

# 修正碳赤字视阈下京津冀县域生态补偿 时空格局及其驱动因素

闫丰<sup>1,2</sup>, 刘鑫<sup>3</sup>, 庞娇<sup>3</sup>, 代鹏宇<sup>3</sup>,  
徐佳音<sup>3</sup>, 安晓明<sup>3</sup>, 申琳<sup>3</sup>, 陈永霞<sup>3</sup>, 陈亚恒<sup>1,2</sup>

(1.河北农业大学 国土资源学院, 河北 保定 071001;

2.河北省农田生态环境重点实验室, 河北 保定 071001; 3.河北农业大学 渤海学院, 河北 黄骅 061100)

**摘要:** [目的] 建立兼顾区域本底差异的生态补偿模型, 进一步明确京津冀生态补偿时空分异格局及其主导驱动因子, 为政府部门制定环境保护与宏观经济政策提供参考。[方法] 基于修正碳赤字, 利用模型构建、空间相关性分析与地理探测器技术等方法构建了合理的生态补偿框架, 分析和研究了2007—2020年的京津冀县域生态补偿的时空变异格局、空间自相关性、驱动因子排序和交互作用等内容。[结果] ①京津冀县域2007—2020年碳排放量呈现“先增后减”的变化趋势, 碳吸收量大体呈现持续增加的变化趋势。②修正前的京津冀县域碳赤字呈现东、南、西部高, 而北部较低的U形格局, 而修正后的碳赤字由于兼顾了区域间本底差异, 在时空分布上更加均匀。③生态补偿额度冷点区域基本分布在京津冀东北部, 热点区域分布在京津冀西南部, 两者之间存在个别冷热点区域, 整体呈现热点区域向东北方向移动, 冷点显著区域向西南方向移动的趋势。④不同年份内影响生态补偿额变化的主要因子不同, 2007, 2012, 2017和2020年这4a中影响京津冀县域生态补偿变化的主导影响因子分别为第三产业产值、财政收入、第二产业产值和人均生产总值; 不同年份导致生态补偿变化的因素交互影响力不同, 交互作用表现出先互相减弱后互相增强的反复效应。[结论] 兼顾区域本底差异的生态补偿模型, 对京津冀生态补偿时空分异格局及其主导驱动因子的分析具有一定的公平性, 可为政府部门制定环境保护与宏观经济政策提供更精准的指导和建议。

**关键词:** 修正碳赤字; 生态补偿; 空间相关性; 驱动因子; 京津冀地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)01-0368-10

中图分类号: F062.2

**文献参数:** 闫丰, 刘鑫, 庞娇, 等. 修正碳赤字视阈下京津冀县域生态补偿时空格局及其驱动因素[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1): 368-377. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.01.036; Yan Feng, Liu Xin, Pang Jiao, et al. Spatiotemporal patterns and driving factors of ecological compensation at county scale in Beijing-Tianjin-Hebei region under modified carbon deficit [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1): 368-377.

## Spatiotemporal Patterns and Driving Factors of Ecological Compensation at County Scale in Beijing-Tianjin-Hebei Region Under Modified Carbon Deficit

Yan Feng<sup>1,2</sup>, Liu Xin<sup>3</sup>, Pang Jiao<sup>3</sup>, Dai Pengyu<sup>3</sup>,

Xu Jiayin<sup>3</sup>, An Xiaoming<sup>3</sup>, Shen Lin<sup>3</sup>, Chen Yongxia<sup>3</sup>, Chen Yaheng<sup>1,2</sup>

(1.College of Land and Resources, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei

071001, China; 2.Key Laboratory for Farmland Eco-environment of Hebei Province, Baoding,

Hebei 071001, China; 3.Bohai College, Hebei Agricultural University, Huanghua, Hebei 061100, China)

**Abstract:** [Objective] An ecological compensation model taking into account regional background differences was established to further clarify the spatial and temporal differentiation pattern of ecological compensation and its leading driving factors in the Beijing-Tianjin-Hebei region, in order to provide to a reference for government departments to formulate environmental protection and macroeconomic policies. [Methods]

收稿日期: 2023-06-04

修回日期: 2023-08-10

资助项目: 河北省社会科学基金项目“多尺度补偿视阈下京津冀碳汇生态产品价值评价及分阶段实现路径研究”(HB23YJ008)

第一作者: 闫丰(1987—), 男(汉族), 河北省保定市人, 博士, 讲师, 主要从事生态补偿等相关教学和科研工作。Email: yanfeng@hebau.edu.cn.

通信作者: 陈亚恒(1973—), 男(汉族), 河北省保定市人, 博士, 教授, 主要从事土地整治、土地资源利用等相关的教学和科研工作。Email: chenyaheng@126.com.

Based on a modified carbon deficit, a reasonable ecological compensation framework was constructed using model construction, spatial correlation analysis, and GeoDetector technology, etc. The spatial and temporal variability pattern, spatial autocorrelation, driver ranking, and interaction of ecological compensation in the Beijing-Tianjin-Hebei region during the period of 2007 to 2020 were analyzed and investigated. [Results] ① Carbon emissions in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2007 to 2020 showed a pattern of “increasing and then decreasing” over time, and carbon sequestration generally showed a trend of continuous increase. ② The carbon deficit in the Beijing-Tianjin-Hebei region before the amendment showed a U-shaped pattern with high carbon deficits in the east, south, and west, and low carbon deficits in the north. After the amendment, the carbon deficits were higher in the east, south, and west due to low carbon deficits in the north. After the amendment, the carbon deficits were more evenly distributed in space and time due to the local differences between regions. ③ The cold spot area of the ecological compensation amount was basically located in the Northeast Beijing-Tianjin-Hebei region, and the hot spot area was located in the Southwest Beijing-Tianjin-Hebei region. There were individual cold and hot spot areas between the two areas. The hot spot area was moving to the northeast, while the cold spot area was moving towards the southwest. ④ The main factors affecting the change of ecological compensation amount were different in different years, and the main factors affecting the change of the ecological compensation amount were different. Compensation amount changed in different years. The main factors affecting the changes in ecological compensation in the Beijing-Tianjin-Hebei region in 2007, 2012, 2017, and 2020 were tertiary industry output, financial revenue, secondary industry output, and per capita gross domestic product, respectively. The interactive influence of the factors leading to the changes in ecological compensation was different in different years. The interaction effect showed the repeated effect of decreasing each other and then increasing each other. The interaction effect was different in different years. [Conclusion] The ecological compensation model that takes into account regional background differences has a certain fairness to the analysis of the spatio-temporal differentiation pattern of ecological compensation and its leading driving factors in the Beijing-Tianjin-Hebei region, and provides more accurate guidance and suggestions for government departments to formulate environmental protection and macroeconomic policies.

