

牛初乳免疫调节机制及其应用研究进展

杨 叶

(广东聚和时代科技有限公司, 广东佛山 528000)

摘 要: 牛初乳是母牛在分娩后72 h内分泌的乳汁, 富含免疫球蛋白、乳铁蛋白、溶菌酶、过氧化物酶等多种生物活性成分, 具有重要的免疫调节功能。本文综述牛初乳中的主要营养成分、免疫活性组分及其含量影响因素, 并系统总结其在婴幼儿、青少年、成年人及老年人群中的免疫调节功能。研究表明, 牛初乳具有增强黏膜免疫功能、调节炎症反应、减轻病原菌感染程度以及维持免疫系统稳态的作用。作为一种天然且安全的营养干预策略, 牛初乳在增强免疫力和促进健康维护方面具有广阔的应用前景。

关键词: 牛初乳; 免疫; 营养成分; 免疫因子

文章编号: 1671-4393 (2026) 01-0109-09

DOI:10.12377/1671-4393.26.01.16

Research Progress on the Immunomodulatory Mechanism and Applications of Bovine Colostrum

YANG Ye

(Guangdong Juhe Times Technology Co., Ltd., Foshan Guangdong 528000)

Abstract: Bovine colostrum is the milk secreted by a cow 72 hours after giving birth. It is rich in various bioactive components such as immunoglobulins, lactoferrin, lysozyme, and peroxidase, and has significant immune regulatory functions. This paper reviewed the main nutritional components, immune-active components and their content influencing factors in bovine colostrum, and systematically summarized its immune regulatory functions in infants, adolescents, adults, and the elderly. Studies have shown that bovine colostrum has the effects of enhancing mucosal immune function, regulating inflammatory responses, reducing the severity of pathogen infections, and maintaining the stability of immune system. As a natural and safe nutritional intervention strategy, bovine colostrum has broad application prospects in enhancing immunity and promoting health maintenance.

Keywords: bovine colostrum; immunity; nutritional component; immune factor

作者简介: 杨 叶 (1989-), 男, 江西上饶人, 本科, 研究方向为乳品科学与技术。

牛初乳因其特殊的生理时期、分泌特性及高度浓缩的营养与免疫成分，近年来受到广泛关注^[1]。牛初乳是母牛在分娩后72 h内分泌的初始乳汁，为新生犊牛提供必要的营养物质和被动免疫支持^[2, 3]。与常规牛乳相比，牛初乳中蛋白质、脂肪、维生素及矿物质等基础营养成分含量更高，能够有效支持机体的快速生长与发育^[4]。牛初乳中富含多种生物活性成分，包括低聚糖、溶菌酶、免疫球蛋白、乳铁蛋白及过氧化物酶等^[2, 5]。上述成分通过协同作用机制，在提供被动免疫、抗菌保护和调控早期胃肠道系统发育等方面发挥重要作用^[6~9]。此外，牛初乳已被证实不会引起毒理学和组织病理学异常，印证了其作为膳食补充剂的安全性^[1]。牛初乳的独特成分为新生犊牛早期生存能力提供关键支持，同时为人类营养补充与免疫调节机制的研究奠定了理论基础^[10]。本文总结和分析牛初乳的营养成分、免疫活性组分及其含量影响因素，以及对机体的免疫调节作用，为牛初乳在功能性食品开发和免疫干预等领域研究与实践提供理论支持与科学依据，同时为其在不同人群中的应用推广提供参考。

1 牛初乳的组成

1.1 营养成分

牛初乳中营养成分包括蛋白质、脂质、碳水化合物、维生素和矿物质（表1）。其中蛋白质种类丰富，总含量远高于成熟乳^[11]。其蛋白质可分为乳清蛋白、酪蛋白和乳脂肪球膜蛋白。乳清蛋白组分包括免疫球蛋白、乳铁蛋白、 α -乳白蛋白、 β -乳球蛋白、乳过氧化物酶、溶菌酶、糖-巨肽及多种生长因子，酪蛋白以 α s1-酪蛋白为主^[11]。酪蛋白具有“慢消化”特性，其进入胃后会形成凝块，延缓胃排空，从而缓慢释放氨基酸^[12, 13]。这一特点使其能够延长氨基酸释放时间，促进蛋白质合成，由此持续为新生儿提供氨基酸，支持组织生长和发育^[12, 13]。与此相对，乳清蛋白易被快速消化吸收^[12]，其中 α -乳白蛋白（约占乳清蛋白的40%）富含必需氨基酸，包括对肌肉蛋白合成关键的支链氨基酸（亮氨酸、异

亮氨酸、缬氨酸）等^[11]。乳脂肪球膜蛋白仅占乳中总蛋白质的5%左右，但包含多种具有生理功能的蛋白质，如乳黏附素、黏蛋白-1、黄嘌呤脱氢酶/氧化酶、脂肪酸合酶、脂肪酸结合蛋白等，在哺乳动物新生儿生长发育过程中起到重要作用^[14, 15]。

表 1 牛初乳和成熟乳的成分差异^[11, 16, 17]
Table 1 Differences in Components between Colostrum and Mature Milk^[11, 16, 17]

