

脱酰胺修饰对植物蛋白功能特性影响研究进展

唐小倩^{1,2}, 邓乾春², 张修华¹, 陈尚文², 彭登峰², 陈亚淑², 崔杰³, 邓紫珂^{2*}

(1. 湖北大学化学化工学院, 湖北武汉 430062) (2. 中国农业科学院油料作物研究所, 农业农村部油料加工重点实验室, 湖北省油脂与植物蛋白工程技术研究中心, 湖北武汉 430062)

(3. 沈阳花样年华食品科技有限公司, 辽宁沈阳 110056)

摘要: 植物蛋白市场前景广阔, 但天然植物蛋白功能特性(溶解性、乳化性、起泡性)较差, 限制了在食品产业中的应用。脱酰胺修饰是改善植物蛋白功能特性的有效方法, 但目前针对脱酰胺在植物蛋白应用中研究进展缺乏及时和全面的评估。因此该文对脱酰胺修饰方法和脱酰胺在提高植物蛋白功能特性中的应用进行综述, 介绍了脱酰胺现有的主要方法化学法、物理法、生物酶法和场酶协同; 阐述了不同植物蛋白脱酰胺修饰对其结构和功能特性的影响。植物蛋白脱酰胺技术在未来有着广阔的发展前景, 不仅能够提升植物蛋白的功能性质, 还能够推动植物性食品的市场接受度, 同时促进食品产业的可持续发展。未来的研究将有助于揭示植物蛋白脱酰胺的完整功能和调控网络, 为植物生物技术和农业生产提供新的策略。

关键词: 脱酰胺; 植物蛋白; 功能特性; 蛋白结构

文章编号: 1673-9078(2025)04-82-96

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.4.0459

Research Progress on the Effect of Deamidation Modification on the Functional Properties of Plant Proteins

TANG Xiaoqian^{1,2}, DENG Qianchun², ZHANG Xiuhua¹, CHEN Shangwen², PENG Dengfeng², CHEN Yashu², CUI Jie³, DENG Ziyu^{2*}

(1.School of Chemistry and Chemical Engineering, Hubei University, Wuhan 430062, China)

(2.Hubei Engineering Research Center of Oil and Vegetable Protein, Key Laboratory of Oil Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Oil Crops, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430062, China)(3.Shenyang Fancy Time Food Technology Co. Ltd., Shenyang 110056, China)

Abstract: The market for plant proteins is promising, but the functional properties (solubility, emulsification, foaming) of natural plant proteins are poor, thereby limiting their applications in the food industry. Deamidation modification is an effective method to improve the functional properties of plant proteins, but there is a lack of timely and comprehensive assessment of the current research progress on the application of deamidation to plant proteins. Therefore, this paper reviews the deamidation modification methods and the application of deamidation in improving the functional properties of plant

引文格式:

唐小倩,邓乾春,张修华,等.脱酰胺修饰对植物蛋白功能特性影响研究进展[J].现代食品科技,2025,41(4):82-96.

TANG Xiaoqian, DENG Qianchun, ZHANG Xiuhua, et al. Research progress on the effect of deamidation modification on the functional properties of plant proteins [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(4): 82-96.

收稿日期: 2024-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(32302149); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1610172023005); 知识创新专项武汉市曙光计划项目(中国农业科学院油料作物研究所 2023020201020397); 山西省重点研发计划项目(2022ZDYF123)

作者简介: 唐小倩(1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 分析化学, E-mail: 2863223372@qq.com

通讯作者: 邓紫珂(1994-), 女, 博士, 特聘研究员, 研究方向: 食品蛋白与功能配料, E-mail: dengziyu@caas.cn

proteins, introduces the main existing methods of deamidation, chemical method, physical method, bioenzymatic method, and physical method synergizing with enzymatic method e; The effects of deamidation modification of different plant proteins on their structural and functional properties are described. Plant protein deamidation technology has broad prospects in the future, which can not only improve the functional properties of plant proteins, but also promote the market acceptance of plant-based foods while accelerating the sustainable development of the food industry. Future studies will help uncover the complete function and regulatory networks of plant protein deamidation, and provide new strategies for plant biotechnology and agricultural production.

Key words: deamidation; vegetable protein; functional properties; protein structure

蛋白质是人类必需的膳食营养元素，也是人类饮食中重要组成部分，它们对维持人体免疫反应和细胞信号传导至关重要^[1,2]。根据获取的物质来源不同，其可以分为动物蛋白与植物蛋白。动物蛋白主要来源是肉、蛋、奶类等，且氨基酸含量丰富接近人体氨基酸组成，是非常优质的蛋白质资源^[3,4]，但动物蛋白具有高饱和脂肪酸，高胆固醇，长期食用会提高患心脑血管疾病、高血压和肥胖等疾病^[5]。随着世界人口数量的增加和人们对健康营养蛋白质的高需求，研究植物蛋白成为蛋白加工应用发展的新方向^[6]。植物蛋白的营养价值与动物蛋白相似，并且植物蛋白成本低、环保、可持续性获得能源效率高^[7-9]，以及在植物饮料开发、面包中蛋白代替肉制品等诸多食品领域中均有强劲发展势头^[10]。然而植物蛋白富含谷氨酰胺和天冬酰胺基团，这些基团易与通过氢键交联导致蛋白质聚集沉淀，使蛋白质溶解性较差进而使乳化性、起泡性等功能特性较差，限制其在食品加工中的应用^[11,12]。

因此，获得理想功能和加工能力较好的植物蛋白质成分，需要通过改变植物蛋白的物理化学性质解决其局限性^[12,13]。常规热处理是物理修饰^[14]植物蛋白结构和功能特性的常用方法，然而过度的热处理会导致蛋白质结构通过不同的键（二硫键、疏水键和静电键）变性和聚集，从而导致功能特性变差。酶水解和酶交联^[15]是生物修饰技术，酶改性条件温和，副产物少，但会造成水解产物产生苦味。糖基化^[16]和脱酰胺是常见的化学改性修饰，糖基化方法会由于赖氨酸生物利用度的损失而对蛋白质的营养价值产生不利影响。脱酰胺作用是谷氨酰胺的酰胺基团转化，增加蛋白质的负电荷，不同于酰化和烷化脱酰胺作用需要化学物质，可以在温和条件下实现，无需额外的分子。相比较其他几种方法脱酰胺作用是食品加工应用中一种安全高效的改性方法。Milad 等^[17]将月见草蛋白脱酰胺

作用，结果表明改善蛋白的溶解性、持水性、乳化性和起泡性。

目前脱酰胺已成功用于修饰改性植物蛋白，以改善其功能特性。蛋白质脱酰胺为蛋白质的侧链酰胺，谷氨酰胺和天冬酰胺通过氨的释放转化为谷氨酸或天冬氨酸^[5]。这一过程改变蛋白质结构进而改善功能特性，改性后的蛋白质的结构比其天然状态更加展开，促进蛋白质的功能特性改善，并为食品领域带来新的工业应用。本文介绍了脱酰胺修饰蛋白质的方法，论述了脱酰胺在提高蛋白质加工性能中的重要性，讨论了脱酰胺对不同植物蛋白功能特性的影响，这将为在不同的植物基食品中开辟新的机会。

1 蛋白质脱酰胺修饰的介绍

蛋白质修饰是通过特殊方法改变蛋白质的分子结构或化学基团的过程^[5,18]。脱酰胺对比其他方法是一种可行有效的蛋白质修饰方法，它具有易于操作，特异性高、效益高等特点，并已成功用于修饰蛋白质，改善蛋白的功能特性^[19]。修饰方法一般可分为物理法、化学法、生物酶法和其他方法（如场酶协同法）。显然它在改善蛋白质的功能特性方面具有巨大潜力，但也存在一些局限性，脱酰胺可能会改变蛋白质的等电点和电荷异质性，从而影响蛋白质的稳定性和活性；对环境条件敏感，需要准确设计和控制生产过程，以确保一致性和可重复性；也受反应条件的控制，包括 pH 值、温度、缓冲液类型和盐离子浓度等，需要精确控制反应条件以获得最佳效果。蛋白质脱酰胺是指蛋白质侧链的酰胺基团经脱酰胺转变成羧基，增加了蛋白质负电荷和分子间的静电斥力，减少了分子内和分子间的氢键^[20-22]，以提高溶解性，进而改善蛋白质的乳化性和起泡性等功能性质^[23]。Hamada 等^[24]研究指出植物蛋白（小麦蛋白、大豆分离蛋白、椰子蛋白、玉

米醇溶蛋白、大米蛋白等) 2%~6% 的脱酰胺度就能显著地提高蛋白的功能特性。Richard 等^[25]研究发现蛋白脱酰胺是以两种机制进行, 直接水解反应机制(如图 1a) 和 β -转变机制(β -shift mechanism)(如图 1b)。一般情况下, 在 pH 值 < 5 的条件下, 蛋白质直接水解脱去酰胺基团, 在 pH 值 > 5 条件下, 则发生 β -转变机制。直接水解反应是以水为介质, 酰胺基团在 H^+ 、 OH^- 或酶催化下, 酰胺键断裂转变成羧基^[26]。 β -转变机制反应比较复杂, 一般肽的脱酰胺反应以 β -转变机制为主。

