

乳清蛋白在运动营养中的应用与趋势

韩晓东¹, 吕嘉晋¹, 邢忆凤^{2, 3}, 王鹏杰⁴, 杨续金^{2, 3*}

(1.内蒙古农业大学生命科学学院, 内蒙古呼和浩特 010018; 2.内蒙古农业大学食品科学与工程学院, 内蒙古呼和浩特 010018; 3.内蒙古农业大学杨续金创新工作室, 内蒙古呼和浩特 010018; 4.中国农业大学营养与健康系, 北京 100193)

摘要: 乳清蛋白富含支链氨基酸及多种生物活性成分, 具有快速消化吸收的代谢优势, 是运动营养领域研究最为深入的蛋白质来源之一。本文系统综述了乳清蛋白在运动营养中的分子机制、临床应用及研究前沿。在机制层面, 乳清蛋白通过激活mTOR信号通路驱动肌肉蛋白质合成, 经色氨酸/5-羟色胺通路延缓中枢疲劳, 并借助免疫球蛋白与乳铁蛋白的协同作用增强运动后免疫防御。在应用层面, 现有临床证据表明乳清蛋白在抗阻训练增肌、耐力运动恢复、体重管理及免疫调节方面均具有显著效果。在研究前沿, 乳清蛋白与胶原蛋白的复配策略、纳米靶向递送技术及基因多态性导向的个性化补充方案正受到广泛关注; 膜分离与精密发酵工艺的进步则为其绿色可持续生产提供了新路径。随着多组学技术与人工智能的深度融合, 乳清蛋白的应用正向基于个体基因型、代谢表型和训练负荷的精准营养方向转变。

关键词: 乳清蛋白; 运动营养; mTOR信号通路; 支链氨基酸; 个性化营养

文章编号: 1671-4393 (2026) 05-0135-08 DOI:10.12377/1671-4393.26.05.19

Applications and Trends of Whey Protein in Sports Nutrition

HAN Xiaodong¹, LYU Jiajin¹, XING Yifeng^{2, 3}, WANG Pengjie⁴, YANG Xujin^{2, 3*}

(1.College of Life Sciences, Inner Mongolia Agriculture University, Hohhot Inner Mongolia 010018; 2.College of Food Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot Inner Mongolia 010018; 3.Yang Xujin Innovation Studio, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot Inner Mongolia 010018; 4.Department of Nutrition and Health, China Agricultural University, Beijing 100193)

基金项目: 呼和浩特市“揭榜挂帅”重大科技项目(2023-揭榜挂帅-农-2); 内蒙古自治区科技创新引导项目(kcyj-202202); 内蒙古自治区科技计划项目(2025YFHH0147)

作者简介: 韩晓东(1985-), 男, 内蒙古乌兰察布人, 博士, 副教授, 研究方向为生物化学与分子生物学;
吕嘉晋(2000-), 男, 山西孝义人, 在读硕士, 研究方向为生物化学与分子生物学;
邢忆凤(2001-), 女, 山东威海人, 在读硕士, 研究方向为乳品工程;
王鹏杰(1986-), 男, 山东青岛人, 博士, 副教授, 研究方向为乳品科学与技术。

通信作者: 杨续金(1975-), 男, 内蒙古包头人, 硕士, 副教授, 研究方向为乳品工程。

Abstract: Whey protein, characterized by a high branched-chain amino acid content, rapid gastrointestinal absorption, and multiple bioactive components, represents one of the most extensively studied protein sources in sports nutrition. This review systematically examined the molecular mechanisms, clinical evidence, and emerging research directions of whey protein in the context of sports nutrition. At the mechanistic level, whey protein stimulates muscle protein synthesis primarily through activation of the mTOR signaling pathway, attenuates central fatigue via modulation of the tryptophan–serotonin axis, and reinforces post-exercise immune function through the concerted actions of immunoglobulins and lactoferrin. Clinically, accumulating evidence supports its efficacy in promoting resistance training-induced hypertrophy, accelerating endurance recovery, facilitating body composition management, and sustaining immune homeostasis during intensive training. Recent advances include co-formulation with collagen to simultaneously target myofibrillar and connective tissue protein synthesis, nano-encapsulation for enhanced bioavailability, and genotype-informed supplementation strategies based on polymorphisms such as ACTN3. Concurrently, membrane filtration and precision fermentation technologies are expanding the sustainable production of functional whey proteins. As multi-omics profiling and artificial intelligence converge with nutritional science, individualized whey protein protocols calibrated to genotype, metabolic phenotype, and training load are becoming increasingly feasible.

