

县域尺度下云南省碳排放时空演变特征及驱动机制

林志富, 陶楠, 单立先, 肖军吉, 张禾

(昆明理工大学, 昆明 650500)

摘要: [目的] 云南作为中国西南生态屏障核心区, 维护区域生态安全责任重大。揭示其县域碳排放时空演变特征及驱动机制, 为区域差异化减碳与发展低碳经济提供科学支撑。[方法] 以云南129个县域为对象, 运用空间自相关、参数最优地理探测器(OPGD)和时空地理加权回归模型(GTWR), 定量研究碳排放时空演变及影响因素。[结果] (1) 2000—2020年云南省碳排放总量持续增长, 从0.93亿t增至2.73亿t, 永仁、富源、宣威、安宁、沾益等县碳排放长期居前。(2) 空间分布呈中东部高, 西北部、西部和西南部低的格局, Moran's I 指数由0.338降至0.219, 空间集聚性减弱但仍呈正相关。高值区和低值区地理邻近明显且空间格局稳定。(3) 单因子探测下, 第二产业产值(q 值为0.3349)解释力最强, 次为高程(0.3088)、第三产业产值(0.1941), 双因子交互作用呈非线性增强, 第二产业产值与人口规模、GDP的交互作用最为显著。[结论] 云南省县域碳排放时空分异特征显著, 第二产业产值、高程和第三产业产值是碳排放空间分异的主要驱动因素。此外, 地形条件与社会经济因素间存在明显的协同效应。

关键词: 县域; 碳排放; 时空演变特征; 驱动机制; 云南省

中图分类号: X321

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0264-10

Spatiotemporal evolution characteristics and driving mechanisms of carbon emissions at county scale in Yunnan Province

Lin Zhifu, Tao Nan, Shan Lixian, Xiao Junji, Zhang He

(Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: [Objective] Yunnan Province, as the core area of China's southwestern ecological barrier, bears significant responsibility for maintaining regional ecological security. This study aims to reveal the spatiotemporal evolution characteristics and driving mechanisms of county-level carbon emissions in Yunnan Province, providing scientific support for regional differentiated carbon reduction and the development of low-carbon economy. [Methods] Taking 129 counties in Yunnan as the study subjects, spatial autocorrelation, optimal parameters-based geographical detector (OPGD), and the spatiotemporal geographically weighted regression (GTWR) model were employed to quantitatively analyze the spatiotemporal evolution of carbon emissions and their influencing factors. [Results] (1) From 2000 to 2020, total carbon emissions in Yunnan Province continued to grow, increasing from 93 million tons to 273 million tons. Counties such as Yongren, Fuyuan, Xuanwei, Anning, and Zhanyi consistently ranked among the highest in carbon emissions. (2) The spatial distribution exhibited a pattern of higher emissions in the central and eastern regions and lower emissions in the northwestern, western, and southwestern regions. The Moran's I index decreased from 0.338 to 0.219, indicating weakened but still positive spatial autocorrelation. High-value and low-value regions showed distinct geographical adjacency and stable spatial patterns. (3) In single-factor detection, the output value of the secondary industry (q value of 0.3349)

收稿日期: 2025-05-13

修回日期: 2025-07-04

接受日期: 2025-07-08

资助项目: 国家自然科学基金(52408065); 云南省科技厅面上项目(202401CF070132)

第一作者: 林志富(1999—), 男, 云南曲靖人, 硕士, 研究方向为国土空间规划、碳排放。E-mail: 1305145980@qq.com

通信作者: 陶楠(1988—), 女, 云南昆明人, 博士, 副教授, 主要从事建成环境地方性与适应性研究。E-mail: taonan5599@qq.com

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

demonstrated the strongest explanatory power, followed by elevation (0.308 8) and the output value of the tertiary industry (0.194 1). The interaction between two factors exhibited a nonlinear enhancement, with the interaction between the secondary industry output value, population size, and GDP being the most significant. [**Conclusion**] Yunnan Province exhibits significant spatiotemporal differentiation characteristics in carbon emissions at the county level. The main driving factors of the spatial differentiation of carbon emissions are the output value of the secondary industry, elevation, and the output value of the tertiary industry. Additionally, a significant synergistic effect is observed between topographic conditions and socioeconomic factors.

Keywords: county-level; carbon emission; spatiotemporal evolution characteristics; driving mechanisms; Yunnan Province

21世纪以来,全球气候治理面临严峻挑战。作为全球主要碳排放国之一,中国能源消费结构对化石能源的依赖亟需优化。在此背景下,中国于2020年联合国大会正式提出“双碳”目标(碳达峰、碳中和)。为实现这一目标,政府已采取系列碳减排措施,党的二十大进一步明确了“2035年前实现碳达峰后稳步下降”的绿色发展路线。学界对此也展开广泛研究,而碳排放存在尺度效应,其空间格局随研究尺度的变化呈现差异性。县域作为生态文明建设的关键实践场域,在碳减排战略中具有基础性作用^[1],因此,深入剖析县域尺度的碳排放时空格局及驱动机制,对制定科学碳减排政策和推动“双碳”目标实现有重要意义。

当前,碳排放研究体系已相对成熟。在研究尺度上,现有研究多聚焦于国家、多跨省区域^[2]、省域^[3]、城市群^[4]、经济带^[5]及市县等典型区域,研究内容主要涵盖3个方面:一是碳排放测算方面,主要方法包括排放系数法^[6]、全生命周期法^[7]、物料平衡法^[8]、IPCC能源消耗法^[9]、燃料CO₂估算法^[10]及基于DMSP/OLS夜间灯光等遥感数据的反演方法^[11]等;二是碳排放时空演变特征方面,常用空间自相关^[12]、基尼系数^[13]、趋势分析^[14]、GTWR模型^[15]、LISA时间路径和时空跃迁^[16]、重心与标准差椭圆等^[17];三是碳排放驱动机制方面,主要运用地理探测器^[18]、STIRPAT模型^[19]、LMDI模型^[20]、投入-产出法、地理加权回归模型等。既有研究为本文提供了重要参考,但存在一定拓展空间:(1)研究尺度多集中于国家至市级等宏观尺度,对县域等微观尺度关注不足,且研究地域分布不平衡,以东部发达城市群(如京津冀、长三角等)为主,针对西部欠发达地区(特别是云南)的实证研究关注较少;(2)驱动机制的探讨常局限于单一时空维度,且多聚焦于经济发展水平、人口规模、城镇化率、产业结构、土地利用等社会经济因素^[21-23],尚未系统考量云南省作为重要旅游目的地、

