

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2023.03.003

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

引文格式:李凯,蔺雪芹,崔惟佳. 主体功能区视角下河南省碳排放时空演化特征及驱动因素[J]. 西安理工大学学报,2023,39(3):317-329.

LI Kai, LIN Xueqin, CUI Weijia. Spatio-temporal evolution characteristics and driving factors of carbon emission in Henan Province from the perspective of major functional zones[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2023, 39(3): 317-329.

# 主体功能区视角下河南省碳排放时空演化特征及驱动因素

李 凯, 蔺雪芹, 崔惟佳

(首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048)

**摘要:** 为揭示河南省碳排放的总体情况,并为实现河南省碳排放的精准控制、制定差别化的区域环境政策提供依据,本研究以 2009—2019 年河南省 158 个县域单元为研究对象,采用 ArcGIS 空间分析、泰尔指数及空间计量模型等研究方法,分析河南省及各主体功能区碳排放的时空演化特征及驱动因素。结果表明:①2009—2019 年河南省碳排放呈现“先急后缓”的增长趋势,重点开发区碳排放最多,重点生态功能区碳排放最少;②河南省碳排放整体呈现以豫中地区为核心的高碳排放集聚区和以豫东南、豫西为核心的低碳排放集聚区,且呈现出以郑州为高碳排放中心向西南逐渐扩张的趋势;③2009—2019 年河南省碳排放总体差异缩小,重点开发区内部差异是全省碳排放空间差异的主要来源;④研究期内重点开发区碳排放与经济发展呈现“正 U 型”关系,与实现碳达峰还有一定距离;⑤城镇化率与建设用地面积是导致河南省碳排放增加的主要因素。与全省估计结果不同的是,第二产业增加值占 GDP 比重和农业用地面积分别是重点开发区和农产品主产区碳排放增加的主导因素。

**关键词:** 主体功能区; 碳排放; 驱动因素; 空间计量模型; 河南省

中图分类号: F127

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2023)03-0317-13

## Spatio-temporal evolution characteristics and driving factors of carbon emission in Henan Province from the perspective of major functional zones

LI Kai, LIN Xueqin, CUI Weijia

(College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** To comprehensively assess the carbon emissions in Henan Province and establish a foundation for effective carbon emission control and the development of tailored regional environmental policies, this study employs various methodologies, including the ArcGIS spatial analysis, the Theil index, and the spatial econometric modeling. The analysis is based on the survey data collected from 158 county-level units in Henan Province spanning from 2009 to 2019, and is aimed at investigating the spatio-temporal evolution patterns and identifying the key drivers of carbon emissions in Henan Province and its different major functional zones. The results show the followings: ①Between 2009 and 2019, the carbon emissions of Henan Province exhibited a pattern of

收稿日期: 2023-01-30; 网络首发日期: 2023-06-25

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/61.1294.N.20230621.1720.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42071148)

第一作者: 李凯,男,硕士生,研究方向为宏观经济管理与可持续发展。E-mail: A2429164003L@163.com

通信作者: 蔺雪芹,女,博士,教授,研究方向为宏观经济管理与可持续发展。E-mail: linxueqin@cnu.edu.cn

initial rapid growth followed by slower growth. Notably, key development zones demonstrated the most amount of carbon emissions, while key ecological function zones exhibited the lowest; ②The overall carbon emission distribution in Henan Province displayed a concentration of high emissions in central region, while southeastern and western regions exhibited lower emissions. There was a gradual expansion of the high carbon region from areas centering around Zhengzhou towards the southwest; ③The spatial difference of carbon emissions within Henan Province, to which key development zones has most contribution, has been narrowing between 2009 and 2019; ④From 2009 to 2019, a “U-shaped” curve relationship has been observed between carbon emissions in key development zones and economic development, suggesting that the carbon peak has not arrived; ⑤The increase in carbon emissions in Henan Province can be attributed to the urbanization rate and construction land area, which serves as the primary factors. Different from estimation results of Henan province, the primary factors for the rise in carbon emissions in key development zones and main agricultural production areas are the proportion of the added value of the secondary industry in GDP and the area of agricultural land, respectively.

**Key words:** major functional zones; carbon emission; driving factors; spatial econometric model; Henan Province

2010 年全国主体功能区规划的发布为区域发展提供了新的视角,主体功能区规划从地域功能理论出发,在区域发展功能差异的基础上,统筹兼顾自然生态系统和社会经济系统,涵盖了经济发展和生态保护的双重目标,以功能区划分的形式明确区域在国土空间分工中所承担的功能,使特定功能类型区得以因地制宜的发展,是区域经济发展和环境保护的新思路<sup>[1]</sup>。“十三五”规划认为主体功能区具有国土空间开发保护基础制度的作用,支持优化开发区率先实现碳达峰,更紧密地将主体功能与低碳发展联系起来<sup>[2]</sup>。“十四五”规划更是进一步明确要细化主体功能区划分,按照主体功能定位划分政策单元,对重点开发地区、生态脆弱地区、能源资源富集地区等制定差异化政策,分类精准施策。因主体功能而异的国土开发格局是空间治理的基础和前提条件,包括低碳发展在内的开发建设活动应与国土开发格局保持基本一致<sup>[3]</sup>。主体功能区规划将国土空间划分为不同的功能区域,这些区域因自然环境和资源禀赋不同,碳排放存在显著的差异<sup>[4]</sup>。在满足国家应对气候变化的总体要求下,需要对各功能区碳排放现状及驱动因素进行分析,才能更好地制定和实施符合各地区发展情况的碳减排政策。河南省作为中国的人口、农业、工业大省及全国重要的交通枢纽,是未来全国高新技术产业、先进制造业的重要基地,同时是全国能源原材料基地、中部地区人口和经济密集区,能源消耗总量长期位居全国第五,其碳排放问题不容忽视<sup>[5-6]</sup>。河南省“十四五”规划提出,要立足资源环境承载能力,发挥各地比较优势,推动形成主体功能明显、优势互补、高质量发展的空间开发保护格局,要着重构建低碳高效的能源支撑体系,

优化省内能源结构,力争在“十四五”阶段持续降低碳排放强度,到 2035 年碳达峰后稳中有降。

已有研究主要从不同尺度、区域和不同行业测算碳排放的总量、强度、效率以及分析碳排放的空间效应和驱动因素。碳排放总量的测算方面,学者们大多从能源消耗的角度利用联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)提供的参考方法计算碳排放总量<sup>[7-8]</sup>。此后部分学者利用夜间灯光监测数据测算碳排放<sup>[9-11]</sup>,该方法解决了由于能源统计数据不完整而导致的无法计算县域尺度碳排放的问题,为研究县域尺度碳排放作出了突出贡献。碳排放的空间尺度方面,已有研究多从省域、市域尺度分析碳排放的时空格局<sup>[12-15]</sup>,由于能源统计数据的缺乏,相对而言,县域尺度下的碳排放时空特征及驱动因素研究还不完善<sup>[16-17]</sup>。碳排放的空间差异方面,学者们主要应用泰尔指数<sup>[18-19]</sup>、基尼系数<sup>[20-21]</sup>等方法考察碳排放的空间差异,但鲜有研究从主体功能区角度切入,划分研究区域并计算空间差异<sup>[22]</sup>。碳排放的驱动因素方面,学者们主要运用 STIRPAT 模型<sup>[16]</sup>、GWR 模型<sup>[23]</sup>、空间计量模型<sup>[24]</sup>等方法分析碳排放的驱动因素,已有研究认为人口规模、城镇化率、产业结构以及土地利用类型的变化是影响碳排放的主要因素<sup>[11, 25-26]</sup>,但并未分主体功能区探讨不同类型区域的驱动因素,因而会忽略不同主体功能区之间的差异,不能为地方低碳政策的制定提供有效依据<sup>[4, 27]</sup>。

可以看出,当前对于不同尺度碳排放时空演化及影响因素的研究较为全面、系统,但囿于县域尺度社会经济数据不全面,导致县域尺度碳排放格局及影响因素研究相对不足。同时,已有碳排放研究均

