

花色苷微胶囊的制备及其在食品中应用研究进展

杨雨彤, 赵彦巧*, 王少平, 王佳栋, 李凯媛, 张文雅

(天津商业大学生物技术与食品科学学院, 天津市食品生物技术重点实验室, 天津 300134)

摘要: 花色苷是一种植物体次生代谢产生的天然色素, 具有多种生物活性, 能够为人体提供健康益处, 但花色苷结构易受环境因素影响。利用微胶囊化技术, 以多糖、蛋白质等材料作为壁材对花色苷进行包封, 可提高花色苷稳定性, 使其具有一定缓释功能, 进一步发挥其生物活性。文章概述了花色苷的分子结构、生物活性以及花色苷在食品行业应用的挑战, 分别基于载体材料和封装策略总结了花色苷微胶囊化技术, 综述了花色苷微胶囊在食品添加剂与食品智能包装等食品行业中的应用现状与发展趋势, 旨在为开发高价值花色苷微胶囊产品提供一定参考。

关键词: 花色苷; 微胶囊; 生物活性; 稳定性; 控制释放

文章编号: 1673-9078(2025)11-395-404

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.11.1185

Research Progress of Preparation and Application of Anthocyanins Microencapsulation in Food

YANG Yutong, ZHAO Yanqiao*, WANG Shaoping, WANG Jiadong, LI Kaiyuan, ZHANG Wenya

(College of Biotechnology and Food Science, Tianjin University of Commerce, Tianjin Key Laboratory of Food Biotechnology, Tianjin 300134, China)

Abstract: Anthocyanins are natural pigments produced during plant secondary metabolism and have various biological activities and provide benefits to human health. However, the structure of anthocyanins is easily affected by environmental factors. By employing microencapsulation technology and polysaccharides, proteins, and other materials as wall components, anthocyanin can be encapsulated to enhance their stability, impart controlled-release properties, and further enhance their biological activity. This review provides an overview of the molecular structure and biological activity of anthocyanins, as well as the challenges of their application in the food industry. Based on carrier materials and packaging strategies, the microencapsulation technology of anthocyanins has been summarized. Additionally, this review summarizes the current applications and future trends of anthocyanin microcapsules in the food industry, particularly in food additives and food intelligent packaging. The aim of this review is to provide reference for the development of high-value anthocyanin microcapsule products.

Key words: anthocyanins; microcapsules; biological activity; stability; controlled release

引文格式:

杨雨彤, 赵彦巧, 王少平, 等. 花色苷微胶囊的制备及其在食品中应用研究进展[J]. 现代食品科技, 2025, 41(11): 395-404.

YANG Yutong, ZHAO Yanqiao, WANG Shaoping, et al. Research progress of preparation and application of anthocyanins microencapsulation in food [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(11): 395-404.

收稿日期: 2024-08-13; 修回日期: 2024-09-29; 接受日期: 2024-10-09

基金项目: 天津商业大学“市级大学生创新创业训练计划”项目
(202410069116)

作者简介: 杨雨彤 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品营养与健康, E-mail: yuto1022@163.com

通讯作者: 赵彦巧 (1979-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 天然产物的提取与分离, E-mail: yqzhao@tjcu.edu.cn

近年来, 食品加工技术的不断发展为人们日常饮食增加了更多选项, 同时促使消费者对食品安全、营养等方面提出了更高的要求。目前, 越来越多的天然植物提取物被用于食品行业, 不仅有利于行业绿色发展, 也有利于促进社会健康发展、提高人们的生活质量。作为天然植物色素, 花色苷具有替代合成色素的潜力。花色苷是蓝莓、越橘、葡萄、紫薯

等植物的次生代谢产物，可使许多植物呈现紫色、红色和蓝色等丰富的颜色，是一类由花青素与糖类物质通过糖苷键缩合形成的多酚类物质^[1-3]。花色苷不仅可以赋予食品良好的感官特性，还具有显著的抗氧化活性，能通过清除自由基、提高抗氧化酶活性两种途径减少人体内蓄积的活性氧^[4]，具有保护心脏、保护神经、抗炎以及抗癌等健康益处^[5]。然而，花色苷分子中多个活性羟基及带正电的结构母核使其结构稳定性较低^[6]，在光照、温度、pH 值等环境条件影响下会发生不同程度降解^[7]。将花色苷提取物制备成不含糖或有机酸等植物成分的微胶囊，可以使花色苷免受环境因素影响，提高花色苷的稳定性，避免最终产品的品质特性受到因花色苷降解而产生的不良影响^[8]。此外，微胶囊化技术可在提高其稳定性同时控制活性物质释放至消化系统的特定位置^[9]，提高体内花色苷生物利用度。目前用于包封花色苷的封装技术有乳化、复凝聚、喷雾干燥、冷冻干燥等^[9]。随着花色苷微胶囊的相关问题受到越来越多学者的关注，本文在论述花色苷结构、生物活性及应用局限性的基础上，主要综述了目前常用于花色苷微胶囊的壁材和封装策略，并总结了花色苷微胶囊在食品行业中的实际应用优势与进展，以期花色苷在食品和其他行业的进一步应用提供参考。

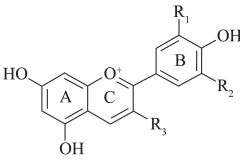
1 花色苷简述

1.1 花色苷分子结构

花青素广泛存在于自然界数万种植物中^[10]，与多种果实、花和叶子的颜色有关^[3]。天然的游离态花青素非常少见，一般与葡萄糖、半乳糖、阿拉伯糖、鼠李糖、木糖等糖类以糖苷键结合为花色苷^[3]。常见花色苷结构如表 1 所示，其结构母核为 2- 苯基苯并吡喃阳离子，由两个苯甲酰环（A、B）和一个含氧杂环（C）组成典型的 C6-C3-C6 碳骨架结构^[6]。糖类可在花青素不同位置发生取代，其中最常见取代是 C3 位置。不同的糖基种类、取代数量和位置使花色苷的颜色、稳定性等性质也有所不同^[10]，C3 位置取代的糖基不会显著改变花色苷的颜色，而 C5 位置的糖基化会导致无色甲醇假碱的形成，因为 C5 位置上羟基的损失会使花色苷更易水化^[11]。由于结构中的阳离子母核与 A、B 环上羟基取代基的存在，花色苷化学性质较为活泼^[12,13]。花色苷 B 环上的羟基越多，花色苷反应活性越强、稳定性越弱；羟基取代位置不同，花色苷的活性也有所不同，花色苷 C4' 和 C3 处的酚羟基活性较强，而 C5 和 C7 处的酚羟基活性较低^[11]。

表 1 食品中常见花青素结构

Table 1 Structures of anthocyanidins in foods

基本结构	花青素	R ₁	R ₂	R ₃
	矢车菊素	-OH	-H	-OH
	飞燕草素	-OH	-OH	-OH
	天竺葵素	-H	-H	-OH
	锦葵素	-OCH ₃	-OCH ₃	-OH
	芍药素	-OCH ₃	-H	-OH
	矮牵牛素	-OH	-OCH ₃	-OH

