

花青素 - 淀粉复合物的结构修饰、 构效关系与功能特性研究进展

吴 佳¹, 龙 裔¹, 邱玉鑫¹, 黄静玮^{1,2*}

¹成都大学基础医学院, 四川 成都

²农业农村部杂粮加工重点实验室, 成都大学, 四川 成都

收稿日期: 2026年6月11日; 录用日期: 2026年7月9日; 发布日期: 2026年7月17日

摘 要

淀粉是主食中最重要的碳水化合物来源, 但其高血糖生成指数与代谢性疾病风险之间的矛盾日益突出。利用花青素对淀粉进行功能化改性, 已成为提升淀粉营养品质的研究热点。花青素是一类广泛存在于植物中的水溶性多酚色素, 具有抗氧化、抗炎等多种生物活性。研究表明, 花青素可通过疏水作用与氢键等非共价相互作用, 与淀粉形成稳定的复合体系。在这一体系中, 淀粉基质能提高花青素的稳定性与生物可及性; 花青素则通过抑制消化酶活性、调控淀粉多尺度结构, 协同延缓淀粉消化速率, 并促进抗性淀粉的形成。本文系统综述了花青素 - 淀粉复合物的形成机制、多尺度结构特征及主要制备方法, 重点阐述了其在流变与质构方面的浓度依赖性调控、回生抑制的双重机制、消化调控的三重作用节点, 以及肠道益生元效应等功能特性与构效关系。在此基础上, 本文分析了该体系产业化面临的技术规模化、成本、法规及市场接纳等挑战, 并展望了未来发展方向, 包括结合人工智能分子模拟、合成生物学、精准加工及多技术耦合策略。本综述旨在为花青素 - 淀粉复合物的精准设计与健康食品开发提供理论依据。

关键词

花青素 - 淀粉复合物, 非共价相互作用, 多尺度结构, 消化特性, 回生抑制, 益生元效应

A Review of the Current State of Research Concerning Structural Modification, Structure-Activity Relationship, and Functional Properties of Anthocyanin-Starch Complexes Is Presented Herein

*通讯作者。

文章引用: 吴佳, 龙裔, 邱玉鑫, 黄静玮. 花青素-淀粉复合物的结构修饰、构效关系与功能特性研究进展[J]. 食品与营养科学, 2026, 15(4): 520-532. DOI: 10.12677/hjfn.2026.154056

Jia Wu¹, Yi Long¹, Yuxin Qiu¹, Jingwei Huang^{1,2*}

¹School of Basic Medical Sciences, Chengdu University, Chengdu Sichuan

²Key Laboratory of Coarse Cereals Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chengdu University, Chengdu Sichuan

Received: June 11, 2026; accepted: July 9, 2026; published: July 17, 2026

Abstract

Starch is the primary carbohydrate source in staple foods, yet its high glycemic index poses an increasing contradiction with the risk of metabolic diseases. Functional modification of starch using anthocyanins has thus become a research hotspot for improving the nutritional quality of starch. Anthocyanins are water-soluble polyphenolic pigments widely found in plants and exhibit multiple bioactivities, including antioxidant and anti-inflammatory effects. Studies have shown that anthocyanins can form stable complexes with starch through non-covalent interactions such as hydrophobic forces and hydrogen bonding. In this system, the starch matrix enhances the stability and bioaccessibility of anthocyanins, while anthocyanins retard starch digestion and promote resistant starch formation by inhibiting digestive enzyme activity and modulating the multi-scale structure of starch. This review systematically summarizes the formation mechanisms, multi-scale structural characteristics, and main preparation methods of anthocyanin-starch complexes. It highlights the functional properties and structure-activity relationships, including concentration-dependent modulation of rheology and texture, dual mechanisms of retrogradation inhibition, triple action nodes in digestive regulation, and prebiotic effects in the gut. On this basis, the challenges facing industrialization—such as technological scaling, cost, regulatory issues, and market acceptance—are analyzed. Future directions integrating artificial intelligence-based molecular simulation, synthetic biology, precision processing, and multi-technique coupling strategies are also discussed. This review aims to provide a theoretical basis for the rational design of anthocyanin-starch complexes and the development of health-oriented food products.

Keywords

Anthocyanin-Starch Complex, Non-Covalent Interaction, Multi-Scale Structure, Digestive Properties, Retrogradation Inhibition, Prebiotic Effect

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

淀粉作为膳食中最主要的碳水化合物来源，在食品工业中具有重要地位。然而，随着慢性代谢疾病发病率持续上升，与淀粉类食品的高血糖生成指数间的矛盾日益突出。研究表明，利用茶多酚[1]、阿魏酸[2]、脂肪酸[3]等天然活性成分对淀粉进行分子修饰，在能有效调控其消化特性的同时，还能提升其营养品质，而在众多天然改性剂中花青素因其独特的分子结构和生物活性而备受关注。

花青素(anthocyanins)在化学本质上属于花青苷元(anthocyanidins, 又称花青素苷元或配基)的糖苷衍生物，即花青苷元通过糖苷键与一个或多个糖基结合形成的多酚类色素[4]。因此，从结构层级上看，花青

苷元为母体苷元,花青素则为其糖基化产物,通常以糖基化或酰基化形式存在,呈阳离子状态,水溶性良好。原花青素则属黄烷-3-醇单元的寡聚物或多聚物,无阳离子特性,水溶性较低,但二者共享类黄酮生物合成前体,且原花青素在酸性加热下可裂解释放花青素,体现同源化学关联。与淀粉互作时,两类多酚均形成氢键和疏水作用,但花青素另具静电吸引,原花青素则依赖多点氢键与疏水堆积[5][6]。功能上,二者均抑制酶活并改变淀粉构象以降低消化,但花青素抑制更强,原花青素因聚合度空间位阻削弱复合[6]。

基于这些分子互作特征,花青素与淀粉复合后的功能活性及其应用潜力成为研究热点。花青素广泛分布于植物组织,具有抗氧化、抗炎及调节糖脂代谢等活性。其可通过氢键、疏水作用等非共价力与淀粉形成稳定复合物,其中淀粉基质增强花青素的稳定性和生物可利用性[7];花青素则通过抑制消化酶和改变淀粉构象双重途径调控淀粉代谢[8]。随着多尺度表征与计算模拟技术的发展,该领域研究已从宏观性质深入至分子水平,涵盖消化调控、构效关系、绿色加工及功能包装等方向。但目前仍存在关键问题,例如非共价作用力的贡献度及其动态演变规律不明,传统手段难以实现原子级结构解析,理论与实验间存在验证缺口,复合物在复杂食品体系中的稳定性、组分相互作用、体内代谢命运及肠道微生态调控机制有待阐明。此外,高静水压、微胶囊化等绿色技术的规模化应用仍受技术瓶颈制约。为此,本综述系统梳理花青素-淀粉复合物的最新进展,重点阐释其形成机制、结构特征与功能调控规律,以期为该体系的精准设计与产业化应用提供理论支撑。

