

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2023.05.009

基于 GWR 模型的京津冀县域碳排放强度 时空演变及影响因素分析

韩 聪, 张立新, 岳美亭

(青岛理工大学 管理工程学院, 山东 青岛 266520)

摘 要: 为探究京津冀各县域碳减排潜力, 在计算 2008—2017 年 165 个县域碳排放强度的基础上, 采用标准差椭圆、探索性空间数据分析及地理加权回归等空间统计工具进行定性分析与定量研究。研究发现: 河北省平均碳排放强度明显高于北京、天津两地, 研究期间各区县碳排放强度下降明显, 表明近年来的碳减排取得了良好成效。其次, 分析重心—标准差椭圆发现碳排放强度重心始终位于保定市高阳县, 重心逐渐向南迁移, 标准差椭圆在空间上呈“东北—西南”分布格局。最后对碳排放强度影响因素进行了分析, 发现人口密度、产业结构多元化、固定资产投资和财政收支在不同区域影响效果不同, 但在多数地区可以有效降低碳排放强度。

关键词: 京津冀县域; 碳排放强度; 空间格局; 地理加权回归

中图分类号: F426

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2023)05-0068-10

引文格式: 韩 聪, 张立新, 岳美亭. 基于 GWR 模型的京津冀县域碳排放强度时空演变及影响因素分析 [J]. 湖南工业大学学报, 2023, 37(5): 68-77.

GWR-Model-Based Analysis of Spatialtemporal Evolution with Its Influencing Factors of Carbon Emission Intensity in Beijing-Tianjin-Hebei Counties

HAN Cong, ZHANG Lixin, YUE Meiting

(School of Management Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao Shandong 266520, China)

Abstract: In view of an inquiry into the carbon emission reduction potential of each county in Beijing-Tianjin-Hebei agglomeration, a qualitative and quantitative analysis has thus been conducted by using such spatial statistical tools as standard deviation ellipse, exploratory spatial data analysis, and geographic weighted regression based on the calculation of carbon emission intensity in 165 counties from 2008 to 2017. The research results show that the average carbon emission intensity in Hebei Province is significantly higher than that in Beijing and Tianjin. During the study period, the carbon emission intensity of each district and county shows a significantly decreasing trend, indicating a favorable achieved results of carbon reduction in recent years. Secondly, based on the center of gravity standard deviation ellipse, it is found that the center of gravity of carbon emission intensity is always located in Gaoyang County, Baoding City, with the center of gravity gradually moving to the south; meanwhile, the standard deviation ellipse shows a “northeast southwest” spatial distribution pattern. Finally, an analysis is made of the impact factors of carbon

收稿日期: 2022-06-27

作者简介: 韩 聪 (1998-), 男, 河南安阳人, 青岛理工大学硕士生, 主要研究方向为工程项目管理,

E-mail: 3213169885@qq.com

通信作者: 张立新 (1967-), 男, 山东青岛人, 青岛理工大学副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为工程项目管理,

E-mail: 619581554@qq.com

emission intensity: population density, diversification of industrial structure, fixed assets investment and fiscal revenue and expenditure, all of which exert different effects in different regions, while in most regions, carbon emission intensity can be effectively reduced.

Keywords: Beijing-Tianjin-Hebei County; carbon emission intensity; spatial pattern; geographical weighted

0 引言

近年来,温室气体过量排放引发了一系列自然灾害,严重影响着全球环境建设及人类可持续发展。为了应对气候变化所带来的挑战,全球已超过 130 个国家提出了“碳中和”发展理念^[1]。作为全球最大的碳排放国,我国正处于工业化发展与城镇化建设的关键时期,如何在保证经济增长的同时减少碳排放量是我们当前所面临的巨大挑战^[2]。为了有效落实碳减排目标,有必要将碳减排任务分配给不同区域。我国幅员辽阔,各地区产业结构、经济水平、发展方式皆存在差异,在分配碳减排任务时不能“一概而论”,必须选取碳减排潜力较大的省份或者城市群进行重点发力,制定针对性的碳减排政策,方能事半功倍。京津冀作为我国三大城市群之一,其人口密度、经济发展水平、产业结构极不协调,能源浪费严重,减排意识薄弱。2017 年,生态环保部将北京、天津及周围城市认定为大气污染传输通道^[3]。因此,有必要对京津冀碳排放空间格局及影响因素展开分析。

目前关于京津冀碳排放的研究主要分为两类:一是碳排放水平核算,二是影响因素分析。在碳排放核算方面,现有学者主要采用碳排放因子法。参考省份(直辖市)统计年鉴,核算不同能源消耗所释放的二氧化碳。研究对象包括北京市^[4]、天津市^[5]、河北省^[6],研究尺度以市域为主。在碳排放影响因素方面,大多数学者采用 LMDI (logarithmic mean divisia index) 模型^[7]与 STIRPAT (stochastic impacts by regression on population, affluence and technology) 模型^[8]展开分析。如王凤婷等^[9]基于 LMDI 模型分析了京津冀碳排放影响因素,认为降低碳排放强度可有效减少碳排放;王韶华等^[10]基于扩展的 STIRPAT 模型,将影响因素分解为人口、人均 GDP、能源强度等,探究了各因素对碳排放强度的影响效果。

由以上分析可知,诸多学者对京津冀碳排放展开分析,并取得了一系列研究成果。但以往学者在研究过程中,受限于数据的可获得性,所选择的研究尺度较为宽泛,无法具体到县域层面。事实上,县域作为国民经济的基本单元,对县域碳排放展开研究,

