

# 河北省区县土地利用碳排放与生态系统服务价值时空关系演化研究

魏慧<sup>1,3</sup>, 李安佳<sup>1</sup>, 尹旭<sup>2</sup>, 王沛然<sup>1</sup>

(1. 河北经贸大学公共管理学院, 石家庄 050061;

2. 河北师范大学地理科学学院, 石家庄 050024; 3. 河北省城乡融合发展协同创新中心, 石家庄 050061)

**摘要:** [目的] 探究河北省土地利用碳排放与生态系统服务价值(ESV)时空关系的动态演化与空间分异特征, 提出土地利用优化调控对策建议, 助力区域低碳减排和生态文明建设。[方法] 以土地利用变化迅速的河北省为案例区, 以区县为研究单元, 综合碳排放系数法、当量因子法、双变量空间自相关模型, 揭示河北省土地利用碳排放与 ESV 的时空关联演化。[结果] (1) 河北省土地利用碳排放呈增加趋势, 由 2000 年的 4 437.98 万 t 增至 2020 年的 12 867.79 万 t, 唐山市、沧州市的黄骅市、邯郸市的武安市以及石家庄市的藁城区和鹿泉区碳排放较高, 张家口市和承德市等西北部生态涵养区碳吸收较高, 建设用地和林地分别为主要碳源和碳汇。(2) ESV 总量呈先降低后增加态势, 由 2000 年的 3 172.21 亿元降至 2010 年的 3 152.52 亿元, 再增至 2020 年的 3 261.50 亿元, 林地为贡献主体, 张家口市、承德市等西北生态涵养区是其高值聚集区。(3) 土地利用碳排放与 ESV 呈显著空间负相关, 以北部的低—高集聚和中南部的低—低集聚为主, 且逐渐由集聚向分散转化, 二者双向调节、空间关系有所改善。[结论] 河北省土地利用碳排放与 ESV 时空分异明显, 分别呈“东南部高、西北部低”和“西北部高, 中南部低”的空间格局, 二者存在显著的空间负相关关系, 且呈由集聚向分散的变化态势。

**关键词:** 土地利用碳排放; 生态系统服务价值; 时空演化; 河北省; 区县尺度

中图分类号: F301.2; X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0274-09

## Spatiotemporal evolution of relationship between land use carbon emissions and ecosystem service value at county level in Hebei Province

Wei Hui<sup>1,3</sup>, Li Anjia<sup>1</sup>, Yin Xu<sup>2</sup>, Wang Peiran<sup>1</sup>

(1. School of Public Management, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang 050061,

China; 2. School of Geographic Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China;

3. Hebei Collaborative Innovation Center for Urban-rural Integrated Development, Shijiazhuang 050061, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to explore the dynamic evolution and spatial differentiation characteristics of the spatiotemporal relationship between land use carbon emissions and ecosystem service value (ESV) in Hebei Province, and put forward countermeasures and suggestions for optimal regulation of land use to support regional low-carbon emission reduction and ecological civilization construction. [Methods] Taking Hebei Province, where land use changes rapidly, as the study area, and using districts and counties as research units, this study integrated the carbon emission coefficient method, equivalent factor method, and bivariate spatial autocorrelation model to reveal the spatiotemporal correlation evolution of land use carbon emissions and ESV in Hebei Province. [Results] (1) Land use carbon emissions in Hebei Province showed an increasing trend, rising from 44,379.8

收稿日期: 2025-04-30

修回日期: 2025-05-28

接受日期: 2025-06-04

资助项目: 教育部人文社会科学研究项目(24YJCZH329); 河北省教育厅科学研究资助项目(BJK2023081); 河北经贸大学科学研究与发展计划项目(2023ZD04); 河北经贸大学在读研究生创新能力培养资助项目(XJCX202533)

第一作者: 魏慧(1993—), 女, 山东潍坊人, 博士, 讲师, 主要从事土地利用变化及其生态响应研究。E-mail: weih@hueb.edu.cn

通信作者: 尹旭(1993—), 男, 河北唐山人, 博士, 讲师, 主要从事人口地理与区域可持续发展研究。E-mail: yinxubj@163.com

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

million tons in 2000 to 128.677 9 million tons in 2020. Areas with relatively high carbon emissions included Tangshan City, Huanghua City (Cangzhou City), Wu'an City (Handan City), Gaocheng District and Luquan District (Shijiazhuang City). Northwestern ecological conservation areas such as Zhangjiakou City and Chengde City had relatively high carbon sequestration. Construction land and forest land were the main carbon source and carbon sink, respectively. (2) The total ESV showed a trend of first decreasing and then increasing: it decreased from 317.221 billion yuan in 2000 to 315.252 billion yuan in 2010, and then increased to 326.150 billion yuan in 2020. Forest land was the main contributor, and high-value agglomeration areas of ESV were concentrated in northwestern ecological conservation areas such as Zhangjiakou City and Chengde City. (3) There was a significant negative spatial correlation between land use carbon emissions and ESV, mainly characterized by low-high agglomeration in the north and low-low agglomeration in the central and southern regions. This correlation gradually transformed from agglomeration to dispersion. With mutual regulation between the two, their spatial relationship improved. [Conclusion] The spatiotemporal differentiation of land use carbon emissions and ESV in Hebei Province is distinct, showing spatial patterns of "high in the southeast and low in the northwest" and "high in the northwest and low in the central-southern region" respectively. Their correlation shows a significant negative spatial correlation, with a changing trend from agglomeration to dispersion.

