

“双碳”战略下中国低碳经济发展及影响因素分析

张卫, 陈伟, 江卉

重庆工商大学数学与统计学院, 重庆

收稿日期: 2024年9月12日; 录用日期: 2024年10月9日; 发布日期: 2024年11月26日

摘要

全球气候变化问题日益严峻, 中国作为全球最大的发展中国家, 积极响应国际社会的呼吁, 提出双碳战略, 大力推动低碳经济发展, 对双碳战略下中国低碳经济发展现状进行研究具有重要意义。通过ArcGIS对2004~2021年中国30省份碳排放强度进行绘制, 基于熵值法计算低碳经济绩效综合得分, 并构建低碳经济发展绩效评价指标体系, 应用莫兰指数和吉尔里指数对我国低碳经济发展的空间效应进行测度, 最后选择空间杜宾模型对发展绩效影响因子进行统计分析。结果表明: ① 中国30省份碳排放量增速呈先增再降后缓慢上升趋势, 2004~2021年各地碳排放强度均有所下降。宁夏碳排放强度最高, 绩效得分最低; 北京碳排放强度最低, 绩效得分最高。② 2004~2021年我国低碳经济绩效发展水平不高但省际差异显著, 碳排放量和工业化程度对低碳经济的影响为抑制效果, 城镇化率对低碳经济的影响为促进效果。

关键词

低碳经济, 绩效评价, 碳排放强度, 空间杜宾模型

Analysis of the Development and Influencing Factors of China's Low Carbon Economy under the Dual Carbon Strategy

Wei Zhang, Wei Chen, Hui Jiang

School of Mathematics and Statistics, Chongqing Technology and Business University, Chongqing

Received: Sep. 12th, 2024; accepted: Oct. 9th, 2024; published: Nov. 26th, 2024

Abstract

The global climate change issue is becoming increasingly severe. As the world's largest developing

country, China actively responds to the call of the international community, puts forward the strategic goal of “double carbon” and vigorously promotes the development of low-carbon economy. It is of great significance to study the current situation of China’s low-carbon economic development under the dual carbon strategy. Using ArcGIS, the carbon emission intensity of 30 provinces in China from 2004 to 2021 was plotted, and the comprehensive score of low-carbon economic performance was calculated based on the entropy method. A low-carbon economic development performance evaluation index system was constructed, and the spatial effects of low-carbon economic development in China were measured using the Moran index and Gilley index. Finally, the spatial Durbin model was selected for statistical analysis of development performance influencing factors. The results show that: ① The growth rate of carbon emissions in 30 provinces of China shows a trend of first increasing, then decreasing, and then slowly increasing. From 2004 to 2021, the carbon emission intensity in all regions has decreased. Ningxia has the highest carbon emission intensity and the lowest performance score; Beijing has the lowest carbon emission intensity and the highest performance score. ② From 2004 to 2021, the development level of low-carbon economy performance in China was not high, but there were significant inter-provincial differences. The impact of carbon emissions and industrialization level on the low-carbon economy was inhibitory, while the impact of urbanization rate on the low-carbon economy was promoting.

Keywords

Low Carbon Economy, Performance Evaluation, Carbon Emission Intensity, 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

随着全球气温的持续升高和气候变化的日益严峻，低碳经济发展成为全球各国的共识和必然选择。中国作为世界上最大的温室气体排放国之一，其低碳经济的发展对全球气候变化的影响至关重要。近年来，中国政府在推动低碳经济发展方面取得了显著成效，特别是在碳排放强度、能源结构调整、可再生能源利用等方面取得了显著进展。然而，低碳经济的发展仍存在产业结构不合理、能源利用效率低、低碳技术创新能力不足等问题，需要进一步优化低碳经济发展评价体系，加强低碳技术创新能力，调整产业结构[1][2]。

现有对低碳经济发展水平进行实证的研究成果有很多，但并没有一个确定的指标体系。众多学者从评价体系[3]、发展绩效水平静态和动态评价[4]-[6]、影响因素[7]-[11]等不同视角对低碳经济发展进行研究。在实证方面，学者们多采用综合指标法构建指标体系对不同地域单元的低碳经济发展绩效进行评价或影响因素分析[12]-[15]。从长期发展来看，经济发展不仅仅依靠化石能源消耗，还可通过节能减排等方式促进地区发展。

本文选取联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)提供的排放因子法计算碳排放量[16]，选取具有代表性的指标，采用熵值法对“双碳”战略目标下中国低碳经济发展绩效进行评价，以了解中国低碳经济发展的实际情况。建立空间杜宾模型探讨影响中国低碳经济发展的关键因素，为制定更加有效的低碳经济发展政策提供理论支持，并提出一系列针对性的政策建议。

