

不同来源多肽—矿物质螯合物活性研究进展

Progress in the study of chelate activity of polypeptide minerals from different sources

楼钰航^{1,2}徐红艳^{1,2}夏新秀^{1,2}杨晰茗^{1,2}王超^{1,2}LOU Yu-hang^{1,2}XU Hong-yan^{1,2}XIA Xin-xiu^{1,2}YANG Xi-ming^{1,2}WANG Chao^{1,2}

(1. 延边大学, 吉林 延吉 133002;

2. 延边大学东北寒区肉牛科技创新教育部工程研究中心, 吉林 延吉 133002)

(1. Yanbian University, Yanji, Jilin 133002, China; 2. MOE Engineering Research Center of Innovative Science and Technology for Beef Cattle in the North-East Cold Region, Yanbian University, Yanji, Jilin 133002, China)

摘要:文章阐述了不同来源的多肽与金属元素钙、铁、锌和非金属元素硒螯合的制备方法, 以及其抗氧化性、抗菌性、增强免疫等方面的研究进展, 并分析了现有研究的不足。

关键词:多肽; 矿物质; 螯合; 生物活性

Abstract: In this paper, the preparation methods of chelating polypeptides from different sources with the metallic elements, such as calcium, iron, zinc and selenium, as well as the research progress on their antioxidant, antibacterial and immune-enhancing properties were reviewed, and the deficiencies of the existing researches were also analyzed.

Keywords: polypeptide; minerals; chelate; biological activity

人体内除碳、氢、氧以外的元素统称矿物质元素, 约占人体内元素4%, 分为常量元素(钙、硫、磷、钠、钾等)和微量元素(铁、锌、硒、锰、碘、铜等)。矿物质元素在构成人体组织和维持正常生理功能过程中发挥着重要作用^[1]。多肽是蛋白质水解产物, 具有良好的营养特性, 还具有抗氧化、抗菌、抑菌、抗炎等生物活性, 以及提高免疫力、降血压和降低胆固醇的作用^[2-4]。

由于矿物质在人体内吸收率较低, 因此提高矿物质的吸收率一直以来都是较热门的话题, 新型矿物质补充剂受到研究者的广泛关注。研究^[5]发现, 部分矿物质元素在一定条件下可与多肽反应生成多肽—矿物质螯

合物, 与螯合前相比矿物质更易被人体吸收, 并可为人体提供一些重要氨基酸, 其生物学利用度高于无机金属盐。由此可见, 多肽矿物质螯合物是一种较理想的矿物质补充剂^[6]。文章拟主要对近年来由不同副产物制备的多肽与不同矿物质螯合的制备方法及生物活性进行综述, 以期多肽—矿物质螯合物此类新型矿物质补充剂的开发利用提供参考。

1 不同来源多肽—矿物质元素螯合物

1.1 植物来源蛋白

中国是花生种植大国, 约有60%的花生用于榨油, 每年因榨油产生的花生粕高达数百万吨^[7]。据测定^[4], 花生粕中蛋白质含量约45%, 是较理想食品工业基础原料。解成骏等^[8]以花生粕为主要原料进行复合氨基酸—锌螯合物的制备, 实现了花生的深加工综合利用。陈晓芸等^[9]利用花生粕多肽与钙元素进行螯合, 通过调整配方, 得到色香味俱佳的营养型花生粕多肽螯合钙咀嚼片。目前, 花生粕主要以热榨花生为主。花生中的蛋白质与多糖在高温条件下产生独特香气的浓香花生油^[7]。热榨工艺导致花生蛋白热变性严重, 使其营养价值及功能特性受到不同程度的影响, 因此, 热榨的花生粕大多用作动物饲料, 附加值较低。李玉珍等^[10]以酶法水解冷榨花生粕蛋白质粉制备得到的花生多肽液为原料, 利用紫外光谱和红外光谱分析发现, Fe^{2+} 与多肽中的 NH_2^+ 以及 COO^- 形成共价配位键并形成稳定结构, 制得多肽—铁螯合物。

豆粕中的蛋白含量高、产量高且尚未被完全开发利用。吴瑞蓝等^[11]采用木瓜蛋白酶水解豆粕蛋白制备锌螯合物, 提高了大豆加工副产物资源的附加值; 方燕凌等^[12]利用晒干后的豆粕, 通过正交试验得到最佳酶解条件, 并

基金项目: 吉林省科技发展计划资助项目(编号: 20190301068NY); 高等学校学科创新引智计划资助(编号: D20034)