Keywords: whey protein; sports nutrition; mTOR signaling pathway; branched-chain amino acid; personalized nutrition

近20年来，运动营养学已从经验性补充策略发展为基于分子机制的精准干预科学。2024年，国际运动营养学会（International Society of Sports Nutrition, ISSN）声明指出，蛋白质摄入量（1.4~2.0 g/kg·d）与运动表现呈剂量依赖性关系，其核心机制涉及肌肉蛋白质合成（Muscle Protein Synthesis, MPS）速率的调控^[1]。研究表明，高强度训练诱导的肌纤维微损伤可通过蛋白质补充显著改善，修复效率提升达1.7倍，凸显了蛋白质在运动恢复中的关键作用^[2]。此外，代谢组学证据表明，蛋白质质量比总量更能预测运动适应性^[3]。基于消化率校正氨基酸评分（Protein Digestibility-Corrected Amino Acid Score, PDCAAS）和消化必需氨基酸评分（Digestible Indispensable Amino Acid Score, DIAAS）的评估，高质量蛋白源（如乳清蛋白）在促进运动表现方面有显著优势^[4]。据Research and Markets 2025年12月发布的《全球乳清蛋白产品市

场报告》，全球乳清蛋白市场规模预计从2025年的91亿美元增长至2030年的129亿美元，年复合增长率为7.2%^[1]。Grand View Research分析显示，全球运动营养市场规模2025年已达715.5亿美元，预计2033年将增至1 384.8亿美元，年复合增长率为8.7%；其中蛋白粉产品在蛋白补充剂市场中占据最大份额（48.8%），以乳清蛋白为主的动物源蛋白产品占据主导地位（59.9%）。

乳清蛋白作为奶酪生产的副产品，其成分与功能特性远超早期认知。现代分离技术揭示，乳清蛋白包含β-乳球蛋白（50%~55%）、α-乳白蛋白（20%）、乳铁蛋白（0.5%~3%）、免疫球蛋白（10%~15%）及200余种生物活性肽段，构成独特的营养矩阵^[5]。其中，亮氨酸浓度显著高于植物蛋白，可通过激活mTORC1通路直接调控肌肉蛋白质合成^[6]。乳清蛋白的功能特性呈现多维性：在代谢调控方面，其支链氨基酸（Branched-Chain Amino

Acids, BCAA) 占比约25%，可显著提升胰岛素敏感性；在免疫调节方面，乳铁蛋白和免疫球蛋白通过抗菌、抗病毒活性支持免疫功能；在抗氧化方面，乳清蛋白作为谷胱甘肽前体，可增强机体抗氧化能力^[7]。2024年质谱分析进一步发现，乳清蛋白中功能肽在模拟消化过程中具有高保留率的特性^[8]，超出了传统营养学的认知局限，这些特性使其成为竞技体育中功能特异性补充的首选。

当前研究正从单一营养补充转向精准营养与系统生物学整合模式。人工智能与多组学技术（如基因组学、代谢组学）的进步，使得基于个体遗传背景、代谢表型及肠道菌群的个性化蛋白质补充方案成为可能。同时，可穿戴设备的实时生物监测（如心率变异性、汗液成分分析）为精准时间营养策略提供了技术支撑。此外，乳清蛋白纳米载体在生物活性化合物递送方面取得显著进展，其中乳清蛋白纳米颗粒可将番茄红素的生物利用率提高50%~68.3%，电喷雾制备的乳清蛋白纳米颗粒（232.3~659.8 nm）对橄榄叶酚类化合物的包封效率达到36.66%~83.66%，而乳清蛋白-短链葡聚糖核壳纳米颗粒对姜黄素的包封效率超过90%^[9]。此外，植物蛋白与动物蛋白的混合配方在提升营养价值与可持续性方面展现出显著潜力，正成为产业转型的重要方向^[10]。据2025年11月发布的《全球精准营养市场报告》，全球精准营养市场规模2024年已达67.8 亿美元，预计2032年将增至228.2 亿美元，年复合增长率高达16.38%，增长动力来自基因组学、生物标志物科学及数字健康平台的快速融合。