2. 花青素-淀粉复合物的形成机制与多尺度结构特征

2.1. 花青素-淀粉复合物的非共价相互作用网络

花青素与淀粉的分子识别依赖疏水作用与氢键协同作用,构成复合物结构基础。

其中,疏水作用在引导V型包合物形成中起主导作用。直链淀粉卷曲形成疏水空腔,花青素苷元嵌入后排出水分子,形成稳定的V型复合物。XRD证实,蓝莓花青素-玉米淀粉[9]、紫红米糠花青素-大米淀粉[10]、欧李原花青素-马铃薯淀粉体系[11]均在 13° 和 20° 处出现V型晶体特征峰。而高添加量原花青素可诱导新晶体排列模式,并且随花青素比例升高,相对结晶度提升[12]。DSC结果也证实,直链淀粉-原花青素复合物在 $120^\circ\text{C}\sim 121^\circ\text{C}$ 处出现典型的II型V型复合物熔解峰[13],其热稳定性优于天然淀粉,且具有益生元潜力。另一方面,氢键网络在复合物稳定中起关键作用。花青素酚羟基与淀粉羟基形成密集氢键,FTIR分析显示,随着原花青素添加量的增加, O-H 伸缩振动峰从 3451.2 cm^{-1} 位移至 3420.7 cm^{-1} ,表明氢键作用增强[14]。在葡萄籽原花青素-糯米淀粉中, $1047/1022\text{ cm}^{-1}$ 比值上升,表明短程有序度的提升[15]。小角X射线散射揭示发酵过程中原花青素与大米淀粉可形成“淀粉-原花青素-淀粉”桥联结构,增厚半结晶层,氢键诱导更高层次有序化[16]。但氢键修饰效果具浓度依赖性,过量添加可导致因空间位阻而弱化网络[17]。

因此,疏水作用构建V型包合主体框架,氢键网络维持结构稳定性,二者协同调控复合物的热稳定性与消化特性。

2.2. 花青素分子对淀粉结构的精细调控机制

花青素聚合度、苷元修饰及糖基化、酰基化程度差异可改变其疏水性、空间构象和反应活性,导致与淀粉相互作用的差异。

首先,在聚合度方面,低聚体(如二聚体)分子量小、生物利用度高,能有效结合淀粉消化酶活性位点,延缓酶解;高聚体则通过空间位阻和裂解释放活性位点,引导淀粉超分子组装,调控消化特性[11]。自由基接枝法将酚类共价连接到淀粉上,可提升抗消化性与抗氧化能力,这源于原花青素的共价与非共价双

重抑制作用[18]。其次, 昔元苯环上的羟基化与甲氧基化修饰对花青素的供氢能力和疏水性具有调控作用。具体而言, 酚羟基增加虽增强氢键, 但增加极性, 不利于嵌入疏水空腔; 甲氧基取代羟基则提高疏水性和平面构象稳定性[19]。花青素稳定性随甲氧基数增加而提高, 随游离羟基增加而降低。例如锦葵素(双甲氧基)的疏水性和稳定性高于矢车菊素(单羟基), 其 V 型复合物更稳定[20]。

此外, 酰基化修饰常与糖基化协同作用, 进一步增强复合物的稳定性。糖基化提供额外氢键位点, 芳香酰基提供疏水驱动力并通过分子内共色效应保护发色团[21]。90℃贮藏下酰基化花青素保留率显著高于未酰基化样品[22]。紫甘薯花青素在低浓度添加量下增强 α -螺旋、提升质构, 但在高浓度因还原性破坏二硫键而弱化网络[23]。尽管花青素-淀粉共价复合物报道有限, 但其他酚类共价接枝方法为未来研究提供了方向。

2.3. 微观与颗粒尺度结构调控

花青素在微观与颗粒尺度上显著调控淀粉结构、溶胀行为及凝胶网络。SEM 显示马铃薯淀粉与花青素作用后表面出现聚集粘附成薄片状[12]。这种表面修饰对溶胀的影响具原料依赖性: 3%原花青素可使小麦、绿豆、马铃薯淀粉膨胀度分别提高 1.53%、2.84%、3.54%; 而在溶解度表现为绿豆淀粉增加 5.82%, 马铃薯淀粉减少 8.09%, 小麦淀粉变化不显著[24]。葡萄籽原花青素-糯米淀粉中, 随添加量增加溶解度和膨胀度显著上升, 8%时 70℃ 膨胀度为天然淀粉的 1.2 倍[15]。其原因可能是由于原花青素羟基结合支链淀粉侧链减少自由水、氢键交联限制链移动及 V 型疏水核心改变亲疏水平衡, 从而增强水合能力。

在凝胶网络形成阶段, 花青素通过空间位阻与竞争性氢键调控网络强度, 呈现浓度依赖性。流变学表明, 马铃薯淀粉中花青素提高粘弹性模量但不改变弱凝胶特性[22]; 紫红米糠花青素-大米淀粉中, 低浓度(0.5%~1.0%)通过干扰交联、抑制直链淀粉浸出而降低黏度, 高浓度(3.0%~5.0%)则充当交联强化剂, 促进分子间交联使黏度回升[10]。因此, 调控花青素浓度可精确调整凝胶质构。未来需结合原位表征动态解析浓度依赖的演变规律, 建立定量预测模型。

2.4. 宏观聚集态结构演变

花青素通过改变晶体结构与热力学行为调控理化特性。XRD 表明, 花青素作为分子间隔物插入淀粉链间破坏规整排列, 并与直链淀粉形成 V 型复合物, 减少可重结晶直链淀粉, 抑制回生与结晶。效果与直链淀粉含量正相关, 向比例为 3.15%~19.39%的大米直链淀粉中添加 10%花青素后, 相对结晶度下降 7.99%~24.87%。原花青素-马铃薯淀粉中添加 2.5%~7.5%时, 结晶度下降 14.53%~28.64%; 相同条件下马铃薯、大米、豌豆淀粉降幅分别为 29.3%、24.7%、3.5%。而在越橘花青素-马铃薯淀粉中结晶度随浓度升高而上升[12], 表明花青素既可抑制 B 型晶体, 又可促进 V 型有序结构, 具双重调控作用。

