

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2025.03.014

陈立新, 辛嘉英, 程伟, 等. 植物酚酸与淀粉相互作用及其对淀粉功能特性的影响研究进展[J]. 粮油食品科技, 2025, 33(3): 146-154.

CHEN L X, XIN J Y, CHENG W, et al. Review of the interaction between plant phenolic acids and starch and its effect on the functional characteristic of starch[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2025, 33(3): 146-154.

植物酚酸与淀粉相互作用及其对淀粉功能特性的影响研究进展

陈立新, 辛嘉英✉, 程伟, 郑梦迪, 刘天复

(哈尔滨商业大学 食品科学与工程重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150076)

摘要: 植物酚酸广泛分布于植物界, 主要分为羟基苯甲酸和羟基肉桂酸两类, 具有良好的生物活性。淀粉由直链淀粉和支链淀粉构成, 具备独特的结构和功能特性。植物酚酸与淀粉相互作用后, 植物酚酸的优良性质不仅会转移到淀粉上, 还能对淀粉进行改性, 进一步增强淀粉的食用价值。本文阐述了植物酚酸与淀粉的相互作用机制, 包括通过物理、化学、酶法促成的非共价和共价结合, 介绍了物理、化学及生物技术手段等加工方式对其相互作用的调控。这些交互作用会影响淀粉的糊化、回生、消化、溶胀、流变等关键特性, 进而为功能性食品的开发及植物酚酸的健康效益和其分子作用机制的深入研究提供参考。

关键词: 植物酚酸; 淀粉; 相互作用; 调控; 功能特性

中图分类号: TS201.2 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2025)03-0146-09

网络首发时间: 2025-04-10 09:43:40

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20250410.0844.004>

Review of the Interaction between Plant Phenolic Acids and Starch and Its Effect on the Functional Characteristic of Starch

CHEN Li-xin, XIN Jia-ying✉, CHENG Wei, ZHENG Meng-di, LIU Tian-fu

(Key Laboratory for Food Science and Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin, Heilongjiang 150076, China)

Abstract: Plant phenolic acids are widely distributed in the plant kingdom, mainly divided into two categories: hydroxybenzoic acid and hydroxycinnamic acid, with good biological activity. Starch, composed of amylose and amylopectin, has unique structural and functional properties. After the interaction between plant phenolic acids and starch, the excellent properties of plant phenolic acids are not only transferred to starch, but also modified to further enhance the edible value of starch. This paper has described the interaction mechanism between plant phenolic acids and starch, including non-covalent and covalent binding promoted by physical, chemical and enzymatic methods, and the regulation of their interactions by physical,

收稿日期: 2024-09-13; 修回日期: 2021-11-20; 录用日期: 2024-11-22

基金项目: 黑龙江省自然科学基金“基于麸皮资源的阿魏酸类抗菌性饲料添加剂生物催化创制关键技术”(LH2020C063)

Supported by: Natural Science Foundation of Heilongjiang Province “The Key Technology of Biocatalysis Creation of Ferulic Acid Anti-bacterial Feed Additive based on Bran Resources” (No. LH2020C063)

第一作者: 陈立新, 男, 2001 年出生, 在读硕士生, 研究方向为生物催化与食品生物技术, E-mail: 2401739950@qq.com

通信作者: 辛嘉英, 男, 1966 年出生, 博士, 教授, 研究方向为生物催化与食品生物技术, E-mail: xinjiayingvip@163.com

chemical and biological techniques, and these interactions affect the key properties of starch, such as gelatinization, retrogradation, digestion, swelling, and rheology. These findings not only laid a theoretical foundation for the development of functional foods, but also pointed out the direction for further research on the health benefits and molecular mechanism of plant phenolic acids.

Key words: plant phenolic acid; starch; mechanism of action; regulation; functional characteristic

植物酚酸，作为自然界中广泛分布的一类生物活性物质，不仅在植物体内发挥着关键作用，也为人类健康带来了诸多益处。它们具有抗氧化、抗炎、抗癌等多样的生物活性，对促进机体健康具有积极作用。淀粉，作为人类饮食中主要的碳水化合物来源，其结构和性质直接影响食品的消化、吸收以及血糖水平的调控。近年来，植物酚酸与淀粉的相互作用引起了科研工作者的广泛关注。本文综述了植物酚酸与淀粉相互作用的研究进展，阐述了植物酚酸的分类、生物活性，以及它们与淀粉相互作用的机制，并探讨这种相互作用对

淀粉功能性质的影响，包括对淀粉消化特性的调控作用，为功能性食品的开发提供部分科学依据。

1 植物酚酸

1.1 植物酚酸来源与分类

植物酚酸是一类广泛存在于植物中的酚类化合物，可从多种植物中提取，根据化学结构，可分为羟基苯甲酸（Hydroxybenzoicacids）和羟基肉桂酸（Hydroxycinnamicacids）两大类^[1]。羟基苯甲酸具有 C_6-C_1 结构，羟基肉桂酸具有 C_6-C_3 结构^[2]。植物酚酸结构如图 1 所示。

