



吴强,王梓瑜,陈金兰. 中国畜牧业碳效率的量化评估、动态演进及空间溢出效应[J]. 中国农业大学学报, 2026, 31(02): 247-260.

WU Qiang, WANG Ziyu, CHEN Jinlan. Quantitative assessment, dynamic evolution, and spatial spillover effects of carbon productivity and carbon efficiency in China's livestock industry[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(02): 247-260.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.02.21

中国畜牧业碳效率的量化评估、动态演进及空间溢出效应

吴强 王梓瑜 陈金兰*

(山东农业大学 经济管理学院, 山东 泰安 271001)

摘要 为准确评估我国畜牧业碳效率,并揭示其演进规律及影响因素,基于2007—2023年中国31省(市、自治区)的面板数据(统计数据不含港、澳、台地区。下同),采用碳排放系数、Kernel密度估计、Markov链和空间杜宾模型等方法分析中国畜牧业碳效率的现状特征、动态演进规律及空间溢出效应,并探究其影响因素。结果表明:1)2007—2023年中国畜牧业碳效率呈波动式上升,基于碳效率的演变特征可将全国畜牧业碳效率的演变历程大致划分为中速、低速、高速增长以及波动下降共4个阶段;2)各省域畜牧业碳效率呈现出“非均衡”特征,畜牧业碳效率整体呈“东高西低”的梯次分布格局且以江苏最高,西藏、青海最低,相比期初,除上海之外省份的碳效率均有所增加且以西藏增幅最大;3)研究期内畜牧业碳效率演进过程呈现集聚特征且有两极分化的趋势,同时表现出路径依赖和近邻效应;4)产业集聚水平与畜牧业碳效率呈“U”型关系,而且产业集聚水平具有显著的空间溢出效应;环境规制水平、城镇化水平和畜牧科技水平的提升对畜牧业碳效率具有促进作用,而农民收入水平起到了相反作用;同时,城镇化水平表现出了负向的空间溢出效应,而农民收入水平却反之。

关键词 碳效率; 动态演进; 溢出效应; 畜牧业

中图分类号 F326.3

文章编号 1007-4333(2026)02-0247-14

文献标志码 A

Quantitative assessment, dynamic evolution, and spatial spillover effects of carbon productivity and carbon efficiency in China's livestock industry

WU Qiang, WANG Ziyu, CHEN Jinlan*

(School of Economy and Management, Shandong Agricultural University, Tai'an 271001, China)

Abstract This study aimed to accurately assess the carbon efficiency of China's animal husbandry and reveal its evolution patterns and influencing factors. Based on the panel data of 31 provinces (municipalities and autonomous regions) in China from 2007 to 2023 (the statistical data do not include Hong Kong, Macao and Taiwan regions. The same below), the current characteristics, dynamic evolution laws and spatial spillover effects of carbon efficiency in China's animal husbandry were analyzed using carbon emission coefficient, Kernel density estimation, Markov chain and spatial Durbin model, and its influencing factors were also explored. The results show that: 1) From 2007 to 2023, the carbon efficiency of China's animal husbandry has risen in a fluctuating manner. Based on the evolution characteristics of carbon efficiency, the evolution process of the national animal husbandry carbon efficiency can be roughly divided into four stages: medium speed, low speed,

收稿日期: 2025-05-26; 接受日期: 2025-08-28

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2024MG050, ZR2022QG056); 中国工程科技发展战略山东研究院咨询研究项目(202302SDZD01); 山东农业大学德州(齐河)小麦产业研究院资助项目

第一作者: 吴强(ORCID:0009-0003-8126-4138), 副教授, 主要从事资源环境经济研究, E-mail: 784890651@qq.com

通讯作者: 陈金兰(ORCID:0009-0008-2834-4311), 讲师, 主要从事农业理论与政策研究, E-mail: cjl8151@163.com

high growth, and fluctuating decline. 2) The carbon efficiency of animal husbandry in various provinces shows an "unbalanced" feature. The overall carbon efficiency of animal husbandry shows a "high in the east and low in the west" stepwise distribution pattern. The highest is in Jiangsu, while Xizang and Qinghai are the lowest. Compared with the beginning of the period, the carbon efficiency of all provinces except Shanghai has increased, while Xizang has the largest increase. 3) During the research period, the evolution process of carbon efficiency in animal husbandry showed agglomeration characteristics and a trend of two-level differentiation, and simultaneously demonstrated path dependence and proximity effects. 4) The level of industrial agglomeration has a U-shaped relationship with the carbon efficiency of animal husbandry, and the level of industrial agglomeration has a significant spatial spillover effect. The improvement of environmental regulation level, urbanization level and animal husbandry science and technology level has a promoting effect on the carbon efficiency of animal husbandry, while the income level of farmers has the opposite effect. Meanwhile, the level of urbanization shows a negative spatial spillover effect, while the income level of farmers is the opposite.

Keywords carbon efficiency; dynamic evolution; spillover effect; animal husbandry

中国作为世界上最大的碳排放国家,为控制温室气体排放,制定了2030年前和2060年前分别实现“碳达峰”和“碳中和”的宏伟目标(以下简称“双碳”目标)。中国畜牧业在满足人们对动物产品需求的同时,成为温室气体排放的主要来源,其温室气体排放量占全球总量的14.5%^[1],占中国农业的35.4%^[2]。中共中央、国务院印发《关于进一步深化农村改革,扎实推进乡村全面振兴的意见》^[3]和《乡村全面振兴规划(2024—2027年)》^[4]等文件,明确要求“扶持畜牧业稳定发展”和“降低农业甲烷和畜禽养殖臭气排放”。提升畜牧业碳效率是实现畜产品安全和减排协同发展的重要途径。畜牧业碳排放的核算方法主要有经济合作与发展组织(Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD)核算法、联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)系数法、全生命周期法与投入产出法等^[5]。其中IPCC系数法是目前应用最为广泛的一种核算方法^[6],其依据《2006年IPCC国家温室气体清单指南》^[7],针对各种排放源构造其活动数据与排放因子,并将二者的乘积作为该排放源的碳排放量^[8]。依据IPCC系数法评估了畜牧业碳排放当量,取得了丰富的研究成果。近20年来,中国畜牧业碳排放整体呈下降趋势而且区域差异依然显著,全国以及三大地区的畜牧业碳排放在考察期内既没有表现出落后地区向先进地区“追赶”的趋势,其绝对差异也没有呈现系统性缩小的迹象^[2,9]。郭娇等^[10]利用中国省级温室气体排放清单重新评估了畜牧业碳排放水平,并在此基础上预测中国畜牧业碳排放达到高峰的年份分别为2034年和2043年,

其中,奶业碳排放可能会在2036—2037年达峰^[11]。

王欢等^[12]在测算2000—2014年省级畜牧业温室气体排放量基础上,借助Tapio脱钩模型分析畜牧业温室气体排放与经济发展之间的关系,结果发现畜牧业温室气体排放脱钩效应比较理想;苏旭峰等^[13]进一步分析表明,全国和农区整体上实现了从弱脱钩到强脱钩变化,而牧区和农牧交错区仍然处于弱脱钩状态。已有研究表明畜牧业生产强度、城镇化因素有利于碳排放脱钩,经济发展、人口增长因素则主要表现出碳排放脱钩的抑制效应,大部分年限畜牧业生产结构因素表现出对碳排放脱钩的促进作用^[14]。

此外,碳效率也被用来阐述某一产业碳排放与经济发展的关系。现有研究在对指标体系进行完善的基础上,运用数据包络模型重新测算了中国畜牧业碳效率,结果显示:2001—2016年年均增长率达到了5.01%;东部和中部地区要明显快于西部地区^[15]。基于已有指标体系增加了畜牧业污染物排放量这一非期望产出,而后以此为基础对中国畜牧业碳效率进行了再测度,结果发现2011—2020年中国畜牧碳效率总体水平偏低,且呈现东、中、西部依次递减的空间分布格局^[16]。聚焦到内蒙古地区,研究发现内蒙古畜牧业生态效率呈先下降后波动上升的变化趋势^[17]。

