

山东省县域碳排放时空格局及影响因素研究

王林晓, 何传涛, 吴 军

曲阜师范大学, 地理与旅游学院, 山东 日照

收稿日期: 2023年5月29日; 录用日期: 2023年8月8日; 发布日期: 2023年8月18日

摘 要

论文基于1998~2017年山东省136个县域碳排放数据, 采用自然断点法、SLOPE倾值法、空间自相关分析和时空地理加权回归模型, 对山东省县域碳排放时空格局及影响因素进行分析。研究表明: 1998~2017年寿光市碳排放增长速率最快。山东省县域碳排放在空间上呈现东北高西南低的格局。山东省县域碳排放量呈现为显著的空间集聚现象, 从整体上呈现一个上升后下降的趋势。即墨区、胶州市、平度市、莱西市、垦利区、广饶县、莱州市7个城市, 存在“高碳锁定”现象。各影响因素具有较强的时空异质性, GDP、产业结构、人口规模和技术水平对各县域碳排放发挥促进作用; 城镇化水平和财政投入对不同时期不同县域的碳排放影响不同, 就回归系数平均值而言, 城镇化水平对碳排放发挥抑制作用, 而财政投入对碳排放发挥促进作用。该研究结果从一定程度上可以为山东省制定地区化、差异化、量化的减排政策提供科学依据, 促进山东省乃至全国早日实现碳达峰、碳中和目标。

关键词

碳排放, 空间自相关, 影响因素, 县域, 山东省

Study on the Spatiotemporal Pattern and Influencing Factors of Carbon Emissions in Counties of Shandong Province

Linxiao Wang, Chuantao He, Jun Wu

College of Geography and Tourism, Qufu Normal University, Rizhao Shandong

Received: May 29th, 2023; accepted: Aug. 8th, 2023; published: Aug. 18th, 2023

Abstract

Based on carbon emission data from 136 counties in Shandong Province from 1998 to 2017, this paper uses natural breakpoint method, SLOPE tilt method, spatial autocorrelation analysis, and

GTWR model to analyze the spatiotemporal pattern and influencing factors of carbon emissions in counties in Shandong Province. Research shows that Shouguang City experienced the fastest growth rate of carbon emissions from 1998 to 2017. The carbon emissions of counties in Shandong Province show a spatial pattern of high in the northeast and low in the southwest. The carbon emissions of counties in Shandong Province show a significant spatial agglomeration phenomenon, showing an overall trend of increasing and then decreasing. Seven cities, including Jimo District, Jiaozhou City, Pingdu City, Laixi City, Kenli District, Guangrao County, and Laizhou City, have a phenomenon of “high carbon lock-in”. Each influencing factor has strong spatiotemporal heterogeneity, and GDP, industrial structure, population size, and technological level play a promoting role in promoting carbon emissions in each county; The level of urbanization and financial investment have different impacts on carbon emissions in different counties during different periods. In terms of the average regression coefficient, the level of urbanization plays an inhibitory role in carbon emissions, while financial investment plays a promoting role in carbon emissions. To some extent, the research results can provide a scientific basis for Shandong Province to formulate regionalized, differentiated and quantitative emission reduction policies, and promote Shandong Province and even the whole country to achieve the goal of carbon peak and carbon neutrality as soon as possible.

Keywords

Carbon Emissions, Spatial Autocorrelation, Influencing Factors, County Level, Shandong Province

Copyright © 2023 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

长期以来,我国的能源结构是以化石能源为主,因此在经济快速发展中,化石能源消耗量也在迅猛增长,导致碳排放剧增。作为世界最大的碳排放国,中国生态环境保护任务任重道远。2020年9月,我国提出碳达峰、碳中和目标,要实现这一目标,不仅需要进行国家层面的系统性变革,更需要区域层面采取具体行动,分解落实国家达峰任务。自2003年以来,山东省一直是中国最大的省域二氧化碳排放地。因此,从区域角度研究山东省碳排放的时空格局及其影响因素,对制定差异化区域减碳政策和发展绿色低碳经济具有极其重要的意义。

近年来,国内外关于碳排放的时空格局及影响因素的研究主要集中在国家尺度、区域尺度及城市尺度,研究内容主要包括碳排放的估算方法、碳排放时空格局、碳排放影响因素等。由于碳排放数据可获得性较差,大部分关于碳排放的时空分布特征研究主要是以国家尺度和区域尺度为主,如Gregg等对北美的碳排放进行时空格局研究[1]。方叶兵等按中国东、中、西部三大地带划分来探讨石油终端利用碳排放的空间分异[2]。随着应用技术的提高,近几年关于县域尺度的碳排放时空格局研究也越来越多,如周玄德等基于线性回归模型、Hurst指数等方法,对湖北省各县域碳排放空间格局演变特征进行研究[3]。莫惠斌等利用空间面板模型、空间自相关分析和空间马尔科夫链,研究了2000~2017年黄河流域县域碳排放时空格局与空间效应[4]。

针对于碳排放影响因素的研究,多数学者认为人口数量、国内生产总值、能源强度、产业结构、城市化水平等因素对碳排放的总量和时空分布有着显著的影响,如关敏捷等分析了山西省能源碳排放影响因素,结果表明,人口因素和能源结构对山西省能源碳排放的影响较大[5]。韩媛媛等认为能源结构、能

耗强度、固定资产投资、轻重工业比值对京津冀地区工业能耗 CO_2 排放量有一定影响[6]。随着科学技术的进步,众多学者开始对碳排放影响因素进行更精细化的研究,如 Wang 等对中国城市进行影响因素分析,表明私家车拥有量对碳排放产生积极影响[7]。常青等对河南省农业碳排放影响因素进行研究,认为农业从业人口、农业机械总动力、农村居民人均可支配收入、财政教育支出是农业碳排放空间分异的关键因素[8]。

从更精细化的角度分析碳排放的时空格局特征和影响因素,可以更好地为制定和实施差异化的碳减排政策和措施提供依据。上述学者对碳排放的研究已取得了一定的进展,但是研究尺度大多集中在全国、省域和市域尺度,因此细化到县域尺度对碳排放的研究至关重要。山东省是我国的重工业大省、能耗大省和碳排放大省,经济社会发展表现出高投入、高能耗、高排放、高污染的粗放型经济特征[9]。此外山东省各区县由于地理位置、经济状况和资源禀赋等各不相同,其碳排放也存在着较大的差异,论文基于山东省 136 个区县碳排放数据,利用 SLOPE 倾值法、空间自相关和时空地理加权回归等方法,探讨了山东省县域碳排放的时空格局特征及影响因素,研究结果可以为山东省制定地区化、差异化、量化的减排政策提供科学依据,以期促进山东省乃至全国早日实现碳达峰、碳中和目标。

2. 研究方法与数据来源

2.1. 研究区概况

山东省目前共包括县级政区 136 个,其中市辖区 58 个、县级市 26 个、县 52 个,论文以山东省人民政府发布的最新行政区划为准[10],对山东省 136 个县域进行碳排放研究(图 1)。



