

中国碳中和指数的区域差异、时空演变特征及其驱动因素分析

甘雨露

福建师范大学数学与统计学院, 福建 福州

收稿日期: 2026年7月3日; 录用日期: 2026年8月5日; 发布日期: 2026年8月25日

摘 要

实现碳中和是发展中国家应对全球气候变暖、保持经济可持续发展面临的共同挑战。基于2007~2022年中国30个省级行政区面板数据, 本文以碳源与碳汇之差测度各省份碳中和指数, 综合应用多种计量模型和方法, 系统考察了中国碳中和指数的区域差异、时空演变特征及其驱动因素。研究发现: (1) 中国碳中和指数呈现“整体持续上升、东高西低、空间集聚性不断增强”的时空分布格局, 高值区域逐步向东部沿海地区及华北平原集中; (2) 区域差异总体呈现“先快速收敛、后趋于稳定”的演变趋势, 总体基尼系数由0.046下降至0.038, 其中组间差异为区域差异的主要来源; (3) 各省碳中和指数维持原有状态的概率均超过82%, 当中低水平省份与中高水平省份接壤时, 其向上跃迁至更高水平的概率明显提升; (4) 经济发展水平、能源利用效率及财政支出规模对碳中和指数具有显著正向影响, 城镇化水平则通过结构转型与技术扩散等路径产生显著的正向间接效应。研究发现不仅为深入了解碳中和进程中区域发展不均衡的内在机理与多维协同机制提供了扎实的实证支撑, 也为制定差异化、精准化的区域碳减排政策, 以及强化跨区域协同治理能力提供了政策启示。

关键词

碳中和指数, 区域差异, Dagum基尼系数, 马尔可夫链模型, 空间面板模型

Analysis of Regional Differences, Spatiotemporal Evolution Characteristics and Driving Factors of China's Carbon Neutrality Index

Yulu Gan

School of Mathematics and Statistics, Fujian Normal University, Fuzhou Fujian

Abstract

Achieving carbon neutrality is a common challenge for developing countries in addressing global warming and maintaining sustainable economic development. Based on panel data of 30 provincial-level administrative regions in China from 2007 to 2022, this paper measures the carbon neutrality index of each province by the difference between carbon sources and carbon sinks. By comprehensively applying various econometric models and methods, this paper systematically examines the regional differences, spatiotemporal evolution characteristics, and driving factors of China's carbon neutrality index. The study found that: (1) China's carbon neutrality index exhibits a spatiotemporal distribution pattern of "overall continuous rise, high in the east and low in the west, and increasing spatial agglomeration", with high-value areas gradually concentrating in the eastern coastal areas and the North China Plain; (2) Regional differences generally show an evolutionary trend of "rapid convergence followed by stabilization", with the overall Gini coefficient decreasing from 0.046 to 0.038, among which inter-group differences are the main source of regional differences; (3) The probability of each province maintaining its original carbon neutrality index exceeds 82%, and when low- to medium-level provinces border high- to medium-level provinces, the probability of them jumping to a higher level increases significantly; (4) Economic development level, energy efficiency, and fiscal expenditure scale have a significant positive impact on the carbon neutrality index, while urbanization level generates a significant positive indirect effect through structural transformation and technology diffusion. These findings not only provide solid empirical support for a deeper understanding of the inherent mechanisms and multi-dimensional collaborative mechanisms of regional development imbalances in the carbon neutrality process, but also provide policy insights for formulating differentiated and precise regional carbon emission reduction policies and strengthening cross-regional collaborative governance capabilities.

Keywords

Carbon Neutrality Index, Regional Differences, Dagum Gini Coefficient, Markov Chain Model, Spatial Panel Model

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

应对全球气候变暖是当前国际社会面临的最紧迫议题之一。随着工业化进程持续加速，化石能源的过度消耗导致大气中温室气体浓度不断攀升。据观测数据，2022 年全球平均地表温度较工业革命前水平高出约 1.1℃，且升温趋势仍在延续[1]。气候变化由此成为人类社会共同面对的重大系统性风险，推动碳中和已成为全球范围内日益深化的政策共识与发展模式。“双碳”目标体现了我国应对气候变化的担当，引领经济社会全面绿色转型、实现高质量发展的关键制度因素与转型路径。当前，中国正处于能源结构深度调整与经济高质量发展协同推进的关键阶段。碳中和进程已超越单纯的环境治理范畴，其影响深度嵌入区域经济格局重构、产业体系升级与空间协同发展全过程。然而，碳中和目标的实现绝非仅依赖末端排放总量控制，而是一个受经济发展阶段、能源消费结构、绿色技术创新能力、生态资源禀赋等多重因素动态耦合、交互作用的复杂系统工程。中国各省份在自然资源禀赋、产业结构特征、基础设

施水平及经济社会发展梯度等方面长期存在显著的非均衡性,致使碳中和进程必然呈现高度异质化的区域分异格局。更为关键的是,在区域开放与要素自由流动背景下,各省碳中和实践并非孤立演进:环境规制的趋同化、低碳技术的空间扩散与外溢效应、高耗能产业的跨区域梯度转移等机制,均促使碳中和水平通过地理邻近性、经济关联性与制度协同性等多维渠道产生显著的空间溢出与相互塑造效应。因此,系统揭示碳中和进程的区域差异格局、时空演化轨迹及其内在驱动机理,不仅有助于精准识别区域协同治理的关键节点与经济中心区域,亦可为构建分类指导、因地制宜、动态适配的差异化碳中和实施路径提供坚实的理论支撑与决策依据,兼具重要的学术价值与现实意义。

近年来,碳中和已成为学术界研究的热点,现有成果主要集中于碳中和绩效的测度、碳中和指数的评估、碳中和的影响因素分析等三个方面:

首先,国内外学者对碳中和绩效的测度形成两类路径。第一类路径以碳减排绩效作为碳中和进程的替代指标。部分研究直接将碳排放总量设定为核心测度变量[2];另一些研究则以能源消费引致的碳排放量作为关键替代性指标[3][4]。Wu 等(2024)进一步将碳排放总量、人均碳排放量及碳排放强度纳入同一分析框架,构建多维评估体系[5]。此外,部分学者聚焦特定产业部门,基于投入-产出关系构建行业层面的测度模型,如针对交通运输业提出碳排放效率测度方法[6],在制造业中运用方向距离函数测算碳减排潜力[7],在农业领域则构建涵盖农田施肥、水稻种植与畜牧业三大碳源的核算框架[8]。第二类路径以清洁能源发展水平作为碳中和绩效的表征指标。其核心逻辑在于,非化石能源的单位发电碳排放强度显著低于化石能源,其规模化应用已被证实是实现碳中和目标的关键技术路径。王鑫淼等(2022)通过测算光伏发电系统全生命周期的碳收支平衡点,识别其实现碳中和的时间节点[9];Chen 等(2025)则以省级水电、风电、核电与太阳能发电总量之和衡量区域碳中和表现[10]。