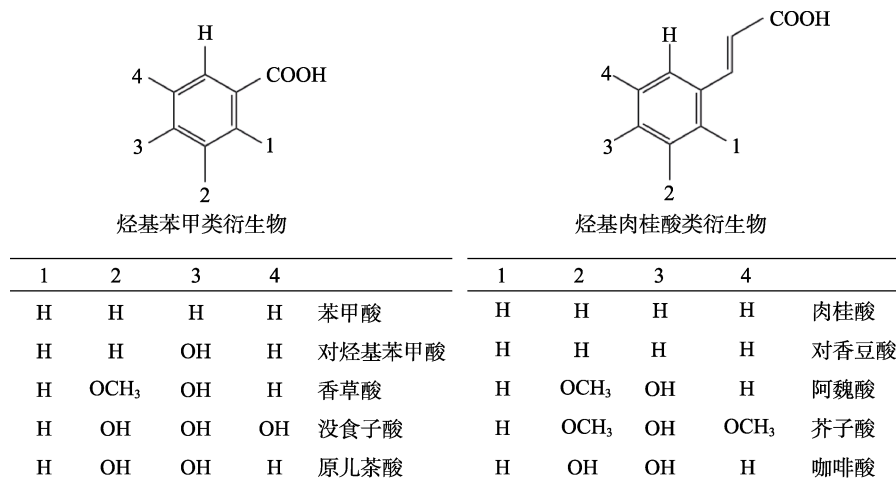


图 1 植物酚酸结构^[1-2]

Fig.1 Structure of plant phenolic acids^[1-2]

1.2 植物酚酸生物活性与功能

植物酚酸具有抗氧化、抗菌、抗炎等生物活性，不仅对人体健康具有积极影响，还能改善淀粉的多种性质与功能^[3]。它们通过清除自由基、螯合金属离子等方式抗氧化，保护细胞，还能与淀粉作用增强淀粉稳定性。如，阿魏酸能抑制炎症介质合成，迷迭香酸能调节信号通路抑制炎症。此外，植物酚酸还有助于调节血糖和血脂，保护肝脏，预防神经退行性疾病。

2 淀粉的物理与化学特性

2.1 淀粉结构

淀粉是由葡萄糖单元通过 α -1,4-糖苷键和 α -1,6-糖苷键连接形成的多糖，自然界中分布广泛。它分为直链淀粉和支链淀粉，具有不同的结构和功能特性。直链淀粉分子量较低（约 $10^4 \sim 10^6$ Da），溶解度低，结晶度高，易形成螺旋结构；支链淀粉分子量高（约 $10^7 \sim 10^9$ Da），溶解度高，结晶度低，黏度大^[4]。不同植物淀粉直链与支链

比例不同,如玉米淀粉直链淀粉约 27%,马铃薯淀粉约 20%,影响其物理化学性质。淀粉颗粒大小 1~100 μm ,形状多样,如圆形、椭圆形和多角形,这些特性影响淀粉的糊化、回生等性质。

2.2 功能性质

淀粉在食品加工和烹饪中的功能性质极为关键。淀粉颗粒在水中加热至糊化温度时,会吸水膨胀,晶体结构破坏,形成粘性糊状溶液^[5]。糊化温度和焓变是淀粉颗粒结晶度和热稳定性的指标,直链淀粉含量高的淀粉糊化温度高,焓变低;支链淀粉含量高的则相反。淀粉糊化后冷却,会发生回生,淀粉分子重新排列形成结晶结构,增加溶液黏度^[6]。回生速度和结构受淀粉种类、浓度、温度、pH 值等因素影响,直链淀粉含量高的淀粉更易回生。淀粉溶液的流变性质,如黏度、弹性和塑性,也会因剪切力作用而表现出剪切变稀的特性。这些特性使淀粉在食品工业中应用广泛。

鉴于淀粉的结构和功能特性在食品科学领域占有核心地位,同时植物酚酸对淀粉性质的潜在影响,下文将探讨植物酚酸如何影响淀粉的物理特性,包括糊化、回生和消化特性,并分析这些变化如何调控淀粉的消化速率,对人体健康产生积极影响。植物酚酸通过改变淀粉消化特性,有助于减缓血糖上升,从而发挥间接的健康效益。深入理解这些相互作用机制,对于开发新型功能性食品有科学意义和应用前景。

3 植物酚酸与淀粉相互作用

3.1 植物酚酸与淀粉的非共价作用

淀粉与植物酚酸之间可通过非共价键生成复合物,这种非共价键主要包括氢键和疏水作用,这种相互作用能对淀粉的结构和性质产生影响^[7]。这些作用能够改变淀粉的形态学特性、多尺度结构特性、膨胀力、糊化和热特性、酶消化性以及抗氧化活性^[8-9]。

