

DOI: 10.5846/stxb202108082172

杨青林, 赵荣钦, 胡月明, 肖连刚, 谢志祥, 揣小伟, 谢英凯. 京津冀地区经济社会要素与碳排放的时空耦合关系. 生态学报, 2023, 43(9): 3458-3472.

Yang Q L, Zhao R Q, Hu Y M, Xiao L G, Xie Z X, Chuai X W, Xie Y K. Spatial-temporal coupling relationship between economic and social factors and carbon emissions in Beijing-Tianjin-Hebei region. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(9): 3458-3472.

京津冀地区经济社会要素与碳排放的时空耦合关系

杨青林^{1,2}, 赵荣钦^{1,*}, 胡月明³, 肖连刚¹, 谢志祥¹, 揣小伟⁴, 谢英凯³

1 华北水利水电大学测绘与地理信息学院, 郑州 450046

2 安州区自然资源局, 绵阳 622650

3 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642

4 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210093

摘要:碳排放受区域发展水平、产业结构、消费模式等经济社会多要素的综合影响。开展区域经济社会要素与碳排放的时空耦合关系研究, 不仅有助于揭示区域内部各要素空间格局对碳排放的影响机制, 而且对于制定差别化的经济、环境和产业政策, 推动区域低碳协调和均衡发展也具有重要的实践意义。基于京津冀地区 2005—2020 年的相关统计数据, 采用区域重心模型、空间关联性分析方法、地理集中度、不一致指数、空间自相关分析等方法, 探讨了区域人口、经济、消费水平、第二产业、贫困度、碳排放量等经济社会要素的重心转移特征和地理集中度, 并对各要素与碳排放的空间关系进行了分析。结果表明: (1) 2005—2020 年京津冀地区各经济社会要素均不同程度偏离区域几何中心, 各要素在空间上长期处于不平衡状态, 但随着时间推移, 不平衡状态有所减缓。(2) 研究期内, 各经济社会要素的重心移动轨迹具有明显的阶段性, 京津冀地区各要素重心格局易于波动, 碳排放与其他要素重心空间耦合性呈现波动式变化。(3) 人口因素是影响碳排放量增长的主要因素。贫困度、第二产业比重、经济发展水平的灰色关联度数值也都较高, 贫困度、第二产业比重、经济发展水平也是碳排放量增长的主要驱动力。(4) 京津冀地区各县(市、区)各要素地理集中度在空间上大多呈现出北低南高的分布格局, 且主要表现为“核心-外围”之间的差异。(5) 2005—2020 年间京津冀地区各要素不平衡指数逐渐增强, 各要素与碳排放空间分布逐步向空间均衡发展变化, 且这种变化趋势通过空间自相关检验, 区域协同发展有助于碳减排。

关键词:京津冀地区; 经济社会要素; 重心; 地理集中度; 时空耦合关系

Spatial-temporal coupling relationship between economic and social factors and carbon emissions in Beijing-Tianjin-Hebei region

YANG Qinglin^{1,2}, ZHAO Rongqin^{1,*}, HU Yueming³, XIAO Liangang¹, XIE Zhixiang¹, CHUAI Xiaowei⁴, XIE Yingkai³

1 School of Surveying and Geo-informatics, North China University of Water Resource and Electric Power, Zhengzhou 450046, China

2 Natural Resources Bureau of Anzhou Country, Mianyang 622650, China

3 College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

4 School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract: Carbon emissions are comprehensively influenced by multiple economic and social factors such as regional development level, industrial structure, and consumption pattern. Studying the spatio-temporal coupling relationship between regional economic and social factors and carbon emissions not only helps to reveal the influence mechanism of the

基金项目:国家自然科学基金(41971241, 42277325); 河南省高校科技创新人才项目(人文社科类)(2021-CX-011); 河南省社会科学规划决策咨询项目(2022JC44)

收稿日期: 2021-08-08; 采用日期: 2022-12-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaorq234@163.com

spatial pattern of each factor within the region on carbon emissions, but also has important practical significance for formulating the differentiated economic, environmental and industrial policies and promoting regional low-carbon coordinated and balanced development. Based on the relevant statistical data of Beijing-Tianjin-Hebei region from 2005 to 2020, the regional center of gravity model, spatial correlation analysis method, geographic concentration, inconsistency index, and spatial autocorrelation analysis were used to explore the characteristics and geographic concentration of regional population, economy, consumption level, secondary industry, poverty, carbon emission and other economic and social factors of center of gravity shift, and the spatial relationship between each factor and carbon emissions was analyzed. The results show that (1) all economic and social factors in Beijing-Tianjin-Hebei region deviated from the regional geometric center to different degrees from 2005 to 2020, and each factor was in a long-term spatial imbalance, but the imbalance has been slowed down over time. (2) During the study period, the trajectory of the center of gravity of each economic and social factor had obvious phases, the pattern of the center of gravity of each factor in the Beijing-Tianjin-Hebei region was easy to fluctuate, and the spatial coupling of carbon emissions and the center of gravity of other factors showed fluctuating changes. (3) Demographic factors are the main factors affecting the growth of carbon emissions. The gray correlation values of poverty, the proportion of secondary industry, and the level of economic development are also high. Poverty, the proportion of secondary industry, and the level of economic development are also the main drivers of carbon emission growth. (4) The geographic concentration of each factor in the counties (cities and districts) of Beijing-Tianjin-Hebei region mostly shows a spatial distribution pattern of low in the north and high in the south, and mainly shows the difference between “core-periphery”. (5) The imbalance index of each factor in the Beijing-Tianjin-Hebei region gradually increased from 2005 to 2020, and the spatial distribution of each factor and carbon emission gradually changed towards spatial balance, and this trend of change passed the spatial autocorrelation test, so that the regional collaborative development helped carbon emission reduction.

Key Words: Beijing-Tianjin-Hebei region; socio-economic factors; gravity center; geographic concentration degree; Spatio-temporal coupling relationship

区域碳排放受城市规模、人口规模、经济发展水平、城市化水平、能源强度、产业结构等因素的影响,从地理要素耦合的视角开展研究是未来资源环境领域的主要研究趋势^[1-2]。由于区域内部与区域之间受经济发展水平和阶段、资源禀赋、产业结构等因素的影响,不同地区经济社会要素存在明显差异,这将导致区域碳排放在空间上会呈现不均衡特征。因此,从地理要素耦合的视角,分析经济社会要素与碳排放的重心演变规律和空间关系,有助于揭示碳排放与经济社会要素的空间匹配特征,以期为区域协同减排提供理论支撑。

长期以来,关于碳排放的研究主要集中在 3 个方面:一是利用 EKC 模型分析碳排放与其他要素之间的关系^[3];二是利用分解模型^[4]、足迹理论^[5-6]和协整分析^[7]等探讨要素与碳排放之间的动态耦合关系及影响机制,这两者主要从经济学视角研究碳排放;三是从地理学角度探讨碳排放的空间格局变化及区域差异。近年来,重心理论被引入以研究碳排放在空间上的演变及其相关规律,且针对单一要素的研究较多^[8-10],虽然也有针对两种或三种要素的关系研究,如全国终端能源消费碳排放和交通运输能源消费碳排放之间的关系^[11]、经济总量、碳排放与人均碳排放的关系^[12]、碳排放和碳排放强度之间动态轨迹研究^[13]等。但从目前来看,有关重心的研究还是主要集中于人口规模^[14-15]、产业结构^[16-17]、粮食生产^[18-19]、经济发展水平^[20]、区域污染^[21]和城市扩展^[22]等方面,以单要素居多。国内外学者对碳排放影响机制的解析主要从人口、经济水平、居民消费、产业结构以及富裕程度等方面展开论述,研究认为人口与碳排放呈倒“U”型关系,进入城市化后期人口会抑制碳排放的增长^[23-24],服务业在经济水平中比重足够高时,有助于保护环境^[25],居民消费水平对于碳排放具有较强的增长作用^[26],但越过阈值时,这种增长作用有所减缓^[27],第二产业对碳排放增长具有显著的作用^[28],而历史贫困地区一般地处偏远山区,第二产业发展迟缓,由于存在大量碳汇资源和较低的生活水平,因此碳排放较低^[29-30]。

