

# 基于时空演变的县域碳排放驱动因素分析研究

邱明晟, 李 林

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2025年5月23日; 录用日期: 2025年6月15日; 发布日期: 2025年6月20日

## 摘 要

县域碳排放驱动因素研究有助于精准剖析县域碳排放的内在机制, 为制定因地制宜的低碳发展策略、优化资源配置、推动绿色转型及实现“双碳”目标提供关键支撑。文章以福建省83个县区作为研究对象, 采用探索性空间数据分析方法探究县域碳排放的时空格局, 研究表明, 福建省碳排放量呈逐年递增趋势, 碳排在空间上表现出显著的集聚分布特征。进一步采用地理探测器和时空地理加权回归(GTWR)模型探究碳排放的主导因子。结果表明农业发展水平、工业化水平和能源消耗量与碳排放之间成正相关关系, 能源消耗量呈现稳定且显著的促进作用, 人口回归系数人口规模对碳排放的影响呈倒U型, 而经济指标表现出复杂的波动特征, 其回归系数呈现正负交替现象。

## 关键词

碳排放, 空间分异, 地理探测器, GTWR, 驱动因素

# Study and Analysis on the Driving Factors of Carbon Emissions at the County Level Based on Spatio-Temporal Evolution

Mingsheng Qiu, Lin Li

School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: May 23<sup>rd</sup>, 2025; accepted: Jun. 15<sup>th</sup>, 2025; published: Jun. 20<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

The study of the driving factors of carbon emissions at the county level helps to accurately analyze the internal mechanism of carbon emissions at the county level, and provides key support for formulating low-carbon development strategies tailored to local conditions, optimizing the allocation of resources, promoting green transformation, and achieving the “dual carbon” goals. This article

takes 83 counties and districts in Fujian Province as the research objects, and uses exploratory spatial data analysis methods to explore the spatio-temporal pattern of carbon emissions at the county level. The research shows that the carbon emissions in Fujian Province show a trend of increasing year by year, and the carbon emissions exhibit significant agglomeration distribution characteristics in space. Furthermore, the Geodetector and the Geographically and Temporally Weighted Regression (GTWR) model are adopted to explore the dominant factors of carbon emissions. The results show that there is a positive correlation between the level of agricultural development, the level of industrialization, energy consumption and carbon emissions. Energy consumption shows a stable and significant promoting effect. The regression coefficient of the population indicates that the impact of the population size on carbon emissions presents an inverted U-shaped pattern, while the economic indicators show complex fluctuation characteristics, and their regression coefficients alternate between positive and negative.

## Keywords

Carbon Emissions, Spatial Differentiation, Geographic Detector, GTWR, Driving Factors

Copyright © 2025 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

自 2006 年起, 中国超越美国成为全球碳排放量最大的国家, 当前年度碳排放量约占全球总量的 30%, 且尚未达峰[1]。作为负责任大国, 中国将绿色低碳发展纳入国家战略核心, 通过构建“双碳”目标体系, 明确高质量发展方向, 以绿色转型驱动经济结构优化与可持续发展[2]。2024 年 5 月 23 日国务院印发《2024~2025 年节能降碳行动方案》, 方案指出节能降碳是推动高质量发展的必然选择、是发展新质生产力的重要举措[3]。研究碳排放驱动因素对节能降碳意义重大。

碳排放驱动因素研究中, 主要有传统统计分析、机器学习和碳排放驱动因素识别法三类。传统方法包含 OLS 模型[4]、主成分分析法[5]、非线性因果关系检验法[6]等, 这类方法基于成熟的统计学理论, 原理相对简单易懂, 但主成分分析在确定主成分时可能会丢失部分原始数据的细节信息; 灰色关联度分析只是一种相对的关联程度衡量, 无法准确确定因素间的因果关系; OLS 模型要求数据满足一定的假设条件, 像线性关系假设、误差项的独立性等, 当实际数据不满足这些假设时, 结果可能不准确; 机器学习方法中, XGBoost 模型[7]可量化评估指标对碳排放的影响, 随机森林模型[8]能对因子重要性排序, 展现因子对模型输出值的边际影响以确定驱动因素。机器学习方法具备非线性建模能力和泛化能力, 可适应大规模数据及动态场景但容易导致过拟合风险且对异常值敏感。碳排放驱动因素识别法基于 LMDI [9] (对数平均迪氏指数法)、SDA [10] (结构分解分析)、EKC [11] (环境库兹涅茨曲线)、STIRPAT [12] (随机影响的人口、富裕和技术模型)等模型将总量指标分解为多个因素的乘积形式, 来分析各因素对总量变化的贡献程度, 清晰拆解多因素对结果的影响路径, 量化各因素贡献度, 逻辑直观、操作便捷, 为精准减排提供更精细化的支撑。研究发现城镇化率提升和能源结构优化会抑制碳排放增加, 经济发展和能源强度会促进城市碳排放[13]。但上述研究少有基于县尺度的研究且多在单一时空维度分析经济、社会、能源因素, 缺乏时空双维度考量, 存在局限性[14]。