**Keywords:** land use carbon emissions; ecosystem service value; spatiotemporal evolution; Hebei Province; county level

土地利用碳排放(Land Use Carbon Emissions)是因土地利用变化导致的温室气体排放,显著影响全球碳循环和气候变化<sup>[1]</sup>。生态系统服务价值(Ecosystem Service Value, ESV)是人类从生态系统中获得的经济价值,可作为区域生态环境质量评价的重要指征。土地利用是人类利用和改造自然的主要手段,其类型的差异会导致不同的碳排放特征,而利用方式的转变也会改变生态系统的空间格局与规模,进而影响ESV。土地利用对碳排放与ESV的多重影响已成为地理学和生态学领域的研究重点。

中国于2020年9月制定“双碳”目标,并随后出台了一系列应对气候变化的政策。其中,2021年发布的《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》中明确提出,要持续增强生态系统的碳汇能力,这表明生态系统服务与碳排放之间存在紧密的相关性<sup>[2]</sup>。为此,开展区域土地利用碳排放与ESV的时空关联研究,对于保护区域生态环境、实现区域可持续发展、支撑国家“双碳”目标与履行全球气候治理责任至关重要。

在全球气候变化和生态系统退化日益严峻的背景下,针对土地利用碳排放和ESV单个子系统的研究成果丰富,且多以国家<sup>[3]</sup>、省域<sup>[4]</sup>及城市群等<sup>[5]</sup>为基本研究单元。其中,在土地利用碳排放方面,相关学者运用碳排放系数法<sup>[6]</sup>、模型模拟法等<sup>[7]</sup>定量核算区域碳排放,进而识别其时空演变格局<sup>[6,8]</sup>、影响因素<sup>[9]</sup>及未来趋势等<sup>[7,10]</sup>;在ESV方面,相关学者多运用当量因子法<sup>[11]</sup>、模型计算法等<sup>[12]</sup>方法对其进行核算,并

对其时空演变特征<sup>[13]</sup>、模拟预测<sup>[14]</sup>及其与其他因素的相互关系<sup>[15-16]</sup>展开研究;而在土地利用碳排放与ESV时空关系方面,虽有部分相关研究出现<sup>[17-18]</sup>,但仍处于起步阶段,成果较少且深度尚显薄弱,其背后深层次的作用机理也有待进一步挖掘。本研究将土地利用碳排放与ESV纳入双要素互动分析框架,与传统单一关注土地利用碳排放或ESV的研究形成互补,挖掘两者在空间上更深层次的互动关系。此外,区县是中国城乡经济发展、土地增减及政策运行的基本单元,将土地利用碳排放与ESV纳入双要素互动分析框架,开展区县单元的土地利用碳排放与ESV时空关系演化研究,不仅能够揭示不同土地利用方式在碳排放和生态效益之间的平衡作用,还能为优化土地资源分配、提升生态系统服务功能提供科学依据。

河北省是中国华北地区兼具地理枢纽、经济重镇与生态屏障功能的关键省份,承担着疏解北京非首都功能、保障区域生态安全的双重使命,其发展模式对全国资源型地区转型具有重要示范意义<sup>[19]</sup>。然而,以高强度土地利用变化为表征的快速城镇化,致使河北省土地利用结构不合理、资源枯竭和环境退化等人地关系问题突出。为此,本研究以河北省为研究区,以区县为研究单元,从土地利用视角出发,探究土地利用碳排放与ESV的时空关系演化特征,以期推动河北省土地利用结构与布局优化,助力北京非首都功能的有序疏解,加快京津冀协同减排增汇与“双碳”目标的实现。

# 1 材料与方 法

## 1.1 研究区概况

河北省(113°27'—119°50'E, 36°05'—42°40'N)地处华北平原北部,属温带大陆性季风气候,行政区划包括石家庄、衡水、邢台、邯郸、保定、廊坊、沧州、张家口、承德、秦皇岛和唐山11个地级市,与定州和辛集两个省辖县级市。河北省陆区国土面积18.88万km<sup>2</sup>,管辖海域面积0.72万km<sup>2</sup>,是中国唯一兼具高原、山地、丘陵、平原、湖泊和海滨的省份,其高程区间为0~2882m,土地利用类型多样,耕地、建设用地和林地是主要的土地利用类型。河北省独特的地理位置使其成为京津冀协同发展的核心生态屏障与产业转型前沿阵地,也是连接东北、华北、西北的交通枢纽。河北省城

镇化进程较快,在全国经济格局中占据重要地位,2024年地区生产总值达47526.9亿元<sup>[20]</sup>,作为传统工业大省,钢铁、煤炭等产业占河北省经济主导地位,如2024年钢铁产量占全国生产比重的22.8%。河北省碳排放量在华北地区占据突出地位<sup>[21]</sup>,高能耗与高碳排放问题亟待解决。同时,河北省也拥有较为丰富的生态系统资源,例如全球最大的人工林海塞罕坝国家森林公园与北戴河国家湿地等,是京津冀地区不可或缺的生态安全网。作为畿辅重地与京津冀协同发展的核心区域,河北省亟待加快培育新兴产业,推动转型,促进减排增汇,其生态修复与环境改善任重道远<sup>[19]</sup>。

## 1.2 数据来源与说明

本研究所用数据类型及其来源与空间分辨率见表1。

表1 数据来源与说明

Table 1 Data source and description

数据类型	数据来源	分辨率
土地利用数据	中国科学院资源环境科学与数据中心( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )	30 m
夜间灯光影像数据	Wu等 <sup>[22]</sup> 于IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing期刊公开发表的数据集( <a href="https://www.grss-ieee.org/">https://www.grss-ieee.org/</a> )	1 km
能源消耗和社会经济数据	《河北统计年鉴》《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国城市统计年鉴》和《全国农产品成本收益资料汇编》等统计资料	