文旅大省及典型山地高原地形的独特影响。因此,亟需构建适用于云南省县域尺度的碳排放驱动机制的研究框架,突破传统范式局限,准确把握其基数现状、变化趋势及驱动机制。

云南省作为能源矿产资源大省,丰富的资源禀赋使其具有较高的碳排放潜力。同时,云南地处中国西南生态屏障核心区,兼具生态保护排头兵、清洁能源富集区和天然碳库等^[23]多重功能,在维护区域生态安全中承担着重要责任。鉴于此,本研究以云南省129个县域为研究对象,通过空间自相关识别碳排放区域集聚特征,并采用参数最优地理探测器(OPGD)及时空地理加权回归(GTWR)模型,系统探究其碳排放的驱动机制,以期为同类欠发达地区制定精准碳减排策略提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

云南省(97°31′—106°11′E, 21°8′—29°15′N),简称云或滇,位于中国西南边陲,属低纬度内陆地区,总面积为39.41万km²,约占全国国土总面积的4.1%,位列全国第八。在地缘格局上呈现“三省接壤、三国毗邻”的区位特征:东与贵州、广西相邻,北与四川隔江相望,西南与缅甸、老挝、越南毗邻。地形以高原山地为主,山地面积34.93万km²,占全省国土总面积的88.6%,其北部为青藏高原南延部分,全省地势高差大,海拔最高点与最低点相差6000多米,地势自西北向东南呈阶梯状递减。行政区划包括16个地级行政区(8市、8州),下辖129个县级行政单元(市辖区16个、县级市15个、县及自治县98个)。近年来,随着西部大开发战略的实施与推进,城市化进程不断加快,产业转型带动旅游高速发展,能源消耗强度随之上升,加之地形的制约,导致产业空间布局失衡与区域发展差异,碳排放的空间异质性更加显著。因此,如何厘清碳排放的变化

趋势,揭示其驱动机制,成为云南生态可持续发展面临的关键问题。

1.2 数据来源

本文使用的能源数据源于2000—2020《云南省统计年鉴》与《中国能源统计年鉴》,碳排放数据源自美国航空航天局(NASA)与日本环境研究所(NIES)联合研发的ODIAC(Open-source Data Inventory for Anthropogenic CO₂)高分辨率全球化石燃料CO₂排放数据集,该数据集提供国家及地区尺度逐年逐月的碳排放数据,其精度与可靠性已获国际广泛认可^[23]。社会经济数据包括人口规模、城镇化率、GDP、财政支出、一二三产值等整合自2000—2020《云南省统计年鉴》《中国县域统计年鉴》及国民经济与社会发展统计公报,行政区划数据取自国家基础地理信息公共服务平台,地形要素(高程、坡度)数据来自地理空间数据云30 m精度的数字高程栅格,旅游景点、道路密度、服务设施等数据则提取自OpenStreetMap平台。

1.3 研究方法

1.3.1 空间自相关 空间自相关是量化地理要素空间关联的重要统计方法,主要通过Moran's *I*指数测度相邻区域属性的相似性,从而揭示空间依赖性与异质特征,并识别碳排放等地理现象的空间集聚模式。依据空间尺度不同,空间自相关可分为全局和局部两类。其中,全局空间自相关用于表征研究区域内所有观测值的整体空间集聚特征,用全局莫兰指数 I_G 表示,公式如下^[24]:

$$I_G(\text{Global Moran's}) = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (1)$$

式中: n 为县域单元数量; x_i 和 x_j 为县域单元 i 和 j 的碳排放量; W_{ij} 为标准化的空间权重矩阵; I_G 取值范围为 $[-1, 1]$ 。当 $I_G > 0$ 时表明观测值呈现显著的空间正相关(即集聚), $I_G < 0$ 时表示空间负相关(即离散), $I_G = 0$ 则空间分布随机。然而, I_G 仅能揭示整体性趋势,无法揭示县域单元的具体集聚位置,相比之下,局部空间自相关不仅能精准界定空间集聚区的边界,还可有效辨识区域内部的空间分异格局。用局部莫兰指数 I_L 表示,计算公式如下^[25]:

$$I_L(\text{Local Moran's}) = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x})}{S^2} \quad (2)$$

式中: S 表示所有县域单元碳排放观测值的标准差,

其他参数含义与上式一致。当 I_L 通过显著性检验后,计算结果可识别出4种空间关联模式:高一高集聚(H-H)与低—低集聚(L-L)分别表征单元自身与邻域区域高值与低值趋同,二者均为空间正相关;高一低集聚(H-L)和低—高集聚(L-H)则呈现核心—边缘式的空间异质性特征,二者均为空间负相关。

1.3.2 参数最优地理探测器 地理探测器作为一种空间统计工具,能够量化多因子间的交互效应与相关性,进而揭示碳排放空间分异格局及驱动机制。然而,传统方法在进行影响因子离散化处理时易受主观因素干扰,存在离散性差^[26]、解释力较弱等问题,而最优参数地理探测器(Optimal Parameters-based Geographical Detector, OPGD)基于等间隔、分位数、自然断点、几何间隔和标准差这5种分类方法,可以自动筛选出 q 值最高的参数组合进行运算,其核心原理在于构建因子协同作用模型,量化特定驱动因子对因变量空间分异程度的解释力^[27],数学表达式为王劲锋等^[27]提出:

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

式中: q 为各驱动因子的交互效应值, q 取值范围为 $[0, 1]$, q 值越大,表示该因子对因变量的影响越显著。 $h=1, \dots, L$ 代表因子的分层总数; N 和 N_h 分别指研究区整体样本数量和第 h 层子区域的样本数量, σ^2 和 σ_h^2 分别对应研究区方差值和第 h 层子区域的方差值。

1.3.3 时空地理加权回归模型 时空地理加权回归(GTWR)模型相较于地理加权回归模型(GWR),其显著优势在于引入时间维度,同时考虑空间和时间的非平稳性,特别适用于分析动态演变数据,能够有效降低参数估计偏差,提升模型结果的可靠性。模型表达式如下^[28]:

$$y = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i, t_i) X_{ik} + \epsilon_i \quad (4)$$

式中: y 为第 i 个样本碳排放量; (u_i, v_i, t_i) 表征样本 i 的时空坐标; $\beta_0(u_i, v_i, t_i)$ 表示样本 i 的截距; $\beta_k(u_i, v_i, t_i)$ 表示样本 i 中影响因素 k 的回归系数; X_{ik} 表示样本 i 中影响因素 k 的观测值; ϵ_i 为随机误差项; p 为解释变量的数量。

