引文格式：邢笑天,王琪,刘雨敏,等. 基于多源数据的安徽省碳排放及影响因素研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(4):42-47. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.04.009

基于多源数据的安徽省碳排放及影响因素研究

邢笑天[1]，王　琪[1]，刘雨敏[1]，刘浦东[1*]，刘建涛[1]，张靖苑[2]，卓　伟[3]
（1. 山东建筑大学 测绘地理信息学院，山东 济南 250101；2. 山东建筑大学 艺术学院，山东 济南 250101；
3. 安徽师范大学 地理与旅游学院，安徽 芜湖 241002）

摘　要：在“双碳”目标的国家战略背景下，安徽省作为长三角地区的重要组成部分，能源消费碳排放量近年来持续升高，对其碳排放及影响因素进行研究是助力安徽省绿色低碳发展的重要科学依据。基于“类NPP-VIIRS”夜间灯光数据、POI数据及统计年鉴等多源数据，构建碳排放拟合模型，估算安徽省历年各市碳排放。通过探索性数据分析方法，开展2005-2020年安徽省碳排放时空演变特征分析，探讨碳排放空间自相关特征，通过POI核密度分析法与地理探测器对碳排放进行驱动因子分析。结果表明：①安徽省碳排放量总体呈上升趋势，在空间分布上呈现“北部＞南部”的情况，其中省会合肥始终处于高度碳排放状态。②安徽省碳排放在空间上呈正相关，但显著性不强，主要以低-高（L-H）、低-低（L-L）聚类为主。③POI所代表的人类活动强度分布与碳排放强度空间分布具有较高的一致性。④碳排放空间分异受多种因素综合作用，经济发展水平单因子对碳排放空间分异的影响力始终最强，多因子交互作用的解释力均优于单独作用时的表现。

关键词：碳排放；夜间灯光；空间自相关；POI；地理探测器；安徽省
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）04-0042-06

Research on Carbon Emission and Influence Factors in Anhui Province Based on Multi-source Data

XING Xiaotian[1], WANG Qi[1], LIU Yumin[1], LIU Pudong[1], LIU Jiantao[1], ZHANG Jingyuan[2], ZHUO Wei[3]
(1. School of Surveying and Mapping and Geo-informatics, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;
2. School of Art, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;
3. School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China)

Abstract: In the context of the national strategy of “dual carbon” goal, Anhui Province, as an important component of the Yangtze River Delta region, has been experiencing the carbon emissions from energy consumption have continued to rise in recent years. The study of its carbon emissions and their influence factors is an important scientific basis for assisting the green and low-carbon development of Anhui Province. We built a carbon emission fitting model based on multi-source data such as “similar NPP-VIIRS” nighttime lighting data, POI data and statistical yearbooks, to estimate the carbon emission of each city in Anhui Province in the past years. By using exploratory data analysis methods, we analyzed the spatio-temporal evolution characteristics of carbon emissions in Anhui Province from 2005 to 2020, explored the spatial auto-correlation characteristics of carbon emissions, and analyzed the driving factors of carbon emissions using POI kernel density analysis and GeoDetector. The results show that ①the overall carbon emissions in Anhui Province are showing an upward trend, with a spatial distribution of “northern>southern”. Among them, the provincial capital Hefei City has always been in a high carbon emission state. ②Carbon emissions in Anhui Province are positively correlated in space, but the significance is not strong, mainly in low-high and low-low clusters. ③The distribution of human activity intensity represented by POI has a high consistency with the spatial distribution of carbon emission intensity. ④Spatial differentiation of carbon emission is affected by the comprehensive effect of various factors. The single factor of economic development level always has the strongest influence on the spatial differentiation of carbon emissions. The explanatory power of each factor to carbon emissions is significantly improved under the interaction.

