

孙莹, 周斌, 王龙, 等. 马铃薯蛋白组成、性质及其改性应用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(9): 36–44. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060277

SUN Ying, ZHOU Bin, WANG Long, et al. Research Progress on Composition, Properties and Modification Application of Potato Protein[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(9): 36–44. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060277

· 未来食品 ·

马铃薯蛋白组成、性质及其改性应用研究进展

孙莹¹, 周斌¹, 王龙¹, 刘申¹, 朱秀清^{2,*}

(1. 哈尔滨商业大学旅游烹饪学院, 黑龙江哈尔滨 150028;

2. 哈尔滨商业大学食品工程学院, 黑龙江哈尔滨 150028)

摘要: 我国马铃薯加工业的快速发展可以归因于马铃薯主食工业化战略的实施。马铃薯蛋白以其高营养价值和功能而闻名, 具有特殊的溶解度, 并含有大量在其他植物蛋白中缺乏的酪氨酸。因此, 马铃薯蛋白在各种市场上具有巨大的潜力。本文对马铃薯蛋白的组成、功能性质、改性方法和改性应用进行了全面的综述。马铃薯蛋白具有良好的溶解性、发泡化和乳化特性、凝胶性和抗氧化活性。目前, 酶法和微生物发酵是马铃薯蛋白改性研究的重点。此外, 本文还概述了马铃薯蛋白中普遍存在的主要问题, 并根据目前的研究进展提出了未来的发展前景。未来, 应深入研究马铃薯蛋白分子结构与其功能活性的联系; 马铃薯蛋白与其他植物蛋白的综合利用; 酶法和微生物发酵可作为未来改性方向, 利用微生物资源降低改性成本。

关键词: 马铃薯蛋白, 组成, 功能性质, 蛋白改性应用

中图分类号: TS219

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)09-0036-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060277



本文网刊:

Research Progress on Composition, Properties and Modification Application of Potato Protein

SUN Ying¹, ZHOU Bin¹, WANG Long¹, LIU Shen¹, ZHU Xiuqing^{2,*}

(1. Tourism & Cuisine College, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China;

2. School of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China)

Abstract: The rapid development of Chinese potato processing industry can be attributed to the implementation of the potato staple food industrialization strategy. Potato protein, known for its high nutritional value and functionality, exhibits exceptional solubility and contains a significant amount of tyrosines that are scarce in other plant proteins. Consequently, potato protein holds immense potential for various market applications. This paper provides a comprehensive review of the composition, functional properties, modification methods, and modification applications of potato protein. Potato protein exhibits good solubility, foaming and emulsifying properties, gelation, and antioxidant activity. Currently, enzyme treatment and microbial fermentation are the focus of potato protein modification research. Additionally, this article provides an overview of the main issues commonly found in potato protein and proposes future development prospects based on current research progress. In the future, it is necessary to further investigate the relationship between the molecular structure of potato protein and its functional activities. Enhancing the utilization of potato protein and plant proteins, enzymatic methods and microbial fermentation shows promise as a future direction for modification. By harnessing microbial resources, the cost of modification can be effectively reduced.

Key words: potato protein; composition; functional properties; protein modification application

收稿日期: 2023-06-28

基金项目: 黑龙江省自然科学基金 (LH2020C048); 2020 年度哈尔滨商业大学“青年创新人才”支持计划 (2020CX01)。

作者简介: 孙莹 (1982-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 烹饪科学, E-mail: sunying625@163.com。

* 通信作者: 朱秀清 (1968-), 女, 硕士, 教授, 研究方向: 蛋白质分子化学及大豆深加工, E-mail: xqzhuwang@163.com。

马铃薯是位于小麦、水稻和玉米之后的世界第四大粮食农作物,中国目前是世界上马铃薯种植、生产、消费的第一大国^[1]。2015 年农业部提出的马铃薯主食产业化重要发展战略,不仅对于国家粮食安全、居民膳食结构的改善有重要意义,对于马铃薯产业开发也起着重要推动作用^[2-3]。在马铃薯种植规模和政策大力支持马铃薯产业发展背景条件下,马铃薯淀粉工业迅速发展,为提升马铃薯淀粉工业的潜在价值,对于马铃薯淀粉工业废水资源化利用的研究不断深入^[4]。

马铃薯蛋白的主要来源是从马铃薯工业淀粉废水中提取,刘垚彤等^[5-9]对工业淀粉废液中马铃薯蛋白的提取分离方法进行了综述总结。相比于其他方法,热凝聚和酸碱沉淀因其操作简便、成本低的原因至今运用较广泛,但缺点是提取出的蛋白质纯度较低、易变性导致的诸多功能特性下降,从而限制了马铃薯蛋白的应用。适宜的改性方法可提升马铃薯蛋白的应用潜力,改性方法广泛,涉及物理方法、化学法、酶法以及微生物发酵等。因此,本文从马铃薯蛋白的组成出发,总结马铃薯蛋白功能性质及其改性应用,以期对马铃薯蛋白研究及其应用的进一步开发提供参考。

1 马铃薯蛋白的组成

天然马铃薯块茎中蛋白质含量很低,不超过 2.1%,但在马铃薯中发现的蛋白质含量高于大多数其他植物块茎或根的蛋白质含量,且其中的蛋白质种类较多^[10]。马铃薯蛋白通常可分为三大类: Patatin, 约占 40%; 蛋白酶抑制剂, 约占 50%; 其他高分子量蛋白质, 约占 10%。马铃薯蛋白质这三大类蛋白组分的分子量与含量在许多研究报道中存在差异,这可能是由研究的马铃薯品种和提取分离方式不同综合导致的。其中高分子量蛋白主要由氧化酶和其他酶组成,如多酚氧化酶、脂氧合酶和一些与淀粉合成有关的酶^[11],但关于其研究的报道很少,蛋白酶抑制剂和 Patatin 由于其含量和功能性质在国内外的研究较多。也有研究结合等电点沉淀法和透析法对马铃薯块茎蛋白组分进行提取分离^[12],结果表明可将马铃薯蛋白分为酸性蛋白组分和碱性蛋白组分,酸、碱性蛋白组分各自的得率与纯度分别为 0.535%、92.5% 和 0.741%、89.2%; 沉降系数和分子质量分别为 5S、82 kDa 和 8S、140 kDa; 分别有亚基带 1 条和 5 条。研究表明^[13],马铃薯蛋白为完全蛋白质,含有多种氨基酸,必需氨基酸含量为 20.13%, 占总氨基酸的 47.9%, 氨基酸评分为 88.0。马铃薯的蛋白营养价值高且质量很高,比其他植物性蛋白更加有营养和较高的可溶性,还含有大量其他植物蛋白缺乏的赖氨酸,可以更好地作为一种优质的植物蛋白资源^[14-15]。

