

• 经济与管理 •

兰西城市群能源消费碳排放时空分布特征及影响因素 ——基于DMSP/OLS与NPP/VIIRS夜间灯光数据

邓光耀^{1,2} 陈刚刚²

1. 兰州财经大学甘肃经济发展数量分析研究中心 甘肃兰州 730020; 2. 兰州财经大学统计学院 甘肃兰州 730020

摘要:在全国碳减排目标框架下,从县域尺度开展能源消费碳排放时空演变及其影响因素的研究,对指导城市群实现碳达峰及碳中和目标具有重要意义。探索性空间数据分析可以揭示区域内碳排放的空间差异性,而地理探测器不仅可以识别影响因素对碳排放单独的影响力,还可以识别影响因素交互效应对碳排放空间分异的影响力。因此,文章通过校正融合长时间序列 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 夜间灯光影像,空间化模拟了 1995—2019 年兰西城市群能源消费碳排放量,并从县域尺度视角出发,利用探索性空间数据分析以及地理探测器等,对碳排放时空分布特征、空间关联特征及影响因素等展开研究。结果表明:(1)碳排放总量从 1995 年的 36.23×10^6 t 上升到 2019 年的 116.61×10^6 t,增长速度呈先上升后下降的态势,年均增速为 4.79%,县域碳排放(10^4 t)区间由 1995 年的 [13.4, 425.4] 增长为 2019 年的 [103.2, 1051.4];(2)高碳县区主要集中在兰州市和西宁市主城区以及周围人口密集、经济较发达的县区,空间差异性在不断缩小,空间正自相关性呈现出逐步扩大的趋势,局部自相关比较稳定,以高一高聚集和低—低聚集为主导;(3)碳排放空间分异受多种因素综合作用,经济发展水平对碳排放空间分异的影响力始终最强。

关键词:能源消费碳排放;夜间灯光影像;时空分布特征;地理探测器;兰西城市群

中图分类号:F125 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-8505(2022)06-0040-21

doi:10.12189/j.issn.1672-8505.2022.06.005

Spatio-temporal Evolution Pattern and Influencing Factors of Carbon Emissions from Energy Consumption in Lanzhou-Xining City Group —Based on DMSP/OLS and NPP/VIIRS Night Light Data

DENG Guang-yao^{1,2} CHEN Gang-gang²

1. Center for Quantitative Analysis of Gansu Economic Development, Lanzhou University of Finance and Economics,
Lanzhou, Gansu, 730020, China;

2. School of Statistics, Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou, Gansu, 730020, China

Abstract: Under the framework of the national carbon emission reduction goals, the research on the spatio-temporal evolution of

收稿日期:2022-08-10

基金项目:国家自然科学基金青年项目(71704070);甘肃省杰出青年基金(20JR5RA206);甘肃省高等学校创新能力提升项目(2020A-058);甘肃省教育厅双一流科研重点项目(GSSYLXM-06);2021年度甘肃省陇原青年创新创业人才项目;兰州财经大学丝绸之路经济研究院重点科研项目(JYYZ202102);兰州财经大学科研项目(Lzufe2021B-002)。

第一作者:邓光耀,男,副教授,博士,主要从事资源环境统计研究。

引用格式:邓光耀,陈刚刚.兰西城市群能源消费碳排放时空分布特征及影响因素——基于DMSP/OLS与NPP/VIIRS夜间灯光数据[J].西华大学学报(哲学社会科学版),2022,41(6):40-60.

energy consumption carbon emissions and its influencing factors at the county level is of great significance to guide urban agglomerations to achieve carbon peak and carbon neutral goals. Exploratory spatial data analysis can reveal the spatial differences of carbon emissions in the region, while geographic detectors can not only identify the independent influence of influencing factors on carbon emissions, but also identify the influence of interaction effects of influencing factors on the spatial differentiation of carbon emissions. Therefore, the paper spatially simulates the carbon emissions of energy consumption in Lan-Xi urban agglomeration from 1995 to 2019 by correcting and fusing the long time series DMSP/OLS and NPP/VIIRS night light images. From the perspective of county scale, the paper uses exploratory spatial data analysis and geographical detectors to study the spatio-temporal distribution characteristics, spatial correlation characteristics and influencing factors of carbon emissions. The results show that: (1) The total carbon emissions increased from 36.23×10^6 t in 1995 to 116.61×10^6 t in 2019, and the growth rate first increased and then decreased, with an average annual growth rate of 4.79%. The range of carbon emissions (10^4 t) increased from [13.4, 425.4] in 1995 to [103.2, 1051.4] in 2019. The range of carbon emissions (t/10 000 yuan) decreased from [4.2, 9.7] in 2005 to that of 2019 [1.6, 5.0]. (2) Regional carbon emissions have always shown a spatial distribution pattern of high in the east and low in the west, high in the middle and low in the north and south. High-carbon counties and districts are mainly concentrated in Lanzhou and Xining and the surrounding densely populated and economically developed areas. The spatial difference is shrinking, and the spatial positive autocorrelation is gradually expanding. The local autocorrelation is relatively stable, dominated by high-high and low-low aggregation. The high-high aggregation is mainly concentrated in the main urban area of Lanzhou, and the low-low aggregation is distributed in Huangnan prefecture and Hainan prefecture. (3) The spatial differentiation of carbon emissions is affected by a variety of factors, and the influence of economic development level on the spatial differentiation of carbon emissions is always the strongest. The interaction between GDP and energy intensity, the enterprises number, industrial structure and urbanization level is the main driving force for the sustained growth of carbon emissions.

Key words: energy consumption carbon emissions; night light images; spatio-temporal evolution pattern; geographical detector; Lanzhou-Xining City Group

近年来,气候变暖的加剧在全球引发了一系列经济、社会和环境问题,已经严重威胁着人类的生存和可持续发展。人类活动产生的能源消耗碳排放是温室气体的主要来源,也是导致全球气候变暖的主要原因之一^[1]。《巴黎协定》呼吁全球温室气体排放尽快达峰,以21世纪后半叶实现全球净零排放为长远碳减排目标,以缔约方国家自主决定贡献为近期目标^[2]。根据能源统计数据,中国的能源消费总量和能源消费碳排放量分别从1980年的5.86亿吨标准煤和7.4亿吨增加到2020年的49.8亿吨标准煤和99亿吨,2020年能源消费碳排放量占全球总排放量的30.9%^[3]。为了对全球生态文明和构建人类命运共同体做出中国贡献,2020年9月22日,国家主席习近平在第75届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话时提出,中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,CO₂力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和。

城市群作为国家工业化和城镇化转型发展高级阶段的产物,是国家和地区经济发展的增长极^[4]。当前国内外学者针对中国城市群碳排放的研究主要集中在长三角^[5]、珠三角^[6]、京津冀^[7,8]等经济发达的城市群,对于中、西部城市群碳排放的研究较少。兰州—西宁城市群(下述简称“兰西城市群”)作为我国西部重要的跨省区城市群,是我国西部重要的生态屏障,也是黄河上游重要的工业和能源基地,正处于经济体制转型和产业结构优化升级的关键时期,同时,该地区也是生态环境保护和污染防治的重点区域^[9]。兰西城市群的绿色转型无论对推进黄河流域高质量发展,还是对甘、青两省加强环境治理和生态保护都具有重要的现实意义,因此,对兰西城市群能源消费碳排放问题展开研究必要且迫切。

夜间灯光数据与能源消费碳排放之间存在较强的相关性,这为利用夜间灯光数据估算碳排放提供了科学依据。如Elvidge等和Doll等早期研究发现,夜间灯光亮度值(Digital Number, DN)与碳排放具有较强的相关性^[10],二者的拟合优度达到0.84^[11]。Zhao等研究发现当DN值介于3到50之间时DN值与

CO₂ 线性相关,当 DN 值介于 51 到 63 之间时 DN 值与 CO₂ 指数相关^[12]。苏泳娴研究发现 DN 值与 CO₂ 之间存在较强的线性相关关系,拟合优度达到 0.818^[13]。马忠玉和肖宏伟构建了中国分省 DN 值与人均碳排放和单位面积碳排放之间的时空地理加权回归模型,发现两个模型整体效果较好,拟合优度分别达 96.74% 和 99.24%^[14]。因此,利用夜间灯光数据估算区域碳排放量具有一定的科学性和可行性。

目前,国内外学者利用夜间灯光数据对能源消费碳排放的研究主要集中在碳排放估算^{[7][8][13][15-18]}、时空分布特征^{[7][8][13][16-18]}以及影响因素^{[7][16][18]}等主题上。苏旭冉和蔺雪芹基于 DMSP/OLS 夜间灯光影像,对京津冀地区的能源消费碳排放进行了估算,发现 1992—2012 年该地区碳排放呈增长趋势,人口规模和城镇化水平是碳排放增长的主要推动力^[7]。Cui 等基于 NPP/VIIRS 夜间灯光影像,估算了 2012—2016 年华北地区集中供热碳排放,结果表明,北京、天津、石家庄和青岛碳排量最多^[15]。于博等利用 NPP/VIIRS 夜间灯光影像,对哈尔滨—长沙城市群县级尺度碳排放量进行模拟研究,发现该城市群 2012—2016 年碳排放总量呈下降趋势,碳排放表现出显著空间正自相关,人口密度和经济水平对碳排放具有显著的正向影响^[16]。吕倩和刘海滨利用 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 夜间灯光影像,分别对京津冀县级尺度(2000—2013 年)和黄河流域多级尺度(1995—2016 年)能源消费碳排放进行模拟研究,发现京津冀县级尺度碳排放的空间正自相关性在不断减弱^[8],黄河流域多尺度碳排放的空间正自相关性在不断增强^[17]。杜海波等利用 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 夜间灯光影像,对黄河流域碳排放量进行模拟研究,发现 2000—2018 年黄河流域碳排放总量在不断上升,但增长速度呈下降趋势,经济发展水平为碳排放空间分异的主导因子^[18]。

能源消费碳排放受到经济发展水平、人口状况、能源强度、产业结构、城镇化水平、投资结构等诸多因素的影响^{[5-7][16][18-21]},既有关于碳排放影响因素的研究大多从空间异质性的角度出发,一般基于结构分解模型和计量检验对碳排放影响因素和影响机制进行分析验证,对多个影响因子的空间分异格局解释力相对重要性判定关注不足^[22],影响因子之间可能存在的复杂交互作用亦需进一步深化。地理探测器作为探测空间分异性、揭示其背后驱动力的一组统计学方法,通过分别计算和比较各单因子的驱动力及两因子叠加后的驱动力,可以判断两因子是否存在交互作用,以及交互作用的强弱、方向、线性还是非线性等(两因子叠加交互效应既包括相乘关系,也包括其他关系,只要有关系,就能检验出来)^[23]。因此,运用地理探测器方法可以对区域碳排放空间分异格局的主导驱动因子进行探测识别与驱动力判断排序,并深入分析关键交互因子的存在性及其对碳排放空间分异格局的多重空间叠加交互效应。