2 结果与分析

2.1 碳排放时间演变特征

时序分析(图1)表明,2000—2020年云南省碳排放总量呈现增长态势,从2000年的0.93亿t增长到2020年的2.73亿t,年均增量约0.09亿t,但增长率略有下降。2016年碳排放量下降,据调查数据,当年三

产结构优化为 14.8:39.0:46.2,二产能耗强度同比下降 3.2 个百分点,其中,烟草加工业通过实施清洁生产改造实现能耗降低 4.3%,全省单位 GDP 二氧化碳排放强度下降 4.1%,标志着“十三五”低碳转型取得显著成效。具体到各县域上(图 2),永仁、富源、宣威、安宁、沾益等工业强县始终处于排放高位,尤其以富源县和永仁县较为突出。富源县经济依托丰富的煤炭资源,形成采掘、火电及煤化工产业链,伴随煤炭物流外运量大幅增加,加剧碳排放增长;永仁县则依托丰富的光热资源享有“中国阳光城”美誉,然而其光伏产业的上游环节存在排放管控难题,加之农业现代化进程加速及旅游开发带动配套设施需求增长,多重因

素叠加导致该县碳排放量持续上升。

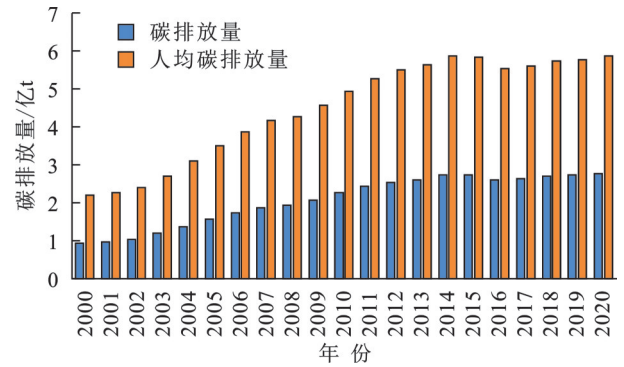


图 1 2000—2020 年云南省碳排放量时间变化
Fig. 1 Temporal variations in carbon emissions in Yunnan Province (2000—2020)

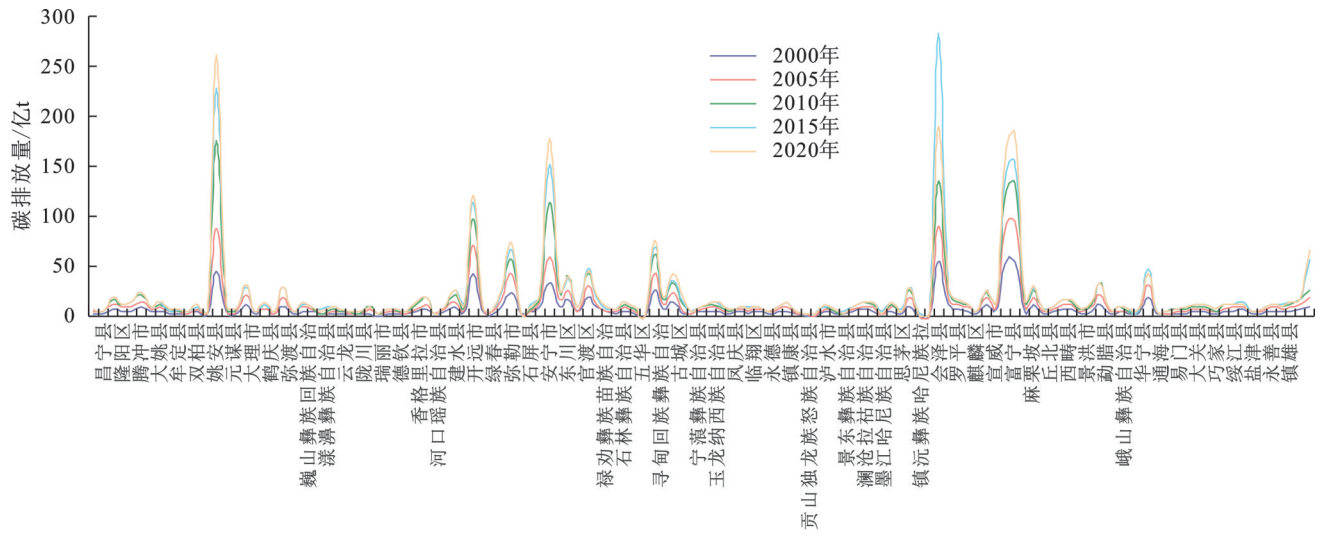


图 2 2000—2020 年云南省各县域碳排放量变化

Fig. 2 Variations in carbon emissions across counties in Yunnan Province (2000—2020)

2.2 碳排放空间演变特征

采用自然间断点分级法对县域碳排放量划分为 5 个等级:轻度(<250 万 t)、一般(250~500 万 t)、中度(500~750 万 t)、较多(750~1 000 万 t)及重度(>1 000 万 t)。结果表明(图 3),云南省县域碳排放的空间分异特征显著,表现为中东部较高,西北部、西部及西南部区域相对较低。具体而言,2000—2020 年永仁、宣威、富源、沾益、安宁、开远等地持续出现高值集聚。究其原因,曲靖市所辖宣威、富源、沾益均位于滇东煤炭资源富集区,已形成火力发电和煤化工为主导的产业体系;永仁则是依托光伏产业,本身是清洁能源,但其上游材料制造环节是典型的高耗能、高排放的过程;安宁、开远则作为省内重要的重化工业、能源、建材基地,其生产活动高度依赖化石能源消耗,工艺过程伴随着大量碳排放。2010 年后大理、弥渡、景洪、思茅、镇雄、蒙自等地相继进入“较多碳排放”行列,这一现象可能与当时云南省城镇化进程加速和旅游产业升级有关,高耗能基础设施扩张及交通

物流需求激增使碳排放量增大。低排放区域主要是迪庆、怒江、保山、德宏和临沧等州市下辖县域,其中迪庆和怒江地处“三江并流区”,人口密度低,且电力、供热主要以水力发电为主,碳排放量相对较少。

2.2.1 全局空间自相关分析 2000—2020 年云南省县域碳排放量表现出显著的空间正相关性,全局 Moran's *I* 指数均为正值(表 1),且均通过显著性检验(Global Moran's $I > 0, p < 0.01, Z \geq 2.58$),表明碳排放具有明显的空间集聚特征。空间分布上,碳排放高值县域与碳排放低值县域各自呈现地理空间邻近分布格局;时序变化方面, Moran's *I* 指数从 2000 年 0.338 降至 2020 年 0.219,表明虽然县域间碳排放存在较高关联性,但空间集聚性逐渐减弱,极端高值区域的集中程度逐渐弱化。