3.1.1 植物酚酸与淀粉作用生成 V 型复合物

V 型复合物的形成依赖于淀粉中的直链淀粉含量和植物酚酸的结构。直链淀粉的单螺旋结构提供了一个疏水的空腔,植物酚酸的疏水环可以部分或全部嵌入这个空腔,从而形成包合复合物^[10]。

小分子量的植物酚酸,如咖啡酸和烷基没食子酸酯,能与直链淀粉形成 V₆ 型复合物。而含有较多羟基的植物酚酸,其 B 环容易进入直链淀粉的螺旋腔,形成 V₇ 型复合物。小分子植物酚酸与直链淀粉的相互作用,导致形成 V 型复合物,这一现象主要归因于直链淀粉螺旋结构内部的疏水基团对酚类物质的吸引作用,促使其嵌入螺旋空腔内,而对于分子量更大的酚酸,可能会形成 V₈ 型复合物,这是植物酚酸与淀粉结合的另一种模式。研究表明酚酸-淀粉复合物的形成会导致淀粉结晶度增加、热稳定性提高以及酶消化性降低^[11]。淀粉糊化后,直链淀粉的含量降低,但引入咖啡酸后,含量会升高,这表明咖啡酸可能延缓或抑制淀粉的降解,并有助于 V 型晶体的形成。引入原儿茶酸后,糊化玉米淀粉的晶体结构会发生变化,形成 V 型结构,并且这种复合物能提高淀粉的冻融稳定性^[12]。简而言之,V 型复合物的形成与淀粉和植物酚酸的特性密切相关,它们能改变淀粉的物理和化学性质,提高其稳定性和抗氧化能力。

3.1.2 植物酚酸与淀粉作用生成非 V 型复合物

非 V 复合物的形成主要是淀粉与植物酚酸分子之间通过氢键或 CH- π 键相互作用^[13]。植物酚酸分子上的羟基可以与淀粉形成氢键,这种相互作用在直链淀粉和支链淀粉中都可能发生,但支链淀粉由于其高度分支的结构和众多侧链,更容易与植物酚酸形成这种复合物^[14]。当阿魏酸与木薯淀粉结合时,通过 X 射线衍射分析没有发现 V 型复合物的特征峰,傅里叶红外光谱分析显示这些复合物主要是通过氢键形成的。非 V 型复合物的生成会导致淀粉的酶消化性提高,但抗氧化活性降低^[15]。此外,非 V 型复合物还可能导致淀粉糊化温度升高和溶解度降低。例如,肉桂酸与玉米淀粉结合后,通过 X 射线衍射发现晶型从 A 型变为 B 型,且植物酚酸苯环上的取代基大小会影响其与淀粉的相互作用^[16]。在大米淀粉与咖啡酸的蒸煮过程中,咖啡酸通过氢键被固定在淀粉-水基质中,这种非 V 型复合物会使淀粉的膨胀力降低。简而言之,非包合复合物通过特定的化学键影响淀粉的消化性、抗氧化活性、膨胀力等物理化学性质。植物多酚通过非共价键与淀粉结合

形成非V型复合物,增强淀粉对消化酶的抵抗力,减少淀粉的水动力学半径,并通过氢键连接淀粉分子,阻止消化酶的接触,同时改变消化酶的空

间结构,降低其活性,影响淀粉的消化过程。这些作用机制的深入研究,有助于深化理解植物酚酸在食品加工和人体健康中的作用。

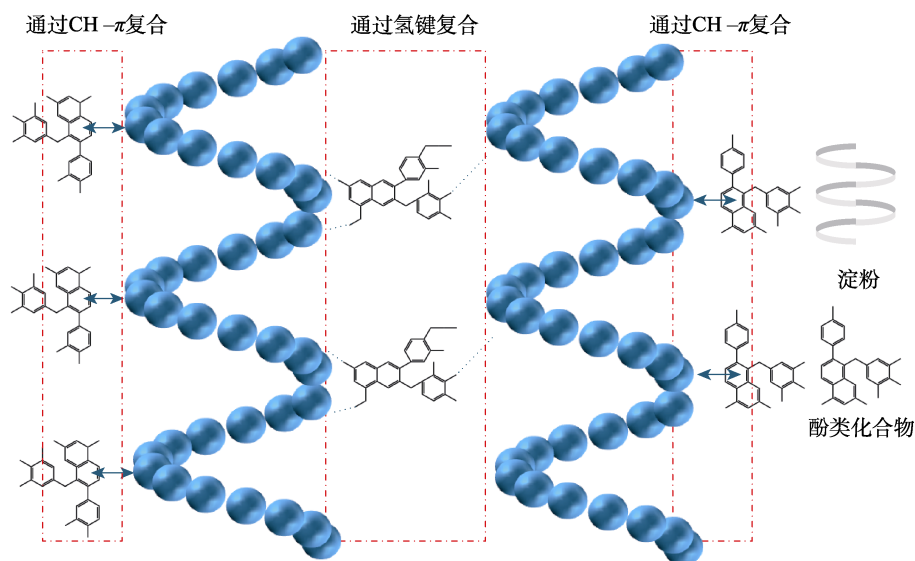


图2 非包合复合物淀粉示意图^[17]