其次,为克服单一指标的片面性,越来越多的研究转向“碳源-碳汇”二元平衡框架或综合性评价指标体系。现有方法可归为三类。第一类以净排放量作为核心指标,通过碳排放总量与区域碳汇能力的差值衡量碳中和程度[11],或在核算中将能源消费、农业生产及废弃物处理等多元排放源纳入考量,并耦合林地、草地、农作物等碳吸收能力计算区域净排放量[12];还有研究将森林、草地、城市绿地、河流、湖泊及滨海湿地等生态系统纳入固碳范畴[13]。第二类采用碳源与碳汇的比值反映进展[14],如Zhan 等(2024)基于 Kaya 恒等式从人口、经济、产业、能耗结构等多维度推算碳排放,并以碳封存量与排放量之比定义碳中和率[15]。第三类则构建综合性评价指标体系[16],Shi 等(2025)在可持续发展目标(SDGs)框架下融合熵权法与 TOPSIS 模型,涵盖生产减排、生活低碳、生态固碳与技术负碳四大维度[17];孙传旺等(2025)整合前沿距离法与 CRITIC 赋权法生成区域碳中和发展力指数[18];Wang 等(2023)从碳源-碳汇系统中选取指标,联合熵权法与变异系数法分析中国东部 12 省市碳中和水平的动态变化[19]。

最后,关于碳中和的影响因素研究,现有文献主要从“碳源-碳汇”系统与“碳中和整体绩效”两个层面递进展开。在碳源-碳汇层面,研究方法可归纳为两类:第一类为基于 Kaya 恒等式拓展的分解分析方法,包括 LMDI 指数分解、STIRPAT 模型及地理探测器等[20]-[22]。Li 等(2022)运用地理加权时间序列回归模型识别各省碳排放驱动机制,结果表明[23]:降低单位 GDP 能耗、优化第二产业比重、提升贸易开放度以及推进电力替代进程,是抑制碳排放增长的关键路径;陈诗一等(2024)对 LMDI 方法进行理论拓展,将化石能源清洁转化、清洁能源替代及生产过程碳效提升等新兴低碳技术纳入驱动因素分析框架,发现总产出规模与总发电量构成碳排放的主要促增因子,而能源利用效率提升与清洁能源发电替代则发挥显著促降作用[24]。此外,部分学者将土地利用类型[25]、城市公园植物群落结构[26]及区域生态系统服务功能[27]作为碳汇能力的代理变量,深入探究碳汇动态变化的驱动机理。梅雪松等(2024)借助结构方程模型检验林分碳汇量的影响路径,证实土壤全氮含量与碳汇量呈显著正相关,而林龄、坡度、年降水

量及土壤全钾含量则与其呈显著负相关[28]。第二类为空间计量建模方法[29] [30]。孙蒙等(2023)采用空间杜宾模型分析中国省级碳排放的空间集聚特征与溢出效应,发现能源结构优化对碳排放具有最强抑制作用[31]; Liu 等(2021)亦证实人口规模、人均 GDP 及地方政府财政收支等变量均存在显著的空间溢出效应[32]。

在碳中和整体绩效层面,影响因素研究亦呈现两类主流范式:第一类基于时空地理加权回归(GTWR)模型[33],考察区域异质性下碳中和水平的驱动机制。周镭基等(2025)运用 GTWR 模型解析水稻种植区净碳汇的影响因素,发现农村经济发展水平、种植业结构优化及日照时数增加对其具有显著正向驱动效应[34]。第二类基于空间计量模型识别政策干预与制度环境的作用路径[35]。Chen 等(2025)构建空间杜宾分位数回归模型,揭示环境治理压力与经济增长的交互效应对碳中和绩效具有显著正向促进作用[10]; Wang 等(2022)则系统考察碳交易政策的传导机制,指出其可通过推动产业结构绿色化、扩大绿地生态空间、降低单位产值能源消耗等多重路径,协同实现碳源削减与碳汇增强,从而加速碳中和目标达成[36]。

综上所述,现有文献对碳中和水平的研究仍存在以下不足之处:首先,目前多数文献仅基于单一碳源或碳汇进行衡量碳中和,未能全面纳入碳源与碳汇的多维构成。具体而言,碳源层面除能源消费外,还应包含水泥生产、农业生产等非能源活动产生的碳排放;碳汇层面则需综合考量植被固碳、湿地固碳等多类型碳汇要素。其次,对碳中和水平的区域差异和时空演化特征进行研究的文献较少,无法更深入地分析省域碳中和水平的区域差异及时空演变。针对以上不足,本文将充分考虑碳源和碳汇因素来衡量碳中和水平,并深入研究碳中和水平的区域差异及其分解,进一步探索碳中和水平的空间溢出效应,为区域碳中和路径优化提供更为坚实的实证依据。

2. 研究方法与数据来源

2.1. 碳中和指数

目前,碳平衡可用碳中和系数[33]或净碳排放量[37]来表示。碳中和系数是指碳汇与碳源的比值,净碳排放量是指碳源与碳汇之间的差值。本文采用净碳排放量(CNE)来衡量碳中和,CNE 越低,则地区的碳平衡能力越强。其计算公式如下:

$$CNE = COE - COS \quad (1)$$

其中,COE 表示碳源排放量,COS 表示碳汇量。

(1) 碳源估算

碳源排放量选择能源消耗、水泥生产和农业生产导致的碳排放总量,计算公式如下:

$$COE = ECE + CPE + APE \quad (2)$$

其中,ECE 为能源消耗碳排放量,参考 Wang 等(2022)的方法利用九种化石燃料消耗(煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气和电力)计算得到[36]。CPE 为水泥生产碳排放量,参考 Yang 等(2019)由水泥产量与水泥生产的碳排放系数的乘积计算得到[38]。APE 为农业生产的碳排放量,参考 Yang 等(2019)由化肥使用量、灌溉面积与各自碳排放系数乘积之和得到[38]。

(2) 碳汇估算

碳汇量选择植被、湿地和作物的固碳量,其计算公式如下:

$$COS = VCS + WCS + CCS \quad (3)$$

其中,VCS 为植被固碳量,参考 Wang 等(2022)由森林面积、草原面积和城市绿地面积与其各自碳吸收系数的乘积之和得到[36]。WCS 为湿地固碳量,参考 Yang 等(2019)由湿地面积与其碳吸收系数之积得到

[38]。CCS为作物固碳量,参考 Yang 等(2019)八种农作物(水稻、小麦、玉米、豆类、块茎类、棉花、花生、油菜)的固碳量计算公式如下[38]:

$$CCS = \sum C_{ai} Y_{ei} / S_i \quad (4)$$

其中, C_{ai} 为作物的碳吸收系数, Y_{ei} 为农作物的经济产量, S_i 为作物的经济系数, $i = 1, 2, \dots, 8$, 表示作物的类型。

2.2. Dagum 基尼系数及其分解

本文运用 Dagum 基尼系数及其分解方法分析碳中和水平的区域差异。总体基尼系数计算公式如下:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{m=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{r=1}^{n_m} |y_{ij} - y_{mr}|}{2\bar{y}n^2} \quad (5)$$

其中, i 、 m 表示不同区域, j 、 r 表示不同省份, k 和 n 分别为区域数量和省份数量, n_i (n_m) 表示 i (m) 区域内省份个数, y_{ij} (y_{mr}) 是区域内省份 a (b) 的碳中和指数, $\bar{y}$ 是区域内碳中和指数的均值。

2.3. 空间马尔可夫链模型

本文运用传统马尔可夫链模型,揭示 30 个省级行政区不同时期碳中和水平的时间演化特征。参考 Zhao 等(2023) [39]和 Shi 等(2025) [17]利用四分位数法将碳中和水平划分为四类,通过建立 4×4 状态转移概率矩阵表征不同类型碳中和水平在不同时期的状态转移,其计算公式如下:

$$P_{ij}(E_i \rightarrow E_j) = \frac{n_{ij}}{n_i} \quad (6)$$

其中, P_{ij} 表示某省碳中和水平从 t 年状态 E_i 到 $t+1$ 年状态 E_j 的转移概率, n_{ij} 表示从第 i 层到第 j 层的区域总数。当碳中和水平从状态 E_i 转移到状态 E_j 时, n_i 表示状态处于第 i 级的省份的数量。

