魏海香, 梁宝东, 徐文倩, 等. 微波处理对大豆肽-淀粉复合物结构、性质及消化性的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(16): 139−147. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080024

WEI Haixiang, LIANG Baodong, XU Wenqian, et al. Influences of Microwave Processing on the Structure, Physicochemical Properties, and Digestibility of Soy Peptide-Starch Complex[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(16): 139−147. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080024

· 研究与探讨 ·

微波处理对大豆肽-淀粉复合物结构、性质及消化性的影响

魏海香[1], 梁宝东[1], 徐文倩[1,2], 张　莉[1,*]

（1.济宁学院生命科学与生物工程学院, 山东曲阜 273155;
2.北京工商大学食品与健康学院, 北京 100048）

摘　要: 采用微波处理制备大豆肽-淀粉复合物，探究了 350、550、700 和 1000 W 四组微波功率处理对大豆肽分别与甘薯淀粉、玉米淀粉、菱角淀粉相互作用的影响，并分析复合物的结构、理化性质和消化性能。结果表明，与大豆肽和淀粉物理混合物相比，微波处理的大豆肽-淀粉复合物呈现明显差异：扫描电镜图像显示其形成了多孔凝胶结构和团聚体，颗粒尺寸显著增大。X 射线衍射和傅里叶变换红外光谱（FT-IR）分析表明复合物的结晶度降低（1047 cm^{-1}/1022 cm^{-1} 处的结晶区缩小，而 1022 cm^{-1}/995 cm^{-1} 处的无定形区保持稳定），同时表现出抗老化性能减弱、冻融稳定性增强以及凝胶强度与硬度下降的特点。体外消化实验显示，与大豆肽和淀粉物理混合物相比，微波处理的复合物中快速消化淀粉的含量明显降低，其中 700 W 微波处理后的样品中慢消化淀粉和抗性淀粉的含量显著提升，分别最高达 28.20% 和 35.70%。该研究为大豆肽-淀粉复合物的开发提供了重要依据，有助于推动改性淀粉作为降血糖成分在食品及冷冻食品工业中的应用拓展。

关键词: 微波处理, 肽-淀粉复合物, 结构特性, 理化性质, 消化性

中图分类号: TS231　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)16−0139−09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080024

本文网刊:

Influences of Microwave Processing on the Structure, Physicochemical Properties, and Digestibility of Soy Peptide-Starch Complex

WEI Haixiang[1], LIANG Baodong[1], XU Wenqian[1,2], ZHANG Li[1,*]

（1.Department of Life Science and Engineering, Jining University, Qufu 273155, China;
2.School of Food and Health, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China）

Abstract: The soybean peptide-starch complex was prepared using microwave-assisted treatment. The effects of microwave power levels at 350, 550, 700 and 1000 W on the interactions between soybean peptides and three types of starch—sweet potato, corn starch, and caltrop starch—were systematically investigated. The structure, physicochemical properties, and digestibility of the as-prepared complexes were explored. The results showed that compared with the physical mixture of starch, the soybean peptide-starch complex subjected to microwave treatment exhibited significant structural and functional changes. Scanning electron microscopy revealed the formation of a porous gel network along with aggregate structure, accompanied by a notable increase in particle size. X-ray diffraction and Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) analyses demonstrated a reduction in crystallinity, characterized by a contraction of the crystalline peak at 1047 cm^{-1}/1022 cm^{-1}, while the amorphous region at 1022 cm^{-1}/995 cm^{-1} remained relatively unchanged. Functionally, the complex displayed reduced gel strength and hardness, diminished anti-aging properties, yet improved freeze-thaw stability. *In vitro*

收稿日期: 2025−08−10

基金项目: 济宁市政府 2023 年重点研发计划项目（2023NYNS010）; 济宁市政府 2022 年重点研发计划项目（2022NYNS024）; 100 名“杰出人才”扶持计划培养项目（000022/220060）。

作者简介: 魏海香（1976−）, 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 功能性食品成分开发, E-mail: weihaixiang03@163.com。

*** 通信作者:** 张莉（1986−）, 女, 博士, 副教授, 研究方向: 降解包装材料包装食品, E-mail: jellyzhangli0506@163.com。

digestion studies indicated that, compared to the physical mixture of soybean peptides and starch, the microwave-treated complex contained significantly lower levels of rapidly digestible starch. Notably, samples treated with 700 W microwave irradiation showed marked increases in both slowly digestible starch and resistant starch content, up to 28.20% and 35.70%, respectively. This study provides valuable insights into the development of soybean peptide-starch complexes and supports the potential application of modified starch as a hypoglycemic ingredient in food and frozen food products.

Key words: microwave treatment; peptide–starch complex; structural properties; physicochemical properties; digestibility

国际糖尿病联合会(IDF)的数据显示,全球糖尿病患者数量从 1980 年的 1.08 亿人增加到 2021 年的 5.37 亿人。在人口老龄化加剧的背景下,这一数字预计将持续攀升[1−2]。控制糖尿病人口快速增长的有效手段是实施饮食规范。在人们的饮食结构中,淀粉消化与糖尿病密切相关[3−4],富含慢消化淀粉(SDS)和抗性淀粉(RS)的食物具有较低的血糖指数(GI)[5−6]。值得注意的是,淀粉消化率也与蛋白质存在显著关联[7],其中蛋白酶水解物肽对淀粉消化率的影响已成为近年来研究热点[8]。

蛋白肽作为蛋白质水解产生的低分子量肽的混合物,具有降血糖和预防糖尿病的生理功能[9]。其分子质量小的特性使其易与淀粉分子通过氢键和静电作用结合,或吸附在淀粉颗粒表面,从而改善淀粉的理化性质和可消化性[10]。付田田等[11]研究发现,在大米淀粉中加入蛋白肽进行共糊化,可显著提高大米淀粉的溶胀度和消化率。Chen 等[12]的研究则证实大豆蛋白肽能有效降低热处理后马铃薯淀粉的消化率。陈旭等[5]通过湿热处理制备马铃薯大豆肽复合物,结果显示其中抗性淀粉含量明显升高。罗明昌等[13]研究马铃薯与大豆肽在蒸煮条件下相互作用及形成复合物的特性,发现大豆肽分子量对复合物的消化性能影响不大,但大豆肽的加入会降低快速消化淀粉含量。

低聚肽与淀粉的相互作用对淀粉的结构和理化性质的影响正成为食品研究的新方向。现有研究多采用蒸煮和高压糊化(耗时 30 min 以上)方法来探究肽和淀粉相互作用[14]。这些方法不仅耗时长,且难以实现快速、均匀的加热处理。相比之下,微波技术以其高效、瞬时且加热均匀的独特优势,在食品加工领域已得到广泛应用[15−16],能够有效克服传统加热的局限。然而,目前利用微波技术系统研究肽与淀粉相互作用的相关报道仍较为有限。为此,本研究引入微波处理技术,将大豆蛋白肽(SPP)与甘薯淀粉、玉米淀粉和菱角淀粉复合,制备大豆肽-淀粉复合物,考察微波处理参数对蛋白肽-淀粉复合物的理化性质、结构特征和消化性能的影响,并进一步评估其在食品中的加工适用性和功能表现,期望本研究为开发具有可控消化特性和具有低升糖指数功能的淀粉基配料提供新思路,同时拓展微波技术在功能性食品配料制备中的应用前景。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

