

中国碳中和发展力的综合测度、区域差异与动态演进

孙传旺¹, 王 博^{2,*}, 李倩文³

1. 厦门大学 经济学院中国能源经济研究中心, 厦门 361005;

2. 厦门大学 经济学院财政系, 厦门 361005;

3. 江南大学 商学院, 无锡 214122



摘 要 : 构建碳中和目标引领下的地区发展程度与发展动力评价体系是“双碳”工作的重要支撑, 然而如何准确测度碳中和发展水平并识别主要动力因素尚未得到现有研究关注。本文基于碳中和发展和驱动力源视角, 系统化搭建了碳中和发展力分析框架与指标体系, 对2020—2023年中国省级层面碳中和发展力开展综合测度与动因分解, 同时利用Dagum基尼系数和Kernel密度估计方法, 重点揭示了不同地区碳中和发展力水平的差异特征与差异来源, 探究了区域碳中和发展力分布的动态趋势与演化模式。研究发现, 其一, 中国碳中和发展力整体水平稳步上升, 东部地区省份持续领先, 中部地区省份追赶效应明显。其二, 持续力与转型力在各地碳中和发展力提升中发挥“双轮驱动”作用, 协调力贡献度普遍较小。其三, 区域间差异仍是碳中和发展力区域差异的主要来源, 各地区碳中和发展力水平存在不同程度的梯度效应与极差扩大趋势。本文结论有助于在实力、效力层面衡量各地区实现“双碳”目标的禀赋条件与工作基础, 同时从能力、潜力维度发现不同地区推进“双碳”行动的优势特色与着力重点。

关 键 词 : “双碳”; 碳中和发展力; 区域差异; 动态演进

中图分类号 : F061.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-4981(2025)01-0027-18
DOI: 10.3724/j.issn.2097-4981.JECC-2024-0016

Comprehensive Measurement, Regional Differences, and Dynamic Evolution of Carbon Neutrality Developmentability in China

SUN Chuanwang¹, WANG Bo^{2,*}, LI Qianwen³

1. China Center for Energy Economics Research, School of Economics, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Department of Public Economics, School of Economics, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

3. School of Business, Jiangnan University, Wuxi 214122, China

Abstract : Building an evaluation system for regional development levels and growth momentum, guided by the goal of carbon neutrality, is essential for supporting efforts related to “dual carbon” action. However, existing research has not adequately focused on how to accurately measure the level of carbon neutrality development and identify the key driving factors. Based on the perspective of carbon neutrality development and driving forces sources, this paper systematically constructs an analytical framework and indicator system for assessing carbon neutrality developmentability. It conducts a comprehensive measurement and decomposition of the driving factors of carbon neutrality developmentability at the provincial level in China from 2020 to 2023. By employing the Dagum Gini coefficient and Kernel density estimation method, this paper uncovers the characteristics and sources of differences in carbon neutrality developmentability levels across regions. It explores the dynamic trends and

收稿日期: 2024-10-20; **接受日期:** 2024-11-12

基金项目: 国家社会科学基金重大项目 (21&ZD109); 国家自然科学基金青年项目 (72204098); 江苏省社会科学基金青年项目 (22GLC018)

作者介绍: 孙传旺 (1983—), 男, 博士, 教授, 研究方向为能源经济与政策、碳中和发展。E-mail: cw_sun@foxmail.com

通讯作者: 王 博 (1998—), 男, 博士研究生, 研究方向为能源经济、碳中和发展。E-mail: xmu_wb2821@163.com

evolution patterns of regional carbon neutrality developmentability distribution. The study has three key findings. First, the overall level of carbon neutrality developmentability in China is steadily increasing, with eastern provinces maintaining a leading position, while the central provinces show a significant catching-up effect. Second, the sustainability force and transformation force play a “dual-driving” role in enhancing carbon neutrality developmentability across various regions, while the contribution of the coordination force is generally small. Third, differences between regions remain the primary source of the disparities in carbon neutrality developmentability, with varying degrees of gradient effects and range-widening trends in carbon neutrality developmentability levels across different regions. The conclusions of this paper contribute to assessing the endowment conditions and work foundations for achieving the “dual carbon” goals across different regions in terms of strength and effectiveness. Additionally, it identifies the unique advantages and focal points for advancing “dual carbon” action in various regions from the perspectives of capacity and potential.

Key Words : dual carbon; carbon neutrality developmentability; regional differences; dynamic evolution

0 引言

党的二十届三中全会指出，要“加快经济社会发展全面绿色转型，健全生态环境治理体系，推进生态优先、节约集约、绿色低碳发展，促进人与自然和谐共生”。有别于传统经济增长方式与生产力提升路径，碳中和发展是以“双碳”目标为导向、产业升级为载体、能源转型为动能、低碳技术为支撑、体制协同为保障、绿色惠民为根本的新质发展状态。加快经济社会发展全面绿色转型、夯实碳中和发展动力基础已成为我国当前的重要政策部署与实践议题之一。

现阶段，我国“双碳”行动落实取得积极成效，“十四五”前三年全国能耗强度累计降低约7.3%，碳强度累计降低约4.6%，能源绿色低碳转型渐进深入，产业优化升级步伐加快，生活生产方式绿色变革加速推进，各地区围绕新型电力系统建设、数据中心绿色发展、绿色交通基础设施完善、关键尖端低碳技术创新、绿色财税金融工具支持等重点任务的专项行动方案密集出台，探索出了具有地方特色的高质量减排路径。与此同时，我国碳中和发展仍存在诸多不利因素与现实难题。一方面，我国碳达峰向碳中和演进的时间裕度较小，整体过渡期与平台缓冲期远小于发达国家，但当前我国能耗强度降低与碳强度降低仍滞后于约束性目标时序进度，碳达峰碳中和压力难度高企^[1]；另一方面，我国碳中和发展面临产业结构偏重、能源结构偏煤、发展效率偏低引致的经济增长与减排、能源供给与需求、转型技术与成本三重平衡问题^[2-3]，各地区在落实“双碳”行动中仍存在经济增长新动能释放不足、能源供需绿色转型路径不明、核心技术突破竞争实力偏弱、保障举措协同精准发力缺位、环境治理持续机制尚待完善等瓶颈障碍^[4]，区间失衡、区内失调显著，亟待挖掘夯实推动碳中和发展的核心推动力。作为全球最大的碳排放国家，中国的碳减排工作任务呈现差异性与迫切性，面临的问题挑战具有多样性和复杂性，要求在碳中和发展综合评

价与动力解析基础上提升“双碳”工作部署的全局性与科学性。进一步，不同地区在推进碳中和发展过程中的基本面、优势项、短板为何？对于上述需求问题的回应解答，既是未来各地区强化低碳转型内源动力、推动绿色发展加速跃升的重要支撑，也是本文对我国碳中和发展力水平开展动态量化评估与差异演进分析的主要出发点。

伴随我国“双碳”工作实践走向纵深，如何从低碳转型视角对地区发展程度进行测度逐渐成为学者关注的重点。韩晶和姜如玥^[5]从资源环境系统和社会经济系统两大维度构建指标体系，对城市低碳发展水平开展评估。徐晓光等^[6]则从社会发展、经济效率、创新驱动、生态建设和惠民公平五个层面衡量了区域及省级绿色发展水平。刘强等^[7]、Chen和Tang^[8]分别采用SBM（Slack-Based Measure）模型，对省级、市级层面的绿色发展效率进行了测算。部分文献还对绿色低碳循环发展经济体系建设^[9]、城市群绿色发展^[10]、减污降碳协同程度^[11]的综合水平、动态演进与差异特征开展了探索性分析。

然而，目前我国碳中和发展依然面临经济增长、结构转型、科技发展、制度协调与持续减排等多维度问题，“双碳”目标的实现仍需以经济社会的全面发展为前提。学界对于地区发展水平与发展质量的研究已较为深入，多数文献围绕高质量发展在理论分析与量化评估层面开展探讨。其中，理论分析聚焦高质量发展的内涵特征与实践路径，研究认为，高质量发展是以新发展理念为重要指引，以质量提升为根本遵循，目标是满足人民日益增长的美好生活需要^[12]，具有规模扩张转向结构升级、要素驱动转向创新驱动、分配失衡转向共同富裕、高碳增长转向绿色发展等特征的发展阶段与发展形态^[13]，能够有效推动经济增长与社会发展动力转换、结构调整以及效率提升^[14]。量化评估层面，已有研究多采用指标评价法，基于新发展理念^[15-16]、发展结构方式与动力成果^[17]、经济增长基本面与社会成果^[18]等维度构建高质量发展评价体系。在进行指标测算时，现有文献主要采用归一化^[19]、标准

化^[20]等方法对指标进行量化处理,以提升指标间的合成可行性,同时利用均等权重法^[21]、层次分析法^[22]等主观赋权方法以及熵值法^[23-24]、主成分分析法^[25]等客观赋权法确定指标权重。

已有研究为本文开展中国碳中和发展力水平测度奠定了较好基础,但就厘清地区碳中和发展力的主导动因、差异来源及演进特征而言仍有可突破之处。一是分析框架方面,碳中和发展既是新发展理念在绿色低碳领域的凝练具现,又是在新阶段对高质量发展实践的外延拓展,碳中和发展力则进一步聚焦推动经济社会绿色转型的核心动能,因此,有必要在高质量发展理论体系基础上对碳中和发展力的内涵特征进行系统化诠释。二是研究方法维度,一方面,现有研究在经济效率、绿色工业、技术创新、生态环境、社会公平等维度的指标设置为本文提供了借鉴与启发,但如未考虑能源结构、基础设施、财税金融等领域的关键性指标,可能导致碳中和发展力水平测度的结果失准,无法切实反映“双碳”行动推进过程中的现实进展与真实成效。另一方面,进行指标测度过程中,传统数据量化方法无法兼顾时间及空间上的变动趋势,使得指数结果缺失可比性^[26];主观赋权法主要依据研究者经验判断,赋权结果缺乏科学性,主成分分析法和熵值法也分别存在权重意义解释性差和不适用于动态问题研究等不足^[27],多维层级、面板数据情形下指标量化处理与赋权方法的合理性仍需提升。三是研究视角方面,已有文献在不同地理尺度对绿色发展水平进行了结果性评估,但由于评价指标体系的局限性,尚无法在碳中和发展视角下对发挥作用的主导要素进行分解剖析。同时,对于不同地区碳中和发展力水平的差异情况与分布演化研究有待补充,这有助于准确理解刻画中国碳中和发展力水平的时空异质特征。为针对性解决上述问题,本文从成长力、转型力、竞争力、协调力、持续力(以下简称“五力”)五个视角出发,对碳中和发展力的内涵特征进行体系化阐释并相应构建评价指标体系,综合运用处理更为灵活的前沿距离法与赋权更为客观的CRITIC赋权法,测度了2020—2023年中国省级层面碳中和发展力水平,同时借助Dagum基尼系数和Kernel密度估计方法考察了碳中和发展力的区域差异与演进轨迹。

本文有以下三方面的贡献。第一,与已有关关注高质量发展理论体系建构的文献相比,本文首次提出了基于高质量发展内涵、综合考量低碳转型力源的碳中和发展力分析框架,较好地弥补了“双碳”目标背景下地区发展水平测度与驱动因素分析的理论缺口问题,为国内碳中和发展评价体系构建和统计指标设计提供了重要参考。第二,本文聚焦“绿色导

向”下的“发展动力”,层递式、结构化分解了拉动碳中和发展力提升的关键因素,与已有开展地区绿色发展水平测度的文献相比,本文创新性地将前沿距离法与CRITIC赋权法纳入统一方法框架,支持了地区碳中和发展力的主导动因分析和贡献程度评估。第三,本文将区域差异研究范畴拓展至绿色发展领域,深入考察了不同地区碳中和发展力的相对差异时变演进与绝对差异变化轨迹,丰富了地区推进经济社会绿色发展的现实经验证据与政策优化依据。