此外,为考察空间因素对类型转移的影响,本文在传统马尔可夫链状态转移矩阵中引入空间滞后,构建 $4 \times (4 \times 4)$ 转移概率矩阵,可以衡量中国碳中和水平的空间演化特征,各省份的空间滞后计算公式如下:

$$Lag = Y_i W_{ij} \quad (7)$$

其中, Lag 表示省份 i 的空间滞后值, Y_i 表示省份 i 的观测值, W_{ij} 是省份 i 与相邻区域之间相互作用的矩阵,选择空间邻接矩阵进行衡量。

2.4. 数据来源

本文选取 2007~2022 年我国 30 个省级行政区(不包含西藏和港澳台地区)作为研究对象。变量数据主要来自历年《中国统计年鉴》与 EPS 数据库,个别缺失值采用线性插值法填补。

3. 结果分析

3.1. 各区域碳中和指数的时空分布特征

各区域碳中和指数的时空分布特征如图 1 所示,可以看出,2007 年至 2022 年间,中国碳中和指数呈现出“整体上升、东高西低、集聚增强”的演变特征。2007 年,全国多数省份碳中和指数处于较低水平,区域差异尚不显著;至 2011 年,东部及中部工业集聚区碳中和指数快速攀升,空间分异初显;到 2022 年,东部增速渐缓,而西部地区此时超过东北地区。西部地区虽整体保持较低水平,但部分资源型省份碳中和压力亦呈上升趋势。

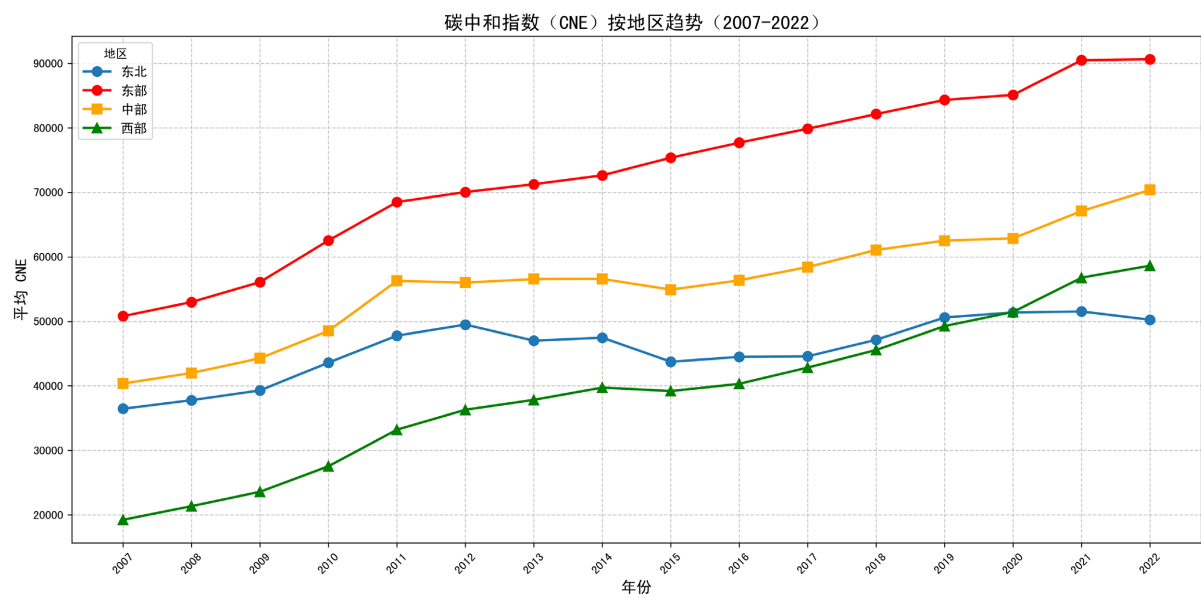


Figure 1. Trend chart of carbon neutrality index for each region from 2007 to 2022
图 1. 2007~2022 年各地区碳中和指数趋势图

3.2. 碳中和指数的区域差异及分布动态演进

3.2.1. 区域差异及分解

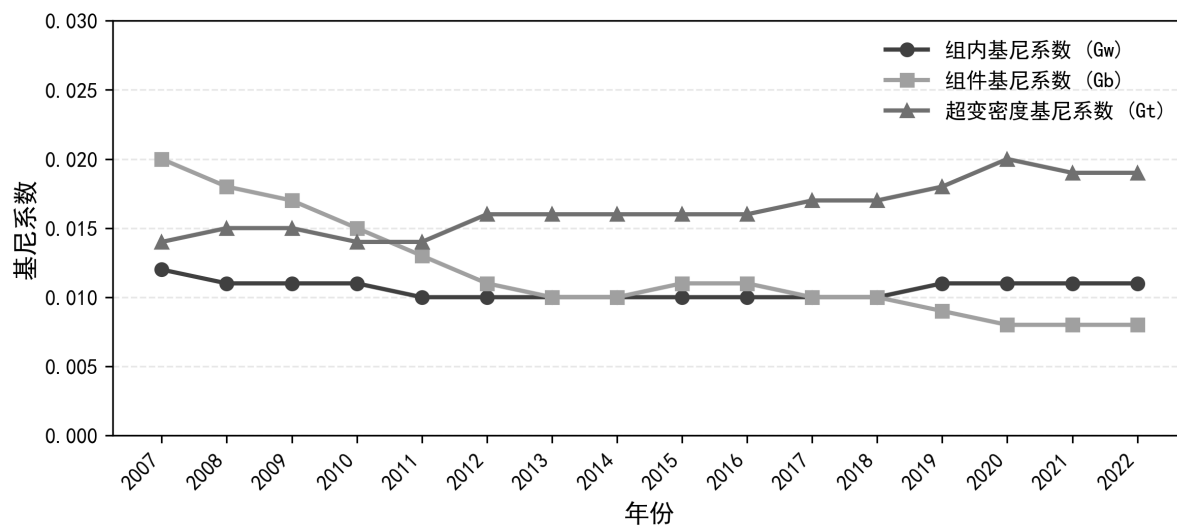
Table 1. Gini coefficient of China’s carbon neutrality index and its decomposition results
表 1. 中国碳中和指数的基尼系数及其分解结果