Figure 1. Geographical distribution of counties in Shandong Province

图 1. 山东省县域地理分布情况

山东省的地理坐标为北纬 34°22.9'~38°24.01'、东经 114°47.5'~122°42.3'，其位于中国沿海、黄河下游区域，境内分为半岛与内陆两大部分，其中山东半岛是全国最大的半岛，北与辽东半岛隔海相望；内陆部分与安徽、江苏、河南、河北四省相邻，全省陆域面积为 15.58 万平方公里。经初步核算，山东省 2022 年共实现地区生产总值 87435.1 亿元，比 2021 年增长 3.9%，其中，第二产业增加值达 35014.2 亿元，较去年增加 4.2%，建筑业总产值为 17559.6 亿元，较上年增长 7%。以 2020 年为例，山东能源消费总量达 41845 万吨标准煤，约占全国能源消费量的 8.4%，工业能耗更是占据了总能源消费的 75.6%，使得山东成为全国能源消费量最高的省份之一，同时这意味着山东省在推进碳减排、产业转型等方面需要付出更多努力，才能实现碳达峰、碳中和等目标。

2.2. 数据来源

当前县域能源数据难以获取，且碳排放数据匮乏，关于县级尺度的碳排放研究相对较少，有待进一步丰富。目前在学术界采用比较多的是 Chen 等[11]学者的研究成果，该算法主要采用粒子群优化反向传播(PSO-BP)法对 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 两种夜间灯光遥感数据进行反演得到碳排放数据。与之前的碳排放测算方法相比，该算法的拟合度($R^2 = 0.9895$)更高，因此文章采用该数据中山东省 1998~2017 年的碳排放数据进行碳排放研究。

人口规模、经济发展水平、城镇化水平、产业结构、技术水平、财政投入等数据来源于《中国县域统计年鉴》、山东省各市域统计年鉴以及各县区统计公报。相关变量的定义如表 1 所示。

Table 1. Definition and descriptive statistics of related variables

表 1. 相关变量的定义及描述性统计

变量(Variables)	定义(Definition)	单位(Unit)
经济发展水平	地区生产总值	万元
产业结构	第二产业产值占地区生产总值的比重	%
人口规模	年末总人口	万人
城镇化水平	城镇人口占年末总人口比重	%
技术水平	单位 GDP 能耗	吨/万元
财政投入	一般公共预算支出	万元

Table 2. Variables selection basis

表 2. 变量选取依据

变量	变量选取依据
经济发展水平	碳排放量的增加与经济的快速发展密不可分，山东省碳排放量的不断增长是伴随着经济发展得到的结果[12]。
产业结构	产业结构变化对碳排放的影响可以为通过产业结构升级实现碳达峰和碳中和提供行动指南[13]。
人口规模	人口规模是碳排放的重要影响因素，人口增长推动碳排放增加[14]。
城镇化水平	城镇化水平越高的国家，碳排放量越大，但随着工业化水平的提升和产业结构的优化升级，碳排放量逐步降低[15]。
技术水平	技术进步在推动经济增长的同时，对二氧化碳等温室气体的排放有着显著的影响[16]。
财政投入	地方财政支出规模扩张会导致碳排放增加，提高非经济性财政支出占比有利于减少碳排放[17]。

2.3. 研究方法

1) SLOPE 倾值法。该方法是一种用于时间序列分析和预测的方法,相对于其他传统的时间序列方法,SLOPE 倾值法可以处理非平稳数据和多变量数据,对于数据中的异常值也有较强的鲁棒性;且预测精度较高,目前用于多种领域,如经济、气象、股票市场等(表 2)。论文采用 SLOPE 倾值法,研究山东省各县域 1998~2017 年碳排放总量的变化速率与类型。方法公式如下:

$$SLOPE = \frac{n \times \sum_{i=1}^n x_i c_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n c_i}{n \times \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (1)$$

公式中, n 表示总年份数, x_i 表示第 i 年, c_i 表示第 i 年的碳排放量。当 SLOPE 值 > 0 时,表示随着时间的增加,碳排放呈现下降的趋势;而当 SLOPE 值 < 0 时,表示随着时间的增加,碳排放呈现上升的趋势;SLOPE 值的大小从一定程度上反应了碳排放上升或下降的变化速率,据此可进一步划分碳排放的变化类型。

2) 空间自相关分析。空间自相关分析旨在确定某一研究对象在空间上的相关性及其相关程度。运用全局空间自相关方法分析了山东省碳排放分布的相关程度;运用局域空间自相关方法,基于县域范围,分析了山东省碳排放的空间异质性特征。

3) 时空地理加权回归模型。时空地理加权回归(GTWR)模型在地理加权回归模型(GWR)的基础上增加了时间维度,其同时考虑了空间和时间的非平稳性[18],适用于动态数据的分析,能够有效减小参数估计误差,增强模型的置信度。论文采用 GTWR 模型,对搜集的山东省 136 个县域 20 年的面板数据进行处理,旨在从时空角度探究山东省碳排放影响因素的时空异质性,揭示山东省各县域碳排放的主要驱动机制。模型如下:

$$y = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i, t_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

公式中, y 表示碳排放量, i 表示样本地区, (u_i, v_i, t_i) 表示第 i 个样本地区的地理坐标, $\beta_0(u_i, v_i, t_i)$ 表示第 i 个样本地区的截距, $\beta_k(u_i, v_i, t_i)$ 表示在第 i 个样本地区中第 k 个影响因素的回归系数, X_{ik} 表示在第 i 个样本地区中第 k 个影响因素的观测值, ε_i 为随机扰动项。若回归系数 β 小于 0,则碳排放与影响因素之间呈正相关关系,反之则为负相关[19]。

3. 结果与分析

3.1. 县域碳排放时间变化特征分析

文章利用 SLOPE 倾值法计算了 1998~2017 年山东省各县域的碳排放倾向值,并利用自然段点法将碳排放增长趋势划分为缓慢增长型、较慢增长型、中速增长型、较快增长型、快速增长型等五种类型。结果显示(表 3),山东省共有 11 个县域属于快速增长型,26 个县域属于较快增长型,36 个县域属于中速增长型,41 个县域属于较慢增长型,22 个县域属于缓慢增长型。寿光市 SLOPE 值最大,这与工业化进程加快、能源消耗增加、农业生产方式、交通运输等多方面因素有关,因此应作为山东省节能减排的重点地区。青岛市的市南区和市北区 SLOPE 值较小,这两个地区主要以发展第三产业为主,碳排放量增长较为缓慢。在 11 个快速增长型城市中青岛县域的面积占了 50.01%,26 个较快增长型城市中,潍坊市县域数量有 4 个,东营市县域数量有 3 个,这两个城市的县域面积占了所有较快增长型县域面积的 36.13%,因此未来应着重加强对青岛市、潍坊市、东营市的减碳控碳治理。

Table 3. Types of carbon emission growth trends in various counties and regions of Shandong Province from 1998 to 2017
表 3. 1998~2017 年山东省各县域碳排放增长趋势类型

