



孙逸航,艾东,帕茹克·吾斯曼江,张金懿,张宗函,洪秋辰,郝晋珉. 河北省土地利用碳排放时空格局及分区管控研究[J]. 中国农业大学学报,2025,30(05):1-16.
SUN Yihang, AI Dong, PARUKE Wusimanjiang, ZHANG Jinyi, ZHANG Zonghan, HONG Qiuchen, HAO Jinmin. Study on the spatio-temporal patterns and zone management of the carbon emissions from land use in Hebei Province[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(05): 1-16.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.05.01

河北省土地利用碳排放时空格局及分区管控研究

孙逸航¹ 艾东¹ 帕茹克·吾斯曼江² 张金懿³ 张宗函¹ 洪秋辰¹ 郝晋珉^{1*}

(1. 中国农业大学 土地科学与技术学院, 北京 100193;

2. 新疆农业大学 公共管理学院, 乌鲁木齐 830052;

3. 自然资源部 国土整治中心, 北京 100035)

摘要 在“双碳”战略背景下,为深入探究河北省土地利用碳排放时空差异及管控策略,以促进区域协同降碳,实现绿色低碳发展。本研究以河北省11个地级市为研究单元,基于2001—2021年河北省能源消耗数据和土地利用现状等数据,构建土地利用碳排放核算体系,分析河北省2001—2021年的碳排放空间格局特征,并结合碳排放经济贡献系数、碳生态承载系数及脱钩指数,提出碳排放分区方案及优化对策。结果表明:1)2001—2021年河北省碳排放量呈现明显增加趋势,碳排放量从2001年的 9.01×10^7 t上升到2021年的 2.75×10^8 t,增幅达205.44%;2001—2011年碳排放量增长迅速,2011—2021年碳排放量增长相对缓慢,全省碳排放呈现出东、中南部较高,而北部较低的空间格局;碳吸收能力表现为北部较高,东部较低的特征。建设用地碳排放是土地利用碳排放的主要碳源。土地利用碳吸收量远不及全省的土地利用碳排放量,河北省的各类生态用地只起到了微弱的碳吸收和调节作用。此外,2001—2021年河北省各地级市碳排放经济贡献系数、碳排放生态承载系数和脱钩指数差异较大,保定、廊坊等地具有碳排放经济贡献优势,承德、张家口等地具有碳生态承载力优势;全省经济增长与碳排放的关系逐渐趋于协调,整体由扩张连结状态过渡至脱钩状态。最后,本研究将河北省划分为低碳优势巩固区、低碳发展示范区、低碳转型提升区及减碳增汇振兴区共4类碳平衡分区,并提出对不同类分区差异化发展的路径,以期促进河北省的低碳协同发展和实现“双碳”目标。

关键词 土地利用; 时空分布; 碳排放; 脱钩效益; 分区管控

中图分类号 F301.2

文章编号 1007-4333(2025)05-0001-16

文献标志码 A

Study on the spatio-temporal patterns and zone management of the carbon emissions from land use in Hebei Province

SUN Yihang¹, AI Dong¹, PARUKE Wusimanjiang², ZHANG Jinyi³, ZHANG Zonghan¹,
HONG Qiuchen¹, HAO Jinmin^{1*}

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. School of Public Management, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

3. Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China)

Abstract In the context of “dual carbon” strategy, exploring the spatiotemporal differences in land-use carbon emissions and devising effective control strategies in Hebei Province are key to promoting regional

收稿日期: 2024-09-19

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD06B01)

第一作者: 孙逸航(ORCID:0009-0002-6667-1803), 博士研究生, E-mail: bs20223211062@cau.edu.cn

通讯作者: 郝晋珉(ORCID:0000-0002-1978-5181), 教授, 主要从事国土空间规划及区域可持续发展研究, E-mail: jmhao@cau.edu.cn

collaborative carbon reduction and achieving green, low-carbon development. This study takes 11 prefecture-level cities in Hebei Province as research units and constructs a carbon emission accounting system based on energy consumption data and current land use data from 2001 to 2021. The spatial pattern characteristics of carbon emissions in Hebei Province is explored during this period. This study proposes a carbon emission zoning scheme and optimization countermeasures by integrating the economic contribution coefficient of carbon emissions, the carbon ecological carrying coefficient, and the decoupling index. The results indicated that: 1) From 2001 to 2021, the carbon emissions in Hebei Province showed a significant upward trend, rising from 9.01×10^7 tons in 2001 to 2.75×10^8 tons in 2021 with an increase of 205.44%. The carbon emissions increased rapidly between 2001 and 2011, but the rate slowed between 2011 and 2021. Spatially, the carbon emissions were higher in the eastern and south-central regions and lower in the northern region, and the carbon absorption capacity was higher in the north and lower in the east. Construction land was the primary source of land-use carbon emissions. The carbon absorption capacity of land use was far less than the province's carbon emissions. Various ecological land types in Hebei only played a minimal role in carbon absorption and regulation. 2) From 2001 to 2021, the economic contribution coefficient, carbon ecological carrying capacity, and decoupling index of carbon emissions varied significantly across the prefecture-level cities in Hebei. Cities like Baoding and Langfang had advantages in economic contribution from carbon emissions, while Chengde and Zhangjiakou had higher carbon ecological carrying capacities. Overall, The relationship between economic growth and carbon emissions in the province was gradually becoming more coordinated, shifting from a state of expansion and coupling to a decoupled state. Lastly, this study categorized Hebei Province into four carbon balance zones, etc, one consolidation zone for low-carbon advantages, one demonstration zone for low-carbon development, one zone for low-carbon transformation and upgrading, and one revitalization zone for carbon reduction and sequestration. The study further suggests tailoring development strategies for each zone to foster collaborative low-carbon development across Hebei Province and achieve the "dual carbon" target.

Keywords land use; spatiotemporal distribution; carbon emissions; decoupling benefits; zoning management

全球变暖导致极端天气频发,引发高温、洪涝等灾害,对农业、水资源、生态和人类生活等多方面造成严重影响^[1]。研究指出:人类活动产生的温室气体排放是导致全球变暖的主要原因^[2]。气候治理既是世界各国对全球变暖的积极响应,也是区域间发展权利之争^[3]。各国秉承“共同但有区别的责任”原则,以公平性和有效性为核心积极开展气候治理^[4]。2020年我国提出“双碳”目标,全国各地区也陆续出台“双碳”战略行动方案^[5]。如何兼顾效率与公平,因地制宜地实现区域低碳发展是当前亟需解决的问题。土地作为人类活动和生态系统的空间载体,地类间面积增减和土地利用方式、格局的改变也引起人类活动碳排放的改变,进而影响碳排放总量与强度的变化。因此,深入探究区域间土地利用碳排放的时空差异及其影响因素,并进行分类,提出差异化的精准施策,显得尤为必要。

在土地利用碳排放研究尺度方面,已有研究分

别从全国、区域、地方、社区等尺度开展。在全国尺度上,赖力^[6]统筹考虑生态系统碳收支和人为碳排放源,提出基于土地利用方式的综合碳排放清单,结果显示中国的碳排放呈现碳亏状态;杨青林等^[7]通过285个地级市的社会经济截面数据,构建计量模型探讨了中国城市碳排放不同类型区的特点和空间差异,发现人口、经济水平和产业结构因素是城市碳排放的关键影响要素。在区域尺度上,Marchi等^[8]构建了区域碳循环模拟框架,实现了对意大利Siena省的碳收支状况的估算;de Melo等^[9]从流域尺度开展研究,发现加拿大魁北克主要流域的碳通量呈现出空间异质性;国内研究重点关注长三角、珠三角、京津冀等经济发达、人口稠密的城市群地区及长江、黄河等流域地区。姜渭宗等^[10]采用夜间灯光数据分析长江流域碳排放的时空格局及异质性。徐素^[11]以生产消费与空间为视角,对比分析了我国五大城市群碳排放特征,并提出差异化减

碳策略;在地方尺度上,夏楚瑜等^[12]基于生态系统代谢理论,采用生态网络分析法研究了杭州市土地利用变化对城市碳代谢的综合作用。杨蕴琦等^[13]构建了改进的IPAT模型,预测了曲周县未来不同情景下的土地利用碳排放状况;在社区尺度上,李晓江等^[14]从居民行为视角核算了上海、深圳、重庆、衢州的5个社区的碳排放,并提出社区减碳实践路径。

土地利用碳排放核算方法很多,各具特点。主要包括实测法、生命周期法、排放系数法、物料平衡法、样地清查法、产量估算法、遥感估测法等。实测法的测量要求高,结果准确,常用于企业层面碳排放监测,如可用于火电厂企业废气处理口中温室气体排放的核算^[15];生命周期法贯穿原材料开采与生产、产品制造、使用与维护、废弃与回收全过程,计算详细完整,适合追踪产品生产消费全过程的碳排放,Li等^[16]采用该方法模拟了中国冬小麦-玉米轮作系统中不同农业管理实践对温室气体排放的影响;排放系数法通过碳排放源与对应排放系数相乘的方式进行计算,方法相对简单,适用范围广泛,例如适用于国土空间规划碳排放定量研究与模拟^[17];物料平衡法需要有完备的基础数据记录,计算结果可靠,主要用于工业生产过程中的碳排放量核算^[18];样地清查法适用于研究植被、枯落物或土壤等的碳储量,赵宁等^[19]运用该方法估算了中国陆地生态系统的碳源、碳汇大小;产量估算法需要收集农作物产量数据及对应的作物碳吸收数据,适用于农业碳吸收的计算。胡国霞等^[20]运用该方法分析了黑龙江省农业碳吸收情况;遥感估测法针对大面积植被的碳储量估算,孔蕊等^[21]运用该方法结合LPJ模型分析了人类活动和气候变化对中国西北草地地上碳储量变化的影响。

