奶的功能认知进展：免疫作用、营养作用、活性作用、水合作用

张养东，郑　楠，赵圣国，刘慧敏，孟　璐，王加启*

中国农业科学院北京畜牧兽医研究所，农业农村部奶及奶制品质量安全控制重点实验室；国家市场监督管理总局重点实验室（乳品质量数智监控技术），北京 100193

摘　要：奶是人类最接近完美的食物。奶中不仅含有种类繁多的免疫物质，还含有易于消化的酪蛋白等营养物质、乳铁蛋白等生物活性物质，以及占奶质量87%以上的水分。奶能够增强人体的免疫功能，快速补充人体所需的能量、蛋白等营养物质，促进婴儿生长和降低“三高”指标，以及为机体的生理活动提供水合底物等。此外，奶中的外泌体等多种活性物质还具有广泛的生物医学用途。本文综述了奶的免疫、营养、活性和水合作用，以期为更好地认识和使用奶，进一步开发优质的活性奶和奶制品提供参考。

关键词：乳；免疫作用；营养作用；活性作用；水合作用

文章编号：1671–4393（2025）11–0024–18　　DOI:10.12377/1671–4393.25.11.04

0 引言

哺乳动物为适应自然环境，经过亿万年的优胜劣汰，逐渐进化成了利用自身分泌的乳汁满足初生哺乳动物生命活动需要的策略——哺乳。乳是由母体产生、供后代直接饮用的复杂液体，具有免疫、营养、活性和水合作用。研究发现，乳铁蛋白（Lactoferrin）[1]、分泌型免疫球蛋白A（Secretory Immunoglobulin A，sIgA）[2]和乳低聚糖（Milk Oligosaccharides）[3]等多种免疫活性物质能够增强其先天性和获得性免疫系统，促进肠道黏膜屏障和免疫功能的发育，抗菌抗病毒、消炎、抗肿瘤；酪蛋白等蛋白[4, 5]营养丰富，易于人体消化吸收；乳脂肪[6]、乳糖[7]能够为机体提供健康能量；维生素[8, 9]能够维持机体物质代谢和合成；矿物质[10]丰富、易吸收；胰岛

作者简介：张养东（1982–），男，山东济宁人，博士，研究员，研究方向为牛奶品质调控；
郑　楠（1980–），女，内蒙古包头人，博士，研究员，研究方向为奶产品质量安全风险评估与营养功能评价；
赵圣国（1984–），男，山东临沂人，博士，研究员，博士生导师，研究方向为反刍动物营养与牛奶品质；
刘慧敏（1983–），女，山西长治人，博士，副研究员，硕士生导师，研究方向为牛奶质量安全检测技术；
孟　璐（1986–），女，江苏徐州人，博士，副研究员，研究方向为奶产品质量安全风险评估。
*通信作者：王加启（1967–），男，安徽宿州人，博士，研究员，研究方向为奶牛营养与牛奶质量安全。

中国乳业线上阅读

素样生长因子（Insulin-like Growth Factors，IGF）[11]和酪蛋白源肽[12]等生物活性物质能够调控生长发育、促进胃肠道的发育和功能、调节肠道菌群平衡、降低三高指标等；占奶质量87%以上的水能够为幼龄哺乳动物快速补充水分，承载和维持奶中蛋白质[13]、脂肪[14]等营养物质的形态，是奶发挥水合作用[15]的基础底物，参与协同消化酪蛋白等营养物质[16]（图1）。本文综述了近5年来奶在免疫、营养、活性和水合领域方面的研究进展，以期为更好认识和利用奶，进一步开发优质的活性奶制品以及奶制品衍生品，提供参考。

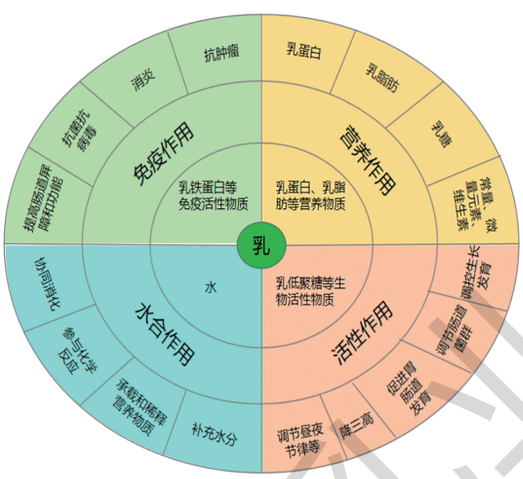


图1 奶的免疫、营养、活性、水合作用

1 奶的免疫作用

初生哺乳动物肠道黏膜免疫发育不成熟，肠道屏障通透性高[17]，天然免疫系统中潘氏细胞（Paneth Cell）功能受限[18]、肠道菌群不平衡[19]等，获得性免疫系统中IgA分泌不足[20]、T细胞发育不成熟[21，22]等。母乳喂养能够降低婴儿早期病毒感染或慢性炎症发生率[23]。乳中乳铁蛋白[24]、免疫球蛋白[25]、T细胞[26]、二十二碳六烯酸（Docosahexaenoic Acid，DHA）[27]等免疫活性物质能够弥补其免疫功能的不足，有效促进初生哺乳动物免疫系统的发育，提高其健康水平。

1.1 奶中免疫活性物质的来源、种类

奶中免疫活性物质主要来自母体的先天性免疫系统（例如乳铁蛋白、溶菌酶等）和获得性免疫系统（例如sIgA、T细胞等），此外还有乳低聚糖、长链脂肪酸等营养性免疫活性物质。乳铁蛋白[24]、溶菌酶[28]、乳过氧化物酶[29]、抗炎细胞因子——白细胞介素-10（Interleukin 10，IL-10）[30]等由母体乳腺细胞分泌，补体（Complement）[31]来源于母体肝脏，免疫细胞[32]来源于母体血液等，乳抗菌肽来自乳蛋白水解衍生肽[33]，奶中还存在间充质干细胞和胚胎干细胞样细胞[34]，以上免疫活性物质是母体黏膜先天免疫系统的一部分。免疫球蛋白[25]、活化的T细胞[26]和B细胞[35]、微RNA（microRNA，miRNA）[36]、无细胞DNA（Cell-free DNA，cfDNA）[37]、细胞外囊泡（Extracellular Vesicles）[38]等来自母体黏膜的获得性免疫系统；初生哺乳动物饮用母乳后，可直接利用来自母体已经激活的获得性免疫活性物质有效抵抗感染，而不需要经历7~10 d的免疫空白期。乳低聚糖[39]、DHA[27]、花生四烯酸（Arachidonic Acid，ARA）[40]、乳糖[41]、甘油单月桂酸酯（Glycerol Monolaurate，GML）[42]、牛乳极性脂质[43]等营养性免疫活性物质，也能增强初生哺乳动物的免疫功能（图2）。

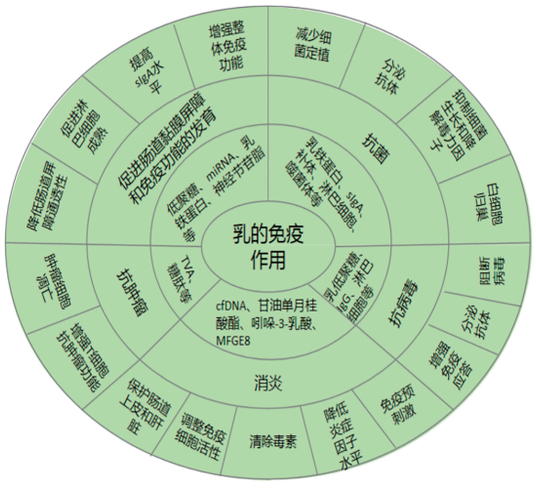


图2 奶的免疫作用

中国乳业线上阅读

1.2 奶中免疫活性物质的作用机制

奶中免疫活性物质能够协同作用，促进初生哺乳动物黏膜屏障和免疫功能的发育，抗菌抗病毒、缓解炎症、抗肿瘤。淋巴细胞具有归巢特性，使得母体肠道、呼吸道、生殖道黏膜的免疫特性通过淋巴细胞传递到乳腺黏膜上皮中，影响母体乳腺的黏膜免疫功能；奶中的免疫活性物质也是母体黏膜免疫水平的体现。

1.2.1 促进肠道黏膜屏障和免疫功能的发育

奶中免疫活性物质能够降低肠道屏障通透性，促进T细胞和B细胞成熟，提高IgA分泌水平，甚至还能增强初生哺乳动物整体的免疫功能。母乳有利于婴幼儿免疫系统的发育和先天免疫的建立[44]。奶中β-酪蛋白水解肽——EMPFPK能够增加黏蛋白分泌[45]；人乳低聚糖——乳糖-N-四糖（Lacto-N-tetraose，LNT）、乳糖-N-三糖II（Lacto-N-triose II，LNT2）能够显著降低肿瘤坏死因子α（the Tumor Necrosis Factor-alpha，TNF-α）和干扰素γ（Interferon-gamma，IFN-γ）诱导的单层人结直肠腺癌细胞caco-2细胞旁路通透性[46]；神经节苷脂能够显著降低健康志愿者肠道通透性[47]。人乳能够增强婴儿血液中先天性免疫细胞——NK细胞、单核细胞和DC细胞，获得性免疫细胞——CD45+细胞、CD8+T细胞、CD4+T细胞和B细胞数量[48]；人乳中富集的CD8+记忆T细胞（Memory CD8+ T cell），即使在婴儿肠道中裂解后，编码抗原特异性的部分T细胞受体仍能够刺激抗原匹配的树突状细胞（dendritic cell）[49]；人乳中miRNA能够调节婴儿6 个月和24 个月时活跃和静止调节性T细胞（Regulatory T cell）的比例[50]；乳铁蛋白通过释放趋化因子配体12（CXC chemokine ligand 12），调节骨髓基质微环境，促进C57BL/6小鼠B细胞的早期发育[51]，还通过减少树突状细胞诱导的Th2辅助细胞（T helper 2 cell）反应改善卵清蛋白诱导的小鼠哮喘[52]。猪乳中小细胞外囊泡通过向受体传递环状RNAs（circRNAs），调节受体的原始miRNA，促进肠道sIgA的产生[53]；神经节苷脂能够增加断奶小鼠肠道分泌IgA的细胞数量，提高肠道sIgA的水平[54]。人乳低聚糖——2'-岩藻糖基乳糖（2'-fucosyl lactose）、乳糖基-N-新四糖（lactose-n-neotetrasaccharide）、6'-唾液乳糖（6'-sialyllactose）能够增加金黄色葡萄球菌（*Staphylococcus aureus*）诱导的单核细胞衍生的巨噬细胞增加相关表面蛋白——CD18、CD80和CD137L的表达，促进巨噬细胞向M1表型极化，增强巨噬细胞的吞噬能力，但是在没有金黄色葡萄球菌暴露的情况下，人乳低聚糖对巨噬细胞的激活和分化没有显著影响[55]。3'-唾液乳糖和6'-唾液乳糖能够显著促进HT29细胞分泌肠道趋化因子——CXCL10、CCL20和CXCL8的表达；显著增加脂多糖（Lipopolysaccharide，LPS）诱导的人单核细胞来源的树突状细胞和经典M1 MØs中促炎和抗炎细胞因子的产生，增强Th1和Th17反应，降低Th2反应[39]；αs1-酪蛋白通过诱导toll样受体4（Toll-like Receptor 4，TLR4），刺激IL-8的分泌[33]；白细胞能从婴儿胃肠道转移到血液，以及淋巴结、脾脏和肝脏等远端的部位[56，57]；此外，在营养和疾病压力下，乳糖可以防止感染或缓解感染[41]。

