

反刍动物营养-健康-减排协同调控技术 研究进展

吴泽鹏, 吴炜俊*, 李颂群, 李冬梅, 范存斐, 孙克龙, 陈绮萍, 张婉莹, 刘帆, 林思怡

(广州风行乳业股份有限公司, 广东广州 510610)

摘要: 在全球气候变暖及国内奶业振兴战略的双重背景下, 兼顾高产高效与绿色低碳的反刍动物养殖模式, 已成为行业可持续发展的核心研究课题。本文以智能营养调控与绿色减排协同发展为核心, 从营养代谢、微生物生态互作、应激调控三个层面, 深入阐释反刍动物营养、机体健康与污染物减排的协同作用机制。文章系统总结了物联网传感、大数据机器学习、智能饲喂设备等智慧技术在精准营养管控中的应用现状, 剖析了相关技术闭环管理的优势与现存短板, 并重点综述低碳养殖理念下的技术创新成果, 涵盖新型饲料资源开发、环保添加剂施用、低排放日粮优化设计等内容, 同时梳理了各类技术的产业落地应用成效。研究明确了当前领域存在四大核心问题: 营养-健康-减排协同机理研究较为零散; 智慧养殖技术规模化适配性不足; 减排技术经济效益与长期稳定性欠佳; 行业统一的一体化评价标准尚未完善。针对以上瓶颈, 本文从多组学技术深化应用、低成本智能设备研发、差异化规模养殖技术体系构建、综合减排评价机制搭建等方面展望未来研究与产业化方向, 旨在为我国反刍动物养殖业智能化、健康化、绿色化转型升级提供科学依据与理论支撑。

关键词: 反刍动物; 智能营养调控; 绿色减排; 协同增效机制; 健康养殖

文章编号: 1671-4393(2026)06-0030-10

DOI:10.12377/1671-4393.26.06.04

Research Progress on Synergistic Regulation Technology of Nutrition, Health and Emission Reduction in Ruminants

WU Zepeng, WU Weijun*, LI Songqun, LI Dongmei, FAN Cunfei, SUN Kelong,
CHEN Qiping, ZHANG Wanying, LIU Fan, LIN Siyi
(Guangzhou Fengxing Dairy Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 510610)

作者简介: 吴泽鹏 (1991-), 男, 广东揭阳人, 本科, 助理工程师, 研究方向为食品质量安全;
李颂群 (1977-), 女, 广东梅州人, 本科, 工程师, 研究方向为乳品质量管控;
李冬梅 (1985-), 女, 福建漳州人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为乳制品质量管理和技术改进;
范存斐 (1986-), 女, 山西大同人, 硕士, 助理工程师, 研究方向为乳品检测分析;
孙克龙 (1983-), 男, 黑龙江肇东人, 本科, 助理工程师, 研究方向为食品质量安全;
陈绮萍 (1992-), 女, 广东广州人, 本科, 助理工程师, 研究方向为食品质量安全;
张婉莹 (1992-), 女, 广东云浮人, 本科, 助理工程师, 研究方向为食品质量安全;
刘帆 (1987-), 男, 湖南常德人, 本科, 助理工程师, 研究方向为乳品生产质量管理;
林思怡 (1994-), 女, 广东肇庆人, 本科, 助理工程师, 研究方向为食品质量安全。

***通信作者:** 吴炜俊 (1995-), 男, 广东江门人, 硕士, 工程师, 研究方向为食品加工与安全。

Abstract: Against the dual backdrop of global warming and China's strategy for revitalizing the dairy industry, ruminant production systems that balance high productivity, high efficiency and low carbon footprint have emerged as a core research topic for the sustainable development of the sector. Centered on the synergistic advancement of intelligent nutritional regulation and green emission reduction, this paper elaborates on the synergistic mechanisms linking ruminant nutrition, animal health and pollutant mitigation from three dimensions: nutritional metabolism, microecological interaction and stress regulation. It systematically reviews the current applications of smart technologies—including Internet of Things (IoT) sensors, big data and machine learning, and intelligent feeding equipment—in precision nutritional management, and analyzes the merits and inherent limitations of closed-loop management enabled by these technologies. This work further highlights technological innovations under the low-carbon breeding framework, such as the exploitation of novel feed resources, application of eco-friendly additives and formulation of low-emission diets, alongside their practical industrial performance. Four pivotal challenges prevailing in this field are identified: fragmented research on the synergistic nutrition-health-emission reduction mechanisms; poor scalability of smart breeding technologies; unsatisfactory economic viability and long-term stability of emission abatement techniques; and the absence of unified integrated evaluation criteria for the industry. To address the above bottlenecks, future research priorities and industrialization pathways are prospected, covering in-depth deployment of multi-omics technologies, development of low-cost intelligent facilities, establishment of differentiated technical frameworks for farms of varying scales, and construction of comprehensive emission assessment systems. This study intends to provide scientific evidence and theoretical support for the intelligent, healthy and green transformation of China's ruminant livestock industry.