上述研究成果为夜间灯光数据模拟区域碳排放提供了诸多有益借鉴,但仍有几点不足:利用夜间灯光数据模拟碳排放的研究主要集中在国家层面和经济较发达的地区,对西部欠发达地区的研究较少,针对兰西城市群碳排放的研究尚处于空白;夜间灯光数据主要采用 DMSP/OLS 或 NPP/VIIRS 单一尺度,时间跨度较短,将两种数据相互校正为同尺度的长时间序列研究较少;对碳排放影响因素的研究大多选择空间计量模型进行分析,忽视了影响因子交互叠加效应对碳排放空间分异的作用。基于此,本文选择兰西城市群为研究区域,通过校正长时间序列夜间灯光影像,空间化模拟了兰西城市群能源消费碳排放量,并从县级尺度视角出发,利用空间趋势分析、探索性空间数据分析以及地理探测器等方法对兰西城市群碳排放时空分布特征、空间关联特征以及驱动因素展开研究。

本文的研究在理论和实践意义上均存在创新。理论意义:(1)通过校正长时间序列夜间灯光数据,为模拟更小尺度碳排放数据提供科学的数据支持;(2)从县级尺度视角出发,选择兰西城市群为研究区域,弥补兰西城市群碳排放研究的空白,为我国西部城市群碳排放研究提供示范参考。实践意义:(1)利用校正后的夜间灯光数据空间化模拟碳排放,解决了兰西城市群县域碳排放数据缺乏的问题;(2)借助地理探测器方法研究碳排放影响因素问题,克服了空间计量模型无法识别影响因素交互效应对碳排放空间分异

表 1 数据来源

数据类型	数据年份	数据来源
DMSP/OLS夜间灯光影像	1992—2013	美国国家海洋和大气管理局(NOAA/NGDC) 官方网站(https://www.ngdc.noaa.gov/eog/download.html)
NPP/VIIRS夜间灯光影像	2012—2019	美国国家海洋和大气管理局(NOAA/NGDC) 官方网站(https://www.ngdc.noaa.gov/eog/download.html)
能源消费数据	1995—2019	《中国能源统计年鉴》(1996—2020)
社会经济数据	2005—2019	《中国县域统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》、《甘肃省统计年鉴》、《青海省统计年鉴》、 相应地级市国民经济与社会发展统计公报(2006—2020)
矢量数据	2019	中国国家基础地理信息中心(http://www.ngcc.cn)

(三) 夜间灯光影响预处理

1. DMSP/OLS 影像预处理

第一步,对全球 1992—2013 年 DMSP/OLS 夜间灯光影像进行投影转换、影像裁剪与重采样,得到中国区域 DMSP/OLS 夜间灯光影像。第二步,选择黑龙江省鹤岗市为不变目标区域,以 F162006 辐射定标夜间灯光影像为参考影像,34 期稳定夜间灯光影像为待校正影像^[26],选择拟合优度最高的二次函数对传感器进行相互校正。第三步利用平均值法对不同传感器获取 DMSP/OLS 夜间灯光影像进行年内融合,得到 1992—2013 年 DMSP/OLS 年度夜间灯光影像。第四步,假设卫星在前一年捕捉到的夜间灯光第二年不会消失,即认为在连续两年的夜间灯光影像中,第二年 DN 值应该不小于第一年 DN 值^[28],利用栅格计算器对年内融合后的夜间灯光影像进行年际间连续性校正,得到具有可比性和连续性的 DMSP/OLS 尺度中国区域 1992—2013 年夜间灯光影像。

2. NPP/VIIRS 影像预处理

第一步,对全球 2012—2019 年 NPP/VIIRS 月度夜间灯光影像进行投影转换、影像裁剪与重采样,得到中国区域 NPP/VIIRS 夜间灯光影像。第二步,由于 NPP/VIIRS 夜间灯光影像存在负值,借鉴周翼等^[27]的校正方法,利用 DMSP/OLS 年度影像对 NPP/VIIRS 月度影像的负值予以消除,然后合成年度均值影像。第三步,利用 NOAA/NGDC 发布的消除了不稳定光源与背景值的 NPP/VIIRS 年度夜间灯光影像(2015 年和 2016 年),选择幂函数对 2012—2019 年 NPP/VIIRS 年度均值影像进行相对辐射校正,使各年度均值影像之间具有可比性。第四步,利用二值化方法去除 NPP/VIIRS 年度均值影像中的不稳当光源和背景噪声,然后采用降值法对极高值进行消除,最后依据 DMSP/OLS 影像连续性校正的原则,对 NPP/VIIRS 年度均值影像进行连续性校正,得到具有可比性和连续性的 NPP/VIIRS 尺度中国区域 2012—2019 年年度夜间灯光影像。

3. DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 影像相互校正

通过统计中国县级行政单元夜间灯光影像的总灯光值(Total Digital Number, TDN),对 2012 年和 2013 年 NPP/VIIRS 影像进行 DMSP/OLS 尺度校正,构建了 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 影像县级 TDN 值的回归关系,回归结果如表 2 所示。

表 2 2012 年和 2013 年 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 拟合结果

拟合函数	R 方	a	b1	b2	b3
线性	0.935	3 777.900	11.795		
对数	0.145	38 296.737	8 629.381		
二次	0.939	4 842.575	10.217	0.000 018 180	
三次	0.928	5 402.078	9.147	0.000 000 000	0.000 000 001
幂	0.734	97.946	0.745		

选择拟合优度最高的二次函数作为两类夜间灯光影像相互融合的校正模型, 校对方程如公式(1):

$$y = 0.000\,018\,18x^2 + 10.217x + 4\,842.575 \tag{1}$$

其中, y 为 2012—2013 年 DMSP/OLS 夜间灯光影像 TDN 值, x 为 2012—2013 年 NPP/VIIRS 夜间灯光影像 TDN 值。

最后, 基于所建立的校正模型对 2014—2019 年 NPP/VIIRS 影像进行 DMSP/OLS 尺度时间序列连续性校正, 得到 2014—2019 年 DMSP/OLS 尺度夜间灯光影像, 再与前面已经校正好的 1992—2013 年 DMSP/OLS 影像进行合并, 就可以得到中国区域 1992—2019 年 DMSP/OLS 尺度长时间序列夜间灯光影像。

4. 校正评价

有研究表明, 中国省级尺度上的 TDN 值与 GDP 之间具有显著的正线性相关关系^[27]。因此, 对中国各省份(不包含台湾地区)2005 年和 2019 年的 TDN 值与 GDP 值进行线性拟合(图 2), 可以发现, 2005 年和 2019 年在省级尺度上 TDN 值对 GDP 的拟合优度分别为 0.86 和 0.85, 说明 TDN 值对 GDP 具有较好的拟合能力, 验证了本文校正的夜间灯光影像具有较高的可信度, 也为后续研究提供了可靠的数据支撑。

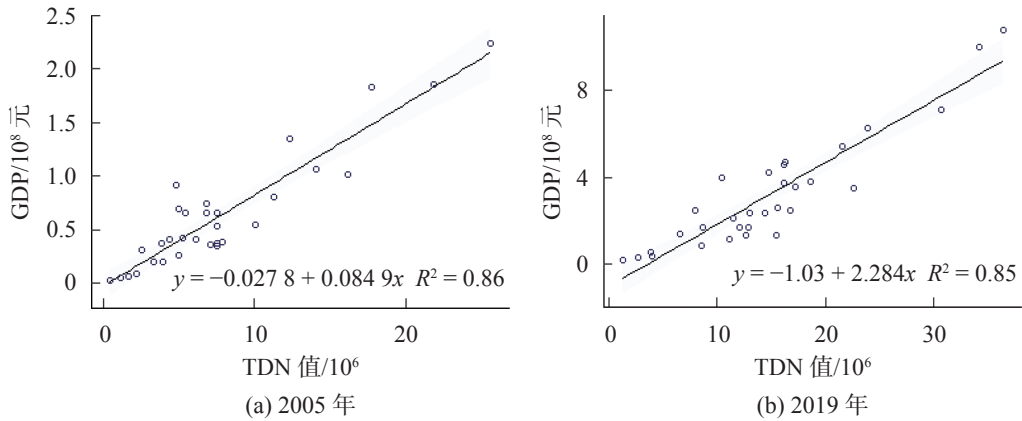


图 2 2005 年和 2019 年省份 TDN 值(10⁶)与 GDP(10⁸ 元)拟合结果

二、研究方法

(一) 碳排放测算模型构建及精度检验

1. 碳排放测算模型

基于甘肃和青海省 1995—2019 年的能源消费统计数据, 参考苏泳娴等^[19] 计算碳排放的方法, 本文选取了 9 种主要能源测算其碳排放量, 测算公式如下:

$$CO_2 = \frac{44}{12} \times \sum_{n=1}^9 K_n \times E_n \tag{2}$$

其中, E_n 表示甘肃省和青海省当年第 n 种能源消费量(10⁴ t 标准煤), K_n 为第 n 种能源的 CO₂ 排放系数(10⁴ t 碳)/(10⁴ t 标准煤)。本文所使用的 9 种能源消耗折算标准煤系数和 CO₂ 排放系数见表 3。

表 3 燃料消耗碳排放系数

能源种类	原煤	焦炭	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油	天然气	电力
换算成标准煤(t标准煤/t)	0.7143	0.9714	1.4286	1.4714	1.4714	1.4571	1.4286	1.33	0.345
CO ₂ 排放系数(10 ⁴ t碳/10 ⁴ t标准煤)	0.7559	0.855	0.5857	0.5538	0.5714	0.5921	0.6185	0.4483	0.272

2. 碳排放模拟模型

基于本文校正的中国区域 DMSP/OLS 尺度的夜间灯光影像, 统计了 1995—2019 年甘肃省和青海省

省级行政单元内的 TDN 值,并计算了甘、青两省碳排放统计值与 TDN 值之间的相关系数,分别为 0.97 和 0.98,均呈现较高的相关关系,说明二者存在某种特定的联系,也进一步证实了利用夜间灯光影像可以较好地模拟能源消费碳排放量,这与相关学者^{[11][16]}的研究结果一致。

由于同一地区 TDN 值与碳排放统计值具有较好的相关性^[19],本文假设 TDN 值与碳排放统计值存在正线性相关性,且省级和县级尺度上的相关关系与像元尺度上的相关关系具有一致性^[8]。利用 1995—2019 年甘肃省和青海省的 TDN 值与碳排放统计值构建碳排放模拟模型,考虑降尺度到栅格单元的精度问题^[18],采用无截距项的线性模型,如公式(3)所示:

$$CS_i = a \times TDN_i$$

(3)

其中, CS_i 为*i*年碳排放模拟值, TDN_i 为校正后相应区域*i*年所有稳定灯光影像像元 DN 值总和, a 为回归系数,甘肃、青海两省 1995—2019 年碳排放模拟结果如图 3 所示。

