doi：10.16006/j.cnki.twnt.2024.01.006

福州都市圈碳排放时空格局演变及其驱动因素分析

任治霖，陈　嘉，方健锋，姜程伟

（闽江学院地理与海洋学院，福建　福州　350108）

摘　要：【目的/意义】探究福州都市圈 2001—2020 年碳排放时空格局及其演变过程，为福州都市圈绿色发展及我国都市圈碳排放合理控制等相关问题提供借鉴。【方法/过程】分析福州都市圈碳排放时空格局演变的影响因素及作用机理，探讨福州都市圈产业结构可持续发展转型的建议。【结果/结论】结果表明：（1）从时间序列角度，都市圈碳排放总量年际变化可大致分为 2 个阶段：2001—2011 年的快速增长期，都市圈碳排放量迅速增加；2012—2020 年的波动调整期，都市圈能源结构调整减缓了碳排放的继续增长；（2）在时空格局演变方面，福州都市圈碳排放量空间格局从早期的分散布局逐渐向东南沿海地区集中，呈现以福清市为核心发散的环状空间布局；（3）在驱动因素方面，人口增长、地区经济发展与产业结构是重要的影响因素。基于此，结合已有经验，提出福州都市圈产业转型与能源结构优化的建议。

关键词：碳排放；kaya 公式；灰关联；产业结构；福州都市圈

中图分类号：F061.5　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673—5617（2024）01—0038—08

Analysis on the Spatial-temporal Pattern Evolution and Driving Factors of Carbon Emissions in the Metropolitan Area of Fuzhou

REN Zhi-lin，CHEN Jia，FANG Jian-feng，JIANG Cheng-wei

（*College of Geography and Ocean*, *Minjiang University*, *Fuzhou*, *Fujian* 350108, *China*）

Abstract：【Objective/Meaning】By exploring the spatial and temporal pattern and evolution process of carbon emissions in the metropolitan area of Fuzhou from 2001 to 2020, it would provide reference for the green development of metropolitan area in Fuzhou and the reasonable control of carbon emissions in the metropolitan area of China.【Methods/Procedures】The influencing factors and mechanism of the spatial and temporal pattern evolution of carbon emissions in the metropolitan area of Fuzhou were analyzed, and then the suggestions for the sustainable development and transformation of industrial structure in the metropolitan area of Fuzhou were discussed. 【Results/Conclusions】The results showed that: (1) From the perspective of time series, the interannual variation of total carbon emissions in the metropolitan areas could be roughly divided into two stages: a rapid growth period from 2001 to 2011, during which there was a rapid increase in the carbon emissions of the metropolitan area, and a fluctuation adjustment period from 2012 to 2020, during which the adjustment of energy structure in the metropolitan area slowed down the continued growth of carbon emissions. (2) In terms of the evolution of spatial and temporal pattern, the spatial pattern of carbon emissions in the metropolitan area of Fuzhou has gradually concentrated from the early scattered layout to the southeastern coastal areas showing a circular spatial layout with Fuqing City as the core. (3) In terms of the driving factors, the population growth, regional economic development, and industrial structure were the important influencing factors. Based on this, by combining the research findings with the existing experience, the countermeasures were put forward for the industrial transformation and energy structure optimization of metropolitan area in Fuzhou.

Key words： carbon emissions；Kaya formula；grey correlation；industrial structure；metropolitan area in Fuzhou

收稿日期：2023—06—15

作者简介：任治霖（2002—），男，研究方向：经济地理、城乡规划. E-mail：3309279213@qq.com

通讯作者：陈嘉（1988—），女，博士，副教授，研究方向：经济地理、闽台产业融合. E-mail：chenjia_1028@163.com

基金项目：国家自然科学基金青年科学基金项目（41801116）；福建省自然科学基金面上项目（2021J011023）；闽江学院校长基金项目（103952022169）

“双碳”问题是我国新发展时期与新格局下的热点与关键，不仅涉及我国所作出的重大承诺，还指向新的发展模式与格局，对地方创新驱动及转型发展意义重大。以《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》为代表的一系列党中央重要文件多次强调了“碳达峰、碳中和”的重要性。碳排放是研究双碳问题的重要指标之一，都市圈是我国区域发展的重大项目，进行都市圈碳排放问题的相关研究，有助于圈内城市合理健康可持续发展。

