

中图分类号: S532 文献标识码: A 文章编号: 1672-3635(2024)01-0084-07

DOI: 10.19918/j.cnki.1672-3635.2024.01.012

综 述

组分互作对马铃薯淀粉理化与消化特性的影响

尹立媛^{1,2}, 周卉卉^{1,2}, 郑振佳², 刘伟¹, 刘倩楠¹, 赵瑞璇^{1*}, 胡宏海^{1*}

(1. 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与贮藏重点实验室/农业农村部马铃薯主食化加工技术集成实验室,

北京 100193; 2. 山东农业大学食品科学与工程学院, 山东 泰安 271018)

摘要: 马铃薯淀粉广泛应用于面食、乳制品、肉制品、糖果等领域, 具有较高的经济价值和开发潜力。马铃薯淀粉糊化温度低、吸水力强、糊化后透明度高, 但易老化、热稳定性差。非淀粉成分如膳食纤维、蛋白质、多酚能与马铃薯淀粉发生相互作用, 调控其理化和消化特性, 拓宽其应用途径。本研究重点介绍多糖、蛋白质、小分子多酚对马铃薯淀粉理化和消化特性的影响, 对马铃薯淀粉未来研究方向进行展望, 为马铃薯淀粉在实际生产应用中提供参考。

关键词: 马铃薯淀粉; 相互作用; 理化特性; 消化特性

Effect of Component Interactions on the Physicochemical and Digestive Properties of Potato Starch

YIN Liyuan^{1,2}, ZHOU Huihui^{1,2}, ZHENG Zhenjia², LIU Wei¹, LIU Qiannan¹, ZHAO Ruixuan^{1*}, HU Honghai^{1*}

(1. Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Agricultural Product Processing and Storage of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Integrated Laboratory of Potato Staple Food Processing Technology of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China; 2. College of Food Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract: Potato starch is widely used in pasta, dairy products, meat products, confectionery and other fields, and has high economic value and development potential. Potato starch has low gelatinization temperature, strong water absorption and high transparency after pasting, but it is easy to aging and has poor thermal stability. Nonstarch components such as dietary fibres, proteins and polyphenols can interact with potato starch, modulate its physicochemical and digestive properties, and expand its application fields. In this review, the effects of polysaccharides, proteins and small-molecule polyphenols on the physicochemical and digestive properties of potato starch were focused, and the future research direction of potato starch was prospected, which would provide a reference for the application of potato starch in practical production.

Key Words: potato starch; interaction; physicochemical property; digestive property

收稿日期: 2023-12-03

基金项目: 中国农业科学院农产品加工研究所创新工程院所重点任务(CAAS-ASTIP-G2022-IFST-04); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(S2023JBKY-04); 国家马铃薯产业技术体系(CARS-09-P27)。

作者简介: 尹立媛(1999-), 女, 硕士研究生, 主要从事马铃薯淀粉加工研究。

*通信作者(Corresponding author): 胡宏海, 博士, 研究员, 主要从事马铃薯加工与品质调控研究, E-mail: huhonghai@caas.cn; 赵瑞璇, 博士, 助理研究员, 主要从事马铃薯加工技术研究, E-mail: zhaoruixuan@caas.cn。

中国马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)种植面积和产量均位居世界第一^[1-3]。淀粉在鲜马铃薯中含量为9%~23%, 在干物质中含量为66%~80%^[4]。与玉米、小麦和大米淀粉等相比, 马铃薯淀粉具有糊化温度低、易吸水膨胀、保水性强等优点^[5]。马铃薯淀粉广泛用于加工即食食品、调味汁、膨化食品^[6]、功能性淀粉、粉丝、粉条、面条、糖果、酸奶等。但马铃薯淀粉存在热稳定性差、易老化、受热后快消化淀粉含量显著升高等问题。因此, 调控马铃薯淀粉理化及消化特性成为当下研究热点。常用改性方法有物理改性、化学改性和酶法改性。物理改性简单快速, 绿色环保, 但生产设备价格较高; 化学改性定向高效, 但反应过程难以控制, 改性副产物对环境存在威胁; 酶法改性对环境友好, 但成本较高^[7,8]。多糖、蛋白质及多酚等小分子物质可通过与马铃薯淀粉相互作用改变其黏度、热稳定性、消化特性等, 扩大马铃薯淀粉适用性, 提高其淀粉基食品品质。同时为改善马铃薯淀粉的理化与消化特性及提高马铃薯淀粉利用率提供了新思路、新方法。本文通过总结多糖、蛋白质和小分子多酚与马铃薯淀粉相互作用对马铃薯淀粉理化及消化特性的影响, 为马铃薯淀粉在实际生产中的应用提供参考。

