



马如意, 肖海峰. 中国畜牧业碳排放: 内涵特征、研究进展与前瞻启示[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(12): 185-195.

MA Ruyi, XIAO Haifeng. Livestock industry carbon emissions in China: Connotation characteristics, research progress and prospective implications[J].

Journal of China Agricultural University, 2024, 29(12): 185-195.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.12.16

中国畜牧业碳排放: 内涵特征、研究进展与前瞻启示

马如意 肖海峰*

(中国农业大学 经济管理学院, 北京 100083)

摘要 为评述我国畜牧业碳排放相关研究进展, 利用文献综述方法, 以畜牧业碳排放的“内涵特征—研究进展—前瞻启示”为逻辑主线, 在梳理畜牧业碳排放内涵特征基础上, 归纳当前已有研究的进展, 而后得到畜牧业碳排放研究的前瞻启示。结果表明: 1) 畜牧业碳排放源、数量和时空分布上具有独特的内涵特征; 2) 畜牧业碳排放的研究进展可以归纳为畜牧业碳排放计量、时空演变特征、碳排放约束下的环境效率、影响因素以及减排措施5方面; 3) 后续畜牧业碳排放的研究可以在规范畜牧业碳排放核算标准、聚焦养殖户减污降碳技术采纳行为、统筹考虑草原碳汇与畜牧业碳排放3方面深入拓展。

关键词 畜牧业; 碳排放; 内涵特征; 研究进展; 前瞻启示

中图分类号 F205

文章编号 1007-4333(2024)12-0185-11

文献标志码 A

Livestock industry carbon emissions in China: Connotation characteristics, research progress and prospective implications

MA Ruyi, XIAO Haifeng*

(College of Economics and Management, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract To review the progress of research on carbon emissions from livestock industry in China, literature review method is employed in this study. The “connotation characteristics - research progress - prospective revelation” of livestock carbon emissions is taken as the logical main line. Based on the analysis of the connotative characteristics of carbon emissions in the livestock industry, this study summarizes current research progress and subsequently derives prospective implications for future studies. The results show that: 1) Livestock industry carbon emissions exhibit unique features in terms of sources, quantities and spatial-temporal distribution patterns. 2) Research progress on livestock carbon emissions can be summarized into five main areas, which are quantification of livestock carbon emissions, characteristics of their spatial-temporal evolution, environmental efficiency under carbon emission constraints, influencing factors, and mitigation measures. 3) Future research could be further expanded in three directions including standardizing accounting practices for livestock industry carbon emissions, focusing on the adoption behavior of pollution reduction and carbon mitigation technologies by livestock farmers, and comprehensively considering both the carbon sink function of grasslands and carbon emissions from the livestock industry.

收稿日期: 2024-01-29

基金项目: 农业农村部财政部国家绒用羊产业技术体系产业经济研究专项资金项目(CARS-39-22); 中央高校基本科研业务费专项资金项目和中国农业大学研究生自主创新研究基金项目(202321)

第一作者: 马如意(0009-0001-7011-4367), 博士研究生, E-mail: mrywork@cau.edu.cn

通讯作者: 肖海峰(0009-0006-4863-1209), 教授, 主要从事农业经济理论与政策、畜牧业经济研究, E-mail: haifengxiao@cau.edu.cn

Keywords livestock industry; carbon emissions; connotative characteristics; research progress; prospective implications

全球气候变化是当今社会所面临的共同危机与挑战。其中,温室气体的浓度增加,如二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)等,进一步加剧了全球气候变化。有效地应对气候变化已成为全球性共识,联合国将其列入可持续发展目标之一^[1-2]。《巴黎协定》中也提出全球控制温升不超过 2°C 并努力使其低于 1.5°C 的要求,以避免极端气候和生态系统恶化^[3]。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)指出自2020年起,人类有67%的可能性将全球气温上升幅度控制在 1.5°C 以内,此时全球碳排放预算则仅剩4 000亿t二氧化碳当量,故而采取相关措施降低碳排放刻不容缓^[4]。

中国是全球气候环境治理的重要参与者和积极贡献者,在2020年召开的第七十五届联合国大会一般性辩论上作出实现“双碳”目标的庄严承诺,即力争在2030年之前实现碳排放量达到峰值、在2060年之前实现碳中和^[5]。农业作为第二大温室气体排放源,是碳排放的重要来源部门之一,其生产活动所产生的温室气体排放量占全国温室气体排放总量的比率约为20%,碳排放量占全国碳排放总量的比率约为13%^[6]。根据中国气候变化第三次国家信息通报,畜牧业生产活动产生的温室气体排放量约占农业温室气体排放总量的43%。此外,联合国粮农组织在《牲畜的巨大阴影:环境问题与选择》中阐明,若将畜牧业饲草料生产以及养殖场扩张所导致的土地利用变化均纳入核算范畴,全球将有18%的温室气体排放源于畜牧业^[7];而Goodland等^[8]则发现牲畜及其副产品排放了至少325.64亿t二氧化碳当量的温室气体,占世界排放总量的51%,远高于联合国粮农组织的估计值。由此不难发现,畜牧业已成为全球温室气体排放的重要生产部门之一,“双碳”目标的实现离不开畜牧业的深度参与。

畜牧业碳排放研究意义重大,得到了学者们的广泛关注,涉及经济学、管理学和农业科学等多个学科。本研究将对其进行系统评述,以畜牧业碳排放的“内涵特征—研究进展—前瞻启示”为逻辑主线,在梳理畜牧业碳排放内涵特征基础上,归纳当前文献的研究进展,讨论可能存在的不足,而后得到畜牧业碳排放研究的前瞻启示,以期为了解畜牧业碳排放的研究进展,揭示畜牧业碳排放的研究动

态,推动畜牧业“双碳”目标实现提供借鉴和思考。

1 畜牧业碳排放内涵特征

动物的呼吸、胃肠道发酵和粪污处理均是畜牧业碳排放源^[9]。其中,作为正常的生理活动,动物体细胞的呼吸作用是在有氧环境下,通过多种酶的催化作用,把糖类有机物彻底氧化分解,产生 CO_2 和水,同时释放能量,合成大量ATP以维持生物体机能^[9]。然而,在实际的碳排放统计中,由动物呼吸作用所产生的 CO_2 并未被计入畜牧业温室气体来源中,因为其被认为是生物系统组成部分,在该系统中动物的呼吸作用与所消耗植物的光合作用相互抵消。反刍动物瘤胃发酵是产生 CH_4 的最主要途径。通过此途径所排放的温室气体约占畜牧业总排放量的43.7%^[9],是最大的排放源,而非反刍动物在胃肠发酵的过程中 CH_4 产生量较少。在饲料进入反刍动物瘤胃后,瘤胃里的微生物把饲料中有机物分解,产生氢(H_2)和含甲基的初级发酵产物,产甲烷菌能将这些初级发酵产物转化为 CH_4 ^[10]。动物 CH_4 的排放量受饲料组成成分、饲喂时间和饲料添加剂等因素影响^[11]。在厌氧条件下,畜禽动物粪污中存在的大量有机物将被微生物分解生成 H_2 、 CO_2 和有机酸,产甲烷菌既可以作用于单链有机酸生成二氧化碳和甲烷,又可利用氢还原 CO_2 生成 CH_4 。同时,在有氧和厌氧结合环境下,粪污在处理过程中将会产生氧化亚氮。研究表明,畜牧系统 CH_4 排放量约占农业 CH_4 排放总量的80%,其中90%左右来自反刍动物的胃肠道发酵,约10%来自粪污;同时畜牧业排放的氧化亚氮有65%来自动物粪便管理^[12]。综上所述,反刍动物肠道发酵和畜禽粪污管理是畜牧业温室气体排放的主要途径,这些气体排放会对空气中含氧量产生影响,致使酸雨沉降,形成温室效应^[13-14]。当前,我国畜牧业碳排放表现出以下特征:就碳源而言,畜牧业的碳排放主要来源于生物过程,是由畜禽生理特性所决定,这与诸如能源和制造业等行业有所差异,因为他们的碳排放多源于化石燃料燃烧和工业生产过程。从数量上来看,与种植业相比,畜牧业温室气体排放量更大,占整个农业温室气体排放总量比例更高,但在时序变化上整体呈下降趋势。至于空间分布,相交于其