类型	城市	合计
快速增长型	寿光市、黄岛区、东营区、即墨区、历城区、济南市中区、平度市、环翠区、城阳区、邹平市、荣成市	11
较快增长型	章丘区、兰山区、滕州市、胶州市、滨城区、福山区、河口区、文登区、任城区、东港区、张店区、莱州市、东昌府区、昌邑市、垦利区、广饶县、牡丹区、诸城市、临淄区、青州市、邹城市、岱岳区、高密市、龙口市、乳山市、河东区	26
中速增长型	新泰市、寒亭区、兖州区、无棣县、淄川区、莱西市、博兴县、招远市、长清区、莒县、兰陵县、费县、曲阜市、肥城市、安丘市、桓台县、郯城县、莒南县、临朐县、莱阳市、陵城区、茌平区、海阳市、薛城区、蓬莱区、罗庄区、齐河县、栖霞市、郯城县、昌乐县、微山县、曹县、沂水县、沂南县、巨野县、惠民县	36
较慢增长型	牟平区、利津县、临邑县、德城区、崂山区、济阳区、芝罘区、东平县、潍城区、东明县、奎文区、宁阳县、平邑县、岚山区、临沭县、嘉祥县、沾化区、莘县、莱山区、单县、商河县、高青县、阳谷县、梁山县、泰山区、枣庄市中区、乐陵市、临清市、冠县、高唐县、天桥区、禹城市、金乡县、平原县、周村区、夏津县、汶上县、五莲县、阳信县、东阿县、泗水县	41
缓慢增长型	博山区、莱芜区、槐荫区、定陶区、坊子区、沂源县、平阴县、峰城区、成武县、历下区、鱼台县、台儿庄区、李沧区、鄄城县、蒙阴县、武城县、宁津县、山亭区、庆云县、钢城区、市北区、市南区	22

3.2. 县域碳排放空间演变特征分析

为了更全面、更细致地比较山东省各县域碳排放的时空转变以及从横向角度进行空间格局的比较研究,文章使用自然段点法,将山东省各县域的碳排放量进行统一调整和划分。具体将碳排放量分为五种类型,分别为:轻度碳排放型(年碳排放量小于 250 万 t)、一般碳排放型(年碳排放量为 250~500 万 t)、中度碳排放型(年碳排放量为 500~750 万 t)、较多碳排放型(年碳排放量为 750~1000 万 t)以及重度碳排放型(年碳排放量超过 1000 万 t)(图 2)。

研究发现,山东省县域碳排放在空间上存在着显著差异,整体上呈现东北高西南低的格局。碳排放量较高的县域主要集中在工业较发达、经济发达的市中心以及部分沿海地区;碳排放量较低的县域主要集中在鲁西北、鲁西南以及鲁东南地区的部分县域。1998~2017 年,山东省各县域碳排放量都有所增加,轻度碳排放型县域明显减少,从 1998 年 136 个县域下降到 2017 年的 6 个县域。1998~2005 年,山东省工业进程发展迅速,各县域建筑项目、工业活动大量进行,煤炭、石油等化石能源的大量使用,导致山东省碳排放量在 250 万 t 以上的县域出现明显扩张趋势;2005~2012 年,碳排放量在 250 万 t 以上的县域增加速度放缓,2012~2017 年各县域碳排放量较为稳定,部分县域碳排放量甚至出现下降趋势,下降程度最大的是济南市中心区,由 2012 年的 1344.56 万 t 下降到 2017 年的 1175.43 万 t。

值得关注的是:重度碳排放型县域数量在 2008~2014 年始终保持不变,它们分别是济南市中心区、东营区、黄岛区、即墨区、平度市与历城区;2014~2017 年重度碳排放型县域由 7 个增加到 9 个,新增加的两个县域为城阳区和环翠区。尽管部分重度碳排放型和较多碳排放型县域近几年碳排放量有所减少,但大部分县域的碳排放量仍呈现波动增长的趋势,尤其是重度碳排放县域中的历城区、环翠区和较多碳排放县域中的荣成市、胶州市、滨州市、任城区、岚山区、东昌府区、牡丹区、福山区、岱岳区等县域,这些地区近几年碳排放量均呈现逐年增加的态势,在未来经济发展中应着重加强碳排放管控力度。

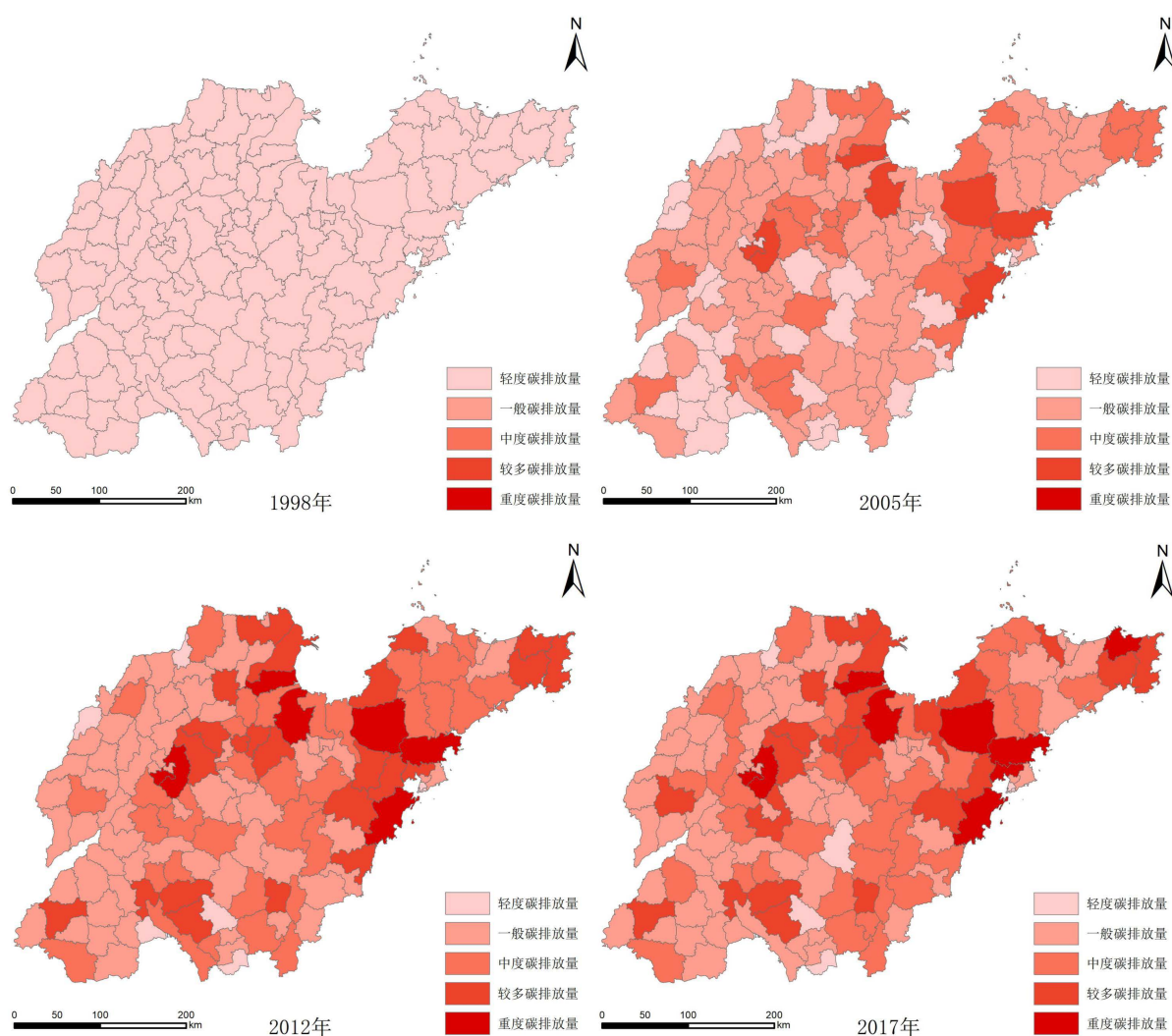


Figure 2. Carbon emissions from energy consumption in counties of Shandong Province from 1998 to 2017
图 2. 1998~2017 年山东省县域能源消费碳排放量

