

引用格式:ZHANG Yao,ZHANG Yuxin,ZHANG Yongjian,*et al.*Study on the spatialization of carbon emission in Xi'an based on the luminous data of LuoJia-01[J].Remote Sensing Technology and Application,2023,38(4):869-879.[张瑶,张宇鑫,张勇建,等.基于珞珈一号夜间灯光数据西安市碳排放空间化研究[J].遥感技术与应用,2023,38(4):869-879.]
DOI:10.11873/j.issn.1004-0323.2023.4.0869

基于珞珈一号夜间灯光数据西安市碳排放空间化研究

张 瑶,张宇鑫,张勇建,弓 超,孔雅倩
(陕西科技大学机电工程学院,陕西 西安 710021)

摘要:基于珞珈一号夜间灯光数据和西安市能源统计数据,结合 ArcGIS 空间分析方法,运用高一低聚类模型,分区县对 2018 年西安市碳排放量进行空间化模拟,并对全市各区县碳排放强度进行计算和分类,研究西安市各区县碳排放量分布特性。结果表明:珞珈一号灯光数据与碳排放量存在较好的相关性,线性相关系数为 0.720 3,四次函数多项式的相关系数最高,为 0.843 5;在年度碳排放量上,西安市碳排放量呈现中心主城区高、周围县区低的空间分布特点,为聚类状态分布,且聚类结果在高值区域内聚类;全市低碳排放强度区县较多,存在少量高碳排放强度区县,对实现绿色发展模式还需要进一步调整产业结构。

关 键 词:夜间灯光数据;高一低聚类;空间化;碳排放强度

中图分类号:P208 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2023)04-0869-11

1 引言

过度的化石燃料消耗所排放出的二氧化碳等温室气体,是导致全球变暖的主要原因^[1]。据美国海洋大气管理局公布的数据,2021 年地球大气中二氧化碳平均浓度达到人类历史上二氧化碳浓度最高的记录,并且超过了 400 万年地质记录中的最高记录,严重威胁到人类未来的生存。中国作为世界上最大的碳排放国,承受着巨大的减排压力。中国政府也在第七十五届联合国大会上提出 2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和的目标^[2]。在经济快速发展的同时,能源消耗量也在不断攀升,使得如期实现双碳减排目标面临许多不确定性^[3]。因此,了解市区一级的二氧化碳排放量以及空间分布的差异性能够为不同地区提供合理的碳减排措施。然而,由于市、区县一级的能源消耗数据获取困难,无法准确地计算出二氧化碳排放量,造成了数据的不一致性,给系统研究带来了一定的困难。

夜间灯光数据的应用较为广泛,学者们利用灯光数据进行过贫困水平、城市化以及经济发展领域等方面的研究^[4-6]。已有的研究表明,由美国国防气象卫星搭载的可见光成像线性扫描业务系统(DMSP-OLS)和国家极轨卫星搭载的可见光近红外成像辐射仪(NPP-VIIRS)采集的夜间灯光数据能够进行碳排放多尺度空间研究,可用于碳排放的分析^[7]。基于 DMSP-OLS 夜间灯光数据,许燕燕等^[8]通过建立碳排放量与夜间灯光数据的回归模型,反演了能源统计数据缺失区县的碳排放量,并应用空间自相关模型,说明了碳排放量的空间集聚性。郭忻怡等^[9]结合了 NDVI 数据,构建了江苏省碳排放的空间滞后回归模型,对江苏省碳排放进行空间分布模拟。相比于 DMSP-OLS 灯光数据,NPP-VIIRS 灯光数据具有更高的空间分辨率和更广泛的辐射探测范围,具有更好的成像效果^[10]。李峰等^[11]分别校正了 DMSP-OLS 和 NPP-VIIRS 两

收稿日期:2022-02-19;修订日期:2023-04-13

基金项目:国家自然科学基金项目“可再生能源环境下智能电网需求响应策略及商业运营机制研究”(51806133)。

作者简介:张 瑶(1990—),女,陕西西安人,博士,副教授,主要从事 GIS 应用、智能社区体系构建研究。E-mail:zhangyao@sust.edu.cn

通讯作者:张宇鑫(1998—),男,湖南张家界人,硕士研究生,主要从事 GIS 应用方面的研究。E-mail:YuxinZhang@tom.com

种夜间灯光数据,分析了长时间序列京津冀碳排放的时空格局变化特征及影响因素。孙贵艳等^[12]在校正两种夜间灯光数据的基础上,结合了Moran's I指数和STIRPAT模型,对长江中上游地区能源消费碳排放量的空间特征及影响因素进行研究。在灯光数据估算碳排放的研究中,目前多数集中于DMSP-OLS和NPP-VIIRS两种夜间灯光数据来估算区域碳排放量。由于珞珈一号卫星发射时间较晚,仅仅记录了少量年份的夜间灯光数据,近年来,已有部分学者利用珞珈一号灯光数据在城市GDP、人口空间化、城市空间格局演变等领域进行了研究^[13-16]。针对于区域碳排放领域,目前有少量学者利用珞珈一号灯光数据进行了城市碳排放的空间化分布研究^[17]。考虑到珞珈一号灯光数据对比于DMSP-OLS和NPP-VIIRS灯光数据,具有更好的精度,本文拟利用珞珈一号夜间灯光数据,探寻西北地区重要的中心城市——西安市的碳排放空间分布情况,并进行相关分析。

西安于2018年获批成为第9个国家中心城市,在“一带一路”国家级发展战略下,作为中国丝绸之路的起点城市,成为西北地区重要的经济文化中心。在经济发展迈入快车道的同时,环境治理、碳减排工作也成为政府工作的重心。因此,研究西安市能源碳排放量的空间分布以及分布特性具有重要的现实意义。本文以西安市为研究区域,结合珞珈一号夜间灯光数据和能源统计数据,通过对西安市县、区尺度进行碳排放估算,分析西安市2018年碳排放的空间分布特征以及聚类情况,并且对全市各区县的碳排放强度进行计算和分类,能够为推动各区县实现社会经济转型、制定节能减排政策提供直观而合理的数据支撑。

2 研究区域与数据

2.1 研究区概况

西安位于中国大陆腹地黄河流域中部的关中平原,陕西省省会城市,是关中平原城市群核心城市,也是中国西部地区重要的中心城市。由于城市的快速发展,西安市的能源消费碳排放总体呈现上升趋势,近年来,全市能源利用结构有效转变,低耗能、低碳排的能源消费逐年上升,碳排放增长率有所减缓,能源强度不断下降^[18-19]。西安境内北部为冲积平原,南部为剥蚀山体,属于大陆性季风气候,冷暖干湿、四季分明。2020年,西安市总面积10 108 km²,