本综述旨在系统总结乳清蛋白在运动营养中的分子作用机制、临床应用效果及最新研究进展，深入探讨其在精准营养时代的发展趋势和应用前景，并分析当前研究面临的挑战与限制，为运动营养科学研究和实践应用提供全面的理论依据和实践指导。

1 乳清蛋白的组成与生物化学特性

乳清蛋白主要来源于奶酪制作过程中的液体分离物，其组成与生物化学特性使其在蛋白质质量上

表现突出，不同蛋白质来源的PDCAAS和DIAAS质量评分对比显示，乳清蛋白在这两项评分中均处于较高水平，体现了其在蛋白质质量方面的显著优势（图1）。根据加工工艺和蛋白质含量的差异，乳清蛋白可分为3 种主要类型^[11]：浓缩乳清蛋白（蛋白质含量70%~80%）、分离乳清蛋白（蛋白质含量≥90%）和水解乳清蛋白。浓缩乳清蛋白保留了部分乳糖、脂肪以及免疫球蛋白和乳铁蛋白等生物活性成分。分离乳清蛋白是通过额外过滤工艺进一步去除乳糖和脂肪，适合乳糖不耐受人群。水解乳清蛋白则是通过酶解预处理将蛋白质分解为小分子肽段，显著提高吸收速率，但其过度水解可能导致生物利用率降低并产生苦味。不同类型乳清蛋白在营养价值上各有特色，浓缩乳清蛋白在保持高蛋白含量的同时，保留了更多天然生物活性化合物；分离乳清蛋白通过精细过滤，达到更高的蛋白质纯度和更好的消化性；水解乳清蛋白通过预消化处理实现最快的吸收速度，但成本最高且适口性相对较差。

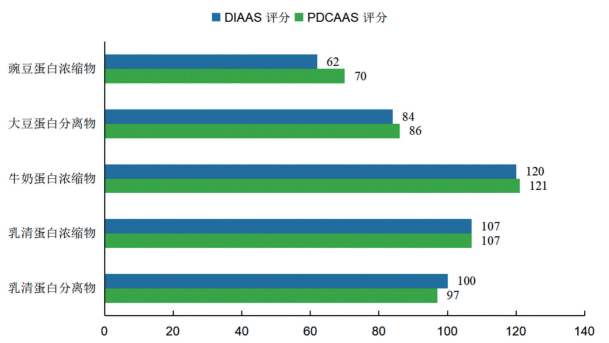


图 1 不同来源蛋白质的 PDCAAS 和 DIAAS 质量评分比较
Figure 1 Comparative Assessment of PDCAAS and DIAAS Quality Scores Across Proteins of Diverse Origins

乳清蛋白的氨基酸组成是其功能优势的核心，其BCAA含量高达25%，其中亮氨酸（10%~12%）显著高于植物蛋白（平均7.1%）和其他动物蛋白。亮氨酸不仅是肌肉蛋白合成的底物，更是mTOR信号通路的关键激活剂^[12]，研究表明，3~5 g亮氨酸可最大化肌肉蛋白合成效应，这解释了单次25~35 g乳清蛋白摄入的优越性^[2]。此外，乳清蛋白富含多种生物活性成分，β-乳球蛋白（50%~55%）可结合

脂溶性维生素和生物活性化合物^[13]； α -乳白蛋白（20%~25%）富含色氨酸，参与神经递质合成^[14]；免疫球蛋白（10%~15%）和乳铁蛋白（1%~2%）分别提供免疫保护和抗菌、抗氧化功能^[15]。这些成分的协同作用使乳清蛋白在运动营养中表现出多维生物效应。

从代谢动力学角度看，乳清蛋白具有“快速蛋白”的典型特征。水解乳清蛋白的吸收速率（10~12 g/h）、乳清蛋白分离物的吸收速率（8~10 g/h）均显著高于酪蛋白（3~6 g/h）^[16]。然而，水解度对生物利用度的影响并非线性关系，适度水解度能够显著提升氨基酸的吸收率和生物活性肽的释放，而过度水解可能导致必需氨基酸的过度氧化和生物利用度的下降。在剂量-反应关系方面，单次摄入较大剂量乳清蛋白比多次小剂量摄入更能有效激活mTOR信号通路并刺激肌肉蛋白合成，但氨基酸在血浆中的生物利用度在不同剂量间保持相对稳定^[17]。这一发现挑战了传统的“氨基酸上限理论”，表明肌肉蛋白合成的启动更依赖于氨基酸浓度峰值而非持续浓度。值得注意的是，乳清蛋白与牛奶共同摄入会因酪蛋白的缓释作用而延迟吸收^[18]。因此，运动后补充时建议将乳清蛋白与水混合摄入，以充分发挥其快速吸收的代谢优势并优化mTOR信号通路的激活效率。