3.3. 县域碳排放时空分异特征分析

3.3.1. 全局空间自相关分析

根据 Queen 标准的一阶空间权重矩阵方法，文章使用 ArcGIS 10.2 的空间统计工具，对山东省 136 个县域的碳排放量进行了全局空间自相关分析，绘制出 1998~2017 年的全局 Moran's I 指数变化趋势图 (图 3)。

由图 3 可知，1998~2017 年，全局 Moran's I 指数均为正值，表明山东省县域碳排放之间存在着空间正相关关系，并且 p 值都小于 0.01，z 得分都大于 5，通过了显著性水平检验，这表示山东省各县域的碳排放量呈现为显著的空间集聚现象，其在空间上并不是均匀分布的。从时间上来看，山东省各县域碳排放量全局 Moran's I 指数从整体上呈现一个上升后下降的趋势，说明从 1998~2007 年其空间相关性在逐年增加，在整体上空间集聚现象越来越明显；2007~2017 年山东省各县之间的碳排放空间集聚程度逐年降低，空间正相关性逐渐减弱，这与山东省各县域减碳措施与政策相互推动，形成减排合力有一定关系。

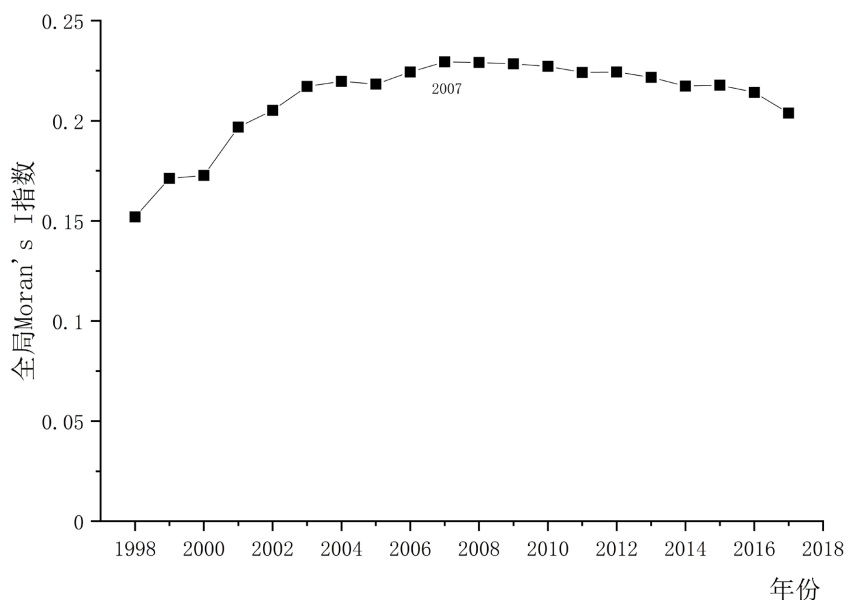
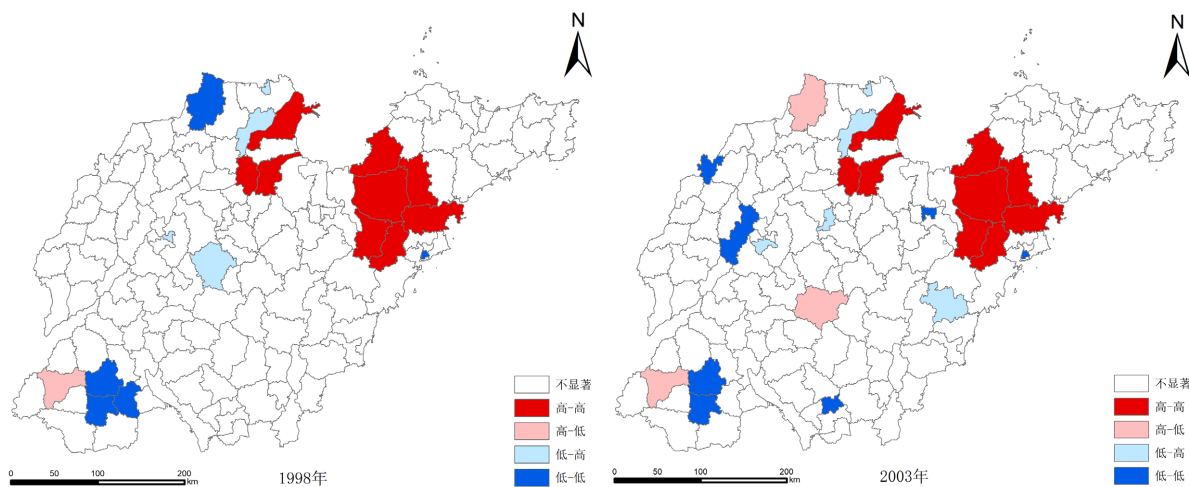


Figure 3. Global Moran's I index of county carbon emissions in Shandong Province from 1998 to 2017

图 3. 1998~2017 年山东省县域碳排放量全局 Moran's I 指数

3.3.2. 局部空间自相关分析

全局 Moran's I 指数只能从整体上判断山东省县域碳排放的空间分异情况, 为了进一步探索其内部碳排放的空间集聚类型, 文章通过使用 GeoDa 与 ArcGIS 软件, 绘制出 1998、2003、2008、2013、2017 等五个年份的 LISA 聚类地图(图 4), 以此分析局部的空间分布规律。根据所得的结果将山东省县域碳排放划分成四种类型, 即高值集聚类型(HH)、低值集聚类型(LL)、高值被低值包围类型(HL)与低值被高值包围类型(LH)。根据图 4, 分析出山东省 136 个县域碳排在空间上的分布特征。在空间分布上: 虽然 1998-2017 年山东省各县域碳排放空间相关性呈现不显著的县域比重较大, 但是相关性显著的县域有呈现不断扩大的趋势, 呈零星分布态势。显著性空间类型主要以高值集聚类型和低值集聚类型为主, 高值集聚类型主要分布在鲁北与鲁东北地区, 低值集聚类型主要分布在鲁西以及鲁西南地区, 高值被低值包围类型和低值被高值包围类型区域规模较小, 零星分布。



