

东北三省能源消费碳排放时空演变特征分析

孟欣

哈尔滨师范大学地理科学学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2023年11月13日; 录用日期: 2023年12月15日; 发布日期: 2023年12月25日

摘要

双碳背景下, 动态分析碳排放的时空演变特征, 对低碳经济的发展具有重要的科学依据和应用价值。基于夜间灯光数据和相关能源数据, 以东北三省及其各地级市为研究对象, 测算并分析了2003~2020年东北三省能源消费碳排放时空演变特征。结果表明: ① 从东北三省2003~2020年能源消费碳排放总量来看, 能源消费碳排放总量呈逐年增长趋势, 呈现出一种以中心城市为中心、辐射状扩展的态势。② 空间上呈现出东北部、西南部最高, 中部最低的分异特征; 各地级市碳排放总量存在明显的高值及低值区域。③ 碳排放具有显著的全局空间正相关, 形成了以辽宁省的高碳集聚区和以吉林省的低碳集聚区为主的城市集聚态势。总体来看, 东北三省能源消费碳排放整体呈现收敛态势, 增长速率有所下降, 但仍未达到碳峰值。

关键词

东北三省, 夜间灯光数据, 能源消费碳排放, 空间自相关

Analysis on the Spatiotemporal Evolution Characteristics of Energy Consumption and Carbon Emissions in the Three Northeastern Provinces

Xin Meng

College of Geographical Science, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: Nov. 13th, 2023; accepted: Dec. 15th, 2023; published: Dec. 25th, 2023

Abstract

In the context of dual carbon, dynamic analysis of the spatial and temporal evolution characteris-

tics of carbon emissions has important scientific basis and application value for the development of low-carbon economy. Based on nighttime light data and related energy data, taking the three Northeastern provinces and their prefecture-level cities as the research object, the spatial and temporal evolution characteristics of energy consumption carbon emissions in the three Northeastern provinces from 2003 to 2020 were measured and analyzed. The results show: ① Judging from the total carbon emissions from energy consumption in the three northeastern provinces from 2003 to 2020, the total carbon emissions from energy consumption show an increasing trend year by year, showing a trend of radial expansion centered on central cities. ② Spatially, it shows the differentiation characteristics of being highest in the northeast and southwest and lowest in the central part; There are obvious high and low value areas in the total carbon emissions of prefecture-level cities. ③ Carbon emissions have a significant global spatial positive correlation, forming an urban agglomeration trend dominated by high-carbon agglomeration areas in Liaoning Province and low-carbon agglomeration areas in Jilin Province. Overall, the carbon emissions from energy consumption in the three northeastern provinces have shown a trend of convergence, and the growth rate has declined, but has not yet reached the carbon peak.

Keywords

Three Northeastern Provinces, Night Light Data, Energy Consumption Carbon Emissions, Spatial Autocorrelation

Copyright © 2023 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

随着我国经济和社会的迅速发展,对能源的需求日益增长,与之相伴的是石油、天然气、煤炭等资源的大量消费,由此产生的大量温室气体导致的气候变暖问题日益凸显[1][2]。为改善此问题,全世界都把注意力转移到了碳减排上,作为碳排放居世界首位的中国,肩负着节能减排的重任。在此背景下,习近平总书记提出:“我国要在2030年前实现碳达峰,并力争到2060年实现碳中和”的“双碳”目标。近年来,东北地区生态环境治理成效显著。据统计,在新一轮东北老工业基地振兴战略背景下,为实现节能减排目标,东北地区也面临着发展经济与保护环境的双重压力[3]。因此,对东北三省能源消费碳排放进行科学测度和动态监测,全面掌握其时空演化规律,对缓解我国碳减排压力,实现绿色低碳可持续发展具有重要的现实意义。