作者简介: 楼钰航, 女, 延边大学在读硕士研究生。

通信作者: 徐红艳(1975—), 女, 延边大学副教授, 博士。

E-mail: xuhongyan@ybu.edu.cn

收稿日期: 2020-09-08

与钙元素进行螯合,制得多肽螯合钙;马利华^[13]利用豆粕中的多肽与锌螯合,发现多肽—锌螯合物清除自由基能力及还原能力均高于螯合前,清除羟基自由基与 DPPH 自由基能力较强于茶多酚。充分开发利用副产物中的蛋白,如核桃粕^[14]、玉米胚芽粕^[15]等都可作为多肽螯合物的植物蛋白来源,不仅能够改善资源的浪费,还可解决油脂加工厂副产品利用不足的问题,对实现资源的充分利用具有重大意义。

1.2 动物来源蛋白

随着中国畜禽养殖产业的兴盛,其副产物的产量也随之增加。动物骨粉中蛋白含量约 23%,因此对于畜禽骨的开发有着巨大的经济价值与社会效益。现如今中国对畜禽骨的开发及利用度还存在局限性,生产出高附加值、高利用率的产品,便成为了相关产品开发的研究热点。高敏等^[16]以螯合能力、钙质量分数为指标螯合牛骨粉多肽与钙元素,通过螯合前后稳定性及结构变化的测定发现螯合物形成了更加紧密的环状结构,说明螯合物更稳定。Wu 等^[17-18]则采用猪骨胶原肽制备钙螯合物并对其结构表征与稳定性进行分析。结果显示,多肽螯合钙在胃肠道环境中有很好的稳定性,可促进胃肠道对钙离子吸收。螯合后可显著改善 Caco-2 细胞单层钙的转运,逆转磷酸盐和植酸盐对钙吸收的抑制作用。上述研究表明,多肽与矿物质螯合后可作为一种新型矿物质补充剂,不仅提高了畜禽骨多肽的营养价值以及其副产品的利用价值,同时也促进了畜牧业的发展,具有深远的现实意义及开发价值。

鱼鳞、鱼骨都是鱼类加工业主要副产物,具有较大的土腥味,不易被大多数消费者接受,导致食用价值较低,但二者均富含优质资源,如胶原蛋白、脂肪酸等。唐顺博^[19]研究了鱼鳞多肽—亚铁螯合物的制备工艺,分析了多肽在螯合前后的结构及性质变化,并对罗非鱼鳞多肽—亚铁螯合物的生物毒性与消化稳定性进行了评价。鱼骨中含有丰富的蛋白、不饱和脂肪酸、钙、磷等营养成分,且钙含量与磷含量的比值接近人体骨骼的钙磷比(2:1)^[20]。周小敏等^[21]以金枪鱼的鱼骨为原料,进行酶解获取胶原多肽,并以螯合率为指标优化胶原多肽与钙的螯合工艺。基于这类资源通常被丢弃,既造成浪费,又污染环境,因此,充分利用其中的资源可有效提高此类水产品的综合价值,可以实现“变废为宝”、促进渔业的可持续发展。

2 多肽与不同矿物质元素的螯合物

2.1 多肽—钙螯合物

钙是人体中最丰富的无机元素,约占总体重 1.5%~2.0%,能保证人体细胞、骨骼和牙齿正常功能的发挥,及体内部分机制的运行^[22]。早期的钙补充剂(如碳酸钙、乳

酸钙等)在碱性肠道环境中易形成沉淀,严重降低钙元素的吸收和生物利用率^[23]。Wang 等^[24]通过对小麦胚芽多肽与钙离子螯合,发现与单纯水解产物相比,钙离子螯合率显著提高。蚕蛹中蛋白质含量约 15%,可为多肽钙螯合物提供优质且丰富的蛋白资源,赵梓月等^[25]以蚕蛹为原料,利用响应面法对其螯合条件进行优化,制得蚕蛹多肽螯合钙。研究^[26]发现,在肠道吸收方面,多肽与钙离子螯合后能量消耗更少,运输速度更快且载体不易饱和,比螯合前更具优势。Wang 等^[27]以从黄瓜籽中提取的蛋白为原料,采用液体发酵法制得黄瓜籽多肽,发现当多肽分子量<6 000 Da 时,其结构表征发生变化,存在大量结合位点,更易形成多肽螯合钙。多肽分子与钙离子发生螯合反应所形成的肽钙复合物结构稳定,消化时即使 pH 发生变化,仍可保持可溶且不易发生化学变化,并能被肠道直接吸收。Chen 等^[28]以扁舵鲈为原料,采用酶解法和膜分离法制备多肽,发现纯化后的多肽与钙的结合能力更强。多肽螯合钙在提高钙元素的生物利用率的同时还可以改善人体健康,可作为一种新型钙元素补充剂。

