

椰子粕蛋白乳化改性的研究进展

张倩^{1,2}, 颜林悦之², 于志鹏², 赵文竹^{2*}

(1. 渤海大学 食品科学与工程学院, 辽宁 锦州 121013; 2. 海南大学 食品科学与工程学院, 海南 海口 570228)

摘要:椰子粕为椰子油加工的主要副产品,含有20%左右的蛋白质,是一种营养价值丰富的植物基蛋白的潜在来源。乳化性是椰子粕蛋白在食品工业应用的重要功能特性之一,但由于其对环境条件(如pH值、盐和温度等)敏感而限制其应用。通过现代生物改性技术对椰子粕蛋白结构进行修饰,可以改善其乳化特性,进而提高椰子粕蛋白的附加值。因此,该文概述椰子粕蛋白的组成、特性及乳化机理。此外,对最新的乳化改性方法进展进行综述,以期椰子粕蛋白在食品加工工业中的应用奠定理论基础。

关键词:椰子粕;乳化特性;改性;植物蛋白;乳化机理

Advances in Modification of Coconut Meal Protein

ZHANG Qian^{1,2}, YAN Linyuezhi², YU Zhipeng², ZHAO Wenzhu^{2*}

(1. College of Food Science and Technology, Bohai University, Jinzhou 121013, Liaoning, China; 2. School of Food Science and Engineering, Hainan University, Haikou 570228, Hainan, China)

Abstract: Coconut meal, as a major by-product of coconut oil processing, contains about 20% protein and is a potential source of plant-based proteins with high nutritional values. Emulsification is one of the important functional properties of coconut meal protein for the application in the food industry. However, the application was limited due to the high sensitivity to environmental conditions (e.g., pH, salt, and temperature). Modification of coconut meal protein by modern biomodification techniques could improve the emulsifying properties and thus increase the value-added of coconut meal protein. The composition, properties, and emulsification mechanisms of coconut meal protein were introduced. In addition, the latest advances in modification methods were reviewed to lay a theoretical foundation for the application of coconut meal protein in the food processing industry.

Key words: coconut meal; emulsifying properties; modification; plant protein; emulsification mechanism

引文格式:

张倩, 颜林悦之, 于志鹏, 等. 椰子粕蛋白乳化改性的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(4): 200-207.

ZHANG Qian, YAN Linyuezhi, YU Zhipeng, et al. Advances in Modification of Coconut Meal Protein[J]. Food Research and Development, 2025, 46(4): 200-207.

椰子是一种热带地区典型的木本油料作物和食品能源作物,属于棕榈科单子叶植物。据统计,2021年全球椰子产量约为6 117.58万t,其中我国椰子产量达到42.55万t,年产量超过2亿个^[1]。目前,椰肉部分研究主要集中在椰子油和椰子蛋白方面。椰子油可作为食用植物油,不仅含有丰富的中链脂肪酸,而且富含酚类、生育酚和植物甾醇等其他生物活性成分,在食品和

医药领域应用广泛,其市场规模也在持续扩张^[2]。椰子油生产过程中,会产生大量的副产品椰子粕。由于椰子粕适口性差,目前多被当作饲料使用或者直接丢弃,经济利用价值较低^[3]。

椰子粕含有20%左右的蛋白质,包括30.0%的清蛋白、61.9%的球蛋白、1.1%的醇溶蛋白和4.7%的谷蛋白^[4]。研究表明,椰子粕蛋白具有较高的营养价值,且氮

基金项目:海南省国际科技合作研发项目(GHYF2024004)

作者简介:张倩(1999—),女(汉),硕士研究生,研究方向:营养与功能食品。

*通信作者:赵文竹(1986—),女(汉),副教授,博士,研究方向:营养与功能食品。

基酸组成相对平衡,被视为理想的植物蛋白质资源,具有较大的开发潜力^[5]。因此,如何提高椰子粕蛋白的附加值一直是行业关注的焦点。椰子粕蛋白具有乳化性。蛋白质具有形成和稳定小液滴的能力,因此可以作为稳定油水乳状液的乳化剂。蛋白质是天然的两性分子,被乳液中的油水界面吸附,降低界面张力并形成界面层,从而稳定了液滴,防止静电排斥导致的絮凝或聚集,并在加工和储存过程中赋予稳定性^[6]。然而,椰子粕蛋白作为一种商业乳化剂在食品中的应用仍然有限,其乳化指数和乳化稳定性分别为 53.34 m²/g 和 23.51 min^[3],与酪蛋白酸钠等大分子乳化剂相比尚有差距,且作为天然蛋白对环境条件(如 pH 值、盐和温度)敏感。

为提升椰子粕蛋白的乳化特性,研究者已广泛尝试多种改性方法,涵盖了物理、化学以及酶促修饰等领域。这些改性手段可在一定程度上提高其乳化性能,拓展其作为天然乳化剂的应用范围。本文系统地探讨椰子粕蛋白的组成、特性及乳化机理,同时综述最新的乳化改性方法的进展,以期椰子粕蛋白在食品加工应用中提供参考。

1 植物蛋白乳化剂的研究

在食品工业中,最常用的天然蛋白质乳化剂来自牛奶乳清蛋白和酪蛋白,但存在诸多问题,如乳糖不耐症、牛奶过敏、化学(来自环境的污染)、物理(在处理牛奶时)、生物(毒素和过敏)和其他问题(宗教和伦理问题)^[7]。随着动物资源蛋白成本的上升和各种食品安全问题的出现,人们对天然植物源蛋白兴趣不断增加^[8]。《国民营养计划(2017-2030年)》指出:到2030年,我国居民膳食中要用50%植物蛋白替代动物蛋白^[9]。植物蛋白乳化剂作为动物蛋白乳化剂替代品的市场需求不断增长。