Keywords: ruminant; intelligent nutritional regulation; green emission reduction; synergistic enhancement mechanism; healthy farming

近年来,国内奶业对高质量发展的重视程度越来越高,《奶业振兴行动方案(2019—2025年)》也把提升乳制品质量与安全供给能力定为核心目标,这给奶业转型升级指明了方向。不过从产业实际来看,以奶牛为主体的传统反刍动物养殖模式,眼下正面临着高产、健康、环保三个方面难以兼顾的困境。一方面,追求高产的精料日粮在牧场里普遍使用,导致饲料投入成本上涨并诱发亚急性瘤胃酸中毒(SARA)、酮病这些代谢病,这对牛群健康和福利造成严重影响^[1]。另一方面,反刍动物消化过程中天然就会产生甲烷(CH₄)和氮代谢产物,这类排放使得反刍动物养殖成了农业温室气体和环境污染的重要来源,对全球气候和生态都有不小的影响。据最新研究评估,畜牧业对全球温室气体排

放的贡献率在14.5%~16.5%之间,其中反刍动物肠道CH₄排放占比相当突出^[2]。与此同时,日粮里氮(N)、磷(P)等养分的利用效率并不高,大量没被利用的N、P随粪尿排出去,给水体和土壤带来了潜在风险,进一步扩大了养殖的环境负担^[3]。可以说,如何在保住产奶量的同时,同步保障奶牛健康饲养、削减养殖污染物排放,已经成了国内外奶业共同关注、亟需化解的核心痛点。

正是基于这样的产业需求,智能营养调控与绿色减排协同的理念逐步形成。这套方案的做法是把精准营养、信息计算技术和环境科学这几个领域的成果整合到一起,推动养殖模式由单一环节局部改良,转变为全链条系统性协同优化。具体来说,就是借助智慧养殖技术,实时采集牛只个体和群体的

生理指标、行为特征、饲养环境等参数，再用大数据分析和机器学习建模的方法，动态调整营养供给方案。这样做既能满足奶牛生产和健康的基本需要，又能有目的地调控瘤胃和肠道微生物的代谢走向，最终在营养利用效率、牛群健康水平、CH₄、N、P排放削减这三个维度上实现协同改善。

立足于营养代谢、奶牛健康与养殖减排协同作用机理，本文系统整理精准营养调控场景中智慧养殖技术的发展现状，解析以生态减排为发展导向的新型营养技术研发思路，探究差异化养殖规模对应的技术实践方案。综合前文分析，明确现阶段该研究领域存在的空白与关键性技术难题，匹配国内奶产业发展现实需求，对未来重点研究内容与产业化应用前景进行展望，旨在为奶业智能化、绿色可持续发展夯实理论基础。

1 反刍动物营养代谢与健康-减排协同机理

在反刍动物体内，宿主微生物构成一套精密共生系统；畜禽泌乳生长表现、生理健康程度与甲烷、氨氮等温室及污染气体的生成量相互制约、密切联系，瘤胃作为核心消化脏器，起到连通各类代谢过程的枢纽作用。伴随宏基因组学、代谢组学等多组学技术近年的普及运用，学术界对于宿主微生物复杂互作网络的解析，不再局限于外在表征观察，而是深入至分子及菌群调控内在机理。

1.1 营养素代谢与瘤胃微生态的互作机制

奶牛生产表现与养殖尾气排放水平，主要受能量、蛋白质两大营养素制约。不同碳水化合物搭配比例会重塑瘤胃内挥发性脂肪酸分布，以此改变泌乳效率与CH₄产生总量。提升日粮精料占比虽可推动丙酸积累、抑制甲烷生成，但若精料饲喂水平过高，奶牛极易患上亚急性瘤胃酸中毒，不仅会破坏瘤胃上皮屏障功能，严重时还会诱发全身性炎症病变^[4]。SARA发作的时候，瘤胃内脂多糖（LPS）浓度上升，不光损害牛的健康，还可能通过改变氢（H₂）的代谢走向，间接影响产CH₄古菌的活性^[4, 5]。Wallace等^[6]用宏基因组学方法做过研究，发现高产CH₄奶牛瘤胃微

生物群落里，纤维素降解和H₂生成相关通路的基因丰度明显更高，低产CH₄奶牛则是富集了能利用H₂合成丙酸或琥珀酸的代谢通路。

蛋白质代谢跟氮排放的关系最为密切，日粮粗蛋白（CP）水平一旦超出瘤胃微生物合成菌体蛋白（MCP）的需求，瘤胃里就会堆积大量NH₃-N，吸收以后经肝脏转成尿素，主要通过尿液排出，这样既浪费了氮素，又加重了污染^[6]。在这个氮代谢过程的基础上，多组学整合分析又发现，瘤胃里某些氨基酸降解菌群的丰度跟尿氮排泄量存在显著正相关^[7]。Wallace等^[8]通过宏基因组与代谢组学联合研究指出，把日粮氨基酸配比优化一下——特别是补充瘤胃保护性赖氨酸和蛋氨酸，乳蛋白合成效率能提高，瘤胃内跟氨基酸脱氨作用有关的微生物功能基因表达也会明显下降，增产和减排就能同时实现。脂肪类物质——特别是富含多不饱和脂肪酸（PUFA），它既是重要的能量来源，也能作为比较高效的CH₄减排剂，机理包括直接抑制产CH₄古菌活性、在生物氢化过程中充当竞争性H₂受体消耗H₂，以及调节瘤胃微生物群落结构^[9]。

