



赵婉莹,杜欣怡,施正香. 中国奶牛养殖业可持续发展的驱动机制[J]. 中国农业大学学报,2025,30(10):241-253.

ZHAO Wanying, DU Xinyi, SHI Zhengxiang. Driving mechanism for the sustainable development of dairy farming in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(10): 241-253.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.10.18

中国奶牛养殖业可持续发展的驱动机制

赵婉莹^{1,2} 杜欣怡^{1,3,4} 施正香^{1*}

(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083;

2. 中国农村技术开发中心, 北京 100045;

3. 安徽省农业科学院 畜牧兽医研究所, 合肥 230031;

4. 安徽省畜禽产品安全重点实验室, 合肥 230031)

摘要 针对奶牛养殖业的工业化发展导致牛奶生产环境负担显著加重的问题,采用2011—2021年奶牛养殖业在中国各区域养殖数量与规模及其影响因素的统计数据,以奶牛存栏量为行业可持续发展的评价指标,采用对数平均迪式分解指数方法,从经济、社会和环境3个维度,对奶牛养殖业影响因素的驱动效应与可持续发展的驱动机制进行研究。结果表明:1)技术创新与应用对研究期间奶牛养殖业可持续发展的驱动效应最强,且是唯一的负面驱动效应,贡献率为-435.4%,而政策、经济和资源因素均表现为正面驱动效应,贡献率分别为57.93%、97.57%和179.90%;2)发达地区与欠发达地区表现出不同的产业发展特性,导致了奶牛养殖业区域供需失衡与局部产能过剩的情况,应通过区域产业链一体化与区域间生产资料流通体系的发展,实现产品生产与消费市场的有机结合,进一步促进奶牛养殖业可持续性的提升;3)未来行业应依据区域经济、社会和环境条件,因地制宜地发展适宜规模养殖场和可持续生产模式,并坚持大规模养殖场和中小规模养殖场群双轨并行的技术发展方向。本研究通过分析行业发展的历史数据,合理预测未来行业发展形势,为优化全局和区域产业链布局,促进奶牛养殖业可持续发展的针对性政策制定提供了理论依据。

关键词 政策导向; 消费市场; 自然资源; 行业基础; 发展规划; 主成分分析

中图分类号 S8

文章编号 1007-4333(2025)10-0241-13

文献标志码 A

Driving mechanism for the sustainable development of dairy farming in China

ZHAO Wanying^{1,2}, DU Xinyi^{1,3,4}, SHI Zhengxiang^{1*}

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. China Rural Technology Development Center, Beijing 100045, China;

3. Institute of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China;

4. Anhui Provincial Key Laboratory of Livestock and Poultry Product Safety, Hefei 230031, China)

Abstract Aiming at the problem that the industrialized development of dairy farming significantly increased environmental burdens on milk production, this study adopted statistical data on the stock and scale of dairy farming and its influencing factors in each province of China from 2011 to 2021, and used cattle stock as an evaluating indicator for the sustainable development of the industry, the driving effects of the influencing factors of dairy farming industry and the driving mechanism of sustainable development were studied from three

收稿日期: 2025-05-18

基金项目: 财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系资助(CARS36)

第一作者: 赵婉莹(ORCID: 0000-0002-2106-1844),博士,助理研究员,主要从事畜禽养殖工艺与环境研究,E-mail:377357645@qq.com

通讯作者: 施正香(ORCID:0000-0003-3082-5305),教授,博士生导师,主要从事畜禽养殖工艺与环境研究,E-mail:shizhx@cau.edu.cn

dimensions: economic, social, and environmental through the method of the logarithmic mean Divisia index. The results show that: 1) technological innovation and application had the strongest driving effect on the sustainable development of dairy farming during the study period and was the only negative driving effect, with a contribution rate of -435.4% , while policy, economic, and resource factors all showed positive driving effects, with contribution rates of 57.93% , 97.57% , and 179.90% , respectively; 2) the developed and underdeveloped regions showed different characteristics of industrial development, resulting in regional supply and demand imbalance and local overcapacity in dairy farming, and the seamless integration of milk production and consumer market should be realized through the creation of the regional industrial chain and the development of inter-regional circulation system of production materials to further promote the sustainability of dairy farming; 3) In the future, the industry should develop appropriate-sized farms and sustainable production models based on regional economic, social, and environmental conditions, and adhere to the dual-track approach of technical development, combining large-scale farms with the clusters of small- and medium-sized farms. This study analyzes the historical data of industry development and reasonably predicts the future development situation of the industry, providing a theoretical basis for optimizing the layout of the global and regional industrial chain and for formulating targeted policies to promote the sustainable development of dairy farming.

Keywords policy orientation; consumer market; natural resources; industrial basis; development planning; principal component analysis

目前,奶牛养殖业正朝着高度工业化的方向发展,这种转变具体体现为,在农场层面通过规模化和集约化提升系统产能,保障牛奶供应;在产业层面通过专门化和集聚化促进资源流通与技术创新。农业工业化是提升农业现代化水平,保障食品安全,提高农业效益和竞争力的重要途径。一方面,集约型规模农场可以采用更高水平的精准畜牧业技术^[1],并应用有效管理以提供更好的动物福利,进一步提升生产效率、降低经济成本和环境影响^[2];另一方面,集聚分布的农场可以协调产业链上下游布局及配套设施和社会服务,降低供应链成本,促进技术的创新、交流和应用,同时降低监管难度,促进产业链有序发展。然而,农业的工业化生产严重依赖于区域资源和市场经济,导致行业的空间分布受到限制^[3]。作为最大的发展中国家,中国的奶牛养殖业自2004年起经历了规模化、集约化和集聚化的发展过程,这一过程带来了营养和经济收益的同时,也显著增加了环境负担^[4]。养殖生产过程中资源的高强度投入已引起世界范围内的广泛关注和严格审查,粪污处理等的环保压力已成为限制行业发展的重要因素。此外,进口奶源的冲击与区域供需失衡导致了中国奶业的利润空间被急剧压缩,奶牛养殖业的发展在当前条件下表现出不协调、不平衡和不可持续的突出问题,亟需通过转型升级提高质量效益和竞争力,促进行业绿色高效可持续发展^[5]。

在可持续发展进程中,产业转型升级的驱动因素和价值体现在经济、社会和环境3个方面^[6]形成正向反馈,使得产业具有更高的生态效率和适应性^[7]。已有研究大多从环境影响角度,结合水^[8]、能源^[9]、土地^[10]等资源的特征演变,分析相关因素对产业可持续发展的驱动效应。随着研究范围的扩大,政策导向^[11]、消费市场和技术发展^[12]等的驱动作用逐渐凸显出来,这些研究同时强调了农业生产安全在地缘政治和社会经济规范中的重要作用。与其他行业不同,农业类行业肩负保障粮食安全和人民健康福祉的重要职责,其可持续发展转型必须以不损害生产能力为前提^[12-13]。中国生态环境部在《农业农村污染治理攻坚战行动方案》^[14]中指出,与农业相关的环境保护策略应以划定法律红线为基础,辅以相关政策提供财政补贴并形成激励机制,由此实现在农业绿色转型的同时,保障行业生产效益与农民经济收益。因此,奶牛养殖业的可持续发展需要在保证产能的基础上,综合考虑经济、社会和环境3方面因素的驱动作用,而相关研究未从此角度讨论过农业产业可持续性的提升,农业产业可持续发展的驱动机制仍有待揭示。