1.1 植物基蛋白质乳化机理

植物基蛋白由于其两性性质(同时拥有亲水和疏水基团)以及成膜能力,使其乳化功能特性备受关注。在界面吸附的过程中,植物基蛋白质结构会展开而变性,其稳定乳液的过程主要分4步:迁移-吸附-重排-成膜。与快速扩散到界面的小分子量乳化剂不同,蛋白质是大分子,扩散速度较慢。一旦蛋白质到达界面,通常需要一定程度的部分变性(部分变形或松散)才能将隐藏的疏水氨基酸暴露在表面。然后蛋白质分子就可以重排,使疏水氨基酸残基暴露出来定位在油相中,并将亲水氨基酸残基定位在水相中。当蛋白质到达两相界面时,能够产生抗机械压力、具有静电稳定性和空间位阻的强黏弹性膜^[9]。一旦形成了蛋白质的黏弹性膜,液滴将带有负电荷或者正电荷,这取决于乳液的pH值是高于还是低于蛋白质的等电点(低离子强度下)。油滴之间的强静电排斥作用可使乳液具有更好

的稳定性,而在pH值靠近蛋白质的等电点附近时(或高盐浓度),由于静电荷数降低,乳液液滴絮凝/聚集导致聚结和不稳定。蛋白质在乳液形成中的作用见图1。

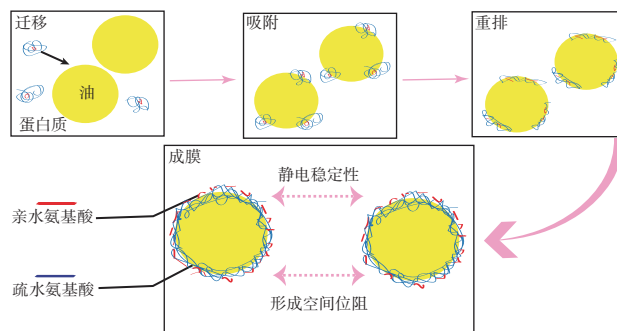


图1 蛋白质在乳液形成中的作用

Fig.1 Protein roles in emulsification

1.2 多元植物基蛋白乳化特性的比较

目前,商业上最重要的植物蛋白是大豆蛋白(soy protein isolate, SPI),大豆的蛋白质含量高达35%~40%,且氨基酸组成均衡^[10]。然而,由于不同的加工方法可能导致SPI结构和功能的差异,将导致溶解度和乳化性变差^[11]。此外,大豆和其他豆类蛋白的使用通常受到其特有口味的限制,这可能导致产品具有不良口感。就大豆衍生产品而言,高过敏性也是一个需要特别关注的问题^[10]。美国食品与药物管理局(Food and Drug Administration, FDA)将大豆列为引起食物过敏的八大食物之一^[12]。作为新兴的植物蛋白来源,豌豆蛋白分离物富含人体所需的氨基酸,敏感性低^[13]。在自然状态下,豌豆蛋白的球形结构可以在不同的pH值和离子强度下展开^[14]。它们具有出色的乳化、凝胶和保水性能,可用于保留水分和风味成分。作为食品加工中的良好成分,目前豌豆蛋白主要与多糖或其他蛋白质结合使用。然而,豌豆蛋白的溶解度差和豆腥味限制了其使用。花生含有高达26%的蛋白质,具有均衡的氨基酸组成和高营养价值^[15]。花生分离蛋白已被证明具有乳化、发泡和凝胶等功能特性^[16]。然而,其加工特性不及大豆蛋白,且具有高致敏性^[17]。此外,鹰嘴豆分离蛋白具有一定的发泡性能,但发泡稳定性较差^[18]。大米蛋白的氨基酸组成平衡,致敏性低,但其溶解性、发泡性和乳化性能在pH4~10时较差^[19]。椰子粕蛋白因其天然固有的乳化性质与大豆分离蛋白相似且具备合理的氨基酸配比而备受关注。然而,天然蛋白质对温度、pH值和金属离子等环境因素非常敏感,从而限制了其应用。因此,通过现代生物改性技术对椰子粕蛋白进行改性,符合天然、安全、健康食品行业发展趋势,避免传统乳化剂潜在的化学残留问题。

2 椰子粕蛋白的研究

椰子粕富含18种氨基酸,必需氨基酸配比合理^[4],

是植物性蛋白质的潜在来源。椰子粕蛋白具有丰富的生物活性,如抗氧化性^[20]、调节血糖^[21]和调节血脂^[22]等活性,是理想的活性蛋白质资源,开发潜力较大^[5]。

2.1 椰子粕蛋白的化学特性

椰子粕蛋白、大豆蛋白和豌豆蛋白的氨基酸含量以及粮农组织/世界卫生组织(Food&Agriculture Organization/World Health Organization, FAO/WHO)推荐模式的分布如表1所示。

表1 椰子粕蛋白、大豆蛋白和豌豆蛋白以及粮农组织/世界卫生组织推荐模式的氨基酸含量

Table 1 Amino acid content of coconut meal protein, soybean protein, pea protein, and FAO/WHO recommended patterns

氨基酸	含量/(g/100 g)			FAO/WHO
	椰子粕蛋白	大豆蛋白	豌豆蛋白	
异亮氨酸	2.70	4.37	4.56	3.0
亮氨酸	5.30	7.28	7.95	5.9
赖氨酸	4.70	5.84	6.98	4.5
苯丙氨酸	3.90	4.93	5.17	
蛋氨酸	1.20	1.12	0.81	
组氨酸	2.50	2.48	2.36	1.5
缬氨酸	4.40	4.49	4.89	3.9
苏氨酸	2.60	3.50	3.39	2.3
色氨酸	0.70	0.96	0.57	0.6
酪氨酸	1.70	3.51	3.61	3.8
半胱氨酸	1.70	0.47	0.33	2.2
精氨酸	14.80	7.15	8.25	
天冬氨酸	7.80	10.45	10.90	
谷氨酸	21.70	18.07	16.53	
丝氨酸	3.80	4.77	4.81	
脯氨酸	2.90	4.84	4.10	
丙氨酸	3.40	3.86	3.92	
甘氨酸	4.00	3.69	3.61	
含硫氨基酸	2.90	1.59	1.14	
亲水性氨基酸	21.60	26.39	26.65	
疏水性氨基酸	24.80	33.20	34.06	
亲水/疏水氨基酸	0.87	0.79	0.78	

