

DOI: 10.20103/j.stxb.202404020707

颜建军, 邓楠, 陈彬, 张熙文. “双碳”目标下京津冀地区碳足迹变化及其影响因素. 生态学报, 2025, 45(3): 1275-1288.

Yan J J, Deng N, Chen B, Zhang X W. Study on carbon footprint changes and influencing factors in Beijing-Tianjin-Hebei region under the “dual-carbon” goal. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(3): 1275-1288.

“双碳”目标下京津冀地区碳足迹变化及其影响因素

颜建军^{1,*}, 邓楠², 陈彬³, 张熙文¹

1 湖南工商大学经济与贸易学院, 长沙 410205

2 南昌大学经济管理学院, 南昌 330031

3 北京师范大学环境学院, 北京 100875

摘要:在“双碳”目标背景下, 定量评估与分析碳足迹的变化对碳排放“双控”具有重要意义。以京津冀地区为研究对象, 基于 2005—2021 年土地利用数据、植被净初级生产力(NPP)数据以及碳排放数据对碳足迹进行测度, 并分析其变化趋势及影响因素。研究发现: (1) 研究期内京津冀地区碳排放的多年平均值为 0.11 Pg C/a, 平均增速为 3.35%, 且整体呈现出显著增长的趋势; NPP 的多年平均值为 0.35 Pg C/a, 平均增速为 0.25%, 整体呈现出上下波动的态势; (2) 研究期内京津冀地区的碳足迹和碳赤字总体表现出明显上升趋势, 年均增长率分别为 3.28% 和 1.27%, 同时碳足迹的变动呈现“东北-西南”的空间分布格局, 且存在明显的区域差异性, 碳足迹压力指数表现出多极化趋势; (3) 城镇化率是影响京津冀地区碳足迹变化的核心驱动因素, 且其变动也受多因子共同作用, 尤其是城镇化率与能源效率交互作用对碳足迹的影响最为显著。

关键词:碳足迹; 碳排放; 土地利用; 净初级生产力

Study on carbon footprint changes and influencing factors in Beijing-Tianjin-Hebei region under the “dual-carbon” goal

YAN Jianjun^{1,*}, DENG Nan², CHEN Bin³, ZHANG Xiwen¹

1 School of Economics and Trade, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China

2 School of Economics & Management, Nanchang University, Nanchang 330031, China

3 School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Under the background of “dual-carbon” target, quantitative assessment and analysis of carbon footprint changes are of great significance for “dual-control” of carbon emissions. The paper taking the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration as an example, we measure the carbon footprint based on the land use data, the net primary productivity (NPP) of vegetation and the carbon emission data from 2005 to 2021, and analyse the trend of its change and the factors affecting it. It is found that: (1) The multi-year average of carbon emissions in the Beijing-Tianjin-Hebei region during the study period was 0.11 Pg C/a, with an average growth rate of 3.35 per cent and an overall trend of significant growth; the multi-year average of NPP was 0.35 Pg C/a, with an average growth rate of 0.25 per cent, and an overall up-and-down trend. ; (2) During the study period, the carbon footprint and carbon deficit in the Beijing-Tianjin-Hebei region showed a clear upward trend, with annual average growth rates of 3.28% and 1.27%, respectively, while the changes in the carbon footprint showed a spatial distribution pattern of ‘Northeast-Southwest’, and there were obvious regional differences, and the carbon footprint pressure index showed a multi-polarisation trend. ; (3) The urbanisation rate is the core driver of carbon footprint change in the Beijing-Tianjin-Hebei region, and its change is also affected by multiple factors, especially the interaction between urbanisation rate and energy efficiency has the most significant effect on carbon footprint.

基金项目: 国家社会科学基金(22BJY108)

收稿日期: 2024-04-02; 网络出版日期: 2024-10-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yan751225@163.com

Key Words: carbon footprint; carbon emissions; land use; Net primary productivity

缓解全球气候变暖已成为人类当前亟待解决的重大问题, IPCC (2018) 指出, 为了避免极端危害, 世界必须将全球变暖幅度控制在 1.5 摄氏度以内^[1]。中国作为世界上最大的碳排放国, 2021 年二氧化碳排放量达到 111.02 亿吨, 占全球总量的 31.56%。中国的高碳排放引起了世界各国的高度关注, 这不仅给中国带来了巨大的国际压力, 也成为中国经济发展的瓶颈。2010 年以来, 中国政府积极探索实行碳排放总量和强度双重目标控制机制, 实行碳排放强度和总量双控, 推动碳排放与能源消费脱钩, 强化应对气候变化和低碳发展目标的落实。由于中国区域之间的经济发展、能源消费、产业结构等存在较大差异, 导致国家各种减排措施无法得到充分发挥。因此, 科学准确地测算出不同地区的碳排放量并分析各区域的碳排放变化特征, 对因地制宜制定符合区域发展的碳减排政策, 合理推进各地区碳减排进程, 实现碳达峰碳中和目标具有重要意义。

碳足迹作为国内外广为认可的用以衡量碳排放在整个生命周期活动过程的重要指标, 在分析碳排放变化, 揭示人类活动对全球气候变暖的过程中发挥了关键作用, 这为从源头上制定科学合理的碳减排计划提供重要参考。然而, 当前学术界对碳足迹一直没有统一的界定标准, 目前对碳足迹的理解可概括为两种: 一是将碳足迹作为描述特定活动或实体造成的温室气体排放量^[2-3]; 二是把碳足迹视作光合作用吸收由化石燃料燃烧所产生的二氧化碳所需要的生产性土地面积^[4-5]。前者主要侧重于考察某产品或生产活动全生命周期不同阶段的碳排放量, 而后者则主要反映人类活动对生态系统造成的影响。当前, 国内外对碳足迹的研究覆盖面广泛且内容丰富。从研究内容来看, 主要集中在碳足迹的测度、时空格局以及影响因素等方面, 相关研究表明我国碳足迹呈现逐年递增的趋势^[6], 同时呈现出北高南低的空间格局^[7-9], 能源结构、经济发展水平、技术研发等因素对碳足迹的空间变化具有重要影响^[10-12], 降低政治和金融风险^[13]、提高清洁能源使用^[14]可以遏制碳足迹水平。此外, 还有研究通过分析碳足迹的广度和深度考察了碳排放对生态环境的影响^[15]。从研究对象来看, 包括不同产品、行业等碳足迹, 如对我国各种食品消费碳足迹变化趋势的揭示^[16-18], 对电力行业^[19]、建筑行业^[20]、农业^[21-22]以及人造板行业^[23]等行业碳足迹转移特征的探究, 以及对电商、外资企业的碳足迹进行追踪^[24-25]。从研究方法来看, 最常用于碳足迹研究的有投入产出分析法 (IOA)、生命周期评价法 (LCA)^[26]、IPCC 计算方法以及对数平均 Divisa 指数 (LMDI) 方法^[27]等, 如运用 IPCC 计算方法构建能源消费碳排放模型对中国不同产业的空间碳足迹进行研究^[28], 利用投入产出模型 (MIRO) 对私人消费所形成的碳足迹进行核算^[29], 运用生命周期分析法 (LCA) 估算中国各种粮食作物的碳足迹^[30-33], 为传统耕作模式绿色化转型提供理论依据。此外, 还有将投入产出法与生命周期法相结合测算中国各区域碳足迹, 并分析区域间碳转移情况^[34-35]。

当前针对碳足迹的研究已取得一定成果, 但仍存在些不足: 一方面是关于区域碳足迹的时空格局, 大多研究主要聚焦于碳足迹的空间关联性分析, 较少探究碳足迹内在驱动因素; 另一方面, 多数研究主要是从能源消耗所产生的二氧化碳来刻画碳足迹, 忽略了其他生产可能产生的碳排放, 由此使研究可能产生一定误差。基于此, 为更直观地反映区域生态承载力和人类经济活动对自然环境的影响, 选择以吸收人类经济活动释放的 CO₂ 所需要的生产性土地面积对碳足迹进行定义, 以京津冀地区作为研究对象, 从直接和间接两个视角考虑碳源, 以 2005—2021 年逐年植被净初级生产力 (NPP) 数据来刻画碳吸收水平, 并对碳足迹进行计算, 分析其变化趋势。最后, 从社会、经济以及自然三个方面探究影响碳足迹变化的驱动因素。这为厘清推进减污降碳协同治理的背后逻辑机制, 进而为新发展阶段制定精细化减排政策提供有益指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