国内外对都市圈发展过程中碳排放的变化及影响因素研究方向有所不同。就目前有关区域碳排放研究而言，国外相关研究主要集中于经济与能源领域对碳排放的影响。如 Jung 等[1] 以美国大都市区为研究对象，分析得出人口、GDP 等指标和中心城市数量、空间布局等因素对美国大都市区碳排放的影响。Fujia 等[2] 对众多城市碳排放与经济增长关系的研究，认为城市碳排放与城市经济增长之间存在反向变化关系。Haakman 等[3] 对 Randstad 和 Rhine-Ruhr 地区交通碳排放进行研究，并从地方政策角度提出建议。国内大多数成果聚焦于结合某一影响因素或角度探究省域等尺度的碳排放研究，如张腾飞等[4] 基于城镇化率的碳排放研究，朱勤等[5] 基于居民消费结构的碳排放分析，以及马大来等[6] 对省际碳排放效率的研究，但研究具体地区的碳排放时空格局的案例较少，且现有研究主要集中于定量分析某个或某些影响因素，基于空间格局与时空演变并进行多因素的相关研究较少见。在都市圈相关研究方面，中国目前拥有 34 个都市圈，众多学者对中国都市圈以及基于城市群的碳排放与产业结构联系的研究积累了丰富经验。如王腾飞等[7] 以胶东半岛为例，提出打造以青岛为中心的国家级都市圈的构想；翟丙英等[8] 指出产业结构对于人均碳排放量的影响，并提出未来的城市群发展应优化产业结构，重点发展第三产业；陈阳[9] 则提出产业结构调整对经济增长起决定性作用，也对产业系统绿色发展效率的提升有着重要影响；而巩雪娇[10] 更是提出，由于黄河“几”弯都市圈产业结构单一且主导产业大多为能源化工产业，造成了环境污染与资源浪费，提高了碳排放总量与能耗；此外，Wang 等[11] 在对中国台湾地区台北都市圈的碳排放研究中，结合城市规划，认为土地利用活动与城市形态变化对城市碳排放有密切联系。由此可见，研究地区碳排放的关键影响因素有助于指导该地未来发展模式的优化改革，为地区产业结构、经济结构、能源结构等的调整提供借鉴。

近年来国内有关城市群碳排放的研究主要侧重于已形成或趋于成熟的地区作为样本，如河北省、京津冀城市群、郑州都市圈、河西走廊地区等[12−15]。福州都市圈位于福建省东北部、台湾海峡西岸沿岸，是 2021 年批复的国家级都市圈。其发展规划定位将创新走廊构建、绿色协同发展作为重点，规划提到的“推进生态环境共防共治，构建城市间绿色隔离和生态廊道”给予了该圈创新、协调、绿色、开放、共享的发展导向。对其发展历程与现状进行研究与探索，进而对福州都市圈碳排放结构进行合理的优化，加快实现“碳达峰、碳中和”，有着显著的现实意义与政策启示作用。作为新近批复的都市圈，福州都市圈概念提出时间晚且区域范围较小，属于一个相对新颖的研究区域，与福州都市圈碳排放相关的文献资料较为匮乏。然而由于其地理位置特殊，该都市圈的发展有助于推动海西经济圈乃至东南地区经济合理发展，因而本文选取福州都市圈为研究区域，利用都市圈范围内各县市区历年产业结构方面的碳排放数据，运用 ArcGIS 绘制多年碳排放时空格局演变图，结合灰色关联分析法及 kaya 公式等方法分析福州都市圈内碳排放体系的主要问题，并进一步研究都市圈碳排放主要来源，结合产业结构、人口规模、农产品生产量、经济发展因素探讨其驱动因素，旨在为福州都市圈绿色发展及我国都市圈碳排放合理控制等相关问题提供借鉴。

1　研究区概况及数据来源

1.1　福州都市圈概况

2021 年 5 月，国家发展改革委正式批复同意福州都市圈发展规划，使得福州都市圈成为第二个国家级都市圈[16]。该都市圈的发展建设贯彻习近平总书记“山海联合、优势互补、相互辐射、共同腾飞”的发展理念，坚持深化山海协作，推动城乡统筹，加快解决发展不平衡不充分的问题。福州都市圈位于福建省东北部、台湾海峡西岸沿岸，以福州为中心，包括莆田、平潭综合实验区全域，以及宁德市蕉城区、福安市、霞浦县、古田县，南平市建瓯市的部分地区、延平区、建阳区。都市圈陆域面积 2.6 万 km^2，2020 年常住总人口约 1300 万人，地区生产总值约 1.5 万亿元，分别占福建省的 21.5%、33.5% 和 34.5%，区域现以第三产业为主导产业，规划以基础设施、产业与创新、公共服务、生态环保等领域协同为重点，至 2025 年形成现代产业体系格局，通过不断提高能源资源利用效率，

逐步建成我国东部沿海地区高质量发展示范区[4]。在都市圈中，有生态环境保护较好的乡村，也有产业发达的城市。都市圈内城乡协同发展必将加速区域内城乡融合的进程，也必然会改变区域整体产业布局等影响碳排放的因素，进而影响区域内碳排放与创新绿色发展路径。

