

淀粉-多酚复合物制备及其消化特性研究进展

柳丝菁, 孙红男*, 马梦梅*, 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: 天然多酚是广泛存在于蔬菜、水果、谷物、茶等植物中的次生代谢产物, 具有降血糖、抗炎、抗氧化、抗癌和抗菌等生理活性。在一定条件下, 淀粉可以与多酚发生相互作用, 形成两种类型的复合物。一种是非包合物, 即酚类化合物的羟基和羰基与淀粉相互作用形成分子间聚集体; 另一种是 V 型包合物, 即酚类化合物部分包封在淀粉的内部疏水螺旋内。已有研究表明, 上述两种复合物对降低淀粉消化特性有一定影响, 并且与加工方式及条件、淀粉和多酚种类有关。因此, 本文在总结上述因素对淀粉-多酚复合物理化及消化特性影响的基础上, 指出目前淀粉-多酚复合物研究中存在的不足之处, 提出进一步的研究重点, 以期为淀粉-多酚复合物在不同食品中的应用提供参考。

关键词: 淀粉; 多酚; 复合物; 理化特性; 消化特性

Research progress in the preparation and digestion characteristics of starch-polyphenol complexes

LIU Si-Jing, SUN Hong-Nan*, MA Meng-Mei*, MU Tai-Hua

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

ABSTRACT: Natural polyphenols are secondary metabolites widely presented in vegetables, fruits, grains, tea, and other plants, with hypoglycemic, anti-inflammatory, antioxidant, anticancer, and antibacterial activities. Under certain conditions, starch can interact with polyphenols to form 2 types of complexes. One is the non-inclusion complex, in which the hydroxyl and carbonyl groups of phenolic compounds interact with starch to form intermolecular aggregates; the other is a starch-polyphenol V-type inclusion complex formed by phenolic compounds partially encapsulated within the internal hydrophobic helix of starch. Previous studies have shown that the above 2 types of complexes have a certain impact on reducing starch digestion characteristics, and are related to processing methods and conditions, as well as the types of starches and polyphenols. Therefore, on the basis of summarizing the effects of the above factors on the physicochemical and digestive properties of starch-polyphenol complexes, this paper pointed out the deficiencies in the current research on starch-polyphenol complexes and proposes further research focuses, with a view to providing references for the application of starch-polyphenol complexes in different foods.

基金项目: 国家甘薯产业技术体系项目(CARS-10)、亚洲合作资金项目

Fund: Supported by the National Sweetpotato Industry Technology System Project (CARS-10), and the Asia Cooperation Funding Program

***通信作者:** 孙红男, 博士, 研究员, 主要研究方向为食品化学与营养。E-mail: sunhongnan@caas.cn

马梦梅, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为食品化学与营养。E-mail: meimei881020@163.com

***Corresponding author:** SUN Hong-Nan, Ph.D, Professor, Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, No.2, Yuanmingyuan West Road, Haidian District, Beijing 100193, China. E-mail: sunhongnan@caas.cn

MA Meng-Mei, Ph.D, Assistant Professor, Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, No.2, Yuanmingyuan West Road, Haidian District, Beijing 100193, China. E-mail: meimei881020@163.com

KEY WORDS: starch; polyphenols; complexes; physicochemical properties; digestive properties

0 引言

淀粉由直链淀粉和支链淀粉组成(表 1), 几乎是所有主食的主要成分, 是大多数人饮食中的主要能量来源^[1]。但是, 淀粉基食物(如馒头、面条、米饭等)的制备需要经高温处理, 在此过程中淀粉发生糊化, 经人体食入后, 糊化淀粉在体内容易被淀粉酶分解转化形成葡萄糖, 如果不加干预, 则会引起血糖快速升高, 对糖尿病、肥胖以及心血管疾病等患者有不利影响^[2]。

多酚(表 1)作为植物的次生代谢产物, 可以通过抑制淀粉酶的活性来延缓淀粉消化^[3-5]。然而原花青素和缩合单宁等多酚在胃肠消化道中不稳定^[6], 易与消化道中的蛋白质、可溶性多糖等结合, 降低其对淀粉酶的抑制能力^[7]。近年来有多项研究表明, 淀粉与多酚通过相互作用可以形成复合物, 可提高多酚的生物利用度, 同时对淀粉消化率也有不同程度的影响^[8-11]。如图 1 所示, 淀粉中的直链淀粉可以通过 CH- π 键、氢键等与多酚形成络合物, 称为非包合物; 也可以通过疏水相互作用与多酚形成单左旋螺旋形式的复合物, 称为 V 型包合物^[12]。上述两种形式的复合物在消化过程中, 淀粉发生降解, 多酚会释放出来, 通过抑制淀粉酶的活性来降低淀粉消化率^[13]。此外, 与非包合物相比, V 型包合物中淀粉与多酚的相互作用更加紧密, 其结构与 5 型抗性淀粉(淀粉-脂质 V 型包合物)类似, 具有高度有序性, 可有效抑制淀粉的分散, 且直链淀粉的单螺旋结构无法为 α -淀粉酶提供活性位点^[14-15], 因此, 更不易被淀粉酶消化^[16]。

述影响因素的基础上, 指出目前淀粉-多酚复合物研究中仍存在的问题, 并提出进一步的研究重点, 旨在为淀粉-多酚复合物在功能食品中的应用奠定理论基础。

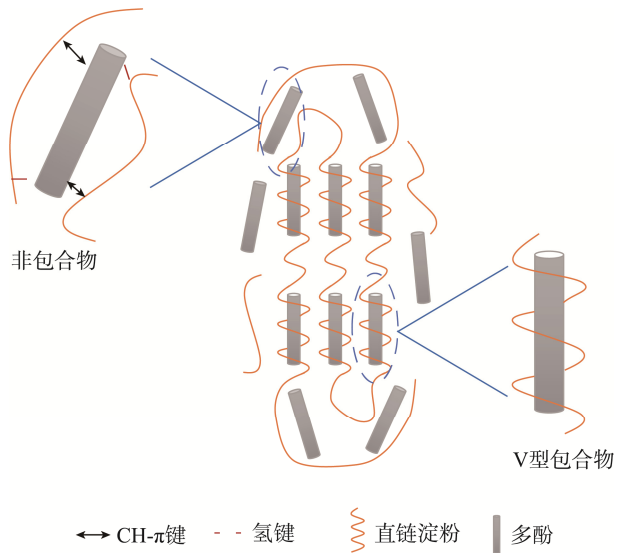


图 1 淀粉-多酚非包合物和包合物结构示意图
Fig.1 Schematic structure of starch-polyphenol non-inclusion and inclusion complexes

1 加工方式对淀粉-多酚复合物制备及其消化特性的影响

目前, 淀粉-多酚复合物的加工方法可分为水热处理法、物理法、化学法及多种方法相结合, 且不同的加工方法对淀粉-多酚复合物的理化及消化特性产生不同的影响^[17-19]。

