

广西东融发展片区碳排放时空特征及其驱动因素

魏锋¹, 韦燕飞¹, 童新华²

(1. 南宁师范大学 自然资源与测绘学院, 广西 南宁 530001; 2. 南宁师范大学 地理科学与规划学院, 广西 南宁 530001)

摘要: [目的] 揭示县域碳排放的时空格局演变及其驱动因素, 为区域规划战略的实际应用和实现“双碳”目标提供科学依据。[方法] 基于广西壮族自治区东融发展片区 2005, 2010, 2015, 2020 年碳排放数据, 运用空间自相关分析测算各区域之间的碳排放时空异质性特征, 并在构建指标体系的基础上, 运用地理探测器计算碳排放时空演变的驱动因子。[结果] ① 广西东融片区各县区碳排放量在空间上存在异质性。2005—2020 年, 该区碳排放量在空间上呈现“西南高, 东北低”, 经济发达的区县碳排放量增速快; ② 各县碳排放量在总体上呈现稳步上涨的趋势。不同经济发展水平的区县间碳排放量差距逐渐拉大; ③ 在碳排放时空分异驱动力分析方面, 能源消费结构和城市经济密度的影响最强。[结论] 广西东融发展片区碳排放时空特征与人类活动密切相关, 达成“双碳”目标必须以规范碳排放行为为前提。

关键词: 碳排放; 广西东融发展片区; 时空演变; 空间自相关分析; 地理探测器

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)03-0381-09

中图分类号: F301.2, X32

文献参数: 魏锋, 韦燕飞, 童新华. 广西东融发展片区碳排放时空特征及其驱动因素[J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 381-389. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.03.047; Wei Feng, Wei Yanfei, Tong Xinhua. Spatio-temporal evolution characteristics and driving factors of carbon emissions in Dongrong development area of Eastern Guangxi Zhuang Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3): 381-389.

Spatio-temporal Evolution Characteristics and Driving Factors of Carbon Emissions in Dongrong Development Area of Eastern Guangxi Zhuang Autonomous Region

Wei Feng¹, Wei Yanfei¹, Tong Xinhua²

(1. College of Natural Resources and Geomatics, Nanning Normal University, Nanning, Guangxi

530001, China; 2. School of Geography and Planning, Nanning Normal University, Nanning, Guangxi 530001, China)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal evolution pattern and driving factors of carbon emissions at the county level were determined in order to provide a scientific basis for the practical application of a regional planning strategy that would meet the “dual carbon” goal. [Methods] Based on carbon emission data from the Dongrong development area in the Guangxi Zhuang Autonomous Region in 2005, 2010, 2015, and 2020, spatial autocorrelation analysis was used to calculate the spatio-temporal heterogeneity of carbon emissions among different regions. An index system was constructed, and geographic detectors were used to calculate the driving factors of the spatio-temporal evolution of carbon emissions. [Results] ① There was spatial heterogeneity in carbon emissions among the counties and districts in the Dongrong development area of the Eastern Guangxi Zhuang Autonomous Region. From 2005 to 2020, the carbon emissions in the space were characterized as being “high in the southwest and low in the northeast”, and the carbon emissions of the economically developed districts and counties grew rapidly; ② The carbon emissions of the districts and counties showed a steady upward trend in general. The carbon emissions gap between districts and counties with different economic development levels gradually widened; ③ An analysis on the driving forces of spatial and temporal differences of carbon emissions showed that the influence of energy consumption structure and

收稿日期: 2022-02-08

修回日期: 2022-03-20

资助项目: 国家自然科学基金项目“广西左右江革命老区土地利用与贫困互馈机制分析及时空模拟”(批准号: 41861039); 广西哲学社会科学规划研究课题项目(17FGL014); 广西哲学社会科学规划研究课题项目(17FGL016)

第一作者: 魏锋(1996—), 男(汉族), 广东省汕头市人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用优化配置相关研究领域。Email: 525608447@qq.com。

通信作者: 韦燕飞(1978—), 女(壮族), 广西壮族自治区田阳县人, 教授, 主要从事土地利用优化配置相关研究。Email: 65358105@qq.com。

urban economic density was the strongest. [Conclusion] The spatial and temporal characteristics of carbon emissions in the Dongrong development area of the Eastern Guangxi Zhuang Autonomous Region were closely related to human activities. In order to meet the “dual carbon” goal, carbon emissions will need to be regulated.

Keywords: carbon emissions; Dongrong development area of Guangxi Zhuang Autonomous Region; temporal and spatial evolution; spatial autocorrelation analysis; geographic detector

气候变化和环境保护问题不分国界、不分地域,是人类社会的共同挑战。碳是人为温室气体的主要成分^[1],为持续推进生态文明建设,大幅度碳减排是实现碳达峰和碳中和目标的战略措施。中国作为温室气体排放第一大国,对国际社会推进碳减排工作具有重要的支撑和导向作用。在《巴黎协定》框架下,中国政府将2030年单位GDP的CO₂排放量比2005年下降60%~65%作为工作方向,且要实现碳达峰的目标^[2]。因此,重新权衡碳排放造成的生态环境负担与经济产能收益,摸清区域碳排放底数,才能真实客观地反映区域碳排放时空特征,从而正确识别区域碳排放现状的推动因素。

