

# 基于土地利用变化的陕西省县域碳排放 时空变化及影响因素研究

曹周亮<sup>1</sup>, 张欣蓉<sup>2</sup>, 员学锋<sup>1,3,4</sup>, 陈锦鸿<sup>1</sup>

(1.长安大学, 土地工程学院, 陕西 西安 710054; 2.长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 3.陕西省土地整治重点实验室, 陕西 西安 710054; 4.长安大学 乡村振兴研究院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** [目的] 分析 2000—2020 年陕西省县域碳排放时空变化和影响因素, 为陕西省生态文明建设和实现低碳可持续发展提供参考。[方法] 利用社会经济数据和土地利用数据, 构建碳排放估算模型, 核算了 2000—2020 年陕西省县域碳排放总量, 分析了陕西省碳排放时空分布格局与演化特征, 并通过地理加权回归(GWR)模型探究了碳排放的影响因素。[结果] ①总量上, 2000—2020 年陕西省碳排放量总量呈上升趋势, 从 2000 年的  $3.30 \times 10^7$  t 增长至 2020 年的  $1.93 \times 10^8$  t, 历经“大幅增长—缓慢增长”两个阶段。②空间上, 2000—2020 年陕西省碳排放量中心逐步向东北方向移动, 空间分布范围呈现扩张态势, 热点区主要分布在榆林市北部县域、西安市和咸阳市辖区的周边部分县域, 冷点区主要分布在佛坪县和石泉县。③影响因素上, 人均 GDP 值、土地利用程度和人均社会零售总额与陕西省各县域碳排放量呈正相关, 产业结构与陕西省 60.74% 县域碳排放量呈负相关, 人口密度与陕西省 92.52% 县域碳排放量呈负相关。[结论] 建议通过制定差异性区域碳减排方案, 优化土地利用结构, 控制建设用地增长规模, 提高公众低碳环保意识等方式促进陕西省县域低碳发展。

**关键词:** 碳排放; 标准差椭圆; 土地利用; 地理加权回归; 陕西省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)05-0376-10

中图分类号: F301.2, Q146

**文献参数:** 曹周亮, 张欣蓉, 员学锋, 等. 基于土地利用变化的陕西省县域碳排放时空变化及影响因素研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 376-385. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.05.045; Cao Zhouliang, Zhang Xinrong, Yuan Xuefeng, et al. Spatio-temporal variation and influencing factors of CO<sub>2</sub> emission at county scale in Shaanxi Province based on land use change [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 376-385.

## Spatio-temporal Variation and Influencing Factors of CO<sub>2</sub> Emission at County Scale in Shaanxi Province Based on Land Use Change

Cao Zhouliang<sup>1</sup>, Zhang Xinrong<sup>2</sup>, Yuan Xuefeng<sup>1,3,4</sup>, Chen Jinhong<sup>1</sup>

(1.School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2.School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3.Shaanxi Key Laboratory of Land Consolidation, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 4.Institute of Rural Revitalization, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

**Abstract:** [Objective] The spatio-temporal changes and influencing factors of carbon emission at the county scale in Shaanxi Province from 2000 to 2020 were analyzed in order to provide a reference for ecological civilization construction and low-carbon sustainable development in Shaanxi Province. [Methods] Socioeconomic and land use data were used to construct a carbon emission estimation model. The total carbon emission in Shaanxi Province was calculated and the spatiotemporal patterns and changes from 2000 to 2020 were analyzed. Subsequently, the influencing factors of carbon emissions were determined using the geographically weighted regression method. [Results] ① Total carbon emissions increased from  $3.30 \times 10^7$  tons in 2000 to  $1.93 \times 10^8$  tons in 2020. The evolution of carbon emission can be divided into two stages (substantial growth

收稿日期: 2022-04-26

修回日期: 2022-07-10

资助项目: 长安大学土地工程学院开放基金(211927190123); 陕西省土地整治重点实验室基金项目“基于土地整治工程的陕西省耕地质量提升潜力分区”(211927190123)

第一作者: 曹周亮(1992—), 男(汉族), 山西省晋城市人, 硕士研究生, 研究方向为土地资源管理。Email: zhouliangcao@chd.edu.cn.

通信作者: 员学锋(1977—), 男(汉族), 陕西省延安市人, 博士教授, 主要从事为土地评价规划研究。Email: zyxifyun@chd.edu.com.

and slow growth). ② The carbon emission center gradually moved to the northeast from 2000 to 2020, and the spatial distribution range showed an expansion trend. The hot spots were mainly located in the northern counties of Yulin City, and around Xi'an and Xianyang City. The cold spots were mainly located in Foping County and Shiquan County. ③ Per capita GDP, land use degree, and per capita total social retail sales were positively correlated with carbon emissions, while industrial structure and population density were negatively correlated in 60.74% and 92.52% of counties, respectively. [Conclusion] Low-carbon development should be promoted in Shaanxi Province by formulating differentiated regional carbon emission reduction plans, optimizing the land use structure, controlling the expansion of construction land, and by enhancing public awareness of low-carbon environmental protection.

**Keywords:** carbon emission; standard deviational ellipse; land use; geographical weighted regression; Shaanxi Province

随着经济发展,全球变暖逐渐成为当今世界热议话题之一,特别是近年来的极端高温天气、海平面上升以及传染病的扩散<sup>[1]</sup>,人类已经真实感受到全球变暖带来的危害。在主要的温室气体中,二氧化碳的排放量达到 72.6%,是导致全球变暖的重要因素之一<sup>[2]</sup>。中国现在已成为全球第一碳排放量大国,2017 年碳排放总量占全球比重达 23.87%,减排压力巨大<sup>[3]</sup>。在此背景下,2020 年中国政府在第七十五届联合国大会提出二氧化碳排放力争 2030 年前达到峰值,争取 2060 年前实现碳中和的目标<sup>[4]</sup>。目前,中国以化石能源为主的经济发展模式短期内难以改变<sup>[5]</sup>,其产生的碳排放量巨大,而土地利用变化所引起的碳排放量占人类活动碳排放量的 1/3,对大气二氧化碳浓度急剧增加的影响仅次于化石燃料的燃烧<sup>[6-7]</sup>。因此,研究不同土地利用类型下碳排放量整体变化与影响因素,对构建低碳国土空间格局体系,推动区域低碳经济发展有着重要意义。