余文结构安排如下:第一节为中国碳中和发展力评价体系与研究方法;第二节为中国碳中和发展力水平结果分析,包括整体情况分析与“五力”模型解析;第三节为中国碳中和发展力地区差异分析;第四节为中国碳中和发展力动态演进分析;最后为结论与建议。

1 中国碳中和发展力评价体系与研究方法

1.1 中国碳中和发展力分析框架构建

碳中和发展力衡量了我国低碳转型、绿色发展的综合能力,反映了不同区域碳减排工作推进的发展性基础与动力性来源,是各地区“双碳”目标落实情况与实现路径的重要参照。本文基于我国碳中和发展的目标导向与现实基础,将地区碳中和发展力进行结构化分解,构建了“五力”驱动分析框架,各驱动力底层逻辑与具体含义如下。

1.1.1 成长力

成长力是碳中和发展力的内在源泉,成长力的强化有助于夯实碳中和发展力的基础优势。经济发展是实现碳中和的必要前提,碳减排不能以抑制发展为代价,而是要实现碳排放增长与经济发展脱钩^[28]。当前,我国经济水平和产业结构的发展条件存在较大优化空间,经济发展仍面临国内有效需求不足、部分行业产能过剩、社会预期偏弱等问题,外部环境的复杂性、严峻性、不确定性等挑战仍存。因此,我国需不断提升经济发展持续活力与产业结构质量等级,保障经济增长与碳达峰碳中和双重目标实现。

1.1.2 转型力

转型力是碳中和发展力的重要基础,构筑地区低碳转型的强劲动力。实现碳达峰碳中和是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革,碳中和事业的稳步推进必须坚定不移贯彻新发展理念,以经济社会发展全面绿色转型为根本引领。当前,部分地区仍存在产业结构偏重、能源结构偏煤的现实问题,因此,工业领域绿色转型与能源领域清洁发展成为强健转型效力的着力点^[29]。一方面,绿色工业衡量了工业生产活动的

低碳发展成效，很大程度上决定了地区低碳转型的路径与难度；另一方面，在碳达峰碳中和目标要求下，当前经济发展的环境友好条件被提前锁定，能源供需双侧协同绿色低碳发展成为推动“双碳”目标实现的关键抓手，需要着力解决能源系统绿色转型与深度脱碳过程中的总量、产业、空间等多维度平衡问题^[3]。

1.1.3 竞争力

竞争力反映了不同地区要素流动与资源配置的优化水平，充当“双碳”行动稳中求进、先立后破的核心支撑。具体来看，基建能力与科技水平是地区竞争力的核心体现。基础设施是推动产业转型与科技进步的重要物质载体，基建水平高低决定了竞争性资源、人才、技术要素跨域跨链流通共享与聚合倍增的难易程度，传统基础设施与新型基础设施量质齐升有利于筑牢绿色发展“稳”的基础，激活结构方式优化“进”的引擎^[30]；同时，科技水平提升为重点地区、重点行业降碳增效提供原动力，绿色低碳技术的自主研发与前沿性攻关有利于拓展降碳新空间^[31]，强化新兴产业“立”的动能，夯实传统产业“破”的实效。

1.1.4 协调力

协调力是推动不同地区碳中和发展力共同提升的关键纽带。碳中和发展不是个别地区的发展质态跃升，必须坚持区域协同、共同发展、共同富裕原则，绝不能在绿色低碳转型过程中加剧地区的发展差距^[26,32]。协调力表示在推进“双碳”行动过程中必须坚持全国一盘棋，因地制宜推动不同资源禀赋和发展基础的地区梯次完成碳达峰碳中和目标，围绕重点领域、重点工作精准施策、靶向发力，充分把握“双碳”工作的优先级与时度效^[33]。伴随我国“双碳”行动走深、走实，顶层设计的前瞻性与战略性需不断强化，地方举措的精准性与切实性应渐进提升，要不断促进财政补贴、金融支持、生态补偿等政策工具同向发力、协同发力、形成合力，保障推动碳中和发展的各项制度机制力量整合、互补契合，努力平衡多层次的减排需要与高维度的增长需求。

1.1.5 持续力

持续力是支撑碳中和发展力提升的长效动能。我国碳中和目标的实现很可能不是一代人就可以完成的，需要几代人的共同奋斗和不懈努力。碳中和不是“运动式”的减碳和一蹴而就的短期发展目标，而是一项复杂且深远的长期事业，需要兼顾发展与减排的协调统一，短期与长期的渐进衔接。碳达峰碳中和的时间与形态受气候条件和经济发展状况的双重影响，可能不是单一的“达峰”与“中和”，而是一个动态波动的、非稳定的过程，需要以整体视角对碳达峰碳中和目

标实现进程重新审视^[34]。因此，我国的绿色低碳事业具有持续性，应充分考虑到代际的公平问题，不仅要应对当前面临的环境与发展挑战，还要确保未来世代拥有同等的机会与权利去享受清洁、健康、可持续的自然环境。碳中和最终能否实现，关键在于能否形成绿色低碳发展的源源动力，持续力是实现碳中和目标的重要保障。

1.2 中国碳中和发展力测算指标选取

1.2.1 指标构建

本文基于碳中和发展力的深刻内涵，以“五力”驱动模型为基本框架，遵循独立性、客观性、系统性、科学性和可扩展性原则构建中国碳中和发展力指标体系，选取成长力、转型力、竞争力、协调力和持续力5个一级指标，经济发展、产业特征、绿色工业、能源结构、基建水平、科技创新、金融财税、生态建设、环境质量、绿色生活10个二级指标^[35]，每个二级指标又下设7~14个三级指标，共设置109个三级指标（表1），各指标设置具体逻辑如下。

成长力下设经济发展与产业特征两项二级指标，二者共同决定了地区低碳转型的潜力空间与发展进程。一方面，实现碳中和必须以经济发展为前提，经济发展为地区承担碳排放成本提供有力支撑，是各地碳中和稳妥推进的重要保障^[28]。当前，我国的经济水平还有很大的增长裕度。2023年我国人均GDP为8.94万元，不及世界人均GDP的1.31万美元，而全球提出碳中和的发达国家人均GDP普遍超过5万美元；另一方面，产业结构是经济发展质量的重要标志，直观反映了地区经济社会生产活动的质量等级。我国仍需加快建设以实体经济为支撑的现代化产业体系，促进一二三产业融合发展^[36]。作为降低碳排放的高效路径，产业结构调整有助于释放发展模式转换、要素配置优化、生产效率提高的乘数效应，持续提升经济发展活力与风险防控韧性^[37]。

转型力包含绿色工业与能源结构两项二级指标。其一，工业绿色发展程度反映了地区节能减排的基本情况，单位工业增加值电耗、单位工业增加值用水量、一般工业固体废物利用率等变量是重点参照指标。虽然我国拥有全世界最完备的工业体系和最庞大的能源系统，但在现阶段，我国工业还未完全实现现代化转型，还面临着传统产业升级较为缓慢、工业发展高度依赖碳基能源、产业链缺乏应对科技制裁打击的高效响应机制等问题^[38]。工业绿色转型不仅是经济可持续发展的重要支撑，更是实现“双碳”目标的关键路径^[39]；其二，能源结构刻画了地区能源生产与能源消费的清洁程度，能源绿色低碳转型要求积极构建新型能源体系与新型电力系

统，协调好煤电转型与新能源发展之间的关系，不断推动能源生产清洁化、能源消费电气化、能源利用高效化、能源系统安全化。本文主要选取煤炭消费量、电力消费量、可再生能源发电量占比等指标对能源结构进行衡量。

竞争力下设基建水平与科技创新两项二级指标。基建水

表 1 中国碳中和发展力指标体系^①

Table 1 China's carbon neutrality developmentability indicator system			
一级指标	二级指标	三级指标	属性
成长力	经济发展	人均地区生产总值/(元/人)	+
		进出口总额/亿元	+
		固定资产投资增速/%	+
		居民人均可支配收入/元	+
		城镇化率/%	+
	产业特征	产业高级化程度	+
		产业结构偏离度	-
		软件业务收入/亿元	+
		战略性新兴产业增加值占比/%	+
		土地资源产出率/(亿元/公顷)	+
转型力	绿色工业	单位工业增加值电耗/(千瓦时/元)	-
		单位工业增加值用水量/(立方米/万元)	-
		单位工业增加值二氧化碳排放量/(吨/亿元)	-
		工业固体废物治理投资额/万元	+
		一般工业固体废物综合利用率/%	+
	能源结构	煤炭消费量/万吨	-
		电力消费量/亿千瓦时	+
		能源消费强度/(吨标准煤/万元)	-
		可再生能源发电量占比/%	+
		非化石能源消费量占比/%	+
竞争力	基建水平	新能源汽车充电桩数量/个	+
		互联网宽带端口接入数/万个	+
		110kV 以上输电线路新增长度/千米	+
		累计建成 5G 基站数/万个	+
		长途光缆线路长度增速/%	+
	科技创新	绿色低碳技术 R&D 经费投入强度/%	+
		绿色专利数量占比/%	+
		高技术研发人员折合全时当量/人年	+
		技术市场成交额/亿元	+
		科创板企业数量/个	+

① 限于篇幅，本文仅列示部分代表性指标，完整指标体系可向作者索取。

续表 1
Table 1 (continued)

一级指标	二级指标	三级指标	属性
协调力	金融财税	金融业增加值占地区生产总值比重/%	+
		北大数字普惠金融指数	+
		税收收入占地区生产总值比重/%	+
		地方财政支出占地区生产总值比重/%	+
		地方环保支出占地区财政支出比重/%	+
	生态建设	森林覆盖率/%	+
		湿地面积占辖区面积比重/%	+
		新增水土流失治理面积/千公顷	+
		国家级自然保护区面积占比/%	+
		公园绿地面积占比/%	+
持续力	环境质量	氮氧化物排放量/万吨	-
		颗粒物排放量/万吨	-
		碳排放量/百万吨	-
		单位地区生产总值碳排放/(千吨/亿元)	-
		化学需氧量排放/吨	-
	绿色生活	城市燃气普及率/%	+
		城市绿色公共交通比例/%	+
		生活垃圾无害化处理率/%	+
		单位建筑面积能耗/(吨标准煤/平方米)	-
		机动车环保监督抽测超标率/%	-

注：“属性”一列中，“+(-)”表示该测度指标为正(负)向指标，指标值越大(小)越优。

平衡量基础设施建设发达程度与赋能作用。低碳转型过程中，资源要素在区域和产业间的重新配置依赖物质基础支撑。基础设施的建设水平直接影响到竞争性要素跨区域流通共享的可及性，尤其是资源、资金、技术等竞争性要素的综合平衡和优化配置。推动基础设施的共建共享和协同联动，可以有效促进基础设施与其他产业的融合发展^[40]，提升地区低碳发展整体竞争力。科技创新体现科研投入与创新产出情况。碳中和引领经济社会的深层次变革，科技创新在推动变革中发挥支撑作用。绿色低碳技术的创新突破有利于夯实传统产业绿色转型能力，释放新兴产业绿色发展动能，集聚绿色产业链融合发展势能，对于汇集实现碳中和的优势要素具有决定性作用。