目前国内学者对碳排放的研究主要集中在以下4方面:①关于碳排放核算体系。目前国内学者在计算能源、工业、农业等各领域CO₂排放量时主要参考IPCC发布的《国家温室气体清单指南》(2006年)^[3]。管亚梅等^[4]基于总量交易机制下的碳排放权交易二阶段视角,在核算时将经营性持有部分分为生产排放和日常排放,从建辉等^[5]梳理了9种城市碳排放核算的边界界定方法并对各方法之间的关系进行总结,何艳秋等^[6]构造了包含基础层级、中间层级和目标层级的碳排放统计核算基本框架,目标是建立“国家—地区—城市—行业”四位一体的碳排放统计核算体系;②碳排放影响因素分析。张雪华等^[7]运用LMDI模型并从周期控制的视角系统探究京津冀及周边城市能源碳排放的驱动因素,韦沁等^[8]人运用卡雅(Kaya)恒等式分析中国农业碳排放的影响因素,张迪等^[9]人选取灰色关联模型分析甘肃省第二产业碳排放的驱动因素,李治国等^[10]人运用多样性运算模型的基础上结合IPAT-LMDI方法探讨中国城乡家庭碳排放驱动因素;③碳排放与用地规划研究。史思琪等^[11]运用多因素综合评价法和HR协调度模型评价中国30个省市土地集约利用水平和系统协调度的时空异质性特征,杨欣等^[12]构建库兹涅茨曲线模型验证碳排放强度与建设用地扩张之间的关系,潘海啸等^[13]从3个层次提出低碳城市空间规划策略,在城市交通与土地使用、密度控制和功能混合方面提出改进规划编制的建议;④城市低碳建设模式与路径研究。张友国等^[14]人认为各地区应根据碳排放驱动因素特征及变化趋势制定低碳发展水平提升策略,

并将自身“双碳”目标实现路径深度融入国家构建新发展格局的重大战略中,黄莹等^[15]以广州市为例,应用长期能源替代规划系统(LEAP)模型,预测多情景下广州交通领域未来的能源需求量和碳排放特征,李志伟等^[16]从指导思想与低碳理论、重点领域、支撑体系和发展目标4个方面构建了县域城镇低碳发展的综合集成框架。

碳排放的研究视角总体上较为丰富,主要存在以下特点:碳排放研究对象多为全国、省级或某一典型区域,而东融发展片区作为广西当下碳减排的重点区域,对其系统研究却鲜有涉及;前人通常将某一特定区域作为整体进行研究,未能深入研究区域内不同城市县级单元碳排放的异质性;传统的计量模型通常将经济、能源等作为单一指标处理,缺少对经济和能源的总量、结构、强度等二级因素的驱动效力进行考量。

本文选取广西壮族自治区东部东融发展片区作为研究对象,综合运用空间自相关分析与地理探测器,从周期视角综合考察城市人口规模、城市经济密度、产业结构、城市经济规模、能源消费结构、人均收入水平这6个驱动因子对研究区域能源碳排放的影响机制,量化各驱动因素对能源碳排放的贡献度,有助于厘清广西东融发展片区碳排放空间差异的来源,明晰该区域碳减排潜力的地理尺度,以期为广西全域乃至全国制定2030年前碳达峰行动方案提供科学依据。

1 研究区概况

广西东融发展片区作为新形势下全面对接粤港澳大湾区建设的关键选择,对于构建广西“南向、北联、东融、西合”全方位开放发展新格局,不断提升区域经济发展活力和实现高质量发展具有重要意义。东融发展片区位于广西东南部,毗邻广东省,辐射范围包括贵港市、玉林市、梧州市和贺州市。本文以2005—2020年作为研究时段,以县域作为研究单元,东融发展片区下辖23个区县级单位(图1),研究区行政面积为47 743 km²,占广西总面积20.09%。

研究期内,东融发展片区的碳排放量从2005年的 2.40×10^8 t提升至2020年 6.04×10^8 t,人均碳排放量15.67 t提升至37.06 t。东融发展片区作为自治区的重要战略开放合作方向,是未来全面对接粤港澳大湾区的通道,既要打造经济走廊,也承担着生态

文明建设的任务。因此,本文将东融发展片区各区县的碳排放时空差异进行分析,深入揭示其驱动因子,为制定阶段性减排政策提供依据。

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

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

$$I_i = \frac{X_i - \bar{x}}{s^2} \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x})^2 \quad (3)$$

式中: n 表示单元数量; W_{ij} 为空间权重矩阵。 $I > 0$, $I < 0$ 和 $I = 0$ 分别表示空间分布呈空间正相关、空间负相关和空间无相关。

$$z = E(I) = \frac{-1}{n} \quad (4)$$

式中: $VAR(I)$ 是 I 的方差。一般采用 Z-Score 值进行显著性检验,当 $|Z\text{-Score}| > 1.96$ 时,说明变量在 $p = 5\%$ 的显著水平上通过检验。

2.1.3 地理探测器 地理探测器(GeoDetector)是近几年由王劲峰等^[20]开发的一款用于探测空间分异性的工具,主要用于揭示某一现象的推动因素。地理探测器不仅可以探测驱动力因子的空间分异,还可以弥补小数据带来的不足,从而不影响研究的科学性与准确性。其因子探测器是用来探测因变量 Y 的空间分异性,以及探测自变量 X 在一定程度上解释了属性 Y 的空间分异,利用 q 值来衡量,其表达式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{i=1}^l n_i \sigma_i^2}{n \sigma^2} \quad (5)$$

式中: q 表示驱动力 X 对 Y 的解释力,其范围在 $[0, 1]$; σ_i^2 和 σ^2 分别表示层 i 和全区的 Y 值得方差; n 和 n_i 分别为全区和层 i 的单元数; i 为 $1, 2, \dots, l$ 为变量 Y 和因子 X 的分层。

2.2 数据来源

本文选取东融发展片区即贵港市、玉林市、梧州市和贺州市 23 个县级单元作为研究区域。土地行政边界来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>),文中所涉及的社会经济数据来源《广西统计年鉴》《中国县域统计年鉴》以及各市统计公报。2005—2020 年碳排放数据计算中采用的各县能源消费结构数据、各种能源消耗总量来自《中国能源统计年鉴》、各市统计年鉴。各种能源热值系数源于 2011 年的中国能源统计年鉴(表 1)。各种燃料消耗的碳含量、碳氧化率值来源于政府间气候变化专门委员会(IPCC)出版的国家温室气体清单指南。根据中国国情,煤炭、石油、天然气的碳氧化率分别设定为 0.80, 0.90, 0.90^[17]。