甘薯淀粉(TS,直链淀粉含量:27.91%)、玉米淀粉(NS,直链淀粉含量:32.20%) 湖北钰诚电子商务有限公司;菱角淀粉(CS,直链淀粉含量:37.45%) 湖北洪湖浩欣土特产店;大豆蛋白肽(SPP,平均分子量 700 Da) 湖北瑞博生生物科技有限公司提供;3,5-二硝基水杨酸(DNS,化学纯品)、葡萄糖 国药化学试剂有限公司;淀粉葡糖苷酶(100000 U/g)、α-淀粉酶(3000 U/g) 山东西亚化工有限公司;其他试剂均为分析纯试剂。

NN-CD997 专用微波炉 松下电器有限公司;LGJ-10 冷冻干燥机 北京松源华兴科技有限公司;TA-XTEXDRE 质构仪 超技仪器有限公司;BetteN-Size 2600 型激光粒度分布仪 丹东百特有限公司;Nicolet IS10 傅里叶变换红外光谱仪 美国赛默飞世尔科技公司;Ultima IV X 射线衍射仪 日本理学公司;西格玛 IGMA 扫描电子显微镜、Oxford Quorum SC7620 溅射镀膜仪 卡尔蔡司有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 SPP-淀粉复合物的制备 先称取 TS、NS、CS 各 10 g,加入去离子水配制成 10% 淀粉乳化液,并分别加入 10% 干基淀粉的 SPP,充分混合,配制 SPP-淀粉初始混合物[4]。对上述方法制备的每一种 SPP-淀粉混合物,均平行取样四份,将四份组成成分相同的混合物分别置于 350、550、700 和 1000 W 的微波炉中加热 7 min,从而构成四个不同的微波处理实验组。反应完成后,将混合物冷却至室温(20 ℃),冷冻干燥 24 h。将制备的 SPP-淀粉复合物粉碎、研磨、过 100 目筛网。将制备的复合物放入密封袋储存,并标记为 350 WSPP-TS、550 WSPP-TS、700 WSPP-TS 和 1000 WSPP-TS;350 WSPP-NS、550 WSPP-NS、700 WSPP-NS 和 1000 WSPP-NS;350 WSPP-CS、550 WSPP-CS、700 WSPP-CS 和 1000 WSPP-CS。作为空白对照,将 CS、NS 和 TS 分别与 SPP 按照 SPP-淀粉初始混合物的配比方法混合后,不经微波处理,所得样品分别记为 SPP-TS、SPP-NS 和 SPP-CS。

1.2.2 形貌和结构表征

1.2.2.1 扫描电镜表征 将微量的样品粉末直接粘在导电胶上,并使用牛津 Quorum SC7620 涂布机在 10 mA 下喷涂金 45 s。随后使用扫描电子显微镜拍摄样品形态。加速度电压 15 kV,使用放大倍数为 3000 倍的 SE2 二次电子探测器。

1.2.2.2 粒度分布 采用激光粒度分布仪对样品进行湿法分析。将 1 g 左右样品分别放入纯净水中分散均匀,当遮光率达到 10%~20%,点击测样。所得

结果用 Excel 软件自动分析三次。

1.2.2.3　傅里叶变换红外光谱表征　采用傅里叶变换红外光谱仪对淀粉进行短程分子结构分析。将 1 mg 样品加入 100 mg 溴化钾中，在玛瑙钵中研磨，彻底混合后压成片，将其放在样品架上，波长范围 400~4000 cm^{-1}，在 25 ℃ 下扫描 16 次。利用 OMNIC 8.0 软件对基线进行校正和卷积，计算 1047 cm^{-1}/1022 cm^{-1} 和 1022 cm^{-1}/995 cm^{-1}。

1.2.2.4　X 射线衍射表征　用 X 射线衍射仪测定淀粉的晶体结构和相对结晶度。X 射线衍射光谱扫描范围为 5°~60°(2θ)，扫描速率为 5°/min，步长为 0.02°，扫描速率 4°/min[17]。采用 MID Jade 6.0 软件[18] 计算样品的相对结晶度(RC)。

$$RC(\%) = \frac{AC}{AC + Aa} \times 100 \qquad 式（1）$$

式中：AC 为结晶峰的面积，Aa 为非晶峰的面积。

1.2.3　理化性质

1.2.3.1　抗老化性　分别称取 0.6 g 各样品，加入蒸馏水配成 2% 淀粉肽复合物溶液，加热糊化 5 min，冷却至室温。取 10 mL 糊化后样品于有刻度玻璃试管中静置。每隔 1 h 观察下层沉淀的体积，即凝沉积。凝沉积与总糊液体积比为沉淀体积比[11]。

1.2.3.2　凝胶特性　称取各样品 4 g，分别加入蒸馏水配成 8% 淀粉肽复合物溶液，混合均匀，在沸水浴中加热糊化 30 min，冷却至室温(20 ℃)，放入 4 ℃ 冰箱 24 h，取出测定样品的凝胶特性[19]。测定参数：探针：P/0.5 型；感应力：5 g；压缩变形：50%；试验前速度：1.00 mm/s；试验速度：10.00 mm/s；测后速度：1.00 mm/s。

1.2.3.3　冻融稳定性　取各样品 1.5 g 与蒸馏水混合配成 6% 肽淀粉复合物溶液，加热糊化 30 min，冷却至室温(20 ℃)。置于−18 ℃ 冰箱中冷冻 24 h，取出在室温(20 ℃)下解冻 12 h，此为一个冻融循环过程。分别制备经过 1、3、5 次冻融循环处理的样品。常温解冻后，5000 r/min 离心 60 min，弃上清液，称沉淀质量[6]。计算析水率(WD)：

$$WD(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \qquad 式（2）$$

式中：m_1 为离心前淀粉肽复合物的质量，g；m_2 为离心后沉淀的质量，g。

1.2.4　淀粉体外消化率测定　采用 Englyst 等[20] 的方法测定淀粉肽复合物的体外淀粉消化率。准确称取 100 mg 各样品放入 200 mL 的锥形烧瓶中，再加入 20 mL pH5.2 的醋酸钠缓冲溶液，沸水浴中振荡 30 min，冷却至室温(20 ℃)，然后在每个锥形瓶中加入 10 mL 含有淀粉葡糖苷酶(15 U/mL)和 α-淀粉酶(290 U/mL)的混合酶溶液，将烧瓶置于 37 ℃ 恒温摇床中，分别在 20、120 min 时取酶解液 1 mL，用无水乙醇(5 mL)灭活酶，4500 r/min 离心 15 min，取上清液(1 mL)，采用 3,5-二硝基水杨酸(DNS)法测定样品中葡萄糖含量。按下式计算快速消化淀粉(RDS)、慢消化淀粉(SDS)和抗性淀粉(RS)含量：

$$RDS(\%) = \frac{(G20 - FG) \times 0.9}{TS} \times 100 \qquad 式（3）$$

$$SDS(\%) = \frac{(G120 - G20) \times 0.9}{TS} \times 100 \qquad 式（4）$$

$$RS(\%) = [1 - (RDS + SDS)] \qquad 式（5）$$

式中：G20 为 20 min 时释放的葡萄糖，mg；G120 为 120 min 时葡萄糖释放量，mg；FG 为游离葡萄糖含量，mg；TS 为淀粉总含量，mg。

