DOI: 10.20103/j.stxb.202303080429
郭亚丽,贾俊松,李玲,胡淼淼,吴钢.收缩视角下黄河中游城市碳排放时空格局及其影响因素.生态学报,2024,44(3):903-914.
Guo Y L, Jia J S, Li L, Hu M M, Wu G.Spatio-temporal pattern and influencing factors of carbon emissions in the middle reaches of the Yellow River from the perspective of urban shrinkage.Acta Ecologica Sinica,2024,44(3):903-914.

收缩视角下黄河中游城市碳排放时空格局及其影响因素

郭亚丽[1],贾俊松[1,*],李 玲[2],胡淼淼[2],吴 钢[2]
1 江西师范大学地理与环境学院,湿地与流域研究教育部重点实验室,南昌 330022
2 中国科学院生态环境研究中心,城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085

摘要:城市收缩作为城市化进程中的一种现象,与碳排放之间的关系错综复杂。当前从多维度收缩视角来探究碳排放量驱动因素的研究鲜有。据此,从人口、社会和经济三个维度构建城市收缩评价体系,利用黄河中游四省 50 个城市 2012—2020 年面板数据,基于熵值法、夜间灯光指数及地理探测器等方法探究城市收缩对碳排放时空差异的影响。结果表明:①黄河中游资源型城市收缩现象最为严重,呈现"大分散,小聚集"特征。人口收缩占比最多,综合收缩最少。②碳排放总量在研究时段内从 2327 Mt 增长到 3040 Mt,热点区域分布在鄂尔多斯市、乌海市、呼和浩特市、忻州市和朔州市;冷点区域从陕西省和河南省分散分布逐渐向河南省集聚。碳排放总量两极分化现象明显,高值区域数量少,数值大,且逐年增幅大;低值区域数量多,数值低,呈逐年降低趋势。成长型和成熟型资源城市是碳排放量的热点区域,同时城市收缩加剧了碳排放量;衰退型和再生型资源城市已经成为碳排放量的冷点区域,此时的城市收缩对碳排放量抑制作用加强。③城市收缩对于碳排放量的影响是复杂的,经济收缩对碳排放空间分异的解释力最强,人口收缩解释力最小,多数影响因素空间叠加后会产生双因子增强作用,且主导因素由人口和经济收缩转变为社会和经济收缩。可见,黄河中游城市碳排放时空格局及影响因素存在一定差异,因此,在制定双碳行动方案时应综合考虑这些差异,进而可提出有针对性且能适应于地区发展需要的节能减排对策。

关键词:城市收缩;碳排放;空间格局;影响因素;黄河中游城市

Spatio-temporal pattern and influencing factors of carbon emissions in the middle reaches of the Yellow River from the perspective of urban shrinkage

GUO Yali[1], JIA Junsong[1,*], LI Ling[2], HU Miaomiao[2], WU Gang[2]
1 *Key Laboratory of Wetland and Watershed Research (Ministry of Education), School of Geography and Environment in Jiangxi Normal University, Nanchang* 330022, *China*
2 *State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100085, *China*

Abstract: As a phenomenon in the process of urbanization, the relationship between urban shrinkage and carbon emissions is complicated. There are few studies to explore the driving factors of carbon emissions from the perspective of multi-dimensional urban shrinkage. Thus, we constructed an urban shrinkage evaluation system from three dimensions of population, society and economy, and used the panel data of 50 cities in four provinces of the middle reaches of the Yellow River from 2012 to 2020 in this paper. The impact of urban shrinkage on spatio-temporal differences of carbon emissions is explored by the entropy method, night lighting index, and geographic detector. The results verify that, first the shrinkage phenomenon of resource-based cities along the middle reaches of the Yellow River is the most serious one, which shows the

基金项目:国家自然科学基金项目(72264016)
收稿日期:2023-03-08; **网络出版日期**:2023-11-08
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: jiaaniu@126.com

characteristics of "large dispersion and small gathering". The proportion of population shrinkage is the largest one, and the comprehensive shrinkage is the least sector. Second, the total carbon emissions increased from 2327 Mt to 3040 Mt during the study period, and the hot spots are distributed in Ordos, Wuhai, Hohhot, Xinzhou, and Shuozhou. The cold spots gradually changed from scattered distribution in Shaanxi and Henan to agglomerate in Henan Province. The total carbon emissions are polarized and the number of high-value areas is small, but the value is large, and the increase rate is larger and larger; the number of low-value areas is large, but the value is low, and the trend is decreasing year by year. Growing and mature resource cities are the hot pots of carbon emissions, and urban shrinkage aggravates carbon emissions; Declining and renewable resource cities become the cold spots of carbon emissions, inhibitory effect is strengthened. Third, the impact of urban shrinkage on carbon emissions is complex, and the influencing factors of economic contraction have the strongest explanatory power on the spatial differentiation of carbon emissions. Conversely, population shrinkage has the least explanatory force, and the spatial superposition of most influencing factors will produce a two-factor enhancement. And the dominant factors have changed from population and economic contraction to social and economic contraction. Overall, there are differences in the spatial and temporal patterns of urban carbon emissions and their influencing factors along the middle reaches of the Yellow River. Therefore, these differences should be considered so that the energy-saving and emission-reduction countermeasures can be put forward and adapted to the needs of regional development.

Key Words: urban shrinkage; carbon emissions; spatio-temporal pattern; influencing factors; the middle reaches of the Yellow River

"双碳目标"背景下,保持经济增长的同时实现低碳循环发展,对中国而言依旧是严峻的挑战[1—2]。这些目标对于黄河中游资源型城市为主导的区域能否顺利达成? 黄河流域作为我国经济社会发展的重点区域,2019 年黄河流域高质量发展被提升为国家战略[3],迎来发展的新契机、新机遇[4]。黄河中游资源型城市数量约占 55%,经济发展过度依赖能源消耗,也引起了一系列的社会经济问题[5],进而诱发城市出现收缩。城市收缩(urban shrinkage)概念源于德国学者[6]起初用以描述西方国家以人口持续流失为突出特征的城市收缩现象[7—8]。从 20 世纪开始,欧美国家的收缩现象愈发突出[9],到 21 世纪后,城市收缩开始在全球蔓延[10—11]。《2019 年新型城镇化建设重点任务》[12],正式提到"收缩型城市"这一概念。《2020 年新型城镇化建设和城乡融合发展重点任务》[13]中,指出收缩型中小城市要瘦身强体。至此,收缩型城市成为中国城镇化、空间规划与城市治理的全新命题[14]。城市收缩现象具有复杂的过程、多维度的表现形式与成因[15],它是城市化进程中的正常现象[16],且更容易发生在一些资源型和一些中小型城市中。城市收缩与环境之间的关系错综复杂,厘清它们之间的相互作用及时空演变特征,对于以资源型为主的收缩型城市的"再生"至关重要。