DSC 分析显示, 花青素对糊化温度的调控呈体系依赖性: 大米淀粉中糊化温度随花青素添加而下降, 降幅与直链淀粉含量正相关[14]; 马铃薯淀粉中添加原花青素反而提升糊化温度[25]。前者因直链淀粉富集区亲水羟基竞争结合水, 削弱链间作用; 后者因支链淀粉主导区氢键网络强化颗粒稳定性。糊化焓在不同体系中均随花青素添加量增加而显著降低, 说明晶体完整性被削弱。酰基化花青素可增强疏水性与构象稳定性, 90℃下保留率较未修饰高 3%以上[26]。花青素通过竞争性水合、氢键交联及 V 型复合物形成协同调控聚集态结构。

3. 花青素-淀粉复合物的制备方法

花青素-淀粉复合物的制备方法主要包括物理共混法、物理场辅助法、化学与酶法交联及微胶囊化技术, 各方法在复合效率、活性保护与规模化潜力上差异显著, 需根据目标需求选择。

3.1. 物理共混法

物理共混法主要包括溶液共混与湿热处理。溶液共混的效果依赖于热处理历程与共混比例,例如糊化-冷却循环可诱导蓝莓花青素-玉米淀粉产生 V 型 X 射线衍射峰[27],但高温易导致花青素降解,部分花青素仅物理吸附于淀粉表面。相比之下,湿热法反应温度低于 100℃,通过优化糊化时间、pH 等参数可提升复合效率[28],且设备简单、成本低、易于放大,缺点是控制精度较低、产物均一性差。

物理共混法依靠热运动促使花青素扩散至淀粉链附近,通过自发非共价作用形成复合物,结合效率较低。如马铃薯淀粉与矢车菊素-3-O-葡萄糖苷结合率约 31.6%,高温糊化虽能增加直链淀粉的暴露程度,但会加速花青素氧化,造成稳定性偏低,而湿热法在低于 100℃下操作,可更好地保留花青素活性[29]。然而,这两类方法均难以突破热扩散的动力学限制。

3.2. 物理场辅助法

物理场辅助法在温和或非热条件下促进复合,能有效保护花青素活性。高静水压处理(200~550 MPa)可将马铃薯淀粉与花青素的结合率从 31.6%提升至 47.0%,但该效果具有显著的原料依赖性;玉米和豌豆淀粉在高压下结合率反而降至 10%以下[29]。超声波利用空化效应破坏淀粉结晶区,增加比表面积,复合物缓释性能显著提升[30];紫玉米芯花青素经超声辅助提取后配合喷雾干燥,包埋率可达 86.7% [31]。微波辅助可实现快速均匀加热,与双螺杆挤出结合能一步制备智能包装膜[32]。物理场辅助法解决了热降解问题,但设备投资大、工艺控制复杂,制约了规模化应用。

3.3. 化学与酶法交联

化学与酶法交联通过共价键或强离子键强化复合物稳定性。化学交联借助三偏磷酸钠、柠檬酸等,如 TEMPO 氧化酶解制备多孔淀粉微凝胶后交联,可获得高负载率和缓释产品[33],已用于 pH 响应智能包装膜,但化学试剂残留需评估安全性。酶法交联条件温和、特异性强,但酶成本高、底物特异性限制技术门槛。

与物理共混和物理场辅助的非共价方法不同,共价键具有更高键能,能抵抗高温高湿环境。但共价修饰可能改变花青素天然结构:化学交联剂可能与酚羟基非特异性反应降低抗氧化活性;酶法对淀粉改性效果有限。化学与酶法交联更加适用于对稳定性要求极高、活性保留要求相对宽松的应用。

3.4. 微胶囊化技术

微胶囊化技术通过构建核-壳结构,将花青素封装于淀粉基壁材中,以降低光、氧、热等环境因素影响并实现靶向控释。喷雾干燥是应用最广的方法,淀粉及其衍生物成膜性好、成本低。例如,以改性糯米淀粉复合明胶为壁材包埋黑枸杞花青素,包埋效率达 83.7% [34];多孔淀粉-明胶体系在优化条件下可达 98.34% [35]。该法生产效率高、可连续化生产,但高温易导致花青素热降解。

与喷雾干燥不同,复合共沉淀法在温和液相条件下利用静电相互作用实现包埋。玉米醇溶蛋白和马铃薯淀粉的结构及花青素稳定性高度依赖于 pH 值:在 pH 8 条件下,花青素包封后,玉米醇溶蛋白纳米胶囊的尺寸从 283~366 nm 减小至 50~175 nm,表明形成了稳定的纳米复合物;在 pH 8 和 pH 2 时,分别可获得最高的抗氧化活性和最高的包封效率[36]。该方法条件温和、粒径均一,但多壁材成本较高,厚度控制困难。静电纺丝法则可用于制备淀粉纳米纤维智能指示膜,将蓝莓花青素作为功能性物质包封在淀粉纳米纤维中[37],所制纤维膜颜色随 pH 变化,适用于智能指示标签,然而生产效率极低,是规模化主要瓶颈。

值得注意的是,微胶囊化技术不追求花青素与淀粉的分子级复合,因此包埋效率虽高,花青素仍以

游离态存在于内核中。为弥补单一方法缺陷,多技术耦合策略(如超声提取联合喷雾干燥)可在一定程度上扬长避短,兼顾包埋效率与活性保留,是未来发展的理性方向。

3.5. 方法比较

不同制备方法在包埋效率、活性保护、设备投资、规模化潜力及安全合规性等方面存在显著差异,需根据目标产品的性能需求进行综合权衡。从规模化角度看,物理共混法最易产业化但效率有限;喷雾干燥兼具高包埋率和连续化生产能力;复合共沉淀条件温和但成本较高;静电纺丝产能较低但功能独特;物理场辅助法活性保护优良但设备投入较大;化学交联稳定性强但安全性存疑。制备方法选择中存在高效率、低成本和良好活性保护难以同时满足的权衡关系。针对不同应用场景,营养强化主食可选用物理共混法,高端功能性食品可选用喷雾干燥,智能包装材料可选用静电纺丝适用于小批量生产,长效缓释递送系统可选用化学交联。多技术耦合策略如超声辅助提取联合喷雾干燥是理性发展方向,可根据目标需求灵活组合,以实现性能、成本与可生产性的综合优化。