总体而言,前期对于要素与碳排放之间的动态耦合关系及影响机制开展了较为系统的研究,对本文有重要的借鉴和参考意义。但现有的研究大多针对全国及省级尺度,较少有针对县级尺度的研究,目前我国以城市群为核心的空间发展格局已基本形成,以城市群为载体研究县级尺度各要素与碳排放空间耦合关系对于实现大中小城市和小城镇的低碳协调发展有重要意义。其次,已有研究在地理和空间因素对碳排放影响路径的研究较少,如果将地理空间位置属性忽略,则不能深入了解经济社会要素与碳排放的时空演变规律和匹配关系。京津冀地区是我国人口、经济、消费、产业高度集中的区域之一,各要素在时空上的重心变化轨迹是区域格局演变最真实的记录^[31],自2014年京津冀协同发展上升为重要国家战略后,资本集聚、人口规模迁移、消费能力提升、产业结构调整等会对碳排放产生胁迫或促进效应,揭示不同地域系统内碳排放主要影响因素的差异成为近年来重要的研究课题之一。鉴于此,本文从地理要素时空耦合视角,深入分析京津冀地区经济社会要素与碳排放的时空演变规律和耦合关系,研究结果对于深入揭示经济社会要素变化对碳排放的影响机制具有重要意义,并能为区域低碳协调发展提供理论依据和实践借鉴。

1 理论框架、数据来源与研究方法

1.1 地域系统经济社会要素与碳排放的耦合关系解析

地域系统是一个自然和经济社会诸要素相互耦合、相互作用的系统。构成系统的各要素在时间和空间发生着复杂的相互联系与内在作用^[32],要素之间的变化表现出在时间上不同步、空间上不匹配的现象,这深刻地影响着人类社会生产生活方式和产业格局,并由此形成差别化的地域“结构—功能”的综合体。结构指地域系统内各要素的组成状态,而功能指地域系统内各要素对碳排放的作用机制,结构演进体现了各社会经济要素对碳排放影响变化过程,由于“结构—功能”综合体演进体现了碳排放变化的进程和方向,因此,探讨各社会经济要素与碳排放演进特征及其与碳排放的空间耦合作用就成为当前研究焦点。具体而言,碳排放受人口规模、经济发展水平、产业结构、消费能力和富裕程度等经济社会多要素影响,经济社会系统要素的相互作用共同决定了碳排放的规模,各要素在空间上的集聚程度和地理分布的差异也必然会影响到碳排放的分布格局。但经济社会要素对碳排放的影响程度并非一成不变的,随着人口规模变化、经济社会发展、产业结构升级、产业转移、城市化进程加快、人民生活水平提高以及消费模式的变化等,经济社会要素的不同组合会对区域碳排放结构和空间特征产生深刻影响,并导致经济社会要素与碳排放的空间匹配格局发生改变(图1)。

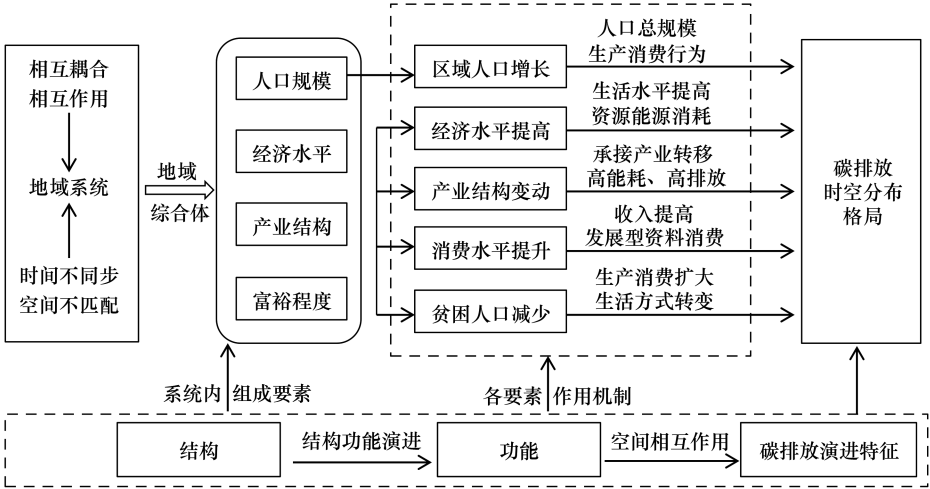


图1 经济社会要素与碳排放的时空耦合研究理论框架

Fig.1 Theoretical framework of the relationship between economic and social factors and carbon emissions

1.2 数据来源

本文从县域层面构建2005—2020年京津冀地区常住人口、经济发展水平、居民消费水平、第二产业产值、

能源消费、贫困度和国土面积的动态数据库。其中,能源消费量、GDP、常住人口数、居民消费水平、第二产业产值和国土面积等数据来源于《北京统计年鉴》、《天津统计年鉴》、《河北经济年鉴》、《中国能源统计年鉴》和《中国统计年鉴》;城市和农村低保人数来源于各省(市)《民政事业发展统计公报》。需要说明的是:本文的贫困度是指各地区相对贫困程度,是低保人数与总人口的比值。

1.3 指标选取的依据

影响碳排放的因素复杂多样,碳排放量会随区域相应影响因素的变化在空间上会呈现不同的空间分布格局,也即是碳排放会随社会经济要素演化趋势在空间上呈现出一定的路径依赖特征。已有文献对碳排放的影响因素进行了较多的分析,大部分研究表明,人口因素是产生碳排放的重要因素之一^[33],生产与消费行为是人类维持生存活动的基本方式,人口通过此行为对碳排放产生影响^[34],Salvador 等的研究也证实人口是碳排放最主要的驱动力^[35]。经济发展意味着人民生活水平提高,生活质量提高的同时会带来消费需求,会消耗更多的资源、能源,产生更多的碳排放^[36]。京津冀地区目前处于工业化推进过程,经济的增长主要还是依靠能源密集型产业带动,大量能源的消耗产生巨量碳排放。第二产业产值反应了区域的工业化程度,而第二产业主要的特征表现为高能耗、高排放,工业化在带动经济过程中也刺激了碳排放增长^[37]。随着经济的快速发展,人民收入水平稳步提高,人们对于发展型资料的消费比重不断提高^[38]。较多学者利用 STTRPAT 模型研究了人口、富裕程度与技术进步,富裕水平提升使得生产消费的规模得到扩大,同时生活水平提升也刺激了消费增长,促进了碳排放量增长。例如王少剑和黄永源^[39]在 STTRPAT 模型中加入了富裕程度以验证环境库兹涅兹曲线的假说。各要素在空间上的集聚程度和地理分布的差异势必会影响碳排放的分布格局,随着经济社会要素对碳排放的影响程度变化,导致经济社会要素与碳排放的空间匹配格局发生改变,因此深入分析碳排放与各经济社会要素之间的空间匹配关系,对于揭示经济社会要素变化对碳排放的影响机制具有重要意义。结合已有研究,本文综合选取人口、经济、第二产业产值、消费水平和贫困度分析京津冀地区经济社会要素与碳排放的时空演变规律和匹配关系。总的来看,碳排放影响因素可归结为规模因素、结构因素和技术因素 3 个一级大类^[40],除此之外 STTRPAT 模型中认为富裕程度对碳排放也有重要影响。人口和经济水平可用于表征规模因素,消费水平和贫困度指标可用于表征富裕程度因素,第二产业产值可用于表征结构和技术因素,因为在三次产业中,第二产业是影响地区碳排放的主要因素,同时第二产业是减少碳排放的一个重要领域,而减排的核心在于工业技术进步。综上所述,本文综合选取的碳排放影响因素指标可以从不同维度反映经济社会状况,同时在碳排放影响因素一级大类中也具有较好的代表性。

1.4 研究方法

1.4.1 碳排放核算方法

采用 IPCC 公布的《2006 温室气体排放清单》,基于 2005—2020 年三省(市)终端能源消费量,选择原煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气、热力和电力 10 种能源类型,根据能源消费碳排放系数测算能源消费产生的碳排放量,计算公式如下^[41]:

$$CE_{\text{energy}-i} = \frac{44}{12} \times \sum_{i=1}^{10} K_i E_i \quad (1)$$

