

营养素调控乳用反刍动物免疫功能的分子机制与应用研究进展

雷江红¹, 石龙飞², 王 青¹, 齐亚辉¹, 赵 敏¹

(1.陕西省动物卫生与屠宰管理站, 陕西西安 710016; 2.西安市动物疫病预防控制中心, 陕西西安 710054)

摘 要: 乳用反刍动物免疫功能是保障其健康状况、生产性能及产品质量的核心要素。营养素作为机体生命活动的物质基础, 同时也是调控免疫功能的关键信号分子, 通过直接作用于免疫细胞或间接调节胃肠道微生物区系等多条途径, 对乳用反刍动物免疫功能产生深远影响。本文系统综述了氨基酸、脂肪酸等关键营养素对免疫细胞的直接调控机制, 营养素通过胃肠道微生物区系及代谢产物的间接免疫调控途径, 营养素对肠道物理与免疫屏障的维护作用, 以及营养素在缓解氧化应激、调节炎症因子平衡中的作用, 并总结了功能性饲料添加剂应用、精准营养与阶段饲养等免疫增强应用策略, 旨在为乳用反刍动物精准营养方案的制定、免疫力提升及健康养殖提供理论参考。

关键词: 乳用反刍动物; 营养素; 免疫功能; 肠道微生物区系; 肠道屏障; 炎症调控

文章编号: 1671-4393(2026)06-0012-09

DOI:10.12377/1671-4393.26.06.02

Research Progress on the Molecular Mechanisms and Applications of Nutrient Regulation of Immune Function in Dairy Ruminants

LEI Jianghong¹, SHI Longfei², WANG Qing¹, QI Yahui¹, ZHAO Min¹

(1.Shaanxi Provincial Animal Health and Slaughter Management Station, Xi'an Shaanxi 710016;
2.Xi'an Animal Disease Prevention and Control Center, Xi'an Shaanxi 710054)

Abstract: The immune function of dairy ruminants is a core factor in safeguarding their health status, production performance, and product quality. Nutrients, as the material basis for life activities, also serve as key signaling molecules regulating immune function. Through multiple pathways, such as directly acting on immune cells or

基金项目: 2024陕西农业核心技术攻关项目羊布鲁氏菌病免疫净化技术研发与推广 (2024NYGG004-6)

作者简介: 雷江红 (1973-), 男, 陕西西安人, 本科, 高级兽医师, 研究方向为动物疫病诊断与防治、兽医公共卫生;
石龙飞 (1988-), 男, 陕西西安人, 硕士, 兽医师, 研究方向为动物疫病诊断与防治、兽药与生物技术;
王 青 (1983-), 女, 陕西西安人, 本科, 高级兽医师, 研究方向为兽医公共卫生、动物防疫;
齐亚辉 (1981-), 女, 陕西西安人, 本科, 高级兽医师, 研究方向为兽医公共卫生、动物防疫;
赵 敏 (1984-), 女, 陕西西安人, 硕士, 高级兽医师, 研究方向为动物疫病诊断与防治、兽医公共卫生。

indirectly modulating the gastrointestinal microbiota, nutrients profoundly influence the immune function of dairy ruminants. This paper systematically reviewed the direct regulatory mechanisms of key nutrients, such as amino acids and fatty acids, on immune cells, the indirect immune regulatory pathways of nutrients via the gastrointestinal microbiota and their metabolites, the role of nutrients in maintaining the intestinal physical and immune barrier, and the functions of nutrients in alleviating oxidative stress and regulating the balance of inflammatory cytokines. Furthermore, it summarized application strategies for immune enhancement, including the use of functional feed additives, precision nutrition, and phase-feeding. The aim is to provide a theoretical reference for formulating precision nutrition plans, enhancing immunity, and promoting healthy farming practices for dairy ruminants.

Keywords: dairy ruminant; nutrient; immune function; gastrointestinal microbiota; intestinal barrier; inflammation regulation

乳用反刍动物（奶牛、奶山羊等）作为畜牧业的重要组成部分，其健康状况直接关系到养殖产业的可持续发展。营养素不仅为乳用反刍动物的生长发育和泌乳提供能量与物质保障，更在免疫功能调控中扮演着关键角色。近年来，随着分子生物学、微生物组学等技术的快速发展，营养素对乳用反刍动物免疫功能的调控机制研究取得了诸多突破，已从传统的表观效应深入到分子互作层面。研究发现，氨基酸、脂肪酸等营养素可通过直接调节免疫细胞代谢与功能，或间接塑造胃肠道微生物群落结构、维护肠道屏障完整性、调节炎症与抗氧化应激通路等途径，全方位调控宿主免疫应答^[1]。此外，酵母培养物、植物提取物、纳米营养素等功能性添加剂的免疫调节潜力也逐渐被揭示，为精准营养干预提供了新的思路。本文基于现有研究成果，系统梳理营养素调控乳用反刍动物免疫功能的分子机制，总结相关应用策略，为乳用反刍动物健康养殖提供科学依据和实践指导。