研究表明,良好的乳化剂需要蛋白质表面的亲水氨基酸和疏水氨基酸平衡,以确保良好的水溶性和表面活性^[23]。与大豆蛋白和豌豆蛋白相比,椰子粕蛋白的亲水/疏水氨基酸更加平衡,显示出作为植物蛋白乳化剂的潜力。谷氨酸是椰子粕蛋白最主要成分,其次是精氨酸,其含量分别为21.70 g/100 g和14.80 g/100 g。同时,椰子粕蛋白中的赖氨酸、组氨酸、苏氨酸、色氨酸和缬氨酸的含量均高于FAO/WHO推荐值。除此之外,椰子粕蛋白富含含硫氨基酸(半胱氨酸和蛋氨酸),这些氨基酸是豆类蛋白中的限制性氨基酸,其含量较大豆蛋白和豌豆蛋白更丰富,可有效弥补膳食中这些氨基酸的不足^[24]。此外,为了实现对椰子粕蛋白质的精细化利用,对组分蛋白的研究是十分必要的。近年来,已从椰子粕中分离出了特征蛋白^[25]。根据椰子粕蛋白在不同溶剂中的溶解度差异,蛋白通常分为4类,

包括30%的清蛋白(水溶)、61.9%的球蛋白(盐溶)、1.1%的醇溶蛋白(碱溶)和4.7%的谷蛋白(醇溶)^[26],这为其在食品工业中的应用提供了更多可能性。

2.2 椰子粕蛋白的生物活性

研究表明,椰子粕蛋白具有抗氧化、预防高脂血症和增加小鼠怀孕率等生物功能^[27]。郑亚军等^[28]研究表明,椰子粕球蛋白中氨基酸种类齐全,二硫键含量较高,具有较好的抗氧化性和很高的络合二价铁能力,可有效改善缺铁性贫血,并具有抗氧化、降低胆固醇、抑菌、抑制高脂血症等活性功能。椰子粕醇溶蛋白是椰肉中重要的活性成分,具有清除体内自由基、改善皮肤弹性、延缓衰老、抑制脂质过氧化等多种功能^[29]。椰子粕谷蛋白具有很好的体外抗氧化性,对超氧根离子自由基、2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) cation, ABTS]阳离子自由基、羟基自由基的清除能力较强,同时具有较好的还原力和Fe²⁺络合能力^[30]。此外,将椰子粕蛋白添加到化妆品中可以增强产品对皮肤的保护作用,一些含有适量椰子醇溶蛋白的护肤产品已被研发。Zheng等^[31]发现脱脂椰肉中清蛋白具有良好的血管紧张素转化酶抑制活性。

2.3 椰子粕蛋白的加工特性

椰子粕蛋白因其氨基酸含量丰富、配比合理,有良好的溶解性、乳化性、起泡性、吸油性等加工特性^[32]。Angelia等^[33]研究发现,在120℃下加热处理椰子粕蛋白30 min后,蛋白的大部分亚基仍没有完全变性,表明椰子粕蛋白具有较好的热稳定性,在食品工业常用的巴氏杀菌中热变性程度较小。Kwon等^[34]从乳液中电荷、电势、分子静电斥力、平均分子直径等方面分析椰子蛋白乳化液的稳定性,结果表明椰子蛋白质表现出一定的乳化性及乳化稳定性。Patil等^[35]从脱脂的椰子肉中分离出清蛋白和球蛋白,分别采用清蛋白和球蛋白组分制备椰奶水油模型乳液,并对其稳定性进行了评价。结果表明,用球蛋白组分稳定的乳液比清蛋白组分的乳液效果更稳定。李艳等^[36]研究从椰子粕中梯次分离组分蛋白并分析其氨基酸组成、结构与乳化性,结果表明组分蛋白必需氨基酸的含量比FAO的推荐值高,且球蛋白的乳化性最高,其次为清蛋白。Ma等^[37]探究不同pH值对椰子球蛋白乳化稳定性的影响。结果表明,在pH 3和11时具有较高的乳化性质,但在pH 5时显示低乳化性质。郑亚军等^[38]研究pH值和离子强度对椰子粕蛋白质功能特性的影响,结果表明pH值是以影响蛋白溶解度的方式来影响蛋白质的乳化性,在远离等电点时,椰子粕蛋白呈现外亲内疏的构象,溶解度升高,乳化性和乳化稳定性也随之升高,且离子强度对椰子蛋白起泡性和乳化稳定性的影响趋势是随着离子强度的增加而逐渐增强。

