

花生蛋白改性技术研究进展

庞 磊¹, 郑嘉宜², 刘伯业^{3*}

(1. 郑州市食品药品检验所, 郑州 450001; 2. 河南工业大学国际教育学院, 郑州 450001;
3. 河南工业大学粮油食品学院, 郑州 450001)

摘 要: 花生是一年生草本植物, 起源于南美洲热带、亚热带地区, 是世界上主要的食用植物油料作物之一, 在全国大部分地区都有种植。作为花生榨油之后的主要副产物, 花生饼粕中约含有 50% 的蛋白质, 丰富的花生资源为花生蛋白的研究与开发利用提供了充足的原料, 由此也有力地推动了花生蛋白产品的迅速发展。花生蛋白不仅所含氨基酸种类比较齐全, 而且所含人体必需氨基酸的比例较高, 是植物蛋白中为数不多能替代动物蛋白的理想营养佳品, 通过蛋白质改性技术可以修饰蛋白质的功能特性, 提高其加工性能, 拓宽花生蛋白在各领域中的应用范围。本文从物理改性、化学改性、酶法改性 3 个方面探讨花生蛋白改性技术对其功能特性所产生的影响, 物理方法主要包括超高压均质、热处理、超声处理、低温等离子体、臭氧、反胶束和冻融循环等; 化学方法包括糖基化、酰化、磷酸化、pH 偏移处理和多酚化合物处理等; 生物方法主要包括酶法水解和酶法交联处理两种。此外, 本文总结了不同改性方法的作用机制及其对花生蛋白性质的影响, 同时展望了花生蛋白改性技术的应用及发展趋势, 旨在为花生蛋白的开发利用和未来发展奠定基础。

关键词: 花生蛋白; 物理改性法; 化学改性法; 酶改性法

Research progress on the modification technology of peanut protein

PANG Lei¹, ZHENG Jia-Yi², LIU Bo-Ye^{3*}

(1. Zhengzhou Food and Drug Inspection Institute, Zhengzhou 450001, China; 2. School of International Education, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 3. College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

ABSTRACT: Peanut is an annual herb, which originated in tropical and subtropical regions of South America. It is one of the main edible plant oil crops in the world, and it is planted in most parts of China. As the main by-product of peanut oil extraction, peanut meal contains about 50% protein. The abundant peanut resources provide sufficient raw materials for the research, development and utilization of peanut protein, which also strongly promotes the rapid development of peanut protein products. Peanut protein not only contains a complete variety of amino acids, but also contains a high proportion of essential amino acids for human body. It is one of the few ideal nutritional products in plant protein that can replace animal protein. Through protein modification technology, the functional characteristics of protein can be modified, its processing performance can be improved, and the application range of peanut protein

基金项目: 国家自然科学基金项目(31901640)、河南省青年人才托举工程项目(2021HYTP041)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (31901640), and the Young Elite Scientists Sponsorship Program by Henan Association for Science and Technology (2021HYTP041)

***通信作者:** 刘伯业, 博士, 讲师, 主要研究方向为蛋白质加工理论与技术。E-mail: liuboye@aliyun.com

***Corresponding author:** LIU Bo-Ye, Ph.D, Lecturer, College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, No.100, Lianhua Street, High-tech Zone, Zhengzhou 450001, China. E-mail: liuboye@aliyun.com

in various fields can be broaden. This paper discussed the influence of peanut protein modification technology on its functional characteristics from 3 aspects: Physical modification, chemical modification and enzymatic modification. The physical methods mainly include ultra-high pressure homogenization, heating, ultrasonic, low-temperature plasma, ozone, reverse micelles and freeze-thaw cycles. The chemical methods include glycosylation, acylation, phosphorylation, pH-shifting treatment and polyphenolic compounds. The enzymatic methods mainly include enzymatic hydrolysis and enzymatic cross-linking. This article systematically summarized the mechanisms of the various modification methods and their impact on the properties of peanut protein, and discussed future trends in the application and development of peanut protein modification technology, in order to lay a foundation for the development and utilization of peanut protein and its future development.

KEY WORDS: peanut protein; physical modification method; chemical modification method; enzymatic modification method

0 引言

花生, 作为全球最主要的油料作物之一, 富含单不饱和脂肪、维生素 E、烟酸、叶酸、锰和蛋白质等多种营养物质。目前, 国内花生的主要用途以榨油为主, 制油工艺中会产生花生粕、花生壳及其他产物, 其中花生粕中含有大量花生蛋白(peanut protein, PP)^[1]。PP 是一种营养价值高、自然资源丰富、抗营养因子含量少、必需氨基酸含量丰富的优质植物蛋白^[2]。尽管 PP 具有这些突出优点, 但由于其自身的天然刚性球状结构和热榨制取工艺对其的影响, 天然 PP 的性能一般难以满足现代食品企业生产环节的需求, 极大程度上约束了其在食品工业中的应用范围^[3-4]。因此, 探究安全且高效的 PP 改性技术, 提高 PP 的营养价值和功能特性, 生产具有高附加值的产品成为许多学者和专家在食品领域中关注的热点。