式中, $CE_{\text{energy}-i}$ 为第 i 种能源的碳排放量; E_i 为第 i 种能源的消费总量,按标准煤计,单位为 10^4t ; K_i 为第 i 种能源的碳排放系数,单位是 $(10^4 \text{t 碳})/(10^4 \text{t 标准煤})$, K_i 的值取自 IPCC 碳排放计算指南缺省值。各种能源类型的折标和碳排放系数见文献^[42]。

1.4.2 重心模型

采用几何重心法来衡量各要素属性的空间分布状态,例如某地区包含有 n 个子区域,第 i 个次级区域的中心坐标为 (X_i, Y_i) , W_{ii} 为某种属性(碳排放量、GDP、常住人口数、第二产业产值、居民消费水平、贫困度)的数量值,则该区域某种属性的重心坐标 $G(X_t, Y_t)$ 为:

$$X_t = \frac{\sum X_i W_{ii}}{\sum W_{ii}} \quad Y_t = \frac{\sum Y_i W_{ii}}{\sum W_{ii}} \quad (2)$$

式中, X_t, Y_t 分别表示第 t 年各要素的重心经、纬度坐标, W_{it} 为第 t 年第 i 省的要素数量值, X_i, Y_i 是第 i 省几何中心经、纬度坐标。

重心偏心距离。是指某种要素的重心到区域内几何中心的距离, 偏心距离公式为:

$$D_0 = c \times \sqrt{(X - x_0)^2 + (Y - y_0)^2} \quad (3)$$

式中, c 是地理坐标与平面单位之间的转换系数, 其值为 111.11, (X, Y) 是区域某种要素的重心, (x_0, y_0) 是区域几何中心坐标。

1.4.3 空间关联性分析方法

(1) 空间耦合性计算方法

空间耦合性可用于计算不同要素重心在空间上的耦合程度, 并由此判断不同要素重心在空间上是否存在关联。如果两种不同要素重心距离越来越远, 表示两者之间的空间关联性越低, 反之, 空间关联性越高。计算公式如下^[43]:

$$S = d_{\text{GEGP}} = \sqrt{(X_E - X_P)^2 + (Y_E - Y_P)^2} \quad (4)$$

式中, S 表示两种不同要素重心空间耦合度, d_{GEGP} 表示两种不同要素重心在空间上的距离, (X, Y) 是区域某种要素的重心。

(2) 灰色关联模型

若两种要素重心在空间上的变化趋势具有一致性, 那么二者的关联程度较高, 反之, 则较低, 此时用灰色关联模型可以很好的描述两种要素随时间变化的关联大小性^[44]。在进行灰色关联分析时, 首先需要确定参考数列, 假设 $x_0 = \{x_0(k) | k = 1, 2, \dots, n\}$ 为参考数列, $x_i = \{x_i(k) | k = 1, 2, \dots, n\} (i = 1, 2, \dots, m)$ 为比较数列, 则 X_{ik} 和 X_{0k} 的关联系数为:

$$\varepsilon_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \times \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \times \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (5)$$

式中, $\varepsilon_i(k)$ 为关联系数, ρ 为分辨系数, 一般取值为 0.5。 $|x_0(k) - x_i(k)|$ 为 x_0 与 x_i 第 k 个指标的绝对差, $\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 和 $\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 分别为两级极小差和两级极大差。

由于关联系数计算的结果参考数列和比较数列的关联数值, 结果较多不便于比较, 因此引入灰关联度, 便于将每一比较数列各个年份的关联系数集中体现在一个值上, 计算公式如下:

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon_i(k) \quad (6)$$

式中, $\varepsilon_i(k)$ 为关联系数, r_i 为灰关联度值, 灰关联度值介于 0 和 1 之间, 如果值越接近于 1 说明两种要素重心的几何曲线形状越接近, 相关性越强, 反之, 相关性较弱。

1.4.4 地理集中度指数

地理集中度可用于衡量某一要素在地域上的集中程度, 在反映某一要素的空间集中度, 以及某一地区在整体区域中的地位 and 作用等方面有重要的意义^[45]。具体公式为:

$$C_{Ei} = \frac{E_i \times \sum E_i}{A_i \times \sum A_i} \quad (7)$$

式中, C_{Ei} 表示某一时间段内 i 地区的人口、经济、消费水平、第二产业、贫困人口和碳排放量地理集中度; E_i 和 A_i 分别表示各要素的数量值及国土面积; $\sum$ 是计算某种属性在大范围的累计之和。

1.4.5 不一致指数模型

为深入分析各要素与碳排放量在空间上的偏差或联系, 借鉴不一致指数^[46]来表征各要素集中度与碳排放关系。重构后的不一致指数是指各要素集中度与碳排放集中度的比值, 计算公式如下:

$$I_a = \frac{C_{Ea}}{C_{\text{carbon}_a}} = \frac{E_a}{\sum E_a} / \frac{\text{carbon}_a}{\sum \text{carbon}_a} \quad (8)$$

式中, C_{E_a} 和 C_{carbon_a} 分别表示的是某时段 a 地区各要素集中度和碳排放集中度; E_a 和 carbon_a 分别表示各要素的数量值和碳排放。

1.4.6 全局空间自相关分析

空间自相关分析的目的是为分析空间变量的分布是否有集聚性和异质性,揭示空间邻接区域单元属性的相似程度,主要包含全局空间自相关和局部空间自相关,本文采用全局空间自相关来表征各要素与碳排放量空间分布的集聚性和变异性。Moran's I 计算公式如下^[47]:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{s^2 \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \right)} \quad (9)$$

式中, I 为莫兰指数,莫兰指数介于-1 到 1 之间,莫兰指数小于 0 说明空间负相关,莫兰指数大于 0 说明空间呈正相关,莫兰指数等于 0 说明空间不相关, n 是空间单元数量, x_i 和 x_j 是区域 i 和区域 j 的某种要素属性值, $\bar{x}$ 是各区域某种要素属性值的平均值, w_{ij} 是空间权重。

2 结果分析

2.1 各要素及碳排放重心时空演变特征

结合前文的计算方法,分别计算出 2005—2020 年京津冀地区各县人口、GDP、消费水平、第二产业、贫困度和碳排放量重心坐标,在此基础上,为进一步了解各要素重心移动距离和移动规律,从而形成如图 2、图 3 所示的 2005—2020 年京津冀地区各要素重心的偏心距离和动态演变轨迹。

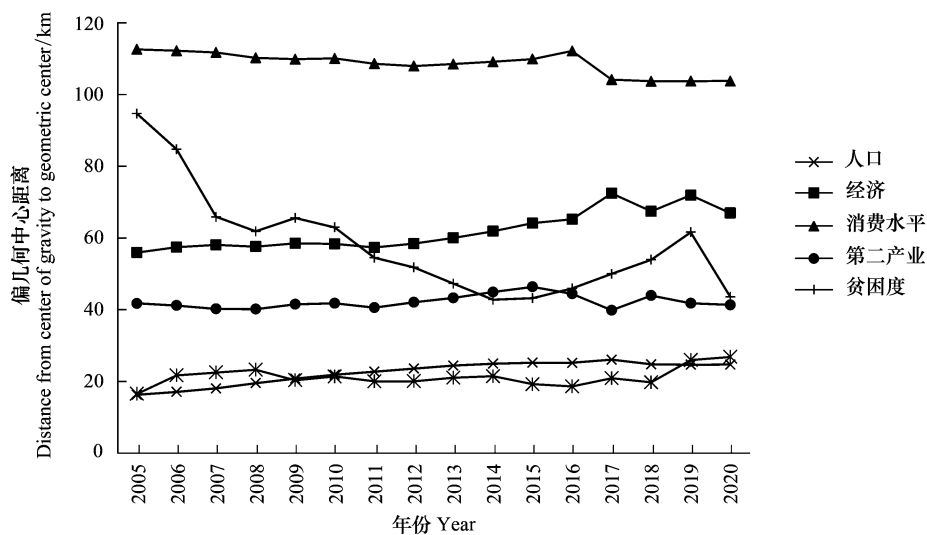


图 2 2005—2020 年间京津冀地区各要素重心偏心距离

Fig.2 The eccentricity of gravity center of each factor in Beijing Tianjin Hebei region from 2005 to 2020

