

黄河流域碳排放的时空分布及影响因素研究^{*}

祁强强 徐占军[#] 李娜艳 解晨啸

(山西农业大学资源环境学院,山西 晋中 030801)

摘要 基于长时间序列的夜间灯光数据估算 2000—2019 年黄河流域市域的碳排放,探究了碳排放的时空分布及影响因素。结果显示:(1)2000—2019 年黄河流域碳排放量不断增加,但增速有所减缓。高值区、中高值区主要分布在山西、山东、晋陕蒙交界区和一些省会城市及其周边地区。低值区、中低值区主要分布在青海、甘肃和四川等地。(2)从时间变化趋势来看,7 个地级市属于迅猛增长型,15 个地级市属于较快增长型,55 个地级市属于中速增长型,38 个地级市属于缓慢增长型。(3)黄河流域碳排放呈现出空间集聚的特点,但随时间有所减弱。高-高集聚区主要分布在山东大部分地级市和山西南部,范围呈缩小趋势。低-低集聚区主要分布在甘肃、青海、四川等地。(4)3 个具有显著影响($p<0.01$)的因素解释能力由强到弱依次是国内生产总值(GDP)、第二产业占 GDP 比例和年末常住人口,它们的交互作用解释能力更强。基于以上结果提出如下建议:山东、山西、晋陕蒙交界区作为黄河流域碳减排的重点区域;建立区域协作机制;引导 GDP 绿色增长。

关键词 碳排放 空间分布规律 时间变化趋势 黄河流域

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2023.04.023

Spatio-temporal distribution pattern and influencing factors of carbon emission in the Yellow River Basin QI Qiangqiang, XU Zhanjun, LI Nayan, XIE Chenxiao. (College of Resource and Environment, Shanxi Agricultural University, Jinzhong Shanxi 030801)

Abstract: Based on long-term sequence nighttime light datasets, the carbon emissions were estimated at city level in the Yellow River Basin from 2000 to 2019, and spatio-temporal distribution pattern and influencing factors of carbon emissions were discussed. Results were as follows: (1) from 2000 to 2019, carbon emissions in the Yellow River Basin showed an increasing trend, but the growth rate slowed down. High and middle-high areas mainly distributed in Shanxi, Shandong, Shanxi-Shaanxi-Mongolia junctional areas, provincial capital cities and their surrounding areas. Low and middle-low areas mainly distributed in Qinghai, Gansu and Sichuan. (2) From the perspective of temporal trend, 7 prefecture-level cities grew great rapidly, 15 grew quite rapidly, 55 grew moderately, and 38 grew slowly. (3) Carbon emissions in the Yellow River Basin showed spatial agglomeration but the agglomeration was weakened as time. High-high areas mainly distributed in most of Shandong, south of Shanxi and Shanxi-Shaanxi-Mongolia junctional areas, but the range was shrinking. Low-low areas were mainly located in Gansu, Qinghai and Sichuan. (4) Three factors had significant impact ($p<0.01$), ranking as GDP, the second industrial GDP percentage and annual resident population. Nevertheless, the interaction of the three factors was greater than any single one. It was suggested that: Shandong, Shanxi, Shanxi-Shaanxi-Mongolia junctional areas should be the key areas for carbon emissions reduction; it was necessary to establish a regional cooperation mechanism; green growth of GDP should adopted.

Keywords: carbon emissions; spatial distribution characteristics; temporal change trend; Yellow River Basin

黄河流域在中国生态安全和社会经济发展中具有重要的全局性和战略性地位^[1]。该区域不仅是连接青藏高原、黄土高原、华北平原的生态廊道,拥有三江源、祁连山等多个国家公园和国家重点生态区^[2],而且是中国重要的能源基地、粮食主产区^[3]。自 2000 年西部大开发以来,黄河流域经济社会快速

发展,已逐步成为中国未来发展的重点支撑区^{[4]127};但受区位条件、自然地理环境等因素影响,特别是以能源化工为主的产业结构给流域生态环境带来了沉重负担,严重威胁流域生态安全、粮食安全和人居环境安全^{[4]127}。为此,中共中央、国务院 2021 年印发了《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》,

第一作者:祁强强,女,1996 年生,硕士研究生,主要从事区域碳减排管理研究。[#] 通讯作者。

^{*} 国家自然科学基金资助项目(No.51304130);山西省人民政府重大决策咨询课题(No.ZB20211703);山西省高等学校哲学社会科学研究项目(No.201803010);山西省软科学研究计划项目(No.2018041060-2);山西省哲学社会科学规划课题(No.2020YJ052)。

