

杨传明, 王帆临, 沈洁. 基于水-能-碳三维足迹的中国碳排放效率研究[J]. 环境科学与技术, 2025, 48(2): 178-190. Yang Chuanming, Wang Fanlin, Shen Jie. Study on carbon emission efficiency based on the three-dimensional footprint of water-energy-carbon in China[J]. Environmental Science & Technology, 2025, 48(2): 178-190.

基于水-能-碳三维足迹的中国碳排放效率研究

杨传明, 王帆临, 沈洁*

(苏州科技大学城市发展智库, 江苏 苏州 215009)

摘要:水-能-碳足迹贯穿经济生产的各个部门,任何单一足迹变化将会产生联动效应,进而影响碳排放效率。以往的研究主要从生产过程的直接资源消耗和单一资源投入角度测算碳排放效率,较少考虑碳排放的其他来源以及由中间生产或消费产生的碳排放。为此该研究设计超效率EBM模型,分别评估基于水-能-碳三维足迹的直接碳排放效率、间接碳排放效率及综合碳排放效率,选择2002-2022年中国各省份为研究对象,分析其时空演变特征及影响因素。研究显示:直接、间接和综合碳排放效率在时间上均呈现先下降后上升的“U”型趋势,综合碳排放效率在不同程度上受直接碳排放效率和间接碳排放效率双重影响;技术进步是提升碳排放效率的主要驱动因素,直接碳排放效率技术进步指数最高,综合碳排放效率次之,间接碳排放效率最低;碳排放效率在空间上呈现东部>中部>西部>东北的梯度分布格局,效率重心集中分布在东部地区;经济发展、环境规制和科技创新是驱动碳排放效率提升的重要动力,城镇化率和产业结构对3种碳排放效率存在异质性影响,耗水强度和能源消耗则对3种碳排放效率起着抑制作用。基于此,提出对策建议以求更好提升中国各省份基于水-能-碳三维足迹的碳排放效率水平。

关键词:水-能-碳; 投入产出; 碳排放效率; 时空差异; 超效率EBM模型

中图分类号:X24 文献标志码:A doi:10.19672/j.cnki.1003-6504.1584.24.338 文章编号:1003-6504(2025)02-0178-13

Study on Carbon Emission Efficiency Based on the Three-dimensional Footprint of Water-Energy-Carbon in China

YANG Chuanming, WANG Fanlin, SHEN Jie*

(Urban Development Think Tank, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: The water-energy-carbon footprint runs through all sectors of economic production. Any change in a single footprint will have a linkage effect, which in turn affects the efficiency of carbon emissions. Previous studies have mainly calculated carbon emission efficiency from the perspective of direct resource consumption and single resource input in the production process, and rarely considered other sources of carbon emissions and carbon emissions generated by intermediate production or consumption. For this reason, a super-efficiency EBM model is designed to evaluate the direct carbon emission efficiency, indirect carbon emission efficiency and comprehensive carbon emission efficiency based on the three-dimensional footprint of water-energy-carbon. Then, provinces in China from 2002 to 2022 are selected as research objects to analyze their spatiotemporal evolution characteristics and influencing factors. The study shows that direct, indirect and comprehensive carbon emission efficiency all show a “U”-shaped trend of first decreasing and then increasing in time, and the comprehensive carbon emission efficiency is affected by direct carbon emission efficiency and indirect carbon emission efficiency to varying degrees; technological progress is the main driving factor for improving carbon emission efficiency, with the highest technical progress index of direct carbon emission efficiency, followed by comprehensive carbon emission efficiency, and the lowest indirect carbon emission efficiency; carbon emission efficiency presents a gradient distribution pattern of east>central>west>northeast in space, and the efficiency center is concentrated in the eastern region; economic development, environmental regulation and technological innovation are important driving forces for improving carbon emission efficiency, urbanization rate and industrial structure have heterogeneous effects on the three carbon emission efficiencies, and water intensity and energy consumption play a restraining role on the three carbon emission efficiencies. Based on this, countermeasures and suggestions are proposed to better improve the carbon emission efficiency level of various provinces in China based on the

《环境科学与技术》编辑部:(网址)http://tjks.chinajournal.net.cn(电话)027-87643502(电子信箱)hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期:2024-09-19;修回2024-11-05

基金项目:国家社科基金一般项目:新时代中国产业水-能-碳三维全足迹立体关联及协同调控研究(22BJY130)

作者简介:杨传明(1979-),教授,博士,研究方向为可持续发展管理,(电子信箱)ycmenglish@163.com;*通讯作者,(电子信箱)sj1135300485@163.com。

three-dimensional footprint of water-energy-carbon.

Key words: water-energy-carbon; input-output; carbon emission efficiency; spatiotemporal difference; super-efficiency epsilon-based measure model

随着经济社会的快速发展,水资源、能源和碳排放关系日趋尖锐,成为当前世界面临的主要风险,并被联合国列为最新可持续发展目标(SDGs)议程中的关键问题^[1]。根据联合国世界水资源发展报告(WWDR)数据,2023年中国人均水资源量为2 271.24 m³,仅为全球平均值的1/3,中国70%的城市面临着不同程度的水资源短缺问题。国际能源署(IEA)报告显示,2023年中国一次性能源消费总量占全球27.6%,碳排放量较2022年增长了1.17%,是世界上最大的能源消费国和二氧化碳排放国。由此可见,当前水资源短缺、能源消费高和碳排放激增成为中国可持续发展面临的重要挑战。然而,能源生产活动依赖于水资源,水资源开发利用也需要能源提供动力,水和能资源的消耗都会导致碳排放,而过度碳排放导致的气候变化又将影响水资源和再生能源的可用性,水、能、碳3种要素相互联系、相互制约^[2]。为此,基于水-能-碳三维足迹科学测算我国在利用水资源和能源过程中所产生的碳排放效率,评估省级层面直接、间接及综合效率水平,探索系统优化的最佳路径,对于实现可持续发展具有重要意义。

通过检索中国知网、SpringerLink等数据库,运用共同聚类法梳理筛选与水、能、碳等要素相关的有效文献,并从研究视角及研究方法进行归类。在研究视角方面,主要可分为两类,其一是基于要素耦合关联视角展开研究,多聚焦于要素的时空分布和流动模式。众多学者解析了两两要素间的关联关系,Chen等^[3]探索了能源相关碳排放的产业部门足迹;Valek等^[4]解析了城市间水-能耦合流动特征;彭辉等^[5]分析了水-能系统关联及协同效益;Okadera等^[6]分析了水资源与能源之间的足迹流动;Kang等^[7]探索了水-能耦合机制;Zhao等^[8]则聚焦水资源消耗过程中产生的碳排放。其二是基于系统视角对整体系统效率进行评价。丁绪辉等^[9]对中国30个省份的水资源利用效率及影响因素进行了评价;孙才志等^[10]对中国水资源-能源-粮食纽带系统效率进行测度,并分析了其时空演化特征。但是现有研究多关注终端产品的单一要素,忽视了中间环节的重要性。在研究方法方面,针对不同的研究视角往往采用不同的研究方法,学者主要采用生命周期评估模型(LCA)、投入产出模型(I-O)等方法进行要素耦合关联的研究,进而量化经济部门之间的复杂关系和影响。鉴于生命周期模型

对数据的依赖性较高,存在系统边界划分难统一的问题,因此较多研究往往采用投入产出模型^[11]。关于系统效率评估的研究方法,主要包括以随机前沿分析法(SFA)为代表的参数模型^[12]和以数据包络分析法(DEA)^[13]为代表的非参数模型,其中数据包络分析因不需要考虑生产函数形式,避免了参数权重的主观性,在效率度量中得到了更为广泛的应用。由于传统的DEA模型要求投入和产出同比例变化,未考虑其松弛性,导致效率度量精度不足^[14],基于非期望产出的松弛测度模型(SBM)一度成为工业^[15]、农业^[16]、旅游业^[17]等多种领域的主要方法。但有学者表示该模型在处理同时具备径向和非径向2种要素情况时存在一些局限性,为此构建EBM(epsilon-based measure)拓展了SBM模型,以能更好地适应不同类型的输入和输出^[18]。

综上所述,现有研究已较为全面,但仍存在以下几点问题。首先,水-能-碳现有的研究视角主要聚焦于各要素间的耦合关联,缺乏系统且全面的效率评价体系,难以全面系统揭示在复杂环境变化情况下的碳排放效率系统演化规律。其次,关于水-能-碳的研究方法较为单一,且模型缺乏创新,难以实现对复杂系统效率的科学评估。最后,当前研究主要关注要素的终端消耗,而忽视了中间生产或与消费相关的间接性资源消耗与碳排放,导致碳排放效率测算与理解和实际情况存在一定偏差。基于此,本文综合考虑水-能-碳要素间的流动性与系统间的关联性,构建基于水-能-碳三维足迹的碳排放效率测度框架,通过优化和改进投入产出模型,构建适用于实际研究的超效率EBM模型,并选择中国长时间跨度的多区域作为研究对象,以期水-能-碳领域碳排放效率研究提供新的视角和方法,也为未来中国各省域提升碳排放效率水平提供有针对性的对策建议。