推动京津冀协同发展是党和国家深入实施的大区域重大战略之一。京津冀地区包括北京市、天津市以及河北省的保定市、石家庄市、邯郸市、秦皇岛市、张家口市、承德市、沧州市、邢台市以及衡水市 11 个市区, 位于 36°03'—42°40'N, 113°27'—119°50'E, 面积约为 2180 万 km² (图 1), 是我国的经济中心区域之一, 三大城市群之一, 也是政治与文化的中心。截止到 2022 年, 京津冀地区常住人口约为 10967.3 万, 占全国总人口的

7.77%, GDP 约为 10.03 万亿元, 占全国 GDP 的 8.29%。京津冀地区具有多种典型地貌, 北部包括坝上高原和燕山山脉, 南部以华北平原为主, 西临太行山, 东临渤海湾, 其中北京市约有 62% 的面积为山地, 天津市有超过 90% 的面积为平原, 河北省则兼有高原、山地、丘陵、平原以及湖泊等地形特征。京津冀地区土地类型多种多样, 其中以建设用地和耕地面积占比较大, 分别为 250 万 hm^2 和 718 万 hm^2 , 林地品种过于单一, 土地资源配置不合理, 人地矛盾较为突出, 生态环境脆弱区面积为 193 万 hm^2 , 占区域总面积的 8.9%。京津冀地区水资源特征表现出水资源短缺、水体污染严重, 2020 年研究区人均用水量为 227 m^3 , 低于全国平均水平, 处于严重缺水阶段。此外, 由于区域经济发展以工业为主, 能源消耗量大, 导致环境污染较为严重。

1.2 数据来源

研究中的数据包括 2005—2021 年逐年土地利用/土地覆被遥感监测数据 (<http://www.resdc.cn>), 该数据基于 LandsatMSS、TM/ETM 和 Landsat8 卫星遥感数据, 采用人机交互解译获得, 空间分辨率为 30 $\text{m} \times 30 \text{m}$ 。

2005—2021 年逐年植被净初级生产力 (NPP) 数据来自于 MODIS 卫星数据, 采用 GLO-PEM 模型进行计算, 空间分辨率为 500 $\text{m} \times 500 \text{m}$ 。归一化植被指数 (NDVI), 来自于 MOD13A3 数据集, 空间分辨率为 500 $\text{m} \times 500 \text{m}$ 。夜间灯光数据来自于 NPP-VIIRS 夜间灯光数据集, 空间分辨率为 500 $\text{m} \times 500 \text{m}$ 。年平均降水量数据和年平均气温数据, 均来自于国家地球科学数据中心, 分辨率为 1 $\text{km} \times 1 \text{km}$ 。风速和混合高度来自 ERA-Interim 数据库。其他数据来自于《河北城市统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》、《中国农村统计年鉴》。DEM 数据来源于地理空间数据云平台, 各行政单元的行政界限、城市驻地等基础地理信息数据来自于国家基础地理信息中心 1:400 万数据库 (<http://www.ngcc.cn/ngcc>)。

1.3 研究方法

1.3.1 碳排放测算方法

二氧化碳排放的测算, 参考朱向梅和王子莎的做法^[8], 从直接和间接两个角度分析碳排放的主要来源, 其中直接来源考虑种植农作物所需要的耕地活动产生的碳排放量, 而间接来源则考虑产业发展所消耗能源产生的碳排放量, 具体计算公式如下所示;

$$E_t = \sum_i E_{it} \quad (1)$$

式中, E_t 表示耕地活动所产生的二氧化碳排放总量, E_{it} 表示第 i 种碳源所产生的碳排放量, 主要包括农作物种植过程中所使用的化肥、农药以及农作物种植面积、农业基础设施动力及灌溉所产生的二氧化碳排放, 以上各种碳源转化系数如表 1 所示。

$$C_t = \sum Qe_i \times Se_i \times De_i \quad (2)$$

式中, i 、 t 分别表示能源类型和年份, C_t 为能源消耗所产生的二氧化碳总量, Qe_i 为能源消耗量 (10^4t 或 m^3), Se_i 为标准煤参考系数 (kg/kg), De_i 为碳排放系数。具体参数形式如表 2 所示。

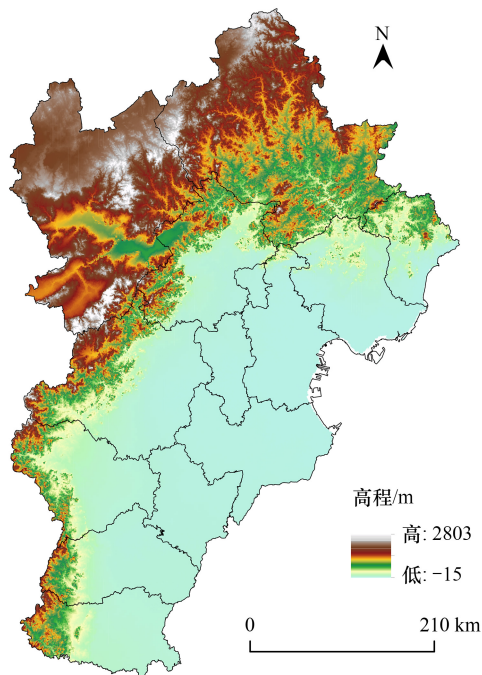


图 1 区位概况图

Fig.1 Location overview map

表 1 碳源转换系数

Table1 Carbon source conversion factor

直接碳源 Direct carbon source	转换系数 Conversion factor	参考来源 Reference source
化肥 Fertiliser	0.8956 kg/kg	ORNL(美国橡树岭实验室) 南京农业大学资源与生产环境研究所(IREEA)
农药 Pesticides	4.9341 kg/kg	
农膜 Agro-film	5.18 kg/hm ²	
农业播种面积 Agricultural sown area	16.47 kg/hm ²	
农业机械动力 Agricultural machinery power	0.18 kg/kw	
农业灌溉面积 Irrigated agricultural area	266.48 kg/hm ²	

表 2 能源折算标准煤及碳排放系数表

Table 2 Energy conversion standard coal and carbon emission factors

能源 Energy	标准煤折算系数 Standard coal conversion factor	碳排放系数 Conversion factor
电力 Electrical power	1.229 t/kwh	2.2132
天然气 Petroleum	1.33 t/10 ⁴ m ³	0.4483
液化石油气 Liquefied petroleum gas	1.7143 kg/kg	0.5042

1.3.2 碳足迹测算方法

参考现有文献^[7,37]的常用作法,基于自然生态系统和社会经济系统视角对碳足迹进行测算。引入 NPP 数据作为生态系统碳吸收的指标,从土地利用数据中提取出生产性土地(植被)面积,其中包括农田、森林、灌木、草地以及湿地,以此构建碳足迹测算模型如下所示。

$$CF_{it} = \frac{CT_{it}}{NPP_{it}} \times S_{it} \tag{3}$$

$$CBI_{it} = \frac{CT_{it}}{NPP_{it}} \tag{4}$$

$$\Delta CF_{it} = CF_{it} - S_{it} \tag{5}$$

式中, CF_{it} 为*i*区域*t*年的碳足迹(km²); CT_{it} 为*i*区域*t*年碳排放总量(g); S_{it} 为*i*区域*t*年的生产性土地面积(km²); NPP_{it} 为*i*区域*t*年的植被净初级生产力(Cg/km²); CBI_{it} 为碳足迹压力指数; ΔCF_{it} 表示碳赤字。

1.3.3 核密度估计

Kernel 密度估计是一种非参数估计方法,被广泛应用于时间变化分析,在研究空间分布非均衡中也有重要应用。假定随机变量 *X* 的密度函数形式如下:

$$f(x) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^N H\left(\frac{X_i - x}{h}\right) \tag{6}$$

式中,*N* 为样本数量,*h* 为窗宽,*H* 为核函数, X_i 为独立同分布的观察值,在本研究中为 13 个城市碳足迹,*x* 为碳足迹的均值。核函数需要满足的条件如下所示:

$$\begin{cases} \lim_{x \rightarrow \infty} H(x) = 0 \\ H(x) \geq 0 \int_{-\infty}^{\infty} H(x) = 1 \\ \text{sub}H(x) < +\infty \int_{-\infty}^{\infty} H^2(x) = 1 < +\infty \end{cases} \tag{7}$$