1 马铃薯淀粉的理化与消化特性

1.1 马铃薯淀粉的理化特性

马铃薯淀粉颗粒呈卵球形和球形, 直径为15~120 μm ^[9]。X-射线衍射图谱显示马铃薯淀粉是B型淀粉^[10]。马铃薯淀粉由直链淀粉和支链淀粉组成, 且支链淀粉占比较高。直链淀粉链相对较长, 分支少, 约含99% α -1, 4-糖苷键和1% α -1, 6-糖苷键; 支链淀粉则具有高度支化结构, 包含约95% α -1, 4-糖苷键和5% α -1, 6-糖苷键^[11]。直链淀粉的聚合度一般在300~5 000, 分子量一般为 $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6$ Da; 支链淀粉的聚合度一般在6 000以上, 分子量一般为 $1 \times 10^7 \sim 5 \times 10^8$ Da^[12]。直链淀粉主要位于淀粉颗粒的无定形区域即非结晶区, 支链淀粉主要位于结晶区^[13], 二者没有明确界限。

淀粉在糊化与老化阶段展现不同特性, 众多学者从淀粉糊化、老化、消化特性等方面研究淀粉特性。淀粉糊化是淀粉颗粒在水分存在并加热的条件下, 结晶结构遭到破坏甚至完全丧失, 淀粉糊黏度逐渐提高, 最终形成糊状黏液的过程^[14], 本质是淀粉颗粒中无序及有序结构发生水合作用, 淀粉颗粒溶胀崩解, 组分溶出并分散在水中形成胶体溶液^[15]。在热水中, 马铃薯淀粉分子间氢键和淀粉颗粒中胶束结构受到破坏, 发生糊化^[16]。马铃薯淀粉糊化温度为56~66 $^{\circ}\text{C}$ ^[17]。马铃薯淀粉糊化时吸水能力强、形成的淀粉糊透明度高、黏弹性好^[18]。

糊化后的淀粉糊在冷却静置过程中变为不透明甚至凝结沉淀^[19], 且不可再溶解, 对酶的抵抗力增加, 浊度增加, 沉淀析出, 这种现象称为淀粉老化。淀粉老化可分为短期老化和长期老化两个阶段^[20], 短期老化主要是直链淀粉的结晶^[21], 通常发生在淀粉糊化后^[22]; 长期老化与支链淀粉的重结晶有关, 时间比直链淀粉的短期老化时间更长^[23]。淀粉老化特性与淀粉来源有关, 不同来源的淀粉老化特性不同^[24]。马铃薯淀粉老化度随糊化度和储存时间增加而增大^[25]。不同温度下老化的马铃薯淀粉凝胶质构特性差异较大。有研究发现, 当老化温度高于-9 $^{\circ}\text{C}$ 时, 马铃薯淀粉凝胶的硬度、黏度和咀嚼性与老化温度均呈负相关; 当老化温度低于-9 $^{\circ}\text{C}$ 时, 马铃薯淀粉凝胶的硬度和咀嚼性与老化温度均呈正相关^[26]。储存温度与淀粉老化速度呈负相关, 淀粉在4 $^{\circ}\text{C}$ 时老化速度快于25 $^{\circ}\text{C}$ ^[27]。

1.2 马铃薯淀粉的消化特性

淀粉在体内的消化吸收过程分为口腔内阶段、十二指肠及小肠阶段和葡萄糖吸收阶段^[28]。根据淀粉在小肠内的生物可利用性可将其分为快消化淀粉、慢消化淀粉和抗性淀粉。淀粉快速水解导致血糖和胰岛素水平快速上升, 因此快消化淀粉不利于身体健康, 而慢消化淀粉和抗性淀粉有助于增强饱腹感, 预防2型糖尿病。未煮熟的马铃薯中抗性淀粉含量达75%, 煮熟的马铃薯中抗性淀粉含量降至5%~10%, 快消化淀粉含量达53%~86%。淀粉晶型与抗酶解性关系为: A型<