下辖11个区、2个县,常住人口1 295.29万人,GDP总量达10 020.39亿元。研究区范围如图1所示。

2.2 数据来源

本研究主要应用到的数据包括西安市能源统计数据、各区县人口密度数据和珞珈一号夜间灯光数据。人口密度数据和能源消耗数据来源于2019年西安市统计年鉴,分别为统计年鉴中1~2土地面积和常住人口密度部分和13~3规模以上工业企业能源购进、消费及库存部分。能源消耗数据为主要能源的年度消耗量,包含有焦炭、原煤、原油、柴油、天然气等11种能源种类。珞珈一号夜间灯光数据来源于高分辨率对地观测系统数据与应用网,网址为<http://59.175.109.173:8888/index.html>。“珞珈一号”是全球首颗专业夜光遥感卫星,由武汉大学团队与相关机构共同研发制作,于2018年6月2日成功发射升空,其精度达到地面分辨率100 m,理想条件下可在15 d内绘制完成全球夜光影像。相比于早期的DMSP-OLS和NPP-VIIRS夜间灯光数据,珞珈一号夜间灯光数据更有利于小尺度研究的高空间分辨率^[20-21]。辅助数据为中国1:400万的地级市行政边界数据,通过国家基础地理信息系统网站查询。

3 研究方法

本文通过查询得到西安市能源消耗数据,以及下载得到夜间灯光数据,进行夜间灯光数据处理和碳排放量的计算,在计算得到市级碳排放量的基础上,利用人口权重分配法,进而计算出区县一级的碳排放量,最后利用聚类分析方法与碳排放强度分类,来分析西安市各区县的碳排放分布情况。

3.1 夜间灯光数据处理

(1)下载研究区域2018年的珞珈一号灯光数据,由于西安市行政区域内单景影像可完全覆盖,只需下载单幅影像数据,无需进行影像的镶嵌与相互校正。原始的灯光数据以压缩格式提供,将数据进行解压后再进行处理,由于文件已经经过系统几何校正,所以不需要进行几何方面的处理。

(2)珞珈一号灯光数据的DN值代表该像元地面上的亮度,由于大气干扰和偶然误差,需要进行数据处理。下载到的珞珈一号数据未经定标处理,在传输过程中存在辐射失真情况,造成DN值偏高。因此需要通过辐射亮度转换公式进行定标处理,公式为: $L = DN^{3/2} \cdot 10^{-10}$;式中 L 为绝对辐射校正后的辐

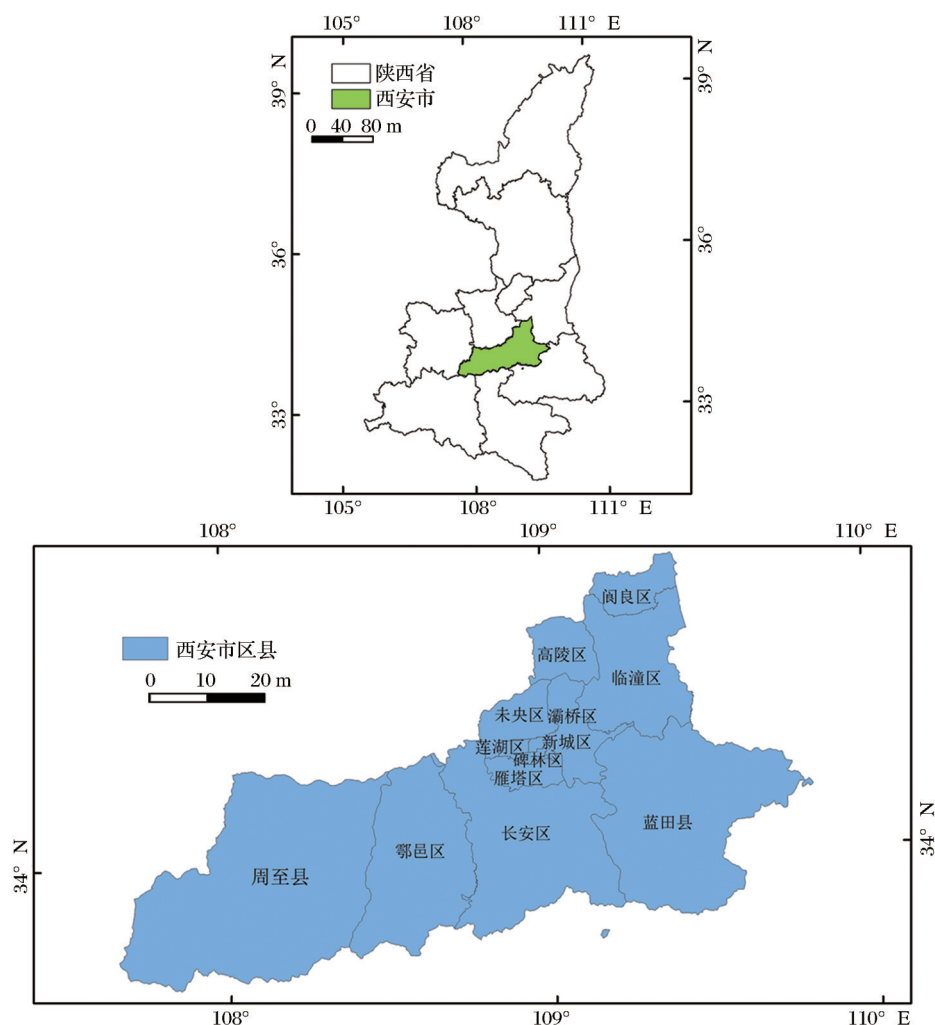


图1 研究区范围

Fig.1 Scope of study area

射亮度值, DN为影像灰度值。

(3) 经过辐射定标处理之后, 为了提高数据精度, 将夜间灯光数据的投影坐标系 WGS-1984 更换为更符合中国地图地形的兰伯特方位等积投影 (Asia_Lambert_Conformal_Conic)。加载西安市行政区划矢量数据, 以西安市行政区外围矢量边界为掩膜作研究区裁剪提取, 分区域统计计算各区域内灯光数总值, 连接相关属性表, 提取出包含西安市各区县灯光总值的行政区划图。

3.2 碳排放量计算

由于西安市区县一级行政区能源消耗数据统计不完善, 不能准确查询出各区县能源消耗数据, 给区县一级的碳排放计算带来一定的困难。人口规模在多项研究中已经被证明是影响碳排放的最主要驱动力, 说明碳排放量与人口规模存在密切关系^[22-25]。已经有学者利用权重法来进行不同领域的

碳排放分配, 比如通过市、县级人口权重对省域碳排放进行分配, 进而估算出市、县一级碳排放量^[26, 27]。本文拟采用人口权重进行县域碳排放分配, 对能源统计数据缺失的区县一级行政区进行碳排放量的计算^[27]。人口密度是影响经济活动的主要因素, 使用人口占比作为权重因子具有一定的可靠性。

