牛奶中天然活性成分及其影响因素研究

孙 华，孙菁笛，何金兴，曲静然*

齐鲁工业大学（山东省科学院）食品科学与工程学院，山东济南 250353

摘 要：牛奶是一种营养全面的天然食品，富含蛋白质、脂肪、碳水化合物、维生素和矿物质等多种基础营养成分，同时含有多种具有生理调节功能的天然活性成分。本文系统综述了牛奶中主要天然活性成分——共轭亚油酸（CLA）、α-亚麻酸（ALA）、二十碳五烯酸（EPA）、二十二碳六烯酸（DHA）、乳铁蛋白和免疫球蛋白的生物学功能及其健康效应，并重点分析了饲养方式、饲粮组成、季节变化、胎次及泌乳阶段等因素对其含量的影响，以期为科学饮奶与高附加值乳制品开发提供理论依据。

关键词：牛奶；共轭亚油酸（CLA）；α-亚麻酸（ALA）；二十二碳六烯酸（DHA）；二十碳五烯酸（EPA）；乳铁蛋白；免疫球蛋白

文章编号：1671-4393（2025）09-0135-11 DOI:10.12377/1671-4393.25.09.20

中国乳业线上阅读

0 引言

牛奶被营养学界誉为“液态白金”，是一种营养素全面、均衡的天然食品。它不仅富含优质蛋白质、脂类、碳水化合物、维生素和矿物质等基础营养成分，还含有多种具有重要生理调节功能的天然活性成分[1~3]。由于其高生物利用度和全面的营养构成，牛奶已成为人类膳食中不可替代的重要部分，尤其对儿童生长发育、孕产妇营养以及老年健康具有显著益处[4~6]。近年来，随着人们对健康需求的不断提升，牛奶中的生物活性成分——如共轭亚油酸（CLA）、乳铁蛋白(LF）、免疫球蛋白以及多种多不饱和脂肪酸——因其广泛的健康效应而备受关注。这些成分的含量与组成受到饲养管理、饲料来源、季节、胎次及泌乳阶段等多种因素的影响。因此，系统研究牛奶中天然活性成分的生物学功能及其影响因素，对指导健康饮奶、开发高附加值乳制品具有重要意义。本文旨在对该领域的研究进展进行综述，以期为相关科研与产业发展提供理论参考。

1 牛奶的营养成分

1.1 乳蛋白

牛奶的蛋白质含量为2.8%～4.0%，在模拟胃肠消化环境下消化率接近100%，远高于大多数植物蛋

基金项目：横向课题[2024KY（JY）HT0414]；齐鲁工业大学（山东省科学院）实验教学和创新实验室建设研究项目资助（2025syyb05）

作者简介：孙 华（1981-），女，山东肥城人，博士，实验师，研究方向为功能性食品的研究与开发；
孙菁笛（1987-），女，山东威海人，硕士，讲师，研究方向为食品物性与组分；
何金兴（1978-），男，山东临沂人，博士，教授，研究方向为食品加工过程质量控制。
*通信作者：曲静然（1970-），女，山东烟台人，硕士，副教授，研究方向为食品生物技术。

白，属于优质膳食蛋白质来源。由于其突出的功能与营养特性，牛奶蛋白在乳品及食品工业中备受重视，被广泛应用于多种食品、临床和制药产品配方中[7]。

乳蛋白主要包括酪蛋白和乳清蛋白。其中，酪蛋白约占蛋白质总量的80%，可分为αs1−、αs2−、β−和κ−酪蛋白4 种亚型。其等电点为pH4.6，热稳定性良好，并能与钙离子结合，有助于提高钙的吸收率。酪蛋白在抗菌、免疫调节及辅助癌症治疗等方面显示出潜在价值，在保健与医疗领域的应用日益广泛。此外，它还可通过与其它物质结合实现分子递送，提升疏水性化合物的生物利用度与稳定性[7]。

乳清蛋白是牛奶中另一类关键功能组分，主要由β−乳球蛋白（约57%）、α−乳白蛋白（约15%）以及具有免疫调节功能的活性成分（如乳铁蛋白，约0.5 g/L；免疫球蛋白IgG，约3%）构成。乳清蛋白具备全面的必需氨基酸组成，可通过调节炎症因子分泌和促进免疫球蛋白合成，协同增强机体防御机制与代谢平衡，对促进儿童生长发育、减轻炎症反应及提升免疫力具有重要作用[8]。

1.2 乳脂肪

牛奶中的脂肪含量一般为2.8%～4.0%，以多级球状乳糜微粒的形式存在，粒径范围在0.1～10.0 μm之间。其结构以内核的甘油三酯为核心，外层覆盖10～50 nm厚的乳脂肪球膜（MFGM）[9]。该膜主要由磷脂−蛋白复合物构成，其中鞘磷脂约占22%，神经节苷脂约占18%。研究表明，MFGM可通过AMPK/PPARα信号通路减少脂肪积累并改善胰岛素敏感性[10~13]。

作为最复杂的天然脂质之一，牛奶脂肪的主要成分为甘油三酯（占总脂肪97%以上），并包含400 多种不同的脂肪酸（FAs）。其余组分包括磷脂（如卵磷脂、脑磷脂和神经磷脂）、甾醇（如胆固醇及其酯类）、少量脂溶性维生素（如维生素A、D、E）、抗氧化剂（如生育酚）、色素（如胡萝卜素）以及风味物质（如乳酸、醛聚合物和酮类）[14]。

牛奶脂肪的营养特性与其脂肪酸组成密切相关。其中，饱和脂肪酸（SFA）约占70%，单不饱和脂肪酸（MUFA）约占25%，多不饱和脂肪酸（PUFA）约占5%。SFA作为主要成分显著影响乳制品的理化性质，而MUFA与PUFA的比例则与多种健康效应密切相关[15]。目前研究关注较多的FA包括n−3PUFA和共轭亚油酸（CLA）等。