他行业,畜牧业碳排放的空间分布受到地理环境、气候条件和畜牧业发展水平等多重因素的影响,空间分布更加分散,且与自然资源条件紧密相关,区域之间具有明显的非均衡性^[4-5,7,15-16]。

2 畜牧业碳排放研究进展

2.1 畜牧业碳排放计量

畜牧业碳排放量是指各动物从幼畜至出栏,全饲养过程中产生并排放到大气中的甲烷和氧化亚氮等温室气体折算成二氧化碳当量的总和^[17]。当前对畜牧业碳排放量的计量主要运用核算法,是指通过排放因子与活动数据相乘以量化温室气体排放量^[18-19]。

在畜牧业的碳排放量统计中,活动数据指的是动物的饲养数量。由于不同种类的畜禽动物养殖周期存在差异,需要调整它们的年底出栏量和存栏量,从而得到饲养量^[20]。具体而言,当饲养周期在 1 年以上(含 1 年),使用年底存栏量表示年养殖数量;当饲养周期在 1 年以下,则需要参照政府间气候变化专家委员会提供的公式,进行年饲养量调整。此外,如前所述畜牧业温室气体主要来源途径为反刍动物肠道发酵和畜禽粪污管理,故而排放因子主要包含肠道发酵 CH_4 的排放因子、粪污管理 CH_4 的排放因子以及粪污管理 N_2O 排放因子。根据 IPCC 系数法提供的计算方法,可以得到温室气体排放量,公式如下:

$$\text{LHGHG} = \text{LHAD} \times \text{LHEF}$$

式中:LHGHG 为畜牧业温室气体的排放量;LHAD 为使得温室气体排放的活动量,相关活动数据可以通过统计年鉴数据、监测数据或调查数据等计算确定;LHEF 为排放因子,既能够使用 IPCC 提供的相关排放系数,也可以根据具有一定代表性的测量数据推算估计;除此之外,我国编制的《省级温室气体清单指南》^①中也设置了省份的排放因子默认参数。当前,IPCC 系数法在畜牧业碳排放核算中得到广泛应用,如郭冬生^[21]通过 IPCC 系数法估计了 2016 年全国各省份畜禽的甲烷温室气体的排放总量,研究发现肠道发酵甲烷排放量占比为 74.9%,而畜禽粪污管理甲烷排放量占比为 25.1%;Cerri 等^[22]得到相似结论,在基于 IPCC 的排放因子估算巴西大型肉

牛养殖场温室气体排放量时,发现规模牛肉生产中动物肠道发酵是温室气体的最大来源;韦秀丽等^[23]参照《省级温室气体清单编制指南》^①,估算了重庆市畜牧业温室气体排放量,研究结果表明牛是关键排放源,对温室气体的排放贡献最大。

然而,也有学者认为 IPCC 系数法主要聚焦于畜牧业生产过程中的温室气体排放,忽视了畜牧业生产前端和后端的碳排放^[24],基于全产业链视角,温室气体的核算范围可能不是特别全面^[25]。为了全面测算畜牧业的温室气体情况,相关研究通过生命周期评估方法(LCA),把动物养殖过程中碳排放扩展到畜牧生产全产业链环节的碳计量,包括饲料原料生产、饲料的运输与加工、动物养殖和畜产品屠宰加工等过程^[26]。生命周期评估方法需要明确碳排放的核算边界,分为部分生命周期和全生命周期,二者的主要区别在于是否包含畜产品的零售、消费环节和最终处置环节。当前基于 LCA 的碳排放估算得到广泛应用,如 Luo 等^[27]基于四川省的相关数据,从饲料投入、农场管理、肠道发酵以及粪便管理的生命周期视角,分析了蛋鸡、奶牛、肉鸡和生猪的碳排放情况;曹淑艳等^[28]运用生命周期法与生态足迹模型等,核算了畜产品生产的生态足迹。

2.2 畜牧业碳排放的时空演变

明晰畜牧业碳排放的时空演变特征,有利于充分把握我国畜牧业碳排放的发展历程以及地区之间差异,能够为因地制宜制定碳减排政策提供科学依据。当前已有研究主要聚焦于畜牧业碳排放时序演变特征与空间差异特征。

2.2.1 畜牧业碳排放时序演变特征分析

由于核算标准选择的差异,研究方法的不同,使得关于畜牧业碳排放时序演变特征的分析众说纷纭。胡向东等^[29]根据 IPCC 公布的畜禽温室气体排放系数,估算了我国畜牧业温室气体排放总量,结果显示 2000—2007 年全国畜禽温室气体排放总量总体呈现下降的趋势,而从 2009 年开始一直到 2017 年又呈缓慢上升的趋势^[30]。范紫月等^[31]基于排放因子法系统探究了 1980—2020 年全国农业系统温室气体排放的变化趋势,发现畜牧业排放的 CH_4 和 N_2O 量均随时间变化而快速增长,尤其是 CH_4 排放量增幅最大;而陈瑶等^[32]则指出 2001—2011 年期间

① 2011 年 5 月,国家发展和改革委员会应对气候变化司编制《省级温室气体清单编制指南(试行)》, <http://www.cbcsd.org.cn/sjk/nengyuan/standard/home/20140113/download/shengjiwenshiqiti.pdf>