3.2.1 能源消耗数据计算西安市碳排放量

根据日本全球环境战略研究所出版的《2006年 IPCC 国家温室气体清单指南》第二卷(能源)碳排放量计算方法, 选取 11 种主要化石能源类型(原煤、洗精煤、焦炭、天然气、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气、热力、电力)对西安市进行碳排放量的计算, 计算公式如下:

$$A = \frac{44}{12} \sum_{i=1}^n E_i K_i \quad (1)$$

其中: A 表示碳排放量(万 t); E_i 表示第 i 种燃料的能

源消耗量; K_i 表示第*i*种燃料的碳排放因子,各能源标准煤折算系数及碳排放系数如表1所示。

3.2.2 人口权重计算区县碳排放量

根据2019年西安市统计年鉴中各区县人口密度数据和常住人口数据,按照人口权重法计算区县

碳排放量^[27],计算公式如下:

$$C = P_q / P \cdot C_0 \tag{2}$$

其中: C 为区县一级的碳排放总量; P_0 为区县的人口总数; P 为市级人口数; C_0 为市一级的碳排放总量。

表1 能源消耗标准煤折算系数、碳排放系数

Table 1 Conversion coefficient of energy consumption standard coal and carbon emission coefficient

	原煤	洗精煤	焦炭	天然气	汽油	煤油	柴油	燃料油	液化石油气	热力	电力
折标煤系数	0.714 3	0.900 0	0.971 4	13.300 0	1.471 4	1.471 4	1.457 1	1.428 6	1.714 3	0.034 1	3.450 0
碳排放系数	0.755 9	0.755 9	0.855 0	0.448 3	0.553 8	0.571 4	0.592 1	0.618 5	0.504 2	0.670 0	0.272 0

3.3 聚类分析(Getis-ord General G)

高一低聚类分析方法可度量高值或低值的聚类程度,利用有限的数据对整体情况的特征进行估计,空间数据之间的关系包含有离散、随机、聚类三大类。高一低聚类通常用General G指数来衡量数据低值或高值的聚类程度,计算公式如下。使用高-低聚类分析功能,结果可获得General G观测值、Genaral G期望值、Z得分和P值。其中,Z得分和P值是统计显著性的量度,用来判断是否拒绝零假设,Z得分越高,表明高值的聚类程度越高;Z得分越低,表明低值的聚类程度越高;Z得分接近零,表示研究区域不存在明显的聚集。

基于西安市各区县碳排放估算结果,判断地区之间能源消费空间特征,以及各研究区域与相邻区域的空间聚类关系。

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} x_i x_j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j}, \forall j \neq i \tag{3}$$

其中: x_i, x_j 是要素*i, j*的属性值; $w_{i,j}$ 是要素*i, j*之间的空间权重; n 等于要素的总数目; $\forall j \neq i$ 即为任意的*i*与*j*不能作为相同要素出现。

3.4 碳排放强度

碳排放强度是指每单位国民生产总值所带来的二氧化碳排放量,主要用来衡量经济发展与碳排放量之间的关系^[28]。经济规模、能源强度、能源结构和产业结构等都是影响碳排放强度的因素^[29]。一般情况下,碳强度指标是随着技术进步和经济增长而下降的,碳排放强度越低,意味着碳排放效率越高。为体现各地区发展的差异性,引入碳排放强度,即地区碳排放量与GDP总量的比值,公式如下:

$$H = \frac{C}{GDP} \tag{4}$$

其中: H 为地区碳排放强度; C 为某地区的碳排放总量; GDP 为某地区的国民生产总值。

4 结果与讨论

4.1 夜间灯光数据与碳排放量的关系

通过ArcGIS软件将珞珈一号夜间灯光数据经过裁剪、提取、辐射定标、坐标系转换等一系列处理后,加载西安市行政区划数据,得到各区县的夜间灯光总值。结合区域灯光总值和通过能源消耗数据计算得出的碳排放量,使用夜间灯光数据与碳排放统计数据构建碳排放估算模型,线性拟合结果如图2所示。

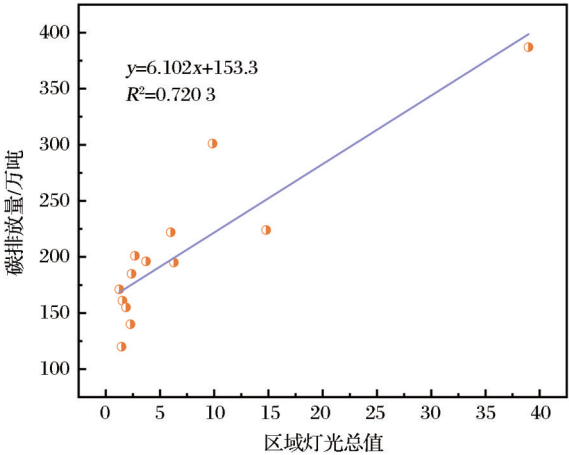


图2 碳排放量与灯光总值线性拟合关系

Fig.2 Linear fitting relationship between carbon emissions and total lighting value

由图可见,珞珈一号区域灯光总值和能源消耗碳排放统计值具有较好的线性相关性,线性拟合优度达0.7203。其他函数的拟合数据如表2。其中,幂函数的拟合优度为0.7806,对数函数的拟合优度为0.757,两者相比之下,幂函数的相关性要优于对数函数的相关性。在多项式函数的拟合关系中,存在多项式阶数越高,拟合优度越高的特点,二次函数的拟合优度最低,为0.7579,当多项式阶数为4阶时,拟合优度达到最大的0.8435。由此可见,可基

于四阶多项式函数模型建立灯光数据与碳排放量之间的关系,从而估算地区碳排放量。

4.2 西安市碳排放量空间分布特征

4.2.1 西安市碳排放精细尺度空间化

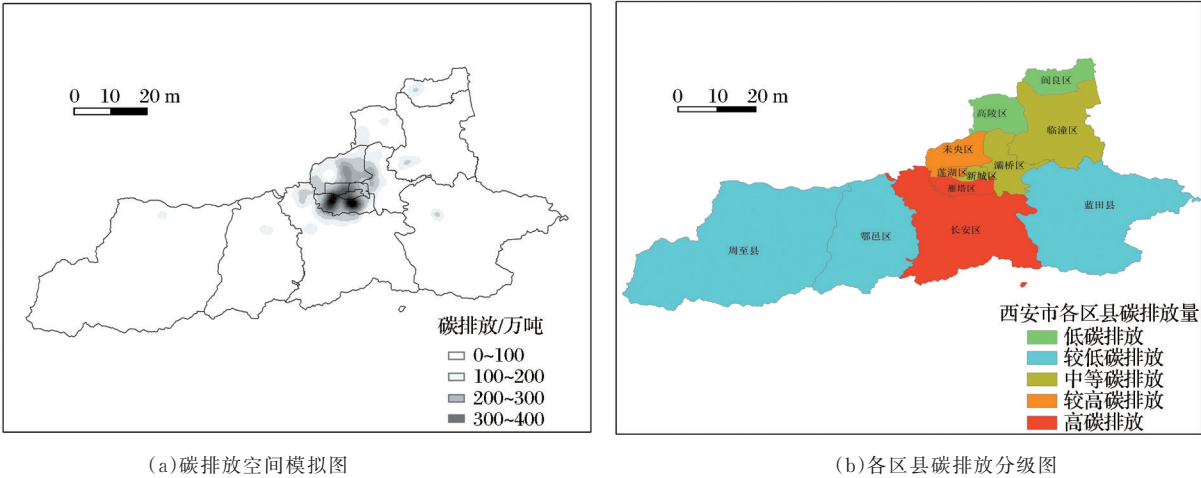
结合珞珈一号灯光栅格数据,提取出单个栅格灯光值,绘制出西安市碳排放量的精细尺度空间核密度图(图 3)。由图 3 可知,西安市碳排放集中区域为雁塔区、莲湖区和未央区。并且可以清楚地看出碳排放空间分布状态,依次由雁塔区、莲湖区、新城区、未央区逐步向外扩张,且碳排放分布向北聚集