1.2 数据来源及处理

本文运用的福州都市圈各县市区碳排放数据来源于中国碳排放数据库（CEADS），运用 ArcGIS 绘制多年碳排放时空格局演变图，结合灰色关联分析法及 kaya 公式等方法分析了福州都市圈内碳排放体系的主要问题，并进一步研究了都市圈碳排放主要来源，结合产业结构、人口规模、农产品生产量、经济发展因素探讨其驱动因素。而驱动因素中三次产业占比、人口规模、农产品生产量、工业产值、消费品零售总额等数据来源于《福建省统计年鉴》及各地方统计年鉴。由于 2020 年碳排放数据库未更新，利用 2017 年数据进行平滑预测，近似得到 2020 年都市圈碳排放相关数据，构建影响因素指标体系（表 1），用以研究 2020 年都市圈碳排放格局及相关因素，具体包括如下：（1）选用人均 GDP、农产品生产量、工业产值、社会消费品零售总额测度经济发展水平；（2）选用人口规模测度人口分布状况；（3）选用第一、二、三产业占比测度产业结构。

表 1 福州都市圈各县市区碳排放影响因素指标体系

影响因素	测度指标
经济发展水平	人均GDP
	农产品生产量
	工业产值
	社会消费品零售总额
人口分布状况	人口规模测度
产业结构	第一产业占比
	第二产业占比
	第三产业占比

2 福州都市圈碳排放时空格局分析

2.1 都市圈碳排放总量的时间序列分析

根据福州都市圈碳排放总量的年变化图可知（图 1），都市圈范围内城市在 2001—2020 年内，碳排放保持波动上升趋势，并逐渐趋于平缓。总体上，都市圈碳排放总量年际变化可大致分为 2 个阶段：2001—2011 年的快速增长期，以及 2012—2020 年的波动调整期。在第一阶段，自 2002 年起福州都市圈的碳排放水平呈显著提升趋势，由 2002 年的 1.03 万 t 增至 2011 年 2.84 万 t，年均增速达 10.1%，这一阶段，福建省总体经济发展较快，碳排放量迅速增加，而福州都市圈内的县市区也进入了快速发展时期，乡镇企业、运输行业的高速发展带动碳排放总量的大幅提升。自 2012 年起，都市圈碳排放总量进入波动调整期，平均维持在 2.96 万 t 左右，增速则显著下降，年均增速为 4.15% 左右，其中在 2015 年还出现了明显降低的情况。在“十二五”期间，福建省政府下达了关于环境治理与排放管理相关的政策，有效遏制了碳排放水平上升速度，同时，能源结构也进行了积极的调整。尤其是自 2014 年起，福建核能开始大规模使用，降低了化石能源的比重，使得省内生产生活造成的碳排放情况有了改观。

2.2 都市圈碳排放空间格局及其演化

结合福州都市圈碳排放数据，利用 ArcGIS 自然断裂法绘制福州都市圈碳排放格局演变图（图 2）。为便于分析，仍将碳排放量发展阶段分为快速增长期（2001—2011）及波动调整期（2012—2020）。

由都市圈碳排放空间格局演变情况可知（图 2），在研究初始阶段（2001 年），福州都市圈碳排放以福清市为高值区，福州市晋安区以及福清市北部毗邻的长乐区、闽侯县为中高值区域，中值区分布在福州市仓山区、连江县以及莆田市等围绕中高值区的地区，而中低值与低值区则分别分布于建阳区、霞浦县、永泰县、平潭县以及建瓯市、古田县、闽清县等外围地区。而后都市圈碳排放进入快速增长期，期间其碳排放空间格局有所变化，高值及中高值区域明显增加，2011 年高值区增加了长乐区、闽侯县，而中高值区范围除原本晋安区外，扩大到莆田市仙游县、涵江区、荔城区以及连江县、福安市、延平区等部分原中值区地区。中值区则基本维持原有的分布规律，除去转为中高值区的地区，还包含秀屿区和蕉城区。进入波动调整期（2011—2020 年）后，都市圈内碳排放格局保持相对稳定。相较于 2011 年前高值区扩大的趋势，2020 年圈内地区碳排放格局有了一定的改善。高值区只有福清市，中高值区范围缩减至仙游县、秀屿区、闽侯县和长乐区，其余地区均为碳排放中值、中低值及低值区域。