2.2 多肽—铁螯合物

铁元素广泛存在于人体组织中,在红细胞中以血红蛋白的形式存在(65%);在肌肉中以肌红蛋白和酶的形式存在(10%);其余铁元素以铁蛋白和含铁血黄素的形式存在于各个组织器官中(15%~20%)。铁元素在人体中发挥着重要作用,缺乏铁元素会导致缺铁性贫血,甚至影响人体行为及智力发育^[29]。

食物中的铁元素大部分以三价铁的形式存在,吸收效率低,当以二价铁形式存在时,生物利用率更高且结构更加稳定,更易被人体胃肠道消化吸收。Wu 等^[30]对多肽螯合铁结构活性及影响因素进行研究,建立了 Caco-2 细胞单层吸收模型,发现多肽与铁螯合后更利于人体对铁的吸收。多肽螯合铁作为补铁剂,可被肠黏膜细胞直接吸收,对肠道副作用极低,吸收率比无机铁高约 2 倍^[31]。铁元素在蛋白质酶解、物质与能量代谢以及生理免疫过程中发挥重要作用。研究人员使用不同仪器对多肽与铁离子螯合、反应前后变化进行分析,Vo 等^[32]对日本毛虾中的蛋白进行酶解,利用超滤法分级后与铁螯合,发现多肽分子量为 1 000~3 000 Da 时,螯合率最高。Palika 等^[33]利用蛋清中的多肽,通过层析、反相高效液相色谱法进行纯化并建立 Caco-2 细胞单层模型。结果表明,消化过程中,多肽与铁螯合后可促进肠道对铁元素吸收。在营养方面,多肽螯合铁作为增加铁元素吸收和生物利用度的天然产品,可满足缺铁性贫血人群的需求。

2.3 多肽—锌螯合物

锌元素作为人体内第二丰富的营养元素,存在于所有具有催化功能的组织中。其中,肌肉和骨骼中锌含量占总量 90%,肝脏中占 5%^[34]。锌缺乏会引起多种疾病,

包括免疫系统紊乱、皮肤炎症和腹泻等^[35]。通过饮食直接摄入锌元素易与植酸产生不可溶性结合物使锌元素生物利用率降低^[36]。锌元素螯合后能借助多肽吸收特性,以螯合物形式使肠道主动吸收,防止在体内产生不可溶物,进而改善锌元素吸收。富天昕等^[37]对绿豆螯合锌条件进行优化,通过体外模拟胃肠道消化,发现锌离子溶解率和透析率均显著高于无机锌盐。梁春辉等^[38]以牡蛎为主要原料,利用中性蛋白酶制得牡蛎多肽—锌螯合物。测定了几种常见的自由基清除能力及抗氧化活性,并研究了其体外抗氧化作用。豆类中蛋白含量较高,可通过蛋白酶水解制得多肽螯合锌。郑英敏等^[39]以大豆为原料制备多肽螯合锌,对其初级结构进行表征。结果表明,多肽与锌元素螯合后化学性质稳定且有较高溶解性,同时为补锌剂的应用提供了“锌”思路。

2.4 多肽—硒螯合物

硒元素是人体内不可缺少的微量营养素之一,可维持生物体生长、发育、繁衍等。同时,硒能够增强机体免疫力。人体内缺少硒元素可能导致重要器官功能失调,也会提高患不同类型慢性疾病(如克山病、大骨节病、心血管疾病、贫血、糖尿病、肿瘤等)的发病率^[40]。刘晓美等^[41]通过对玉米肽的酶解,制得具有更高活性的玉米多肽,优化了玉米肽与硒元素螯合工艺,并通过肝损伤的小鼠模型,证实了其对肝脏具有保护作用,多肽—硒螯合物其实是一种将无机硒转化成有机硒的新型硒元素补充剂。Qin等^[42]与林栋等^[43]分别从豌豆、核桃中提取多肽,与亚硒酸钠制备多肽—硒螯合物后,进行抗氧化活性及还原能力检测,由于螯合后分子量较低,更易被吸收。由于人体自身不具备产生硒元素能力,因此只能通过日常饮食摄入,Sayra等^[44]比较了发芽鹰嘴豆不同蛋白组分中硒积累及其对蛋白水解物消化率和细胞抗氧化活性的影响,螯合后鹰嘴豆芽球蛋白消化率较高。综上所述,多肽螯合硒的生物利用度高于无机硒,且毒副作用方面也低于无机硒,可作为补硒剂的研究重点。

3 多肽及其矿物质螯合物的生物活性

3.1 抗氧化性

自由基作为机体内许多生化反应中间代谢产物,当体内自由基过量时,会攻击人体内正常细胞,促使人体衰老,各种疾病也因此产生^[45]。

研究^[46-47]发现,蛋白质水解物即多肽具有较好的抗氧化活性。Lu等^[48]采用双酶体系水解芝麻蛋白,结果发现温度、pH、金属离子对抗氧化活性均有影响。芝麻经蛋白酶水解蛋白肽可预防一些慢性代谢疾病,如:糖尿病、高血压等,在相关功能性食品中具有广阔的应用前景。Ramak等^[49]利用肽组学分析方法测定抗氧化活性,发现与其他蛋白酶相比,木瓜蛋白酶水解制得的多肽及螯