成分	牛初乳	成熟乳
总固形物 (g/100 mL)	24.0 ~ 28.0	12.9
蛋白质 (g/100 mL)	14.9	3.1
脂肪 (%)	6.0 ~ 7.0	3.6 ~ 4.0
乳糖 (g/100 mL)	2.5	5.0
钙 (g/kg)	2.6 ~ 4.7	1.2 ~ 1.3
磷 (g/kg)	4.5	0.9 ~ 1.2
钾 (g/kg)	1.4 ~ 2.8	1.5 ~ 1.7
钠 (g/kg)	0.7 ~ 1.1	0.4
镁 (g/kg)	0.4 ~ 0.7	0.1
锌 (mg/kg)	11.6 ~ 38.1	3 ~ 6
维生素 B ₁ (μg/mL)	0.58 ~ 0.90	0.4 ~ 0.5
维生素 B ₂ (μg/mL)	4.55 ~ 4.83	1.5 ~ 1.7
维生素 B ₃ (μg/mL)	0.34 ~ 0.96	0.8 ~ 0.9
维生素 B ₁₂ (μg/mL)	0.05 ~ 0.60	0.004 ~ 0.006
维生素 A (IU/100 mL)	208.33 ~ 250.00	128.90 ~ 159.63
维生素 D (IU/g fat)	0.89 ~ 1.81	0.41
维生素 E (μg/g)	2.92 ~ 5.63	0.06

牛初乳中脂质约占乳汁重量的7%，主要以三酰甘油形式存在^[11]。其脂肪酸成分以饱和脂肪酸为主（占65%~75%），单不饱和脂肪酸占24%~28%，多不饱和脂肪酸占4%~5%；其中棕榈酸和油酸分别约占40%和21%^[11]。牛初乳还富含 ω -3必需脂肪酸、 ω -6必需脂肪酸、共轭亚油酸以及短链脂肪酸等。脂肪球膜中的磷脂和神经节苷脂具有特殊的生物活性，可参与神经系统发育、病原体结合和免疫调节等过程^[18~20]。

牛初乳中碳水化合物主要包括乳糖与多种低聚糖^[11]。其中乳糖含量约2.5%，明显低于成熟乳^[5, 21]；而低聚糖总量约1 g/L，是成熟乳的2倍，且以唾液酸化低聚糖为主^[22]。低聚糖在消化道难以被完全降解，可作为肠道有益菌（如双歧杆菌）的底物，促进有益菌群定殖并改善肠道生态^[11]。综上所述，乳

糖可为机体提供必要能量，低聚糖和糖蛋白可通过益生元作用维持肠道菌群平衡，有助于增强肠道屏障功能。

牛初乳富含多种维生素和矿物质，可满足多方面营养需求和生理功能。其中包括脂溶性维生素（维生素A、维生素D、维生素E）及水溶性B族维生素^[11]。这些维生素对新生儿发育至关重要：维生素A支持视觉和上皮组织发育^[23]，维生素D调节钙磷代谢并增强免疫功能^[24]，维生素E具有抗氧化作用，可保护细胞免受氧化损伤^[25]，B族维生素参与能量代谢和神经功能，有利于生长发育^[26]。此外，牛初乳还富含钙、磷、铁、锌、镁、锰和铜等元素^[11]。钙、磷等矿物质是骨骼和牙齿形成的关键成分^[27]，铁是造血必需元素^[28]，锌作为酶的辅因子参与氧化还原反应及免疫反应^[29]。

1.2 免疫因子

1.2.1 免疫球蛋白

免疫球蛋白是一种复杂的蛋白质，被称为抗体，是牛初乳中重要的蛋白质组分。牛初乳中的免疫球蛋白主要有IgG、IgA、IgM 3种不同类型。IgG是牛初乳中的主要免疫球蛋白^[10]，占免疫球蛋白总量的80%~90%，其次是IgA和IgM^[11]。牛初乳中免疫球蛋白水平比成熟乳中高约100倍。人乳中主要免疫球蛋白类型是IgA。然而，来自牛初乳的IgG仍可通过被动免疫机制为动物和人类提供保护，以免受疾病侵害^[30]。牛初乳中IgG的转移与保护宿主免受感染的机制有关。IgG的Fc受体分为两个不同的功能类别，即新生儿Fc受体（FcRn）和Fc γ 受体（Fc γ R）^[30]。前者在肠上皮细胞上表达，通过结合IgG并将其转运至黏膜表面提供局部免疫保护。在新生儿中，这种途径尤为重要，因为新生儿免疫系统尚未成熟，依赖外源性免疫成分提供保护^[31]；后者是IgG在免疫细胞中发挥作用的关键受体，分为激活受体和抑制受体。激活性Fc γ R包括Fc γ RIa、Fc γ RIIa和Fc γ RIIIa，另一类是单一的抑制受体Fc γ RIIb，主要在巨噬细胞、树突状细胞和淋巴细胞等免疫细胞上表达^[31]。大多数免疫效应细胞都同

时表达激活受体和抑制受体，它们的相对表达决定了细胞激活的阈值。当牛初乳中IgG与这些受体结合时，会触发消除病原体、刺激免疫系统的活化和成熟等效应^[32]。

1.2.2 乳铁蛋白

乳铁蛋白是一种铁结合糖蛋白，存在于眼泪、汗液、精液、唾液和牛初乳等分泌物中。一般来说，牛初乳和成熟乳中乳铁蛋白的浓度分别为1 500~5 000 mg/L和20~750 mg/L^[33]。它被认为是一种重要的宿主防御分子，并已在体内和体外试验中被证明具有多种生物活性，例如抗菌、抗氧化、抗炎、抗癌和免疫调节等功能^[34, 35]。

