

山东省能源消费碳排放时空格局研究

张 梁¹, 席武俊^{2*}

¹云南师范大学地理学部, 云南 昆明

²楚雄师范学院资源环境与化学学院, 云南 楚雄

收稿日期: 2025年3月8日; 录用日期: 2025年4月18日; 发布日期: 2025年4月28日

摘 要

能源消耗和碳排放增加, 加剧气候变化, 准确估算碳排放和了解碳排放空间分布, 是节能减排的基础。传统的碳排放估算仅通过统计数据计算省或区域碳排放量, 由于统计数据的缺失, 无法估算小空间尺度的碳排放。为了更好地了解市级碳排放空间分布, 文章利用NPP-VIIRS夜间灯光数据, 采用时空地理加权回归模型, 建立夜间灯光与能源消费碳排放的关系模型, 得到山东省市级能源消费碳排放空间分布图。结果表明: GTWR模型估算, 能源消费碳排放具有较高的精度, 能够展现山东省碳排放的空间分布特征。总体空间上, 山东省碳排放呈增长趋势, 主要分布在北部、南部、东部; 碳排放热点主要分布在东部的日照、潍坊、青岛、烟台; 分布重心在潍坊。研究结果可为山东省减排政策提供支撑。

关键词

夜间灯光, 能源消费, 碳排放, 山东

Research on the Spatiotemporal Pattern of Carbon Emissions from Energy Consumption in Shandong Province

Liang Zhang¹, Wujun Xi^{2*}

¹Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

²School of Resources, Environment and Chemistry, Chuxiong Normal University, Chuxiong Yunnan

Received: Mar. 8th, 2025; accepted: Apr. 18th, 2025; published: Apr. 28th, 2025

Abstract

The increase in energy consumption and carbon emissions has aggravated climate change. Accurately

*通讯作者。

文章引用: 张梁, 席武俊. 山东省能源消费碳排放时空格局研究[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(4): 577-585.
DOI: 10.12677/ag.2025.154057

estimating carbon emissions and understanding the spatial distribution of carbon emissions are the basis for energy conservation and emission reduction. Traditional carbon emission estimation only calculates provincial or regional carbon emissions through statistical data. Due to the lack of statistical data, it is impossible to estimate carbon emissions at a small spatial scale. In order to better understand the spatial distribution of carbon emissions at the municipal level, this paper uses NPP-VIIRS night light data and a spatiotemporal geographic weighted regression model to establish a relationship model between night light and energy consumption carbon emissions, and obtains a spatial distribution map of energy consumption carbon emissions at the municipal level in Shandong Province. The results show that the GTWR model estimates energy consumption carbon emissions with high accuracy and can show the spatial distribution characteristics of carbon emissions in Shandong Province. In terms of overall space, carbon emissions in Shandong Province are on the rise, mainly distributed in the north, south and east; carbon emission hotspots are mainly distributed in Rizhao, Weifang, Qingdao and Yantai in the east; the distribution center is in Weifang. The research results can provide support for Shandong Province's emission reduction policies.

Keywords

Night Lights, Energy Consumption, Carbon Emissions, Shandong

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

全球经济快速发展,城市化和工业化进程加快,推动了化石能源的消耗,二氧化碳排放量迅速增加,导致全球气候变化,加剧全球变暖,引发海平面上升、极端天气频发、生态系统失衡等问题[1]。国际多次召开气候会议,并达成政府间协议,促进节能减排,实现可持续发展。根据能源统计署统计,2007年中国成为碳排放最高的国家,至2020年,中国碳排放量占全球碳排放量的31% [2]。中国为最大的发展中国家,主动承担减排责任,提出2030年实现碳达峰,2060年实现碳中和目标。为应对气候变化,中国需控制碳排放总量和降低碳排放强度,而准确估算中、小尺度碳排放是节能减排,制定相关政策的基础。

