

植物来源金属离子螯合肽的研究进展

裴函哲^{1,2} 赵宏飞² 周家华³ 张柏林² 陈永浩¹

(1. 北京市农林科学院林业果树研究所, 北京 100093; 2. 北京林业大学生物科学与技术学院, 北京 100091;
3. 北京市农林科学院农产品加工与食品营养研究所, 北京 100097)

摘要: 矿物质元素缺乏会引起许多健康问题, 传统的金属元素补充剂存在许多不足, 食源性金属元素补充剂逐渐成为研究热点。植物源多肽在成本和原料来源等方面存在巨大优势, 与金属离子螯合形成的螯合肽兼具肽的生理活性与金属元素的功能特点, 是较为理想的营养补充剂, 展现出广阔的发展前景。文章收集了国内外的相关研究报道, 梳理了植物来源金属离子螯合肽的制备工艺、螯合机制和特点及其展现的生物活性等内容, 并展望了植物源金属离子螯合肽在基础研究、应用场景、产业转化方面的发展趋势及规模化应用前景。

关键词: 金属离子; 螯合; 植物源蛋白肽; 制备工艺; 螯合机制; 生物活性

Research progress on plant-derived metal ion chelating peptides

Pei Hanzhe^{1,2} Zhao Hongfei² Zhou Jiahua³ Zhang Bolin² Chen Yonghao¹

(1. Institute of Forestry and Pomology, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100093, China;
2. School of Biological Sciences and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100091, China; 3. Institute of Agri-food Processing and Nutrition, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: Mineral element deficiency can cause many health problems. Traditional metal element supplements have many shortcomings. Food-derived metal element supplements have gradually become a research hotspot. Plant-derived polypeptides have significant advantages in terms of cost and raw material sources. Chelating peptides formed by chelating metal ions with plant-derived polypeptides have the physiological activity of peptides and the functional characteristics of metal elements, which makes them relatively ideal nutritional supplements, showing broad development prospects. This paper collects relevant research reports at home and abroad, and sorts out the preparation process, chelation mechanism and characteristics, and biological activity of plant-derived metal ion chelating peptides. The paper provides an outlook on the development trend and large-scale application prospect of plant-derived metal ion chelating peptides in basic research, application scenarios, and industrial transformation.

Keywords: metal ions; chelation; plant-derived protein peptides; preparation process; chelation mechanism; biological activity

金属元素如钙(Ca)、锌(Zn)、铁(Fe)和铜(Cu)等在维持人体正常生理功能中发挥着重要作用, 参与了人体多种关键的生物化学过程, 包括骨骼和牙齿的形成、神经传导、凝血过程、免疫功能以及细胞代谢^[1-3]等, 金属元素的缺乏会导致骨质疏松、生长迟缓、贫血和免疫损伤^[1-3]等问题。传统的金属元素补充剂(如无机盐、氧化物等)存在溶解性差、消化吸收负担重、在胃肠道中生物利用度低

等局限性, 不利于长期应用^[4]。因此, 开发新型、高效且生物利用度高的金属元素补充剂已成为当前营养科学领域的研究热点。

在现有的膳食蛋白质来源中, 植物性来源在蛋白质供应中占主导地位(57%), 并且在维持环境稳定、满足更高消费者需求以及对抗蛋白质能量营养不良等方面占有持续上升的普及优势^[5]。植物源蛋白肽来源于天然植物

基金项目: 国家重点研发计划项目(编号: 2023YFD2201300)

通信作者: 张柏林(1963—), 男, 北京林业大学教授, 博士。E-mail: zhangbolin888@163.com

陈永浩(1979—), 男, 北京市农林科学院林业果树研究所副研究员, 博士。E-mail: cyh2010@126.com

收稿日期: 2025-03-27 **改回日期:** 2025-12-09

引用格式: 裴函哲, 赵宏飞, 周家华, 等. 植物来源金属离子螯合肽的研究进展[J]. 食品与机械, 2026, 42(7): 203-209.

Citation: Pei Hanzhe, Zhao Hongfei, Zhou Jiahua, et al. Research progress on plant-derived metal ion chelating peptides[J]. Food & Machinery, 2026, 42(7): 203-209.