1.2 营养应激对健康与环境排放的联动影响

营养应激在规模化奶牛养殖中很常见，尤其是围产期负能量平衡（NEB）和热应激（HS），它带来的危害不只是生产性能下降，跟环境排放也有密切关系。

泌乳启动叠加干奶转产阶段采食水平急剧下滑，会让围产期奶牛长期处于能量负平衡状态（NEB），由此诱发酮病等多种代谢综合征。转录组学和蛋白质组学层面的研究显示，NEB状态下肝脏脂肪酸氧化和糖异生通路会被激活，同时氧化应激和炎症反应也会加剧^[10, 11]，这种全身性的代谢紊乱还会反过来影响肠道微生物群落的结构。Patra^[12]的研究发现，酮病奶牛粪便微生物多样性下降了，潜在致病菌增多，而丁酸等有益代谢产物的含量反而减少，这样的变化不仅会削弱肠道屏障、加重炎症，还可能因为消化功能出了问题而增加N、P排泄量。

热应激的情况又不一样，它通过“下丘脑-垂体-肾上腺”轴的调控，再加上对消化道生理功能的直接干扰，给奶牛健康和排放都带来负面影响。HS会抑制奶牛采食，动物依靠加快散热呼吸维持正常体温，这一过程会加剧能量损耗，也会造成二氧化碳排放增多。Koch等^[13]在配对饲喂环境仓试验中发现，HS会直接改变奶牛空肠紧密连接蛋白的表达，引起巨噬细胞样免疫细胞大量涌入黏膜下层，促进LPS等内毒素跨过屏障进入循环系统，触发系统性炎症。热应激还会扰动奶牛瘤胃微生态平衡，大幅降低纤维分解菌数量、提高淀粉分解菌占比，引发瘤胃酸度下降，饲料消化利用率有所降低，进一步拉高单位产出的CH₄与N排放水平^[14]。

1.3 代谢性疾病与环境排放的内在关联

SARA、酮病、真胃变位这类常见代谢病，本质就是营养代谢失衡发展到一定程度的表现，它们跟环境排放之间的关联也在被逐步解析。SARA会打乱瘤胃发酵与H₂代谢平衡，发病初期丙酸增多、CH₄小幅减少；长期消化失调会持续降低饲料利用率，致使奶牛全周期CH₄排放强度不降反增^[15]，酸中毒引起的腹泻还会让粪便里未消化的养分（尤其是N、P）排泄量增加。酮病奶牛因为能量摄入严重不足，机体不得不分解脂肪和蛋白质来供能，乳品质受影响不说，蛋白质分解代谢加强还会提升尿氮排泄量。Li等^[16]通过血浆代谢组学和氨基酸谱分析，找到了跟奶牛氮利用效率有关的代谢物特征，其中酮病相关的代谢紊乱（比如氨基酸代谢失衡）是影响氮利用效率的关键因素。以上研究充分证明，优化奶牛饲养健康管理可作为减排途径，机体代谢失衡会造成额外的养殖污染排放。

2 智慧养殖技术在精准营养中的应用进展

传统奶牛养殖主要靠群体均值和饲养员的经验来管饲喂，这种办法很难满足现代畜牧业对个体化、精细化管理的要求。智慧养殖技术搭建了一套“数据采集-模型预测-精准执行”的闭环管理体系，为个体精准营养供给的落地提供了技术上的保障。

2.1 基于物联网传感器的多维数据实时感知

开展奶牛精准营养调控工作，首要前提是获取持续、精准的单头奶牛个体数据，而物联网（IoT）传感设备是完成这类信息采集的核心载体。

在个体行为与生理监测方面，安装三轴加速度计和GPS模块的颈圈或耳标传感器，能实时记录奶牛采食、反刍、站立、行走等行为的时间和强度，这些数据是判断牛只健康状况和饲料消化效果的重要依据^[17, 18]。Maman等^[19]研究证实，采食和反刍时间只要有细微变化，就能提前24~48 h预警SARA或酮病的发生。植入式瘤胃探针则能持续监测瘤胃内的pH值、温度和氧化还原电位，给消化紊乱的诊断提供直接数据^[20]。饲料成分与采食量的监测上，智能饲喂站可以精确记录每头牛的采食量、采食次数和速度，再配合近红外光谱（NIRS）、高光谱成像等快速检测手段，能对全混合日粮（TMR）、青贮等原料的水分、蛋白质、纤维等组分进行实时在线分析，保障日粮配方落实到位^[4]。环境参数监测这块，牛舍里布置的传感器可以实时采集温湿度、空气流速、氨气浓度等数据，通过计算温湿度指数（THI），给热应激预警和环境调控提供依据。

2.2 基于大数据与机器学习的动态预测与优化

在积累充足监测数据集后，机器学习（ML）和人工智能（AI）算法便可为预测模型的构建提供数据支撑。

动态营养需求预测方面，传统的营养模型（如NRC、CNCPS）是基于群体试验数据建出来的，反映不了个体差异。当下业内研究的核心方向，是融合ML算法，整合奶牛泌乳时期、胎次、泌乳性能、体况评分、行为特征乃至基因组数据，动态测算单头奶牛的能量、蛋白与氨基酸营养需求量。Li等^[21]用随机森林（RFR）模型做预测，对奶牛个体蛋白质需求的准确率（R²）比传统线性模型提高了15%以上。He等^[22]则用深度学习模型分析奶牛的行为和生理数据流，能预测未来24 h的能量平衡状态，给早期干预留出了时间窗口。日粮配方优化与减排潜力评估方面，有了精准的个体需求预测，AI模型就

