

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2024.02.005

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:郭晓佳,李晋强.煤炭资源型地区碳排放时空演变及影响因素——以山西省为例[J].西安理工大学学报,2024,40(2):193-203.

GUO Xiaojia, LI Jinqiang. Spatial-temporal evolution and influencing factors of carbon emissions in coal-based areas: taking the Shanxi as an example[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2024, 40(2): 193-203.

煤炭资源型地区碳排放时空演变及影响因素

——以山西省为例

郭晓佳, 李晋强

(山西师范大学 地理科学学院, 山西 太原 030000)

摘要:煤炭资源型地区是碳减排的重点关键区域,其节能降碳对于全国实现碳达峰、碳中和目标具有重要意义。本文借助融合校正后的DMSP/OLS与NPP-VIIRS夜间灯光数据,构建能源消费碳排放与夜间灯光数据模型,对典型煤炭资源型省份山西省碳排放量进行测算,并采用探索性时空分析、地理探测器等方法对山西省县域碳排放的时空格局演变及影响因素进行分析。结果表明:①2000—2020年,山西省碳排放量呈现不断增长的趋势,2010年以后增速大幅度放缓,呈现收敛态势;②山西省碳排放呈现显著的正向全局自相关,形成了以太原与晋中为中心的高-高集聚,低-低集聚则主要分布于忻州西部和大同东部;③经济发展水平、人口规模、固定资产投资、城镇化率对碳排放量的增长具有促进作用,而产业结构优化对碳排放量的增长具有抑制作用。

关键词:煤炭资源型地区;碳排放;时空演变;影响因素;地理探测器

中图分类号: X24

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2024)02-0193-11

Spatial-temporal evolution and influencing factors of carbon emissions in coal-based areas: taking the Shanxi as an example

GUO Xiaojia, LI Jinqiang

(College of Geographical Science, Shanxi Normal University, Taiyuan 030000, China)

Abstract: Coal resource-based areas are the key regions of carbon emission reduction, whose energy conservation and carbon reduction are of great significance to achieve the goal of carbon peak and carbon neutrality in China. In this study, nighttime light data of Defense Meteorological Satellite Program/Operational Line Scanner (DMSP/OLS) and National Polar-orbiting Partnership Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (NPP-VIIRS) after fusion correction are used. The data model of carbon emissions from energy consumption and nighttime light is constructed to measure the carbon emissions of counties in Shanxi Province, a typical coal resource-based region. Meanwhile, the exploratory spatial-temporal analysis and geographical detector are used to analyze the spatial and temporal pattern evolution and influencing factors of carbon emissions of all counties in Shanxi. The results show that: ①From 2000 to 2020, carbon emissions in Shanxi show a growing trend, but the growth rate slows down significantly from 2010. ②Carbon emissions show a significant positive global autocorrelation, forming a high-high agglomeration centered on the provincial capital Taiyuan and Jinzhong, while low-low agglomeration is mainly dis-

收稿日期: 2023-04-09; 网络首发日期: 2023-11-03

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20231103.1001.004.html>

基金项目: 教育部人文社会科学研究青年基金资助项目(20YJC630032); 山西省党的十九届六中全会及省第十二次党代会专项课题资助项目(2022YD062); 教育部春晖计划合作科研资助项目(HZKY20220513)

第一作者: 郭晓佳,女,博士,副教授,研究方向为资源城市绿色转型、区域可持续发展。E-mail: guoxj@sxnu.edu.cn

通信作者: 李晋强,男,硕士生,研究方向为城市韧性与区域可持续发展。E-mail: lijinqiang2021@163.com

tributed in the western regions of Xinzhou and the eastern counties of Datong. ③The level of economic development, population size, fixed asset investment and urbanization rate have a positive effect on the increase of carbon emissions, while the optimization of industrial structure has an inhibitory effect on the increase of carbon emissions.

Key words: coal resource-based areas; carbon emissions; spatial-temporal evolution; influencing factors; geographical detector

温室气体排放带来了气候变暖、海平面上升等一系列全球性问题。近年来,减少二氧化碳排放、发展绿色低碳经济成为全球共识。我国也制定了一系列节能减排目标。这些目标的提出对资源型城市转型和绿色高质量发展提出了更高的要求^[1]。作为传统煤炭资源型地区的山西,在实现经济结构转型升级与高质量发展上面临巨大挑战。因此,如何科学准确地测算碳排放情况成为山西实现双碳目标的前提和迫切要求。

近年来,国内外学者针对碳排放时空格局的演变及影响因素开展了大量的研究,研究尺度涉及国家^[2-3]、流域^[4-5]、城市群^[6-7]、省域^[8]等多个尺度。目前在碳排放量核算方面,学者主要通过由 IPCC 所提出的系数进行估算以及对 DMSP/OLS 与 NPP-VIIRS 夜间灯光数据进行反演两种方式得到。Choi 等^[9]基于 IPCC 方法估算了韩国 1961—1988 年的碳排放,认为石油等化石燃料消费量的增长是导致韩国碳排放增长的主要原因。程叶青等^[10]通过对中国 30 个省份 1997—2010 年碳排放强度进行估算,得出中国能源消费碳排放强度在省区尺度上具有明显的空间集聚特征,且集聚程度呈现出不断增强的态势。Elvidge 等^[11]和 Christopher 等^[12]首次提出夜间灯光数据与碳排放量之间存在着相关性,为其应用于碳排放领域的研究提供了理论支撑。于博等^[13]基于夜间灯光数据,对哈长城市群县域碳排放进行了深入研究,结果表明哈长城市群县域碳排放存在着显著的空间集聚性,空间溢出效应明显。

而对于碳排放影响因素的研究,学者们主要采用 STIRPAT 模型^[14-15]、LMDI 分解法^[16-17]、环境库兹涅茨曲线^[18]等方法,研究发现人口密度、经济发展、城镇化等因素对碳排放增长具有重要影响。近年来,空间计量方法、空间探索性数据分析及地理探测器等方法也开始广泛应用于碳排放空间分异及驱动因素的研究之中。田娟娟等^[19]利用地理探测器对中国省域碳排放影响因素进行深入研究,得出经济发展水平和固定资产投资是碳排放增长的主要驱动因素。Mousavi 等^[20]采用 LMDI 分解法对伊朗碳排放的驱动因素进行了分析,得出消费的增加是伊朗碳排放的主要驱动力。Zhang 等^[21]基于