虽然现有研究厘清了畜牧业碳排放现状,也为畜牧业碳效率的测算、提升和相关政策的制定奠定了基础,但是仍存在以下需要完善的地方:一是研究对象的选择上,现有研究主要集中于农业碳排放和畜牧业碳排放测算等领域,对于畜牧业碳效率现状及特征的把握并不清晰;二是研究方法的使用

上,现有研究运用数据包络模型测算畜牧业碳效率,该方法将劳动力、资本等作为投入要素,畜牧业产值与碳排放量则分别作为期望产出与非期望产出,缺乏对于畜牧业单一要素碳效率的考察;三是研究内容的设计上,现有研究仅探讨了畜牧业经济与碳排放之间的关系,未能进一步揭示这种关系的动态演进趋势及其驱动因素。

鉴于此,为准确评估我国畜牧业碳效率,并揭示其动态演进规律及驱动因素,本研究拟基于2007—2023年中国31省(市、自治区)的面板数据(统计数据不含港、澳、台地区,下同),采用碳排放系数、Kernel密度估计、Markov链和空间杜宾模型等方法,探究中国畜牧业碳效率的现状特征、动态演进规律及空间溢出效应,并识别其影响因素,以期为提升畜牧业碳效率提供理论支撑。

1 理论分析与研究假说

1.1 各种因素对畜牧业碳效率影响的作用机理分析

理论上,直接或者间接影响畜牧业碳排放的因素均可能作用于畜牧业碳效率。从驱动因素来看,畜牧业产业集聚会通过技术溢出和规模经济效应,实现资源的优化配置,进而改善养殖效率,达到减排作用^[18]。与此同时,产业集聚引起的横向(同一类产业)和纵向(上下游产业)经济联系又可以有效促进当地农业发展并优化产业结构,而农业发展、设施建设和产业结构优化反过来促进产业集聚,从而实现畜牧产业的二次集聚,而且集聚过程会对邻区产生正外部效应,引起养殖技术和经验的溢出^[19]。但这一过程具有波动性,产业集聚的初期,各主体为追求更高的产出,会盲目扩充养殖规模,而养殖主体素质尚未强化,客观上会导致碳效率的损失;而到了后期,随着生产要素的不断聚集以及生产主体的优胜劣汰,资源配置更加有效,产业集聚效应的拐点便会如期而至,产业集聚的积极作用就会显现^[19]。此外,经济环境也会影响畜牧业碳效率的变化,农民收入水平和城镇化水平会影响养殖场户的生产积极性,进而引起碳生产率的变化^[14]。环境规制力度的提高能显著改善养殖场的生态效率^[20],从而间接影响畜牧业碳效率。相较于种植业,畜牧业的高质量发展则更需要科学技术的支撑,尤其在饲料研发、良种繁育和疫病防控方面,科

技引领和服务支撑具有十分重要的保障作用^[21]。以上各因素或单独作用或共同起效,抑或直接作用和间接影响,都可能对畜牧业碳效率产生影响。各类因素相互促进和交互影响,可能诱发畜牧科技的创新、养殖模式的进化、管理水平的提升、养殖结构的调整以及环保型投入品的使用等一系列积极现象。

据此,本研究提出假说1:市场(产业结构、农民收入、城镇化水平和畜牧科技水平)和政府(环境规制和公共投资)因素对畜牧业碳效率的具有正向作用,产业集聚对畜牧业碳效率可能存在“U”影响。

1.2 畜牧业碳效率及其影响因素的空间效应分析

由地理学第一定律可知,任何事物在空间上都具有关联性,因此,本地区的畜牧业碳效率不仅受到本地区因素的影响,还受到邻区畜牧业碳效率的影响,即畜牧业碳效率及其影响因素存在空间相关性^[22]。究其原因,一是相邻区域的自然环境特征和经济发展水平更为相近,在区域经济一体化和基础设施不断完善的作用下,畜牧养殖技术与经验在相邻区域间更容易交流互动,进而对邻近区域的畜牧业碳效率及其影响因素产生正外部效应;二是在全国统一大市场的背景下,区域间经济活动的往来将会更加频繁与密切,加快了资金、劳动力、科技人员等生产要素的流动,而且先进地区的养殖模式与管理水平对邻区产生示范效应,落后地区亦会模仿先进地区养殖技术^[23]。

据此,本研究提出假说2:畜牧业碳效率及其影响因素可能通过区域间的关联互动,从而实现畜牧业碳效率的空间溢出效应与整体改善。

具体作用路径如图1所示。

2 研究方法与数据来源

2.1 畜牧业碳效率的测算方法

借鉴Kaya等^[24]对碳效率的定义,将畜牧业碳效率定义为畜牧业在一定周期内的总产值与生产过程中产生的温室气体排放量(为便于计算,这里用CO₂排放当量替代)的比值。具体计算公式如下:

$$CP = \sum_{i=1}^n P_{Qi} Q_i / C \quad (1)$$

式中:CP为畜牧业碳效率,万元/t;i为畜禽种类;n为常数; P_{Qi} 为畜禽*i*的市场出售价格,10³元/t; Q_i 为畜禽*i*的总产量,t; $\sum_{i=1}^n P_{Qi} Q_i$ 为畜牧业总产值,万元; C 为畜禽的温室气体排放总量,t。

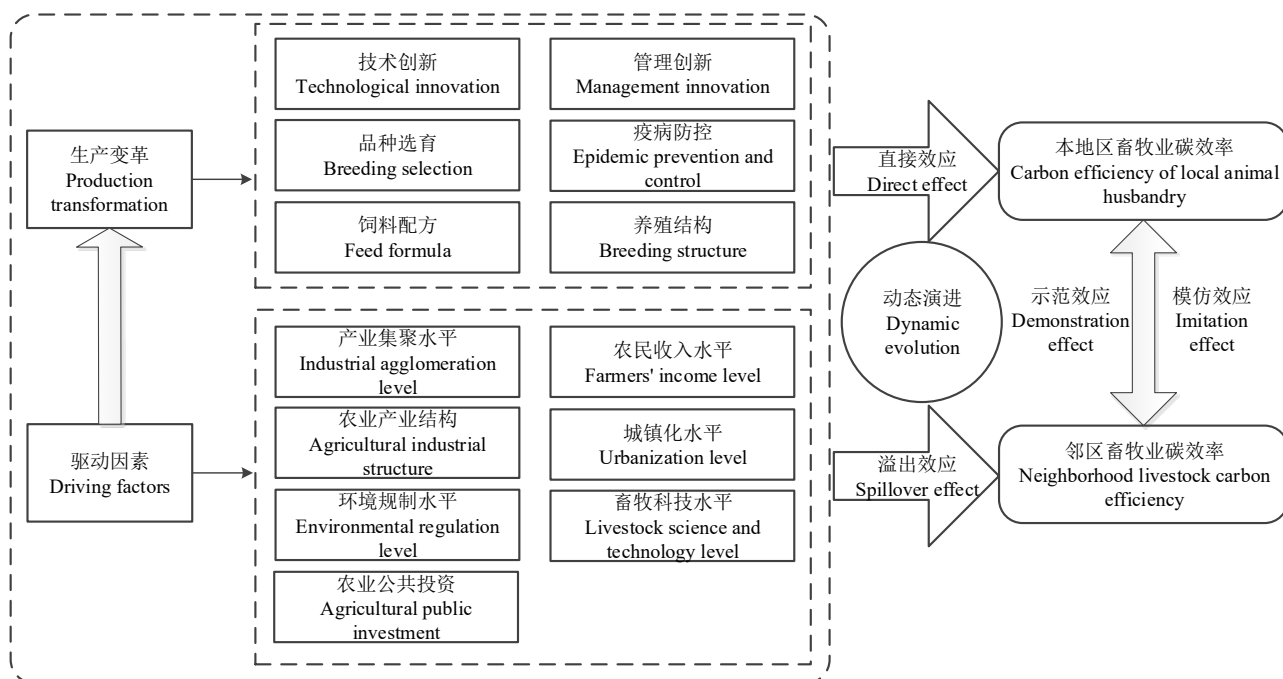


图1 畜牧业碳效率驱动因素及其空间效应

Fig. 1 Driving factors of carbon productivity and carbon efficiency in animal husbandry and their spatial effects

