

动物血液蛋白质及活性肽开发研究进展

李 滢^{1,2}, 张远红^{1,2*}, 董 浩^{1,2}, 陈伟波³, 曾晓房^{1,2*}

- (1. 仲恺农业工程学院农业农村部岭南特色食品绿色加工与智能制造重点实验室, 广州 510225;
2. 仲恺农业工程学院轻工食品学院, 广东省岭南特色食品科学与技术重点实验室, 广州 510225;
3. 梅州市金绿现代农业发展有限公司, 梅州 514500)

摘 要: 动物血液作为畜禽屠宰及加工的主要副产物, 富含蛋白质、微量元素、矿物质、激素、维生素、酶类等多种功能成分, 营养价值较高。其中, 蛋白质作为动物血液的主要营养成分, 占动物全血含量的 10%~20%, 其氨基酸组成丰富, 富含赖氨酸, 是一种优质的动物蛋白资源, 素有“液态肉”之称, 具有广阔的开发应用前景。本文主要综述动物血液蛋白质的研究进展及开发应用现状, 重点总结了近年来以动物血液蛋白为原料开发的具有特定生理功能的生物活性肽, 如抗氧化肽、抗菌肽、免疫调节肽、抗癌肽、降血压肽、抗糖尿病肽等, 对活性肽的结构、序列及活性功能进行系统阐述, 并对动物血液蛋白实际应用中出现的问题以及未来发展趋势进行展望, 旨在为动物血液蛋白的高附加值开发利用提供参考。

关键词: 动物血液; 蛋白质; 生物活性肽

Advances in the development of animal blood protein and bioactive peptides

LI Ying^{1,2}, ZHANG Yuan-Hong^{1,2*}, DONG Hao^{1,2}, CHEN Wei-Bo³, ZENG Xiao-Fang^{1,2*}

- (1. Key Laboratory of Green Processing and Intelligent Manufacturing of Lingnan Specialty Food, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Lingnan Specialty Food Science and Technology, College of Light Industry and Food Sciences, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China; 3. Meizhou Golden Green Modern Agriculture Development Co., Ltd., Meizhou 514500, China)

ABSTRACT: As the main by-product of livestock and poultry slaughter processing, animal blood is rich in protein, trace elements, minerals, hormones, vitamins, enzymes, and has high nutritional value. Protein as the main nutritional components of animal blood, accounting for 10%-20% of the total blood content of animals. The amino acid composition is rich in blood, especially rich in lysine, is a kind of high-quality animal protein resources, known as “liquid meat”, and has a good application prospect. This paper mainly reviewed the research progress

基金项目: 广东省岭南特色食品科学与技术重点实验室项目(2021B1212040013)、梅州市兴宁市肉鸽产业园技术研发项目(粤农农函〔2021〕1024号)、广东省仲恺农业工程学院-广州质量监督检测研究院联合培养研究生示范基地项目(粤教研函〔2021〕2号)

Fund: Supported by the Guangdong Provincial Key Laboratory of Lingnan Specialty Food Science and Technology (2021B1212040013), the Meizhou Xingning Meat Pigeon Industrial Park Technology Research and Development Project (Yuenong Agricultural Letter (2021) No.1024), and the Zhongkai University of Agriculture and Engineering and Guangzhou Quality Supervision and Testing Institute Joint Training of the Graduate Program (Guangdong Teaching and Research Letter [2021] No.2)

*通信作者: 张远红, 博士, 副教授, 主要研究方向为农副产品精深加工。E-mail: zyh5801307075@163.com

曾晓房, 博士, 教授, 主要研究方向为肉品加工和质量控制。E-mail: 59592743@qq.com

*Corresponding author: ZHANG Yuan-Hong, Ph.D, Associate Professor, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, No.24, Dongsha Road, Haizhu District, Guangzhou 510225, China. E-mail: zyh5801307075@163.com

ZENG Xiao-Fang, Ph.D, Professor, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, No.24, Dongsha Road, Haizhu District, Guangzhou 510225, China. E-mail: 59592743@qq.com

and development and application status of animal blood proteins, focused on the recent years of animal blood proteins as raw materials to develop biological active peptides with specific physiological functions, such as antioxidant peptides, antihypertensive peptides, antibacterial peptides, hypoglycemic peptides, anticancer peptides, anti-diabetic peptides and other peptides, and systematically described the structure, sequence and functional activity of bioactive peptides, as well as prospected the problems encountered in practical applications and the future development trend of animal blood, to provide reference for the development and utilization of animal blood protein with high added value.

KEY WORDS: animal blood; proteins; bioactive peptides

0 引言

动物血液是畜禽屠宰及加工过程中产生的主要副产物之一, 占动物体重的 6%~8%^[1]。我国动物血液资源十分丰富, 根据联合国粮食及农业组织估计, 2021 年我国的畜禽肉产量达到 8.89×10^7 t, 可收集到的动物血液在 8.0×10^6 t 以上, 产量巨大^[2]。动物血液营养丰富, 富含蛋白质、碳水化合物、维生素、矿物质、脂肪、酶类等多种生物活性物质。其中, 蛋白质是血液中的主要营养成分, 约占全血含量的 10%~20%, 干燥血粉的蛋白质含量可达 80%以上, 是全乳粉的 3 倍, 相当于瘦肉中的蛋白含量^[1]。血液中氨基酸的总含量明显高于人乳和全蛋的氨基酸含量, 其中, 赖氨酸的含量可达到 9%, 与谷物蛋白形成较好的互补作用。因此, 血液又被称为“液态肉”^[3], 是一种优质的动物蛋白资源库, 具有极大的开发应用前景。但是由于血液保存难、极易受到污染、血腥味重难以开发产品、消化性能极差、宗教限制、血及血制品的适口性较差等原因, 屠宰后的动物血液绝大部分作为废弃物排放, 仅少部分被利用。本文在介绍动物血液蛋白质的研究进展及开发利用现状的基础上, 重点对近年来以动物血液蛋白为原料开发的生物活性肽的应用现状进行综述, 以期对动物血液的深加工开发利用提供参考价值。

1 动物血液蛋白质组成及其在食品中的应用

动物血液是由血浆和血细胞组成的红色黏稠液体, 血浆约占血液总量的 65%, 其蛋白质含量约为 8%, 剩余 35%的成分为血球, 主要成分是红细胞浓缩物, 富含携氧功能的血红蛋白, 其含量达到 36%左右^[4]。血浆蛋白主要成分为纤维蛋白原、白蛋白、球蛋白。目前血浆蛋白制品主要包括免疫球蛋白类、凝血因子类、凝血抑制类及其他蛋白类。血红蛋白作为一种结合蛋白, 其蛋白质部分被称为珠蛋白。将动物血液的蛋白质进行充分利用, 尤其是对血红蛋白、血浆蛋白、免疫球蛋白等进行增值深加工, 可较大程度提高动物血液的附加值并产生一定的经济社会效益。