1.2.5　酶解动力学　根据 Englyst 等[20] 的方法，分别在 30、60、90、120、150 和 180 min 时收集酶解液 1 mL，在酶解液中加入 5 mL 无水乙醇灭活酶。然后，将混合物以 4500 r/min 离心 15 min，取上清液 1 mL 用于测量葡萄糖的释放量。用 DNS 法测定其释放量，并按下式计算配合物的水解率：

$$水解率(\%) = \frac{At \times 0.9}{W} \times 100 \qquad 式（6）$$

式中：At 为时间 t 时葡萄糖的释放量，mg；W 为复合物的总质量，mg。

1.3　数据处理

使用 SPSS 16.0 统计软件测出显著性差异，显著水平设在 P<0.5，采用 Excel 2016 和 Origin8.6 软件绘图。所有实验重复三次取平均值，采用方差分析，最终结果以 mean±SD 表示。

2　结果与分析

2.1　扫描电镜表征

图 1 展示了 SPP-淀粉复合物的微观形貌变化。A1、B1 和 C1 分别呈现了大豆肽与 TS、NS 和 CS 淀粉的物理混合，可见淀粉颗粒保持完整结构。经微波处理后，SPP-TS(A2~A5)和 SPP-NS(B2~B5)复合物呈现多孔凝胶结构。这是微波处理过程中的加热导致淀粉颗粒膨胀、破裂及糊化作用所致。在此过程中，释放的内部分子与肽通过静电相互作用形成内凝胶网络[21]。随着微波功率的增加，淀粉膨胀加速，肽和淀粉之间的静电相互作用增强，抑制水分子与淀粉颗粒的结合，从而促进了多孔团聚现象的逐渐发展。相反，SPP-CS(C2~C5)复合物呈现致密的凝聚结构，这可能是归因于 CS 淀粉中直链淀粉含量较多导致糊化温度升高和膨胀速率降低[21]，从而使肽分子倾向于通过氢键以及静电和疏水相互作用更牢固地粘附在这些颗粒结构的表面，减少了水渗透到内部的机会，最终形成紧密聚集的复合结构。

2.2　微波处理对 SPP-淀粉复合物粒径分布的影响

如图 2 所示，微波处理的 SPP-TS、SPP-NS 和 SPP-CS 复合物的峰值粒径均大于相应的物理混合物。结合表 1 数据，微波处理的 SPP-淀粉复合物的 D90 粒径显著高于物理混合的样品。这是因为微波

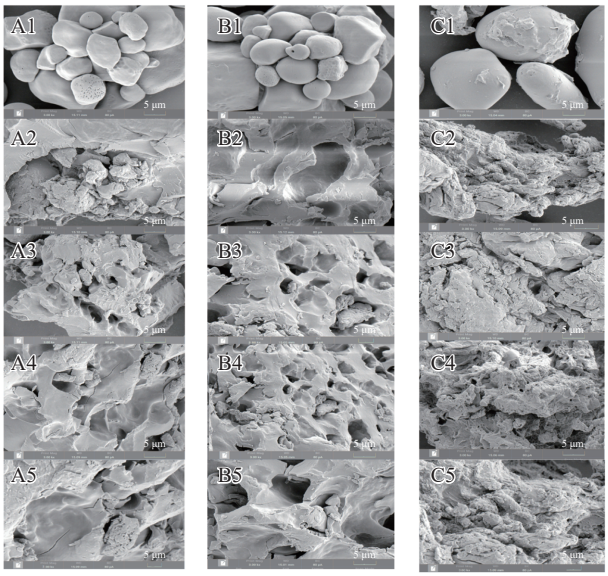


图 1 物理混合样品和 SPP-淀粉复合物的扫描电镜图像(3000×)

Fig.1 Scanning electron microscopy images of the physically mixed samples and SPP-starch complexes (3000×)

注:A1~A5 分别为 SPP-TS、350 WSPP-TS、550 WSPP-TS、700 WSPP-TS 和 1000 WSPP-TS;B1~B5 分别为 SPP-NS、350 WSPP-NS、550 WSPP-NS、700 WSPP-NS 和 1000 WSPP-NS;C1~C5 分别为 SPP-CS、350 WSPP-CS、550 WSPP-CS、700 WSPP-CS 和 1000 WSPP-CS。

处理破坏了淀粉颗粒结构,导致颗粒内部的吸水膨胀暴露出大量的羟基,促进了其与 SPP 的结合以及颗粒间的相互聚集,从而形成更大的颗粒[22]。此外,在 700 W 微波条件下处理的三种 SPP-淀粉复合物,其 D90 粒径均显著高于其他微波功率处理的样品。这表明 700 W 微波处理更有利于淀粉与多肽结合成稳定的复合物。

2.3 傅里叶变换红外光谱表征

图 3 为物理混合样品及不同微波处理条件下 SPP-淀粉复合物的分子短程有序结构 FT-IR 图谱。淀粉分子以脱水葡萄糖单元为基本结构,其主要特征峰包括:2980 cm^{-1} 处的 C-H 的伸缩振动峰,1640 cm^{-1} 处 H_2O 的弯曲振动峰,以及 1040 cm^{-1} 处的面内弯曲振动峰。微波处理后,SPP-NS 和 SPP-CS 复合物的特征峰强度在 700 W 处理后呈更显著的变化,但所有特征峰的位置均未发生明显的偏移,也没有形成新的特征峰。这一结果与通过蒸煮方法制备的 SPP-马铃薯淀粉复合物的红外分析结果一致[13](即没有新的特征峰)。表明 SPP 分子中的极性基团(如氨基和羰基)主要通过氢键作用而非共价键与淀粉分子发生相互作用[3]。实际上,1047、1022 和 995 cm^{-1} 处的特征吸收峰与淀粉的晶体结构密切相关[23]。其中,1047/1022 cm^{-1} 峰强度比值反映淀粉有序结晶区的结构特征,而 1022/995 cm^{-1} 比值则表征为淀粉无定形区结构特征[24]。如表 1 和图 3A~图 3C 所示,微波处理后,SPP-淀粉样品的 1047/1022 cm^{-1} 比值显著降低,其中 700 WSPP-NS 和