是探讨不同因素对城市或县域尺度碳排放的平均影响,考虑区域差异尤其是区域主体功能差异的研究相对较少,从而可能削弱影响因素对不同主体功能区域、不同因素的解释力度。基于此,本研究以河南省 158 个县域单元为研究对象,采用 ArcGIS 空间分析、泰尔指数及空间计量模型等方法,分析 2009—2019 年河南省及各主体功能区碳排放的时空演化特征及驱动因素,以期为河南省及各主体功能区的低碳发展提供更精准的决策支撑。

## 1 研究方法和数据来源

### 1.1 研究方法

#### 1.1.1 泰尔指数

泰尔指数(Theil index),最早是由信息理论中熵的概念演化而来,用来衡量不同地区之间的收入差异。Theil 指数越大,说明区域之间的差异越大。本研究根据河南省主体功能区规划将全省分为重点开发区、农产品主产区、重点生态功能区三类区域。泰尔指数的计算公式如下:

$$T = \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_i}{C}\right) \ln \left(\frac{C_i/C}{1/n}\right) = T_w + T_B \quad (1)$$

$$T_{wj} = \sum_{i=1}^{n_j} \left(\frac{C_{ji}}{C_j}\right) \ln \left(\frac{C_{ji}/C_i}{1/n_j}\right) \quad (2)$$

$$T_w = \sum_{j=1}^M \left(\frac{C_j}{C}\right) T_{wj} \quad (3)$$

$$T_B = \sum_{j=1}^M \left(\frac{C_j}{C}\right) \ln \left(\frac{C_j/C}{n_j/n}\right) \quad (4)$$

式中: $i$  为县域; $j$  为主体功能区; $C$  为碳排放总量; $C_i$  为  $i$  县的碳排放量; $C_j$  为  $j$  功能区的碳排放量; $C_{ji}$  为  $j$  功能区内  $i$  县的碳排放量; $n$  为县域总个数; $n_j$  为  $j$  功能区的县域个数; $M$  为功能区总个数; $T$  为总 Theil 指数; $T_B$  为区域间 Theil 指数; $T_w$  为区域内 Theil 指数; $T_{wj}$  为  $j$  功能区内 Theil 指数。

此外,定义  $\frac{T_B}{T}$  为区域间贡献率,  $\frac{T_w}{T}$  为区域内贡献率。

#### 1.1.2 理论框架的构建与解释变量的选取

IPAT 理论最初由 Ehrlich 和 Holdren 提出,该模型认为环境是由人口数量、富裕程度和技术进步共同决定的<sup>[28]</sup>,后来经学者改进并应用于碳排放的研究当中<sup>[29]</sup>。环境库兹涅茨假说认为,污染排放物与经济增长呈现倒“U”型关系<sup>[30]</sup>,即随着经济发展水平的提高,污染排放物呈现先上升后下降的趋势,

后来学者将该结论与库兹涅茨曲线<sup>[31]</sup>对比,提出了环境库兹涅茨曲线<sup>[32]</sup>。污染天堂假说认为,在经济发展早期阶段,发展中国家为了吸引外资促进经济发展而降低本国环境保护标准,外商直接投资(FDI)会加剧东道国的环境污染<sup>[33]</sup>,从而成为发达国家的污染天堂<sup>[34-35]</sup>。公共选择理论认为,地方政府在执行中央政府的政策措施时也会追求自身利益最大化,政府会通过对于基础设施、社会服务等投入,提高地区竞争力和吸引力,刺激社会经济发展和能源消耗,从而提升碳排放<sup>[11]</sup>。土地利用类型的变化会直接引起区域内经济活动的改变,它已成为影响碳排放分布的关键因素<sup>[36-37]</sup>,已有研究表明,由土地利用类型变化引起的碳排放量仅次于化石燃料的燃烧<sup>[38]</sup>。波特假说讨论了环境规制与技术创新之间的关系,认为恰当的环境规制可以通过技术补偿效应和学习效应改进环境质量,从而刺激工业企业技术创新,提升工业资源环境效率<sup>[39]</sup>。

综上所述,本文选取人口规模、城镇化率、经济发展水平、产业结构、对外开放程度、公共支出、财政收入分权、生态用地面积、农业用地面积、建设用地面积、环境规制、技术进步共 12 个指标作为碳排放的驱动因素(表 1),并在此基础上构建理论框架(图 1)。

#### 1.1.3 空间计量模型

本研究以碳排放量为被解释变量,以表征人口变化、经济发展、土地面积、制度因素等社会发展水平的指标为解释变量。参考文献[40]~[43],本文城镇化率、产业结构和财政收入分权为比例数据,属于无量纲数据,且数值很小,故无需再取对数,除此以外,对其他变量取对数使之无量纲化。建立一般线性回归模型(ordinary least square, OLS):

$$\ln CE_{it} = a_0 + a_1 \ln RP_{it} + a_2 UR_{it} + a_3 \ln PGDP_{it} + a_4 \ln PGDP_{it}^2 + a_5 IS_{it} + a_6 \ln OP_{it} + a_7 \ln PE_{it} + a_8 FRD_{it} + a_9 \ln ELA_{it} + a_{10} \ln ALA_{it} + a_{11} \ln CLA_{it} + a_{12} \ln ER_{it} + a_{13} \ln TP_{it} + \epsilon_{it} \quad (5)$$

式中: $i$  和  $t$  分别表示第  $i$  个县域第  $t$  年的数据; $CE$  指碳排放量; $RP$  指人口规模; $UR$  指城镇化率; $PGDP$  指经济发展水平; $IS$  指产业结构; $OP$  指对外开放程度; $PE$  指公共支出; $FRD$  指财政收入分权; $ELA$  指生态用地面积; $ALA$  指农业用地面积; $CLA$  指建设用地面积; $ER$  指环境规制; $TP$  指技术进步; $a_0$  为常数项, $a_1 \sim a_{13}$  为各解释变量的弹性系数; $\epsilon$  为随机扰动项。

表 1 解释变量选择  
Tab. 1 Selection of explanatory variables

变量类型	变量名称	变量定义
人口	人口规模/(万人)	县/区常住人口数量
	城镇化率/%	县/区城镇人口占总人口比重
经济	经济发展水平/(万元)	县/区人均 GDP
	产业结构/%	县/区第二产业增加值占 GDP 比重
社会	对外开放程度/(万元)	县/区工业企业外商资本总和
	技术进步/个	县/区专利申请受理量
	公共支出/(亿元)	县/区一般公共预算支出
土地	生态用地面积/(hm <sup>2</sup> )	县/区林地、草地、湿地面积
	农业用地面积/(hm <sup>2</sup> )	县/区耕地面积
	建设用地面积/(hm <sup>2</sup> )	县/区建筑物覆盖面积
制度	财政收入分权	县/区人均财政收入与全省人均财政收入比值
	环境规制/个	县/区国家重点监控企业(废气)个数

