

畜牧业技术进步的碳减排效应及其作用机制

——基于中介效应、调节效应和空间溢出效应的检验

吴强¹, 孙继雅², 陈金兰¹

(1. 山东农业大学 经济管理学院, 山东 泰安 271001; 2. 山东财经大学东方学院 会计学院, 山东 泰安 271000)

摘要:厘清技术进步推动我国畜牧业碳减排的机理,对畜牧业低碳转型和“双碳”目标实现具有重要理论与现实意义。基于2007—2020年31省(市、自治区,因数据缺失,未包含港澳台地区)的面板数据,测算并揭示中国畜牧业碳排放现状与特征,在此基础上,利用面板回归模型分析技术进步对畜牧业碳排放的影响及空间溢出效应。研究发现,全国畜牧业碳排放呈缩减趋势,各省畜牧业碳排放差异显著,整体呈“西高东低”的梯次分布格局。技术进步通过畜牧业碳排放强度改进减少的碳排放可以遏制其通过经济增长所带来的碳排放的增加,但这一结果具有区域异质性,技术进步对西部地区畜牧业碳排放的“规模效应”大于“强度效应”,因而未能同时实现经济发展与减排,进一步探究发现,技术进步对畜牧业碳排放的边际效应随着产业集聚水平的提升而增强。此外,技术进步对畜牧业碳排放还具有显著的空间溢出效应,具体表现为,本地区技术进步增长一个单位,邻区畜牧业碳排放将会降低1.666个百分点。

关键词:技术进步;畜牧业碳排放;中介效应;调节效应;溢出效应

中图分类号: F326.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002—980X(2023)11—0062—13

一、引言

20世纪80年代以来,全球温室气体骤升且变暖趋势加快,引起了国际社会的共同关注。随后,《京都议定书》和《巴黎协定》相继签订和实施标志着所有国家均需要承担相应的减排义务。在此背景下,作为全球最大的碳排放国家,也是负责任的大国,中国政府提出了2030年实现“碳达峰”和2060年实现“碳中和”的宏伟目标。“双碳”目标实现的根本途径在于减排增汇,其中减排是基础。厘清各行业碳排放现状特征显然有助于减排策略的提出。畜牧业不同于工业,尽管不是碳排放的主要源头,但随着居民膳食结构的调整及对肉蛋奶需求的增加,畜牧业发展带来的碳排放量的增加也不容小觑。为此,《农业农村减排固碳实施方案》(2022)指出畜禽低碳减排行动中,要推广低蛋白日粮、全株青贮等技术和高产低排放畜禽品种,改进畜禽饲养管理,实施精准饲喂,降低单位畜禽产品肠道甲烷排放强度。因此,推动技术进步是畜牧业“减排降碳”的有效途径。

学术界围绕畜牧业碳排放与减排问题展开了丰富讨论,主要集中在以下四个方面:

一是畜牧业碳排放的测算、现状及预测。畜牧业碳排放的核算方法主要有OECD(organization for economic co-operation and development)核算法、IPCC(intergovernmental panel on climate change)系数法、全生命周期法与投入产出法等(师帅等,2017)。胡向东和王济民(2010)及孟祥海等(2014)分别以IPCC系数法和全生命周期法,估算了中国不同时间段的畜牧业碳排放总量,结果发现考察期内畜牧业碳排放总量一直处于波动中。张金鑫和王红玲(2020)及吴强等(2022)利用IPCC系数法更新了历史研究数据,并得出了更为丰富的结论,即近二十年来,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,全国及三大地区的畜牧业碳排放不存在 δ 和 β 收敛。郭娇等(2017)预测了中国畜牧业碳排放的达峰时间,若以2013年欧盟和美国居民蛋白质摄取量为基准,中国畜牧业碳排放的达峰时间分别为2034年和2043年。张越杰和闫佳惠(2022)研究发现,中国肉牛产业尚未实现“碳达峰”,未来可能会进入产业增长与高碳排放并行的阶段。

二是畜牧业碳排放的影响因素分析。陈瑶和尚杰(2014)利用LMDI(logarithmic mean divisia index)模型探究了畜牧业碳排放数量变化的主要原因,发现经济增长是其增加的关键成因,而生产效率降低了畜牧业碳

收稿日期:2023-06-12

基金项目:山东省社会科学基金青年项目“碳补偿视角下山东省畜牧业低碳发展的实现机制研究”(22DJJJ18)

作者简介:吴强,管理学博士,山东农业大学经济管理学院讲师,研究方向:资源环境经济;孙继雅,马来西亚新纪元大学学院研究生院博士研究生,山东财经大学东方学院讲师,研究方向:农业环境管理;(通讯作者)陈金兰,管理学博士,山东农业大学经济管理学院讲师,研究方向:农业理论与政策。

排放,并据此提出了培育优良品种、提升饲料转化率、加大低碳技术、粪污处理技术的研发与推广及提高农民职业素养等增汇措施;姚成胜等(2017)结合 KAYA 恒等式和 LMDI 模型探究了中国畜牧业碳排放的影响因素及空间差异,结果发现农民人均纯收入、城镇居民人均可支配收入和城镇化水平将决定中国畜牧业碳排放增长的时空格局。

三是畜牧业碳排放与经济发展间关系分析。王欢和乔娟(2019)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,结果表明畜牧业温室气体排放脱钩效应比较理想;苏旭峰等(2022)基于 2000—2018 年的数据进一步分析发现,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。

四是技术进步与畜牧业碳排放关系分析。相关研究主要讨论了技术进步对农业或畜牧业碳排放的影响。技术进步显著增加了农业碳排放总量(张永强等,2019),但降低了碳排放强度(杨钧,2013)。田云和尹恣昊(2021)分析了技术进步对农业能源碳排放强度的影响及溢出效应,研究发现技术进步对农业能源碳排放强度具有明显的抑制作用,同时也表现出显著的空间溢出效应。魏梦升等(2023)分析了规模经营和技术进步对农业绿色低碳发展的影响,研究发现粮食主产区促进了农业技术进步和规模经营,从而实现减排效应,两者协同作用强化了减排效应。对于畜牧业而言,技术进步可通过提高饲料转化率、缩短畜禽生长周期、降低单位畜禽产品环境污染物排放强度等方式影响畜牧业碳排放总量(周晶等,2018)。经营管理水平对畜牧业碳排放也有重要影响,畜禽养殖集约化程度越高,甲烷排放强度就越低(Sakamoto et al, 2020)。进一步地,励汀郁等(2022)在奶业碳排放测算的基础上设计了减排情景,结果发现使用优质饲草可减少奶业碳排放。

已上研究明确了畜牧业碳排放总量、现状特征及影响因素,并从微观层面讨论了技术进步对经济发展及农业或畜牧业碳排放的影响,但关于其中存在的作用路径与机制的讨论多集中在农业领域,而对于技术进步对畜牧业碳排放的影响及其作用机制的讨论仍处于理论层面,缺乏面板数据的支撑,所得结论缺乏严谨性和科学性。此外,畜牧业技术进步包含了自然科学技术进步和养殖过程中的管理技术和服务技术进步,而现有研究对于畜牧业技术进步的衡量指标较为单一,难以综合反映畜牧业技术进步程度。

基于此,本文首先基于 2007—2020 年面板数据,利用省级畜禽碳排放因子测算畜牧业碳排放总量,然后运用面板回归模型检验技术进步对畜牧业碳排放的影响及其作用机制,最后引入空间因素考察技术进步的空间溢出效应。可能的边际贡献有:①依据《省级温室气体清单编制指南(试行)》(2011 年),基于规模差异和区位差异确定碳排放因子,测算结果相较于 IPCC 系数法,准确性更高;②利用综合评价方法测度技术进步水平,削弱了因某个指标计算偏差对整体结果的影响,能够更加全面准确地反映技术进步水平;③基于中介和调节效应模型,考察技术进步对畜牧业碳排放影响的内在机理,揭示了技术进步对于畜牧业碳排放的影响路径,为进一步巩固和提高畜牧业技术水平提供了实践经验;④从空间的视角探究技术进步对畜牧业碳排放的空间溢出效应,所得结论有助于区域间的协同创新及技术共享。

