

收稿日期:2026-02-24

中国城市能源碳绩效的区域差异 与动态演进研究

姚登宝^{1,2}, 朱媛媛¹, 阮倩倩¹

(1. 安徽大学 经济学院, 安徽 合肥 230601; 2. 安徽大学 中国金融研究院, 安徽 合肥 230601)

摘要:城市能源碳绩效是评估经济社会全面绿色转型效果的重要指标。基于2012—2024年中国30个省份数据,运用超效率SBM模型测度了中国城市能源碳绩效水平,采用Dagum基尼系数分解、核密度估计、探索性空间数据分析与马尔可夫链模型等方法,探索中国城市能源碳绩效的区域差异与动态演进规律。研究发现:全国碳绩效呈“波动探底、稳健回升”态势,但区域分化显著,东部、北部及南部沿海地区效率领先,长江中游地区快速追赶,而西北、黄河中游等资源型地区提升缓慢甚至下滑;区域差异主要源于八大综合经济区之间的结构性差距,区域内则表现出较强同质性;动态分布呈现“多峰并存、整体右移”的俱乐部收敛特征,空间上形成“高-高”沿海集聚与“低-低”内陆连片格局;马尔可夫链模型分析进一步显示城市碳绩效演化具有路径依赖与“高稳低固”的两极锁定特征。

关键词:能源碳绩效;SBM模型;区域差异;动态演进;空间关联

中图分类号:F832.7

文献标识码:A

文章编号:1003-6873(2026)04-0020-16

基金项目:安徽省哲学社会科学规划一般项目“数实融合赋能安徽新质生产力发展的机制与路径研究”(AHSKY2024D101)。

作者简介:姚登宝(1987—),男,安徽合肥人,安徽大学经济学院副教授,博士,主要从事绿色金融和碳金融研究;朱媛媛(2003—),女,安徽六安人,安徽大学经济学院硕士研究生,主要从事碳金融与能源经济研究;阮倩倩(2003—),女,安徽池州人,安徽大学经济学院硕士研究生,主要从事数字经济研究。

DOI:10.16401/j.cnki.ysxb.1003-6873.2026.04.003

一、引言及文献综述

推动经济社会发展绿色化、低碳化,是中国式现代化的内在要求与必由之路。在全球气候变化挑战日益严峻与中国经济社会发展全面绿色转型的关键交汇期,城市作为能源消耗与碳排放的核心载体,其能源碳绩效水平已成为衡量高质量发展成效、决定“双碳”目标实现进度的关键标尺^[1]。2025年中央经济工作会议是部署“十五五”开局之年经济工作的纲领性会议,明确将“协同推进降碳、减污、扩绿、增长”置于突出位置,并强调需“因地制宜塑造绿色低碳发展新格局”^[2]。这为区域低碳转型指明方向的同时,也对科学评估并有效缩小区域碳绩效差异提出了

迫切要求。在此背景下,科学、精准地评估中国城市能源碳绩效的时空分异格局、动态演进规律,探索深层结构成因,不仅是对过去十余年各区域绿色转型路径与成效的一次系统性检验,更是为“十五五”乃至更长时期优化国家区域低碳治理体系、破解发展不平衡不充分问题、制定精准协同的减排政策提供不可或缺的实证依据与决策支撑的核心课题^[3]。

国内外学者已围绕区域与城市碳排放绩效的评价、差异及演进展开了多维度、多层次的深入研究。在分析框架上,研究范式已从传统地理分区逐步转向更具经济关联性的区域划分标准,如Shen等^[4]将样本划分为“八大综合经济区”展开研究,这为识别内部同质性与区间异质性提供了新视角;在此基础上,针对京津冀、长三角、粤港澳大湾区等重大战略区域的聚焦分析进一步深化^[5-7],不仅揭示了能源结构、产业同构等共性制约,也辨析了创新集聚、政策协同等差异化提升路径。在测度方法上,Tang等^[8]基于非径向方向距离函数(NDDF)与全局Malmquist-Luenberger(GML)指数的静态-动态集成方法对效率值进行测算,能够同时捕捉环境绩效的静态效率与动态生产率变化,为识别区域间的长期差异提供了可靠工具;超效率SBM模型与Malmquist指数分解也被广泛用于测度城市碳排放效率的静态水平与动态演进^[9],进而通过面板Tobit等模型检验其影响因素^[10]。这些方法不仅克服了传统测度中径向性与角度选择的局限,还为多维度、多尺度的绩效比较奠定了方法论基础。在时空格局与动态演进方面,王少剑等^[11]揭示了中国城市能源碳绩效具有显著的空间异质性与动态复杂性。从空间分布看,碳绩效水平虽整体呈上升态势,但“东高西低”的区域非均衡格局依然持续。在动态演进上,则呈现整体收敛与局部极化并存的复合特征^[12]:一方面,全国及区域层面在“双碳”目标推动下表现出收敛趋势,后发地区存在一定的“追赶效应”;另一方面,部分类型区域内部差异有所扩大^[13],收敛过程并不均衡。Huang等^[14]研究发现,资源型城市绿色转型绩效呈现明显的“俱乐部收敛”现象,内部差异显著,成长型、再生型城市绩效通常优于成熟型与衰退型城市,凸显了绿色转型的路径依赖与长期性。

综观现有文献,虽成果丰硕,但针对“中国城市能源碳绩效”这一复杂系统的动态演进研究,仍需深化与整合。在研究视角层面,现有文献多侧重于单一维度或部分方法组合,缺乏能够有效整合多种模式的完整分析框架,难以系统揭示其全貌与内在复杂性。在方法论层面,对这些前沿工具的运用相对独立,未能串联成立体化、全过程分析链条,从而难以全面解构碳绩效演化背后多维度机制的交互作用。在时效性与系统性层面,已有研究对“十四五”中后期及“十五五”新阶段转型动态的捕捉尚显不足。鉴于此,本文可能的边际贡献在于:第一,构建一个集成化的多尺度分析框架,融合Dagum基尼系数分解、核密度估计、探索性空间数据分析(ESDA)与马尔可夫链模型,实现了从静态差异、动态分布、空间关联到长期趋势的全方位、连贯性分析;第二,基于2012—2024年数据,刻画新发展阶段下中国城市能源碳绩效的完整演变轨迹与内在规律,提供了更新的经验证据;第三,将实证发现转化为服务于“十五五”时期推动区域协调低碳发展的具体策略,为破解转型中的不平衡难题、塑造高质量发展新格局提供科学参考。

二、中国城市能源碳绩效的测度分析

(一) 投入-产出指标体系

借鉴李江龙等^[15]的方法,将能源、资本、劳动作为投入要素,以实际GDP表征期望产出,并将二氧化碳排放量作为非期望产出,建构城市能源碳绩效评价指标体系,如表1所示。劳动力投入以各城市年末从业人员数表示;资本存量参照单豪杰等^[16]的方法,采用永续盘存法计算出城市固定资产存量;能源投入以城市全年用电总量表示;期望产出为通过GDP平减指数计算得到