1.1 血浆蛋白

血浆蛋白(blood plasma protein, BP)是血浆的主要成分, 目前在食品领域主要被用作乳化剂、发泡剂、黏合剂、热诱导凝胶剂、保水剂等, 可充当食品添加剂应用于食品加工当中。加热后血浆蛋白可形成类似煮熟鸡蛋蛋白的凝胶网络结构, 同时兼具有良好的发泡特性, 在烘焙行业中常被用做蛋清的替代品^[5]。CSURKA 等^[6]使用动物血粉代替鸡蛋制作可口口味的蛋糕, 提升蛋糕的咀嚼力和凝胶性能且不影响蛋糕的质地和感官。于楠楠等^[7]将羊血浆蛋白添加到白鲢鱼糜中, 显著提高鱼糜制品的硬度、弹性、胶黏性及咀嚼性等质构特性。FERNÁNDEZ 等^[8]利用脱水牛血浆作为结构乳化剂制备食用亚麻籽油乳液凝胶, 开发具有降低胆固醇和血糖水平功能的饱和脂肪替代品。ÁLVAREZ 等^[9]将回收的血浆蛋白替代肉类蛋白加到爱尔兰早餐肠中, 发现当替代量达到 20%时, 产品的持水力和乳化稳定性显著提高。此外, 研究发现, 血浆蛋白可作为可食用薄膜的原材料应用于包装材料领域。WENG 等^[10]将牛血浆酸化后用纳米纤维素加固, 通过调节酸化牛血浆和纳米纤维素的比例制备不同物理性能的血浆蛋白薄膜, 满足不同食品的包装需求。ÁLVAREZ 等^[11]也利用猪和牛血浆蛋白进行酸化后采用乙醇沉淀蛋白, 再与甘油混合制成薄膜, 以生产出可持续的包装材料。血浆蛋白作为良好的蛋白质来源, 几乎没有颜色和味道, 添加到食品中可以显著改善其营养品质和感官特性, 被越来越多地应用到食品体系中。

1.2 血红蛋白

血红蛋白(hemoglobin, Hb), 作为二聚体(α 和 β 珠蛋白)对称配对形成的四聚体, 含有一个血红素以及氧的结合部位, 是动物血液含量最丰富的蛋白质, 占动物血液成分的 12%~18%^[12]。血红蛋白中的血红素可以结合二价铁离子形成血红素铁, 约占血红蛋白的 3.8%左右。动物血液的血红蛋白约占细胞组分的 31%, 由于其本身颜色为红色, 且铁含量较高, 是食品行业较受欢迎的蛋白质^[13]。

1.2.1 食品着色剂

由美国 Essentia Protein Solutions 公司研发的产品

AproRed、荷兰 Sonac 公司生产的 Harimix, 主要成分均是从牛、猪血液中提取出来的血红蛋白。张洁^[14]将虾青素、辣椒红色素与血红素进行对比发现, 添加血红素的调理猪排色泽及冻融稳定性高于对照组, 且能缓解贮藏过程中色泽变暗的问题。血红素在食品工业中普遍用作肉制品的天然食品着色剂, 然而天然色素不稳定, 容易氧化^[15], 为解决血红蛋白不稳定的问题, 其方法主要包括亚硝基化、糖基化、磷酸化和低一氧化碳含量包装。哈穆德^[16]制备的亚硝基牛血红蛋白对 2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐[2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ammonium salt, ABTS]自由基清除活性、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)抑制能力均高于对照组, 研究表明亚硝基化可增强血红蛋白的结构稳定性。MA 等^[17]在亚硝基血红蛋白的基础上进行磷酸化修饰, 磷酸基通过丝氨酸和酪氨酸残基的 C-O-P 键连接, 证明该二级结构可以增加血红蛋白的稳定性, 且比亚硝基血红蛋白稳定性更高。虽然人工和天然色素都已被批准用于人类食品中, 但有研究表明^[18], 大多数合成食品色素及其杂质存在不良反应, 因此天然食品着色剂越来越受青睐。

1.2.2 营养补充剂

血红蛋白富含血红素铁, 与人工合成的亚铁盐相比, 天然含铁蛋白中的铁不会直接与食物中的螯合剂直接接触, 能提高其生物利用率^[19], 具有改善缺铁性贫血的作用。ARCAYA 等^[20]安排血红蛋白低于 11 g/dL 的实验组儿童食用牛血强化饼干 12 周后, 其血液中血红蛋白从 10.4 g/dL 增加到 11.4 g/dL, 研究表明, 食用牛血强化饼干可强化儿童饮食中缺乏的铁含量, 减少儿童贫血的发生。王春霞等^[21]以梅花鹿血粉与乳酸亚铁作为对照试验对大鼠进行灌喂, 发现两者对大鼠的营养性贫血均有改善效果, 表明鹿血对失血性贫血有明显的补血作用^[22]。WANG 等^[23]以酪蛋白酸钠、麦芽糊精及羧甲基纤维素为食用壁材对鹅血水解物(microencapsulated goose blood hydrolysate, MGBH)进行微胶囊化, 研究 MGBH 对缺铁性贫血(iron deficiency anemia, IDA)模型大鼠的影响, 结果表明鹅血补铁对 IDA Wistar 大鼠的治疗有积极的影响, 在改善贫血症状方面, MGBH 的摄入比猪血摄入效果更佳。IDA 作为世界上最常见和普遍的营养缺乏症, 通常通过额外补充铁剂进行改善。血红素铁相比较于铁离子补铁剂效果更优, 由于本身可食用, 动物血液可作为一种安全、高效的新型营养补充剂, 应用于功能性食品这一领域将会具有很好的发展前景。