牛奶中的n−3 PUFA种类丰富但含量较低，主要包括α−亚麻酸（ALA）、二十碳五烯酸（EPA）和二十二碳六烯酸（DHA）。这类FA为人体必需FA，无法自身合成，需依靠膳食摄取。n−3 PUFA在促进神经系统发育、维护脑结构与功能、支持儿童认知发展以及预防心血管疾病、糖尿病、肿瘤和肾脏疾病等方面均具有积极作用[16~21]。因此，提高牛奶中n−3 PUFA含量，有助于增加日常摄入量，从而对公众健康产生积极影响。

1.3 乳糖

牛奶中碳水化合物的含量为3.4%～5.4%，其中乳糖是主要成分，也是牛奶中重要的热量来源。作为一种双糖，乳糖在体内被分解为葡萄糖和半乳糖。半乳糖对神经系统的发育和功能维持具有重要作用，能够促进脑苷脂和粘多糖的合成。因此，在婴幼儿配方奶粉中，乳糖应作为碳水化合物的主要来源，且占总碳水化合物的90%以上。

此外，牛奶中还含有少量牛乳低聚糖（BMO）。研究发现，BMO在结构上与母乳低聚糖相似，可作为替代营养源，是婴幼儿配方奶粉中模拟母乳低聚糖的理想天然成分。BMO具有多种生物学功能：在肠道健康方面，它能够选择性促进双歧杆菌等益生菌的增殖，优化肠道菌群，并形成生物屏障以抑制病原体在肠上皮的定植。BMO还可双向调节机体免疫反应，并有助于新生儿神经元突触的形成，促进神经发育。研究还表明，BMO具有广谱抗病毒活性，对坏死性肠炎（ZFC）、轮状病毒性腹泻及围产期感染性肠病等婴幼儿消化道疾病具有

中国乳业线上阅读

显著的预防和治疗效果，尤其在降低早产儿院内感染风险方面显示出重要临床价值[22]。

1.4 维生素和矿物质

牛奶作为优质营养源，其脂溶性维生素（如维生素A、D）和水溶性B族维生素的含量处于动态变化之中。研究表明，牛奶中维生素的组成不仅取决于奶牛品种的遗传背景，还受到牧场饲喂管理（如粗饲料配比与青贮质量）、泌乳周期（夏季与冬季产奶差异）以及加工工艺（如巴氏杀菌和超高温瞬时灭菌/UHT）等多因素的综合调控。

同时，牛奶也是优质的膳食钙来源，其矿物质谱包含钙（含量为100～120 mg/100 g）、磷、钾等常量元素和碘、硒等微量营养素。其中，钙磷比接近1.3:1的黄金比例，可通过磷酸盐协同转运机制显著提高钙的生物利用效率。需要指出的是，乳中矿物质的组成也受泌乳阶段和加工工艺的影响，例如巴氏杀菌可能改变钙离子活性，而超滤处理则有助于调节钠钾平衡。

2 牛奶中的主要天然活性成分

2.1 天然活性 FAs

2.1.1 CLA

CLA是一类具有共轭双键结构的亚油酸异构体总称，其双键可位于碳链8～13之间的不同位置，并呈现顺式或反式构型。最主要的两种异构体为顺式-9，反式-11（c9，t11）和反式-10，顺式-12（t10，c12），其中 c9，t11 约占CLA总量的80%～90%，t10，c12占3%～5%[23]。

CLA具有多种生理功能，包括提高免疫力、缓解炎症、减少体脂，并对多种疾病表现出抵抗作用。在脂代谢调节方面，一项针对肥胖人群的研究显示，连续12周每日补充3.4 g CLA可显著降低肥胖指数，且未观察到明显不良反应[24，25]。其抗氧化与抗炎特性也与自由基清除能力密切相关。

CLA对肠道健康具有双重保护机制：不仅可通过调节菌群和氧化应激间接增强屏障功能，还能直接调控粘蛋白、紧密连接蛋白及炎症因子表达，从而改善结肠炎相关指标[26，27]。在坏死性小肠结肠炎（NEC）——一种常见于早产儿的高死亡率肠道疾病，CLA被确认为关键的改善性代谢物。研究表明，CLA通过降低促炎细胞因子、维持上皮更新和修复紧密连接，发挥抗NEC作用[28]。

此外，CLA还具有抗肿瘤、抗动脉粥样硬化、心脏保护、心血管疾病预防和菌群调节等功能，是迄今唯一被广泛认定具有抗癌活性的脂肪酸，被誉为“21世纪的新型营养素”[29~31]。其安全性已获多国权威机构认可：我国卫生部于2009年批准CLA作为食品添加剂使用；美国FDA将其按膳食补充剂管理；欧洲食品安全局（EFSA）也确认CLA混合异构体（c9，t11与t10，c12）作为新食品成分的安全性，允许摄入量最高达3.5 g/天。

2.1.2 ALA

ALA化学名称为全顺式-9，12，15-十八碳三烯酸，是一种非共轭立体构型的n-3 PUFA，也是牛奶中含量最高的n-3 FA。作为人体必需的C18 FA，ALA被誉为生命核心物质。人体无法自行合成ALA，必须通过膳食摄取。进入体内后，ALA可经碳链延长和去饱和作用，转化为更长链的n-3 PUFA，如EPA和DHA，这些衍生物对维持正常生理机能和整体健康至关重要[32]。

除基本营养功能外，ALA在疾病预防与治疗方面也显示出显著效果，已被广泛应用于食品、保健品及医药领域[32]。研究表明，ALA具有调节血脂、辅助减肥、降血压、预防心脑血管疾病、抑制癌症、抗炎、抗氧化及抗衰老等多种生理功效[33]。

在神经保护方面，ALA的富集可提高DHA水平，可能有助于保护神经元，从而对阿尔茨海默病（AD）等神经退行性疾病发挥预防作用[34]。怀孕期间母体补充ALA可增加胎儿大脑磷脂中DHA含量，并上调DHA转运相关基因与蛋白表达，对后代大脑发育和认知功能产生持久积极影响，甚至可改善19周龄后代的记忆表现[35]。

中国乳业线上阅读

ALA通过改善血脂、降低血压和减缓动脉硬化等多途径发挥心脏保护作用。早在1994年，人体试验就发现富含ALA的地中海饮食对冠心病二级预防具有显著效果[36]。近年研究进一步表明，ALA可通过降低血浆脂多糖水平增强肠道完整性、调节肠道微生物群组成及短链脂肪酸与胆汁酸代谢，从而预防和改善心血管疾病，但其具体机制仍需深入探索[37]。