目前国内外学者针对碳排放已开展了大量研究:①从碳排放测算方法来看,不仅可以依靠工业<sup>[8]</sup>、农业<sup>[9]</sup>、旅游业<sup>[10]</sup>等面板数据,而且还可以通过土地数据<sup>[11]</sup>、夜间灯光数据<sup>[12]</sup>、能源数据测算。如吕倩等<sup>[12]</sup>结合夜间灯光数据和省级能源消费碳排放数据,分析了 1995—2016 年黄河流域碳排放时空演变特征。②从研究尺度来看,大多从国家<sup>[13]</sup>、省域<sup>[14]</sup>和市域<sup>[15]</sup>等较大尺度开展研究,较少从县域尺度上进行研究。而县域作为新型城镇化和生态管理决策的基本单元<sup>[3,16]</sup>,不同单元之间的碳排放存在差异,因此,开展县域尺度下碳排放时空变化和影响因素研究,有利于制定因地制宜的节能减排政策,对促进区域生态文明建设和绿色转型发展有着积极意义。③从研究内容来看,主要集中在区域碳排放量整体变化和驱动因素研究,且常用驱动因素研究方法包括 LMDI 模型<sup>[17]</sup>、Kaya 扩展模型<sup>[11]</sup>、STIRPAT 模

型<sup>[18]</sup>等。如刘玉珂等<sup>[17]</sup>通过构建 LMDI 模型,分析了人口规模、经济发展、能耗强度和产业结构等方面对中部各省碳排放的影响。由于碳排放在地理空间上分布是不均匀的,不同驱动因素对碳排放的影响也不是均质的。而这些方法并未考虑到影响因子作用强度的空间差异性,具有一定的局限性。地理加权回归(GWR)模型能够充分考虑各个单元地理空间位置及相邻关联性,根据数据的空间特性和地理因素非平稳性,分析出驱动因子对不同单元的影响程度<sup>[19]</sup>。

因此,本文以陕西省为研究区域,利用社会经济数据和土地利用数据构建碳排放估算模型,从县域层面分析了陕西省 2000—2020 年碳排放量时空变化特征,并基于地理加权回归(GWR)模型揭示各影响因子对碳排放影响的空间异质性,以为陕西省推动生态文明建设和实现低碳可持续发展提供参考。

## 1 研究区概况

陕西省(31°42'—39°35'N, 105°29'—111°15'E)位于中国西北部、黄河流域的中游,下辖 10 个地级市,107 个区县,总面积  $2.06 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。其地势特点南北高、中部低,按地形特征可将全省划分为陕北黄土高原(榆林、延安市)、关中平原(西安、宝鸡、咸阳、铜川、渭南市)、陕南秦巴山区(汉中、安康、商洛市)。陕北地区属于黄土高原区,蕴藏丰富矿产资源,能源化工产业占工业经济 80%,是陕北经济发展的主要动力。关中地区地势平坦、人口密集,是陕西省和西北地区经济发展的核心区域。陕南地区主要为山地丘陵,是中国重要的生态保护区,拥有号称“生物基因库”的秦巴山区。受地势地貌条件和经济发展水平影响,陕北,关中,陕南三大区域土地利用情况复杂,而碳排放时空变化受到土地利用情况和社会经济条件影响较大,因此,本文将陕西省作为研究区域,探究碳排放时空变化特征及影响因素。

## 2 材料与方 法

### 2.1 数据来 源

本文所使用的基础数据包括：①陕西省土地利用数据(2000, 2005, 2010, 2015, 2020 年)来源于中国科学院资源环境科学数据中心,空间分辨率 30 m,其地类按照《土地利用现状分类》(GB/T21-010-2017)标准分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 种类型。②陕西省社会经济数据,包括能源数据、人均 GDP、产业结构、人口密度、人均社会零售总额等数据,来源于 2000—2020 年《中国县域统计年鉴》《陕西省统计年鉴》、相关地市级国民经济和社会发展统计公报。③能源折算标准煤系数和碳排放因子数据来自于《中国能源统计年鉴》(2016)及《2006 年国家温室气体排放清单指南》,具体系数见表 2。

### 2.2 研究方 法

2.2.1 土地利用碳排放估算模型 土地利用碳排放估算模型是基于不同土地利用类型和相应碳排放系数所构建的估算模型。参考魏燕茹等<sup>[20]</sup>和袁壮壮等<sup>[21]</sup>的研究,将土地利用碳排放量分为非建设用地碳排放量和建设用地碳排放量。非建设用地碳排放量根据碳排放系数直接计算,建设用地碳排放量通过化石能源消耗和人口呼吸间接计算。具体计算公式如下:

$$\begin{aligned} C_n &= \sum_{i=1}^5 e_i = \sum_{i=1}^5 A_i \times \alpha_i + C_g \\ &= \sum_{i=1}^5 A_i \times \alpha_i + C_d + C_f \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $C_n$  为  $n$  县碳排放总量(t);  $e_i$  为第  $i$  种土地类

型产生的碳排放量(t);  $A_i$  为第  $i$  种土地利用类型(耕地、林地、草地、水域、未利用地);  $\alpha_i$  为第  $i$  种土地类型的碳排放系数;  $C_g$  为建设用地碳排放量(t),用能源消费量数据和人口碳排放量估算;  $C_d$  为化石能源消耗碳排放量(t);  $C_f$  为人口呼吸碳排放量(t),按每人每天排出  $2.45 \times 10^{-1}$  t 碳进行计算。陕西省内县域能源消费量数据通过县域 GDP 和全省 GDP 比值来间接测算。碳排放系数通过结合已有研究成果<sup>[22-27]</sup>和不同土地类型进行确定(表 1)。建设用地碳排放量计算时需要将原煤、焦炭、天然气、汽油等能源消费量转化为标准煤(表 2)。

