DOI: 10.20103/j.stxb.202304290904

陈靖松,张建军,李金龙,李山.京津冀地区碳排放时空格局变化及其驱动因子.生态学报,2024,44(6):2270-2283. Chen J S, Zhang J J, Li J L, Li S.Spatio-temporal pattern of carbon emissions and its driving factors in the Beijing-Tianjin-Hebei region. Acta Ecologica Sinica,2024,44(6):2270-2283.

京津冀地区碳排放时空格局变化及其驱动因子

陈靖松1,张建军1,2,*,李金龙1,李山1

1 中国地质大学(北京)土地科学技术学院,北京 100083
 2 自然资源部土地整治重点实验室,北京 100083

摘要:人类对陆地生态系统的改变是碳排放增加的主要原因。在"双碳"目标背景下探索土地利用变化与碳排放的动态关系, 有助于区域土地低碳可持续利用。研究基于土地利用转移视角,采用重心-标准差椭圆方法揭示了京津冀地区土地利用碳排放 时空格局演化特征,评估了碳排放与生态环境、社会经济发展的协调程度,并借助改进的 Kaya 模型和 LMDI 分解模型定量分析 了土地利用变化对碳排放的影响程度。结果表明:(1)建设用地的转入是土地利用碳排放增加的主要来源,引起碳排放量增加 15844.36 万 t;耕地、草地向林地、水域的转变促进了地区固碳能力的提升。(2)土地利用碳排放空间分布格局呈现出东北-西南 方向向中心进一步聚集的趋势,并且东-西向聚集趋势大于南-北向。(3)京津冀地区整体碳排放与生态环境的协调性呈向好趋 势发展,但大部分地区碳排放与社会经济发展出现失衡现象,地区间碳生产力差异逐渐增大。(4)经济水平是促进碳排放增加 的最显著因素,单位 GDP 用地强度是抑制碳排放增加的最主要因素。分析结果表明,严格控制建设用地的无序扩张是促进低 碳土地利用的基础,低碳经济发展是促进地区减碳的重要途径。

关键词:城市群;土地利用;碳排放;Logarithmic Mean Divisia Index

Spatio-temporal pattern of carbon emissions and its driving factors in the Beijing-Tianjin-Hebei region

CHEN Jingsong¹, ZHANG Jianjun^{1,2,*}, LI Jinlong¹, LI Shan¹

1 School of Land Science and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

2 Key Laboratory of Land Reclamation, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China

Abstract: Human-induced terrestrial ecosystem modification is a significant cause of the increased carbon emissions. Consequently, in the context of carbon peaking and carbon neutrality goals, exploring the dynamic relationship between land use change and carbon emissions is conducive to low-carbon and sustainable utilization of regional land. From the perspective of land use transfer, this study uses gravity-standard deviational ellipse method to reveal the spatio-temporal pattern evolution of carbon emissions from land use in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region. At the same time, the coordination degree between carbon emissions, ecological environment, and socioeconomic development is rationally evaluated by utilizing the Economy Contributive Coefficient and Ecological Support Coefficient. In addition, this paper also applies the modified Kaya and Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI) models to quantitatively analyze the influence extent of land use change on carbon emissions, causing an increase in carbon emissions of 158.44 million, while the transfer of arable land and grassland to forest and water body enhanced the regional carbon sequestration capacity. (2) The land-use carbon emissions exhibited a spatial distribution pattern with northeast-southwest direction that converged towards the

收稿日期:2023-04-29; 网络出版日期:2023-12-28

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFE0117900)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhangjianjun_bj@ 126.com

center, and the aggregation trend in the east-west direction exceeded that in the south-north. The total transfer distance of the net carbon emission center was 15.15km, of which 13.21km to the east and 6.41km to the north, with a 14.22% decrease in the standard deviation ellipse area, from 2005 to 2020. (3) The coordination between carbon emissions and the ecological environment in the BTH region was improving, but the imbalance between carbon emissions and socioeconomic development appeared in most cities, resulting in a widening disparity in carbon productivity among cities. (4) The influence direction of each driving factor on the carbon emissions of the BTH region as a whole and each individual city was approximately the same, but the influence strength of each driving factor varied for different areas due to the discrepancies in carbon emissions levels. Among which the economic level played a major role in promoting carbon emissions, while the land use intensity per unit of GDP emerged as the primary factor in mitigating the rise of carbon emissions. The analysis indicates that effectively managing the uncontrolled expansion of built-up land is the basis of promoting low-carbon land use, and promoting the development of a low-carbon economy is a significant approach to facilitate regional carbon reduction.

Key Words: city cluster; land use; carbon emissions; Logarithmic Mean Divisia Index

土地利用和覆盖变化是引起碳排放的重要来源,约占人类活动碳排放量的三分之一^[1-2]。研究土地利用 碳排放是当前热点^[3-7],一些学者评估了特定土地利用类型的碳排放量^[8-11],并对土地利用碳排放变化进行 了预测^[12-15];另有部分学者开展了对碳排放的时空效应研究^[16-17],发现区域农业碳排放出现显著的空间溢 出效应^[18],中国建设用地碳排放强度出现空间失衡^[19],全球城市用地与碳排放的重心向东移动且二者出现 脱钩趋势^[20];此外,还有部分研究聚焦于土地利用碳排放影响机制分析^[21-22],证明城市化、能源强度、人口规 模、技术水平等均与土地利用碳排放密切相关^[23-27]。土地利用方式改变也会影响土地利用碳排放^[28]。但现

有研究对二者动态特征的探索不足,缺乏从土地利用角 度对碳排放内在驱动机制的分析。因此,本研究以京津 冀地区为研究对象,明确了土地利用变化与碳排放的动 态关系,阐明了土地利用碳排放变化的内在驱动机制, 并尝试回答了以下问题:(1)土地利用变化引起碳排放 格局如何变化?(2)土地利用碳排放与社会经济、生态 环境的协调程度如何,是否发生变化?(3)哪些因素更 易与碳排放产生关联,各影响因素对区域与城市个体的 影响是否一致?