1.1 Patatin 蛋白

Patatin 是一种二聚体糖蛋白,含有 32% 的糖和 64% 的蛋白质,分子量为 39~45 kDa。Patatin 蛋白

由于其分子量较低,具有良好的乳化和起泡活性,在三种马铃薯蛋白中占有相当重要的地位。而且,它对人体健康有多种积极影响,包括抗氧化、调节胆固醇、血压和脂酰水解酶(LAH)活性^[16-17]。

在之前的研究^[18]中对马铃薯汁水进行超滤膜处理分离出马铃薯浓缩蛋白,通过色谱分离技术对浓缩蛋白进行纯化,得到了分子量为 40.6 kDa 的 Patatin 糖蛋白。并且利用气相色谱法分析了其单糖组成,对比标准混合单糖与 Patatin 气相色谱图(图 1),确定其单糖组成包括半乳糖、鼠李糖、甘露糖和葡萄糖;对比 NaOH 溶液处理前后 Patatin 的紫外吸收光谱,235 nm 处吸光度差异显著,分析说明马铃薯糖蛋白糖肽键为 O-连接糖肽键。此外还测定了处理前后 Patatin 糖蛋白的最高热变性温度分别为 74.97、66.98 °C,热变性温度的明显下降说明糖链对热稳定性的作用,与文献^[5]报道中 Patatin 是一种高热稳定性蛋白相符;最后,通过对马铃薯糖蛋白 Patatin 的核磁共振(NMR)分析,信号峰结果分析证明了 Patatin 糖苷键主要类型为 α -型吡喃糖。

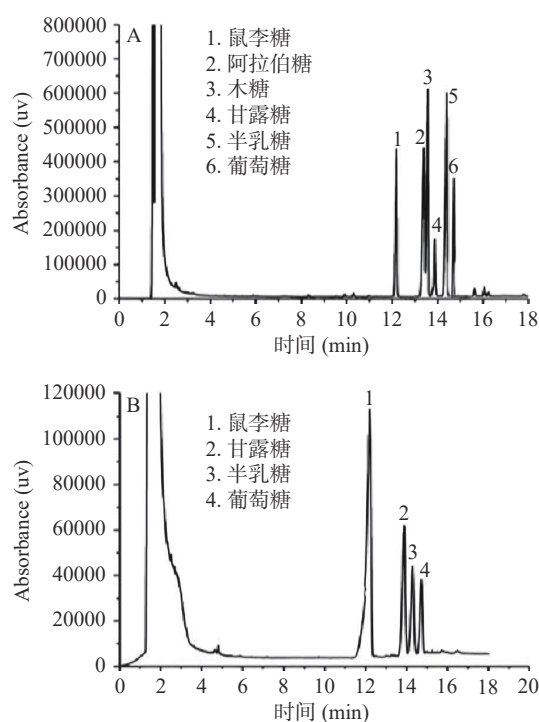


图 1 标准混合单糖(A)和 Patatin(B)气相色谱图^[18]

Fig.1 Gas chromatogram of standard mixed monosaccharides (A) and Patatin (B)^[18]

Pots 等^[17]首次对分离的马铃薯块茎蛋白 Patatin 在室温和高温下的结构进行了表征。室温下分离的 Patatin 是一种二级和三级高度结构的分子。根据远紫外圆二色谱数据估计,约 33% 的残基为 α 螺旋结构,46% 为 β 链结构。Patatin 在超过 28 °C 的温度下热不稳定,这可由近紫外圆二色性表明。结果表明,部分 α 螺旋贡献在 45~55 °C 区域展开,而 β 链部分在 50~90 °C 时展开更缓慢。傅里叶变换红外光谱结果也证实了这一点,差示扫描量热法表明在 50~

60 ℃ 之间发生了协同跃迁,很可能反映了分子 α 螺旋部分的展开。此外,荧光光谱证实了蛋白质在 45~55 ℃ 之间的全局展开。观察到的蛋白质的展开与 Patatin 酶活性的失活相一致,并与马铃薯果汁加热时发生的沉淀相一致。在高温下,Patatin 仍含有一些螺旋和链状结构。冷却后蛋白质部分折叠,观察到其主要形成 α 螺旋结构。

在一些研究报道中^[16-17,19],马铃薯蛋白的单糖组成、糖苷键类型和二、三级蛋白质结构与其抗氧化性、抗肿瘤活性、脂酰水解酶(LAH)活性具有一定相关性。关于其具体的结构与功能性机理之间的关系还需更加深入的研究。

1.2 蛋白酶抑制剂

蛋白酶抑制剂在马铃薯蛋白三个蛋白组分中含量最多、分子量最小,约占马铃薯汁中总可溶性蛋白质的 50%,重要地位仅次于 Patatin。蛋白酶抑制剂是一组异质性蛋白质,其等电点在 5~8 之间,分子量一般不超过 25 kDa^[20]。曾凡逵等^[21]以 Amberlite XAD7HP 树脂作为扩张床吸附法的吸附剂,从马铃薯淀粉加工废水中回收具有活性的蛋白,对 Patatin 蛋白和蛋白酶抑制剂实现了分离。检验分离得到的蛋白酶抑制剂对胰蛋白酶抑制活力为 410 mg/g,对其进行氨基酸分析,结果如图 2 所示。分离到的蛋白酶抑制剂氨基酸含量最多的为丝氨酸,其次是亮氨酸和谷氨酸,此外疏水氨基酸如异亮氨酸、缬氨酸、酪氨酸和苯丙氨酸的含量也较高。



图 2 马铃薯蛋白酶抑制剂氨基酸含量^[21]

Fig.2 Amino acid content of potato protease inhibitor^[21]

有研究对马铃薯蛋白酶抑制剂进行纯化和定量,将蛋白酶抑制剂分为七个不同的家族^[22]:马铃薯抑制剂 I (PI-1)、马铃薯抑制剂 II (PI-2)、马铃薯半胱氨酸蛋白酶抑制剂(PCPI)、马铃薯天冬氨酸蛋白酶抑制剂(PAPI)、土豆库尼茨型蛋白酶抑制剂(PKPI)、马铃薯羧肽酶抑制剂(PCI)和“其他丝氨酸蛋白酶抑制剂”。其中最丰富的家族是 PI-2 和 PCPI 家族,分别占马铃薯汁中所有蛋白质的 22% 和 12%。所有家族(PCI 除外)均抑制胰蛋白酶或糜蛋白酶。PI-2 亚型对总胰蛋白酶和糜蛋白酶分别表现出 82%