能快速优化日粮配方，在保证营养、控制成本的同时把CH₄和N排放降到最低。这类模型可以把不同饲料原料的营养参数、市场价格以及环境足迹（碳足迹、氮足迹）数据整合起来，做多目标优化^[23, 24]。例如，模型能在保证氨基酸平衡的前提下，优先挑选利用率高、性价比好的蛋白源组合，尽量把日粮粗蛋白水平降下来，N排放也就随之减少了^[25]。

2.3 智能饲喂设备的精准调控执行

仅依靠预测模型输出的营养需求参数远远不足，必须配套智能自动化设备完成饲喂落地，以此构建全流程一体化管理闭环。

智能饲喂系统方面，自动饲喂系统（AFS）按照决策系统给出的指令，能给不同分组甚至个体奶牛精确配制和投喂日粮。一些比较先进的系统还配了选择性补饲站，能根据个体产奶量或代谢状况额外补充高能量物质或特定营养添加剂^[26]，这样做可以提升饲喂精准度，人工成本和饲料浪费也能明显降下来^[27]。集成化决策支持平台方面，把传感器数据、模型预测结果和设备运行状态整合到一个可视化管理平台上，是智慧养殖技术真正落地的关键。平台能自动推送疾病风险预警、发情提醒等信息，还能输出饲喂调整建议和效益分析报告，帮助管理人员做决策^[28]。行业现阶段核心难点为搭建开放可拓展、数据互通性强的综合平台，消除各类品牌设备形成的数据孤岛问题。

3 绿色减排导向的营养技术创新与实践

在精准预判营养需求的前提下，借助创新性营养调控技术直接干预瘤胃发酵过程及N、P代谢路径，是达成源头减排目标的最有效路径。在精准掌握营养需求的前提下，通过创新性的营养调控手段直接干预瘤胃发酵和N、P代谢过程，是实现源头减排最有效的途径。

3.1 环保型饲料添加剂的研发进展及应用实践

饲料添加剂是做精准减排的核心工具，近几年学界和产业界的研究重点都放在了开发高效、安全、经济性好的天然或合成化合物上。

CH₄抑制剂方面，3-硝基氧丙醇（3-NOP）是目前研究得最系统、减排效果也最稳定的CH₄抑制剂之一。它能特异性地抑制产CH₄过程最后一步的关键酶——甲基辅酶M还原酶。研究发现，在常规奶牛日粮里添加3-NOP，不影响产奶性能和乳品质的情况下，能把肠道CH₄排放量持续降低20%~35%^[29]。紫杉状海门冬等特定红藻在短期试验中的CH₄减排效率甚至能超过80%，不过长期使用的安全性和效果稳定性还需要进一步验证^[30]。植物提取物方面，单宁、皂苷、植物精油这些植物次级代谢产物因为天然安全，受到了不少关注。缩合单宁能和蛋白质结合，降低蛋白质在瘤胃里的降解效率，减少氨态氮生成，对产CH₄菌和原虫也有抑制作用^[31]。植物精油（如牛至油、肉桂醛）的作用机理主要是破坏微生物细胞膜完整性、调控瘤胃发酵过程^[32]。Bach等^[33]的研究显示，日粮中添加复合植物精油制剂，奶牛产奶量能提高，CH₄排放量也能显著降低。微生物制剂方面，益生菌和益生元通过调节瘤胃和肠道菌群结构，提高饲料消化利用率，改善牛的健康状况，间接达到减排效果^[34, 35]。比如某些产丙酸菌株能竞争性地利用H₂，减少合成CH₄所需的底物^[36]；长期饲喂某复合益生菌制剂，奶牛氮素利用率明显提升，粪便中CH₄散发量也有所下降^[37]。

3.2 氨基酸平衡调控与低排放日粮配方构建

围绕全混合日粮配方开展整体性优化设计，是同步实现精准营养供给与养殖减排目标的核心手段。

氨基酸平衡与低蛋白日粮配置是削减N排放的有效办法，核心思路就是根据奶牛理想氨基酸模型，在降低日粮粗蛋白水平的同时，精准补充限制性氨基酸（主要是瘤胃保护性蛋氨酸和赖氨酸），保证可代谢蛋白的供给充足。Ren等^[38]研究证实，日粮粗蛋白从17.5%降到16.0%，同步补充瘤胃保护性氨基酸，产奶量和乳蛋白率不降反升，总N排放量显著降低，氨挥发和氮淋溶的风险也有效降低。非常规饲料资源的高值化利用方面，用玉米干全酒糟（DDGS）、甜菜粕、棉籽等加工副产物替代部分玉

米、豆粕，饲料成本能降下来，日粮纤维和脂肪组成也会发生变化，进而影响CH₄排放——比如用高脂肪含量的DDGS替代玉米，CH₄产量就能有效降低^[39]。针对秸秆等粗纤维原料开展发酵、酶解等生物预处理，可改善饲料在瘤胃内的消化吸收率，实现单位养殖产品甲烷排放强度的削减。