1 模型构建

1.1 DCE-WLS模型

投入产出表可以将产业部门间的价值型关系转变成要素流动关系,从而清晰地对各产业部门间的资源消耗和碳排放关系进行描述。基本公式如下:

$$X = M(I - A)^{-1} Y \quad (1)$$

式中, X 为各部门资源消耗或碳排放的全足迹矩阵; M 为资源消耗系数或碳排放系数的对角矩阵, m_i

为其中元素,代表各部门单位产值的资源消耗量或碳排放量; I 为单位矩阵; A 为直接消耗系数矩阵, a_{ij} 为其中元素; Y 为投入产出表的最终需求列向量。鉴于传统投入产出表的行向量表示一个部门分配给各部门用于生产消耗的产品量,列向量表示各部门为该部门生产消耗所投入的产品价值,因此对转移矩阵 X 的元素进行行加总得 $\sum x_i$,定义为直接足迹,表示生产视角下,产业部门在生产过程中直接产生的二氧化碳。对转移矩阵 X 的元素进行列加总得 $\sum x_j(i \neq j)$,定义为间接足迹,表示消费视角下,产业部门消耗其他部门产品所间接产生的二氧化碳,全足迹则为以上两者加总构成。

由于投入产出表的编制非常复杂,中国每5年编制一次正式投入产出表,即使期间逢0及5年份修正延长表一次,仍无法反馈最新内外环境变化。为解决该问题,学者提出了交叉熵函数(CE)和最小二乘函数(LS)2种方法,通过计算基准及目标年份系数差值获得投入产出表^[19,20],公式如下:

$$\min D_{CE} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}^t (\ln a_{ij}^t / a_{ij}^0) \tag{2}$$

$$\min D_{LS} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (a_{ij}^0 - a_{ij}^t)^2 \tag{3}$$

CE函数较LS函数能严密控制系数矩阵,但对数据流量精度控制不足,容易导致基准及目标表出现离差期望小而方差大的不均衡^[21]。为此,本文通过引入信息权重矩阵,将公式(2)修正为双系数交叉熵函数(DCE):

$$\min D_{DCE} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} a_{ij}^t (\ln a_{ij}^t - \ln a_{ij}^0)^2 \tag{4}$$

再利用拉格朗日乘数法进行计算:

$$a_{ij}^t = \begin{cases} \left[w_{ij} a_{ij}^0 \exp(\sqrt{\lambda_i v_j^t + \xi_j + 1}) \right] / \left[\sum_{j=1}^n a_{ij}^0 \exp(\sqrt{\lambda_i v_j^t + \xi_j + 1}) \right], a_{ij}^0 \exp(-1) \leq a_{ij}^t \\ \left[w_{ij} a_{ij}^0 \exp(-\sqrt{\lambda_i v_j^t + \xi_j + 1}) \right] / \left[\sum_{j=1}^n a_{ij}^0 \exp(-\sqrt{\lambda_i v_j^t + \xi_j + 1}) \right], a_{ij}^0 \exp(-1) \leq a_{ij}^t \end{cases} \tag{5}$$

式中, a_{ij}^t 及 a_{ij}^0 分别为目标年份及基准年份直接消耗系数矩阵的元素; v_j^t 为目标年份第 j 个产业的中间使用及投入合计;引入双拉格朗日乘数 λ_i 和 ξ_j ,能更好防止各种矩阵系数的波动; w_{ij} 为信息权重矩阵元素。

LS函数较CE函数能更好提升交易流量精度,但对于系数矩阵的控制度仍较为欠缺,一定程度上会影响更新表的数据质量。因此,基于公式(3)构建权重最小二乘函数(WLS):

$$\min D_{WLS} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} a_{ij}^0 (a_{ij}^0 - a_{ij}^t)^2 \tag{6}$$

为综合利用2种方法的优点,保证投入产出表在交易流量和系数矩阵2个角度更加精确稳定,综合构建DCE-WLS函数,即DCE和WLS加权之和,公式如下:

$$\min D = \beta \min D_{DCE} + (1 - \beta) \min D_{WLS} \tag{7}$$

式中, β 为权重,为了综合确保更新的平衡性,本文令 $\beta=0.5$ 。

1.2 超效率EBM模型

在DEA框架下,EBM模型可同时考虑投入与产出变量所具备的径向和非径向特征,初始EBM模型公式如下:

$$\gamma = \min \theta - \varepsilon_x \sum_{i=1}^m \frac{\omega_i^- s_i^-}{x_{ik}} \tag{8}$$

$$\text{s.t.} \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + s_i^- = \theta x_{ik}, i=1, \dots, m \tag{9}$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} \geq y_{rk}, r=1, \dots, l \tag{10}$$

$$\lambda_j \geq 0, s_i^- \geq 0$$

式中, k 为决策单元($k=1, 2, \dots, n$), x_{ik} 、 y_{rk} 分别为决策单元 k 的投入和产出, s_i^- 为投入松弛变量, ω_i^- 则为相应的权重; θ 为投入径向条件下的效率值; λ_j 为决策单元的线性组合系数; ε_x 为反应效率计算中非径向部分的重要程度,其取值范围为 $[0, 1]$,取0时相当于径向模型,取1时相当于非径向模型。

基于碳排放效率的研究现实,本研究期望在节约水、能资源和经济资源的投入量的同时获得最大的GDP产出,而初始EBM模型为投入导向,不包括产出因素。鉴于此,在初始EBM模型的产出约束条件中添加产出松弛变量 s_r^+ ,构造无导向EBM模型,通过分析投入产出变量在效率最优时对应的目标值,投入产出变量的改进值可在此基础上取得。公式如下:

$$\sum_{j=1, j \neq k}^n \lambda_j y_{rj} - s_r^+ = \varphi y_{rk}, r=1, \dots, l \tag{11}$$

式中, s_r^+ 为产出松弛变量; φ 为产出径向条件下的效率值。

然而,碳排放效率的研究还需考虑环境污染物的排放,所以应区分坏的产出(非期望产出)与期望产出。因此,进一步构造可以处理非期望产出的无导向模型,扩展步骤如下:

第一步:增加非期望产出约束条件。

$$\sum_{i=1}^n \lambda_j b_{ij} + s_i^{b-} = \varphi b_{ik}, t=1, \dots, p \quad (12)$$

第二步:在目标函数中添加附带权重的非期望产出的整体产出项。

$$\varphi + \varepsilon_y \sum_{r=1}^l \frac{\omega_r^+ s_r^+}{y_{rk}} + \varepsilon_b \sum_{i=1}^p \frac{\omega_i^- s_i^{b-}}{b_{ik}} \quad (13)$$

第三步:对目标函数进行调整,构建分式形式的表达式,考虑到产出规划里面径向与非径向的重要程度,同时考虑不同产出要素的权重差异,且分式整体应满足小于等于1的约束,则径向与非径向无效率应该采用加和形式,因此目标函数的分母部分应表述为:

$$\gamma^* = \min \frac{\theta - \varepsilon_x \sum_{i=1}^m \frac{\omega_i^- s_i^-}{x_{ik}}}{\varphi + \varepsilon_y \sum_{r=1}^l \frac{\omega_r^+ s_r^+}{y_{rk}} + \varepsilon_b \sum_{i=1}^p \frac{\omega_i^- s_i^{b-}}{b_{ik}}} \quad (14)$$

通过上述模型测算的碳排放效率可能存在多个效率值为1的无效结果,为此对约束条件进行调整,对式(13)测算结果等于1的省份碳排放效率进行二次评估。公式如下:

$$\gamma^* = \min \frac{\theta + \varepsilon_x \sum_{i=1}^m \frac{\omega_i^- s_i^-}{x_{ik}}}{\varphi - \varepsilon_y \sum_{r=1}^l \frac{\omega_r^+ s_r^+}{y_{rk}} + \varepsilon_b \sum_{i=1}^p \frac{\omega_i^- s_i^{b-}}{b_{ik}}} \quad (15)$$

$$GML(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}, x^t, y^t, b^t) = \frac{E^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})}{E^t(x^t, y^t, b^t)} \left(\frac{E(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}) E^t(x^t, y^t, b^t)}{E^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}) E(x^t, y^t, b^t)} \right) = EC^{t,t+1} \times TC^{t,t+1} \quad (17)$$

式中, x^t, y^t, b^t 和 $x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}$ 分别表示决策单元在 t 和 $t+1$ 时期的投入、期望产出和非期望产出值; E 表示参考集在全局前沿上所测算的效率值; EC 为规模效率变动; TC 为技术效率变动; $GML > 1$ 表明碳排放效率提升,反之则下降。