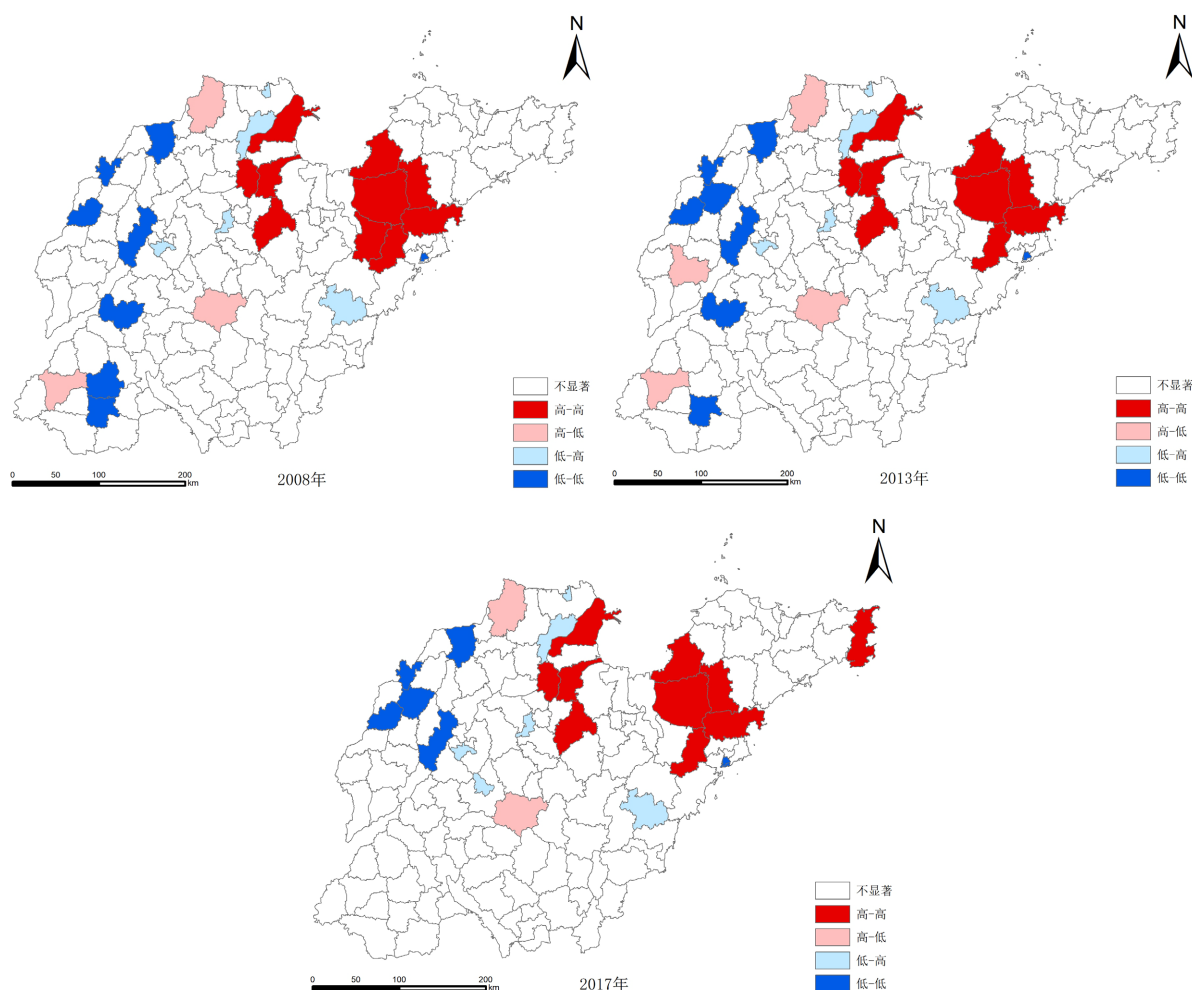


Figure 4. LISA clustering of county carbon emissions in Shandong Province from 1998 to 2017

图 4. 1998~2017 年山东省县域碳排放 LISA 聚类

高值集聚类型县域空间变动较为稳定且分布集中，尤其是即墨区、胶州市、平度市、莱西市、垦利区、广饶县、莱州市这 7 个城市，这 20 年始终为高值集聚类型，存在“高碳锁定”现象，这些地区的经济发展有着非常强的区位优势，紧邻环渤海和东部沿海地区，尤其是垦利区和广饶县，石油资源丰富，依赖重工业，在经济发展的同时 CO_2 排放量也较高，因此针对碳排放较高的这些地区，应加快产业结构的调整和升级，促进相邻县域之间的资源优化配置，以此破解“高碳锁定”效应。

3.4. 碳排放影响因素分析

3.4.1. GTWR 模型构建和回归模型结果分析

文章采用 GTWR 模型对经济发展水平、产业结构、人口规模、城镇化水平、技术水平、财政投入 6 个影响因素进行时空异质性分析。文章对 GTWR 模型的实现主要基于搜集的山东省 136 个县域 20 年的影响因素数据以及 136 个县域的经纬度，通过 ArcGIS 10.2 空间软件，利用 Huang 等[20]研制的 GTWR 插件，时空距离参数比值为 1，带宽采用 AICc 优化设置，对碳排放影响因素进行分析。在构建 GTWR 模型之前，为排除多个变量间由于高度相关存在多重共线性问题，对碳排放与各影响因素进行相关性分析与共线性诊断。文章选用方差膨胀因子法对多重共线性进行诊断，其判定准则为当 $\text{VIF} > 10$ ，容差 $<$

0.1, 可认为存在多重共线性[21]。运用 SPSS 对碳排放与各解释变量进行相关性检验与共线性检验, 对于相关性不显著和 $VIF > 10$, 容差 < 0.1 的解释变量进行剔除, 以确保模型的可靠性, 分析结果见表 4, 这 6 个指标与碳排放 $p < 0.01$ 上显著相关, 其中经济发展水平与碳排放的相关性最为显著, 达到了 0.832, 6 个影响因素的 VIF 值都小于 10, 容差均小于 0.1, 说明各影响因素之间相互独立, 不会对模型造成不稳定的影响。

Table 4. Definition and descriptive statistics of related variables

表 4. 相关变量的定义及描述性统计

指标	与碳排放的相关性	VIF	容差
GDP	0.832**	4.784	0.209
产业结构	0.318**	1.024	0.974
人口规模	0.299**	1.131	0.884
城镇化水平	0.296**	1.076	0.929
技术水平	-0.326**	1.256	0.796
财政投入	0.810**	4.540	0.220

论文使用 GTWR 模型, 选取 AICc 值和拟合优度 R^2 两种指标来评价模型准确度。其中 AICc 值可以用来度量模型的性能, 其值越小说明模型拟合观测数据越好; R^2 用来度量模型拟合度, 其值越大说明模型的解释力越高。文章还将 OLS、TWR、GWR 三种模型的回归结果同 GTWR 模型进行 R^2 与 AICc 值比较(表 5), 用以突出 GTWR 模型对山东省碳排放影响因素研究的置信度和适用性。根据表 5 发现, 与 OLS、TWR 和 GWR 相比, GTWR 模型的 R^2 值和调整 R^2 值有较大改进; 模型 AICc 值为 1604.65, 较 OLS、TWR 和 GWR 分别降低了 3736.74、1324.62 和 2297.26。由此可见, GTWR 模型在空间维度和时间维度上都能够更好地解释各影响因素对山东省县域碳排放影响的时空异质性。

Table 5. Comparison of model evaluation indicators

表 5. 模型评价指标对比

模型参数	OLS	TWR	GWR	GTWR
R^2	0.585	0.8324	0.764	0.903
调整后 R^2	-	0.8321	0.763	0.902
AICc	5341.39	2929.07	3901.91	1604.65

3.4.2. 各影响因素的时间演变

文章通过 GTWR 模型回归结果, 绘制出各影响因素随时间变化的趋势图(图 5)。

1) 在所选影响因素中, GDP 与碳排放的平均回归系数值达到 9.3971。GDP 与山东省碳排放的回归系数值每年均为正值, 说明自 1998~2017 年, 其对碳排放始终起着正向作用。在时间序列上, 自 1998 年到 2017 年, GDP 与碳排放的平均回归系数呈现一个上升后下降的趋势, 由 1998 年的 9.706 上升到 2005 年的 12.64, 说明正相关关系的趋势是增强的, 随着经济发展水平的不断提高, 各地碳排放量也在不断增加。2005~2017 年, GDP 对碳排放的正向影响关系逐渐减弱, 随着经济的不断发展, 各地不断优化调整经济结构, 提出促进低碳经济发展等目标, 抑制碳排放增加的强度逐渐加大。

