

李斌, 王琳, 岳健, 等. 花青素类化合物影响淀粉理化性质研究进展 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(1): 343–351. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023020169

LI Bin, WANG Lin, YUE Jian, et al. Research Progress on the Effects of Anthocyanidin Compounds on Physicochemical Properties of Starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(1): 343–351. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023020169

· 专题综述 ·

花青素类化合物影响淀粉理化性质研究进展

李斌¹, 王琳¹⁺, 岳健², 苏娟², 杨曙方³, 杨一莹³, 牛文博⁴, 边媛媛^{1*}

(1. 沈阳农业大学食品学院, 辽宁沈阳 110866;

2. 云南山里红生物科技有限公司, 云南昆明 650299;

3. 浙江蓝美技术股份有限公司, 浙江诸暨 311800;

4. 锦州海关综合技术服务中心, 辽宁锦州 121001)

摘要: 花青素类化合物包括原花青素、花青素、花色苷等。其中, 原花青素是一种聚多酚类化合物, 花青素和花色苷均属黄酮类化合物。当在酸性介质中加热时, 原花青素可产生花青素, 花青素可通过糖苷键与糖相结合可产生花色苷。在深色谷物、浆果及蔬菜中, 原花青素、花青素、花色苷广泛分布, 均具有多种功效。淀粉价格低廉、来源丰富, 具有多种功能特性, 淀粉基食品的感官品质及营养价值主要由淀粉糊化性质、热力学性质、流变学性质、老化性质及消化性质等变化所决定。对于淀粉与其他化合物共存能够改善淀粉原本性质已有很多研究, 但关于花青素类化合物对淀粉性质影响的概述较少。因此, 本文综述了花青素类化合物提高淀粉的糊化温度, 降低淀粉的糊化焓值, 进而影响淀粉的热力学性质, 同时降低淀粉的老化焓以及老化率, 降低淀粉的消化速率等对淀粉糊化特性、热力学特性、流变学特性、老化特性和消化性质影响的最新研究进展, 为利用花青素类化合物等改善淀粉基食品的加工性能、感官和营养品质提供指导。

关键词: 花青素类化合物, 原花青素, 花青素, 花色苷, 淀粉

中图分类号: TS234^{+.1}

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)01-0343-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023020169

本文网刊:



Research Progress on the Effects of Anthocyanidin Compounds on Physicochemical Properties of Starch

LI Bin¹, WANG Lin¹⁺, YUE Jian², SU Juan², YANG Shufang³, YANG Yiyun³, NIU Wenbo⁴, BIAN Yuanyuan^{1*}

(1. College of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;

2. Yunnan Shanli Hong Biotechnology Co., Ltd., Kunming 650299, China;

3. Zhejiang Lanmei Technology Co., Ltd., Zhuji 311800, China;

4. Jinzhou Customs Comprehensive Technical Service Center, Jinzhou 121001, China)

Abstract: Anthocyanidin compounds include proanthocyanidins, anthocyanidins, anthocyanins, etc. Among them, proanthocyanidin is a kind of polyphenol compound, then anthocyanidin and anthocyanin belong to flavonoid compounds. When heated in an acidic medium, proanthocyanidins can produce anthocyanidins, which combine with sugars via glycosidic bonds to produce anthocyanins. Proanthocyanidins, anthocyanidins and anthocyanins are widely distributed in dark grains, berries and vegetables, all of them have various functional effects. Starch is low in price, rich in sources, and has a variety of functional properties. The sensory quality and nutritional value of starch-based foods are mainly determined by the changes of starch gelatinization properties, thermodynamic properties, rheological properties, aging properties and digestive properties. There have been many studies about the co-existence of starch and other compounds that can improve

收稿日期: 2023-02-20 +并列第一作者

基金项目: 辽宁省教育厅一般项目 (LJKZ0651)。

作者简介: 李斌 (1979-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 健康食品营养创制, E-mail: libinsyau@163.com。

王琳 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 健康食品营养创制, E-mail: wangss20150101@163.com。

* 通信作者: 边媛媛 (1985-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 健康食品营养创制, E-mail: byy@syau.edu.com。

the original properties of starch. However, there is limited overview on the effects of anthocyanidin compounds on starch properties. Therefore, this paper reviews the latest research progress of anthocyanidin compounds and their effects on the gelatinization properties, thermodynamic properties, rheological properties, aging properties and digestive properties of starch through increasing the gelatinization temperature of starch and reducing its gelatinization enthalpy can affect its thermodynamic properties, as well as reduce its aging enthalpy and aging rate, additionally and the digestion rate of starch etc. These can provide guidance for the use of anthocyanidin compounds to improve the processing properties, sensory and nutritional quality of starch-based foods.

Key words: anthocyanidin compounds; proanthocyanidin; anthocyanidins; anthocyanins; starch

在人类日常饮食中,淀粉为机体的生理活动提供主要能量,在人类健康中起着十分重要的作用^[1]。当前,我国糖尿病患者愈来愈多,肥胖症也逐年增加,因此,延缓淀粉消化、降低食品血糖指数尤为重要^[2]。在经热处理时,淀粉受热后吸水膨胀,破坏其氢键,粘度变高,难以维持原有的结构,此过程不可逆,为淀粉糊化^[3]。糊化后,由于高温及水分子的作用,淀粉会再结合,相互凝结,为淀粉老化^[4],淀粉类产品在经老化后品质会降低,容易变质,进而会影响食品的加工与储存^[5]。淀粉基食品的感官品质及营养价值主要由淀粉糊化性质、流变学性质、老化性质及消化性质等变化所决定,淀粉加工过程中的结构变化对营养品质具有重要的影响。

原花青素是一种聚多酚类化合物,可以清除自由基,具有良好的抗氧化活性。研究表明,通过氢键,淀粉可与多酚类物质结合,其属于非共价结合,形成淀粉-多酚复合物,进而改善淀粉原有的理化性质^[6]。花青素是一种类黄酮化合物,具有增强和保护视力、降血糖、抗肿瘤以及抗炎等多种功效,研究已经证实,通过酶抑制机制,花青素可以降低食物系统中淀粉的消化率。花色苷是一种可溶性黄酮类物质,能够抗氧化、抗衰老、抗炎症、抗癌,同时具有保护视力、对慢性疾病进行预防、对肥胖进行预防等效果。花色苷还可提高淀粉的营养品质、改善淀粉的性质^[7],多项研究表明,淀粉与花色苷相结合后,可使淀粉在体内消化、吸收,降低淀粉进入血液的速度,影响淀粉的消化率,延缓淀粉消化,影响酶的活性,使葡萄糖释放率减慢,在特定趋向下还可以降低血糖^[8]。