二、理论框架与研究假说

畜牧业技术进步有狭义和广义之分,狭义上畜牧业技术进步是指养殖过程中的自然科学技术(或硬技术)进步;广义上的技术进步还包括了养殖过程中的管理技术和服务技术(或软技术)进步(赵芝俊和张社梅,2005;顾海英,1994)。本文所考察的畜牧业技术进步为广义上的技术进步,主要是指育种、饲喂、防疫、机械等硬技术及资源整合能力、管理决策能力(如养殖结构的调整)和养殖技术认知与采纳能力等软技术。

新经济增长理论认为技术进步是推动经济增长的重要因素(Romer, 1990; Grossman and Helpman, 1991),技术进步作为一种生产投入要素在促进经济总量增加的同时也带来了更多污染物的排放。不但如此,技术进步还会促进畜禽生产效率与饲料利用效率不断提升,故畜牧业碳排放量在出现增长后可能逐步受到抑制。所以,技术进步既可能增加碳排放也可能减少碳排放(Jaffe et al, 2002)。具体而言:一方面,畜牧业技术进步(机械化水平、品种培优、管理创新)有效促进了牧业增效,从而极大地激发了地区生产经营者从事畜牧业的积极性,进而引起畜牧经济产出规模的扩大,导致畜牧业碳排放量增加;另一方面,技术进步促进了养殖效率的提高及单位畜禽产品所带来的碳排放量的降低,进而导致碳排放总量的减少。在此,将技术进步通过影响畜牧业经济规模而引起畜牧业碳排放量的变化称为“规模效应”,而将技术进步通过影响生产活动

的碳排放产生强度而引起碳排放产生量的变化称为“强度效应”(李明全和王奇,2012)。

据此,提出假设1~假设3:

技术进步会增加畜牧业经济规模,导致碳排放量的增加(H1);

技术进步会降低碳排放强度,促使畜牧业碳排放量的减少(H2);

技术进步对畜牧业碳排放的作用可能是促进,也可能是抑制,这取决于“规模效应”和“强度效应”的大小(H3)。

长期来看,畜牧业碳减排在很大程度上取决于技术的可能性边界(Seo,2013)。养殖场户的知识水平、管理能力和经济实力存在差异,因而对先进技术的接纳能力参差不齐,所以促进养殖技术在区域内流动及溢出对于技术的推广与应用十分重要。技术溢出是畜牧产业集聚的动力源泉,而产业集聚又可通过降低技术采纳成本(包括信息成本、风险损失)促进技术溢出,因此产业集聚与技术溢出之间存在相互促进的关系(梁琦,2009),产业集聚水平高的地区引入新技术以后,能够加强养殖场户之间的非正式交流,以及进行技术“解密”的正式知识扩散(张翼和卢现祥,2015),因此产业集聚与技术溢出的相互强化提升了技术进步的减排效应。

据此,提出假设4:

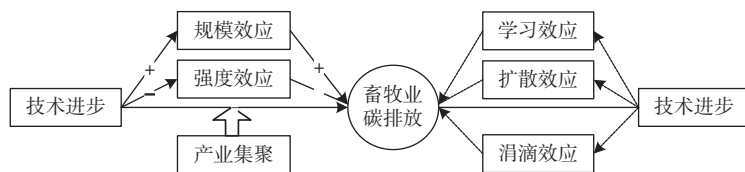
产业集聚对于技术进步的减排效应具有积极作用,即产业集聚水平越高的地区,技术进步带来的畜牧业减排效果越明显(H4)。

此外,技术进步还会通过区域间的溢出效应达到减排目的(田云和尹恣昊,2021;何艳秋等,2022)。这是一种相对“省力”并且能够凸显区域间良性互动的减排方式,各区域通过分析邻区畜牧业碳排放增减变化的原因从而改进自身的生产行为。经济发展水平高、畜牧养殖基础牢固及技术水平先进的养殖区域通过自身努力及外界支持,加强先进技术、专业知识及管理经验等软、硬技术的学习与累积,实现养殖效益提升及减排目标,在此过程中,该地区会成为邻区学习的主要方向与重要目标,再加上其强大的辐射和带动能力,该地区将优质的知识、技术和经验向邻区“输送”,从而产生“涓滴效应”。因此,本地区与邻区通过良性互动、交流学习和模仿竞争,可以促使邻近地区畜牧业碳排放同步降低。

据此,提出假设5:

技术进步对畜牧业碳排放具有积极的空间溢出效应,技术进步在降低本地区畜牧业碳排放的同时,也会促使邻区碳排放的降低(H5)。

技术进步对畜牧业碳排放的作用路径如图1所示。



“+”表示变量间具有正向影响,“-”表示变量间具有负向影响

图1 技术进步对畜牧业碳排放的作用路径

三、研究方法、变量选取及数据来源

(一)畜牧业碳排放的测算方法

畜牧业温室气体主要源于动物肠胃发酵和粪污处理所产生的 CH_4 和 N_2O ,因而本文重点围绕这两方面测算畜牧业碳排放(陈瑶和尚杰,2014)。依据碳排放因子法,本文将测算奶牛、非奶牛、马、骡、驴、猪、骆驼、山羊、绵羊、兔和家禽等畜禽的 CO_2 排放当量。测算公式为

$$CP = C_{\text{CH}_4} + C_{\text{N}_2\text{O}} = e_{\text{CH}_4} \times \sum N_i \alpha_i + e_{\text{N}_2\text{O}} \times \sum N_i \beta_i \quad (1)$$

其中: CP 为 CO_2 排放总量; C_{CH_4} 为 CH_4 转化后的 CO_2 当量; $C_{\text{N}_2\text{O}}$ 为 N_2O 转化后的 CO_2 当量; e_{CH_4} 和 $e_{\text{N}_2\text{O}}$ 为全球升温潜能值,根据《京都议定书》,以 CO_2 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; 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,排放因子来源于《省级温室气体清单编制指南(试行)》(2011),具体见表1和表2。

表1 肠道发酵的CH₄气体排放因子(千克/头/年)

碳源	奶牛	非奶牛	马	骡/驴	猪	骆驼	山羊	绵羊	兔
排放系数	88.1/89.3/99.3	52.9/67.9/85.3	18	10	1	46	8.9/9.4/6.7	8.2/8.7/7.5	0.254

注：奶牛、非奶牛、山羊和绵羊的三种排放系数分别对应规模化养殖、散养和放牧饲养模式下的排放系数。

表2 粪便管理的温室气体排放因子(千克/头/年)

地区	气体	奶牛	非奶牛	马	骡/驴	猪	骆驼	山羊	绵羊	兔	家禽
华北	CH ₄	7.460	2.820	1.090	0.600	3.120	1.280	0.170	0.150	0.080	0.010
	N ₂ O	1.846	0.749	0.330	0.188	0.227	0.330	0.093	0.093	0.020	0.007
华东	CH ₄	8.330	3.310	1.640	0.900	5.080	1.920	0.280	0.260	0.080	0.020
	N ₂ O	2.065	0.846	0.330	0.188	0.175	0.330	0.113	0.113	0.020	0.007
中南	CH ₄	8.450	4.720	1.640	0.900	5.850	1.920	0.310	0.340	0.080	0.020
	N ₂ O	1.710	0.805	0.330	0.188	0.157	0.330	0.106	0.106	0.020	0.007
西南	CH ₄	6.510	3.210	1.640	0.900	4.180	1.920	0.530	0.480	0.080	0.020
	N ₂ O	1.884	0.691	0.330	0.188	0.159	0.330	0.064	0.064	0.020	0.007
东北	CH ₄	2.230	1.020	1.090	0.600	1.120	1.280	0.160	0.150	0.080	0.010
	N ₂ O	1.096	0.913	0.330	0.188	0.266	0.330	0.057	0.057	0.020	0.007
西北	CH ₄	5.930	1.860	1.090	0.600	1.380	1.280	0.320	0.280	0.080	0.010
	N ₂ O	1.447	0.545	0.330	0.188	0.195	0.330	0.074	0.074	0.020	0.007