3 椰子粕蛋白乳化性提高方法

蛋白质改性是指根据某些特定需要,通过合适的方法对蛋白质结构进行人工修饰,从而改善蛋白

质的加工性能^[39]。目前,蛋白质的改性通常通过物理、化学和酶促改性来实现,常见的改性方法如图2所示^[40]。

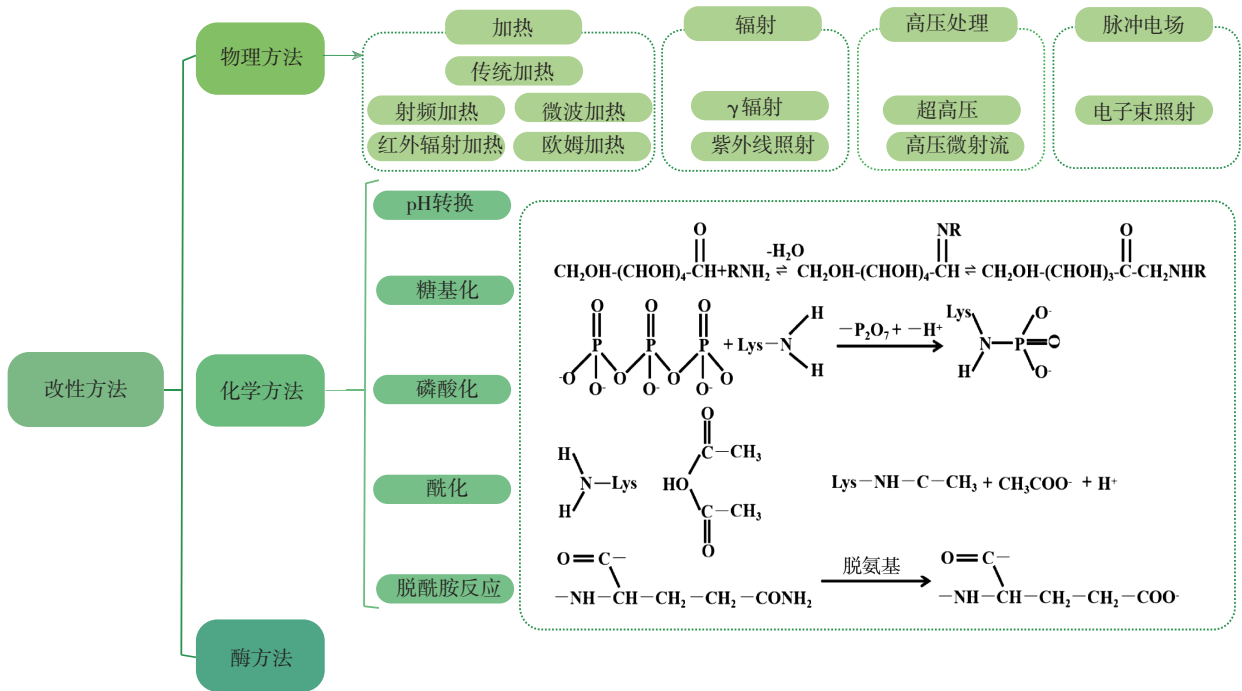


图2 蛋白质的改性方法

Fig.2 Methods of proteins modification

3.1 椰子粕蛋白的物理法改性

物理改性包括通过诸如超微粉碎、高压处理、高频电场、超声波处理和超临界 CO₂ 流体处理等过程来改变蛋白质结构和分子间聚集。目前, Lad 等^[41]探究超声处理(250 W、20 kHz 和 120 W、20 kHz)对椰子粕蛋白乳状液稳定性的影响。结果显示, 超声处理显著影响了椰子粕蛋白基葵花籽水包油乳液的平均液滴大小和稳定性, 使乳液的平均液滴尺寸减小, 同时提高了其对 pH 值的稳定性。Chen 等^[42]研究常压冷等离子体对椰子粕球蛋白结构和乳化性能的影响, 经处理后, 球蛋白的结构展开, 无规则线圈增加, 粒径减小。适度的改性(60 kV、60 s 和 60 kV、90 s)会导致蛋白质分子展开和疏水性基团暴露, 增加了它们在油水界面的吸附, 其乳化能力和乳化稳定性得到了显著提高。Ma 等^[43]研究蛋白质浓度(0.2%~1.0%)、离子强度(100~500 mmol/L NaCl)和热处理(温度 80 °C 和 90 °C、时间 15 min 和 30 min)对椰子粕球蛋白的界面和乳化特性的影响。当蛋白质浓度为 0.2%~0.6% 时, 界面吸附随蛋白质浓度的增加而增加。当球蛋白浓度为 0.6% 时, 界面黏弹性最低。当蛋白浓度大于 0.6% 时, 膨胀黏弹性随蛋白浓度的增加而增加。蛋白浓度对球蛋白乳状液稳定性有正向影响。离子强度对界面吸附有积极影响, 但对界面黏弹性和乳液稳定性有消极影响。温度越高, 加热时间越长, 界面性能越差。加热球蛋白(90 °C,

30 min)的界面行为最差, 但乳液稳定性最好。

综上, 超声处理和常压冷等离子体处理等物理改性方法可以改善椰子粕蛋白乳化性能。通过改变蛋白质的二级和三级结构, 从而增强其在油水界面的吸附能力, 提高乳化能力和乳化稳定性。目前, 物理改性仍处于实验室阶段, 需要进一步评估这些方法在实验室规模下的效果是否适用于大规模生产。同时, 需要结合食品生产的实际需求, 进一步考虑生产效率和成本效益。

3.2 椰子粕蛋白的化学法改性

化学改性是基于化学试剂与蛋白质的相互作用, 从而导致肽键断裂或将官能团引入蛋白质结构, 进而改善其功能性质。常见的改性方法包括酰基化、磷酸化、糖基化和酸碱修饰等。目前, Ma 等^[37]研究 pH 值对椰子粕球蛋白界面行为和乳液稳定性的影响。结果表明, 球蛋白的动态界面张力在 pH 值为 11 时最低, 其次为 9、3、7 和 5, 并且在 pH5 时界面吸附效果最好, 在 pH11 时界面脱附效果较好。Zhou 等^[44]研究甜菜果胶糖基化对椰子粕蛋白界面行为和乳化能力的影响。结果表明, 甜菜果胶-椰子粕蛋白复合物在离心过程中表现出比椰子粕蛋白更好的乳液稳定性, 因为甜菜果胶的存在大大降低蛋白的吸附速率并增强了吸收层的膨胀特性。Chen 等^[45]通过咖啡多酚和椰子粕球蛋白之间的相互作用研究对乳液稳定性的影响。结果表明, 两者之间主要通过氢键发生相互作用, 促进了油水

界面上致密厚的界面层的形成,形成的乳液在储存、离心、pH值和盐处理后表现出优异的稳定性。Zhu等^[46]研究椰子粕蛋白-岩藻多糖配合物的乳化性能,以及乳化稳定性与界面行为的关系。结果表明,随着糖基化程度的提高,岩藻多糖改性的球蛋白具有较好的乳化稳定性和较高的黏度以及具有更厚的界面层。

对于椰子粕的化学法改性,目前多集中于与多糖进行相互作用。由于蛋白质具有快速的界面吸附动力学,而多糖可以形成厚的空间位阻层,二者的结合能够快速吸附在油-水界面上,提供对液滴聚集的静电排斥力,是一种优良的复合乳化剂。蛋白质和多糖在水溶液中混合后,会呈现出3种可能的存在状态:由热力学不相容引起的相分离、互溶态以及因非共价相互作用而形成的复合物,蛋白质和多糖在体系中的可能存在形式如图3所示。