当前,国内外学者已经关注到城市收缩对碳排放的影响,并初步探讨了二者关系。国外学者较早将城市收缩与碳排放联系在一起,国内学者主要揭示了收缩城市的碳排放模式。收缩城市往往面临着能源结构失衡的问题,因此,收缩城市的碳排放问题是需要关注的焦点。如 März 等[17]率先将城市收缩与碳排放联系到一起。Moss[18]认为城市收缩通过不同渠道影响居民的碳排放。Satterthwaite[19]表明消费水平增长比人口增长对碳排放的影响更加显著。Xiao 等[20]对比了收缩型城市与增长型城市的碳排放模式。Liu 等[21]揭示了技术投资和紧凑的城市空间格局可以促进经济发展和减排的平衡。杨盛东[5]研究了东北三省城市收缩对碳排放的影响。Liu 等[22]以中国地级市作为研究区域,发现收缩城市的能源利用效率低于增长城市。Tong 等[23]以中国 280 个城市为例,研究了收缩和增长城市的碳排放模式及驱动因素。虽然现有研究已经对城市收缩和碳排放的关系做了初步探讨,国外研究大多基于单一因素城市收缩对碳排放的影响,国内研究虽然注意到了区域性的城市收缩问题,但鲜有量化不同维度城市收缩与碳排放之间的具体关系。

综上所述,本文将以黄河中游四省为例,探讨其作为资源区域所面临的碳减排与城市收缩的双重压力,及所带来的新思考:如何科学合理地评价城市收缩及收缩视角下城市碳排放具有怎样的时空演变格局和驱动因

素? 城市发展背景的差异性,导致了不均衡的区域发展,这种异质性可能具有不同的环境表现。研究收缩视角下的城市碳排放驱动因素对地区制定合理的可持续发展政策具有重要意义。因此,本研究具体选择资源型城市较为集中的黄河中游四省 50 个城市作为研究对象,实证分析收缩视角下这些城市碳排放的时空格局和驱动因素,以期为黄河中游城市应对城市收缩以及碳减排问题提供科学的理论和数据支撑,并可望对已出现收缩的城市进行整合和治理,重塑其活力。这对中国双碳目标的达成同样具有重要的现实意义。

1　指标体系的建构、数据与方法

1.1　指标体系的建构

目前学术界对收缩型城市的识别上还存在争议。李郇等[24]认为使用单一人口指标进行识别的准确性有待商榷。本文参考已有文献[25—29],分别从人口、经济以及社会三个维度构建指标体系(表 1)。人口收缩是城市收缩的最根本标志,选择城区常住人口、人口密度和少年人口抚养比作为衡量指标;经济收缩意味着城市发展活力不足,选择人均 GDP、人均财政收入、GDP 增速等作为衡量指标;社会收缩是城市收缩的外在表现,选择城市人均道路面积、燃气普及率、用水普及率等作为衡量指标。

表 1　综合评价指标体系

Table 1　Comprehensive evaluation index system

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	指标层 Index layer	指标解释 Index interpretation	权重 Weight	序号 Number
人口 Population	人口规模	城区人口数量	城区人口	0.146	X_1
	人口密度	城区人口密度	城区人口密度	0.322	X_2
	人口结构	#少年人口抚养比	中小学在校人数/年末单位从业人数	0.006	X_3
经济 Economy	经济水平	人均 GDP	人均 GDP	0.061	X_4
		人均财政收入	地方财政一般预算内收入/总人口	0.132	X_5
	经济增速	GDP 增速	GDP 增速	0.005	X_6
	经济结构	#就业结构	第二产业从业人员数/年末单位从业人员数	0.016	X_7
		产业结构	第三产业增加值/第二产业增加值	0.053	X_8
社会 Society	基础设施	交通	人均道路面积	0.044	X_9
		社会服务	燃气普及率	0.005	X_{10}
			用水普及率	0.004	X_{11}
	社会环境	生活环境	建成区绿化覆盖率	0.007	X_{12}
		居住环境	城市居住用地面积/总人口	0.061	X_{13}
		城市空间	城市建成区面积	0.136	X_{14}

X_1:城区人口 Urban population;X_2:城区人口密度 Urban population density;X_3:少年人口抚养比 The dependency ratio of the juvenile population;X_4:人均 GDP GDP per capita;X_5:人均财政收入 Per capita fiscal revenue;X_6:GDP 增速 GDP growth;X_7:就业结构 Employment structure;X_8:产业结构 Industrial structure;X_9:人均道路面积 Road area per capita;X_{10}:燃气普及率 Gas penetration rate;X_{11}:用水普及率 Water penetration rate;X_{12}:建成区绿化覆盖率 Coverage rate of the built-up area;X_{13}:居住环境 Living environment;X_{14}:城市建成区面积 Urban built-up area;“#”代表负向指标 Negative indicators

1.2　研究区域概况

黄河中游经济区是全国十大经济区之一。包括山西、陕西、河南、内蒙古中西部地区(图 1)。国土面积约 171.25 万 km^2,人口 19717 万人(2021 年)占全国总人口的 13.96%。国民生产总值 131792.8 亿元(2021 年),占全国 GDP 的 11.52%;四省二产比重都在 41%以上,均高于全国平均二产比重。本区地域辽阔、矿产资源丰富,是我国重要的煤炭生产基地和以煤炭为原料的电力、化工工业的重要基地,是我国重要的能源、重化工综合开发区。

2020 年国家统计局发布的《2019 年分省(区、市)万元地区生产总值能耗降低率等指标公报》中,四个省份的能源消费总量增速,仅有河南省的能源消费总量增速呈现负增长即-1.6%,其他三个省份增速均在3.3%及以上。

1.3 数据来源

为保证研究区域的相对完整性,本文以黄河中游四省共计 50 个城市,包括 47 个地级城市、内蒙古锡林浩特市和乌兰浩特市两个县级市和河南省济源市作为研究对象,所需社会经济统计数据主要来源于 2013—2021 年《中国城市统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》《中国能源统计年鉴》等。地级市数据采用市辖区范围内数据,个别缺失和统计错误的数据,在 stata17 中进行补齐和校正。地级城市尺度的能源消耗数据,选用 2012—2020 年美国国家极轨环境卫星的年度 NPP-VIIRS 数据(https://search.earthdata.nasa.gov/search)。