1.2.3 溶菌酶

溶菌酶存在于眼泪、唾液和粘液、乳中^[36]。牛初乳中的溶菌酶浓度高于成熟乳，分别为0.14~0.45 mg/L和0.07~0.60 mg/L^[35]。它是一种保守的抗菌蛋白，作为非特异性免疫因子参与体内各种免疫反应^[36]，能够通过水解细菌细胞壁的肽聚糖，杀死细菌以发挥其抗菌作用^[37, 38]。

1.2.4 乳过氧化物酶

乳过氧化物酶是牛初乳中主要的抗菌酶，它是一种碱性糖蛋白^[39]。乳过氧化物酶在牛初乳中的浓度为11~45 mg/L，在成熟乳中的浓度为13~30 mg/L^[2]。它在牛初乳中的浓度最初较低，但在分娩后3~5天时达到最高水平。牛初乳中的乳过氧化物酶活性也高于成熟乳^[2]。它可催化硫氰酸盐的氧化并产生能抑制细菌和真菌生长的氧化产物^[40]。

2 影响牛初乳成分的主要因素

牛初乳品质受母牛品种、遗传背景、泌乳期、营养状况、生理状态及环境等多重因素共同影响。

2.1 泌乳期

牛初乳成分随挤奶时间和泌乳阶段迅速变化。母牛产后1 h内牛初乳乳铁蛋白浓度达到峰值，随后逐渐下降^[41]；而IgA、IgM等免疫球蛋白在牛初乳中浓度本就远低于IgG，也会随泌乳递增而降低。总体而言，分娩后初乳向过渡乳、成熟乳转变过程

中，蛋白质、脂质和免疫物质含量均趋于下降，乳糖和水分含量增加^[41]。该变化趋势不仅反映了乳腺分泌机制的调节过程，更体现了对犊牛逐步发育成熟的消化和代谢系统所进行的营养适配调整。因此，泌乳早期（尤其产后前几次挤奶）的牛初乳质量最高，推荐及时采集首泌初乳以保证高免疫因子含量。

2.2 母牛品种与遗传背景

不同品种母牛产出的初乳成分存在显著差异。研究表明，泽西奶牛产生的IgG浓度最高（66.5 g/L），而弗里斯兰-荷斯坦牛产生的IgG浓度最低（41.2 g/L）^[42]。一项对瑞士和德国等地共13个乳肉兼用或肉牛混品种牛初乳成分的调查中，不同牛初乳中的IgG和其他成分的浓度差异较大。与低产牛、肉牛和乳肉兼用牛相比，高产母牛的初乳质量未见显著差异^[43]。经产母牛初乳中IgG含量通常高于初产母牛^[42]。

2.3 营养状况

母牛干乳期的营养管理对初乳品质至关重要。研究表明，在干乳期给予满足营养要求的饲料，可产生高质量牛初乳。例如，营养满足需求的饲喂方案可使牛初乳IgG含量达到或超过优秀标准；而营养受限（尤其能量不足）的饲喂方案虽对牛初乳IgG浓度影响不显著，但会降低牛初乳产量和犊牛血清IgG水平^[44]。Gao等^[45]研究发现，能量不足的母牛所产初乳喂养犊牛后，犊牛血清IgG浓度显著低于能量充足的对照组（17.2 g/L vs 22.2 g/L）。

2.4 母牛生理状态

母牛健康状况和产程相关因素对牛初乳品质有重要影响。乳腺健康方面，乳房炎（如大肠杆菌性乳房炎）会显著改变乳腺分泌物组成。研究发现，急性乳腺感染时，乳汁中乳铁蛋白浓度可增加30倍^[46]。虽然局部炎症可提升某些免疫蛋白，但整体牛初乳质量（营养平衡、吸收效率）常受损。

2.5 气候与季节

气候变化和季节也可影响牛初乳成分。夏季产犊的奶牛初乳质量通常低于秋季产犊的奶牛^[47]。牛初乳脂肪含量在产后24 h和48 h呈现季节性差异，

其中，秋冬季产犊母牛所产初乳脂肪含量高于春夏季产犊母牛。该差异可能与不同季节母牛新陈代谢状态、饲料组成和饮水量差异有关^[48, 49]。此外，季节性采食习惯（牧草与青贮比例变化）、光照时长（影响激素分泌）也可能间接影响牛初乳的免疫活性成分和营养组成。

2.6 储存与处理

牛初乳采集后的储存和处理方式对其活性成分的稳定性有显著影响。常见的储存和处理方式包括冷藏、冷冻保存以及巴氏消毒等。适当冷冻保存牛初乳是一种维持IgG含量的有效方法。研究表明，只要解冻方式温和（如隔水缓慢加温至40℃以下），冻融过程对IgG浓度影响极小^[50]。相比之下，高温处理对免疫活性成分影响较大。使用热处理有利于杀死牛初乳中的微生物并延长其保质期，但也会影响牛初乳中营养物质的含量。在60℃下热处理牛初乳60 min或更长时间会导致牛初乳中免疫球蛋白、酪蛋白和乳铁蛋白含量降低^[51]，这种损失的原因可能与长时间热处理有关。