**Keywords: modified carbon deficit; ecological compensation; spatial relevance; driving factors; Beijing-Tianjin-Hebei region**

生态补偿是一项以保护和可持续利用生态系统服务为目的,以经济手段为调节利益相关者关系的制度安排。当今区域发展失衡及环境恶化给人类生产、生活带来诸多问题,如何协调环境保护与经济的关系,不仅关系到生态建设的成效,也影响区域生态保护利益者之间的关系。因此构建合理的生态补偿标准以及研究生态补偿的区域分布特征至关重要。

目前国内外学者对生态补偿开展了大量的研究,相关研究成果主要集中在以下方面:①生态补偿概念和内涵研究,生态补偿最早应用于生态学和经济学领域,因不同学科中学者的视角不同,对生态补偿的理解也有所侧重。张家其等<sup>[1]</sup>认为生态补偿是生态系统受损的弥补措施,能够影响生态效益提供者的土地利用策略;王怀毅等<sup>[2]</sup>认为生态补偿是通过生态服务供给产生正外部性给予付费补偿或者对于生态环境破坏产生负外部性予以惩罚,以经济手段激励督促生态保护行为。Wunder S.等<sup>[3]</sup>认为,生态补偿是指生态系统服务能够被清楚界定的,同时存在生态系统服务提供者和购买者的一种自愿交易行为。②生

态补偿标准的核算研究,生态补偿政策的核心是生态补偿标准的核算,可以为区域生态文明建设提供保障。目前,生态补偿标准的主要核算方法有生态系统服务价值法、意愿评估方法和生态足迹法。Yang Yi等<sup>[4]</sup>采用生态足迹法,确定了当地居民的生态补偿标准;蒋毓琪等<sup>[5]</sup>以浑河流域森林生态补偿为研究对象,在计算流域上游向下游空间转移的森林生态服务的价值基础上,利用主成分分析法得到了浑河流域下游各县市社会经济发展水平测算得出的补偿系数,进而确定了流域生态补偿标准;杨欣等<sup>[6]</sup>以武汉市的实证调查为基础,采用意愿调查法测算出以农户最低受偿意愿为出发点的农田生态补偿标准。③生态补偿标准时空格局演变的研究,正确的地理空间的选择对于生态补偿效率的提高有显著作用。Gao Xin等<sup>[7]</sup>以江苏省太湖为例,首先对该区域的生态服务价值进行计算并进行了时空分析,其次构建了基于GDP、流域面积和人口的补偿标准模型,并将其应用于生态补偿标准的核算;王浩东等<sup>[8]</sup>通过基于渭河流域陕西段土地利用数据,通过土地利用动态度、当量因子法和

重心模型法对生态系统服务价值及其空间分布和时空演变情况进行研究,并结合优先级进行了补偿关系分析;陈儒等<sup>[9]</sup>通过对 2007—2015 年中国各省域农业净碳汇量进行测算,同时考虑了区域间生态环境和经济发展水平差异,进行了低碳农业横向空间生态补偿的实证研究。

虽然当前国内外生态补偿相关研究取得了一定成果,但仍然存在一些不足,譬如研究尺度下沉到县域级别的研究较少,不同学者的碳排放和碳吸收模型存在差异,补偿模型构建过程中较少考虑区域人口、面积和 GDP 等地区差异。因此为了兼顾区域间本底差异,确保碳赤字空间分布更科学合理,本文在考虑区域人口数量、面积和 GDP 的基础上更新了碳赤字敏感系数,利用模型构建法、空间异质性分析开展生态补偿时空格局研究,最后,进一步引入地理探测器技术分析生态补偿驱动因素,为构建更加完备的京津冀县域生态补偿机制提供理论参考。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

随着京津冀协同发展战略的实施,京津冀生态文明建设成为研究重点。本研究选取的研究区为京津冀地区,包括北京市、天津市和河北省 3 个省市,其中河北包括承德、张家口、秦皇岛、唐山、廊坊、保定、沧州、衡水、石家庄、邢台、邯郸 11 个地级市(图 1)。京津冀(36°03′—42°37′N, 113°27′—119°53′E)处于环渤海地区的中心位置,是国家经济发展的重要引擎,具有较高的人口密度,随着人类活动强度日益增大,将不可避免地导致环境污染,带来生态压力。

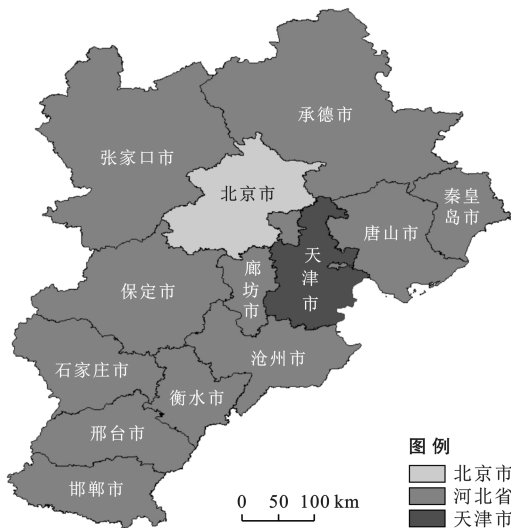


图 1 京津冀区域地理位置

Fig.1 Geographic location of Beijing-Tianjin-Hebei region

### 1.2 数据来源

碳排放数据来源于中国碳核算数据库;土地利用数据来源于武汉大学 1990—2020 年中国 30 m 土地覆盖数据集;地区社会经济数据来源于各省统计年鉴等统计资料;行政边界矢量数据来自全国地理信息资源目录服务系统的 1:100 万全国基础地理数据库,行政区划以 2020 年为准。考虑到行政区划调整和数据的可获得性,将东城区、西城区、海淀区、朝阳区、丰台区和石景山区合并到北京市市辖区;将和平区、河西区、河东区、南开区、河北区和红桥区合并到天津市市辖区;河北省各地级市区县也按相同标准进行相应处理,同时部分县域名称由于数据问题仍沿用原名称,另有个别缺失数据由相近年份数据插值或参考邻近县域数据均值填充。

### 1.3 碳排放与碳吸收核算

(1) 碳排放。考虑到县域统计年鉴公布数据的不完整性,自下而上获取县域精确的化石能源消耗数据十分困难,因此本次研究中 2007—2017 年碳排放数据直接引用中国碳核算数据库的县域碳排放数据(<https://www.ceads.net/user/index.php?id=1057&lang=en>),2018,2019 和 2020 年 3 a 的碳排放数据利用 2007—2017 年碳排放数据和 GDP 线性回归趋势进行核算。