注:①全文涉及行政图均基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为桂 S(2020)48 号的标准地图制作,底图无修改。② 1 为万秀族自治县; 2 为万秀区; 3 为长洲区; 4 为玉州区。下同。

图 1 广西东融发展片区县区分布

2 研究方法数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 碳排放计算方法 本文依据国际通用的政府间气候变化专门委员会(IPCC)的方法对各县 2005—2020 年的 CO_2 排放量进行估计^[17]。计算的公式为:

$$E_{CO_2} = \sum_{j=1}^n FC_j \times CAL_j \times CC_j \times CO_j \times \left(\frac{44}{12}\right) \quad (1)$$

式中: E_{CO_2} 为某县区 CO_2 排放量; j 代表能源种类; FC 为能源消耗总量; CAL 为能源的热值; CC 为碳含量; CO 代表碳氧化率。

2.1.2 空间自相关分析 全局空间自相关用于描述空间要素属性值在全区域内的空间特征,并反映其邻域属性值相似度,对于某一特定空间属性在全区域分布特征分析描述具有重要意义,常用 Moran' I 指数表示。Moran' I 指数的值域为 $[-1, 1]$ 之间,小于 0 负相关,等于 0 不相关,大于 0 正相关。相较于全局空间自相关,局部空间自相关反映局部区域内的空间异质性与不稳定性。全局自相关和局部自相关分别采用 Global Moran' I 统计量和 Local Moran' I 统计量表示^[18-19],采用“最近 K 点关系”方法确定空间权重,计算公式分别如下所示:

表 1 研究数据概况及来源(2000—2020 年)

变量名称	来源
土地行政面积/km ²	中国科学院资源环境科学数据中心(https://www.resdc.cn/)
碳排放数据/10 ⁶ t	中国碳排放数据库(https://www.ceads.net.cn/)
城市经济规模/10 ⁴ 元	《广西统计年鉴》
城市人口规模/10 ⁴ 人	《广西统计年鉴》
人均收入水平/元	《广西统计年鉴》
能源消费结构/%	《中国能源统计年鉴》《中国县域统计年鉴》
城市经济密度/10 ⁴ 元	《广西统计年鉴》

3 结果与分析

3.1 广西东融发展片区碳排放时空特征

3.1.1 碳排放时空异质性特征 广西东融发展片区各县区碳排放量在空间上存在异质性,各年高值集中出现在东融片区的西南部,低值则出现在中部地区。2005,2010,2015,2020 年各县区碳排放情况见表 2。同时本文利用 ArcGIS 10.2 平台,根据自然间断点分级法将 4 个年份的碳排放数据进行分级(如图 2 所示)。

从描述性统计指标上看,各县区碳排放量总体呈现上升趋势(如图 3 所示)。玉州区是 4 个年份碳排放量最多的地区,该区是玉林市经济、政治、文化中心,目前已形成机械、陶瓷水泥等产业集群,工业产值占比高。蒙山县是 4 个研究时点碳排放量最少的地区,蒙山县是广西重点生态功能区,碳排放量在所有

研究单位中最少,碳吸收能力也最强。在碳排放均值方面呈现持续增长态势,从各年碳排放分布格局看,2005—2010 年低值区主要集中在贺州市富川瑶族自治县、昭平县和梧州市万秀区、长洲区、蒙山县、龙圩区,并且随着研究时点的推进,贺州市钟山县、梧州市苍梧县的碳排放量在 2015—2020 年也进一步减少,这表明某个地区的碳排放量较低,会影响周围地区的碳排放量,并呈现同向发展态势,具有一定的正相关性。

表 2 2005—2020 年广西东融发展片区
县域碳排放量描述性统计

年份	极大值/10 ⁴ t	极小值/10 ⁴ t	平均值/10 ⁴ t
2005	256.90(玉州区)	22.36(蒙山县)	109.01
2010	389.62(福绵区)	33.22(蒙山县)	157.42
2015	556.47(福绵区)	50.50(蒙山县)	238.11
2020	658.36(福绵区)	48.24(蒙山县)	246.84

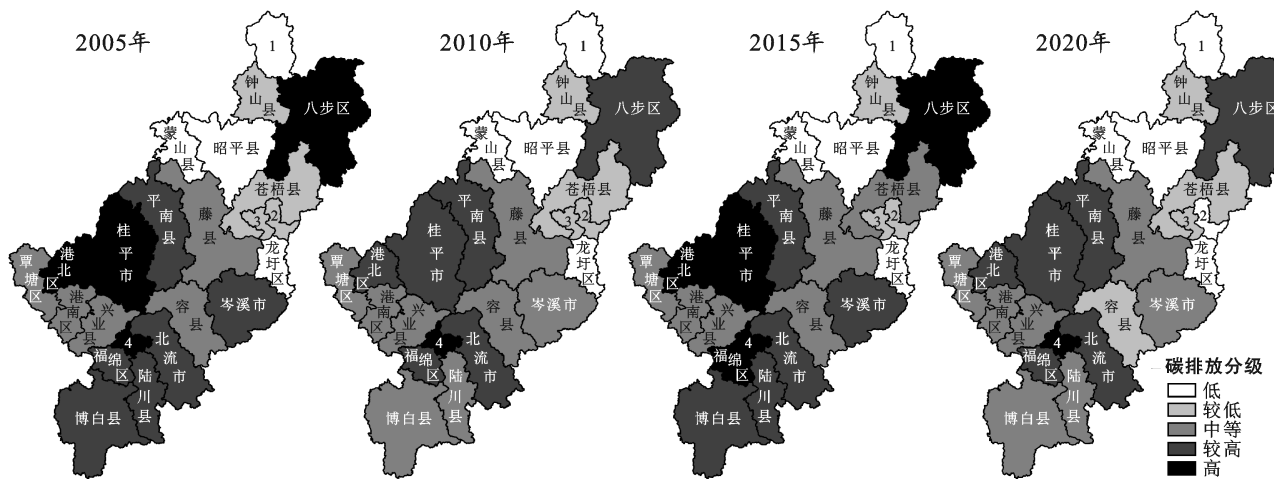


图 2 广西东融发展片区 4 个年份碳排放量分级

3.1.2 碳排放时空依赖性特征

(1) 全局空间关联性。广西东融发展片区各县区的碳排在空间上存在正相关性,且相关性波动上升并趋于稳定。本文基于 23 个县区在 2005,2010,2015,2020 年的碳排放数据,对广西东融发展片区的全局空