效果明显。由于市区南面土地类型多为山地、林地,城区发展趋于饱和,发展速度减慢。相比于南郊,北城区具有广阔的平原和河流,拥有更好的区位优势。以未央区为代表的西安市北郊,政府实施大力开发北城区的政策方略,推动西咸一体化建设^[30]。导致经济重心的北移,北郊的城市化建设取得一定成效,大量的工业企业迁入、以及诸多商业区规划建设,改变了西安长期以来“北轻南重”的城市空间格局。城市化进程伴随着一定碳排放量的增加,因此,北城区的碳排放也较为集中。

表 2 碳排放量与灯光总数各函数关系

Table 2 Functional relationship between carbon emission and total number of lights

方程	b_1	b_2	b_3	b_4	常量	R^2
幂函数	121.850 0	—	—	—	—	0.780 6
对数函数	66.071 0	—	—	—	107.830	0.757 0
二次函数	0.145 8	12.057 0	—	—	134.680	0.757 9
三次函数	0.042 6	-2.389 6	36.096 0	—	89.863	0.821 5
四次函数	0.008 0	-0.450 4	5.728 7	-6.438 1	144.600	0.843 5



(a)碳排放空间模拟图 (b)各区县碳排放分级图

图 3 西安市碳排放空间分布特征

Fig.3 Spatial distribution characteristics of carbon emission in Xi'an

4.2.2 碳排放分级分析

为了能直观地了解西安市区县的碳排放量分布特征,利用 ArcGIS 自然断点法将西安市各区县的碳排放量划分为低碳排放、较低碳排放、中等碳排放、较高碳排放、高碳排放 5 个级别,如图 3 所示。由图可知,西安市碳排放量区域特征明显,整体差异较大,形成了以雁塔区、长安区两个区为中心的碳排放核心区域,碳排放级别最高;未央区、莲湖区两区的较高碳排放级别区域;碑林区、灞桥区、新城区、临潼区 4 个中等碳排放区域;以及蓝田县、周至县、鄠邑区的较低碳排放区域和阎良区、高陵区两个低碳排区域。碳排放空间分布总体呈现出中心

主城区高、周围县区低的分布特点,并且市区的碳排放量与郊区、县的碳排放量存在较大差异,这与全市各城区的发展程度、商业活动以及产业分布有很大关系。

产业结构、城镇化水平、工业生产总值等因素已经被证明是影响碳排放的主要因素^[31-34]。在各个碳排放级别区域中,平均城镇化率、工业生产总值占比(不包括西咸新区)如图 4。由雁塔区为代表的中等以上碳排放区域作为西安市的中心城区,经济体量大,商业活动密集,是全市最为重要的行政区。城区城市化进程起步早、发展时间长,4 个行政区的平均城镇化率高达 89.5%,并且拥有大量的工业企

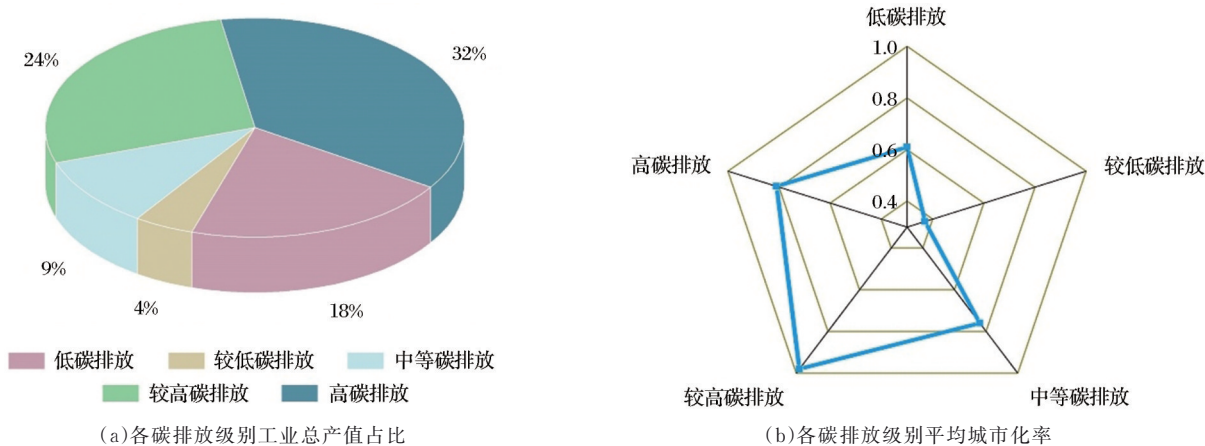


图 4 各碳排放级别区域影响因素

Fig.4 Regional influencing factors of carbon emission levels

业和工业设施,工业总产值占比 56%。重工业分布相对集中,在工业内部中,高耗能的化学制品制造业、非金属矿物制造业以及机电制造业等高耗能产业分布密集,能源需求量较大,消耗大量的煤、石油、天然气等化石能源,对二氧化碳排放有着正向作用,增加二氧化碳的排放量。中等级别碳排放区域相对于高碳排放级别区域来说,商业活动相对较少。虽然中等碳排放区县城市化率也较高,但其区域内工业化水平较低,只有少量的工业企业,工业总产值仅占比 9%。且区域内高耗能工业产业较少,是造成碳排放量低于高碳排放区县的主要原因。较低和低等两个级别碳排放区县城市化率和工业企业数量都处于相对较低的水平,由于城市发展趋势以及能源结构转型的目标,在城市现代化发展的同时,政府有意识地将低碳产业、节能技术引入到中心城区外围的区县。这也造成了分组内的工业总产值绝大多数来源于高陵区的高新技术产业和阎良区的航空制造业,占到分组内工业总产值的 86.5%,特别是阎良区作为中国著名的航空城,以技术创新为动力,围绕航空产业链构建和城市环境建设两大主线^[35]。近年来,阎良区、高陵区不断加快发展科技研发、汽车制造、生物医药、节能环保、科技服务等低碳产业,实现能源结构的转型^[36],在工业产值增长的同时,有效控制了碳排放量的上升。而分组内其他区县由于工业规模较小,且工业内部行业多数为轻工制造业、烟草加工业等低碳行业,化石能源的消耗远低于高碳排放级别的中心城区。且在城郊及县城区域中,由于城市发展滞后,城区规模小,土地类型也多为山地、林地等,大量的植物通过光合作用吸收大气中的二氧化碳,也在一定程