(2) 碳吸收。依据中国科学院土地资源分类系统,选取林地、草地、灌木、近海和湿地 5 种土地利用类型开展区域碳吸收测算,相关碳承载系数参考段晓男等<sup>[10]</sup>和谢鸿宇等<sup>[11]</sup>的研究,具体系数内容见表 1,最终确定碳吸收测算模型为<sup>[12]</sup>:

$$C_a = \sum C_i = \sum_{i=1}^n A_i \times P_i \quad (1)$$

式中: $C_a$  为碳吸收量; $C_i$  为第  $i$  种土地利用类型的碳吸收; $A_i$  为第  $i$  种土地利用类型的面积; $P_i$  为第  $i$  种土地利用类型的碳承载系数, $P_1, P_2, P_3, P_4$  和  $P_5$  分别表示森林、灌木、草原、近海和湿地的碳承载系数,对应数值为: $P_1 = P_2 = 3.8096 \text{ t}/(\text{hm} \cdot \text{a})$ , $P_3 = 0.9482 \text{ t}/(\text{hm} \cdot \text{a})$  和  $P_4 = P_5 = 5.7 \text{ t}/(\text{hm} \cdot \text{a})$ 。

### 1.4 生态补偿模型

利用碳排放数据与碳吸收模型,可以得到区域碳赤字,见式(2)。

$$C_s = C_e - C_a \quad (2)$$

式中: $C_s$  为修正前碳赤字; $C_e$  是碳排放总量。

式(2)中的碳赤字是忽略了区域人口、面积和 GDP 的绝对数据,欠缺了公平性,本文更新了碳赤字敏感度系数<sup>[13]</sup>,见式(3)。

$$M = \frac{C_s}{R \times S \times \text{GDP}} \quad (3)$$

式中: $R$  为区域人口; $S$  为面积;GDP 为地区国内生产总值。

区域间生态补偿应以区域内碳赤字敏感度的相对大小作为参考,进而得到修正后碳赤字,见式(4)。

$$C'_s = C_{\text{总}} \frac{M_k}{M_{\text{总}}} - \bar{C} \quad (4)$$

式中: $C'_s$  为修正后碳赤字; $C_{\text{总}}$  为研究区内所有碳赤字的总和( $t/a$ ); $\bar{C}$  为研究区内碳赤字算术平均值( $t/a$ ); $M_k$  为研究区内第  $k$  区块的碳赤字敏感度 [ $t/(万元 \cdot 人 \cdot hm^2 \cdot a)$ ]; $M_{\text{总}}$  为研究区内碳赤字敏感度总和。

修正后碳赤字为负值,意味着第  $k$  区块属于补偿受体,会接受其他区块相应额度的补偿款;反之则是补偿主体,应补偿给其他区块相应的补偿款。修正后碳赤字综合考虑了区域内人口数量、面积和 GDP 对生态补偿的影响,碳赤字用碳赤字敏感度相对大小作为衡量区域间的补偿量的标准更具科学性,最终在考虑碳交易价格的基础上得到了区域生态补偿额度,其中碳交易价格为中国 2007—2020 年碳交易市场中交易价格的平均值。生态补偿价格为正值时表示该区域需要支付金额,反之则得到补偿。根据各年的碳交易的价格计算补偿额度,公式为:

$$BCE_k = C'_s \cdot V_{CO_2} \quad (5)$$

式中: $BCE_k$  为  $k$  区域的补偿额度; $V_{CO_2}$  为碳交易价格,取 27.31 元/ $t$ 。

### 1.5 冷热点分析 (Getis-Ord $G_i^*$ )

Getis-Ord  $G_i^*$  指数用于识别研究区内热点区 (hot spots) 和冷点区 (cold spots) 的空间分布格局<sup>[14]</sup>。表达式见式(6)。

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} X_j}{\sum_{j=1}^n X_j} \quad (6)$$

$$Z(G_i^*) = [G_i^* - E(G_i^*)] / \sqrt{\text{var}(G_i^*)} \quad (7)$$

式中: $X_j$  为研究区域样本值; $W_{ij}(d)$  为空间权重; $E(G_i^*)$  和  $\text{var}(G_i^*)$  分别为  $G_i^*$  的数学期望和变异系数。

当  $Z(G_{ij}^*)$  显著为正时,呈现热点区;当  $Z(G_{ij}^*)$  显著为负时,呈现冷点区<sup>[15]</sup>。

### 1.6 地理探测器

探测各驱动因子对生态补偿变化的影响程度,用  $q$  值进行计算分析,计算见式(7)。 $q$  为各个因素对生态补偿变化的解释程度,值域为  $[0, 1]$ ,值越大说明影响因素对生态补偿变化解释力越强。

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

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (9)$$

$$SST = N \sigma^2 \quad (10)$$

式中: $h$  为驱动因子的分类或分区; $N_h$  和  $N$  分别为分层  $h$  与全区的单元数; $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  分别是层  $h$  和全区  $Y$  值的方差;SSW 和 SST 分别为层内方差之和与全区总方差,用方差进行比较求出各个因子对生态补偿变化的影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 碳排放与碳吸收时空分异特征分析

从表 1 可以发现,碳排放量排名前 5 的县域基本不变,只在内部发生排序调整。按照时间进行纵向对比,发现碳排放量排名前 5 的县域,在这 4 a 的碳排放量基本按照“增加—减少”的变化趋势进行变动。将相应描述样本扩大到每年碳排放量排名前 10 的县域,纵向对比发现排名前 10 的县域在 2007,2012,2017,2020 年 4 a 内基本一致,只在内部发生排序变化。同时,大部分县域在这 4 a 的碳排放量变化也基本符合“增加—减少”的变化趋势。由此可以推断,2007—2020 年 14 a 京津冀县域的碳排放量变化也基本符合“增加—减少”的变化趋势。同时,根据表内数据可以看到在碳排放量贡献中河北省占主导地位,天津市次之,这说明京津冀 3 地碳排放量分布具有差异性。

表 1 2007—2020 年京津冀碳排放量前 10 名县市

Table 1 Top 10 counties or cities of carbon emissions in Beijing-Tianjin-Hebei region during 2007—2020