合物的ABTS⁺自由基清除能力及螯合率均最高,有更好抗氧化活性,多肽与亚铁的螯合率也有所提高。蛋白质在水解过程中,水解度过高可能会导致苦味肽的产生,对产品的口感也会有所损害^[50],不可单纯根据水解度高低进行蛋白酶的筛选。因此,在今后研究过程中,抗氧化活性应成为蛋白酶筛选的影响因素之一。Karami等^[51]利用不同蛋白酶水解蛋白并采用反相高效液相色谱法对蛋白质水解液进行分馏,通过测定其抗氧化活性发现不同蛋白酶对抗氧化及其他生物活性均有影响。Feng等^[52]从板栗蛋白中分离出新的抗氧化肽,通过测定ABTS⁺自由基清除能力分析其抗氧化活性,通过模拟消化后发现其有良好的抗氧化活性。肖玉娟等^[53]利用蓝圆鲹蛋白进行酶解,超滤法进行分级,以自由基清除率为指标与铁元素进行螯合,结果发现多肽与铁离子螯合后的抗氧化性强于螯合前。Canabady-Rochelle等^[54]根据多肽—矿物质螯合物的抗氧化活性提出了一种新的方法,利用表面等离子体共振直接筛选粗水解物中的金属螯合肽,缩小了其在工业应用中的局限性。以上研究表明,多肽—矿物质螯合物的自由基清除活性以及体内、体外抗氧化活性等已成为研究热点。

3.2 抗菌性

随着人们对健康生活质量要求的不断提高,关于食品的质量安全问题备受关注。现如今抗生素、磺胺等抗菌药物的使用不断增加,导致细菌耐药能力也随之提高,因此效率高、残留少、毒害低的抗菌物便成为了预防细菌感染的重点^[55]。

天然的抗菌肽是一种从动植物中提取的小分子,也被称作天然防腐剂^[56],李敏晶等^[57]选择了一种海洋生物提取多肽,并研究其抑菌活性。结果发现,多肽的浓度越高抑菌能力越强,菌株种类和多肽分子量共同决定了抑菌的效果。张囡^[58]利用香菇柄中分离纯化得到的不同分子质量的多肽,发现其不仅具有抑菌作用,还有较强的还原能力。天然提取物具有能够抑制甚至直接杀死病原菌,同时不产生耐药性并提高机体的免疫力等功能^[59-61]。有研究显示,矿物质与多肽螯合后不仅能提高矿物质的吸收率,同时使多肽的抑菌效果显著提高。如:Lin等^[62]从一种低价值鱼类的蛋白水解物中分离得到了多肽并与亚铁离子螯合,通过自由基清除能力的测定,发现螯合后的多肽螯合亚铁不仅具有营养特性,易于消化吸收,而且具有抑菌及抗氧化的功效。因为绝大多数多肽来源于食物自身,所以天然抗菌肽对人体不产生副作用,而且还可以促进伤口痊愈。Fang等^[63]以章鱼下角料中蛋白为原料制备多肽螯合锌,并对其抗菌活性进行了表征,发现多肽螯合锌对金黄色葡萄球菌的抑菌能力显著。杨玉蓉等^[64]利用桃仁与3种不同植物中多肽与金属螯合抗菌能力进行比较,发现螯合后的抗菌能力强于螯

合前。多肽—矿物质螯合物作为一种天然抑菌剂应用于食品加工行业,有着巨大的潜力。

3.3 其他活性

人体免疫系统被称为人体卫士,与体外或已进入体内的细菌、病毒进行对抗,以确保机体健康运行。疾病发生的基本原因是人体免疫调节功能的失效。除了注意个人卫生、增加锻炼、充足睡眠、保持积极心态,还可通过摄入营养补充剂来提高自身免疫力。潘天齐等^[65]发现菜籽多肽可提高细胞免疫能力,增强吞噬细胞和 NK 细胞的吞噬活性,具有降血压、抗凝血及抗癌等功效。Yuan 等^[66]发现灰树花多肽与铁元素螯合后,不仅可以促进脾细胞和腹腔巨噬细胞的增殖,还有提高免疫的能力。目前已有研究^[67]发现,不同蛋白酶水解同一来源蛋白所得的生物活性肽往往生物活性也不同,其中经胃蛋白酶酶解后的多肽通常具备较好的增强免疫力效果。Huang 等^[68]对带鱼尾蛋白中制得的多肽—亚铁螯合物进行抗氧化活性、氨基酸组成及螯合速率的测定,经大鼠试验得出,含多肽螯合铁可有效改善疲劳能力。综上,生物活性肽与矿物质螯合后具有提高免疫力、抗疲劳、辅助降血压等功能,作为当前食品领域较热门的研究课题,具有广阔的发展前景。