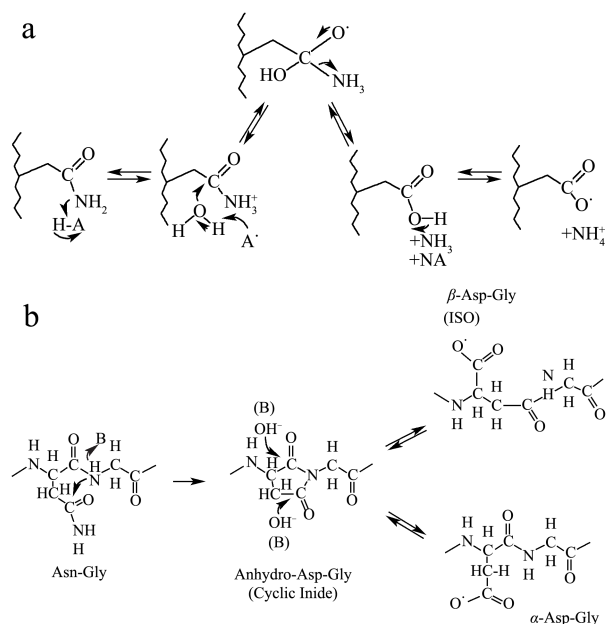


图 1 蛋白脱酰胺两种机制

Fig.1 Two mechanisms of protein deamidation

注: (a) 直接水解机制, (b) β -转变脱酰胺机制。

2 脱酰胺方法的研究进展

2.1 脱酰胺-物理法

物理法脱酰胺主要是指通过高温或其他物理手段促使蛋白质中的天冬酰胺或谷氨酰胺残基发生脱酰胺反应, 转变为天冬氨酸或谷氨酸的过程^[27]。通常包括热处理^[28]、双螺杆挤压^[29]、超声波^[30]和微波等方法。物理法脱酰胺无毒副作用, 反应条件温和, 费用低等^[27]。蔡建荣等^[31]研究以大豆分离蛋白为原料, 利用微波处理对其进行脱酰胺, 研究处理时间对其起泡性和乳化性的影响, 得出微波 1 000 W 处理 40 s, 可改善大豆分离蛋白的功能特性。Zhao 等^[14]研究表明热处理可以提高植物蛋白起泡性。物

理法脱酰胺可以避免化学残留和酶的使用, 保持食品的天然属性, 但有研究表明物理法脱酰胺肽键容易断裂对蛋白质结构破坏较大, 进而对蛋白质功能性质的改善效果不太显著^[32]。物理法脱酰胺的相关研究和应用也相对较少, 但随着非热等新型物理加工技术的发展, 未来可能会有新的突破。

2.2 脱酰胺-化学法

化学法脱酰胺是一种通过化学手段诱导蛋白质或肽中天冬酰胺和谷氨酰胺残基的酰胺基团发生脱酰胺反应, 形成相应的羧酸形式过程。这种反应在生物体内和体外都可能发生, 对蛋白质的结构和功能有重要影响^[33]。其包括酸法脱酰胺和碱法脱酰胺两种方法。该方法成本低、快速高效、条件可控效果显著, 但反应产物存在安全性低会形成致癌物(氯丙醇)和肾毒性化合物(赖丙氨酸)。

最常用的酸法脱酰胺的试剂为盐酸(Hydrochloric Acid, HCl)。然而, 在极酸性条件下的脱酰胺蛋白质会导致潜在问题发生, 如不可控水解、产生潜在致癌化合物(单氯丙醇和二氯丙醇)等^[34]。有机酸(如羧酸)性质温和, 可以避免过度脱酰胺, 比无机酸(如 HCl)更适合用于蛋白质的脱酰胺^[35,36]。除了酸的类型外, 一些环境因素(pH 值、温度、离子强度)和蛋白质的天然结构(肽序列、构象)也对酸催化脱酰胺度和速率有显著影响。酸法脱酰胺通常在较低的 pH 值(3~6)和温和的温度(65~90 °C)下进行。使用酸作为催化剂的成本较低, 适合大规模生产^[37]。

碱法脱酰胺通常以氢氧化钠和碳酸氢钠等碱为催化剂进行脱酰胺。该方法中蛋白质的二硫键、氢键和疏水键的会发生断裂, 使其刚性致密结构得到伸展, 因此碱法脱酰胺适用于改性具有刚性球状结构的蛋白质(如大麦蛋白等)^[38], 其存在较强的分子内或分子间二硫键和表面疏水相互作用。研究发现, 碱法处理米糠蛋白和大麦蛋白脱酰胺的效率高于酸法^[39]。碱法脱酰胺米糠蛋白和大麦蛋白不会造成分子量的降低或肽键断裂, 并能有效提高溶解性, 而酸法对其脱酰胺效果不如碱法^[39]。但是碱法脱酰胺过程中会引起蛋白质的氨基酸外消旋和其他不良反应, 如形成赖丙氨酸, 可能产生毒性^[40]。因此使用碱法脱酰胺时需要精确控制温度和反应时间, 以确保达到安全性和功能性。

表 1 用于植物蛋白脱酰胺酶法的特性和缺点

Table 1 Characteristics and disadvantages of deamidase for plant proteins

脱酰胺酶	酶的生产品种	特征	缺点	参考文献
谷氨酰胺转氨酶	枯草芽孢杆菌	脱酰胺的同时水解蛋白， 蛋白质肽键易断裂	成本相对高、 反应时间长	[42]
肽谷氨酰胺酶	环状芽孢杆菌	仅对短肽上的谷氨酰胺残基起催化作用， 无法应用于大分子蛋白质	不适用于高分子量肽和 蛋白（如天然酪蛋白和 乳清蛋白）	[21]
蛋白质谷氨酰胺酶	蛋白水解金黄杆菌 (<i>Chryseobacterium proteolyticum</i>)	只对蛋白质或大分子多肽中谷氨酰胺侧链 的酰胺基起催化作用，在脱酰胺的同时不 引起蛋白质水解	由于产量低和成本高， 工业生产受到限制	[7]

离子交换树脂是具有网状结构的高分子化合物，它们带有活性基团，能够通过离子交换的方式吸附溶液中的特定离子。在脱酰胺过程中，离子交换树脂通常利用其功能团与溶液中的酰胺离子进行交换，从而脱去酰胺基团。Hitomi 等^[41]使用阳离子交换树脂对小麦醇溶蛋白进行脱酰胺，发现脱酰胺麦醇溶蛋白比未脱酰胺的麦醇溶蛋白具有更高的溶解性。离子交换树脂在脱酰胺过程中有较好的高效性和适应性、操作简便，但同时也有着高成本、维护难度大等问题。在实际应用中，需要根据具体的工艺要求和经济效益来权衡选择。

2.3 脱酰胺-酶法

酶法脱酰胺具有温和、高效专一，保持蛋白良好特性^[5]，与物理法和化学法脱酰胺相比更受欢迎。酶法脱酰胺的酶有谷氨酰胺转氨酶、肽-谷氨酰胺酶和蛋白质-谷氨酰胺酶等如表 1 所示。

2.3.1 谷氨酰胺转氨酶

谷氨酰胺转氨酶（TGase, EC2.3.2.13）是一种食品级的转移酶，来源于动物、植物和微生物^[43]。如图 2 所示，TGase 能够催化谷氨酰胺残基的 γ -羧基酰胺作为酰基受体和伯胺作为酰基受体之间的酰基转移反应^[44]，当蛋白质中赖氨酸残基的 ϵ -氨基作为酰基受体时，酰基会转移到赖氨酸残基上导致形成分子间和分子内的 ϵ -(γ -Gln)Lys 共价交联。当没有伯胺情况下，水成为酰基受体，TGase 水解谷氨酰胺残基的 γ -羧基酰胺基团，使谷氨酰胺脱酰胺^[45]。TGase 这些催化反应可用于改善食品蛋白质的功能特性，如溶解性、乳化性等^[43]。如 Zang 等^[46]的研究表明，在 TGase 催化的过程中，大豆分离蛋白发生交联反应的同时也发生了脱酰胺作用，脱酰胺作用可以使得蛋白的二级结构得到伸展，降低产物热稳定性，改善了蛋白的溶解性，拓宽其在食品加工的应用范围^[47]。

2.3.2 肽-谷氨酰胺酶

肽-谷氨酰胺酶（Peptido Glutaminase）是一种从环状芽孢杆菌中分离出的酶，它主要催化短肽链中的谷氨酰胺（Glutamine, Gln）脱酰胺^[48]。分离出的酶是由两种不同的同工酶组成：肽-谷氨酰胺酶 I 和 II；它们是二聚体，分子量分别为 42 和 51 kDa；肽-谷氨酰胺酶 I 作用于羧基末端谷氨酰胺，而肽-谷氨酰胺酶 II 作用于蛋白质的谷氨酰胺残基^[48]。由于肽-谷氨酰胺酶主要对短肽链中的谷氨酰胺催化，如大豆肽。因此肽谷氨酰胺酶对高分子量肽和天然酪蛋白、乳清蛋白的脱酰胺作用较小^[6]。即为促进肽-谷氨酰胺酶脱酰胺作用，则需要先对蛋白质进行预处理修饰。

2.3.3 蛋白质-谷氨酰胺酶

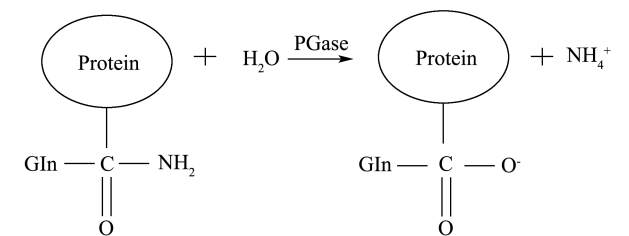


图 2 PGase 的催化反应机制图
Fig.2 Catalytic reaction mechanism of PGase

蛋白质-谷氨酰胺酶（Protein-Glutaminase, PGase）是一种新型的脱酰胺酶^[7]，如图 2 是 PGase 催化反应机制。PGase 作用于蛋白质的谷氨酰胺基团，将谷氨酰胺转化为谷氨酸，且不影响天冬酰胺残基和游离的谷氨酰胺^[49]。研究表明 PGase 可以有效提高不同蛋白质（如 α -zein 玉米油、大豆蛋白等）的乳化性和起泡性。转谷氨酰胺酶及部分蛋白酶脱酰胺的同时水解蛋白，蛋白质肽键易断裂，易引起蛋白质交联及水解，产生苦味物质影响风味；肽谷氨酰胺酶仅对短肽上的谷氨酰胺残基起催化作用，无法应用于大分子蛋白质，且在进行脱酰胺作用时还需