本研究重点围绕养殖环节中动物肠胃发酵和粪污处理这两方面测算各类畜禽的温室气体排放量^[9,25-26]。具体计算公式如下:

$$C = C_{CH_4} + C_{N_2O} = e_{CH_4} \times \sum_{i=1}^n N_i \times \alpha_i + e_{N_2O} \times \sum_{i=1}^n N_i \times \beta_i \quad (2)$$

式中: C 为畜禽的温室气体排放量,万t; C_{CH_4} 为 CH_4 转化后的 CO_2 当量,万t; C_{N_2O} 为 N_2O 转化后的 CO_2 当量,万t; e_{CH_4} 和 e_{N_2O} 为全球升温潜能值,根据《京都议定书》^①,以二氧化碳的100年全球变暖潜力值(GWP)为基准给定甲烷和氧化亚氮的全球升温潜能值,分别为21和310^[27], N_i 为第*i*种畜禽的平均饲养量, α_i 和 β_i 分别为 CH_4 和 N_2O 排放因子,具体排放因子出自于2011年《省级温室气体清单编制指南(试行)》^[28]。

2.2 Kernel密度估计和Markov链分析法

核密度估计是研究非均衡分布的常用方法,此方法主要用于描绘研究对象分布的位置、形态及延展性。Markov链分析方法用于考察各地区畜牧业碳效率转移概率分布情况,从而刻画中国畜牧业碳效率的演进规律。空间Markov链在传统Markov链的基础上引入了“空间滞后”概念,进而揭示空间关

联对畜牧业碳效率动态演变的影响关系。

2.3 空间计量分析方法

基于地理空间权重探究各变量的空间相关性,利用空间杜宾模型进行检验。表达式如下:

$$CP_{kj} = \alpha_k + \rho \sum_{j=1}^m W_{kj} CP_{kj} + \beta X_{kt} + \varphi \sum_{j=1}^m W_{jt} X_{jt} + \mu_k + \theta_k + \epsilon_k \quad (3)$$

式中: k 和 j 为不同省份; t 为不同年份, W_{kj} 为空间权重矩阵,在回归过程中,把地理空间距离矩阵为权重的模型作为基准模型,再利用空间邻接矩阵进行稳健性检验。 β 、 ρ 、 φ 为相关回归系数, μ_k 和 θ_k 为地区和时间固定效应, ϵ_k 为随机误差项。 X_{kt} 为解释变量, CP_{kj} 为被解释变量。

地理空间权重矩阵的计算公式如下:

$$W_{kj} = \begin{cases} 1/d_{kj}^2, & \text{if } k \neq j \\ 0, & \text{if } k = j \end{cases} \quad (4)$$

式中: d_{kj} 为2个省份之间的地理距离。

空间邻接矩阵的计算公式如下:

$$W_{kj} = \begin{cases} 1, & \text{if 相邻} \\ 0, & \text{if 不相邻} \end{cases} \quad (5)$$

产业集聚水平用区位熵表示;以农民可支配收

①《京都议定书》http://www.npc.gov.cn/zgrdw/huiyi/ztbg/jjyqhbh1110/2009-08/24/content_1514963.htm

入表征农民收入水平；以畜牧业在农业中的比重表征农业产业结构；用各地区污染治理投资占 GDP 比重代表环境规制水平；用农林牧渔业固定资产投资额占总投资额的比例衡量农业投资水平；以城镇人口占总人口的比重来表征城镇化水平；参考现有做法，以畜牧科技人数与畜牧业总产值之比来表征畜牧科技水平^[29]。

2.4 数据来源

研究期限为 2007—2023 年，覆盖中国 31 个省（市、自治区）。畜禽的存栏量与出栏量等数据来源于 2008—2024 年《中国畜牧业年鉴》^[30]。规模化饲养、农户散养和放牧饲养的划分标准参考 2008—

2024 年《中国畜牧业年鉴》^[30]，并依据各年度数据对不同饲养模式下肠道发酵甲烷排放因子进行加权核算。城镇化水平、地区生产总值、畜牧业总产值来源于历年的 2008—2024 年《中国统计年鉴》^[31]，产值类指标以 2007 为基期对产值类数据进行不变价处理。环境污染治理投资额来源于 2008—2024 年《中国环境统计年鉴》^[32]，农业固定投资和各行业总投资来源于 2008—2024 年《中国固定资产投资统计年鉴》^[33]。农民可支配收入来源于 2008—2024 年《中国农村统计年鉴》^[34]。畜牧科技人数来源于 2008—2024 年《中国农业机械年鉴》^[35]。各指标的统计特征如表 1 所示。

表 1 各指标的统计特征
Table 1 Statistical characteristics of each indicator

变量名称 Variable	均值 Mean	标准差 Standard deviation	最小值 Minimum	最大值 Maximum
畜牧业碳效率 Livestock carbon efficiency (LCE)	0.804	0.495	0.024	2.935
产业集聚水平 Industrial agglomeration level (IAL)	1.261	0.734	0.030	3.916
农业产业结构 Agricultural industrial structure (AIS)	0.305	0.097	0.105	0.658
环境规制水平 Environmental regulation level (ERL)	1.335	0.824	0.050	9.362
农业公共投资 Agricultural public investment (API)	0.041	0.027	0.000	0.165
农民收入水平 Farmers' income level (FIL)	1.106	0.628	0.233	3.852
城镇化水平 Urbanization level (UL)	0.561	0.142	0.215	0.896
畜牧科技水平 Livestock science and technology level (LST)	12.817	10.768	0.795	73.424

3 结果与分析

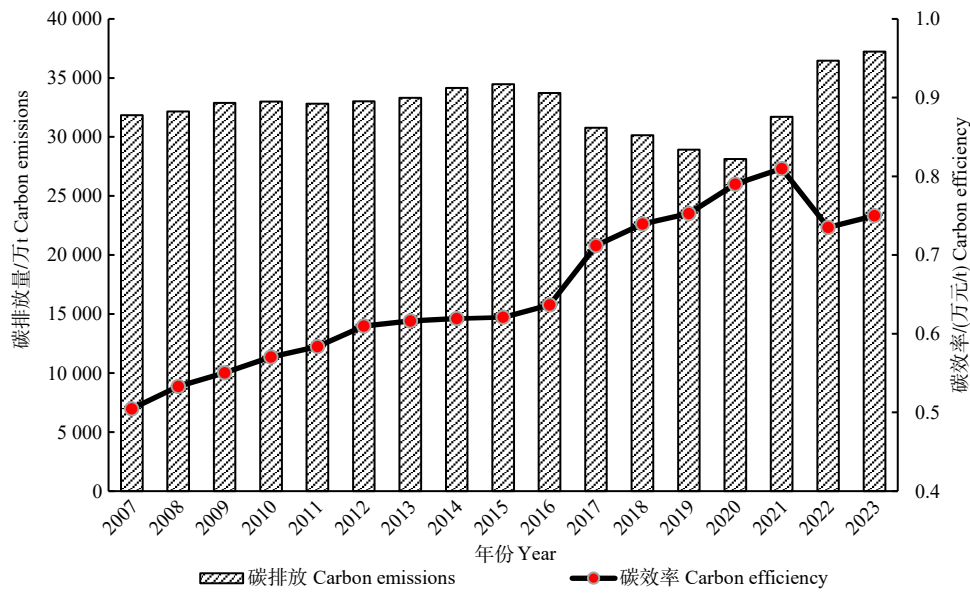
3.1 中国畜牧业碳效率的时空特征分析

3.1.1 全国层面畜牧业碳效率时序特征分析

本研究测算了 2007—2023 年全国以及 31 省（市、自治区）的温室气体排放量和碳效率，结果见图 2。可见：全国畜牧业碳排放总量有所增长，由 2007 年的 31 840.19 万 t 增至 2023 年的 37 237.17 万 t，增加了 5 396.98 万 t；畜牧业碳效率得到了快速提升，由 2007 年的 0.50 万元/t 增至 2023 年的 0.75 万