畜禽生长周期的不同导致各年份平均畜禽饲养量有所差异,因而需要调整,调整方式如式(2)所示。需调整的畜禽品种有生猪(200天)、兔(105天)和禽类(55天)。

$$App = \begin{cases} Herds_{end}, & Day_s \geq 365 \\ Day_s \times \frac{L}{365}, & Day_s < 365 \end{cases} \quad (2)$$

其中:App为年均饲养量;Herds_{end}为年末存栏量;Day_s为饲养周期;L为年出栏量。

(二) Kernel 密度估计方法

核密度估计是研究非均衡分布的常用方法。因而,本文利用此方法刻画全国畜牧业碳排放分布的位置、形态、延展性和极化趋势(Quah, 1993)。假设 $f(x)$ 是中国畜牧业碳排放 x 的密度函数,计算公式为

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{X_i - x}{h}\right) \quad (3)$$

其中: n 为样本数; X_i 为观测值; x 为观测值的均值; $K(\cdot)$ 为核密度函数; h 为带宽。本文选择高斯密度函数进行估计,其表达式为

$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \quad (4)$$

(三) 面板回归分析方法

为检验上述研究假说,首先针对技术进步对畜牧业碳排放的两条作用路径,借鉴温忠麟和叶宝娟(2014)的思路设计如下时间和地区双向固定效应模型:

$$\ln CP_{it} = \alpha_1 + \beta_1 TECH_{it} + \gamma_1 X_{it} + \mu_i + \varphi_i + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

$$M_{it} = \alpha_2 + \beta_2 TECH_{it} + \gamma_2 X_{it} + \mu_i + \varphi_i + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

$$\ln CP_{it} = \alpha_3 + \beta_3 TECH_{it} + \gamma_3 M_{it} + \gamma_4 X_{it} + \mu_i + \varphi_i + \varepsilon_{it} \quad (7)$$

其中: $\ln CP_{it}$ 为 i 省份 t 年畜牧业碳排放的对数值; $TECH_{it}$ 为 i 省份 t 年的技术水平; M_{it} 为中介要素; α_1 、 α_2 、 α_3 为截距项; $\gamma_1 \sim \gamma_4$ 为解释变量对被解释变量的影响效应; μ_i 为 i 省份的地区效应; φ_i 为 t 年的时间效应; ε_{it} 为随机误差项; X_{it} 为控制变量;若 β_1 、 β_2 、 β_3 显著为负,则技术进步对畜牧业碳排放具有抑制作用。

为进一步讨论技术进步对畜牧业碳排放的空间溢出效应,需要构建空间计量模型进行检验。首先,利用全局 Moran's I 指数检验中国畜牧业碳排放的空间相关关系,计算式如式(8)所示。

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (8)$$

其中: i 和 j 为不同省份; x 和 $\bar{x}$ 分别为样本值和均值; S^2 为方差; w_{ij} 为空间权重矩阵。 $I > 0$ 表明样本值在空间上主要表现为正相关,该值越大空间相关性越强, $I < 0$ 表明此时的空间相关性为负,其值越小空间越分散, $I = 0$ 代表空间呈随机性, $I = [-1, 1]$ 。鉴于邻接矩阵无法反映非邻接地区的空间相关性,故本文基于地理距离空间权重探究各变量的空间相关性。

接下来利用空间杜宾模型探究技术进步对畜牧业碳排放的影响及其空间效应,该模型表达式如式(9)所示。

$$\ln CP_{it} = \alpha_i + \rho \sum_{j=1}^n W_{ij} \ln CO_2 + \beta X_{it} + \varphi \sum_{j=1}^n W_{jt} X_{jt} + \mu_i + \theta_t + \varepsilon_i \quad (9)$$

其中: i 和 j 为不同省份; t 为不同年份; W_{ij} 为空间权重矩阵,在回归过程中,把反地理距离空间矩阵为权重的模型作为基准模型,再利用空间邻接矩阵和地理距离空间矩阵进行稳健性检验; β 、 ρ 、 φ 为相关回归系数; μ_i 和 θ_t 分别为地区和时间固定效应; ε_i 为随机误差项; X_{it} 为解释变量,包括技术进步和其他控制变量。

(四)变量测度与说明

(1)被解释变量。畜牧业碳排放量的对数($\ln CP$)。主要指各种畜禽经动物肠胃发酵和粪污处理所产生的 CH_4 和 N_2O ,然后根据碳排放因子和全球升温能值转换为 CO_2 排放当量。

(2)核心解释变量。技术进步($TECH$)。借鉴赵芝俊和张社梅(2005)及王国刚等(2018)的指标选取与变量测度方法,基于数据可得性及研究需要,构建了如表3的畜牧业技术进步指标体系。表3中给出了技术进步的二级指标及权重,其中权重是根据熵值法得出,利用权重对二级指标进行加权求和即可得到技术进步水平。

表3 畜牧业技术进步指标体系

一级指标	二级指标	含义	权重
技术进步	良种供应能力	种畜禽存栏量/畜禽存栏总量	0.134
	畜牧养殖机械化程度	畜牧机械总动力(万千瓦)	0.221
	畜牧科技人员比重	畜牧科技人员总数/畜牧业劳动力总数	0.167
	大专及以上学历科技人员比重	大专及以上学历科技人员数/畜牧科技人员总数	0.152
	畜牧业劳动生产率	畜牧业产值/畜牧业劳动力总数	0.197
	畜禽产出率	期内畜禽产出当量/期初畜禽存栏当量	0.129

(3)中介变量。畜牧业发展水平(DLA),用畜牧业增加值与畜牧业从业人数的比值代替;畜牧业碳排放强度(CI),用畜牧业碳排放总量与畜牧业产值之比表示。

(4)调节变量。产业集聚水平(AGG)。衡量产业集聚水平的指标包括E-G指数、Hoover指数、Gini系数和区位熵等。但区位熵具备反映地理要素的空间分布和消除规模差异的优势,故而较为常用(杨仁发,2015)。

区位熵(LIA)计算式为: $LIA_{ir} = \frac{p_{ir}/p_i}{p_r/p}$,其中, LIA_{ir} 为 i 地区畜牧业碳排放的区位熵; p_{ir} 、 p_i 、 p_r 和 p 分别为某地区的畜牧业产值、所有行业产值、全国畜牧业总产值和全国所有行业产值。

(5)控制变量。畜牧业比重(SAI),以畜牧业产值在农业产值中的比重代替;环境规制水平(ER),用各地区污染治理投资占GDP比重表征;农业固定资产投资(FAI),用农业固定资产投资总投资比重表征;财政支农投入(FIA),以财政支农资金占财政总支出的比重表征;城镇化水平(LR),以城镇人口占总人口的比重来表征;农民收入水平(INF),以农民可支配收入代替。

(五)数据来源与描述

各种畜禽的存栏量与出栏量等数据来源于2008—2021年历年的《中国畜牧业年鉴》。规模化饲养、农户散养和放牧饲养的划分标准参考《中国畜牧业年鉴》,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、畜牧业总产值、畜牧业增加值来源于2008—2021年历年的《中国统计年鉴》,个别指标以2007为基期做了不变价处理。财政支农投入来源2008—2021年历年的《中国财政年鉴》。农业固定资产投资和各行业总投资来源于2008—2021年《中国固定资产投资统计年鉴》。环境污染治理投资额来源于2008—2021年历年的《中国环境统计年鉴》。第一产业从业人数、农民可支配收入来源于2008—2021年历年的《中国农村统计年鉴》。畜牧机械总动力、畜牧科技人数来源于2008—2021年历年的《中国农业机械年鉴》。主要变量的统计特征见表4。