要对蛋白先进行预处理成本高^[50]。而 PGase 脱酰胺只对蛋白质或大分子多肽中谷氨酰胺侧链的酰胺基起催化作用，在脱酰胺的同时不引起蛋白质水解，解决了其他脱酰胺酶作用过程中的副作用。但目前 PGase 促性能不足，且天然蛋白水解金黄杆菌菌株 9670 的产量较低，以及活性和稳定性较低，不能完全满足工业应用的需求^[51]。

2.3.4 场酶协同

化学、物理、生物技术改性方法来改变天然蛋白功能特性的研究主要集中在单一改性上，以增加溶解性，提高乳化性和起泡性。但单一方法改性可能会忽略反应过程中的苛刻反应条件（如反应温度高、反应时间长）和费用高（如高成本酶酶促反应），这就限制了该技术在食品工业中的应用。目前物理法和酶法脱酰胺都已用于蛋白改性，然而结合物理场和酶法脱酰胺组合方法改性蛋白还处于研究的前沿。虽然现在对于场酶协同脱酰胺蛋白研究较少，但场酶协同技术已经非常成熟，该技术利用物

理场减少分子间相互作用和提高肽键断裂引起蛋白质构象变化，暴露使更多的水解位点暴露以供酶接触，提高酶解反应速率，从而提高其功能特性^[52]。如 Jin 等^[53]研究超声对玉米蛋白粉酶解和结构特性的影响和功能特性，发现超声波预处理显著改善了酶解过程，增强蛋白的溶解性。Chen 等^[54]研究超声波预处理大豆分离蛋白酶解及水解乳化特性影响，发现超声预处理和可控酶解相结合是一种有效的球状蛋白功能修饰方法，显著提高蛋白的乳化能力。Liang 等^[55]研究热处理和酶水解改进大豆分离蛋白起泡性，结果显示大豆蛋白水解物的组成可以通过预热处理和酶处理起泡性显著增加。Li 等^[56]研究超声波和酶解对大米蛋白结构特性的影响，研究表明蛋白疏水基团的暴露、二级结构重新分布成功地改善了蛋白的溶解性。以上成功案例表明场酶结合脱酰胺在改善蛋白功能特性具有很大发展前景，这将为脱酰胺技术在食品应用中提供极大的发展潜力。

表 2 脱酰胺方法的比较
Table 2 Comparison of deamidation methods

脱酰胺改性方法	优点	缺点	参考文献
物理法脱酰胺	费用低、无毒副作用	氢键断裂、蛋白质变性，脱酰胺程度低	[57]
化学法脱酰胺	效果好、广泛使用	蛋白质容易发生变性，肽键容易发生水解，蛋白质的功能性质遭到破坏，特异性差，安全性低	[58]
酶法脱酰胺	温和、高效、专一、安全、保持蛋白良好的特性	易引起蛋白质水解，产生苦味物质影响风味	[7]
场酶协同	效果好，保持蛋白良好特性	成本高，能耗大，产生苦味	[59]

表 3 脱酰胺对不同蛋白功能特性的影响
Table 3 Effects of deamidation on functional properties of different proteins

蛋白质	改性影响	参考文献	
豆类蛋白	大豆分离蛋白	提高了乳化稳定性和起泡性能，降低了泡沫乳化活性	[61]
	大豆蛋白	二级结构变化，更好的乳化性	[62]
	豌豆蛋白	改善蛋白溶解性和技术功能性，以及改善其风味，降低其豆腥味、砂粒性和结块性	[63]
谷物类蛋白	小麦蛋白	改善乳化能力	[64]
	小麦面筋蛋白	改善溶解性和乳化性，增加表面疏水性，降低致敏性	[33,65]
	大米蛋白	提高乳化性、起泡性、持水性、持油性	[66]
	玉米醇溶蛋白	改善溶解性和乳化性，降低抗氧化能力	[67]
	燕麦蛋白	改善溶解性和乳化性	[68]
其他类蛋白	椰子蛋白	改善溶解度，提高起泡性	[69]
	月见草蛋白	提高溶解性、乳化性和起泡性	[17]
	亚麻籽蛋白	改善乳化性、起泡性和凝胶性	[70]

目前,脱酰胺改性常用的方法分为物理法、化学法、生物酶法和场酶协同。表2是四种脱酰胺方法的比较。物理法脱酰胺效果有限、蛋白质变性,脱酰胺程度低。化学法脱酰胺肽键水解、蛋白质变性、特异性差、安全性低。与之相比,生物酶法脱酰胺有高特异性、专一性、反应条件温和等特点^[5]。因此,生物酶法脱酰胺优选用于食品系统。但酶法脱酰胺过程中也会偶尔出现蛋白质水解问题,使蛋白质表面疏水性降低,对蛋白质功能特性产生影响^[26]。

3 脱酰胺对不同蛋白功能特性的影响

在食品加工产业过程中,需要提高原材料的功能特性,以满足消费者对食品健康、营养和可持续的需求^[60]。植物蛋白如豆类(大豆和豌豆)、谷物(小麦、大米、玉米和燕麦)和月见草蛋白、亚麻籽蛋白等已通过脱酰胺改性^[17],提高了它们作为食品工业中功能成分的可加工性和可用性,如调味品、乳制品替代品等。表3介绍了脱酰胺修饰对不同植物蛋白功能特性的影响。下面主要介绍了大豆分离蛋白、豌豆蛋白、大米蛋白、玉米醇溶蛋白、燕麦蛋白、椰子蛋白脱酰胺后结构的变化和功能特性的改善。

3.1 不同植物蛋白脱酰胺结构变化

3.1.1 大豆分离蛋白

大豆分离蛋白(Soy Protein Isolate, SPI)是一种在食品加工中广泛使用的植物蛋白,其球形结构限制了其疏水残基的暴露,从而影响了其功能特性。脱酰胺是改善SPI功能特性的一种方法,它通过脱除蛋白质分子中的酰胺基团,可以显著改变蛋白质的结构和功能。

脱酰胺后SPI的表面疏水性增加,这可能是由于脱酰胺使SPI的空间结构发生一定的变化,暴露SPI更多的折叠和疏水区。通过红外和荧光分析SPI的结构变化,发现SPI的二级结构主要以 β -折叠和无规则卷曲为主^[71]。改性后的SPI的 α -螺旋含量减少; β -折叠含量和 β -转角和无规则卷曲含量都有所增加,尤其 β -转角含量从3.6%增加到14.0%。荧光光谱发生红移三级结构发生明显变化,色氨酸残基从蛋白质内部疏水区域转移至亲水区域。产生这现象可能是脱酰胺反应可能导致蛋白质分子结构的部分展开,从而增加蛋白质分子的柔性^[71]。

3.1.2 豌豆蛋白

豌豆是世界上产量最高的豆科作物之一,占豆类总产量的26%。豌豆的平均蛋白质含量约为20%~25%。豌豆蛋白由于不太理想的功能特性和豆腥味限制商业利用。蛋白质改性可能会改变其功能特性,并拓宽蛋白在食品工业中的应用^[72]。

脱酰胺后豌豆蛋白的二级结构由31.7%的分子内 β -折叠、10.6%的 α -螺旋、11.0%的无规卷曲、26.5%的 β -转角和13.4%的分子间 β -折叠组成。Luo等^[73]研究蛋白质谷氨酰胺酶介导的对豌豆蛋白脱酰胺作用,表明脱酰胺后蛋白分子间 β -折叠含量增加,分子内 β -折叠含量减少。这可能是80℃处理过程中热诱导的分子间 β -片层聚集体的形成,而不是脱酰胺作用。这些结果表明脱酰胺作用不会改变豌豆蛋白的二级结构。通过荧光分析脱酰胺后豌豆蛋白的三级结构,发现高脱酰胺度豌豆蛋白有更明显的红移,表明蛋白质结构更加延伸,这是脱酰胺后羧基之间的静电斥力增加,使更多的疏水基团暴露^[74]。

3.1.3 大米蛋白

大米蛋白是自然界广泛公认的低过敏性、高消化蛋白,有利于食品加工业的发展和利用。大米蛋白80%为碱溶性谷蛋白,且具有良好的氨基酸结构和较高的生物学价值,然而天然大米蛋白水溶性较差,影响乳化性、起泡性等其他功能特性,限制大米蛋白在食品加工产业中的应用^[38],研究表明通过脱酰胺可以成功改善大米蛋白功能特性扩大应用。

Liu等^[75]根据光谱分析脱酰胺后大米蛋白二级和三级结构的变化,通过谷氨酰胺酶脱酰胺作用, α -螺旋含量从42.41%减少到24.74%。相反, β -转角和随机线圈分别显示出约7.8%和8.8%的增量, β -折叠总含量也增加1%。表明 α -螺旋向无规卷曲和 β -转角的转变,脱酰胺反应增加带负电荷的谷氨酸残基。使蛋白质中排斥力的增加,从而改变 α -螺旋结构域的堆积。脱酰胺处理后,大米蛋白的三级结构可能变得更为松散,这有助于暴露更多的酶切位点,从而提高其体外消化性表面疏水性也随着脱酰胺时间增加,呈现先降后增的趋势。当脱酰胺反应2h后蛋白表面疏水性达到最低;这可能是由于脱酰胺后蛋白质重新聚集导致暴露的疏水性基团重新折叠,从而降低蛋白质表面疏水性。随着反应继续进行,蛋白质结构展开并暴露疏水基团,使蛋白