年份	总体	地区内				地区间					
		东部	中部	西部	东北	东 - 中	东 - 西	东 - 东北	中 - 西	中 - 东北	西 - 东北
2007	0.046	0.048	0.028	0.04	0.025	0.041	0.06	0.041	0.047	0.03	0.043
2008	0.044	0.047	0.027	0.036	0.025	0.041	0.056	0.041	0.043	0.029	0.039
2009	0.043	0.047	0.025	0.036	0.024	0.04	0.054	0.04	0.042	0.029	0.037
2010	0.040	0.046	0.024	0.032	0.023	0.038	0.051	0.04	0.038	0.027	0.034
2011	0.037	0.045	0.020	0.029	0.022	0.037	0.047	0.039	0.034	0.025	0.03
2012	0.036	0.045	0.022	0.029	0.022	0.037	0.045	0.038	0.032	0.026	0.029
2013	0.036	0.046	0.021	0.028	0.023	0.037	0.045	0.04	0.030	0.027	0.028
2014	0.036	0.045	0.020	0.030	0.023	0.037	0.044	0.04	0.030	0.026	0.028
2015	0.037	0.046	0.019	0.032	0.026	0.037	0.046	0.043	0.030	0.029	0.031
2016	0.038	0.047	0.018	0.032	0.027	0.038	0.046	0.044	0.030	0.029	0.031
2017	0.038	0.047	0.018	0.031	0.028	0.038	0.046	0.045	0.029	0.031	0.032
2018	0.037	0.047	0.018	0.031	0.028	0.038	0.045	0.044	0.029	0.032	0.033
2019	0.038	0.046	0.017	0.033	0.029	0.037	0.045	0.044	0.029	0.032	0.035
2020	0.038	0.048	0.017	0.033	0.030	0.039	0.046	0.045	0.029	0.032	0.036
2021	0.038	0.047	0.019	0.034	0.030	0.038	0.045	0.045	0.029	0.031	0.035
2022	0.038	0.048	0.019	0.034	0.030	0.039	0.045	0.046	0.029	0.032	0.035

运用 Dagum 基尼系数及其分解方法对 2007~2022 年中国碳中和指数区域差异及来源进行分析, 表 1 展示了 2007~2022 年中国碳中和指数总体基尼系数的演变趋势。总体而言, 基尼系数呈“先快速下降、后趋于平稳”的特征。2007~2012 年为快速下降期, 基尼系数由 0.046 降至 0.036, 区域差异显著缩小, 这一时期的区域差异缩小与国家对区域协调发展的重视密切相关。“十一五”规划明确提出“促进区域协调发展”, 加大对中西部地区的基础设施投资与生态补偿力度; “十二五”规划进一步强调“实施区域发展总体战略”, 推动东部产业向中西部转移, 促进了碳排放在空间上的再配置。同时, 在 2009 年哥本哈根会议后, 中国提出碳强度下降目标, 地方政府开始重视碳排放管控, 部分地区碳汇能力逐步提升, 共同推动了区域碳中和水平的趋同。2013~2022 年进入平稳波动期, 基尼系数维持在 0.036~0.038 之间, 这一阶段, 国家层面碳减排政策逐步加码, 但区域间的差异化发展路径也日益显现。从 2013 年起国家先后在 7 个省级行政区启动碳排放权交易试点, 在 2017 年启动全国碳市场建设, 东部地区凭借技术与市场优势率先形成碳减排能力, 而中西部地区仍处于工业化进程中, 碳排放压力持续存在, 区域差异进入相对稳定的“平台期”。2020 年以来基尼系数略有回升, 这与“双碳”目标提出后的政策响应差异密切相关。在 2020 年 9 月中国明确提出“3060”“双碳”目标, 东部沿海地区率先制定碳达峰行动方案, 依托经济与科技优势加速绿色转型, 而部分中西部资源型省份面临产业结构调整压力, 碳排放与碳汇能力失衡问题尚未根本解决, 导致区域间差距略有扩大。

图 2 展示了 2007~2022 年中国碳中和指数的区域差异的主要来源及其贡献率的变化趋势。研究结果表明, 组间差异是区域差异的主导因素, 始终占据总体不平等的最大份额, 贡献率维持在 30%~44%之间。这一主导地位反映了四大区域(东部、中部、西部、东北)之间存在的结构性差异, 如经济发展水平、能源消费结构、森林碳汇资源禀赋等方面的固有差距, 是碳中和指数区域差异的主要根源。组内基尼系数由 0.02 降至 0.011, 其贡献率由 44.0%下降至 30.0%, 表明四大区域之间的碳中和水平差距在逐步缩小。这一变化与“十一五”以来国家实施的区域协调发展战略、生态补偿机制以及产业梯度转移政策密切相关, 中西部地区在经济发展与生态建设方面逐步缩小了与东部地区的差距。组内差异贡献率由 26.0%小幅上升至 30.0%, 对总体差异影响较为稳定。超变密度贡献率由 18.0%上升至 30.0%~39.0%, 表明跨区域交叉差异的重要性显著增强, 碳中和水平的空间分布正突破传统区域板块界限。2012 年后, 三类贡献率趋于稳定, 形成“三足鼎立”的多元格局, 反映出区域差异来源的复杂化趋势。

各年基尼系数



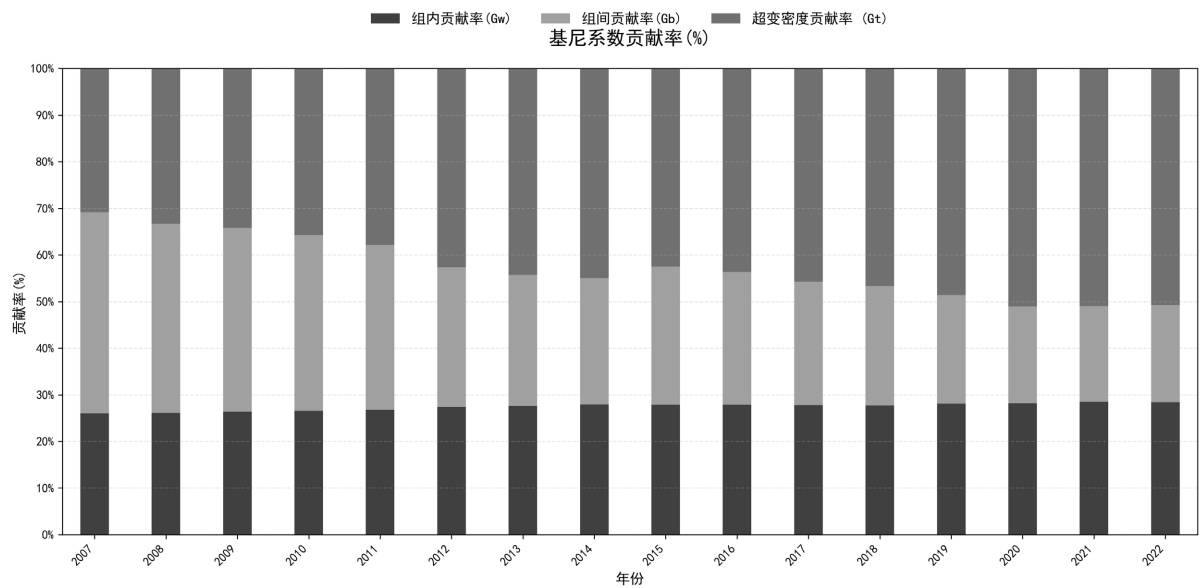
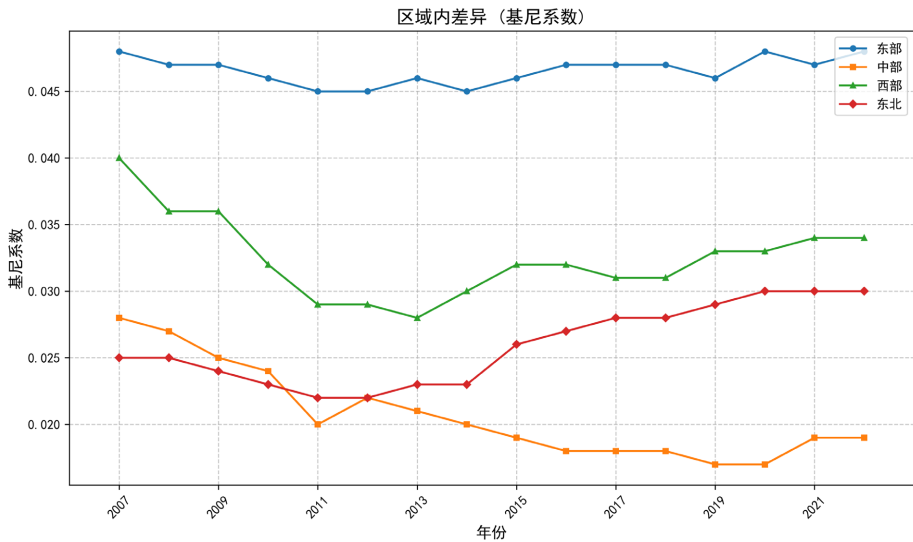