排名	2007 年		2012 年		2017 年		2020 年	
	县市	碳排放量/ $t$	县市	碳排放量/ $t$	县市	碳排放量/ $t$	县市	碳排放量/ $t$
1	石家庄市辖区	$2.73 \times 10^7$	石家庄市辖区	$3.98 \times 10^7$	滨海新区	$3.43 \times 10^7$	天津市辖区	$1.29 \times 10^8$
2	北京市辖区	$2.36 \times 10^7$	滨海新区	$3.05 \times 10^7$	石家庄市辖区	$3.39 \times 10^7$	滨海新区	$3.34 \times 10^7$
3	滨海新区	$2.05 \times 10^7$	北京市辖区	$2.50 \times 10^7$	邯郸市辖区	$1.86 \times 10^7$	石家庄市辖区	$3.32 \times 10^7$
4	邯郸市辖区	$1.46 \times 10^7$	邯郸市辖区	$2.07 \times 10^7$	北京市辖区	$1.69 \times 10^7$	唐山市辖区	$2.15 \times 10^7$
5	通州区	$1.33 \times 10^7$	唐山市辖区	$1.61 \times 10^7$	武清区	$1.59 \times 10^7$	北京市辖区	$1.65 \times 10^7$
6	唐山市辖区	$1.15 \times 10^7$	天津市辖区	$1.61 \times 10^7$	唐山市辖区	$1.51 \times 10^7$	武安市	$1.46 \times 10^7$
7	天津市辖区	$1.11 \times 10^7$	通州区	$1.57 \times 10^7$	天津市辖区	$1.48 \times 10^7$	武清区	$1.41 \times 10^7$
8	保定市辖区	$1.03 \times 10^7$	武清区	$1.46 \times 10^7$	黄骅市	$1.37 \times 10^7$	通州区	$1.40 \times 10^7$
9	武安市	$1.02 \times 10^7$	保定市辖区	$1.45 \times 10^7$	保定市辖区	$1.28 \times 10^7$	迁安市	$1.39 \times 10^7$
10	武清区	$1.00 \times 10^7$	武安市	$1.42 \times 10^7$	静海区	$1.28 \times 10^7$	黄骅市	$1.36 \times 10^7$

根据表 2 可以看出,碳吸收量排名前 5 的县域, 2007, 2012, 2017, 2020 这 4 a 间的变化不大, 只在内部发生排序变化, 但 4 a 的碳吸收量变化轨迹大部分呈现“增加”趋势。将相应描述样本扩大到每年碳排

放量排名前 10 的县域, 同样基本符合入选县域不变, 只在内部发生排序调整, 4 a 的碳吸收量变化轨迹大部分呈现“增加”趋势。由此推断 2007—2020 年 14 a 京津冀碳吸收量也基本符合以上分析。

表 2 2007—2020 年京津冀碳吸收量前 10 名县市

Table 2 Top 10 counties or cities of carbon sequestration in Beijing-Tianjin-Hebei region during 2007—2020

排名	2007 年		2012 年		2017 年		2020 年	
	县市	碳吸收量/t	县市	碳吸收量/t	县市	碳吸收量/t	县市	碳吸收量/t
1	丰宁县	$1.87 \times 10^6$	丰宁县	$1.92 \times 10^6$	丰宁县	$1.99 \times 10^6$	丰宁县	$2.01 \times 10^6$
2	隆化县	$1.38 \times 10^6$	隆化县	$1.42 \times 10^6$	隆化县	$1.46 \times 10^6$	隆化县	$1.47 \times 10^6$
3	承德县	$1.13 \times 10^6$	承德县	$1.16 \times 10^6$	赤城县	$1.15 \times 10^6$	赤城县	$1.18 \times 10^6$
4	赤城县	$1.08 \times 10^6$	赤城县	$1.11 \times 10^6$	承德县	$1.14 \times 10^6$	承德县	$1.13 \times 10^6$
5	兴隆县	$1.06 \times 10^6$	兴隆县	$1.06 \times 10^6$	兴隆县	$1.05 \times 10^6$	兴隆县	$1.03 \times 10^6$
6	青龙县	$8.99 \times 10^5$	青龙县	$9.40 \times 10^5$	青龙县	$9.44 \times 10^5$	青龙县	$9.21 \times 10^5$
7	滦平县	$8.79 \times 10^5$	滦平县	$9.06 \times 10^5$	滦平县	$9.10 \times 10^5$	滦平县	$9.13 \times 10^5$
8	平泉县	$6.85 \times 10^5$	平泉县	$7.22 \times 10^5$	平泉县	$7.11 \times 10^5$	平泉县	$7.03 \times 10^5$
9	怀柔区	$6.43 \times 10^5$	怀柔区	$6.47 \times 10^5$	怀柔区	$6.53 \times 10^5$	怀柔区	$6.53 \times 10^5$
10	宽城县	$5.94 \times 10^5$	宽城县	$6.03 \times 10^5$	密云区	$6.06 \times 10^5$	密云区	$6.19 \times 10^5$

## 2.2 碳赤字修正前后时空分异特征对比分析

由图 2 可见, 从京津冀区域整体来看, 2007—2020 年碳赤字呈现出增加的变化趋势, 特别是东南沿海地区碳赤字增加最为明显。从县域尺度来看, 碳赤字的最高值主要位于邢台市辖区、邯郸市武安市及天津市部分沿海县域地区, 最低值位于丰宁满族自治县。从时间尺度上来看, 2007 年碳赤字较高的区域较少。2012 年碳赤字较高的区域增加, 与 2012 年相比, 2017 年隆化县、万全县和张北县碳赤字增加最为明显, 此外, 增加的碳赤字较高区域主要位于天津市

滨海新区附近区域、石家庄市辖区以及北京市通州区附近。到 2020 年, 碳赤字较高区域基本与 2017 年相持平, 丰宁满族自治县碳赤字有明显下降。从空间尺度上来看, 碳赤字较高的区域主要分布在京津冀东南沿海区域以及邢台市周边县域, 较低的区域主要集中在京津冀的北部地区。其中, 2007, 2012, 2020 年碳赤字的最低值均位于丰宁满族自治县, 2017 年位于康保县, 2007, 2012, 2017 和 2020 年碳赤字最高值均位于北京市通州区、邢台市辖区以及天津市辖区附近。