有助于我们更好地理解京津冀碳排放空间格局,对碳减排政策的制定具有重要意义;其次,以往学者在分析京津冀碳减排潜力时,仅仅以各区域碳排放量作为衡量指标。实际上,各县域行政面积并不相同,产业布局和经济增速存在较大差异,选取碳排放强度作为碳减排潜力指标更具备实际意义;最后,以往学者在分析碳排放影响因素时,并未考虑空间异质性影响,所计算出来的回归系数为各地区“平均”水平,所得到的结果与实际情况可能并不相符。基于以上考虑,本文拟对 2008—2017 年京津冀 165 个县域(部分县域数据缺失)数据进行整理,在分析碳排放强度时空格局及相关性的基础上,采用地理加权回归 (geographically weighted regression, GWR) 模型分析驱动因素在不同单元影响程度的差异性。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究方法

1) 标准差椭圆。标准差椭圆可以衡量要素在空间上的分布格局及时空演变特征。可以通过重心坐标、长短轴、转角等参数描绘京津冀碳排放强度在空间上的重心迁移、集聚程度,以及扩散方向等^[11]。

2) 探索性数据分析。碳排放强度在空间上的分布格局并不是随机的,可能存在相关性。利用全局空间自相关可以度量京津冀碳排放强度在空间上的相关程度;并且利用冷热点分析 (Getis-Ord Gi*) 探究京津冀碳排放强度在空间上的聚集类型,识别其热点区域及冷点区域。

3) 地理加权回归。传统回归模型在分析影响因素时未引入空间权重矩阵,并假定回归分析时与地理位置无关,因此无法解决空间非平稳性问题。GWR 模型可在各局部空间进行回归分析,将子数据纳入回归模型,进而得到不同区域的回归系数^[12]。

1.2 影响因素选取及预处理

参考已有学者的研究成果,并结合京津冀实际情况,本文选取人口密度^[13]、产业结构多元化^[14]、固定资产投资^[15]及财政支出^[16]作为碳排放强度的影响因素,各变量含义及描述性统计结果如表 1 所示。

表 1 变量含义及描述性统计结果

Table 1 Variable meanings and descriptive statistics results

变量	含义	单位	最小值	最大值	平均值
碳排放强度	单位生产总值的二氧化碳排放量	t/万元	0.019	12.291	2.952
人口密度	单位面积人口数量	万人/km ²	0.004	3.789	1.988
产业结构多元化	第一产业向第二、三产业转换程度		1.402	1 652.312	32.623
固定资产投资	固定资产投资额	亿元	5.182	6 363.950	183.712
财政收支	财政一般预算支出与一般预算收入的比例		0.743	18.250	3.775

在进行回归分析之前,利用 SPSS 软件对各变量进行多重共线性检验,以剔除不符合要求的变量。其中,各变量的方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)最大值为 2.009,说明不存在共线性问题,可以进行回归分析。

1.3 数据来源

受限于数据的可获得性,本文以京津冀 165 个县域(部分县域数据缺失)为研究对象,选取 2008—2017 年为研究期限,并以 2017 年为基准,将各区县行政区域进行划分。各区县的碳排放数据来自于 Chen J. D. 等^[17]研究结果;各影响因素数据均来自于各期省(直辖市)统计年鉴及区域统计年鉴,部分缺失数据采用插值法补齐。

2 京津冀碳排放强度时空格局

2.1 各地区碳排放强度水平

图 1 为京津冀地区 2008 年和 2017 年的碳排放强度水平。

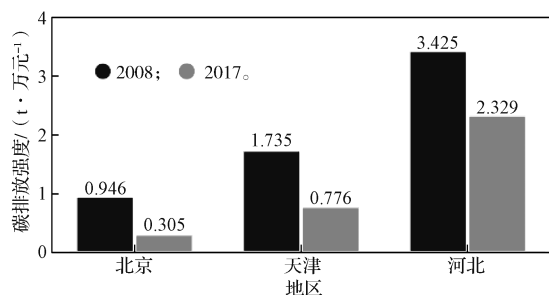


图 1 京津冀地区平均碳排放强度

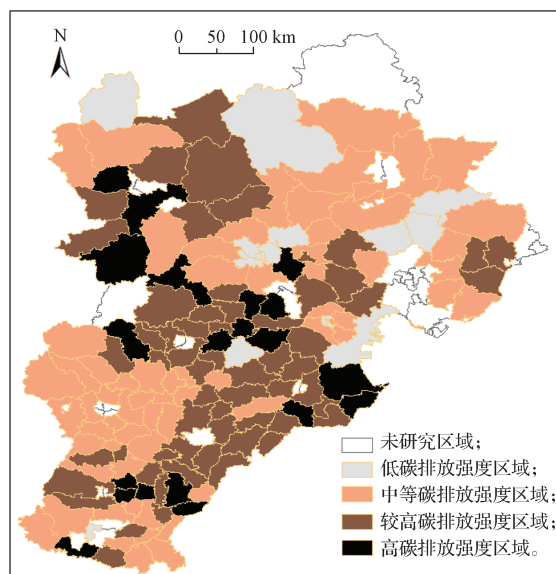
Fig. 1 Average carbon emission intensity in the Beijing-Tianjin-Hebei agglomeration

图 1 中结果显示,京津冀各地区碳排放强度明显降低,北京的碳排放强度由 0.946 t/万元下降为 0.305 t/万元,下降幅度约为 67.8%;天津的碳排放强度由 1.735 t/万元下降为 0.776 t/万元,下降幅度约为 55.3%,可见京津两地的碳减排效果良好。其