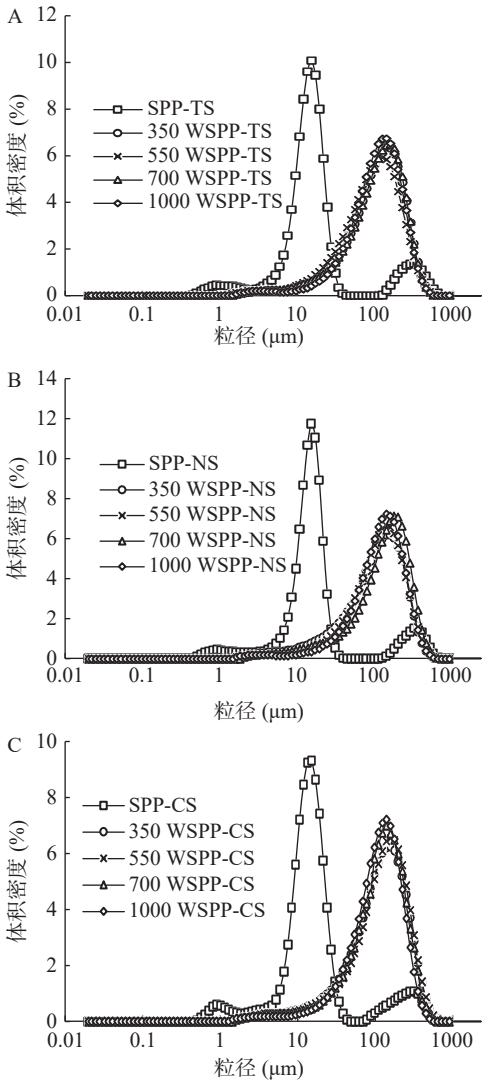


图 2 大豆肽-淀粉复合物的粒度分布

Fig.2 Particle size distribution of the physically mixed samples and the SPP–starch complex

表 1 物理混合样品和 SPP-淀粉复合物的 D90 粒径、1047 cm^{-1}/1022 cm^{-1} 和 1022 cm^{-1}/995 cm^{-1} 吸光度比以及相对结晶度

Table 1 D90 particle sizes, absorbance ratios of 1047 cm^{-1}/1022 cm^{-1} and 1022 cm^{-1}/995 cm^{-1} and relative crystallinity of the physically mixed samples and SPP-starch complexes

样品	D90(μm)	1047 cm^{-1}/1022 cm^{-1}	1022 cm^{-1}/995 cm^{-1}	RC(%)
SPP-TS	206.6±0.12^{e}	1.32±0.016^{a}	1.01±0.074^{a}	27.56±0.636^{a}
350 WSPP-TS	245.5±0.23^{d}	1.29±0.023^{a}	0.98±0.011^{a}	18.77±1.117^{b}
550 WSPP-TS	266.4±0.35^{b}	1.18±0.043^{b}	0.96±0.013^{a}	18.05±1.159^{bc}
700 WSPP-TS	276.5±0.11^{a}	1.13±0.011^{b}	0.95±0.012^{a}	16.32±0.651^{bc}
1000 WSPP-TS	253.8±0.97^{c}	1.12±0.012^{b}	0.95±0.032^{a}	15.97±1.386^{bc}
SPP-NS	212.8±0.87^{d}	1.30±0.016^{a}	0.77±0.131^{d}	28.67±1.725^{a}
350 WSPP-NS	264.4±0.76^{c}	1.19±0.002^{b}	0.98±0.230^{c}	21.76±1.697^{ab}
550 WSPP-NS	273.0±0.45^{b}	1.16±0.012^{b}	1.16±0.145^{b}	20.99±0.467^{bc}
700 WSPP-NS	306.4±0.33^{a}	1.05±0.004^{c}	1.29±0.001^{a}	20.31±1.146^{bc}
1000 WSPP-NS	267.5±0.21^{c}	1.02±0.022^{c}	1.03±0.142^{c}	17.54±1.103^{c}
SPP-CS	132.7±0.24^{e}	1.35±0.064^{a}	1.27±0.199^{a}	30.02±1.556^{a}
350 WSPP-CS	295.1±1.23^{c}	1.20±0.007^{b}	1.20±0.053^{ab}	17.78±0.792^{ab}
550 WSPP-CS	300.4±0.22^{b}	1.13±0.011^{b}	1.09±0.049^{ab}	17.54±0.679^{ab}
700 WSPP-CS	312.7±0.09^{a}	1.02±0.002^{c}	0.99±0.138^{ab}	16.98±0.481^{b}
1000 WSPP-CS	250.6±0.98^{d}	1.02±0.065^{c}	0.96±0.021^{b}	16.03±2.447^{b}