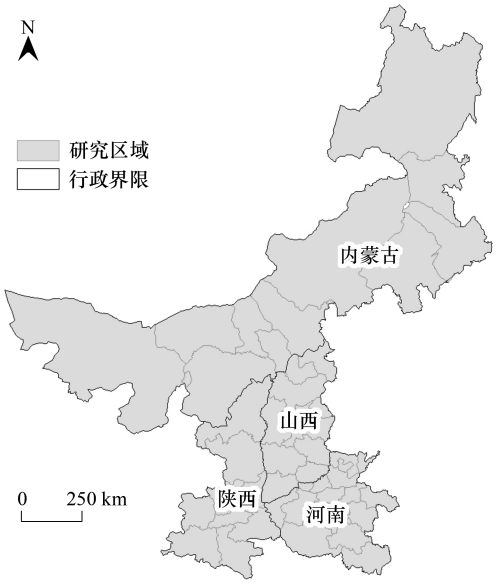

图 1 研究区域

Fig.1 Study area

1.4 研究方法

1.4.1 能源消费碳排放计算模型

本文选取煤炭、焦炭、液化石油气、汽油、燃料油、柴油、煤油、电力、天然气 9 种主要能源品种进行测算。其中,CO_2为碳排放总量,k 为能源种类,E 为能源消费量,SC 为标准煤折算系数(表 2),CF 为碳排放系数(表 2),44/12 是二氧化碳分子量。计算方法如式(1)所示.

$$CO_2 = \frac{44}{12} \times \sum_{k=1}^{9} \times E_k \times CF_k \times SC_k \quad (1)$$

1.4.2 基于 NPP-VIIRS 夜间灯光数据核算碳排放量及数据预处理

夜间灯光指数能够有效核算城市层面的碳排放,且可弥补城市能源消耗统计口径不一和数据缺失等问题[30—32],本文选取 2012—2020 年黄河中游四省的夜间灯光数据总亮度值(TDN 值)与各省相应年份的能源消耗碳排放量进行拟合。结果显示,夜间灯光数据与能源碳排放有较强的相关性,线性回归方程拟合优度最高,其拟合度 R^2均在 0.8500 以上。然后运用各城市的夜间灯光数据亮度值与省域 TDN 值的比值来测算黄河中游城市能源消耗碳排放量,得到间接碳排放量 CE 值,单位为 Mt。由于存在背景噪声的影响,需对原始灯光数据进行预处理。参照前人处理方法[33—34]对夜间灯光数据的异常值进行剔除,将 DN 值为负的像素分配为 0,异常高值区域按照市中心最大值替换。对 2012—2020 年 NPP-VIIRS 年度数据进行重投影、重采样以及裁剪处理提取掩膜数据,因为灯光辐射数值与经济发展程度呈正相关关系,本研究中选取西安市和郑州市为参考对象确定最大阈值,并对数据进行进一步的校准,降低数据的误差。

表 2 标准煤折算系数与碳排放系数

Table 2 Standard coal conversion coefficient and carbon emission coefficient

能源 Energy	煤炭 Coal	焦炭 Coke	液化石油气 Liquefied petroleum gas	燃料油 Fuel oil	汽油 Gasoline	煤油 Kerosene	柴油 Diesel oil	天然气 Natural gas	电力 Electricity
折标煤系数/(kg/kg) Standard coal conversion factors	0.7143	0.9714	1.7143	1.4286	1.4714	1.4714	1.4574	1.330 kg/m^3	0.3450 kg kW^{-1}h^{-1}
碳排放系数/(kg/kg 标准煤) Carbon emission	0.7559	0.8550	0.5042	0.6182	0.5538	0.5714	0.5921	0.4483	0.2702

1.4.3 熵值法

(1)标准化处理。

采用极差法对指标进行标准化处理[35],具体如下:

$$X'_{ij}=\begin{cases}\dfrac{X_{ij}-\min X_i}{\max X_i-\min X_i} & \text{正向指标}\\ \dfrac{\max X_i-X_{ij}}{\max X_i-\min X_i} & \text{负向指标}\end{cases} \tag{2}$$

式中,X'_{ij}为标准值;X_{ij}为第 i 个指标第 j 年的原始值;$\max X_i$、$\min X_i$分别为第 i 个指标的最大值和最小值。

(2)计算各个指标权重和各个维度城市收缩水平。

①选取 m 个样本,n 项评价指标,形成原始指标数据矩阵。计算第 i 个评价单元第 j 项指标值的比重:

$$Y_{ij}=X'_{ij}/\sum_{i=1}^{m}X'_{ij} \tag{3}$$

②计算指标信息熵:

$$e_j=-k\sum_{i=1}^{m}(Y_{ij}\times\ln(Y)_{ij})),\text{其中 } k=1/\ln(m) \tag{4}$$

③计算信息冗余度:

$$d_j=1-e_j \tag{5}$$

④确定指标权重:

$$W_j=d_j/\sum_{j=1}^{n}d_j \tag{6}$$

⑤计算第 i 个城市的综合发展指数:

将城市收缩目标层中各指标的标准化值与其权重相乘再求和,得到城市人口、经济和社会发展指数:

$$UD_i=\sum_{j=1}^{n}W_j\times X'_{ij} \tag{7}$$

式中,UD_i 表示城市目标层发展测度指数,W_j表示指标权重,n 表示目标层包含的指标数,X'_{ij}表示指标的标准化值。

$$UD=\sum_{j=1}^{m}(UD_i)_j\times w_j \tag{8}$$

式中,UD 表示城市综合发展测度指数,W_j表示目标层权重,n 表示目标层包含的指标层 3,$(UD_i)_j$ 表示城市人口、经济和社会发展指数。

⑥计算城市的收缩水平:

$$SK_i=(UD_{2020}-UD_{2012}) \tag{9}$$

K_i数值越小,说明与基期相比报告期内 i 城市发展水平下滑越严重,即城市收缩水平越高;反之,即城市收缩水平越低。为了更加客观合理地描述黄河中游城市的收缩情形,基于自然间断点法和前人的相关研究成果[36—38],将城市收缩度分为 4 个等级(表 3)。

表 3　城市收缩度分级标准

Table 3　Grading standards for urban shrinkage

收缩度分类 Shrinkage classification	高度收缩型 Highly shrinkable type	轻度收缩型 Mildly shrinkable type	轻度增长型 Mildly growth type	高度增长型 Highly growth type
综合收缩指数 Comprehensive shrinkage index	$SK<-4.4\%$	$[-4.4\%,0)$	$[0,7.5\%)$	$SK\geq7.5\%$
人口收缩指数 Population shrinkage index	$SK<-13\%$	$[-13\%,0)$	$[0,4.2\%)$	$SK\geq4.2\%$
社会收缩指数 Social shrinkage index	$SK<-1.9\%$	$[-1.9\%,0)$	$[0,9.6\%)$	$SK\geq9.6\%$
经济收缩指数 Economic shrinkage index	$SK<-7.5\%$	$[-7.5\%,0)$	$[0,8.3\%)$	$SK\geq8.3\%$

