

张智扬, 尹海魁, 李新旺, 等. 河北省县域土地利用碳排放空间格局及协调分区[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(2): 281-292.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2024.02.010

河北省县域土地利用碳排放空间格局及协调分区

张智扬¹, 尹海魁^{2,3}, 李新旺⁴, 陈亚恒^{1,5}, 刘 微⁶, 王树涛^{1,5}

(1.河北农业大学国土资源学院,河北 保定 071000; 2.河北农业大学资源与环境科学学院,河北 保定 071000; 3.河北工程大学水利水电学院,河北 邯郸 056038; 4.河北省水利科学研究院,河北 石家庄 050011; 5.河北省农田生态环境重点实验室,河北 保定 071000; 6.河北大学化学与环境科学学院,河北 保定 071000)

摘要: 土地利用变化是区域碳排放变化的主要驱动力,研究土地利用变化对碳排放的影响有助于制定碳排放政策。基于土地利用现状数据和能源消耗数据,构建碳排放评价模型,测算河北省2000–2020年土地利用碳排放量,利用标准差椭圆模型探究研究区碳排放空间格局分布特征,依据碳排放经济贡献系数和碳生态承载系数提出碳平衡分区方案及优化对策。结果表明,①2000–2020年河北省碳排放总量整体上呈现明显的上涨趋势,从 9.01×10^7 t上升到 2.75×10^8 t,2000–2010年碳排放量增长速率快速提升,2010–2020年碳排放量增长相对缓慢。②河北省碳排放强度呈现多圈层结构空间分布特征,主要以资源型城市为中心向外呈圈层结构扩散,石家庄和沧州核心市区次圈层结构逐渐显现。③河北省县域碳排放经济贡献系数空间特征呈四周低中间高,碳生态承载系数呈现西北高东南低的空间分布规律。④基于碳平衡分析将河北省划分为碳汇功能区、低碳保持区、经济发展区、碳汇发展区和高碳优化区,并提出了相应的发展策略。

关键词: 土地利用; 碳排放; 碳生态承载; 平衡分区

中图分类号: F301.2; X32

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2024)02-0281-12

Spatial pattern and coordination division of carbon emissions of county land use in Hebei province

ZHANG Zhi-yang¹, YIN Hai-kui^{2,3}, LI Xin-wang⁴, CHEN Ya-heng^{1,5}, LIU Wei⁶, WANG Shu-tao^{1,5}

(1.School of Land and Resources, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China; 2.School of Resources and Environmental Science, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China; 3.School of Water Resources and Hydropower, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 4.Hebei Institute of Water Resources, Shijiazhuang 050011, China; 5.Key Laboratory for Farmland Eco-Environment of Hebei Province, Baoding 071000, China; 6.School of Chemistry and Environmental Sciences, Hebei University, Baoding 071000, China)

Abstract: Land use change is the main driving force of regional carbon emissions change. Studying the impact of land use change on carbon emissions will help to formulate carbon emission policies. Based on the current land use data and energy consumption data, a carbon emission evaluation model was built to calculate the land use carbon emissions of Hebei province from 2000 to 2020. The standard deviation ellipse model was used to explore the spatial pattern distribution characteristics of carbon emissions in the study area. Based on the economic contribution coefficient of carbon emissions and the carbon ecological carrying coefficient, the carbon balanced zoning scheme and optimization countermeasures were proposed.

The results showed that, from 2000 to 2020, the total carbon emissions of Hebei province showed an obvious upward trend, risen from 9.01×10^7 t to 2.75×10^8 t, the growth rate of carbon emissions from 2000 to 2010 improved rapidly, and the growth of carbon emissions from 2010 to 2020 was relatively slow. The carbon emission in-

收稿日期:2022-11-08

基金项目:河北省重点研发计划项目(22327301D、21373807D)

作者简介:张智扬(1998–),男,河北唐山人,硕士研究生,研究方向

为土地资源利用。(E-mail)531383124@qq.com

通讯作者:王树涛,(E-mail)55381040@qq.com

tensity of Hebei province presented a spatial distribution characteristic with multi-circle structure, mainly centered around the resource-based cities and spreaded outward in a circle structure, and the sub circle structure of Shijiazhuang and Cangzhou core urban areas gradually became apparent. The spatial characteristics of the economic contribution coefficient of carbon emissions of counties in Hebei province were low in four directions and were high in the middle, and the carbon ecological carrying coefficient was high in the northwest and was low in the southeast. Based on the carbon balance analysis, Hebei province was divided into carbon sink functional area, low carbon conservation area, economic development area, carbon sink development area and high carbon optimization area, and corresponding development strategies were proposed.

Key words: land use; carbon emission; carbon ecological carrying capacity; balanced partition

人类活动造成了二氧化碳排放量上升和全球变暖^[1-2]。土地利用碳排放效应是指土地受到人类活动的直接影响,进而影响到土地释放碳的机制、过程和活动^[3-4]。随着中国碳达峰、碳中和(简称“双碳”)政策的提出,土地利用碳排放研究逐渐成为学界关注的焦点。近几年来,中国已然成为碳排放量第一的国家,因此当下低碳减排具有一定的压力。一个国家的经济发展水平与土地利用结构和布局密切相关,中国要想进一步实现社会经济的快速腾飞,就必须进行土地利用转型和空间格局的优化。从碳排放视角出发,探究土地利用碳排放格局演变规律,对维持自然生态系统与社会经济系统平衡、引导社会经济的低碳转型与可持续发展、区域和国家的规划发展有一定的指导意义,也可为中国碳中和目标的实现提供理论参考,对于实现低碳减排具有重要意义。

碳排放研究内容主要聚焦于土地利用碳排放作用机理、时空分异特征和影响因素等方面,赵荣钦等^[5]研究认为,土地利用碳排放量是由土地利用格局和类型变化引起的。1996 年联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)的研究结果表明,森林和碳源密切相关,土地利用变化和碳汇密切相关^[6]。Campbell 等^[7]认为陆地生态系统的碳流主要受自然因素的影响。从研究视角上看,Lal 等^[8]关于土壤碳管理的研究结果表明,在保护耕地上免耕可以节省燃料并减少二氧化碳排放,秸秆还田减缓了有机质的降解,减弱了土壤呼吸,最终减少了二氧化碳的排放。吴建国等^[9]分析土壤有机碳储量的影响因素,指出土地转换是碳排放的一个重要因素。从研究方法看,国内外学者在碳排放因子分解研究中常用的模型有平均分解法、Kaya 恒等式和对数平均迪氏分解法等^[10-13]。张德英等^[14]总结了 3 种碳排放测算法,分别为实测法、物料衡算法和排放系数法。方精云等^[15]使用实际测量方法在现场对碳排放的元素变化进行统计调查。汤洁等^[16]在利用遥

感技术获取时空土地利用变化数据后,根据不同土地类型面积估算碳排放量。

综上所述,关于土地利用碳排放的研究已有比较丰硕的成果,对本研究具有较强的参考意义。但土地利用碳排放与经济发展内在关系的研究相对较少,协调两者关系进行分区优化的研究更为鲜见。已有研究主要侧重于典型陆地生态系统(如森林、草地、水稻田等),对各类土地利用方式的综合研究还有待进一步深化。基于此,本研究以河北省为研究对象,建立碳排放测算模型,分析研究区 2000–2020 年碳排放时空格局特征,进行碳平衡分区及对策优化分析,为河北省碳排放规划提供新视角,也为中国推进生态文明建设、践行“两山”理论和实现“双碳”目标提供科学依据和理论支持。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