表面疏水性提高^[63]。

3.1.4 玉米醇溶蛋白

玉米醇溶蛋白是一种具有疏水性的蛋白质，来源广泛，致敏性极低，生物学功效高，最丰富的醇溶蛋白是 α -玉米醇溶蛋白（占总量的75%~85%）。 α -醇溶蛋白可溶于95%vol（Volume, Vol 容量）乙醇。玉米醇溶蛋白具有特殊的氨基酸组成（含有高浓度的非极性氨基酸，如亮氨酸和丙氨酸）^[76]，这些特殊氨基酸组成导致其水溶性差，极大限制蛋白在食品中的应用。需要扩大玉米醇溶蛋白在工业食品中的应用，水溶液中的溶解性起着至关重要的作用。因此需要脱酰胺改性玉米醇溶蛋白优化其功能特性^[77,78]。

表面疏水性反映了蛋白质疏水基团含量，脱酰胺处理后，玉米醇溶蛋白的表面疏水性降低，这可能是由于脱酰胺反应使得疏水酰胺基团形成亲水性的羧基^[78]。对红外光谱和紫外光谱分析了玉米醇溶蛋白改性后二、三级结构变化，发现 β -折叠结构含量经脱酰胺后减少约7%，分子间的 β -折叠的减少可能是由于脱酰胺作用明显减弱了蛋白质分子的聚集能力； α -螺旋含量略微降低2%^[79]。由紫外光谱发生变化表明蛋白质内容发色基团暴露在外，蛋白三级结构更加舒展。脱酰胺改变了玉米醇溶蛋白的构象，提高分子柔性，从而增加可作为食品加工中的表面活性剂或乳化剂应用。

3.1.5 燕麦蛋白

燕麦是人体营养的丰富来源，与小麦（9%~16%蛋白质）和大麦（9%~12%蛋白质）等其他谷物相比，燕麦因其高蛋白（占燕麦的15%~20%）和脂肪含量（占燕麦的3%~15%）而成为独特的谷物。燕麦中的主要蛋白质组分-球蛋白。燕麦球蛋白的分子结构非常紧密，在水中的溶解性较差，限制了燕麦和燕麦蛋白在食品中的用途。

Jiang 等^[68]研究酶法对燕麦蛋白脱酰胺作用，从红外光谱分析表明，PGase 脱酰胺使燕麦蛋白中 β -折叠结构的总含量从24.9%下降到14.1%，脱酰胺率为59%。无规则卷曲结构含量和 α -螺旋结构含量之和从55.1%增加到70.4%。根据 Reza 等^[80]研究得出 β -折叠结构是稳定的，而 α -螺旋、 β -转角和无规则卷曲结构是“环状”和相对柔性的结构。因此，结果发现 PGase 脱酰胺增加了燕麦蛋白二级结构的灵活性；也增加了三级结构中游离巯基含量和二硫键含量，这可能与蛋白质解折叠和聚集有关。

3.1.6 椰子蛋白

椰子蛋白（Coconut Protein, CP）是一种富含多种氨基酸的植物蛋白，具有降血脂、降低胆固醇等保健功能在食品和医疗应用中非常有意义^[81]。CP 作为原料的应用取决于蛋白质的功能特性，但 CP 溶解性低，限制在食品工业中应用^[69]。研究表明脱酰胺修饰可以改善椰子蛋白的功能特性。

酸法脱酰胺后的椰子蛋白脱酰胺度和水解度随酸浓度的增加而增加，进而使蛋白表面疏水性增加，这可能是脱酰胺后蛋白质无序结构的增加暴露更多的疏水基团，从而更容易水解^[69]。Supichcha 等^[82]从圆二光谱分析，发现脱酰胺使 α -螺旋结构的比例增加， β -折叠结构的比例增加。脱酰胺后 β -折叠含量的增加与对大豆分离蛋白的研究一致，可能是蛋白质的脱酰胺不仅产生羧化作用，使蛋白质分子负电荷增加，而且改变蛋白质的结构^[83]；从结构柔性变化分析发现脱酰胺可能会影响 CP 的三级结构，脱酰胺后使结构变得更加灵活。

3.2 不同植物蛋白脱酰胺功能特性影响

3.2.1 溶解性

蛋白质溶解性是热力学平衡条件下液相中存在的蛋白质与液相和固相中存在的蛋白质的比率^[73]。脱酰胺对蛋白质溶解性的影响是多方面的，可以通过提高蛋白质的亲水性、改变其在不同 pH 值下的溶解性以及增加必需氨基酸的可利用性来提高其在食品加工中的应用潜力^[7]。同时，不同来源的植物蛋白质对脱酰胺反应的响应也可能不同。

3.2.1.1 大豆分离蛋白

Inthaeoot 等^[84]在不同 pH 条件下用 PGase 酶对 SPI 进行脱酰胺处理，结果表明，脱酰胺后的 SPI 在酸性和中性条件下的溶解性明显提高（7%~20%）。Zheng 等^[19]用 PGase 酶对 SPI 改性影响，研究发现，PGase 酶处理的 SPI 的溶解性从8%提高到19.20%，这可能是因为 PGase 脱酰胺将谷氨酰胺残基转化为短肽侧链，减少了羟基或羧基的氢键和静电排斥，溶解性增加。苗杏^[85]探究 SPI 脱酰胺在不同 pH 值下的溶解度变化当 pH 值 5.0 时，未脱酰胺 SPI 溶解性 9.23%，经过脱酰胺后增加到16.33%~24.07%；当 pH 值 7.0 时，未处理 SPI 溶解度为 21.5%，脱酰胺后提高到最高 58%。脱酰胺后 SPI 溶解性增加可能是羧基数量增加，等电点降低，疏水区暴露，蛋白质的溶解性得到提高。

3.2.1.2 豌豆蛋白

Fang 等^[86]研究谷氨酰胺酶脱酰胺作用改变豌豆蛋白结构中表明在所有分析的 pH 值下,脱酰胺后蛋白溶解性都高于未处理的,尤其是当 pH 值为 5~9 时,脱酰胺 12 h 的溶解增加 50%。这可能是由于蛋白质结构展开和净电荷增加^[84]。Luo 等^[73]研究 PGase 酶介导的对豌豆蛋白脱酰胺作用,表明,表明脱酰胺处理提高了豌豆蛋白的溶解性。蛋白质溶解性随着脱酰胺度增加,当脱酰胺度 PGase 达到 25% 时,溶解性从 63.4% 提升至 80.4%。PGase 修饰后蛋白溶解性的增加可能是脱酰胺作用诱导的蛋白质酰胺基团向羧基的转化,增强蛋白质和水之间的相互作用,从而提高溶解性^[73]。

3.2.1.3 大米蛋白

Shi 等^[87]研究柠檬基天然低共熔溶剂脱酰胺提高大米蛋白溶解性,结果表明大米蛋白改性后溶解性在各 pH 值下均显著提高,pH 值 7 时提升了 70%,这可能是脱酰胺后蛋白质静电斥力增加。Liu 等^[75]研究谷氨酰胺酶脱酰胺作用大米蛋白,结果发现未脱酰胺的大米蛋白溶解性在 pH 值 5 和 pH 值 7 下的溶解度非常低(分别为 3.71% 和 8.62%),经谷氨酰胺酶脱酰胺后,脱酰胺度为 52.29% (48 h) 时,溶解性分别达到 55.18% 和 76.39%。这可能是蛋白质分子上净电荷的增加可以提高蛋白质-水相互作用和脱酰胺蛋白质具有较低的等电点。

3.2.1.4 玉米醇溶蛋白

Yie 等^[67]用 PGase 脱酰胺对玉米醇溶蛋白功能性质的影响,研究发现 PGase 酶对 α -玉米醇溶蛋白混合物在 70% 乙醇中进行脱酰胺处理,提高了在中性 pH 和水下的溶解性,pH 值 5.0 和 pH 值 7.0 时溶解性分别增加了 16 和 17 倍。这是由于脱酰胺改性后减小蛋白分子的聚集絮凝,从而增加了蛋白质的溶解性^[67]。Qu 等^[88]研究一种新的非热脱酰胺技术用于玉米醇溶蛋白的构象修饰,结果表明在脱酰胺过程中,蛋白质失去氨基获得强亲水性的羧基,使蛋白整体亲水性改善和水溶性增加,溶解性增加 20%。脱酰胺对玉米醇溶蛋白最显著的改善是提高蛋白的溶解性,玉米醇溶蛋白非极性氨基酸含量高,非极性氨基酸容易疏水聚集,导致粒径大、分散不均匀溶解性差^[88]。

3.2.1.5 燕麦蛋白

Leil 等^[89]研究脱酰胺对燕麦蛋白功能特性影响,结果显示溶解性提高了 2.2%。脱酰胺燕麦蛋白

溶解性的改善可能是由于其分子大小的减小和净电荷的增加。蛋白质分子净电荷的任何增加都可能增加蛋白质与水的相互作用,从而增加蛋白质的溶解性^[89]。Jiang 等^[68]采用 PGase 酶对燕麦蛋白脱酰胺,发现脱酰胺度为 59% 的 PGase 脱酰胺作用使燕麦蛋白质的溶解性从 32% 增加至 90%。燕麦蛋白溶解性的显著增加可能是蛋白质结构柔性的增加和蛋白质净电荷的增加。PGase 脱酰胺作用通过向燕麦蛋白中引入带负电荷的羧基侧链增加了燕麦蛋白分子间的电子排斥力。燕麦蛋白水溶性的增加可以提高其在水性食品中的利用率^[68]。