间自相关进行显著性检验。如图 4 所示,4 个研究年份碳排放的 Morans' $I > 0$,且全部通过了 $p = 0.01$ 的显著性检验,这表明东融发展片区的碳排在空间上存在较强的相关性,即研究单元碳排放量会受到周围区县排放量的正向影响,碳排放程度空间分布呈现聚集

模式。从整体上看, I 值从 2005—2020 年呈现波动增长的趋势, I 值在 2005—2010 年上升, 2010—2015 年

下降并最终在 2020 年上升至最高值, 即研究区内碳排放的空间集聚水平波动上升且相关性增强。

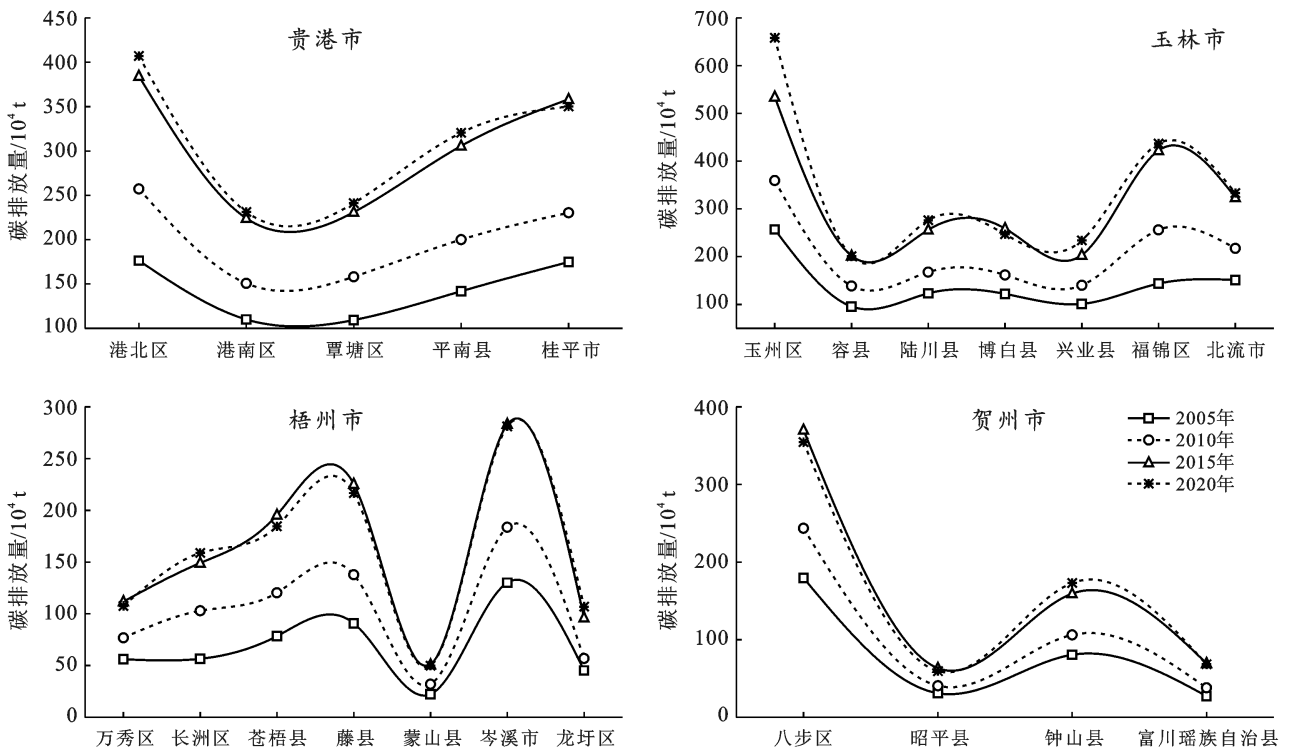


图 3 2005—2020 年东融片区各县区碳排放量汇总

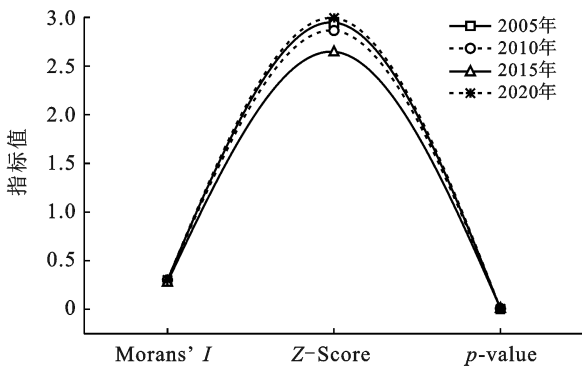


图 4 2005, 2010, 2015, 2020 年东融片区全局 Moran's I 计算情况

(2) 局部空间关联性。进一步采用 LISA 图分析碳排放局部空间上的集聚和分散情况(图 5—6), 发现局部空间聚类分析与全局聚类分析结果相对应, 即低—低聚集区主要发生在东融片区中北部低碳排放区, 高一—高聚集区主要发生在东融片区中南部高碳排放区。通过东融发展片区碳排放的 Moran 散点图来分析局部演变情况, 将散点图分为 4 个象限, 包括高一—高聚集区、低—低聚集区、高一—低聚集区、低—高聚集区和不显著区域, 运用 GeoDa 软件得到 2005, 2010, 2015, 2020 年 23 个研究单元碳排放空间分布情况, 具体的演化过程见表 3。由表 3 可知, 低—低聚