1 营养素对免疫细胞的直接调控机制

免疫细胞是机体免疫应答的核心执行者，其增殖、活化及功能发挥依赖于多种营养素的精准调控。氨基酸、脂肪酸等关键营养素可通过直接作用于免疫细胞的代谢过程、信号通路及基因表达，实现对免疫功能的精细调控（图1）。

1.1 氨基酸的免疫调节作用

1.1.1 蛋氨酸（Met）的免疫调控

蛋氨酸是乳用反刍动物必需的含硫氨基酸，同时也是关键的甲基供体，其对围产期奶牛等反刍动物的免疫调节作用已得到广泛证实。蛋氨酸及其代谢产物S-腺苷甲硫氨酸可通过多条分子途径调控免疫细胞功能，补充过瘤胃蛋氨酸（RPM）能够有效改善围产期奶牛的免疫状态，缓解该阶段常见的免疫抑制现象^[2]。其核心机制在于促进T淋巴细胞的增殖与活化，调节白细胞介素-2（IL-2）、干扰素- γ （IFN- γ ）等关键细胞因子的表达，增强机体对病原体的识别与清除能力^[3]。

此外，蛋氨酸的供应直接影响体液免疫功能，充足的蛋氨酸水平是高效合成免疫球蛋白（如IgG和IgA）、建立有效体液免疫防御的物质基础^[4]。围产期奶牛由于能量负平衡和代谢应激，对蛋氨酸的需求显著增加，此时补充过瘤胃蛋氨酸不仅有助于维持肝脏甲基化代谢和抗氧化状态，还能通过支持免疫细胞的增殖与分化，增强机体抵抗力，进而改善整体健康状况和生产性能^[2]。因此，精准调控日粮蛋氨酸含量，尤其是通过过瘤胃保护形式进行补充，已成为优化乳用反刍动物免疫功能、应对围产期挑战的重要营养策略。

1.1.2 功能性氨基酸与抗氧化防御

谷氨酰胺等功能性氨基酸在维持乳用反刍动物

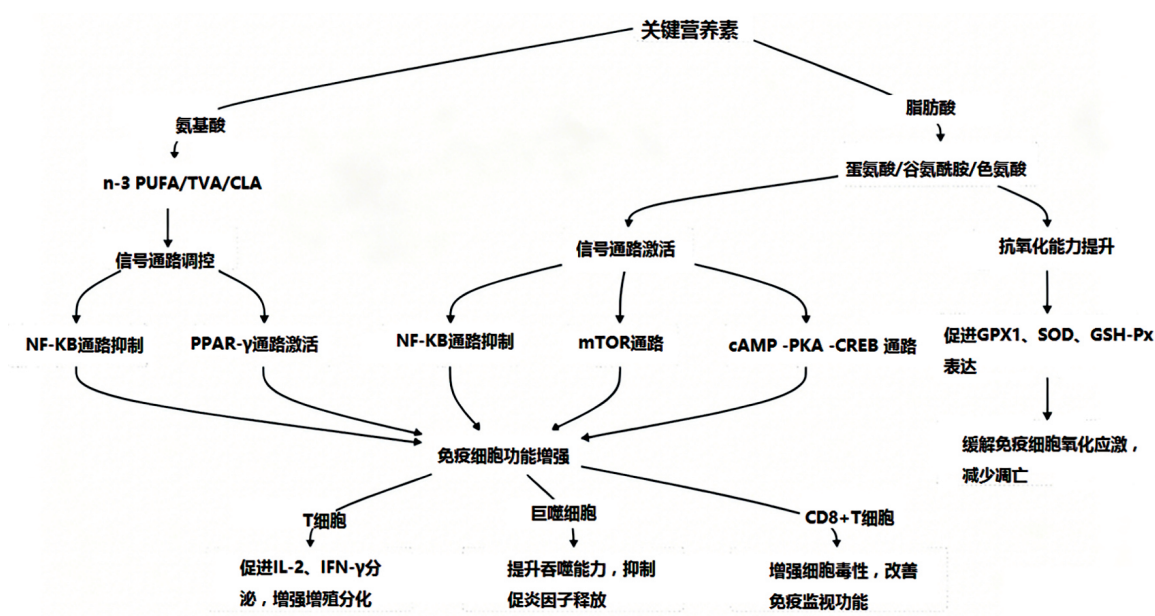


图 1 营养素对乳用反刍动物免疫细胞的直接调控机制
Figure 1 Direct Regulatory Mechanisms of Nutrients on Immune Cells in Dairy Ruminants

图片来源：根据文献整理

肠道免疫在稳态和系统抗氧化防御中扮演着核心角色，作为快速增殖细胞（尤其是淋巴细胞和肠上皮细胞）的重要能量底物，其对维持肠道相关淋巴组织（GALT）的结构完整性与免疫功能至关重要^[5]。