河北省位于中国北部(36°05′~42°40′N, 113°27′~119°50′E),省域面积达到 $1.89 \times 10^7 \text{ km}^2$ (图 1),2020 年河北省常住人口 7.46×10^7 人。河北属温带大陆性季风气候,大部分地区四季分明,降水量分布特点为东南多西北少。

1.2 数据来源

土地利用原始数据来源于河北省 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年 Landsat TM/ETM+遥感影像,空间分辨率为 1 km,数据下载于中国科学院资源环境科学数据中心网站(<http://www.resdc.cn>),在 ENVI 4.3 软件中通过辐射校正、几何校正、图像配准和人工解译等处理后得到 5 个年份的土地利用现状图,综合评价精度超过 94%。依据研究需要将土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地。河北省能源消耗和国内生产总值(GDP)数据来自 2000–2020 年的《中国能源统计年鉴》、《河北农村统计年鉴》和《河北经济年鉴》。

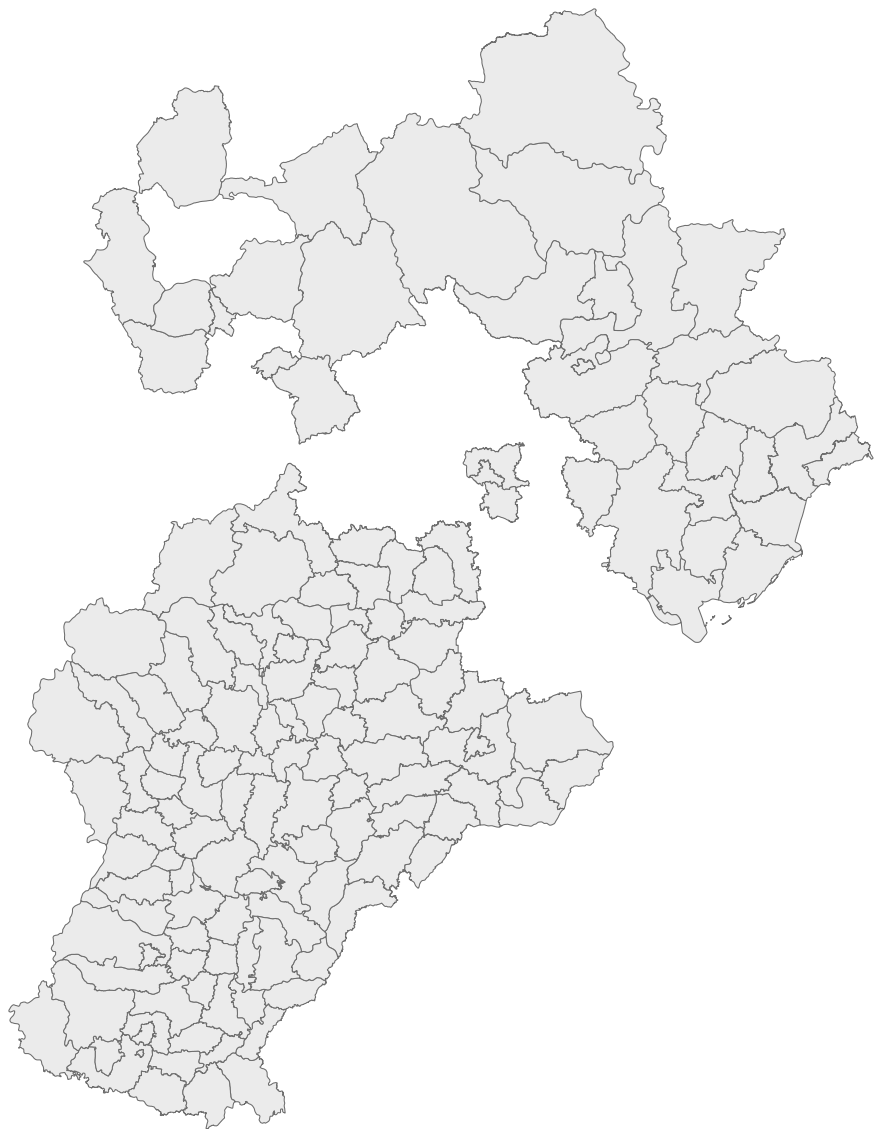


图1 河北省行政区划
Fig.1 Administrative region map of Hebei province

2 研究方法

2.1 土地利用碳排放的测算

土地利用碳排放为土地利用单位面积的碳排放量,可定量反映土地利用碳排放效应^[17]。土地利用变化通过改变原有的土地覆被类型及其所承载的社会经济活动,进而影响陆地生态系统的碳循环过程。何勇^[18]在对广元市碳排放效应的研究中发现,土地利用类型的转变导致了碳排放效应的变化。张润森等^[19]基于无锡市土地利用和能源消耗数据分析了无锡市的碳排放特征。本研究将不同土地利用类型分为碳源用地与碳汇用地,碳源用地包括耕地与建设用地,碳汇用地

则包括林地、草地、水域及未利用地,土地利用碳排放取决于碳源排放与碳汇吸收的差值。耕地、林地、草地、水域及未利用地碳排放在长时间内保持稳定状态,可采用直接碳排放系数法对其碳排放进行测算,土地利用碳排放系数见表1,计算公式如下:

$$E=A_i \times B_i \tag{1}$$

式中, E 为直接碳排放量; A_i 为土地利用类型面积; B_i 为碳排放系数。

本研究在参考之前研究成果的同时,综合考虑了河北省的自然地理与资源环境以及社会经济情况,选取了适合河北省研究区的土地利用类型的碳排放系数。

表 1 土地利用类型直接碳排放系数

Table 1 Direct carbon emission coefficient of land use type

土地利用类型	碳排放系数 [kg/(m ² · a)]	数据来源	本研究取值
耕地	0.047 9	何勇 ^[18]	0.046 6
	0.042 2	张润森等 ^[19]	
	0.049 7	石洪昕等 ^[20]	
林地	-0.058 5	肖红艳等 ^[21]	-0.058 1
	-0.057 7	方精云等 ^[22]	
	-0.058 1	石洪昕等 ^[20]	
草地	-0.021 0	石洪昕等 ^[20]	-0.021 5
	-0.022 0	肖红艳等 ^[21]	
水域	-0.024 8	赖力等 ^[23]	-0.025 0
	-0.025 3	段晓男等 ^[24]	
未利用地	-0.000 5	赖力等 ^[23]	-0.000 5

目前,能源消耗是土地利用碳排放的主要来源,不能仅根据建筑面积数据直接计算二氧化碳排放系数,只能通过不同能源碳排放系数(表 2)来核算出它们在建设用土地利用过程中的能源消耗量,间接计算出土地的碳排放量,计算公式如下:

表 2 标准煤的能量转换系数和碳排放系数

Table 2 Energy conversion coefficient and carbon emission coefficient of standard coal

能源种类	燃料油	煤油	天然气	汽油	电力	柴油	原油	煤炭	焦炭
标准煤系数	1.428 6	1.471 4	1.214 3	1.471 4	0.404 0	1.457 1	1.428 6	0.714 3	0.971 4
碳排放系数(t/tce)	0.618 5	0.571 4	0.448 3	0.553 8	0.793 5	0.592 1	0.585 7	0.755 9	0.855 0