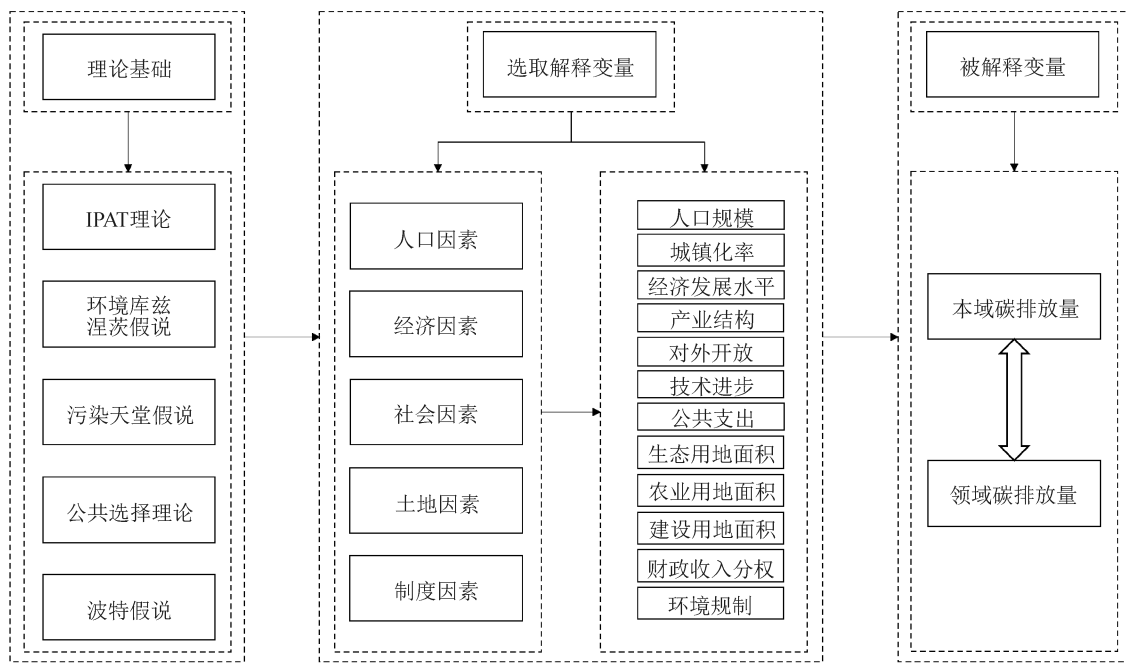


图 1 理论框架的构建

Fig. 1 Construction of theoretical framework

考虑到碳排放的空间溢出效应以及自变量的空间依赖作用,本研究在一般线性回归模型的基础上引入空间滞后模型(SLM)、空间误差模型(SEM)和空间杜宾模型(SDM),并根据拉格朗日乘数(LM)检验择优选用,对于以上模型的估计采用极大似然估计法。

空间滞后模型主要考察变量在某一区域是否存在显著的空间溢出效应,其公式为:

$$\ln CE_{it} = \rho \mathbf{W}_{\ln CE, it} + a_0 + a_1 \ln RP_{it} + a_2 UR_{it} + a_3 \ln PGDP_{it} + a_4 \ln PGDP_{it}^2 + a_5 IS_{it} + a_6 \ln OP_{it} +$$

$$a_7 \ln PE_{it} + a_8 FRD_{it} + a_9 \ln ELA_{it} + a_{10} \ln ALA_{it} + a_{11} \ln CLA_{it} + a_{12} \ln ER_{it} + a_{13} \ln TP_{it} + \epsilon_{it} \quad (6)$$

式中:  $\rho$  为空间自回归系数,反映邻近区域观测值变化对本区域观测值的影响;  $\mathbf{W}$  为空间权重矩阵,本研究采用空间邻接权重矩阵,即当两区域相邻时  $\mathbf{W}$  取 1,否则  $\mathbf{W}$  取 0;  $\mathbf{W}_{CE}$  为空间滞后因变量,反映了空间距离对区域碳排放的作用程度。

空间误差模型主要考察邻接地区因变量的误差冲击对本地区观测值的影响程度,其公式为:

$$\ln CE_{it} = \lambda \mathbf{W}_{\ln CE, it} + a_0 + a_1 \ln RP_{it} + a_2 UR_{it} +$$

$$a_3 \ln PGDP_{it} + a_4 \ln PGDP_{it}^2 + a_5 IS_{it} + a_6 \ln OP_{it} + a_7 \ln PE_{it} + a_8 FRD_{it} + a_9 \ln ELA_{it} + a_{10} \ln ALA_{it} + a_{11} \ln CLA_{it} + a_{12} \ln ER_{it} + a_{13} \ln TP_{it} + \epsilon_{it} \quad (7)$$

式中:  $\lambda$  为空间误差系数,反映邻近区域随机误差项对本区域的误差冲击。

空间杜宾模型为空间滞后模型和空间误差模型的结合形式,能够同时反映某一区域的空间溢出效应及其邻接区域对本区域的误差冲击,其公式为:

$$\ln CE_{it} = \rho W_{\ln CE, it} + \lambda W_{\ln CE, it} + a_0 + a_1 \ln RP_{it} + a_2 UR_{it} + a_3 \ln PGDP_{it} + a_4 \ln PGDP_{it}^2 + a_5 IS_{it} + a_6 \ln OP_{it} + a_7 \ln PE_{it} + a_8 FRD_{it} + a_9 \ln ELA_{it} + a_{10} \ln ALA_{it} + a_{11} \ln CLA_{it} + a_{12} \ln ER_{it} + a_{13} \ln TP_{it} + \epsilon_{it} \quad (8)$$

## 1.2 研究区域和数据来源

### 1.2.1 研究区域

选择河南省 158 个县域作为研究对象(图 2),《河南省统计年鉴》自 2009 年起公布市辖区指标数据,而中国碳核算数据库中县域尺度碳排放最新数据发布到 2017 年,参考文献[44],本文对 2018—2019 年未公布的碳排放量通过线性外推的方式予以补齐。因此本研究选取 2009—2019 年作为研究区间,在此期间行政区划未发生变更。

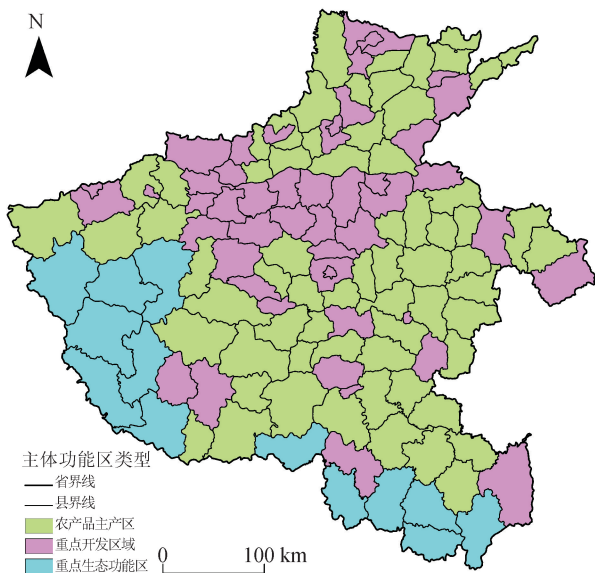


图 2 河南省主体功能区分布

Fig. 2 Distribution map of major functional zones in Henan Province

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2019)1822 号的标准地图制作,底图无修改。

### 1.2.2 数据来源

2009—2019 年河南省各县区碳排放数据来源于中国碳核算数据库(<https://www.ceads.net/data/county/>),该数据通过对国家物理地球数据中心

提供的 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS 两套夜间灯光数据反演得到,具有连续性强、统计口径一致等优势,并且在学术界得到广泛引用<sup>[16, 19]</sup>;社会经济数据来源于 2009—2019 年《中国县域统计年鉴》、《河南省统计年鉴》以及河南省各地级市统计年鉴和中国工业企业数据库,个别年份的缺失数据采用插值法补齐;技术进步数据来源于 2009—2019 年国家知识产权局;土地利用数据来源于 2009—2019 年美国国家航空航天局(NASA)提供的 MODIS 数据产品 MCD12Q1;2009—2019 年环境规制数据来源于中国生态环境部、河南省环境保护厅、河南省人民政府等官方网站。

## 2 结果与分析

### 2.1 河南省碳排放的时空演化特征

#### 2.1.1 碳排放的时间演化特征

由图 3 可知,2009—2019 年河南省碳排放总量从  $4.3459 \times 10^8$  t 增加到  $5.4884 \times 10^8$  t,增长率达 26.29%,总体呈现出以 2011 年为分界点的“先急后缓”的增长状态。其中 2009—2011 年碳排放处于快速增长期,在此期间,河南省总碳排放量由  $4.3459 \times 10^8$  t 增加到  $5.4541 \times 10^8$  t,增幅达 25.50%。之后,因“十二五”规划的节能减排目标提供了强有力的政策约束,且在 2011 年《国务院关于支持河南省加快建设中原经济区的指导意见》中明确提到,要把资源节约与环境保护作为中原经济区建设的重点之一,在经济发展的同时注重资源的有效利用,尽可能做到最大化的可持续发展,这使得 2011 年后碳排放增速明显放缓,2011—2019 年河南省碳排放增长率仅为 0.63%。