STIRPAT 模型,从全国和不同区域多种尺度评估了多种因素对碳排放的影响,结果表明研发投入和能源清洁程度对碳减排具有重要作用。

目前,对于中国碳排放时空特征的研究主要集中在东部经济发达地区,且研究尺度相对较大。煤炭资源型地区在控制碳排放增长中起着重要作用,但对煤炭资源型地区的碳排放研究很少,尤其缺乏深入到县级尺度。从县级尺度探讨分析煤炭资源型地区碳排放时空格局,对于制定差异化的精准减排措施和实现碳减排目标至关重要。山西作为中国煤炭大省,科学测定并分析其碳排放量,对山西因地制宜制定碳减排政策以及全国其他资源型地区早日实现碳达峰、碳中和目标具有重要的借鉴意义与实践价值。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

山西省地处黄河流域中部,东依太行山,与河北省为邻;西、南依吕梁山、黄河,与陕西省、河南省相望;北依古长城,与内蒙古自治区毗连。山西省煤炭储量 2.71×10^{11} t,居全国各省之首,是典型的煤炭资源型地区之一。山西省含煤面积达到了 6.48×10^4 km²,约占其国土总面积的五分之二,主要分布在大同、河东、宁武、西山、霍西、沁水六大煤田。2021 年,山西省原煤产量突破 1×10^9 t,占中国原煤产量高达 29.31%。据统计,2020 年山西省能源消费量达到 2.1×10^8 t,占中国能源消费总量的 4.3%,位居中国第 9 位,而与此同时山西的 GDP 只有 1.76×10^{12} 元,位居中国各省份第 21 位。能源利用率不高是摆在山西面前的突出问题。山西作为煤炭资源的主要输出地区和消费地区,在全国碳减排大局中居于突出地位。

1.2 数据来源及处理

本文的数据来源包括夜间灯光数据、能源消费数据、社会经济数据三部分。其中夜间灯光数据分为两部分,分别为 2000—2012 年 DMSP/OLS 夜间灯光数据和 2012—2020 年 NPP/VIIRS 数据,均来源于美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)下属的国家地球物理数据中心(National Geophysical Data

Center, NGDC)。能源消费及社会经济数据主要来源于 2000—2020《山西省能源年鉴》、《山西统计年鉴》及各地市国民经济与社会发展统计公报。标准煤折算系数及碳排放系数来自《2006 年国家温室气体排放清单指南》。

1.3 研究方法

1.3.1 夜间灯光数据的处理

数据处理主要分为以下三个步骤,分别为 DMSP/OLS 灯光数据预处理、NPP/VIIRS 灯光数据预处理和 DMSP/OLS 灯光数据与 NPP/VIIRS 灯光数据的融合校正。

1) DMSP/OLS 灯光数据预处理

首先对 2000—2013 年的 DMSP/OLS 灯光数据进行重投影、重采样与裁剪处理,进而得到山西省行政界线的夜间灯光影像。因 DMSP/OLS 灯光数据存在像元饱和等问题,因此采用增强型植被指数对其进行饱和校正。然后通过相对不变目标区域法对 1992—2013 年山西省 DMSP-OLS 影像进行年内融合校正,最后对其进行年际校正。对于部分缺失数据的像元,其 DN 值用 0 来代替。通过以上步骤,得到 2000—2013 年山西省 DMSP/OLS 夜间灯光数据集。

2) NPP/VIIRS 灯光数据预处理

同样首先对 2012—2020 年 NPP/VIIRS 夜间灯光影像进行年度的合成、重投影与重采样及裁剪。与 DMSP/OLS 数据相比,NPP/VIIRS 数据虽然不存在像元饱和等问题,但由于受到偶然噪声的影响从而存在异常值,故采用 Zhao 等^[22]提出的方法首先将异常值进行剔除处理。最后对 NPP/VIIRS 数据进行年际之间的连续校正,以确保后一年的 DN 值始终大于前

一年,并用 0 来替代缺失值。通过年内合成、稳定性校正和年际间的连续校正,最终得到山西省 2012—2020 年校正后的 NPP/VIIRS 夜间灯光数据集。

3) DMSP/OLS 灯光数据与 NPP/VIIRS 灯光数据融合校正

理论上不同传感器相同年份所采集的夜光数据的亮度值应大致相同。由于 DMSP/OLS 数据更新时间为 1992—2013 年,而 NPP/VIIRS 数据更新则始于 2012 年 4 月。鉴于此,本文以 DMSP/OLS 数据为基准,将 NPP/VIIRS 数据作为校正对象,构建 2012 和 2013 年两套数据县域尺度数据总亮度值(TDN)的回归关系,得出其回归方程为 $y=0.53824x$,其中 y 为 2012—2013 年的 DMSP-OLS 夜间灯光数据, x 为 2012—2013 年 NPP/VIIRS 夜间灯光数据,拟合优度为 0.998 4。基于此回归方程对 2014—2020 年 NPP/VIIRS 数据进行 DMSP/OLS 尺度时间序列连续性校正,最后得到融合校正后的 2000—2020 年山西省 DMSP-OLS 尺度夜间灯光数据集。

1.3.2 能源消费碳排放测算与模拟

1) 能源消费碳排放测算

本文采用联合国气候变化专门委员会(IPCC)提出的计算方法,选取原油、煤炭等 9 种主要能源的消费统计数据数据进行核算,计算公式为:

$$C = \frac{44}{12} \times \sum_{i=1}^9 k_i E_i \quad (1)$$

式中: C 为碳排放总量; i 表示选取能源种类的数量; k_i 为第 i 类能源的碳排放系数; E_i 第为 i 类能源的消费量。各类化石能源的折标准煤系数和碳排放系数见表 1。

表 1 主要化石能源的碳排放系数

Tab. 1 Standard coal coefficient and carbon emission coefficient for energy conversions

能源种类	煤炭	焦炭	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油	天然气	电力
折算标准煤系数	0.714 3	0.971 4	1.428 6	1.471 4	1.471 4	1.457 1	1.428 6	1.330 0	0.345 0
碳排放系数	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 0

注:数据来源:《IPCC 国家温室气体排放清单指南》。

2) 能源消费碳排放模拟

本文利用校正后的夜间灯光数据与省级尺度上能源消费统计数据所测算的碳排放之间建立相关关系,同时考虑降尺度到栅格单元的精度问题,采取不含截距的线性回归,建立山西省的 DN 总值与相应的碳排放量之间的相互关系。相关研究表明,夜间灯光 DN 值越大,碳排放量越大,且省域、县域尺度上与像元尺度上保持一致的相关关系^[1,23]。基于此,本文将校正后的夜间灯光数据裁剪后得到山西省夜间灯光数据,统计出山西省 2000—2020 年夜间灯光亮度总