1.1 水热处理法

水热处理法是将淀粉与多酚在一定量的水中混合, 进而在一定温度条件下进行糊化来制备淀粉-多酚复合物的方法。目前, 大多采用预糊化、湿热处理以及糊化(退火处理)对淀粉-多酚复合物进行制备, 不同水热处理法对淀粉-多酚复合物的影响见表 2。

1.1.1 预糊化处理

预糊化处理是一种安全且省时的方法, 是将多酚和淀粉在溶剂中混合均匀后, 在一定温度下加热一定时间后冷却、离心, 再用蒸馏水或乙醇溶液洗涤, 收集沉淀物并进行干燥^[25-26]。淀粉与水共热时, 淀粉颗粒发生溶胀后破裂, 原有的颗粒形态被改变, 有利于多酚与淀粉的结合。在预糊化处理中, 合适的糊化温度可以破坏淀粉颗粒, 增加淀粉与多酚的接触面积, 提高复合率, 并降低淀粉的消化率(表 2)。然而, 糊化温度过高, 会使淀粉黏度增加、流

表 1 常见的淀粉和多酚种类
Table 1 Common types of starch and polyphenols

淀粉种类	多酚种类
小麦淀粉	阿魏酸
玉米淀粉	咖啡酸
大米淀粉	绿原酸
马铃薯淀粉	没食子酸
甘薯淀粉	槲皮素
荞麦淀粉	原花青素
板栗淀粉	儿茶素

已有学者通过研究淀粉-多酚复合物的结构和理化特性, 明确其在降低淀粉消化率、调节人体血糖及制备低血糖生成指数功能食品中的应用前景。然而, 淀粉-多酚复合物的加工方式及条件、淀粉和多酚种类等对其复合率、结晶结构以及消化特性有显著性影响。因此, 本文在综述上

动性减小,不利于淀粉与多酚的接触,从而使复合率降低、消化率升高^[20]。除糊化过程中的加热温度外,淀粉的冷却过程也会影响复合物的形成及其消化特性。例如,更快的冷却速率和较高的剪切速度可以降低淀粉和多酚的聚集,使二者分布更加均匀,促进多酚与淀粉的相互作用,增加复合率和复合物中的 V 型结晶结构,进而提高淀粉的抗消化特性^[21]。

1.1.2 湿热处理

湿热处理通常先将淀粉和多酚混合物的水分调节至一定含量,再对其进行高温处理,最终冷冻干燥并过筛得到复合物^[22]。湿热处理通常会改变淀粉-多酚复合物的结晶结构。例如,天然板栗淀粉呈 C 型结晶结构,经湿热处理制备淀粉-多酚复合物后会将复合物结晶结构向 C+V 型改变^[22-23]。这是由于淀粉结构经过湿热处理遭到破坏后,活跃的水分子更易侵入淀粉颗粒内部,与淀粉分子之间形成氢键,使淀粉形貌发生改变,如表面开裂、颗粒团聚等。同时,湿热处理会造成淀粉结晶结构破坏、双螺旋结构解聚,晶体结构内部淀粉链之间的相互作用增强,形成了新的无定形结构、双螺旋结构以及 V-型单螺旋结构,从而导致淀粉抵抗酶水解的能力提高^[27]。

1.1.3 糊化处理(退火处理)

糊化处理,又称退火处理,常用于单独对淀粉进行改性,是指淀粉在大于 40%的水分含量、处理温度在玻璃化转变温度和起始糊化温度之间的条件下的热处理过程^[28]。近年来,除了探究糊化处理对淀粉理化性质的影响外,还有学者研究了该处理对淀粉和多酚形成复合物的影响。结果表明,糊化处理的 pH、温度和时间均会影响淀粉-多酚复合物的形成。多酚对环境 pH 较为敏感, pH 的提高会促使多酚氧化,生成含氧自由基,降低多酚与淀粉的结合能力^[24]。同时,淀粉吸附多酚的过程为放热反应^[29],因此,较低的温度有助于二者之间发生相互作用。此外,淀粉对多酚的吸附量随处理时间的增加呈逐渐上升的趋势,最终达到吸附平衡状态^[24]。

综上所述,水热处理法制备淀粉-多酚复合物的过程中,制备条件(如处理温度、糊化时间、pH 等)通常是影响淀粉-多酚复合物复合率和消化特性的关键因素,通常复合物的复合率越高,其消化率越低。但目前水热处理制备淀粉-多酚复合物的时间相对较长,下一步可以考虑结合超声波、微波、高静水压等物理方法辅助水热处理,提高淀粉-多酚复合物的制备效率。

表 2 水热处理法对淀粉-多酚复合物的影响
Table 2 Effects of hydrothermal treatment method on starch-polyphenol complexes

加工方式	淀粉种类	多酚种类	制备方法	结论	参考文献
预糊化处理	荞麦淀粉	槲皮素	最佳制备工艺: 糊化温度 70℃; 料液比 1:10 (g:mL); 槲皮素浓度 10%; 糊化时间 1.5 h	复合物的复合率随糊化温度的升高(50~90℃)呈先增加后降低的趋势, 随糊化时间的延长呈增加的趋势。在最佳制备工艺条件下, 复合物的复合率最高, 为 37.3%; 与预糊化淀粉(消化率 92.6%)相比, 复合物在体外消化过程中具有更低的消化率(消化率 79.2%)。	[20]
	大米淀粉	咖啡酸	糊化温度 95℃; 糊化时间 5 min; 冷却速率(4、8、12、16℃/min); 冷却期间剪切速度(10、100、200、300 r/min)	冷却速率由 4℃/min 增至 16℃/min, 复合物中咖啡酸含量、结晶度和抗性淀粉(resistant starch, RS)含量分别增加了 6.37 mg/g 复合物、2.56%和 7.67%; 随着冷却期间剪切速度的增加, 复合物中咖啡酸含量、结晶度和 RS 含量分别增加了 12.74 mg/g 复合物、4.13%和 12.12%。	[21]
湿热处理	板栗淀粉	绿原酸	水分含量 20%; 处理温度 105℃; 处理时间 2 h	板栗淀粉-绿原酸复合物的结晶结构呈现 C+V 型结晶特征; 与湿热处理但未添加绿原酸的板栗淀粉相比, 复合物的快速消化淀粉(rapid digestible starch, RDS)含量由 25.90%降至 23.20%、RS 含量由 62.22%增至 64.58%, 抗消化性能增强。	[22]
	板栗淀粉	表儿茶素	水分含量 20%; 处理温度 105℃; 处理时间 2 h	板栗淀粉-表儿茶素复合物的结晶结构为 C+V 型结晶, 与湿热处理但未添加表儿茶素的板栗淀粉相比, 复合物的 RDS 含量由 74.38%降至 62.50%、RS 含量由 9.09%增至 17.99%。	[23]
糊化处理	马铃薯淀粉	茶多酚	最佳吸附条件: pH 2.0; 处理温度 25℃; 处理时间 80 min	随着 pH 和处理温度的升高, 淀粉对茶多酚的吸附量降低; 随着处理时间的增加, 改性淀粉对茶多酚的吸附量呈先上升后降低的趋势。改性淀粉茶多酚吸附量的影响顺序为: 温度>pH>时间, 最佳吸附条件下, 改性淀粉对茶多酚吸附量最高, 为 301.1 mg/g。	[24]