1.2.2 抗菌

奶及奶中免疫活性物质能够通过减少细菌定植、分泌抗体、抑制细菌生长、降解毒力因子、白细胞归巢等方式，发挥抗菌活性。人乳能够限制婴儿口腔中变形链球菌（*Streptococcus mutans*）的定植，有利于婴儿的牙齿健康[58]；人乳sIgA能够选择性的结合婴儿肠道细菌，使未结合的细菌更有效地定植和增殖[59]；在人喉表皮样癌细胞HEp-2中，人乳sIgA能够与肠致病性大肠杆菌（Enteropathogenic *Escherichia coli*）细胞质和细胞膜组分中的Toll/白细胞介素-1受体（Toll/interlukin-1 Receptor，Tir）、大肠杆菌分泌蛋白B（*Escherichia coli* secreted protein A，EspB）、内膜素（Intimin）反应[60]。牛乳乳铁蛋白能够清除大肠杆菌（*Escherichia coli*）O157：H7在犊牛体内定植，诱导直肠黏膜产生

中国乳业杂志网

EspA、EspB特异性IgA[61]。人乳乳铁蛋白能够与肠道中Fe^{3+}结合，抑制需铁细菌的生长[62]；人乳中的补体（Complement）能够通过C1依赖级联途径而非抗体依赖途径被激活，使膜攻击复合物（Membrane Attack Complex）——C5b-9附着到细胞膜上，从而杀死缓慢葡萄球菌B3（*Staphylococcus lentus* B3）[63]。人乳乳铁蛋白能够降解产肠毒素大肠杆菌（Enterotoxigenic *Escherichia coli*）产生的F4菌毛、F18菌毛和鞭毛蛋白等多种毒力因子[64]。怀孕母亲口服特定的大肠杆菌，会导致初乳中迅速出现分泌针对致敏大肠杆菌IgA的白细胞，原因可能是来自母亲肠道的致敏淋巴细胞归巢到乳腺产生IgA[65]；哺乳婴儿呼吸道感染可增加母乳中CCL20、CXCL10、白细胞介素6（Interleukin-6，IL-6）、IL-8、总IgA和IgG等细胞因子和趋化因子水平，促进CCR5、CCR6和CXCR3+CD4 T细胞、CCR6和CXCR3+CD8 T细胞、CCR6+B细胞等淋巴细胞的募集和激活[66]。此外，乳铁蛋白、乳过氧化物酶等在奶中就能直接抑制大肠杆菌（*Escherichia coli*）等生长[67, 68]；细胞外囊泡对金黄色葡萄球菌（*Staphylococcus aureus*）具有较强的抑制性[38]；酪蛋白水解物——αs1-酪蛋白等对坏死性肠炎常见致病菌——克雷伯氏伯菌（*Klebsiella aerogenes*）、弗氏柠檬酸杆菌（*Citrobacter freundii*）和黏质沙雷氏菌（*Serratia marcescens*）均有抑制作用[69]；奶中噬菌体能够减少牛奶、脱脂牛奶和全脂牛奶中的活菌计数[70]。

1.2.3 抗病毒

奶中免疫活性物质通过阻断病毒与宿主细胞结合、分泌抗体和增强免疫应答等方式，发挥抗病毒活性。奶中2'-岩藻糖基乳糖能够弱抑制GI.1、GII.10和GII.17型诺如病毒颗粒附着到组织血型抗原（Histo-blood Group Antigens，HBGAs）上[71]；人乳通过阻断钠/钾转运ATP酶亚基α-1（the Na+/K+ ATPase α1，ATP1A1）介导的病毒内吞过程，抑制中东呼吸综合征冠状病毒（Middle East Respiratory Syndrome Coronavirus）等包膜病毒的活性[72]；人乳低聚糖能够降低呼吸道合胞病毒（Respiratory Syncytial Virus）感染婴儿呼吸道中的病毒载量和炎症信号[73]；人乳IgA还能够阻止诺如病毒（Norovirus）[74]、轮状病毒（Rotavirus）[75]与受体结合。感染HIV-1母亲的母乳中存在针对HIV-1抗原的B细胞，能够分泌特异性抗体[35]；肠道病毒能够回流婴儿唾液中，哺乳期间婴儿通过唾液将肠道病毒感染母亲的乳腺，导致母乳中分泌的IgA迅速激增[76]。接种流感疫苗能够上调母乳中T细胞表面标志物——CD44等基因水平，提高T细胞的免疫功能[77]；人乳中含有抗严重急性呼吸综合征（Severe Acute Respiratory Syndrome，SARS）IgG，能够激活补体，增强婴儿的先天免疫应答[78]。

1.2.4 消炎

奶中免疫活性物质能够通过免疫预刺激、降低促炎因子水平、清除毒素、调整免疫细胞活性、保护肠道上皮屏障和肝脏等途径，缓解炎症。人乳中cfDNA与新生儿肠上皮细胞顶端表面的TLR9相互作用，在共生菌建立之前起到初始抗炎刺激作用[37]。乳铁蛋白能够降低血清中IL-1β、IL-6、TNF-α和IFN-γ的水平，其中高不饱和铁含量的乳铁蛋白活性较强[79]；sIgA通过与肠道中高亲和力微生物的结合，减少IL-8的促炎反应[80]；β-酪蛋白衍生肽——CASB能够靶向肠道巨噬细胞，快速抑制核因子-κB（Nuclear Factor-κB，NF-κB）信号通路，减轻大鼠坏死性小肠结肠炎反应[81]。乳神经节苷脂GM1能够抑制婴儿肠道中霍乱弧菌肠毒素和大肠杆菌热不稳定肠毒素[82]；富含神经节苷脂GM1的脂质双分子层能够与霍乱毒素B亚基结合[83]。乳外泌体能够将低聚糖转移到巨噬细胞，调整巨噬细胞活性，减轻黏附-侵袭性大肠杆菌（Adherent-invasive *Escherichia coli*）感染[84]；人乳3'-唾液乳糖通过抑制LPS诱导巨噬细胞中组蛋白H3K27乙酰化，减少动脉粥样硬化的发展[85]；人乳中甘油单月桂酸酯通过抑制Th17细胞、中性粒细胞和巨噬细胞的浸润、保护肠黏膜屏障和改变共生菌的丰度来改善葡聚糖硫酸钠（Dextran Sulphate Sodium，DSS）诱导的结肠炎[42]。2'-岩藻糖基乳糖能够调节肠道微生物产生

中国乳业线上阅读

有益的代谢物，保护肠道屏障[86]；奶中吲哚-3-乳酸（Indole-3-acetic Acid）能够以芳香烃受体（the Arylhydrocarbon Receptor）依赖的方式降低TNF-α诱导的caco2细胞和人类胎儿类器官（Human Retal organoids，HFOs）中IL8的表达，显著降低了TNF-α诱导的HFOs屏障破坏[87]；人乳来源的外泌体能够增强肠道屏障功能，保护肠上皮细胞免受氧化应激，促进肠上皮细胞的增殖和迁移，缓解坏死性结肠炎[88]；乳铁蛋白通过调节胚胎致死性视样蛋白1（Embryonic lethal Vision-like Protein 1）信号通路减轻LPS诱导的幼龄小鼠肠道免疫屏障损伤[79]；人乳能够增强LPS诱导的TLR4信号通路以及LPS诱导的促炎细胞因子和NF-κB负调节因子的肠上皮细胞基因——NFKBIA、TNFAIP3表达[89]。牛乳极性脂质日粮能够降低大肠杆菌LPS引起全身炎症的C57BL/6J小鼠肝脏质量和乙酰辅酶a羧化酶2和3-羟基-3-甲基戊二酰辅酶a还原酶的肝脏基因表达[43]；乳脂球表皮生长因子8（Milk Fat Globule-epidermal Growth Factor 8，MFGE8）在严重急性胰腺炎诱导的肝损伤中起内源性保护介质的作用；MFGE8还通过与整合素αVβ3/5结合，减轻肝细胞过度自噬，抑制铁死亡[90]。此外，人乳中的干细胞的多谱系分化潜力能够治疗新生儿肠道坏死等多种疾病[91]。

1.2.5 抗肿瘤

奶中免疫活性物质能够通过多种途径发挥抗肿瘤活性。乳铁蛋白-油酸通过死亡受体和线粒体介导的途径诱导肿瘤细胞凋亡[92]。反式异油酸（Trans-vaccenic acid，TVA）通过抑制G蛋白偶联受体43（the G-protein-coupled Receptor 43，GPR43），激活环状腺苷酸单磷酸（Cyclic Adenosine Monophosphate，cAMP）信号通路，增强CD8+T细胞抗肿瘤功能[93]。乳外泌体能够通过其包裹的miRNA，抑制癌细胞的增殖[94]。此外，奶中的α-乳白蛋白（α-Lactalbumin）与油酸的配合物——哈姆雷特（Hamlet）[95, 96]、糖肽（Glycomacropeptide）[97]也具有抗肿瘤活性。

1.3 小结

综上所述，奶中含有的免疫球蛋白、乳铁蛋白、低聚糖等众多天然免疫、获得性免疫和营养性免疫活性物质，组成了一个强大且相互关联的免疫网络，能够有效保护初生哺乳动物不受致细菌、病毒等病性微生物的侵害，保障初生哺乳动物的健康。由于奶中的免疫活性物质众多、结构灵活多变、作用机制复杂，奶中的免疫活性物质抑制和清除病原微生物的主要作用机制、与黏膜免疫之间的协调作用机制，以及提高奶和奶制品中免疫活性物质的方法，这些都是需要深入研究的问题。

2 奶的营养作用

初生哺乳动物身体生长发育迅速，每日需要补充大量蛋白质、脂肪等优质易消化的营养物质。奶中含有的乳蛋白、乳脂肪、乳糖等营养物质能够有效的满足初生哺乳动物的需求，为其快速生长提供物质保障（图3）。

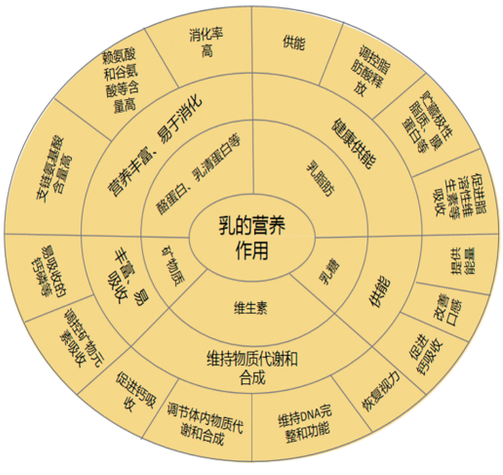


图3 奶的营养作用

2.1 奶的物理性质和化学组成

奶是乳浊液（乳脂肪等）、悬浊液（乳蛋白等）、溶液（乳糖等）3种体系构成的白色胶体性液体。通常说的牛奶是指常乳（有别于初乳），相

中国乳业线上阅读

对密度为1.03，pH6.7[98]，水分87%，乳蛋白3%，乳脂肪3%~4%，乳糖4%~5%[99~101]；矿物质（粗灰分）0.7%~0.8%[102]，以及多种脂溶性和水溶性维生素等[103]。