土地利用碳排放分区管控是将特定区域划分为不同的碳排放管控单元并进行差异化施策的管控行为。在分区依据方面,通常考虑碳源碳汇高低、经济发展水平、生态环境条件、碳排放经济贡献能力、碳汇生态承载能力等因素。龙志^[22]依据碳补偿能力和地均碳排放强度指标,划分了碳强度控制区、低碳优化区、碳平衡区、碳汇功能区4类县域尺度碳平衡分区。赵筱青等^[23]结合InVEST模型的生境质量模块,从生态环境角度对下滇西北石漠化山区进行低碳国土空间综合分区;杨世兵等^[24]以脱

钩态势分析为基础,结合经济与碳排放特征聚类,构建了浙江省碳排放二级管控分区;李建豹等^[25]依据碳排放经济贡献系数和碳生态承载系数,将长三角地区各市分为低碳保持区、经济发展区、碳汇发展区和综合优化区4类。在分区方法方面,周波等^[26]运用二阶聚类法进行成渝城市群碳平衡分区,发现成渝之间还存在生态、经济壁垒;杨静媛等^[27]采用以1为界限划分碳经济贡献系数和碳生态承载系数的碳平衡分区方法,划分江西省的土地碳平衡分区。

综上所述,关于我国土地利用碳排放核算及分区管控的研究成果颇丰,对本研究具有较强的参考意义。但仍存在以下2点不足:一是土地利用碳排放的核算存在概念界定及核算范围不明晰问题。碳排放核算的“碳”部分研究指代二氧化碳,也研究将“碳”扩展至二氧化碳、甲烷、氧化亚氮等几类主要温室气体。核算范围通常将区域作为封闭系统,较少考虑区域间电力、热力等资源输入输出产生的碳排放。二是碳排放分区管控依据不够全面、综合。现有研究中的碳排放分区多从资源禀赋角度,依据不同区域间的横向对比结果,例如通过体现经济社会资源禀赋的碳排放经济贡献系数和体现自然生态资源禀赋的碳生态承载系数进行分区,能比较区域间的碳排放、碳吸收相对优势,提出的管控策略具有公平性,但难以体现区域内社会经济发展与碳排放的耦合关系,无法从区域未来经济增长是否与碳排放脱钩、是否依赖碳排放的角度提出前瞻性建议;也有研究从区域经济发展阶段角度,侧重区域内的纵向对比,以脱钩理论作为分区依据,其优势在于能体现该区域对碳排放的需求程度,但缺乏区域间的横向比较以及碳汇能力的考量。

在国土空间规划“五级三类”体系中,市级作为承上启下的行政单元和传导重点,既须落实国家级、省级“双碳”战略的要求,又须对县、乡级行政单元的“双碳”目标提供指引,目前对市级层面的碳排放分区管控和指引的研究较为缺乏。因此,本研究拟以我国能源消费大省河北省为例,以其11个地级市为分区单元,详细核算市级土地利用碳排放,将碳排放经济贡献因素、碳生态承载力因素与脱钩理论相结合,统筹考虑地区资源禀赋与经济发展阶段,再提出分区管控策略,以期为河北省低碳发展提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

河北省地处华北平原的北部,总面积约为18.88万 km^2 ,2021年常住人口数量约为7500万,下辖11个地级市(图1)。产业结构以重工业为主,能源密集型

产业集中,特别是钢铁、水泥、玻璃和电力等传统高耗能、高排放行业发达,对煤炭等化石燃料依赖度较高,导致碳排放总量较高^[28];林草覆盖面积广,蓄积量大,随着近年来通过大规模植树造林和森林保护,固碳能力不断增强,陆地碳汇资源优势显著^[29]。全省呈现降碳任务艰巨、增汇潜力巨大的特点。

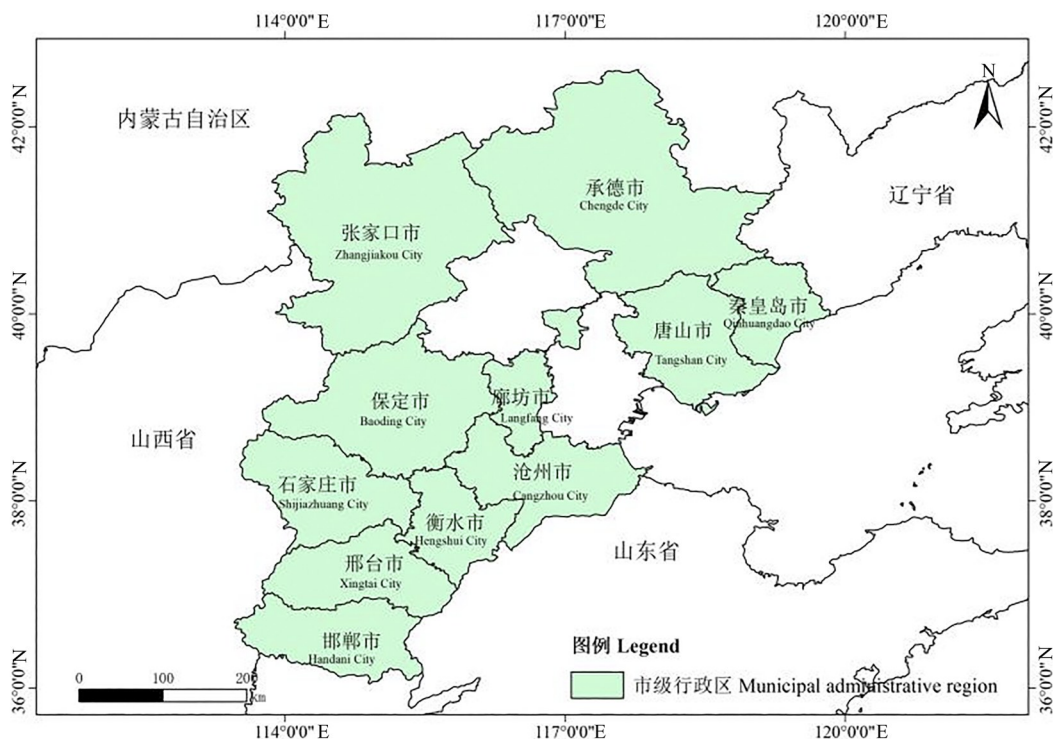


图1 河北省区位图

Fig. 1 Location map of Hebei Province

1.2 数据来源

本研究的GDP、常住人口、农作物产量、农作物播种面积、化肥使用量、农药使用量、农膜使用量、动物存栏数、工业产品产量等数据来源于2002—2022年《河北统计年鉴》^[30]及河北各市统计年鉴;能源消费数据来源于2002—2022年《中国能源统计年鉴》^[31]中的河北省能源平衡表(实物量),生活垃圾焚烧数据来源于2002—2022年《中国城乡建设统计年鉴》^[32]。

2001、2006、2011、2016、2021年土地利用数据来源于武汉大学杨杰和黄昕教授团队的中国土地覆盖数据集(China Land Cover Dataset, CLCD)^[33]。

1.3 研究方法

1.3.1 明确核算边界

我国的“双碳”战略尤其是碳达峰阶段,是以二

氧化碳作为考核标准^[34],故本研究的碳排放指狭义的二氧化碳排放。且由于区域系统的开放性及二氧化碳的流动性,使碳排放具有外部性特征,因此碳排放的核算须明确空间范围^[35]。能源消费碳排放是碳排放活动的主体,包括区域内化石能源燃烧产生的直接碳排放、区域间电力和热力消费产生的间接碳排放、贸易隐含碳排放3种范围^[36]。由于贸易不是本研究重点,故本研究的能源消费排放直接以行政区范围内化石能源燃烧产生直接碳排放以及电力和热力消费产生的间接碳排放进行核算。

1.3.2 碳排放与土地利用的对应关系

土地是人类各种生产、生活活动的空间载体,不同的土地利用类型承载着不同的碳排放活动。结合CLCD土地利用分类以及研究区特点,将土地划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地

共 6 类。参考《省级温室气体清单编制指南(试行)》及已有研究成果,碳排放类型分为能源消费碳排放、工业生产过程碳排放、农业生产过程碳排放、废弃物处理碳排放、人畜呼吸碳排放、陆地生态系统碳汇共 6 类。碳排放或碳汇与土地利用类型的关系详见表 1。

表 1 碳排放与土地利用对应关系
Table 1 Correspondence between carbon emissions and land use

土地利用类型 Land use type	碳排放或碳汇 Carbon emissions or carbon sinks
耕地 Cultivated land	化肥、农药、农膜使用、土壤翻耕过程
建设用地 Construction land	能源消费碳排放、工业生产过程碳排放、废弃物处理碳排放、人畜呼吸碳排放
林地、草地、水域、未利用地 Forest land, grassland, wetland, unused land	林地碳汇、草地碳汇、水域碳汇、未利用地碳汇