B型 < C型 < V型, 马铃薯淀粉和马铃薯抗性淀粉的结晶结构分别为B型和C型, 血糖指数分别为70.42和40.50^[29]。

2 组分互作对马铃薯淀粉理化与消化特性的影响

近年来, 通过添加多糖、蛋白质、多酚等天然食品组分改变马铃薯淀粉的理化及消化特性研究备受关注, 不同来源的食品级非淀粉多糖、蛋白质及小分子物质可以不同程度调控天然马铃薯淀粉的理化及消化特性。

2.1 多糖对马铃薯淀粉理化及消化特性的影响

研究表明, 非淀粉多糖可影响马铃薯淀粉的理化及消化特性, 如提升淀粉糊化温度, 降低淀粉糊化焓, 改变慢消化淀粉、抗性淀粉和快消化淀粉含量等。中药材多糖可减弱马铃薯淀粉的衍射峰强度, 显著降低中药材多糖-马铃薯淀粉(B型)复合体系中快消化淀粉比例。但在中药材多糖-玉米淀粉(A型)和中草药多糖-豌豆淀粉(C型)复合体系中快消化淀粉含量升高, 说明中药材多糖对淀粉消化性能的影响与淀粉的晶型密切相关^[30]。银耳多糖也可显著影响马铃薯淀粉的理化性质和消化特性。当银耳多糖添加量从0.1%(W/V)增至0.4%时, 马铃薯淀粉-银耳多糖复合体系的网络结构逐渐稳定, 孔壁增厚; 马铃薯淀粉的糊化初始温度由61.03℃增至61.80℃、峰值温度从65.73℃增至66.83℃、糊化焓值从2.65 J/g降至2.16 J/g, 说明添加一定量银耳多糖可抑制马铃薯淀粉糊化; 快消化淀粉含量由38.39%降至8.00%, 抗性淀粉含量由29.96%升至76.30%, 证实一定浓度范围内银耳多糖可提高马铃薯淀粉抗消化性^[31]。马铃薯淀粉中添加5%西葫芦多糖后, 马铃薯淀粉的峰值黏度从9 780 mPa·s降至7 023 mPa·s ($P<0.05$), 西葫芦多糖-马铃薯淀粉复合体系的血糖指数从70.98降至65.22, 马铃薯淀粉的消化率显著降低^[32]。

膳食纤维能通过非共价键与淀粉相互作用, 影响淀粉的理化及消化特性, 弥补天然淀粉水溶性差、乳化能力及凝胶能力低、易老化回生、稳

定性不足等缺点^[33,34]。马铃薯膳食纤维可抑制直链淀粉的浸出和淀粉颗粒受热后的溶胀, 提高马铃薯淀粉凝胶的抗剪切性, 效果与马铃薯膳食纤维浓度密切相关^[35]。以马铃薯淀粉与马铃薯皮为原料制备纤维素纳米晶体并将其与马铃薯淀粉混合制备水凝胶复合体系, 马铃薯淀粉的溶胀特性得到显著改善, 纯马铃薯淀粉凝胶的平衡溶胀比为772.4 g/g, 而纤维素纳米晶体-马铃薯淀粉水凝胶复合体系的平衡溶胀比为921.8 g/g。此外, 纤维素纳米晶体-马铃薯淀粉水凝胶复合体系具有更好的吸水性, 更快的水扩散速率及更强的三维网络结构^[36]。有学者研究不同添加量的天然纤维素、微晶纤维素、可溶性纤维糊精对马铃薯淀粉消化特性的影响。结果显示低添加量的天然纤维素和微晶纤维素(0.3%和1.2%)对抗性淀粉含量无显著影响, 但当天然纤维素和微晶纤维素的添加量增至2.1%和3.0%时, 抗性淀粉含量显著提高; 当可溶性纤维糊精添加量达到3.0%时, 快消化淀粉比例从31.2%下降至11.3%, 抗性淀粉比例从15.0%上升至58.0%, 三种纤维素在一定浓度下均可改善马铃薯淀粉的抗消化特性^[37]。