1.2 物理法

物理法制备淀粉-多酚复合物, 通常是将淀粉和多酚悬浮液混合后置于物理场, 如高静水压、超声、微波、高压均质、球磨和等离子体等, 进行处理, 再进行洗涤、过滤、冷冻干燥和研磨, 最终得到复合物。不同物理法对淀粉-多酚复合物的影响见表 3。

1.2.1 高静水压

高静水压(high hydrostatic pressure, HHP)是一种仅依赖压力的非热处理方法, 可以在室温下破坏淀粉的结晶区和无定形区, 水分子进入淀粉颗粒, 淀粉发生糊化, 双螺旋结构打开, 促进淀粉链和多酚之间形成氢键, 从而得到淀粉-多酚复合物^[37]。并且, 淀粉糊化程度与处理压力有关, 通常随着处理压力的增加, 淀粉糊化程度提高, 使其更易与多酚结合形成复合物, 从而降低淀粉的消化速率^[38]。然而, 这种处理方法较为温和, 因此, HHP 制备的淀粉-多酚复合物以非包合物为主^[30]。

1.2.2 超 声

超声会引起温度升高, 从而使直链淀粉从淀粉颗粒中移出, 因此多酚有机会与浸出的直链淀粉链发生交联, 通过颗粒表面的氢键形成一些松散连接的复合物。随着超声功率的增加, 复合物被破坏, 多酚被推入直链淀粉螺旋腔中形成包合物^[31]。

与传统的单频超声相比, 多频功率超声(multifrequency power ultrasound, MFPU)的声场分布更均匀, 产生更多共振^[39]。在 MFPU 下制备淀粉-多酚复合物的过程中, 不同超声频率以及工作模式均会对复合物的复合率产生一定影响。低频超声波比高频具有更大的波长和更强的穿透能力, 可以更好地破坏淀粉的分子结构, 使其以更高的速率与多酚结合, 因此, 低频超声波制备复合物的复合率更高。此外, 双频超声在同步工作模式下会引发共振场, 出现两个波的叠加和减少, 从而导致能量突变, 降低超声设备发射的能量, 不利于淀粉和多酚的结合, 而在顺序工作模式下则不会出现类似的情况^[32]。

1.2.3 微 波

微波是一种非电离辐射能量, 可以快速均匀地加热淀粉颗粒, 使淀粉的结构和功能特性发生改变, 加速淀粉分子链内氢键的破坏, 导致淀粉分子结构的定向重排, 产生更多可与多酚结合的自由淀粉链, 并且降低多酚与淀粉链结合所需的熵和活化能, 因此, 可促进淀粉-多酚复合物的形成^[40-41]。然而, 当微波功率过高或微波时间较长时, 淀粉表面结构变得粗糙多孔, 这为淀粉酶的扩散提供了更多的附着位点和传输通道, 加速淀粉酶和淀粉之间的接触, 促进淀粉消化^[33]。因此, 采用微波制备淀粉-多酚复合物时, 应针对淀粉和多酚的种类, 综合考虑其复合率和消化特性, 选择适宜的微波条件。

1.2.4 高压均质

高压均质利用高压剪切、空化和对流共同作用使淀粉颗粒粒径减小, 支链淀粉结构破坏, 短程有序分子结构减少, 直链淀粉浸出, 为多酚和直链淀粉形成复合物提供了机会^[42-43]。在初始反应过程中, 多酚通过 2~3 个弱 CH- π 键将芳香残基堆积在淀粉吡喃糖环上与淀粉结合; 随着压力的增加, CH- π 键被破坏, 氢键作为主要的键合力; 压力进一步增加, 多酚被推入直链淀粉的螺旋腔内, 促进了淀粉-多酚复合物中 V 型结晶结构的形成^[44]。此时, 复合物的微观结构变得更加致密, 这可以阻止淀粉酶与底物的接触, 从而降低复合物的消化率^[34]。

1.2.5 球 磨

球磨法是利用碰撞、摩擦、剪切等作用力改变淀粉的相对结晶度、颗粒形态、粒径分布、分子质量、直链淀粉/支链淀粉比等结构特性, 从而改变其溶解性、膨胀势等, 这可使多酚更容易直接进入到淀粉的螺旋空腔内部^[45]。球磨处理时间和转速均是影响淀粉-多酚复合物形成的关键因素, 合适的球磨处理时间和转速可使直链淀粉单螺旋空腔大量暴露, 增加复合物的复合率, 然而当处理时间过长、转速过高时, 会对淀粉和已形成复合物的结构造成破坏, 导致淀粉与多酚的结合位点变少, 复合率降低, 复合物的消化速度增加^[35]。

1.2.6 等离子体

等离子体是一种新的、环境友好的物理处理方法, 其蚀刻作用可以增加淀粉颗粒的有效表面积和亲水性^[46], 此外, 等离子体中的活性粒子可以诱导支链淀粉侧链交联, 致使淀粉内部双螺旋含量增加^[47], 有利于淀粉和多酚的结合^[36]。与其他物理法相比, 等离子体处理不会对淀粉的整体结构进行破坏, 而是通过使淀粉产生孔洞、裂纹等, 增加淀粉与多酚的接触机会, 促进淀粉-多酚包合物的形成, 从而使其消化特性进一步降低^[48]。

由上可知, 物理法制备复合物的基本原理是促进淀粉颗粒破碎, 使直链淀粉浸出, 从而增加直链淀粉与多酚的相互作用, 形成复合物。然而, 在使用不同物理法制备淀粉-多酚复合物时, 物理场强度过高会导致已形成的淀粉-多酚复合物发生破裂和降解, 导致复合率降低。因此, 针对不同种类的淀粉和多酚, 应优化适宜的物理场强度(如压力、功率等), 从而提高淀粉-多酚复合物的复合率。

1.3 化学法

1.3.1 共沉淀法

共沉淀法是将淀粉溶解在二甲基亚砜(dimethyl sulfoxide, DMSO)、KOH/NaOH 溶液、醇溶液或水等溶剂中, 进而加入多酚, 通过加水、酸化或冷却沉淀形成淀粉-多酚复合物。根据使用溶剂种类的不同, 可进一步分为二

表 3 物理法对淀粉-多酚复合物的影响
Table 3 Effects of physical methods on starch-polyphenol complexes