我国畜牧业温室气体排放总体保持稳定,略有上升,其中甲烷排放量有所下降,氧化亚氮排放量有所增加。田云等^[5]基于大农业范畴,考察中国30个省份2005—2019年农业碳排放量,在畜牧业部分使用IPCC碳排放系数法,探究主要畜禽品种的碳排放量情况,研究发现畜牧业碳排放具有明显的下降趋势,累计降幅高达28.03%。何可等^[15]基于生命周期视角,测算了畜牧业产前、产中、产后全过程的碳排放,发现2010—2020年中国畜牧业碳排放量整体呈现先升后降的变化态势,并于2014年达到碳排放的峰值。此外,部分学者基于单个畜种视角,探究其温室气体的排放情况。如励汀郁等^[33]以奶牛产业为例,基于全产业链的视角,运用LAC法测算了2008—2020年奶业碳排放,研究表明我国奶业碳排放具有“快速上升—波动上升—急剧下降—缓慢增长”的变动趋势;孔凡斌等^[34]运用生命周期评价方法,分析了2000—2013年鄱阳湖生态经济区生猪产业温室气体排放情况,发现研究期内该区生猪产业生命周期以及各个环节的温室气体排放量均呈上升的趋势。

2.2.2 畜牧业碳排放空间差异特征分析

对畜牧业碳排放进行不同区域之间的对比分析,归纳其中的共性与差异化特征,是因地制宜开展碳排放管理的前提。当前研究主要包括畜牧业碳排放空间格局特征、空间聚集性、空间收敛性等方面。姚成胜等^[35]在对全国各省2000—2014年畜牧业碳排放量估算基础上,划分出畜牧业低度、中度、偏高以及高度碳排放区,发现研究期内低度和高度碳排放区的空间格局基本保持稳定不变,草原牧区则是我国畜牧业碳排放增长的核心区。陈瑶等^[36]对比分析2001—2011年我国四大牧区的畜牧业温室气体排放变化情况,研究结果表明内蒙古、青海和西藏三大牧区的畜牧业温室气体排放量总体具有上升趋势,而新疆牧区则呈现先增后降的变化态势,空间非均衡性特征明显^[16]。吴强等^[37]基于IPCC系数法测算出2001—2020年全国及各省畜牧业的碳排放量,并借助莫兰指数等方法,探究畜牧业碳排放的动态演变规律。研究发现畜牧业碳排放向资源禀赋优势区域集聚,其中草原牧区和粮食主产区占居主导地位;同时指出我国畜牧业碳排放的空间关联性在不断增强,在转移过程中呈现出较强的时空依赖性。张金鑫等^[38]综合运用泰尔指数

和核密度法,实证分析了全国各省1997—2017年畜牧业碳排放的区域差异及其动态演进规律,发现我国畜牧业碳排放区域之间差异明显,全国以及东、中、西地区畜牧业碳排放既不存在 σ ,也不具有 β 收敛。徐丽等^[39]在研究全国各省1997—2016年的农牧业碳排放空间演化进程中,发现多数省份的畜牧业碳排放呈下降趋势,其中畜牧业重心在河南境内摆动,重心移动可以划分为2个阶段:第一阶段(1997—2004年)向东北方向移动明显;第二阶段(2004—2016年)显著往西北方向转移。

2.3 碳排放约束下畜牧业的环境效率

环境效率是衡量经济、环境、资源与碳排放发展的重要指标。畜牧业高质量发展迫切需提高环境效率,开展该领域的研究愈发重要。目前,已有研究主要聚焦于两个方面:我国畜牧业环境效率的整体情况以及基于不同畜禽种类的个体情况。邹洁等^[40]将畜牧业的碳排放作为非期望产出,采用非径向非期望产出模型(SBM模型),估算了我国各省份2000—2013年的畜牧业环境效率,研究表明综合来看我国畜牧业环境效率处于中等水平,北京、上海、浙江、江苏和福建的环境效率高于其他省份,东部地区的环境效率明显领先于中部地区和西部地区;而梁耀文等^[41]则认为我国畜牧业环境效率整体处于较低水平,在时序上具有波动上升特征,在空间上呈现出阶梯性,逐渐形成“俱乐部收敛”式两极格局,西部地区是环境效率提高的重点区域。许标文等^[42]通过测算2001—2016年我国31个省份畜牧业的绿色全要素生产率(TFP),发现研究期内畜牧业绿色TFP的年均增长率为5.01%,东部和中部地区的畜牧业绿色TFP明显快于西部地区。崔姹等^[43]以草食畜牧业为主要研究对象,引入考虑非期望产出的SSBM模型等方法,探究草食畜牧业2004—2015年的TFP变动情况,发现温室气体排放对草食畜牧业全要素生产率的影响由不显著转变为显著,其中技术效率作用效果明显,这与Han等^[44]研究结论一致。

基于单个畜禽种类的环境效率研究方面,李翠霞等^[45]运用SBM-Undesirable模型,估算了我国29个省份不同规模奶牛养殖场的环境效率,结果显示不同规模养殖场以及不同省域间环境效率存在显著差异,环境效率和技术效率之间相关性较高,收敛性分析表明 σ 收敛和 β 收敛结果存在冲突,而

小规模奶牛养殖环境效率总体符合俱乐部收敛^[46]。Zhong等^[47]测算了27个省份的奶牛绿色全要素生产率(GDC),研究显示GDC处于波动状态,年均增长2.45%,增长态势明显^[48];西部地区最高,东部地区和中部地区较低。朱宁等^[49]使用2004—2013年蛋鸡养殖的投入产出数据,估算了不同规模蛋鸡养殖场的环境效率,发现环境效率呈现“U”型特征,且低于技术效率;小规模蛋鸡养殖场的环境效率最高,而Zhong等^[50]则认为中等规模的养殖场绿色全要素生产率最高。王善高等^[51]运用随机前沿生产函数测算了我国2004—2017年不同规模生猪养殖的环境效率,并考查其俱乐部收敛情况,研究结果表明生猪养殖环境效率呈增长趋势,总体并不收敛,而具有俱乐部收敛趋势;然而李欣蕊等^[52]研究表明全国东部、中部和西部养猪业环境全要素生产率出现不同程度下降。

2.4 畜牧业碳排放的影响因素

明晰畜牧业碳排放的影响因素,对于制定有效的温室气体减排政策和引导畜牧业绿色低碳可持续发展具有至关重要的意义。环境库兹涅茨曲线(Environmental Kuznets Curve, EKC)是经济发展与环境质量关系研究中应用最普遍和最直接的假说^[53]。根据EKC,畜牧业经济发展与其碳排放之间呈现倒“U”型曲线关系,即随着畜牧业经济发展水平的提高,碳排放则会逐渐提升,当经济发展水平达到一定程度时,碳排放将会开始下降,如田素妍等^[17]基于2003—2009年的省际面板数据,实证验证了我国东中西部地区畜牧养殖碳排放强度与收入之间存在EKC关系。

在其他影响因素研究方面,学者们主要按照特定时间序列,借助KAYA恒等式模型、STIRPAT模型、对数平均迪氏指数分解法(LMDI)和IPAT模型等数学方法对影响因素进行分解。例如姚成胜等^[54]综合运用KAYA恒等式模型和LMDI法分析了我国2000—2014年畜牧业碳排放的影响因素,发现导致畜牧业碳排放量增长的主要因素是单位农业人口农业生产效益和总人口增长;可以有效抑制碳排放增长的驱动因素是畜牧业生产效率和城镇化;而农业结构调整对畜牧业碳排放变化由正向促进变为负向驱动。Xiong等^[55]通过修正的STIRPAT模型,分析江苏省的人口、经济和技术对该省畜牧业碳排放量的作用路径,发现农业人口的减少、农