## 1.3 研究方法

1.3.1 土地利用碳排放核算 本研究参考前人研究成果<sup>[23-24]</sup>,结合河北省实际土地利用情况,运用碳排放系数法核算土地利用碳排放。其中耕地、林地、草地、水域和未利用地的碳排放核算采用直接计算法,碳排放系数分别为0.4220, -0.6125, -0.0210, -0.2570, -0.0050。建设用地的碳排放核算采用间接计算法。

(1) 直接计算法。

$$CA_x = \sum C_i = \sum S_i \times \alpha_i \quad (1)$$

式中:CA<sub>x</sub>为第x个行政区的碳排放总量;C<sub>i</sub>, S<sub>i</sub>和α<sub>i</sub>分别为第i种地类的碳排放量、面积和碳排放系数。

(2) 间接计算法。本研究选取煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气、液化石油气和电力10大能源,综合标准煤换算系数和碳排放系数(表2),核算建设用地碳排放量。因区县数据缺失,而夜间灯光与地区经济活动关系密切,经济活动又与建设用地碳排放量具有相关性,故本研究利用夜间灯光数据对河北省区县的建设用地碳排放量进行反演<sup>[25-26]</sup>。由表3可知,将河北省市域夜间灯光亮度总值与各市建设用地碳排放量进行拟合,得到河北省市域单元能源消耗和建设用地碳排放的拟合方程,拟合程度较高,R<sup>2</sup>均高于0.70。基于区县夜间灯光数据,结合拟合方程,反演得出河北省区县建设用地碳

排放量。

$$CB_x = \sum_{i=1}^n e_i \times \beta_i \times \gamma_i \quad (2)$$

式中:CB<sub>x</sub>为第x市建设用地碳排放量;e<sub>i</sub>为第i种能源的能源消费总量;β<sub>i</sub>为标准煤换算系数;γ<sub>i</sub>为碳排放系数。

表2 河北省各类型能源的标准煤换算系数以及碳排放系数

Table 2 Standard coal conversion factors and carbon emission coefficients for different energy types in Hebei Province

能源类型	标准煤换算系数	碳排放系数
煤炭	0.7143	0.7559
焦炭	0.9714	0.8550
原油	1.4286	0.5857
汽油	1.4714	0.5538
煤油	1.4714	0.5714
柴油	1.4571	0.5921
燃料油	1.4286	0.6185
天然气	1.7143	0.5042
液化石油气	1.2280	0.5857
电力	0.1229	0.2132

1.3.2 ESV核算 本研究基于2015年谢高地等<sup>[27]</sup>制定的中国陆地生态系统服务价值当量表,参考已有研

究成果<sup>[18,28-29]</sup>,结合河北省实际土地利用和经济社会发展情况,进行粮食单产经济价值修正。在此基础上,根据不同土地利用类型的面积与相应的ESV系数进行相乘以及加权求和,得到各县的ESV总量。以下为具体步骤:

(1) 粮食单产经济价值修正。已有研究表明,1个ESV当量的价值量由每公顷农田年平均自然粮食产量的经济价值1/7来确定<sup>[27]</sup>。综合考虑河北省生态系统实际情况,本研究选取稻谷、小麦和玉米3种主要农作物,并将其播种面积、单产和粮食价格作为基础数据。为减少粮食价格水平波动产生的影响,本研究以2020年为基期,运用消费者物价指数(Consumer Price Index, CPI),将2000年、2005年、2010年、2015年的粮食价格调整至2020年价格水平。基于上述运算,得到2000—2020年河北省粮食产量的经济价值为1 698.88元/hm<sup>2</sup>,进一步得出河北省ESV系数(表4)。

表 4 河北省各土地利用类型的ESV系数  
Table 4 ESV coefficients for different land use types in Hebei Province

生态系统服务		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
供给服务	食物生产	1877.26	428.97	396.41	1112.77	0.00	8.49
	原料生产	416.23	985.35	583.28	620.09	0.00	25.48
	水资源供给	-2217.04	509.66	322.79	9241.91	0.00	16.99
调节服务	气体调节	1512.00	3240.62	2049.98	2268.01	0.00	110.43
	气候调节	789.98	9696.36	5419.43	5003.20	0.00	84.94
	净化环境	229.35	2841.38	1789.49	7772.38	0.00	348.27
	水文调节	2539.83	6345.32	3969.72	107428.74	0.00	203.87
支持服务	土壤保持	883.42	3945.65	2497.36	2752.19	0.00	127.42
	维持养分	263.33	301.55	192.54	212.36	0.00	8.49
	生物多样性	288.81	3593.13	2270.84	8851.17	0.00	118.92
文化服务	美学景观	127.42	1575.71	1002.34	5623.30	0.00	50.97
合计		6710.58	33463.71	20494.17	150886.12	0.00	1104.27

(2) 河北省区县ESV核算。

$$ESV = \sum_{i=1}^n S_{ij} \times E_r \quad (3)$$

式中: $S_{ij}$ 为区县*j*中第*i*地类的面积; $E_r$ 为修正后的ESV系数。

1.3.3 土地利用碳排放与ESV双变量空间自相关分析 本研究利用GeoDa软件,借助双变量全局莫兰指数(Bivariate Global Moran's *I*)和双变量局部莫兰指数(Bivariate Local Moran's *I*),探究土地利用碳排放与ESV间的空间聚类和离散关系,并通过LISA双变量集聚图对其空间关系进行可视化。模型计算公式为:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (4)$$

表 3 河北省各市能源消费碳排放量拟合方程

Table 3 Fitting equation between energy consumption carbon emissions and total night-time light brightness of each city in Hebei Province

