

蛋白质对淀粉的影响及其复合体系应用研究进展

Research progress on the influence of protein on physicochemical properties, microstructures and digestive properties of starch and its application

赵海波^{1,2,3} 孙纯锐¹ 邱洪伟¹

ZHAO Hai-bo^{1,2,3} SUN Chun-rui¹ QIU Hong-wei¹

崔波³ 程云辉^{3,4} 陈玲²

CUI Bo³ CHENG Yun-hui^{3,4} CHEN Ling²

(1. 诸城兴贸玉米开发有限公司, 山东 诸城 262218; 2. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东 广州 510641; 3. 齐鲁工业大学食品科学与工程学院, 山东 济南 250353;

4. 长沙理工大学食品与生物工程学院, 湖南 长沙 410114)

(1. Zhucheng Xingmao Corn Development Co., Ltd., Zhucheng, Shandong 262218, China; 2. School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China; 3. School of Food Science and Engineering, Qilu University of Technology, Jinan, Shandong 250353, China; 4. School of Food Science and Bioengineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

摘要:淀粉和蛋白质是食品体系中两种重要的组分,二者之间的相互作用对淀粉的结构、理化性质及淀粉基食品的质构特性和消化性能具有重要影响。近年来,关于外源蛋白质对混合体系中淀粉—蛋白质相互作用的影响及其应用研究成为食品领域的研究热点。文章综述了淀粉和蛋白质相互作用方式,蛋白质对淀粉理化性质(糊化特性、回生特性、流变学特性、热力学特性和质构特性)及淀粉—蛋白质混合体系微观结构的影响,总结了蛋白质对混合体系中淀粉体外消化性的调控作用及机制,综述了该体系在食品加工中的应用研究进展。

关键词:淀粉;蛋白质;相互作用;理化性质;消化性;微观结构

Abstract: Starch and protein are two important components in food system. The interactions between starch and protein have important influence on the structure, physicochemical properties of starch and the texture and digestibility of starch-based food. In

基金项目:山东省重点研发计划(编号:2021CXGC010808, 2022TZXD0021);山东省科教产教融合创新试点项目(编号:2022JBZ01-08)

作者简介:赵海波,男,齐鲁工业大学讲师,博士。

通信作者:陈玲(1961—),女,华南理工大学教授,博士。

E-mail: haibozhao@qlu.edu.cn

收稿日期:2022-07-24 **改回日期:**2023-03-12

recent years, the effect of exogenous protein on starch-protein interaction in mixed system and its application have become a hot research topic in the field of food. This article reviews the interaction mode between starch and protein, the effect of protein on physicochemical properties (gelatinization properties, retrogradation properties, rheological properties, thermal properties and texture properties) and microstructure of starch-protein mixed system, summarizes the regulation effect of protein on digestibility of starch in mixed system and its mechanism, and presents the application of the mixed system in food processing, aiming to clarify the mechanism of interactions between starch and protein and provide theoretical reference for the research and development of starch-based food.

Keywords: starch; protein; interaction; physicochemical properties; digestibility; microstructure

淀粉和蛋白质,作为常见食品中两种主要的生物大分子,是维持人体健康和代谢功能的重要能量和营养来源^[1]。淀粉是一种由葡萄糖分子通过 α -糖苷键连接形成的聚合碳水化合物^[2],它由直链淀粉和支链淀粉组成,常以半结晶颗粒的形式存在^[3]。在食品加工过程中,淀粉通常会和蛋白质发生相互作用从而改变食品的营养和品质。从食品营养的角度而言,蛋白质覆盖于淀粉表面能

够降低淀粉消化性,可使人体血糖维持在正常范围内^[4]。从食品品质的角度而言,蛋白质和淀粉形成共混凝胶或发生相分离,导致食品的感官性质发生变化。目前,有关二者在淀粉基食品中的相互作用研究引起了研究者广泛关注^[5]。

淀粉和蛋白质之间互动,能改变淀粉结构和理化性质,淀粉理化特性(如糊化和回生)改变又会对淀粉基食品品质产生极大影响;一般而言,淀粉-蛋白质共混体系中淀粉的某些性能一定程度上优于单一体系。因此,明确混合体系中淀粉和蛋白质分子相互作用机制,有助于在生产过程中调整原料配比及工艺条件,获得理想加工品质和营养品质的产品。基于此,文章拟综述淀粉和蛋白质的相互作用方式,蛋白质对淀粉理化性质、微观结构和消化性的影响及在食品中的实际应用,旨在为淀粉基食品品质的改良和研发提供理论参考。

1 淀粉和蛋白质的相互作用方式

淀粉和蛋白质之间存在共价和非共价相互作用^[6]。共价相互作用源于大分子上特定反应基团之间的强化学键。淀粉和蛋白质之间形成共价键的方式有美拉德反应、酶结合和化学交联^[7]。非共价键是淀粉和蛋白质之间最常见的相互作用类型。淀粉和蛋白质之间的非共价键相互作用发生在两种生物大分子的不同片段和侧链之间,不同分子间存在不同类型的相互作用力,主导力最终由分子的组成和结构决定^[8]。淀粉和蛋白质之间通过共价键、静电相互作用、氢键、范德华力和疏水相互作用形成混合体系^[9]。

