

竹笋蛋白的生理活性、提取及应用研究进展

戴娜娜¹ 陈 军^{1,2} 帅希祥³ 韩嘉龙¹ 戴涛涛^{1,2}

(1. 南昌大学食品科学与资源挖掘全国重点实验室, 江西 南昌 330047; 2. 江西南大国创院食品科技有限公司, 江西 南昌 330200; 3. 中国热带农业科学院南亚热带作物研究所, 广东 湛江 524091)

摘要:近年来,植物蛋白因其来源广泛、营养价值高、价格低廉、环境污染小等优点成为健康食品原料。竹笋蛋白资源丰富,氨基酸组成平衡,具有良好的溶解性、持油性、发泡性、抗氧化活性和抗肿瘤活性等,在预防治疗心血管、癌症等疾病上发挥着重要作用。然而,在传统加工模式下竹笋从采收到产品会产生大量不可食用的副产物且被丢弃,而且竹笋复杂的高纤维结构也严重阻碍了竹笋蛋白的提取。文章综述了竹笋蛋白的提取方法、生理活性及应用等研究进展,重点总结了竹笋蛋白的现有提取方法的优缺点,并指出了未来竹笋蛋白的研究挑战。

关键词:竹笋;蛋白;提取方法;生理活性;应用

Research progress on physiological activities, extraction, and applications of bamboo shoot protein

DAI Nana¹ CHEN Jun^{1,2} SHUAI Xixiang³ HAN Jialong¹ DAI Taotao^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Food Science and Resources, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330047, China; 2. International Institute of Food Innovation Co., Ltd., Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330200, China; 3. Institute of Subtropical Crops, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Zhanjiang, Guangdong 524091, China)

Abstract:In recent years, plant proteins have become highly sought-after ingredients in health foods due to their wide range of sources, high nutritional value, low cost, and minimal environmental pollution. Bamboo shoot protein is abundant in resources and features a well-balanced amino acid composition. It possesses good solubility, oil-holding capacity, foaming ability, antioxidant activity, and anti-tumor activity, playing a significant role in the prevention and treatment of cardiovascular diseases, cancer, and other illnesses. However, under the conventional processing model from harvesting to final product, a large quantity of inedible by-products is discarded, and the complex high-fiber structure of bamboo shoots severely hinders protein extraction. This article reviews the research progress on the extraction methods, physiological activities, and applications of bamboo shoot protein, with a focus on summarizing the advantages and disadvantages of existing extraction techniques, and points out the future research challenges in this field.

Keywords: bamboo shoot; protein; extraction methods; physiological activities; applications

蛋白质是机体细胞重要组成成分,在维持机体正常新陈代谢和各类物质运输中发挥着重要作用。全球蛋白质资源主要来源于动物和植物。然而动物蛋白的生产会造成耕地和淡水资源减少、生物多样性丧失、人畜共患疾病的传播等危害^[1]。近年来,全球消费者对植物性饮食的需求显著提升,以植物蛋白为代表的食品功能成分因资

源丰富、成本低廉、满足素食主义者需求、可持续性等优点受到了广泛的关注^[2],如大米蛋白因低致敏性、高消化率等优点常被应用于婴幼儿配方奶粉及其水解产物可作为天然抗氧化剂^[3]。

竹笋是一种富含蛋白质的植物性食物,蛋白干基含量可达 21.1%~25.8%^[4]。然而,竹笋含水量高、保质期短,

基金项目:江西省“双千计划”创新领军人才长期(青年)项目(编号:jxsq2023101076)

通信作者:戴涛涛(1991—),男,南昌大学助理研究员,博士。E-mail:ncubamboo@163.com

收稿日期:2024-10-16 **改回日期:**2025-06-20

引用格式:戴娜娜,陈军,帅希祥,等. 竹笋蛋白的生理活性、提取及应用研究进展[J]. 食品与机械, 2025, 41(11): 192-198.

Citation:DAI Nana, CHEN Jun, SHUAI Xixiang, et al. Research progress on physiological activities, extraction, and applications of bamboo shoot protein[J]. Food & Machinery, 2025, 41(11): 192-198.