在能源和环境经济学领域研究中,通过对指数的分解可以分析指数变化背后的潜在驱动因素。近年来,随着产业可持续发展的要求提升,指数分解方法也被应用于产业分析和宏观经济研究^[15]。奶牛是奶牛养殖业生产的核心^[16],就可持续发展评

价而言,奶牛存栏量是对该行业在经济、社会和环境 3 个维度进行评价的基础变量,也是行业发展的显性形态指标^[10]和基础变量。此外,区域奶牛养殖业的可持续发展受到多种内外因素的影响,包括政策导向、消费市场、自然资源、产业基础等,这些因素在行业形态演变过程中协同联动、相互作用^[8]。由于对数平均迪式分解指数(Logarithmic mean divisia index, LMDI)方法能够完全无残差地分解变量,适用于分解多个相关因素对行业演变的耦合驱动作用,已被应用于宏观区域规划和产业绿色转型的多项研究中^[13]。因此,采用区域奶牛存栏量作为行业可持续发展的指标进行驱动效应的解构分析,可以保证系统对社会的服务性功能,同时指征行业规模和空间分布。本研究拟对 2011—2021 年

奶牛养殖业在中国各区域的养殖数量和规模变化进行分析,提取产业发展影响因素间的相关信息,在此基础上对存栏量进行 LMDI 指数分解,解析影响因素的驱动效应与奶牛养殖业可持续发展的驱动机制,对未来不同区域的行业发展做出合理预测,以期优化奶牛养殖业可持续发展的全局和区域产业链布局,推进各区域发展适宜规模养殖场和可持续生产模式,以及针对性政策的制定提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究中,与行业可持续发展相关的影响因素对应的变量、释义及符号见表 1,相关数据均来自国家统计局^[17]公布的普查统计数据。

表 1 奶牛养殖业可持续发展影响因素对应的变量

Table 1 Variables corresponding to the influencing factors of the sustainable development of dairy farming

因素分类 Factor classification	因素变量 Factor variable	变量释义及符号 Description and symbol of variable
政策导向 Policy orientation	部门贡献	农业总产值, OVA
	财政支持	农业财政补贴, FSA
	技术应用	农业机械总动力, AM
消费市场 Consumer market	人口总数	年末常住人口, POP
	购买力	区域生产总值, GRP
自然资源 Natural resource	水资源	水资源总量, WAT
	土地资源	农作物播种面积, PA
行业基础 Industrial basis	产业规模	奶牛存栏量, CS
	上游产品供应	饲料总产量, FY
	产品产能	原料奶产量, MY

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

当通过系统分析做出决策时,对复杂的多维数据集考虑多种方法组合的评价结果可以提升决策的可信度^[18]。主成分分析(Principal component analysis, PCA)是一种多维数据分析方法,通过降低维度来提高数据集的可解释性,同时最大限度地减少信息损失,近年来已在社会学、经济学、管理学方面时间和空间的数据处理中得到广泛应用^[19]。本研究通过将原始数据集中各影响因素无差别地输入 PCA 分析模型中,求解因素间的相关性,为驱动因素的分解提供理论依据。为确保数据集的有效性,应在 PCA 之前进行 Kaiser-Meyer-Olkin

(KMO)检验和 Bartlett 球形度检验^[20]分别验证数据集的充分性和必要性。本阶段的数据分析采用 SPSS(IBM SPSS Statistics 25)软件进行。

基于数据有效性验证和主成分信息提取的结果,对驱动因素数据集进行指数分解。指数分解方法依据研究指数的影响因素构建分解项和数学模型,计算出各个分解项对应的百分比,即为驱动因素及其对指数变化的贡献率,综合所有驱动因素的贡献率即为该指数的驱动机制。指数分解分析方法由 Ang 等^[21]提出,在后来逐步的方法改进和扩展中,开始探索在不遗留残差项的情况下产生分解结果,以适应分解涉及许多因素或影响的情况,且当数据集具有多个级别的分类汇总时,确保不同级别

分类汇总的一致性,并按子类别对估计影响进行归因分析。LMDI方法的选择包括3个维度:分解方法(LMDI-I和LMDI-II)、分解过程(加法和乘法分解)和分解指标(数量和强度指标)^[22]。同样作为指数分解方法,LMDI-I和LMDI-II都具有许多必要的特性,如指数问题中的因子反转检验和时间反转检验;易于制定和应用,并且具有零值和负值鲁棒性,其中LMDI-I因其更为简单的计算过程和多角度聚合的一致性而被更多的研究人员选择^[23]。由于数据单位的原因,强度指标的结果解读性较差,而加法分解无论在时间序列数据还是选定基准年数据分解中使用都更便捷。此外,数量变化的分解与加法分解更适配,可以更高效准确地识别和捕捉分解项的影响与贡献。同时,加法分解的结果包含更多的信息,增强了结果的解读性^[24]。

1.2.2 KMO检验和Bartlett球形度检验

KMO检验是对原始变量之间的简单相关系数和偏相关系数的相对大小进行检验,主要应用于多元统计的因子分析。KMO统计量的取值范围为0~1,当所有变量间的简单相关系数平方和远大于偏相关系数平方和时,KMO值接近于1,象征变量间的强相关性,表明原有变量适合进行因子分析^[25]。如果KMO指数>0.5,则可以进行成分分析,而最大值1则表示成分和数据集之间的完全一致。

Bartlett球形度检验是一种检验各变量之间相关程度的检验方法。该方法从变量的相关系数矩阵出发,它的原假设是相关系数矩阵是一个单位阵,即相关系数矩阵对角线上的所有元素都是1,所有非对角线上的元素都为0。根据相关系数矩阵的行列式得到了检验的统计量后,如果该值对应的概率值 P 小于研究所需的显著性水平,应该拒绝原假设,认为相关系数矩阵不是单位阵,即原始变量之间存在相关性,可以用作因子的降维分析。因此,在Bartlett球形度检验的结果中,使用 P 值检查所选变量的冗余度, P 值越小表示所选因素数据集的残差越小^[26]。

1.2.3 PCA模型的数据处理

经KMO检验和Bartlett球形度检验验证数据集有效后,将数据集作为输入信息进行PCA以揭示其相关关系。从几何角度看,PCA首先对原坐标轴进行坐标旋转,使所有数据点在新坐标轴中可以达

到最大的分散程度。此时得到的新变量为原变量的线性组合,在新变量中选取数据点离散程度最大的一个,即方差最大的新变量以代替原来的数据点,可以实现尽可能保留原数据点的特征信息,同时降低信息处理的难度^[27]。

本研究根据PCA的原理特性,提取影响因素间的相关关系,为消除所选因素之间的单位差异,对每个因素分别进行标准化^[28],公式为:

$$x = \frac{Y - \bar{Y}}{S} \quad (1)$$

式中: Y 为数据原始值; $\bar{Y}$ 为平均值; S 为标准差。 X 为 $p \times q$ 的标准化矩阵, p 为样本数, q 为因素数。 X 的协方差矩阵定义为 M ,由于给定标准化数据的平均值为0, M 的元素 m_{ij} 的计算公式为:

$$m_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n x_{ki} x_{kj} \quad (2)$$