总体上看，整体碳排放格局有所好转，但碳排放

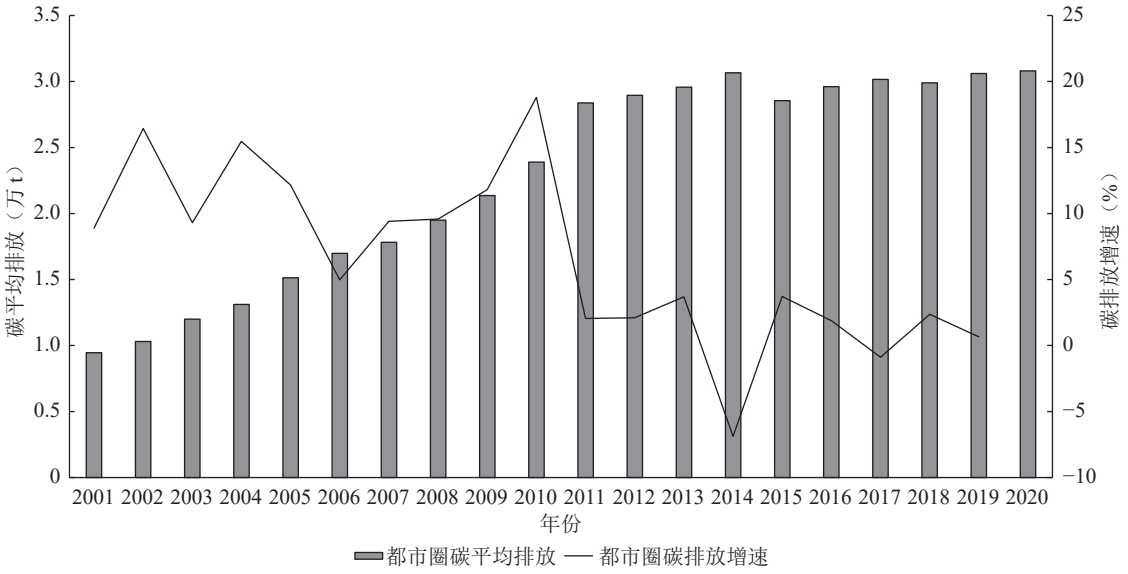

图 1　2001—2020 年福州都市圈平均碳排放趋势及增速

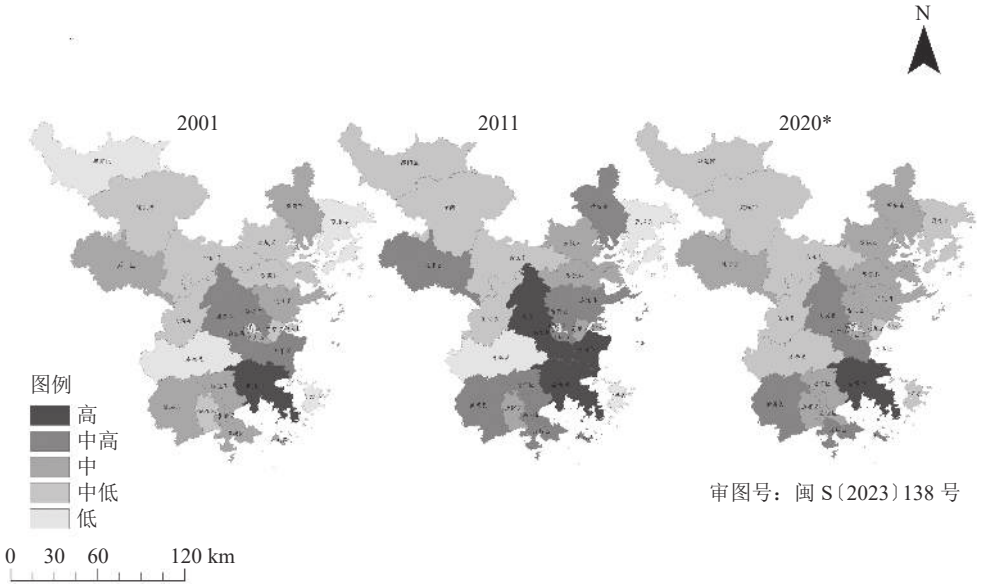

图 2　主要年份福州都市圈碳排放空间格局

注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为闽 S〔2023〕138 号标准地图制作，底图无修改。

总量依然在增加。福州都市圈内部存在一个碳排放核心，呈现由沿海向内陆递减的趋势。都市圈碳排放高值区核心位于都市圈东南区域，集中于福清、闽侯、长乐一带，体现出区域碳排放分布与各城市产业结构密切相关，区域内第二产业占比高的则碳排放量相对而言亦较高。其中，福清市多年来一直是都市圈碳排放的高值区域，这与其多年来以港区经济、工业经济为主导的产业结构有关。碳排放中值区域多年间有所变化，但总体上集中于莆田市周边及福州市连江区等靠近高值区的地区，而碳排放总量相对较低的区域则集中于区域外围远离高值区的地区，以永泰、平潭和霞浦为主要县区，这与县区内较好的生态环境及第三产业为主的产业结构有关，也与地方开发的时间总体较短有关[17]。

3　福州都市圈碳排放驱动因素分析

在研究某地碳排放量变化的影响因素时，往往会聚焦到某个或某些要素上，例如 GDP、人口、产业、能源消费结构等方面[18]。本文借鉴 kaya 公式，利用灰关联分析法定量分析福州都市圈碳排放量主要影响因