京津冀地区各经济社会要素重心与碳排放重心均不同程度偏离区域几何中心,各经济社会要素重心在空间上长期处于不均衡状态,但随着时间推移,不均衡状态有所减缓。各要素均衡程度具体变化过程为,人口重心所指示的非均衡性总体增大,但是在 2017 年之后有所减小。经济水平重心的非均衡性处于起伏变化状态,从 2011—2017 年非均衡性一直增大,2017 年之后呈现波动下降趋势。消费水平重心偏移距离最大,重心的非均衡性也处于起伏变化状态,但是在 2016 年之后有明显的下降趋势。第二产业重心非均衡性总体有所减小,在 2015 年之后,偏心距离开始减小,说明第二产业重心在空间上开始趋向于均衡。贫困度重心的非均衡性总体呈减小态势,贫困度重心的偏心距离减小有明显的三个阶段,第一阶段是 2005—2008 年,相比 2005 年

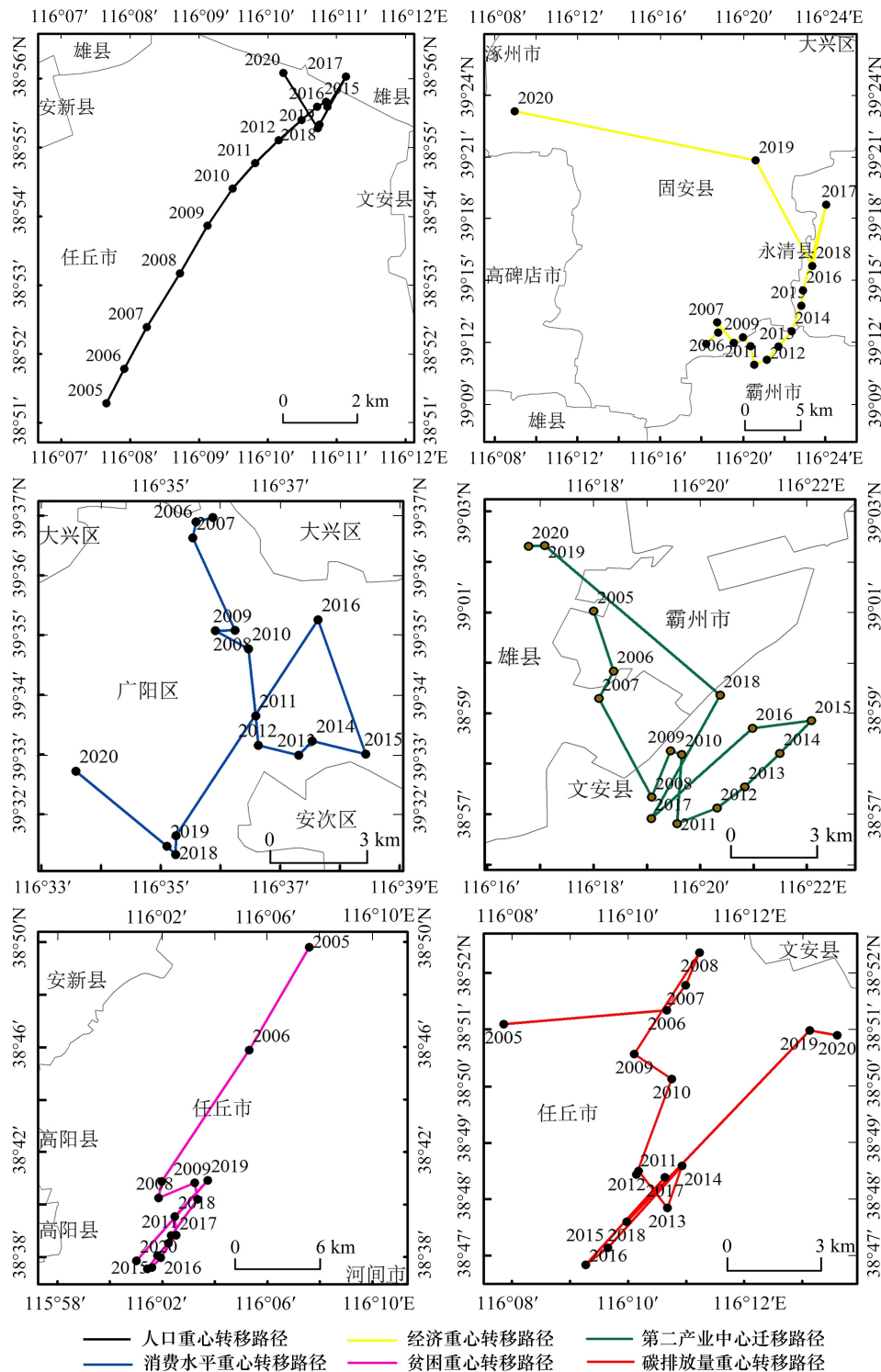


图 3 2005—2020 年间京津冀地区各要素重心变动趋势

Fig.3 The changing trend of the center of gravity of various factors in Beijing Tianjin Hebei region from 2005 to 2020

偏心距离减少 32.83km。第二阶段是 2009—2014 年,相比 2009 年偏心距离减少 22.81km。第三阶段是 2019—2020 年,相比 2019 年偏心距离减少 18.01km。碳排放量重心的偏心距离最小,但是碳排放量重心的非均衡性总体处于增长状态,尤其是 2018 年之后这种增长较为明显,到 2020 年碳排放量重心偏心距离相较于 2005 年增加 10.27km。所有指标的均衡性在空间上处于动态变化过程,表明京津冀区域内不同城市不同时期

空间作用力量的博弈均衡特征。

各经济社会要素的重心移动轨迹具有明显的阶段性,京津冀地区各要素重心格局易于波动。①碳排放量重心一直处于沧州任丘市的北部,且有总体向东南移动的趋势。由于产业转移政策的影响,使得资本、人才、技术和资源等向天津市和河北省流动,短期内可以为两地带来巨大的经济效应,但是由于区域内部产业结构尚未优化完成,所以过重的产业转移会超出区域环境容量,因此,碳排放量重心移动方向与产业转移方向具有一致性。②消费水平重心一直处于北京大兴区南部,整体向南部移动,但是在 2016 年消费重心急剧向北移动,之后大幅度向西南偏移。北京和天津的产业不断向河北转移和集中,带动了河北地区经济发展,但实际上北京和天津的人均 GDP 要远远大于河北省,所以消费水平重心主要还是靠近北京和天津。③第二产业重心主要经历两个时期变化,2005—2018 年重心总体向东南方移动,2018 年之后重心急剧向西北方移动。经济重心由廊坊固安县移动到廊坊永清县,2018 年之后重心急剧向西北方移动。《京津冀城镇群协调发展规划》以及京津冀协同发展战略的实施,北京和天津的资金、技术、产业、人才和资源要素不断沿着转移带向河北转移,北京和天津对于河北的“虹吸效应”正在不断减弱。2017 年印发的《河北省“十三五”脱贫攻坚规划》中提出支持“张承保”3 市 16 个县(区)积极承接京津产业转移,因此第二产业重心和经济重心总体向西北移动,同时也表明了经济发达地区对于欠发达地区的带动效应,“张承保”地区在此期间受到北京和天津的经济辐射,发展速度明显提高。④人口重心一直处于沧州任丘市,重心总体向东北方移动,且不断逼近保定雄县。人口重心的演变反映了京津冀地区人口分布密度的空间演变过程,由于北京和天津位于几何中心的东北方向,无论是在经济水平、就业机会、基础设施和教育水平等方面要优于河北省,受雄安新区和滨海新区等国家级新区“虹吸效应”影响,吸引了大量外来人口,因此人口重心会不断向东北方和西北方偏移。⑤贫困度重心由廊坊永清县移动到廊坊文安县,重心总体向西南方移动。研究期间内,京津冀地区贫困人口数量明显减少,但河北省与北京、天津相比依然存在明显差距,河北省贫困人口数要远远大于北京和天津贫困人口之和,且贫困人口主要聚集在冀西南地区,因此贫困重心向西南方移动。

2.2 各要素重心与碳排放重心对比分析

碳排放重心与其他要素重心在研究期内,其空间耦合性呈现波动式变化(表 1)。具体来看,碳排放重心

表 1 碳排放重心与其他要素重心耦合分析/m

Table 1 Coupling analysis of carbon emission barycenter and other factors barycenter