2.2.2 局部空间自相关分析 为深入揭示云南省县域碳排放的局部关联性特征,综合运用 GeoDa 与 ArcGIS 软件,绘制 2000 年、2010 年、2020 年 LISA 聚类地图(图 4),系统解析其局部空间分布规律。(1)碳

排放高值区(红色)空间格局基本保持稳定,核心区域主要为会泽县、宣威市、富源县、麒麟区和沾益区。该区域依托富集的煤炭资源禀赋,重点发展冶金、化工等高耗能产业以驱动经济快速增长,加之工业布局集中与经济活动密集^[23],共同导致碳排放量长期较高。(2)碳排放低值集聚区(蓝色)空间分布亦较为稳定,但呈现分散态势,早期集中于滇西

北生态屏障区(如贡山县、福贡县、德钦县)及滇西南边境县域(如陇川、芒市),后期新增文山马关县等生态保育区,整体呈现出空间边缘分布特征。受限于自然地理条件、区位及生态保护政策约束,这些地区经济发展相对滞后,产业结构以农林牧业为主,缺乏大规模工业化基础,因此长期维持着较低的碳排放水平。

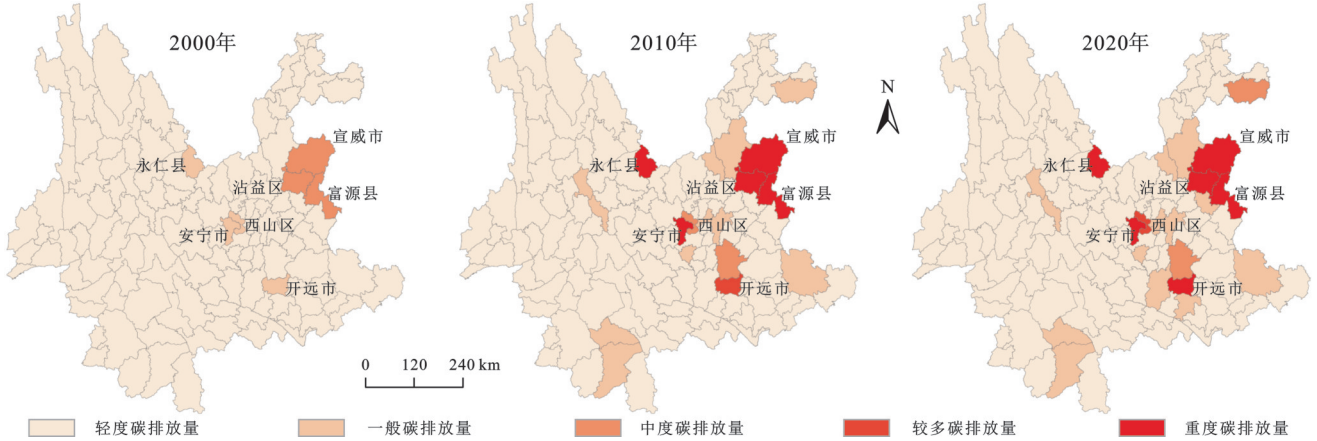


图 3 2000—2020年云南省县域碳排放空间分布特征

Fig. 3 Spatial distribution characteristics of county-level carbon emissions in Yunnan Province (2000—2020)

表 1 云南省 2000—2020年县域碳排放全局莫兰指数

Table 1 Global Moran's *I* index of county-level carbon emissions in Yunnan Province (2000—2020)

年份	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年
莫兰指数	0.338079	0.307297	0.247329	0.239502	0.218646
Z值	6.513099	5.930941	4.861357	4.893882	4.373243
p值	0	0	0.000001	0.000001	0.000012

2.3 碳排放驱动力分析

本文采用参数最优地理探测器(OPGD),结合数据的可获取性和云南省地域特点,选取 13 个驱动因子,涵盖自然地理与社会经济 2 个维度:高程(X_1)、坡度(X_2)、人口规模(X_3)、城镇化率(X_4)、GDP(X_5)、社

会消费品零售总额(X_6)、财政支出(X_7)、第一产业产值(X_8)、第二产业产值(X_9)、第三产业产值(X_{10})、道路密度(X_{11})、景点密度(X_{12})和服务设施密度(X_{13})。

单因子探测结果显示(图 5A),第二产业产值($q=0.3449$)对碳排放空间分异的解释力最强,高程($q=0.3088$)次之。随后依次是第三产业产值($q=0.1941$)、第一产业产值($q=0.1929$)、城镇化率($q=0.1928$)、GDP($q=0.1823$)及坡度($q=0.1356$)。社会消费品零售总额、人口规模、财政支出和服务设施密度对碳排放亦具一定解释力, q 值分别为 0.095 4, 0.093 4, 0.079 0, 0.057 8, 道路密度(0.019 3)和景点密度(0.018 0)解释力最弱。