果胶可包裹淀粉颗粒, 阻止直链淀粉渗出, 抑制淀粉糊化, 降低淀粉黏度^[38]。苹果果胶的添加显著降低马铃薯淀粉的峰值黏度(4 400 mPa·s至849 mPa·s)、谷值黏度(1 210 mPa·s至141 mPa·s)和终值黏度(1 639 mPa·s至941 mPa·s), 增加峰值时间(4.93 min至9.71 min)和糊化温度(65.15℃至68.87℃); 提高马铃薯淀粉凝胶的抗剪切性^[39]。此外, 将苹果果胶与糯米淀粉进行复配, 随果胶添加量从0%增至10%, 糯米淀粉的糊化温度从75.2℃升至78.7℃; 慢消化淀粉和抗性淀粉含量分别从20.11%和15.75%增至21.87%和26.52%, 快消化淀粉含量从64.31%降至51.61%^[40]。相关研究表明, 柑橘皮果胶也可提升马铃薯淀粉的糊化温度, 抑制马铃薯淀粉溶胀并保持其完整性, 使慢消化淀粉含量升高而快消化淀粉含量降低, 从而提高马铃薯淀粉的抗消化性^[41]。

2.2 蛋白质对马铃薯淀粉理化及消化特性的影响

添加外源蛋白是改善淀粉理化及消化特性的

另一选择。蛋白质在室温下会包裹淀粉颗粒,在淀粉颗粒糊化升温过程中与膨胀的淀粉颗粒结合,增加淀粉颗粒的溶解度,降低其溶胀力和凝胶渗透力。玉米醇溶蛋白含量从0%增至5%,木薯淀粉的糊化初始温度、峰值温度分别由 $(52.45 \pm 3.18)^\circ\text{C}$ 和 $(58.9 \pm 3.54)^\circ\text{C}$ 增至 $(56.4 \pm 2.69)^\circ\text{C}$ 和 $(63 \pm 1.13)^\circ\text{C}$,糊化焓由 $(11.8 \pm 0.14) \text{ J/g}$ 增至 $(14.55 \pm 0.07) \text{ J/g}$ ^[42]。

可溶性谷蛋白和麦醇溶蛋白对马铃薯淀粉结晶结构形成、淀粉糊化和消化特性具有积极影响。当可溶性谷蛋白和麦醇溶蛋白浓度分别从0%增至1.5%时,马铃薯淀粉-可溶性谷蛋白复合体系和马铃薯淀粉-麦醇溶蛋白复合体系的相对结晶度分别从10.4%和10.1%增至15.1%和16.8%;当可溶性谷蛋白含量为1.5%时,马铃薯淀粉-可溶性谷蛋白复合体系中快消化淀粉含量从39.43%降至31.79%,抗性淀粉含量从16.84%增至25.17%;4℃储存28 d后,马铃薯淀粉的糊化焓从4.27 J/g增至9.24 J/g,当麦醇溶蛋白浓度从0%增至1.5%时,马铃薯淀粉的糊化焓从4.27 J/g增至9.76 J/g^[43]。

研究表明,乳清分离蛋白也可抑制马铃薯淀粉糊化,增强马铃薯淀粉的有序结构。当马铃薯淀粉和乳清分离蛋白质量比为1:0.5时,快消化淀粉含量降低29.18%,抗性淀粉含量增加12.02%^[44]。在马铃薯淀粉中添加10%卵清蛋白和大豆分离蛋白,并将pH降至4.5,马铃薯淀粉凝胶结构显著增强,糊化焓值增加,说明蛋白质和pH可影响马铃薯淀粉凝胶特性^[45]。在pH为3.5和6.8条件下,添加乳清蛋白原纤维使马铃薯淀粉糊化起始温度分别增加0.7~1.2℃、0.5~0.8℃,糊化焓分别降低10%~17%和5%~8%,马铃薯淀粉凝胶黏度持续降低。在pH 3.5条件下,马铃薯淀粉凝胶的储能模量随乳清蛋白原纤维含量增加而增加,但在pH 6.8时无显著变化。综上,在不同pH条件下,乳清蛋白原纤维对马铃薯淀粉凝胶特性的影响效果不同,且pH较低时乳清蛋白原纤维的作用效果较显著^[46]。

2.3 多酚对马铃薯淀粉理化及消化特性的影响

酚酸在植物中含量丰富,近年来在食品领域受到广泛关注,多酚与淀粉分子间可通过氢键非

共价形式相互作用^[47],改变淀粉分子的结构特征,影响淀粉基食品品质。添加蒲公英黄酮使马铃薯淀粉糊颜色更亮,可用于淀粉基食品着色;蒲公英黄酮添加量从0%增至10%,熟马铃薯淀粉结晶度由3.48%增至11.20%,可抑制马铃薯淀粉颗粒糊化^[48]。