素。Kaya 公式是由日本 Yoichi Kaya 教授于 1989 年提出，将经济、政策、人口等因素与人类活动产生的 CO_2 联系起来，并从中发现不同影响因素对碳排放的不同影响力[19]。结合 Kaya 公式，本文主要探讨经济发展、产业结构、人口规模等因素对区域碳排放量的影响，分别以各区域人均 GDP 与常住人口总量、三次产业比重来表征各地区经济发展水平、人口分布状况与产业结构，以农产品生产量、工业产值、社会消费品零售总额表征三次产业发展状况，在数据无量纲化的基础上，利用灰色关联分析法试图分析都市圈碳排放的主要驱动因素（表 2）。

表 2　福州都市圈碳排放驱动因素灰关联系数

年份（年）	人均GDP	第一产业占比	第二产业占比	第三产业占比	人口	农产品生产量	工业产值	社会消费品零售总额
2001	0.75	0.36	0.46	0.52	0.96	0.51	0.68	0.69
2002	0.73	0.36	0.48	0.52	0.74	0.53	0.68	0.67
2003	0.69	0.49	0.49	0.58	0.94	0.60	0.64	0.63
2004	0.68	0.47	0.50	0.64	0.98	0.59	0.64	0.62
2005	0.63	0.47	0.60	0.68	0.78	0.67	0.61	0.59
2006	0.61	0.47	0.66	0.76	0.66	0.72	0.59	0.57
2007	0.67	0.59	0.68	0.78	0.69	0.93	0.64	0.59
2008	0.68	0.73	0.73	0.92	0.75	0.98	0.65	0.60
2009	0.68	0.97	0.94	0.91	0.80	0.97	0.65	0.61
2010	0.71	0.85	0.69	0.84	0.86	0.86	0.70	0.62
2011	0.66	0.63	0.71	0.61	0.86	0.62	0.71	0.58
2012	0.74	0.61	0.63	0.61	0.88	0.63	0.81	0.69
2013	0.85	0.59	0.66	0.57	0.89	0.64	0.95	0.85
2014	0.96	0.51	0.62	0.55	0.87	0.63	0.78	0.98
2015	0.77	0.51	0.68	0.66	0.93	0.76	0.60	0.63
2016	0.68	0.54	0.59	0.64	0.96	0.73	0.55	0.56
2017	0.55	0.44	0.57	0.67	0.65	0.67	0.54	0.48
2018	0.44	0.37	0.52	0.77	0.65	0.64	0.47	0.41
2019	0.38	0.38	0.51	0.86	0.68	0.69	0.42	0.35
2020	0.37	0.37	0.49	0.86	0.67	0.71	0.40	0.35
关联系数	0.72	0.57	0.63	0.68	0.85	0.71	0.68	0.60

由表 2 可知，2001 年，都市圈碳排放影响因素中，人口规模是影响力最大的因素，相关系数达 0.96，而人均 GDP、社会消费品零售总额等因素次之，相关系数分别为 0.75、0.69，工业产值、第三产业占比、农产品生产量、第二产业占比和第一产业占比分列其后。2011 年碳排放影响因素中，人口依旧是影响最大的因素，但较 2001 年有所下降，相关系数为 0.86，第二产业占比、工业产值、人均 GDP、第一产业占比、农产品生产量、第三产业占比和社会消费品零售总额分列其后。2020 年，都市圈碳排放影响因素中第三产业占比成为影响力最大的因素，关联系数高达 0.86，农产品生产量、人口、第二产业占比、工业产值、第一产业占比、人均 GDP、社会消费品零售总额次之，关联系数分别为 0.71、0.67、0.49、0.40、0.37、0.37、0.35。

总体上，在 2001—2020 年的福州都市圈各年碳排放驱动因素关联度最大的且次数最多的为区域人口规模，关联系数高达 0.85；而经济发展指标影响力居次，人均 GDP、农产品生产量、工业产值、消费品零售总额等指标分列第二至第五位。由驱动因素关联系

数的演变可知，快速增长期（2001—2011 年）内，所选指标与碳排放的关联度总体保持上升，第二产业与人口总量与碳排放的关联度呈明显上升趋势；波动调整期（2012—2020 年）内，都市圈碳排放增速放缓，各指标与碳排放的关联度趋于平稳。由此可见，各项指标中“区域人口规模”因素对福州都市圈碳排放影响最为明显。因此，在 2001—2020 年的福州都市圈碳排放中，不断增加的区域人口规模和农产品生产量是导致碳排放上升的主要因素，而经济发展与产业结构则一直对区域碳排放有着重要影响。

综上所述，人口是影响都市圈碳排放最明显的关键要素。2001—2020 年区间内，人口对于都市圈碳排放的影响常年位居高位。结合现有文献可知，观察“主要年份福州都市圈碳排放空间格局”（图 2），对比都市圈人口密度，可以发现人口密度最高的福州市区碳排放低于地域周边地区，而人口密度较福州市低的莆田市等地碳排放较高，表明都市圈内各城市地区发展水平存在较大差异，有的县市跨过了第一或第二临界点，有的显示仍处于发展起步阶段[20]。因此实质上，相较于人口密度，经济发展差异性在都市圈碳排放空间分布上的关联性更大。