加工方式	淀粉种类	多酚种类	制备方法	结论	参考文献
高静水压	莲子淀粉	绿茶多酚	在 200、400、600 MPa 下分别处理 30 min	压力增加, 淀粉颗粒溶胀和糊化程度增加, 热稳定性降低, 淀粉与多酚形成非包合物; 复合物的消化速率与高静水压压力呈负相关。	[30]
	苦荞淀粉	类黄酮	处理功率 450 W; 处理时间: 每处理 5 s, 间隔 3 s, 循环 30 min	经超声处理后的复合物颗粒表面粗糙, 有 V 型结晶结构的形成, 促进了 RS 含量的增加, 消化率降低。	[31]
	马铃薯淀粉	玫瑰多酚	处理功率 0~500 W; 处理时间 0~25 min; 处理频率 40、60 kHz	与 60 kHz 的单频超声下制备的复合物相比, 40 kHz 下制备复合物的复合率更高; 与同步工作模式下的双频超声波相比, 顺序工作模式下制备复合物的复合率更高; 不同超声条件制备复合物中 RS 含量均显著增加。	[32]
微波	莲子淀粉	绿原酸	处理功率 200、250、300 W; 处理频率 2450 MHz; 处理时间 8 min	形成了淀粉-多酚 V 型包合物, 随着处理功率的增加, 淀粉-多酚复合物中 RDS 含量增加, RS 含量降低, 且在相同的微波功率下, 复合物(200 W: 58.5%; 250 W: 49.5%; 300 W: 29.6%)中的 RS 含量均高于莲子淀粉(200 W: 54.3%; 250 W: 45.7%; 300 W: 26.3%)。	[33]
高压均质	莲子淀粉	绿茶多酚	处理压力 60~180 MPa; 处理次数 5 次	150 MPa 以下制备复合物呈 C 型结晶结构, 粒径大, 而 150 MPa 制备的复合物有 V 型结晶结构出现, 粒径减小; 且随着压力的增加, 复合物消化率降低。	[34]
球磨	马铃薯淀粉	石榴皮多酚	球磨机负荷 15 g; 处理转速 100~700 r/min; 处理时间 1~25 h	球磨处理 10 h、转速 500 r/min 时复合物的复合率最高, 为 73.18%; 与未球磨的马铃薯淀粉相比, 球磨时间越长复合物消化率越高, 体外消化 5 h 后, 球磨 5 h 的复合物消化率为 32%, 而球磨 25 h 的复合物消化率为 54%。	[35]
等离子体	苦荞淀粉	槲皮素	等离子体处理时间 30 s; 放电距离 2 mm	复合物的结晶度和 RS 含量均增加, 分别为 51.94%和 44.21%。	[36]

甲基亚砷法、碱法、醇法和高温水法^[13,49]。影响共沉淀方法制备淀粉-多酚复合物复合率的因素主要有 pH 和反应时间等。碱性条件下直链淀粉的单螺旋和空腔内的疏水环境被破坏, 促进了可溶性淀粉的溶解, 增强了酚类物质与淀粉的相互作用。同时, 与预糊化改性方法相比, 共沉淀条件下淀粉分子充分延伸, 更容易形成 V 型包合物, 从而使复合物消化率降低^[26]。随着反应时间的增加, 淀粉与多酚充分接触, 多酚可以通过疏水作用与淀粉紧密结合, 直至平衡状态, 然而反应时间过长, 淀粉的黏度增加, 流动性减小, 不利于淀粉和多酚的接触, 因此, 部分多酚可能会从淀粉疏水腔中释放出来, 使淀粉-多酚复合物的复合率略微降低^[50]。

1.3.2 酸 法

酸法是将淀粉和多酚在酸性(如 pH 2)、低温(5℃)条件下搅拌过夜, 然后离心、冻干, 获得淀粉-多酚复合物的方法。酸性条件有利于支链淀粉侧链的去除, 使直链淀粉含量增加, 促进淀粉-多酚复合物的形成, 降低淀粉消化率, 从而对预估血糖生成指数(expected glycemic index, eGI)产生影响^[15]。

化学法对淀粉-多酚复合物的影响见表 4。其中共沉淀法是制备淀粉-多酚复合物最典型的方法, 然而在碱性或高温条件下可能会导致某些酚类化合物降解, 并且过长的反应时间和过高的温度均会破坏直链淀粉螺旋结构, 从而降低淀粉-多酚复合物的复合率。此外, 化学法还可能会在复合物中产生部分化学物质的残留。因此, 应进一步探究化学法制备淀粉-多酚复合物的最优条件, 提高淀粉-多酚复合物的复合率, 降低复合物中的化学残留物。

1.4 多种加工方式协同

与使用单一方法制备淀粉-多酚复合物相比, 多种加工方式协同可进一步促进淀粉和多酚的结合, 并降低复合物的消化率。例如, SUDLAPA 等^[51]发现与仅使用预糊化方法制备的大米淀粉-苯酚复合物(复合率: 5.14%; RS: 6.25%; RDS: 90.27%)相比, 湿热处理协同预糊化制备复合物的复合率更高(10.17%), RS 含量(15.76%)增加, RDS 含量(77.19%)降低。然而, 过度的加工不利于淀粉与多酚的相互作用^[41]。ZHAO 等^[52]采用超声协同微波制备莲子淀粉-绿茶多酚复合物, 并测定其结晶结构和消化率, 结果表明,

表 4 化学法对淀粉-多酚复合物的影响
Table 4 Effects of chemical methods on starch-polyphenol complexes

加工方式	淀粉种类	多酚种类	制备方法	结论	参考文献
共沉淀法	苦荞淀粉	芦丁	处理温度 90℃; 处理时间 30 min; 搅拌速率 150 r/min	与未添加 Ca(OH) ₂ 制备的复合物(6.61 J/g)相比, 添加 Ca(OH) ₂ 制备的苦荞淀粉-芦丁复合物具有更低的糊化焓值(5.24 J/g)和体外淀粉消化率。	[26]
	马铃薯直链淀粉	茶多酚	最佳制备工艺: 乙醇体积分数 40%; 反应时间 2 h; 反应温度 40℃	复合物的复合率随乙醇体积分数、反应时间和反应温度的增加呈先上升后降低的趋势, 在最佳制备工艺下复合率最高, 为 38.14%。	[50]
酸法	马铃薯淀粉	阿魏酸	pH 2.0; 处理温度 5℃; 处理时间过夜	淀粉和多酚主要通过淀粉吡喃糖环和酚类芳香族残基之间的潜在 CH- π 键与淀粉分子沿 α -(1 $\rightarrow$ 4)糖苷链相互作用, 而非化学修饰, 且复合物的 cGI 值(94.0)低于马铃薯淀粉(107.8)。	[43]

复合物中 V 型结晶结构的比例随超声功率的增加而增加, 当超声功率为 400 W 时, 复合物中 V 型结晶结构含量最高, 为 21.92%; 然而, 复合物的消化率随超声功率的增加呈先降低后升高的趋势, 这可能是因为过高功率的超声处理可能会破坏淀粉颗粒的完整性, 并增加淀粉对消化酶的敏感性。