2.3 碳排放经济贡献系数

碳排放的经济贡献系数旨在从经济发展的角度分析研究区域二氧化碳排放量的空间分布,反映区域碳生产率的大小^[28]。计算方法如下:

$$ECC = \frac{G_i}{G} \cdot \frac{C_i}{C} \quad (5)$$

式中, ECC 为碳排放经济贡献系数, G 和 G_i 分别指河北省和 i 地区的国内生产总值(GDP), C 和 C_i 分别指河北省和 i 地区的碳排放量。

2.4 碳生态承载系数

碳生态承载系数是指在研究区域内,一个区域的碳吸收量占总碳吸收量的份额,对应于一个区域碳排放量占总碳排放量的份额,反映了区域碳吸收能力的大小。计算方法如下:

$$L = \Sigma E \times P \quad (2)$$

式中, L 为间接排放量; E 为标准煤量; P 为碳排放系数。

2.2 标准差椭圆

标准差椭圆是由 Lefever^[25] 提出的空间分析方法,常用来分析碳排放量的空间分布特征。根据椭圆标准差和动态重心偏差 2 个因素的差异,得到碳排放的空间分布特征和扩展趋势。椭圆的主次轴代表碳排放空间分布的主次方向^[26-27]。测算公式如下:

$$SDE_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n}}, SDE_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}{n}} \quad (3)$$

$$\tan\theta = \frac{(\sum_{i=1}^n \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n \tilde{y}_i^2) + \sqrt{(\sum_{i=1}^n \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n \tilde{y}_i^2)^2 + 4(\sum_{i=1}^n \tilde{x}_i \tilde{y}_i)^2}}{2 \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i \tilde{y}_i} \quad (4)$$

式中, SDE_x 为椭圆 x 轴长度, SDE_y 为椭圆 y 轴长度, $\tan\theta$ 为椭圆偏转角度, \tilde{x}_i 和 \tilde{y}_i 为要素 i 坐标和椭圆质心(\bar{X}, \bar{Y})的偏离值, n 为要素 i 的个数。

$$ESC = \frac{C_x}{C_x} \cdot \frac{C_i}{C} \quad (6)$$

式中, ESC 为碳生态承载系数, C_x 和 C_x 分别指河北省和 i 地区的碳吸收量, C 和 C_i 分别指河北省和 i 地区的碳排放量。

3 结果与分析

3.1 土地利用碳排放时空特征

根据土地利用现状数据和能源消耗数据测算河北省碳排放量,测算结果见表 3。

由表 3 可知,2000–2020 年河北省碳排放总量呈现明显的上涨趋势,河北省土地利用碳排放量的增长趋势有一定规律性,可分为 2 个阶段:(1) 2000–2010 年为增长迅速阶段,河北省土地利用产

生的碳排放量迅速增加,总碳排放量增加了约 1.5×10^8 t;(2)2010–2020 年为缓慢增长阶段,河北省土地利用产生的碳排放量缓慢增加,总碳排放量增加了约 3.2×10^7 t。由表 3 和图 2 可知,从碳排放强度来看,林地的碳吸收能力最大,每增加 1 km²的林地面积,每年会多吸收 58.0 t 二氧化碳。水域的碳吸收能力次之,每增加 1 km²的面积,每年会多吸收

25.0 t 二氧化碳。草地每增加 1 km²的面积,每年会多吸收 21.0 t 二氧化碳。未利用地的碳吸收能力最弱,每增加 1 km²面积,每年仅多吸收 0.5 t 二氧化碳。建设用地的碳排放能力最强,增加 1 km²的建设用地面积,每年多产生 1 078.0 t 二氧化碳,耕地次之,增加 1 km²的面积,每年多产生 46.0 t 二氧化碳。

表 3 河北省2000–2020 年土地利用碳排放量
Table 3 Land use carbon emissions in Hebei province from 2000 to 2020

土地利用类型	2000 年碳排放量 ($\times 10^4$ t/km ²)	2005 年碳排放量 ($\times 10^4$ t/km ²)	2010 年碳排放量 ($\times 10^4$ t/km ²)	2015 年碳排放量 ($\times 10^4$ t/km ²)	2020 年碳排放量 ($\times 10^4$ t/km ²)
耕地	455.30	453.12	451.74	449.86	421.20
林地	-213.64	-213.76	-213.79	-213.71	-218.17
草地	-72.24	-71.96	-71.81	-71.74	-69.88
水域	-9.95	-9.82	-9.86	-9.94	-12.44
建设用地	8 852.23	16 989.42	24 097.77	26 732.69	27 380.26
未利用地	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.07
碳源量	9 307.53	17 442.54	24 549.51	27 182.55	27 801.47
碳汇量	-295.92	-295.63	-295.55	-295.49	-300.56
合计	9 011.61	17 146.91	24 253.96	26 887.06	27 500.91

如图 2 所示,建设用地占碳源量的比例最大,草地占碳汇量的比例最大。2000 年建设用地碳排放量占碳源量的 95%,到 2020 年增长到 98%。2000 年耕地碳排放量占碳源量的 5%,到 2020 年下降到 2%,碳排放量与建设用地和耕地面积呈现正相关。林地的碳汇能力强于草地,20 年间林地、草地碳吸收量占碳汇量的比例基本保持不变。

河北省碳排放强度整体呈现多圈层结构空间分布特征,主要以资源型城市为中心向外呈圈层结构扩散,石家庄和沧州核心市区次圈层结构逐渐显现。唐山市和武安市矿产资源丰富,研究期内碳排放强度以唐山市和武安市为核心向周围逐渐递减。石家庄作为河北省会,经济提升速度快,碳排放强度逐渐增强并有向外扩散的趋势。沧州市拥有黄骅港,2010 年前沧州市碳排放强度较低,此时黄骅港货物吞吐量低,经济发展较弱,2010 年后,黄骅港的货物运输量变大,沧州市经济快速发展,导致碳排放强度变大,随着时间的发展,碳排放强度有以沧州市为中心向外扩散的趋势。

采用自然断点法将河北省碳排放量划分为 4 级(图 3),用 I ~ IV 表示, I 级碳排放量最低, IV 级碳

排放量最高。2000 年河北省 80%的县域位于 I 级碳排放区,到 2020 年缩减到 58%。2000 年有 6 个县表现为碳吸收,其中丰宁满族自治县碳汇能力最大,约为 12.0 t,其次是隆化县、阜平县、兴隆县、宽城满族自治县和涞源县。至 2020 年,仅有阜平县还表现为碳吸收,约为 0.2 t。I 级碳排放区主要位于河北省的北部和西部,北部地区包括张家口和承德两地,地处燕山山地,有丰富的林地和草地资源,西部地区包括保定、石家庄和张家口西南部,地处太行山地,森林资源丰富,所以碳汇能力强。2000–2020 年,河北省南部地区处于 II 级和 III 级碳排放区域,该地区位于华北大平原中部,为全国重要的粮棉生产基地,耕地资源丰富,碳汇能力较弱。经研究发现,在产业结构上对化石能源依赖性严重的地区,其碳排放远大于碳吸收;唐山市近 20 年一直位于 IV 级碳排放区域,究其原因是其产业具有高火电、多钢铁的特点,碳排放强度最大。邯郸市具有丰富的煤、铁资源并逐渐得到开发,造成大量二氧化碳的排放,所以其碳排放量增长十分迅猛。

3.2 土地利用碳排放异质性分析

采用标准椭圆差模型分析2000–2020 年河北省

土地利用碳排放异质性,探究碳排放空间格局特征及空间分布规律,有助于从省域尺度分析碳排放时空格局特征和碳排放变化趋势。河北省碳排放标准差椭圆参数如表4所示,从 y 轴方向上看,20年间主半轴标准差增加了12.105 km,说明研究区内河北省碳排在主要方向上出现分散。其中2000–2010年主半轴扩大了9.732 km,碳排在主要方向

上表现为分散现象;2010–2015年主半轴缩小了7.038 km,碳排在主要方向上出现极化现象;2015–2020年主半轴扩大了9.411 km,碳排在主要方向上出现分散。从 x 轴方向上看,辅半轴标准差由2000年的114.791 km下降到2020年的108.646 km,表明河北省碳排在西北-东南方向上出现极化现象。