近年来，后生元（特定益生菌发酵产物）中氨基酸成分的免疫调节潜力受到广泛关注。源自植物乳杆菌的后生元成分能够上调肝脏中谷胱甘肽过氧化物酶1（GPX1）、谷胱甘肽过氧化物酶4（GPX4）和铜锌超氧化物歧化酶（Cu/Zn SOD）等关键抗氧化酶基因的表达^[6]，这些酶可有效清除过量的活性氧（ROS），减轻氧化应激对免疫细胞的损伤。氧化应激是围产期乳用反刍动物常见的病理生理状态，可导致免疫细胞功能受损、炎症反应加剧^[7]，通过膳食干预补充谷氨酰胺等功能性氨基酸，或利用富含特定氨基酸代谢物的后生元激活宿主抗氧化通路，能够间接保护免疫细胞，维持其正常功能，为增强乳用反刍动物免疫韧性提供新的思路。

1.2 脂肪酸的免疫信号功能

脂肪酸不仅是机体重要的能量来源，还可作为

信号分子参与免疫细胞的功能调控。其中，n-3多不饱和脂肪酸（PUFA）、共轭亚油酸（CLA）及反式疫苗酸（TVA）等具有独特的免疫调节特性，通过影响免疫细胞膜组成、信号转导及炎症介质合成等途径，调控乳用反刍动物免疫功能。

1.2.1 n-3 PUFA的抗炎作用

n-3 PUFA（如亚麻酸）通过调节免疫细胞的膜磷脂组成和类二十烷酸代谢网络，在乳用反刍动物中发挥重要的抗炎作用。当日粮中添加n-3 PUFA后，其在瘤胃中经微生物氢化作用生成代谢产物，被吸收后整合进入免疫细胞膜，改变膜流动性和信号转导效率，进而调控免疫细胞活化与功能^[8]。

更为关键的是，n-3 PUFA与n-6 PUFA竞争环氧化酶和脂氧合酶，改变类二十烷酸的合成谱系：n-3 PUFA衍生的类二十烷酸促炎活性较弱，而n-6 PUFA衍生物促炎作用较强^[9]，这种代谢偏向有助于抑制过度炎症反应，促进炎症消退。围产期奶牛处于强烈的代谢和免疫应激状态，过度炎症会损害生殖系统和免疫系统功能。因此，通过日粮策略增加n-3 PUFA供给，能够帮助机体建立更有利的脂质介质平

衡, 缓解围产期炎症, 对维护奶牛生殖健康、降低子宫炎和乳腺炎发病率具有积极意义。

1.2.2 共轭亚油酸 (CLA) 与反式疫苗酸 (TVA) 的免疫调控

CLA和TVA是反刍动物特有的脂肪酸, 主要来源于瘤胃微生物对膳食脂肪酸的生物氢化作用及乳脂等产品, 具有独特的免疫调节特性。近年来研究发现, TVA能够通过新颖的分子机制直接增强CD8⁺T细胞的效应功能^[8]。

具体而言, TVA可拮抗短链脂肪酸对G蛋白偶联受体43 (GPR43) 的激活, 解除其对特定信号通路的抑制, 进而激活“环磷酸腺苷-蛋白激酶A-CAMP反应元件结合蛋白 (cAMP-PKA-CREB)”信号轴, 该信号通路的激活直接促进CD8⁺T细胞的增殖、细胞因子产生和细胞毒活性, 显著增强机体细胞免疫应答^[8]。这一发现揭示TVA作为免疫信号分子的潜在价值, 尽管目前多数研究集中在单胃动物或体外模型, 但其机制为理解反刍动物免疫系统的营养调控提供重要线索, 优化日粮和瘤胃发酵环境以促进CLA、TVA生成, 可能成为未来增强乳用反刍动物特异性免疫防御能力的重要策略。

2 营养素通过胃肠道微生物区系间接调控免疫

胃肠道微生物区系是乳用反刍动物机体的重要组成部分, 与宿主形成密切的共生关系。营养素可通过塑造胃肠道微生物群落结构与功能, 调节微生物代谢产物的生成, 进而间接调控宿主免疫功能, 这一调控途径已成为营养免疫学研究的热点。

2.1 塑造微生物群落结构与功能

胃肠道微生物群落的平衡与稳定是宿主免疫稳态的重要保障。酵母培养物、植物性添加剂等营养素或功能性饲料成分, 能够通过提供营养底物、抑制有害菌生长等方式, 优化微生物群落结构, 增强肠道健康与免疫功能。

2.1.1 酵母培养物 (YC) 的益生作用

YC作为常用微生态制剂, 富含β-葡聚糖、甘露

聚糖、消化酶等多种活性成分, 对反刍动物胃肠道微生物群落的结构与功能具有显著塑造作用。其可为肠道微生物提供特殊营养底物, 刺激肠道黏膜上皮细胞增殖和微生物繁殖, 同时在瘤胃中能改变固相和液相相关微生物丰度, 优化瘤胃发酵模式, 提高总挥发性脂肪酸浓度 (特别是丁酸含量), 降低乳酸、脂多糖等异常代谢产物水平, 增强瘤胃消化能力^[10, 11]。

