

# 我国省域碳排放的时空演变及影响机制研究

## ——基于SDM的实证分析

柳春燕, 周文学\*

兰州交通大学数理学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2024年8月18日; 录用日期: 2024年9月12日; 发布日期: 2024年9月18日

### 摘要

文章首先基于碳排放系数法, 科学测度2008~2022中国30个省份的碳排放水平; 其次运用kernel密度估计分析各地区碳排放量的动态演进特征; 最后, 在进行空间相关性检验的基础上, 构建时间固定效应的空间杜宾模型, 对碳排放量的影响因素进行分析。研究表明: 我国及各省份的碳排放量均呈现上升趋势, 在空间分布上, 高碳排放量省份主要集中在东部及东部沿海, 集聚特征明显, 不平衡问题显著, 经济发展水平、城镇化率、科技发展水平、产业结构均对碳排放量产生影响, 其中, 经济发展水平、科技发展水平对碳排放具有促进作用, 城镇化率、产业结构对碳排放均有抑制作用, 且科技发展水平、产业结构存在空间溢出效应。

### 关键词

碳排放, 时空演变, 核密度估计, 空间杜宾模型

# Temporal and Spatial Evolution and Influencing Mechanism of Provincial Carbon Emissions in China

## —An Empirical Analysis Based on SDM

Chunyan Liu, Wenxue Zhou\*

School of Mathematics and Physics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: Aug. 18<sup>th</sup>, 2024; accepted: Sep. 12<sup>th</sup>, 2024; published: Sep. 18<sup>th</sup>, 2024

### Abstract

Firstly, based on the carbon emission coefficient method, this paper scientifically measures the

\*通讯作者。

carbon emission level of 30 provinces in China from 2008 to 2022. Secondly, kernel density estimation was used to analyze the dynamic evolution characteristics of carbon emissions in each region. Finally, on the basis of the spatial correlation test, the spatial Durbin model of time-fixed effect is constructed to analyze the influencing factors of carbon emission. The research shows that: In terms of spatial distribution, provinces with high carbon emissions are mainly concentrated in the eastern and eastern coastal areas, with obvious agglomeration characteristics and significant imbalance. The level of economic development, urbanization rate, scientific and technological development level, and industrial structure all have an impact on carbon emissions. The level of economic development and scientific and technological development can promote carbon emissions, and the urbanization rate and industrial structure can inhibit carbon emissions, and the level of scientific and technological development and industrial structure have spatial spillover effects.

## Keywords

Carbon Emissions, Temporal and Spatial Evolution, Kernel Density Estimation, Spatial Durbin Model

Copyright © 2024 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

2020年9月22日, 习近平总书记在联合国大会一般性辩论上向全世界宣布: “中国二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和”, 全面开启了我国“双碳”战略目标建设工作。

当前, 全球气温持续升高, 极端天气事件频发, 公众对环保问题的关注日益增加, 因此, 对碳排放现状进行分析, 并对碳排放影响因素进行研究, 了解碳排放的影响机制刻不容缓。中国地域广阔, 众多学者都对碳排放的影响因素进行了研究。张恪渝等[1]构建产业结构优化模型, 在能源消耗量与二氧化碳排放量的双重约束下, 得到最优产业结构调整方案, 并计算了现有科技水平下中国最大的碳排放潜力。王少剑等[2]运用碳排放量物料平衡法和结构分解模型, 核算广东省工业行业碳排放量, 并揭示其时空格局演变规律。卢娜等[3]在界定并量化突破性低碳技术创新的基础上, 采用动态空间杜宾模型检验技术创新对碳排放的直接影响与空间溢出效应。张华和丰超[4]从创新型城市出发, 使用双重差分法估计了创新型城市建设对碳排放绩效的影响。张磊[5]等认为城镇化与碳排放之间呈现倒U型关系。李建豹等[6]通过构建空间滞后面板Tobit模型, 发现人口城镇化和能源消费碳排放的耦合协调能力随时间变化而不断提高。

本文选用碳排放系数法, 测度2008~2022中国30个省份的碳排放水平, 研究碳排放的现状和时空演进趋势, 科学评估碳排放量的影响因素, 分析逐步实现低碳发展的现实基础和存在的短板, 旨在为推动低碳发展、加快达到“双碳”目标提供参考。