在加工过程中剔除的笋衣、笋头和笋渣等副产物约占原料的50%~70%^[5],常作为垃圾焚烧或者丢弃处理^[6],从而造成大量竹笋资源浪费。有研究^[7]表明,竹笋加工副产物中的主要营养素与竹笋原料并无显著性差异。竹笋及其加工副产物均是蛋白质的良好来源^[8]。竹笋蛋白中氨基酸种类十分丰富。徐圣友等^[9]对9种竹笋蛋白中的氨基酸进行分析发现,竹笋蛋白中有17种氨基酸,必需氨基酸含量普遍高于常见的蔬菜,其中竹笋中酪氨酸含量占总氨基酸的比值高达57%~67%^[10]。竹笋蛋白根据在不同溶剂中溶解度差异又可以分为白蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和碱溶蛋白。杨金来等^[11]采用Osborne分级法从毛竹笋中分离出这4种竹笋蛋白的得率分别为1.42%,0.33%,0.11%,0.12%,4种蛋白氨基酸组成差异不大,均含有除色氨酸以外的人体必需氨基酸。Sayanika等^[8]通过凝胶电泳分析了多种可食用竹笋的蛋白质组成,发现其相对分子质量主要在15 500~20 100和29 000~66 500范围内。不同品种的竹笋蛋白组成也存在差异,雷竹笋以碱性蛋白为主,而毛竹笋中酸性蛋白更多^[12]。此外,竹笋蛋白及其肽具有多种生物活性,如降血压^[13]、抗氧化^{[14]25-26}、抗菌^[15]、抗肿瘤^[16-17]等。这些作用使得竹笋蛋白在食品和保健品等领域具有广泛的应用前景。

尽管竹笋蛋白是一种优质蛋白质来源,但目前对竹笋蛋白质的研究并不深入,采用传统提取方法难以获取高质量的竹笋蛋白,新的绿色提取技术尚未应用于竹笋蛋白;其次,竹笋蛋白的功能性质探索不够全面以及发挥生理活性机理并不明确,这将阻碍其作为优质蛋白在食品工业中的应用。因此,对现有竹笋蛋白的提取方法、生理活性以及应用进行全面概述,以期对竹笋蛋白深入研究、工业化生产以及高价值利用提供思路和参考。

1 竹笋蛋白的提取

从植物中提取蛋白的方法可以分为传统方法和新型绿色提取技术。传统方法主要是利用有机溶剂、酸、碱、盐等来提取蛋白质,这种方法存在提取率低、提取时间长、污染环境等缺点^[1]。新型绿色提取技术则具有高效、环保、经济的优势^[1],如超声波辅助提取、脉冲电场辅助提取、亚临界水萃取、低共熔溶剂法等。表1总结了现有竹笋蛋白提取方法。

1.1 有机溶剂法

有机溶剂法主要是通过破坏蛋白质表面的水化膜和降低溶液的介电常数,使蛋白质表面相同电荷排斥力减小,从而沉淀蛋白质^[24]。其主要用于提取一些不溶于水、酸碱、盐溶液的蛋白质。常用于提取蛋白质的有机溶剂有丙酮、乙醇、异丙醇等^[25]。杨金来等^[26]用改良三氯乙酸-酚法提取建瓯白笋蛋白,提取率为2.23%。杨慧敏

等^[27]在构建勃氏甜龙笋蛋白双向电泳体系时,发现用三氯乙酸/丙酮法提取勃氏甜龙笋总蛋白得率要高于改良三氯乙酸-酚法,且提取出的蛋白种类更多。这可能由于后者提取步骤更加繁琐,导致蛋白损失较多。有机溶剂法操作复杂、成本较高且会残留有机溶剂,在大规模提取蛋白质的研究中受到较大的限制。

1.2 碱溶酸沉法

碱溶酸沉法是提取植物蛋白的传统方法^[28]。它主要是利用植物蛋白在碱性条件下溶解度大,而在等电点(pH 4~5)条件下溶解度最低的原理提取蛋白质。林倩^{[18]10-17}在 $m_{\text{竹笋}}:V_{\text{超纯水}}=1:4$ 、碱溶pH为9、提取温度45℃、酸沉pH为4.2的条件下得到纯度为57.52%的竹笋蛋白。Lv等^[29]采用响应面法得到毛竹笋蛋白碱溶酸沉法的最佳提取工艺。当 $m_{\text{竹笋}}:V_{\text{超纯水}}=1:32.24$ 、碱溶pH为12、提取温度为46.12℃、提取时间为20 min时,竹笋蛋白理论得率最大为 $(10.77\pm 2.28)\%$ 。Xiao等^[20]对比了碱溶酸沉法、盐提法和磷酸盐辅助乙醇沉淀法对竹笋蛋白的影响,发现碱溶酸沉法提取竹笋蛋白得率最高,为8.60%。此法操作简单,成本较低,是大规模工业化生产蛋白的主要方法^[30]。然而,碱溶酸沉提取竹笋蛋白质也存在一些问题:① 较低pH下蛋白不易溶出,而极端碱性条件不仅需要大量碱液,还会导致蛋白质变性,其营养和功能特性变差^[31],如半胱氨酸和丝氨酸会在碱性条件下转化形成赖氨酸和丙氨酸,降低蛋白质生物活性^[32];② 碱性提取没有选择性,竹笋中的木质素和半纤维素也会被提取,从而降低蛋白质的纯度;③ 碱性提取过程会产生大量的废水,造成生产成本升高^[33]。