元/t，增幅达到了 48.65%，年均增速为 2.51%。

本研究根据波动幅度和变化趋势将全国畜牧业碳效率的演变历程划分为 3 个阶段：中速增长阶段（2007—2012 年），全国畜牧业碳效率由 0.50 万元/t 增至 0.61 万元/t，增加了 0.11 万元/t，年均增速为 3.86%；低速增长阶段（2012—2015 年），全国畜牧业碳效率由 0.61 万元/t 增至 0.62 万元/t，增加了 0.01 万元/t，年均增速为 0.59%；高速增长阶段（2015—2021 年），全国畜牧业碳效率由 0.62 万元/t 增至 0.81 万元/t，增加了 0.19 万元/t，年均增速为



统计数据未包含港、澳、台地区。下同。
Data do not include those of Hong Kong, Macao and Taiwan regions. The same below.

图2 中国温室气体排放量和碳效率

Fig. 2 China's greenhouse gas emissions and carbon efficiency

4.53%；波动下降阶段（2021—2023年），全国畜牧业碳效率由0.81万元/t降至0.75万元/t，降低了0.06万元/t，年均降速为3.91%。

3.1.2 省域层面畜牧业碳效率时空特征分析

中国31个省(市)畜牧业碳效率统计结果如表2所示。可见：2023年各省域畜牧业碳效率呈现出“非均衡”特征，整体呈“东高西低”的梯次分布格局。根据不同省份畜牧业碳效率的大小，可将全国31省份划分为4个层次（2.0万元/t以上、1.5万~2.0万元/t、

1.0万~1.5万元/t、低于1.0万元/t），可见：第一层次以江苏、福建和浙江为代表，地处东部发达地区；第二层次包括安徽、山东和广东3个省份，大多省份地处东部沿海地区；第三层次包括北京、湖北、河北、河南、辽宁、上海、湖南、海南、四川和广西10个省份，主要分布在东中部地区；第四层次包括重庆、江西、天津、吉林、黑龙江、陕西、山西、云南、贵州、内蒙古、宁夏、甘肃、新疆、西藏和青海，尽管涉及东、中、西部地区，但主要分布在西南地区 and 西北地区。

表2 中国31省(市)2023年畜牧业碳效率及排序

Table 2 China's 31 provinces (municipalities) livestock carbon efficiency and ranking in 2023

层次(区域) Level (Region)	省(市) Province (City)	生产率/(万元/t) Productivity	排序 Ranking
第一层次(东部地区) First tier (Eastern region)	江苏 Jiangsu	2.93	1
	福建 Fujian	2.32	2
	浙江 Zhejiang	2.16	3
第二层次(东部地区为主) Second tier (Mainly eastern region)	安徽 Anhui	1.95	4
	山东 Shandong	1.92	5
	广东 Guangdong	1.89	6
第三层次(东中部地区为主) Third tier (Mainly eastern and central regions)	北京 Beijing	1.48	7
	湖北 Hubei	1.43	8
	河北 Hebei	1.37	9

表 2（续）

层次（区域） Level（Region）	省（市） Province（City）	生产率/（万元/t） Productivity	排序 Ranking
第四层次（西部地区为主） Fourth tier（Mainly western region）	河南 Henan	1.35	10
	辽宁 Liaoning	1.24	11
	上海 Shanghai	1.23	12
	湖南 Hunan	1.07	13
	海南 Hainan	1.05	14
	四川 Sichuan	1.01	15
	广西 Guangxi	1	16
	重庆 Chongqing	0.98	17
	江西 Jiangxi	0.97	18
	天津 Tianjin	0.95	19
	吉林 Jilin	0.79	20
	黑龙江 Heilongjiang	0.79	21
	陕西 Shaanxi	0.76	22
	山西 Shanxi	0.52	23
	云南 Yunnan	0.38	24
	贵州 Guizhou	0.32	25
	内蒙古 Inner Mongolia	0.28	26
	宁夏 Ningxia	0.21	27
	甘肃 Gansu	0.18	28
	新疆 Xinjiang	0.17	29
	西藏 Xizang	0.07	30
	青海 Qinghai	0.07	31

3.2 中国畜牧业碳效率的动态演进

3.2.1 畜牧业碳效率分布动态演进——Kernel 密度估计法

本研究采用 Kernel 密度估计方法分析区域碳生产率增长的趋同性，个别年份畜牧业碳效率分布曲线如图 3 所示。可见：1）从波峰的数量和位置来看，中国畜牧业碳效率整体上呈现出 1 个主峰和若干个次峰的分布形态，主峰位置呈右移态势，具体而言，分布密集区由 2007 年的 0.5 附近向 2023 年的 1.0 附近演进，而 2007 年和 2023 年全国畜牧业碳效率的平均值分别为 0.50 和 1.06，这说明中国畜牧业碳效率整体水平在提升；2）分布曲线的宽度在增加，从 2007 年的 0.02~1.62 发展到 2023 年的 0.07~2.93，其畜牧业碳效率差距在不断扩大，即畜牧业碳效率较高的省份与畜牧业碳

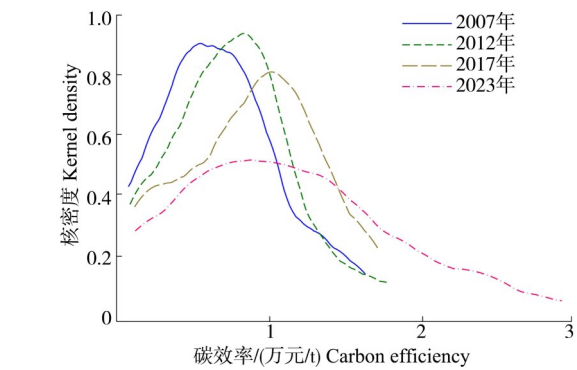


图 3 中国畜牧业碳效率的 Kernel 密度曲线图
Fig. 3 Kernel density curve of carbon productivity and carbon efficiency in China's animal husbandry

效率较低的省份间的差距正在逐步拉大，两极分化的趋势明显。

3.2.2 畜牧业碳效率分布动态演进——Markov链分析法

1)传统 Markov 链分析。传统 Markov 链测算结果如表 3 所示。可见:①当 T 取 1、2 和 3 时,主对角线上的元素均大于非对角线上的元素,并且该对角线上的最大元素为 0.97,最小元素为 0.54,这表明畜牧业碳效率保持稳定的概率至少为 0.54 以上,远大于畜牧业碳效率类型发生转移的概率,说明短期内,畜牧业碳效率受到原有养殖方式和技术水平的限制,呈现增长惯性和路径依赖性。但当 T 取 4 和 5 时,对角线上元素并非全都大于非对角线元素,表明随着经验的累积和养殖技术的更

迭,区域畜牧业碳效率类型会发生转移;②非对角线上既有非零元素,也有零元素,并且非零元素紧邻对角线,而零元素却远离对角线,说明区域畜牧业碳效率类型只可能在相邻 2 个等级间发生转移,并且向上转移的概率要大于向下转移的概率,表明中国畜牧业碳效率在向更高等级发展,但基本不大可能实现碳生产率的跃迁;③高水平地区保持稳定的概率最低为 0.94,向下转移的概率最大为 0.06,说明畜牧业碳效率高水平地区有内部趋同趋势;低水平地区在不同时长下,保持原有类型的概率至少为 0.83,向更高水平发展的概率最高为 0.18,这说明该地区很有可能陷入“低产陷阱”。