地级市	公式	R <sup>2</sup>
承德	$y = -0.0020x^2 + 259.9574x - 2148350.7816$	0.9988
张家口	$y = -0.0016x^2 + 267.0448x - 5210130.8110$	0.9951
秦皇岛	$y = -0.0018x^2 + 244.0938x - 2522723.2601$	0.9728
唐山	$y = -0.0009x^2 + 429.0482x - 22497599.4943$	0.9936
保定	$y = -0.0008x^2 + 316.9759x - 16136662.4999$	0.9986
廊坊	$y = 1.2083x^{1.3460}$	0.9269
沧州	$y = -0.0019x^2 + 636.8169x - 37021465.6978$	0.9743
石家庄	$y = 0.0046x + 41811.6055$	0.7055
衡水	$y = -0.0036x^2 + 485.1271x - 10015174.2472$	0.7302
邢台	$y = -0.0017x^2 + 405.5922x - 14880042.3515$	0.7322
邯郸	$y = -0.0029x^2 + 793.7881x - 39702839.1399$	0.9664

注: $y$ 代表能源消耗碳排放; $x$ 代表夜间灯光总亮度。

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x})}{S^2} \quad (5)$$

式中: $I$ 和 $I_i$ 分别为双变量全局莫兰指数(Bivariate Global Moran's *I*)和双变量局部莫兰指数(Bivariate Local Moran's *I*); $n$ 为研究区的区县个数; $W_{ij}$ 为 $n \times n$ 的空间权重矩阵; $x_i$ 和 $x_j$ 分别为区县*i*和*j*的属性值; $\bar{x}$ 和 $S^2$ 为属性值的均值和方差。

## 2 结果与分析

### 2.1 土地利用碳排放时空格局变化特征

研究时段内,河北省土地利用碳排放呈增加趋势,由2000年的4 437.98万t增至2020年的12 867.79万t,增长率为189.95%(表5)。建设用地是土地利用碳排放的贡献主体,其占土地利用碳排放的比重也

呈逐期上涨态势,分别为96.19%,98.13%,98.58%,98.90%,98.97%;耕地碳排放逐期减少,所占比重也呈下降趋势,分别为9.25%,4.59%,3.47%,3.05%,2.97%。2000—2020年河北省土地利用碳吸收呈缓

慢上升趋势,由241.79万t增至248.42万t,增长率为2.74%(表5)。林地是土地利用碳吸收的贡献主体,其所占比重较为稳定,始终处于92%~93%,分别为92.80%,92.90%,92.11%,92.44%,92.17%。

表5 2000—2020年河北省各地类土地利用碳排放

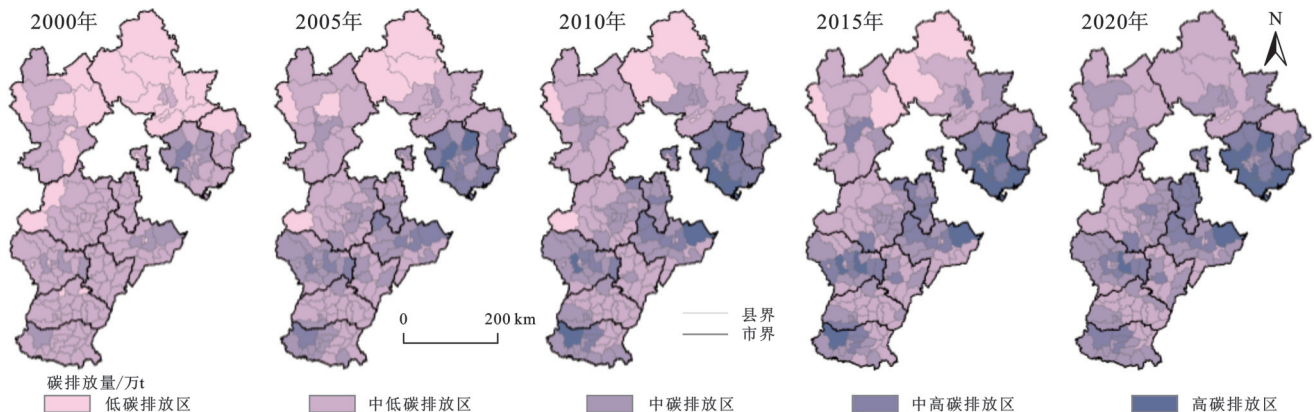
Table 5 Carbon emissions from land use of various categories in Hebei Province (2000—2020)

万t

年份	各地类的碳排放量						碳排放总量
	耕地	建设用地	林地	草地	水域	未利用地	
2000	410.56	4269.20	-224.38	-7.08	-10.23	-0.10	4437.98
2005	408.68	8738.22	-224.63	-7.03	-10.04	-0.10	8905.07
2010	407.39	11557.99	-272.74	-7.34	-15.94	-0.10	11723.58
2015	386.79	12553.19	-229.21	-6.86	-11.80	-0.07	12692.04
2020	382.03	12734.18	-228.96	-6.77	-12.61	-0.07	12867.79

为方便直观展示,本研究综合已有研究<sup>[3]</sup>和河北省实际情况,利用自然间断法将河北省土地利用碳排放分为低碳排放区(<10万t)、中低碳排放区

(10万~50万t)、中碳排放区(50万~100万t)、中高碳排放区(100万~200万t)、高碳排放区(200万~360万t)五大等级(图1)。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2019)1822号的标准地图制作,底图未做修改,下图同。

图1 2000—2020年河北省土地利用碳排放时空格局

Fig. 1 Spatiotemporal pattern of carbon emissions from land use in Hebei Province (2000—2020)