蛋白如大豆、小麦、玉米^[6-8]等,原料来源丰富且成本低易获取,经过酶解或发酵等温和工艺制备而成,具有良好的生物相容性和低毒性。与化学合成的螯合剂相比,植物源金属螯合肽在人体内的代谢更为安全,不会产生有害的副产物,并且能与金属离子形成稳定的螯合物,显著提高金属离子在胃肠道中的溶解性和吸收率^[9]。除此之外,植物源蛋白肽本身具有多种生物活性,如抗氧化、降血压、抑菌^[10-12]等,为开发具有多重健康益处的产品提供可能,在食品、保健品和医药等领域前景广阔。文章拟对植物来源的金属离子螯合肽最新研究进展进行综述,总结植物源金属离子螯合肽的制备流程、螯合机制和特点及其展现的功能活性等,以期对金属离子螯合肽的开发和应用提供理论参考和技术支撑。

1 植物来源金属离子螯合肽的制备

金属离子螯合肽的螯合工艺方式主要是水相与固相两种合成途径。水相合成法是将多肽与金属离子按照一定比例混合在溶液中,通过水浴加热处理促进二者间的螯合反应,之后引入有机溶剂诱导螯合物析出,最终通过干燥步骤获得所需的金属离子螯合肽;固相合成法则直接采用多肽固态粉末与金属离子盐粉末进行物理混合,随后在固相状态下进行螯合反应,反应结束后,利用醇类溶剂进行析出处理,并对沉淀物进行干燥,从而制得金属离子螯合肽^[13]。

1.1 水相合成

水相合成法因其工艺流程简单、经济成本相对较低,成为制备金属离子螯合植源肽的主要方法。在螯合过程中,金属离子与植源性多肽的比例、pH、温度、时间等螯合条件会对螯合率产生重要影响。为确保特定金属离子与植源性多肽的有效结合,需根据实际需求调整并优化最佳的螯合工艺条件,Zhai等^[14]使用水相合成法将不同质量比的绿豆多肽与CaCl₂进行螯合,通过正交试验优化绿豆肽—钙螯合物(MBP-Ca)制备工艺,在最佳制备条件(pH 6,温度 45℃,时间 60 min,MBP/CaCl₂质量比 4:1,MBP质量浓度 20 mg/mL)下高效合成 MBP-Ca,钙螯合率高达 86.26%。此外,有研究表明,借助新型技术手段可以促进螯合进程并达到更好的螯合效果,刘畅等^[15]通过使用高压脉冲电场技术辅助制备大豆肽螯合钙,在电场强度 15 kV/cm、电场频率 1 200 Hz 的脉冲电场处理下,钙螯合率达 95.38%,电场诱导了多肽分子的极化和取向作用,增强了多肽分子间的相互作用和碰撞频率,使得多肽发生结构变化,同时降低了反应的活化能,有助于其与金属离子结合,进一步优化了植物源金属螯合肽的制备条件。

1.2 固相合成

固相合成技术在制备溶解性差或不溶的金属螯合肽的过程中展现出显著优势,目前普遍使用微波固相合成

技术以提升螯合反应转化率,利用微波辐射的极化作用破坏反应物分子间的氢键和其他弱相互作用,使反应物更容易接近并发生反应。为提升原料的利用率和螯合效果,常会对微波处理条件进行优化,李安平等^[16]在微波功率 460~610 W,微波固相反应时间 ≥ 1 min,气流温度 60~120℃的条件下将桃仁多肽粉末与亚铁盐粉末以 1:2~5:1 质量比混合反应,制备桃仁多肽亚铁螯合物。李玉珍等^[17]优化了花生肽与硫酸亚铁的微波辐射螯合工艺参数,最终的螯合率达到了 90.68%,验证了微波固相合成技术能够有效促进多肽与金属离子的螯合反应。

2 植物源金属螯合肽的螯合机制及影响因素

2.1 螯合机制

金属离子与多肽的螯合机制主要是作为配体的多肽通过其特定的供电子基团(主要是氨基和羧基上的氮、氧、硫原子)与金属中心离子在特定条件下形成配位键,从而构建成一个或多个稳定的螯合结构。在螯合过程中,因氧原子个数的不同而存在不同的螯合模式,如 Lin 等^[18]在研究 Fe²⁺螯合特性和提高 Fe²⁺螯合肽生物利用率的机制中发现,Fe²⁺能够以两种模式与肽链中的谷氨酸(Glu)残基进行螯合:①与 Glu9 残基羧基上的单个氧原子形成单齿螯合;②与相邻的 Glu8 和 Glu9 两个残基羧基上的两个氧原子共同形成双齿螯合模式。Liu 等^[19]在小麦麸质肽—钙螯合物的分析中,阐述了多肽羧基与 Ca²⁺之间的多种螯合模式。除了常见的单齿和双齿螯合外,还观察到一种桥联作用,即羧基上的两个氧原子分别与两个 Ca²⁺相互作用。此外,还存在一种 α 螯合模式,即多肽羧基上的一个氧原子同时与 Ca²⁺以及配体中的其他原子形成配位键。

2.2 螯合影响因素

通过对植物源蛋白螯合肽的结构进行鉴定分析,可以明确其螯合机制,常用的分析方法有:紫外—可见吸收光谱(UV-Vis)、傅里叶变换红外光谱(FTIR)、质谱分析(MS)、核磁共振(NMR)、圆二色谱(CD)和 X 射线衍射(XRD)等。不同原料来源的植物多肽与不同种类金属离子的螯合活性不同,这些差异主要与肽的相对分子质量大小、氨基酸组成以及肽链中特定氨基酸基团与残基的存在和性质有关。