蛋白质改性是指使用物理、化学和生物等技术, 改变特定的氨基酸残基与多肽链排列顺序, 使其相对分子质

量、分子空间结构、氨基酸组成、静电荷、表面疏水性等方面发生变化, 从而赋予蛋白质更优的特定功能属性^[5]。如图 1 所示, 已知的 PP 改性技术主要有物理改性、化学改性和酶法改性等方法。本文通过归纳和总结 PP 改性的不同方法, 阐述其基本概念及相应的作用效果, 以期 PP 的进一步开发利用和未来发展提供借鉴。

1 物理改性法

物理改性被广泛应用于 PP, 其主要优势是安全、成本低、无杂质污染、作用时间短且对食品本身原有的营养特性影响较小。物理改性主要运用挤压、磁、热、电等方法, 一般采用机械处理的方式改变蛋白质分子的大小、折叠和聚集形态, 从而改善其构象, 提高其功能特性。然而由于物理改性通常只能用于改善蛋白质分子的高级结构, 不会改变蛋白质的一级结构, 因此该方法可以应用的范围相对较窄。现阶段, 研究中常见的 PP 物理改性法主要是超高压均质、热改性和超声波改性等方法^[6-8]。

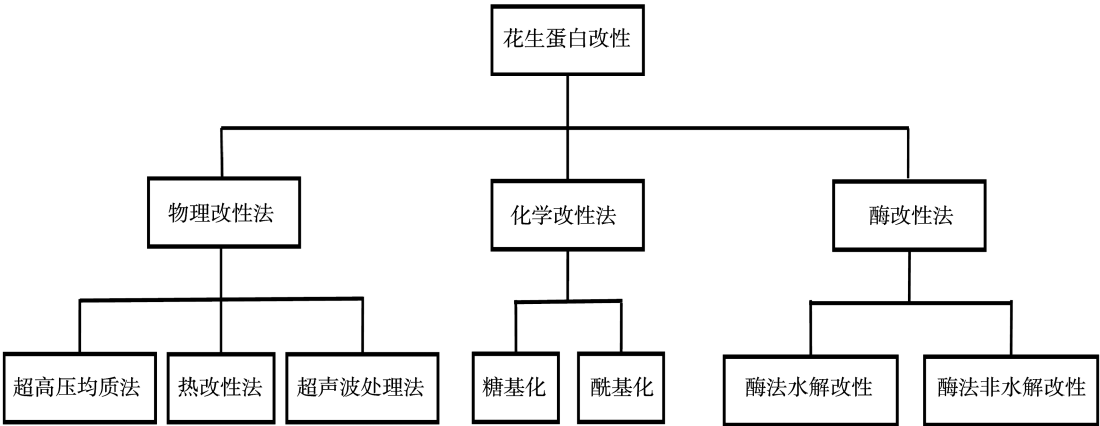


图 1 花生蛋白改性的主要方法
Fig.1 Main methods of the modification of peanut protein

1.1 超高压均质法

超高压处理普遍应用于 PP 改性, 能够使 PP 降解为亚基, 暴露大量的极性基团, 从而改变 PP 的功能特性, 可应用于构建 PP 稳定乳液和降低致敏蛋白的免疫反应性。超高压均质过程中蛋白质会出现许多不规则的细裂纹, 使 PP 微观结构发生了改变, 暴露更多的疏水基团, 有助于凝胶过程中的蛋白质分子间的相互作用, 使更多的水分滞留, 从而提高了其乳化活性指数、起泡能力、溶解度和持水性等功能特性^[9]。高压微射流处理能够促进蛋白内部疏水基团暴露在花生分离蛋白(peanut protein isolate, PPI)分子表面, 且增加碰撞的概率, 改变了原料的极性环境, 增强了蛋白表面的疏水性, 促进了分子间的相互作用, 增加二硫键的形成, 减少总巯基含量, 削弱静电斥力, 从而增强聚集, 最终使得乳液失稳^[10]。高温高压被认为是一种改变花生过敏原含量和结构的有效途径。高温高压混合体系, 可导致致敏蛋白溶解度下降, 同时可使溶解性片段的构象和结构发生改变, 导致其免疫亲和力下降, 从而降低了其免疫反应性^[11]。

1.2 热改性法

热改性法是物理改性蛋白质领域中一种常见的技术, 通过加热使蛋白质分子结构发生变化从而改变其特性, 这些特性和变化程度主要取决于蛋白质热处理的温度范围和时间。通常, 热改性对蛋白质的三级结构产生的影响是可逆的, 对二级结构的影响是不可逆的^[12]。PP 的二级结构改变并引起聚集和水解会导致其与人体内的免疫球蛋白 E (immunoglobulin E, IgE) 结合能力降低, 从而使其致敏性下降^[13-14]。热改性温度高达一定程度时, 将会使花生伴球蛋白变性, 此时球蛋白肽链开始相对剧烈的伸展, 一部分通过表面疏水作用及二硫键的重组结合生成分子量更大的聚集条带, 另一部分则偏移到了分子量更小的区域, 增加了蛋白质的表面疏水性, 同时高温减小了乳浊体系中液滴平均粒径, 从而使乳化性升高。赵冠里等^[15]对 PPI 施加干热烘烤, 随着烘烤时间的增加, 在 pH 为 7.0 时, PPI 比天然 PP 的溶解度增加了 19%, 同时伴随着 PPI 中伴球蛋白的聚集变性, 球蛋白的肽链展开, 其表面疏水性增加, 促使 PPI 的乳化性升高。热处理在凝胶工艺上有广泛应用, 干热处理可使 PP 的分子充分打开, 从而形成一定网络结构, 锁住水分, 形成凝胶, 同时由于空间结构发生变化, 导致巯基暴露, 蛋白质分子内和分子间的疏水基团交联形成二硫键, 可进一步有效改善凝胶硬度和凝胶弹性, 降低其脆度和黏合性^[16]。由此可见, 热改性有助于 PP 在食品、化工以及生物材料领域的进一步应用。