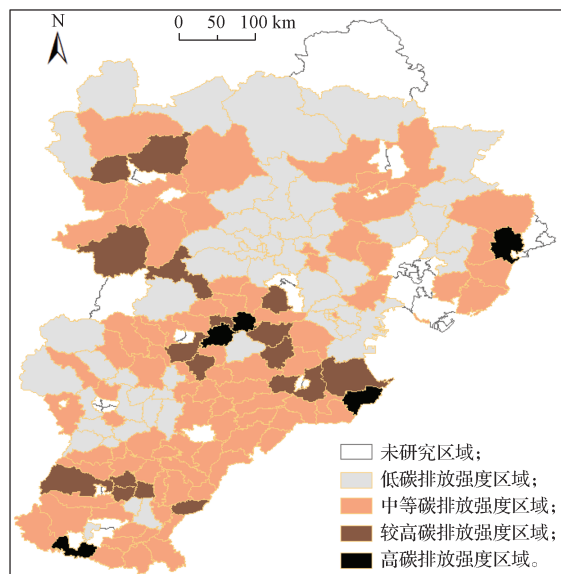
原因是北京于 2013 出台了《北京市 2013—2017 年清洁空气行动计划》,加大了对环境管控力度;天津深化供给侧结构性改革,大力发展现代制造业。河北省的碳排放强度由 3.425 t/万元下降为 2.329 t/万元,原因是河北于 2015 年出台了大气污 3 a 年治理方案,同时加大了产业结构调整力度。2017 年,河北省服务业增加值增长了 11.3%,较 2016 年加快 1.4 个百分点;同时逐步改变了地区发电模式,风力发电、太阳能发电、生物质能发电取得了较快发展。但是河北省 2017 年碳排放强度仍然高于全国平均水平 2.02 t/万元^[16],其原因可能是河北省部分市域,如唐山市、廊坊市、秦皇岛市及邯郸市等地区,仍以煤炭、钢铁、水泥、化工、玻璃等高能耗、高污染产业为主,能源结构不够合理,资源约束和环境压力较大。

近年来,京津冀区域大力发展第三产业,推进高污染、重工业企业结构升级、逐步扩大高新技术产业规模,形成了新的空间发展格局。图 2 为京津冀 2008 年和 2017 年的县域碳排放强度空间格局。如图 2 所示,本研究中将碳排放强度划分为 4 个等级:低碳排放强度区县(≤ 1.80 t/万元)、中等碳排放强度区县(1.81~3.50 t/万元)、较高碳排放强度区县(3.51~5.50 t/万元)、高碳排放强度区县(≥ 5.51 t/万元)。

2008 年,北京、天津、石家庄的碳排放强度处于较低水平,而其周围的张家口、保定、沧州、衡水的碳排放强度相对较高,原因可能是中心城市环境规制更为严格,经济成本更高,高污染企业被逐步转移至周边城市,而周边城市人才、技术相对落后,发展过程中依赖以上高污染企业,致使周边城市的碳排放强度相对较高。



a) 2008 年



b) 2017 年

图 2 京津冀碳排放强度分布格局

Fig. 2 Distribution pattern of carbon emission intensity in Beijing-Tianjin-Hebei agglomeration

2017 年, 各区县碳排放强度明显降低, 2008 年的较高碳排放强度区域和高碳排放强度区域逐渐转化为中等碳排放强度区域, 并逐渐形成“东北低, 西南高”的空间格局。这一结果说明近年来京津冀各地区的碳减排政策取得了一定成效, 但西南各县的碳排放强度仍处于较高水平, 需加大其减排力度。

2.2 重心迁移及标准差椭圆分析

利用重心-标准差椭圆分析京津冀碳排放强度重心迁移轨迹, 以 2008 年、2013 年、2017 年为特征年限, 将重心迁移轨迹进行可视化表达所得结果图 3 所示。

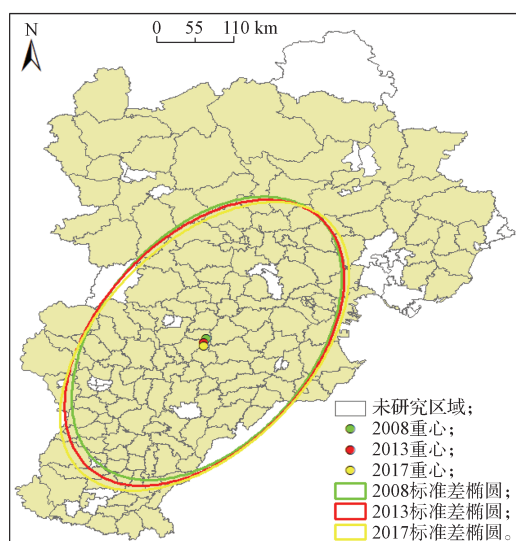


图 3 京津冀碳排放强度重心及标准差椭圆分析结果

Fig. 3 Center of gravity and standard deviation ellipse of carbon emission intensity in Beijing-Tianjin-Hebei agglomeration

由图 3 可知, 研究期间碳排放强度重心始终位于保定市高阳县, 重心逐渐向西南方向迁移, 说明京津冀东北方向碳排放强度下降更为明显; 在椭圆方位角上, 碳排放强度在空间上呈“东北-西南”分布格局, 与京津冀地形类似; 椭圆转角由 2008 年的 41.34° 扩大至 2017 年的 44.75° , 椭圆长轴由 2008 年的 115.87 km 增长至 2017 年的 115.90 km, 短轴由 2008 年的 38.65 km 减至 2017 年的 38.55 km, 表明碳排放强度的空间格局有加强趋势。

2.3 全局空间自相关性分析

利用 Geoda095i 软件分析京津冀碳排放强度在空间上的相关性, 计算 Moran's I 以及对应的 P 值和 Z 值, 其结果见表 2。

表 2 京津冀碳排放强度空间自相关性分析结果

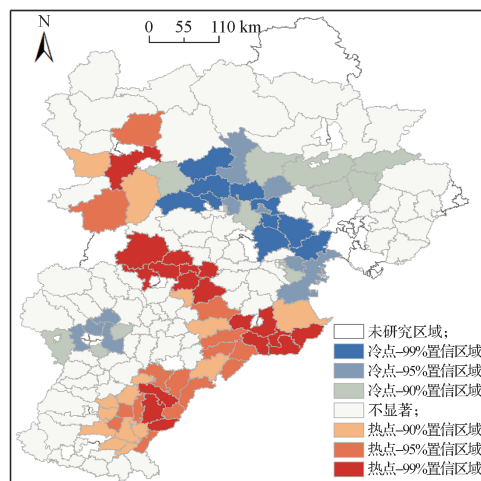
Table 2 Spatial autocorrelation analysis of carbon emission intensity in Beijing-Tianjin-Hebei agglomeration