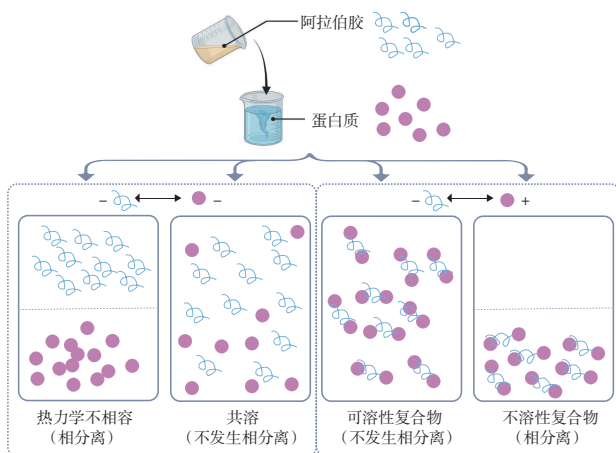


图3 蛋白质和多糖在体系中的可能存在形式

Fig.3 Possible protein-polysaccharide interactions in systems

综上所述,化学改性是改善椰子粕蛋白乳化性质的有效方法之一。研究表明,不同的化学改性方法,如pH值、多糖、多酚等对椰子粕蛋白的乳化特性和稳定性产生一定的影响。其中椰子粕蛋白与多糖的相互作用,可以较好的改善乳液的稳定性,并具有成本低、专一性高等特点,有较广泛的应用前景。

3.3 椰子粕蛋白的酶促改性

酶促改性是指利用特定的蛋白酶将大分子分解成不同链长的小肽链的过程^[47]。在一定程度的水解下,蛋白质形成网状凝胶,吸收大量水分并具有柔软的质地,从而产生光滑的粘性质地^[48]。然而,过度水解会阻止凝胶的形成。Patil等^[35]从脱脂的椰子肉中分离出清蛋白和球蛋白,用碱性蛋白酶水解来提高其乳化特性。结果表明,当用1%碱性蛋白酶处理90min时,与清蛋白相比,球蛋白稳定乳状液效果更好。Thaiphanit等^[49]研究椰子粕蛋白水解物对水包油乳液稳定性和流变特性的影响。结果表明,乳液的稳定性和流变性能取决于反应条件和水解度。水解度为8.25%~10.17%的椰

子粕蛋白能够形成稳定乳液,具有高的乳化活性。Kunarayakul等^[50]研究谷氨酰胺酶对椰子粕蛋白脱酰胺作用的优化及其对蛋白质乳化性质的影响。发现最佳条件:酶与底物比为36U/g蛋白,温度为50℃,pH7.0。与对照样组相比,经过脱酰胺处理的球蛋白的溶解度及乳化稳定性指数均有所提高。

综上所述,酶促改性可以显著提高蛋白质的乳化稳定性和溶解度,从而改善其在食品生产中的应用性能。但目前对于利用酶促修饰应用于椰子粕乳化改性的研究较少,其作为一种温和有效的改性方法,仍然值得进一步深入研究和应用。

3.4 椰子粕蛋白的联合改性

除了上述单一改性的方法,近年来,联合改性也引起了食品工业的兴趣。联合改性是指将两种或更多种改性方法相结合,以期在改善蛋白质功能性能的同时,实现更多的优势并增强效果。通过联合改性,可以充分利用不同改性方法的优点,弥补各自的缺陷,进一步提高蛋白质的乳化能力、稳定性和其他功能特性。例如,将物理改性和化学改性相结合,可以在保留蛋白质天然结构的同时,引入化学试剂来改变其结构和性质。这种联合改性方法能够在改善蛋白质乳化性能的同时,增强其稳定性和溶解度,从而扩大其在食品加工中的应用范围。另外,联合酶促改性和物理改性也是一种常见的联合改性方法。酶促改性可以使蛋白质分解成小肽链,提高其乳化能力,而物理改性则可以进一步改变蛋白质结构,增强其在油水界面的吸附能力,从而提高乳化稳定性。总之,联合改性作为一种综合利用各种改性方法的手段,能够充分发挥不同方法的优势,进一步提高椰子粕蛋白的乳化性能,为食品工业提供更多可能性和创新空间。

3.4.1 超声联合热处理改性椰子粕蛋白

超声作为一种新兴的改性蛋白质结构的物理方法,引起了广泛的关注。超声的作用主要归因于空化效应。超声波可以产生能量,将能量传递到流体介质中,并迅速形成高压区,导致形成快速生长的小空腔。当空泡膨胀破裂时,在空泡区将产生瞬时高温、高压、高能剪切波和湍流。通过空化效应,可以破坏分子间的氢键和静电力等分子键,从而改变蛋白质的结构^[51]。然而,超声的改性能力不足,改性效果仍不能满足食品工业的需要。因此,超声波与其他蛋白质改性技术的结合成为食品工业研究的热点。热处理是一种简单方便的技术,可以改变蛋白质的功能特性,如溶解度、乳化性和起泡性。在热处理过程中,高温会使蛋白质变性,这可能导致蛋白质分子内埋藏的一些基团暴露,使蛋白质表面电荷增加^[52]。同时,变性会引起蛋白质活性位点的猝灭,进而诱导蛋白质分子内和分子间键的重组。目前,Sun等^[53]探究超声联合热处理对椰子粕

球蛋白乳化特性的影响。结果表明,经超声(40 W/L, 53 kHz)联合热处理(90 °C)的椰子粕蛋白具有更好的乳化性能,并表现为更高的溶解度(45.2%~53.5%)、更