1.4 Tobit 模型

碳排放效率除了受到选定的投入产出变量的影响外,还会受到其他因素带来的不同程度的影响,因此需要进一步构建计量模型来实证检验各省碳排放效率的影响因素。考虑到超效率EBM模型和GML指数测算结果不可能为负,因此本研究将采用能较好解决因变量受限问题的Tobit回归模型进行检验。模型设置如下:

$$D_{it} = \begin{cases} 0, & D_{it}^* \leq 0 \\ D_{it}^* = \alpha + \beta L_{it} + \alpha_{it} + \delta_{it}, & D_{it}^* > 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中, D_{it} 为省份 i 在 t 期的截断因变量,即省份 i 在第 t 年的碳排放效率值; D_{it}^* 为省份 i 在 t 期的潜变量; L_{it} 为自变量,即碳排放效率的影响因素; α_{it} 为省份 i 第 t 年的固定效应; δ_{it} 为随机扰动项。

2 数据收集和指标构建

为全面分析中国各省碳排放效率的时空差异特

$$\begin{cases} \sum_{j=1, j \neq k}^n \lambda_j x_{ij} - s_i^- \leq \theta x_{ik}, i=1, \dots, m \\ \sum_{j=1, j \neq k}^n \lambda_j y_{rj} + s_r^+ \geq \varphi y_{rk}, r=1, \dots, l \\ \sum_{i=1, i \neq k}^n \lambda_j b_{ij} - s_i^{b-} \leq \varphi b_{ik}, t=1, \dots, p \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \lambda_j \geq 0, s_i^-, s_r^+, s_i^{b-} \geq 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中, φ 为产出导向下的碳排放效率, θ 为投入导向下的碳排放效率,在非导向情况下两者的值相同。

1.3 GML 指数模型

鉴于超效率EBM模型仅能刻画决策单元在某一时间节点的静态效率值,而Malmquist-Luenberger (ML)指数可描述决策单元长时间的动态效率。鉴于传统ML指数存在结果可能无解、相邻参比不具备可传递性等问题^[22],而Global Malmquist-Luenberger (GML)指数模型不仅能有效避免这类问题,还具有循环累积和跨期比较等优点^[23]。因此本文采用全局指数构建GML指数模型评价碳排放效率的动态变化情况,公式如下:

征,以2002-2022年中国30个省份(不包括西藏和港澳台)为研究对象,并进一步划分为东部、中部、西部和东北四大区域。基础数据来源于《统计年鉴》《水资源公报》、中国碳核算数据库(CEADs)及EPS数据平台,个别缺失数据采用插值法补齐,未公布年份的投入产出表利用DCE-WLS函数进行推算。

2.1 投入产出指标体系

遵循科学性、代表性、系统性的原则,从资源投入、经济效益、环境污染3个维度,构建基于水-能-碳三维足迹的碳排放效率投入产出测算指标体系(表1)。选取资本、劳动力、能源及水资源4个投入变量和GDP及二氧化碳排放量2个产出变量。具体而言,资本存量以2002年为基期,运用“永续盘存法”进行估算^[24];劳动力、能源和水资源分别用地区总就业人数、能源足迹、水资源足迹加以衡量;区域生产总值为期望产出变量,以2002年为基期进行平减处理以消除不同年份价格因素的影响;二氧化碳排放量为非期望产出变量,以碳足迹加以衡量。需要说明的是,若水、能资源投入指标和碳排放产出指标选取全足迹数值,则模型输出结果为综合碳排放效率;若选取直接或间接足迹值,则模型输出结果为直接碳排放效率或间接碳排放效率。

表 1 变量描述性统计
Table 1 Descriptive statistics of variables

指标体系	变量	衡量标准	单位	平均值	标准差	最小值	最大值	
投入产出指标	资本	资本存量	亿元	13 520	14 216	227.442	72 808	
	劳动力	地区总就业人数	万人	2 193	2 003	247	6 904	
	能源	能源的直接足迹			14 307	9 990	283.201	51 583
		能源的间接足迹		万 t	11 258	7 693	245.662	37 789
		能源的全足迹			25 565	17 637	528.904	89 371
	水资源	水资源的直接足迹			223.573	171.220	23.018	801.501
		水资源的间接足迹		亿 m ³	148	111.732	16.412	542.242
		水资源的全足迹			372	297	39	1 344
	二氧化碳	二氧化碳的直接足迹			32 194	24 948	647.343	183 537
		二氧化碳的间接足迹		t/万 t	27 627	22 487	1 608	170 340
二氧化碳的全足迹				59 821	47 936	2 506	353 877	
GDP	区域生产总值		亿元	18 810	20 726	326.310	137 588	
IN	人均可支配收入		万元	20 005	12 987	3 625	79 610	
IS	第三产业增加值与第二产业增加值之比		%	0.424	0.083	0.160	0.624	
UR	城镇人口占总人口的比重		%	0.546	0.154	0.244	0.944	
EC	人均电力消费量		亿 kW·h/万人	0.398	0.292	0.028	1.787	
WI	单位面积耗水量		万 m ³ /km ²	17.806	31.840	0.336	200.476	
ER	每千元工业增加值的工业污染治理完成投资额		%	7.895	5.541	2.258	36.053	
TP	自主创新知识存量		-	9.401	1.803	4.248	13.85	

2.2 影响因素指标体系

结合已有研究成果,兼顾指标数据可得性原则,从经济系统和组织的角度的5个方面选择了7个环境变量。一是经济体制,选择人均可支配收入表征经济发展(IN);二是结构变动,选取产业结构(IS,第三产业增加值与第二产业增加值之比来衡量)和城镇化率(UR,以城镇人口占总人口的比重来衡量)2个变量;三是资源消耗,选取能源消耗(EC,以人均电力消费量来衡量)和耗水强度(WI,以单位面积耗水量来衡量)2个变量;四是规章制度,选取工业污染治理完成投资占第二产业增加值的比重(即每千元工业增加值的工业污染治理完成投资额(ER))对环境规制强度进行描述;五是科技创新,借鉴 Popp^[25]的思路构建公

式 $T_{i,t} = \sum e^{-\beta_1 s}(1 - e^{-\beta_2(s+1)})Q_{i,t}$,选择各省份专利授权数量构建“自主创新知识存量”指标表征自主创新知识存量(TP)。其中 Q 代表专利授权数量, s 代表基期到当前年份的时间, β_1 代表知识的衰减率, β_2 代表知识的扩散率,分别取 36% 和 3%。

3 研究结果

3.1 超效率EBM结果分析

运用超效率EBM模型测算基于水-能-碳三维足迹的碳排放效率,并分析其变化趋势。考虑到2012年中国特色社会主义进入新时代,为避免时间跨度过大并更好地进行比较,将研究期分为2002-2011年(第一阶段)及2012-2022年(第二阶段),计算得到表2、表3。

表 2 基于水-能-碳三维足迹省份碳排放效率均值(第一阶段)

Table 2 Average carbon emission efficiency of provinces based on the three-dimensional footprint of water-energy-carbon (Stage I)

省份	直接效率	间接效率	综合效率	省份	直接效率	间接效率	综合效率
北京	1.301	1.155	1.189	河南	0.527	0.522	0.567
天津	0.647	0.643	0.590	湖北	0.508	0.470	0.464
河北	0.395	0.431	0.396	湖南	0.655	0.756	0.721
山西	0.497	0.490	0.471	广东	0.823	0.720	0.796
内蒙古	0.423	0.418	0.390	广西	0.469	0.447	0.452
辽宁	0.214	0.264	0.269	海南	0.554	0.512	0.536
吉林	0.378	0.354	0.335	重庆	0.565	0.499	0.527
黑龙江	0.381	0.436	0.436	四川	0.442	0.435	0.415
上海	0.888	0.882	0.799	贵州	0.357	0.382	0.337
江苏	0.634	0.600	0.575	云南	0.441	0.428	0.411
浙江	0.630	0.608	0.591	陕西	0.474	0.446	0.436
安徽	0.538	0.495	0.510	甘肃	0.386	0.384	0.361
福建	0.686	0.682	0.625	青海	0.297	0.302	0.272
江西	0.501	0.447	0.448	宁夏	0.278	0.291	0.250
山东	0.480	0.535	0.453	新疆	0.557	0.458	0.546

表3 基于水-能-碳三维足迹省份碳排放效率均值(第二阶段)

Table 3 Average carbon emission efficiency of provinces based on the three-dimensional footprint of water-energy-carbon (Stage II)