和 50% 的抑制活性,并且对糜蛋白酶抑制活性与其他蛋白酶抑制剂家族相比有显著差异。

马铃薯蛋白酶抑制剂显示出广泛的酶抑制作用和其他功能活性,这与其种类繁多有密切关系。其他研究表明^[23],从马铃薯蛋白酶抑制剂中获得的多肽对血脂有积极影响;由于这些多肽的甾醇结合特性,可以降低血清胆固醇水平,从而增加甾醇的排泄。此外,有研究发现从马铃薯块茎中分离的马铃薯蛋白可以抑制血管紧张素转换酶,降低周围血管阻力,起到稳定肾功能的作用^[24]。目前为止,已有 100 多种编码蛋白酶抑制剂的核苷酸序列被公布(<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/>)^[21]。未来对更多种类马铃薯蛋白质抑制酶核苷酸序列的编码研究将有助于研究人员对其酶抑制作用与机理应用的深入研究,对于食品领域有重要意义。

2 马铃薯蛋白的功能性质

蛋白质所具有的功能特性,包括溶解度、乳化性和发泡性、凝胶性,对一些混合体系(复合凝胶、乳液、溶液)很重要^[25]。除此之外,在一些研究中已经报道^[17,19],马铃薯蛋白还具有抗氧化活性、抗肿瘤活性。以合适的方法提取马铃薯蛋白质至关重要,目的是为了保持天然马铃薯蛋白的原始形态,否则蛋白质变性导致其功能性质改变,低成本地从马铃薯淀粉废液中提取的马铃薯蛋白很难达到理想的溶解度、凝胶性、乳化性和发泡性。马铃薯蛋白的功能特性可以通过各种技术和方法进行修饰和增强^[7]。

2.1 溶解性

马铃薯蛋白质的一个关键特性是它的溶解性,它间接决定了许多基础功能性质,包括乳化、凝胶和发泡性能。这些功能性质在很大程度上受到制备条件、纯度和最终蛋白质组分情况的影响^[26]。溶解度是一个在单蛋白溶液中很容易测量的参数;然而,在蛋白质混合物中却难以测量,因为不同的蛋白质有不同的溶解性。在前文中已经叙述了马铃薯蛋白质其许多蛋白质的组成,以及各种提取纯化蛋白质方法生产的蛋白质,所以很难准确评估它们的溶解度,即对于马铃薯蛋白的溶解度没有一个具体的结论,下文的其他性质也是同理。

马铃薯蛋白在 pH 中性、碱性或者强酸性时溶解度较高,在弱酸性时,其马铃薯蛋白的总溶解度取决于离子强度和 Patatin 的变性程度。纯化的 Patatin 糖蛋白在 pH 为 4 时几乎完全溶解,在 pH 为 5 时沉淀,在 pH 为 6 时完全溶解。然而马铃薯蛋白在 pH 小于 4 时表现出最大的沉淀,在 pH5 时收集的沉淀在 pH 为 7 时仅部分溶解^[27]。Van 等^[28]分别研究了马铃薯蛋白组分的溶解度,得出的结论是,蛋白酶抑制剂表现出比 Patatin 略高的开始沉淀温度。蛋白酶抑制剂在 50~60 ℃ 的温度下开始不溶,而 Patatin 在 40 ℃ 以上的温度下开始不溶。马铃薯蛋白溶解度极容易受温度影响,随着温度上升,马铃薯蛋白溶

解度显著下降^[29]。高温高压可能导致蛋白质的解缠和疏水残留物的暴露,从而增强溶解性^[30-31]。有研究报道,高强度超声、高压可以成功地提高马铃薯蛋白的溶解度;通过修饰蛋白水解酶,马铃薯蛋白的溶解度可提高 40% 以上^[32-33]。

2.2 乳化性和发泡性

乳化性是指蛋白质形成乳化液的能力,乳化液是指至少由两种不相混合的液体形成的分散均匀混合物,其中一种以细液滴的形式分散在另一种液体中。乳化液的稳定性可以描述为一个系统的能力,以抵抗变化的物理化学性质随时间的推移。乳化液的稳定性在许多工业应用中都至关重要,包括涂料、封装和设计新食品^[34]。Romero 等^[35]研究了马铃薯分离蛋白的界面和乳化特性,在 pH 为 2 和 8 下稳定水包油乳液,结果表明,在 pH 为 8 的情况下马铃薯蛋白显示出更高的乳化能力,可以生产精细和稳定的乳剂。而且,马铃薯蛋白界面膜的 pH 依赖性与其形成稳定油水乳液的能力有关。Schmidt 等^[36]对喷雾干燥后的马铃薯蛋白进行了离子交换和层析分离,分离得到 Patatin 和蛋白酶抑制剂,研究了其发泡和乳化性,结果表明,喷雾干燥马铃薯蛋白和 Patatin 组分蛋白在 pH 为 3 时发泡性最好但泡沫稳定性不如蛋白酶抑制剂,而蛋白酶抑制剂在 pH 为 5 时发泡性最好;低疏水组分的蛋白酶抑制剂乳化性较差,稳定性也低,而高疏水组分的蛋白酶抑制剂具有更好的乳液能力,显示了疏水性对于乳化性的重要性。

刘兴丽等^[37]以三种带电多糖(黄原胶、瓜尔胶和壳聚糖)为载体,采用湿法对马铃薯蛋白进行糖基化改性。与马铃薯蛋白相比,3 种糖基化产物的乳化活性与乳化稳定性均显著提高,其中阴离子多糖黄原胶为载体的马铃薯糖基化产物的乳化活性及其稳定性分别提高了 210.34% 和 99.15%。改性后的蛋白表面与马铃薯蛋白相比更加多孔疏松,表明糖基化反应通过改变马铃薯蛋白的空间结构使其乳化特性得到强化。Santos 等^[38]通过不同技术(流变性、光学显微镜和多重光散射)组合提供的信息证明了在马铃薯蛋白乳液中添加瓜尔胶多糖可以增强其稳定性。也有研究^[39]报道了壳聚糖浓度对马铃薯蛋白乳液稳定性的影响,低温扫描电镜结果证明,随着壳聚糖浓度的增加,蛋白质-多糖网络的形成越来越致密,当浓度达到 1%wt 时,壳聚糖控制乳液的微观结构,促进了物理稳定性的增强。虽然马铃薯蛋白因其营养价值成为食品中极具潜力的原料,但是其难以形成稳定的乳剂,多糖对于马铃薯乳剂稳定性改善的研究还需更加深入。

2.3 凝胶性

马铃薯蛋白凝胶性是指其形成凝胶的能力,马铃薯蛋白具有良好的凝胶性。蛋白形成凝胶过程一般可分为三个阶段^[40]: a. 达到变性温度,蛋白质变性,蛋白质分子结构发生变化,基团暴露; b. 变性的蛋白