2. 数据来源及指标体系

本文数据来源于中国统计年鉴-2023，因数据缺失，下文研究范围不包括西藏自治区、台湾省、香港

和澳门特别行政区。数据来源网址：<https://www.stats.gov.cn/sj/ndsjs/2023/indexch.htm>。(因中国统计年鉴数据仅统计至 2022 年，部分指标数据缺失，所以选取 2004~2021 年数据分析研究)

依据低碳经济发展的本质，坚持系统性、科学性、全面性的评价原则，结合国家相关政策及国内外学者[17][18]对低碳经济发展评价指标的研究成果。如表 1 所示，本文从经济、社会、环境、技术进步和能源消耗五方面构建了中国低碳经济发展综合评价指标体系。根据低碳经济发展绩效评价体系，能有效了解我国现阶段低碳经济发展水平。通过进一步分析，可以发现各地区的低碳发展差异，分析影响低碳经济发展绩效的主要因素，找到提升低碳经济发展绩效的侧重点，为政府提供决策依据。

Table 1. Performance evaluation index system for low-carbon economic development.

表 1. 低碳经济发展绩效评价指标体系

	指标选取	单位	影响作用
经济	国内生产总值	亿元	+
	人均地区生产总值	元/人	+
社会	城镇人均可支配收入	元	+
	就业人数	万人	+
	年末人口	万人	+
	城镇化率	百分比	+
环境	森林覆盖率	百分比	+
	碳排放量	百万吨	-
技术进步	工业化程度	百分比	-
能源消耗	能源消费总量	万吨标准煤	+
	碳排放强度	/	-

3. 低碳经济发展绩效评价

3.1. 低碳经济发展现状

我国正处于工业化发展过程，工业化和城市化进程加快，国民生产总值与能源产出总量的增长与能源消费总量具有强相关关系。即随着地区能源消费的增加，国民生产总值也随之增加。经济增长速度加快，同样也伴随着能源消耗速度过快的问题。然而，在发展初期，为追求经济的快速增长，能源消耗带来的环境问题在一定程度上通常会被忽略。

2000~2021 年中国能源消费总量情况见图 1。我国能源消费总量呈现上升趋势。在前期，我国能源消费总量增速较快。能源消费总量增速逐渐放缓。2004 年我国能源消费总量增速达到近年最高值 16.23%，2013 年能源消费总量增速降为-3.85%。随着我国经济快速发展，综合国力不断增强，能源消费总量规模变大。总体来看，我国能源消费总量增速呈先上升再下降，最后缓慢上升的趋势，能源消费得到更加合理地规划。

2004~2021 年我国能源消费结构变化见图 2。发展前期，作为我国的主要能源之一的煤炭在能源消费总量中占主导地位，在 2012 年以前，煤炭占比稳定在 70%以上并且呈小幅度的下降趋势。后期，煤炭消费占比显著下降，天然气和一次性电力及其它能源消费量占比逐渐上升。这说明我国正在进行绿色转型，

并且略有成效。随着绿色发展倡议的提出，2013年前后，我国的能源产业结构发生转变，绿色能源逐渐成为主流，天然气与一次性电力及其他能源消费量显著提高，我国能源消费结构趋于合理。



Figure 1. China's total energy consumption from 2000 to 2021

图 1. 2000~2021 年中国能源消费总量

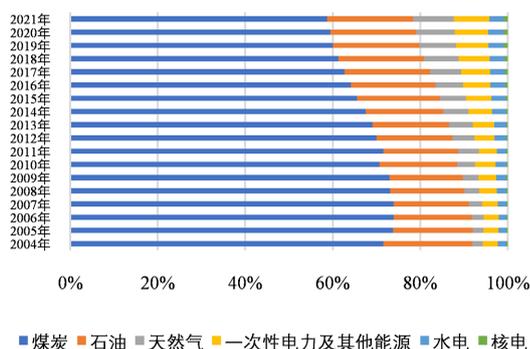


Figure 2. Changes in China's energy consumption structure from 2004 to 2021

图 2. 2004~2021 年我国能源消费结构变化

2004~2021 年我国人均碳排放量见图 3。2009 年人均碳排放量为 5.38 吨，碳排放量增速首次实现负增长，2010 年人均碳排放量增速又创新高，达到 15.99%。总体来看，人均碳排放量呈上升趋势，人均碳排放量增速先增加再放缓，由此可见我国低碳发展落实到位，低碳经济发展取得初步成效。