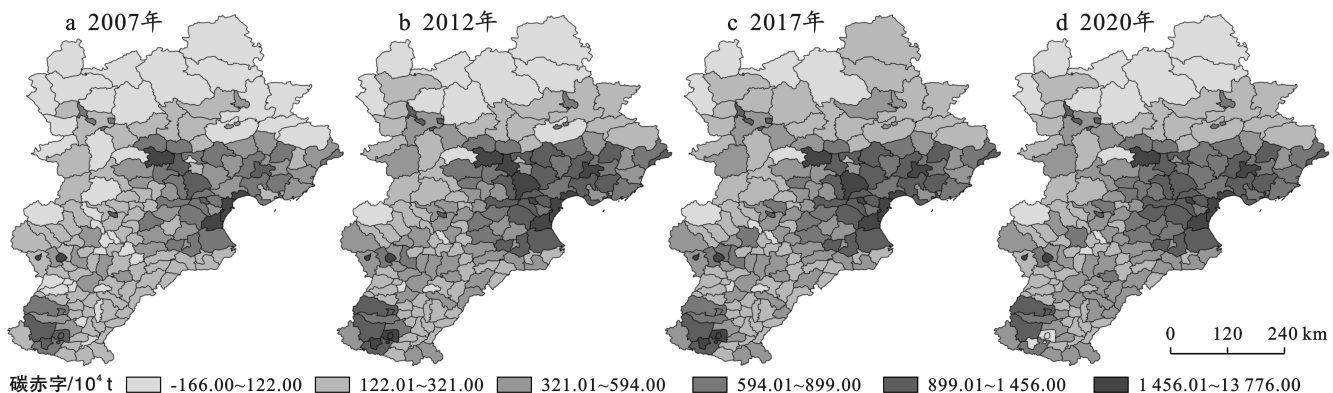


图 2 2007—2020 年修正前京津冀碳赤字时空分异

Fig.2 Spatial and temporal variability of carbon deficit in Beijing-Tianjin-Hebei region before correction from 2007 to 2020

在综合考虑区域面积、人口与 GDP 等影响因素后得到修正后的碳赤字时空分异图(图 3)可见, 2007—2020 年京津冀区域碳赤字整体呈现出“北低南高”的分布趋势, 主要的碳吸收区位于京津冀北部,

碳排放区位于京津冀南部。北部地区碳赤字呈现出“先减后增”的变化趋势, 只有隆化县呈现出明显的递增趋势; 中部地区, 北京市辖区附近碳赤字呈现出逐年递增的趋势, 南部地区碳赤字呈现出逐年增加的变

化趋势,其中邢台市隆尧县碳赤字逐年递增趋势较为明显,并在 2020 年成为碳赤字峰值区。此外,邢台市宁晋县由最开始的碳吸收区变为碳排放区,其碳赤字呈现出逐年递增的趋势。

通过对修正前后的碳赤字时空分异进行对比,京津冀县域修正前的碳赤字总体呈现东、南、西部高,而

北部较低的 U 形格局,而修正后的碳赤字在时空分异上更加均匀。在空间尺度上,修正前的京津冀碳赤字峰值集中在环渤海地区,而修正后的碳赤字则分布较为均匀。在时间尺度上,北部区域修正前的碳赤字变化较为明显,而修正后的碳赤字变化不大。修正后的碳赤字缓和了区域间的碳压力。

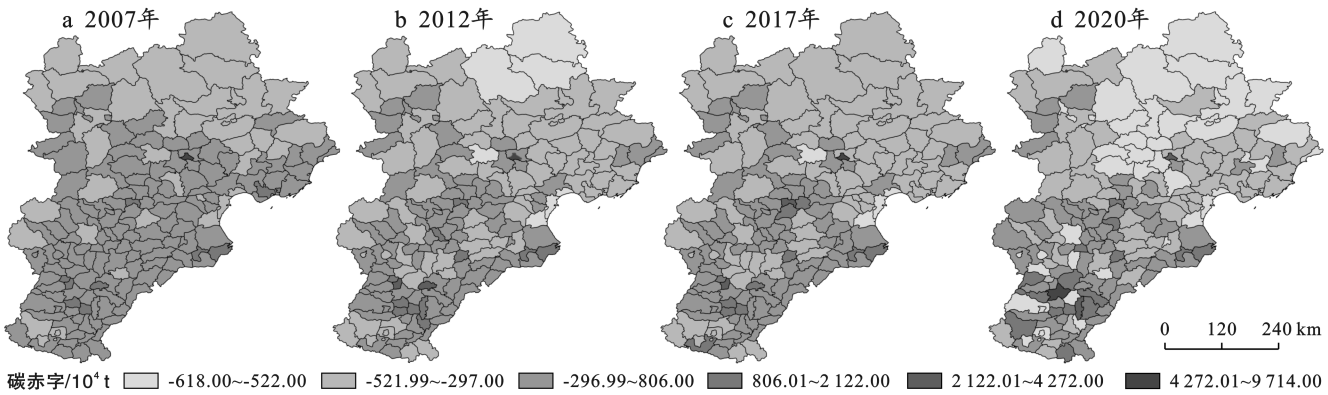


图 3 2007—2020 年修正后的京津冀碳赤字时空分异

Fig.3 Spatial and temporal variability of corrected carbon deficit in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2007 to 2020

### 2.3 生态补偿额度空间相关性分析

总体来看,2007,2012,2017,2020 年这 4 a 京津冀生态补偿额度的冷热点区域变化不大。冷点区域基本分布在京津冀东北部,热点区域分布在京津冀西南部,两者之间存在个别冷热点区域,其余部分都为不显著。

2007 年,京津冀地区热点区有 19 个,主要集中于任县、巨鹿县、广宗县等县域;冷点区有 8 个,主要集中于兴隆县、遵化市、承德县等县域;2012 年,京津

冀地区冷热点区域空间分布基本不变,冷热点数量却较 2007 年出现明显增加,热点区域变为 27 个,冷点区域变为 20 个,盐山县、海兴县变为不显著;2017 年冷热点数量较 2012 年变动不大,热点显著区域向东北方向移动,冷点显著区域向西南方向移动;2020 年热点区域变为 28 个,冷点区域较 2017 年显著性下降,变为 8 个,空间分布基本不变(见图 4)。总之京津冀各县域生态补偿额度空间分异性明显。

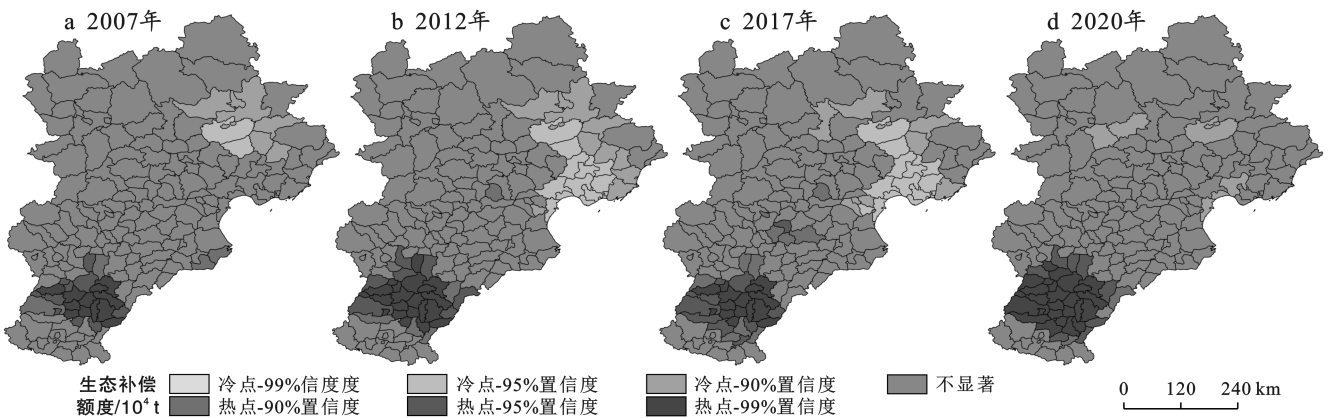


图 4 2007—2020 年京津冀生态补偿额度空间自相关性分析

Fig.4 Spatial autocorrelation analysis of eco-compensation amount in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2007 to 2020