表4 主要变量的统计特征

变量名称	单位	均值	标准差	最小值	最大值
畜牧业碳排放(CP)	万吨	0.758	0.444	0.024	2.161
畜牧业技术进步(TECH)		0.265	0.086	0.054	0.518
畜牧业碳排放强度(CI)	吨CO ₂ /万元	0.758	0.444	0.024	2.161
畜牧业产业集聚水平(AGG)		1.253	0.724	0.032	3.916
畜牧业发展水平(DLA)	万元/人	0.525	0.271	0.099	2.566
畜牧业比重(SAI)		0.306	0.096	0.105	0.658
环境规制水平(ER)		1.356	0.827	0.050	9.362
农业固定资产投资(FAI)		0.039	0.024	0.000	0.141
财政支农投入(FSA)		0.112	0.034	0.029	0.204
城镇化水平(LR)		0.554	0.142	0.215	0.896
农民收入水平(INF)	万元/人	1.045	0.580	0.233	3.491

三、中国畜牧业碳排放时空特征分析

(一)畜牧业碳排放时序特征分析

全国31省(市、自治区,因数据缺失,未含港澳台地区)畜牧业碳排放测算结果见表5,为节省篇幅,本文只列出了2007年和2020年的测算数据。从表5中可知,考察期内全国畜牧业碳排放总量整体呈下降趋势且由2007年的31840.19万吨降至28140.84万吨,减少了3699.35万吨。从各省来看,2020年畜牧业碳排放量最高的省份是内蒙古,碳排放量高达2658.73万吨,紧跟其后的是四川,其碳排放量也达到了2093.68万吨,排在3~5位的省份依次是云南、新疆、河南,其畜牧业碳排放量分别为2054.02万吨、1918.82万吨和1507.41万吨。而畜牧业碳排放量最低的省份是北京,仅有24.93万吨,与其最为接近的省份是上海,以27.51万吨的碳排放量位居倒数第二,天津、海南、浙江依次排在倒数3~5位,其畜牧业碳排放量分别为87.24万吨、130.19万吨和134.71万吨。综合来看,各地区畜牧业碳排放总量差异较大,最高是最低的106倍,两级分化明显。各省份除了在绝对数量上存在差异,其在畜牧业碳排放量的增减变化过程中也有所不同。相较于2007年,有21个省份的畜牧业碳排放量呈下降态势且以北京降幅为最大,高达75.74%,河南、广西、浙江、上海依次排在2~5位,其降幅分别为46.97%、46.38%、44.52%和40.13%;余下10个省份的畜牧业碳排放量则表现出增长态势且以宁夏增幅最大,高达73.72%,青海、甘肃、云南、山西的增幅分列2~5位,分别为27.09%、20.33%和18.39%。整体而言,全国畜牧业碳排放呈缩减趋势,因养殖区域和养殖结构的调整,各省份增减变化不一。

进一步,根据2020年畜牧业碳排放量的大小并参考考察期内聚类分析结果,将研究样本划分为四个层次,具体见表6。

第一层次为畜牧业碳排放量超过1344万吨的地区,包括内蒙古等8省(市、自治区)。畜牧业碳排放对资源禀赋和畜牧养殖基础有较大依赖性。进一步解释,内蒙古、新疆和青海为草原牧区,凭借天然草场优势主

表5 31省(市、自治区)部分年份畜牧业碳排放(万吨)及排序

地区	2007年		2020年		变化率 (%)	地区	2007年		2020年		变化率 (%)
	总量	排序	总量	排序			总量	排序	总量	排序	
北京	101.61	29	24.93	31	-75.47	湖北	978.81	16	724.49	16	-25.98
天津	93.61	30	87.24	29	-6.80	湖南	1365.43	9	1468.01	6	7.51
河北	1614.37	7	1255.87	11	-22.21	广东	792.62	18	514.69	21	-35.06
山西	439.70	22	516.47	20	17.46	广西	1090.08	14	584.46	18	-46.38
内蒙古	2485.60	3	2658.73	1	6.97	海南	198.33	28	130.19	28	-34.36
辽宁	954.14	17	849.13	14	-11.01	重庆	355.56	24	364.62	24	2.55
吉林	1168.99	11	708.96	17	-39.35	四川	2728.21	2	2093.68	2	-23.26
黑龙江	1263.25	10	1259.96	10	-0.26	贵州	1118.66	12	1086.02	13	-2.92
上海	45.95	31	27.51	30	-40.13	云南	1734.93	5	2054.02	3	18.39
江苏	435.74	23	352.24	25	-19.16	西藏	1477.32	8	1245.67	12	-15.68
浙江	242.81	27	134.71	27	-44.52	陕西	515.00	21	512.71	22	-0.44
安徽	633.11	20	567.45	19	-10.37	甘肃	1100.98	13	1324.83	9	20.33
福建	312.36	25	238.90	26	-23.52	青海	1076.08	15	1367.60	7	27.09
江西	660.04	19	746.63	15	13.12	宁夏	270.66	26	470.19	23	73.72
山东	2060.96	4	1344.69	8	-34.75	新疆	1682.60	6	1918.82	4	14.04
河南	2842.69	1	1507.41	5	-46.97	全国	31840.19		28140.84		

要饲养碳排放量较大的牛马羊等大牲畜,云南为农牧交错地区,既可发展耗粮型的生猪饲养业,又可发展以禽类为主的林下经济,因而畜禽养殖业相对发达,而其余 4 个省份均为农耕区,粮食产量高,畜牧业发展基础良好,并且承担着本省及相邻省份的重要畜产品供给功能,所以碳排放水平居高不下。

第二层次为畜牧业碳排放量介于 849~1325 万吨的地区,涵盖了甘肃等 6 省(市、自治区)。其中,西藏和贵州同属草原牧区,但与内蒙古和新疆相比,畜牧业碳排放水平相对较低。究其原因,西藏地处高寒地区,牧草生长季节短,草原载畜能力低,而贵州的山地丘陵地貌致使畜牧养殖规模水平难以大幅提升,因而限制了畜牧业发展与碳排放的增长。甘肃地处农牧过渡地带,气候条件适宜、饲草料资源丰富和种质资源优良,故以牛羊为主的草食畜产业逐渐成为该地区促农增收的重要支柱产业之一,因而该地区畜牧业碳排放水平偏高。东北地区的黑龙江和辽宁及东部的河北为粮食主产区,拥有畜牧业发展的坚实物质基础,因而畜牧业碳排放也偏高。

第三层次为畜牧业碳排放量介于 560~750 万吨的地区,包括江西等 5 省(市、自治区)。江西和广西均以生猪和家禽饲养为主,这两种畜禽碳排放因子相对较低,故畜牧业碳排放偏低。安徽和湖北属于南方水网地区,也是生猪养殖的约束发展区,因而畜牧业碳排放受到一定抑制。吉林受饲养方式粗放、畜产品加工和运销能力不足等因素影响,畜牧业发展水平与丰富的粮草资源不相称,该省畜牧业碳排放水平也不高,但随着《关于加快东北粮食主产区现代畜牧业发展的指导意见》(农牧发[2017]12 号)的出台,东北地区畜牧业碳排放具有较大增长的可能。

第四层次为畜牧业碳排放量低于 550 万吨的地区,囊括了山西等 12 省(市、自治区)。中国地域辽阔,区域资源禀赋有所不同,制约畜牧业碳排放增长的因素也存在显著差异。例如,宁夏虽为牧区,但省域面积狭小,畜牧业碳排放总量不大;山西属于中部能源和重工业基地,跟其他农业省份相比,其畜牧业占比不高;陕西省畜牧养殖方式比较落后,散养比例大,规模化程度低,从而限制了畜牧养殖发展规模;重庆市畜牧业生产因受到饲料、土地、劳动力等资源和生产成本制约增产十分有限,故畜牧业碳排放也较低;其余 8 省(市、自治区)中多为粮食主销区且地处东部沿海地区,城镇化和工业化发展水平较高,对畜牧业发展产生了“挤兑”效应,因而畜牧业碳排放总量不高。