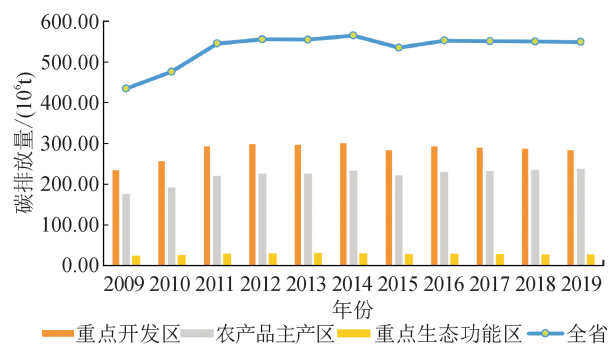


图 3 2009—2019 年河南省及各主体功能区碳排放量变化  
Fig. 3 Changes of carbon emissions in Henan Province and major functional zones from 2009 to 2019

分主体功能区来看,重点开发区碳排放量最大,其次为农产品主产区,重点生态功能区碳排放量最小。重点开发区碳排放量占全省的比重由 2009 年的 54% 下降到 2019 年的 52%,但仍是全省碳排放

的主要来源。农产品主产区碳排放量占全省的比重由 2009 年的 40% 上升到 2019 年的 43%，同样是碳排放的主要来源。而重点生态功能区碳排放量占比要远远小于前两者，一直保持在 5% 左右。

### 2.1.2 碳排放的空间演化特征

为体现区域碳排放量的变化,以 2009 年碳排放量为标准,采用 ArcGIS 自然间断点分级法将河南省分为高值、较高值、中值、较低值和低值五类区域(图 4),同样,将 2009—2019 年碳排放增长率数值由高到低分为五类区域(图 4)。由图可以发现:① 2009 年河南省碳排放整体呈现以豫中地区为核心的高碳排放集聚区和以豫东南、豫西为核心的低碳排放集聚区,高值、较高值、中值、较低值和低值区的区域数量分别为 1、18、26、44 和 38 个。作为省内重要的交通枢纽和产业集聚区,郑州市辖区是省内碳排放最高的区域(高值区);较高值区呈现“中心集聚、四周分散”的空间格局,主要集中在郑州市周围,以重点开发区为主;中值区依托省内焦柳线和孟宝线两条铁路呈南北走向的带状格局;较低值区广泛分布于中值区附近,尤以淮阳县为中心集聚的较低值区最为显著,其多数为农产品主产区;低值区广泛

分布于河南南部和西部,这两处区域紧邻伏牛山脉和大别山脉,是河南省重要的生态功能区区域。② 2019 年,高值区由原来的 1 个增加到 4 个,皆为重点开发区;较高值区由 18 个增加到 32 个,可以看到碳排放以郑州为中心逐渐向西南扩张;中值区由 26 个增加到 38 个;较低值区以农产品主产区为主,由原来的 44 个减少到 29 个;低值区几乎都分布在重点生态功能区附近,由原来的 38 个减少到 24 个。③ 河南省西部的伏牛山脉和太行山脉附近一直存在贫困人口较多、基础设施薄弱等问题,因此碳排放增长率在空间上呈现“东高西低”的格局,按照碳排放增长率由高到低,五类区域的数量分别为 9、19、21、35 和 43 个。高值区与较高值区中,农产品主产区数量为 21 个,占两类区域全部数量的 75%,占农产品主产区总数的 31.82%;中值区、较低值区和低值区中,重点开发区数量为 42 个,占三类区域全部数量的 42.42%,占重点开发区总数的 87.5%,表明重点开发区碳排放增长率在三类主体功能区中处于一个较低的水平;而 13 个重点生态功能区中,较低值和低值区有 12 个,占到了总数的 92.31%,说明重点生态功能区的碳排放量不仅低,且增长较为缓慢。

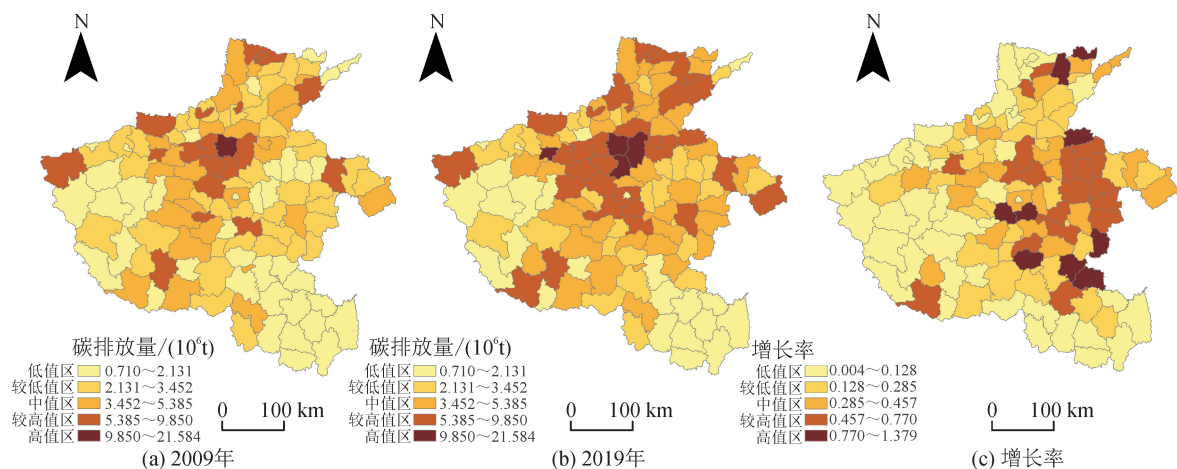


图 4 2009—2019 年河南省碳排放量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of carbon emissions in Henan Province from 2009 to 2019

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2019)1822 号的标准地图制作,底图无修改。

### 2.1.3 碳排放的空间差异变化

由表 2 可知:① 河南省总体泰尔指数  $T$  从 2009 年的 0.181 下降到 2019 年的 0.160, 总体差异缩小;其次,区域内指数  $T_w$  和区域间指数  $T_b$  也都从 2009 年的 0.121 和 0.060 下降到 2019 年的 0.111 和 0.049, 说明区域内差异与区域间差异均有不同程度的下降。其中区域间差异的缩小可能是因为农产品主产区和重点生态功能区在明确其主体功能的前提下,也可以发展与当地资源环境相适宜的特色

产业,同时重点开发区也要着重保护区域内的耕地,降低资源消耗,减少对生态环境的损害。2009—2019 年,重点开发区与农产品主产区的指数值均在下降,只有重点生态功能区的指数值上升,表明前两者区域内差异缩小,而重点生态功能区差异变大。② 从贡献率来看,区域内差异贡献率为 70%,其中重点开发区贡献率为 43%,这是河南省碳排放总体差异的主要来源,因此,未来应重点关注各功能区内部差异以减少河南省总体差异;各区域贡献率在

2009—2019年间并无明显变化,均在2%左右波动,说明各区域及其子区域的空间差异几乎是随着河南

省总体差异同升同降,重点开发区内部差异仍是河南省总体差异的主要来源。

表2 2009—2019年河南省及各主体功能区碳排放 Theil 指数

Tab. 2 Theil index of carbon emissions in Henan Province and major functional zones from 2009 to 2019

项目	2009年		2019年	
	指数值	贡献比例/%	指数值	贡献比例/%
$T$	0.181	100	0.160	100
$T_w$	0.121	67	0.111	70
$T_B$	0.060	33	0.049	30
重点开发区 Theil 指数	0.151	45	0.134	43
农产品主产区 Theil 指数	0.085	19	0.078	21
重点生态功能区 Theil 指数	0.096	3	0.159	5

## 2.2 河南省碳排放的驱动因素分析

### 2.2.1 模型检验与选择

参考文献[41],首先构建传统 OLS 模型对各解释变量与被解释变量间的关系进行估计,在方差膨胀系数(VIF)检验中,所有变量的 VIF 值均小于10,说明不存在多重共线性。对 OLS 模型估计结果进行 LM 检验,结果表明,对于全省碳排放,LM lag

与 LM error 都通过了显著性检验,因而采用 SDM;对于重点开发区碳排放,仅有 LM lag 通过了显著性检验,故采用 SLM;同理,对农产品主产区碳排放采用 SDM,对重点生态功能区采用 SEM。回归结果显示(表3、表4),各模型空间滞后系数  $\rho$  与空间误差系数  $\lambda$  均显著为正,表明河南省及各主体功能区碳排放存在显著且强烈的空间溢出效应。