目前,化石能源消耗产生大量二氧化碳排放,是全球变暖原因之一,能源消费碳排放估算成为研究热点[3] [4]。目前碳排放估算方法主要有:IPCC能源消费法、模型法、生命周期法、质量平衡法、实测法等[5]。IPCC能源消费法是一种自上而下的碳排放计算方法,计算简单、操作容易,因此,许多学者采用该方法进行碳排放估算。例如:郑继承[6]根据贵州省2001~2014年相关数据,利用IPCC能源消费法测度贵州省14年间居民生活直接和间接能源消费碳排放的动态变化特征。但中国碳排放统计所需要的数据主要来源于国家统计局部门,主要包括省级区域和重点城市,大多数市级、县级统计数据的缺失以及各个地方能源消费统计数据存在偏差,市级行政单位碳排放估算变得困难。夜间灯光遥感,被广泛用于多尺度估算多类社会经济发展指标[7] [8]。目前常用的夜间灯光数据集包括:DMSP-OLS数据和NPP-VIIRS数据,DMSP-OLS稳定夜间灯光遥感数据存在一些缺陷:辐射分辨率较低,导致灯光亮度的最大值为63,存在“过饱和”现象;而且在灯光边缘区会出现“溢出效应”。NPP-VIIRS数据在空间、时间和辐射分辨率等方面得到了提升,该数据不存在“过饱和”现象。但是其灵敏性较强,能够捕捉到冰雪、戈壁等反射光,夜间灯光数据中存在噪声和异常值,因此在使用DMSP-OLS和NPP-VIIRS数据均需要对数据进行预处理[9]。许多学者尝试运用夜间灯光数据估算碳排放,例如:苏泳娴[10]等基于

DMSP/OLS 夜间灯光影像实现了以市级为单位的碳排放估算。牛亚文[11]等基于 NPP-VIIRS 夜间灯光数据测算长株潭地区县域土地利用碳排放, 发现长株潭地区县域土地利用碳排放差异较为显著, 在波动中呈递减趋势。蓝皓新等[12]基于夜间灯光构建碳排放估算模型, 分析浙江省县域碳排放时空格局及影响因素研究; 杨琳琦等[13]以甘肃为例, 基于多视角, 利用夜间灯光数据与碳排放数据估算甘肃省碳排放; 多位学者研究表明夜间灯光与碳排放存在线性关系。目前研究多集中于国家、区域或省份地区, 对于小尺度区域研究仍有待加强。因此, 本研究对山东省、市两尺度碳排放量进行估算, 分析其时空演变特征, 为山东省能源结构调整, 制定减排政策提供支撑。

2. 研究区域、数据来源与研究方法

2.1. 研究区域

山东省位于中国东部沿海、黄河下游, 处于 $34^{\circ}23'N \sim 38^{\circ}17'N$, $114^{\circ}48'E \sim 122^{\circ}42'E$, 全省陆域面积 15.81 万平方公里, 毗邻海域面积约 15.86 万平方公里, 山东省辖设区的市有 16 个; 县级行政区 136 个。山东省中部山地突起, 西南、西北低洼平坦, 东部缓丘起伏, 属温暖带季风气候。2023 年山东省地区生产总值达 92068.7 亿元。

2.2. 数据来源

本文主要选取 2013 年~2019 年《中国能源统计年鉴》, NPP-VIIRS 夜间灯光数据下载于美国国家海洋与大气管理的美国国家地理数据中心的 VCM 版本数据, 山东省级和市级 2022 年行政区划矢量数据来源于中科院资源环境与数据平台。

2.3. 研究方法

2.3.1. NPP-VIIRS 数据处理

NPP-VIIRS 夜间灯光影像仅有 2015 和 2016 年为年度影像, 而在其余年份中, NPP-VIIRS 提供的影像数据为月度数据。年均 NPP-VIIRS 夜间灯光数据计算公式如下:

$$DN_i = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^{12} DN_{(n,i)} \quad (1)$$

式中, DN_i 和 $DN_{(n,i)}$ 分别代表 NPP-VIIRS 数据的第 i 个像元的 DN 值和第 n 月 i 像元的 DN 值, m 为数据月数。