2022 年更是在立法层面出台了《黄河保护法》，其中碳达峰、碳中和都是黄河流域生态环境保护和高质量发展的重要内容，黄河流域各级政府都已将此列入当地的经济社会发展“十四五”规划。

从时空尺度把握碳排放分布规律，量化区域碳排放的主导因素，对于确定黄河流域碳减排的重点区域和调控要素具有重要的指导意义。目前，我国只有国家和省级层面有较完整的统计数据，市级以下的统计数据往往不完整，或者因与国家、省级的统计口径、计算方法等差异而不具可比性。夜间灯光数据可以很好地反映人类社会经济活动水平，数据易得，已用于人口空间分布^[5]、城市空间格局演变^[6]、国内生产总值(GDP)估算^[7]、碳排放估算^[8]¹⁵¹⁶等研究。考虑到不同省份资源禀赋及经济发展水平对碳排放的差异^[9]²⁰⁶⁰，^[10]，本研究拟用长时间序列的夜间灯光数据估算 2000—2019 年黄河流域市域尺度的碳排放，系统分析时间变化趋势及空间分布规律，揭示碳排放的影响因素，为黄河流域制定区域化减排政策，确定减排的重点管控地区和管控因素提供数据基础和依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本研究中黄河流域包括青海、甘肃、宁夏、山西、山东、四川、河南、内蒙古、陕西 9 个省份的 115 个地级市。夜间灯光数据 2013 年及以前用 DMSP/OLS 年平均灯光辐射影像(<https://www.ngdc.noaa.gov/eog/dmsp>)，2013 年及以后用 NPP/VIIRS 月平均灯光辐射影像(<https://eogdata.mines.edu/products/vnl/>)。利用 2013 年的两种影像数据建立拟合关系，进行连续性校正^[11]³¹，以解决 2013 年前后卫星数据不一致的问题。能源消费数据来源于历年中国能源统计年鉴，用于构建夜间灯光数据与碳排放关系。社会经济数据来源于历年各省的统计年鉴，用于碳排放影响因素确定。

1.2 数据处理

首先对所有灯光辐射影像进行兰伯特等角圆锥投影，并以 1 km 的分辨率进行重采样。由于 DMSP/OLS 年平均灯光辐射影像本身存在像元饱和与不连续问题，借鉴朱恩燕^[11]³⁰的方法进行校正。NPP/VIIRS 月平均灯光辐射影像存在背景噪音，借鉴 SHI 等^[12]的方法剔除背景噪音，并利用栅格计算器合成年平均灯光辐射影像。然后，夜间灯光数据与碳排放量建立相关关系，拟合优度均达到 0.9

以上。

1.3 碳排放计算

根据文献^[13]确定碳排放系数(见式(1))并计算碳排放量(见式(2))，各种能源的低位发热量和基于低位发热量的碳排放量见表 1。

$$K_i = C_i \times H_i \quad (1)$$

$$S = \sum_i E_i \times K_i \quad (2)$$

式中： K_i 为第 i 种能源的碳排放系数，g/t 或 g/万 m^3 ； C_i 为第 i 种能源基于低位发热量的碳排放量，g/J； H_i 为第 i 种能源的低位发热量，J/t 或 J/万 m^3 ； S 为碳排放量，g； E_i 为第 i 种能源消费量，t 或万 m^3 。

表 1 各种能源的低位发热量和基于低位发热量的碳排放量
Table 1 Low heat output and carbon emission based on low heat output of fuels

能源	H_i	C_i
原煤	20 908.42 MJ/t	26.37 g/MJ
洗精煤	26 344.08 MJ/t	25.41 g/MJ
焦炭	28 434.04 MJ/t	29.50 g/MJ
焦炉煤气	179 812.98 MJ/万 m^3	13.58 g/MJ
原油	41 816.84 MJ/t	20.10 g/MJ
汽油	43 069.64 MJ/t	18.90 g/MJ
煤油	43 069.64 MJ/t	19.60 g/MJ
柴油	42 651.07 MJ/t	20.20 g/MJ
燃料油	41 816.84 MJ/t	21.10 g/MJ
液化石油气	50 179.62 MJ/t	17.20 g/MJ
炼厂干气	45 996.76 MJ/t	18.20 g/MJ
天然气	389 306.96 MJ/万 m^3	15.30 g/MJ