## 2. 研究方法 with 数据

### 2.1. 碳排放测算

目前应用最为广泛的碳排放量测算方法为碳排放系数法和投入产出法, 由于我国的投入产出表五年发布一次, 连续的时间序列数据不可得, 因此本文采用IPCC制定的《2006年IPCC国家温室气体清单指南》中提供的碳排放系数法, 并结合我国2011年公布的《省级温室气体清单编制指南》(第二卷能源部

分), 具体碳排放系数如表 1。对我国各省份 2008~2022 年的碳排放量进行估算, 具体公式[7]如下:

$$C_t = \sum e_{it} \times cf_i \times cef_i \times cor_i \times ncv_i \quad \text{公式 1}$$

其中,  $C_t$  为第  $t$  年的碳排放量,  $e_{it}$  为第  $i$  种能源第  $t$  年的消耗量,  $cf_i$  为第  $i$  种能源的折标准煤系数,  $cef_i$  为第  $i$  种能源的碳排放因子,  $cor_i$  为第  $i$  种能源的碳氧化率,  $ncv_i$  为第  $i$  种能源的低热位值。

**Table 1.** Carbon emission coefficient of energy consumption

**表 1.** 能源消费碳排放系数

	$cf_i$ (kg 标准煤/kg)	$cef_i$ (kg/TJ)	$cor_i$ (%)	$ncv_i$ (kJ/kg)
原煤	0.7143	93,133	0.98	20,908
焦炭	0.9714	108,166	0.93	28,435
原油	1.4286	73,700	0.98	41,816
汽油	1.4714	69,300	0.98	43,070
煤油	1.4714	71,866	0.98	43,070
柴油	1.4571	74,066	0.98	42,652
燃料油	1.4286	77,366	0.98	41,816
天然气	1.215	56,100	0.99	35,584

## 2.2. Kernel 密度估计

核密度估计是一种被广泛应用于空间不平衡分析中的非参数统计方法, 本文中, 采用高斯核函数估计法对我国共同富裕水平的动态演进进行分析。假设  $f(x)$  是随机变量  $X$  的密度函数, 公式 2 则为点  $x$  的核密度估计, 公式 3 为核函数[8],

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x_i - \bar{x}}{h}\right) \quad \text{公式 2}$$

$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad \text{公式 3}$$

其中,  $x_i$  代表观测值,  $n$  代表样本数量,  $h$  代表带宽,  $x$  代表独立同分布的观测值。

## 2.3. 数据来源

本文研究中所使用的数据, 来源于《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》以及各省统计局官网、各省统计年鉴, 对于数据中的缺失值选用插值法补齐。本文选取 2008~2022 为研究区间, 样本为我国 30 个省级行政区(港澳台及西藏除外)。

## 3. 碳排放的时空演变研究

### 3.1. 碳排放总体分析

本文运用 IPCC 提供的碳排放系数法计算出 2008~2022 年 30 个省份的碳排放量, 并在其基础上得出了研究区间内全国的碳排放量(图 1), 并使用 ArcGIS 绘制了选定年份(2008 年、2012 年、2017 年、2022 年)各省份的碳排放量变化情况图(图略)。通过分析可以发现, 我国碳排放量水平呈现以下特征:

1) 2008~2022 年间, 我国总体碳排放量呈上升趋势, 碳排放量从 2008 年的 8495 百万吨增长至 2022 年的 14,872 百万吨, 年均增长率为 3.80%, 并在 2010 年首次突破了一百亿吨。此外, 2008 至 2013 年,

2013 至 2022 年, 碳排放量年均增长率分别为 7.24%、2.37%, 究其原因, “十二五”期间, 国家提出要着力加快能源生产和利用方式变革, 强化节能优先战略, 全面提升能源开发转化和利用效率, 控制能源消费总量, 构建安全、稳定、经济、清洁的现代能源产业体系, 因此, 虽然我国在 2013 年之后碳排放总量的依旧保持增长, 但增长率有所放缓。