值 D ,并与 2000—2020 年山西省省级尺度相应年份的碳排放总量 C 进行拟合分析,得到 $C=1.0205D$ 的回归方程,拟合结果在 0.01 水平上显著相关, R^2 为 0.969。进一步根据碳排放量与夜间灯光值的比例关系构造山西省县域基于夜间灯光数据的碳排放量计算公式:

$$C_n = 1.0205D_n \quad (2)$$

式中: C_n 为第 n 个县单元区的碳排放量; D_n 为第 n 个县单元区的夜间灯光数值。

1.3.3 全局空间自相关

本文运用探索性时空数据分析法,通过全局 Moran's I 指数来反映区域内的空间关联性特征。全局 Moran's I 指数的值位于 $[-1, 1]$ 之间,当值大于 0 时呈现正相关,表明碳排放的演变与临近单元具有一致性,小于 0 则呈现负相关,表明其与临近单元变化趋势相反。全局 Moran's I 指数的计算方法为:

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

式中: n 为研究区内区县的个数; x_i 和 x_j 分别为第 i 个和第 j 个区县单元碳排放量; \bar{x} 为各县域单元排放量的平均值; w_{ij} 是空间权重矩阵,通过 GeoDa 软件生成,用来描述区县单元的空间邻近关系,本文采用 Queen 连接。

1.3.4 局域空间自相关

利用 LISA 对山西省县域碳排放进行聚类检验,分析各个县域与其临近县域碳排放的相关程度,识别碳排放的空间依赖性和一致性,从而分析各区县对全局自相关的影响程度,并揭示各县域之间碳排放的集聚类型,计算公式为:

$$I_i = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_{i=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

式中:当 I_i 为正时,表明相邻区域之间的集聚类型

为:高-高聚集(H-H)或低-低聚集(L-L);当 I_i 为负时,集聚类型则为高-低聚集(H-L)或低-高聚集(L-H),高(低)碳排放区域被低(高)碳排放区域所包围。

1.3.5 地理探测器

地理探测器(geographical detector)是分析地理要素空间异质性及因子驱动作用的一种统计方法,由王劲峰等^[24]于 2010 年提出,广泛应用于社会、生态、经济等各个领域,主要用来探究和分析不同影响因子对于同种现象的空间分异的解释力的大小,其还具有交互探测的功能,主要通过识别评估不同因子 X_1 和 X_2 交互作用的 q 值,通过与单一因子 q 值大小的比较,来分析其相互作用对变量的解释力是否产生了增强或者减弱效果。

本文通过地理探测器来解释不同因子及其交互作用对碳排放的影响, q 取值范围为 $[0, 1]$,值越大表示该因素影响越大,反之则越小。本文构建的评价指标体系所选取的 6 项指标均基于 ArcGIS 10.8 对数据进行离散化处理,通过自然断点法将数据分为 5 个层级,然后将处理好的数据利用地理探测器进行运算。

2 结果分析

2.1 碳排放时空演变特征

2.1.1 时间序列特征

从图 1 可以看出,2000—2020 年,山西省整体碳排放量呈现出持续增长的态势,但增速逐渐放缓。

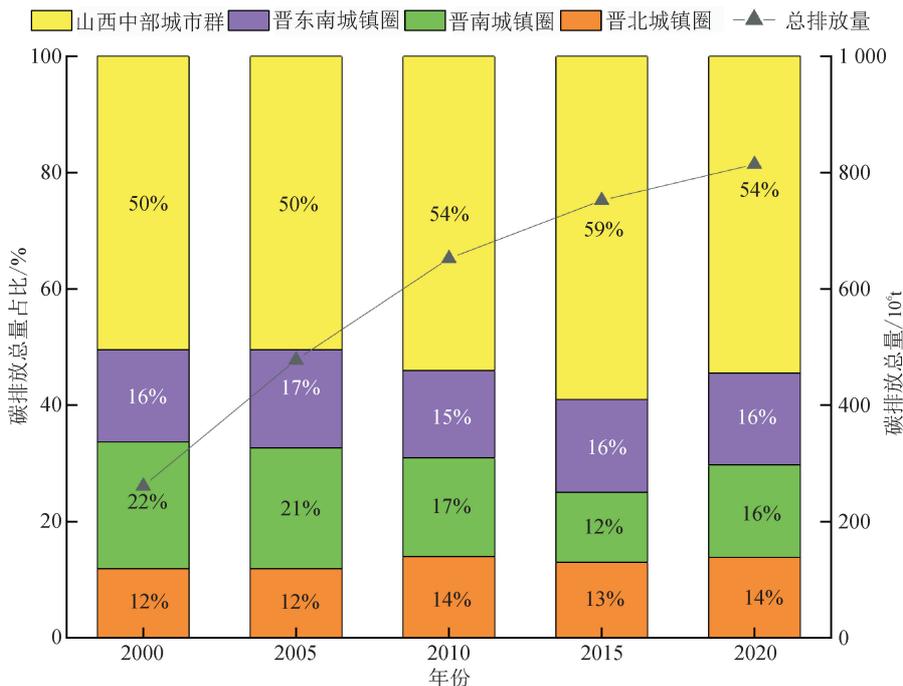


图 1 2000—2020 年山西碳排放及区域碳排放总量变化趋势
Fig. 1 Shanxi carbon emissions and regional carbon emissions trends during 2000—2020

2020年碳排放总量达到 8.1×10^7 t,相较于2000年的 2.6×10^7 t增长了2倍,平均值则由2000年的 3.18×10^4 t上升至 7×10^4 t。2000—2010年,碳排放年增长速度超过15%,2010年之后上升速度大幅放缓,下降至2.48%。与此同时,各地区碳排放量的差距也进一步拉大。由于中国政府于2009年哥本哈根会议上自愿减排承诺的提出以及2015年巴黎协定的签订,作为传统化石能源大省的山西积极发展低碳经济,提出了到2020年单位GDP能耗下降45%以上的目标。近年来通过加速产业结构调整、促进产业转型升级、倒逼传统产业提质增效,有效减缓了二氧化碳排放的增长速度,单位GDP二氧化碳排放强度也逐年下降,到2020年,已经提前完成了减排45%的目标。但由于经济增长对能源的强依赖性,目前仍然无法扭转碳排放继续增长的态势。从山西最新的“一群两区三圈”的布局