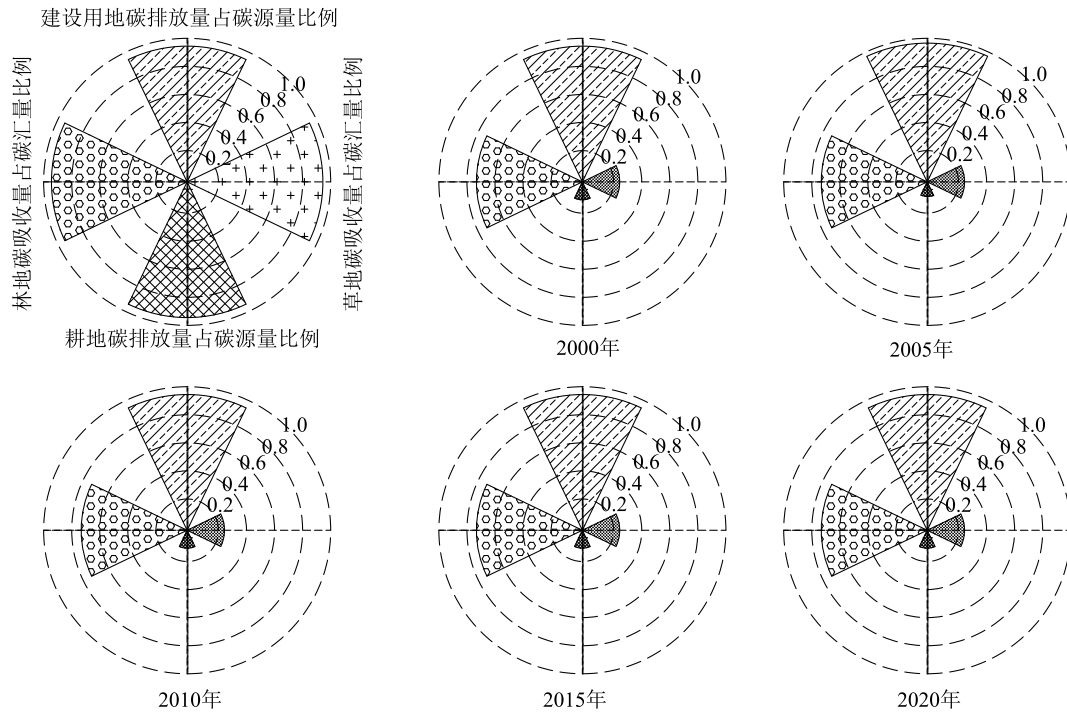


图2 河北省主要碳源/碳汇比例

Fig.2 Proportion of major carbon sources/sinks in Hebei province

从转角(θ)的变化范围来看,2000–2020年 θ 减少了 1.129° ,表明河北省碳排放的空间分布呈现出东北—西南弱化特征,其中2000–2005年 θ 减少了 0.317° ,东北—西南格局出现弱化,2005–2010年 θ

增加了 0.312° ,东北—西南的空间分布格局得到加强,2010–2020年 θ 减少了 1.124° ,东北—西南格局进一步出现弱化。

表4 河北省2000–2020年县域碳排放标准差椭圆参数变化

Table 4 Changes of elliptical parameters of county carbon emission standard deviation in Hebei province from 2000 to 2020

参数	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年
沿 x 轴的标准差(km)	114.791	113.996	109.111	110.168	108.646
沿 y 轴的标准差(km)	282.062	288.862	291.794	284.756	294.167
转角($^\circ$)	46.202	45.885	46.197	45.988	45.073

从图4可以看出,各年份的标准差椭圆均以该年份碳排放的重心为中心(位于河北省中部地区)。

2000年到2020年的标准差椭圆总体上变化不大,以沧州市为核心,东北至兴隆县、宽城满族自治县、

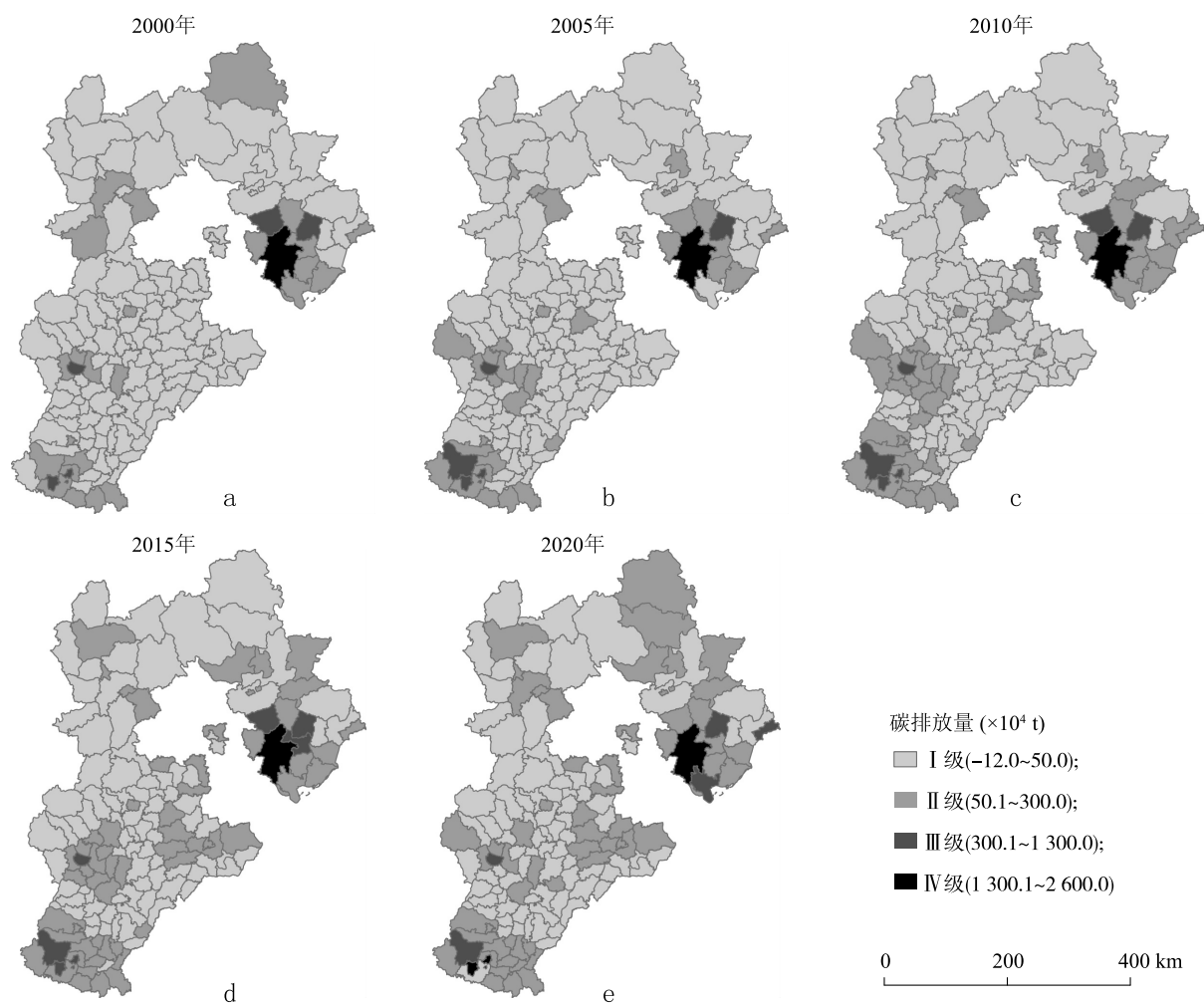


图3 河北省2000–2020 各县碳排放量分布

Fig.3 Distribution of carbon emissions in Hebei province from 2000 to 2020

青龙满族自治县、卢龙县、昌黎县和滦南县,西北连易县、唐县、曲阳、行唐县和井陉县,西南接邢台县、武安市、永年县、曲周县和邱县,东南抵海兴县、盐山县、故城县和临西县,主要覆盖河北省碳排放量最高的地区,结合碳排放高值区的集聚区域,发现河北省县域碳排放热点基本上处于标准差椭圆内。