协调力主要包括金融财税与生态建设两项二级指标。金融财税决定低碳发展资金体系建设的完备度及绿色融资的难易度，生态建设则刻画了政府对生态保护的重视度与执行度，二者共同反映了地方推动碳中和发展的协调性^[35]。其一，金融财税是金融支持与财政转移力度的主要体现。低碳转型所带来的成本与代价对政府扮演好统筹兼顾、多方协调的角色提出了更高要求，节能减排财税扶持与稳健金融资金保障是重点领域低碳转型与地区“双碳”协同推进的关键抓手^[41]。以金融业增加值占地区生产总值比重和地方环保支出占地区财政支出比重为例，现阶段以绿色信贷、绿色债券和绿色保险为代表的绿色金融成为地区金融行业发展的主要支柱，金融业增加值占地区生产总值比重一定程度上反映了地区开展绿色融资的积极性；在“双碳”目标下，地方政府承担生态环境保护的主要事权与支出责任，地方财政支出中的环境保护支出比重体现了政府对于绿色发展的投资偏向与重视程度。其二，生态建设是生态治理与生态补偿工作的综合考量。做好山水林田湖草沙生态系统保护工作，有序协调开发森林绿碳、湿地绿碳等碳汇扩容路径，可以在改善本地生态环境、降低碳排放的同时，有效释放生态效益外溢的乘数效应，推进区域生态保护事业共进。例如，近年来我国通过实施林业生态工程，开展了大规模造林和天然林保护联合行动，森林资源和自然碳汇得到有效储育发展，森林覆盖率成为衡量地区生态资源禀赋和生态建设工作质量的重要指标之一^[42]。

持续力下设环境质量与绿色生活两项二级指标。其中，环境质量体现地区环境治理水平与降污减排成效。从当前问题看，我国正处于加快经济社会发展全面绿色转型的战略机遇期，必须健全绿色低碳发展机制，协同推进降碳、减污、扩绿、增长，全方位提升环境质量与环保实效^[43]。绿色生活则衡量了绿色发展意识与低碳生活理念的普及程度。碳中和的实现不仅需要顶层设计和宏观擘画，更需要公民层面转变生活方式、培育低碳生活意识、共同参与碳中和事业，不断集聚绿色转型的微观效能^[44]。例如，公园绿地往往以满足绿色公共产品使用、改善城市微气候和体现当地文化特色为设计目标，旨在为居民提供绿色、健康的生态环境。合宜的人均公园绿地面积是衡量地区碳中和持续力的重要指标。

1.2.2 数据来源

本文样本原始数据主要来源于国家统计局官方网站发布的年度数据，部分来源于国家发展和改革委员会、科学技术部、生态环境部等部门的官方网站和万得数据库、CEADs数据库等平台，主要涉及的年鉴有《中国统计年鉴》（2021—2024）、《中国科技统计年鉴》（2021—2023）、《中国环境统

计年鉴》（2021—2023）、《中国高技术产业统计年鉴》（2021—2023）、《中国能源统计年鉴》（2021—2023）、《中国水利统计年鉴》（2021—2023）、《中国电力统计年鉴》（2021—2023）、《中国卫生健康统计年鉴》（2021—2022）、《中国碳中和发展报告》（2021—2023）和我国各省（自治区、直辖市）统计年鉴（2021—2023）与2020—2023年国民经济和社会发展统计公报等。

1.2.3 数据处理

本文选取2020—2023年为研究样本区间，考虑到数据可得性、全面性及连续性，剔除香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾省3个样本数据缺失较多的地区。同时，本文对收集到的原始数据进行预处理：一是对于个别指标某些年份缺失数据采取插值法、年均增长率法进行补充；二是将部分原始指标数据转化为比例型指标、强度型指标或结构型指标，如战略性新兴产业增加值占比、单位工业增加值电耗、可再生能源发电量占比、绿色低碳技术R&D经费投入强度、地方环保支出占地区财政支出比重等。通过以上处理，最终得到2020—2023年31个省（自治区、直辖市）的面板数据。

1.3 中国碳中和发展力水平测度方法

基于已构建的中国碳中和发展力指标体系，本文参考World Bank^[45]、刘骅和卢亚娟^[46]的研究，综合使用前沿距离法和CRITIC赋权法，对关键性指标进行分级逐层加权求和，最终得到各地区碳中和发展力指数（Carbon Neutrality Developmentability Index, CNDI）。前沿距离法是用于评估决策单元（如国家、地区或企业）相对于整体最佳表现差距的一种分析方法。该方法通过构建一个“最优前沿”，并计算各个决策单元相对于该前沿的距离，来量化其在某一特定领域的相对表现。与其他量化方法相比，前沿距离法主要有以下两方面优点：其一，前沿距离法适用于复杂评价场景，同本文开展的碳中和发展力综合指标评估研究更为契合，能够有效识别优势地区的先进表现与落后区域的改进幅度；其二，前沿距离法将归一化方法与分位数缩尾方法结合，既能够消除原始数据量纲差异对测算结果带来的可能影响，又能够避免将极端最大值或极端最小值机械化确定为最佳值与最差值带来的失准干扰，增强了数据处理的科学性与实效性。

CRITIC赋权法是一种多标准决策中的赋权方法，旨在通过分析指标内波动幅度（变异性）与各指标间的相互关系（冲突性）来客观确定权重。其基本原理是：变异性使用标准差进行表示，如果数据标准差越大说明波动越大，指标权重会越高；冲突性使用相关系数进行表示，如果某指标与其他

指标之间的相关系数值越大,说明冲突性越小,那么该指标权重也就越低。在碳中和和发展力的评估中,各关键性指标间相互关联性不同,且各指标内数据分布情况也有所差异。因此CRITIC赋权法在进行指标赋权时表现出较强的性能优势:一方面,CRITIC赋权法基于数据自身的客观特征确定权重,规避了人为判断对于权重赋值的主观影响。另一方面,CRITIC赋权法充分利用了数据波动性与数据相关性信息,能够通过分析各指标的独立性和贡献度,在简化算法前提下提升指标赋权的合理性。

基于此,本文综合采用前沿距离法和CRITIC赋权法分别对指标进行量纲化处理和赋权,具体核算框架如下。

1.3.1 计算指标前沿距离得分

在中国碳中和发展力指标体系中,所有三级指标按评价作用可分为正向指标和逆向指标,按数据性质又可分为绝对指标和相对指标,按数据类别则可分为存量指标和流量指标,各基础指标在属性、数量级和形式上存在明显分异,需要消除上述差异可能对碳中和发展力水平测算带来的失准影响,确保指标间的可加性与可比性。本文采用前沿距离法对碳中和发展力的关键指标进行量纲化处理和前沿得分计算。具体如式(1)所示:

$$DTF_{ij} = \frac{x_{ij} - \text{worst}(x_j)}{\text{best}(x_j) - \text{worst}(x_j)} \times 100 \quad (1)$$

式中, i 为地区; j 为中国碳中和发展力三级指标; x_{ij} 表示 i 地区三级指标 j 的数值; $\text{best}(x_j)$ 表示各地区三级指标 j 的最佳值, $\text{worst}(x_j)$ 表示各地区三级指标 j 的最差值,最佳值与最差值为三级指标 j 观测值区间内的分位数值,分位数主要根据指标性质和数据分布形态进行设定; DTF_{ij} 表示 i 地区三级指标 j 的前沿距离得分,分值区域为0~100分,得分越高则代表 i 地区在三级指标 j 上的表现越接近最优水平;对于最值区间外的观测值,将三级指标 j 中观测值大于 $\text{best}(x_j)$ 的地区均设为100分,小于 $\text{worst}(x_j)$ 的地区均设为0分。

1.3.2 计算指标权重

本文主要采用CRITIC赋权法确定碳中和发展力三级指标权重,指标权重确定具体步骤如下:

1) 计算指标变异性系数,以三级指标 j 的标准差 S_j 作为该指标变异性的评估变量,具体如式(2)、式(3)所示:

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (DTF_{ij} - \overline{DTF_j})^2}{m-1}} \quad (2)$$

$$\overline{DTF_j} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m DTF_{ij} \quad (3)$$

式中,下标 i 、 j 含义同上; m 为地区数量,即31; S_j 为三级指标 j 前沿距离得分 DTF_{ij} 的标准差; $\overline{DTF_j}$ 为各地区三级指标 j 前沿距离得分 DTF_{ij} 的平均值。 S_j 越大表示三级指标 j 的数值差异越大,越能反映出更多的信息,三级指标 j 应被赋予更大权重。

2) 计算指标冲突性系数,具体如式(4)、式(5)所示:

$$r_{jh} = \frac{\sum_{i=1}^m (DTF_{ij} - \overline{DTF_j})(DTF_{ih} - \overline{DTF_h})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (DTF_{ij} - \overline{DTF_j})^2 \sum_{i=1}^m (DTF_{ih} - \overline{DTF_h})^2}} \quad (4)$$

$$R_j = \sum_{h=1}^{n_h} (1 - r_{jh}) \quad (5)$$

式中,下标 i 、 j 、 m 含义同上; $\overline{DTF_j}$ 和 $\overline{DTF_h}$ 分别为各地区三级指标 j 和三级指标 h 前沿距离得分的平均值; r_{jh} 为三级指标 j 和三级指标 h 前沿距离得分的相关系数; n_h 为三级指标 h 所属二级指标下三级指标总数; R_j 为三级指标 j 同其他三级指标的冲突性系数,该系数值越大,说明三级指标 j 同其他三级指标携带信息的重合度越低,越能反映出更多独立信息,相应权重值更大。

3) 依据变异性系数和冲突性系数计算三级指标 j 的信息量,具体如式(6)所示:

$$C_j = S_j \times R_j \quad (6)$$

式中,下标 j 含义同上; C_j 为三级指标 j 的信息量指标。

4) 计算三级指标 j 的客观权重,如式(7)所示:

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^{n_j} C_j} \quad (7)$$

式中, n_j 为三级指标 j 所属二级指标下三级指标总数; W_j 为三级指标 j 的客观权重。

1.3.3 计算CNDI得分

1) 对三级指标进行加权求和,计算各二级指标得分。以经济发展指标为例,如式(8)所示,其余二级指标得分计算方法相同。

$$Score_{\text{经济发展}} = \sum_{j=1}^{n_j} DTF_j \times W_j \quad (8)$$

式中, DTF_j 为二级指标经济发展下各三级指标的前沿距离得分; W_j 为各三级指标的对应权重; $Score_{\text{经济发展}}$ 为经济发展指标得分。

2) 采用与三级指标同样赋权方法,对应计算“五力”下

各二级指标权重，并分别加权求得成长力、转型力、竞争力、协调力、持续力得分，以成长力指标得分为例，如式（9）所示：

$$Score_{成长力} = Score_{经济发展} \times W_{经济发展} + Score_{产业特征} \times W_{产业特征} \quad (9)$$

式中， $Score_{成长力}$ 代表成长力得分； $Score_{经济发展}$ 与 $Score_{产业特征}$ 分别代表经济发展和产业特征得分； $W_{经济发展}$ 与 $W_{产业特征}$ 则分别代表经济发展与产业特征两项二级指标的权重。

3) 对“五力”各指标得分求和，最终得到CNDI得分，具体如式（10）所示：

$$CNDI = Score_{成长力} + Score_{转型力} + Score_{竞争力} + Score_{协调力} + Score_{持续力} \quad (10)$$

1.4 地区差异及演进趋势分析方法

1.4.1 Dagum 基尼系数及其分解

本文参考吕承超和崔悦^[47]的研究，借助Dagum基尼系数对CNDI相对差异程度开展测度并对差异来源进行分解剖析。具体计算步骤如下：

第一，定义Dagum基尼系数，即不同地区CNDI的总体差异，如式（11）所示：

$$G = \frac{\sum_{j=1}^k \sum_{h=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |Y_{ji} - Y_{hr}|}{2n^2 \bar{Y}} \quad (11)$$

式中， G 代表CNDI总体差异； Y_{ji} 和 Y_{hr} 分别代表 j 地区内第 i 个省份和 h 地区内第 r 个省份的CNDI； $\bar{Y}$ 代表所有省份CNDI的平均值； n 表示省份个数（本文中 $n=31$ ）； k 代表样本子类总数（本文中 $k=4$ ，即东部地区、中部地区、西部地区和东北地区四大地区）； n_j 和 n_h 表示 j 地区和 h 地区内省份数量。