1.3.3 核算方法

能源消费碳排放计算相关系数见表 2,计算公式如下:

$$C_{\text{enr}} = \sum Q_{\text{enr}-i} \times \text{NCV}_i \times \text{CC}_i \times \text{OF}_i \times A \quad (1)$$

式中: C_{enr} 为能源消费碳排放总量; $Q_{\text{enr}-i}$ 为第*i*种能源类型的消费量; NCV_i 为第*i*种能源类型的平均低位发热

量,kJ/kg; CC_i 为第*i*种能源类型的缺省碳含量,t/TJ(以碳计); OF_i 为第*i*种能源类型的碳氧化率; A 为常数项,表示二氧化碳与碳的质量之比,数值为 44/12。其中, $Q_{\text{enr}-i}$ 采用省级能源平衡表实物量数据,根据市级各产业部门产值或生活部门人口占对应省级部门比重作为比例系数,将省级能源消费量分配到各市级部门^[37]。

表 2 能源排放系数
Table 2 Energy emission coefficient

能源类型 Energy type	平均低位发热量 Average lower heating value	缺省碳含量 Default carbon content	氧化碳因子 Oxidation factor
原煤 Raw coal	20 934	26.37	0.93
洗精煤 Cleaned coal	26 377	25.41	0.93
其他洗煤 Other washed coal	8 374	25.41	0.93
焦炭 Coke	28 470	29.42	0.93
原油 Crude oil	41 868	20.08	0.98
燃料油 Fuel oil	41 868	21.10	0.98
汽油 Gasoline	43 124	18.90	0.98
柴油 Diesel	42 705	20.20	0.98
煤油 Kerosene	43 124	19.60	0.98
炼厂干气 Refinery dry gas	46 055	18.20	0.99
液化石油气 LPG	50 242	17.20	0.98
天然气 Natural gas	35 609	15.32	0.99
焦炉煤气 Coke oven gas	17 375	13.58	0.99
高炉煤气 Blast furnace gas	3 768	70.80	0.99
液化天然气 LNG	51 498	17.20	0.98

注:平均低位发热量数据来自 GB/T 2589—2020《综合能耗计算通则》^[38];缺省碳含量数据来自《省级温室气体清单编制指南(试行)》;氧化碳因子固体燃料系数取 0.93,液体燃料系数取 0.98,气体燃料系数取 0.99,依据 Mi 等^[39]和 Shan 等^[40]研究成果。

Note: The data for average lower heating value is sourced from GB/T 2589—2020 *General Principles for Calculation of Comprehensive Energy Consumption*^[38]. The data for default carbon content is from *Guidelines for Preparing Provincial Greenhouse Gas Inventories (Trial)*. The oxidation factor coefficients are set as 0.93 for solid fuels, 0.98 for liquid fuels, and 0.99 for gaseous fuels, based on the research results of Mi et al.^[39] and Shan et al.^[40].

工业生产过程碳排放计算公式如下:

$$C_{\text{ind}} = \sum Q_{\text{ind}-i} \times f_{\text{ind}-i} \quad (2)$$

式中: C_{ind} 为工业生产过程碳排放总量; $Q_{\text{ind}-i}$ 为第 i 种工业产品的产量; $f_{\text{ind}-i}$ 为第 i 种工业产品的碳排放系数, 表示每生产 1 t 工业产品排放的二氧化碳吨数。水泥排放系数为 0.538, 钢铁为 0.452, 合成氨为 3.273, 烧碱为 0.138^[41-42]。

垃圾焚烧碳排放计算公式如下:

$$C_b = N_b \times CC_n \times MC_n \times EF \times A \quad (3)$$

式中: C_b 为垃圾焚烧所产生的碳排放量; N_b 为垃圾焚烧量; CC_n 为垃圾中含碳比例, 缺省值为 50%; MC_n 为垃圾中矿物碳比例, 缺省值为 40%; EF 为垃圾完全燃烧率, 缺省值为 95%^[43]; A 为常数项, 表示二氧化碳与碳的质量之比, 数值为 44/12。

人畜呼吸碳排放量计算公式如下:

$$C_r = \sum K_i \times \rho_i + N_p \times \theta_p \quad (4)$$

式中: C_r 为人畜呼吸碳排放量; K_i 为第 i 种动物的数量; ρ_i 为第 i 种动物的呼吸碳排放系数; N_p 为研究区常住人口数量; θ_p 为人类呼吸碳排放系数。根据河北省牲畜养殖情况, 选取猪、牛、羊为主要动物进行牲畜呼吸碳排放核算, 其排放系数表示每单位个体每年产生的二氧化碳吨数。其中, 人的排放系数为 0.079, 猪为 0.796, 牛为 0.083, 羊为 0.042^[44]。

农业生产资料投入碳排放计算公式如下:

$$C_{\text{am}} = \sum Q_{\text{am}-i} \times f_{\text{am}-i} \quad (5)$$

式中: C_{am} 为农业生产资料投入碳排放总量; $Q_{\text{am}-i}$ 为不同类型的农业生产资料的投入量; $f_{\text{am}-i}$ 为不同类型的农业生产资料的碳排放系数, 表示每投入 1 t 农业生产资料产生的二氧化碳吨数, 其中, 氮肥系数为 0.079, 磷肥为 0.796, 钾肥为 0.082, 复合肥为 0.042, 农膜为 5.180, 农药为 4.934^[43,45]。

土壤翻耕碳排放计算公式如下:

$$C_{\text{st}} = \sum S_{\text{st}} \times f_{\text{st}} \quad (6)$$

式中: C_{st} 为土壤翻耕碳排放总量; S_{st} 为翻耕面积; f_{st} 为土壤翻耕碳排放系数, 本研究取 312.6 kg/km² (以碳计)^[45]。

陆地生态系统碳汇计算公式如下:

$$C = \sum S_i \times V_i \quad (7)$$

式中: S_i 为第 i 种类型碳汇用地的面积; V_i 为第 i 类碳汇用地的碳吸收系数, 表示每 km² 碳汇用地每年

吸收的二氧化碳吨数。其中, 林地系数为 0.079^[44], 草地为 0.796^[46], 水域为 0.082^[47]。

1.3.4 碳排放的经济贡献系数

碳排放的经济贡献系数是衡量单位碳排放对经济增长贡献的指标, 反映碳排放过程中生产、消费所产生的经济价值与碳排放量之间的关系, 是评估碳生产力和能源利用效率的重要参数之一, 可用于研究区域间碳排放经济贡献的公平性, 计算公式如下:

$$ECC = \frac{G_i/G}{C_i/C} \quad (8)$$

式中: ECC 为碳排放经济贡献系数; G_i 为 i 区域 GDP; G 为整个区域 GDP; C_i 为 i 区域碳排放量; C 为全区域碳排放量。若 $ECC > 1$, 表示 i 区域单位碳排放量创造经济效益的能力高于全区域平均值, 经济贡献能力较高; 反之, 则表示碳排放的经济贡献能力较低。

1.3.5 碳生态承载系数

碳汇产生的生态环境效益具有正外部性, 某区域的碳汇能力大小对周边区域碳平衡具有一定的影响^[27]。碳生态承载系数 (ESC) 是某区域碳吸收量及碳排放量占全省份额之比, 反映区域碳吸收能力的相对贡献度, 计算公式如下:

$$ESC = \frac{CA_i/CA}{C_i/C} \quad (9)$$

式中: CA_i 为 i 区域碳吸收量; CA 为整个区域的碳吸收量。若 $ESC > 1$, 表明 i 区域产生的单位碳排放中被碳汇吸收的比例高于全区域平均值, 对整个区域碳排放的消纳有积极作用; 反之, 对整个区域碳排放的消纳有负作用。

1.3.6 脱钩

脱钩指 2 个或者多个具有关联关系的变量, 其变量之间的相互关系不再存在^[48]。随着概念的解释与延伸, 脱钩分析应用逐渐广泛, 其中尤以经济增长与环境污染间关系的议题关注度最高^[49]。契合“双碳”战略背景下, 研究工业大省河北经济增长与碳排放耦合关系, 计算公式如下:

$$e = \frac{\Delta C/C}{\Delta G/G} \quad (10)$$

式中: e 为脱钩弹性; C 为碳排放; ΔC 为碳排放变化量; G 为 GDP 总量; ΔG 为 GDP 变化量, 脱钩类型及状态定义见表 3。

表 3 脱钩类型及状态定义
Table 3 Decoupling types and state definitions

脱钩类型 Decoupling type	碳排放变化量 ΔC	GDP 变化量 ΔG	脱钩弹性 e	状态定义 State definition
弱脱钩 Weak decoupling	≥ 0	≥ 0	$0 \leq e < 0.8$	碳排放和 GDP 均增长, GDP 增速更快
强脱钩 Strong decoupling	< 0	> 0	$e < 0$	GDP 增长, 碳排放减少
衰退脱钩 Recessive decoupling	< 0	< 0	$e > 1.2$	碳排放和 GDP 均减少, 碳排放减速更快
扩张连结 Expansive connection	> 0	> 0	$0.8 \leq e \leq 1.2$	碳排放和 GDP 均增长, 增速相对同步
衰退连结 Recessive connection	< 0	< 0	$0.8 \leq e \leq 1.2$	碳排放和 GDP 均减少, 减速相对同步
扩张负脱钩 Expansive negative decoupling	> 0	> 0	$e > 1.2$	碳排放和 GDP 均增长, 碳排放增速更快
强负脱钩 Strong negative decoupling	> 0	< 0	$e < 0$	GDP 减少, 碳排放增加
弱负脱钩 Weak negative decoupling	≤ 0	≤ 0	$0 \leq e < 0.8$	碳排放和 GDP 均减少, GDP 减速更快