Key words: carbon emission, nighttime lighting, spatial auto-correlation, POI, GeoDetector, Anhui Province

随着工业生产的快速发展，能源消费等人类社会经济活动产生的碳排放已成为全球气候变化的重要影响因素，减少碳排放已成为全球关注的重点和共识[1]。在联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第 4 次报告中指出，大规模能源消耗所排放的CO_2，被认为是影响气候变化的最大原因之一。中国提出2030年前实现碳达峰和2060年前实现碳中和[2]，以期实现助力全球碳减排的目标。

项目来源：国家自然科学基金资助项目（42171113）；山东省自然科学基金资助项目（ZR2020QD017）；山东建筑大学博士基金资助项目（XNBS19010）。
第一作者简介：邢笑天（2003—），本科，主要研究方向为城市遥感与生态环境监测，E-mail: xingxiaotian0607@qq.com。
通信作者：刘浦东（1989—），博士，讲师，主要研究方向为生态遥感、城市环境与区域规划、遥感大数据分析，E-mail：liupudong@163.com。

NPP-VIIRS夜间灯光数据，具有更高的空间和时间分辨率，结合高分辨率卫星，估算能源消费碳排放，可以实现更精细的碳排放时空变化[3]。Ghosh等[4-9]国内外众多学者通过相关计算证明了夜间灯光数据估算能源消费碳排放的可行性，并研究其时空变化特征现象。王莉雯等[10]基于相关遥感技术进行了碳排放空间分布模拟，李小军等[11]与徐彭辉等[12]均基于STIRPAT模型进行碳排放的相关因素探究，郑秋红等[13]基于夜间灯光数据对全国栅格尺度碳排放进行模拟，张乐勤等[14]运用IPCC碳排放测度模型进行安徽省农业生产碳排放测算及典型相关分析法考察其驱动因子。

本研究利用安徽省2005—2020年间“类NPP-VIIRS”500 m夜间灯光数据和能源消费碳排放估算数据，建立碳排放拟合模型，通过探索性数据分析方法，探讨碳排放空间自相关特征，结合POI（point of interest）数据和地理探测器对安徽省碳排放的时空特征与驱动因子进行分析，为安徽省经济社会绿色低碳发展的同时，更好融入区域间合作与协调，优化资源配置，推动产业升级提供科学理论参考。

1　研究区域概况与数据来源

1.1　研究区概况

安徽省位于中国的长江三角洲地区，地势以平原为主，丘陵和山地间接分布，处暖温带与亚热带过渡地区。安徽省下辖16个地级市、10个县级市、52个县和44个市辖区，全省总面积14.01万km^2，截至2022年，全省常住人口为6 127万人。

1.2　数据来源及预处理

1.2.1　夜间灯光数据预处理

本研究采用的夜间灯光数据来源于“类NPP-VIIRS”数据集(https://engine-aiearth.aliyun.com)。该数据集有效剔除了月光、天然气燃烧等偶然光源的干扰，其参数属性与NPP-VIIRS夜间灯光数据保持高度一致，能清晰反映城市内部在时序上的细节变化，需要对其做出以下处理：①对研究区影像进行辐射校正并消除负值带来的不良影响；②对影像中的稳定像元*DN*值进行均值化处理，以增强多源传感器数据的稳定性和时序连续性；③通过投影转换和归一化处理消除奇异值的影响，最终获得标准化处理的“类NPP-VIIRS”影像数据（图1）。

由于研究区时间跨度较大，市级尺度的能源数据难以获取，因此本研究通过夜间灯光数据估算历年安徽省各市碳排放总量。

1.2.2　相关辅助数据

安徽省2005—2020年能源消费统计数据及影响因子数据来源于《安徽省统计年鉴》《中国能源统计年鉴》和IPCC公布的《2006温室气体排放清单》，研究区矢量数据来源于中国国家基础地理信息中心（http://www.ngcc.cn）；安徽省POI数据通过爬虫工具从高德地图爬取获得。

2　研究方法

2.1　碳排放估算模型构建及校正

2.1.1　基于能源消费数据估算碳排放

本研究基于安徽省各市统计年鉴获得能源数据，估算各地市碳排放总量，采用IPCC公布的《2006温室气体排放清单》碳排放计算方法来计算能源产生的CO_2排放量，根据规模以上工业能源消费数据，选择9种能源（如表1）。公式表示如下：

$$CO_2=\frac{44}{12}\times\sum_{i=1}^{9}K_iE_i \tag{1}$$

式中，i为能源种类；E_i为能源i的消费量，按标准煤计算；K_i为能源i的碳排放系数，原始数据单位为J；统一将计数单位其转化为标准煤，转化关系如下：1×10^4 t标准煤的排放能量为2.93×10^5 GJ。

2.1.2　碳排放模拟模型

本研究通过建立夜间灯光数据总值与能源消费碳排放统计值之间的拟合方程，统计安徽省地区的夜间灯光数据得到*DN*，将*DN*与CO_2进行拟合分析[15]（表2）。对拟合模型系数进行分析，选择拟合效果较好的线性方程进行拟合，基于数据特征，将每相邻2 a