### 2.4 生态补偿额度变化的驱动因素分析

2.4.1 因子探测结果与分析 本文以京津冀县域数据为研究样本,开展生态补偿变化驱动因素分析。为了探究各驱动因子对生态补偿变化的影响程度,首先

分析了单因子  $q$  值大小,进而判别占主导作用的驱动力因子。基于地理探测器对区内各驱动因子的  $q$  值进行计算分析,从图 5 可以看出 2007,2012,2017,2020 年 4 a 影响生态补偿变化的因子排序,结果表明

不同年份内驱动因子对区域内生态补偿变化的影响程度不同,不同年份内影响生态补偿变化的主要因子也是不同的,总的来说,第三产业产值、年末总人口和人均生产总值的影响排名比较靠前。

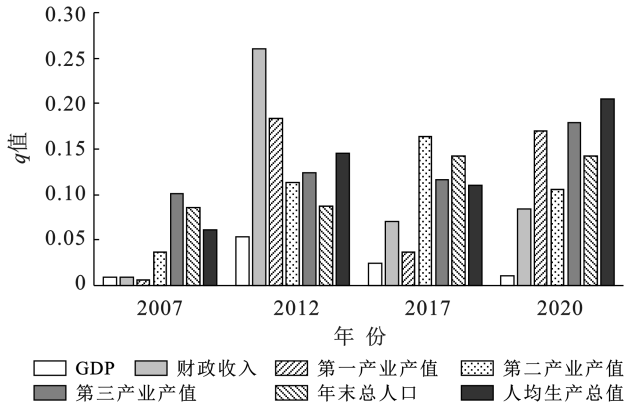


图 5 2007—2020 年京津冀地区生态补偿额度因子探测结果

Fig.5 Detection results of ecological compensation quota factor in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2007 to 2020

2.4.2 交互作用分析 本文利用地理探测器中交互作用探测分析不同因素对生态补偿变化影响的交互作用关系,即探测两个因子共同作用对生态补偿变化所产生的作用强度(见表 3)。其中包括 GDP( $X_1$ )、财政收入( $X_2$ )、第一产业产值( $X_3$ )、第二产业产值( $X_4$ )、第三产业产值( $X_5$ )、年末总人口( $X_6$ )和人均生产总值( $X_7$ )。2007 年各组合对生态补偿变化的作用强度均在 0.5 以下,最高仅有 0.462 2,表现为年末总人口和人均生产总值;2012 年交互作用强度有所提高,第一产业值和第二产业值对生态补偿变化的作用强度高于 0.5;2017 年所有组合对生态补偿变化的作用强度全在 0.5 以下,最高仅有 0.451 3,表现为年末总人口和人均生产总值;2020 年交互作用有所提高,各因素对生态补偿变化的作用强度较大部分在 0.5 左右,其中第一产业值和年末总人口达到 0.634 1。综上所述,纵观整个研究期发现不同年份导致生态补偿变化的因素交互影响力不同,交互作用表现出先互相降低后互相增强的反复效应。

表 3 京津冀地区不同时期因子交互作用强度

Table 3 Intensity of factor interaction at different periods in Beijing-Tianjin-Hebei region

项 目	驱动因子						
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$
2007 年 驱动因子	$X_1$	0.008 9					
	$X_2$	0.009 2	0.008 9				
	$X_3$	0.014 9	0.014 9	0.006 3			
	$X_4$	0.038 3	0.038 3	0.059 4	0.036 5		
	$X_5$	0.102 5	0.102 5	0.127 1	0.303 7	0.101 1	
	$X_6$	0.084 8	0.084 8	0.160 7	0.409 5	0.276 8	0.084 6
	$X_7$	0.062 5	0.062 5	0.208 4	0.239 4	0.363 5	0.462 2
2012 年 驱动因子	$X_1$	0.053 5					
	$X_2$	0.387 8	0.260 3				
	$X_3$	0.407 6	0.457 6	0.183 9			
	$X_4$	0.201 6	0.420 4	0.527 4	0.112 9		
	$X_5$	0.298 8	0.376 8	0.442 0	0.371 5	0.123 8	
	$X_6$	0.191 2	0.384 6	0.425 9	0.297 7	0.277 9	0.087 0
	$X_7$	0.206 5	0.416 5	0.434 9	0.304 3	0.292 9	0.389 0
2017 年 驱动因子	$X_1$	0.024 3					
	$X_2$	0.091 0	0.069 7				
	$X_3$	0.069 2	0.143 1	0.037 3			
	$X_4$	0.166 6	0.293 0	0.237 3	0.164 1		
	$X_5$	0.121 5	0.216 3	0.189 7	0.416 8	0.116 6	
	$X_6$	0.144 4	0.386 4	0.228 5	0.441 3	0.299 5	0.143 3
	$X_7$	0.116 7	0.277 3	0.174 6	0.323 3	0.284 9	0.451 3
2020 年 驱动因子	$X_1$	0.009 7					
	$X_2$	0.084 6	0.084 1				
	$X_3$	0.183 5	0.490 0	0.170 3			
	$X_4$	0.124 9	0.277 1	0.528 5	0.105 1		
	$X_5$	0.179 3	0.336 6	0.516 9	0.297 8	0.178 7	
	$X_6$	0.143 9	0.372 2	0.634 1	0.337 4	0.402 5	0.142 5
	$X_7$	0.207 0	0.402 7	0.614 5	0.488 9	0.455 0	0.434 5

### 3 讨论

本文对 2007—2020 年间京津冀县域生态补偿时空分异进行了深入研究,根据京津冀 2007—2020 年的碳排放量与碳吸收量计算出京津冀各县域的碳赤字,但此时的碳赤字是忽略了区域人口、面积和 GDP 的绝对数据,欠缺了一定的公平性,因此参考相关文献提出了碳赤字敏感度系数并计算出修正后碳赤字。最终综合考虑 2007—2020 年间的碳价,计算出各县域的生态补偿额度,使用冷热点分析探究出各县域不同年份的生态补偿额度时空特征,并利用 ArcGIS 对京津冀地区进行驱动因素分析。