研究表明,原花青素可延缓马铃薯淀粉颗粒的快速膨胀,抑制直链淀粉浸出,从而降低马铃薯淀粉黏度^[49]。原儿茶酸、鞣花酸、柚皮苷和单宁酸在马铃薯淀粉糊化和回生过程中,可通过氢键与马铃薯淀粉分子相互作用且作用顺序不同,这可能与酚类结构中羟基含量及其分子量有关,羟基含量越多,分子量越高,酚类物质对马铃薯淀粉的影响越大^[50]。研究发现,原儿茶酸和单宁酸体现较强的ABTS自由基清除能力和还原能力,柚皮苷抗氧化活性较弱,说明酚羟基较多的酚类化合物对马铃薯淀粉抗氧化活性改善效果更显著;当三种多酚的额外剂量为1.0%时,葡萄糖含量显著降低,说明在一定浓度范围内,较高浓度下酚类化合物降低马铃薯淀粉的消化率效果更显著^[51]。茶多酚与马铃薯淀粉质量比为1:50时,慢消化淀粉含量可达80.17%,快消化淀粉含量不随茶多酚与马铃薯淀粉质量比的变化而显著变化^[52]。

绿原酸是马铃薯中含量最高的酚类化合物^[53],占马铃薯总酚含量的80%^[54,55]。绿原酸是由咖啡酸和奎尼酸组成的一种重要生物活性膳食多酚^[56],其毒性小,具有多种药理属性,如抗氧化、抗炎、抗糖尿病、抗肥胖等^[57],是制作膳食补充剂和功能性食品^[58]的良好选择。在马铃薯淀粉食品加工过程中,绿原酸与马铃薯淀粉相互作用是决定食品品质的关键因素之一,复合体系的控制对淀粉基食品加工应用及功能特性的定向设计具有重要意义。因此马铃薯淀粉与绿原酸的相关研究较多。绿原酸可弱化淀粉糊的交联结构,干预绿原酸-淀粉体系中直链淀粉分子的相互作用,弱化凝胶网络中永久缠结区的形成,使淀粉糊体系具有更强恢复性^[59]。

在淀粉糊化的不同阶段,绿原酸对淀粉的影响不同。糊化早期(65、70℃),绿原酸主要以弱

结合形式参与淀粉分子的重排;糊化后期(85℃),绿原酸进入莲子淀粉的疏水螺旋腔,促进莲子淀粉-绿原酸复合体系中V型淀粉螺旋结构的形成^[60]。在65、80、95℃条件下加入绿原酸,小麦淀粉溶解度分别由2%、3%、4%增至8%、11%、14%,抗性淀粉比例从31.70%增至69.63%,远高于糊化淀粉(26.34%),说明绿原酸可显著降低小麦淀粉的消化率且在一定范围内与温度呈正相关^[61]。绿原酸可有效抑制板栗淀粉回生,与板栗淀粉相比,板栗淀粉-绿原酸复合体系的回生率由12.010%±0.013%降至9.850%±0.160%,糊化焓由(9.843±0.021)J/g降至(4.216±0.017)J/g;板栗淀粉的慢消化淀粉和抗性淀粉含量分别由13.20%±0.16%增至13.40%±0.27%、2.34%±0.19%增至4.37%±0.49%,板栗淀粉的营养价值得到改善^[62]。

影响马铃薯淀粉消化特性最关键的两种酶是 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶,植物多酚通过抑制这两种酶活性减缓淀粉消化速率,从而降低葡萄糖释放量,增强淀粉抗消化性^[63]。绿原酸含量较高的马铃薯品种血糖控制效果较好,原因是绿原酸可竞争性结合 α -淀粉酶,抑制 α -淀粉酶活性^[64],进而有效抑制马铃薯淀粉消化。绿原酸对 α -淀粉酶的抑制作用随绿原酸浓度的增加而增强,绿原酸抑制 α -淀粉酶活性产生 IC_{50} 值为(0.498±0.013)mg/mL^[65]。酚酸对 α -淀粉酶的抑制作用与其含有羟基数量有关,绿原酸因其较多的羟基数量表现出对 α -淀粉酶更高的抑制作用^[66]。绿原酸在5 min和20 min时分别抑制 α -淀粉酶消化马铃薯淀粉53.8%和28.3%。以上研究证实绿原酸对马铃薯淀粉糊化、老化、消化特性产生不同程度的影响。