注:不同字母表示同一淀粉-SPP复合物在不同微波处理条件下差异显著(P<0.05),表2~表3同。

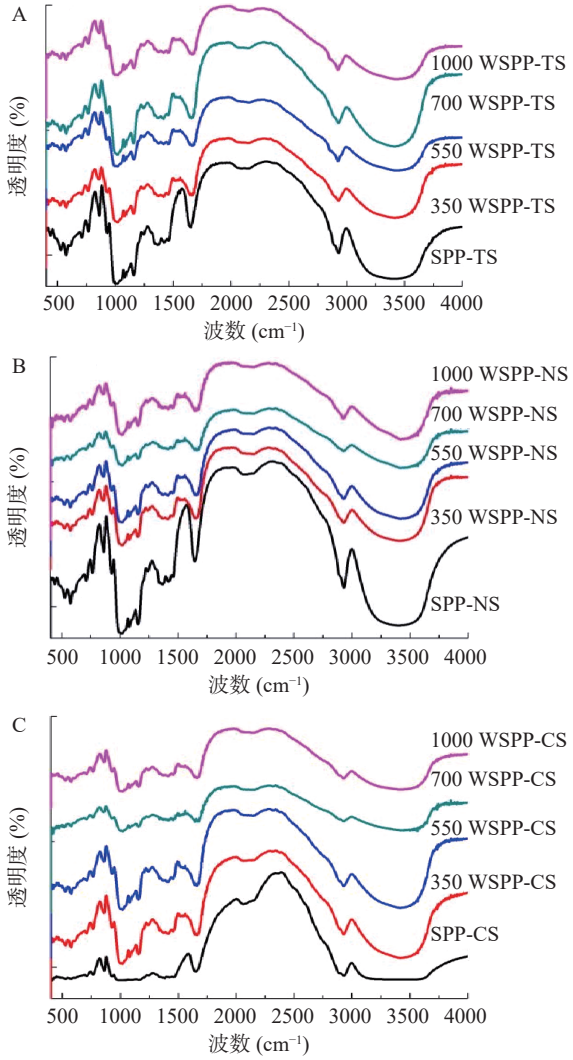


图 3　物理混合样品和 SPP-淀粉复合物的 FT-IR 图谱

Fig.3　FT-IR of physical mixed sample and SPP-starch compound

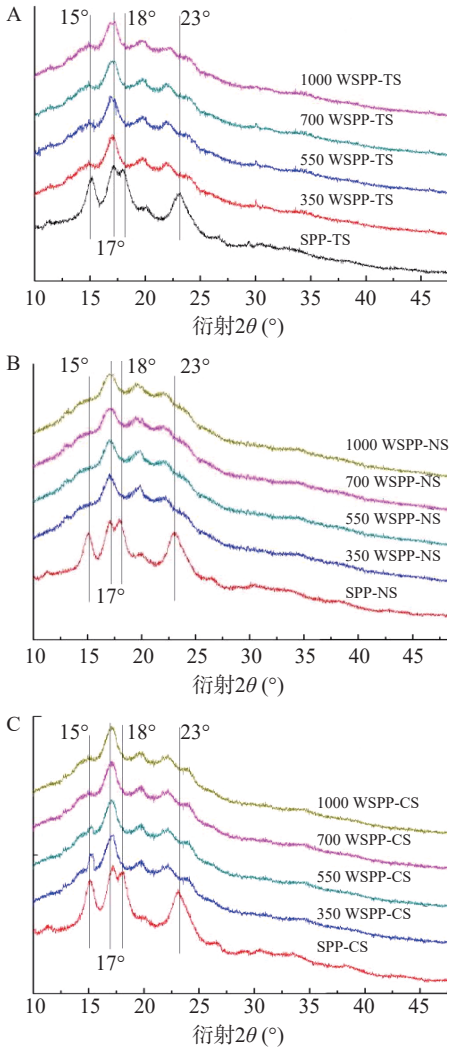


图 4　物理混合样品和 SPP-淀粉复合物的 XRD 衍射图

Fig.4　XRD diffraction patterns of the physically mixed samples and SPP–starch complexes

700 WSPP-CS 微波处理样品降低幅度最为明显；相比之下，1022/995 cm^{-1} 比值变化不显著。这些结果表明，微波处理主要破坏了淀粉分子中的结晶区结构，而对无定形区的影响较小，这进一步证实微波处理的选择性作用主要针对淀粉中的直链淀粉结构。

2.4　XRD 晶体分析

图 4A~图 4C 为 SPP-淀粉复合物的 XRD 衍射图谱，表 1 总结了 SPP-淀粉复合物相对结晶度晶体特征参数。如图 4 所示，SPP-TS、SPP-NS 和 SPP-CS 均在 15°和 23°处呈现强衍射峰，并在 17°和 18°处出现未完全分离的双峰，符合 A 型淀粉的典型衍射模式。其中 NS 和 TS 属于 A 型晶体结构[25]，而 TS 表现出 Ca 型结构[26]。值得注意的是 SPP-NS 和 SPP-CS 物理混合物的 XRD 谱图与原淀粉基本一致，而 SPP-TS 物理混合物的 XRD 衍射图谱与原淀粉存在差异。由于 Ca 型结构介于 A 型和 B 型之间，其晶体结构可能在 SPP 的作用下发生改变[27]。

微波处理显著影响了 SPP-淀粉复合物的晶体结构。在 17°和 18°处，原本的双峰逐渐变为单峰。此外，随着微波功率从 350 W 到 1000 W，15°处的衍射峰逐渐消失，而 23°处的峰强度减弱并分裂为两个小峰，表明微波处理破坏了 SPP-淀粉复合物的有序晶体结构。表 1 数据显示，相对结晶度随着微波功率升高而逐渐降低，同时晶体类型也发生明显转变，这一结果与 FT-IR 分析中 1047 cm^{-1}/1022 cm^{-1} 结晶区峰强比逐渐降低的变化趋势一致。综上，微波功率对 SPP-淀粉复合物的晶体结构具有显著调控作用。

2.5　微波对大豆肽-淀粉复合物抗老化性的影响

淀粉的老化程度可通过沉降体积比反映，沉降体积比越小，表明老化程度越严重(图 5)。在 3 h 的短期老化过程中，三种 SPP-淀粉物理混合物沉降体积比依次为 SPP-TS>SPP-NS>SPP-CS。这一差异主要源于 CS 的直链淀粉含量高，其在老化过程中更容易发生分子链重排和再结晶，导致水分流失加快，凝胶结构紧密，从而显著降低沉降体积[28]。微波处理进一步加剧了淀粉的老化现象。与物理混合样品相比，微波处理后的复合物沉降体积比普遍减少，表明微波促进 SPP 与淀粉的相互作用，形成更大的聚集体，加

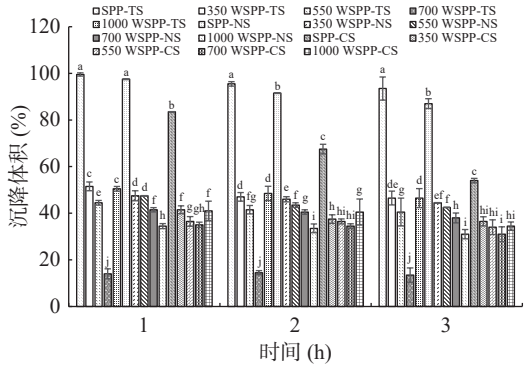


图 5 物理混合样品和 SPP-淀粉复合物的沉降体积

Fig.5 Settling volume of the physically mixed samples and SPP-starch complexes

注: 不同字母表示 SPP-淀粉复合物在相同时间内参数差异显著标记(P<0.05)。

速沉淀与老化。具体而言, 700 W 微波处理使 SPP-TS 和 SPP-CS 的沉降体积比降至最低, 老化效应最显著; 1000 W 处理则对 SPP-NS 的影响最大, 其沉降体积比最小。这种差异可能与不同微波功率处理下的复合物粒径大小有关, 微波功率通过调控相互作用强度, 影响复合物聚集尺寸, 从而改变沉降率与老化程度。综上, 微波处理可精准调控 SPP-淀粉复合物的老化行为, 其效果取决于淀粉类型与功率参数的协同作用。

2.6 微波处理对 SPP-淀粉复合物凝胶性能的影响

微波处理显著影响了 SPP-淀粉复合物的凝胶特性。如表 2 所示, 经微波处理的复合物凝胶强度和断裂强度均低于物理混合样品, 其中 700 W 处理的混合物下降幅度最为显著。这一现象可能由于在 700 W 微波条件下, SPP 与淀粉颗粒通过氢键和静电相互作用形成了更为紧密的结合[29]。在糊化过程中, SPP 中的小分子组分如多肽和低聚糖可能通过淀粉颗粒的纳米通道快速渗透, 并嵌入淀粉晶体结构中。这种分子嵌入作用会阻碍直链淀粉的释放, 削弱淀粉分子间的相互作用网络, 最终导致复合物凝胶强度和断裂强度的降低[30]。