2 乳清蛋白在运动营养中的应用

2.1 促进肌肉蛋白质合成的机制研究

乳清蛋白通过激活雷帕霉素靶蛋白（Mammalian Target of Rapamycin, mTOR）信号通路、促进肌肉蛋白质合成的作用机制已得到充分验证。研究表明，抗阻训练后摄入乳清蛋白可显著提高mTOR磷酸化水平，其中核糖体蛋白S6激酶1（p70S6K1）磷酸化增加达6.2倍，真核翻译起始因子4E结合蛋白1（4E-BP1）活性明显增强，且这种激活效应可持续至训练后24 h^[19]。乳清蛋白中高浓度的亮氨酸（10%~12%）作为关键的“合成代谢触发器”，通过直接激活mTORC1复合体启动下游蛋白合成机制^[20]。

关于补充时机的研究发现，传统“30 min合成代谢窗口期”的概念已被修正。最新证据表明，肌肉对氨基酸的敏感性可延长至训练后24~48 h，且总体蛋白质摄入量比精确补充时机更为关键^[21]。当前证据显示，若训练前已摄入蛋白质，训练后4~6 h内补充仍可获得良好效果；而空腹训练后则建议在1 h内补充高质量蛋白质以最大化合成代谢效应^[22]。基于现有研究，推荐每次摄入0.25~0.5 g/kg体重或绝对剂量20~40 g的高质量蛋白质，以获得最佳合成代谢效应^[23]。

2.2 在耐力运动中的应用价值

乳清蛋白凭借其优异的特性，在多个领域都有广泛应用。从市场分布来看，运动营养是乳清蛋白最大的应用市场，占比达到35%，这也从侧面反映了其在运动营养领域的重要地位（图2）。在耐力运动中，乳清蛋白主要通过减少肌肉分解、延缓中枢疲劳和促进恢复发挥作用。马拉松运动员补充乳清蛋白（33.5 g/d）、连续5周的随机对照实验显示，血清天冬氨酸转氨酶和丙氨酸转氨酶水平显著降低，肌酸激酶和乳酸脱氢酶峰值分别下降45%和38%，且这种保护效应在马拉松后一周仍然持续^[24]。这种肌肉保护效应可能与乳清蛋白富含谷胱甘肽前体物质（胱氨酸）有关，能够增强机体抗氧化能力并减轻运动诱导的氧化应激。乳清蛋白还可通过调节色氨酸/5-羟色胺通路、延缓中枢疲劳。根据中枢疲劳假说，长时间耐力运动时游离脂肪酸与色氨酸

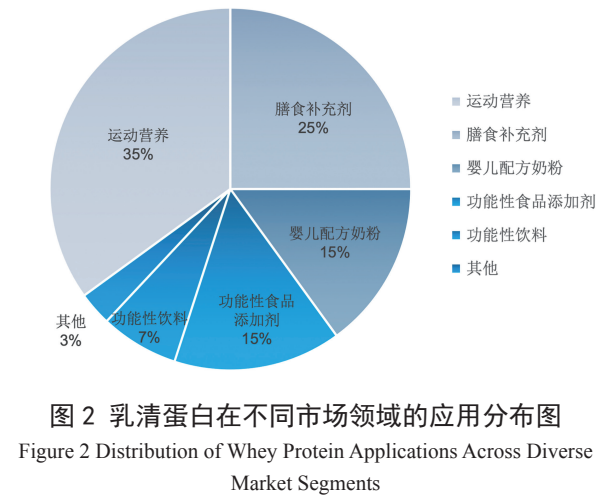


图2 乳清蛋白在不同市场领域的应用分布图
Figure 2 Distribution of Whey Protein Applications Across Diverse Market Segments

竞争白蛋白结合位点，导致游离色氨酸增加，更多色氨酸通过血脑屏障转化为5-羟色胺，引发中枢疲劳。乳清蛋白中的BCAA占25%与色氨酸竞争同一载体系统（LAT1转运体），可使脑内色氨酸浓度降低8%~12%，从而延缓疲劳的产生。