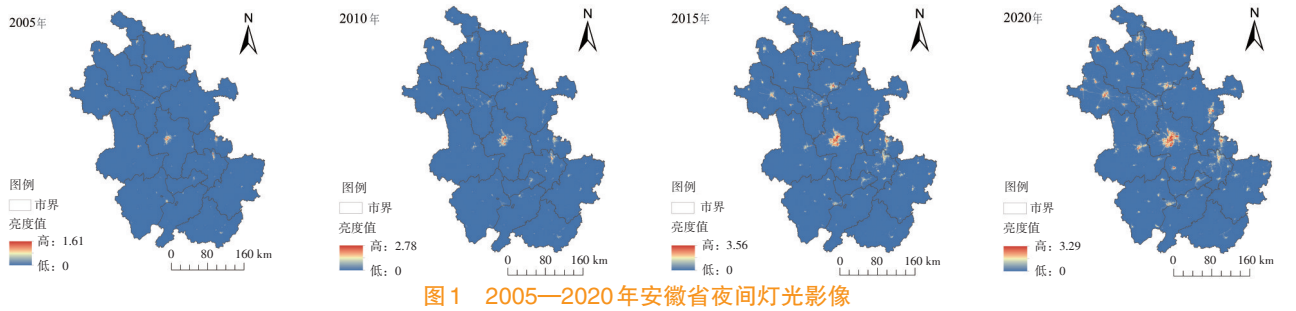


图1　2005—2020年安徽省夜间灯光影像

审图号：GS(2019)1822号

表1 能源消耗碳排放系数

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）	0.714 3	0.971 4	1.428 6	1.471 4	1.471 4	1.457 1	1.428 6	1.33	0.345
CO_2排放系数（10^4t碳/10^4t标准煤）	0.755 9	0.855 0	0.585 7	0.553 8	0.571 4	0.592 1	0.618 5	0.448 3	0.272

数据合并进行拟合分析。

$$y=Ax+B \tag{2}$$

式中，y 为统计省级能源消费碳排放量；x 总亮度值 DN；A、B 为拟合方程系数；R^2 是趋势线拟合程度的指标。

表2 拟合模型

趋势线	拟合方程	拟合指数 R^2
指数	Ae^x	0.671 8
线性	$Ax+B$	0.742 6
对数	$A\ln x+B$	0.915 2
多项式	Ax^2+Bx+C	0.946 3
幂数	Ax^B	0.864 9

2.1.3 碳排放模型精度检验

基于线性拟合方程估算安徽省每相邻2 a碳排放数据，为确保模拟值准确性，进一步计算了模拟结果的精度。

结果表明相对误差最大值为18.24%，最小值为0.32%，除前4 a外其余年份相对误差均小于10%，相对误差均值为6.24%，模拟效果较优。

2.1.4 碳排放模型系数校正

为减少估算市级碳排放数据相对误差，进一步提高拟合精度，本研究采用省级碳排放系数修正对各市碳排放进行准确估算。构建碳排放模拟值和统计值的比例系数，最终得到历年各市碳排放数据。

$$R_n=\frac{DN_{n,k}}{\mathrm{SDN}_n} \tag{3}$$

$$CS_{n,k}=CE_n\times R_n \tag{4}$$

式中，R_n 为第 n 年夜间灯光亮度值比例系数；$DN_{n,k}$ 为第 n 年安徽省第 k 市夜间灯光亮度值；SDN_n 为第 n 年安徽省夜间灯光亮度总值；$CS_{n,k}$ 为第 n 年第 K 市碳排放量模拟值；CE_n 为第 n 年安徽省碳排放统计值。

2.2 探索性数据数据分析方法

2.2.1 空间自相关分析

本研究对安徽省市域尺度城市碳排放空间相关性进行分析，采用莫兰指数（Moran’I）对其全域空间进行自相关性分析。

$$I=\frac{\left[n\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{W}_{ij}(x_j-\bar{x})\right]}{\left[\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{W}_{ij}\right]} \tag{5}$$

局部Moran’s I指数能够衡量相邻像元间的空间关联性和差异性，可用于分析全省范围内碳排放的局部空间聚集特征。

$$I_i=\frac{n(x_i-\bar{x})\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{W}_{ij}(x_i-\bar{x})}{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2/(n-1)} \tag{6}$$