1.4 探索性空间数据分析

探索性空间数据分析是以空间关系为测度，通过空间自相关鉴别空间数据的属性。以全局空间自相关研究整体空间关系，用莫兰指数反映观测变量在整个研究区域内空间相关性变化趋势^[14]；以局部自相关研究空间变异状况^[15]，识别空间集聚与空间孤立特征，探测空间异质性^[16]。

1.5 碳排放的时间变化趋势分析

采用线性倾向估计进行时间变化趋势分析^[17]，通过建立碳排放量与时间的一元回归模型得到 2000—2019 年的倾向值，若倾向值大于 0 说明碳排放量随时间呈现增加趋势，反之为减少趋势，并参考文献^[12]的标准划分增长类型。

1.6 地理探测器

地理探测器是探测空间分异及其背后影响因素的一种统计方法，可以分析影响因素的解释能力和多个影响因子之间的交互作用^[18]，通常用解释度来表征，解释度值域为[0,1]，解释度越大，表明该因子的解释能力越强，反之则越弱。

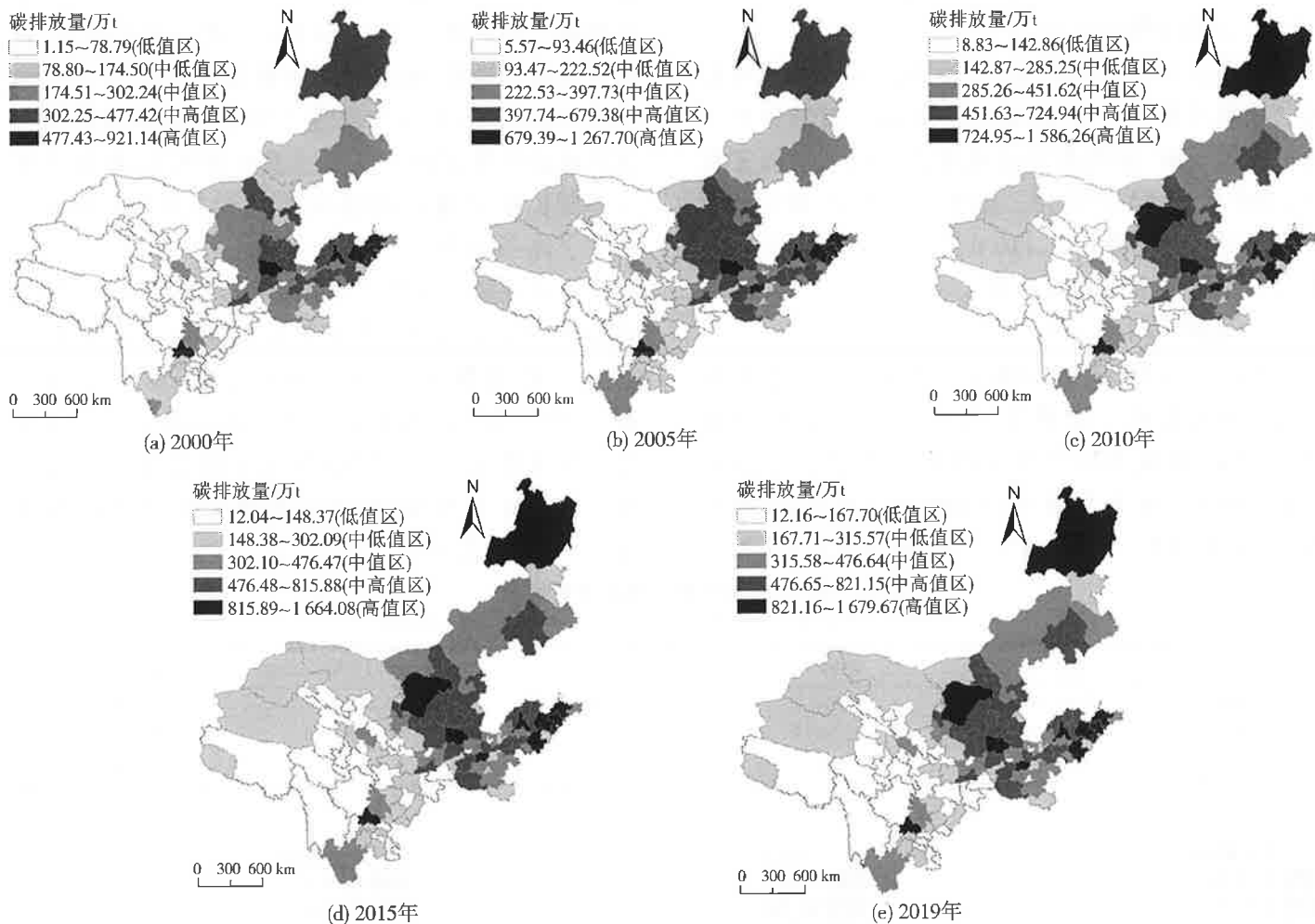


图1 黄河流域市域尺度的碳排放量
Fig.1 Carbon emissions at city scale in the Yellow River Basin

2 结果与讨论

2.1 黄河流域碳排放量时空分布特征

2.1.1 空间分布规律

分别选取 2000、2005、2010、2015、2019 年的数据,利用自然断点法划分黄河流域市域尺度碳排放等级(见图 1)。总体上看,黄河流域碳排放量不断增加,但增速有所减缓。2000 年高值区主要分布在济南、潍坊、青岛、烟台、成都、临汾等地;中高值区分布在山西、山东以及呼和浩特、包头、新乡、郑州、西安、呼伦贝尔、聊城等地。