表 3 中国畜牧业碳效率的传统 Markov 转移概率

Table 3 Traditional Markov transition probabilities of carbon productivity and carbon efficiency in China’s animal husbandry

时间间隔 T /年 Time intervals	类别 Category	低 Low	中低 Low-medium	中高 Medium-high	高 High
1	低	0.88	0.13	0.00	0.00
	中低	0.00	0.80	0.19	0.02
	中高	0.00	0.02	0.80	0.19
	高	0.00	0.01	0.02	0.97
2	低	0.88	0.13	0.00	0.00
	中低	0.00	0.63	0.34	0.04
	中高	0.00	0.04	0.68	0.28
	高	0.00	0.00	0.04	0.96
3	低	0.88	0.13	0.00	0.00
	中低	0.00	0.54	0.39	0.07
	中高	0.00	0.04	0.64	0.32
	高	0.00	0.00	0.04	0.96
4	低	0.83	0.17	0.00	0.00
	中低	0.00	0.42	0.48	0.10
	中高	0.00	0.02	0.59	0.39
	高	0.00	0.00	0.05	0.95
5	低	0.83	0.18	0.00	0.00
	中低	0.00	0.34	0.51	0.15
	中高	0.00	0.01	0.55	0.44
	高	0.00	0.00	0.06	0.94

2)空间 Markov 链分析。考虑空间关联后,中国畜牧业碳效率的转移概率矩阵如表 4 所示。可见:①不同区域背景下地区畜牧业碳效率转移的方向与强度也不一样。以高水平地区为邻的地区碳生产率向上转移的可能性更大,而且还可能促使该地区碳生产率实现跨越式发展。例如,当时长为 5 年时,以低水

平地区为邻的中低水平地区向上转移的概率为 0.60,当“邻居”变为中低水平时,该地区向上转移的概率增至 0.62,并且还有 0.08 的概率向高水平类型转移,而当“邻居”切换至中高水平时,该地区碳生产率类型发生跃迁的概率增至 0.47。这说明“邻居”的空间效应在区域畜牧业碳效率的增长过程中起着十

分重要的作用,将空间因素纳入中国畜牧业碳效率演变趋势分析框架内很有必要;②空间效应的作用具有滞后性。时长为1年时,主对角线上的概率均为最大值,但当时长为5年时,主对角线上的概率有变小的趋势,不同的区域背景下这种变化幅度也有所差别,说明在区域碳生产率转移过程中尽管存在空间效应,但要打破畜牧业生产的路径依赖性需要一定时间;

③空间效应对低水平和高水平地区的影响较小,而对中等水平地区的影响较大;④空间效应的作用强度与某地区与“邻居”的差距并不成比例。例如,当某一地区为中低水平区域时,其分别以中高水平和高水平为邻时,1年后该地区向上或者更高等级转移的概率分别为0.17和0.04,该地区“邻居”的水平增高时,其向上或者更高等级转移的概率不增反降。

表 4 不同区域背景下中国畜牧业碳效率的空间转移概率对比

Table 4 Comparative analysis of spatial transfer probability of carbon efficiency in China's animal husbandry under different regional backgrounds

区域背景 Regional background	自身类型 Self-type	T=1 转移概率 T=1 Transition probability				T=5 转移概率 T=15 Transition probability			
		低	中低	中高	高	低	中低	中高	高
		Low	Low-medium	Medium-high	High	Low	Low-medium	Medium-high	High
低 Low	低	0.84	0.16	0.00	0.00	0.83	0.17	0.00	0.00
	中低	0.00	0.71	0.29	0.00	0.00	0.40	0.60	0.00
	中高	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.80	0.20
	高	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
中低 Low- medium	低	0.96	0.04	0.00	0.00	0.80	0.20	0.00	0.00
	中低	0.00	0.77	0.21	0.02	0.00	0.30	0.62	0.08
	中高	0.00	0.00	0.69	0.31	0.00	0.00	0.42	0.58
	高	0.00	0.20	0.20	0.60	0.00	0.00	0.00	1.00
中高 Medium- high	低	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	中低	0.00	0.79	0.17	0.04	0.00	0.37	0.16	0.47
	中高	0.00	0.00	0.76	0.24	0.00	0.00	0.56	0.44
	高	0.00	0.00	0.02	0.98	0.00	0.00	0.00	1.00
高 High	低	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	中低	0.00	0.94	0.06	0.00	0.00	0.33	0.67	0.00
	中高	0.00	0.07	0.86	0.07	0.00	0.06	0.53	0.41
	高	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.10	0.90

注:区域背景的低、中低、中高和高分别代表自身以低、中低、中高和高水平地区为邻。

Note: Low, low-medium, medium-high, and high represent the regional context of the neighboring areas at low, low-medium, medium-high, and high levels, respectively.

3.3 中国畜牧业碳效率的影响因素及其空间溢出效应

3.3.1 各因素对畜牧业碳效率影响

Moran's I 指数检验结果表明畜牧业碳效率及其影响因素间存在空间上的关联性。因此,利用空间计量模型确定畜牧业碳效率的影响因素较为合适。拉格朗日乘数(Lagrange Multiplier, LM)和似然比(Likelihood Ratio, LR)检验表明空间杜宾模型

优于空间滞后模型和空间误差模型。豪斯曼(Hausman)检验结果表明,在空间杜宾模型中加入固定效应更好。因此,本研究基于地理空间权重矩阵,利用固定效应的空间杜宾模型进行畜牧业碳效率的影响因素分析,为检验模型的稳健性,基于空间邻接矩阵重复上述回归,结果见表5。可见:产业集聚水平通过了1%显著性水平下的检验,并且其一次项系数为负、二次项系数为正。这说明,产业

集聚水平与畜牧业碳效率非简单的线性关系,而是呈现出“U”型关系。理论上讲,产业集聚水平越高,资源共享、规模经济、技术溢出等集聚效应越强,生产效率越高。但由于畜牧业本身的特殊性,这种线性关系并不成立,在产业集聚的初始阶段,畜牧养殖基础设施尚不完善,养殖技术研发与推广进程迟缓,再加上畜牧资源配置不力和饲养管理水平低下等原因,养殖场户只能依靠资源消耗的粗放经营方式来换取更高的产出,于是加剧了畜牧业碳排放的

增加,由此陷入了“高碳低产”的现实困境。而后当畜牧业产业集聚水平超过某一阈值,产业集聚水平对畜牧业碳效率的作用由抑制转为促进,其作用机制是:随着畜牧业产业集聚水平的提升,养殖规模和要素投入不断增加,畜牧养殖基础设施不断完善,良种繁育、疫病防控、饲料加工、技术指导等社会化服务体系日益健全,畜牧养殖基础设施与社会化服务组织的建设有利于优化资源配置,提高养殖效率,实现外部规模经济带来的减排效应。

表5 各因素对畜牧业碳效率影响的空间杜宾模型回归结果
Table 5 Spatial durbin model regression results of the impact of various factors on carbon productivity and carbon efficiency in China's animal husbandry

变量 Variable	回归I Regression I			回归II Regression II		
	系数 Coefficient	Z统计量 Z statistic	P值 P value	系数 Coefficient	Z统计量 Z statistic	P值 P value
IAL	−0.414***	−3.210	0.001	−0.288**	−1.980	0.047
IAL ²	0.070***	3.110	0.002	0.048*	1.800	0.072
AIS	0.251	0.740	0.456	0.221	0.860	0.392
ERL	0.015*	1.700	0.089	0.005	0.690	0.491
API	−1.298**	−2.090	0.037	−0.685	−0.990	0.322
FIL	−0.000***	−3.430	0.001	−0.000**	−2.520	0.012
UL	1.507**	2.400	0.017	2.000**	2.130	0.033
LST	0.005***	2.650	0.008	0.005**	2.210	0.027
ρ	0.408***	3.690	0.000	0.476***	5.950	0.000
R ²		0.6165			0.5952	

注:回归I和回归II分别对应基于地理距离空间权重矩阵和空间邻接权重矩阵的回归结果。***、**和*分别代表1%、5%和10%的显著性水平。下同。
Note: Regressions I and II correspond to the regression results based on the spatial weight matrix of geographical distance and the spatial weight matrix of spatial adjacency, respectively. ***, ** and * represent significance levels of 1%, 5% and 10%, respectively. The same below.