Figure 3. Per capita carbon emissions in China from 2004 to 2021

图 3. 2004~2021 年我国人均碳排放量

2004~2021 年各地碳排放强度见表 2。(由于数据量较大，表 2 仅展示了部分年份的数据，具体年份

为 04、10、16、21)。2004 年宁夏回族自治区碳排放强度最高, 达到 12.24, 平均碳排放强度为 1.54。2010 年各地平均碳排放强度为 0.84, 2016 年各地平均碳排放强度为 0.84, 2021 年各地平均碳排放强度为 0.83, 北京市碳排放强度最低, 达到了 0.20。总体来看, 2004 到 2021 年期间, 各地碳排放强度均有所下降, 北京市的碳排放强度一直为全国各地节能减排起到良好模范作用。

Table 2. Carbon emission intensity of various regions from 2004 to 2021
表 2. 2004~2021 年各地碳排放强度

地区	年份	2004 年	2010 年	2016 年	2021 年
北京市		1.4542827	0.7226454	0.3505448	0.1983643
天津市		2.5161637	1.4823173	0.8327796	0.9910515
河北省		4.4140684	3.3430296	2.5180792	2.1923216
山西省		7.5007534	4.6990203	3.6363889	2.7167939
内蒙古自治区		6.8180355	4.0680805	3.3434695	4.1112941
辽宁省		3.7506258	2.4855229	2.1597126	1.9782213
吉林省		3.5974783	2.2347331	1.362907	1.5460329
黑龙江省		2.9509699	2.1686523	1.8047518	1.9324722
上海市		1.8421983	1.1275423	0.6909834	0.4490869
江苏省		2.0770517	1.4238122	0.9601511	0.7026905
浙江省		1.8714041	1.3026344	0.792722	0.6015077
安徽省		3.2317598	2.0065227	1.5410982	0.8970162
福建省		1.7385463	1.3644719	0.7564114	0.6142487
江西省		2.5815355	1.6071167	1.1844022	0.8285534
山东省		2.6477978	1.9215014	1.2692863	1.1398431
河南省		3.24478	2.2241635	1.2884824	0.8214626
湖北省		3.2348716	2.1146469	0.9789019	0.721923
湖南省		2.2215253	1.6345836	0.9764702	0.6748865
广东省		1.5741048	0.962987	0.6558852	0.506343
广西壮族自治区		2.521394	1.5962879	1.1835822	1.1641967
海南省		2.1472812	1.4011105	0.983287	0.7050395
重庆市		2.5352438	1.8347646	0.8826199	0.5925248
四川省		2.7438245	1.5454077	0.9688841	0.5847674
贵州省		7.6656354	4.1811464	2.131037	1.3573842
云南省		1.9050962	2.5097898	1.2434365	0.8633371
陕西省		3.3908113	2.2250953	1.4035799	1.1378969
甘肃省		4.6113693	3.0962098	2.1378781	1.8495255
青海省		4.0820141	2.3704504	2.20299	1.6847082
宁夏回族自治区		12.242599	5.5503777	4.4023666	5.2034936
新疆维吾尔自治区		4.0848094	2.9818725	3.8717526	3.2577679

3.2. 各省低碳经济发展综合得分

3.2.1. 方法及步骤

首先,对原始数据进行标准化处理,消除量纲、数量级以及指标的正负取向对评价结果的影响。指标的正负取向见指标体系。其次,通过熵值法计算各指标的熵值来确定它们在低碳经济评价中的权重。熵值越小,说明该指标在综合评价中的差异性越大,对评价结果的影响也就越大,应赋予较大的权重;反之,熵值越大,说明该指标在综合评价中的差异性越小,对评价结果的影响也就越小,应赋予较小的权重。最后,基于各指标的权重和标准化后的数据,熵值法可以计算出低碳经济评价的综合得分。这个得分能够客观反映各省在低碳经济方面的表现,为政策制定和决策提供科学依据。各省综合得分结果如表3、图4所示。

Table 3. Performance score of China's low-carbon economy development from 2004 to 2021