产业结构对都市圈碳排放的影响稍逊于人口规模，但是其变化也会左右碳排放情况。由表 2 可知，第一产业与第二产业在 2001—2020 年都市圈碳排放的占比中呈现以 2009 年为折点的先波动上升后波动下降的过程，而第三产业在经历了 2001—2008 年的上升后也出现了波动下降的趋势，但在 2014 年前后重新呈增长趋势，并逐渐居于各大要素之首。在第一产业方面，农产品生产量对都市圈碳排放的影响仅次于人口因素。福州都市圈的农产品生产总量增长，且农作物播种面积减少，原因是农业机械化的发展，投入的生产要素增加了能源消耗，化肥使用成为农业碳源。农产品生产量的影响不是直接作用，其背后蕴含的是农业技术的提高导致的农业碳排放的增加。相较本文所选其他指标而言，第二产业在都市圈碳排放的贡献度并不高，其在经济结构中的占比与碳排放关联度在 2009 年达到峰值（0.9381），同期全中国碳排放量跃居世界第一，全国正处于经济高速发展阶段。之后都市圈范围内第二产业与碳排放关联度波动下降，反映区域工业化水平较发达地区有较大差距。结合已有研究分析，都市圈产业结构的地域差异导致了二三产业过度集中于东部沿海发达地区，在导致了经济发展不平衡的同时也影响到了地区碳排放重心的分布，使其徘徊在都市圈东南区域[21−22]。由此可以发现，经济结构与能源结构是影响区域碳排放的重要因素。以工业为主导的传统工业经济模式在没有改善能源结构的情况下就会持续高碳排放，经过产业结构调整或能源结构优化的地区碳排放情况就会得到改善。

经统计，经济发展对都市圈碳排放的影响与人口指标相比较低。其中，人均 GDP、社会消费品零售总额碳排放与工业产值、农产品生产量相比关联度较低，仅 2014 年呈现与碳排放有明显的关联性。但根据一般规律，碳排放与经济增长直接挂钩。现有研究表明，经济发展和碳排放关系与人口和碳排放“N”型关系不同，随着经济发展和产业集聚的初步发展，碳排放会呈现降低趋势；随着经济发展越过某一临界点时，碳排放会随着产业集聚发展而上升；越过第二临界点后，碳排放会随着产业结构的优化与清洁能源的普及而减少。因此，经济发展作用于碳排放会呈现出地域差异性[23]。而在福州都市圈范围内，则表现为经济重心所在的福州地区碳排放量市中心较低，市区外围较高，郊区较低。从福州各辖区经济结构与发展情况来看，低碳排放的市中心包括鼓楼区、台江区、以金融业商业及众多第三产业集聚形成经济组团等，其较为发达的经济结构使区域碳排放水平维持较低水平；闽侯、福安、长乐等外围地区以轻重工业区、产业园为经济支柱，着重发展第二产业，货物集散密集且能源消耗量大，伴有大量污染物排放，则会造成碳排放较高；福州辖区最外围为闽清、永泰等以生态保护为主要职能的区县，这些地区经济以林业、旅游业为主导产业，其稳定的经济结构、良好的生态与较低的人口使得地区碳排放量处于较低水平。而在整个福州都市圈范围，不同地区碳排放水平的差异依然与地区经济结构与发展水平的不同相关，并表现为上述规律。

4　结论与建议

4.1　主要结论

本文通过研究福州都市圈碳排放的时空格局演变，进而利用 kaya 公式以及灰色关联分析法分析福州都市圈内碳排放的主要驱动因素，由此较为全面深入地分析福州都市圈碳排放时空格局及其驱动因素，得到主要结论如下：

（1）在碳排放的时间序列分析方面，本文发现福州都市圈内大致分为快速增长期（2001—2011 年）和波动调整期（2011—2020 年），其中高速增长时期（2001—2011 年）碳排放量开始逐年增加，历年的增

加量也开始平稳上升，但在波动调整期（2011—2020 年），碳排放量虽然依然在上升，但总体速度减缓，历年的增加量大幅减少乃至下降。总的来说，2001—2020 年的福州市都市圈碳排放量大致呈“S”型增长并仍保持一定的增长态势。（2）在碳排放的空间格局演化方面，空间格局由 2001 年的碳排放东南沿海单一高值核心向 2010 年碳排放高值区东部沿海条状分布发展，截至 2020 年碳排放量呈现自东南向西北逐级递减的环状格局。由上述分析看，2001—2020 年福州市都市圈周边地区的碳排放格局在不断改善，至 2020 年都市圈碳排放格局仍呈现自东南向西北递减的格局，中高值区与高值区退居都市圈东南沿海，大体范围包括以福清市为中心的福州部分区域以及莆田市大部分区域，而中值区范围主要为福州市区以及宁德沿海环三都澳地区，其余中低值区多位于都市圈西北边缘地区。但同时高值区和中高值区范围趋于固定，需要针对重点区域进行进一步整治。（3）通过灰色关联模型的分析可知，在 2001—2020 年的福州都市圈各年碳排放驱动因素关联度最大的为区域人口规模，其次为农产品生产量与第三产业占比，最后为工业产值与消费品零售总额。由此可见，区域人口规模因素对福州都市圈碳排放影响最为明显，而经济结构与产业结构的地区差异性导致了都市圈碳排放地域差异。产业结构的调整将改变能源结构，其合理的优化将使区域碳排放水平进一步降低并维持在正常水平。