表 1 陕西省县域土地利用类型及对应的碳排放系数

土地利用类型		碳排放系数/(t · hm <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> )
耕地	耕地	0.422 0
	有林地	-0.870 0
林地	灌木林	-0.230 0
	疏林地	-0.580 0
	其他林地	-0.232 7
	高覆盖度草地	-0.138 0
草地	中覆盖度草地	-0.046 0
	低覆盖度草地	-0.021 0
	河渠	-0.671 0
水域	湖泊	-0.303 0
	水库坑塘	-0.303 0
	滩涂	-0.567 0
	滩地	-0.567 0
未利用地	未利用地	-0.000 5

表 2 陕西省县域各类能源标准煤换算系数及碳排放系数

能源类型	原煤	焦炭	天然气	汽油	柴油	燃料油	煤油
折标准煤系数(t/t,以标准煤计)	0.714 3	0.971 4	1.214 3	1.471 4	1.457 1	1.428 6	1.471 4
碳排放系数(t/t,以标准煤计)	0.755 9	0.855 0	0.448 3	0.553 8	0.592 1	0.618 5	0.571 4

此外,为检验碳排放模型估算结果的可信度,本研究将基于土地利用碳排放估算模型所得到的陕西省 2000—2020 年各县域碳排放量汇总到市级行政单元,然后与市级统计碳排放量进行比较(图 1)。由图 1 可知,碳排放模型估计值与统计值的  $R^2$  为 0.65,并且通过了 0.01 的显著性检验,说明基于土地利用碳排放估算模型的结果良好,可作为后续研究分析的数据基础。

2.2.2 标准差椭圆分析法 通过 ArcGIS 10.2 软件标准差椭圆分析法<sup>[28]</sup>功能,对陕西省县域碳排放的空间位置分布情况进行分析。椭圆长轴和短轴表征碳排放量分布形状变化,面积表征碳排放量的集散程度,中心坐标表征碳排放量重心位置移动轨迹。

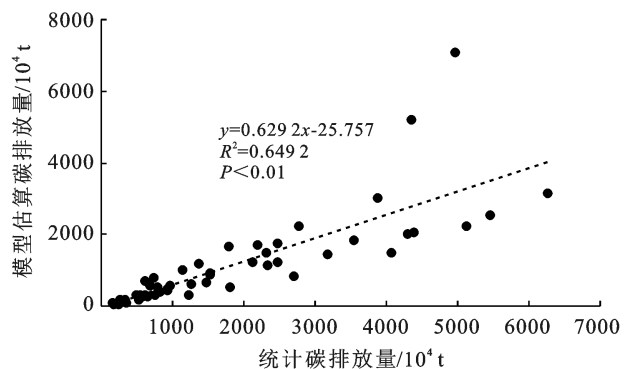


图 1 陕西省 2000—2020 年各县域碳排放精度估算

2.2.3 空间相关分析法 通过 ArcGIS 10.2 局部空间自相关分析功能,采用 Getis-Ord  $G^*$  统计量工具

分析陕西省县域碳排放量冷热点分布,  $G^*(d)$  值为正值则表示为高值聚类, 即热点区,  $G^*(d)$  值为负值则表示为低值聚类, 即冷点区<sup>[29]</sup>。

#### 2.2.4 影响因素分析

(1) 地理加权回归模型 (geographically weighted regression, GWR)。地理加权回归模型 (GWR) 通过构造空间地理位置函数, 分析不同空间位置的差异性<sup>[30-31]</sup>。其模型原理就是将地理位置带入到回归参数中, 并根据相邻观测的子样本数据对局部进行回归, 其估计的参数随着局部空间位置发生变化<sup>[32]</sup>。其模型如下:

$$m_i = \gamma_0(\mu_i, \theta_i) + \sum_{j=1}^n \gamma_j(\mu_i, \theta_i) n_{ij} + \epsilon_i \quad (2)$$

式中:  $m_i$  是  $n \times 1$  维解释变量;  $n_{ij}$  是  $n \times j$  维解释变量矩阵;  $\gamma_j(\mu_i, \theta_i)$  是第  $j$  个因素在回归点  $i$  的回归系数;  $(\mu_i, \theta_i)$  是第  $i$  个样本点的经纬度坐标;  $\epsilon_i$  是服从方差为常数的随机误差<sup>[33]</sup>。

(2) 影响因素选取。在研究碳排放量的影响因素中, 本文从土地、经济、人口、社会城镇化等角度出发, 选取了土地利用程度、经济发展水平、人口密度和人均社会零售总额等指标。①土地利用程度: 用县城建设用地面积和总面积比值来表征。城镇建设用地增加是土地城镇化的表征之一, 随着城镇建设用地增加, 城镇经济发展和效率发生变化, 从而导致碳排放量增加<sup>[16]</sup>。②经济发展水平: 用产业结构 (第二产业 GDP 与 GDP 总产值占比) 和人均 GDP 来表征。城镇化进程中, 经济增长与碳排放之间存在密切联系<sup>[34]</sup>。一方面经济规模增长会导致碳排放量增加, 另一方面通过产业结构调整 and 升级, 转变经济发展方式会抑制碳排放量增加。③人口密度: 用单位面积人口数量来表征。人口增长对碳排放有正负两方面效应<sup>[35]</sup>, 一方面人口增长会增加能源消耗从而促进碳排放量增加, 另一方面人口规模的聚集效应能够提高耗能设施利用效率从而抑制碳排放量增加。④人均社会零售总额: 用人均消费生活商品和公共商品数量来表征。物质生活水平提高会刺激人们对于产品的消费, 从而促进产品制造导致碳排放增加<sup>[36]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 2000—2020 年陕西省县域碳排放时空演变特征

从总量上来看, 2000—2020 年陕西省碳排放总量呈现增长趋势, 碳排放量从 2000 年的  $3.30 \times 10^7$  t 增长至 2020 年的  $1.93 \times 10^8$  t, 年均增长量为  $7.94 \times 10^6$  t (图 2), 其增长趋势可分为 2 个阶段, 即大幅增长阶段 (2000—2015 年)—缓慢增长阶段 (2015—2020