年份	Moran's I	P 值	Z 值	年份	Moran's I	P 值	Z 值
2008	0.441	0.000	13.904	2013	0.497	0.001	15.652
2009	0.472	0.000	14.875	2014	0.489	0.000	15.384
2010	0.461	0.000	14.548	2015	0.494	0.000	15.538
2011	0.474	0.001	14.953	2016	0.438	0.000	13.860
2012	0.478	0.000	15.077	2017	0.379	0.000	12.424

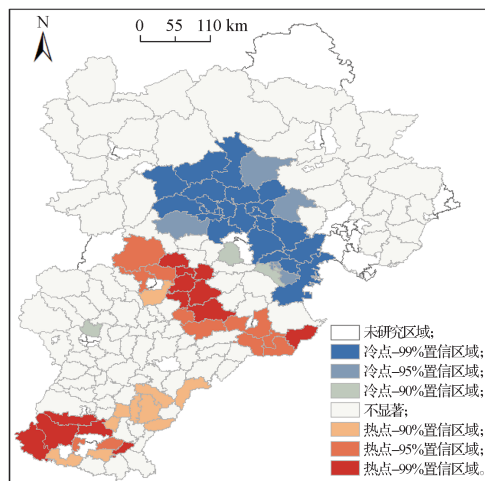
研究期间全局 Moran's I 全部为正数, 且通过 1% 水平下显著性检验, 表明京津冀碳排放强度在空间上呈显著正相关。从指数变化趋势来看, 2008 年 Moran's I 为 0.441, 2013 年为 0.497, Moran's I 呈波动中上升趋势, 空间相关性逐步加强; 2017 年 Moran's I 下降为 0.379, 相关性出现弱化。主要原因是河北省 2013 年之后进行产业结构调整, 碳排放强度较高区县逐渐分散, 聚集模式由之前的“片状聚集”逐步转变为“点式聚集”。

2.4 冷热点分析

进一步利用 Arcmap 10.8 对京津冀碳排放强度进行冷热点分析, 结果如图 4 所示。



a) 2008 年



b) 2017 年

图 4 京津冀碳排放强度冷热点分析结果

Fig. 4 Analysis results of hot and cold spots of carbon emission intensity in Beijing-Tianjin-Hebei agglomeration

从热点聚集区域来看, 2008 年热点区域主要分散在 3 个位置: 其一, 以邢台、沧州、衡水、邯郸为中心, 呈“东北-西南”带状分布, 主要位于京津冀东南边界处。其形成原因是邢台、邯郸的重工业基础较好。例如, 邢台地区有色金属冶炼及延压业占据较大份额; 而邯郸地区黑色金属冶炼及延压业较为发达; 这些行业多为碳排放较高的重工业。另一个热点聚集区域为保定市, 呈“西北-东南”方向分布, 横穿于京津冀中部。其形成原因是保定市电力、煤气等行业占据较大份额, 进而释放大量二氧化碳。此外, 第三个热点聚集区域位于京津冀西北方向的张家口市, 原因是张家口市大力发展黑色金属冶炼延压业、有色金属冶炼及延压业等污染程度较高的企业; 冷点区域主要位于京津冀中心城市, 其形成原因是这些地区的经济发展、基础设施完善程度较高, 地理区位优势, 电子通信设备制造业、食品制造业、木材加工制造业等新兴产业占据较大比例。2017 年, 热点区域逐渐南移, 分别形成以“保定-沧州”和“邯郸-邢台”为中心的聚集区域。冷点区域持续扩张, 以北京为中心向外扩张, 且置信程度更为强烈, 说明近年来京津冀地区碳减排形式取得了良好成效, 但部分地区仍需加大环境管控力度。

3 京津冀碳排放影响因素分析

3.1 GWR 模型结果

由空间自相关分析可知, 京津冀县域碳排放强度存在明显的空间正相关, 不符合最小二乘法 (ordinary least square, OLS) 模型区域间相互独立的前提假设, 因此本文采用 GWR 模型分析京津冀县域碳排放强度

分异的影响因素。模型参数回归结果如表 3 所示, 由表可知, 其 R^2 为 0.926, 调整后 R^2 为 0.925, 表明回归方程拟合结果良好。

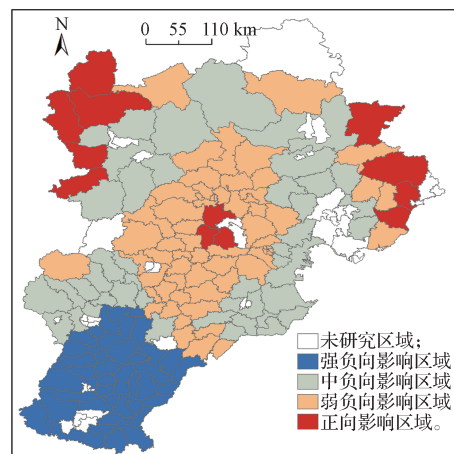
表 3 GWR 模型回归结果

Table 3 Regression results of GWR Model

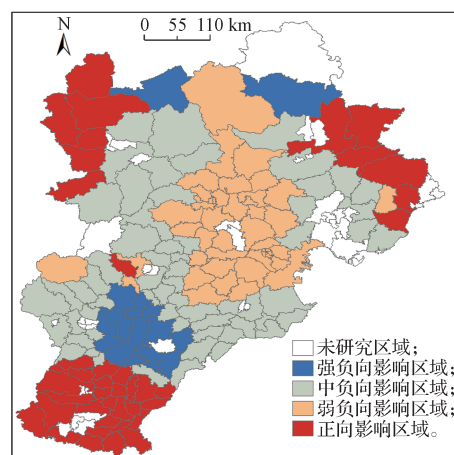
变量	最小值	最大值	中值	平均值	标准差
截距	-0.524	0.897	-0.106	-0.124	0.649
人口密度	-6.782	11.074	-1.023	-1.426	4.382
产业结构多元化	-8.249	12.296	-3.259	-2.965	6.432
固定资产投资	-7.432	1.269	-2.563	-2.964	4.698
财政收支	-4.328	2.637	-1.065	-1.206	3.967
R^2	0.926				
调整 R^2	0.925				
残差平方和	1.569				
AICc	-863.692				
Sigma	0.072				
带宽	3.639				