2) 区域层面, 各省份 2008~2022 年间的区域碳排放量均保持增长趋势, 且区域的碳排放量不平衡特征明显, 中部地区、东部及东南沿海地区的碳排放量高于其他省份, 此外, 区域碳排放的集聚特征显著, 碳排放量较高的省份在地理位置上总是连接成片。

3) 30 个省份中, 碳排放量均值前五的省份分别为: 山东(1279 百万吨)、山西(1133 百万吨)、河北(744 百万吨)、辽宁(740 百万吨)、江苏(719 百万吨), 年均增速排名前五的省份分别为山西(8.28%)、宁夏(7.33%)、新疆(7.33%)、广西(6.51%)、贵州(5.90%), 山西作为我国第一产煤大省、重要的能源重化工基地, 受限于本省的发展定位, 碳排放量与增速均居高不下; 除山西外, 增速较快的省份均为碳排放量较低的地区, 而碳排放量较高的区域, 增速较缓。

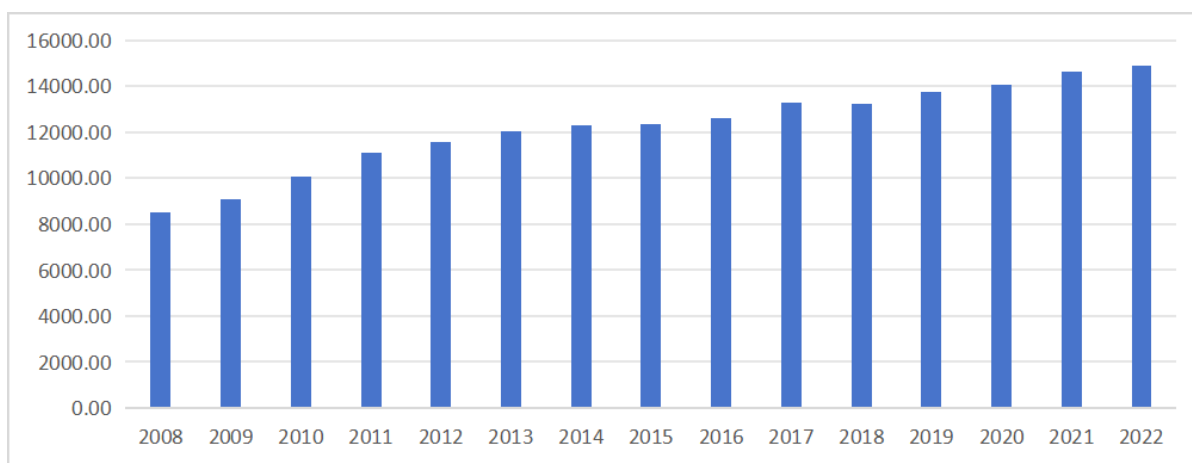


Figure 1. National carbon emissions from 2008 to 2022

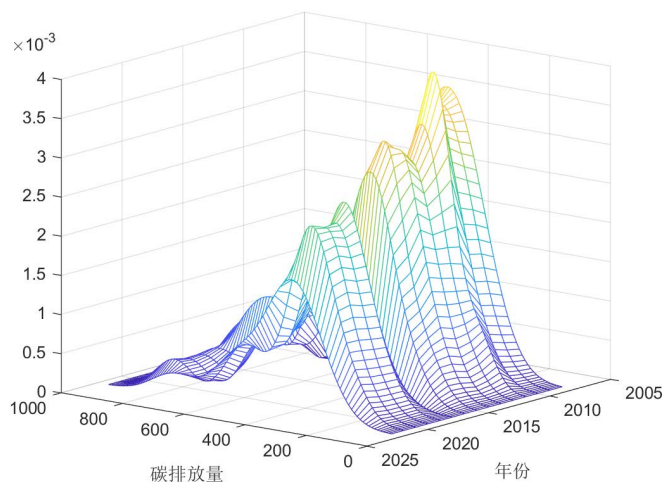
图 1. 2008~2022 全国碳排放量情况

### 3.2. 碳排放动态演进分析

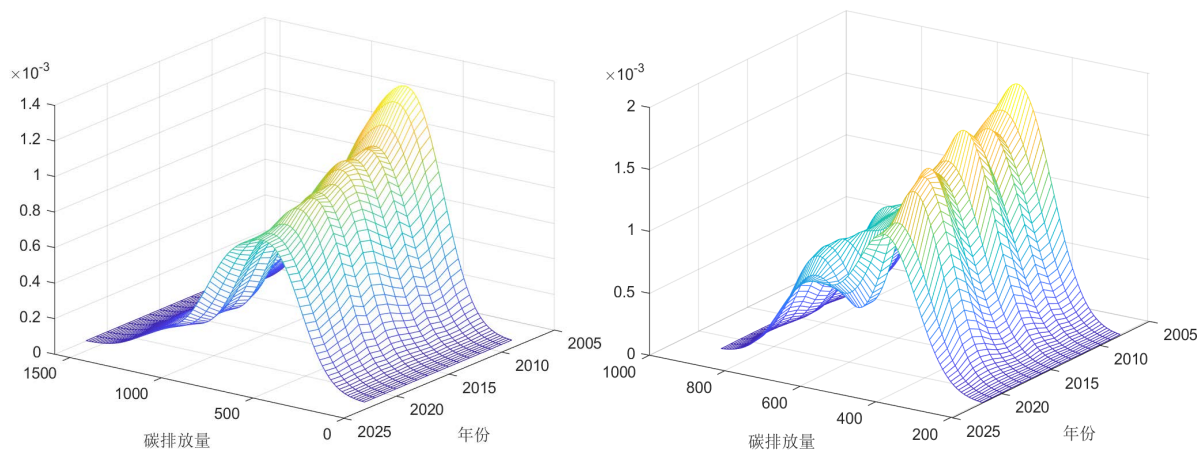
