

# 食物源肽与淀粉相互作用的研究进展

胡 玥, 孙红男\*, 张 苗\*, 木泰华

(中国农业科学院农产品加工研究所, 农业农村部农产品加工综合性重点实验室, 北京 100193)

**摘要:** 食物源肽与淀粉之间的相互作用对淀粉基食品的结构及特性具有重要影响。食物源肽能够通过氢键、静电和疏水相互作用附着在淀粉颗粒表面, 形成物理屏障; 还能够在氢键和静电相互作用的共同作用下与淀粉分子形成凝胶结构, 从而改变淀粉基食品的结构与特性。本文就食物源肽与淀粉相互作用方式, 食物源肽对淀粉结构、理化(流变学、热力学和糊化性质)性质与消化特性的影响, 以及食物源肽-淀粉体系的应用进行综述, 以为食物源肽与淀粉在功能食品中的应用提供理论基础。

**关键词:** 肽; 淀粉; 相互作用; 结构特性; 理化性质; 消化特性

## Research Progress on the Interaction between Food-Derived Peptides and Starch

HU Yue, SUN Hongnan\*, ZHANG Miao\*, MU Taihua

(Key Laboratory of Agro-products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

**Abstract:** The interaction between food-derived peptides and starch has an important impact on the structure and properties of starch-based foods. Food-derived peptides can adhere to the surface of starch granules through hydrogen bonds and electrostatic and hydrophobic interactions, forming a physical barrier, and they can also form a gel structure with starch molecules by hydrogen bonds and electrostatic interaction, which in turn can change the structure and characteristics of starch-based foods. This paper reviews the interaction between food-derived peptides and starch, the effects of food-derived peptides on the structure, physicochemical (rheological, thermodynamic and gelatinization properties) and digestive properties of starch, and the application of food-derived peptide-starch system. This review is expected to provide a theoretical basis for the application of food-derived peptides and starch in functional foods.

**Keywords:** peptide; starch; interaction; structural properties; physicochemical properties; digestive properties

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220714-152

中图分类号: TS231

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2023)09-0163-07

引文格式:

胡玥, 孙红男, 张苗, 等. 食物源肽与淀粉相互作用的研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(9): 163-169. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220714-152. <http://www.spkx.net.cn>

HU Yue, SUN Hongnan, ZHANG Miao, et al. Research progress on the interaction between food-derived peptides and starch[J]. Food Science, 2023, 44(9): 163-169. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220714-152.

<http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2022-07-14

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32172250); 中国农业科学院科技创新工程项目(CAAS-ASTIP-202X-IFST); “一带一路”国家薯类加工与品质调控国际合作研究项目(DL2021056002L)

第一作者简介: 胡玥(1999—)(ORCID: 0000-0003-3820-7747), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品化学与营养。

E-mail: 15235338460@163.com

\*通信作者简介: 孙红男(1983—)(ORCID: 0000-0003-0631-4775), 女, 副研究员, 博士, 研究方向为薯类加工、食品化学与营养。E-mail: honey0329@163.com

张苗(1984—)(ORCID: 0000-0003-3174-7994), 女, 副研究员, 博士, 研究方向为薯类加工、食品化学与营养。E-mail: zhangmiao@caas.cn

淀粉是一种易水解的高分子有机物质,广泛存在于植物的根、茎、叶和种子中,是粮食中的主要成分,也是碳水化合物的主要来源<sup>[1]</sup>。淀粉消化始于口腔,主要发生在小肠,淀粉在小肠中可被胰腺 $\alpha$ -淀粉酶、糊精酶、淀粉葡萄糖苷酶、 $\alpha$ -葡萄糖苷酶和麦芽糖苷酶分解<sup>[2]</sup>。根据淀粉的消化速度,大致可分为3类:快速消化淀粉(rapidly digestible starch, RDS),是指在20 min内消化的淀粉,在摄入后人体血糖水平立即上升,为人体提供必要的能量,但这可能诱发与饮食相关的代谢性慢性疾病,如II型糖尿病<sup>[3]</sup>;缓慢消化淀粉(slowly digestible starch, SDS),是指在20~120 min内消化的淀粉,其在小肠中被缓慢但完全消化,以维持人体血液中葡萄糖浓度的稳定<sup>[4]</sup>;抗性淀粉(resistant starch, RS),是指消化时间在120 min以上的淀粉,其不能被人体消化道消化,可以通过厌氧发酵被结肠中的菌群降解,有利于调节肠道菌群和预防代谢性疾病<sup>[5-6]</sup>。

食物源肽具有多种生物活性,如降血糖活性等<sup>[7]</sup>,其分子质量低、结构灵活,分子链上的氨基酸序列、氨基酸构型、末端氨基酸以及其电荷、两性性等性质可为与其他物质之间相互作用提供广泛的位点<sup>[8-9]</sup>。食物源肽能够通过和淀粉相互作用显著降低淀粉的消化率,从而得到低血糖指数的淀粉基食品<sup>[9-12]</sup>。