3.2 影响因素时空格局

人口密度对碳排放强度的空间影响特征如图 5 所示。



a) 2008 年



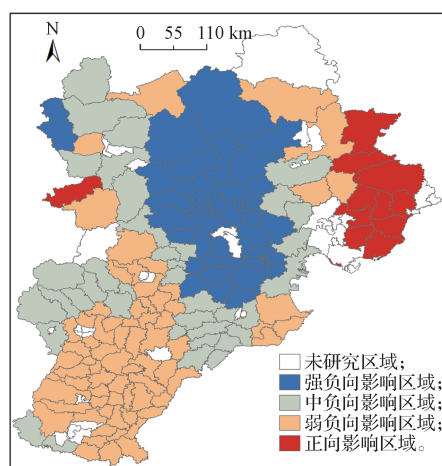
b) 2017 年

图 5 人口密度对碳排放强度的影响特征图

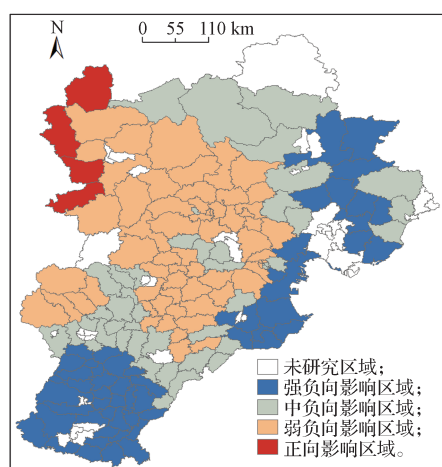
Fig. 5 Effect feature map of population density on carbon emission intensity

2008 年, 人口密度对碳排放强度的影响效果差距较大, 以“保定市-北京市”为中心向外扩散, 影响程度逐渐加强, 尤其是邢台市和邯郸市表现为强负向影响, 其形成原因主要是北京市及周边区域人口基数较大, 人口密度对碳排放强度抑制效果不明显, 而早期邢台和邯郸地区的人口密度较低, 人口密度增加带来了一定的人口红利, 促进当地经济发展形成规模效应, 加快了城镇化建设速度, 一定程度上降低了碳排放强度^[18]; 2017 年, 邢台和邯郸地区由强负向影响转变为正向影响, 其余地区影响格局变化不大, 其原因是人口红利影响效果并不固定, 即人口密度过大时会增加交通拥堵情况, 促进碳排放强度增加; 张家口和秦皇岛地区一直表现为正向影响, 其原因可能是人才流失现象严重, 因经济、教育、医疗等原因, 高等教育人才多前往“京-津-石”定居。即人口密度虽有所增加, 但碳排放强度并未降低。

产业结构多元化对碳排放强度的空间影响特征如图 6 所示。



a) 2008 年



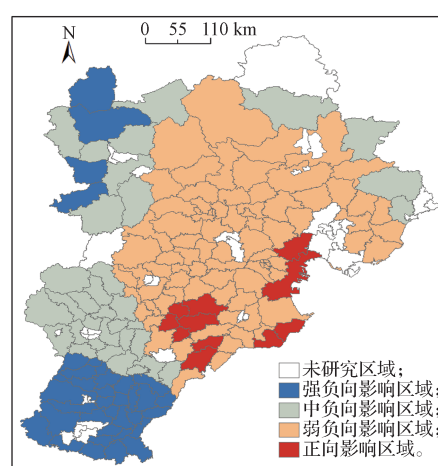
b) 2017 年

图 6 产业结构多元化对碳排放强度的影响结果

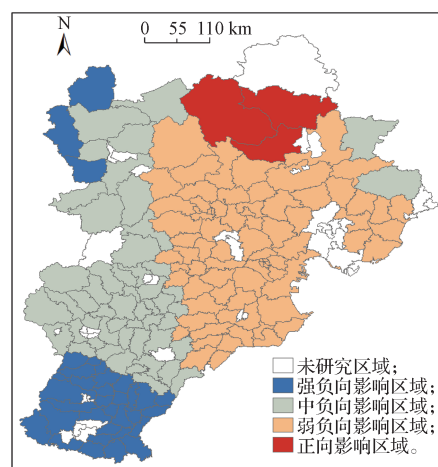
Fig. 6 Impact results of industrial structure diversification on carbon emission intensity

2008 年, 产业结构多元化系数对碳排放强度的影响效果以“北京-廊坊”为中心向外扩散减弱, 其原因可能是早期北京市仍以第二产业为主, 随着产业结构多元化系数的增大, 第二产业逐渐转变为第三产业, 故北京地区表现为强负向影响。秦皇岛地区表现为正向影响, 其原因可能是产业结构多元化系数描述的是第一产业向第二产业、第三产业转换程度, 2008 年秦皇岛地区的高污染企业较为发达, 所以产业结构多元化系数虽有所增加, 但碳排放强度并未降低; 2017 年的产业结构系数影响效果变化较大, 北京及周边地区影响程度减弱, 而廊坊、邢台、沧州、唐山等地区表现为强负向影响, 原因是这些地区仍以第二产业为主, 玻璃、金属冶炼等行业较为发达, 能源依赖程度较高, 碳排放效率较低。故随着产业结构多元化系数的增加, 第三产业比例逐步提高, 进而减少了碳排放强度。