业人口人均畜牧业产值的增加、畜牧业碳生产率的提高均对畜牧业温室气体排放具有抑制作用。陈瑶等^[36]运用LMDI模型分解了中国四大牧区畜牧温室气体排放量的驱动因素,发现四大牧区畜牧业温室气体排放量的促进因素是经济水平提升,具有抑制作用的是经济效率提高,而农业产业结构和劳动力因素的影响因地而异。甘雨田^[56]结合IPAT分析框架对KAYA恒等式进行拓展,在构建理论模型的基础上,探究了奶牛产业碳排放量的影响因素,研究结果表明产业规模和产业发展水平对碳排放量具有正向影响,技术水平和环境规制起到抑制作用。

2.5 畜牧业的碳减排措施

温室气体排放总量核算以及预测结果表明,畜牧业碳减排形势严峻,需要加强低碳减排措施。目前,已有研究主要通过控制源头排放量、转变畜牧业发展模式、提升生产者和消费者低碳发展意识以及构建畜牧业低碳发展激励约束机制等,从而为畜牧业碳排放提供减排措施。

源头控制排放量指从动物产生温室气体的碳排放源入手,减少肠道发酵中的甲烷、粪污管理中的甲烷和氧化亚氮等排放。Llonch等^[57]将源头控制动物肠道发酵中的甲烷排放量总结为抑制产生和降低排放强度两种方式。前者可以通过化学抑制剂和膳食脂质等实现;后者的实现方法有提高繁殖效率、优化育种、密集畜舍等,其中提高饲养效率是减少碳排放的最有效方式之一,需要合理配制日粮,减少饲料浪费^[15]。

转变发展方式,加强粪污资源化利用,推动畜牧业可持续发展^[58]。种养结合是畜禽动物粪污资源化利用的关键和主要途径^[59]。在我国几千年的农业文明史,畜禽粪便是农业生产的重要有机肥源,种养结合、以地养地^[60],实现农牧双赢,具体表现为通过调整种植结构节约资源、通过种养循环保护生态环境、通过粪肥还田改善农田地力,最终促进农民效率提高,实现收入增加^[61-62]。

认知是行动的先导。推动畜牧业低碳减排,需要综合提升畜产品生产者以及消费者低碳发展的意识和认知水平。一方面,至于生产者,他们的认知水平在一定程度上直接决定了绿色低碳养殖技术的采纳意愿和行为^[63],促进养殖过程低碳减排;另一方面,对于消费者,他们的认知水平对绿色低

碳畜产品购买行为具有显著拉力作用^[64],可以促进提升其溢价付费意愿^[65],从而倒逼生产者在养殖过程中进行绿色低碳生产。此外,合理饮食,减少浪费,亦可缓解碳排放^[66]。

为了纠正由外部性等引起的市场失灵问题,政府需要运用环境管理的政策工具,引导畜牧业低碳减排^[67]。一方面,推动畜牧业绿色低碳发展,必须让生产者有利可图,那么政府则需要建立健全绿色低碳发展补贴机制,以弥补养殖户可能的损失,提高他们的响应度^[68]。另一方面,根据外部性内部化理论,政府可以建立碳排放权交易市场,有序引导畜牧业有关主体纳入碳市场,以降低碳排放带来的外部成本^[69]。

3 讨 论

纵观既有畜牧业碳排放的学术成果,已从畜牧业碳排放计量、时空演变特征、碳排放约束下的环境效率和影响因素等方面进行了广而深的研究。然而,在畜牧业碳排放核算方面,当前国内已有研究成果多运用宏观统计数据,依据 IPCC 推荐的碳排放清单评估畜牧业碳排放量,并在此基础上进一步讨论其他有关内容。那么,此时畜牧业碳排放量的测定可能主要取决于畜禽的养殖数量,在一定程度上忽视了地区间畜牧生产方式的差异。生产模式对于畜牧业碳排放的影响具有复杂性,它涉及到畜牧业多个方面,如动物的种类、饲料的分配利用、动物的饲养环境等。不同的生产模式,如天然放牧、半舍饲或舍饲等,对上述因素有着不同的影响,从而将会导致差异化的碳排放核算结果,所以仅从养殖数量层面计算碳排放量结果会有偏。同时,畜牧业具有为公众提供肉、蛋、奶等动物性食品的功能,兼具稳产保供任务,故而在推动畜牧业低碳减排时,需要动态平衡畜产品供给与减排低碳发展之间的关系^[15],不能简单地从养殖数量减少层面考虑碳减排。

随着居民收入水平的提高和食物消费观念的改变,使其畜禽产品消费结构不断优化升级,畜产品消费数量日趋增加,预计畜禽养殖数量将持续增长^[19],那么在此现实背景下,畜牧业碳减排则需要综合利用相关养殖低碳减排技术,实现减排不减产。为有效降低农业碳排放,2021年11月19日,农业农村部发布了《农业农村减排固碳十大技术模

式》,涵盖畜牧业减污降碳、种植业减排固碳、渔业减排增汇和农村可再生能源替代等重点领域,涉及温室气体减排技术4项、可再生能源替代技术2项以及固碳增汇技术4项。其中,畜牧业减污降碳技术有反刍动物肠道甲烷减排技术和畜禽粪便管理温室气体减排技术^[70]。养殖户(包括小规模养殖户和规模化养殖场)作为畜牧业的微观生产主体,是畜牧业碳减排的重要参与者。他们的养殖行为决定了温室气体的排放量,而畜牧业减污降碳技术作为实现温室气体减排的有利载体与工具,对其采纳与否在一定程度上直接作用于碳减排的效果,然而,当前畜牧业碳排放研究鲜有关关注养殖户对碳减排技术采纳情况。那么,聚焦于微观养殖生产,养殖户采纳减污降碳技术的驱动因素有哪些?作为理性人,养殖户减污降碳技术采纳是否具有经济效应,又能够产生多大的环境效应?如果以期通过养殖户采纳减污降碳技术实现畜牧业减排不减产的目标,则是否需要基于外部性理论,建立行之有效的补偿机制,激励养殖户长期技术采纳?对上述问题的回答,有助于促进畜牧业“双碳”目标实现。

与此同时,畜牧业是我国西北少数民族地区的主导产业,发展程度不仅事关牧民增收和牧区稳定,同时也关系到畜牧强国、农业强国建设。需要关注的是,通过畜牧业碳排放空间差异特征分析,可以发现关于边疆牧区是我国畜牧业碳排放增长的核心区这一论述得到学者们广泛认可。但与农耕区的畜牧业不同,边疆牧区的畜牧业属于草原畜牧业,兼具碳排放源与草原碳汇双重属性,即草原上的动物会通过消耗植物等排放温室气体,同时草原上的植被可以通过光合作用,吸收空气中的CO₂并将其固定在植被或土壤中,从而降低大气中二氧化碳的浓度。据测算,每公顷天然草原的固碳能力大约为1.5 t,相当于减少6.9 t的二氧化碳排放^[71]。然而,当前已有研究成果对边疆牧区畜牧业碳排放的考察,多基于动物养殖碳源视角,忽视了草原碳汇的作用。