本文就食物源肽与淀粉相互作用方式,食物源肽对淀粉结构、理化和消化特性的影响,以及食物源肽-淀粉体系的应用进行综述,旨在为开发淀粉基低血糖指数食品提供理论依据。

## 1 食物源肽与淀粉的相互作用方式

天然淀粉主要以颗粒形式存在,绝大多数淀粉颗粒表面较粗糙,且有些谷物淀粉存在微孔结构和孔道结构,可为小分子物质进入淀粉颗粒内部提供作用位点<sup>[13]</sup>。糊化时,淀粉颗粒吸水膨胀,内部小体的排列被破坏,具有网状结构的外壳发生拉伸和变形,最终破裂,释放小体;同时小体在加热过程中膨胀,链伸长与周围小体连接呈丝状,并随着糊化进行最终形成疏松的网络结构,即凝胶<sup>[13]</sup>。在淀粉糊化后期,由于淀粉颗粒破裂,直链淀粉析出,形成不稳定的凝胶;进一步随着温度的降低,肽分子会与淀粉分子间发生相分离<sup>[14]</sup>。食物源肽通常通过氢键、静电和疏水相互作用共同作用吸附在淀粉颗粒表面、与淀粉分子形成凝胶结构或与淀粉分子发生相分离(图1)。

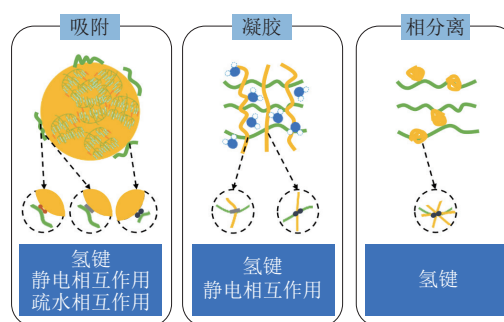


图1 食物源肽与淀粉的相互作用方式

Fig. 1 Interaction modes between food-derived peptides and starch

### 1.1 吸附作用

肽分子可通过氢键<sup>[15]</sup>、静电相互作用<sup>[16]</sup>和疏水相互作用<sup>[17]</sup>附着在淀粉颗粒表面,形成物理屏障。在加热过程中,表面吸附的肽分子一方面限制水分子进入淀粉颗粒内部,削弱淀粉-水之间的相互作用<sup>[18-19]</sup>;另一方面,在消化过程中与淀粉酶分子结合,竞争性抑制淀粉酶作用<sup>[20]</sup>。肽与淀粉的吸附作用会改变淀粉的结构,降低淀粉的糊化程度以及消化率<sup>[9,18,21]</sup>。Xu Hanbin等<sup>[15]</sup>指出面筋酶解物与淀粉之间通过氢键发生吸附作用。Chi Chengdeng等<sup>[17]</sup>研究表明,大米蛋白酶解物中含有的亲水基团和疏水氨基酸可以通过氢键和疏水相互作用黏附在淀粉颗粒表面。

### 1.2 凝胶作用

肽分子与淀粉颗粒在加热条件下通过氢键和静电相互作用形成凝胶结构,从而改变淀粉的流变学特性,其中静电相互作用可能与糊化初始时淀粉颗粒表面裂痕和孔洞的出现具有一定关系<sup>[13]</sup>。付田田等<sup>[16]</sup>研究表明,在糊化过程中,谷物低聚肽与淀粉分子之间通过静电相互作用发生聚集,从而促进谷物低聚肽与淀粉复合凝胶体系的形成。Luo Yunmei等<sup>[22]</sup>研究表明,在多糖存在的情况下,草鱼皮蛋白酶解物与大米淀粉分子之间通过氢键和静电相互作用产生具有不规则片段的“细胞壁”结构,该结构的形成抑制了凝胶中水分的迁移,并降低了非结晶区转化为结晶区的比例,从而发挥抑制淀粉回生的作用。牛海力等<sup>[23]</sup>研究表明猪血浆蛋白酶解物能够显著降低玉米淀粉糊的透明度、凝沉性和冻融稳定性,抑制玉米淀粉的老化,增加淀粉糊化过程中水分子的移动,可能的原因是猪血浆蛋白酶解物与玉米淀粉分子链的相互包埋与氢键作用。

### 1.3 相分离

相分离是指系统中稳定而均匀的单相状态被打破,不同成分之间发生相互融合、阻隔,分离成具有不同结构和组成的几个相<sup>[24]</sup>。Noisuwang等<sup>[14]</sup>研究表明,随着糊化温度的降低,牛乳蛋白与大米淀粉之间的凝胶结构被破坏,蛋白分子发生聚集,并与淀粉分子发生相分离。

Vu Dang等<sup>[25]</sup>在乳清蛋白和天然蜡质玉米淀粉混合物中观察到蛋白质聚集体,证明存在相分离现象。然而,目前鲜有关于肽与淀粉分子之间相分离现象的报道,有待进一步研究。

## 2 食物源肽与淀粉相互作用对淀粉结构与性质的影响

肽-淀粉的相互作用对淀粉的结构、理化和消化特性有很大影响,具体表现在:1)使淀粉的有序结构增强且更易聚集<sup>[21]</sup>;2)在糊化过程中与淀粉竞争水分子,从而抑制淀粉糊化<sup>[18]</sup>;3)在淀粉周围形成物理屏障,使淀粉的消化率降低<sup>[26]</sup>(图2)。