表3 河南省碳排放回归模型估计结果

Tab. 3 Overall results of regression models of carbon emissions in Henan Province

变量	主函数	滞后项	直接效应	间接效应
lnRP	0.552***	0.554**	0.643***	1.283***
UR	5.497***	-11.367***	4.467***	-14.790***
lnPGDP	0.049	0.099	0.068	0.205
lnPGDP <sup>2</sup>	-0.004	0.000	-0.004	-0.003
IS	0.006	1.284***	0.139*	2.110***
lnOP	0.013*	-0.004	0.013*	0.003
lnTP	0.029**	0.097***	0.041***	0.178***
lnPE	0.233**	0.097	0.251***	0.322*
lnELA	0.039*	0.123***	0.056***	0.227***
lnALA	0.799***	-0.748**	0.756***	-0.688
lnCLA	1.604***	-1.061***	1.557***	-0.606
FRD	0.196***	-0.287***	0.175***	-0.338**
lnER	0.032***	0.041*	0.038***	0.090**
$\rho$	0.429***			
$R^2$	0.586			

注: \*、\*\* 和 \*\*\* 分别表示在 10%、5% 和 1% 的水平上显著。

### 2.2.2 河南省总体碳排放驱动因素分析

模型估计结果如表3所示,当被解释变量空间滞后项系数显著不为零时,采用空间杜宾模型系数

度量其经济增长的溢出效应会存在系统性偏差,因此要通过直接效应和间接效应来反映<sup>[45]</sup>。

从表3可以看出,对河南省碳排放影响显著为

正的因素由大到小分别是城镇化率、建设用地面积、农业用地面积、人口规模、公共支出、财政收入分权、产业结构、生态用地面积、技术进步、环境规制和对外开放程度,这些因素每增长1%,碳排放相应地增加4.467%、1.557%、0.756%、0.643%、0.251%、0.175%、0.139%、0.056%、0.041%、0.038%和0.013%。这可能是因为:①城镇化带动了人口和其他资源的集聚,人口的集聚使能源利用和交通方式发生改变,通过规模效应导致能源消费的增加,并且人口的集聚会带来交通拥堵,也会导致碳排放的增加<sup>[15, 46]</sup>,在此期间,建设用地规模的扩张也会引起能源消耗和交通运输,间接导致碳排放增加,这与魏燕茹等<sup>[21]</sup>的研究结果一致;②第二产业增加值占GDP比重的增加势必会引起更多的能源消耗,从而产生更多的碳排放,这与王少剑等<sup>[16]</sup>的研究结果一致;③财政分权赋予地方政府较大的自主权,地方政府为了寻求利益最大化,在现有的激励体制下,更愿意发展经济而非关注环境改善。此外,公共支出多用来完善基础设施以提高城市竞争力,因此更多的公共预算被用来构造建筑或是铺设道路,而对减排设施研发投入较少,从而导致碳排放量的增加,这与莫惠斌等<sup>[11]</sup>的研究一致;④农业用地以耕地农田为主,而农田的灌溉,农用机械及氮肥、磷肥的使用都

是导致碳排放增加的因素,这与文献<sup>[47]</sup>、<sup>[48]</sup>一致;⑤环境规制的力度可以从两个方面影响碳排放,一方面根据波特假说,国家重点监控企业个数的增加会提高该区域的能源效率和技术水平;但另一方面,监控企业个数的增加也恰恰说明该区域污染型企业较多,虽然国家监控会让企业的气体污染物排放控制在一个合理的范围之内,但总量仍然是增加的,因此,当后者效果大于前者时,便会导致碳排放增加;⑥生态用地面积的增加往往伴随着一系列活动的产生,如人口与产业的转移、生态产品的培养、生态能力的修复和绿色空间的扩大,这些活动的实施过程都会引起碳排放的产生;⑦在提高碳排放效率的同时,技术进步更多地作用于产出和经济增长,生产领域的研发投入促进了生产规模的扩大,而产生对绿色技术研发投入的挤出效应,这会引起更多的能源要素投入,从而导致产生更多的碳排放,这与张兵兵等<sup>[49-50]</sup>的研究结果一致;⑧河南省正处于中原经济区的发展阶段,在引入外资促进区域经济发展的同时,本地的环境保护标准也处于一个较低的水平,而外商投资多出于寻求廉价劳动力和扩大市场份额等目的,更注重对劳动密集型制造业或污染密集型企业投资<sup>[48]</sup>,这也加剧了区域碳排放量的增加(图5)。

表4 河南省各主体功能区碳排放回归模型估计结果

Tab. 4 Overall results of regression models of carbon emissions in major functional zones of Henan Province

变量	重点开发区			农产品主产区				重点生态功能区
	主函数	直接效应	间接效应	主函数	滞后项	直接效应	间接效应	主函数
lnRP	0.251	0.273	0.085	0.421***	-0.297	0.406***	-0.242	0.028
UR	3.225***	3.330***	1.075***	2.620*	-6.529***	1.917*	-7.431***	0.534
lnPGDP	-0.252***	-0.253***	-0.082**	0.096	0.125	0.122	0.205	-0.334
lnPGDP <sup>2</sup>	0.010*	0.009*	0.003*	-0.001	-0.018*	-0.004	-0.025	0.032
IS	2.711***	2.816***	0.901***	-0.500	1.388***	-0.374	1.600***	0.265
lnOP	-0.002	-0.001	-0.000	0.012*	-0.009	0.012*	-0.007	0.006
lnTP	0.087***	0.090***	0.029***	0.095***	-0.024	0.094***	0.002	0.116***
lnPE	0.439***	0.447***	0.143**	-0.161	0.482***	-0.117	0.564***	0.056
lnELA	0.132**	0.144**	0.046**	0.025	0.148***	0.043**	0.200***	-0.289
lnALA	0.747***	0.792***	0.255	2.000***	-1.744***	1.873***	-1.530***	-0.067
lnCLA	2.232***	2.324***	0.746***	0.898***	-0.009	0.920***	0.330	0.638***
FRD	0.210***	0.223***	0.071	0.387***	-0.511***	0.344***	-0.524***	0.168**
lnER	0.044**	0.045**	0.014**	0.056**	0.015	0.059**	0.040	0.174***
$\rho/\lambda$	0.319***			0.289***				0.596***
R <sup>2</sup>	0.573			0.619				0.731

注: \*、\*\*和\*\*\* 分别表示在10%、5%和1%的水平上显著。



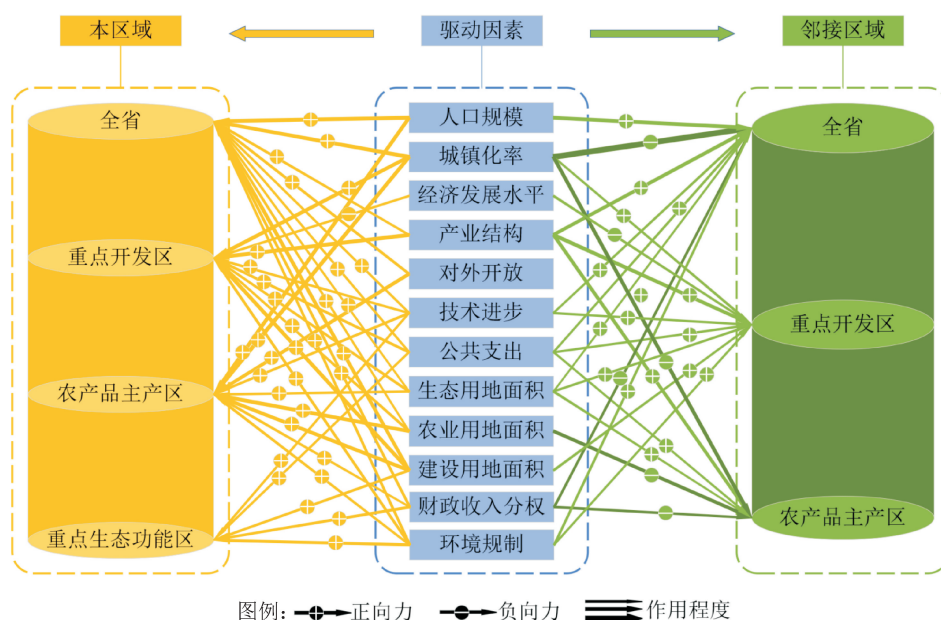


图5 2009—2019年河南省及各主体功能区碳排放驱动因素

Fig. 5 Driving factors of carbon emissions in Henan Province and major functional zones from 2009 to 2019