少的游离巯基(33.24~28.05 μmol/g)和更高的表面疏水性(7 658.6~10 815.1)。超声联合热处理改性蛋白见图4。

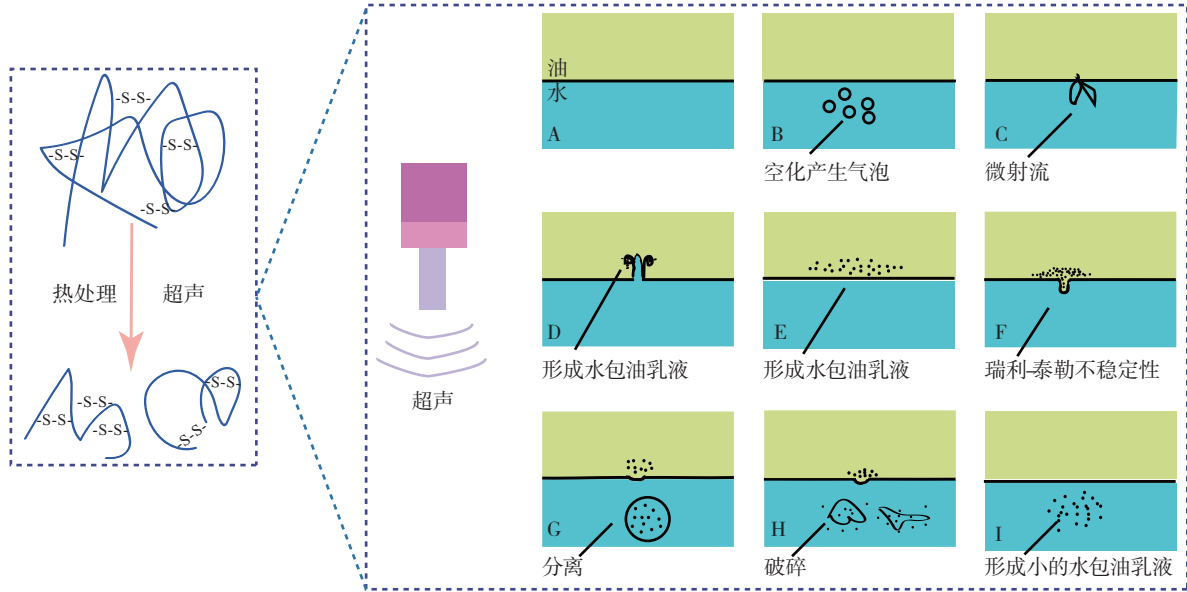


图4 超声联合热处理改性蛋白

Fig.4 Modification of proteins by ultrasound combined with heating

3.4.2 脉冲光联合弱碱循环改性椰子粕蛋白

碱循环是一种简单有效的改性方法,通过将蛋白质溶液的pH值调节到碱性环境,然后再重新调节到中性,使蛋白质结构经历去折叠和复性过程。这种处理方式导致蛋白质表面疏水性的增加,从而改善了蛋白质的乳化性能。然而,单一处理并不能达到理想效果。脉冲光技术作为一种新型的非热处理技术,具有能耗低、处理时间短、无污染等优点。脉冲光可以破坏特定化学基团的电离或静电相互作用,导致蛋白质二级和三级结构的变化。目前,Zhu等^[54]以脉冲光联合弱碱循环处理的椰子粕蛋白为研究对象,以探究对其乳化能力的影响。结果表明,经脉冲光或弱碱循环处理后,椰子粕蛋白乳化性和乳化稳定性均有所增强,而联合处理的乳化性最大(6.24 m²/g),且乳化稳定性较空白组提高了25.45倍。

3.4.3 pH值联合热处理改性椰子粕蛋白

在不同pH值条件下,蛋白质的电荷状态、空间结构和疏水性均会发生显著变化,从而直接影响其乳化性能。研究表明,在pH值接近等电点时,蛋白质的乳化性能较差,而当pH值远离等电点时则表现出较好的乳化性能^[55]。这一现象在卵清蛋白、牛血清白蛋白和β-乳球蛋白等多种蛋白质中都有所体现^[56]。热处理是另一种常用的技术,通过预先加热蛋白质溶液,可以使蛋白质的构象发生变化,影响其在界面上的吸附行为。已有研究表明,预处理可以显著改善蛋白质在乳液中的稳定性和乳化特性^[53]。目前,Ma等^[57]探究

热处理(70~90 °C)和pH值(pH3~11)对椰子粕球蛋白乳化性能的影响。结果表明,在单一处理条件下,随着温度的升高,乳化性能得到了提升。此外,在pH值为3和11时,球蛋白表现出较好的乳化性能,而在pH值为5时,其溶解度、表面疏水性以及Zeta电位的绝对值最低,导致乳化性能较差。值得注意的是,在联合处理的条件下,即90 °C的加热条件下,pH值为11时显示出最佳的乳化稳定性。

4 结论

椰子粕蛋白作为一种优质植物蛋白质资源,具有较大的开发潜力,正在逐渐发挥着满足人类对食物蛋白质需求的重要作用。乳化作为椰子粕蛋白在食品工业中的重要功能特性之一,成为提高椰子粕蛋白的附加价值的关键。然而,椰子粕蛋白对温度、pH值和金属离子等环境因素非常敏感,这限制了其在食品工业中的应用。通过物理、化学和酶等方法的修饰和其他技术的处理,椰子粕蛋白可以获得良好的乳化特性。未来研究中应进一步评估各种改性方法的安全性、效率和成本效益,同时结合食品生产的实际需求,全面推动这些方法的应用,以创造出更高品质、更具营养价值的椰子粕蛋白产品。

参考文献:

[1] MEENMANEE S, RATTANANUKROM A, THAI PHANIT S, et al. Improvement of solubility, foaming, and emulsification properties