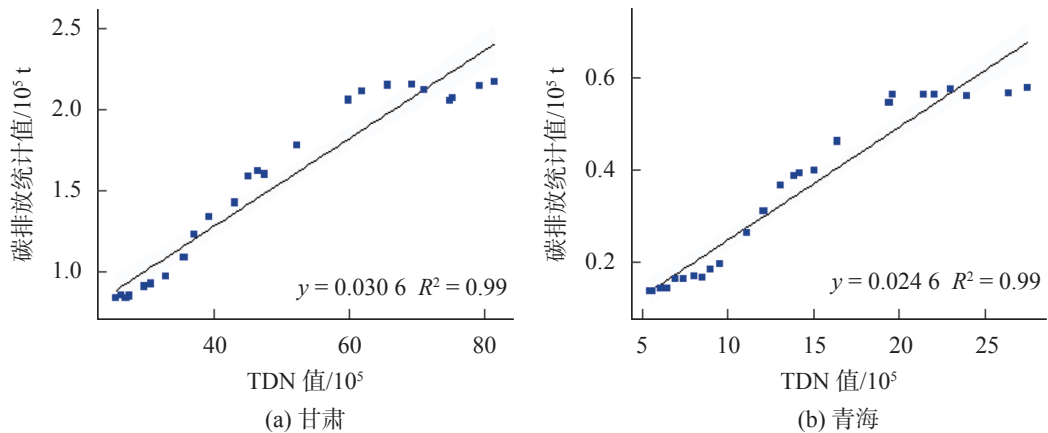


图 3 1995—2019 年甘肃 (a) 和青海 (b) 碳排放统计值(10⁵t)与 TDN 值(10⁵)拟合结果

由图 3 中的拟合结果可知,TDN 值与碳排放统计值具有良好的线性相关性,甘、青两省的拟合优度均高达 0.99,因此,利用夜间灯光影像模拟碳排放的假设前提是成立的,二者存在正向线性相关关系。

3. 模拟精度检验

基于图 3 中的拟合方程计算得到甘、青两省的能源消费碳排放模拟值,为确保模拟值的精确性,进一步计算了甘、青两省碳排放统计值与模拟值的相对误差(表 4),进行模拟结果的精度检验。

表 4 甘肃、青海两省 1995—2019 年碳排放量模拟精度检验表

年份	统计值	模拟值	相对误差	年份	统计值	模拟值	相对误差
1995	96.78	85.48	-20.90%	2008	200.76	189.61	-12.13%
1996	99.10	92.44	-16.58%	2009	199.26	186.73	-9.25%
1997	98.00	94.13	-5.35%	2010	217.94	193.95	-12.00%
1998	97.97	98.39	-1.37%	2011	252.17	229.09	-18.52%
1999	101.17	104.34	2.94%	2012	266.04	249.11	-14.79%
2000	106.96	108.79	0.18%	2013	271.42	252.57	-9.27%
2001	109.29	115.66	5.17%	2014	271.63	264.90	-1.54%
2002	113.68	122.27	6.99%	2015	268.32	272.14	2.80%
2003	126.93	128.86	0.46%	2016	260.92	271.51	12.75%
2004	142.67	135.53	-7.74%	2017	263.03	272.71	15.72%
2005	160.14	147.78	-9.97%	2018	271.36	285.83	18.72%
2006	173.34	158.52	-9.53%	2019	274.55	294.30	20.68%
2007	195.50	174.34	-15.48%				

由精度检验表4可以发现,碳排放统计值与模拟值的相对误差最大的为1995年的20.90%,最小的为2000年的0.18%,其中,有14个年份的相对误差小于10%,相对误差均值为10.03%,这小于一些学者^{[8][17][19][29]}的研究结果。

4. 碳排放模拟修正模型

为了减小相对误差,进一步提高模拟的精度,同时保证空间统计单元的一致,采用省级碳排放零误差法对单位像元上的碳排放模拟值进行修正^[29]。构建夜间灯光影像模拟的碳排放比例系数,然后将碳排放模拟值乘以相应的比例系数,使碳排放模拟值与统计值相同,最终得到空间化碳排放数据(图4)。其计算方法如下:

$$R_n = \frac{CE_n}{CS_n} \quad (4)$$

$$C_{s,n,k} = C_{x,n,k} \times R_n \quad (5)$$

式中, R_n 表示第 n 年碳排放比例系数, CE_n 为第 n 年碳排放统计值, CS_n 为第 n 年碳排放模拟值, $C_{s,n,k}$ 为第 n 年第 k 个栅格单元上分布的碳排放量, $C_{x,n,k}$ 为第 k 个栅格单元上分布的碳排放模拟值。

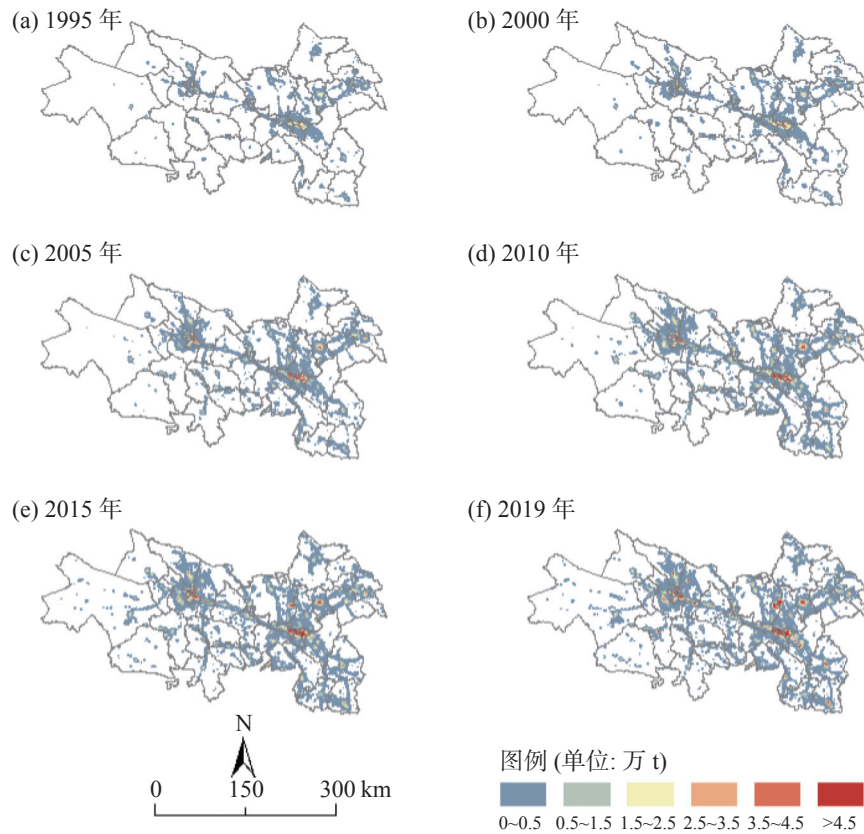


图4 1995—2019年兰西城市群县域碳排放空间化模拟结果

图4可以直观展示兰西城市群县域碳排放的高低以及不同县区的空间差异性,1995—2019年兰西城市群碳排放围绕兰州市和西宁市呈向心聚集与外围扩散并存态势。具体来看,1995—2000年间,兰西城市群碳排放整体处于较低水平,且分布范围较小;2005年以后,兰州与西宁碳排放不断串联并向周边扩散,白银市的碳排放扩散明显;2019年,出现3个明显的高碳排放区,分布在兰州市、西宁市和白银市。

(二) 变异系数

通过变异系数来度量兰西城市群碳排放的相对差异程度,其计算公式如下:

$$CV = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2} \div \bar{C} \quad (6)$$

式中, C_i 表示 i 县区的碳排放量, n 为研究区区县个数, $\bar{C}$ 为兰西城市群 39 个县区的平均碳排放量; CV 表示变异系数, 其值越大表明兰西城市群碳排放的相对差异越大。

(三) 探索性数据分析方法

1. 全局空间自相关

全局 Moran's I 指数能有效反映兰西城市群整体碳排放空间集聚情况, 从而揭示整个城市群碳排放空间分布特征。Moran's I 介于 $[-1, 1]$ 之间, 大于 0 表示空间正相关, 且越接近 1, 正相关性越强, 即高碳排(或低碳排)县区之间的空间集聚性越强; 接近 0 表示邻接县区单元不相关, 即区域碳排放在空间上呈随机分布模式; 小于 0 表示空间负相关, 且越接近 -1, 负相关性越强, 即区域碳排放与周围县区的差异性越明显^{[7][30]}。计算公式如下:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

式中, I 表示全局 Moran's I 指数, n 为研究区区县总个数, x_i 和 x_j 为 i 和 j 县区的碳排放值, $\bar{x}$ 为县区碳排放均值。 w_{ij} 为空间权重矩阵, 用来刻度兰西城市群各县区的空间邻接或邻近关系, 本文采用基于邻接概念的 Queen 空间权重矩阵, 即采用拥有公共边界为相邻原则建立兰西城市群县域的空间关系, 公式如下:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{空间位置 } i \text{ 和 } j \text{ 空间相邻} \\ 0, & \text{空间位置 } i \text{ 和 } j \text{ 空间不相邻} \end{cases} \quad (8)$$

可以通过以下 Z 统计量对 Moran's I 指数的显著性进行检验:

$$Z = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{Var}(I)}} \quad (9)$$

其中, $E(I)$ 为 Moran's I 指数的数学期望, $\text{Var}(I)$ 为 Moran's I 指数的方差。

2. 局部空间自相关

借助局部 Moran's I 指数和 LISA 聚类对兰西城市群碳排放空间关联和集聚特征进行研究, 局部 Moran's I 指数如下:

$$I_i = z_i \sum_j w_{ij} z_j \quad (10)$$

式中, I_i 表示局部 Moran's I 指数, z_i 和 z_j 分别为县区 i 和 j 的碳排放标准化值, w_{ij} 为兰西城市群县区空间权重矩阵。

(四) 地理探测器

本文利用地理探测器来揭示兰西城市群碳排放空间分异性的驱动力。其核心思想如下: 如果自变量 X (碳排放影响因子) 对因变量 Y (碳排放量) 具有重要影响, 那么两个变量的空间分布应该趋于一致, 其空间一致性程度可通过 q 统计量来测度自变量 X 对因变量 Y 的解释力, 计算公式如下^[31]:

$$q = 1 - \frac{\sum_{m=1}^K N_m \delta_m^2}{N \delta^2} = \frac{SSW}{SST} \quad (11)$$

式中, $m = 1, 2, \dots, K$ 为碳排放影响因子 X 的分类, N 为兰西城市群县区数量, N_m 为影响因子 X 的 m 类包含的县

区数, δ_m^2 和 δ^2 分别为类 m 和整个城市群碳排放值的方差, δ_m^2 和 δ^2 分别为分类 m 的方差与总方差, $SSW = \sum_{m=1}^K N_m \delta_m^2$ 和 $SST = N \delta^2$ 分别为各类别方差之和与整个城市群总方差。 $q \in [0, 1]$, $q = 0$ 时, 表示碳排放呈随机分布, q 值越大, 碳排放的空间分异越明显, 说明影响因子对碳排放的解释力就越大, q 值表示 X 解释了 $100 \times q\%$ 的 Y 。