年)。从不同区域来看, 陕北地区碳排放量从 2000 年的  $1.10 \times 10^7$  t 增长至 2020 年的  $4.40 \times 10^7$  t, 年均增长量为  $1.62 \times 10^6$  t; 关中地区碳排放量从 2000 年的  $1.90 \times 10^7$  t 增长至 2020 年的  $1.24 \times 10^8$  t, 年均增长量为  $5.22 \times 10^6$  t; 陕南地区碳排放量从 2000 年的  $3.00 \times 10^6$  t 增长至 2020 年的  $2.50 \times 10^7$  t, 年均增长量为  $1.09 \times 10^6$  t。总而言之, 不同区域碳排放总量和年均增长量均呈现出: 关中 > 陕北 > 陕南的趋势 (图 3)。

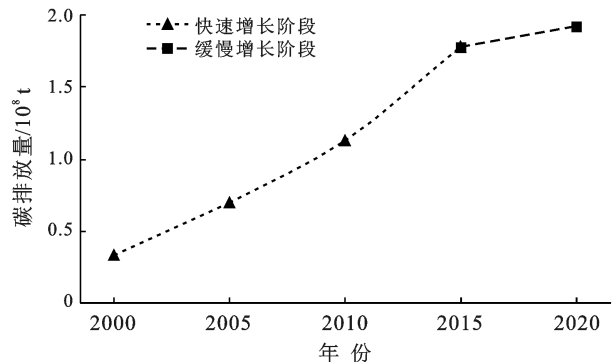


图2 2000—2020年陕西省碳排放总量

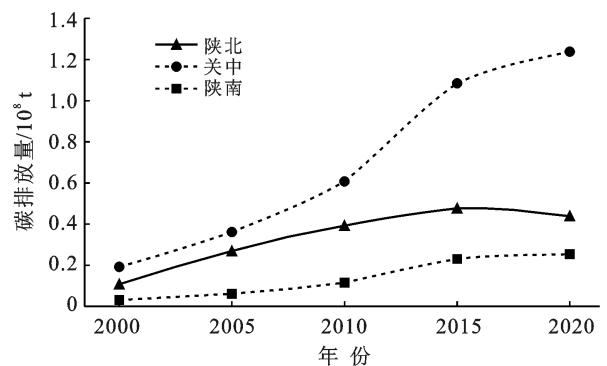


图3 2000—2020年陕西省各区域碳排放量

从空间分布上来看, 2000—2020 年陕西省各县域碳排放量在空间分布上变化显著 (图 4)。在 2000—2020 年期间内, 低水平碳排放量县域单元数量减少最多, 由 87 个减少至 12 个, 2020 年低水平县域仅分布在黄龙县、宁陕县、留坝县等县域; 高水平碳排放量县域单元数量增加最多, 由 6 个增至 34 个, 2020 年极高水平碳排放主要分布在榆林市北部县域和雁塔区、碑林区、莲湖区等区域。分时段看 2000—2005 年, 低水平碳排放量县域单元减少, 中等水平以上碳排放量县域单元增加, 靖边县、宝塔区、三原县等县域由低水平转变为中水平。2005—2010 年, 低水平碳排放量县域单元减少, 中等以上碳排放量县域单元增加, 吴起、旬邑、凤县、周至等县域由低水平转变

为中水平。2010—2015 年,低水平碳排放量县域单元减少,主要转化为中等水平碳排放量域单元,子洲县、丹凤县、石泉县等县域由低水平转变为中水平,高水平以上碳排放量县域单元增加,三原县、岐山县、南

郑区等县域由中水平转变为高水平及以上。2015—2020 年,除留坝县、佛坪县、太白县三县由低水平碳排放量县域单元转化为中等水平碳排放量县域单元外,其余各级县域单元基本保持不变。