目前,我国统计部门只公开了省域和少数发达城市的能源消费平衡表[4],关于能源消费碳排放的研究多关注国家和省域层面,空间上难以细化到更小尺度。近几年来,国内外对碳排放的时空演化规律进行了大量研究,同时已有不少学者试图将夜间灯光数据应用于能源消费碳排放的测算及分析中,并获得了较好的结果[5]。从证实夜间灯光数据与碳排放量之间存在相关关系可被用于碳排放的估算与模拟[6][7],到应用于国家、省级等不同的研究尺度[5][8][9],再到探索影响碳排放的关键因素[5][10][11][12]。随着研究的不断推进,部分学者将关注的重点放在了DMSP/OLS与NPP/VIIRS两种夜间灯光数据在不同尺度、不同领域碳排放估算精度的比较分析上来[13]。因此,基于夜间灯光数据,以市级精细化为基础分析尺度,模拟能源消费碳排放量,科学合理地分析能源消费碳排放的时空变化特征,对我国制定差异化的减排策略和指导低碳经济发展具有重要意义。

基于此,本研究拟以我国东北三省2003~2020年的夜间灯光数据和东北地区的能源统计资料为基础,

构建各省灯光总值与能源消费碳排放的关联模型，反演东北三省地级市 2003~2020 年的碳排放，系统分析 2003~2020 年东北三省地级市碳排放时空演变特征，为东北三省科学制定区域碳减排工作方案及绿色发展措施提供一定的科学参考。

2. 研究区和研究数据(Study area and data)

2.1. 研究区概况

东北三省位于我国秦岭 - 淮河以北东部季风区，大部分地区属于温带季风气候，东南部临海，位于渤海以北，由北向南依次是黑龙江省、吉林省和辽宁省，包括 34 个地级城市、一个地区(大兴安岭地区)和一个自治州(延边朝鲜族自治州)，行政区域范围内经纬度跨度较大(经纬度：118°05'~135°06'E；38°43'~53°33'N)。该区域自然资源富庶，具有广泛分布且类型多样的矿产资源，是我国重要的矿产生产基地，也是全国石油生产的主力地区，还有抚顺、鸡西、鹤岗等著名煤矿。东北三省是中国的老工业基地，这就意味着东北三省可能具有严重的能源消耗和碳排放问题。

2.2. 数据来源

(1) 夜间灯光数据。2000~2013 年 DMSP/OLS 稳定夜间灯光数据，像元灰度值范围为 0~63，空间分辨率为 30"。2012~2020 年 NPP/VIIRS 影像，空间分辨率为 15"。两种数据来源于 NOAA 网站的 NGDC 数据中心(<https://www.ngdc.noaa.gov/eog/download.html>)。

(2) 能源统计数据。东北三省的能源消费数据来源于《中国能源统计年鉴》(2003~2020 年)中的终端能源消费平衡表。

(3) 其他相关数据。主要包括中国 1:400 万的省级、市级矢量行政界线，来源于国家基础地理信息中心(<http://www.ngcc.cn>)。

3. 研究方法(Research methods)

3.1. 能源消费碳排放测算及反演

3.1.1. 东北三省省级能源消费碳排放测算

基于统计数据计算能源消费碳排放量，采用 IPCC 公布的《2006 温室气体排放清单》来计算能源产生的碳排放量[14]，公式[14] (1)如下：

$$CE = \frac{44}{12} \times \sum_{j=1}^{10} K_j E_j \quad (1)$$

式中： j 为能源类型， E 为能源消费量， K 为碳排放系数。其中，能源系数来源于 IPCC 碳排放计算指南缺省值[15]。

3.1.2. 东北三省地级市能源消费碳排放反演

根据不变区域法对原始的 DMSP/OLS 进行校正和去饱和处理，通过中低阈值法对原始的 NPP/VIIRS 进行去噪处理[16]。在处理好两种夜光影像的前提下，对 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 进行整合，得到由 NPP/VIIRS 演变而来的模拟的 DMSP/OLS。