2 结果与分析

2.1 土地利用碳排放情况

河北省土地利用碳排放情况测算结果详见图 2。可见：河北省 2001—2021 年，土地利用碳排放

量呈稳定增长趋势，土地利用碳排放由 2001 年的 32 600 万 t 增至 2021 年的 132 692 万 t，增幅为 307.60%，碳排放年均增速约 7.27%；GDP 总量由 5 577.71 亿元增长至 40 391.32 亿元，增幅为 624.30%，GDP 年均增速为 11.87%。结果表明河

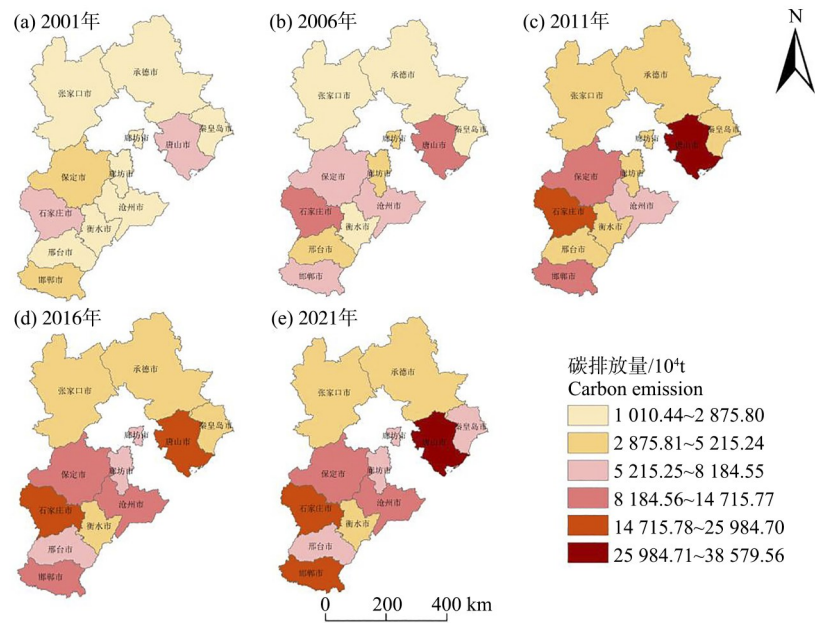


图 2 2001—2021 年河北省土地利用碳排放量分布

Fig. 2 Distribution of the carbon emissions from land use in Hebei Province from 2001 to 2021

北省近20年经济快速增长,产业发展迅速,尤其是高碳排放的钢铁、建材等行业产能扩大,导致能源消费量增加,使碳排放量逐年增高,其中,工业较为发达的东部及中南部区域碳排放较高,以第三产业为主的北部区域碳排放量较低。

河北省土地利用碳吸收情况见图3。可见:土地利用碳吸收相对稳定,呈缓慢增长趋势,由2001年的265.78万t增长至2021年的300.82万t,远不及全省的土地利用碳排放总量。表明河北省生态空间规模相对稳定,碳汇功能略有提升,生态保护政策具有成效,但各类生态用地目前只起到了微弱的碳吸收和调节作用,“双碳”战略实施的核心与难点在于减碳增效。此外,北部区域自然条件优越,生态用地重视度日益提高,碳汇优势明显。东部区域因经济发展较快,生态用地受到较大压力,碳吸收能力较弱。

建设用承载了人类绝大部分碳排放活动,是河北省土地利用碳排放量最大的地类,近20年快速的城镇化、工业化使建设用地的规模及承载的能源消费活动日益增长,导致该地类碳排放占比逐年增

高,由2001年的92.34%增长至2021年的98.39%。耕地规模的减少以及农业生产活动的低碳化使耕地碳排放占比逐年降低。林地是河北省碳汇功能最强的地类,占总碳汇量的95.31%以上。

按地级市分析,2001—2021年各市碳排放总量皆呈上升趋势。唐山市、石家庄市、邯郸市位列碳排放总量的前3位。2020年唐山市碳排放总量高达38 579.56万t,占全省碳排放总量的29.07%,该市作为重工业基地,能源密集型产业集中,以钢铁、煤炭、化工等产业为主,在生产过程中需要大量能源,特别是煤炭,导致碳排放量居高不下。石家庄的产业结构相对综合,以钢铁为主的重工业及以纺织、制药为代表的轻工业均较为发达,碳排放总量较高。邯郸的钢铁产业在全国也占有重要地位,此外化工、建材等重工业发达,对碳排放的需求较大。承德市和张家口市在碳汇功能方面具有显著优势。2020年两地合计吸收碳排放207.61万吨,占全省碳吸收总量的69.02%,其中,承德市得益于丰富的森林资源及迅速发展的林业碳汇项目,张家口市草原面积广阔,草原碳汇能力较强。

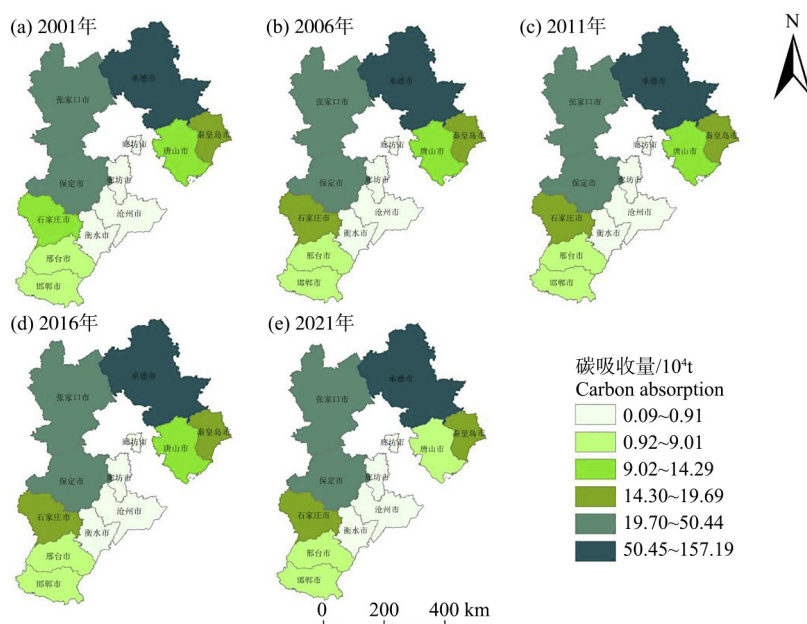


图3 2001—2021年河北省土地利用碳吸收量分布

Fig. 3 Distribution of the carbon absorption from land use in Hebei Province from 2001 to 2021

2.2 各市碳排放经济贡献系数

河北省碳排放经济贡献情况见图4。可见:在2001—2021年,河北省11个地级市的碳排放经济贡

献系数区域差异较大,为0.62~2.11。中部地区碳排放经济贡献优势明显,2001年碳排放经济贡献系数>1的城市数量仅5个,2021年已增长至9个,表

明碳生产力和能源利用效率优于全省均值的地区逐年增多,与低于全省均值的地区呈两极分化趋势,碳生产力及能源利用效率相对劣势较大的地区低碳转型难度较大,容易逐年落后于低碳化先发地区。20年间,廊坊市、保定市、沧州市和衡水市的碳排放经济贡献系数均 >1 ,且保定市、廊坊市的碳排

放经济贡献更为明显,依托靠近首都的区位优势以及雄安新区设立的政策优势,此区域具有更好的低碳发展前景。唐山市的碳排放经济贡献系数均 <1 ,表明唐山作为老工业基地,碳锁定效应明显,能源结构转型和产业低碳发展任重而道远,经济发展对碳排放的依赖程度较大。

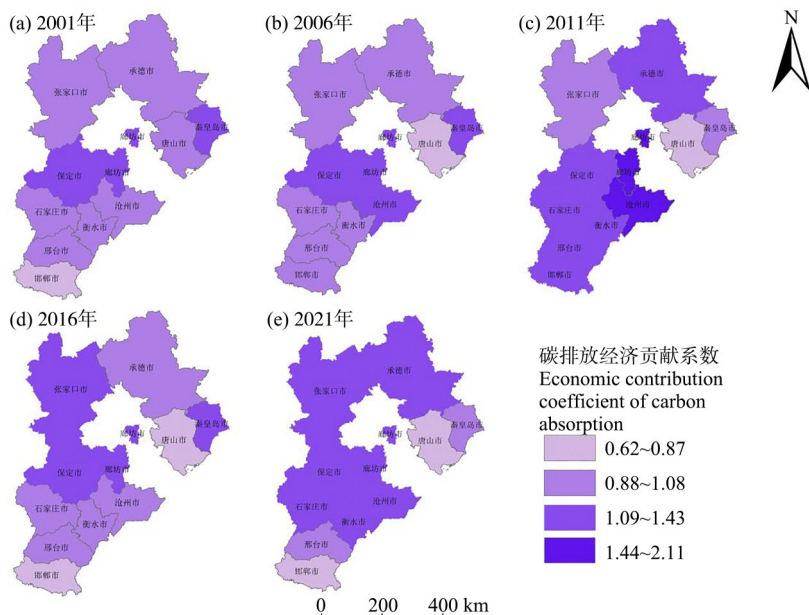


图4 2001—2021年河北省碳排放经济贡献系数分布

Fig. 4 Distribution of the economic contribution coefficient of carbon absorption in Hebei Province from 2001 to 2021