更重要的是, YC中的β-葡聚糖和甘露聚糖能有效刺激肠道黏膜免疫, 激活巨噬细胞并提高酸性磷酸酶水平, 增强机体对多种疾病的抵抗力, 尤其在幼龄反刍动物中, 添加YC能显著缓解断奶应激对胃肠道的损伤, 促进肠道菌群平衡、肠道组织发育和黏膜免疫系统建立^[10]。

2.1.2 植物性添加剂与中药制剂的影响

植物性添加剂与中药制剂通过其独特的生物活性成分 (如多糖、黄酮、生物碱等), 能深刻影响反刍动物胃肠道微生物的组成与功能, 进而调节局部和全身免疫状态^[12, 13]。目前虽然在乳用反刍动物上没有具体例证, 但在绒山羊、肉羊和牦牛上已经有相关研究证据。例如, 在绒山羊日粮中添加0.3%沙蒿粗多糖, 可显著增加瘤胃液中微生物丰度, 促进有益菌定植, 减少潜在致病菌丰度, 同时提升血清抗氧化和免疫相关指标, 增强机体抗氧化和免疫能力^[12]。

在高谷物日粮饲养的滩羊中, 补充外源性猪胆酸 (HCA) 可显著改变瘤胃和回肠菌群结构 (关键菌群LDA评分提升2.48~3.75倍), 并大幅上调肝脏胆汁酸代谢物 (去氧胆酸log₂ FC=6.30, 鼠胆酸log₂ FC=5.60), 通过微生物-肠-肝轴影响肝脏糖脂代谢相关基因与代谢产物表达, 从而调控全身代谢稳态, 其中去氧胆酸 (log₂ FC=6.30, $P<0.005$) 效果最为突出^[14]。此外, 长期饲喂高比例精料 (>60%) 会损害牦牛空肠屏障功能, 而柑橘类黄酮提取物能通过改变瘤胃微生物群落, 调节瘤胃抗生素抗性基因和毒力因子谱, 改善瘤胃内稳态^[13, 15]。这些研究表明, 植物性添加剂和中药制剂通过靶向调节胃肠道

微生物区系，可增强局部和全身免疫与代谢健康。

2.2 微生物代谢产物的免疫介导作用

胃肠道微生物在代谢过程中会产生短链脂肪酸、胞外囊泡等多种代谢产物，这些产物作为微生物与宿主沟通的“信号分子”，能够通过多种途径调控宿主免疫功能，是营养素间接调控免疫的重要媒介。

2.2.1 短链脂肪酸（SCFA）的免疫调节

SCFA（主要包括乙酸、丙酸和丁酸）是胃肠道微生物发酵膳食纤维产生的主要代谢产物，既是反刍动物重要能量来源，也是关键免疫调节信号分子，其可通过多种分子机制维持肠道免疫稳态：作为配体激活肠上皮细胞和免疫细胞表面的G蛋白偶联受体（如GPR41和GPR43），或抑制组蛋白去乙酰化酶活性，影响基因表达，调节免疫细胞分化和功能^[16, 17]。

研究表明，丁酸可通过GPR41促进巨噬细胞向M2型极化，抑制NF-κB和NLRP3炎症小体激活，缓解低度内毒素血症诱导的乳腺炎^[17]；在断奶过渡期犊牛中，瘤胃SCFA含量增加与瘤胃上皮中相关功能基因表达呈正相关，有助于犊牛适应固体饲料^[18]。此外，营养胁迫会改变反刍动物盲肠微生物群落，破坏上皮增殖更新和肠道免疫功能，而藏羊应对冷季营养应激时，瘤胃微生物产生的短链脂肪酸与瘤胃上皮microRNA相互作用，可维持瘤胃上皮屏障功能，改善宿主免疫力^[19]。

2.2.2 胞外囊泡（EV）的通信功能

EV是由胃肠道中原核和真核细胞释放的脂质膜结合小泡，携带蛋白质、脂质和核酸等多种活性物质，在微生物-宿主及宿主不同器官间扮演重要信息传递角色，广泛存在于瘤胃液和粪便中，其携带的功能性物质能调节代谢、免疫等多种生物过程，影响饲料消化、营养吸收及整体生产性能，甚至可能作用于肝脏、乳腺等其他器官，其中初乳和牛奶中的EV对生命早期肠道功能和发育具有特殊意义^[20]。

有研究提出“瘤胃-微生物组-脑”轴概念，指出瘤胃微生物产生的活性物质可被小肠吸收，通过

全身调节和迷走神经通路影响中枢神经系统，尽管EV在该轴中的作用尚在探索中，但瘤胃微生物失调与动物异常行为、激素和神经递质水平改变的相关性，提示其可能是介导这种远程通信的潜在载体^[21]。总之，EV作为跨界通信的关键媒介，在维持反刍动物胃肠道稳态和整体健康中发挥着日益重要的作用。

3 营养素对肠道物理屏障与免疫屏障的维护作用

肠道是乳用反刍动物最大的消化器官，同时也是重要的免疫器官。肠道物理屏障和免疫屏障的完整性是抵御病原体入侵、防止有害物质易位、维持机体免疫稳态的关键。营养素通过增强肠道上皮屏障完整性、激活黏膜免疫系统途径，对肠道屏障功能进行精准调控。

