

花色苷结构与呈色稳定性研究进展

梁璐^{1,2}, 隋勇¹, 黄师荣², 蔡芳^{1*}, 施建斌¹, 蔡沙¹, 熊添¹, 梅新¹

(1. 农业农村部农产品冷链物流技术重点实验室, 湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 湖北省农业科技创新中心农产品加工研究分中心, 湖北武汉 430064)(2. 湘潭大学化工学院, 湖南湘潭 411105)

摘要: 随着生活水平的提高, 人们对营养膳食的关注度越来越高, 更加重视食品安全摄入的问题。花色苷作为一种安全无毒的天然色素, 在当前营养膳食的社会热点下, 使其在食用色素及功能食品开发领域具有十分重要的地位, 然而花色苷具有多个酚羟基, 存在结构稳定性较差、极易发生降解以及生物利用率较低等问题, 导致在食品加工等方面的应用受到一定限制。花色苷的呈色多样性与其结构密切相关, 该文主要基于花色苷结构与呈色的关系, 概述了其基本结构与呈色的相关性, 并讨论了不同加工方式对其呈色稳定性的影响, 同时通过对花色苷与淀粉、蛋白质、膳食纤维和果胶等物质结合可以有效提高花色苷的稳定性的阐述, 为更深入地研究花色苷和开发更安全、更环保的功能食品新产品提供参考。

关键词: 花色苷; 结构; 呈色; 稳定性

文章编号: 1673-9078(2024)06-336-346

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.6.0582

Research Progress on the Structures and Coloration Stability of Anthocyanins

LIANG Lu^{1,2}, SUI Yong¹, HUANG Shirong², CAI Fang^{1*}, SHI Jianbin¹, CAI Sha¹, XIONG Tian¹, MEI Xin¹

(1.Key Laboratory of Cold Chain Logistics Technology for Agro-product, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Agro-product Processing and Nuclear Agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Agro-product Processing Research Sub-center of Hubei Innovation Center of Agriculture Science and Technology, Wuhan 430064, China)(2.School of Chemical Technology, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: With the improvement of living standard, people pay increasing attention to nutrition and diet while placing greater emphasis on the safety of the food ingested. Anthocyanins, as one type of safe and non-toxic natural pigments, play a very important role in the field of food coloring and functional food development under the current social hotspot of nutritious diets. However, anthocyanins have multiple phenolic hydroxyl groups, which present problems such as poor structural stability, susceptibility to degradation and low bioavailability, resulting in limitations in food processing and other applications. The color diversity of anthocyanins is closely related to their structure. On the basis of the relationship between the structure and color of anthocyanins, this article mainly reviews the correlation between their basic structure and color, and discusses the effects of different processing methods on the color stability of anthocyanins. Meanwhile, this article elaborates the opportunities to improve the stability of anthocyanins via the combination of anthocyanins with starch, protein, dietary fiber, and pectin, which provides a reference for deeper studies on anthocyanins and the development of safer and more environmentally friendly functional food products.

Key words: anthocyanins; structures; coloration; stability

引文格式:

梁璐,隋勇,黄师荣,等.花色苷结构与呈色稳定性研究进展[J].现代食品科技,2024,40(6):336-346.

LIANG Lu, SUI Yong, HUANG Shirong, et al. Research progress on the structures and coloration stability of anthocyanins [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(6): 336-346.

收稿日期: 2023-05-16

项目基金: 湖北省科技人才服务企业项目(2023DJC101)

作者简介: 梁璐(1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: 2285014767@qq.com

通讯作者: 蔡芳(1974-), 女, 副研究员, 研究方向: 农产品加工, E-mail: 1242753811@qq.com

近年来,人们更加重视食品安全摄入的问题,尤其是在人工合成色素的使用安全方面,天然色素以其来源广泛、自身绿色环保等优势而具有重要的应用前景。花色苷是对植物中天然色素的总称,其可使许多植物的根、茎、花和果实等呈现橙色、粉红色、红色、紫色和蓝色等不同色泽^[1]。作为一种植物类黄酮物质,花色苷的来源十分广泛,大量存在于许多水果和蔬菜中。有研究表明,花色苷还具有多种独特的生理活性,如具有预防心脏病、降血糖、抗衰老、抗癌和抗炎等功效^[2,3]。因其来源天然、无毒安全和生物功能等优异特性,花色苷现已引起研究者的广泛关注。

花色苷作为一种可溶性酚类化合物,在植物表皮和皮下组织的细胞液泡中含量最丰富,受植物发育条件和环境条件的影响,花色苷易发生不同程度的降解^[4]。研究表明,花色苷的形成与不同的贮藏条件(温度、光照和酸碱度等)之间存在显著相关性,其稳定性在很大程度上取决于植物液泡的微环境。随着温度升高,花色苷会逐渐水解或发生去糖基开环反应转化为无色的假碱和查尔酮,冷却后醌型碱和假碱转变成红色二苯基苯并吡喃阳离子,但查尔酮难以转化为二苯基苯并吡喃阳离子^[5]。pH是导致花色苷降解的最重要原因之一^[6],衰老组织液泡中pH值的升高会降低花色苷稳定性,在由酸到碱变化过程中,花色苷将经历可逆的结构转变^[7],由稳定黄盐阳离子逐渐转化为稳定性较差的查尔酮,最终转化为极不稳定的醌型碱^[2,8]。此外,光照也会使花色苷发生降解^[9,10]。

由于高活性的花色苷具有多个酚羟基,结构稳定性较差^[11],易受到温度、光照、金属离子和pH等影响而发生不同程度的降解^[2,12,13],从而严重影响花色苷色泽与澄清度,使植物失去原有的鲜艳颜色,且不同的加工处理方式以及不同食物基质对花色苷会产生不同的影响,这对富含花色苷的原料贮藏及其在

食品加工领域中的应用有一定的限制作用。花色苷作为一种天然食用功能色素,在食品工业已得到广泛应用。当前对花色苷的研究主要集中在提取纯化、吸收代谢、健康功效等方面,但对花色苷本身呈色的相关机制尚不清晰^[14]。因此,本文综述了不同加工处理对花色苷的分子结构与呈色相关的影响,以期为花色苷类功能产品的进一步开发研究提供一定理论基础。

1 花色苷的化学组成

作为植物界中分布最广的一种水溶性色素,花色苷(Anthocyanins)是一种由花青素和植物体内各种单糖结合形成糖苷的天然有色黄酮酚类化合物^[12,15],因其可强烈吸收可见光而区别于其它天然黄酮类化合物,其广泛存在于植物的花瓣、果实和茎叶中。花色苷的基本结构为3,5,7-三羟基-2-苯基苯并吡喃^[16],具有典型的C₆-C₃-C₆碳骨架结构(结构式如图1),能与一个或多个糖分子通过糖苷键结合。由于花色苷羟基化、甲基化和酰基化的数量、位置以及其结构中存在的糖的性质、位置和数量差异,因此其种类繁多,据报道目前已鉴定出550多种花色苷^[17],其中矢车菊素、天竺葵素、飞燕草素、芍药色素、牵牛色素和锦葵色素是在植物可食用部分中最常见的六种^[13,18]。