集区包括富川瑶族自治县、钟山县、昭平县、苍梧县、长洲区和藤县, 主要分布于研究区域的北部, 这表明低碳排放的相邻县域之间存在空间上的集聚效应。2005—2020 年高一—低聚集区仅有八步区, 这表明这个县区自身碳排放量较高, 但是其周边县区碳排放量较低, 这种地区可以通过与邻近城市的辐射效应, 加强地域合作的方式降低碳排放量。这两个区域所包括的县区数量在研究时点内变化幅度较小, 在空间分布上呈现稳定的状态。高一—高聚集区从 2005 年的 3 个县区增长为 2020 年的 5 个, 并且陆川县和博白县这两个区县始终属于高一—高聚集区, 表明与碳排放量高相邻近的县域存在空间上的集聚效应。研究时点内处于低—高聚集区的单元较小, 仅有港南区、兴业县和容县, 该区域的特征是自身碳排放量较低, 但是其周边县区排放量较高。

3.2 广西东融发展片区碳排放驱动因素分析

参考碳排放空间分布差异因子探测 现有研究^[21-22], 结合广西东融发展片区的现实及数据的可获得性, 从效率因素、发展水平、总量因素和结构因素等方面选取城市经济密度、人均收入水平、城市经济规模、城市人口规模、城市人口规模和能源消费结构(表 4)。