矩阵 M 的特征值和特征向量分别用 λ 和 μ 表示,表达式为 $M\mu = \lambda\mu$,对于 $\{(\lambda_1, \mu_1), (\lambda_2, \mu_2), \dots, (\lambda_q, \mu_q)\}$ 中的特征值 λ ,应满足 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_q \geq 0$ 。基于PCA理论,第 i 个主成分的特征值在全部特征值之和中所占比重 α 为:

$$\alpha = \left(\lambda_i / \sum_{k=1}^q \lambda_k \right) \times 100\% \quad (3)$$

α 越大,说明该主成分综合表示原数据集特征信息的能力越强。PC i 的累积贡献率 β 指前 i 个主成分的特征值之和在所有主成分特征值之和中所占比重,计算公式为:

$$\beta = \left(\sum_{k=1}^i \lambda_k / \sum_{k=1}^q \lambda_k \right) \times 100\% \quad (4)$$

在计算结果中排名靠前的主成分需要包含原始变量的最大方差,即覆盖原始数据集最多的相关信息。通常情况下,最终结果中所选主成分的累积贡献率应超过85%^[25]。分析结果中的载荷值表示因素和主成分之间的正、负关系及相关程度^[29]。

1.2.4 LMDI模型的分解项

本研究以奶牛养殖业发展显性形态中区域存栏量作为数量指标,同时指征行业规模和空间分布,分析结果可以对奶牛养殖业在2011—2021年的全局和区域发展形态进行解释。根据PCA分析结果中影响因素间的相关关系,数量指标分解项的释义及符号见表2。

机械利用效率表示机械和技术在奶牛场中的

表 2 奶牛养殖业可持续发展驱动效应的分解项

Table 2 Decomposition terms of the driving effects on the sustainable development of dairy farming

分解项分类	分解项 ^①	分解项释义及符号
Classification of decomposition term	Decomposition term	Description and symbol of decomposition term
技术效应	CS/AM	机械利用效率, A
Technical effect	AM/FSA	财政补贴转化率, B
政策效应	FSA/OVA	农业投资强度, C
Policy effect	OVA/GRP	农业产值占比, D
经济效应	GRP/POP	区域人均生产总值, E
Economic effect	POP/MY	牛奶需求差额, F
	MY/FY	饲料需求差额, G
资源效应	FY/PA	土地利用结构, H
Resource effect	PA/WAT	水土环境条件, I
	WAT	水资源总量, J

注：①分解项变量释义及符号见表 1。

Note: ① The descriptions and symbols of variables used in the decomposition terms are shown in Table 1.

应用程度。考虑到机械是由能源驱动的,机械利用效率也可以表示奶牛养殖的能源效率。由于财政补贴转化率体现了生产技术的应用成本,表现其创新程度,可以揭示农业机械和技术的可用性和实用性。因此,机械利用效率和财政补贴转化率的结合说明了技术因素对奶牛养殖的驱动效应。农业投资强度和农业产值占比分别代表了政府投资回报和区域产业结构的变化,体现了政策因素对奶牛养殖的驱动效应^[30]。区域人均生产总值、牛奶需求差额和饲料需求差额显示了上下游产业对奶牛养殖产业链市场结构的影响,表现为经济因素的驱动效应。水资源总量、土地利用结构和水土环境条件影响农业的布局和生产环境,3项联合表现为资源因素的驱动效应。

1.2.5 LMDI模型的构建

根据 Ang^[31]给出的 LMDI 方法实践指导,本研究将 V 定义为包含奶牛存栏量数据的集合,则 LMDI 模型表示为:

$$V = \sum_i V_i = \sum_i A_i \times B_i \times C_i \times D_i \times E_i \times F_i \times G_i \times H_i \times I_i \times J_i \quad (5)$$

式中: $A、B、\cdots、J$ 为数量指标的分解项,其释义见表 2; i 表示数据集中的各个区域。集合从第 0 周期中的 V^0 变化到第 T 周期中的 V^T ,其变化总量 ΔV_{total} 的加法分解公式为:

$$\Delta V_{\text{total}} = V^T - V^0 = \Delta V_A + \Delta V_B + \Delta V_C + \Delta V_D + \Delta V_E + \Delta V_F + \Delta V_G + \Delta V_H + \Delta V_I + \Delta V_J \quad (6)$$

式中: $\Delta V_A、\Delta V_B、\cdots、\Delta V_J$ 分别表示分解项 $A、B、\cdots、J$ 的驱动效应。对于第 k 个因素 x_k ,其驱动效应的计算公式为:

$$\Delta V_{x_k} = \sum_i \frac{V_i^T - V_i^0}{\ln V_i^T - \ln V_i^0} \ln \left(\frac{x_{k,i}^T}{x_{k,i}^0} \right) \quad (7)$$

数据集中所有的 0 值都被一个很小的正数代替,如 10^{-20} ^[31]。当驱动效应的计算结果为正时,表明该因素导致奶牛存栏量增加,负效应表示存栏量减少。在这种情况下,我们能够将不同因素对行业可持续发展的驱动作用进行比较。

2 结果与分析

2.1 行业发展的规模结构变化

2012—2021 年中国奶牛养殖规模总体呈现先下降后上升的趋势。根据中国奶业协会的数据,2021 年中国奶牛总存栏量 1 094 万头,与 2012 年相比下降了 7.2%。自 2012 年以来,全国奶牛总存栏量持续下降,在 2016 年达到最低点,共计下降了 12.0%,直至 2018 年前后实现了逐步回升。2012—2021 年中国不同规模养殖场奶牛存栏情况见图 1。