- of coconut (*Cocos nucifera* L.) protein by non-enzymatic deamidation[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 153: 112493.
- [2] MARINA A M, CHE MAN Y B, AMIN I. Virgin coconut oil: Emerging functional food oil[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2009, 20(10): 481-487.
- [3] RODSAMRAN P, SOTHORNVIT R. Physicochemical and functional properties of protein concentrate from by-product of coconut processing[J]. *Food Chemistry*, 2018, 241: 364-371.
- [4] 彭吟雪. 椰子蛋白及多肽的制备研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2018.
PENG Yinxue. Preparation of protein and peptide from coconut[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2018.
- [5] 张昭, 崔岗, 李富如, 等. 椰子汁和椰杏汁对人体血脂水平的影响[J]. *食品科学*, 1996, 17(2): 54-57.
ZHANG Zhao, CUI Gang, LI Furu, et al. Effects of coconut juice and coconut apricot juice on human blood lipid level[J]. *Food Science*, 1996, 17(2): 54-57.
- [6] NIKBAKHT NASRABADI M, SEDAGHAT DOOST A, MEZZENGA R. Modification approaches of plant-based proteins to improve their techno-functionality and use in food products[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 118: 106789.
- [7] QAMAR S, MANRIQUE Y J, PAREKH H, et al. Nuts, cereals, seeds and legumes proteins derived emulsifiers as a source of plant protein beverages: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 60(16): 2742-2762.
- [8] DU M X, XIE J H, GONG B, et al. Extraction, physicochemical characteristics and functional properties of Mung bean protein[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 76: 131-140.
- [9] DRUSCH S, KLOST M, KIESERLING H. Current knowledge on the interfacial behaviour limits our understanding of plant protein functionality in emulsions[J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2021, 56: 101503.
- [10] DAY L. Proteins from land plants - Potential resources for human nutrition and food security[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2013, 32(1): 25-42.
- [11] KAN X H, CHEN G J, ZHOU W T, et al. Application of protein-polysaccharide Maillard conjugates as emulsifiers: Source, preparation and functional properties[J]. *Food Research International*, 2021, 150(Pt A): 110740.
- [12] FDA U. Food allergen labeling and consumer protection act of 2004 (FALCPA)[J]. *Public Law 108-282, Title II*, 2004, 21.
- [13] TORRES-FUENTES C, ALAIZ M, VIOQUE J. Affinity purification and characterisation of chelating peptides from chickpea protein hydrolysates[J]. *Food Chemistry*, 2011, 129(2): 485-490.
- [14] LI H, WANG T, HU Y L, et al. Designing delivery systems for functional ingredients by protein/polysaccharide interactions[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 119: 272-287.
- [15] SINGH B, SINGH U. Peanut as a source of protein for human foods [J]. *Plant Foods for Human Nutrition*, 1991, 41(2): 165-177.
- [16] WU H W, WANG Q, MA T Z, et al. Comparative studies on the functional properties of various protein concentrate preparations of peanut protein[J]. *Food Research International*, 2009, 42(3): 343-348.
- [17] AHMED E M, SCHMIDT R H. Functional properties of peanut and soybean proteins as influenced by processing Method1[J]. *Peanut Science*, 1979, 6(1): 1-6.
- [18] WANG S N, YANG J J, SHAO G Q, et al. Soy protein isolated-soy hull polysaccharides stabilized O/W emulsion: Effect of polysaccharides concentration on the storage stability and interfacial rheological properties[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 101: 105490.
- [19] CHEN X W, ZHAO H Q, WANG H, et al. Preparation of high-solubility rice protein using an ultrasound-assisted glycation reaction [J]. *Food Research International*, 2022, 161: 111737.
- [20] PLANGKLANG T, KHUWIJITJARU P, KLINCHONGKON K, et al. Chemical composition and antioxidant activity of oil obtained from coconut meal by subcritical ethanol extraction[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2021, 15(5): 4128-4137.
- [21] SALIL G, NEVIN K G, RAJAMOCHAN T. Arginine rich coconut kernel protein modulates diabetes in alloxan treated rats[J]. *Chemico-Biological Interactions*, 2011, 189(1/2): 107-111.
- [22] DEBMANDAL M, MANDAL S. Coconut (*Cocos Nucifera* L.: Arecaaceae): In health promotion and disease prevention[J]. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 2011, 4(3): 241-247.
- [23] BURGER T G, ZHANG Y. Recent progress in the utilization of pea protein as an emulsifier for food applications[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 86: 25-33.
- [24] GE J, SUN C X, MATA A, et al. Physicochemical and pH-dependent functional properties of proteins isolated from eight traditional Chinese beans[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 112: 106288.
- [25] 陈国东. 椰子粕复合酶解制备抗氧化活性肽及其在化妆品中的应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
CHEN Guodong. Preparation of antioxidant active peptides by complex enzymatic hydrolysis of defatted coconut meal and its application in cosmetics[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [26] LI Y, ZHENG Y J, ZHANG Y F, et al. Antioxidant activity of coconut (*Cocos nucifera* L.) protein fractions[J]. *Molecules*, 2018, 23(3): 707.
- [27] 郭帅, 李艳. 椰子活性蛋白与功能肽的研究进展[J]. *食品科技*, 2018, 43(5): 67-71, 76.
GUO Shuai, LI Yan. Study progress on the active protein and functional peptides of coconut[J]. *Food Science and Technology*, 2018, 43(5): 67-71, 76.
- [28] 郑亚军, 唐敏敏, 赵松林, 等. 一种椰子球蛋白亚铁络合物补铁剂的制备及应用: CN101920004B[P]. 2012-11-21.
ZHENG Yajun, TANG Minmin, ZHAO Songlin, et al. Preparation and application of coconut globulin ferrous complex iron supplement agent: CN101920004B[P]. 2012-11-21.
- [29] 郑亚军, 李艳, 赵松林, 等. 椰肉中醇溶蛋白抗氧化活性[J]. *热带作物学报*, 2009, 30(7): 1035-1038.
ZHENG Yajun, LI Yan, ZHAO Songlin, et al. Antioxidant activities of coconut prolamine protein[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2009, 30(7): 1035-1038.
- [30] 郭帅, 李艳. 脱脂椰麸谷蛋白-1 抗氧化性的研究[J]. *食品研究与开发*, 2018, 39(15): 18-22.
GUO Shuai, LI Yan. Analysis on antioxidant activities of defatted coconut cake glutelin-1[J]. *Food Research and Development*, 2018, 39(15): 18-22.
- [31] ZHENG Y J, LI Y, LI G F. ACE-inhibitory and antioxidant peptides from coconut cake albumin hydrolysates: Purification, identification and synthesis[J]. *RSC Advances*, 2019, 9(11): 5925-5936.
- [32] 刘磊, 郑亚军, 李艳, 等. 椰子分离蛋白起泡性、黏度及其影响因素的研究[J]. *热带作物学报*, 2011, 32(12): 2358-2362.
LIU Lei, ZHENG Yajun, LI Yan, et al. Viscosity and foaming ability of coconut protein isolates and the influencing factors[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2011, 32(12): 2358-2362.
- [33] ANGELIA M R N, GARCIA R N, CALDO K M P, et al. Physicochemical and functional characterization of cocosin, the coconut 11S globulin[J]. *Food Science and Technology Research*, 2010, 16(3): 225-232.