年份 Year	碳排放与人口 Coupling of carbon emission and population center of gravity	碳排放与经济 Coupling of carbon emission and economic center of gravity	碳排放与第二产业 Coupling of carbon emissions and the focus of the secondary industry	碳排放与消费水平 Coupling of carbon emission and consumption level	碳排放与贫困度 Coupling of carbon emissions and poverty centroid
2005	0.02	150.54	55.97	802.47	0.49
2006	2.16	142.71	36.55	748.97	16.25
2007	2.21	141.53	29.68	725.76	55.70
2008	1.93	126.23	24.02	680.39	65.21
2009	3.28	158.07	40.64	735.19	39.52
2010	5.53	156.67	40.06	737.31	42.61
2011	11.18	170.66	44.15	762.00	42.69
2012	12.14	176.34	49.21	748.35	45.23
2013	15.86	193.41	54.81	763.11	48.46
2014	13.64	195.93	56.71	750.11	58.95
2015	20.57	245.60	81.06	814.49	43.27
2016	22.00	264.68	77.18	874.67	36.82
2017	16.31	304.91	40.04	688.17	43.59
2018	16.79	269.57	68.42	708.49	33.71
2019	6.72	262.99	40.04	589.16	52.75
2020	10.64	296.02	38.95	596.60	91.35

与人口重心的空间距离总体增大,说明其空间耦合性总体在减弱,但总体关联性还是较强。碳排放重心与经济重心的空间距离总体增大,说明碳排放重心与经济重心呈现非均衡性发展。碳排放重心与第二产业重心的空间距离总体减小,说明其空间耦合性总体在增强。碳排放重心与消费水平重心的空间距离总体减小,说明其空间耦合性总体在增强。碳排放重心与贫困度重心的空间距离总体增大,说明其空间耦合性总体减弱。

人口因素是影响碳排放量增长的主要因素(表2)。贫困度、第二产业比重、经济发展水平的灰色关联度数值也都较高,说明贫困度、第二产业比重、经济发展水平也是碳排放量增长的主要驱动力。京津冀地区2005—2020年人口总体处于增长状态,16年间人口增长14.68%,而人口增长的背后更多的是对资源能源需求,从而产生更多的碳排放,因此人口因素对于碳排放量增长具有重要作用,这也与陈婧^[48]的研究结果一致。京津冀地区的低保人数呈“倒U型”增长,2011年是增长的拐点,随着2011年《中国农村扶贫开发纲要(2011—2020年)》的颁布,我国开始了精准扶贫模式的摸索实践,因此从2011年之后贫困人口不断减少,但相反富有的人口会越来越多,有研究表明全球前1%最富人口的二氧化碳排放量比后50%的贫困人口的排放量还大^[49],因此贫困度降低对于碳排放量增长也有驱动作用,所以未来还更应强调低碳消费模式。但从表1可以看出,碳排放重心与贫困度重心的距离越来越远,也即表明贫困度对于碳排放的影响正在减弱。研究期间内,京津冀地区的第二产业GDP水平和GDP总量分别增长158.50%、224.40%,目前京津冀城市群尚处于工业化中期阶段,“工业强群”仍是今后相当长一段时期内必须坚持的发展战略^[50],所以对能源的需要也会不断增加,导致碳排放量随之增长。

表2 碳排放重心与相关因素的灰色关联度

Table 2 Grey correlation degree between carbon emission center of gravity and related factors

评价指标 Evaluating indicator	经度方向关联度 Correlation degree of longitude direction	纬度方向关联度 Correlation degree in latitude direction	排序 Sort
人口重心 Population center of gravity	0.922	0.846	1
经济重心 Economic center of gravity	0.591	0.502	4
第二产业重心 Secondary industry center of gravity	0.628	0.729	3
消费水平重心 Consumption level center of gravity	0.362	0.355	5
贫困度重心 Poverty degree center of gravity	0.658	0.733	2

2.3 京津冀地区各要素地理集中度及其空间关系

2.3.1 京津冀地区各要素地理集中度空间特征

重心模型可以从总体上描述各要素的变化情况和耦合规律,区域内部各个城市之间的耦合关系用地理集中度体现。地理集中度表征了单位国土面积上集聚的人口分布、经济强度、产业产值、贫困人口分布和碳排放量。因此根据公式(4)计算出2005—2020年京津冀地区各县(市、区)各要素地理集中度(图4),并对其值划分为5个等级,从内部空间角度把握京津冀地区各要素空间格局。由于篇幅限制,在此只展示2005年、2012年和2020年的情况。

京津冀地区各县(市、区)各要素地理集中度在空间上均呈现出北低南高的分布格局,各要素的集中区域和集聚程度却有所差异。①从人口地理集中度来看,京津冀地区整体差异显著,主要表现为冀东南-冀西北和“核心-外围”之间的差异。集中度较高的城市在核心和外围均有分布,核心区北京、天津人口集中度最高,此外冀南和冀西南的人口集中度也较高。从时间角度来看,2005年时人口集中度较为分散,到2020年人口主要集中于北京和天津,人口“虹吸效应”较为明显,但核心区人口也有向外扩散的趋势。②从经济地理集中度来看,京津冀地区也表现为冀东南-冀西北和“核心-外围”之间的差异。京津冀地区经济集聚格局与人口集聚格局过程相似,有向北京和天津集中的趋势,但相比其他要素而言,经济地理集中度的高值区较为离散。③消费水平集中度也呈现出“核心-外围”的空间格局。京津冀城市群消费总体表现为北京独大,“虹吸效应”突出,这就需要更好发挥北京的带动效应,加快非首都功能疏解,实现从而提升经济效率,拉动消费增长,促进京

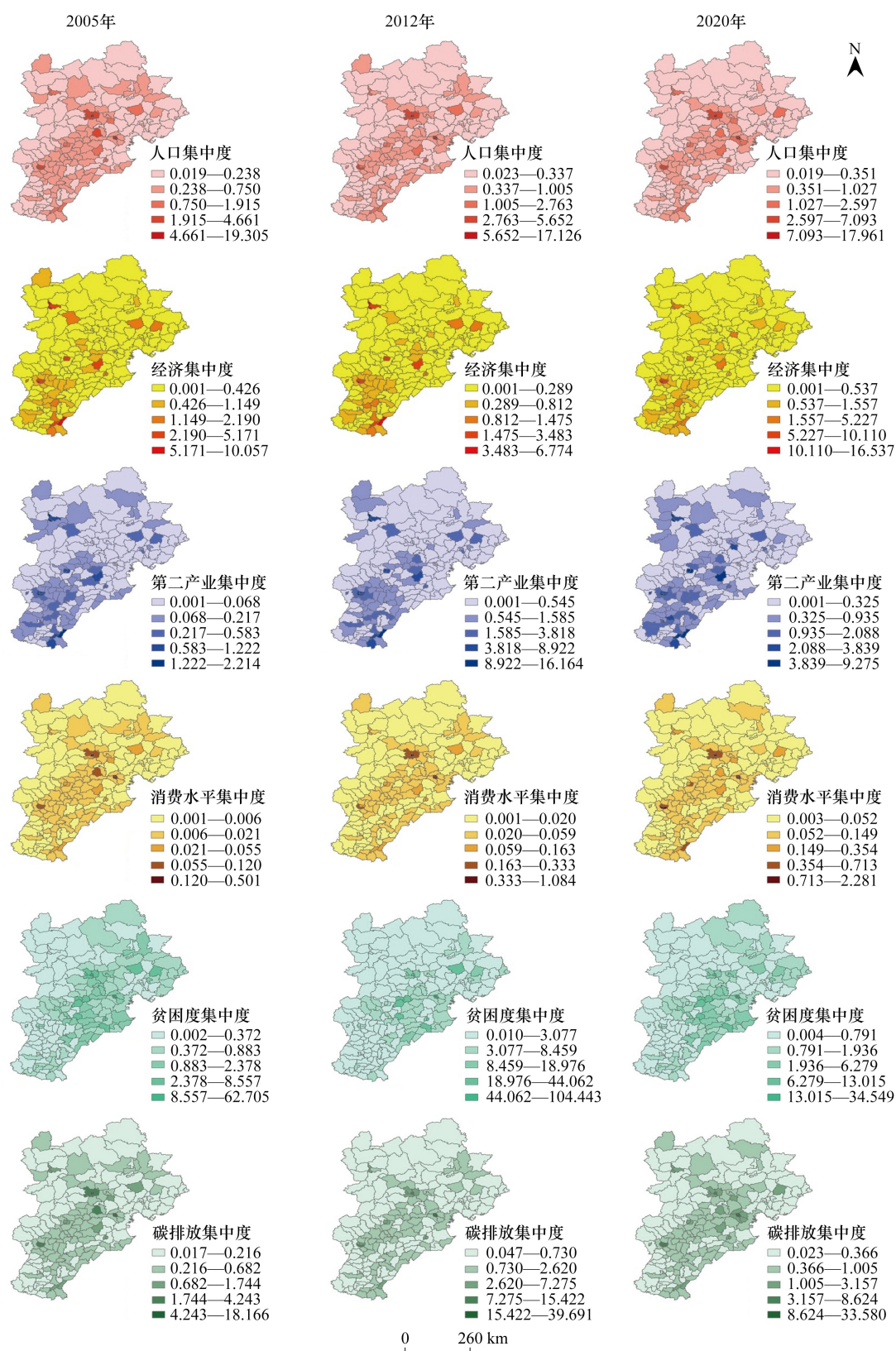


图4 2005年、2012年、2020年京津冀地区各要素地理集中度的空间分布特征

Fig.4 Spatial distribution characteristics of geographical concentration of various elements in Beijing Tianjin Hebei region in 2015, 2012 and 2020