4 结语

多肽—矿物质螯合物作为一种新型的矿物质补充剂,引起了人们的广泛关注,对其研究也日益增多。近几年研究发现,多肽—矿物质螯合物具有抗氧化、抗菌、增强免疫力、抗癌等生物活性。目前,学者通常将多肽与金属元素(钙、铁、锌等)进行螯合,而非金属元素(硒等)螯合的研究较少,而且肽链结合位置、化学结构、动态过程、蛋白酶的选择对其生物活性影响均需进行深入研究。除此之外,现阶段的研究都局限于多肽与单一矿物质螯合,关于多肽与多种矿物质共同螯合达到“一食多补”效果的研究尚未发现,有待进一步考证。同时,开发多肽—矿物质螯合物功能性食品并实现工业化生产,对促进身体健康、合理利用资源,均具有深远的现实意义,也为今后的进一步研究提供了新的思路。

参考文献

[1] CARNEIRO G, LAFERRÈRE B, ZANELLA M T, et al. Vitamin and mineral deficiency and glucose metabolism: A review[J]. e-SPEN Journal, 2013, 8(3): e73-e79.

[2] 刘伦伦, 刘焱, 瞿朝霞, 等. 抗菌肽的功能及生产研究进展[J]. 中国酿造, 2015, 34(8): 1-4.

[3] FIDEL T, MILAGRO R, M-CONCEPCIÓN A, et al. Generation of bioactive peptides during food processing[J]. Food Chemistry, 2017, 267: 395-404.

[4] 韩昊天, 李晓彤, 吴澎, 等. 花生多肽研究进展[J]. 中国粮

油学报, 2019, 34(10): 140-146.

[5] GUO Li-dong, HARNEDY P A, LI Ba-fang, et al. Food protein-derived chelating peptides: Biofunctional ingredients for dietary mineral bioavailability enhancement[J]. Trends in Food Science & Technology, 2014, 37(2): 92-105.

[6] ZHU Ke-xue, WANG Xiao-ping, GUO Xiao-na. Isolation and characterization of zinc-chelating peptides from wheat germ protein hydrolysates[J]. Journal of Functional Foods, 2015, 12: 23-32.

[7] 刘庆芳, 蒋竹青, 贾敏, 等. 花生粕综合利用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(7): 192-195.

[8] 解成骏, 李洪潮, 张文强, 等. 花生粕制备复合氨基酸螯合锌的研究[J]. 中国油脂, 2019, 44(6): 120-123.

[9] 陈晓芸, 王桔红, 林鸿生, 等. 花生粕多肽螯合钙咀嚼片制作工艺研究[J]. 江苏调味副食品, 2019(4): 35-37.

[10] 李玉珍, 肖怀秋, 赵谋明, 等. 冷榨花生粕蛋白多肽—亚铁螯合物制备工艺优化及结构分析[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(4): 64-69.

[11] 吴瑞蓝, 林嘉怡, 周燕芳, 等. 木瓜蛋白酶酶解豆渣制备锌螯合盐[J]. 农产品加工, 2016(10): 16-18.

[12] 方燕凌, 赖燕珠, 吴瑞蓝, 等. 酶解豆渣制备多肽钙螯合物及其抗氧化性的测定[J]. 江西化工, 2016(4): 99-102.

[13] 马利华. 豆粕多肽锌螯合物的抗氧化性研究[J]. 中国调味品, 2019, 44(4): 84-88.

[14] 马雅鸽, 张希, 杨婧娟, 等. 核桃饼粕蛋白提取、多肽制备条件优化及其酶解液的抗氧化性研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(11): 151-157.

[15] 马雪, 关海宁, 郭丽, 等. 双酶法提取玉米胚芽粕水解蛋白及抗氧化特性[J]. 食品工业, 2019, 40(7): 85-90.

[16] 高敏, 汪建明, 甄灵慧, 等. 牛骨多肽螯合物的制备及结构表征[J]. 食品科学, 2020, 41(8): 256-261.

[17] WU Wen-min, HE Li-chao, LI Cheng-liang. Phosphorylation of porcine bone collagen peptide to improve its calcium chelating capacity and its effect on promoting the proliferation, differentiation and mineralization of osteoblastic MC3T3-E1 cells[J]. Journal of Functional Foods, 2020, 64: 103701.