当 *h* 越大时,密度函数的曲线越平滑,精确度就越低,*h* 越小,估计结果的变化趋势越明显,估计结果也会

更加精确,但是可能会过度拟合,降低结果的可读性。为此,本研究在选择窗宽时,在尽可能保证曲线平滑条件下,选择较小的窗宽进行核密度估计。

1.3.4 地理探测器

地理探测器主要用于测算某个因子对因变量在空间分异上的解释力度。考虑导致碳足迹变化的因素主要包括三大类,分别是社会因素、经济因素以及自然因素。社会经济因素是指影响社会环境变化的各种宏观经济状况,包括人口、工业、交通等方面的情况,参考现有研究^[38-39],自然因素是指影响生态环境变化的自然条件,包括气候、地质、水文、土壤、植被等方面的情况,同时遵循科学性、完备性以及数据可获得性等原则,选取涉及社会、经济以及自然条件的 11 个影响因子进行分析(表 3)。同时,为探明所筛选的影响因子对碳足迹变化的作用程度,借助地理探测器对各因子的解释力进行测算,具体模型如式(8)所示:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (8)$$

式中, L 表示变量分层; N_h 表示在 h 层的全区单元数; σ^2 表示全区的方差; q 表示某一自变量对因变量的影响大小,其值域为 $[0,1]$, q 值越大表示自变量因子对因变量的解释力越大。

表 3 碳足迹影响因子选取
Table 3 Selection of carbon footprint impact factors

维度 Dimensions	指标 Norms	指标编号 Indicator number	指标含义 Meaning of the indicator
社会因素 Social factor	人口密度	X1	反映人口密集度,采用单位面积人口数量来刻画
	城镇化率	X2	反映城市人口集聚程度,采用城镇人口与年末常住人口的比值来衡量
经济因素 Economic factor	产业结构高级化	X3	反映经济结构优化程度,采用第三产业与第二产业比值来衡量
	经济活跃度	X4	反映夜间人类经济活动,采用夜间灯光指数来刻画
	能源消耗强度	X5	反映能源使用效率,采用能源消耗总量与地区 GDP 的比值来衡量
	绿色技术创新水平	X6	反映科技创新能力,采用绿色发明专利数量占专利总数比重来衡量
自然因素 Natural factor	年均气温	X7	反映气候变化情况
	年均降水	X8	
	空气流通系数	X9	反映空气流通速度,参考 Broner 等 ^[36] 的研究,采用风速与大气边界高度的乘积来刻画
	地形起伏度	X10	反映地形特征,采用坡度的平均值来刻画
	植被覆盖度 (NDVI)	X11	反映植被生长情况

2 结果分析

2.1 碳吸收与碳排放是时空变化分析

在研究期内京津冀地区碳排放量整体呈现线性上升的趋势(图 2),平均碳排放总量为 1.46Pg C/a,年均增长率为 3.16%。碳吸收量则呈现出先降后升的不稳定波动态势,平均碳吸收总量为 4.50Pg C/a,年均增幅为 0.25%,这说明京津冀地区的碳排放增速要远大于碳吸收增速,可能原因是前期工业化和城镇化进程的加快,导致建成区面积扩张和工业污染排放加剧,这使得生产性土地面积减少,碳排放增长加速。具体而言,从碳排放量来看,在京津冀地区,以北京碳排放总量最大,平均碳排放量为 0.66Pg C/a,平均增幅为 3.24%;天津次之,平均碳排放量为 0.39Pg C/a,平均增幅为 3.10%,且均表现出明显的线性上升趋势。而相比于北京和天津,河北省内各城市的碳排放量相对较少且上升幅度较为平缓,其整个省份的年平均碳排放总量为 0.41Pg C/a,年均增幅为 3.17%(图 3)。这可能是由于北京作为首都经济活动空间过度密集,导致了一系列“大城市病”问题。同时,天津作为邻近首都的城市也受其影响。尤其是在 2005—2010 年这一时期北京和天津的社会经济处于工业化发达阶段,能源消耗大幅增加,城镇建设用地不断扩张,导致碳排放量急剧增长。在 2010 年以后,

随着政府对环境治理的重视,以及清洁生产技术的推广与运用,使工业企业的碳排放量得到有效控制,碳排放增速开始放缓。

从碳吸收来看,研究期内京津冀地区各城市碳吸收量均未表现出明显的动态变化趋势(图2)。具体而言,以承德碳吸收总量最多,年均碳吸收量为 0.71 Pg C/a ,平均增长速率为 0.63% ;其次是张家口和保定,年平均碳吸收量分别为 0.57 Pg C/a 、 0.49 Pg C/a ,平均增长速率分别为 0.66% 、 0.42% ;北京、天津和唐山相对较多,年平均碳吸收量分别为 0.48 Pg C/a 、 0.42 Pg C/a 、 0.42 Pg C/a ,年均增长速分别为 0.40% 、 0.04% 、 -0.02% ,廊坊的碳吸收量最少,年均碳吸收量为 0.11 Pg C/a ,而其余城市的年均碳吸收量介于 0.30 Pg C/a 至 0.16 Pg C/a 之间(图3)。这可能是受地形特征、土壤条件以及人类活动等因素的制约,导致不同地区的植被覆盖面积存在较大差异,进而影响碳吸收。

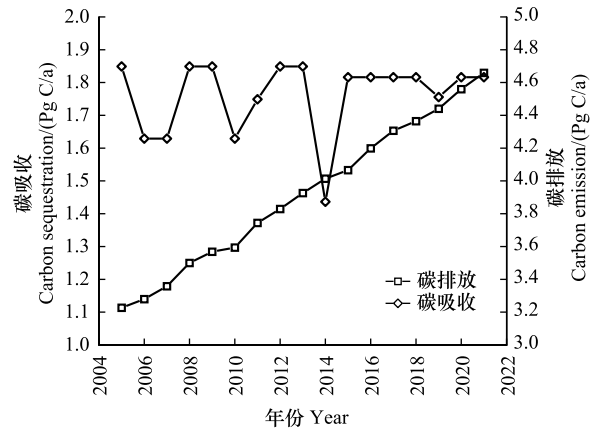


图2 2005—2021年京津冀地区碳排放与碳吸收整体变化趋势

Fig.2 Trends in carbon emissions and carbon sequestration in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, 2005–2021

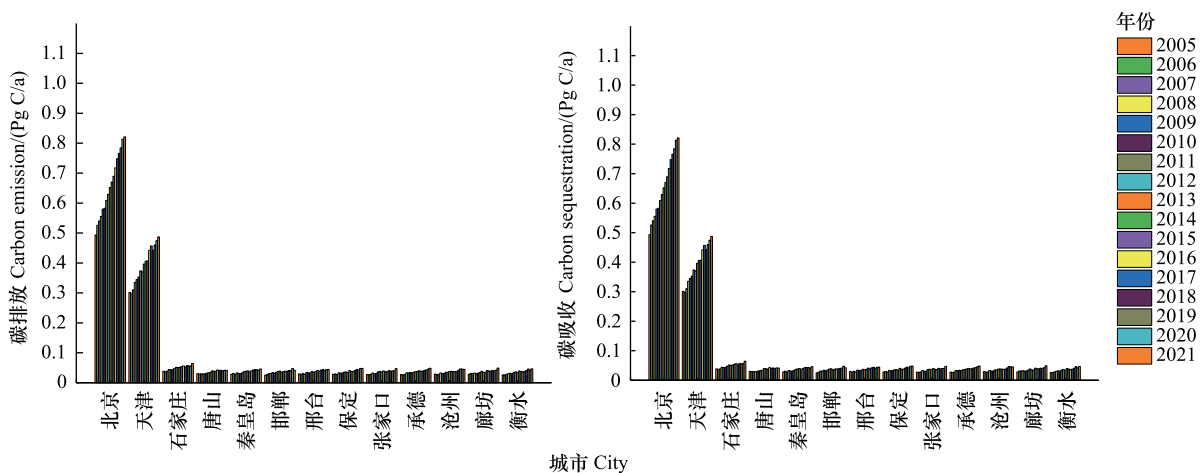


图3 2005—2021年碳吸收与碳排放时序变化图

Fig.3 Chronological change of carbon sequestration and emission, 2005–2021

2.2 碳足迹的时空演化分析

2.2.1 碳足迹时序变化

从整体来看,2005—2021年京津冀地区碳足迹和碳赤字均呈现出增长的趋势(图4),碳足迹由 $6.16 \times 10^4 \text{ km}^2$ (2005年)增加到 $9.76 \times 10^4 \text{ km}^2$ (2021年),年均增长率为 3.28% ,其多年平均值为 $0.62 \times 10^4 \text{ km}^2$;碳赤字由 $-25.61 \times 10^4 \text{ km}^2$ (2005年)上升至 $-20.68 \times 10^4 \text{ km}^2$ (2021年),其多年平均值为 $-22.81 \times 10^4 \text{ km}^2$,年平均增速为 1.27% 。同时,还可以发现,研究期内京津冀地区始终处于负碳赤字,在2016—2020年阶段的碳足迹和碳赤字增速相较于前期更快。从以上分析说明京津冀地区生态系统的碳承载能力已达极限,建成区面积的持续扩张,导致生产性土地面积所能承载的碳排放量要小于能源消耗和耕地活动所带来的碳源增加。

