

畜禽血液高附加值产品的研究与应用进展

侯嘉淼^{1,2}, 陈雪莹^{2,3}, 兰毅博², 王晓雯^{2,3}, 程梅², 邹烨^{2,3}, 徐为民^{1,2,3}, 倪艳秀^{2,3*}, 辜雪冬^{1,2*}

(1. 西藏农牧大学食品科学与工程学院, 西藏林芝 860000)

(2. 江苏省农业科学院农产品加工研究所, 江苏南京 210014) (3. 江苏大学食品与生物工程学院, 江苏镇江 212000)

摘要: 畜禽血液含有丰富的血红蛋白, 血红蛋白肽, 超氧化物歧化酶 (Superoxide Dismutase, SOD), 免疫球蛋白等活性物质, 利用先进的分离技术和生物工程手段, 可将禽畜血液的活性物质转化为多种高附加值的产品。该文综述了畜禽血液作为潜在的生物资源在高附加值产品中的应用与研究进展; 详细探讨了血红蛋白, 血红蛋白肽, SOD, 免疫球蛋白等活性物质的分离提纯和改性技术; 归纳总结了其在食品添加剂、功能性食品、动物饲料和医药等领域的应用研究现状, 同时, 分析了当前面临的挑战和未来的研究方向, 为了畜禽血液资源的高效利用和产业化发展提供科学依据, 推动其在食品和医药等行业的广泛应用。

关键词: 畜禽血液; 血红蛋白; SOD; 免疫球蛋白

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.2.1547

Research and Application Progress of High-Value Products from Livestock and Poultry Blood

HOU Jiamiao^{1,2}, CHEN Xueying^{2,3}, LAN Yibo², WANG Xiaowen^{2,3}, CHENG Mei², ZOU Ye^{2,3}, XU Weimin^{1,2,3}, NI Yanxiu^{2,3*}, GU Xuedong^{1,2*}

(1. College of Food Science and Engineering, Tibet Agricultural and Animal Husbandry University, Linzhi 860000, China)

(2. Institute of Agricultural Product Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

(3. College of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212000, China)

Abstract: Livestock and poultry blood is rich in active substances such as hemoglobin, hemoglobin peptides, superoxide dismutase (SOD), immunoglobulin and so on. Using advanced separation technology and biological engineering methods, active substances in livestock blood can be converted into a variety of high value-added products. This article reviewed the application and research progress of livestock and poultry blood as a potential biological resource in high value-added products. The separation, purification and modification of active substances such as hemoglobin, hemoglobin peptide, SOD and immunoglobulin were discussed in detail. This paper summarized the research status of its application in the fields of food additives, functional food, animal feed and medicine, and analyzed the current challenges and future research directions. This paper provided a scientific basis for the efficient utilization and industrialization of livestock and poultry blood resources, and promoted its wide application in food and medicine industries.

Key words: livestock and poultry blood; hemoglobin; superoxide dismutase; immunoglobulin

预计到 2050 年, 全球对动物源性蛋白质的需求将再次翻倍, 这将对环境和粮食安全带来严峻挑战。随着人口的增长和生活水平的提高, 人们对高质量动物蛋白的需求不断上升, 也促使我们寻找的蛋白质资源^[1]。畜禽血液作为一种富含营养的生物资源, 含有大约 13%~15% 的蛋白质, 是一种经济实惠、又容易获得的蛋白质资源^[2]。近年来, 研究者们越来越重视畜禽血液的开发与利用, 将其视为可持续食品生产的重要组成部分。

截至到 2022 年, 鸡肉、猪肉、牛肉和羊肉作为主要的肉类品种, 其总产量占全球肉类总产量的 92%, 达到

收稿日期: 2024-10-17; 修回日期: 2024-12-19; 接受日期: 2024-12-23

基金项目: 国家现代农业产业技术体系资助项目 (CARS-41); 西藏自治区重点研发项目 (XZ202401ZY0045); 国家重点研发计划项目 (2022YFD2100500); 江苏省农业科技自主创新资金项目 (CX(24)1020)

作者简介: 侯嘉淼 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 动物源副产物综合利用, E-mail: 1281378269@qq.com

通讯作者: 倪艳秀 (1970-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 畜禽加工及其副产物综合利用, E-mail: er1998@126.com; 共同通讯作者: 辜雪冬 (1978-), 男,

博士, 教授, 研究方向: 畜产食品科学, E-mail: xuedonggu@xza.edu.cn

了 3.33×10^8 吨 (t)。这一庞大的肉类生产不仅满足了市场需求,也产生了相应的畜禽血液,总量超过了 3×10^7 t^[3,4]。然而,在中国,只有大约 30% 的畜禽血液被加工成食品,如:制作成血豆腐和血肠。这种低利用率意味着仍有大量的血液资源未被有效利用,潜在的经济价值和营养价值尚未完全开发。这些以血液为原料的产品也开始进入美国市场,通常以更精细加工的形式出现,应用于沙拉酱、奶酪、蛋糕、酸奶和各类汤品等多个领域。此外,宠物食品行业也是加工畜禽血液制品的一个重要领域,将这些副产品转化为宠物的营养补充品^[5,6]。这不仅为畜禽血液的利用开辟了新市场,也推动了相关产业的发展。随着消费者对食品安全和营养价值的日益重视,畜禽血液制品的市场需求有望进一步增长^[7]。该文对畜禽血液中高附加值产品主要成分的功能和技术应用的研究进行综述,为畜禽血液的高值化利用与开发提供基础。

1 畜禽血液主要的功能组分

1.1 血红蛋白

血液是动物循环系统的重要组成部分,其中血浆和血细胞是其主要构成。血细胞包括红细胞、白细胞和血小板,各有不同功能。在这些血细胞中,红细胞因其内含的丰富血红蛋白而显得尤为重要。血红蛋白不仅在生物体内负责氧气的运输,而且在食品工业中也展现出了广泛的应用潜力。血红蛋白在畜禽血液中的含量高达 60%~70%^[8],是一种重要的蛋白质资源。在食品工业中,血红蛋白可作为天然着色剂,赋予食品如肉制品诱人的色泽,增强其外观吸引力^[9]。此外,血红蛋白还能作为风味增强剂,提升食品的口感和风味,增加消费者的食欲(详情见表 1)。在肉制品加工中,血红蛋白的应用尤为显著。它可替代传统的亚硝酸盐作为着色剂,用于腌肉制品和灌肠等,不仅提高了产品的安全性,还赋予了产品独特的风味和色泽^[10]。血红蛋白的这些特性使其在食品工业中具有高附加值,不仅可提升食品的营养价值,还能增加产品的市场竞争力。随着消费者对健康和天然食品需求的日益增长,血红蛋白作为一种天然、多功能的食品成分,其研究和应用前景十分广阔。通过深入研究血红蛋白的特性和功能,开发出更多创新性的食品产品,将有助于推动食品工业的可持续发展,并满足消费者对高品质食品的追求。

表 1 血红蛋白在食品添加剂中的应用

Table 1 Application of hemoglobin in food additives

应用	作用	食品	结果	参考文献
天然着色剂	稳定性	猪排	即使经过反复的冻融循环,猪血液中的血红蛋白能有效地增强猪排的色泽、外观和气味的稳定性	[11]
		巧克力棒	加深了巧克力的色泽和断裂强度	[12]
	抗氧化性	鸡肉	鸡肉香肠 a^* 值升高, L^* 值降低	[13]
		香肠	增色和抑菌作用	[14]
风味增强剂	甜味增强	香肠	增强了香肠的整体风味	[15]
	鲜度增强	肉汤	使肉汤的口感更丰富	[16]
	咸味增强	巧克力棒	98%的 6-10 岁儿童在感官上可以接受强化巧克力	[12]
	苦味减少	哈尔滨红肠	香肠具有更高的感官评分	[10]
食品添加剂	发泡	香肠	香肠更有嚼劲,并减缓脂质过氧化	[10]
	显色 乳化管理增强	糕点	糕点在烘焙过程中膨胀,产生轻盈的质地	[17]