3 展 望

多糖、蛋白质和小分子多酚的添加使马铃薯淀粉糊化温度升高、黏度降低、抗消化能力增强。马铃薯淀粉理化及消化特性的研究与开发功能性马铃薯淀粉基食品还需进一步探索。未来研究方向可能包括以下两个方面:(1)阐明马铃薯淀粉理化及消化特性与其他物质(如蛋白质、多糖、小分子物质)相互作用机理;(2)探究实际食品生产过程中,

加工方法对马铃薯淀粉理化及消化特性的影响。

[参 考 文 献]

- [1] 仇菊,朱宏,朱大洲,等.不同加工用途马铃薯品质特性分析[J].中国马铃薯,2019,33(6):372-378.
- [2] 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,2021,329(15):104-107.
- [3] 张颢城,李中慧,王秀丽.中国马铃薯主要品种特征与产业布局分析[J].中国马铃薯,2022,36(1):78-85.
- [4] 胡宏海,张泓,戴小枫.马铃薯营养与健康功能研究现状[J].生物产业技术,2017(4):31-35.
- [5] Zhang C, Lim S T, Chung H J. Physical modification of potato starch using mild heating and freezing with minor addition of gums[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 94: 294-303.
- [6] 张依睿.马铃薯淀粉的微波糊化及其在挤压重组米中的应用基础研究[D].沈阳:沈阳师范大学,2021.
- [7] 曹英,夏文,王飞,等.物理改性对淀粉特性影响的研究进展[J].食品工业科技,2019,40(21):315-319,325.
- [8] 王梦桔,马春敏,吴巧艳,等.淀粉多尺度结构及物理改性调控淀粉消化特性的研究进展[J/OL].食品工业科技,2023:1-12 [2023-11-13]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023100136>.
- [9] 高琨,田晓红,谭斌,等.马铃薯食品加工现状及展望[J].中国粮油学报,2021,36(8):161-168.
- [10] 罗芳会,刘传菊,聂荣祖,等.玉米淀粉和马铃薯淀粉共混糊化及凝胶特性的研究[J].中国粮油学报,2022,37(8):159-165.
- [11] 韩文芳,林亲录,赵思明,等.直链淀粉和支链淀粉分子结构研究进展[J].食品科学,2020,41(13):267-275.
- [12] 肖遥.几种食源多酚对淀粉特性的影响研究[D].郑州:河南工业大学,2018.
- [13] Zhang W H, Shen S G, Song T G, et al. Insights into the structure and conformation of potato resistant starch (type 2) using asymmetrical flow field-flow fractionation coupled with multiple detectors[J]. Food Chemistry, 2021, 349: 129-168.
- [14] 罗玉.凉粉草多糖对不同直链含量玉米淀粉凝胶特性的影响及凉粉草布丁产品的研发[D].南昌:南昌大学,2021.
- [15] 吕春月.马铃薯淀粉复合凝胶制备及其性能研究[D].沈阳:沈阳师范大学,2022.