来看,2020年山西中部城市群、晋南高质量城镇圈、晋北高质量城镇圈、晋东南高质量城镇圈的碳排放量在全省的占比分别为55:16:16:14,与2000年的分布格局相比变化不大。近年来山西省政府大力发展的山西中部城市群是主要的碳排放来源,占比始终保持在50%以上。晋南地区的临汾、运城两市虽然通过淘汰落后产能,传统产业技术升级等一系列措施,在整体占比略有下降,但仍然是未来山西控制碳排放增长的重点区域。

2.1.2 空间分布特征

从图2可以看出,山西省各地区碳排放存在着明显的区域差异,碳排放量高的区县主要分布在省内各大河流沿岸,尤其以汾河沿岸的碳排放量增长最为显著。碳排放格局整体分布呈现出“中间高、两侧低”的分布格局。碳排放高值区主要集中于山西中部,这与经济发展和城镇化水平相一致。

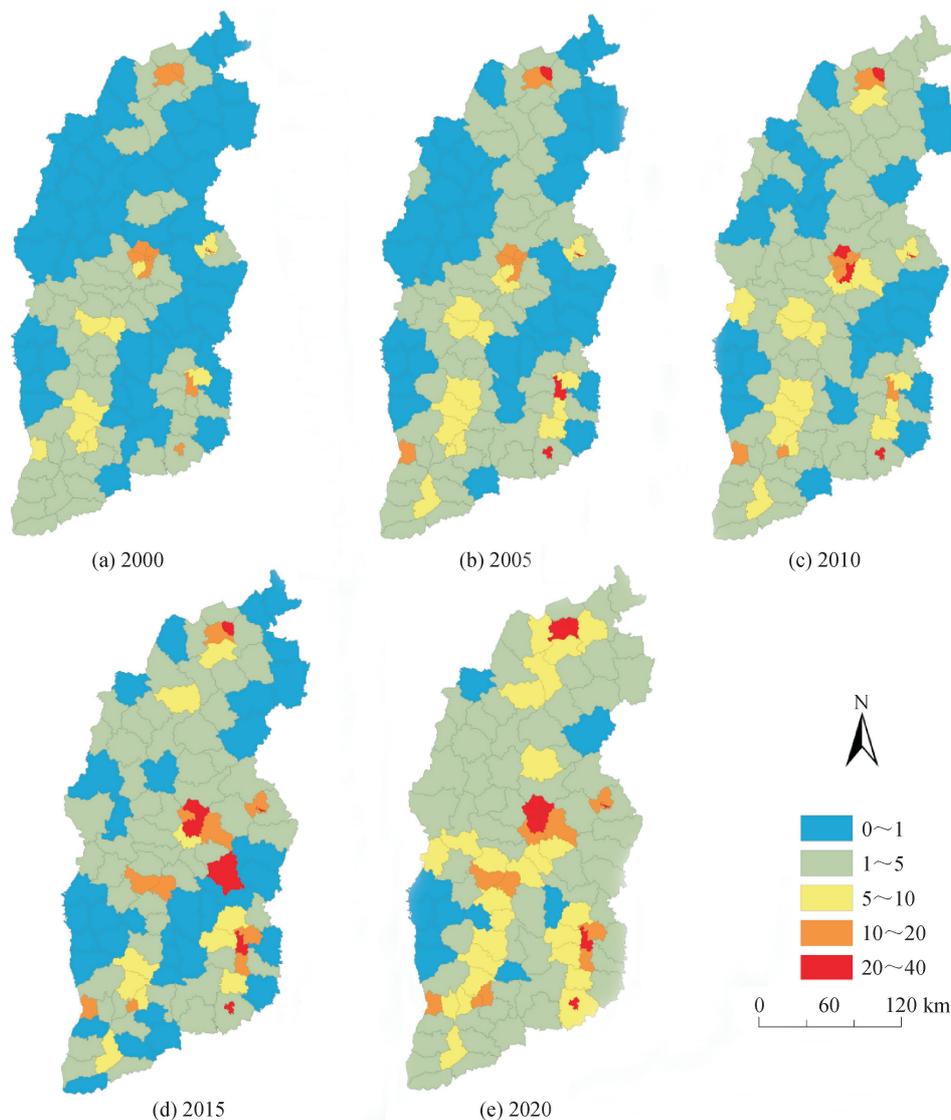


图2 2000—2020山西县域碳排放时空演变图

Fig. 2 Spatio-temporal evolution of carbon emission at county level in Shanxi during 2000—2020
注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为GS2019(1822)的标准地图制作,底图无修改。

2000 年碳排放水平整体不高,高值地区仅限于阳泉的矿区、太原的主城区,范围较小。2005 年,以大同市云冈区和晋东南的长治市的潞州区、晋城市城区为中心的高值区迅速扩大,并开始向周边地区扩散。此后,随着山西大力推进强省会战略,将太原城市圈的发展置于全省城镇化进程的中心地位以及在国务院 2009 年发布的《促进中部地区崛起规划》中,太原城市圈被确立为中部地区的城市增长极之一,人口开始不断向太原聚集,钢铁、煤化工和装备制造业等产业快速发展,太原整体碳排放量也出现了大幅度上升,并与周围高值区域连接成片。2010 年,上述区域碳排放量增长由中心向外围地区扩散的趋势愈发明显。2015 年,碳排放高值区的区域规模仍在小幅扩大,但整体分布格局基本保持稳定。2020 年,随着强省会战略的持续推进以及太榆一体化的不断加速,在太原、晋中形成了一个更大规模的碳排放中心区,并与孝义、汾阳等高排放中心共同组

成了山西规模最大的碳排放高值带。在山西北部,忻州、朔州随着煤炭资源的开采与积极承接产业的转移,工业产值大幅提高,形成了忻府区、原平县、朔城区、平鲁区等新兴高碳排放区域,与原有的大同市区等区域相连组成了第二条高值带。而在东南部、南部,随着碳排放高值区的不断扩散,高值区不断相连成片,也均形成了分别以侯马-绛县为中心的第三条高值带和以潞城-潞州为中心的第四条碳排放高值带。

2.2 空间关联特征

通过 Moran 指数来分析五个时相下的山西碳排放空间分布的关联程度,结果见表 2。2000—2020 年 Moran 指数均在 1% 水平下显著且值全部大于 0,表明山西省各县域碳排放表现出显著的正相关。Moran 指数值由 0.348 上升至 0.405,说明山西省碳排放空间关联程度趋于上升,碳排放相似的区县倾向于集中成片分布。