由此可见, 动物血红蛋白已经成功应用到食品和保健品行业, 目前关于该类产品的大规模生产还需要进一步研究, 以减少资源浪费。

1.3 免疫球蛋白

免疫球蛋白(immunoglobulin G, IgG)存在于球蛋白中,

占球蛋白含量的约 75%。IgG 由两条轻链、两条重链和四个二硫键链接而成, 呈 Y 字型^[24]。IgG 是具有抗体活性或化学结构与抗体相类似的一类球蛋白, 具有清除病原体、增强机体免疫力等功能。IgG 作为唯一一类能通过胎盘的抗体, 在新生儿抗感染中起着重要作用^[25], 而且 IgG 能通过有效的免疫应答来维护内环境的稳定, 且通过酸性的环境后, IgG 以口服的方式被机体吸收后仍能发挥免疫的作用^[24]。目前免疫球蛋白作为“抗体食品”的开发应用是功能性食品、药品领域的研究热点。PEREZ-BOSQUE 等^[26]研究表明, 血清来源的 Ig 补充剂对炎症性肠病起到预防和改善的作用。HERNANDEZ-CHIRLAQUE 等^[27]研究证实猪免疫球蛋白(immunoglobulin concentrate, IC)对肠上皮细胞 IEC18 和大鼠脾细胞的免疫细胞功能有促进作用。在另一项研究中, BALAN 等^[28]基于口服绵羊血清免疫球蛋白是否能调节肠道沙门氏菌感染的问题进行研究, 试验中以生长大鼠黏膜的免疫功能和免疫介质为指标, 结果表明 IgG 补充剂在各种动物模型中均能积极调节肠道和外周免疫系统的各项指标。另外已有企业将动物血液中的食品级蛋白质商业化, 比如由美国 Proliant 公司生产的牛血浆血清浓缩物宣传中, 称其含有免疫球蛋白等物质, 添加到饮料中可增强机体的免疫系统^[29]。

现阶段动物血液主要以完整蛋白或血粉的形式应用到食品、饲料及医药等领域中, 缺乏精深加工。在当前时代背景下, 大健康产业的发展与民众健康美好生活息息相关, 大健康功能性食品行业越来越受到重视, 动物血液源生物活性肽的开发应用显得尤为重要。

2 动物血液生物活性肽的开发

近年来, 随着大健康产业的发展, 采用生物酶解、生物发酵等技术从动物血液蛋白中制备具有特定生理功能的活性多肽越来越受到科研工作者的关注。动物血液蛋白来源的活性肽可以进入细胞内参与机体的各种生理功能调节, 具有广泛的生理活性, 如抗氧化、抗菌、降高血压、免疫调节、抗癌、金属螯合和抗糖尿病等, 这主要取决于它们的氨基酸组成、序列及其空间结构^[30]。本文对近年来已报道的动物血液源生物活性肽的种类、结构、生理功能及其应用领域进行总结。

2.1 抗氧化活性肽

抗氧化活性肽通常由 5~16 个氨基酸残基组成。生物体内的氧化反应是由于活性氧(reactive oxygen species, ROS)的产生以及体内抗氧化机制的功能障碍所引起, 机体抗氧化机制无法清除由病理生理条件产生的自由基, 自由基过量积累后可能会损伤机体的组织和细胞而引起慢性疾病和衰老效应^[31], 还会损害蛋白质、脂质和 DNA^[32], 导致癌症和心血管疾病等的发生。据报道, 动物血液源抗氧

化肽被视为增加经济价值和为屠宰场血液创造新应用的机会。利用酶法水解是生成抗氧化肽的有效途径, YANG 等^[33]利用碱性蛋白酶酶解鸭血浆后, 通过清除超氧自由基实验、DPPH 自由基清除实验、ABTS 自由基清除实验、 Fe^{2+} 螯合能力的测定及还原力的测定来评价鸭血酶解物的抗氧化活性, 并成功筛选鉴定出 7 个新的抗氧化活性肽段: LDGP、TGVGTK、EVGK、RCLQ、LHDVK、KLGA、AGGVVAG, 以上肽段中半胱氨酸(Cys)、精氨酸(Arg)、谷氨酸(Glu)、谷氨酰胺(Gln)、甘氨酸(Gly)、亮氨酸(Leu)、丙氨酸(Ala)残基的存在使得到的多肽具有较高的抗氧化活性。此外, 疏水性氨基酸也具有清除自由基的能力^[34], 能使肽段表现出更强的抗氧化能力。毛筱艺^[35]采用木瓜蛋白酶对鸡血红蛋白进行酶解, 分离鉴定出的 4 个抗氧化活性肽段 AEDKKLIQ、LSDLHAHKL、LSNLHAYNL、APAPAAK 均具有以上特性。力俊琛^[36]以鸽血为原料进行酶解, 成功筛选出两个新的抗氧化活性肽段 IDGPRFPF 和 TRPDLVGF, 同时王爽等^[37]、刘丽君^[38]、王珍如^[39]、BAH 等^[40]、布冠好等^[41]分别成功从驴血、驼血、羊血、鹿血、猪血、鹅血中鉴定出的抗氧化肽段, 也具有以上的特征。结合以上研究表明, 抗氧化活性肽活性与许多因素相关, 比如氨基酸的组成、肽分子量的大小、排列顺序及亲疏水性等等。不同动物来源的血液均具备抗氧化活性, 为动物血液高值化利用提供系统的理论支撑。

2.2 抗菌活性肽

大多数抗菌活性肽由 10~50 个氨基酸组成, 其中 50% 是疏水氨基酸, 通常会折叠成两亲性的 3D 结构。抗菌肽机制通常表现为细胞膜的解体, 其中细胞膜的磷脂双分子层是主要靶点, 抗菌肽与富含阴离子的磷脂双分子层结合后, 抑制细胞壁合成, 改变细胞质膜的形成, 抑制核酸和蛋白质的合成或抑制酶活性, 致使细胞裂解, 达到抑菌的目的。由于传统抗生素的滥用导致耐药性, 抗菌肽的出现可以满足取代抗生素的需求。从动物血液中制备的抗菌肽已得到较广泛的研究, HAO 等^[42]研究的含有鹿茸血肽的水凝胶(chitosan/sodium alginate/velvet antler blood peptides hydrogel, CAVBPH)通过调控 SIRT1/NF- κ B 通路, 能显著加速小鼠皮肤创面愈合并使治疗细胞增殖、促进血管生成, 这与 CHENG 等^[43]制备的牛血清白蛋白水凝胶对伤口有相同的愈合效果。KUMARI 等^[44]采用胰蛋白酶从绵羊、山羊和兔血浆酶解产物在 6 h 和 8 h 观察到其对大肠杆菌有很强的细菌抑制作用, 对蜡状芽孢杆菌、肠杆菌和金黄色葡萄球菌具有中等抑制作用。杜贺阳^[45]从羊血血红蛋白酶解物中发现其对沙门氏菌、普通大肠杆菌、*E. coli* K88 有抑制活性, 且其最小抑菌浓度(minimal inhibitory concentration, MIC)均高于 HU 等^[46]从鸡血红蛋白中分离出的抗菌肽(the chicken hemoglobin antimicrobial peptides,