不同蛋白质和淀粉之间通过不同的作用力形成复合物。Zhang 等^[10]发现 NaCl、尿素或 SDS 的加入降低了糊化玉米淀粉(含淀粉粒结合蛋白)的弹性,对除去蛋白的玉米淀粉影响不大,说明淀粉粒结合蛋白与淀粉链之间存在较强的静电相互作用、氢键和疏水相互作用。Wang 等^[11]分别分析乳清分离蛋白、大豆分离蛋白和酪蛋白与粳米淀粉在不同缓冲液中形成复合物的储能模量图,发现乳清分离蛋白和酪蛋白与淀粉之间主要存在疏水相互作用,氢键和静电相互作用相对较弱,而大豆分离蛋白与淀粉链之间存在较强的氢键、静电相互作用和疏水相互作用。Liu 等^[12]分析乳清分离蛋白和马铃薯淀粉复合物之间的相互作用力,认为疏水相互作用和氢键起主要作用,二者之间的静电相互作用相对较弱。

在这些力的作用下,蛋白质和淀粉表现为 3 种存在形式:离析、缔合和共溶。蛋白质淀粉混合体系可能会发生相分离和共溶现象,其中离析和缔合同属于相分离。离析是指淀粉和蛋白质在溶剂中出现蛋白质富集相和淀粉富集相。缔合是指蛋白质和淀粉相互吸引形成的聚集体和溶剂相共存。

2 蛋白质对淀粉理化性质的影响

蛋白质对淀粉理化性质的影响见表 1。

2.1 糊化特性

淀粉糊化是指淀粉颗粒在热处理下缓慢吸水膨胀,形成黏稠胶体溶液的过程^[23]。蛋白质/蛋白质的水解物会通过降低淀粉峰值黏度,提高淀粉糊化温度,改变糊化焓等方式对淀粉的糊化起抑制作用^[9]。

表 1 蛋白质对淀粉理化特性的影响

Table 1 Effects of protein on physicochemical properties of starch

淀粉性质	淀粉种类	蛋白质种类	对淀粉的影响	参考文献
糊化特性	荞麦淀粉	豆类蛋白	糊化温度升高,峰值黏度降低	[13]
	小麦淀粉	麦谷蛋白、醇溶蛋白	麦谷蛋白-小麦淀粉的糊化温度更高	[14]
回生特性	小麦淀粉	小麦表面蛋白	去除表面蛋白之后,回生焓升高,延缓淀粉老化	[15]
	马铃薯淀粉、玉米淀粉	大豆肽	大豆肽和淀粉复合物回生焓高于单一体系	[16]
流变特性	小麦淀粉	大米蛋白水解物	储能模量降低,损耗角正切值增加	[17]
	荞麦淀粉	绿豆蛋白	储能模量和损耗模量随绿豆蛋白含量的增加而降低	[18]
热力学特性	薏苡仁淀粉	薏苡仁蛋白	薏苡仁蛋白脱除导致糊化焓(ΔH)增加	[19]
	玉米淀粉	乳清蛋白	随着蛋白含量增加,峰值糊化温度提高, ΔH 显著降低	[20]
质构特性	小麦淀粉	乳清蛋白、大豆蛋白	两种蛋白增加了复合产品的硬度,乳清蛋白作用更显著	[21]
	大米淀粉	米糠蛋白、大豆蛋白	添加米糠蛋白和大豆蛋白显著降低了产品的硬度	[22]

蛋白质的加入能抑制淀粉的糊化。Wang 等^[24]制备了不同比例大米蛋白与淀粉的混合体系,发现随着蛋白质含量的增加,糊化峰值黏度逐渐降低,糊化温度逐渐升高。Kumar 等^[25]研究了乳清分离蛋白对燕麦淀粉糊化特性的影响,结果表明,低含量的乳清分离蛋白能显著降低淀粉峰值黏度,增加峰值温度和糊化焓,且糊化焓随乳清分离蛋白浓度的增加而增加,这可能是由于未折叠的蛋白质和蛋白质聚集在燕麦淀粉颗粒表面形成蛋白质膜,它作为一个物理屏障起到抑制淀粉糊化的作用;而高含量的乳清分离蛋白提高了其峰值黏度,说明蛋白质含量影响淀粉的糊化行为。Zheng 等^[26]在湿热处理的条件下,分别以玉米醇溶蛋白、大豆分离蛋白和乳清分离蛋白为原料与淀粉复合形成蛋白质—淀粉混合物,发现玉米醇溶蛋白的添加使峰值黏度提高,糊化温度降低,糊化焓降低,推测这是由于在热处理过程中,破坏了淀粉的无定形结构,从而使水分子进入淀粉颗粒内部;而大豆分离蛋白和乳清分离蛋白的添加使峰值黏度降低,糊化温度升高,糊化焓降低,这是由于蛋白质包裹淀粉,抑制淀粉膨胀。因此,不同类型的蛋白质对淀粉糊化产生不同的影响。