式中，n 为地级行政单元数量；x_i 和 x_j 分别为地级行政单元 i 和 j 的碳排放量；$\bar{x}$ 为各地级单元碳排放量的平均值；$\boldsymbol{W}_{ij}$ 为邻近地级单元 i 和 j 的空间权重矩阵。

2.2.2 核密度分析法

核密度估计法源自概率论中的密度函数估计理论[16]，能够有效揭示研究对象在特定地理区域内的空间聚集程度。

$$F(x)=\frac{1}{nh}\sum_{i=1}^{n}K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \tag{7}$$

式中，$F(x)$ 为核密度估计值；n 为研究要素数量；h 为核密度函数的宽度；k 为空间权重函数；$x-x_i$ 为点 x 到区域 x_i 处的距离；$\sum_{i=1}^{n}K\left(\frac{x-x_i}{h}\right)$ 为核函数。

2.2.3 地理探测器

地理探测器由王劲峰[17]提出，用于探测地理事物空间分异性及因子驱动作用。本研究利用地理探测器中的单因子探测与交互作用探测来揭示不同因子及其交互作用对碳排放的影响。

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2}{N\sigma^2} \tag{8}$$

式中，L 为变量的分层；N 和 N_h 分别为全区与层 h 的单元数；σ^2 和 σ_h^2 分别为全区与层 h 的方差；q 为探测因子对碳排放的解释程度。

3 结果与分析

3.1 碳排放时空演变特征

3.1.1 碳排放时间变化

安徽省在2005—2020年间，碳排放量总体呈上升

趋势。参考现有研究结果[18-19]，得出以下结论：2005—2014年间，碳排放量增速明显，主要原因是安徽省在此期间处于工业高速发展阶段。2014年后，碳排放增速减慢，在2020年甚至出现了负增长率现象，主要得益于安徽省政策导向的改变。

3.1.2　碳排放空间变化

本研究考虑到市域碳排放空间变化，依据安徽省市级行政区数量将安徽省在2005—2020年间的碳排放量分为16个等级进行分析，结果表明合肥市始终处于高度碳排放状态，碳排放总量占比约27%，以合肥市为中心向四周分布的各市区碳排放量相对较少，原因在于合肥市是安徽省工业发展的主要地区以及主要的人口聚集地。其中，铜陵市、池州市、宜城市以及黄山市一直处于低度碳排放状态，碳排放总量占比依次为2.2%、1.5%、3.6%、1.3%，这主要得益于产业结构优化、生态环境保护以及政策引导等多方面的措施。亳州市、蚌埠市以及宿州市碳排放量呈逐步增长趋势，原因在于城市化快速发展加剧了碳排放的增势。

3.2　碳排放空间相关性特征

全局Moran’s I指数可用于评估地理要素在区域尺度上的空间关联特征。本研究基于GeoDa平台计算所有要素全年份的全局莫兰指数（表3），以探索各要素本身是否受空间影响，使用2005—2020年安徽省碳排放数据，分析安徽省碳排放的总体变化、区域差异、时空格局及集聚特征。对于其空间相关性，采用Moran’I值来检验两者之间的相关性。

表3　全局Moran’s I指数

年份	*I*（莫兰指数）	*P*（概率）	*Z*（标准差）
2005	0.016 379	0.314 314	1 .006 212
2006	0.001 682	0.375 070	0.887 016
2007	−0.046 609	0.726 644	0.349 593
2008	−0.014 928	0.494 465	0.683 224
2009	−0.025 369	0.622 355	0.492 516
2010	0.028 556	0.247 181	1.157 225
2011	0.041 040	0.234 787	1.188 118
2012	0.049 673	0.260 407	1.125 429
2013	0.049 203	0.206 736	1.262 591
2014	0.027 527	0.276 202	1.088 892
2015	0.028 492	0.309 253	1.016 791
2016	0.026 730	0.324 360	0.985 537
2017	0.003 256	0.464 510	0.731 441
2018	−0.011 287	0.585 512	0.545 351
2019	0.023 584	0.396 747	0.847 445
2020	0.029 944	0.378 172	0.881 270

由上表可知，Moran’I值普遍大于0，表明碳排放指数在空间上呈正相关，即碳排放高值地区在空间上更为聚集且数据本身的空间相关性极弱，结果不具有显著性。因此，市域尺度上的碳排放几乎不受城市用地自身空间布局的影响，研究碳排放受其他因素的影响作用更为科学。