3.1 增强肠上皮屏障完整性

肠道上皮屏障由肠上皮细胞、紧密连接蛋白及黏液层构成，其完整性是维持肠道健康的第一道防线。膳食营养素通过促进肠上皮细胞增殖与更新、上调紧密连接蛋白表达等方式，增强肠道上皮屏障功能。

例如，在断奶羔羊日粮中添加0.9%（体积/重量）植物乳杆菌RG14后生元，可显著上调瘤胃上皮中紧密连接蛋白TJP、OCLD、CLDN1和CLDN4的基因表达，强化瘤胃上皮物理屏障功能，降低系统性炎症风险^[22]。蛋氨酸（尤其是过瘤胃保护形式）对支持肠上皮细胞增殖与更新至关重要，围产期奶牛补充蛋氨酸，有助于维持肠道黏液层合成，保护肠道屏障结构完整性^[2]。此外，妊娠母羊营养不良会破坏盲肠上皮细胞外基质-受体相互作用，干扰上皮细胞增殖与更新，从反面印证了充足营养对维持肠道上皮稳态的必要性^[19]。

3.2 激活黏膜免疫系统

反刍动物的肠道黏膜免疫系统是抵御病原体入侵的关键，由肠道相关淋巴组织、免疫细胞及免疫分子构成，其激活依赖于肠道内复杂的细胞与分子

网络。营养素通过调节免疫细胞活性、促进细胞因子分泌等方式，激活黏膜免疫系统，增强局部免疫应答。

功能性碳水化合物（如酵母培养物中的 β -葡聚糖和甘露聚糖）可被肠黏膜固有层中的树突状细胞和巨噬细胞表面的模式识别受体识别，启动下游信号传导，促进细胞因子分泌，增强局部黏膜免疫应答^[23]。短链脂肪酸作为肠道微生物发酵非消化性碳水化合物的主要终产物，参与调节炎症小体激活、淋巴细胞增殖及肠道黏膜免疫成熟过程^[23]，例如在奶山羊中，口服丁酸钠（0.5 g/kg）可特异性富集结肠上皮免疫相关信号通路，同时显著降低血清丙二醛水平（ $P=0.042$ ），发挥最佳抗氧化效应；而补充乙酸钠和丙酸钠（均为0.8 g/kg）则可显著提高肠道白细胞介素-10浓度（ $P<0.001$ ），发挥更优的抗炎作用^[24]。此外，胞外囊泡作为独特生物信使，也能参与调节宿主免疫功能，间接体现了营养素对黏膜免疫的系统调控作用^[20]。

4 营养素调控系统性炎症与抗氧化状态

系统性炎症与抗氧化状态的平衡是乳用反刍动物免疫稳态的重要体现。多种应激因素会导致机体氧化应激加剧、炎症反应失衡，而营养素通过增强抗氧化防御体系、调节炎症因子平衡等途径，维持机体免疫稳态，保障动物健康。

4.1 缓解氧化应激

氧化应激是指机体活性氧（ROS）产生过多或抗氧化能力下降，导致氧化与抗氧化失衡的病理生理状态^[7]，会损伤免疫细胞功能、破坏生物膜结构，进而诱发多种疾病。营养素通过增强机体抗氧化酶活性、减少脂质过氧化产物积累等方式，可有效缓解氧化应激。

在乳用反刍动物生产中，多种营养策略可增强机体抗氧化防御体系：日粮中添加特定酵母培养物（如Diamon V XP），可显著提高血清谷胱甘肽过氧化物酶（GSH-Px）、过氧化氢酶（CAT）和总抗氧化能力（T-AOC），降低丙二醛（MDA）水平，

保护免疫细胞免受氧化损伤^[9]；参照混合牧草饲喂使绵羊总抗氧化能力提升88.82 μM （从720.69 μM 升至809.51 μM ， $P<0.01$ ）的研究结果，妊娠后期母羊日粮中添加植物-乳酸菌复合物（PEL）同样可改善血清抗氧化指标（预期TAC提升），并上调肝脏抗氧化相关基因表达，发挥系统性抗氧化保护效应^[25]。此外，一碳代谢途径中的甲基供体（如蛋氨酸、胆碱等）可促进抗氧化物质（如谷胱甘肽）合成，缓解围产期奶牛氧化应激^[26]；富含花青素的狼尾草青贮替代部分饲料，可提升泌乳山羊血浆总抗氧化能力^[27]；犊牛开食料中添加全棉籽，有助于减轻断奶期氧化损伤^[28]。

4.2 调节炎症因子平衡

炎症反应是机体对病原体入侵或组织损伤的防御性反应，但过度炎症会对机体造成损伤。乳用反刍动物在应激状态下易出现炎症因子失衡，表现为促炎因子过度表达、抗炎因子不足，进而导致免疫功能紊乱，而营养素可通过调节炎症因子合成与释放，维持炎症反应适度平衡。