4 前瞻启示

通过对畜牧业碳排放内涵特征的梳理,从畜牧业碳排放计量、时空演变特征、碳排放约束下的环境效率、影响因素以及减排措施5方面归纳当前中国畜牧业碳排放的研究进展,并对相关研究问题进

行讨论。在此基础上,从规范畜牧业碳排放核算标准、聚焦养殖户减污降碳技术采纳行为和统筹考虑草原碳汇与畜牧业碳排放3方面得到当前中国畜牧业碳排放研究的前瞻启示。

4.1 规范畜牧业碳排放核算标准

减少畜牧业碳排放是实现碳中和的应有之义,要为减排提供相应的数理依据,那么合理的畜牧业碳排放量统计则是前提。当前已有研究对碳排放量的核算尚不完全一致,这致使研究结果之间存在较大差异,相关成果之间的可比性有待增强,不利于准确把握畜牧业碳排放的演进规律。具体而言,在排放源确定上,对于畜牧业养殖过程中的动物肠道 CH_4 、粪便管理 CH_4 和 N_2O 这3类排放源尚无争议,但是对于产前、产中和产后的饲料原料生产、养殖煤电气消耗以及动物屠宰加工等所产生的温室气体是否作为排放源尚无定论,一部分基于全生命周期视角考察的研究者认为需要作为排放源,而基于非全生命周期视角的研究者则认为饲料原料生产过程的温室气体排放应计入种植业排放,养殖煤电气消耗以及动物屠宰加工导致的温室气体排放应计入能源排放,都不属于畜牧业碳排放范畴。此外,当前畜牧业碳排放量的测定主要取决于畜禽的养殖数量,尚未考虑动物的养殖方式、饲养阶段、饲料特性和粪便管理特性等,这些将会导致核算出来的碳排放量与实际碳排放情况之间存在较大差异。因此,畜牧相关部门需要规范畜牧业碳排放核算标准,明确碳排放源;在碳排放量测量时,综合考虑动物饲养方式、生长净能、日粮维持净能、可消化净能以及不同粪污管理方式等科学计算畜牧业温室气体排放量。

4.2 聚焦养殖户减污降碳技术采纳行为

至于农业的绿色低碳发展,既有量化减排目标的约束,又要以确保粮食安全等重要农产品稳产保供为底线,所以需要在保障我国食物供给的前提下,利用相关生产技术促进农业低碳减排^[72-73]。当前在种植业领域农户低碳农业技术采纳行为得到了广泛关注^[74-75],而鲜有研究关注养殖户的畜牧业减污降碳技术采纳情况,有必要对此进行深度探究,具体可以聚焦于以下方面:一是通过考察养殖户减污降碳技术采纳行为的影响因素,从生产者视角揭示养殖户碳减排技术采纳的驱动因素,特别需要明晰外部环境的制约与激励在其中的作用效果;

二是以技术评价为目标,从经济和环境两方面评估养殖户碳减排技术采纳行为的效应情况,考察其减污降碳技术采纳是否具有经济效应,又能够产生多大的环境效应。三是基于外部性理论,当养殖户采纳减污降碳技术时会产生正外部性,如果没有任何政策干预,完全依靠市场的力量,将导致养殖户私人目标与社会目标发生偏离,其采纳并非帕累托最优。所以需要建立行之有效的补偿机制,提高养殖户减污降碳技术采纳的积极性,以期实现帕累托最优。相关补偿机制要包括补偿目标和原则、补偿主体和范围、补偿方式和标准等。

4.3 统筹考虑草原碳汇与畜牧业碳排放

草原是陆地生态系统的重要组成部分,通过光合作用吸收大气中的二氧化碳,将其储藏在生态系统中,具有调节气候、保护土壤和碳汇等功能,能够助力畜牧业碳减排。显然,在对草原畜牧业碳排放核算时,有必要统筹考虑草原碳汇发展,探索草原生态产品价值实现机制。具体而言,一方面,由于我国草原面积广阔,类型丰富,要在综合考虑不同草原类型固碳能力的基础上,构建草原碳汇计量监测体系;另一方面,借鉴森林碳汇项目管理的经验与启示,探索规范草原碳汇市场运行机制,建立完善草原碳汇交易机制。然而,值得注意的是随着全球气候变暖和人类长期以来掠夺式的开发利用,草原出现了不同程度的退化,造成生态服务能力不断下降,严重制约畜牧业经济可持续发展,阻碍了碳汇功能的充分发挥。因此,要优化草原管理方式,增强草原碳汇功能,促进畜牧业碳减排。具体措施包括:一是完善草原生态保护补助奖励政策,在继续落实禁牧和草畜平衡等草原生态保护办法的基础上,适当提高禁牧补助、草畜平衡奖励等的补贴标准,增强相关主体保护草原的积极性,促进草原植被恢复,以提高土壤有机质含量,从而增加草原的碳储存量。二是要加大监督检查力度,确保牲畜养殖在合理的载畜量范畴内,这即有利于减少由于过度养殖造成的额外畜牧业碳排放,又可以保护草原生态,巩固其碳汇功能。

参考文献 References

- [1] 林斌,徐孟,汪笑溪.中国农业碳减排政策、研究现状及展望[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(4):500-515
Lin B, Xu M, Wang X X. Mitigation of greenhouse gas emissions in