蛋白质水解物对淀粉糊化具有显著的抑制效果。López-Barón 等^[27]研究了大豆蛋白、大米蛋白和豌豆蛋白及其水解物对小麦淀粉糊化特性的影响,发现天然状态下的3种蛋白质对淀粉糊化性能无显著影响,而蛋白质的水解物提高了淀粉糊化的温度,这可能是由于蛋白质被水解后,其表面疏水性增强,持水能力发生改变,最终影响了淀粉的水合作用。Chen 等^[28]研究了马铃薯淀粉与大豆多肽在不同条件下共混形成配合物的糊化特性,结果显示:大豆多肽能阻碍淀粉的糊化,降低糊化焓;与物理混合样品相比,湿热处理得到的配合物糊化温度更高,糊化焓更低。Lin 等^[29]研究了大米蛋白水解物对小麦淀粉糊化性质的影响,发现小麦淀粉和蛋白质水解物对可利用水的竞争可能会削弱淀粉—水的相互作用,导致湿热处理过程中进入淀粉颗粒的水分减少,此外,大米蛋白水解物包裹在淀粉颗粒的表面,使其结构更致密并起到保护作用,从而减缓淀粉糊化过程。

2.2 回生特性

淀粉回生也称为淀粉老化、凝沉,即淀粉在糊化之后,随着温度的降低,直链淀粉和支链淀粉分子相互靠近并重排,通过氢键形成双螺旋结构,变无序为有序状态的过程^[30]。目前,普遍认为多数蛋白质/蛋白质水解物对淀粉的回生有抑制作用,具体体现在降低淀粉凝胶硬度、回生焓和回生值等。

肖瑜等^[31]发现玉米醇溶蛋白、大豆分离蛋白和乳清分离蛋白能抑制黍米淀粉回生,3种蛋白使淀粉重结晶的速率减慢,回生焓降低。Zhang 等^[32]研究表明大米蛋白

的加入影响了淀粉凝胶中的水分迁移,提高了淀粉凝胶的持水能力,从而抑制了大米淀粉的老化作用。Wang 等^[24]发现由于蛋白质分子形成的空间限制,降低了淀粉分子有序交联结构的形成,抑制了大米淀粉的回生,并认为这种抑制作用是淀粉吸水不充分、糊化不完全和淀粉凝胶水分子迁移受限导致的。Lin 等^[29]向小麦淀粉中添加大米蛋白水解物,发现糊化后直链淀粉和蛋白质分子在直链淀粉重排过程中的缠结阻碍了直链淀粉的有序排列,从而降低了淀粉的回生值;微量的大米蛋白水解物可能延缓小麦淀粉中束缚水的迁移从而抑制淀粉老化。Hu 等^[33]研究乳清蛋白水解物对大米淀粉回生特性的影响,发现淀粉凝胶硬度降低,水流动性受到限制,从而抑制大米淀粉回生。

2.3 流变学特性

淀粉的流变学特性是指在外力的作用下,淀粉发生的形变和流动。在混合体系中,储能模量(G')表征弹性特性并反映凝胶结构的强度,损耗模量(G'')表征黏性特性,代表分子流动和迁移率之间的相互作用, δ 为损耗角,其正切值($\tan\delta$)为黏性成分与弹性成分的比值,表示体系的黏弹特性。蛋白质—淀粉分子相互作用影响淀粉黏弹性。

不同种类和形式的蛋白质与淀粉形成的混合体系具有不同的流变学特征。杨翠红^[34]向玉米淀粉中加入乳清分离蛋白,发现随着蛋白质比例逐渐增加, $\tan\delta$ 相应提高,表明乳清分离蛋白作为惰性填料填充到玉米淀粉中,弱化了玉米淀粉凝胶,降低了体系弹性。Gui 等^[35]制备了天然蛋白质或蛋白质酶解物与马铃薯淀粉的复合物,与淀粉或蛋白质相比,蛋白质和淀粉复合物具有更高的 G' 和 G'' 值,这是因为蛋白质是一种活性填料,填充到缠结的直链淀粉分子中,从而形成更紧密、更强的凝胶。酶处理的蛋白质和淀粉复合物比天然蛋白质和淀粉复合物形成的凝胶更致密、更牢固,表明酶处理的蛋白质具有更好的填充效果。Li 等^[36]利用漆酶和酪氨酸酶处理的马铃薯蛋白分别与不同比例的淀粉制备复合物,发现随着淀粉含量的增加, G' 和 G'' 值略有降低,表明蛋白质分子的重排在凝胶化过程中减少,从而形成较弱的凝胶。另外,漆酶处理的马铃薯蛋白和淀粉形成的复合物与天然马铃薯蛋白和淀粉的复合物相比, G' 和 G'' 值更高,表明漆酶处理可以更显著地促进蛋白质分子之间的相互作用,形成更完美的交联网络结构,紧密包裹淀粉颗粒,因此,蛋白质和淀粉之间的相互作用更强,从而提高凝胶的强度。