1.2 花色苷生物活性

花色苷具有抗氧化、抗炎、抗癌和保护心脏等生物活性，能有效清除氧化应激环境中产生的活性氧，有助于降低因氧化应激引起的慢性、非传染性疾病的患病风险^[14,15]。活性氧是细胞信号传导和组织内稳态中的必需物质，通常活性氧含量在机体内呈动态平衡^[16]。当机体内代谢产生活性氧的速率超过体内抗氧化系统的清除速率时，体内抗氧化系统失衡，蓄积的过量活性氧会诱导细胞损伤、凋亡，进而诱发多种疾病^[17]。花色苷分子具有多个酚羟基，易被氧化生成稳定的醌类结构，同时电离出氢原子并将其转移给活性氧、DPPH、ABTS⁺ 等自由基，保护细胞免受氧化损伤^[18]。Zhu 等^[19]将 ABTS⁺、DPPH、羟自由基清除率和铁离子还原能力作为抗氧化指标评价了铁皮石斛花色苷的生物活性，结果表明铁皮石斛花色苷和 Vc 抗氧化能力都呈质量浓度依赖型，与 Vc 相比，花色苷清除 ABTS⁺、DPPH 及羟自由基的能力更强；在低质量浓度条件下，Vc 的铁离子还原能力高于花色苷，但当质量浓度高于 20.0 μg/mL 时，铁皮石斛花色苷具有更强的铁离子还原能力。此外，花色苷可通过提高抗氧化酶活性达到降低环境中活性氧含量的目的。Yang 等^[20]以斑马鱼胚胎为模型，研究发现花色苷能提高超氧化物歧化酶、谷胱甘肽过氧化物酶和过氧化氢酶的酶活性，进而显著减弱双酚 A 诱导的氧化应激。花色苷在改善肠道环境等方面也具有重要作用，花色苷可以促进短链脂肪酸的产生、加速自降解、提高微生物相关酶的活性；促进益生菌的增殖、抑制有害细菌基因的表达；促进完整肠道屏障的形成、调节肠道环境，保持身体健康^[21]。

1.3 花色苷在食品行业应用的挑战

近年来食品安全问题层出不穷，更加绿色安全的食品成为消费者的追求，花色苷作为天然着色剂，具有优异的着色性能，食品安全国家标准中现允许使

用的着色剂有越橘红、玫瑰茄红等。这些着色剂因具有良好的生物活性而得到了一定认可,然而有研究发现花色苷在人体中的生物利用率较低,一般为1%~2%^[5,22]。人体中花色苷吸收利用的主要部位为胃肠道,其生物利用率主要受到化学结构、食品加工条件以及消化道环境如pH值、其他食物成分影响^[23,24]。在食品加工过程中,温度、光照、氧、酶等因素都会引起花色苷结构变化,进而影响生物活性,如长时间光照会诱导花色苷C2位上碳骨架断裂,形成开环的中间产物,随后被氧化生成查尔酮,查尔酮进一步被氧化为苯甲酸、2,4,6-苯甲醛等产物,导致花色苷降解^[3]。食品中的金属离子也会对花色苷造成影响,如 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Cu^{2+} 、 Mg^{2+} 等可与飞燕草素、矮牵牛素、矢车菊素形成配合物^[12]。因此,如何保护花色苷在食品产品中的结构完整性、提高生物利用率是近年来开发利用花色苷的主要挑战。

2 花色苷微胶囊化技术

提高花色苷稳定性可由自身结构和环境因素入手,酰化作用、辅色作用及生物合成等研究是以花色苷自身结构作为切入点,而微胶囊化、脂质体及纳米颗粒等包封技术则是针对环境因素进行研究。花色苷极易受光照、温度、pH值等条件影响,在加工贮藏过程中发生降解、颜色改变,进而影响食品感官质量、降低产品生物活性,造成一定程度的经济损失。但在复杂的食品加工贮藏过程中,这些不利环境因素难以完全避免,因此对提高花色苷稳定性的技术进行探索至关重要。

微胶囊主要可分为三种结构:单壁单芯型、单壁多芯型以及多壁单芯型^[1],这些结构的差异取决于微胶囊制备工艺以及芯材和壁材的选择。微胶囊技术根据壁材可开发为多种递送体系,如蛋白质递送系统、多糖递送系统、脂质体递送系统、复乳递送系统以及复合递送系统。借助微胶囊技术,从植物中提取的花色苷能够实现胃肠道定向输送、控制释放,使花色苷的生物活性作用最大化^[25]。通过微胶囊技术提高花色苷的稳定性,可以保护花色苷生物活性与颜色,减少其在储藏期的降解、损失,防止花色苷与食品基质发生不良相互作用,拓宽花色苷资源在食品工业中的应用范围^[26]。

2.1 载体材料

微胶囊的载体材料也被称作壁材、包衣、载体或外壳,理想的壁材应具有易操作、良好的乳化性能、低敏感性、高保护性以及低粘度等特点^[27,28]。不同材

料的结构、性能会影响微胶囊包埋率,壁材的选择对微胶囊化方法、芯材的生物活性有着重要影响^[29,30]。

2.1.1 多糖

多糖是具有良好的生物相容性和生物降解性的天然材料,来源广泛、价格低廉,且易改性修饰,在后续开发研究中更易控制成本、增加效益。多糖作为花色苷微胶囊壁材具有广阔的应用前景,目前关于多糖包埋花色苷的研究多集中于植物胶、淀粉及衍生物、壳聚糖及衍生物三类。

阿拉伯胶是具有成膜能力和乳化特性的植物胶,可在不同食品体系和药品配方中作为食用涂层、稳定剂和乳化剂,Xie等^[31]以阿拉伯胶为壁材制备的花色苷微胶囊包埋率达到了93%,并在不同食物模拟下,矢车菊素-3-O-葡萄糖苷保留率均达到89%以上。海藻酸钠是微胶囊化技术中应用最广泛的阴离子多糖之一,带正电的花色苷阳离子可与海藻酸钠的羧基结合生成离子配合物,经干燥得到的微胶囊具有较低的吸湿性和较高的稳定性^[32,33],邹超^[34]利用低粘度海藻酸钠制备了花色苷微胶囊,并与未包封花色苷相比,微胶囊在光照条件下贮藏35d,其花色苷保留率提高了15.53%。