固定资产投资、财政收支对碳排放强度的空间影响特征如图 7~8 所示。



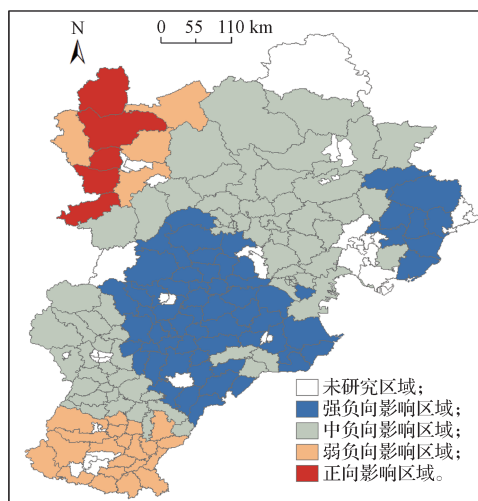
a) 2008 年



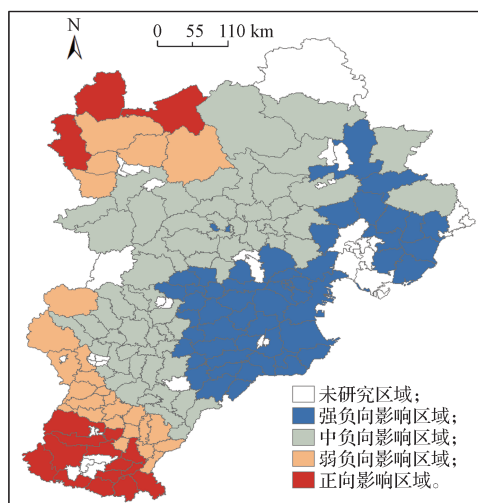
b) 2017 年

图 7 固定资产投资对碳排放强度的影响结果

Fig. 7 Impact of fixed asset investment on carbon emission intensity



a) 2008 年



b) 2017 年

图 8 财政收支对碳排放强度的影响结果

Fig. 8 Impact of fiscal revenue and expenditure on carbon emission intensity

由图 7 可知, 2008 年, 固定资产投资对碳排放强度的影响效果呈明显的“西南强-东北弱”分异格局, 在滨海新区、武强县等县域表现为正向影响。形成这种空间格局的主要原因是早期邢台、邯郸地区固定资产较低。而投资作为促进经济增长的“三驾马车”之一, 一方面, 固定资产投资的增加会扩大相关产业规模, 进而形成规模效应, 同时由于产业的关联性, 相关产业规模会随之增加, 进而拉动经济增长; 另一方面, 固定资产的投资会扩大基础设施的完善程度, 有利于文化、体育、娱乐、金融等产业的发展, 改善居民服务, 进而促进第三产业的发展。2017 年, 固定资产投资对碳排放强度的影响效果变化不大, 保定市部分县域由之前的弱负向影响转变为中负向影响, 抑制效果加强, 而隆化县、

滦平县、丰宁满族自治县地区由之前的抑制效果转变为促进效果, 其原因可能是固定资产投资的扩大并未带动技术的进步, 在进行基础设施建设过程中能源浪费现象仍然严重, 能源利用效率不高, 使得碳排放强度有所增加。

由图 8 可知, 2008 年, 财政收支对碳排放强度的影响效果较强的地区主要聚集于沧州、保定、衡水及秦皇岛地区, 这些地区主要围绕在“京-津-石”周边, 其原因主要是早期这些地区财政支出较低, 而增加财政支出可以引导各种要素在不同产业间实现均衡配置, 进而调整产业结构^[19]、促进企业进行生产工艺及排放治理水平、调节经济发展和优化产业结构, 因此增加财政支出额度会降低碳排放强度; 2017 年, 邢台、邯郸地区由弱负向影响转变为正向影响, 原因主要是财政收支的提高会扩大政府间转移支付额度, 势必增加生产性投入^[20], 进而导致碳排放强度的增加, 强负向影响地区向东北方向迁移。保定市部分县域由强负向影响转变为中负向影响, 其原因可能是近年来保定市逐步增加财政支出, 产业结构逐步优化, 故财政收支对碳排放强度的影响程度降低。

4 结论与建议

4.1 结论

研究期间, 北京市、天津市的平均碳排放强度明显要低于河北地区的平均碳排放强度。2017 年, 北京市、天津市的平均碳排放强度分别为 0.305 t/万元和 0.776 t/万元, 下降幅度分别为 67.7% 和 55.3%; 2017 年河北省的平均碳排放强度为 2.329 t/万元, 下降幅度为 47.1%。

研究期间京津冀碳排放强度格局相对稳定, 碳排放强度重心逐渐向南移动, 标准差椭圆长短轴短幅减少, 标准差椭圆呈“东北-西南”分布格局; 其次, 京津冀县域碳排放强度具有明显的空间效应, 研究期间冷点区域主要聚集于北京及其周围区县, 热点区域逐渐由保定、沧州、衡水等县域转移至保定、邯郸。

对京津冀碳排放强度影响因素进行分析, 发现人口密度和财政收支比在不同区域表现出差异化影响效果, 而产业结构多元化系数和固定资产投资则可以明显降低县域碳排放强度。

4.2 建议

充分把握人口红利, 制定相应人才政策。京津冀地区作为我国东部地区的经济增长重心, 常年吸引着

全国不同地区人口前来。人口密度的增加可以降低碳排放强度,因此京津冀地区(北京市除外)应充分把握人口红利,促进经济增长的同时应做到减排降污;其次,各地区应增加人才福利政策,让更多的年轻人能够“留下来”,尤其是北京周围的张家口、承德等地区,应加强基础教育,塑造良好文化氛围,培养更多专业性、技术性人才;最后,在生活中应加强保护环境政策的宣传力度,人口密度的增加势必造成更多的垃圾、更高的能耗,在日常生活中政府应推广资源的循环利用、垃圾分类,增加公共交通工具数量,树立居民低碳生活意识等。