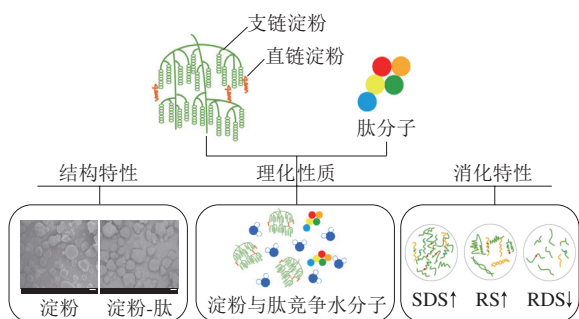


图2 食物源肽-淀粉相互作用对淀粉结构与性质的影响<sup>[27]</sup>

Fig. 2 Effects of food-derived peptides-starch interaction on starch structure and properties<sup>[27]</sup>

### 2.1 对淀粉结构特性的影响

淀粉是由两种葡聚糖聚合物(即直链淀粉和支链淀粉)有序堆积而成的半结晶颗粒<sup>[28]</sup>。直链淀粉是由相对线性的分子组成,通过调节疏水性客体化合物,具有形成单螺旋的倾向;支链淀粉是一种支链多糖,通常具有比直链淀粉更高的分子质量,其支链在分子内氢键作用下也倾向于形成螺旋结构<sup>[29]</sup>。当淀粉糊化时,大部分直链淀粉会从淀粉颗粒中溶出,在没有其他客体小分子存在的情况下,直链淀粉发生无规卷曲,形成单螺旋结构;当加热停止,冷却至室温后直链淀粉之间会通过氢键发生聚集,形成双螺旋结构<sup>[30]</sup>。而加入的肽会与淀粉发生氢键缔合和疏水相互作用,有助于淀粉链的有序重排,从而增加淀粉的短程有序及聚集结构,提高淀粉的相对结晶度<sup>[21,31]</sup>。

付田田等<sup>[9]</sup>以大米淀粉为原料,向其中添加一定量的大豆肽和豌豆肽共糊化,肽的加入使淀粉结构中的无定形区被破坏,促进了淀粉的自由膨胀。由于大豆肽的分子质量较豌豆肽大,其与淀粉的竞争性相互作用阻碍了淀粉中直链淀粉分子重排缠绕形成双螺旋结构的过程<sup>[32]</sup>。Chen Xu等<sup>[27]</sup>发现大豆肽与马铃薯淀粉经湿热处理后,大豆肽侧链基团与淀粉链之间的静电相互作用使复合物显示出较高的结晶度,且偏光十字变得模糊,表明支链淀粉链的柔韧性增加,双螺旋的径向发生变化。Niu Haili等<sup>[33]</sup>

发现猪血浆蛋白酶解物能够抑制玉米淀粉的凝胶化,促进玉米淀粉三维网络凝胶结构中弹性成分的形成,并延缓了玉米淀粉短期回生过程中直链淀粉的重结晶。Sakauchi等<sup>[34]</sup>指出,带有更高电荷的肽可以减少马铃薯淀粉短程有序结构的重建,延缓相对长期的回生。Chi Chengdeng等<sup>[17]</sup>发现大米蛋白酶解物的加入使大米淀粉具有更多的双螺旋结构,增加了大米淀粉糊的短程有序和聚集结构数量,这是由于一方面蛋白酶解物黏附在大米淀粉颗粒表面,从而抑制了大米淀粉的水合作用;另一方面,蛋白酶解物可诱导大米淀粉重排,从而减少大米淀粉的无定形结构。Lu Xiaoxue等<sup>[21]</sup>发现与大米蛋白相比,大米蛋白酶解物更能增加大米淀粉的短程有序结构。因此,肽/酶解物与淀粉颗粒之间形成的氢键能够增加淀粉晶体的短程有序结构,有助于淀粉链的有序重排。食物源肽对淀粉结构特性的影响如表1所示。

表1 食物源肽对淀粉结构特性的影响

Table 1 Effects of food-derived peptides on the structural properties of starch

肽来源	淀粉来源	影响或研究结果	参考文献
大豆	大米	复合物的无定形区结构被破坏,促进了淀粉的自由膨胀	[9]
大豆	马铃薯	加入5% (以体系质量计,下同)大豆肽后,经湿热处理复合物的相对结晶度增加了0.56%	[27]
大米	大米	加入大米蛋白酶解物后,非晶态结构比例降低了0.39%,单螺旋结构比例增加了1.86%,双螺旋结构比例降低了0.59%	[17]
大米	大米	加入大米蛋白水解物后,相对结晶度增加了3.3%, $A_{1,047\text{cm}^{-1}}/A_{1,022\text{cm}^{-1}}$ 增加了0.059	[21]
乳清	马铃薯	结晶度(Y)与带电氨基酸含量(X)的线性回归方程为 $Y=-1.7X+138$	[34]

### 2.2 对淀粉理化性质的影响

食物源肽的加入不仅会对淀粉的结构产生影响,同时还会对淀粉加热糊化后的理化性质产生影响,主要表现在流变学、热力学以及糊化性质方面。

#### 2.2.1 流变学性质

##### 2.2.1.1 静态流变学性质

根据剪切应力和剪切速率的关系,可以将流体分为牛顿流体和非牛顿流体:当流动行为指数为1时为牛顿流体;当流动行为指数小于1时为假塑性非牛顿流体;当流动行为指数大于1时为胀塑性非牛顿流体<sup>[35]</sup>。邹静怡等<sup>[36]</sup>研究表明,大米淀粉糊的剪切应力随剪切速率增加而增大,呈现假塑性剪切稀释特征,且随着核桃蛋白添加量的增加,应力曲线整体下移,稠度指数降低,这是由于核桃蛋白抑制了淀粉颗粒的膨胀以及直链淀粉的析出。甘爱园等<sup>[37]</sup>研究表明,随着蛋清蛋白含量的增加,相同剪切速率对应的剪切应力呈下降趋势,表明蛋清蛋白的添加削弱了豌豆淀粉糊化后网络结构对剪切的抗性。然而,目前鲜有关于肽的加入对淀粉静态流变学性质影响的报道,有待进一步探究。