第二，将Dagum基尼系数分解为地区内差异、地区间净值差异和地区间超变密度三部分，如式（12）所示：

$$G = G_w + G_{nb} + G_t \quad (12)$$

式中， G_w 表示四大地区内各省份CNDI差异（式（13）、式（14））； G_{nb} 表示东部地区、中部地区、西部地区和东北地区之间的CNDI净值差异（式（15）~（19））； G_t 表示地区间超变密度，即四大地区间CNDI交叉影响的基尼系数余数（式（20））。

$$G_{jj} = \frac{\frac{1}{2Y_j} \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_j} |Y_{ji} - Y_{jr}|}{n_j^2} \quad (13)$$

$$G_w = \sum_{j=1}^k G_{jj} P_j S_j \quad (14)$$

式中， G_{jj} 表示地区 j 内部CNDI差异； $P_j = n_j / n$ ； $S_j = n_j \bar{Y}_j / n \bar{Y}$ ； $\bar{Y}_j$ 代表地区 j 所有省份CNDI的平均数。

$$G_{jh} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |Y_{ji} - Y_{hr}|}{n_j n_h (\bar{Y}_j + \bar{Y}_h)} \quad (15)$$

$$G_{nb} = \sum_{j=2}^k \sum_{h=1}^{j-1} G_{jh} D_{jh} (P_j S_h + P_h S_j) \quad (16)$$

$$D_{jh} = \frac{M_{jh} - N_{jh}}{M_{jh} + N_{jh}} \quad (17)$$

$$M_{jh} = \int_0^\infty dF_j(Y) \int_0^Y (Y-x) dF_h(x) \quad (18)$$

$$N_{jh} = \int_0^\infty dF_h(Y) \int_0^Y (Y-x) dF_j(x) \quad (19)$$

式中， G_{jh} 表示地区 j 和地区 h 间的CNDI差异； $P_h = n_h / n$ ； $S_h = n_h \bar{Y}_h / n \bar{Y}$ ； $\bar{Y}_h$ 代表地区 h 所有省份CNDI的平均数； D_{jh} 为地区 j 和地区 h 之间CNDI的相对影响； M_{jh} 表示区域间CNDI的差值，即区域 j 和区域 h 所有 $Y_{ji} - Y_{hr} > 0$ 样本值加总的数学期望， N_{jh} 表示超变一阶矩，及即地区 j 和地区 h 所有 $Y_{ji} - Y_{hr} < 0$ 样本值加总的数学期望； $F_j(\cdot)$ 和 $F_h(\cdot)$ 分别表示地区 j 和地区 h CNDI的累积密度分布函数。

$$G_t = \sum_{j=2}^k \sum_{h=1}^{j-1} G_{jh} (P_j S_h + P_h S_j) (1 - D_{jh}) \quad (20)$$

借助系数 D_{jh} ，可进一步从地区间差距贡献中分离出超变密度贡献。参考张卓群等^[48]，本文对地区间超变密度定义为：在CNDI低值区域中，假设部分省份CNDI较高，且超过CNDI高值区域中部分省份，即子样本之间存在质性交互。若提升CNDI低值区域中各省份得分并降低CNDI高值区域各省份得分，则会引致地区内差异上升、地区间净值差异下降、地区间交互部分差异提升的叠加效应，最终使得Dagum基尼系数总体上升，地区间交互部分差异即地区间超变密度。

1.4.2 Kernel 密度估计

Kernel密度估计属于非参数估计方法，采用连续型峰值函数对样本数据进行拟合，具有模型依赖性低、稳定性强的性能优势^[49]，被广泛应用于空间非均衡性分析中。本文采用的密度函数形式设定如式（21）所示：

$$f(x) = \frac{1}{Nk} \sum_{i=1}^N H\left(\frac{X_i - x}{k}\right) \quad (21)$$

$$H(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \quad (22)$$

式中, N 为观测样本个数, 本文中为样本省份个数, 即 $N=31$; X_i 为独立同分布观测值, 本文指样本省份的 $CNDI$ 数值; x 为所有样本省份 $CNDI$ 平均值; k 为带宽; $H(x)$ 为核函数, 计算方法见式 (22), 本文采用一般性研究使用较多的高斯核函数进行估计。基于上述 Kernel 密度估计方法可以进一步绘制 Kernel 密度曲线, Kernel 密度曲线的中心位置和数值区间直观反映了区域 $CNDI$ 的整体水平, 曲线的高度和宽度可以体现区域内不同样本 $CNDI$ 的离散程度, 波峰数目和形态能够刻画区域内各省份 $CNDI$ 的极化程度, 分布延展性描述了区域内 $CNDI$ 极值省份与平均水平的差距。

2 中国碳中和发展力水平结果分析

2.1 中国碳中和发展力水平整体情况

现阶段, 我国将碳达峰碳中和纳入生态文明建设整体布局 and 经济社会发展全局, 构建完成了涵盖顶层设计、行业规划、地区方案、组织保障的“1+N”政策体系, 面向碳中和发展的重要领域与关键环节, 不断强化前瞻性谋划、战略性布局、整体性推进。图1为全国和地区层面碳中和发展力演变情况。测算结果显示, 中国碳中和发展力保持稳定增长态势。2020—2023年, 全国 $CNDI$ 均值由54.15分增长至57.24分, 增幅为3.09分, 年均水平达56.06分, 年均增长率达1.87%。

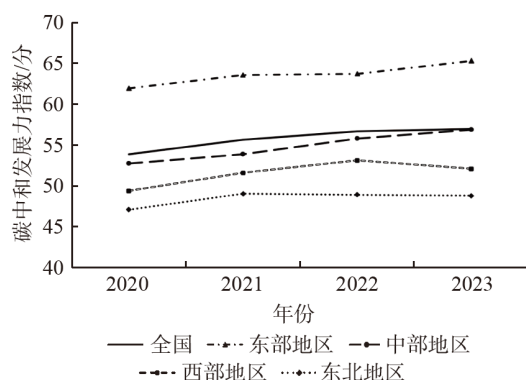


图1 2020—2023年全国和四大地区碳中和发展力水平

Fig.1 Carbon neutrality developmentability in China and the four major regions from 2020 to 2023

地区层面, 东部地区碳中和发展力遥遥领先, 中部地区表现出明显的追赶效应。从规模看, 2023年东部地区 $CNDI$ 为65.60分, 较2020年提升了3.35分, 全区年均值位居四大地区之首, 超过全国水平7.86分, 分别高出中部地区、西部地区、

东北地区8.82分、12.10分和15.19分, 表现出显著的领先优势。中部地区 $CNDI$ 在四大地区中位列第二, 2020年为53.04分, 2023年提升至57.13分, 总体上升4.09分, 年均值接近全国水平。西部地区 $CNDI$ 由2020年的49.66分增长至2022年的53.40分, 2023年小幅回落, 年均值位居第三名。东北地区 $CNDI$ 总体水平较低, 样本期内均位于50.00分以下, 自2021年起呈现微弱下降趋势。增长率特征显示, 中部地区碳中和发展力增势明显, $CNDI$ 增速在2022年达到峰值3.56%, 年均增长率达2.51%, 高于全国0.64个百分点, 远超其他地区。西部地区 $CNDI$ 增速2021年达4.45%, 领先其他地区, 但后续下降较快, 年间波动较大。东部地区 $CNDI$ 年均增长率为1.76%, 同西部地区接近, 年间增长率呈“V”型波动。东北地区 $CNDI$ 年均增长率仅为1.18%, 碳中和发展力提升缓慢。究其原因, 东部地区传统产业绿色转型成效显著, 非化石能源替代持续深入, 交通、建筑等重点领域能效提高步伐加快, 生态系统碳汇能力巩固强化, 在碳中和发展力提升工作中发挥示范作用。得益于推动高质量发展系列政策的有力赋能, 中部地区碳中和发展力水平保持高速增长, 经济社会绿色转型后发优势明显。而西部地区、东北地区主体为资源型省份, 传统产业形态具有高排放、高能耗的典型特征, 新兴绿色产业发展进程缓慢, 能源消费强度基数较大, 对所在地区资源禀赋及用能模式形成路径依赖, 仍需进一步夯实碳中和发展基础。

由图2(a)~(d)可知, 各省份碳中和发展力不断向高水平跃迁, 呈现“东高西低、南强北弱”的差异分化。2020年, 仅广东和浙江属于碳中和发展力引领型地区 ($CNDI$ 位于70~80分之间); 碳中和发展力优质型地区 ($CNDI$ 位于60~70分之间) 有4个; 碳中和发展力提升型地区 ($CNDI$ 位于50~60分之间)、碳中和发展力追赶型地区 ($CNDI$ 位于40~50分之间) 分别有13个和12个; 样本期内, $CNDI$ 高值区域逐渐由沿海向内陆扩散, 到2023年, 引领型地区由2个增长至4个, 分别为浙江、广东、北京、江苏, 优质型地区由4个增长至5个, 上海、四川、福建、山东、湖南位居“第二梯队”, 发展型地区由13个增长至16个, 追赶型地区则由12个下降至6个。样本期内, 各地区在全面推进经济社会绿色转型过程中探索出多样化路径, 产业优化升级取得积极成效, 能源清洁转型渐进深入, 重点行业节能降碳加速推进, 碳中和发展力提升取得显著进展。以碳中和发展力引领型地区为例, 浙江积极构建资源回收与循环利用全产业链体系, 通过产业结构升级构筑成长力新动能; 广东领先推动清洁能源规模化应用, 以能源结构绿色化赋能转型力稳固夯实; 北京发布《北京市“十四五”时期生态环境保护规划》, 持续完善生态环境治理体系,

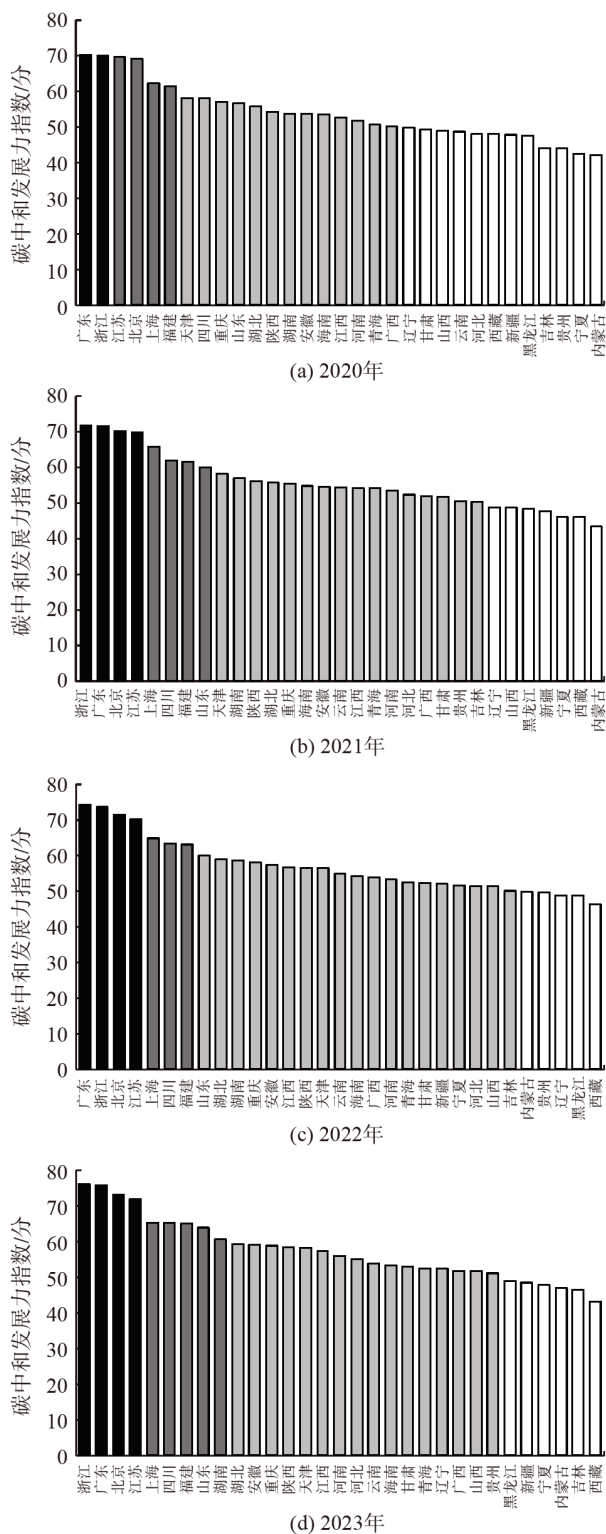


图2 2020—2023年省级碳中和发展力水平
Fig.2 Provincial carbon neutrality developmentability from 2020 to 2023