据图1可知,2000—2020年河北省土地利用碳排放空间分异显著,呈“东南高,西北低”的空间分布态势。其中,土地利用碳排放较高的区县主要分布于唐山市、沧州市的黄骅市、邯郸市的武安市以及石家庄市的藁城区和鹿泉区。造成上述区县土地利用碳排放较高的主要原因在于其均具有工业占比较高的产业结构。例如唐山市的曹妃甸区、迁安市、丰南区,石家庄市的藁城区、鹿泉区,沧州市的黄骅市,邯郸市的武安市,均拥有大型的工业基地与产业园区,能耗较高,且能源结构依赖煤、石油等传统能源,清洁能源利用不足,碳排放远超河北省平均水平。

研究时段内,远离上述区县的区域土地利用碳排放较低,且以河北省西北部生态涵养区最为显著(图1)。这些区域林草地丰富,碳吸收较高,高能耗高碳排放的产业较少,碳排放较低。如承德市林草水域覆盖率高,生态系统丰富,且政府高度重视湿地

保护,碳汇能力突出,其产业结构以文旅、康养、食品医药等低碳产业为主,辖区内的隆化、丰宁、围场3个自治县在2000年的净碳排放为负,此后3县碳排放水平也始终位居河北省最低;张家口市肩负着“阻沙源、涵水源”的重任,积极推进生态修复及京津风沙源治理等国家项目,完善生态防护体系;秦皇岛市海洋碳汇优势显著,海港区碳汇稳定在1.5万t左右。

## 2.2 ESV时空格局变化特征

研究时段内,河北省ESV呈先降低后增加的趋势(表6),先由2000年的3172.21亿元降至2010年的3152.52亿元,增长率为-0.62%,再增至2020年的3261.50亿元,增长率为3.46%。林地是ESV的贡献主体,其贡献率较稳定,始终处于38%~39%。

2000—2020年河北省ESV空间分异显著,且以西北生态涵养区为高值聚集区,中部核心区与南部功能拓展区为低值聚集区(图2)。河北省西北部地形起伏大,植被垂直分布明显,生态系统多样

且发展依赖自然资源,是ESV高值区得以形成的主要原因。然而,中部和南部地区多以平原为主,生态系统类型少,且土地利用以农业和建设用地为主,人口密度大,故ESV较低。研究时段内,承德市的围场、丰宁、隆化3县始终为河北省ESV最高的区

县,其地处燕山生态安全屏障区,林草地面积占比大,水资源丰富,且土地利用模式稳定,长期维持高生态价值。此外,河北省“两山、两翼、三带、多廊、多心”生态空间格局,对维持和提升上述区域ESV也起到了关键作用。

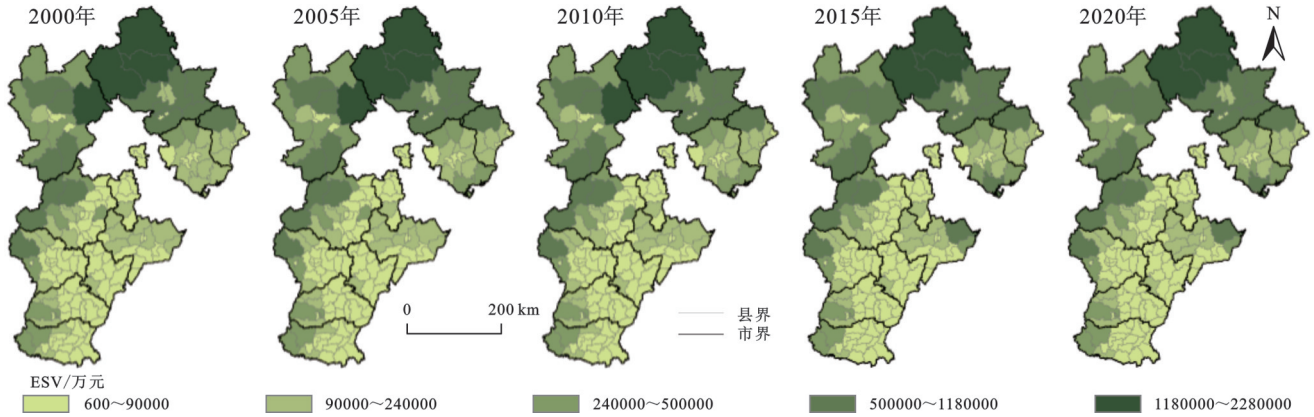


图 2 2000—2020年河北省区县ESV的时空格局

Fig. 2 Spatiotemporal pattern of ESV at county level in Hebei Province (2000—2020)

表 6 2000—2020年河北省各地类的生态系统服务价值  
Table 6 ESV of various land use types in Hebei Province (2000—2020) 亿元

年份	各地类的生态系统服务价值						总价值
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	
2000	652.87	1225.90	690.52	600.72	0.00	2.20	3172.21
2005	649.88	1226.95	687.51	593.90	0.00	2.16	3160.40
2010	647.83	1227.26	685.85	589.47	0.00	2.12	3152.52
2015	615.07	1252.29	669.52	693.08	0.00	1.49	3231.45
2020	607.50	1250.93	660.97	740.57	0.00	1.52	3261.50

### 2.3 土地利用碳排放和ESV的时空关系

据表7可知,双变量全局莫兰指数均为负数, $p$ 值均为0.001, $Z$ 值始终小于 $-1.96$ ,表明河北省土地利用碳排放与ESV之间始终具有显著的空间负相关性。即2000—2020年随着土地利用碳排放的增加,河北省各区县ESV呈现下降趋势;反之,ESV则呈增加趋势。此外,2000—2020年双变量全局莫兰指数整体呈现增加趋势,表明土地利用碳排放与ESV在空间上表现为由集聚向分散的变化态势,河北省减排增汇与生态修复双向调节,二者空间关系有所改善。

2000—2020年河北省土地利用碳排放和ESV的空间关系以低—高集聚和低—低集聚为主,分别主要分布于河北省的北部和中南部区域,高一高集聚和高—低集聚分布较少且较为零散,总体集聚趋势变动幅度较低(图3)。