2.2.1 肽的相对分子质量大小 肽的相对分子质量对肽与金属离子的螯合效果具有重要作用,研究普遍认为,相比于相对分子质量较大的多肽,较小相对分子质量的植源性多肽结构更简单灵活,更易与金属离子接近发生螯合作用,会呈现出更强的金属离子螯合能力。Liu 等^[20]发现,小麦胚芽中与钙结合能力强的肽的相对分子质量低于 2 000。Eckert 等^[21]研究了大麦蛋白水解物的金属离子

结合能力,发现低相对分子质量肽的混合物具有最佳的金属离子结合能力。虽然有研究表明一些相对分子质量大的植源性多肽也可以表现出良好的金属离子螯合能力,例如Lv等^[22]分析了不同相对分子质量的大豆多肽的钙结合能力,结果表明相对分子质量为10 000~30 000的肽段的钙结合能力更强,但这可能是因为大豆蛋白本身就含有大量与钙结合能力较强的谷氨酸和天冬氨酸。以上研究结果表明不同植物原料来源和不同相对分子质量的多肽在与金属离子结合时的螯合活性有所差异,在实践应用中仍需进行进一步的探索。

2.2.2 氨基酸的组成和序列 金属螯合肽的螯合活性和效果与肽的氨基酸组成及序列密切相关。某些氨基酸具有较强的螯合能力,如组氨酸(His)、半胱氨酸(Cys)、谷氨酸(Glu)、天冬氨酸(Asp)等。当肽中关键氨基酸比例较高时,其螯合能力通常也更强,Torres-Fuentes等^[23]发现来源于鹰嘴豆蛋白的含有20%~30% His的小肽组分较其他His低的组分有更高的铜螯合活性,且His含量与铁螯合活性呈正相关;Zhao等^[24]制备的新型核桃肽锌螯合物中Asp和Glu的含量约为27%,这些关键氨基酸的存在使得植源肽与金属离子的螯合效果进一步增强。除此之外,肽中特征氨基酸的位置和序列也是与金属螯合活性强弱的重要参考,An等^[25]使用质谱法鉴定并分析了大豆肽钙螯合物中特征氨基酸的位置分布,当Asp位于N末端附近,或Glu靠近末端时,或者在连续Asp或Glu的情况下,肽和钙离子之间的结合速度、概率和强度优于其他位置。Bao等^[26]通过高效液相色谱—电喷雾电离—飞行时间质谱法表征,从葵花籽肽和花生肽中鉴别到与Ca²⁺螯合最强的是以连续谷氨酸(“E”)和谷氨酰胺(“Q”)为主要氨基酸的特征序列,并且具有低相对分子质量,如EEEQQQ、EQ-QQQ-QQ、QQ-QQQQ等。氨基酸的组成和序列在一定程度上影响着多肽与金属离子的螯合活性,通过利用其展现的生物规律可定向合成高螯合率的肽段,实现该领域应用的更大突破。

2.2.3 特定基团和残基 研究表明,肽中特定的氨基酸残基及其基团(如组氨酸的咪唑环、半胱氨酸的巯基、谷氨酸和天冬氨酸的羧基等)是金属离子结合的关键位点。Bu等^[27]使用傅里叶变换红外光谱分析出Ca²⁺与花生肽的螯合位点为氨基酸残基上的羧基和氨基,门德盈等^[28]利用紫外—可见吸收光谱、傅里叶变换红外光谱分析技术,发现超声波和微波处理显著增加了核桃粕蛋白肽的氨基、羰基、羧基、酰胺键及羧酸盐基团等官能团的数量,这些官能团作为Ca²⁺的有效结合位点,进而增强了核桃粕蛋白肽对钙离子的螯合能力。碱性氨基酸His的侧链基团带有电荷,能够与金属离子发生静电相互作用,咪唑基团可以提供孤对电子与金属离子结合,使其具有较高的螯合活性,Zhang等^[29]使用红外光谱分析发现绿豆中的

咪唑基团的富N原子促进了与Fe²⁺的螯合;酸性氨基酸Glu和Asp的羧基是金属离子的良好结合位点,能够与金属离子形成稳定的配位键,冷雨佳^[30]使用分子动力学模拟发现合成的大豆肽链中位于Glu侧链的羧基常参与和Zn²⁺的螯合过程。表1列出了部分植物来源螯合肽的螯合位点及关键氨基酸,可更直观地看到关键氨基酸残基和基团与金属螯合位点的潜在关系。