2.7 微波处理对 SPP-淀粉复合物冻融稳定性的影响

冻融稳定性是评价冷冻食品品质的重要指标, 可通过析水率来表征。析水率越低, 表明冻融稳定性越好, 反之亦然[31]。如表 2 所示, 经微波处理后, SPP-淀粉复合物的析水率显著降低, 说明其冻融稳定性得到明显改善, 其中 700 W 微波处理组表现出优异的性能即析水率最低。这可能是由于微波辐射对复合物微观结构及组分之间相互作用的深刻影响。微波处理过程中, 淀粉链因高频电场作用而发生剧烈分子振动, 导致体系内部热能迅速积累, 这种由内向外的分子级加热, 促进淀粉颗粒快速的膨胀与结构重组, 从而诱导淀粉形成发达的多孔结构。这种结构变化使得更多直链淀粉暴露并降解为单糖或具有强吸水能力的多糖, 这些产物比表面积大, 而且富含羟基等亲水基团, 能够通过增强的氢键作用更有效地吸附并固定水分子。此外, 微波诱导形成的多孔结构也提高了复合物的持水空间与水分包裹能力, 从而能抑制在冻融循环过程中冰晶形成与生长所引起的水分析出[32]。因此, 微波处理的 SPP-淀粉复合物表现出更低的析水率。尤其是在 700 W 条件下, 微波能量输入与物料吸收率达到较好的匹配, 促使结构修饰与组分讲解程度最为适宜, 因而复合物展现出最佳的冻融稳定性。

不同淀粉类型与 SPP 形成的复合物表现出差异性的冻融稳定性。如表 2 所示, SPP-CS 复合物的析水率明显高于 SPP-NS 和 SPP-TS 复合物, 表明其冻融稳定性相对较差。这一差异可能与淀粉的分子结构特性有关: CS 含有较高比例的直链淀粉, 所以有助于更稳定的复合物结构, 但同时削弱了其与外界水分子的结合能力[33]。相比之下, NS 和 TS 中较低的直链淀粉含量可能更有利于维持复合物的吸水性能, 从而表现出更好的冻融稳定性。

表 2 物理混合样品与 SPP-淀粉复合物的凝胶性质和析水率

Table 2 Gel properties, and WD of the physically mixed samples and SPP-starch complexes

样品	凝胶强度(g)	断裂强度(g)	1WD(%)	3WD(%)	5WD(%)
SPP-TS	43.07±0.58^{a}	66.69±0.31^{a}	12.63±0.76^{a}	17.84±0.39^{a}	25.73±0.79^{a}
350 WSPP-TS	30.78±0.74^{b}	66.68±1.85^{a}	12.02±0.02^{ab}	12.96±2.47^{b}	14.38±2.14^{b}
550 WSPP-TS	28.29±0.46^{c}	25.10±0.30^{c}	11.53±0.12^{ab}	12.21±1.15^{b}	12.92±0.77^{b}
700 WSPP-TS	20.97±0.14^{e}	23.97±0.19^{d}	7.70±1.09^{c}	8.07±0.18^{c}	9.86±0.25^{c}
1000 WSPP-TS	24.50±1.45^{d}	44.66±1.70^{b}	10.59±1.64^{b}	12.74±0.21^{b}	13.21±0.25^{b}
SPP-NS	33.85±1.12^{a}	34.04±0.30^{a}	34.03±1.67^{a}	35.23±0.51^{a}	37.76±1.33^{a}
350 WSPP-NS	31.3±0.23^{b}	33.95±0.29^{a}	15.47±0.33^{b}	16.33±3.92^{b}	17.78±2.22^{b}
550 WSPP-NS	19.17±0.30^{c}	19.52±0.44^{b}	11.03±0.11^{c}	11.31±0.14^{c}	12.95±1.76^{c}
700 WSPP-NS	8.86±0.38^{e}	14.63±0.53^{c}	9.79±0.12^{c}	10.07±4.57^{c}	11.08±1.78^{c}
1000 WSPP-NS	13.53±0.38^{d}	19.03±0.12^{b}	16.82±0.24^{b}	17.44±0.29^{bc}	18.32±1.03^{b}
SPP-CS	28.18±1.10^{a}	30.72±0.77^{a}	66.61±1.01^{a}	69.23±0.13^{a}	81.26±0.13^{a}
350 WSPP-CS	11.09±0.19^{c}	28.95±0.97^{a}	64.19±1.29^{b}	67.71±5.55^{a}	69.83±0.21^{b}
550 WSPP-CS	28.05±0.15^{a}	30.63±1.79^{a}	57.40±0.43^{c}	58.88±0.86^{b}	65.83±0.25^{c}
700 WSPP-CS	6.48±0.31^{d}	11.11±0.45^{b}	38.77±1.07^{d}	39.69±0.03^{c}	53.75±0.21^{e}
1000 WSPP-CS	21.79±0.48^{b}	29.42±0.66^{a}	55.72±1.72^{c}	56.91±1.48^{b}	60.54±0.28^{d}

2.8　微波对大豆肽-淀粉复合物体外消化性的影响

与物理混合样品相比，经微波处理后 SPP-淀粉复合物其快速消化淀粉（RDS）含量均有不同程度的降低（表 3）。随着微波功率的增加，RDS 含量呈现先降后升的趋势。其中，700 W 微波处理复合物中 RDS 含量降低最为显著，同时其慢消化淀粉（SDS）和抗性淀粉（RS）含量显著升高，特别是 700 WSPP-CS 的 SDS 含量为 28.20%，RS 的含量达 35.70%。这表明微波处理促进了 SPP 与淀粉分子的结合，进而增强了淀粉对酶解的抵抗能力[11]。其作用机制包括两方面：一方面，残留的 SPP 分子通过与 α-淀粉酶和淀粉葡萄糖苷酶结合，抑制其酶活性。另一方面，在微波作用下，SPP 通过氢键和静电相互作用与淀粉分子结合，导致淀粉颗粒的粒径增大，这与粒径分析的结果一致[34]。粒径越大，淀粉酶对淀粉的水解率越低。值得注意的是，粒径增大对消化率降低的影响程度超过了淀粉结晶度及短程有序结构变化所产生的影响。

表 3　物理混合样品和 SPP-淀粉复合物的体外消化率

Table 3　*In vitro* digestibility of the physically mixed samples and SPP-starch complexes

样品	RDS(%)	SDS(%)	RS(%)
SPP-TS	64.83±0.40^{a}	13.76±0.45^{c}	21.41±0.83^{c}
350 WSPP-TS	60.69±0.41^{b}	8.83±0.50^{d}	30.48±0.91^{b}
550 WSPP-TS	57.59±0.50^{c}	9.74±0.55^{e}	32.67±1.05^{ab}
700 WSPP-TS	42.03±0.78^{e}	22.96±0.82^{a}	35.01±1.60^{a}
1000 WSPP-TS	44.32±0.65^{d}	21.70±0.70^{b}	33.98±1.35^{ab}
SPP-NS	65.33±0.71^{a}	18.76±0.56^{bc}	15.91±1.26^{c}
350 WSPP-NS	61.25±0.40^{b}	14.60±0.57^{c}	24.15±0.97^{b}
550 WSPP-NS	56.77±0.54^{c}	25.72±0.41^{a}	17.51±0.95^{c}
700 WSPP-NS	45.75±0.57^{d}	22.86±0.61^{ab}	31.39±1.17^{a}
1000 WSPP-NS	48.51±0.42^{d}	21.35±0.56^{ab}	30.14±0.97^{a}
SPP-CS	57.10±0.29^{a}	16.05±0.63^{c}	26.85±0.92^{c}
350 WSPP-CS	51.13±0.45^{b}	23.30±0.54^{b}	25.57±0.39^{c}
550 WSPP-CS	50.68±0.54^{b}	17.99±0.40^{c}	31.33±0.86^{b}
700 WSPP-CS	36.10±0.25^{d}	28.20±0.35^{a}	35.70±0.59^{a}
1000 WSPP-CS	37.30±0.39^{c}	27.78±0.31^{ab}	34.92±0.45^{ab}