##### 2.2.1.2 动态流变学性质

淀粉的流变学特性取决于溶胀淀粉颗粒所占体积分数,

通常采用动态流变实验测定淀粉的黏弹性, 主要参数是储能模量 ( $G'$ ) 和损耗模量 ( $G''$ )<sup>[38]</sup>。其中,  $G'$  可以反映黏弹性材料的类固体性质, 如弹性和刚度;  $G''$  可以反映黏弹性材料的类液体性质, 如黏度和流动性<sup>[39]</sup>。肽与淀粉的相互作用能够抑制淀粉的聚集, 从而导致  $G'$  降低<sup>[19]</sup>。Luo Yunmei 等<sup>[40]</sup>研究表明大豆蛋白酶解物使大米淀粉的类固体结构含量降低。Zhang Min 等<sup>[41]</sup>发现大米蛋白酶解物使小麦淀粉的  $G'$  最初缓慢增加, 然后几乎保持不变, 这表明淀粉的聚集受到抑制。Niu Haili 等<sup>[33]</sup>研究表明, 与单独的天然玉米淀粉相比, 猪血浆蛋白酶解物-玉米淀粉复合物的  $G'$  最初稳定增加, 然后保持恒定, 这是由于猪血浆蛋白酶解物的加入限制了直链淀粉的溶出, 抑制了猪血浆蛋白酶解物-玉米淀粉复合物的凝胶化; 同时, 随着猪血浆蛋白酶解物的添加,  $G'$  逐渐降低, 这是由于猪血浆蛋白酶解物的添加抑制了猪血浆蛋白酶解物-玉米淀粉复合物三维网络凝胶结构的形成。

### 2.2.2 热力学性质

热力学性质与淀粉基食品的性能和品质密切相关, 通常采用差示扫描量热仪对淀粉的糊化转变温度进行分析<sup>[1]</sup>。Zhang Min 等<sup>[41]</sup>指出大米蛋白酶解物能够使小麦淀粉的糊化起始温度、峰值温度和终止温度增加, 回生焓值降低, 这表明大米蛋白酶解物可以抑制淀粉的结晶和长期回生。Chen Xu 等<sup>[27]</sup>发现大豆肽会升高淀粉糊化过程中的起始温度、峰值温度和终止温度, 这可能是由淀粉颗粒之间的弱静电相互作用以及大豆肽的两亲性造成的。Guan Haining 等<sup>[42]</sup>研究表明, 大豆分离蛋白酶解物能够使淀粉糊化的起始温度、峰值温度、终止温度和焓值提高, 这可能是由于肽分子与淀粉颗粒之间的静电相互作用, 从而需要较高的温度破坏淀粉的分子结构。

### 2.2.3 糊化性质

淀粉在常温下不溶于水, 但当温度上升时, 淀粉的物理性能会发生明显变化<sup>[43-44]</sup>。淀粉在水中加热溶胀、胶束结构全部崩溃分裂, 并被水包围, 由于淀粉分子是链状甚至分支状, 彼此牵扯, 最终形成具有黏性的糊状溶液, 此过程称为淀粉的糊化<sup>[45-47]</sup>。而肽的加入会与淀粉竞争水分子, 从而削弱淀粉-水之间的相互作用, 进而抑制淀粉颗粒的糊化<sup>[18-19]</sup>。不同肽对淀粉糊化特性的影响程度也存在差异, 这是由于分子质量小及带电荷数多的肽具有较大的比表面积, 可以更好地与淀粉结合, 附着在淀粉颗粒表面<sup>[35]</sup>。

Chen Xu 等<sup>[27]</sup>将大豆肽加入淀粉中, 延缓了淀粉的糊化, 这是由于淀粉颗粒之间的弱静电相互作用以及大豆肽的两亲性。付田田等<sup>[9]</sup>研究表明豌豆肽对大米淀粉糊化透明度的改善作用优于大豆肽, 这是由于豌豆肽的分子质量 ( $<1\ 000\ \text{Da}$ ) 小于大豆肽 ( $\leq 2\ 000\ \text{Da}$ ), 在糊化过程中小分子肽可以更好地与淀粉分子结合, 从而削弱

淀粉分子间的相互作用。Lin Li 等<sup>[18]</sup>研究表明, 大米蛋白酶解物的加入显著降低了淀粉的峰值黏度、延迟了淀粉的糊化时间, 这是由于肽包裹在淀粉颗粒表面, 对淀粉起到保护作用, 且肽对水分子的竞争削弱了淀粉-水相互作用。Luo Yunmei 等<sup>[19]</sup>证实植物蛋白酶解物的加入抑制了大米淀粉的糊化, 这是由于植物蛋白酶解物中存在活性亲水基团, 其会锁住和减少淀粉分子中的有效水。Zhang Min 等<sup>[41]</sup>研究表明大米蛋白酶解物可以包裹在小麦淀粉颗粒的表面, 从而抑制淀粉颗粒的膨胀和糊化。罗明昌等<sup>[48]</sup>研究表明, 大豆肽的加入使马铃薯淀粉的峰值黏度、崩解值和回生值均降低。Lian Xijun 等<sup>[49]</sup>研究表明, 较中性蛋白酶和酸性蛋白酶, 碱性蛋白酶解得到的大豆蛋白水解物可以使玉米淀粉的回生率降至最低, 这是由于碱性蛋白酶解得到的大豆蛋白水解物与玉米淀粉之间形成的氢键较少。