度上中和了当地的碳排放,使得城郊、县区域碳排放处于较低水平。

4.3 空间碳排放量聚类分析

根据 ArcGIS 高一低聚类分析工具,做出西安市各区县碳排放的高一低聚类程度,高低聚类值参考结果如表 3 所示。对西安市各区县碳排放量作高一低聚类值分析,结果显示 General G 的观测值为 0.093, General G 的期望值为 0.083, Z 得分为 2.10, P 值 0.036。在分析结果中, Z 得分为正值,且 General G 的观测值大于 General G 的期望值,研究结果落在高值聚集区内,并且研究区碳排放数据拥有 95% 的把握在高值区域聚类。可见西安市各区县碳排放量并不是随机、无规律的排放状态,而是呈高值聚集状态分布。

表 3 高一低聚类参考结果

Table 3 High oligomeric reference results

聚类程度	临界值	显著性水平
高值区域	>2.58	随机产生高聚类可能性<1%
	1.96~2.58	随机产生高聚类可能性<5%
	1.65~1.96	随机产生高聚类可能性<10%
随机	-1.65~1.65	—
低值区域	<-2.58	随机产生低聚类可能性<1%
	-2.58~-1.96	随机产生低聚类可能性<5%
	-1.96~-1.65	随机产生低聚类可能性<10%

如图 5 所示,全市各区县城市规模、GDP、工业化水平均处于发展的高速阶段,特别是 2005 年之后,全市各行业都迎来了高速发展时期,到 2018 年底,西安市常住人口总数达到 1 000 万,较前一年增长近 40 万人。全市建成区 724 km²,较前一年提升 5.6 个百分点,国内生产总值和工业生产总值分别达到 8 349 亿元和 6 759 亿元,较前一年分别提升 10%

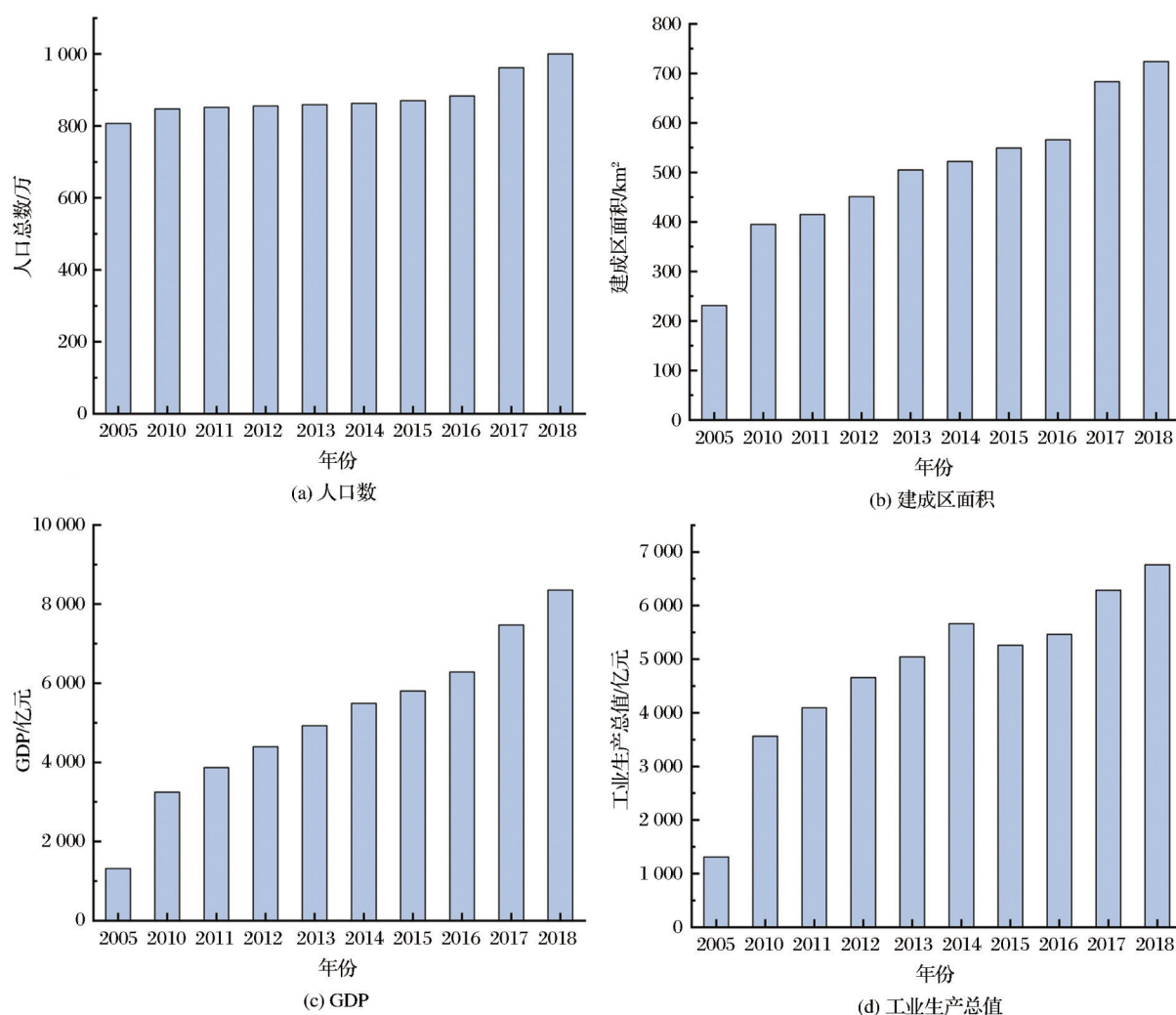


图5 全市2005~2018年人口数、建成区面积、GDP和工业生产总值变化

Fig.5 Changes in population, built-up area, GDP and industrial GDP of the city from 2005 to 2018

和7%。人口活动强度、工业化产业强度不断增大,化石能源消耗也在不断上升,是导致全市各区县碳排放量出现高值聚集的主要原因。此外,碳排放的高值聚类结果还表明全市各区县经过一定时间的城市化发展,经济建设和工业建设取得显著成就,在城市高速发展的同时对区域碳排放有明显的正向促进作用。同时,根据区域高值聚类的结果,可预测全市城镇化建设和工业化建设还将不断发展,城镇规模将进一步扩大,有着巨大的发展潜力。

4.4 碳排放强度空间分布

通过上式4计算得出全市各区县的碳排放强度,将碳排放强度分为3个级别,如表4,由表4可知,全市共有9个区县处于碳排放强度第一级别,占到全市区县总数的69%,中等碳排放强度有临潼区、鄠邑区两个区,碳排放强度最高的为蓝田县、周至县。碳排放强度的空间分布整体呈现出中心城

区低,外围区县高的分布状态。碳排放强度较低的区县基本为全市经济产业集中的中心城区,碳排放效率较高,而碳排放强度较高的区域基本为全市欠发达的县城。

表4 西安市区县碳排放强度分级

Table 4 Classification of carbon emission intensity of districts and counties in Xi'an