2.2 奶成分的营养作用

2.2.1 营养丰富、易于消化的蛋白质

奶中含有营养丰富、易于消化的蛋白质。奶中乳蛋白分为乳清蛋白（Whey Proteins）和酪蛋白（Casein）[104]，其中酪蛋白占比为85%左右，乳清蛋白为15%左右[5]。亮氨酸、异亮氨酸、缬氨酸是人和动物体内需求量最大的必需氨基酸[105]，赖氨酸是人类谷物饮食的第一限制性氨基酸[106]，谷氨酸和谷氨酰胺是肠上皮细胞和免疫细胞快速生长时期的重要能量底物[107]；乳蛋白中的氨基酸能够有效匹配人体的需要，其中酪蛋白中必需氨基酸含量前3位的依次是亮氨酸、赖氨酸、异亮氨酸，乳清蛋白中含量前3位的依次是亮氨酸、赖氨酸、缬氨酸[5]，奶中还含有大量的谷氨酸和谷氨酰胺[108]。乳蛋白消化率（86.1%~90.8%）显著高于植物类（65.1%~85.1%）和昆虫类蛋白（63.6%~69.5%）；乳蛋白体外可消化必需氨基酸评分（in Vitro Digestible Indispensable Amino Acid Score）平均值（105.0~137.5）也高于植物蛋白和昆虫蛋白（1.9~91.0）[4]。

2.2.2 健康供能的乳脂肪

乳脂肪是初生哺乳动物的主要能量来源，乳脂肪球的特殊结构使得脂肪酸能够健康释放，促进维生素A（Vitamin A，VA）等脂溶性维生素的吸收。乳脂肪所含能量占奶的36%~91%[109]。奶中98%的乳脂肪以甘油三酯形式储存于乳脂肪球（Milk Fat Globules）内[110]，乳脂肪球由三层膜包裹，膜上含有极性脂质、糖蛋白和胆固醇等，内部为甘油三酯核心[111]。乳脂肪球膜蛋白能够提高油水界面区域的稳定性，使乳脂肪球在消化过程中释放更多的非饱和脂肪酸和更少的饱和脂肪酸[112]，有助于更健康的脂质代谢，有利于降低体重和脂肪组织，降低血浆胰岛素[113]。VA等脂溶性维生素存在于乳脂球膜中，乳脂球膜能够促进脂溶性维生素的消化吸收[114]。体外模拟婴儿胃肠消化模型肠道消化末期发现，人乳、绵羊乳、山羊乳、牛乳的脂肪分解度依次为88.47%、83.92%、57.00%、40.98%[115]。此外，人乳中的丁酸水平与血浆中相比增加了约100倍，丁酸可为婴儿胃肠道上皮提供能量[116]。

2.2.3 主要的碳水化合物——乳糖

乳糖能够提供能量，促进钙的吸收，改善口感。乳糖是哺乳动物乳中的主要碳水化合物，乳糖能够被小肠刷状缘的β-半乳糖苷酶水解为葡萄糖和半乳糖[117]，提供能量[7]；在出生后的前3 个月，乳糖和24 h人乳摄入量的增加与婴儿体重增加和健康脂肪沉积有关[118]。乳糖水解时产生的有机酸能够降低胃肠道的pH，增强钙离子（葡萄糖酸钙）在肠道中的运输和吸收，从而提高了骨骼质量[119]。此外，乳糖作为二糖能够使乳呈现甜味的口感。

2.2.4 维生素

奶中含有多种维生素，能够促进钙吸收，调节体内物质代谢和合成，维持DNA完整和功能，恢复视力等。奶中含有VD、VB_6、VA等多种维生素[8, 9]。VD是最佳生长和磷酸钙平衡的关键成分，能够促进钙的吸收[120]；奶中VD的形式为25羟基VD3（25-hydroxyvitamin D3），能够不经肝脏而在肾脏中直接转化为VD最重要的的活性形式1,25二羟基VD3（1,25-dihydroxyvitamin D3）[8]；人奶中VD含量低还可能是婴儿特应性皮炎发作的一个危险因素[121]。VB_6是一种辅酶，催化150 多种酶，调节蛋白质、碳水化合物、脂质、血红素和重要生物活性代谢物的代谢和合成[122]；叶酸（VB_9）是DNA合成、修复和甲基化反应所必需的[123]；VB_{12}在叶酸代谢和DNA合成所必需的两个关键酶反应中起辅助作用[124]，对胎儿和儿童的正常生长发育至关重要[125]。VA涉及多种生理过程，包括视网膜视觉、基因表达、免疫、生殖、胚胎发育和生长[126]。

2.2.5 丰富、易吸收的常量和微量元素

奶中的钙磷等矿物元素易吸收，并且奶能够调控矿物元素的吸收。牛乳中含有丰富的矿物质和微

中国乳业杂志上网版

量元素，其中钙1 050~1 190 mg/kg，磷870~980 mg/kg，钾1 580~1 650 mg/kg，钠370~390 mg/kg，锌3.37~3.48 mg/kg[10]；牛乳酪蛋白胶束中的丝氨酸残基通过与68%钙和47%磷酸盐离子络合形成稳定的复合物[127]，使得钙、磷更易于吸收。奶中的骨桥蛋白（Osteopontin）是一种酸性、高度磷酸化的整合素结合蛋白（Integrin-binding Protein），通过与铁结合，促进肠细胞对铁的吸收[128]；牛乳中高钙含量会抑制铁的吸收[129]，而大多数纯母乳喂养婴儿（6~8 周龄）的钙摄入量不足以满足推荐的每日摄入量[130]，因此在配制婴儿奶制品时，需要同时考虑增加钙、铁的含量。

2.3 小结

综上所述，奶中的乳蛋白、乳脂肪、乳糖等，是奶发挥营养作用的物质基础，极易消化吸收，几乎可以全部满足初生哺乳动物和婴儿（1~12月龄）的营养需求。随着营养的精细化，需要进一步研究如何对牛乳中的营养物质进行调整组合，满足婴儿或需要补充奶类物质人群的营养需要。

3 奶的生物活性作用（免疫活性除外）

初生哺乳动物生长发育迅速，体内代谢反应高效运转，自身产生的生物活性物质不足以满足机体需要，需要额外补充充足的生物活性物质，有效维持机体高强度的新陈代谢活动（图4）。

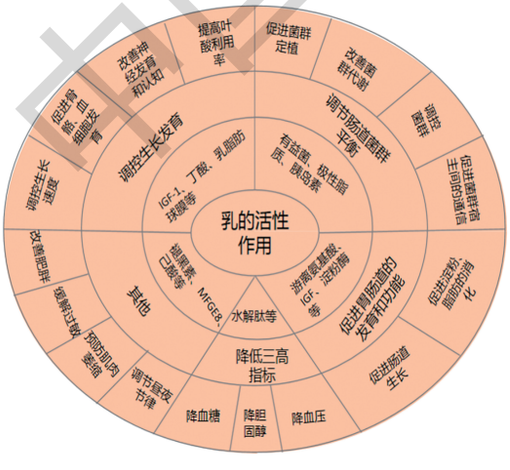


图 4 奶的活性作用

3.1 奶中生物活性物质种类、来源

奶中生物活性物质包括母体产生的胰岛素、瘦素[131]等激素，游离氨基酸[108]、丁酸[132]、长链不饱和脂肪酸[133]、乳低聚糖[134]、神经营养因子（Neurotrophic Factors）[131]等，以及有益菌[135]，它们能够调控初生哺乳动物的生长发育，调节胃肠道菌群平衡，促进胃肠道的发育和功能，降低中老年人“三高”指标等。

3.2 奶的生物活性

3.2.1 调控生长发育

奶中生物活性物质能够调控婴儿的生长速度和体重，促进骨骼、血细胞发育，改善认知和神经发育，提高叶酸利用率。人乳中IGF-1水平与极早产儿的出生后早期生长呈正相关[11]；在哺乳期间摄入足够的瘦素能控制能量平衡[136]，防止婴儿体重快速增加[137]；丁酸也能通过调节食欲和人乳摄取量，降低婴儿生长速度[132]。富含牛乳外泌体的乳清蛋白浓缩物通过哺乳动物雷帕霉素靶蛋白（Mammalian Target of Rapamycin，mTOR）/蛋白激酶B（Protein Kinase B，Akt）信号通路促进C28/I2人软骨细胞增殖，改善发育迟缓大鼠胫骨骨密度、小梁微观结构和空间，使生长板更活跃[138]；人乳来源的长双歧杆菌亚种（*Bifidobacterium longum* subsp）通过磷脂酰肌醇激酶（Phosphatidylinositol 3-kinase，PI3K）/AKT-生长激素（Growth Hormone，GH）/IGF轴调控婴儿骨形成[139]；人乳喂养1月龄婴儿红细胞数量、血红蛋白的平均浓度和堆积细胞体积显著高于配方奶粉[48]。在配方奶中补充牛乳脂肪球膜与改善婴儿认知发育显著相关[140]；2'-岩藻糖基乳糖、3'-唾液乳糖、二唾液酸乳-N-四糖（disialyllacto-N-tetraose）能够改善婴儿神经发育，头围z评分（Head Circumference Z-score，ΔHCZ）与唾液酸乳糖-N-四糖b（Lactosialyltetrasaccharide b）和2'-岩藻糖基乳

中国乳业线上阅读

糖水平呈正相关，而神经发育评分与三种乳糖水平都呈正相关[141]。牛奶叶酸结合蛋白能够与食物中通常存在的两种最不稳定的叶酸衍生物——5-ch3-h4叶酸和h4叶酸结合，起到稳定叶酸的作用[142]，还能够提高叶酸在大鼠体内的生物利用度[143]。

3.2.2 调节肠道菌群平衡

奶中生物活性物质能够通过促进新生儿肠道菌群定植、改善菌群代谢、调控肠道菌群，促进菌群宿主间的通信。细菌通过母乳喂养垂直传播，在1~4月龄婴儿中充当益生菌剂，促进婴儿的健康发育[144]。牛乳中含有乳酸菌（*Lactobacillus*）、双歧杆菌（*Bifidobacteria*）等有益菌[135]；与粪肠球菌（*Enterococcus faecalis*）相比，长双歧杆菌（*Bifidobacterium longum*）、短双歧杆菌（*Bifidobacterium brevis*）在新生儿早期的微生物定植中表现出病原体抗性[145]。牛乳小细胞外囊泡能够优化小鼠盲肠细菌混合培养中基因组变异和群体结构的选择，改变细菌糖、氨基酸和嘌呤的代谢[146]。骆驼乳极性脂质（主要是磷脂酰乙醇胺、鞘磷脂和磷脂酰胆碱）能够增加益生菌的丰度，减少有害菌的丰度，部分缓解小鼠肠道菌群失调[147]；人乳中胰岛素能够显著改善婴儿肠道中的双歧杆菌（*Bifidobacterium*）群落[148]；双歧杆菌能够有效代谢婴儿不易消化的人乳低聚糖[149]，混合人乳低聚糖能够促进超过100种非双歧杆菌生长[134]。此外，乳中小细胞外囊泡通过传递其包裹的RNA等，促进哺乳动物、革兰氏阴性、阳性细菌的细胞间通信、细胞与环境通信[146]；人乳中35 种miRNA与15 d婴儿肠道内厚壁菌门、放线菌门和变形菌门呈正相关[150]。