的城市实际GDP;非期望产出为二氧化碳排放量。

表1 中国城市能源碳绩效投入-产出指标体系

一级指标	二级指标	指标说明
投入要素	能源	电力消费
	资本	城市固定资产存量
	劳动	各城市年末从业人员数
期望产出	实际GDP	城市实际GDP
非期望产出	二氧化碳排放量	各城市二氧化碳排放量

(二) 测度方法:超效率SBM模型

传统数据包络分析(DEA)虽能处理多投入多产出系统的效率评价,但它对松弛变量的度量存在局限。Tone发展的SBM模型虽弥补了这一缺陷,却难以对有效单元(效率值为1)进一步排序。为克服该问题,Tone进一步融合超效率理念与SBM框架,提出超效率SBM模型^[17]。该模型不仅纳入非期望产出,还纠正了松弛偏差,从而实现对多个有效决策单元的精细化区分与比较,显著提升了测度的准确性^[18]。基于此,本文采用超效率SBM模型测度中国城市能源碳绩效,具体模型设定如下:

$$\min \rho = \frac{1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{S_i^-}{X_{ik}}}{1 - \frac{1}{v+u} \left(\sum_{r=1}^v \frac{S_r^+}{Y_{rk}} + \sum_{q=1}^u \frac{S_q^{O-}}{O_{qk}} \right)} \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n \lambda_j X_{ij} - S_i^- \leq X_{ik}, i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n \lambda_j Y_{rj} + S_r^+ \leq Y_{rk}, r = 1, 2, \dots, v \\ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n \lambda_j O_{qj} - S_q^{O-} \leq O_{qk}, q = 1, 2, \dots, u \\ 1 - \frac{1}{v+u} \left(\sum_{r=1}^v \frac{S_r^+}{Y_{rk}} + \sum_{q=1}^u \frac{S_q^{O-}}{O_{qk}} \right) > 0 \\ \lambda_j, S_i^-, S_r^+, S_q^{O-} \geq 0 \\ j = 1, 2, \dots, n (j \neq k) \end{array} \right. \quad (2)$$

其中,综合效率 ρ 表示城市能源碳绩效水平。若 $\rho^* < 1$,表明该DMU(决策单元)在当前时期的能源碳绩效未达有效状态;当且仅当 $\rho^* \geq 1$,才能判定该DMU的能源碳绩效处于强有效状态。 X_{ij} 、 Y_{rj} 、 O_{qj} 分别为决策单元 j 的第 i 项投入、第 r 项期望产出、第 q 项非期望产出; m 、 v 、 u 分别表示投入、期望产出和非期望产出的个数; λ_j 为决策单元 j 的权重系数。 S_i^- 、 S_r^+ 、 S_q^{O-} 分别对应着投入、期望产出和非期望产出的冗余量; X_{ik} 、 Y_{rk} 、 O_{qk} 则分别表示投入、期望产出、非期望产出的向量值。

(三) 测度结果分析

1. 区域层面

参考史依铭^[19]的研究,本文根据国务院发展研究中心的划分标准将样本数据划分为八大综合经济区^①。图1给出了2012—2024年全国及八大综合经济区城市能源碳绩效水平的测度结果,从中可以看出,2012—2024年全国城市能源碳绩效整体呈“波动探底,稳健回升”的态势,绩效值从2012年的0.643经历短暂下滑后,自2016年起进入持续上升通道,至2024年达到0.648,标志着中国城市经济增长与碳排放的初步脱钩。然而,区域分化格局显著。东部沿海、北部沿海与南部沿海地区构成全国的效率前沿,其绩效水平持续领先,2024年绩效值均高于0.82。长江中游地区迅速追赶,碳绩效从2013年的0.435大幅跃升至2024年的0.612,增幅超过40%,这主要得益于“中部崛起”战略下绿色产业转移和光伏、锂电池等新能源产业集群的“弯道超车”。东北地区保持平稳提升,西南地区低起点增长。黄河中游地区作为国家能源重化工基地,绩效增长平缓,反映资源型经济路径依赖的转型阻力。最为特殊的是西北地区,其碳绩效水平从2012年的0.734下滑至2024年的0.553,这可能是因为区域内传统能源产能扩张,碳排放增速长期超过经济增速。

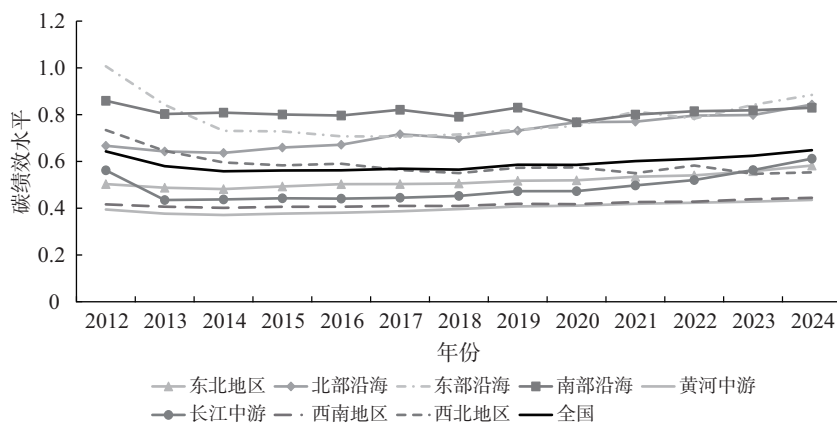


图1 2012—2024年全国及八大综合经济区城市能源碳绩效水平测度结果

2. 省域层面

图2展示了2012—2024年中国省域城市能源碳绩效水平变化,揭示了较区域框架更为精细和动态的转型图谱,各省份的演进路径呈现高度异质性,可归纳为稳健上升型、高位波动型、平稳滞后型和异常下滑型四种典型模式。稳健上升型以四川、山东、安徽等省份为代表,其绩效呈持续、单调的上升趋势,增幅介于35%至65%,体现了这些省份通过系统性产业结构优化与清洁能源替代,成功推动碳排放与经济增长脱钩的转型成效。高位波动型包括天津、浙江、上海、北京等省份,其绩效始终处于全国前列,但波动显著。天津2016—2017年间因工业去产能与高端制造转型,绩效值跃升至1.000;浙江与上海则经历了“高起点—深度调整—创新复苏”的“V型”路径。平稳滞后型涵盖陕西、山西、内蒙古、新疆、云南等省份,其绩效长期在较低水平(多数

① 中国八大经济区包括东北(辽宁、吉林、黑龙江)、北部沿海(北京、天津、河北、山东)、东部沿海(上海、江苏、浙江)、南部沿海(福建、广东、海南)、长江中游(湖北、湖南、江西、安徽)、黄河中游(陕西、山西、河南、内蒙古)、西南(云南、贵州、四川、重庆、广西)、西北(甘肃、青海、宁夏、西藏、新疆)。本研究样本不含香港、澳门、台湾和西藏。

<0.45),凸显了资源依赖型地区因产业锁定、技术不足与转型动力匮乏陷入“低效均衡”的困境。异常下滑型以宁夏、重庆、青海为代表,其绩效绝对值下降,宁夏降幅超过40%,这一特殊轨迹与这些省份处于承担国家能源战略保供、高载能产业布局扩张的发展阶段密切相关。