1.2 血红蛋白肽

血红蛋白肽是从血红蛋白中通过酶解或水解产生的多肽分子,它们不仅含有丰富的矿物质,如铁、钾、钠和钙等,对维持人体电解质平衡和神经肌肉功能至关重要^[18],且这些多肽分子因其独特的生物活性而备受关注。王鹏等^[19]发现,血红蛋白肽在促进人体生长发育方面扮演着重要角色,不仅能促进胃肠道蠕动,改善消化功能,加速蛋白质的合成和利用,对肌肉的生长和修复也起到关键的作用。同时血红蛋白肽还能提高机体对营养物质的吸

收效率,对于维持整体健康和促进疾病的恢复具有积极作用。在免疫调节方面,血红蛋白肽通过增强免疫细胞的增殖和分化能力,以及调节免疫细胞的活性,有助于提升机体的免疫力,这对于抵抗病原体入侵、预防感染以及在疾病状态下加速康复过程具有显著意义^[20]。综合来看,血红蛋白肽作为一种多功能的生物活性分子,其在食品工业、医药保健以及营养补充剂领域的应用前景十分广阔。

1.3 超氧化物歧化酶

自1938年Mann等^[21]从牛红细胞中发现一种蓝色铜蛋白以来,SOD被广泛研究。SOD作为关键的抗氧化酶,能够有效清除体内的活性氧。活性氧是生物体内由氧代谢转化而来的含氧化合物,它们具有高度的反应活性。虽然活性氧在维持生命活动中扮演着重要角色,但过量的活性氧会导致细胞损伤,引发多种疾病保护细胞免受氧化应激的损害^[22,23]。SOD的抗氧化作用不仅有助于抗衰老,还能减缓细胞代谢,预防细胞色素的积累,因此在美容护肤领域具有祛斑和抗皱的功效^[24]。此外,SOD还具有抗紫外线辐射的能力,可作为防晒成分保护皮肤免受损伤,现今已被证明具有抗炎作用^[25,26]。鉴于SOD的这些特性,它已被广泛应用于食品、保健品和化妆品行业。

1.4 免疫球蛋白

免疫球蛋白,是指一种在具有抗体功能的化学组成上和抗体相同的球蛋白。畜禽血液中的免疫球蛋白根据理化性质和生物学功能可以分为多种,主要有IgG、IgM、IgE、IgA、IgY等^[27]。免疫球蛋白在维护动物消化道卫生方面具有重要意义,作为一项新兴的免疫调控手段,具备专一性好、开发成本低、疗效显著的特性,可调控瘤胃微生物功能代谢方面的应用,例如抑制甲烷排放、减缓尿素分解、减少原虫数量和减缓淀粉分解^[28]。当前,免疫球蛋白被广泛应用于保健品领域,以口服液的形式帮助增强人体免疫力,预防免疫缺陷疾病;被用作食品添加剂,以预防龋齿,维护口腔健康;还被添加到动物饲料中能够促进动物生长,降低死亡率,提高养殖效率^[29]。这些应用表明了免疫球蛋白在提升生物体抵抗力和健康水平方面的潜力。

2 畜禽血液中主要功能组分提取与纯化技术研究

为了最大限度地挖掘畜禽血液的潜力,采用先进的分离与纯化技术来提取其中的血红蛋白、血红蛋白肽、SOD和免疫球蛋白等关键功能活性成分,将是推动畜禽血液高附加值产品走向产业化的重要策略。通过这些技术,不仅能提高畜禽血资源的利用效率,还能为市场提供具有高营养价值和生物活性的健康产品,满足消费者对健康食品的日益增长需求。

2.1 血红蛋白的提取与纯化

目前,国内外用于提取血红蛋白的血液主要来源牛血、鸡血、猪血等^[30,31]。血红蛋白提取分粗提、分离、纯化三步。首先对血液的样品进行处理,除去血浆液得到血细胞、红细胞的洗涤、破碎红细胞和离心等操作得到血红蛋白粗提液^[32](见图1)。

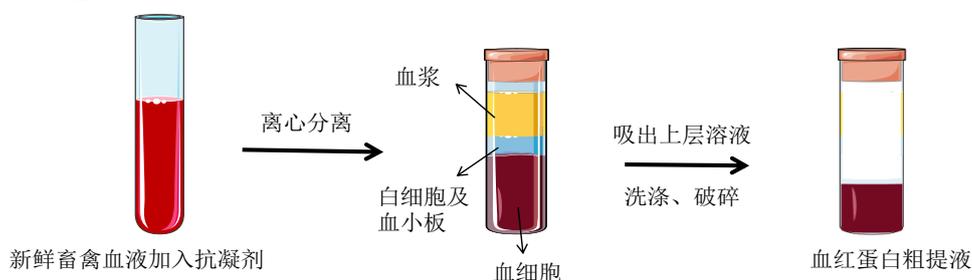


图1 血红蛋白的粗提

Fig.1 Crude extraction of hemoglobin

提取高纯度血红蛋白需除杂蛋白,是动物血液研究的关键且困难步骤。Rabiner等^[33]就利用微孔过滤方法对血红蛋白进行提取分离,不足之处是无法有效的除去杂蛋白。Dociz等^[34]利用1.6%的NaCl溶液洗涤红细胞,然后利用生理盐水洗去杂蛋白,去除了血液中的病毒污染物、血浆成分和血型抗原。近年来,科研工作者们不断尝试优化血红蛋白的提取方法。如:胡美琴等^[35]成功从新鲜猪血中提取猪血红蛋白,采用聚乙二醇6000作为非有机

溶媒, 结合离心、过滤和离子交换柱纯化, 最终提取出的猪血红蛋白浓度为 7.8 mg/mL。吴瑶^[36]通过实验优化了鸡血红蛋白的提取工艺, 确定了最优条件: 料液比 1:4、洗涤 3 次、裂解时间 56 min、0.1 倍的 NaCl 体积, 在此条件下, 所得鸡血红蛋白的纯化相对纯度高达 93.77%。这些研究表明, 通过优化提取条件可有效地提高血红蛋白的提取效率和纯度, 为畜禽血液资源的高值化利用提供了科学依据。因此, 持续探索和改进提取技术对于推动相关领域的发展至关重要。

2.2 血红蛋白肽的提取与纯化

2.2.1 化学水解法

化学水解法作为一种传统的血红蛋白肽制备技术, 主要通过酸性或碱性条件催化蛋白质中的肽键水解, 从而达到断裂肽链、释放肽段的目的^[37]。这种方法因其成本低廉、操作简单, 在工业规模的蛋白质水解过程中曾经占据主导地位。然而, 随着对产品质量和生产效率要求的提高, 化学水解法的局限性逐渐显现。首先, 化学水解过程中的反应条件难以精确控制, 这不仅可能导致氨基酸发生变性, 还可能引起肽链的过度水解, 从而影响最终产品的分子量分布和氨基酸组成^[38]。这种不稳定性会对肽段的功能活性造成负面影响, 限制其在食品、保健品和医药等领域的应用。为了提高控制精度, 可能需要引入更先进的监测和控制系统, 这无疑会增加技术难度和生产成本^[39], 从而削弱了成本低廉的优势。其次, 化学水解后需要进行酸碱中和, 这一步骤会产生大量的无机盐^[40]。这些无机盐的存在不仅会影响产品的纯度, 还会在后续的脱盐过程中增加额外的操作步骤和成本。脱盐过程的复杂性可能会降低生产效率, 影响产品的市场竞争力。因此, 尽管化学水解法在经济性和操作便捷性上具有一定优势, 但其在反应控制和后续处理方面的局限性, 限制了其在现代工业生产中的应用范围。为了满足市场和法规的严格要求和随着生物技术的进步和新型水解技术的不断发展, 化学水解法将逐渐被更环保、更高效的技术所取代^[37]。