#### 3.1 碳排放、碳吸收和碳赤字时空特征

京津冀碳地区的碳排放量从 2007 年开始明显增加,到 2012 年呈现出下降的趋势,与闫丰等<sup>[13]</sup>的研究结果基本一致;碳吸收量整体呈现“西北高,东南低”的特点,与赵荣钦等<sup>[16-17]</sup>、周嘉<sup>[18]</sup>对中原经济区县域碳收支空间分异的研究一致,说明河北省的碳吸收量分布服从整体分布,碳吸收量呈现持续增加的变化趋势,但总体碳排放量大于碳吸收量;同时河北省是京津冀的碳排放主体,这与殷会良等<sup>[19]</sup>的研究结果一致,碳吸收主要地区分布在京津冀北部,这也与张正峰等<sup>[20]</sup>的研究结果一致。

通过引入区域人口数量、面积和 GDP 构建碳赤字敏感系数,对碳赤字进行修正。修正后的碳赤字在空间尺度上大体呈现出“北低南高”的趋势,京津冀的主要碳吸收区集中在北部,主要的碳排放区集中在南部,与夏四友等<sup>[21]</sup>的研究基本一致。因京津冀地区的经济发展具有差异性,主要的碳排放区域集中在经济发展较快、人口密集、工业水平比较发达的地区,而主要的碳吸收区域主要集中在经济发展水平比较落后、工业化和技术水平较为落后的区域,为后续生态补偿的研究提供前提条件。

#### 3.2 生态补偿额度空间相关性及其生态补偿驱动因子分析

对于生态补偿额度的空间相关系分析,通过对京津冀地区生态补偿额度的冷热点分析可知,生态补偿额度高一高聚集区或热点地区主要位于北京附近、石家庄周边以及邯郸—邢台 3 个主要地区,生态补偿额度低—低聚集区或冷点区域,主要集中在承德市等主要县域。主要原因是京津冀北部地广人稀,人类经济活动对于生活环境破坏较小,适宜植被生长;而北京、石家庄、邯郸等地附近,经济发展水平较高,人口密度大,对环境破坏较强,因此碳排放较多,张正峰等<sup>[20]</sup>的研究同样也得出这个结论。

地理探测器应用于生态补偿额度驱动因子分析发现不同年份内影响生态补偿额度的主要因子不同,2007 年影响京津冀县域生态补偿额度的前 3 个因子分别为第三产业产值、年末总人口和人均生产总值;2012 年影响京津冀县域生态补偿额度的前 3 个因子为财政收入、第一产业产值和人均生产总值;2017 年影响京津冀县域生态补偿额度的前 3 个因子为第二产业产值、年末总人口和第三产业产值,这和殷会良等<sup>[19]</sup>、李国平等<sup>[22]</sup>研究相符,其认为京津冀的碳排放量主要集中于第二产业,地区经济仍依赖于高耗能高排放产业,其中又属河北省最明显;2020 年影响力排名前 3 的因子则是人均生产总值、第三产业值和第一产业产值,总的来说,第三产业产值、年末总人口和人均生产总值的影响排名比较靠前。利用地理探测器探测两个因子共同作用对生态补偿变化所产生的作用强度,发现不同年份导致生态补偿变化的因素交互影响力不同,交互作用表现出先互相降低后互相增强的反复效应,2007 年各组合对生态补偿变化的作用强度均在 0.5 以下;2012 年较 2007 年交互作用强度有所提高;2017 年各组合对生态补偿变化的作用强度全在 0.5 以下;2020 年交互作用有所提高,各因素对生态补偿变化的作用强度较大部分在 50% 左右。这与夏利恒<sup>[23]</sup>的研究相符,其认为不同年份导致因子交互作用差异明显。

#### 3.3 局限性

本文在计算京津冀县域的碳吸收量过程中,由于农作物类型众多且种植面积分布情况难以获取,无法对其碳吸收因子进行完全统一,因此文中缺少耕地碳吸收量的计算,这是后续研究需要完善的地方。同时在应用地理探测器探究生态补偿的驱动因子中,缺少一些难以量化的社会因素指标,例如民众意识、政策方针等,同时没有对生态补偿额度进行风险探测分析,这些都是后续研究需要补充的方面。

### 4 结论

(1) 2007—2020 年京津冀县域碳排放量总体呈现“先增加,后减少”的变化趋势,碳吸收量总体呈现“增加”的变化趋势,但相较于碳排放量增量较少。同时,2007—2020 年碳排放量、碳吸收量排名前 10 的县域基本不变,只在内部发生排序变化,具有一定的稳定性。

通过对修正前后的碳赤字时空分异进行对比,京津冀县域修正前的碳赤字总体呈现东、南、西部高,而北部较低的 U 形格局,而修正后的碳赤字在时空分异上更加均匀。在空间尺度上,修正前的京津冀碳赤

字峰值集中在环渤海地区,而修正后的碳赤字则分布较为均匀。在时间尺度上,北部区域修正前的碳赤字变化较为明显,而修正后的碳赤字变化不大。

(2) 通过冷热点分析发现,2007,2012,2017,2020 这 4 a 冷点区域基本分布在京津冀东北部,热点区域分布在京津冀西南部,两者之间存在个别冷热点区域,其余部分都为不显著,2007—2020 年呈现热点显著区域向东北方向移动,冷点显著区域向西南方向移动的趋势。

(3) 通过对县域视角下生态补偿额度驱动因子的分析发现,不同年份内影响生态补偿变化的主导因子不同。2007,2012,2017,2020 年这 4 a 中影响京津冀县域生态补偿变化的主要因素分别为第三产业产值、财政收入、第二产业产值和人均生产总值。此外,不同年份导致生态补偿变化的因素交互影响力不同,交互作用表现出先降低后增强的反复效应。

#### [参 考 文 献]

- [1] 张家其,杨贺菲,田亚平,等.基于生态系统服务功能价值的湖北省恩施地区生态补偿研究[J].水土保持通报,2016,36(5):214-219.  
Zhang Jiaqi, Yang Hefei, Tian Yaping, et al. A study on ecological compensation based on ecosystem service value of Enshi region in Hubei Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016,36(5):214-219.
- [2] 王怀毅,李忠魁.流域生态补偿研究的演进与热点分析[J].水土保持通报,2022,42(3):304-311.  
Wang Huaiyi, Li Zhongkui. Evolution and hotspot analysis of ecological compensation research in watersheds [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(3):304-311.
- [3] Wunder S. Payments for environmental services: Some nuts and bolts [M]. Bolivia, Brazil, Indonesia: Center for International Forestry Research (CIFOR), 2005.
- [4] Yang Yi, Yao Congxu, Xu Delong. Ecological compensation standards of national scenic spots in Western China: A case study of Taibai Mountain [J]. Tourism Management, 2020,76:103950.
- [5] 蒋毓琪,陈珂,朱少英,等.浑河流域森林生态补偿标准测算[J].水土保持通报,2018,38(6):206-211.  
Jiang Yuqi, Chen Ke, Zhu Shaoying, et al. Measure of forest ecological compensation standard in Hunhe River Basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(6):206-211.
- [6] 杨欣,蔡银莺.基于农户受偿意愿的武汉市农田生态补偿标准估算[J].水土保持通报,2012,32(1):212-216.  
Yang Xin, Cai Yinying. Ecological compensation criteria for agricultural land based on farmers' willingness to

accept in Wuhan City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012,32(1):212-216.