关于 q 值是否显著, 可通过以下 F 统计量进行检验^[23]:

$$F = \frac{N-L}{L-1} \frac{q}{1-q} F(L-1, N-L; \lambda) \quad (12)$$

$$\lambda = \frac{1}{\delta^2} \left[\sum_{m=1}^L \bar{Y}_m^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{m=1}^L \sqrt{N_m} \bar{Y}_m \right)^2 \right] \quad (13)$$

式中, λ 为非中心参数, $\bar{Y}_m$ 为层 m 的均值。

三、结果分析

(一) 碳排放时间序列变化

1. 碳排放总量

如图5所示, 1995—2019年, 兰西城市群碳排放总量整体呈增长趋势, 增长速度表现出明显的阶段特征, 碳排放总量从 36.23×10^6 t 增长至 116.61×10^6 t, 增长了 3.22 倍。根据碳排放量及其增长速度的变化趋势, 本文将 1995—2019 年碳排放变化情况分为以下三个阶段进行分析。

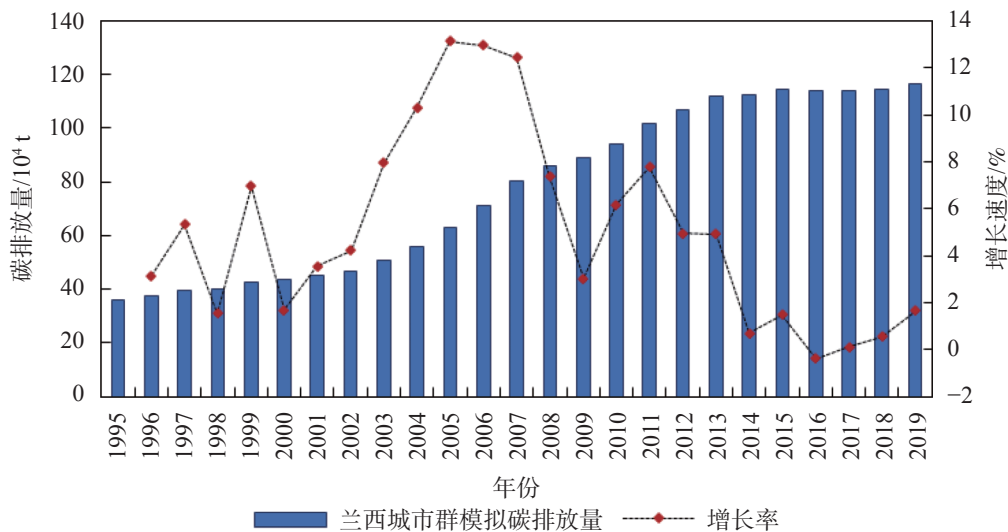


图5 1995—2019年兰西城市群碳排放量及增长情况

第一阶段(1995—2002年): 碳排放量处于缓慢增长阶段, 碳排放增长速度呈波动起伏状态。碳排放量由 1995 年的 36.23×10^6 t 增长为 2002 年的 46.92×10^6 t, 7 年间碳排放总量共增长 10.69×10^6 t, 增长了 1.30 倍, 碳排放年均增长速度为 3.15%。长期以来, 该地区一直延续着高投入、高消耗、高排放的粗放式发展模式, 在经济增长的同时, 钢铁、有色金属、石化、化工、水泥、煤电等高耗能重工业加速发展, 对化石能源的需求也不断增长, 势必导致碳排放量不断上升。第二阶段(2002—2013年): 碳排放量处于快速增长阶段, 碳排放量从 2002 年的 46.92×10^6 t 上升为 2013 年的 111.88×10^6 t, 11 年间碳排放总量共增长 64.96×10^6 t, 增长了 2.38 倍。在此阶段, 碳排放增长速度经历了“M”型变化过程, 年均增长速度为 7.88%。自从国家实施西部大开发以来, 甘青两省经济加速前进, 此阶段兰西城市群正处于工业化的快速

发展时期,实现经济增长仍是该地区所面临的重大任务,其所处的发展阶段和老工业基地的地位客观上决定了该阶段碳排放处于快速增长状态。同时随着人口的增长,城镇化进程加快以及人们生活水平的提高,建筑和生活耗能也大幅上升,也加速了碳排放的进一步增长。第三阶段(2013—2019年):碳排放量基本维持在同一水平,碳排放增长速度相对较低。在此期间,碳排放量出现了两个明显的峰值,分别为2015年的 114.34×10^6 t 和 2019年的 116.61×10^6 t;增长速度呈先下降后上升的趋势,年均增长速度为1.28%,增长速度从2013年的4.92%下降为2016年的-0.37%,之后处于缓慢低增长状态,2019年增长速度为1.67%。这与其经济发展重心由早期追求经济快速发展转为提高经济发展质量与效益、优化经济结构密切相关,也与能源使用效率的提升、清洁能源的开发以及节能减排政策的落实密不可分,此阶段能源消费碳排放增速持续放缓。

2. 县级尺度碳排放量

如图6所示,1995—2019年,兰西城市群县级尺度碳排放呈增长趋势,碳排放的最低值和最高值分别由 13.4×10^4 t 和 425.4×10^4 t 增长为 103.2×10^4 t 和 1051.4×10^4 t,最低县域和最高县域碳排放分别增长8.46倍和2.47倍。

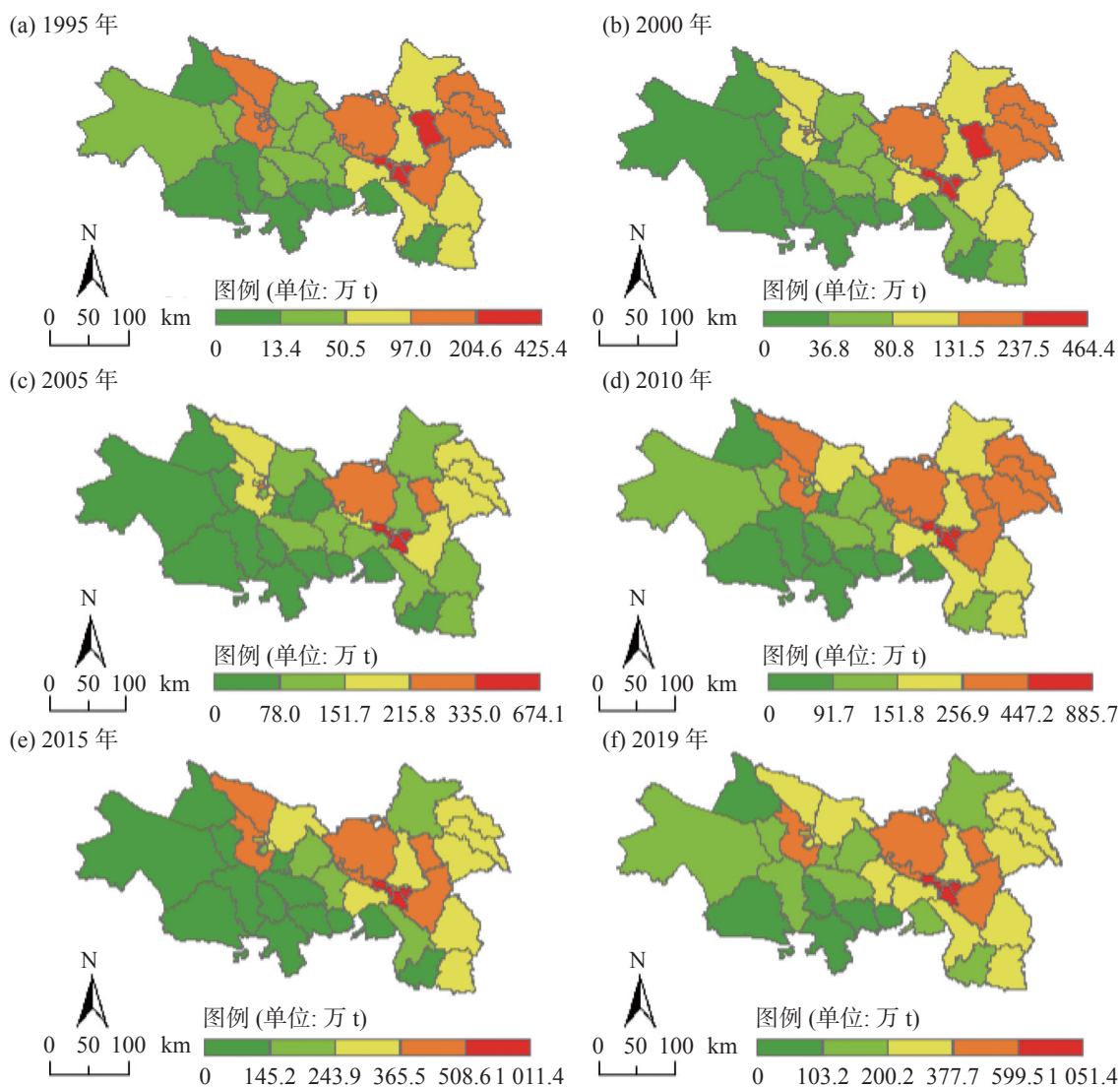


图6 1995—2019年兰西城市群县域碳排放量空间分布

具体来看,1995年高碳排放区域主要集中在甘肃兰州市主城区(西固区、城关区、七里河区)和白银市

白银区,次高区域分布在西宁市县区、兰州市周围县域、白银平川区和靖远县,青海省县区碳排放处于较低水平,整体表现出东高西低的分布特征。2000年,由于甘肃所属县区碳排放体量高于青海省所属县区,尽管增速相差不大,但高碳排区域还是集中在兰州市主城区和白银市白银区,次高区有白银市平川区、靖远县和兰州市永登县,东高西低的分布特征也更加明显。2005年,由于兰州市区的碳排放增长速度远高于同期其他县区,导致碳排放最高区域一直集中在兰州市主城区,次高区为白银市白银区和兰州市永登县,但其他县域碳排放都处于增长状态。

2010—2019年,高碳排区域一直集中在兰州市主城区,次高区变化较大。在2010年,次高区有西宁市主城区(城北区、城西区、城东区 and 城中区)、湟中县和大通县,兰州市红古区、永登县和榆中县,白银市白银区、平川区和靖远县;同时,碳排放增长较为明显的县区有海东市互助县、兰州市皋兰县、临夏州永靖县、定西市安定区、陇西县、临洮县和白银市景泰县,这些县域多围绕在兰州市和西宁市周围,表明二者碳排放具有区域溢出效应。2015年,兰西城市群县区的碳排放增速较之前明显下降,而受到碳排放基数的影响,除西宁市县区以外,甘肃省县域碳排放明显高于青海省县域。2019年,碳排放围绕兰州市主城区和西宁市主城区逐渐分层分布的趋势尤为明显,就整个区域而言,虽然东高西低态势依然明显,但东西分层差异有所减小(其中海东市平安区、乐都区 and 民和县变化较为明显)。

以上结果表明,人口数量较多和经济发展水平较高的县区碳排放量较高,反之则较低。究其原因,人口数量越多、经济发展水平越高的县区对能源消费量也越高,因此能源消费碳排放量也越高。