值得注意的是,2012 年,养殖数量为 1~99 头奶牛的农场存栏量是其他规模牛场总存栏量的 1.68 倍,在行业中处于明显的优势地位。然而,随着国内奶牛养

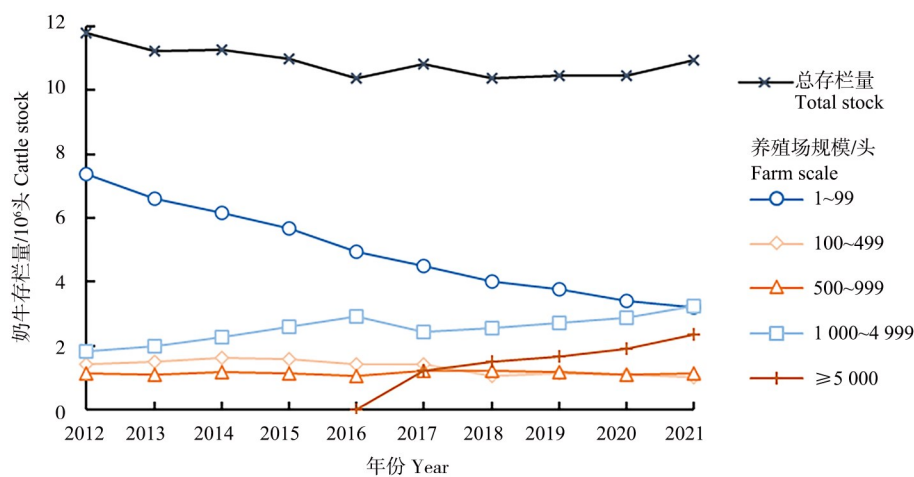


图1 2012—2021年中国不同规模养殖场奶牛存栏量

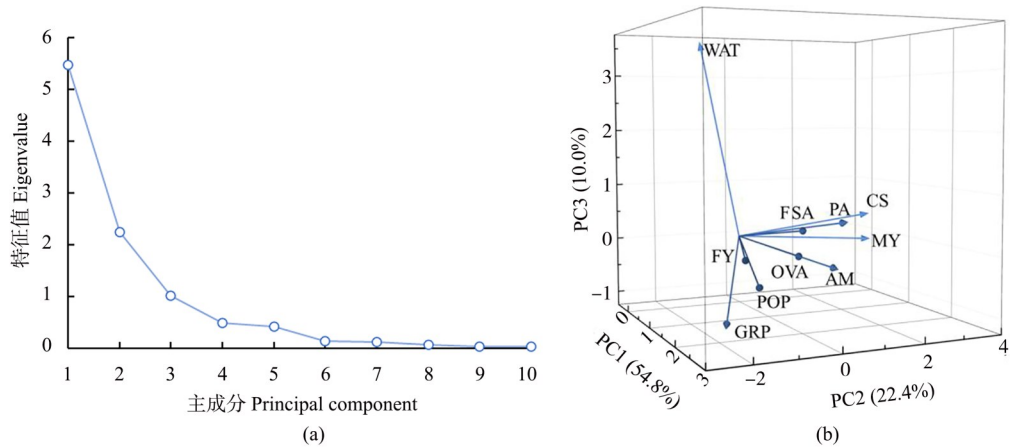
Fig. 1 Stocks of different scale dairy farms in China from 2012 to 2021

殖场的规模化发展和传统小农户生产模式逐渐减少,存栏量1~99头奶牛的牛场总规模在10年内减少了420万头,在全国总存栏量中占比<30%。与之相反的是,>1000头存栏量规模的奶牛场在这一时期呈现出持续增长的趋势,特别是在2017年之后大量出现了养殖规模≥5000头的超大规模奶牛场。直到2021年,养殖规模在1000~4999头的奶牛场总存栏量在全国总量中占比29.6%,已经超过了养殖规模为1~99头奶牛场的存栏量,在不同养殖规模的奶牛场中位列第一。养殖规模>1000头的奶牛场总存栏量已超过全国总量的50%,而养殖规模为1~499头的奶牛场存栏量均呈下降趋势。根据中国奶业协会的分类标准,当牛群规模≥500头时,奶牛场被称为大规模奶牛场,

2021年大规模奶牛场养殖的奶牛在中国奶牛总存栏量中占比61.4%。而规模奶牛场数量在经历了2016—2017年的爆发式增长后,从7100个左右下降至4600个左右。

2.2 影响因素的主成分与贡献率

本研究计算了2012—2021年中国省级区域奶牛养殖各影响因素的平均值,并进行了KMO检验和Bartlett球形度检验。结果表明,研究期间影响因素的KMO指数为0.744,Bartlett球形度检验的概率值 $P<0.001$,证明所选数据的充分性和必要性。将经过验证的数据集依据主成分分析的特征值和载荷图进行信息提取,提取数据特征值并计算各主成分的贡献率,结果见图2。



变量释义及符号见表1。

The descriptions and symbols of variables are shown in Table 1.

图2 影响因素数据集主成分分析的特征值(a)和载荷图(b)

Fig. 2 Eigenvalues (a) and loading diagram (b) of principal component analysis for the influencing factors dataset

特征值曲线表现主成分对数据集的贡献率大小,而主成分载荷图则通过特征向量显示了各影响因素与主成分之间的相关关系。在所有的主成分中,PC1的贡献率最高,占 54.8%。除水资源总量外,所有因素都与 PC1 有正面的相关关系。相反,水资源总量对 PC3 的贡献远高于其他因素,其相关关系也是正面的。PC3 的特征值在所有主成分中占 10.0%,其累积贡献率为 87.2%。可以看出,特征值曲线的拐点出现在 PC4 处,PC4 的累积贡献率为 92.1%。根据 PCA 的一般原则,所选取的主成分累积贡献率应在 85% 以上,本研究为了能够更全面地提取影响因素之间的相关信息,取前 4 个主成分进

行相关关系的分析,并以此作为驱动因素分解的依据。

为确保主成分的提取结果能够有效表示区域影响因素的数据信息,本研究根据各区域影响因素数据计算了省级区域前 5 个主成分的累积贡献率,结果见表 3。当将累积贡献率的阈值设置为 90% 时,PC1 和 PC2 可以代表 23 个省份的数据集特征信息。西藏、福建和青海需要 3 个主成分,其余 5 个省份则需要 4 个主成分代表数据集的特征信息。因此,综合全局数据集与区域数据集分析的结果,根据 PCA 提取的影响因素相关信息,PC1、PC2、PC3 和 PC4 被认为是构建驱动效应分解项的基础。

表 3 各省主成分的累积贡献率
Table 3 Cumulative contribution rates of the principal components in each province %