NPP-VIIRS 夜间灯光数据能够准确的反应城市碳排放空间变化, 但存在冰雪、戈壁等反射光, 存在异常值, 因此要对夜间灯光数据进行预处理。NPP-VIIRS 卫星提供了自 2012 年 4 月起, 每月获取一次影像, 本次研究采用年均夜间灯光数据。首先, 将影像 DN 值小于 0 的像元赋值为 0;

$$DN_i = \begin{cases} 0, & DN_i < 0 \\ DN_i, & DN_i \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, DN_i 为夜间灯光 i 像元上的 DN 值。

为了消除极值的影响, 以山东省发展较好的地区为参考。根据 2023 年《山东统计年鉴》, 选取地区生产最高的青岛, 统计该地区夜间灯光的最高值为阈值, 山东省高于该值的 DN 值为极值, 将阈值替代该值, 公式如下:

$$DN_i = \begin{cases} DN_i, & DN_i < DN_{MAX} \\ DN_{MAX}, & DN_i \geq DN_{MAX} \end{cases} \quad (3)$$

式中, DN_i 为夜间灯光 i 像元上的 DN 值; DN_{MAX} 为统计得到的阈值。

基于中国的发展, 夜间灯光数据处于不断增强。因此, 假设, DN 值具有持续增长的趋势, 则下一年的 DN 值不低于前一年的 DN 值。基于此, 对多年夜间灯光影像进行校正, 公式如下:

$$DN_{(n,i)} = \begin{cases} DN_{(n,i)}, & DN_{DN_{(n,i)}} < DN_{DN_{(n+1,i)}} \\ DN_{(n+1,i)}, & DN_{DN_{(n,i)}} \geq DN_{DN_{(n+1,i)}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $DN_{(n,i)}$ 为 n 年像元 i 上的 DN 值; $DN_{(n+1,i)}$ 为 $n+1$ 年像元 i 上的 DN 值;

2.3.2. 碳排放计算

基于 IPCC 能源消费法进行山东省尺度碳排放计算, 本文计算山东 2012 年~2019 年能源消费碳排放量, 公式如下:

$$CO_2 = \sum_i^{11} FC_i \times EF_i \quad (5)$$

式中: i 为能源类型; FC_i 为 i 类型能源消费量, 本文选取原煤、洗精煤、焦炭、焦炉煤气、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气、天然气等 11 种化石能源; EF_i 为碳排放因子。具体碳排放因子如下表 1。

Table 1. Carbon emission factor
表 1. 碳排放因子

能源类型	碳排放因子(EF , t/t)
原煤	1.90
洗精煤	2.49
焦炭	2.86
焦炉煤气	0.73
原油	3.02
汽油	2.93
煤油	3.03
柴油	3.10
燃料油	3.17
液化石油气	3.13
天然气	2.16

2.3.3. 相关性检验

相关系数衡量两个变量之间相关程度的统计指标, 本文将夜间灯光影像与碳排放计算进行相关性分析, 本文采用皮尔逊相关检测, 公式如下:

$$R = \frac{\sum (CE - \overline{CE})(NTL - \overline{NTL})}{\sqrt{\sum (CE - \overline{CE})^2 \sum (NTL - \overline{NTL})^2}} \quad (5)$$

2.3.4. 碳排放估算

传统线性回归模型虽能揭示二者的整体关联, 难以同时考虑空间和时间的动态变化, 可能导致偏差。而时间地理加权回归模型(GTWR)可用于捕捉数据的空间和时间变化特征, 因此采用 GTWR 碳排放, 公式如下:

$$\ln CO_{2(i)} = \beta_0(u, v, t) + \beta_n(u, v, t) \ln NTL_{(i)} + \varepsilon_i \quad (6)$$

式中: $CO_{2(i)}$ 为 i 年碳排放; $\beta_0(u, v, t)$ 为截距; $\beta_n(u, v, t)$ 为斜率; $NTL_{(i)}$ 为 i 年灯光值; ε_i 为误差项。