当前对于淀粉与原花青素、花青素和花色苷的相互作用机制和其他性质等已有一定研究,但综合原花青素、花青素以及花色苷对淀粉的理化性质的影响尚不明晰。因此,对淀粉与原花青素、花青素和花色苷之间相互作用的研究进展进行综述十分重要。本文综述了原花青素、花青素与花色苷之间的相互作用机制,原花青素、花青素和花色苷对淀粉的糊化特性、流变学特性、老化特性及消化性质影响规律的研究进展,为改善淀粉基食品品质、开发新型食品奠定理论基础。

1 原花青素、花青素、花色苷简介

1.1 原花青素简介

原花青素属于聚多酚类化合物,由黄烷-3-醇单

体及其聚合体缩合而成,通常由表儿茶素和儿茶素单体组成。原花青素多存在于植物的皮、壳、籽中,比如葡萄籽、黑米皮等。原花青素具有抗氧化、抑菌、增强免疫、辅助治疗糖尿病等许多生物活性^[9]。当在酸性介质中加热时,原花青素可产生花青素,此过程不可逆。原花青素在疾病的预防与治疗中也有重要作用,并且也在医药化妆品、保健食品、特医食品等领域使用,是一种功能性食品原料^[10],具有广阔的发展前景。

1.2 花青素简介

花青素是一种广泛存在于植物中的类黄酮化合物,由苯基丙酸类和类黄酮合成途径生成。花青素属于水溶性天然色素,由花色苷水解而得^[11]。其在水果、谷物和蔬菜中广泛存在,结构主要是由 C₆-C₃-C₆ 为基本的 C 骨架组成的,具有较高的抗氧化活性^[12]。此外,无色花青素可通过花青素合成酶形成有色花青素,通过 LAR 还原酶形成原花青素。有色花青素通过 AMR 还原酶形成原花青素^[13]。花青素具有神经保护、心脏保护、抗糖尿病、抗肥胖和抗癌等多种功效^[14]。

1.3 花色苷简介

花色苷是一种类黄酮化合物,是花青素与糖通过糖苷键结合而成的一类化合物,广泛存在于蓝莓、草莓等浆果和紫玉米、紫薯、紫甘蓝等谷物和蔬菜中,是水溶性天然色素^[15]。花色苷可由有色花青素通过类黄酮糖基转化酶分解得到。花色苷在降血脂、降血糖、降低心血管疾病以及抗癌等方面具有一定的作用^[16]。花色苷新品种“蓝美 1 号”是从蓝莓水果中提取的天然抗氧化剂和抗衰老因子,其蓝莓花青素是目前国内唯一含有完整 15 种花色苷的花青素,不仅所含花青素成分齐全,且飞燕草素、矮牵牛素等组成所占比例,远高于其它蓝莓品种^[17]。“蓝美 1 号”花色苷具有缓解视疲劳、美容、抗衰老、改善睡眠、改善脑健康、预防心血管健康、护肝和缓解体力疲劳以及减少放疗副作用等功效。原花青素、花青素、花色苷关系转化见图 1。

2 花青素类化合物对淀粉流变学特性影响研究进展

淀粉是一种多糖,是贮存能量的一种方式。在外力的作用下,淀粉呈现出不同的流动特性,为淀粉的流变行为,表征方法通常为静态流变学特性和动态

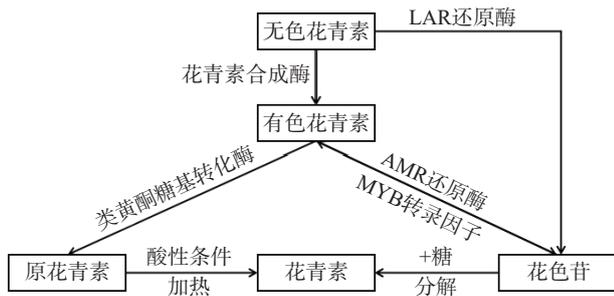


图 1 原花青素、花青素、花色苷关系转化图

Fig.1 Relationship transformation diagram of proanthocyanidins, anthocyanidins and anthocyanins

流变学特性, 流变学特性是淀粉基食品的重要性质, 流变学特性对于改善淀粉食品生产工艺具有一定意义。

2.1 对淀粉静态流变学特性的影响

在热加工时, 淀粉遇热会生成粘性的淀粉糊^[5], 淀粉糊具有剪切变稀的性质, 属于非牛顿假塑性流体。淀粉在形成双螺旋结构时受多酚及黄酮类物质抑制, 从而抑制淀粉的老化, 改变淀粉的流变学性质^[18]。当剪切速率增加时, 复合物体体系剪切变稀^[19], 原花青素会在淀粉凝胶化过程中与淀粉之间竞争水分子, 与淀粉分子链发生作用, 使淀粉链之间进行重新组合^[20]。与淀粉结合后, 原花青素改变了淀粉的表观粘度, 进而使淀粉的剪切稳定性提高, 其触变性、稠度系数、流动行为指数降低^[21]。此外, 花青素与直链淀粉通过氢键作用结合, 淀粉体系中分子顺向性增加, 表观粘度和流动阻力均降低。例如 Chai 等^[22]研究发现, 一定量茶多酚会降低直链玉米淀粉的粘度, 其他研究也发现多酚类物质影响淀粉的流变学性质, 因此花青素和原花青素对淀粉的静态流变学性质有一定的影响。