综上所述,随着现代结构分析技术的不断突破,不同植物原料和金属离子来源螯合肽的螯合机制逐渐被揭示,然而对于金属螯合肽的构效关系、螯合的具体位点和螯合时的动态变化等机理仍需进行更细致深入的探索。

3 金属离子与植源肽螯合物的生物活性

3.1 提高矿物质元素生物利用度

3.1.1 克服矿物质吸收障碍 在胃肠道的特定pH环境中,许多矿物质如Fe²⁺、Ca²⁺、Zn²⁺等容易与膳食中的植酸、草酸、膳食纤维等形成不溶性复合物而沉淀。螯合肽通过与矿物质形成可溶性的、稳定的螯合物,保护矿物质不被这些抑制剂结合沉淀,使其保持溶解状态。除此之外,螯合肽通过与目标矿物质形成高亲和力、高特异性的复合物,减少与消化道中竞争性阳离子的非特异性结合,从而确保目标矿物质的有效输送。目前探索螯合肽在促进矿物质元素消化吸收途径和生物利用度方面的评价方法包括采用体外模拟消化、Caco-2细胞的体外模型研究以及基于动物模型的体内试验^[35]。刘凤茹^[36]通过体外模拟胃肠道消化试验研究了麦胚蛋白肽螯合钙的稳定性,发现经胃肠消化后钙的释放率、溶解度和透析率能保持较高水平,且在植酸、草酸和膳食纤维等抑制剂的影响下,麦胚肽—钙络合物仍具有较高的生物利用度。

3.1.2 植物源多肽的天然优势 植源性多肽的相对分子质量相对较小、分子结构较为简单稳定,使其能以完整的形态被小肠上皮细胞直接快速吸收,进入血液循环系统。与无机盐或有机酸来源的金属螯合物相比,植物源螯合肽作用更温和,能够保护胃肠道不被刺激,具有更好的溶解性和稳定性,同时植源肽具有天然活性,能促进金属元素和活性肽的双重吸收和作用^[37]。肽—金属螯合物被人体摄入后会经过消化系统的破坏,通过体外模拟消化试验模拟人体胃液的酸性环境和胃蛋白酶的作用及肠道的碱性环境和胰蛋白酶、糜蛋白酶等消化酶的作用,可探究金属螯合肽在消化阶段的稳定性变化。刘春燕^[38]对所制备的西瓜籽肽钙螯合物进行体外模拟消化和Caco-2细胞转运试验,结果显示西瓜籽肽钙螯合物经胃、胰蛋白酶消化后钙保留率仍保持较高水平,螯合物的钙生物利用率显著高于CaCl₂。

上述研究结果证明,植物源蛋白可作为生产金属螯合肽的良好来源,许多金属离子在与植物源蛋白肽螯合

表 1 部分植物来源金属螯合肽螯合位点及关键氨基酸

Table 1 Chelating sites and key amino acids of plant-derived metal chelating peptides				
金属螯合肽	植物来源蛋白原料	金属来源	螯合位点	关键氨基酸
钙离子螯合肽	小麦 ^[31]	CaCl ₂	肽中的羧基的氧原子、酰胺基的氮原子	天冬氨酸、苏氨酸和酸性氨基酸
	绿豆 ^[32]	CaCl ₂	肽中的羧基、氨基和肽键的氧原子和氮原子	谷氨酸、天冬氨酸
	小麦 ^[20]	CaCl ₂	羧基上的氨基氮原子和氧原子	谷氨酸、赖氨酸、天冬氨酸和甘氨酸
	花生 ^[27]	CaCl ₂	肽中的氨基和羧基	酸性氨基酸和精氨酸
	核桃 ^[28]	CaCl ₂	肽中的氨基、羧基、羧基、酰胺键及羧酸盐基团	芳香族氨基酸
锌离子螯合肽	木瓜籽 ^[33]	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	—NH、—CH ₂ 、C=O、C—N 和—COOH	谷氨酸、天冬氨酸、组氨酸、赖氨酸、精氨酸
	核桃 ^[24]	ZnSO ₄	羧基、氨基、肽键	天冬氨酸、谷氨酸
	油棕仁 ^[34]	ZnSO ₄	Glu 残基中的羧基、Pro 残基中的 α-氨基以及 EVPQAYIP 的酰胺键	谷氨酸、脯氨酸
亚铁离子螯合肽	花生 ^[14]	FeCl ₂ ·4H ₂ O	氨基酸主链氧原子、侧链氧原子和羧基氧原子	谷氨酸、精氨酸、甘氨酸、苏氨酸、苯丙氨酸和赖氨酸
	绿豆 ^[29]	FeCl ₂ ·4H ₂ O	氨基、羧基、咪唑基等基团	赖氨酸、精氨酸、天冬氨酸、谷氨酸