2.3 各市碳生态承载系数

河北省碳生态承载情况见图5。可见:在2001—2021年,河北省11个地级市的碳排放生态承载系数处于0.01~16.94,对碳排放的消纳作用差异很大。相对碳排放量越低,相对碳吸收量越高,区域的碳生产承载力越高。北部区域具有碳吸纳优势,东南部地区碳生态承载力较弱,原因在于河北省的自然资源禀赋区域差异明显,生态用地分布不均,且各市逐年的生态空间格局相对稳定。北部的承德、张家口2市林草资源丰富,承德塞罕坝是全球最大的人造森林,对塞罕坝、塞北等国有林场的严格管护使该地区碳汇功能突出。此外,承德、张家口2市产业结构均以旅游、康养、物流等第三产业为主,工业碳排放量相对较低,因此碳排放总量较低,碳排放生态承载系数 >1 ,在全省碳排放的消纳过程中起积极作用,承德市的碳吸纳能力尤其突出,平均碳排放生态承载系数达14.52,远高于其余

地市,是全省碳汇功能保护与提升的核心区域。由于承德、张家口碳汇功能相对优势明显,其余8市碳生态承载系数均 <1 。其中,廊坊、衡水、沧州3市显著低于其他区域,这是因为该区域自然资源禀赋相对较差,林地、草地、湿地等地类规模较小,碳汇能力较弱,且该区域电力行业及石油化工行业发达,碳排放总量较高。

2.4 碳排放与经济增长脱钩指数

河北省碳排放与经济增长的脱钩关系见表4。可见:2001—2021年,11个地级市各阶段土地利用碳排放与经济发展的脱钩情况存在时空异质性。共表现出4种类型,包括强脱钩、弱脱钩、扩张连结、扩张负脱钩,整体以弱脱钩和扩张连接结为主要类型。

在2001—2006年,脱钩类型以扩张连结为主,可能原因是该时期以钢铁代表的重工业产量处于逐步上升期,土地利用碳排放总量与经济保持相对

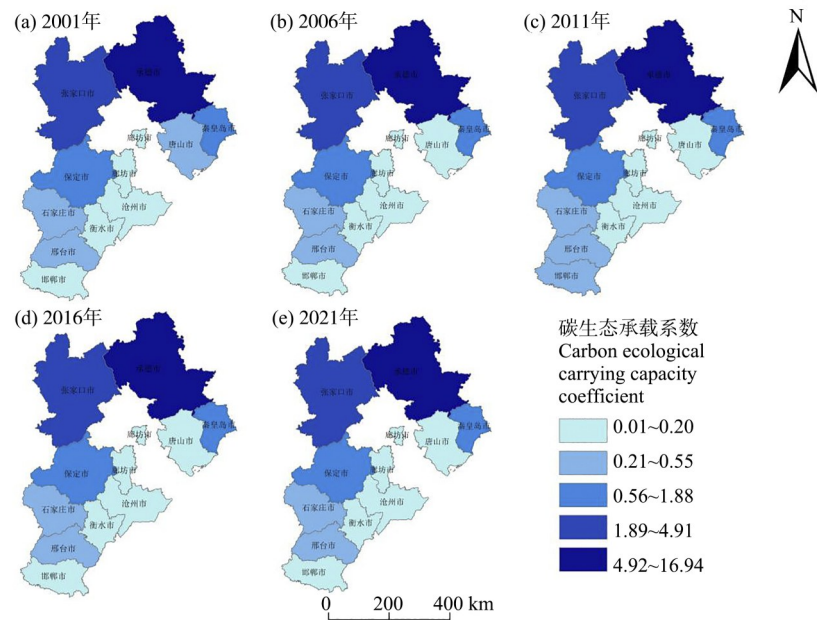


图5 2001—2021年河北省碳生态承载系数分布

Fig. 5 Distribution of the carbon ecological carrying capacity coefficient of Hebei Province from 2001 to 2021

表4 2001—2021年河北省不同时间段碳排放与经济增长的脱钩状态

Table 4 Decouplind state of carbon emissions and economic growth in Hebei Province during different time periods from 2001 to 2021

城市 City	2001—2006 年	2006—2011 年	2011—2016 年	2016—2021 年
石家庄 Shijiazhaung	扩张连结	弱脱钩	弱脱钩	强脱钩
邢台 Xingtai	扩张连结	弱脱钩	扩张连结	弱脱钩
廊坊 Langfang	扩张连结	强脱钩	扩张负脱钩	弱脱钩
邯郸 Handan	弱脱钩	弱脱钩	扩张负脱钩	扩张连结
秦皇岛 Qinhuangdao	扩张连结	扩张连结	强脱钩	扩张连结
张家口 Zhangjiakou	弱脱钩	扩张连结	强脱钩	扩张连结
衡水 Hengshui	扩张连结	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩
唐山 Tangshan	扩张连结	扩张连结	强脱钩	扩张负脱钩
承德 Chengde	扩张连结	弱脱钩	扩张负脱钩	强脱钩
保定 Baoding	扩张连结	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩
沧州 Cangzhou	扩张连结	弱脱钩	扩张负脱钩	弱脱钩

同步增长。在2006—2011年,全省各市脱钩类型以弱脱钩为主,经济发展与碳排放呈同步增长趋势,且经济增速更快,表明河北省推行的加强环境保护、推动清洁生产等政策初见成效。在2011—2016年,GDP增速明显放缓,各市脱钩类型趋于多元化,秦皇岛、张家口、唐山市为强脱钩状态,表明在经济由数量增长转变为高质量发展的时期,3市低碳转型成效显著,尤其是唐山市作为重工业基地,具有很好的示范作用。廊坊、邯郸、承德、沧州

4市表现为扩张负脱钩状态,体现出粗放式增长特点。在2016—2021年,石家庄、邢台等7市表现为强脱钩或负脱钩状态,为实现“双碳”战略尤其是碳达峰奠定了良好的基础。秦皇岛和唐山市的脱钩状态由强脱钩转变为扩张负脱钩,需要予以重点关注。

按城市分析,2001—2021年,石家庄、衡水、保定均由扩张连结状态过渡至弱脱钩甚至强脱钩状态,3市经济发展与碳排放呈良性状态。邢台、廊

坊、承德、沧州4市经历了扩张连结—弱脱钩(强脱钩)—扩张连结(扩张负脱钩)—弱脱钩(强脱钩)4个阶段,经济增长与碳排放呈现波动向好态势。邯郸市、秦皇岛、张家口、唐山4市由扩张连结(弱脱钩)状态转变为扩张负脱钩(扩张连结)状态,经济增长与碳排放的依赖程度呈增加态势,是未来节能减排的重点区域。

2.5 河北省低碳发展现状格局

综合考虑河北省11个地级市碳排放经济贡献系数、碳生态承载系数、脱钩指数,分析河北省低碳发展现状格局(图6)。可见:在2001—2021年,区域处于脱钩-高碳效-低承载的状态逐渐增多,经济发展与碳排放已实现脱钩,但区域碳汇能力相对较弱。2016—2021年,石家庄、邢台、廊坊、衡水、沧州5市属于此类型。可能是在此期间,石家庄、廊坊注重高新技术产业和现代服务业发展,邢台重工业优化升级成效显著,衡水市绿色农业发展迅速,沧州依托沿海优势发展海洋经济和绿色港口。脱钩-低碳效-低承载状态相对特殊,仅2001—2006年邯郸市属于此类型。经济发展表面上已实现与碳排放脱钩,实则可能是新世纪初期,邯郸市的生产力尚

未充分解放,工业水平和经济发展都相对较低,但经济增速略快于碳排放增速,属于较低发展阶段的脱钩,该状态会随着经济社会进一步发展而改变。脱钩-高碳效-高承载区域是碳排放与经济发展最协调的状态,对碳的吸纳能力相对较高,同时碳生产力和能源利用效率亦具有领先优势,属于高质量发展阶段下的脱钩。2016—2021年,承德和保定属于此类型区域。其中,保定是我国最早开展低碳城市实践的试点之一,雄安新区设立也为保定在交通、科技、生态等诸多领域带来显著正面影响,承德市丰富的森林资源及其创造的低碳效益印证了“绿水青山就是金山银山”;2001—2021年共4种状态呈负脱钩特征,其中负脱钩-低碳效-低承载区域的GDP和碳排放均呈增长趋势,且碳排放的增速快于GDP增速,碳生产力和能源利用效率相对较低,碳吸纳能力较弱。最近2016—2021年,唐山市属于此类型。且由前一阶段2011—2016年的脱钩状态转变为扩张负脱钩状态。表明在2011—2016年,唐山市低碳效、低承载的发展模式下,经济增长与碳排放的脱钩协调状态具有不可持续性。负脱钩-高碳效-低承载区域相对特殊,2011—2016年的廊坊市和沧