表 2 2000—2020 山西碳排放全局 Moran's I 指数

Tab. 2 Moran's I index of Shanxi's global carbon emissions during 2000—2020

变量	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
Moran's I	0.320	0.304	0.323	0.337	0.428
Z	4.745	4.496	4.806	4.916	6.196

采用 LISA 聚类来揭示县域尺度的山西省碳排放时空差异的局部相似性和差异性(见图 3)。

整体上来看,山西省大部分地区为高-高集聚和低-低集聚型。高-高集聚地区范围较为稳定,变动不大。2000—2010 年碳排放高-高集聚区主要出现在山西中部的太原以及阳泉的城区和矿区,此时高-高集聚的规模较小。2015—2020 年,山西的高-高集聚区范围有所扩大,扩大地区主要位于中部的晋中的榆次区与太谷区,太榆同城不仅加强了两地之间的经济联系和往来,促进了晋中的经济发展,同时也使得太原碳排放扩散效应也愈发明显。而低-低集聚分布的地区范围变动较为显著。2000 年,在忻州与吕梁的西部山区,以及大同的东部县区存在着大面积的低-低集聚,这些地区不仅矿产资源相对欠丰,人

口规模较小,经济发展以第一产业为主,并且工业发展水平与周边地区差距较大,均为近年来才被批准退出贫困县的地区。随后的 15 年间,低-低集聚的规模大幅减小,由成片分布逐渐转为点状分布。低-高集聚和高-低集聚整体较为稳定,没有表现出明显的规律性。

2.3 碳排放影响因素分析

本文在参考前人研究成果^[1,17]的基础上,并考虑到县级尺度数据的可获取性,重点从以下 6 个方面对碳排放的影响因素进行深入分析(见表 3)。基于 2005—2020 年山西省 117 个县的截面数据,首先通过自然断点法对影响因子进行类别化处理,然后使用地理探测器对碳排放空间分异的影响因素进行分析,由此确定各因子的影响程度和交互作用。

表 3 碳排放影响因素指标选取

Tab. 3 Explanatory variables relevant to spatial-temporal variation of carbon emissions

影响因素	变量含义	符号
经济发展水平	GDP	X_1
人口规模	年末总人口数量	X_2
产业结构	第二产业产值占总产值的比重	X_3
城镇化水平	城镇常住人口占总人口比例	X_4
固定资产投资	固定资产投资总额	X_5
居民生活水平	城乡居民人均可支配收入	X_6

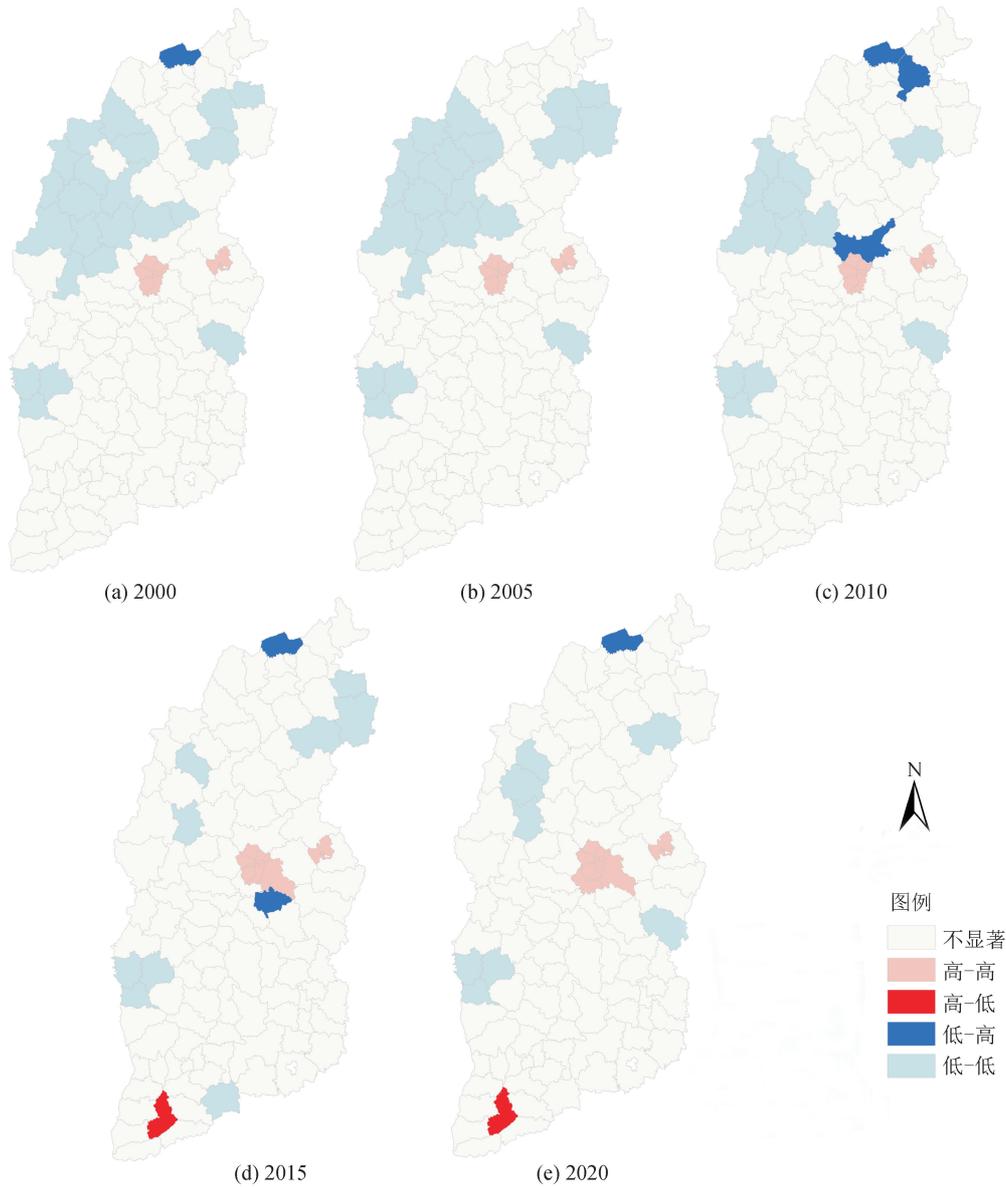


图3 2000—2020年山西碳排放LISA聚类图

Fig. 3 LISA clusters of carbon emission in Shanxi during 2000—2020

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为GS2019(1822)的标准地图制作,底图无修改。

2.3.1 单因子探测结果

由表4可知,四个时期对碳排放起主导作用的影响因子始终未变,排序变动不大。经济发展水平、人口规模对碳排放的影响最为显著,为影响碳排放

增长的关键因素;固定资产投资的对碳排放的影响也较为显著;产业结构和城镇化水平的影响较为稳定;居民生活水平对碳排放的影响大幅下降并趋于稳定。

表4 单因子探测结果

Tab. 4 Detection resultsof influencing factors.