表 3. 2004~2021 年中国低碳经济发展绩效得分

省份	2004 年	2010 年	2016 年	2021 年	省份	2004 年	2010 年	2016 年	2021 年
北京	0.37945	0.3718	0.3898	0.3682	湖北	0.13767	0.1391	0.1513	0.1628
天津	0.19366	0.2129	0.2114	0.1757	湖南	0.16453	0.1614	0.1613	0.1671
河北	0.13621	0.1375	0.1196	0.1167	广东	0.28497	0.2624	0.2586	0.2633
山西	0.08209	0.0804	0.0813	0.0795	广西	0.15367	0.1493	0.1392	0.1339
内蒙古	0.12407	0.1555	0.1443	0.1084	海南	0.14202	0.1433	0.1447	0.1570
辽宁	0.14856	0.1736	0.1526	0.1328	重庆	0.1232	0.1298	0.1407	0.1551
吉林	0.1346	0.1353	0.1255	0.1044	四川	0.14456	0.138	0.142	0.1624
黑龙江	0.12179	0.1237	0.1207	0.1098	贵州	0.08739	0.0858	0.0973	0.1204
上海	0.35559	0.337	0.3562	0.3349	云南	0.14267	0.1167	0.1268	0.1456
江苏	0.19712	0.2413	0.2564	0.2512	西藏	0.14785	0.1144	0.1021	0.1246
浙江	0.28746	0.2796	0.2768	0.2729	陕西	0.10195	0.1164	0.1187	0.1245
安徽	0.12221	0.1155	0.1188	0.145	甘肃	0.08826	0.0681	0.0737	0.0842
福建	0.19993	0.1944	0.198	0.2066	青海	0.09253	0.0927	0.0824	0.0797
江西	0.12544	0.1213	0.1219	0.1382	宁夏	0.06041	0.0777	0.0708	0.0638
山东	0.18308	0.2023	0.2041	0.1857	新疆	0.09739	0.0826	0.0795	0.0778
河南	0.12938	0.1298	0.1233	0.1374					

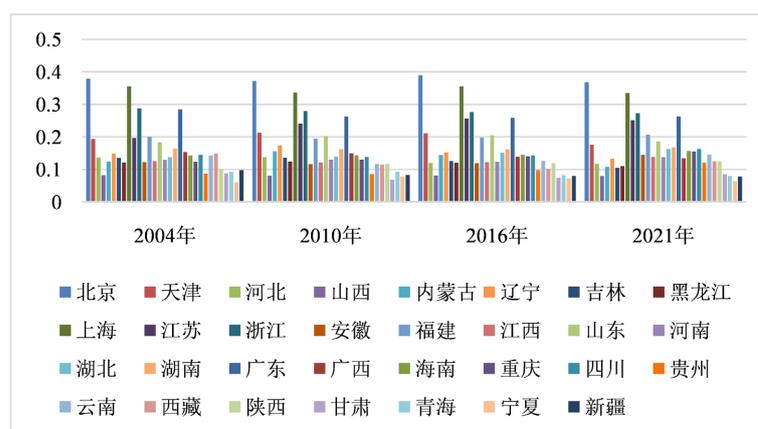


Figure 4. Comprehensive evaluation scores of each province from 2004 to 2021

图 4. 2004~2021 年各省综合评价得分

3.2.2. 绩效得分分析

根据表 3 及图 4 可知,北京市的综合得分遥遥领先,得分排在前五的省份是:北京、上海、浙江、广东和江苏,全部位于我国东部地区。后五位得分省份是:宁夏、甘肃、新疆、青海、山西,这几个省份都位于中西部地区,存在着天然的生态环境脆弱问题。2004~2021 年北京绩效得分最高,从 2004 年得分 0.379,变为 2021 年得分 0.368,其碳排放强度处于各地最低。宁夏绩效得分最低,从 2004 年得分 0.088,变为 2021 年得分 0.064,其碳排放强度处于各地最高,碳排放强度高,绩效得分低,符合认知规律。

以下从经济、社会、环境、技术进步和能源消耗五个方面对各省碳排放强度变化趋势作具体分析。

(1) 经济方面:位于东部的省份,如上海、北京等,在低碳经济综合评价中得分较高。这些省份经济发达,产业结构优化,绿色低碳产业占比高,为低碳经济发展提供了良好的经济基础。同时,这些省份的市场化程度高,对环保技术的研发和推广更为敏感和积极,有利于推动低碳技术的创新和应用。相比之下,中西部地区的一些省份得分较低。这些地区经济相对滞后,产业结构偏重,能源密集型产业占比较大,对低碳经济发展的推动力度有限。

(2) 社会方面:北京、上海等排名靠前的省份在推广节能减排、垃圾分类、绿色出行等方面取得了显著成效,为低碳经济发展营造了良好的社会氛围。然而,得分较低的省份在低碳社会建设方面仍需加强,公众环保意识有待提高,低碳生活方式普及程度较低。

(3) 环境方面:环境保护是低碳经济发展的重要组成部分。得分较高的省份政府对环境保护的投入较大,在治理空气污染、水污染等方面取得了积极进展,为低碳经济发展提供了良好的环境基础。相反,得分较低的省份在环境保护方面存在一些问题,如污染排放控制不严、环境治理力度不足等,这些问题对低碳经济发展构成了一定的挑战。