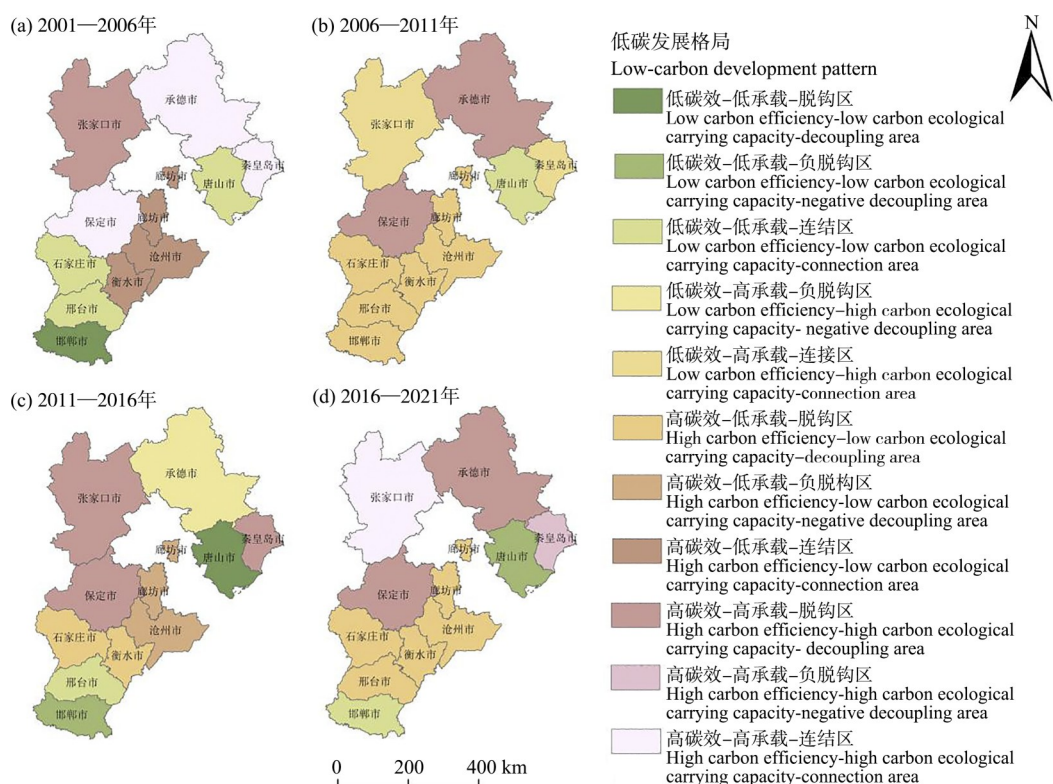


图6 2001—2021年河北省低碳发展现状格局

Fig. 6 Current status and layout of low-carbon development in Hebei Province from 2001 to 2021

州市属于此类。尽管碳效率已领先其余地市,但仍处于负脱钩状态,原因在于相较于2011年,两市2016年的ECC均显著下降,分别从2.11下降至1.26、1.63下降至1.03。说明廊坊、沧州的碳生产率及能源利用效率领先优势减弱。负脱钩-高碳效-高承载区域指尽管碳生产力和能源利用效率较高,碳吸纳能力较强,经济增长仍对碳排放依赖度较大的区域,仅2016—2021年的秦皇岛市属于此类型。表明具有碳排放经济贡献系数相对优势的区域,与对碳排放依赖度较低的脱钩区域并非完全一致,仅凭碳排放经济贡献系数高并不能充分说明区域经济增长对碳排放的依赖性弱,进一步印证了在分区管控中引入脱钩分析的合理性。2011—2016年的承德市属于负脱钩-低碳效-高承载区域,工业是其支柱型产业,该区域经济增长仍伴随着大量碳排放;呈连结特征的4种类型多出现在2001—2011年。其中,连结-低碳效-低承载区域以2001—2006年的邢台及唐山市为代表,该区域经济增长与碳排放量增加相对同步,且碳生产率、能源利用效率以及碳生态承载力较低。2006—2011年的承德市属于连结-低碳效-高承载区域,尽管该区域碳汇资源丰富,但尚未实现低碳化发展。连结-高碳效-高承载区皆位于生态环境良好的秦皇岛、张家口、承德

等地,同时具备碳吸纳及碳效率相对优势,是未来最易于实现脱钩的区域,但经济增长仍伴随着碳排放来同步增加。连结-高碳效-低承载区位于2001—2006年的廊坊、沧州、衡水3市。在经济发展水平相对较低的本世纪初期,尽管3市碳效率具有相对优势,但尚未实现与碳排放脱钩,且碳汇资源禀赋较差。

2.6 碳平衡分区结果

综合分析结果中的11种类型表明,河北省各地级市不同年份的综合状态可能有所不同。为便于分区管控,碳排放经济贡献系数、碳生态承载力系数、脱钩状态以各市2001—2021年呈现的主要状态为准,分区原则见表5。共划分为4类分区。其中:石家庄、邢台、廊坊、衡水、沧州5市属于低碳优势巩固区,该区域的经济发展对碳排放的依赖程度较低,碳生产率及能源利用效率较高,但碳吸纳能力较弱;承德、保定2市属于低碳发展示范区,该区域经济发展与碳排放呈脱钩状态,低碳发展状况及碳汇禀赋均处于领先地位;秦皇岛、张家口2市属于低碳转型提升区,该区域碳排放经济贡献能力及碳吸纳能力较强,但经济发展对碳排放的依赖程度较高;唐山、邯郸2市属于减碳增汇振兴区,该区域经济发展与碳排放尚未脱钩,面临经济发展以及碳生态承载力双重压力。

表5 碳平衡分区原则

Table 5 Principle of carbon balance partitioning

脱钩状态 Decoupling status	碳排放经济贡献系数 ECC	碳生态承载力系数 ESC	分区类型 Partition type
脱钩(强脱钩、弱脱钩) Decoupling(Strong decoupling、 weak decoupling)	>1	<1	低碳优势巩固区
	>1	>1	低碳发展示范区
未脱钩(扩张连结、扩张负脱钩) Not decoupling(Expansive connection、 Expansive negative decoupling)	>1	>1	低碳转型提升区
	<1	<1	减碳增汇振兴区

3 讨论

本研究得出的碳排放、碳吸收量、碳排放与经济增长的脱钩指数等结果与已有研究呈现出一致性^[28-29,49],不同之处在于本研究综合考虑了河北省区域间资源禀赋差异及区域自身低碳发展阶段,兼顾了按资源禀赋状况进行分区的效率性及按脱钩状态进行分区的公平性,将河北省划分为4类碳平

衡区域进行差异化管控:

低碳优势巩固区:石家庄、邢台、廊坊、衡水、沧州5市经济发展与碳排放已实现脱钩,应通过碳市场配额分配、碳交易等手段适当限制碳排放总量,倒逼区域经济继续沿脱钩路径发展。巩固生物医药、先进装备制造、新能源等战略性新兴产业优势,淘汰落后产能,构建绿色低碳的现代化产业体系。适当扩大碳汇空间规模,营造宜居生活环境。

低碳发展示范区：承德、保定2市在碳汇能力、低碳发展方面优势显著，应在保持经济发展与碳排放脱钩的基础上，依托丰富的碳汇资源探索更为灵活的碳配额分配与交易机制，为碳汇项目提供交易平台和融资支持，显著扩大碳汇空间规模，打造全国领先的碳汇基地。充分发挥产业集群、科技创新及人力资源等优势，加速绿色低碳产业升级。

低碳转型提升区：秦皇岛、张家口2市尽管碳效率、碳汇能力具有相对优势，但呈现经济增长伴随碳排放大量增加的趋势。首先应予以相对较多的碳配额分配来保证区域发展诉求；其次，依托该区域丰富的自然资源，将文旅产业、绿色农业、冰雪经济、可再生能源产业等作为新的低碳经济增长点，逐渐摆脱对碳排放的依赖性。

减碳增汇振兴区：唐山、邯郸2市碳效率及碳汇能力均处于相对劣势，经济增长对碳排放的依赖程度较大。该区域尤其是唐山市作为重要的重工业基地，应保障充分的碳配额来满足生产需求，同时推动钢铁等重工业行业低碳转型，鼓励实施能效改造、推广高效节能设备及低碳环保新材料的使用，加快能源结构调整，提高可再生能源及氢能等清洁能源使用。同时，适当扩大碳汇规模，提升碳生态承载能力。

本研究还存在不足之处，有待进一步优化。例如，土地利用碳排放的核算结果存在不确定性，多基于前人研究结果采用系数法进行估算。其中，能源碳排放的计算是基于省级能源平衡表，根据各市分行业产值比例得出各市能源碳排放数据进一步通过系数法计算碳排放量。在未来的研究中应根据河北省各地级市自身资源禀赋情况、产业发展及能源消耗现状采用在地化系数进行核算。此外，论文以11个地级市进行分区研究，可能会忽略地级市内部的差异，后续可以区县为分区单元开展细化研究。