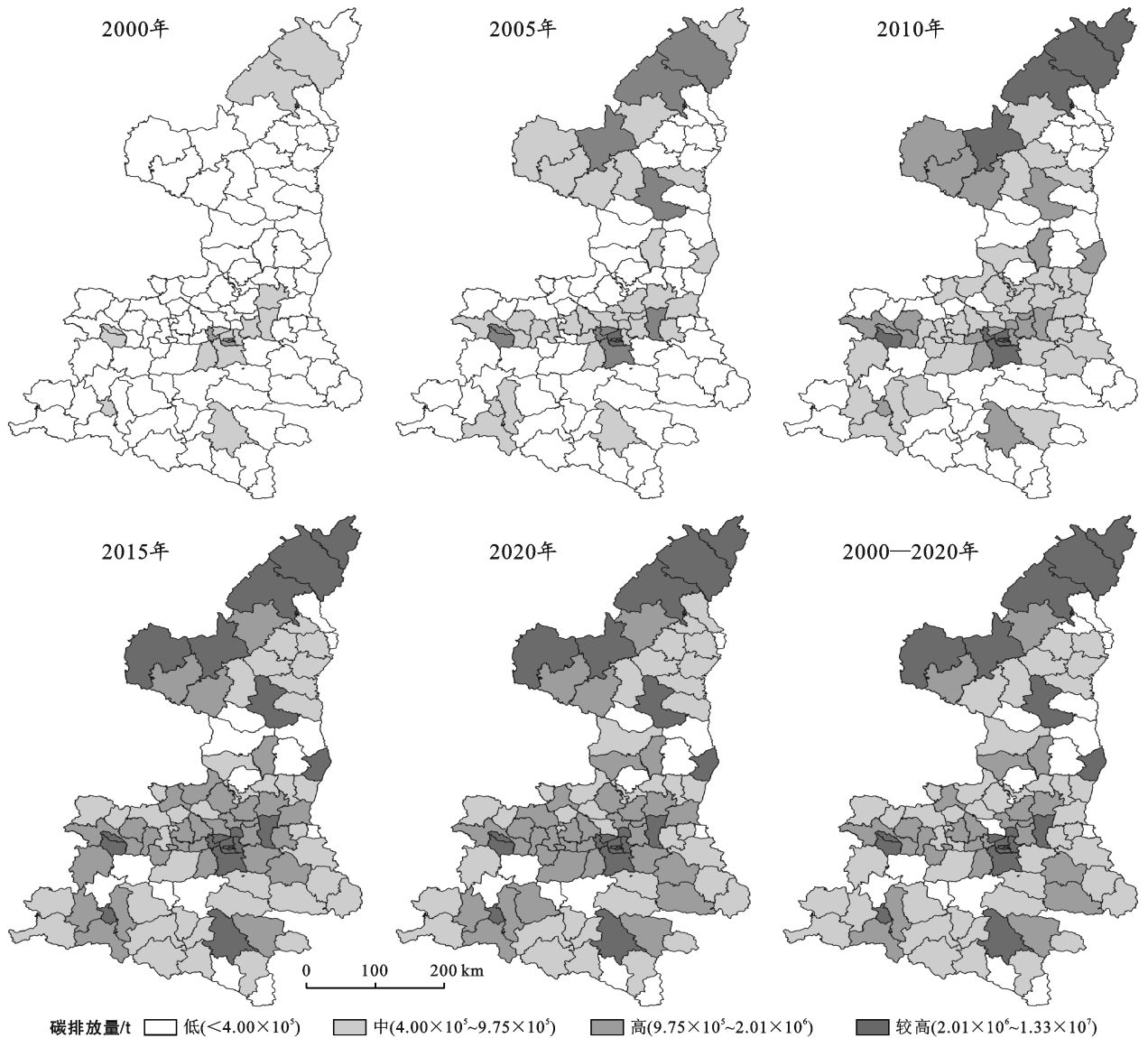


图 4 2000—2020 年陕西省县域碳排放总量空间分布

### 3.2 空间分异特征

从空间分异格局来看(图 5),陕西省碳排放量整体以东北—西南方向为主导,空间分布范围整体呈现扩张态势。在分布中心上,2000—2010 年,全省碳排放量空间分布中心从泾阳县北部边界向东北方向移动至耀州区北部边界,偏移距离约 52.43 km。2010—2020 年,分布中心先向西南方向移动,再向东北方向移动,最终移动到耀州区中部,偏移距离约 17.54 km。在分异形状上,2000—2020 年,全省碳排放量空间分布标准差椭圆短轴与长轴的比值大致呈现逐年减少的趋势,表明全省碳排放量分布形状呈扁

化趋势,碳排放分布在长轴方向上(东北—西南)逐步发展,在短轴方向上(西北—东南)相对减缓。在分异方向上,2000—2010 年,全省碳排放量空间分布准差椭圆方位角不断缩小,由 2000 年的  $25.96^\circ$  减少到 2010 年  $21.19^\circ$ ,表明陕西省西南地区对全省碳排放量空间格局的影响作用加强,2010—2015 年,方位角增加了  $0.64^\circ$ ,表明陕西省东北部地区对全省碳排放量空间格局的影响作用加强,2015—2020 年,方位角缩小了  $0.60^\circ$ ,西南部地区对全省碳排放量空间格局的影响作用加强后趋于平稳。2000—2020 年,方位角整体上减少了  $4.73^\circ$ 。



要集中在旬邑县—周至县—石泉县以东和陕北北部,且人均 GDP 回归系数在 0.40~0.62 之间,高于其他县域,说明在这些地区,虽然经济增长对碳排放量影响程度高,但通过调整产业结构,转变经济发展方式

可以有效减少碳排放量。在剩余 39.26 % 的县域,产业结构与碳排放量呈正相关,人均 GDP 对碳排放影响程度相对较低,说明这些地区应进行产业升级和技术进步来实现减排目的。