1.3 超声波处理法

超声波改性处理通过改变蛋白质高级结构和分子聚

集状态, 从而改变 PP 的功能特性。从分子水平, 超声波利用空化效应, 即使用超声波时系统中的气泡快速形成继而破裂, 引起温度升高, 则局部产生压力差, 使局部区域的流体产生强烈的剪切力从而改变蛋白质的粒径、结构和表面疏水性来影响其性能^[17]。此外, 超声波还会使蛋白质的巯基和二硫键展开, 改变蛋白质的溶解度、表面电荷、表面疏水性和分子的相互作用, 进而提高 PP 的溶解性和乳化性能。LI 等^[18]采用超声波改性和加热处理对 PPI 进行糖基化改性, 研究发现, 在 pH 3~9 的范围内, PPI-葡聚糖的溶解度得到改善, 在 pH>7 时, PPI-阿拉伯胶的溶解度得到改善。从宏观水平, 在加工 PP 领域, 超声改性提取被认为是一种有效的改性技术, 同时超声作为复合改性的预处理手段也得到了广泛认可。超声波产生的瞬时高温与压力会使 PP 解折叠, 暴露出大量疏水基团并且粒径显著减小, 进而增大了蛋白中的自由氨基和糖分子还原末端羰基的结合率, 提高了反应产率^[19]。与常规的热处理相比, 超声波作用更易于将 PP 的结构转化为无序状态, 暴露出更多的自由氨基, 从而有利于提高 PP 接枝改性的接枝率^[20]。此外, 不同的超声波参数也会影响其改性效果, 选择不同的温度、作用时间和功率, PPI 的三级结构会有不同程度的改变^[21], 在特定的反应参数下, PP 的吸水性、持油性、乳化性、乳化稳定性、溶解性、起泡性、起泡稳定性和最低凝胶点等功能特性均得到了显著改善^[22]。

1.4 其他物理改性方法

目前应用于蛋白质改性的其他物理改性方法有低温等离子体^[23]、臭氧、反胶束和冻融循环等, 通过蛋白质肽链的解聚和重组, 改变分子聚集状态, 提高蛋白质的持水性、溶解度和乳化特性。低温等离子体产生的高能粒子通过能量传递, 对 PP 表面进行轰击, 改变分子静电相互作用, 氨基酸侧链变化, α -螺旋和 β -转角含量降低, β -折叠和无规则卷曲的含量增加, 使 PP 结构从有序和紧密变得无序和松散, 从而引起蛋白质功能性质的改善^[24-25]。蛋白分子在等离子体的作用下, 被分解成较小的分子, 粒径减小, 破坏了二级结构的有序度, 改变了 PP 的构象, 使得其溶解性、持水性和吸油性能都有显著的提升^[26]。臭氧处理 PP 产生氧自由基, 巯基被氧化形成二硫键, 含量升高, 其热稳定性逐渐增加, PP 的结构更加紧密^[27]。反胶束和冻融循环改性能使蛋白质游离巯基含量增加, 表面疏水性增加, 提高其乳化能力。反胶束是表面活性分子在非极性有机溶剂中自发形成的具有热力学稳定性的纳米级聚集体, 其内部形成“水池”, 可以溶解蛋白。采用反胶束萃取 PP, 操作过程中 PP 的二级结构发生改变, β -转角和 α -螺旋的含量增加, β -折叠的含量稍微减少。改性后的 PP 色泽更白, 吸油性较差, 但其乳化性能和发泡性提高^[28]。冻融循环是指在不同温度下冻结解冻, 反复冻结和融化, FENG 等^[29]研究

了冻融循环(-20℃冷冻 2 d, 25℃解冻 12 h)对 PPI 结构及乳化性质的影响,结果表明:冻融循环使 PPI 的二级和三级结构发生显著变化,进而改善了 PPI 的乳化性能,且循环 3 次后所制得的乳化效果最佳。

2 化学改性法

化学改性就是通过加入各种化学试剂使蛋白质肽链上的基团发生反应,改变蛋白的化学键和结构,使蛋白质分子的空间结构、亲疏水基团、电荷特性等发生变化,进而改变 PP 的功能特性。化学改性能产生交联反应,效果显著,反应迅速。目前 PP 的化学改性中比较常见的方法是糖基化^[30-31]和酰基化,虽然化学改性操作简单、成本低,改性效果较为明显并且应用范围广泛,但其对反应条件的要求更加严苛,存在能耗相对较高、副产物多及有毒化学残留难以去除等缺陷。因此,如何更好地开发出新的化学改性方法,同时避免其潜在的危害,仍是一项具有挑战性的研究。