2.3.5. 碳排放估算精度验证

为了验证 GTWR 模型对能源消费碳排放估算的可靠性, 计算 R^2 和均方根误差(RMSE), 公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (CO_i - \overline{CO_i})^2} \quad (7)$$

式中: n 为碳排放的年份数量; CO_i 为 i 年碳排放统计数据; $\overline{CO_i}$ 为 i 年碳排放估算数据。

2.3.6. 热点分析

热点分析有助于识别碳排放冷点区和热点区的空间分布。本研究采用 Getis-Ord G_i^* 分析山东省碳排放的空间聚集性, 确定高碳排放和低碳排放在空间上的聚集位置。通常使用标准化 Z 值检验 G_i^* 的统计意义, Z 值为正, 为高碳排放聚集; Z 值为负, 为低碳排放聚集[14]。本文, 使用自然断点法将 Z 值分为 5 类, 分别是冷点、次冷点、过渡、次热点、热点。

2.3.7. 标准差椭圆

标准差椭圆能够准确的揭示碳排放空间分布整体特征。通过中心、长短轴、方向角等参数对碳排放的空间分布进行描述。标准椭圆差的中心能够反映山东碳排放空间分布在省内的相对位置; 长半轴表示碳排放空间分布的方向, 短半轴为分布范围等。本文采用标准差椭圆多角度揭示山东省能源消费碳排放的空间分布及时空演化[15]。

3. 结果与分析

3.1. 相关性检验和精度分析

计算夜间灯光影像与碳排放相关性, 相关系数为 0.888, 相关性的 P 值(双尾) < 0.01 , 呈现较高的相关性。GTWR 模型进行碳排放估算, 其中 AICc 为 -19.82; 调整后 R^2 为 0.8369, RMSE 值为 3857.739485; 目前碳排放估算常用线性回归模型, 线性回归模型估算碳排放的 R^2 和 RMSE 值分别为 0.8182, 4174.288232; 结果表明, GTWR 模型的 R^2 和 RMSE 均优于线性回归模型, 更适合进行碳排放估算。

3.2. 总体特征分析

2012 年~2019 年山东省能源消费碳排放(图 1)总体来看, 碳排放呈现增加趋势, 碳排放总量由 2012 年的 137833.2508 万吨增长至 2019 年的 161394.9715 万吨, 年均增长率为 2.55%。2012 年~2015 年增长速度较慢, 呈下降趋势, 年均增长率为 1.91%; 2016 和 2017 年增长率出现大幅上涨, 年均增长率为 4.24%; 2018 年增长率下降, 下降至 1.81%, 2019 年增长率较为稳定, 增长率为 1.80%。如图 2 所示, 2012 年~2019 年山东省碳排放空间分布, 总体来看, 碳排放空间分布变化不大, 高碳排放地区主要分布在山东省北部、南部及东部地区, 分布较为聚集; 中部地区碳排放较少, 东部地区, 碳排放量有较为明显的减少趋势。