京津冀城市群的整体协调发展。纵向比较各城市群内部消费占比,可以发现中心城市在下降,非中心城市上升,不平衡性正在减缓。④从第二产业地理集中度来看,主要表现为“核心-外围”差异,纵向比较河北省周边区县的第二产业集中度在不断增大,说明正在实现产业分工在京津冀城市群的合理化,有利于带动周边县市发展。⑤从贫困地理集中度来看,主要表现为冀南-冀北和“核心-外围”之间的差异。核心区贫困度正在不断降低,但是外围区县贫困度有所增高,所以应鼓励北京和天津市的产业向河北历史贫困市县转移,引导资源、技术、资金等要素向历史贫困地区集中,带动周边区县发展。⑥从碳排放量地理集中度来看,主要表现为“沿海-内陆”、“核心-外围”和冀南-冀北之间的差异。碳排放量集中度集聚过程、第二产业集中度和消费水平集中度较为相似,随着非首都功能的加速疏解和周边地区的产业承接,极大的带动了周边区县的发展,从而提升了经济效率,拉动了消费增长,但也产生了巨量碳排放,所以未来更应关注产业转移视角下京津冀协同碳减排机制、技术、模式和应用研究。

2.3.2 京津冀地区各要素与碳排放集中度不一致指数时空演变

结合上文分析,京津冀地区各经济社会要素与碳排放在空间上分布不一致,其不一致性具体可用各经济社会要素集中度与碳排放量集中度的相对比例来衡量,根据公式(8)计算出各经济社会要素与碳排放量分布不一致指数,并将各要素与碳排放的分布关系分为三类^[51]:各要素集聚滞后于碳排放集聚、各要素集聚与碳排放集聚协调、各要素集聚超前于碳排放集聚(图5)。

2005—2020年间京津冀地区各要素不均衡指数逐渐增强,均匀分布趋势加强。京津冀地区各区县的人口、经济、消费水平、第二产业、贫困度集聚由滞后于碳排放量集聚正转变为超前于碳排放量集聚,说明人口、经济、消费水平、第二产业、贫困度等因素是碳排放量增长的主要驱动力。京津冀地区人口集聚普遍超前于碳排放量集聚,例如青龙满族自治县、永年区、平山县、滦南县等。根据京津冀一体化纲要规划,北京主城区正逐步开始向外疏解腾退人口,主要承接地是北京远郊区及环京带的廊坊、保定、张家口等,人口不断向周边区县集中,人口规模的扩大导致对能源、资源、交通等需求越来越大,因此碳排放总量增加。从京津冀协同发展战略实施后,首都经济圈中的第二产业不断向天津和河北转移,北京地区的产业结构呈现出“三二一”模式,2012年后经济集聚明显滞后于碳排放集聚,碳排放量的增长速度远超前于经济发展速度。河北周边城市由于承接第二产业转移带动了经济发展,但此时经济集聚效应较低,产业结构内部尚未优化完成,经济的发展滞后于碳排放量水平,总体来说,研究期间京津冀地区经济的向外空间扩散会促使碳排放量上升,但均匀分布区县数量在逐渐增多,说明经济发展水平和碳排放空间分布上正向均衡方向发展。张家口和承德属于西北部生态涵养区,而邯郸、唐山和秦皇岛第二产业内部结构尚未优化完成,属于粗放型发展,因此第二产业发展水平滞后于碳排放量,而保定、衡水、沧州、廊坊、天津、北京是京津冀地区第二产业最集中的区域,由于区位条件、产业转移政策、技术和资金明显要优于其它地区,所以第二产业集聚水平要高于碳排放量集聚。石家庄、廊坊、北京、唐山的贫困度集聚低于碳排放量集聚,而邢台、保定、衡水、天津、张家口、承德的贫困度集聚高于碳排放量集聚。历史贫困人口分布主要与城市的区位、城市经济发展水平、城乡发展平衡度、地区资源禀赋等有关,由于北京周边城市和石家庄市区位优势明显、经济发展水平较高、城乡发展较为平衡,因此贫困人口相比其他城市较少,此区历史贫困人口集聚远低于碳排放量集聚,碳排放量较高,所以在生活水平提高的同时应该强调低碳消费和生活。需要注意的是,研究期间内,京津冀地区各要素与碳排放集中度的均匀分布趋势正逐步加强,说明在京津冀协同发展背景下,各要素与碳排放空间分布逐步向空间均衡发展变化。当区域协同发展水平达到一定程度后,区域协同发展有助于碳减排^[52]。自2014年京津冀协同发展上升为重要国家战略后,京津冀地区2015年后的碳排放总量不断降低,至2020年碳排放总量下降36067.91万吨,下降约23.26%。所以未来京津冀地区还应继续加强区域协作能力、提升集聚水平、合理布局产业,实现高效碳减排。

2.3.3 京津冀地区各要素与碳排放集中度的空间协调对比分析

为了探究各时间段不同要素与碳排放不一致指数在空间上的聚集程度,利用ArcGIS软件的空间自相关分析模块,计算出2005年、2012年、2020年各要素与碳排放不一致指数的莫兰指数(表3)。