Fig.2 Schematic diagram of non-inclusion complex starch^[17]

3.2 植物酚酸与淀粉的共价相互作用

淀粉与植物酚酸可通过共价反应生成缀合物,主要包括酯化反应与醚化反应等类型。这些反应一般在特定条件下发生,导致淀粉结构和性质的发生变化。

3.2.1 酯化反应

酯化反应是淀粉与植物酚酸之间形成共价键的一种常见方式,通常涉及有机酸如阿魏酸和没食子酸与淀粉发生反应。这种反应能够改变淀粉的结构,从而影响其性质。在酯化过程中,有机酸的羧基与淀粉分子中的羟基结合形成酯键,这种化学变化会改变淀粉的物理化学特性和功能。酯化后的淀粉,其抗性淀粉含量增加,消化率降低^[18]。这是因为酯键的存在保护了淀粉分子,使其不易被消化酶分解。即使在淀粉糊化过程中,这种保护作用也能维持,从而抑制淀粉的消化,同时酯化后的淀粉结晶度会降低,热稳定性提高^[19]。此外,酯化反应还可能改变淀粉颗粒的形态和表面性质,这会影

也会对淀粉的性质产生不同的影响^[21]。如,香豆酸酯化后会

也会使淀粉糊化温度升高、糊化焓降低;阿魏酸酯化能提高淀粉的抗氧化性能;咖啡酸酯化能增强淀粉的抗菌活性;芥子酸酯化则能改善淀粉的流变学性质。酯化反应通过形成酯键,能够在多个层面上改变淀粉的性质,使其在食品工业中具有更广泛的应用潜力。

3.2.2 醚化反应

醚化反应是植物酚酸与淀粉形成共价键的重要方式,通过使用氯乙酸钠等化学试剂,可以促进植物酚酸与淀粉发生醚化,生成具有新官能团的醚化淀粉。这种化学修饰能够改善淀粉的溶解性、稳定性等物理化学性质,对淀粉在食品工业中的应用产生重要影响^[22]。研究表明,醚化后的淀粉在流变学特性上发生变化,如黏度和弹性的调整,但不同类型的植物酚酸与淀粉的醚化反应效果存在差异^[14],如,咖啡酸与淀粉的醚化反应能够降低淀粉的糊化温度并增加糊化焓,提高淀粉在食品加工过程中的稳定性,没食子酸与淀粉的醚化反应提高了淀粉的抗氧化性能,香草酸与淀粉的醚化反应能够增强淀粉的抗菌性能,而丁香酸与淀粉的醚化则改善凝胶特性,原儿茶酸与

淀粉的醚化提高了淀粉的热稳定性^[23]。此外，醚化淀粉在面包制作中能有效延缓老化过程，醚化反应通过引入新的官能团，能够显著改变淀粉的性质,使其在食品工业中具有更广泛的应用潜力，如改善食品的加工性能、延长保质期、提高食品

的抗氧化和抗菌性能等。

3.3 加工方式调控植物酚酸与淀粉相互作用

在食品加工过程中，加工方式对淀粉与植物酚酸的相互作用具有重要的调控作用，对生成物的结构和反应速率产生影响。详见表 1。

表 1 加工方式对植物酚酸与淀粉相互作用的影响

Table 1 Effects of processing methods on the interaction between plant phenolic acids and starch

加工方式	作用机制	结构、性质及动力学影响	来源
微波法	改变淀粉分子结构，增加植物酚酸接触机会	600~800 W 的微波功率和 2~4 min 的处理时间促进植物酚酸与淀粉发生非共价作用	[24-25]
超声法	空化效应和机械力破坏淀粉结构,增强与植物酚酸相互作用	300~400 W 超声功率和 10~15 min 处理时间加快植物酚酸与淀粉的非共价反应	
化学法	改变淀粉溶胀糊化程度，影响结合与结构	20~40%乙醇浓度和 0.5~0.8 mol/L 碱浓度使淀粉结构变松，且带负电有利于吸引植物酚酸，二甲基亚砷能完全溶解淀粉，提高植物酚酸的反应效率，有助于酚酸与淀粉的结合	
机械酶法	改变淀粉微环境、调节构象、使分子识别与定向作用	3%~10%添加量的脂肪酶辅以物理手段（如球磨、双螺杆挤压）有助于植物酚酸与淀粉之间发生共价结合形成酚酸淀粉酯	

3.4 植物酚酸与淀粉作用后产物的检测技术及特征指标

植物酚酸-淀粉复合物的类型可通过分析技术来区分，包括 X 射线衍射、差示扫描量热仪、傅里叶变换红外光谱、核磁共振等。这些技术能够揭示复合物的热特性、晶体结构、化学环境变化及氢键形成情况等。详见表 2。