2.3 体重管理与免疫调节的双重功效

乳清蛋白在体重管理与免疫调节方面表现出显著的协同效应，其作用机制涉及多个靶点。首先，它能够增强饱腹感，从而减少总能量摄入。其次，通过促进食物热效应和基础代谢，乳清蛋白显著提高了能量消耗。最后，它对瘦体组织具有保护作用，有助于在减重过程中维持或增加骨骼肌质量。以上多靶点机制相互配合，共同促进了体重的有效管理。乳清蛋白可刺激胰高血糖素样肽-1、肽酪氨酸酰胺等肠道激素分泌，使饱腹感持续时间较碳水化合物延长2~3 h^[25]。研究表明，异亮氨酸、亮氨酸、赖氨酸、蛋氨酸、苯丙氨酸、脯氨酸、酪氨酸和缬氨酸等八种氨基酸与饱腹感正相关，与饥饿感负相关，可能通过与肠壁L细胞的营养感受器结合，发挥食欲抑制效应^[26]。在减脂过程中，高蛋白饮食（2.3~3.1 g/kg·d）可最大程度保留瘦体重，防止代谢率下降。在等热量条件下，乳清蛋白的食物热效应显著高于碳水化合物和脂肪，可额外增加餐后能量消耗20%~30%，有助于维持负能量平衡。临床研究表明，乳清蛋白补充不仅改善血脂谱，显著降低甘油三酯水平，还可优化高密度脂蛋白胆固醇浓度^[27]，从而增强其对整体代谢健康的益处。

乳清蛋白在免疫调节中具有多层次保护作用。首先，其所含免疫球蛋白约10%~15%可直接增强体液免疫，并通过调节辅助性T细胞促进免疫球蛋白生成^[28]。其次，作为谷胱甘肽前体的胱氨酸可提升机体抗氧化防御。此外，每份乳清蛋白可提供高达800 mg乳铁蛋白和2 g免疫球蛋白。乳铁蛋白凭借铁离子螯合和直接结合病原体的能力，展现出显著的抗菌与抗病毒活性，对大肠杆菌和冠状病毒等多种病原体均具有抑制作用^[29]。在高强度训练后免疫抑制期，乳清蛋白补充可将上呼吸道感染发生率降低

50%~60%，并缩短症状持续时间，对密集训练期运动员尤为重要。

3 当前研究趋势与创新方向

近年来，乳清蛋白在运动营养领域呈现多维度发展趋势，其应用已从单一组分向复配化和功能化方向转变。摄入乳清蛋白（25 g）与胶原蛋白（5 g）的复配制剂可同时促进肌原纤维蛋白合成率（静息状态提高23%，运动后提高33%）和肌肉结缔组织蛋白合成率（静息状态提高22%），而单纯乳清蛋白仅能显著刺激肌原纤维蛋白合成；Aussieker等^[30]研究还发现，5:1的黄金质量配比通过提供充足的必需氨基酸（特别是亮氨酸）和甘氨酸，分别优化肌肉与结缔组织的蛋白质合成途径。新型递送技术的突破进一步提升了乳清蛋白的应用效果，如纳米载体技术通过脂质体或聚合物包裹实现精准递送。2024年开发的纳米颗粒系统在胃酸环境中保持稳定，并在小肠特定pH值条件下快速释放，显著提升生物利用度^[31]。微胶囊化技术通过包埋处理解决了乳清蛋白的稳定性和适口性问题，在延长保质期的同时实现精确的营养素释放。随着乳清蛋白应用领域的不断拓展，其市场规模呈现良好增长态势。

基因多态性对乳清蛋白效果的影响日益受到关注。ACTN3基因（rs1815739）编码α-肌动蛋白-3，专一表达快肌纤维，RR基因型个体具有更高的快肌纤维比例和爆发力潜能。在巴西等高加索人种为主的混合人群中，RR基因型个体对阻力训练的适应性更强，建议将蛋白质摄入量适度增加至1.8~2.2 g/kg·d以最大化肌肉增长效应。而XX基因型个体在高加索人群中约占18%、在亚洲人群中约占25%，虽在耐力运动中表现更优，但运动后肌肉损伤标志物（肌酸激酶、肌红蛋白）显著升高，需要强化抗氧化营养支持^[32, 33]。乳糖酶基因变异影响乳糖耐受性，全球约65%成年人群存在乳糖酶持续性缺陷，其中北欧人群乳糖不耐受率仅为5%，而东亚人群高达70%~100%，此类人群应选择乳清分离蛋白或水解乳清蛋白以避免胃肠道不适。维生素D受体的多态性