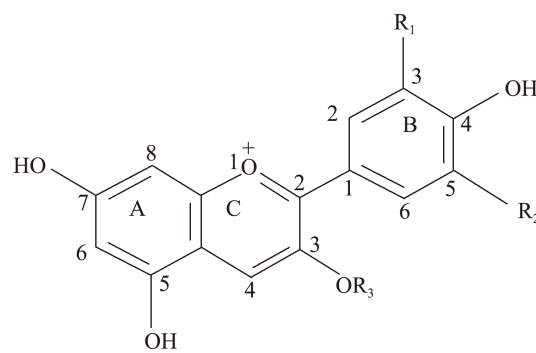


图1 花色苷结构单元

Fig.1 Anthocyanin structural unit

表1 六种常见花色苷基本结构及特点

Table 1 Basic structure and characteristics of six common anthocyanins

花色苷	英文名	缩写	替代形式			颜色	主要来源
			R ₁	R ₂	R ₃		
矢车菊素	Cyanidin	Cy	OH	H	OH	橙红	紫薯、桑葚等
天竺葵素	Pelargonidin	Pg	H	H	OH	橙色	紫薯、草莓等
飞燕草素	Delphinidin	Dp	OH	OH	OH	蓝红	茄子、石榴等
芍药色素	Peonidin	Pn	OMe	H	OH	橙红	紫薯、樱桃等
牵牛色素	Petunidin	Pt	OMe	OH	OH	蓝红	葡萄等
锦葵色素	Malvidin	Mv	OMe	OMe	OH	蓝红	蓝莓、葡萄等

2 花色苷结构与呈色相关性

花色苷的呈色性与其天然化学组分有关, 由于环境因素和发色基团糖基化、酰基化、羟基化和甲氧基化等的化学取代影响, 花色苷的结构会发生变化, 从而表现出多种色调, 其中糖基化与酰基化被认为是最具有影响性的因素。

2.1 糖基化

糖基化主要是指将糖基通过 O 键和分子间作用力附着在花色苷上, 同时通过露出疏水面、减少电子离域和增强链阻的方式, 提高花色苷的稳定性和水溶性^[19-21], 从热力学角度, 糖基化可以提高花色苷因水合不平衡而褪色的活化能, 从而有效阻止有色花色苷水化成无色的甲醇假碱^[22]。糖基化会影响花色苷光谱及其色度特性, 随着吸收波长和光谱形状的变化, 花色苷会呈现出不同色泽^[23]。一般情况下, 糖基化会降低花色苷的相对最大吸收波长, 产生蓝移色效应, 赋予花色苷蓝色色调^[24,25], Sigurdson 等^[23]研究发现 pH 会影响不同糖基化对邻二羟基花青素衍生物的颜色表达, 随着 pH 值的增加, 观察到最大吸收波长的深度变色变化, 同时不同的糖基化模式不仅影响最大吸收波长, 还会改变花色苷吸收光谱的形状, 从而导致其产生不同的色度特性。另一方面, 糖基类型、位点及其数量的协同作用决定花色苷的性质^[22,26,27], 含有一个糖基时通常附着在 C₃ 位点, 含有两个糖基时通常连续附着在 C₃ 位点或各自附着在 C₃ 和 C₅ 位点^[28,29]。据报道, 糖基化位点与花色苷颜色强度和色调密切相关, 如 Rein 等^[28]和 Mazza 等^[30]研究发现 C₃ 位点的糖基化可以使光谱吸光度增加, 从而使得色泽增强, 同时 A 环上糖基数量越多, 相应花色苷的蓝色色调越深, Jordheim 等^[27]研究同样发现糖基数量主要影响花色苷的色调 (引起蓝移), 葡萄糖苷数量的增加会导致花色苷黄色加深。

2.2 酰基化

花色苷酰基化主要指花色苷取代糖基部分的羟基 (AOH) 通过酯键被脂肪族或芳香族酸酯化的现象^[31]。研究表明, 酰基化可有效保护花色苷原有颜色, 在加工储藏过程中酰基化后的花色苷稳定性显著增强^[30]。Nakayama 等^[32]发现微酸性至中性介质可增强花色苷酰基化稳定性, 对 pH 更加耐受。Zhao 等^[31]通过二维核磁共振分析发现花色苷母环与酰基氧原子空间折叠成“三明治”结构, 可以有

效阻止母体核中苯基苯并吡喃阳离子的 C₂ 位被水分子攻击, 有利于保持花色苷原有结构, 提高花色苷稳定性^[33-35]。不同酰化有机酸对花色苷稳定性会产生不同的影响, 酰基化受糖基化、酰基类型、数量的不同而影响不同^[36-39]。有机酸一般结合在花色苷 C₃ 位和 C₆ 位糖基上, 有时在 C₃ 位和 C₅ 位上可以同时结合两种酸, 另外芳香酸和脂肪酸同时连在同一分子中时会形成多酰化花色苷^[33]。紫薯中常见酰化有机酸为咖啡酸、阿魏酸和对香豆酸等芳香族有机酸^[36], 其中咖啡酸对花色苷稳定性影响程度最高, 阿魏酸、对香豆酸次之^[37], 且带有芳香族酰基的花色苷比带有脂肪族酰基的花色苷更稳定^[38]。另一方面, 酰基化会使花色苷色泽发生变化。Odake 等^[39]研究发现在热加工和紫外线照射后紫薯花色苷比红甘蓝、紫苏等提取的花色苷能更好地保持本身颜色, 推测是由于紫薯花色苷中大部分为酰化花色苷。同时, 陆漫漫等^[40]通过对比酰化与未酰化的矢车菊素及飞燕草素衍生物, 结果发现酰基的存在会影响花色苷色饱和度, 降低花色苷明暗度。