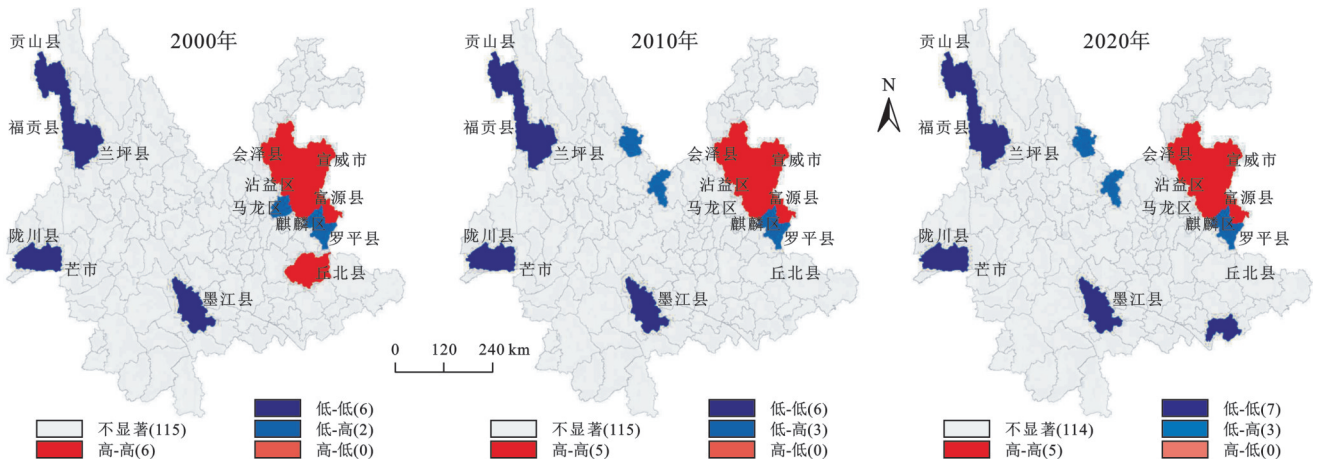


图 4 局部空间自相关-LISA 聚类地图

Fig. 4 Local spatial autocorrelation-LISA cluster map

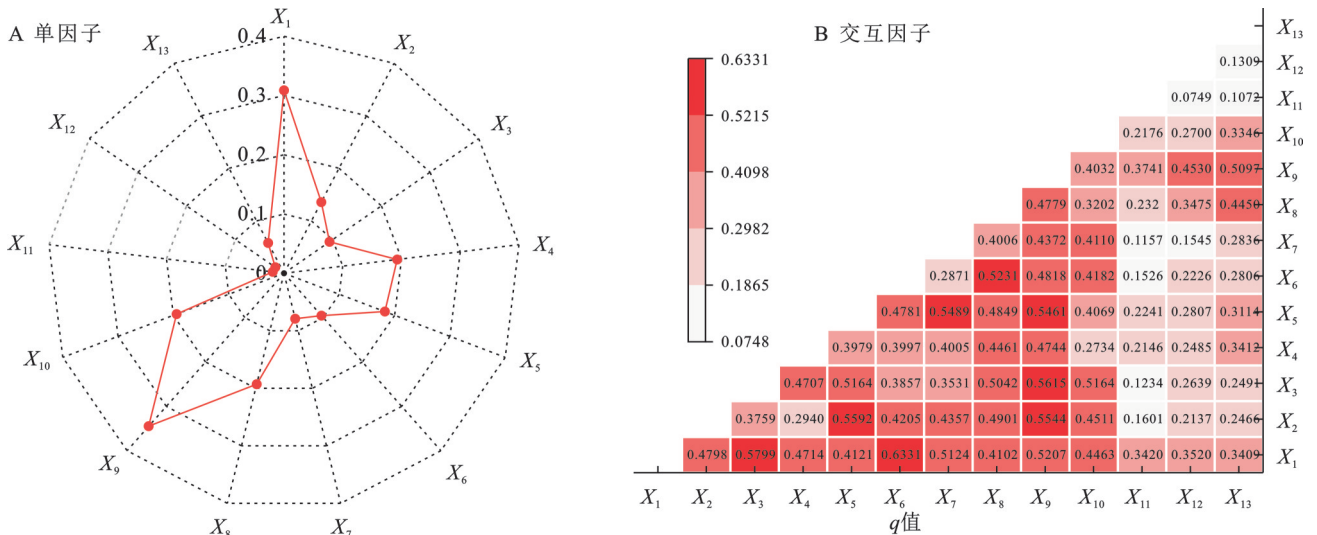


图 5 单因子和交互因子探测结果

Fig. 5 Results of single-factor and interaction-factor detection

与单因子探测相比,双因子交互探测结果显示(图 5B)所有交互因子解释力显著增强,均呈现非线性增强或双因子增强。具体而言,高程(X_1)、坡度(X_2)分别与人口规模(X_3)、社会消费品零售总额(X_6)、财政支出(X_7)、道路密度(X_{11})和景区密度(X_{12})的交互作用表现出非线性增强,可以看出地形因素与社会经济因素共同作用对碳排放产生协同强化效应。同时,社会经济因素驱动因子(X_3 — X_{13})的交互作用均表现为增强效应,其中以人口规模(X_3)与第二产业产值(X_9)、GDP(X_5)与财政支出(X_7)、GDP(X_5)与第二产业产值(X_9)交互作用最为突出。综上,云南省县域碳排放空间分异是地形条件、人口规模、经济发展水平 GDP 及产业结构等多要素协同作用的结果。

2.4 碳排放各驱动因子驱动效应空间异质性分析

鉴于云南省的独特地域特征,并基于 2.3 节单因子及交互因子探测结果,同时参考既有研究^[12,29],本研究采用时空地理加权回归模型(GTWR),选取第二产业产值、第三产业产值、GDP 及人口规模作为核心驱动因子,进一步揭示 2000—2020 年云南省县域碳排放影响因素在空间上的分布差异(图 6)。结果显示,县域尺度下云南省碳排放驱动因子呈现显著的空间异质性,且其驱动作用呈单向扩张趋势,第二产业产值驱动方向由滇西向滇中和滇东扩展,第三产业产值驱动效应的空间变化由滇南—滇东—滇东北地区呈逆时针方向迁移,GDP 的驱动重心从滇东北—滇北—滇东南地区转移,而人口规模对碳排放的驱动作用则主要集中在云南省东部,由南逐渐向北转移。

(1) 第二产业产值对碳排放量高影响系数县域主要分布于滇西、滇西北地区(如迪庆州、怒江州、保

山市等下辖县域)。该区域地处青藏高原的南延部分,海拔 3 000~4 000 m,属滇西生态屏障及“三江并流区”,产业基础薄弱,以高能耗初级加工业为主,单位产值碳排放较高,故其影响系数较大。值得注意的是,近年来伴随全域旅游推进及滇西旅游大环线建设,丽江、大理等著名旅游地正逐渐成为新的高值区,可能与游客量激增及配套基础设施需求相关。相比之下,滇中、滇东北地区碳排放受第二产业产值的影响系数数值较低,空间分布有收缩趋势,说明其产业结构逐步优化、产业能效提高。(2) 第三产业产值对云南县域碳排放量的影响程度空间格局变动显著,系数高值区域从滇南—滇东—滇东北地区呈逆时针方向迁移,系数低值区域从滇西北—滇西—滇西南转变。滇东北、滇东地区(尤其曲靖和昭通下辖县域)碳排放受第三产业产值影响系数逐年上升,其原因可能是人口集聚效应导致的服务需求扩张推动第三产业迅速发展。滇西北、滇西、滇西南地区碳排放受第三产业产值的影响系数偏低,表明第三产业发展相对滞后,规模化程度不足。(3) GDP 对县域碳排放量的驱动效应空间格局变化较大,系数高值区域从滇东北—滇北—滇东南地区转移,系数低值区域主要是滇西、滇南地区。具体而言,滇东资源型县域发展路径单一,GDP 增长长期依赖资源本底、传统基建投资与资源开发项目,形成“高投资、高能耗和高排放”的粗放模式,能效提升滞后于经济增长需求,因此碳排放量相对较多。滇中城市群地区碳排放受 GDP 的影响程度下降明显,折射出区域发展模式转型,开始注重对低碳经济的投入与发展。(4) 人口规模对碳排放的驱动作用存在显著地理差异,回归系数高值区域呈现动态迁移特征,由滇东南—滇东北地区转移。整体来看,昭通、曲靖作为主要响应区