采用多年来的城市空间尺度上分割对应年度的 DMSP/OLS 夜间灯光数据，获得各省 2003~2020 年的夜间灯光数据，并对各省 2003~2020 年的灯光总值进行估算[17]。在此基础上，本研究将灯光总值与省级能源消费碳排放量统计值进行拟合分析(见图 1)。根据拟合结果可知，幂函数的综合拟合结果最优，拟合公式(2)如下：

$$y = ax^b \tag{2}$$

式中： x 是各省份夜间灯光数据总值； y 是相应省份能源消费碳排放量； a 为参数， b 为常数项。

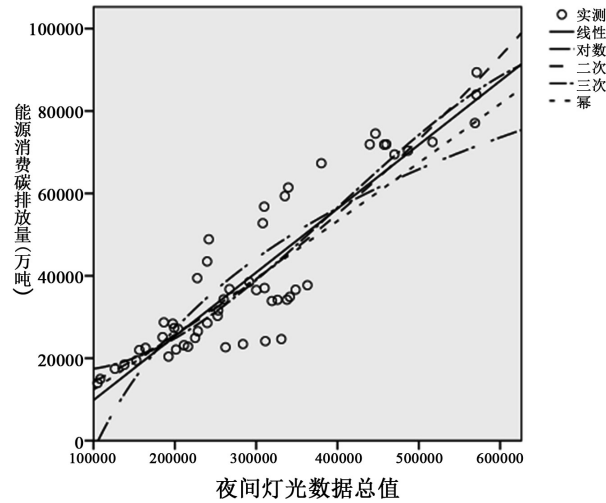


Figure 1. Fitting curve of total nighttime lighting value and energy consumption and carbon emissions in the three northeastern provinces
图 1. 东北三省夜间灯光总值与能源消费碳排放量拟合曲线

3.2. 空间自相关分析

目前用于空间自相关性度量的方法很多，其中普遍认为 Moran’s I 指数方法是用于统计分析空间分布特征和揭示空间分布差异的有效研究手段[18]。Moran’s I 指数包括全局 Moran’s I 指数(Global Moran’s I)和局部 Moran’s I 指数(LISA)。

全局 Moran’s I 指数能有效反应区域整体集聚情况，其计算公式[18] (3)为：

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x})}{s^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \tag{3}$$

式中： $s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ ， n 是空间单元数目； x_i 、 x_j 表示空间单元 i 和 j 的属性值； W_{ij} 是空间权重系数矩阵，表示各空间单元临近关系。

全局 Moran’s I 指数值介于-1~1，当 $I > 0$ 时，研究区域在空间分布上呈现正空间自相关，观测属性呈集聚空间格局。

全局 Moran’s I 指数可以判断观察值在空间上整体的分布情况，但无法显示出集聚的位置及区域相关的程度。而局部 Moran’s I 指数(LISA)弥补了这一局限，可以有效揭示空间参考单元与其邻近的空间单元属性值之间的相似性或相关性，识别空间集聚和空间孤立，探测空间异质等。局部 Moran’s I 指数可通过公式(4)和公式(5)求得[19]。

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{s^2} \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x}) \tag{4}$$

$$I_i = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} = Z_i' \sum_i W_{ij} Z_j \tag{5}$$

式中： x_i 、 x_j 表示空间单元*i*和*j*的属性值， W_{ij} 是空间权重系数矩阵，表示各空间单元邻近关系， Z_i' 、 Z_j' 是经过标准差标准化的观测值。

当 $I_i > 0$ 时，区域空间单元*i*与相邻空间单元的观测属性存在较强的正空间自相关，呈局部空间集聚；当 $I_i < 0$ 时，存在较强的负空间自相关，呈局部空间离散。

4. 结果和分析(Results and analysis)

4.1. 时空演变特征分析

4.1.1. 东北三省省级能源消费碳排放时间变化特征

根据东北三省 2003~2020 年能源消费碳排放量绘制其时间变化趋势图，如图 2 所示。由图可知，东北三省能源消费碳排放量均随时间增加而增加，其中黑龙江省与吉林省增速相近，而辽宁省增速较其他两省更为快速。