2.3 羟基化

花色苷中 A、B、C 环均可发生羟基化, 不同碳位羟基化程度不同, 对花色苷色泽影响也不同。大多数 C₃ 位点羟基化会使花色苷稳定性降低, 一般呈红色, 脱氧时呈黄色, 而 C₄ 或 C₅ 位点羟基化可以通过阻碍花色苷的水合反应, 增强稳定性, C₄ 位点羟基化一般使花色苷呈黄色^[33,41,42]。羟基化程度增加会使花色苷变得不稳定, 随着羟基化程度增大, 花色苷的最大吸收波长增大, 吸收强度降低, 色调发生变化^[43,44], 花色苷生物活性部分取决于 B 环羟基化的程度, 花色苷的 B 环羟基化会使花色苷的颜色从粉红色或红色变为紫色和蓝色^[45]。同时, Liu 等^[46]研究发现, 花色苷羟基数量会影响单个化合物的极性、大小和空间概念, 对生物利用度也有一定的影响。Schwinn 等^[44]发现 B 环羟基化的程度影响花色苷的色调, 羟基数量增加导致最大吸收波长从可见光谱的红色末端向蓝色转变。朱磊等^[47]同样发现花色苷蓝色色调会随 B 环羟基化程度增大而增强, 可能是由于相邻 OH 内部的氢键降低了基团与溶剂的相互作用。Noda 等^[48]研究发现, 菊花花瓣蓝色色移是由于花色苷 B 环的羟基化和糖基化以及与黄酮葡萄糖苷的共色素化引起的, 花色苷从显示为红色的黄盐阳离子结构到显示为紫色的醌基结构, 然后依次改变为显示为紫色的阴离子醌基结构。

表 2 不同结构变化对花色苷呈色性及作用效果的影响

结构变化	作用位置	呈色性	作用效果	参考文献
糖基化	通过 O 键与花色苷 C ₃ 、C ₅ 位点结合, 使结构稳定性增强	色泽强度增加; 色调蓝移	提高活化能, 阻止花色苷水化为无色假碱; 提高稳定性	[20-22,26,27]
酰基化	取代 C ₃ 位糖基的羟基 (AOH) 通过酯键被脂肪族或芳香族酸酯化	降低色泽明暗度; 芳香酸酯化色调蓝移; 芳香族酸酯化不改变呈色	对 pH 值、温度、光照的变化敏感度低, 稳定性显著增强	[32,33,39,40]
羟基化	A、B、C 环均可发生羟基化, 不同结合位点稳定性不同	C ₃ 位点羟基化呈红色; C ₄ 位点羟基化呈黄色; B 环羟基化、羟基数量增加蓝色色调加深	C ₄ 、C ₅ 位点羟基化增强花色苷稳定性; B 环羟基数量影响颜色特征	[33,41,42]
甲氧基化	B 环 C ₃ 、C ₅ 位	随甲氧基化程度增大; λ _{max} 红移, 红色色调增强	提高花色苷稳定性、水溶性; 增强色泽; 易发生分子内辅色	[42,43,50,51]

2.4 甲氧基化

花色苷甲氧基化的位置和数量是其稳定性和反应性的关键特征^[49]。甲氧基化通常发生在 B 环的 C₃ 位和 C₅ 位, 随着甲氧基化程度增加, 花色苷稳定性增强且红色色调加强, 这可能是由于甲氧基化可以阻止花色苷水解产生无色假碱, 同时使花色苷最大吸收波长向长波移动, 产生红移效应, 使花色苷稳定性增强^[33,42,43]。花色苷 B 环上甲氧基化有助于花色苷的稳定性。研究表明, B 环甲氧基化取代程度的不同会导致吸收光谱红移, 使花色苷略带蓝色^[28]。Cheng 等^[50]研究发现甲氧基化会影响花色苷的稳定性和水溶性, 这对植物体中花色苷的积累有着重要作用。González 等^[51]发现花色苷 B 环的甲氧基化程度越高, 花色苷分子内辅色作用越易发生, 花色苷越稳定。Noda 等^[48]研究结果显示, 飞燕草苷相关色素的甲氧基化衍生物, 可在罗苹和托伦尼亚的花瓣中产生蓝色或紫色。

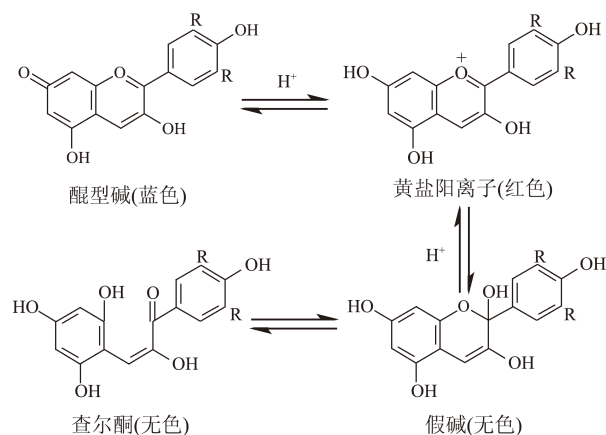


图 2 花色苷主要 4 种不同结构转化

Fig.2 Four main structural transformations of anthocyanins

3 加工方式对花色苷结构及呈色的影响

近年来, 人们在对富含花色苷食物原料进行处理制作现代化新型食品时, 会采用多种不同的加工处理方式。研究表明, 不同的加工方式会对食物中花色苷的结构、呈色及其稳定性产生不同的影响, 目前常见的加工方式主要有干燥、微生物发酵、辅色 (护色) 等。

3.1 干燥对花色苷结构及呈色的影响

花色苷通常存在于植物的根、茎、叶和果实中, 然而由于含水量较高, 在储藏期间易发生腐烂变质, 为了延长富含花色苷原料的储藏期及产品的货架期, 减少储藏损失, 提高农产品附加值, 目前多采用干燥后粉碎成末的方式进行储存, 但是干燥会导致富含花色苷产品发生褐变, 引起负面的颜色及风味变化, 褐变主要是通过酶和非酶途径产生, 酶促褐变是通过多酚氧化酶将酚类物质氧化成醌类物质, 而非酶褐变反应的机制很复杂, 尚未得到充分表征。在干燥过程中, 花色苷易发生裂解产生无色化合物, 聚合伴随着褐变, 衍生化反应可产生各种颜色的分子。花色苷与其他酚类和非酚类化合物的初始加合生成的衍生物均较不稳定, 且呈现的颜色色度不同^[52]。目前常见的干燥方式主要有热风干燥、微波干燥、真空冷冻干燥和喷雾干燥等, 研究表明, 不同干燥处理方式对花色苷的影响不同。热风干燥具有成本低, 能耗低, 操作方便等优点, 但是该方式生产的样品细胞在干燥过程中会发生破裂, 同时由于样品会与空气接触会发生较严重的褐变, 花色苷易发生降解, 其含量随热风干燥温度及时间的升

高而降低,保留率最低^[53,54];微波干燥的干燥时间短、效率高、花色苷保留率较高,但其具有生产成本高、物料易焦糊、质量损失大、对原料的组织破坏严重等缺点,花色苷的含量随微波频率与时间的变化而变化^[53];真空冷冻干燥耗时久,但是干燥脱水后产品空隙小、品质高,对基本化学成分损失小,能够最大程度保留花色苷,保持产品色泽鲜亮^[55];喷雾干燥粉质细腻,粒径小,水溶性好,花色苷保留率高,但其粒径生产成本较高,产量低^[55]。