3.3 各县域碳排放经济贡献系数空间分布

由图5可知,河北省北部、东部和南部地区的土地利用碳排放经济贡献系数为0~2.80,而河北省中部地区经济贡献系数为2.81~7.40,总体空间特征呈现四周低中间高的趋势。本研究结果表明,2000年环京津的廊坊和保定地区的经济贡献系数最高,西北部的张家口、东北部的唐山和南部的邯郸地区经济贡献系数较低。2000年全省共有106个县域碳排放经济贡献系数大于1.00,其中有10个县域

大于4.70;2010年河北省所有县域碳排放经济贡献系数全部大于1.00,但碳排放经济贡献系数大于4.70的县域减少到5个,说明在这期间经济快速发展,一些县域的产业发展粗放,对能源的利用效率也不高,从而使得碳生产力较低甚至下降;2020年碳排放经济贡献系数大于4.70的县域增加到32个,且大部分县域的碳排放经济贡献系数较2000年有所提高。近20年内,除了张家口、承德、唐山和邯郸等地区外,其他地区碳排放经济贡献系数均有所提高,随着时间的推移和经济的快速发展,全省的碳排放经济贡献系数即能源利用效率和碳生产力在不断增大。

3.4 各县域碳吸收能力分析

由图6可知,2000–2020年河北省碳生态承载系数空间分布特征较为明显,呈现西北高东南低的

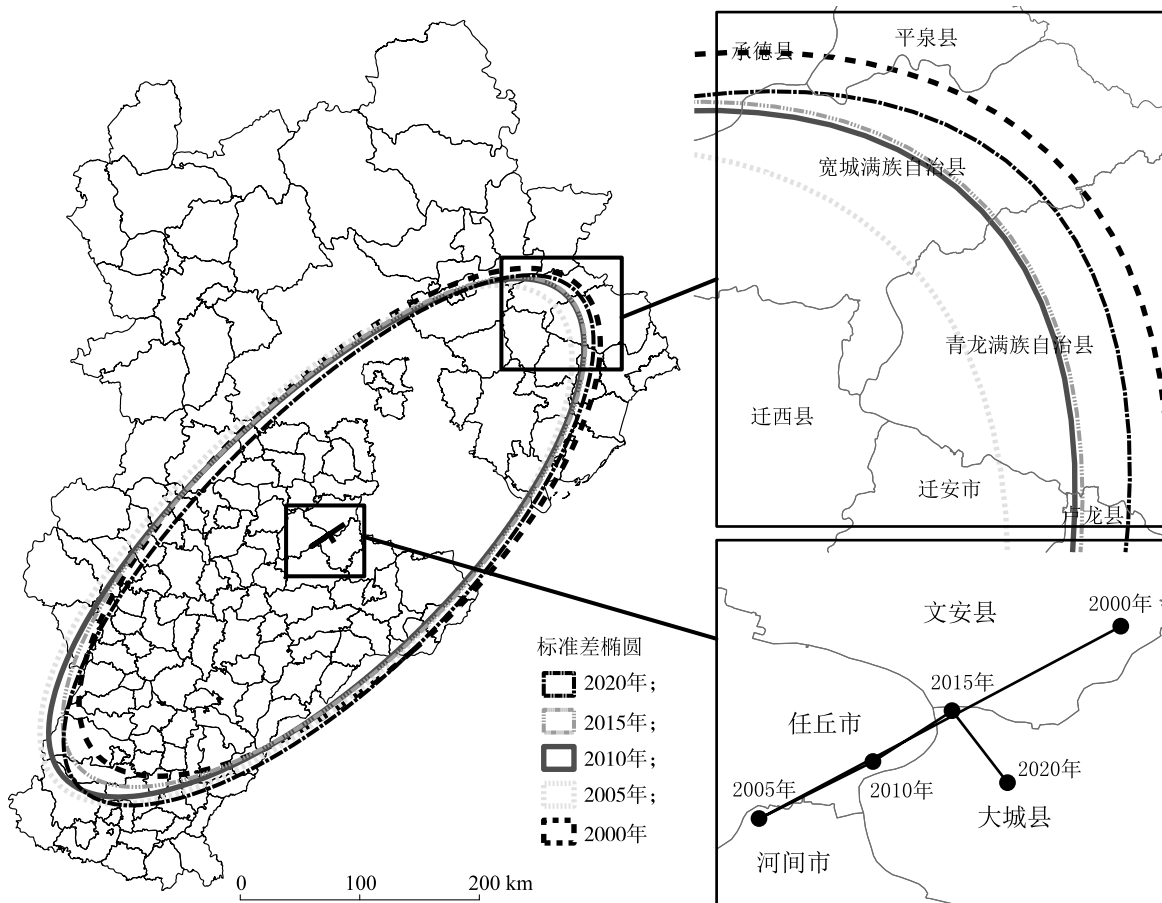


图 4 河北省2000–2020 年碳排放重心及标准差椭圆分布

Fig.4 Elliptic distribution of carbon emission center and standard deviation in Hebei province from 2000 to 2020

特征。河北省北部的燕山山地和西部太行山山脉具有较强的碳汇能力,这是因为这些地区林地和草地资源丰富,生态资源良好,拥有自然资源保护区,这些城市的开发建设较少,从而碳吸收能力较强。就整个研究期看,2000 年河北省碳生态承载系数大于 1.00 的县域有 41 个,到 2020 年增加到 43 个,表明全省有 30% 的县域碳生态承载能力增强。碳生态承载系数计算结果表明,阜平县碳生态承载力最大,碳吸收能力最强,是河北省碳汇主要地区。河北省中部和南部地区碳生态承载系数低于北部,并且大部分地区系数位于 0.50 以下,这是因为中部城市紧挨北京和天津,经济发展迅速,南部地区是主要的粮食生产基地,碳排放量相对增加。

3.5 河北省碳平衡分区及建议

如图 7 所示,基于对河北省碳排放量、碳排放经济贡献系数和生态承载系数等指标的测算,综合考

量区域碳平衡的原则,并参考已有的碳平衡分区依据和标准^[29-32],制定本研究碳平衡分区标准,将河北省划分为碳汇功能区(碳汇量>碳源量, $ECC>1$, $ESC>1$)、低碳保持区(碳汇量<碳源量, $ECC>1$, $ESC>1$)、经济发展区(碳汇量<碳源量, $ECC<1$, $ESC>1$)、碳汇发展区(碳汇量<碳源量, $ECC>1$, $ESC<1$)和高碳优化区(碳汇量<碳源量, $ECC<1$, $ESC<1$)。

碳汇功能区指区域经济贡献系数和生态承载系数高、碳汇量高于碳源量、整体碳汇能力强、呈现碳汇功能、固碳能力强的区域。对碳汇功能区,要加大对自然资源的保护,确保该区域不会消失。低碳保持区指区域的碳生产力和能源利用率较高,且碳汇的生态资源比较丰富、碳吸收能力和承载能力比较强、社会经济的发展与生态资源保护相对均衡的区域,主要包括张家口市、承德市、秦皇岛市、保定市的