SK:收缩指数 Shrinkage index

1.4.4 地理探测器法

地理探测器是探测空间异质性的方法。本文重点运用地理探测器方法中的因子探测与交互探测。因子探测主要用来测度不同维度城市收缩影响因素对碳排放影响的解释程度,用 q 值度量。其计算公式为:

$$q_{x,y} = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} n_h \sigma_h^2}{n\sigma^2} \tag{10}$$

式中,$q_{x,y}$ 为不同维度收缩城市影响因子 x 对碳排放总量 y 的解释力;h 为选取的影响因子的分层;n_h 和 σ_h 为 h 层样本量和方差;n 和 σ^2 为全区样本量和方差。$q_{x,y}$ 的取值范围为[0,1],值越大,表明城市收缩影响因子对碳排放总量的解释力越强。交互探测是识别不同维度城市收缩影响因素两两共同作用时是否会增强或减弱对碳排放的解释力。交互关系主要包括 5 种:非线性减弱、单因子非线性减弱、独立、双因子增强、非线性增强[39—41]。

1.4.5 热点分析方法

Getis-Ord G_i^* 指数用于识别具有统计显著性的高值(热点)和低值(冷点)的空间聚类,能够识别碳排放是否具有高值聚集区(热点区)和低值聚集区(冷点区)以及确定相应位置,相关公式参考张秋梦等[42]。

2 结果分析

2.1 黄河中游城市收缩的时空分异特征

从整体来看(表 4),综合收缩型城市最少,其次是社会、经济收缩型城市,人口收缩型城市最多。综合收缩有增多趋势,2012—2016 年,高度收缩型 1 个;轻度收缩型 3 个。2016—2020 年,高度收缩型 3 个;轻度收缩型 3 个。2012—2020 年,高度收缩型 4 个。出现综合型收缩说明该城市的收缩程度严重,在人口、经济、社会各方面均出现收缩,需要引起重视。

表 4 黄河中游城市不同时段、不同维度城市收缩数量分类统计

Table 4 Classification statistics of the number of urban shrinking in different periods and dimensions of cities in the middle reaches of the Yellow River

	时间 Time	高度收缩型 Highly shrinkable type		轻度收缩型 Mildly shrinkable type	
		城市	占比	城市	占比
综合收缩 Comprehensive shrinkage	2012—2016	咸阳市	2%	许昌市、商洛市、鄂尔多斯市	6%
	2016—2020	乌兰浩特市、包头市、鄂尔多斯市	6%	晋城市、锡林浩特市、乌海市	6%
	2012—2020	鄂尔多斯市、包头市、乌兰浩特市、咸阳市	8%		0
人口收缩 Population shrinkage	2012—2016	咸阳市	2%	乌兰浩特市、乌兰察布市、鄂尔多斯市、晋中市、延安市、渭南市、三门峡市、焦作市、济源市、许昌市	20%
	2016—2020	乌兰浩特市	2%	巴彦淖尔市、包头市、赤峰市、通辽市、朔州市、忻州市、太原市、延安市、铜川市、咸阳市、渭南市、三门峡市、商洛市、临汾市、晋城市、商丘市、平顶山市	34%
	2012—2020	咸阳市	2%	商丘市、许昌市、济源市、三门峡市、渭南市、延安市、晋城市、朔州市、鄂尔多斯市、包头市、乌兰察布市、乌兰浩特市	24%
经济收缩 Economic shrinkage	2012—2016	商洛市	2%	呼伦贝尔市、乌兰浩特市、大同市、朔州市、忻州市、阳泉市、临汾市、榆林市、咸阳市、宝鸡市、安康市、许昌市	24%
	2016—2020	鄂尔多斯市、乌海市	4%	包头市、呼和浩特市、商丘市、周口市、焦作市、济源市、洛阳市、渭南市、商洛市、安康市、汉中市	22%
	2012—2020	商洛市、安康市	4%	乌兰浩特市、包头市、乌海市、鄂尔多斯市、焦作市、汉中市	12%
社会收缩 Social shrinkage	2012—2016	鄂尔多斯市、咸阳市、商洛市、许昌市、漯河市	10%	榆林市、临汾市、晋城市、信阳市	8%
	2016—2020	锡林浩特市	2%	鄂尔多斯市、呼和浩特市、晋城市、安康市	8%
	2012—2020	鄂尔多斯市、宝鸡市	4%	晋城市	2%

收缩型城市呈现“大分散,小集聚”的空间特征,收缩型城市基本上都处在省级行政单元交界地带或者高速增长型城市旁边,这与前人的一些研究相符[43—44]。这种由低人口密度区域向高人口密度区域转移的特征与美国等西方国家恰好相反[45],也印证了中国的城市收缩是以相对收缩为主,不同于西方国家的绝对收缩。随着城市化进程加快,能源经济下行,资源型城市逐渐面临“因资源而兴,因资源而衰”的问题[4],首先出现人口流失、经济收缩等现象,进而产生多维度的收缩问题。但也有一些城市受到政府规划的影响,咸阳市就是一个特例,受到西咸新区建设的影响,出现高度综合收缩。故在解决问题时,必须兼顾整个系统的综合性和复杂性。

2.2　黄河中游城市碳排放特征

利用 ArcGIS10.8 计算各城市的局部空间关联指数 Getis-Ord G_i^*,并进行可视化,图 2 展示了黄河中游 50 个城市碳排放的冷热点空间分布。整体来看,碳排放具有明显的冷点和热点。热点主要分布在内蒙古和山西省;冷点主要分布在陕西省和河南省。冷点在研究时段内有明显扩大趋势,且从 2012 年由陕西省和河南省分散状态向 2020 年河南省集聚发展。热点区域与能源矿产资源的分布特征有较强的一致性。