2.2.2 酶水解法

酶解法作为一种将血红蛋白转化为小肽的有效方法, 因其温和的反应条件和较低的化学残留而受到青睐。这种方法不仅安全性高, 而且能够保持肽类的生物活性, 减少对环境的污染。然而, 酶制剂的制备过程复杂, 成本较高, 且在水解过程中可能会遇到水解不完全的问题, 导致产物组成复杂, 进而影响后续的分离和纯化步骤。为了克服这些挑战, 研究人员通过优化酶的种类组合和工艺参数, 如酶解时间、温度和 pH 值, 以提高水解效率和产品质量^[41]。章斌等^[42]通过响应面分析法优化了猪血红蛋白的酶解工艺, 成功地将酶解产物的 DPPH 自由基清除率提高至 96.94%, 这表明通过精细调控酶解条件, 可以有效地制备出具有高抗氧化活性的猪血红蛋白肽。毛筱艺^[43]选择木瓜蛋白酶对鸡血进行酶解, 最佳条件为温度 40 °C、酶用量 8 666.94 U/g、酶解时间 4 h, DPPH 自由基清除率达到 67.36%, 随后, 采用超滤和凝胶过滤层析技术进行分离纯化, 获得具有良好抗氧化活性的肽。不同的蛋白酶对猪血红蛋白的酶解效果有显著差异, 这意味着选择合适的酶种类对于提高血红蛋白的提取效率和产品质量至关重要。通过精细调控酶解工艺, 可以有效地提升血红蛋白的提取效率和产品质量, 为血红蛋白的高值化应用奠定基础。这些研究不仅为血红蛋白的利用提供了新的思路 (见表 2), 也为其他蛋白质资源的开发和利用提供了宝贵的经验。随着酶制剂制备技术的进步和成本的降低, 预计酶解法将在蛋白质水解领域发挥更大的作用。

表 2 血红蛋白肽相关高附加值产品及其来源、酶解方式

Table 2 High value-added products related to hemoglobin peptides and their sources and enzymatic hydrolysis method

产品	主要血液来源	酶解方式	参考文献
抗氧化剂	鸡、猪	木瓜蛋白酶+固态相合成	[44]
血管紧张素 I 转换酶	鸡、猪、牛	胃蛋白酶或胰蛋白酶或木	[45]
血管紧张素转化酶 (Angiotensin Converting Enzyme, ACE) 抑制剂		瓜蛋白酶	
阿片肽	牛	胃蛋白酶	[46]
抑菌剂	牛	胃蛋白酶	[47]

2.2.3 微生物发酵法

微生物发酵法利用微生物生长代谢产生的酶水解蛋白质, 制取蛋白多肽, 其优点是工艺简单、生产成本低、更易于产业化, 因而应用前景广阔^[48]。在发酵利用动物血方面, 赵晓丹等^[49]研究利用酵母菌、黑曲菌和米曲菌等比例混合发酵新鲜牛血, 能有效地将大分子蛋白质降解为小分子蛋白, 发酵后粗蛋白增至 53.81%, 比发酵前提高

了 36.50%，真蛋白增至 36.50%，比发酵前提高了 55.92%，小肽占真蛋白的比例增至 44.97%，比发酵前提高了 115.08%。这一研究表明，微生物发酵法不仅能够提升蛋白质的生物利用度，还有助于增强其功能性，为血液资源的高值化利用提供一种高效、环保的加工技术。因此，通过优化发酵工艺，可进一步提高蛋白多肽的生产效率和产品质量，为食品、饲料及生物医药等行业提供高质量的蛋白多肽原料。

2.3 SOD 的提取与纯化技术

在 SOD 的提取历程中，最初的策略是直接从动物血清、肝脏以及植物等自然资源中分离获取。这一过程中，最为关键的步骤在于精确地去除杂质蛋白，以确保最终产品的纯度和活性^[50]。为了达到这一目的，开发并采用了多种蛋白质沉淀技术。其中，盐析法通过向溶液中加入高浓度的盐类，使蛋白质因溶解度降低而析出；热变性沉淀法则利用高温使不稳定的蛋白质变性并沉淀下来；而层析法则依据蛋白质在固定相和流动相之间的分配差异进行分离^[51]。这些方法各有优势，共同构成了当前 SOD 提取技术的重要组成部分。

2.3.1 盐析法

盐析法是一种通过改变溶液中离子强度来分离和纯化蛋白质及其他生物大分子的技术。这一过程通常利用盐类在溶液中对溶质的溶解度影响，从而实现分离和浓缩的目的^[52]。在生物化学和分子生物学领域，盐析是一种普遍运用的蛋白质分离技术。此技术通过在蛋白质溶液中加入中性盐（例如硫酸铵等），这些盐类能够减少蛋白质的溶解度，进而促使蛋白质沉淀，实现分离^[53]。每种蛋白质都有其特定的盐析浓度，这使得通过调节盐的浓度，可实现不同蛋白质的逐步沉淀和分离。盐析法的优点在于其操作简便、成本低廉，且不需要复杂的仪器设备。此外，由于使用的是中性盐，该方法对蛋白质的生物活性和结构影响较小，因此不容易引起蛋白质变性^[54]。这使得盐析法特别适合于那些对活性敏感的蛋白质的分离和纯化。然而，盐析法也有其局限性，例如，对于溶解度差异不大的蛋白质，可能难以实现有效分离。此外，高盐浓度可能会对一些细胞或生物分子造成毒性，因此在应用时需考虑其对生物体系的影响^[55]。

2.3.2 热变性沉淀法

热变性沉淀法利用 55 °C 高温使不稳定蛋白质变性沉淀，操作简便安全，通过温差可除去杂蛋白，如 SOD 因热稳定性高而保留^[56]。张书文等^[57]通过采用变温二次热变性技术，有效避免了难以回收的有机溶剂的使用，不仅减少了生产成本，还提升了产品的回收率与质量。该方法的优势在于其简便性和经济性，尤其适用于大规模生产。在实际应用中，热变性沉淀法常与其他分离技术结合使用，以提高分离效率和纯度。可先通过热变性沉淀去除大部分杂蛋白，再利用层析法等技术进行进一步的纯化。这种组合方法不仅提高了目标蛋白的纯度，还能有效降低生产成本。

2.3.3 层析法

层析法是一种利用混合物中各组分物理和化学性质差异的分离技术。通过调控组分在固定相和流动相中的分布程度，层析法可以使不同组分以不同的速度移动，从而实现分离的目的^[58]。这种方法可以分为多种类型，包括吸附层析、分配层析、离子交换层析、凝胶层析和亲和层析等^[59]。通过将多个层析柱串联使用，可以显著提升比活力和纯化倍数。但这种方法的成本相对较高，并且步骤繁多^[60]。刘靖^[61]通过使用 SephadexG-75 柱层析法，成功地从猪血中纯化出了 SOD。在层析过程中，其中 SOD 的最大活力达到了 3 965 U/mL，比活力达到了 9 675.60 U/mg。这表明所采用的层析方法有效地分离和纯化了 SOD，使其达到了较高的纯度和活性。