3 免疫调节作用

3.1 牛初乳对婴儿的免疫调节作用

婴儿出生后即面临外界环境中多种微生物和抗原的挑战，其免疫系统尚处于发育初期阶段，特别是肠道黏膜免疫系统尚未成熟，导致婴儿在该阶段对病原体感染和炎症反应的抵抗力较弱。婴儿的先天性免疫功能尚不完善，适应性免疫功能也处于较低水平，且肠道菌群尚未稳定建立。由于这些因素，婴儿在初生阶段对外部病原的防御能力有限，容易受到病原体感染^[52]。哺乳动物新生儿由于未具备咀嚼和消化固体食物的能力，因此其唯一生存途径是通过母乳获得所需的营养和免疫支持。然而，部分婴儿无法获得充足的母乳喂养，可能因此错失母乳提供的免疫保护^[53]。此外，早产儿，尤其是妊娠32周以下的极早产儿，对生长发育有更高的营养需求。早产儿母亲的乳汁供应往往不足以满足早产儿的营养和免疫需求^[2]。在这种情况下，外源性免

疫调节物质,如牛初乳,可作为母乳替代品或营养强化剂帮助提升婴儿,尤其是早产儿的免疫防御能力,并促进免疫系统成熟。一项使用早产猪模型的研究显示,将牛初乳用于人乳强化剂比传统基于配方奶的强化剂表现出更低的腹泻评分、更高的乳糖酶活性和更强的肠道屏障功能;且牛初乳组的肠道炎症标志物表达较低,肠道菌群多样性更高,肠道黏液细胞密度更大,骨髓中细菌转移减少^[54]。此外,将牛初乳添加到人乳中可增强其对新生儿常见致病菌(如大肠杆菌和表皮葡萄球菌)的体外抗菌活性^[54]。上述结果表明,牛初乳作为人乳强化剂在增强肠道健康、免疫防御力和降低早产儿病原体感染风险方面有显著优势。Rasmussen等^[55]以早产猪模型进行研究,发现牛初乳相比人乳或婴儿配方奶更能增强小肠黏膜结构、提高肠道免疫相关基因的表达(如转化生长因子TGF- β 、白细胞介素IL-10)并降低肠炎发生率,提示其具有促进肠道免疫成熟和抗炎作用。另一项研究进一步证实,膳食牛初乳可改善肠道吸收功能并显著减少坏死性小肠结肠炎的发生率^[56]。此外,牛初乳已被证明对具有抗人轮状病毒抗体的儿童具有被动免疫作用^[6]。胃肠炎小鼠和正常婴儿用含有人轮状病毒抗体的牛初乳进行饮食干预,能显著提高接受治疗的小鼠对人轮状病毒感染的被动保护,与对照组相比,牛初乳组没有一例人轮状病毒诱导的腹泻,而对照组70%的婴儿出现腹泻症状^[57]。综上所述,牛初乳作为一种富含免疫活性成分的外源性补充物,能够在婴儿特别是早产儿免疫系统尚未成熟的关键时期,有效增强其免疫防御能力、改善肠道功能,并显著降低病原体感染及炎症相关疾病的发生风险,具有重要的临床应用潜力。

3.2 牛初乳对青少年和儿童的免疫调节作用

青少年和儿童处于提高免疫力的关键阶段,对外界病原微生物的防御能力相对较弱,对营养和免疫支持的需求更高。因此,为青少年和儿童提供充足的营养物质,尤其是具有免疫调节作用的功能性成分,对于提高其对感染、炎症及其他免疫相关疾病的防御能力有重要意义^[58, 59]。临床试验证实,牛

初乳在降低青少年和儿童病原体感染频率和临床症状严重程度方面有显著功效。一项涉及57名学龄前儿童的随机对照试验表明,连续6周补充牛初乳可使上呼吸道感染(URTI)频率降低30.5%,症状严重程度降低37%,且效果持续至20周^[60]。在胃肠道感染方面,一项针对324名儿童的荟萃分析发现,补充牛初乳可使感染性腹泻的发生率降低71%,粪便中病原体的检出率降低至29%,这归因于IgG介导的病原体中和以及乳铁蛋白对细菌黏附的阻断^[61]。Saad等^[9]研究评估牛初乳对1~6岁反复呼吸道感染和腹泻儿童的免疫保护作用。结果显示,连续4周每日补充牛初乳可显著降低感染频率。同时,URTI与腹泻的发生次数及住院率显著减少。在过敏性疾病方面,一项对7~18岁患有支气管哮喘和过敏性鼻炎的儿童进行的随机双盲安慰剂对照试验显示,连续3个月每日补充1 000 mg牛初乳可显著缓解鼻部症状和改善肺功能,尤其在单一过敏原敏感的患者中效果更显著^[62]。综上所述,牛初乳通过其丰富的免疫活性成分在增强儿童和青少年的免疫防御能力、减少感染发生率以及缓解过敏性疾病症状方面展现出良好的干预效果,具有作为日常免疫营养补充剂的广泛应用前景。

3.3 牛初乳对成年人的免疫调节作用

虽然成年人的免疫系统相对成熟,但在高强度运动或营养不良等因素影响下,免疫功能可能受到抑制,表现为病原体感染风险增加、炎症水平升高和黏膜屏障功能下降^[63~65]。牛初乳已被证实对成年人有免疫调节作用^[2]。在一项针对29名高水平男性公路自行车运动员的双盲随机对照研究中,连续8周补充牛初乳蛋白浓缩物后,试验组在高强度训练期间表现出显著的免疫调节效应。具体而言,试验组在运动前血清可溶性肿瘤坏死因子受体1(TNFR1)水平显著升高,提示该组可能具备更强的炎症信号调控能力。此外,与安慰剂组相比,补充牛初乳能有效抑制试验组高强度训练及之后恢复期内细胞毒性/抑制性T细胞(CD8⁺T细胞)比例的下降,维持免疫效应细胞的稳态。进一步分析还表明,该干预