质聚集形成聚集物(球形或者长粒状); c. 聚集物之间相互作用形成网络状结构,小粒子或部分聚集物填充在网络结构空间中。Creusot 等^[27]比较了 Patatin 凝胶与常用蛋白(乳球蛋白、卵白蛋白、甘氨酸)的热展开和流变性能,研究发现 Patatin 与常用蛋白一样,能形成具有类似小变形流变特性的凝胶。Patatin 变性温度为 59 °C,低于常用蛋白约 20 °C;凝胶形成的温度为 50~60 °C,比其他常用蛋白低 20~25 °C;在低离子强度下,Patatin 形成凝胶的最低浓度仅为 6%,而其他常用蛋白的最低浓度为 8%~11%,这些效应可能归因于 Patatin 相对较高的暴露疏水性。

由于马铃薯蛋白分子量较小,单一马铃薯蛋白形成的凝胶在强度方面较其他蛋白形成的凝胶较弱,与其他蛋白混合形成复合凝胶可能可形成互补。两种蛋白质混合形成凝胶可形成五种凝胶类型^[41-42](图 3): A 是一种蛋白质以散布颗粒状态填充在连续相蛋白质网络结构中; B 是一种蛋白质以可溶状态填充在蛋白质凝胶中; C 是两种蛋白质混合后产生物理结合,非网络结构组分通过非特异性的相互作用随机吸附在连续相蛋白质网络结构上; D 是蛋白质发生共聚合形成杂合单一的凝胶网络结构; E 是两种蛋白质完全兼容形成相互贯穿的聚合网络结构。刘鑫硕等^[43]分析比较了不同比例马铃薯蛋白-蛋清蛋白混合凝胶,结果表明随着马铃薯蛋白含量的增加,混合凝胶的保水性上升,粗糙程度下降;随着马铃薯蛋白含量的减少,混合凝胶的硬度上升,马铃薯蛋白和蛋清蛋白在保水性和硬度方面形成互补。但对于凝胶类型未有研究表述。

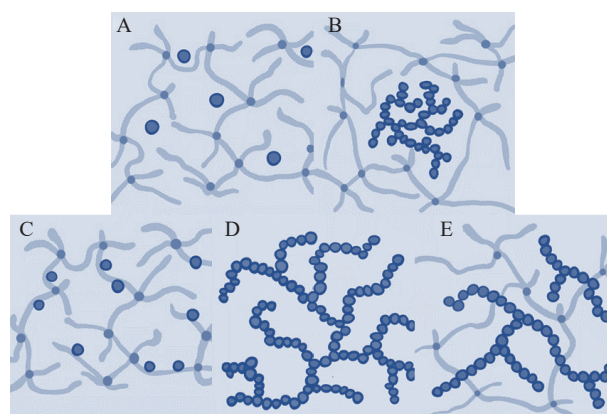


图 3 两种蛋白可能形成的凝胶类型^[41-42]

Fig.3 Possible gel types of two proteins^[41-42]

除了凝胶特性方面可以和其他蛋白互补,由于马铃薯蛋白营养价值高且氨基酸含量与其他蛋白存在差异,马铃薯蛋白还可以作为其他蛋白的部分替代来达到平衡营养或者减少成本的作用。王思念等^[44]使用马铃薯蛋白替代乳清蛋白质量的一半制备了热诱导凝胶,考察了总蛋白浓度对于复合凝胶性质的影响。结果表明,马铃薯蛋白部分替代乳清蛋白形成复合凝胶可以明显减少乳清蛋白的用量,复合蛋白具有一定的质构与持水性,其中总蛋白浓度为 80 g/L 的

复合凝胶具有较好的凝胶强度,形成了致密的网络结构。但同样对复合凝胶类型的研究未有表述。LÜ等^[45]为了改善大豆蛋白分离物凝胶体系的营养和凝胶性能,添加了马铃薯蛋白、蛋清蛋白和马铃薯蛋白-蛋清蛋白混合物。结果表明,复合凝胶形成的凝胶类型为图 3 中的 B 型。马铃薯蛋白-蛋清蛋白(3:3)凝胶中 β 折叠比例最高(47%),凝胶结构最有序,固化水比例最高(96%),而且添加了马铃薯蛋白形成的凝胶消化率高于未添加马铃薯蛋白形成的凝胶。马铃薯蛋白的添加或替代对于其他蛋白凝胶的研究具有拓展意义,可能将有助于更好氨基酸模式的肉类类似物的开发。对于马铃薯蛋白复合凝胶的类型以及形成机理研究较少,不同来源的蛋白质性质差异很大,解释混合体系蛋白之间的作用机理仍然存在挑战。

2.4 抗氧化活性和抗肿瘤活性

马铃薯蛋白抗氧化活性指其对 DPPH、OH 和 ABTS⁺等自由基的清除能力,马铃薯蛋白的抗氧化活性可归因于其含有的抗氧化活性氨基酸,Patatin 含有的多种氨基酸如色氨酸、酪氨酸、苯丙氨酸和组氨酸等都是具有自由基清除能力的氨基酸^[5]。食物成分的抗氧化活性因其抗氧化应激的保护能力和可预防一系列慢性退行性疾病而受到广泛关注^[46-47]。在之前的研究^[48]中采用超滤和色谱相结合的方法,从马铃薯汁液中分离纯化了 Patatin 并研究了其对小鼠黑色素瘤 B16 细胞的体外抗氧化和抗肿瘤活性。结果表明 Patatin 具有显著的抗氧化活性,具有显著的氧化降低能力,对羟基自由基诱导的氧化 DNA 损伤有保护作用,对脂质过氧化有抑制作用,因此 Patatin 被鉴定为一种对小鼠黑色素瘤 B16 细胞有效的抗增殖剂,具有一定的抗肿瘤活性,其可能作为一种潜在的癌症化学预防剂和食品配料。

通过分离纯化马铃薯蛋白可获取具有显著抗氧

化活性的蛋白,除此之外,还有通过发酵与酶解马铃薯蛋白制备抗氧化肽的方法。高丹丹等^[49]利用七株产蛋白酶能力较强菌株对马铃薯蛋白进行发酵制备抗氧化肽,其中有一株菌株发酵液表现出了对 DPPH 自由基很强的清除能力,确认可以通过该菌株发酵制备抗氧化肽。常坤朋等^[50]分别利用胰蛋白酶等五种蛋白酶对马铃薯蛋白进行水解,研究结果表明,胰蛋白酶水解马铃薯得到的水解物的抗氧化活性最高,DPPH 自由基清除率为 69.82%、羟自由基清除率为 71.01%、超氧阴离子自由基清除率为 50.56%。因此,可选用胰蛋白酶水解马铃薯蛋白制备抗氧化肽。此外,通过物理方法处理提高马铃薯蛋白抗氧化活性的研究也有报道^[51],为了提高马铃薯蛋白抗氧化活性,将其在高静水压(HHP)条件下进行处理,其抗氧化活性的增加主要是因为 HHP 诱导了马铃薯蛋白结构的变化。因此,生物发酵、酶解和物理处理等改性方法对于马铃薯蛋白抗氧化活性研究与应用具有重要意义,这也对马铃薯蛋白其他性质的研究与强化有很大的借鉴价值。近年来对于马铃薯蛋白进行改性的研究不少,下文将对近年来马铃薯蛋白改性与应用进行总结。