促进供给侧结构性改革,加快产业结构转变力度。河北省能源消耗体系中,煤炭占据 83.71%,一次电力占据 4.09%。因此,在未来发展过程中,京津冀地区(尤其是河北省)应转变产业结构。天津、唐山、邯郸等地区应促进黑色金属冶炼业、化学原料及制品制造业、交通运输设备制造业转型,减少传统能源依赖程度、提高排放标准;促进新工艺、新材料在重工业应用频率,逐步向生物医药、航空航天、智能化等新型产业方面转型;各地区(尤其是邯郸、邢台)应控制传统能源消费总量,逐步摆脱能源依赖型发展模式,加快清洁能源开发水平,将风能、太阳能融入能源消费结构,通过能源消费结构多元化来实现碳减排。例如,张家口张北县的光能、风能丰富,可以借助自然资源大力发展太阳能发电和风力发电^[21]。

增加固定资产投资力度。固定资产投资可以有效降低碳排放强度,尤其是张家口、邢台、邯郸等地区,抑制效果比较明显。首先,应补齐传统基础设施的短板。从长期来看,要促进经济发展、加快能源转换步伐,京津冀地区仍需补齐传统基础设施存在的短板,加快城市建设、交通运输等方面建设步伐;其次,应逐步扩大新型基础设施投资,包括物联网、5G、人工智能、新能源等方面的投资力度,逐步由重工业基地向高新技术区转变;最后,京津冀区域间、城乡间发展不协调,北京、天津应带动周围地区协同发展,加大技术创新力度,使区域间投资更协调,同时应逐步缩小城乡间贫富差距,促进城乡一体化协调发展,加快乡村振兴战略步伐,完善乡村基础设施,加大环境乡村治理力度,使城乡间投资更加高效^[22]。

加强顶层设计,以财政支出促进绿色发展。财政支出包含环保支出、交通运输支出、农林水支出、科研和教育支出等。不同的财政支出政策所发挥的减碳效应并不相同。首先,各地区应根据实际情况

制定更具针对性的财政支出政策,控制财政支出金额及比例,并逐步引导钢铁、电力、交通运输、建设等高耗能产业进行升级改造;其次,将环境治理等因素加入地方政府考核指标,引导政府官员重视减排降污重要性;最后,促进政府资金与社会资金相融合,引导社会资本向绿色低碳领域倾斜,同时提高财政支出的效率。

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] 武义青,姚连宵.基于碳生产率的我国省域经济增长方式评价[J].河北经贸大学学报,2021,42(4): 67-73.
WU Yiqing, YAO Lianxiao. Evaluation of China's Provincial Economic Growth Mode Based on Carbon Productivity[J]. Journal of Hebei University of Economics and Business, 2021, 42(4): 67-73.
- [3] 张雪华,董会忠.“2+26”城市碳排放时空演变特征及其驱动因素研究[J].资源开发与市场,2021,37(12): 1448-1456.
ZHANG Xuehua, DONG Huizhong. Study on the Spatial-Temporal Evolution of Carbon Emissions in “2 + 26” Cities and Its Driving Factors[J]. Resource Development & Market, 2021, 37(12): 1448-1456.
- [4] 金乐琴,黄炎.北京市二氧化碳排放的驱动因素及减排路径[J].经济与管理,2015,29(4): 85-90.
JIN Leqin, HUANG Yan. Driving Factors of Carbon Dioxide Emissions in Beijing and the Path of Reducing Emissions[J]. Economy and Management, 2015, 29(4): 85-90.
- [5] 李雪梅,张庆.天津市能源消费碳排放影响因素及其情景预测[J].干旱区研究,2019,36(4): 997-1004.
LI Xuemei, ZHANG Qing. Factors Affecting Carbon Emission from Energy Consumption in Tianjin[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(4): 997-1004.
- [6] 何永贵,于江浩.河北省碳排放及其影响因素变化趋势研究[J].环境科学与技术,2018,41(1): 184-191.
HE Yonggui, YU Jianghao. Study on the Change Trend of Carbon Emissions and Its Influencing Factors in Hebei