Figure 2. Decomposition of the Gini coefficient and contribution rate trend of China's carbon neutrality index
图 2. 中国碳中和指数的基尼系数分解和贡献率趋势

中国碳中和指数的区域差异及演变趋势如图 3 所示，从区域内差异来看，东部地区内部差异最大，呈现高位震荡特征；西部地区内部差异呈 U 型演变，先降后升，西部各省份在资源禀赋、生态条件、经济发展阶段等方面差异显著，早期在西部大开发政策推动下区域内趋同态势明显，但近年来随着内蒙古和陕西等省级行政区碳排放压力上升，以及云南省和四川等省依托清洁能源与森林碳汇优势表现突出，区域内分化再度加剧；中部地区内部差异持续缩小，为四大区域中最低水平；东北地区内部差异先降后升，东北三省早期在重工业结构调整过程中碳中和水平趋于一致，但近年来辽宁、吉林、黑龙江三省在产业转型、碳汇能力等方面的差异逐步显现，导致区域内分化有所加剧。从区域间差异来看，东部与西部差异最大，但呈现持续缩小态势；东部与中部差异快速下降后趋于稳定，由于中部地区近年来在承接东部产业转移、推进绿色发展方面成效显著，与东部地区的碳中和水平差距逐步缩小；中部与西部差异持续缩小，为区域间差异中最低水平。总体而言，区域间差异持续缩小，但区域内部分化问题日益凸显，需在碳中和政策设计中加以关注。



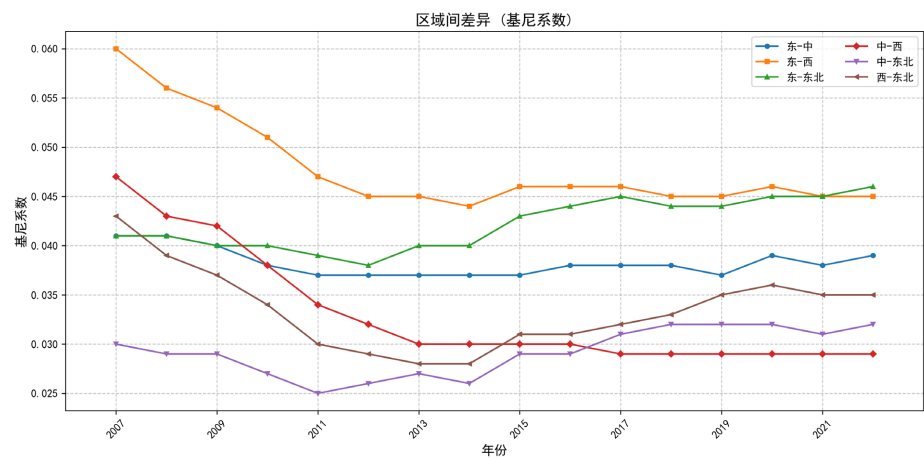


Figure 3. Regional differences and evolution trends of China’s carbon neutrality index
图 3. 中国碳中和指数的区域差异及演变趋势

3.2.2. 空间相关性检验

利用全局莫兰指数对 2007~2022 年碳中和指数的空间相关性进行检验,表 2 表明在空间邻接矩阵下,碳中和水平的莫兰指数均大于 0,呈现显著的空间正相关性,但莫兰指数由 0.247 波动下降至 0.112,空间集聚程度逐步减弱。其中,2021 年莫兰指数为 0.099 且未通过显著性检验,反映出当年碳中和水平的空间分布出现结构性转变。这一现象可能与“双碳”目标提出后各地区政策响应差异、西部地区碳汇能力提升、全国碳市场启动以及经济复苏的区域不均衡等因素有关。2022 年莫兰指数回升至 0.112 且在 10% 水平上显著,表明空间集聚特征有所恢复,但显著性水平仍偏低。

Table 2. Global Moran’s test results of the carbon neutrality index
表 2. 碳中和指数的全局莫兰检验结果

年份	Moran’ I	年份	Moran’ I
2007	0.247*** (0.110)	2015	0.207*** (0.106)
2008	0.258*** (0.109)	2016	0.198*** (0.106)
2009	0.251*** (0.110)	2017	0.182*** (0.106)
2010	0.238*** (0.109)	2018	0.174*** (0.107)
2011	0.234*** (0.110)	2019	0.148*** (0.107)
2012	0.221*** (0.109)	2020	0.133** (0.108)
2013	0.228*** (0.110)	2021	0.099 (0.108)
2014	0.200*** (0.109)	2022	0.112* (0.109)

注: ***, **, * 分别表示 1%、5%、10% 的显著性水平, 括号内数值为标准误。

3.2.3. 我国碳中和指数的马尔可夫链分析

本文利用马尔可夫链分析法揭示各省碳中和指数的内部动态变化,将区域划分为四种状态:低水平(I)、中低水平(II)、中高水平(III)和高水平(IV)。分析结果如表 3 所示。可以看出,在不考虑空间因素的情况下,碳中和指数的演变具有显著的稳定性,各等级省份维持原状态的概率均在 82%以上,跨等级转移概率极低。其中高水平的稳定性最高为 97.2%。从转移方向来看,状态转移主要发生在相邻等级之间,跨等级转移概率极低,反映出碳中和指数的演变具有“渐进式”特征,难以实现跨越式跃迁。

Table 3. Results of spatial Markov chain analysis
表 3. 空间马尔可夫链分析结果

空间滞后类型		$t/(t+1)$	I	II	III	IV
传统	无滞后	I	0.871	0.129	0.000	0.000
		II	0.044	0.823	0.133	0.000
		III	0.000	0.036	0.866	0.098
		IV	0.000	0.000	0.028	0.972
空间	I	I	0.846	0.154	0.000	0.000
		II	0.143	0.571	0.286	0.000
		III	0.000	0.000	0.875	0.125
		IV	0.000	0.000	0.000	1.000
	II	I	0.810	0.190	0.000	0.000
		II	0.045	0.773	0.182	0.000
		III	0.000	0.000	1.000	0.000
		IV	0.000	0.000	0.000	1.000
	III	I	0.859	0.141	0.000	0.000
		II	0.041	0.877	0.082	0.000
		III	0.000	0.016	0.857	0.127
		IV	0.000	0.000	0.022	0.978
	IV	I	1.000	0.000	0.000	0.000
		II	0.000	0.727	0.273	0.000
		III	0.000	0.130	0.783	0.087
		IV	0.000	0.000	0.043	0.957