3 马铃薯蛋白的改性与应用

蛋白质改性是指通过人为地改变条件,改变蛋白质的氨基酸残基和多肽链规律结构或者破坏蛋白质分子的空间结构,从而引起蛋白质理化性质的改变。目前,关于蛋白质改性的研究主要集中在物理改性、化学改性、酶法改性和基因工程改性等^[52]。在马铃薯蛋白改性方面,主要集中在前三者,而且近年来酶改性马铃薯蛋白的研究较多。

3.1 改性方法

表 1 对近年来对马铃薯蛋白的改性方法进行了归纳举例,一些传统的如热处理、酸碱调节改性

表 1 马铃薯蛋白的改性方法
Table 1 Modification methods of potato protein

方法		原理	应用举例	参考文献
物理	高静水压	诱导蛋白质结构变化,压力诱导聚集	施加200、400和600 MPa的压力,蛋白表面疏水性在加压处理后提高1.3倍,泡沫稳定性提高177%	[33]
	高强度超声	诱导了蛋白质大分子团聚集体的展开和破裂,导致疏水基团和R-SH基团的暴露,粒径减少	高强度超声(200、400、600 W)和处理时间对不溶性马铃薯蛋白处理。结果表明,有助于马铃薯蛋白形成致密均匀的凝胶网络,还改善了其乳化活性	[31]
化学	糖基化	美拉德反应及多糖反应,引入糖链,使空间结构发生变化	复合物产生较疏松的表面结构,提高了乳化性能;并且共价复合物具有较强的抗氧化活性。糖基化反应后马铃薯蛋白乳化特性得到改善	[37,53]
	酶脱酰胺	增加蛋白质表面的负电荷	制备不同脱酰胺时间马铃薯蛋白乳液,结果表明脱酰胺6 h的乳液体系最稳定、乳液的粘度、弹性较好	[54]
酶法	酶催化	催化马铃薯蛋白的交联反应,形成共价交联结构	用谷氨酰胺转氨酶、漆酶、酪氨酸酶和过氧化物酶催化马铃薯蛋白的共价交联。谷氨酰胺转氨酶和过氧化物酶处理的蛋白凝胶显示出更均匀的三维网络和更大的孔径	[55]
	酶水解	水解蛋白为小分子量的多肽,蛋白质三、四级结构被破坏	用Alcalase水解马铃薯蛋白水解产物,马铃薯蛋白水解产物的疏水部分具有较强的抗氧化活性,高分子量部分具有较强的 α -淀粉酶抑制活性	[56]
微生物发酵		利用微生物生产的特异性蛋白酶对蛋白进行酶处理	利用七株产蛋白酶菌株对马铃薯蛋白进行发酵,研究结果发现,B菌株发酵液的抗氧化性最强,可利用其发酵马铃薯蛋白制备抗氧化肽	[49]
复合改性	超声波辅助+糖基化	空化作用,对物料施加张力和崩溃作用,造成大分子机械性断裂;引入糖链,使空间结构发生变化	利用超声波辅助马铃薯蛋白质进行糖接枝反应,接枝度超过未使用超声波辅助下的湿法反应,大幅缩短反应时间,使褐变度较大降低	[57]

等^[58-61]因被熟知本文不再进行论述。由表 1 可见马铃薯蛋白质改性的方法多样,酶处理方法由于酶具有的特异专一性使其成为目前改性研究的热点,但其成本高的缺点可能导致该方法不适宜大规模应用。利用微生物资源,筛选出特定的高产酶蛋白菌株来发酵马铃薯蛋白进行改性或者生产发酵产物或许是未来研究的重点。

3.2 改性马铃薯蛋白的应用

3.2.1 作为面点制作的改良剂 无麸质产品是乳糜泻患者的食疗食物,但其缺乏面筋蛋白,面团持气能力差、蓬松度、韧性小。为改善无麸质产品的品质不良现象,朱香杰等^[62]以大米粉为原料,添加马铃薯蛋白-黄原胶复合物(PPXG)和马铃薯蛋白-黄原胶复合微凝胶(PPXGM),研究其对无麸质大米面团流变特性和微观结构的影响。结果表明,PPXG 和 PPXGM 与对照组(添加马铃薯蛋白)相比更能提高面团的持气性,增加馒头比容。添加 PPXGM 的馒头品质比其他组更好。杨龙松^[63]也系统探究了 PPXG 对冻融过程中饺子皮品质的影响,结果发现 PPXG 的加入减缓了水分在冻融过程中的迁移,减少冰晶对网络结构的破坏,降低蒸煮损失率;还增强了蛋白质和淀粉的相互作用,减缓了冻融过程中蛋白质二级结构、巯基及二硫键的变化,降低了淀粉短链有序化程度,饺子皮品质得到改善。因此,多糖与马铃薯蛋白复合物有望成为面点制作的有效改良剂,用于面团、馒头或其他面点食品生产中。关于其他多糖与马铃薯蛋白复合产物对面点制作的影响如何,以及马铃薯糖基化产物对面团影响的机理都还有待深入研究。

3.2.2 作为微胶囊制作的主要原料 微胶囊化能有效防止不饱和脂肪酸的氧化变质,同时改善油的口感,方便运输与储藏。为达到上述对油的保护效果,合适的基质对于微胶囊化效率以及其他理化性质起着关键作用^[64]。张天奇等^[65]以马铃薯蛋白、山茶籽油和壳聚糖为主要原料,运用复合凝聚法、乳化和冷冻干燥制备出了性质稳定的马铃薯蛋白质基微胶囊,通过结构表征发现,马铃薯蛋白基微胶囊壁材成功包裹芯材山茶籽油。因此,马铃薯蛋白经过壳聚糖改性可作为微胶囊制作的主要原料之一,这对于马铃薯蛋白高值化利用具有广阔的前景。