2.4 热力学特性

淀粉的热力学特性与淀粉基食品的其他性质密切相关。研究者通常采用差示扫描量热法(DSC)分析淀粉的糊化起始温度(T_o)、糊化峰值温度(T_p)、糊化终点温度(T_e)、糊化焓(ΔH)等变化研究蛋白质对淀粉—蛋白混合

基质热稳定性的影响^[37-38]。

蛋白质对淀粉热力学特性的影响与蛋白质的含量和种类有关。Hou 等^[39]研究表明,蛋白的存在提高了大米粉、绿豆粉的糊化起始温度。Yao 等^[40]研究发现低蛋白含量的面条比高蛋白含量的面条更易蒸煮,证实了蛋白对增强淀粉基食品的糊化稳定性起到重要作用。Li 等^[14]的研究结果表明麦谷蛋白—小麦淀粉混合物的 T_p 高于麦醇溶蛋白—小麦淀粉混合物,可能是由于麦谷蛋白的疏水性高于麦醇溶蛋白。据学者^[6,14]推测,蛋白质对淀粉糊化的影响可能源自淀粉和蛋白质两种生物大分子对可利用水的竞争性作用,导致水分在二者中间重新分布,亦或是淀粉颗粒和蛋白质分子的相互作用。基于上述原因,蛋白质的类型和添加量以及淀粉—蛋白质相互作用显著改变了淀粉的糊化温度。

2.5 质构特性

淀粉基食品的质构信息对其生产过程质量控制非常关键,决定着产品的货架寿命和感官品质^[40-41]。蛋白质对淀粉基食品的质构特性有显著影响,影响程度大小取决于蛋白质的种类和添加量。Joshi 等^[42]研究发现,扁豆蛋白的添加降低了扁豆淀粉凝胶的硬度。而 Baxter 等^[43]发现随着谷蛋白和球蛋白添加量的增加,大米淀粉凝胶的硬度呈线性增加的趋势。推测原因,凝胶结构的改变可能是由于蛋白质和淀粉链的相互作用影响了直链淀粉和直链淀粉间氢键的形成,亦或蛋白质对淀粉凝胶起到了惰性填料的作用^[33]。

质构特性是食品重要的感官属性评价指标。淀粉基食品体系的质构特性(如硬度、弹性、黏结性)极为重要,因为它们决定了消费者对产品的可接受程度^[44]。因此,更好地了解不同种类和不同添加量的蛋白质对淀粉基产品的质构特性影响将极大促进更多高品质食品的诞生。

3 蛋白质对淀粉—蛋白质复合物微观结构的影响

淀粉—蛋白质复合物的微观结构能更直观体现淀粉和蛋白质分子在复合体系中的形态和分布,反映蛋白质—淀粉分子间的相互作用对淀粉分子结构和物化特性的影响。

扫描电子显微镜(SEM)是观察淀粉—蛋白质凝胶体系微观形态常用的手段。Wang 等^[11]研究表明,向籼米淀粉中加入球蛋白(乳清分离蛋白、大豆分离蛋白)后,形成凝胶的网格尺寸明显增大,推测是由于籼米淀粉和球蛋白之间的相互作用阻碍了水分在淀粉颗粒中的扩散,从而使淀粉链凝胶化受到抑制。另外,在籼米淀粉—大豆分离蛋白混合物中出现了聚集状结构,表明大豆分离蛋白在热处理过程中发生聚集,进而影响了混合物的网络结构。Zheng 等^[26]研究了粟淀粉—蛋白质复合物的

微观结构,结果显示粟淀粉大部分形状不规则,少数为圆形,淀粉颗粒表面光滑、有孔洞。经过湿热处理后,淀粉—蛋白质混合物呈现出不同的形态。含玉米醇溶蛋白的粟淀粉经热处理后发生团聚,而玉米醇溶蛋白覆盖在淀粉表面;淀粉—大豆分离蛋白混合物形成比淀粉—玉米醇溶蛋白复合物更大的团块,且大豆分离蛋白混合物形成的网络结构更加紧密。对于淀粉—乳清分离蛋白混合物而言,SEM 图片显示为片状结构,淀粉的形态几乎消失。这可能是由于乳清分离蛋白与淀粉分子的共价结合以及蛋白质二级结构的破坏导致分子完全延伸并失去了球状结构。