省份	直接效率	间接效率	综合效率	省份	直接效率	间接效率	综合效率
北京	1.400	1.246	1.324	河南	0.525	0.443	0.464
天津	0.828	0.735	0.773	湖北	0.567	0.509	0.527
河北	0.406	0.363	0.355	湖南	0.746	0.914	0.846
山西	0.517	0.389	0.526	广东	0.745	0.734	0.729
内蒙古	0.454	0.396	0.416	广西	0.397	0.461	0.410
辽宁	0.257	0.245	0.345	海南	0.473	0.518	0.626
吉林	0.477	0.350	0.373	重庆	0.615	0.579	0.617
黑龙江	0.320	0.359	0.369	四川	0.490	0.402	0.468
上海	1.033	1.033	0.918	贵州	0.398	0.328	0.333
江苏	0.697	0.647	0.684	云南	0.482	0.488	0.382
浙江	0.695	0.598	0.621	陕西	0.501	0.432	0.506
安徽	0.547	0.429	0.486	甘肃	0.378	0.324	0.332
福建	0.638	0.631	0.625	青海	0.358	0.305	0.308
江西	0.525	0.456	0.520	宁夏	0.454	0.339	0.340
山东	0.481	0.479	0.523	新疆	0.493	0.427	0.452

表2显示,各省份直接碳排放效率均值处于0.214~1.301之间,标准差为0.208,表现出明显波动离散特征。直接碳排放效率均值排名前3位的省份分别是北京(1.301)、上海(0.888)和广东(0.823),均为东部发达地区,排名后3位的省份是青海(0.297)、宁夏(0.278)和辽宁(0.214),表明东北和西北地区部分省份的直接碳排放效率不容乐观,这可能与当地重工业较多,能源结构单一以及经济发展水平相对滞后等因素相关。第一阶段各省间接碳排放效率均值处于0.264~1.155之间,标准差为0.519,反映出第一阶段各省间接碳排放效率差异较大,均值排名前3位的省份是北京(1.155)、上海(0.882)和湖南(0.756),排名后3位的省份是青海(0.302)、宁夏(0.291)和辽宁(0.264)。第一阶段综合碳排放效率均值处于0.250~1.189之间,标准差为0.193,均值排名前3的省份是北京(1.189)、上海(0.799)和广东(0.796),排名后3位的省份是青海(0.272)、辽宁(0.269)和宁夏(0.250)。对比各省第一阶段三大碳排放效率结果可知,间接碳排放效率的省际差异最为突出。除湖南间接碳排放效率均值排名第三外,直接和综合效率前3位次均为北京、上海和广东,而青海、宁夏和辽宁的三大碳排放效率均值均位于各省份最末,表明三大碳排放效率具有较强的-一致性。其次,第一阶段三大碳排放效率呈现明显的地域分化特征,东部发达地区三大碳排放效率均明显领先,而东北、西北部分省份则均处于落后状态。

从表3可以看到第二阶段直接碳排放效率均值处于0.257~1.400之间,标准差为0.563;间接碳排放效率均值处于0.245~1.246之间,标准差为0.225;综合碳排放效率均值处于0.308~1.324之间,标准差为0.218。表明第二阶段大部分省份碳排放效率绝对数值相较于第一阶段有明显提升,间接和综合效率的数据波动

也明显减小,表明间接和综合碳排放效率的省际绝对差距缩小。第二阶段直接碳排放排名前3的省份分别为北京(1.400)、上海(1.033)和天津(0.828),排名后3位的省份为青海(0.358)、黑龙江(0.320)和辽宁(0.257);间接碳排放排名前三的省份分别为北京(1.246)、上海(1.033)和湖南(0.914),排名后3位的省份为甘肃(0.324)、青海(0.305)和辽宁(0.245);综合碳排放排名前三的省份分别为北京(1.324)、上海(0.918)和湖南(0.846),排名后3位的省份为贵州(0.333)、甘肃(0.332)和青海(0.308)。值得注意的是,尽管大部分省份第二阶段碳排放效率均高于第一阶段,但也有地区三大碳排放效率均出现了回退现象,如黑龙江、河南、甘肃和新疆。

对比两阶段三大碳排放效率的测度结果,可得到以下2个特征,一是大部分省份碳排放效率值相较于第一阶段均有明显提升,体现出中国新时代推动节能减排和绿色发展的显著成效;二是碳排放效率具有明显“自身锁定”效应,即高效率地区的优势可以长期保持,低效率地区却很难摆脱落后状态,要防止出现回退和滑落。

图1为全国及四大区域的碳排放效率均值。纵向来看,各区域呈现东部遥遥领先的“一超”格局,东、中部地区碳排放效率均值均高于全国均值,而西部、东北地区碳排放效率低于全国均值,且波动变化较大。横向来看,2002~2010年各区域碳排放效率均呈现波动下降趋势,其中全国综合碳排放效率下降了29.7%,直接碳排放效率下降了24.6%,间接碳排放效率下降了31.5%。2010年后碳排放效率显著提升,全国综合碳排放效率提升了30.3%,直接碳排放效率提升了48.8%,间接碳排放效率提升了21.3%,除间接碳排放效率未达到期初水平,综合碳排放效率和直接碳排放

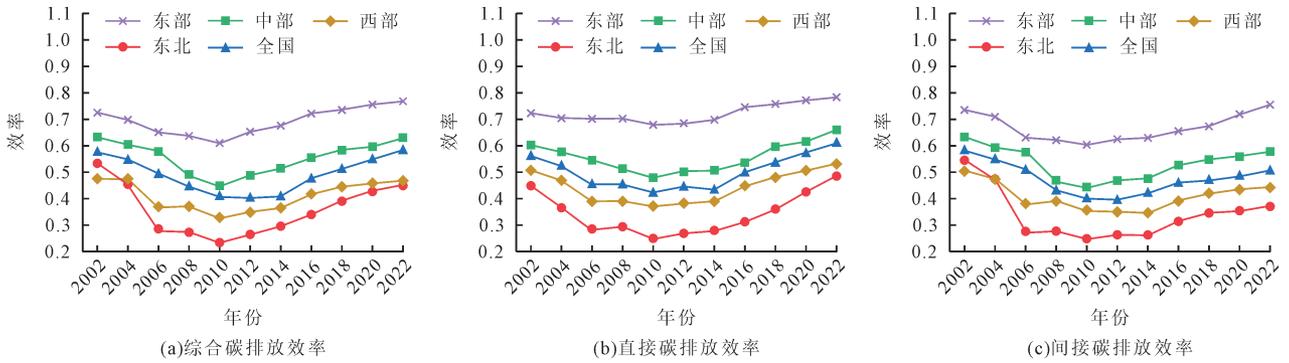


图1 2002-2022年基于水-能-碳三维足迹区域碳排放效率均值

Fig.1 Carbon emission efficiency of regions in China based on the three-dimensional footprint of water-energy-carbon from 2002 to 2022

效率均高于期初值,说明全国大部分区域在生产端的碳排放治理方面已经取得了一定的成效,显示出政策实施与技术创新对提升碳排放效率的积极影响。然而,消费端的碳排放仍然是一个短板,存在较大的提升空间,未来需进一步加强消费端的碳排放管理,以实现更加全面和有效的碳排放控制。

