

区域实践

# 黄河流域碳排放时空格局演变、 影响因素与情景预测分析

张一凡

(西安石油大学经济管理学院, 西安 710065)

**摘要:** 科学估算、分析黄河流域碳排放时空格局、影响因素及情景预测,对黄河流域高质量发展具有重大意义。首先,使用 DMSP/OLS(国防气象卫星计划/业务线扫描系统)与 NPP/VIIRS(对地观测卫星计划/可见光红外成像辐射仪套件)夜间灯光数据模拟 2000—2022 年区域碳排放量并分析其时空格局和集聚特征;其次,通过扩展 STIRPAT(随机影响回归人口-富裕度-技术)模型和岭回归方法对碳排放影响因素进行分析;最后,根据扩展的 STIRPAT 模型对不同情景下该区域碳排放的发展趋势进行预测。结果表明:2000—2022 年黄河流域碳排放总量呈现上升的趋势,且在地级市层面上呈现显著为正的全局空间自相关,其中山西、陕西、宁夏、内蒙古呈现碳排放“高-高”集聚,青海、四川、甘肃呈现碳排放“低-低”集聚;人口总量、人均 GDP、第二产业产值占 GDP 比例、城镇化水平、能源结构和能源强度都对黄河流域碳排放呈现促进作用,政府干预呈现抑制作用;不同情景预测下,绿色发展情景预计在 2035 年实现碳达峰,而粗放情景下碳达峰时间延迟至 2045 年。

**关键词:** 黄河流域; 碳排放; 空间格局; 影响因素; 情景预测; STIRPAT(随机影响回归人口-富裕度-技术)模型  
**中图分类号:** X321 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)13-0186-08

全球面对气候变化的严峻现实,中国作为世界上最大的发展中国家和碳排放国之一,在国际气候谈判中扮演着重要角色,国际社会普遍期待中国在应对气候变化方面发挥更大作用,承担更多责任。黄河流域作为中国“能源流域”煤炭基础储量占全国的 75%左右,石油资源累计探明地质储量占全国的 36%,碳排放量占到全国的 1/3,黄河流域经济发展和生态保护之间的矛盾日益尖锐。黄河流域碳减排目标是国家区域战略重要一环,研究黄河流域碳排放的时空格局演变和影响因素,科学预测其碳达峰路径,为制定有效的碳减排政策提供科学依据,从而推动区域乃至全国的绿色可持续发展。

在“双碳”目标的背景下,学者们围绕碳排放做了大量研究并取得了显著的研究成果。主要集中在 4 个方面:①在碳排放测算上,最初研究主要通过 IPCC(政府间气候变化专门委员会)的排放因子法测算碳排放量。例如,李彦晏等<sup>[1]</sup>通过 IPCC 的方法测算中国省级层面能源消费的碳排放量。但此方法受到数据难获取的限制,研究主要在宏观层面上。随着遥感技术的突破,夜间灯光数据开始便于

获得,研究发现夜间灯光数据可用于模拟地区的碳排放,并且夜间灯光数据能够弥补碳排放数据在市、县级难以统计的缺陷,使碳排放能具体到微观层面上。例如,朱振东等<sup>[2]</sup>通过夜间灯光数据来模拟长三角城市群市级层面 CO<sub>2</sub> 的排放量;周桂芳等<sup>[3]</sup>通过夜间灯光数据模拟中原城市群县域碳排放。②在碳排放时空格局方法上,学者采用泰尔指数<sup>[4]</sup>、Dagum 基尼系数<sup>[5]</sup>、核密度<sup>[6]</sup>、标准差椭圆<sup>[7]</sup>和空间自相关<sup>[8]</sup>等方法。其中空间自相关可以与地理信息系统(geographic information system, GIS)技术结合,通过 LISA(局部空间自相关)集聚图的绘制研究者能够直观地在地图上展现碳排放量的空间集聚与分散现象,进而从区域层面深入揭示其集聚模式及其随时间的演变趋势,在研究区域时空特征时被学者广泛使用。具体到黄河流域,目前时空格局研究主要集中于资源富集的省份。上游的宁夏<sup>[9]</sup>,中游的山西<sup>[10]</sup>、陕西<sup>[11]</sup>,下游的山东<sup>[12]</sup>。总体来看,目前关于黄河流域 9 省份整体的碳排放时空格局分析的相关研究较少。③在影响因素上,影响因素分解模型主要有 IPAT(环境影响-