2.4 免疫球蛋白的提取与纯化技术

2.4.1 辛酸沉淀法

辛酸沉淀法是一种选择性沉淀蛋白质的技术，它在偏酸的环境下进行，能够有效地从血清、乳清和腹水中沉淀除 IgG 以外的蛋白质^[62]。这使得上清液中主要含有 IgG，特别适合于 IgG1 和 IgG2 的纯化。然而，该方法并不适用于 IgM1 和 IgM2 的纯化。通过辛酸沉淀法，可以有效地分离出目标蛋白质，尤其是在 IgG 的纯化过程中表现出较高的选择性^[63]。李希强等^[64]通过结合辛酸沉淀法和少量阴离子交换剂，成功地从多种动物抗血清及正常猪血清和羊血清中纯化出 IgG。这种方法的电泳纯度与亲和层析法和硫酸铵法相当，且在提纯过程中能够保持抗体的活性，证明了辛酸沉淀法在 IgG 纯化中的有效性和实用性，尤其适用于需保持抗体活性的实验方法。

2.4.2 乙醇提取法

乙醇提取法是一种在国内外血液制品规模化生产领域广泛采用的生产工艺。其优点包括：易于操作，可以实现自动化生产，具有强大的可操控性；环境污染小；能够同时提取多种活性蛋白质成分；乙醇成本较低且易于获得^[65]。这种方法因其规模化生产能力强而受到青睐。其原理是乙醇的加入能降低蛋白质的介电常数，降低水分活度，蛋白质的溶解度降低^[66]。余健等^[67]采用低温乙醇法从猪血浆中提取的抗体 T 细胞猪免疫球蛋白成品的主要质量指标均符合《中国药典》的要求。考虑到乳清和血清在成分上的相似之处，研究者对传统的乙醇提取法进行了改良，使得这种方法不仅适用于血清的处理，同样也适用于初乳乳清的初步提取过程。这种改良后的乙醇提取法为初乳乳清的预处理提供了一种有效的技术手段。

2.4.3 盐析沉淀法

硫酸铵沉淀法是一种常用且经济的 IgG 提取技术，属于盐析沉淀法。其原理在于高浓度的中性盐（如硫酸铵）能够破坏蛋白质表面的水化膜，从而降低蛋白质在溶液中的稳定性，促使蛋白质组分沉淀且工艺较为简单、成本不高，但此法也可将其他非抗体球蛋白沉淀故只能达到粗提蛋白质的目的^[68]。肖雪莉^[69]以新鲜牦牛血为原料，使用 α/β -半乳糖苷酶辅助饱和硫酸铵法提取 IgG 的最佳工艺参数为：酶解时间 2 h、酶解 pH 值 4.4、酶解温度 39 °C、酶添加量 5 mL(467.5 U)。在这些条件下，IgG 含量最高，可达 27.13 mg/mL，比未使用酶处理的方法提高了 21.39%，这表明酶辅助技术能显著提高提取效率，为血液资源的高值化利用提供了新途径。这种方法的优化和应用，不仅提高了 IgG 的提取效率，还为血液资源的深度开发提供了有价值的参考。

3 畜禽血液中主要功能组分的改性技术研究

畜禽血中的蛋白质和肽能改善食品外观、风味和质地，具有多种生物活性，常用于加工食品和保健品中。然而，食品加工过程中的一些操作（如加热、剪切、高压等），会导致蛋白质和肽的稳定性降低，并对其功能特性和生物活性造成不同程度的影响，这在一定程度上限制了其在食品工业中的应用^[70]。因此，利用改性技术改变蛋白质和肽的结构及理化性质，进而改善其功能特性、保持生物活性，对于拓宽蛋白质和肽在食品工业中的应用具有重要意义^[71]。

3.1 糖基化改性技术

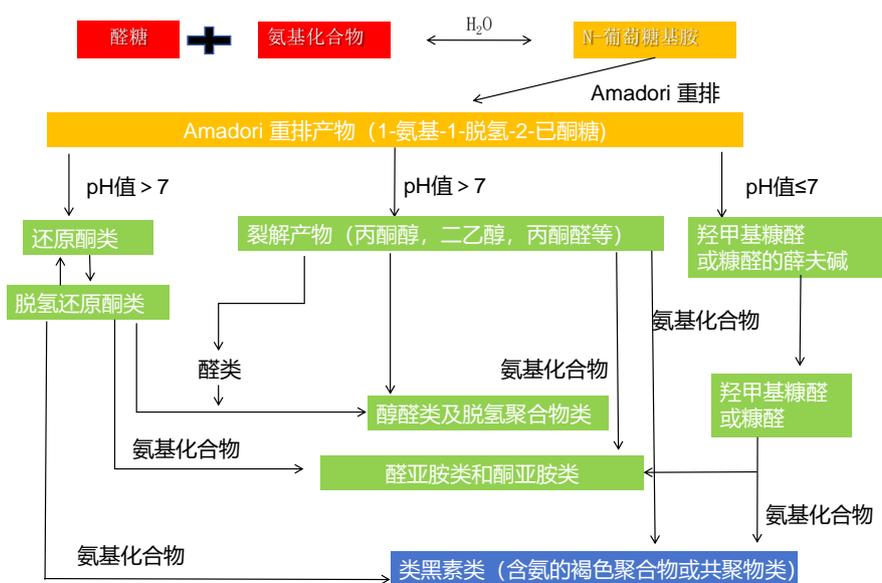


图 2 美拉德反应的主要途径

Fig.2 The main pathway of the Maillard reaction

注：文本框中不同颜色对应三个阶段的反应产物。黄色框架代表早期阶段的产品，绿色框架代表中期阶段的产品，蓝色框架代表最终阶段的产品。

美拉德反应 (Maillard Reaction, MR) 也称糖基化反应，指的是含氨基的化合物（如血红蛋白）与含羰基的

化合物（主要是各种还原糖）间发生的复杂化学反应（见图 2），是食品加工过程中一类常见的非酶褐变反应^[72]。MR 过程中，蛋白质与糖共价交联，生成改善食品色泽、风味及活性的产物，无需化学试剂，安全环保，能增强蛋白质和肽的功能及生理活性，如乳化、起泡、凝胶性、溶解性和抗菌、抗氧化作用。张晓燕等^[73]用于干热法对牛血清白蛋白进行糖基化改性，所得 MR 产物的乳化性较改性前显著提高。MR 主要分为干热法和湿热法^[74]。干热法通过冻干混合的蛋白质和糖类后再在特定温湿度下进行 MR，但存在不均匀接触、长时间反应导致不良风味和低效等问题。湿热法则在特定 pH 值溶液中加热混合蛋白质和糖类，具有反应快、易控和稳定的优点，但面临回收率低和高温变性挑战^[75]。为改善以上缺点，可在高浓度下利用大分子拥挤效应防止蛋白质变性，以提高效率和产物品质。MR 导致的褐变往往难以避免，但并不总是被期望的。非酶褐变不仅影响食品的感官质量和消费者的可接受性，也是缩短食品货架期的一个限制性因素^[76]。这是 MR 改性蛋白质在食品方面的一大难题。