3. 碳排放强度

如图7所示,2005—2019年,兰西城市群碳排放强度整体上呈下降趋势。其中,碳排放强度下降幅度最大的5个县区为临夏州临夏市、西宁市城西区、城东区、海东市化隆县和兰州市七里河区,分别为83.2%、82.5%、78.7%、75.5%和74.9%;碳排放强度下降最多的5个县区为海东市化隆县、兰州市榆中县、定西市安定区、临夏市和临洮县,每万元碳排放量分别下降了6.6t、6.5t、6.2t、6.1t和6.0t。而海北州海晏县、黄南州尖扎县、海南州贵南县、西宁市大通县、海南州共和县以及定西市渭源县共6个县的碳排放强度呈先上升后下降的趋势,分别在2010年或2015年达到峰值,下降速度比较缓慢。

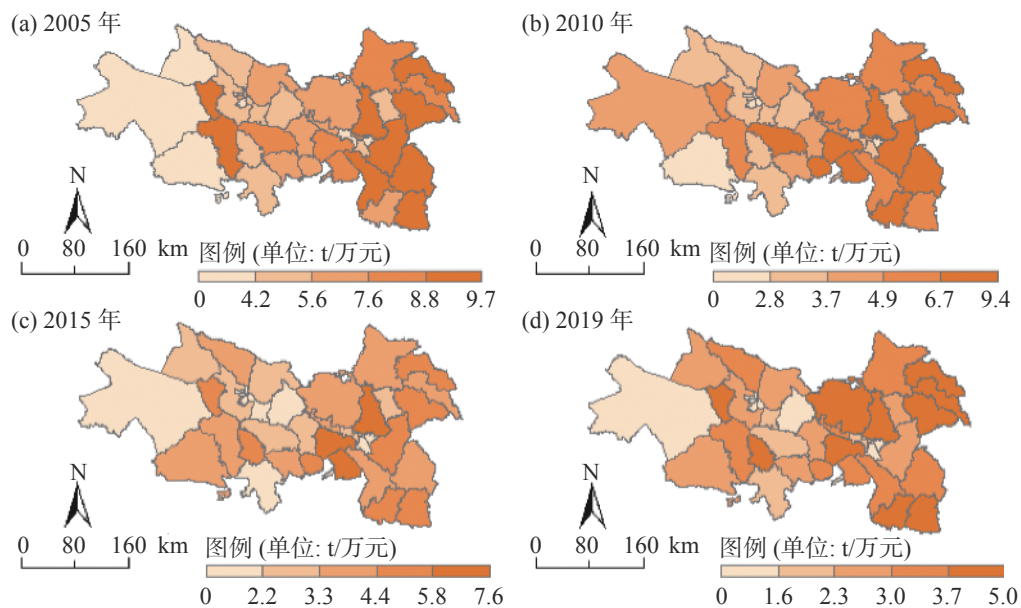


图7 2005、2010、2015、2019年兰西城市群县域碳排放强度

具体来看,2005年,碳排放强度最高的为西宁市湟源县,达到9.7 t/万元,最低的海北州海晏县为2.5 t/万元;2010年碳排放强度最高的是兰州市榆中县,为9.4 t/万元,最低的西宁市城中区为2.2 t/万元;

2015 年碳排放强度最高值为临夏州永靖县的 7.6 t/万元,最低值为兰州市城关区的 1.3 t/万元;到 2019 年,碳排放强度最高和最低的县区仍然为临夏州永靖县和兰州市城关区,分别为 5.0 t/万元和 1.0 t/万元。总之,无论从单位 GDP 碳排放强度下降幅度和净下降量,还是碳排放强度最高值与最低值的变化来看,2005—2019 年,兰西城市群碳排放强度的下降趋势都非常明显,说明近年来该地区经济总体上发展向好,技术进步使得能源利用效率得到了一定程度的提高。

(二) 碳排放空间分布特征

1. 正态性检验

对兰西城市群 1995 年和 2019 年的县级尺度碳排放模拟值进行正态性检验,图 8 为碳排放模拟值经过对数变换后的正态 QQ 图。可以看出,数据集近似呈直线分布,即认为兰西城市群县级尺度碳排放近似服从正态分布,可以对其进行空间趋势分析。

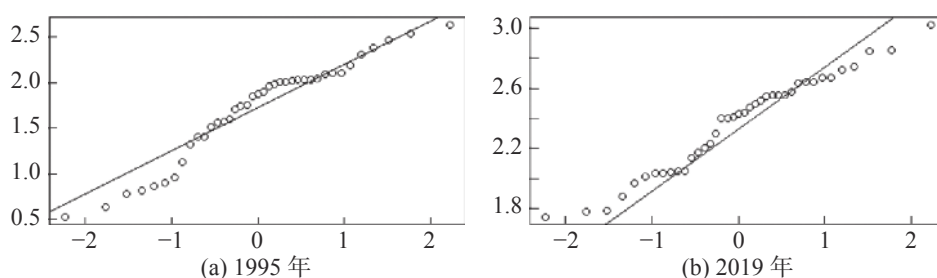


图 8 正态 QQ 图

2. 空间趋势分析

为了进一步探讨兰西城市群县域尺度碳排放空间分布特征,本文选取 1995 年和 2019 年栅格尺度(图 9)和分区统计(图 10)下的碳排放数据分析空间变化趋势。图中,X 轴正方向为东,Y 轴正方向为北,Z 轴为碳排放量,XY 平面上的杆高代表栅格(县区)单元上碳排放值的大小,将高点分别投影到 XZ 平面和 YZ 平面上。在图 9 中,XY 平面上的 39 个样本点分别代表兰西城市群 39 个县区,利用二次函数分别对 XZ 平面和 YZ 平面上的投影点进行拟合,XZ 平面上的拟合曲线代表东西方向上碳排放的分布特征,YZ 平面上的拟合曲线代表南北方向上碳排放的分布特征^[8]。

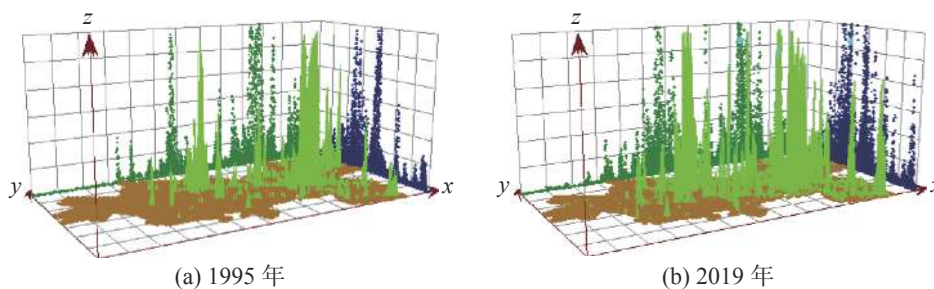


图 9 1995 年和 2019 年兰西城市群栅格尺度碳排放空间分布趋势

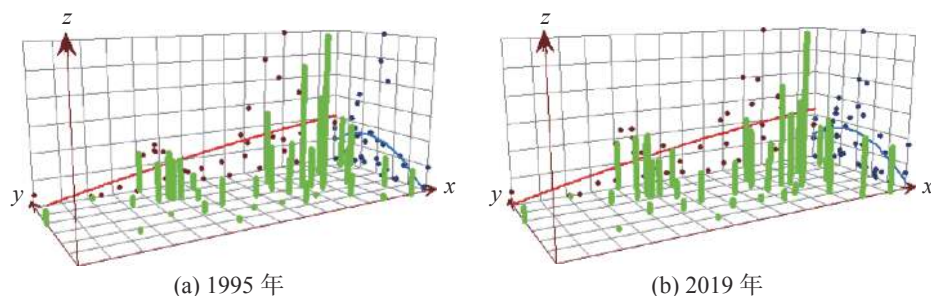


图 10 1995 年和 2019 年兰西城市群县域碳排放空间趋势

从1995年和2019年的空间趋势来看,1995年兰西城市群县域碳排放由南向北呈“倒U形”曲线,东西方向呈现“东高西低”的态势;1995年与2019年的分布趋势相同,即兰西城市群碳排放一直表现出东高西低,中部高、南北低的空间分布态势,兰西城市群高碳县域多集中在兰州市和西市周围人口密集、经济较发达区域,且甘肃省所属县域碳排放要高于青海省所属县域的碳排放,表明研究区的差异并没有显著改变,这与兰西城市群县域碳排放的总体分布特征相符。

(三) 碳排放空间关联特征

由图11可知,1995—2019年,兰西城市群县域碳排放差异演变趋势虽然在2001—2004、2010—2011和2016—2017年三个时间段经历了短暂增长过程,但总体表现出缩小的趋势。变异系数从1995年的1.015缩小至2019年的0.700,表明在此期间,兰西城市群县域碳排放的差异在不断缩小。从全局空间自相关分析来看,1995—2019年,兰西城市群县域碳排放全局Moran's I 指数呈现出波浪增长的态势,总体增长趋势明显,从1995年的0.225增长至2019年的0.489,说明兰西城市群县域碳排放存在明显的空间正自相关性,且表现出逐步扩大的趋势。在全局Moran's I 统计值中,只有1995年的Z-Score大于1.96且p-value小于0.05,其他年份的Z-Score均大于2.58,且p-value都小于0.01,表明兰西城市群县域碳排放存在显著的空间集聚分布模式。随着我国“西部大开发战略”的实施、“兰白都市经济圈”与“西宁都市经济圈”发展格局的形成以及“兰西城市群发展建设”的推进,兰西城市群整体得到了前所未有的发展机遇,能源消费碳排放也显著增长。但是,从空间布局来看,兰州市主城区和西宁市主城区仍然是兰西城市群社会经济发展的中心,同样也是高碳排区,加上兰州市和西宁市对周围县区人口、经济等的“虹吸效应”,这种特征在短期内不会改变,甚至会呈现出增强的趋势。