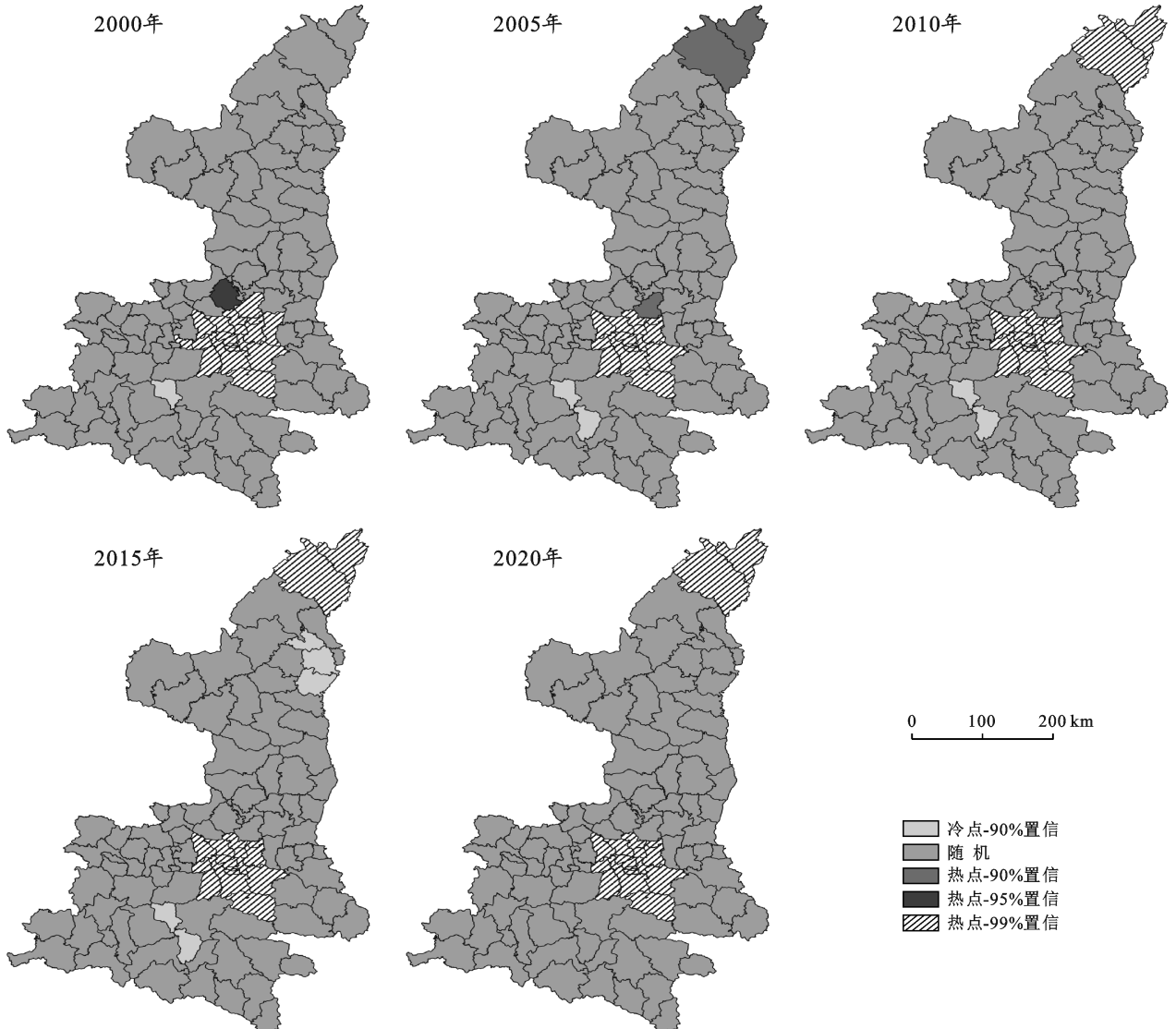


图 6 2000—2020 年陕西省县域碳排放总量热点分析

在土地城镇化过程中,通常土地利用程度越高,碳排放量越高。土地利用程度与陕西省各县域碳排放量呈正相关,陕北、关中、陕南地区的土地利用程度回归系数分别约为 0.57,0.69,0.49,影响程度呈现“关中>陕北>陕南”空间格局分布。说明在关中和陕北地区土地利用程度对碳排放影响程度较高,这些地区应严格控制建设用地扩张,合理利用已开发土地。在陕南地区土地利用程度对碳排放影响程度较低,这些县域应加强对非建设用地格局调整,保护生态用地。

在人口城镇化过程中,人口密度与陕西省 92.52% 的县域碳排放量呈负相关,且绝对值高值区域主要集中在关中和陕北北部县域,说明这些地区人口

聚集所形成的规模抑制了碳排放增加。在凤县、略阳县、留坝县、宁强县等县域,人口密度与碳排放量呈正相关,说明这些地区在未来应提高耗能设施使用效率,发挥好人口聚集产生的规模效应,减少碳排放量。

在社会城镇化过程中,人均社会零售总额与陕西省各县域碳排放量呈正相关。整体上看,人均社会零售总额在陕北地区县域回归系数大部分在 0.37 以上,远高于关中和陕南地区县域,且人均 GDP 回归系数在 0.45 以上,说明该地区经济水平提高会刺激产品消费,促进制造业产品生产,间接导致碳排量增加。因此,在经济发展同时,应加强对该地区人口进行低碳和环保教育,提升整体节能意识。