4.2 讨论

综上，针对影响福州市都市圈最大的几个因素：区域人口规模、第三产业占比、农产品生产量与工业产值，福州市都市圈应积极优化现有城市结构，缓解“强省会”政策下人口增加导致碳排放量增加的问题，同时避免城市化进程的无序发展导致大量人口涌入城市；整体可继续降低第二产业比重，大力发展金融商贸、电子信息等第三产业，配合“强省会”战略，使区域整体经济越过第二临界点，从而实现碳排放水平降低。具体如下：

（1）针对关联度最大的驱动因素，即区域人口规模，福州都市圈的目标应是在未来将人口规模控制于一定的区间内，优化措施方向应为积极改善现有城市结构，缓解“强省会”政策下人口增加导致碳排放量增加的问题，同时避免城市化进程的无序发展导致大量人口涌入城市。在实际政策上，政府可以出台福州都市圈内统一的城乡规划法，加快农村土地制度与户籍制度改革的改革，将城乡用地进行市场化整合，发掘工农用地成为服务城乡产业功能区的潜力，促进城乡生产要素的双向流动，加快城市化发展以减少人口向现有市区的涌入。同时基于国土空间规划这一背景，严格落实“多规合一”政策，促进农村文化建设，城乡基础设施和公共服务均等化，以及教育资源与医疗资源的共享化。

（2）针对第三产业占比与工业产值这 2 个驱动因素，福州都市圈的优化措施方向应为在整体上继续降低第二产业比重，大力发展金融商贸、电子信息等第三产业，配合“强省会”战略，使区域整体经济越过第二临界点，从而实现碳排放水平降低。都市圈内也要加快减少经济产业地域差异性，西部落后地区可以承接由经济发展较好的县市经过产业升级后的剩余产业，因地制宜，依托于招商引资项目使产业集聚起步，以优厚福利吸引人才进驻，借助其丰富的发展经验尽快实现由第一产业向二三产业的转化，特别是在乡村振兴战略的大背景下旅游产业的加速发展，进而使经济迈入高速发展行列，及早进入碳排放后期阶段。在实际政策上，可以学习国际主流方式，在碳交易权上效仿北京、上海、广东等地，由人大出台碳排放管理和碳排放权交易的相关法律法规，力求在更高的层面上，更加规范合理化地管理碳排放，也是为了配合“强省会”政策，避免产业集中带来的碳排放强度无序上升。对于都市圈内所有高污染、高排放的企业应统筹推进节能监察，确保相关政策标准落实落地，严格工作责任，完善通报批评、用能预警、约谈问责、整改督办等工作机制，完善行业节能降碳监管体系。同时要发挥信用信息共享平台作用，加强对违规企业的失信联合惩罚，在区域产业结构优化的同时减少因产业结构变动造成的碳排放上升。最终培养一批结构优化、经济效益好、资源消耗低、相互协调的区域产业。

（3）针对农产品生产量这一驱动因素，从实际上看，要控制的是农业发展过程中碳排放量的提高，所以优化措施方向应为对农业的发展做出整体规划。应避免氮肥等生产过程中可能造成污染的肥料的使用，压低农业中以柴油为动力的机械的使用比例，大力普及新技术农业机械，如无人机技术。应积极调动科研技术的力量，研究改善现有能源结构的方案，全面降低三次产业化石能源使用比重，逐步普及新型能源。统筹管理好都市圈内有限的资源与环境容量，同时注意实际政策与农业发展的协同，福州市都市圈应出台

相关规划，引导都市圈内部农业的产业升级，向低碳、环保的方向发展。生态保护方面的法律也应加以完善，特别是关于福州都市圈内丰富的林业资源与城镇绿地资源的保护利用与扩大，以保证碳吸收部分；出台关于土地管理利用的法规，规划利用都市圈内有限的农业土地资源，避免盲目扩张工业用地。

本文由于数据获取渠道等限制，收集数据有较大难度，因此只对 2001—2020 年的部分数据指标进行分析，同时 2018—2020 年的福州市都市圈碳平均排放为加权预测法得出。另外在灰预测模型的构建中，缺少针对结果的验证。在未来的研究中，若能扩大福州都市圈碳排放研究的时间跨度，结合“库兹涅茨曲线”建立模型以预测福州都市圈地区碳排放量的拐点，给福州都市圈的整体发展提供更高效的行动路径，在灰预测模型的构建中，针对结果进行验证，便能让研究结果更加完善。

参考文献：

[1] MEEN CHEL JUNG, MINGYU KANG, SUNGHWAN KIM. Does polycentric development produce less transportation carbon emissions? Evidence from urban form identified by night-time lights across US metropolitan areas[J]. Urban Climate, 2022, 44: 101223—101223.