注：子图（a）～（d）分别为2020年、2021年、2022年及2023年省级CNDI得分情况；各子图柱形四种颜色由深至浅分别代表碳中和发展力引领型地区、优质型地区、提升型地区和追赶型地区。

塑造持续力稳定增长内在支撑；江苏加强低碳零碳负碳关键技术攻关，以科技创新策源动能释放推动竞争力培育壮大。

具体来看，数值层面，CNDI年均值超过全国平均水平的省份有14个，广东、浙江、北京、江苏、上海连续四年位居全国前五名，CNDI年均值分别为73.07分、73.02分、71.15分、70.47分、64.63分，较全国水平分别高出17.01分、16.96分、15.09分、14.41分、8.57分。而辽宁、新疆、贵州、黑龙江、吉林、宁夏、西藏、内蒙古CNDI得分年均值位于50.00分以下，常年处于较低位次。发展趋势层面，年平均增速高于全国水平的省份有15个，贵州、河北、山东、湖南、宁夏、四川、内蒙古、安徽处于CNDI高速增长队列，其中贵州、河北、山东CNDI年均增速分别为4.64%、4.45%、3.82%，分别领先全国水平2.77个百分点、2.58个百分点、1.95个百分点，远超东部地区省份；广西、新疆、天津、海南、西藏CNDI增速处于末位，需要进一步挖掘碳中和发展力新增长点。

2.2 中国碳中和发展力“五力”模型解析

图3为CNDI“五力”结构化分解情况。可以发现，持续力与转型力成为碳中和发展力提升的“双支柱”。2020—2023年，成长力由7.17分增长至9.66分，增幅为2.49分，在“五力”中排名第一；年均值达8.98分，在“五力”中位居第四。转型力由2020年的9.91分提升至2023年的11.70分，年均值与增幅分别为10.98分和1.79分，在“五力”中均排名第二。竞争力由2020年的10.94分下降至9.89分，在2022年升至11.55分后又下降至11.35分，总体呈现“降—升—降”的变动趋势，年均值为10.93分，位居“五力”第三名。协调力在样本期内由7.83分提升至7.90分，年均值与增幅均处“五力”靠后位次，总体水平较低且增长缓慢，是制约CNDI提升的短板。持续力得分连

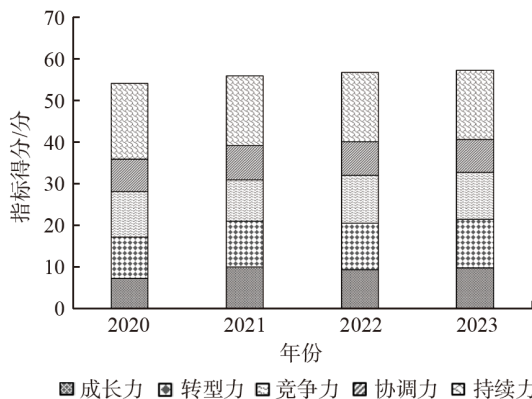


图3 2020—2023年碳中和发展力“五力”分解
Fig.3 Decomposition of the five forces for carbon neutrality developmentability from 2020 to 2023

续四年位于16.00分以上,年均值高达17.13分,在“五力”中遥遥领先,分别超过成长力、转型力、竞争力、协调力8.15分、6.15分、6.20分和9.12分,是碳中和发展力提升的核心驱动力。

图4为四大地区CNDI“五力”构成情况。分维度看,不同地区存在明显的渐进增强性和非均衡性特征,“五力”得分分化明显。成长力方面,东部地区年均值最高,为11.41分,超过全国水平2.43分,在四大地区中具有绝对优势,中部地区、西部地区和东北地区分别为8.75分、7.46分和7.43分,均位于全国水平以下。转型力方面,得分排名由大到小分别为东部地区、中部地区、西部地区和东北地区,东部地区分别领先中部地区、西部地区和东北地区1.61分、2.53分、4.05分。竞争力层面,东部地区 and 中部地区年均得分较高,分别为13.21分、12.01分,东北地区和西部地区得分较低,分别低于全国水平1.86分、1.97分。协调力层面,四大地区得分均未超过10.00分,各地区不充分不平衡特征较为突出,其中,东北地区得分最高,为8.67分;东部地区和西部地区次之,分别为8.26分和7.82分;中部地区得分相对较低,仅为7.62分。持续

力层面,各地区表现相对较好,东部地区得分为18.34分;西部地区得分为17.41分,领先全国水平0.28分;中部地区得分为15.63分;东北地区得分为14.91分,持续力为东北地区“五力”中得分唯一突破10.00分的指标。

分地区看,四大地区的“五力”贡献率各有偏重,反映了碳中和发展力提升的比较优势。具体而言,东部地区持续力和竞争力在推动碳中和发展力提升中发挥“双轮”驱动作用,贡献率分别达到28.70%和20.66%;成长力贡献率为17.85%,在四大地区中居首;转型力贡献率为19.86%,在各地区中排名第二;协调力成为抑制东部地区碳中和发展的短板因素,贡献率仅为12.93%,不及其他地区。中部地区“五力”贡献结构同东部地区相似,持续力、竞争力、转型力贡献率相对较高,分别为28.37%、21.79%和20.12%,转型力贡献率在四大地区中居首;协调力贡献率相对较小,为13.83%。西部地区持续力和转型力表现优异,持续力贡献率分别领先东部地区、中部地区和东北地区4.89个、5.22个和2.99个百分点;转型力贡献率超过竞争力、协调力、成长力2.33个、4.52个和5.22个百分点。东北地区协调力贡献率为17.79%,在四大

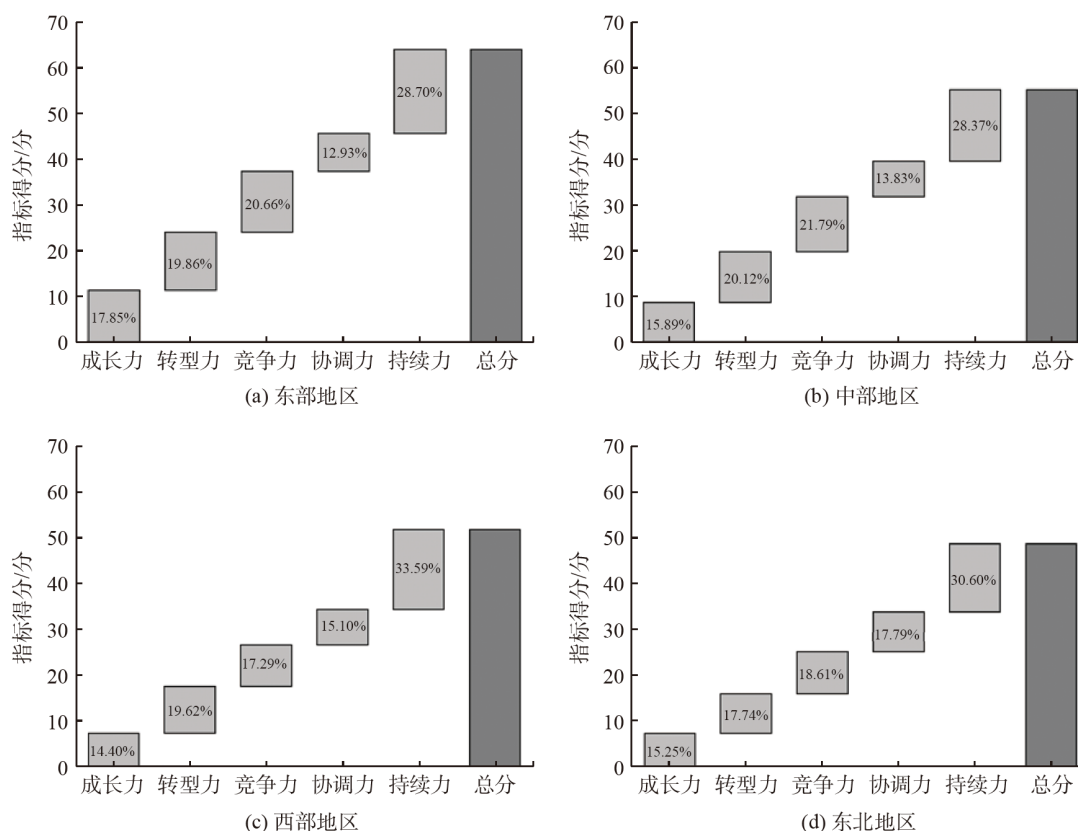


图4 四大地区“五力”得分与占比情况

Fig.4 Score and proportion of the five forces in the four major regions

注:子图(a)~(d)分别为东部地区、中部地区、西部地区和东北地区“五力”年均得分情况;柱中百分比数值为该指标得分占总分比重。

地区中位列第一；持续力贡献率仅次于西部地区，达30.60%；竞争力、成长力和转型力贡献率相对较低，在各地区中排名靠后。

出现上述结果的原因可能是，东部地区经济水平常年稳居四大地区前列，经济发展呈现明显的量增质提趋势，新兴绿色产业占比较高，在核心绿色技术创新、新型基础设施布局、优势资源要素汇集上具备明显的高位引领优势。中部地区立足中部崛起、长三角一体化发展、长江经济带发展叠加战略，不断推动绿色低碳发展提升纵横合作，有效承接了优质人才、资金、技术要素转移，碳中和发展优质动能不断夯实。而西部地区和东北地区拥有良好的生态资源禀赋和环境质量本底，持续力成为推动地区碳中和发展的核心因素。

表2为2020年、2023年CNDI“五力”得分前十名省份及排名变化情况，结果表明，东部地区省份在各驱动力表现中稳居前列，中部地区省份后发优势明显。从成长力来看，2023年，前十名省份均增长至10.00分以上，北京、广东、上海、江苏、浙江稳居前五名，广东立足区位优势前瞻布局未来绿色低碳产业集群，加快培育壮大新质生产力发展新赛道，成

长力得分由11.19分增长为15.24分，排名升至第一名，浙江赶超上海、江苏位居第二，北京、上海排名小幅下降，福建、江西、安徽、湖南进入前十名。从转型力看，广东、浙江、江苏、福建、山东稳居前五名，四川绿色工业快速转型与能源结构不断优化“双轮并进”，转型力得分由11.41分增长至12.96分，排名上升一位，湖北、贵州跃升至前十名，分列七、八，北京转型力得分提升缓慢，排名下降四位，天津、重庆退出前十名。从竞争力看，江苏由20.02分下降至19.23分，但仍稳居第一名，领先优势明显；样本期内前列省份基本不变，但相对位次波动较大，广东、四川均上升两个位次，排名第二、五，浙江、山东、北京、安徽分别下降一名，分列第三名、第四名、第六名、第七名，上海取代河南进入前十名行列。从协调力看，广东同样表现较好，得分提升6.04%，取代黑龙江升至第一位，重庆协调力得分由8.40分增加至9.39分，从第七名跃升至第二名，协调力提升明显，涨幅高达11.79%，江西、陕西、湖北成为前十名新晋省份。从持续力看，前十名省份得分出现不同程度下降，北京升至第一名，福建排名下降六位，陕西取代西藏进入前十名省份序列，重庆由第九