4 结 论

本研究以河北省11个地级市为研究单元，基于2001—2021年河北省能源消耗数据和土地利用现状等数据，构建土地利用碳排放核算体系，分析河北省2001—2021年的碳排放空间格局特征，并结合碳排放经济贡献系数、碳生态承载系数及脱钩指数，提出碳排放分区方案及优化对策。主要结论

如下：

1) 2001—2021年河北省碳排放量呈现明显的增加趋势，碳排放量从2001年的 9.01×10^7 t上升到2021年的 2.75×10^8 t，2001—2011年碳排放量增长迅速，2011—2021年碳排放量增长则相对缓慢。全省碳排放呈现出东、中南部较高，而北部较低的空间格局；碳吸收能力表现为北部较高，东部较低的特征。建设用地碳排放是土地利用碳排放的主要碳源。土地利用碳吸收量远不及全省的土地利用碳排放量，表明河北省的各类生态用地目前只起到了微弱的碳吸收和调节作用。

2) 2001—2021年河北省各地级市碳排放经济贡献系数、碳排放生态承载系数和脱钩指数差异较大，交通便利、政策支持力度大的保定、廊坊等地具有碳生产力及能源利用效率优势，林草资源丰富的承德、张家口等地具有碳吸纳能力优势。全省经济增长与碳排放的关系逐渐趋于协调，整体由扩张连结状态过渡至脱钩状态。

3) 基于碳排放经济贡献能力、碳排放生态承载能力及脱钩状态综合分析，把河北省分为低碳优势巩固区、低碳发展示范区、低碳转型提升区及减碳增汇振兴区4类碳平衡分区。

参考文献 References

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2023
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Intergovernmental Panel on Climate Change* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021
- [3] 杨泽伟. 碳排放权：一种新的发展权[J]. 浙江大学学报：人文社会科学版, 2011, 41(3): 40-49
Yang Z W. Carbon emission rights: A new right to development [J]. *Journal of Zhejiang University: Humanities and Social Sciences Edition*, 2011, 41(3): 40-49 (in Chinese)
- [4] 董康银, 王健达, 张伟玉, 董秀成. 大国气候博弈的中国经济与生态环境效应评估[J]. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(9): 14-25
Dong K Y, Wang J D, Zhang W Y, Dong X C. Economic and ecological impacts of the great power climate game on China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2023, 33(9): 14-25 (in Chinese)
- [5] 潘家华. “双碳”目标再解析：概念、挑战和机遇[J]. 北京工业大学学报：社会科学版, 2024, 24(3): 1-13
Pan J H. Reanalysis of the “dual carbon” target: Concepts, challenges, and opportunities [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology: Social Sciences Edition*, 2024, 24(3): 1-13 (in Chinese)
- [6] 赖力. 中国土地利用的碳排放效应研究[D]. 南京：南京大学, 2010
Lai L. Research on carbon emission effects of land use in China [D].

- Nanjing: Nanjing University, 2010 (in Chinese)
- [7] 杨青林, 赵荣钦, 丁明磊, 满洲, 王帅, 余娇, 杨文娟. 中国城市碳排放的空间格局及影响机制: 基于285个地级市截面数据的分析[J]. 资源开发与市场, 2018, 34(9): 1243-1249
- Yang Q L, Zhao R Q, Ding M L, Man Z, Wang S, Yu J, Yang W J. Spatial pattern and influencing mechanism of urban carbon emissions in China: Based on cross-section data of 285 cities [J]. *Resource Development & Market*, 2018, 34(9): 1243-1249 (in Chinese)
- [8] Marchi M, Jørgensen S E, Pulselli F M, Marchettini N, Bastianoni S. Modelling the carbon cycle of Siena Province: Tuscany, central Italy[J]. *Ecological Modelling*, 2012, 225: 40-60
- [9] de Melo M L, Teodoru C R, del Giorgio P A. Catchment-scale carbon fluxes and processes in major rivers of northern Québec, Canada [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 873: 162308
- [10] 姜渭宗, 徐建辉, 赵田. 基于夜间灯光数据的长江流域碳排放时空格局及异质性研究[J]. 长江流域资源环境, 2024, 33(9): 2004-2017
- Jiang W Z, Xu J H, Zhao T. Research on the spatiotemporal pattern and heterogeneity of carbon emissions in the Yangtze River Basin based on nighttime light data [J]. *Resources and Environment in the Yangtze River Basin*, 2024, 33(9): 2004-2017 (in Chinese)
- [11] 徐素. 我国五大城市群碳排放特征分析与减碳策略探讨[J]. 上海城市规划, 2024(4): 48-55
- Xu Su. Analysis of carbon emission characteristics and exploration of carbon reduction strategies in China's five major urban agglomerations [J]. *Shanghai Urban Planning*, 2024(4): 48-55 (in Chinese)
- [12] 夏楚瑜, 李艳, 叶艳妹, 史丹, 刘婧鸣, 李效顺. 基于生态网络效用的城市碳代谢空间分析: 以杭州为例[J]. 生态学报, 2018, 38(1): 73-85
- Xia C Y, Li Y, Ye Y M, Shi Z, Liu J M, Li X S. Analyzing urban carbon metabolism based on ecological network utility: A case study of Hangzhou City [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(1): 73-85 (in Chinese)
- [13] 杨蕴琦, 郝晋珉, 张金懿, 武子豪, 孙逸航. 曲周县土地利用碳排放测算及情景预测研究[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(2): 160-175
- Yang Y Q, Hao J M, Zhang J Y, Wu Z H, Sun Y H. Carbon emission measurement and prediction of land use in Quzhou County based on carbon neutrality target [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(2): 160-175 (in Chinese)
- [14] 李晓江, 吕晓蓓, 邵玲, 余妙, 肖颖禾, 胡京京, 周游, 史帅. “社区减碳”: 计量方法、排放特征及其实现路径[J]. 城市规划学刊, 2024, (5): 40-46
- Li X J, Lv X B, Shao L, Yu M, Xiao Y H, Hu J J, Zhou Y, Shi S. Community carbon reduction: Measurement methods, emission characteristics, and implementation paths [J]. *Journal of Urban Planning*, 2024, (5): 40-46 (in Chinese)
- [15] 刘学之, 孙鑫, 朱乾坤, 尚玥佟. 中国二氧化碳排放量相关计量方法研究综述[J]. 生态经济, 2017, 33(11): 21-27
- Liu X Z, Sun X, Zhu Q K, Shang Y D. A review of research on measurement methods related to carbon dioxide emissions in China [J]. *Ecological Economy*, 2017, 33(11): 21-27 (in Chinese)
- [16] Li H, Qiu J J, Wang L G, Tang H J, Li C S, van Ranst E. Modelling impacts of alternative farming management practices on greenhouse gas emissions from a winter wheat-maize rotation system in China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 135(1-2): 24-33
- [17] 熊健, 张肿, 谢湘雅, 卢柯, 张天然, 金昱, 王波, 时寅. 基于温室气体清单的市级国土空间规划碳定量研究: 分析框架、核算方法与规划模拟[J]. 上海城市规划, 2024(2): 73-81
- Xiong J, Zhang C, Xie X Y, Lu K, Zhang T R, Jin Y, Wang B, Shi Y. Study on carbon quantitative analysis of spatial planning: Framework, calculation methods and simulation [J]. *Shanghai Urban Planning Review*, 2024(2): 73-81 (in Chinese)
- [18] 孟帆, 张光明. 基于物料平衡的光合细菌污水资源化碳排放研究[J]. 工业水处理, 2022, 42(6): 74-78
- Meng F, Zhang G M. Carbon emission of photosynthetic bacteria wastewater bioconversion technology based on material balance algorithm [J]. *Industrial Water Treatment*, 2022, 42(6): 74-78 (in Chinese)
- [19] 赵宁, 周蕾, 庄杰, 王永琳, 周稳, 陈集景, 宋璐, 丁键滢, 迟永刚. 中国陆地生态系统碳源/汇整合分析[J]. 生态学报, 2021, 41(19): 7648-7658
- Zhao N, Zhou L, Zhuang J, Wang Y L, Zhou W, Chen J J, Song J, Ding J X, Chi Y G. Integration analysis of the carbon sources and sinks in terrestrial ecosystems, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(19): 7648-7658 (in Chinese)
- [20] 胡国霞, 雷国平, 周浩, 路昌, 赵宇辉. 黑龙江省土地利用变化的碳排放效应研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(6): 287-292
- Hu G X, Lei G P, Zhou H, Lu C, Zhao Y H. Research on the carbon emission effect of land use change in Heilongjiang Province [J]. *Soil and Water Conservation Research*, 2015, 22(6): 287-292 (in Chinese)
- [21] 孔蕊, 张增信, 张凤英, 田佳西, 朱斌, 朱敏, 王益明. 长江流域森林碳储量的时空变化及其驱动因素分析[J]. 水土保持研究, 2020, 27(4): 60-66
- Kong R, Zhang Z X, Zhang F Y, Tian J X, Zhu B, Zhu M, Wang Y M. Analysis of spatiotemporal changes and driving factors of forest carbon storage in the Yangtze River Basin [J]. *Soil and Water Conservation Research*, 2020, 27(4): 60-66 (in Chinese)
- [22] 龙志. 县域尺度碳排放时空格局与碳平衡分区优化[D]. 兰州: 兰州大学, 2022
- Long Z. Spatial and temporal patterns of county-level carbon emissions and optimization of carbon balance zoning [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022 (in Chinese)
- [23] 赵筱青, 陈彦君, 徐逸飞, 陶俊逸, 施馨雨, 唐媛媛, 向爱盟, 顾泽贤, 瞿国寻. 低碳导向下滇西北石漠化山区国土空间综合分区[J]. 华南师范大学学报: 自然科学版, 2023, 55(4): 14-27
- Zhao X Q, Chen Y J, Xu Y F, Tao J Y, Shi X Y, Tang Y Y, Xiang A M, Gu Z X, Qu G X. Territorial space comprehensive zones under the guidance of low carbon in the rocky desertification mountains of northwest Yunnan Province [J]. *Journal of South China Normal University: Natural Science Edition*, 2023, 55(4): 14-27 (in Chinese)
- [24] 杨世岳, 何崑健. 基于脱钩分析的区域碳排放管控分区与策略: 以浙江省为例[J]. 建筑创作, 2022(5): 193-199
- Yang S P, He Y J. Regional carbon emission control zoning and strategies based on decoupling analysis: A case study of Zhejiang Province [J]. *Architectural Creation*, 2022(5): 193-199 (in Chinese)
- [25] 李建豹, 陈红梅, 张彩莉, 揣小伟, 周艳. 长三角地区碳源碳汇时空演化特征及碳平衡分区[J]. 环境科学, 2024, 45(7): 4090-4100
- Li J B, Chen H M, Zhang C L, Chuai X W, Zhou Y. Spatiotemporal evolution characteristics of carbon sources and carbon sinks and carbon balance zoning in the Yangtze River Delta Region [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(7): 4090-4100 (in Chinese)