环境规制水平、城镇化水平和畜牧科技水平分别通过了10%、5%和1%显著性水平检验,并且影响方向均为正。首先,环境规制力度的加强促进了畜牧业碳效率的提升,这主要源于环境规制的“创新补偿”效应^[36]。环境规制力度增强会促使养殖场户自查畜禽生产过程中存在的要素利用效率低、碳排放量高等现实问题,从而推动其改进畜禽养殖技术、优化资源配置、降低碳排放且提高产品附加值,达到经济增长与生态保护的双重目标。其次,城镇化水平对畜牧业碳效率也表现出了正向促进作用,究其原因:一是城镇化的发展活跃了经济,降低了

养殖场户对畜牧养殖收入的依赖性,当畜牧养殖效益较低时,养殖场户将会进入收入更高的行业,这对畜牧业碳排放具有抑制作用;二是城镇化的集聚效应明显,它可以加快畜牧业资本、知识、技术和人才在城市的聚集,从而推动畜牧养殖科技的研发、推广与应用^[37]。最后,畜牧科技水平的提升对于畜牧业碳效率的增加做出了重要贡献。这主要是因为畜禽养殖理念、品种选育、疫病防控和饲喂方式等因素在很大程度上都会影响畜禽碳排放以及畜产品产出水平,进而决定畜牧业碳效率的高低,畜牧科技的研发、推广与应用离不开畜牧科技人员的

投入,单位产值所拥有科技人员数量的增加对畜牧业碳效率具有积极促进作用。

然而,农民收入水平对畜牧业碳效率的影响为负。可能的解释是,畜牧业经济效益要高于种植业,农民为了增收可能转向畜牧业生产,进而扩大畜禽养殖规模,与此同时,农民收入水平的增加拉动了农民对畜产品的需求,这也将导致畜禽养殖量的增加,当畜牧养殖基础设施和社会化服务体系建设的进程跟不上畜禽养殖数量的扩充时,畜牧业碳排放的增速将会快于产值,这必然会导致畜牧业碳效率的降低。农业产业结构未通过显著性检验,这说明畜牧业增长过程中自我强化和循环累积效应尚未显现;农业公共投资则对畜牧业碳效率产生了负向影响,这意味着农业投资效率在现阶段依然不高,影响了其对畜牧业碳效率的作用效果。

3.3.2 各因素对畜牧业碳效率的空间溢出效应

该模型的测算结果如表6所示。可见:产业集聚水平的一次项和二次项均通过了1%显著性水平检验,直接效应分别为-0.478和0.085,在拐点之前,产业集聚程度每增长1%,当地畜牧业碳效率将下降0.478%,拐点之后,产业集聚程度每增长1%,当地畜牧业碳效率将上涨0.085%;一次项的直接效应比回归系数增加了0.064,表明反馈效应促进了本地区的畜牧业碳效率的提升,二次项的直接效应比回归系数增加了0.015,表明反馈效应在拐点之后促进了本地区畜牧业碳效率提升。产业集聚水平一次项和二次项的间接效应分别通过了5%和

1%显著性水平检验,间接效应值分别为-3.219和0.705,间接效应的绝对值远大于直接效应的绝对值,说明产业集聚水平具有明显的空间溢出效应。

环境规制水平存在显著的直接效应,其中反馈效应为0.001,但间接效应不明显。农业公共投资仅存在直接效应,并且为负值。城镇化水平既存在直接效应,也存在间接效应,同时还存在反馈效应(-0.064),而且间接效应为负,表明城镇化水平的提升对本地区畜牧业碳效率有促进作用,但对邻区起抑制作用,这可能是源于“污染天堂效应”的存在,畜牧养殖可能会从经济发达地区向邻近的落后地区转移,导致邻区养殖规模扩大,由于邻区技术和管理水平相对滞后,其结果就是邻区畜牧业碳效率越来越低,产生“马太效应”。畜牧科技水平只有直接效应,表明畜牧科技水平的提升有利于本地区碳效率的改善,但对邻区的示范效应不够明显,因此,要加强省域之间养殖技术的交流与推广,实现区域经济一体化的发展。

农民收入水平兼具两类效应,其直接效应为负,但农民收入水平的空间溢出效应为正。可能的解释是:农民收入增加引致本地区畜牧养殖积极性变高,畜牧业碳排放急速扩增而畜牧业产值增长缓慢,导致本地区碳效率降低;农民收入的地区差距又会促进劳动力的转移,邻区养殖规模较小、养殖效益较差的散户将会“退出”,因而间接促进了邻区碳效率的提升。

综上,畜牧业碳效率的影响因素空间溢出效应

表6 各变量对畜牧业碳效率的直接与间接效应

Table 6 Direct and indirect effects of each variable on carbon productivity and carbon efficiency in China's animal husbandry

变量 Variable	直接效应 Direct effect		间接效应 Indirect effect		总效应 Total effect	
	系数 Coefficient	T值 T value	系数 Coefficient	T值 T value	系数 Coefficient	T值 T value
IAL	-0.478***	-4.510	-3.219**	-2.230	-3.696**	-2.540
IAL2	0.085***	4.390	0.705***	2.640	0.790***	2.950
AIS	0.251	0.720	-0.301	-0.380	-0.049	-0.060
ERL	0.016*	1.900	0.043	0.740	0.059	1.020
API	-1.100**	-1.990	3.875	1.300	2.775	0.950
FIL	-0.000***	-3.290	0.000***	3.510	0.000***	2.850
UL	1.443**	2.180	-5.122***	-3.010	-3.679**	-2.320
LST	0.005***	2.580	-0.000	-0.120	0.005**	2.080

明显,产业集聚水平二次项和农民收入水平均表现出正向的空间溢出效应,而产业集聚一次项和城镇化水平对邻区畜牧业碳生产率具有抑制作用。事实上,在农业发展以及城镇化的推进过程中,一旦与邻区形成竞争,污染转嫁和资源掠夺便不可避免,邻区可能会通过更为粗放的生产方式来实现数量上的胜出,届时会导致碳效率的进一步下降,但当恶性竞争发展到一定程度时,环境规制政策与区域协调发展战略将会如期而至,产业集聚水平也到了拐点,此时区域间的学习、交流与合作在内容和程度上不断加深,逐步产生技术集成效应、技术溢出效应和经验溢出效应,从而形成一个良好的空间效应机制。

4 研究结论与政策建议

本研究为准确评估我国畜牧业碳效率,并揭示其动态演进规律及驱动因素,基于2007—2023年中国31省(市、自治区)的面板数据,采用碳排放系数、Kernel密度估计、Markov链和空间杜宾模型等方法探究了中国畜牧业碳效率的现状特征、动态演进规律及空间溢出效应,并分析了其影响因素。主要研究结论如下:

1)中国畜牧业碳效率整体呈波动上升趋势。全国畜牧业碳效率的演变历程大致划分为“中速增长”、“低速增长”、“高速增长”和“波动下降”4个阶段;

2)畜牧业碳效率的省际差异明显。整体而言,各省域畜牧业碳效率呈现出“非均衡”特征,中国畜牧业碳效率“东高西低”的分布格局依然稳定;