4. 功能特性的定向调控与健康效应

基于花青素-淀粉复合物独特的结构特征,该体系在食品加工、储藏、营养消化及健康促进方面展现出多层次应用潜力。

4.1. 流变与质构性能的浓度依赖性调控

花青素对淀粉流变与质构的调控呈现低浓度削弱、高浓度增强的浓度依赖性特征。其分子根源为花青素(尤其是低聚体)为低浓度时优先与溶出的直链淀粉形成 V 型包合物,减少游离直链淀粉,从而降低表观黏度;而当其为高浓度时,花青素分子之间及与淀粉链之间的多重氢键交联占主导,花青素充当交联点促进凝胶网络形成,使黏弹性回升。淀粉对花青素浓度响应与花青素聚合度呈负相关,聚合度越高,分子间交联能力越强,因此更低添加量即可引发网络增强效应。傅里叶变换红外光谱证实花青素能够增强氢键作用,从而缩短面团形成时间、延长面团稳定时间并提高凝胶强度。以紫甘蓝花青素为例,其可使面团稳定时间从 5.20 分钟延长至 8.30 分钟,咀嚼性提升 113.20% [38],这些效果归因于花青素酚羟基与淀粉羟基之间形成的三维氢键网络。然而,蒸煮和烘焙等热加工过程中的高温高湿环境可能破坏维系复合物的非共价相互作用,导致花青素解离与降解。而酰基化修饰能够增强花青素的疏水性和氢键形成能力,从而有效提升其热稳定性[39]。因此,将葡萄籽原花色色素应用于面条制作中,不仅可以优化面团的网络结构,还能降低产品蒸煮损失率,并提升面条的硬度、弹性与咀嚼性等食用品质[30]。

4.2. 回生动力学的双重阻碍机制

花青素通过分子间隔物与成核抑制剂双重机制抑制淀粉回生,从而改善储藏稳定性,其抑制效果与花青素的分子尺寸及酚羟基密度密切相关。

作为分子间隔物,花青素能够插入直链淀粉分子链间,破坏淀粉链的有序排列。其中,低聚体花青素因分子尺寸较小,更容易进入淀粉链间的纳米空间,从而有效干扰有序排列;而高聚体花青素则主要吸附于淀粉微晶表面,通过空间位阻阻碍链段的重排。傅里叶变换红外光谱证实,花青素与淀粉之间形成的氢键能够部分替代原有的淀粉分子间氢键,从而降低体系回生的热力学驱动力[40]。花青素分子中酚羟基数量越多,这种竞争性氢键替代效应越显著。

作为成核抑制剂,花青素能够有效阻碍支链淀粉的结晶成核过程。X 射线衍射结果显示,高直链玉米淀粉在原花青素添加量为 5%时相对结晶度达到最小值,而普通玉米淀粉则在添加量为 1.5%时达到最小值[41],这种响应差异与淀粉的直链/支链比例以及结晶类型有关。进一步研究表明,将 5%的亲水胶体

与板栗淀粉耦合,对短期和长期储藏的回生抑制率分别可达 48.89%~55.62%和 34.98%~36.19%;若在此基础上进一步耦合阿魏酸,短期回生抑制率可提升至 74.30%~78.69% [42],说明多酚类物质与胶体在抑制回生方面存在协同效应。

但花青素对回生的抑制作用存在最适浓度范围,过量添加可能因分子聚集反而诱导局部有序结构,削弱抑制效果。综上,分子间隔作用主要干扰直链淀粉的有序重排,成核抑制作用侧重于延缓支链淀粉的结晶进程,两者通过不同靶点协同削弱淀粉分子间的氢键网络,从而实现对淀粉回生的有效抑制。

4.3. 消化特性的三重调控屏障

花青素通过物理阻隔、生化抑制与结构重塑三重机制协同调控淀粉消化,其调控效果取决于花青素的分子结构以及复合物的多尺度结构特征。

在物理屏障层面,花青素能够构建致密的凝胶网络,从而在空间上限制消化酶与淀粉底物的接触。花青素诱导形成的淀粉与原花青素的桥联结构可增强淀粉颗粒表面的有序性,提高聚集体的整体密度,进而对淀粉酶的渗透与扩散构成物理屏障[43]。这一屏障的形成依赖于花青素酚羟基与淀粉羟基之间的氢键网络以及 V 型包合结构所提供的骨架支撑,V 型晶体的特征衍射峰越明显,复合物的抗消化性能越强。

在生化抑制方面,花青素对消化酶的抑制效能与其分子结构高度相关。花青素 B 环上的邻苯二酚结构可通过竞争性抑制方式与淀粉底物争夺酶的活性中心[44],同时也可通过非竞争性抑制机制与酶的别构位点结合,诱导酶构象变化从而降低催化效率[45]。低聚体花青素如二聚体因分子量小、结构相对柔性,能够更有效地进入酶活性口袋,其抑制效果通常优于高聚体[46];而高聚体花青素虽难以直接进入活性位点,但可通过空间位阻效应阻碍酶与底物接触,并在肠道中缓慢裂解释放更多活性亚基,实现长效抑制[47]。在动态消化过程中,从复合物无定形区持续释放的花青素分子能够维持对酶活性的长效抑制。

在结构重塑层面,低聚体花青素倾向于嵌入直链淀粉螺旋中形成稳定的 V 型复合物,而高聚体则可能通过氢键交联引导淀粉发生超分子组装,改变其晶体排列模式。以欧李原花青素与马铃薯淀粉复合体系为例,原花青素添加后可使快速消化淀粉含量显著降低,同时慢消化淀粉和抗性淀粉含量明显提升[11],这种组分转化的程度与花青素的聚合度及添加量呈正相关。由此可见,花青素的聚合度和酚羟基密度首先决定了其与淀粉的相互作用模式是嵌入还是交联,进而决定了复合物的晶体结构类型与有序度,最终表现为消化特性的差异。

目前相关研究主要集中于体外模拟消化模型,体内实验证据仍相对不足。部分动物研究提供了相关性线索,例如紫薯花青素可调节高脂膳食大鼠肠道菌群[48],这些发现为花青素干预碳水化合物代谢的体内潜力提供了旁证。未来研究需要加强体外结论与体内效应之间的关联验证,并建立花青素结构参数如聚合度和酰基化程度与消化率降低幅度之间的定量构效关系模型。

4.4. 肠道健康与益生元效应

花青素与淀粉复合物促进肠道健康的潜力源于 V 型晶体结构与抗性淀粉的协同作用,以及花青素在结肠中的逐步释放。

具有 V 型晶体结构的复合物能够显著提升肠道菌群多样性,增加拟杆菌门、瘤胃球菌科等有益菌的丰度[49]。V 型结构的形成依赖于花青素苷元的疏水部分与直链淀粉螺旋空腔的嵌合,而花青素的糖基化与酰基化修饰则通过调节疏水性和空间位阻,影响 V 型复合物的稳定性与晶体完美程度。晶体越完整,其对消化酶的物理屏障作用越强,从而到达结肠的抗性淀粉比例越高。