植物酚酸与淀粉的相互作用是一个复杂而精

细的过程，涉及非共价和共价相互作用，这些相互作用不仅改变了淀粉的物理化学特性，还影响食品加工和人体吸收利用过程。加工方式为调控这些相互作用提供了有效的手段，而先进的分析技术则为研究和优化这些复合物提供了重要工具。未来的研究应继续探索这些相互作用的机制，以期开发出更健康、更稳定的食品产品，同时提高植物酚酸的生物利用度。

表 2 植物酚酸-淀粉产物的常用分析技术和关键指标

Table 2 Common analytical techniques and key indicators of plant phenolic acid-starch complexes

检测方法	原理	指标
X 射线衍射	通过测量复合物的 X 射线衍射图谱，观察衍射峰的位置和强度。	V 型复合物特征峰在 2 θ =7°、13°、20°；衍射峰强度和宽度指示结晶度和纯度
差示扫描量热仪	测定加热/冷却过程中的热流变化，分析热稳定性和相变	V 型复合物熔融状态吸热峰：通常 ≥ 90 °C，但具体数值需依原料不同而变化
傅里叶变换红外光谱	监测官能团振动吸收峰变化，评估化学键合和相互作用	羟基伸缩振动峰位移从 3 400 cm ⁻¹ 至 3 350 cm ⁻¹ ，羰基吸收峰变化指示氢键形成
核磁共振	通过检测质子或碳的化学环境变化来表征产物的形成	质子化学位移变化 δ =4.0 ppm 至 δ =4.5 ppm，反映植物酚酸与淀粉的相互作用

4 植物酚酸与淀粉相互作用对淀粉的影响

植物酚酸与淀粉作用后对淀粉的功能性质有着显著的影响。这些影响包括糊化特性、回生特

性、消化特性、溶胀特性、流变特性等方面。深入理解这些影响对于食品加工和品质控制具有重要意义。

4.1 对淀粉理化及结构的影响

4.1.1 糊化特性

植物酚酸可对淀粉糊化特性产生影响, 对其进行探究有助于理解淀粉在加工和烹饪过程中的行为变化。研究表明, 植物酚酸能显著改变淀粉的糊化温度和糊化焓。如, 绿原酸可与淀粉分子相互作用, 限制其加热过程中的吸水膨胀, 使糊化温度上升。在小麦淀粉中添加绿原酸, 糊化起始温度提高约 5 °C, 峰值温度亦增加; 木薯淀粉中加入绿原酸后, 糊化温度上升近 4 °C。此外, 植物酚酸还能影响淀粉的糊化焓^[26], 如没食子酸与玉米淀粉结合后, 糊化焓从 12 J/g 降至 8 J/g, 表明淀粉糊化所需能量减少; 红薯淀粉中, 没食子酸的加入使其糊化焓降低约 25%。咖啡酸对马铃薯淀粉和豌豆淀粉的糊化特性也有影响, 能提高马铃薯淀粉糊化温度约 3 °C 并改变糊化焓, 却使豌豆淀粉糊化焓降低约 15%。植物酚酸通过与淀粉分子相互作用, 能够改变淀粉的糊化温度和所需的热量, 从而影响淀粉的功能特性。

4.1.2 回生特性

植物酚酸通过与淀粉分子相互作用后, 能抑制淀粉的回生过程。阿魏酸与大米淀粉相互作用, 干扰直链淀粉的有序排列和结晶, 使大米淀粉回生度降低约 30%, 同样在糯米淀粉中, 阿魏酸也能使回生度降低约 25%^[22]。植物酚酸的化学结构和浓度是影响其抑制效果的关键因素, 没食子酸由于其丰富的羟基和羧基, 展现出更强的抑制回生作用。在小麦淀粉中, 随着没食子酸浓度从 0.5% 增至 2%, 淀粉回生度从 25% 降至 15%^[11]。香草酸也能通过改变淀粉分子结构抑制回生, 在玉米淀粉中减缓回生速率, 在高粱淀粉中抑制效果达 30%^[20]。这些结果表明, 通过调节植物酚酸的化学结构和浓度, 可以有效控制淀粉的回生, 对提高食品保质期和改善质地具有重要价值。

4.1.3 溶胀特性

淀粉的溶胀特性在食品加工中起着关键作用, 既影响食品最终质地和口感, 又与加工过程中的稳定性相关。植物酚酸能与淀粉分子形成稳定的复合物, 限制淀粉颗粒的吸水膨胀^[21]。在小麦淀粉中添加阿魏酸后, 淀粉的溶胀力显著降低,

这影响了面包的体积和质地^[28]。通过扫描电子显微镜观察, 可以看到阿魏酸作用下的淀粉颗粒表面结构更紧密, 这可能是溶胀力降低的原因之一。在玉米淀粉中, 随着阿魏酸浓度的增加, 溶胀力降低更为显著。没食子酸和咖啡酸等其他植物酚酸也对淀粉的溶胀特性有明显影响^[15]。没食子酸能降低玉米淀粉的溶胀程度, 这可能是因为它与淀粉分子间形成了特定的化学键合, 阻碍了淀粉颗粒在水中的膨胀。咖啡酸在马铃薯淀粉系统中的作用也呈现出降低溶胀力的趋势, 这可能与咖啡酸对淀粉分子的空间构象产生的影响有关, 使淀粉颗粒在水中难以充分舒展^[26]。