在代谢性疾病方面，2023年Xi等[38]研究发现补充ALA可有效降低2型糖尿病（T2DM）患者的糖化血红蛋白（HbA1c）水平，尤其适用于血糖控制不佳者。Liu等[39]揭示ALA通过G蛋白偶联受体120激活巨噬细胞并调节其极化状态，发挥抗炎作用，从而改善糖尿病病情。

此外，富含ALA的饮食可抑制自发性或致癌物诱导的乳腺肿瘤发展，并通过调控细胞粘附与集落形成阻遏结肠癌扩散。研究还发现ALA能够影响线粒体蛋白质输入及柠檬酸循环途径，显著调节结肠癌细胞的恶性表型[40]。

2.1.3 EPA 和 DHA

EPA与 DHA均属于n−3 PUFA，前者常被称为“血管清道夫”，后者则被誉为“脑黄金”。在生乳中，EPA含量略高于DHA，但两者含量均较低。它们在人体内可以ALA为前体，通过碳链延长和去饱和反应合成。尽管牛奶中EPA和DHA的含量有限，两者却在人体多项生理过程中发挥关键作用，已被证实具有抗炎、抗过敏、降低心血管疾病和癌症风险、延缓中老年神经退行性变化、增强免疫力以及促进婴幼儿视力和智力发育等功能。

EPA和DHA通过酰基链重构参与细胞膜脂筏微域的形成，影响膜受体构象与激活，对维持细胞膜稳定性与功能具有重要作用。DHA是胎儿神经和视网膜发育的关键成分。在妊娠末3 个月，DHA大量积累于神经和视网膜组织中，胎儿脑组织中DHA每日积累速率可达12 mg/kg。该过程依赖于胎盘脂蛋白脂酶（LPL）及CD36/FATP4转运体完成DHA的跨膜输送。

DHA对大脑结构及功能完整性至关重要。它通过激活脑源性神经营养因子BDNF/TrkB信号通路，可使海马区神经突触密度增加37%，这一机制在2～6岁儿童前额叶髓鞘化关键期尤为显著。研究表明，连续12 个月每日补充200 mg DHA，可提高学龄儿童工作记忆测试的正确率，并使注意力网络测试反应时间缩短83 ms。因此，充足的DHA摄入有助于增强儿童的智力、注意力与记忆力，并降低系统性疾病的发病风险。

此外，DHA还表现出显著的抗氧化能力，可通过激活NRF2/ARE信号通路提高超氧化物歧化酶（SOD）活性，降低海马区8−OHdG等氧化应激标志物水平，并抑制由锌转运体ZIP4介导的caspase−3激活，从而发挥神经保护作用，有效降低AD和帕金森病的发病风险。

2.2 天然活性蛋白质

2.2.1 LF

LF因其多种生理功能被广泛应用于食品、医药及保健品等领域。它有助于胎儿正常组织发育，包括促进骨化、保障充足的铁供应与吸收、预防感染和炎症，对母婴健康均具有积极意义[41]。LF作为重要的营养强化剂，被添加至婴幼儿配方乳粉中，以提高其营养价值和保健功能。此外，它还用于制备抗菌剂、抗病毒剂和免疫调节剂等医药产品。近年来，欧洲食品安全局（EFSA）已将LF正式列入食品成分许可清单。在中国，LF已完成作为食品添加剂的应用转化，并获得国家食品药品监督管理总局（CFDA）的审批认证。值得关注的是，中国营养学会妇幼营养分会发布的《乳铁蛋白婴幼儿健康效应专家共识》系统阐述了其临床价值：研究证实，婴幼儿定期摄入LF可显著改善营养吸收、增强抗病能力；该成分对孕产妇群体也具有独特的补铁功效，为防治缺铁性贫血提供了新的营养干预策略。

（1）结构与性质

LF是转铁蛋白家族的重要成员，主要在哺乳动物乳腺上皮细胞中生物合成。该糖蛋白具有非血红素铁结合特性，其单链多肽由708 个氨基酸残基组

中国乳业线上阅读

成，分子量约为80 ku。序列比对显示，其与人乳LF具有69%的同源性，为功能相似性提供了结构基础[42]。LF富含赖氨酸、精氨酸等碱性氨基酸，等电点（pI）偏碱（8～9），在低于等电点的环境中表面带强正电荷，可特异性结合阴离子配体及带负电分子，这构成了其抗菌与免疫调节等多元生物效应的物理化学基础[43]。从二级结构看，LF呈典型的α－螺旋与β－折叠交替排列，为其构象可塑性与功能域暴露提供了结构支持[44]。其三维空间被折叠成近乎对称的叶状结构域，分别标记为N叶和C叶（图1）[45]。

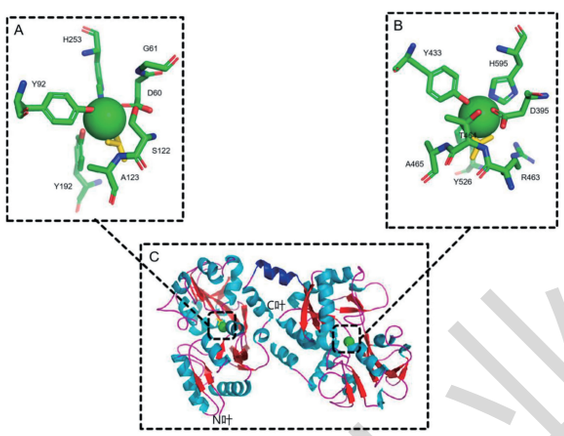


图1 乳铁蛋白分子结构

注：A，乳铁蛋白N叶中铁周围氨基酸的分布，其中Asp60，Tyr92，Tyr192和His253参与稳定铁；B，乳铁蛋白C叶中铁周围氨基酸的分布，其中Asp395，Tyr433，Tyr526和His595参与稳定铁；C，乳铁蛋白三维结构结构图，青色表示α－螺旋，红色表示β－折叠，品红表示不规则卷曲，绿色表示铁，黄色表示碳酸盐离子，蓝色表示α－螺旋连接在N叶和C叶之间