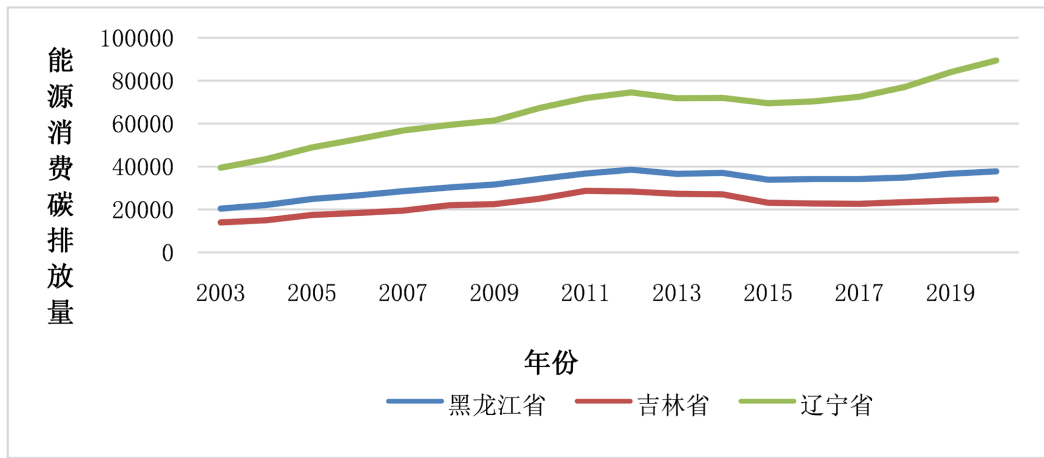


Figure 2. Temporal change trend of energy consumption carbon emissions in the three northeastern provinces from 2003 to 2020

图 2. 东北三省 2003~2020 年能源消费碳排放量时间变化趋势图

4.1.2. 东北三省地级市能源消费碳排放空间变化特征

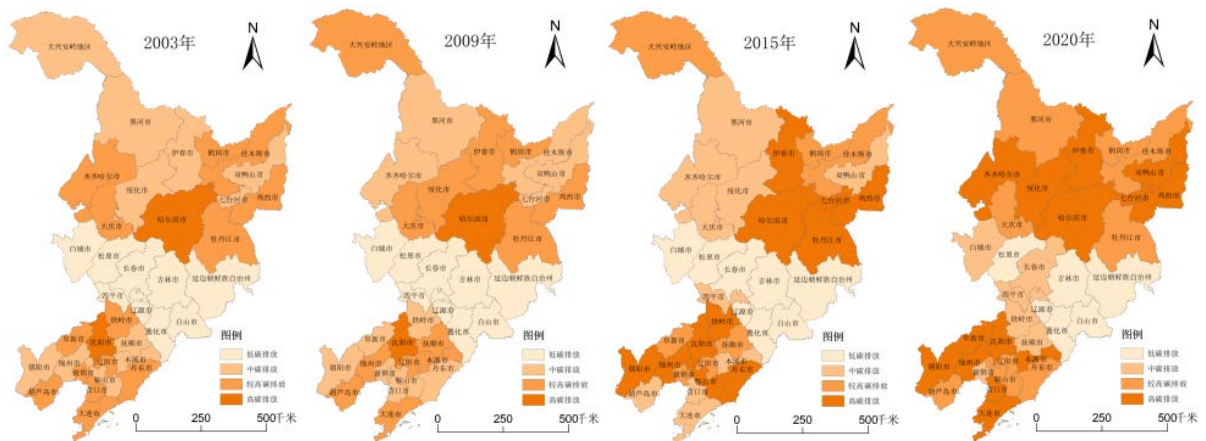


Figure 3. Evolution characteristics of carbon emissions at the municipal level in the three northeastern provinces

图 3. 东北三省市级尺度碳排放演变特征

以东北三省 2003、2009、2015、2020 年的各地级市能源消费碳排放数据为基础, 借助 Jenks 自然断点分级, 将东北三省各地级市能源消费碳排放划分为低碳排放型、中碳排放型、较高碳排放型、高碳排放型 4 个等级的碳排放区(见图 3)。2003、2009、2015、2020 年的能源消费碳排放量均呈现出明显的空间分布差异, 即东北部、西南部最高, 中部最低。具体来说, 2003~2020 年东北三省能源消费碳排放总量持续增长, 高碳排放地区呈现多核心式分布, 且演变成以中心城市为核心, 逐渐呈放射状向外扩张, 最终形成高碳排放核心地区的连通态势, 其中以辽宁省的高碳排放地区表现得最为显著, 吉林省和黑龙江省向北呈逐年增多趋势。辽宁省各地级市的碳排放量普遍偏高, 东北三省较低碳排放区和中等碳排放区数量增多且有向北扩张的态势。究其原因, 辽宁省作为东北老工业基地, 第二产业比重较大, 碳排放量较高东北部地区, 耕地面积大、农业发达, 第二产业比重相对较小, 因此黑龙江省大兴安岭地区、黑河市和伊春市的碳排放量始终相对较低。