- China's agricultural sector: Current status and future perspectives [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(4): 500-515 (in Chinese)
- [2] 田云, 张惠杰. 中国农业碳排放效率时空格局及空间分异机理[J]. 社会科学辑刊, 2024(2): 172-182
- Tian Y, Zhang H J. The spatiotemporal pattern and spatial differentiation mechanism of carbon emission efficiency in Chinese agriculture[J]. *Social Science Journal*, 2024(2): 172-182 (in Chinese)
- [3] United Nations. The Paris Agreement [R]. Paris: United Nations Framework Convention on Climate Change, 2015
- [4] 浦华, 鲁帆, 马莹. “双碳”背景下的中国奶业低碳发展路径研究[J]. 农业经济问题, 2023(4): 123-133
- Pu H, Lu F, Ma Y. Low-carbon development of China's dairy industry based on greenhouse gas emission reduction [J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2023(4): 123-133 (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 赵敏娟. 统筹兼顾应对多方面挑战[N]. 经济日报, 2021-11-03(11)
- Zhao M J. Taking into account all aspects of challenges and addressing them comprehensively [N]. *Economic Daily*, 2021-11-03 (11) (in Chinese)
- [7] 联合国粮农组织. 牲畜的巨大阴影: 环境问题与选择[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. *Livestock's Long Shadow-environmental Issues and Options* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2019 (in Chinese)
- [8] Goodland R, Anhang J. Livestock and climate change [J]. *World Watch*, 2009(11/12): 10-19
- [9] 汪开英, 李鑫, 陆建定, 周斌, 何勇. 碳中和目标下畜牧业低碳发展路径[J]. 农业工程学报, 2022, 38(1): 230-238
- Wang K Y, Li X, Lu J D, Zhou B, He Y. Low-carbon development strategies of livestock industry to achieve goal of carbon neutrality in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(1): 230-238 (in Chinese)
- [10] 覃春富, 张佩华, 张继红, 张养东, 周振峰. 畜牧业温室气体排放机制及其减排研究进展[J]. 中国畜牧兽医, 2011, 38(11): 209-214
- Qin C F, Zhang P H, Zhang J H, Zhang Y D, Zhou Z F. Research on mechanism of greenhouse gases emission from livestock and its reducing countermeasures [J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2011, 38(11): 209-214 (in Chinese)
- [11] Pragna P, Chauhan S S, Sejian V, Leury B J, Dunshea F R. Climate change and goat production: Enteric methane emission and its mitigation [J]. *Animals*, 2018, 8(12): 235
- [12] 胡婉玲, 黄玛兰, 王红玲. 低碳背景下畜牧业甲烷排放现状与减排策略研究[J]. 华中农业大学学报: 自然科学版, 2022, 41(3): 115-123
- Hu W L, Huang M L, Wang H L. Methane emission and mitigation strategy of animal husbandry under low carbon background [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2022, 41(3): 115-123 (in Chinese)
- [13] 董红敏. 畜牧业温室气体监测、报告和核证方法指南[M]. 北京: 科学出版社, 2022
- Dong H M. *Guidance for Measurement, Reporting and Verification of Livestock Greenhouse Gas Emissions* [M]. Beijing: Science Press, 2022 (in Chinese)
- [14] 奚永兰, 叶小梅, 杜静, 孔祥平, 王莉, 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 L, Ye X M, Du J, Kong X P, Wang L, 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)
- [15] 何可, 李凡略, 刘颖. “双碳”目标下的畜禽养殖业绿色发展[J]. 环境保护, 2022, 50(16): 28-33
- He K, Li F L, Liu Y. Green development of livestock and poultry farming under the goal of carbon peaking and carbon neutrality [J]. *Environmental Protection*, 2022, 50(16): 28-33 (in Chinese)
- [16] 张振龙, 孙慧, 苏洋. 中国西北干旱地区农牧业生态系统碳排放的空间分布与演变趋势[J]. 生态学报, 2017, 37(16): 5263-5272
- Zhang Z L, Sun H, Su Y. The spatial distribution and evolution trends of agricultural and animal husbandry carbon emissions in the northwest arid region of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(16): 5263-5272 (in Chinese)
- [17] 田素妍, 郑微微, 周力. 中国低碳养殖的环境库兹涅茨曲线特征及其成因分析[J]. 资源科学, 2012, 34(3): 481-493
- Tian S Y, Zheng W W, Zhou L. Characteristics of Environmental Kuznets Curve for the low carbon breeding in China and its causes [J]. *Resources Science*, 2012, 34(3): 481-493 (in Chinese)
- [18] 李鹏, 吴文昊, 郭伟. 连续监测方法在全国碳市场应用的挑战与对策[J]. 环境经济研究, 2021, 6(1): 77-92
- Li P, Wu W H, Guo W. The challenges and recommendations of application of the measurement-based monitoring methodology in national carbon market [J]. *Journal of Environmental Economics*, 2021, 6(1): 77-92 (in Chinese)
- [19] 翟那秋, 张芊芊, 刘芳, 应光国, 柳王荣. 我国畜禽养殖业碳排放研究进展[J]. 华南师范大学学报: 自然科学版, 2022, 54(3): 72-82
- Zhai Y Q, Zhang Q Q, Liu F, Ying G G, Liu W R. The progress in the research on carbon emissions from livestock and poultry breeding in China [J]. *Journal of South China Normal University: Natural Science Edition*, 2022, 54(3): 72-82 (in Chinese)
- [20] 刘琼, 肖海峰. 中国农村居民不同类型收入与畜禽养殖碳排放的动态响应关系: 基于Tapio脱钩和SVAR模型的分析[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(4): 453-465
- Liu Q, Xiao H F. The dynamic relationship between different income types and carbon emissions from livestock and poultry breeding in rural China: An analysis based on Tapio and SVAR model [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(4): 453-465 (in Chinese)
- [21] 郭冬生. 基于IPCC排放系数估测主要畜禽甲烷温室气体排放量[J]. 家畜生态学报, 2020, 41(9): 65-68
- Guo D S. Estimates on greenhouse gas emissions from methane of livestock and poultry based on IPCC emission factors [J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2020, 41(9): 65-68 (in Chinese)
- [22] Cerri C C, Moreira C S, Alves P A, Raucci G S, Castigioni B D, Mello F F C, Cerri D G P, Cerri C E P. Assessing the carbon footprint of beef cattle in Brazil: A case study with 22 farms in the State of Mato Grosso [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 2593-2600
- [23] 韦秀丽, 高立洪, 徐进, 朱金山, 敬廷桃. 重庆市畜牧业温室气体排放量评估[J]. 西南农业学报, 2013, 26(3): 1235-1239
- Wei X L, Gao L H, Xu J, Zhu J S, Jing T T. Evaluation on greenhouse gas emission of livestock in Chongqing City [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 26(3): 1235-1239 (in Chinese)
- [24] 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)
- [25] Rosen R A. Is the IPCC's 5th assessment a denier of possible macroeconomic benefits from mitigating climate change [J]. *Climate Change Economics*, 2016, 7(1): 1640003
- [26] 孟祥海,程国强,张俊飏,王宇波,周海川. 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, 2014, 34(8):2167-2176
- Meng X H, Cheng G Q, Zhang J B, Wang Y B, Zhou H C. Analyze on the spatial temporal characteristics of GHG estimation of livestock by life cycle assessment in China [J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(8):2167-2176 (in Chinese)
- [27] 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
- [28] 曹淑艳,谢高地,陈文辉,郭红. 中国主要农产品生产的生态足迹研究[J]. 自然资源学报, 2014, 29(8):1336-1344
- Gao S Y, Xie G D, Chen W H, Guo H. Ecological footprint of raw and derived agricultural products[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(8):1336-1344 (in Chinese)
- [29] 胡向东,王济民. 中国畜禽温室气体排放量估算[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10):247-252
- Hu X D, Wang J M. Estimation of livestock greenhouse gases discharge in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(10):247-252 (in Chinese)
- [30] 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(4):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)
- [31] 范紫月,齐晓波,曾麟岗,吴锋. 中国农业系统近40年温室气体排放核算[J]. 生态学报, 2022(23):1-13
- Fan Z Y, Qi X B, Zeng L L, Wu F. Accounting of greenhouse gas emissions in the Chinese agricultural system from 1980 to 2020[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022(23):1-13 (in Chinese)
- [32] 陈瑶,尚杰. 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, 2014, 24(3):101-107
- Chen Y, Shang J. Disconnect analysis and influence factors of animal husbandry in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(3):101-107 (in Chinese)
- [33] 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)
- [34] 孔凡斌,王智鹏,潘丹. 基于LCA方法的生猪产业温室气体排放时空特征分析:以鄱阳湖生态经济区为例[J]. 企业经济, 2016(9):157-163
- Kong F B, Wang Z P, Pan D. Analysis of spatiotemporal characteristics of greenhouse gas emissions in the pig industry based on LCA method: A case study of the Poyang Lake ecological economic zone [J]. *Enterprise Economy*, 2016(9):157-163 (in Chinese)
- [35] 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]. *Resources Science*, 2017, 39(4):698-712 (in Chinese)
- [36] 陈瑶,尚杰. 四大牧区畜禽业温室气体排放估算及影响因素分解[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(12):89-95
- Chen Y, Shang J. Estimation and effecting factor decomposition of green house gas emission of animal husbandry industry in four pastoral areas [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(12):89-95 (in Chinese)
- [37] 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)
- [38] 张鑫鑫,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)
- [39] 徐丽,曲建升,吴金甲,韦沁,白静,李恒吉. 中国农牧业碳排放时空变化及预测[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(10):1232-1241
- Xu L, Qu J S, Wu J J, Wei Q, Bai J, Li H J. Spatial-temporal dynamics and prediction of carbon emission from agriculture and animal husbandry in China [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(10):1232-1241 (in Chinese)
- [40] 邹洁,项朝阳. 中国大陆畜牧业环境效率测算及影响因素研究[J]. 环境污染与防治, 2016, 38(1):90-96
- Zou J, Xiang C Y. Research on the livestock environmental efficiency in mainland China and its influencing factors [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2016, 38(1):90-96 (in Chinese)
- [41] 梁耀文,王明利,马晓萍,李鹏程. 中国畜牧业生态效率时空特征及溢出效应研究[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(8):189-201
- Liang Y W, Wang M L, Ma X P, Li P C. Study on the spatial and temporal characteristics and spillover effects of eco-efficiency in China's animal husbandry [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, 44(8):189-201 (in Chinese)
- [42] 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)
- [43] 崔妮,王明利,石自忠. 基于温室气体排放约束下的我国草食畜牧业全要素生产率分析[J]. 农业技术经济, 2018(3):66-78
- Cui C, Wang M L, Shi Z Z. Effect of greenhouse gas emissions on total factor productivity of herbivorous animal husbandry in China [J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2018(3):66-78 (in Chinese)
- [44] Han Z, Han C, Yang C. Spatial econometric analysis of environmental total factor productivity of animal husbandry and its influencing factors in China during 2001-2017 [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 723, (2020-06-25), DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137726
- [45] 李翠霞,曹亚楠. 中国奶牛养殖环境效率测算分析[J]. 农业经济问题, 2017, 38(3):80-88, 111-112
- Li C X, Cao Y N. Research on the environmental efficiency and its determinants in dairy farming in China [J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2017, 38(3):80-88, 111-112 (in Chinese)
- [46] Xu J B, Wang J J, Wang H Y, Li C X. Evolution trend and promotion