- [16] Xu F, Zhang L, Liu W, *et al.* Physicochemical and structural characterization of potato starch with different degrees of gelatinization [J]. *Foods*, 2021, 10(5): 1104.
- [17] 徐芬, 刘伟, 刘倩楠, 等. 不同糊化度马铃薯淀粉的黏度及凝胶特性分析 [J]. *现代食品科技*, 2020, 36(5): 42–50.
- [18] 周童童, 梁单, 刘伟, 等. 不同中薯系列马铃薯淀粉组成与理化性质的差异分析 [J]. *核农学报*, 2022, 36(4): 766–776.
- [19] 刘素臣. 基于凉粉草多糖-不同类型淀粉相互作用形成的凝胶特性及新型黑凉粉制品研发 [D]. 南昌: 南昌大学, 2019.
- [20] Funami T, Kataoka Y, Omoto T, *et al.* Effects of nonionic polysaccharides on the gelatinization and retrogradation behavior of wheat starch [J]. *Food Hydrocolloids*, 2005, 19(1): 1–13.
- [21] Chang Y H, Lim S T, Yoo B. Dynamic rheology of corn starch-sugar composites [J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 64(4): 521–527.
- [22] Chen L, Ren F, Zhang Z P, *et al.* Effect of pullulan on the short-term and long-term retrogradation of rice starch [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 115: 415–421.
- [23] Krystyjan M, Adamczyk G, Sikora M, *et al.* Long-term storage stability of selected potato starch-non-starchy hydrocolloid binary gels [J]. *Food Hydrocolloids*, 2013, 31(2): 270–276.
- [24] Pietrzyk S, Fortuna T, Juszczak L, *et al.* Influence of amylose content and oxidation level of potato starch on acetylation, granule structure and radicals' formation [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 106: 57–67.
- [25] 于婷婷, 雷鸣, 刘宁, 等. 部分糊化马铃薯淀粉颗粒及老化特性影响研究 [J]. *中国调味品*, 2022, 47(11): 24–28.
- [26] Jiang K J, Zeng J, Gao H Y, *et al.* Effect of low temperature on the aging characteristics of a potato starch gel [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 150: 519–527.
- [27] Xu F, Liu W, Zhang L, *et al.* Retrogradation and gelling behaviours of partially gelatinised potato starch as affected by the degree of pre-gelatinisation [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2022, 57(1): 426–435.
- [28] 任欣, 张一, 方圆, 等. 影响淀粉消化的内外因素 [J]. *中国食品学报*, 2021, 21(12): 283–292.
- [29] 程冰, 张乐乐, 安艳霞, 等. 马铃薯抗性淀粉结构特征及体外消化特性的研究 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(17): 6975–6981.
- [30] Liu S C, Shen M Y, Xiao Y H, *et al.* Effect of maize, potato, and pea starches with *Mesona chinensis* polysaccharide on pasting, gelatinization properties, granular morphology and digestion [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 108: 106047.
- [31] Yang F, Du Q L, Miao T, *et al.* Interaction between potato starch and *Tremella fuciformis* polysaccharide [J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 127: 107509.
- [32] Zhang Y, Wang Y M, Yang B J, *et al.* Effects of zucchini polysaccharide on pasting, rheology, structural properties and *in vitro* digestibility of potato starch [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 253: 127077.
- [33] Xu H J, Hao W Z, Cao J W, *et al.* Complexation between rice starch and cellulose nanocrystal from black tea residues: gelatinization properties and digestibility *in vitro* [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 234: 123695.
- [34] 王磊鑫, 吕莹果, 吴娜娜, 等. 膳食纤维对淀粉性质的影响研究进展 [J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(6): 173–181.
- [35] Zhang Z Z, Zhang L, Liu W, *et al.* Potato soluble dietary fiber as a functional ingredient affects the physicochemical properties of native potato starch during freeze-thawing [J/OL]. *Food and Bioprocess Technology*, 2023: 1–12. <https://doi.org/10.1007/s11947-023-03252-5>.
- [36] Olad A, Doustdar F, Gharekhani F. Fabrication and characterization of a starch-based superabsorbent hydrogel composite reinforced with cellulose nanocrystals from potato peel waste [J]. *Colloids and Surfaces A*, 2020, 601: 124962.
- [37] Zhu Y L, Wen P C, Wang C J, *et al.* Influence of native cellulose, microcrystalline cellulose and soluble cellodextrin on inhibition of starch digestibility [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 219: 491–499.
- [38] Zhang B, Bai B, Pan Y, *et al.* Effects of pectin with different molecular weight on gelatinization behavior, textural properties, retrogradation and *in vitro* digestibility of corn starch [J]. *Food Chemistry*, 2018, 264: 58–63.
- [39] 曾琼, 成健, 李丛冠, 等. 苹果果胶改善马铃薯淀粉的糊化和流变特性 [J]. *现代食品科技*, 2023, 39(7): 75–81.
- [40] 翟羽恒. 果胶对糯米淀粉特性的影响及在汤圆中的应用 [D]. 无锡: 江南大学, 2022.
- [41] Yin X X, Zheng Y X, Kong X L, *et al.* RG-I pectin affects the physicochemical properties and digestibility of potato starch [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 117: 106687.