食物源肽对淀粉理化性质的影响如表2所示。

表2 食物源肽对淀粉理化性质的影响  
Table 2 Effects of food-derived peptides on physicochemical properties of starch

影响方面	肽来源	淀粉来源	结果	参考文献
流变学特性	大豆	大米	随着温度的降低, 肽的加入使淀粉的 $G'$ 降低	[40]
	大米	小麦	随着贮藏时间的延长, $G'$ 最初缓慢上升, 之后几乎保持不变	[41]
	猪血浆	玉米	猪血浆蛋白酶解物含量越高, 复合物的初始 $G'$ 越低, 且随着贮藏时间的延长, $G'$ 越稳定	[33]
热力学性质	大米	小麦	添加2%的大米蛋白酶解物, 复合物的 $T_g$ 增加0.65 °C, $T_p$ 增加0.86 °C, $T_c$ 增加1.09 °C	[41]
	大豆	玉米	添加5%的大豆肽, 复合物的 $T_g$ 增加1.22 °C, $T_p$ 增加1.44 °C, $T_c$ 增加1.30 °C	[27]
	大豆	玉米	添加2%的大豆分离蛋白酶解物, 复合物的 $T_g$ 增加1.26 °C, $T_p$ 增加2.92 °C, $T_c$ 增加2.80 °C	[42]
	大豆	大米	与原淀粉相比, 大豆肽含量为1%的肽-淀粉复合物PV降低了70 cP, BD降低了19 cP, FV降低了97 cP, SB降低了46 cP	[9]
糊化性质	豌豆	大米	与原淀粉相比, 豌豆肽含量为1%的肽-淀粉复合物PV降低了136 cP, BD降低了88 cP, FV降低了12 cP, SB降低了60 cP	[9]
	大米	小麦	与原淀粉相比, 大米蛋白酶解物含量为4%的肽-淀粉复合物PV降低了279 cP	[18]
	玉米	大米	与原淀粉相比, 肽-淀粉复合物PV降低了138.33 cP, BD降低了182.67 cP, SB降低了208.67 cP	[19]
	大米	大米	与原淀粉相比, 肽-淀粉复合物PV降低了229.67 cP, BD降低了184.67 cP	[19]
	小麦	大米	与原淀粉相比, 肽-淀粉复合物PV降低了136.33 cP, BD降低了187.00 cP	[19]
	大豆	大米	与原淀粉相比, 肽-淀粉复合物PV降低了133.33 cP, BD降低了200.00 cP, SB降低了316.00 cP	[19]
大豆	马铃薯	加入小分子质量肽 (468.3±5.6 Da) 后, 复合物的PV降低了316.6 BU, BD降低了284.4 BU, SB降低了12.3 BU	[48]	

注:  $T_g$ , 起始温度;  $T_p$ , 峰值温度;  $T_c$ , 终止温度; PV, 峰值黏度 (peak viscosity); BD, 崩解值 (break down); FV, 终值黏度 (final viscosity); SB, 回生值 (setback)。

### 2.3 对淀粉消化特性的影响

淀粉在消化酶的作用下转化为葡萄糖, 可为人体提供能量, 但是淀粉的快速消化会导致血糖浓度升高, 这对人体健康不利。食物源肽的加入会降低淀粉的消化率,

对 $\alpha$ -葡萄糖苷酶起到抑制作用,间接降低了淀粉基食品中淀粉的酶解速率和程度<sup>[1]</sup>,其主要原因是肽作为物理屏障,通过疏水相互作用和氢键吸附在淀粉颗粒表面,从而减少酶与淀粉之间的接触<sup>[26,50-52]</sup>。

Chen Xu等<sup>[27]</sup>发现大豆肽的加入降低了淀粉中RDS含量,增加了RS含量(表3),可能的原因是大豆肽限制了湿热处理后淀粉链的流动性,从而抑制了淀粉的消化。付田田等<sup>[9]</sup>研究指出豌豆肽和大豆肽的加入能够降低大米淀粉的RDS含量,增加SDS和RS含量,这是由于小分子肽使淀粉结构发生变化或者形成空间阻碍。罗明昌等<sup>[48]</sup>指出大豆肽的加入可以有效降低马铃薯淀粉的RDS含量,增加SDS和RS含量,从而可以降低 $\alpha$ -淀粉酶对马铃薯淀粉的水解率和升糖指数。付田田等<sup>[16]</sup>研究表明谷物蛋白肽的加入使大米淀粉RDS含量显著降低,SDS和RS含量显著增加,这是肽与淀粉的静电相互作用所致。