影响因子	Q			
	2005年	2010年	2015年	2020年
经济发展水平 X_1	0.480***	0.443***	0.375***	0.450***
人口规模 X_2	0.392***	0.360***	0.358***	0.434***
产业结构 X_3	0.178***	0.182***	0.168**	0.174***
城镇化水平 X_4	0.196**	0.269***	0.252***	0.257***
固定资产投资 X_5	0.279***	0.334***	0.393***	0.270***
居民生活水平 X_6	0.320***	0.099	0.042	0.058

注:** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$ 。

1) 经济发展水平和人口规模

经济发展水平和人口规模对碳排放的影响长期保持主导地位,但均呈现出缓慢下降的态势,在 2005 年均处于最高值,分别为 0.48 和 0.39,2020 年分别变化至 0.45 和 0.43。在 2002—2011 年煤炭产业的黄金十年中,依靠煤炭大省的资源禀赋和贯穿东西的区位优势,山西经济长期保持快速增长,经济增长对碳排放的解释力在这 10 年中也不断增强。随着黄金十年的结束以及转型绿色发展的要求,中国经济逐渐转向高质量发展阶段,不再将 GDP 作为衡量的唯一标准,经济发展水平对碳排放的解释力也相对减弱。人口的增加所带来的直接影响就是生活碳排放量的增长和对化石燃料需求的不断增加,而随着近年来山西人口增长率的不断放缓以及人口流失,人口规模的影响力也出现了明显下降。

2) 产业结构和城镇化水平

产业结构和城镇化水平对碳排放的影响力较为显著,长期保持较为稳定的状态。从 2005—2020 年,山西第二产业占比由 56.3% 下降至 43.7%,而第三产业占比由 37.4% 上升至 51.7%。第二产业占比过高的局面得到一定程度的缓解,产业结构的优化和调整对碳排放的增长产生了抑制作用,但因基数过大未能产生显著影响。2005—2010 年,山西城镇化速度增长较快,碳排放量也随之快速上升。2010 年之后,城镇化水平较为稳定,10 年间仅上升不足 7%。城镇化水平的不断提高势必会带来人口规模和城市用地的扩张,基础设施的建设速度的不断加快,以及人才、技术的集聚,进而带来土地利用碳排放的快速增长。

3) 固定资产投资

从 2005—2015 年,固定资产投资的影响力不断增强,但 2015 年之后开始下降。虽然从 2009 年开始,山西不断推动产业结构转型升级,但由于投资仍然集中于传统重工业,尤其是装备制造业和采矿业,

这种情况不可避免的也会带来化石燃料需求的增加。随着近年来在合成生物、电子信息、节能环保等战略性新兴产业和绿色生态产业的不断发力,固定资产投资的影响力开始下降,从侧面也说明了投资方向开始逐渐转变,山西转型高质量发展逐渐取得成效。

4) 居民生活水平

居民生活水平对碳排放的影响力在整个研究期内整体较弱。城乡居民人均可支配收入是衡量一个地区家庭生活水平高低的重要标志,而生活水平的提高将会从能源消费总量和结构变化等方面带来碳排放量的增长。收入是消费的前提,居民消费所带来的碳排放也是城市碳排放的一个重要增长源。随着交通便利程度的不断提高,跨区域消费的不断增长,居民生活水平对于碳排放的解释力出现了明显下降,由 2005 年的 0.31 不断下降至 2020 年的 0.05。

2.3.2 交互作用探测结果

分别对 2005 年、2010 年、2015 年以及 2020 年四期因子交互作用的探测结果进行排序,根据因子组合解释力的大小整理得到表 5。由表 5 可知,上述因子经过彼此相互作用,解释力较单一因子明显增强,这说明碳排放受到多方面因素的综合影响。四个时相下,起主导作用的交互作用因组合子各不相同,但 GDP、人口规模与其他因子所主导的交互作用的影响力始终居于较强地位。四个时间段交互作用 q 值最高的分别为 $X_6 \cap X_2$ 、 $X_3 \cap X_2$ 、 $X_3 \cap X_1$ 、 $X_4 \cap X_2$ 。经济发展水平和产业结构的解释力在 2010 年前后显著增强,这表明主要依靠能源驱动的经济模式及由此所推动的快速城镇化对碳排放的影响愈发显著。固定资产投资与产业结构的影响力在 2015 年之后显著下降,这充分说明从 2015 年开始,山西持续推进能源绿色转型的政策引领下,投资的主要导向从高度集中于煤炭、炼焦等高耗能产业开始转向装备制造、医药等高新技术产业,投资导向和产业结构得到显著优化,第二产业占比过高的局面得到改善。

表 5 影响因子交互作用探测结果

Tab. 5 Detection results of interaction for influencing factors

交互因子	2005	交互因子	2010	交互因子	2015	交互因子	2020
$X_6 \cap X_2$	0.741	$X_3 \cap X_2$	0.731	$X_3 \cap X_1$	0.782	$X_4 \cap X_2$	0.745
$X_3 \cap X_1$	0.726	$X_6 \cap X_2$	0.680	$X_4 \cap X_1$	0.676	$X_5 \cap X_4$	0.699
$X_3 \cap X_2$	0.722	$X_1 \cap X_2$	0.653	$X_5 \cap X_4$	0.618	$X_3 \cap X_2$	0.687
$X_1 \cap X_2$	0.716	$X_4 \cap X_2$	0.649	$X_5 \cap X_3$	0.607	$X_6 \cap X_2$	0.663
$X_4 \cap X_2$	0.697	$X_5 \cap X_2$	0.632	$X_6 \cap X_5$	0.538	$X_6 \cap X_1$	0.648
$X_6 \cap X_5$	0.643	$X_4 \cap X_1$	0.625	$X_5 \cap X_2$	0.527	$X_4 \cap X_1$	0.646