域,其下辖的镇雄、永善、绥江、盐津、水富及宣威等县市,人口集聚效应对碳排放的边际贡献度呈持续增长趋势。该现象可能归因于两个方面:一是工业

化进程加速导致基础设施扩建与公共服务需求激增,二是能源消费结构刚性特征与资源依赖型产业布局产生协同放大效应。

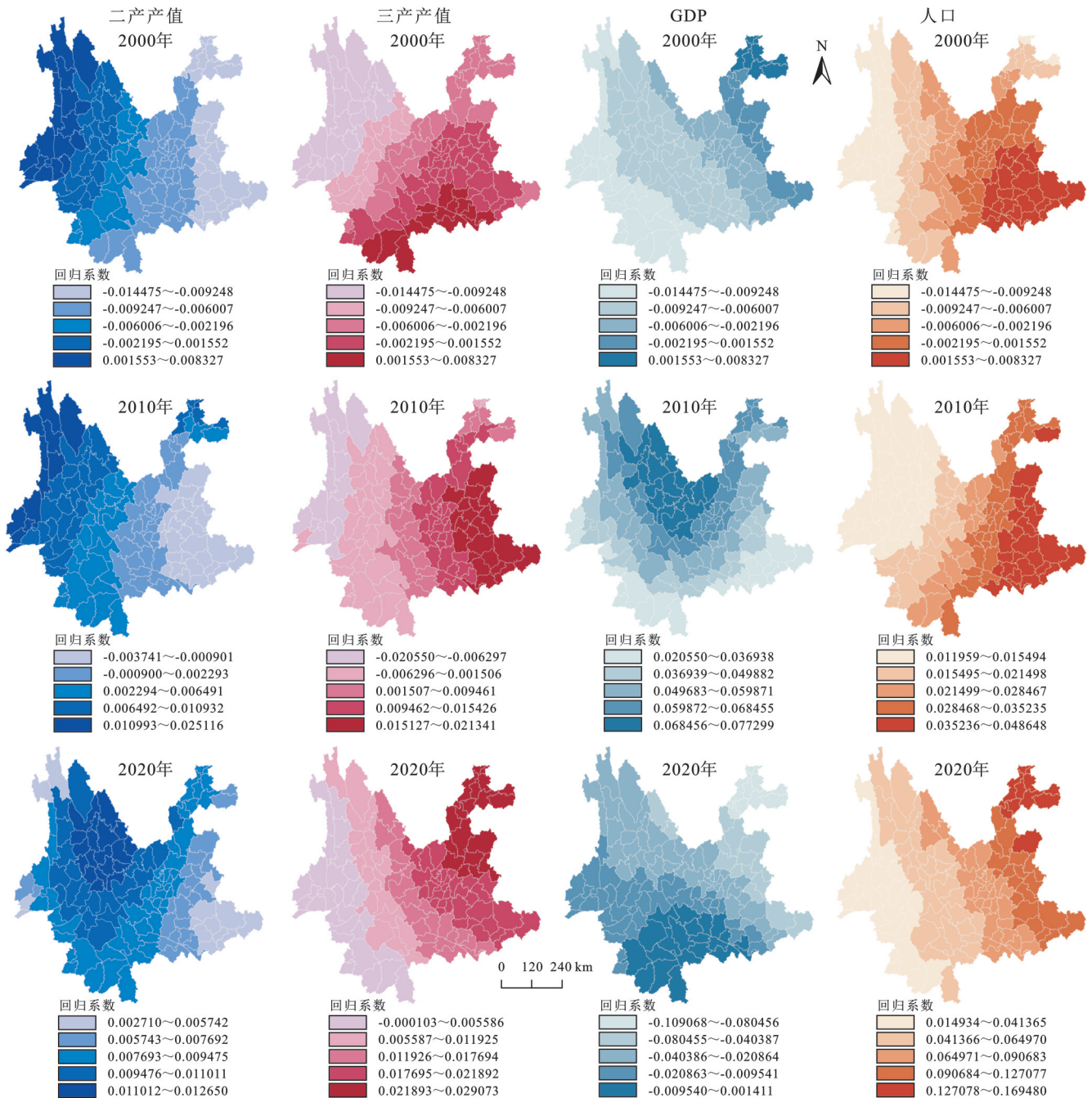


图 6 2000—2020 碳排放各驱动因子的回归系数

Fig. 6 Regression coefficients of driving factors of carbon emissions (2000—2020)

3 讨论

云南省作为我国西南重要的生态屏障和高原山地省份典型代表,在国家战略与区域发展格局中具有多重特殊性,其区域发展不平衡性与产业结构的特殊性,使碳排放时空演变规律及驱动机制具有典型研究价值。值得注意的是,县域作为政策落地的关键行政单元,其微观尺度复杂性在以往宏观尺

度^[21-23]研究中常被忽略,本研究则为此提供重要的实证依据。

2000—2020 年云南省碳排放总量持续增长但增速趋缓,这与陶俊逸等^[21]研究结论吻合,在空间分布上,有别于李志英等^[22]提出“中间高、四周低”的初步结论,本研究发现云南省县域碳排放呈现“中东部高、西北西南低”的空间分异特征,高排放区主要集中在富源、宣威、沾益、安宁等县域,低值区则分布在

滇西北贡山、德钦及滇西南陇川、芒市等地,这与王巧玲等^[23]研究结论相近。对比国家、省域、城市群、经济带、市域和县域等^[1-5]不同尺度的碳排放研究,其空间自相关 Moran's *I* 均为正值,与本文县域尺度研究结果一致。云南省县域碳排放还表现出显著的高—高(H-H)和低—低(L-L)空间集聚现象。此外, Moran's *I* 指数逐年递减,表明云南省县域碳排放的空间集聚程度持续弱化,此规律与武紫涵等^[15]和对苏北地区县域和周航等^[30]对湖南省县域的研究结论相一致。