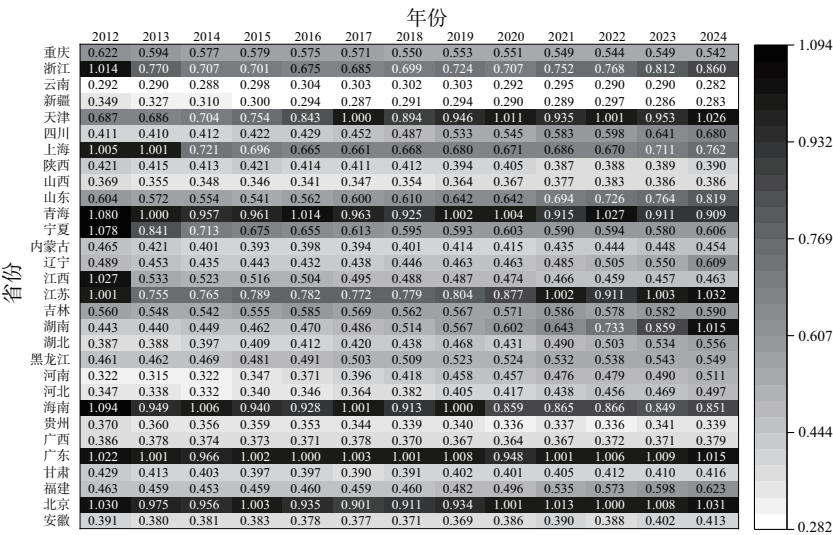


图2 2012—2024年中国省域城市能源碳绩效水平变化热力图

三、 研究设计

(一) Dagum 基尼系数

为了深入探寻中国城市能源碳绩效的区域差异及其产生的原因,借鉴Dagum^[20]的方法,采用Dagum基尼系数分析测度结果。总体基尼系数可进一步分解为区域内差异 G_w 、区域间差异 G_{nb} 和超变密度差异 G_t ,三者之间的关系为 $G = G_w + G_{nb} + G_t$ 。

$$G = \frac{\sum_{j=1}^k \sum_{h=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |P_{ji} - P_{hr}|}{2n^2 \bar{P}}$$

(3)

其中, G 表示总体基尼系数, $n_j(n_h)$ 表示第 $j(h)$ 个区域内省份的个数, $P_{ji}(P_{hr})$ 表示第 $j(h)$ 个区域内省份 $i(r)$ 的城市能源碳绩效水平, $\bar{P}$ 代表城市能源碳绩效水平均值。

(二) Kernel核密度估计

Kernel核密度作为一种非参数检验方法,能够通过核密度函数生成平滑的连续密度曲线,刻画出中国城市能源碳绩效随时间的动态演进特征^[21]。本文采用高斯函数计算全国以及八大综合经济区城市能源碳绩效水平的核密度,具体计算公式为:

$$f(x) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^N K\left(\frac{x_i - \bar{x}}{h}\right)$$

(4)

其中, $K(\cdot)$ 为高斯核密度函数, x 表示城市能源碳绩效水平的观测值, $\bar{x}$ 则表示观测值均值, N 为观测值的个数, h 为带宽。

(三) 探索性空间数据分析法(ESDA)

探索性空间数据分析法通过整合空间数据集,探索和分析变量之间存在的空间相关性和集聚特征,揭示研究变量的空间分布格局。参考肖黎明^[22]的方法,运用全局莫兰指数反映城市能源碳绩效水平的整体空间自相关程度,计算公式为:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m w_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{S^2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m w_{ij}} \quad (5)$$

其中, I 为城市能源碳绩效水平的全局莫兰指数,取值范围为 $[-1, 1]$, $I < 0$ 表示城市能源碳绩效水平空间相关性为负, $I = 0$ 表示城市能源碳绩效水平不存在空间相关性, $I > 0$ 则表示城市能源碳绩效水平空间相关性为正; w_{ij} 采用空间邻接权重矩阵来计算; X_i 、 X_j 分别表示 i 省份与 j 省份的观测值; $\bar{X}$ 则表示观测值的均值。

同时,运用局部莫兰指数反映局部空间特征,计算公式为:

$$I_i(d) = Z_i \sum_{j=1}^n w'_{ij} Z_j \quad (6)$$

其中, $I_i(d)$ 为城市能源碳绩效水平的局部莫兰指数,取值范围为 $[-1, 1]$; d 为空间邻域距离阙值; Z_j 表示 X_j 的标准化数值; w'_{ij} 表示 w_{ij} 的标准化空间权重。

(四) 马尔可夫链(Markov)模型

为了更好地掌握中国城市能源碳绩效的动态演进过程,参考刘凯等^[23]的做法构造马尔可夫链转移概率矩阵,描述中国各区域城市能源碳绩效水平的内部动态演进格局,具体公式为:

$$Q_{ij}(E_i \rightarrow E_j) = \frac{n_{ij}}{n_i} \quad (7)$$

其中, Q_{ij} 为城市能源碳绩效水平从等级 E_i 转移到等级 E_j 的概率, n_{ij} 表示2012—2024年从等级 E_i 转移到等级 E_j 的省份数量; n_i 表示2012—2024年处于等级 E_i 的省份总数。

(五) 数据来源说明

基于数据可得性,本文选取2012—2024年我国30个省份、直辖市、自治区为研究样本(港、澳、台和西藏资料暂缺)。数据主要来自《中国统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国能源统计年鉴》以及各省份统计年鉴等,个别缺失数据运用线性插值法予以补全。

四、中国城市能源碳绩效的区域差异分析

(一) 总体差异及其来源分解

图3和图4分别给出了2012—2024年中国城市能源碳绩效水平的基尼系数及其贡献率,从中可以看出以下特征:总体基尼系数在研究期内呈波动下降趋势,从0.248降至0.215,但自2018年触底(0.203)后连续小幅回升至0.215,表明区域不均衡收敛进入平台期且存在结构性反弹压力。从分解值看,差异主要源于三部分:组间基尼系数(G_b)介于0.140~0.176,是数值最大的组成部分;超变密度基尼系数(G_t)在0.047~0.053间窄幅波动;组内基尼系数(G_w)则稳定处

于0.015~0.018的极低区间。从贡献率来看,组间差异始终是总体差异的最主要贡献者,其贡献率稳定保持在67%~72%的绝对主导区间,反映了八大经济区间存在显著的结构性的发展失衡;与此同时,超变密度贡献率呈较为明显的波动式上升态势,从21.55%升至23.48%,说明不同区域省份间的绩效分布交叉与重叠日益显著,传统地理板块边界解释力减弱;而组内贡献率则持续稳定在极低的水平(约7.5%),表明各综合经济区内省份间碳绩效水平非常接近,具有高度的同质性。