级别	碳排放强度(t/万元)	区县
1	<0.5	雁塔区、未央区、莲湖区、碑林区、新城区、高陵区、长安区、灞桥区、阎良区
2	0.5~1.0	临潼区、鄠邑区
3	>1.0	蓝田县、周至县

4.5 碳排放量与碳排放强度分类

为了能直观地体现各区县碳排放量与碳排放强度之间的空间分布,绘制了各区县碳排放量与碳

排放强度关系图,如图6,将区县划分为高碳排放量—高碳排放强度(高一高)、高碳排放量—低碳排放强度(高一低)、低碳排放量—高碳排放强度(低—高)、低碳排放量—低碳排放强度(低—低)四种类型。其中,根据划分结果,高一高区域为临潼区;高一低区域为雁塔区、长安区、未央区、莲湖区、碑林区、灞桥区、新城区;低—高区域为蓝田县、周至县、鄠邑区;低—低区域为高陵区、阎良区。全市多数区县处于高一低类型,这些区县随着碳排放量的增高,碳排放强度反而较低,在城市高速发展的同时有效地提高了碳排放效率;低—高类型的区县在城区发展、经济建设方面相对滞后,多处于中心城区外围;低—低类型的“双低”区县在城市化进程中有着一定的碳减排发展潜力。

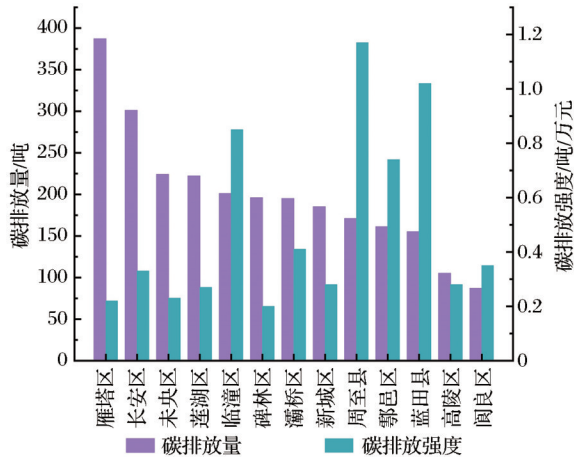


图6 碳排放量与碳排放强度关系

Fig.6 Relationship between carbon emission and carbon emission intensity

产业结构的变化能够有效地降低碳排放强度,实现碳排放模式的转变^[37]。相比较于第一、第二产业,第三产业的碳排放效率更高,全市分区县的产业占比如图7所示,碳排放强度较高的临潼区、周至县、蓝田县第一产业相对于其他10个区县来说占比较大,第二产业占有量偏低,以农业、渔业、畜牧业为主的第一产业经济仍是当地部分居民不可缺少的经济来源,工业化水平相对落后,抑制了碳排放效率的提高。而以雁塔区、莲湖区为代表的低碳排放强度区县,形成以服务业、商业为主的第三产业成为新的支柱性产业,并且由于近年来西安市低碳工业体系的完善绿色技术创新能力不断加强,产业升级加快,在工业保持快速发展的同时,碳排放强度也在不断下降。

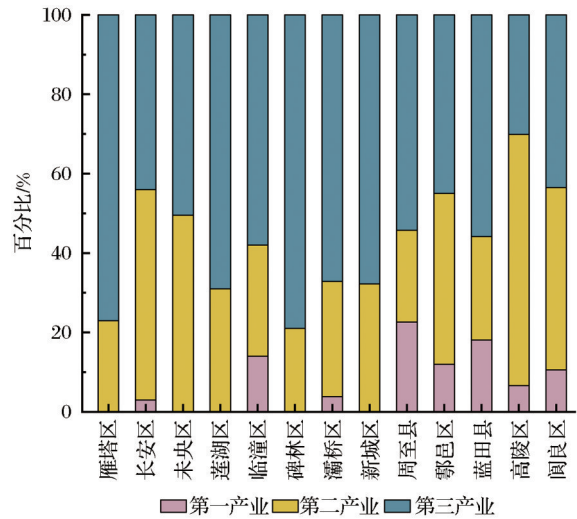


图7 各区县第一、二、三产业占比

Fig.7 Proportion of primary, secondary and tertiary industries in each district and county

5 结论与展望

5.1 结论

本研究以2018年西安市珞珈一号夜间灯光数据为基础,进行西安市区县一级碳排放的估算以及空间化,在精细尺度上展现了全市各区县碳排放的分布差异,主要结论如下:

(1)以西安市各区县为研究区域,利用珞珈一号夜间灯光数据和能源统计数据。运用人口权重分配法估算了各区县2018年度碳排放量,建立了珞珈一号数据和碳排放量之间的多个函数模型。其中,四次函数拟合优度最高,可借助此函数模型来分析区域碳排放量的空间分布状态。

(2)从各区县估算的碳排放结果来看,全市碳排放量形成了以雁塔区、长安区为代表的中心城区高、周围区县低的空间分布特点。根据高-低聚类结果,Z得分为正值,且General G的观测值大于General G的期望值,表明全市碳排放量呈聚集状态分布,且在高值区域内聚集,根据高值聚类结果预测,碳排放量有着进一步扩大的趋势。

(3)通过计算全市各区县的碳排放强度,得出碳排放强度较高的区县为蓝田县、周至县、鄠邑区、临潼区4个区县,碳排放效率较低。与其当地的经济发展、产业结构有着很大关系,应积极促进产业结构转型,改变以传统化石能源消耗为主的能源消费结构,降低碳排放强度,提高区域内碳排放效率。

5.2 展望

本文利用珞珈一号进行碳排放精细尺度的模

拟,并建立了灯光数据与区县一级碳排放之间的估算模型。虽然文中建立的估算模型有较好的拟合优度,并且根据西安市具体情况,全市碳排放量空间分布基本符合实际,能够用于估算区域碳排放。但是,该模型仍存在以下缺陷:①相比于DMSP-OLS和NPP-VIIRS灯光数据,珞珈一号数据具有较好的精度,可减少由于精度带来的估算误差,实现更精细尺度化的碳排放研究。但是,由于卫星发射时间较晚,在时间尺度上存在不稳定性,仅仅记录了少量年份的灯光数据,造成了数据的缺失,给模型带来了一定的误差。②人口权重法尽管在前人文献中有所应用,有一定的借鉴性,但由于不同群体的差异,也存在一定的估算误差。此后的研究中,随着珞珈一号数据记录的完善,能够很好地应用于城市碳排放估算领域,为碳排放的估算提供一种新的估算方法,并且可以与DMSP-OLS和NPP-VIIRS数据的估算结果进行对比分析,来反映城市或区域碳排放的长时间序列演变趋势,分析城市碳排放的空间化特征。此外,随着国家双碳目标的提出,节能减排力度不断加大,低碳城市建设成为未来发展的新趋势,在利用灯光数据估算碳排放的基础上,可进一步分析碳排放驱动因素,并结合预测模型来预测碳达峰时间,为城市碳减排提供理论和数据支撑,促进区域碳达峰。