考虑空间滞后因素后，转移概率呈现出显著的空间异质性，表明碳中和指数的演变具有明显的空间依赖性。可以发现，领域类型对省域碳中和指数类型转移存在一定的影响。具体来看：(1) 低水平省份在邻近省份为中低水平时向上转移概率最高为 0.190；(2) 中低水平省份在邻近低水平省份时向上跃升概率最高为 0.286；(3) 中高水平省份在邻近省份为低水平时向上转移概率最高为 0.125，体现出“示范效应”；(4) 高水平省份在邻近省份为高水平时稳定性最强为 0.957，表现出“俱乐部趋同”特征。结果表明碳中和指数的空间动态演变受到邻近省份碳中和水平的显著影响，在推进碳中和进程中应重视空间溢出效应与区域协同。

3.3. 碳中和指数的影响因素分析

为进一步验证空间溢出效应对省域碳中和指数影响的显著性，我们引入空间杜宾模型进行影响因素分析：

$$Y_{it} = \beta_0 + \rho W_{ij} Y_{it} + \theta W_{ij} X_{it} + \beta X_{it} + \delta_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \tag{8}$$

其中， Y_{it} 表示碳中和指数， X_{it} 表示解释变量， ρ 为空间自回归系数， θ 为解释变量空间交互项系数， β 为回归系数， W_{ij} 为空间权重矩阵， δ_i 为个体固定效应， λ_t 为时间固定效应， ε_{it} 为随机扰动项。

3.3.1. 解释变量设定

参考现有研究成果，我们选择以下变量作为影响碳中和指数的变化的因素：

(1) 经济发展水平(PGDP)。经济发展水平是影响碳排放与碳汇能力的核心因素[20]。因此，本文选择人均 GDP (元/人)衡量各省经济发展水平。

(2) 人口规模(POP)。人口规模通过两个渠道影响碳中和指数：一是消费效应，人口增长增加能源需求，从而导致碳排放[23]；二是空间效应，人口集聚改变土地利用方式，影响森林、草地等碳汇资源的存续。因此，本文选择年末总人口(万人)衡量人口规模。

(3) 能源强度(EC)。能源强度是衡量能源利用效率的关键指标。能源强度越低，单位产出的能源消耗越少，碳排放水平越低。在中国“双碳”目标背景下，降低能源强度是碳减排的核心抓手[40]。因此，本文选择单位 GDP 能耗衡量能源强度。

(4) 政府干预程度(GI)。财政支出规模反映地方政府在环境治理与生态建设中的投入能力。财政支出对碳中和指数的影响具有双重性：一方面，财政支出可能用于基础设施建设与工业发展，间接推高碳排放[41]；另一方面，财政资金可投向生态修复、森林保护、绿色技术研发等领域，提升碳汇能力。因此，本文选择一般公共预算支出与地区生产总值的比重来衡量政府干预程度。

(5) 城镇化水平(UR)。城镇化进程通过三个渠道影响碳中和指数：一是能源消费渠道，城市居民能源消费强度高于农村，城镇化推高碳排放[42]；二是产业集聚渠道，城市产业集中带来规模效应，可能提高能源利用效率；三是土地利用渠道，城市扩张挤占森林、农田等碳汇空间，削弱碳吸收能力。因此，本文选择城镇化率衡量城镇化水平。

3.3.2. 空间计量模型设定

我们通过相关测试来确定具体的空间计量模型。Hausman 检验结果显示可以使用固定效应模型。为准确估计碳中和指数的空间溢出效应，分别采用固定效应模型(FE)、空间自回归模型(SAR)、空间误差模型(SEM)和空间杜宾模型(SDM)进行对比分析。如表 4 所示，LM 检验、LR 检验和 Wald 检验都显著，可知 SDM 模型不会退化成 SLM 和 SEM 模型。因此，本文采用 SDM 模型进行空间效应检验。

Table 4. Model estimation results
表 4. 模型估计结果

变量	FE	SAR	SEM	SDM	
				Main	Wx
PGDP	1.108***	1.023***	1.069***	1.043***	-0.136
	(0.00)	(0.06)	(0.06)	(0.06)	(0.25)
POP	0.908***	0.960***	1.027***	1.058***	-0.318
	(0.00)	(0.1)	(0.11)	(0.12)	(0.14)
EC	1.082***	1.012***	1.048***	1.036***	-0.160
	(0.00)	(0.04)	(0.04)	(0.04)	(0.15)
GI	0.754***	0.982***	1.020***	1.114***	0.614**
	(0.00)	(0.16)	(0.15)	(0.15)	(0.02)
UR	0.414	0.437*	0.351	0.102	2.036***
	(0.29)	(0.21)	(0.22)	(0.21)	(0.00)
Constant	-8.759***				
	(0.00)				

续表

ρ		0.181*** (0.05)		0.106* (0.10)
λ			0.175* (0.07)	
Hausman				61.93***
LR-lag				27.27***
LR-error				42.74***
Wald-lag				43.96***
Wald-error				51.79***
N	480	480	480	480
R ²	0.888	0.867	0.868	0.797

注：***、**、*分别表示 1%、5%、10%的显著性水平，括号内数值为标准误。

3.3.3. 影响因素的直接效应和空间效应分析

表 5 汇报了 SDM 模型的空间效应分解结果。可以看出，PGDP 对于本地碳中和指数具有促进作用，而邻近地区 PGDP 的提高对本地区碳中和指数具有抑制作用虽然不显著。这可能是因为经济发达地区在绿色技术、清洁能源应用方面具有先发优势，其先进经验可通过人才流动、产业关联等渠道向邻近地区扩散，促进本地区碳减排。POP 对本地区碳中和指数的影响显著但数值极小，这可能是因为虽然人口增长会增加能源消费总量，但人均碳排放强度的区域差异以及技术进步对能源效率的提升，部分抵消了人口规模的影响。而邻近地区人口规模对本地区的影响不显著，表明人口的空间分布对碳中和水平的跨区域影响有限。EC 对本地区碳中和指数的影响显著为正，而邻近地区 EC 的提高对本地区碳中和指数具有抑制作用虽然不显著，这可能是因为能耗强度增大加强了节能技术的传播和分享。GI 对本地区碳中和指数的影响显著为正，而邻近地区 GI 的增高对本地区碳中和指数具有促进作用，这可能是因为地方政府的财政竞争效应。在现行财政体制下，地方政府倾向于通过加大财政投入推动经济增长，而邻近地区的财政扩张可能引发本地区的跟进竞争，导致碳排放压力同步上升。UR 对本地区碳中和指数的影响不显著，而邻近地区 UR 的增大对本地区碳中和指数具有促进作用，表明 UR 可能主要通过相邻区域的协调发展来影响碳中和指数，由于城镇化进程中的城市群一体化使得相邻城市在土地利用、产业布局、能源基础设施等方面紧密关联，邻近地区城市扩张会通过人口流动、产业联动等渠道对本地区产生压力。

Table 5. Direct, indirect and overall effects of the factors influencing the carbon neutrality index

表 5. 碳中和指数影响因素的直接、间接和总效应

变量	直接效应	间接效益	总效应
PGDP	1.044*** (0.00)	-0.029 (0.77)	1.015*** (0.00)
POP	1.048*** (0.00)	-0.223 (0.31)	0.825*** (0.00)
EC	1.039*** (0.00)	-0.059 (0.53)	0.980*** (0.00)
GI	1.131*** (0.00)	0.815*** (0.00)	1.946*** (0.00)
UR	0.148 (0.47)	2.246*** (0.00)	2.392*** (0.00)