食物源肽对淀粉消化特性的影响如表3所示。

表3 食物源肽对淀粉消化特性的影响

Table 3 Effects of food-derived peptides on the digestive properties of starch

肽来源	淀粉来源	结果	参考文献
大豆	玉米	与原淀粉相比,经湿热处理后大豆肽添加量为5%的肽-淀粉复合物RDS含量降低了6.43%,SDS含量增加了2.26%,RS含量增加了3.76%	[27]
豌豆	大米	与原淀粉相比,豌豆肽添加量为1%的肽-淀粉复合物RDS含量降低了13.36%,SDS含量增加了0.67%,RS含量增加了12.70%	[9]
大豆	大米	与原淀粉相比,大豆肽添加量为1%的肽-淀粉复合物RDS含量降低了18.19%,SDS含量增加了12.43%,RS含量增加了5.77%	[9]
大豆	马铃薯	与原淀粉相比,小分子质量(468.3±5.6 Da)大豆肽-淀粉复合物RDS含量降低了6.60%,SDS含量增加了0.76%,RS含量增加了5.84%	[48]

### 3 食物源肽-淀粉体系的应用

由于食物源肽和淀粉在生物中大量存在,且具有生物可降解性和生物活性,因此可被广泛应用于生物、医学、食品等领域。Meira等<sup>[53]</sup>将乳链菌肽加入到以玉米淀粉为基质的纳米材料中,获得具有抗菌活性的新型活性食品包装材料。Mokrejs等<sup>[54]</sup>用苋菜粉淀粉-蛋白酶解物制备了可生物降解和可食用的薄膜。Jain等<sup>[55]</sup>研究表明,蛋壳膜蛋白质酶解物与香蕉淀粉可形成具有较强物理和氧化稳定性的乳液。Segura-Campos等<sup>[56]</sup>将菜豆蛋白酶解物加入小麦粗粒面粉中,得到具有低热量的功能性食品。Honda等<sup>[57]</sup>研究表明 $\alpha$ -谷蛋白酶解物可以提高无麸质大米淀粉面包的比容。

### 4 结语

食物源肽与淀粉分子的氢键、静电和疏水相互作用会影响淀粉的结构、理化和消化性质,从而改变淀粉基食品的结构与特性。虽然目前已有一些关于食物源肽与淀粉分子相互作用的研究报道,但仍有许多方面需要进一步深入探讨。首先,食物源肽与淀粉分子之间的相互

作用方式与作用力强弱取决于肽及淀粉分子的结构,因此,有必要探究肽分子序列、淀粉的短程及长程有序结构等的变化对肽与淀粉分子相互作用的影响规律,从而为食物源肽与淀粉在功能食品中的应用提供基础数据;其次,低血糖指数淀粉基食品的研发已成为促进淀粉基食品产业发展新的增长点,因此,如何高效且最大限度地发挥肽与淀粉相互作用在低血糖指数淀粉基食品中的应用仍是一项较为迫切的任务。

### 参考文献:

- [1] LU X, MA R, ZHAN J, et al. The role of protein and its hydrolysates in regulating the digestive properties of starch: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 125: 54-65. DOI:10.1016/j.tifs.2022.04.027.
- [2] 魏芷茜, 欧雨嘉, 汤俊杰, 等. 淀粉消化的影响因素及其速率调控的研究进展[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2022, 51(3): 289-297. DOI:10.13323/j.cnki.j.fafu(nat.sci.).2022.03.001.
- [3] SVIHUS B, HERVIK A K. Digestion and metabolic fates of starch, and its relation to major nutrition-related health problems: a review[J]. Starch-Stärke, 2016, 68(3/4): 302-313. DOI:10.1002/star.201500295.
- [4] MIAO M, JIANG B, CUI S W, et al. Slowly digestible starch: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2015, 55(12): 1642-1657. DOI:10.1080/10408398.2012.704434.
- [5] 赵德厚, 郝帅, 朱智杰, 等. 大豆蛋白肽-玉米淀粉复合物的制备及其性质研究[J]. 安徽农业大学学报, 2021, 48(6): 989-996. DOI:10.13610/j.cnki.1672-352x.20220106.023.
- [6] DUAN Y, WANG Y, LIU Q, et al. Changes in the intestine microbial, digestion and immunity of *Litopenaeus vannamei* in response to dietary resistant starch[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 6464. DOI:10.1038/s41598-019-42939-8.
- [7] VALENCIA-MEJÍA E, BATISTA K A, FERNÁNDEZ J J A, et al. Antihyperglycemic and hypoglycemic activity of naturally occurring peptides and protein hydrolysates from easy-to-cook and hard-to-cook beans (*Phaseolus vulgaris* L.)[J]. Food Research International, 2019, 121: 238-246. DOI:10.1016/j.foodres.2019.03.043.
- [8] CHUAH J A, MATSUGAMI A, HAYASHI F, et al. Self-assembled peptide-based system for mitochondrial-targeted gene delivery: functional and structural insights[J]. Biomacromolecules, 2016, 17(11): 3547-3557. DOI:10.1021/acs.biomac.6b01056.
- [9] 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.
- [10] FITZGERALD C N, MORA-SOLER L, GALLAGHER E, et al. Isolation and characterization of bioactive pro-peptides with *in vitro* renin inhibitory activities from the macroalga *Palmaria palmata*[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(30): 7421-7427. DOI:10.1021/jf301361c.
- [11] SMITH C E, MOLLARD R C, LUHOVYY B L, et al. The effect of yellow pea protein and fibre on short-term food intake, subjective appetite and glycaemic response in healthy young men[J]. British Journal of Nutrition, 2012, 108(Suppl 1): S74-S80. DOI:10.1017/S0007114512000700.
- [12] 张舒, 王长远, 张东杰. 食源性生物活性肽对II型糖尿病的干预作用及其机制研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(3): 278-287. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220225-220.
- [13] 陈治光. 不同加工条件下淀粉分子构象和次级相互作用力变化规律研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2021: 1-134.