高精料日粮易导致反刍动物亚急性瘤胃酸中毒及系统性炎症，补充酵母培养物可显著降低血清促炎细胞因子（如IL-1 β 、IL-6、TNF- α ）水平，提高抗炎细胞因子IL-10及免疫球蛋白浓度，缓解炎症反应^[9]；复合酵母培养物（CYC）可双向调节断奶羔羊肝脏免疫反应，通过激活PI3K-AKT等信号通路促进免疫稳态^[29]。此外，营养不足或应激（如冷季放牧藏羊、断奶犊牛）会破坏肠道微生物-上皮互作，诱发全身性炎症，损害上皮更新和肠道免疫网络功能；妊娠毒血症山羊、莫尼茨绦虫感染山羊中，均会出现显著炎症失衡状态，进一步凸显了营养供应在维持炎症平衡中的基础性作用^[30, 31]。

5 基于营养调控的免疫增强应用策略

5.1 功能性饲料添加剂应用

5.1.1 酵母培养物应用

酵母培养物在乳用反刍动物生产中展现出显著实践效果：泌乳中期奶牛日粮添加20 g/头·d活酵母

(*Saccharomyces cerevisiae*)，可提高干物质采食量、产奶量及乳成分产量，同时优化瘤胃发酵，增强血清抗氧化能力和免疫功能^[32]；补充酿酒酵母培养物可调节瘤胃微生物组成与功能，缓解热应激对奶牛的负面影响^[33]；泌乳母羊补充酵母培养物，可改善粪便微生物结构，增加厚壁菌门丰度，减少潜在有害菌，提升整体健康水平^[34]。

5.1.2 纳米营养素应用

纳米技术在功能性饲料添加剂领域潜力巨大，可显著提高矿物质和生物活性物质的生物利用度。例如，奶牛日粮中添加0.3 mg/kg纳米硒，可提高能量校正乳和乳糖产量，改善营养消化率，优化瘤胃发酵，同时提高血液中胰岛素样生长因子-1和硒水平，上调乳腺相关基因和蛋白表达，促进乳腺发育和免疫功能^[35]。

此外，纳米包被技术可实现对精油、益生菌等生物活性物质的精准递送，如瘤胃保护的干葡萄提取物（富含低分子量多酚）可在肠道靶向释放，缓解热应激奶牛炎症反应，增强先天免疫功能^[36]；氢化脂肪包埋的葡萄糖酸钙靶向后肠递送，有助于增加乳脂产量和能量校正乳产量^[37]，为替代抗生素生长促进剂、精准调节后肠微生物和免疫提供了新路径。

5.2 精准营养与分阶段饲养

5.2.1 围产期精准营养

围产期是奶牛生理和代谢挑战的关键阶段，常伴随能量负平衡和免疫抑制，针对性营养调控至关重要。初产奶牛日粮中添加95.17 g/头·d瘤胃保护性支链氨基酸，可改善能量代谢，缓解氧化应激，维持免疫功能，提升相关代谢途径的代谢物浓度^[38]；产前补充16.66 g/100kg辣木叶粉，可提高初乳质量和初乳中免疫球蛋白G浓度，提升新生犊牛被动免疫水平^[39]；围产期奶牛日粮中补充50 mg/头·d维生素K3，可增加初乳中免疫球蛋白G浓度，助力高品质初乳生产^[40]。

5.2.2 应激期营养调节

环境应激（冷季营养应激、热应激等）对反刍

动物生产性能和免疫稳态构成严峻挑战，针对性营养方案可有效缓解应激影响。例如，冷季营养限制的泌乳期藏羊，补充不同水平精料可帮助其适应应激；意大利地中海奶水牛日粮中加入30%黑麦草青饲料，可调节瘤胃壁免疫相关基因表达，维持动物健康和生产质量^[41]；热应激条件下，补充酿酒酵母培养物可调节瘤胃微生物组成与功能，补充瘤胃保护的干葡萄提取物可改善奶牛产奶性能，降低炎症状态，增强免疫细胞吞噬活性^[33, 36]。

6 小结

尽管营养素调控乳用反刍动物免疫功能的研究已取得显著进展，但仍存在一些亟待解决的问题：一是不同营养素之间的协同调控机制尚不明确，多种营养素联合使用的效果和最佳配比需要进一步探索；二是营养素对免疫记忆和长期免疫效果的影响研究较少，缺乏长期跟踪数据；三是纳米营养素等新型添加剂的长期安全性和环境影响需要深入评估；四是基于个体微生物组特征的个性化营养方案制定仍面临挑战，需要结合多组学技术和大数据分析进行突破。

未来研究应聚焦于以下方向：一是利用多组学技术（基因组学、转录组学、代谢组学等）深入解析营养素-微生物-免疫系统之间的互作网络，揭示关键调控节点和分子机制；二是开展不同营养素协同调控的研究，优化日粮配方，提高免疫调控效果；三是加强营养素对长期免疫功能影响的研究，为制定可持续的营养策略提供依据；四是推进个性化精准营养技术的开发，结合动物个体生理状态和微生物组特征，实现营养方案的精准匹配；五是关注新型功能性添加剂的研发与应用，同时重视其安全性评估，推动绿色健康养殖发展。

参考文献

[1] 郝文君.补饲开食料对牦牛犊牛免疫器官发育及其机能的影响[D].西宁：青海大学，2022.