分城市来看,可以发现,北京的碳足迹面积最大(图5),呈现出显著增长的趋势,多年平均值为 $3.06 \times 10^4 \text{ km}^2$,平均增长速率为 3.05% ;其次是衡水,碳足迹多年平均值为 $1.37 \times 10^4 \text{ km}^2$,该变化也呈现出较为明显的扩张态势,平均增长速率为 4.79% 。同时在2014年和2019年,北京和衡水的碳足迹都出现了极大值情况。其

中,在 2014 年,北京和衡水的碳足迹分别为 $3.58 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $1.78 \times 10^4 \text{ km}^2$,2019 年则分别为 $3.67 \times 10^4 \text{ km}^2$ 和 $1.90 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。天津的碳足迹仅次于衡水,多年平均值为 $1.06 \times 10^4 \text{ km}^2$,呈现出线性增长的趋势,平均增长速率为 2.55%。石家庄、秦皇岛、邢台以及承德均表现出较高的碳足迹,多年平均值分别为 $0.53 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $0.38 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $0.32 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $0.35 \times 10^4 \text{ km}^2$,且碳足迹均表现出线性增长的趋势。张家口的碳足迹最低 ($0.07 \times 10^4 \text{ km}^2$),且变化趋势较为平缓。超过京津冀地区整体碳足迹水平的城市包括北京、天津和衡水,而其他城市的碳足迹多年均值要低于整体平均水平。

进一步地,对于京津冀地区各城市的碳赤字变化而言,以承德的碳赤字水平最高(图 5),多年碳赤字平均值为 $-4.83 \times 10^4 \text{ km}^2$,其次是承德 ($6.54 \times 10^4 \text{ km}^2$),石家庄 ($-2.63 \times 10^4 \text{ km}^2$)、唐山 ($-1.43 \times 10^4 \text{ km}^2$)、秦皇岛 ($-1.40 \times 10^4 \text{ km}^2$)、邯郸 ($-1.39 \times 10^4 \text{ km}^2$)、邢台 ($-1.37 \times 10^4 \text{ km}^2$)、保定 ($-1.39 \times 10^4 \text{ km}^2$)、张家口 ($-1.04 \times 10^4 \text{ km}^2$) 以及沧州 ($-1.00 \times 10^4 \text{ km}^2$) 的碳赤字虽有递减趋势但变化相对平缓。不难发现,河北省各城市在研究期内均处于碳赤字状态,这说明河北省的碳生态承载能力较强。天津则表现出由碳赤字向碳盈余转换的过程,在 2014 年以前,均存在碳赤字,在 2015 年以后,则表现出明显的碳盈余,且多年碳赤字平均值为 $-0.09 \times 10^4 \text{ km}^2$;北京在研究期内始终保持碳盈余状态,且有显著增长的趋势,多年碳赤字均值为 $0.84 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。这表明北京和天津生态系统的碳承载能力处于超负荷状态,过量的碳排放导致生产性土地面积难以有效吸收,进而影响了生态碳循环系统的运行效率。可能原因是北京和天津作为经济发达地区,工业化水平较高,且多数工业企业集聚在城市外围区域,这就导致碳排放量持续增加,而植被的碳吸收速度慢于碳排放速度,由此造成两个地区处于碳盈余的状态。

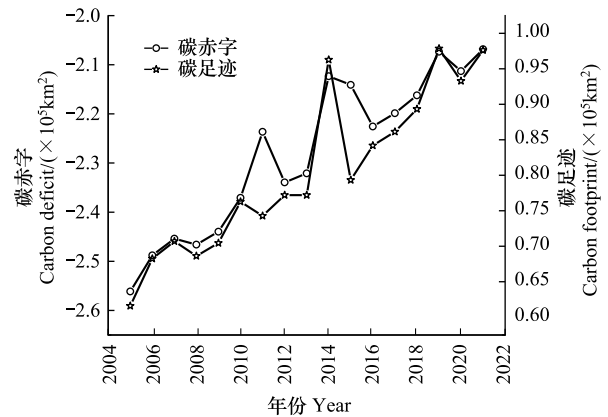


图 4 2005—2021 年碳足迹和碳赤字变化趋势图

Fig.4 Trends in carbon footprint and carbon deficit, 2005—2021

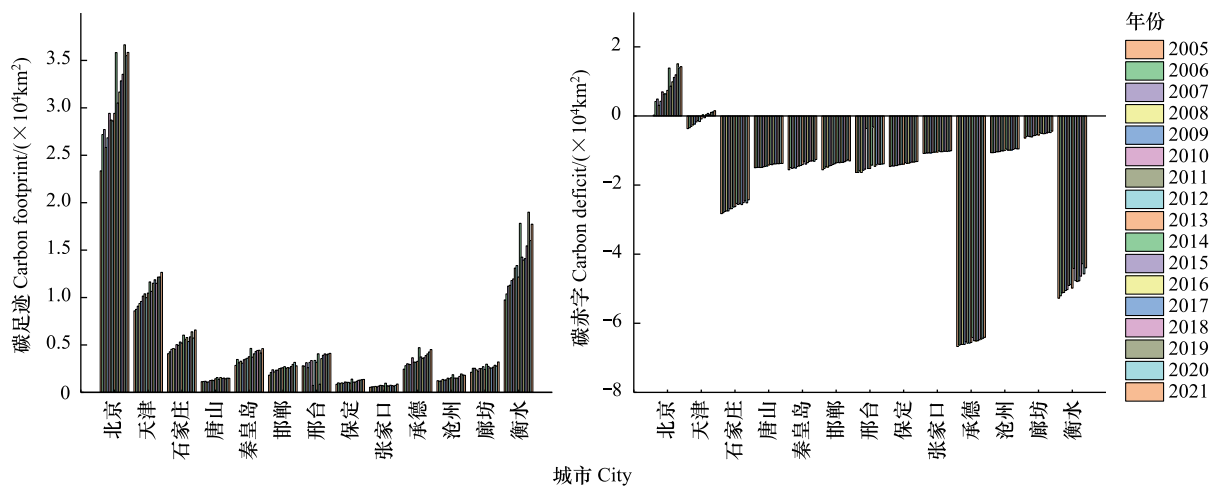


图 5 2005—2021 年碳足迹与碳赤字时序变化图

Fig.5 Chronological change of carbon footprint and carbon deficit, 2005—2021

2.2.2 碳足迹的空间变化

(1) 碳足迹空间分布格局

为探究京津冀地区的区位分布及动态演变情况,采用标准差椭圆对碳足迹的方向分布和重心迁移情况进

行分析(图6)。从重心迁移情况来看,京津冀地区碳足迹重心经纬度由2005年的($116.372^{\circ}\text{E}, 39.254^{\circ}\text{N}$)转移至2021年的($116.356^{\circ}\text{E}, 39.231^{\circ}\text{N}$),迁移轨迹的累积距离为16.267km,重心位置在廊坊市市内变动。根据重心迁移轨迹,可以看出,2005—2010年碳足迹重心向西北方向转移,2010—2015年则呈现出向东北方向转移的态势,2015—2020年又向西南方向移动,整体迁移方向表现为东北—西南走势。从标准差椭圆变化情况看,空间旋转角有略微减小,由 22.25° 变为 21.71° ,椭圆面积则先由2005年的 61355.8km^2 扩张至2010年的 61366.8km^2 ,再收缩至2015年的 60441.4km^2 ,最后又扩张至2021年 61905.11km^2 。由此可以看出,京津冀地区碳足迹表现出先扩张后缩小再扩张的变化特征,整体上有增长的态势,重心位移并未发生较大幅度的变动,且始终落在河北省的廊坊市内。