[2] HIDEMICHI FUJIIA, KAZUYUKI IWATAB, ANDREW CHAPMANC, et al. An analysis of urban environmental Kuznets curve of CO2 emissions: Empirical analysis of 276 global metropolitan areas[J]. Applied Energy, 2018, 228: 1561—1568.

[3] ROBERT HAAKMAN, IVO BEENAKKER, HARRY GEERLINGS. Reducing vehicle-related NOx and PM emissions in metropolitan areas: A comparison between the Randstad and the Rhine-Ruhr area[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 247: 119175—119175.

[4] 张腾飞，杨俊，盛鹏飞. 城镇化对中国碳排放的影响及作用渠道[J]. 中国人口•资源与环境，2016，26（2）：48—54.

[5] 朱勤，魏涛远. 居民消费视角下人口城镇化对碳排放的影响[J]. 中国人口•资源与环境，2013，23（11）：23—28.

[6] 马大来，陈仲常，王玲. 中国省际碳排放效率的空间计量[J]. 中国人口•资源与环境，2015，25（1）：67—76.

[7] 王腾飞，杨郑鑫，何枫鸣，等. 新发展阶段下胶东都市圈一体化发展路径及规划策略研究[C]//中国城市规划学会，成都市人民政府. 面向高质量发展的空间治理——2021 中国城市规划年会论文集（14 区域规划与城市经济）. 中国建筑工业出版社，2021：9.

[8] 翟丙英，陈婷，秦维. 成渝城市群碳排放问题及对策分析[J]. 城市建筑，2022，19（4）：1—5.

[9] 陈阳. 徐州都市圈产业系统绿色发展效率时空格局研究[D]. 徐州：江苏师范大学，2018：53.

[10] 巩雪娇. 碳排放约束、产业集聚与经济高质量发展研究——基于黄河“几”弯都市圈实证研究都市圈产业结构现状[D]. 兰州：兰州大学，2022：51.

[11] WANGA SZU-HUA, HUANGB SHU-LI , HUANGB PO-JU . Can spatial planning really mitigate carbon dioxide emissions in urban areas? A case study in Taipei, Taiwan[J]. Landscape and Urban Planning，2018，169：22—36.

[12] 周磊，郭梦姣. 河北省城市碳排放灰色关联度分析及情景预测研究[J]. 河北科技大学学报（社会科学版），2023，23（3）：32—42.

[13] 刘云青. 京津冀城市群产业结构、土地利用效益与碳排放的耦合协同发展研究[J]. 江西农业学报，2023，35（1）：145—151.

[14] 张少然，李玲，陈帅奇，等. 郑州都市圈新型城镇化、生态环境、碳排放耦合协调分析[J]. 河南农业大学学报，2023，57（3）：471—482.

[15] 李绵德，周冬梅，朱小燕，等. 河西走廊 2000—2020 年农业碳排放时空特征及其影响因素[J]. 农业资源与环境学报，2023，40（4）：940—952.

[16] 福建省人民政府关于印发福州都市圈发展规划的通知[R/OL].（2022-02-28）. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztzl/xxczhjs/ghzc/202202/t20220228_1317636.html.

[17] 永泰县发改局. 发展概况[EB/OL].（2021-06-15）. www.yongtai.gov.cn/xjwz/zjyt/jjfz/.

[18] 王文举. 中国碳排放总量确定、指标分配、实现路径机制设计综合研究[M]. 北京：首都经济贸易大学出版社，2018：76-121.

[19] KAYA Y. Impact of carbon dioxide emission on GNP growth: interpretation of proposed scenarios[R]. Paris: IPCC Energy and Industry Subgroup, 1989.

[20] 张腾飞，杨俊，盛鹏飞. 城镇化对中国碳排放的影响及作用渠道[J]. 中国人口•资源与环境，2016，26（2）：47—55.

[21] 朱斯斯. 福莆宁同城化空间发展策略研究[D]. 北京：北京林业大学，2014：27-30.

[22] 赖文亭，王远，黄琳琳，等. 福建省行业碳排放驱动因素分解及其与经济增长脱钩关系[J]. 应用生态学报，2020，31（10）：3533—3537.

[23] 王少剑，谢紫寒，王泽宏. 中国县域碳排放的时空演变及影响因素[J]. 地理学报，2021，76（12）：3111—3113.