有助于维持血清中IgG2水平,防止运动员在剧烈运动后出现IgG2水平显著下降情况。上述结果表明,在高负荷训练条件下补充牛初乳可通过多维度调节免疫参数,增强机体免疫应答稳定性^[66]。另一项由Jones等^[67]进行的双盲随机对照试验显示,补充牛初乳可减轻长时间运动引起的体内免疫反应下降,特别是在对新抗原的反应能力方面。综上所述,牛初乳在成人人群中,尤其是在承受高强度体能负荷或存在免疫功能易受抑制风险的个体中,能有效调节免疫反应、维持免疫稳态,展现出作为功能性营养补充剂的重要应用价值。

3.4 牛初乳对老年人的免疫调节作用

随着人口老龄化进程加快,老年人群对免疫健康管理的需求日益凸显^[68]。年龄增长引发的免疫衰老导致免疫功能普遍下降,其中,胸腺功能退化会导致新生T细胞(尤其是CD8⁺和CD45RA⁺初始T细胞)数量减少,免疫系统对新抗原的识别和应答能力下降^[69]。T细胞群体构成发生变化,外周血中CD8⁺T细胞特别是CD45RA⁺初始T细胞显著减少,而CD4⁺T细胞数量并未明显变化。此外,衰老T细胞(如CD28⁻、CD57⁺、CD8⁺T细胞)比例升高,这类高分化T细胞增殖能力下降且更易进入衰老状态。B细胞群体与功能发生变化,外周血中初始B细胞数量减少,记忆B细胞比例升高;B细胞克隆多样性降低,亲和力成熟过程中选择功能受损;衰老B细胞中线粒体含量和线粒体ROS水平升高,影响其能量代谢与抗体生成能力^[69]。中性粒细胞、巨噬细胞、自然杀伤细胞和树突状细胞等先天性免疫细胞功能也发生衰退^[69]。同时常伴有慢性、全身性的低度炎症状态,如血浆中炎症因子IL-6、TNF- α 水平普遍升高,进一步削弱免疫反应^[69],显著增加感染、慢性病及炎症性疾病风险。因此,探索安全有效的营养干预策略以支持老年免疫功能,已成为公共卫生领域的重点议题^[70]。在一项对低NK细胞活性老年人群的干预研究中,补充含有牛初乳乳铁蛋白成分的复合制剂2个月后,受试者的NK细胞杀伤力显著提高^[71]。Ooi等^[72]采用随机对照试验设计,选取50~69

岁受试者每天饮用富含牛初乳的脱脂牛奶,12周后干预组与对照组相比CRP、IL-6、TNF- α 等促炎因子的表达水平分别下降33.6%、19.6%和44.1%,并诱导甘油磷脂代谢、半胱氨酸和蛋氨酸代谢途径的变化,从而可能改善老年人的免疫功能。此外,饮用含牛初乳的脱脂牛奶可改善老年人的体重、血压和下肢运动功能,有助于更好地控制血液中胆固醇水平,并可能在一定程度上增强机体的免疫功能^[73]。此外,体外研究发现摄入牛初乳可促进淋巴细胞分泌抗炎细胞因子,提示其具有调节免疫平衡的潜力^[71]。综上所述,牛初乳通过下调炎症因子、增强NK细胞活性及改善代谢通路,在促进老年人免疫功能、调节免疫平衡和提升整体健康状态方面展现出显著潜力,具有重要的应用前景。

4 牛初乳制品

牛初乳因其丰富的营养成分及显著的生物活性功能,已被广泛应用于功能性食品和乳制品的开发中^[35]。为保障牛初乳及其制品的质量与安全,国家和行业层面制定了相应的标准与规范。生鲜牛初乳须符合中国乳制品工业协会发布的《RHB 601—2005 生鲜牛初乳》,该标准对污染物、兽药残留及微生物指标设定基础限值,以确保其作为食品原料的安全性^[74]。在加工制品方面,牛初乳粉执行《RHB 602—2005 牛初乳粉》行业标准^[75]。该标准明确规定,牛初乳粉中的蛋白质含量应不低于非脂乳固体的40%。还明确规定牛初乳粉必须在产品标签上明确标示IgG含量。此外,根据《GB 28050—2011 食品安全国家标准 预包装食品营养标签通则》^[76],若产品在标签上标注如“高IgG”或“增强免疫力”等功能性营养声称,企业必须提供相应的科学依据支持其功能属性。同时,为确保最终产品的功能有效性,其所含活性成分的保留率应达到80%以上。该要求亦参考《GB 12693—2023 食品安全国家标准 乳制品良好生产规范》^[77]相关工艺验证和生产控制要求,确保产品在加工和储存过程中尽可能保留牛初乳中核心活性成分。这些标准体系的建立不仅为牛初乳及

其制品的规范化生产和市场准入提供了制度保障，也为消费者获取安全、有效的功能性乳制品提供了信心支撑，为牛初乳产品的产业化与高质量发展奠定了基础。

5 结论

牛初乳作为哺乳动物早期分泌的功能性乳品，富含免疫球蛋白、乳铁蛋白、溶菌酶、过氧化物酶等多种免疫活性成分，展现出显著的免疫调节潜力。牛初乳不仅能增强黏膜和系统性免疫防御，改善肠道屏障功能，还可调节炎症反应与免疫细胞功能，在婴幼儿、青少年、成年人及老年人群中均表现出积极的干预效果。作为天然、安全的营养干预手段，牛初乳在乳制品工业中的应用价值日益受到关注。其富含的生物活性成分使其成为开发功能性乳制品的理想原料，有望满足不同人群对高附加值营养食品的个性化需求，在提升群体免疫力和预防感染方面具有广阔应用前景。未来研究应进一步探讨牛初乳在特定疾病（如自身免疫性疾病、炎症性肠病和代谢性疾病）治疗中的潜在应用机制，明确其有效成分及作用途径，并通过大规模临床试验验证其安全性和疗效。这将为牛初乳的精准应用和产品开发提供科学依据。