(4) 技术进步方面:技术进步是推动低碳经济发展的关键力量。在低碳技术研发和应用方面,东部地区的省份表现较为突出,得分较高。这些省份拥有较多的高校和科研机构,对低碳技术的研发和推广具有较强的实力。同时,这些省份的企业在低碳技术创新和应用方面也具有较高的积极性。而一些得分较低的省份在低碳技术研发和应用方面存在短板,需要加强技术创新能力,推动低碳技术的研发和应用。

(5) 能源消耗方面:得分较高的省份在能源消费结构、能源利用效率等方面表现较好,能够有效控制碳排放。这些省份通常注重发展清洁能源,减少对化石能源的依赖,同时加强能源管理和节能工作。相比之下,得分较低的省份在能源消耗方面仍有较大的改进空间,需要进一步优化能源消费结构,提高能源利用效率,降低碳排放强度。

4. 低碳经济发展绩效影响因素分析

4.1. 空间自相关检验

使用空间计量模型之前,需先评估变量之间的空间依赖性。首先采用莫兰指数(Moran's I) [19],它是最为常见的评估方式,其计算公式如下:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (1)$$

其中, n 代表研究样本的地区总数, $n=30$; i 和 j 分别表示两个空间截面; $S^2 = 1/n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ 是样本方差, w_{ij} 是空间权重矩阵的第 (i,j) 个元素。 I 是空间自相关系数,且 $I \in [-1,1]$ 。

测量空间自相关性的另一种方法是吉尔里指数 C (Geary's C):

$$C = \frac{(n-1) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - x_i)^2}{2 \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \right) \left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]} \quad (2)$$

其中，C 的取值范围一般介于[0, 2)，C > 1 为负相关，C < 1 为正相关，C = 1 为不相关。本文分别采用 Moran's I 指数和 Geary's C 指数检验变量的空间相关性，验证结果见表 4。由表 4 可知，除 2015 年 2005~2021 年之间低碳经济的两个指数 1% 的显著性水平下均通过检验，表明低碳经济在区域之间具有较强的空间依赖性。

Table 4. Moran's and Geary's for low carbon economic development

表 4. 低碳经济发展莫兰指数和吉尔里指数

时间	莫兰指数	P 值	吉尔里指数	P 值	时间	莫兰指数	P 值	吉尔里指数	P 值
2005	0.472	0.000	0.472	0.000	2014	0.439	0.000	0.490	0.000
2006	0.474	0.000	0.440	0.000	2015	0.446	0.000	0.482	0.000
2007	0.476	0.000	0.446	0.000	2016	0.461	0.000	0.460	0.000
2008	0.475	0.000	0.448	0.000	2017	0.473	0.000	0.473	0.000
2009	0.456	0.000	0.466	0.000	2018	0.477	0.000	0.440	0.000
2010	0.462	0.000	0.476	0.000	2019	0.461	0.000	0.444	0.000
2011	0.472	0.000	0.463	0.000	2020	0.471	0.000	0.436	0.000
2012	0.459	0.000	0.477	0.000	2021	0.509	0.000	0.404	0.000
2013	0.435	0.000	0.499	0.000					

4.2. 模型构建

空间计量模型是一种将空间结构引入计量模型中的统计模型，主要研究自变量和因变量在空间作用下的相互影响关系，能够更为准确地描述解释变量和被解释变量之间的关系。常见的空间计量模型主要有三种：空间滞后模型(SLM)、空间误差模型(SEM)以及空间杜宾模型(SDM) [20]。其中，学者们对空间杜宾模型的使用较为广泛，因为空间杜宾模型包含的信息较其他两个模型多，综合性较强，可以同时反映本地区解释变量和相邻地区解释变量、被解释变量对本地区被解释变量的影响，模型表达式如下：

$$Y_{it} = \rho \sum_{i=1}^n W_{ij} Y_{jt} + \beta X_{it} + \sum_j W_{ij} X_{jt} \theta + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

其中， Y_{it} 为被解释变量(碳排放)， i 表示地区、 t 代表时间， X_{it} 表示被解释变量(产业结构、碳排放强度、城镇化率、人口规模、开放程度)， W_{ij} 表示空间权重矩阵位置为 (i,j) 的元素， ρ 和 θ 表示待估计参数， ε_{it} 为随机误差项。 ρ 表示空间自回归系数，反映空间溢出效应，如果该系数显著，说明各地区间存在空间相关性。