本文以 2012~2020 年福建省 83 个县区(不含金门县)的夜间灯光数据、经济指标与能耗碳排放数据为基础, 综合运用空间自相关模型、地理探测器和时空地理加权回归模型等多种方法, 深入剖析县域碳排

放的时空演变特征。旨在县域层面的碳减排实践及“双碳”目标的实现提供科学理论支撑与实践指导。

## 2. 研究区概况

福建省地处我国东南沿海,截至2024年,下辖9个地级市(11个县级市、42个县、31个市辖区)。2012~2024年,全省地区生产总值从20081.75亿元攀升至57761.02亿元,2024年相较于上一年增长5.5%。其中,2024年第一产业增加值为3287.67亿元,占比5.7%,增长率为3.4%;第二产业增加值达24713.16亿元,占比2.8%,增长5.8%;第三产业增加值为29760.19亿元,占比51.5%,增长5.5%,呈现出“一产稳、二产优、三产进”的良好态势。在碳排放构成体系中,工业能源消耗产生的碳排放占据主导地位,其余包括生活及交通运输业能源消耗、设施农用地及耕地产生的碳排放[15]。

## 3. 数据来源与研究方法

### 3.1. 数据来源

福建省碳排放和能源消耗数据来源于中国碳核算数据库和中国市县级时空能耗与效率数据集,该数据基于国家物理地球数据中心(NGDC)提供的DMSP/OLS和NPP/VIIRS卫星夜间灯光数据[16],采用粒子群优化-反向传播(PSO-BP)算法对中国各区县的碳排放总量进行估算。本文选取2012~2020年作为研究周期,碳排放驱动因素指标数据主要取自福建省统计局历年《福建省统计年鉴》、福建省各市统计局历年统计年鉴。

### 3.2. 研究方法

#### 3.2.1. 空间自相关

空间自相关分析是地理学研究中探讨变量空间依赖性的重要方法,莫兰指数因能更好地克服偏离正态分布的影响,被广泛地应用于空间相关性的检验当中,主要包括全局莫兰指数和局部莫兰指数两类型[17]。

全局莫兰指数用于检验区域是否存在空间自相关现象。局部莫兰指数通过计算每个空间单元与其相邻单元的属性值之间的相关性,来衡量该单元在局部空间上的聚集特征,其公式表达分别如下[18]:

$$I_G = \frac{m \sum_{a=1}^m \sum_{b=1}^m W_{ab} (X_a - \bar{X})(X_b - \bar{X})}{\left( \sum_{a=1}^m \sum_{b=1}^m W_{ab} \right) \sum_{a=1}^m (X_a - \bar{X})^2} \quad (1)$$

$$I_L = \frac{m(X_a - \bar{X}) \sum_{b=1}^m W_{ab} (X_b - \bar{X})}{\sum_{a=1}^m (X_a - \bar{X})^2} \quad (2)$$

其中:  $I_G$  为全局莫兰指数;  $I_L$  为局部莫兰指数;  $X_a$  和  $X_b$  分别为第  $a$ 、 $b$  个市(县、区)的碳排放量;  $\bar{X}$  为碳排放量平均值;  $m$  为市(县、区)单元数;  $W_{ab}$  为空间权重矩阵。

#### 3.2.2. 地理探测器

地理探测器作为解析地理要素空间分异规律及其驱动机制的空间统计方法,其核心在于:通过将研究区域划分为不同子区域,对比子区域方差之和与区域总方差,若前者小于后者,则表明地理要素存在空间分异性;同时,通过比较两个变量的空间分布模式,若二者高值与低值分布趋势高度契合,即可判定二者间存在统计关联性[19]。该模型能通过比较不同因素下指标的空间分布差异,评估该因素对空间异