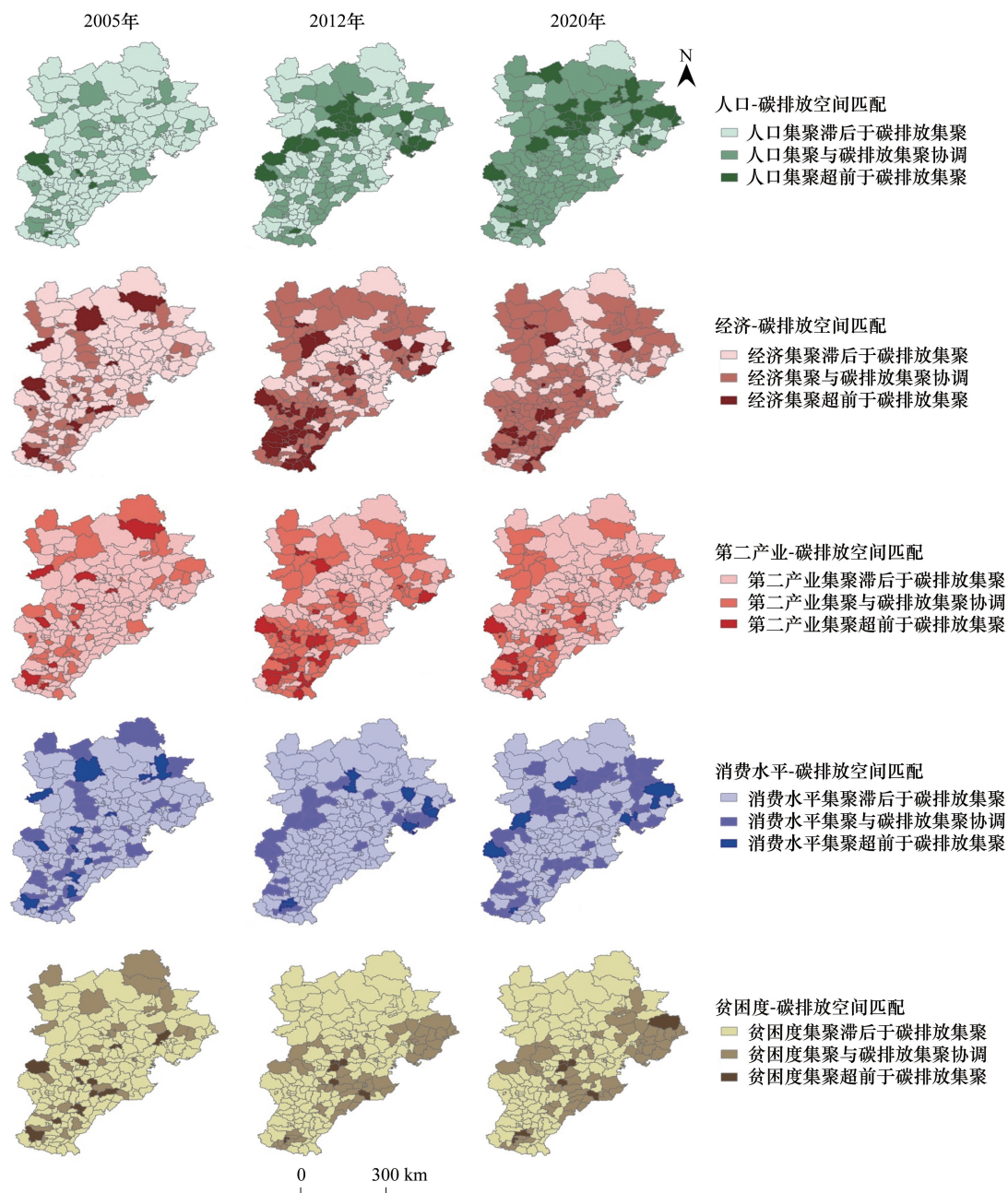


图5 2005年、2012年、2020年京津冀区域各要素与碳排放量耦合类型空间分布

Fig.5 Spatial distribution of coupling types of factors and carbon emissions in Beijing Tianjin Hebei region in 2005, 2012 and 2020

2020年和2012年各要素与碳排放不一致指数存在显著的空间正相关性,不一致性相似的区域趋于空间集聚。2005年各要素与碳排放不一致指数存在空间负相关性或表现出不显著的空间正相关性,说明在2005年时京津冀地区各要素与碳排放不一致指数在空间分布上较为离散。对比2020年和2012年莫兰指数变化,2012年的莫兰指数普遍高于2020年,例如人口-碳排放不一致指数从2012年的0.371变为2020年的0.206,表明随着时间的推移,各要素与碳排放不一致指数较高和较低的区县在空间上的集聚程度正在减弱,即县域尺度下各要素与碳排放不一致指数的空间分布正趋于协调发展,有助于区域碳减排。

表 3 2020 年、2012 年、2005 年京津冀地区各空间匹配类型全局空间自相关显著性检验表

Table 3 Significance test for global Moran's *I* of spatial matching types in Beijing Tianjin Hebei region in 2020, 2012 and 2005

年份 Year	指数 Index	人口-碳排放 不一致指数 Population-carbon emission inconsistency index	经济-碳排放 不一致指数 Economy-carbon emission inconsistency index	第二产业-碳 排放不一致指数 Secondary industry- carbon emissio n inconsistency index	消费水平-碳 排放不一致指数 Consumption level- carbon emission inconsistency index	贫困度-碳 排放不一致指数 Poverty-carbon emission inconsistency index
2005	Moran's <i>I</i>	0.009	0.008	-0.012	-0.037	-0.050
	<i>z</i> scores	0.321	0.312	-0.166	-0.735	-1.041
	<i>P</i>	0.749	0.755	0.868	0.462	0.298
2012	Moran's <i>I</i>	0.371	0.456	0.353	0.252	0.393
	<i>z</i> scores	8.578	10.492	8.174	5.917	9.301
	<i>P</i>	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
2020	Moran's <i>I</i>	0.206	0.463	0.292	0.178	0.336
	<i>z</i> scores	5.021	10.831	6.952	4.308	7.918
	<i>P</i>	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

z scores 是标准差的倍数, *P* 表示概率

3 结论与政策建议

3.1 结论

本文基于 2005—2020 年京津冀地区的相关统计数据,利用区域重心模型、空间关联性分析方法、地理集中度、不一致指数模型和空间自相关模型等分析了区域经济社会要素重心转移特征及其与碳排放的空间关系。主要结论如下:(1)2005—2020 年京津冀地区各经济社会要素均不同程度偏离区域几何中心,各要素在空间上长期处于不均衡状态,但随着时间的推移,不均衡状态有所减缓。各经济社会要素的重心移动轨迹具有明显的阶段性,京津冀地区各要素重心格局易于波动。(2)碳排放重心与其他要素重心在研究期内,其空间耦合性呈现波动式变化。具体而言,碳排放重心与人口重心的空间距离总体增大,碳排放重心与经济重心的空间距离总体增大,碳排放重心与第二产业重心的空间距离总体减小,碳排放重心与消费水平重心的空间距离总体减小,碳排放重心与贫困度重心的空间距离总体增大。(3)人口因素是影响碳排放量增长的主要因素。贫困度、第二产业比重、经济发展水平的灰色关联度数值也都较高,说明贫困度、第二产业比重、经济发展水平也是碳排放量增长的主要驱动力。(4)京津冀地区各县(市、区)各要素地理集中度在空间上均呈现出北低南高的分布格局,各要素的集中区域和集聚程度却有所差异,大多表现为“核心-外围”之间的差异。(5)2005—2020 年间京津冀地区各要素不均衡指数逐渐增强,均匀分布趋势加强,在京津冀协同发展背景下,各要素与碳排放空间分布逐步向空间均衡发展变化,区域协同发展有助于碳减排。(6)2020 年和 2012 年各要素与碳排放不一致指数存在显著的空间正相关性,不一致性相似的区域趋于空间集聚。

3.2 政策建议

在全面推进京津冀地区低碳协调发展背景下,建议未来可采取以下策略:

(1)有序引导北京和天津过度集中的人口、经济,以“一极多中”的方式进行区域空间布局。未来京津冀地区的人口—经济布局调整应该以“张家口-北京-廊坊-天津”、“承德-北京-保定-石家庄-邯郸”、“秦皇岛-唐山-天津-沧州-衡水-邢台”和雄安新区“三线一点”的人口-经济分布密度轴进行引流和布局,最后形成京津冀地区人口-经济多中心均衡布局。

(2)调整优化产业空间布局,河北渐次梯度承接京津产业转移。河北应借京津冀协同发展的机遇,加强与京津深化合作,加快产业空间布局优化调整,构建环首都新兴技术产业带、沿海产业带、冀中先进轻纺产业带、冀西先进制造业带和冀北绿色生态产业带的新格局。

(3)大力发展循环经济,走绿色低碳产业道路。推进产业转移的同时,应针对区域特点制定差别化的产

业转移和环境保护的政策。北京市主要承担京津冀地区技术研发和科技创新服务,天津和河北应充分发挥工业发展方面区位和资源优势,同时应不断优化产业内部结构,降低产业转移对碳排放的影响。

(4) 构建区域城乡融合机制,推动城市与环首都周边历史贫困地区共荣共生发展。开展产业合作,鼓励北京和天津市的产业向河北历史贫困市县转移,引导资源、技术、资金等要素向历史贫困地区集中。此外也可考虑对历史贫困地区实施碳补偿,以实现区域公平协调发展。

参考文献 (References):