全局Moran’s I指数仅能反映安徽省域整体的空间自相关特征，而无法揭示市域单元间的局部空间关联模式。基于此，本研究采用局部空间莫兰指数模型深入分析区域内的空间关联特征，并借助Geoda软件平台，以Moran散点图为依据，绘制了LISA空间集聚分布图。

以2005年为例，芜湖市和马鞍山市位于第一象限，表现出高-高（H-H）的正自相关关系集群；铜陵市、滁州市、六安市、安庆市、淮南市等5个市位于第二象限，表现出低-高（L-H）的负自相关关系集群；池州市、蚌埠市、淮北市、苏州市、亳州市、阜阳市和黄山市等7个市位于第三象限，表现出低-低（L-L）的空间自相关关系；合肥市同时横跨第一、四象限，宣城市同时横跨第二、三象限。

本研究针对2005—2020年安徽省碳排放数据计算均值，通过安徽省碳排放均值LISA分析其空间自相关分布特征。由图2可知，从安徽省市级区域上看，安徽省各市中心城区的碳排放具有显著的高-高集聚特征，碳排放低-低聚类区主要分布于各城区周边，其他聚类区不显著，总体上来看，碳排放不显著聚类较多，不显著聚类的存在表明安徽省地区的碳排放分布呈现出一种混合型模式，存在一定的高碳排放地区与低碳排放地区相互交织的情况。碳排放在空间自相关特征上，主要以低-高聚类和低-低聚类为主，其中碳排放高-高聚类区面积为807.8 km^2，占面积比例0.5%，该聚类区域面积相对较小，高碳排放的现象并没有在广泛的范围内分布；碳排放低-低聚类区面积为2 118 km^2，占面积比例1.5%，区域内部的碳排放水平存在较大的差异，与莫兰指数所呈现的空间信息一致。

3.3　碳排放驱动因子分析

3.3.1　POI数据分析

本研究利用POI数据代表人类活动范围，以2020年为例选取交通站点、经营场所、行政区点、运输站点、自然景点5种POI数据探究人类活动对碳排放的影响。基于中国城市领域的有关规范要求及以往学者的研究[20]，较为离散分布的POI数据采用较大的查找半径，集中分布的兴趣点适用较小的查找半径，利用ArcGIS10.8对POI数据进行核密度分析，获得5种类型的POI栅格数据，本文根据POI占地面积及公

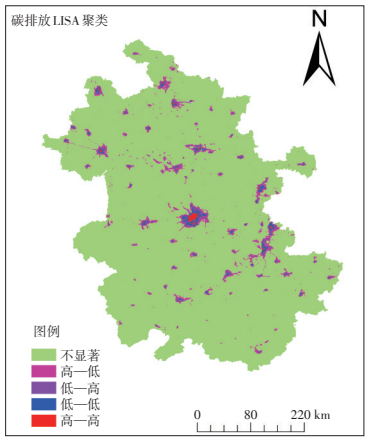


图2 2005—2020年安徽省碳排放的LISA聚类

审图号：GS(2019)1822号

共认知度[21]，对各类POI赋予权重：交通站点20、经营场所30、行政区点30、运输站点10、自然景点10，获得联合影响栅格数据。

结合图1中2020年安徽省夜间灯光影像图可知：POI所代表的人类活动强度分布与碳排放强度空间分布具有较高的一致性。其中交通站点、经营场所、行政区点的人类活动强度较为明显，对碳排放具有较高影响力，通过赋予不同权重后得到的联合分析图与碳排放空间分布在空间分布格局上达到高度一致。人类活动强度主要聚集于安徽省中部，以省会合肥为主；西北部和东南部也具有较高人类活动强度。通过区域分析，按市区分析统计人类活动强度均值，合肥市、芜湖市、阜阳市均处于人类活动强度较高区域，与碳排放强度情况较为一致。由于黄山市为重点旅游景区，POI数据反映的人类活动强度较高，但实际碳排放强度较低，符合常理。

3.3.2 地理探测器

本研究参考现有研究成果[22-24]，并考虑地级尺度数据的可获取性，选择2005—2020年以5 a为间隔的4个年份作为样本年，探究以下影响因子对碳排放的影响：城镇化水平UR（城镇人口占总人口的比重）、经济发展水平GDP（各市生产总值）、电量消费水平EC（各市全社会用电总量）、财政支出FE（各市一般公共预算支出总值）、企业个数IL（规模以上工业企业个数）。