淀粉主要存在于植物种子、块茎中,是植物体中最丰富的天然多糖之一^[35],淀粉颗粒对花色苷、儿茶素、芦丁等多酚都有良好的微胶囊化效果。目前已有多种淀粉被提取应用于花色苷包埋,Sylvia等^[36]将芋头淀粉作为壁材,采用喷雾干燥法制备了花色苷微胶囊,有效保护了花色苷的生物活性。Chen等^[35]对玉米淀粉进行了改性处理,基于层层自组装技术设计得到了具有高稳定性的微胶囊。 β -环糊精为直链淀粉的酶降解产物,能与花色苷形成非共价结合,使其免受环境条件影响,提高其稳定性,Prakash等^[37]研究表明花色苷经 β -环糊精包封后具有更好的热稳定性,与游离花色苷相比,微胶囊中花色苷的半衰期在60℃时提高了1.74倍。麦芽糊精是淀粉经酶法水解得到的衍生物,同样被广泛用作活性成分包封的壁材,具有溶解性好、稳定性高的特点^[38]。Juliana等^[39]研究表明,与其他壁材相比,麦芽糊精在喷雾干燥过程中对花色苷保护效果更好,微胶囊中花色苷含量为5.42 mg/100 g,且在33%相对湿度下,麦芽糊精微胶囊中飞燕草素-3-O-葡萄糖苷降解半衰期可达到86.6 d。这是由于麦芽糊精与花色苷阳离子相互作用,通过降低花色苷流动性来提高其稳定性。

壳聚糖是唯一的天然阳离子多糖,将其作为壁材包埋花色苷,能够有效提高花色苷稳定性、控制花色

昔在模拟消化过程中的释放^[40],壳聚糖分子只能溶解在少数稀酸溶液中,这限制了壳聚糖的应用,因此研究人员针对壳聚糖改性后的壳聚糖季铵盐、壳聚糖盐酸盐、羧甲基壳聚糖等衍生物进行了研究,Ge等^[41]将壳聚糖盐酸盐与羧甲基壳聚糖作为壁材、通过静电相互作用将花色苷包埋,所得微胶囊在4、25、40℃下分别放置3d后,花色苷保留率分别为95.0%、88.9%和88.0%,而同等条件下花色苷在水溶液中保留率仅为82.3%、26.6%和10.0%,可见微胶囊有效抑制了花色苷因环境温度升高而引起的降解。综合而言,多糖作为天然材料具有广阔的前景,通过化学改性,可实现对壳聚糖、海藻酸钠等多糖材料的性能调控,进一步推动其在生物医学、食品工业等领域的应用。

2.1.2 蛋白质

蛋白质是人体能量和氨基酸的来源,是维持人体生理活动所必需的营养素^[42]。蛋白质可形成致密的结构,为微胶囊芯材提供更好的保护。常用作花色苷微胶囊壁材的动物蛋白有酪蛋白、乳清分离蛋白、明胶和丝素蛋白。Liao等^[43]通过体外模拟消化发现以酪蛋白胶束和乳清分离蛋白为壁材制备的蓝莓花色苷微胶囊能够有效减缓花色苷的释放与降解。明胶是动物蛋白质的水解产物,来源广泛且具有良好的生物相容性和生物降解性,是目前常见的微胶囊壁材。Sun等^[44]利用多孔明胶与花色苷之间的静电相互作用,将花色苷成功负载至明胶微球内部,贮藏稳定性试验表明微胶囊在光湿环境下花色苷降解率(49.24%)显著低于游离花色苷的降解率(56.66%)。丝素蛋白作为天然高分子纤维蛋白,含有18种氨基酸,具有降血压、降血脂等生理功能,以丝素蛋白为壁材可达到提高花色苷稳定性的效果,还有利于拓展丝素蛋白在食药领域的应用。Li等^[45]研究表明在丝素蛋白保护下花色苷80℃下的半衰期提高了2.5倍。

此外,在食品行业中出现一种新的趋势,即利用植物性来源成分替代动物性来源成分。大豆蛋白作为植物蛋白重要来源之一,已被证明可通过疏水相互作用增强花色苷稳定性。Jiang等^[46]研究发现大豆水解蛋白对花色苷的保护作用优于大豆蛋白,荧光分析表明大豆水解蛋白对花色苷的结合亲和力大于大豆蛋白。玉米蛋白是一种两亲性植物蛋白,其在胃酸溶液中的质子化、去质子化作用可为微胶囊芯材带来良好缓冲作用, Li等^[47]采用超声辅助反溶剂沉淀法制备的玉米蛋白花色苷微胶囊具有较高的包埋率(85.17%),并通过分子对接证明花色苷成功结合到玉米蛋白内部活性位点。

2.1.3 脂类

由磷脂、胆固醇等脂类包裹生物活性成分形成的球形小囊泡为脂质体,可通过薄膜蒸发、反相蒸发、溶剂注入等方法制备^[48]。脂质体包括脂质相和水相,可用于包裹、传递和释放水溶性、脂溶性和两亲性材料^[49]。脂质体的形成机制是磷脂和水分子之间的亲/疏水相互作用^[50]。脂质体包埋花色苷等酚类物质的优势是其具有良好的控释效果与保护作用,脂质体可以保护花色苷免受口腔、胃部环境的影响,直到花色苷在肠道中被吸收,从而提高花色苷的生物利用度^[51]。Fan等^[52]用磷脂和糖脂制备的花色苷脂质体包埋率为54.9%,在pH值2.0~7.0范围内脂质体稳定性几乎不受影响。Irmak等^[51]研究发现大豆磷脂酰胆碱包裹红洋葱皮花色苷得到的脂质体在模拟口腔、胃部环境中生物利用度较低,而在模拟肠道环境中有良好的释放效果,表明脂质体达到了控制花色苷释放的目的。此外,脂质体的外层组分、结构与细胞膜相似,因此具有更高的细胞亲和力,更易使包埋的花色苷透过细胞膜被机体吸收利用。

2.1.4 复合壁材

本文综述了目前研究较多的几种花色苷微胶囊壁材,以多糖、蛋白质和脂类为材料制备的花色苷微胶囊在提高花色苷稳定性、保护花色苷生物活性方面效果显著,但仍然存在部分不足,如多糖需要与其他壁材复配从而实现微胶囊在胃肠道中的控释,蛋白质易受温度、pH值等环境因素影响而变性,传统脂质体在贮藏期易发生聚集、氧化等现象。

单一壁材可能不具备使微胶囊达到理想状态所需的全部特性,将不同比例多糖、蛋白质等材料混合,得到更好的稳定性、更高的包埋率以及更低廉的成本是现在微胶囊化研究的一大热点。Mansour等^[53]以大豆分离蛋白作为壁材与阿拉伯胶复配对花色苷进行包埋,得到了高达98.87%的包埋率,且在25℃和37℃贮藏60d,花色苷保留率分别达到了60.26%和48.32%,与单一壁材微胶囊相比获得了更好的稳定性。Fernandes等^[54]将米糠蛋白与麦芽糊精复配作为包封壁材,在喷雾干燥过程中有效保留了葡萄汁中的花色苷,当添加20wt.%米糠蛋白时,花色苷总保留率相较仅添加麦芽糊精的微胶囊提高了3.2倍。同样, Bertha等^[55]研究发现麦芽糊精与海藻糖作为二元壁材得到的花色苷微胶囊包封率(76.53%)高于麦芽糊精作为单一壁材得到的微胶囊(40.65%)。随着微胶囊化技术的不断发展和应用,更多复合壁材组合可被开发用于更好地保护花色苷、实现其靶向释放。