3.2 微生物发酵对花色苷结构及呈色的影响

对于富含花色苷的植物原料而言,果酒、果汁及乳制品的发酵过程是微生物代谢的生化过程,这些代谢产物会对最终产品的感官特性和颜色稳定性造成影响^[56]。不同的发酵菌种、发酵方式、发酵条件对花色苷的结构、呈色性及稳定性具有重要影响^[57]。研究发现,色素溶液中过多的水分和糖的存在会导致花色苷更快地褐变和降解,从而影响花色苷的稳定性,利用微生物发酵有利于与黄酮类阳离子和醌类碱基形式的色素沉着,可以有效降低色素提取物的含糖量。Morata等^[58]研究发现葡萄酒的颜色主要受到在发酵过程中酵母产生的代谢物葡萄素的影响,葡萄素与葡萄花色苷发生反应,会形成高度稳定的吡喃花色苷,与葡萄素类似,乙烯基酚类与吡喃花色苷加合物具有很好的颜色稳定性。Benito等^[59]研究发现与酿酒酵母相比,具有高羟基肉桂酸脱羧酶活性的非酵母菌菌株可以产生更高浓度的乙烯基

酚吡喃花色苷,使呈色稳定性更强。另一方面,花色苷在酵母菌细胞壁上的吸附也会影响发酵酒的颜色。Braga等^[60]对双歧杆菌、乳酸杆菌菌株与花色苷之间的相互作用研究发现在发酵过程中花色苷都会转化为分子量较低的酚类化合物,这与Aura等^[61]研究结果一致,细菌代谢会涉及糖苷键的裂解和花色苷杂环的分解。

3.3 辅色对花色苷结构及呈色的影响

研究表明,花色苷与辅色剂之间的辅色作用对植物色素稳定性具有重要作用^[62],将花色苷与无色或浅色的辅色剂结合,可以有效阻止水化转换、转移花色苷的最大吸收波长、提高颜色强度和化学稳定性^[63,64],同时不会产生新的花色苷衍生物^[65]。辅色剂主要通过分子间或分子内部的氢键、络合以及共价结合等作用使花色苷稳定呈色,其作用包括分子内基团相互作用的分子内辅色和不同花色苷分子间或花色苷与辅色剂之间络合或自聚合反应的分子间辅色^[66]。常见的护色剂通常为多酚类化合物、有机酸、多糖、生物碱和金属离子等。

4 花色苷与其它分子相互作用

从植物中提取的天然花色苷结构稳定性较差,在加工、生产、储存和人体消化过程中易受环境变化的影响,导致花色苷损失较为严重,这极大限制了它们作为功能性食品配料的使用。研究表明,花色苷通常会与淀粉、蛋白质、膳食纤维等食物基质结合,从而影响功能性食品配料的稳定性^[77]。

表3 不同护色剂对花色苷结构及特性的影响

Table 3 Effect of different color fixatives on the structure and characteristics of anthocyanins

护色剂类型	结构影响	优势	不足	参考文献
多酚类	与二苯基苯并吡喃阳离子相互作用,避免水的亲核攻击;	λ_{\max} 红移; 吸光度增强; 色泽强度增加	—	[65,67-70]
金属离子	与花色苷形成配位络合物	增加稳定性; 减少降解率; 色泽强度增加	不同来源花色苷与不同金属离子作用效果不同	[35,41,71]
多糖类	通过静电及疏水作用力与花色苷结合	对 pH 及热稳定性增强; 与多糖浓度呈正相关	—	[72-74]
有机酸	通过氢键与疏水作用力与花色苷结合	吸光度下降速率减缓; 最大吸收波长红移; 褐变指数降低; 稳定性提高	咖啡酸、阿魏酸酰化的花色苷半衰期显著降低	[64,75,76]

4.1 花色苷与淀粉的相互作用

花色苷通过非共价键与淀粉结合形成复合物^[78]。Cai等^[79]研究表明,用羧甲基淀粉和黄原胶包封蓝莓花色苷可以提高其热稳定性。Milena等^[80]研究表明,花色苷的保留率随着淀粉浓度的增加而显著增加。另外,花色苷的动态结构在不同pH值条件下会赋予它们不同的结构特征,进而影响淀粉与花色苷的相互作用,Li等^[81]探究不同pH值条件下矢车菊素-3-葡萄糖苷与马铃薯淀粉结合的呈色性,结果发现当环境pH值为3时,矢车菊素-3-葡萄糖苷中带正电的黄盐阳离子会与马铃薯淀粉中带负电组分(如磷酸单酯、羟基)形成氢键并产生强烈的静电相互作用,从而呈现红色色泽,此时两者结合力最强,色泽明亮,稳定性强;而在pH值为5环境下,花色苷中的半缩醛结构会通过氢键与淀粉结合,此时花色苷转化为查尔酮,无明显的静电相互作用,结合能力较差,呈现淡紫色;pH值为5条件下,花色苷中的阴离子喹啉碱会与带负电荷的淀粉之间产生强静电排斥力,有效阻止接触,使其呈现暗紫色,此时结合能力最差^[81-83]。

4.2 花色苷与蛋白质的相互作用

食品中的蛋白质与花色苷通常通过共价作用与非共价作用相互结合,非共价作用通常包括氢键、静电相互作用、疏水相互作用、范德华力,两者的相互作用会使花色苷的化学稳定性、颜色及其功能发生变化。花色苷在碱性条件下易被氧化为带负电荷的醌,醌与蛋白质中的巯基和氨基可以发生不可逆地相互作用,通过酚环形成共价键与蛋白质侧链相互作用^[84,85]。Nagy等^[86]研究发现花色苷与蛋白质的结合能力由相互作用模式以及蛋白质的内在性质决定。Jiang等^[87]通过比较大豆蛋白与花色苷缀合物的色泽,结果发现随着花色苷含量的增加,花色苷的颜色从紫色逐渐转变为浅棕色,最终变为深棕色,

推测可能是由于花色苷衍生醌形成的结果。Khalifa等^[88]研究发现二葡萄糖苷花色苷比单葡萄糖苷花色苷与蛋白质结合能力强,不仅在体外模拟胃消化阶段显著提高蛋白质的溶解度,还可以有效提高 β -乳球蛋白消化物的自由基清除能力,其原因可能是由于花色苷可以有效改变蛋白质的二级结构。另外,Ren等^[89]研究表明,在抗坏血酸存在情况下,添加乳清蛋白对花色苷具有更强的颜色增强和保护作用。Quan等^[90]发现,在紫肉甘薯花色苷中加入大豆蛋白,可以有效提高紫肉甘薯在100℃下的颜色稳定性。