2005 年起,郑州、鄂尔多斯、临沂、呼伦贝尔相继步入高值区;榆林、延安、银川、赤峰、洛阳、南阳相继步入中高值区,而聊城则退出了中高值区。综合而言,高值区、中高值区主要分布在山西、山东、晋陕蒙交界区以及成都、西安、郑州、银川等省会城市及其周边地区。低值区、中低值区相对稳定,主要分布在青海、甘肃、四川等地。

2.1.2 时间变化趋势

计算了 2000—2019 年黄河流域碳排放量随时间变化的倾斜值,增长类型划分结果如图 2 所示。7

个地级市属于迅猛增长型,分别为鄂尔多斯、榆林、延安、潍坊、郑州、成都、呼伦贝尔。15 个地级市属于较快增长型,主要分布于吕梁、忻州、银川、凉山以及山东境内和内蒙古东北部。55 个地级市属于中速增长型,该类型占比最大,分布较广。38 个地级市属于缓慢增长型,主要分布于青海、甘肃以及四川东南部、陕西南部地区。

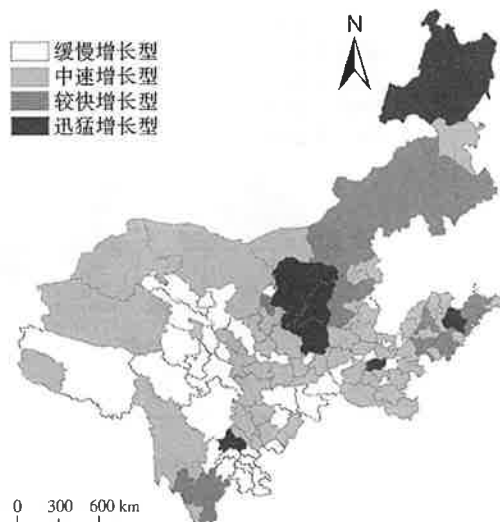


图2 黄河流域市域尺度碳排放增长类型
Fig.2 Types of carbon emissions growth at city scale in the Yellow River Basin

2.2 黄河流域碳排放空间相关性分析

2.2.1 全局空间相关性

由表 2 可见,2000、2005、2010、2015、2019 年的莫兰指数均大于零, z 值全部通过 0.01 置信水平下的显著性检验,表明黄河流域碳排放呈现空间正相关,即存在空间集聚特征。随着时间演变,黄河流域碳排放量莫兰指数由 0.430 0 降至 0.336 0,表明这种空间集聚现象有减弱趋势。