根据 kernel 密度估计对全国及四大地区的碳排放量水平的密度分布形态和动态演变规律进行分析, 分别得到图 2、图 3、图 4。

1) 从全国范围来看, 主峰分布位置存在明显的左移趋势, 说明我国整体碳排放量随着时间推移有了显著增加, 同时, 峰值有所下降且宽度逐年递增, 表明我国碳排放量出现了增速不一、水平不齐的差异性发展; 此外, 从分布的延展性角度看, 存在明显的左拖尾现象, 表明我国碳排放量的差距正在不断拉大。

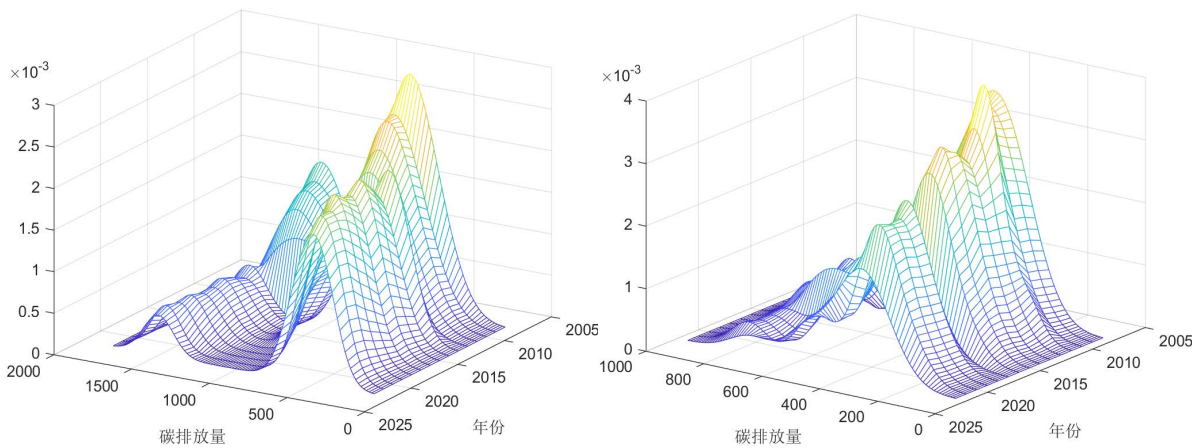
2) 分区域来看, 四大地区的主峰位置均存在左移趋势, 意味着各地区的碳排放量逐年递增; 东部、东北部及西部地区的峰值逐年下降且宽度变宽, 说明这三个地区内的碳排放量水平存在差距, 中部地区起初就存在双峰现象, 2013 年起双峰现象得到缓解, 说明最初中部地区的碳排放量水平差异较大, 出现极化趋势, 2013 年后极化现象减弱, 东北部地区与中部地区相似, 均为本就存在双峰现象, 但与中部地区不同的是, 东北部地区的双峰现象并没有弱化趋势, 表明东北三省的碳排放量差异一直较为明显。从分布的延展性角度来看, 东部及西部地区均存在明显的左拖尾现象, 表明这两个地区存在碳排放量水平明显高于地区内其他区域的省份。