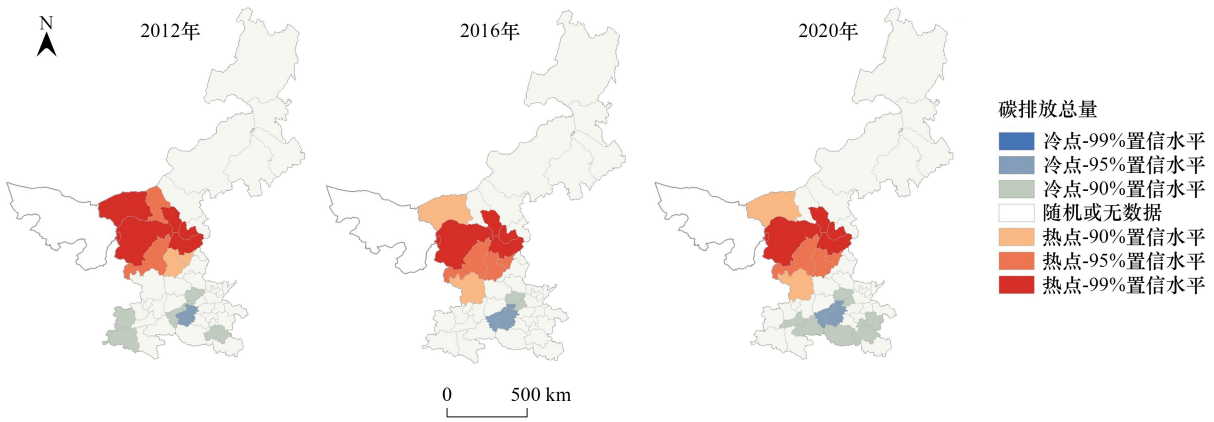

图 2　2012—2020 年黄河中游城市碳排放冷热点分布

Fig.2　Distribution of cold and hot spots of carbon emissions in cities in the middle reaches of the Yellow River from 2012 to 2020

根据碳排放估算结果(图 3),碳排放总量呈稳步增长态势,从 2012 年 2327 Mt 增长到 2020 年 3040 Mt,结合图 2 和表 4 可知,研究时段内碳排放量热点区域基本一致,分布在鄂尔多斯市、乌海市、呼和浩特市、忻州市、朔州市、吕梁市、太原市、榆林市、延安市和巴彦淖尔市。2016 年热点区域:鄂尔多斯市、忻州市、朔州市、榆林市和延安市均出现了不同程度和维度的收缩,鄂尔多斯市出现了高度社会收缩、轻度综合和人口收缩。忻州市、朔州市和榆林市出现轻度经济收缩,榆林市和延安市同时也出现轻度人口收缩;2020 年除吕梁市和榆林市在研究时段未出现收缩,其他热点区域均出现不同维度和程度的收缩,鄂尔多斯市出现了高度综合、经济收缩和轻度社会收缩,乌海市出现了高度经济收缩和轻度综合收缩,太原市、朔州市、忻州市、延安市和巴彦淖尔市均出现轻度人口收缩,呼和浩特市出现了轻度社会和经济收缩。综上可知,成长型和成熟型资源城市是碳排放量的热点区域,同时也是城市收缩的重点区域。2016 年冷点区分布在三门峡市、济源市、洛阳市、晋城市和焦作市,济源市、三门峡市和焦作市出现轻度人口收缩,晋城市出现轻度社会收缩;2020 年冷点区扩大,新增南阳市、驻马店市、漯河市、周口市、商洛市和西安市,晋城市出现轻度综合、人口和社会收缩,商洛市出现轻度人口和经济收缩,洛阳市、济源市、焦作市和周口市出现轻度经济收缩。衰退型和再生型资源城市已经成为碳排放量的冷点区域,但在转型过程中依旧面临城市收缩影响。冷点区可能受到新冠疫情的影响也比较大,所以 2020 年冷点区迅速扩大。从整体来看,冷热点区呈明显的极化态势,热点区较为稳定,碳排放量增幅较大;冷点区域数量剧增,碳排放呈降低势头。据此,我们推测碳排放高值区有向内蒙古东部和山西省中部扩大转移态势。

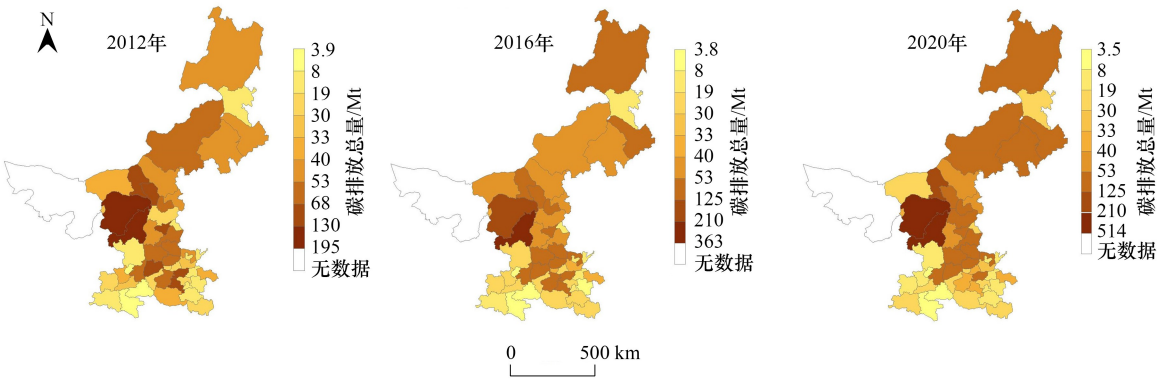

图 3 2012—2020 年黄河中游城市碳排放总量空间分布

Fig.3 Spatial distribution of total carbon emissions in cities in the middle reaches of the Yellow River from 2012 to 2020

资源开发处于不同阶段,存在较大经济社会发展水平差异,也导致了城市收缩对碳排放影响的差异。在城市收缩和“双碳目标”的双重制约下,必须遵循分类指导、特色发展的原则,协调好资源开发利用与城市发展。本着整体性原则,避免将经济发达地区老旧淘汰重污染产业向欠发达地区转移,我们发现内蒙古东部地区就是最好的例证。

2.3 收缩视角下的城市收缩对碳排放的影响因素分析

本文选取的 14 个指标均采用自然断点法进行离散化处理,分为 5 类,运用地理探测器方法计算。选取 2012 年、2016 年和 2020 年城市碳排放总量作为研究对象,揭示影响因子作用强度及各因子之间交互作用,同时对各维度收缩对碳排放总量的影响进行分析。

2.3.1 因子探测

地理探测器结果表明,14 个指标均通过了显著性检验($P<0.001$),说明城市收缩影响因素均对碳排放总量具有一定的解释力,各影响因子的解释力在 11%—64.6%(表 5)。2012—2020 年大部分影响因素对碳排放总量的解释力较为稳定,但 X_3、X_7、X_{12}和 X_{13}波动较大。X_3在 2020 年解释力骤增,2020 年研究区域大部分城市少年人口抚养比在增加,这与二孩政策的实施不无关系。X_7在 2016 年解释力骤增,之后下降,十三五时期加大了对资源型区域多元化发展,就业结构开始调整,使得它对碳排放总量的解释力下降。X_{12}在 2016 年解释力骤降,之后上升,研究区域大部分城区绿化覆盖率呈先升高后降低,故导致 X_{12}波动变化。X_{13}也是在 2016 年解释力骤降,之后又上升,研究区域在 2016 年人均居住面积降低幅度大,这与房地产去库存压力关系密切。