2) 产业结构对山东省县域碳排放的贡献也比较明显, 从回归分析结果来看, 系数均为正值, 表明产业结构对山东省各区县的碳排放量具有促进作用。1998~2007 年, 产业结构平均回归系数呈现上升态势,

这段时期内为了促进经济的快速发展,山东省大部分地区以石油、电力、焦化等高耗能为主的产业在不断壮大,导致碳排放量也出现急剧增加的态势。2007~2009年山东省碳排放量受产业结构的影响程度出现小幅度下降,与山东省响应2008年夏季奥运会有一定关系。2009年至2017年,产业结构平均回归系数处于比较平稳的态势,平均回归系数值在4~5之间,各区县为了减少重工业带来的碳排放增加现象,开始不断优化产业结构,提倡绿色经济与低碳经济,一定程度上抑制了产业结构对碳排放量的促进作用。

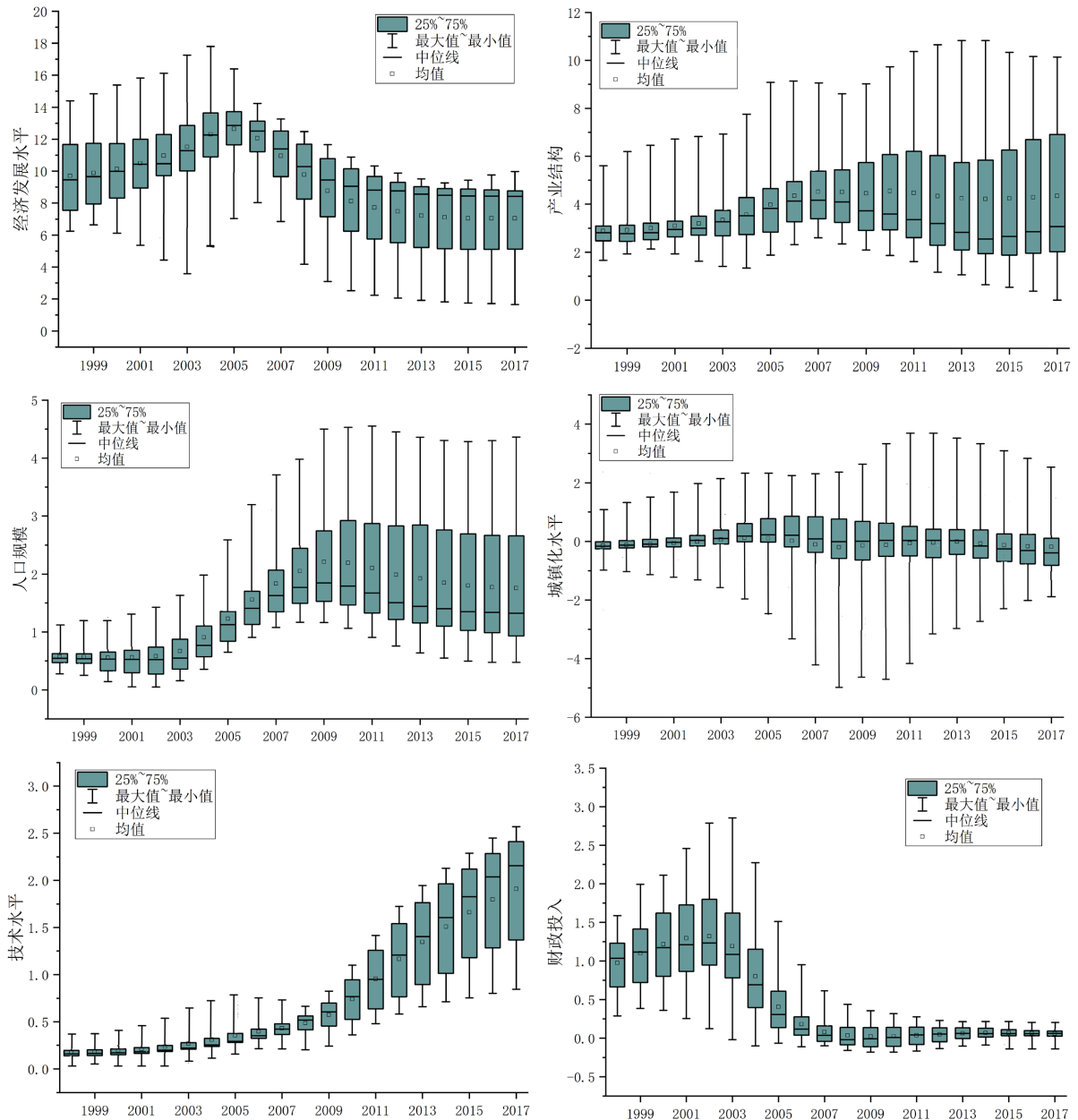


Figure 5. Time evolution trend of GTWR regression coefficient
图 5. GTWR 回归系数时间演变趋势

3) 人口规模对山东省各县的碳排放量有一定正向影响,即随着人口增加,碳排放量也随之增加,这与赵志耘等人[22]的研究结果一致。这是由于人口规模的提升导致人口集聚度增大,进而加剧了交通拥堵、

高污染建筑增多、能源消耗等现象,从而导致碳排放量持续上升。此外,人口规模回归系数随时间先上升后下降。具体来说,1998~2002年,人口规模回归系数处于比较平稳的态势,平均回归系数值在0.56左右。2002~2009年,人口规模回归系数增长速率较快,与2002年调整计划生育政策,允许符合条件的夫妻生育二胎有一定关联。2009~2017年,平均回归系数值逐年减小,减小速率较缓慢,人口规模与碳排放量的正相关关系逐年减弱,各地区为了控制人口集聚带来的碳排放增加现象,不断优化经济结构,注重节能减排,提高能源和资源的综合利用率,在一定程度上削弱了人口增加对碳排放的影响。

4) 从城镇化水平对碳排放回归结果来看,城镇化水平在不同时期对不同县域发挥着不同作用。1998~2002年,城镇化水平平均回归系数不断增加,但中位数均为负数,说明城镇化水平对大部分县域碳排放发挥抑制作用,这是因为2002年之前,城镇化发展初期的规模效应和集聚效应会在一定程度上抑制碳排放。2002~2006年城镇化水平对碳排放促进作用增强,农村人口在向城镇迁移的过程中,在带动城镇经济的同时,也消耗了大量能源,更多的城镇居民倾向于消费高能耗、高排放产品,因此,农村人口的迁移对碳排放起到了一定的促进作用。2006~2017年城镇化水平对大部分县域碳排放发挥抑制作用,且2013~2017年,随着各地经济水平的不断发展,城镇化水平对大部分县域碳排放的负向作用呈现逐年加强态势,随着资源配置的合理调节、产业结构的不断优化以及自然资源的有效利用,各地尽可能地控制对能源的消耗,在一定程度上提升了城市综合承载力,城镇化在很大程度上抑制了碳排放的增加。