表 2 不同封装策略优劣势比较

Table 2 Comparison of advantages and disadvantages of various microencapsulation strategies			
方法	常用壁材	优势	劣势
喷雾干燥	多糖、蛋白质	快速，成本效益高，易扩大生产规模	高温导致花色苷损失
冷冻干燥	多糖、蛋白质	低温环境能够更好保护花色苷	耗时较长，且微胶囊表面易产生孔状结构，长期储藏易发生花色苷泄漏、氧化等现象
复凝聚法	蛋白质与带电荷的多糖等聚电解质	微胶囊化条件温和，高包埋率，微胶囊结构致密	结合顺序会影响微胶囊的稳定性，微胶囊对环境 pH 值敏感
乳化法	磷脂、胆固醇等脂溶性壁材	有效限制花色苷释放	热力学、动力学稳定性不高

2.2 封装策略

已报道用于花色苷封装的技术有喷雾干燥、冷冻干燥等依靠物理手段改变环境条件进而促进分子聚集的封装策略，以及利用机械破坏力将材料破碎、促进微胶囊形成的封装策略，如复凝聚法、乳化法等^[56]，各策略优劣势比较如表 2 所示。

2.2.1 喷雾干燥

喷雾干燥技术在封装生物活性物质方面有广泛的应用，在各种微胶囊化技术中，喷雾干燥技术操作简单、灵活，易于实现规模化生产，已经广泛应用于食品、药品等行业^[27]。喷雾干燥需要将生物活性成分分散在壁材溶液中，形成均匀、稳定的物料，随后在干燥室入口处雾化为微小液滴，增大物料与热气流的接触面积。液滴中的水分被迅速蒸发，形成包裹着生物活性成分的微胶囊颗粒^[57,58]。干燥过程中的高速气流使颗粒与器壁之间产生摩擦，使微胶囊之间发生团聚并形成光滑的表面。Pan 等^[59]以高甲基果胶与乳清分离蛋白、大豆分离蛋白混合作为壁材，采用喷雾干燥法制备蓝莓花色苷微胶囊，研究结果表明喷雾干燥得到的微胶囊具有更高的包埋率和玻璃化转变温度 Tg，且有更好的释放性能和储存稳定性，最佳壁材配方为 4 wt.% 大豆分离蛋白混合 2 wt.% 高甲基果胶。

2.2.2 冷冻干燥

花色苷对温度敏感，冷冻干燥的加工温度低于喷雾干燥，能够更好保留花色苷，且冷冻干燥微胶囊的抗氧化活性和花色苷稳定性均高于喷雾干燥微胶囊。Kanha 等^[60]采用喷雾干燥与冷冻干燥两种工艺对包埋黑米花色苷的乳剂进行干燥，冷冻干燥处理时间较长，但微胶囊中总酚、花色苷含量显著高于喷雾干燥。冷冻干燥前需将花色苷在壁材溶液中均质，以保留花色苷的原始活性。因此微胶囊对花色苷的保护和控释效果与壁材的组成有关，冷冻干燥制备微胶囊常用的壁材有麦芽糊精、阿拉伯胶、大豆分离蛋白、乳清分离蛋白等。冷冻干燥过程中冰晶升华，容易造成微胶囊

表面粗糙多孔，相比其他封装技术包封时间更长、设备价格也更加昂贵。

2.2.3 复凝聚法

复凝聚法通过两种带相反电荷的聚电解质之间的电荷中和引起相分离，得到的一种胶体聚电解质复合物。复凝聚过程通常需要制备至少两种聚合物水溶液，随后按所需比例混合均质，产生稳定的乳液，再改变介质 pH 值与温度诱导凝聚过程发生^[61]。聚电解质的摩尔比、pH 值、离子强度对复凝聚有重要影响，常用的聚电解质为蛋白质与带电荷的多糖。复凝聚法制备条件温和，得到的微胶囊包埋率较高，近年来在食品行业已有多种采用复凝聚法制备精油^[62,63]、多酚^[64,65]、脂溶性维生素^[66]以及益生菌^[67]等微胶囊。孙雪等^[68]采用明胶和阿拉伯胶作为复凝聚法包埋西番莲果皮花色苷的壁材，制备得到的微胶囊呈球形和椭球形，结构完整，包埋率最高可达 96.83%。复凝聚法制备得到的花色苷微胶囊结构致密，可以有效控制花色苷释放。但 Tan 等^[69]研究发现复合物中聚电解质与花色苷结合顺序会影响微胶囊的稳定性，多阳离子与花色苷竞争阴离子，削弱阴离子的辅色作用，为解决此问题，研究人员引入乳清分离蛋白作为阳离子聚合物首先通过疏水相互作用结合花色苷，再与四种硫酸化多糖组成聚电解质微胶囊，复合物之间的紧密网络结构提高了被包裹的花色苷的稳定性。

2.2.4 乳化法

乳化技术也已广泛用于包封生物活性成分，如皮克林乳剂、纳米乳剂以及复乳剂等。皮克林乳剂的乳化剂是固体颗粒，这些固体颗粒对油相和水相都有亲和力和，具有一定的润湿性但不溶于任何一相^[70]。赵霞等^[71]以睡莲花色苷水溶液为水相、大豆油为油相，采用聚甘油蓖麻醇酸酯作为乳化剂，构建了一个稳定的食品级皮克林乳液体系。纳米乳剂同样是由水、油、乳化剂组成的混合分散体系，平均粒径小于 200 nm。复乳剂是将单乳体系嵌入另一种不相溶的物质的液滴中，复乳法有两种类型，一是分散在外油相中的油

包水包油型 (Oil in Water in Oil, O/W/O) 乳液, 另一种是分散在外水相中的水包油包水型 (Water in Oil in Water, W/O/W) 乳液。与传统乳化法相比, 复乳法具有两个界面, 即需要两套乳化剂分别用于制备油包水乳液和水包油乳液。W/O/W 乳液能够有效保护内部水相中的亲水性成分, 并限制亲水性成分向外部水相释放, Huang 等^[72]用亚微米级的液滴包裹黑米花色苷, 并将这些液滴分散在中间油相中, 与外部水相分离, 制备得到的 W/O/W 复乳液包埋率为 99.45%, 并且能够有效阻止花色苷在胃部的释放。复乳法制备的微胶囊在保护花色苷方面具有一定应用潜力, 但是乳剂自身热力学、动力学稳定性不高, 后续可与其他技术结合来提高稳定性。

3 在食品行业中的应用

微胶囊化技术可使花色苷在加工贮藏过程中损失减少、货架期延长, 目前已成为食品领域的前沿和热点, 在食品添加剂、保健食品及食品智能包装领域均有应用。微胶囊可保持花色苷的光、热、氧化稳定性, 实现花色苷的控制释放并有效改善产品的感官性状, 使产品的营养和经济价值得到提高。