3.2.1.6 椰子蛋白

Sophitha 等^[69]通过物理(加热)^[90]、化学(盐酸 HCl)联合处理 CP 进行脱酰胺。研究发现,在不同 pH 条件下,脱酰胺 CP 的溶解性都高于未处理和对照样品。脱酰胺后的 CP 溶解性在 pH 值 7.0 时达到最高 55%;其次是 pH 值 5.0 (45%);pH 值 3.0 时最低 38%。这结果表明 pH 值 3.0 和 5.0 与 CP 的等电点相当接近,CP 等电点为 3.9。改性后的 CP 溶解性提高,可能是由于蛋白内部的静电斥力增加,减弱了蛋白分子的聚集,从而使蛋白质的溶解性增加^[34]。Supichcha 等^[82]研究 PGase 酶对 CP 脱酰胺的功能特性影响,结果发现,在不同 pH 值条件下溶解性改善不同,pH 值 7.0 时的溶解性高于 pH 值 3.0 和 5.0。脱酰胺 12 h 后,pH 值 7.0 时溶解度达到 83.63%,pH 值 3.0 为 51.85% 而 pH 值 5.0 只有 23.36%,溶解性提高与 Sophitha 研究一致认为可能是由于脱酰胺增加了蛋白质的静电斥力,减小蛋白分子聚集絮凝。

3.2.2 乳化性

蛋白质的乳化特性是食品工业的重要功能特征。由蛋白质形成的水包油乳液是胶体系统,用作递送营养剂、功能性脂质和其他物质^[6]。脱酰胺过程可以改变蛋白质的三级和四级结构,暴露出更多疏水性区域,这可能有助于改善蛋白质在油水界面的吸附能力,从而提升乳化性能^[7]。在实际应用中,需要考虑脱酰胺程度、pH 值、温度等因素对蛋白质乳化性的具体影响。

3.2.2.1 大豆分离蛋白

Jiang 等^[91]用热诱导和 PGase 酶对 SPI 脱酰胺研究,发现经过 PGase 脱酰胺后,表现出最高的乳化活性值 90.19 m²/g,乳化稳定性值 110.19 min 是未

脱酰胺的两倍,这可能是因为PGase脱酰胺后实现了更好的亲水-亲油平衡,并且在油水界面上更容易吸附。Inthawoot等^[92]用蛋白质-谷氨酰胺酶对大豆分离蛋白改性,结果发现改性后大豆分离蛋白的乳化活性提高了4.6%,ESI提高了9.32 min。朱啸宇^[93]用PGase酶对SPI脱酰胺处理,结果表明,乳化活性受到溶解度的影响,呈逐渐增加,pH值7.0时乳化活性提高0.55 m²/g;但随着脱酰胺过程的推移,乳化稳定性呈先增加后降低的趋势,开始阶段乳化稳定性增长最快,但反应12 h后开始逐渐降低(250~106 min)。

3.2.2.2 豌豆蛋白

Fang等^[86]研究谷氨酰胺酶脱酰胺作用改变豌豆蛋白结构影响,结果显示未脱酰胺豌豆蛋白的乳化活性高于改性后的。这可能是由于蛋白质柔性构象和表面疏水性的影响。目前对于脱酰胺作用改善豌豆蛋白的乳化性和起泡性尚未得到研究,因此,我们需要深入了解豌豆蛋白的乳化性和起泡性和脱酰胺作用的影响。这些结果将有助于豌豆蛋白在未来食品工业中的应用前景。

3.2.2.3 大米蛋白

脱酰胺处理可使大米蛋白乳化活性和乳化稳定性得到显著改善。Meter等^[94]研究表明,乳化活性随溶解性增加而增加,脱酰胺后大米蛋白的乳化活性增加了2.70~4.69倍,乳化稳定性也得到显著提高,乳化稳定性在脱酰胺处理1和4 h后,由原来的28.89%分别增加至60.12%和97.88%,这可能是因为脱酰胺处理促进了大米蛋白的溶解,使其发挥出较好的ESI。聂小华等^[95]酸法脱酰胺处理对大米蛋白功能特性的影响,发现脱酰胺后大米蛋白乳化活性和乳化稳定性分别提高了4.67倍和3.39倍,这是因为脱酰胺处理促进了大米蛋白的溶解,使其发挥出较好的乳化性。Shi等^[87]研究柠檬基天然低共熔溶剂脱酰胺提高大米蛋白的乳化性,发现脱酰胺后大豆蛋白的乳化活性显著提高(37.62~44.19 m²/g),这表明蛋白质的良好乳化活性与其高溶解性密切相关。

3.2.2.4 玉米醇溶蛋白

不同脱酰胺度玉米醇溶蛋白有不同的乳化性。Vanessa等^[23]利用碱对玉米醇溶蛋白进行脱酰胺修饰,结果显示玉米醇溶蛋白的ESI增加了62%。董世荣等^[96]研究在碱-水介质环境中利用碱对玉米醇溶蛋白脱酰胺,实验结果表明,玉米醇溶蛋白的乳化稳定性和乳化活性都随着脱酰胺度的增加而增加。在脱酰胺度为0.89%时,蛋白乳化活

性为1.07 m²/g;当脱酰胺度增加至34.70%时,蛋白乳化活性提高3倍,这可能是由于随着脱酰胺度增加表面疏水性较低^[97],乳化活性得以提高。脱酰胺度为0.89时,乳化稳定性为6.32%;但脱酰胺度增加至34.70%时,蛋白的乳化稳定性从6.32%提高到73.05%。这原因可能是脱酰胺度的增加使蛋白充分展开和电荷增加,从而促进蛋白在空气和水界面扩散,减少蛋白分子聚集^[98],得到良好的乳化稳定性。

3.2.2.5 燕麦蛋白

Leila等^[89]研究脱酰胺对燕麦蛋白功能特性影响,结果表明脱酰胺后燕麦分离蛋白的乳化活性增加,乳化活性提高一倍。脱酰胺作用对乳化活性的改善应该是溶解性和表面疏水性的增加。溶解度和表面疏水性的增加使乳化作用具有更好的疏水-亲水平衡^[89]。在脱酰胺后乳化稳定性从3 756减少至3 600 m²/g,尽管脱酰胺作用增加溶解性和表面疏水性会改善乳化稳定性,但净电荷的过度增加可能会降低蛋白质之间的相互作用,并阻止油-液界面形成弹性膜。Jiang等^[68]采用PGase酶对燕麦蛋白脱酰胺作用,燕麦蛋白乳化性得到极大改善。PGase脱酰胺作用对乳化性能的改善是燕麦蛋白结构柔性和表面电荷的增加。具有较高脱酰胺度的PGase-脱酰胺燕麦蛋白更容易被吸附到油-水界面上,并在乳液油滴之间引起较大的电子排斥力。化学脱酰胺和PGase脱酰胺会引起燕麦蛋白乳化稳定性的不同变化。PGase脱酰胺化提高了燕麦蛋白的乳化稳定性。使用盐酸的化学脱酰胺作用也显著提高了燕麦蛋白的乳化稳定性。但在70℃下用盐酸进行脱酰胺作用,燕麦蛋白的乳液稳定性略有下降^[89]。乳液稳定性的降低是因为蛋白质水解与脱酰胺作用同时发生^[68]。

3.2.2.6 椰子蛋白

Supichcha等^[82]研究PGase对CP脱酰胺修饰,结果发现,未脱酰胺CP的乳化活性高于改性后CP乳化活性。脱酰胺15 min后CP的乳化活性达到最低(17.76%),可能是由于可溶蛋白结构和蛋白质表面疏水性的影响。但乳化稳定性与乳化活性结果相反,所有脱酰胺CP的乳化稳定性均有所提高,脱酰胺12 h后CP的ESI提高2倍,这是由于脱酰胺使蛋白质在水-油界面向脂肪方向移动,从而增加了乳液的稳定性。Sophitha等^[69]通过物理化学法联合处理对CP脱酰胺影响。结果表明,未经脱酰胺CP的乳化活性低于脱酰胺后的CP,其脱酰胺后CP的乳化活性值最高达到67.43%。这可能是化学法脱酰胺后增加了蛋白溶解性,从而改善了CP的

乳化活性。与乳化活性相比,脱酰胺的 CP 乳化稳定性值低于未修饰的 CP,其未脱酰胺的乳化稳定性为 65.28%,而脱酰胺后的乳化稳定性只有 24.49%,这可能是脱酰胺后的 CP 静电斥力增加,进而使蛋白质之间相互作用减少^[90,99,100]。

3.2.3 起泡性

蛋白质的起泡性与其通过在界面形成薄蛋白质层来稳定气液界面的能力有关^[6]。脱酰胺可以导致蛋白质空间结构的变化,这可能会影响蛋白质在气-水界面上的展开和重排能力,从而改善起泡性和泡沫稳定性。通过脱酰胺反应,蛋白质的疏水性可能会增强,这有利于蛋白质分子在气-水界面上的吸附和稳定,进而提高起泡性^[2]。