质性的解释能力, 明晰自变量对因变量的解释力( $q$ )强度[20]。其公式表达如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^I N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (3)$$

其中:  $I$  为自变量或因变量的分层;  $N_h$  和  $\sigma_h^2$  分别表示  $h$  层的样本量和方差。

### 3.2.3. 时空地理加权回归模型

时空地理加权回归(GTWR)模型是一种高级空间统计分析方法, 结合了时间和空间两个维度, 通过动态调整权重函数, 反映不同时空点数据的变化, 能够更精确地捕捉数据中的时空异质性, 提供更为准确的回归结果[21]。因此, 研究采用 Huang [22]等开发的 GTWR 插件进行研究。模型表达式为:

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_{k=1}^P \beta_k(u_i, v_i, t_i) \cdot X_{ik} + \varepsilon_i \quad (4)$$

其中,  $Y_i$  为第  $i$  个观测点的与变量值;  $\beta_0(u_i, v_i, t_i)$  为第  $i$  个点的截距项, 是地理坐标  $(u_i, v_i, t_i)$  和时间  $t_i$  的函数;  $\beta_k(u_i, v_i, t_i)$  是第  $i$  个观测点对于第  $k$  个解释变量的回归系数;  $X_{ik}$  是第  $i$  个观测点对于第  $k$  个解释变量的解释变量值;  $\varepsilon_i$  是第  $i$  个观测点的随机误差项,  $P$  是解释变量的个数。

## 4. 结果分析

### 4.1. 县域碳排放时空分布

选取 2012~2020 年福建省九个地级市的碳排放量作变化趋势图(见图 1)。2015 年, 福建省各地市碳排放量均有所下降, 原因是福建省政府发布了《关于进一步做好 2015 年控制温室气体排放工作的意见》要求福建省当年二氧化碳排放下降 3%, 并围绕该指标实施了一系列强有力的措施, 但总体来看, 福建省碳排放量依然呈上升趋势, 其中泉州、福州、漳州 3 市碳排放量在福建省处于领先水平, 且呈现出较快的增长态势, 南平、宁德、三明 3 市不仅碳排放量相对较低, 其增速也较为平缓。

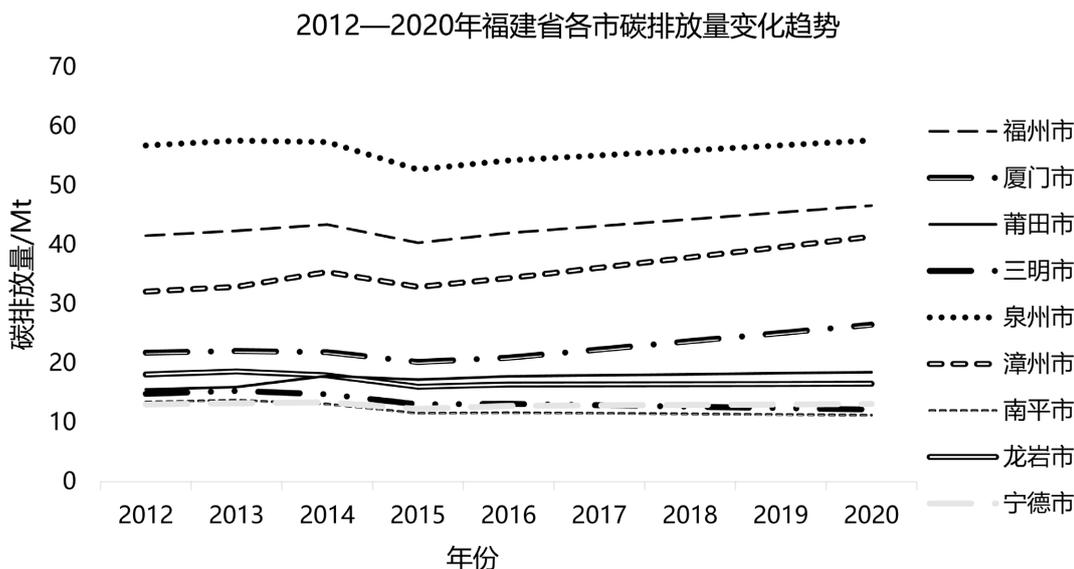


Figure 1. Trends of carbon emissions in various cities of Fujian province from 2012 to 2020  
图 1. 2012~2020 年福建省各市碳排放量变化趋势