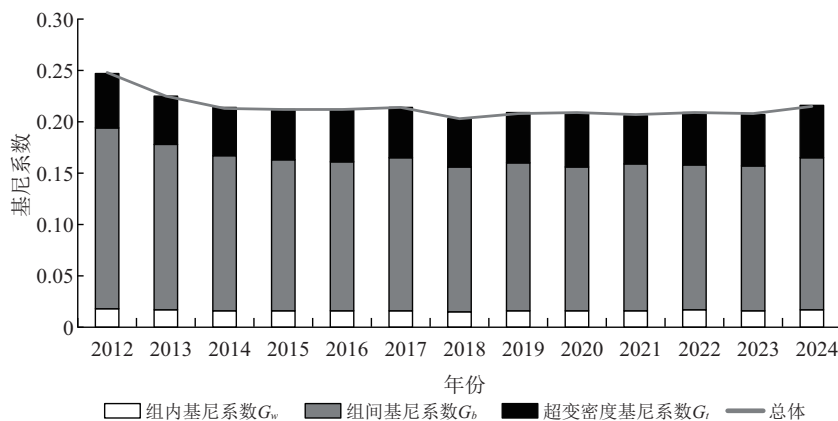


图3 2012—2024年中国城市能源碳绩效水平的基尼系数

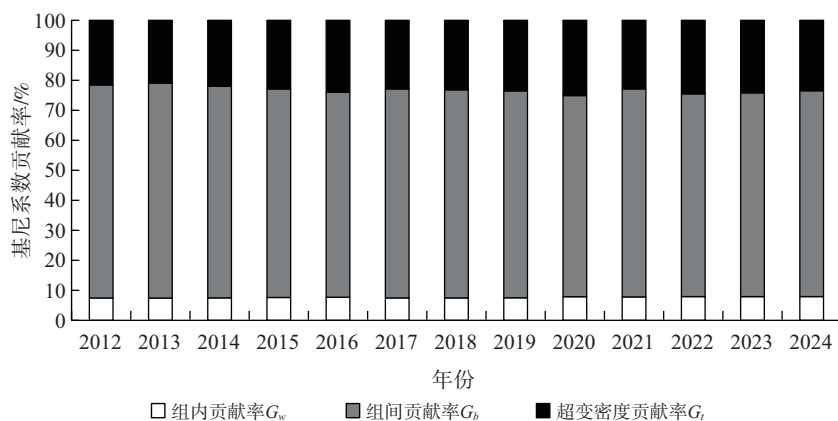


图4 2012—2024年中国城市能源碳绩效水平的基尼系数贡献率

（二）区域内差异分析

图5展示了2012—2024年中国城市能源碳绩效水平的组内基尼系数变化,揭示了其内部碳绩效均衡性的多元演变。具体而言,黄河中游地区基尼系数从0.076降至0.063,其内部差异在研究期后段明显缩小,表明山西、陕西、河南等能源大省在产业绿色转型中逐步缩小差距。长江中游地区内部差异从0.219收窄至0.194,2021年后加速下降。尽管各省绿色产业起步时间不同,但区域协同政策推动各省互补发展,缩小了省际差距。北部沿海从0.200降至0.134,南部沿海从0.163降至0.105,印证了沿海一体化战略的协同成效。东北地区组内差异从0.044波动下降至0.023,显示该地区在振兴政策下低碳转型路径趋同。与此趋势相反,东部沿海的内部差

异系数从 2012 年的 0.003 波动上升至 2024 年的 0.068, 表明发达省份间竞争加剧; 西南地区的系数从 0.135 稳步上升至 0.180, 均质化格局被打破; 西北地区的内部差异则始终在高位 (0.234~0.256) 窄幅波动, 格局稳定。

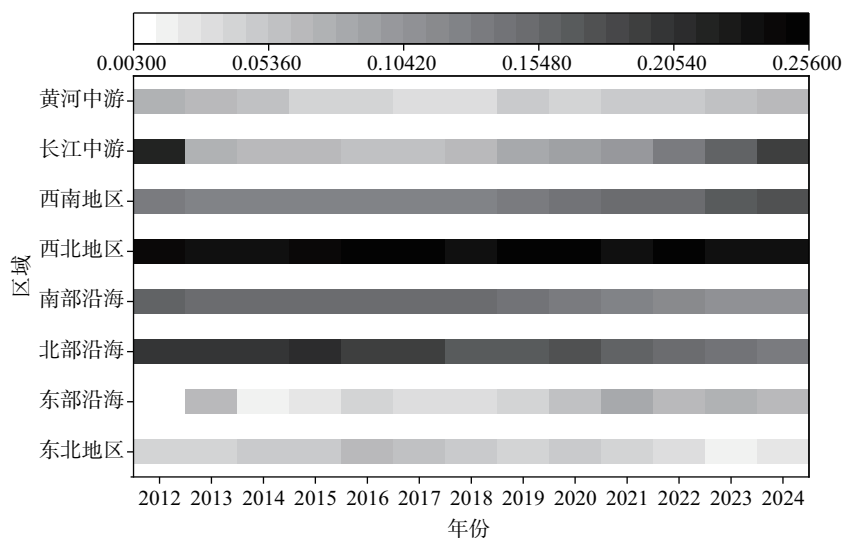


图 5 2012—2024 年中国城市能源碳绩效水平的组内基尼系数变化热力图

(三) 区域间差异分析

图 6 展示了 2012—2024 年中国城市能源碳绩效水平的组间基尼系数均值变化, 揭示了中国八大综合经济区间碳绩效水平差异的两极分化特征。黄河中游与南部沿海 (0.338 9)、西南地区与南部沿海 (0.330 8)、黄河中游与东部沿海 (0.323 6) 的组间差异, 构成了全国碳绩效差异的极值边界, 清晰刻画了以黄河中游为代表的传统能源重化工地区、西南内陆地区与沿海发达板块之间形成的系统性发展鸿沟。同时, 南部沿海与长江中游 (0.271 2)、西北地区与黄河中游 (0.247 2) 以及西北地区与西南地区 (0.255 2) 的差异也维持在较高区间, 进一步印证了资源型地区内部、西部与中部之间转型进程的复杂性与不均衡性。相比之下, 部分区域对间的差异则相对缓和。例如, 东北地区与长江中游之间的差异最小 (0.101 7), 北部沿海与东部沿海 (0.152 2)、东部沿海与南部沿海 (0.141 5) 的差异也处于较低水平。这表明, 在京津冀协同发展、长三角一体化等国家区域战略的推动下, 地理邻近或经济联系紧密的区域间, 通过基础设施互联、产业协同与市场整合, 在绿色发展路径上呈现一定的趋同特征。

图 7 展示了 2012—2024 年中国城市能源碳绩效水平的组间基尼系数年均变化幅度, 表明八大综合经济区间的碳绩效差异动态演进呈“沿海趋同、陆海分化”格局。区域差异收敛趋势主要集中在沿海板块内部及部分内陆关联区域间。其中, 东部沿海与东北地区的差异以年均 $-0.009 9$ 的幅度急剧缩小, 构成了最强收敛极; 南部沿海与东北地区 ($-0.008 2$)、北部沿海与南部沿海 ($-0.007 6$)、北部沿海与东部沿海 ($-0.007 5$) 的差异也显著收窄, 直观印证了在国家重大区域战略引领下, 沿海主要增长极的绿色发展模式与效率水平正在快速趋同。西北地区与黄河中游之间的差异同样大幅收窄 (年均 $-0.008 9$), 暗示这两个资源型地区可能形成了内部发展路径接近的“转型俱乐部”。与此同时, 部分区域间的碳绩效差距不断扩大。黄河中游与北部沿海