- [34] KWON K, PARK K H, RHEE K C. Fractionation and characterization of proteins from coconut (*Cocos nucifera* L.)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1996, 44(7): 1741-1745.
- [35] PATIL U, BENJAKUL S. Characteristics of albumin and globulin from coconut meat and their role in emulsion stability without and with proteolysis[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 69: 220-228.
- [36] 李艳, 李啸天, 郭文渊, 等. 椰麸组分蛋白的氨基酸组成、结构与乳化性分析[J]. 热带作物学报, 2022, 43(3): 644-652.
LI Yan, LI Xiaotian, GUO Wenyuan, et al. Analysis of amino acid composition, structure and emulsion properties of coconut cake protein fractions[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2022, 43(3): 644-652.
- [37] MA J R, PAN C, CHEN H M, et al. Interfacial behavior of coconut (*Cocos nucifera* L.) globulins at different pH: Relation to emulsion stability[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 144: 108958.
- [38] 郑亚军, 查滕涛, 李艳, 等. pH、离子强度等因素对椰子分离蛋白溶解性和乳化性的影响[J]. 热带作物学报, 2011, 32(8): 1464-1468.
ZHENG Yajun, ZHA Mengtao, LI Yan, et al. Effect of factors including pH and ionic strength on the solubility and emulsion of coconut protein isolates[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2011, 32(8): 1464-1468.
- [39] MUHOZA B, QI B K, HARINDINTWALI J D, et al. Combined plant protein modification and complex coacervation as a sustainable strategy to produce coacervates encapsulating bioactives[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107239.
- [40] WANG C Z, WU J H, WANG C H, et al. Advances in Pickering emulsions stabilized by protein particles: Toward particle fabrication, interaction and arrangement[J]. Food Research International, 2022, 157: 111380.
- [41] LAD V N, MURTHY Z V P. Enhancing the stability of oil-in-water emulsions emulsified by coconut milk protein with the application of acoustic cavitation[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(11): 4222-4229.
- [42] CHEN Y, YAO M Y, YANG T Y, et al. Changes in structure and emulsifying properties of coconut globulin after the atmospheric pressure cold plasma treatment[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 136: 108289.
- [43] MA J R, PAN C, CHEN H M, et al. Effects of protein concentration, ionic strength, and heat treatment on the interfacial and emulsifying properties of coconut (*Cocos nucifera* L.) globulins[J]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 100984.
- [44] ZHOU Y J, NIU H, LUO T, et al. Effect of glycosylation with sugar beet pectin on the interfacial behaviour and emulsifying ability of coconut protein[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 183: 1621-1629.
- [45] CHEN Y L, CHEN Y, JIANG L Z, et al. Improvement of emulsifying stability of coconut globulin by noncovalent interactions with coffee polyphenols[J]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 100954.
- [46] ZHU Q Q, CHEN H M, CHEN W J, et al. Effects of glycation method on the emulsifying performance and interfacial behavior of coconut globulins - fucoidan complexes[J]. Food Chemistry, 2024, 430: 137033.
- [47] BRÜCKNER-GÜHMANN M, KRATZSCH A, SOZER N, et al. Oat protein as plant-derived gelling agent: Properties and potential of modification[J]. Future Foods, 2021, 4: 100053.
- [48] SHEN Y T, HONG S, SINGH G, et al. Improving functional properties of pea protein through "green" modifications using enzymes and polysaccharides[J]. Food Chemistry, 2022, 385: 132687.
- [49] THAIPHANIT S, SCHLEINING G, ANPRUNG P. Effects of coconut (*Cocos nucifera* L.) protein hydrolysates obtained from enzymatic hydrolysis on the stability and rheological properties of oil-in-water emulsions[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 60: 252-264.
- [50] KUNARAYAKUL S, THAIPHANIT S, ANPRUNG P, et al. Optimization of coconut protein deamidation using protein - glutaminase and its effect on solubility, emulsification, and foaming properties of the proteins[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 79: 197-207.
- [51] JIANG S S, DING J Z, ANDRADE J, et al. Modifying the physicochemical properties of pea protein by pH-shifting and ultrasound combined treatments[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 38: 835-842.
- [52] DISSANAYAKE M, VASILJEVIC T. Functional properties of whey proteins affected by heat treatment and hydrodynamic high-pressure shearing[J]. Journal of Dairy Science, 2009, 92(4): 1387-1397.
- [53] SUN Y Z, CHEN H M, CHEN W X, et al. Effects of ultrasound combined with preheating treatment to improve the thermal stability of coconut milk by modifying the physicochemical properties of coconut protein[J]. Foods, 2022, 11(7): 1042.
- [54] ZHU Q Q, CHEN W X, CHEN W J, et al. Role of interfacial flexibility in emulsifying ability of coconut protein isolate remodeled by pulsed light coupled with weak alkali cycling treatment[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 147: 109373.
- [55] YANG J J, ZHU B, DOU J J, et al. pH and ultrasound driven structure-function relationships of soy protein hydrolysate[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 85: 103324.
- [56] TIAN Y, TAHA A, ZHANG P P, et al. Effects of protein concentration, pH, and NaCl concentration on the physicochemical, interfacial, and emulsifying properties of β -conglycinin[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 118: 106784.
- [57] MA J R, CHEN H M, CHEN W J, et al. Effects of heat treatment and pH on the physicochemical and emulsifying properties of coconut (*Cocos nucifera* L.) globulins[J]. Food Chemistry, 2022, 388: 133031.