影响钙代谢，特定基因型个体需增加钙摄入以优化骨健康。个性化营养检测技术已实现商业化，如基于多基因风险评分为运动员提供精准的蛋白质推荐方案^[34]。

环保提取工艺已成为行业发展重点。膜分离技术采用超滤、纳滤等物理分离方法，避免化学试剂使用，能耗降低30%~40%，乳清蛋白回收率可达95%以上。现代膜技术结合人工智能实现实时监测和预测性维护，显著延长膜寿命并优化分离效率。酶解工艺优化通过精准控制酶解条件和多酶协同作用，在提高蛋白质功能性的同时减少废料产生^[35]。替代蛋白质生产代表未来发展方向。通过精密发酵技术，利用基因工程酵母或细菌生产与牛乳乳清蛋白结构相似的重组蛋白质，可将乳清废料转化为单细胞蛋白，转化率达85%，为可持续蛋白质生产提供新思路^[36, 37]。这些创新技术不仅减少了对传统畜牧业的依赖，还显著降低了碳足迹和环境影响，为运动营养产业的可持续发展奠定基础。

4 结论与展望

乳清蛋白在运动营养中的核心价值已获科学验证，其通过激活mTOR信号通路促进肌肉蛋白质合成、调节色氨酸/5-羟色胺通路延缓中枢疲劳、增强免疫球蛋白和乳铁蛋白介导的免疫功能等多重机制日趋明确。随着基因多态性个性化营养、纳米载体靶向递送技术和膜分离可持续生产工艺的发展，乳清蛋白应用正向精准化、智能化方向演进。未来研究应强化跨学科整合，融合营养学、运动医学、食品科学和基因组学等领域知识，重点阐明乳清蛋白与胶原蛋白等成分的协同效应机制、代谢组学标志物的临床转化应用，以及长期高剂量补充的安全性评估。同时，亟需建立国际统一的质量评价体系和法规标准，规范市场秩序，为不同训练水平人群提供循证的个性化使用指导。在精准营养和绿色生产的双重驱动下，乳清蛋白将从传统的“通用型”补充模式转向基于基因型、代谢表型和训练特征的动态调节策略，为运动员和健身爱好者提供更加个性

化、可持续且经过科学验证的营养支持方案，推动运动营养学向系统化、精准化的新时代迈进。

乳清蛋白在运动营养领域的广泛应用，目前仍面临诸多挑战，同时蕴含着重要机遇。一方面，虽然健康个体每日摄入高达3.0 g/kg的蛋白质被认为安全，但长期大剂量补充对肾功能和肝功能的潜在影响仍需更多纵向研究验证；现有90 d慢性补充研究显示推荐剂量下未见明显毒性，但高剂量组出现轻度血糖升高和器官重量变化，提示需要个体化剂量调整^[38]。另一方面，人群间在蛋白质需求、代谢能力及训练强度上的差异尚未充分量化，目前推荐标准主要基于职业运动员，对普通健身人群的适用性有待进一步验证。此外，全球法规和标准尚不统一，美国食品药品监督管理局已将多种乳清蛋白制品列入“一般认为安全”清单，重组发酵乳清蛋白亦获安全认证，但欧盟和中国法规仍在完善中，消费者教育亟需加强以避免盲目选择和过量使用^[39]。未来研究应聚焦乳清蛋白与胶原蛋白、肌酸等补剂的协同效应与最佳配比，以及糖基化修饰和特定生物活性肽段优化等新型功能化产品开发。此外，代谢组学和蛋白质组学技术在揭示乳清蛋白摄入后代谢谱变化、识别新生物标志物和作用靶点方面正展现巨大潜力，可为动态、精准的营养干预提供坚实科学依据。

参考文献

[1] Jäger R, Kerksick C M, Campbell B I, et al. International society of sports nutrition position stand: Protein and exercise[J]. Journal of the International Society of Sports Nutrition, 2017, 14 (1) : 20.