**Figure 2.** The dynamic evolution of the national carbon emission level  
**图 2.** 全国碳排放量水平动态演进



**Figure 3.** Dynamic evolution of carbon emission levels in the eastern and northeastern regions  
**图 3.** 东部、东北部地区碳排放量水平动态演进



**Figure 4.** Dynamic evolution of carbon emission levels in the central and western regions  
**图 4.** 中部、西部地区碳排放量水平动态演进

## 4. 碳排放影响因素研究

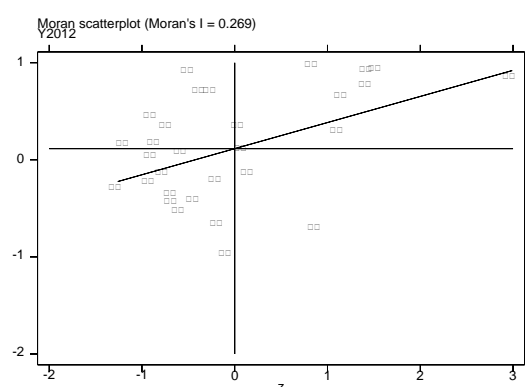
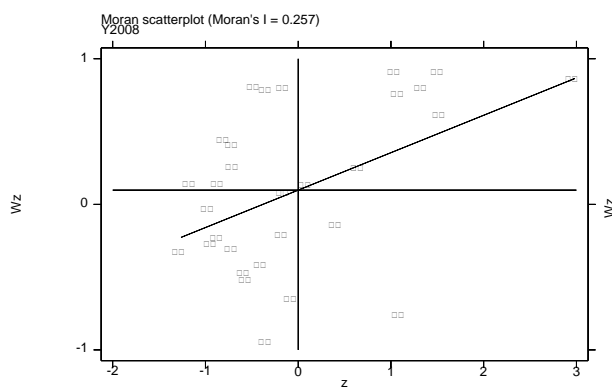
### 4.1. 空间自相关性

为了验证各个省份碳排放量水平的空间自相关性, 本文根据前文中得到的各省碳排放数据, 运用莫兰指数, 进行全局自相关检验, 得到莫兰指数值(表 2)及部分年份(2008 年、2012 年、2017 年、2022 年)的莫兰指数图(图 5)。结果显示, 研究期内碳排放量的全局自相关莫兰指数均为正值且通过 10% 的显著性检验, 说明我国碳排放量水平在空间上并不是无序分布的, 而是存在显著的空间正相关性, 即某个地区的碳排放量水平会受到邻近地区碳排放量水平的影响。此外, 根据莫兰指数图可以看出, 我国碳排放量水平存在着空间集聚特征, 绝大多数省份位于 H-H 和 L-L 聚集板块。

**Table 2.** 2008~2022 China's carbon emissions Moran Index

**表 2.** 2008~2022 我国碳排放量莫兰指数

年份	Moran's I	E(I)	Sd(I)	Z 值	P 值
2008	0.257	-0.034	0.117	2.485	0.006
2009	0.243	-0.034	0.117	2.377	0.009
2010	0.249	-0.034	0.117	2.431	0.008
2011	0.269	-0.034	0.118	2.577	0.005
2012	0.269	-0.034	0.117	2.587	0.005
2013	0.258	-0.034	0.116	2.511	0.006
2014	0.239	-0.034	0.115	2.368	0.009
2015	0.241	-0.034	0.115	2.396	0.008
2016	0.222	-0.034	0.114	2.253	0.012
2017	0.209	-0.034	0.114	2.144	0.016
2018	0.202	-0.034	0.114	2.071	0.019
2019	0.194	-0.034	0.115	1.994	0.023
2020	0.181	-0.034	0.114	1.894	0.029
2021	0.146	-0.034	0.114	1.594	0.056
2022	0.140	-0.034	0.113	1.545	0.061