表 5 收缩视角下的城市收缩对碳排放影响因子探测结果(q 值)

Table 5 Detection results of urban contraction on carbon emission impact factor from the perspective of contraction

年份 Year	指标 Index													
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}
2012	0.127	0.385	0.225	0.595	0.527	0.302	0.121	0.372	0.467	0.384	0.451	0.464	0.537	0.439
2016	0.170	0.441	0.248	0.646	0.464	0.396	0.381	0.456	0.576	0.446	0.395	0.168	0.353	0.458
2020	0.118	0.516	0.446	0.612	0.602	0.228	0.110	0.461	0.616	0.443	0.576	0.467	0.615	0.457
平均 Average	0.138	0.447	0.306	0.618	0.531	0.309	0.204	0.430	0.553	0.424	0.474	0.366	0.502	0.451

通过对各影响因素解释力大小筛选,得到 2012—2020 年碳排放量的主导因素,X_4、X_5、X_9、X_{13}四项指标平均 q 值大于 0.5。可以看出,经济收缩对碳排放总量的影响最大,社会收缩也发挥着关键作用,人口收缩对碳排放总量空间分异影响发挥作用最小。经济和社会的收缩对资源利用率、环保技术投入、基础设施的共享率、居住环境的建设等方面都有一定的负面影响,进而加剧了区域碳排放量;人口收缩一定程度上减轻了环境压力。

2.3.2　交互探测

进一步通过交互探测进行分析。结果表明(表6),各指标交互作用后的因子解释力均大于任一因子的

表 6　2012 年、2016 年和 2020 年碳排放总量各影响因子交互作用结果

Table 6　Interaction results of impact factors of total carbon emissions in 2012, 2016 and 2020

年份 Year	指标 Index	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}
2012	X_1	0.127													
	X_2	0.721 *	0.385												
	X_3	0.609 *	0.585	0.225											
	X_4	0.710	0.751	0.807	0.595										
	X_5	0.723 *	0.808	0.704	0.695	0.527									
	X_6	0.566 *	0.618	0.713 *	0.754	0.837 *	0.302								
	X_7	0.253 *	0.605 *	0.314	0.736 *	0.781 *	0.604 *	0.121							
	X_8	0.618 *	0.785 *	0.606 *	0.717	0.737	0.424	0.557 *	0.372						
	X_9	0.638 *	0.690	0.604	0.620	0.723	0.707	0.570	0.579	0.467					
	X_{10}	0.611 *	0.641	0.460	0.738	0.713	0.602	0.518 *	0.523	0.637	0.384				
	X_{11}	0.584 *	0.696	0.733 *	0.632	0.715	0.635	0.733 *	0.590	0.587	0.614	0.451			
	X_{12}	0.610 *	0.600	0.604	0.611	0.798	0.592	0.531	0.617	0.514	0.634	0.579	0.464		
	X_{13}	0.693 *	0.748	0.680	0.665	0.727	0.687	0.630	0.649	0.585	0.701	0.718	0.634	0.537	
	X_{14}	0.555	0.574	0.513	0.622	0.673	0.496	0.498	0.523	0.531	0.571	0.577	0.579	0.642	0.439
2016	X_1	0.170													
	X_2	0.717 *	0.441												
	X_3	0.494 *	0.661	0.248											
	X_4	0.700	0.829	0.821	0.646										
	X_5	0.640 *	0.778	0.719 *	0.736	0.464									
	X_6	0.501	0.652	0.614	0.741	0.651	0.396								
	X_7	0.475	0.654	0.504	0.766	0.702	0.579	0.381							
	X_8	0.550	0.617	0.748 *	0.782	0.717	0.581	0.547	0.456						
	X_9	0.649	0.799	0.707	0.714	0.686	0.629	0.611	0.673	0.576					
	X_{10}	0.541	0.687	0.792 *	0.748	0.729	0.660	0.509	0.665	0.780	0.446				
	X_{11}	0.434	0.631	0.618	0.727	0.671	0.543	0.585	0.500	0.740	0.746	0.395			
	X_{12}	0.469 *	0.820 *	0.281	0.805	0.655 *	0.540	0.564 *	0.651 *	0.634	0.797 *	0.506	0.168		
	X_{13}	0.529 *	0.641	0.634 *	0.780	0.703	0.681	0.677	0.651	0.664	0.638	0.569	0.745 *	0.353	
	X_{14}	0.569	0.588	0.691	0.765	0.828	0.608	0.557	0.540	0.730	0.725	0.639	0.677 *	0.691	0.458
2020	X_1	0.118													
	X_2	0.682 *	0.516												
	X_3	0.571 *	0.609	0.446											
	X_4	0.690	0.746	0.705	0.612										
	X_5	0.696	0.718	0.670	0.745	0.602									
	X_6	0.544 *	0.688	0.696 *	0.798	0.734	0.228								
	X_7	0.570 *	0.682 *	0.551	0.779 *	0.731 *	0.557 *	0.110							
	X_8	0.623 *	0.707	0.614	0.672	0.705	0.720 *	0.701 *	0.461						
	X_9	0.691	0.791	0.725	0.756	0.778	0.855 *	0.703	0.746	0.616					
	X_{10}	0.593 *	0.688	0.636	0.679	0.679	0.767 *	0.736 *	0.666	0.688	0.443				
	X_{11}	0.677	0.773	0.685	0.796	0.782	0.748	0.794 *	0.672	0.842	0.698	0.576			
	X_{12}	0.717 *	0.672	0.630	0.790	0.780	0.795 *	0.626 *	0.622	0.749	0.648	0.689	0.467		
	X_{13}	0.714	0.767	0.679	0.680	0.767	0.816	0.773 *	0.739	0.796	0.786	0.830	0.774	0.615	
	X_{14}	0.656 *	0.642	0.592	0.654	0.690	0.744 *	0.611 *	0.616	0.698	0.592	0.671	0.633	0.658	0.457