4.3. 变量选择

低碳经济绩效得分为被解释变量，解释变量的选取需要考虑其他因素对低碳经济的影响。此处参考

前文综述部分低碳经济的其他影响因素,最终选取碳排放强度(C)、城镇化(urban)、人口(pop)、工业化程度(indus)、对外开放程度(open)四个控制变量。城镇化(urban):城镇化会带来相应的生产活动,从而消耗能源,增加碳排放量。根据前文综述内容,许多学者认为城镇化是影响低碳经济的重要因素,因此本文将城镇人口占总人口比重作为衡量城镇化(urban)的标准;人口(pop):为了更好地检验科技创新水平对低碳经济的空间影响,本文研究过程中引入了人口总量进行衡量;工业化程度(indus):许多研究都显示,第二产业是二氧化碳排放的重要来源,因此对低碳经济、碳减排等相关研究中,都将工业化程度作为控制变量[21]。本文选取第二产业增加值占国民生产总值的百分比来衡量工业化程度(indus);对外开放程度(open):大多数文献衡量对外开放程度都选取外商直接投资额这一指标,本文选用这一指标来衡量。有研究表明,地区的外商直接投资额增加可以促进产业结构的优化和资本的形成,对于该地区低碳经济的发展有积极的作用;也有研究表明,地区的外商直接投资额增加可能会加剧工业生产及碳排放,对低碳经济起到抑制的作用。为了能够充分反映中国科技创新与低碳经济之间的相关关系,选取2005~2021年我国30个省份共510个样本的面板数据进行实证分析。为确保估计过程的科学性,将科技创新指标体系中的变量及所有控制变量均取对数处理。

4.4. 模型检验

根据前文的空间自相关性分析,全国各省市的低碳经济呈聚集分布,可以采用空间计量模型进行分析。进行LM检验、LR检验以及Hausman检验,选择最合理的空间计量模型。检验结果见表5。由表5可知,LM检验、LR检验结果均显著,说明应该选择空间杜宾模型。

Table 5. Spatial econometric model validation

表 5. 空间计量模型检验

检验方法	统计量	P 值
LMEError	429.768	0.000
LMEError (robust)	403.624	0.000
LMlag	45.067	0.000
LMlag (robust)	18.923	0.000
Lr_lag test	166.60	0.000
Lr_error test	92.35	0.000

4.5. 实证结果分析

特征测度结论表明30省份低碳经济间的空间自相关特征非常显著,不能忽视,将空间相关性特征引入计量模型构建空间面板模型。首先,对2005~2021年影响碳排放强度变动的因素进行参数估计,结果见表6。SDM模型拟合优度的判定系数为0.9576,较普通面板模型有了进一步改善;对数似然函数值log-L也有大幅度改进。在1%置信水平下,Wald检验(Wald-lag和Wald_error统计量)和LR检验(LR_lag和LR_error统计量)中四个统计量均显著,SDM模型不能退化为SEM或SLM模型。

由上表可知,碳排放量对低碳经济的影响系数为-0.196且在百分之二的水平下显著。说明本地区碳排放量对低碳经济的影响为抑制效果。其原因在于高碳排放往往与高能耗密切相关,过度依赖传统高碳能源,如煤炭,石油等等,会导致能源供应安全问题。同时能源成本可能随着碳排放控制政策的实施而增加,给企业经营和发展带来了挑战。城镇化率对低碳经济的影响系数为0.547,在百分之二的水平下显

著。工业化程度对低碳经济的影响系数为-0.265,说明本地区的工业化程度对低碳经济的影响为抑制作用。其原因在于工业化程度高的地区通常拥有庞大的重工业和制造业部门,这些部门往往消耗大量的能源并产生大量的碳排放,而低碳经济更加注重发展清洁能源,高科技产业和服务业等低碳产业,以降低对环境的影响。

Table 6. Results of spatial Durbin model

表 6. 空间杜宾模型结果

VARIABLES	(1) Main	(2) Wx	(3) Spatial	(4) Variance
lnC	-0.196*** (0.0138)	0.0387 (0.0284)		
lnopen	0.00513 (0.00590)	-0.0228 (0.0170)		
lnurban	0.547*** (0.0469)	-0.0404 (0.0850)		
lnpop	-0.00699 (0.0539)	-0.111 (0.115)		
lnus	-0.265*** (0.0212)	-0.0154 (0.0448)		
rho			0.288*** (0.0510)	
sigma2_e				0.00165*** (0.000104)
Observations	510	510	510	510
R-squared	0.231	0.231	0.231	0.231
Number of id	30	30	30	30