4.2. 空间自相关分析

4.2.1. 全局空间相关性

2003~2020 年东北三省能源消费碳排放量全局 Moran's I 指数如表 1 所示, 表明东北三省能源消费碳排放量一直存在正向的空间相关性, 且空间相关性逐步增强, 可见, 2003~2020 年期间我国能源消费碳排放量在整体上空间聚集现象越来越明显。

Table 1. Summary of the overall Moran's I index of energy consumption and carbon emissions in the three northeastern provinces from 2003 to 2020

表 1. 东北三省 2003~2020 年能源消费碳排放量全局 Moran's I 指数汇总

年份	全局 Moran's I 指数	年份	全局 Moran's I 指数	年份	全局 Moran's I 指数
2003	0.281	2009	0.356	2015	0.364
2004	0.395	2010	0.410	2016	0.353
2005	0.436	2011	0.394	2017	0.371
2006	0.384	2012	0.323	2018	0.317
2007	0.345	2013	0.355	2019	0.402
2008	0.407	2014	0.372	2020	0.445

4.2.2. 局部空间相关性

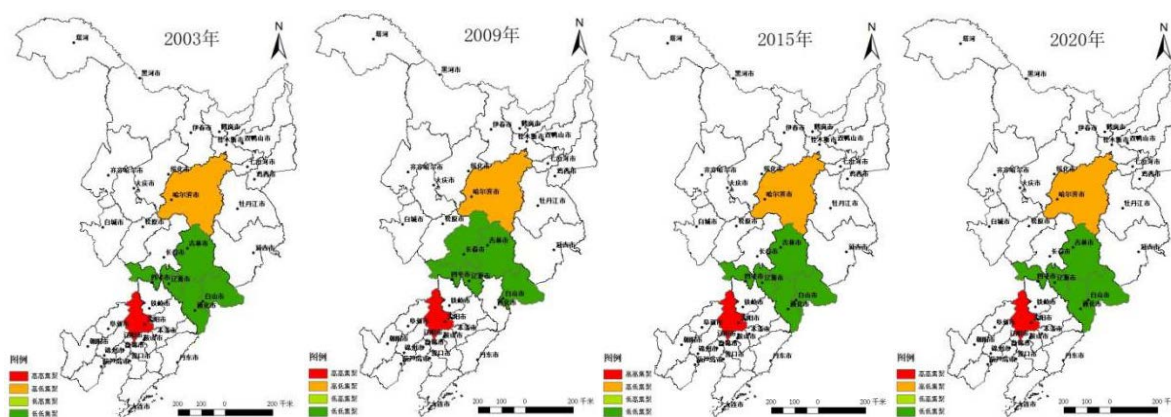


Figure 4. Aggregation distribution map of total energy consumption carbon emissions in prefecture-level cities in the three northeastern provinces from 2003 to 2020

图 4. 东北三省 2003~2020 年地级市能源消费碳排放总量集聚分布图

为进一步探索东北三省能源消费碳排放量的空间集聚类型,计算 2003~2020 年东北三省的 Lisa 指数,并划分出高高集聚、低低集聚、低高集聚和高高集聚 4 种类型。结果发现(见图 4),高高集聚主要发生在区域经济发达的辽宁省,低低集聚则主要分布在经济发展一般的吉林省中部,高低集聚现象则发生在黑龙江省南部的省会城市哈尔滨市。辽宁省作为我国经济发展水平较好地区,与经济不发达的黑龙江省的能源消费碳排放分布格局形成鲜明对比,可见,区域经济发展水平差异是碳排放空间格局的决定因素。

5. 结论(Conclusions)