3.3 “营养-减排-品质”协同优化路径

绿色减排最终的目标是在不损害甚至提升产品经济价值的前提下实现环境效益的提升。相关研究显示多项减排技术可正向调节乳品质，补充CLA或高Omega-3亚麻籽，可减少CH₄产出并提升牛乳功能性脂肪酸含量，增强乳品市场竞争力^[40]；通过氨基酸平衡的优化，可以提升乳蛋白的合成效率，乳制品的加工性能和经济价值也能直接改善。后续开展各类营养技术效果评估时，亟需构建一套多维度综合评判体系，将减排成效、养殖生产收益、乳品质提升幅度以及投入产出效益纳入统一考量范围。

4 不同规模养殖场技术适配性与应用案例

智能营养和绿色减排技术要落地推广，需要衡量不同规模牧场的实际条件——资金实力、技术储备、管理模式都不一样，技术路径也得差异化。

4.1 规模化牧场方案

大型规模化牧场（一般存栏量>1 000头）是新技术落地的主要载体，依托充足资金与精细化管理，可优先落地各类先进养殖技术。这类牧场的技术方案侧重全套集成化的智慧牧场解决方案，涵盖全场牛只个体监测传感器、自动化TMR制备与投喂系统、环境智能调控设备，以及统一的数据管理和决策支持平台^[41]。比如把自动饲喂系统（AFM）和自动挤奶系统（AMR）集成起来，就能根据每头牛的产奶数据和健康状况动态调整饲喂策略，把饲料转化效率（FCR）提到最高。目前国内外不少大型乳企的示范牧场已经部署了此类系统，智能饲喂能让饲料浪费率下降3%~5%，人工成本节约50%以上，能耗也降了近30%^[42]；精准营养管理可以把牛群繁殖效率提高5%，临床乳房炎发生率降低30%^[43]。

减排方面，这类牧场更倾向于选择效果稳定、可量化的技术，有的还能通过参与碳交易市场把环境效益变成经济收益；示范牧场结合低蛋白日粮和CH₄抑制剂的使用，单位牛奶碳足迹能降低10%~15%^[44]。但这套技术落地模式同样存在不少现实阻碍：前期硬件购置成本偏高，不同厂商设备的数据难以互通整合，整套体系还需要配备专业技术管理人员长期维护。

4.2 中小型牧场方案

中小型牧场（存栏量50~500头）在国内奶牛养殖中占有相当比重，但技术受成本和人才两方面限制，推广重点应该放在低成本、高回报、容易上手的模块化技术上。具体操作上，可以先从关键环节入手，优先部署投资回报率最高的单项技术——比如基于颈圈传感器的发情监测与健康预警系统，或者用在TMR质量管控上的手持式近红外光谱（NIRS）分析仪。国产平价物联网设备与SaaS云端管理平台近年逐步普及，有效降低中小型牧场数字化改造门槛，拓宽了养殖场的技术选择空间^[45~47]。有些地方性的推广项目已经跑通了“传感器+云平台+专家远程指导”的服务模式：牧场主花不多的钱买传感器，手机APP上就能看到牛只健康预警和基础饲喂建议。相关实测数据证明，单靠奶牛健康智能预警系统，就能把重症疾病对应的医治开支削减近四成，同时还能减少奶牛非计划淘汰现象^[48]。减排方面，重点推广低成本的营养策略就好——利用当地农副产品、配置氨基酸平衡日粮、筛选性价比好的复合植物提取物添加剂，这些路径中小型牧场更容易接受和实施^[49]。各类智能化技术推广依旧面临多重阻碍，养殖户专业认知不足、缺乏稳定售后技术指导，难以充分挖掘数据蕴含的生产价值；市面上大量低成本传感设备，在检测准确度与耐用程度上还有较大改进空间。

无论牧场存栏规模大小，智能化技术落地过程中存在诸多共性痛点。多数智能装备长期使用能够创造经济收益，但高昂的前期投入成为牧场落地的最大阻碍，这就需要政府补贴、涉农金融产品等

多方政策协同缓解；设备运维实操难题，各类复杂智能系统离不开专业操作人员，而行业普遍存在技术人员缺口，这就要求相关设备简化操作流程，配套稳定完善的售后技术服务；最后是养殖数据的价值落地问题，采集的数据最终应当服务于生产决策，但现阶段多数牧场仅完成数据存储，并未开展深度分析。如何将海量监测数据转化为可落地的饲养调整方案，也会成为后续技术服务企业重点发力的方向。

5 研究缺口与挑战

智能营养与绿色减排协同领域虽然取得了不少进展，但深层次的问题仍然存在，需要进一步突破。

协同机理研究还比较碎片化，系统性的调控网络未清晰。目前大多数研究关注的是单一营养策略对某一类排放物（比如CH₄、NH₃-N）的影响，对“营养-微生物-宿主-健康-排放”这样一个复杂系统的内在联动机制还缺乏整体认识。以CH₄抑制剂为例，其抑制产CH₄菌后对纤维降解菌群、饲粮消化率及奶牛能量代谢的连锁反应尚不明确；各类营养干预措施间的协同、拮抗互作机制研究不足，机理认知碎片化造成减排效果不稳定、可预测性差，制约精准复合调控方案的开发。