2.9　微波对大豆肽-淀粉复合物酶消化动力学的影响

如图 6 所示，微波处理的 SPP-淀粉配合物的水解率低于相应的物理混合的样品。这是因为在微波处理过程中，SPP 通过氢键和静电相互作用与淀粉颗粒结合，从而在酶水解过程中抑制酶与淀粉分子的结合[34]。特别是，在 700 W 微波条件下制备的 SPP-淀粉复合物，其淀粉水解程度显著低于其他微波功率处理的样品。这表明在 700 W 微波功率下，大豆肽对淀粉与消化酶相互作用的抑制作用更强。在特定的微波条件 700 W 下，SPP-淀粉复合物内部的肽含量最高，进而增强了其抑制淀粉和淀粉酶结合的能力。这些结果表明，SPP 可通过上述机制间接降低淀粉酶解速率和程度，该研究结果可为开发低血糖指数淀粉基食品提供理论支撑。

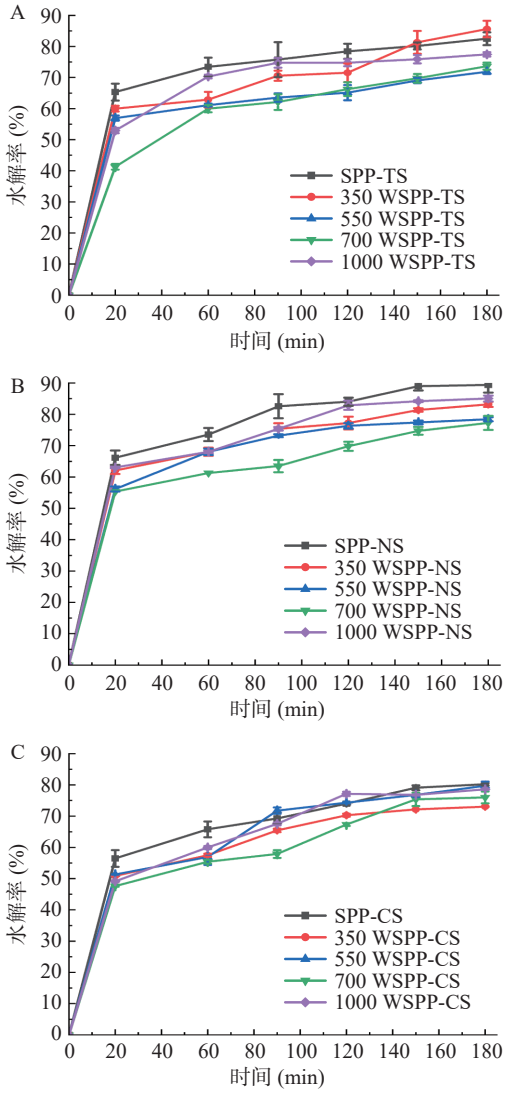


图 6　物理混合样品和 SPP-淀粉复合物的体外淀粉水解率

Fig.6　*In vitro* starch hydrolysis rate of the physically mixed samples and SPP–starch complexes

3　结论

本研究采用微波法制备了 SPP-淀粉复合物，并对复合物的结构、理化性质和体外消化率进行了研究。结果表明，微波处理使 SPP-淀粉复合物形成了多孔凝胶结构和致密的团聚体，粒径显著增大。傅里叶变换红外光谱显示 SPP 与淀粉主要是通过氢键和静电相互作用结合。X-射线衍射分析说明复合物的结晶度随微波处理强度的增加而降低。在理化性能方面，复合物经微波处理后断裂强度和凝胶强度下降，抗老化性减弱，但冻融稳定性得到提升，尤其 SPP-TS 和 SPP-NS 复合物表现更佳，显示出在冷冻食品中的应用潜力。体外消化实验表明，随微波功率的升高，复合物的 RDS 含量呈先降低后略升趋势，其中 700 W 处理的复合物消化率下降最为显著。值得注意的是，尽管微波处理引起淀粉结晶区域破坏通常会提高消化率，但 SPP-淀粉复合物消化率仍然降低，表明 SPP 对淀粉消化的抑制作用强于淀粉结构变化对消化的促进效应，其机制主要与抑制酶活性和

增大复合物颗粒有关。本研究为开发基于 SPP-淀粉相互作用的低升糖指数食品和冷冻食品提供了理论依据，未来需要进一步探究 SPP 对不同来源淀粉消化率的抑制效应是否具有普遍性。

© The Author(s) 2026. 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］ 周丽霞, 李丹, 王亚宁, 等. 中成药治疗糖尿病的临床应用及其研发趋势[J]. 世界中西医结合杂志, 2023, 18(4): 840−843. ［ZHOU Lixia, LI Dan, WANG Yaning, et al. Clinical application and research progress on Chinese patent medicines against diabetes mellitus[J]. World Journal of Integrated Traditional and Western Medicine, 2023, 18(4): 840−843.］

［2］ 邓楠, 杨正香, 刘成梅, 等. 大米淀粉-多酚复合物的制备与消化特性研究[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(11): 57−63. ［DENG Nan, YANG Zhengxiang, LIU Chengmei, et al. Preparation and digestibility of rice starch-polyphenol complex[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(11): 57−63.］

［3］ LI Nannan, CAI Zexi, GUO Yan, et al. Hierarchical structure and slowly digestible features of rice starch following microwave cooking with storage[J]. Food Chemistry, 2019, 295: 475−483.

［4］ 任顺成, 张丹丹, 刘泽龙. 4 种外源植物蛋白对小麦淀粉消化性的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(2): 91−99. ［REN Shuncheng, ZHANG Dandan, LIU Zelong. Influence of four exogenous plant protiens on the digestibility of wheat starch[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(2): 91−99.］

［5］ 陈旭, 赵华彬, 罗健伟, 等. 湿热处理对马铃薯淀粉-大豆肽复合物的理化和消化特性的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(7): 133−141. ［CHEN Xu, ZHAO Huabin, LUO Jianwei, et al. The influence of heat moisture treatment on the physicochemical and digestive properties of potato starch-soy peptide complex[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(7): 133−141.］

［6］ 李旭, 王弘, 王鼎, 等. 不同直链淀粉含量小麦淀粉理化性质与消化特性研究[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(4): 470−476. ［LI Xu, WANG Hong, WANG Ding, et al. Digestibility and physicochemical properties of wheat starch differing in amylose content[J]. Journal of Triticeae Crops, 2023, 43(4): 470−476.］

［7］ LÓPEZ-BARÓN N, SAGNELLI D, BLENNOW A, et al. Hydrolysed pea proteins mitigate *in vitro* wheat starch digestibility[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 79: 117−126.