1.3 酶法

酶法又分为蛋白酶法和非蛋白酶法。蛋白酶法是指利用相关蛋白酶将竹笋蛋白降解成可溶性肽而被提取出的方法;而非蛋白酶法则是利用纤维素酶、半纤维素酶、淀粉酶等降解相对应的纤维素、半纤维素、淀粉等物质,促进蛋白质溶出,从而提取蛋白质。植物细胞壁的主要成分是纤维素、半纤维素和果胶,利用纤维素酶和果胶酶等将细胞壁溶解,有利于蛋白质的提取。林倩^{[18]11-12}比较了水提法、碱溶酸沉法、纤维素酶法制备竹笋蛋白的效率,发现水提法的提取率以及纯度均最低,纤维素酶法的提取率最高(13.70%)。由于酶具有高度特异性,降解细胞壁时对蛋白质影响较小,采用酶法辅助提取能够获得高质量的蛋白质^[34]。Guo等^[23]也发现酶辅助法获得的竹笋蛋白的纯度要比碱溶酸沉法和超声辅助法的高。此外,与酸碱辅助提取相比,酶法作用条件更加温和,蛋白不易变性,对环境的影响较小^[35]。但酶辅助提取也存在提取时间长、价格昂贵、难以扩大提取规模等缺点。

表 1 竹笋蛋白的提取方法
Table 1 Extraction methods of bamboo shoot protein

提取方法	提取条件	提取率/%	纯度/ %	参考文献
水提法	$m_{\text{竹笋}}:V_{\text{超纯水}}=1:5$,提取温度 45℃,提取时间 40 min,pH 7.0	9.53	42.50	[18] ¹⁰⁻¹⁶
碱溶酸沉法	$m_{\text{竹笋}}:V_{\text{超纯水}}=1:4$,碱溶 pH 9.0,提取温度 45℃,酸沉 pH 4.2	17.19	57.52	
酶辅助法	纤维素酶 1%,提取温度 45℃,pH 6.5,提取时间 3 h	13.70	51.37	
Osborne 分级法	$m_{\text{竹笋}}:V_{\text{超纯水}}=1:10$,提取时间 2 h,提取温度 30℃,提取剂有 1.42(白蛋白),0.33(球蛋白),0.11(醇溶蛋白),0.12(碱溶蛋白)			[11]
低共熔溶剂法	氯化胆碱与乙酰丙酮摩尔比 1:6,提取温度 80℃,时间 50 min,含水量 40%,笋尖、笋基、笋鞘料液比分别为 30:1, 70:1,70:1 (mg/mL)	3.92(笋尖),1.55(笋基),0.95(笋鞘)		[19]
碱溶酸沉	$m_{\text{竹笋}}:V_{\text{超纯水}}=1:30$,碱溶 pH 9.0,室温提取、酸沉 pH 4.5	8.60	40.86	[20]
盐提取法	按照 $m_{\text{竹笋}}:V_{\text{NaCl 溶液}}=1:30$ 混合后,缓慢加入质量分数为 60%的(NH ₄) ₂ SO ₄ 以沉淀蛋白,NaCl浓度为 0.5 mol/L	3.75	90.11	
磷酸盐辅助乙醇沉淀法	按照 $m_{\text{竹笋}}:V_{\text{PBS 缓冲液}}=1:30$ 混合后,离心收集上清液,再加入等体积无水乙醇并冰浴 15 min 以沉淀蛋白,PBS 缓冲液浓度为 0.01 mol/L	6.71	48.77	
碱溶酸沉法	$m_{\text{竹笋}}:V_{\text{NaOH 溶液}}=1:10$,碱溶 pH 9.0,提取时间 2 h,温度 60℃,酸沉 pH 3.8		67.90	[21]
碱溶酸沉法	料液比 1:100 (g/mL),碱溶 pH 11.9~12.1,提取时间 2.1~2.2 h,温度 30℃,酸沉 pH 3.5	65.69(方竹笋),56.01(吊丝球竹笋),60.73(梁山慈竹笋)		[22]
低共熔溶剂法	氯化胆碱和蔗糖摩尔比 1:2,方竹笋和梁山慈竹笋料液比 1:50 (g/mL),含水量 72%~74%,提取时间 4.0 h,温度 42~44℃;吊丝球竹笋料液比 1:50 (g/mL),含水量 63%,提取时间 2.2 h,温度 46℃	59.39(方竹笋),51.87(吊丝球竹笋)45.22(梁山慈竹笋)		
碱溶酸沉	$m_{\text{竹笋}}:V_{\text{超纯水}}=1:4$,碱溶 pH 10.0,提取温度 40℃,提取时间 1 h,酸沉 pH 4.0	13.75	76.08	[23]
超声辅助法	$m_{\text{竹笋}}:V_{\text{超纯水}}=1:4$,在 pH 10.0 的条件下以 350 W 和 20 kHz 的参数超声 1 h,然后重复碱溶酸沉操作	16.63	78.48	
酶辅助法	$m_{\text{竹笋}}:V_{\text{超纯水}}=1:4$,在 pH 4.5 的条件下加入 1%的纤维素酶、1%的淀粉葡萄糖苷酶和 1%木聚糖酶,酶解温度 55℃,酶解时间 1 h,然后重复碱溶酸沉操作	15.08	82.37	