3.2.3.1 大豆分离蛋白

蛋白质的起泡性与其通过在界面形成薄蛋白质层来稳定气液界面的能力有关。Zheng 等^[19]研究高效的 PGase 酶对 SPI 功能性质影响,结果发现经改性后 SPI 的起泡能力和起泡稳定性都得到改善,起泡能力 28.60% 提高到 40.10%,起泡稳定性 8% 提高到 38.95%,溶解度的增加增强了蛋白的起泡性。Xiang 等^[101]探究用谷氨酰胺酶修饰 SPI,发现起泡能力增加了 45%,表明起泡能力与表面疏水性高度正相关。谷氨酰胺酶修饰后有较高的表面疏水性。徐子惠^[102]研究谷氨酰胺酶对大豆分离蛋白脱酰胺,结果表明经谷氨酰胺酶处理后 SPI 的起泡能力提高至 102%,经过脱酰胺处理后,蛋白的溶解性有了明显提高,为蛋白分子以更快的速度扩散至气-水界面提供了条件。脱酰胺后的 SPI 在中性和弱酸性体系中的功能特性得到提高,这有助于其在半固体食品和液体饮料中的应用。

3.2.3.2 大米蛋白

龚燕丹^[103]用 HCl 对大米蛋白进行脱酰胺处理,研究发现脱酰胺大米蛋白起泡能力和起泡稳定性得到显著增加,起泡能力和起泡稳定性在脱酰胺 2 h 后均达到较佳,起泡能力提高了 5.92 倍;起泡稳定性提高了 1.92 倍。这与 Meter 等^[94]研究一致认为大米蛋白起泡性增强主要原因可能是脱酰胺后静电荷含量增加使蛋白质在空气-水界面充分吸附,从而蛋白质起泡性增强,即脱酰胺大米蛋白起泡能力和起泡稳定性得到显著增加。蔡玉红等^[104]酸法脱酰胺改善大米蛋白功能性质分析,表明起泡能力和起泡稳定性由 22.50% 和 80.40% 提高至 78.50% 和 151.70%。脱酰胺可能增强大米浓缩蛋白生产和稳

定高内相乳液的能力,这对于食品工业中的乳液产品生产具有重要意义。

3.2.3.3 玉米醇溶蛋白

天然玉米醇溶蛋白的起泡性差主要是由于蛋白高疏水性和不规则聚集体颗粒的存在,未经脱酰胺玉米醇溶蛋白的起泡能力值为 50.00%,起泡稳定性值为 106%。Qu 等^[88]研究开发了一种非热脱酰胺方法,采用冷等离子体协同酸改善泡沫性能,结果表明脱酰胺作用通过降低颗粒的表面疏水性和降低颗粒在气泡表面上吸附的能力改善蛋白的起泡性,脱酰胺后的蛋白起泡能力增加了 116%,起泡稳定性增加 22%。

3.2.3.4 燕麦蛋白

Leila 等^[89]研究脱酰胺对燕麦蛋白功能特性影响,脱酰胺作用后蛋白起泡能力从 280% 增加至 326%。通过酸处理增加燕麦蛋白分离物的溶解性,增强起泡能力,因为可溶性蛋白有助于起泡。起泡稳定性减少 18 min,脱酰胺后起泡稳定性降低是因为电荷的过度增加会减少蛋白质之间的相互作用,并阻止在空气-液体界面形成弹性膜,从而降低起泡稳定性。Mika 等^[105]研究脱酰胺作用和脂类对燕麦蛋白起泡性影响,发现脱酰胺作用起泡能力增加,这与 Leila 等^[89]研究结果一致,表明化学脱酰胺的燕麦蛋白由于脱酰胺蛋白的分子量降低和溶解性增加,从而起泡能力增加。

3.2.3.5 椰子蛋白

Supichcha 等^[82]研究 PGase 对 CP 脱酰胺对功能特性影响,结果发现,经 PGase 脱酰胺处理后 CP 的起泡能力增加,起泡稳定性降低;起泡能力从 4.67% 增加到 5.91%,起泡能力的增加可能是蛋白在空气-水界面的充分吸附;起泡稳定性随着脱酰胺反应时间的增加而降低,从 70% 降至 40%,这可能是因为脱酰胺改性后的蛋白质在界面没有得到充分伸展,吸附。Sophitha 等^[69]通过高温加热和 HCl 对 CP 进行脱酰胺研究。结果表明,未脱酰胺 CP 的起泡能力为 3.68%,脱酰胺后 CP 的起泡能力提高到 7.32%。表明高温和 HCl 的加入可能导致 CP 的部分变性和表面疏水性降低;此外,溶解性增加也是影响起泡能力增加的因素。对于起泡稳定性值,与 Supichcha 研究一致脱酰胺后 CP 的起泡稳定性值降低,未脱酰胺的 CP 显示出稳定泡沫的形成(100% 起泡稳定性),而脱酰胺后 CP 的起泡稳定性为 95.62%。

3.2.4 营养性

脱酰胺修饰反应是一种常见的食品加工方法,主要用于改善植物蛋白质的功能性和稳定性。这种反应也可能对植物蛋白质的营养性产生影响。脱酰胺修饰反应会导致一些氨基酸的损失,尤其是赖氨酸和精氨酸,这两种氨基酸对人体健康至关重要,这可能会降低蛋白质的营养价值。脱酰胺修饰还可能改变蛋白质的结构,从而影响其在人体内的消化和吸收,使蛋白质的生物利用度降低。Olivia等^[42]微生物谷氨酰胺转氨酶对面筋蛋白脱酰胺和蛋白质消化研究,发现蛋白的可消化性没有明显改变。龙佩等^[106]研究了酸法脱酰胺处理对大米、小麦、玉米蛋白体外消化率的影响,发现脱酰胺处理能在一定程度上提高小麦、大米和玉米蛋白的体外消化率,并且随着脱酰胺程度的升高,体外消化率也逐渐增大。因此,脱酰胺修饰反应对植物蛋白质的营养性影响是复杂的,既可能降低蛋白质的营养价值,也可能提高其营养价值。在进行脱酰胺修饰反应时,需要仔细控制反应条件,并尽可能通过优化反应条件来最大限度地保留蛋白质的营养价值。

以上众多研究表明燕麦蛋白、大米蛋白、椰子蛋白、玉米醇溶蛋白已成功地通过脱酰胺改性改善功能特性(如溶解性、乳化性、起泡性)和营养性。从而提高了它们的加工能力并扩大了它们在食品工业中的应用,如可以广泛地应用于肉制品、面制品、水产制品、素食制品等行业,通过不同的添加方式,如干法添加、水合胶体添加、乳化体添加等增强食品的营养价值和改善食品的感官特性。虽然植物蛋白脱酰胺可以改善植物蛋白的功能特性,但在实际的食物加工过程中,可能需要考虑酶的添加量、处理时间、温度等因素,确保食品的质量和安全性。为了脱酰胺方法对植物蛋白进行更好的改性,我们应该继续优化各种脱酰胺方法,使来自特定来源的蛋白质可以选择性地脱酰胺,同时也可以最大限度地减少副反应作用。相信在不久的将来脱酰胺技术会广泛应用探究改善植物蛋白功能特性。

3 结论

脱酰胺修饰可以有效地改善植物蛋白的功能特性,本文论述了目前脱酰胺主要方法以及对不同植物蛋白脱酰胺功能特性影响的研究进展。蛋白质脱酰胺导致带负电荷的羧基数量增加,静电排斥力增加,使蛋白质处于伸展状态,使原来的高级结构发

生改变,进而影响功能性质。植物蛋白质脱酰胺可以通过酸、碱的化学法、微波等的物理法、生物酶法和场酶协同来实现。使用化学法和物理法可以有效地脱胺,但可能导致不利的肽键水解和致癌或肾毒性化合物的形成。酶法具有更好的脱酰胺特异性和更少的副作用。对比其他几种方法酶法脱酰胺更推荐使用,未来可以致力于开发更多这样的专一性酶,以提高脱酰胺过程的效率和特异性。但酶法脱酰胺也面临高成本和不可回收等问题,因此酶法脱酰胺还需要继续开展更深层次的探索,如研究酶的生物合成法以降低成本,发展固定化酶技术以提高回收率。本文诸多实例已证明植物蛋白的脱酰胺改性是一个活跃的研究领域,具有提高植物蛋白在食品工业应用中的明显优势。未来研究可以集中在提高脱酰胺效率、降低成本、增强蛋白质的功能特性以及开发新型植物蛋白食品等方面。

参考文献

- [1] ABEDI E, POURMOHAMMADI K. Chemical modifications and their effects on gluten protein: an extensive review [J]. Food Chemistry, 2020, 343: 128398.
- [2] CAO Y P, RAFFAELE M. Food protein amyloid fibrils: origin, structure, formation, characterization, applications and health implications [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2019, 269: 334-356.
- [3] 张迪. 多糖—植物蛋白复合物的制备及特性研究进展[J]. 食品与机械, 2024, 40(4): 227-232.
- [4] THEOCHARIS I, OLIVER C W, LAUREN C D, et al. The efficacy of essential amino acid supplementation for augmenting dietary protein intake in older adults: implications for skeletal muscle mass, strength and function [J]. The Proceedings of the Nutrition Society, 2021, 80(2): 230-242.
- [5] 刘兴丽. 蛋白质谷氨酰胺酶在植物蛋白改性中的应用研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(9): 241-247.
- [6] CHEN X, FU W Y, LUO Y C, et al. Protein deamidation to produce processable ingredients and engineered colloids for emerging food applications [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20: 3788-3817.
- [7] LIU X, WANG C, ZHANG X W, et al. Application prospect of protein-glutaminase in the development of plant-based protein foods [J]. Foods, 2022, 11(3): 435-440.
- [8] ANAËLLE R, LOUISE S, BRIGITTE L, et al. Greenhouse gas emissions, energy demand and land use associated with omnivorous, pesco-vegetarian, vegetarian, and vegan diets accounting for farming practices [J]. Sustainable