智慧养殖技术落地存在显著壁垒，产品与产业实际需求存在脱节。高端传感器、自动饲喂设备多依赖进口，采购、维护成本高昂，设备适配性较差，难以契合国内牧场养殖与管理模式^[50]。国产设备虽然价格有优势，但传感精度、数据稳定性和使用寿命这些关键指标上跟进口产品还是有差距。更要紧的是，多数技术侧重于数据展示而不是决策支撑，模型和数据体系太复杂，一线管理人员看不懂也用不好，技术应用浮在表面，未能真正融进生产流程的价值转化。

减排技术的经济性和长期效果需要提升。很多减排技术已经被证明有效，但要大规模推广还存在困难。以3-NOP为例，其减排效果显著，但其成本

也高，在没有碳价支撑或政策补贴的情况下，牧场缺乏应用的经济动力。植物提取物等天然添加剂成本相对低一些，但效果容易波动、稳定性差，长期饲喂会不会有效果下降或微生物群落产生抗性等问题，研究仍旧欠缺^[51]。现有研究多基于理想试验环境开展，技术在复杂商业化牧场中的实际减排效果与经济效益，有待更多大规模、长周期田间试验进一步验证。

标准体系还不完善，缺乏统一的技术评价和应用规范。目前各类智能设备的数据接口、通信协议没有统一标准，数据孤岛的问题比较突出；减排技术效果的评估也缺少标准化方法和认证体系。例如，如何在牧场里准确、低成本地测定CH₄排放量，如何评价某一项技术全生命周期的综合环境和经济效益，目前都没有公认的操作规范^[52]。标准缺失不仅让技术的比较和筛选变得困难，也不利于政策引导和市场监管的形成。

6 未来研究与应用展望

上述缺口和挑战客观存在，结合国内奶业振兴的战略需求，后续研究可从四个方向重点推进。

机理研究需要从“还原论”转向“系统论”，用系统生物学的思路将基因组、转录组、蛋白质组、代谢组等多组学数据深度整合，构建反刍动物“营养-微生物-宿主”互作的动态数学模型^[53]。这一方向有助于定位关键代谢节点与调控网络，阐明不同营养策略协同影响生产、健康与排放的分子机制。其中瘤胃微生物组编辑^[54]、宿主遗传育种（筛选低排放高效率个体）与营养调控之间的协同效应值得关注，也是未来颠覆性减排技术的理论基础。

微机电系统（MEMS）运动传感器、微流控芯片生化传感器等核心传感器件，以及智能算法与自动化装备的自主研发亟需提速，重点突破适应国内养殖环境、成本可控、维护简便、数据可靠的设备。算法层面应开发更具解释性的“白箱”模型，将动物生理学机理与数据驱动模型融合^[23]，使决策建议更透明，便于一线人员理解与使用。同时，高

效经济的本土化环保饲料添加剂研发与产业化也应加速,如筛选本土植物资源、利用合成生物学技术制备特定酶制剂或抑制剂。

各地饲料资源禀赋不同,不同规模牧场的实际需求也有差异,技术组合方案应做到菜单式、可灵活搭配。大型牧场可推动全流程数字化转型与智慧平台建设,中小型牧场则推广“备租赁+数据服务”等轻资产模式以降低使用门槛。此外还需健全社会化技术服务体系,通过培训、远程诊断及现场指导提升从业人员的数字素养与技术应用能力,打通落地的“最后一公里”。

智慧养殖设备的数据接口、IoT通信协议等基础标准需加快推进,实现数据互联互通。牧场层面的温室气体与氮磷排放核算方法(MRV:监测、报告和核查)也有待研究建立,为减排效果评估与碳交易提供依据。在此基础上构建综合评价体系,对单一技术或管理措施在动物生产性能、健康福利、环境足迹及经济效益等维度的表现做出系统评估,引导产业向全面可持续方向发展。