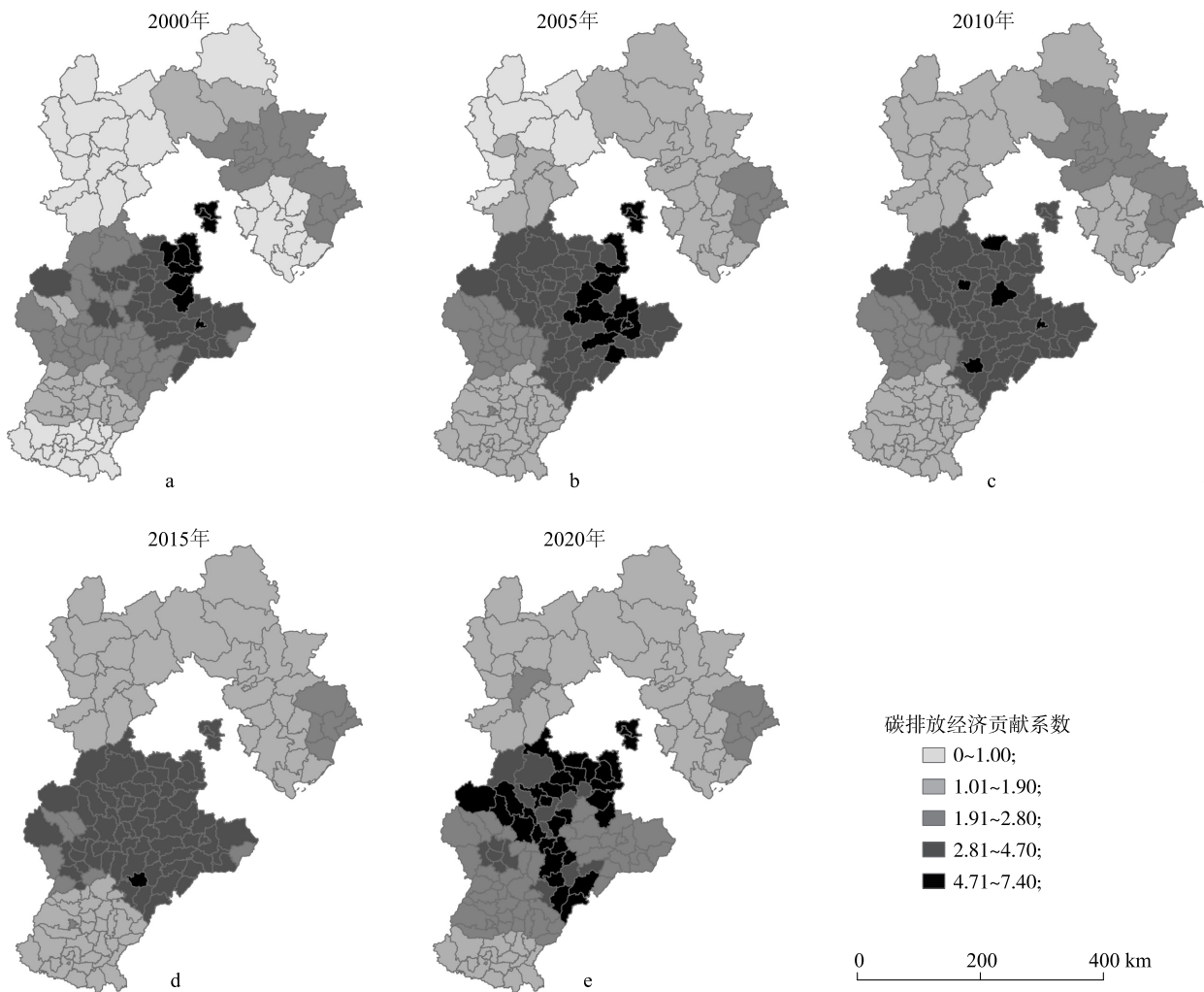


图5 河北省2000~2020年碳排放经济贡献系数空间分布
Fig.5 Spatial distribution of economic contribution coefficient of carbon emission in Hebei province from 2000 to 2020

西北部和邢台市的北部,这些地区的自然生态资源丰富,碳吸收能力和碳承载力大,在经济发展的同时兼具了生态资源的保护,应当继续加大对生态资源用地的保护,可通过扶持新型能源等产业,大力发展以旅游业为主导的第三产业,使产业向低碳产业靠拢。经济发展区指区域碳汇能力较强但经济贡献比较低、能源利用率较低、碳汇量低于碳源量的区域。经济发展区应在保护提升生态资源,保障生态功能的前提下,推进新型环保产业和生态旅游等产业的落地发展,加快低碳技术的研发引进,合理规划发展用地,以求在提高碳生产力和能源利用率的同时,提升其生态屏障功能。2000年有15个经济发展区,到2005年下降到8个经济发展区,2010年至今,河北省没有经济发展区,这说明河北省各个县(市)的能源利用率逐渐提高,减少了对能源资源的浪费。

碳汇发展区指区域碳汇量低于碳源量,经济贡献系数比较高但碳生态承载系数低的区域,该区域分布在河北省的中东部,主要包括保定市东部、廊坊市、石家庄市、沧州市、衡水市、邯郸市和邢台市部分地区,这些地区碳吸收能力虽然不大,但是经济发展比较好,同时碳排放量大,这类地区应提高土地利用率,减小区域内建设用地的扩张速度,缩减对化石能源和高碳产业的依赖性,严格保护生态资源和规划增加生态用地,提高其碳汇能力。高碳优化区指区域内碳排放总量极高,碳生产能力低,碳吸收能力也低的区域,该区域内的经济建设与生态环境水平存在一定的提升空间,未来应着重提升二者发展水平,应当以控制碳排放和绿色发展为主。2000年唐山市和邯郸市为高碳优化区,随着时间的推移,高碳优化区逐渐消失。