“ * ”为非线性增强型,其他为双因子增强型

q 值,说明城市收缩指标交互影响碳排放总量空间分布的作用机制较强。其中,2012 年 $X_6 \cap X_5$ 的交互值最大(0.837),其次为 $X_2 \cap X_5$(0.808),$X_3 \cap X_4$(0.807),经济收缩和人口收缩交互作用更为强烈地影响碳排放总量空间分布差异;2016 年 $X_4 \cap X_2$ 的交互值最大(0.829),其次为 $X_{14} \cap X_5$(0.828),$X_3 \cap X_4$(0.821),$X_{12} \cap X_4$(0.805),除人口和经济收缩因子叠加后对碳排放总量空间分布起主导作用外,社会和经济的交互值解释力也在凸显;2020 年 $X_6 \cap X_9$ 的交互值最大(0.855),其次为 $X_9 \cap X_{11}$(0.842),$X_{11} \cap X_{13}$(0.830),$X_6 \cap X_{13}$(0.816),很明显人口收缩的解释力降低,社会因素间与社会和经济因素的空间交互叠加成为主导。此外,其他因子交互值普遍大于 0.6,具有较强的交互作用。这也说明碳排放总量空间差异性是各因素共同作用的结果,且各因素交互叠加的解释力也在发生变化。人口收缩前期会直接导致资源利用效率的降低,但随着城市收缩的进一步发展,经济和社会收缩的影响逐渐凸显出来,它们对碳排放量的影响更为强烈。

3 结论与建议

本文基于 2012—2020 年黄河中游 50 个城市面板数据,探讨了收缩视角下碳排放的时空格局和驱动因素。首先,从人口、经济、社会三个维度选取相应指标共 14 个,运用熵值法和收缩度模型来测度不同维度城市收缩的时空分异。然后,用运夜间灯光数据拟合测算出城市碳排放总量,借助空间分析方法分析黄河中游城市碳排放量的空间演变格局。最后,利用地理探测器研究收缩视角下的城市碳排放影响因素,得出以下结论:

第一,分析黄河中游城市收缩的演变特征,分为三个阶段,即 2012—2016 年、2016—2020 年和 2012—2020 年,识别出收缩城市(表 4)。各城市呈现出不同的收缩状态,人口收缩型城市最多,其次是经济收缩型城市,综合收缩型城市最少。整体来看,黄河中游城市收缩空间分异特征显著,呈现“大分散,小集聚”的空间特征,相对收缩特征明显。

第二,2012—2020 年碳排放总量整体呈上升态势(图 3)。极化现象明显,高值区域数量少,数值大,逐年增幅也大;低值区域数量多,数值低,且呈逐年降低趋势。从空间分布格局来看(图 2 和表 4),差异很大,热点集中分布在内蒙古、陕西和山西交汇处,冷点有明显的转移和集聚扩大现象。热点主要集中在成长型和成熟型资源城市中,此时的收缩对碳排放的促进作用强;冷点主要集中在一些衰退型和再生型资源城市中,此时收缩对碳排放的抑制作用大。人口收缩对冷点区影响更为剧烈,热点区更多受社会和经济收缩的影响。

第三,收缩视角下碳排放的影响因素是复杂的,经济收缩对碳排放总量影响最为剧烈,其次是社会收缩,人口收缩影响最小(表 5)。社会收缩和经济收缩存在一个很奇怪的现象,在资源型城市中对碳排放总量的促进作用强,但在非资源型城市中对碳排放总量抑制作用大。交互探测结果显示(表 6),研究时段内碳排放总量的主导因素由人口收缩因素逐渐转为社会和经济因素。至于,接下来各维度城市收缩对碳排放量的影响又会如何变化?这种变化有没有规律可循?这也是日后需要继续研究的一个方向。

黄河中游城市的收缩整体上以相对收缩为主,这与中国典型收缩区域—东北地区(绝对收缩)有很大的不同[5];为尽早实现双碳目标,针对黄河中游区域,我们可以:首先,对于碳排放热点区域,加强合作减排,建立区域间污染核算体系,实现互利共赢,协调好区域间基础设施的共享性,实现区域均衡发展,抑制城市收缩蔓延[46],不妨尝试设立跨区或跨省的区域管理机构,突破行政界限间的封闭性和孤立性发展。其次,对于碳排放量的空间分异特征,高值区域,要重视绝对量的控制,同时不同城市收缩类型对不同区域碳排放表现出的影响不尽相同,因此需因地制宜采取减排措施。研究区域大部分是资源型城市,必须以优化产业结构、降低能源强度为重心,大力推进清洁生产及低碳高效利用。需从根本上破解社会经济发展中存在的体制性、机制性矛盾,统筹兼顾,改革创新。最后,需要顺应城市收缩趋势灵活处理。对于适合增长的收缩型城市采取振兴战略,打造收缩区域增长极,引入新兴产业,营造良好的市场投资环境,鼓励科技创新,推动收缩型城市实现转型发展等措施,从而降低碳排放总量;对于适合顺应收缩趋势发展的城市,采取建设紧凑收缩城市的方式,降低出行成本,提高资源利用效率,规划城市的紧凑发展路线[47];在调整好收缩和增长城市发展的前提下,采取差异化的环境规制,积极引导企业创新投入向环保技术转移,进而实现收缩背景下的减碳任务。

参考文献(References):

[1] 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. 地理科学, 2021, 41(8): 1324-1335.

[2] 邵帅, 张可, 豆建民. 经济集聚的节能减排效应: 理论与中国经验. 管理世界, 2019, 35(1): 36-60, 226.

[3] 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. 中国水利, 2019(20): 1-3.

[4] 闫超华. 黄河流域中下游资源型城市收缩时空异质性及治理效能提升[D]. 天津: 天津理工大学, 2022.

[5] 杨盛东. 收缩情境下东北三省城市碳排放时空演变格局及驱动因素[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2022.

[6] Häußermann H, Siebel W. Die schrumpfende stadt und die stadtsoziologie. Soziologische Stadtforschung. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 1988: 78-94.

[7] Turok I, Mykhnenko V. The trajectories of European cities, 1960-2005. Cities, 2007, 24(3): 165-182.

[8] Murdoch. Specialized vs. diversified: the role of neighborhood economies in shrinking cities. Cities, 2018, 75: 30-37.

[9] Alves D, Barreira A P, Guimarães M H, Panagopoulos T. Historical trajectories of currently shrinking Portuguese cities: a typology of urban shrinkage. Cities, 2016, 52: 20-29.

[10] Wiechmann T, Pallagst K M. Urban shrinkage in Germany and the USA: a comparison of transformation patterns and local strategies. International Journal of Urban and Regional Research, 2012, 36(2): 261-280.

[11] Short J R, Mussman M. Population change in U.S. cities: estimating and explaining the extent of decline and level of resurgence. The Professional Geographer, 2014, 66(1): 112-123.

[12] 国家发展和改革委员会.2019 年新型城镇化重点任务.(2019-03-31),http://www.gov.cn/xinwen/2019-04/08/content_5380457.htm.

[13] 国家发展和改革委员会.2020 年新型城镇化建设和城乡融合发展重点任务.(2020-04-03),http://www.gov.cn/zhengce/2020-04/10/content_5500749.htm.

[14] 吴康, 戚伟. 收缩型城市:认知误区、统计甄别与测算反思. 地理研究, 2021, 40(1): 213-229.