1 研究区与数据

1.1 研究区概括

京津冀地区位于华北平原北部(图1),是我国北方 经济增长"第一极",地区发展极具活力。但当前京津 冀地区仍然存在土地利用不合理、碳排放压力大等问 题,限制了地区高质量发展^[29]。因此,本研究选取北京 市、天津市以及河北省11个城市作为研究对象,旨在为 促进京津冀低碳经济发展提供坚实科学依据。

1.2 数据

本文采用的行政边界及土地利用数据均来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.



图 1 研究区示意图 Fig.1 Schematic diagram of study area

cn),栅格数据精度为1km。根据《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017)及研究区实际情况,基于 ArcGIS10.3 重分类工具将土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6个大类,利用行政 边界矢量数据进行裁剪获得京津冀地区各地级市土地面积数据。地区生产总值、单位 GDP 能耗、人口等社会 经济数据来源于京津冀各地级市 2005—2020 年《统计年鉴》。

2 研究方法

2.1 碳排放时空特征分析

在土地利用碳排放时空特征分析方面,本文采用碳排放系数法估算各城市土地利用碳排放量,拟通过土 地利用转移矩阵分析地类转移引起的碳排放转移特征,同时结合重心—标准差椭圆方法探究碳排放重心转移 情况。

2.1.1 碳排放量估算

(1)直接计算

将耕地和建设用地作为碳源,林地、草地、水域和未利用地作为碳汇。采用直接碳排放系数法测算耕地、 林地、草地、水域、未利用地的碳排放量,计算公式为:

$$CE_{an} = \sum CE_i = \sum A_i \times \gamma_i \tag{1}$$

式中, CE_{an} 为第n 市的直接碳排放量; CE_i , A_i , γ_i 分别为第i 种土地利用类型的碳排放量、面积与碳排放系数, 碳排放系数是在京津冀及周边地区研究基础上通过求取平均所得(表1)。

(2)间接计算

建设用地承载了大量人类活动,一般通过其利用过程中的能源消耗进行间接估算。参考现有研究成果^[30],以单位 GDP 能耗为基础估算各市建设用地碳排放量,计算公式为:

$$CE_{hn} = E_n \times \beta = \text{GDP}_n \times \alpha_n \times \beta \tag{2}$$

式中, CE_{bn} , E_n , GDP_n , α_n 分别为第 n 市的间接碳排放量、能源消耗总量、地区生产总值与单位 GDP 能耗, β 为标准煤的碳排放系数(表 1)。

Table 1 Carbon emission coefficient of different land use type and standard coal								
类型 Type	碳排放系数 Carbon emission coefficient	单位 Unit	参考 Reference					
耕地 Arable land	0.4595	t/hm ²	Cui 等 ^[31] 、孙雷刚等 ^[32]					
林地 Forest	-0.6125	t∕hm²	Wang 等 ^[33] 、Zhou 等 ^[34]					
草地 Grassland	-0.0215	t∕hm²	Zhou 等 ^[34] 、孙贤斌 ^[35]					
水域 Water body	-0.2523	t∕hm²	Zhou 等 ^[34] 、Wei 等 ^[36]					
未利用地 Unused land	-0.005	t/hm ²	Zhou $\ensuremath{\mathfrak{F}^{[34]}}$,Liu and $\ensuremath{Zhang^{[37]}}$					
标准煤 Standard coal	0.67	tc/tce	国家发改委能源研究所					

表1 不同用地类型及标准煤的碳排放系数

2.1.2 土地利用转移矩阵与碳排量转移矩阵构建

(1)土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵主要通过建立二维矩阵,反映区域研究期初、末阶段各土地利用类型间的转移情况,表达式如下:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1m} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{m1} & A_{m2} & \cdots & A_{mm} \end{bmatrix}$$
(3)

式中, A_{ii} 表示第 i 种地类转化为第 j 种地类的面积(hm²), m 为土地利用类型数。

土地利用碳排放转移量计算公式如下:

$$CE_{ij} = (\gamma_T - \gamma_0) \times A_{ij} \tag{4}$$

式中, *CE_{ij}* 是第*i* 种地类转化为第*j* 种地类所引起的碳排放变化量, γ₀, γ₇ 分别表示土地类型转移前、后的碳 排放系数(建设用地碳排放系数为间接碳排放量与建设用地面积的商值)。

2.1.3 空间演化特征分析

重心-标准差椭圆方法是空间统计中研究方向分布的经典方法,能够精确揭示各类权重要素的中心性、方向性、展布性等空间分布特征^[38-39],现已广泛应用于社会、经济学等研究领域^[40-41]。本文拟采用该方法探究 京津冀地区碳排放空间分布演化过程,核心参数计算公式如下:

加权重心:

$$\overline{X_{\omega}} = \frac{\sum_{k=1}^{n} \omega_k x_k}{\sum_{k=1}^{n} \omega_k}; \quad \overline{Y_{\omega}} = \frac{\sum_{k=1}^{n} \omega_k y_k}{\sum_{k=1}^{n} \omega_k}$$
(5)

X轴标准差:

$$\sigma_{x} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{n} (w_{k} \ \tilde{x_{k}} \cos\theta - w_{k} \ \tilde{y_{k}} \sin\theta)^{2}}{\sum_{k=1}^{n} w_{k}^{2}}}$$
(6)

Y轴标准差:

$$\sigma_{y} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{n} (w_{k} \ \tilde{x_{k}} \sin\theta - w_{k} \ \tilde{y_{k}} \cos\theta)^{2}}{\sum_{k=1}^{n} w_{k}^{2}}}$$
(7)