CHAP)对 19 株革兰氏阴性菌和革兰氏阳性菌的 MIC。TIAN 等^[47]通过碱性蛋白酶酶解鸡血浆得到两个新的抗菌肽 VSDH 和 CCCPKAF 对蜡样芽孢杆菌有抑菌作用, 其中仅 VSDH 对金黄色葡萄球菌有抑菌效果。动物血液源抗菌肽的发现, 为解决抗生素危机提供了选择, 抗菌肽具有广谱、强效和快速的抗菌优势, 可以成为医药等领域发展的新趋势。

2.3 降血压活性肽

高血压是心脑血管疾病最主要的危险因素之一, 目前全球高血压患病率已达到 12.8 亿人次^[48]。血管紧张素转化酶(angiotensin converting enzyme, ACE)是肾素-血管紧张素系统(rennin angiotensin system, RAS)和激肽-激肽素系统中控制血压的重要酶, 是一种二肽基羧基肽酶(EC 3.4.15.1), 也是一种非活性形式的十肽^[49], 因此抑制 ACE 酶的活性具有重要意义。从动物血液蛋白中制备的天然抗高血压活性肽已被证明有 ACE 抑制活性。AIEMRATCHANEE 等^[49]从猪血红细胞和血浆的酶解物中, 鉴定出 TPYPCV、VVYPWR、FLCT、YTFPFH、WGHGNPHV、VPLW 6 个 ACE 抑制肽, 其中 TPYPCV 对 ACE 抑制活性最强。一旦血压下降, RAS 通路就会在肾脏中被激活, 肾素在肾脏中形成, 进入血液中水解血管紧张素原形成血管紧张素 I, ACE 将血管紧张素 I 转化成有效的血管收缩剂血管紧张素 II, ACE 还能水解缓激肽, 达到舒张血管的作用^[50]。WONGNGAM 等^[51]利用碱性蛋白酶从鸡血细胞中制备鉴定出 ACE 抑制肽 VSKRLNDA, 经体内消化后半抑制浓度(half maximal inhibitory concentration, IC_{50})达到 26.46 $\mu\text{mol/L}$, 高于上述猪血 ACE 抑制肽。研究员^[51]将 VSKRLNDA 肽通过口服给自发性高血压大鼠 1 周, 阳性对照组(卡托普利组)和口服 VSKRLNDA 组的舒张压下降幅度最大。马志鹰^[52]也从驼血酶解产物得到降血压多肽 NPRNR、VVDMPCTR、VDEVGWALGR, 多肽分子量小于 3 kDa 的组分对 ACE 抑制率可达到 61.8%。肽的 ACE 抑制活性取决于 N 或 C 末端氨基酸残基对 ACE 活性位点的亲和力^[53], C 末端上疏水性(芳香族)氨基酸残基如色氨酸(Trp)、酪氨酸(Tyr)、脯氨酸(Pro)、苯丙氨酸(Phe)、亮氨酸(Leu)的存在, 特别脯氨酸在 C 端或者倒数第二位氨基酸能使 ACE 抑制活性增加^[54]。降血压肽作为合成药物的替代品, 用于预防或治疗高血压的同时能避免合成药物的副作用, 能更好地应用于食品或药物当中, 综上研究考虑, 动物血液可以为获得降血压肽提供新思路。

2.4 免疫调节活性肽

免疫调节活性肽是通过改变免疫系统的任何部分(包括免疫系统的先天和适应性功能类别)来增强、减少或修改免疫反应的任何物质^[55], 当免疫调节活性肽进入抗原呈递

细胞后可与 MHCII 结合, MHCII 可以结合 10~18 个氨基酸组成的多肽, 从而产生免疫应答反应。目前已经从动物血液水解物中发现免疫调节活性肽。霍双双^[56]研究发现, 猪血红蛋白(porcine Hb, pHb)能进一步改善免疫抑制小鼠的免疫器官病理损伤, 且没有对小鼠造成明显毒性。王铮^[57]通过中性蛋白酶、碱性蛋白酶、木瓜蛋白酶以 1:1:1 酶制备向海鸿雁雁血肽, 所获得的多肽可以增加白细胞介素-2、干扰素分泌量, 降低前列腺素 E2 的分泌量, 同时能提高免疫低下小鼠的脾脏和胸腺指数、迟发型变态反应强度、血清溶血素水平以及小鼠巨噬细胞吞噬鸡红细胞能力, 说明向海鸿雁雁血多肽具有一定的免疫活性。李京蔓等^[58]研究发现鹿血晶(deer blood crystal, DBC)可以提高脂多糖刺激下的 RAW264.7 细胞活力及其对大肠杆菌的吞噬能力, 并抑制该细胞炎症因子的表达和释放以及抑制核因子 κ B 抑制剂激酶 α/β (inhibitor of nuclear factor kappa-B kinase α/β , IKK- α/β) 和 P65 蛋白的磷酸化。目前大多数免疫调节药物昂贵且具有毒副作用, 不适合用于慢性疾病和预防, 动物血液源免疫调节活性肽在保护机体免受病原体入侵方面起着重要作用, 尽管如此, 此来源的免疫调节活性肽仍需要通过大量的临床试验进行验证, 为动物血液资源在功能性食品及医药领域的应用提供理论依据。

2.5 抗癌活性肽

癌症是全球第二大死亡原因, 仅在 2018 年就有约 960 万人死于癌症, 占全部死亡人数的 1/6^[59], 预计 2040 年将有 2840 万例新发癌症患者^[60]。治疗癌症的传统方法有手术、放疗、化疗, 但由于价格昂贵且对正常细胞有较大破坏性, 而抗癌活性多肽能模拟体内的自然代谢作用, 毒性低、选择性较好, 是一种较有前景的能替代传统化疗的选择。不同来源的抗癌活性肽大多含有赖氨酸、组氨酸、精氨酸, 一般由 5~40 个氨基酸组成^[61-62]。在动物血液源抗癌活性肽研究方面, 王兴玥^[63]以向海雁鹅血为原料, 通过酶水解制备的多肽具有调控肺癌反应、蛋白质磷酸化以及氧化还原过程等生理功能, 对肺癌有潜在的抑制作用。周伟^[64]发现提取的狮白鹅血清能降低人胃癌细胞和人肝癌细胞的活力及细胞迁移率, 改变细胞形态并增加癌细胞的凋亡率。O'SULLIVAN 等^[65]评估了牛血蛋白(如纤维蛋白原)在人类癌细胞系中的抗炎活性, 发现纤维蛋白原衍生水解物对 U937 淋巴瘤细胞、MCF-7 乳腺癌细胞、HepG2 肝细胞和 Caco-2 上皮结肠腺癌细胞具有高度毒性, 表明纤维蛋白原水解物能抑制上述癌细胞的增殖。综上所述, 动物血液源抗癌肽已成为抗肿瘤药物研究的新宠, 然而多肽类药物进入机体可能无法专一作用于靶细胞, 且存在被胃肠道消化酶系水解、口服吸收利用率低等问题, 因此从动物血液中获取抗癌活性肽并提高其口服利用率和靶向释放性是未来研究的重点。