由于地理探测器进行运算时自变量需为类型数据，使用自然断点法进行类别化处理，分别按其大小顺序赋值（1，2，3，4，5）作为类别层次标识。引入地理探测器中，提取单因子探测的结果和交互作用探测结果。

3.3.3 单因子探测结果

根据表4的数据分析，安徽省碳排放的主要驱动因素在不同时间段内基本保持一致，其中经济发展水平和地方财政支出对安徽省碳排放空间分异的影响具有突出作用，规模以上企业个数对碳排放的影响也有显著作用，城镇化水平、电量消费水平对碳排放空间分异的影响相对较弱。

表4 单因子探测结果

影响因子	q值			
	2005年	2010年	2015年	2020年
城镇化水平	0.214	0.306	0.871	0.370
经济发展水平	0.949	0.940	0.965	0.961
电量消费水平	0.252	0.167	0.589	0.354
财政支出	0.910	0.928	0.917	0.926
企业个数	0.653	0.698	0.673	0.904

经济发展水平和地方财政支出对安徽省碳排放空间分异的解释力一直处于主导地位，就趋势而言，经济发展水平对碳排放的解释力处于缓慢增加，其中q值2015年最高为0.965，2010年最低为0.940。近年来安徽省政府积极推进开放型经济，但由于产业机构仍然相对单一，经济增长带动的能源消耗仍然是安徽省碳排放的主导因素，其对碳排放空间分异的解释力呈现稳步上升趋势。地方财政支出对碳排放的影响则表现出明显的政策驱动特征，其解释力q值在0.910~0.928区间内波动，其中2010年达到峰值（q=0.928），2005年处于谷值（q=0.910）。这种波动性特征与财政支出的政策导向性和阶段性特征密切相关。

规模以上企业个数，q值介于0.653~0.904之间，安徽省经济发展依然依靠传统制造业发展模式，规模以上企业耗能依旧占比较大，所以对碳排放空间分异的解释力较为显著。由于企业规模不断扩大，工业生产和经济发展增幅较大，从而带来大量能源消耗，造成2020企业个数q值突增。城镇化水平、电量消费水平，这2个影响因子的q值均有明显波动，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性特征。

3.3.4 交互作用探测结果

在理清各影响因子对碳排放空间分异性的单独解释力之后，本研究深入探讨了各影响因素之间的交互作用对碳排放空间分布差异的影响。结果显示（图3），多因子交互作用的解释力均优于单独作用时的表现，以2005年为例，2005年城镇化水平和电量消费水平单因子探测q值较低，在与规模以上企业个数的交互作用下对碳排放的影响力分别达到0.997和0.720。

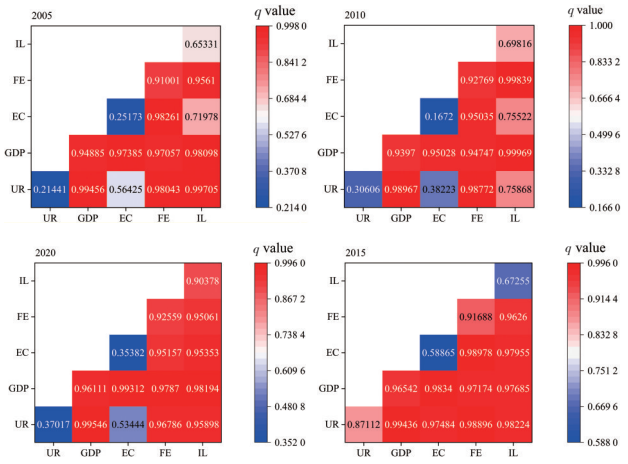


图 3　交互作用探测结果

4 个时间段交互作用 q 值最高的分别为 UR ∩ IL（0.997）、GDP ∩ IL（0.999）、UR ∩ GDP（0.994）、UR ∩ GDP（0.995）。研究发现，城镇化水平、电量消费水平单独发挥的解释力有限，但由于 GDP 单因子对碳排放的解释力处于主导地位，使得含有 GDP 的交互因子对碳排放的影响力得到飞跃性提升，因此 GDP 及其交互作用是推动碳排放持续增长的关键驱动因素。随着安徽省新型城镇化建设的不断推进，安徽省城镇化率不断提高，相应经济发展水平、电量消费水平随之增长，由 UR ∩ GDP 交互作用对碳排放的影响力逐渐成为主导地位，2015 年和 2020 年 q 值均最高。规模以上企业在前两期的交互作用中，也占居首位，原因在于前期安徽省经济发展主要依据工业为主，规模以上企业贡献占比较大，随着产业结构改革，不断落实企业创新驱动发展，其交互作用对碳排放依然具有较强影响力，但也有所降低。