收稿日期: 2024-12-23

作者简介: 张一凡(1999—),男,河南商丘人,硕士研究生,研究方向为环境经济、区域经济。

人口-富裕度-技术)模型<sup>[13]</sup>、KAYA(卡娅)模型<sup>[14]</sup>、LMDI(迪氏对数指标分解法)<sup>[15]</sup>、STIRPAT(随机影响回归人口-富裕度-技术)模型<sup>[16]</sup>。周桂芳等<sup>[17]</sup>运用 LMDI 模型,从人口、经济、能源、技术 4 个维度分析碳排放影响因素,认为经济效应是碳排放增加的决定性因素;邹秀清等<sup>[18]</sup>运用 STIRPAT 模型,在人口、经济、技术方面进行扩展,分析不同省份各影响因素的贡献度。碳排放影响因素研究,一直是学者关注的热点,但缺乏对黄河流域政府干预这一影响因素的研究,因此本文分析碳排放影响因素加入政府干预进行探讨。④在情景预测上,王韶华等<sup>[19]</sup>基于扩展的 STIRPAT 模型,对京津冀碳排放情景进行达峰预测;蒋惠琴等<sup>[20]</sup>基于扩展的 STIRPAT 模型,对长三角碳排放情景进行达峰预测。虽然目前部分学者在碳排放情景预测进行了研究,但关于黄河流域碳排放的情景预测上的研究匮乏。

通过对上述文献的梳理,现有文献在碳排放上已取得了丰硕成果,这为厘清碳排放时空格局演变、影响因素和情景预测奠定了坚实的基础。然而仍有几点不足:①在时空格局上难以包含黄河流域 9 省份地级市的数据,对区域碳减排政策无法提供有力支持;②在影响因素上没有考虑黄河流域政府干预的影响;③黄河流域在碳达峰情景预测研究涉及较少。

基于此,本文存在的边际贡献可能在于:①在时空特征,根据 DMSP/OLS(国防气象卫星计划/业务线扫描系统)与 NPP/VIIRS(对地观测卫星计划/可见光红外成像辐射仪套件)夜间灯光数据模拟地级市层面的碳排放,运用空间自相关分析黄河流域 9 省份地级市碳排放的空间集聚特征;②运用扩展 STIRPAT 模型,除在人口、经济和能源变量之外,考虑政府对碳排放的干预程度,将政府干预这一变量加入驱动因素;③预测不同情景下黄河流域碳排放达峰时间,为推动黄河流域低碳高质量发展提供科学依据。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 数据来源

碳排放数据来源于中国能源统计局和《中国能源统计年鉴》。2000—2013 年 DMSP/OLS 和 2012—2022NPP/VIIRS 来源于 NOAA 网站 NGDC 数据中心。各省份的人口总量、人均 GDP、第二产业产值占 GDP 比例、城镇化水平数据均来自各省的《统计年鉴》,能源结构以及能源强度通过计算得出。在研究中,影响因素体系中存在数据缺失,采

用插值法来进行数据的补充,以确保研究的全面性和准确性。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 碳排放量计算

关于碳排放量计算,用能源消费代替碳排放。选取黄河流域 9 省份并依据国际通用的 IPCC (2006)标准确定各类能源碳排放系数,参考李静等计算碳排放的方法<sup>[21]</sup>选取 9 种能源。计算公式为

$$CO_2 = \frac{44}{12} \times \sum_{i=1}^9 K_i E_i \quad (1)$$

式中: $i$  为能源种类; $K_i$  为能源  $i$  的  $CO_2$  排放系数,万 t 碳/万 t 标准煤; $E_i$  为能源  $i$  的消费量,按标准煤计,万 t。9 种能源  $CO_2$  排放系数和折算标准煤系数参考国际通用的 IPCC 公布的 2006 年的数据。

#### 1.2.2 碳排放模拟

关于黄河流域地级市层面的碳排放,采用夜间灯光数据拟合矫正,分别对 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 卫星数据进行拟合校正和降噪处理,对 NPP/VIIRS 的数据进行异常值处理。参考杜海波等<sup>[22]</sup>的做法,借助省级数据计算出二者之间具体的相关性系数,将其代入到城市数据中,利用城市层面的夜间灯光反推城市层面的能源消耗量。考虑到从栅格尺度上容易增加误差,因此采用不含截距项的线性模型。结果表明,黄河流域城市所在 9 省份的夜间灯光总值 TDN 和能源消费碳排放量存在具有正向的线性相关性,并且拟合优度  $R^2$  均大于 0.8。

#### 1.2.3 空间自相关模型

全局空间自相关是指在整个研究区域内,某一变量是否在空间上具有一致的相似性或差异性。通常用莫兰指数 Moran's  $I$  指数进行度量,莫兰指数的值介于  $[-1, 1]$ ,其数值反映不同区域之间的空间自相关性。计算公式为

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

式中: $n$  为研究区域中观测点的数量; $x_i$  和  $x_j$  为位置  $i$  和  $j$  的变量值; $\bar{x}$  为所有观测点变量值的平均值; $W_{ij}$  为位置  $i$  和  $j$  之间的空间权重矩阵元素。