参考文献

- [1] Castillo-Lopez E, Petri R M, Ricci S, et al. Dynamic changes in salivation, salivary composition, and rumen fermentation associated with duration of high-grain feeding in cows[J]. *Journal of Dairy Science*, 2021, 104 (4) : 4875-4892.
- [2] Narain D. Animal agriculture's potential financial risks[J]. *Science (New York, N.Y.)*, 2023, 379 (6630) : 341-342.
- [3] Calsamiglia S, Ferret A, Reynolds C K, et al. Strategies for optimizing nitrogen use by ruminants[J]. *Animal*, 2010, 4 (7) : 1184-1196.
- [4] Tapio I, Snelling T J, Strozzi F, et al. The ruminal microbiome associated with methane emissions from ruminant livestock[J]. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2017, 8 (2) : 289-299.
- [5] Patra A, Park T, Kim M, et al. Rumen methanogens and mitigation of methane emission by anti-methanogenic compounds and substances[J]. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2017, 8 (2) : 271-288.
- [6] Wallace R J, Snelling T J, McCartney C A, et al. Application of meta-omics techniques to understand greenhouse gas emissions originating from ruminal metabolism[J]. *Genetics Selection Evolution*, 2017, 49 (1) : 9.
- [7] Zeleke A W, Dimonaco N J, Lawther K, et al. Reducing crude protein content in the diet of lactating dairy cows improved nitrogen-use-efficiency and reduced N excretion in urine, whilst having no obvious effects on the rumen microbiome[J]. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2025, 16 (1) : 113.
- [8] Wallace R J, Rooke J A, McKain N, et al. The rumen microbial metagenome associated with high methane production in cattle[J]. *BMC Genomics*, 2015, 16 (1) : 839.
- [9] Yang Z, Zheng Y, Liu S, et al. Rumen metagenome reveals the mechanism of mitigation methane emissions by unsaturated fatty acid while maintaining the performance of dairy cows[J]. *Animal Nutrition*, 2024, 18 (3) : 296-308.
- [10] Zhu Y, Bu D, Ma L. Integration of multiplied omics, a step forward in systematic dairy research[J]. *Metabolites*, 2022, 12 (3) : 225.
- [11] Zhang J, Gaowa N, Wang Y, et al. Complementary hepatic metabolomics and proteomics reveal the adaptive mechanisms of dairy cows to the transition period[J]. *Journal of Dairy Science*, 2023, 106 (3) : 2071-2088.
- [12] Patra A K. Enteric methane mitigation technologies for ruminant livestock: A synthesis of current research and future directions[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, 184 (4) : 1929-1952.
- [13] Koch F, Thom U, Albrecht E, et al. Heat stress directly impairs gut integrity and recruits distinct immune cell populations into the bovine intestine[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116 (21) : 10333-10338.
- [14] Rajaraman B, Selvaraj A, Bae E K, et al. Ruminant methane emissions, metabolic, and microbial profile of Holstein steers fed forage and concentrate, separately or as a total mixed ration[J]. *PloS ONE*, 2018, 13 (8) : e0202446.
- [15] Belanche A, de la Fuente O G, Newbold C Jamie. Effect of progressive inoculation of fauna-free sheep with holotrich protozoa and total-fauna on rumen fermentation, microbial diversity and methane emissions[J]. *Fems Microbiology Ecology*, 2014, 91 (3) : 26.
- [16] Li H, La S K, Zhang L Y, et al. Metabolomics and amino acid profiling of plasma reveals the metabolite profiles associated with nitrogen utilisation efficiency in primiparous dairy cows[J]. *Animal: An International Journal of Animal Bioscience*, 2024, 18 (10) : 101202.
- [17] Tedeschi L O, Greenwood P L, Ilan H. Advancements in sensor technology and decision support intelligent tools to assist

- smart livestock farming[J].*Journal of Animal Science*, 2021, 99 (2) : 1-11.
- [18] Rial C, Laplacette A, Caixeta L, et al. Metabolic-digestive clinical disorders of lactating dairy cows were associated with alterations of rumination, physical activity, and lying behavior monitored by an ear-attached sensor[J].*Journal of Dairy Science*, 2023, 106 (12) : 9323-9344.
- [19] Maman L G, Palizban F, Atanaki F F, et al. Co-abundance analysis reveals hidden players associated with high methane yield phenotype in sheep rumen microbiome[J].*Scientific Reports*, 2020, 10 (1) : 4995.
- [20] Krizova L, Richter M, Trinacty J. Continuous monitoring of ruminal pH and redox-potential in dry cows using a novel wireless ruminal probe[J].*Advances in Animal Biosciences*, 2010, 1 (1) : 252.
- [21] Li Q S, Wang R, Ma Z Y, et al. Dietary selection of metabolically distinct microorganisms drives hydrogen metabolism in ruminants[J].*The ISME Journal*, 2022, 16 (11) : 2535-2546.
- [22] He X, Zeng Z, Liu Y, et al. An internet of things-based cluster system for monitoring lactating sows' feed and water intake[J].*Agriculture (Basel)*, 2024, 14 (6) : 848.
- [23] Kaniyamattam K, Tedeschi L O. Asas-Nanp symposium: Mathematical modeling in animal nutrition: agent-based modeling for livestock systems: the mechanics of development and application[J].*Journal of Animal Science*, 2023 (101) : 1-11.
- [24] Wang H, Liu J, Dong Z, et al. Artificial intelligence-based metabolic energy prediction model for animal feed proportioning optimization[J].*Italian Journal of Animal Science*, 2023, 22 (1) : 942-952.
- [25] Chowdhury M R, Wilkinson R G, Sinclair L A. Reducing dietary protein and supplementation with starch or rumen-protected methionine and its effect on performance and nitrogen efficiency in dairy cows fed a red clover and grass silage-based diet[J].*Journal of Dairy Science*, 2024, 107 (6) : 3543-3557.
- [26] Nadeem G, Anis M I. Investigation of bovine disease and events through Machine Learning Models[J].*Pakistan Journal of Agricultural Research*, 2024, 37 (2) : 102-114.
- [27] Tangorra F M, Calcante A. Energy consumption and technical-economic analysis of an automatic feeding system for dairy farms: Results from a field test[J].*Journal of Agricultural Engineering*, 2017, 49 (4) : 228-232.
- [28] Neethirajan S. Transforming the adaptation physiology of farm animals through sensors[J].*Animals*, 2020, 10 (9) : 1512.
- [29] Liu N, Qi J, An X, et al. A review on information technologies applicable to precision dairy farming: Focus on behavior, health monitoring, and the precise feeding of dairy cows[J].*Agriculture*, 2023, 13 (10) : 1858.
- [30] Neupane R, Aryal A, Haeussermann A, et al. Evaluating machine learning algorithms to predict lameness in dairy cattle[J].*PLoS ONE* (v.1; 2006), 2024, 19 (7) : 17.
- [31] Durand M, Largouet C, Beaufort L B D, et al. Prediction of the daily nutrient requirements of gestating sows based on sensor data and machine-learning algorithms[J].*Journal of Animal Science*, 2023, 101: 1-11.
- [32] Zhou R, Wu J, Lang X, et al. Effects of oregano essential oil on in vitro ruminal fermentation, methane production, and ruminal microbial community[J].*Journal of Dairy Science*, 2020, 103 (3) : 2303-2314.
- [33] Bach A, Elcoso G, Miguel E, et al. Modulation of milking performance, methane emissions, and rumen microbiome on dairy cows by dietary supplementation of a blend of essential oils[J].*Animal: An International Journal of Animal Bioscience*, 2023, 17 (6) : 100825.
- [34] Doyle N, Mbandlwa P, Kelly W J, et al. Use of Lactic Acid Bacteria to reduce methane production in ruminants, a critical review[J].*Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: 2207.
- [35] Wang J, Liu T, Xu J, et al. Mannan oligosaccharides reduce the carbon footprint by decreasing methane emission and nitrogen excretion in Xiangdong black goats[J].*Animal Feed Science and Technology*, 2025 (328) : 116464.
- [36] Jeong J, Yu C, Kang R, et al. Application of propionate-producing bacterial consortium in ruminal methanogenesis inhibited environment with bromoethanesulfonate as a methanogen direct inhibitor[J].*Frontiers in Veterinary Science*, 2024 (11) : 1422474.
- [37] Kashenye B N, Zhang J. Gastrointestinal modification based on probiotic feed additive enviro-alleviators to reduce enteric methane production in ruminant and non-ruminant livestock[J].*Resources, Environment and Sustainability*, 2025 (22) : 100276.
- [38] Ren Y, Yue C, Wang W, et al. Metabolomics combined with 16S rDNA revealed the effects of low protein diet on rumen microbiome structure, nitrogen utilization rate and differential metabolites in feces and urine of dairy cows[J].*Research in Veterinary Science*, 2025 (196) : 105901.
- [39] Mitsunaga M T, Garcia N L B, Pereira R B L, et al. Current trends in Artificial Intelligence and bovine mastitis research: A bibliometric review approach[J].*Animals*, 2024, 14 (14) : 2023.
- [40] Beauregard A, Dallaire M, Gervais R, et al. Lactational performance of cows fed extruded flaxseed in commercial dairy