（2）功能与应用

研究表明，LF与甘油单月桂酸酯（GML）对多种革兰氏阳性菌和阴性菌均具有显著抗菌效果，这些细菌常与新生儿感染相关，因此二者在婴儿配方奶粉中作为抗菌剂应用具有重要意义[46]。Sherman等[47]对体重≤1 500 g的极低出生体重儿经鼻饲给予LF，持续28 天。微生物组测序显示，干预组患儿肠道菌群发生特征性重构：肠杆菌科中的致病菌属（如克雷伯菌属）及葡萄球菌属定植水平受到剂量依赖性抑制，条件致病菌相对丰度下降35%～42%，表明LF可能通过营养–微生物组调控轴维持肠道微生态平衡。Alkhulaifi等[48]通过琼脂扩散试验评估LF的抗菌性能，发现4 mg/mL LF对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抑制效果最佳，抑菌圈分别达16.5 mm和14.0 mm；10 mg/mL LF对肺炎克雷伯菌（12.5 mm）和粪肠球菌（12 mm）的抑菌活性最强，说明其最适抑菌浓度因微生物类型而异。

研究表明，早产儿补充LF可降低败血症和NEC发生风险，缩短住院时间。补充LF还能降低婴幼儿和儿童呼吸道及胃肠道疾病发生率，缩短病程，且呈剂量反应关系，高剂量LF预防效果更优。LF联合标准三联疗法可提高儿童幽门螺杆菌根除率，降低不良反应发生率。目前我国尚无LF药品制剂，可通过普通食品或强化奶粉进行补充[49]。

LF及其活性肽的抑菌机制具有多维度特性，主要包括以下五类路径：（1）膜通透性干预机制：凭借正电特性与革兰氏阴性菌脂多糖结合，诱导外膜崩解和细胞完整性破坏；（2）铁离子竞争机制：结合病原体铁转运受体，截获微生物代谢所需铁元素，其中铁不饱和态抑菌活性更强；（3）毒力因子降解功能：通过N端蛋白酶活性切割细菌侵袭性蛋白复合物，阻断病原体与宿主细胞粘附；（4）免疫协同效应：激活单核/巨噬细胞系统，促进IL-12合成，增强吞噬功能及T淋巴细胞活化；（5）空间位阻作用：竞争性结合宿主细胞表面糖胺聚糖，降低病原体定植概率。

在肠道微生态调控方面，LF具有多靶点调节特性：通过增强紧密连接蛋白表达、促进绒毛发育和隐窝结构优化，提升物理屏障功能；调节黏蛋白分泌及抗菌肽表达，强化化学屏障；通过提高免疫球蛋白（IgG/IgM）水平、下调促炎因子（IL-1β/IL-6），协同Th1/Th2淋巴细胞分化调控，构建免疫稳态微环境[50]。临床研究证实，LF可抑制致病菌增殖，修复肠黏膜屏障，改善菌群结构，在新生儿NEC防治和腹泻控制中效果显著[51，52]。动物实验表明，LF可重构Dex模型小鼠肠道菌群，提高有益菌丰度和菌群多样性[53]。上述多重生物活性共同构成LF维持肠道健康的分

中国乳业线上阅读

子基础，涵盖机械屏障修复、免疫调控及生物屏障重塑等多维度机制。

LF具有抗炎特性，主要通过调节免疫细胞增殖与分化及细胞因子释放来调控炎症反应[54，55]。它储存于中性粒细胞中，在炎症反应时释放以抑制局部炎症，对皮肤炎症、胃肠道炎症、无菌与脓毒性炎症及急慢性炎症均具有作用，逐渐成为一种有效的抗炎剂[56，57]。LF被视为哺乳动物的“免疫调节剂”，能双向调节免疫系统，增强宿主防御，同时避免过度免疫反应。其免疫调节作用主要通过作用于免疫细胞和免疫因子实现，还可通过改变抗菌物质表达和结合免疫细胞介质影响免疫反应。研究表明，LF能抵抗婴儿胃肠道消化，以完整形式吸收入血，发挥生理功能，可预防感染，促进免疫系统、肠道、大脑发育和骨骼健康，并改善缺铁性贫血[58]。

LF对多种癌症（如结肠癌、胃癌、乳腺癌、肺癌、肾癌、宫颈癌等）具有抑制和抵抗作用[59]。作为一种天然糖蛋白，LF对轮状病毒、阿尔法病毒、脊髓灰质炎病毒、疱疹病毒、呼吸道合胞病毒（RSV）、细胞巨化病毒及腺病毒等多种病毒表现出较强的抗病毒活性[60]。其抗病毒效果因病毒类型而异，且与LF浓度呈正相关。

作为乳源生物活性分子的代表，LF凭借其唾液酸化糖蛋白属性，在神经系统调控中发挥双重保护效应。在神经发育层面，LF通过干预Wnt/β-catenin、BDNF/TrkB等信号通路，促进神经元突触可塑性与轴突导向，提升海马区神经干细胞分化效率及神经网络成熟度，从而优化认知与学习记忆功能。在神经退行性病变防控方面，LF凭借铁离子配位特性发挥双重调节功能：一方面螯合游离铁、阻断Fenton反应，降低脑组织氧化损伤；另一方面平衡铁调素-铁转运蛋白轴表达，纠正铁代谢异常引发的神经元铁沉积，延缓AD、帕金森病等病理进程。这种从促进神经发育到阻遏退行性损伤的双向调控模式，凸显了LF在神经科学领域的多维度价值。

除上述功能外，LF还参与铁代谢、促进矿物质吸收、减脂、调节糖脂代谢、抗氧化、促进伤口愈合和骨骼生长等多种生物学过程。作为多功能生物活性物质，LF已实现跨行业应用，涵盖食品工业（功能性配料与营养强化剂）、畜牧养殖业（生长促进与免疫调节组分）、生物医药（靶向递送载体及辅助治疗剂）及功效型化妆品（抗衰修护活性成分）等领域。在商业化开发中，LF既可作为食品级添加剂提升产品附加值，也可开发为精准递送系统用于靶向治疗。对其构效关系及作用通路的深入研究，将推动其在精准营养干预、智能药物递送等领域的创新应用，为健康产业提供新解决方案。