2.6 抗糖尿病活性肽

抗糖尿病活性多肽主要是通过抑制二肽基肽酶-IV (dipeptidyl peptidase IV, DPP-IV) 的活性, 达到控制血糖的目的。DPP-IV 作为一种广泛存在于人体的丝氨酸氨基肽酶, 有助于从多肽和蛋白质的 N 端特异性去除 X-Pro 或 X-Ala 二肽, 主要作用于葡萄糖依赖性促胰岛素多肽和胰高血糖素样肽-1 受体^[66], 破坏其链段, 使其失去功能而不能刺激胰岛素分泌, 从而不能控制餐后血糖。因此, 抑制 DPP-IV 酶是有效治疗糖尿病的重要策略之一^[67]。近年来也有动物血液来源的 DPP-IV 抑制肽被报道。刘丹^[68]对蛋白酶 K 酶解的驴血红蛋白酶解物分离鉴定后, 合成出两个多肽 VDPENFRLI 和 YPWTQ, 并验证其能降低 II 型糖尿病小鼠的空腹血糖值, 改善小鼠糖耐量。CARRERA-ALVARADO 等^[69]采用不同酶酶解鸡蛋白后, 获得的 3 个多肽: GPF、IGL 和 GGGW 均对 DPP-IV 具有较好的抑制能力, 说明鸡血水解多肽可作为 II 型糖尿病的控制来源。刘丽君^[38]以 α -淀粉酶抑制率、 α -葡萄糖苷酶抑制率为评价指标来探究驼血酶解产物的降血糖活性, 鉴定出两个抑制率最高的活性多肽: Tyr-Pro-Gly-Glu-Thr-Arg、Tyr-Pro-Trp-Thr-Arg-Arg。邱多隆等^[70]研究发现驼血多肽具有显著的降血糖活性, 进一步分离纯化得到的高纯度多肽可应用于药物、保健品或者食品等领域。

2.7 其他生物活性肽

除了上述生理活性外, 研究者们^[51,71-72]还从动物血液中制备得到了具有降血脂、金属螯合、抗疲劳等活性的多肽。表 1 总结了近年来已报道的从动物血液中获取的生物活性肽的来源、氨基酸序列及其活性功能。目前许多生物活性肽的作用机制尚未完全阐明, 有待进一步深入研究与探讨, 从而为生物活性肽的开发应用提供更多的基础理论指导。

3 展望

随着大健康产业的快速发展, 从畜禽动物血液中提取和制备功能性蛋白和生物活性肽已成为拓宽畜禽加工副产物在功能性食品及食品配料中应用的重要手段, 被视为增加动物血液附加值的重要窗口之一。目前, 受限于传统提取、分离、纯化等技术的限制, 从动物血液开发功能性蛋白和生物活性肽存在产品功能活性低、产品纯度低、生产成本高等问题, 导致动物血液及其制品作为高附加值功能性蛋白或多肽的应用仍然有限, 深加工产品较少。提高动物血液的加工利用率, 还需要食品科研工作者和行业共同努力, 突破传统技术限制, 研发功能活性成分制备关键技术, 提高活性成分的纯度与生物活性, 开发高附加值动物血液深加工产品, 从而推动动物血液在功能性食品的高附加值利用, 提高其经济社会效益。

表 1 动物血液的活性肽来源、功能及氨基酸组成
Table 1 Source, function and amino acid composition of bioactive peptides in animal blood

生物活性	蛋白酶种类	来源	氨基酸序列	功能特点	参考文献
降血压活性	碱性蛋白酶	鸡血蛋白	VSKRLNGDA	抑制血管紧张素I转化酶的活性	[51]
抗疲劳活性	木瓜蛋白酶、中性蛋白酶、碱性蛋白酶	马鹿血	VVYP、L(I)L(I)、DQ、FL(I)	减少肌肉乳酸积累和促使肝糖原的增加	[72]
抗氧化活性	碱性蛋白酶	鸭血	LDGP、TGVGTK、EVGK、RCLQ、LHDVK、KLGA、AGGVPAG	防止脂肪过氧化,清除生物体内自由基,维持生命体内自由基平衡,提高生物体免疫力,抗疾病、抗衰老等功能	[73]
抗菌活性	碱性蛋白酶	鸡血浆	VSDH、CCCCKAF	减少食品储存过程中的脂质氧化和微生物生长,可作为食品防腐剂用于食品工业	[47]
降胆固醇活性	胃蛋白酶、胰蛋白酶	驼血蛋白	RVADEVGGEAIGR、EAVAHHHPGDFTPDAAH、PDDDHGPGLNHLNHNK	抑制羟甲基戊二酸单酰辅酶 A 还原酶,降低胆固醇合成和反馈增强细胞表面上低密度脂蛋白受体的表达,从而起到降血脂的作用	[52]
免疫调节活性	木瓜蛋白酶、中性蛋白酶	鹿茸血	L(I)Y、WQ、L(I)AFA 或 L(I)AAF	具有增强机体免疫力,刺激淋巴细胞增殖,增强巨噬细胞吞噬等多种生理功能	[74]
金属螯合活性	复合风味蛋白酶	猪血浆蛋白	DLGEQYFKG	作为不同矿物质的载体,矿物结合肽具有生物利用度高、吸收快、生物活性强的特点	[75]
阿片类活性	-	骆驼血红蛋白	LVVYPWTQRF	可用于改善阿片样物质受体的功能限制	[76]
抗癌细胞增殖活性	中性蛋白酶、碱性蛋白酶、木瓜蛋白酶	向海雁鹅血	HNDDM-OH、TTNYTD、AWMDFV	主要调控肺癌反应、蛋白质磷酸化、氧化还原过程等生物功能,影响着细胞增殖、凋亡、氧化还原	[62]
降血糖活性	蛋白酶 K	驴血血红蛋白	VDPENFRLL、YPWTQ	对 DPP-IV 活性有抑制作用,可以有效治疗 II 型糖尿病,可降低血糖水平	[67]