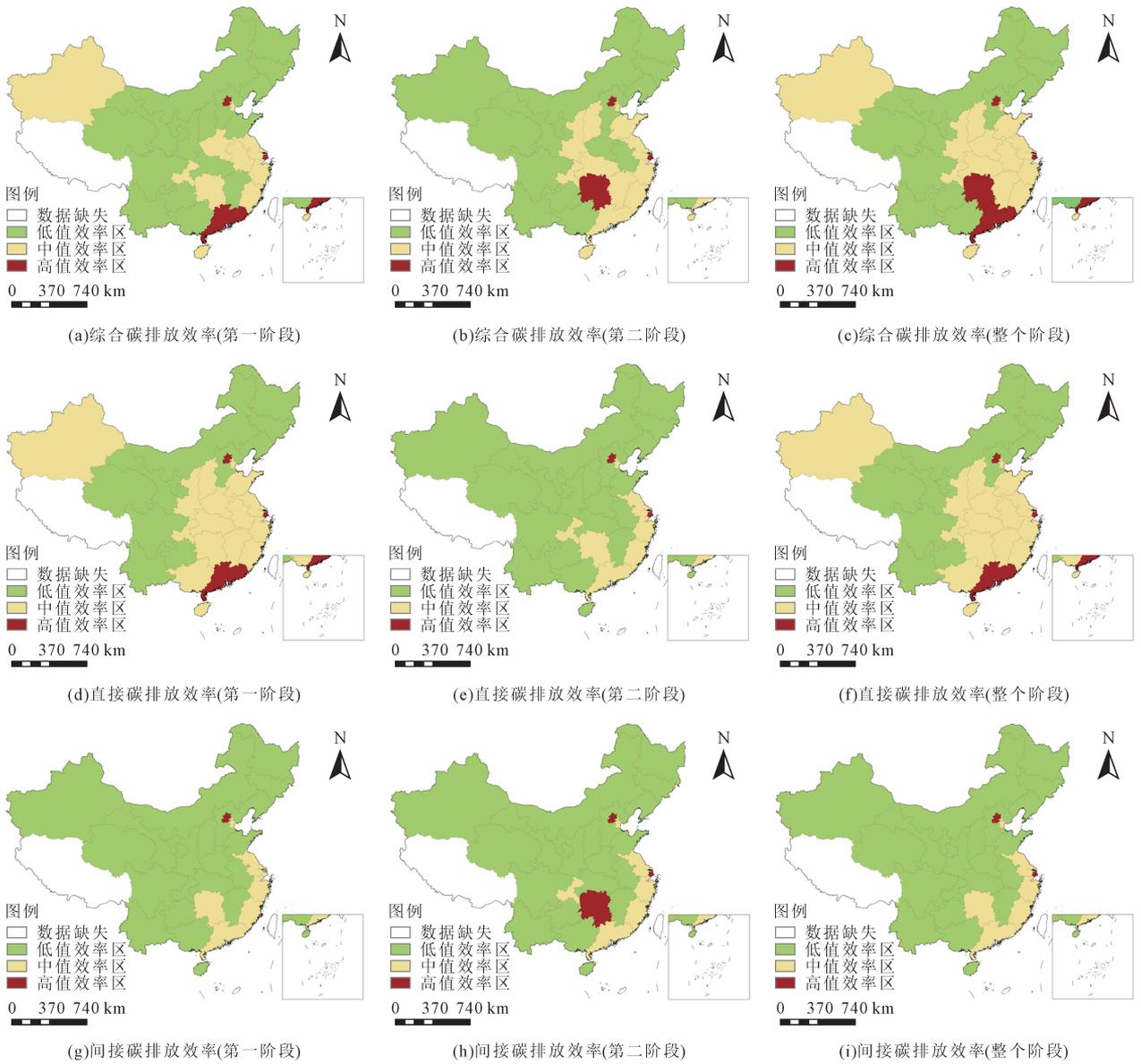
3.2 空间特征分析

为避免主观因素影响,依据自然断点法绘制碳排放效率静态分布图,揭示2个阶段之间的内在联系和差异。此外与整个研究期(2002-2022年)进行综合对比,以全面地把握碳排放效率在长时间尺度上的演变规律,并采用标准差椭圆分析模型测算动态变化轨迹,对碳排放效率的聚类特征进行描述。

从图2可以看出,碳排放效率空间分布格局具有明显的阶段性特征。就第一阶段而言,各省份的综合碳排放效率和间接碳排放效率普遍较低,且分布情况相似,但60%的省份第一阶段的直接效率达到中值或中高值,说明2002-2010年间,中国各省份综合效率普遍较低,其中间接效率低下是主要原因。就第二阶段而言,三大效率中高值省份数量排序分别为“直接>综合>间接”。直接碳排放效率的影响显著提升,在拉动综合碳排放效率升高方面起到主导作用。在一些省份中,综合碳排放效率受到直接碳排放效率和间接碳排放效率的双重影响;如湖南省较高的间接效率拉动了较高的综合效率,说明该省在间接碳排放方面表现较好,同时也影响了综合效率。而广东省则相反,其较高的直接效率拉动了综合效率的升高,这可能意味着该省的直接碳排放活动表现较好,对综合效率的提升起到主导作用。此外,较低的间接效率也会导致整体的综合效率较低,比如新疆。这表明尽管间接排放的影响不可忽视,但在这些省份中,直接碳排放活动仍然是主导因素。整个阶段内,观察到综合效率达到中高值的省份数量多于直接效率和间接效率,表明在这段时间里,一些省份在整体碳排放效率方面取得了

显著的改善。这种现象可能受到了社会和公众环保意识的普及和增强的影响,促使相关省份采取了更为积极的减排措施,从而有效提升了综合效率。值得注意的是,就具体效率数值而言,第二阶段大部分省份直接效率值高于第一阶段,但地图所展示的高效率省份数量却减少了一倍,说明尽管直接效率值在全国范围内实现了整体进步,但只有少数几个省份的改进幅度足以跨越新的、更为严格的效率阈值。这也意味着,中国各省直接效率值面临着一种“水涨船高”的效应,原本处于高效率行列的省份,如果未能跟上快速提升的步伐,就可能会被后来者超越,从而失去其原有的领先地位。

由于篇幅限制,本节聚焦于综合碳排放效率,借此反映全国碳排放效率的总体变化。通过追溯不同时间段的综合碳排放效率重心,客观反映全国碳排放效率的变化轨迹和演变趋势,如图3和表4所示。整体来看,椭圆分布方向呈现东北-西南方向的空间分布,效率重心集中分布在东部地区。标准差椭圆面积从2002年的 $6.777 \times 10^6 \text{ km}^2$ 减至2022年 $6.482 \times 10^6 \text{ km}^2$,表明期间综合碳排放效率的地区差异在样本研究期内缩小,空间分布呈现聚集态势。长轴和短轴略微缩小,整体变化不明显,说明研究期内综合碳排放效率的空间分布格局变化不大、较为稳定。从空间分布中心变化可以看出,综合碳排放效率的中心点集中分布在河南地区,说明中国中东部地区的综合碳排放效率水平较高。其中2002-2007年中心点向西偏移,这段时间中国中西部地区的工业化、城市化建设加速推进,导致碳排放量快速增加,全国碳排放效率呈现下降趋势。2007-2012年中心点又从西向东回移,东部地区通过技术创新、产业结构优化、管理水平提升等手段提高综合碳排放效率水平,效率提升动力转向效率先进的东部地区。2012-2017年中心点向南移动,说明中部和长江下游地区通过加速提高能效、发展低碳产业追赶东部地区,提升全国综合碳排放效率贡献



注：本图使用中华人民共和国自然资源部标准地图服务系统(批准文号:GS(2019)1827)生成。

图2 基于水-能-碳三维足迹的碳排放效率空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of carbon emission efficiency based on three-dimensional footprint of water-energy-carbon

提高。2017-2022年中心点由东部地区向东北方向略微移动,东部地区作为中国经济最发达的地区,综合碳排放效率水平已相对较高,改善进程出现放缓趋势。东北作为老工业基地,积极推动产业转型升级,推广绿色能源生产技术,使得碳排放效率有所改善。

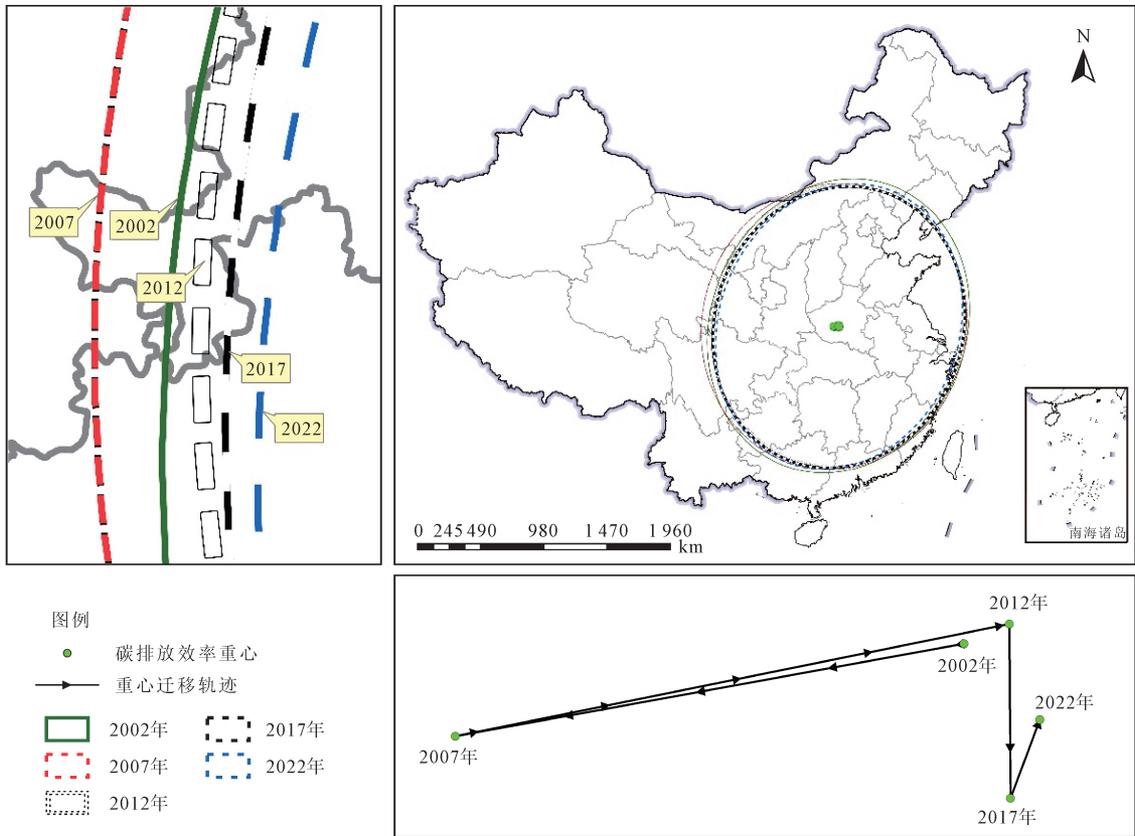
3.3 动态演进分析

为进一步分析碳排放效率的动态变化趋势,采用超效率EBM-GML指数模型测算碳排放效率变动指数,并将其分解为技术效率指数(EC)和技术进步指数(TC),探究各省份碳排放效率的动态演进趋势。