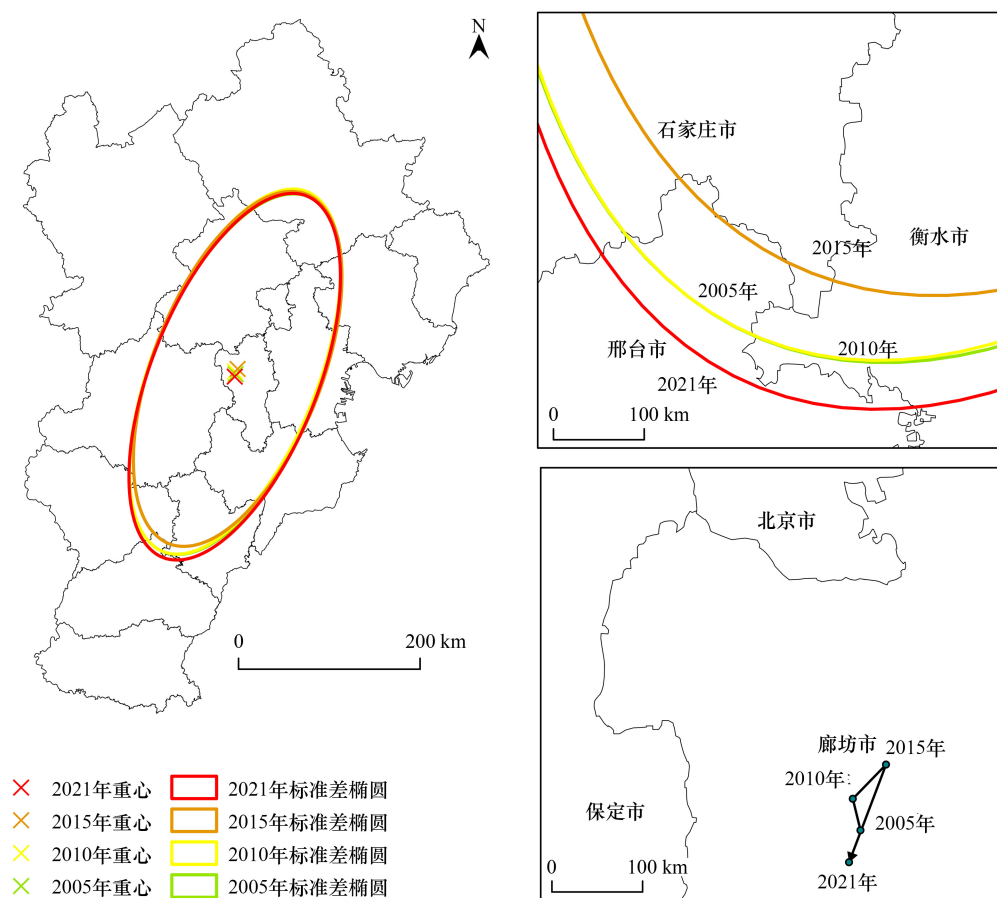


图6 2005—2021年碳足迹方向布及重心迁移

Fig.6 Carbon Footprint Directional Fabric and Centre of Gravity Migration, 2005—2021

(2) 碳足迹空间演化趋势

为进一步分析京津冀地区碳足迹的演化趋势,采用高斯核密度估计探讨碳足迹和碳足迹压力指数的分布位置、分布形态、波峰数量和分布的延展性以揭示二者的动态演进过程(图7)。从分布位置来看,碳足迹和碳足迹压力指数的分布位置均有不同程度的右移,碳足迹和碳足迹压力指数不断增大,但总体变动相对较小。从分布形态来看,碳足迹和碳足迹压力指数在低水平附近集聚,存在严重的右拖尾现象,个别城市的碳足迹高于均值,在2015年碳足迹峰值有所下降,并且未形成新的主峰,大部分城市的碳足迹在向着更高水平增长,但是城市差异依然明显。对于碳足迹压力指数而言,核密度峰值始终保持上升趋势,且研究期内表现出主峰变高,峰体延展的趋势,呈现出多极化趋势。

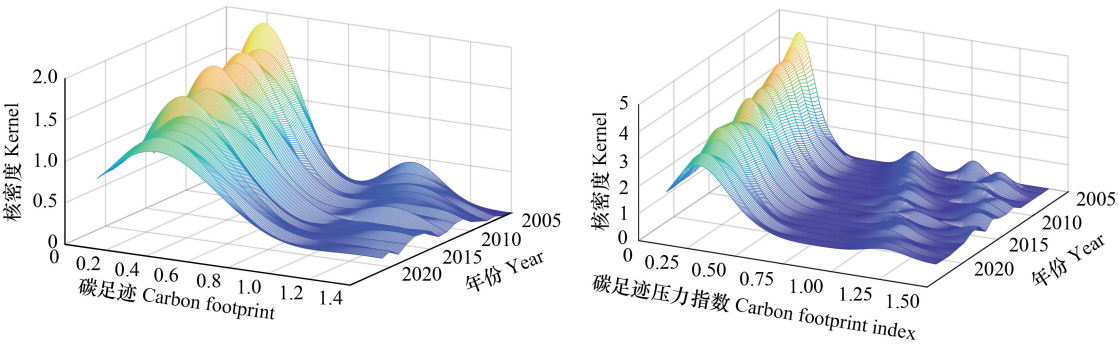


图 7 2005—2021 碳足迹和碳足迹压力指数核密度估计

Fig.7 Kernel density estimates of carbon footprint and carbon footprint pressure index, 2005—2021

2.3 碳足迹影响因素分析

2.3.1 碳足迹影响因素单因子探测分析

因子探测能够较好地观察和分析各种因素对碳足迹变化的解释力度。表 4 和图 8 展示了京津冀地区碳足迹影响因素的单因子探测结果。从表中可以看出,不论是社会因素、经济因素还是自然因素均对碳足迹的变化存在显著影响。

表 4 2005—2021 年碳足迹影响因素单因子探测结果

Table 4 Results of one-way detection of carbon footprint influencing factors, 2005—2021

因子 Factor	2005 年	2009 年	2013 年	2017 年	2021 年
X1	0.31 ***	0.48 ***	0.52 ***	0.40 ***	0.33 ***
X2	0.68 ***	0.65 ***	0.74 ***	0.60 ***	0.62 ***
X3	0.40 ***	0.58 ***	0.50 ***	0.54 ***	0.56 ***
X4	0.35 ***	0.52 ***	0.52 ***	0.13 ***	0.26 ***
X5	0.53 ***	0.30 ***	0.24 ***	0.17 ***	0.60 ***
X6	0.30 ***	0.17 ***	0.20 ***	0.19 ***	0.19 ***
X7	0.10 ***	0.10 ***	0.10 ***	0.10 ***	0.11 ***
X8	0.21 ***	0.30 ***	0.30 ***	0.52 ***	0.32 ***
X9	0.49 ***	0.20 ***	0.44 ***	0.44 ***	0.18 ***
X10	0.07 ***	0.10 ***	0.10 ***	0.10 ***	0.08 ***
X11	0.33 ***	0.24 ***	0.12 ***	0.14 ***	0.19 ***

*** 表示 1% 的显著性水平; X1: 人口密度 Population density; X2: 城镇化率 Urbanisation rate; X3: 产业结构高级化 Advanced industrial structure; X4: 经济活跃度 Economic activity; X5: 能源消耗强度 Energy intensity; X6: 绿色技术创新水平 Green technology innovation level; X7: 年均气温 Average annual temperature; X8: 年均降水 Average annual precipitation; X9: 空气流通系数 Air flow coefficient; X10: 地形起伏度 Topographical relief; X11: 植被覆盖度 Vegetation cover

(1) 城镇化率(X2)。城镇化率是影响京津冀地区碳足迹变化的核心驱动力,平均贡献度为 0.66,在研究期内其解释力度始终保持在最上方(图 8),表现出先减弱后增强的动态变化趋势,且在 2013 年 q 值达到最大为 0.74。2005—2013 年是京津冀地区建成区扩张较为迅速的一个时期,而为了缓解城市化进程加快所导致的区域发展不协调和生态环境破坏,2014 年发布的《京津冀协同发展纲要》明确指出京津冀地区的空间布局为“一核、双城、三轴、四区、多节点”,这为京津冀地区经济的可持续发展奠定了基础,有序推动产业化和人口聚集,放缓了城镇化进程,城镇化率对碳足迹的解释度也有所削减,但依然是影响京津冀地区碳足迹变化的关键诱因。

(2) 产业结构高级化(X3),其平均贡献度为 0.52,对碳足迹变化的影响力度相对弱于城镇化率,但也发挥

了重要影响。产业结构高级化的 q 值在 2005—2013 年阶段呈现出先增大后减小的动态变化趋势,在 2009 年达到最大值为 0.58。2013—2021 年阶段 q 值表现出线性上升态势,在 2021 年对碳足迹的解释力度达到 0.56。2012 年北京、天津以及河北的社会经济均处于一个工业化发展较发达的阶段,在这一阶段产业结构始终以重工业为主。而在 2013 年以后,随着协同发展战略的实施,制造业企业由最初的集中布局开始逐渐分散化发展,产业结构开始转型升级,这有效控制了碳排放增速,产业结构高级化对碳足迹的解释力也逐渐增强。