参考文献

- [1] Davis P F, Greenhill N S, Rowan A M, et al. The safety of New Zealand bovine colostrum: Nutritional and physiological evaluation in rats[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2007, 45 (2) : 229-236.
- [2] Duan H, Sun Q, Chen C, et al. A review: The effect of bovine colostrum on immunity in people of all ages[J]. *Nutrients*, 2024, 16 (13) : 2007.
- [3] Hue D T, Skirving R, Chen T, et al. Colostrum source and passive immunity transfer in dairy bull calves[J]. *Journal of Dairy Science*, 2021, 104 (7) : 8164-8176.
- [4] Poonia A, Shiva. Bioactive compounds, nutritional profile and health benefits of colostrum: A review[J]. *Food Production, Processing and Nutrition*, 2022, 4 (1) : 1-21.
- [5] Kehoe S I, Jayarao B M, Heinrichs A J. A survey of bovine colostrum composition and colostrum management practices on Pennsylvania dairy farms[J]. *Journal of Dairy Science*, 2007, 90 (9) : 4108-4116.
- [6] Davidson G P, Daniels E, Nunan H, et al. Passive immunisation of children with bovine colostrum containing antibodies to human rotavirus[J]. *Lancet*, 1989, 334 (8665) : 709-712.
- [7] Jones A W, March D S, Curtis F, et al. Bovine colostrum supplementation and upper respiratory symptoms during exercise training: A systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials[J]. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 2016, 8 (1) : 21.
- [8] King M R, Morel P C H, Revell D K, et al. Dietary bovine colostrum increases villus height and decreases small intestine weight in early-weaned pigs[J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2008, 21 (4) : 567-573.
- [9] Saad K, Abo-Elela M G M, El-Baseer K A A, et al. Effects of bovine colostrum on recurrent respiratory tract infections and diarrhea in children[J]. *Medicine*, 2016, 95 (37) : e4560.
- [10] Arslan A, Kaplan M, Duman H, et al. Bovine colostrum and its potential for human health and nutrition[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2021, 8: 651721.
- [11] Playford R J, Weiser M J. Bovine colostrum: Its constituents and uses[J]. *Nutrients*, 2021, 13 (1) : 265.
- [12] Canbolat A A, Lombardo M, Mondragon A D C, et al. Bovine colostrum in pediatric nutrition and health[J]. *Nutrients*, 2024, 16 (24) : 4305.
- [13] Boirie Y, Dangin M, Gachon P, et al. Slow and fast dietary proteins differently modulate postprandial protein accretion[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1997, 94 (26) : 14930-14935.
- [14] 李墨翰, 张秀敏, 王亦宁, 等. 牛初乳与牛常乳脂肪球膜中丰度差异蛋白的表征与分析[J]. *食品科学*, 2022, 43 (12) : 163-170.
- [15] 李墨翰, 张秀敏, 宋婉莹, 等. 驴初乳与常乳脂肪球膜蛋白质组的对比分析[J]. *食品科学*, 2022, 43 (8) : 104-112.
- [16] Borad S G, Singh A K. Colostrum immunoglobulins: Processing, preservation and application aspects[J]. *International dairy journal*, 2018, 85: 201-210.
- [17] Polidori P, Rapaccetti R, Klimanova Y, et al. Nutritional parameters in colostrum of different mammalian species[J]. *Beverages (Basel)*, 2022, 8 (3) : 54.
- [18] Verardo V, Gómez-Caravaca A, Arráez-Román D, et al. Recent advances in phospholipids from colostrum, milk and dairy by-products[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2017, 18 (1) : 173.
- [19] 李墨翰, 宋婉莹, 张秀敏, 等. 乳极性脂质组成及其功能性研究进展[J]. *乳业科学与技术*, 2022, 45 (2) : 24-29.