利用激光共聚焦扫描显微镜(CLSM)可以观察混合凝胶中淀粉和蛋白质两相的分布。Liu 等^[45]通过 CLSM 观察到添加小麦蛋白、蛋清蛋白和乳清分离蛋白后,连续的蛋白质网络紧密地包围着淀粉颗粒,形成相对致密的微观结构。这表明更多的淀粉颗粒嵌入到蛋白质网络中,增强了蛋白质和淀粉之间的相互作用,从而防止淀粉颗粒在蒸煮过程中膨胀。López-Barón 等^[27]的研究结果显示,未煮熟的小麦淀粉和植物蛋白之间通常存在松散的联系,蛋白质变性/水解和蒸煮大大加强了蛋白质—淀粉的结合。蛋白质—淀粉相互作用导致淀粉颗粒表面形成包衣,起到阻碍淀粉糖苷酶的作用。CLSM 图像还显示,蛋白质嵌入淀粉颗粒内部,原因可能是淀粉颗粒在蒸煮过程中解体,使蛋白质向其内部渗透。

因此,淀粉和蛋白质复合物结构的变化可以改变复合物的性质,影响淀粉消化性。

4 蛋白质对淀粉消化性的影响

淀粉是人体能量的主要来源,按照消化性分为三类^[34]:快速消化淀粉(RDS)、慢消化淀粉(SDS)和抗性淀粉(RS)。若摄入过多的快速消化淀粉,会引起血糖指数升高,进而导致糖尿病和肥胖症的发病率增加。因此,降低 RDS 含量,提高 SDS 和 RS 的含量对人体健康是有益的。影响淀粉消化率的因素有很多,包括淀粉的结构、食品体系中其他组分的影响和食品加工贮藏方式等。近年来,蛋白质和淀粉的相互作用对淀粉消化性的影响成为研究热点。

目前,研究者普遍认为蛋白质能降低淀粉的消化率。Jin 等^[46]揭示了粟粉中蛋白质—淀粉相互作用降低淀粉消化率的机理,认为蛋白质基质不仅在淀粉和淀粉酶之间起到物理屏障的作用,而且粟蛋白还可能通过与淀粉酶结合抑制 α -淀粉酶活性,抑制粟粉中淀粉的酶解,从而降低淀粉的消化率。Zhang 等^[47]发现在共糊化过程中,乳清分离蛋白和玉米淀粉之间形成强烈的氢键相互作用,乳清分离蛋白的物理屏障作用以及乳清分离蛋白对 α -淀粉酶和淀粉糖苷酶活性的抑制,共同导致乳清分离

蛋白降低共混物中糊化玉米淀粉的消化率。Khatun等^[48]通过提取大米蛋白中球蛋白、谷蛋白和醇溶蛋白并研究其对大米淀粉体外消化性的影响,发现总蛋白与离体淀粉消化率之间无相关性,而溶剂浸提的大米单一组分蛋白对淀粉消化有抑制作用,原因是球蛋白可能通过抑制淀粉和淀粉酶结合来抑制淀粉消化,谷蛋白和醇溶蛋白可能通过影响淀粉特性来抑制淀粉消化。

与完整的蛋白质相比,蛋白质经水解之后能更为有效地减缓淀粉的消化。付田田等^[49]发现豌豆肽和大豆肽都能使大米淀粉中RDS降低,其中大豆肽对消化性的抑制作用更强。Lin等^[29]向大米淀粉中添加大米蛋白酶解物,发现其显著降低了小麦淀粉的消化率,认为大米蛋白水解物作为物理屏障,通过抑制淀粉酶的催化来延缓淀粉的消化。Chi等^[9]研究了天然大米蛋白和酶解大米蛋白对煮熟大米淀粉消化率的影响,发现天然和胃蛋白酶水解蛋白通过增加淀粉分子的有序性降低淀粉的消化率,而胃蛋白酶—胰酶水解蛋白通过协同增加淀粉的V型结构和抑制 α -淀粉酶活性降低淀粉的消化率。

因此,淀粉—蛋白复合体系能够降低淀粉消化率的主要原因可能是:①蛋白质以非催化方式与淀粉酶分子结合,竞争性地抑制淀粉酶,从而减少淀粉的催化。②蛋白质通过氢键和疏水性非共价作用与淀粉结合,降低了淀粉作为催化底物的消化率。③蛋白质作为物理屏障,吸附或包埋在淀粉颗粒表面,从而减少了酶与淀粉的接触。

5 复合体系在食品加工中的应用

利用淀粉—蛋白质的相互作用来改善产品的组织结构特性、营养品质、消化特性受到越来越多的关注。淀粉—蛋白质共混体系的理化特性与淀粉和蛋白质的种类、结构性质、预处理过程和加工手段等有密切关系。