2.1 糖基化

糖基化改性是通过蛋白质的氨基与单糖或多糖的羰基发生作用形成新的产物,从而赋予蛋白质不同的功能特性。现阶段,糖基化改性被证实可以改善 PP 的致敏性、乳化性、热稳定性和发泡性。在低温条件下,对 PP 进行氨基葡萄糖糖基化改性,PP 会形成紧密的聚集体,增加了空间位阻并破坏了其完整的表位,导致 PP 无法与 IgE 结合,在反应温度为 40℃时,降低其致敏性的效果最佳^[32]。糖基化技术是一种高效、安全、反应柔和的化学改性技术,糖的种类、添加量、反应温度和 pH 对 PP 的改性效果是完全不同的,应根据生产需求,采用不同的工艺条件进行糖基化反应。LIU 等^[33]将 PP 与葡聚糖按 1:1 的重量比混合,在 60℃和 79%相对湿度的条件下进行干热糖基化反应,改性后蛋白的三级结构更紧密,在 pH 为 4.5~6.0 时,结合物溶解度显著增加,其热稳定性、发泡性和乳化性得到进一步增强。同时,物理技术可以辅助 PP 进行糖基化改性,杨伟强等^[34]采用超声波技术和糖基化反应对花生浓缩蛋白进行改性,提高了花生浓缩蛋白的乳化活性,实验表明通过控制多糖的添加量、反应的 pH 和温度,能够调控花生浓缩蛋白糖基化产物的功能特性。目前常见的 PP 糖基化改性多使用葡聚糖和木糖,其余糖类的开发较少。林伟静等^[35]用木糖对 PP 进行糖基化,并研究了不同温度条件对 PP 成膜性的影响,实验结果表明高温更加有利于蛋白膜在溶解性、膨胀性、拉伸强度和延伸性等性能方面的提高。

2.2 酰 化

蛋白质酰化改性是指酰化剂(例如琥珀酸酐和乙酸酐)与蛋白质氨基酸残基(尤其是赖氨酸)之间发生亲核取代反应,进而改善蛋白质的功能特性^[36]。常见的关于 PP 的酰

化改性包括乙酰基化反应和琥珀酰基化反应。在酸性、中性条件下,PP 的溶解度较低,在溶液中容易沉淀,对产品质量有较大的影响,而酰化是改善 PP 溶解度和分散性的一种主要方法^[37]。在琥珀酰化改性 PP 之后,PP 的分子结构由折叠趋向伸展,蛋白质聚集体的尺寸减小,酰基化改性后的蛋白质与水分子间作用力增强,其水溶性得以改善,特别是在酸性环境中,其溶解性得到极大的提高^[38]。酰化后的 PP 表面带有更多的负电荷,增加了蛋白的分子间斥力,并且无水条件下改性产物的乙酰化程度更加显著。阎杰等^[39]通过实验发现在水溶液中进行蛋白质乙酰化改性可制备低酰化度产物,而为了获得高酰化度产物需要在非水环境中进行改性。当乙酸酐/蛋白为 0.095 mol/g、反应温度为 85℃、反应时间为 20 min 时,其产物的乙酰化度为 27.72 mol/kg,其功能特性得到了显著改善。

2.3 其他化学改性方法

目前应用于 PP 的其他化学改性方法还包括磷酸化、pH 偏移处理和多酚化合物处理等方法。磷酸改性 PPI 的溶解性、乳化性、泡沫稳定性、持水能力和吸油能力均较好^[40],PPI 中丝氨酸和苏氨酸的羟基基团、赖氨酸的氨基基团与三磷酸钠发生反应,提高蛋白质的乳化性能^[41]。pH 偏移处理显著改变了 PPI 的自由巯基含量、表面疏水性、蛋白质二级和三级结构,在 pH 为 10 的条件下对 PPI 进行处理,可以显著提高 PPI 的溶解度,减小 PPI 的粒径,增加 PPI 的游离巯基含量和表面疏水性,从而提高 PPI 凝胶的拉断力和持水性^[42]。将多酚类化合物(如单宁酸、绿原酸、植物提取物等)添加到 PP 水解物中,多酚类化合物能够通过共价键或非共价键与蛋白质形成复合物,影响蛋白质疏水相互作用,使其内部的疏水性和极性基团裸露在外,有利于分子之间的相互作用,进而改善蛋白的功能特性^[43]。常南等^[44]将香芹酚加入到 PPI 中,制成一种新型的抗菌薄膜,结果表明,当香芹酚体积分数为 0~2%时,随着体积比的增加,抗张强度呈现出先上升后下降的趋势,对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌有显著的抑制作用。此外,王晨曦等^[45]发现,经过氢氧化钠的作用,用乙二醛-尿素合成树脂对 PP 进行改性,改性后的胶水具有更好的耐水性。