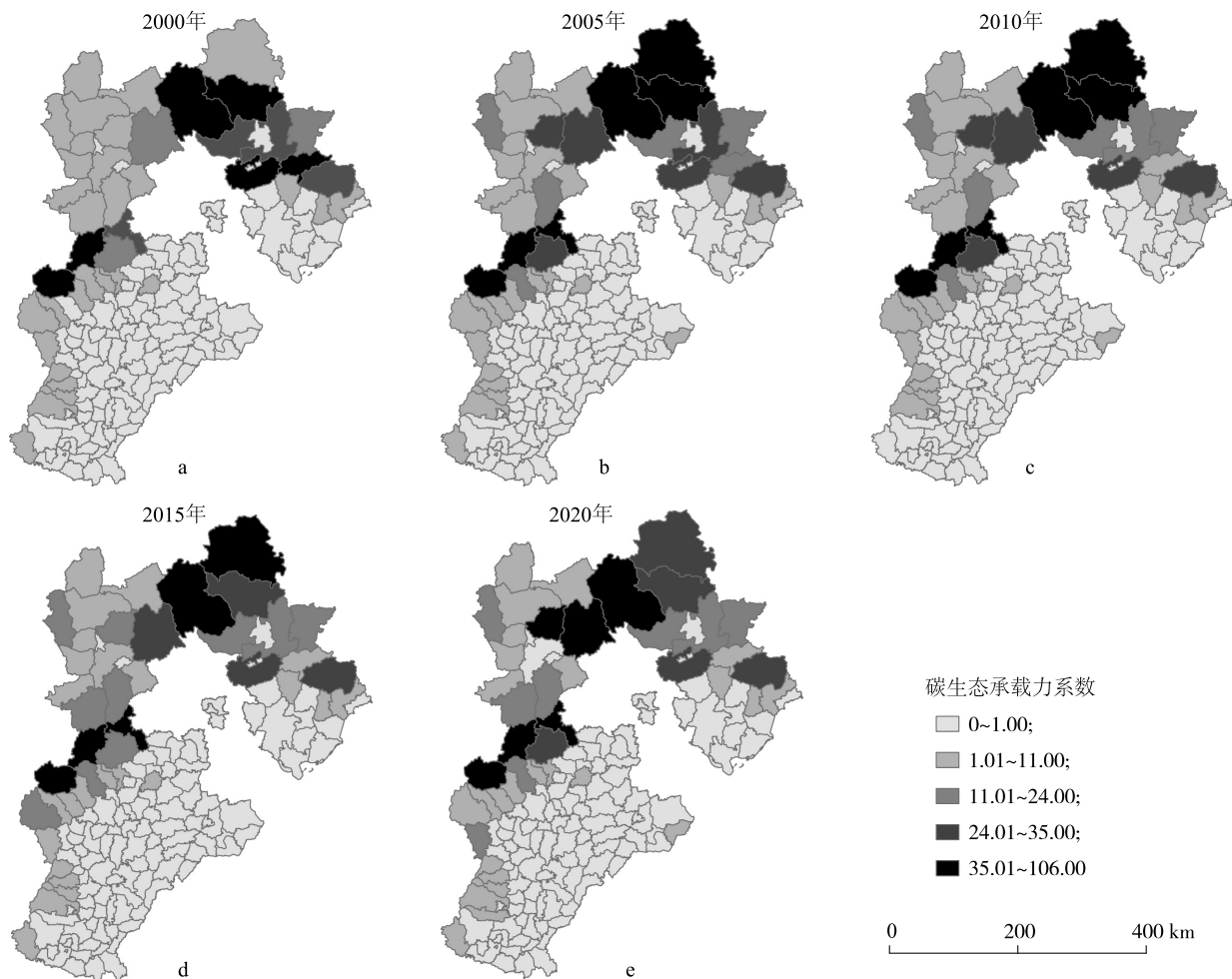


图 6 河北省2000–2020 年碳生态承载力系数空间分布

Fig.6 Spatial distribution of carbon ecological carrying capacity coefficient in Hebei province from 2000 to 2020

4 讨论

随着经济的快速发展及城镇化进程的继续推进,土地利用变化引起的碳排放量逐年增大。在碳达峰和碳中和的概念提出后,中国响应联合国的号召亦提出了碳达峰和碳中和的目标,力争解决碳排放的问题。在“两山”理念和“双碳”目标的背景下,本研究以河北省为例,对土地碳排放时空格局和碳协调分区开展研究。

在土地碳排放时空格局特征演变中,碳排放量高的地区经济发达、交通便利、地势平坦开阔,有丰富的矿产资源。李缘缘等^[31]采用碳排放系数法和聚类与异常值分析法对中国碳排放量进行分析。赵先超等^[32]采用碳排放测算模型和基于面板数据的分析方法对湖南省碳排放效应进行分析。杨静媛

等^[30]采用碳排放测算模型和基尼系数法分析江西省的碳排放空间格局。以上研究得到碳排放时空格局特征,与本研究结果一致。因此,本研究具有一定可行性和普适性,可用本研究方法分析其他地区碳排放的时空格局演变。在碳平衡分区中,张正峰等^[33]以碳生态承载系数分大区,以叠加社会网络分析和局部自相关分析分小区,把京津冀地区分为 7 个碳平衡区。魏燕茹等^[34]采用碳排放总量和碳生态承载系数将福建省分为 3 类区域。碳排放量与区域经济水平的关系密不可分,故本研究在碳排放量和碳生态承载系数的基础上,增加了碳排放经济贡献系数,把河北省分为 5 类碳平衡区域。综上所述,本研究在一定程度上有助于河北省碳排放量逐年增高问题的解决和低碳平衡发展政策的实施,可为地貌类型差异较大地区的碳排放测算和分析碳排放时

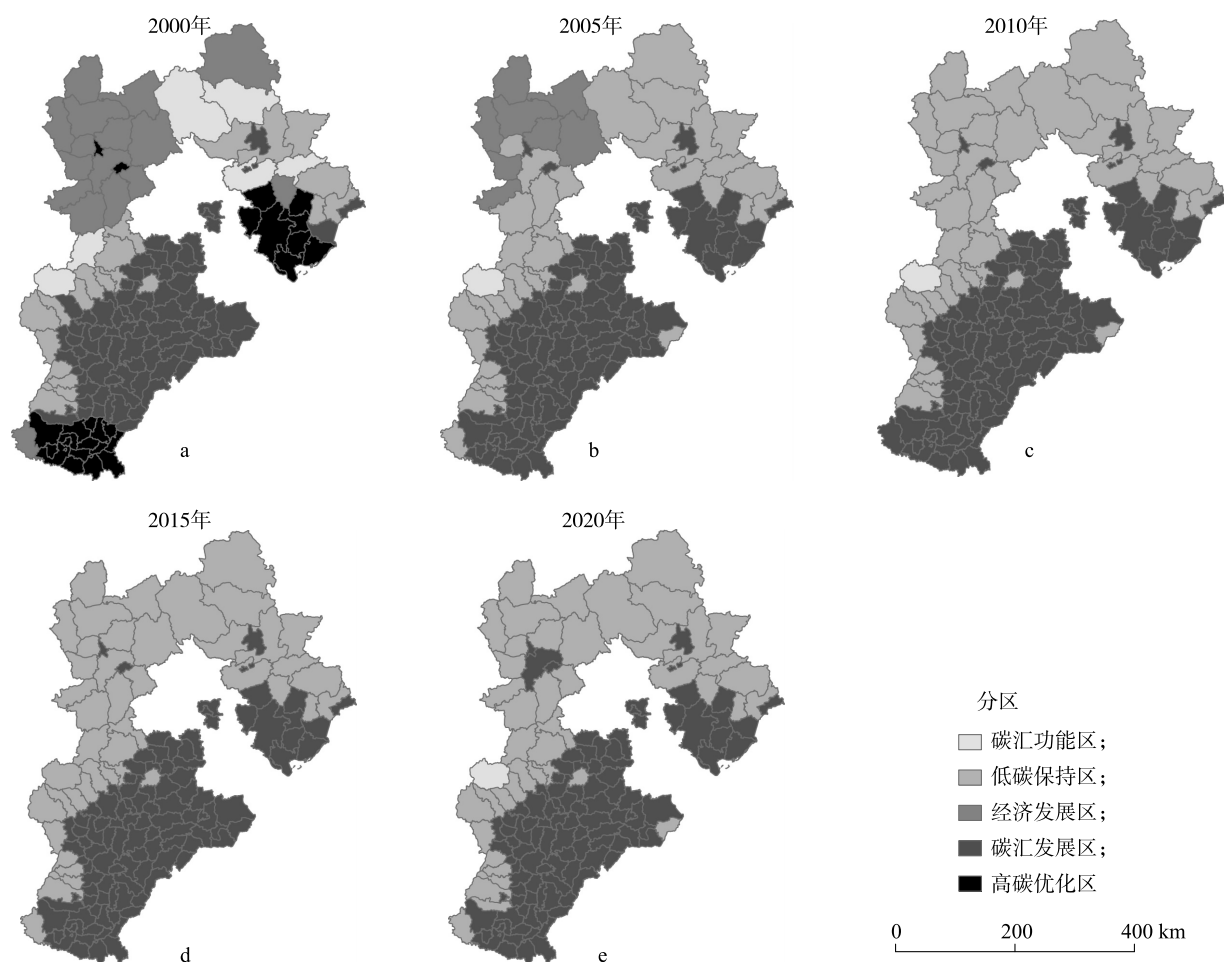


图7 河北省2000-2020年各县域碳平衡分区

Fig.7 Carbon balanced zoning of counties in Hebei province from 2000 to 2020

空分布特征提供思路和方法。

本研究还存在不足之处,有待进一步优化,比如本研究在测算河北省碳排放量时,构建了碳排放测算模型,采用的碳排放系数参考了其他相似文献。虽然选择了与河北省自然地理条件较为相似的研究区域的碳排放系数,但因不同研究区自然和经济状况存在差异,所测算结果可能会存在偏差。在未来的研究中应根据河北省自然和经济的实际情况,进一步修正适用于河北省的碳排放系数。