后能够表现出良好的稳定性,经模拟胃肠消化后能保持较高的金属活性和生物功能,并且是吸收和输送金属元素的良好途径,为有机金属补充剂的开发提供更多方向。

3.2 提高功能活性

植物源多肽在经生物酶解后,会释放出许多生物活性功能成分,植物来源的螯合肽不仅能够有效提升矿物质元素在生物体内的利用率,同时,这些与金属离子结合形成的螯合物还保留了多种功能特性,包括抗氧化能力、血压调节作用以及抑菌活性等。

3.2.1 抗氧化活性 抗氧化活性是生物活性肽非常重要的活性之一,许多研究证明在经过与金属离子螯合后,螯合物的抗氧化活性往往会更强。Fan 等^[39]制备了一种新型低相对分子质量核桃肽铁(WP-Fe)螯合物并对自由基清除能力进行测定,发现 WP-Fe 螯合物的自由基清除能力显著高于 WP。郑义等^[40]优化工艺制备银杏肽锌(Zn-GBP)螯合物,所制得的 Zn-GBP 具有较好的 DPPH 自由基和 ABTS⁺ 自由基清除能力,其 EC₅₀ 值分别为 101.0、83.6 mg/L,显示出较强的还原能力,此外,与银杏肽相比, Zn-GBP 在体外试验中也展现出了更高的抗氧化活性。这些研究结果表明,金属螯合反应可能会提高植物源肽的供氢能力,因而在一定程度上提高植源肽的抗氧化能力。

3.2.2 降血压活性 ACE 抑制肽是生物活性肽的一种,其可以抑制致使血压升高的血管紧张素转换酶(ACE 酶)的活性从而产生降压效果,许多研究表明,在与金属离子螯合后螯合物的降压活性仍能保持理想水平。Qu 等^[41]开发出新型钙螯合玉米醇溶蛋白肽(Ca-ZP)并对其生物活性进行测定,发现螯合前后 ZP 和 Ca-ZP 复合物的 ACE 抑制活性没有显著差异, Ca-ZP 复合物仍具有较高的 ACE

抑制能力。Zhang 等^[34]从脱脂油棕仁球蛋白中鉴定出具有 ACE 抑制活性和锌螯合能力的肽段,在模拟胃肠道消化试验中发现该肽段增强了肠道中锌的稳定性,并在自发性高血压大鼠试验中发挥了抗高血压作用。这些研究结果表明,金属螯合反应不会对植源性肽的 ACE 抑制活性产生负面影响,螯合后的植源性金属螯合肽的降压活性仍能够保持较为稳定的状态。

3.2.3 抑菌活性 许多植物源多肽具有抑菌活性,在与金属离子结合成为螯合物后,仍能保持较好的抑菌作用。杨玉蓉等^[42]对不同相对分子质量大小的桃仁多肽及多种植物多肽与亚铁离子、锌离子、钙离子和镁离子形成的螯合物进行了抑菌活性的对比分析,研究结果显示,抑菌活性最强的金属螯合多肽为相对分子质量<5 000 的桃仁多肽螯合亚铁和小麦多肽螯合亚铁。这些螯合物对大肠杆菌的最小抑菌质量浓度(MIC)均为 5.0 mg/mL,对金黄色葡萄球菌的 MIC 分别为 2.5、5.0 mg/mL。蒲传奋等^[43]制备了玉米醇溶蛋白肽—钙螯合物,并对此螯合物的抗菌性能进行了探究,研究结果显示,该肽钙螯合物通过破坏细菌细胞膜的完整性影响金黄色葡萄球菌的正常生长曲线,对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌均具有明显的抑制作用。

3.2.4 其他活性功能 除上述活性功能外,植物源金属离子螯合肽对其他生物活性功能如学习记忆、降血糖等也具有较好的效果。Zhang 等^[44]的研究采用了成年雄性小鼠来构建阿尔茨海默病模型。研究结果显示,松子肽与锌的螯合物对小鼠的学习能力、记忆功能、大脑健康状况以及肠道平衡均有改善作用。这一发现为探究活性肽与金属离子螯合物在阿尔茨海默病中的潜在作用机制,

以及为相关药物的研发提供了科学依据。Zhao等^[45]通过锌配位研究来探索核桃衍生肽的降血糖特性,发现相较于未经螯合的肽,锌与肽形成的螯合物在 α -葡萄糖苷酶抑制活性和 α -淀粉酶抑制活性方面有所增强。综上所述,植物来源金属离子螯合肽在保持肽的生物活性功能,增强复合功能用途方面具有重要意义。