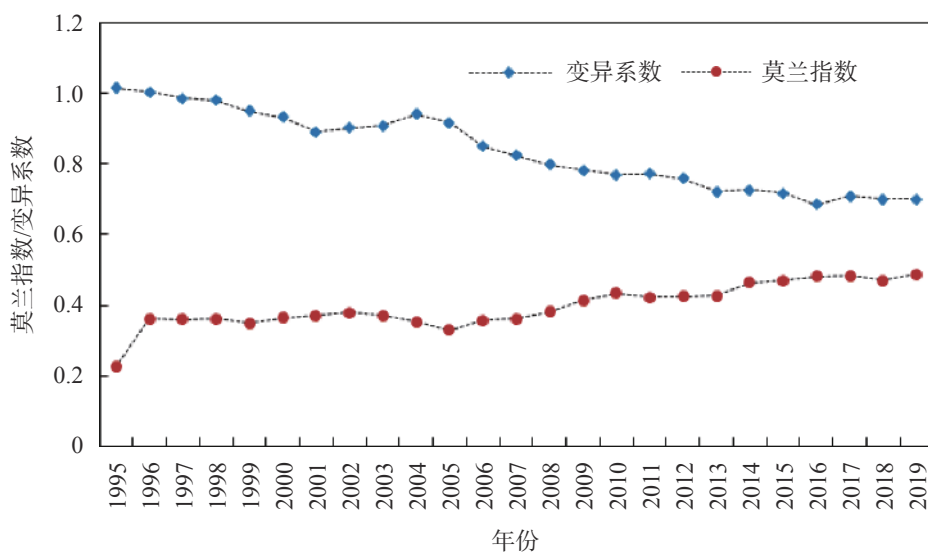


图11 1995—2019年兰西城市群碳排放变异系数和全局Moran's I 指数

从图12可以看出,兰西城市群县域碳排放表现出显著正自相关集聚分布为主的空间关联特征,具体表现为:1995年,碳排放属于高~高聚集县区为4个,低~低聚集的县区有7个,占显著性集聚总数的84.6%,属于低~高聚集的县区为2个,占总数的15.4%;2000年,高~高聚集的县区增加到5个,其他均同1995年一致;2005年,高~高聚集和低~低聚集的县区分别减少到3个和6个,占显著性集聚总数的90%,低~高聚集的县区减少到1个,占显著性集聚总数的10%;2010年,高~高聚集的县区又增加到5个,其他均同2005年一致;2015年,高~高聚集和低~低聚集的县区均为6个,占显著性集聚总数的100%,低~高聚集的县区减少到0个;2019年,低~低聚集的县区减少到5个,其他均同2015年一致;1995—2019年,没有出现高~低聚集的县区。

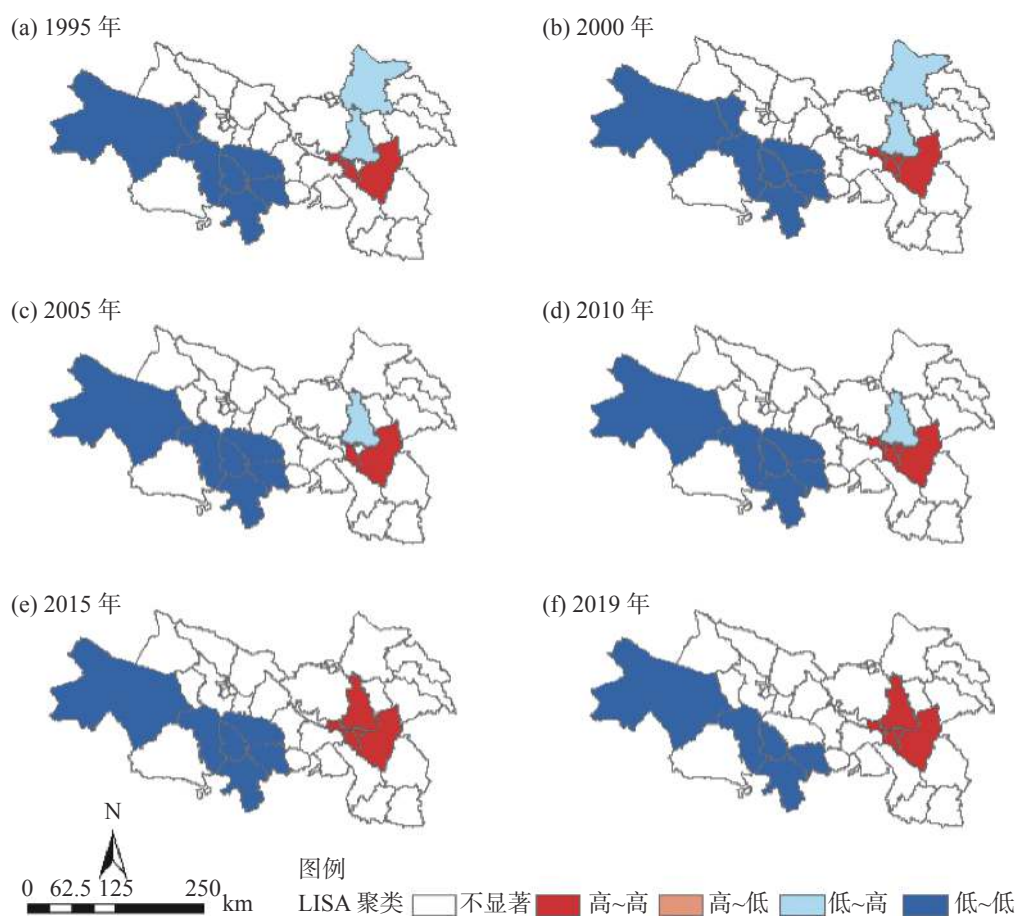


图 12 1995—2019 年兰西城市群县域碳排放 LISA 聚类

从具体的空间位置可以看出,1995 年,高~高聚集县区主要集中在兰州市七里河区、西固区、安宁区和榆中县,这些县区人口较多、经济发展水平较其他县区要高,因此碳排放量偏高;自身碳排放最高的兰州市城关区没有表现出高~高聚集,是由于邻接的兰州市皋兰县碳排放较低造成的;低~低聚集的县区主要分布在青海省的共和县、湟源县、贵德县、尖扎县、同仁县、循化县和化隆县,这些县区主要以第一产业为主、地广人稀且经济发展水平相对落后,碳排放量低;低~高聚集的县区为兰州市皋兰县和白银市景泰县,主要是由于皋兰县毗邻兰州市城关区、西固区、安宁区和榆中县等高碳排放区,景泰县毗邻白银市白银区和平川区等高碳排放区,但其自身的碳排放量较低,因此出现了低~高聚集。

2000 年,兰州市城关区的碳排放增长较快,使得城关区由不显著转变为高~高聚集;其他碳排放集聚特征和 1995 年相同,没有发生显著变化。2005 年,兰州市西固区和城关区由高~高聚集转变为不显著,这是由于毗邻西固区的兰州市红古区、永登县和临夏州永靖县的碳排放增长明显,西固区转变为不显著,而城关区是由于毗邻的兰州市七里河区、西固区属高碳排放区,而邻接的皋兰县碳排放相对较低造成的;白银市景泰县由低~高聚集转变为不显著,西宁市湟源县由低~低聚集转变为不显著,这是由于景泰县和湟源县自身碳排放的增加导致的。2010 年,兰州市城关区和西固区由不显著再次转变为高~高聚集型。2015 年碳排放集聚类型主要表现在兰州市皋兰县由低~高聚集转变为不显著,可能的原因是皋兰县自身碳排放的增长所致;其他碳排放集聚特征和 2010 年相同,没有发生显著变化。2019 年,由于海东市化隆县碳排放增长相对较快,使得其由低~低聚集转变为不显著,其他碳排放集聚特征和 2015 年相同,没有发生显著变化。

总体而言,1995—2019 年,兰西城市群县域碳排放的局部自相关较为稳定,聚集类型主要以高~高型和低~低型为主,且高~高型主要集中在兰州市主城区,低~低型分布在青海省黄南州和海南州。究其原

因, 区域内甘肃省会兰州市作为西北工业重镇, 其碳排放远高于其他地市, 且经济发展水平相对较高, 人口集聚分布, 产业发展水平较高, 形成较高的碳排放, 由此形成地理空间位置碳排放高~高型模式; 青海省海南州和海南州人口稀少, 经济总量偏低, 各县区的碳排放均较低, 碳排放在地域空间上表现为低~低型模式。

(四) 碳排放影响因素研究

本文的结果分析前三部分详细地描述了兰西城市群碳排放时空分布特征, 但是仍未分析究竟是哪些因素导致了兰西城市群县域碳排放量在时空上的变化, 因此本部分进一步利用地理探测器模型研究其影响因素, 探究各因素作用的强弱以及各因素之间的交互作用。

1. 指标选取

依据指标选取的科学性, 并考虑兰西城市群县域尺度数据的可获得性, 本文选择 2005 年、2010 年、2015 年和 2019 年 4 个年份作为样本年, 着重探讨并深入分析以下 7 个影响因子对碳排放的影响, 对影响因子的具体含义进行如下界定: 包括经济发展水平(GDP), 指标选取 GDP; 人口密度(PD), 指标选取单位平方公里上的人口数(年末常住总人口数/行政区面积); 产业结构(IS), 指标选取第二、三产业占 GDP 的比重; 能源强度(EI), 指标选取单位 GDP 能源消费量; 城镇化水平(UR), 指标选取非农业人口占总人口的比重; 财政支出(FE), 指标选取地方财政一般预算支出占 GDP 的比重; 企业个数(IL), 指标选取规模以上工业企业个数。分别选取 2019 年份兰西城市群 39 个县区截面数据, 如图 13 所示。