的差异持续扩大,凸显了传统重化工基地与加速升级的沿海板块在绿色转型速度上的落差。西南地区与北部沿海的差异扩大,反映了内陆部分地区与核心沿海板块之间转型进程的不同步。值得注意的是,西北地区与东部沿海的差异仍在扩大,表明能源战略基地与最高效前沿地区间的结构性差距尚未出现收敛拐点。

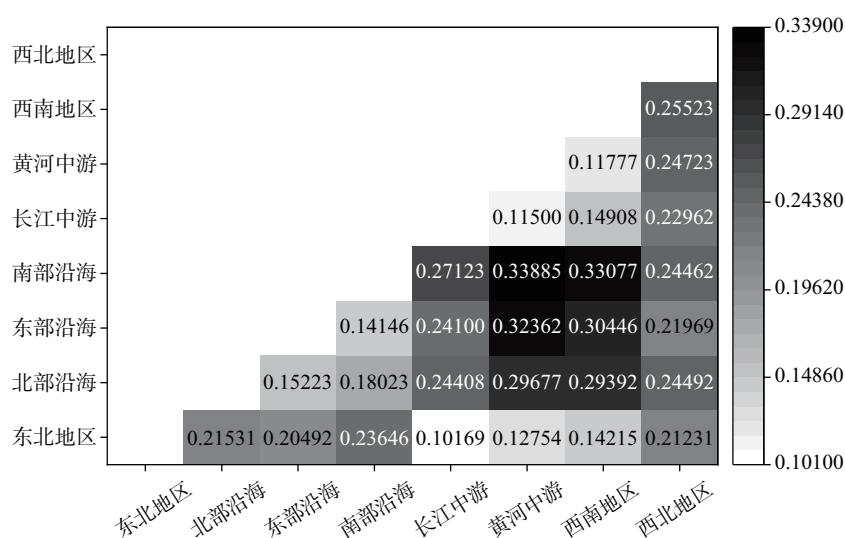


图6 2012—2024年中国城市能源碳绩效水平的组间基尼系数均值热力图

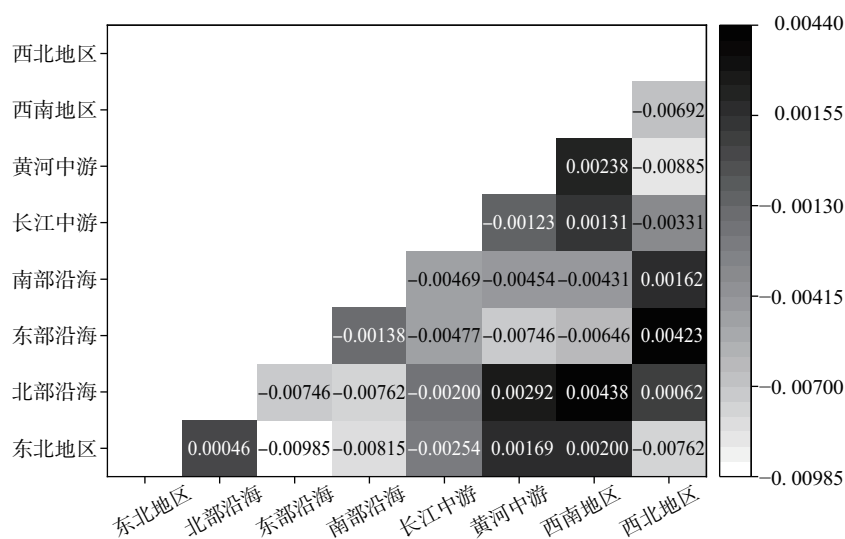


图7 2012—2024年中国城市能源碳绩效水平的组间基尼系数年均变化幅度热力图

五、中国城市能源碳绩效的时空演进分析

(一) 基于核密度估计的时间维度分析

图8展示了2012—2024年中国城市能源碳绩效的核密度估计曲线,从中可以看出全国整体分布呈现“多峰并存、整体右移、右尾拉长”的复杂特征。分布曲线并非单一正态,而是在不同绩

效水平上形成了多个局部峰值,这直观印证了全国范围内存在多个差异化“收敛俱乐部”,从分布形态上揭示由Dagum基尼系数度量的总体差异具有深厚的结构性根源。分布主体持续向右平移,表明全国城市能源碳绩效水平的系统性提升。与此同时,右尾的延长与增厚反映出一批领先城市的涌现,而左尾的持续则揭示了大量转型滞后城市的存在,这共同构成了全国总体差异的微观分布基础。

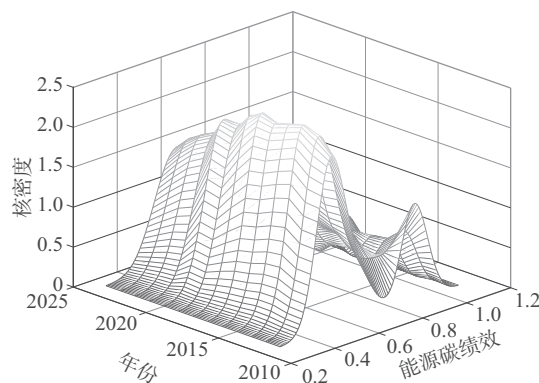
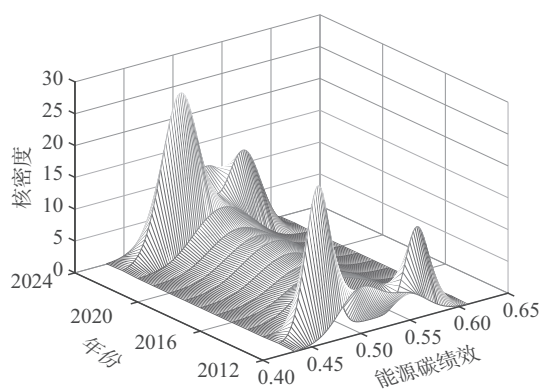
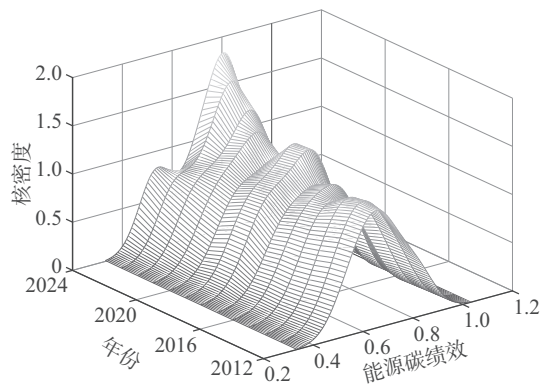