3.2 超声波改性技术

超声波是指振动频率超出一般人耳所能接收的频率上限的弹性波，其频率范围通常在 16 kHz~10 MHz 之间^[77,78]。超声波诱导空化效应，由微小气泡在声波作用下产生，体积在生长和收缩之间发生多次周期性振荡，直至空化泡崩溃的动力学过程。空化效应可间接或直接产生的机械剪切力和热效应，能够破坏蛋白质分子内部的氢键、疏水相互作用等内键，以及蛋白质分子间的静电相互作用，导致蛋白质结构的松弛或展开。这种结构变化使得蛋白质分子更加灵活，增加了其与水分子的相互作用，从而提高了蛋白质的溶解性和功能性。赫玉兰等^[79]利用超声波的空化效用产生的机械振动和微射流能对细胞产生剪切力，进一步破坏细胞膜和细胞壁，使得血红蛋白从红细胞中释放出来提取率达到 92.33%。超声波处理能够改善蛋白质的功能特性，如增强起泡性和乳化性。这是因为超声波能够促进蛋白质分子在界面上的吸附，增加空气或油滴的包裹，从而提高泡沫和乳液的稳定性^[80]。此外，超声波还能提高蛋白质的凝胶性，这对于食品的质地和口感改良具有重要意义^[81]。在酶活性调节方面，超声波能够激活某些酶，如 α -淀粉酶，通过改变酶的构象，增加酶活性位点的可及性，从而提高其催化效率^[82]。唐雯倩等^[83]利用超声波辅助酶解技术能显著提升胰蛋白酶的酶活力，缩短猪血血红蛋白制备抗氧化肽的酶解时间至 2 h，达到常规方法 6 h 的酶解效果。狄蕊等^[84]发现通过超声波预处理增加了胰酶的活性位点，从而增强了与 SOD 的结合，提高了催化效率，最终使 SOD 的比活力达到了 1 410.62 U/mg。然而，超声波也可能对某些酶产生失活作用，这通常与超声波引起的氧化应激或热损伤有关。

3.3 酶法改性技术

酶法改性用酶制剂改变蛋白质结构，进而调整其理化性质和功能。酶法改性通过水解、交联或共价接枝改善蛋白质功能特性和营养价值^[85]。交联法能提升蛋白质的凝胶强度、热稳定性和持水性，改善食品质构^[86]。但存在过度交联风险，可能影响食品口感和营养，且精确控制交联条件要求高，成本增加；共价接枝引入新功能，技术复杂，安全性高，条件温和，但需精细控制以优化产品特性，成本和技术难度是挑战。相比之下，酶水解蛋白技术成熟且应用广，利用酶降解蛋白质成水解物。酶水解改善蛋白质的功能特性主要与 3 个方面直接相关，包括蛋白质分子质量的下降、可电离基团的增加、疏水基团的暴露^[87]。Adler-Nissen^[88]等总结了一系列酶水解蛋白质增加其溶解性的实例，讨论了蛋白质溶解性与酶水解蛋白质程度的关系。蔡艺菲等^[89]通过单因素和正交试验，优化了酶解猪血制备氨基酸液体肥的工艺条件。研究发现，pH 值、料液比、温度、酶添加量和水解时间是影响水解率的关键因素。通过实验确定的最佳酶解条件为：料液比 1:10.5 g/mL、pH 值 6、水解温度 50 °C、风味蛋白酶酶浓度 12 000 U/g、水解时间 7 h。在这些条件下，水解率达到了 40.42%。此研究有助于提高氨基酸液体肥的生产效率和质量，同时为猪血资源的高值化利用开辟了新途径。

4 畜禽类高附加值产品应用研究进展

4.1 食品添加剂

血红蛋白及其水解产物具有高价值的食品加工特性，如溶解度、起泡性和乳化性^[90]。因此，它们可用作食品添加剂。其水解产物血红蛋白肽提升肉制品保水性、弹性等，加热成膜还可提高成品率。研究显示，血红蛋白可替 50% 鸡蛋，饼干蓬松压缩性依旧。添加到面包中，面包具有较好的保色性和保形性，不易老化^[91]。SOD 通过清

除自由基减少氧化, 延长食品保质期, 维持色泽和风味, 可作为水果罐头、饮料、酒类等食品的抗氧化剂, 延长食品货架期, 还可作为新鲜水果, 蔬菜等的良好保鲜剂, 应用时需考虑成本、稳定性及法规标准, 以确保其有效性和安全性^[92]。

4.2 功能性食品

血红蛋白含二价铁, 更易于人体消化吸收, 适用于保健品及医药中补铁剂的开发。Izgarishev 等^[93]水解血红蛋白以获得氨基酸复合物, 作为抗贫血食品的成分, 并开发了一种预防缺铁的糖果。分析了血红蛋白水解物的微生物学和毒理学特性。结果表明, 血红蛋白水解物中毒理学检测和致病菌未检出或在正常范围内。

血红蛋白肽用于制造氨基酸口服溶液、注射剂和用于补充和强化各种氨基酸的配合物^[94]。血红蛋白肽还可用于生产粉末、饮料或能量棒等多种形式的运动营养品。这些产品可设计成方便携带和快速消费, 以满足人们在高强度训练后即时的营养需求。

SOD 以营养强化剂在功能性食品研发中得到了相当广泛的应用, 如以刺梨为原料生产的刺梨果汁和果酒因含有 SOD 起到美容养颜的效果^[95]。此外, 将 SOD 作为营养强化剂加入番茄中、采用低温生物技术发酵制成番木瓜 SOD 酒, 它们是低度纯天然的绿色健康型果露酒, 具有促进消化, 舒展血管, 增强抵抗力等作用^[96]。

免疫球蛋白能够显著增强机体的抵抗力, 广泛应用于婴儿、老年人食品以及各类保健品的开发。市场上已经推出了婴儿奶粉, 其中添加了免疫球蛋白。这种配方不仅可以促进婴儿的生长发育, 还能有效增强其免疫系统, 帮助婴儿更好地抵御各种疾病和感染^[97]。随着人们对健康的关注不断增加, 免疫球蛋白的应用前景广阔, 未来可能会有更多针对特定人群的保健产品上市, 进一步满足消费者的需求。

4.3 动物饲料

在饲料研究中表明血红蛋白及其水解产物血红蛋白及肽高营养, 富氨基酸, 促进动物生长。肽分子小, 易消化, 能提高饲料的吸收率。血红蛋白肽具有一定的抗性, 可提高动物的免疫力和抗病能力^[98]。SOD 作为一种关键的抗氧化酶类物质, 具备中和自由基的能力, 进而对肉类及脂质过氧化程度产生调控作用^[99]。研究表明, SODm 可显著降低鸡肉蒸煮损失、剪切力, 提高嫩度并且可显著提高肉鸡肌肉纤维密度, 降低肌纤维直径, 改善肉品质^[100-102]。综上, SOD 能调节氧化平衡, 控制肉脂氧化, 改善肉质。马辉等^[103]研究了饲料中添加抗菌活性肽和免疫球蛋白对肉鸡产量和抵抗力的影响。相较于对照组, 这两种添加剂的加入能够大幅度提升肉鸡的平均日体重增长率及饲料转化率, 并且有效增强了肉鸡的免疫能力。这表明在饲料中添加抗菌肽和免疫球蛋白可作为抗生素的有效替代品, 提高肉鸡的生产性能和免疫力。