综上所述, 制备淀粉-多酚复合物的机制大致相同, 即破坏淀粉颗粒结构, 增加多酚与淀粉的结合位点, 促进淀粉-多酚复合物的形成, 但破坏淀粉颗粒结构的途径各

不相同, 例如: 水热处理通过热能, 物理法通过压力、超声、微波等机械能和热能, 化学法则通过化学物质辅助热能能使淀粉颗粒破碎。同时, 合适的制备条件是非常重要的, 加热时间过长、压力过大、pH 过高等均会对淀粉-多酚复合物产生不利影响。除此之外, 不同途径制得的淀粉-多酚复合物中包含物/非包含物的比例也有所不同(图 2)。因此, 应继续探究不同制备方法对淀粉-多酚复合物理化特性的影响, 进一步优化淀粉-多酚复合物的制备工艺, 为未来淀粉-多酚复合物在功能食品中的应用奠定基础。

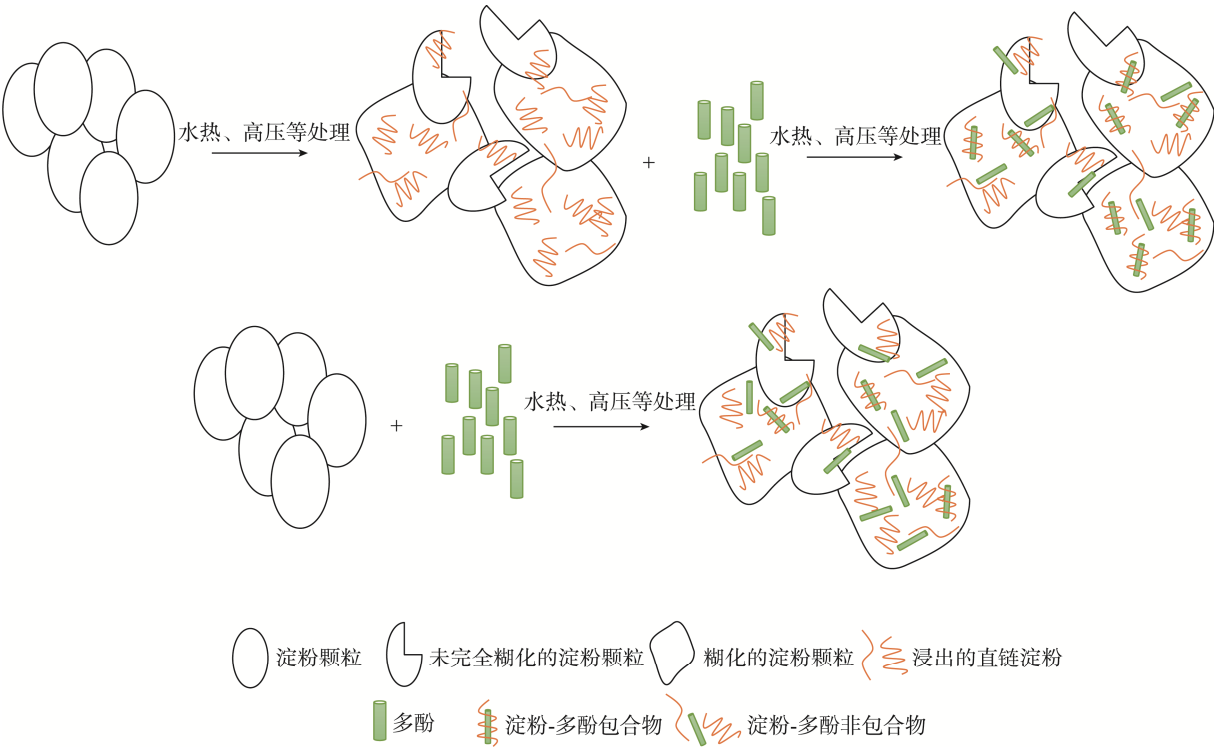


图 2 不同制备方法对淀粉-多酚复合物的影响
Fig.2 Effects of different preparation methods on starch-polyphenol complexes

2 淀粉和多酚种类对淀粉-多酚复合物制备及其消化特性的影响

2.1 淀粉种类对淀粉-多酚复合物制备及其消化特性的影响

除了外在的加工条件对淀粉-多酚复合物产生影响外,形成复合物的淀粉种类也是重要的影响因素之一。不同品种的淀粉、同种淀粉中直/支链淀粉的含量以及直链淀粉的链长都会对淀粉-多酚复合物的理化特性产生影响。CHOU 等^[53]发现在添加等量苹果多酚条件下,天然玉米/小麦淀粉与苹果多酚复合物的储能模量降低,而天然大米淀粉-苹果多酚复合物的储能模量增大;此外,天然玉米/大米淀粉-苹果多酚复合物的微观结构呈紧密的网状结构,而天然小麦淀粉-苹果多酚复合物的结构较为松散。

淀粉中直/支链淀粉的含量以及慢速消化淀粉(slow digestible starch, SDS)、RDS 和 RS 的比例不同,导致其形成淀粉-多酚复合物的消化特性也有所不同。YU 等^[54]探究了普通玉米淀粉(直链淀粉含量为 32.05%)、高直链玉米淀粉(直链淀粉含量为 62.14%)、糯玉米淀粉(直链淀粉含量为 0.01%)对淀粉-咖啡酸复合物消化特性的影响,结果显示,与原淀粉相比,糯玉米淀粉与咖啡酸形成的复合物消化率增加,而高直链玉米淀粉和普通玉米淀粉与咖啡酸形成复合物的消化率降低。这体现出多酚与直链淀粉的相互作用是影响淀粉消化的主要原因,直链淀粉含量越高,复合物的消化率越低。

此外,直链淀粉的螺旋结构和客体分子的链长是直链淀粉复合物形成、结构和性质的重要决定因素^[39]。直链淀粉包合物主要具有 V6、V7 和 V8 3 种典型的螺旋结构,其中 6、7 和 8 表示直链淀粉单螺旋每节的葡萄糖单元数,其螺旋尺寸与客体分子的大小密切相关^[55]。FAN 等^[56]表征了烷基间苯二酚(alkylresorcinols, ARs)的烷基链长度和 V 型直链淀粉结构对 V 型淀粉-ARs 包合物稳定性的影响。研究表明,V 型淀粉-ARs 包合物的结晶度、热稳定性和耐消化性随着 ARs 烷基链长度的增加而增加。并且与 V7 直链淀粉 ARs 包合物和 V8 直链淀粉 ARs 包合物相比,V6 直链淀粉 ARs 包合物表现出最强的热稳定性、最高的结晶度和最低的消化率。

目前的研究表明,淀粉-多酚复合物的形成与淀粉中直链淀粉的含量及其烷基链长密切相关,但是淀粉中的内源成分,如脂质、蛋白、膳食纤维等的含量对淀粉-多酚复合物的影响的相关研究未见报道。因此,可进一步探究淀粉内源成分对淀粉-多酚复合物的影响规律,深入研究淀粉-多酚复合物的形成机制。