空间分布特征显示,福建省碳排放量存在显著区域差异,呈现出“东南高、西北低”的分布格局。具体而言,东部沿海地区的碳排放强度显著高于西部内陆地区,南部区域的排放量亦明显超过北部区域。其中,南部地区的碳排放集中特征尤为突出,以泉州市为核心区域。

## 4.2. 探索性空间数据分析

### 4.2.1. 全局空间自相关

由表 1 可知,2012~2020 年福建省县域碳排放量在空间分布上呈现显著正相关关系。研究期内各年度全局莫兰指数均为正值,且通过了显著性水平为  $p < 0.01$ 、 $z > 2.58$  的显著性水平检验。结果表明,在空间维度上,福建省县域碳排放量存在明显的集聚分布特征,即高碳排放或低碳排放的县(市、区)在地理空间上存在显著的相邻集聚现象;从时间维度上看,碳排放量莫兰指数均满足  $p < 0.01$ 、 $z > 2.58$  的显著性水平检验,表明市(区、县)碳排放量仍存在较高关联,但莫兰指数呈下降趋势,表明福建省县域碳排放量的空间自相关程度正逐步减弱,区域间碳排放的空间集聚效应有所衰减。

**Table 1.** Spatial autocorrelation values of county-level carbon emissions

**表 1.** 县域碳排放空间自相关值

年份	2012 年	2014 年	2016 年	2018 年	2020 年
莫兰指数	0.32	0.31	0.31	0.25	0.27
$z$ 值	4.49	4.37	4.35	3.5	3.69
$p$ 值	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

### 4.2.2. 局部空间自相关

为深入探究福建省各区县碳排放量的内部空间关联特征,本研究选取 2012 年、2016 年和 2020 年三个关键时间节点,通过局部空间自相关分析方法,解析县域尺度下碳排放的空间分布模式及其演变规律。由表 2 可知:① 高-高聚集区 9 个减少到 7 个,高值聚集区主要集中在闽南地区,多为泉州、厦门区县。② 高-低聚集区的区县由 2 个减少到 1 个,2012 年分布在福鼎市和福安市,2016 和 2020 年分布在福安市。③ 低-高聚集区由 3 个增长到 6 个,2012 年主要分布在泉州区县,2020 年分布在泉州区县和平潭区。④ 低-低聚集区由 6 个增长到 8 个,主要位于西北部的南平、三明、宁德三市。上述研究发现可知,福建省碳排放量在空间上呈现明显的分层集聚格局,但各区县间的空间集聚强度正逐步减弱,区县碳排放量在局部空间尺度上存在较强的空间依赖性。

**Table 2.** Spatial autocorrelation analysis of carbon emissions in counties

**表 2.** 县域碳排放空间自相关分析

年份	聚集模式	县(区)	县数量/个
2012	高-高聚集	安溪县 永春县 南安市 翔安区 同安区 晋江市 石狮市 丰泽区 惠安县	9
	高-低聚集	福安市 福鼎市	2
	低-高聚集	鲤城区 洛江区 平潭县	3
	低-低聚集	泰宁县 将乐县 建瓯市 屏南县 政和县 松溪县	6
2016	高-高聚集	安溪县 永春县 南安市 翔安区 同安区 石狮市 泉港区	7
	高-低聚集	福安市	1
	低-高聚集	鲤城区 洛江区 丰泽区 平潭县	4

续表

2020	低 - 低聚集	泰宁县 将乐县 邵武市 建瓯市 屏南县 政和县 松溪县	7
	高 - 高聚集	漳浦县 长泰县 安溪县 南安市 晋江市 同安区 翔安区	7
	高 - 低聚集	福安市	1
	低 - 高聚集	永春市 鲤城区 洛江区 丰泽区 平潭县 石狮市	6
	低 - 低聚集	泰宁县 将乐县 邵武市 明溪县 建瓯市 政和县 松溪县 福鼎市	8