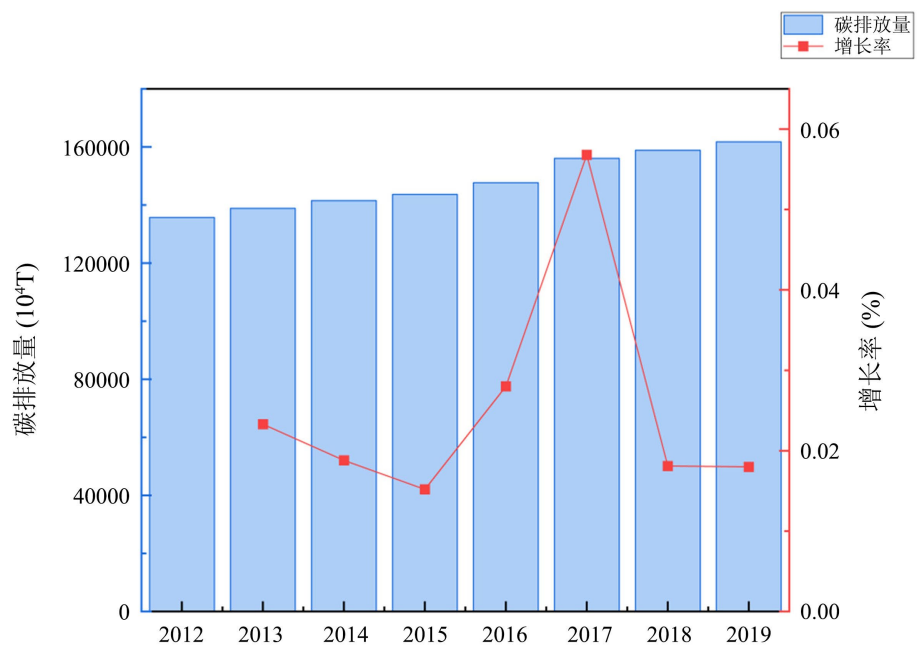


Figure 1. Carbon emissions and growth rates from 2012 to 2019
图 1. 2012~2019 年碳排放量与增长率

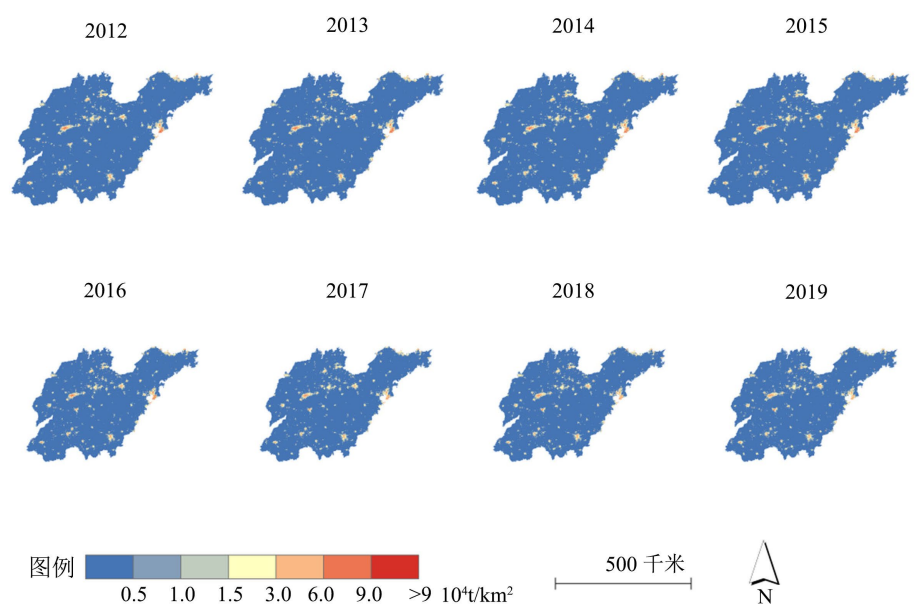


Figure 2. Carbon emissions and growth rates from 2012 to 2019
图 2. 2012~2019 年碳排放像素级空间分布

3.3. 市级碳排放空间特征

根据碳排放量, 将市级碳排小于 6000 万吨为低排放, 6000~9000 万吨为中排放、9000~12000 万吨较高排放, 大于 12000 万吨为高排放(图 3)。2012 年~2019 年市级碳排放总体变化不大; 具体而言, 2012 年~2016 年, 高碳排放地区均为: 济南、临沂、潍坊和青岛; 2017 年, 烟台增加为高排放地区; 较高碳排放地区, 在 2012 年~2016 年为: 济宁和烟台; 2017 年~2019 年为: 济宁和菏泽; 中排放地区, 变化较

大，2012 年和 2013 年仅有滨州、东营、淄博和菏泽；2014 年，聊城成为中排放地区；至 2017 年德州成为中排放地区，菏泽不再是中排放地区；2017 年~2019 年，中排放地区，主要分布在山东西北地区，济南市周围。低排放地区逐年减少，由西北向东南减少。