2.2 多酚种类对淀粉-多酚复合物制备及其消化特性的影响

多酚种类可影响淀粉-多酚复合物的结构和理化性

质。酚类物质的体积和疏水性以及直链淀粉螺旋中空腔大小可以影响 V 型包合物的形成^[12],进一步影响复合物的消化率。邓楠等^[57]以金雀异黄酮、槲皮素、柚皮苷、没食子酸、阿魏酸、咖啡酸与大米淀粉为原料制备淀粉-多酚复合物,结果表明,在 6 种多酚中,咖啡酸最易与淀粉复合形成 V 型包合物,且与其他多酚形成的复合物相比,大米淀粉-咖啡酸复合物中 RS 的增加量最大,为 6.69%。这是由于咖啡酸分子量较小,拥有大量疏水基团的小配体分子,可以很容易地穿透淀粉网络,促进 V 型结构的产生^[58]。

多酚中酚羟基数目多,增加了其与淀粉分子之间的结合位点,可促进淀粉凝胶网络结构的形成,然而酚羟基数目过多,会对淀粉-多酚复合物的结合产生不利影响。黄越峰^[59]发现含 3 个酚羟基的没食子酸与苦荞淀粉形成的复合物热稳定性差,且复合指数(13.35 mg/g 淀粉)最低,而低于 3 个酚羟基的多酚与淀粉的复合指数均大于 30 mg/g 淀粉;此外,酚羟基数目较多(2~3 个)的多酚可能会与淀粉通过氢键发生更强的相互作用,仅含 1 个酚羟基的多酚与淀粉形成复合物的碘结合能力和对淀粉老化回生的抑制作用更强。

不同多酚浓度是影响淀粉-多酚复合物的理化性质和体外消化率的重要因素之一。LI 等^[60]发现随着槲皮素浓度的增加(2.5%、5.0%、7.5%和 10.0%),苦荞淀粉的溶解度、溶胀性和吸水性显著降低,吸油性、颗粒聚集度和结晶度增加,且复合物中 RDS 含量降低,RS 含量升高,当槲皮素浓度提高至 10%时,复合物中 RDS 含量最低(69.35%),RS 含量最高(21.27%)。李姝琪^[61]以马铃薯淀粉和不同浓度欧李原花青素(1%、2%、3%、4%、4.5%、5%、5.5%)为原料制备淀粉-多酚复合物,结果显示,与马铃薯淀粉相比,马铃薯-原花青素复合物的微观结构变得更加致密,原有结晶区域消失,形成了新的疏水结构区,抑制淀粉酶的水解;随着原花青素浓度的增加,RDS 含量从 73.24%降低到 43.37%,RS 含量从 13.32%增加到 24.16%,这可能是因为加入的原花青素越多,羟基越多、原花青素的多羟基结构和苯环等构成的疏水空间尺寸越大,其相互作用对消化性质的抑制效果越明显。

不同多酚由于其结构的差异,对淀粉-多酚复合物的影响不同,但均会降低淀粉结晶度。多酚浓度及其分子量对淀粉消化率的影响显著,随着多酚浓度的增加,复合物中 RDS 含量降低,RS 含量增加,从而降低淀粉的消化率,且分子量小的多酚更易与淀粉形成 V 型包合物,进而对淀粉消化率的抑制作用更强。因此,应根据不同多酚对淀粉-多酚复合物理化性质的影响,制备适用于不同功能性食品的淀粉-多酚复合物。

3 存在的问题

综上所述,尽管已有对淀粉-多酚复合物制备方法、影响因素的研究,但是仍存在以下几个方面的问题:(1)

影响淀粉-多酚复合物复合率、理化特性的因素较多, 目前对淀粉-多酚复合物影响规律及机制的研究仍不全面, 此外, 将淀粉-多酚复合物应用于食品中, 且对食品结构、理化及消化等特性影响的研究较少, 更未见添加淀粉-多酚复合物制备低血糖生成指数食品的研究; (2) 已有研究表明, 淀粉与脂质、蛋白质形成的复合物可降低淀粉消化率, 但淀粉、脂质、蛋白和多酚共同形成复合物及其对淀粉消化特性的研究较少; 且鲜有对淀粉内源脂质、蛋白质、膳食纤维对淀粉-多酚复合物影响的研究; (3) 目前制备淀粉-多酚复合物仍停留在实验室阶段, 未见中试及产业化相关产品。

4 展 望

淀粉-多酚复合物能增加抗性淀粉含量、降低淀粉消化率, 对制备适合减肥人群和糖尿病人食用的功能性食品有着重要意义。在今后的研究中, 可从以下几个方面着手解决上述问题, 推动新型功能食品的研发: (1) 探究不同因素对淀粉-多酚复合物形成及理化特性的影响机制, 并针对不同的淀粉基食品选择合适的淀粉-多酚复合物作为原料, 明确其对食品结构、理化及消化等特性的影响规律, 研发新型低血糖生成指数食品; (2) 可进一步探究淀粉与外源脂质、蛋白质和多酚进行多元复合的条件及所得复合物的结构、消化特性等, 以及淀粉-多酚复合物与其内源脂质、蛋白质、膳食纤维等的相互作用, 为研发适合糖尿病人食用的功能性食品奠定理论基础; (3) 继续完善淀粉-多酚复合物的制备方法, 提高淀粉-多酚复合物的复合率, 研究出绿色环保高效的适用于工业生产的淀粉-多酚复合物制备工艺。