5) 1998~2017年,技术水平对碳排放的影响关系始终为正向影响,且一直呈现上升态势,1998~2008年,技术水平回归系数增加较为缓慢,年均增加0.03,2008~2017年,随着技术的不断发展,碳排放量不断加大,年均增加0.15。虽然近几年山东省环境状况有所改善,但其目前的技术主要用于发展经济,减碳技术的应用还不足以抵消经济规模扩大带来的碳排放量的增加,至今仍有大批落后、低效的高能耗企业亟待技术升级与设备更新。

6) 1998~2002年,财政投入平均回归系数不断增加,达到最大值1.32,且各县域回归系数均为正数,说明财政投入对各县域碳排放均发挥促进作用,这一时间段,财政支出主要用于经济性基础设施支出,需要消费大量化石能源,因此对碳排放影响程度较大。2003~2008年,各地回归系数均呈现不同程度的下降,表明各地开始注重对低碳经济的投入与发展,部分县域碳排放开始受财政投入的负向影响。2008~2017年,财政投入平均回归系数在0.05左右波动,财政投入对碳排放的影响较小且较为稳定。

3.4.3. 各影响因素的空间差异

为了更直观地观察各影响因素在空间分布上的差异,论文根据模型回归结果,利用ArcGIS,采用自然断点法得到各影响因素估计系数的空间分布图(图6)。

1) 碳排放量受GDP影响程度较高的区域为鲁北地区,如聊城市、滨州市、东营市等地区,可能是由于这些地区在促进经济发展的过程中,不断扩张建设用地、发展重工业,能源需求量增加,进而导致碳排放量增加过快。碳排放量受GDP影响程度较低的地区主要集中于烟台市、青岛市与潍坊市,主要原因是这些地区比较注重优化能源结构,能源利用效率较高,因此其碳排放量受GDP的影响较小。

2) 东营市、滨州市等地区的产业结构估计系数较高,因为这些高值县域重工业较发达,高耗能产业较多,尤其东营市,依托当地丰富的石油资源,形成了石油化工及盐化工、石油装备、有色金属、橡胶轮胎及汽车配件四大支柱产业,因此其碳排放量受产业结构影响也较为显著。另外,青岛的李沧区、城阳区等青岛地区因为人口的急剧增加,为了满足人民生活的需要,这些地区高耗能产业不断增加,其碳排放量受产业结构影响的程度也相应增强。芝罘区、东港区、岚山区、环翠区等地区产业结构估计系数较高,开发方式的粗放阻碍了当地海洋经济的高质量发展,绝大部分沿海地区产业规划布局大同小异,沿海重工业、港口布局仍存在高密度、低效率的“怪相”。

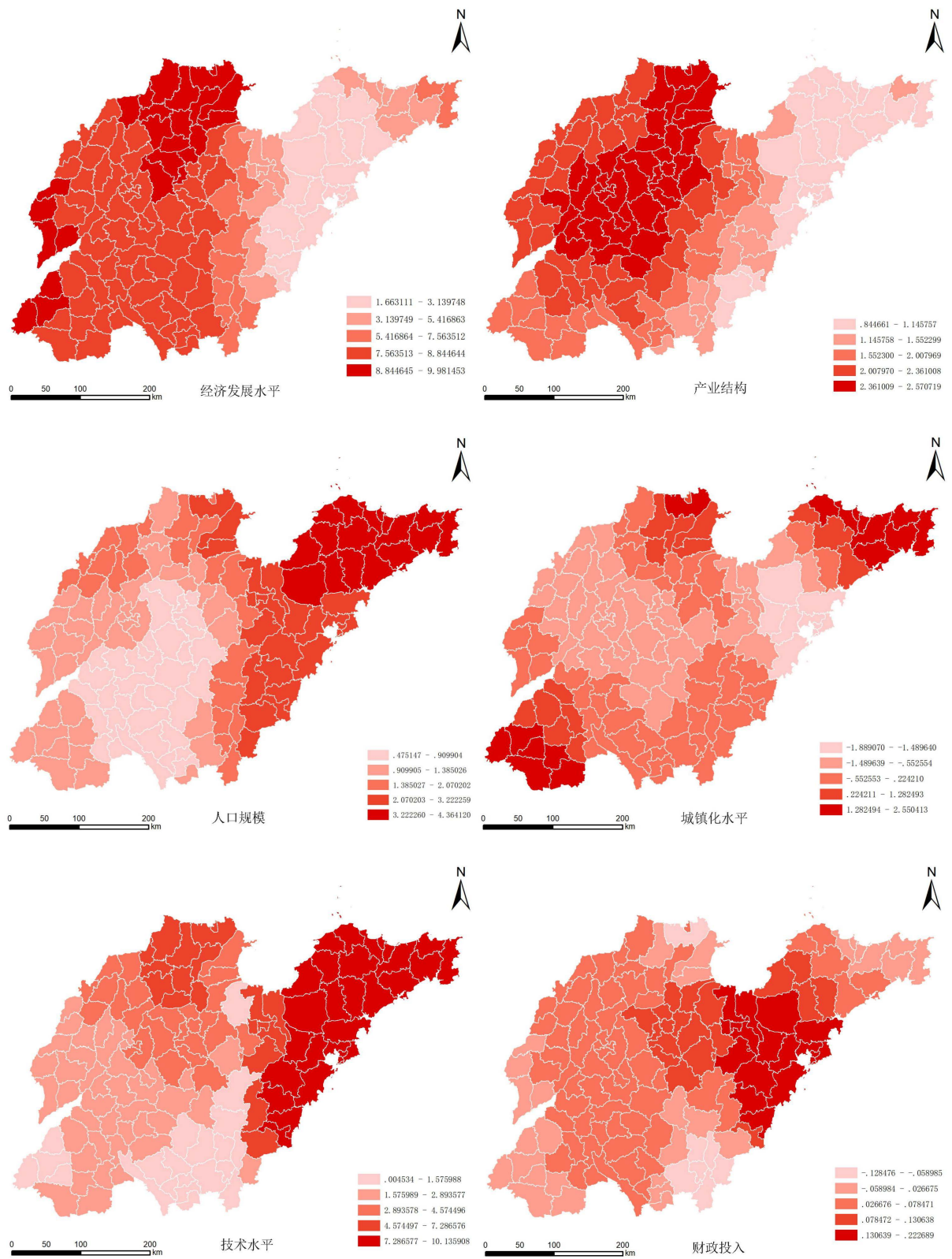


Figure 6. Spatial distribution pattern of factors influencing carbon emissions in counties of Shandong Province
图 6. 山东省县域碳排放影响因素系数空间分布格局

3) 人口规模对碳排放的影响程度整体上呈现四周高中间低的格局, 整体来看, 沿海城市人口密集, 尤其是烟台、威海、日照、青岛等地区的县域, 其碳排放受人口规模影响较为显著, 这些地区工业发达, 港口众多, 这意味着城市需要提供更多的基础设施与服务, 而这些服务需要消耗大量能源, 因此这些地区碳排放量也相应增加; 另外随着基础设施建设的不断完善, 沿海的城市环境不断得到改善和提升, 吸引了更多的人前来创业与居住, 在一定程度上也增加了人口对碳排放的影响程度。