3.2.3 促进胃肠道的发育和功能

奶及奶中生物活性物质能够有效促进肠道生长，促进淀粉、脂肪等营养物质的消化。人乳低聚糖中的2'-岩藻糖基乳糖能够调控小鼠肠道中黏蛋白的种类，促进黏蛋白的分泌，并显著增加盲肠及其内容物重量，显著增加空肠长度[151]；人乳中较高水平的游离氨基酸有利于胃肠道和免疫发育，促进婴儿的合成代谢[152]；IGF能够促进肠道细胞增殖和分化[153]；核苷酸能够促进肠道的生长、分化和修复[154]；奶中β-酪蛋白水解肽——EMPFPK能够增加黏蛋白分泌[45]。人乳能够促进肠道细胞转运营养物质和分泌消化酶[44]；人乳中淀粉酶能够帮助婴儿消化乳糖和短链葡萄糖聚合物，依赖胆汁盐的脂肪酶能够促进脂肪消化[155]。

3.2.4 降低三高指标

奶中生物活性物质具有降血压、降血糖、降胆固醇等多种生理作用。牛乳中矿物质的摄入与血压呈反比关系，牛乳蛋白消化过程中形成的多肽也具有降低血压的作用[156]；用分离自乳中的具有高血管紧张素转换酶抑制活性的植物乳杆菌（*Lactobacillus plantarum*）发酵水牛乳能够降低高血压大鼠血压[157]。牛乳蛋白通过降低空腹胰岛素、空腹血糖和胰岛素抵抗的稳态模型评估值，改善成人血糖[158]；脱脂羊奶的木瓜蛋白酶水解产物（Papain Hydrolysate）具有较强的抗糖尿病活性[159]；牛奶、黄油、总奶制品与较低的II型糖尿病风险相关[160]；骆驼乳对葡萄糖转运代谢、胰腺β细胞结构和功能特性及胰岛素分泌等相关参数均有积极影响[161]。牛乳酪蛋白源肽通过抑制胶束胆固醇溶解度，影响肠上皮细胞中胆固醇吸收相关蛋白和酶的表达，降低胆固醇水平[12]。

3.2.5 其他

此外奶中还有多种生物活性因子能够调节昼夜节律、预防骨骼肌萎缩、缓解过敏、改善肥胖等作用。人乳是婴儿最初几个月褪黑素的重要来源，母乳中褪黑激素水平的昼夜波动（白天低，晚上高）有助于维持新生儿的昼夜节律性[162]；褪黑激素在夜间降低皮质醇水平，降低体温和血压，调节免疫系统，提供神经保护作用，并通过清除自由基和减少奶牛的氧化应激来支持胃肠道健康[163]。乳脂肪球膜中提取的MFGE8通过激活丝裂原活化蛋白激酶（Mitogen-activated Protein Kinases，MAPK）/细胞外信号调节激酶（the Extracellular Signal Regulated Kinases，ERK）信号通路改善衰老大鼠线粒体损伤引起的骨骼肌萎缩[164]；也能够预防肠纤维化[165]。人

中国乳业杂志社版权

乳中的IgA通过调节肠道菌群来预防哮喘[166]；人乳中的已酸水平与血浆中相比增加了约100倍，并且与婴儿致敏性之间存在显著负相关[116]。乳蛋白还能够改善快餐引起的肥胖[167]。

3.3 小结

综上所述，奶中含有激素、微量元素、维生素、游离氨基酸、丁酸、长链不饱和脂肪酸、有益菌、乳低聚糖等多种生物活性物质，能够调控初生哺乳动物的生长发育，促进胃肠道的发育和功能等。随着对奶中生物活性物质认识的深入，还需要深入研究奶中的生物活性物质对不同年龄段人群的健康作用。

4 奶的水合作用

水合作用指水分子与奶中其他成分（如蛋白质、乳糖、脂肪）的相互作用，影响奶中营养物质消化、吸收、转运和代谢。同时，水作为奶中的主要成分，还能够满足初生哺乳动物对水分的需求（图5）。

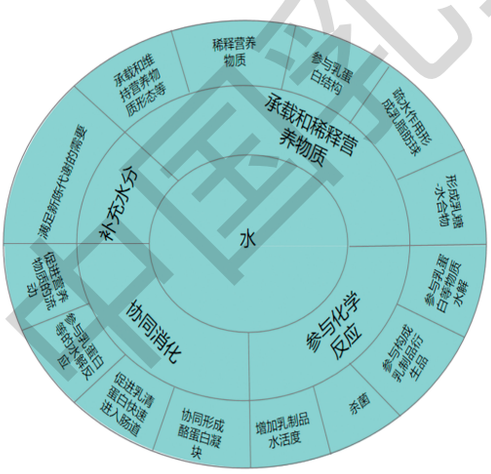


图 5 奶的水合作用

4.1 水的结构及奶中水的作用力

每个水分子能够分别接受2 个氢键（分子间氢键）和提供2 个氢键（共价键）[168]，形成水分子的四面体结构。当水分子间氢键相互结合时，会形成五元环和其他可以聚集形成三维结构的环[169]。不过这种结构是动态的，水分子间通过分子弛豫，可以快速变换与其形成氢键的分子[170]，此外，还有游离H_2O[171]、H_3O^+、OH^-[172]存在。

奶中水的作用力有分子间氢键、静电吸引力和疏水力。分子间氢键是指水分子中的氢原子与吸引电子的氧或氮原子之间形成的氢键，例如酪蛋白与其表面的水合水[13]、乳糖–水结晶[173]。静电吸引力是指溶液中的Na^+与水分子中的氧原子、Cl^-与水分子中的氢原子形成离子氢键[174]，奶及液态奶制品中Na^+、Cl^-等阴阳离子与水分子也存在相似的静电吸引力。疏水力是指水促使疏水基团聚在一起，将疏水基团对氢键连接而成的水分子网络的破坏效应降至最低限度[175]，例如奶中悬浮的乳脂肪球[176]、β－乳球蛋白与维生素A的结合[177]。

4.2 奶的水合作用

水是奶中的主要物质，具有补充水分、承载和维持营养物质形态、稀释营养物质、参与奶中生化反应，协同消化等作用。

4.2.1 补充水分

水分占奶质量的80%以上，其中占牛奶的87.8%[178]；奶中的水分作为初生哺乳动物主要的水分来源，能够快速补充水分，满足机体各种生理活动的需要。

4.2.2 承载和维持营养物质形态

奶中的水能够承载和维持营养物质形态，稀释营养物质，参与乳蛋白结构，通过疏水作用形成乳脂肪球，形成乳糖–水合物等。奶中水能够承载初生哺乳动物生长所必需的乳蛋白、乳脂肪、乳糖、矿物质，以及sIgA、乳铁蛋白等物质[179]。奶中水与亲水化合物通过偶极–偶极（例如乳蛋白、乳糖等）或离子–偶极（例如Na^+等）相互作用。酪蛋白胶束具有三层海绵状结构，最里层由作为锚点的磷酸钙纳米团簇组成，10~40 nm中间层是由蛋白质和磷酸钙组成的坚硬区域，形成连续的多孔材料，最外层结

中国乳业线上阅读

构是酪蛋白胶束本身，平均大小为100 nm[180]；随着温度的变化（10~40 ℃），酪蛋白胶束的大小不变，但空隙的半径由11 nm扩大到16 nm[181]，酪蛋白胶束内自由水的含量增加用以维持酪蛋白胶束的基本结构。VC具有四个羟基，B族维生素（硫胺素、核黄素、烟酸、吡哆醇和叶酸）一般具有羧基或两个以上的羟基，羟基、羧基都具有亲水性[182]，因此，VC和B族维生素均是水溶性维生素[183, 184]；VA、VE、VD结构中羟基等极性基团较少，不易溶于水，属于脂溶性维生素[185]，一般存在于奶的脂肪球膜中[186, 187]。奶中钙、镁、钠、钾为主要阳离子，以无机磷酸盐、柠檬酸盐和氯化物为主要阴离子；其中钠、钾和氯化物属于可扩散的，钙、镁、磷酸盐和柠檬酸盐部分与酪蛋白分子结合，形成酪蛋白胶束[188]。水有助于稀释奶中的营养物质，使营养物质更容易被初生动物消化。水能够参与乳蛋白的组成，维持酪蛋白的三层海绵状结构。在β-乳球蛋白二聚体接触面有水分子参与二聚体的形成[189]。乳脂肪在奶中呈球状，外被一层乳脂肪球膜，其最外层是磷脂双分子层，外层磷酸“头”部亲水，脂肪酸“尾”部疏水[176]，因此，乳脂肪球在奶中悬浮，不容易相互融合；乳脂球膜蛋白在模拟体外婴儿胃肠道消化过程中对调节脂质消化至关重要[112]。乳糖分子具有8 个极性基团——羟基，使得水分子能够与乳糖分子发生强烈的相互作用，形成水簇状结构，并且极易溶于水；乳糖的水合作用是影响奶介电性能的重要因素[190]。

4.2.3 参与化学反应

水参与奶酪制作过程的生化反应，有利于奶制品杀菌、提高品质，以及加工成奶制品衍生品。奶酪的生产主要分为3 个步骤：奶中乳酸菌发酵、凝乳酶凝乳和奶酪发酵成熟[191]；奶中乳糖水解生成乳酸[192]，乳蛋白水解生成多肽、氨基酸[193]，乳脂水解生成脂肪酸[194]都需要水的参与才能完成。水活度增加有助于杀灭奶粉和乳蛋白粉中的有害菌[195, 196]，增加抗氧化性[197]；还有助于形成乳糖晶体[173]，阻止水扩散[198, 199]，但是也容易导致褐变[200]。水参与构成奶制品衍生品——纤维化模型牛奶浓缩蛋白（the Fibrillated Model Milk Protein Concentrate，FMMPC）[201]、纳米水凝胶[202]等。

4.2.4 协同消化

在有水参与的条件下，奶中的酪蛋白等能够在胃凝乳酶的作用下水解，形成凝乳块，减缓酪蛋白在胃内的消化吸收，而剩下的乳清则快速进入十二指肠消化吸收[16]。

4.3 小结

综上所述，水对奶中营养物质形态和功能的维持，奶制品加工、储存、灭菌，高端奶制品、奶制品衍生品制造等都有重要的作用。关于水在奶中的水合作用，目前研究较少，深入研究水在奶储存、奶制品加工等方面的作用具有重要的意义。

5 展望

奶中含有种类多样的蛋白质、脂肪、乳糖、低聚糖、多肽、核苷酸、免疫细胞和干细胞等物质，它们能够增强初生哺乳动物的免疫功能，快速补充机体所需的能量、蛋白等营养物质，促进生长和降低中老年人“三高”指标，为机体的生化反应提供水合底物等。近年来的研究还发现，奶中的多种物质还具有较高的药用价值，例如人乳干细胞具有治疗新生儿小肠坏死性肠炎的潜力，乳外泌体能够作为小分子药物递送的过胃载体，酪蛋白水解肽具备抗菌活性等。未来，提高奶牛所产奶中免疫和生物活性物质的含量、最大限度的保留奶和奶制品的生物活性、深入研究和利用奶中免疫和生物活性物质及其衍生物的功能将是我国奶业发展的重要方向。

参考文献

[1] Kowalczyk P，Kaczyńska K，Kleczkowska P，et al. The lactoferrin phenomenon–a miracle molecule[J]. Molecules，2022，27（9）：2941.