参考文献

- [1] 燕子豪, 汪丽萍, 谭斌, 等. 谷物食品血糖生成指数研究进展[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(3): 147–156.
YAN ZH, WANG LP, TAN B, *et al.* Advances in glycemic index of cereal foods [J]. *Sci Technol Cere Oils Foods*, 2021, 29(3): 147–156.
- [2] BAI Y, LI X, JI H, *et al.* A review of the design and architecture of starch-based dietary foods [J]. *Engineering*, 2021, 7(5): 663–673.
- [3] HE T, WANG K, ZHAO L, *et al.* Interaction with longan seed polyphenols affects the structure and digestion properties of maize starch [J]. *Carbohydr Polym*, 2021, 256: 117537.
- [4] LI D, YANG Y, YANG X, *et al.* Modulation of gelatinized wheat starch digestion and fermentation profiles by young apple polyphenols *in vitro* [J]. *Food Funct*, 2021, 12(5): 1983–1995.
- [5] ZHANG Y, BAI B, YAN Y, *et al.* Bound polyphenols from red quinoa prevailed over free polyphenols in reducing postprandial blood glucose rises by inhibiting α -glucosidase activity and starch digestion [J]. *Nutrients*, 2022, 14(4): 728.
- [6] HU B, XIE M, ZHANG C, *et al.* Genipin-structured peptide-polysaccharide nanoparticles with significantly improved resistance to harsh gastrointestinal environments and their potential for oral delivery of polyphenols [J]. *J Agric Food Chem*, 2014, 62(51): 12443–12452.
- [7] SUN L, GIDLEY MJ, WARREN FJ. Tea polyphenols enhance binding of porcine pancreatic α -amylase with starch granules but reduce catalytic activity [J]. *Food Chem*, 2018, 258: 164–173.
- [8] 任顺成, 陈佳乐, 陶华. 多酚对淀粉慢消化作用及其生物利用率研究进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2022, 43(3): 133–140.
REN SC, CHEN JL, TAO H. Progress in the study of polyphenols on the slow digestion of starch and its bioavailability [J]. *J Henan Univ Technol Nat Sci Ed*, 2022, 43(3): 133–140.
- [9] PARADA J, PÉREZ-CORREA JR, PÉREZ-JIMÉNEZ J. Design of low glycemic response foods using polyphenols from seaweed [J]. *J Funct Foods*, 2019, 56: 33–39.
- [10] 李晓玺, 沈少丹, 陆萍, 等. 发酵协同多酚复合对大米淀粉消化性能的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 1–8.
LI XX, SHEN SD, LU P, *et al.* Effect of fermentation synergized polyphenol complexation on the digestibility of rice starch [J]. *J South China Univ Technol Nat Sci*, 2022, 50(1): 1–8.
- [11] COE S, RYAN L. Impact of polyphenol-rich sources on acute postprandial glycaemia: A systematic review [J]. *J Nutr Sci*, 2016, 5: e24.
- [12] ZHU F. Interactions between starch and phenolic compound [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2015, 43(2): 129–143.
- [13] DENG N, DENG Z, TANG C, *et al.* Formation, structure and properties of the starch-polyphenol inclusion complex: A review [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2021, 112: 667–675.
- [14] COHEN R, SCHWARTZ B, PERI I, *et al.* Improving bioavailability and stability of genistein by complexation with high-amylose corn starch [J]. *J Agric Food Chem*, 2011, 59(14): 7932–7938.
- [15] LI M, NDIAYE C, CORBIN S, *et al.* Starch-phenolic complexes are built on physical CH- π interactions and can persist after hydrothermal treatments altering hydrodynamic radius and digestibility of model starch-based foods [J]. *Food Chem*, 2020, 308: 125577.
- [16] GUTIÉRREZ TJ, TOVAR J. Update of the concept of type 5 resistant starch (RS5): Self-assembled starch V-type complexes [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2021, 109: 711–724.
- [17] DU J, YAO F, ZHANG M, *et al.* Effect of persimmon tannin on the physicochemical properties of maize starch with different amylose/amylopectin ratios [J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 132: 1193–1199.
- [18] MANIGLIA BC, CASTANHA N, LE-BAIL P, *et al.* Starch modification through environmentally friendly alternatives: A review [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2021, 61(15): 2482–2505.
- [19] LV Y, ZHANG L, LI M, *et al.* Physicochemical properties and digestibility of potato starch treated by ball milling with tea polyphenols [J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 129: 207–213.
- [20] 刘娜. 苦荞淀粉-槲皮素复合物制备与特性研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2019.
LIU N. Preparation and characterization of buckwheat starch-quercetin complexes [D]. Xianyang: Northwest Agriculture and Forestry University, 2019.
- [21] CHI C, WANG H, WANG S, *et al.* Promoting starch interaction with caffeic acid during hydrothermal treatment for slowing starch digestion [J].

- Innovat Food Sci Emerging Technol, 2022, 82: 103168.
- [22] 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.
- CHEN J, HE DW, CHEN L. Effect of caffeic acid/chlorogenic acid on the digestive and regenerative properties of chestnut starch in a moist heat treatment environment [J]. J South China Univ Technol (Nat Sci Ed), 2022, 50(8): 41–48.
- [23] 杜安林. 湿热处理环境中多酚对板栗淀粉消化及回生性质协同调控的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- DU ANL. Synergistic regulation of starch digestion and regeneration properties of chestnut by polyphenols in a moist heat treatment environment [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [24] 李华, 康丹辉, 陆启玉. 马铃薯淀粉改性及其吸附茶多酚的条件优化[J]. 中国食品添加剂, 2019, 30(5): 62–69.
- LI H, KANG DH, LU QY. Modification of potato starch and optimization of conditions for its adsorption of tea polyphenols [J]. China Food Addit, 2019, 30(5): 62–69.
- [25] 刘华玲, 史苗苗, 周亚萍, 等. 茶多酚/直链淀粉复合物的制备及表征[J]. 食品工业科技, 2019, 40(2): 113–118.
- LIU HL, SHI MM, ZHOU YP, *et al.* Preparation and characterization of tea polyphenol/straight chain starch complexes [J]. Sci Technol Food Ind, 2019, 40(2): 113–118.
- [26] DING X, LI X, CAI Q, *et al.* Effect of calcium hydroxide on physicochemical and *in vitro* digestibility properties of tartary buckwheat starch-rutin complex prepared by pre-gelatinization and co-gelatinization methods [J]. Foods, 2023, 12(5): 951.
- [27] 郭硕, 刘景圣, 郑明珠. 热处理过程中食品组分与淀粉相互作用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(1): 17–24.
- GUO S, LIU JS, ZHENG MZ. Progress in the study of the interaction between food components and starch during heat treatment process [J]. J Food Saf Qual, 2023, 14(1): 17–24.
- [28] BIAN L, CHUNG HJ. Molecular structure and physicochemical properties of starch isolated from hydrothermally treated brown rice flour [J]. Food Hydrocolloid, 2016, 60: 345–352.
- [29] ZHANG X, REHMAN R, WANG S, *et al.* Blue honeysuckle extracts retarded starch digestion by inhibiting glycosidases and changing the starch structure [J]. Food Funct, 2022, 13(11): 672–688.
- [30] GUO Z, ZHAO B, CHEN J, *et al.* Insight into the characterization and digestion of lotus seed starch-tea polyphenol complexes prepared under high hydrostatic pressure [J]. Food Chem, 2019, 297: 124992.
- [31] ZHOU X, CHEN J, WANG S, *et al.* Effect of high hydrostatic pressure treatment on the formation and *in vitro* digestion of Tartary buckwheat starch/flavonoid complexes [J]. Food Chem, 2022, 382: 132324.
- [32] XU B, ZHANG C, LIU Z, *et al.* Starches modification with rose polyphenols under multi-frequency power ultrasonic fields: Effect on physicochemical properties and digestion behavior [J]. Ultrason Sonochem, 2023, 98: 106515.
- [33] WANG J, JIANG X, GUO Z, *et al.* Insights into the multi-scale structural properties and digestibility of lotus seed starch-chlorogenic acid complexes prepared by microwave irradiation [J]. Food Chem, 2021, 361: 130171.
- [34] ZHAO B, WANG B, ZHENG B, *et al.* Effects and mechanism of high-pressure homogenization on the characterization and digestion behavior of lotus seed starch-green tea polyphenol complexes [J]. J Funct Foods, 2019, 57: 173–181.
- [35] 张丽. 基于球磨法的淀粉-石榴皮多酚复合物制备及其特性研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2021.
- ZHANG L. Preparation and characterization of starch-pomegranate peel polyphenol complex based on ball milling method [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2021.
- [36] GAO S, LIU H, SUN L, *et al.* Rheological, thermal and *in vitro* digestibility properties on complex of plasma modified Tartary buckwheat starches with quercetin [J]. Food Hydrocolloid, 2021, 110: 106209.
- [37] WANG N, DONG Y, ZHANG H, *et al.* Exploring the mechanism of high hydrostatic pressure on the chemical activity of starch based on its structure and properties changes [J]. Food Chem, 2023, 418: 136058.
- [38] KARUNARATNE R, ZHU F. Physicochemical interactions of maize starch with ferulic acid [J]. Food Chem, 2016, 199(15): 372–379.
- [39] XU B, REN A, CHEN J, *et al.* Effect of multi-mode dual-frequency ultrasound irradiation on the degradation of waxy corn starch in a gelatinized state [J]. Food Hydrocolloid, 2021, 113: 106440.
- [40] TESTER RF, BRAAOVEANU M, NEMAANU MR. Behaviour of starch exposed to microwave radiation treatment [J]. Starch Stärke, 2014, 66(1–2): 3–14.
- [41] CHEN B, ZENG S, ZENG H, *et al.* Properties of lotus seed starch-glycerin monostearin complexes formed by high pressure homogenization [J]. Food Chem, 2017, 226: 119–127.
- [42] YANG Q, QI L, LUO Z, *et al.* Effect of microwave irradiation on internal molecular structure and physical properties of waxy maize starch [J]. Food Hydrocolloid, 2017, 69: 473–482.
- [43] XIAO H, LIN Q, LIU GQ, *et al.* Evaluation of black tea polyphenol extract against the retrogradation of starches from various plant sources [J]. Molecules, 2012, 17(7): 8147–8158.
- [44] LI M, PERNELL C, FERRUZZI MG. Complexation with phenolic acids affect rheological properties and digestibility of potato starch and maize amylopectin [J]. Food Hydrocolloid, 2018, 77: 843–852.
- [45] 张黎明, 时文佳, 张丽, 等. 球磨法制备淀粉-芹菜素复合物及其消化性分析[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 64–70.
- ZHANG LM, SHI WJ, ZHANG L, *et al.* Preparation of starch-apigenin complexes by ball milling and analysis of their digestibility [J]. Food Sci, 2020, 41(11): 64–70.
- [46] GE X, SHEN H, SU C, *et al.* The improving effects of cold plasma on multi-scale structure, physicochemical and digestive properties of dry heated red adzuki bean starch [J]. Food Chem, 2021, 349: 129159.
- [47] OKYERE AY, BERTOFT E, ANNOR GA. Modification of cereal and tuber waxy starches with radio frequency cold plasma and its effects on waxy starch properties [J]. Carbohydr Polym, 2019, 223: 115075.
- [48] 李钦, 栗瑜婉, 饶雷, 等. 食品加工方式调控淀粉与多酚相互作用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(22): 481–490.
- LI Q, LI YW, RAO L, *et al.* Advances in food processing methods modulating starch-polyphenol interactions [J]. Sci Technol Food Ind, 2022,