方位角:

$$\tan\theta = \frac{\left(\sum_{k=1}^{n} w_{k}^{2} \, \widetilde{x_{k}}^{2} - \sum_{k=1}^{n} w_{k}^{2} \, \widetilde{y_{k}}^{2}\right) + \sqrt{\left(\sum_{k=1}^{n} w_{k}^{2} \, \widetilde{x_{k}}^{2} - \sum_{k=1}^{n} w_{k}^{2} \, \widetilde{y_{k}}^{2}\right)^{2} + 4\sum_{k=1}^{n} w_{k}^{2} \, \widetilde{x_{k}}^{2} \, \widetilde{y_{k}}^{2}}{2\sum_{k=1}^{n} w_{k}^{2} \, \widetilde{x_{k}}^{2} \, \widetilde{y_{k}}}$$
(8)

式中, (x_k, y_k) 代表研究对象的空间位置; $(\tilde{x_k}, \tilde{y_k})$ 代表研究对象距平均中心的坐标偏差; $(\overline{X_{\omega}}, \overline{Y_{\omega}})$ 表示净 碳排的加权平均中心; ω_k 表示权重,本文以净碳排放量为权重。

2.2 碳平衡分析

从经济效益和生态承载两方面开展碳平衡分析,可以有效评估地区碳排放与社会经济、生态环境的协调 发展程度,为制定适宜各地区的减排策略提供有力科学理论支撑。

(1) 经济贡献系数

经济贡献系数(Economy Contributive Coefficient, ECC)^[42]可以衡量区域碳排放对经济效益的贡献程度, 反映区域碳生产力大小,计算公式如下:

$$ECC = \frac{GDP_n}{\sum_{n} GDP_n} / \frac{C_n}{\sum_{n} C_n}$$
(9)

式中, *C_n* 表示第 *n* 市碳源地类的碳排放总量; ECC > 1 说明该市拥有较高的能源利用效率和碳生产力。 (2) 生态承载系数

生态承载系数(Ecological Support Coefficient, ESC)^[42]可以衡量区域碳吸收的贡献度,反映区域碳补偿率

的大小,计算公式如下:

$$ESC = \frac{CS_n}{\sum_n CS_n} / \frac{C_n}{\sum_n C_n}$$
(10)

式中, CS_n 表示第 n 市碳汇地类的碳吸收总量; ESC > 1 说明该市碳补偿率较高。

2.3 碳排放驱动因子分析

此部分对 Kaya 模型进行了改进,从土地利用视角探究土地利用变化对碳排放的影响,并在此基础上结合 LMDI 分解法量化各驱动因子对碳排放的贡献程度。

2.3.1 Kaya 模型改进

基于土地利用视角,在社会、经济传统要素基础上,加入土地碳排放强度、土地利用结构和单位 GDP 用地 强度等因素对该模型进行扩展,修正后的表达式如下:

$$CE = \sum_{i} \frac{CE_{i}}{A_{i}} \times \frac{A_{i}}{A} \times \frac{A}{\text{GDP}} \times \frac{\text{GDP}}{\text{POP}} \times \text{POP}$$
(11)

式中, CE, A, GDP, POP 分别表示研究对象的土地利用碳排放总量、土地利用总面积、地区生产总值和总人口数。

2.3.2 因素分解模型

对数均值迪氏指数分解法(LMDI)是由 Ang 首次提出,具有操作简单、适应性强、分解无残差等优点。该 方法分为乘法分解与加法分解两种形式,最终计算结果一致。本文在 Kaya 模型分解的基础上,采用加法分解 法分析各驱动因子对京津冀地区碳排放的影响程度,将式(11)改为:

$$CE = \sum_{i} \frac{CE_{i}}{A_{i}} \times \frac{A_{i}}{A} \times \frac{A}{\text{GDP}} \times \frac{\text{GDP}}{\text{POP}} \times \text{POP} = \sum_{i} f_{i} \times s_{i} \times g \times e \times p$$
(12)

式中, $f_i = CE_i/A_i$ 代表土地碳排放强度, $s_i = A_i/A$ 代表土地利用结构, g = A/GDP代表单位 GDP 用地强度, e = GDP/POP表示经济水平, p = POP代表人口规模。

本文用 CE^0 表示基期土地利用碳排放总量, CE^T 表示第 T 期土地利用碳排放总量, ΔCE 表示第 T 期相当 于基期的碳排放变化总效应。

$$\Delta CE = CE^{T} - CE^{0} = \Delta CE_{f_{i}} + \Delta CE_{s_{i}} + \Delta CE_{g} + \Delta CE_{e} + \Delta CE_{p}$$
(13)

式中, ΔCE_{f_i} , ΔCE_{s_i} , ΔCE_{e} , ΔCE_{e} , ΔCE_{e} , ΔCE_{p} 分别代表土地碳排放强度、土地利用结构、单位 GDP 用地强度、经济水 平和人口规模因素对碳排放变化的分效应。

各因素差分分解结果及分解因素贡献率表达式如下:

$$\Delta CE_{f_i} = \sum_i \frac{CE_i^T - CE_i^0}{\ln CE_i^T - \ln CE_i^0} \ln \left(\frac{f_i^T}{f_i^0}\right)$$
(14)

$$\Delta CE_{s_i} = \sum_i \frac{CE_i^T - CE_i^0}{\ln CE_i^T - \ln CE_i^0} \ln \left(\frac{s_i^T}{s_i^0}\right)$$
(15)

$$\Delta CE_g = \sum_i \frac{CE_i^T - CE_i^0}{\ln CE_i^T - \ln CE_i^0} \ln\left(\frac{g^T}{g^0}\right)$$
(16)

$$\Delta CE_e = \sum_i \frac{CE_i^T - CE_i^0}{\ln CE_i^T - \ln CE_i^0} \ln\left(\frac{e^T}{e^0}\right)$$
(17)

$$\Delta CE_{p} = \sum_{i} \frac{CE_{i}^{T} - CE_{i}^{0}}{\ln CE_{i}^{T} - \ln CE_{i}^{0}} \ln\left(\frac{p^{T}}{p^{0}}\right)$$
(18)

$$K_{f/s/g/e/p} = (\Delta C E_{f/s/g/e/p} / \Delta C E) \times 100\%$$
(19)