1) 已有学者多选择经济较发达的地区进行研究,本文对少有学者关注研究的东北三省地区能源消费碳排放时空变化特征进行分析,结果显示,2003~2020 年东北三省能源消费碳排放总量呈波动中递增的变化趋势,但增长速率略有下降,整体呈收敛态势且尚未达到碳峰值。

2) 空间维度上看,东北三省能源消费碳排放分布态势呈东北部、西南部最高,中部最低的特征。各地级市碳排放总量存在明显的高值及低值区域,高值区域以辽宁省为主,低值区域主要分布在中部的吉林省。

3) 目前多数研究均立足于国家或省域尺度,较少关注更小尺度范围的能源消费碳排放特征,本文将研究尺度细化到地级市,研究发现,市域尺度能源消费碳排放放在各个年份全局 Moran's I 指数值均为正,具有显著空间正相关;市域能源消费碳排放量之间差距并不显著,高高集聚主要发生在区域经济水平较高的辽宁省,低低集聚则主要分布在经济发展水平中等的吉林省中部,说明市域碳排放量与其周边地级市的碳排量差异较小。

参考文献

- [1] 关伟,李书妹,许淑婷.东北三省碳排放时空演变多尺度分析——基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据[J].生态经济,2022,38(11):19-26.
- [2] 刘燕华,葛全胜,何凡能,程邦波.应对国际 CO₂ 减排压力的途径及我国减排潜力分析[J].地理学报,2008(7):675-682.
- [3] 张余,姜博,赵映慧,赵毅,邹铁安,薛睿.东北三省土地利用碳排放时空格局及影响因素研究[J].地域研究与开发,2022,41(4):150-156.
- [4] 王少剑,苏泳娴,赵亚博.中国城市能源消费碳排放的区域差异、空间溢出效应及影响因素[J].地理学报,2018,73(3):414-428.
- [5] 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.
- [6] Elvidge, C.D., Imhoff, M.L., Baugh, K.E., et al. (2001) Night-Time Lights of the World: 1994-1995. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **56**, 81-99.
- [7] Shi, K.F., Yu, B.L., Zhou, Y.Y., et al. (2019) Spatiotemporal Variations of CO₂ Emissions and Their Impact Factors in China: A Comparative Analysis between the Provincial and Prefectural Levels. *Applied Energy*, **233-234**, 170-181.
- [8] 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.
- [9] 苏泳娴,陈修治,叶玉瑶,吴旗韬,张虹鸥,黄宁生,匡耀求.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.
- [10] 刘玉珂,金声甜.中部六省能源消费碳排放时空演变特征及影响因素[J].经济地理,2019,39(1):182-191.
- [11] 赵先超,彭竞霄,胡艺觉,等.基于夜间灯光数据的湖南省县域碳排放时空格局及影响因素研究[J].生态科学,2022,41(1):91-99.
- [12] Zhao, J.C., Chen, Y.L., Ji, G.X., et al. (2018) Residential Carbon Dioxide Emissions at the Urban Scale for County-Level Cities in China: A Comparative Study of Nighttime Light Data. *Journal of Cleaner Production*, **180**, 198-209.
- [13] Chen, Z.Q., Yu, B.L., Yang, C.S., et al. (2021) An Extended Time Series (2000-2018) of Global NPP-VIIRS-Like Nighttime Light Data from a Cross-Sensor Calibration. *Earth System Science Data*, **13**, 889-906.

-
- [14] 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]: [博士学位论文]. 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2015.
- [15] 宋杰鲲. 山东省能源消费碳排放预测[J]. 技术经济, 2012, 31(1): 82-85+94.
- [16] 肖亚来. 夜光遥感技术支持下湖南省城市能源消费碳排放研究[D]: [硕士学位论文]. 赣州: 江西理工大学, 2021.
- [17] 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.
- [18] 张青峰, 吴发启, 赵龙山, 卢柳叶, 兰敏. 基于空间分析方法的山西省县域经济空间差异分析[J]. 生态经济(学术版), 2011(1): 18-22.
- [19] 林琳, 马飞. 广州市人口老龄化的空间分布及趋势[J]. 地理研究, 2007(5): 1043-1054.