参考文献(References):

- [1] SARKODIE S A, OWUSU P A. Escalation effect of fossil-based CO₂ emissions improves green energy innovation[J]. Science of the Total Environment, 2021, 785:DOI:10.1016/J.SCITOTENV.2021.147257
- [2] PAN Jiahua, LI Meng, ZHANG Kun. China's plan to achieve carbon peak and carbon neutralization[N]. China Social Science Journal, 2021-11-26(006).[潘家华,李萌,张坤.实现碳达峰碳中和的中国方案[N].中国社会科学报,2021-11-26(006).]
- [3] WANG Shaohong. Current situation, challenges and breakthroughs of China's energy transformation under the goal of carbon peak[J]. Price Theory and Practice, 2021, 1-5[2021-12-07]. DOI:10.19851/j.cnki.CN111010/F.2021.08.246.[王少洪.碳达峰目标下我国能源转型的现状、挑战与突破[J].价格理论与实践,2021:1-5[2021-12-07].DOI:10.19851/j.cnki.CN111010/F.2021.08.246.]
- [4] CHEN Jizhen, ZHANG Jun, XUE Liang. Analysis of the spatio-temporal differences of relative poverty levels in Shaanxi Province based on night light data[J]. Remote Sensing Technology and Applications, 2022, 37(4):908-918.[陈吉臻,张君,薛亮.基于夜间灯光数据的陕西省县域相对贫困水平时空差异分析[J].遥感技术与应用,2022,37(4):908-918.]
- [5] WANG Han, HU Ziyuan, LI Fuquan, *et al.* Research on the spatial-temporal process of urbanization in Chengdu-Chongqing region based on nighttime light from 2000 to 2018[J]. Remote Sensing Technology and Applications, 2022, 37(4):897-907.[王晗,胡自远,李付全,等.基于夜间灯光的2000-2018年成渝地区城市化过程研究[J].遥感技术与应用,2022,37(4):897-907.]
- [6] ZOU Dan, ZHOU Yuke, LIN Jingtang, *et al.* Analysis of inequality of socioeconomic development on both sides of Hu Huanyong line using nighttime light [J]. Remote Sensing Technology and Applications, 2022, 37(4):929-937.[邹丹,周玉科,林金堂,等.利用夜间灯光分析胡焕庸线两侧社会经济发展不平衡状况[J].遥感技术与应用,2022,37(4):929-937.]
- [7] MA Zhongyu, XIAO Hongwei. Spatiotemporal simulation of carbon emissions in different provinces of China based on satellite night light data[J]. China's Population, Resources and Environment, 2017, 27(9):143-150.[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.]
- [8] XU Yanyan, ZHOU Yangang, LI Hongzhong, *et al.* Study on temporal and spatial dynamic characteristics of carbon emission in Chengdu Chongqing Urban Agglomeration based on DMSP/OLS night light data[J]. Environmental Pollution and Prevention, 2019, 41(12):1504-1511.[许燕燕,周延刚,李洪忠,等.基于DMSP/OLS夜间灯光数据的成渝城市群碳排放时空动态特征研究[J].环境污染与防治,2019,41(12):1504-1511.]
- [9] GUO Xinyi, YAN Qingwu, TAN Xiaoyue, *et al.* Simulation of spatial distribution of carbon emissions in Jiangsu Province based on DMSP/OLS and NDVI[J]. Research on World Geography, 2016, 25(4):102-110.[郭忻怡,闫庆武,谭晓悦,等.基于DMSP/OLS与NDVI的江苏省碳排放空间分布模拟[J].世界地理研究,2016,25(4):102-110.]
- [10] YU Bailang, WANG Congxiao, GONG Wenkang, *et al.* Research on night light remote sensing and urban problems: Data, methods, applications and Prospects [J]. Journal of Remote Sensing, 2021, 25(1):342-364.[余柏菡,王丛笑,宫文康,等.夜间灯光遥感与城市问题研究:数据、方法、应用和展望[J].遥感学报,2021,25(1):342-364.]
- [11] LI Feng, LIU Jun, LIU Wenlong, *et al.* Temporal and spatial dynamic analysis of carbon emission from night light data in Beijing Tianjin Hebei County[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2021, 34(2):230-236.[李峰,刘军,刘文龙,等.京津冀县域夜间灯光数据碳排放时空动态分析[J].信阳师范学院学报(自然科学版),2021,34(2):230-236.]
- [12] SUN Guiyan, WANG Sheng, XIAO Lei. Study on carbon emission and influencing factors of energy consumption in the upper reaches of the Yangtze River based on night light data [J]. Regional Research and Development, 2020, 39(4):159-