[18] WU Wen-min, HE Li-chao, LIANG Yan-hui, et al. Preparation process optimization of pig bone collagen peptide-calcium chelate using response surface methodology and its structural characterization and stability analysis[J]. Food Chemistry, 2019, 284: 80-89.

[19] 唐顺博. 鱼鳞胶原肽亚铁螯合物的制备及性质研究[D]. 南昌: 江西师范大学, 2020: 2-9.

[20] 尹涛. 纳米鱼骨的制备、特性表征及其对鱼糜胶凝影响的机制研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015: 13-15.

[21] 周小敏, 郑万源, 李澄. 金枪鱼骨胶原多肽螯合钙的制备[J]. 食品工业, 2020, 41(7): 22-26.

[22] 王俊伟. 钙的功用和人体健康[J]. 中国医药指南, 2013, 11(13): 766.

- [23] VAVRUSOVA M, SKIBSTED L H. Calcium nutrition. Bioavailability and fortification[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 59(2): 1 198-1 204.
- [24] WANG Li, DING Yuan-yuan, ZHANG Xin-xia, et al. Isolation of a novel calcium-binding peptide from wheat germ protein hydrolysates and the prediction for its mechanism of combination[J]. Food Chemistry, 2018, 239: 416-426.
- [25] 赵梓月, 王思远, 廖森泰, 等. 蚕蛹多肽螯合钙的制备工艺优化及结构表征[J]. 食品与机械, 2019, 35(8): 20-26.
- [26] 李超楠. 米蛋白肽—钙螯合物的制备及其性质研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2019: 4-5.
- [27] WANG Xu, GAO Ang, CHEN Yue, et al. Preparation of cucumber seed peptide-calcium chelate by liquid state fermentation and its characterization [J]. Food Chemistry, 2017, 229: 487-494.
- [28] CHEN Ming, JI Hong-wu, ZHANG Ze-wei, et al. A novel calcium-chelating peptide purified from *Auxis thazard* protein hydrolysate and its binding properties with calcium[J]. Journal of Functional Foods, 2019, 60: 103447.
- [29] 孙长峰, 郭娜. 微量元素铁对人体健康的影响[J]. 微量元素与健康研究, 2011, 28(2): 64-66.
- [30] WU Wen-fei, YANG Yi-ying, SUN Na, et al. Food protein-derived iron-chelating peptides: The binding mode and promotive effects of iron bioavailability[J]. Food Research International, 2020, 131: 108976.
- [31] HOZ L D L, PONEZI A N, MILANI R F, et al. Iron-binding properties of sugar cane yeast peptides[J]. Food Chemistry, 2014, 142(1): 166-169.
- [32] VO T D L, PHAM K T, LE V M V, et al. Evaluation of iron-binding capacity, amino acid composition, functional properties of *Acetes japonicus* proteolysate and identification of iron-binding peptides [J]. Process Biochemistry, 2020, 91: 374-386.
- [33] PALIKA R, MASHURABAD P C, NAIR M K, et al. Characterization of iron-binding phosphopeptide released by gastrointestinal digestion of egg white[J]. Food Research International, 2015, 67: 308-314.
- [34] THOEN R U, BARTER N N, ELIZÂNGELA S, et al. Zinc supplementation reduces diet-induced obesity and improves insulin sensitivity in rats[J]. Applied Physiology Nutrition and Metabolism, 2018, 44(6): 580-586.
- [35] GIBSON R S. Zinc deficiency and human health: Etiology, health consequences, and future solutions[J]. Plant & Soil, 2012, 361(1/2): 291-299.
- [36] PANDA S L, JAISWAL A, LAKSHMI A J. Compositional and processing effects in promoting the bioaccessibility of iron and zinc of ready to cook high protein kheer mix[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 109: 186-193.
- [37] 富天昕, 张舒, 盛亚男, 等. 绿豆多肽锌螯合物的制备及其结构与体外消化的分析[J]. 食品科学, 2020, 41(4): 59-66.
- [38] 梁春辉, 李雨哲, 敖冉, 等. 牡蛎氨基酸螯合锌体外抗氧化作用研究[J]. 食品科技, 2016, 41(3): 270-274.
- [39] 郑英敏, 袁杨, 苏东晓, 等. 大豆多肽锌螯合物的制备工艺优化及其结构表征[J]. 食品工业科技, 2020, 41(14): 160-165.
- [40] XU Zi, FANG Yong, CHEN Yue, et al. Protective effects of Se-containing protein hydrolysates from Se-enriched rice against Pb²⁺-induced cytotoxicity in PC12 and RAW264.7 cells[J]. Food Chemistry, 2016, 202: 396-403.
- [41] 刘晓美, 李圆圆, 王升光, 等. 玉米肽螯合硒元素的制备工艺及其保肝作用研究[J]. 山东科学, 2019, 32(1): 29-37.
- [42] QIN Xiu-yuan, ZHANG Jiang-tao, LI Guo-ming, et al. Structure and composition of a potential antioxidant obtained from the chelation of pea oligopeptide and sodium selenite[J]. Journal of Functional Foods, 2020, 64: 103619.
- [43] 林栋, 孙倩, 马立志, 等. 核桃多肽螯合物制备工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 食品科技, 2019, 44(11): 302-307.
- [44] SAYRA N S S, GUARDADO-FÉLIX D, JANET A G U. Changes in digestibility of proteins from chickpeas (*Cicer arietinum* L.) germinated in presence of selenium and antioxidant capacity of hydrolysates [J]. Food Chemistry, 2019, 285: 290-295.
- [45] 张亚楠, 董旭然. 秋葵多糖提取及抗氧化性的研究进展[J]. 现代农村科技, 2019(10): 66-67.
- [46] 李超楠, 鹿保鑫, 王长远, 等. 响应面优化碎米蛋白水解及多肽抗氧化研究[J]. 中国食品添加剂, 2018(8): 82-89.
- [47] 王和涛, 丁德龙. 乌骨鸡多肽制备及其抗氧化活性研究[J]. 食品工业, 2017, 38(9): 15-17.
- [48] LU Xin, ZHANG Li-xia, SUN Qiang, et al. Extraction identification and structure-activity relationship of antioxidant peptides from sesame (*Sesamum indicum* L.) protein hydrolysate[J]. Food Research International, 2019, 116: 707-716.
- [49] RAMAK E, WILLIAM G W, APOLLINAIRE T. Peptidomic analysis of hydrolyzed oat bran proteins, and their in vitro antioxidant and metal chelating properties[J]. Food Chemistry, 2018, 279: 49-57.
- [50] 祁岩龙, 孙文敏, 孙丽娜. 核桃粕中多肽的酶法制备工艺[J]. 食品工业, 2019, 40(5): 46-50.
- [51] KARAMI Z, PEIGHAMBARDoust S H, HESARI J, et al. Antioxidant, anticancer and ACE-inhibitory activities of bioactive peptides from wheat germ protein hydrolysates[J]. Food Bioscience, 2019, 32: 100450.
- [52] FENG Yan-xia, RUAN Guo-rui, JIN Feng, et al. Purification, identification, and synthesis of five novel antioxidant peptides from Chinese chestnut (*Castanea mollissima* Blume) protein hydrolysates[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 92: 40-46.