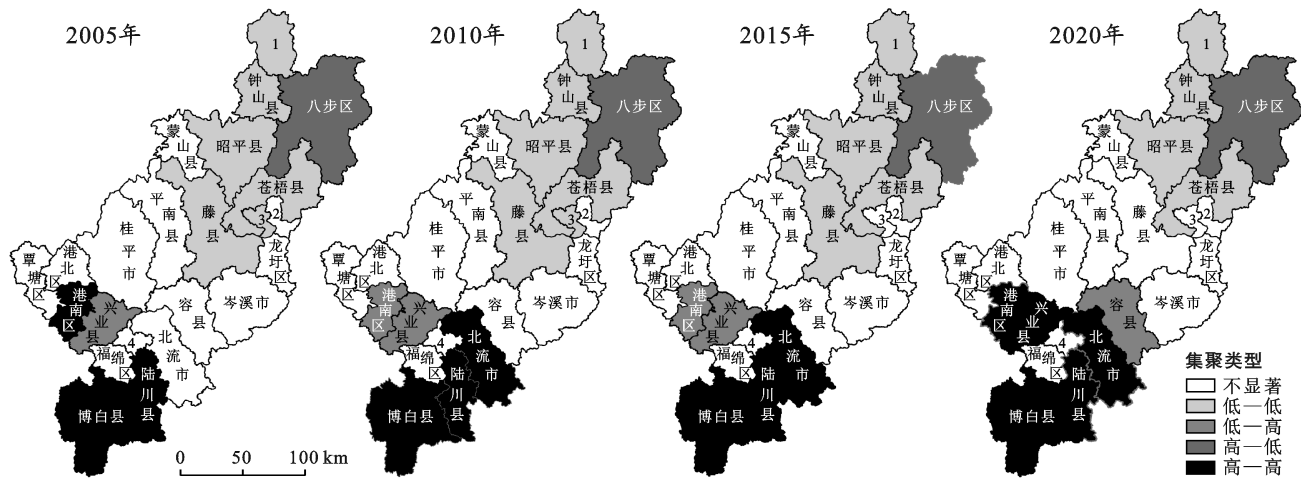


图 5 2005—2020 年广西东融发展片区碳排放 LISA 分布

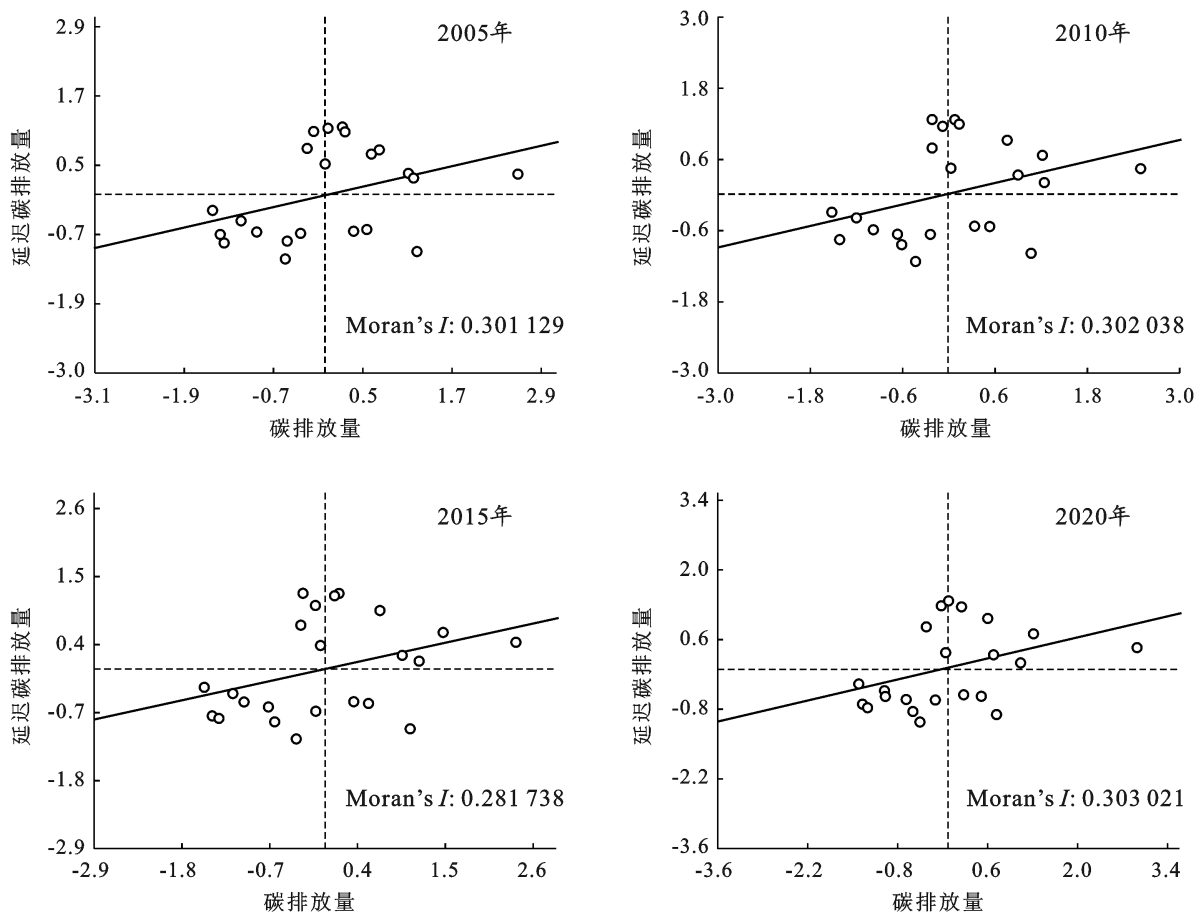


图 6 2005—2020 年广西东融发展片区碳排放莫兰散点图

3.2.1 碳排放时空分异格局的因子探测 基于上述探测因子,结合 ArcGIS 10.2 将各指标结果赋值到东融发展片区各县,运用自然间断点分级法将数值划分等级,最后运用地理探测器的因子探测模型进行因子驱动力识别,得出各区域碳排放的决定力 q 值,广西东融发展片区 4 个时点碳排放空间分异驱动因素的

决定力分布见图 7。

总体来看,能源消费结构因素 2010,2015,2020 年的 q 值最大,即能源消费结构是碳排放空间分异的主导驱动因子,而人均收入水平在 2010,2015,2020 年的 q 值最小,即该因子对碳排放空间分异格局影响相对较小。

表 3 广西东融发展片区空间变化过程

集聚类型	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
高一高聚集	博白县、陆川县、港南区	博白县、陆川县、北流市	博白县、陆川县、北流市	博白县、陆川县、北流市、兴业县、港南区
低一低聚集	富川瑶族自治县、钟山县、昭平县、苍梧县、长洲区、藤县	富川瑶族自治县、钟山县、昭平县、苍梧县、长洲区、藤县	富川瑶族自治县、钟山县、昭平县、苍梧县、藤县	富川瑶族自治县、钟山县、昭平县、苍梧县、长洲区
高一低聚集	八步区	八步区	八步区	八步区
低一高聚集	兴业县	兴业县、港南区	港南区、兴业县	容县
不显著	蒙山县、平南县、桂平市、港北区、覃塘区、玉州区、福绵区、龙圩区、容县、岑溪市、万秀区、北流市	蒙山县、平南县、桂平市、港北区、覃塘区、玉州区、福绵区、龙圩区、容县、岑溪市、万秀区	玉州区、福绵区、平南县、桂平市、港北区、覃塘区、蒙山县、万秀区、龙圩区、长洲区、容县、岑溪市	玉州区、福绵区、平南县、桂平市、港北区、覃塘区、蒙山县、万秀区、龙圩区、长洲区、藤县、岑溪市

表 4 广西东融发展片区的碳排放时空分异驱动因素指标体系

结构类型	探测因子	指标解释
效率因素	城市经济密度	地区生产总值与土地面积的比值/(万元·km ⁻²)
	发展水平	人均地区生产总值/元
总量因素	城市经济规模	地区生产总值/万元
	城市人口规模	常住人口/万人
结构因素	产业结构	第二产业占城市地区生产总值的比重/%
	能源消费结构	煤炭能源占能源消费总量的比重/%

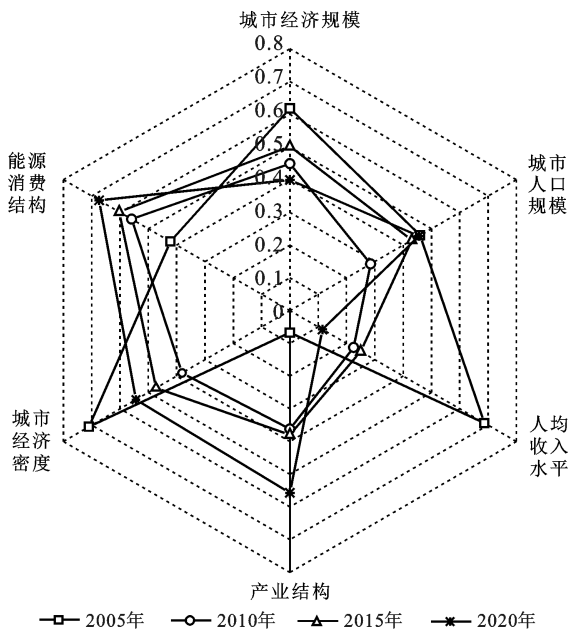


图 7 广西东融发展片区碳排放时空分异驱动因素的决定力 q 值雷达图

(1) 2005 年驱动因子从大到小为:城市经济密度 > 人均收入水平 > 城市经济规模 > 城市人口规模 > 能源消费结构 > 产业结构。由此可知,城市经济密度(0.710)、人均收入水平(0.687)和城市经济规模(0.618)对 2005 年碳排放空间分异格局的决定力最强,这说明地区经济水平的差异与地区碳排放量成正相关,即不同区域之间经济水平差距越大,碳排放量的差距同样会被拉大,反之亦然。