4.4 医药领域

血红蛋白类氧载体 (Hemoglobin-based Oxygen Carriers, HBOCs) 是一类人工合成的携氧材料, 它的主要成分是血红蛋白。它们可到达正常红细胞难以通过的微循环小血管, 为缺氧组织输送氧气^[104]。郑诗凡等^[105]研究表明, HBOCs 在肿瘤治疗中可增加组织氧合, 通过改善肿瘤组织氧合, 增强放疗、化疗、光动力治疗和免疫治疗的效果, 具有显著的治疗潜力和临床应用前景。Mann 等^[21]研究表明, 血红蛋白肽具有降血压、降血糖的潜力, 这主要归功于它们能够影响 ACE 的活性, 从而参与调节血压。此外, 它们还展现出抗菌和抗氧化的能力, 有助于增强机体的免疫防御和清除自由基, 保护细胞免受氧化应激的伤害^[106]。SOD 作为一种药物, 主要用于治疗炎症性疾病, 尤其在抗肿瘤、心血管疾病、辐射损伤、自身免疫性疾病以及免疫调节等领域, 已广泛应用于科研和临床实践中^[107]。研究表明, 肿瘤的发生与活性氧分子密切相关, 其中锰超氧化物歧化酶 (Mn-SOD) 作为一种新型的抗肿瘤因子, 为肿瘤防治提供新思路。增强其基因的表达能够防止由辐照引起的癌变, 达到防癌效果。此外, 免疫球蛋白在治疗由肠道病原菌或病毒引起的腹泻方面也具有重要作用。例如, 德国牛初乳口服产品富含高效价免疫球蛋白, 可以有效对抗腹泻相关的病原体, 预防免疫缺陷性疾病、麻疹等疾病, 同时还可辅助治疗癌症、艾滋病等免疫功能低下的患者^[108]。

5 展望

畜禽血液中的活性成分, 如血红蛋白、血红蛋白肽、SOD 和免疫球蛋白等, 不仅含量丰富、成本低廉, 还具

有显著的生物活性,因此在食品工业、医疗保健和动物饲料等多个领域具有广泛的应用前景。然而,尽管这些活性成分具有很高的应用价值,目前对它们的研究和应用还相对有限。一个主要的挑战是如何保证这些活性成分在体内的稳定性,以及它们在加工、储存和应用过程中的活性维持。例如,血红蛋白在体内的降解可能会影响其功能性,而免疫球蛋白的稳定性则直接关系到其免疫调节效果的发挥。因此,深入研究这些活性成分的结构-功能关系,开发有效的保护和递送系统,是实现它们在食品、医药等领域中应用的关键。此外,随着消费者对健康和营养的日益关注,开发基于畜禽血液的高附加值产品,如功能性肽、生物活性蛋白和营养补充剂等,将有助于满足市场对健康食品的需求。通过采用先进的分离、纯化和加工技术,可提高这些活性成分的提取效率和生物利用率,从而为人类健康和动物营养提供更多创新解决方案。随着研究的深入和技术的进步,畜禽血液相关高附加值产品的开发有望成为生物医药和健康产业的新增长点。

参考文献

- [1] CHIRIQUE R G S, CORNELIO-SANTIAGO H P, ESPINOZA-ESPINOZA L, et al. A review of slaughterhouse blood and its compounds, processing and application in the formulation of novel non-meat products [J]. *Current Research in Nutrition and Food Science Journal*, 2023, 11(2): 534-548.
- [2] ÁLVAREZ-CASTILLO E, FELIX M, BENGOCHEA C, et al. Proteins from agri-food industrial biowastes or co-products and their applications as green materials [J]. *Foods*, 2021, 10(5): 981.
- [3] SHEN X, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Novel technologies in utilization of by products of animal food processing: A review [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(21): 3420-3430.
- [4] SHIRSATH A P, HENCHION M M. Bovine and ovine meat co-products valorisation opportunities: A systematic literature review [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 118: 57-70.
- [5] OFORI J A, HSIEH Y H P. Issues related to the use of blood in food and animal feed [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2014, 54(5): 687-697.
- [6] BAK K H, PETERSEN M A, LAMETSCH R, et al. Development of volatile compounds during hydrolysis of porcine hemoglobin with papain [J]. *Molecules*, 2018, 23(2): 357.
- [7] ZOU Y, LU F, YANG B, et al. Effect of ultrasound assisted konjac glucomannan treatment on properties of chicken plasma protein gelation [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 80: 105821.
- [8] LI Q, LIU J, CAO L, et al. Effects of γ -glutamylated hydrolysates from porcine hemoglobin and meat on kokumi enhancement and oxidative stability of emulsion-type sausages [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2022, 15(8): 1851-1865.
- [9] ZHENG H, ZHAO S, LU Y, et al. Toward the high-efficient utilization of poultry blood: Insights into functionality, bioactivity and functional components [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2024, 64(27): 10069-10088.
- [10] LIU P, WANG S, ZHANG H, et al. Influence of glycosylated nitrosohaemoglobin prepared from porcine blood cell on physicochemical properties, microbial growth and flavour formation of Harbin dry sausages [J]. *Meat Science*, 2019, 148: 96-104.
- [11] ZHOU K, ZHANG J, XIE Y, et al. Hemin from porcine blood effectively stabilized color appearance and odor of prepared pork chops upon repeated freeze-thaw cycles [J]. *Meat Science*, 2021, 175: 108432.
- [12] PÉREZ L A C, MÉNDEZ A S, RIVERA M E. Efecto de la adición de hemoglobina bovina desecada, en el color, la fuerza de fractura y la satisfacción general de un chocolate en barra, fortificado con hierro hemo [J]. *Bistua Reviste La Facultad De Ciencias Basicas*, 2013, 10(1): 90-100.
- [13] XU P, ZHU X, TAN S, et al. The role of monoxide hemoglobin in color improvement of chicken sausage [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2016, 25: 409-414.
- [14] MOHAMMED H H H, MA M, ELGASIM E A, et al. Nitroso-hemoglobin-ginger conjugates effects on bacterial growth and color stability in a minced beef model [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2020, 331: 108731.
- [15] FEIFEI S, KRYZHNSKA TA, YAN L, et al. Effects of different natural food coloring additions on the quality of chicken sausage [J]. *Journal of Chemistry and Technologies*, 2022, 30(2): 265-274.
- [16] LI Q, FU Y, ZHANG L, et al. Plastein from hydrolysates of porcine hemoglobin and meat using alcalase and papain [J]. *Food Chemistry*, 2020, 320: 126654.