式中, *K*_{f/s/g/e/p} 分别表示土地碳排放强度、土地利用结构、单位 GDP 用地强度、经济水平和人口规模因素的贡献率。

http://www.ecologica.cn

3 结果分析

3.1 土地利用时空格局变化

京津冀地区地类大面积转换发生在 2015—2020 年间,且以耕地和建设用地变化最为明显(图 2)。其中, 耕地减少 9.1×10⁵hm²,建设用地增加 8.5×10⁵hm²,耕地是建设用地增加的主要来源。空间上,具有碳汇功能 的地类呈现向西北转移的趋势,具有碳排功能的地类在各地市区中心出现明显扩散现象。其中,中腹部和东





图 2 土地利用变化时空特征 Fig.2 Spatio-temporal characteristics of land use change

http://www.ecologica.cn

南部土地类型变化以建设用地转入为主,西北部以林、草地转入为主。

3.2 土地利用碳排放时空演变特征

3.2.1 土地利用碳排放转移

土地利用变化引起的土地面积转移与碳排放转移特征基本一致(表 2)。碳源地类转变方面,耕地向碳汇 地类转移较少,大部分转变为建设用地,引起转移碳排放量增加 15844.36 万 t;建设用地向碳汇地类的转移则 导致碳排放量减少 2315.45 万 t,一定程度上缓解了区域碳排放压力。碳汇地类转变方面,研究期内碳汇地类 向林地等具有较强碳汇能力的地类转移较多,向碳源地类转移较少,促进了地区碳汇能力的提升。

Table 2 Ca	arbon emission	changes caused by	y land use chang	e in the Beijing-	Tianjin-Hebei re	gion from 2005 to	2020
2005				2020			
2003	耕地	林地	草地	建设用地	水域	未利用地	累计
耕地 Arable land	_	-48.61	-33.14	15844.36	-15.29	-1.74	15745.58
林地 Forest	39.72	—	38.24	900.07	0.95	0.21	979.20
草地 Grassland	31.77	-41.06	_	1349.37	-1.03	0.03	1339.07
建设用地 Built-up land	-7500.70	-298.69	-454.79	—	-1507.19	-54.78	-9816.15
水域 Water body	11.67	-1.22	1.11	757.06		1.12	769.74
未利用地 Unused land	3.73	-0.40	-0.05	148.99	-0.35	—	151.92
累计 Accumulation	-7413.81	-389.99	-448.63	18999.84	-1522.91	-55.15	_

表 2 2005—2020 年京津冀地区土地利用类型转变引起的碳排放变化/万 t

3.2.2 碳源、碳汇时序变化特征

京津冀地区土地利用碳排放量整体呈先上升后下降趋势,碳吸收量呈缓慢上升趋势(图3)。2010年前 为碳排放快速增长阶段,该时期能源消耗加剧,以北京、天津、唐山等城市为重要增长点的地区城镇用地加速 扩张,导致碳排放量快速增长;2010年后为碳排放下降阶段,该时期新能源的开发利用降低了传统化石能源 能耗,同时科技水平的提升提高了能源利用效率,因此建设用地碳排放强度大幅下降,地区碳排放量呈下降趋 势。近年来,京津冀地区"退稻还旱"、永定河综合治理等生态保护修复工程的实施增加了地区森林、水域面 积,促进了地区碳汇能力的提升,因此碳汇量有所增加。







3.2.3 碳排放空间格局演变

(1)空间分布差异

京津冀地区土地利用碳排放总体呈现"东南高西北低"的分布特征(图4)。固碳区连续分布于京津冀地

区的西北部,间隙分布于西南部城镇区周边;排碳区主要分布在中腹部和东南部人类活动密集区,且具有明显 扩张趋势。其中,北京、天津、唐山等城市碳排放空间分布扩张明显,是主要的碳源地;承德、张家口碳排放空 间分布较稳定,为主要的碳汇功能区。



图 4 碳排放量空间分布图 Fig.4 Spatial distribution of carbon emissions

(2)空间格局演化

2005—2020年,京津冀地区净碳排标准差椭圆方位角偏移了 0.86°,净碳排放中心从 2005年的霸州市转移至 2020年的永清县,转移总距离为 15.15km(表 3、表 4 和图 5)。其中椭圆中心向东移动 13.21km,向北移动 6.41km,表明京津冀东北地区碳排放强度逐渐增强。同时,标准差椭圆面积在研究期内呈下降趋势,长轴与短轴由 2005年的 237361.22m、111394.69m分别缩小至 2020年的 212119.72m、106919.19m,面积下降 14.22%,周长下降 9.01%,说明此阶段京津冀地区净碳排的空间分布格局呈现出东北—西南方向向中心进一步聚集的趋势。另外,扁率出现微弱的变小趋势,说明东—西向聚集趋势略大于南—北向。

Table 3	Transfer of net carbon emission center in	the Beijing-Tianjin-Hebei region	from 2005 to 2020
年份 Year	2005—2010	2010—2015	2015—2020
中心位移距离 Displacement/	⁷ km 5.97	3.61	5.57