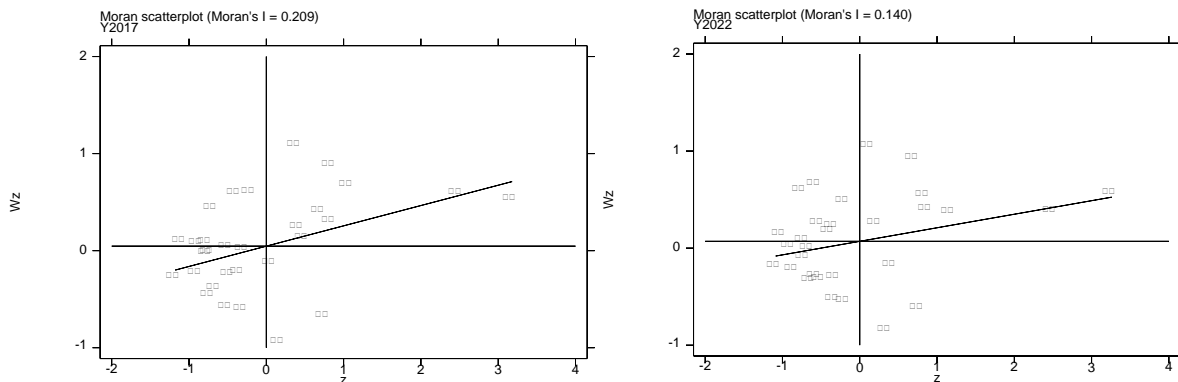


Figure 5. Moran index chart  
图 5. 莫兰指数图

### 4.2. 碳排放影响因素分析

1) 人均 GDP: 经济发展往往伴随着能源消费的增加, 而传统化石能源的消费增长势必会导致二氧化碳大量排放, 因此, 应将经济水平作为碳排放的首要影响因素进行研究, 本文选取人均 GDP 指标来衡量省域经济发展水平。

2) 城镇化率: 城镇化进程的加快必然需要更多的交通、建筑和各项基础设施的支撑, 而这些活动通常会增加二氧化碳的排放, 本文选取常住人口城镇化率衡量地区城镇化水平。

3) 科技发展水平: 科学技术的进步可以提高能源利用效率, 降低单位能源消耗产生的二氧化碳, 本文中用发明专利数来衡量地区科技发展水平。

4) 产业结构: 重工业和制造业通常会产生大量的二氧化碳, 面向服务业和高新技术产业转型, 会减少二氧化碳的排放, 文本选取第三产业产值与第二产业产值之比来衡量地区产业结构。

### 4.3. 模型构建与检验

一般常用的空间计量模型主要有空间杜宾模型(SDM)、空间滞后模型(SAR)、空间误差模型(SEM), 根据前文中空间相关性检验可知, 我国省域碳排放量之间存在显著的空间正相关性, 因此本文构建空间杜宾模型来考察各因素对碳排放量直接影响和空间溢出效应, 同时, 为了消除异方差, 将模型对数化:

$$\begin{aligned} \ln C_{it} = & \beta_0 + \rho W \ln C_{it} + \beta_1 \ln RGDP_{it} + \beta_2 \ln URB_{it} + \beta_3 \ln INV_{it} \\ & + \beta_4 \ln INST_{it} + \theta_1 W \ln RGDP_{it} + \theta_2 W \ln URB_{it} + \theta_3 W \ln INV_{it} \\ & + \theta_4 W \ln INST_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad \text{公式 4}$$

其中,  $\rho$  为被解释变量的空间滞后系数;  $W$  为空间权重矩阵, 本文采用空间邻接矩阵作为空间权重矩阵;  $\beta_1 \sim \beta_4$  分别为各解释变量的回归系数;  $\theta_1 \sim \theta_4$  分别为各解释变量的空间自回归系数;  $\mu_i$  为个体固定效应;  $\lambda_t$  为时间固定效应;  $\varepsilon_{it}$  为随机误差项。