- [14] NOISUWAN A, HEMAR Y, WILKINSON B, et al. Dynamic rheological and microstructural properties of normal and waxy rice starch gels containing milk protein ingredients[J]. *Starch-Stärke*, 2009, 61(3/4): 214-227. DOI:10.1002/star.200800049.
- [15] XU Hanbin, ZHOU Jiaping, YU Jinglin, et al. Mechanisms underlying the effect of gluten and its hydrolysates on *in vitro* enzymatic digestibility of wheat starch[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 113: 106507. DOI:10.1016/j.foodhyd.2020.106507.
- [16] 付田田, 舒蓝萍, 徐理宏, 等. 谷物蛋白肽对大米淀粉理化特性和体外消化特性的影响[J]. *现代食品科技*, 2019, 35(10): 76-84. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.10.012.
- [17] CHI Chengdeng, LI Xiaoxi, ZHANG Yiping, et al. Understanding the mechanism of starch digestion mitigation by rice protein and its enzymatic hydrolysates[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 84: 473-480. DOI:10.1016/j.foodhyd.2018.06.040.
- [18] LIN Li, YU Xietian, GAO Yuchen, et al. Physicochemical properties and *in vitro* starch digestibility of wheat starch/rice protein hydrolysate complexes[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 125: 107348. DOI:10.1016/j.foodhyd.2021.107348.
- [19] LUO Yunmei, NIU Liya, LI Dongming, et al. Synergistic effects of plant protein hydrolysates and xanthan gum on the short- and long-term retrogradation of rice starch[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 144: 967-977. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2019.09.174.
- [20] ZOU W, SCHULZ B L, TAN X, et al. The role of thermostable proteinaceous  $\alpha$ -amylase inhibitors in slowing starch digestion in pasta[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 90: 241-247. DOI:10.1016/j.foodhyd.2018.12.023.
- [21] LU Xiaoxue, MA Rongrong, QIU Hongwei, et al. Mechanism of effect of endogenous/exogenous rice protein and its hydrolysates on rice starch digestibility[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 193: 311-318. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2021.10.140.
- [22] LUO Yunmei, NIU Liya, ZHANG Senwang, et al. Effect of grass carp skin protein hydrolysates on the retrogradation tendency of gelatinized rice starch in the presence of non-ionic and ionic hydrocolloids during cold storage[J]. *Starch-Stärke*, 2019, 71(7/8): 1800260. DOI:10.1002/star.201800260.
- [23] 牛海力, 孔保华, 刘赛, 等. 猪血浆蛋白水解物对玉米淀粉老化和糊化特性的影响[J]. *中国食品学报*, 2016, 16(12): 50-58. DOI:10.16429/j.1009-7848.2016.12.008.
- [24] 吴晗, 孙奋勇. 生物大分子相分离及其药物靶向技术研究进展[J]. *同济大学学报(医学版)*, 2022, 43(2): 151-156. DOI:10.12289/j.jissn.1008-0392.21533.
- [25] VU DANG H, LOISEL C, DESRUMAUX A, et al. Rheology and microstructure of cross-linked waxy maize starch/whey protein suspensions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2009, 23(7): 1678-1686. DOI:10.1016/j.foodhyd.2009.01.004.
- [26] EZEUGU L I, DUODU K G, TAYLOR J R N. Effects of endosperm texture and cooking conditions on the *in vitro* starch digestibility of sorghum and maize flours[J]. *Journal of Cereal Science*, 2005, 42(1): 33-44. DOI:10.1016/j.jcs.2005.02.002.
- [27] CHEN Xu, LUO Jianwei, FU Lingling, et al. Structural, physicochemical, and digestibility properties of starch-soybean peptide complex subjected to heat moisture treatment[J]. *Food Chemistry*, 2019, 297: 124957. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.124957.
- [28] FAROOQ A M, DHITAL S, LI C, et al. Effects of palm oil on structural and *in vitro* digestion properties of cooked rice starches[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 107: 1080-1085. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2017.09.089.
- [29] WANG H, WU Y, WANG N, et al. Effect of water content of high-amylose corn starch and glutinous rice starch combined with lipids on formation of starch-lipid complexes during deep-fat frying[J]. *Food Chemistry*, 2019, 278: 515-522. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.11.092.
- [30] 蔡灿欣. 抗性淀粉的挤压法制备、性质及其应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021: 1-137.
- [31] CHI C, LI X, HUANG S, et al. Basic principles in starch multi-scale structuration to mitigate digestibility: a review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 109: 154-168. DOI:10.1016/j.tifs.2021.01.024.
- [32] 何财安, 张珍, 刘航, 等. 苦荞多酚对苦荞淀粉和小麦淀粉理化性质的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(9): 66-71. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201709011.
- [33] NIU Haili, HAN Qi, CAO Chuanai, et al. Short-term retrogradation behaviour of corn starch is inhibited by the addition of porcine plasma protein hydrolysates[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 115: 393-400. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2018.04.047.
- [34] SAKAUCHI S, HATTORI M, YOSHIDA T, et al. Thermal behavior of potato starch and water-vaporization behavior of its paste controlled with amino acid and peptide-rich food materials[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 75(2): C177-C183. DOI:10.1111/j.1750-3841.2009.01481.x.
- [35] 罗舜菁, 李燕, 杨榕, 等. 氨基酸对大米淀粉糊化和流变性质的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(15): 178-182. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201715029.
- [36] 邹静怡, 尹婷婷, 刘传菊, 等. 核桃蛋白对大米淀粉凝胶化及凝胶特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(4): 40-46.
- [37] 甘爱园, 鄒银强, 刘松继, 等. 蛋清蛋白对豌豆淀粉凝胶化及凝胶特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(1): 68-73; 9.
- [38] 侯佳曼, 李丹丹, 崔波, 等. 牛乳蛋白与淀粉相互作用的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(21): 408-413. DOI:10.13386/j.jissn1002-0306.2020090276.
- [39] CHEN Shuai, QIN Li, CHEN Ting, et al. Modification of starch by polysaccharides in pasting, rheology, texture and *in vitro* digestion: a review[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 207: 81-89. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2022.02.170.
- [40] LUO Yunmei, CHENG Hao, NIU Liya, et al. Improvement in freeze-thaw stability of rice starch by soybean protein hydrolysates-xanthan gum blends and its mechanism[J]. *Starch-Stärke*, 2022, 74(1/2): 2100193. DOI:10.1002/star.202100193.
- [41] ZHANG Min, SUN Chao, WANG Xiaorui, 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: 1169-1175. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2019.11.084.
- [42] GUAN Haining, DIAO Xiaoqin, HAN Jianchun, et al. Influence of soy protein isolate hydrolysates obtained under high hydrostatic pressure on pasting and short-term retrogradation behavior of maize starch[J]. *Food Biophysics*, 2021, 16(3): 395-405. DOI:10.1007/s11483-021-09676-w.
- [43] LAVOISIER A, AGUILERA J M. Starch gelatinization inside a whey protein gel formed by cold gelation[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 256: 18-27. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2019.03.013.
- [44] GUO P, YU J, COPELAND L, et al. Mechanisms of starch gelatinization during heating of wheat flour and its effect on *in vitro* starch digestibility[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 82: 370-378. DOI:10.1016/j.foodhyd.2018.04.012.
- [45] 傅宝尚, 胡雪微, 祁立波, 等. 冲泡方式对米糊冲泡品质影响的研究进展[J]. *粮油食品科技*, 2022, 30(2): 132-139. DOI:10.16210/j.cnki.1007-7561.2022.02.016.