局部空间自相关利用 LISA 进行聚类检验,局部莫兰指数用于识别单个观测值与其邻近观测值之间的空间自相关。计算公式为

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

式中:当  $I_i > 0$  时,表明相邻区域之间呈现正的空间自相关,属于“高-高”或“低-低”类型,即相邻区域的碳排放存在高(或低)集聚现象;当  $I_i < 0$  时,表明相邻区域之间呈现负的空间自相关,属于“高-低”或“低-高”类型,相邻地区的碳排放高(低),低(高)集聚现象。

#### 1.2.4 扩展 STIRPAT 模型

STIRPAT 模型是在 IPAT 模型的基础上提出的。其标准形式为

$$I = a P^b A^c T^d e \quad (4)$$

式中: $a$  为常数项; $P$ 、 $A$ 、 $T$  分别表示人口数量、富裕程度、技术水平; $b$ 、 $c$ 、 $d$  分别为人口、富裕程度和技术水平的弹性系数; $e$  为随机误差项。对模型取对数:

$$\ln I = \ln a + b \ln P + c \ln A + d \ln T + \ln e \quad (5)$$

黄河流域能源消费碳排放影响因素变量见表 1,为精确预测黄河流域碳排放,选取人口、经济、产业、城镇化、能源和政府 5 个一级指标和 7 个二级指标。扩展的 STIRPAT 模型计算公式为

$$\ln Y = a_0 + a_1 \ln X_1 + a_2 \ln X_2 + a_3 \ln X_3 + a_4 \ln X_4 + a_5 \ln X_5 + a_6 \ln X_6 + \ln X_7 \quad (6)$$

表 1 黄河流域能源消费碳排放影响因素变量

变量	符号	计算方法
人口总量	$\ln X_1$	年末常住总人口
人均 GDP	$\ln X_2$	GDP/总人口
第二产业产值占 GDP 比例	$\ln X_3$	第二产业产值/GDP
表示城镇化水平	$\ln X_4$	城镇人口/总人口
能源结构	$\ln X_5$	煤炭消费量/全部能源消费量
能源强度	$\ln X_6$	单位 GDP 能源消费量
政府干预	$\ln X_7$	财政支出/地区生产总值

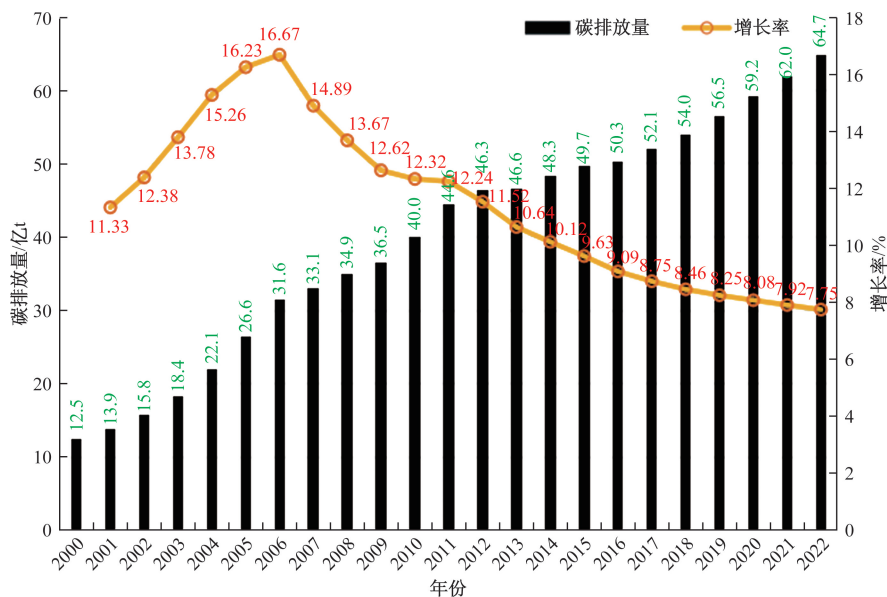


图 1 1997—2022 年黄河流域碳排放量及增长率

## 2 结果分析

### 2.1 黄河流域能源消费碳排放时空演变特征

#### 2.1.1 时间序列特征

黄河流域 2000—2022 年碳排放量如图 1 所示,在研究期间碳排放量呈现持续上升的趋势但是增长速率却呈现先上升后下降的态势,这表明黄河流域的碳排放还未达到峰值。具体看,2000—2006 年,碳排放量从 12.5 亿 t 增长至 2006 年 31.6 亿 t,年均增长率为 16.67%。说明 2001 年中国加入世贸组织后,以山东为“龙头”带动经济增长强劲,区域间产业分工合作拉动黄河流域中下游省份的经济增长,黄河流域整体碳排放明显增加。2006—2010 年,碳排放年均增长率显著下降,表明党的十六届六中全会提出“资源利用效率显著提高,生态环境明显好转”的政策,促使黄河流域各省份特别是能源大省山西、内蒙古等省份,能源结构优化、效率提高。2010—2022 年,碳排放的年均增长率呈现出缓慢下降的趋势,这一现象与《巴黎协定》的签署有着密切的关联,随着新发展理念深入人心,黄河流域开始从经济快速增长向高质量发展转变。