5 结论

(1)2000-2020年河北省碳排放总量呈现明显的增加趋势,碳排放总量从2000年的 9.01×10^7 t上升到2020年的 2.75×10^8 t,但上涨趋势以2010年为时间结点,2000-2010年碳排放量增长十分迅猛,2010-2020年碳排放量增长则相对缓慢。因此,要减少对化石能

源的使用,多开发和利用新型的清洁能源,缩减碳源和碳汇的差距,逐渐实现碳中和的目标。

(2)河北省碳排放强度呈现多圈层结构空间分布特征,主要以资源型城市为中心向外呈圈层结构扩散,石家庄和沧州核心市区次圈层结构逐渐显现。各地区应采取合适的碳减排政策,因地制宜,争取省内共同低碳发展,为中国碳中和助力。

(3)2000-2020年河北省碳排放经济贡献系数总体空间特征为四周低中间高,随着时间的推移和经济的快速发展,全省的碳排放经济贡献系数即能源利用效率和碳生产力在不断提高。2000-2020年河北省碳生态承载系数空间分布特征较为明显,呈现西北高东南低的分布特征。

(4)基于碳平衡分析,把河北省分为碳汇功能区、低碳保持区、经济发展区、碳汇发展区和高碳优化区,并提出相应的策略。其中碳汇功能区、经济发

展区和高碳优化区随着时间的推移逐渐消失,在全国低碳发展的大背景下,河北省应当合理利用土地资源,增加固碳能力,提高碳汇功能。

参考文献:

- [1] JEAN P C, ANVER G. The role of the European union in global change research[J]. AMBIO, 1994, 23(1): 101-103.
- [2] 李国煜,王嘉怡,曹宇,等. 碳排放约束下的福建省城镇建设用地利用效率动态变化与影响因素[J]. 中国土地科学, 2020, 34(4): 69-77.
- [3] 李小康,王晓鸣,华虹. 土地利用结构变化对碳排放的影响关系及机理研究[J]. 生态经济, 2018, 34(1): 14-19.
- [4] 魏媛,吴长勇. 喀斯特贫困山区土地利用碳排放效应及风险研究——以贵州省为例[J]. 生态经济, 2018, 34(3): 31-36.
- [5] 赵荣钦,李志萍,韩宇平,等. 区域“水-土-能-碳”耦合作用机制分析[J]. 地理学报, 2016, 71(9): 1613-1628.
- [6] REVISED I. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[J]. Reference Manual, 1996, 2(3): 325-333.
- [7] CAMPBELL C A, ZENTNER R P, LIANG B C, et al. Organic C accumulation in soil over 30 years in semiarid southwestern Saskatchewan-effect of crop rotations and fertilizers[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2000, 80(1): 179-192.
- [8] LAL R, GRIFFIN M, APT J, et al. Managing soil carbon[J]. Science, 2004, 304(5669): 393-393.
- [9] 吴建国,张小全,徐德应. 土地利用变化对生态系统碳汇功能影响的综合评价[J]. 中国工程科学, 2003(9): 65-71, 77.
- [10] KAYA Y. The role of CO₂ removal and disposal[J]. Energy Conversion & Management, 1995, 36(6/7/8/9): 375-380.
- [11] KAYA Y, TAMAKI M, YAMAGISHI K, et al. Japan's strategy in technology development for mitigating global warming[J]. Energy Conversion & Management, 1996, 37(6/7/8): 679-684.
- [12] ANG B W, LEE S Y. Decomposition of industrial energy consumption: some methodological and application issues[J]. Energy Economics, 1994, 16(2): 83-92.
- [13] ANG B W. The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide[J]. Energy Policy, 2005, 33(7): 867-871.
- [14] 张德英,张丽霞. 碳源排碳量估算办法研究进展[J]. 内蒙古林业科技, 2005(1): 20-23.
- [15] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等. 1981~2000年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2007(6): 804-812.
- [16] 汤洁,毛子龙,王晨野,等. 基于碳平衡的区域土地利用结构优化——以吉林省通榆县为例[J]. 资源科学, 2009, 31(1): 130-135.
- [17] 赵荣钦,黄贤金. 基于能源消费的江苏省土地利用碳排放与碳足迹[J]. 地理研究, 2010, 29(9): 1639-1649.
- [18] 何勇. 中国气候、陆地生态系统碳循环研究[M]. 北京:气象出版社, 2006.
- [19] 张润森,濮励杰,文继群,等. 建设用地扩张与碳排放效应的库兹涅茨曲线假说及验证[J]. 自然资源学报, 2012, 27(5): 723-733.
- [20] 石洪昕,穆兴民,张应龙,等. 四川省广元市不同土地利用类型的碳排放效应研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(3): 101-106.
- [21] 肖红艳,袁兴中,李波,等. 土地利用变化碳排放效应研究——以重庆市为例[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2012, 29(1): 38-42, 115.
- [22] 方精云,刘国华,徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. 生态学报, 1996, 16(5): 497-508.
- [23] 赖力,黄贤金. 全国土地利用总体规划目标的生态足迹评价研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 66-71.
- [24] 段晓男,王效科,逯非,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.
- [25] LEFEVER D W. Measuring geographic concentration by means of the standard deviational ellipse[J]. American Journal of Sociology, 1926, 32(1): 88-94.
- [26] 赵媛,杨足膺,郝丽莎,等. 中国石油资源流动源—汇系统空间格局特征[J]. 地理学报, 2012, 67(4): 455-466.
- [27] 赵璐,赵作权. 基于特征椭圆的中国经济空间分异研究[J]. 地理科学, 2014, 34(8): 979-986.
- [28] 徐影,郭楠,茹凯丽,等. 碳中和视角下福建省国土空间分区特征与优化策略[J]. 应用生态学报, 2022, 33(2): 500-508.
- [29] 余光英,员开奇. 基于碳平衡适宜性评价的城市圈土地利用结构优化[J]. 水土保持研究, 2014, 21(5): 179-184, 192.
- [30] 杨静媛,张明,多玲花,等. 江西省土地利用碳排放空间格局及碳平衡分区[J/OL]. 环境科学研究, 2022, 35(10): 1-14. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2022.05.04.
- [31] 李缘缘,魏伟,周俊菊,等. 中国土地利用碳排放变化及协调分区[J/OL]. 环境科学, 2022: 1-13. DOI: 10.13227/j. hjkx. 202204009.
- [32] 赵先超,朱翔,周跃云. 湖南省不同土地利用方式的碳排放效应及时空格局分析[J]. 环境科学学报, 2013, 33(3): 941-949.
- [33] 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/OL]. 中国环境科学, 2022, 43(4): 1-12. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20221011.002.
- [34] 魏燕茹,陈松林. 福建省土地利用碳排放空间关联性与碳平衡分区[J]. 生态学报, 2021, 41(14): 5814-5824.

(责任编辑:陈海霞)