表 3 2005—2020 年京津冀地区净碳排放中心转移

表 4	2005-2020	年京津冀地区净碳排标准差椭圆参数
1X =	2003-2020	十不住 美地区伊姆市你住在 佣凶罗奴

Tal	Table 4 Standard deviation elliptic parameters of net carbon emissions in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2005 to 2020								
年份 Year	面积/km ² Area	周长/km Length	X 坐标/(°) Center X	Y 坐标/(°) Center Y	X 轴长度/m X StdDist	Y 轴长度/m Y StdDist	方位角/(°) Azimuths	扁率 Oblateness	
2005	83057.58	1131.64	449759.09	4333254.09	111394.69	237361.22	40.89	0.53	
2010	84918.38	1142.19	455664.53	4334143.68	113030.80	239165.96	42.07	0.53	
2015	73300.71	1052.16	458289.21	4336625.97	106815.56	218456.96	41.53	0.51	
2020	71243.70	1029.69	462988.10	4339617.06	106919.19	212119.72	41.75	0.50	

3.3 京津冀地区土地利用碳平衡格局变化

京津冀地区各市的碳生产力存在明显差异,且这种差异正逐渐增强,整体呈现出"核高翼低"的分布特征 (图 6)。研究期内,除北京的经济贡献系数出现略微增长以外,其余大部分城市均呈下降趋势。说明大部分 地区消耗能源产生的经济效益与碳排放量不匹配,碳排放与社会经济发展失衡,城市间发展差距正逐渐增大。 研究区碳补偿率空间分布呈现出"西北高东南低"的特征,与碳排放空间分布特征正好相反(图 7)。除廊坊、



图 5 2005—2020 年京津冀地区净碳排空间格局演化

Fig.5 Spatial pattern evolution of net carbon emissions in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2005 to 2020



图 6 碳生产力分布特征演变



衡水等部分城市生态承载系数出现略微下降外,其余大部分城市生态承载系数均出现不同程度的增长,说明 京津冀地区生态环境协同治理成效显著,碳源得到一定控制,碳汇能力有所增强,地区碳补偿率差异正逐渐 缩小。

3.4 土地利用碳排放驱动因子分析

3.4.1 京津冀地区整体碳排放驱动因子分析

2005—2020年,土地利用结构、经济水平与人口规模三个驱动因子对京津冀地区土地利用碳排放具有促进作用,土地碳排放强度与单位 GDP 用地强度则对碳排放起抑制作用(表5)。其中经济水平为主要推动力,贡献值超过土地利用结构与人口规模之和,为30298.4万t,贡献率高达359.2%;单位 GDP 用地强度为主要负效抑制因子,贡献值超过经济水平,高达-34027.1万t,贡献率绝对值也高达403.5%。

2279



图 7 碳补偿率分布特征演变

Fig.7 The evolution of distribution characteristics of carbon compensation rate

表 5	2005-2020	年京津冀地区碳排放驱动因素贡献值
-----	-----------	------------------

Table 5Contribution of land-use carbon emission driving factors in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2005 to 2020

指标	贡献值 Contribution/(万 t)				贡献率 Contribution rate/%			
Index	2005—2010	2010—2015	2015—2020	2005-2020	2005—2010	2010—2015	2015—2020	2005—2020
土地碳排放强度 Carbon emission intensity	10655.5	-2862.5	-11468.1	-1482.1	91.9	204.7	649.5	-17.6
土地利用结构 Land use structure	942.5	1464.2	9702.4	9916.2	8.1	-104.7	-549.5	117.6
单位 GDP 用地强度 Land use intensity per unit of GDP	-17425.2	-13269.0	-8119.1	-34027.1	-150.2	949.0	459.8	-403.5
经济水平 Economic level	14842.5	11567.4	8152.6	30298.4	128.0	-827.3	-461.7	359.2
人口规模 Population size	2582.7	1701.6	-33.6	3728.8	22.3	-121.7	1.9	44.2

3.4.2 京津冀地区各市碳排放驱动因子分析

各驱动因子对京津冀地区整体与各市碳排放的影响方向大致相同,影响程度因各地碳排放量不同而存在 一定差异(图 8)。2005—2015 年,经济水平是京津冀地区所有城市土地利用碳排放的主要推动力;但在 2015—2020 年,土地利用结构对碳排放的贡献值迅速升高,除北京、天津与唐山以外,已取代经济水平成为其 余城市促进碳排放的新型主导因素。各市土地碳排放强度对碳排放的影响均经历了从正向促进向负效抑制 的转变。单位 GDP 用地强度则始终保持抑制作用,是减缓碳排放和环境压力的最重要驱动因子。人口规模 对碳排放的促进作用较弱,但不可忽视其作用。

4 讨论

4.1 土地利用与碳排放动态关系

2005—2020年,京津冀地区土地利用碳排放呈现先上升后下降的趋势。2005—2010年是地区土地城镇 化加速发展时期^[43],城镇用地快速扩张促使人口增长,进一步加剧了能源消耗,导致各地碳排放量快速上升。 但在 2010年后,随着主体功能区规划以及最严厉的耕地保护政策的落实,京津冀地区城市用地扩张强度明显 下降,城市用地增长逐渐向有序扩张转变^[44];同时京津冀协同发展战略推动了地区产业转移升级,降低了经 济发展的能源消耗水平,因此地区碳排放量的高速增长得到有效遏制。另外,以疏解北京非首都功能为"牛



图 8 2005—2020 年京津冀各城市碳排放驱动因子贡献值

Fig.8 Contribution of carbon emission driving factors by cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2005 to 2020

鼻子",北京大部分高能耗产业逐渐疏解至天津、河北唐山等地,缓解了首都发展压力,一定程度上促进了建 设用地的有序扩张。高能耗意味着高碳排,但低碳经济的发展促进了产业转型,降低了企业能耗,因此碳排放 中心会随工业用地的迁移而变化,但地区碳排放量并未因建设用地的扩张而急剧增加。