2000—2020年河北省土地利用碳排放和ESV低—低集聚区主要分布于邯郸市、邢台市和保定市,其中邢台市的巨鹿县、平乡县和南宫市,邯郸市的肥乡

区、邱县、曲周县和广平县、保定市的蠡县较长时期内始终为低—低集聚模式。这些区县的共性在于:(1)土地利用以耕地和生态用地为主,建设用地少,ESV稳定,如蠡县以药材种植和传统农业为主,无大规模高碳工业;(2)产业结构以传统农业和小型农产品加工为主,缺少高碳重工业及高附加值生态产业;(3)缺乏高碳或高ESV核心区域的辐射带动,周边地区经济互动较弱,土地利用变化平缓,形成低—低集聚模式。

表 7 2000—2020年河北省土地利用碳排放和ESV的空间相关性

Table 7 Spatial correlation between carbon emissions from land use and ESV in Hebei Province (2000—2020)

参数	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年
Moran's $I$	-0.284	-0.188	-0.118	-0.115	-0.117
$p$	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
$Z$	-7.035	-5.213	-3.318	-3.170	-3.237

研究时段内,高一高集聚模式的区县数量较少且分布零散,主要分布在张家口市的宣化区和唐山市的迁西县。宣化区和迁西县分别为张家口市的工业密集区,碳排放较高,但自然资源禀赋又较为优越,故形成了高一高集聚区。2015年,唐山市的迁西县退出高一高集聚模式,转为低—高集聚,承德市宽城满族自治县和双滦区转为高一高集聚区。2020年,宽城满族自治县与双滦区重回低—高集聚模式,迁西县重回高一高集聚模式。上述区县均位于高碳排放—高ESV区域的过渡带,碳排放与ESV的细微波动也易引发二者空间耦合关系的变动。

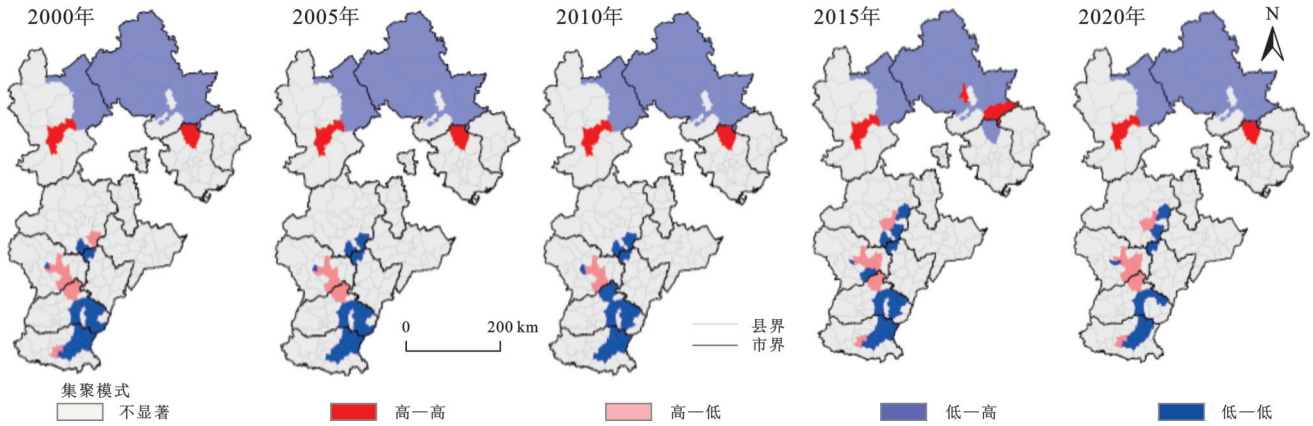


图 3 2000—2020年河北省土地利用碳排放与ESV的时空集聚特征

Fig. 3 Spatiotemporal agglomeration characteristics of carbon emissions from land use and ESV in Hebei Province (2000—2020)

高一低集聚区主要分布于保定市的清苑区,邢台市的宁晋县,石家庄市的长安区和藁城区等传统工业与农业并存型区县。以电线电缆产业和小型加工业为主导的宁晋县和清苑区为例,其工业生产能耗高、碳排放量大,且传统农业对提升ESV作用有限,致使当地形成高一低集聚模式。同时,城市扩张中农业用地快速向建设用地转换时,缺乏生态补偿机制,导致ESV降低,也是其重要成因。此外,2015年,石家庄市的晋州市成为高一低集聚区,晋州市紧靠碳排放较高的藁城区与辛集市,易受碳排放溢出效应影响,故碳排放增加。

低一高集聚区主要分布于承德市和张家口市的沽源县和赤城县,变动幅度较小。这些地区土地利用以林地和草地为主(承德市、张家口市林草地占比分别达76%,45%),生态资源丰富且固碳能力强。与此同时,因建设用地少、工业活动稀疏,能源消耗及工业碳排放较低,整体碳排放维持在较低水平。

### 3 结论与建议

#### 3.1 结论

研究时段内,河北省土地利用碳排放呈增加趋势,建设用地为主要碳源,林地为主要碳汇;ESV总量呈先降低后增加的趋势,林地为主要贡献主体;土地利用碳排放与ESV具有显著的空间负相关性,空间关系以低一高集聚和低一低集聚为主,且逐渐由集聚向分散转化,二者双向调节、空间关系有所改善。具体结论如下:

(1) 2000—2020年河北省土地利用碳排放呈增加趋势,由4 437.98万t增至12 867.79万t。建设用地是土地利用碳排放的主要来源,贡献率约为98%;林地是主要的碳汇,其对碳吸收总量的贡献率为92%~93%。土地利用碳排放空间分异显著,呈“东