- [17] LYNCH S A, MULLEN A M, O'NEILL E, et al. Opportunities and perspectives for utilisation of co-products in the meat industry [J]. *Meat Science*, 2018, 144: 62-73.
- [18] 赵立冬,高杨,于振新,等.鹅血血红蛋白肽成分的分析[J].*肉类工业*,2010,7:26-28.
- [19] 王鹏.猪血红蛋白活性肽的膜分离方法的研究[D].大连:大连海洋大学,2015.
- [20] 闫昌誉,叶卉儿,郑钧,等.卵清蛋白肽的制备及生物活性研究进展[J].*今日药学*,2024,34(3):220-235.
- [21] MANN T, KEILIN D. Haemocuprein and hepatocuprein, copper-protein compounds of blood and liver in mammals [J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B-Biological Sciences*, 1938, 126(844): 303-315.
- [22] ISLAM M N, RAUF A, FAHAD F I, et al. Superoxide dismutase: an updated review on its health benefits and industrial applications [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, 62(26): 7282-7300.
- [23] SHAO X, ZHANG M, CHEN Y, et al. Exosome-mediated delivery of superoxide dismutase for anti-aging studies in *caenorhabditis elegans* [J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2023, 641: 123090.
- [24] DONG L, CHEN Y, GU L, et al. Oral delivery of a highly stable superoxide dismutase as a skin aging inhibitor [J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2023, 164: 114878.
- [25] YANG Y, WANG W, LIU K, et al. Immobilization of superoxide dismutase in mesoporous silica and its applications in strengthening the lifespan and healthspan of *caenorhabditis elegans* [J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2022, 10: 795620.
- [26] SCHLICHTE S L, ROMANOVA S, KATSURADA K, et al. Nanof ormulation of the superoxide dismutase mimic, mntnbuoe-2-pyp5+, prevents its acute hypotensive response [J]. *Redox Biology*, 2020, 36: 101610.
- [27] TANABE K, KAJIHARA R, 23. The role of protein phosphorylation in the regulation of class switch recombination [J]. *Biocell*,2020, 44(4): 545-558.
- [28] 卜莹,郑楠,王加启,等.免疫球蛋白调控动物胃肠道健康及微生物功能的研究进展[J].*中国畜牧兽医*,2022,49(10):3800-3808.
- [29] 杨晓宇,陈锦屏,张富新.初乳中免疫球蛋白的研究进展[J].*食品科学*,2006,27(10):582-588.
- [30] THIANSILAKUL Y, BENJAKUL S, PARK S Y, et al. Characteristics of myoglobin and haemoglobin-mediated lipid oxidation in washed mince from bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) [J]. *Food Chemistry*, 2012, 132(2): 892-900.
- [31] WU H, YIN J, ZHANG J. et al. Factors affecting lipid oxidation due to pig and turkey hemolysate [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(36): 8011-8017.
- [32] 苏博雅.戊二醛聚合猪血红蛋白对血管内皮细胞的影响研究[D].西安:西北大学,2016.
- [33] RABINER S F, HELBERT J R, LOPAS H, et al. Evaluation of a stroma-free hemoglobin solution for use as a plasma expander [J]. *The Journal of Experimental Medicine*, 1967, 126(6): 1127-1142.
- [34] DOCZI J. Injectable stroma free hemoglobin solution and its method of manufacture: U.S. Patent 3,991,181[P]. 1976-11-9.
- [35] 胡美琴,余蓉.用 PEG6000 从新鲜猪血中分离提取猪血红蛋白[J].*华西药学杂志*,2008,3:329-330.
- [36] 吴瑶.鸡血中血红蛋白的提取纯化及性质的研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2020.
- [37] 陈丽.废羽毛生物水解技术的研究[D].上海:东华大学,2006.
- [38] 刘骞,张靖铭,孔保华,等.预制肉类食品贮藏及复热过程中品质变化的研究进展[J].*食品科学技术学报*,2024,42(3):11-22.
- [39] WANG H, ZHANG Z, WU B, et al. Extraction technology determines the properties of bamboo shoots dietary fiber concentrate and its application in chicken mince gels: Systematic analysis [J]. *Food Hydrocolloids*, 2025, 160(P1): 110776.
- [40] 王睿,王倩,林樟楠,等.谷氨酸提取技术及其废液资源化清洁生产研究进展[J].*中国调味品*,2021,46(12):196-200.
- [41] 张艳,江波涛,李莉,等.驴血血红蛋白肽的制备工艺研究[J].*黑龙江畜牧兽医*,2023,17:134-138+142.
- [42] 章斌,侯小桢,杨胜远,等.猪血红蛋白酶解条件优化及酶解物抗氧化研究[J].*食品研究与开发*,2017,38(15):99-103.
- [43] 毛筱艺.鸡血源抗氧化肽的分离纯化及其体外消化产物的研究[D].银川:宁夏大学,2022.
- [44] CUI W, XIE Y, ZHANG Y, et al. Antioxidant potential of peptides from poultry hemoglobin via probiotic-assisted hydrolysis: deciphering mechanisms at the cellular level and through molecular dynamics simulations [J]. *Food Research International*, 2025, 204: 115953.
- [45] WONGNGAM W, ROYTRAKUL S, MITANI T, et al. Isolation, identification, and in vivo evaluation of the novel antihypertensive peptide, vskrlngda, derived from chicken blood cells [J]. *Process Biochemistry*, 2022, 115: 169-177.
- [46] SARUKHANYAN F P, HUNANYAN O V, ZAKARYAN H H. Hemorphins-a family of a typical opioid peptides [J]. *Neurochemical Journal*, 2023, 17(4): 648-653.

- [47] ADJE E Y, BALTI R, KOUACH M, et al. Obtaining antimicrobial peptides by controlled peptic hydrolysis of bovine hemoglobin [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2011, 49(2): 143-153.
- [48] 蔡新东,马石霞,冉权,等.碱性蛋白酶酶解血液蛋白的工艺优化[J].农村实用技术,2020,8:115-117.
- [49] 赵晓丹,郭春华,柏雪,等.微生物发酵牛血生产蛋白饲料的研究[J].生物学通报,2016,51(4):45-49.
- [50] ZHANG Z M, YU J Z, CHENG P, et al. Effect of different process parameters and ultrasonic treatment during solid osmotic dehydration of Jasmine for extraction of flavoured syrup on the mass transfer kinetics and quality attributes [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2022, 15(5): 1055-1072.
- [51] 孔炜浩,高琳,周起,等.蛋白质提取分离纯化及特性研究进展[J/OL].中国食物与营养,1-7[2024-10-06].
- [52] 王潇,张蕾,陈永福,等.乳酸菌抗菌肽的分离纯化方法研究进展[J].食品科技,2023,48(8):222-229.
- [53] 黎柯君,陈展鹏,刘仁,等.水果废弃物活性成分提取方法及其在食品包装的应用进展[J].包装工程,2024,45(17):50-59.
- [54] 陈映伍,张胜利,李生娥,等.血红蛋白多肽的降压机制研究进展[J].药物生物技术,2024,31(1):90-98.
- [55] 张宏,谭竹钧.牛血超氧化物歧化酶(bovine superoxide dismutase)生产工艺研究[J].内蒙古大学学报(自然科学版),2002,33(5):567-571.
- [56] LAURSEN F N, ATIL U G, GREGERSEN B S, et al. Composition and functionality differences of oat protein concentrates: Potential of less refined concentrates obtained by wet milling [J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 155: 110187.
- [57] 张书文,于春慧.超氧化物歧化酶提取新工艺[J].适用技术市场,2001,10:46-47.
- [58] 高香兰.银杏内酯萃余物中白果内酯的分离纯化工艺研究[D].安徽:合肥工业大学,2010.
- [59] 张晓玲.菊苣综合利用与菊粉的纯化及活性研究[D].西安:西北农林科技大学,2008.
- [60] 张轩.产纳豆激酶和凝乳酶枯草芽孢杆菌的筛选及其在发酵乳中的应用[D].无锡:江南大学,2021.
- [61] 刘婧.猪血超氧化物歧化酶的提取、性质及其化学修饰研究[D].长春:吉林大学,2011.
- [62] 甘丽晶,刘晓波,胡质毅.抗体分离纯化技术研究进展[J].检验医学与临床,2013,10(4):461-464.
- [63] 冯仁青,郭振泉,宓捷波.现代抗体技术及其应用[M].北京:北京大学出版社,2006.
- [64] 李希强,陈莉.一种简便可较大量提取血清 IgG 的方法[J].生物化学与生物物理进展,1991,18(3):214-215.
- [65] CHY R W M, AHMEC T, IFTEKHAR J, et al. Optimization of microwave-assisted polyphenol extraction and antioxidant activity from papaya peel using response surface methodology and artificial neural network [J]. *Applied Food Research*, 2024, 4(2): 100591.
- [66] 王岸娜,苏子豪,吴立根,等.蛋白质结晶研究进展[J].河南工业大学学报(自然科学版),2014,35(5):107-115.
- [67] 余健,吴笛,宰家敏,等.低温乙醇法纯化抗人 T 细胞猪免疫球蛋白的研究[J].微生物学免疫学进展,2008,36(3):42-44.
- [68] PEGRAM L M, RECORD M T. Hofmeister salt effects on surface tension arise from partitioning of anions and cations between bulk water and the air-water interface [J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2007, 111(19): 5411-5417.
- [69] 肖雪莉. α - β -半乳糖苷酶辅助饱和硫酸铵法提取牦牛血中免疫球蛋白 G 及其活性稳定性研究[D].兰州:甘肃农业大学,2017.
- [70] MIRMOGHATAIE L, ALIABADI S S, HOSSEINI S M. Recent approaches in physical modification of protein functionality [J]. *Food Chemistry*, 2016, 199: 619-627.
- [71] BOUTUREIRA O, BERNARDES G A J. Advances in chemical protein modification [J]. *Chemical Reviews*, 2015, 115(5): 2174-2195.
- [72] LIU J, RU Q, DING Y. Glycation a promising method for food protein modification: Physicochemical properties and structure, a review [J]. *Food Research International*, 2012, 49(1): 170-183.
- [73] 张晓燕,孟令莉,吴子健,等.葡聚糖分子量对其与牛血清白蛋白共聚物性质的影响[J].食品与发酵工业,2021,47(15):104-110.
- [74] 吴颖,屈婷敏,文诗雨,等.糖基化肽的制备、结构表征及生物活性研究进展[J].食品与机械,2023,39(8):192-198+217.
- [75] YU B, GONG X, ZHANG N, et al. Glycation modification of protein hydrolysate from channel catfish (*Ictalurus Punetaus*) viscera to mitigate undesirable flavor: Unraveling structure and flavor characteristics [J]. *Food Chemistry: X*, 2024, 24: 101993.
- [76] CHEN X, FANG F, WANG S. Physicochemical properties and hepatoprotective effects of glycosylated Snapper fish scale peptides conjugated with xylose via maillard reaction [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2020, 137: 111115.
- [77] KENTISH S, ASHOKKUMAR M. The physical and chemical effects of ultrasound[M]//*Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing*. New York, NY: Springer New York, 2010.
- [78] ALARCON-ROJO A D, JANACUA H, RODRIGUEZ J C, et al. Power ultrasound in meat processing [J]. *Meat science*, 2015, 107: 86-93.