3 酶法改性

酶法改性具有反应效率高、作用条件温和、专一性强;同时不会对蛋白质造成破坏,使其失去原有功能特性,保留蛋白质更多的营养价值等优势,从营养和经济上讲,酶法改性都明显优于酸、碱的化学改性方法。因此,蛋白质的酶法改性越来越受到学者们的青睐^[46-47]。酶法改性技术主要分为酶法水解改性和酶法非水解改性^[48],酶法水解改性的原理是采用蛋白酶在一定条件下对蛋白质的肽键或酰胺键进行部分水解,使大分子的蛋白质降解成具有一定功

能性质的小分子肽段或游离氨基酸，可以在不降低蛋白质营养价值的前提下增强其功能特性。李佳笑等^[49]通过实验证明高压均质-中性蛋白酶改性方法能够提高 PP 在酸性条件下的氮溶指数，提升 PP 在 pH<7.0 时的溶解性，使其在酸性饮料加工方面得以应用，从而扩大了其在酸性饮料生产中的使用。酶法水解通过选择特定的酶和反应条件达到所期望的改性结果，具有效率高、专一性强且不会产生毒素等优点，因此被广泛应用。曹迪等^[50]使用中性蛋白酶对 PP 进行处理，酶解后 PP 的次级键被破坏，致密的分子结构舒展、集团暴露，以致溶解性、吸水性、吸油性、乳化性及起泡性分别提高了 61.44%、25.69%、161.70%、19.91% 和 32.33%，提高了 PP 在生产开发中的应用潜能。酶法非水解改性是一种共价交联改性，主要是采用谷氨酰胺转氨酶催化蛋白质间(或内)发生酰基转移反应，从而导致多肽的分子内和分子间产生共价交联，改善蛋白质的结构和功能，进而影响其溶解性、乳化性和起泡性。熊柳等^[51]研究谷氨酰胺转氨酶对 PPI 凝胶性、吸油性和持水性的影响，通过单因素和响应面实验得到最佳改善条件，在此条件下样品的凝胶强度可达到 333.49 g/cm²，同时产物的吸油性和持水性均有不同程度的提高，分别提高了 27.41% 和 61.24%。

4 花生蛋白改性的发展前景

目前，花生在中国有着广阔的种植面积，2016—2021 年花生产量不断增加，PP 的产量也在逐年上升。PP 具有营养价值高和易被人体吸收等多种优点，是优质的蛋白资源，在食品、生物材料和化工医疗等领域具有强劲的发展势头。PP 由于其良好的色泽和风味，以及必需和非必需氨基酸的

良好组成，是一种很有前途的食品配料，在烘焙食品、发酵食品、乳制品、肉制品和饮料中都有应用，但其较差的溶解性、乳化性、泡沫性和凝胶性，限制了其应用。蛋白质分子之间的解离和聚合对蛋白质的功能性具有十分重要的影响，物理改性通过改变极性环境和提高水分散体的表面疏水性来诱导蛋白质解聚，提高 PP 的凝胶性和持水性，提升 PP 在肉制品中的应用价值。化学改性通过对蛋白质分子中的主链或侧链基团进行化学修饰，从而提高 PP 的溶解性和乳化稳定性，改善 PP 在植物蛋白饮料和乳饮料中应用。酶改性是利用蛋白酶水解来改进 PP 功能性质，降低其致敏性和提升其营养功效，提高 PP 溶解性、持水性和持油性，改善食品加工工艺，提高食品品质，除添加到米面制品和焙烤食品中，还可以用于可食性蛋白膜。根据目前的研究来看，PP 的物理、化学和酶法等改性技术各有优势，都对 PP 的结构和功能有着不同程度的改善，经过改性处理的 PP 不仅功能性提高，营养价值高，而且易于被人体吸收和利用。每种改性方法都有其不足之处，如表 1 所示，任何一种改性技术都无法完美地对 PP 进行定性改性来满足不同食品加工体系的需要，进一步研究加工过程对 PP 的影响，将为调节蛋白质功能提供重要的信息，从而通过改性调整其特性以适应特定的食品应用。采用复合改性技术，比如开发酶和超声波辅助改性方法，在安全性、功能性、价格和可持续性都有很大的发展前景。我国 PP 的开发研究仍相对较少，且深入研究不足，没有形成较为完备的理论体系，在实际生产中仍缺少足够的参考数据。因此，开发和推广 PP 的改性技术，并有效地改善其应用途径和利用率，拓宽 PP 在各领域的应用价值应成为未来的研究焦点。

表 1 改性方法的优劣势及发展方向
Table 1 Advantages and disadvantages of modification methods and development direction

改性方法	优势	劣势	发展方向
物理改性	安全，无污染，营养物质保留完整	需要高能量输入，改善效果具有一定局限性	实现工业化
化学改性	方法简单，改善效果明显	使用化学物质，产生高废物	安全性
酶法改性	反应条件温和，专一性高，副产物最少，低能量输入	各项技术还不够成熟	酶的类型和酶解程度对蛋白功能特性影响

5 结束语

目前，国内 PP 的核心生产技术与高端加工设备尚处于落后状态，高值化加工和转换的科学研究相对不足。因此，研究和开发新型 PP 产品，拓宽其新的应用领域势在必行。深层次开发利用 PP，不仅可以拉长农产品深加工链条，提高农产品附加值和增加农民收入，而且完全符合国家的产业政策，其应用潜力和价值存在广阔的发展空间。

参考文献

[1] 郭曼莉, 李晓彤, 吴澎, 等. 花生加工副产物的综合利用及精深加工[J]. 粮油食品科技, 2018, 26(3): 27–31.
GUO ML, LI XT, WU P, *et al.* Comprehensive utilization and intensive processing of by-products during peanut processing [J]. *Sci Technol Cere Oils Foods*, 2018, 26(3): 27–31.
[2] BOUKID F. Peanut protein-an underutilised by-product with great potential: A review [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2022, 57(9): 5585–5591.