[2] Huo W, Lin Y, Wang C, et al.Methionine and its derivatives in dairy cow nutrition: Implications for intestinal barrier

- function, periparturient performance, and metabolic health[J]. *Frontiers in Veterinary Science*, 2025, 12: 1664853.
- [3] 唐俊, 贺荔, 王彭辉, 等.肠道微生物在反刍动物健康生产中的作用研究进展[J]. *中国畜牧兽医*, 2024, 51 (4): 1466-1479.
- [4] Jinesh P, Lijina P, Gnanesh Kumar B S.Sequence and N-glycan diversity analysis of immunoglobulin G from buffalo milk using RP-UHPLC MS/MS[J]. *Amino Acids*, 2021, 53 (4): 533-539.
- [5] Bampidis V, Azimonti G, et al.Safety and efficacy of l-glutamine produced using corynebacterium glutamicum NITE BP-02524 for all animal species[J]. *EFSA Journal*, 2020, 18 (4): e06075.
- [6] Mgeni M S, Zhang L, Chen Y, et al.Effects of dandelion extracts on the ruminal microbiota, metabolome, and systemic inflammation in dairy goats fed a high-concentrate diet[J]. *Veterinary Sciences*, 2025, 13 (1): 28.
- [7] Khan M Z, Liu S, Ma Y, et al.Overview of the effect of rumen-protected limiting amino acids (methionine and lysine) and choline on the immunity, antioxidative, and inflammatory status of periparturient ruminants[J]. *Frontiers in Immunology*, 2022, 13: 1042895.
- [8] Kotsampasi B, Karatzia M A, Tsiokos D, et al.Nutritional strategies to alleviate stress and improve welfare in dairy ruminants[J]. *Animals*, 2024, 14 (17): 2573.
- [9] Ayemele A G, Tilahun M, Lingling S, et al.Oxidative stress in dairy cows: Insights into the mechanistic mode of actions and mitigating strategies[J]. *Antioxidants*, 2021, 10 (12): 1918.
- [10] Liu S, Yang L, Zhang Y, et al.Review of yeast culture concerning the interactions between gut microbiota and young ruminant animals[J]. *Frontiers in Veterinary Science*, 2024, 11: 1335765.
- [11] Zhao C, Hu X, Bao L, et al.Gut dysbiosis induces the development of mastitis through a reduction in host anti-inflammatory enzyme activity by endotoxemia[J]. *Microbiome*, 2022, 10 (1): 205.
- [12] Li S, Guo Y, Guo X, et al.Effects of artemisia ordosica Crude Polysaccharide on antioxidant and immunity response, nutrient digestibility, rumen fermentation, and microbiota in Cashmere Goats[J]. *Animals*, 2023, 13 (22): 3575.
- [13] Yu S, Li L, Zhao H, et al.Citrus flavonoid extracts alter the profiling of rumen antibiotic resistance genes and virulence factors of dairy cows[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1201262.
- [14] Zhao H, Zhu D, Gao Y, et al.Bile acids modulate hepatic glycolipid metabolism via the Microbiota-Gut-Liver Axis in lambs[J]. *The Journal of Nutrition*, 2025, 155 (7): 2172-2184.
- [15] Jia J, Liang C, Wu X, et al.Effect of high proportion concentrate dietary on Ashdan Yak jejunal barrier and microbial function in cold season[J]. *Research in Veterinary Science*, 2021, 140: 259-267.
- [16] 张剑霞.复合饲料添加剂对娟姗牛抗冷应激的血液生理生化指标及瘤胃微生物区系的影响[D].呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- [17] Zhao Y, Li H, Xu J, et al.Phytosphingosine contributes gut microbiota metabolism to alleviate low-grade endotoxemia-induced mastitis[J]. *Microbiome*, 2025, 14 (1): 2.
- [18] Nishihara K, van Niekerk J, Innes D, et al.Transcriptome profiling revealed that key rumen epithelium functions change in relation to short-chain fatty acids and rumen epithelium-attached microbiota during the weaning transition[J]. *Genomics*, 2023, 115 (5): 110664.
- [19] Wu W, Lu H, Cheng J, et al.Undernutrition disrupts cecal microbiota and epithelium interactions, epithelial metabolism, and immune responses in a pregnant Sheep Model[J]. *Microbiology Spectrum*, 2023, 11 (2): e0532022.
- [20] Malik A, Sauerwein H.Graduate student literature review: Significance of extracellular vesicles in the interaction between host and microbiota in the ruminant gastrointestinal tract[J]. *Journal of Dairy Science*, 2026, 109 (2): 1175-1186.
- [21] Joshi H, Bernard B, Lemley C, et al.Unveiling the rumen-microbiome-brain circuit: A unique dimension of gut-brain axis in ruminants[J]. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2025, 16 (1): 159.
- [22] Izuddin W I, Humam A M, Loh T C, et al.Dietary postbiotic *Lactobacillus plantarum* improves serum and ruminal antioxidant activity and upregulates hepatic antioxidant enzymes and ruminal barrier function in post-weaning lambs[J]. *Antioxidants*, 2020, 9 (3): 250.
- [23] He Z, Dong H.The roles of short-chain fatty acids derived from colonic bacteria fermentation of non-digestible carbohydrates and exogenous forms in ameliorating intestinal mucosal immunity of young ruminants[J]. *Frontiers in Immunology*, 2023, 14: 1291846.
- [24] Zhen Y, Rahmat A, Zhang C, et al.Multi-level regulation of hindgut homeostasis by volatile fatty acid administration in dairy goats: Linking microbial metabolism to epithelial inflammation and barrier function[J]. *mSystems*, 2025, 10 (7): e0011625.
- [25] Aldian D, Harisa L D, Mitsuishi H, et al.Diverse forage improves lipid metabolism and antioxidant capacity in goats,