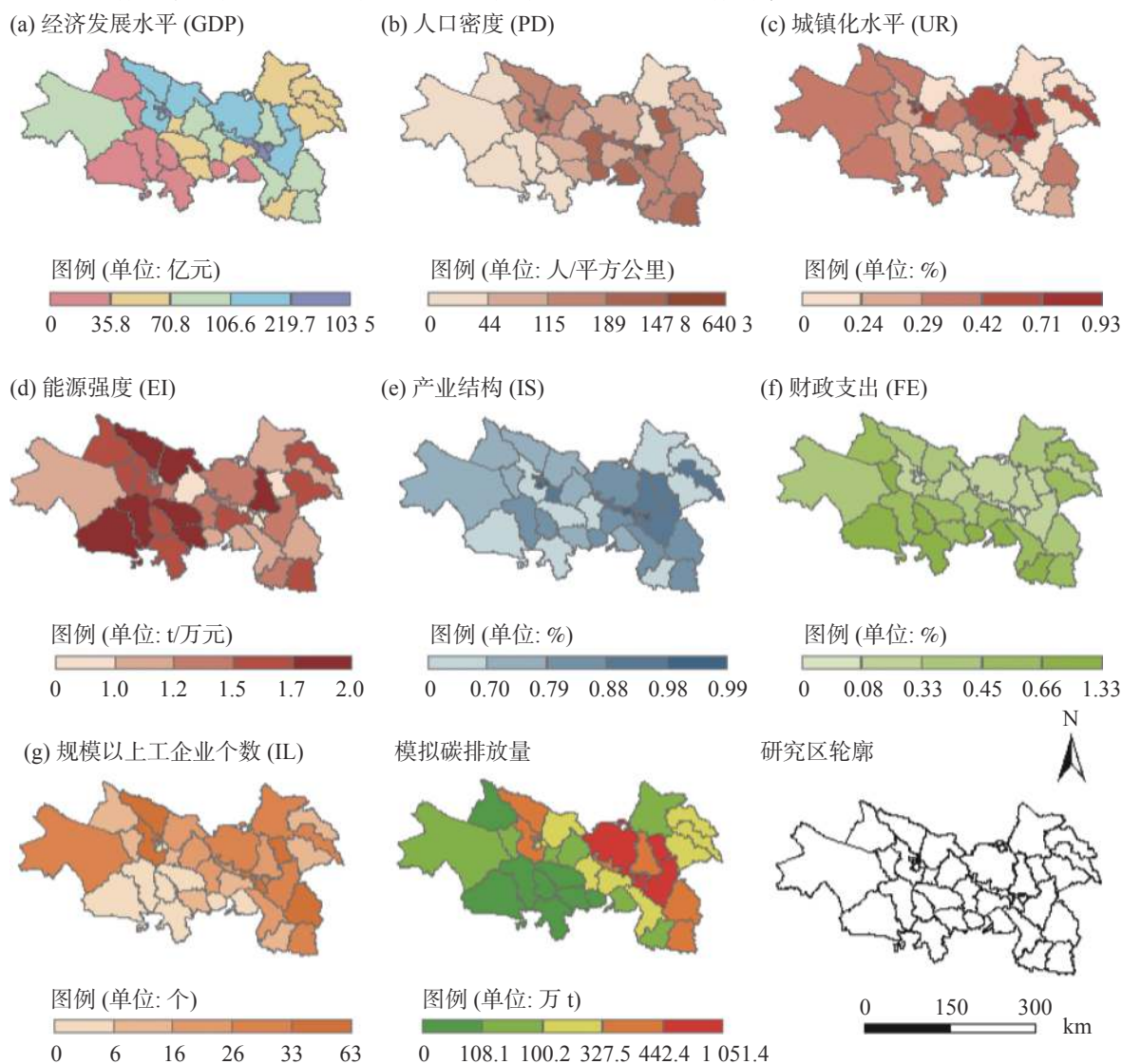


图 13 2019 年兰西城市群县域尺度碳排放影响因素空间分布

由于地理探测器擅长自变量为类型变量、因变量为数值型变量的分析^[23],因此,借助 Arcgis10.8,利用分位数法对各样本年的碳排放影响因子进行类别化处理为 5 类(图 13),并将其赋值为数字 1、2、3、4、5 作为类别层次标识,然后将影响兰西城市群碳排放空间分异的影响因子引入地理探测器,得到各探测模块的结果,提取单因子探测和交互作用探测模块的结果,对碳排放影响因素的单独解释力和交互作用驱动力进行分析。

2. 单因子探测结果

如表 5 所示,在样本年份期,对兰西城市群碳排放起主导作用的因子大致相同,经济发展水平对兰西城市群碳排放空间分异的影响力始终最强;地方财政支出、企业个数和产业结构对碳排放也具有显著的影响力;城镇化水平、人口密度和能源强度对碳排放空间分异的影响相对较弱。

表 5 单因子探测结果

单因子探测结果				
影响因子	q statistic			
	2005年	2010年	2015年	2019年
经济发展水平(GDP)	0.710***	0.670***	0.663***	0.649***
城镇化水平(UR)	0.208*	0.263*	0.267*	0.336**
地方财政支出(FE)	0.555***	0.493***	0.619***	0.560***
人口密度(PD)	0.266*	0.262*	0.267*	0.267*
企业个数(IL)	0.572***	0.621***	0.587***	0.435***
产业结构(IS)	0.512***	0.263*	0.475***	0.372**
能源强度(EI)	0.365**	0.352**	0.260*	0.282*

注: *p<0.10; **p<0.05; ***p<0.01。

经济发展水平对兰西城市群碳排放空间分异的解释力一直处于主导地位,但长期来看,其解释力在缓慢减弱,2005 年的 q 值最高为 0.710,2019 年下降至 0.649。近年来,技术的变革使得能源使用效率大幅提升(能源强度对碳排放的解释力也在减弱),加之碳减排政策的推动,碳排放增速放缓,经济增长对碳排放的解释力也在相对减弱,但经济增长带动的能源消耗仍旧是兰西城市群碳排放的主要来源。而人口密度对碳排放空间分异的驱动力比较稳定,q 值一直徘徊在 0.266 左右,这与兰西城市群大部分县区人口密度较小密切相关,兰西城市群高人口密度的地区主要聚集在兰州市主城区和西宁市主城区,主城区不仅人口众多、面积狭小,而且对周围城市具有很强的人口“虹吸效应”。

地方财政支出和产业结构的 q 值分别介于 0.493~0.619 与 0.263~0.512 之间,从这两个指标的数据结构来看,地方财政支出和产业结构具有较强的阶段性,从而对碳排放空间分异的影响也呈现出阶段特征。第二产业比重的下降势必会影响到第三产业的比重,而地方财政支出也具有很强的政策导向。企业个数的解释力呈先增长后下降的态势,q 值在 2010 年达到最大为 0.621,到 2019 年下降为 0.435,这可能与兰西城市群企业转型发展相关,规模以上工业企业个数减少,从而对碳排放的解释力度也在减弱。

城镇化水平的解释力趋于增强,q 值从 2005 年的 0.208 上升至 2019 年的 0.336,2005—2015 年处于缓慢增长,2015—2019 年增长较快。兰西城市群处于西部内陆,大部分县区域镇化进程缓慢,随着“西部大开发”“促进中西部地区崛起”等战略的实施以及“兰州—白银都市经济圈”和“西宁都市经济圈”的形成,加速了兰西城市群城市化进程,从而带来大量能源消耗拉动了碳排放增长。

3. 交互作用探测结果

在厘清了各影响因子对兰西城市群碳排放空间分异单独的解释力之后,接下来分析以上 7 个影响因

子之间的交互作用对碳排放空间分异的影响力。本文分别对4期影响因子交互作用结果进行排序,将交互作用影响力位于前十的因子组合整理到表6。

表6 2005—2019年影响因子交互作用探测结果

交互因子	2005年		2010年		2015年		2019年	
	q	排名	q	排名	q	排名	q	排名
GDP $\cap$ EI	0.912	1	0.821	2	0.820	5	0.764	8
EI $\cap$ IL	0.829	2	0.837	1	0.812	6	0.916	3
GDP $\cap$ IS	0.821	3			0.902	1		
FE $\cap$ IL	0.816	4	0.769	7	0.788	9	0.883	4
FE $\cap$ EI	0.815	5	0.797	3	0.835	4		
GDP $\cap$ PD	0.809	6	0.744	10			0.728	10
GDP $\cap$ UR	0.801	7					0.839	6
GDP $\cap$ FE	0.795	8	0.747	9				
GDP $\cap$ IL	0.785	9	0.783	5	0.804	8	0.886	5
UR $\cap$ IL	0.777	10	0.774	6	0.806	7	0.736	9
PD $\cap$ IL			0.791	4			0.937	1
IS $\cap$ IL			0.773	8	0.873	2	0.924	2
FE $\cap$ IS					0.848	3		
UR $\cap$ IS					0.773	10		
FE $\cap$ UR							0.803	7

结果显示,影响因子经过两两交互以后,对兰西城市群碳排放空间分异的解释力较任何单一影响因子的解释力,均得到了显著的增强。特别地,城镇化水平、人口密度和能源强度的单因子解释力相对较弱,但通过交互作用以后,q值得到明显提升。具体来看,2005年城镇化水平与人口密度的单因子探测q值相对较低,分别为0.208和0.266,但GDP $\cap$ UR、GDP $\cap$ PD对碳排放的影响力达到0.801和0.809;2019年人口密度和能源强度的单因子探测q值为0.267和0.282,但PD $\cap$ IL、IL $\cap$ EI的解释力达到0.937和0.916,各因子在交互作用下均比单因子的解释力更强。影响因子在两两交互作用以后,q值大于0.9的有5对,分别为2005年的GDP $\cap$ EI(0.912),2015年的GDP $\cap$ IS(0.902),2019年的PD $\cap$ IL(0.937)、IL $\cap$ IS(0.924)和IL $\cap$ EI(0.916)。可以发现,能源强度、产业结构和人口密度等单独发挥解释力的作用有限,但与经济发展水平等主导因子交互以后,对碳排放的解释力得到了飞跃性的提升,这说明含有能源强度、产业结构和人口密度的交互因子,对兰西城市群碳排放空间分异格局具有重要的多重空间叠加效应。

为了更直观地看出主导交互因子在时间序列中的变化趋势,本文绘制了主导交互因子雷达图(图14),可以发现,不同时间段,q值最大的交互因子不同,2005、2010、2015和2019年,q值最大的交互因子分别为GDP $\cap$ EI(0.912)、EI $\cap$ IL(0.837)、GDP $\cap$ IS(0.902)和PD $\cap$ IL(0.937)。GDP $\cap$ EI、FE $\cap$ EI和GDP $\cap$ PD的解释力逐渐减弱,q值分别从2005年的0.912、0.815和0.809下降至2019年的0.764、0.706和0.728。PD $\cap$ IL、IL $\cap$ IS和GDP $\cap$ IL的解释力逐渐增强,q值分别从2005年的0.662、0.734、0.785上升至2019年的0.937、0.924和0.886,且PD $\cap$ IL的变化幅度最大。EI $\cap$ IL和FE $\cap$ IL的解释力先减弱后增强,且在2019年解释力明显增强,q值也最高,分别达到0.916和0.883。GDP $\cap$ IS和UR $\cap$ IL的解释力在2015年最强,q值分别为0.902和0.806。因此,GDP与能源强度、企业个数、产业结构、城镇化水平所主导的交互作用是碳排放持续增长的主要推动力。

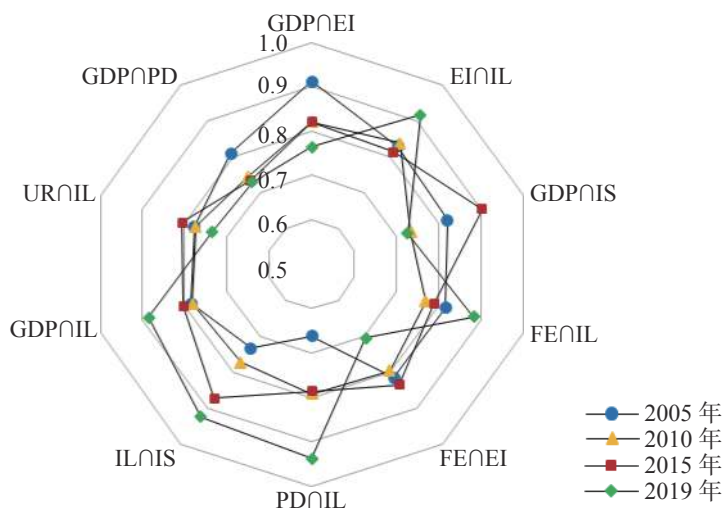


图 14 2005—2019 年主导交互因子影响力

四、结论与政策建议

更小尺度的碳排放核算为实现碳减排目标提供了数据基础,本文模拟的碳排放具有较高的精度,可以为兰西城市群政府部门制定系统化、差异化、精细化的减排措施以及将减排任务具体到县级行政单元提供较为科学的参考依据,也能为我国西部城市群碳排放研究提供示范参考。

(一) 主要结论

本文通过校正融合中国区域长时间序列 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 夜间灯光影像,空间化模拟了 1995—2019 年兰西城市群的能源消费碳排放量。从县级尺度视角出发,利用空间趋势分析、变异系数分析、探索性空间数据分析以及地理探测器等,对兰西城市群碳排放的时空分布特征、空间关联特征以及影响因素等进行研究,得出以下结论。