[2] Yang X，Fox A，DeCarlo C，et al. The secretory IgA response in human milk against the SARS-CoV-2 spike is highly durable and neutralizing for at least 1 year of lactation

中国乳业线上阅读

postinfection[J]. Breastfeeding Medicine，2023，18（8）：602–611.

[3] Hu M，Miao M，Li K，et al.Human milk oligosaccharide lacto–N–tetraose：Physiological functions and synthesis methods[J]. Carbohydrate Polymers，2023，316：121067.

[4] Komatsu Y，Tsuda M，Wada Y，et al. Nutritional evaluation of milk–，plant–，and insect–based protein materials by protein digestibility using the INFOGEST digestion method[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2023，71（5）：2503–2513.

[5] Rafiq S，Huma N，Pasha I，et al. Chemical composition，nitrogen fractions and amino acids profile of milk from different animal species[J]. Asian–Australasian Journal of Animal Sciences，2016，29（7）：1022–1028.

[6] Zhao L，Wang J，Mao X. Composition and interfacial properties play key roles in different lipid digestion between goat and cow milk fat globules in vitro[J]. Food Chemistry，2022，374：131538.

[7] Costa A，Lopez–Villalobos N，Sneddon N W，et al. Invited review：milk lactose–current status and future challenges in dairy cattle[J]. Journal of Dairy Science，2019，102（7）：5883–5898.

[8] Han S M，Huang F，Derraik J G B，et al A nutritional supplement during preconception and pregnancy increases human milk vitamin D but not B–vitamin concentrations[J]. Clinical nutrition （Edinburgh，Scotland），2023，42（12）：2443–2456.

[9] Zhang H，Ren X，Yang Z，et al. Vitamin A concentration in human milk：a meta–analysis[J]. Nutrients，2022，14（22）：4844.

[10] Walther B，Guggisberg D，Badertscher R，et al. Comparison of nutritional composition between plant–based drinks and cow's milk[J]. Frontiers in Nutrition，2022，9：988707.

[11] Holgersen K，Rasmussen M B，Zamir I，et al. Glucose–regulatory hormones and growth in very preterm infants fed fortified human milk[J]. Pediatric Research,2024，96（3）：713–722.

[12] Jiang X，Pan D，Zhang T，et al. Novel milk casein–derived peptides decrease cholesterol micellar solubility and cholesterol intestinal absorption in Caco–2 cells[J]. Journal of Dairy Science，2020，103（5）：3924–3936.

[13] Mariette F，Topgaard，D，Jönsson B，et al.1H NMR diffusometry study of water in casein dispersions and gels[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2002，50（15）：4295–4302.

[14] Wang Y，Hartel R W，Li Y，et al. Crystal networks，partial coalescence，and rheological properties of milk fat fraction model systems[J]. Journal of Dairy Science，2023，106（11）：7486–7500.

[15] Kanematsu Y,Narita A,Oda T,et al. Structures and mechanisms of actin ATP hydrolysis[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America，2022，119（43）：e2122641119.

[16] Barbé F，Ménard O，Le Gouar Y，et al.Acid and rennet gels exhibit strong differences in the kinetics of milk protein digestion and amino acid bioavailability[J]. Food Chemistry，2014，143：1–8.

[17] Noel G，In J G，Lemme–Dumit J M，et al. Human breast milk enhances intestinal mucosal barrier function and innate immunity in a healthy pediatric human enteroid model[J]. Frontiers in Cell and Developmental Biology，2021，9：685171.

[18] Mallow E B，Harris A，Salzman N，et al. Human enteric defensins. Gene structure and developmental expression[J]. The Journal of Biological Chemistry，1996，271（8）：4038–4045.

[19] Bosheva M，Tokodi I，Krasnow A，et al. Infant formula with a specific blend of five human milk oligosaccharides drives the gut microbiota development and improves gut maturation markers：a randomized controlled trial[J]. Frontiers in Nutrition，2022，9：920362.

[20] Porter P，Noakes D E，Allen W D. Intestinal secretion of immunoglobulins in the preruminant calf[J]. Immunology，1972,23（3）：299–312.

[21] Schreurs R R C E，Sagebiel A F，Steinert F L，et al. Intestinal CD8+ T cell responses are abundantly induced early in human development but show impaired cytotoxic effector capacities[J]. Mucosal Immunology，2021，14（3）：605–614.

[22] Adkins B. T–cell function in newborn mice and humans[J]. Immunol Today 1999，20：330–335.

[23] Capra M E，Aliverti V，Bellani A M，et al. Breastfeeding and non–communicable diseases：a narrative review[J]. Nutrients，2025，17（3）：511.

[24] Kobayashi–Sakamoto M，Maeda T，Kimura M，et al. Bovine lactoferrin increases the poly（I：C）–induced antiviral response in vitro[J]. Biochemistry and Cell Biology，2022，100（4）：338–348.

[25] Rio–Aige K，Azagra–Boronat I，Castell M，et al. The breast milk immunoglobulinome[J]. Nutrients，2021，13（6）：1810.

[26] Trend S，de Jong E，Lloyd M L，et al. Leukocyte populations in human preterm and term breast milk identified by multicolour flow cytometry[J]. PLoS One. 2015，10（8）：e0135580.

[27] Adams J M，Valentine C J，Karns R A，et al. DHA supplementation attenuates inflammation–associated gene expression in the mammary gland of lactating mothers who deliver preterm[J]. The Journal of Nutrition，2022，152（6）：1404–1414.

[28] Jaeser M，Moeckel U，Weigel K，et al. Natural association of lysozyme and casein micelles in human milk[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2022，70（5）：1652–1658.

[29] Singh P K，Sharma P，Bhushan A，et al. Structure of a ternary complex of lactoperoxidase with iodide and hydrogen peroxide at 1.77 Å resolution[J]. Journal of Inorganic Biochemistry，2021，220：111461.

[30] Khandelwal P，Andersen H，Romick–Rosendale L，et al.A pilot study of human milk to reduce intestinal inflammation after bone marrow transplant[J]. Breastfeeding Medicine，2019，14（3）：193–202.

中国乳业杂志网录

[31] 王月丹，初明，徐晓军，等. 免疫系统工作原理[M]. 北京：北京大学医学出版社，2023：12–15.

[32] Ninkina N，Kukharsky M S，Hewitt M V，et al. Stem cells in human breast milk[J]. Hum Cell，2019，32（3）：223–230.

[33] Saenger T，Schulte M F，Vordenbäumen S,et al.Structural analysis of breast–milk α S1–casein：an α–helical conformation is required for TLR4–stimulation[J]. International Journal of Molecular Sciences，2024,25（3）：1743.

[34] Sani M，Hosseini S M，Salmannejad M，et al. Origins of the breast milk–derived cells；an endeavor to find the cell sources[J]. Cell Biology International，2015，39（5）：611–618.

[35] Tuaillon E，Valea D，Becquart P，et al. Human milk–derived B cells：a highly activated switched memory cell population primed to secrete antibodies[J]. Journal of Immunology，2009，182（11）：7155–7162.

[36] Raymond F，Lefebvre G，Texari L，et al. Longitudinal human milk miRNA composition over the first 3 mo of lactation in a cohort of healthy mothers delivering term infants[J]. The Journal of Nutrition，2022，152（1）：94–106.

[37] Rezai T，Fell–Hakai S，Guleria S，et al.The role of breast milk cell–free DNA in the regulation of the neonatal immune response[J]. Nutrients，2024,16（24）：4373.

[38] Sapugahawatte D N，Godakumara K，Mäesaar M，et al. Harnessing nature's defence：the antimicrobial efficacy of pasteurised cattle milk–derived extracellular vesicles on staphylococcus aureus ATCC 25923[J]. International Journal of Molecular Sciences，2024，25（9）：4759.

[39] Boll E J，Lopez D V，Terne M，et al. Human milk oligosaccharides differentially support gut barrier integrity and enhance Th1 and Th17 cell effector responses in vitro[J]. Frontiers in Immunology，2024，15：1359499.

[40] Miles E A，Childs C E，Calder P C . Long–chain polyunsaturated fatty acids （LCPUFAs） and the developing immune system：a narrative review[J]. Nutrients，2021，13（1）：247.

[41] Fujita M，Wander K. Lactose in human milk is associated with lower rates of infection during a drought[J]. Annals of Human Biology,2025，52（1）：2455703.

[42] He K J，Dong J H，Ouyang X M，et al.Glycerol monolaurate ameliorates DSS–induced acute colitis by inhibiting infiltration of Th17，neutrophils，macrophages and altering the gut microbiota[J]. Frontiers in Nutrition，2022,9：911315.

[43] Zhou A L，Ward R E. Dietary milk polar lipids modulate gut barrier integrity and lipid metabolism in C57BL/6J mice during systemic inflammation induced by Escherichia coli lipopolysaccharide[J]. Journal of Dairy Science，2024，107（10）：7578–7593.

[44] Wang X，Zhong Y，Zheng C，et al. Transcriptome and metabolome analyses reveal the effects of formula and breast milk on the growth and development of human small intestinal organoids[J]. Food Research International,2024，195：114999.

[45] Grigorean G，Du X，Kuhfeld R，et al. Effect of in vitro digestion on bioactive peptides related to immune and gut health in intact cow's milk and hydrolyzed protein–based infant formulas[J]. Nutrients，2024，16（19）：3268.

[46] Šuligoj T，Vigsnæs L K，Abbeele P V D，et al. Effects of human milk oligosaccharides on the adult gut microbiota and barrier function[J]. Nutrients，2020，12（9）：2808.

[47] Miklavcic J J，Shoemaker G K，Schnabl K L，et al. Ganglioside intake increases plasma ganglioside content in human participants[J].Journal of Parenteral and Enteral Nutrition,2017，41（4）：657–666.

[48] Hamdan T A，Alkhateeb S，Oriquat G，et al.Impact of breastfeeding and formula feeding on immune cell populations and blood cell parameters：an observational study[J]. The Journal of International Medical Research，2024，52（12）：3000605241307217.

[49] Myles I A，Datta S K. Frontline Science：breast milk confers passive cellular immunity via CD8–dependent mechanisms[J]. Journal of Leukocyte Biology，2021，109（4）：709–715.

[50] Ahlberg E，Martí M，Govindaraj D，et al. Immune–related microRNAs in breast milk and their relation to regulatory T cells in breastfed children[J]. Pediatric Allergy and Immunology，2023，34（4）：e13952.

[51] Wei L，Liu C，Wang J，et al. Lactoferrin is required for early B cell development in C57BL/6 mice[J]. Journal of Hematology & Oncology，2021，14（1）：58.