2.2 对淀粉动态流变学特性的影响

淀粉的动态粘弹性, 被称为动态流变学特性。有研究证明, 在淀粉中加入原花青素, 由于原花青素

会影响淀粉的电负性, 在一定程度上可以影响淀粉的粘弹性, 从而减弱淀粉链之间的排斥作用, 降低淀粉的有序性以及结构致密性, 并且易溶于水的原花青素会减缓水分子进入淀粉分子内部的速率^[20]。在淀粉中添加少量的原花青素时不会改变淀粉凝胶的弹性性能, 当进一步增加添加量时, 弹性降低。原花青素添加量较大时, 由于原花青素含有多个羟基, 具有较好水溶性的原花青素会与淀粉争夺水分子, 易与水分子结合^[23]。除此之外, 在淀粉老化的过程中, 原花青素会结合淀粉的直链淀粉, 使得直链淀粉分子之间的重结晶得到抑制, 因此会降低淀粉-原花青素体系的弹性。同时淀粉的回复值会因原花青素而降低, 说明淀粉的短期老化受原花青素影响^[24]。此外, 花青素与淀粉互作后, 降低其体系弹性, 由于花青素的存在, 减少淀粉糊内直链淀粉分子间的结合点, 凝胶体系的组织结构被损坏, Zhang 等^[25]的研究表明, 通过疏水作用, 小麦淀粉中的直链淀粉与芦丁和槲皮素结合, 使淀粉链之间结合减少, 降低凝胶网络强度。因此花青素和原花青素在一定程度上会影响淀粉的粘弹性, 进而影响动态流变学性质。花青素类化合物对淀粉流变学特性的影响见表 1。

3 花青素类化合物对淀粉糊化特性及热力学特性影响研究进展

淀粉受热后吸水膨胀, 粘度变高, 为淀粉糊化。糊化特性是淀粉的基本性质, 对食品品质、贮藏及加工性能有一定影响。在淀粉颗粒组织中, 能够通过氢键结合其内部聚合多糖, 再形成紧密的结构, 温度低时, 不能打破淀粉结构, 使其难溶于冷水, 有研究表明淀粉通过加热后, 破坏了淀粉内部胶束区的氢键, 淀粉颗粒大量吸水膨胀, 温度越高, 吸水量越多, 当达到一定温度时, 淀粉原有的形状发生改变, 整个体系的粘度上升^[26]。

原花青素与水分子进行相互作用, 改变淀粉颗粒所处介质, 增大水分子与淀粉颗粒之间接触面积,

表 1 花青素类化合物对淀粉流变学特性的影响

Table 1 Effect of anthocyanidin compounds on rheological properties of starch

序号	原花青素来源/添加量	淀粉/添加量	静态流变学	粘弹性	动态流变学	参考文献
1	葡萄籽/0%、0.5%、1%、1.5%、2%、2.5%	玉米/3 g	—	↓	—	[9]
2	高聚原花青素	高直链玉米淀粉; 普通玉米淀粉; 蜡质玉米淀粉	流动性↑	↓	改变	[10]
3	紫米糠	大米	改变	—	改变	[18]
4	黑米/0%、1%、2%、5%、10%	珍珠糯米; 赛亚东北香米; 赛亚桃花米/50 mg	粘度↓	↓	弹性↓	[24]
5	葡萄籽/0%、2.5%、5%、7.5%	马铃薯/1.5 g	流动行为指数、稠度系数、触变性↓、剪切稳定性↑	—	—	[26]
6	葡萄籽/0%、5%、10%、15%	大米/0.5 mg	不改变、改变(稠度系数、屈服应力和流动性为指数)	改变	改变	[27]
7	黑米/0%、2.5%、5%、7.5%、10%	大米	粘度↓	↓	改变	[28]
8	—	黑米	粘度↓	↓	改变	[29]
9	杨梅叶	玉米	表观粘度↑	↓	改变	[30]
10	欧李	马铃薯	粘度↓	↓	改变	[31]

表2 花青素类化合物对淀粉糊化及热力学性质的影响

Table 2 Effect of anthocyanin compounds on starch gelatinization and thermodynamic properties

序号	花青素来源/添加量	淀粉	整体粘度	崩解值	回复值	糊化焓	参考文献
1	葡萄籽/0%、5%、10%、15%	大米/0.5 mg	↓	↓	↓	↓	[9]
2	高聚原花青素	高直链玉米淀粉; 普通玉米淀粉; 蜡质玉米淀粉	↓	↓	↓	↓	[10]
3	葡萄籽/0%、0.5%、1%、1.5%、2%、2.5%	玉米/3 g	↓	↓	↓	↓	[24]
4	葡萄籽/0%、2.5%、5%、7.5%	马铃薯/1.5g	↓	↓	↓	↓	[26]
5	葡萄籽	马铃薯	↓	↓	↓	↓	[27]
6	—	高直链玉米淀粉	↓	↓	↓	↓	[28]
7	黑米/0%、1%、2%、5%、10%	珍珠糯米; 赛亚东北香米; 赛亚桃花米/50 mg	—	—	—	↓	[29]
8	黑米/0%、2.5%、5%、7.5%、10%	大米	↓	↓	↓	↓	[33]
9	杨梅叶	玉米	↓	↓	↓	↓	[34]
10	枸杞叶	大米	↓	↓	—	—	[35]

从而对淀粉糊化特性产生一定影响^[32]。原花青素与淀粉发生相互作用,在一定程度上,支链淀粉的侧链、淀粉颗粒的无定形区域与多酚的亲水性羟基基团结合^[7],张子睿等^[33]研究表明原花青素破坏淀粉微晶结构,导致淀粉的糊化焓、糊化温度、整体粘度、回复值、崩解值发生改变。在淀粉糊化过程中,通过氢键,原花青素和水分子和淀粉分子进行结合,淀粉易于吸水膨胀^[24]。例如 Zhang 等^[25]研究发现花青素的亲水性羟基在某种程度上与直链淀粉非结晶区发生了结合,改变了淀粉结晶区与非结晶区的耦合力,减小了破坏淀粉分子结构所需要的能量。原花青素具有大量的酚羟基,与淀粉和水分子发生氢键作用,影响淀粉的糊化性质。有关研究证明,与原淀粉相比,在原花青素-淀粉体系下,降低了淀粉的糊化焓值,其体系的初始温度、峰值温度、终值温度也得到改变^[34]。花青素类化合物对淀粉糊化及热力学性质的影响见表2。综上所述,花青素类化合物能够影响淀粉的糊化及热力学性质。

4 花青素类化合物对淀粉老化特性影响研究进展

糊化后的淀粉,在贮存过程中,淀粉糊会变得不透明,硬度上升,持水性下降,粘度下降,淀粉分子的直链和支链淀粉分子重新结晶,由无序转变为有序结构,为淀粉的老化^[36]。淀粉老化后口感变差、较难恢复糊化前状态,致使消化率降低。淀粉类食品的食用品质和加工与淀粉的老化特性有很大关系。因此,提高淀粉基食品的质量、有效延缓淀粉老化十分重要^[27]。通常情况下,可利用差示扫描热量法(Differential Scanning Calorimetry, DSC)、红外光谱分析(Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)、扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)、X-射线衍射(X-ray Powder diffractometer, XRD)等手段考察淀粉的老化性质,