由图4可知GML的演进趋势呈现2个特点,首先是研究期内综合、直接、间接碳排放效率核密度曲线均呈现波动向右移动趋势,揭示了各省份在碳排放效率上的逐步提升。然而,值得注意的是,综合碳排放

效率和直接碳排放效率的最终曲线横坐标均大于1,这意味着相较于基期,研究期间省际综合与直接碳排放效率实现了显著的上升。相比之下,间接碳排放效率的最终曲线对称轴则落于1的左侧,表明其效率水平较基期略有下降。其次,核密度曲线呈现多峰分布,说明各省份不同碳排放效率存在一定差异。不同山峰间的间距呈现综合碳排放效率>直接碳排放效率>间接碳排放效率,表明间接碳排放效率的省域差异较小,直接碳排放效率的省域差异较大,两者共同作用使得省域综合碳排放效率差异加大。

EC的演进趋势特点表现出以下特征:第一,研究期内3种碳排放效率的技术效率指数分布均呈现“陡峭-扁平-陡峭”的转变趋势。具体而言,各省份的技术效率指数在2007年之前呈现出一定的差距,这反映



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2020)4630号的标准地图制作，底图无修改。

图3 综合碳排放效率动态变化轨迹

Fig.3 Dynamic change trajectory of comprehensive carbon emission efficiency

表4 重心坐标与标准差椭圆

Table 4 Center of mass coordinates and standard deviation ellipse

年份	椭圆面积/($\times 10^6 \text{ km}^2$)	重心经度	重心纬度	短半轴 X/km	长半轴 Y/km
2002	6.777	113.027°E	33.488°N	989.599	1 164.067
2007	6.720	112.661°E	33.457°N	1 024.016 9	1 114.325
2012	6.551	113.060°E	33.497°N	987.903 9	1 096.108
2017	6.500	113.051°E	33.397°N	962.351 9	1 104.245
2022	6.482	113.076°E	33.440°N	929.506 9	1 129.102

了初期阶段,各省份在碳排放效率的技术效率方面存在显著的异质性。然而,到了2007年这种差距逐渐缩小,技术效率指数呈现出均衡化发展的趋势。但随后这种均衡状态被打破,各省份之间的技术效率指数差距又逐渐拉大,直至2019年达到顶峰。近年来,这一差距开始逐步缩小,显示出技术效率指数分布正趋于新的平衡状态。第二,除综合、直接碳排放效率曲线于2022年呈现向左小幅移动,出现“技术效率倒退”现象,其他时段以及间接碳排放效率的所有时段核密度曲线位置基本保持不变,表明技术效率对碳排放效率增长的驱动作用相对稳定,随时间推移并未增强,全国碳排放产业部门的经营管理水平和行业技术水平在总体上并未发生显著变化,仍保持着相对稳定的状态。然而,2022年综合和直接碳排放效率的技术效率倒退现象也说明,在追求碳排放效率提升的过程

中,仍需关注技术效率的波动和潜在风险,以确保碳排放效率的持续增长和稳定性。

就TC的演进趋势而言,一是在研究期内核密度曲线波动向右移动,表明大部分省份碳排放技术进步指数呈现增长态势。二是综合碳排放效率和间接碳排放效率的TC曲线向右移动时波峰变窄,说明随着技术的进步,综合碳排放效率和间接碳排放效率的提升速度加快,且省际之间的差距在逐渐缩小,呈现出一种趋同现象。而直接碳排放效率的TC曲线向右移动时波峰变宽,右拖尾增加,说明直接碳排放效率也在技术进步的作用下有所提升,但省际之间的差距却在逐渐扩大。这可能是不同省份在直接碳排放效率的技术进步方面存在较大的异质性和不均衡性所导致的。因此,在未来的政策制定和实践中,决策者需要更加关注直接碳排放效率的技术进步问题,采取有效措施促

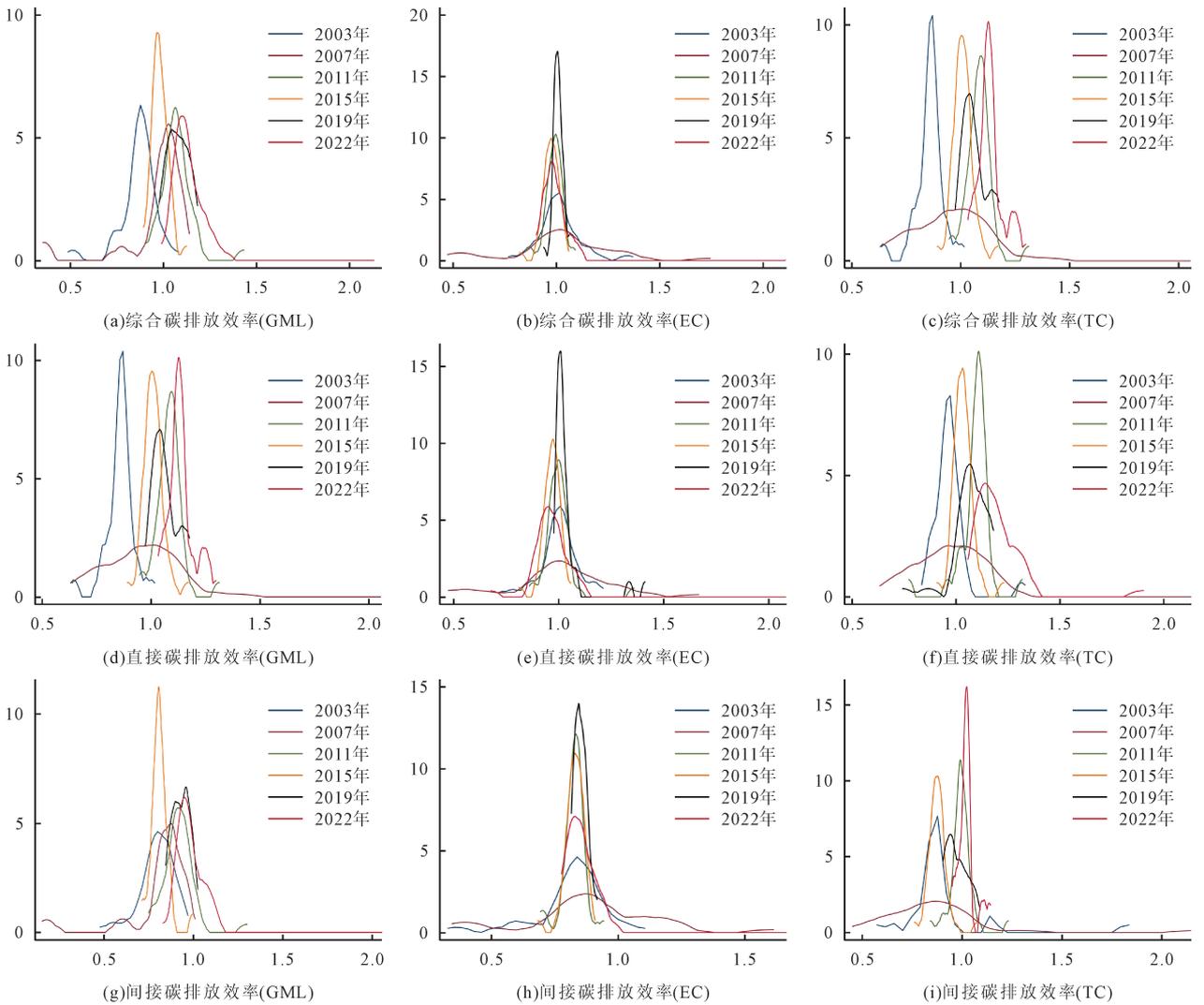


图4 GML指数及其分解项的核密度分布图
 Fig.4 Kernel density distribution diagram of GML index and its decomposition items

进各省份在直接碳排放效率方面的均衡发展。

3.4 影响因素分析

为避免伪回归,对选取的碳排放效率影响因素进行相关性分析和多重共线性检验,相关系数结果显示所有指标相关性指数最高为0.485,小于0.5,说明指标间不存在较强的相关性。方差膨胀因子VIF最大值为1.73,均值为1.30,均远小于5,表明本文所选取的变量共线性程度基本在合理范围内,适合进行回归分析。估计结果如表5所示。