1.4 低共熔溶剂法

Abbott 等^[36]在 2003 年提出低共熔溶剂(deep eutectic solvents, DES),DES 是通过特定摩尔比的氢键供体和氢键受体简单混合形成的低共熔混合物。常见的氢供体有醇类、有机酸、酰胺等^[37];而季铵碱、氨基酸和金属离子等通常用作氢键受体^[19]。目前在 DES 中使用最广泛的氢键受体是氯化胆碱,它具有成本低、无毒、生物可降解等优点^[38-40]。DES 主要通过自身阴阳离子破坏蛋白质肽链间的氢键并且形成更强的氢键,从而使蛋白质溶出^[41],目前已用作各种蛋白的提取剂,如燕麦蛋白^[42]、南瓜籽蛋白^[43]、大豆蛋白^[44]等。Lin 等^[19]采用低共熔溶剂法从笋尖、笋基、笋鞘 3 个部位提取蛋白,并且确定了竹笋各部位的最佳提取工艺参数。当氯化胆碱与乙酰丙酮的摩尔比为 1:6,提取温度为 80℃,提取时间为 50 min,水分含量为

40%,笋尖、笋基和笋鞘料液比分别为 30:1,70:1,70:1 (mg/mL)时,笋尖、笋基和笋鞘的蛋白质提取率最高分别可达 3.92%,1.55%,0.95%。王斯逸^[22]对比了碱溶酸沉法和低共熔溶剂法分别提取方竹笋、吊丝球竹笋和梁山慈竹笋蛋白质,发现碱溶酸沉法提取率更高,分别为 65.69%,56.01%,60.73%。低共熔溶剂法在提取竹笋蛋白方面并未表现出绝对的优势,这可能与竹笋自身高纤维结构有关。此外,与传统的有机溶剂相比,DES 具有可持续、绿色、环保、制备简单、生物可降解、低成本等优点^[45]。但用其提取蛋白质仍然存在诸多挑战:① 大多数 DES 由于复杂的氢键网络而具有高黏度,而高黏度的 DES(超过 100 mPa·s)会影响溶剂的传质现象、传热速率和电导率,从而阻碍溶解物质的流动;② DES 的选择性较差,无法提取特异性靶向蛋白质;③ 由氢供体与氢受体组合形成

DES种类十分丰富,选择合适的DES提取蛋白质具有挑战性^[46]。

目前,很多植物蛋白提取技术已被开发,选择最合适的提取方法对提高竹笋蛋白的提取率和纯度至关重要。竹笋含有丰富的膳食纤维,其高纤维结构不仅会阻碍溶剂的渗透,还会与蛋白质等物质结合,严重干扰竹笋蛋白的提取分离^[47],极大降低了竹笋蛋白的得率和纯度,从而难以对竹笋蛋白的结构和功能进一步研究。通过总结现有植物蛋白的提取方式可知,物理辅助酶法既能有效破坏植物细胞壁,使溶剂渗透到植物细胞中,同时纤维素酶又可酶解大量纤维素,两者共同作用提高蛋白的提取效率和蛋白纯度。例如,Xue等^[48]研究表明,超声结合酶法能更有效地破碎和分解蜂花粉细胞壁,使蜂花粉蛋白得率提高了近20%。Fan等^[49]在提取桑叶蛋白时发现超声辅助纤维素酶法提取的蛋白纯度最高,比传统碱溶酸沉法提高了21.94%。由此可见,物理辅助酶法有望获得高质量的竹笋蛋白。然而,其在竹笋蛋白方面并未有相关报道,物理联合酶法将是进一步研究的方向。

2 竹笋蛋白的生理活性

竹笋蛋白作为竹笋中主要营养成分,表现出较高的生理活性。目前竹笋蛋白生理活性的研究主要集中在抗氧化、抗菌和抗肿瘤。竹笋蛋白质主要是由多种天然肽组成的低分子量的蛋白质^[8],研究从竹笋中提取到的血管紧张素转换酶抑制肽显示出对高脂饮食诱导大鼠降血脂作用以及高血压大鼠的降血压作用,表明该肽具有较高的抗氧化活性,可作为血管紧张素转换酶的潜在抑制剂来预防心血管疾病^[13]。席宇航^{[14]25-26}发现竹笋蛋白在适当的加热条件下具有良好抗氧化性,加热后竹笋蛋白的自由基清除率提升了8%~17%,其ABTS自由基和DPPH自由基清除率最高达95.4%和78.2%,对FRAP还原能力最高为65.2%。通过酶解竹笋蛋白得到的蛋白肽也具有良好的抗氧化活性。林倩^{[18]41-47}用Protamex和Papain 2种酶制备出不同相对分子质量的竹笋短肽对DPPH自由基以及ABTS自由基清除率均可达到90%以上,IC₅₀值表明竹笋短肽抗氧化性(<2.0 mg/mL)强于大豆肽(约6.0 mg/mL)和花生肽(约8.2 mg/mL),且其抑制亚油酸氧化率高达65.54%,对铁离子的还原能力与1.7 mg/mL下的维生素E相当。竹笋蛋白良好的抗氧化能力为其加工利用提供了附加值,可用作食品工业中潜在的营养保健品或功能性成分。