3.1 食品添加剂

3.1.1 食品着色剂

产品色泽是消费者选购时的重要指标, 花色苷作为天然植物色素, 其色泽鲜艳, 能赋予食品良好的感官特性。根据 GB2760-2014 食品添加剂使用标准, 以玫瑰茄为原料提取、精制得到的玫瑰茄红色素在饮料、糖果产品中可按生产需要适量添加^[73]。但花色苷作为食品着色剂的应用会受到其稳定性的限制, 因此研究人员尝试将微胶囊化的花色苷应用到食品中。Mohsen 等^[74]以水解改性的乳清蛋白作为壁材, 将玫瑰茄花色苷通过喷雾干燥微胶囊化, 有效保护了花色苷抗氧化性, 同时在软糖中展示出良好的着色性能。Feyza 等^[26]选择了麦芽糊精和阿拉伯树胶作为微胶囊壁材, 利用冷冻干燥技术包埋了以花色苷为主的酚类物质, 并将其应用于开菲尔, 研究结果显示花色苷微胶囊改变了开菲尔产品的颜色参数, 添加量为 5 wt.% 时产品感官评价最佳。陈鹏等^[75]通过研究确定了海藻酸钠与 CaCl_2 质量分数分别为 2 wt.% 和 3 wt.% 时, 制备得到的花色苷微球能够促进酸乳发酵, 赋予酸乳独特的色泽与口感, 且微胶囊添加量为 0.15 wt.% 时酸乳样品的感官评分最高。可见, 花色苷微胶囊能够赋予产品良好的感官特性, 具有替代化学合成着色剂的应用潜力。

3.1.2 食品抗氧化剂

花色苷除有助于提高食品感官特性外, 还具有良好的生物活性。Arkadiusz 等^[76]将花色苷微胶囊与植物材料混合制备了一种无麸质植物肉, 所得产品具有良好的接受度, 且花色苷的加入增加了产品的抗氧化活性, 扩大了素食产品的受众范围。Papillo 等^[77]将黑米花色苷微胶囊作为功能性成分加入饼干配方中, 即使在烘烤过程中花色苷等酚类物质有所减少, 但与传统饼干相比, 功能性饼干的总酚含量增加了 78%, 抗氧化能力提高了 83%, 可见添加花色苷微胶囊改善了饼干感官特性同时能够提高产品抗氧化性。黑豆作为营养丰富的豆科植物, 是一种优质的代餐粉原料, 其种皮是花色苷的良好来源, 但黑豆粉加工工艺易造成花色苷损失。朱莹莹等^[78]以大豆分离蛋白和麦芽糊精作为复合壁材, 通过喷雾干燥将黑豆种皮花色苷制备为微胶囊, 与挤压膨化后的黑豆粉混合得到了可降低血压、抑制氧化反应的黑豆冲调粉, 与现有产品相比, 该冲调粉更有新鲜感、口感更好、营养更丰富。花色苷微胶囊作为抗氧化剂在食品行业展现出良好的应用效果, 后续可进一步探索基于花色苷微胶囊的抗氧化剂工业化生产。

3.2 保健食品

随着大众健康意识的提高, 消费者对于保健食品的需求不断增加。花色苷的生物活性促进了众多具有营养保健功效的功能性食品的研究开发, 如李晓艺^[79]将包封后的紫玉米花色苷作为原料, 与 Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 、Vc 等配料混合制备了咀嚼片, 经过配方优化后的花色苷微胶囊咀嚼片具有良好的感官特性, 且在模拟胃肠道环境中具有更高的花色苷保留率, 进一步证明了微胶囊技术对花色苷起到了明显的保护效果。白金荣^[80]在优化桑葚花色苷提取和包封条件的基础上, 混合桑葚多糖和花色苷微胶囊作为片剂原料, 制备了颜色均匀、酸甜适中的桑葚咀嚼片, 整体提高了咀嚼片的口感、颜色稳定性和片剂咀嚼性。有研究表明^[81], 花色苷能够保护视网膜色素上皮细胞免受光诱导和过氧化氢诱导的氧化损伤, 李佳文等^[82]将花色苷微胶囊制成具有缓解视疲劳作用且便携、低热量的功能性压片糖果, 保证了花色苷在肠道内充分吸收利用, 符合消费者对于保健食品的多元化需求。微胶囊化技术有效保护了花色苷的稳定性, 使其在人体内发挥生物活性, 目前添加微胶囊化花色苷的保健食品多围绕护眼、抗氧化、抗老等功效, 产品形式通常为咀嚼片或软胶囊形式, 后续仍可继续开发研究更多产品种类, 或选择具有保健功效的微胶囊壁材, 以满足不同消费群体对保健食品的需求。

3.3 食品智能包装

除作为具有附加价值的添加剂或保健食品原料外，花色苷还被开发为能维持食品新鲜度、及时将食品质量状态可视化的食品智能包装。花色苷具有 pH 值敏感性，如图 1 所示，其结构随 pH 值变化能以四种形式存在，如红色黄烩离子、蓝或紫色醌式碱、无色甲醇假碱和淡黄色查尔酮^[83]。将花色苷作为指示剂与成膜基质混合，制得的指示膜可响应肉类、海产品、乳制品等产品的 pH 值变化，消费者无需打开包装即可了解产品是否新鲜^[84]。Jiang 等^[85]以杨梅渣花色苷作为原料制备了能有效区分南美白对虾在贮存期内新鲜度的纳米纤维薄膜。

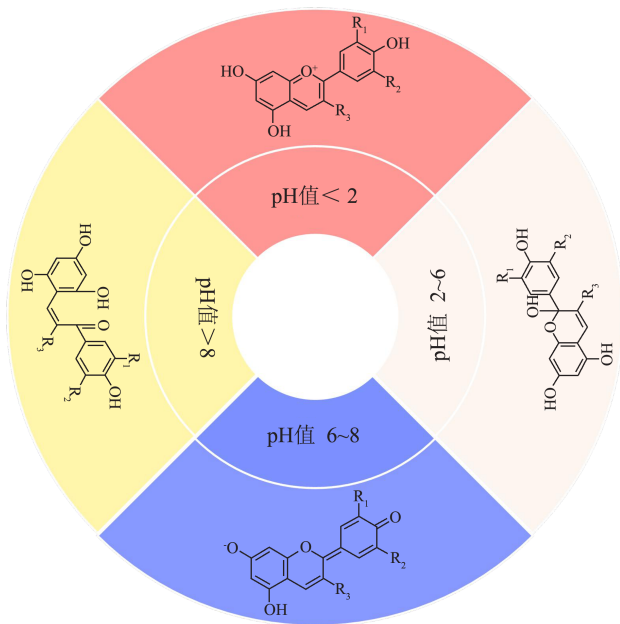


图 1 花色苷在不同 pH 值水溶液中的颜色
Fig.1 Color of anthocyanins in aqueous solutions of different pH