在碳排放驱动机制解析方面,相较于李志英等^[22]和王巧玲等^[23]的单一驱动框架,本文充分考虑到云南省高原山地地貌及作为全国热门旅游目的地和文旅大省的双重属性,在选取人口规模、城镇化率、GDP、一二三产值等社会经济因子的基础上,创新性地纳入高程、坡度、道路密度、景点密度及服务设施密度等因子。方法上,为克服传统地理探测器离散性差及解释力弱的局限^[26],本研究采用最优参数地理探测器与GTWR模型相结合的方法。在驱动因子解释力层面,既有研究如陶俊逸等^[21]和王巧玲等^[23]均认为产业结构对碳排放的影响较弱。然而,本文发现第二产业产值对云南省县域碳排放的解释力最强,其次为高程、第三产业产值、城镇化率和坡度。同时,高程和坡度与其他因子交互作用均呈现非线性增强,此结果呼应了马国斌等^[29]关于广西县域研究中第二产业占比及平均高程的驱动力逐渐增强的结论。上述表明,云南省县域碳排放演变是独特的地形地貌、旅游活动驱动以及社会经济因素共同作用的结果。因此,作为生态文明建设排头兵,云南省在统筹生态保护与旅游开发时,应重点考量这些因素的交互影响。

需指出研究仍存在以下不足:受限于县域数据可获性,碳排放数据主要源自权威官方数据库,未进行精细化测算。虽与既有研究趋势基本一致,但县域数据的稳定性仍需深入探讨。未来研究可考虑纳入城市土地利用、人口呼吸代谢、产业与居民活动,以及农业化学品施用、秸秆焚烧等潜在碳排放源头。此外,尽管第二产业产值是主导驱动因子,旅游、交通等活动亦对区域碳排放产生重要影响。如何量化这些活动的强度并探究其对碳排放的驱动机制是未来值得关注的研究方向。

4 结论

(1) 碳排放时间演变总量增长与区域分化。2000—2020年云南省碳排放总量持续增长但增长率趋缓,永仁、富源、宣威、安宁、沾益等长期处于排放

高位。其中,富源县因煤炭资源依赖型经济衍生的高耗能产业链碳排放上升,永仁县则受光伏产业上游高排放环节及农业现代化、旅游开发的配套设施需求影响,形成差异化的碳排放增长路径。

(2) 碳排放空间分布存在显著集聚性与分异性。全省县域碳排放呈现“中东部高、西北部及西南低”的空间分异特征,存在显著空间正相关,集聚性有所减弱,但高值区(宣威、富源、安宁和开远)和低值区(迪庆、怒江)仍保持稳定的空间格局。高值区可能是依托煤炭资源和高耗能产业形成经济密集区,低值区则可能受地理环境与生态政策限制,以农林牧业为主,维持低碳排放特征。

(3) 产业结构与多因子交互驱动县域碳排放空间分异。参数最优地理探测器显示,第二产业产值(*q*值为0.3449)是碳排放的最强驱动因子,高程、第三产业产值等因子次之,且双因子交互作用显著增强,凸显地形条件与社会经济要素的协同作用机制。GTWR进一步揭示驱动因子的空间异质性:第二产业产值对滇西、滇西北县域影响作用显著,第三产业产值驱动效应随人口集聚向滇东、滇东北迁移,GDP驱动呈现从粗放型资源依赖区域向低碳发展区域转移的特征,人口规模对滇东县域碳排放的边际贡献度持续上升。以上现象共同揭示出工业化、城镇化进程中能源消费结构优化与产业布局调整的协同增强效应。

参考文献(References):

- [1] 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):3103-3118.
Wang S J, Xie Z H, Wang Z H. The spatiotemporal pattern evolution and influencing factors of CO₂ emissions at the county level of China[J]. Acta Geographica Sinica, 2021,76(12):3103-3118.
- [2] 张梅霞,李芳,郭宸宁.华北平原三省耕地利用碳排放时空特征、影响因素及脱钩关系[J].水土保持通报,2024,44(6):366-376.
Zhang M X, Li F, Guo C N. Spatial-temporal characteristics, influencing factors, and decoupling relationship of carbon emissions from cultivated land use in three provinces of North China Plain[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(6):366-376.
- [3] 崔嵩,陈茁,贾朝阳.黑龙江省能源碳排放时空演变格局及其影响因素分析[J].东北农业大学学报,2025,56(2):118-130.
Cui S, Chen Z, Jia Z Y. Analysis of spatiotemporal evolution pattern and influencing factors of energy carbon emissions in Heilongjiang Province[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2025,56(2):118-130.
- [4] 邹秀清,杨林茵,孙学成,等.长三角城市群碳达峰水平