[2] Phillips S M. A brief review of critical processes in exercise-induced muscular hypertrophy[J]. Sports Medicine, 2014, 44 (Suppl 1) : 71-77.

[3] Witard O C, Hearnis M, Morgan P T. Protein nutrition for endurance athletes: A metabolic focus on promoting recovery and training adaptation[J]. Sports Medicine, 2025, 55 (6) : 1361-1376.

[4] Wolfe R R, Church D D, Ferrando A A, et al. Consideration of the role of protein quality in determining dietary protein recommendations[J]. Frontiers in Nutrition, 2024, 11:

- 1389664.
- [5] Chen G Q, Qu Y, Gras S L, et al. Separation technologies for whey protein fractionation[J]. *Food Engineering Reviews*, 2023, 15 (3) : 438-465.
 - [6] D'Hulst G, Masschelein E, De Bock K. Dampened muscle mTORC1 response following ingestion of high-quality plant-based protein and insect protein compared to whey[J]. *Nutrients*, 2021, 13 (5) : 1396.
 - [7] Jaafir S, Mahdi S. Therapeutic benefits of whey protein[J]. *University of Thi-Qar Journal of Agricultural Research*, 2024, 13 (2) : 20-27.
 - [8] Sutantawong S, Kim B J, Kuhfeld R F, et al. Release of bioactive peptides from whey proteins across digestion in adult humans and a static in vitro digestion model[J]. *Journal of Functional Foods*, 2024, 122: 106540.
 - [9] Jiang L, Zhang Z, Qiu C, et al. A review of whey protein-based bioactive delivery systems: Design, fabrication, and application[J]. *Foods (Basel, Switzerland)*, 2024, 13 (15) : 2453.
 - [10] Zamzam N S, Ogura T, Wakayama M, et al. Effect of hybrid animal-plant milk blends on metabolomic profiles, antioxidant capacities, and protein digestibility for potential infant nutrition applications[J]. *Food Chemistry*, 2025, 487: 144675.
 - [11] Abish Z A, Alibekov R S, Tarapoulouzi M, et al. Review in deep processing of whey[J]. *Cogent Food & Agriculture*, 2024, 10 (1) : 2415380.
 - [12] Kakigi R, Yoshihara T, Ozaki H, et al. Whey protein intake after resistance exercise activates mTOR signaling in a dose-dependent manner in human skeletal muscle[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2014, 114 (4) : 735-742.
 - [13] Rupa N M, More V S, Nair A, et al. Bovine milk proteins and human health: Unveiling interplay, surmounting challenges and future prospects[J]. *Pharmacognosy Research*, 2025, 17 (2) : 427-439.
 - [14] Mackay-Phillips K, Orssatto L B R, Polman R, et al. Effects of α -lactalbumin on strength, fatigue and psychological parameters: A randomised double-blind cross-over study[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2023, 123 (2) : 381-393.
 - [15] Eker F, Akdaşçi E, Duman H, et al. Antimicrobial properties of colostrum and milk[J]. *Antibiotics*, 2024, 13 (3) : 251.
 - [16] Farup J, Rahbek S K, Storm A C, et al. Effect of degree of hydrolysis of whey protein on in vivo plasma amino acid appearance in humans[J]. *SpringerPlus*, 2016, 5 (1) : 382.
 - [17] Trommelen J, Van Lieshout G A A, Nyakayiru J, et al. The anabolic response to protein ingestion during recovery from exercise has no upper limit in magnitude and duration in vivo in humans[J]. *Cell Reports Medicine*, 2023, 4 (12) : 101324.
 - [18] Shrestha A K. Scientific background of dairy protein digestibility: A review[J]. *Journal of Food Science and Technology Nepal*, 2012, 7: 1-8.
 - [19] Farnfield M M, Carey K A, Gran P, et al. Whey protein ingestion activates mTOR-dependent signalling after resistance exercise in young men: A double-blinded randomized controlled trial[J]. *Nutrients*, 2009, 1 (2) : 263-275.
 - [20] Wilson G J, Layman D K, Moulton C J, et al. Leucine or carbohydrate supplementation reduces AMPK and eEF2 phosphorylation and extends postprandial muscle protein synthesis in rats[J]. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 2011, 301 (6) : E1236-E1242.
 - [21] Morton R W, McGlory C, Phillips S M. Nutritional interventions to augment resistance training-induced skeletal muscle hypertrophy[J]. *Frontiers in Physiology*, 2015, 6: 245.
 - [22] Zhou H H, Liao Y, Zhou X, et al. Effects of timing and types of protein supplementation on improving muscle mass, strength, and physical performance in adults undergoing resistance training: A network meta-analysis[J]. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 2023, 34 (1) : 54-64.
 - [23] Gwin J A, Church D D, Wolfe R R, et al. Muscle protein synthesis and whole-body protein turnover responses to ingesting essential amino acids, intact protein, and protein-containing mixed meals with considerations for energy deficit[J]. *Nutrients*, 2020, 12 (8) : 2457.
 - [24] Huang W C, Chang Y C, Chen Y M, et al. Whey protein improves marathon-induced injury and exercise performance in elite track runners[J]. *International Journal of Medical Sciences*, 2017, 14 (7) : 648-654.
 - [25] Neeland I J, De Gregório L H, Zagury R, et al. A randomized, placebo-controlled, single-center, crossover study to evaluate the effects of pre-meal whey protein microgel on post-prandial glucometabolic and amino acid response in people with type 2 diabetes and overweight or obesity[J]. *Metabolites*, 2025, 15 (1) : 61.
 - [26] Rigamonti A E, Leoncini R, De Col A, et al. The appetite-suppressant and GLP-1-stimulating effects of whey proteins in obese subjects are associated with increased circulating levels of specific amino acids[J]. *Nutrients*, 2020, 12 (3) : 775.
 - [27] Gataa I S, Abdullah Z, Cabrera M V G, et al. Impact of whey protein on lipid profiles: A systematic review and meta-analysis[J]. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular*