4.3 花色苷与膳食纤维的相互作用

花色苷与膳食纤维中含有羟基基团,这为氢键的形成提供了条件,通过形成氢键可以缩短空间距离,进而形成范德华力与疏水相互作用^[91,92]。大豆不溶性膳食纤维具有网状结构,可以作为惰性底物构建稳定体系,He等^[93]研究发现,锦葵色素通过氢键与大豆不溶性膳食纤维相互作用形成包合物,可以保护锦葵色素免受环境因素的影响,从而提高其呈色稳定性。不同花色苷与纤维素的结合方式不同,主要有氢键和疏水相互作用等结合方式,矢车菊素-3-葡萄糖苷与燕麦 β -葡聚糖通过氢键结合,而苹果中的原花青素、原花青素单宁与细胞壁材料中的膳食纤维则通过氢键和疏水相互作用结合^[94-96],花色苷对膳食纤维的吸附作用主要受花色苷自身结构与环境条件的影响。Le等^[84]和Jakobek等^[92]研究发现原花青素和纤维素、原花青碱和木葡聚糖相互作用于膳食纤维表面,同时,膳食纤维可以在原花青素结构中形成空洞或孔隙,进而渗透到这些孔隙中。环境中离子强度、温度、pH值对花色苷的键合同样十分重要,Phan等^[97]研究发现在4℃条件下,矢车菊素-3-葡萄糖苷对纤维素的吸附能力最强;在pH值为5时,矢车菊素-3-葡萄糖苷的吸附最佳。

表4 不同物质与花色苷相互作用后对花色苷稳定性的影响

Table 4 Effect of different substances on the stability of anthocyanins after interacting with anthocyanins

食物基质	作用方式	结构影响	作用效果	参考文献
淀粉	共价作用和非共价作用	结合形成淀粉-花色苷复合物	增强花色苷稳定性,同时改善淀粉的物理化学性质	[81-83]
蛋白质	共价作用与非共价作用	与乳清蛋白形成复合物	改变蛋白质构象,增强花色苷的稳定性	[84-86,88]
膳食纤维	氢键、疏水相互作用	吸附结合形成花色苷与膳食纤维复合物	提高花色苷稳定性,保留功能活性	[91-97]
果胶	氢键、疏水相互作用	结合形成花色苷-果胶复合物	花色苷稳定性增强,同时防止花色苷色素沉淀	[98-100]

4.4 花色苷与果胶的相互作用

果胶是一组富含半乳糖醛酸的复杂多糖，可以与花色苷进行不同程度的结合，随着花色苷形式、种类及环境条件的不同，其与果胶的结合能力也不同，原花青素对果胶具有很强的亲和力，半缩酮形式的花色苷与果胶之间具有较弱的相互作用，而酸性形式的黄盐阳离子与果胶具有更强的亲和力；具有三个 OH 基团的飞燕草素-3-葡萄糖苷比矢车菊素-3-葡萄糖苷结合能力强^[98]。魏婧琦等^[99]研究黑果腺肋花楸花色苷与果胶的结合作用，结果发现羟基数量较多或糖基为 L (+) 构型的花色苷与果胶结合更好，果胶的加入使花色苷稳定性显著增强。Tomas 等^[100]将单体花色苷置于含有 5% 果胶的果泥中孵育后发现其含量显著增加，这一结果同样表明果胶对花色苷具有保护及稳定作用。Guan 等^[101]报道阿拉伯胶与花色苷通过疏水相互作用形成复合物，提高了花色苷的热稳定性。Fernandes 等^[102]在饮料模型中发现葡萄糖多糖与锦葵色素-3-O-β-D-葡萄糖苷通过静电和疏水相互作用形成复合物，保护花色苷的发色团，从而可能屏蔽了黄盐阳离子高度亲电的 C₂ 位置，C₂ 位置由于化学降解容易被水侵蚀，因此保护 C₂ 位置可以提高花色苷的稳定性。

5 提高花色苷稳定性的方法

花色苷的稳定性一直是制约其应用的主要因素，也是目前非常关注的内容。花色苷的降解变质不仅发生在提取、纯化过程，其贮藏环境、加工方式、与食物基质相互作用等都对花色苷的稳定性具有显著影响，进而使花色苷在食品加工领域中的应用具有一定的限制作用。目前关于提高花色苷稳定性的方法研究报道较多，主要包括物理方法及化学方法。物理方法多为控制花色苷制备、加工及贮藏过程中的 pH 值、光照、温度，通常应尽量保证其 pH 值小于 3、避光保存、温度小于 60 °C^[65-67,103]。还可以通过在加工过程中添加辅色剂（多酚类化合物、有机酸、多糖、生物碱和金属离子）、有机大分子（蛋白质、淀粉、纤维素、果胶）等物质来提高花色苷的稳定性^[79,90,93,102]，另一方面，近年来，胶囊包埋在对食品活性成分的稳定化及生物利用度提升方面表现出巨大的潜力，因此可以通过制备花色苷胶囊的方法提升花色苷的稳定性^[104]；化学方法修饰花色苷，往往具有更高的稳定性，如花色苷的羟基化、

酰基化、糖基化及甲氧基化均可不同程度的提高花色苷的呈色稳定性及生物活性。

6 结论及展望

花色苷作为一种天然食用色素资源，具有广阔的开发前景，近年来，随着人们对天然色素价值的认可和选择偏好，花色苷发展非常迅速。本文综述了花色苷基本结构与其呈色的相关性，糖基化、酰基化、羟基化和甲氧基化均能提高花色苷呈色稳定性，同时不同加工方式对花色苷结构及呈色稳定性会产生不同影响，可通过与淀粉、蛋白质、膳食纤维和果胶等物质结合提高花色苷稳定性。未来花色苷研究主要集中在提高其稳定性方面，并通过新型技术直接提高其稳定性、降低降解损失率，或与其他物质的相互作用减少花色苷的损失，也可以提升植物中花色苷的含量，提高其经济价值。这都有利于花色苷开发成更多健康安全的功能性新产品，对人们的生活提供助力具有实际意义。

参考文献

- [1] 刘兴海,邱诗波,杜桂涛,等.天然色素的提取、稳定性改进及其应用进展探究[J].数字印刷,2022,1:1-25.
- [2] LIU Y, LIU Y, TAO C, et al. Effect of temperature and pH on stability of anthocyanin obtained from blueberry [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2018, 12(3): 1744-1753.
- [3] MIYAZAKI K, MAKINO K, IWADATE E, et al. Anthocyanins from purple sweet potato *Ipomoea batatas* cultivar *Ayamurasaki* suppress the development of atherosclerotic lesions and both enhancements of oxidative stress and soluble vascular cell adhesion molecule-1 in apolipoprotein E-deficient mice [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(23): 11485-11492.
- [4] ZHAO Y W, WANG C K, HUANG X Y, et al. Anthocyanin stability and degradation in plants [J]. Plant Signaling & Behavior, 2021, 16(12): 1987767.
- [5] TIWARI B K, O'DONNELL C P, CULLEN P J. Effect of nonthermal processing technologies on the anthocyanin content of fruit juices [J]. Trends in Food Science & Technology, 2009, 20(3-4): 137-145.
- [6] 胡燕辉,纪漫,汪丽亚,等.紫甘薯色素稳定性能研究[J].广州化工,2022,50(4):86-88,114.
- [7] FU X, WU Q, WANG J, et al. Spectral characteristic, storage stability and antioxidant properties of anthocyanin extracts from flowers of butterfly pea (*Clitoria ternatea* L.) [J]. Molecules, 2021, 26(22): 7000.