表2 2020年和2023年“五力”得分前十名省份
Table 2 Top 10 provinces of the five forces score in 2020 and 2023

排名	成长力		转型力		竞争力		协调力		持续力	
	2020年	2023年	2020年	2023年	2020年	2023年	2020年	2023年	2020年	2023年
1	北京 (12.29)	广东 (15.24)	广东 (15.51)	广东 (15.96)	江苏 (20.02)	江苏 (19.23)	黑龙江 (10.28)	广东 (10.00)	海南 (24.83)	北京 (22.37)
2	广东 (11.19)	浙江 (14.45)	浙江 (14.12)	浙江 (15.47)	浙江 (16.38)	广东 (18.59)	广东 (9.43)	重庆 (9.39)	福建 (23.11)	海南 (21.48)
3	上海 (10.50)	北京 (13.82)	江苏 (13.68)	江苏 (14.83)	山东 (15.98)	浙江 (17.57)	四川 (9.13)	四川 (9.32)	北京 (22.38)	天津 (20.35)
4	江苏 (10.00)	江苏 (13.47)	福建 (12.59)	福建 (13.73)	广东 (15.65)	山东 (17.26)	江苏 (8.83)	黑龙江 (9.29)	青海 (22.34)	重庆 (19.84)
5	浙江 (9.99)	上海 (13.31)	山东 (12.32)	山东 (13.59)	北京 (14.53)	四川 (16.17)	浙江 (8.59)	上海 (9.05)	西藏 (21.95)	青海 (19.83)
6	天津 (8.85)	山东 (13.23)	北京 (12.04)	四川 (12.96)	安徽 (14.23)	北京 (15.33)	山东 (8.56)	北京 (8.75)	天津 (21.53)	浙江 (19.72)
7	重庆 (8.71)	福建 (13.12)	四川 (11.41)	湖北 (12.88)	四川 (13.62)	安徽 (15.06)	重庆 (8.40)	浙江 (8.59)	浙江 (21.31)	上海 (18.76)
8	湖北 (8.16)	江西 (10.34)	河南 (11.31)	贵州 (12.73)	河南 (13.05)	湖南 (14.47)	上海 (8.38)	江西 (8.53)	上海 (21.04)	福建 (18.26)
9	山东 (7.58)	安徽 (10.11)	天津 (10.89)	河南 (12.65)	湖南 (12.74)	湖北 (13.88)	北京 (8.35)	陕西 (8.48)	重庆 (20.72)	甘肃 (17.85)
10	海南 (7.45)	湖南 (10.06)	重庆 (10.50)	北京 (12.65)	湖北 (12.66)	上海 (13.54)	湖南 (8.34)	湖北 (8.32)	甘肃 (19.55)	陕西 (17.65)

注：括号内为各省份“五力”得分。

名上升至第四名,增加位次较多。

3 中国碳中和发展力地区差异分析

3.1 地区内差异分析

图5为2020—2023年中国碳中和发展力地区内Dagum基尼系数情况。从整体差异看,不同地区碳中和发展力差异短期收窄并逐渐扩大,考察期内全国Dagum基尼系数从2020年的0.080下降至2022年的0.071,但在2023年升至0.083。就四大地区内差异及演变过程而言,东部地区和西部地区内差异明显高于中部地区和东北地区。具体来看,四大地区内Dagum基尼系数年均值由大到小依次为东部地区(0.067)>西部地区(0.053)>中部地区(0.025)>东北地区(0.017),东部地区分别高出西部地区、中部地区、东北地区0.014、0.042和0.050。东部地区内Dagum基尼系数在2020—2021年间由0.067小幅降至0.061,后期又出现回升,并在0.070附近上下波动;同时,Dagum基尼系数在各年均超过其他地区,说明东部地区内CNDI差异高企,各省份碳中和发展力仍处于失衡状态。西部地区内Dagum基尼系数从2020年的0.056下降至2022年的

0.043,在2023年升至0.060,总体呈“V”型变化。中部地区内差异总体波动幅度相对较小,2020年Dagum基尼系数为0.022,在四大地区中排名末位,CNDI区域内差异相对较小;2021—2023年,中部地区Dagum基尼系数超过东北地区,逐渐升至0.027,区域内不同省份碳中和发展力水平差异小幅扩大。东北地区Dagum基尼系数由2020年的0.026下降至2022年的0.006,降幅达0.020,较同期全国下降幅度高出0.011,但Dagum基尼系数在样本末期迅速上浮,说明东北地区内各省份碳中和发展力协调水平有待进一步提升。

3.2 地区间净差异分析

地区间Dagum基尼系数净值测算结果表明,东部地区同东北地区、西部地区和中部地区间碳中和发展力的差异构成地区间差异的主要来源。由图6可知,从均值来看,2020—2023年,东部与东北、东部与西部之间的Dagum基尼系数年均值分别为0.135、0.112,地区间差异显著,东北与西部之间的碳中和发展力差异最小,年均值为0.049,东部与东北、东部与西部之间的Dagum基尼系数分别高出东北与西部0.086、0.063。东部与中部、中部与东北、中部与西部之间的Dagum

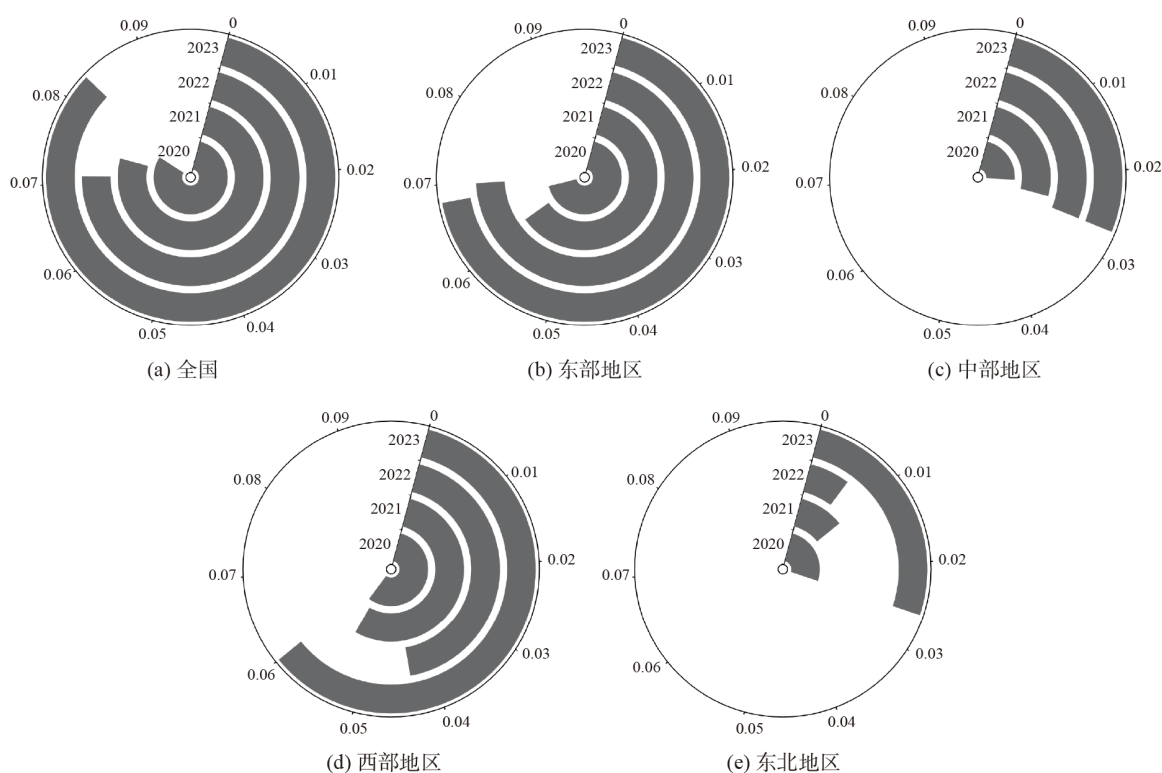


图5 CNDI地区内Dagum基尼系数

Fig.5 Dagum Gini coefficient of CNDI inside the region

注:子图(a)~(e)分别为全国、东部地区、中部地区、西部地区和东北地区内Dagum基尼系数;圆环外数值代表Dagum基尼系数值。

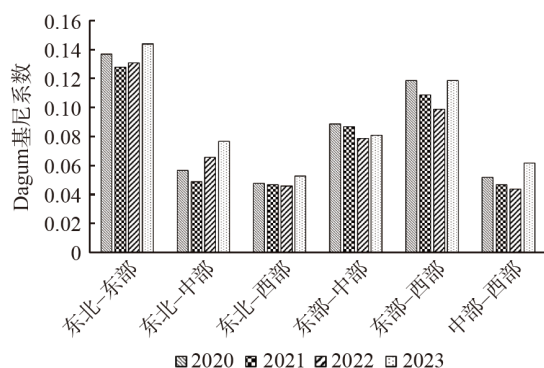


图6 CNDI地区间Dagum基尼系数

Fig.6 Dagum Gini coefficient of CNDI between regions

基尼系数均小于0.100，地区间碳中和发展力相对差异较小。具体而言，东部与东北之间的Dagum基尼系数从2020年的0.137下降至2021年的0.128，降幅达6.57%，但在2023年提升至0.144，地区间碳中和发展力差异先收窄后扩增。东部与西部之间的Dagum基尼系数变动同样呈现先降后升态势，由0.119下降至0.099后复升至初始水平。东北与西部之间Dagum基尼系数介于0.040和0.060之间，CNDI相对差异稳定在较低水平。东部与中部之间的Dagum基尼系数由0.089波动下降至0.081，降幅达8.99%，下降比例位居第一。中部与东北、西部之间的碳中和发展力差异扩大明显，Dagum基尼系数年均增长率分别为10.54%和6.04%，年度间波动较大。

3.3 地区差异来源分解

图7(a)和(b)分别为CNDI各差异来源贡献值及贡献率情况。从差异贡献数值看，碳中和发展力地区间净差异始终保持高位。2020—2023年，地区间Dagum基尼系数净值年均

水平为0.054，较地区内Dagum基尼系数年均值和地区间超变密度Dagum基尼系数年均值分别高出0.037、0.047，在三类差异中居首。时序特征显示，地区内Dagum基尼系数由0.017下降至0.015，并在2023年上升至0.018，总体波动幅度不大。地区间Dagum基尼系数净值从2020年的0.056下降至2022年的0.049，下降比例达12.50%，但在2023年回弹至0.058，总体仍处于0.050~0.060的高值区间。

从差异贡献结构看，在样本期内，地区间Dagum基尼系数贡献率年均值达78.86%，始终大于地区内Dagum基尼系数年均贡献率，地区间差异是中国区域碳中和发展力差距的主要来源，与前述结论一致。具体而言，地区间Dagum基尼系数净贡献率在2020—2023年由70.15%下降至69.85%，降幅为0.30个百分点，但各期均接近70%水平，削减地区间碳中和发展力差异仍是未来推进“双碳”行动的关键抓手；地区内Dagum基尼系数贡献率有所上升，由20.73%提升至21.19%，上升幅度为0.46个百分点；地区间超变密度Dagum基尼系数贡献率则由9.13%降至8.97%。

4 中国碳中和发展力动态演进分析

基于Dagum基尼系数的分析揭示了中国碳中和发展力的相对差异程度与地区差异来源，但无法对各地区碳中和发展力的绝对差异进行精准刻画。本文采用Kernel密度估计方法，综合选取分布位置、分布形态、分布特征和分布延展性等重点维度，通过分析Kernel密度曲线的变化特征与演进过程，进一步识别不同地区碳中和发展力的绝对差异时变趋势与分布动态演化轨迹。表3显示，除西部地区外，样本期内全域及各地区总体分布曲线均向右移动，碳中和发展力呈现不同程度