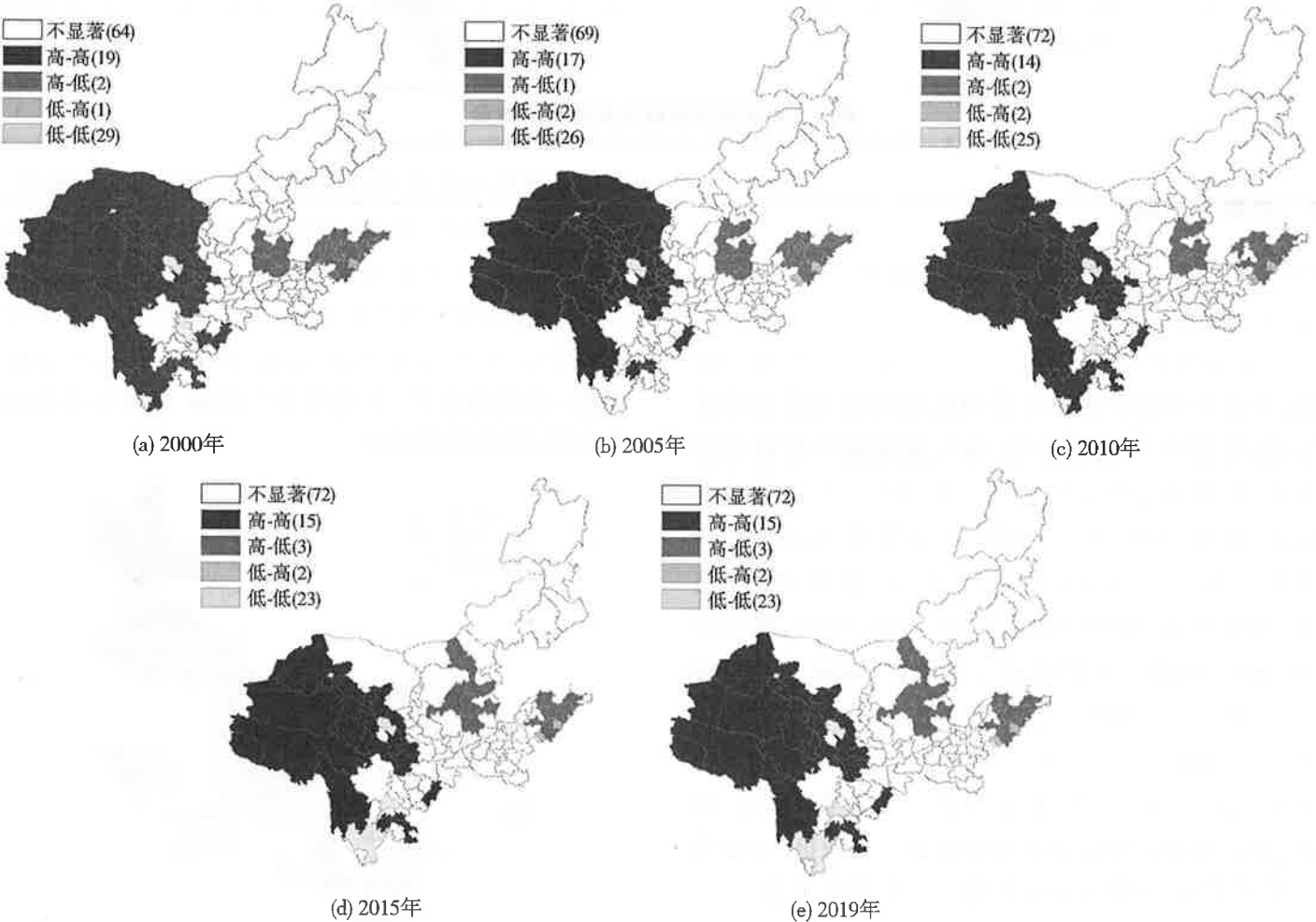
2.2.2 局部空间相关性

由图 3 可见,高-高集聚区主要分布在山东大部分地区 and 山西南部的晋城、临汾、长治、晋中、吕梁等,不过高-高集聚区呈缩少趋势,特别是山东减少地尤为明显,高-高集聚区的地级市个数由 2000 年的 19 个减少至 2019 年的 15 个,山西的晋城、长治

也相继退出了高-高集聚区,然而忻州步入了高-高集聚区。原因是 2010 年以来山东推行蓝色经济,实施节能减排政策,能源利用效率大幅提高,能源排放强度大幅减小;而山西成为了国家资源型经济转型综合配套改革试验区。晋陕蒙交界区高-高集聚区在不断扩张,内蒙古的呼和浩特、包头和陕西的延安步入了高-高集聚区。这主要是由于“十二五”规划明确了建设鄂尔多斯盆地国家综合能源基地,导致煤炭开发中心西移,部分能源密集型产业向西转移^[19]。低-低集聚区主要分布在甘肃、青海、四川等省份,空间格局较为稳定。这主要是由于这些地区受各种因素的限制,经济发展水平较低,碳排放量一直不大。高-低集聚区和低-高集聚区范围略有变化,但整体变化不大。