- [3] JI H, HAN F, PENG S, *et al.* Behavioral solubilization of peanut protein isolate by atmospheric pressure cold plasma (ACP) treatment [J]. *Food Bioproc Technol*, 2019, 12(12): 2018–2027.
- [4] 贾润红. pH 对糖基化花生蛋白乳化特性的影响[J]. *粮食与油脂*, 2021, 34(3): 107–110.
- JIA RH. Effect of pH on emulsification of glycosylated peanut protein [J]. *Cere Oils*, 2021, 34(3): 107–110.
- [5] 孙鹏. 大豆蛋白改性技术的研究[J]. *食品研究与开发*, 2005, 26(5): 115–117.
- SUN P. Study on the technology of soy protein modification [J]. *Food Res Dev*, 2005, 26(5): 115–117.
- [6] LI J, SHI A, LIU H, *et al.* Effect of hydrothermal cooking combined with high-pressure homogenization and enzymatic hydrolysis on the solubility and stability of peanut protein at low pH [J]. *Foods*, 2022, 11(9): 1289.
- [7] 耿军凤, 张丽芬, 陈复生. 超声波辅助提取对花生蛋白结构与功能特性的影响[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(9): 61–69.
- GENG JF, ZHANG LF, CHEN FS. Effect of ultrasound-assisted extraction on the structure and functional properties of peanut protein [J]. *Food Res Dev*, 2020, 41(9): 61–69.
- [8] CHEN L, CHEN J, WU K, *et al.* Improved low pH emulsification properties of glycosylated peanut protein isolate by ultrasound Maillard reaction [J]. *J Agric Food Chem*, 2016, 64: 5531–5538.
- [9] DONG X, ZHAO M, YANG B, *et al.* Effect of high-pressure homogenization on the functional property of peanut protein [J]. *J Food Proc Eng*, 2011, 34(6): 2191–2204.
- [10] GONG K, CHEN L, XIA H, *et al.* Driving forces of disaggregation and reaggregation of peanut protein isolates in aqueous dispersion induced by high-pressure microfluidization [J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 130: 915–921.
- [11] 李颖超, 赵良, 钱和. 高温高压处理对花生致敏蛋白 Ara h1 及其免疫反应性的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(20): 32–36.
- LI YC, ZHAO L, QIAN H. Effects of autoclaving on the immunoreactive properties of allergenic protein Ara h1 from peanut seeds [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(20): 32–36.
- [12] MONDOULET L, PATY E, DRUMARE MF, *et al.* Influence of thermal processing on the allergenicity of peanut proteins [J]. *J Agric Food Chem*. 2005, 53 (11): 4547–4553.
- [13] BLANC F, VISSERS YM, ADEL-PATIENT K, *et al.* Boiling peanut Ara h 1 results in the formation of aggregates with reduced allergenicity [J]. *Mol Nutr Food Res*, 2011, 55(12): 1887–1894.
- [14] SHEN LL, ZHU QQ, HUANG FW, *et al.* Effect of heat treatment on structure and immunogenicity of recombinant peanut protein Ara h 2.01 [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2015, 60(2): 964–969.
- [15] 赵冠里, 赵谋明, 刘岩, 等. 烘烤对花生分离蛋白结构及功能特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2009, 35(7): 20–23.
- ZHAO GL, ZHAO MM, LIU Y, *et al.* Effects of roasting on structural components and functional properties of peanut seeds protein [J]. *Food Ferment Ind*, 2009, 35(7): 20–23.
- [16] 张健磊, 崔波. 高温处理提高花生蛋白凝胶性的研究[J]. *食品与发酵科技*, 2011, 47(1): 68–70.
- ZHANG JL, CUI B. The study of high-temperature treatment increased gelation of peanut protein [J]. *Food Ferment Technol*, 2011, 47(1): 68–70.