屈展平等^[50]利用马铃薯淀粉和小麦蛋白共混制作的面条,与普通小麦面条相比,其硬度和咀嚼性不足,但其弹性大于小麦面条且能延缓老化,从而延长贮藏时间。杨翠红^{[34]45-47}在制作玉米松饼和蒸糕过程中向玉米粉中添加不同比例的乳清蛋白,发现乳清蛋白和玉米淀粉的相互作用能显著降低消化性,且不会影响松饼、蒸糕特有的蓬松性及柔软性,对食品感官品质无影响。Liu等^[45]研究表明,将外源蛋白质加入高粱面条中,由于蛋白质和淀粉的相互作用,可改善高粱面条的质构特性,降低淀粉的消化率。为解决自身免疫缺陷人群因麸质不耐受而导致的乳糜泻,Sahagún等^[51]研究了4种不同外源蛋白质对无麸质蛋糕特性的影响,发现豌豆蛋白对提高面糊的黏性有最好的效果,蛋清蛋白的添加导致蛋糕变硬,乳清分离蛋白、蛋清蛋白均提高了蛋糕的内聚性和弹性。与对照蛋糕相比,乳清蛋白蛋糕的可接受性最高。Sofi

等^[52]研究表明,添加鹰嘴豆分离蛋白降低了面条的血糖生成指数,这可能是由于在加工过程中,大米淀粉颗粒和鹰嘴豆蛋白结合,形成不易消化的交联复合物,阻碍消化酶进入大米淀粉颗粒,导致其消化性降低。

6 总结与展望

近年来,国内外学者在蛋白质—淀粉混合体系方面开展了大量研究,且取得了一定的进展,但仍然存在很多不足:①研究集中在外源蛋白质与淀粉的相互作用,而内源蛋白质与淀粉的相互作用研究较少。探究内源蛋白质—淀粉相互作用更有助于阐释真实体系中淀粉结构及理化性质的影响因素及调控途径。②淀粉—蛋白质复合体系在食品加工中的应用有待进一步拓展。目前,食品基质中蛋白质—淀粉复合物主要与意大利面、面包、饼干等烘焙食品结合应用,在与特殊人群食品的结合应用上可进行广泛的探究。③食品体系中,在淀粉—蛋白质二元体系的基础上,探究其他组分如脂肪、酚类和纤维等对产品性质的影响,有助于提高对复杂食品体系中多组分间相互作用的科学认识。尽管蛋白质—淀粉复合物体系存在许多问题尚未阐明,但相关探索为改善淀粉基食品品质提供了一种策略,为生产新型功能性食品提供了新思路。

参考文献

- [1] WANG C, XUE Y, YOUSAF L, et al. Effects of high hydrostatic pressure on the ordered structure including double helices and V-type single helices of rice starch [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 144: 1 034-1 042.
- [2] JUNEJO S A, FLANAGAN B M, ZHANG B, et al. Starch structure and nutritional functionality—past revelations and future prospects[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 277: 118837.
- [3] BARAK S, MUDGIL D, KHATKAR B S. Influence of gliadin and glutenin fractions on rheological, pasting, and textural properties of dough[J]. *International Journal of Food Properties*, 2014, 17(7): 1 428-1 438.
- [4] JAMILAH B, MOHAMED A, ABBAS K A, et al. Protein-starch interaction and their effect on thermal and rheological characteristics of a food system: A review [J]. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 2009, 7(2): 169-174.
- [5] MEJIA T A, BIANCO-LIZARAZO C M. Considerations for functional food design based on starch-protein interactions: A systematic review [J]. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 2021, 72(8): 1 009-1 018.
- [6] REN F, WANG S J. Effect of modified tapioca starches on the gelling properties of whey protein isolate[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 93: 87-91.
- [7] ZHANG B J, QIAO D L, ZHAO S M, et al. Starch-based food matrices containing protein: Recent understanding of morphology,