3.2.3 作为酶抑制剂和抗氧化性物质 血管紧张素转化酶(ACE)是一种能够调节血压的多功能酶,对人体内的血压和体液平衡起着重要作用;但 ACE 也能水解神经肽、脑啡肽和其他一些生物活性肽,对人体的免疫、消化和神经功能造成影响。目前,ACE 抑制剂已经可以从各种食物中提取,食源性 ACE 抑制剂安全性高,且无副作用^[66]。高丹丹等^[67]利用筛选出来的菌株发酵马铃薯蛋白制备 ACE 抑制肽,生产出来的抑制肽 ACE 抑制率高达 86.94%。此外,该团队还进行了利用胰蛋白酶水解马铃薯蛋白制备 ACE 抑制肽的研究,并且还利用类蛋白反应修饰

ACE 抑制剂。结果发现,经过类蛋白反应修饰产物的 ACE 抑制率比未经修饰的提高了 1.35 倍^[68]。利用微生物发酵马铃薯蛋白制备抗氧化肽该团队也有进行研究^[49],利用七株产蛋白酶能力强的菌株发酵马铃薯蛋白的产物 DPPH 自由基的清除率分别为 88.32%、92.00%、24.49%、76.90%、53.02%、18.11%、55.69%。因此,无论是通过蛋白酶水解还是微生物发酵马铃薯蛋白制备酶抑制剂和抗氧化性物质都是可行的,为天然高效 ACE 抑制剂和抗氧化物质的制备提供了新的途径,但制备工艺技术和对其他酶的抑制剂的研需要更加深入的探索。

4 结语与展望

马铃薯蛋白资源丰富,中国是全球马铃薯种植、生产和消费最大的国家。马铃薯蛋白独特的组成决定了其独特的营养价值。其多样的组成和较小的分子量使其具有良好的乳化性、发泡性和溶解性等特性,在食品领域中具有巨大潜力。此外,马铃薯蛋白还具有抗氧化和抗肿瘤活性等功能,在功能性食品和药品等方面有广阔的前景。目前已有对一百多种马铃薯蛋白酶抑制剂的氨基酸序列进行了编码,但相关工作仍需完善。提取马铃薯蛋白常使用的酸碱沉淀法存在多种性能损失或下降问题,因此除了提高纯度和优化分离提纯方法之外,改性技术也是另一条突破的途径。然而,目前许多改性方法的成本过高,不适合工业大规模应用。未来的研究方向包括深入研究马铃薯蛋白分子结构与功能活性之间的联系,探究其抗氧化机制,实现马铃薯蛋白在医药领域的高价值利用;加强马铃薯蛋白与其他植物蛋白的综合利用,开发更营养健康的植物基蛋白肉或其他蛋白食品,推动马铃薯工业化进程;深入研究改性蛋白在应用中的机制原理,同时降低马铃薯蛋白改性成本,优化现有的改性方法,并利用微生物资源进行马铃薯蛋白改性的研究,以适应大规模应用的需求。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 孙永立. 马铃薯淀粉产量大幅增长高端需求增长空间大[J]. 中国食品工业, 2021(15): 104-107. [SUN Y L. Potato starch production has a large increase in high-end demand growth space[J]. China Food Industry, 2021(15): 104-107.]
- [2] 陈萌山, 王小虎. 中国马铃薯主食产业化发展与展望[J]. 农业经济问题, 2015, 36(12): 4-11. [CHEN M S, WANG X H. Development and prospect of potato staple food industrialization in China[J]. Agricultural Economic Issues, 2015, 36(12): 4-11.]
- [3] 逢学思, 曲峻岭, 郭燕枝. 中国马铃薯主食产业化现状及未来展望[J]. 农业展望, 2018, 14(4): 28-31. [PANG X S, QU J L, GUO Y Z. Current situation and future prospects of potato staple food industrialization in China[J]. Agriculture Outlook, 2018, 14(4): 28-31.]
- [4] 刘凌, 崔明学, 吴娜, 等. 马铃薯淀粉工业废水的环境影响与