在体外发酵模型中,复合物能够有效促进丁酸、丙酸等短链脂肪酸的生成[50]。其作用机制主要包括

三个方面：抗性淀粉作为发酵底物被肠道微生物利用；花青素促进特定菌群的生长；复合结构延缓发酵速率，使短链脂肪酸的生成更加平缓持久。这种缓释特性与消化率的降低密切相关，例如在高直链淀粉体系中，随着花青素添加量的增加，消化 120 分钟时的消化率可下降 37.47% [14]。花青素的聚合度影响其在结肠中的释放速率，高聚体降解较慢，能够提供更持久的益生元效应；而酰基化花青素由于疏水性增强，与淀粉的结合更加紧密，其释放更为缓慢，有利于在远端结肠发挥作用。

花青素与淀粉复合物实现了抗性淀粉持续发酵与花青素逐步释放的时空协同，有助于营造更加稳定的肠道微环境。未来研究需要建立花青素结构参数、复合物晶体结构、肠道发酵动力学以及短链脂肪酸生成谱之间的定量关联，以指导针对抗炎、屏障修复、代谢调节等健康需求的复合物理性设计。

5. 花青素与其他典型植物多酚改性淀粉的比较分析

天然多酚中儿茶素、姜黄素、白藜芦醇、没食子酸和绿原酸等同样能与淀粉互作，但因分子尺寸、疏水性、荷电状态和官能团差异，导致结合模式、改性效率及产品特性不同。

5.1. 不同多酚与淀粉相互作用机制的比较

淀粉与多酚通过氢键、疏水作用和范德华力等非共价力复合，可形成非包合物或 V 型包合物。儿茶素分子量约 290 Da，以氢键和范德华力为主，非包合结合，降低淀粉老化结晶度且无 V 型晶体特征峰 [51]；白藜芦醇疏水性强，以疏水作用和 CH- π 堆积主导，因分子较大难以嵌入螺旋，V 型包合效率有限 [52]；姜黄素疏水性极强，主要吸附于淀粉链表面或螺旋间隙 [53]；没食子酸仅 170 Da，以氢键为主导，难以形成稳定 V 型包合物；绿原酸以氢键为主、疏水作用为辅 [54]。这些多酚均缺乏静电吸引。与上述多酚相比，花青素在 pH < 4 时以黄烺盐阳离子存在，可提供疏水嵌入、氢键锚定和静电吸引三重协同，使结合兼具特异性和稳健性，且其糖基化和酰基化修饰可进一步调节疏水性和空间构象，为精准互作提供更丰富的调控维度。

5.2. 多酚种类对淀粉消化与回生抑制效率的影响差异

不同多酚对淀粉消化和回生的调控效率受分子结构、结合方式及对消化酶活性直接影响等多重因素制约。在消化调控方面，多种多酚均表现出抑制效果。白藜芦醇添加量从 0 增至 10%，小麦和大米淀粉的快消化淀粉含量分别降低 11.33% 和 15.34%，抗性淀粉含量分别提升 12.54% 和 7.59% [52]；没食子酸添加 20% 使大米快消化淀粉从 80.76% 降至 64.62%，抗性淀粉从 11.26% 升至 16.69%，水解率由 57.97% 降至 49.81%，其抑制效果优于阿魏酸 [54]；儿茶素-板栗淀粉复合物使抗性淀粉增加 39.93% [55]，热挤压联合 8% 儿茶素处理，24 天抗回生率 76.63%，快消化淀粉降至 64.55% [56]；绿原酸抑制 α -淀粉酶，半数抑制浓度约 0.498~2 mg/mL，复合马铃薯和玉米淀粉后快消化淀粉可降至 34.72% 和 28.09% [57]。姜黄素-鹰嘴豆淀粉经等离子体辅助制备，复合指数从 8.50% 升至 28.69%，消化速率常数由 0.085 降至 0.029 [53]。花青素则通过物理阻隔、生化抑制与结构重塑三重屏障实现多节点协同。回生抑制方面，儿茶素可显著降低小麦淀粉相对结晶度 [54]，花青素凭借分子间隔物与成核抑制剂双重机制在宽浓度范围有效，效率可通过聚合度优化。

5.3. 多酚改性淀粉复合物的稳定性与感官特性比较

复合物的储藏稳定性和食品感官接受度是评价改性效果的重要维度，不同多酚在此方面表现各异。稳定性上，淀粉与多酚复合物整体上可提高多酚的热稳定性并降低其释放速率。白藜芦醇-大米淀粉复合物在 70°C、10% 载量下释放率 42.37%，具缓释保护作用 [52]；姜黄素负载于改性淀粉-海藻酸盐微珠，体外胃肠消化保留率 70%，远高于未改性淀粉的 43% 和无淀粉的 22% [58]。花青素因阳离子特性与淀粉

的静电吸引额外增强了结合强度，加之酰基化修饰可进一步提升疏水性和构象稳定性，其热稳定性和光稳定性在多酚中处于较高水平。在感官特性方面，茶多酚降低淀粉凝胶黏弹性且儿茶素苦涩，姜黄素赋予黄色但苦味限制用量，白藜芦醇对色泽风味干扰小。花青素本身呈天然红紫色，可为淀粉基食品赋予吸引人的色泽，但轻微涩味可能影响部分消费者的接受度。在质构方面，花青素表现出浓度依赖性双向调控特征，低浓度时削弱凝胶网络，高浓度时增强凝胶强度，这种能力是其他多酚所不具备的。综合稳定性和感官两个维度，花青素在色泽赋予和质构双向调节方面具有独特优势，但其涩味问题需要在产品配方设计中予以考虑，可通过与其他风味物质的复配加以掩盖或转化。

5.4. 花青素在多酚改性淀粉体系中的独特定位

花青素的核心优势体现在四个层面：疏水嵌入、氢键锚定和酸性条件下静电吸引构成三重协同互作，使结合兼具分子识别性与环境稳健性；聚合度、糖基化和酰基化程度可系统调控，实现从分子设计到消化抑制、回生抑制及凝胶质构的精准调节，形成结构可调的功能多样性；同时兼具天然色素与抗氧化、抗炎等生物活性，在清洁标签和功能性食品中形成双重功能输出；且低浓度削弱、高浓度增强凝胶的浓度依赖性双向质构调节，为淀粉质食品的质构精细设计提供了独特维度。因此，花青素在多酚改性淀粉工具箱中不可替代，尤其适合开发调色、控糖与肠道健康一体化的淀粉基食品。