#### 2.1.2 空间关联特征

表 2 显示,黄河流域碳排放表现出显著的空间正自相关关系,说明黄河流域各省碳排放的空间正自相关关系呈现相对稳定态势。

表 2 2000—2022 年黄河流域碳排放全局 Moran's I 指数

年份	2000	2005	2010	2015	2022
Moran's I	0.437	0.546	0.503	0.568	0.646

从空间分布上看,运用 LISA 聚类绘制 2000 年、2005 年、2015 年、2022 年空间集聚图,从地级市揭示黄河流域碳排放的局部差异性和关联度。在 2000 年,“高-高”集聚主要分布在山西省太原市、吕梁市、临汾市、长治市、晋城市、大同市,陕西省榆林市、延安市以及山东省烟台市、潍坊市,此时集聚规模较小;2005 年,“高-高”集聚在山西省基本保持不变,山东省开始扩散,扩张至青岛市、日照等市。说明山东依托对外贸易,以重工业为经济引擎,推动碳排放量的增加;2010 年,“高-高”集聚从山西省中部扩展到内蒙古呼和浩特市、鄂尔多斯等市;2015 年,“高-高”集聚扩散加剧,黄河中上游形成山西、陕西、宁夏、内蒙古能源富集城市为主的城市群。其中山西省是中国煤炭大省,宁夏宁东、内蒙古鄂尔多斯、陕西榆林为核心的能源化工“金三角”,是全国罕见的能源富集区,是中国能源供应增长的主力军,经济发展主要依靠传统能源,传统能源的消耗自然带来碳排放的增加并向周围地区扩展;2022 年,“高-高”集聚开始缩小,山东省“高-高”集聚消失。说明《山东省推进工业转型升级行动计划(2015—2020 年)》:淘汰 6 大领域落后产能,积极推进传统产业改造提升,推动发展方式绿色低碳转型,推进绿色环保科技创新和产业发展,取得显著成效。“低-低”集聚分布比较稳定,主要分布在青海、四川、甘肃等地,说明地区生态资源的约束以及人口稀少,城市经济发展不足难以形成联系。“高-低”集聚主要分布在兰州和成都两地,兰州是西北地区的重要工业基地而成都作为西南重镇经济繁荣,两地的碳排放远高于周边城市。“低-高”集聚则没有呈现一定的规律。

## 2.2 碳排放扩展 STIRPAT 模型分析

扩展 STIRPAT 模型可能导致数据产生多重共

线性问题。岭回归是解决多重共线性问题的常用方法。采用岭回归方法对数据重新分析,见表 3。

### 2.3 影响因素分析

(1)黄河流域人口每增长 1%,碳排放量将增加 0.422%。黄河流域承载全国约 30.05% 人口,2000—2019 年,其人口规模显著增长,从 39 856.03 万人攀升至 42 180.15 万人。人口增长带来的不仅是劳动力资源与消费市场的扩大,也伴随着对衣食住行等基本生活需求的急剧增加,造成人口增长产生的边际碳排放递增。

(2)黄河流域人均 GDP 每增长 1%,碳排放量将增加 0.546%。黄河流域经济发展强劲,人均 GDP 从 2000 年的 0.51 万元跃升至 2022 年的 7.16 万元,年均增长率高达 12.76%,说明黄河流域正处于高速发展阶段,人民生活水平不断提高,收入的增加会带来对商品与服务需求的扩大,进而驱动生产与消费链条上的能源消耗与碳排放,造成人均 GDP 增长,带来边际碳排放递增。

(3)黄河流域第二产业产值占 GDP 比例每增长 1%,碳排放量将增加 0.061%。黄河流域上游的宁夏与内蒙古是中国的传统能源工业重镇;中游的山西省,煤炭资源富集;下游的山东省,以重工业为引擎,共同构成黄河流域以第二产业为主导的经济格局。说明当前黄河流域的发展模式仍然是粗放式,经济增长伴随着资源能源的大量消耗,科技创新的作用还未充分发挥,造成第二产业产值占 GDP 比例的增加产生的边际碳排放递增。

(4)黄河流域城镇化水平每增长 1%,碳排放量将增加 1.347%。2000 年,山东、河南、四川等人口大省的城镇化率分别为 35%、23.2%、26.69%,截至 2022 年,显著提升至 64.54%、57.07%、58.35%,几乎呈现翻倍式增长。说明在加速城镇化