南高、西北低”的空间分异特征,碳排放较高的区县分布于唐山市、沧州市的黄骅市、邯郸市的武安市以及石家庄市的藁城区和鹿泉区,碳吸收较高的区县则以张家口市和承德市等西北部生态涵养区为主。

(2) 河北省ESV呈先降低后增加的趋势,由2000年的3 172.21亿元降至2010年的3 152.52亿元,再增至2020年的3 261.50亿元。林地是ESV的贡献主体,贡献率为38%~39%。ESV较高的区县集中在河北省的西北生态涵养区,如张家口市、承德市的大多数区县等,在空间上呈“西北部高,中南部低”的空间分布态势。

(3) 2000—2020年河北省土地利用碳排放与ESV具有显著空间负相关性,且呈由集聚向分散的变化态势。二者空间集聚模式以低一高集聚和低一低集聚为主,高一高集聚和高一低集聚分布较少且较为零散。低一高集聚区主要分布于承德市和张家口市的沽源县和赤城县等工业活动少,林草地密集的北部地区;低一低集聚区主要分布于邢台市的巨鹿县、平乡县和南宫市,邯郸市的肥乡区、邱县、曲周县和广平县、保定市的蠡县等耕地与生态用地多,产业结构低下零散的中南部地区;高一高集聚区主要分布在张家口的宣化区与唐山市的迁西县等自然禀赋优越且工业密集的区县;高一低集聚区主要分布于保定市的清苑区、邢台市的宁晋县、石家庄市的长安区和藁城区等传统工业与农业并存型城市。

#### 3.2 对策与建议

(1) 分区分类精准施策,优化土地资源配置。严格遵循“三区三线”国土空间规划框架,依据土地利用碳排放与ESV的不同集聚模式实施差异化治理。对低一低集聚区,积极推进退耕还湖与荒漠治理,扩大林地、草地和湿地面积以提升ESV,同时引入低碳高新产业;高一高集聚区需重点监管高碳产业,加速产

业低碳转型,开展工矿生态修复,发展生态旅游、碳汇交易等生态产业化项目;高一低集聚区需强制推动产业低碳转型,实施退耕还林、草、湿工程,优先布局生态修复项目;低一高集聚区则要划定生态保护红线,严控开发活动,扩大生态用地规模,巩固生态优势。

(2) 强化区域协同联动,促进生态经济融合。构建统一标准的碳排放与ESV监测网络,在区域产业协作中严格落实生态影响预评估。加强城乡及经济核心区与生态功能区的联动,通过财政转移支付、对口支援等方式,推动生态保护与经济利益的共享,形成生态保护与经济发展的良性互动格局。

(3) 推动能源产业转型,筑牢可持续发展根基。在高碳排放区域严格限制传统能源消费,大力开发太阳能、风能等清洁能源,降低化石能源依赖,推动产业向低能耗、高附加值方向升级,培育绿色制造、数字经济等新兴产业。在生态服务优势区域,重点培育生态旅游、健康养老、特色农业等绿色低碳产业,构建“生态+”产业体系,实现生态保护与经济增长协同发展。

#### 参考文献(References):

- [1] Hong C P, Burney J A, Pongratz J, et al. Global and regional drivers of land-use emissions in 1961—2017[J]. *Nature*, 2021, 589(7843):554-561.
- [2] 中共中央国务院.关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[EB/OL].(2021-10-24)[2025-04-29]. [https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content\\_5644613.htm](https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm).
- [3] 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 J, Wang Y X, Liu X R, 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.
- [4] Cai C, Fan M, Yao J, et al. Spatial-temporal characteristics of carbon emissions corrected by socio-economic driving factors under land use changes in Sichuan Province, southwestern China [J]. *Ecological Informatics*, 2023, 77:102164.
- [5] 张俊峰,张安录,董捷.武汉城市圈土地利用碳排放效应分析及因素分解研究[J].*长江流域资源与环境*, 2014, 23(5):595-602.  
Zhang J F, Zhang A L, Dong J. Carbon emission effect of land use and influencing factors decomposition of carbon emission in Wuhan urban agglomeration [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(5):595-602.
- [6] 黄汉志,贾俊松,张振旭.江西县域土地利用变化碳排放时空演变及其影响因素[J].*生态学报*, 2023, 43(20):8390-8403.
- [7] 李语诗,夏志业,张蕾.基于SSPs多情景目标的2030年成渝经济圈土地利用碳排放预测及其空间优化[J].*生态环境学报*, 2023, 32(3):535-544.  
Li Y S, Xia Z Y, Zhang L. Carbon emission prediction and spatial optimization of land use in Chengdu-Chongqing economic circle in 2030 based on SSPs multi-scenarios[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2023, 32(3):535-544.
- [8] Zhang C Y, Zhao L, Zhang H T, et al. Spatial-temporal characteristics of carbon emissions from land use change in Yellow River Delta region, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 136:108623.
- [9] 李键,毛德华,蒋子良,等.长株潭城市群土地利用碳排放因素分解及脱钩效应研究[J].*生态经济*, 2019, 35(8):28-34,66.  
Li J, Mao D H, Jiang Z L, et al. Research on factors decomposition and decoupling effects of land use carbon emissions in Chang-Zhu-Tan urban agglomeration [J]. *Ecological Economy*, 2019, 35(8):28-34,66.
- [10] Rong T Q, Zhang P Y, Zhu H R, et al. Spatial correlation evolution and prediction scenario of land use carbon emissions in China [J]. *Ecological Informatics*, 2022, 71:101802.
- [11] 栾诗萌,马书明.基于GEE的土地利用变化对生态服务价值影响研究:以大连市为例[J].*环境科学学报*, 2024, 44(8):446-458.  
Luan S M, Ma S M. Impact of land use changes on ecosystem service values based on GEE: a case study of Dalian City[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024, 44(8):446-458.
- [12] Caro C, Marques J C, Cunha P P, et al. Ecosystem services as a resilience descriptor in habitat risk assessment using the InVEST model [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 115:106426.
- [13] Hu M M, Li Z T, Wang Y F, et al. Spatio-temporal changes in ecosystem service value in response to land-use/cover changes in the Pearl River Delta[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 149:106-114.
- [14] 刘园,任意,周勇,等.基于CA-Markov的江汉平原生态系统服务价值动态模拟:以湖北省潜江市为例[J].*中国农业资源与区划*, 2020, 41(4):159-167.  
Liu Y, Ren Y, Zhou Y, et al. Dynamic simulation of future ecosystem services value in Jianghan plain based on CA-Markov: a case study of Qianjiang City[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional*