- Production and Consumption, 2020, 22: 138-146.
- [9] STEPHAN V V, SCOTT L K, FREDERICK D P. Plant-based meats, human health, and climate change [J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2020, 4: 120-128.
- [10] 侯姣靓,宋佳慧,章旋,等.6种植物蛋白粉的冲泡特性与感官特性比较[J].*食品与生物技术学报*,2024,43(5):64-71.
- [11] FELIX A, ROTIMI E A, AKINBODE A A. Modification of plant proteins for improved functionality: a review [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 20: 198-224.
- [12] AMANDA G A S, JOÃO B L, YARA M F M, et al. Influence of emerging technologies on the utilization of plant proteins [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 1-19.
- [13] MARYAM N N, ALI S D, RAFFAELE M. Modification approaches of plant-based proteins to improve their techno-functionality and use in food products [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 118: 106789.
- [14] ZHAO M, XIONG W X, CHEN B, et al. Enhancing the solubility and foam ability of rice glutelin by heat treatment at pH value 12: insight into protein structure [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 103: 105626.
- [15] METER K S D. Functionalisation of pea protein by tryptic hydrolysis-characterisation of interfacial and functional properties [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 86: 134-140.
- [16] ALI S D, MARYAM N N, WU J F, et al. Maillard conjugation as an approach to improve whey proteins functionality: a review of conventional and novel preparation techniques [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 91: 1-11.
- [17] MILAD H, ALBERT L, SHIVA P. Optimization of extraction and deamidation of edible protein from evening primrose (*Oenothera biennis* L.) oil processing by-products and its effect on structural and techno-functional properties [J]. *Food Chemistry*, 2020, 4: 12713.
- [18] OLADIPUPO O, IYIOLA O O, OLAMIDE S F, et al. Enzymatic modification of plant proteins for improved functional and bioactive properties [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2022, 16: 1216-1234.
- [19] ZHENG N, LONG M F, ZHANG Z H, et al. Functional, structural properties and interaction mechanism of soy protein isolate nanoparticles modified by high-performance protein-glutaminase [J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 139: 108594.
- [20] QU R D, DAI T, WU J J, et al. The characteristics of protein-glutaminase from an isolated *Chryseobacterium cucumeris* strain and its deamidation application [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 969445.
- [21] GUDRUN H, JACOB E, TIMO S, et al. A novel protein glutaminase from *Bacteroides helcogenes*-characterization and comparison [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2019, 104: 187-199.
- [22] YING Y, LI H. Recent progress in the analysis of protein deamidation using mass spectrometry [J]. *Methods*, 2022, 200: 42-57.
- [23] VANESSA C, ROBERTO A, RAFAEL V D, et al. Effect of alkaline deamidation on the structure, surface hydrophobicity, and emulsifying properties of the Z19 α -Zein [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55(2): 439-445.
- [24] HAMADA J S, MARSHALL W E. Preparation and functional properties of enzymatically deamidated soy proteins [J]. *Journal of Food Science*, 1989, 54: 598-601.
- [25] RICHARD L, VERNE S. Role of peptide conformation in the rate and mechanism of deamidation of asparaginyl residues [J]. *Biochemistry*, 1988, 27(20): 76717.
- [26] 廖兰,赵谋明,汪少芸,等.脱酰胺改性蛋白和肽的研究进展[J].*食品科学*,2013,34(9):340-345.
- [27] 靳冰.脱酰胺大豆分离蛋白与壳聚糖相互作用及其流变特性研究[J].杭州:浙江工商大学,2020.
- [28] JAWAD A, METER A, ZHOU S M, et al. Effect of thermal processing on cholesterol synthesis, solubilisation into micelles and antioxidant activities using peptides of *Vigna angularis* and *Vicia faba* [J]. *LWT*, 2020, 129: 109504.
- [29] WANG Z, HE X J, YAN L M, et al. Enhancing enzymatic hydrolysis of corn stover by twin-screw extrusion pretreatment [J]. *Industrial Crops and Products*, 2020, 143: 111960.
- [30] HUANG S, LI Y L, LI C L, et al. Effects of ultrasound-assisted sodium bisulfite pretreatment on the preparation of cholesterol-lowering peptide precursors from soybean protein [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 183: 295-304.
- [31] 蔡建荣,张银志,孙秀兰,等.微波处理对大豆分离蛋白功能特性的影响[J].*安徽农业科学*,2009,37(2):453-454,489.
- [32] TROY W C, LAWRENCE A J. Twin-screw extrusion texturization of extruded-expelled soybean flour [J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2001, 78(8): 781-786.
- [33] HE W, YANG R, ZHAO W, et al. Effect of acid deamidation-*alcalase* hydrolysis induced modification on functional and bitter-masking properties of wheat gluten hydrolysates [J]. *Food Chemistry*, 2019, 277: 655-663.
- [34] QIU C Y, SUN W Z, ZHAO M M, et al. Comparison of the conformational and nutritional changes of deamidated wheat gliadin by citric acid and hydrochloric acid [J]. *Journal of Cereal Science*, 2014, 60(1): 143-150.
- [35] LIAO L, LIU T X, ZHAO M M. Aggregation behavior of wheat gluten during carboxylic acid deamidation upon hydrothermal treatment [J]. *Journal of Cereal Science*, 2011, 54(1): 129-136.

- [36] QIU C, SUN W Z, CUI C, et al. Effect of citric acid deamidation on *in vitro* digestibility and antioxidant properties of wheat gluten [J]. Food Chemistry, 2013, 141(3): 2772-2778.
- [37] LIAO L, HUANG X Y, CHEN L P, et al. Comparative characterization of the deamidation of carboxylic acid deamidated wheat gluten by altering the processing conditions [J]. Food Chemistry, 2016, 210: 520-529.
- [38] YANG J, MENG D, WU Z J, et al. Modification and solubility enhancement of rice Protein and its application in food processing: a review [J]. Molecules, 2023, 28(10): 40-78.
- [39] GUAN J, TAKAI R, TORAYA K, et al. Effects of alkaline deamidation on the chemical properties of rice bran protein [J]. Food Science and Technology Research, 2017, 23: 697-704.
- [40] WANG Y, ZHANG Z L, MA H L, et al. Lysinoalanine formation and conformational characteristics of rice dreg protein isolates by multi-frequency countercurrent s-type sonochemical action [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 69: 105257.
- [41] HITOMI K, AKIHIRO S, HIDETOSHI S, et al. Improvement of digestibility, reduction in allergenicity, and induction of oral tolerance of wheat gliadin by deamidation [J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2007, 71(4): 977-985.
- [42] OLIVIA O, SARAH R, K S, et al. The use of microbial transglutaminase in a bread system: A study of gluten protein structure, deamidation state and protein digestion [J]. Food Chemistry, 2021, 340: 127903.
- [43] 方梦雪. 转谷氨酰胺酶诱导的不同交联程度鱼糜凝胶消化吸收特性研究[D].武汉:华中农业大学,2023.
- [44] PEDRO F, FILIPE C. Chapter 19-microbial enzymes for the food industry [J]. Biotechnology of Microbial Enzymes, 2017, 12: 513-544.
- [45] FANG M X, LUO X Y, XIONG S B, et al. In vitro trypsin digestion and identification of possible cross-linking sites induced by transglutaminase (TGase) of silver carp (*hypophthalmichthys molitrix*) surimi gels with different degrees of cross-linking [J]. Food Chemistry, 2021, 364: 130443.
- [46] ZANG X D, PENG L, CHEN Y, et al. Improved freeze-thaw stability of o/w emulsions prepared with soybean protein isolate modified by papain and transglutaminase [J]. LWT, 2019, 104: 195-201.
- [47] WANG L M, YU B, WANG R X, et al. Biotechnological routes for transglutaminase production: recent achievements, perspectives and limits [J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 81: 116-120.
- [48] YOHANNA B M, FLAVIA V F, MATÍAS A M. L-Glutamine, peptidyl and protein-glutainases: structural features and applications in the food industry [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2022, 38(11): 204.
- [49] LU X, POON T C W, ZHANG H. Mass production of active recombinant chryseobacterium proteolyticum protein glutaminase in escherichia coli using a sequential dual expression system and one-step purification [J]. IUBMB Life, 2020, 72: 2391-2399.
- [50] LENG W J, LI Y, LIANG X, et al. Discovery and mechanistic analysis of a novel source protein glutaminase PG5 and its potential application [J]. Food Chemistry, 2024, 457: 140-121.
- [51] ZHANG G Q, MA S J, LIU X, et al. Protein-glutaminase: research progress and prospect in food manufacturing [J]. Food Bioscience, 2021, 43: 101314.
- [52] WANG Y X, ANWAR N, ZHANG C, et al. Effects of ultrasound pretreatment on the enzymolysis of hybrid sturgeon (*huso dauricus*×*acipenser schrenckii*) protein and the structural, functional, and antioxidant properties of hydrolysates [J]. LWT, 2023, 188: 115421.
- [53] JIN J, MA H L, QU W J, et al. Effects of multi-frequency power ultrasound on the enzymolysis and structural characteristics of corn gluten meal [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 24: 55-64.
- [54] CHEN L, CHEN J S, REN J Y, et al. Effects of ultrasound pretreatment on the enzymatic hydrolysis of soy protein isolates and on the emulsifying properties of hydrolysates [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(6): 2600-2609.
- [55] LIANG G J, CHEN W P, QIE X J, et al. Modification of soy protein isolates using combined pre-heat treatment and controlled enzymatic hydrolysis for improving foaming properties [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 105: 105-764.
- [56] LI S Y, YANG X, ZHANG Y Y, et al. Effects of ultrasound and ultrasound assisted alkaline pretreatments on the enzymolysis and structural characteristics of rice protein [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2016, 31: 20-28.
- [57] HAN L, LI J L, JIANG L T, et al. Changes in the structure and functional properties of soybean isolate protein: effects of different modification methods [J]. Food Chemistry, 2024, 432: 137-214.
- [58] QIU C Y, SUN W Z, ZHAO Q Z, et al. Emulsifying and surface properties of citric acid deamidated wheat gliadin [J]. Journal of Cereal Science, 2013, 58(1): 68-75.
- [59] GBEMISOL J F, HARSHARN G, ASGAR F, et al. Investigating the impact of ultrasound pretreatment on the physicochemical, structural, and antioxidant properties of lupin protein hydrolysates [J]. Food and Bioprocess Technology, 2021, 14(11): 2004-2019.