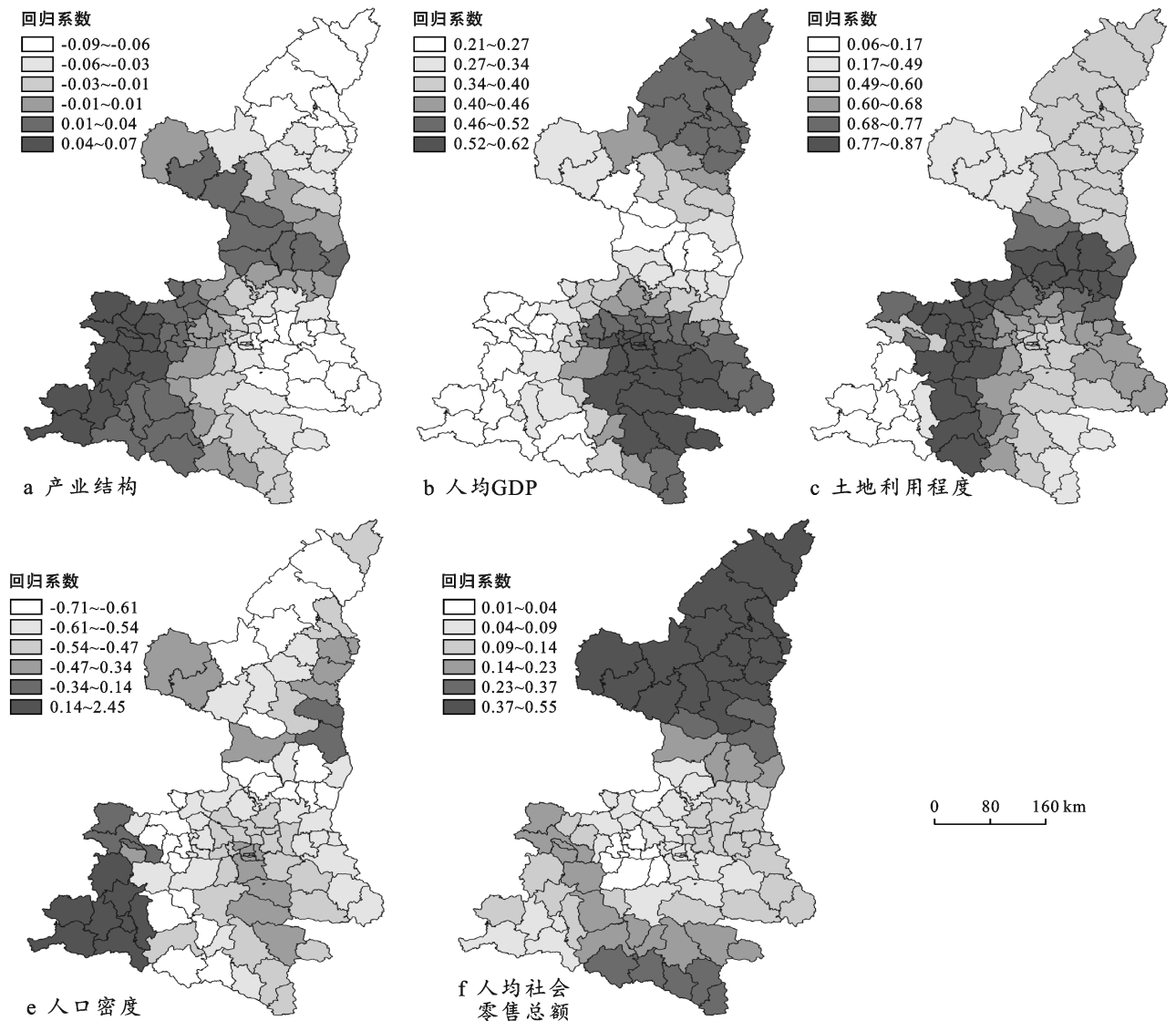


图 7 陕西省县域碳排放各影响因素空间异质性分布

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

(1) 本文以县域作为研究单元,以土地利用数据为基础数据,分析了 2000—2020 年陕西省县域碳排放量时空格局和空间分异特征,同时应用 GWR 模型探究了城镇化进程中碳排放的影响因素。在对陕西省碳排放空间分异研究上,本文研究结果与武娜等<sup>[14]</sup>一致,陕北地区煤炭资源丰富,能源化工业比重高,关中地区人口密集,经济发达,特别是西安市作为省会城市,GDP 占全省 1/3 以上,而高耗能产业和较大规模经济活动往往会导致碳排放量增加,因此,碳排放热点区主要分布在榆林北部和西安市及周边县域。陕南地区自然条件优越,产业以农业经济为主,佛坪县和石泉县内有多个国家级自然保护区,植被覆盖率高,固碳能力强,会抑制碳排放量增加,因此,碳

排放冷点区主要分布在佛坪县和石泉县。

(2) 本文从城镇化角度出发探究了相关因素的影响程度,与王少剑等<sup>[3]</sup>对全国县域碳排放影响因素的研究结果基本一致,本文所得出的产业结构对碳排放影响有正有负,人均 GDP 对碳排放影响为正,且人均 GDP 影响程度高于产业结构,说明经济发展会导致碳排放量增加,因此,地方政府应重点关注产业结构调整,通过技术创新和降低高碳排产业比重来减少碳排放量,缓解区域经济发展与低碳发展之间的矛盾。本研究发现土地利用程度对碳排放影响为正,结果与张赫等<sup>[16]</sup>发现一致,说明建设用地扩张会导致碳排放量增加,特别是土地利用程度高的县域,应严格控制建设用地扩张,提高土地集约节约利用水平。人口密度对碳排放影响有正有负,该结果与何文举等<sup>[35]</sup>发现一致,说明人口密度在不同阶段会对碳排放产生不同的影响,即当人口规模达到某一临界值时



会产生聚集效应,有利于塑造紧凑型城市空间结构,减少当地能源消耗,因此,地方政府应提高公共基础设施利用率和做好合理区域规划,发挥好人口规模聚集效应,从而抑制碳排放量增加。人均社会零售总额对碳排放影响程度为正,与袁宝龙等<sup>[36]</sup>发现一致,说明随着生活水平提高,人均消费水平的增高间接导致碳排放量增加,对此,各地政府应加强有关低碳生活知识宣传力度,增强大众对低碳生活和绿色消费意识。

(3) 本文从城镇化角度分析了产业结构、人均 GDP、土地利用程度、人口密度和人均社会零售总额对碳排放影响的时空异质性,但由于数据的可获取性,仅利用统计数据进行分析,缺乏与时空大数据、遥感等多源数据的融合。此外,本文主要是基于土地利用数据和能源数据对碳排放量进行测算,会存在一定误差,未来可结合夜间灯光数据和不透水面数据对碳排放量进行精细测算。

## 4.2 结论

通过对 2000—2020 年陕西省县域碳排放量时空格局分析,并运用标准差椭圆、冷热点分析,探究了陕西省县域碳排放的时空分异特征,基于地理加权回归模型揭示城镇化对碳排放的影响。

(1) 在总量上,2000—2020 年陕西省碳排放总量呈现上升趋势,从 2000 年的  $3.30 \times 10^7$  t 增长至 2020 年的  $1.93 \times 10^8$  t,其年均增长量  $7.94 \times 10^6$  t,历经大幅增长—缓慢增长阶段两个阶段。从不同区域上看,陕西省碳排放总量和年均增长量均呈现出:关中>陕北>陕南的趋势。

(2) 在空间上,2000—2020 年陕西省碳排放量和年均碳排放增长量均呈现出:关中>陕北>陕南的格局;碳排放量中心呈现向东北方向移动的趋势,空间分布范围呈现扩张态势,西南地区对全省碳排放量的影响作用加强;碳排放的冷热点空间聚集程度呈现基本稳定状态。

(3) 在影响因素上,人均 GDP、土地利用程度、人均社会零售总额与陕西省各县域碳排放呈正相关;产业结构与陕西省 60.74% 的县域呈负相关,其余地区呈正相关;人口密度除与省内个别县域呈正相关外,与全省 92.52% 的县域呈负相关。“十四五”时期是陕西省实现碳达峰和碳中和的重要机遇期,县域作为最基本行政单元和生态决策单元,碳排放水平空间异质性明显,因此各地政府应根据当地实际发展情况制定差异化减排政策。

## 【参 考 文 献】

[1] Meehl G A, Teng Haiyan, Arblaster J M. Climate model

simulations of the observed early-2000s hiatus of global warming [J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4 (10): 898-902.