间接效应中(表3),具有正向空间溢出效应的因素有人口规模、产业结构、公共支出、技术进步、生态用地面积和环境规制,即这些因素的提高会引起其他区域碳排放量的上升。这可能是因为:①发达地区的产业结构、公共支出和技术进步存在一定的示范效应和辐射效应,会促进邻近区域人口的增长和产业规模的扩大,带来正向溢出效应;②当区域自身承担更多的生态功能时,其人口与产业会向其他区域转移,从而导致其他区域碳排放上升;③本区域环境规制力度的不断提高会使部分污染性企业向邻接区域转移,从而提高其他区域的碳排放。

具有负向空间溢出效应的因素包括城镇化率和财政收入分权。这可能是因为:①由于全省经济发展和生活条件的不均衡,人们更愿意居住在城镇或城市,因此城镇化率高的县域往往能够吸引周围的产业和人文活动,引起其他区域碳排放量的下降;②财政收入分权的提高往往会降低当地环境标准和监管力度,以吸引周围区域高污染高排放行业集聚而促进自身经济发展,从而导致邻域碳排放量减少(图5)。

### 2.2.3 各功能区碳排放驱动因素分析

1) 重点开发区碳排放驱动因素分析。表4显示,重点开发区内与碳排放呈显著正相关的指标由大到小依次为:城镇化率、产业结构、建设用地面积、农业用地面积、公共支出、财政收入分权、生态用地面积、技术进步和环境规制。与全省估计结果不同的是,经济发展水平一次项系数显著为负,二次项系数显著为正,说明研究期间重点开发区的经济发展

水平与碳排放呈现“正U型”关系,即在未来一段时间内,随着经济发展碳排放仍会不断上升,这与实现碳达峰还有一定距离(图5)。

间接效应中(表4)本地区的产业结构、技术进步、公共支出、生态用地面积和环境规制的提高会促使邻近地区碳排放的增加,这与全省估计结果一致。同时,经济发展水平对邻近区域的溢出效应一次项系数为负,二次项系数为正,说明经济发展对邻接区域先是积极影响,后是消极影响。与全省估计结果不同的是,城镇化率的提高与建设用地面积的扩大会增加其他重点开发区的碳排放量,这可能是由区域的主体功能决定的,作为地区性中心城市发展区和全省城市体系的重要支撑点,城镇化与工业化的推进是重点开发区的主要任务,在此过程中必然会引起建设用地面积的增加,同时发达地区的辐射带动效应和重点开发区在空间上的集聚也会引起其他区域碳排放量的上升(图5)。

2) 农产品主产区碳排放驱动因素分析。农产品主产区人口规模、城镇化率、对外开放、生态用地面积、农业用地面积、建设用地面积、财政收入分权、环境规制和技术进步的提高会引起本区域碳排放的提高(表4),这与全省估计结果一致。其中农业用地面积的增加和城镇化率的提高是导致农产品主产区碳排放增长的主要因素。

间接效应中,城镇化率、产业结构、公共支出、财政收入分权和生态用地面积的提高会引起其他区域碳排放的上升或下降,与全省估计结果一致。与全

省估计结果不同的是,农业用地面积的提高会引起其他农产品主产区碳排放量的下降,这可能是因为当区域自身有更多的耕地面积和承担更多的农业功能时,会吸引周围地区与农业相关的其他产业在此集聚,从而引起周围区域碳排放量的下降。

3) 重点生态功能区碳排放驱动因素分析。可以发现(表4),重点生态功能区中对碳排放产生显著影响的变量较少,这主要是因为重点生态功能区以增加生态产品和扩大绿色空间为主,其经济活动较少,因此对碳排放的影响并不显著。仅有财政收入分权、建设用地面积、环境规制和技术进步对碳排放产生了显著的正向影响,与全省估计结果一致(图5)。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 讨论

由于不同的主体功能区其碳排放产生的主导因素不同,因此河南省在未来的低碳发展过程中,应打破行政区划的限制,尝试制定基于国土空间开发格局的跨行政单元的、相对灵活的、目标导向比较具体的空间规划,包括省内跨地市、地市内跨市县的区域低碳规划。

对于重点开发区:①要实行更严格的碳排放标准和产业准入环境标准,严控碳排放总量,注重提高能源效率和绿色技术水平,进一步推动产业结构升级和清洁生产技术的研发和应用,同时发挥自身的极化作用,带动其他区域早日实现碳达峰;②注重公共基础设施特别是公共交通系统的完善,避免人口集聚带来的交通拥堵问题;③充分挖掘用地潜力,提高国土空间利用效率,加强土地的集约利用,避免城市过度扩张。

对于农产品主产区:①合理控制城镇规模,避免工业化、城镇化过度开发导致的生态退化,限制有损自然生态系统的农业开发;②提高集约化程度,加强耕地保护,避免出现土地过多占用、资源过度开发和生态环境压力过大等问题,努力提高环境质量;③早日实现农业现代化,提高农业综合生产能力,加强农业科技创新,提高耕地效率和技术水平,力争以最少的资源投入获得最大的收益。

对于重点生态功能区:①要严格保护大别山、太行山水土保持生态功能区,桐柏山、丹江口水源涵养生态功能区 and 伏牛山生物多样性维护生态功能区,提高生态产品的数量和质量,扩大绿色生态空间,提升碳吸收能力;②要严格把控大规模高强度的工业化城镇开发,严格禁止发展高污染、高耗能产业;③在未来碳市场建设的过程中,应充分发挥其在生态建设、修复和保护过程中的补偿作用,为重点生态功能区提供新的发展机会。

本研究将主体功能区与碳排放研究相结合,同时利用空间计量模型分析河南省不同主体功能区驱动因素的差异,为河南省低碳发展和整治策略的制定提供了更为精准的决策支撑。但由于社会经济数据和碳排放数据较少,本文只分析了2009—2019年间的数,时间序列较短,不能更精确地反映区域碳排放的变化规律,未来可通过新方法和新数据作进一步研究。

#### 3.2 结论

本文以2009—2019年河南省158个县域单元为研究对象,采用ArcGIS空间分析、泰尔指数及空间计量模型等方法,分析了河南省及各主体功能区碳排放的时空演化特征及驱动因素。

1) 2009—2019年,河南省县域碳排放变化可分为两个阶段:2009—2011年为碳排放快速增长阶段,2011—2019年为碳排放缓慢增长阶段,整体上呈现以2011年为分界点的“先急后缓”的波动增长趋势;重点开发区碳排放量最多,重点生态功能区碳排放量最少;三个主体功能区碳排放量占比几乎保持不变,仅有2%左右的波动。

2) 2009—2019年,河南省碳排放整体呈现以豫中地区为核心的高碳排放集聚区和以豫东南、豫西为核心的低碳排放集聚区,且呈现出以郑州为中心向西南逐渐扩张的趋势。碳排放高值区、较高值区和中值区数量有所增加,在空间上广泛分布于安阳县—唐河县一带的两侧,整体呈东北—西南走势,以重点开发区和农产品主产区为主。碳排放增长率在空间上整体呈现东高西低的格局。

3) 2009—2019年,河南省碳排放泰尔指数由0.181下降到0.160,总体差异缩小,只有重点生态功能区的内部差异扩大。各区域贡献率在2009—2019年间并无明显变化,均在2%左右波动,其中重点开发区贡献率达43%,是河南省碳排放空间差异的主要来源。

4) 2009—2019年,重点开发区的经济发展水平与碳排放呈现“正U型”关系,也就是说,在未来一段时间内,随着经济发展碳排放仍会不断上升,这与实现碳达峰还有一定距离;而其他三类区域的碳排放与经济发展没有显著的相关关系。