- [20] 李墨翰, 刘爱成, 赵闪闪, 等. 驴乳营养成分研究进展[J]. 乳业科学与技术, 2022, 45 (6) : 42-49.
- [21] Urashima T, Saito T, Nakamura T, et al. Oligosaccharides of milk and colostrum in non-human mammals[J]. Glycoconjugate Journal, 2001, 18 (5) : 357-371.
- [22] Ten Bruggencate S J, Bovee-Oudenhoven I M, Feitsma A L, et al. Functional role and mechanisms of sialyllactose and other sialylated milk oligosaccharides[J]. Nutrition Reviews, 2014, 72 (6) : 377-389.
- [23] Huang Z, Liu Y, Qi G, et al. Role of Vitamin A in the immune system[J]. Journal of Clinical Medicine, 2018, 7 (9) : 258.
- [24] Charoenngam N, Holick M F. Immunologic effects of Vitamin D on human health and disease[J]. Nutrients, 2020, 12 (7) : 2097.
- [25] Kilicarslan You D, Fuwad A, Lee K H, et al. Evaluation of the protective role of Vitamin E against ROS-driven lipid oxidation in model cell membranes[J]. Antioxidants, 2024, 13 (9) : 1135.
- [26] Calderón-Ospina C A, Nava-Mesa M O B. Vitamins in the nervous system: Current knowledge of the biochemical modes of action and synergies of thiamine, pyridoxine, and cobalamin[J]. CNS Neuroscience & Therapeutics, 2020, 26 (1) : 5-13.
- [27] Driessens F C M. The mineral in bone, dentin and tooth enamel[J]. Bulletin des Sociétés Chimiques Belges, 1980, 89 (8) : 663-689.
- [28] Kao Y R, Chen J, Kumari R, et al. An iron rheostat controls hematopoietic stem cell fate[J]. Cell Stem Cell, 2024, 31 (3) : 378-397.
- [29] Lee S R. Critical role of zinc as either an antioxidant or a prooxidant in cellular systems[J]. Oxidative Medicine and Cellular Longevity, 2018 (2018) : 1-11.
- [30] Hurley W L, Theil P K. Perspectives on immunoglobulins in colostrum and milk[J]. Nutrients, 2011, 3 (4) : 442-474.
- [31] Zhu H L, Zhao X W, Wang X Z, et al. Changes in expression of antimicrobial peptides and Fc receptors in the small intestines of neonatal calves during the passive immunity period[J]. Journal of Dairy Science, 2020, 103 (10) : 9515-9524.
- [32] Castro-Dopico T, Clatworthy M R. IgG and Fc γ receptors in intestinal immunity and inflammation[J]. Frontiers in Immunology, 2019, 10: 805.
- [33] McGrath B A, Fox P F, McSweeney P L H, et al. Composition and properties of bovine colostrum: A review[J]. Dairy Science & Technology, 2016, 96 (2) : 133-158.
- [34] Abd El-Hack M E, Abdelnour S A, Kamal M, et al. Lactoferrin: Antimicrobial impacts, genomic guardian, therapeutic uses and clinical significance for humans and animals[J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2023, 164: 114967.
- [35] Legrand D, Elaiss E, Pierce A, et al. Lactoferrin and host defence: An overview of its immuno-modulating and anti-inflammatory properties[J]. Biometals, 2004, 17 (3) : 225-229.
- [36] Ferraboschi P, Ciceri S, Grisenti P. Applications of lysozyme, an innate immune defense factor, as an alternative antibiotic[J]. Antibiotics (Basel), 2021, 10 (12) : 1534.
- [37] Davis K M, Weiser J N. Modifications to the peptidoglycan backbone help bacteria to establish infection[J]. Infection and Immunity, 2010, 79 (2) : 562-570.
- [38] Ragland S A, Criss A K. From bacterial killing to immune modulation: Recent insights into the functions of lysozyme[J]. PLOS Pathogens, 2017, 13 (9) : e1006512.
- [39] Fox P F, Kelly A L. Indigenous enzymes in milk: Overview and historical aspects—Part 2[J]. International Dairy Journal, 2006, 16 (6) : 517-532.
- [40] Saarela M. Functional foods—Concept to product[M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011.
- [41] Trajkovska B, Kochoski L, Dimitrovska G, et al. Changes in the lactoferrin concentration in the bovine colostrum during postpartum period[J]. Macedonian Veterinary Review, 2022, 45 (2) : 177-185.
- [42] Muller L D, Ellinger D K. Colostral immunoglobulin concentrations among breeds of dairy cattle[J]. Journal of Dairy Science, 1981, 64 (8) : 1727-1730.
- [43] Kessler E C, Bruckmaier R M, Gross J J. Colostrum composition and immunoglobulin G content in dairy and dual-purpose cattle breeds[J]. Journal of Animal Science, 2020, 98 (8) : 1-6.
- [44] Erickson P S. Colostrum management: Keys to optimizing output and uptake of immunoglobulin G[J]. Frontiers in Animal Science, 2022, 3: 914361.
- [45] Gao F, Liu Y C, Zhang Z H, et al. Effect of prepartum maternal energy density on the growth performance, immunity, and antioxidation capability of neonatal calves[J]. Journal of Dairy Science, 2012, 95 (8) : 4510-4518.
- [46] Harmon R J, Schanbacher F L, Ferguson L C, et al. Changes in lactoferrin, immunoglobulin G, bovine serum albumin, and alpha-lactalbumin during acute experimental and natural coliform mastitis in cows[J]. Infection and Immunity, 1976, 13 (2) : 533-542.
- [47] Morin D E, Constable P D, Maunsell F P, et al. Factors associated with colostral specific gravity in dairy cows[J]. Journal of Dairy Science, 2001, 84 (4) : 937-943.
- [48] Erdem H, Okuyucu I C. Non-genetic factors affecting some colostrum quality traits in Holstein cattle[J]. Pakistan Journal of Zoology, 2020, 52 (2) : 557.
- [49] West J W. Effects of heat-stress on production in dairy cattle[J]. Journal of Dairy Science, 2003, 86 (6) : 2131-2144.