注: *、**、***分别表示在 10%、5%、1%的水平下显著。

直接效应和间接效应测算结果见表 7。结果表明,碳排放强度、城镇化率、工业化程度对低碳经济的直接效应分别为-0.197、0.561、-0.271。其中城镇化率对其产生的是正向影响,而碳排放强度、工业化程度对其产生负面影响,且都在 1%的水平下显著,说明碳排放强度、城镇化率、工业化程度是影响低碳经济发展的重要因素。城镇化率每变动一个百分点将引起本地区低碳经济上升 0.56 个百分点,而碳排放强度每变动一个百分点,将引起本地区低碳经济下降 0.197 个百分点,工业化程度每变动一个百分点,将引起本区域低碳经济下降 0.27 个百分点。此外,工业化程度的间接影响系数为-0.114,也在百分之一的水平下显著这意味着本省的工业化程度对相邻区域低碳经济发展具有负向的空间溢出效应,即本省工业化程度每变动一个百分点,将会引起相邻区域低碳经济发展程度下降 0.114 个百分点。

Table 7. Effect decomposition of spatial econometric models
表 7. 空间计量模型的效应分解

VARIABLES	(1) LR_Direct	(2) LR_Indirect	(3) LR_Total
lnC	-0.197*** (0.0141)	-0.0212 (0.0339)	-0.218*** (0.0368)
lnopen	0.00339 (0.00619)	-0.0273 (0.0231)	-0.0239 (0.0266)
lnurban	0.561*** (0.0441)	0.148 (0.106)	0.709*** (0.113)
lnpopu	-0.0126 (0.0517)	-0.132 (0.137)	-0.145 (0.136)
Indus	-0.271*** (0.0214)	-0.114** (0.0545)	-0.385*** (0.0667)
Observations	510	510	510
R-squared	0.231	0.231	0.231
Number of id	30	30	30

注：*、**、***分别表示在 10%、5%、1%的水平下显著。

5. 结论与建议

5.1. 主要结论

本文通过熵值法测算低碳经济绩效得分，北京市的低碳经济绩效综合得分遥遥领先，得分排在前五位的省份是：北京、上海、浙江、广东和江苏，全部位于我国东部地区。得分排在后五位的省份是：宁夏、甘肃、新疆、青海、山西，都位于我国中西部地区，存在天然的生态环境脆弱问题。2004~2021 年北京绩效得分最高，其碳排放强度最低。宁夏绩效得分最低，其碳排放强度排名最高，符合认知规律。建立 SDM 模型，结果显示，碳排放强度、城镇化率和工业化程度是影响低碳经济发展的关键因素。

1. 地区碳排放量对低碳经济的影响为抑制效果。其原因在于高碳排放往往与高能耗密切相关，过度依赖传统高碳能源，如煤炭，石油等。高碳排放量会导致大气污染，全球气候变暖等环境问题加重，影响生态系统平衡，增加自然灾害风险，对人类健康和社会稳定造成负面影响，从而制约低碳经济发展。

2. 城镇化率对低碳经济的影响为促进效果。其原因在于城市化通常伴随着更有效的能源利用，包括更好的能源基础设施和更高效的能源使用模式，城市化可以推动可再生能源的应用，降低能源消耗，进而促进低碳经济的发展，为可持续发展提供支持。

3. 工业化程度对低碳经济的影响为抑制作用。其原因在于工业化程度高的地区通常拥有庞大的重工业和制造业部门，这些部门往往消耗大量的能源并产生大量的碳排放，相比之下，低碳经济更加注重发展清洁能源，高科技产业和服务业等低碳产业，以降低对环境的影响。

综上所述，中国各省在低碳经济综合评价得分情况下呈现出显著的区域差异。为了推动全国范围内的低碳经济发展，需要各地根据自身实际情况，制定针对性的政策措施，加强区域合作与交流，共同推动中国低碳经济的健康发展。

5.2. 相关建议

1. 经济方面：建立去中心化的区块链碳排放市场，采用智能合约技术实现碳交易的透明、高效和安全，激励企业采取更多的低碳行为。发展以区块链技术为基础的绿色金融平台，实现对环保项目的去中心化融资和跟踪，吸引更多的社会资本流入低碳领域。

2. 社会层面：建立基于区块链技术的社区合作平台，促进居民间的能源分享和碳减排合作，实现社区层面的低碳生活和能源共享。开发创新数字化教育工具和平台，通过虚拟现实等手段，提高公众对低碳经济的认知和理解。

3. 环境方面：利用人工智能和大数据技术监测和预测生态系统变化，实现精准的生态保护和修复，促进生态系统的健康发展。发展智慧城市技术，通过智能交通管理、节能建筑等措施，实现城市资源利用的优化和碳排放的减少。