(二)畜牧业碳排放分布动态演进

为了探索中国畜牧业碳排放增长随时间的动态演变趋势,本文以 2007 年、2012 年、2017 年和 2020 年为考察时点,采用 Kernel 密度估计方法分析畜牧业碳排放的动态演进过程,结果如图 2 所示。

由图 2 可知,考察期内畜牧业碳排放核密度曲线的中心位置经历了“右移-左移”的变化,表明全国畜牧业碳排放整体经历了先增加后下降的变化过程;从波峰来看,核密度曲线由单峰逐渐变为多峰,并且主峰高度增加,说明畜牧业碳排放梯度差异明显。分阶段来看,相较于 2007 年,2012 年核密度曲线中心位置右移,而且波峰降低并变宽,说明畜牧业碳排放在此阶段有所增加,区域差异扩大;相较于 2012 年,2017 年核密度曲线中心位置左移,波峰高度有所回升,右拖尾“厚度”减少,说明在此期间畜牧业碳排放有所降低,“高碳”地区有所减少;相较于 2017 年,2020 年核密度曲线中心位置继续左移,波峰由单峰变为多峰,主峰高度增加,次峰不明显,右拖尾“变薄”,说明在此期间畜牧业碳排放进一步降低,并呈梯度变化,“高碳”地区进一步减少。整体来看,各个年份的核密度曲线均呈非对称分布,并且中心位置偏左,说明中国畜牧业碳排放呈非均衡分布。

表 6 中国畜牧业碳排放水平类型划分

类型	地区
第一层次	内蒙古、四川、云南、新疆、河南、湖南、青海、山东
第二层次	甘肃、黑龙江、河北、西藏、贵州、辽宁
第三层次	江西、湖北、吉林、广西、安徽
第四层次	山西、广东、陕西、宁夏、重庆、江苏、福建、浙江、海南、天津、上海、北京

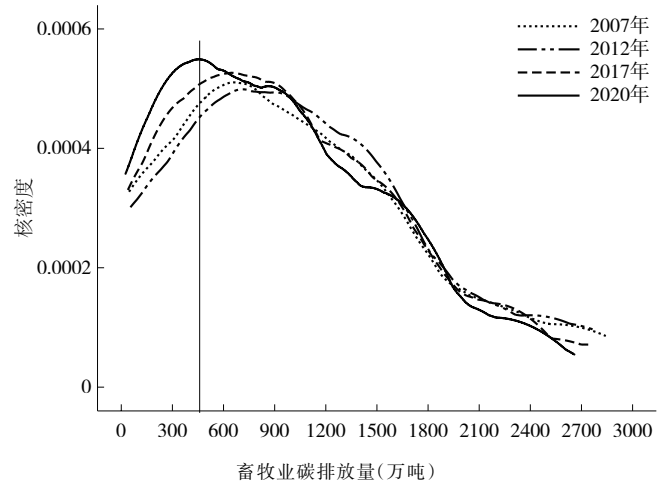


图 2 中国畜牧业碳排放分布的演进

四、技术进步对畜牧业碳排放影响的实证检验

(一)基准回归及稳健性检验

本文利用Stata14.0软件对模型进行检验,在此之前,需要对模型进行选择,Hausman检验结果显示,固定效应模型较好,因此,本文汇报固定效应模型结果,结果见表7。其中,模型一仅放入核心解释变量技术进步,结果表明,技术进步的回归系数在1%水平下显著为负,说明技术进步有助于抑制畜牧业碳排放。模型二纳入了控制变量,此时技术进步的回归系数依然显著为负,这说明在控制了可能影响畜牧业碳排放的众多因素后,技术进步对畜牧业碳排放量仍有显著的抑制作用,即在控制其他条件后,技术进步每提高一个单位,畜牧业碳排放将减少0.52%。控制变量中,碳排放强度的回归系数显著为正,说明碳排放强度越大,意味着养殖方式越为粗放,生产过程所产生的碳排放总量就越多;畜牧业发展水平和畜牧业比重对畜牧业碳排放表现出了促进作用,这主要是因为畜牧业比种植业的增收效应更为明显,因此,当畜牧业效益较高时,逐利的农户将会转向畜牧业生产,从而增加了畜牧业在农业的比重,这必然会引引起畜牧业碳排放量的激增;农业固定资产投资和财政支农投入未能起到抑制畜牧业碳排放的作用,这可能是因为农业投资效率低下及监管缺失,再加上部分农户“坐享其成”的心理,容易滋生盲目扩张和“骗补”行为,这无疑会增加畜牧业碳排放量;城镇化的推进会提高居民对肉蛋奶等畜禽产品的需求,因而会带动畜牧业的发展与碳排放量的增加;农民收入增加能够提高养殖户的抗风险能力和支付能力,促进其采纳相关养殖技术,从而实现畜牧业减排,但这一作用强度较小(回归系数趋向于零)。

考虑到畜牧业碳排放水平较高的养殖主体可能更倾向于改进养殖技术,即可能存在反向因果关系,可能会高估估计结果。此外,受一些其他因素的影响,模型可能会存在内生性问题。因此,借鉴已有研究,将技术进步的滞后一期(*L.TECH*)引入模型以尽可能降低内生性问题。表7中的模型三为处理内生性问题后的回归结果,可以发现技术进步对畜牧业碳排放依然具有显著的抑制作用,说明本文的回归结果较为稳健。另外,还采用技术进步的替代变量来进一步检验模型的稳健性,由于技术进步与畜牧科技人员密切相关,因而,本文利用科技人员占比作为替代变量进行回归,结果如模型四所示,结果显示核心解释变量和控制变量的方向及显著性水平未发生明显改变,再次证明研究结论的稳健性。

表7 基准回归及稳健性检验结果

变量	模型一			模型二			模型三			模型四		
	系数	<i>T</i>	<i>P</i>	系数	<i>T</i>	<i>P</i>	系数	<i>T</i>	<i>P</i>	系数	<i>T</i>	<i>P</i>
<i>TECH</i>	-0.677***	-4.90	0.000	-0.520***	-2.95	0.003						
<i>L.TECH</i>							-0.796**	-2.08	0.038			
<i>PPA</i>										-0.223***	-4.27	0.000
<i>CI</i>				0.011***	3.34	0.001	0.011***	2.81	0.005	0.006*	1.79	0.074
<i>DLA</i>				0.175***	3.62	0.000	0.190***	3.65	0.000	0.163***	3.46	0.001
<i>SAI</i>				0.729***	3.48	0.001	0.625***	2.57	0.010	0.494**	2.25	0.025
<i>ER</i>				-0.004	-0.48	0.631	-0.006	-0.73	0.466	-0.009	-1.09	0.278
<i>FAI</i>				-0.189	-0.44	0.661	-0.101	-0.22	0.824	-0.082	-0.19	0.848
<i>FSA</i>				1.480***	3.51	0.001	1.333***	2.95	0.003	1.395***	3.35	0.001
<i>LR</i>				1.971***	7.73	0.000	2.173***	6.64	0.000	1.552***	6.68	0.000
<i>INF</i>				-0.000***	-14.01	0.000	-0.000***	-14.08	0.000	-0.000***	-14.46	0.000
组内 <i>R</i> ²	0.056			0.500			0.533			0.512		
Prob > <i>F</i>	0.000			0.000			0.000			0.000		