- [50] Robbers L, Jorritsma R, Nielen M, et al. A scoping review of On-farm colostrum management Practices for Optimal Transfer of Immunity in Dairy Calves[J]. *Frontiers in Veterinary Science*, 2021, 8, 668639.
- [51] Mann S, Curone G, Chandler T L, et al. Heat treatment of bovine colostrum: I. Effects on bacterial and somatic cell counts, immunoglobulin, insulin, and IGF-I concentrations, as well as the colostrum proteome[J]. *Journal of Dairy Science*, 2020, 103 (10): 9368-9383.
- [52] Wells J M, Gao Y, de Groot N, et al. Babies, bugs, and barriers: Dietary modulation of intestinal barrier function in early life[J]. *Annual review of nutrition*, 2022, 42 (1): 165-200.
- [53] 王煜林, 吉日木图, 何静. 乳脂球膜中的营养成分在婴儿健康和发育中的作用[J]. *中国食品学报*, 2023, 23 (6): 402-410.
- [54] Gao X, Li Y, Olin A B, et al. Fortification with bovine colostrum enhances antibacterial activity of human milk[J]. *Journal of Parenteral and Enteral Nutrition*, 2021, 45 (7): 1417-1424.
- [55] Rasmussen S O, Martin L, Østergaard M V, et al. Bovine colostrum improves neonatal growth, digestive function, and gut immunity relative to donor human milk and infant formula in preterm pigs[J]. *American Journal of Physiology-Gastrointestinal and Liver Physiology*, 2016, 311 (3): G480-G491.
- [56] Shen R L, Thymann T, Østergaard M V, et al. Early gradual feeding with bovine colostrum improves gut function and NEC resistance relative to infant formula in preterm pigs[J]. *American Journal of Physiology-Gastrointestinal and Liver Physiology*, 2015, 309 (5): G310-G323.
- [57] Ebina T, Ohta M, Kanamaru Y, et al. Passive immunizations of suckling mice and infants with bovine colostrum containing antibodies to human rotavirus[J]. *Journal of Medical Virology*, 1992, 38 (2): 117-123.
- [58] Patel K, Rana R. Pedimune in recurrent respiratory infection and diarrhoea—The Indian experience—The PRIDE study[J]. *Indian Journal of Pediatrics*, 2006, 73 (7): 585-591.
- [59] Rodriguez L, Cervantes E, Ortiz R. Malnutrition and gastrointestinal and respiratory infections in children: A public health problem[J]. *International journal of environmental research and public health*, 2011, 8 (4): 1174-1205.
- [60] Hałasa M, Skonieczna-Żydecka K, Machaliński B, et al. Six weeks of supplementation with bovine colostrum effectively reduces URTIs symptoms frequency and gravity for up to 20 weeks in pre-school children[J]. *Nutrients*, 2023, 15 (16): 3626.
- [61] Li J, Xu Y W, Jiang J J, et al. Bovine colostrum and product intervention associated with relief of childhood infectious diarrhea[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9 (1): 3093.
- [62] Oloroso-Chavez K Q, Gonzalez-Andaya P A M, Wong-Chuah C C. The effect of bovine colostrum supplementation in the management of respiratory allergies in children according to allergen sensitization: A subgroup analysis from the results of a randomized double-blinded placebo-controlled trial[J]. *Philippine Journal of Allergy, Asthma and Immunology*, 2022, 22 (1): 1-11.
- [63] Bourke C D, Berkley J A, Prendergast A J. Immune dysfunction as a cause and consequence of malnutrition[J]. *Trends in Immunology*, 2016, 37 (6): 386-398.
- [64] Gleeson M. Immune function in sport and exercise[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2007, 103 (2): 693-699.
- [65] Morey J N, Boggero I A, Scott A B, et al. Current directions in stress and human immune function[J]. *Current Opinion in Psychology*, 2015, 5: 13-17.
- [66] Shing C M, Peake J, Suzuki K, et al. Effects of bovine colostrum supplementation on immune variables in highly trained cyclists[J]. *Journal of applied physiology*, 2007, 102 (3): 1113-1122.
- [67] Jones A W, March D S, Thatcher R, et al. The effects of bovine colostrum supplementation on in vivo immunity following prolonged exercise: A randomised controlled trial[J]. *European Journal of Nutrition*, 2019, 58 (1): 335-344.
- [68] Shao T, Verma H K, Pande B, et al. Physical activity and nutritional influence on immune function: An important strategy to improve immunity and health status[J]. *Frontiers in Physiology*, 2021, 12: 751374.
- [69] Goyani P, Christodoulou R, Vassiliou E. Immunosenescence: Aging and immune system decline[J]. *Vaccines*, 2024, 12 (12): 1314.
- [70] Zitvogel L, Kroemer G. Boosting the immunotherapy response by nutritional interventions[J]. *The journal of clinical investigation*, 2022, 132 (11): 1-3.
- [71] Ghosh S, Iacucci M. Diverse immune effects of bovine colostrum and benefits in human health and disease[J]. *Nutrients*, 2021, 13 (11): 3798.
- [72] Ooi T C, Ahmad A, Rajab N F, et al. The effects of 12 weeks colostrum milk supplementation on the expression levels of pro-inflammatory mediators and metabolic changes among older adults: Findings from the biomarkers and untargeted metabolomic analysis[J]. *Nutrients*, 2023, 15 (14): 3184.
- [73] Ooi T C, Ahmad A, Rajab N F, et al. Effects of 12 weeks colostrum milk supplement among older adults: A randomised, double-blind and placebo-controlled trial[J]. *International Dairy Journal*, 2024, 149: 105819.
- [74] 中国乳制品工业协会. RHB 601—2005 生鲜牛初乳[S].
- [75] 中国乳制品工业协会. RHB 602—2005 牛初乳粉[S].
- [76] 中华人民共和国卫生部. GB28050—2011 食品安全国家标准预包装食品营养标签通则[S].
- [77] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB12693—2023 乳制品良好生产规范[S].