- [60] NEGIN Y, SOLEIMAN A. Food proteins: solubility & thermal stability improvement techniques [J]. Food Chemistry Advances, 2022, 1: 100090.
- [61] NEGAR G, EBRAHIM H. Physical and oxidative stability of emulsions treated with bitter almond gum-soy protein isolate maillard conjugates [J]. LWT, 2021, 152: 112-352.
- [62] LI Q Y, ZHENG J B, GE G, et al. Impact of heating treatments on physical stability and lipid-protein co-oxidation in oil-in-water emulsion prepared with soy protein isolates [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 100: 105-167.
- [63] FANG Y L, XIANG H, SUN D X, et al. Enhancing the usability of pea protein isolate in food applications through modifying its structural and sensory properties via deamidation by glutaminase [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(6): 1691-1697.
- [64] JONATHAN O'S, MICHAEL P, JACK B. The effect of ultrasound upon the physicochemical and emulsifying properties of wheat and soy protein isolates [J]. Journal of Cereal Science, 2016, 69: 77-84.
- [65] 廖兰, 韩雪跃, 李章发, 等. 小麦面筋蛋白分子聚集态对脱酰胺程度的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(10): 80-85, 62.
- [66] LI T, WANG L, CHENG Z X, et al. Electron beam irradiation induced aggregation behaviour, structural and functional properties changes of rice proteins and hydrolysates [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 97: 105-192.
- [67] YIE H Y, SHOTARO Y, YEUN S G, et al. Effects of enzymatic deamidation by protein-glutaminase on structure and functional properties of alpha-zein [J]. Journal of Agricultural Food Chemistry, 2004, 52(23): 7094-7100.
- [68] JIANG Z Q, TUULA S S, HANNU S, et al. Oat protein solubility and emulsion properties improved by enzymatic deamidation [J]. Journal of Cereal Science, 2015, 64: 126-132.
- [69] SOPHITHA M, APISADA R. Improvement of solubility, foaming, and emulsification properties of coconut (*Cocos nucifera* L.) protein by non-enzymatic deamidation [J]. LWT, 2022, 153: 112-493.
- [70] GRAZINA J, DAIVA Z, KAROLINA T R, et al. Functionalisation of flaxseed proteins assisted by ultrasonication to produce coatings enriched with raspberries phytochemicals [J]. LWT, 2020, 124: 109-180.
- [71] YAO X T, ZHAO X H. Pre-deamidation of soy protein isolate exerts impacts on transglutaminase-induced glucosamine glycation and cross-linking as well as properties of the products [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(7): 2418-2425.
- [72] A.C.Y. LAM, A. CAN KARACA, R.T. Tyler. Pea protein isolates: structure, extraction, and functionality [J]. Food Reviews International, 2018, 34(2): 126-147.
- [73] LUO L J, DENG Y Y, LIU G, et al. Enhancing solubility and reducing thermal aggregation in pea proteins through protein glutaminase-mediated deamidation [J]. Foods, 2023, 12(22): 4130.
- [74] MOHAMED-L C, JEAN-L M, NICOLAS S, et al. Heat-induced soluble protein aggregates from mixed pea globulins and β -lactoglobulin [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(13): 2780-2791.
- [75] LIU Y L, LI X H, ZHOU X L, et al. Effects of glutaminase deamidation on the structure and solubility of rice glutelin [J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 44(10): 2205-2210.
- [76] 徐群娜, 白忠薛, 马建中. 玉米醇溶蛋白的化学改性及应用研究进展[N]. 材料导报, 2021, 35(3): 3194-3203.
- [77] SHABBIR A, LIU F, WU J M, et al. Effect of transglutaminase crosslinking on solubility property and mechanical strength of gelatin-zein composite films [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 116: 106-649.
- [78] JOVANA G, FISHMAN A. Enzymatic and chemical modification of zein for food application [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 112: 507-517.
- [79] ZHOU L J, XU G R, ZHANG Z, et al. Surface activity and safety of deamidated zein peptides [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2018, 540: 150-157.
- [80] REZA T, SEYED V H. Chapter 2-proteins, peptides, and amino acids [J]. Nutraceutical and Functional Food Components, 2017: 15-38.
- [81] SUGANTHI R, ANITHA M C, RAVEENDRAN S R, et al. Coconut kernel protein in diet protects the heart by beneficially modulating endothelial nitric oxide synthase, tumor necrosis factor-alpha, and nuclear factor-kappaB expressions in experimental myocardial infarction [J]. Journal of Food and Drug Analysis, 2013, 21(3): 325-331.
- [82] SUPICHCHA K, SOMRUEDEE T, PRANEE A, 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.
- [83] HAN L, ZHOU S J, ZHANG X Y, et al. Effect of carbohydrate type on the structural and functional properties of Maillard-reacted black bean protein [J]. Journal of Food Science, 2022, 87(1): 165-177.
- [84] INTHAWOOT S, ELVIRA G D M, KEITH R C. Optimization of the enzymatic deamidation of soy protein by protein-glutaminase and its effect on the functional properties of the protein [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(21): 11621-11628.
- [85] 苗杏. 蛋白质谷氨酰胺酶菌株选育及酶解大豆蛋白的应用研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2021.

- [86] FANG L Y, XIANG H, SUN D X. Enhancing the usability of pea protein isolate in food applications through modifying its structural and sensory properties via deamidation by glutaminase [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(6): 1691-1697.
- [87] SHI W Y, XIE H X, KEFAN O, et al. Enhancing the solubility and emulsion properties of rice protein by deamidation of citric acid-based natural deep eutectic solvents [J]. Food Research International, 2024, 175: 113762.
- [88] QU Z H, CHEN G Y, YANG T L. Mechanisms underlying the formation of non-thermal deamidated zein via synergistic treatment of cold plasma with acid: improved foam performance [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 146: 109-195.
- [89] LEIL A M, MAHDI K, HAHEDI M. Effects of succinylation and deamidation on functional properties of oat protein isolate [J]. Food Chemistry, 2009, 114(1): 127-131.
- [90] 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, 2023, 20: 100984.
- [91] JIANG Y Q, WANG Z J, HE Z Y, et al. Effect of heat-induced aggregation of soy protein isolate on protein-glutaminase deamidation and the emulsifying properties of deamidated products [J]. LWT, 2022, 154: 112328.
- [92] INTHAWOOT S, LEE S Y. Effect of enzymatic deamidation of soy protein by protein-glutaminase on the flavor-binding properties of the protein under aqueous conditions [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(32):7817-7823.
- [93] 朱啸宇.蛋白质谷氨酰胺酶的制备、性质及其在植物蛋白中的应用研究[M].上海:华东师范大学,2021.
- [94] METER A, W P, RAO R M. Solubilized wheat protein isolate: functional properties and potential food applications [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1999, 47(4): 1340-1345.
- [95] 聂小华,龚燕丹,许丹,等.酸法脱酰胺处理对大米蛋白功能特性的影响[J].食品与发酵工业,2015,41(5):85-88.
- [96] 董世荣,王丽,高昂,等.脱酰胺对玉米醇溶蛋白乳化特性和结构的影响[J].食品与发酵工业,2020,46(17):67-72.
- [97] TENG M J, WEI Y S, HU T G, et al. Citric acid cross-linked zein microcapsule as an efficient intestine-specific oral delivery system for lipophilic bioactive compound [J]. Journal of Food Engineering, 2020, 281: 109993.
- [98] LI L, YAO P. High dispersity, stability and bioaccessibility of curcumin by assembling with deamidated zein peptide [J]. Food Chemistry, 2020, 319: 126577.
- [99] WANG Y G, GUAN J, ZHOU Y, et al. Improving solubility and emulsifying property of wheat gluten by deamidation with four different acids: effect of replacement of folded conformation by extended structure [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 72: 105-114.
- [100] A.M. M, Y.B. C M, I. A. Virgin coconut oil: emerging functional food oil [J]. Trends in Food Science & Technology, 2009, 20(10): 481-487.
- [101] XIANG H, SUN D X, CUI Y, et al. Modification of soy protein isolate by glutaminase for nanocomplexation with curcumin [J]. Food Chemistry, 2018, 268: 504-512.
- [102] 徐子惠.大豆分离蛋白的酶法改性及其体外模拟胃消化特性的研究[D].广州:华南理工大学,2024.
- [103] 龚燕丹.脱酰胺耦合美拉德修饰大米蛋白的制备、功能性质及结构表征[D].杭州:浙江工业大学,2018.
- [104] 蔡玉红,刘欢,谢明勇.酸法脱酰胺改善大米蛋白的溶解性及其功能性质分析[J].食品研究与开发,2023,44(24):30-37.
- [105] MIKA I, ANGGA C, SANNA H, et al. The effect of deamidation and lipids on the interfacial and foaming properties of ultrafiltered oat protein concentrates [J]. LWT, 2022, 169: 114016.
- [106] 龙佩,张晖,王立,等.脱酰胺处理对不同谷物蛋白体外消化率的影响[J].现代食品科技,2015,31(9):162-168.