注:***、**、*分别代表1%、5%、10%的显著性水平。

(二)区域层面的异质性分析

畜牧业生产是以资源凝聚力和環境承载力为基础,以社会经济协调力为直接驱动力。经济发展条件、区位优势、畜牧发展历史与基础使得各区域畜牧业碳排放总量差异较大,这可能导致技术进步对不同区域内畜牧业碳排放的影响呈现出异质性。中国畜牧业碳排放整体呈“西高东低”的梯次分布格局,因此,本文将全国划分为西部、中东部地区。首先在模型一的基础上引入技术进步与西部地区虚拟变量(*WEST*)的交叉项,并以中东部地区为基准探究区域异质性,回归结果见表8。从表8中可知技术进步与西部地区虚拟变量的交互项回归系数在1%水平下显著为正,表明相对于中东部地区,西部地区技术进步对畜牧业碳排放具有促进作用,体现出西部地区的“规模效应”优于“强度效应”。究其原因可能是中东部地区经济相对发达,随着经济的

表 8 技术进步对畜牧业碳排放区域异质性结果

变量	模型五			模型六		
	系数	<i>T</i>	<i>P</i>	系数	<i>T</i>	<i>P</i>
<i>TECH</i>	-1.181***	-6.63	0.000	-0.655***	-3.40	0.001
<i>TECH</i> × <i>WEST</i>	1.191***	4.35	0.000	0.387*	1.71	0.087
<i>CI</i>				0.013***	3.64	0.000
<i>DLA</i>				0.181***	3.74	0.000
<i>SAI</i>				0.741***	3.55	0.000
<i>ER</i>				-0.004	-0.46	0.645
<i>FAI</i>				-0.290	-0.67	0.505
<i>FSA</i>				1.332***	3.10	0.002
<i>LR</i>				1.895***	7.34	0.000
<i>INF</i>				-0.000***	-13.17	0.000
组内 <i>R</i> ²	0.099			组内 <i>R</i> ²	0.504	
Prob > <i>F</i>	0.000			<i>F</i> 检验	0.000	

注：***、**、*分别代表1%、5%、10%的显著性水平。

发展,居民对环境的关注程度也在增强,因而在政府的环保高压下,该地区的技术进步方向主要偏向于绿色低碳技术;西部地区主要以发展自身作为第一要务,并且西部地区多属草原牧区,养殖条件良好,因而本地区除了要满足自身对畜产品的需求,还要承担对中西部地区畜产品的供给任务,因而技术进步加剧了该地区的畜牧业碳排放。

五、作用机制分析:中介效应、调节效应和空间溢出效应检验

(一)中介效应检验

前文理论分析表明,技术进步通过畜牧业发展水平和畜牧业碳排放强度间接作用于畜牧业碳排放。为此,本部分将选取畜牧业发展水平和畜牧业碳排放强度作为中介变量,通过构建中介效应模型来验证技术进步通过促进畜牧业经济发展和降低碳排放强度影响畜牧业碳排放的传导路径。

表9给出了技术进步与畜牧业碳排放作用机制的检验结果。结果表明,技术进步对畜牧业发展水平和畜牧业碳排放强度有着相反的显著影响,而畜牧业发展水平和畜牧业碳排放强度均对畜牧业总体的碳排放量有显著正向影响。这说明本文的理论模型与假设是合理的,技术进步通过畜牧业发展水平和畜牧业碳排放强度对畜牧业碳排放具有截然相反的影响效应。综合来看,技术进步对畜牧业碳排放的“强度效应”要高于“规模效应”,这说明2007—2020年,技术进步通过畜牧业碳排放强度改进减少的畜牧业碳排放可以遏制其通过经济增长所带来的碳排放的增加,即技术进步在推动畜牧经济发展的同时抑制了碳排放的增加。

表 9 中介效应检验结果

变量	模型七		模型八		模型九		模型十	
	lnCO ₂		<i>CI</i>		<i>DLA</i>		lnCO ₂	
	系数	<i>T</i>	系数	<i>T</i>	系数	<i>T</i>	系数	<i>T</i>
<i>TECH</i>	-0.455**	-2.55	-6.372***	-2.85	0.592***	3.24	-0.520***	-2.95
<i>CI</i>							0.011***	3.34
<i>DLA</i>							0.175***	3.62
其他变量	已控制		已控制		已控制		已控制	
组内 <i>R</i> ²	0.477		0.178		0.638		0.500	
Prob > <i>F</i>	0.000		0.000		0.000		0.000	

注：***、**、*分别代表1%、5%、10%的显著性水平。

(二)调节效应检验

由前文分析可知,产业集聚可能影响技术进步对畜牧业碳排放的作用效果,为检验这一理论假说,在技术进步层面,加入了产业集聚与技术进步的交互项,进而考察产业集聚对于技术进步与畜牧业碳排放关系的调节作用,结果见表10。从中可知,产业集聚与技术进步的交互项系数通过了显著性检验,并且为负值,说明技术进步对畜牧业碳排放的边际效应随着产业集聚水平的提升而增强。

产业集聚通过技术进步对畜牧业碳排放作用的主要途径是产业集聚能有效促进畜牧养殖相关知识和技术的溢出。具体而言:一是,养殖技术的研发与推广需要畜牧科技人员的持续投入和转化,产业集聚能够产

生“虹吸效应”，吸引科技人才的集聚，因此为养殖技术的推广与应用提供了便利条件；二是，产业集聚减少了知识和技术在传播过程中的信息损失和扭曲，并且降低了技术交易成本，提高了知识和技术的外溢效果，增强了技术进步的减排效果；三是，产业集聚区拥有大量从事畜牧生产的“精英”，其抵御风险能力强，也更容易接纳新生事物，因而会率先使用新技术，而且在“精英”的示范带头作用下，小农户技术采纳意愿增强，即产业集聚区的技术“示范效应”和“学习效应”更容易形成，区域内的技术溢出效果更加明显。

(三)空间溢出效应

1. 全局相关性分析

在讨论中国畜牧业碳排放的空间相关性之前，需要对其进行空间相关性检验。本文采用Moran’s I指数进行检验，结果显示，畜牧业碳排放的莫兰指数均通过了显著性检验，2007年莫兰指数在5%水平下显著为正，其值为0.036，而2020年莫兰指数在1%水平下显著为正，其值为0.072，除2008年有所波动整体表现出递增趋势，显著性水平也随之提高。由此表明，研究期内我国畜牧业碳排放具有明显空间相关性且较为稳定，主要表现为低碳区域被一个或多个低碳区域包围，高碳区域与一个或多个高碳地区相邻。

2. 考虑空间因素后技术进步对畜牧业碳排放影响分析

由前文分析可知，技术进步对畜牧业碳排放还可能产生空间溢出效应，为检验这一理论假说，模型中需要纳入空间因素。因此，运用空间计量模型进行实证分析较为合适。回归分析之前，需要对空间计量模型进行选择。空间误差模型的LM(lagrange multiplier)检验结果显示，空间误差模型要优于OLS(ordinary least square)回归模型，空间滞后模型的LM检验结果显示空间滞后模型效果更好。LR(likelihood ratio)的检验结果拒绝了原假设，说明空间杜宾模型不能退化为空间滞后模型和空间误差模型。与此同时，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，本文基于反地理距离空间权重矩阵，利用固定效应的空间杜宾模型分析技术进步对畜牧业碳排放的空间效应，为检验模型的稳健性，基于空间邻接矩阵和地理距离矩阵重复上述回归，结果见表11。

由模型十二、模型十三和模型十四的结果可知，空间滞后系数 ρ 在反地理空间权重、空间邻接矩阵和地理距离矩阵设定下均呈现较高显著性且系数为正，这也再次表明畜牧业碳排放存在明显的空间集聚特征。进一步地，通过比较3个回归结果可知，核心解释变量及控制变量对畜牧业碳排放的影响方向与显著性特征在大多数情况下是一致的。由此表明，模型十二结果整体上表现出较强的稳健性。