### 4.3. 驱动因素分析

#### 4.3.1. 驱动因素指标选取

综合上述研究结论, 福建省县域碳排放存在显著的空间分异特征, 其变化过程受多元因素的共同作用。因此, 本研究从政策导向、经济发展、产业结构、能源消耗、社会发展等五个维度, 排除共线性较大的因子, 遴选 14 项关键指标, 构建福建省县域碳排放驱动因子体系(见表 3)。

Table 3. Carbon emission driving factors

表 3. 碳排放驱动因素表

一级指标	驱动因子	单位	因子解释
社会因素	人口规模( $X_1$ )	万人	各市(县、区)年末常住人口数
	受教育程度( $X_2$ )	%	中小学学校人数与常住人口数之比
	城镇化水平( $X_3$ )	%	城镇常住人口数与常住人口数之比
	第一产业 GDP( $X_4$ )	亿元	第一产业地区产值
	社会消费品零售总额( $X_5$ )	万元	社会消费品零售总额
	人均社会消费品零售额( $X_6$ )	元/人	社会消费品零售总额与常住人口数之比
	人均 GDP( $X_7$ )	元/人	GDP 与年末常住人口数之比
政策因素	财政支出( $X_8$ )	万元	一般公共预算支出
	科学技术支出( $X_9$ )	万元	各市(县、区)科学技术支出
产业因素	产业升级( $X_{10}$ )	%	第三产业与第二产业产值之比
	农业发展水平( $X_{11}$ )	%	第一产业产值与 GDP 之比
	工业化水平( $X_{12}$ )	%	第二产业产值与 GDP 之比
能源因素	能源消耗量( $X_{13}$ )	百万吨	能源消耗碳排放量
	能源强度( $X_{14}$ )	吨/亿元	能源消耗碳排放量与 GDP 之比

#### 4.3.2. 基于地理探测器的驱动因素识别

基于 2012~2020 年福建省统计年鉴等数据, 使用 ArcGIS 10.8.2 软件, 通过自然断点法将 14 个指标分为五类, 转化为类型量数据进行因子分析。结果见表 4。

Table 4. The explanatory power of driving factors on carbon missions

表 4. 驱动因素对碳排放的解释力

探测指标	不同年份解释变量对碳排放的解释力									
	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	
人口规模( $X_1$ )	0.7480	0.7459	0.7163	0.7072	0.7027	0.6703	0.6503	0.6359	0.7036	

续表

受教育程度( $X_2$ )	0.0616	0.0541	0.0406	0.0383	0.0437	0.0429	0.0245	0.0151	0.0237
城镇化水平( $X_3$ )	0.1237	0.1126	0.1162	0.0950	0.1132	0.1240	0.1194	0.1278	0.0735
第一产业 GDP( $X_4$ )	0.0668	0.0740	0.0762	0.0750	0.0783	0.1106	0.0847	0.1856	0.1279
社会消费品零售总额( $X_5$ )	0.3825	0.3615	0.3436	0.3296	0.3208	0.2957	0.3346	0.3224	0.3239
人均社会消费品零售额( $X_6$ )	0.1228	0.1265	0.1367	0.2188	0.2089	0.1676	0.2091	0.0668	0.0142
人均 GDP( $X_7$ )	0.0840	0.0623	0.0450	0.0379	0.0573	0.0458	0.0665	0.0578	0.0390
财政支出( $X_8$ )	0.6049	0.5850	0.5471	0.4955	0.5000	0.4576	0.4393	0.4622	0.5120
科学技术支出( $X_9$ )	0.6030	0.5654	0.5315	0.4323	0.3238	0.2215	0.2446	0.1839	0.2216
产业升级( $X_{10}$ )	0.1276	0.0710	0.0728	0.0839	0.0577	0.1324	0.1255	0.1041	0.1067
农业发展水平( $X_{11}$ )	0.2397	0.2439	0.2469	0.2622	0.2591	0.3062	0.2740	0.2380	0.2209
工业化水平( $X_{12}$ )	0.2582	0.2197	0.2195	0.2347	0.2800	0.2167	0.2256	0.1696	0.1864
能源消耗量( $X_{13}$ )	0.9514	0.9500	0.9382	0.9413	0.9429	0.9407	0.9448	0.9483	0.9558
能源强度( $X_{14}$ )	0.0614	0.0704	0.1014	0.1479	0.2861	0.2197	0.2667	0.3780	0.2919