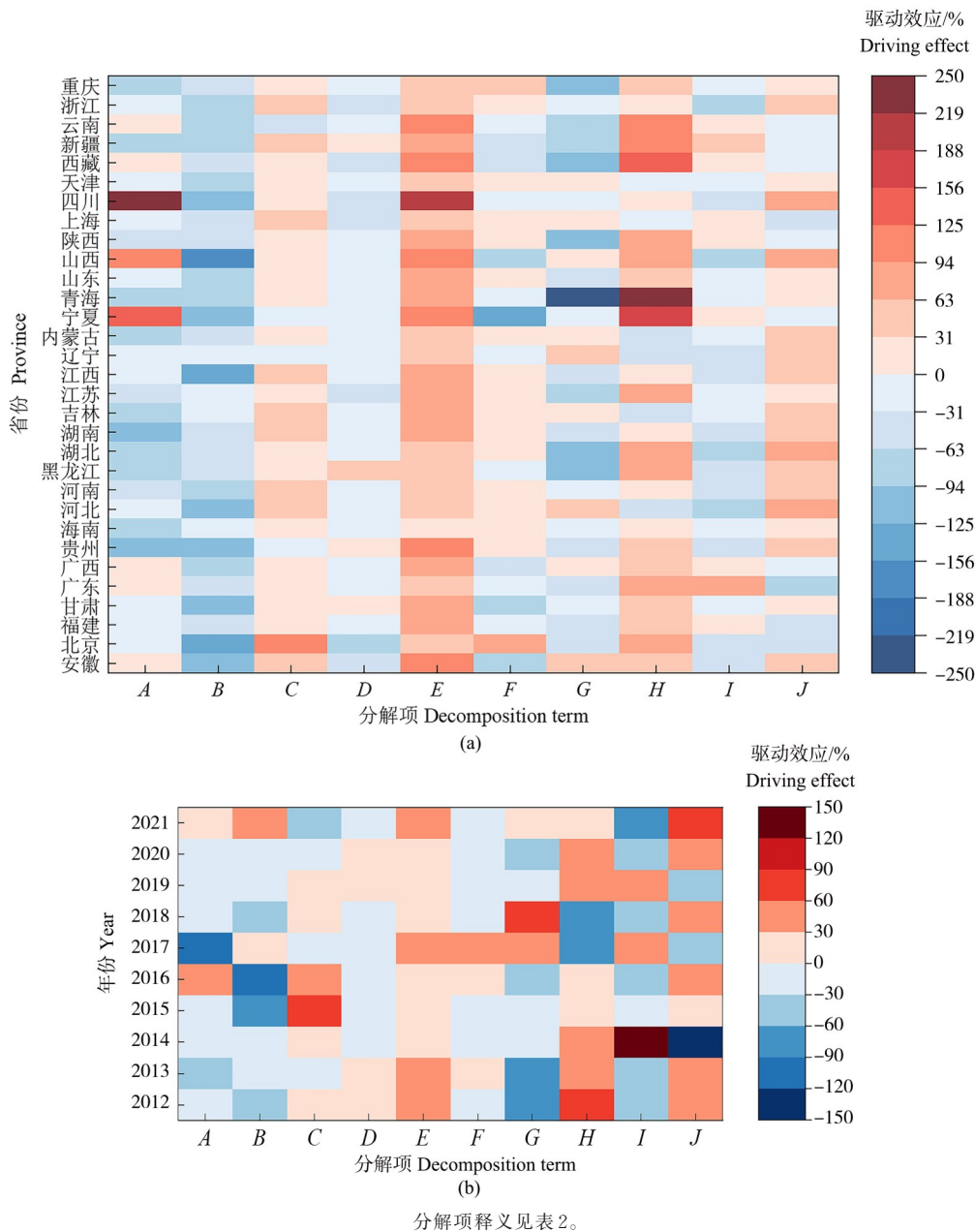
省份 Province	累积贡献率 Cumulative contribution rate					省份 Province	累积贡献率 Cumulative contribution rate				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5		PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
黑龙江 Heilongjiang	90.5	93.9	96.6	97.8	100.0	山东 Shandong	76.3	93.3	93.4	97.8	100.0
吉林 Jilin	84.3	95.1	96.4	97.9	100.0	江苏 Jiangsu	68.8	90.2	90.4	97.0	100.0
辽宁 Liaoning	75.2	93.1	93.1	97.8	100.0	安徽 Anhui	78.9	93.5	94.4	97.6	100.0
北京 Beijing	62.1	87.6	87.8	96.6	100.0	上海 Shanghai	62.0	87.6	87.8	96.6	100.0
天津 Tianjin	65.5	88.9	89.2	96.9	100.0	浙江 Zhejiang	65.9	89.2	89.6	97.0	100.0
河北 Hebei	81.2	94.9	95.0	97.9	100.0	江西 Jiangxi	75.5	92.4	94.0	97.9	100.0
山西 Shanxi	76.3	92.9	93.1	97.4	100.0	福建 Fujian	67.3	89.9	90.5	97.3	100.0
内蒙古 Inner Mongolia	85.1	94.0	95.8	97.5	100.0	重庆 Chongqing	71.5	90.9	91.7	97.2	100.0
陕西 Shaanxi	74.3	92.0	92.6	97.4	100.0	贵州 Guizhou	79.5	93.0	95.0	97.5	100.0
甘肃 Gansu	83.8	94.9	96.0	97.7	100.0	四川 Sichuan	75.0	92.0	93.5	97.6	100.0
青海 Qinghai	70.6	87.3	93.6	97.6	100.0	云南 Yunnan	77.9	92.3	94.6	97.6	100.0
宁夏 Ningxia	82.2	93.9	94.5	97.5	100.0	西藏 Xizang	43.4	65.3	94.8	99.0	100.0
新疆 Xinjiang	82.4	93.6	95.7	97.7	100.0	广东 Guangdong	66.4	89.8	89.9	97.2	100.0
河南 Henan	80.9	94.6	94.9	97.8	100.0	海南 Hainan	74.8	92.4	93.9	98.0	100.0
湖北 Hubei	74.9	92.3	93.1	97.5	100.0	广西 Guangxi	78.6	93.6	95.4	98.2	100.0
湖南 Hunan	76.6	92.9	94.0	97.8	100.0						

2.3 影响因素驱动效应分解

以 2011 年作为基准年,本研究对 2012—2021 年中国 31 个省份的奶牛存栏量变化进行驱动效应分解,各分解项在研究期间对各省和全国奶牛养殖结构变化的驱动效应见图 3。

技术效应中的分解项 A 和 B 分别表示技术在生产中的应用程度和技术的创新程度。就 2011—2021 年总体来说,技术的应用与创新都

对中国奶牛养殖总存栏量呈现明显的抑制作用,导致技术类因素呈现出最强的驱动效应,也是唯一负面的驱动效应。这种现象在贵州最为显著,技术效应对贵州奶牛存栏量的负面驱动效应达到了 202%。技术创新则是山西奶牛存栏量增长的主要障碍,其负面影响达到了 165%。然而,机械利用效率的提升显著促进了四川、宁夏和山西奶牛存栏量的增长,其正面驱动效应分别为 228%、152% 和



分解项释义见表2。
The descriptions of decomposition terms are shown in Table 2.

图3 各分解项对各省(a)和中国(b)奶牛养殖可持续发展的驱动效应

Fig. 3 Driving effects of decomposition terms on the sustainable development of dairy farming in each province (a) and in China (b)

119%。2016—2017年,技术效应的影响呈现明显波动,这一时期与奶牛存栏量 $\geq 5\,000$ 头农场的出现时间相吻合。直到2021年,技术应用与创新才同时对奶牛总存栏量表现出正面驱动效应,分别为7%和38%。

政策效应的分解项C和D可以表示政府投资强度和区域产业结构。总体而言,政府投资强度的提升对奶牛存栏量有积极影响,尤其是对于发达地

区,如北京和上海分别呈现出99%和45%的正面驱动效应。与之相反的是,农业产值的比重上升仅对黑龙江、甘肃和贵州等欠发达地区表现出积极影响,其驱动效应分别为34%、15%和13%。在国家层面上,政府投资强度的上升为奶牛养殖提供了正向的激励作用,其驱动效应的峰值出现在2015年,为88%,而值得考虑的负面效应出现在2021年,为54%。从全局看,政策效应通过提高奶牛养殖的投

资强度来促进行业可持续发展,但由于资源侵占对产业结构造成的负面影响,总体上正面的驱动效应并不显著,仅为 58%。

经济效应的分解项 E 、 F 和 G 分别表示人均购买力、牛奶需求差额和饲料需求差额,其中后 2 项指征产品与生产原料在上下游市场中的供需关系,反映了区域自给能力及对区域间产品市场流通的依赖程度。研究期间,区域人均生产总值对所有省份的奶牛存栏量都产生了积极影响,同样也是所有影响因素中驱动效应最强的。人均生产总值上升对欠发达地区奶牛存栏量的增量影响更加显著,例如贵州、宁夏和西藏,分别为 120%、108% 和 102%,总体高于发达地区,例如北京和上海,分别为 42% 和 44%。2017 年,经济因素总体表现出 105% 的增量影响,为研究期间的最高值。2011—2021 年经济因素总的增量驱动效应为 98%,其中饲料自给能力低导致了 153% 的负面驱动效应。在所有省份中,饲料需求差额对青海省的负面影响最大,达到了 231%,其次是重庆和湖北,分别为 113% 和 111%。牛奶需求差额对北京和重庆奶牛养殖业的发展起到了较为明显的积极作用,分别为 68% 和 55%,而对宁夏、安徽、山西等省份起到了抑制作用,其负面驱动效应分别为 149%、94% 和 73%。总的来说,牛奶供需失衡对国家奶牛养殖的发展呈现不利的影响,尽管这种影响相比于其他因素并不显著。