第一,从总量看,1995—2019 年兰西城市群碳排放总量呈增长趋势,增长速度整体呈先上升后下降的趋势,表现出明显的阶段特征。碳排放量从 1995 年的 36.23×10^6 t 上升到 2019 年的 116.61×10^6 t, 24 年增长了 80.38×10^6 t, 增长了 3.22 倍;碳排放年平均增长速度为 4.79%。

第二,从县域看,1995—2019 年间,兰西城市群县域碳排放增长明显,碳排放(10^4 t)区间由 1995 年的 [13.4, 425.4] 增长为 2019 年的 [103.2, 1051.4], 最低县域(海南州贵南县)和最高县域(兰州市城关区)分别增长 8.46 倍和 2.47 倍,碳排放量分别增长 48.92×10^4 t 和 625.95×10^4 t。从碳排放强度看,2005—2019 年,兰西城市群绝大多数县区的单位 GDP 碳排放强度呈持续下降的态势,碳排放强度(t/万元)区间由 2005 年的 [4.2, 9.7] 下降为 2019 年的 [1.6, 5.0]。

第三,从时空分布看,1995—2019 年,兰西城市群碳排放一直表现出东高西低,中部高、南北低的空间分布态势,高碳县域多集中在兰州市和西宁市周围人口密集、经济较发达的区域;兰西城市群县域碳排放存在显著的空间差异性和空间正自相关性,但差异在不断缩小,空间正自相关性呈现出逐步扩大的趋势;碳排放的局部自相关比较稳定,以高一高聚集和低一低聚集为主导,且高一高聚集主要集中在兰州市主城区,低一低聚集集中在青海省黄南州和海南州。

第四,兰西城市群碳排放空间分异受到多种因素的综合影响。经济发展水平对兰西城市群碳排放空间分异的影响力始终最强,地方财政支出、企业个数和产业结构对碳排放也具有显著的影响力,城镇化水平、人口密度和能源强度对碳排放的影响相对较弱;2019 年各影响因子对碳排放空间分异的解释力从大到小依次为:经济发展水平(0.649)>地方财政支出(0.560)>企业个数(0.435)>产业结构(0.372)>城镇化水平(0.336)>能源强度(0.282)>人口密度(0.267)。影响因子经过两两交互以后,影响力较任何单一影响

因子的解释力,均得到了显著的增强,2005年、2010年、2015年和2019年 q 值最大的交互因子分别为 $GDP \cap EI(0.912)$ 、 $EI \cap IL(0.837)$ 、 $GDP \cap IS(0.902)$ 和 $PD \cap IL(0.937)$;经济发展水平与能源强度、企业个数、产业结构、城镇化水平所主导的交互作用是碳排放持续增长的主要推动力。

(二) 政策建议

伴随着“西部大开发”“促进中西部地区崛起”战略的实施,“丝绸之路经济带”的建设以及“兰西城市群建设”的持续推进,兰西城市群的经济体量势必会持续扩大,在保持GDP持续增长的前提下,有必要对产业结构、能源强度、城镇化水平和财政支出等影响因子进行宏观调控,使其与主导因子之间的交互作用力得到削弱,从而使得碳排放增速持续放缓,碳排放总量早日达峰。基于结论,提出以下政策建议。

1. 立足资源禀赋和区位优势,优化能源结构

对于兰西城市群来说,以煤炭为主的能源消费结构难以在短期内转变,在提升能源利用效率的同时,应大力发展新能源,充分发挥区域内太阳能、风能等得天独厚的资源优势,着力增加光伏发电、太阳能热发电、风电、抽水蓄能发电等非化石能源供给,持续提升非化石能源及清洁能源的使用比重。从碳排放空间分布和集聚特征来看,碳减排重点既要落在以“兰白都市经济圈”为主的高碳排放区,也要落在碳排放强度较高的湟源县、榆中县和永靖县等县区,加快调整产业结构、优化能源结构,大力淘汰落后产能、优化存量产能。

2. 创新绿色供暖技术,推广低碳生活方式

冬季集中供暖是兰西城市群碳排放调控的重点,提高集中供热能源使用效率,减少供热过程中的热量损失,创新绿色供暖技术,减少煤炭使用量,从供给侧降低碳排放量。同时,兰西城市群需协同发展、统筹规划,根据各县区资源环境承载力与国土空间规划,合理控制人口密度与城镇开发力度,加快低碳县城创建,对县城建筑、基础设施进行低碳化改造,完善县城低碳管理和运营模式,推广低碳生活方式。

3. 完善低碳经济政策,提高能源利用效率

经济增长是兰西城市群碳排放增长的主要驱动力,而甘、青两省作为全国经济发展水平相对落后的地区,碳减排政策的实施需从低碳经济的视角出发,在保持经济增长的前提下,提升能源使用效率,优化产业结构,鼓励技术变革,实现城市群低碳、绿色发展。政府部门建立符合市场经济要求的节能金融机制和绿色金融改革政策,引导行业和企业低碳转型和实际运作。同时,要立足区域(兰州、西宁)科学城,积极引进国际低碳技术与专家人才,加大能源领域技术创新,提高能源利用效率。

参考文献:

- [1] SETO K C, GUNERALP B, HUTYRA L. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools[J]. AGUFM, 2012, 109(10): 16083 – 16088.
- [2] 潘家华, 廖茂林, 陈素梅. 碳中和: 中国能走多快?[J]. 改革, 2021(7): 1 – 13.
- [3] 苏健, 梁英波, 丁麟, 等. 碳中和目标下我国能源发展战略探讨[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(9): 1001 – 1009.
- [4] 方创琳, 王振波, 马海涛. 中国城市群形成发育规律的理论认知与地理学贡献[J]. 地理学报, 2018, 73(4): 651 – 665.
- [5] 李建豹, 黄贤金, 孙树臣, 等. 长三角地区城市土地与能源消费 CO_2 排放的时空耦合分析[J]. 地理研究, 2019, 38(9): 2188 – 2201.
- [6] 洪凯, 朱子玉. 珠三角农地利用中的碳排放时空特征及影响因素——基于1996—2014年数据[J]. 湖南农业大学学报(社会科学版), 2017, 18(1): 70 – 76.
- [7] 苏旭冉, 蔺雪芹. 基于夜间灯光数据的京津冀地区碳排放的时空演化特征及影响因素[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2019, 40(4): 48 – 57.
- [8] 吕倩, 刘海滨. 京津冀县域尺度碳排放时空演变特征——基于DMSP/OLS夜间灯光数据[J]. 北京理工大学学报, 2019, 21(6): 41 – 50.
- [9] 贾卓, 杨永春, 赵锦瑶, 等. 黄河流域兰西城市群工业集聚与污染集聚的空间交互影响[J]. 地理研究, 2021, 40(10): 2897 – 2913.
- [10] ELVIDGE C D, BAUGH K E, KIHN E A, et al. Mapping city lights with nighttime data from the DMSP Operational Linescan System[J]. Eng & remote sens, 1997, 63(6): 727 – 734.
- [11] DOLLCHRISTOPHER N H, MULLER JAN-PETERR, ELVIDGE CHRISTOPHER D. Night-time imagery as a tool for global mapping of so-

- cioeconomic parameters and greenhouse gas emissions[J]. *AMBIO - A Journal of the human environment*, 2000, 29(3): 157 - 162.
- [12] ZHAO N, SAMSON E L, CURRIT N A. Nighttime-lights-derived fossil fuel carbon dioxide emission maps and their limitations[J]. *Photogrammetric engineering & remote sensing*, 2015, 81(12): 935 - 943.
- [13] 苏泳娴. 基于DMSP/OLS夜间灯光数据的中国能源消费碳排放研究[D]. 广东: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2015.
- [14] 马忠玉, 肖宏伟. 基于卫星夜间灯光数据的中国分省碳排放时空模拟[J]. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(9): 143 - 150.
- [15] CUI X, LEI Y, ZHANG F, et al. Mapping spatiotemporal variations of CO₂ (carbon dioxide) emissions using nighttime light data in Guangdong Province[J]. *Physics and chemistry of the earth*, 2019, 110(4): 89 - 98.
- [16] 于博, 杨旭, 吴相利. 哈长城市群县域碳排放空间溢出效应及影响因素研究——基于NPP-VIIRS夜间灯光数据的实证[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(2): 697 - 706.
- [17] 吕倩, 刘海滨. 基于夜间灯光数据的黄河流域能源消费碳排放时空演变多尺度分析[J]. *经济地理*, 2020, 40(12): 12 - 21.
- [18] 杜海波, 魏伟, 张学渊, 等. 黄河流域能源消费碳排放时空格局演变及影响因素——基于DMSP/OLS与NPP-VIIRS夜间灯光数据[J]. *地理研究*, 2021, 40(7): 2051 - 2065.
- [19] 苏泳娴, 陈修治, 叶玉瑶, 等. 基于夜间灯光数据的中国能源消费碳排放特征及机理[J]. *地理学报*, 2013, 68(11): 1513 - 1526.
- [20] WANG Z. Analysis of CO₂ emissions and the mechanism of the industrial enterprises above designated size (ieds) in resource-based cities by application of geographical detector technology[J]. *Journal of resources and ecology*, 2019, 10(5): 537 - 545.
- [21] 孙贵艳, 王胜, 肖磊. 基于夜间灯光数据的长江上游地区能源消费碳排放及影响因素研究[J]. *地域研究与开发*, 2020, 39(4): 159 - 162+174.
- [22] 赵领娣, 吴栋. 中国能源供给侧碳排放核算与空间分异格局[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(2): 48 - 58.
- [23] 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.
- [24] 张文斌, 张志斌, 周翼, 等. 基于夜间灯光数据的兰西城市群时空演变特征[J]. *遥感信息*, 2020, 35(6): 38 - 43.
- [25] 杨永春, 张旭东, 穆焱杰, 等. 黄河上游生态保护与高质量发展的基本逻辑及关键对策[J]. *经济地理*, 2020, 40(6): 9 - 20.
- [26] 曹子阳, 吴志峰, 匡耀求, 等. DMSP/OLS夜间灯光影像中国区域的校正及应用[J]. *地球信息科学学报*, 2015, 17(9): 1092 - 1102.
- [27] 周翼, 陈英, 刘洋, 等. NPP-VIIRS年度夜间灯光数据的合成方法与验证[J]. *遥感信息*, 2019, 34(2): 62 - 68.
- [28] LIU Z, HE C, ZHANG Q, et al. Extracting the dynamics of urban expansion in China using DMSP-OLS nighttime light data from 1992 to 2008[J]. *Landscape and urban planning*, 2012, 106(1): 62 - 72.
- [29] 顾羊羊. 夜间灯光数据的区域能源消费碳排放空间化[J]. *测绘科学*, 2017, 42(2): 140 - 146.
- [30] 陈强. 计量经济学及Stata应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [31] WANG J F, HU Y. Environmental health risk detection with GeogDetector[J]. *Environmental modelling & software*, 2005, 20(1): 114 - 115.

[责任编辑 李秀燕]