- 162,174.[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.]
- [13] LI Xiang, ZHU Jiang, YIN Xiangdong, *et al.* Spatialization of GDP in Guangdong Province using night light data of Luo-jia-01[J]. Remote Sensing Information, 2021, 36(2):40-45. [李翔,朱江,尹向东,等.利用珞珈一号夜间灯光数据的广东省GDP空间化[J].遥感信息,2021,36(2):40-45.]
- [14] LOU Ge, CHEN Qiuxiao. Research on rural population spatialization method based on "Luo-jia-01" luminous remote sensing data fusion[J]. Architecture and Culture, 2021(1):74-75. [娄格,陈秋晓.基于“珞珈一号”夜光遥感数据融合的乡村人口空间化方法研究[J].建筑与文化,2021(1):74-75.]
- [15] WANG Meiling, ZHANG Hesheng. Study on population spatialization based on night light data of Luo-jia-01[J]. Geospatial Information, 2021, 19(9):53-56,7.[王美玲,张和生.基于珞珈一号夜间灯光数据的人口空间化研究[J].地理空间信息,2021,19(9):53-56,7.]
- [16] YU Tingting. Study on population spatialization in Ganjingzi District of Dalian based on night light data of Luo-jia-01[J]. Scientific and Technological Innovation, 2021(1):91-92. [于婷婷.基于珞珈一号夜间灯光数据的大连市甘井子区人口空间化研究[J].科学技术创新,2021(1):91-92.]
- [17] LU Yifan, LIANG Yingran, LU Siyan, *et al.* Simulation of spatial distribution of carbon emissions in Guangzhou and analysis of its influencing factors based on "Luo-jia-01" night lights and urban functional zoning[J]. Journal of Geoinformation Science, 2022, 24(6):1176-1188.[卢奕帆,梁颖然,卢思言,等.结合“珞珈一号”夜间灯光与城市功能分区的广州市碳排放空间分布模拟及其影响因素分析[J].地球信息科学学报,2022,24(6):1176-1188.]
- [18] WANG Jian, XUE Dongqian, MA Beibei. Research on decomposition of carbon emission factors of energy consumption in Xi'an based on GFI model[J]. Geography of Arid Areas, 2018, 41(6):1388-1395.[王剑,薛东前,马蓓蓓.基于GFI模型的西安市能源消费碳排放因素分解研究[J].干旱区地理,2018,41(6):1388-1395.]
- [19] KANG Mingmin. Research on peak value prediction and control strategy of carbon emission in Xi'an[D].Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology,2020.[康铭敏.西安市碳排放峰值预测及控制策略研究[D].西安:西安建筑科技大学,2020.]
- [20] ZHONG Liang, LIU Xiaosheng. Application potential analysis of new night light data of Luo-jia-01[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(7):132-137.[钟亮,刘小生.珞珈一号新型夜间灯光数据应用潜力分析[J].测绘通报,2019(7):132-137.]
- [21] Luo-jia-01 satellite data and application service[J]. Satellite Application, 2019(5):26-29.[珞珈一号01星数据与应用服务[J].卫星应用,2019(5):26-29.]
- [22] HONG Yeying, XIANG Sijie, CHEN Jingxin. An empirical study on the impact of population size and structure on carbon emissions in Chongqing: An analysis based on STIRPAT model[J]. Northwest Population, 2015, 36(3):13-17.[洪业应,向思洁,陈景信.重庆市人口规模、结构对碳排放影响的实证研究——基于STIRPAT模型的分析[J].西北人口,2015,36(3):13-17.]
- [23] LI Guozhi, ZHOU Ming. Dynamic effects of population and consumption on carbon dioxide emissions: An empirical analysis based on variable parameter model[J]. Population Studies, 2012, 36(1):63-72.[李国志,周明.人口与消费对二氧化碳排放的动态影响——基于变参数模型的实证分析[J].人口研究,2012,36(1):63-72.]
- [24] YANG Zhen, LI Zehao. Study on carbon emission measurement and dynamic characteristics of its driving factors in Central China[J]. Ecological Economy, 2022, 38(5):13-20.[杨振,李泽浩.中部地区碳排放测度及其驱动因素动态特征研究[J].生态经济,2022,38(5):13-20.]
- [25] ZHONG Yusheng. The impact of population change on carbon emissions in Jiangxi Province—Based on STIRPAT extended model[J]. Journal of Fujian Business College, 2017(4):14-21.[钟宇声.江西省人口变动对碳排放的影响——基于STIRPAT扩展模型[J].福建商学院学报,2017(4):14-21.]
- [26] CHUAI X W, FENG J X. High resolution carbon emissions simulation and spatial heterogeneity analysis based on big data in Nanjing City, China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 686:828-837.DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.05.138
- [27] LIU Chang, SU Yun, LI Lingling. Estimation and spatial distribution of carbon emissions from county energy consumption in China[J]. Environmental Pollution and Prevention, 2020, 42(1):113-119.[刘畅,苏筠,黎玲玲.中国县域能源消费碳排放估算及其空间分布[J].环境污染与防治,2020,42(1):113-119.]
- [28] MURA M, LONGO M, TOSCHI L, *et al.* Industrial carbon emission intensity: A comprehensive dataset of European regions[J].Data in Brief,2021,36. DOI:10.1016/J.DIB.2021.107046
- [29] YIN J L, DING Q, FAN X H. Direct and indirect contributions of energy consumption structure to carbon emission intensity[J]. International Journal of Energy Sector Management, 2021, 15(3).DOI:10.1108/IJESM-08-2020-0009
- [30] XU Huan, FU Bihong, GUO Qiang, *et al.* Study on the integration process of Xi'an and Xianyang and urban expansion[J]. Journal of Remote Sensing, 2018, 22(2):347-359.[徐焕,付碧宏,郭强,等.西咸一体化过程与城市扩展研究[J].遥感学报,2018,22(2):347-359.]
- [31] GUAN Mingjie, YUAN Yanhong, RAN Muxi, *et al.* Influencing factors and peak value prediction of energy carbon emission in Shanxi Province based on STIRPAT model[J]. Chinese Coal, 2021, 47(9):48-55.[关敏捷,袁艳红,冉木希,等.基于STIRPAT模型的山西省能源碳排放影响因素及峰值预测[J].中国煤炭,2021,47(9):48-55.]
- [32] ZHANG M M, YANG Z K, LIU L Y, *et al.* Impact of re-

- newable energy investment on carbon emissions in China – An empirical study using a nonparametric additive regression model[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 785. DOI: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.147109
- [33] GAO C X, TAO S M, HE Y Y, *et al.* Effect of population migration on spatial carbon emission transfers in China [J]. *Energy Policy*, 2021, 156. DOI: 10.1016/J.ENPOL. 2021. 112450
- [34] LI J B, HUANG X J, CHUAI X W, *et al.* The impact of land urbanization on carbon dioxide emissions in the Yangtze River Delta, China: A multiscale perspective [J]. *Cities*, 2021, 116. DOI:10.1016/J.CITIES.2021.103275
- [35] Building characteristic industrial clusters, building a modern aviation new city, national Shaanxi aviation economic and technological development zone, Xi'an Yanliang National Aviation high tech industrial base [J]. *Electronic technology*, 2012, 25(3):127.[打造特色产业集群建设现代航空新城国家级陕西航空经济技术开发区西安阎良国家航空高技术产业基地[J].*电子科技*, 2012, 25(3):127.]
- [36] LI Ni. "Made in Gaoling" to "intelligent made in Gaoling"[N]. *Shaanxi Daily*, 2020-12-02(011).[李妮.“高陵制造”驶向“高陵智造”[N].*陕西日报*, 2020-12-02(011).]
- [37] MA Jingfu. Empirical study on environmental Kuznets curve of carbon emission in Liaoning Province[J]. *Energy Conservation*, 2021, 40(5):58-62.[马景富.辽宁省碳排放的环境库兹涅茨曲线实证研究[J].*节能*, 2021, 40(5):58-62.]

Study on the Spatialization of Carbon Emission in Xi'an based on the Luminous Data of LuoJia-01

ZHANG Yao, ZHANG Yuxin, ZHANG Yongjian,
GONG Chao, KONG Yaqian

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology,
Xi'an 710021, China)

Abstract: Based on the night lighting data of LuoJia 01 and the energy statistics of Xi'an, combined with the Arc-GIS spatial analysis method, this paper uses the high oligomeric model to spatially simulate the carbon emission of Xi'an in 2018, calculate and classify the carbon emission intensity of all districts and counties in the city, and study the distribution characteristics of carbon emission of all districts and counties in Xi'an. The results show that there is a good correlation between LuoJia-01 light data and carbon emissions, the linear correlation coefficient is 0.720 3, and the correlation coefficient of quartic function polynomial is the highest, which is 0.843 5; In terms of annual carbon emissions, Xi'an's carbon emissions show the spatial distribution characteristics of high in the central main urban area and low in the surrounding counties, which is a cluster distribution, and the clustering results are clustered in the high value area; There are many low-carbon emission intensity districts and counties in the city, and there are a few high-carbon emission intensity districts and counties. The industrial structure needs to be further adjusted to realize the green development model.

Key words: Night light data; High oligomers; Spatialization; Carbon emission intensity