图8 中国城市能源碳绩效的核密度估计曲线

图9(a)~(h)分别展示了八大综合经济区的核密度估计结果,其分布动态可归纳为三类典型模式,进一步细化了各板块的内部结构。第一类是东部沿海、北部沿海及南部沿海地区呈现的“尖峰右移”收敛模式,其分布曲线演化为峰值陡峭、位置显著右移且宽度收窄的单一高峰,表明前沿区域内部碳绩效快速提升并高度均质化,形成高效协同的低碳集群。第二类是长江中游与西南地区表现的“宽峰延展”分化追赶模式,其分布曲线在整体右移的同时主峰高度降低、分布范围拓宽,形态扁平化。这反映了“增长中的分化”特征:先进城市加速提升但后线城市滞后,内部差距扩大。第三类是黄河中游、东北地区及西北地区显示的“缓移稳形”黏性发展模式,其分布曲线右移幅度有限,主峰形态在较低区间保持相对稳定,未出现显著的尖锐化或剧烈拓宽,反映了资源依赖型或转型压力较大区域面临发展惯性制约问题。特别地,西北地区核密度曲线进一步呈现主峰右移幅度最小且峰值高度与分布宽度未发生剧烈变化的特征,凸显国家能源战略与地方产业转型之间的结构性矛盾。



(a) 东北地区



(b) 北部沿海

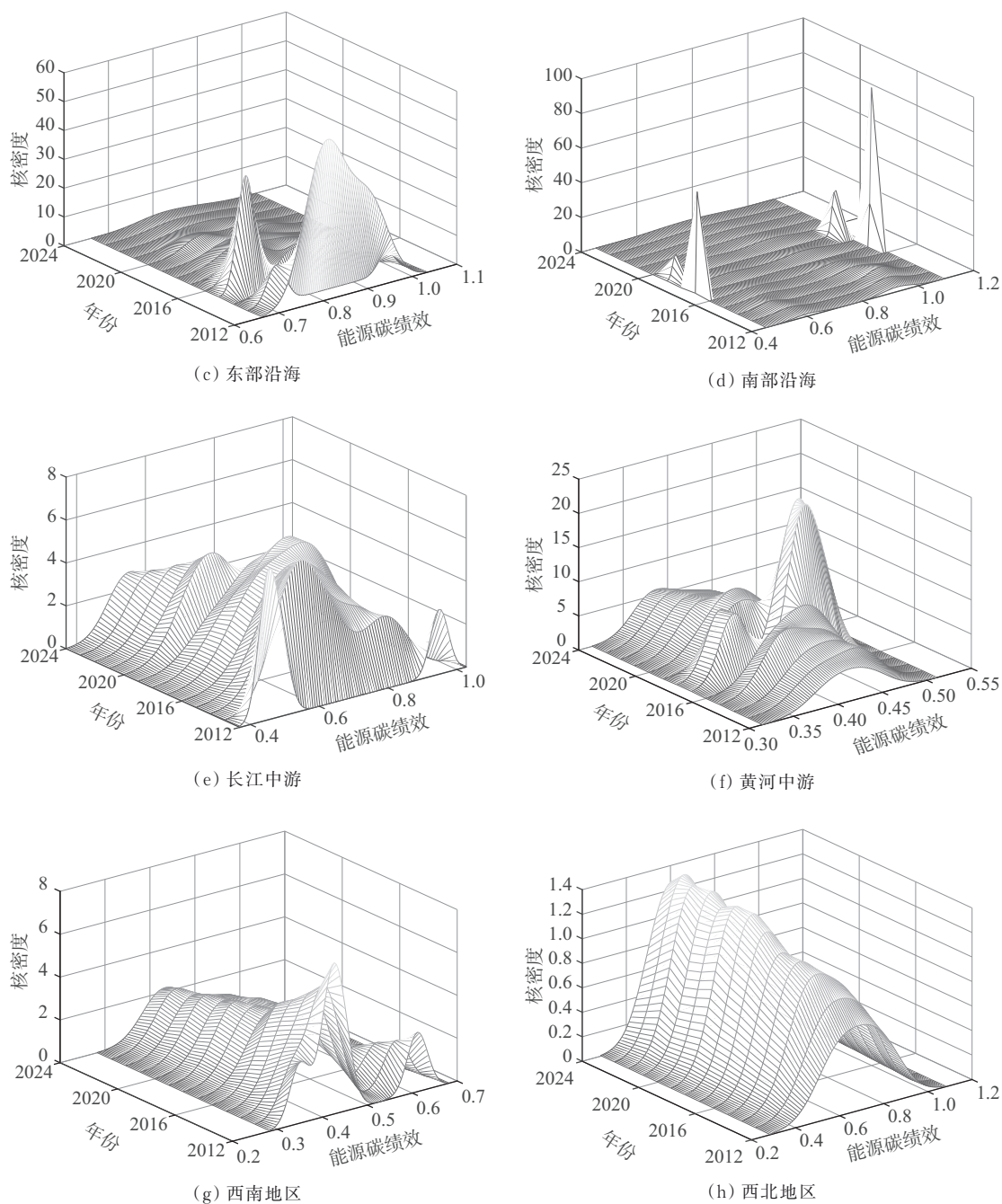


图9 八大综合经济区城市能源碳绩效的核密度估计曲线

(二) 基于探索性空间数据分析法的空间维度分析

基于2012—2024年中国城市能源碳绩效水平的全局莫兰指数分析显示(表2),中国城市能源碳绩效水平在研究期内存在显著且稳定的空间正自相关,所有年份的莫兰指数均为正值(介于0.196至0.248)且通过5%的显著性检验,这表明高碳绩效城市彼此在空间上显著集聚,低碳

绩效城市彼此相邻,形成了清晰的“高-高”与“低-低”空间俱乐部结构。从动态演变看,空间集聚强度呈现明显的阶段性波动,可能恰逢环境规制强化与转型政策深化关键期,加剧了区域间基于不同禀赋的响应分化;此后直至 2021 年,指数持续在高位运行,表明空间集聚格局趋于巩固;然而,自 2022 年起指数出现连续回调,至 2024 年降至 0.204,可能预示在“双碳”目标推动下的区域协同政策与技术扩散开始产生效应,使得长期固化的空间分异格局出现初步松动迹象。

表 2 2012—2024 年中国城市能源碳绩效水平的全局莫兰指数

年份	莫兰指数值	<i>z</i> 值	<i>p</i> 值
2012	0.212	2.009	0.022
2013	0.211	2.006	0.022
2014	0.227	2.137	0.016
2015	0.214	2.030	0.021
2016	0.196	1.877	0.030
2017	0.248	2.304	0.011
2018	0.240	2.241	0.013
2019	0.238	2.225	0.013
2020	0.215	2.031	0.021
2021	0.236	2.208	0.014
2022	0.201	1.918	0.028
2023	0.216	2.040	0.021
2024	0.204	1.948	0.026

基于 2012、2018 和 2024 年中国城市能源碳绩效水平的局部莫兰指数的分析表明(表 3),中国城市能源碳绩效的空间集聚格局呈“核心稳定、边缘流动与异常减少”的演变特征。

表 3 2012、2018 和 2024 年中国城市能源碳绩效水平的局部莫兰指数

象限	2012	2018	2024
第一象限(高-高集聚)	津、沪、苏、浙、粤、琼	京、津、沪、苏、浙、琼	京、津、沪、苏、浙、粤、琼
第二象限(低-高集聚)	皖、闽、湘、甘、新	冀、皖、闽、赣、新	冀、皖、闽、赣、桂、新
第三象限(低-低集聚)	冀、晋、内蒙古、辽、吉、黑、鲁、豫、鄂、桂、川、贵、云、陕	晋、内蒙古、辽、黑、豫、鄂、晋、内蒙古、辽、吉、黑、豫、湘、桂、川、贵、云、陕、甘	晋、内蒙古、辽、吉、黑、豫、鄂、渝、贵、云、陕、甘、宁
第四象限(高-低集聚)	京、赣、渝、青、宁	吉、鲁、粤、渝、青、宁	鲁、湘、川、青