由上表得知: ① 解释力强的指标为人口规模、财政支出、社会消费品零售总额和能源消耗量, 其解释力  $q > 0.3$  且  $p < 0.01$ ; ② 解释力较强的指标为农业发展水平、工业化水平和科学技术支出, 其解释力  $q > 0.1$  且  $p < 0.01$ ; ③ 解释力较弱的指标为第一产业、产业升级、城镇化水平和能源强度, 其  $q$  值呈现波动特征, 表现出非平稳性; ④ 解释力弱的指标为人均 GDP、受教育程度和人均零售总额, 其  $q$  值基本小于 0.1 且置信度趋弱。

综上所述, 本文最终选取人口规模、财政支出、社会消费品零售总额、能源消耗量、农业发展水平、工业化水平和科学技术支出七项指标作为主要因子进行分析。

#### 4.3.3. 碳排放驱动因素分析

基于上述结果, 采用时空地理加权回归模型对七项指标进行分析。经过多次实验, 当参数  $\sigma$  设置为 0.12, 带宽设置为 0.115 时, 决定系数  $R^2$  达到了 0.9978, 模型取得较好的效果。为检验时空地理加权回归模型的有效性, 采用对比分析法, 将该模型的回归结果与普通最小二乘模型、地理加权回归模型的结果进行比较。通过评估不同模型在拟合优度及解释能力等方面的差异(见表 5)。结果表明, 时空地理加权回归模型拟合度最优, 且较 OLS 模型和 GWR 模型相比, 残差平方和分别下降了 47.43 和 47.01, 赤池信息准则分别下降了 1163.86 和 1165.23。

Table 5. Comparison of evaluation indicators of three models

表 5. 三种模型评价指标对比

模型	拟合度 $R^2$	残差平方和	赤池信息准则
OLS	0.9879	58.10	234.56
GWR	0.9881	57.68	235.93
GTWR	0.9978	10.67	-929.30

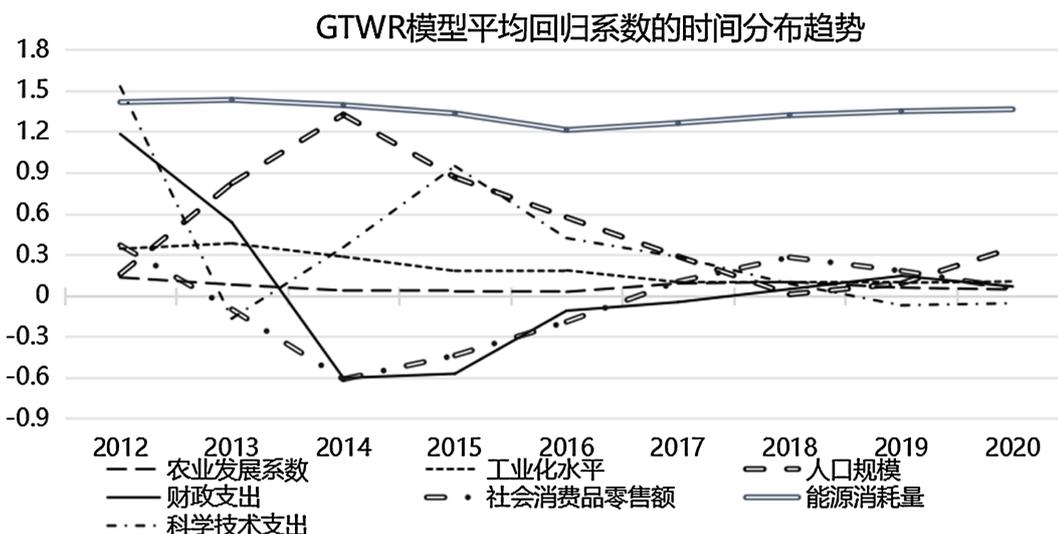
采用灰色关联分析对上述结果进行敏感性分析, 结果见表 6。

**Table 6.** Sensitivity analysis  
**表 6.** 敏感性分析

驱动因素	$X_1$	$X_5$	$X_8$	$X_9$	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$
敏感度指标	0.901	0.816	0.877	0.742	0.641	0.722	0.970