4) 城镇化水平回归系数低值区域主要集中在青岛市以及潍坊等地区的部分县域, 高值区域主要集中在鲁北、鲁东北以及鲁西南地区, 碳排放量受城镇化水平正向影响的县域相对较少, 其中影响最大的县域是曹县, 其次是定陶区与环翠区, 这些地区城市化水平较低、城市人口规模较小, 公共设施和基础设施达不到高效率运营, 交通、建筑和高耗能产业等也更为分散, 聚集度更低, 其发展生产更依赖于能源设备, 从而导致碳排放量不断上升。在未来发展中, 对于碳排放受城镇化正向影响的这些县域可以在城市化发展过程中通过促进产业结构转型升级、优化城市建设、使用低碳材料、鼓励绿色出行等多种方式逐渐降低碳排放量, 努力建设低碳型城市。

5) 烟台市、青岛市、威海市等沿海地区与其他地区相比, 碳排放受技术水平的影响较小。碳排放量受技术水平影响程度大的县域集中于济南市、淄博市、东营市等地区的部分县域, 这些县域技术发展水平的提高, 粗放式的发展, 使得碳排放量出现急剧的增加, 在以后的发展中, 更应该兼顾碳排放绿色科技的创新, 进而减少碳排放。

6) 安丘市、坊子区与奎文区等县域的碳排放受财政投入正向影响程度较大, 主要原因是这些地区财政支出主要用于民生基础设施建设, 对提升居民环境质量的关注度并不高, 为了促进经济的发展, 地方财政支出主要用来发展粗放型经济, 对低碳经济关注较少, 因此碳排放量相对较多。

4. 结论与讨论

论文以山东省 136 个县域作为研究对象, 基于统计的山东省县域碳排放量数据, 利用 ArcGIS、GeoDa 等软件分析了山东省县域碳排放时空分布格局及特征, 并采用 GTWR 模型对山东省县域碳排放影响因素进行研究, 得到的主要结论如下:

1) 山东省共有 11 个县域属于快速增长型, 26 个县域属于较快增长型, 36 个县域属于中速增长型, 41 个县域属于较慢增长型, 22 个县域属于缓慢增长型。寿光市 SLOPE 值最大。山东省县域碳排放的空间上存在着显著差异, 整体上, 呈现东北高西南低的格局。碳排放量较高的县域主要集中在工业较发达、经济发达的区域以及部分沿海地区。

2) 山东省各县域的碳排放量呈现为显著的空间集聚现象。从时间上来看, 山东省各县域碳排放量全局 Moran's I 指数从整体上呈现一个上升后下降的趋势。高值集聚类型的县域主要分布在鲁北与鲁东北地区, 其空间变动较为稳定且分布集中。即墨区、胶州市、平度市、莱西市、垦利区、广饶县、莱州市这 7 个城市, 存在“高碳锁定”现象, 在未来发展中应积极采取碳减排措施, 以更快破解“高碳锁定”效应。

3) 从时空地理加权回归模型对山东省县域碳排放影响因素分析的结果来看, GDP、产业结构、人口规模和技术水平对各县域碳排放发挥促进作用; 城镇化水平和财政投入对各县域碳排放的影响既有正向作用, 又有负向作用, 就回归系数平均值而言, 城镇化水平对碳排放发挥抑制作用, 而财政投入对碳排放发挥促进作用。

4) 在当前社会趋势和政策下, 山东省各县域应针对自己的短板, 制定差异化、地区化的减排策略, 对碳排放重点领域、重点区域加大管控力度, 通过转变经济发展方式、优化产业结构、普及减碳技术、提高全民减排意识、优化财政支持政策等方式不断降低碳排放量, 努力建设低碳型城市, 打造高质量发展先行区, 扎实推进美丽山东建设。

参考文献

- [1] Gregg, J.S. (2009) The Temporal and Spatial Distribution of Carbon Dioxide Emissions from Fossil-Fuel Use in North America. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **48**, 2528-2542. <https://doi.org/10.1175/2009JAMC2115.1>
- [2] 方叶兵, 王礼茂, 牟初夫, 等. 中国石油终端利用碳排放空间分异及影响因素[J]. 资源科学, 2017, 39(12): 2233-2246.
- [3] 周玄德, 窦文章, 詹庆明, 等. 基于县域单元的湖北省碳排放时空格局演变特征[J]. 测绘通报, 2022(11): 149-156.
- [4] 莫惠斌, 王少剑. 黄河流域县域碳排放的时空格局演变及空间效应机制[J]. 地理科学, 2021, 41(8): 1324-1335.
- [5] 关敏捷, 袁艳红, 冉木希, 等. 基于STIRPAT模型的山西省能源碳排放影响因素及峰值预测[J]. 中国煤炭, 2021, 47(9): 48-55.
- [6] 韩媛媛, 皮荷杰, 时泽楠, 等. 京津冀地区工业 CO₂ 排放测度及其影响因素研究[J]. 世界地理研究, 2020, 29(1): 140-147.
- [7] Wang, S.J. (2019) Examining the Spatial Variations of Determinants of Energy-Related CO₂ Emissions in China at the City Level Using Geographically Weighted Regression Mode. *Applied Energy*, **235**, 95-105. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.083>
- [8] 常青, 蔡为民, 谷秀兰, 等. 河南省农业碳排放时空分异、影响因素及趋势预测[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 367-377.
- [9] 靳祥锋. 碳排放约束下的区域经济增长机制与对策研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2017.
- [10] 山东省人民政府. 山东省行政区划[EB/OL]. <http://www.shandong.gov.cn/col/col97866/index.html>, 2022-12-31.
- [11] Chen, J.D. (2020) County-Level CO₂ Emissions and Sequestration in China during 1997-2017. *Scientific Data*, **7**, 391-391. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00736-3>
- [12] 王玥. 山东省碳排放影响因素分解及趋势预测[D]: [硕士学位论文]. 日照: 曲阜师范大学, 2019.
- [13] 原嫫, 周洁. 中国省域尺度下产业结构多维度特征及演化对碳排放的影响[J]. 自然资源学报, 2021, 36(12): 3186-3202.
- [14] 邵红梅. 人口因素对碳排放的影响研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2012.
- [15] 齐昕, 郭薛南. 新兴经济体国家城镇化发展对碳排放影响的比较研究[J]. 生态经济, 2022, 38(3): 101-108.
- [16] 雷宏, 李智. 技术进步对二氧化碳排放的影响效应研究——基于省级面板门限模型[J]. 中南财经政法大学学报, 2017(3): 58-65.
- [17] 赵哲, 谭建立. 中国地方财政支出的碳减排效应研究——基于新型城镇化调节效应的实证分析[J]. 财经论丛, 2022(11): 41-50.
- [18] 李云燕, 张硕. 中国城市碳排放强度时空演变与影响因素的时空异质性[J]. 中国环境科学, 2023(3): 1-16.
- [19] 刘雪琪, 李波. 碳中和目标下中国农地利用效率的影响因素及时空异质性[J]. 华中农业大学学报, 2023(1): 197-209.
- [20] Huang, B., et al. (2010) Geographically and Temporally Weighted Regression for Modeling Spatio-Temporal Variation in House Prices. *International Journal of Geographical Information Science*, **24**, 383-401. <https://doi.org/10.1080/13658810802672469>
- [21] 高辉. 多重共线性的诊断方法[J]. 统计与信息论坛, 2003(1): 73-76.
- [22] 赵志耘, 杨朝峰. 中国碳排放驱动因素分解分析[J]. 中国软科学, 2012(6): 175-183.