- [17] AWAD TS, MOHARRAM HA, SHALTOU OE, *et al.* Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review [J]. *Food Res Int*, 2012, 48(2): 410–427.
- [18] LI C, XUE H, CHEN Z, *et al.* Comparative studies on the physicochemical properties of peanut protein isolate-polysaccharide conjugates prepared by ultrasonic treatment or classical heating [J]. *Food Res Int*, 2014, 57: 1–7.
- [19] ZHANG QT, TU ZC, XIAO H, *et al.* Influence of ultrasonic treatment on the structure and emulsifying properties of peanut protein isolate [J]. *Food Bioprod Proc*, 2014, 92(C1): 30–37.
- [20] 奥文芳, 王承明, 李克超, 等. 超声辅助花生蛋白-低聚异麦芽糖接枝改性的研究[J]. *中国油脂*, 2017, 42(12): 26–31.
- AO WF, WANG CM, LI KC, *et al.* Ultrasound-assisted glycosylation of peanut protein and isomalto-oligosaccharide [J]. *China Oils Fats*, 2017, 42(12): 26–31.
- [21] 张淑艳, 章绍兵, 陈林, 等. 花生蛋白的浓度对其超声改性效果的影响[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(3): 58–64.
- ZHANG SY, ZHANG SB, CHEN L, *et al.* Effect of peanut protein concentration on its ultrasonic modification [J]. *J Henan Univ Technol (Nat Sci Ed)*, 2022, 43(3): 58–64.
- [22] 赵雪淞, 蔺雅菲, 刘民. 花生浓缩蛋白超声改性的工艺条件[J]. *食品与发酵工业*, 2014, 40(3): 147–152.
- ZHAO XS, LIN YF, LIU M. The technological conditions of ultrasonic modification of peanut protein concentrate [J]. *Food Ferment Ind*, 2014, 40(3): 147–152.
- [23] YU JJ, JIANG PY, LI SH, *et al.* Mechanism of improving interfacial hydration characteristic of high-denatured peanut protein induced by cold plasma [J]. *J Food Process Eng*, 2022, 45(1): e13926.
- [24] 王向阳, 李森, 王若兰, 等. 冷等离子体处理对花生中脂质及蛋白理化特性的影响[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(7): 89–95.
- WANG XY, LI M, WANG RL, *et al.* Effect of cold plasma treatment on physicochemical characteristics of lipid and protein in peanuts [J]. *Food Res Dev*, 2022, 43(7): 89–95.
- [25] 季慧, 于娇娇, 张金, 等. 介质阻挡低温等离子处理对花生蛋白持水性及溶解性的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(4): 299–304.
- JI H, YU JJ, ZHANG J, *et al.* Effects of dielectric barrier discharge cold plasma treatment on solubility and water holding capacity of peanut protein [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2019, 35(4): 299–304.
- [26] 王文涛, 张华, 刘兴丽, 等. 等离子体对花生蛋白功能特性和结构的影响[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(2): 54–59.
- WANG WT, ZHANG H, LIU XL, *et al.* Effects of plasma treatment on functional properties and structure of peanut protein [J]. *J Chin Cere Oils Ass*, 2021, 36(2): 54–59.
- [27] 严永红, 郑召君, 林叶, 等. 臭氧处理对花生蛋白结构性能的影响[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(1): 61–67.
- YAN YH, ZHENG ZJ, LIN Y, *et al.* Effects of ozone on the structural characteristics of peanut protein [J]. *J Chin Cere Oils Ass*, 2021, 36(1): 61–67.
- [28] 赵晓燕, 朱海涛, 张炳文, 等. 反胶束体系对花生蛋白功能性与结构的影响研究[J]. *中国粮油学报*, 2016, 31(6): 63–67.
- ZHAO XY, ZHU HT, ZHANG BW, *et al.* Effect of reverse micelles on the functional properties and structure of peanut protein [J]. *J Chin Cere Oils Ass*, 2016, 31(6): 63–67.
- [29] FENG H, JIN H, GAO Y, *et al.* Effects of freeze-thaw cycles on the structure and emulsifying properties of peanut protein isolates [J]. *Food*