4 植物源金属离子螯合肽的产品开发

植物源螯合肽因其来源丰富、经济成本低及生物利用率高,适宜作为食源性矿物质元素的补充剂,用于相关产品的研制。目前,关于金属离子与植源肽的螯合物产品开发已有初步探索,例如,张兆中^[46]开发了核桃多肽—亚铁螯合物抗氧化活性饮料,并优化了产品工艺条件。江铁群^[47]研制出荷载异黄酮的功能化大豆肽钙螯合颗粒与微胶囊制品,旨在增强活性成分在胃肠道环境中的稳定性,同时改良不溶性肽以减少苦味,优化颗粒的物理化学特性,拓宽其应用范围。其中,金属离子螯合肽产品因肽在酶解过程中产生苦味和不同金属离子带来的呈味特性的变化影响产品风味等问题需持续关注,在食品领域的后续研究仍需在金属离子螯合肽产品深度开发利用等方面不断加强。除此之外,以植物源金属离子螯合肽为主要成分开发的产品需通过体外及体内试验进行金属离子螯合能力的功能验证和毒理学、致敏性等安全性评估,以确保符合产品安全标准和功能稳定性等要求。目前对相关产品的法规不够明确、安全性存在争议,且市场接受度较低,未来仍需在与相关法规建立、第三方安全评估认证和市场宣传等方面加大力度,为消费者提供更多健康、安全的食品选择。

5 总结与展望

随着植物资源的深度开发与利用,植物源螯合肽作为功能食品领域的研究热点,已展现出巨大的应用潜力。基于当前研究基础已明确以下关键进展,金属离子与肽链中氨基、羧基等官能团的配位化学机制已初步阐明,但缺少对动态螯合过程的深度解析和多金属离子协同增效机制的探索;植物源螯合肽兼具植源肽的营养特性与金属离子的功能强化效应,在抗氧化、矿物吸收调控等方面表现出协同效应,未来可从构建多组学联用评价体系着手,解析其分子作用网络,开发纳米递送系统等以提升生物利用度。

展望未来,该领域呈现多重发展趋势:基础研究纵深化,通过多学科交叉(如计算化学、合成生物学)揭示构效关系,指导理性设计多功能复合螯合物;应用场景多元化,从功能食品向医药载体与精准营养和个性化医疗等领域拓展;产业化加速化,依托工艺优化与设备创新突破产业化瓶颈,建立标准化技术体系,完善相关产品风味及安全评估等问题,推动其在健康产业中的规模化应用。

综上所述,金属离子螯合植源肽作为一种新型的生物活性物质,具有广阔的应用前景和发展潜力,随着相关技术的不断突破和市场需求的持续增长,植物源金属离子螯合肽有望突破传统生物活性物质的性能边界,在未来实现规模化生产,为健康产业和可持续发展做出重要贡献。

参考文献

- [1] Suzuki Y, Landowski C P, Hediger M A. Mechanisms and regulation of epithelial Ca^{2+} absorption in health and disease[J]. *Annual Review of Physiology*, 2008, 70: 257-271.
- [2] Singh P, Prasad S. A review on iron, zinc and calcium biological significance and factors affecting their absorption and bioavailability[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2023, 123: 105529.
- [3] Guo L D, Harnedy P A, Li B F, 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.
- [4] 刘凌云. 国内外多肽金属离子螯合物的研究进展[J]. *化工设计通讯*, 2023, 49(8): 32-34.
Liu L Y. Research progress in peptide metal ion chelates at home and abroad[J]. *Chemical Engineering Design Communications*, 2023, 49(8): 32-34.
- [5] Langyan S, Yadava P, Khan F N, et al. Sustaining protein nutrition through plant-based foods[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 8: 772573.
- [6] Da Silva Crozatti T T, Miyoshi J H, Tonin A P P, et al. Obtaining of bioactive di- and tripeptides from enzymatic hydrolysis of soybean meal and its protein isolate using Alcalase® and Neutrase®[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2023, 58(3): 1 586-1 596.
- [7] Du K, Tian S Q, Chen H, et al. Application of enzymes in the preparation of wheat germ polypeptides and their biological activities[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 943950.
- [8] 李云亮, 王晓静, 阮思煜, 等. 玉米多肽制备方法及其功能性研究进展[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(2): 434-441.
Li Y L, Wang X J, Ruan S Y, et al. Research progress on preparation and functional activity of corn polypeptides[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(2): 434-441.
- [9] 乔虹, 黎松松, 周南希, 等. 海洋来源金属离子螯合肽研究进展[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(1): 368-377.
Qiao H, Li S S, Zhou N X, et al. Research progress in metal ion chelated peptides of marine sources[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(1): 368-377.
- [10] 陈卓, 秦丹, 李先奇. 植物蛋白源抗氧化肽的研究进展[J]. *中国食物与营养*, 2012, 18(4): 37-39.
Chen Z, Qin D, Li X Q. Research on antioxidant peptide from plant protein[J]. *Food and Nutrition in China*, 2012, 18(4):