6. 产业化挑战与未来展望

6.1. 产业化挑战

花青素与淀粉复合物从实验室走向工业化面临技术、成本、法规及市场等多维度挑战。

技术规模化是难关。实验室优化的工艺在放大时往往失效。高静水压处理能保护花青素活性，但设备投资大，单次处理量小，难以连续化生产[59]。静电纺丝可制备高性能纳米纤维膜，但生产效率极低，商业化困难。放大过程中，物料混合和热量传递不均，导致复合效率波动和批间差。此外，实验室基于纯净二元体系获得的高性能，在复杂食品基质中难以复现。蛋白质、脂质等会与花青素竞争结合，使缓释功能和色泽稳定性显著下降。成本与法规构成双重壁垒。高纯度花青素原料昂贵，而紫薯、黑米等廉价原料成分复杂、批次不均。甘薯花青素精制品提取率仅 0.05%，急需高效低成本提取技术。法规方面，复合物作为新配料，定义、安全标准和功效声称依据均不明确。虽有黑果枸杞花青素测定的团体标准[60]，但复合物自身的质量标准几乎空白，人体试验证据严重缺乏。市场接纳度决定成败。花青素的天然色泽和轻微涩味可能影响消费者接受度。因此必须明确产品定位：是面向大众的日常健康食品，还是满足特定需求的功能性产品。产业化的核心挑战，在于从追求单一性能转向综合权衡技术可行性、经济成本、法规合规性与真实市场需求。

6.2. 未来研究方向

未来研究需从制备技术、科学基础、应用开发三个层面系统推进，尤其要强化与产业应用的对接。

制备技术层面，研究的核心问题是开发高效、稳定、可规模化的先进工艺。通过组合物理场辅助、酶法、微胶囊化等多技术协同策略，摆脱单一技术局限，在温和条件下同步提高包埋率、稳定性和功能活性。同时推动工艺连续化、数字化、智能化。例如，集成近红外、拉曼光谱在线监控关键质量指标，利用人工智能动态调优参数，实现闭环精准控制。还应开发模块化、柔性化生产设备，降低投资风险，保障大规模生产的稳定与均一性。科学基础与原料层面，利用高分辨固体核磁共振、原位同步辐射等工具，在原子尺度解析构效关系，为理性设计提供理论支撑。合成生物学提供新路径：构建微生物细胞工厂，定向合成结构明确、性能稳定、成本可控的花青素单体，从源头解决天然原料的批次差异。同时，建立

从体外模拟、动物实验到人体临床试验的完整证据链，验证安全性与健康功效，推动相关标准体系的建立。这些基础研究最终要服务于产品开发。

应用开发层面，需要逐步向含蛋白质、膳食纤维等多组分的复合体系拓展，开发具有多重健康效益的食品配料。产品形式上，优先选择面条、营养棒等传统载体，让功能成分自然融入日常饮食，降低市场接受门槛。通过探索 pH 响应或酶触发的智能递送系统，实现活性成分在胃肠道的靶向释放，大幅提升生物利用度。花青素-淀粉复合物可成为个性化营养的重要载体，为定制满足个体健康需求的主食产品提供技术方案。未来必须构建覆盖基础研究、工程转化、法规科学与市场洞察的全链条创新体系，才能真正实现技术的价值转化与成功应用。

7. 结论

花青素-淀粉复合物的研究揭示了天然多酚与淀粉通过非共价相互作用实现功能协同的内在规律，其结构基础主要依赖于疏水作用驱动的 V 型包合与氢键网络的稳定化效应，而花青素的聚合度、苷元修饰及糖基化与酰基化程度则是精准调控上述相互作用的关键结构参数。在此基础上，花青素能够引导淀粉发生从分子链构象到宏观聚集态的多尺度有序重构，具体表现为螺旋构象转变、凝胶网络重组以及结晶与糊化行为的改变；这些结构变化进一步转化为一系列独特功能，包括在低至高浓度范围内精确调节流变与质构、通过分子间隔与成核抑制双重机制延缓回生、借助物理阻隔-生化抑制-结构重塑三个协同节点降低消化速率，以及在结肠发酵中促进有益菌增殖与短链脂肪酸生成。然而，该体系从实验室走向产业化仍面临多重挑战，如真实食品基质中蛋白质和脂质等组分的竞争性干扰、非共价作用力的动态演变规律难以精确定量解析，以及高静水压和静电纺丝等绿色制备技术的规模化放大与成本控制问题。未来研究应聚焦于发展多技术协同的连续化生产工艺、结合人工智能与分子模拟建立原子尺度的定量构效关系模型，并依托合成生物学获得结构均一的花青素原料，从而推动花青素-淀粉复合物在个性化营养与健康干预领域中的实际应用。

基金项目

四川省大学生创新训练计划项目(S202511079083)；成都大学大学生创新训练计划(CDUCX2026744)。

参考文献

- [1] Zhao, D., Zhang, K., Guo, D. and Tong, X. (2023) Effect of Tea Polyphenols on the Physicochemical, Structural and Digestive Properties of Modified High Amylose Corn Starch. *Food & Function*, **14**, 5196-5204. <https://doi.org/10.1039/d2fo04089a>
- [2] 宋靖邦, 韩四海, 刘建学, 等. 阿魏酸协同初化处理对马铃薯淀粉的改性作用[J]. 中国食品学报, 2024, 24(9): 51-59.
- [3] Sun, S., Jin, Y., Hong, Y., Gu, Z., Cheng, L., Li, Z., *et al.* (2021) Effects of Fatty Acids with Various Chain Lengths and Degrees of Unsaturation on the Structure, Physicochemical Properties and Digestibility of Maize Starch-Fatty Acid Complexes. *Food Hydrocolloids*, **110**, Article ID: 106224. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106224>
- [4] Wallace, T.C. and Giusti, M.M. (2015) Anthocyanins. *Advances in Nutrition*, **6**, 620-622. <https://doi.org/10.3945/an.115.009233>
- [5] Yang, X., Yu, T., Rao, L., Wang, Y. and Liao, X. (2025) Outer Shell: Natural Biomaterial Derived from Starch for Effective Anthocyanin Interaction. *International Journal of Biological Macromolecules*, **312**, Article ID: 144121. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.144121>
- [6] Li, F., Chen, Z., Chang, M., Zhang, X., Liu, X. and Wang, J. (2023) Three Anthocyanin-Rich Berry Extracts Regulate the In Vitro Digestibility of Corn Starch: Physicochemical Properties, Structure and α -Amylase. *International Journal of Biological Macromolecules*, **253**, Article ID: 127484. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127484>
- [7] Xu, J., Li, X., Liu, S., Zhao, P., Huo, H. and Zhang, Y. (2019) Effect of Nanocrystallization of Anthocyanins Extracted from Two Types of Red-Fleshed Apple Varieties on Its Stability and Antioxidant Activity. *Molecules*, **24**, Article No.