- [53] 肖玉娟, 傅奇, 何少贵, 等. 蓝圆鲐多肽亚铁螯合物制备及其抗氧化性[J]. 食品工业, 2020, 41(2): 126-129.
- [54] CANABADY-ROCHELLE L L, SELMECZI K, COLLIN S, et al. SPR screening of metal chelating peptides in a hydrolysate for their antioxidant properties[J]. Food Chemistry, 2018, 239: 478-485.
- [55] 孔维宝, 杨树玲, 霍焕燃, 等. 油橄榄叶提取物的抑菌活性研究[J]. 中国油脂, 2020, 45(2): 95-100.
- [56] 孙秀秀. 大豆碱性多肽对大肠杆菌的抑菌机制及应用研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2016: 42-43.
- [57] 李敏晶, 孙蔷薇, 王旭燃, 等. 多棘海盘车多肽的抑菌活性研究[J]. 应用化工, 2017, 46(10): 2 073-2 076.
- [58] 张囡. 香菇柄多肽的制备、分离及其生物活性研究[D]. 西安: 西北大学, 2019: 3-5.
- [59] 吕诗文, 叶芳, 吴国辉, 等. 苦瓜抑菌作用的研究进展[J]. 农产品加工, 2020(1): 84-86.
- [60] 徐海花, 牛钟相, 秦爱建, 等. 细菌耐药性研究进展[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2010, 41(1): 156-160.
- [61] 郑晨, 何晓静, 菅凌燕. 细菌耐药性及特殊使用级抗菌药物使用情况分析[J]. 中国临床药理学杂志, 2018, 34(14): 1 700-1 702.
- [62] LIN Hui-min, DENG Shang-gui, HUANG Sai-bo. Antioxidant activities of ferrous-chelating peptides isolated from five types of low-value fish protein hydrolysates[J]. Journal of Food Biochemistry, 2015, 38(6): 627-633.
- [63] FANG Zheng, XU Liang-zong, LIN Yan-lan, et al. The preservative potential of Octopus scraps peptides-Zinc chelate against *Staphylococcus aureus*: Its fabrication, antibacterial activity and action mode[J]. Food Control, 2018, 98: 24-33.
- [64] 杨玉蓉, 李安平, 钟政昌, 等. 桃仁多肽螯合亚铁的抑菌活性及结构表征[J]. 食品科学, 2019, 40(5): 57-62.
- [65] 潘天齐, 何荣海, 徐军, 等. 莱籽多肽增强免疫力作用的研究[J]. 现代医学, 2016, 44(11): 1 605-1 608.
- [66] YUAN Biao, ZHAO Cong, CHENG Chen, et al. A peptide-Fe(II) complex from *Grifola frondosa* protein hydrolysates and its immunomodulatory activity[J]. Food Bioscience, 2019, 32: 100549.
- [67] 谈森焱. 小球藻酶解多肽的制备及其增强免疫力的功能研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2018: 7-9.
- [68] HUANG Sai-bo, LIN Hui-min, DENG Shang-gui. Study of anti-fatigue effect in rats of ferrous chelates including hairtail protein hydrolysates[J]. Nutrients, 2015, 7(12): 9 860-9 871.