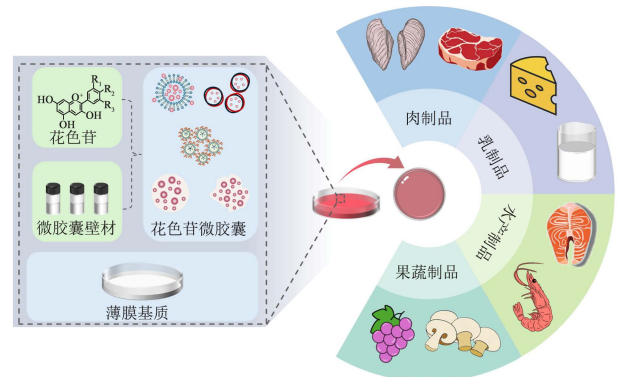


图 2 花色苷微胶囊在食品包装中的应用
Fig.2 Application of anthocyanins microcapsule in food packaging

由于花色苷性质较为活泼、稳定性较低，由游离花色苷制备的薄膜在推广使用过程中存在花色苷过早消耗、实际应用效果不理想等问题^[86]。为提高花色苷

薄膜的稳定性，研究人员通过微胶囊化技术将游离花色苷制备成不同形态微胶囊，再与多糖、蛋白质、脂质或复合材料等薄膜基质混合，得到化学性质更稳定的食品智能包装薄膜，并应用于多种食品领域，如图 2 所示。Zheng 等^[87]以马铃薯支链淀粉包封的玫瑰花色苷为基础制备了一种复合指示膜，包封后的花色苷薄膜相比只含有游离花色苷的薄膜具有更高的颜色稳定性，且微胶囊的加入提高了薄膜的力学性质和对蒸汽、光的阻隔性能。Wang 等^[88]以海藻酸钠、魔芋葡甘露聚糖作为壁材，将枸杞花色苷微胶囊化并制成 pH 值响应膜，同时添加茶多酚进一步提高薄膜稳定性，茶多酚与微胶囊化的花色苷可作用于细菌细胞壁的不同组分，得到协同抑菌效果；该薄膜在实际应用中不仅延长了牛奶的保质期，还可有效监控产品新鲜度。未来在保证食品安全的前提下，合理开发花色苷微胶囊薄膜，有利于进一步开拓市场，扩展智能包装的应用范围。

4 总结与展望

本文综述了花色苷的结构与生物活性及其目前在食品领域应用局限，并介绍了用于保护花色苷的常用微胶囊化壁材及封装策略。市场对以花色苷为代表的天然植物提取物需求增加，未来花色苷有望大量用于食品添加剂、食品包装材料等领域。但花色苷的不稳定性限制了其广泛使用，通过微胶囊化技术保护花色苷，是拓展花色苷作为天然提取物应用的有效途径。目前花色苷微胶囊已应用于食品添加剂、保健食品领域，更可作为包装材料维持食品新鲜度和监控质量状况。虽然多种花色苷微胶囊已经用于食品行业，但仍可降低制备技术成本与难度，实现花色苷微胶囊产品的工业连续化生产，如制定行业标准、不断开发创新先进微胶囊化技术，此外还可利用分子对接等方法筛选性能优良且成本低廉的壁材组合。此外，由于体内环境与体外模拟环境存在一定差异，随研究技术的不断进步，可通过细胞学实验开发更易吸收利用的微胶囊产品，并整合细胞学实验、动物实验及临床试验等结果，建立系统性数据库，以便为开发高值化花色苷产品提供理论支撑。目前，花色苷微胶囊在食品中的应用仍处在发展阶段，在未来需深入研究以进一步推广其在食品工业的应用，开发新型食品添加剂，为食品工业赋能，在健康中国战略下发挥重要作用。

参考文献

[1] TARONE A G, CAZARIN C B B, JUNIOR M R M. Anthocyanins: new techniques and challenges in microencapsulation [J]. Food

- Research International, 2020, 133: 109092.
- [2] DANGLES O, FENGER J A, GIUSTI M M, et al. The chemical reactivity of anthocyanins and its consequences in food science and nutrition [J]. *Molecules*, 2018, 23(8): 1970.
- [3] OSVALDT R T K, PAULO F J. Nanoencapsulated anthocyanin as a functional ingredient: technological application and future perspectives [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2022, 218: 112707.
- [4] 王海歌, 鲍梦圆, 徐心雨, 等. 植物食材花青素结构特性及其功效机制研究进展[J]. *中国食品添加剂*, 2024, 35(2): 299-307.
- [5] SHU C, WU S Y, LI H K, et al. Health benefits of anthocyanin-containing foods, beverages, and supplements have unpredictable relation to gastrointestinal microbiota: a systematic review and meta-analysis of random clinical trials [J]. *Nutrition Research (New York, NY)*, 2023, 116: 48-59.
- [6] 曾茜茜, 雷琳, 赵国华, 等. 花青素加工贮藏稳定性的改善及应用研究进展[J]. *食品科学*, 2018, 39(11): 269-275.
- [7] 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.
- [8] ANNA C, ANNA C, ANNA S-L, et al. Quality of bread enriched with microencapsulated anthocyanin extracts during *in vitro* simulated digestion [J]. *Journal of Cereal Science*, 2023, 113: 103724.
- [9] FATEME A, SHIVA P, ALI R, et al. Fortification/enrichment of milk and dairy products by encapsulated bioactive ingredients [J]. *Food Research International*, 2022, 157: 111212.
- [10] 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.
- [11] WANG J D, ZHAO Y Q, SUN B, et al. The structure of anthocyanins and the copigmentation by common micromolecular copigments: A review [J]. *Food Research International*, 2024, 176: 113837.
- [12] 赵祥杰, 杨文君, 杨荣玲, 等. 花色苷生物转化修饰的研究进展[J]. *生物技术通报*, 2019, 35(10): 205-211.
- [13] JENS F, FRANK K, GERHARD R, et al. Stability and biotransformation of various dietary anthocyanins *in vitro* [J]. *European Journal of Nutrition*, 2006, 45(1): 7-18.
- [14] BAHARE S, JAVAD S R, FRANCESCA C, et al. The therapeutic potential of anthocyanins: current approaches based on their molecular mechanism of action [J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2020, 11: 1300.
- [15] LUCIA P, FEDERICA M, RITA N, et al. Bioactive phenolic compounds from agri-food wastes: an update on green and sustainable extraction methodologies [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2020, 7: 60.
- [16] SU L J, ZHANG J H, HERNANDO G, et al. Reactive oxygen species-induced lipid peroxidation in apoptosis, autophagy, and ferroptosis [J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2019, 5080843: 13.
- [17] 王硕, 吴华, 李金铭, 等. 天然提取物在影响动物氧化应激中的研究进展[J]. *饲料研究*, 2023, 46(18): 145-149.
- [18] 张淑淑, 吕想, 刘伟, 等. 果蔬花色苷的理化特性、提取技术及功能活性研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(2): 360-371.
- [19] ZHU Z, SONG X, HUANG Y, et al. Acylated anthocyanins from *dendrobium officinale* kimura & migo: structural characteristics, antioxidant and hypoglycemic activities [J]. *Food Chemistry*, 2024, 455: 139952.
- [20] YANG G C, YANG L P, LIU Q, et al. Protective effects of cyanidin-3-O-glucoside on BPA-induced neurodevelopmental toxicity in zebrafish embryo model [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology. Toxicology & Pharmacology: CBP*, 2022, 264: 109525.
- [21] WANG M W, ZHANG Z Y, SUN H J, et al. Research progress of anthocyanin prebiotic activity: a review [J]. *Phytomedicine*, 2022, 102: 154145.
- [22] 马小强, 白卫滨, 陈嘉莉, 等. 花色苷递送系统研究进展[J]. *食品科学*, 2022, 43(7): 245-253.
- [23] 陈雨露, 孙婉秋, 高彦祥, 等. 食品运载体系提高酚类物质生物利用度的研究进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(5): 323-330.
- [24] 孙希云, 王静雯, 田思慧, 等. 食品基质及加工方式对多酚生物利用度影响的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(21): 400-407.
- [25] HYEJI K, MINJUNG K, MYONGSOO C. Anthocyanin structure and pH dependent extraction characteristics from blueberries (*Vaccinium corymbosum*) and chokeberries (*Aronia melanocarpa*) in subcritical water state [J]. *Foods*, 2021, 10(3): 527.
- [26] FEYZA T, SIBEL B. Encapsulation of bioactive compounds in shalgam and investigation of the possibilities of their use in probiotic food production [J]. *Food Bioscience*, 2022, 50(PA): 102166.
- [27] PIÑÓN-BALDERRAMA C I, LEYVA-PORRAS C, TERÁN-FIGUEROA Y, et al. Encapsulation of active ingredients in food industry by spray-drying and nano spray-drying technologies [J]. *Processes*, 2020, 8(8): 889.
- [28] 应欣, 卢玉, 李义, 等. 麦芽糊精的功能特性及其应用研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(12): 131-137.
- [29] 章智华, 钟舒睿, 彭飞, 等. 微胶囊壁材及制备技术的研究进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(9): 246-253.
- [30] SHARIF N, KHOSHNOUDI-NIA S, JAFARI S M. Nano/microencapsulation of anthocyanins: a systematic review and meta-analysis [J]. *Food Research International*, 2020, 132: 109077.
- [31] XIE L H, YAHIA Z O, RASHWAN A K, et al. Green synthesis, characterization, food simulants stability, and antioxidant activity of gum arabic-coated cyanidin-3-O-glucoside-loaded nano-nutrosomes [J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 154: 110083.
- [32] CARVALHO A G D S, MACHADO M T D C, BARROS H D D F Q, et al. Anthocyanins from jussara (*Euterpe edulis* Martius) extract carried by calcium alginate beads pre-prepared using ionic gelation [J]. *Powder Technology*, 2019, 345: 283-291.
- [33] DOS S S S, MOSER P C, BRUNO R E, et al. Bioavailability of blackberry pomace microcapsules by using different techniques: an approach for yogurt application [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2022, 81: 103111.
- [34] 邹超. 海藻酸钠-花色苷自组装颗粒制备及改善小鼠食物过敏研究[D]. 厦门: 集美大学, 2020.
- [35] CHEN L, ZHANG D, WEI L F, 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.
- [36] SYLVIA R C, O. N C R, A. B P L, et al. Optimal conditions for anthocyanin extract microencapsulation in taro starch: physicochemical characterization and bioaccessibility in gastrointestinal conditions [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 227: 83-92.
- [37] PRAKASH C P, ABHISHEK M, ANIRBAN D, et al. Delineating the behavior of berberis anthocyanin/ β -cyclodextrin inclusion complex *in*