- 资源化利用[J]. 食品与发酵工业, 2011, 37(8): 131–135. [LIU L, CUI M X, WU N, et al. Environmental impact and resource utilization of potato starch industrial wastewater[J]. Food and Fermentation Industry, 2011, 37(8): 131–135.]
- [5] 刘垚彤, 孙伟, 董墨思, 等. 马铃薯糖蛋白 Patatin 的研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(11): 331–337. [LIU Y T, SUN W, DONG M S, et al. Research progress of potato glycoprotein Patatin[J]. Food Science, 2019, 40(11): 331–337.]
- [6] 潘牧, 彭慧元, 邓宽平, 等. 马铃薯蛋白的研究进展[J]. 贵州农业科学, 2012, 40(10): 22–26. [PAN M, PENG H Y, DENG K P, et al. Research progress of potato protein[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2012, 40(10): 22–26.]
- [7] HUSSAIN M, QAYUM A, XIU Z, et al. Potato protein: An emerging source of high quality and allergy free protein, and its possible future based products[J]. Food Research International, 2021, 148: 110583.
- [8] 张笃芹, 木泰华, 孙红男. 马铃薯块茎特异蛋白 Patatin 的研究进展[J]. 中国农业科学, 2016, 49(9): 1746–1756. [ZHANG D Q, MU T H, SUN H N. Research progress of potato tuber-specific protein Patatin[J]. Chinese Agricultural Sciences, 2016, 49(9): 1746–1756.]
- [9] 杨琦, 程述震, 杜明. 马铃薯蛋白制备及应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(16): 454–463. [YANG Q, CHENG S Z, DU M. Research progress on preparation and application of potato protein[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(16): 454–463.]
- [10] BEALS K A. Potatoes, nutrition and health[J]. American Journal of Potato Research, 2019, 96(2): 102–110.
- [11] SCHMIDT J M, DANGAARD H, GREVE P M, et al. Gel properties of potato protein and the isolated fractions of patatins and protease inhibitors—Impact of drying method, protein concentration, pH and ionic strength[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 96: 246–258.
- [12] 崔竹梅, 黄海珊, 秦欢欢, 等. 马铃薯蛋白组分的分离提取和功能性质研究[J]. 食品科学, 2011, 32(3): 76–80. [CUI Z M, HUANG H S, QIN H H, et al. Separation, extraction and functional properties of potato protein components[J]. Food Science, 2011, 32(3): 76–80.]
- [13] 张泽生, 刘素稳, 郭宝芹, 等. 马铃薯蛋白质的营养评价[J]. 食品科技, 2007(11): 219–221. [ZHANG Z S, LIU S W, GUO B Q, et al. Nutritional evaluation of potato protein[J]. Food Science, 2007(11): 219–221.]
- [14] WAGLAY A, KARBOUNE S. Potato proteins: Functional food ingredients[M]. Advances in Potato Chemistry and Technology. Academic Press, 2016: 75–104.
- [15] WAGLAY A, KARBOUNE S, ALLI I. Potato protein isolates: Recovery and characterization of their properties[J]. Food Chemistry, 2014, 142: 373–382.
- [16] RALET M C, GUEGUEN J. Fractionation of potato proteins: Solubility, thermal coagulation and emulsifying properties[J]. LWT-Food Science and Technology, 2000, 33(5): 380–387.
- [17] POTS A M, DE J H H J, GRUPPEN H, et al. Heat-induced conformational changes of patatin, the major potato tuber protein[J]. European Journal of Biochemistry, 1998, 252(1): 66–72.
- [18] 孙莹, 魏冬旭, 姚春艳, 等. 马铃薯淀粉汁水中 Patatin 的纯化及结构研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(11): 122–127. [SUN Y, WEI D X, YAO C Y, et al. Purification and structure of patatin in potato starch juice[J]. Science and Technology of Food industry, 2017, 38(11): 122–127.]
- [19] TANGER C, ANDLINGER D J, BRUMMER R A, et al. Quantification of protein-protein interactions in highly denatured whey and potato protein gels[J]. MethodsX, 2021, 8: 101243.
- [20] LOKRA S, HELAND M H, CLAUSSEN I C, et al. Chemical characterization and functional properties of a potato protein concentrate prepared by large-scale expanded bed adsorption chromatography[J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 41(6): 1089–1099.
- [21] 曾凡遼, 刘刚. 马铃薯蛋白的分离及氨基酸组成分析[J]. 食品科学, 2014, 35(9): 53–56. [ZENG F K, LIU G. Separation and amino acid composition analysis of potato protein[J]. Food Science, 2014, 35(9): 53–56.]
- [22] POUVREAU L, GRUPPEN H, PIERSMA S R, et al. Relative abundance and inhibitory distribution of protease inhibitors in potato juice from c. v. Elkana[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(6): 64–74.
- [23] LIYANAGE R, MINAMINO S, NAKAMURA Y, et al. Preparation method modulates hypocholesterolaemic responses of potato peptides[J]. Journal of Functional Foods, 2010, 2(2): 118–125.
- [24] MAKINEN S, KELLONIEMI J, PIHLANTO A, et al. Inhibition of angiotensin converting enzyme I caused by autolysis of potato proteins by enzymatic activities confined to different parts of the potato tuber[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(21): 9875–9883.
- [25] MCCLEMENTS D J, DECKER E A, PARK Y, et al. Structural design principles for delivery of bioactive components in nutraceuticals and functional foods[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2009, 49(6): 577–606.
- [26] ALTING A C, POUVREAU L, GIUSEPPIN M L F, et al. Potato proteins[M]. Handbook of Food Proteins. Woodhead Publishing, 2011: 316–334.
- [27] CREUSOT N, WIERENGA P A, LAUS M C, et al. Rheological properties of patatin gels compared with β -lactoglobulin, ovalbumin, and glycinin[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2011, 91(2): 253–261.
- [28] VAN G A, WALSTRA P, VORAGEN A G J, et al. Effects of protein composition and enzymatic activity on formation and properties of potato protein stabilized emulsions[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(17): 6419–6427.
- [29] VAN K G A, WALSTRA P, GRUPPEN H, et al. Formation and stability of foam made with various potato protein preparations[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(26): 7651–7659.
- [30] GALAZKA V B, DICKINSON E, LEDWARD D A. Emulsifying behaviour of 11S globulin *Vicia faba* in mixtures with sulphated polysaccharides: Comparison of thermal and high-pressure treatments[J]. Food Hydrocolloids, 1999, 13(5): 425–435.
- [31] ZHAO R, LIU X, LIU W, et al. Effect of high-intensity ultrasound on the structural, rheological, emulsifying and gelling properties of insoluble potato protein isolates[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 85: 105969.
- [32] AKBARI N, MOHAMMADZDEH M J, BIPARVA P. Functional and conformational properties of proteolytic enzyme-modified potato protein isolate[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(3): 1320–1327.
- [33] BAIER A K, KNORR D. Influence of high isostatic pressure on structural and functional characteristics of potato protein[J]. Food Research International, 2015, 77: 753–761.
- [34] GOODARZI F, ZENDHBOUDI S. A comprehensive review