表 3 岭回归结果

变量	非标准化系数		标准化系数	<i>t</i>	<i>P</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	调整 <i>R</i> <sup>2</sup>	<i>F</i>
	<i>B</i>	标准误	Beta					
常数	-7.340	0.457	—	-16.044	0.000	0.919	0.916	322.217 (0.000)
ln <i>X</i> <sub>1</sub>	0.422	0.020	0.406	21.040	0.000			
ln <i>X</i> <sub>2</sub>	0.546	0.024	0.420	22.577	0.000			
ln <i>X</i> <sub>3</sub>	0.061	0.022	0.051	2.814	0.005			
ln <i>X</i> <sub>4</sub>	1.347	0.078	0.327	17.306	0.000			
ln <i>X</i> <sub>5</sub>	0.588	0.059	0.189	10.045	0.000			
ln <i>X</i> <sub>6</sub>	0.262	0.028	0.178	9.481	0.000			
ln <i>X</i> <sub>7</sub>	-0.665	0.045	-0.301	-14.875	0.000			

$K=0.165$ , 因变量:  $\ln Y$

注:括号内为 *P* 值。

过程中,大量人口从农村迁往所属城市,将会带动基础设施建设、交通和用电量等需求增加,造成城镇化的提升,带来边际碳排放递增。

(5)黄河流域能源结构每增长1%,碳排放量将增加0.588%。黄河流域中上游山西、陕西、宁夏、内蒙古地区煤炭消耗高达70%以上,多数省份能源结构还是以煤炭为主,说明黄河流域始终处于缺油、少气、相对富煤的状态,区域经济的发展更加依赖煤炭能源,造成能源结构上升会带来碳排放量的增加。

(6)能源强度每增长1%,碳排放量将增加0.262%。当能源强度较高时,意味着为获得相同的经济产出,需要消耗更多的能源。说明黄河流域在技术水平上相对落后,能源利用效率较低,能源强度高导致碳排放量的增加。

(7)政府干预每增长1%,碳排放量将减少0.665%。黄河流域在碳排放问题上,政府出台相关政策、加强监管和执法力度取得显著成效,如碳排放权交易制度、节能减排政策、新能源发展政策等,来引导和约束企业和个人的行为,降低碳排放量。

#### 2.4 碳排放情景预测

考虑到未来的发展趋势,人口总量、人均GDP、第二产业产值占GDP比例、城镇化水平、能源结构、能源强度受多种因素的影响,并结合国家和各个省份政策,构建式(6)参数下的年度增长情景,将预测

参数分别设定为绿色发展情景、低碳节能情景、粗放情景3种情景,见表4。

(1)人口总量。2000—2022年,中国年平均增长率0.5%,黄河流域年平均增长率0.35%,依据《国家人口发展规划(2016—2030年)》全国人口在2030年达到峰值,随后出现负增长的趋势,将2023—2050年的人口增长速率区间设定为 $-0.1\% \sim 0.6\%$ 。

(2)人均GDP。2022年全国人均GDP增长率为3%,黄河流域平均人均GDP增长率为4%,结合黄河流域经济社会发展情况,以及各省国民经济和社会发展公报,将2023—2050年的人均GDP增长速率区间设定为 $3\% \sim 7.5\%$ 。

(3)第二产业产值占GDP比例。黄河流域2020—2022年第二产业增加值占GDP比重年均增长率 $-0.23\%$ ,"十四五"规划和2035年远景目标纲要指出,中国经济要向高质量发展转变,大幅增强工业创新能力,产业结构向低碳绿色转型,将2023—2050年的第二产业产值占GDP比例的增长速率区间设定为 $-1.5\% \sim -0.1\%$ 。

(4)城镇化水平。2022年全国城镇化水平增长率为0.5%,黄河流域平均城镇化水平增长率为0.52%,结合黄河流域各省份"十四五"规划中提到的城镇化率目标,将2023—2050年的城镇化水平增长速率区间设定为 $-0.1\% \sim 0.6\%$ 。