此外,竹笋蛋白还具有一定抗菌和抗肿瘤活性。Wang等^[15]发现,新鲜竹笋会产生一种对尖孢镰刀菌、灰霉病菌和花生分枝杆菌的菌丝生长具有抑制作用的抗真菌蛋白。Fujimura等^[50]从日本毛竹笋分离出2种具有抗

致病菌和抗真菌功能的几丁质结合肽Pp-AMP1和Pp-AMP2,发现其氨基酸序列与槲寄生毒肽有70%的同源性,而槲寄生毒肽对恶性肿瘤细胞有抑制以及免疫调节作用,能预防肿瘤的生长。杨慧敏等^[16-17]先后共研究了36种竹笋蛋白对肿瘤细胞的增殖影响,这些竹笋蛋白对胃癌细胞SGC-7901和结肠癌细胞HCT-116的增殖均具有显著的抑制作用。这表明竹笋蛋白具有一定的临床开发价值,为其今后开发出一款低毒、高效的竹笋蛋白类抗菌、抗肿瘤药物提供了理论基础。然而,竹笋蛋白抗菌和抗肿瘤机制尚不明确,仍需深入研究。

3 竹笋蛋白在食品领域的应用现状

蛋白质的功能性质影响着食物的质地、稳定性和感官特性^[51]。其中,竹笋蛋白的溶解度是其应用于食品的关键^[52]。一般来说,竹笋蛋白溶解度越高,其功能性质越好,越有利于应用于食品工业。Xiao等^[20]研究发现,采用碱溶酸沉法和盐提法得到的竹笋蛋白的溶解度曲线随pH变化均呈U型,两者在中性条件下的溶解度分别约为58.0%和71.7%。席宇航^{[14]13-22}采用碱提法结合喷雾干燥得到溶解度为72.1%的竹笋蛋白,加热后竹笋蛋白结构发生构象变化,形成大分子聚集体,导致溶解度降低,但加热后竹笋蛋白的持油、持水能力均提高100%以上,表面疏水性提高2~3倍,起泡性提高60.4%~90.0%,泡沫稳定性提高20%~90%,表明了竹笋蛋白在适当的加热条件下具有良好的持油性、持水性、乳化性和起泡性。此外,竹笋蛋白展示出优越的持油性、发泡性,且均优于商业大豆分离蛋白和乳清蛋白,表明其成为商业蛋白的潜力^[20]。竹笋蛋白作为一种新型的植物蛋白,具有良好的持油性、乳化性、起泡性等,可作为一种良好的食品添加剂应用于食品行业。竹笋蛋白热处理后暴露出更多的疏水性肽键能够更有效地与油结合,可用于烘焙产品等加工^[53]。植物蛋白乳化剂在食品工业中应用十分广泛,如饮料、调味品、酱汁、奶油等。目前,已有研究将竹笋蛋白与大豆分离蛋白进行复配,制备的山茶油基乳液具有良好的贮藏稳定性和氧化稳定性^[54]。由此可见,竹笋蛋白可以作为良好的食品乳化剂。竹笋蛋白还可用于制备可食用油凝胶。油凝胶不会改变脂肪酸的结构,是固体脂肪的最佳替代品。它还能用于脂溶性营养成分的封装和递送。Li等^[55]利用竹笋蛋白与大豆分离蛋白复合出山茶油基乳液,采用乳液模板法制备了油凝胶体系,得到的所有油凝胶均表现出以弹性为主的类固体行为,并且具有良好的热稳定性。在食品体系中,很多生物活性成分因不稳定应用受到限制,而包封能够有效解决这一问题,可以通过构建竹笋蛋白的包封体系来提高其他生物活性成分在食品中的利用率。然而,竹笋蛋白的开发与利用依旧不够