4.1 热力学性质分析

在 DSC 中,原花青素与淀粉中的羟基形成氢键,从而抑制淀粉多聚物链与淀粉的结合,淀粉与原花青素结合会提高淀粉的糊化温度,降低淀粉的糊化

焓值,同时还会降低淀粉的老化焓以及老化率。例如房子蔚等^[37]通过葡萄籽原花青素对不同淀粉理化性质影响发现老化焓下降,说明淀粉的老化受原花青素的抑制。乔炳乾等^[38]通过研究将原花青素与其它多酚类化合物进行比较,原花青素的羟基数更多,因此原花青素与淀粉分子发生相互作用更易进行。汪婷婷等^[28]通过黑米花青素对大米淀粉热力学特性的影响分析,证实了花青素对淀粉老化有一定影响。综上所述,随原花青素添加量增加,更加抑制淀粉老化,对淀粉老化作用有一定改善。

4.2 核磁共振分析

核磁共振分析法具有测定快速、制样方便、重现性好、精度高等优点,江帆^[39]的研究表明此技术在研究淀粉的组成、颗粒结构、结构分析、分子迁移等具有重要作用。徐佳慧^[10]通过高聚原花青素与马铃薯淀粉分子之间形成氢键相互作用,证实其对淀粉老化有一定的作用。孙健^[40]在分子水平上,采用核磁共振进行分析,发现原花青素-淀粉体系化学位移产生变化,淀粉分子附近的电子云密度减小,同时其间的氢键作用力增强,淀粉分子的有序性也发生变化,影响了淀粉的老化特性。通过核磁共振分析,淀粉与花青素类化合物之间形成氢键相互作用,影响淀粉老化。

4.3 X-射线衍射与结晶度分析

原花青素与淀粉结合后,体系吸收峰强度变弱,相对结晶度降低,对淀粉的重结晶进行抑制,孙健^[40]在淀粉老化性质研究中进行了证实。Wang 等^[41]通过 X-射线衍射证明原花青素与淀粉相互作用,阻碍淀粉重结晶,起到抑制淀粉老化的作用。Wu 等^[42]将原花青素与淀粉结合后,由于羟基引入,通过氢键使淀粉分子结合,并且原花青素易溶于水,可降低淀粉周围水分子的运动能力,阻碍淀粉与水分子之间的结合,使老化过程中淀粉结晶度下降,原花青素表现出对淀粉老化具有较好的抑制效果。研究表明,淀粉相对结晶度降低均体现花青素类化合物抑制淀粉的老化。

4.4 傅里叶红外光谱分析

傅里叶红外光谱分析化合物之间相互作用^[43]。

原花青素与淀粉结合后,混合体系的红外图谱没有出现新的吸收峰,原花青素与淀粉之间的相互作用较弱,并且相互作用方式为氢键作用^[44]。原花青素-淀粉体系相互作用越强,其红外吸收峰的频率越低^[45]。张成浩^[26]通过葡萄籽原花青素与马铃薯淀粉之间无新吸收峰,以非共价键结合,证实对淀粉老化性质的影响。例如 Liu 等^[29]研究发现,糊化后降温的过程中原花青素干扰了淀粉分子的结合,会减弱淀粉分子之间的氢键作用,破坏了淀粉的结晶结构。有研究表明花青素与淀粉过非共价键结合后,红外光谱几乎不变,花青素对淀粉的基本结构没有破坏^[46]。通过傅里叶红外光谱分析无新吸收峰,花青素类化合物与淀粉之间以非共价键结合,改善淀粉老化。

4.5 扫描电镜微观结构与凝胶性质分析

扫描电镜放大倍数高,易于观察,在淀粉微观形貌的观察中普遍应用^[47]。有研究表明当原花青素与淀粉结合后,在淀粉老化过程中,在 SEM 下,增加持水性,减慢脱水性,硬度降低较明显,可观察到淀粉结构变得疏松,淀粉分子的内部结构呈现疏松多孔^[48]。原花青素和淀粉分子链结合,从而使淀粉的重结晶受到抑制^[49]。Xue 等^[50]利用 SEM 分析了淀粉老化处理的形态,老化过程中淀粉颗粒破碎,淀粉颗粒内由于水分的进入,淀粉颗粒结构发生变化。此外,Zhang 等^[25]研究发现花青素-淀粉体系的水分蒸发缓慢,与原淀粉相比,体系含水量较高,使得淀粉分子间相互结合受到阻碍,抑制淀粉老化。综上所述,通过扫描电镜观察到花青素类化合物改变了淀粉的表面形态,改善淀粉老化。

4.6 淀粉的水分迁移与分布

有研究发现通过测定淀粉持水性,可以很好地观察对淀粉老化性质的影响^[51]。李蟠莹等^[27]通过原花青素与大米淀粉结合后,体系持水性增强,对水分迁移具有一定影响,证实其对淀粉老化的影响。例如 Fu 等^[52]研究发现原花青素的持水性较好,水分子减弱较慢,从而不易形成凝胶,水分子具有较强的流动性,加快了分子间的运动,原花青素与淀粉结合后,对支链淀粉的重结晶产生破坏,进而延缓了淀粉老化。花青素类化合物对淀粉老化特性影响见表 3。

5 花青素类化合物对淀粉消化特性影响研究进展

近年来,肥胖和糖尿病已经成为比较严重的健康问题^[30],淀粉类食物富含碳水化合物,提供主要能量,减缓食入后血糖指数的升高,对降低糖尿病和肥胖症至关重要^[54]。淀粉摄入后主要在小肠中消化,摄入淀粉后先后进入口腔和十二指肠进行分解^[55],随后在小肠上皮粘膜细胞中,再次被分解为葡萄糖,葡萄糖进入人体血液,提高了血糖水平^[56]。

5.1 体外消化性质影响

原花青素与淀粉共存的现象也十分普遍,目前研究发现原花青素能够降低淀粉的消化速率^[57],主要通过花色苷能够与淀粉酶结合,从而影响酶的活性,使得葡萄糖释放率减慢。花色苷和淀粉链通过氢键结合,其中主要作用于淀粉中的直链淀粉,使淀粉的结构发生改变,从而影响淀粉的消化速率^[35]。