由模型十二可知，考虑空间因素后，与面板数据估计结果保持一致，技术进步对畜牧业碳排放的抑制作用依然成立，表明通过聚焦于畜牧产业领域与关键技术的研发，中国畜牧养殖技术进步驱动低碳高效转型的战略取得了初步成效，并为未来实现畜牧业减排目标奠定了坚实的技术基础。

3. 技术进步对畜牧业碳排放的空间溢出效应

由于空间滞后项的引入，空间计量模型回归系数并不能反映出解释变量的直接和间接效应，因此，本文基于Lesage和Pace(2009)的思路，利用偏微分的方法求解各变量的直接和间接效应。直接效应是指本地区自变量对因变量的影响，也称本地效应；间接效应是指邻区自变量对本地区因变量的影响，也称空间溢出效应；总效应是直接效应和间接效应的综合，表示自变量对因变量的平均影响，结果见表12。

从表12可见，技术进步的直接效应在1%水平下显著为负，表明本地区技术进步每提高1个单位，本地

表 10 集聚效应下技术进步与畜牧业碳排放的回归结果

变量	模型十一		
	系数	T	P
TECH	-0.468***	-2.63	0.009
TECH×AGG	-0.412*	-1.94	0.053
其他变量	已控制		
组内 R ²	0.505		
Prob > F	0.000		

注：***、**、*分别代表1%、5%、10%的显著性水平。

表 11 技术进步对畜牧业碳排放影响的空间杜宾模型回归结果

变量	模型十二		模型十三		模型十四	
	系数	Z统计量	系数	Z统计量	系数	Z统计量
TECH	-0.604**	-2.24	-0.518*	-1.94	-0.577**	-2.15
CI	0.016***	3.19	0.020***	3.55	0.020***	3.05
DLA	0.204***	2.67	0.177**	2.17	0.168**	2.28
SAI	1.483***	3.34	1.306***	2.72	1.499***	3.17
ER	-0.023***	-2.86	-0.014**	-2.17	-0.019**	-2.26
FAI	0.954*	1.69	0.486	0.95	1.076**	1.95
FSA	0.653	1.28	0.060	0.13	0.633	1.14
LR	1.963***	2.59	1.433**	2.02	2.263***	3.06
INF	-0.000	-0.98	-0.000	-1.43	-0.000*	-1.77
ρ	0.472***	4.53	0.413***	5.55	0.407***	4.34
R ²	0.648		0.619		0.645	

注：模型十二、模型十三和模型十四分别对应基于反地理距离空间权重矩阵、邻接空间权重矩阵和地理距离空间权重矩阵的回归结果；***、**、*分别代表1%、5%、10%的显著性水平。

区畜牧业碳排放量就会减少0.644个百分点,这是因为技术进步通过改良畜禽品种、饲喂技术、增强疫病防控能力及提高规模化水平等途径提升畜禽单产和效益,在充分保障供给与收益的同时,降低了畜牧业碳排放总量。畜牧业碳排放强度、畜牧业发展水平、畜牧业比重和城镇化的推进对本地区畜牧业碳排放产生显著促进作用,而环境规制力度的增加能够抑制本地区畜牧业碳排放。

溢出效应方面,技术进步在10%水平下显著为负,说明其对畜牧业碳排放具有积极的空间溢出效应。从作用力的大小来看,技术进步的空间溢出效应要强于本地效应,本地区技术进步增长一个单位,邻区畜牧业碳排放将会降低1.666个百分点。对此,可能的解释是:一方面,邻区通过模仿学习周围先进地区的高效养殖技术、专业养殖知识和管理经验,促进了畜牧业碳排放强度的降低。具体而言,通过先进地区的知识溢出和技术溢出,周围地区实现了品种的改良、饲喂方法的改进及管理模式的优化,从而在确保畜禽产品产量与经济效益的条件下,实现畜牧业碳排放量的降低。另一方面,“搭便车”效应降低了落后地区的研发和试错成本,邻近地区可将节省的成本及增加的收益用于改进优化抑或研发更具优势的新兴技术和管理模式,进而实现畜牧经济增长与减排的协同推进。此外,控制变量中畜牧业发展水平的空间溢出效应为正,说明区域之间经济发展存在策略互动,表现为“邻高排,我高排”;畜牧业比重的空间溢出效应为负,这可能是因为本地区畜牧业比重的调整过程中伴随着邻区畜牧业的转入,因此,本地区畜牧业占比增加会减少邻区畜牧业碳排放;农民收入水平的空间溢出效应为负,这主要是因为地区间收入水平的差异,会使劳动力从低收入地区向高收入地区转移,并且促进邻区规模化经营,一定程度上抑制了邻区畜牧业碳排放,因而邻区畜牧业碳排放会受到抑制,但作用强度较弱。综合来看,技术进步在降低本地区畜牧业碳排放的同时产生了积极的空间溢出效应,降低了周围地区的畜牧业碳排放,假设5得到了证实。

五、结论与政策建议

本文基于2007—2020年31省(市、自治区,因数据缺失,未包含港澳台地区)的面板数据,依据碳排放因子,测算了中国畜牧业碳排放现状,并结合核密度估计方法揭示了其动态演进趋势,最后利用面板回归模型讨论了技术进步对畜牧业碳排放的影响机制。主要结论如下。

(1)全国畜牧业碳排放呈缩减趋势,各省畜牧业碳排放差异显著,整体呈“西高东低”的分布格局。全国畜牧业碳排放总量由2007年的31840.19万吨降至28140.84万吨。2020年内蒙古以2658.73万吨的碳排放量居首,北京居末。相较于2007年,有21个省份的畜牧业碳排放量呈下降态势且以北京降幅为最大;余下10个省份则表现出增长态势且以宁夏增幅最大。核密度估计结果显示,中国畜牧业碳排放呈非均衡分布,梯度差异明显。

(2)技术进步通过畜牧业发展水平和畜牧业碳排放强度对碳排放具有截然相反的影响效应,技术进步通过畜牧业碳排放强度改进减少的碳排放可以遏制其通过经济增长所带来的碳排放的增加。产业集聚对技术进步与畜牧业碳排放关系的调节作用显著,技术进步对畜牧业碳排放的边际效应随着产业集聚水平的提升而增强。

(3)技术进步对畜牧业碳排放具有显著的空间溢出效应。本地区技术进步增长一个单位,邻区畜牧业碳排放将会降低1.666个百分点,即本地技术进步通过空间溢出效应对邻区畜牧业碳排放产生积极影响。

基于上述研究结论,提出以下政策建议:

第一,增加财政支持力度,推动畜牧业科技创新,尤其要强化对低碳养殖突破性技术的研发。由于突破性低碳养殖技术的应用较为复杂,并且还可能导致养殖成本的增加,因而推广起来存在诸多障碍,其减排效果难以显现。因此,要建立专项资金,重点支持一些“卡脖子”技术的研发,如采纳成本低、操作简单的突破性技术。

第二,对于仍处于畜禽产品需求增长的中国而言,考虑现时发展阶段、膳食结构与经济发展等因素,倘若

表12 技术进步对畜牧业碳排放的直接与间接效应

变量	直接效应		间接效应		总效应	
	系数	Z统计量	系数	Z统计量	系数	Z统计量
TECH	-0.644***	-2.80	-1.666*	-1.87	-2.310***	-2.46
CI	0.015*	1.79	-0.043	-0.20	-0.028	-0.13
DLA	0.224***	2.68	0.708*	1.88	0.932**	2.39
SAI	1.412***	3.16	-5.010**	-2.40	-3.598**	-1.92
ER	-0.022***	-2.84	0.000	-0.01	-0.022	-0.25
FAI	0.964	1.63	-2.452	-0.73	-1.488	-0.45
FSA	0.660	1.16	1.699	0.78	2.359	1.09
LR	2.005***	2.77	2.934	0.60	4.939	0.95
INF	-0.000	-1.20	-0.000*	-1.73	0.000**	-2.10