- [2] Olivier J G J, Peters J A H W. Trends in global CO<sub>2</sub> and total greenhouse gas emissions: 2020 report [R]. The Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2020: 1-85.
- [3] 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.
- [4] 习近平.继往开来,开启全球应对气候变化新征程:在气候雄心峰会上的讲话[J].*一带一路报道(中英文)*, 2021 (1): 20-21.
- [5] 王深,吕连宏,张保留,等.基于多目标模型的中国低成本碳达峰、碳中和路径[J].*环境科学研究*, 2021, 34(09): 2044-2055.
- [6] 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.
- [7] Watson R T. Land use, land-use change, and forestry [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000.
- [8] 何小钢,张耀辉.中国工业碳排放影响因素与 CKC 重组效应:基于 STIRPAT 模型的分行业动态面板数据实证研究[J].*中国工业经济*, 2012(1): 26-35.
- [9] 高鸣,宋洪远.中国农业碳排放绩效的空间收敛与分异:基于 Malmquist-Luenberger 指数与空间计量的实证分析[J].*经济地理*, 2015, 35(4): 142-148.
- [10] 孙玉环,杨光春.中国旅游业碳排放的影响因素分解及脱钩效应[J].*中国环境科学*, 2020, 40(12): 5531-5539.
- [11] 李小康,王晓鸣,华虹.土地利用结构变化对碳排放的影响关系及机理研究[J].*生态经济*, 2018, 34(1): 14-19.
- [12] 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.
- [13] 孙赫,梁红梅,常学礼,等.中国土地利用碳排放及其空间关联[J].*经济地理*, 2015, 35(3): 154-162.
- [14] 武娜,沈镭,钟帅,等.晋陕蒙地区经济增长与碳排放时空耦合关系[J].*经济地理*, 2019, 39(9): 17-23.
- [15] 李鹏,李静婷,梁亚红,等.近 30 年鹤壁市土地利用/覆被变化及碳效应分析[J].*生态经济*, 2019, 35(7): 121-128.
- [16] 张赫,彭千芮,王睿,等.中国县域碳汇时空格局及影响因素[J].*生态学报*, 2020, 40(24): 8988-8998.
- [17] 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.
- [18] 黎孔清,马豆豆,李义猛.基于 STIRPAT 模型的南京市农业碳排放驱动因素分析及趋势预测[J].*科技管理研究*, 2018, 38(8): 238-245.
- [19] 袁长伟,芮晓丽,武大勇,等.基于地理加权回归模型的中国省域交通碳减排压力指数[J].*中国公路学报*,

- 2016,29(6):262-270.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Fang Jingyun, Yu Guirui, Liu Lingli, et al. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018,115(16):4015-4020.
- [23] Tang Xuli, Zhao Xia, Bai Yongfei, et al. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: New estimates based on an intensive field survey [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018,115(16):4021-4026.
- [24] Piao Shilong, Fang Jingyun, Zhou Liming, et al. Changes in vegetation net primary productivity from 1982 to 1999 in China [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2005,19(2).
- [25] 孔东升,张灏.张掖黑河湿地自然保护区生态服务功能价值评估[J].生态学报,2015,35(4):972-983.
- [26] 赖力,黄贤金,刘伟良,等.基于投入产出技术的区域生态足迹调整分析:以2002年江苏省经济为例[J].生态学报,2006,26(4):1285-1292.
- [27] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等.1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算[J].中国科学(D辑:地球科学),2007,37(6):804-812.
- [28] 赵璐,赵作权.基于特征椭圆的中国经济空间分异研究[J].地理科学,2014,34(8):979-986.
- [29] 靳诚,陆玉麒.基于县域单元的江苏省经济空间格局演化[J].地理学报,2009,64(6):713-724.
- [30] Stewart Fotheringham A, Charlton M, Brunsdon C. The geography of parameter space: An investigation of spatial non-stationarity [J]. International Journal of Geographical Information Systems, 1996,10(5):605-627.
- [31] Brunsdon C, Fotheringham A S, Charlton M E. Geographically weighted regression: A method for exploring spatial nonstationarity [J]. Geographical Analysis, 2010,28(4):281-298.
- [32] 王雅楠,赵涛.基于GWR模型中国碳排放空间差异研究[J].中国人口·资源与环境,2016,26(2):27-34.
- [33] Fotheringham A S, Brunsdon C, Charlton M. Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships [M]. Chichester: Wiley, 2002.
- [34] 赵雲泰,黄贤金,钟太洋,等.1999—2007年中国能源消费碳排放强度空间演变特征[J].环境科学,2011,32(11):3145-3152.
- [35] 何文举,张华峰,陈雄超,等.中国省域人口密度、产业集聚与碳排放的实证研究:基于集聚经济、拥挤效应及空间效应的视角[J].南开经济研究,2019(2):207-225.
- [36] Yuan Baolong, Ren Shenggang, Chen Xiaohong. The effects of urbanization, consumption ratio and consumption structure on residential indirect CO<sub>2</sub> emissions in China: A regional comparative analysis [J]. Applied Energy, 2015,140:94-106.

(上接第375页)

- [15] 谢钧宇,曹寒冰,孟会生,等.不同施肥措施及施肥年限下土壤团聚体的大小分布及其稳定性[J].水土保持学报,2020,34(3):274-281.
- [16] 祁迎春,王益权,刘军,等.不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J].农业工程学报,2011,27(1):340-347.
- [17] 王润泽,湛芸,李铁,等.紫色土区植物篱篱前淤积带土壤团聚体稳定性特征研究[J].水土保持学报,2018,32(2):210-216.
- [18] Kahlon M S, Lal R, Ann-Varughese M. Twenty two years of tillage and mulching impacts on soil physical characteristics and carbon sequestration in Central Ohio [J]. Soil and Tillage Research, 2013,126:151-158.
- [19] Paciolla M D, Kolla S, Sein L T, et al. Generation of Free Radicals by Humic Acid: Implications for Biological Activity-Humic Substances: Structures, Properties and Uses [M]// Humic Substances, 1998:203-214.
- [20] 周虎,吕貽忠,杨志臣,等.保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J].中国农业科学,2007,40(9):1973-1979.
- [21] Du Zhangliu, Zhao Jiankun, Wang Yiding, et al. Biochar addition drives soil aggregation and carbon sequestration in aggregate fractions from an intensive agricultural system [J]. Journal of Soils and Sediments, 2017,17(3):581-589.
- [22] 梁利宝,冯鹏艳.生物炭与有机肥、无机肥配施对采煤塌陷区复垦土壤理化性状的影响[J].水土保持学报,2017,31(5):305-308.
- [23] 尚杰,耿增超,赵军,等.生物炭对塿土水热特性及团聚体稳定性的影响[J].应用生态学报,2015,26(7):1969-1976.
- [24] 王玉玲,李军.利于小麦—玉米轮作田土壤理化性状和作物产量的耕作方式研究[J].植物营养与肥料学报,2014,20(5):1139-1150.
- [25] Tian Shenzhong, Ning Tangyuan, Wang Yu, et al. Crop yield and soil carbon responses to tillage method changes in North China [J]. Soil and Tillage Research, 2016,163:207-213.