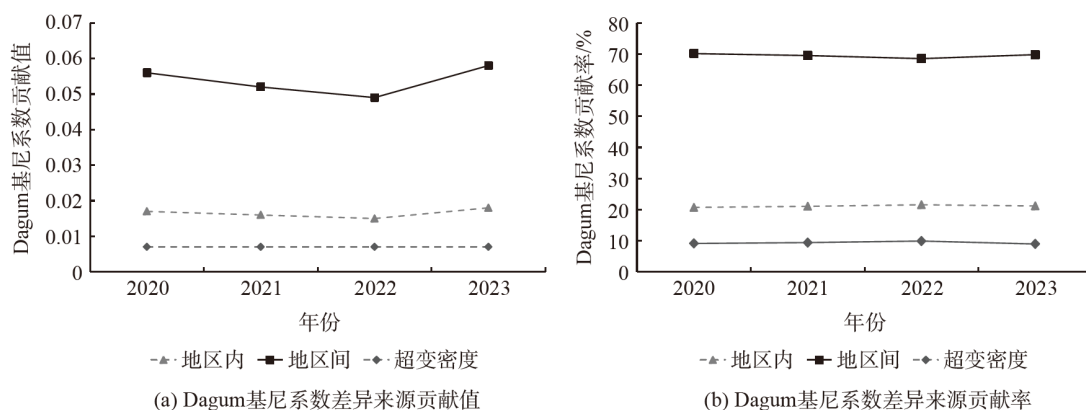


图7 Dagum基尼系数分解及变动情况

Fig.7 Decomposition and changes of Dagum Gini coefficient

注：子图(a)、(b)分别为Dagum基尼系数各差异来源贡献值与贡献率。

的上升趋势。同时，全国及四大地区分布曲线出现高度下降、宽度增大的变动现象，分布延展性未明显收敛，曲线峰态分化加剧，碳中和发展力梯度效应与极化特征渐显。

图8（a）展示了2020—2023年全国碳中和发展力分布演化趋势。分布位置维度，全国总体Kernel密度曲线中心位置及变化区间向右移动，说明样本期内各地区碳中和发展力水平增势良好；主峰形态维度，曲线峰高呈现先上升后下降的趋势，宽度先缩小后扩大，且样本末期曲线高度低于期初水平，宽度超过期初水平，表明全国范围内省级CNDI离散程度有所提升，碳中和发展力出现不均衡演进态势；分布延展性维度，曲线具有明显的右拖尾特征，且尾部逐年拉长，进一步说明

不同地区碳中和发展力水平失衡现象逐渐加剧；波峰维度，曲线在2020—2023年间维持“高主峰、低侧峰”的双峰状态，主峰和侧峰之间距离较大，侧峰逐渐凸显，说明不同省份空间极化现象明显，碳中和发展力区间分异显著。

图8（b）为东部地区CNDI Kernel密度估计结果。东部地区Kernel密度曲线逐年右移，表明区内省份碳中和发展力整体上升，但曲线近年移动速度趋缓，仍需进一步强化碳中和发展力提升整体效能；曲线高度出现先升后降的演进趋势，总体稳定在较低水平，曲线宽度无显著变化，说明东部地区内省份碳中和发展力绝对差异进一步扩大；样本期内曲线保持双峰形态，但左侧峰逐渐平缓，存在向单峰演进趋势，极化

表3 中国碳中和发展力分布动态的演化特征

Table 3 Evolutionary characteristics of the distribution dynamics of China's carbon neutrality developmentability

区域	分布位置	主峰形态	分布延展性	波峰数目
全国	右移	高度先升后降，宽度先变小后变大	右拖尾，延展拓宽	双峰
东部地区	右移	高度先升后降，宽度不变	两侧拖尾，延展不变	双峰
中部地区	右移	高度降低，宽度变大	左拖尾，延展收敛	双峰向单峰过渡
西部地区	先右移后左移	高度先降后升再降，宽度变大	右拖尾，延展拓宽	单峰
东北地区	右移	高度先升后降，宽度先变小后变大	两侧拖尾向右拖尾过渡	单峰向双峰过渡

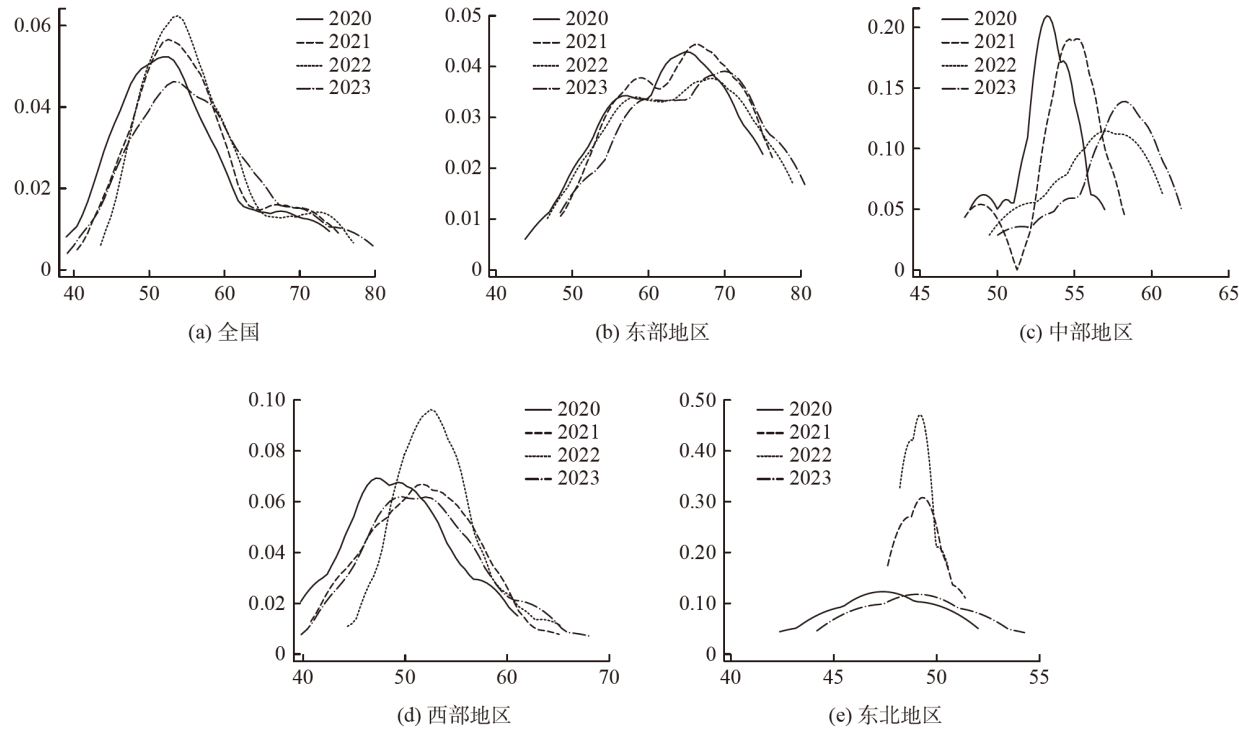


图8 中国碳中和发展力分布动态

Fig.8 Distribution dynamics of carbon neutrality developmentability in China

注：子图（a）～（e）分别为全国、东部地区、中部地区、西部地区和东北地区Kernel密度估计结果；横轴为CNDI数值区间，纵轴为CNDI对应概率密度估计值。

特征有所缓和；曲线左右延展收敛不明显，说明东部地区省份CNDI极差仍较大，这与北京、江苏等强势省份同河北、海南等滞后省份的差异演变事实保持一致。

图8(c)为中部地区CNDI Kernel密度估计结果及时序演化情况。中部地区Kernel密度曲线右移幅度相较于其他地区更大，碳中和发展力提升后发动强劲；曲线在考察期内经历高度下降、宽度扩增的变化过程，地区内省份非均衡性呈现恶化趋势；波峰演变过程显示，曲线期初双峰形态较全国更为明显，区内省份碳中和发展力两极分化现象较为凸显，但曲线在末期由双峰向单峰过渡，说明中部地区内省份碳中和发展力梯级分化现象得到缓解；曲线存在左拖尾现象，CNDI低值省份同区域内其他省份差距明显，但该方向分布延展渐进收敛，碳中和发展力落后省份追赶效应显著。

图8(d)展示了西部地区碳中和发展力分布动态演进趋势。西部地区曲线中心先右移后左移，区域内省份2023年CNDI平均水平虽相较于2020年有所提升，但近年出现“负增长”现象，碳中和发展力水平同其他地区进一步拉大；同时，曲线高度呈现先降后升再降的倒“N”型演化趋势，宽度整体变大，地区内省份CNDI离散程度呈上升趋势，西部地区碳中和发展力分异严重问题仍未得到改善；曲线在样本期内均表现为单峰特征，内部极化特征并不明显；曲线右拖尾现象逐年显著，说明西部地区部分省份碳中和发展力水平已处高位，但省份间差距仍在扩大。

图8(e)为东北地区CNDI Kernel密度估计结果。2020—2023年东北地区Kernel密度曲线高度升降交织，宽度大小交替，曲线高度及宽度波动在四大地区中最为明显，区域内省份碳中和发展未形成稳定的演进格局及共进趋势；曲线中心位置变动不大，碳中和发展力整体水平同发达地区仍有差距；分布延展性表明，曲线由双侧延展过渡到右侧延展形态，低值省份碳中和发展力向区内平均水平靠近；曲线在样本考察初期为单峰形态，后期在左侧逐渐演化出侧峰，分化特征持续显现。

5 结论与建议

本文对碳中和发展力的理论内涵进行了系统化阐释，据此构建了包含成长力、转型力、竞争力、协调力和持续力五个层面的中国碳中和发展力指标体系，综合利用前沿距离法和CRITIC赋权法分别测度了2020—2023年省级、区域、全国层面的碳中和发展力水平。同时，通过计算Dagum基尼系数并进行地区内差异与地区间差异分解，揭示了碳中和发展力

水平的区域差异程度与来源，进一步，利用Kernel密度估计方法剖析了不同地区碳中和发展力的分布动态与演进规律。研究发现：

1) 全国碳中和发展力水平呈现稳定增长态势，CNDI由54.15分增长至57.24分，东部地区CNDI年均值在四大地区中排名第一，中部地区表现出较为明显的追赶效应，浙江、广东等省份常年位于碳中和发展力引领型梯队。

2) 从“五力”驱动模型分解结果看，各地区持续力、转型力得分均较高，二者在推动碳中和发展力水平提升中发挥“双轮驱动”作用，协调力水平普遍较低。地区层面，东部地区在成长力、转型力、竞争力、持续力层面得分遥遥领先，具有绝对优势，中部地区、西部地区和东北地区分别在转型力、持续力和协调力上存在比较优势；省份层面，广东、浙江、江苏稳居成长力、转型力、竞争力排名前列，福建、湖北、江西、重庆、陕西成为“五力”发展新势力。

3) 中国碳中和发展力区域差异主要来自区域间差异，区域内差异稳定在较低水平，其中东部地区和西部地区内碳中和发展力水平失衡现象仍然突出，东部地区与东北地区、西部地区之间的差距仍处高位。

4) 东部地区头部省份和尾部省份碳中和发展力绝对差异收窄趋势不明显，中部地区省份间绝对差异逐渐扩大，但碳中和发展力梯度效应有所缓解，西部地区省份碳中和发展力水平规模滞后且分化严重，东北地区省份间绝对差异波动较大，极化特征持续显现。