花青素可以降低食物系统中淀粉的消化率。淀粉和淀粉消化酶由于花青素存在而发生的变化都有

表 3 花青素类化合物对淀粉老化特性影响

Table 3 Effect of anthocyanidin compounds on the aging characteristics of starch

序号	原花青素来源/添加量	淀粉/添加量	时间(d)	DSC	XRD 结晶度	FTIR	SEM	LF-NMR 水分迁移	参考文献
1	黑米/0%、2.5%、5%、10%	大米/100 mg	—	—	↓	—	—	—	[7]
2	葡萄籽/0%、5%、10%、15%	大米/0.5 mg	1、7、14	老化焓值↓	↓	影响羟基官能团	持水性↑、淀粉凝胶的硬度↓、内聚性、胶粘性↓、凝胶的粘附性↑	改变	[9]
3	高聚原花青素	高直链玉米淀粉;普通玉米淀粉;蜡质玉米淀粉	7	起始和峰值凝胶化温度↑	↓	无新吸收峰,以非共价键结合	疏松、多孔	—	[10]
4	葡萄籽/2%、4%、8%	大米/100 g	—	—	↓	表面短程有序化↑	—	—	[19]
5	葡萄籽/0%、0.5%、1%、1.5%、2%、2.5%	玉米/3 g	5、10、15	老化焓值先↓后↑	先↓后↑	无新吸收峰	—	—	[24]
6	葡萄籽/0%、2.5%、5%、7.5%	马铃薯/1.5g/-	1、7、14	糊化温度↑,糊化焓值↓,老化焓和老化率↓	↓	无新吸收峰,以非共价键结合	疏松、多孔	—	[26]
7	黑米/0%、1%、2%、5%、10%	珍珠糯米;赛亚东北香米;赛亚桃花米/50 mg	7	—	↓	非共价键结合	疏松、多孔	—	[27]
8	黑米/0%、2.5%、5%、7.5%、10%	大米	14	起始和峰值凝胶化温度↑	—	—	—	—	[28]
9	杨梅叶	玉米	—	—	↓	无新吸收峰,以非共价键结合	有序性降低	—	[30]
10	欧李果实/0%、1.0%、2.0%、3.0%	马铃薯/500 mg	7	—	↓	—	改变表面形态	—	[53]

表4 花青素类化合物对淀粉消化特性影响研究进展
Table 4 Effect of anthocyanidin compounds on starch digestibility

序号	原花青素来源	淀粉来源	原花青素添加量	淀粉添加量	消化	酶	参考文献
1	黑米	大米	0%、2.5%、5%、10%	100 mg	抑制	α -淀粉酶、 α -葡萄糖苷酶	[7]
2	葡萄籽	大米	1 g	500 g	抑制	猪胰腺 α -淀粉酶、淀粉葡萄糖苷酶	[8]
3	高聚原花青素	链玉米淀粉、普通玉米淀粉、蜡质玉米淀粉	—	—	抑制	α -淀粉酶、 α -葡萄糖苷酶	[10]
4	葡萄籽	大米	2%、4%、8%	100 g	抑制	—	[19]
5	葡萄籽	玉米	0%、0.5%、1%、1.5%、2%、2.5%	100 mg	抑制	—	[24]
6	葡萄籽	马铃薯	0%、2.5%、5%、7.5%	1.5 g	—	—	[26]
7	—	大米	—	—	抑制	α -淀粉酶、 α -葡萄糖苷酶	[33]
8	—	玉米	—	—	抑制	α -淀粉酶	[35]
9	欧李果实	马铃薯	0%、1.0%、2.0%、3.0%	500 mg	抑制	α -淀粉酶、 α -葡萄糖苷酶	[53]
10	龙眼、冷撒果	—	—	—	抑制	α -淀粉酶、葡萄糖苷酶	[60]

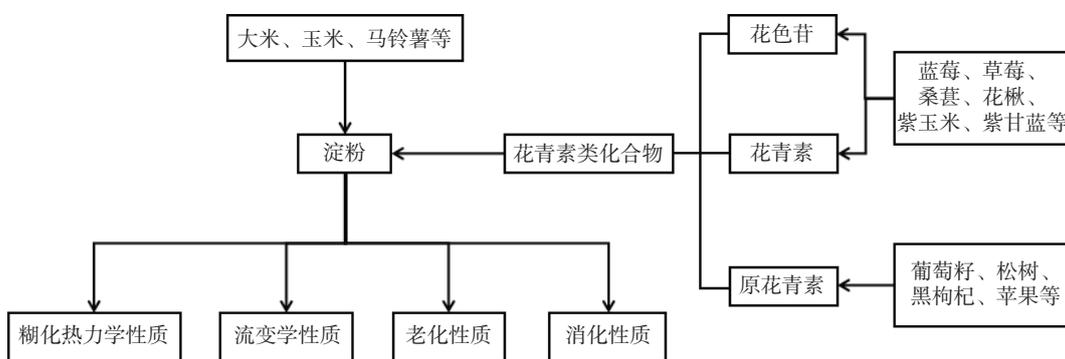


图2 花青素类化合物改善淀粉性质汇总

Fig.2 Anthocyanidin compounds improve starch properties

助于延缓淀粉的消化率^[53]。研究已经证实,通过酶抑制机制,花青素可以降低食物系统中淀粉的消化率。然而,淀粉-多酚相互作用也可能通过改变淀粉的食品微观结构和理化性质来促进^[58]。

李姝琪通过体外消化结果表明,原花青素与淀粉的共糊化能更显著地降低淀粉的消化率^[31]。花色苷与淀粉通过非共价键进行复合,形成淀粉-花色苷体系,而淀粉消化系统无法识别这种复合物酶,进一步阻碍淀粉与这些酶的结合,导致淀粉的消化率降低^[59]。

5.2 淀粉酶与消化性质的影响

淀粉消化主要由 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶参与分解,可通过降低小肠中葡萄糖释放与吸收速率,进而延缓淀粉消化^[60]。食用富含酚类食物与心血管疾病和II型糖尿病的患病率具有相反的关系^[61]。越来越多的证据表明,浆果、蔬菜、坚果和茶中所含的多酚具有许多促进健康和预防疾病的特性^[62]。特别是,包括酚类化合物在内的天然抗氧化剂可以降低患糖尿病的风险^[63],因为可抑制肠道 α -葡萄糖苷酶和胰腺 α -淀粉酶的活性。酚类化合物降低淀粉的消化率的效果比膳食纤维好,酚类化合物通过抑制消化酶来抑制淀粉水解^[64]。多酚已被证明可抑制 α -淀粉酶和/或 α -葡萄糖苷酶,从而调节对碳水化合物的血糖反应,单体多酚可以通过阻断催化作用激活两种初级消