- potential of environmental efficiency of dairy farming in China from the perspective of 'club convergence' [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10, (2022-08-16), DOI: 10.3389/fenvs.2022.967150
- [47] Zhong S, Li J W, Qu Y. Green total factor productivity of dairy cow in China: Key facts from scale and regional sector [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2022, 183. DOI: 10.1016/j.techfore.2022.121949
- [48] 崔婉, 王明利. 温室气体排放约束下奶牛规模养殖环境效率及全要素生产率分析[J]. 农村经济, 2017(12):30-36
- Cui C, Wang M L. Environmental efficiency and total factor productivity analysis of large-scale dairy farming under greenhouse gas emission constraints[J]. *Rural Economy*, 2017(12):30-36 (in Chinese)
- [49] 朱宁, 秦富. 畜禽规模养殖场环境效率与环境全要素生产率分析:以蛋鸡为例[J]. 农业技术经济, 2015(9):86-98
- Zhu N, Qin F. Analysis of environmental efficiency and total factor productivity of large scale livestock and poultry farms: A case study of laying hens[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2015(9):86-98 (in Chinese)
- [50] Zhong S, Li J W, Chen X, Wen H M. Research on the green total factor productivity of laying hens in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 315, (2021-09-15), DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128150
- [51] 王善高, 周应恒, 田旭. 中国生猪养殖环境效率及收敛性分析[J]. 统计与决策, 2020, 36(15):70-74
- Wang S G, Zhou Y H, Tian X. Analysis on environmental efficiency and convergence of Chinese pig breeding[J]. *Statistics & Decision*, 2020, 36(15):70-74 (in Chinese)
- [52] 李欣蕊, 齐振宏, 曹丽红. 我国养猪业环境全要素生产率测算与分解研究:基于SFA-Malmquist方法[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(4):272-280
- Li X R, Qi Z H, Cao L H. Research on measurement and decomposition of environmental TFP of China's pig industry: Based on SFA-malmquist method[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(4):272-280 (in Chinese)
- [53] 蒋黎, 王晓君. 环境质量与农业经济增长的内在关系探讨:基于我国31个省区面板数据的EKC分析[J]. 农业经济问题, 2019(12):43-51
- Jiang L, Wang X J. EKC hypothesis verification between rural environmental quality and agricultural economic growth in China: An empirical analysis based on panel data of 31 provinces [J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2019(12):43-51 (in Chinese)
- [54] 姚成胜, 钱双双, 毛跃华, 李政通. 中国畜牧业碳排放量变化的影响因素分解及空间分异[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12):10-19
- Yao C S, Qian S S, Mao Y H, Li Z T. Decomposition of impacting factors of animal husbandry carbon emissions change and its spatial differences in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(12):10-19 (in Chinese)
- [55] Xiong C H, Su W Z, Li H P, Guo Z. Influencing mechanism of non-CO₂ greenhouse gas emissions and mitigation strategies of livestock sector in developed regions of eastern China: A case study of Jiangsu Province[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(26):39937-39947
- [56] 甘雨田. 中国奶牛产业碳排放量估算及影响因素研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019
- Gan Y T. Research on the estimation and influence factors of carbon emission of dairy cattle industry in China [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019 (in Chinese)
- [57] Llonch P, Haskell M J, Dewhurst R J, Turner S P. Current available strategies to mitigate greenhouse gas emissions in livestock systems: An animal welfare perspective[J]. *Animal*, 2017, 11(2):274-284
- [58] 王建华, 钭露露, 王缘. 环境规制政策情境下农业市场化对畜禽养殖废弃物资源化处理行为的影响分析[J]. 中国农村经济, 2022(1):93-111
- Wang J H, Tou L L, Wang Y. The impact of agricultural marketization on livestock waste resource utilization in the context of environmental regulation policy[J]. *Chinese Rural Economy*, 2022(1):93-111 (in Chinese)
- [59] 孟祥海, 沈贵银. 畜禽养殖业种养结合:典型模式、运营要点与推广路径[J]. 环境保护, 2022, 50(16):34-38
- Meng X H, Shen G Y. Integrated breeding and breeding in livestock and poultry industry: Typical models, operational points, and promotion paths[J]. *Environmental Protection*, 2022, 50(16):34-38 (in Chinese)
- [60] 董红敏, 左玲玲, 魏莎, 朱志平, 尹福斌. 建立畜禽废弃物养分管理制度 促进种养结合绿色发展[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(2):180-189
- Dong H M, Zuo L L, Wei S, Zhu Z P, Yin F B. Establish manure nutrient management plan to promote green development of integrated crop-livestock production system [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(2):180-189 (in Chinese)
- [61] 王如玉, 肖海峰. 种养结合对肉羊养殖减排增效的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(2):192-204
- Wang R Y, Xiao H F. Effect of combination of planting and breeding on the emission reduction and efficiency of mutton sheep breeding [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(2):192-204 (in Chinese)
- [62] 姜天龙, 朱新方, 舒坤良. 农户开展种养结合的积极效应、制约因素及政策建议[J]. 经济纵横, 2022(6):104-110
- Jiang T L, Zhu X F M, Shu K L. Positive effects, restrictive factors and policy suggestions for farmers to carry out the combination of planting and breeding [J]. *Economic Review Journal*, 2022(6):104-110 (in Chinese)
- [63] 丰雷, 江丽, 郑文博. 农户认知、农地确权与农地制度变迁:基于中国5省758农户调查的实证分析[J]. 公共管理学报, 2019, 16(1):124-137
- Feng L, Jiang L, Zheng W B. Farmers' cognition, rural land registration and rural land institutional change: An empirical study based on 758 farmers survey of 5 Chinese provinces [J]. *Journal of Public Management*, 2019, 16(1):124-137 (in Chinese)
- [64] 王萌, 乔娟, 沈鑫琪. 现实情境视角下消费者对可追溯猪肉实际选择行为的研究[J]. 华中农业大学学报:社会科学版, 2020(4):98-108
- Wang M, Qiao J, Shen X Q. Research on the actual choice behavior of consumers traceable pork from the perspective of realistic situation [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University: Social Sciences Edition*, 2020(4):98-108 (in Chinese)
- [65] 梁志会, 张露, 张俊彪, 刘勇. 基于MOA理论消费者绿色农产品溢价支付意愿驱动路径分析:以大米为例[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(1):30-37
- Liang Z H, Zhang L, Zhang J B, Liu Y. Exploring the driving forces of consumers' willingness to pay premium for green agri-food based on the moa theory: Evidence from rice [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2020, 41(1):30-37 (in Chinese)
- [66] Yue Q, Xu X R, Hillier J, Cheng K, Pan G X. Mitigating greenhouse gas emissions in agriculture: From farm production to food consumption[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 149:1011-1019
- [67] 陈秋红, 李凡略. 政府履责状况如何影响养殖废弃物资源化利用及其改进:来自生猪养殖主体的微观证据[J]. 中国农村经济, 2022(9):100-123
- Chen Q H, Li F L. The effects of government responsibility performance on resource utilization of pig manure and its improvement in China: Micro evidence from pig breeding agents [J]. *Chinese Rural Economy*,