4.1.4 流变特性

淀粉糊的流变特性, 包括黏度、弹性和触变性等, 影响其在食品加工过程中的流动行为与稳定性。植物酚酸通过与淀粉分子的相互作用, 改变淀粉糊的流变特性。在红薯淀粉糊中添加咖啡酸, 淀粉糊的黏度明显增加, 在剪切力作用下呈现出更高的抗性, 流变仪测试分析表明, 咖啡酸的加入使淀粉糊的流动曲线发生变化, 显示其内部结构更为紧密, 抵抗剪切变形的能力增强^[14]。阿魏酸可能通过形成特定的网络结构, 增强木薯淀粉糊的弹性并减少触变性, 这可能是由于它与淀粉分子形成了一种特定的网络结构, 帮助淀粉糊在受力变形后更快恢复^[7]。没食子酸和绿原酸也对流变特性有影响, 在小麦淀粉糊中, 没食子酸改变了黏度和弹性, 可能与它对淀粉分子聚集状态的影响有关^[18]。绿原酸在豌豆淀粉糊中影响了触变性, 可能是因为它与淀粉分子的相互作用改变了内部结构, 影响了重复剪切下的响应特性^[17]。

4.2 对淀粉消化特性的影响

4.2.1 与淀粉作用对消化速率和程度的影响

植物酚酸, 包括阿魏酸、没食子酸、咖啡酸和香草酸, 与淀粉的相互作用在食品科学领域扮演着至关重要的角色。这种相互作用能够改变淀粉的物理和消化特性, 从而对开发低血糖指数食品、提高食品的健康价值以及满足特定营养需求具有重要意义。如, 阿魏酸可以通过与淀粉分子的羟基形成氢键, 使淀粉分子排列更紧密有序, 降低消化酶的可及性, 从而阻碍消化过程^[19]。在

玉米淀粉中添加阿魏酸后,体外模拟消化实验显示消化速率下降约 30%,消化程度从 80%降至 60%左右。没食子酸通过改变淀粉颗粒的形态和结晶结构,减少消化酶的渗透和作用^[11]。红薯淀粉添加没食子酸后,淀粉颗粒表面粗糙度增加约 50%,孔隙直径减小约 30%,导致消化酶难以进入颗粒内部,消化速率降低 25%,消化程度从 75%

下降至 55%。咖啡酸能诱导淀粉结晶度增加,从 A 型转变为 B 型,使淀粉更难被消化酶分解^[16]。在马铃薯淀粉实验中,加入咖啡酸后,X 射线衍射分析表明淀粉结晶度从 20%提高到 35%,消化程度降低约 20%^[25]。香草酸与淀粉结合后,会使淀粉分子螺旋结构更紧密,减少消化酶作用位点,从而影响消化速率和程度。