(1)经济发展回归系数为正,且综合碳排放效率水平通过1%水平显著性检验,直接、间接碳排放效率水平均至少通过10%的显著性检验,表明经济发展水平的提高能够显著提升碳排放效率水平。其中对综合碳排放效率的影响最大,对间接碳排放效率的影响最小。原因在于经济发展水平和人均可支配收入的提高,会促进绿色低碳技术的应用和低碳供应链的布局,低碳产品更加普及,公众的低碳意识也会相应提升,从而提升碳排放效率。综合碳排放效率

受直接、间接碳排放效率双重作用,受经济发展水平影响更大。

表5 影响因素的Tobit回归估计结果

变量	综合碳排放效率	直接碳排放效率	间接碳排放效率
经济发展	0.388*** (0.048)	0.174* (0.090)	0.145* (0.086)
城镇化率	0.231** (0.111)	0.715*** (0.050)	0.025 (0.028)
产业结构	0.146*** (0.031)	0.155** (0.064)	-0.143* (0.075)
能源消耗	-0.113*** (0.023)	-0.024** (0.011)	-0.038*** (0.012)
耗水强度	-0.140*** (0.053)	-0.122* (0.069)	-0.127** (0.050)
环境规制	0.189** (0.079)	0.153* (0.087)	0.707*** (0.053)
科技创新	0.033*** (0.006)	0.037*** (0.005)	0.026*** (0.005)
常数项	0.522*** (0.030)	0.538*** (0.015)	0.513*** (0.019)

注:根据Stata回归结果编制。*** $P < 0.01$, ** $P < 0.05$, * $P < 0.1$,括号内为标准误。

(2)城镇化率回归系数为正,且综合和直接碳排放效率通过至少5%的显著性检验,间接碳排放效率

未通过显著性检验。说明城镇化水平显著提升直接碳排放效率,正向影响综合碳排放效率,对间接碳排放效率没有显著影响。究其原因,生产方式转型和能源结构升级等由城镇化率提高带来的变化,直接作用于产业部门的生产过程,从而提高了直接碳排放效率。而间接碳排放主要来源于上游产业和消费过程,受城镇化率变化的影响较小。

(3)产业结构对碳排放效率存在异质性影响,其中综合碳排放和直接碳排放均至少在5%水平显著为正,表明产业结构高级化能够提升综合和直接碳排放效率,但产业结构高级化对间接碳排放效率产生了负向影响。究其原因,产业结构转型促进了能源结构的优化,在生产环节直接减少了对高碳能源的依赖,从而提高了直接碳排放效率。但第三产业占比提升往往伴随着产业链延长和复杂化,带来了更多的中间投入,引致间接碳排放效率降低,且第三产业虽自身碳排放较低,但仍需要上游产业提供的大量传统能源支持,如电力等,从而导致上游产业碳排放增加,间接碳排放效率降低。

(4)能源消耗的回归系数为负,且综合、直接和间接碳排放效率均通过显著性检验,说明电力消费量增加带来的能源消耗是影响碳排放效率的重要制约因素。此外,对间接碳排放效率影响系数的绝对值略大于直接碳排放效率的影响系数,说明能源消耗对间接碳排放效率的抑制作用大于直接碳排放效率,主要在于火力发电仍是电力供应的主要来源,化石燃料在开采、加工、运输等前端环节,燃烧处理后的后端环节以及输配电过程中都会增加间接碳排放,而现代化的低碳技术对于上下游的间接排放减少作用有限,因此能源结构变化对间接碳排放效率的负面影响更大。

(5)耗水强度对综合、直接和间接碳排放效率均具有显著的负向作用,表明减少单位面积耗水量可以显著提升碳排放效率,且对综合碳排放效率的负向影响最为显著。究其原因,水资源贯穿产品生命周期的全部过程,直接碳排放效率主要聚焦生产过程中水资源的直接消耗,间接碳排放效率主要关注生产过程中由于中间投入、上游供应链环节以及消费过程所产生的碳排放。由于水资源在生产和消费的整个过程都具有重要作用,因此提高单位面积的水资源利用效率不仅可以减少直接生产过程中的碳排放,同样可以促进整个供应链的资源优化配置和效率提升,从而减少由于中间投入和供应链环节所产生的碳排放,因此耗水强度减弱对综合碳排放效率的促进作用更为明显。

(6)环境规制对综合、直接和间接碳排放效率均存在正向影响。通过指标数据可看出环境规制对于

直接碳排放效率的提升作用最小,这是由于对于企业而言,环境规制强度存在“门槛”值,只有达到门槛值,环境规制才能发挥出补偿效应并提升企业竞争力。当环境规制强度难以促进企业技术革新时,产生的治污成本反而会降低直接碳排放效率^[20]。而对于上下游生产环节的间接产品和消费,较严格的环境规制则有利于促使上游供应商采取减排措施,实施环境友好型生产工艺等,从而减少整个供应链的碳排放,提升间接碳排放效率。

(7)科技创新的回归系数为正,且综合、直接、间接碳排放效率均通过1%的显著性检验,说明技术进步对碳排放效率具有显著的正效应。技术进步带来的低碳技术、节能技术等可直接应用于生产,优化生产工艺,提高直接碳排放效率。新技术还可以降低上下游行业的耗能和污染,降低产业链传导中的碳排放,提高间接碳排放效率。此外,新技术促进低碳行业的发展壮大,带动产业结构升级,经济体系向低碳方向转变,促进综合碳排放效率的提升。

4 结论与建议

4.1 结论

文章测算了基于水-能-碳三维足迹的直接碳排放效率、间接碳排放效率和综合碳排放效率,从而评估2002-2022年中国30个省份的碳排放效率水平及时空特征。

(1)碳排放效率均呈现先下降后上升的“U”型趋势,综合碳排放效率在不同程度上受直接碳排放效率和间接碳排放效率双重影响。2001年中国加入WTO后大力投资能源密集型产业,水、能资源消耗和碳排放大量增加,2011年诸如“十二五”规划等政策的实施,一定程度上削减了碳排放,提高了水、能资源的利用效率,与综合碳排放效率的变化趋势相吻合。此外,综合效率在2010年前与间接效率趋势类似,在2011年后与直接效率类似,说明综合效率在不同阶段上受直接效率、间接效率双重影响。因此,真实效率要综合考虑直接值和间接值,这在以前的研究中一直被忽视。

(2)技术进步是提升碳排放效率的主要驱动因素,间接碳排放效率的技术进步指数最低。研究期内中国各省份综合效率均值为0.524,直接效率均值为0.548,间接效率均值为0.518,各省份间接效率值普遍偏低。此外,各省份的EC指数几乎没有变化,而GML指数与TC指数均呈现“直接效率>综合效率>间接效率”的趋势,说明决定GML指数的是TC值,即技术进步是提升碳排放效率的主要驱动因素,这

在Tobit回归结果中得到同样印证。考虑到间接碳排放效率的效率值和TC值均最低,因此需重点关注间接碳排放效率的技术创新。

(3)研究期内,碳排放效率均受到不同因素作用,在空间上呈现“东部>中部>西部>东北”的分布格局。其效率重心均集中在东部地区,表明当前中国低碳转型在空间上存在明显区域差异。具体而言,东部地区效率最高,中西部次之,东北地区最低。究其原因,东部地区经济发展水平高,在资金、技术、管理水平、发展理念等方面处于领先地位,使得其综合、直接、间接碳排放效率整体优于其他地区。此外,经济发展、环境规制和自主创新均能在不同程度上促进三大碳排放效率的提升,城镇化率和产业结构对三大碳排放效率存在异质性影响,耗水强度和能源消耗则阻碍了效率提升。

4.2 政策建议

(1)在制定降碳策略时,不能仅依赖直接碳足迹总量、单一足迹强度或历史使用量,简单对所有地区设置统一性指标,而需综合考虑整个产业链的资源消耗和碳排放情况,既要关注产业自身的节能减排,也要关注产业链上下游的绿色协同治理。合理构建产业部门足迹总量统计和转移核算制度,结合各地区产业分布特征和各产业部门实际需求和供给过程,再具体采用诸如完善资源税、推进碳排放权交易市场建设等做法,为各产业部门配置共同且有区别的责任。

(2)产业部门间的间接足迹协同管理亟待加强。应联合产业链各个部门,基于研发设计、原料选择、生产制造、运输销售、使用报废的全生命周期环节,协同打造低水耗和清洁能源为主化石能源为辅的全产业链,从而提升间接碳排放效率。在此基础上,改变传统以区域为基础的碳排放效率提升思路,建设以产业为监控对象的水-能-碳信息共享平台,实现整个系统的实时监控和智能化管理。