- 2022(9):100-123 (in Chinese)
- [68] 杨芷晴,孔东民. 我国农业补贴政策变迁、效应评估与制度优化[J]. 改革, 2020(10):114-127
- Yang Z Q, Kong D M. The evolution, effect and optimization of China's agricultural subsidy policy[J]. *Reform*, 2020(10):114-127 (in Chinese)
- [69] 何可,汪昊,张俊彪. “双碳”目标下的农业转型路径:从市场中来到“市场”中去[J]. 华中农业大学学报:社会科学版,2022(1):1-9
- He K, Wang H, Zhang J B. Agricultural transformation path with respect to the target of carbon peak and carbon neutrality: From the market to the 'market' [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University: Social Sciences Edition*, 2022(1):1-9 (in Chinese)
- [70] 李丽颖. 农业农村减排固碳十大技术模式发布[J]. 农业工程技术, 2021, 41(32):2
- Li L Y. Release of ten major technology models for agricultural and rural emission reduction and carbon fixation [J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2021, 41(32):2 (in Chinese)
- [71] 马军. 中国草原碳汇管理的理论探索与实证研究[M]. 北京:经济科学出版社, 2020
- Ma J. *Theoretical Exploration and Empirical Study on Grassland Carbon Sink Management in China* [M]. Beijing: Economic Science Press, 2020 (in Chinese)
- [72] 何秀荣. 农业的绿色低碳发展之路[J]. 群言, 2023(10):8-10
- He X R. The road of green and low carbon development in agriculture [J]. *Popular Tribune*, 2023(10):8-10 (in Chinese)
- [73] 王如玉,肖海峰. 中国肉羊养殖碳排放时空演化及减排路径研究[J]. 家畜生态学报, 2024, 45(3):46-54
- Wang R Y, Xiao H F. Spatial-temporal evolution and emission reduction path of carbon emissions from mutton sheep breeding in China [J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2024, 45(3):46-54
- [74] 任重,郭焱. 环境规制、社会资本对农户低碳农业技术采纳行为的影响[J]. 自然资源学报, 2023, 38(11):2872-2888
- Ren Z, Guo Y. The effect of environmental regulation and social capital on farmers' adoption behavior of low-carbon agricultural technology [J]. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(11):2872-2888 (in Chinese)
- [75] 姚佳好,刘蕾,范晓鑫,贾文茜,杨欣. 技术认知与推广对农户低碳农业技术采纳行为的影响研究[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(12):21-30
- Yao J Y, Liu L, Fan X X, Jia W X, Yang X. Influence of technological cognition and promotion on farmers' adoption of low-carbon agricultural techniques [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023, 37(12):21-30 (in Chinese)

责任编辑:王岩



第一作者简介: 马如意, 博士研究生, 就读于中国农业大学经济管理学院农业经济管理专业, 主要专业方向为农业资源与环境经济、畜牧业经济。主持中国农业大学研究生自主创新研究基金项目(202321), 参与农业农村部 and 财政部国家产业技术体系产业经济研究项目(CARS-39-22)、农业农村部畜禽产品生产统计监测与预警研究项目(A170302), 在《农业技术经济》《干旱区资源与环境》《西南民族大学学报(人文社会科学版)》等期刊发表若干篇学术论文。参加中国农林经济管理学术年会、中国林牧渔业经济学会年会和中国农业技术经济学会学术研讨会等学术会议并作学术报告。



通讯作者简介: 肖海峰, 博士, 中国农业大学经济管理学院教授、博士生导师, 主要研究方向为畜牧业经济、农业经济理论与政策。先后主持完成国家自然科学基金项目、农业农村部、财政部等部委项目、中德合作、FAO项目等40余项。出版著作及教材近20部, 在《中国农村经济》《农业经济问题》等杂志上发表论文200余篇。多项政策建议获得党和国家领导人批示。获得北京市“四个一批”人才、全国农业推广硕士优秀论文指导教师、中国农业大学十大优秀博士论文指导教师等奖励。自2011年起, 被农业农村部、财政部聘为国家绒毛用羊产业技术体系产业经济研究室主任、产业经济岗位专家。自2012年始被农业农村部聘为肉羊产业监测与预警首席专家。