3)畜牧业碳效率演进过程中呈现集聚特征和近邻效应。中国畜牧业碳效率增长呈俱乐部趋同现象,并且在演进的过程中受到近邻效应的影响;

4)畜牧业碳效率受到多重因素直接或者间接影响。产业集聚水平与畜牧业碳效率呈现“U”型关系,而且产业集聚水平具有显著的空间溢出效应;环境规制水平、城镇化水平和畜牧科技水平显著提高畜牧业碳效率,但只有城镇化水平具有空间溢出效应;农民收入水平的直接效应为负,但其空间溢出效应为正。

基于以上研究结论,提出如下政策建议:1)加快推进畜牧业产业集聚进程,充分发挥内、外部规模经济效应。重点推进畜禽养殖主产区的基地建

设,加大对养殖基地基础设施建设的支持力度,特别是投入高、专业化的设施,完善相关社会化服务体系,打破要素流动与技术溢出的市场壁垒,充分发挥产业集聚所带来的外部规模经济效应,与此同时,引导畜牧业向适度规模化和标准化养殖发展,激活产业集聚的内部规模经济效应。2)加大环境规制力度,提高农业公共投资效率。利用多种渠道增强养殖场户的环保意识,建立畜牧养殖的环保壁垒,尽管农业公共投资对畜牧业碳效率的促进作用并不明显,但仍然要增加农业固定资产的公共投资,监管农业投资中畜牧业资金使用效果与效率,从而切实提高畜牧养殖效率和管理效率,实现畜牧养殖发展与低碳生产的协调共赢。3)强化畜牧科技支撑,提高动物生产性能。大力支持低碳养殖技术研发与推广,提高单位数量动物的生产性能,减少畜禽饲养量。具体而言:通过品种选育,培育出生产性能佳、繁育性能好、抗病能力强、产出水平高的畜种;加大推广人工授精、胚胎移植等现代技术,减少公畜饲养量;改善饲养管理,充分发挥动物的最大生产性能;调整饲料结构、改进饲喂技术,减少动物肠胃发酵产生的温室气体,提高碳效率。4)充分利用区域之间的关联性以及依存性,构建地区间联合减排机制,例如,优良种质资源共享、低碳养殖技术协同创新与成果共享以及完善经验分享和帮扶机制,充分发挥畜牧业低碳发展的空间外溢与交互作用,共同实现区域畜牧业低碳发展与全国“双碳”目标。

参考文献 References

- [1] Gerber P J, Steinfeld H, Henderson B, Gerber P J, Steinfeld H, Henderson B, Mottet A, Opio C, Dijkman J, Falcucci A, Tempio G. *Tackling Climate Change Through Livestock: A Global Assessment of Emissions and Mitigation Opportunities*[M]. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2013
- [2] 吴强, 张园园, 张明月. 中国畜牧业碳排放的量化评估、时空特征及动态演化: 2001—2020[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(6): 65-71
Wu Q, Zhang Y Y, Zhang M Y. Quantitative assessment, temporal and spatial characteristics and dynamic evolution of China's animal husbandry carbon emissions[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(6): 65-71 (in Chinese)
- [3] 中共中央、国务院. 关于进一步深化农村改革, 扎实推进乡村全面振兴的意见[EB/OL]. [2025-05-26] https://www.gov.cn/gongbao/2025/issue_11906/202503/content_7011166.html
The Central Committee of the Communist Party of China and the State Council. Opinions on further deepening rural reform and solidly promoting comprehensive rural revitalization[EB/OL]. [2025-05-26] https://www.gov.cn/gongbao/2025/issue_11906/202503/content_7011166.html

- cn/gongbao/2025/issue_11906/202503/content_7011166.html
- [4] 中共中央、国务院. 乡村全面振兴规划(2024—2027年)[EB/OL]. [2025-05-26]. https://www.gov.cn/gongbao/2025/issue_11846/202502/content_7002798.html
- The Central Committee of the Communist Party of China and the State Council. Rural comprehensive revitalization plan (2024-2027)[EB/OL]. [2025-05-26]. https://www.gov.cn/gongbao/2025/issue_11846/202502/content_7002798.html
- [5] 师帅, 李翠霞, 李媚婷. 畜牧业“碳排放”到“碳足迹”核算方法的研究进展[J]. 中国人口资源与环境, 2017, 27(6): 36-41
- Shi S, Li C X, Li M T. Review of research from carbon emissions to carbon footprint in livestock husbandry[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2017, 27(6): 36-41 (in Chinese)
- [6] 奚永兰, 叶小梅, 杜静, 孔祥平, 王莉田, 朱飞, 韩挺. 畜禽养殖业碳排放核算方法研究进展[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(4): 1-8
- Xi Y G, Ye X M, Du J, Kong X P, Wang L T, Zhu F, Han T. Research progress on carbon emission accounting methods for livestock and poultry breeding industry[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(4): 1-8 (in Chinese)
- [7] 政府间气候变化专门委员会. 2006年IPCC国家温室气体清单指南[M]. 茨城: 全球环境战略研究所, 2006
- Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* [M]. Ibaraki: Institute for Global Environmental Strategies, 2006
- [8] Luo T, Yue Q, Yan M, Cheng K, Pan G X. Carbon footprint of China's livestock system: A case study of farm survey in Sichuan Province, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015(102): 136-143
- [9] 张金鑫, 王红玲. 中国畜牧业碳排放地区差异、动态演进与收敛分析: 基于全国31个省(市)1997—2017年畜牧业数据[J]. 江汉论坛, 2020(9): 41-48
- Zhang J X, Wang H L. Regional difference, dynamic evolutionary and convergence analysis on the Chinese animal husbandry: Based on the animal husbandry data in 31 provinces from 1997 to 2007[J]. *Jiangnan Tribune*, 2020(9): 41-48 (in Chinese)
- [10] 郭娇, 齐德生, 张妮娅, 孙铭辉, 胡荣桂. 中国畜牧业温室气体排放现状及峰值预测[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(10): 2106-2113
- Guo J, Qi D S, Zhang N Y, Sun L H, Hu R G. Chinese greenhouse gas emissions from livestock: Trend and predicted peak value[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(10): 2106-2113 (in Chinese)
- [11] 励汀郁, 熊慧, 王明利. “双碳”目标下我国奶牛产业如何发展: 基于全产业链视角的奶业碳排放研究[J]. 农业经济问题, 2022(2): 17-29
- Li T Y, Xiong H, Wang M L. How does China's dairy industry develop under “the carbon peaking and carbon neutrality goal”: Study on carbon emission of dairy industry from the perspective of whole industry chain[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2022(2): 17-29 (in Chinese)
- [12] 王欢, 乔娟. 中国畜牧业温室气体排放的脱钩与预测分析[J]. 中国生态农业学报: 中英文, 2019, 27(5): 793-802
- Wang H, Qiao J. Decoupling and predictive analysis of greenhouse gas emission from animal husbandry in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(5): 793-802 (in Chinese)
- [13] 苏旭峰, 杨小东, 冉启英. 基于碳排放视角的中国畜牧业绿色增长分析[J]. 生态经济, 2022, 38(04): 101-107
- Su X F, Yang X D, Ran Q Y. Analysis on the green growth of animal husbandry in China from the perspective of carbon emissions[J]. *Ecological Economy*, 2022, 38(4): 101-107 (in Chinese)
- [14] 陈强强, 李晓榕. 甘南黄河水源补给区畜牧业碳排放驱动因素及脱钩效应分析[J]. 中国生态农业学报: 中英文, 2025, 33(5): 858-871
- Chen Q Q, Li X R. Driving factors and decoupling effects of animal husbandry carbon emissions in the Yellow River water supply area of Gannan[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2025, 33(5): 858-871 (in Chinese)
- [15] 许标文, 沈智扬, 林国华. 中国畜牧业绿色全要素生产率演变及区域差异研究[J]. 中国生态农业学报: 中英文, 2019, 27(4): 613-622
- Xu B W, Shen Z Y, Lin G H. Evolution of green total factor productivity and regional disparity in China's husbandry[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(4): 613-622 (in Chinese)
- [16] 林紫藤, 张艳荣. 我国畜牧业绿色全要素生产率时空差异及影响因素研究[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(9): 1144-1157
- Lin Z T, Zhang Y R. Temporal and spatial differences and influencing factors of green total factor productivity of animal husbandry in China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, 39(9): 1144-1157 (in Chinese)
- [17] 李雪敏, 张耘恺, 王菲菲, 潘越明. 畜牧业生态效率评价及影响因素: 以内蒙古33个牧业旗县为例[J/OL]. 中国农业资源与区划, 2025: 1-16 [2025-04-18]
- Li X M, Zhang W K, Wang F F, Pan Y M. Evaluation of the eco-efficiency of animal husbandry and its influencing factors: A case study of 33 pastoral flag counties in Inner Mongolia[J/OL]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2025: 1-16 [2025-04-18]
- [18] 田云, 尹恣昊. 中国农业碳排放再测算: 基本现状、动态演进及空间溢出效应[J]. 中国农村经济, 2022(3): 104-127
- Tian Y, Yin M H. Re-evaluation of China's agricultural carbon emissions: basic status, dynamic evolution and spatial spillover effects[J]. *Chinese Rural Economy*, 2022(3): 104-127 (in Chinese)
- [19] 杜凤君, 郑军, 吴强. 产业集聚的“本地—邻地”畜牧业碳排放治理效应: 阻力还是助力[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(2): 228-241
- Du F J, Zheng J, Wu Q. Effect of industrial agglomeration on carbon emission control in “local-neighborhood” animal husbandry: Resistance or assistance[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(2): 228-241 (in Chinese)
- [20] 杨皓天, 马骥. 环境规制对养殖场生态效率的影响研究: 基于SFA方法及门限回归的实证分析[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(1): 27-33
- Yang H T, Ma J. Environmental regulation affecting technical efficiency of laying farms: Empirical analysis using stochastic frontier analysis and threshold regressive model[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34(1): 27-33 (in Chinese)
- [21] 朱冠楠. 中国现代化进程中的畜禽业变革: 民国时期江苏畜禽业的现代性与大众生活需求[J]. 西北农林科技大学学报: 社会科学版, 2018, 18(6): 152-160
- Zhu G N. Change of livestock and poultry industry in China's modernization process: Modernity of livestock and poultry industry and public life needs in Jiangsu during the period of the People's Republic of China[J]. *Journal of Northwest A&F University: Social Science Edition*, 2018, 18(6): 152-160 (in Chinese)
- [22] 黄杰, 孙自敏. 中国种植业碳生产率的区域差异及分布动态演进[J]. 农业技术经济, 2022(7): 109-127
- Huang J, Sun Z M. Regional differences and dynamic evolution of carbon productivity of China's planting industry[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2022(7): 109-127 (in Chinese)
- [23] 吴昊玥, 何艳秋, 陈文宽, 黄瀚蛟. 中国农业碳补偿率空间效应及影响因素研究: 基于空间Durbin模型[J]. 农业技术经济, 2020(3): 110-123
- Wu H Y, He Y Q, Chen W K, Huang H J. Spatial effect and influencing factors of China's agricultural carbon compensation rate based on spatial durbin model[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2020(3): 110-123 (in Chinese)
- [24] Kaya Y, Keiichi Y. *Environment, Energy, and Economy: Strategies for Sustainability* [M]. Tokyo: United Nations University Press, 1997