注:***、**、*分别代表1%、5%、10%的显著性水平。

过分强调控制畜牧业碳排放总量目标,可能有悖于中国畜牧业发展,而且还有失公平性。因此,坚持共同而有区别的减排原则,选择降低碳排放强度的减排目标对中国而言更为实际。

第三,加快推进畜牧业产业集聚进程,充分发挥技术溢出效应。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规模经济效应,增强技术溢出效果。

第四,制定并完善区域技术标准要求,积极引导地区间的交流互助,促进突破性技术的推广应用。鉴于中国地理条件、资源禀赋等有所差异,可以先制定区域层面的技术标准和要求,然后通过试验识别出能够推广且高效的技术,而后进行全国推广,充分发挥技术进步对畜牧业碳排放的积极空间溢出效应。

参考文献

- [1] 陈瑶, 尚杰, 2014. 中国畜牧业脱钩分析及影响因素研究[J]. 中国人口资源与环境, 24(3): 101-107.
- [2] 顾海英, 1994. 农业技术进步的内涵与作用探讨[J]. 农业技术经济, (4): 24-27.
- [3] 郭娇, 齐德生, 张妮娅, 等, 2017. 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, 36(10): 2106-2113.
- [4] 何艳秋, 成雪莹, 王芳, 2022. 技术扩散视角下农业碳排放区域溢出效应研究[J]. 农业技术经济, (4): 132-144.
- [5] 胡向东, 王济民, 2010. 中国畜禽温室气体排放量估算[J]. 农业工程学报, 26(10): 247-252.
- [6] 李明全, 王奇, 2012. 基于 Malmquist 指数的技术进步对污染产生量的综合影响研究——以工业 SO₂ 为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 48(5): 817-823.
- [7] 励汀郁, 熊慧, 王明利, 2022. “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, (2): 17-29.
- [8] 梁琦, 2009. 分工、集聚与增长[M]. 北京: 商务印书馆.
- [9] 孟祥海, 程国强, 张俊飏, 等, 2014. 中国畜牧业全生命周期温室气体排放时空特征分析[J]. 中国环境科学, 34(8): 2167-2176.
- [10] 师帅, 李翠霞, 李媚婷, 2017. 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, 27(6): 36-41.
- [11] 苏旭峰, 杨小东, 冉启英, 2022. 基于碳排放视角的中国畜牧业绿色增长分析[J]. 生态经济, 38(4): 101-107.
- [12] 田云, 尹恣昊, 2021. 技术进步促进了农业能源碳减排吗? ——基于回弹效应与空间溢出效应的检验[J]. 改革, (12): 45-58.
- [13] 田云, 尹恣昊, 2022. 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, (3): 104-127.
- [14] 王国刚, 杨春, 王明利, 2018. 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) (6): 150-151.
- [15] 王欢, 乔娟, 2019. 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), 27(5): 793-802.
- [16] 魏梦升, 颜廷武, 罗斯炫, 2023. 规模经营与技术进步对农业绿色低碳发展的影响——基于设立粮食主产区的准自然实验[J]. 中国农村经济, (2): 41-65.
- [17] 温忠麟, 叶宝娟, 2014. 中介效应分析: 方法和模型发展[J]. 心理科学进展, 22(5): 731-745.
- [18] 吴强, 张园园, 张明月, 2022. 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, 36(6): 65-71.
- [19] 杨钧, 2013. 农业技术进步对农业碳排放的影响——中国省级数据的检验[J]. 软科学, 27(10): 116-120.
- [20] 杨仁发, 2015. 产业集聚能否改善中国环境污染[J]. 中国人口资源与环境, 25(2): 23-29.
- [21] 姚成胜, 钱双双, 李政通, 等, 2017. 中国省际畜牧业碳排放测度及时空演化机制[J]. 资源科学, 39(4): 698-712.
- [22] 张金鑫, 王红玲, 2020. 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, (9): 41-48.
- [23] 张翼, 卢现祥, 2015. 技术交易与产业集聚互动视角的区域二氧化碳减排研究——来自中国省域层面的经验证据[J]. 财贸研究, 26(5): 33-40.
- [24] 张永强, 田媛, 王珏, 等, 2019. 农村人力资本、农业技术进步与农业碳排放[J]. 科技管理研究, 39(14): 266-274.
- [25] 张越杰, 闫佳惠, 2022. 中国肉牛产业碳排放的达峰假象——基于 EKC 理论的实证分析与检验[J]. 农业经济问题, (6): 93-105.
- [26] 赵芝俊, 张社梅, 2005. 农业技术进步源泉及其定量分析[J]. 农业经济问题, (S1): 70-75.
- [27] 周晶, 青平, 颜廷武, 2018. 技术进步、生产方式转型与中国生猪养殖温室气体减排[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 136(4): 38-45, 167.
- [28] GROSSMAN G M, HELPMAN E, 1991. Trade, knowledge spillovers, and growth[J]. European Economic Review, 35

- (2-3): 517-526.
- [29] JAFFE A B, NEWELL R G, STAVINS R N, 2002. Environmental policy and technological change[J]. *Environmental and Resource Economics*, 22(1): 41-70.
- [30] LESAGE J, PACE R K, 2009. Introduction to spatial econometrics[M]. Boca Raton: Chapman and Hall/CRC Press, 155-165.
- [31] QUAH D, 1993. Galton's fallacy and tests of the convergence hypothesis[J]. *The Scandinavian Journal of Economics*, 95(4): 427-443.
- [32] ROMER P M, 1990. Endogenous technological change[J]. *Journal of Political Economy*, 98(5): 71-102.
- [33] SAKAMOTO L S, BERNDT A, PEDROSO A F, et al, 2020. Pasture intensification in beef cattle production can affect methane emission intensity[J]. *Journal of Animal Science*, 98(10): 309.
- [34] SEO S N, 2013. Economics of global warming as a global public good: Private incentives and smart adaptations[J]. *Regional Science Policy & Practice*, 5(1): 83-95.

Carbon Emission Reduction Effect and Its Mechanism of Technological Progress in Animal Husbandry: A Test Based on Mediating Effect, Regulating Effect and Spatial Spillover Effect

Wu Qiang¹, Sun Jiya², Chen Jinlan¹

(1. College of Economics and Management, Shandong Agriculture University, Taian 271018, Shandong, China;

2. Dongfang College, Shandong University of Finance and Economics, Taian 271000, Shandong, China)

Abstract: It is of great theoretical and practical significance to clarify the mechanism of carbon emission reduction in animal husbandry promoted by technological progress for low-carbon transformation of animal husbandry and the realization of “double-carbon” target. Based on the panel data of 31 provinces (cities and autonomous regions, due to the lack of data, the statistical data mentioned here do not include the Hong Kong Special Administrative Region, the Macao Special Administrative Region and Taiwan Province.) from 2007 to 2020, the present status and characteristics of carbon emissions from animal husbandry in China were estimated and revealed, the panel regression model was used to analyze the impact of technological progress on carbon emission and spatial spillover effect of animal husbandry. The results show that the carbon emission of animal husbandry is decreasing in China, and there is a significant difference among different provinces. The reduction of carbon emissions from technological progress through the improvement of carbon intensity in animal husbandry can curb the increase of carbon emissions from economic growth, but this result has regional heterogeneity, the “scale effect” of technological progress on the carbon emissions of animal husbandry in the western region is greater than the “intensity effect”, so it can't achieve both economic development and emission reduction, the marginal effect of technological progress on carbon emission of animal husbandry is enhanced with the increase of industrial agglomeration level. In addition, technological progress has a significant spatial spillover effect on livestock carbon emissions, as demonstrated by the fact that a unit increase in technological progress in the region will reduce livestock carbon emissions by 1.666 percentage points in neighbouring regions.

Keywords: technological progress; carbon emission from animal husbandry; intermediary effect; regulatory effect; spillover effect