表4 黄河流域各影响因素变化率设置

情景	时期	增长率设定						
		$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$
绿色发展情景	2023—2025年	0.4	5.5	-0.5	0.4	-2.0	-3.5	0.3
	2026—2030年	0.3	5.0	-0.7	0.3	-2.5	-4.0	0.4
	2031—2035年	0.2	4.5	-0.9	0.2	-3.0	-4.5	0.5
	2036—2040年	0.1	4.0	-1.1	0.1	-3.5	-5.0	0.6
	2041—2045年	0.0	3.5	-1.3	0.0	-4.0	-5.5	0.7
	2046—2050年	-0.1	3.0	-1.5	-0.1	-4.5	-6.0	0.8
低碳节能情景	2023—2025年	0.5	6.5	-0.3	0.5	-1.5	-3.0	0.2
	2026—2030年	0.4	6.0	-0.5	0.4	-2.0	-3.5	0.3
	2031—2035年	0.3	5.5	-0.7	0.3	-2.5	-4.0	0.4
	2036—2040年	0.2	5.0	-0.9	0.2	-3.0	-4.5	0.5
	2041—2045年	0.1	4.5	-1.1	0.1	-3.5	-5.0	0.6
	2046—2050年	0.0	4.0	-1.3	0.0	-4.0	-5.5	0.7
粗放情景	2023—2025年	0.6	7.5	-0.1	0.6	-1.0	-2.5	0.1
	2026—2030年	0.5	7.0	-0.3	0.5	-1.5	-3.0	0.2
	2031—2035年	0.4	6.5	-0.5	0.4	-2.0	-3.5	0.3
	2036—2040年	0.3	6.0	-0.7	0.3	-2.5	-4.0	0.4
	2041—2045年	0.2	5.5	-0.9	0.2	-3.0	-4.5	0.5
	2046—2050年	0.1	5.0	-1.1	0.1	-3.5	-5.0	0.6

(5)能源结构。十四五规划中明确能源消耗下降 13.50% 的目标,结合黄河流域各省份要加速淘汰以煤炭为主的传统产业,将 2023—2050 年的能源结构增长速率区间设定为  $-1\% \sim -4.5\%$ 。

(6)能源强度。按照“十四五”规划设定的约束值,结合黄河流域独特的地理优势在清洁领域的快速发展,将 2023—2050 年的能源强度增长速率区间设定为  $-2.5\% \sim -6\%$ 。

(7)政府干预。黄河流域的政府干预比重较为稳定,根据路径依赖特征,将 2023—2050 年的政府干预增长速率区间设定为  $0.1\% \sim 0.8\%$ 。

## 2.5 不同情景下黄河流域能源消费碳达峰趋势分析

2020—2022 年黄河流域能源消费碳排放呈逐渐上升趋势,碳排放没有达到峰值。3 种场景的情景预测如图 2、表 5 所示。低碳节能情景达到碳达峰的时间是 2035 年,碳峰值为 76.4 亿 t,表明在按照目前的碳减排政策的情况下“双碳”目标难以实现,黄河流域需要原来产业的基础上加快产业升级、清洁能源的发展和能源结构的调整;绿色发展情景下碳达峰的时间是 2030 年,这有利于国家“双碳”目标的实现,碳峰值为 68.5 亿 t,在该情景下,黄河流域在现有的经济增长趋势下,进一步调整能源结构和降低能源强度可以让黄河流域提早实现碳达峰。粗放情景下碳达峰的时间是 2045 年,峰值为 88.8 亿 t,表明依赖传统能源的消耗来加快发展经济,用经济的发展速度来作为政府的发展目标,将难以实现碳达峰的目标。

表 5 不同情景下的碳达峰时间和峰值

情景	低碳节能情景	绿色发展情景	粗放情景
碳达峰年份	2035	2030	2045
碳排放峰值/亿 t	76.4	68.5	88.8

## 3 结论和对策建议

### 3.1 结论

使用 2000—2022 年黄河流域的碳排放量分析时空格局和集聚特征,通过扩展 STIRPAT 模型考察人口总量、人均 GDP、第二产业产值占 GDP 比例、城镇化水平、能源结构、能源强度和政府干预 7 个影响因素对黄河流域碳排放量的影响,在此基础上设置 3 种不同的发展情景,模拟黄河流域未来碳排放趋势。主要研究结论如下。

(1)2000—2022 年黄河流域碳排放呈现总量不断上升,碳排放并未达到峰值。增长速率呈现先上升后下降的趋势,年均增长率由 2001 年 11.33% 增长至 2006 年 16.67%,但是到 2022 年降低至 7.75%。

(2)黄河流域在地级水平上展示出明显的全局空间正相关特征,且关联程度逐年增强。具体来说,“高-高”集聚区域主要分布在山西、陕西、宁夏、内蒙古等传统能源富足的区域,随着时间的推移,“高-高”集聚现象开始不断缩小;“低-低”集聚区域则主要集中分布在宁夏、青海和四川,这些地区的碳排放水平相对较低,其集聚的规模和分布范围相对稳定,没有呈现出显著的变化趋势。