[52] Lin C C，Chuang K C，Chen S W，et al. Lactoferrin ameliorates ovalbumin–induced asthma in mice through reducing dendritic–cell–derived Th2 cell responses[J]. International Journal of Molecular Sciences，2022，23（22）：14185.

[53] Zeng B，Wang H，Luo J，et al. Porcine milk–derived small extracellular vesicles promote intestinal immunoglobulin production through pIgR[J]. Animals，2021，11（6）：1522.

[54] Va´zquez E，Gil A，Rueda R. Dietary gangliosides increase the number of intestinal IgA–secreting cells and the luminal content of secretory IgA in weanling mice[J]. Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition，2000，31（Suppl. 2）：S133.

[55] Jepsen S D，Lund A，Matwiejuk M，et al.Human milk oligosaccharides regulate human macrophage polarization and activation in response to Staphylococcus aureus[J]. Frontiers in Immunology，2024,15：1379042.

[56] Cabinian A，Sinsimer D，Tang M，et al. Transfer of maternal immune cells by breastfeeding：maternal cytotoxic T lymphocytes present in breast milk localize in the Peyer’s patches of the nursed infant[J]. PLoS One，2016，11（6）：e0156762.

[57] Wold A E，Adlerberth I. Does breastfeeding affect the infant’s immune responsiveness[J]. Acta Paediatrica，1998，87：19–22.

[58] Córdova–Carrillo K，De la Peña–Lobato C，Cuevas–González M V，et al.Importance of Human Breast Milk in the Early Colonization of Streptococcus mutans[J]. Medicina，2024，60（8）：1308.

[59] Johnson–Hence C B，Gopalakrishna K P，Bodkin D，et al. Stability and heterogeneity in the antimicrobiota reactivity of human milk–derived immunoglobulin A[J]. The Journal of

中国乳业编辑部

Experimental Medicine，2023，220（8）：e20220839.
[60] Gavilanes-Parra S，Mendoza-Hern á ndez G，Ch á vez-Berrocal M E，et al. Identification of secretory immunoglobulin A antibody targets from human milk in cultured cells infected with enteropathogenic Escherichia coli （EPEC）[J]. Microbial Pathogenesis，2013，64：48-56.
[61] Rybarczyk J，Kieckens E，De Zutter L，et al. Effects of lactoferrin treatment on Escherichia coli O157：H7 rectal colonization in cattle[J]. Veterinary Microbiology，2017，202：38-46.
[62] Lönnerdal B. Lactoferrin receptors in intestinal brush border membranes[J]. Advances in Experimental Medicine and Biology，1994，357：171-175.
[63] Xu D，Zhou S，Liu Y，et al. Complement in breast milk modifies offspring gut microbiota to promote infant health[J]. Cell，2024，187（3）：750-763.
[64] Dierick M，Van der Weken H，Rybarczyk J，et al. Porcine and bovine forms of lactoferrin inhibit growth of porcine enterotoxigenic escherichia coli and degrade its virulence factors[J]. Applied and Environmental Microbiology，2020，86（24）：e00524-20.
[65] Goldblum R M，Ahlstedt S，Carlsson B，et al. Antibodyforming cells in human colostrum alter oral immunisation[J],Nature，1975，257：797.
[66] Zheng Y，Corr ê a-Silva S，Rodrigues R M，et al.Infant respiratory infections modulate lymphocyte homing to breast milk[J]. Frontiers in Immunology，2025,15：1481416.
[67] Biernbaum E N，Gnezda A，Akbar S，et al. Lactoferrin as an antimicrobial against Salmonella enterica and Escherichia coli O157：H7 in raw milk[J]. JDS Communications，2021，2（3）：92-97.
[68] Kussendrager K D，van Hooijdonk A C. Lactoperoxidase：physico-chemical properties，occurrence，mechanism of action and applications[J]. The British Journal of Nutrition，2000，84（Suppl 1）：S19-S25.
[69] Lyu Y，Kim B J，Patel J S，et al.Human milk protein-derived bioactive peptides from in vitro-digested colostrum exert antimicrobial activities against common neonatal pathogens[J]. Nutrients,2024,16（13）：2040.
[70] Tanaka C，Yamada K，Takeuchi H，et al. A lytic bacteriophage for controlling pseudomonas lactis in raw cow's milk[J]. Applied and Environmental Microbiology，2018，84（18）：e00111-e00118.
[71] Rudd P A，Kher G，Tame J R H，et al. Human milk oligosaccharide 2'-fucosyllactose guards norovirus histo-blood group antigen co-factor binding site[J]. Journal of Virology,2024，98（7）：e0086524.
[72] Aknouch I，Sridhar A，Freeze E，et al. Human milk inhibits some enveloped virus infections，including SARS-CoV-2，in an intestinal model[J]. Life Science Alliance，2022，5（12）：e202201432.
[73] Tonon K M，Chutipongtanate S，Morrow A L，et al. Human milk oligosaccharides and respiratory syncytial virus infection in infants[J]. Advances in nutrition （Bethesda，Md.），2024,15（6）：100218.
[74] Khodayar-Pardo P，Mart í nez-Costa C，Carmona-Vicente N，et al. Norovirus GII.4 antibodies in breast milk and serum samples：their role preventing virus-like particles binding to their receptors[J]. The Pediatric Infectious Disease Journal，2014，33（6）：554-559.
[75] Asensi M T，Mart í nez-Costa C，Buesa J. Anti-rotavirus antibodies in human milk：quantification and neutralizing activity[J]. Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition，2006，42（5）：560-567.
[76] Ghosh S，Kumar M，Santiana M，et al. Enteric viruses replicate in salivary glands and infect through saliva[J]. Nature，2022，607（7918）：345-350.
[77] Demers-Mathieu V，DaPra C，Medo E. Influenza vaccine associated with the gene expression of T cell surface markers in human milk[J]. Breastfeeding Medicine，2022，17（3）：218-225.
[78] Agostinis C，Toffoli M，Balduit A，et al. Anti-spike antibodies present in the milk of SARS-CoV-2 vaccinated mothers are complement-activating[J]. International Journal of Molecular Sciences，2023，24（5）：4395.
[79] Li C，Liu X，Huang Z，et al. Lactoferrin alleviates lipopolysaccharide-induced infantile intestinal immune barrier damage by regulating an ELAVL1-related signaling pathway[J]. International Journal of Molecular Sciences，2022，23（22）：13719.
[80] Mahdally S M，Izquierdo M，Viscardi R M，et al. Secretory-IgA binding to intestinal microbiota attenuates inflammatory reactions as the intestinal barrier of preterm infants matures[J]. Clinical and Experimental Immunology，2023，213（3）：339-356.
[81] Yuan F，Han X，Huang M，et al.The human milk-derived peptide drives rapid regulation of macrophage inflammation responses in the neonatal intestine[J]. Cellular and Molecular Gastroenterology and Hepatology，2025，19（2）：101420.
[82] Laegreid A，Otnaess A B，Fuglesang J. Human and bovine milk：comparison of ganglioside composition and enterotoxin-inhibitory activity[J]. Pediatric Research，1986，20（5）：416-421.
[83] Bint E Naser S F，Su H，Liu H Y，et al. Detection of ganglioside-specific toxin binding with biomembrane-based bioelectronic sensors[J]. ACS Applied Bio Materials，2021，4（11）：7942-7950.
[84] He Y，He Z，Leone S,et al. Milk exosomes transfer oligosaccharides into macrophages to modulate immunity and attenuate adherent-invasive E. coli （AIEC） infection[J]. Nutrients，2021，13（9）：3198.
[85] Pessentheiner A R，Spann N J，Autran C A，et al.The human milk oligosaccharide 3'sialyllactose reduces low-grade inflammation and atherosclerosis development in mice[J]. JCI insight，2024，9（21）：e181329.
[86] Schalich K M，Buendia M A，Kaur H，et al.A human milk oligosaccharide prevents intestinal inflammation in adulthood via modulating gut microbial metabolism[J]. mBio，2024,15（4）：e0029824.
[87] Wieser N V，Ghiboub M，Verseijden C，et al. Exploring the

中国乳业编辑部

immunomodulatory potential of human milk：aryl hydrocarbon receptor activation and its impact on neonatal gut health[J]. Nutrients，2024,16（10）：1531.

[88] Di S J，Cui X W，Liu T J，et al. Therapeutic potential of human breast milk–derived exosomes in necrotizing enterocolitis[J]. Molecular Medicine，2024，30（1）：243.

[89] Pizzarello C R，Nelson A，Verekhman I，et al. Human milk affects TLR4 activation and LPS–induced inflammatory cytokine expression in Caco–2 intestinal epithelial cells[J]. Scientific Reports,2024，14（1）：13448.

[90] Cui Q，Liu H C，Liu W M，et al. Milk fat globule epidermal growth factor 8 alleviates liver injury in severe acute pancreatitis by restoring autophagy flux and inhibiting ferroptosis in hepatocytes[J]. World Journal of Gastroenterology，30（7），2024：728–741.

[91] Filler R，Li B，Chusilp S，et al.Amniotic fluid and breast milk：a rationale for breast milk stem cell therapy in neonatal diseases[J]. Pediatric Surgery International，2020，36（9）：999–1007.

[92] Fang B，Zhang M，Tian M，et al. Bovine lactoferrin binds oleic acid to form an anti–tumor complex similar to HAMLET[J]. Biochimica Et Biophysica Acta，2014，1841（4）：535–543.

[93] Fan H，Xia S，Xiang J，et al. Trans–vaccenic acid reprograms CD8+ T cells and anti–tumour immunity[J]. Nature，2023，623（7989）：1034–1043.

[94] Kim K U，Kim W H，Jeong C H，et al. More than nutrition：therapeutic potential of breast milk–derived exosomes in cancer[J]. International Journal of Molecular Sciences，2020，21（19）：7327.

[95] Permyakov E A. α–Lactalbumin，amazing calcium–binding protein[J]. Biomolecules，2020，10（9）：1210.

[96] Svensson M，D ü ringer C，Hallgren O，et al. Hamlet––a complex from human milk that induces apoptosis in tumor cells but spares healthy cells[J]. Advances in Experimental Medicine and Biology，2002，503：125–132.

[97] Kim H Y，Kim M H，Kim H K，et al. Genotoxicity study of glycopeptide（G–7%NANA）[J]. Toxicological Research，2018，34（3）：259–266.

[98] Madsen B D，Rasmussen M D，Nielsen M O，et al. Physical properties of mammary secretions in relation to chemical changes during transition from colostrum to milk[J]. The Journal of Dairy Research，2004，71（3）：263–272.

[99] 秦学文，任澎，刘宇，等. 日粮添加不同过瘤胃率裂壶藻粉对奶牛生产性能、健康状况及乳中DHA含量的影响[J]. 中国畜牧杂志，2024，60（04）：228–232+240.

[100] 尚松林，栗桐，李佳骏，等. 带轴高湿玉米对奶牛生产性能、血清生化指标、免疫功能和抗氧化能力的影响[J]. 动物营养学报，2023，35（08）：5226–5235.

[101] Costa A，Bovenhuis H，Penasa M. Changes in milk lactose content as indicators for longevity and udder health in Holstein cows[J]. Journal of Dairy Science，2020，103（12）：11574–11584.

