.基于ZSG-DEA模型的中国六大行业碳减排分配效率研究[J].生态经济,2020,36(1):13-18.
- [4]曾诗鸿,徐妍.基于零和DEA模型的中国省级碳减排分配效率研究[J].管理现代化,2014,34(5):63-65.
- [5]陈晓红,易国栋,刘翔.基于三阶段SBM-DEA模型的中国区域碳排放效率研究[J].运筹与管理,2017,26(3):115-122.
- [6]杨清可,段学军,叶磊,等.基于SBM-Undesirable模型的城市土地利用效率评价——以长三角地区16城市为例[J].资源科学,2014,36(4):712-721.
- [7]吴佳勉,赵巧芝,孙圣仪.基于SNA方法的区域间碳排放空间关联网络特征测度研究[J].统计与管理,2019,(10):35-38.
- [8]余光英,员开奇.湖南省土地利用碳排放动态效率研究:基于Malmquist指数模型[J].环境科学与技术,2015,38(2):189-194.
- [9]王坤,黄震方,曹芳东.中国旅游业碳排放效率的空间格局及其影响因素[J].生态学报,2015,35(21):7150-7160.
- [10]吴贤荣,张俊飏,田云,等.中国省域农业碳排放:测算、效率变动及影响因素研究——基于DEA-Malmquist指数分解方法与Tobit模型运用[J].资源科学,2014,36(01):129-138.
- [11]Liu B, Tian C, Li Y, et al. Research on The Effects of Urbanization on Carbon Emissions Efficiency of Urban Agglomerations in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 197: 1374-1381.
- [12]Wang K, Wu M, Sun Y, et al. Resource Abundance, Industrial Structure, and Regional Carbon Emissions Efficiency in China[J]. Resources Policy, 2019, 60: 203-214.
- [13]王文举,陈真玲.中国省级区域初始碳配额分配方案研究——基于责任与目标、公平与效率的视角[J].管理世界,2019,35(3):81-98.
- [14]周迪,周丰年,郑楚鹏.公平和效率视角的中国碳排放区域差异及其固化研究[J].干旱区地理,2019,42(6):1461-1469.
- [15]宋杰鲲,张凯新,曹子建.省域碳排放配额分配——融合公平和效率的研究[J].干旱区资源与环境,2017,31(5):7-13.
- [16]周迪,郑楚鹏,华诗润,等.公平与效率协调视角下的中国碳减排潜力与路径[J].自然资源学报,2019,34(1):80-91.
- [17]严志翰,任丽燕,刘永强,等.浙江省碳排放时空格局及影响因素研究[J].长江流域资源与环境,2017,26(9):1427-1435.
- [18]郭炳南,林基.基于非期望产出SBM模型的长三角地区碳排放效率评价研究[J].工业技术经济,2017,36(1):108-115.
- [19]马娜.浙江省各地级市碳排放脱钩特征与低碳经济水平评价研究[D].杭州:浙江财经大学硕士学位论文,2016.

-
- [20] Wang S, Zeng J, Liu X. Examining The Multiple Impacts of Technological Progress on CO₂ Emissions in China: A Panel Quantile Regression Approach[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 103 : 140-150.
- [21] 孙秀梅, 张慧, 王格. 基于超效率 SBM 模型的区域碳排放效率研究——以山东省 17 个地级市为例[J]. *生态经济*, 2016, 32(5) : 68-73.
- [22] Kaoru T. A Slacks-based Measure of Efficiency in Data Envelopment Analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 143(1) : 32-41.
- [23] Zhou P, Ang B W, Han J Y. Total Factor Carbon Emission Performance: A Malmquist Index Analysis[J]. *Energy Economics*, 2010, 32(1) : 194-201.
- [24] 周倩, 邹逸江, 乔观民, 等. 长三角地区旅游发展效率空间分异及空间自相关研究——基于面板数据的解释[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2020, 33(2) : 100-106.
- [25] Wegener M, Amin G R. Minimizing Greenhouse Gas Emissions Using Inverse DEA with an Application in Oil and Gas[J]. *Expert Systems with Applications*, 2019, 122 : 369-375.
- [26] 马大来, 陈仲常, 王玲. 中国省际碳排放效率的空间计量[J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(1) : 67-77.
- [27] 李健, 马晓芳, 苑清敏. 区域碳排放效率评价及影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(12) : 4293-4300.
- [28] 孙秀梅, 张慧, 蔡振法, 等. 我国东西地区的碳排放效率对比及科技减排路径研究——基于三阶段 DEA 和超效率 SBM 模型的分析[J]. *华东经济管理*, 2016, 30(4) : 74-79.
- [29] 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, 25(10) : 17-31.
- [30] 张军, 吴桂英, 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算: 1952-2000[J]. *经济研究*, 2004, (10) : 35-44.
- [31] 郑长德, 刘帅. 基于空间计量经济学的碳排放与经济增长分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(5) : 80-86.
- [32] 郭文慧, 吴佩林, 王玎. 山东省碳排放效率与影响因素分析——基于非期望产出的 SBM 模型的实证研究[J]. *东岳论丛*, 2013, 34(5) : 172-176.
- [33] 郑长德, 刘帅. 产业结构与碳排放: 基于中国省际面板数据的实证分析[J]. *开发研究*, 2011, (2) : 26-33.
- [34] 王兵, 吴延瑞, 颜鹏飞. 中国区域环境效率与环境全要素生产率增长[J]. *经济研究*, 2010, 45(5) : 95-109.
- [35] 刘文君, 刘秀春. 基于 SBM-DEA 模型的工业碳减排潜力与影响因素分析[J]. *中南林业科技大学学报(社会科学版)*, 2019, 13(2) : 26-34.
- [36] 王兆峰, 杜瑶瑶. 基于 SBM-DEA 模型湖南省碳排放效率时空差异及影响因素分析[J]. *地理科学*, 2019, 39(5) : 797-806.