- Planning, 2020, 41(4):159-167.
- [15] 李佳桐,唐海萍,邝佛缘.国家公园生态系统服务与农牧户福祉的时空耦合分析:以祁连山国家公园为例[J].生态学报,2024,44(15):6527-6539.  
Li J T, Tang H P, Kuang F Y. Spatial-temporal coupling analysis of ecosystem service and well-being of farmers and herdsmen: a case study of Qilian Mountain National Park [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(15):6527-6539.
- [16] 蔡超岳,唐健雄,陈文灏.旅游城镇化与生态系统服务价值的互动关系及协调效应研究:以湖南武陵山片区为例[J].华中师范大学学报:自然科学版,2024,58(4):453-469.  
Cai C Y, Tang J X, Chen W H. Research on the interactive relationship and coordination effect between tourism urbanization and ecosystem services value: a case study of Wuling Mountain area of Hunan Province [J]. *Journal of Central China Normal University: Natural Sciences*, 2024, 58(4):453-469.
- [17] 赵先超,田一豆,张潇湘.长株潭城市群土地利用碳排放与生态系统服务价值时空关系分析[J].水土保持学报,2023,37(5):215-225.  
Zhao X C, Tian Y D, Zhang X X. Spatio-temporal relationship between land use carbon emissions and ecosystem service value in Changzhutan urban agglomeration [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(5):215-225.
- [18] 王丹,荆延德,韩善梅,等.基于格网的南四湖流域土地利用碳排放与其生态系统服务价值时空关系分析[J].生态学报,2022,42(23):9604-9614.  
Wang D, Jing Y D, Han S M, et al. Spatio-temporal relationship of land-use carbon emission and ecosystem service value in Nansi Lake Basin based upon a grid square [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(23):9604-9614.
- [19] 黄昱杰,刘贵贤,薄宇,等.京津冀协同推进碳达峰碳中和路径研究[J].中国工程科学,2023,25(2):160-172.  
Huang Y J, Liu G X, Bo Y, et al. Beijing-Tianjin-Hebei coordinated development toward the carbon peaking and carbon neutrality goals [J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(2):160-172.
- [20] 方素菊.2024年河北地区生产总值47 526.9亿元[EB/OL].(2025-01-23)[2025-04-29].<http://he.news.cn/20250123/acc6d7309a074126b3e0c15db15b30d8/c.html>.
- [21] 陈亮,张楠,王一帆,等.京津冀地区碳排放强度变化驱动因素及归因分析[J].中国环境科学,2023,43(8):4382-4394.  
Chen L, Zhang N, Wang Y F, et al. Driving factors and attribution analysis of carbon emission intensity change in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *China, Environmental Science*, 2023, 43(8): 4382-4394.
- [22] Wu Y Z, Shi K F, Chen Z Q, et al. Developing improved time-series DMSP-OLS-like data (1992 - 2019) in China by integrating DMSP-OLS and SNPP-VIIRS [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60:4407714.
- [23] 陈靖松,张建军,李金龙,等.京津冀地区碳排放时空格局变化及其驱动因子[J].生态学报,2024,44(6):2270-2283.  
Chen J S, Zhang J J, Li J L, et al. Spatio-temporal pattern of carbon emissions and its driving factors in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(6):2270-2283.
- [24] 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,2007,37(6):804-812.  
Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, et al. Estimation of carbon sinks of terrestrial vegetation in China from 1981 to 2000 [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 37(6):804-812.
- [25] 张斌,卫丹琪,丁乙,等.基于夜间灯光和土地利用的珠江流域城市碳排放估算及其时空动态特征研究[J].地球科学进展,2024,39(3):317-328.  
Zhang B, Wei D Q, Ding Y, et al. Research on cities' carbon emissions and their spatiotemporal evolution coupled with nighttime light image and land use data in the Pearl River Basin [J]. *Advances in Earth Science*, 2024, 39(3):317-328.
- [26] 吕倩,刘海滨.基于夜间灯光数据的黄河流域能源消费碳排放时空演变多尺度分析[J].经济地理,2020,40(12):12-21.  
Lyu Q, Liu H B. Multiscale spatio-temporal characteristics of carbon emission of energy consumption in Yellow River Basin based on the nighttime light datasets [J]. *Economic Geography*, 2020, 40(12):12-21.
- [27] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.  
Xie G D, Zhang C X, Zhang L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8):1243-1254.
- [28] Chen Y Z, Lu H W, Li J, et al. Effects of land use cover change on carbon emissions and ecosystem services in Chengyu urban agglomeration, China [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2020, 34(8):1197-1215.
- [29] Zhang R J, Yu K H, Luo P P. Spatio-temporal relationship between land use carbon emissions and ecosystem service value in Guanzhong, China [J]. *Land*, 2024, 13(1):118.