[102] 王加启，张养东，郑楠，等. 奶与奶制品化学及生物化学（M）. 北京，中国农业科学技术出版社，2019：1.

[103] Collard K M，McCormick D P. A nutritional comparison of cow’s milk and alternative milk products[J]. Academic Pediatrics，2021，21（6）：1067–1069.

[104] Mudgil P，AlMazroui M，Redha A A，et al. Cow and camel milk–derived whey and casein protein hydrolysates demonstrated effective antifungal properties against selected Candida species[J]. Journal of Dairy Science，2022，105（3）：1878–1888.

[105] Nie C，He T，Zhang W，et al. Branched chain amino acids：beyond nutrition metabolism[J]. International Journal of Molecular Sciences，2018,19（4）：954.

[106] Hussain T，Abbas S，Khan M A，et al. Lysine fortification of wheat flour improves selected indices of the nutritional status of predominantly cereal–eating families in Pakistan[J]. Food and Nutrition Bulletin，2004，25（2）：114–122.

[107] Kong S，Zhang Y H，Zhang W. Regulation of intestinal epithelial cells properties and functions by amino acids[J]. BioMed Research International，2018：2819154.

[108] Landi N，Ragucci S，Di Maro A. Amino acid composition of milk from cow，sheep and goat raised in ailano and valle agricola，two localities of 'Alto Casertano'（campania region）[J]. Foods，2021,10（10）：2431.

[109] Butte N F. Fat intake of children in relation to energy requirements. The American Journal of Clinical Nutrition，2000，72（5 Suppl）：1246S–1252S.

[110] Thum C，Roy N C，Everett D W，et al. Variation in milk fat globule size and composition：A source of bioactives for human health[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition，2023，63（1）：87–113.

[111] Maheshwari A，Mantry H，Bagga N，et al. Milk fat globules：2024 updates. Newborn（Clarksville，Md.），2024，3（1）：19–37.

[112] Li Z，Liu A，Cao Y，et al.Milk fat globule membrane proteins are crucial in regulating lipid digestion during simulated in vitro infant gastrointestinal digestion[J]. Journal of Dairy Science，2024,107（10）：7549–7563.

[113] Bourlieu C，Michalski M C. Structure–function relationship of the milk fat globule[J]. Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care，2015，18（2）：118–127.

[114] Singh H. Symposium review：Fat globules in milk and their structural modifications during gastrointestinal digestion[J]. Journal of Dairy Science，2019，102（3）：2749–2759.

[115] Liu B，Liang Y H，He Y Z，et al. Differences in fat digestion from milk of different Species：In vitro gastrointestinal digestion model for infants[J]. Food Research International（Ottawa，Ont.），2023，174（Pt 1）：113571.

[116] Barman M，Gio–Batta M，Andrieux L，et al. Short–chain fatty acids（SCFA）in infants' plasma and corresponding mother's milk and plasma in relation to subsequent sensitisation and atopic disease[J]. EBioMedicine，2024,101：104999.

[117] Urashima T，Katayama T，Sakanaka M，et al. Evolution of milk oligosaccharides：Origin and selectivity of the ratio of milk oligosaccharides to lactose among mammals[J]. Biochimica Et biophysica Acta. General Subjects，2022，1866（1）：130012.

中国乳业线上阅读

[118] Cheema A S，Stinson L F，Rea A，et al. Human milk lactose，insulin，and glucose relative to infant body composition during exclusive breastfeeding[J]. Nutrients，2021，13（11）：3724.

[119] Anguita-Ruiz A，Vatanparast H，Walsh C，et al. Alternative biological functions of lactose：a narrative review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition，2025：1-14.

[120] Chevalley T，Brandi M L，Cashman K D，et al. Role of vitamin D supplementation in the management of musculoskeletal diseases：update from an European Society of Clinical and Economical Aspects of Osteoporosis，Osteoarthritis and Musculoskeletal Diseases （ESCEO） working group[J]. Aging clinical and experimental research，2022，34（11）：2603-2623.

[121] Huang Y H，Yang T H，Huang P C，et al. Low Vitamin D levels in breast milk may be a risk factor for atopic dermatitis flare-up during infancy[J]. Dermatitis，2021,32（6）：e124-e125.

[122] Bird R P. The emerging role of vitamin B6 in inflammation and carcinogenesis[J]. Advances in Food and Nutrition Research，2018，83：151-194.

[123] Savarino G，Corsello A，Corsello G. Macronutrient balance and micronutrient amounts through growth and development[J]. Italian Journal of Pediatrics，2021，47（1）：109.

[124] Martens J H，Barg H，Warren M J，et al. Microbial production of vitamin B12[J]. Applied Microbiology and Biotechnology，2002，58（3）：275-285.

[125] Pepper M R，Black M M. B12 in fetal development[J]. Seminars in Cell & Developmental Biology，2011，22（6）：619-623.

[126] Zhang H，Ren X，Yang Z，et al. Vitamin A concentration in human milk：a meta-analysis[J]. Nutrients，2022，14（22）：4844.

[127] Cross K J，Huq N L，Reynolds E C. Casein phosphopeptide-amorphous calcium phosphate nanocomplexes：a structural model[J]. Biochemistry，2016，55（31）：4316-4325.

[128] Buhl E H，Christensen B，Pedersen F H，et al. Milk osteopontin has high iron-binding capacity and facilitates iron absorption in intestinal cells[J]. Journal of Dairy Science，2025，108（1）：90-100.

[129] Hallberg L，Rossander-Hultén L，Brune M，et al. Bioavailability in man of iron in human milk and cow's milk in relation to their calcium contents[J]. Pediatric Research，1992，31（5）：524-527.

[130] Bzikowska-Jura A，Wesołowska A，Sobieraj P，et al. Maternal diet during breastfeeding in correlation to calcium and phosphorus concentrations in human milk[J]. Journal of Human Nutrition and Dietetics，2023，36（3）：798-809.

[131] Sinkiewicz-Darol E，Łubiech K，Adamczyk I. Influence of lactation stage on content of neurotrophic factors，leptin，and insulin in human milk[J]. Molecules，2024，29（20）：4973.

[132] Olga L，van Diepen J A，Chichlowski M，et al. Butyrate in human milk：associations with milk microbiota，milk intake volume，and infant growth[J]. Nutrients，2023，15（4）：916.

[133] Caroprese M，Marzano A，Marino R，et al. Flaxseed supplementation improves fatty acid profile of cow milk[J]. Journal of Dairy Science，2010，93（6）：2580-2588.

[134] Renwick S，Furst A，Knip M，et al. Modulating the developing gut microbiota with 2'-fucosyllactose and pooled human milk oligosaccharides[J]. Microbiome，2025,13（1）：44.

[135] Taye Y，Degu T，Fesseha H，et al. Isolation and identification of lactic acid bacteria from cow milk and milk products[J]. Scientific World Journal，2021，2021：4697445.

[136] Palou M，Picó C，Palou A. Leptin as a breast milk component for the prevention of obesity[J]. Nutrition Reviews，2018，76：875-892.

[137] Miralles O，Sánchez J，Palou A，et al. A physiological role of breast milk leptin in body weight control in developing infants[J]. Obesity，2006，14：1371-1377.

[138] García-Martínez J，Salto R，Girón M D，et al. Supplementation with a whey protein concentrate enriched in bovine milk exosomes improves longitudinal growth and supports bone health during catch-up growth in rats[J]. Nutrients，2024，16（22），3814.

[139] Ding M，Li B，Chen H，et al. Human breastmilk-derived Bifidobacterium longum subsp. infantis CCFM1269 regulates bone formation by the GH/IGF axis through PI3K/AKT pathway[J]. Gut microbes，2024，16（1）：2290344.

[140] Thongseiratch T，Kittisakmontri K，Chandeying，N.Bovine milk fat globule membrane supplementation and neurocognitive development：a systematic review and meta-analysis[J]. Nutrients，2024,16（14）：2374.

[141] Sato K，Nakamura Y，Fujiyama K，et al. Absolute quantification of eight human milk oligosaccharides in breast milk to evaluate their concentration profiles and associations with infants' neurodevelopmental outcomes[J]. Journal of Food Science，2024,89（12）：10152-10170.

[142] Jones M，Nixon P F. Tetrahydrofolates are greatly stabilized by binding to bovine milk folate-binding protein[J]. The Journal of Nutrition，2002，132（9）：2690-2694.

[143] Tani M，Iwai K. Some nutritional effects of folate-binding protein in bovine milk on the bioavailability of folate to rats[J]. The Journal of Nutrition，1984，114：778-785.

[144] Vélez-Ixta J M，Juárez-Castelán C J，Ramírez-Sánchez D，et al. Post natal microbial and metabolite transmission：the path from mother to infant[J]. Nutrients，2024,16（13）：1990.

[145] Shao Y，Garcia-Mauriño C，Clare S，et al.Primary succession of Bifidobacteria drives pathogen resistance in neonatal microbiota assembly[J]. Nature Microbiology，2024,9（10）：2570-2582.

[146] Zhou F，Tajamul Mumtaz P，Dogan H，et al. Divergence of gut bacteria through the selection of genomic variants implicated in the metabolism of sugars，amino acids，and purines by small extracellular vesicles in milk[J]. Gut Microbes，2025,17（1）：2449704.

[147] He J，Wang D，Guo K，et al.Camel milk polar lipids ameliorate dextran sulfate sodium-induced colitis in mice by

中国乳业杂志社版权

modulating the gut microbiota[J]. Journal of Dairy Science，2024,107（9）：6413–6424.

[148] Rizzo S M，Alessandri G，Lugli G A，et al. Exploring molecular interactions between human milk hormone insulin and bifidobacteria[J].Microbiology Spectrum,2023,11（3）：e0066523.

[149] Hermes G D A，Rasmussen C，Wellejus A. Variation in the conservation of species–specific gene sets for HMO degradation and its effects on HMO utilization in bifidobacteria[J]. Nutrients，2024，16（12）：1893.

[150] Yeruva L，Mulakala B K，Rajasundaram D，et al. Human milk miRNAs associate to maternal dietary nutrients，milk microbiota，infant gut microbiota and growth[J]. Clinical Nutrition，2023，42（12）：2528–2539.

[151] Paone P，Latousakis D，Terrasi R，et al.Human milk oligosaccharide 2'–fucosyllactose protects against high–fat diet–induced obesity by changing intestinal mucus production，composition and degradation linked to changes in gut microbiota and faecal proteome profiles in mice[J]. Gut，2024,73（10）：1632–1649.

[152] Balde ó n M E，Zertuche F，Flores N，et al. Free amino acid content in human milk is associated with infant gender and weight gain during the first four months of lactation[J]. Nutrients，2019，11（9）：2239.

[153] Zumkeller W. Relationship between insulin–like growth factor–I and –II and IGF–binding proteins in milk and the gastrointestinal tract：growth and development of the gut[J]. Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition，1992，15（4）：357–369.

[154] Yu V Y. Scientific rationale and benefits of nucleotide supplementation of infant formula[J]. Journal of Paediatrics and Child Health，2002，38（6）：543–549.

[155] Hamosh M. Digestion in the newborn[J]. Clinics in Perinatology，1996，23（2）：191–209.