- [25] 李明, 肖海峰. 畜产品进口对畜牧业碳排放的影响及其空间效应[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(2): 176-191
- Li M, Xiao H F. Impact of livestock products import on carbon emissions from livestock industry and its spatial effect [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(2): 176-191 (in Chinese)
- [26] 白雪冰, 胡浩, 周应恒, 张岳. 中国畜牧业碳排放的时空演进及其影响因素分析[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(9): 260-274
- Bai X B, Hu H, Zhou Y H, Zhang Y. Study on space-time evolution and influence factors of carbon emissions in China's animal husbandry [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(9): 260-274 (in Chinese)
- [27] The United Nations Framework Convention on Climate Change. Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change [R]. Bonn: The United Nations Framework Convention on Climate Change, 1997
- [28] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 省级温室气体清单指南(试行)[EB/OL]. [2024-04-21]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/jianyitianfuwen/qgzxwytafwgk/202107/t20210708_1288699.html
- National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Guidelines for provincial greenhouse gas inventories (Trial) [EB/OL]. [2024-04-21]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/jianyitianfuwen/qgzxwytafwgk/202107/t20210708_1288699.html
- [29] 王国刚, 杨春, 王明利. 中国现代畜牧业发展水平测度及其地域分异特征[J]. 华中农业大学学报: 社会科学版, 2018(6): 7-13
- Wang G G, Yang C, Wang M L. Measurement and spatial distribution of the development level of animal husbandry's modernization in China [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2018(6): 7-13 (in Chinese)
- [30] 中国畜牧业年鉴编辑委员会. 中国畜牧业年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008-2024
- Editorial Committee of China Animal Husbandry Yearbook. *China Animal Husbandry Yearbook* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2008-2024 (in Chinese)
- [31] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2008-2024
- National Bureau of Statistics of China. *China Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2008-2024 (in Chinese)
- [32] 国家统计局生态环境部. 中国环境统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2008-2024
- National Bureau of Statistics, Ministry of Ecology and Environment. *China Environmental Statistics Yearbook* [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2008-2024 (in Chinese)
- [33] 国家统计局固定资产投资统计司. 中国固定资产投资统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2008-2024
- Department of Fixed Assets Investment Statistics, National Bureau of Statistics. *China Fixed Asset Investment Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2008-2024 (in Chinese)
- [34] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2008-2024
- Department of Rural Socio-Economic Survey, National Bureau of Statistics. *China Rural Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2008-2024 (in Chinese)
- [35] 中国农业机械工业协会机械工业信息研究所. 中国农业机械工业年鉴[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008-2024
- China Agricultural Machinery Industry Association, Machinery Industry Information Research Institute. *China Agricultural Machinery Industry Yearbook* [M]. Beijing: China Machine Press, 2008-2024 (in Chinese)
- [36] Porter M, Linde C. Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship [J]. *Journal of Economic Perspective*, 1995, 9(4): 97-118
- [37] 姚成胜, 钱双双, 李政通, 梁龙武. 中国省际畜牧业碳排放测度及时空演化机制[J]. 资源科学, 2017, 39(4): 698-712
- Yao C S, Qian S S, Li Z T, Liang L W. Provincial animal husbandry carbon emissions in China and temporal-spatial evolution mechanism [J]. *Resource Science*, 2017, 39(4): 698-712 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 吴强, 博士, 山东农业大学经济管理学院(商学院)副教授。长期从事农业经济理论与政策、农产品供应链质量控制与农业低碳发展方面的科研与研究生培养工作。参与完成国家社科基金2项, 主持多项省部级课题, 主要有山东省社会科学基金青年项目(22DJJJ18)、山东省自然科学基金青年项目(ZR2022QG056)和山东省自然科学基金面上项目(ZR2024MG050)。在《农业技术经济》、《中国农业大学学报》、《干旱区资源与环境》、《统计与决策》、*Journal of Environmental Management*等国内外核心期刊上发表多篇论文, 出版专著一部。



通讯作者简介: 陈金兰, 博士, 山东农业大学经济管理学院(商学院)讲师。长期从事土地经济及农户行为方面的学术研究。主持山东省社会科学专项项目(24CCXJ26), 参与国家社会科学基金和国家自然科学基金及省部级基金项目8项。在《农业经济问题》、《干旱区资源与环境》、*Journal of Environmental Management*等国内外学科重要期刊发表高水平学术论文14篇。