注: -代表不存在。

参考文献

- [1] 张露娟. 畜禽血液在食品工业中的应用[J]. 农产品加工, 2019, (5): 58-62.
ZHANG LJ. The application of livestock and poultry blood in food industry [J]. Farm Prod Process, 2019, (5): 58-62.
- [2] 汪正熙, 王卫, 张旭, 等. 畜禽血精深加工利用及其研究进展[J]. 农产品加工, 2020, (3): 67-71.
WANG ZX, WANG W, ZHANG X, *et al.* Deep processing and utilization of livestock and poultry blood and its research progress [J]. Farm Prod Process, 2020, (3): 67-71.
- [3] 张旭, 王卫, 汪正熙, 等. 畜禽血食用产品及 1 其研究进展[J]. 中国调味品, 2020, 45(4): 194-196.
ZHANG X, WANG W, WANG ZX, *et al.* Research progress of livestock and poultry blood edible products [J]. Chin Cond, 2020, 45(4): 194-196.
- [4] 郑召君, 张日俊. 畜禽血液的开发与研究进展[J]. 饲料工业, 2014, 35(17): 65-70.
ZHENG SJ, ZHANG RJ. Advances in development and research of livestock blood [J]. Feed Ind, 2014, 35(17): 65-70.
- [5] JAYATHILAKAN K, SULTANA K, RADHAKRISHNA K, *et al.* Utilization of byproducts and waste materials from meat, poultry and fish processing industries: A review [J]. J Food Sci Technol, 2011, 49(3): 278-293.
- [6] CSURKA T, VARGA-TOTH A, KUHN D, *et al.* Comparison of technological and sensory properties of sponge cakes made with egg powder and different quality of powdered blood products for substituting egg allergen and developing functional food [J]. Front Nutr, 2022, 9: 979594.
- [7] 于楠楠, 李景敏, 汤楚琦, 等. 羊血浆蛋白对高温杀菌鱼糜制品凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(16): 32-36, 42.
YU NN, LI JM, TANG CQ, *et al.* Effect of sheep plasma protein on gel characteristics of high-temperature sterilization surimi products [J]. Sci Technol Food Ind, 2020, 41(16): 32-36, 42.
- [8] FERNÁNDEZ CL, ROMERO MC, ROLHAISER F, *et al.* Fat substitutes based on bovine blood plasma and flaxseed oil as functional ingredients [J]. Int J Gastron Food Sci, 2021, 25: 100365.
- [9] ÁLVAREZ C, DRUMMOND L, MULLEN AM. Protein recovered from meat co-products and processing streams as pork meat replacers in Irish

- breakfast sausages formulations [J]. *LWT*, 2018, 96: 679–685.
- [10] WENG S, SAEZ-ORVIZ S, MARCET I, *et al.* Novel bovine plasma protein film reinforced with nanofibrillated cellulose fiber as edible food packaging material [J]. *Membranes*, 2021, 12(1): 31.
- [11] ÁLVAREZ S, WENG S, ÁLVAREZ C, *et al.* A new procedure to prepare transparent, colourless and low-water-soluble edible films using blood plasma from slaughterhouses [J]. *Food Packag Shelf*, 2021, 28: 100639.
- [12] ÁLVAREZ C, TIWARI BK, RENDUELES M, *et al.* Use of response surface methodology to describe the effect of time and temperature on the production of decoloured, antioxidant and functional peptides from porcine haemoglobin by sub-critical water hydrolysis [J]. *LWT*, 2016, 73: 280–289.
- [13] LYNCH SA, MULLEN AM, O'NEILL EE, *et al.* Harnessing the potential of blood proteins as functional ingredients: A review of the state of the art in blood processing [J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2017, 16(2): 330–344.
- [14] 张洁. 血浆蛋白及血红素在调理猪排中的应用研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
- ZHANG J. Application of plasma protein and heme in prepared pork chops [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020.
- [15] LOMBARDELLI C, BENUCCI I, ESTI M. Novel food colorants from tomatoes: Stability of carotenoid-containing chromoplasts under different storage conditions [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2021, 140: 110725.
- [16] 哈穆德. 亚硝基血红蛋白制备及在肉制品中的应用[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
- HAMMAD. Preparation of nitrosohemoglobin and its application in meat products [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020.
- [17] MA X, SUN Y, PAN D, *et al.* Structural characterization and stability analysis of phosphorylated nitrosohemoglobin [J]. *Food Chem*, 2022, 373(Pt B): 131475.
- [18] CIAN RE, DRAGO SR, GONZÁLEZ RJ. Influence of pH on colour and iron content of peptide fractions obtained from bovine Hb concentrate hydrolysates [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2012, 47(7): 1348–1353.
- [19] XING Y, GAO S, ZHANG X, *et al.* Dietary heme-containing proteins: Structures, applications, and challenges [J]. *Foods*, 2022, 11(22): 3594.
- [20] ARCAYA MMJ, GARCÍA AGF, CORAS BDM, *et al.* Efecto de la ingesta de galletas fortificadas con sangre bovina en hemoglobina de niños anémicos [J]. *Rev Cub Enferm*, 2020, 36(3): e3442.
- [21] 王春霞, 管春姮, 高鹏, 等. 梅花鹿血粉对大鼠营养性贫血改善作用的研究[J]. *经济动物学报*, 2022, 26(2): 116–120.
- WANG CX, GUAN CY, GAO P, *et al.* Improving effect of sika deer blood powder on nutritional anemia of rats [J]. *J Econ Anim*, 2022, 26(2): 116–120.
- [22] 韩欢胜, 郭喜明, 徐馨, 等. 鹿血功能研究进展[J]. *特种经济动植物*, 2021, 24(5): 31–32, 41.
- HAN HS, GUO XM, XU X, *et al.* Research progress of deer blood function [J]. *Spec Econ Anim Plant*, 2021, 24(5): 31–32, 41.
- [23] WANG B, CHENG F, GAO S, *et al.* Double enzymatic hydrolysis preparation of heme from goose blood and microencapsulation to promote its stability and absorption [J]. *Food Chem*, 2017, 217: 699–704.
- [24] 刘峰成, 李展峰, 贺建华, 等. 猪血浆免疫球蛋白的功能及纯化工艺的研究进展[J]. *中国畜牧杂志*, 2023, 59(2): 21–28.
- LIU FC, LI ZF, HE JH, *et al.* Research progress on the function and purification technology of porcine plasma immunoglobulin [J]. *Chin J Anim Sci*, 2023, 59(2): 21–28.
- [25] 贾晓伟. 鹅血清中免疫球蛋白 IgG 的分离纯化及其稳定性的研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2010.
- JIA XW. Studies on fractionation and extraction and stability of immunoglobulin G from goose blood [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2010.
- [26] PEREZ-BOSQUE A, MIRO L, MAIJO M, *et al.* Oral Serum-derived bovine immunoglobulin/protein isolate has immunomodulatory effects on the colon of mice that spontaneously develop colitis [J]. *PLoS One*, 2016, 11(5): e154823.
- [27] HERNANDEZ-CHIRLAQUE C, ARANDA CJ, OCON B, *et al.* Immunoregulatory effects of porcine plasma protein concentrates on rat intestinal epithelial cells and splenocytes [J]. *Animals (Basel)*, 2021, 11(3): 807.
- [28] BALAN P, MOUGHAN PJ. Intact but not denatured ovine serum immunoglobulins positively modulate mucosal immune mediators in the growing rat challenged with *Salmonella enteritidis* [J]. *Brit J Nutr*, 2013, 110(6): 1031–1039.
- [29] TOLDRA M, LYNCH SA, COUTURE R, *et al.* Blood proteins as functional ingredients [M]. Amsterdam: Academic Press, 2019.
- [30] LAFARGA T, ÁLVAREZ C, HAYES M. Bioactive peptides derived from bovine and porcine co-products: A review [J]. *J Food Biochem*, 2017, 41(6): e12418.
- [31] YE N, HU P, XU S, *et al.* Preparation and characterization of antioxidant peptides from carrot seed protein [J]. *J Food Qual*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/8579094>
- [32] HENKEL R, SAMANTA L, AGARWAL A. Oxidants, antioxidants and impact of the oxidative status in male reproduction [M]. America: Academic Press, 2019.
- [33] YANG J, HUANG J, DONG X, *et al.* Purification and identification of antioxidant peptides from duck plasma proteins [J]. *Food Chem*, 2020, 319: 126534.
- [34] 杨静. 鸭血浆蛋白抗氧化肽的分离鉴定及作用机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
- YANG J. Study on the Identification and mechanism of duck plasma antioxidant peptides [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020.
- [35] 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.
- MAO XY. Isolation and purification of chicken blood-derived antioxidant peptides and their *in vitro* digestion products [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022.
- [36] 力俊琛. 鸽血抗氧化肽的分离、结构鉴定及体外抗氧化活性评价[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2022.
- LI JC. Isolation, structural identification and *in vitro* antioxidant activity