(上接第 157 页)

- [18] 朱秀清, 王子玥, 李美莹, 等. 热处理对汉麻乳稳定性的影响及蛋白结构表征[J/OL]. 食品科学. (2020-04-28) [2020-07-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20200428.0858.005.html>.
- [19] 寇明钰. 花椒籽蛋白质分离提取及功能性质的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2006: 4-9.
- [20] 王震, 乔天磊, 霍乃蕊, 等. 植物叶蛋白提取方法及研究进展[J]. 山西农业科学, 2016, 44(1): 126-130.
- [21] 贾峰, 刘效谦, 王震磊, 等. 小麦粉蛋白质溶解性差异的韦恩分类研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2017, 38(1): 1-4, 11.
- [22] 宋鹏. 大豆蛋白质组成对其提取率的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2011: 5-7.
- [23] 肖连冬, 程爽, 李杰. 大豆分离蛋白起泡性和乳化性影响因素的研究[J]. 中国酿造, 2014, 33(4): 83-86.
- [24] 上官新晨, 陈锦屏, 蒋艳, 等. 籽粒苋蛋白质功能特性的理论研究 II: 籽粒苋蛋白质发泡性的理论研究[J]. 中国粮油学报, 2003(2): 40-42.
- [25] 迟玉杰, 赵英, 毋引子. 鸡蛋蛋白液起泡性的研究[J]. 中国家禽, 2017, 39(3): 1-5.
- [26] 赵维高, 刘文营, 黄丽燕, 等. 食品加工中蛋白质起泡性的研究[J]. 农产品加工(学刊), 2012(11): 69-72.
- [27] 王雪, 郭兴凤. 蛋白质乳化性研究进展[J]. 粮食加工, 2017, 42(1): 39-43.
- [28] 邓塔, 李军生, 阎柳媚, 等. 大豆蛋白乳化性的研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(2): 90-93.
- [29] 徐丽兰, 赵燕, 徐明生, 等. 食盐诱导的蛋黄凝聚行为研究进展[J]. 中国食品学报, 2019, 19(3): 317-325.

(上接第 164 页)

- [10] 李钰, 李雅雅, 王鑫玥, 等. 神经网络一遗传算法优化细菌拟青霉多糖超声提取工艺[J]. 吉林医药学院学报, 2019, 40(1): 15-17.
- [11] 郭新铭, 赖志荣. 天然冬虫夏草多糖的提取及其抗氧化活性研究[J]. 临床合理用药杂志, 2018, 11(15): 32-34.
- [12] 查昱, 张宗豪, 李秀璋, 等. PB 试验结合 BBD 响应面法优化冬虫夏草菌菌丝体多糖的提取工艺[J]. 中国食用菌, 2020, 39(6): 25-31.
- [13] 王斌, 连宾. 食药真菌多糖的研究与应用[J]. 食品与机械, 2005(6): 96-100.
- [14] 杜景东, 田凤娟, 陈培雄, 等. 云雾绿茶多糖提取方法的优化及 Seville 法除蛋白的工艺研究[J]. 中南药学, 2015, 13(12): 1 281-1 283.
- [15] LEE H G, JO Y, AMEER K. Optimization of green extraction methods for cinnamic acid and cinnamaldehyde from Cinnamon (*Cinnamomum cassia*) by response surface methodology[J]. Pubmed, 2018, 27(6): 1 607-1 617.
- [16] 池源, 王丽波. 苯酚-硫酸法测定南瓜籽多糖含量的条件优化[J]. 食品与机械, 2014, 30(1): 89-92.
- [17] 柳荫, 吴凤智, 陈龙, 等. 考马斯亮蓝法测定核桃水溶性蛋白含量的研究[J]. 中国酿造, 2013, 32(12): 131-133.