- [8] 董楠,雷丹丹,刘嘉,等.花色苷的热稳定性及其影响因素研究[J].食品工业科技,2012,33(7):393-396.
- [9] ZHAO M, LUO Y, LI Y, et al. The identification of degradation products and degradation pathway of malvidin-3-glucoside and malvidin-3, 5-diglucoside under microwave treatment [J]. Food Chemistry, 2013, 141(3): 3260-3267.
- [10] GAO B B, JIN L, LI Y, et al. Changes of pigment components in *Dendrobium catenatum* flower under different storage conditions [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2020, 45(4): 829-837.
- [11] 由璐,隋茜茜,赵艳雪,等.花色苷分子结构修饰及其生理活性研究进展[J].食品科学,2019,40(11):351-359.
- [12] CHEN C C, LIN C, CHEN M H, et al. Stability and quality of anthocyanin in purple sweet potato extracts [J]. Foods, 2019, 8(9): 393.
- [13] 张永祥.紫薯花色苷分离纯化,结构鉴定及其抗氧化活性研究[D].秦皇岛:河北科技师范学院,2016.
- [14] 刘婷婷,彭文婷,庞邵杰,等.谷物花色苷功能活性与开发利用研究进展[J].食品工业科技,2022,10:1-15.
- [15] WEI K, DUAN Y, ZHU W, et al. Research on extraction and purification of purple sweet potato anthocyanins [C]// Proceedings of 2018 7th International Conference on Medical Engineering and Biotechnology (MEDEB 2018). Clausius Scientific Press, 2018: 97-101.
- [16] FIGUEIREDO P, ELHABIRI M, SAITO N, et al. Anthocyanin intramolecular interactions. A new mathematical approach to account for the remarkable colorant properties of the pigments extracted from *Matthiola incana* [J]. Journal of the American Chemical Society, 1996, 118(20): 4788-4793.
- [17] REQUE P M, STEFFENS R S, JABLONSKI A, et al. Cold storage of blueberry (*Vaccinium* spp.) fruits and juice: Anthocyanin stability and antioxidant activity [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2014, 33(1): 111-116.
- [18] KONG J M, CHIA L S, GOH N K, et al. Analysis and biological activities of anthocyanins [J]. Phytochemistry, 2003, 64(5): 923-933.
- [19] HE J, GIUSTI M M. Anthocyanins: natural colorants with health-promoting properties [J]. Annu Rev Food Sci Technol, 2010, 1(1): 163.
- [20] ZHAO C L, CHEN Z J, BAI X S, et al. Structure-activity relationships of anthocyanidinglycosylation [J]. Molecular Diversity, 2014, 18(3): 687-700.
- [21] BORKOWSKI T, SZYMUSIAK H, GLISZCZYŃSKA-SWIGŁO A, et al. The effect of 3-O- β -glucosylation on structural transformations of anthocyanidins [J]. Food Research International, 2005, 38(8-9): 1031-1037.
- [22] NAYAK B, BERRIOS J D J, POWERS J R, et al. Thermal degradation of anthocyanins from purple potato (Cv. Purple Majesty) and impact on antioxidant capacity [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(20): 11040-11049.
- [23] SIGURDSON G T, ROBBINS R J, COLLINS T M, et al. Impact of location, type, and number of glycosidic substitutions on the color expression of o-dihydroxylatedanthocyanidins [J]. Food Chemistry, 2018, 268: 416-423.
- [24] STINTZING F C, CARLE R. Functional properties of anthocyanins and betalains in plants, food, and in human nutrition [J]. Trends in Food Science & Technology, 2004, 15(1): 19-38.
- [25] KOAY S S. Establishment of cell suspension culture of *Melastoma malabathricum* L. for the production of anthocyanin [D]. Universiti Sains Malaysia, 2008.
- [26] FARR J E, SIGURDSON G T, GIUSTI M M. Stereochemistry and glycosidic linkages of C3-glycosylations affected the reactivity of cyanidinderivatives [J]. Food Chemistry, 2019, 278: 443-451.
- [27] JORDHEIM M. Isolation, identification and properties of pyranoanthocyanins and anthocyanin forms [D]. University of Bergen, 2007.
- [28] REIN M. Copigmentation reactions and color stability of berry anthocyanins [D]. University of Helsinki, 2005.
- [29] WROLSTAD R E. Anthocyanin pigments-bioactivity and coloring properties [J]. Journal of Food Science, 2004, 69(5): C419-C425.
- [30] MAZZA G, MINIATI E. Anthocyanins in Fruits, Vegetables, and Grains [M]. CRC Press, 2018.
- [31] ZHAO C L, YU Y Q, CHEN Z J, et al. Stability-increasing effects of anthocyanin glycosylacylation [J]. Food Chemistry, 2017, 214: 119-128.
- [32] NAKAYAMA T, SUZUKI H, NISHINO T. Anthocyanin acyltransferases: specificities, mechanism, phylogenetics, and applications [J]. Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic, 2003, 23(2-6): 117-132.
- [33] 李云,赵昶灵,杨晓娜,等.花色苷分子结构与其稳定性以及呈色关系的研究进展[J].云南农业大学学报:自然科学版,2010,25(5): 712-720.
- [34] 马懿,肖雄峻,包文川,等.紫薯中四种花色苷抗氧化活性的密度泛函理论研究[J].天然产物研究与开发, 2018, 30(9):1534-1537,1542.
- [35] LI A, XIAO R, HE S, et al. Research advances of purple sweet potato anthocyanins: extraction, identification, stability, bioactivity, application, and biotransformation [J]. Molecules, 2019, 24(21): 3816.
- [36] 方继利.六种紫色蔬菜中花青素的提取分析及生物活性研究[D].杭州:浙江农林大学,2019.
- [37] MATSUFUJI H, KIDO H, MISAWA H, et al. Stability to light, heat, and hydrogen peroxide at different pH values and DPPH radical scavenging activity of acylatedanthocyanins from red radish extract [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,