- [42] 符珍, 贾燕君, 林莹, 等. 玉米醇溶蛋白对木薯淀粉理化性质的影响[J]. 粮食与饲料工业, 2018(10): 26–29.
- [43] Chen B, Wang Y R, Fan J L, *et al.* Effect of glutenin and gliadin modified by protein–glutaminase on retrogradation properties and digestibility of potato starch [J]. Food Chemistry, 2019, 301: 125226.
- [44] 刘佳松. 乳清蛋白及其酶解产物对淀粉消化性影响机制探究[D]. 无锡: 江南大学, 2022.
- [45] Villanueva M, Ronda F, Moschakis T, *et al.* Impact of acidification and protein fortification on thermal properties of rice, potato and tapioca starches and rheological behaviour of their gels [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 79: 20–29.
- [46] Chen D, Fang F, Federici E, *et al.* Rheology, microstructure and phase behavior of potato starch–protein fibril mixed gel [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 239: 116247.
- [47] 韩雪琴. 大米淀粉与食源性多酚相互作用的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [48] Huang Y M, Wu P, Chen X D. Mechanistic insights into the influence of flavonoids from dandelion on physicochemical properties and *in vitro* digestibility of cooked potato starch [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 130: 107714.
- [49] Gao L Z, Zhang C H, Chen J, *et al.* Effects of proanthocyanidins on the pasting, rheological and retrogradation properties of potato starch [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(11): 4760–4767.
- [50] Chen N, Feng Z J, Gao H X, *et al.* Effects of phenols with different structure characteristics on properties of potato starch: action rule and molecular mechanism [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(7): 16679.
- [51] Chen N, Gao H X, He Q, *et al.* Insight into property, function, and digestion of potato starch modified by phenolic compounds with varying structures [J]. Journal of Food Science, 2023, 88(3): 962–976.
- [52] Lv Y Z, Zhang L M, Li M N, *et al.* Physicochemical properties and digestibility of potato starch treated by ball milling with tea polyphenols [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 129: 207–213.
- [53] Navarre D A, Pillai S S, Shakya R, *et al.* HPLC profiling of phenolics in diverse potato genotypes [J]. Food Chemistry, 2011, 127(1): 34–41.
- [54] 寇婷婷, 陈瑾, 范艳丽, 等. 马铃薯抗氧化活性成分研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(12): 158–162.
- [55] 肖继坪, 吴晓杰, 邓声翠, 等. 7个彩色马铃薯品种抗氧化性研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2023, 51(4): 16–24.
- [56] 和润莹, 杨慧珍, 崔瑶, 等. 绿原酸的生物活性及其作为食品添加剂的应用潜力探讨[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(11): 225–232.
- [57] Nwafor E O, Lu P, Zhang Y, *et al.* Chlorogenic acid: potential source of natural drugs for the therapeutics of fibrosis and cancer [J]. Translational Oncology, 2022, 15(1): 101294.
- [58] Singha S K, Thakur K, Sharma V, *et al.* Exploring the multifaceted potential of chlorogenic acid: journey from nutraceutical to nanomedicine [J]. South African Journal of Botany, 2023, 159: 658–677.
- [59] Bagdas D, Gul Z, Meade J A, *et al.* Pharmacologic overview of chlorogenic acid and its metabolites in chronic pain and inflammation [J]. Current Neuropharmacology, 2020, 18(3): 216–228.
- [60] Jiang X F, Wang J Y, Ou Y J, *et al.* Effect of chlorogenic acid on the structural properties and digestibility of lotus seed starch during microwave gelatinization [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 191: 474–482.
- [61] Li D, Yao X L, Yang Y L, *et al.* *In vitro* digestibility and fermentability profiles of wheat starch modified by chlorogenic acid [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 215: 92–101.
- [62] 陈瑾, 何大伟, 陈玲. 湿热处理环境下咖啡酸/绿原酸对板栗淀粉消化和回生性能的影响[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2022, 50(8): 41–48.
- [63] 李驰, 姚佳, 韩乔, 等. 马铃薯淀粉消化特性及多酚对其影响研究进展[J]. 食品科技, 2022, 47(12): 221–227.
- [64] Karim Z, Holmes M, Orfila C. Inhibition of pancreatic alpha amylase digestion of potato starch by chlorogenic acid *in vitro* [J]. Proceedings of the Nutrition Society, 2015, 74(OCE1): E64.
- [65] Zheng Y X, Yang W H, Sun W X, *et al.* Inhibition of porcine pancreatic α -amylase activity by chlorogenic acid [J]. Journal of Functional Foods, 2020, 64: 103587.
- [66] Aleixandre A, Gil J V, Sineiro J, *et al.* Understanding phenolic acids inhibition of α -amylase and α -glucosidase and influence of reaction conditions [J]. Food Chemistry, 2022, 372: 131231.