(3)人口总量、人均 GDP、第二产业产值占 GDP 比例、城镇化水平、能源结构和能源强度对黄河流域碳排放起到推动作用,其中城镇化水平是碳

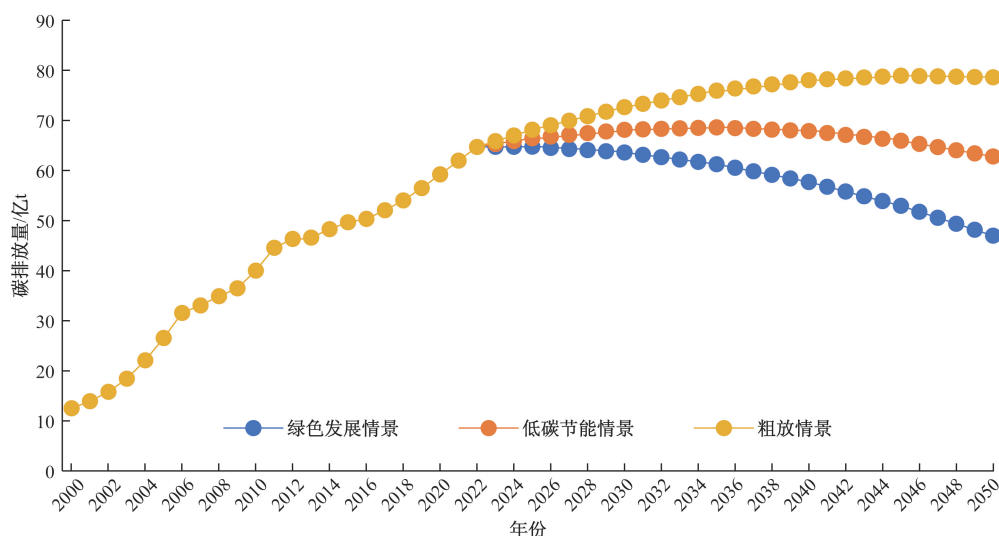


图 2 不同情景下黄河流域能源消费碳排放量预测

排放增加的主要影响因素。

(4)不同情景下黄河流域能源消费碳排放达峰差异明显,绿色发展情景最可能符合未来的发展趋势。

### 3.2 对策建议

(1)优化能源开布局局和合理规划能源行业生产规模,充分利用黄河流域的资源、要素禀赋和发展基础。根据黄河流域独特的地理优势、资源特征,差异化制定碳减排政策及碳排放交易额,争取尽快实现“双碳”目标。

(2)从黄河流域碳排放的空间分布及集聚状态来看,城市仍旧是实施碳减排的主要区域。山西大同市、陕西榆林市、内蒙古鄂尔多斯市等典型城市,作为以能源驱动型经济为主的的城市仍然是重点减排区,黄河流域重工业的城市要促进能源密集型行业如化工、钢铁、建材等产业转型升级,提高能源效率,优化能源结构与产业结构,推动重点行业节能降碳改造和设备更新,壮大战略性新兴产业、先进制造业集群,减少对高耗能、高排放行业的依赖。

(3)城镇化水平是黄河流域碳排放的主要驱动力,而黄河流域作为人口稠密的区域,在优化城乡区域发展布局、推进政府治理效能、碳减排政策的实施上要统筹兼顾。在推动城镇化的过程中,要引导大中小城市和小城镇协调发展、集约紧凑布局,提升县城产业和人口承载能力,减轻生态脆弱区的承载压力。政府干预对黄河流域碳排放起抑制作用,各省域政府要充分发挥财税政策对绿色转型和科技创新引导作用,加大对绿色产业和绿色科技创新的扶持,在转型中加强监管力度,在确保经济发展的前提下,实现生态协调发展。

(4)加快黄河流域清洁能源的使用,着力降低能源强度,加大能源结构的调整力度。上游地区,充分利用沙漠、戈壁地区的风能、光能资源,着重发展光伏、风电等新能源,同时要注重提高清洁能源的外送效率;中游地区,充分发挥化石能源的优势,构建化石能源和新能源良性融合发展的机制;下游地区,依托临海优势,充分挖掘海上风电的潜力,重点推进能源基地转型和安全保障设施布局。在整体上,黄河流域既要推动煤炭开发利用的转型升级也要差异化发展黄河流域新能源产业,加强多因素协同,因地制宜共创新高效发展和产业结构协同优化策略,各省市要加快构建新能源和清洁产业集群,形成多元、多极支撑的现代产业新体系。