高-高集聚区(第一象限)始终稳固地以京津、长三角和珠三角核心省份(如上海、江苏、浙江、广东)为主体,2018 年起北京、天津、海南加入,形成“核心稳定”空间锚点。低-低集聚区(第三象限)范围广泛且相当稳定,覆盖黄河中游、西南地区及东北地区多省份,构成纵贯南北的内陆低碳效率洼地,凸显转型滞后区域的空间连绵性。与此同时,低-高集聚区(第二象限)出现积极变化:安徽、福建、新疆等省份长期位列其中,表明其持续受到邻近高值板块的辐射;河北在 2018 年由低-低型转入此象限,可能得益于京津冀协同发展的绿色压力传导与产业升级。最为显著的调整发生在高-低集聚区(第四象限),其省份数量明显减少,显示“高值被低值包围”的异

常格局有所改善,但青海持续位于此象限,反映了局部区域与周边发展的不同步。

表4 2012—2024年中国城市能源碳绩效水平的马尔可夫转移概率矩阵

区域	本地状态	频数	I	II	III	IV
			<25%	25%~50%	50%~75%	>75%
东北地区	I	0	0.000	0.000	0.000	0.000
	II	15	0.000	0.867	0.133	0.000
	III	21	0.000	0.000	1.000	0.000
	IV	0	0.000	0.000	0.000	0.000
北部沿海	I	7	0.857	0.143	0.000	0.000
	II	5	0.000	0.800	0.200	0.000
	III	13	0.000	0.000	0.846	0.154
	IV	23	0.000	0.000	0.000	1.000
东部沿海	I	0	0.000	0.000	0.000	0.000
	II	0	0.000	0.000	0.000	0.000
	III	13	0.000	0.000	0.846	0.154
	IV	23	0.000	0.000	0.087	0.913
南部沿海	I	0	0.000	0.000	0.000	0.000
	II	8	0.000	0.875	0.125	0.000
	III	4	0.000	0.000	1.000	0.000
	IV	24	0.000	0.000	0.000	1.000
黄河中游	I	22	0.864	0.136	0.000	0.000
	II	26	0.115	0.846	0.038	0.000
	III	0	0.000	0.000	0.000	0.000
	IV	0	0.000	0.000	0.000	0.000
长江中游	I	13	0.846	0.154	0.000	0.000
	II	22	0.000	0.909	0.091	0.000
	III	10	0.000	0.100	0.800	0.100
	IV	3	0.000	0.000	0.333	0.667
西南地区	I	13	0.846	0.154	0.000	0.000
	II	20	0.000	0.900	0.100	0.000
	III	9	0.000	0.111	0.778	0.111
	IV	2	0.000	0.000	0.500	0.500
西北地区	I	36	1.000	0.000	0.000	0.000
	II	7	0.000	0.857	0.143	0.000
	III	17	0.000	0.000	1.000	0.000
	IV	0	0.000	0.000	0.000	0.000
全国整体	I	92	0.924	0.076	0.000	0.000
	II	93	0.043	0.871	0.086	0.000
	III	87	0.000	0.011	0.931	0.057
	IV	88	0.000	0.000	0.045	0.955

(三) 基于马尔可夫链模型的状态维度分析

表 4 为 2012—2024 年中国城市能源碳绩效水平的马尔可夫转移概率矩阵,从中不难看出,中国城市能源碳绩效的动态演进呈现“状态依赖”与“俱乐部收敛”特征,转移过程深受初始状态的影响。从全国整体看,状态转移表现为“两端锁定、中间流动”的惰性特征。处于最低等级(状态 I)和最高等级(状态 IV)的单元维持概率分别高达 92.4% 和 95.5%,揭示了“低者恒低、高者恒高”的极化锁定效应。而中间状态(II 和 III)则表现出更高的流动性,构成主要的向上跃迁通道。从区域异质性看,这种收敛趋势呈现鲜明的空间分异:西北地区与黄河中游地区等资源型地区陷入严峻的低绩效“陷阱”,其状态 I 的自我维持概率分别为 100% 和 86.4%,向上转移的可能性极低;而北部沿海与南部沿海地区则呈高绩效的“稳定俱乐部”特征,其状态 IV 的维持概率均为 100%,表明其已形成稳固的绿色发展前沿。值得注意的是,长江中游与西南地区作为在中间状态(II、III)活跃的“追赶者”,状态 II 向上转移的概率分别为 9.1% 和 10%,表现出较强的转型潜力与动态性。

六、结论与建议

(一) 研究结论

本文基于 2012—2024 年中国 30 个省份的面板数据,构建了集成静态测度、差异分解、动态分布、空间关联与状态转移的综合分析框架,系统考察了中国城市能源碳绩效的时空格局与演进规律。主要结论如下:(1)中国城市能源碳绩效整体呈“波动探底、稳健回升”趋势,但区域分化显著。东部、北部及南部沿海地区始终处于效率前沿;长江中游地区实现快速追赶;西北、黄河中游等资源型地区则受制于路径依赖,碳绩效提升缓慢甚至出现下滑。(2)区域差异主要源自板块间的结构性差距,区域内具有较强同质性。Dagum 基尼系数分解显示,总体差异呈波动收敛,其中组间差异贡献率持续居于主导,组内差异贡献率相对较低。(3)动态分布呈现“多峰并存、整体右移”的俱乐部收敛特征。核密度估计显示,沿海地区表现为“尖峰右移”的高度收敛模式;长江中游等追赶区域呈“宽峰延展”的分化形态;西北等地则维持“缓移稳形”的黏性状态。(4)空间关联格局稳定,集聚与扩散效应并存。ESDA 分析证实,城市能源碳绩效存在显著的空间正自相关,形成“高-高”集聚于沿海核心区,“低-低”连片分布于内陆的集聚格局,且局部已出现增长极的辐射迹象。(5)状态转移具有显著“俱乐部收敛”与“两端锁定”特征。马尔可夫链分析显示,城市能源碳绩效演进路径依赖突出,呈现“低者恒低、高者恒高”的锁定效应,中间状态区域则具备一定的向上跃迁潜力。

(二) 政策建议

为有效缩小城市能源碳绩效差距,推动形成优势互补、协同联动的区域绿色低碳发展新格局,本文提出以下政策建议:

第一,实施差异化、精准化的区域减排策略。政策制定需彻底摒弃“一刀切”模式,依据各区域碳绩效等级与演化特征精准施策。对于沿海高效前沿地区(如东部、南部沿海),应鼓励其对标国际领先水平,强化绿色技术原始创新与高端产业培育,探索碳中和先行路径。对于快速追赶地区(如长江中游),应优化产业转移的绿色门槛,支持其打造新能源产业集群,畅通技术扩散渠道。对于转型滞后的资源型地区(如西北、黄河中游),必须在保障能源安全的前提下,通过中央财政、绿色金融等综合支持,建立生态补偿与产能置换机制,助力其突破“碳锁定”,发展接续