依据灰色关联分析可以计算出各驱动因素的敏感度指标如表 6 所示, 可得 7 个驱动因素对福建省碳排放量的敏感度大小排序为:  $X_{13} > X_1 > X_8 > X_5 > X_9 > X_{12} > X_{11}$ 。

时空地理加权回归模型整合空间异质性与时间动态变化的双重维度, 能够更精准地捕捉变量间复杂的时空关系, 为量化分析提供更具解释力和适用性的研究工具。基于此, 绘制 GTWR 模型平均回归系数时间分布趋势图, 呈现福建省县域碳排放在不同时段内各影响因素的变化趋势, 见图 2。



**Figure 2.** Time distribution of regression coefficients for driving factors  
**图 2.** 驱动因素回归系数的时间分布

(1) 农业发展水平对碳排放始终呈现稳定的正向驱动作用, 其回归系数保持平稳正值, 表明福建省农业现代化进程持续推动着碳排放增长。

(2) 工业化水平虽然同样呈正向相关性, 但其回归系数呈现显著下降趋势, 反映出产业转型升级政策正在逐步显现减排成效。国家“双碳”目标与福建省“十四五”工业高质量发展规划协同, 推动传统制造业转型。

(3) 人口规模对碳排放的影响呈倒 U 型, 体现人口红利与城镇化进程的阶段性作用。城镇化初期, 人口向城市集聚, 建筑施工、交通运输等领域碳排放增长, 居民生活方式改变也推高碳排放。但人口老龄化加剧, 劳动年龄人口占比下降, 社会能源需求增速放缓, 人口规模对碳排放的推动作用减弱并趋于平稳。

(4) 财政支出、社会消费品零售额和科学技术支出三项经济指标表现出更为复杂的波动特征, 其回归系数呈现正负交替现象。这种动态变化揭示了经济发展与碳排放之间的非线性关系: 一方面, 财政水平提升带来的经济发展会通过能源需求增长推高碳排放; 另一方面, “十三五”规划实施的绿色发展政策, 这方面的经济指标有效促进了经济发展方式的绿色转型, 得以呈现出对碳排放的抑制作用, 使得经济增长的碳强度逐步降低。

(5) 能源消耗量对碳排放有显著正向影响, 凸显能源结构调整的关键作用。福建作为经济外向型省份, 工业生产对能源需求大, 火力发电占比高, 导致碳排放居高不下。

## 5. 结论与建议

### 5.1. 结论

本研究以福建省 83 个县为研究单元, 综合运用空间自相关方法, 探寻 2012~2020 年间县域碳排放的时空演变规律; 借助地理探测器技术, 识别影响碳排放的关键驱动因素; 并通过时空地理加权回归模型, 探究主导驱动因子在时间维度上的分异特征及其作用机制。研究结果显示:

(1) 福建省碳排放量呈逐年递增趋势。基于莫兰指数的分析结果显示, 从空间维度上看, 碳排放的空间上表现出显著的集聚分布特征, 碳排放量高的地区主要集中在闽东南地区, 碳排放量低的地区主要集中在闽西北地区, 高 - 高聚集区和低 - 低聚集区的空间分布格局无明显转变。

(2) 基于地理探测器发现, 人口规模、财政支出、社会消费品零售总额、能源消耗量、农业发展水平、工业化水平和科学技术支出七项指标是影响碳排放的主导因子。基于 GTWR 模型分析可知, 农业发展水平、工业化水平和能源消耗量对碳排放产生正向影响, 其中能源消耗量呈现稳定且显著的促进作用, 其平均回归系数保持在 1.2 以上; 人口回归系数人口规模对碳排放的影响呈倒 U 型, 受人口红利与城镇化阶段性作用影响, 人口老龄化使推动作用逐渐减弱; 而经济指标表现出更为复杂的波动特征, 其回归系数呈现正负交替现象, 经济发展推高碳排放的同时绿色发展政策又抑制碳排放。

### 5.2. 建议

(1) 推广绿色农业技术, 优化农业生产方式。加大对绿色农业技术的研发投入和推广力度; 推进农业机械化的电动化、智能化改造, 提高能源利用效率。

(2) 加强产业结构调整: 推进节能减排技术改造。严格控制高耗能、高排放项目的建设, 加快淘汰落后产能。推动传统制造业向高端化、智能化、绿色化转型。

(3) 优化能源结构, 提高能源利用效率: 加大对清洁能源的开发和利用力度, 提高风电、太阳能、水能、生物质能等可再生能源在能源消费中的比重, 减少对煤炭等化石能源的依赖。