- on emulsions and emulsion stability in chemical and energy industries[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2019, 97(1): 281–309.
- [35] ROMERO A, BEAUMAI V, DAVID B E, et al. Interfacial and oil/water emulsions characterization of potato protein isolates[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(17): 9466–9474.
- [36] SCHMIDT J M, DAMAGAARD H, GREVE P M, et al. Foam and emulsion properties of potato protein isolate and purified fractions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 74: 367–378.
- [37] 刘兴丽, 杨龙松, 张艳艳, 等. 多糖对马铃薯蛋白糖基化产物乳化特性及结构的影响[J]. *食品科技*, 2020, 45(12): 208–214. [LIU X L, YANG L S, ZHANG Y Y, et al. Effects of polysaccharides on emulsifying properties and structure of potato protein glycosylation products[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 45(12): 208–214.]
- [38] SANTOS J, CALERO N, GUERRERO A, et al. Relationship of rheological and microstructural properties with physical stability of potato protein-based emulsions stabilized by guar gum[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 44: 109–114.
- [39] CALERO N, MUNOZ J, COX P W, et al. Influence of chitosan concentration on the stability, microstructure and rheological properties of O/W emulsions formulated with high-oleic sunflower oil and potato protein[J]. *Food Hydrocolloids*, 2013, 30(1): 152–162.
- [40] SCHMIDT J M, LARSEN L B, HAMMERSHOJ M. Appearance and textural properties of sheared low concentration potato protein gels—Impact of drying method, pH, and ionic strength[J]. *Journal of Food Science*, 2017, 82(9): 2056–2061.
- [41] BURGARELLA J C, LANIER T C, HAMANN D D. Effects of added egg white or whey protein concentrate on thermal transitions in rigidity of croaker surimi[J]. *Journal of Food Science*, 1985, 50(6): 1588–1606.
- [42] ZIEGLER G R, FOEGEDING E A. The gelation of proteins[M]. *Advances in Food and Nutrition Research*. Academic Press, 1990, 34: 203–298.
- [43] 刘鑫硕, 刘倩楠, 刘伟, 等. 马铃薯蛋白与蛋清蛋白混合凝胶特性分析[J]. *食品科学*, 2022, 43(2): 34–40. [LIU X S, LIU Q N, LIU W, et al. Analysis of mixed gel properties of potato protein and egg white protein[J]. *Food Science*, 2022, 43(2): 34–40.]
- [44] 王思念, 伍娟, 李堃芳, 等. 马铃薯/乳清蛋白复合凝胶的性质和微观结构[J]. *精细化工*, 2022, 39(12): 2541–2549. [WANG S N, WU J, LI K F, et al. Properties and microstructure of potato/whey protein composite gels[J]. *Fine Chemicals*, 2022, 39(12): 2541–2549.]
- [45] LÜ Y, XU L, TANG T, et al. Gel properties of soy protein isolate-potato protein-egg white composite gel: Study on rheological properties, microstructure, and digestibility[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 135: 108223.
- [46] DE O F J G, RODRIGUES J M, VALADARES A C F, et al. Bioactive properties of protein hydrolysate of cottonseed byproduct: Antioxidant, antimicrobial, and angiotensin-converting enzyme (ACE) inhibitory activities[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2021, 12(3): 1395–1404.
- [47] EGEA M B, DE O F J G, LEMES A C, et al. Bioactive properties of protein hydrolysate of cottonseed byproduct: Antioxidant, antimicrobial, and angiotensin-converting enzyme (ACE) inhibitory activity[J]. *The FASEB Journal*, 2020, 34(S1): 1–10.
- [48] SUN Y, JIANG L, WEI D. Partial characterization, *in vitro* antioxidant and antiproliferative activities of patatin purified from potato fruit juice[J]. *Food & Function*, 2013, 4(10): 1502–1511.
- [49] 高丹丹, 孙青青, 郭鹏辉, 等. 发酵马铃薯蛋白制备抗氧化肽[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(7): 159–162. [GAO D D, SUN Q Q, GUO P H, et al. Preparation of antioxidant peptides from fermented potato protein[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(7): 159–162.]
- [50] 常坤朋, 高丹丹, 张嘉瑞, 等. 马铃薯蛋白抗氧化肽的研究[J]. *农产品加工*, 2015(7): 1–4. [CHANG K P, GAO D D, ZHANG J R, et al. Studies on antioxidant peptides from potato protein[J]. *Product Processing*, 2015(7): 1–4.]
- [51] ELAHI R, MU T H. High hydrostatic pressure (HHP)-induced structural modification of patatin and its antioxidant activities[J]. *Molecules*, 2017, 22(3): 438–443.
- [52] 郭超凡, 王云阳. 蛋白质物理改性的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2017, 8(2): 428–433. [GUO C F, WANG Y Y. Research progress of protein physical modification[J]. *Journal of Food Safety and Quality Inspection*, 2017, 8(2): 428–433.]
- [53] 马双双. 阿拉伯树胶-马铃薯蛋白共价复合物抗氧化性和乳化特性的研究[J]. *粮食与油脂*, 2021, 34(5): 151–155. [MA S S. Study on antioxidant and emulsifying properties of gum arabic-potato protein covalent complexes[J]. *Food and Oil*, 2021, 34(5): 151–155.]
- [54] 刘兴丽, 魏莹莹, 张艳艳, 等. 脱酰胺马铃薯蛋白乳液的制备及其微流变特性[J]. *食品科学*, 2023, 44(2): 94–100. [LIU X L, WEI Y Y, ZHANG Y Y, et al. Preparation and microrheological properties of deamidated potato protein emulsion[J]. *Food Science*, 2023, 44(2): 94–100.]
- [55] GUI Y, LI J, ZHU Y, et al. Roles of four enzyme crosslinks on structural, thermal and gel properties of potato proteins[J]. *LWT*, 2020, 123: 109116.
- [56] RAHIMI R, GAVLIGHI H A, SARTESHNIZI R A, et al. *In vitro* antioxidant activity and antidiabetic effect of fractionated potato protein hydrolysate via ultrafiltration and adsorption chromatography[J]. *LWT*, 2022, 154: 112765.
- [57] 刘昀. 马铃薯蛋白-糖共价复合物的制备及功能性质的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017. [LIU J. Preparation and functional properties of potato protein-sugar covalent complexes[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017.]
- [58] LOMOLINO G, VINCENZI S, ZANNOMI S, et al. Emulsifying activity of potato proteins in the presence of k-carrageenan at different pH conditions[J]. *Food Chemistry: X*, 2022, 13: 100232.
- [59] DROZLOWSKA E, WERNISI M, BARTKOWIAK A. The influence of thermal hydrolysis process on emulsifying properties of potato protein isolate[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2020, 57(3): 1131–1137.
- [60] HADAS K, LIBI C, ZOYA O, et al. Comparison of thermal and high-pressure gelation of potato protein isolates[J]. *Foods*, 2020, 9(8): 1041.
- [61] MAO C, WU J, ZHANG X Z, et al. Improving the solubility and digestibility of potato protein with an online ultrasound-assisted pH shifting treatment at medium temperature[J]. *Foods*, 2020, 9(12): 1908–1914.
- [62] 朱香杰, 魏莹莹, 赵双丽, 等. 马铃薯蛋白微凝胶对无麸质面团流变特性和微观结构的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(5): 172–177, 184. [ZHU X J, WEI Y Y, ZHAO S L, et al. Effects of potato protein microgels on rheological properties and microstructure of gluten-free dough[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2023, 49(5): 172–177, 184.]

- [63] 杨龙松. 马铃薯蛋白-多糖复合物的制备及其对饺子皮品质的影响[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2021. [YANG L S. Preparation of potato protein-polysaccharide complex and its effect on the quality of dumpling skin[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2021.]
- [64] WANG C, CHANG T, ZHANG D, et al. Preparation and characterization of potato protein-based microcapsules with an emphasis on the mechanism of interaction among the main components[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(7): 2866–2872.
- [65] 张天奇, 陈彦廷, 崔延如, 等. 壳聚糖/马铃薯蛋白/山茶籽油微胶囊的研制[J]. *山东理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 36(2): 53–57. [ZHANG T Q, CHEN Y T, CUI Y R, et al. Preparation of chitosan/potato protein/camellia seed oil microcapsules[J]. *Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 36(2): 53–57.]
- [66] EHLERS M W, RIORDAN J F. Angiotensin-converting enzyme: New concepts concerning its biological role[J]. *Biochemistry*, 2002, 28(13): 5311–5318.
- [67] 高丹丹, 李海霞, 祁高展. 发酵马铃薯蛋白制备 ACE 抑制肽[J]. *食品科技*, 2015(1): 258–262. [GAO D D, LI H X, QI G Z. Fermented potato protein to prepare ACE inhibitory peptides[J]. *Food Science and Technology*, 2015(1): 258–262.]
- [68] 高丹丹, 马忠仁, 田晓静, 等. 马铃薯蛋白 ACE 抑制肽的 Plastein 反应修饰研究[J]. *食品与机械*, 2018, 34(2): 6–10. [GAO D D, MA Z R, TIAN X J, et al. Plastein reaction modification of potato protein ACE inhibitory peptides[J]. *Food and Machinery*, 2018, 34(2): 6–10.]