(3)不同地区应找准定位,制定符合当地实际情况的减排策略,打造特色的治理路径。例如,东部地区经济发展水平已经较高,应进一步加强环境规制,以规制企业采用更为清洁的生产技术,减少碳排放。中部地区处于经济发展的中间阶段,应加大技术创新和科技投入,推动传统产业向绿色、智能方向转型。西部地区拥有丰富的自然资源,但也面临着资源开发过程中的环境压力,因此应重点关注资源的高效利用和可持续性,推动绿色能源的开发利用。东北地区有着传统的重工业基础,可以通过技术改造和产业升级,提高工业生产效率,降低能源消耗和碳排放。

4.3 研究局限

本文构建了一个基于水-能-碳三维足迹的碳排放效率测度框架,全面评估中国区域和省际层面的碳排放效率并分析时空差异,但研究仍存在一定的局限性。

(1)在资源足迹的量化过程中,采用单区域投入产出表作为分析工具,未能充分考量不同省份间资源的流入与流出情况,可能忽略了其他影响因素。为了更准确地描绘资源流动的全貌,未来的研究将尝试引入多区域投入产出模型,以全面刻画区域间的资源要素流动特征。

(2)在构建超效率EBM的投入产出指标体系时,为了重点突出碳排放效率,将碳排放作为唯一的非期望产出,忽略了水资源和能源由更广泛经济活动引致的其他产出。仅将水资源和能源与碳排放相联系,可能低估了它们在整体经济活动中的关键性和广泛影响,未来的研究将进一步拓展投入产出指标体系的范围,以纳入更多与水资源和能源使用相关的经济活动指标。

【参考文献】

- [1] Oh X B, Mohammad Rozali N E, Liew P Y, et al. Design of integrated energy-water systems using Pinch Analysis: a nexus study of energy-water-carbon emissions[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021,322:129092.
- [2] Tan Q L, Liu Y, Ye Q. The impact of clean development mechanism on energy-water-carbon nexus optimization in Hebei, China: a hierarchical model based discussion[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020,264:110441.
- [3] Chen G W, Hadjikakou M, Wiedmann T. Urban carbon transformations: unravelling spatial and inter-sectoral linkages for key city industries based on multi-region input-output analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 163: 224-240.
- [4] Valek A M, Sušnik J, Grafakos S. Quantification of the urban water-energy nexus in México City, México, with an assessment of water-system related carbon emissions[J]. *Science of the Total Environment*, 2017,590/591:258-268.
- [5] 彭辉,徐佩琦,邵玲,等. 京津冀地区水-能系统关联及协同效益[J]. *资源科学*, 2022,44(11):2330-2340.
Peng Hui, Xu Peiqi, Shao Ling, et al. Water-energy nexus and co-benefits in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. *Resources Science*, 2022,44(11):2330-2340.
- [6] Okadera T, Geng Y, Fujita T, et al. Evaluating the water footprint of the energy supply of Liaoning Province, China: a regional input-output analysis approach[J]. *Energy Policy*, 2015,78:148-157.
- [7] Kang J F, Xu L P, Ren X H, et al. An integrated assessment

- and prediction approach of water-energy nexus at the provincial scale: a case study of Inner Mongolia, China[J]. *Energy*, 2024,291:130438.
- [8] Zhao L Q, Wu J Y, Luan Z F, et al. Sustainable carbon retention from water input to wetlands at two temporal scales[J]. *Catena*, 2024,245:108319.
- [9] 丁绪辉,贺菊花,王柳元. 考虑非合意产出的省际水资源利用效率及驱动因素研究:基于SE-SBM与Tobit模型的考察[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018,28(1):157-164.
Ding Xuhui, He Juhua, Wang Liuyuan. Inter-provincial water resources utilization efficiency and its driving factors considering undesirable outputs: based on SE-SBM and Tobit model[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2018,28(1):157-164.
- [10] 孙才志,郝帅,赵良仕. 中国水资源-能源-粮食纽带系统效率时空分异特征[J]. *水资源保护*, 2021,37(1):61-68,78.
Sun Caizhi, Hao Shuai, Zhao Liangshi. Spatial-temporal differentiation characteristics of water resources-energy-food nexus system efficiency in China[J]. *Water Resources Protection*, 2021,37(1):61-68,78.
- [11] 石常峰,俞越,吴凤平,等. 近远程耦合视角下黄河流域产业虚拟水流动与水资源短缺风险传递[J]. *自然资源学报*, 2024,39(1):228-244.
Shi Changfeng, Yu Yue, Wu Fengping, et al. Exploring virtual water flows and water resources risk transfer in the Yellow River Basin based on local-distant perspective[J]. *Journal of Natural Resources*, 2024,39(1):228-244.
- [12] 李振冉,宋妍,岳倩,等. 基于SFA-CKC模型评估中国碳排放效率[J]. *中国人口·资源与环境*, 2023,33(4):46-55.
Li Zhenran, Song Yan, Yue Qian, et al. Evaluation of carbon emission efficiency in China based on the SFA-CKC model[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2023,33(4):46-55.
- [13] 杨传明,沈洁,卓青青. 长三角城市群大气环境效率时空分异研究[J]. *环境科学与技术*, 2023,46(4):92-99.
Yang Chuanming, Shen Jie, Zhuo Qingqing. Study on the spatio-temporal differentiation of air environmental efficiency in Yangtze River Delta urban agglomeration[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023,46(4):92-99.
- [14] Santos Camanho A, Silva M C, Piran F S, et al. A literature review of economic efficiency assessments using data envelopment analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 2024,315(1):1-18.
- [15] 何寿奎,丘康尧. 国家中心城市建筑业碳排放效率及影响研究[J]. *环境科学与技术*, 2024,47(2):195-205.
He Shoukui, Qiu Kangyao. Research on carbon emission efficiency and impact of construction industry in national central cities[J]. *Environmental Science & Technology*, 2024,47(2):195-205.
- [16] 贾璐豪,王明仕,王明娅,等. 低碳背景下中国农业投入及产出碳排放分析[J]. *环境科学与技术*, 2024,47(7):43-54.
Jia Luhao, Wang Mingshi, Wang Mingya, et al. Analyses of carbon emissions from agricultural inputs and outputs in China in a low carbon context[J]. *Environmental Science & Technology*, 2024,47(7):43-54.
- [17] 宋娜,原一敏. 长江经济带省域旅游碳减排潜力与旅游碳排放效率的交互响应[J]. *经济地理*, 2023,43(7):225-233.
Song Na, Yuan Yimin. Interactive response between tourism carbon emission reduction potential and tourism carbon emission efficiency in the Yangtze River Economic Belt[J]. *Economic Geography*, 2023,43(7):225-233.
- [18] 岳立,雷燕燕. 中国旅游资源绿色转换效率的时空演化及影响因素研究[J]. *统计与决策*, 2021,37(22):41-45.
Yue Li, Lei Yanyan. Study on spatial-temporal evolution and influencing factors of green conversion efficiency of China's tourism resources[J]. *Statistics & Decision*, 2021,37(22):41-45.
- [19] Xia P S. RAS: Stata Module to Implement Biproportional Scaling (RAS) Method[R]. *Statistical Software Components*, 2021.
- [20] Klees R, Slobbe D C, Farahani H H. A methodology for least-squares local quasi-geoid modelling using a noisy satellite-only gravity field model[J]. *Journal of Geodesy*, 2018,92(4):431-442.
- [21] 杨传明. 新旧常态中国产业全碳足迹关联效应对比研究[J]. *软科学*, 2020,34(12):68-73.
Yang Chuanming. Comparative study on the relevant effect of China's industrial full carbon footprint in the new and old normal periods[J]. *Soft Science*, 2020,34(12):68-73.
- [22] 胡剑波,王楷文. 中国省域碳排放效率时空差异及空间收敛性研究[J]. *管理学报*, 2022,35(4):36-52.
Hu Jianbo, Wang Kaiwen. Study on temporal and spatial differences and spatial convergence of provincial carbon emission efficiency in China[J]. *Journal of Management*, 2022,35(4):36-52.
- [23] 王帅. 数字经济对区域绿色发展的影响研究[D]. 兰州:兰州大学, 2022.
- [24] 杨晓军,薛洪畅. 创新驱动政策是否促进城市减污降碳协同增效——来自国家创新型城市试点政策的经验证据[J]. *产业经济研究*, 2024(3):1-14.
Yang Xiaojun, Xue Hongchang. Does innovation-driven policy enhance synergizing the reduction of pollution and carbon emissions in cities—empirical evidence from national innovative city pilot policy[J]. *Industrial Economics Research*, 2024(3):1-14.
- [25] Popp D. Induced innovation and energy prices[J]. *American Economic Review*, 2002,92(1):160-180.
- [26] 何玉梅,罗巧. 环境规制、技术创新与工业全要素生产率——对“强波特假说”的再检验[J]. *软科学*, 2018,32(4):20-25.