- herds[J].Animal-Open Space, 2023 (2) : 100043.
- [41] Li S, Zhang M, Hou L, et al.A framework for cost-effectiveness analysis of greenhouse gas mitigation measures in dairy industry with an application to dairy farms in China[J]. Journal of Environmental Management, 2024 (370) : 122521.
- [42] 王乃健, 于春风, 管乐胜, 等.数智化精准饲喂集成技术在奶牛养殖上的应用——以寒亭优然牧业有限责任公司为例[J].中国乳业, 2024 (11) : 29-34.
- [43] Hu T, Zhang J, Zhang X, et al.The development of Smart Dairy Farm System and its application in nutritional grouping and Mastitis Prediction[J].Animals, 2023, 13 (5) : 804.
- [44] Tedeschi L O, Menendez H M, Aline R.Asas-Nanp symposium: Mathematical Modeling in animal nutrition: Training the future generation in data and predictive analytics for sustainable development.A summary of the 2021 and 2022 Symposia[J].Journal of Animal Science, 2023, 101: 1-3.
- [45] 齐凯.基于惯性传感器的奶牛行为识别及控制电路中DAC的设计与实现[D].泰安: 山东农业大学, 2022.
- [46] 刘琪, 孙威, 韩吉雨, 等.伊起牛智慧牧业生态系统的开发与应用[J].中国奶牛, 2024 (5) : 63-68.
- [47] 陈继国.智慧管理系统在牧场的应用[J].中国乳业, 2020 (8) : 57-59.
- [48] Weigele H C, Gygax L, Steiner A, et al.Moderate lameness leads to marked behavioral changes in dairy cows[J].Journal of Dairy Science, 2017, 101 (3) : 2370-2382.
- [49] 席瑞谦, 王娟, 李正义, 等.奶牛智能饲喂关键技术研究[J].中国农机化学报, 2021, 42 (2) : 190-196.
- [50] Upton J, Murphy M, Boer I J M D, et al.Investment appraisal of technology innovations on dairy farm electricity consumption[J].Journal of Dairy Science, 2015, 98 (2) : 898-909.
- [51] Prado A D, Vibart R E, Bilotto F M, et al.Feed additives for methane mitigation: Assessment of feed additives as a strategy to mitigate enteric methane from ruminants-Accounting; How to quantify the mitigating potential of using antimethanogenic feed additives[J].Journal of Dairy Science, 2025, 108 (1) : 411-429.
- [52] Murphy M D.Over 20 years of machine learning applications on dairy farms: A comprehensive mapping study[J].Sensors, 2021, 22 (1) : 52.
- [53] Yu Z, Yan M, Wang J.Rumen microbiome nutriomics: Harnessing omics technologies for enhanced understanding of rumen microbiome functions and ruminant nutrition[J].Animal Nutriomics, 2024, 1 (1) : 10.
- [54] Udaya S, Kazi K, Jayawardhane K N, et al.The potential of Novel Gene Editing-Based Approaches in Forages and Rumen Archaea for reducing livestock methane emissions[J].Agriculture, 2022, 12 (11) : 1780.