表 2 全局空间自相关分析结果
 Table 2 Global spatial self-correlation analysis results

项目	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2019 年
莫兰指数	0.430 0	0.411 0	0.360 0	0.340 0	0.336 0
z 值	7.195 4	6.861 3	6.017 7	5.690 5	5.633 7
p 值	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001



注:括号中标注的数字指地级市个数。

图 3 黄河流域城市域局部自相关图

Fig.3 Local spatial correlation maps at city scale in the Yellow River Basin

表 3 单因子探测结果
Table 3 Single factor detection results

影响因素	2005 年	2010 年	2015 年	2019 年
GDP	0.684 1	0.661 3	0.631 1	0.559 5
年末常住人口	0.403 6	0.449 0	0.399 5	0.412 3
第二产业占 GDP 比例	0.145 4	0.072 0	0.105 6	0.123 4

表 4 交互探测结果
Table 4 Interactive detection results

交互因素	2005 年	2010 年	2015 年	2019 年
GDP 与年末常住人口	0.718 6	0.692 9	0.660 6	0.608 1
GDP 与第二产业占 GDP 比例	0.774 6	0.707 5	0.685 0	0.630 7
第二产业占 GDP 比例与年末常住人口	0.590 0	0.519 3	0.566 8	0.552 5

2.3 黄河流域碳排放的影响因素

本研究着重考虑以下因素对碳排放的影响：GDP、年末常住人口、第二产业占 GDP 比例和碳排放强度(碳排放量/GDP)^[20]。由于 2000 年相关数据不全,因此只讨论了 2005、2010、2015、2019 年。

2.3.1 单因子探测结果

根据地理探测器单因子探测结果,发现 GDP、年末常住人口和第二产业占 GDP 比例 3 个因子对黄河流域碳排放具有显著影响($p < 0.01$)。分析表 3 发现,GDP 对于碳排放的解释能力最强,经济增长仍然是黄河流域碳排放增加的最主要因素,不过其解释能力随时间不断减弱,由 2005 年 0.684 1 降低至 2019 年的 0.559 5。这是由于“十一五”时期,黄河流域投资进入高速增长阶段,从而带来大量的能源消耗,导致碳排放增加^{[8]1521}。年末常住人口对于碳排放的解释能力小于 GDP,并且随时间呈波动变化。人口增长会促进对能源需求的增加,但随着公共设施利用率提高,加上减排设施优化又会降低碳排放,因此呈现波动。第二产业占 GDP 比例对于碳排放的解释能力在 2010 年后随时间呈逐渐增强趋势,由 2010 年的 0.072 0 增加至 2019 年的 0.123 4。这与杜海波等^{[9]2060}的研究结果一致,也与黄河流域作为我国的能源基地,流域内大多数省份以煤炭、石化、电力、钢铁、有色冶金、建材等行业为主的特点相符,消耗能源的基础原材料产业占比大,导致区域内碳排放量大。

2.3.2 交互探测结果

从表 4 的交互探测结果来看,任何两个因子交互的解释能力都要大于单因子的解释能力。GDP 与第二产业占 GDP 比例交互作用的解释能力最强,但随时间逐渐弱化。GDP 与年末常住人口交互作用的解释能力其次,也随时间呈弱化趋势。第二产业占 GDP 比例与年末常住人口交互作用的解释能

力随时间波动变化。

3 结论与建议

3.1 结 论

(1) 总体上看,2000—2019 年黄河流域碳排放量不断增加,但增速有所减缓。高值区、中高值区主要分布在山西、山东、晋陕蒙交界区以及成都、西安、郑州、银川等省会城市及其周边地区。低值区、中低值区相对稳定,主要分布在青海、甘肃及四川等地。

(2) 从时间变化趋势来看,7 个地级市属于迅猛增长型,15 个地级市属于较快增长型,55 个地级市属于中速增长型,38 个地级市属于缓慢增长型。

(3) 黄河流域碳排放呈现空间集聚的特点,但随时间有减弱趋势。高-高集聚区主要分布在山东大部分地级市和山西南部,范围呈缩小趋势。低-低集聚区主要分布在甘肃、青海、四川等地,空间格局较为稳定。