(2) 2010 年驱动因子从大到小为:能源消费结构 > 城市经济规模 > 城市经济密度 > 产业结构 > 城市人口规模 > 人均收入水平。在这个阶段,能源消费结构(0.537)和城市经济规模(0.449)的 q 值最大,说明能源要素结构开始被重视,并且能源消费量大的地区的碳排放量更大。虽然 2010 年各县区主要以一、二产业为主,地区间的产业结构差异较小,但是部分城市的产业结构开始转型,因此产业结构(0.362)因素的决定力得到提升,产业结构变化对于地区间碳排放分异格局影响逐渐增大。

(3) 2015 年驱动因子从大到小为:能源消费结构 > 城市经济规模 > 城市经济密度 > 城市人口规模 > 产业结构 > 人均收入水平。2015 年能源消费结构(0.603)、城市经济规模(0.502)和城市经济密度(0.473)的 q 值最大,与上个阶段相比,能源消费结构的决定力 q 值进一步增大,这说明随着能源使用效率的提高和应用领域的拓展,更多地区对能源需求提升,而经济水平较差的地区对能源需求量较小。因此,地区之间能源消费量差距被拉开的同时,碳排放量差也被进一步放大。

(4) 2020 年驱动因子从大到小为:能源消费结构 > 产业结构 > 城市经济密度 > 城市人口规模 > 城市经济规模 > 人均收入水平。2020 年能源消费结构(0.674)、产业结构(0.557)和城市经济密度(0.544)为碳排放空间分异的主要推动要素,其中 2020 年能源消费结构和产业结构的决定力 q 值为 4 个研究时点

中的最高值,这表明能源消费和产业结构持续成为碳排放空间分异的关键因素,并且影响力在提升。

3.2.2 碳排放时空分异格局的交互作用探测 交互探测的结果用于表明任意两因子的组合是否会增强或减弱它们各自对碳排放空间分布的解释力度^[23],地区碳排放量空间分异格局的驱动因子在两两空间叠加后形成的交互作用结果见表 5。

在 2005 年城市人口规模 \cap 城市经济密度(0.633)是地区碳排放空间分异的主导交互因子,表明这两者在空间上的结合对碳排放总体格局的变化影响最大。值得一提的是,人均收入水平 \cap 产业结构(0.613)的测算结果与单个因子测算结果出现异质性。在进行单个因子测算时,产业结构的决定力长期处于低值状态,但与人均收入水平进行交互测算时却是 2005 年的第二高值,这表明人均收入水平与产业结构产生了更显著的空间叠加效应。

表 5 广西东融发展片区 4 个时段碳排放时空分异的交互作用因子探测结果

探测因子 q 值	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
城市经济规模 \cap 城市人口规模	0.433	0.302	0.406	0.422
城市经济规模 \cap 人均收入水平	0.525	0.422	0.557	0.434
城市经济规模 \cap 产业结构	0.500	0.462	0.543	0.690
城市经济规模 \cap 城市经济密度	0.593	0.603	0.635	0.588
城市经济规模 \cap 能源消费结构	0.403	0.653	0.588	0.611
城市人口规模 \cap 人均收入水平	0.540	0.411	0.571	0.601
城市人口规模 \cap 产业结构	0.473	0.342	0.481	0.531
城市人口规模 \cap 城市经济密度	0.633	0.647	0.673	0.677
人均收入水平 \cap 产业结构	0.613	0.495	0.329	0.387
人均收入水平 \cap 城市经济密度	0.567	0.550	0.544	0.604
人均收入水平 \cap 能源消费结构	0.266	0.334	0.353	0.422
产业结构 \cap 城市经济密度	0.553	0.406	0.411	0.576
产业结构 \cap 能源消费结构	0.563	0.682	0.697	0.748
城市经济密度 \cap 能源消费结构	0.489	0.541	0.575	0.671
城市人口规模 \cap 能源消费结构	0.436	0.574	0.546	0.602

在 2010 年地区碳排放空间分异的关键交互因素是产业结构 \cap 能源消费结构(0.682)和城市经济规模 \cap 能源消费结构(0.653),其中能源消费结构在交互测算中的表现与单个因子测算的表现一致,均在 2010 年就逐渐成为碳排放空间分异的关键因素,这说明能源消费结构对碳排放空间分异的作用效果显著性强。

在 2015 年产业结构 \cap 能源消费结构(0.697)和城市人口规模 \cap 城市经济密度(0.673)的决定力 q 值最大,这个阶段产业结构的转型更为明显,同时受政策影响,地方政府对于优化能源消费结构有更强大的内生动力。而人口规模与经济密度的空间联系则表

明人口聚集在为地区创造经济效益的同时,也影响地区碳排放空间演化进程。

在 2020 年产业结构 \cap 能源消费结构(0.748)和城市经济规模 \cap 产业结构(0.690)为当年最高值,其中产业结构与能源消费结构在空间上的交互是 4 个年份的最高值,说明产业类型的选择与能源消费种类为正向关系,并且从 2005 年起这两者交互产生的决定力 q 值呈现直线上升状态,也说明两者交互后产生的效果对地区碳排放空间分异的决定性不断增强。同时,城市经济规模与产业结构交互在 2020 年达到高值说明经济规模与产业结构之间具有极强的相关性。

4 结论与建议

4.1 结论

(1) 广西东融发展片区各县区碳排放量在空间上存在异质性,各年高值集中出现于东融片区的西南部,而低值出现在中部地区。总体而言,经济发达地区碳排放量明显高于经济落后地区。同时,由于 2010—2015 年产业层次不高、污染防治意识薄弱并于 2015 年往后的“十三五”规划中突出碳减排任务的艰巨性,从而使得东融发展片区各县区的碳排放量在前一时段涨幅最大而在后一时段涨幅最小甚至部分县出现负增长。相较于其他经济片区,东融发展片区内部各区县发展均衡性较差,因此宏观政策的实施效果各异,呈现较为明显的“马太效应”。

(2) 广西东融发展片区各区县的碳排放 Morans' $I > 0$,在空间上存在正相关性,区县之间碳排放活动会互相产生影响。局部空间聚类分析与全局聚类分析结果相对应,即低—低聚集区主要发生在东融片区中北部低碳排放区,高一高聚集区主要发生在东融片区中南部高碳排放区。