(3) 人口密度、能源效率、经济活跃度以及绿色技术创新水平作为社会经济因素,相比于城镇化率和产业结构高级化,对京津冀地区碳足迹变化的解释力度相对较弱,其 q 值的变化表现出上下波动的态势。其中,人口密度(X1)对碳足迹变化的平均解释度为 0.41,在研究期内表现出先升后降的倒 U 型变化趋势,2013 年为临界点达到最大值为 0.52,之后有小幅下降。人口密度扩大大会导致交通、电力基础设施以及建设用电的需求扩

张,从而导致生产性土地面积的缩减,碳排放的加剧。能源效率(X5)对碳足迹解释度的均值为 0.37。在 2005—2017 年阶段, q 值表现出线性减少的趋势,而在 2021 年 q 值发生跨越式上升达到 0.62。虽然能源效率的 q 值相对较小,但对碳足迹的变化依然有显著影响。能源消耗是碳排放的主要来源,因此,提升能源效率是降低碳排放的有效途径之一,在减少碳足迹过程中扮演了至关重要的作用。经济活跃度(X4)的平均解释度为 0.35。在 2005—2013 年阶段,呈现出先上升后不变的变化趋势, q 值由 0.35 增长至 0.52,此阶段之后, q 值有所减小。经济活跃度是反映一个地区经济发展状况的重要指标,与碳排放存在密切联系,因而对碳足迹的影响也不容忽视。绿色技术创新水平(X6)的平均解释度为 0.21, q 值介于 0.30 至 0.19 之间,变化呈现出先降后升再降的趋势。绿色技术创新是优化能源结构,提高能源使用效率的关键渠道,能够有效控制碳排放。尽管对碳足迹的解释度相对弱于其他因子,但在减少碳足迹中仍具有重要作用。

(4) 对于自然因素而言,以空气流通系数(X9)对碳足迹变化的影响最强,平均解释度为 0.35, q 值表现出上升后下降的变化趋势,在 2013 年达到最大值为 0.44,在 2021 年有所降低。由于二氧化碳具有流通的特性,因此,空气流通速度会影响碳排放的空间分布,进而影响碳足迹的变化。植被归一化指数(X11)对碳足迹变化的平均解释度为 0.20, q 值表现出先降后升的 U 型变化趋势,在 2013 年降至最低点为 0.12,之后开始回升。NDVI 能够较好地反映植被覆盖度,植被的覆盖面积会决定了生产性土地面积和固碳能力,因而会影响碳排放总量占生产性土地面积的比例。地形起伏度(X10)对碳足迹变化的作用最弱,平均贡献度为 0.09, q 值变化相对平稳,这表明研究区域地势对碳足迹的影响较小。

综合以上分析表明,城镇化率是影响京津冀地区碳足迹变动的关键驱动因素,同时,人口密度、产业结构高级化、能源效率以及绿色技术创新水平对碳足迹的影响也不容小觑。因此,为更好地实现碳排放“双控”的目标,需要重视如何缓解城镇化所带来的副作用,加大对绿色技术创新的投资力度,推动产业结构转型升级,提高能源利用效率。

2.3.2 碳足迹影响因素交互探测分析

交互探测能够更好地分析社会因素、经济因素以及自然因素两两相互作用对京津冀地区碳足迹变化的影响效果,通过比较单因子或两个因子交互作用对京津冀地区碳足迹的解释度(q)来判断因子交互产生的影响

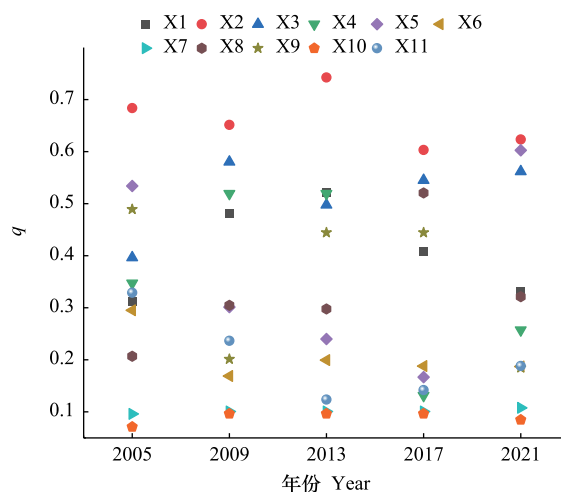


图8 碳足迹影响因素单因子探测结果趋势

Fig.8 Trends in the results of the one-way detection of carbon footprint impact factors

X1: 人口密度; X2: 城镇化率; X3: 产业结构高级化; X4: 经济活跃度; X5: 能源消耗强度; X6: 绿色技术创新水平; X7: 年均气温; X8: 年均降水; X9: 空气流通系数; X10: 地形起伏度; X11: 植被覆盖度

是强化还是弱化。图 9 展示了 5 期因子交互探测的作用结果。可以看出,研究期内任意两个影响因子之间的交互作用对碳足迹空间分异的解释力均表现性为非线性增强或双因子增强。在 2021 年,人口密度(X1)、经济活跃度(X4)以及绿色技术创新水平(X6)的单因子解释度较弱,分别为 0.33、0.26、0.19,但 $X1 \cap X11$ 、 $X4 \cap X11$ 、 $X6 \cap X8$ 对碳足迹变化的解释力达到了 0.94、0.89、0.52,显然各因子在交互作用下对碳足迹的影响得到进一步增强。