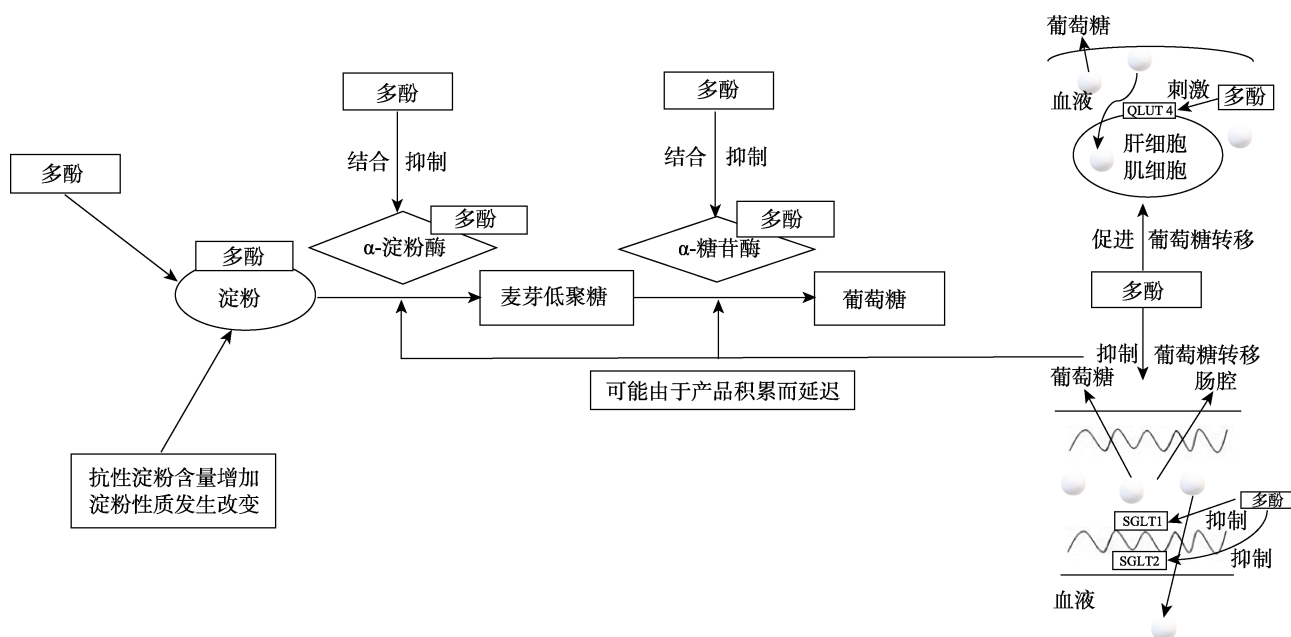


图 3 多酚物质对淀粉消化和血糖控制机理图^[10]

Fig.3 Mechanism of polyphenols on starch digestion and blood glucose control^[10]

4.2.2 与淀粉酶作用对消化速率和程度的影响

植物酚酸与淀粉酶的相互作用是决定淀粉消化速率和程度的关键因素之一。其与酶的作用可分为直接抑制、间接抑制、改变酶构象等。直接抑制方面,部分植物酚酸能精准占据淀粉酶活性位点,阻碍淀粉与酶有效结合。以没食子酸为例,它能与 α -淀粉酶的活性位点形成多重相互作用,导致酶的活性中心构象改变,降低淀粉底物的亲和能力。酶动力学分析显示,没食子酸存在时, α -淀粉酶的米氏常数显著增大,最大反应速度明显降低。在小麦淀粉中添加没食子酸后, α -淀粉酶对淀粉的消化速率降低约 40%,消化程度从 75%减至 50%左右^[29]。间接抑制方面,植物酚酸可与淀粉酶的非活性区域相结合,诱导酶的构象变化和二级结构调整,间接影响其催化活性。咖啡酸和咖啡酸能与淀粉酶的表面特定区域结合,改变酶的柔韧性和活性位点的可及性,导致消化程度

降低^[30]。此外,植物酚酸还能通过影响淀粉酶的稳定性,使其在消化环境中更易失活或降解。阿魏酸能促使淀粉酶发生氧化修饰和聚集,降低其热稳定性,提高对蛋白酶的敏感性,缩短酶在胃肠道中的活性和寿命,从而减缓淀粉的消化进程。

5 总结与展望

植物酚酸与淀粉之间的相互作用通过非共价键(氢键和疏水作用)和共价键(酯化和醚化反应)影响淀粉的物理化学特性,如形态学特性、结晶度、膨胀力、糊化和热特性。食品加工技术如化学、微波和超声法等,能调控这些相互作用,提高淀粉的热稳定性和抗氧化性,降低消化速率,对开发特定健康益处的食品具有科学意义。

未来研究可聚焦于分子层面的相互作用机制,利用核磁共振、质谱和分子动力学模拟等技术,为功能性食品设计提供依据。如开发新型调

节血糖、改善肠道健康等功效的新型功能性食品,以满足特定消费群体的健康需求(如肥胖人群、运动员等)。同时,还需关注植物酚酸与淀粉相互作用后产物的生物利用度和代谢过程,评估长期摄入的健康效应,确保功能性食品的安全。此外,优化加工技术,在保持食品的感官品质和营养价值上,考虑环境可持续性,即利用农业副产品中的植物酚酸,通过成本效益分析,推动其在食品工业中的应用。这有助于丰富食品科学理论基础,推动食品工业发展,满足现代消费者需求,开发出更多健康食品。

参考文献:

- [1] KIOKIAS S, OREOPOULOU V. A review of the health protective effects of phenolic acids against a range of severe pathologic conditions (including coronavirus-based infections[J]. *Molecules*, 2021, 26(7): 54-72.
- [2] ZAIN M Z M, SHORI A B, BABA A S. Potential functional food ingredients in bread and their health benefits[J]. *B8iointerface Res. Appl. Chem*, 2022, 12(5): 6533-6542.
- [3] 吴娜娜, 吴非霏, 乔聪聪, 等. 糙米酚类物质对淀粉消化特性的影响研究进展[J]. *粮油食品科技*, 2024, 32(1): 21-27.
WU N N, WU F F, QIAO C C, et al. The current progress in research about the effect of phenolics from brown rice on the digestibility of starch[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2024, 32(1): 21-27.
- [4] 翟玲侠, 宋继玲, 杨梦平, 等. 马铃薯淀粉研究进展[J]. *中国瓜菜*, 2024, 37(5): 12-17.
ZHAI L X, SONG J L, YANG M P, et al. Research progress of potato starch[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2024, 37(5): 12-17.
- [5] RODRIGUEZ-GARCIA M E, HERNANDEZ-LANDAUVERDE M A, DELGADO J M, et al. Crystalline structures of the main components of starch[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2021, 37(5): 107-111.
- [6] JUNEJO S A, FLANAGAN B M, ZHANG B, et al. Starch structure and nutritional functionality—past revelations and future prospects[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 277: 118837.
- [7] DENG N, DENG Z, TANG C, et al. Formation, structure and properties of the starch-polyphenol inclusion complex: a review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 112(3): 667-675.
- [8] WU Y, NIU M, XU H. Pasting behaviors, gel rheological properties, and freeze-thaw stability of rice flour and starch modified by green tea polyphenols[J]. *Lwt*, 2020, 118: 108796.
- [9] HERNÁNDEZ H A R, GUTIÉRREZ T J, BELLO-PÉREZ L A. Can starch-polyphenol V-type complexes be considered as resistant starch[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 124: 107226.
- [10] SUN L, MIAO M. Dietary polyphenols modulate starch digestion and glycaemic level: a review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 60(4): 541-555.
- [11] KAN L, CAPUANO E, OLIVIERO T, et al. Wheat starch-tannic acid complexes modulate physicochemical and rheological properties of wheat starch and its digestibility[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 126: 107459.
- [12] CHEN N, GAO H X, HE Q, et al. Influence of structure complexity of phenolic compounds on their binding with maize starch[J]. *Food Structure*, 2022, 33(2): 100286.
- [13] LIMWACHIRANON J, HUANG H, LI L, et al. Enhancing stability and bioaccessibility of chlorogenic acid using complexation with amylopectin: a comprehensive evaluation of complex formation, properties, and characteristics[J]. *Food chemistry*, 2020, 311: 125879.
- [14] LIU B, ZHONG F, YOKOYAMA W, et al. Interactions in starch co-gelatinized with phenolic compound systems: effect of complexity of phenolic compounds and amylose content of starch[J]. *Carbohydrate polymers*, 2020, 247: 116667.
- [15] FANG K, HE W, JIANG Y, et al. Preparation, characterization and physicochemical properties of cassava starch-ferulic acid complexes by mechanical activation[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 160(10): 482-488.
- [16] YU M, ZHU S, ZHONG F, et al. Insight into the multi-scale structure changes and mechanism of corn starch modulated by different structural phenolic acids during retrogradation[J]. *Food hydrocolloids*, 2022, 128: 107581.
- [17] 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 Chemistry*, 2019, 297: 124992.
- [18] WANG W, HU A, LIU S, et al. Physicochemical properties and structure of starch ester/copolymer/complex synthesized by combination of microwave and acid (anhydride): a review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2023, 13(8): 539-550.
- [19] LI H, MA Y, GAO X, et al. Probing the structure-antioxidant activity relationships of four cinnamic acids porous starch esters[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 256: 117428.
- [20] FAN H, YAO X, CHEN Z, et al. Interaction of high amylose corn starch with polyphenols: modulating the stability of polyphenols with different structure against thermal processing[J]. *Food Chemistry*, 2024, 437: 137708.
- [21] ZIA-UD-DIN, XIONG H, FEI P. Physical and chemical modification of starches: a review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 57(12): 2691-2705.
- [22] XU N, ZHANG Y, ZHANG G, et al. Effects of insoluble dietary fiber and ferulic acid on rheological and thermal properties of rice starch[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*,

- 2021, 19(3): 2260-2270.
- [23] WANG S, CHAO C, CAI J, et al. Starch-lipid and starch-lipid-protein complexes: a comprehensive review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(3): 1056-1079.
- [24] 刘静雪, 辛嘉英, 孙立瑞, 等. 淀粉-酚酸复合物的制备及其应用研究进展[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(4): 181-188.
- LIU J X, XIN J Y, SUN L R, et al. Advance on preparation and application of starch - phenolic acid complex[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(4): 181-188.
- [25] LIU J, GAO T, XIN J, et al. Unveiling optimal synthesis and structural insights of starch ferulate via the mechanoenzymatic method[J]. Foods, 2023, 12(20): 37-52.
- [26] JIANG X, WANG J, LI L, et al. Effect of chlorogenic acid on lotus seed starch gelatinization behavior and complexation mode during microwave treatment[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 144: 108925.
- [27] XU T, ZHONG Y, CHEN Q, et al. Modulating the digestibility of cassava starch by esterification with phenolic acids[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 127: 107432.
- [28] HUANG Y, RICHARDSON S J, BRENNAN C S, et al. Mechanistic insights into α -amylase inhibition, binding affinity and structural changes upon interaction with gallic acid[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 148: 109467.
- [29] CHOUDHARY D K, CHATURVEDI N, SINGH A, et al. Characterization, inhibitory activity and mechanism of polyphenols from faba bean (gallic-acid and catechin) on α -glucosidase: insights from molecular docking and simulation study[J]. Preparative biochemistry & biotechnology, 2020, 50(2): 123-132.
- [30] ZHENG Y, TIAN J, YANG W, et al. Inhibition mechanism of ferulic acid against α -amylase and α -glucosidase[J]. Food Chemistry, 2020, 317: 126346. 

备注：本文的彩色图表可从本刊官网（<http://lspkj.ijournal.cn>）、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。