本文通过 LM 检验、Hausman 检验、LR 检验等对模型数据进行空间计量模型适用性检验, 检验结果如表 3。根据检验结果, 选取时间固定效应的空间杜宾模型进行后续研究。

Table 3. Applicability test of the spatial Durbin model  
表 3. 空间杜宾模型的适用性检验

检验	统计量	P 值
LM-error	624.392	0.000

续表

R-LM-error	69.645	0.000
LM-lag	573.752	0.000
R-LM-lag	19.004	0.000
Hausman 检验	21.43	0.0109
LR 检验(个体效应)	-247.43	1.000
LR 检验(时间效应)	1259.98	0.000
稳健性 LR 检验(SAR)	77.62	0.000
稳健性 LR 检验(SEM)	51.53	0.000
模型选择		时间固定效应 SDM

#### 4.4. 空间杜宾模型回归分析

空间杜宾模型回归结果如表 4 所示。根据表 4, 可以得出:

1) 人均 GDP 的回归系数为 0.6763, 并通过了显著性水平为 1% 的显著性检验, 说明经济水平的提高对碳排放具有促进作用, 即人均 GDP 每提高 1%, 碳排放量就增加 0.6763%, 经济水平的提高往往伴随着更多的能源消耗, 从而会产生更多的二氧化碳。同时,  $W \times \ln RGDP$  的回归系数为 0.3261, 但并未通过显著性检验, 说明某省人均 GDP 水平的提高不会对相邻省份的碳排放产生影响。

2) 城镇化率的回归系数为-1.0802, 并通过了显著性水平为 1% 的显著性检验, 说明城镇化水平的提高对碳排放存在着抑制作用, 即城镇化率每增加 1%, 碳排放量就减少 1.0802%, 可能的原因是人们集中生活在城镇区域, 可以提高资源利用效率, 较之分散的能源消耗, 会产生较少的二氧化碳, 此外, 城镇区域往往具备完善的公共交通系统, 相对于个人车辆, 公共交通的碳排放量更少。同时,  $W \times \ln URB$  的回归系数为-0.8917, 但并未通过显著性检验, 表明某省城镇化水平的提高并不会对相邻省份的碳排放产生影响。

3) 科技发展水平的回归系数是 0.2594, 并通过了显著性水平为 1% 的显著性检验, 说明科技的发展对碳排放具有促进作用, 即科技水平每提高 1%, 碳排放就增加 0.2594%, 可能的原因是新的技术会产生新的消费模式和生活方式, 这种变化可能会导致能源需求增加, 从而提高碳排放量, 此外, 随着科技进步, 智能设备和数据设备被广泛应用, 会导致电力需求增加, 如果这些电力由化石能源产生, 那么会导致碳排放量增加。此外,  $W \times \ln INV$  的回归系数为-0.3288, 且通过了显著性检验, 说明某省科技水平的进步对邻省的碳排放存在抑制作用, 可能的原因是, 某省在可再生能源开发和利用方面的进步, 可能会影响邻省的能源结构, 促使其更快地转向低碳和可再生能源, 从而抑制碳排放。

4) 产业结构的回归系数是-0.9336, 并通过了显著性水平为 1% 的显著性检验, 说明产业结构的优化对于碳排放存在着抑制作用, 即产业结构每优化 1%, 碳排放量就减少 0.9336%, 产业结构优化通常意味着减少对高碳排放行业得依赖, 并促进绿色和低碳行业发展, 从而降低碳排放量。同时,  $W \times \ln INST$  的回归系数是-0.2764, 且通过了显著性水平为 10% 的显著性检验, 说明某省产业结构的优化对于邻省的碳排放存在抑制作用。

Table 4. Spatial Durbin model regression results

表 4. 空间杜宾模型回归结果

变量	回归系数	Z 统计量	P 值
$\ln RGDP$	0.6763	4.57	0.000
$\ln URB$	-1.0802	-3.39	0.001



续表

$\ln INV$	0.2594	12.01	0.000
$\ln INST$	-0.9336	-12.89	0.000
$W \times \ln RGDP$	0.3261	1.12	0.262
$W \times \ln URB$	-0.8917	-0.15	0.880
$W \times \ln INV$	-0.3288	-8.45	0.000
$W \times \ln INST$	-0.2764	-1.77	0.076
$\rho$	0.3636	6.25	0.000
$\sigma^2$	0.2237	14.87	0.000
$N$		450	
$R^2$		0.5786	