(4) GDP、年末常住人口和第二产业占 GDP 比例对黄河流域碳排放具有显著影响($p < 0.01$),其中 GDP 的解释能力最强,第二产业占 GDP 比例最弱。它们的交互作用解释能力都要大于任一单因素的解释能力。

3.2 建 议

(1) 山东、山西、晋陕蒙交界区应是黄河流域碳减排的重点区域,应根据资源环境禀赋、产业结构、发展需求等精准实施减排政策。山东、山西作为我国的典型资源型省份,它们的很多地级市都是成熟的资源型城市,这类城市一般处于工业化中期向后期的过渡阶段,在制定减排政策时,应尽力削弱对资源产业的依赖,积极引导非资源产业发展。对于延安、鄂尔多斯、榆林等成长中的资源型城市,应规范开发秩序、合理确定开发规模,严格控制传统资源和能源产业的能源消耗与污染物排放,淘汰落后产能,

加快绿色高效的资源产业链培育。

(2) 针对黄河流域碳排放高-高集聚区,应建立区域协作机制,围绕共同的重点减排目标,针对重点减排产业,实施区域统筹协作的方案。

(3) 经济发展和产业结构仍是黄河流域碳排放量增长的主要原因,今后应该引导 GDP 的绿色增长,加快产业结构升级,改造传统技术发展、转变为技术含量和附加值高的技术密集型产业,实现经济增长和碳减排“双赢”。

参考文献:

- [1] 马丽,田华征,康蕾.黄河流域矿产资源开发的生态环境影响与空间管控路径[J].资源科学,2020,42(1):137-149.
- [2] 习近平.在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话[J].求是,2019(20):1-4.
- [3] 赵良仕,刘思佳,孙才志.黄河流域水-能源-粮食安全系统的耦合协调发展研究[J].水资源保护,2021,37(1):69-78.
- [4] 金凤君,马丽,许堃.黄河流域产业发展对生态环境的胁迫诊断与优化路径识别[J].资源科学,2020,42(1).
- [5] 王明明,王卷乐.基于夜间灯光与土地利用数据的山东省乡镇级人口数据空间化[J].地球信息科学学报,2019,21(5):699-709.
- [6] 陈昕,彭建,刘焱序,等.基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的京津冀地区城市空间扩展与空间关联测度[J].地理研究,2018,37(5):898-909.
- [7] 王俊华,张廷斌,易桂花,等.DMSP/OLS 夜间灯光数据的四川省 GDP 空间化分析[J].测绘科学,2019,44(8):50-60.
- [8] 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).
- [9] 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).
- [10] 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.
- [11] 朱恩燕.浙江省碳排放时空格局动态及其对城镇化的响应研究[D].杭州:浙江大学,2020.
- [12] SHI K F, YU B L, HU Y J, et al. Modeling and mapping total freight traffic in China using NPP-VIIRS nighttime light composite data[J]. GIScience & Remote Sensing, 2015, 52(3): 274-289.
- [13] 周维维.京津冀能源消费碳排放影响因素分析及情景预测研究[D].北京:华北电力大学,2016.
- [14] 方叶林,黄震方,王坤,等.基于 PCA-ESDA 的中国省域旅游经济时空差异分析[J].经济地理,2012,32(8):149-154.
- [15] 吕倩,刘海滨.京津冀县域尺度碳排放时空演变特征——基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据[J].北京理工大学学报(社会科学版),2019,21(6):41-50.
- [16] 陈黎黎,宋戈,邹朝晖,等.基于改进局部空间自相关分析的萝北县耕地保护分区[J].资源科学,2016,38(10):1871-1882.
- [17] 赵桔超.基于夜间灯光数据的长三角地区碳排放时空变化及其与夜间地表温度的关系研究[D].昆明:云南师范大学,2020.
- [18] 李妍,张国钦,齐涛,等.乡镇遥感生态指数时空变化及影响因素研究——以天津市蓟州区为例[J].生态学报,2022,42(2):474-486.
- [19] 石敏俊,黄文,李娜.资源优势能否转化为产业优势?——煤炭开发重心西移对能源密集型产业空间格局变化的影响[J].自然资源学报,2015,30(6):891-902.
- [20] 李建豹,黄贤金,揣小伟,等.江苏省人口城镇化与能源消费 CO₂ 排放耦合协调度时空格局及影响因素[J].经济地理,2021,41(5):57-64.

编辑:陈锡超 (收稿日期:2022-01-06)