[156] Groziak S M，Miller G D. Natural bioactive substances in milk and colostrum：effects on the arterial blood pressure system[J]. The British Journal of Nutrition，2000，84（Suppl 1）：S119–S125.

[157] Yi L，Min J T，Jun C L，et al. Buffalo yogurt fermented with commercial starter and Lactobacillus plantarum originating from breast milk lowered blood pressure in pregnant hypertensive rats[J]. Journal of Dairy Science，2024,107（1）：62–73.

[158] Mohammadi S，Asbaghi O，Dolatshahi S，et al. Effects of supplementation with milk protein on glycemic parameters：a GRADE–assessed systematic review and dose–response meta–analysis[J]. Nutrition Journal，2023，22（1）：49.

[159] Zhang W，Al–Wraikata M，Li L，et al.Physicochemical properties，antioxidant and antidiabetic activities of different hydrolysates of goat milk protein[J]. Journal of Dairy Science，2024,107（12）：10174–10189.

[160] Trichia E，Koulman A，Stewart I D，et al. Plasma metabolites related to the consumption of different types of dairy products and their association with new–onset Type 2 diabetes：analyses in the fenland and EPIC–Norfolk studies，United Kingdom[J]. Molecular Nutrition & Food Research，2024，68（1）：e2300154.

[161] Ayoub M A，Yap P G，Mudgil P，et al. Invited review：camel milk–derived bioactive peptides and diabetes–molecular view and perspectives[J]. Journal of Dairy Science，2024，107（2）：649–668.

[162] Häusler S，Lanzinger E，Sams E，et al.Melatonin in human breast milk and its potential role in circadian entrainment：a nod towards chrononutrition?[J]. Nutrients，2024,16（10）：1422.

[163] Andrani M，Dall'Olio E，De Rensis F，et al. Bioactive peptides in dairy milk：highlighting the role of melatonin[J]. Biomolecules,2024,14（8）：934.

[164] Guan K，Liu X，Lu W，et al. Bioactive milk–derived nutrient MFG–E8 ameliorates skeletal muscle atrophy induced by mitochondria damage in aging rats via activating the MAPK/ERK signaling pathway[J]. Journal of Dairy Science，2025，108（2）：1182–1197.

[165] Lin S，Wang J，Mukherjee P K，et al.Milk fat globule–epidermal growth factor 8（MFGE8）prevents intestinal fibrosis[J]. Gut，2024，73（7）：1110–1123.

[166] Donald K，Serapio–Palacios A，Gerbec Z，et al.Secretory IgA in breast milk protects against asthma through modulation of the gut microbiota[J]. Cell Reports，2024，43（10）：114835.

[167] Abdisa K B，Szerdahelyi E，Moln á r M A，et al. Metabolic syndrome and biotherapeutic activity of dairy（Cow and Buffalo）milk proteins and peptides：fast food–induced obesity perspective–a narrative review[J]. Biomolecules，2024，14（4）：478.

[168] Gartner T E,Hunter K M,Lambros E,et al. Anomalies and local structure of liquid water from boiling to the supercooled regime as predicted by the many–body MB–pol mmodel[J]. The Journal of Physical Chemistry Letters，2022，13（16）：3652–3658.

[169] Plumridge T H，Waigh R D. Water structure theory and some implications for drug design[J]. The Journal of Pharmacy and Pharmacology，2002，54（9）：1155–1179.

[170] Hsieh C S，Campen R K，Okuno M，et al. Mechanism of vibrational energy dissipation of free OH groups at the air–water interface[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America，2013，110（47）：18780–18785.

[171] Alghoul Z M，Ogden P B，Dorsey J G. Characterization of the polarity of subcritical water[J]. Journal of Chromatography. A，2017，1486：42–49.

[172] Buch V，Milet A，V á cha R，et al. Water surface is acidic[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America，2007，104（18）：7342–7347.

[173] Wijayasinghe R，Bogahawaththa D，Chandrapala J，et al. Crystallization behavior and crystal properties of lactose as affected by lactic，citric，or phosphoric acid[J]. Journal of Dairy science，2020，103（12）：11050–11061.

[174] Shi Y，Wang P，Li W，et al. Effects of Na+ and Cl– on hydrated clusters by ab initio study[J]. The Journal of Chemical Physics，2023，159（4）：044305.

[175] 艾伯茨 B. 细胞生物学精要[M].3版. 北京：科学出版社，2021：74-75.

[176] Lopez C，Madec M N，Jimenez-Flores R. Lipid rafts in the bovine milk fat globule membrane revealed by the lateral segregation of phospholipids and heterogeneous distribution of glycoproteins[J]. Food Chemistry，2010，1（120）：22-33.

[177] Muresan S，van der Bent A，de Wolf F A. Interaction of beta-lactoglobulin with small hydrophobic ligands as monitored by fluorometry and equilibrium dialysis：nonlinear quenching effects related to protein--protein association[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2001，49（5）：2609-2618.

[178] Liu K,Zhang Y,Huang G,et al. Ruminal bacterial community is associated with the variations of total milk solid content in Holstein lactating cows[J]. Animal Nutrition （Zhongguo xu mu shou yi xue hui），2022，9：175-183.

[179] Yi D Y，Kim S Y. Human breast milk composition and function in human health：from nutritional components to microbiome and microRNAs[J]. Nutrients，2021，13（9）：3094.

[180] Bouchoux A,G é san-Guiziou G，P é rez J,et al.How to squeeze a sponge：casein micelles under osmotic stress，a SAXS study[J]. Biophysical Journal，2010，99（11）：3754-3762.

[181] Takagi H，Nakano T，Aoki T，et al. Temperature dependence of the casein micelle structure in the range of 10-40 ℃：An in-situ SAXS study[J]. Food Chemistry，2022，393：133389.

[182] Li D Q，Li J，Dong H L，et al. Pectin in biomedical and drug delivery applications：A review[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2021，185：49-65.

[183] JamaliMoghadamSiahkali S，Zarezade B,Koolaji S，et al. Safety and effectiveness of high-dose vitamin C in patients with COVID-19：a randomized open-label clinical trial[J]. European Journal of Medical Research，2021，26（1）：20.

[184] Layden A J，Finkelstein J. B-vitamins and HIV/AIDS[M]// Mehta S，Finkelstein J L,et al.Nutrition and HIV：Epidemiological Evidence to Public Health.New York（NY）：CRC Press，2018，27-87.

[185] Stevens S L. Fat-soluble vitamins[J]. The Nursing Clinics of North America，2021，56（1）：33-45.

[186] Lindmark-Månsson H，Akesson B. Antioxidative factors in milk[J]. The British Journal of Nutrition，2000，84（Suppl 1）：S103-S110.

[187] Alshehab M，Reis M G，Day L，et al. Milk fat globules，a novel carrier for delivery of exogenous cholecalciferol[J]. Food Research International （Ottawa，Ont.），2019，126：108579.

[188] Gaucheron F. The minerals of milk[J]. Reproduction，Nutrition，Development，2005，45（4）：473-483.

[189] Bello M,P é rez-Hern á ndez G，Fern á ndez-Velasco D A，et al. Energetics of protein homodimerization：effects of water sequestering on the formation of beta-lactoglobulin dimer[J]. Proteins，2008，70（4）：1475-1487.

[190] Fang D，Yang K，Zhu J，et al. Hydration dominates dielectric spectroscopy-based high accuracy quantification of lactose content in cow's milk[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture，2023，103（12）：5873-5882.

[191] Johnson M E. A 100-Year Review：Cheese production and quality[J]. Journal of Dairy Science，2017，100（12）：9952-9965.

[192] Tadesse B T，Zhao G，Kempen P，et al. Consolidated bioprocessing in a dairy setting-concurrent yoghurt fermentation and lactose hydrolysis without using lactase enzymes[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2022，70（37）：11623-11630.

[193] Duan C，Li S，Zhao Z，et al. Proteolytic activity of lactobacillus plantarum strains in cheddar cheese as adjunct cultures[J]. Journal of Food Protection，2019，82（12）：2108-2118.

[194] Zhao J，Ma M，Yan X,et al. Expression and characterization of a novel lipase from Bacillus licheniformis NCU CS-5 for application in enhancing fatty acids flavor release for low-fat cheeses[J]. Food Chemistry，2022，368：130868.

[195] Lang E，Chemlal L，Molin P，et al. Modeling the heat inactivation of foodborne pathogens in milk powder：High relevance of the substrate water activity[J]. Food Research International （Ottawa，Ont.），2017，99（Pt 1）：577-585.

[196] Wei X，Lau S K，Chaves B D，et al. Effect of water activity on the thermal inactivation kinetics of Salmonella in milk powders[J]. Journal of Dairy Science，2020，103（8）：6904-6917.

[197] Li Y H，Wang W J，Guo L，et al. Comparative study on the characteristics and oxidation stability of commercial milk powder during storage[J]. Journal of Dairy Science，2019，102（10）：8785-8797.

[198] Maidannyk V，Mcsweeney D J，Hogan S A，et al. Water sorption and hydration in spray-dried milk protein powders：Selected physicochemical properties[J]. Food Chemistry，2020，304：125418.

[199] Murrieta-Pazos I，Gaiani C，Galet L，et al. Comparative study of particle structure evolution during water sorption：skim and whole milk powders[J]. Colloids and Surfaces. B，Biointerfaces，2011，87（1）：1-10.

中国乳业线上阅读

[200] Yan H，Yu Z，Liu L. Lactose crystallization and Maillard reaction in simulated milk powder based on the change in water activity[J]. Journal of Food Science，2022，87（11）：4956–4966.

[201] Rathod G，Amamcharla J K. Process development for a novel milk protein concentrate with whey proteins as fibrils[J]. Journal of Dairy Science，2021，104（4）：4094–4107.

[202] Tan S，Hadinoto K，Ebrahimi A，et al. Fabrication of novel casein gel with controlled release property via acidification，spray drying and tableting approach[J]. Colloids and Surfaces. B Biointerfaces，2019，177：329–337.

Cognitive Progress of Milk Function：Immune，Nutritional，Active，Hydration Function

ZHANG Yangdong，ZHENG Nan，ZHAO Shengguo，LIU Huimin，Meng Lu，WANG Jiaqi*

Key Laboratory of Quality & Safety Control for Milk and Dairy Products of Ministry of Agriculture and Rural Affairs，Institute of Animal Science of Chinese Academy of Agricultural Sciences；Key Laboratory of Dairy Quality Digital Intelligence Monitoring Technology，State Administration for Market Regulation，Institute of Animal Science of Chinese Academy of Agricultural Sciences，Beijing 100193

Abstract：Milk is the food that is closest to perfection for human beings. Milk not only contains a wide variety of immune substances，but also contains easily digestible nutrients such as casein，bioactive substances such as insulin-like growth factors，and water accounting for more than 87% of milk mass. Milk can enhance the immune function of the human body，quickly supplement the energy，protein and other nutrients required by the human body，promote infant growth and reduce the "three high" indicators，and provide hydration substrate for the body's physiological activities. In addition，many active substances such as exosomes in milk have a wide range of biomedical applications. In this paper，the immunity，nutrition，activity and hydration of milk were reviewed in order to provide reference for better understanding and use of milk and further development of high-quality active milk and dairy products.

Keywords：milk；immunity；nutrition；activity；hydration

中国乳业线上阅读