- Chem, 2020, 330(1): 127215.
- [30] HAN X, ZHAO Y, MAO S, *et al.* Effects of different amounts of corn silk polysaccharide on the structure and function of peanut protein isolate glycosylation products [J]. Foods, 2022, 11(15): 2214.
- [31] 季慧. 低温等离子快速提高糖基化花生分离蛋白溶解性及乳化性[J]. 农业工程学报, 2020, 36(11): 289–295.
- JI H. Rapid improvement in solubility and emulsification of glycation peanut protein isolate with non-thermal plasma (NTP) [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2020, 36(11): 289–295.
- [32] TIAN Y, LIU C, ZHANG K, *et al.* Glycosylation between recombinant peanut protein Ara h 1 and glucosamine could decrease the allergenicity due to the protein aggregation [J]. LWT-Food Sci Technol, 2020, 127: 109374.
- [33] LIU Y, ZHAO G, ZHAO M, *et al.* Improvement of functional properties of peanut protein isolate by conjugation with dextran through Maillard reaction [J]. Food Chem, 2012, 131(3): 901–906.
- [34] 杨伟强, 杜德红, 江晨, 等. 超声波辅助花生浓缩蛋白糖基化改性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(3): 830–840.
- YANG WQ, DU DH, JIANG C, *et al.* Evaluation of ultrasonic assisted glycosylation modification of peanut protein concentrate [J]. J Food Saf Qual, 2020, 11(3): 830–840.
- [35] 林伟静, 刘红芝, 石爱民, 等. 木糖接枝改性温度对花生蛋白膜物理性质的影响[J]. 中国食品学报, 2016, 16(11): 76–82.
- LIN WJ, LIU HZ, SHI AIM, *et al.* Effect of Xylose's grafting temperature on the physical properties of peanut protein film [J]. China J Food Sci, 2016, 16(11): 76–82.
- [36] SHEN Y, LI Y. Acylation modification and/or guar gum conjugation enhanced functional properties of pea protein isolate [J]. Food Hydrocolloid, 2021, 117: 106686.
- [37] 李玉珍, 肖怀秋, 赵谋明. 花生蛋白质改性方法与应用策略[J]. 廊坊师范学院学报, 2016, 16(4): 48–53.
- LI YZ, XIAO HQ, ZHAO MM. Modification methods of peanut protein and application strategies [J]. J Langfang Technol Coll, 2016, 16(4): 48–53.
- [38] 芦鑫, 王克琴, 张丽霞, 等. 琥珀酰化改性花生蛋白研究. 中国油脂, 2017, 42(5): 34–39.
- LU X, WANG KQ, ZHANG LX, *et al.* Modification of peanut protein by succinylation [J]. China Oils Fats, 2017, 42(5): 34–39.
- [39] 阎杰, 杨金兰, 李灿芳. 花生蛋白乙酰化改性的适宜条件[J]. 农业机械, 2011, 54(17): 64–68.
- YAN J, YANG JL, LI CF. Suitable conditions for acetylation modification of peanut protein [J]. Agric Mach, 2011, 54(17): 64–68.
- [40] YU L, YANG W, SUN J, *et al.* Preparation, characterisation and physicochemical properties of the phosphate modified peanut protein obtained from *Arachin conarachin* L [J]. Food Chem, 2015, 170: 169–179.
- [41] 张倩, 陈复生. 花生蛋白的改性方法研究[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(9): 13–17.
- ZHANG Q, CHEN FS. Research on the modification methods of peanut protein [J]. Cere Oils, 2017, 30(9): 13–17.
- [42] LI J, WU M, WANG Y, *et al.* Effect of pH-shifting treatment on structural and heat induced gel properties of peanut protein isolate [J]. Food Chem, 2020, 325: 126921.
- [43] 李佳婷, 王敏. 苹果提取物对花生蛋白水解物水包油乳液氧化稳定性的影响[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(7): 58–62.
- LI JT, WANG M. Effect of apple extract on oxidation stability of peanut protein hydrolysate oil in water emulsion [J]. Food Res Dev, 2020, 41(7): 58–62.
- [44] 常南, 梁月, 钟天辰. 香芹酚对花生蛋白膜理化性能及抑菌效果影响研究[J]. 农业科技与装备, 2018, 40(2): 26–29.
- CHANG N, LIANG Y, ZHONG TC. Research on influence of carvacrol on physicochemical properties and anti-bacterial effect of peanut protein film [J]. Agric Sci Technol Equip, 2018, 40(2): 26–29.
- [45] 王晨曦, 安丽平, 高敏. 乙二醛-尿素树脂改性花生蛋白胶黏剂的制备[J]. 中国油脂, 2022, 47(3): 54–59.
- WANG CX, AN LP, GAO M. Preparation of glyoxal-urea modified peanut protein adhesive [J]. China Oils Fats, 2022, 47(3): 54–59.
- [46] 李响, 张焕丽, 郭世龙, 等. 不同改性方法对花生蛋白理化特性影响研究[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(9): 101–108.
- LI X, ZHANG HL, GUO SL, *et al.* Effect of enzymatic hydrolysis on the formation and structural properties of peanut protein gels [J]. J Chin Cere Oils Ass, 2021, 36(9): 101–108.
- [47] JIANG S, ZHANG J, LI S, *et al.* Effect of enzymatic hydrolysis on the formation and structural properties of peanut protein gels [J]. Int J Food Eng, 2021, 17(3): 167–176.
- [48] YU J, MIKIASHVILI N, BONKU R, *et al.* Allergenicity, antioxidant activity and ACE-inhibitory activity of protease hydrolyzed peanut flour [J]. Food Chem, 2021, 360: 129992.
- [49] 李佳笑, 石爱民, 赵志浩, 等. 高压均质-酶解改性提高酸性条件下花生蛋白的溶解性其稳定性研究[J]. 核农学报, 2021, 35(6): 1356–1366.
- LI JX, SHI AIM, ZHAO ZH, *et al.* Allergenicity, antioxidant activity and ACE-inhibitory activity of protease hydrolyzed peanut flour [J]. J Nucl Agric Sci, 2021, 35(6): 1356–1366.
- [50] 曹迪, 范远景, 黄婷, 等. 不同改性方法对花生浓缩蛋白结构及功能特性的影响[J]. 食品工业, 2014, 35(10): 186–190.
- CAO D, FAN YJ, HUANG T, *et al.* Effects of modified methods on conformational and functional properties of peanut protein concentrate [J]. Food Ind, 2014, 35(10): 186–190.
- [51] 熊柳, 孙庆杰, 刘砚, 等. 转谷氨酰胺酶改性花生分离蛋白工艺的研究[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(4): 44–49.
- XIONG L, SUN QJ, LIU Y, *et al.* Study on modification of peanut protein isolate with transglutaminase [J]. J Chin Cere Oils Ass, 2012, 27(4): 44–49.

(责任编辑: 于梦娇 张晓寒)

作者简介



庞磊, 工程师, 主要研究方向为蛋白质加工理论与技术。
E-mail: 793039150@qq.com



刘伯业, 博士, 讲师, 主要研究方向为蛋白质加工理论与技术。
E-mail: liuboye@aliyun.com