- structure, and properties[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 114: 212-231.
- [8] 缪铭, 江波, 张涛. 食品典型组分相互作用的研究进展[J]. *食品科学*, 2008, 29(10): 625-629.
- MIAO M, JIANG B, ZHANG T. Research progress of interactions of food typical ingredients[J]. *Food Science*, 2008, 29(10): 625-629.
- [9] CHI C D, LI X X, ZHANG Y P, et al. Understanding the mechanism of starch digestion mitigation by rice protein and its enzymatic hydrolysates[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 84: 473-480.
- [10] ZHANG X, WANG L L, XU J, et al. Effects of endogenous proteins on the hydrolysis of gelatinized starch and their mechanism of inhibition[J]. *Process Biochemistry*, 2022, 113: 134-140.
- [11] WANG J, ZHAO S M, MIN G, et al. Starch-protein interplay varies the multi-scale structures of starch undergoing thermal processing[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 175: 179-187.
- [12] LIU J S, LIU Q, YANG Y Y, et al. Effects of whey protein on the in vitro digestibility and physicochemical properties of potato starch[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 193: 1 744-1 751.
- [13] 张森. 豆类蛋白对荞麦淀粉理化性质的影响及应用研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2020: 17.
- ZHAG M. Effects of legume protein on the physicochemical properties of buckwheat starch and its application[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2020: 17.
- [14] LI M F, YUE Q H, LIU C, et al. Effect of gliadin/glutenin ratio on pasting, thermal, and structural properties of wheat starch [J]. *Journal of Cereal Science*, 2020, 93: 102973.
- [15] TAO H, LU F, ZHU X F, et al. Removing surface proteins promote the retrogradation of wheat starch[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 113: 106437.
- [16] CHEN X, LUO J W, FU L L, et al. Structural, physicochemical, and digestibility properties of starch-soybean peptide complex subjected to heat moisture treatment [J]. *Food Chemistry*, 2019, 297: 124957.
- [17] ZHANG M, SUN C, WANG X R, et al. Effect of rice protein hydrolysates on the short-term and long-term retrogradation of wheat starch [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 155: 1 169-1 175.
- [18] 修琳, 张森, 许秀颖, 等. 绿豆蛋白对荞麦淀粉糊化和流变特性的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(16): 57-61.
- XIU L, ZHANG M, XU X Y, et al. Effect of mung bean protein on gelatinization and rheological properties of buckwheat starch[J]. *Food Science*, 2020, 41(16): 57-61.
- [19] DING Y Y, CHENG J J, LIN Q Y, et al. Effects of endogenous proteins and lipids on structural, thermal, rheological, and pasting properties and digestibility of adlay seed (*Coix lacryma-jobi L.*) starch[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 111: 106254.
- [20] YANG C H, ZHONG F, GOFF H D, et al. Study on starch-protein interactions and their effects on physicochemical and digestible properties of the blends[J]. *Food Chemistry*, 2019, 280: 51-58.
- [21] ZHOU J M, LIU J F, TANG X Z. Effects of whey and soy protein addition on bread rheological property of wheat flour[J]. *Journal of Texture Studies*, 2018, 49(1): 38-46.
- [22] PHONGTHAI S, D'AMICO S, SCHOENLECHNER R, et al. Effects of protein enrichment on the properties of rice flour based gluten-free pasta[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 80: 378-385.
- [23] WANG W, ZHOU H X, YANG H, et al. Effects of salts on the gelatinization and retrogradation properties of maize starch and waxy maize starch[J]. *Food Chemistry*, 2017, 214: 319-327.
- [24] WANG L F, ZHANG L, WANG H L, et al. Insight into protein-starch ratio on the gelatinization and retrogradation characteristics of reconstituted rice flour[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 146: 524-529.
- [25] KUMAR L, BRENNAN M, BRENNAN C, et al. Influence of whey protein isolate on pasting, thermal, and structural characteristics of oat starch[J]. *Journal of Dairy Science*, 2022, 105(1): 56-71.
- [26] ZHENG M Z, XIAO Y, YANG S, et al. Effect of adding zein, soy protein isolate and whey protein isolate on the physicochemical and in vitro digestion of proso millet starch [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2020, 55(2): 776-784.
- [27] LÓPEZ-BARÓN N, GU Y C, VASANTHAN T, et al. Plant proteins mitigate in vitro wheat starch digestibility [J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 69: 19-27.
- [28] CHEN X, ZHANG Y, ZHAO H B, et al. Effects of heat moisture treatment on the structural, physicochemical and digestibility properties of potato starch-soybean peptide complexes [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2022, 57(4): 1 975-1 987.
- [29] LIN L, YU X T, GAO Y C, et al. Physicochemical properties and in vitro starch digestibility of wheat starch/rice protein hydrolysate complexes[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 125: 107348.
- [30] WANG S J, LI C L, COPELAND L, et al. Starch retrogradation: A comprehensive review [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2015, 14(5): 568-585.
- [31] 肖瑜, 杨新标, 林楠, 等. 不同蛋白质对大黄米淀粉老化特性的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(16): 45-51.
- XIAO Y, YANG X B, LIN N, et al. Effects of adding different proteins on retrogradation properties of proso millet starch [J]. *Food Science*, 2020, 41(16): 45-51.
- [32] ZHANG Y F, CHEN C, CHEN Y, et al. Effect of rice protein on the water mobility, water migration and microstructure of rice starch during retrogradation [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 91: 136-142.
- [33] HU Y, HE C X, ZHANG M Y, et al. Inhibition from whey protein hydrolysate on the retrogradation of gelatinized rice starch [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 108: 105840.
- [34] 杨翠红. 乳清分离蛋白对淀粉消化特性的影响及其作用机制研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019.