本文基于“五力”分析框架，通过构建多维度指标体系对我国省级层面碳中和发展力的现状水平、地区差异及动态演进开展了系统分析。然而，作为碳排放的主要来源，城市既是推进“双碳”行动的“主战场”，也是实现碳中和发展的重要载体。因此，有必要在更为微观尺度上对城市碳中和发展力水平开展评估。探索构建“省级+城市”双尺度下碳中和发展力的测算框架，更加全面地评估各地碳中和发展的主要成效是未来研究的主要方向。同时，面向碳中和远期目标，碳中和发展力长时间尺度动态预测是有效支持低碳减排与绿色发展工作的重点研究拓展领域。

基于上述结论，本文得出三点政策启示及建议。第一，持续优化碳中和发展力评价体系，夯实工作任务细化落实的组织保障。“双碳”工作的顺利推进有赖于对各个地区碳中和发展能力的量化评估与综合评价，推动各地区因类施策、对点发力，化解低碳转型过程中的难点问题与主要风险，仍需要反映地方碳中和发展能力的综合评价体系发挥基础性、引领性作用。应进一步以碳中和发展理念为指导，依据低碳

转型过程中出现的现实问题与先进经验,不断推动具有中国特色的碳中和发展力评价体系动态优化与功能拓延,为地方政府开展“双碳”工作提供科学依据和价值参考。在落实全国碳达峰碳中和目标过程中,必须兼顾发展与减排的协调统一,短期与长期的渐进衔接,充分把握“双碳”工作的优先级与时度效,根据各地区资源禀赋、发展水平、战略定位和减排潜力等现实条件,提升节能降碳任务部署同阶段性目标的适配性,压实各方主体责任与激励约束,全面强化碳中和发展的整体效应。

第二,强健碳中和发展核心动能领先优势,激活绿色转型关键要素发展活力。成长力、转型力、竞争力、协调力、持续力对推动碳中和发展具有特性功能,加强“五力”间协调配合有助于释放碳中和发展力核心动力要素的叠加倍增作用。对此,需以产业结构优化、能源结构转型、节能技术创新、财税金融协同、绿色生活践行等碳中和发展重点领域为抓手,持续优化传统产业产品结构与用能结构,前瞻布局未来绿色低碳产业集群,推动产业链上下游落后产能有序化解、绿色产能快速积蓄,协同推进煤电转型与新能源发展,加快构建新型电力系统,着力提升产业链供应链核心技术自主可控力度,强化数字技术与绿色技术耦合创新与研发应用,不断健全完善支持绿色转型的财税金融工具与市场价格机制,综合运用税收减免、土地优惠、项目补贴等财政税收工具,加强绿色信贷、绿色债券、绿色保险等组合式绿色金融产品创新推广,加大绿色产品有效供给,不断丰富节能型产品服务消费场景。

第三,综合考虑区域碳中和发展力水平差异,构建优势互补发展格局。全国“双碳”行动的整体推进需要各地区系统梳理自身工作基础与进展,深入分析低碳转型面临的迫切问题,围绕产业升级、能源转型、资源循环、生态保护等重点领域精准施策、靶向发力。具体地,应强化区域间与区域内空间协同联动和功能布局优化,充分发挥碳中和发展力高水平地区的示范作用,巩固东部地区碳中和发展先驱优势,在产业园区绿色循环体系建设、数字化绿色化高效协同、绿色制造与现代服务有机融合领域探索一批可复制、可推广的经验做法,持续打造低碳转型新拉力和新增长极。同时,需要加大政策工具对碳中和发展滞后地区的倾斜力度,加快重点地区钢铁、电力、石化、有色等重点行业深入调整原料结构与工艺流程,推进清洁能源项目与新型基础设施落地建设,完善山河湖海林草沙生态环境协同保护机制,支持碳中和发展落后地区有效承接优质人才、资金、技术要素引入与产业梯度转移,利用成本、资源比较优势与后发动能,推动

绿色发展领域引资、引技、引智有机结合,在低碳转型“新赛道”抢抓新机,努力消除碳中和发展鸿沟。

参考文献

- [1] 余碧莹,赵光普,安润颖,等.碳中和目标下中国碳排放路径研究[J].北京理工大学学报(社会科学版),2021,23(2):17-24.
- [2] 魏一鸣,余碧莹,唐葆君,等.中国碳达峰碳中和路径优化方法[J].北京理工大学学报(社会科学版),2022,24(4):3-12.
- [3] 张希良,黄晓丹,张达,等.碳中和目标下的能源经济转型路径与政策研究[J].管理世界,2022,38(1):35-66.
- [4] 林伯强.碳中和进程中的中国经济高质量增长[J].经济研究,2022,57(1):56-71.
- [5] 韩晶,姜如玥.数字经济赋能低碳发展:理论逻辑与实践路径[J].统计研究,2024,41(4):54-67.
- [6] 徐晓光,樊华,苏应生,等.中国绿色经济发展水平测度及其影响因素研究[J].数量经济技术经济研究,2021,38(7):65-82.
- [7] 刘强,马彦瑞,徐生霞.数字经济发展是否提高了中国绿色经济效率?[J].中国人口·资源与环境,2022,32(3):72-85.
- [8] Chen Y J, Tang J W. The impact of economic growth targets on the level of green development—A perspective on officials' promotion incentives and environmental regulations[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 368: 122056.
- [9] 张友国,窦若愚,白羽洁.中国绿色低碳循环发展经济体系建设水平测度[J].数量经济技术经济研究,2020,37(8):83-102.
- [10] 黄跃,李琳.中国城市群绿色发展水平综合测度与时空演化[J].地理研究,2017,36(7):1309-1322.
- [11] Yang T T, Yi L, Yan S, et al. Synergy of pollution reduction and carbon abatement of the 8 urban agglomerations in China: Status, dynamic evolution, and spatial-temporal characteristics[J]. Resources Policy, 2024, 95: 105180.
- [12] 金碚.关于“高质量发展”的经济学研究[J].中国工业经济,2018,(4):5-18.
- [13] 王一鸣.百年大变局、高质量发展与构建新发展格局[J].管理世界,2020,36(12):1-13.
- [14] 韩保江,李志斌.中国式现代化:特征、挑战与路径[J].管理世界,2022,38(11):29-43.
- [15] 陈景华,陈姚,陈敏敏.中国经济高质量发展水平、区域差异及分布动态演进[J].数量经济技术经济研究,2020,37(12):108-126.
- [16] Luo S Y, Yu M Y, Dong Y L, et al. Toward urban high-quality development: Evidence from more intelligent Chinese cities[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2024, 200: 123108.
- [17] 郭芸,范柏乃,龙剑.我国区域高质量发展的实际测度与时空演变特征研究[J].数量经济技术经济研究,2020,37(10):118-132.
- [18] 师博,任保平.中国省际经济高质量发展的测度与分析[J].经济问题,2018,(4):1-6.
- [19] 王军,朱杰,罗茜.中国数字经济发展水平及演变测度[J].数量经济技术经济研究,2021,38(7):26-42.
- [20] 姚战琪.数字贸易、产业结构升级与出口技术复杂度——基于结构方程模型的多重中介效应[J].改革,2021,(1):50-64.
- [21] 师博,张冰瑶.全国地级以上城市经济高质量发展测度与分析[J].社会科学研究,2019,(3):19-27.
- [22] 张涛.高质量发展的理论阐释及测度方法研究[J].数量经济技术经济研究,2020,37(5):23-43.
- [23] 韩文龙,张瑞生,赵峰.新质生产力水平测算与中国经济增长新动能[J].数量经济技术经济研究,2024,41(6):5-25.
- [24] 魏丽莉,侯宇琦.数字经济对中国城市绿色发展的影响作用研究[J].数量

- 经济技术经济研究, 2022, 39(8): 60–79.
- [25] 赵涛, 张智, 梁上坤. 数字经济、创业活跃度与高质量发展——来自中国城市的经验证据[J]. 管理世界, 2020, 36(10): 65–76.
- [26] 周小亮, 吴武林. 中国包容性绿色增长的测度及分析[J]. 数量经济技术经济研究, 2018, 35(8): 3–20.
- [27] 聂长飞, 简新华. 中国高质量发展的测度及省际现状的分析比较[J]. 数量经济技术经济研究, 2020, 37(2): 26–47.
- [28] Xie P J, Shu Y L, Sun F H, et al. Decoupling economic development from carbon emissions: Insights from Chinese provinces [J]. Energy, 2024, 308: 133008.
- [29] Zhou S Y, Li W, Lu Z G, et al. A technical framework for integrating carbon emission peaking factors into the industrial green transformation planning of a city cluster in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 344: 131091.
- [30] 张涛, 李均超. 网络基础设施、包容性绿色增长与地区差距——基于双重机器学习的因果推断[J]. 数量经济技术经济研究, 2023, 40(4): 113–135.
- [31] Gao P F, Wang Y D, Zou Y, et al. Green technology innovation and carbon emissions nexus in China: Does industrial structure upgrading matter?[J]. Frontiers in Psychology, 2022, 13: 951172.
- [32] 李华, 董艳玲. 中国经济高质量发展水平及差异探源——基于包容性绿色全要素生产率视角的考察[J]. 财经研究, 2021, 47(8): 4–18.
- [33] 张友国, 白羽洁. 区域差异化“双碳”目标的实现路径[J]. 改革, 2021, (11): 1–18.
- [34] 段宏波, 汪寿阳. 中国的碳中和: 技术经济路径与政策选择[J]. 管理科学学报, 2024, 27(2): 1–17.
- [35] 孙传旺, 占妍泓. 碳中和发展轨迹的国际比较与中国碳中和发展力研究[J]. 国外社会科学, 2022, (1): 120–132+199.
- [36] 周密, 郭佳宏, 王威华. 新质生产力导向下数字产业赋能现代化产业体系研究——基于补点、建链、固网三位一体的视角[J]. 管理世界, 2024, 40(7): 1–26.
- [37] 邵帅, 范美婷, 杨莉莉. 经济结构调整、绿色技术进步与中国低碳转型发展——基于总体技术前沿和空间溢出效应视角的经验考察[J]. 管理世界, 2022, 38(2): 46–69+4–10.
- [38] 王维国, 张逸君, 邱德馨. 人口老龄化、财政支出效率与产业结构升级——理论机制与经验证据[J]. 统计研究, 2024, 41(7): 134–147.
- [39] Yu Y, Shi C F, Guo J R, et al. To what extent can clean energy development advance the carbon peaking process of China?[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 412: 137424.
- [40] 步晓宁, 张天华, 张少华. 通向繁荣之路: 中国高速公路建设的资源配置效率研究[J]. 管理世界, 2019, 35(5): 44–63.
- [41] 尹旭, 黄彩云. 财税政策、金融政策促进制造业绿色转型发展研究[J]. 地方财政研究, 2023, (7): 28–39.
- [42] 魏敏, 李书昊. 新时代中国经济高质量发展水平的测度研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2018, 35(11): 3–20.
- [43] 刘华军, 吴倩敏. 新时代十年中国绿色发展之路[J]. 中国人口·资源与环境, 2024, 34(3): 102–111.
- [44] Lin B Q, Qiao Q. Exploring the participation willingness and potential carbon emission reduction of Chinese residential green electricity market[J]. Energy Policy, 2023, 174: 113452.
- [45] World Bank. Doing Business(2020)[EB/OL]. 2019. <https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/75ea67f9-4bcb-5766-ada6-6963a992d64c/content>.
- [46] 刘骅, 卢亚娟. 转型期地方政府投融资平台债务风险分析与评价[J]. 财贸经济, 2016, 37(5): 48–59.
- [47] 吕承超, 崔悦. 中国高质量发展地区差距及时空收敛性研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2020, 37(9): 62–79.
- [48] 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[J]. 数量经济技术经济研究, 2022, 39(4): 67–87.
- [49] 姬志恒. 中国农业农村高质量发展的空间差异及驱动机制[J]. 数量经济技术经济研究, 2021, 38(12): 25–44.