- 2007, 55(9): 3692-3701.
- [38] B'KOWSKA-BARCZAK A. Acylatedanthocyanins as stable, natural food colorants-A review [J]. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences, 2005, 14: 55.
- [39] ODAKE K, TERAHARA N, SAITO N, et al. Chemical structures of two anthocyanins from purple sweet potato, *Ipomoea batatas* [J]. Phytochemistry, 1992, 31(6): 2127-2130.
- [40] 陆漫漫,敬璞.酰基化对花色苷呈色及抗氧化性影响[J].上海交通大学学报:农业科学版,2016,34(6):29-36.
- [41] 田小燕,邓洁红,位佳静,等.花色苷有机酸酰化及黄酮辅色研究进展[J].农产品加工,2012,11:126-131.
- [42] 支伟特,赵昶灵,陈中坚,等.花色苷对高等植物器官颜色的决定及其影响因素[J].热带亚热带植物学报,2012, 20(3):303-310.
- [43] HURTADO N H, MORALES A L, GONZÁLEZ-MIRET M L, et al. Colour, pH stability and antioxidant activity of anthocyanin rutinosides isolated from tamarillo fruit (*Solanum betaceum* Cav.) [J]. Food Chemistry, 2009, 117(1): 88-93.
- [44] SCHWINN K, MIOSIC S, DAVIES K, et al. The B-ring hydroxylation pattern of anthocyanins can be determined through activity of the flavonoid 3'-hydroxylase on leucoanthocyanidins [J]. Planta, 2014, 240(5): 1003-1010.
- [45] MA D, TANG H, REICHEL T M, et al. Poplar MYB117 promotes anthocyanin synthesis and enhances flavonoid B-ring hydroxylation by up-regulating the flavonoid 3', 5'-hydroxylase gene [J]. Journal of Experimental Botany, 2021, 72(10): 3864-3880.
- [46] LIU Y, LIN J, CHENG T, et al. Methylation, hydroxylation, glycosylation and acylation affect the transport of wine anthocyanins in Caco-2 cells [J]. Foods, 2022, 11(23): 3793.
- [47] 朱磊,李新月,胡禧熙,等.葡萄花色苷的组成及生物合成研究进展[J].黑龙江八一农垦大学学报,2021,33(5):59-66.
- [48] NODA N, YOSHIOKA S, KISHIMOTO S, et al. Generation of blue chrysanthemums by anthocyanin B-ring hydroxylation and glucosylation and its coloration mechanism [J]. Science Advances, 2017, 3(7): e1602785.
- [49] ADAKU C, SKAAR I, BERLAND H, et al. Anthocyanins from mauve flowers of *Erlangea tomentosa* (*Bothriocline longipes*) based on erlangidin—the first reported natural anthocyanidin with C-ring methoxylation [J]. Phytochemistry Letters, 2019, 29: 225-230.
- [50] CHENG J, WEI G, ZHOU H, et al. Unraveling the mechanism underlying the glycosylation and methylation of anthocyanins in peach [J]. Plant Physiology, 2014, 166(2): 1044-1058.
- [51] GONZÁLEZ-MANZANO S, SANTOS-BUELGA C, DUENAS M, et al. Colour implications of self-association processes of wine anthocyanins [J]. European Food Research and Technology, 2008, 226(3): 483-490.
- [52] 贾冬梅.草莓加工过程中的变色机理及调控技术研究[D].天津:天津科技大学,2021.
- [53] 熊添,蔡芳,何建军,等.不同干燥工艺下紫薯全粉品质分析[J].食品工业科技,2023,44(6):49-57.
- [54] 王尤强,孙成萍,王迪青.干燥工艺对紫薯全粉理化性质及花色苷的影响[J].中国食品工业,2021(24):101-102,78.
- [55] 邓资靖,蒋和体.不同干燥方式对紫薯全粉品质的影响[J].食品工业科技,2011,32(12):359-361,364.
- [56] RUTA L L, FARCASANU I C. Anthocyanins and anthocyanin-derived products in yeast-fermented beverages [J]. Antioxidants, 2019, 8(6): 182.
- [57] AI J, WU Q, BATTINO M, et al. Using untargeted metabolomics to profile the changes in roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) anthocyanins during wine fermentation [J]. Food Chemistry, 2021, 364: 130425.
- [58] MORATA A, LOIRA I, HERAS J M, et al. Yeast influence on the formation of stable pigments in red winemaking [J]. Food Chemistry, 2016, 197: 686-691.
- [59] BENITO S, MORATA A, PALOMERO F, et al. Formation of vinylphenolic pyranoanthocyanins by *Saccharomyces cerevisiae* and *Pichia guilliermondii* in red wines produced following different fermentation strategies [J]. Food Chemistry, 2011, 124(1): 15-23.
- [60] BRAGA A R C, DE SOUZA MESQUITA L M, MARTINS P L G, et al. *Lactobacillus* fermentation of jussara pulp leads to the enzymatic conversion of anthocyanins increasing antioxidant activity [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2018, 69: 162-170.
- [61] AURA A M, MARTIN-LOPEZ P, O'LEARY K A, et al. *In vitro* metabolism of anthocyanins by human gut microflora [J]. European Journal of Nutrition, 2005, 44(3): 133-142.
- [62] MAZZA G, BROUILLARD R. The mechanism of co-pigmentation of anthocyanins in aqueous solutions [J]. Phytochemistry, 1990, 29(4): 1097-1102.
- [63] 王晰锐.紫甘薯花色苷的结构鉴定以及稳定性和功能性的研究[D].沈阳:东北农业大学,2011.
- [64] 王萌,李小定,刘硕,等.有机酸对紫甘薯花色苷的辅色作用[J].食品科学,2014,23:119-124.
- [65] 楼乐燕,岳阳,尹培,等.单宁酸和绿原酸对杨梅花色苷的辅色作用[J].食品与发酵工业,2019,45(4):74-80.
- [66] 陆国权,郭建敏,黄红升.加工方法对紫心甘薯花色苷含量和组分的影响[J].浙江农业学报,1996,8(6):353-356.
- [67] MOLAEAFARD S, JAMEI R, MARJANI A P. Co-pigmentation of anthocyanins extracted from sour cherry (*Prunus cerasus* L.) with some organic acids: Color intensity, thermal stability, and thermodynamic parameters [J]. Food Chemistry, 2021, 339: 128070.
- [68] 朱洪梅,韩永斌,顾振新,等.单宁对紫甘薯花色苷的辅色作用研究[J].南京农业大学学报,2006,29(3):98-102.