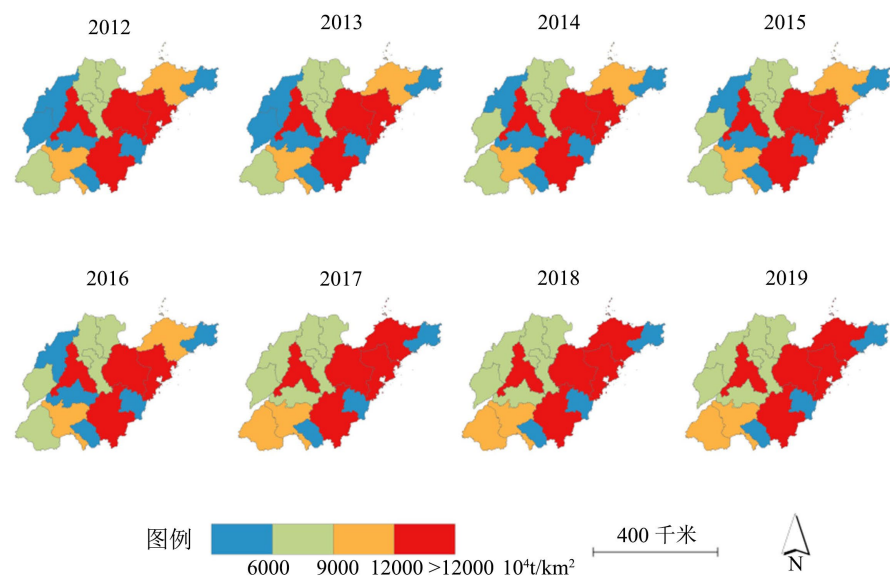


Figure 3. Spatial distribution of carbon emissions at the city level in Shandong Province from 2012 to 2019
图 3. 2012~2019 年山东省市级碳排放空间分布

通过计算 Getis-Ord G_i^* 得到 2012、2016、2019 年山东省能源消费碳排放冷热点图(图 4)。2012 年碳排放冷点从济南、聊城、济宁，2016 年临沂新增为冷点，至 2019 年仅剩济南冷点；次冷点主要分布山东的西部地区，以及威海市；2012 年碳排放过渡地区主要以东营、泰安和枣庄为主，至 2016 年仅剩东营和枣庄，2019 年过度地区发展为：东营、泰安、枣庄、德州和菏泽；2012 年~2019 年，次热点均为淄博；碳排放热点主要分布在山东东部地区，包括日照、潍坊、青岛、烟台。

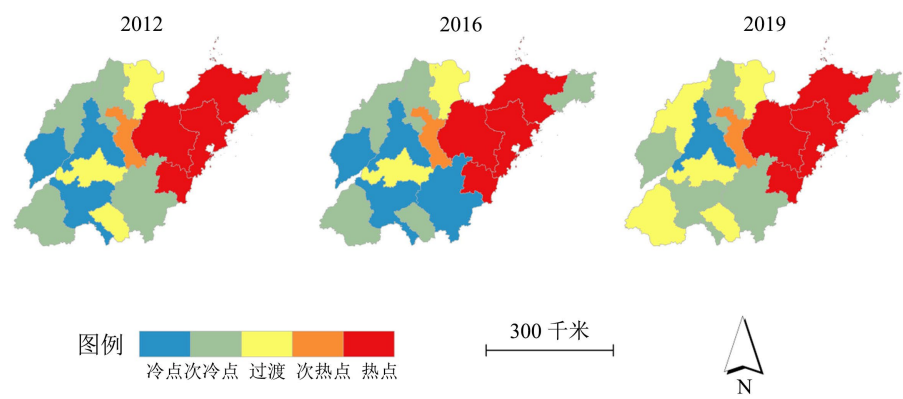


Figure 4. Distribution of carbon emission hotspots from 2012 to 2019
图 4. 2012~2019 年碳排放热点分布