## 参考文献

- [1] 李睿奇. 长江中游地区工业碳排放影响因素及脱钩效应研究[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2024.
- [2] Jin, Y., Sharifi, A., Li, Z., Chen, S., Zeng, S. and Zhao, S. (2024) Carbon Emission Prediction Models: A Review. *Science of The Total Environment*, **927**, Article 172319. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172319>
- [3] 国务院. 2024-2025 年节能降碳行动方案[R]. 北京: 国务院, 2024.
- [4] 许灵凤, 陈皖玲, 朱红梅, 等. 湖南省不同土地利用类型碳排放特征与驱动因素分析[J]. 环境科学, 1-20. <https://doi.org/10.13227/j.hjxk.202406034>, 2025-06-18.
- [5] 王元奎, 彭渝佳, 刘添一. 基于 PCA 与聚类分析的我国农业碳减排驱动因素研究[J]. 中国市场, 2024(5): 78-81.
- [6] Wen, L. and Li, Y. (2017) The Causality Relationships between Energy-Related CO<sub>2</sub> Emissions and Its Influencing Factors with Linear and Nonlinear Granger Causality Tests. *Polish Journal of Environmental Studies*, **26**, 1313-1322. <https://doi.org/10.15244/pjoes/67356>
- [7] Xu, P., Zhou, G., Zhao, Q., Lu, Y. and Chen, J. (2024) Spatial-Temporal Dynamics and Influencing Factors of City Level Carbon Emission of Mainland China. *Ecological Indicators*, **167**, Article 112672. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112672>
- [8] 王巧玲, 李双成. 云南省碳排放时空演变特征及驱动因素分析[J]. 中国环境科学, 2025, 45(1): 528-537.
- [9] 范建双, 周琳. 城镇化及房地产投资对中国碳排放的影响机制及效应研究[J]. 地理科学, 2019, 39(4): 644-653.
- [10] Lu, Z., et al. (2024) Decoupling Effect and Influencing Factors of Carbon Emissions in China: Based on Production,

- Consumption, and Income Responsibilities. *Advances in Climate Change Research*, **15**, 1177-1188.
- [11] Bekun, F.V., Gyamfi, B.A., Olasehinde-Williams, G. and Yadav, A. (2024) Revisiting the Foreign Direct Investment-CO<sub>2</sub> Emissions Nexus within the N-EKC Framework: Evidence from South Asian Countries. *Sustainable Futures*, **8**, Article 100357. <https://doi.org/10.1016/j.sfsr.2024.100357>
- [12] 李志东, 杜烜锋. 基于 STIRPAT 模型的辽宁省碳排放预测[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2024, 42(5): 398-402.
- [13] 牛鸿蕾. 中国城镇化碳排放效应的实证检验[J]. 统计与决策, 2019, 35(6): 138-142.
- [14] 周航, 赵先超. 县域尺度下湖南省碳排放空间分异特征与影响因素[J]. 地球科学与环境学报, 2024, 46(2): 196-210.
- [15] 陈潇, 陈奕霖, 甘晖, 等. 福建省县级碳排放时空特征和面板数据模型分析[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2023, 39(5): 83-92.
- [16] Chen, J., Gao, M., Cheng, S., Hou, W., Song, M., Liu, X., et al. (2020) County-Level CO<sub>2</sub> Emissions and Sequestration in China during 1997-2017. *Scientific Data*, **7**, Article No. 391. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00736-3>
- [17] 贾璧宇. 黄河流域旅游产业结构优化对旅游业碳排放效率的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 山西财经大学, 2024.
- [18] 姚小剑, 吴毓源. 粤港澳大湾区碳排放影响因素分析与情景预测[J]. 资源与产业, 2025, 27(3): 44-53.
- [19] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [20] 蒋明月. 黄河流域中下游城市群创新生态系统创新绩效评价及影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2024.
- [21] 朱梅涛, 李翺, 武杰, 等. 京津冀地区水质净化特征时空演变及影响因[J]. 地质通报, 1-21. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.P.20250407.1619.002.html>, 2025-06-18.
- [22] Huang, B., Wu, B. and Barry, M. (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>