4.2 碳排放与社会经济、生态环境协调性

研究发现,京津冀各地区碳生产力差异正逐渐增强,但碳补偿率差异正逐渐缩小。这是因为北京处于城 镇化高级发展阶段^[45],第二、三产业发达,地区相关技术人才占比多,能有效推动区域绿色技术创新,加速减 碳进程^[46],促进碳生产力的提高。天津、河北等地虽然承接北京第二产业转移带动了经济发展,但此时产业 内部结构尚未完成优化,经济发展滞后于碳排水平^[47],导致地区碳排放与经济发展呈现失衡状态,碳生产力 差异也因此逐渐增大。但这种差异会随产业结构的优化而逐渐缩小,因此津冀两地应抓住京津冀协同发展机 遇,深化区域合作,加快产业布局优化调整。自 2016年山水林田湖草生态保护修复工程实施以来,京津冀地 区森林生态系统面积有所增加,碳汇能力和潜力得到有效改善^[48]。碳排强度降低,碳汇能力提升,因此地区 碳补偿率逐渐增大,碳排放与生态环境的协调发展程度逐渐好转。

4.3 碳排放归因分析

土地碳排放强度对碳排放的影响从促进转向抑制,主要归因于地区碳源用地能耗的下降以及碳汇用地固 碳能力的提升。经济水平一直是促进京津冀地区碳排放增长的主要因子,但其作用强度却在逐渐下降。这是 因为"十一五"期间,各地加快经济结构调整和增长方式转变;2014年京津冀协同发展战略的实施,进一步促 进了高能耗产业的迁移转型。因此,近年来京津冀地区经济快速增长的同时单位 GDP 能耗不断下降,地区碳 排放量在 2010年后呈下降趋势,碳排放与经济增长的脱钩关系逐渐增强^[49],由经济增长带来的碳排放量增 加也因此得到减缓。由于产业迁移涉及建设用地的大量转移,导致河北大部分建设用地迁入地的转移碳排放 量增加,因此土地利用结构对碳排放的促进作用逐渐增强。但这种增强效应是暂时的,随着京津冀地区协同 发展不断向纵深推进,社会经济发展步入新常态转型阶段后,经济发展对用地扩张的依赖性会逐渐减弱^[43], 土地利用结构变化导致的碳排放效应也会因此逐渐减弱。经济和科技发展水平的不断提升,会提高资源的高 效利用,促进土地利用效率的提升^[50],进而导致单位 GDP 用地强度的衰弱,因此生产单位 GDP 所产生的碳 排放量逐渐下降,对碳排放增长的抑制作用逐渐增强。人口规模对碳排放的促进作用较弱但不可忽视。北京 市"十二五"节能减排全民行动计划的实施,促进了居民文明节约、绿色低碳生活习惯的养成,对于地区减缓 碳排放增长具有积极作用。

4.4 不足与展望

本文以京津冀地区作为研究对象,深入分析了土地利用变化对碳排放的影响,为区域低碳土地利用提供 了坚实科学依据。相较于既有研究,本研究的主要贡献在于:①明确了城市群土地利用变化与碳排放的动态 关系;②揭示了碳排放与生态环境、社会经济发展协调关系的变化特征;③明晰了土地利用视角下碳排放的内 在驱动机制;④在城市群尺度基础上增加了区域内碳排放的横向对比,为各地因地制宜制定减排策略提供了 科学参考。但本研究仍存在以下不足:①虽然土地利用碳排放系数通过求取平均可减少单一计算误差的不良 影响^[51],但受各地自然植被生长状况、人类干预程度等影响,不同地区不同地类碳排/汇能力存在一定差异, 未来可根据京津冀地区实际情况进行深入研究,探索更适合京津冀各地区的碳排放系数;②本文将土地利用 碳排放限定为土地覆被变化引起的碳排放,缺乏对土地管理措施等影响的考虑;③碳排放还受科技水平、产业 结构等的影响,未来可以通过改良模型探索土地利用变化在更完善指标体系中对碳排放的相对影响。

5 结论与建议

在京津冀协同发展战略背景下,本文进行了京津冀地区土地利用碳排放时空格局及驱动因子研究,主要 结论如下:①建设用地转入是地区碳排放增加的主要来源,同时建设用地迁移还会导致碳排放中心的改变;② 京津冀各地区碳生产力差异逐渐增大,碳补偿率差异逐渐缩小;③各驱动因子对地区整体与城市个体的影响 方向基本一致,其中经济水平对碳排放的促进作用呈现减弱趋势,单位 GDP 用地强度持续保持对碳排放的高 效抑制作用。

综合研究成果,本文提出以下建议:①严控建设用地规模,充分发挥土地利用总体规划管控作用。京津冀 各市应避免建设用地无序扩张,加强对闲置、低效、废弃建设用地等的开发利用,深挖存量建设用地潜力,促进 土地资源的节约集约利用;同时引入碳排放指标进行用地管制,加强用地规划实施中对碳排放的监测和管控。 ②推进生态工程建设,促进地区碳汇潜力与能力提升。以国土空间生态修复为核心,全面统筹"山水林田湖 草沙"全要素,推动构建京津冀生态安全屏障。对于北京、天津等高碳排地区,需加强绿地空间扩建、水体治 理、大气净化等,推进森林城市建设,减少地区碳排放和环境污染。③推动产业转移升级,促进经济协同可持 续发展。被疏解主体北京应充分考虑承接地的现实需求和发展规律,津冀承接地应完善衔接机制,促进非首 都特色功能疏解的精准承接,实现产业的快速重组和优化升级,提高地区碳生产力;同时北京应发挥地区科技 资源优势,全面深化合作,推动区域协同创新,促进经济绿色转型,从而降低经济发展对用地扩张的依赖性,提 高土地资源利用效率,有效抑制碳排放增长。