- vitro*: a molecular dynamics approach [J]. LWT, 2022, 157: 113090.
- [38] 赵彦巧,王月,孟翔宇,等.喷雾干燥法制备玫瑰茄花色苷微胶囊条件优化[J].福建农业学报,2021,36(1):104-114.
- [39] JULIANA M G C, FRANCISCO J R, FRANCISCO J H, et al. Characterization and bioaccessibility assessment of bioactive compounds from camu-camu (*Myrciaria dubia*) powders and their food applications [J]. Food Research International, 2024, 176: 113820.
- [40] 郭红辉,卫晓怡,凌文华.花色苷代谢的研究进展[J].食品研究与开发,2011,32(5):163-166.
- [41] GE J, YUE P X, CHI J P, et al. Formation and stability of anthocyanins-loaded nanocomplexes prepared with chitosan hydrochloride and carboxymethyl chitosan [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 74: 23-31.
- [42] ZAHRA A, HADI P S, KHASHAYAR S, et al. Spray drying encapsulation of bioactive compounds within protein-based carriers; different options and applications [J]. Food Chemistry, 2021, 359: 129965.
- [43] LIAO M J, MA L J, MIAO S, et al. The in-vitro digestion behaviors of milk proteins acting as wall materials in spray-dried microparticles: effects on the release of loaded blueberry anthocyanins [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 115: 106620.
- [44] SUN J L, WEI Z H, XUE C H. Porous gelatin microspheres for high loading and improved stability of anthocyanins: serving as antioxidant factors and food freshness indicators [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 148(PA): 109494.
- [45] LI Y W, YAO L, ZHANG L W, et al. Enhanced physicochemical stabilities of cyanidin-3-O-glucoside *via* combination with silk fibroin peptide [J]. Food Chemistry, 2021, 355: 129479.
- [46] JIANG Y T, YIN Z C, WU Y R, et al. Inhibitory effects of soy protein and its hydrolysate on the degradation of anthocyanins in mulberry extract [J]. Food Bioscience, 2021, 40: 100911.
- [47] LI Z Y, WANG Y D, SONG B G, et al. The comparison between zein-anthocyanins complex and nanoparticle systems: stability enhancement, interaction mechanism, and *in silico* approaches [J]. Food Chemistry, 2023, 420: 136136.
- [48] 茹苹,朱龙佼,周伟,等.黑果腺肋花楸花色苷纳米脂质体的制备及稳定性研究[J].食品科技,2023,48(6):237-245.
- [49] 池金鹏.花色苷纳米脂质体的制备及性能研究[D].合肥:安徽农业大学,2019.
- [50] FANG Z X, BHANDARI B. Encapsulation of polyphenols-a review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2010, 21(10): 510-523.
- [51] IRMAK S O, NESLIHAN D A, KUBRA U, et al. Lyophilized nano-liposomal system for red onion (*Allium cepa* L.) peel anthocyanin: Characterization, bioaccessibility and release kinetics [J]. Food Bioscience, 2023, 53: 102702.
- [52] FAN L L, CHEN Q H, YASHENG M, et al. Stable vesicle self-assembled from phospholipid and mannosylerythritol lipid and its application in encapsulating anthocyanins [J]. Food Chemistry, 2020, 344: 128649.
- [53] MANSOUR M, SALAH M, XU X. Effect of microencapsulation using soy protein isolate and gum arabic as wall material on red raspberry anthocyanin stability, characterization, and simulated gastrointestinal conditions [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 63: 104927.
- [54] FERNANDES A R, GOUVEIA G M H, EMY K L. Rice bran protein increases the retention of anthocyanins by acting as an encapsulating agent in the spray drying of grape juice [J]. Food Research International, 2023, 172: 113237.
- [55] MILLINIA L B, MASHITHAH D, NAWATILA R, et al. Microencapsulation of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) anthocyanins: effects of maltodextrin and trehalose matrix on selected physicochemical properties and antioxidant activities of spray-dried powder [J]. Future Foods, 2024, 9, 100300.
- [56] KATHERINE H S, ESTHER T, MARTA P, et al. Integrating top-down and self-assembly in the fabrication of peptide and protein-based biomedical materials [J]. Chemical Society Reviews, 2011, 40(9): 4563-4577.
- [57] 罗晓莉,高彦祥.姜黄素及其微胶囊化技术研究进展[J].中国食品添加剂,2023,34(5):315-330.
- [58] 付聪,董鸿春,刘玥婷,等.番茄红素的微胶囊化、稳定性及生物利用率的研究进展[J].食品工业科技,2022,43(11):391-397.
- [59] PAN L H, CHEN L P, WU C L, et al. Microencapsulation of blueberry anthocyanins by spray drying with soy protein isolates/high methyl pectin combination: physicochemical properties, release behavior *in vitro* and storage stability [J]. Food Chemistry, 2022, 395: 133626.
- [60] KANHA N, REGENSTEIN J M, SURAWANG S, et al. Properties and kinetics of the *in vitro* release of anthocyanin-rich microcapsules produced through spray and freeze-drying complex coacervated double emulsions [J]. Food Chemistry, 2021, 340: 127950.
- [61] TIMILSENA Y P, AKANBI T O, KHALID N, et al. Complex coacervation: principles, mechanisms and applications in microencapsulation [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 121: 1276-1286.
- [62] 赵帅,庄媛媛,杨华.复凝聚法包封茶树精油 β -环糊精包合物研究[J].食品科技,2023,48(1):233-239.
- [63] 李振杰,熊亚妹,刘远上,等.复凝聚法制备甜橙油纳米微胶囊的研究[J].轻工学报,2022,37(2):44-50.
- [64] PINTANELA V L, CRISTINA D S H H, CRISTINA J A, et al. Encapsulation of phenolic compounds through the complex coacervation technique for the enrichment of diet chewable candies [J]. Food Bioscience, 2023, 51: 102256.
- [65] MA L, SU C R, LI S Y, et al. Co-delivery of curcumin and quercetin in the bilayer structure based on complex coacervation [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 144: 108907.
- [66] 李悦,王帆,臧敏,等.复凝聚法制备维生素A微胶囊及表征[J].大连工业大学学报,2023,42(4):235-241.
- [67] 徐玉巧,王金华,熊智,等.复凝聚法鼠李糖乳杆菌微胶囊工艺优化及储藏稳定性[J].食品与发酵工业,2020,46(5):194-199.
- [68] 孙雪,张蕊,范方宇,等.复凝聚法制备西番莲果皮花色苷微胶囊及其性质分析[J].食品工业科技,2021,42(17):187-193.
- [69] TAN C, SUN Y, YAO X Q, et al. Stabilization of anthocyanins by simultaneous encapsulation-copigmentation via protein-polysaccharide polyelectrolyte complexes [J]. Food Chemistry, 2023, 416: 135732.
- [70] BAI L, HUAN S Q, ROJAS O J, et al. Recent innovations in emulsion science and technology for food applications [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(32): 8944-8963.
- [71] 赵霞,陈彦甫,周卫娟,等.‘蓝鸟’睡莲花色苷W/O皮克林乳液的制