4　结　语

本研究以安徽省为例，基于 NPP/VIIRS 夜间灯光数据、POI 数据及统计年鉴等多源数据，分析了碳排放的时空演变特征及其驱动因子。研究发现，安徽省碳排放总量持续增长，空间分布呈现“北部>南部”的格局，省会合肥因工业和人口聚集成为碳排放高地。碳排放的空间正相关性较弱，LISA 聚类显示高–高(H–H)和低–低(L–L)聚类区面积占比小。人类活动强度与碳排放强度空间分布高度一致，主要集中在中部合肥及西北部、东南部地区。经济发展水平对碳排放空间分异的影响力最强，多因子交互作用下解释力显著提高。此外，碳排放与夜间地表温度存在时空正相关性，但显著性不强。在方法上，研究采用线性模型拟合碳排放与夜间灯光指数，结果较为合理。但由于数据的局限性，空间自相关分析仅限于市域尺度，Moran’I 值较小，表明城市用地布局对碳排放影响较弱。POI 数据在反映人类活动时存在局限性，后续研究可结合城市不透水面等数据，更全面地分析碳排放与驱动因子的关系。基于研究结论，建议政府加强对能源消耗的监管，扶持清洁能源，强化生态建设；企业应提高能源利用效率，积极响应政策，助力安徽省碳减排目标的实现。

参考文献

[1] 邵帅,张可,豆建民. 经济集聚的节能减排效应:理论与中国经验[J]. 管理世界,2019,35(1):36-60

[2] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[N]. 2020-09-23

[3] 宋珺,周蕾,赵盟,等. 2014—2019 年京津冀城市群能源碳排放的遥感监测[J]. 浙江师范大学学报(自然科学版),2021,44(4):467-474

[4] Ghosh T, Elvidge C D, Sutton P C, et al. Creating a Global Grid of Distributed Fossil Fuel CO_2 Emissions from Nighttime Satellite Imagery[J]. Energies 2010,3(12):1 895-1 913

[5] 李云燕,盛清,代建. 基于 DMSP-OLS 与 NPP-VIIRS 整合数据的京津冀城市群碳排放时空演变特征[J]. 环境工程技术学报,2023,13(2):447-454

[6] 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):1 513-1 526

[7] 张永年,潘竟虎. 基于 DMSP/OLS 数据的中国碳排放时空模拟与分异格局[J]. 中国环境科学,2019,39(4):1 436-1 446

[8] 顾羊羊,乔旭宁,樊良新,等. 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

[9] 邓祥征,丹利,叶谦,等. 碳排放和减碳的社会经济代价研究进展与方法探究[J]. 地球信息科学学报,2018,20(4):405-413

[10] 王莉雯,卫亚星. 基于 RS 和 GIS 的沈阳碳排放空间分布模拟[J]. 资源科学,2012,34(2):328-336

[11] 李小军,朱青祥,漆志强,等. 基于 STIRPAT 模型的碳排放峰值预测研究:以甘肃省为例[J]. 环保科技,2022,28(5):38-44

[12] 徐彭辉,周咏馨,郭楠. 基于 STIRPAT 模型的辽宁省工业用地碳排放影响因素分析[J]. 能源与环境,2023(4):68-71

[13] 郑秋红. 基于夜间灯光数据的全国栅格尺度碳排放模拟[J]. 科技与创新,2024(4):111-113

[14] 张乐勤,陈永卓. 安徽省农业生产碳排放测算及驱动因子的典型相关分析[J]. 现代农业科技,2024(1):122-127

[15] 刘耀辉,刘文毅,仇培元,等. 基于夜间灯光数据的东部七省市碳排放时空演变和监测评估[J]. 测绘通报,2023(12):38-44

[16] 吴森森,师满江,曹琦,等. 多源大数据下中国特大城市人口夜间热力特征与影响因素研究[J]. 世界地理研究,2024,33(12):1-12

（下转第 54 页）