- [1] Poumanyong P, Kaneko S. Does urbanization lead to less energy use and lower CO₂ emissions? A cross-country analysis. *Ecological Economics*, 2010, 70(2): 434-444.
- [2] 赵荣钦,李志萍,韩宇平, Milind Kandlikar, 张战平, 丁明磊. 区域“水-土-能-碳”耦合作用机制分析. *地理学报*, 2016, 71(9): 1613-1628.
- [3] Wang S J, Li C F. The impact of urbanization on CO₂ emissions in China: an empirical study using 1980-2014 provincial data. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(3): 2457-2465.
- [4] Li J X, Chen Y N, Li Z, Liu Z H. Quantitative analysis of the impact factors of conventional energy carbon emissions in Kazakhstan based on LMDI decomposition and STIRPAT model. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(7): 1001-1019.
- [5] 卢俊宇, 黄贤金, 陈逸, 肖潇. 基于能源消费的中国省级区域碳足迹时空演变分析. *地理研究*, 2013, 32(2): 326-336.
- [6] 赵荣钦, 黄贤金, 钟太洋. 中国不同产业空间的碳排放强度与碳足迹分析. *地理学报*, 2010, 65(9): 1048-1057.
- [7] Fei L, Dong S C, Xue L, Liang Q X, Yang W Z. Energy consumption-economic growth relationship and carbon dioxide emissions in China. *Energy Policy*, 2011, 39(2): 568-574.
- [8] 王倩倩, 黄贤金, 陈志刚, 谭丹, 揣小伟. 我国一次能源消费的人均碳排放重心移动及原因分析. *自然资源学报*, 2009, 24(5): 833-841.
- [9] 高长春, 刘贤赵, 李朝奎, 张勇, 余光辉, 宿庆, 田艳林. 近 20 年来中国能源消费碳排放时空格局动态. *地理科学进展*, 2016, 35(6): 747-757.
- [10] Wang M, Feng C. Decomposition of energy-related CO₂ emissions in China: an empirical analysis based on provincial panel data of three sectors. *Applied Energy*, 2017, 190: 772-787.
- [11] 高洁, 张晓明, 王建伟, 李琳娜. 中国碳排放与交通运输碳排放重心演变及对比分析. *生态经济*, 2013, 29(8): 36-40.
- [12] 李想, 王仲智, 芦惠. 江苏省经济重心与能源碳排放重心路径演变分析. *亚热带资源与环境学报*, 2013, 8(3): 59-64.
- [13] 刘佳骏, 李雪慧, 史丹. 中国碳排放重心转移与驱动因素分析. *财贸经济*, 2013(12): 112-123.
- [14] 徐建华, 岳文泽. 近 20 年来中国人口重心与经济重心的演变及其对比分析. *地理科学*, 2001, 21(5): 385-389.
- [15] Jones B. Assessment of a gravity-based approach to constructing future spatial population scenarios. *Journal of Population Research*, 2014, 31(1): 71-95.
- [16] 侯丽朋, 唐军, 赵荣钦, 刘秉涛, 丁明磊, 张战平. 郑州市不同产业的碳排放特征及减排潜力分析. *华北水利水电大学学报: 自然科学版*, 2016, 37(3): 82-88.
- [17] 黄娉婷, 张晓明. 大都市区工业重心时空变动轨迹分析: 以天津市为例. *经济地理*, 2012, 32(3): 89-95.
- [18] 刘影, 肖池伟, 李鹏, 姜鲁光. 1978—2013 年中国粮食主产区“粮-经”关系分析. *资源科学*, 2015, 37(10): 1891-1901.
- [19] 王介勇, 刘彦随. 1990 年至 2005 年中国粮食产量重心演进格局及其驱动机制. *资源科学*, 2009, 31(7): 1188-1194.
- [20] 乔家君, 李小建. 近 50 年来中国经济重心移动路径分析. *地域研究与开发*, 2005, 24(1): 12-16.
- [21] 周亮, 周成虎, 杨帆, 王波, 孙东琪. 2000—2011 年中国 PM_{2.5} 时空演化特征及驱动因素解析. *地理学报*, 2017, 72(11): 2079-2092.
- [22] Wang H J, Zhang B, Liu Y L, Liu Y F, Xu S, Zhao Y T, Chen Y C, Hong S. Urban expansion patterns and their driving forces based on the center of gravity-GTWR model: a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, 30(2): 297-318.
- [23] 汪升. 中西部地区资源环境绩效及影响因素研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- [24] 秦昌才. 经济增长门槛效应下的城市化与碳排放. *烟台大学学报: 哲学社会科学版*, 2019, 32(1): 105-114.
- [25] Aunan K, Wang S X. Internal migration and urbanization in China: impacts on population exposure to household air pollution (2000-2010). *Science of the Total Environment*, 2014, 481: 186-195.
- [26] Fan J L, Liao H, Liang Q M, Tatano H, Liu C F, Wei Y M. Residential carbon emission evolutions in urban-rural divided China: an end-use and behavior analysis. *Applied Energy*, 2013, 101: 323-332.
- [27] 佟金萍, 陈国栋, 杨足膺, 柏楚. 居民消费水平对生活碳排放的门槛效应研究. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(1): 38-43.

- [28] Zhang Y J, Da Y B. The decomposition of energy-related carbon emission and its decoupling with economic growth in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 41: 1255-1266.
- [29] 孔立. 连片特困地区低碳发展研究——基于系统分析与生产效率的视角[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- [30] 曲建升, 王琴, 曾静静, 李燕, 张志强, 张丽华. 中国西北寒旱区农牧民生活碳排放评估. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(4): 90-95.
- [31] 刘贤赵, 高长春, 宋炎, 张勇, 宿庆, 田艳林. 湖南省域化石能源消费碳排放时空格局及驱动因素. *生态学报*, 2017, 37(7): 2476-2487.
- [32] 宋长青, 程昌秀, 杨晓帆, 叶思菁, 高培超. 理解地理“耦合”实现地理“集成”. *地理学报*, 2020, 75(1): 3-13.
- [33] Zheng X, Lu Y, Yuan J, Baninla Y, Zhang S, Stenseth N C, Hessen D O, Tian H, Obersteiner M, Chen D. Drivers of change in China's energy-related CO₂ emissions. *Proceedings of the National Academy of Science*, 2020, 117(1): 29-36.
- [34] 彭希哲, 朱勤. 我国人口态势与消费模式对碳排放的影响分析. *人口研究*, 2010, 34(1): 48-58.
- [35] Puliafito S E, Puliafito J L, Grand M C. Modeling population dynamics and economic growth as competing species: An application to CO₂ global emissions. *Ecological Economics*, 2008, 65(3): 602-615.
- [36] 蒋译漫. 区域视角下的碳排放影响因素比较研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [37] 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. *地理学报*, 2021, 76(12): 3103-3118.
- [38] 张丽峰. 北京人口、经济、居民消费与碳排放动态关系研究. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(2): 8-13.
- [39] 王少剑, 黄永源. 中国城市碳排放强度的空间溢出效应及驱动因素. *地理学报*, 2019, 74(6): 1131-1148.
- [40] 王少剑, 刘艳艳, 方创琳. 能源消费 CO₂ 排放研究综述. *地理科学进展*, 2015, 34(2): 151-164.
- [41] 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.
- [42] 顾羊羊, 乔旭宁, 樊良新, 关中美, 冯德显, 高亚红. 夜间灯光数据的区域能源消费碳排放空间化. *测绘科学*, 2017, 42(2): 140-146.
- [43] 韩云霞. 我国人口、经济聚集与环境污染的空间演变及关联性分析[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2018.
- [44] 张北赢, 徐学选, 刘文兆, 杜峰. 黄土丘陵区不同土地利用的土壤水分灰色关联度. *生态学报*, 2008, 28(1): 361-366.
- [45] 李国平, 罗心然. 京津冀地区人口与经济协调发展关系研究. *地理科学进展*, 2017, 36(1): 25-33.
- [46] Brunelli M, Fedrizzi M. Axiomatic properties of inconsistency indices for pairwise comparisons. *Journal of the Operational Research Society*, 2015, 66(1): 1-15.
- [47] 雷金睿, 陈宗铸, 吴庭天, 李苑菱, 杨琦, 陈小花. 海南岛东北部土地利用与生态系统服务价值空间自相关格局分析. *生态学报*, 2019, 39(7): 2366-2377.
- [48] 陈婧. 人口因素对碳排放的影响. *西北人口*, 2011, 32(2): 23-27, 33.
- [49] Bruckner B, Hubacek K, Shan Y L, Zhong H L, Feng K S. Impacts of poverty alleviation on national and global carbon emissions. *Nature Sustainability*, 2022, 5(4): 311-320.
- [50] 王德利. 京津冀城市群新型工业化发展方向及重点. *中国市场*, 2018(2): 16-20.
- [51] 王德怀, 李旭东. 贵州乌江流域人口与经济发展协调性研究. *地理科学*, 2019, 39(3): 477-486.
- [52] 耿蕊. 京津冀区域产业协同发展的减排效应研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2020.