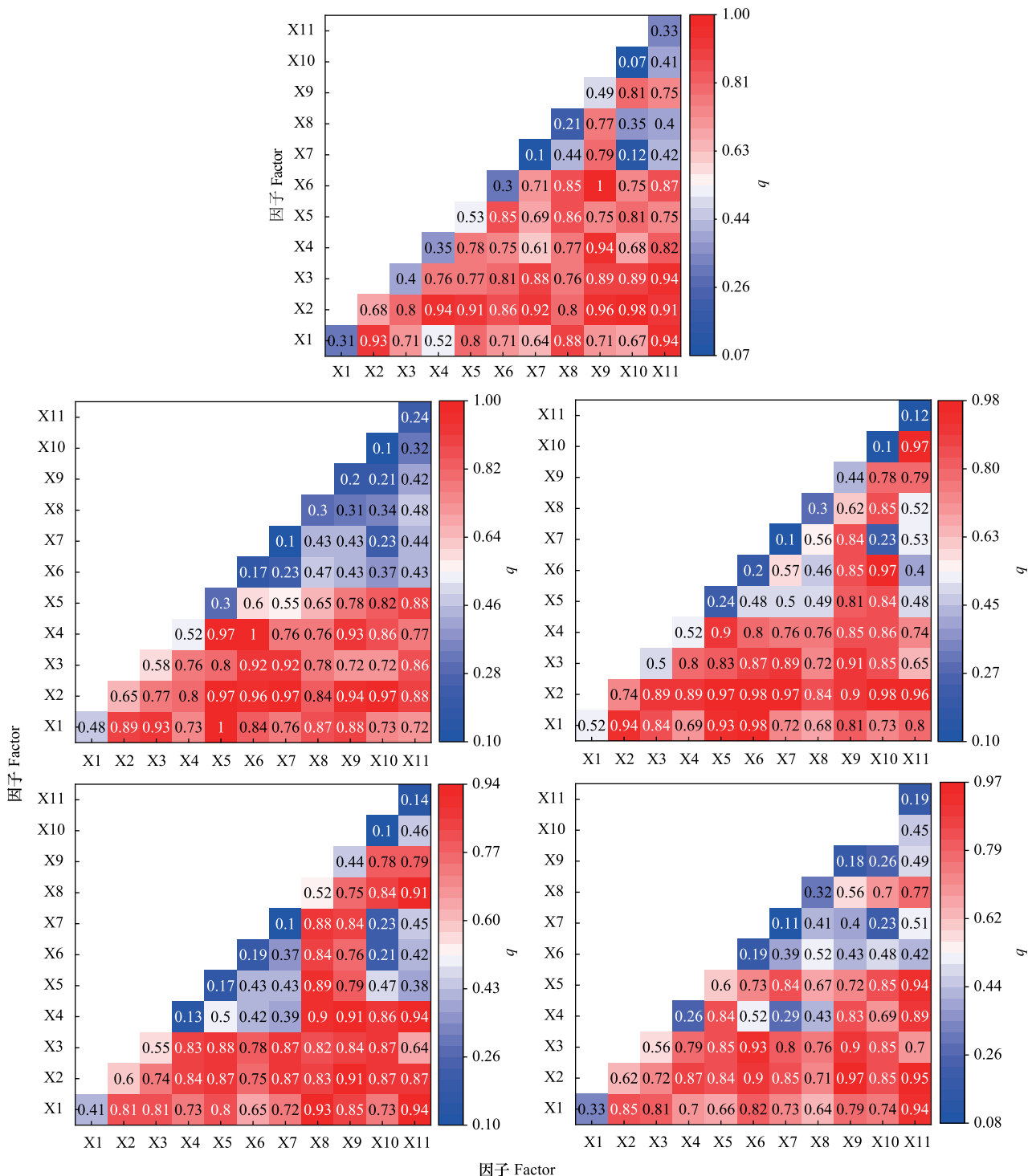


图 9 2005—2021 年碳足迹影响因子交互分析图

Fig.9 Interaction analysis of carbon footprint impact factors, 2005—2021

从时序变化来看,随着时间的推移各因子间的交互作用都存在不同程度的增强或减弱,其中以人口密度(X_1)和城镇化率(X_2)与其他因子交互作用对碳足迹变化解释力度较强,人口密度(X_1)在5个时期与其他因子的交互作用最高值分别为 $X_1 \cap X_{11}(0.94)$ 、 $X_1 \cap X_5(1)$ 、 $X_1 \cap X_5(0.98)$ 、 $X_1 \cap X_8(0.93)$ 、 $X_1 \cap X_{11}(0.94)$,城镇化率(X_2)与其他因子交互作用最高值分别为 $X_2 \cap X_9(0.98)$ 、 $X_2 \cap X_5(0.97)$ 、 $X_2 \cap X_{10}(0.98)$ 、 $X_2 \cap X_9(0.91)$ 、 $X_2 \cap X_9(0.97)$ 。可以看出,其交互作用均在0.9以上。同时,在各时期经济因素与其他因子的交互作用也明显优于单因子的解释力度,尤其是绿色技术创新水平对碳足迹的影响有显著提高,与产业结构高级化(X_3)、能源效率(X_5)共同作用的效果得到凸显。在5个时期 $X_6 \cap X_3$ 的交互作用对碳足迹的影响力分别为0.81、0.92、0.87、0.78、0.93, $X_6 \cap X_5$ 交互作用的解释力分别为0.85、0.60、0.48、0.43、0.73。绿色技术创新作为优化产业结构和能源结构的重要工具,可以促进产业结构高级化和能源效率提升。随着京津冀协同发展战略的提出,京津冀三省市开始对产业结构、城市布局以及生态空间等方面不断进行调整和优化,以创新驱动引领经济高质量发展,形成优势互补的新发展格局。产业结构升级、能源效率提升以及创新能力提高成效显著,这为改善环境质量,进一步降低碳排放,减少碳足迹作出了重要贡献。

3 讨论

从当前相关碳足迹的研究来看,不同地区碳足迹的空间变化及其影响因素都存在一定的异同。大多数研究从不同地域、不同行业以及不同核算方法等方面对碳足迹进行分析后,均发现碳足迹表现出增加的趋势^[40-41],产业结构、能源强度、技术进步以及经济规模等是影响碳足迹的主要因素。同时,针对京津冀地区碳足迹变化,有研究指出京津冀地区能源消耗碳足迹有上升态势^[38-39],北京、天津和河北三个地区的碳足迹集中部门较为相似^[39],产业结构和经济规模与碳足迹存在正相关关系,能源强度与其则呈现负相关^[42]。虽然现有研究从多个视角指出了碳足迹的变化特征,表明了能源、产业以及技术等与碳足迹变化存在密切联系,但对于不同领域碳足迹的驱动因素研究视角仍较为单一。而关于京津冀地区碳足迹核算中的碳源也主要集中于各产业部门的能源消耗,这可能造成所计算的碳足迹存在一定局限性。为此,一方面,本文尝试从直接碳源和间接碳源两个视角对碳排放进行核算,既考虑了能源消费,也将农耕活动所产生的碳排放考虑在内,从而更全面地核算京津冀地区的碳足迹。另一方面,在驱动因素分析中,区别于以往研究,综合考虑了社会因素、经济因素以及自然因素,以系统探讨影响碳足迹变化的驱动因素,从而为制定更为科学合理的碳减排举措提供经验证据。

然而,本研究还存在一些不足和有待进一步拓展的地方:首先,由于数据的可获得性,本文仅从城市尺度展开了研究,后续可以深入到县级尺度以更深入细致地考察各区域内部碳足迹的变化情况,为京津冀地区因地制宜实施环境规制政策提供更有价值的参考。其次,在初选环境驱动因子时,仅考虑了气候、地形、空气流通以及植被的影响,忽略了土壤侵蚀、生境质量以及景观格局等其他可用于表征环境变化的因子影响,为更好地考察环境因素对碳足迹变化的影响,后续研究还应做进一步拓展。最后,在驱动因素分析过程中,研究侧重于考察各因子对碳足迹的影响力及其时序变化,对于这些因素的空间演变格局如何尚不清楚。因此,为更充分了解京津冀地区各城市或县域内部影响碳足迹变化的各驱动因子作用大小差异,还需做进一步探讨。

4 结论

(1)2005—2021年京津冀地区的多年平均碳排放量为1.46Pg C/a,年均增长速率为3.16%,整体呈现线性上升的趋势,其中以北京碳排放量最大,多年平均碳排放量为0.66Pg C/a,天津次之,多年平均碳排放量为0.39Pg C/a,河北省各城市碳排放量虽有上升趋势,但总体排放量相对较少;整体多年平均碳吸收总量为4.50Pg C/a,年均增长速率为0.25%,整体呈现不稳定波动态势,其中以承德的碳汇能力最强,北京和天津相对较弱。

(2)2005—2021年京津冀地区的碳足迹和碳赤字均呈现显著逐年增长态势,多年平均值分别为 0.62×10^4

km²和-22.81×10⁴km²,年均增长率分别为3.28%和1.27%。碳足迹面积北京>天津>河北,研究期内北京始终处于碳盈余,天津则由碳赤字转向碳盈余,生态系统承载能力表现出超负荷状态,河北省各城市则始终处于碳赤字,也即河北省具有较强的生态碳汇功能。同时,京津冀地区的碳足迹变化呈现出“东北-西南”的空间分布格局。此外,京津冀地区的碳足迹空间变化差异明显,碳足迹压力指数存在多级化趋势。

(3)不论是社会因素、经济因素还是自然因素均对京津冀地区碳足迹变化有显著影响,且因子交互作用对碳足迹的影响力要强于单因子。具体而言,城镇化率是影响碳足迹变化的关键因素,单因子探测解释力度在60%以上,且与其他因子交互作用对碳足迹的影响可高达90%以上。人口密度、产业结构高级化、能源效率以及经济活跃度单因子探测对碳足迹也有较强的影响力,尤其是人口密度与其他因子交互作用对碳足迹的解释力度均在60%以上,绿色技术创新水平和其他自然因素单因子探测对碳足迹的解释度相对较弱,但与其他因子交互作用对碳足迹的影响有显著增强。

5 政策建议

(1)根据本研究可知,京津冀地区碳足迹变化存在显著的区域差异性,因此,要因地制宜精准施策。要结合京津冀各地区的产业发展特点、资源禀赋情况以及地理位置特征等来进行碳排放“双控”,不能仅依靠减缓经济发展来控制;要重点关注北京和天津的碳赤字状态,加强生态保护红线管理,深化北京、天津的碳交易市场,逐步完善碳交易定价机制,推动形成绿色金融体制机制;要充分考虑河北以工业发展为基础的特点,将该省重点碳排放行业纳入碳市场,通过碳交易来刺激企业的绿色技术创新活力,以促进高排放企业的低碳转型。