2.2.2 免疫球蛋白

球蛋白是一类具有抗体活性的球蛋白，能够与相应抗原发生特异性结合，是牛奶中重要的免疫活性成分。牛奶中的免疫球蛋白主要包括IgG、IgM和IgA等，其中IgG含量最为丰富。IgG又可进一步分为IgG1和IgG2两个亚类。所有免疫球蛋白均具有相似的基本结构：由两条相同的轻链（约23 kDa）和两条相同的重链（约53 kDa）通过二硫键连接而成。每条重链和轻链的N端共同构成一个抗原结合位点，这种结构对其发挥免疫调节功能具有重要意义。

免疫球蛋白在体内具有多种生物功能，包括调节免疫反应、阻止病原体入侵、中和毒素、清除肿瘤细胞及外来抗原等，表现出抗菌、抗病毒和免疫调节等多重作用。IgG能够结合并凝集抗原，有效中和毒素和病原微生物（如病毒），同时也是母体向幼崽传递特异性免疫力的主要媒介。免疫球蛋白还具有抗蛋白酶水解的特性，能够以完整形态进入近端小肠，凝集细菌、中和细菌毒素，增强肠道局部免疫力，从而有效保护小肠黏膜。婴幼儿通过摄入富含免疫球蛋白的配方乳粉，可增强消化系统抵抗力，更好地抵御病原菌侵袭[61]。

3 影响牛奶成分的主要因素

3.1 饲养方式

集约化饲养是现代商业奶牛养殖的主要模式之

中国乳业线上阅读

一，其特点为高度集中化管理，通过科学的饲养与营养配比实现高效产奶。该方式能够严格控制奶牛生活环境，提供充足均衡的饲料，有助于维持奶牛健康并保障稳定的产奶量。然而，集约化环境也带来一系列健康问题，如蹄病、乳腺炎和趾部皮炎等，导致奶牛淘汰率上升。

相比之下，放牧饲养是一种更接近自然的生产方式，奶牛可在自然环境中自由采食和活动，主要摄取天然草料（如青草、干草），并辅以少量精饲料。该方式有助于奶牛维持自然行为状态，降低产奶压力，减少疾病发生，增强体质和免疫力。研究表明，放牧饲养所产牛奶在脂肪、蛋白质以及免疫球蛋白和乳铁蛋白等生物活性成分含量上均高于集约化饲养[62]。具体而言，放牧奶牛奶中ALA、n-3 FA和CLA的含量分别为集约化饲养的2.48~2.60倍、3.60倍和3.03~3.20倍[63~65]。笔者研究还发现，每日放牧6 h并采食新鲜黑麦草的奶牛，所产牛奶中ALA、CLA和n-3 FA含量较非鲜草饲喂组高出3倍。这主要由于黑麦草富含亚油酸和ALA等活性不饱和脂肪酸，这些物质在奶牛瘤胃内经氢化反应后，最终在乳腺中转化为CLA和ω-3 FA等有益成分。

3.2 日粮组成

日粮是调控生乳中n-3 PUFA含量的关键因素。通过添加n-3 PUFA补充剂或特定饲料原料（如鱼油、亚麻籽、藻类、微藻及奇亚籽等），可有效提高奶中n-3 PUFA水平。其中，鱼油主要提供EPA和DHA，藻类和微藻富含DHA，亚麻籽和奇亚籽则是ALA的良好来源。此外，合理的精粗比不仅有助于维持奶牛健康，还能通过降低粗饲料比例减轻瘤胃氢化作用，从而提高牛奶脂肪中ALA含量，且不影响奶牛健康与泌乳性能。

3.3 季节变化

季节变化对牛奶中共轭亚油酸（CLA）含量具有显著影响，这与牧草质量、饲料组成及环境因素密切相关。春夏季牧草丰富且富含PUFA（如亚油酸和ALA），这些是CLA合成的重要前体。奶牛采食后，瘤胃微生物通过生物氢化作用将亚油酸转化为CLA（其中cis-9，trans-11 CLA占80%以上），因此春夏季牛奶中CLA含量高于秋冬季。

冬季牛奶中LF含量通常高于夏季，且随管理水平提高和气温降低呈上升趋势[66]。杨晋辉等[67]报道，春季和夏季牛奶中IgM、IgA和LF含量存在显著差异：夏季IgM含量高于春季，而IgA和LF含量因牧场环境和奶牛免疫状态不同呈现不一致的季节变化。

3.4 胎次

胎次对牛奶成分也有明显影响。LF浓度随胎次增加而上升，初产时最低（13.61 mg/mL），至第5胎时达到最高（16.28 mg/mL），较初产牛奶高出19.6%。同样，免疫球蛋白（如IgG）浓度也随泌乳次数和年龄增加而提高，初产牛奶中的IgG含量显著低于经产奶牛[68]。

3.5 泌乳阶段

LF和免疫球蛋白的含量随泌乳阶段发生变化。初乳中两者含量最高，随后免疫球蛋白逐渐下降，LF则呈现先降后升的趋势[69, 70]。研究表明，泌乳100 天时MUFA和PUFA含量达到峰值，分别为32.334 g/100 g FA和3.553 g/100 g FA；而泌乳200天时SFA和CLA含量最高，分别为63.238 g/100 g FA和1.378 g/100 g FA[71]。

4 小结

牛奶是一种营养全面的天然食品，也是多种生物活性成分的重要载体。其中的活性蛋白质具有多重保护功能：免疫球蛋白能够识别并中和有害细菌与病毒，阻断病原体入侵，预防感染；LF可通过结合铁离子剥夺微生物必需营养，并直接破

中国乳业线上阅读

坏细菌细胞膜，发挥广谱抗菌作用；CLA可参与调节脂肪、肌肉、骨骼代谢及免疫炎症反应，并具有降脂和改善血糖的潜力；n-3 FA则为脑细胞提供关键营养，有助于增强认知功能，改善神经系统疾病和情绪障碍。

当前，我国正步入营养与健康发展的新阶段，健康食品消费需求潜力巨大。随着居民健康意识的持续提升，人均牛奶消费量预计将稳步增长，进一步推动奶业生产规模的扩大。未来，通过深化对牛奶中生物活性成分的研究与开发，这些功能性物质将更广泛应用于烘焙、糖果、乳制品、饮料等多个食品工业领域，为健康产品创新提供核心原料支撑。

参考文献

[1] Amalfitano N，Patel N，Haddi M L，et al.Detailed mineral profile of milk，whey，and cheese from cows，buffaloes，goats，ewes and dromedary camels，and efficiency of recovery of minerals in their cheese[J].Journal of Dairy Science，2024，107（11）：8887-8907.