在行业相关的 4 类影响因素中,资源类因素对奶牛养殖业可持续发展的积极作用最强,达到了 180%。资源效应的分解项 H 、 I 和 J 分别表示土地利用结构、水土平衡状况和水资源总量。水土平衡状况对大多数地区奶牛存栏量的影响呈现减量驱动效应,而水资源总量则多呈现增量驱动效应,两者对同一区域的影响形成鲜明对比。该现象在北京出现了不同的状况,水土平衡状况与水资源总量对北京奶牛存栏量均表现出减量驱动效应,分别为 46% 和 34%。相似地,土地利用结构和饲料需求差额对同一省份的影响同样呈现出相反的效果,而这 2 个因素对安徽、广西和山西的奶牛存栏量均呈现积极的驱动效应。在国家层面上,土地利用结构和饲料需求差额直到 2021 年才对奶牛存栏量表现出一致的积极影响,分别为 12% 和 7%,此前二者均表现出相反的驱动效应。水土平衡状况和水资源总量在整个研究时期均表现出完全相反的驱动作用,

且同一年份 2 种影响因素的驱动效应强度基本保持一致,其峰值出现在 2014 年,效应大小分别为 146% 和 138%。

3 讨 论

3.1 技术因素的驱动效应

技术的创新和应用提高了生产系统的机械化程度和能源强度,这一现象同时反映了技术使用成本和应用场景需求的提升。这其中存在一些关键技术只有应用在一定规模以上的农场中才能体现出其对生产效益的积极作用,如自动挤奶系统、自动清粪系统等。有研究证明,牛群规模与生产管理技术应用的强度呈现极显著相关性^[1],大型奶牛场技术应用的能源效率与经济效益均处于优势地位^[32]。规模较小且分散的奶牛场因此存在技术应用的壁垒与效益提升的上限,使其无法在更进一步的交流与竞争中取得优势。在研究前期,小农户的生产模式在中国奶牛养殖中一直占据较大比例,因此对于当时的中国奶牛养殖业整体来说,与主流生产场景不匹配是技术因素导致行业可持续性退步的主要原因,也是奶牛养殖总量下降的决定性因素。此外,规模奶牛场在经当地农业、工商部门批准建造经营^[33],自觉接受食品安全监督管理的同时,也获得了更便捷的商业渠道,尤其是在信息和技术的沟通交流中往往能够获得更大的经营优势^[34]。这一过程是规范产业发展,调整养殖结构,促进奶牛养殖规模化与标准化必经的发展阶段。当行业整体进入更深层次的规模化发展阶段时,对于大型奶牛场来说,对产业外部条件具有针对性的生产技术能够得到更深入的创新和应用,而较小规模的奶牛场群体趋于稳定,随之出现更适配的技术投放市场。因此在研究周期的最后,技术效应对奶牛养殖业整体的可持续发展呈现积极影响,可以预见随着大型奶牛场与中小型奶牛场群的稳定发展,技术效应将进一步促进奶牛养殖业经济绩效与环境绩效的提升。

3.2 政策因素的驱动效应

奶业的发展为保障乳品供给、促进奶农增收做出了积极贡献,但其前期的无序扩张导致了产品供需结构不平衡、产业竞争力不强、消费培育不突出等一系列问题^[35]。在经济与社会经历了几十年的发展后,中国人民整体的饮食结构发生改变,奶制

品需求量上升,这种现象在发达地区尤为显著。然而,发达地区往往不以农业作为其主要的发展方向,周边配套的农业生产系统不能够满足当地人民的生活需要。此外,发达地区由于其更为密集的人口和工业生产,资源紧缺与环保问题的双重压力为农业生产的发展造成了严重阻碍^[36]。农业生产与食品安全紧密相连,是关乎区域稳定与安全的重大问题。为保障区域食品安全,当地政府会采取激励机制与补贴政策保证农业生产系统的服务性功能。当更多的政府资金投资于奶牛养殖业时,通常伴随减免税收、增加信贷、降低利率和资费等一系列措施促进产业发展。同时由于区域消费倾向与产品需求更为明确,区域政府可进一步规范奶业的生产建设,提升其产业竞争力。对于其他地区来说,区域资源有限的情况下,发展农业经济虽然会带来一定收益,但提升农业生产在区域产业结构中的地位会导致生产资料及社会服务等资源被挤占,继而阻碍其他行业的发展^[10]。因此只有在以农业生产为主的地区,农业产值占比的提升会进一步促进其自身的发展,形成良性循环,例如奶业产业发展带来的饲料需求与有机肥产出可以有效促进循环经济的发展,提升区域农业的经济弹性与生态效益。

3.3 经济因素的驱动效应

经济的繁荣提升了人民对健康福祉的追求,牛奶作为各年龄阶段人体多种营养物质的重要来源,其需求随着人均收入的提升而迅速增长,因此区域人均生产总值的增长对奶牛养殖业的可持续发展表现出强增量作用。然而人均牛奶消费水平有限,对于发达地区来说,牛奶需求的上升已进入相对缓和的阶段,其需求总量相对稳定,而主要需求的上涨集中在高品质产品。这种现象与发达地区对农业产业的高质量发展要求相契合,同时发达地区奶业总量发展空间有限,因此在发达地区周边的奶牛养殖场应通过更高水平的技术应用,提升系统可持续性与竞争力^[1]。具体来说,除了更密集的使用绿色生产技术,以提升生产效率与资源利用效率,还需要通过更高水平的系统管理,降低产品生产的碳排放与营养物质流失,以更严格的标准实现周边环境污染的控制甚至环境质量的提升^[37]。此外,动物福利的进一步提升也是此类奶牛场提升产品品质与附加效益的重要途径。饲料生产作为奶牛养殖业的上游产业,其产品产量与产业布局对奶牛养殖

业的发展产生重要影响。当区域饲料自给率低时,外部收购将增加奶牛场饲料使用的经济成本,同时引进外部生产的饲料会降低本区域牛奶生产的环境绩效,不利于区域循环经济的发展^[38]。受国际饲草市场行情影响,引进外部饲料增加了本地养殖系统生产的不确定性,不利于奶农对生产经营做出可靠的决策。因此,中国在加强优质奶源基地建设的路径中强调了饲草生产的重要性,并将优质饲草自给率作为奶源基地建设的重要考核指标。对于牛奶产量较高而市场消费能力不足的区域会出现牛奶产能过剩的情况,这种现象会抑制区域奶牛养殖业的发展。由于中国奶业整体结构在研究期间经历了重大调整,其产业链配套结构的发展具有一定的滞后性。虽然奶业整体产能仍存在较大的上升空间,但供应链中运输系统和奶制品生产加工与奶源基地的布局不匹配导致局部奶源供应过剩,整体表现为牛奶供应能力上升阻碍奶牛存栏量上升的结果。因此应在奶源基地推进乳制品加工生产和冷链运输的一体化发展,实现生产端与消费端的紧密连结。