替代产业。

第二,强化区域协同与空间联动治理机制。针对区域间差异主导的格局,必须强化跨区域协同治理。应深化京津冀、长三角、粤港澳等重大区域战略中的低碳协同内容,推动区域间环保标准统一、碳市场互联互通与绿色基础设施共建共享。建立健全跨省碳排放权交易协同与生态补偿机制,探索“飞地经济”合作下的碳收益共享。重点增强高效地区对周边“低-低”洼地的辐射带动能力,通过产业协作、技术转移等方式,打破其空间孤立状态。

第三,构建动态监测与适应性政策调整体系。鉴于碳绩效演进具有路径依赖和俱乐部收敛特征,应构建国家与区域尺度的动态监测预警平台。政策资源应重点关注处于“中间流动状态”的省份与区域,这些地区跃迁潜力大,是防止整体分化的关键。政策本身须具备灵活性,要根据监测结果及时调整,对向上转移势头明显的地区强化激励,对陷入低效“陷阱”的地区启动专项干预,确保转型进程协调推进。

参考文献

- [1] Yin S, Zhou Y, Bai C. Impact of Renewable Energy Technological Innovation on Urban Low-Carbon Transition: Taking the Yangtze River Economic Belt as an Example[J]. *Energy*, 2025, 333: 137432.
- [2] 周宏春. 经济社会发展全面绿色转型:价值意蕴、转型路径与实施机制[J]. *北京行政学院学报*, 2025(3): 108-117.
- [3] Liu M, Yu Y, Zhang M, et al. Carbon Balance Matching Relationships and Spatiotemporal Evolution Patterns in China's National-Level Metropolitan Areas[J]. *Land*, 2025, 14(4): 800.
- [4] Shen Y, Li H. Carbon Emission Efficiency in China(2010-2025): Dual-Scale Analysis, Drivers, and Forecasts Across the Eight Comprehensive Economic Zones[J]. *Sustainability*, 2025, 17(22): 10007.
- [5] 孙兴,刘熙. 中国城市碳排放效率的时空演变及影响因素:基于异质性空间随机前沿模型[J]. *地理研究*, 2023, 42(12): 3182-3201.
- [6] 刘敏,陈银蓉,王珏,等. 中国土地利用碳排放效率的空间关联网络及其驱动因素:基于国家重大战略区域的考察[J]. *资源科学*, 2024, 46(12): 2462-2476.
- [7] 廖铮潇,席广亮,张嵌玮,等. 碳汇潜力视角下的长三角城市群碳排放空间关联网络时空演变及驱动因素[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2025, 53(5): 1-14.
- [8] Tang D C, Shan Z M, He J X, et al. How Do Environmental Regulations and Outward Foreign Direct Investment Impact the Green Total Factor Productivity in China?: A Mediating Effect Test Based on Provincial Panel Data [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(23): 15717.
- [9] 权天舒,张晖,许玉韞. 长三角城市群碳排放效率的空间关联网络及其影响因素[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2024, 48(6): 217-228.
- [10] 岳立,韩亮. 不同类型资本偏向性技术进步对碳排放效率的影响[J]. *科技管理研究*, 2022, 42(14): 211-218.
- [11] 王少剑,王泽宏,方创琳. 中国城市碳排放绩效的演变特征及驱动因素[J]. *中国科学(地球科学)*, 2022, 52(8): 1613-1626.
- [12] 魏丽莉,侯宇琦,曹昊煜. 中国城市碳排放绩效:动态分解、空间差异与影响因素[J]. *统计与信息论坛*, 2024, 39(2): 69-83.
- [13] 王珏,李琳. 国家重大区域发展战略视角下资源型城市绿色转型绩效的地区差距及其政策启示[J]. *自然资源学报*, 2023, 38(12): 3041-3057.
- [14] Huang T, Yuan X, Liu R. Drivers of Green Transition Performance Differences in China's Resource-Based Cities: A Carbon Reduction-Pollution Control-Greening-Growth Framework[J]. *Sustainability*, 2025, 17(20): 9262.
- [15] 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?[J]. *经济研究*, 2018, 53(9): 151-167.
- [16] 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.
- [17] Tone K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis [J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 143(1): 32-41.

- [18] Guo Y, Tong Z, Wang Z, et al. Evolutionary Characteristics and Influencing Mechanisms of Green Development Efficiency in Chinese Urban Agglomerations: Analysis of the Yangtze River Delta Urban Agglomeration [J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 375: 124236.
- [19] 史依铭,张波. 中国式现代化水平测度、区域差异与动态演进[J]. *统计与决策*, 2025, 41(16): 95-99.
- [20] Dagum C. A New Approach to the Decomposition of the GiniIncome Inequality Ratio[J]. *Empirical Economics*, 1997, 22(4): 515-531.
- [21] 马玉林,马运鹏. 中国科技资源配置效率的区域差异及收敛性研究[J]. *数量经济技术经济研究*, 2021, 38(8): 83-103.
- [22] 肖黎明,李雯欣,肖沁霖. 中国数字生态文明建设水平:统计测度、区域差异与动态演进[J]. *统计与决策*, 2026, 42(2): 50-56.
- [23] 刘凯,刘涛. 中国市域经济发展质量水平的格局演变及其驱动因子[J]. *经济地理*, 2023, 43(12): 80-90.

Regional Disparities and Dynamic Evolution of Urban Energy Carbon Performance in China

YAO Dengbao^{1,2}, ZHU Yuanyuan¹, RUAN Qianqian¹

(1. School of Economics, Anhui University, Hefei, Anhui, 230601, China;

2. Institute for China Finance Research, Anhui University, Hefei, 230601, China)

Abstract: Urban energy carbon performance is a crucial indicator for assessing the effectiveness of the comprehensive green transition of the economy and society. Based on the panel data of 30 Chinese provinces from 2012 to 2024, this research employs the Super-Efficiency SBM model to measure the urban energy carbon performance in China. Methods including Dagum Gini coefficient decomposition, kernel density estimation, exploratory spatial data analysis, and Markov chain models are applied to examine the regional disparities and dynamic evolution patterns of urban energy carbon performance. The findings reveal that: National carbon performance exhibits a trend of “fluctuating bottoming out, followed by steady recovery”, but with significant regional divergence. The eastern, northern, and southern coastal regions lead in terms of efficiency, the Middle Yangtze River region is catching up rapidly, while resource-dependent regions such as the northwest and the Middle Yellow River region improve slowly or even decline. Regional disparities are mainly attributable to structural gaps among the eight comprehensive economic zones, whereas strong homogeneity is observed within each zone. The dynamic distribution exhibits club convergence, characterized by “multiple peaks coexisting and overall right-ward shift”, forming a spatial “high-high” agglomeration along the coast and a “low-low” contiguous zone in the inland area. The analysis based on Markov chain further indicates that the evolution of carbon performance is path-dependent, and displays a polarized locking feature of “high stability and low-level persistence”.

Key words: energy carbon performance; SBM model; regional disparity; dynamic evolution; spatial correlation

[责任编辑:陈济平]