[2] Pereira P C.Milk nutritional composition and its role in human health[J].Nutrition，2014，30（6）：619-627.

[3] Watson R R，Collier R J，Preedy V R.Nutrients in Dairy and their Implications on Health and Disease[M].，Amsterdam：Elsevier Inc，2017.

[4] 王加启，郑楠，李松励.中国奶产品质量安全研究报告（2017年度）[R].北京：中国农业科学技术出版社，2018.

[5] Ach ó n M，Úbeda N，Garc í a-Gonz á lez Á，et al.Effects of milk and dairy product consumption on pregnancy and lactation outcomes：A systematic review[J].Advances in Nutrition，2019，10（suppl_2）：S74-S87.

[6] Patil G B，Wani S P，Bafna P S，et al.Milk adulteration：From detection to health impact[J].Food and Humanity，2024，3：100339.

[7] 刘正清，王志坤，葛鑫，等.牛奶中酪蛋白的结构和作用研究进展[J].中国奶牛，2024（5）：38-43.

[8] 王磊，成雪，毛学英.乳清蛋白及其活性多肽的生物学功能研究进展[J].中国农业科技导报，2010，12（5）：30-35.

[9] Lopez C，Briard-Bion V，M é nard O，et al.Fat globules selected from whole milk according to their size：Different compositions and structure of the biomembrane，revealing sphingomyelin-rich domains[J].Food Chemistry，2011，125（2）：355-368.

[10] Li T，Gao J，Du M，et al.Milk fat globule membrane attenuates high-fat diet-induced obesity by inhibiting adipogenesis and increasing uncoupling protein 1 expression in white adipose tissue of mice[J].Nutrients，2018，10（3）：331.

[11] Yuan Q C，Zhan B Y，Du M，et al.Dietary milk fat globule membrane regulates JNK and PI3K/Akt pathway and ameliorates type 2 diabetes in mice induced by a high-fat diet and streptozotocin[J].Journal of Functional Foods，2019，60：103435.

[12] 姜佳齐，羊玉凤，李建锋，等.牛奶及乳脂摄入对脂质代谢影响的初步研究[J].基因组学与应用生物学，2024，43（11）：1746-1760.

[13] Yan K，Ma X Y，Jiang M C，et al.Effects of bovine milk and buffalo milk on lipid metabolism in mice[J].J. Journal of animal physiology and animal nutrition，2023，107（2）：428-434.

[14] Shingfield K J，Bonnet M，Scollan N D.Recent developments in altering the fatty acid composition of ruminant-derived foods[J].Animal，2013，7（s1）：132-162.

[15] 倪炜，王梦琦，张少卿，等. 荷斯坦牛与娟姗牛乳脂肪酸组成与测定日泌乳性能的差异分析[J].中国奶牛，2018（5）：24-29.

[16] Khoshvaght A，Towhidi A，Zare-Shahneh A，et al.Dietary n-3 PUFAs improve fresh and postthaw semen quality in Holstein bulls via alteration of sperm fatty acid composition[J].Theriogenology，2016，85（5）：807-812.

[17] Kabeya N，Fonseca M M，Ferrier D E K，et al.Genes for de novo biosynthesis of omega-3 polyunsaturated fatty acids are widespread in animals[J].Science Advances，2018，4（5）：eaar6849.

[18] Saini R K，Keum Y S.Omega-3 and omega-6 polyunsaturated fatty acids：Dietary sources，metabolism，and significance—A review[J].Life Sciences，2018，203：255-267.

[19] 刘玉鹏，夏佳，秦炯.Omega-3多不饱和脂肪酸对脑发育及脑功能的价值[J].中国实用儿科杂志，2023，38（10）：741-745.

[20] Culussi G，Catena C，Novello M，et al.Impact of omega-3 polyunsaturated fatty acids on vascular function and blood pressure：Relevance for cardiovascular outcomes[J].Nutrition Metabolism And Cardiovascular Diseases，2017，27（3）：191-200.

[21] Al-Ghannami S S，Al-Adawi S，Ghebremeskel K，et al.Randomised open-label trial of docosahexaenoic acid-enriched fish oil and fish meal on cognitive and behavioural functioning in Omani children[J].Nutrition，2019（57）：

中国乳业线上阅读

167–172.

[22] 董人华，滕国新，王晓杰，等.牛乳低聚糖的结构和功能研究及其开发应用[J].中国乳品工业，2022，50（12）：34–38.

[23] Badawy S，Liu Y，Guo M，et al Conjugated linoleic acid（CLA） as a functional food：Is it beneficial or not? [J].Food Research International，2023，172：113158.

[24] Viladomiu M，Hontecillas R，Bassaganya–Riera J.Modulation of inflammation and immunity by dietary conjugated linoleic acid[J].European Journal of Pharmacology，2016，785：87–95.

[25] Ali Y M，Kadir A A，Ahmad Z，et al.Free radical scavenging activity of conjugated linoleic acid as single or mixed isomers[J].Pharmaceutical Biology，2012，50（6）：712–719.

[26] Chen Y，Yang B，Ross R P，et al.Orally administered CLA ameliorates DSS–induced colitis in mice via intestinal barrier improvement，oxidative stress reduction，and inflammatory cytokine and gut microbiota modulation[J].Journal of Agricultural and Food Chemistry，2019，67（48）：13282–13298.

[27] Ren Q，Yang B，Zhang H，et al.C9，t11，c15–CLNA and t9，t11，c15–CLNA from Lactobacillus plantarum ZS2058 ameliorate dextran sodium sulfate–induced colitis in mice[J].Journal of Agricultural and Food Chemistry，2020，68（12）：3758–3769.