- Province[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(1): 184-191.
- [7] 赵玉焕, 李 浩, 刘 娅, 等. 京津冀 CO₂ 排放的时空差异及影响因素研究 [J]. *资源科学*, 2018, 40(1): 207-215.
- ZHAO Yuhuan, LI Hao, LIU Ya, et al. Identifying Driving Forces of CO₂ Emissions in Beijing-Tianjin-Hebei Region from Temporal and Spatial Angles[J]. *Resources Science*, 2018, 40(1): 207-215.
- [8] 杨 森, 许平祥, 白 兰. 京津冀生态化路径的差异化与协同效应研究: 基于 STIRPAT 模型行业动态面板数据的 GMM 分析 [J]. *工业技术经济*, 2019, 38(12): 84-92.
- YANG Sen, XU Pingxiang, BAI Lan. Differentiation Ecologization Evolution and Synergy Effects of Industrial Structure for Beijing-Tianjin-Hebei Regions[J]. *Journal of Industrial Technological Economics*, 2019, 38(12): 84-92.
- [9] 王凤婷, 方 恺, 于 畅. 京津冀产业能源碳排放与经济增长脱钩弹性及驱动因素: 基于 Tapio 脱钩和 LMDI 模型的实证 [J]. *工业技术经济*, 2019, 38(8): 32-40.
- WANG Fengting, FANG Kai, YU Chang. Decoupling Between Industrial Energy-Related Carbon Emissions and Economic Growth and Its Driving Factors in Beijing, Tianjin and Hebei Urban Agglomeration: Empirical Study Based on Tapio Decoupling and LMDI Model[J]. *Journal of Industrial Technological Economics*, 2019, 38(8): 32-40.
- [10] 王韶华, 刘 晔, 张 伟. 京津冀碳排放强度影响因素的动态效应分析及情景预测 [J]. *城市问题*, 2021(5): 42-51.
- WANG Shaohua, LIU Ye, ZHANG Wei. Dynamic Effect Analysis and Scenario Prediction of Factors Influencing Carbon Emission Intensity in Beijing, Tianjin and Hebei[J]. *Urban Problems*, 2021(5): 42-51.
- [11] 刘晓婷, 陈闻君. 基于 ESDA-GIS 的新疆能源碳排放空间差异动态演化分析 [J]. *干旱区地理*, 2016, 39(3): 678-685.
- LIU Xiaoting, CHEN Wenjun. Dynamic Evolution of Spatial Disparity of Energy Carbon Emissions in Xinjiang Based on ESDA-GIS[J]. *Arid Land Geography*, 2016, 39(3): 678-685.
- [12] 李 慧, 李 玮, 姚西龙. 基于 GWR 模型的农业碳排放影响因素时空分异研究 [J]. *科技管理研究*, 2019, 39(18): 238-245.
- LI Hui, LI Wei, YAO Xilong. Study on Spatial and Temporal Variation of Impacting Factors of Agricultural Carbon Emissions Based on the GWR Model[J]. *Science and Technology Management Research*, 2019, 39(18): 238-245.
- [13] 宋德勇, 徐 安. 中国城镇碳排放的区域差异和影响因素 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(11): 8-14.
- SONG Deyong, XU An. Regional Difference and Influential Factors of China's Urban Carbon Emissions[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(11): 8-14.
- [14] 黄 华. 上海市经济结构多元化与碳排放相关性研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(增刊 2): 32-35.
- HUANG Hua. Research on the Pertinence Between Shanghai's Economic Polynary Structure and Carbon Emission[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(S2): 32-35.
- [15] 李秋妍, 曹 翠. 固定资产投资对二氧化碳排放影响的实证研究: 基于省际面板数据模型 [J]. *科技管理研究*, 2014, 34(14): 221-225.
- LI Qiuyan, CAO Cui. Empirical Study on the Relationship Between the Investment on Fixed Assets and Carbon Dioxide Emissions: Based on the Panel Date of Provinces[J]. *Science and Technology Management Research*, 2014, 34(14): 221-225.
- [16] 余文梦, 张婷婷, 沈大军. 基于随机森林模型的我国县域碳排放强度格局与影响因素演进分析 [J]. *中国环境科学*, 2022, 42(6): 2788-2798.
- YU Wenmeng, ZHANG Tingting, SHEN Dajun. County-Levelspatial Pattern and Influencing Factors Evolution of Carbon Emission Intensity in China: a Random Forest Model Analysis[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(6): 2788-2798.
- [17] CHEN J D, GAO M, CHENG S L, et al. County-Level CO₂ Emissions and Sequestration in China During 1997—2017[J]. *Scientific Data*, 2020, 7: 391.
- [18] 蔺雪芹, 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.
- LIN 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.
- [19] 赵 哲, 谭建立. 中国财政支出对碳排放影响的双重效应分析 [J]. *云南财经大学学报*, 2020, 36(5): 24-36.
- ZHAO Zhe, TAN Jianli. The Dual Effect of Fiscal Expenditure on Carbon Emissions in China[J]. *Journal of*

Yunnan University of Finance and Economics, 2020, 36(5): 24-36.

- [20] 谭建立, 赵 哲. 财政支出结构、新型城镇化与碳减排效应[J]. 当代财经, 2021(8): 28-40.

TAN Jianli, ZHAO Zhe. Fiscal Expenditure Structure, New Urbanization and Carbon Emission Reduction Effect[J]. Contemporary Finance & Economics, 2021(8): 28-40.

- [21] 吕 倩, 刘海滨. 京津冀县域尺度碳排放时空演变特征: 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2019, 21(6): 41-50.

LÜ Qian, LIU Haibin. Spatio-Temporal Evolution

Characteristics of County Scale Carbon Emissions in Beijing-Tianjin-Hebei Region: A Study Based on DMSP/OLS Nighttime Light Data[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2019, 21(6): 41-50.

- [22] 易 信. 我国中长期固定资产投资变动趋势、问题及建议[J]. 经济纵横, 2022(7): 33-41.

YI Xin. The Medium and Long Term Trends, Problems and Suggestions of Fixed Asset Investment of China[J]. Economic Review Journal, 2022(7): 33-41.

(责任编辑: 申 剑)

(上接第 67 页)

FENG Ketao, LÜ Jian, KAN Gaohui, et al. Effects of Nitrogen Partial Pressure During Sintering on Microstructure and Properties of (Ti, Nb)(C, N)-Based Cermets[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2021, 49(6): 47-54.

- [20] XIONG H W, WU Y X, LI Z Y, et al. Comparison of Ti(C, N)-Based Cermets by Vacuum and Gas-Pressure Sintering: Microstructure and Mechanical Properties[J]. Ceramics International, 2018, 44(1): 805-813.

- [21] LIU N, LIU X S, ZHANG X B, et al. Effect of Carbon

Content on the Microstructure and Mechanical Properties of Superfine Ti(C, N)-Based Cermets[J]. Materials Characterization, 2008, 59(10): 1440-1446.

- [22] 秦蜀懿, 张国定. 改善颗粒增强金属基复合材料塑性和韧性的途径与机制[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(5): 621-629.

QIN Shuyi, ZHANG Guoding. Methods and Mechanisms to Improve Ductility and Toughness of Particle Reinforced Metal Matrix Composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(5): 621-629.

(责任编辑: 申 剑)