- [79] 赫玉兰,卢士玲,吴亚楠,等.响应面优化超声波法提取牛血红蛋白工艺[J].食品工业科技,2015,36(10):259-263+268.
- [80] CAO J, YAN H, YE B, et al. The inhibitory effect of Maillard reaction products on fish and chicken muscle oxidation [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2024, (prepublish): 1-10.
- [81] ZENG J, SONG Y, FAN X, et al. Lipid- involved browning mechanism during the drying process of squid [J]. Food Chemistry, 2024, 465(Pt 2): 142016.
- [82] GUO R, DENG X, HU Q, et al. Soy protein gels based on ultrasonic treatment: Effects of Ca^{2+} and 11S/7S ratio on gel structures and digestive properties [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 111: 107143.
- [83] 唐雯倩,成晓瑜,刘文营,等.超声波辅助酶解制备猪血源抗氧化肽[J].肉类研究,2015,29(11):10-14.
- [84] 狄蕊,张珍,张盛贵,等.酶法辅助提取牦牛血中超氧化物歧化酶的工艺条件优化[J].食品与发酵科技,2017,53(3):8-13+28.
- [85] PANYAM D, KILARA A. Enhancing the functionality of food proteins by enzymatic modification [J]. Trends in Food Science & Technology, 1996, 7(4): 120-125.
- [86] GIRI K P, MAGED A, RAWAT A, et al. Biphenyl derived hyper-crosslinked polymer as a metal-free adsorbent for the removal of pharmaceuticals from water [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 501: 157478.
- [87] 高博雅,李平兰.微生物发酵技术生产水产胶原蛋白肽的研究进展[J].中国酿造,2023,42(3):1-7.
- [88] ADLER-NISSEN J. Enzymic hydrolysis of proteins for increased solubility [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1976, 24(6): 1090-1093.
- [89] 蔡艺菲,赵鑫阳,田晓静,等.酶解猪血制备氨基酸液体肥工艺条件优化[J].现代畜牧兽医,2021,6:23-26.
- [90] LYNCH S A, MULLEN A M, O'NEILL E E, et al. Harnessing the potential of blood proteins as functional ingredients: a review of the state of the art in blood processing [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2017, 16(2): 330-344.
- [91] 田春美,钟秋平.超氧化物歧化酶的现状研究进展[J].中国热带医学,2005,5(8):1730-1732.
- [92] BAH C S F, BEKHIT A E D A, CARNE A, et al. Slaughterhouse blood: an emerging source of bioactive compounds [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2013, 12(3): 314-331.
- [93] IZGARISHEV A V, IZGARISHEVA N V, OSTROUMOV L A. Development and study of food product with anti-anemic agent based on farm animal blood [J]. Foods and Raw materials, 2018, 6(1): 56.
- [94] DAR Ó C, KATIUSCA V, GEIZON T, et al. Efficacy of Cytoreg in the treatment of diabetic foot disease [J]. Journal of Wound Care, 2024, 33(11): 806-812.
- [95] 俞露,赵芷,张文欣,等.贵州不同地区刺梨的综合品质对比分析[J].现代食品科技,2021,37(9):169-178.
- [96] 沈洪国.黄鳝肝脏超氧化物歧化酶的分离纯化与性质研究[D].重庆:西南师范大学,2005.
- [97] XIE Q, HUANG Y, ZHANG X, et al. Development of an Indirect Competitive ELISA Based on a Stable Epitope of β -Lactoglobulin for Its Detection in Hydrolyzed Formula Milk Powder [J]. Foods, 2024, 13(21): 3477.
- [98] 于丽颖.花生抗氧化肽的制备,分离纯化及其缓解小鼠疲劳活性研究[D].长春:吉林农业大学,2021.
- [99] SURAI P F, KOCHISH I I, FISINIS V I, et al. Antioxidant defence systems and oxidative stress in poultry biology: An update [J]. Antioxidants, 2019, 8(7): 235.
- [100] DEEB E S, ASHOUR A E, HACK E A E M, et al. Impacts of dietary different levels of thyme leave powder as a natural growth promoter on growth performance, carcass characteristics, and blood indices of broilers [J]. Poultry Science, 2024, 103(12): 104396.
- [101] MA G, AYALEW H, MAHMOOD T, et al. Methionine and vitamin E supplementation improve production performance, antioxidant potential, and liver health in aged laying hens [J]. Poultry Science, 2024, 103(12): 104415.
- [102] 郭照宙,崔红霞,武洪志,等.饲料中添加超氧化物歧化酶模拟物对肉仔鸡肌纤维特性及肌肉超氧化物歧化酶活性的影响[J].动物营养学报,2018,30(1):202-211.
- [103] 马辉,原东林,乔宏兴,等.饲料中添加抗菌肽和免疫球蛋白对肉鸡生产性能和免疫功能的影响[J].畜牧与兽医,2016,9:67-71.
- [104] 刘群峰.氧气控制释放型生物材料研究进展[J].材料研究与应用,2021,15(5):572-582.
- [105] 郑诗凡,王红,徐莹璨,等.血红蛋白类氧载体在肿瘤治疗领域中的应用进展[J].中国输血杂志,2024,37(4):477-481.
- [106] 李洋,杨明峰,王莹,等.血红蛋白类氧载体的研究进展及应用前景[J].临床输血与检验,2024,26(2):282-288.
- [107] 崔慧斐,张天民.超氧化物歧化酶在食品和化妆品中的应用及其发酵法生产进展[J].药物生物技术,2000,7(3):187-189.
- [108] 巨晓军,杨海明,王志跃,等.卵黄免疫球蛋白在畜禽生产中的研究与应用[J].动物营养学报,2015,27(3):691-697.