[28] Jiang C Y，Zhang F，Zhang M，et al.Conjugated linoleic acid ameliorates necrotizing enterocolitis by suppressing inflammatory responses and maintaining intestinal barrier integrity via the PPAR γ/NF κ B signaling pathway[J].Journal of Functional Foods，2024，123：106581.

[29] Dilzer A，Park Y.Implication of conjugated linoleic acid（CLA） in human health[J].Critical Reviews in Food Science and Nutrition，2012，52（6）：488–513.

[30] Hartigh L J.Conjugated linoleic acid effects on cancer，obesity，and atherosclerosis：A review of pre–clinical and human trials with current perspectives[J].Nutrients，2019，11（2）：370.

[31] Derakhshande–Rishehri S M，Mansourian M，Kelishadi R，et al.Association of foods enriched in conjugated linoleic acid（CLA） and CLA supplements with lipid profile in human studies：A systematic review and meta–analysis[J].Public Health Nutrition，2014，18（11）：2041–2054.

[32] 巩振虎，刘义章，周凯，等.α–亚麻酸的制备与分离技术研究进展[J].商丘师范学院学报，2021，37（12）：24–27.

[33] Huang W，Hu M，Yuan Q，et al.The review of alpha–linolenic acid：Sources，metabolism，and pharmacology[J].Phytotherapy Research，2022，36：164–188.

[34] Leikin–Frenkel A，Schnaider B M，Cooper I.How alpha linolenic acid may sustain blood–brain barrier integrity and boost brain resilience against alzheimer’s disease[J].Nutrients，2022，14（23）：5091.

[35] Leikin–Frenkel A，Liraz–Zaltsman S，Hollander K S，et al.Dietary alpha linolenic acid in pregnant mice and during weaning increases brain docosahexaenoic acid and improves recognition memory in the offspring[J].The Journal of Nutritional Biochemistry，2021，91：108597.

[36] De Lorgeril M，Renaud S，Salen P，et al.Mediterranean alpha–linolenic acid–rich diet in secondary prevention of coronary heart disease[J].Lancet，1994，343（8911）：1454–1459.

[37] Li Y，Yu Z，Liu Y，et al.Dietar α–linolenic acid–rich flaxseed oil ameliorates high–fat diet–induced atherosclerosis via gut microbiotainflammation–artery Axis in ApoE−/− mice[J].Frontiers in Cardiovascular Medicine，2022，9：830781.

[38] Xi H，Zhou W，Sohaib M，et al.Flaxseed supplementation significantly reduces hemoglobin A1c in patients with type 2 diabetes mellitus：A systematic review and meta–analysis[J].Nutrition Research，2023，110：23–32.

[39] Liu Y Y，Guo M X，Li Y W，et al. α–Linolenic acid regulates macrophages via GPR120–NLRP3 inflammasome pathway to ameliorate diabetic rats[J]. Journal of Functional Foods，2022（99）：105348.

[40] Gonz á alez–Fern á ndez M J，Ortea I，Guil–Guerrero J L. α–Linolenic and γ–linolenic acids exercise differential antitumor effects on HT–29 human colorectal cancer cells[J].Toxicology Research，2020，9（4）：474–483.

[41] Artym J，Zimecki M，Kruzel M L.Lactoferrin for prevention and treatment of anemia and inflammation in pregnant women：A comprehensive review[J].Biomedicines，2021，9（8）：898.

[42] Liu L，Guo Q，Cui M.Impact of maternal nutrition during early pregnancy and diet during lactation on lactoferrin in mature breast milk[J].Nutrition（Burbank，Los Angeles County，Calif.），2022，93：111500.

[43] 许琳霜，屈晓清，曾小凤，等.天然和热变性乳铁蛋白与α–乳白蛋白聚集体的超分子结构表征[J].食品工业科技，2020，41（15）：15–20，28.

[44] Dierick M，Vanrompay D，Devriendt B，et al.Minireview：Lactoferrin，a versatile natural antimicrobial glycoprotein which modulates host innate immunity[J].Biochemistry and

中国乳业线上阅读

Cell Biology，2020，99（2）：61–65.

[45] Hu C，Shen W，Xia Y，et al.Lactoferrin：Current situation and future prospects[J].Food Bioscience，2024，62：105183.

[46] Sawale M，Singh A，Gutierrez V，et al.Antimicrobial effect of lactoferrin and glycerol monolaurate on selected bacteria associated with newborn infectionss[J].Food Control，2025（168）：110882.

[47] Sherman M P，Sherman J，Arcinue R，et al.Randomized control trial of human recombinant lactoferrin：A substudy reveals effects on the fecal microbiome of very low birth weight infants[J].Journal of Pediatrics，2016，173：37–42.

[48] Alkhulaifi M M，Alosaimi M M，Khan M S，et al.Assessment of broadspectrum antimicrobial，antibiofilm，and anticancer potential of lactoferrin extracted from camel milk[J].Applied Biochemistry and Biotechnology，2024，196（3）：1464–1480.

[49] 中国医疗保健国际交流促进会营养与代谢管理分会.乳铁蛋白临床应用中国专家共识[J].中华预防医学杂志，2022，56（12）：1694–1701.

[50] 吴洪亚，高亚男，王加启，等.乳铁蛋白对肠道屏障保护作用的研究进展[J].现代食品科技，2023，39（11）：371–380.

[51] Manzoni P，Meyer M，Stolfi I，et al.Bovine lactoferrin supplementation for prevention of necrotizing enterocolitis in very–low–birth–weight neonates：A randomized clinical trial[J].Early Human Development，2014，90（Suppl 1）：S60–S65.

[52] Ochoa T J，Chea–Woo E，Baiocchi N，et al.Randomized double–blind controlled trial of bovine lactoferrin for prevention of diarrhea in children[J].Journal Of Pediatrics，2013，162（2）：349–356.

[53] 邱金玲，成一新，刘小凡.乳铁蛋白对Dex模型小鼠肠道菌群调控研究[J].中国食物与营养，2023，29（7）：52–56.