- 37-39.
- [11] Meinschmidt P, Schweiggert-Weisz U, Eisner P. Soy protein hydrolysates fermentation: effect of debittering and degradation of major soy allergens[J]. LWT-Food Science & Technology, 2016, 71: 202-212.
- [12] 阮晓慧, 韩军岐, 张润光, 等. 食源性生物活性肽制备工艺、功能特性及应用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(6): 248-253.
- Ruan X H, Han J Q, Zhang R G, et al. Progress in the preparation, functional properties and applications of food-derived bioactive peptides[J]. Food and Fermentation Industry, 2016, 42(6): 248-253.
- [13] 周莹, 石景, 邹烨, 等. 食源性肽铁螯合物研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(14): 418-425.
- Zhou Y, Shi J, Zou Y, et al. Research progress on iron chelates of foodborne peptides[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(14): 418-425.
- [14] Zhai W L, Lin D, Mo R S, et al. Process optimization, structural characterization, and calcium release rate evaluation of mung bean peptides-calcium chelate[J]. Foods, 2023, 12(5): 1 058.
- [15] 刘畅, 肖涵波, 李方杰, 等. 高压脉冲电场技术制备大豆肽螯合钙[J]. 食品安全质量检测学报, 2015(6): 2 138-2 144.
- Liu C, Xiao H B, Li F J, et al. Preparation of soybean protein hydrolysates chelating calcium with pulses electric field technology[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2015(6): 2 138-2 144.
- [16] 李安平, 杨玉蓉, 钟政昌, 等. 一种固体脂质桃仁多肽亚铁螯合物纳米颗粒及其制备方法: CN201710844170.1[P]. 2020-05-08.
- Li A P, Yang Y R, Zhong Z C, et al. A solid lipid peach kernel polypeptide ferrous chelate nanoparticle and its preparation method: CN201710844170.1[P]. 2020-05-08.
- [17] 李玉珍, 肖怀秋, 姜明姣, 等. 响应面优化微波固相合成花生肽亚铁金属配位整合工艺[J]. 中国油脂, 2017, 42(9): 38-43.
- Li Y Z, Xiao H Q, Jiang M J. Optimization of microwave solid-phase synthesis of peanut peptide-ferrous metal coordination chelating technology by response surface methodology[J]. China Oils and Fats, 2017, 42(9): 38-43.
- [18] Lin S T, Hu X, Yang X Q, et al. GLPGPSGEEGKR: Fe²⁺ chelating characterization and potential transport pathways for improving Fe²⁺ bioavailability in Caco-2 cells[J]. Food Bioscience, 2022, 48: 101806.
- [19] Liu W Y, Wu H S, Liu R, et al. Structural identification, stability and combination mechanism of calcium-chelating wheat gluten peptides[J]. International Journal of Food Engineering, 2024, 20(5): 303-313.
- [20] Liu F R, Wang L, Wang R. Calcium-binding capacity of wheat germ protein hydrolysate and characterization of peptide-calcium complex[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(31): 7 537-7 544.
- [21] Eckert E, Bamdad F, Chen L. Metal solubility enhancing peptides derived from barley protein[J]. Food Chemistry, 2014, 159: 498-506.
- [22] Lv Y, Bao X L, Yang B C, et al. Effect of soluble soybean protein hydrolysate-calcium complexes on calcium uptake by caco-2 cells[J]. Journal of Food Science, 2008, 73(7): H168-H173.
- [23] Torres-Fuentes C, Alaiz M, Vioque J. Iron-chelating activity of chickpea protein hydrolysate peptides[J]. Food Chemistry, 2012, 134(3): 1 585-1 588.
- [24] Zhao S B, Wang L, Liang J Y, et al. Preparation, characterization and microencapsulation of walnut (*Juglans regia* L.) peptides-zinc chelate[J]. Journal of Food Science, 2024, 89(9): 5 618-5 632.
- [25] An J L, Wang Y M, Li W H, et al. Evaluating the capability of soybean peptides as calcium ion carriers: a study through sequence analysis and molecular dynamics simulations[J]. RSC Advances, 2024, 14(22): 15 542-15 553.
- [26] Bao X L, Yuan X Y, Feng G X, et al. Structural characterization of calcium-binding sunflower seed and peanut peptides and enhanced calcium transport by calcium complexes in Caco-2 cells[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(2): 794-804.
- [27] Bu G H, Zhao X L, Wang M L, et al. Identification of calcium chelating peptides from peanut protein hydrolysate and absorption activity of peptide - calcium complex[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2024, 104(11): 6 676-6 686.
- [28] 门德盈, 王增丽, 项全燕, 等. 超声波、微波预处理对核桃粕蛋白肽钙螯合能力、结构及稳定性的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(8): 193-201.
- Men D Y, Wang Z L, Xiang Q Y, et al. Effects of ultrasonic and microwave pretreatments on calcium chelating capacity, structure and stability of walnut meal protein peptides[J]. Food Science, 2024, 45(8): 193-201.
- [29] Zhang Y J, Ding X J, Li M Q. Preparation, characterization and *in vitro* stability of iron-chelating peptides from mung beans[J]. Food Chemistry, 2021, 349(1): 129101.
- [30] 冷雨佳. 大豆肽锌螯合物的制备、螯合机理及其生物活性研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2022: 43-47.
- Leng Y J. Study on preparation, chelation mechanism and biological activity of soybean peptide zinc chelates[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2022: 43-47.
- [31] Wang L, Ding Y, Zhang X, 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.
- [32] Bu G H, Zhai G H, Zhao X L, et al. Isolation, identification, and chelation mechanism of ferrous-chelating peptide from