- [7] Gao Xin, Shen Juqin, He Weijun, et al. Spatial-temporal analysis of ecosystem services value and research on ecological compensation in Taihu Lake basin of Jiangsu Province in China from 2005 to 2018 [J]. Journal of Cleaner Production, 2021,317:128241.
- [8] 王浩东,汪妮,汪泉熹.基于时空演变的渭河流域陕西段生态服务价值及区间补偿关系研究[J].水土保持通报,2022,42(6):304-311.  
Wang Haodong, Wang Ni, Wang Quanxi. Relationship between ecological service value and interval compensation in Shaanxi section of Weihe River basin based on temporal and spatial evolution [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(6):304-311.
- [9] 陈儒,姜志德.中国省域低碳农业横向空间生态补偿研究[J].中国人口·资源与环境,2018,28(4):87-97.  
Chen Ru, Jiang Zhide. Transverse space ecological compensation of low-carbon agriculture in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2018,28(4):87-97.
- [10] 段晓男,王效科,逮非,等.中国湿地生态系统固碳现状和潜力[J].生态学报,2008,28(2):463-469.  
Duan Xiaonan, Wang Xiaoke, Lu Fei, et al. Carbon sequestration and its potential by wetland ecosystems in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008,28(2):463-469.
- [11] 谢鸿宇,陈贤生,林凯荣,等.基于碳循环的化石能源及电力生态足迹[J].生态学报,2008,28(4):1729-1735.  
Xie Hongyu, Chen Xiansheng, Lin Kairong, et al. The ecological footprint analysis of fossil energy and electricity [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008,28(4):1729-1735.
- [12] 魏庭阳,张晨,缪一祎.福建省碳超载时空格局演化及弱化路径[J].生态学报,2022,42(23):9677-9688.  
Wei Tingyang, Zhang Chen, Miao Yiyi. Patterns and weakening paths of the spatio-temporal evolution of regional carbon overload in Fujian Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(23):9677-9688.
- [13] 闫丰,王洋,杜哲,等.基于 IPCC 排放因子法估算碳足迹的京津冀生态补偿量化[J].农业工程学报,2018,34(4):15-20.  
Yan Feng, Wang Yang, Du Zhe, et al. Quantification of ecological compensation in Beijing-Tianjin-Hebei based on carbon footprint calculated using emission factor method proposed by IPCC [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018,34(4):15-20.
- [14] 胡雪瑶,张子龙,陈兴鹏,等.县域经济发展时空差异和影响因素的地理探测:以甘肃省为例[J].地理研究,

- 2019,38(4):772-783.
- Hu Xueyao, Zhang Zilong, Chen Xingpeng, et al. Geographic detection of spatial-temporal difference and its influencing factors on county economic development: A case study of Gansu Province [J]. *Geographical Research*, 2019,38(4):772-783.
- [15] 赵璐,赵作权,王伟.中国东部沿海地区经济空间格局变化[J].*经济地理*,2014,34(2):14-18.
- Zhao Lu, Zhao Zuoquan, Wang Wei. The spatial pattern of economy in coastal area of China [J]. *Economic Geography*, 2014,34(2):14-18.
- [16] 赵荣钦,张帅,黄贤金,等.中原经济区县域碳收支空间分异及碳平衡分区[J].*地理学报*,2014,69(10):1425-1437.
- Zhao Rongqin, Zhang Shuai, Huang Xianjin, et al. Spatial variation of carbon budget and carbon balance zoning of Central Plains Economic Region at county-level [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014,69(10):1425-1437.
- [17] 赵荣钦,刘英,马林,等.基于碳收支核算的河南省县域空间横向碳补偿研究[J].*自然资源学报*,2016,31(10):1675-1687.
- Zhao Rongqin, Liu Ying, Ma Lin, et al. County-level carbon compensation of Henan Province based on carbon budget estimation [J]. *Journal of Natural Resources*, 2016,31(10):1675-1687.
- [18] 周嘉,王钰萱,刘学荣,等.基于土地利用变化的中国省域碳排放时空差异及碳补偿研究[J].*地理科学*,2019,39(12):1955-1961.
- Zhou Jia, Wang Yuxuan, Liu Xuerong, et al. Spatial temporal differences of carbon emissions and carbon compensation in China based on land use change [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2019,39(12):1955-1961.
- [19] 殷会良,杜恒,王鹏苏,等.“双碳”背景下京津冀协同发展的挑战、对策和政策研究[J].*城市发展研究*,2022,29(8):12-19.
- Yin Huiliang, Du Heng, Wang Pengsu, et al. Study on opportunities, challenges and countermeasures of Beijing-Tianjin-Hebei coordinated development under the background of carbon neutrality and carbon peak [J]. *Urban Development Studies*, 2022,29(8):12-19.
- [20] 张正峰,张栋.基于社会网络分析的京津冀地区碳排放空间关联与碳平衡分区[J].*中国环境科学*,2023,43(4):2057-2068.
- Zhang Zhengfeng, Zhang Dong. Spatial relatedness of CO<sub>2</sub> emission and carbon balance zoning in Beijing Tianjin Hebei Counties [J]. *China Environmental Science*, 2023,43(4):2057-2068.
- [21] 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.
- [22] 李国平,吕爽.“双碳”目标视角下的京津冀产业结构优化研究[J].*河北经贸大学学报*,2022,43(2):81-89.
- Li Guoping, Lyu Shuang. Research on the optimization of industrial structure in Beijing-Tianjin-Hebei under the perspective of “carbon peak and carbon neutrality” goal [J]. *Journal of Hebei University of Economics and Business*, 2022,43(2):81-89.
- [23] 夏利恒.陕西渭北旱塬区耕地时空格局演变及驱动力分析[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2021.
- Xia Liheng. Analysis of the spatiotemporal pattern evolution and driving forces of cultivated land in the Weibei arid plateau area of Shaanxi Province [D]. Yang Ling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2021.