[54] Lee O Y A，Wong A N N，Ho C Y，et al.Potentials of natural antioxidants in reducing inflammation and oxidative stress in chronic kidney disease[J].Antioxidants，2024，13（6）：751.

[55] Wright S W，Lovelace–Macon L，Ducken D，et al.Lactoferrin is a dynamic protein in human melioidosis and is a TLR4–dependent driver of TNF–α release in Burkholderia thailandensis infection in vitro[J].PLoS Neglected Tropical Diseases，2020，14（8）：e0008495.

[56] Liu C，Peng Q，Wei L，et al.Deficiency of lactoferrin aggravates lipopolysaccharide–induced acute inflammation via recruitment macrophage in mice[J].Biometals，2023，36（3）：549–562.

[57] Ran L，Shi J，Lin Y，et al.Evaluation of the protective bioactivity and molecular mechanism verification of lactoferrin in an Alzheimer’s mouse model with ulcerative enteritis[J].Journal of Dairy Science，2024，107（11）：8796–8810.

[58] Li W，Liu B，Lin Y，et al.The application of lactoferrin in infant formula：The past，present and future[J].Critical Reviews in Food Science and Nutrition，2024，64（17）：5748–5767.

[59] Ramírez - Sánchez D A，Canizalez - Román A，León - Sicairos N，et al.The anticancer activity of bovine lactoferrin is reduced by deglycosylation and it follows a different pathway in cervix and colon cancer cells[J].Food Science & Nutrition，2024，12（5）：3516–3528.

[60] 肖红艳，兰欣怡，张佩华.乳铁蛋白生物学功能研究进展[J].中国奶牛，2021（4）：46–50.

[61] 皮迪，王小凤，刘志娟.婴幼儿配方奶粉中主要蛋白质及其主要功能的研究概况[J].湘南学院学报（医学版），2022，24（4）：75–78.

[62] Alothman M，Hogan S A，Hennessy D，et al.“Grass–Fed”milk story：Understanding the impact of pasture feeding on the composition and quality of bovine milk[J].Foods，2019，8（8）：350.

[63] 贺越，赵圣国，郑楠，等.α–亚麻酸的生理功能及其在牛奶中的营养调控研究进展[J].中国乳品工业，2020，48（6）：31–35.

[64] 张克春，徐国忠，沈向真.放牧奶牛的牛奶脂肪酸营养价值分析[J].乳业科学与技术，2010，33（1）：37–38.

[65] 孙小琴.放牧奶牛乳脂肪酸组成及瘤胃脂肪酸代谢规律的研究[D].咸阳：西北农林科技大学，2012.

[66] 梁俊芳.牛乳中乳铁蛋白随着季节变化规律的研究[J].农产品加工·学刊，2009（2）：75–76.

[67] 杨晋辉，张军民，卜登攀，等.不同牛场春季和夏季牛奶中IgA、IgM和乳铁蛋白的调查[J].华中农业大学学报，2013，32（3）：94–98.

[68] 张静静，李春芳，樊懿楷，等.牛奶中天然活性物质和过敏物质及其影响因素[J]. 中国奶牛，2021（6）：41–46.

[69] Cheng J B，Wang J Q，Bu D P，et al.Factors affecting the lactoferrin concentration in bovine milk[J].Journal of Dairy Science，2008，91（3）：970–976.

[70] Tortadès M，Garcia–Fruitós E，Arís A，et al.Short communication：The biological value of transition milk：analyses of immunoglobulin G，IGF–I and lactoferrin in primiparous and multiparous dairy cows[J].Animal，2023，17（7）：100861.

[71] Acosta–Balcazar I C，Quiroz–Valiente J，Granados–Zurita L，et al.Effect of genotype，lactation and climatic factors on fatty acid profile of bovine milk[J].Czech Journal of Animal Science，2022，67（5）：167–175.

下转150页

中国乳业线上阅读

Research Progress on De-mutton Technology of Goat Milk

GUO Jie[1]，SUN Liyuan[1]，LUO Qiang[1]，WANG Juan[2]，LING Xingxing[3]，
WANG Haitao[4]，LI Sheng[1*]，JIA Yonghong[3*]
[1]Shaanxi Provincial Animal Husbandry Technology Promotion Station，Xi'an Shaanxi 710000
[2]Shaanxi Limu Biotechnology Co., Ltd.，Xi'an Shaanxi 710000
[3]Shaanxi Animal Husbandry Industry Development Center，Jingyang Shaanxi 713702
[4]Hanzhong Animal Disease Prevention and Control Center，Hanzhong Shaanxi 723000

Abstract：As an important part of traditional dairy products，goat milk is favored by more and more consumers for its unique nutritional value and health benefits，but its distinctive muttony has become a major obstacle restricting its market popularization and consumer acceptance.In recent years，with the continuous progress of science and technology and the growing demand for healthy diet，the technology of goat milk de-mutton has been widely concerned and studied.This paper aimed to review the current research progress of goat milk de-mutton technology，and discussed its development trend，so as to provide reference for researchers and practitioners in related fields.

Keywords：goat milk；de-mutton；technology；method

▲上接144页

Research on Natural Active Components in Milk and their Influencing Factors

SUN Hua，SUN Jingdi，HE Jinxing，QU Jingran*
School of Food Science and Engineering，Qilu University of Technology（Shandong Academy of Sciences），Jinan Shandong 250353

Abstract：Milk is a nutritionally complete natural food，rich in a variety of essential nutrients such as proteins，fats，carbohydrates，vitamins，and minerals，while also containing multiple natural active ingredients with physiological regulatory functions. This paper systematically reviewed the biological functions and health effects of key natural active components in milk—including conjugated linoleic acid（CLA），α-linolenic acid（ALA），eicosapentaenoic acid（EPA），docosahexaenoic acid（DHA），lactoferrin，and immunoglobulins—and emphasizes the impact of factors such as feeding methods，diet composition，seasonal variations，parity，and lactation stage on their content. The aim is to provide a theoretical basis for scientific milk consumption and the development of high-value-added dairy products.

Keywords：milk；conjugated linoleic acid（CLA）；α-linolenic acid（ALA）；docosahexaenoic acid（DHA）；eicosapentaenoic acid（EPA）；lactoferrin；immunoglobulin

中国乳业线上阅读