- [69] EIRO M J, HEINONEN M. Anthocyanin color behavior and stability during storage: Effect of intermolecular copigmentation [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(25): 7461-7466.
- [70] BOULTON R. The copigmentation of anthocyanins and its role in the color of red wine: A critical review [J]. *American Journal of Enology and Viticulture*, 2001, 52(2): 67-87.
- [71] WU H Y, YANG K M, CHIANG P Y. Roselle anthocyanins: Antioxidant properties and stability to heat and pH [J]. *Molecules*, 2018, 23(6): 1357.
- [72] 江澜.紫薯花色苷的提取纯化分析及其应用[D].保定:河北农业大学,2015.
- [73] 梁舒妍,白卫滨,刘嘉惠,等.富含花色苷的发酵型果酒色泽衰减原因及机制分析[J].*浙江大学学报(农业与生命科学版)*,2021,47(6):695-703.
- [74] KOPJAR M, JAKŠIĆ K, PILIŽOTA V. Influence of sugars and chlorogenic acid addition on anthocyanin content, antioxidant activity and color of blackberry juice during storage [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2012, 36(6): 545-552.
- [75] 刘海英,邢子毅,王加华,等.不同有机酸体系中紫薯花色苷热降解稳定性研究[J].*食品工业科技*,2015,36(10):320-324.
- [76] 潘颖,高庆超,孙晨晨,等.不同有机酸对紫甘蓝花色苷辅色效应及热稳定性对比分析[J].*现代食品科技*,2021, 37(8):97-108.
- [77] ZHAO N, ZOU H, SUN S, et al. The interaction between sodium alginate and myofibrillar proteins: The rheological and emulsifying properties of their mixture [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 161: 1545-1551.
- [78] 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.
- [79] CAI X, DU X, CUI D, et al. Improvement of stability of blueberry anthocyanins by carboxymethyl starch/xanthan gum combinations microencapsulation [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 91: 238-245.
- [80] SILVA MOURA M, SILVA GOMES DA COSTA B, GIACONIA M A, et al. Jaboticaba powders production by freeze-drying: Influence of octenyl succinic anhydride-modified starch concentrations over anthocyanins and physical properties [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2023, 46(3): e14256.
- [81] LI Q, LI Y, RAO L, et al. Insights into pH-modulated interactions between native potato starch and cyanidin-3-O-glucoside: Electrostatic interaction-dependent binding [J]. *Food Research International*, 2022, 156: 111129.
- [82] PISMENSKAYA N, SARAPULOVA V, KLEVTSOVA A, et al. Adsorption of anthocyanins by cation and anion exchange resins with aromatic and aliphatic polymer matrices [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21(21): 7874.
- [83] RAKIĆ V, RINNAN Å, POLAK T, et al. pH-induced structural forms of cyanidin and cyanidin 3-O- β -glucopyranoside [J]. *Dyes and Pigments*, 2019, 165: 71-80.
- [84] LE BOURVELLEC C, RENARD C. Interactions between polyphenols and macromolecules: Quantification methods and mechanisms [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2012, 52(3): 213-248.
- [85] OZDAL T, CAPANOGLU E, ALTAY F. A review on protein-phenolic interactions and associated changes [J]. *Food Research International*, 2013, 51(2): 954-970.
- [86] NAGY K, COURTET-COMPOUNDU M C, WILLIAMSON G, et al. Non-covalent binding of proteins to polyphenols correlates with their amino acid sequence [J]. *Food Chemistry*, 2012, 132(3): 1333-1339.
- [87] JIANG L, LIU Y, LI L, et al. Covalent conjugates of anthocyanins to soy protein: Unravelling their structure features and *in vitro* gastrointestinal digestion fate [J]. *Food Research International*, 2019, 120: 603-609.
- [88] KHALIFA I, LORENZO J M, BANGAR S P, et al. Effect of the non-covalent and covalent interactions between proteins and mono-or di-glucoside anthocyanins on β -lactoglobulin-digestibility [J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 133: 107952.
- [89] REN S, GIUSTI M M. The effect of whey protein concentration and preheating temperature on the color and stability of purple corn, grape and black carrot anthocyanins in the presence of ascorbic acid [J]. *Food Research International*, 2021, 144: 110350.
- [90] QUAN W, HE W, QIE X, et al. Effects of β -cyclodextrin, whey protein, and soy protein on the thermal and storage stability of anthocyanins obtained from purple-fleshed sweet potatoes [J]. *Food Chemistry*, 2020, 320: 126655.
- [91] QUIRÓS-SAUCEDA A E, PALAFOX-CARLOS H, SÁYAGO-AYERDI S G, et al. Dietary fiber and phenolic compounds as functional ingredients: interaction and possible effect after ingestion [J]. *Food & Function*, 2014, 5(6): 1063-1072.
- [92] JAKOBEK L, MATIĆ P. Non-covalent dietary fiber-polyphenol interactions and their influence on polyphenol bioaccessibility [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 83: 235-247.
- [93] HE Y, CHEN D, LIU Y, et al. Protective effect and mechanism of soybean insoluble dietary fiber on the color stability of malvidin-3-O-glucoside [J]. *Foods*, 2022, 11(10): 1474.
- [94] GAO R, LIU H, PENG Z, et al. Adsorption of (-)-epigallocatechin-3-gallate (EGCG) onto oat β -glucan [J]. *Food*

- Chemistry, 2012, 132(4): 1936-1943.
- [95] PHAN A D T, NETZEL G, WANG D, et al. Binding of dietary polyphenols to cellulose: Structural and nutritional aspects [J]. Food Chemistry, 2015, 171: 388-396.
- [96] LE BOURVELLEC C, GUYOT S, RENARD C. Non-covalent interaction between procyanidins and apple cell wall material: Part I. Effect of some environmental parameters [J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects, 2004, 1672(3): 192-202.
- [97] PHAN A D T, D'ARCY B R, GIDLEY M J. Polyphenol-cellulose interactions: effects of pH, temperature and salt [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2016, 51(1): 203-211.
- [98] FERNANDES A, BRÁS N F, MATEUS N, et al. Understanding the molecular mechanism of anthocyanin binding to pectin [J]. Langmuir, 2014, 30(28): 8516-8527.
- [99] 魏婧琦,李冬男,孟宪军.黑果腺肋花楸花色苷与果胶的结合作用对其稳定性的影响[J].食品科学,2020,41(2):65-72.
- [100] Tomas M, Rocchetti G, Ghisoni S, et al. Effect of different soluble dietary fibres on the phenolic profile of blackberry puree subjected to *in vitro* gastrointestinal digestion and large intestine fermentation [J]. Food Research International, 2020, 130: 108954.
- [101] GUAN Y, ZHONG Q. The improved thermal stability of anthocyanins at pH 5.0 by gum Arabic [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 64(2): 706-712.
- [102] FERNANDES A, BRANDAO E, RAPOSO F, et al. Impact of grape pectic polysaccharides on anthocyanin thermostability [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 239: 116240.
- [103] PHAM T N, NGUYEN T N P, LAM T D, et al. Effects of various solvent concentration, liquid-solid ratio, temperatures and time values on the extraction yield of anthocyanin from Vietnam *Hibiscus sabdariffa* L.(Roselle) [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 542(1): 12-33.
- [104] 徐青,王代波,刘国华等.花青素稳定性影响因素及改善方法研究进展[J].食品研究与开发,2020,41(7):218-224.