3366. <https://doi.org/10.3390/molecules24183366>
- [8] Miao, L., Xu, Y., Jia, C., Zhang, B., Niu, M. and Zhao, S. (2021) Structural Changes of Rice Starch and Activity Inhibition of Starch Digestive Enzymes by Anthocyanins Retarded Starch Digestibility. *Carbohydrate Polymers*, **261**, Article ID: 117841. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117841>
- [9] 杜萌, 王月慧, 丁文平, 等. 不同烷基链长度磺酸钠乳化剂对玉米淀粉结构与表面性质影响[J]. 农业工程学报, 2025, 41(8): 301-309.
- [10] Zhang, W.D., Zhu, H.B., Rong, L.Y., *et al.* (2023) Purple Red Rice Bran Anthocyanins Reduce the Digestibility of Rice Starch by Forming V-Type Inclusion Complexes. *Food Research International*, **166**, Article ID: 112578. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112578>
- [11] 李奎, 魏代巍, 李姝琪, 等. 欧李原花青素对马铃薯淀粉消化的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(2): 212-217.
- [12] Zhou, H.B., Peng, S.H., Liu, Y.M., Wang, T., Weng, X.H., Liu, G., *et al.* (2024) Structural Changes of Potato Starch and Activity Inhibition of Starch Digestive Enzymes by Anthocyanin from Lingonberry (*Vaccinium uliginosum* L.) Retarded Starch Digestibility. *International Journal of Biological Macromolecules*, **281**, Article ID: 136673. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.136673>
- [13] Cabrera-Ramírez, A.H., Cervantes-Ramírez, E., Morales-Sánchez, E., Rodríguez-García, M.E., Reyes-Vega, M.d.l.L. and Gaytán-Martínez, M. (2021) Effect of Extrusion on the Crystalline Structure of Starch during RS5 Formation. *Polysaccharides*, **2**, 187-201. <https://doi.org/10.3390/polysaccharides2010013>
- [14] 苗兰鸽, 许燕, 赵思明, 等. 花青素对不同直链淀粉含量的淀粉理化特性的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(14): 22-28.
- [15] 李雅丽, 季原, 胡金朋, 等. 葡萄籽原花青素-糯米淀粉复合物性质的结构基础[J]. 保山学院学报, 2024, 43(2): 24-31.
- [16] Lavelli, V., Sri Harsha, P.S.C., Ferranti, P., Scarafoni, A. and Iametti, S. (2016) Grape Skin Phenolics as Inhibitors of Mammalian α -Glucosidase and α -Amylase—Effect of Food Matrix and Processing on Efficacy. *Food & Function*, **7**, 1655-1663. <https://doi.org/10.1039/c6fo00073h>
- [17] Kolev, T., Chochkov, R. and Boz, H. (2023) Rheological Properties of Dough and Quality Characteristic of Wheat Whole Grain Bread Added with Black Chokeberry (*Aronia melanocarpa*). *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies*, **9**, 4844-4851.
- [18] Wu, T., Sun, N., Chan, Z., Chen, C., Wu, Y. and Chau, C. (2022) Enhancement of Digestion Resistance and Glycemic Control of Corn Starch through Conjugation with Gallic Acid and Quercetin Using the Free Radical Grafting Method. *Processes*, **10**, Article No. 2610. <https://doi.org/10.3390/pr10122610>
- [19] Sohany, M., Tawakkal, I.S.M.A., Ariffin, S.H., Shah, N.N.A.K. and Yusof, Y.A. (2021) Characterization of Anthocyanin Associated Purple Sweet Potato Starch and Peel-Based pH Indicator Films. *Foods*, **10**, Article No. 2005. <https://doi.org/10.3390/foods10092005>
- [20] Butković, V. (2009) Nitroxide Mediated Degradation of Anthocyanidins. *Croatica Chemica Acta*, **82**, 707-713.
- [21] Leonarski, E., Cesca, K., de Oliveira, D. and Zielinski, A.A.F. (2023) A Review on Enzymatic Acylation as a Promising Opportunity to Stabilizing Anthocyanins. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **63**, 6777-6796. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2041541>
- [22] Xu, Q., Zhou, Y.J., Luo, L.P., *et al.* (2017) Acylation of Blueberry Anthocyanins with Aliphatic Carbonyl Acids and Their Stability Analysis. In: *Proceedings of the 2017 6th International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2017)*, Atlantis Press, 904-907.
- [23] Khalifa, I., Li, Z., Zou, X., Nawaz, A., Walayat, N., Manoharadas, S., *et al.* (2024) RuBisCo Can Conjugate and Stabilize Peonidin-3-o-p-coumaroylrutinoside-5-o-glucoside in Isotonic Sport Models: Mechanisms from Kinetics, Multispectral, and LibDock Assays. *Food Chemistry*, **438**, Article ID: 138006. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138006>
- [24] 乔炳乾, 付田田, 牛丽亚, 等. 葡萄籽原花青素对不同淀粉理化性质影响的研究[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(6): 59-64.
- [25] 张成浩. 原花青素对不同淀粉理化性质的影响[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2020.
- [26] Ye, Z.W., Liu, M.Y., Lyu, J., Rong, H. and Gan, L. (2025) Influence of Enzymatic Acylation on the Stability and Antioxidant Properties of Cyanidin-3-o-glucoside in Both Aqueous and Lipid Systems. *Molecules*, **30**, Article No. 2015. <https://doi.org/10.3390/molecules30092015>
- [27] Zhang, Z., Tian, J., Fang, H., Zhang, H., Kong, X., Wu, D., *et al.* (2020) Physicochemical and Digestion Properties of Potato Starch Were Modified by Complexing with Grape Seed Proanthocyanidins. *Molecules*, **25**, Article No. 1123. <https://doi.org/10.3390/molecules25051123>
- [28] 郭文会, 张丽霞, 陈晓明, 等. 黑豆花色苷-豌豆淀粉复合物制备及其抗氧化活性研究[J]. 粮食与油脂, 2024,