4. 技术进步：加大对碳捕集和利用技术的研发投入，探索新型的碳捕集材料和工艺，降低碳捕集成本，实现大规模的碳减排。利用人工智能优化能源系统运行，提高能源利用效率和系统稳定性，推动智能能源生产、转运和消费。

5. 能源消费：建立去中心化的区块链能源交易平台，实现分布式能源生产者和消费者之间的直接交易，促进可再生能源的广泛应用和消费。开发智能化的节能设备和系统，利用物联网技术实现设备间的智能控制，提高能源利用效率，降低能源消耗。

综上所述，研究低碳经济需要综合考虑政策、技术、产业、市场和社会等多个方面的因素，提出全面的建议和解决方案，促进经济、社会 and 环境的可持续发展，以推动经济向低碳环保的方向发展。

基金项目

重庆工商大学研究生科研创新项目“几类常用张量分解方法在航班延误中的应用研究”(yjscxx2024-284-246)。

参考文献

- [1] 付允, 马永欢, 刘怡君, 等. 低碳经济的发展模式研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(3): 14-19.
- [2] 周宏春. 中国低碳经济的发展重心[N]. 四川日报, 2010-01-21(07).
- [3] 付加锋, 庄贵阳, 高庆先. 低碳经济的概念辨析及评价指标体系构建[J]. 中国人口资源与境, 2010, 20(8): 38-43.
- [4] 马军, 周琳, 李薇. 城市低碳经济评价指标体系构建——以东部沿海6省市低碳发展现状为例[J]. 科技进步与对策, 2010, 27(22): 165-167.
- [5] 杨颖. 四川省低碳经济发展效率评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(6): 52-56.
- [6] 周泽炯, 胡建辉. 基于 Super-SBM 模型的低碳经济发展绩效评价研究[J]. 资源科学, 2013, 35(12): 2457-2466.
- [7] 刘朝, 赵涛. 中国低碳经济影响因素分析与情景预测[J]. 资源科学, 2011, 33(5): 844-850.
- [8] 王喜, 秦耀辰, 鲁丰先, 等. 黄河中下游地区主要省份低碳经济发展水平的时空差异研究[J]. 地理科学进展, 2013, 32(4): 505-513.
- [9] 揭懋汕, 郭洁, 陈罗焯, 等. 碳约束下中国县域尺度农业全要素生产率比较研究[J]. 地理研究, 2016, 35(5): 898-908.
- [10] 谢志祥, 秦耀辰, 沈威, 荣培君. 中国低碳经济发展绩效评价及影响因素[J]. 经济地理, 2017, 37(3): 1-9.
- [11] 朱巧娴, 梅昀, 陈银蓉, 等. 基于碳排放测算的湖北省土地利用结构效率的 DEA 模型分析与空间分异研究[J]. 经济地理, 2015, 35(12): 176-184.
- [12] 王怡. 基于突变级数法的中国低碳经济复杂系统综合评价[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(5): 525-532.
- [13] 黎孔清, 陈银蓉, 陈家荣. 基于 ANP 的城市土地低碳集约利用评价模型研究——以南京市为例[J]. 经济地理, 2013, 33(2): 156-161.

- [14] 秦耀辰, 张丽君, 鲁丰先, 等. 国外低碳城市研究进展[J]. 地理科学进展, 2010, 29(12): 1459-1469.
- [15] 王媛, 程曦, 殷培红, 等. 影响中国碳排放绩效的区域特征研究——基于熵值法的聚类分析[J]. 自然资源学报, 2013, 28(7): 1106-1116.
- [16] 荣培君, 杨群涛, 秦耀辰, 等. 中国省域能源消耗碳排放评价[J]. 地理科学进展, 2016, 35(4): 487-495.
- [17] 王晓珊. 内蒙古低碳经济发展绩效评价及影响因素分析[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古财经大学, 2018.
- [18] 徐军委, 刘志华. 京津冀地区城市绿色发展评价及空间效应研究——基于空间杜宾模型的实证研究[J]. 生态经济, 2022, 38(8): 80-87.
- [19] 惠宁, 白思. 互联网, 空间溢出与文化产业发展——基于省域面板数据的空间计量分析[J]. 统计与信息论坛, 2021, 36(1): 100-107.
- [20] 赵林, 刘焱序, 曹乃刚, 等. 中国包容性绿色效率时空格局与溢出效应分析[J]. 地理科学进展, 2021, 40(3): 382-396.
- [21] 牛宝春, 崔光莲, 张喜玲. 科技创新对低碳经济的影响研究——基于省际面板数据的实证分析[J]. 技术经济与管理研究, 2022(1): 43-48.