化酶,聚合多酚可以与消化酶一起沉淀形成不易消化的复合物^[8]。富含多酚的提取物含有花青素和原花青素,其可以抑制 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶活性,从而抑制淀粉消化^[65]。周培羽等^[66]研究表明,聚合度越大的原花青素,抑制消化酶的作用越强。综上所述,多种食品药用植物来源的原花青素、花色苷及花青素可能是有效的淀粉酶抑制剂。花青素类化合物对淀粉消化特性影响研究进展见表4。花青素类化合物改善淀粉性质汇总见图2。

6 结论

原花青素具有抗氧化、抑菌、增强免疫等多种生物活性。花青素是一种类黄酮化合物,具有增强和保护视力、降血糖、抗肿瘤以及抗炎等多种功效,花色苷在降血脂、降血糖、降低心血管疾病以及抗癌等方面具有显著效果。同时,在人类日常饮食中,淀粉为机体的生理活动提供主要能量,在人类健康中起着重要作用。

淀粉糊具有剪切变稀的性质,属于非牛顿假塑性流体,淀粉与原花青素、花青素结合,会提高淀粉的糊化温度,降低淀粉的糊化焓值,进而影响淀粉的热力学性质,同时还会降低淀粉的老化焓以及老化率。原花青素、花青素、花色苷能够降低淀粉的消化速率,从而影响酶的活性,使得葡萄糖释放率减慢,导致淀粉的消化率降低。

因此, 为了促进含花青素类化合物与淀粉新产品的开发与品质的改良, 在今后的研究中, 不仅需对淀粉与花青素类化合物的相互作用机理进行进一步探究, 还需以富含淀粉和花青素类化合物的食品体系为对象, 深入研究改变淀粉基食品品质的规律。

参考文献

- [1] 张子睿. 低 GI 马铃薯馒头的开发及其对原花青素体外释放的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021. [ZHANG Z R. The development of low GI potato steamed bread and its effect on the *in vitro* digestion release of procyanidins[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.]
- [2] LIN X, LI S, YIN J, et al. Anthocyanin-loaded double pickering emulsion stabilized by octenylsuccinate quinoa starch; Preparation, stability and *in vitro* gastrointestinal digestion[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 152: 1223–1241.
- [3] XU J, LI X, CHEN J, et al. Effect of polymeric proanthocyanidin on the physicochemical and *in vitro* digestive properties of different starches[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 148: 11713.
- [4] 王思琪, 许秀颖, 崔维建, 等. 大豆异黄酮对玉米淀粉老化的影响及体系水分迁移研究[J]. 中国食品学报, 2022, 22(6): 232–241. [WANG S Q, XU X Y, CUI W J, et al. Effect of soy isoflavones on the retrogradation properties of corn starch[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(6): 232–241.]
- [5] 董慧娜, 汪磊, 陈洁, 等. 板栗淀粉-脂质复合物对淀粉老化性质的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2022, 43(1): 49–57. [DONG H N, WANG L, CHEN J, et al. Effects of fatty acids and cooking methods on aging properties of chestnut starch[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 43(1): 49–57.]
- [6] 郭佳欣, 张慧君, 刘鑫宇, 等. 玉米淀粉和马铃薯淀粉糊化后的流变性及热力学性质比较[J]. 中国果菜, 2022, 42(3): 1–5, 39. [GUO J X, ZHANG H J, LIU X Y, et al. Comparison of rheological and thermodynamic properties of gelatinized corn starch and potato starch China[J]. Fruit & Vegetable, 2022, 42(3): 1–5, 39.]
- [7] MIAO L, XU Y, JIA C, et al. Structural changes of rice starch and activity inhibition of starch digestive enzymes by anthocyanins retarded starch digestibility[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 261: 117841.
- [8] GUSTAVO A C, EDITH A, MIRNA M S, et al. Effect on *in vitro* starch digestibility of mexican blue maize anthocyanins[J]. Food Chemistry, 2016, 211: 281–284.
- [9] 许晨. 原花青素抑制玉米淀粉老化作用的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2016. [XU C. Study on preventing the retrogradation of maize starch using proanthocyanidins[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2016.]
- [10] 徐佳慧. 高聚原花青素对淀粉性质的影响研究及产品开发[D]. 南昌: 南昌大学, 2022. [XU J H. Effect of polyprocyanidins on starch properties and product development[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.]
- [11] PROMYOS N, TEMVIRIYANUKUL P, SUYYISANSANEE U, et al. Investigation of anthocyanidins and anthocyanins for targeting alpha-glucosidase in diabetes mellitus[J]. Preventive Nutrition and Food Science, 2020, 25(3): 263–271.
- [12] RATSEWO J, WARREN F J, SIRIAMOMPUN S, et al. The influence of starch structure and anthocyanin content on the digestibility of thai pigmented rice[J]. Food Chemistry, 2019, 298: 124949.
- [13] 吴莉. 花青素类化合物抗氧化活性的密度泛函理论研究[D]. 新乡: 河南师范大学, 2015. [WU L. Density functional theory calculations on the antioxidant activity of anthocyanins[D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2015.]
- [14] LUIZ B D S S, FRANCESCO C, SOLENE S, et al. Anthocyanins formulated with carboxymethyl starch for gastric and intestinal delivery[J]. Molecules, 2022, 27: 7271.
- [15] SEAN J L O, JINGYING Y, et al. Effects of anthocyanins on bread microstructure, and their combined impact on starch digestibility[J]. Food Chemistry, 2022, 374: 131744.
- [16] HUSEYIN A, TURGUT C, ASIYE A, et al. Anthocyanins: Metabolic digestion, bioavailability, therapeutic effects, current pharmaceutical/industrial use, and innovation potential[J]. Antioxidants, 2023(48): 2–19.
- [17] 刘梦溪, 林绍艳, 曾其龙, 等. 3 个南高丛蓝莓品种果实主要风味品质比较[J]. 中国果树, 2023(3): 54–59. [LIU M X, LIN S Y, ZENG Q L, et al. Comparison of fruit flavor and quality of three southern highbush blueberry varieties[J]. Chinese Fruit Tree, 2023(3): 54–59.]
- [18] DAS A B, GOUD V V, DAS C, et al. Microencapsulation of anthocyanin extract from purple rice bran using modified rice starch and its effect on rice dough rheology[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019(124): 573–581.
- [19] 涂园, 李晓玺, 陆萍, 等. 发酵过程中原花青素对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. [TU Y, LI X X, LU P, et al. Procyanidins regulate the multi-scale structures and *in vitro* digestibility of rice starch during fermentation[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(3): 152–158, 285.]
- [20] 许永亮, 程科, 邱承光, 等. 不同品种淀粉的流变学特性研究[J]. 中国粮油学报, 2006, 21(4): 16–20. [XU Y L, CHENG K, QIU C G, et al. Study on rheological properties of different varieties of starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2006, 21(4): 16–20.]
- [21] ALAMRI M S, MOHAMED A, AHUSSAIN S, et al. Effects of alkaline-soluble okra gum on rheological and thermal properties of systems with wheat or corn starch[J]. Food Hydrocolloids, 2013, 30(2): 541–551.
- [22] CHAI Y, WANG M, ZHANG G, et al. Interaction between amylose and tea polyphenols modulates the postprandial glycemic response to high-amylose maize starch[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(36): 8608–8615.
- [23] LEI C, DIE Z, LING F W, et al. Structural and mechanistic insights into starch microgel/anthocyanin complex assembly and controlled release performance[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 213: 718–727.
- [24] 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. [MIAO L G, XU Y, ZHAO S M, et al. Effects of anthocyanins on physicochemical properties of amylose with different amylose content[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(14): 22–28.]
- [25] ZHANG H, SUN B, ZHANG S, et al. Inhibition of wheat starch retrogradation by tea derivatives[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 134: 413–417.
- [26] 张成浩. 原花青素对不同淀粉理化性质的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2020. [ZHANG C H. Effects of proanthocyanidins on physicochemical properties of different starches [D]. Nanchang:

- Nanchang University, 2020.]
- [27] 李蟠莹, 戴涛涛, 陈军, 等. 原花青素对大米淀粉老化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(18): 6-11. [LI F Y, DAI T T, CHEN J, et al. Effect of proanthocyanidins on retrogradation of rice starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(18): 6-11.]
- [28] 汪婷婷, 沈月, 邓蒙蒙, 等. 黑米花青素对大米淀粉热力学、回生及流变学特性的影响[C]. 中国食品科学技术学会, 2020: 357-358. [WANG T T, SHEN Y, DENG M M, et al. Effects of black rice anthocyanin on thermodynamic, regenerative and rheological properties of rice starch[C]. Chinese Society of Food Science and Technology, 2020: 357-358.]
- [29] LIU R, XU C, CONG X, et al. Effects of oligomeric pro-cyanidins on the retrogradation properties of maize starch with different amylose/amylopectin ratios[J]. Food Chemistry, 2017, 221: 2010-2017.
- [30] 王梦婷. 杨梅叶原花色色素基于调控淀粉消化吸收和肝糖代谢的降血糖作用机制[D]. 杭州: 浙江大学, 2021. [WANG M T. Hypoglycemic mechanism of proanthocyanidins from bayberry leaves via regulating starch digestion and absorption together with hepatic glucose metabolism[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.]
- [31] 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 S Q. Analysis of main polyphenols of plum and inhibitory effect of proanthocyanidins on digestion of potato starch[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2021.]
- [32] 王新文. 糯米中淀粉及其糊化特性探讨[J]. 现代食品, 2020(18): 181-183, 201. [WANG X W. Starch in glutinous rice and its gelatinization characteristics[J]. Modern Food, 2020(18): 181-183, 201.]
- [33] 张子睿, 田金虎, 张惠玲, 等. 葡萄籽原花色色素对马铃薯馒头中淀粉消化特性的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(7): 234-240. [ZHANG Z R, TIAN J H, ZHANG H L, et al. Effect of grape seed proanthocyanidin on digestion characteristics of starch in potato steamed bread[J]. Chinese Journal of Food Science, 2021, 21(7): 234-240.]
- [34] 任顺成, 胡海洋, 李柯柯, 等. 多酚对淀粉的热力学特性的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(7): 18-27. [REN S C, HU H Y, LI K K, et al. Effects of polyphenols on thermodynamic properties of starch[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(7): 18-27.]
- [35] 谭沙, 朱仁威, 刘庆庆, 等. 外源添加物对淀粉理化性质和消化特性影响的研究进展[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(12): 286-292. [TAN S, ZHU R W, LIU Q Q, et al. Research progress on the effects of exogenous additives on the physicochemical properties and digestibility of starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(12): 286-292.]
- [36] LI C L, GIDDLEY M J. Starch structure and exchangeable protons contribute to reduced aging of high-amylose wheat bread[J]. Food Chemistry, 2022, 385(15): 132673.
- [37] 房子蔚, 王雨生, 于真, 等. 油酸和麦芽糖醇混合物对玉米淀粉老化特性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(20): 109-116. [FANG Z W, WANG Y S, YU Z, et al. Effects of different proportions of oleic acid and maltitol mixture on the retrogradation properties of corn starch[J]. Food Science, 2022, 43(20): 109-116.]
- [38] 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. [QIAO B Q, FU T T, NIU L Y, et al. Effect of grape seed proanthocyanidins on physicochemical properties of different starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(6): 59-64.]
- [39] 江帆. 藜麦淀粉理化特性及其纳米颗粒性质研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020. [JIANG F. Physicochemical properties of starch and starch nanoparticles from quinoa[D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2020.]
- [40] 孙健. 亚麻籽胶对肉制品保水性、乳化性、淀粉糊化和老化特性影响及其应用[D]. 南京: 南京农业大学, 2011. [SUN J. Effects of flaxseed gum on water-holding capacities, emulsion capacities, gelatinisation and anti-retrogradation of starch in meat product[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.]
- [41] WANG M T, CHEN J C, CHEN S G, et al. Inhibition effect of three common proanthocyanidins from grape seed, peanut skins and pine barks on maize starch retrogradation[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 252: 117-172.
- [42] WU Y, NIU M, XU H, et al. Pasting behaviors, gel rheological properties, and freeze-thaw stability of rice flour and starch modified by green tea polyphenols[J]. LWT, 2020, 118, doi: 10.1016/j.lwt.2019.108796.
- [43] 张仲柏, 牛黎莉, 汪月, 等. X-射线和红外光谱研究马铃薯蛋糕老化特性[J]. 食品与生物技术学报, 2019, 38(8): 119-125. [ZHANG Z B, NIU L L, WANG Y, et al. X-Ray and FT-IR research on staling characteristics of potato cake[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2019, 38(8): 119-125.]
- [44] 吴跃林, 亲录, 陈正行, 等. 茶多酚对粳米淀粉回生抑制作用的研究[J]. 食品工业科技, 2011, 32(12): 78-80, 84. [WU Y L, QIN L, CHEN Z X, et al. Study on preventing the retrogradation of long-shaped rice starch using tea polyphenols (TPLs)[J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(12): 78-80, 84.]
- [45] VEMON-CARTER E J, ALVAREZ-RAMIREL J, BELLO-PEREZ A, et al. Supplementing white maize masa with anthocyanins: Effects on masa rheology and on the *in vitro* digestibility and hardness of tortillas[J]. Journal of Cereal Science, 2020, 91: 102883.
- [46] SEBASTIAN M P, CRISTINA N M, TERESA P G, et al. Flour functional properties of purple maize (*Zea mays* L.) from Argentina. Influence of environmental growing conditions[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 146: 311-319.
- [47] 张明珠, 郝明欣, 桑喆, 等. 玉米淀粉的扫描电镜分析方法[J]. 理化检验-物理分册, 2022, 58(8): 21-24, 28. [ZHANG M Z, HAO M X, SANG Z, et al. Scanning electron microscope analysis method for corn starch[J]. Part A: Physical Testing, 2022, 58(8): 21-24, 28.]
- [48] BELLO-PEREZ L A P C, SIFUENTES-NIEVES I, AGAMA-ACEVEDO, et al. Controlling starch digestibility and glycaemic response in maize-based foods[J]. Journal of Cereal Science, 2021, 99: 103222.
- [49] YANG J, HE H, LU Y, et al. Four flavonoid compounds from phyllostachys edulis leaf extract retard the digestion of starch and its working mechanisms[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(31): 7760-7770.
- [50] XUE Q H, MING W Z, RUI F Z, et al. Physicochemical interactions between rice starch and different polyphenols and structural characterization of their complexes[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 125: 109277.
- [51] JIANG J K, GAO H Y, ZENG J, et al. Determination of sub-freezing temperature and gel retrogradation characteristics of potato starch gel[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 149:

112037.

[52] FU Z, BEMILLER J N. Effect of hydrocolloids and salts on retrogradation of native and modified maize starch[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 69: 36–48.

[53] 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. [LI K, WEI D W, LI S Q, et al. Study on the effect of *Prunus* proanthocyanidins on the digestion of potato starch[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(2): 212–217.]

[54] BAE I Y, AN J S, OH I K, et al. Optimized preparation of anthocyanin-rich extract from black rice and its effects on *in vitro* digestibility[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2017, 26: 1415–1422.

[55] 张玮. 低血糖生成指数膳食在初诊 2 型糖尿病营养治疗中的效果观察[J]. *临床医药文献电子杂志*, 2019, 6(79): 31–33.

[ZHANG W. Efficacy of low glycemic index diet in nutritional treatment of newly diagnosed type 2 diabetes mellitus[J]. *Electronic Journal of Clinical Medical Literature*, 2019, 6(79): 31–33.]

[56] 朱宋达, 刘超. 抗性淀粉: 2 型糖尿病患者的明智之选[J]. *中国临床研究*, 2022, 35(7): 889–893. [ZHU S D, LIU C. Resistant starch: A wise choice for patients with type 2 diabetes mellitus [J]. *Chinese Clinical Research*, 2022, 35(7): 889–893.]

[57] ROCCHETTI G, GUIBERTI G, BUSCONI M, et al. Pigmented sorghum polyphenols as potential inhibitors of starch digestibility: An *in vitro* study combining starch digestion and untargeted metabolomics[J]. *Food Chemistry*, 2020, 312(15):126077.

[58] LIAO X, ZHANG K, LUO Q, et al. A possible structure of retrograded maize starch speculated by UV and IR spectra of it and its components[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2012, 50: 119–124.

[59] WANG L B, WANG L J, WANG T T, et al. Comparison of quercetin and rutin inhibitory influence on tartary buckwheat starch digestion *in vitro* and their differences in binding sites with the di-

gestive enzyme[J]. *Food Chemistry*, 2022, 367(15): 130762.

[60] 杨雪娜. 不同来源原花青素的 α -淀粉酶抑制活性及应用研究[D]. 福州: 福州大学, 2016. [YANG X N. Studies on the α -amylase inhibition activities and applications of proanthocyanidins from plants [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2016.]

[61] 杨扬. 紫薯花色苷干预淀粉消化与改善高果糖高脂诱导代谢综合征的机制研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021. [YANG Y. Effect of anthocyanins on starch digestion and metabolism syndrome induced by high fructose and high fat in purple potato[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021.]

[62] YANG Y, ZHANG J I, SHEN L H, et al. Inhibition mechanism of diacylated anthocyanins from purple sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) against α -amylase and α -glucosidase[J]. *Food Chemistry*, 2021, 359: 29934.

[63] CIANCIOSI D, REGOLO L, FORBES-HENANDEZ T Y, et al. The reciprocal interaction between polyphenols and other dietary compounds: Impact on bioavailability, antioxidant capacity and other physico-chemical and nutritional parameters[J]. *Food Chemistry*, 2022, 375: 131904.

[64] KAN L, OLIVIERO T, VERKERK R, et al. Interaction of bread and berry polyphenols affects starch digestibility and polyphenols bio-accessibility[J]. *Journal of Functional Foods*, 2020, 68: 103924.

[65] TAN Y, CHANG S K C, ZHANG Y, et al. Comparison of α -amylase, α -glucosidase and lipase inhibitory activity of the phenolic substances in two black legumes of different gener. [J]. *Food Chemistry*, 2017, 214: 259–268.

[66] 周培羽, 张灵敏, 李灵犀, 等. 不同聚合度葡萄籽原花青素对三种消化酶抑制作用机制[J]. *沈阳药科大学学报*, 2019, 36(5): 436–445. [ZHOU P Y, ZHANG L M, LI L X, et al. The inhibitory mechanism of grape seed anthocyanins with different degrees of polymerization on three digestive enzymes[J]. *Journal of Shenyang Pharmaceutical University*, 2019, 36(5): 436–445.]