3 讨论

本研究通过构建长时间序列连续的夜间灯光数据集,为煤炭资源型地区因缺乏能源统计数据而无法进行精细估算碳排放情况提供了新方法。山西省作为中国最典型的煤炭资源型地区,对其碳排放时空演变及驱动因素进行研究,一定程度上会对其他资源型地区制定节能减排政策仍具有重要的借鉴价值。从研究方法上来看,相较于于博等^[13]仅应用NPP-VIRS数据对碳排放进行模拟估算,本研究将两套数据相结合,开展了更长时间尺度的研究。相较于目前大多数学者从省、市尺度开展研究,本文从县级角度出发,更能准确地反应区域碳排放的时空格局的动态演变。从研究内容来看,估算结果表明,山西省内高排放区域主要位于太原及周边地区,低碳排放区域主要位于临汾西部的地区,这与赵文婷^[8]等研究结论相一致。从空间自相关分析来看,山西省内高-高集聚区域在研究期间小幅扩张,低-高集聚整体保持稳定。这与莫惠斌等^[4]研究结果有所差异,后者发现山西省内多县向上转移导致省内原有的高-高集聚和低高集聚区消失。从影响因素来看,经济发展水平、人口规模对能源富集型地区县域碳排放空间分异的解释力最为明显,这与杜海波等^[1]、邓光耀等^[25]的研究结果保持一致,而产业结构的升级对碳排放具有显著的抑制作用,这与Han等^[26]得到的结论相符。

受制于统计数据公布的滞后性以及县域数据获取的局限性,本研究在数据时效性以及指标体系的选择上存在一定不足。在后续研究中,将进一步提高数据质量,增加碳排放影响因素的选取维度,构建更加全面的指标体系对山西碳排放的驱动因素进行更加全面深入地探究。此外,研究仅从县域单一尺度展开探讨,但不同尺度碳排放的影响因素和影响程度存在差异,从多尺度对煤炭资源型地区碳排放时空演变及影响因素开展对比研究也是未来努力的方向。

4 结论

本文基于山西省2000—2020年县域碳排放及社会经济数据,运用探索性时空分析、地理探测器等方法,揭示了山西省碳排放的时空格局演变,并对影响因素进行了深入分析。

1) 2000—2020年山西省碳排放总量呈现出不断上升的态势,但增速在2010年之后趋于放缓,减排取得一定成效,但尚未达到碳排放峰值。山西中部城市群仍是山西碳排放的主要来源。县域之间碳

排放量差距悬殊,且呈现不断拉大的趋势。

2) 山西省碳排放的高值区主要位于省会太原,以及大同、吕梁、晋城等地市,表现出显著的二元空间分布结构,集聚现象明显。碳排放整体分布格局呈现出自南向北分布的四条碳排放高值带。这种碳排放的规模与分布范围与省内主要工业县市和经济规模等级分布现状相吻合。

3) 山西省县域碳排放表现出显著的空间自相关,且关联程度呈现出有所增强。从总体上来看,空间集聚特征保持较为稳定的状态。高-高集聚主要出现在太原、晋中等地区,而在忻州西部的偏关、河曲以及临汾西部的乡宁等县则形成了低-低集聚。随着时间的推移,低-低集聚的规模显著缩小,高-高集聚的规模变动不大。

4) 山西省碳排放的空间分布受到多种因素的综合作用。经济发展水平和人口规模对碳排放的影响最为显著,城镇化水平和固定资产投资对碳排放也起着较为显著的作用。居民生活水平的影响在大幅度降低。产业结构与经济发展水平的交互作用不断增强,可见,长期以来以资源为主导的经济发展模式未能得到根本性的转变。

5 建议

随着双碳目标节点的不断临近,山西面临的形势十分严峻和紧迫。山西省节能减排虽取得了一定成效,但目前以煤炭为主要能源的产业结构与能源消费结构,使得其为全国碳排放高值区的局面未能产生根本性改变。以2018年为例,山西碳排放量位居全国第7位,而GDP仅位居31个省市的第23位,属于典型的经济小省和碳排大户。经济社会发展的需要以及长期以来形成的生产方式、消费方式和城市建设模式带来的碳锁定效应,使得山西的低碳绿色发展之路仍然面临严峻挑战。本研究根据山西碳排放时空分布特征及其主要影响因素,提出以下对策建议。

1) 山西需要紧抓黄河流域生态保护高质量发展与资源型经济转型综合配套改革试验区的战略机遇,不断降低对煤炭资源的使用比例和过度依赖,大力开发风能、地热能等清洁能源;重塑能源结构,构建多元化、清洁低碳、安全高效的现代能源体系。同时,加大技术投入和创新力度,从要素、投资驱动转向创新驱动,早日实现碳达峰。

2) 在承接发达地区产业转移时,应注重对承接产业的脱碳改造。在引进外来投资时,首先考虑绿色产业,提高外来投资的环境保护门槛;以可持续发

展作为制定产业政策的出发点和落脚点,杜绝高污染和高排放的企业;积极引导资本转向低碳的高新技术产业和第三产业,统筹推进低碳转型和经济社会高质量发展。

3) 同时要重视空间效应,充分发挥中心区域碳减排对整体减排的重要作用。各县区要因地制宜,制定符合本地情况的差异化减排对策;在制定本区域节能减排对策时,应充分考虑相邻地区对本区域碳排放产生的影响,从而实现整体绿色协同发展。

参考文献:

- [1] 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.
DU Haibo, WEI Wei, ZHANG Xueyuan, et al. Spatio-temporal evolution and influencing factors of energy-related carbon emissions in the Yellow River Basin: based on the DMSP/OLS and NPP/VIIRS nighttime light data[J]. Geographical Research, 2021, 40(7): 2051-2065.
- [2] 崔恒. “一带一路”沿线国家碳排放量测度及影响因素研究[J]. 绿色科技, 2019(22):257-260.
CUI Heng. Study on measurement and influencing factors of carbon emissions in countries along The Belt and Road initiative[J]. Journal of Green Science and Technology, 2019(22): 257-260.
- [3] 李云燕,张硕. 中国城市碳排放强度时空演变与影响因素的时空异质性[J]. 中国环境科学, 2023, 43(6): 3244-3254.
LI Yunyan, ZHANG Shuo. Spatio-temporal evolution of urban carbon emission intensity and spatiotemporal heterogeneity of influencing factors in China[J]. China Environmental Science, 2023, 43(6): 3244-3254.
- [4] 莫惠斌,王少剑. 黄河流域县域碳排放的时空格局演变及空间效应机制[J]. 地理科学, 2021, 41(8): 1324-1335.
MO Huibin, WANG Shaojian. Spatio-temporal evolution and spatial effect mechanism of carbon emission at county level in the Yellow River Basin[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(8): 1324-1335.
- [5] 蒋培培,王远,罗进,等. 长江与黄河流域碳排放效率时空演变特征及路径识别探究[J]. 环境科学研究, 2022, 35(7):1743-1751.
JIANG Peipei, WANG Yuan, LUO Jin, et al. Comparative study of spatial-temporal evolution and growth path of carbon emissions efficiency in Yangtze River Basin and Yellow River Basin[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(7): 1743-1751.
- [6] 韦彦汀,李思佳,张华. 成渝城市群碳排放时空特征及其影响因素[J]. 中国环境科学, 2022, 42(10): 4807-4816.
WEI Yanting, LI Sijia, ZHANG Hua. Temporal-spatial evolution of carbon emission and driving factors in the Chengdu-Chongqing urban agglomeration[J]. China Environmental Science, 2022, 42(10): 4807-4816.
- [7] 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.
LI Yunyan, SHENG Qing, DAI Jian. Spatio-temporal evolution characteristics of carbon emissions in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration derived from integrated data of DMSP-OLS and NPP-VIIRS[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(2): 447-454.
- [8] 赵文婷,罗淑贞,原晓红,等. 山西省县域碳排放时空格局及影响因素分析[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(8):226-236.
ZHAO Wenting, LUO Shuzhen, YUAN Xiaohong, et al. Spatiotemporal pattern and influencing factors of carbon emissions at county level in Shanxi Province [J]. Environmental Science & Technology, 2022, 45(8): 226-236.
- [9] CHOI K H, ANG B W. A time-series analysis of energy-related carbon emissions in Korea [J]. Energy Policy, 2001, 29(13): 1155-1161
- [10] 程叶青,王哲野,张守志,等. 中国能源消费碳排放强度及其影响因素的空间计量[J]. 地理学报, 2013, 68(10):1418-1431.
CHENG Yeqing, WANG Zheye, ZHANG Shouzhi, et al. Spatial econometric analysis of carbon emission intensity and its driving factors from energy consumption in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(10): 1418-1431.
- [11] ELVIDGE C D, IMHOFF M L, BAUGH K E, et al. Night-time lights of the world: 1995-1995[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2001, 56(2): 81-89.
- [12] CHRISTOPHER N H, MULLER J P. Night-time imagery as a tool for global mapping of socioeconomic parameters and greenhouse gas emissions[J]. Ambio: A Journal of the Human Environment, 2000, 29(3): 157-162.
- [13] 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.
YU Bo, YANG Xu, WU Xiangli. Study on spatial spillover effects and influencing factors of carbon emis-

- sions in county areas of Ha-Chang city group: Evidence from NPP-VIIRS nightlight data[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(2): 697-706.
- [14] 黄蕊,王铮,丁冠群,等. 基于 STIRPAT 模型的江苏省能源消费碳排放影响因素分析及趋势预测[J]. *地理研究*, 2016, 35(4): 781-789.
HUANG Rui, WANG Zheng, DING Guanqun, et al. Trend prediction and analysis of influencing factors of carbon emissions from energy consumption in Jiangsu province based on STIRPAT model[J]. *Geographical Research*, 2016, 35(4): 781-789.
- [15] 陈占明,吴施美,马文博,等. 中国地级以上城市二氧化碳排放的影响因素分析:基于扩展的 STIRPAT 模型[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(10): 45-54.
CHEN Zhanming, WU Shimei, MA Wenbo, et al. Driving forces of carbon dioxide emission for China's cities: empirical analysis based on extended STIRPAT Model[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2018, 28(10): 45-54.
- [16] 杨绍华,张宇泉,耿涌. 基于 LMDI 的长江经济带交通碳排放变化分析[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(10): 4817-4826.
YANG Shaohua, ZHANG Yuquan, GENG Yong. An LMDI-based investigation of the changes in carbon emissions of the transportation sector in the Yangtze River Economic Belt [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(10): 4817-4826.
- [17] 陈锋,张晶,任娇,等. 基于 LMDI 模型的黄河流域碳排放时空差异及影响因素研究[J]. *地球环境学报*, 2022, 13(4): 418-427.
CHEN Feng, ZHANG Jing, REN Jiao, et al. Spatio-temporal variations and influencing factors of carbon emissions in the Yellow River Basin based on LMDI model[J]. *Journal of Earth Environment*, 2022, 13(4): 418-427.
- [18] 王向前,夏丹. 工业煤炭生产—消费两侧碳排放及影响因素研究——基于 STIRPAT-EKC 的皖豫两省对比[J]. *软科学*, 2020, 34(8): 84-89.
WANG Xiangqian, XIA Dan. Research on carbon emission and influencing factors of industrial coal production and consumption—comparison of Anhui and Henan Provinces based on STIRPAT-EKC[J]. *Soft Science*, 2020, 34(8): 84-89.
- [19] 田娟娟,张金锁. 基于地理探测器的中国碳排放时空分布特征及驱动因素研究[J]. *生态经济*, 2022, 38(7): 13-20, 27.
TIAN Juanjuan, ZHANG Jinsuo. Research on Spatial-temporal distribution and the driving factors of CO₂ emissions in China based on geographic detector [J]. *Ecological Economy*, 2022, 38(7): 13-20, 27.
- [20] MOUSAVI B, LOPEZ N S A, BIONA J B M, et al. Driving forces of Iran's CO₂ emissions from energy consumption: an LMDI decomposition approach [J]. *Applied Energy*, 2017, 206: 804-814.
- [21] ZHANG Sicong, ZHAO Tao. Identifying major influencing factors of CO₂ emissions in China: regional disparities analysis based on STIRPAT model from 1996 to 2015 [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 207: 136-147.
- [22] ZHAO Jincai, JI Guangxing, YUE Yanlin, et al. Spatio-temporal dynamics of urban residential CO₂ emissions and their driving forces in China using the integrated two nighttime light datasets [J]. *Applied Energy*, 2019, 235: 612-624.
- [23] 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.
LÜ Qian, LIU Haibin. Multiscale spatio-temporal characteristics of carbon emission of energy consumption in Yellow River Basin Based on the nighttime light datasets [J]. *Economic Geography*, 2020, 40(12): 12-21.
- [24] 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.
WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
- [25] 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.
DENG Guangyao, CHEN Ganggang. 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 [J]. *Journal of Xihua University (Philosophy & Social Sciences)*, 2022, 41(6): 40-60.
- [26] HAN Yan, ZHANG Jiajie, YUAN Mengjie. Carbon emissions and economic growth in the Yellow River Basin: decoupling and driving factors [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10.

(责任编辑 王绪迪)