注：***、**、*分别表示 1%、5%、10%的显著性水平，括号内数值为标准误。

综上所述,碳中和指数具有显著的空间溢出效应,经济发展水平、能源强度和政府干预程度等因素都在碳中和指数的空间演化中发挥着重要作用。

4. 结论与建议

4.1. 结论

基于 2007~2022 年中国 30 个省级行政区(不包含西藏和港澳台地区)的面板数据,本文运用 Dagum 基尼系数及其分解、空间马尔可夫链和空间杜宾模型,系统考察碳中和指数的区域差异、空间演化特征及影响因素。主要结论如下:

第一,碳中和指数呈现“整体上升、东高西低、集聚增强”的时空格局。2007~2022 年全国指数持续提升,东部与中部工业集聚区增速最快,高值区向东部沿海和华北平原进一步集中,凸显经济发展与碳汇能力的结构性失衡;西部整体水平偏低,但部分资源型省份碳中和压力持续上升。

第二,区域差异呈“先快速缩小、后趋于稳定”趋势。总体基尼系数由 0.046 降至 0.038。组间差异贡献率从 44.0%降至 30.0%,仍为差异主因。区域内差异方面:东部最大且高位波动;西部呈 U 型(先降后升);中部持续收窄,为四大区域最低;东北先降后升,近年有所扩大。区域间差异方面:东-西差距最大但持续缩小;东-中差距快速下降后趋稳;中-西差距持续收窄。

第三,碳中和指数演变兼具强稳定性与空间依赖性。传统马尔可夫链显示,各等级省份维持原状态概率均超 82%,高水平省份最稳定;状态转移主要集中于相邻等级,呈“渐进式”。引入空间滞后后,转移概率显现出显著空间异质性:低水平省份邻近中低水平时向上转移概率最高(0.190);中低水平省份邻近低水平时跃升概率最高(0.286);中高水平省份邻近低水平时向上转移概率最高(0.125),体现“示范效应”;高水平省份邻近高水平时稳定性最强(0.957),呈现“俱乐部趋同”。

第四,碳中和指数存在显著正向空间溢出效应,各因素作用机制各异。空间杜宾模型表明:邻近地区碳中和水平提升对本地有促进作用。具体来看:经济发展水平(PGDP)对本地有显著正向影响,但邻近地区 PGDP 提升反而抑制本地发展,反映技术溢出与产业转移的双重效应;能源强度(EI)对本地有显著正向影响,而邻近地区 EI 下降却抑制本地,体现节能技术扩散的滞后性;财政支出规模(GI)对本地及邻近地区均有显著正向影响,凸显地方政府财政竞争效应;城镇化率(UR)对本地无显著影响,但邻近地区城镇化对本地具有显著正向溢出,表明其影响主要通过空间联动实现。

4.2. 建议

基于上述研究结论,本文提出以下政策建议:

第一,实施差异化区域碳减排政策,精准应对内部差异。东部地区应强化省际协同治理,推动高碳与低碳省份间技术交流和政策协调;西部地区在推进大开发的同时,重点关注内蒙古、陕西等资源型省级行政区的碳排放压力,加强云贵川等西南省份生态碳汇能力保护与提升;东北地区需制定针对性产业低碳转型政策,促进辽、吉、黑三省在碳中和进程中的协同发展。

第二,强化区域协同治理,发挥空间溢出效应。依托碳中和指数显著的正向空间溢出,建立跨区域协调机制,推动东部绿色技术向中西部转移,通过技术扩散、人才流动和产业协作,增强经济发展与能源强度的负向溢出效应。同时,针对超变密度贡献率上升所反映的交叉重叠差异,避免东中西部“一刀切”,转向更精细的差异化治理。

第三,优化财政支出结构,加大绿色投入。提高环保、生态修复、绿色技术研发等支出比重,压减高碳领域的基建与园区开发投入。加快节能技术空间扩散,强化工业研发与技术创新支持,推广高效能源利用技术。推动城镇化绿色转型:在城市群建设中融入生态城市、海绵城市、绿色建筑等理念,发挥人

口与产业集聚的规模效应以提升能效；加强相邻城市在土地利用、产业布局、能源基础设施等方面的协同规划。

参考文献

- [1] IPCC (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2391 p. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- [2] Yan, D., Liu, C. and Li, P. (2023) Effect of Carbon Emissions and the Driving Mechanism of Economic Growth Target Setting: An Empirical Study of Provincial Data in China. *Journal of Cleaner Production*, **415**, Article 137721. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137721>
- [3] Zhou, Y., Zou, S., Duan, W., Chen, Y., Takara, K. and Di, Y. (2022) Analysis of Energy Carbon Emissions from Agroecosystems in Tarim River Basin, China: A Pathway to Achieve Carbon Neutrality. *Applied Energy*, **325**, Article 119842. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119842>
- [4] Li, Q., Chen, J. and Zhang, P. (2024) Study on Carbon Emission Characteristics and Its Influencing Factors of Energy Consumption in Sichuan Province, China. *Frontiers in Environmental Science*, **12**, Article ID: 1414730. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1414730>
- [5] Wu, Y., Zong, T., Shuai, C. and Jiao, L. (2024) How Does New-Type Urbanization Affect Total Carbon Emissions, per Capita Carbon Emissions, and Carbon Emission Intensity? An Empirical Analysis of the Yangtze River Economic Belt, China. *Journal of Environmental Management*, **349**, Article 119441. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119441>
- [6] Xu, G., Zhao, T. and Wang, R. (2022) Research on Carbon Emission Efficiency Measurement and Regional Difference Evaluation of China's Regional Transportation Industry. *Energies*, **15**, Article 6502. <https://doi.org/10.3390/en15186502>
- [7] Bian, H. and Meng, M. (2023) Carbon Emission Reduction Potential and Reduction Strategy of China's Manufacturing Industry. *Journal of Cleaner Production*, **423**, Article 138718. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138718>
- [8] Dang, H., Deng, Y., Hai, Y., Chen, H., Wang, W., Zhang, M., et al. (2025) Integrating Geodetector and GTWR to Unveil Spatiotemporal Heterogeneity in China's Agricultural Carbon Emissions under the Dual Carbon Goals. *Agriculture*, **15**, Article 1302. <https://doi.org/10.3390/agriculture15121302>
- [9] 王鑫淼, 马志勇, 周旺潇, 等. 光伏发电系统碳中和及其影响因素[J]. 资源科学, 2022, 44(8): 1735-1744.
- [10] Chen, D. and Li, S. (2025) Exploring the Pathway to Carbon Neutrality in China Based on a Dynamic Spatial Durbin Quantile Regression Model. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 17442. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01748-y>
- [11] Li, C., Zhang, W., Xu, Z., Zhang, Y., Yue, M., Wu, L., et al. (2025) Impacts and Threshold Effects of Total Factor Energy Efficiency on Carbon Emissions and Carbon Neutrality across China's Cities. *Humanities and Social Sciences Communications*, **12**, 1-18. <https://doi.org/10.1057/s41599-025-05488-2>
- [12] Guo, A., Yang, J. and Zhong, F. (2023) Carbon Emission Quotas and a Reduction Incentive Scheme Integrating Carbon Sinks for China's Provinces: An Equity Perspective. *Sustainable Production and Consumption*, **41**, 213-227. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.08.014>
- [13] Cai, J., Zheng, H., Vardanyan, M. and Shen, Z. (2023) Achieving Carbon Neutrality through Green Technological Progress: Evidence from China. *Energy Policy*, **173**, Article 113397. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113397>
- [14] Wang, Y., Zhang, H., Zhang, C. and Liu, C. (2021) Is Ecological Protection and Restoration of Full-Array Ecosystems Conducive to the Carbon Balance? A Case Study of Hubei Province, China. *Technological Forecasting and Social Change*, **166**, Article 120578. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120578>
- [15] Zhan, J., Wang, C., Wang, H., Zhang, F. and Li, Z. (2024) Pathways to Achieve Carbon Emission Peak and Carbon Neutrality by 2060: A Case Study in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **189**, Article 113955. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113955>
- [16] 赵金凯, 张萌, 吴婷. 强可持续视角下中国碳中和指数的区域差异、结构差异及分布差异[J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2023, 43(2): 143-155.
- [17] Shi, X., Zhang, H., Zhang, J. and Zheng, L. (2025) Evaluating China's Carbon Neutrality Capacity a Comprehensive Spatiotemporal Analysis within the SDGs Framework. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 45060. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-31989-w>
- [18] 孙传旺, 王博, 李倩文. 中国碳中和发展力的综合测度、区域差异与动态演进[J]. 能源与气候变化, 2025, 1(1): 27-44.
- [19] Wang, Y., Chu, N. and Xu, S. (2023) Measurement and Factor Analysis of Carbon Neutrality Development Level in Eastern China. *Environmental Science and Pollution Research*, **30**, 112037-112051.