- peanut protein hydrolysate[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2024, 104(15): 9 368-9 378.
- [33] 邓叶俊, 黄立新, 张彩虹, 等. 木瓜籽肽—锌螯合物的制备、结构表征及稳定性研究[J]. *林产化学与工业*, 2023, 43(5): 73-80.
- Deng Y J, Huang L X, Zhang C H, et al. Preparation, structural characterization and stability of Chinese quince seed peptide-zinc chelate[J]. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2023, 43(5): 73-80.
- [34] Zhang L L, Pan D, Shao L H, et al. Oil palm kernel globulin antihypertensive peptides: isolation and characterization, ACE inhibition mechanisms, zinc-chelating activity, security and stability[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2023, 14: 1225256.
- [35] 赵梓月, 王思远, 廖森泰, 等. 多肽螯合钙的研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(5): 200-206.
- Zhao Z Y, Wang S Y, Liao S T, et al. Progress in research on peptide chelated calcium[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(5): 200-206.
- [36] 刘凤茹. 麦胚蛋白聚集行为及其钙离子螯合肽的制备与评价[D]. 无锡: 江南大学, 2014: 53-58.
- Liu F R. The aggregation behavior of wheat germ protein and the preparation and evaluation of calcium chelating peptides [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014: 53-58.
- [37] 秦修远, 刘文颖, 张静波, 等. 豌豆低聚肽螯合物的稳定性研究[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(2): 74-79.
- Qin X Y, Liu W Y, Zhang J B, et al. Stability of selenium-chelating pea oligopeptide[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(2): 74-79.
- [38] 刘春燕. 西瓜籽肽与钙螯合物的制备及其功能特性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022: 52-58.
- Liu C Y. Preparation and functional properties of watermelon seed peptide and calcium chelate[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022: 52-58.
- [39] Fan C Z, Wang X T, Song X W, et al. Identification of a novel walnut iron chelating peptide with potential high antioxidant activity and analysis of its possible binding sites[J]. *Foods*, 2023, 12(1): 226.
- [40] 郑义, 李诗颖, 李闯, 等. 银杏肽锌螯合物的制备、体外消化及抗氧化活性分析[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(17): 420-427.
- Zheng Y, Li S Y, Li C, et al. Preparation, in vitro gastrointestinal digestion and antioxidant activity of ginkgo biloba peptides-zinc chelate[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(17): 420-427.
- [41] Qu W J, Li Y H, Xiong T, et al. Calcium-chelating improved zein peptide stability, cellular uptake, and bioactivity by influencing the structural characterization[J]. *Food Research International*, 2022, 162(Pt A): 112033.
- [42] 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.
- Yang Y R, Li A P, Zhong Z C, et al. Antibacterial activity and structural characterization of peach kernel peptide-ferrous chelate[J]. *Food Science*, 2019, 40(5): 57-62.
- [43] 蒲传奋, 唐文婷. 玉米醇溶蛋白肽钙螯合物的制备及其抑菌性能研究[J]. *食品科技*, 2015, 40(12): 246-250.
- Pu C F, Tang W T. Preparation and antibacterial properties of zein peptide-calcium chelate[J]. *Food Science and Technology*, 2015, 40(12): 246-250.
- [44] Zhang Z, Sun J J, Li Y X, et al. Ameliorative effects of pine nut peptide-zinc chelate (Korean pine) on a mouse model of Alzheimer's disease[J]. *Experimental Gerontology*, 2023, 183: 112308.
- [45] Zhao F R, Hou W Y, Guo L X, et al. Novel strategy to the characterization and enhance the glycemic control properties of walnut-derived peptides *via* zinc chelation[J]. *Food Chemistry*, 2024, 441: 138288.
- [46] 张兆中. 核桃多肽—亚铁螯合物的制备及其功能性饮料的开发[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2023: 59-63.
- Zhang Z Z. Preparation of polypeptide-ferrous chelate from walnut and development of functional beverage[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2023: 59-63.
- [47] 江轶群. 功能性大豆肽基纳米颗粒的钙离子螯合及微囊化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022: 62-66.
- Jiang Y Q. Calcium chelation and microencapsulation of functional soybean peptide-based particles[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022: 62-66.