- 43(22): 481–490.
- [49] TAN L, KONG L. Starch-guest inclusion complexes: Formation, structure, and enzymatic digestion [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2020, 60(5): 780–790.
- [50] 景悦, 刘华玲, 史苗苗, 等. 茶多酚/直链淀粉复合物体系的构建及表征[J]. *食品工业*, 2020, 41(2): 177–180.
- JING Y, LIU HL, SHI MM, *et al.* Construction and characterization of tea polyphenol/straight chain starch complex system [J]. *Food Ind*, 2020, 41(2): 177–180.
- [51] SUDLAPA P, SUWANNAPORN P. Dual complexation using heat moisture treatment and pre-gelatinization to enhance starch-phenolic complex and control digestibility [J]. *Food Hydrocolloid*, 2023, 136: 108280.
- [52] ZHAO B, SUN S, LIN H, *et al.* Physicochemical properties and digestion of the lotus seed starch-green tea polyphenol complex under ultrasound-microwave synergistic interaction [J]. *Ultrason Sonochem*, 2019, 52: 50–61.
- [53] CHOU S, MENG X, CUI H, *et al.* Rheological and pasting properties of maize, wheat and rice starch as affected by apple polyphenols [J]. *Int J Food Prop*, 2019, 22(1): 1786–1798.
- [54] YU M, LIU B, ZHONG F, *et al.* Interactions between caffeic acid and corn starch with varying amylose content and their effects on starch digestion [J]. *Food Hydrocolloid*, 2021, 114: 106544.
- [55] PUTSEYS JA, LAMBERTS L, DELCOUR JA. Amylose-inclusion complexes: Formation, identity and physico-chemical properties [J]. *J Cere Sci*, 2010, 51(3): 238–247.
- [56] FAN H, CHEN Z, XU L, *et al.* Both alkyl chain length and V-amylose structure affect the structural and digestive stability of amylose-alkylresorcinols inclusion complexes [J]. *Carbohydr Polym*, 2022, 292: 119567–119567.
- [57] 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 N, YANG ZX, LIU CM, *et al.* Preparation and digestive characterization of rice starch-polyphenol complexes [J]. *J Food Sci Biotechnol*, 2022, 41(11): 57–63.
- [58] MARINOPOULOU A, PAPASTERGIADIS E, RAPHAELIDES SN, *et al.* Morphological characteristics, oxidative stability and enzymic hydrolysis of amylose-fatty acid complexes [J]. *Carbohydr Polym*, 2016, 141: 106–115.
- [59] 黄越峰. 高能电子束预处理对颗粒态淀粉-酚酸复合物特性的影响研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2022.
- HUANG YF. Study on the effect of high-energy electron beam pretreatment on the properties of granular starch-phenolic acid complexes [D]. Xianyang: Northwest Agriculture and Forestry University, 2022.
- [60] LI Y, GAO S, JI X, *et al.* Evaluation studies on effects of quercetin with different concentrations on the physicochemical properties and *in vitro* digestibility of tartary buckwheat starch [J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 163: 1729–1737.
- [61] 李姝琪. 欧李主要多酚物质成分分析及原花青素对马铃薯淀粉消化抑制作用研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2021.
- LI SQ. Compositional analysis of major polyphenols in *Olea europaea* and inhibitory effect of proanthocyanidins on potato starch digestion [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2021.

(责任编辑: 于梦娇 郑 丽)

作者简介

柳丝菁, 硕士研究生, 主要研究方向为食品化学与营养。
E-mail: 11007678@126.com

孙红男, 博士, 研究员, 主要研究方向为食品化学与营养。
E-mail: sunhongnan@caas.cn

马梦梅, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为食品化学与营养。
E-mail: meimei881020@163.com