- YANG C H. Study on the influence of whey protein isolate on the digestibility of starch and its mechanism [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.
- [35] GUI Y F, ZOU F X, ZHU Y, et al. The structural, thermal, pasting and gel properties of the mixtures of enzyme-treated potato protein and potato starch[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 154: 112882.
- [36] LI J H, YANG N, TANG J, et al. The characterization of structural, thermal, pasting and gel properties of the blends of laccase-and tyrosinase-treated potato protein and starch[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 153: 112463.
- [37] LI W D, GU Z B, CHENG L, et al. Effect of endogenous proteins and heat treatment on the in vitro digestibility and physicochemical properties of corn flour[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 135: 108220.
- [38] TARAHI M, SHAHIDI F, HEDAYATI S. Physicochemical, pasting, and thermal properties of native corn starch-mung bean protein isolate composites[J]. *Gels*, 2022, 8(11): 693.
- [39] HOU D Z, ZHAO Q Y, YOUSAF L, et al. In vitro starch digestibility and estimated glycemic index of mung bean (*Vigna radiata* L.) as affected by endogenous proteins and lipids, and exogenous heat-processing methods[J]. *Plant Foods for Human Nutrition*, 2020, 75(4): 547-552.
- [40] YAO M D, LI M, DHITAL S, et al. Texture and digestion of noodles with varied gluten contents and cooking time: The view from protein matrix and inner structure[J]. *Food Chemistry*, 2020, 315: 126230.
- [41] FURLÁN L T R, PADILLA A P, CAMPDERRÓS M E. Improvement of gluten-free bread properties by the incorporation of bovine plasma proteins and different saccharides into the matrix [J]. *Food Chemistry*, 2015, 170: 257-264.
- [42] JOSHI M, ALDRED P, PANOZZO J F, et al. Rheological and microstructural characteristics of lentil starch-lentil protein composite pastes and gels [J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 35: 226-237.
- [43] BAXTER G, BLANCHARD C, ZHAO J. Effects of glutelin and globulin on the physicochemical properties of rice starch and flour [J]. *Journal of Cereal Science*, 2014, 60(2): 414-420.
- [44] YU B, REN F, ZHAO H B, et al. Effects of native starch and modified starches on the textural, rheological and microstructural characteristics of soybean protein gel[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 142: 237-243.
- [45] LIU F Y, YANG Z, GUO X N, et al. Influence of protein type, content and polymerization on in vitro starch digestibility of sorghum noodles [J]. *Food Research International*, 2021, 142: 110199.
- [46] JIN Z Q, BAI F L, CHEN Y B, et al. Interactions between protein, lipid and starch in foxtail millet flour affect the in vitro digestion of starch[J]. *CyTA-Journal of Food*, 2019, 17(1): 640-647.
- [47] ZHANG S H, YANG C H, ZHU S, et al. Understanding the mechanisms of whey protein isolate mitigating the digestibility of corn starch by in vitro simulated digestion[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 124: 107211.
- [48] KHATUN A, WATERS D L, LIU L. The impact of rice protein on in vitro rice starch digestibility [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 109: 106072.
- [49] 付田田, 靳凤芳, 牛丽亚, 等. 大豆肽和豌豆肽对大米淀粉理化性质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(6): 53-58, 67.
- FU T T, JIN F F, NIU Y L, et al. Effect of pea peptides and soybean peptides on physicochemical properties of rice starch[J]. *Journal of the Chinese and Oils Association*, 2019, 34(6): 53-58, 67.
- [50] 屈展平, 任广跃, 张迎敏, 等. 马铃薯淀粉-小麦蛋白共混体系的相互作用及对复合面条性质的影响[J]. *食品与机械*, 2020, 36(1): 72-78.
- QU Z P, REN G Y, ZHANG Y M, et al. Interaction of potato starch-wheat protein blend system and its effect on the properties of compound noodles[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(1): 72-78.
- [51] SAHAGÚN M, BRAVO-NÚÑEZ Á, BÁSCONES G, et al. Influence of protein source on the characteristics of gluten-free layer cakes [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 94: 50-56.
- [52] SOFI S, SINGH J, CHHIKARA N, et al. Effect of incorporation of germinated flour and protein isolate from chickpea on different quality characteristics of rice-based noodle[J]. *Cereal Chemistry*, 2020, 97(1): 85-94.
-
- (上接第 190 页)
- [69] GAO J H, YU P X, LIANG H R, et al. The wPDI redox cycle coupled conformational change of the repetitive domain of the HMW-GS 1Dx5: A computational study[J]. *Molecules*, 2020, 25(19): 4393.
- [70] ZHAO C F, LUO Z Y, LI M Z, et al. Wheat protein disulfide isomerase improves bread properties via different mechanisms[J]. *Food Chemistry*, 2020, 315: 126242.
- [71] SISWOYO T A, MORITA N. Influences of sulfhydryl oxidase isolated from *Aspergillus niger* on physicochemical properties of starch and rheological properties of wheat dough[J]. *International Food Research Journal*, 2016, 23(5): 1960-1964.
- [72] SELINHEIMO E, NIEIDHIN D, STEFFENSEN C, et al. Comparison of the characteristics of fungal and plant tyrosinases [J]. *Journal of Biotechnology*, 2007, 130(4): 471-480.
- [73] ZHANG Y P, CHEN M R, CHEN Y, et al. Characterization and exploration of recombinant wheat catalase for improvement of wheat-flour-processing quality[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(9): 2660-2669.