[15] Cunningham S E, Roth H. Growth Paradigmagainst Urban Shrink age A Standardized Fight? The Cass of Glasgow (UK) and Saint-Etienne (France)//Pallagst K, Wiechmann T, Martinez-Fernan dez C. Shrinking Cities: International Perspectives and Policy Implications. London: Routledge, 2014: 99-124.

[16] 贺蕾. 中国城市收缩的空间识别与形成机制[D]. 兰州: 西北师范大学, 2021.

[17] März S, Bierwirth A, Hauptstock D. Rethink the target: drivers, barriers and path dependencies for a low-carbon-transition in shrinking cities: the case of Oberhau-sen. In: Lindström T, editor. Rethink. renew, estart ECEEE 2013 summer study; 3-8 June 2013, Belambra Les Criques, Toulon/Hyères, Fr.; Proc, Stockholm. Council for an Energy Efficient Economy. Europ: 2013, 783-793.

[18] Moss T. 'cold spots' of urban infrastructure: 'shrinking' processes in eastern Germany and the modern infrastructural ideal. International Journal of Urban and Regional Research, 2008, 32(2): 436-451.

[19] Satterthwaite D. The implications of population growth and urbanization for climate change. Environment and Urbanization, 2009, 21(2): 545-567.

[20] Xiao H J, Duan Z Y, Zhou Y, Zhang N, Shan Y L, Lin X Y, Liu G S. CO_2 emission patterns in shrinking and growing cities: a case study of Northeast China and the Yangtze River Delta. Applied Energy, 2019, 251: 113384.

[21] Liu Y, Song Y, Song X D. An empirical study on the relationship between urban compactness and CO_2 efficiency in China. Habitat International, 2014, 41: 92-98.

[22] Liu X J, Wang M S, Qiang W, Wu K, Wang X M. Urban form, shrinking cities, and residential carbon emissions: evidence from Chinese city-regions. Applied Energy, 2020, 261: 114409.

[23] Tong X H, Guo S R, Duan H Y, Duan Z Y, Gao C, Chen W. Carbon-emission characteristics and influencing factors in growing and shrinking cities: evidence from 280 Chinese cities. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(4): 2120.

[24] 李郇, 吴康, 龙瀛, 李志刚, 罗小龙, 张学良, 王德起, 杨东峰, 邹艳丽, 李裕瑞, 杨振山, 周恺, 胡毅, 宋涛, 戚伟, 李昊, 高舒琦. 局部收缩: 后增长时代下的城市可持续发展争鸣. 地理研究, 2017, 36(10): 1997-2016.

[25] 刘玉博, 张学良, 吴万宗. 中国收缩城市存在生产率悖论吗——基于人口总量和分布的分析. 经济学动态, 2017(1): 14-27.

[26] 庾梦桐. 东北老工业基地城市收缩识别与调控对策研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2020.

[27] 刘豫萍, 罗小龙, 殷洁. 行政区划调整对小城镇发展的负向影响——以湖南省华容县沿江乡镇为例. 城市问题, 2015(11): 4-9.

[28] 温佳楠, 宋迎昌, 任杲. 中国城市收缩状况评估——基于地级及以上城市市辖区数据的测算. 城市问题, 2019(9): 4-10.

[29] 陈蕊. 中国收缩型城市的综合测度与影响因素分析. 统计与决策, 2021, 37(23): 68-71.

[30] Sha W, Chen Y, Wu J S, Wang Z Y. Will polycentric cities cause more CO_2 emissions? A case study of 232 Chinese cities. Journal of Environmental Sciences, 2020, 96: 33-43.

[31] Lv Q, Liu H B, Wang J T, Liu H, Shang Y. Multiscale analysis on spatiotemporal dynamics of energy consumption CO_2 emissions in China: Utilizing the integrated of DMSP-OLS and NPP-VIIRS nighttime light datasets. Science of the Total Environment, 2020, 703: 134394.
[32] 苏泳娴, 陈修治, 叶玉瑶, 吴旗韬, 张虹鸥, 黄宁生, 匡耀求. 基于夜间灯光数据的中国能源消费碳排放特征及机理. 地理学报, 2013, 68(11): 1513-1526.
[33] 周翼, 谢保鹏, 赵鸿雁, 陈英, 裴婷婷, 刘士琪. 基于灯光数据的中国县域城市规模时空格局分析. 长江流域资源与环境, 2019, 28(2): 250-260.
[34] 牛亚文, 赵先超, 胡艺觉. 基于 NPP-VIIRS 夜间灯光的长株潭地区县域土地利用碳排放空间分异研究. 环境科学学报, 2021, 41(9): 3847-3856.
[35] 李博, 张帅, 王艺. 辽宁省城市弹性及其空间分异测度. 城市问题, 2018(8): 40-47.
[36] 刘春阳, 杨培峰. 中外收缩城市动因机制及表现特征比较研究. 现代城市研究, 2017, 32(3): 64-71.
[37] 张帅, 王成新, 王敬, 姚士谋, 张帆, 殷冠文, 许馨月. 中国城市收缩的综合测度及其时空分异特征研究. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(8): 72-82.
[38] 杨琳, 何邕健. 吉林省收缩城市的空间分布与影响因素分析. 西部人居环境学刊, 2018, 33(3): 21-27.
[39] 张赫, 彭千芮, 王睿, 强文丽, 张建勋. 中国县域碳汇时空格局及影响因素. 生态学报, 2020, 40(24): 8988-8998.
[40] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
[41] 李若倩, 孟斌. 基于地理探测器的北京市居民通勤距离影响因素分析. 资源开发与市场, 2020, 36(5): 449-455.
[42] 张秋梦,贾宝全,李彤,刘文瑞,李晓婷.中国生态用地稳定性空间分异及其影响因素. 生态学报,2023,43(14),1-12.
[43] 张帅. 中国城市收缩的时空演变及其驱动机理研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2021.
[44] 丁晓明,王成新,李梦程,王瑞莉,金振兴.中国老工业基地城市收缩的时空演变及影响因素分析.世界地理研究,2022,1-6.
[45] 罗婧怡, 刘迪, 王一方, 张清凌. 基于多维数据的中美收缩城市比较研究. 测绘地理信息, 2023, 48(2): 133-137.
[46] 宫攀, 张槊, 王文哲. 人口视角下中国城市收缩的演变特征与时空格局——基于第七次全国人口普查公报数据的分析. 人口与经济, 2022(3): 1-15.
[47] 赵景柱, 宋瑜, 石龙宇, 唐立娜. 城市空间形态紧凑度模型构建方法研究. 生态学报, 2011, 31(21): 6338-6343.