- Diseases, 2025, 35 (6) : 103858.
- [28] Yuan H, Lingju G, Zhiqing C, et al.The effect of whey protein administration on the immune function of athletes in the intensive endurance training[J].Nutrafoods, 2007, 7 (4) : 13-20.
- [29] Kell D B, Heyden E L, Pretorius E.The biology of lactoferrin, an iron-binding protein that can help defend against viruses and bacteria[J].Frontiers in Immunology, 2020, 11: 1221.
- [30] Aussieker T, Kaiser J, Hermans W J H, et al.Ingestion of a whey plus collagen protein blend increases myofibrillar and muscle connective protein synthesis rates[J].Medicine and Science in Sports and Exercise, 2025, 57 (3) : 544-554.
- [31] Yuan Y, Hu Y, Huang J, et al.Optimizing anthocyanin oral delivery: Effects of food biomacromolecule types on nanocarrier performance for enhanced bioavailability[J].Food Chemistry, 2024, 454: 139682.
- [32] Del Coso J, Hiam D, Houweling P, et al.More than a 'speed gene': ACTN3 R577X genotype, trainability, muscle damage, and the risk for injuries[J].European Journal of Applied Physiology, 2019, 119 (1) : 49-60.
- [33] Belli T, Crisp A H, Verlengia R.Greater muscle damage in athletes with ACTN3 R577X (RS1815739) gene polymorphism after an ultra-endurance race: A pilot study[J].Biology of Sport, 2017, 34 (2) : 105-110.
- [34] Guest N S, Horne J, Vanderhout S M, et al.Sport nutrigenomics: Personalized nutrition for athletic performance[J].Frontiers in Nutrition, 2019, 6: 8.
- [35] Halavach T M.Efficient enzymatic hydrolysis of the whey protein fraction from bovine milk[J].Journal of Global Innovations in Agricultural Sciences, 2024, 12 (3) : 743-749.
- [36] Knychala M M, Boing L A, Ienczak J L, et al.Precision fermentation as an alternative to animal protein, a review[J].Fermentation, 2024, 10 (6) : 315.
- [37] Amini A, Remelli A, Mojarad V A, et al.From cheese whey to single-cell protein production: By-product valorization through acidogenic fermentation and purple phototrophic bacteria[J].Bioresource Technology, 2025, 435: 132894.
- [38] Vasconcelos Q D J S, Bachur T P R, Aragão G F.Whey protein supplementation and its potentially adverse effects on health: A systematic review[J].Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism, 2021, 46 (1) : 27-33.
- [39] Vishwanath Deutsch R, Dallas D C, Besada Lombana P, et al.A review of the safety evidence on recombinant human lactoferrin for use as a food ingredient[J].Food and Chemical Toxicology, 2024, 189: 114727.