- 备及稳定性分析[J].现代食品科技,2024,40(6):206-213.
- [72] HUANG Y, ZHOU W B. Microencapsulation of anthocyanins through two-step emulsification and release characteristics during *in vitro* digestion [J]. Food Chemistry, 2018, 278: 357-363.
- [73] GB 2760-2014食品安全国家标准食品添加剂使用标准[S].
- [74] MOHSEN Y, HADI P S, KHASHAYAR S, et al. Application of structurally modified WPC in combination with maltodextrin for microencapsulation of roselle (*Hibiscus sabdariffa*) extract as a natural colorant source for gummy candy [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 242(P3): 124903.
- [75] 陈鹏,王卉,白燕.花青素微球制备及在酸乳中的应用[J].农产品加工,2023,2:1-4.
- [76] ARKADIUSZ S, ANNA O, MATEUSZ B, et al. The optimization of a gluten-free and soy-free plant-based meat analogue recipe enriched with anthocyanins microcapsules [J]. LWT, 2022, 168: 113849
- [77] PAPILLO A V, LOCATELLI M, TRAVAGLIA F, et al. Spray-dried polyphenolic extract from Italian black rice (*Oryza sativa* L., var. Artemide) as new ingredient for bakery products [J]. Food Chemistry, 2018, 269(15): 603-609.
- [78] 朱莹莹,么杨,闫溢哲,等.一种富含花青素的黑豆冲调粉及其制备方法:河南省:CN202310988343.2[P].2023-11-21.
- [79] 李晓艺.紫玉米花色苷咀嚼片研制及体外模拟消化研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2023.
- [80] 白金荣.一种新型营养桑葚咀嚼片的研制[D].沈阳:沈阳农业大学,2023.
- [81] SESSO D H, RAUTIAINEN S, PARK J S, et al. Intake of blueberries, anthocyanins, and risk of eye disease in women [J]. The Journal of Nutrition, 2024, 154(4): 1404-1413.
- [82] 李佳文,崔慧,陈浩然.“视界”功能性压片糖果的研制[J].现代食品,2016,8:108-109.
- [83] ZHAO L, LIU Y Q, ZHAO L, et al. Anthocyanin-based pH-sensitive smart packaging films for monitoring food freshness [J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2022, 9: 100340.
- [84] MAHMOOD A S, MILAD T, ESAMIL M, et al. pH-responsive color indicator films based on methylcellulose/chitosan nanofiber and barberry anthocyanins for real-time monitoring of meat freshness [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 166: 741-750.
- [85] JIANG L J, WANG C Y, ZHAO F, et al. Development of electrospun nanofiber films based on pullulan/polyvinyl alcohol incorporating bayberry pomace anthocyanin extract for aquatic products freshness monitoring [J]. Food Bioscience, 2024, 58: 103717.
- [86] NAZILA O, ABDORREZA M N, MEHRAN G, et al. Natural anthocyanins: sources, extraction, characterization, and suitability for smart packaging [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2022, 33: 100872.
- [87] ZHENG L M, LIU L M, YU J H, et al. Intelligent starch/chitosan-based film incorporated by anthocyanin-encapsulated amylopectin nanoparticles with high stability for food freshness monitoring [J]. Food Control, 2023, 151: 109798.
- [88] WANG S C, LIU R, HAN M J, et al. Intelligent active films of sodium alginate and konjac glucomannan mixed by *Lycium ruthenicum* anthocyanins and tea polyphenols for milk preservation and freshness monitoring [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253(P1): 126674.