### 参考文献

- [1] 李彦旻, 张晓桦, 张天琦, 等. 长江经济带能源消费碳排放时空特征及驱动因素研究[J]. 煤炭经济研究, 2024, 44(11): 22-29.
- [2] 朱振东, 齐璇璇, 贾一越, 等. 长三角城市群 CO<sub>2</sub> 排放时空格局和影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(2): 242-253.
- [3] 周桂芳, 周彦兵, 胡涛. 中原城市群县域碳排放时空演变及影响因素分析[J]. 管理学报, 2023, 36(3): 19-34.
- [4] 刘战豫, 张伞伞. 黄河流域河南段县域能源消费碳排放时空格局演变特征[J]. 河南理工大学学报(社会科学版), 2024, 25(5): 58-67.
- [5] 曾鹏, 段至诚, 宗成. 中国城市群经济高质量发展与碳排放强度的解耦态势及差异分解[J]. 统计与决策, 2024, 40(16): 117-121.
- [6] 韩冬. 京津冀城市群协调发展与碳排放耦合协调度的时空演进[J]. 统计与决策, 2024, 40(13): 124-129.
- [7] 李云燕, 张硕, 张玉泽. 绿色金融视角下中国省域碳排放的时空演变及减排研究[J]. 软科学, 2023, 37(12): 39-48.
- [8] 张赫, 黄雅哲, 王睿, 等. 中国县域碳排放脱钩关系及其时空特征演变[J]. 资源科学, 2022, 44(4): 744-755.
- [9] 马明德. 黄河流域碳排放的时空格局演变及驱动机制[J]. 北方民族大学学报, 2024(4): 137-147.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 胡一凡, 明涛, 柴成富. 山东省土地利用变化对碳排放时空演变格局的影响分析[J]. 综合运输, 2024, 46(7): 167-174.
- [13] 张潇, 王冉, 刘世奇, 等. 基于扩展 IPAT 模型的徐州市碳达峰情景分析[J]. 中国市场, 2023(8): 22-24.
- [14] 罗浩. 基于 Kaya 拓展模型的福建省能源消费碳排放驱动因素分析[J]. 化学工程与装备, 2024(8): 149-152.
- [15] 乌日娜, 吴海连, 赵明宇, 等. 基于夜间灯光数据的辽宁省能源碳排放时空格局演化及驱动机制研究[J]. 辽宁师范大学学报(自然科学版), 2024, 47(4): 559-568.
- [16] 刘畅. 东北三省碳排放影响因素分析和趋势预测: 基于 STIRPAT 模型和情景分析法[J]. 科技和产业, 2024, 24(21): 348-358.
- [17] 周桂芳, 周彦兵, 胡涛. 中原城市群县域碳排放时空演变及影响因素分析[J]. 管理学报, 2023, 36(3): 19-34.
- [18] 邹秀清, 孙学成, 葛天越, 等. 长三角地区碳排放差异、影响机理及碳达峰预测[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(3): 548-557.
- [19] 王韶华, 赵鸣春, 张伟, 等. 京津冀碳排放的影响因素分析及达峰情景预测: 基于供给侧改革视角[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2022, 24(6): 54-66.
- [20] 蒋惠琴, 陈苗苗, 余昭航, 等. 异质性视角下长三角城

- 市群碳达峰影响因素研究[J]. 城市问题, 2022(8): 52-61.
- [21] 李静, 王坤, 陈奕伶, 等. 京津冀地区能源消费碳排放量变化及影响因素分析[J/OL]. 天津师范大学学报(自然科学版), 1-14[2024-11-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1337.n.20241022.1025.002.html>.
- [22] 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.

## Analysis of the Temporal and Spatial Evolution, Influencing Factors, and Scenario Predictions of Carbon Emissions in the Yellow River Basin

ZHANG Yifan

(School of Economics and Management of Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Scientifically estimating and analyzing the spatiotemporal pattern, influencing factors, and scenario predictions of carbon emissions in Yellow River Basin is of great significance for its high-quality development. Firstly, DMSP/OLS and NPP/VIIRS nighttime light data was used to simulate regional carbon emissions from 2000 to 2022 and their spatiotemporal patterns and agglomeration characteristics were analyzed. Secondly, the influencing factors of carbon emissions were analyzed through an extended STIRPAT (stochastic impacts by regression on population, affluence, and technology) model and ridge regression method. Finally, based on the extended STIRPAT model, the development trend of carbon emissions in this region under different scenarios is predicted. The results show that from 2000 to 2022, total carbon emissions in the Yellow River Basin showed an upward trend, with a significant positive global spatial autocorrelation at the prefecture-level city level. Among them, Shanxi, Shaanxi, Ningxia, and Inner Mongolia provinces exhibited "high-high" agglomeration of carbon emissions, while Qinghai, Sichuan, and Gansu provinces exhibited "low-low" agglomeration. Total population, per capita GDP, the proportion of secondary industry output value to GDP, urbanization level, energy structure, and energy intensity all contribute to increased carbon emissions in the Yellow River Basin, while government intervention has an inhibitory effect. Under different scenario predictions, the green development scenario predicts that carbon emissions will peak in 2035, while under the extensive scenario, the peaking time is delayed until 2045.

**Keywords:** Yellow River Basin; carbon emissions; spatiotemporal pattern; influencing factors; scenario prediction; STIRPAT (stochastic impacts by regression on population, affluence, and technology) model