- [26] 周波, 许源溪, 冯田. 成渝城市群碳平衡空间分异与优化对策[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(8): 1650-1662
Zhou B, Xu Y X, Feng T. Spatial differentiation of carbon balance and optimization countermeasures in Chengdu-Chongqing urban agglomeration [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2024, 33(8): 1650-1662 (in Chinese)
- [27] 杨静媛, 张明, 多玲花, 肖圣, 赵显茜. 江西省土地利用碳排放空间格局及碳平衡分区[J]. 环境科学研究, 2022, 35(10): 2312-2321
Yang J Y, Zhang M, Duo L H, Xiao S, Zhao Y X. Spatial pattern of land use carbon emissions and carbon balance zoning in Jiangxi Province [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(10): 2312-2321 (in Chinese)
- [28] 朱婧, 刘金娜, 房学宁, 窦睿音. 面向碳达峰碳中和目标的省域碳排放仿真与对策研究: 以河北省为例[J]. 生态经济, 2024, 40(7): 20-26
Zhu Q, Liu J N, Fang X N, Dou R Y. Research provincial carbon emission reduction simulation and reduction strategy for carbon peaking and carbon neutral goal: Taking Hebei Province as an example [J]. *Ecological Economy*, 2024, 40(7): 20-26 (in Chinese)
- [29] 杨宗霖. 河北省“双碳”趋势情景预测及实现路径对策研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022
Yang Z L. Research on scenario prediction and implementation path countermeasures of "carbon emission peak and carbon neutralization" trend in Hebei Province [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022 (in Chinese)
- [30] 河北省统计局. 河北统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2002—2022
Hebei Provincial Bureau of Statistics. *Hebei Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2002—2022 (in Chinese)
- [31] 国家统计局. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2002—2022
National Bureau of Statistics. *China Energy Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2002—2022 (in Chinese)
- [32] 中国住房和城乡建设部. 中国城乡建设统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2002—2022
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of China. *China Urban-Rural Construction Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2002—2022 (in Chinese)
- [33] Yang J, Huang X. The 30m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925
- [34] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2020(28): 5-7
Xi J P. Speech at the 75th general debate of the United Nations General Assembly [J]. *Bulletin of the State Council of the People's Republic of China*, 2020 (28): 5-7 (in Chinese)
- [35] 王正, 周侃, 樊杰, 赵浩. 市—县尺度能源消费碳排放核算方法研究进展[J]. 地理科学进展, 2023, 42(7): 1406-1419
Wang Z, Zhou K, Fan J, Zhao H. Progress of research on energy-related carbon emission accounting methods at the prefectural and county levels [J]. *Progress in Geography*, 2023, 42(7): 1406-1419 (in Chinese)
- [36] World Business Council for Sustainable Development and World Resources Institute. *The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard* [M]. Array Geneva: World Business Council for Sustainable Development, World Resources Institute, 2004
- [37] Huang Y Z, Matsumoto K. Drivers of the change in carbon dioxide emissions under the progress of urbanization in 30 provinces in China: A decomposition analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 322: 129000
- [38] GB/T 2589—2020. 综合能耗计算通则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020
GB/T 2589—2020. General principles for calculation of comprehensive energy consumption [S]. Beijing: China Standard Press, 2020 (in Chinese)
- [39] Mi Z F, Wei Y M, Wang B, Meng J, Liu Z, Shan Y L, Liu J R, Guan D B. Socioeconomic impact assessment of China's CO₂ emissions peak prior to 2030[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 2227-2236
- [40] Shan Y L, Guan D B, Hubacek K, Zheng B, Davis S J, Jia L C, Liu J H, Liu Z, Fromer N, Mi Z F, Meng J, Deng X Z, Li Y, Lin J T, Schroeder H, Weisz H, Schellnhuber H J. City-level climate change mitigation in China[J]. *Science Advances*, 2018, 4(6): eaaq0390
- [41] 蔡博峰. 城市温室气体清单研究[J]. 气候变化研究进展, 2011, 7(1): 23-28
Cai B F. A study on city greenhouse gas emissions inventory [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2011, 7(1): 23-28 (in Chinese)
- [42] 杨欣, 蔡银莺, 张安录. 武汉城市圈碳排放的时空格局及影响因素分解研究: 基于2001—2009年市级面板数据的实证[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(11): 1389-1396
Yang X, Cai Y Y, Zhang A L. Spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of carbon emission in Wuhan urban circle from 2001 to 2009[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, 22(11): 1389-1396 (in Chinese)
- [43] 王颖. 武汉市国土空间碳排放时空演变及情景模拟研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2022
Wang Y. Research on the spatiotemporal evolution and scenario simulation of carbon emissions in the land space of Wuhan City [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2022
- [44] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 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
Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, Chen A P. Estimation of land vegetation carbon sequestration in China from 1981 to 2000 [J]. *Chinese Science: Volume D: Earth Science*, 2007(6): 804-812 (in Chinese)
- [45] 田云, 张俊彪, 李波. 中国农业碳排放研究: 测算、时空比较及脱钩效应[J]. 资源科学, 2012, 34(11): 2097-2105
Tian Y, Zhang J B, Li B. Agricultural carbon emissions in China: Calculation, spatial-temporal comparison and decoupling effects [J]. *Resources Science*, 2012, 34(11): 2097-2105 (in Chinese)
- [46] 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 (in Chinese)
- [47] 段晓男, 王效科, 退非, 欧阳志云. 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 X N, Wang X K, Lu F, Ouyang Z Y. Current status and potential of carbon sequestration in Chinese wetland ecosystems [J]. *Journal of Ecology*, 2008, (2): 463-469 (in Chinese)

- [48] Tapio P. Towards a theory of decoupling: Degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001 [J]. *Transport Policy*, 2005, 12(2): 137-151
- [49] 帕茹克·吾斯曼江. 土地利用碳代谢视角下京津冀低碳协同发展路径研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2024

Paruke W. Research on the path of low-carbon collaborative development in the Beijing-Tianjin-Hebei region from the perspective of land use carbon metabolism [D]. Beijing: China Agricultural University, 2024 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 孙逸航, 现为中国农业大学土地科学与技术学院博士研究生。研究方向为低碳国土空间规划。学士毕业于西南大学, 土地管理专业。先后作为主要成员参与昆明市国土空间总体规划编制、曲周县空间总体规划编制、基于第三次国土调查的青岛市自然资源调查专题研究等; 曾赴云南、河北、山东等地主持或参与十余次微观调研活动。



通讯作者简介: 郝晋珉, 中国农业大学土地科学与技术学院教授, 博士生导师, 国家科技支撑计划项目首席科学家, 兼任中国土地学会理事、中国农业工程学会理事、土地规划分会副主任、土地整治分会副主任等。长期从事土地利用规划、土地整治、土地管理和农业农村发展等领域的科研教学工作, 主持完成国家科研项目20余项, 先后获得国家科技进步二等奖等国家和省部级科技奖励8项。获“国务院政府特殊津贴”“全国优秀农业科技工作者”“国家重点科技攻关计划先进个人”“农业部有突出贡献专家”“教育部跨世纪优秀人才”“北京高校优秀共产党员”等荣誉和称号。