深入,其在3D打印、植物蛋白肉、蛋糕、饮料、食用薄膜等方面的应用还未涉及。

4 结论与展望

竹笋含有丰富的优质蛋白质,可作为新型植物蛋白的来源之一。竹笋蛋白具有良好的溶解性、乳化性、发泡性等功能特性,以及抗氧化、抗菌和抗肿瘤等生理活性,在食品和医药等方面具有广阔的应用前景。但是由于现有研究采用的传统提取方法难以获得高纯度和高得率的竹笋蛋白,这极大地阻碍了竹笋蛋白的进一步研究及大规模生产利用。针对现有研究不足,未来竹笋蛋白研究方向可以从以下3个方面开展:①新型植物蛋白提取技术不断发展,可应用新型绿色提取技术如超声、微波等方法提取竹笋蛋白,甚至联合多种提取方法来获得高质量的竹笋蛋白。同时还需要不断优化和创新更加经济高效的竹笋蛋白提取技术,彻底表征竹笋蛋白的组成及结构。②竹笋蛋白的功能性质和生理活性研究处于起步阶段,其抗氧化、抗菌和抗肿瘤机制仍不明晰,深入研究竹笋蛋白分子结构和功能活性之间的联系,并且不断挖掘并改善其功能活性,为其在食品和医药等领域的高价值应用提供更为科学的理论指导。③竹笋蛋白在3D打印、植物蛋白肉、饮料、面包等食品领域应用尚未涉及,还需要拓宽竹笋蛋白的应用范围,推动竹笋蛋白的工业化应用。

参考文献

- [1] KUMAR M, TOMAR M, POTKULE J, et al. Advances in the plant protein extraction: mechanism and recommendations[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 115: 106595.
- [2] POJIC M, MISAN A, TIWARI B. Eco-innovative technologies for extraction of proteins for human consumption from renewable protein sources of plant origin[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 75: 93-104.
- [3] ZHENG L, SAN Y, XING Y J, et al. Rice proteins: a review of their extraction, modification techniques and applications[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 268: 131705.
- [4] ZHANG Y, WU L R, LI Y X, et al. Bamboo shoot and its food applications in last decade: an undervalued edible resource from forest to feed future people[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 146: 104399.
- [5] 陈晓光, 朱斌, 何展荣. 竹笋加工下脚料的利用研究进展[J]. 中国食物与营养, 2012, 18(7): 29-32.
CHEN X G, ZHU B, HE Z R. Research progress of the use of bamboo shoots processing tail materials[J]. Food and Nutrition in China, 2012, 18(7): 29-32.
- [6] YE L Y, ZHANG J M, ZHAO J, et al. Liquefaction of bamboo shoot shell for the production of polyols[J]. Bioresource Technology, 2014, 153: 147-153.
- [7] LIN Z, CHEN J, ZHANG J Z, et al. Potential for value-added utilization of bamboo shoot processing waste-recommendations for a biorefinery approach[J]. Food and Bioprocess Technology, 2018, 11(5): 901-912.
- [8] SAYANIKA D W, LOUIS B, PRANAB R, et al. Insights on predominant edible bamboo shoot proteins[J]. African Journal of Biotechnology, 2015, 14(17): 1 511-1 518.
- [9] 徐圣友, 曹万友, 宋曰钦, 等. 不同品种竹笋蛋白质与氨基酸的分析与评价[J]. 食品科学, 2005, 26(7): 222-227.
XU S Y, CAO W Y, SONG Y Q, et al. Analysis and evaluation of protein and amino acid nutritional components of different species of bamboo shoots[J]. Food Science, 2005, 26(7): 222-227.
- [10] KOZUKUE E, KOZUKUE N, TSUCHIDA H. Changes in several enzyme activities accompanying the pulp browning of bamboo shoots during storage[J]. Journal of the Japanese Society for Horticultural Science, 1999, 68(3): 689-693.
- [11] 杨金来, 杨慧敏, 吴良如, 等. 毛竹笋中4种蛋白的提取与功能性质研究[J]. 竹子学报, 2019, 38(1): 1-8.
YANG J L, YANG H M, WU L R, et al. Extraction and functional properties of four types of proteins from moso bamboo shoots[J]. Journal of Bamboo Research, 2019, 38(1): 1-8.
- [12] 潘雁红, 杨慧敏, 吴良如, 等. 雷竹笋蛋白的双向电泳分析[J]. 竹子学报, 2017, 36(1): 36-40.
PAN Y H, YANG H M, WU L R, et al. Two-dimensional electrophoresis analysis of bamboo shoot protein of *Phyllostachys praecox*[J]. Journal of Bamboo Research, 2017, 36(1): 36-40.
- [13] LIU L L, LIU L Y, LU B Y, et al. Evaluation of antihypertensive and antihyperlipidemic effects of bamboo shoot angiotensin converting enzyme inhibitory peptide in vivo[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(45): 11 351-11 358.
- [14] 席宇航. 竹笋蛋白基食品胶体体系的构建与应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
XI Y H. The preparation and application of bamboo shoot protein-based food colloid systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [15] WANG H X, NG T B. Dendrocin, a distinctive antifungal protein from bamboo shoots[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2003, 307(3): 750-755.
- [16] 杨慧敏, 吴良如. 24种竹笋蛋白对肿瘤细胞增殖的抑制作用[J]. 竹子学报, 2018, 37(2): 49-56.
YANG H M, WU R L. Inhibition of the proteins of 24 species of bamboo shoots on the tumor cell proliferation[J]. Journal of Bamboo Research, 2018, 37(2): 49-56.
- [17] 杨慧敏, 吴良如, 杨金来, 等. 12种竹笋蛋白对肿瘤细胞体外