5) 2009—2019年,促使河南省碳排放增长的因素由大到小依次为城镇化率、建设用地面积、农业用地面积、人口规模、公共支出、财政收入分权、产业结构、生态用地面积、技术进步、环境规制和对外开放程度。间接效应中,具有正向空间溢出效应的因素有人口规模、产业结构、公共支出、技术进步、生态用地面积和环境规制,具有负向空间溢出效应的因素有

城镇化率和财政收入分权。与全省估计结果不同的是:重点开发区中城镇化率的提高与建设用地面积的增加会增加其他区域的碳排放;而第二产业增加值占GDP比重和农业用地面积的增加分别是重点开发区和农产品主产区碳排放增加的主导因素。

#### 参考文献:

- [1] 夏四友,杨宇. 基于主体功能区的京津冀城市群碳收支时空分异与碳补偿分区[J]. 地理学报, 2022, 77(3): 679-696.  
XIA Siyou, YANG Yu. Spatio-temporal differentiation of carbon budget and carbon compensation zoning in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration based on the plan for major function-oriented zones [J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(3): 679-696.
- [2] 朱松丽,汪航,王文涛,等. “十二五”期间中国区域低碳经济与国土空间开发格局的协调发展研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(9): 135-142.  
ZHU Songli, WANG Hang, WANG Wentao, et al. Status of coordinated development between regional low-carbon economy and spatial land-use pattern in the 12<sup>th</sup> Five Year Plan [J]. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(9): 135-142.
- [3] 朱松丽,刘嘉,高翔,等. 与国土空间开发格局相适应的低碳发展区域分类初探[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(10): 99-105.  
ZHU Songli, LIU Jia, GAO Xiang, et al. The study on region clustering regarding low-carbon development corresponding to spatial land-use pattern [J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(10): 99-105.
- [4] 谭显春,赖海萍,顾佰和,等. 主体功能区视角下的碳排放核算——以广东省为例[J]. 生态学报, 2018, 38(17): 6292-6301.  
TAN Xianchun, LAI Haiping, GU Baihe, et al. Carbon emission accounting from the perspective of main functional areas: a case study of Guangdong Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(17): 6292-6301.
- [5] 胡雪瑶,焦文献,陈兴鹏,等. 河南省能源消费碳排放动态变化及空间分异[J]. 地域研究与开发, 2017, 36(4): 147-152.  
HU Xueyao, JIAO Wenxian, CHEN Xingpeng, et al. The dynamics and spatial differentiation research of carbon emission from energy consumption in Henan Province [J]. Areal Research and Development, 2017, 36(4): 147-152.
- [6] 侯正猛,熊鹰,刘建华,等. 河南省碳达峰与碳中和战略、技术路线和行动方案[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 23-36.  
HOU Zhengmeng, XIONG Ying, LIU Jianhua, et al. Strategy, technical route and action plan towards carbon peak and carbon neutrality in Henan Province [J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(1): 23-36.
- [7] 王喜,鲁丰先,秦耀辰,等. 河南省碳源碳汇的时空变化研究[J]. 地理科学进展, 2016, 35(8): 941-951.  
WANG Xi, LU Fengxian, QIN Yaochen, et al. Spatial and temporal changes of carbon sources and sinks in Henan Province [J]. Progress in Geography, 2016, 35(8): 941-951.
- [8] 宋旭,贾俊松,陈春谛,等. 江西省能耗碳排放时空特征、脱钩关系及其驱动因素[J]. 生态学报, 2020, 40(20): 7451-7463.  
SONG Xu, JIA Junsong, CHEN Chundi, et al. Spatio-temporal characteristics, decoupling relation and its driving factors of the carbon emission from energy consumption in underdeveloped Jiangxi Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(20): 7451-7463.
- [9] 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 emissions in county areas of Ha-Chang city group: evidence from NPP-VIIRS nightlight data [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(2): 697-706.
- [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.  
SU Yongxian, CHEN Xiuzhi, YE Yuyao, et al. The characteristics and mechanisms of carbon emissions from energy consumption in China using DMSP/OLS night light imageries [J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(11): 1513-1526.
- [11] 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.
- [12] 黄蕊,王铮,刘慧雅,等. 中国中部六省的碳排放趋势研究[J]. 经济地理, 2012, 32(7): 12-17.  
HUANG Rui, WANG Zheng, LIU Huiya, et al. Prediction on carbon emission in six provinces of China [J]. Economic Geography, 2012, 32(7): 12-17.
- [13] 鲁丰先,张艳,秦耀辰,等. 中国省级区域碳源汇空间格局研究[J]. 地理科学进展, 2013, 32(12): 1751-1759.  
LU Fengxian, ZHANG Yan, QIN Yaochen, et al. Spatial patterns of provincial carbon source and sink in China [J]. Progress in Geography, 2013, 32(12): 1751-1759.
- [14] 张丽君,李宁,秦耀辰,等. 基于 DPSIR 模型的中国城市低碳发展水平评价及空间分异[J]. 世界地理研究, 2019, 28(3): 85-94.  
ZHANG Lijun, LI Ning, QIN Yaochen, et al. The low-carbon city evaluation and its spatial differentiation based on the DPSIR [J]. World Regional Studies, 2019, 28(3): 85-94.
- [15] 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.
- WANG Shaojian, SU Yongxian, ZHAO Yabo. Regional inequality, spatial spillover effects and influencing factors of China's city-level energy-related carbon emissions[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(3): 414-428.
- [16] 王少剑, 谢紫寒, 王泽宏. 中国县域碳排放的时空演变及影响因素[J]. *地理学报*, 2021, 76(12): 3103-3118.
- WANG Shaojian, XIE Zihan, WANG Zehong. The spatiotemporal pattern evolution and influencing factors of CO<sub>2</sub> emissions at the county level of China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(12): 3103-3118.
- [17] 刘华军, 赵浩. 中国二氧化碳排放强度的地区差异分析[J]. *统计研究*, 2012, 29(6): 46-50.
- LIU Huajun, ZHAO Hao. Empirical analysis of the regional differences of China's carbon dioxide emissions intensity[J]. *Statistical Research*, 2012, 29(6): 46-50.
- [18] 谭华云, 许春晓, 董雪旺. 旅游业碳排放效率地区差异分解与影响因素探究[J]. *统计与决策*, 2018, 34(16): 51-55.
- [19] 刘华军, 邵明吉, 吉元梦. 中国碳排放的空间格局及分布动态演进——基于县域碳排放数据的实证研究[J]. *地理科学*, 2021, 41(11): 1917-1924.
- LIU Huajun, SHAO Mingji, JI Yuanmeng. The spatial pattern and distribution dynamic evolution of carbon emissions in China: empirical study based on county carbon emission data[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(11): 1917-1924.
- [20] 赵荣钦, 张帅, 黄贤金, 等. 中原经济区县域碳收支空间分异及碳平衡分区[J]. *地理学报*, 2014, 69(10): 1425-1437.
- ZHAO Rongqin, ZHANG Shuai, HUANG Xianjin, et al. Spatial variation of carbon budget and carbon balance zoning of central plains economic region at county-level[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(10): 1425-1437.
- [21] 魏燕茹, 陈松林. 福建省土地利用碳排放空间关联性与碳平衡分区[J]. *生态学报*, 2021, 41(14): 5814-5824.
- WEI Yanru, CHEN Songlin. Spatial correlation and carbon balance zoning of land use carbon emissions in Fujian Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(14): 5814-5824.
- [22] 王容, 王文军, 赵黛青. 广东省主体功能区碳排放特征及驱动因素研究[J]. *新能源进展*, 2019, 7(4): 365-373.
- WANG Rong, WANG Wenjun, ZHAO Daiqing. Carbon emission characteristics and driving factors of low carbon development in the main functional areas of Guangdong Province[J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2019, 7(4): 365-373.
- [23] 刘贤赵, 高长春, 张勇, 等. 中国省域碳排放强度空间依赖格局及其影响因素的空间异质性研究[J]. *地理科学*, 2018, 38(5): 681-690.
- LIU Xianzhao, GAO Changchun, ZHANG Yong, et al. Spatial dependence pattern of carbon emission intensity in China's provinces and spatial heterogeneity of its influencing factors[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(5): 681-690.
- [24] 蒯雪芹, 边宇, 王岱. 京津冀地区工业碳排放效率时空演化特征及影响因素[J]. *经济地理*, 2021, 41(6): 187-195.
- LIU Xueqin, BIAN Yu, WANG Dai. Spatiotemporal evolution characteristics and influencing factors of industrial carbon emission efficiency in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Economic Geography*, 2021, 41(6): 187-195.
- [25] 马晓哲, 王铮. 土地利用变化对区域碳源汇的影响研究进展[J]. *生态学报*, 2015, 35(17): 5898-5907.
- MA Xiaozhe, WANG Zheng. Progress in the study on the impact of land-use change on regional carbon sources and sinks[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(17): 5898-5907.
- [26] 王睿, 张赫, 强文丽, 等. 基于城镇化的中国县级城市碳排放空间分布特征及影响因素[J]. *地理科学进展*, 2021, 40(12): 1999-2010.
- WANG Rui, ZHANG He, QIANG Wenli, et al. Spatial characteristics and influencing factors of carbon emissions in county-level cities of China based on urbanization[J]. *Progress in Geography*, 2021, 40(12): 1999-2010.
- [27] 梁育填, 张家熙, 周侃, 等. 主体功能区视角下的环境污染时空格局及驱动因素——基于广东省 121 个县域的实证分析[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(10): 3916-3926.
- LIANG Yutian, ZHANG Jiayi, ZHOU Kan, et al. Spatiotemporal pattern and driving factors of environmental pollution from the perspective of major functional zones: empirical analysis based on 121 counties in Guangdong Province, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(10): 3916-3926.
- [28] EHRlich P R, HOLDREN J P. Impact of population growth [J]. *Science*, 1971, 171(3977): 1212-1217.
- [29] DIETZ T, ROSA E A. Effects of population and affluence on CO<sub>2</sub> emissions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1997, 94(1): 175-179.
- [30] GROSSMAN G M, KRUEGER A B. Environmental impacts of a North American free trade agreement[J]. *CEPR Discussion Papers*, 1992, 8(2): 223-250.
- [31] KUZNETS S. Economic growth and income inequality [J]. *The American Economic Review*, 1955, 45(1): 1-28.
- [32] 胡聃, 许开鹏, 杨建新, 等. 经济发展对环境质量的影响——环境库兹涅茨曲线国内外研究进展[J]. *生态学报*, 2004, 24(6): 1259-1266.
- HU Dan, XU Kaipeng, YANG Jianxin, et al. Economic development and environmental quality: progress on the environmental Kuznets curve[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(6): 1259-1266.