- 37(12): 128-134.
- [29] Li, Q., Guo, A., Rao, L., Zhao, L., Wang, Y. and Liao, X. (2024) Tunable Interactions in Starch-Anthocyanin Complexes Switched by High Hydrostatic Pressure. *Food Chemistry*, **436**, Article ID: 137677. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137677>
- [30] 王金晶. 葡萄籽原花青素对面团流变及其品质特性的研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津科技大学, 2024.
- [31] 陈丽媛, 杨敏, 孔青, 等. 紫玉米芯花青素的超声波辅助提取及喷雾干燥的工艺优化[J]. 食品工业科技, 2017, 38(16): 199-204+209.
- [32] Vedove, T.M.A.R.D., Maniglia, B.C. and Tadini, C.C. (2021) Production of Sustainable Smart Packaging Based on Cassava Starch and Anthocyanin by an Extrusion Process. *Journal of Food Engineering*, **289**, Article ID: 110274. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110274>
- [33] Mirmoghtadaie, L., Kadivar, M. and Shahedi, M. (2009) Effects of Cross-Linking and Acetylation on Oat Starch Properties. *Food Chemistry*, **116**, 709-713. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.03.019>
- [34] Tarone, A.G., Cazarin, C.B.B. and Marostica Junior, M.R. (2020) Anthocyanins: New Techniques and Challenges in Microencapsulation. *Food Research International*, **133**, Article ID: 109092. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109092>
- [35] 吴朝霞, 孟, 林琳, 臧辉. 几种微胶囊包裹方法对葡萄籽原花青素包裹效果的对比研究[J]. 食品工业科技, 2005(9): 67-68+72.
- [36] Farnad, N. and Farhadi, K. (2023) Simple and Complex Coacervation Methods for the Nanoencapsulation of *Rosa damascena* Mill L. Anthocyanin in Zein/Potato Starch: A New Approach to Enhance Antioxidant and Thermal Properties. *Journal of Food Science*, **88**, 1019-1032. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16463>
- [37] 袁虎, 陈复生. 花青素-淀粉智能指示膜的制备及性能研究[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(4): 129-135.
- [38] 谢莉. 紫甘蓝花青素对面筋蛋白网络结构及面团品质的影响[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2024.
- [39] Vidana Gamage, G.C., Lim, Y.Y. and Choo, W.S. (2022) Sources and Relative Stabilities of Acylated and Nonacylated Anthocyanins in Beverage Systems. *Journal of Food Science and Technology*, **59**, 831-845. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05054-z>
- [40] Feng, N., She, S., Hu, H., Tang, S., Tan, J., Wu, Q., *et al.* (2021) Effects of Oligomeric Procyanidins from Lotus Seedpod on the Retrogradation Properties of Rice Starch. *Frontiers in Nutrition*, **8**, Article ID: 751627. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.751627>
- [41] 许晨, 刘锐, 孙婵婵, 等. 原花青素抑制玉米淀粉回生作用的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(5): 1811-1818.
- [42] 饶晨露. 挤出耦合亲水胶体及阿魏酸调控板栗淀粉回生及消化性质的研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2022.
- [43] 涂园, 李晓玺, 陆萍, 等. 发酵过程中原花青素对大米淀粉多尺度结构及体外消化特性的调控[J]. 现代食品科技, 2022, 38(3): 152-158+285.
- [44] 陈荣达. 紫娟茶花青素抑制酪氨酸酶活性及其作用机制研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春师范大学, 2021.
- [45] 郭雅靖, 颜梦婷, 林圣楠, 等. 几种原花青素的降血糖作用及与常见食品原料的结合研究[J]. 食品科学, 2017, 38(19): 156-163.
- [46] Lu, Y. and Yeap Foo, L. (2000) Antioxidant and Radical Scavenging Activities of Polyphenols from Apple Pomace. *Food Chemistry*, **68**, 81-85. [https://doi.org/10.1016/s0308-8146\(99\)00167-3](https://doi.org/10.1016/s0308-8146(99)00167-3)
- [47] 李淼, 胡文泽, 岳国鑫, 等. 高聚原花青素降解技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(7): 417-423.
- [48] 陈伟平, 毛童俊, 樊林, 等. 紫心甘薯对高脂血症大鼠脂质代谢及氧化应激的影响[J]. 浙江大学学报(医学版), 2011, 40(4): 360-364.
- [49] 扶晓菲, 鄢明辉, 游春苹. 原花青素生理功能及其与肠道微生物相互作用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(10): 350-357.
- [50] Yue, Y., Nielsen, D.S.G., Forssten, S.D., Knudsen, K.E.B., Saarinen, M.T., Ouwehand, A.C., *et al.* (2021) Effects of Colonic Fermentation Products of Polydextrose, Lactitol and Xylitol on Intestinal Barrier Repair *in Vitro*. *Applied Sciences*, **11**, Article No. 4174. <https://doi.org/10.3390/app11094174>
- [51] Zhu, F. (2015) Interactions between Starch and Phenolic Compound. *Trends in Food Science & Technology*, **43**, 129-143. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.02.003>
- [52] Yang, J., Dong, M., Fang, F., Li, Y. and Li, C. (2024) Effects of Varied Preparation Processes on Polyphenol-Rice Starch Complexes, *in Vitro* Starch Digestion, and Polyphenols Release. *Food Chemistry*, **450**, Article ID: 139330.

- <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139330>
- [53] 涂安, 景成童, 王建航, 等. 等离子体辅助处理对鹰嘴豆淀粉-姜黄素复合物结构和功能性质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(24): 264-271.
- [54] Aalim, H., Arslan, M., Abaker, H.M.A., Hashim, S.B.H., Tahir, H.E., Karim, N., *et al.* (2026) Phenolics Distribution in Rice and Their Macromolecular Interactions: A Matrix-Centric Perspective. *Foods*, **15**, Article No. 660. <https://doi.org/10.3390/foods15040660>
- [55] Wang, R., Liu, C., Zhang, K., Sun, R., Liu, S., Chang, X., *et al.* (2025) Effect of High Hydrostatic Pressure on Physicochemical and Digestive Properties of Catechin-Chestnut Starch Complexes. *Food Chemistry*, **485**, Article ID: 144501. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.144501>
- [56] Raza, H., Li, S., Zhou, Q., He, J., Cheng, K.W., Dai, S., *et al.* (2023) Effects of Ultrasound-Induced V-Type Rice Starch-Tannic Acid Interactions on Starch *in Vitro* Digestion and Multiscale Structural Properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, **246**, Article ID: 125619. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125619>
- [57] Wang, Y., Wang, D., Xing, M., Ji, M., Jiang, X., Jia, L., *et al.* (2025) Effect and Mechanism of Chlorogenic Acid Inhibition of Starch Enzymatic Hydrolysis: Comparison of Different Processing Methods. *Food Chemistry: X*, **29**, Article ID: 102796. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102796>
- [58] Koev, T.T., Harris, H.C., Kiamehr, S., Khimyak, Y.Z. and Warren, F.J. (2022) Starch Hydrogels as Targeted Colonic Drug Delivery Vehicles. *Carbohydrate Polymers*, **289**, Article ID: 119413. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119413>
- [59] de Oliveira, A.A., Torres, A.G., Perrone, D. and Monteiro, M. (2021) Effect of High Hydrostatic Pressure Processing on the Anthocyanins Content, Antioxidant Activity, Sensorial Acceptance and Stability of Jussara (*Euterpe edulis*) Juice. *Foods*, **10**, Article No. 2246. <https://doi.org/10.3390/foods10102246>
- [60] 全国特殊膳食标准化技术委员会. 黑果枸杞及其制品中花青素(花色苷)的含量测定 pH 示差法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.