(3) 能源消费结构因素 2010,2015,2020 年的 q 值最大,即能源消费结构是碳排放空间分异的主导驱动因子,而人均收入水平在 2010,2015,2020 年的 q 值最小,即该因子对碳排放空间分异格局影响相对较小。

4.2 建议

当前,广西东融发展片区碳排放呈现持续增长的状态,且根据前文分析可知各区县之间存在明显的空间异质性和不同程度的空间溢出效应,因此政策的制定必须基于广西东融发展片区实际的碳排放空间特征,运用差异性政策针对性地协调各区县的碳排放格局,制定富有可行性、科学性地碳减排行动方案。

(1) 调整企业能源消费结构,推动低碳产业发

展。贺州市作为广西东融发展片区中主要承接广东产业转移的城市,面临产业层次不高、科技创新驱动力不足以及互联互通设施滞后等现实问题,这就使得贺州市极易成为高耗能产业的主要承接城市,因此需要加速发展绿色可再生发展能源,改善欠发展地区的能源消费结构。同时,地方政府必须加大可再生能源技术研发投入,提高风电、水电等清洁能源的转化率,降低单位产值的能耗和排放水平。

(2) 构建合理的碳减排区域协作机制。广西东融发展片区的构建是新形势下全面对接粤港澳大湾区建设的关键选择,既有利于广西东融发展片区经济发展提速,更是构建区域碳减排协作机制的契机。因此,政府可以根据碳排放的区域特征,以系统思维统筹区域碳减排实施方案,在保障地方政府制定碳减排行动方案过程中具有充分自主权的同时,相关单位应从全局角度出发提供科学指导,实现区域间社会经济和生态环境的协调发展。

(3) 人口政策制定兼顾地区差异。从整体来看,人口和经济增长是地区发展的必然趋势,引导人均碳排放水平高的区县人口向城镇适度集聚,提高城市建设的紧凑度,提升公共资源和设施的集约利用水平。将提高人口素质、深化绿色消费意识的内生性动力与政策的外部引导相结合,为碳减排方案的实施提供充足的现实支撑。

[参 考 文 献]

- [1] 张苗,甘臣林,陈银蓉,等.中国城市建设用地开发强度的碳排放效率分析与低碳优化[J].资源科学,2016,38(2):265-275.
- [2] Liu Z, Guan D, Moore S, et al. Climate policy: Steps to China's carbon peak [J]. Nature,2015,522(7556):279-281.
- [3] Paustian K, Ravindranath N H, Amstel A V. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, Japan [M]. International Panel on Climate Change, 2006.
- [4] 管亚梅,束小雪.基于交易二阶段视角下的碳排放核算体系构建[J].会计之友,2016(15):54-56.
- [5] 丛建辉,刘学敏,赵雪如.城市碳排放核算的边界界定及其测度方法[J].中国人口·资源与环境,2014,24(4):19-26.
- [6] 何艳秋,倪方平,钟秋波.中国碳排放统计核算体系基本框架的构建[J].统计与信息论坛,2015,30(10):30-36.
- [7] 张雪华,董会忠.“2+26”城市碳排放时空演变特征及其驱动因素研究[J].资源开发与市场,2021,37(12):1448-1456.
- [8] 韦沁,曲建升,白静,等.我国农业碳排放的影响因素和南北区域差异分析[J].生态与农村环境学报,2018,34(4):318-325.
- [9] 张迪,王彤彤,支金虎,等.第二产业碳排放量生态经济及驱动因素分析:以甘肃省为例[J].西南农业学报,2021,34(8):1740-1750.
- [10] 李治国,王杰.中国城乡家庭碳排放核算及驱动因素分析[J].统计与决策,2021,37(20):48-52.
- [11] 史思琪,梁彦庆,黄志英,等.低碳理念下我国土地集约利用水平时空异质性及其障碍因子分析[J].湖南师范大学自然科学学报,2020,43(3):1-9.
- [12] 杨欣,谢向向.武汉市建设用地扩张与碳排放效应的库兹涅茨曲线分析[J].华中农业大学学报(社会科学版),2020,40(4):158-165.
- [13] 潘海啸,汤葐,吴锦瑜,等.中国“低碳城市”的空间规划策略[J].城市规划学刊,2008,52(6):57-64.
- [14] 张友国,白羽洁.区域差异化“双碳”目标的实现路径[J].改革,2021,34(11):1-18.
- [15] 黄莹,郭洪旭,廖翠萍,等.基于 LEAP 模型的城市交通低碳发展路径研究:以广州市为例[J].气候变化研究进展,2019,15(6):670-683.
- [16] 李志伟,赵志峰.生态文明视域下县域城镇低碳发展的创新思路[J].科学管理研究,2018,36(2):54-57.
- [17] 刘佳骏,史丹,汪川.中国碳排放空间相关与空间溢出效应研究[J].自然资源学报,2015,30(8):1289-1303.
- [18] 付建新,曹广超,郭文炯.1980—2018年祁连山南坡土地利用变化及其驱动力[J].应用生态学报,2020,31(8):2699-2709.
- [19] 杨晴青,刘倩,尹莎,等.秦巴山区乡村交通环境脆弱性及影响因素:以陕西省洛南县为例[J].地理学报,2019,74(6):1236-1251.
- [20] 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.
- [21] Tapio P. Towards a theory of decoupling: Degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001 [J]. Transport Policy, 2005,12(2):137-151.
- [22] 王睿,张赫,强文丽,等.基于城镇化的中国县级城市碳排放空间分布特征及影响因素[J].地理科学进展,2021,40(12):1999-2010.
- [23] 景海超,刘颖慧,贺佩,等.青藏高原典型区生态系统服务空间异质性及其影响因素分析:以那曲市为例[J].生态学报,2022,42(7):2657-2673.