- 测度、时空演变及影响因素研究[J/OL]. 软科学, 2025: 1-14. (2025-06-16). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1268.G3.20250613.1846.002.html>.
- Zou X Q, Yang L Y, Sun X C, et al. Study on the measurement of peak carbon levels, spatial and temporal evolution, and influencing factors in the Yangtze River Delta urban agglomeration [J/OL]. *Soft Science*, 2025: 1-14. (2025-06-16). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1268.G3.20250613.1846.002.html>.
- [5] 金贵, 邓祥征, 赵晓东, 等. 2005—2014年长江经济带城市土地利用效率时空格局特征[J]. *地理学报*, 2018, 73(7): 1242-1252.
- Jin G, Deng X Z, Zhao X D, et al. Spatio-temporal patterns of urban land use efficiency in the Yangtze River Economic Zone during 2005-2014 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(7): 1242-1252.
- [6] Kong H J, Shi L F, Da D, et al. Simulation of China's carbon emission based on influencing factors [J]. *Energies*, 2022, 15(9): 3272.
- [7] 王少剑, 田莎莎, 蔡清楠, 等. 产业转移背景下广东省工业碳排放的驱动因素及碳转移分析[J]. *地理研究*, 2021, 40(9): 2606-2622.
- Wang S J, Tian S S, Cai Q N, et al. Driving factors and carbon transfer of industrial carbon emissions in Guangdong Province under the background of industrial transfer [J]. *Geographical Research*, 2021, 40(9): 2606-2622.
- [8] 李键, 毛德华, 蒋子良, 等. 长株潭城市群土地利用碳排放因素分解及脱钩效应研究[J]. *生态经济*, 2019, 35(8): 28-34, 66.
- Li J, Mao D H, Jiang Z L, et al. Research on factors decomposition and decoupling effects of land use carbon emissions in Chang-Zhu-Tan urban agglomeration [J]. *Ecological Economy*, 2019, 35(8): 28-34, 66.
- [9] Nejat P, Jomehzadeh F, Taheri M M, et al. A global review of energy consumption, CO₂ emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO₂ emitting countries) [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 43: 843-862.
- [10] Park J, Hong T. Analysis of South Korea's economic growth, carbon dioxide emission, and energy consumption using the Markov switching model [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 18: 543-551.
- [11] Liu X P, Ou J P, Wang S J, et al. Estimating spatio-temporal variations of city-level energy-related CO₂ emissions: An improved disaggregating model based on vegetation adjusted nighttime light data [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 177: 101-114.
- [12] 魏俊超, 梅志雄, 马君杰, 等. 广州市土地利用碳排放时空演变及影响因素[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(4): 298-307.
- Wei J C, Mei Z X, Ma J J, et al. Spatiotemporal evolution and influencing factors of land-use carbon emissions in Guangzhou [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(4): 298-307.
- [13] 李姗姗, 秦乐瑶, 孔维龄, 等. 公平视角下中国区域碳排放时空演变及其影响因素[J/OL]. *环境科学*, 2025: 1-16. (2025-06-17). <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjlx.202501050>.
- Li S S, Qin Y Y, Kong W L, et al. Spatial and temporal evolution of China's regional carbon emission and its influencing factor from the perspective of equity [J/OL]. *Environmental Science*, 2025: 1-16. (2025-06-17). <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjlx.202501050>.
- [14] 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, 161.
- Zhou X D, Dou W Z, Zhan Q M, et al. Spatio-temporal patterns of carbon emissions in Hubei Province based on county level [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2022(11): 149-156, 161.
- [15] 武紫涵, 佟帅, 季翔. 苏北地区县域土地利用碳排放时空演变及驱动机制研究[J/OL]. *生态与农村环境学报*, 2025: 1-11. (2025-06-16). <https://link.cnki.net/doi/10.19741/j.issn.1673-4831.2025.0140>.
- Wu Z H, Tong S, Ji X. Spatiotemporal evolution and driving mechanisms of county-level land use carbon emissions in northern Jiangsu [J/OL]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2025: 1-11. (2025-06-16). <https://link.cnki.net/doi/10.19741/j.issn.1673-4831.2025.0140>.
- [16] 全文露, 李丁, 李田田, 等. 江苏省县域碳排放的时空动态格局[J]. *环境科学与技术*, 2023, 46(5): 165-173.
- Tong W L, Li D, Li T T, et al. Spatial-temporal dynamics of county carbon emissions in Jiangsu Province [J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 46(5): 165-173.
- [17] 曹周亮, 张欣蓉, 员学锋, 等. 基于土地利用变化的陕西省县域碳排放时空变化及影响因素研究[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(5): 376-385.
- Cao Z L, Zhang X R, Yuan X F, et al. Spatio-temporal variation and influencing factors of CO₂ emission at county scale in Shaanxi Province based on land use change [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(5): 376-385.
- [18] 贺祥, 杨层, 安小敏, 等. 贵州省碳源碳汇时空演变与影响因素研究[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(4): 297-309.
- He X, Yang C, An X M, et al. Research on the spatio-temporal evolution and influencing factors of carbon

- sources and sinks in Guizhou Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(4): 297-309.
- [19] Poumanyong P, Kaneko S. Does urbanization lead to less energy use and lower CO₂ emissions: a cross-country analysis [J]. *Ecological Economics*, 2010, 70(2): 434-444.
- [20] 赵琪琛, 余敦, 王检萍. 九江市农地利用碳排放时空演变、影响因素及趋势预测 [J]. *水土保持研究*, 2023, 30(6): 441-451.
- Zhao Q C, Yu D, Wang J P. Spatial and temporal evolution, influencing factors and trend prediction of carbon emissions from agricultural land use in Jiujiang City [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(6): 441-451.
- [21] 陶俊逸, 赵筱青, 陈彦君, 等. 云南省能源消费碳排放时空演变及其影响因素 [J]. *环境科学与技术*, 2023, 46(9): 178-187.
- Tao J Y, Zhao X Q, Chen Y J, et al. Spatial and temporal evolution of carbon dioxide emissions from energy consumption and influencing factors in Yunnan Province [J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 46(9): 178-187.
- [22] 李志英, 朱晓珊, 杨丽, 等. 云南省土地利用碳排放时空演变特征及影响因素 [J]. *水土保持通报*, 2023, 43(5): 297-303, 311.
- Li Z Y, Zhu X S, Yang L, et al. Spatial-temporal evolution characteristics and influencing factors of carbon emissions in Yunnan Province based on land use changes [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(5): 297-303, 311.
- [23] 王巧玲, 李双成. 云南省碳排放时空演变特征及影响因素分析 [J]. *中国环境科学*, 2025, 45(1): 528-537.
- Wang Q L, Li S C. Dynamics of carbon emissions in Yunnan Province: spatiotemporal characteristics and influencing factors [J]. *China Environmental Science*, 2025, 45(1): 528-537.
- [24] 梅志雄, 徐颂军, 欧阳军. 珠三角县域城市潜力的空间集聚演化及影响因素 [J]. *地理研究*, 2014, 33(2): 296-309.
- Mei Z X, Xu S J, Ouyang J. Spatial agglomeration pattern evolution and its influencing factors of urban potential at county level in the Pearl River Delta [J]. *Geographical Research*, 2014, 33(2): 296-309.
- [25] 金贵, 邓祥征, 董寅, 等. 发展地理学视角下中国多维贫困测度及时空交互特征 [J]. *地理学报*, 2020, 75(8): 1633-1646.
- Jin G, Deng X Z, Dong Y, et al. China's multidimensional poverty measurement and its spatiotemporal interaction characteristics in the perspective of development geography [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(8): 1633-1646.
- [26] 单立先, 田潇然, 林嘉暄. “三生空间”视角下旅游地碳储量时空演变及其驱动机制: 以丽江市为例 [J/OL]. *环境科学*, 2025: 1-18. (2025-06-16). <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjkx.202502251>.
- Shan L X, Tian X R, Lin J X. Spatiotemporal evolution and driving mechanisms of carbon storage in tourist destinations from the perspective of “production-living-ecological space”: a case study of Lijiang City [J/OL]. *Environmental Science*, 2025: 1-18. (2025-06-16). <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjkx.202502251>.
- [27] 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.
- Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
- [28] Huang B, Wu B, Barry M. Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(3): 383-401.
- [29] 马国斌, 陆汝成, 吴彬. 广西县域土地利用碳排放时空演变特征及驱动机理 [J/OL]. *中国农业资源与区划*, 2025: 1-13. (2025-01-27). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFD&filename=ZGNZ20241108006>.
- Ma G B, Lu R C, Wu B. Spatio-temporal evolution characteristics and driving mechanism of land use carbon emission at county level in Guangxi [J/OL]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2025: 1-13. (2025-01-27). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFD&filename=ZGNZ20241108006>.
- [30] 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.
- Zhou H, Zhao X C. Spatial differentiation characteristics of carbon emission and its influencing factors in Hunan Province, China at the county scale [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2024, 46(2): 196-210.