3.4 资源因素的驱动效应

本研究中土地利用结构指饲草种植面积在农作物播种总面积中所占比例,该比例的上升意味着区域饲草自给能力的提高,对奶牛养殖业的可持续发展起到显著的推动作用。以内蒙古为例,通过采用本地化饲料生产策略,该区域2022年苜蓿价格降低了1800元/t,为当地奶牛养殖业带来了显著的经济收益^[39]。与此同时,耕地可以消纳养殖系统产出的有机肥,是循环经济中的重要组成部分^[40]。发展循环经济有助于降低奶牛场生产系统的环保压力,提升整体的生态效益。因此,推广粮改饲是中国推进奶业振兴的重要举措。此外,饲草种植面积占比的提升表明该区域配套资源投入的增加,可以表征区域奶牛养殖生产一体化发展的推进。水作为奶牛养殖的重要资源,在牛奶降温、牲畜饮用等生产环节均具有重要作用。区域水资源可利用总量的增加有助于缓解区域用水压力,同时有利于奶牛养殖生产的取水用水^[36]。目前奶牛场中多需要水泵取用水资源,水泵所需电力是规模奶牛场和牧场电力消耗的重要组成部分,因此水资源总量的增加还有助于降低奶牛场的能源投入与生产成本。水土状况指征该区域土地的生产力水平与粪污消纳能

力,可以通过影响饲草的产量和品质以及粪污利用影响奶牛养殖状况。此外,水土资源的平衡状况还可以表征区域环境气候,而过于干旱或潮湿的区域均不适宜奶牛养殖^[41]。尤其是对于大规模集约化奶牛养殖来说,潮湿的环境会影响奶牛散热,增加牛舍内通风降温的难度,加重夏季奶牛热应激,影响高产奶牛生产性能的发挥。因此,在水资源丰富而环境较为湿热的区域,可以通过适当缩小养殖规模,降低养殖密度,改善降温方式等提升牛舍的舒适性,缓解奶牛热应激,或通过养殖奶牛水牛等能够适应环境的特色品种降低区域特性对生产系统的影响。

4 研究结论与政策启示

虽然 2011—2021 年中国奶牛养殖业总存栏量略有下降,但养殖规模结构已发生重大调整。在区域奶业发展中,应依据区域经济、社会和环境条件,因地制宜地发展适宜规模养殖场和可持续生产模式。对于人口密度大、人均购买力强而自然资源稀缺的区域,如北京、上海、重庆等,应实施生产补贴政策 and 环保奖励机制,着重打造现代化的中小规模奶牛场,保证奶牛养殖业的服务性功能,满足本地人民对于牛奶产量和产品结构的需求;对于人口较少而水土资源丰富的区域,如黑龙江、内蒙古等,应扩大产业规模,同时加强饲草种植、乳制品加工和冷链运输等产业链各环节的配套发展,打造生产、销售、加工一体化的奶源基地,提升产业整体效益和竞争力;对于环境气候特殊且区域经济欠发达的地区,如广西、西藏、贵州等,应发展小而精的特色养殖产业和差异化产品,丰富产业供给侧结构,促进区域经济发展和人民增收。

在技术的应用和创新方面,应坚持大规模养殖场和中小规模养殖场群双轨并行的发展方向,不断提升大规模养殖的生产效率和经济效益,降低环境影响,同时研发适用于中小规模奶牛场的技术和设备,简化应用场景,降低使用成本,提升其机械化和标准化程度。针对区域供需失衡与局部产能过剩的情况,需要从国家层面同步推进奶源基地建设和现代化流通体系的发展,通过生产资料的流通和调配发挥全域整体布局的优势,实现产品生产与消费市场的有机结合,增强中国奶牛养殖业抵御国际市场风险的能力。

参考文献 References

- [1] Palma-Molina P, Hennessy T, O'Connor A H, Onakuse S, O'Leary N, Moran B, Shalloo L. Factors associated with intensity of technology adoption and with the adoption of 4 clusters of precision livestock farming technologies in Irish pasture-based dairy systems[J]. *Journal of Dairy Science*, 2023, 106(4): 2498-2509
- [2] Smid A C, Inberg P H J, de Jong S, Sinclair S, von Keyserlingk M A G, Weary D M, Barkema H W. Perspectives of Western Canadian dairy farmers on providing outdoor access for dairy cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2021, 104(9): 10158-10170
- [3] Siafakas S, Tsiplakou E, Kotsarinis M, Tsiboukas K, Zervas G. Identification of efficient dairy farms in Greece based on home grown feedstuffs, using the Data Envelopment Analysis method[J]. *Livestock Science*, 2019, 222: 14-20
- [4] Cui X H, Guo L Y, Li C H, Liu M Z, Wu G L, Jiang G M. The total biomass nitrogen reservoir and its potential of replacing chemical fertilizers in China [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 135: 110215
- [5] 田万强, 贾永宏, 肖红年, 杨海涛, 韩瑞华, 陈辉, 令幸幸. 新时期陕西省奶牛高质量发展的思路和建议[J]. *家畜生态学报*, 2024, 45(9): 85-90
Tian W Q, Jia Y H, Xiao H N, Yang H T, Han R H, Chen H, Ling X X. Strategies and suggestions for high-quality development of dairy cattle in Shaanxi Province in the new era[J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2024, 45(9): 85-90 (in Chinese)
- [6] Houssard C, Revéret J P, Maxime D, Pouliot Y, Margni M. Measuring shared value creation with eco-efficiency: Development of a multidimensional value framework for the dairy industry[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 374: 133840
- [7] Bocken N M P, Short S W, Rana P, Evans S. A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 65: 42-56
- [8] Ling M H, Yang Y Q, Li S, Lv C M. Evolution and driving forces of water use structures in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 427: 139263
- [9] Tajbakhsh A, Hassini E. Evaluating sustainability performance in fossil-fuel power plants using a two-stage data envelopment analysis [J]. *Energy Economics*, 2018, 74: 154-178
- [10] Tan X L, Chen W, Cao H M, Li Q, Zhang S. Identifying spatiotemporal characteristics and driving factors of industrial land use morphology in China [J]. *Expert Systems with Applications*, 2024, 235: 121231
- [11] Mao D H, He X Y, Wang Z M, Tian Y L, Xiang H X, Yu H, Man W D, Jia M M, Ren C Y, Zheng H F. Diverse policies leading to contrasting impacts on land cover and ecosystem services in NorthEast China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 240: 117961
- [12] Khanh Chi N T. Driving factors for green innovation in agricultural production: An empirical study in an emerging economy[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 368: 132965
- [13] Okorie D I, Lin B Q. Emissions in agricultural-based developing economies:

- A case of Nigeria[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 337: 130570
- [14] 生态环境部. 关于印发《农业农村污染治理攻坚战行动方案(2021—2025年)》的通知[EB/OL]. [2025-01-25]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202201/t20220129_968575.html
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China.
- Notice on printing and distributing the "Action plan for the battle against agricultural and rural pollution (2021-2025)" [EB/OL]. [2025-01-25]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202201/t20220129_968575.html (in Chinese)
- [15] Wang Y B, Zhen J J. Drivers and strategic options for renewable energy development in China: LMDI-elasticity analysis perspective based on photovoltaic and wind energy[J]. *Energy*, 2024, 309: 133078
- [16] Thomassen M A, Dolman M A, van Calker K J, de Boer I J M. Relating life cycle assessment indicators to gross value added for Dutch dairy farms[J]. *Ecological Economics*, 2009, 68(8/9): 2278-2284
- [17] 国家统计局. 国家数据[EB/OL]. [2025-01-25]. <https://data.stats.gov.cn/>
- National Bureau of Statistics. National data [EB/OL]. [2025-01-25]. <https://data.stats.gov.cn/> (in Chinese)
- [18] Zhang X, Cheng S, Zhang Y F, Wang J, Wang S Y. An attention-PCA based forecast combination approach to crude oil price[J]. *Expert Systems with Applications*, 2024, 240: 122463
- [19] Zhao J, Duan J J, Han Y P, Gao F. Correlation between carbon emissions and water consumption in different industries in China: Spatial and temporal distribution characteristics and driving factors [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 427: 139196
- [20] Wu T. Quantifying coastal flood vulnerability for climate adaptation policy using principal component analysis[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 129: 108006
- [21] Ang B W, Zhang F Q. A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies[J]. *Energy*, 2000, 25(12): 1149-1176
- [22] Ang B W. LMDI decomposition approach: A guide for implementation[J]. *Energy Policy*, 2015, 86: 233-238
- [23] Qiao D W, Luo Y, Chu Y Y, Zhang H, Zhao F. Decomposition of agriculture-related non-CO₂ greenhouse gas emissions in Chengdu: 1995 - 2020[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 434: 140125
- [24] Ang B W. Decomposition analysis for policymaking in energy: Which is the preferred method?[J]. *Energy Policy*, 2004, 32(9): 1131-1139
- [25] Liu D R, Deng Q L, Ren Z G, Zhou Z, Song Z, Huang J H, Hu R B. Variation trends and principal component analysis of nitrogen oxide emissions from motor vehicles in Wuhan City from 2012 to 2017[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 704: 134987
- [26] Bartlett M S. Tests of significance in factor analysis[J]. *British Journal of Statistical Psychology*, 1950, 3(2): 77-85
- [27] 陈佩. 主成分分析法研究及其在特征提取中的应用[D]. 西安: 陕西师范大学, 2014
- Chen P. Research on principal component analysis and its application in feature extraction[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2014 (in Chinese)
- [28] Voukantsis D, Karatzas K, Kukkonen J, Räsänen T, Karppinen A, Kolehmainen M. Intercomparison of air quality data using principal component analysis, and forecasting of PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations using artificial neural networks, in Thessaloniki and Helsinki[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(7): 1266-1276
- [29] Liu J W, Kang H, Tao W D, Li H Y, He D, Ma L X, Tang H J, Wu S Q, Yang K X, Li X X. A spatial distribution - Principal component analysis (SD-PCA) model to assess pollution of heavy metals in soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 859: 160112
- [30] Yang B, Zhang Z, Wu H. Detection and attribution of changes in agricultural eco-efficiency within rapid urbanized areas: A case study in the Urban agglomeration in the middle Reaches of Yangtze River, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 144: 109533
- [31] Ang B W. The LMDI approach to decomposition analysis: A practical guide [J]. *Energy Policy*, 2005, 33(7): 867-871
- [32] Moerkerken A, Duijndam S, Blasch J, van Beukering P, Smit A. Determinants of energy efficiency in the Dutch dairy sector: Dilemmas for sustainability[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 293: 126095
- [33] 赵玥. 规模化奶牛养殖场粪污治理机制对治理效率的影响研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023
- Zhao Y. Study on the influence of manure treatment mechanism on treatment efficiency in large-scale dairy farms[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023 (in Chinese)
- [34] Wu J X, Xu H, Tang K. Industrial agglomeration, CO₂ emissions and regional development programs: A decomposition analysis based on 286 Chinese cities[J]. *Energy*, 2021, 225: 120239
- [35] Yan B J, Li Y X, Qin Y F, Yan J J, Shi W J. Spatial - temporal analysis of the comparative advantages of dairy farming: Taking 18 provinces or municipalities in China as an example[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 180: 105846
- [36] He Y H, Wu L Y, Liang Y Z, Zheng Y H, Zhang L. Spatial suitability between water supply pressure and waterworks water supply capacity in the Guangdong-Hong Kong-Macau Greater Bay Area: Spatial-temporal evolution pattern, driving mechanism and Implications [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 434: 140317
- [37] McDowell R W, MacIntosh K A, Depree C. Linking the uptake of best management practices on dairy farms to catchment water quality improvement over a 20-year period[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 895: 164963
- [38] Dutreuil M, Wattiaux M, Hardie C A, Cabrera V E. Feeding strategies and manure management for cost-effective mitigation of greenhouse gas emissions from dairy farms in Wisconsin[J]. *Journal of Dairy Science*, 2014, 97(9): 5904-5917
- [39] Daneshi A, Esmaili-Sari A, Daneshi M, Baumann H. Greenhouse gas emissions of packaged fluid milk production in Tehran[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 80: 150-158
- [40] Xue Y N, Luan W X, Wang H, Yang Y J. Environmental and economic benefits of carbon emission reduction in animal husbandry via the circular

- economy: Case study of pig farming in Liaoning, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 238: 117968
- [41] Hristov A N, Degaetano A T, Rotz C A, Hoberg E, Skinner R H, Felix T, Li H, Patterson P H, Roth G, Hall M, Ott T L, Baumgard L H, Staniar W, Hulet R M, Dell C J, Brito A F, Hollinger D Y. Climate change effects on livestock in the Northeast US and strategies for adaptation[J]. *Climatic Change*, 2018, 146(1): 33-45
- 责任编辑: 刘迎春



第一作者简介: 赵婉莹, 博士, 助理研究员, 主要从事畜禽养殖工艺与环境研究。获 2018—2019 年中国农业大学博士二等学业奖学金、2020—2021 年中国农业大学博士一等学业奖学金。参与国家现代农业产业技术体系-奶牛(CARS-36)项目, 在 *Livestock science*、*Animals*、《农业工程学报》《中国农业大学学报》等国内外学术刊物上发表论文近 10 篇, 发表国际学术会议论文 1 篇, 并获得“优秀论文奖”, 出版专著 1 部, 参与制定国家标准 1 项。坚持与行业内一线设计企业、养殖生产企业联系, 深入沟通交流学习。



通讯作者简介: 施正香, 博士, 教授, 博士生导师。国家奶牛产业技术体系岗位科学家, 中国农业工程学会畜牧工程分会副理事长, 中国畜牧兽医学会家畜环境卫生学分会副理事长, 农业农村部畜牧业科技(环境)咨询专家组成员。主要研究方向为畜牧工程、畜牧环境、动物福利。主持或参加了国家科技攻关、科技支撑项目、重要技术标准专项、公益性行业(农业)专项、重点研发计划项目等重大课题 20 余项。获省部级科技进步一等奖 4 项、二等奖 5 项。在 *Biosystems Engineering*、*Animals*、*Computers and Electronics in Agriculture*、《农业工程学报》《中国农业大学学报》等国内外学术刊物上发表论文 150 余篇, 出版专著及教材 22 部, 授权发明专利 28 项、实用新型专利 30 项, 制订国家及行业标准 7 项。坚持在学术领域不断探索创新, 同时长期深入产业一线, 开展技术培训和现场指导。