2012 年~2019 年山东省碳排放空间变化如图 5 所示。2012 年~2019 年山东省碳排放重心在潍坊市内，先向东北移动，之后向西南方向移动，累计迁移距离约 10.29 千米；2012 年至 2019 年，主轴方向西南

- 东北方向; 椭圆的面积呈现逐渐增大的趋势, 表明山东省碳排放量呈上升趋势;

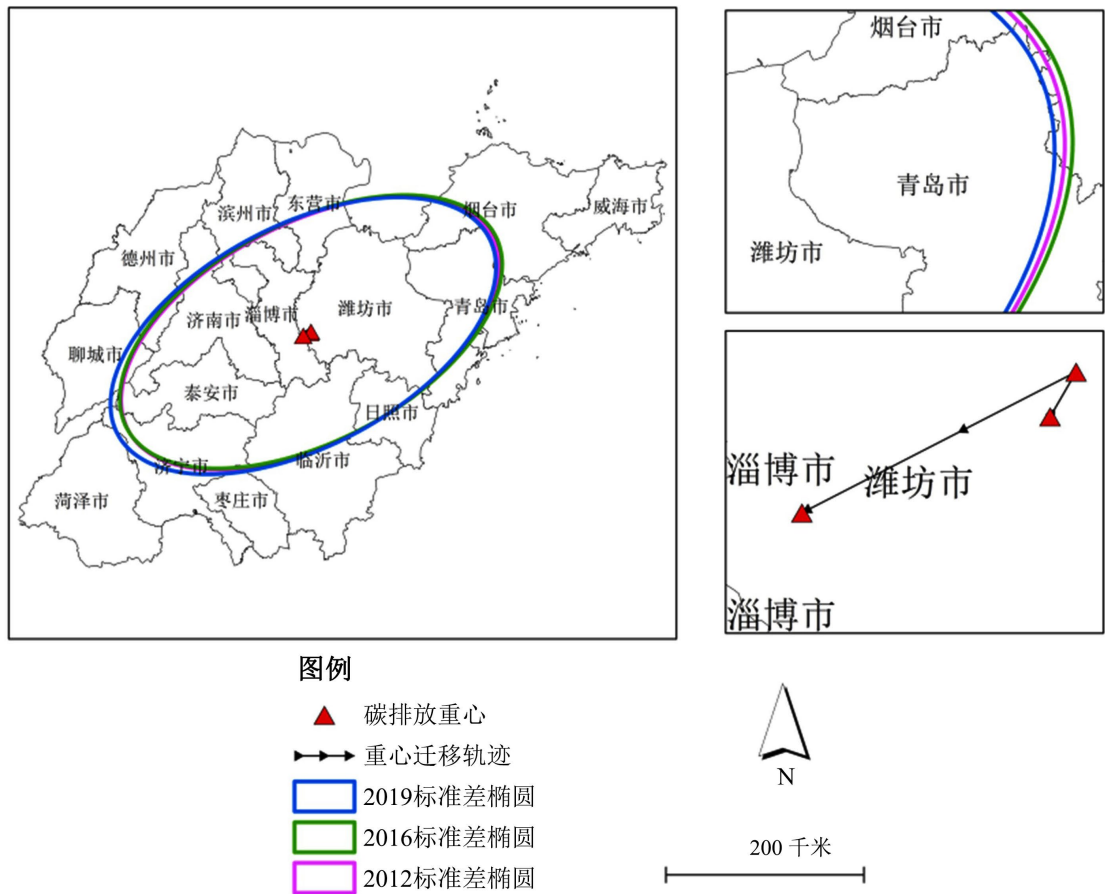


Figure 5. Standard deviation ellipse and center of gravity migration from 2012 to 2019
图 5. 2012~2019 年标准差椭圆及重心迁移