- evaluation of antioxidant peptides from pigeon blood [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2022.
- [37] 王爽, 刘雪松, 江波涛. 驴血蛋白酶解制备抗氧化肽工艺优化[J/OL]. 生物学杂志: 1-7. [2023-03-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1081.Q.20220927.1302.003.html>
- WANG S, LIU XS, JIANG BT. Optimization of enzymatic hydrolysis on donkey blood to prepare antioxidant peptides [J]. J Biol: 1-7. [2023-03-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1081.Q.20220927.1302.003.html>
- [38] 刘丽君. 驴血抗氧化与降糖活性肽的制备与鉴定[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- LIU LJ. Preparation and identification of antioxidant and hypoglycemic bioactive peptide from camel blood [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.
- [39] 王珍如. 羊血来源生物活性肽抗氧化活性的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- WANG ZR. Antioxidant activity of bioactive peptides from sheep blood [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2021.
- [40] BAH CSF, CARNE A, MCCONNELL MA, *et al.* Production of bioactive peptide hydrolysates from deer, sheep, pig and cattle red blood cell fractions using plant and fungal protease preparations [J]. Food Chem, 2016, 202: 458–466.
- [41] 布冠好, 姬莉莉, 王琳珍, 等. 鹅血血红蛋白抗氧化活性肽的制备及工艺研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(3): 201–204.
- BU GH, JI LL, WANG LZ, *et al.* Preparation of antioxidative peptides from goose hemoglobin hydrolysates and optimization of enzymatic hydrolysis conditions [J]. Sci Technol Food Ind, 2013, 34(3): 201–204.
- [42] HAO M, PENG X, SUN S, *et al.* Chitosan/sodium alginate/velvet antler blood peptides hydrogel promoted wound healing by regulating PI3K/AKT/mTOR and SIRT1/NF- κ B pathways [J]. Front Pharmacol, 2022, 13: 913408.
- [43] CHENG L, CAI Z, YE T, *et al.* Injectable polypeptide-protein hydrogels for promoting infected wound healing [J]. Adv Funct Mater, 2020, 30(25): 2001196.
- [44] KUMARI SPASA. Optimisation of antioxidant, antimicrobial and metal-chelating properties of bioactive peptides from blood wastes by enzymatic hydrolysis [J]. Anim Prod Sci, 2022, 62(9): 891–900.
- [45] 杜贺阳. 羊血来源生物活性肽抗菌效果的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
- DU HY. Study on antibacterial function of bioactive peptides derived from sheep blood [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020.
- [46] HU F, WU Q, SONG S, *et al.* Antimicrobial activity and safety evaluation of peptides isolated from the hemoglobin of chickens [J]. BMC Microbiol, 2016, 16(1): 287.
- [47] TIAN F, RODTONG S, THUMANU K, *et al.* Molecular Insights into the mode of action of antibacterial peptides derived from chicken plasma hydrolysates [J]. Foods, 2022, 11(22): 3564.
- [48] World Health Organization Hypertension. Hypertension [EB/OL]. [2021-08-25]. <https://www.who.int/zh/news/item/25-08-2021-more-than-700-million-people-with-untreated-hypertension> [2023-03-17].
- [49] AIEMRATCHANEE P, PANYAWECHAMONTRI K, PHAOPHU P, *et al.* *In vitro* antihypertensive activity of bioactive peptides derived from porcine blood corpuscle and plasma proteins [J]. Int J Food Sci Technol, 2021, 56(5): 2315–2324.
- [50] JIA L, WANG L, LIU C, *et al.* Bioactive peptides from foods: Production, function, and application [J]. Food Funct, 2021, 12(16): 718–7125.
- [51] 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 Biochem, 2022, 115: 169–177.
- [52] 马志鹰. 驴血中降血压降血脂多肽的制备及鉴定[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- MA ZY. Preparation and identification of blood pressure lowering polypeptide and hypolipidemic polypeptide in camel blood [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.
- [53] 杨文清, 黄秀芳, 陈耀兵, 等. 植物源生物活性肽的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(1): 270–278.
- YANG WQ, HUANG XF, CHEN YB, *et al.* Research progress of plant-derived bioactive peptides [J]. J Food Saf Qual, 2023, 14(1): 270–278.
- [54] MANOHARAN S, SHUIB AS, ABDULLAH N. Structural characteristics and antihypertensive effects of angiotensin-i-converting enzyme inhibitory peptides in the renin-angiotensin and kallikrein kinin systems [J]. Afr J Tradit Compl Altern Med, 2017, 14(2): 383–406.
- [55] CHALAMAIAH M, YU W, WU J. Immunomodulatory and anticancer protein hydrolysates (peptides) from food proteins: A review [J]. Food Chem, 2018, 245: 205–222.
- [56] 霍双双. 猪血红蛋白对免疫抑制小鼠的免疫功能及脾脏基因转录组的影响研究[D]. 西安: 西北大学, 2021.
- HUO SS. Study on the preparation and properties of porcine hemoglobin iron chelating peptide [D]. Xi'an: Northwest University, 2021.
- [57] 王铮. 向海鸿雁血肽的制备及其免疫活性研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2020.
- WANG Z. Preparation and Immune activity study of *Anser cygnoides* blood peptide [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2020.
- [58] 李京蔓, 潘宇晨, 夏晓雨, 等. 中药饮片鹿血晶对巨噬细胞的免疫调节作用研究[J]. 中国免疫学杂志, 2020, 36(7): 810–814.
- LI JM, PAN YC, XIA XY, *et al.* Immunoregulating effects of deer blood crystal on macrophages [J]. Chin J Immunol, 2020, 36(7): 810–814.
- [59] 蒋玉梅, 简文, 江孟蝶. 膳食营养与癌症预防的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(24): 9475–9480.
- JIANG YM, JIAN W, JIANG MD. Research progress on dietary nutrition and cancer prevention [J]. J Food Saf Qual, 2020, 11(24): 9475–9480.
- [60] 田艳涛, 康文哲. 全球癌症发病情况研究新进展[J]. 中国医药, 2021, 16(10): 1446–1447.
- TIAN YT, KANG WZ. New progress in research on global cancer incidence [J]. Chin Med, 2021, 16(10): 1446–1447.
- [61] HILCHIE AL, HOSKIN DW, POWER CMR. Anticancer activities of