参考文献(References):

- [1] Houghton R, House J, Pongratz J, Werf G, DeFries R, Hansen M, Le Quéré C, Ramankutty N. Carbon emissions from land use and land-cover change. Biogeosciences, 2012, 9: 5125-5142.
- [2] Chuai X W, Huang X J, Lu Q L, Zhang M, Zhao R Q, Lu J Y. Spatiotemporal changes of built-up land expansion and carbon emissions caused by the Chinese construction industry. Environmental Science & Technology, 2015, 49(21): 13021-13030.
- [3] Li M, Peng J Y, Lu Z X, Zhu P Y. Research progress on carbon sources and sinks of farmland ecosystems. Resources, Environment and Sustainability, 2023, 11: 100099.
- [4] Parsamehr K, Gholamalifard M, Kooch Y, Azadi H, Scheffran J. Impact of land cover changes on reducing greenhouse emissions: site selection,

baseline modeling, and strategic environmental assessment of REDD+ projects. Land Degradation & Development, 2023, 34(10): 2763-2779.

- [5] 冯杰,张胜,王涛.中国省际土地利用碳排放及其影响因素分析.统计与决策,2019,35(5):141-145.
- [6] 杨静媛,张明,多玲花,肖圣,赵昱茜.江西省土地利用碳排放空间格局及碳平衡分区.环境科学研究,2022,35(10):2312-2321.
- [7] Houghton R, Castanho A. Annual emissions of carbon from land use, land-use change, and forestry from 1850 to 2020. Earth System Science Data, 2023, 15: 2025-2054.
- [8] Zuo C C, Wen C, Clarke G, Turner A, Ke X L, You L Z, Tang L P. Cropland displacement contributed 60% of the increase in carbon emissions of grain transport in China over 1990-2015. Nature Food, 2023, 4(3): 223-235.
- [9] 邓路,袁圣博,白萍,李会芳.基于机器学习算法的新疆农业碳排放评估及驱动因素分析.中国生态农业学报:中英文,2023,31(2): 265-279.
- [10] Peng Y, Zhou C Q, Jin Q, Ji M, Wang F Y, Lai Q, Shi R J, Xu X G, Chen L G, Wang G X. Tidal variation and litter decomposition co-affect carbon emissions in estuarine wetlands. Science of the Total Environment, 2022, 839: 156357.
- [11] Yang F, He F N, Li S C, Li M J, Wu P F. A new estimation of carbon emissions from land use and land cover change in China over the past 300 years. Science of the Total Environment, 2023, 863: 160963.
- [12] Arneth A, Sitch S, Pongratz J, Stocker B D, Ciais P, Poulter B, Bayer A D, Bondeau A, Calle L, Chini L P, Gasser T, Fader M, Friedlingstein P, Kato E, Li W, Lindeskog M, Nabel J E M S, Pugh T A M, Robertson E, Viovy N, Yue C, Zaehle S. Historical carbon dioxide emissions caused by land-use changes are possibly larger than assumed. Nature Geoscience, 2017, 10(2): 79-84.
- [13] Xia C Y, Zhang J, Zhao J, Xue F, Li Q, Fang K, Shao Z, Zhang J, Li S, Zhou J. Exploring potential of urban land-use management on carbon emissions—a case of Hangzhou, China. Ecological Indicators, 2023, 146: 109902.
- [14] Wei B H, Kasimu A, Reheman R, Zhang X L, Zhao Y Y, Aizizi Y, Liang H W. Spatiotemporal characteristics and prediction of carbon emissions/ absorption from land use change in the urban agglomeration on the northern slope of the Tianshan Mountains. Ecological Indicators, 2023, 151: 110329.
- [15] 顾汉龙,马天骏,钱凤魁,蔡玉梅.基于 CLUE-S 模型县域土地利用情景模拟与碳排放效应分析.农业工程学报,2022,38(9):288-296.
- [16] Cai C, Fan M, Yao J, Zhou L L, Wang Y Z, Liang X Y, Liu Z Q, Chen S. Spatial-temporal characteristics of carbon emissions corrected by socioeconomic driving factors under land use changes in Sichuan Province, southwestern China. Ecological Informatics, 2023, 77: 102164.
- [17] Wang Q, Yang C H, Wang M L, Zhao L, Zhao Y C, Zhang Q P, Zhang C Y. Decoupling analysis to assess the impact of land use patterns on carbon emissions: a case study in the Yellow River Delta efficient eco-economic zone, China. Journal of Cleaner Production, 2023, 412: 137415.
- [18] Wen C C, Zheng J R, Hu B, Lin Q N. Study on the spatiotemporal evolution and influencing factors of agricultural carbon emissions in the counties of Zhejiang Province. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 20(1): 189.
- [19] Li J, Jiao L M, Li F H, Lu X H, Hou J, Li R P, Cai D W. Spatial disequilibrium and influencing factors of carbon emission intensity of construction land in China. Journal of Cleaner Production, 2023, 396; 136464.
- [20] Chen W X, Gu T C, Fang C L, Zeng J. Global urban low-carbon transitions: Multiscale relationship between urban land and carbon emissions. Environmental Impact Assessment Review, 2023, 100: 107076.
- [21] Kang T T, Wang H, He Z Y, Liu Z Y, Ren Y, Zhao P J. The effects of urban land use on energy-related CO₂ emissions in China. Science of the Total Environment, 2023, 870: 161873.
- [22] Zhang H, Gu P C, Cao G R, He D Q, Cai B F. The Impact of Land-Use Structure on Carbon Emission in China. Sustainability, 2023, 15, 2398.
- [23] Zhao C X, Liu Y L, Yan Z X. Effects of land-use change on carbon emission and its driving factors in Shaanxi Province from 2000 to 2020. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(26); 68313-68326.
- [24] Li J W, Huang X T, Yang T F, Su M Y, Guo L L. Reducing the carbon emission from agricultural production in China: do land transfer and urbanization matter? Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(26): 68339-68355.
- [25] Xia C Y, Li Y, Xu T B, Chen Q X, Ye Y M, Shi Z, Liu J M, Ding Q L, Li X S. Analyzing spatial patterns of urban carbon metabolism and its response to change of urban size: a case of the Yangtze River Delta, China. Ecological Indicators, 2019, 104: 615-625.
- [26] Li Y, Shen J Y, Xia C Y, Xiang M T, Cao Y, Yang J Y. The impact of urban scale on carbon metabolism —a case study of Hangzhou, China. Journal of Cleaner Production, 2021, 292: 126055.
- [27] Xia C Y, Dong Z Y Z, Wu P, Dong F, Fang K, Li Q, Li X S, Shao Z, Yu Z N. How urban land-use intensity affected CO₂ emissions at the County level: influence and prediction. Ecological Indicators, 2022, 145: 109601.
- [28] Taheripour F, Zhao X, Tyner W E. The impact of considering land intensification and updated data on biofuels land use change and emissions estimates. Biotechnology for Biofuels, 2017, 10(1): 1-16.
- [29] 高威,魏建飞,李强.碳排放约束下京津冀地区建设用地利用效率时空演化特征与影响因素研究.地理与地理信息科学,2022,38(5): 88-95.