- as revealed by metabolomics[J].Animal, 2023, 17 (10) : 100981.
- [26] Coleman D N, Alharthi A S, Liang Y, et al.Multifaceted role of one-carbon metabolism on immunometabolic control and growth during pregnancy, lactation and the neonatal period in dairy cattle[J].Journal of Animal Science and Biotechnology, 2021, 12 (1) : 82-109.
- [27] Chaokaur A, Sittiya J, Saenphoom P, et al.Effects of anthocyanin-rich napier grass silage on feed intake, milk production, plasma profile, and nutritional digestibility in lactating crossbred Saanen goats[J].Veterinary World, 2024, 17 (12) : 2802-2810.
- [28] Amato A, Minuti A, Liotta L, et al.Whole cottonseed inclusion in starter feeds improves performance, inflammometabolic profile, and rumination behavior in Holstein dairy calves[J].JDS Communications, 2023, 4 (5) : 422-427.
- [29] Li C, Bai H, Bai P, et al.Immune-modulatory Mechanism of compound yeast culture in the liver of weaned lambs[J].Animals, 2025, 16 (1) : 104.
- [30] El-Sayed A, Marzok M, Alqahtani H A, et al.Genomic variants, transcriptomic profile, ultrasonographic findings, and antioxidant and immunological biomarkers linked to pregnancy toxemia susceptibility in goats[J].Veterinary Sciences, 2025, 12 (9) : 891.
- [31] 黄颖妍, 李健, 吕娜, 等.微量矿物元素在围产期奶牛中的应用研究进展[J].饲料工业, 2026, 47 (2) : 65-70.
- [32] Zhang Q, Ma L, Zhang X, et al.Feeding live yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) improved performance of mid-lactation dairy cows by altering ruminal bacterial communities and functions of serum antioxidation and immune responses[J].BMC Veterinary Research, 2024, 20 (1) : 245.
- [33] Morano K A, Grant C M, Moye-Rowley W S .The response to heat shock and oxidative stress in *Saccharomyces cerevisiae*. [J].Genetics, 2012, 190.DOI:10.1534/genetics.111.128033.
- [34] Zhang M, Zhang A, Han R, et al.Changes of fecal microbiota with supplementation of *Acremonium terricola* culture and yeast culture in ewes during lactation[J].Journal of Animal Science, 2024, 103: skaf174.
- [35] Liu Y, Zhang J, Bu L, et al.Effects of nanoselenium supplementation on lactation performance, nutrient digestion and mammary gland development in dairy cows[J].Animal Biotechnology, 2024, 35 (1) : 2290526.
- [36] Amato A, Cavallo C, Minuti A, et al.Rumen-protected dry grape extract supplementation enhances milk production, behavior traits, and immunometabolism of mid-lactating Fleckvieh cows under naturally occurring heat stress[J].Journal of Dairy Science, 2025, 108 (10) : 11586-11605.
- [37] Seymour D J, Sanz-Fernandez M V, Daniel J B, et al.Effects of supplemental calcium gluconate embedded in a hydrogenated fat matrix on lactation, digestive, and metabolic variables in dairy cattle[J].Journal of Dairy Science, 2021, 104 (7) : 7845-7855.
- [38] Zhao Z, Dong J, Wang D, et al.Metabolomic analysis of rumen-protected branched-chain amino acids in primiparous dairy cows[J].Frontiers in Immunology, 2024, 15: 1385896.
- [39] Kekana T W, Marume U, Nherera-Chokuda F V.Prepartum supplementation of *Moringa oleifera* leaf meal: Effects on health of the dam, colostrum quality, and acquisition of immunity in the calf[J].Journal of Dairy Science, 2022, 105 (7) : 5813-5821.
- [40] Kuroiwa T, Ohtani Y, Obara Y, et al.Effect of Vitamin K3 supplementation on immunoglobulin G concentration in colostrum of periparturient Holstein dairy cows[J].Animal Science Journal, 2022, 93 (1) : e13706.
- [41] Salzano A, Fioriniello S, D' Onofrio N, et al.Transcriptomic profiles of the ruminal wall in Italian Mediterranean dairy buffaloes fed green forage[J].BMC Genomics, 2023, 24 (1) : 133.