- natural and synthetic peptides [M]. Singapore: Springer Singapore, 2019.
- [62] 李宁, 石爱民, 刘红芝, 等. 生物活性肽抗癌活性及其作用机制研究进展[J]. 中国食品学报, 2019, 19(11): 261-269.
- LI N, SHI AIM, LIU HZ, *et al.* Research progress of bioactive peptides anticancer function and its mechanism of action [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2019, 19(11): 261-269.
- [63] 王兴玥. 基于网络药理学及分子对接技术对向海雁鹅血多肽抗肺癌的机制研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2022.
- WANG XY. Study on anti-lung cancer mechanism of Xianghai wild goose blood polypeptide based on network pharmacology and molecular docking technology [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2022.
- [64] 周伟. 狮白鹅血清对胃癌和肝癌细胞的影响作用[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2019.
- ZHOU W. Effect of White Lion goose serum on gastric cancer and liver cancer cells [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2019.
- [65] O'SULLIVAN SM, LAFARGA T, HAYES M, *et al.* Anti-proliferative activity of bovine blood hydrolysates towards cancer cells in culture [J]. Int J Food Sci Technol, 2017, 52(4): 1049-1056.
- [66] DENG Y, GRUPPEN H, WIERENGA PA. Comparison of protein hydrolysis catalyzed by bovine, porcine, and human trypsins [J]. J Agric Food Chem, 2018, 66(16): 4219-4232.
- [67] ELAM E, FENG J, LV Y, *et al.* Recent advances on bioactive food derived anti-diabetic hydrolysates and peptides from natural resources [J]. J Funct Foods, 2021, 86: 104674.
- [68] 刘丹. DPP-IV抑制肽的制备鉴定及其对糖尿病小鼠肠道微生态影响的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021.
- LIU D. Preparation and identification of DPP-IV inhibitory peptide and its effect on the intestinal microecology of diabetic mice [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2021.
- [69] CARRERA-ALVARADO G, TOLDRA F, MORA L. DPP-IV inhibitory peptides GPF, IGL, and GGGW obtained from chicken blood hydrolysates [J]. Int J Mol Sci, 2022, 23(22): 14140.
- [70] 邸多隆, 刘永峰. 一种具有降血糖功能的驼血多肽及其制备方法: 中国, CN107674902B[P]. 2021-05-11.
- DI DL, LI YF. Preparation method of hypoglycemic function from camel blood polypeptide: China, CN107674902B [P]. 2021-05-11.
- [71] 杨静, 石景, 邹焯, 等. 鸡血多肽亚铁螯合物的制备工艺优化及结构表征[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(6): 1678-1685.
- YANG J, SHI J, ZOU Y, *et al.* Preparation process optimization and structural characterization of chicken blood peptides-iron chelate [J]. Jiangsu J Agric Sci, 2022, 38(6): 1678-1685.
- [72] LV JJ, LIU Y, ZENG XY, *et al.* Anti-fatigue peptides from the enzymatic hydrolysates of *Cervus elaphus* blood [J]. Molecules, 2021, 26(24): 7614.
- [73] YANG J, HUANG J, DONG X, *et al.* Purification and identification of antioxidant peptides from duck plasma proteins [J]. Food Chem, 2020, 319: 126534.
- [74] 马立芹. 马鹿茸血蛋白免疫活性肽的制备及其活性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
- MA LQ. Preparation and bioactivity of immuno peptide from *Cervus-elaphus* linnaeas antler blood [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.
- [75] LEE S, SONG KB. Purification of an iron-binding nona-peptide from hydrolysates of porcine blood plasma protein [J]. Process Biochem, 2009, 44(3): 378-381.
- [76] ALI A, BABY B, SOMAN SS, *et al.* Molecular insights into the interaction of hemorphin and its targets [J]. Sci Rep, 2019, 9(1): 14747.

(责任编辑: 张晓寒 郑 丽)

作者简介



李滢, 硕士研究生, 主要研究方向为肉制品加工。
E-mail: 592333044@qq.com



张远红, 博士, 副教授, 主要研究方向为农副产品精深加工。
E-mail: zyh5801307075@163.com



曾晓房, 博士, 教授, 主要研究方向为肉品加工和质量控制。
E-mail: 59592743@qq.com