- [30] 王正,周侃,樊杰.西部地区县域碳排放核算及主体功能区解析——以四川省为例.生态学报,2022,42(21):8664-8674.
- [31] Cui X L, Wei X Q, Liu W, Zhang F, Li Z H. Spatial and temporal analysis of carbon sources and sinks through land use/cover changes in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration region. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2019, 110: 61-70.
- [32] 孙雷刚,刘剑锋,徐全洪,王绍强,周蕾.环京津区域城市碳排放效应及时空格局分析.地理与地理信息科学,2016,32(4):113-118.
- [33] Wang C, Zhan J Y, Zhang F, Liu W, Twumasi-Ankrah M J. Analysis of urban carbon balance based on land use dynamics in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China. Journal of Cleaner Production, 2021, 281: 125138.
- [34] Zhou Y, Chen M X, Tang Z P, Mei Z A. Urbanization, land use change, and carbon emissions: quantitative assessments for city-level carbon emissions in Beijing-Tianjin-Hebei region. Sustainable Cities and Society, 2021, 66: 102701.
- [35] 孙贤斌. 安徽省会经济圈土地利用变化的碳排放效益. 自然资源学报, 2012, 27(3): 394-401.
- [36] Wei J F, Xia L L, Chen L, Zhang Y, Yang Z F. A network-based framework for characterizing urban carbon metabolism associated with land use changes: a case of Beijing city, China. Journal of Cleaner Production, 2022, 371: 133695.
- [37] Liu G, Zhang F. Land zoning management to achieve carbon neutrality: a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, China. Land, 2022, 11(4): 551.
- [38] 于琛, 胡德勇, 曹诗颂, 张旸, 张亚妮, 段欣. 近 30 年北京市 ISP-LST 空间特征及其变化. 地理研究, 2019, 38(9): 2346-2356.
- [39] 杨迪,杨旭,吴相利,曹原赫,周嘉,范大莎,赵程.东北地区能源消费碳排放时空演变特征及其驱动机制.环境科学学报,2018,38 (11):4554-4565.
- [40] 赵璐, 赵作权. 基于特征椭圆的中国经济空间分异研究. 地理科学, 2014, 34(8): 979-986.
- [41] 刘华军, 王耀辉, 雷名雨. 中国战略性新兴产业的空间集聚及其演变. 数量经济技术经济研究, 2019, 36(7): 99-116.
- [42] 卢俊宇,黄贤金,戴靓,陈志刚,李月.基于时空尺度的中国省级区域能源消费碳排放公平性分析.自然资源学报,2012,27(12): 2006-2017.
- [43] 王海军,张彬,刘耀林,刘艳芳,徐姗,邓羽,赵雲泰,陈宇琛,洪松.基于重心-GTWR 模型的京津冀城市群城镇扩展格局与驱动力多维 解析. 地理学报, 2018, 73(6): 1076-1092.
- [44] 李孝永, 匡文慧. 京津冀 1980—2015 年城市土地利用变化时空轨迹及未来情景模拟. 经济地理, 2019, 39(3): 187-194, 200.
- [45] 李智礼, 匡文慧, 赵丹丹. 京津冀城市群人口城镇化与土地利用耦合机理. 经济地理, 2020, 40(8): 67-75.
- [46] 李竹, 王兆峰, 吴卫, 邵海琴. 碳中和目标下中国省域碳平衡能力与城镇化的关系. 自然资源学报, 2022, 37(12): 3136-3152.
- [47] 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.
- [48] 梁森,张建军,王柯,刘时栋.区域生态保护修复碳汇潜力评估方法与应用——基于第一批山水林田湖草生态保护修复工程的研究.生态学报,2023,43(9):3517-3531.
- [49] 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.工业技术经济, 2019, 38(8): 32-40.
- [50] 罗谷松,李涛.碳排放影响下的中国省域土地利用效率差异动态变化与影响因素.生态学报, 2019, 39(13): 4751-4760.
- [51] 何海珊,赵宇豪,吴健生.低碳导向下土地覆被演变模拟——以深圳市为例.生态学报, 2021, 41(21): 8352-8363.