- [46] 李肖汶. 沙蒿多糖对小麦淀粉糊化及老化特性的影响[D]. 西安: 陕西师范大学, 2020: 1-68.
- [47] 唐联坤. 淀粉糊化、老化特性与食品加工[J]. 西部粮油科技, 1996(3): 26-29.
- [48] 罗明昌, 吴乐萍, 王一竹, 等. 蒸煮条件下马铃薯淀粉与大豆肽的相互作用及其产物结构特性的探究[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(5): 1391-1398. DOI:10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2022.05.017.
- [49] LIAN Xijun, ZHU Wei, WEN Yan, et al. Effects of soy protein hydrolysates on maize starch retrogradation studied by IR spectra and ESI-MS analysis[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 59: 143-150. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2013.03.071.
- [50] ANNOR G A, MARCONE M, BERTOFT E, et al. *In vitro* starch digestibility and expected glycemic index of kodo millet (*Paspalum scrobiculatum*) as affected by starch-protein-lipid interactions[J]. Cereal Chemistry, 2013, 90(3): 211-217. DOI:10.1094/CCHEM-06-12-0074-R.
- [51] YANG C, ZHONG F, DOUGLAS GOFF H, 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. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.12.028.
- [52] LU Z H, DONNER E, YADA R Y, et al. Physicochemical properties and *in vitro* starch digestibility of potato starch/protein blends[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 154: 214-222. DOI:10.1016/j.carbpol.2016.08.055.
- [53] MEIRA S M M, ZEHETMEYER G, WERNER J O, et al. A novel active packaging material based on starch-halloysite nanocomposites incorporating antimicrobial peptides[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 63: 561-570. DOI:10.1016/j.foodhyd.2016.10.013.
- [54] MOKREJS P, LANGMAIER F, JANACOVA D, et al. Thermal study and solubility tests of films based on amaranth flour starch-protein hydrolysate[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2009, 98(1): 299-307. DOI:10.1007/s10973-009-0106-4.
- [55] JAIN S, ANAL A K. Preparation of eggshell membrane protein hydrolysates and culled banana resistant starch-based emulsions and evaluation of their stability and behavior in simulated gastrointestinal fluids[J]. Food Research International, 2018, 103: 234-242. DOI:10.1016/j.foodres.2017.10.042.
- [56] SEGURA-CAMPOS M R, GARCÍA-RODRÍGUEZ K, RUIZ-RUIZ J C, et al. Effect of Incorporation of hard-to-cook bean (*Phaseolus vulgaris* L.) protein hydrolysate on physical properties and starch and dietary fiber components of semolina pasta[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 39(6): 1159-1165. DOI:10.1111/jfpp.12330.
- [57] HONDA Y, INOUE N, KURITA M, et al.  $\alpha$ -Glutelin degradation and its hydrolysate by protease enhance the specific volume of gluten-free rice starch bread[J]. Journal of Cereal Science, 2021, 102: 103338. DOI:10.1016/j.jcs.2021.103338.