- <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30096-5>
- [20] Guo, F., Zhang, L., Wang, Z. and Ji, S. (2022) Research on Determining the Critical Influencing Factors of Carbon Emission Integrating GRA with an Improved STIRPAT Model: Taking the Yangtze River Delta as an Example. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **19**, Article 8791. <https://doi.org/10.3390/ijerph19148791>
 - [21] Xiaobing, H. and Shiqi, G. (2022) Temporal Characteristics and Influencing Factors of Agricultural Carbon Emission in Jiangxi Province of China. *Environmental Research Communications*, **4**, Article 045006. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ac6380>
 - [22] Wang, W., Chen, H., Wang, L., Li, X., Mao, D. and Wang, S. (2022) Exploration of Spatio-Temporal Characteristics of Carbon Emissions from Energy Consumption and Their Driving Factors: A Case Analysis of the Yangtze River Delta, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **19**, Article 9483. <https://doi.org/10.3390/ijerph19159483>
 - [23] Li, W., Ji, Z. and Dong, F. (2022) Spatio-Temporal Evolution Relationships between Provincial CO₂ Emissions and Driving Factors Using Geographically and Temporally Weighted Regression Model. *Sustainable Cities and Society*, **81**, Article 103836. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103836>
 - [24] 陈诗一, 王畅, 郭越. 面向碳中和目标的中国工业部门减排路径与战略选择[J]. 管理科学学报, 2024, 27(4): 1-20.
 - [25] Qin, M., Zhao, Y., Liu, Y., Jiang, H., Li, H. and Zhu, Z. (2023) Multi-Scenario Simulation for 2060 and Driving Factors of the Eco-Spatial Carbon Sink in the Beibu Gulf Urban Agglomeration, China. *Chinese Geographical Science*, **33**, 85-101. <https://doi.org/10.1007/s11769-023-1327-3>
 - [26] Zhao, D., Cai, J., Shen, S., Liu, Q. and Lan, Y. (2024) Nature-Based Solutions: Assessing the Carbon Sink Potential and Influencing Factors of Urban Park Plant Communities in the Temperate Monsoon Climate Zone. *Science of the Total Environment*, **950**, Article 175347. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175347>
 - [27] Zhang, Y., Cheng, C., Wang, Z., Hai, H. and Miao, L. (2025) Spatiotemporal Variation and Driving Factors of Carbon Sequestration Rate in Terrestrial Ecosystems of Ningxia, China. *Land*, **14**, Article 94. <https://doi.org/10.3390/land14010094>
 - [28] 梅雪松, 董灵波, 陈冠谋. 基于结构方程模型的兴安落叶松天然林碳汇量驱动因素[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(9): 1-10.
 - [29] Weng, Y.Y., Lin, Y.C. and Park, S.D. (2025) A Systems Approach to Carbon Emission Networks and Spatial Spillovers in China: Evidence from 31 Provinces Using the Spatial Durbin Model and Social Network Analysis. *Systems*, **13**, Article 410. <https://doi.org/10.3390/systems13060410>
 - [30] 王一婕, 史武莹. 黄河流域城市碳排放强度的动态演进、差异分解及影响因素[J]. 统计与决策, 2025, 41(1): 98-103.
 - [31] 孙蒙, 李长云, 邢振方, 等. 碳中和目标下中国碳排放关键影响因素分析及情景预测[J]. 高电压技术, 2023, 49(9): 4011-4022.
 - [32] Liu, S., Zhang, X., Zhou, Y. and Yao, S. (2021) Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of Carbon Sink Dynamics at County Scale: A Case Study of Shaanxi Province, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **18**, Article 13081. <https://doi.org/10.3390/ijerph182413081>
 - [33] 李素娟, 马奇飞, 叶芳. 中国碳中和潜力的区域差异及影响因素的时空异质性分析[J]. 环境科学, 2025, 46(7): 4075-4089.
 - [34] 周镨基, 廖彪, 吴思斌. “双碳”背景下水稻生产净碳汇时空演变及驱动因素分析——以湖北省地级市为例[J/OL]. 中国农业资源与区划: 1-14. <https://link.cnki.net/urlid/11.3513.s.20251021.1625.043>, 2026-04-08.
 - [35] 杜鹏程, 洪宇. 碳中和实现途径与政策选择——基于空间溢出效应的视角[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(9): 35-46.
 - [36] Wang, X., Huang, J. and Liu, H. (2022) Can China's Carbon Trading Policy Help Achieve Carbon Neutrality? A Study of Policy Effects from the Five-Sphere Integrated Plan Perspective. *Journal of Environmental Management*, **305**, Article 114357. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114357>
 - [37] Huang, X. and Tian, P. (2023) How Does Heterogeneous Environmental Regulation Affect Net Carbon Emissions: Spatial and Threshold Analysis for China. *Journal of Environmental Management*, **330**, Article 117161. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117161>
 - [38] Yang, G., Shang, P., He, L., Zhang, Y., Wang, Y., Zhang, F., et al. (2019) Interregional Carbon Compensation Cost Forecast and Priority Index Calculation Based on the Theoretical Carbon Deficit: China as a Case. *Science of the Total Environment*, **654**, 786-800. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.134>
 - [39] Zhao, S., Shi, W., Qiao, F., Wang, C., An, Y. and Zhang, L. (2023) Temporal and Spatial Changes and Trend Predictions of Forest Carbon Sequestration Efficiency in China Based on the Carbon Neutrality Goal. *Forests*, **14**, Article 2387. <https://doi.org/10.3390/f14122387>

-
- [40] Li, G., Zeng, S., Li, T., Peng, Q. and Irfan, M. (2023) Analysing the Effect of Energy Intensity on Carbon Emission Reduction in Beijing. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **20**, Article 1379. <https://doi.org/10.3390/ijerph20021379>
- [41] Huang, H., Wei, Z., Ge, Q. and Guo, Q. (2023) Analysis of Spatial-Temporal Evolution and Influencing Factors of Carbon Emission Efficiency in Chinese Cities. *Frontiers in Environmental Science*, **11**, Article ID: 1119914. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1119914>
- [42] Guo, X. and Fang, C. (2023) How Does Urbanization Affect Energy Carbon Emissions under the Background of Carbon Neutrality? *Journal of Environmental Management*, **327**, Article 116878. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116878>