4. 结论与讨论

4.1. 结论

本研究基于 NPP-VIIRS 夜间灯光数据, 估算 2012 年~2019 年山东省能源消费碳排放, 揭示山东省碳排放空间分布情况。该模型对碳排放估算上具有较高的精度, 展示了山东省能源消费在市级行政单位的分布情况。山东省碳排放总体呈现上升趋势, 年均增长率为 2.55%。从空间上看, 高碳排放地区主要分布在山东省北部、南部和东部, 呈聚集性分布。基于市级行政单位碳排放, 2012 年~2019 年高碳排放地区主要以济南、临沂、潍坊和青岛为主, 2017 年以后, 烟台成为高碳排放地区; 排放热点地区均为: 日照、潍坊、青岛、烟台地区; 通过标准差椭圆, 碳排放主轴方向西南 - 东北方向, 山东省碳排放重心位于潍坊。研究结果为了解山东省能源消费碳排放空间分布提供了有力的支撑, 对未来精准制定减排政策提供数据基础。

4.2. 讨论

本研究揭示了山东省空间分布时空演变, 发现由于山东省沿海地区工业化和城市化程度相对较高, 能源消费碳排放较大, 青岛、烟台等城市工业发达, 经济活跃, 能源需求较高, 碳排放量相对较高; 高

碳排主要分布在济南、青岛、潍坊等工业城市；本文采用地理加权回归模型拟合夜间灯光影像与碳排放量，具有较高的拟合度 R^2 ，高于 Chen 等[16]的拟合度 R^2 ；在减排方面，应实行差异化的区域政策，城市群协同发展，加强能源结构调整和碳排放管理。在省内推动能源结构优化，减少化石能源依赖，推广绿色技术与低碳产业模式。

基金项目

云南师范大学研究生科研创新基金(YJSJJ23-B95)。

参考文献

- [1] 李春丽, 唐宏, 张志丹, 等. 基于不同土地利用的吉林省碳排放时空格局分析[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 250-254+284.
- [2] 刘占成, 王安建, 于汶加, 等. 中国区域碳排放研究[J]. 地球学报, 2010, 31(5): 727-732.
- [3] 齐玉春, 董云社. 中国能源领域温室气体排放现状及减排对策研究 [J]. 地理科学, 2004, 24(5): 528-534.
- [4] 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.
- [5] 刘明达, 蒙古军, 刘碧寒. 国内外碳排放核算方法研究进展[J]. 热带地理, 2014, 34(2): 248-258.
- [6] 郑继承. 城乡居民生活能源消费碳排放测算研究——以贵州省为例[J]. 生态经济, 2017, 33(6): 14-18.
- [7] 高倩. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的天山北坡城市群人口分布空间模拟[J]. 西北人口, 2017, 38(3): 113-120.
- [8] 潘竟虎, 李俊峰. 基于夜间灯光影像的中国电力消耗量估算及时空动态[J]. 地理研究, 2016, 35(4): 627-638.
- [9] 余柏漠, 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.
- [10] 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.
- [11] 牛亚文, 赵先超, 胡艺觉. 基于 NPP-VIIRS 夜间灯光的长株潭地区县域土地利用碳排放空间分异研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(9): 3847-3856.
- [12] 蓝皓新, 徐军. 浙江省县域碳排放时空格局及影响因素研究[J]. 地理空间信息, 2024, 22(10): 5-8+112.
- [13] 杨琳琦, 赵锐锋, 康丽芳, 等. 甘肃省碳排放时空演变及其影响因素的多尺度[J/OL]. 环境科学, 2024, 1-18. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202406275>, 2025-04-24.
- [14] 陈怡, 凌莉, 古圳威, 等. 陕西省碳排放时空格局演变及其影响因素[J]. 中国环境科学, 2024, 44(4): 1826-1839.
- [15] 韩聪, 张立新, 岳美亭. 基于 GWR 模型的京津冀县域碳排放强度时空演变及影响因素分析[J]. 湖南工业大学学报, 2023, 37(5): 68-77.
- [16] Chen, H., Zhang, X., Wu, R. and Cai, T. (2020) Revisiting the Environmental Kuznets Curve for City-Level CO₂ Emissions: Based on Corrected NPP-VIIRS Nighttime Light Data in China. *Journal of Cleaner Production*, 268, Article 121575. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121575>