- [33] ESTY D C, DUA A. Sustaining the Asia Pacific miracle: environmental protection and economic integration [J]. Peterson Institute Press All Books, 1997, 3(1): 150-152.
- [34] LIST J A, CO C Y. The effects of environmental regulations on foreign direct investment[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2000, 40(1): 1-20.
- [35] MARKUSEN J R, VENABLES A J. Foreign direct investment as a catalyst for industrial development[J]. *European Economic Review*, 1999, 43(2): 335-356.
- [36] HOUGHTON R A. Magnitude, distribution and causes of terrestrial carbon sinks and some implications for policy[J]. *Climate Policy*, 2002, 2(1):71-88.
- [37] HINGE G, SURAMPALLI R Y, GOYAL M K. Regional carbon fluxes from land-use conversion and land-use management in northeast India[J]. *Journal of Hazardous, Toxic and Radioactive Waste*, 2018, 22(4): 04018016. 1-04018016. 8.
- [38] 袁壮壮,叶长盛,李辉丹. 基于土地利用变化的南昌市碳排放效应分析[J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2021,44(5):30-39.  
YUAN Zhuangzhuang, YE Changsheng, LI Huidan. Impacts of land use changes in Nanchang on carbon emission [J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2021, 44(5): 30-39.
- [39] 董颖,石磊. “波特假说”——生态创新与环境管制的关系研究述评[J]. *生态学报*, 2013,33(3):809-824.  
DONG Ying, SHI Lei. The Porter Hypothesis: a literature review on the relationship between eco-innovation and environmental regulation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(3): 809-824.
- [40] WOOLDRIDGE J M. Introductory econometrics: a modern approach[M]. Boston: Cengage Learning, 2009.
- [41] 王宇凡,柴康妮,卓云霞,等. 中国城市流动人口住房质量的空间分异与影响因素[J]. *地理学报*, 2021, 76(12):2944-2963.  
WANG Yufan, CHAI Kangni, ZHUO Yunxia, et al. Spatial variation of migrant population's housing quality and its determinants in China's prefecture-level cities[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(12): 2944-2963.
- [42] 王振波,梁龙武,王旭静. 中国城市群地区 PM<sub>2.5</sub>时空演变格局及其影响因素[J]. *地理学报*, 2019, 74(12): 2614-2630.  
WANG Zhenbo, LIANG Longwu, WANG Xujing. Spatio-temporal evolution patterns and influencing factors of PM<sub>2.5</sub> in Chinese urban agglomerations[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019,74(12):2614-2630.
- [43] 许和连,邓玉萍. 外商直接投资导致了中国的环境污染吗? ——基于中国省际面板数据的空间计量研究[J]. *管理世界*, 2012(2):30-43.  
XU Helian, DENG Yuping. Does foreign direct investment cause environmental pollution in China? — a spatial econometric study based on inter-provincial panel data in China[J]. *Management World*, 2012(2): 30-43.
- [44] 祁慧博,沈欣懿,龙飞,等. 浙江省县域碳排放的时空格局与影响因素研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(4):821-831.  
QI Huibo, SHEN Xinyi, LONG Fei, et al. Study on spatial-temporal pattern and influencing factors of county carbon emissions in Zhejiang Province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32(4): 821-831.
- [45] 赵林,张宇硕,焦新颖,等. 河南省基本公共服务质量空间格局与空间效应研究[J]. *地理科学*, 2016, 36(10):1495-1504.  
ZHAO Lin, ZHANG Yushuo, JIAO Xinying, et al. The spatial pattern and effect of basic public service quality in Henan Province [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(10): 1495-1504.
- [46] 杨振,李泽浩. 中部地区碳排放测度及其驱动因素动态特征研究[J]. *生态经济*, 2022,38(5):13-20.  
YANG Zhen, LI Zehao. Research on the measurement of carbon emissions and dynamic characteristics of its driving factors in central regions of China[J]. *Ecological Economy*, 2022, 38(5): 13-20.
- [47] 尹钰莹,郝晋珉,牛灵安,等. 河北省曲周县农田生态系统碳循环及碳效率研究[J]. *资源科学*, 2016, 38(5):918-928.  
YIN Yuying, HAO Jinmin, NIU Ling'an, et al. Carbon cycle and carbon efficiency of farmland ecosystems in Quzhou, Hebei Province [J]. *Resources Science*, 2016, 38(5): 918-928.
- [48] 周思宇,郝凤明,尹岩,等. 东北地区耕地利用碳排放核算及驱动因素[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(11): 3865-3871.  
ZHOU Siyu, XI Fengming, YIN Yan, et al. Accounting and drivers of carbon emission from cultivated land utilization in Northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(11): 3865-3871.
- [49] 张兵兵,徐康宁,陈庭强. 技术进步对二氧化碳排放强度的影响研究[J]. *资源科学*, 2014,36(3):567-576.  
ZHANG Bingbing, XU Kangning, CHEN Tingqiang. The influence of technical progress on carbon dioxide emission intensity [J]. *Resources Science*, 2014, 36(3): 567-576.
- [50] 杨莉莎,朱俊鹏,贾智杰. 中国碳减排实现的影响因素和当前挑战——基于技术进步的视角[J]. *经济研究*, 2019,54(11):118-132.  
YANG Lisha, ZHU Junpeng, JIA Zhijie. Influencing factors and current challenges of CO<sub>2</sub> emission reduction in China: a perspective based on technological progress[J]. *Economic Research Journal*, 2019, 54(11): 118-132.

(责任编辑 周 蓓)