(2)本研究表明城镇化率、产业结构以及能源效率等是影响京津冀地区碳足迹变动的重要因素。因此,在开展碳排放治理时应考虑以下几个方面:一要适当放缓城镇化进程。加强京津冀周边农村建设,增强农村经济活力,实现就地城镇化以缓解城市化压力;实施差别化的户籍政策,限制人口过度流入,尤其是针对北京、天津等特大城市要严格实施户籍准入门槛;加强京津冀地区的协同规划,避免各地的无序竞争。二要明确产业发展定位,优化布局京津冀地区的产业分布。鼓励推动产业结构数字化、智能化转型,淘汰落后高污染、高耗能企业,重点发展清洁能源、智能制造、新材料等低碳环保产业,从而实现碳排放的源头预防。三要加快推进能源革命,京津冀地区应大力发展风能、太阳能、地热能等清洁能源,加快推进可再生能源建设项目。加强京津冀能源网络的互联互通,优化区域电网和能源传输系统,实现区域内能源的高效调配和共享。四是要加强低碳技术研发与推广。鼓励企业和科研机构加强对绿色低碳技术的研发与投资,尤其是节能环保技术、碳捕捉与碳存储技术等。政府还应加大对低碳技术研发的资金支持,推动科技成果在京津冀地区的快速转化与应用。

参考文献(References):

- [1] Climate and Clean Air Coalition (CCAC), United Nations Environment Programme (UNEP). Air Pollution in Asia and the Pacific: Science-based solutions. the United Nations Environment Programme, 2019.
- [2] Boguski T K. Life cycle carbon footprint of the National Geographic magazine. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2010, 15(7): 635-643.
- [3] Wiedmann T, Minx J. A definition of carbon footprint. Journal of the Royal Society of Medicine, 2007, 92(4): 193-195.
- [4] 彭文甫,周介铭,徐新良,罗怀良,赵景峰,杨存建.基于土地利用变化的四川省碳排放与碳足迹效应及时空格局.生态学报,2016,36(22): 7244-7259.
- [5] 焦文献,陈兴鹏,贾卓.甘肃省能源消费碳足迹变化及影响因素分析.资源科学,2012,34(3): 559-565.
- [6] 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.
- [7] 潘竞虎,张永年.中国能源碳足迹时空格局演化及脱钩效应.地理学报,2021,76(1): 206-222.
- [8] 朱向梅,王子莎.中国碳足迹广度空间关联格局及影响因素研究.调研世界,2021(5): 38-48.
- [9] Ti J S, Zheng Y, Duan W D, Zhao H B, Qin Y Q, Yin G T, Xie L W, Dong W S, Lu X C, Song Z P. Carbon footprint of tobacco production in China through Life-cycle-assessment: Regional compositions, spatiotemporal changes and driving factors. Ecological Indicators, 2024,

- 165; 112216.
- [10] 张清, 郑丹, 许宪硕. 中国能源碳足迹生态压力变动的因素分解研究. 干旱区资源与环境, 2015, 29(4): 41-46.
- [11] 彭俊铭, 吴仁海. 基于 LMDI 的珠三角能源碳足迹因素分解. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(2): 69-74.
- [12] Sun J X, Sun S K, Yin Y L, Wang Y B, Zhao J F, Tang Y H, Wu P T. Decoupling trend and drivers between grain water-carbon footprint and economy-ecology development in China. *Agricultural Systems*, 2024, 217: 103904.
- [13] Shi C Q, Murshed M, Alam M M, Ghardallou W, Balsalobre-Lorente D, Khudoykulov K. Can minimizing risk exposures help in inhibiting carbon footprints? The environmental repercussions of international trade and clean energy. *Journal of Environmental Management*, 2023, 347: 119195.
- [14] Chen L, Ma R. Clean energy synergy with electric vehicles: Insights into carbon footprint. *Energy Strategy Reviews*, 2024, 53: 101394.
- [15] 郑德凤, 刘晓星, 王燕燕, 吕乐婷. 中国省际碳足迹广度、深度评价及时空格局. 生态学报, 2020, 40(2): 447-458.
- [16] Li H, Hu S Q, Tong H L. Carbon footprint of household meat consumption in China: a life-cycle-based perspective. *Applied Geography*, 2024, 169: 103325.
- [17] 苏冰涛. 中国城乡居民食品消费碳足迹的变化趋势. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(3): 13-22.
- [18] 马海波. 双碳目标下自助餐饮食碳足迹研究. 干旱区资源与环境, 2022, 36(9): 106-112.
- [19] 柳君波, 徐向阳, 李思雯. 中国电力行业的全周期碳足迹. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(1): 31-41.
- [20] Li C Z, Tam V W, Lai X L, Zhou Y J, Guo S. Carbon footprint accounting of prefabricated buildings: a circular economy perspective. *Building and Environment*, 2024, 258: 111602.
- [21] 尚杰, 杨滨键. 区域农业碳足迹动态影响效应研究——以潍坊市种植业为例. 农村经济, 2020(5): 75-82.
- [22] Huo Y W, Mi G H, Zhu M Y, Chen S, Li J, Hao Z H, Cai D Y, Zhang F S. Carbon footprint of farming practices in farmland ecosystems on the North and Northeast China Plains. *Journal of Environmental Management*, 2024, 354: 120378.
- [23] 王珊珊, 张寒, 杨红强. 中国人造板行业的生命周期碳足迹和能源耗用评估. 资源科学, 2019, 41(3): 521-531.
- [24] 余金艳, 张英男, 刘卫东, 王焱, 姜懿轩, 张亚辉. 电商快递包装箱的碳足迹空间分解和隐含碳转移研究. 地理研究, 2022, 41(1): 92-110.
- [25] 张晓娣, 范磊. 上海 FDI 碳足迹测度与分解——基于区分内外资企业异质性的省际投入产出表. 上海经济研究, 2024, (6): 99-113.
- [26] Giusti G, Galo N R, Tóffano Pereira R P, Lopes Silva D A, Filimonau V. Assessing the impact of drought on carbon footprint of soybean production from the life cycle perspective. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 425: 138843.
- [27] Wei Y B, Chen Y X, Yang L M, Ramaswami A, Chen W Q, Tong K K. Tracking a Chinese megacity's community-wide carbon footprint and driving forces from a multi-infrastructure perspective. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 460: 142420.
- [28] 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.
- [29] Sommer M, Kratena K. The carbon footprint of European households and income distribution. *Ecological Economics*, 2017, 136: 62-72.
- [30] 严燕, 季国军, 胡乃娟, 陈留根, 郑建初, 胡锋. 长江下游稻田不同种植制度的碳足迹分析. 长江流域资源与环境, 2024, 33(7): 1462-1473.
- [31] 韩欣怡, 韩雪, 李廷亮, 李迎春, 李阔. 中国马铃薯分省碳足迹核算与减排策略研究——基于生命周期评价法. 中国农业资源与区划, 2024(1): 11-19.
- [32] 戴林秀, 徐强, 彭翔, 李京咏, 周影, 黄佳敏, 敖弟彩, 窦志, 高辉. 稻渔共作模式碳足迹评价及减排对策分析. 长江流域资源与环境, 2023, 32(9): 1971-1980.
- [33] 马海波, 朱强. 基于生命周期评价的我国稻米碳足迹核算. 干旱区资源与环境, 2023, 37(6): 11-19.
- [34] Liu X R, Wang K. The inequality of household carbon footprint in China: a city-level analysis. *Energy Policy*, 2024, 188: 114098.
- [35] 庞军, 高笑默, 石媛昌, 石媛昌, 孙文龙. 基于 MRIO 模型的中国省级区域碳足迹及碳转移研究. 环境科学学报, 2017, 37(5): 2012-2020.
- [36] Broner F, P Bustos, V.M. Carvalho. Sources of Comparative Advantage in Polluting Industries. *National Bureau of Economic Research*, 2012, No.18337.
- [37] 吴文佳, 蒋金亮, 高全洲, 蒋海兵. 2001—2009 年中国碳排放与碳足迹时空格局. 生态学报, 2014, 34(22): 6722-6733.
- [38] 闫云凤. 京津冀碳足迹演变趋势与空间、产业分布. 经济与管理研究, 2016, 37(11): 75-81.
- [39] 周国富, 宫丽丽. 京津冀能源消耗的碳足迹及其影响因素分析. 经济问题, 2014, (8): 27-31.
- [40] 薛秀峰, 张仕超, 张焯赞, 张湘. 近 24 年三峡水库库尾重庆市江津区耕地利用碳汇及碳足迹变化. 中国农业资源与区划, 2024, 45(01): 139-149.
- [41] 叶文伟, 王城城, 赵从举, 郑熊. 近 20 年海南岛热带农田生态系统碳足迹时空格局演变. 中国农业资源与区划, 2021, 42(10): 114-126.
- [42] 孙丽文, 韩莹, 杜娟. 京津冀高能耗产业碳足迹的影响因素——基于 de Bruyn 模型. 技术经济, 2019, 38(8): 86-92, 118.