- 增殖的抑制作用[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(12): 181-186.
- YANG H M, WU R L, YANG J L, et al. Inhibition of 12 kinds of bamboo shoot protein on proliferation of tumor cells *in vitro* [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019, 47(12): 181-186.
- [18] 林倩. 竹笋短肽制备及其抗氧化活性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
- LIN Q. Study on preparation and antioxidative activities of bamboo shoot peptides[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011.
- [19] LIN Z, JIAO G L, ZHANG J Z, et al. Optimization of protein extraction from bamboo shoots and processing wastes using deep eutectic solvents in a biorefinery approach[J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2021, 11(6): 2 763-2 774.
- [20] XIAO Z L, HAN Q Y, CHEN K X, et al. The impact of extraction processes on the physicochemical, functional properties and structures of bamboo shoot protein[J]. Food Research International, 2024, 187: 114368.
- [21] DU J J, ZHU Q, GUO J G, et al. Effects of ultrasonic and steam-cooking treatments on the physicochemical properties of bamboo shoots protein and the stability of O/W emulsion[J]. Heliyon, 2023, 9(9): e19825.
- [22] 王斯逸. 不同竹笋蛋白质提取鉴定及性质初步分析[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2024: 15-40.
- WANG S Y. Extraction, identification and preliminary analysis of different bamboo shoot proteins[D]. Hangzhou: Zhejiang Agricultural and Forestry University, 2024: 15-40.
- [23] GUO J G, WU Y H, SUN S Y, et al. Effect of different extraction methods on physicochemical, functional and antioxidant properties of bamboo shoot protein[J]. LWT-Food Science and Technology, 2025, 216: 117328.
- [24] 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.
- WANG Z, QIAO T L, HUO N R, et al. Methods for plant leaf protein extraction and related research progresses[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2016, 44(1): 126-130.
- [25] DEL MAR CONTRERAS M, LAMA-MUNOZ A, MANUEL GUTIERREZ-PEREZ J, et al. Protein extraction from agro-food residues for integration in biorefinery: potential techniques and current status[J]. Bioresource Technology, 2019, 280: 459-477.
- [26] 杨金来, 吴良如, 潘雁红, 等. 建瓯白笋及其竹叶蛋白双向电泳分析[J]. 竹子学报, 2018, 37(4): 9-13.
- YANG J L, WU L R, PAN Y H, et al. Two-dimensional electrophoresis analysis on protein of jianou bai moso bamboo shoots and leaves[J]. Journal of Bamboo Research, 2018, 37(4): 9-13.
- [27] 杨慧敏, 吴良如, 杨金来, 等. 勃氏甜龙竹笋蛋白的提取及双向电泳分析[J]. 竹子学报, 2019, 38(1): 34-39, 45.
- YANG H M, WU L R, YANG J L, et al. Extraction and two-dimensional electrophoresis analysis of protein of *Dendrocalamus brandisi* bamboo shoots[J]. Journal of Bamboo Research, 2019, 38(1): 34-39, 45.
- [28] CUI Q Y, NI X H, ZENG L, et al. Optimization of protein extraction and decoloration conditions for tea residues[J]. Horticultural Plant Journal, 2017, 3(4): 172-176.
- [29] LV G T, LI J H, HUANG C X, et al. Response surface methodology for extraction optimization of *Phyllostachys pubescens* bamboo shoots protein[J]. Advances Material Research, 2013, 709: 852-857.
- [30] 宋艳秋. 牡丹籽蛋白的提取、功能特性及应用研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2018: 2-3.
- SONG Y Q. Study on the extraction, features and application of peony seed protein[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2018: 2-3.
- [31] GAO Z L, SHEN P Y, LAN Y, et al. Effect of alkaline extraction pH on structure properties, solubility, and beany flavor of yellow pea protein isolate[J]. Food Research International, 2020, 131: 109045.
- [32] ZHANG J X, WEN C T, ZHANG H H, et al. Structure of the zein protein as treated with subcritical water[J]. International Journal of Food Properties, 2018, 21(1): 143-153.
- [33] ZHANG C, SANDERS J P M, XIAO T T, et al. How does alkali aid protein extraction in green tea leaf residue: a basis for integrated biorefinery of leaves[J]. PLoS One, 2015, 10(7): 0133046.
- [34] SIERRA L S, DIXON C K, WILKEN L R. Enzymatic cell disruption of the microalgae *Chlamydomonas reinhardtii* for lipid and protein extraction[J]. Algal Research-Biomass Biofuels and Bioproducts, 2017, 25: 149-159.
- [35] 陈飞, 陈盼盼, 咸漠, 等. 生物酶法提取米糠蛋白的研究进展[J]. 氨基酸和生物资源, 2015, 37(4): 7-11.
- CHEN F, CHEN P P, XIAN M, et al. Progress on extraction of rice bran protein by bio-enzymatic method[J]. Amino Acids & Biotic Resources, 2015, 37(4): 7-11.
- [36] ABBOTT A P, CAPPER G, DAVIES D L, et al. Novel solvent properties of choline chloride/urea mixtures[J]. Chemical Communications, 2003, 39(1): 70-71.
- [37] PAIVA A, CRAVEIRO R, AROSO I, et al. Natural deep eutectic solvents - solvents for the 21st century[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2014, 2(5): 1 063-1 071.
- [38] XU K J, WANG Y Z, HUANG Y H, et al. A green deep eutectic solvent-based aqueous two-phase system for protein extracting[J]. Analytica Chimica Acta, 2015, 864: 9-20.
- [39] WANG M, WANG J Q, ZHANG Y, et al. Fast environment-friendly ball mill-assisted deep eutectic solvent-based extraction of natural products[J]. Journal of Chromatography A, 2016, 1 443: 262-266.