［8］ 唐倩, 肖华西, 孙术国, 等. 植物蛋白及其酶水解产物对淀粉消化性的影响研究进展[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(5): 184−191. ［TANG Qian, XIAO Huaxi, SUN Shuguo, et al. Review on effects of plant protein and its enzymatic hydrolysate on rice starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(5): 184−191.］

［9］ 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. ［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.］

［10］ 蒲华寅, 陈旭艳, 郭思敏, 等. 微波处理对不同链支比玉米淀粉结构及理化性质的影响[J]. 陕西科技大学学报, 2022, 40(2): 39−45. ［PU Huayin, CHEN Xuyan, GUO Simin, et al. Effects of microwave treatment on structure and physicochemical properties of corn starches with different amylose/amylopectin ratios[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2022, 40(2): 39−45.］

［11］ 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 Tiantian, JIN Fengfang, NIU Liya, et al. Effect of pea peptides and soybean peptides on physicochemical properties of rice starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(6): 53−58,67.］

［12］ CHEN Xu, LUO Jianwei, LIANG Zhili, et al. Structural and physicochemical/digestion characteristics of potato starch-amino acid complexes prepared under hydrothermal conditions[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 145: 1091−1098.

［13］ 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. ［LUO Mingchang, WU Leping, WANG Yizhu, et al. Investigation of the interaction between potato starch and soybean peptide under cooking conditions and the structural properties of their products[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(5): 1391−1398.］

［14］ 于丽雅, 石梦梦, 王月琴, 等. 微波超声联用处理对青稞 β-葡聚糖理化性质及结构特性的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(8): 185−192. ［YU L Y, SHI M M, WANG Y Q, et al. Effects of microwave ultrasound on physicochemical and structural properties of barley –glucan[J]. Food Science, 2024, 45(8): 185−192.］

［15］ OYEYINKA S A, UMARU E, OLATUNDE S J, et al. Effect of short microwave heating time on physicochemical and functional properties of bambara groundnut starch[J]. Food Bioscience, 2019, 28: 36−41.

［16］ ZHONG Yuyue, LIANG Wenxin, PU Hanqi, et al. Short-time microwave treatment affects the multi-scale structure and digestive properties of high-amylose maize starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 137: 870−877.

［17］ 魏海香, 高贤贤, 张莉, 等. 感应电场对普鲁兰酶解玉米淀粉结构性能和体外消化的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(15): 186−193. ［WEI Haixiang, GAO Xianxian, ZHANG Li, et al. Effect of induced electric field on structural properties and *in vitro* digestibility of corn starch hydrolyzed by pullulanase[J]. Food Science, 2024, 45(15): 186−193.］

［18］ HE Ting, WANG Kai, ZHAO Lei, et al. Interaction with Longan seed polyphenols affects the structure and digestion properties of maize starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 256: 117537.

［19］ GE Xiangzhen, SHEN Huishan, SU Chunyan, et al. Pullulanase modification of granular sweet potato starch: Assistant effect of dielectric barrier discharge plasma on multi-scale structure, physicochemical properties[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 272: 118481.

［20］ ENGLYST H N, KINGMAN S M, CUMMINGS J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1992, 46(Suppl 2): S33-S50.

［21］ MAPENGO C R, RAY S S, NAUSHAD EMMAMBUX M. Granular morphology, molecular structure and thermal stability of infrared heat-moisture treated maize starch with added lipids[J]. Food Chemistry, 2022, 382: 132342.

［22］ 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.

［ZHAO Dehou, HAO Shuai, ZHU Zhijie, et al. Preparation of soybean protein peptide-corn starch compound and analysis of its properties［J］. Journal of Anhui Agricultural University, 2021, 48(6): 989−996.］
［23］ LÜ Xinxin, HONG Yan, GU Zhengbiao, et al. Effect of solution on starch structure: New separation approach of amylopectin fraction from gelatinized native corn starch［J］. Carbohydrate Polymers, 2024, 329: 121770.
［24］ LI Zerun, LIU Yang, HUANG Yanhong, et al. Preparation of resistant glucan by high pressure processing (HPP) and enzymatic methods increases indigestibility［J］. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 219: 150−158.
［25］ 马萌. 菱角粉的理化性质及应用研究［D］. 无锡: 江南大学, 2013.［MA Meng. Study on the physicochemical properties and application of water caltrop［D］. Wuxi: Jiangnan University, 2013.］
［26］ GUO Han, HILAILI M, SARI B P P, et al. Determination of starch digestibility in white sweet potato after acid hydrolysis and heat-moisture treatment using terahertz spectroscopy［J］. Food Chemistry, 2025, 479: 143867.
［27］ CHENL L, LI X T, SONG J Q, et al. Progress on research of the effect of heat and low temperature treatment to the long and short order structure of starch and its change mechanism［J］. Polymeric Materials Science and Engineering, 2024, 40(7): 162−171.
［28］ AL-HAJJI L, NASSEHI V, STAPLEY A. Spatial variation of starch retrogradation in Arabic flat bread during storage［J］. Journal of Food Engineering, 2016, 187: 44−52.
［29］ 王萌. 超声波和微波双重处理对淀粉理化性质和功能性质的影响［D］. 北京: 北京林业大学, 2021.［WANG Meng. Effect of ultrasonic and microwave dual-treatment on the physicochemical and functional properties of starch［D］. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.］
［30］ 王伟良. 不同处理对荔浦芋淀粉加工特性和体外消化性能的影响研究［D］. 南宁: 广西大学, 2022.［WANG Weiliang. Effects of different treatments on the processing properties and *in vitro* digestibility of Lipu taro starch［D］. Nanning: Guangxi University, 2022.］
［31］ LI Mengqing, WANG Guidan, SUN Lijun, et al. Physical field excitation to modify *Cyperus esculentus* starch and its complex with EGCG: Multiscale structural changes and digestive behavior［J］. Carbohydrate Polymers, 2025, 366: 123900.
［32］ 文茜, 张希讯, 刘畅, 等. 微波处理对板栗淀粉结构和消化性的影响［J］. 食品与发酵工业, 2025, 51(12): 236−241.［WEN Xi, ZHANG Xixun, LIU Chang, et al. Effect of microwave modification on structure and digestibility of chestnut starch［J］. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(12): 236−241.］
［33］ GARCIA M C, PEREIRA-DA-SILVA M A, TABOGA S, et al. Structural characterization of complexes prepared with glycerol monoestearate and maize starches with different amylose contents［J］. Carbohydrate Polymers, 2016, 148: 371−379.
［34］ NA-NAKORN K, KULRATTANARAK T, HAMAKER B R, et al. Starch digestion kinetics of extruded reformed rice is changed in different ways with added protein or fiber［J］. Food & Function, 2019, 10(8): 4577−4583.