## 5. 结论及建议

本文首先采用碳排放系数法测度了 2008~2022 我国整体及 30 个省份的碳排放量,接着使用 kernel 密度估计分析了我国共同富裕水平的动态演进情况,最后,在对可能对碳排放量产生影响的因素进行分析的基础上,选择空间杜宾模型对我国碳排放量影响因素进行研究。主要研究结论如下:

1) 从整体特征看,在 2008 至 2022 年间,我国碳排放量整体呈上升趋势,在 2010 年首次突破了一百亿吨,年均增长率为 3.8%,但在“十二五”提出要强化节能优先战略后,增速已放缓。

2) 从空间特征来看,省域碳排放存在明显的空间正自相关性,集聚特征明显,碳排放量不平衡问题仍然显著,碳排放水平较高的省份集中在中部及东部沿海。

3) 从演进趋势看,我国东部、中部、东北部及西部地区的区域内碳排放量水平存在差距,且中部地区差异较大,存在极化现象,且东部、西部地区中存在碳排放量水平较高的省份。

4) 从影响因素看,经济发展水平、城镇化率、科技发展水平、产业结构均对碳排放量产生影响,经济发展水平、科技发展水平对碳排放具有促进作用,城镇化率、产业结构对碳排放具有抑制作用,同时,科技发展水平、产业结构亦存在空间溢出效应。

基础上述研究结论,本文提出以下政策建议:

1) 在高碳排放地区引入和推广低碳技术,推动能源生产和消费转型,鼓励高碳排放地区减少对煤炭等化石能源的依赖,加强不同区域间的合作和交流,共享成功案例和技术经验;通过社区活动、环保倡议等方式,激励公众参与碳减排行动。

2) 资助和奖励创新绿色技术、可再生能源技术,推动低碳技术的商业化,提高科技成果转化率,降低科技成果转化成本,改进工业生产工艺,提升材料利用率,减少废料、降低能耗,鼓励企业实施碳减排措施,采用节能设备和工艺,提升生产过程中的能源效率。

3) 支持传统高碳企业进行技术改造,推动其引入低碳生产工艺和设备,实现转型升级;鼓励发展低碳、环保相关的第三产业,如绿色旅游、生态农业等,促进经济结构的多样化和低碳转型。

4) 优化城市布局,完善城市交通系统,在城市中心区实施低排放区,限制高排放车辆的进入;大力推广绿色建筑,应用节能建筑材料,对老旧建筑进行节能改造,进行合理的资源分配,加快乡村基础设施建设,提高服务水平,减少城乡差距,通过政策引导和法规约束,促进城镇化进程中的环境保护。

## 参考文献

- [1] 张格渝, 廖明球, 杨军. 绿色低碳背景下中国产业结构调整分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(3): 116-122.

- [2] 王少剑, 田莎莎, 蔡清楠, 等. 产业转移背景下广东省工业碳排放的驱动因素及碳转移分析[J]. 地理研究, 2021, 40(9): 2606-2622.
- [3] 卢娜, 王为东, 王淼, 张财经, 陆华良. 突破性低碳技术创新与碳排放: 直接影响与空间溢出[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(5): 30-39.
- [4] 张华, 丰超. 创新低碳之城: 创新型城市建设的碳排放绩效评估[J]. 南方经济, 2021(3): 36-53.
- [5] 张磊. 城市化与碳排放[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [6] 李建豹, 黄贤金, 揣小伟, 孙树臣. 江苏省人口城镇化与能源消费 CO<sub>2</sub> 排放耦合协调度时空格局及影响因素[J]. 经济地理, 2021, 41(5): 57-64.
- [7] 刘浩东, 邱微, 陈爽. 黑龙江省能源碳排放核算及驱动因素分析[J]. 中国环境科学, 2024, 44(7): 4117-4126.
- [8] 郭文强, 谭乔阳, 雷明, 等. 中国农村碳排放强度时空演变趋势及影响因素分析[J]. 河南科技大学学报(社会科学版), 2024, 42(2): 87-96.