- [40] XU K J, WANG Y Z, LI Y X, et al. A novel poly(deep eutectic solvent)-based magnetic silica composite for solid-phase extraction of trypsin[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2016, 946: 64-72.
- [41] 梁珍珍. 基于氯化胆碱/二元醇的低共熔溶剂制备、理化性质及提取燕麦蛋白研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2023: 8-9.
- LIANG Z Z. Fabrication, physicochemical properties of deep eutectic solvents and extraction of oat protein based on deep eutectic solvents of choline and dihydric alcohol[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2023: 8-9.
- [42] YUE J X, ZHU Z B, YI J H, et al. Structure and functionality of oat protein extracted by choline chloride-dihydric alcohol deep eutectic solvent and its water binary mixtures[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 112: 106330.
- [43] LIU R L, YU P, GE X L, et al. Establishment of an aqueous peg 200-based deep eutectic solvent extraction and enrichment method for pumpkin (*Cucurbita moschata*) seed protein[J]. *Food Analytical Methods*, 2017, 10(6): 1 669-1 680.
- [44] CHEN Q S, CHAIHU L X, YAO X P, et al. Molecular property-tailored soy protein extraction process using a deep eutectic solvent[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, 9(30): 10 083-10 092.
- [45] ZAINAL-ABIDIN M H, HAYYAN M, HAYYAN A, et al. New horizons in the extraction of bioactive compounds using deep eutectic solvents: a review[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2017, 979: 1-23.
- [46] ZHOU Y H, WU W, ZHANG N, et al. Deep eutectic solvents as new media for green extraction of food proteins: opportunity and challenges[J]. *Food Research International*, 2022, 161: 111842.
- [47] CHANG W J, CHANG M J, CHANG S T, et al. Chemical composition and immunohistological variations of a growing bamboo shoot[J]. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 2013, 33(2): 144-155.
- [48] XUE F, LI C. Effects of ultrasound assisted cell wall disruption on physicochemical properties of camellia bee pollen protein isolates[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2023, 92: 106249.
- [49] FAN W, DUAN H Y, REN X L, et al. Optimization of ultrasound-assisted cellulase degradation method on the extraction of mulberry leaf protein and its effect on the functional characteristics[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2023, 99: 106561.
- [50] FUJIMURA M, IDEGUCHI M, MINAMI Y, et al. Amino acid sequence and antimicrobial activity of chitin-binding peptides, *Pp*-AMP 1 and *Pp*-AMP 2, from Japanese bamboo shoots (*Phyllostachys pubescens*) [J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2005, 69(3): 642-645.
- [51] GE J, SUN C X, CORKE H, et al. The health benefits, functional properties, modifications, and applications of pea (*Pisum sativum* L.) protein: current status, challenges, and perspectives[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(4): 1 835-1 876.
- [52] WANG T, ZHANG H, WANG L, et al. Mechanistic insights into solubilization of rice protein isolates by freeze-milling combined with alkali pretreatment[J]. *Food Chemistry*, 2015, 178: 82-88.
- [53] ZHANG Z Y, YANG Y L, TANG X Z, et al. Chemical forces and water holding capacity study of heat-induced myofibrillar protein gel as affected by high pressure[J]. *Food Chemistry*, 2015, 188: 111-118.
- [54] XI Y H, ZHANG A P, WANG Z J, et al. Improved oxidation stability of camellia oil-in-water emulsions stabilized by the mixed monolayer of soy protein isolate/bamboo shoot protein complexes[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2021, 8: 782212.
- [55] LI J W, XI Y H, WU L R, et al. Preparation, characterization and *in vitro* digestion of bamboo shoot protein/soybean protein isolate based-oleogels by emulsion-templated approach[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 136: 108310.