

DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2025.04.025

# 原花青素的生物活性及在食品中的应用

田艳杰<sup>1,2</sup>, 陈志强<sup>2</sup>, 姜华<sup>1\*</sup>

(1. 齐鲁工业大学(山东省科学院)食品科学与工程学院, 山东 济南 250353; 2. 山东每日良食食品有限公司, 山东 德州 253000)

**摘要:** 原花青素广泛存在于葡萄籽、蓝莓、花生红衣等植物中, 具有抗氧化、抗菌、抗肿瘤等多种生物活性。由于其较好的抗氧化性、抗菌性, 原花青素作为天然的抗氧化剂、防腐剂应用于食品领域, 用于延长食品货架期, 增加色泽。该文总结原花青素的提取、纯化工艺以及其生物活性, 并对近年来在食品中的应用进行综述, 以期在原花青素在食品领域扩大应用提供参考。

**关键字:** 原花青素; 生物活性; 抗氧化作用; 抗菌作用; 食品应用

## Proanthocyanidins: Bioactivities and Applications in Food

TIAN Yanjie<sup>1,2</sup>, CHEN Zhiqiang<sup>2</sup>, JIANG Hua<sup>1\*</sup>

(1. School of Food Science and Engineering, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250353, Shandong, China; 2. Shandong Quality Good Food Co., Ltd., Dezhou 253000, Shandong, China)

**Abstract:** Proanthocyanidins are ubiquitous in grape seeds, blueberries, peanut red coats and other plants and have antioxidant, antimicrobial, and antitumor activities. Due to the antioxidant and antimicrobial properties, proanthocyanidins have been used as natural antioxidants and preservatives for prolonging the shelf-life and improving the color of food. The research progress in proanthocyanidins was reviewed in terms of the extraction and purification processes, bioactivities, and applications in food, with a view to providing reference for expanding the applications of proanthocyanidins in food.

**Key words:** proanthocyanidins; bioactivity; antioxidant effect; antimicrobial effect; application in food

引文格式:

田艳杰, 陈志强, 姜华. 原花青素的生物活性及在食品中的应用[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(4): 187-191, 199.

TIAN Yanjie, CHEN Zhiqiang, JIANG Hua. Proanthocyanidins: Bioactivities and Applications in Food[J]. Food Research and Development, 2025, 46(4): 187-191, 199.

原花青素(proanthocyanidins, PCs)是一种由黄烷-3-醇单体缩合而形成不同聚合度的黄酮类化合物, 广泛存在于葡萄籽、蓝莓、花生红衣中, 易溶于水、醇等极性溶液<sup>[1]</sup>, 提取步骤主要包括预处理、提取和纯化<sup>[2]</sup>。依据原花青素不同的聚合度, 可以分为单体原花青素、平均聚合度小于或等于4的低聚原花青素和平均聚合度大于4的高聚原花青素, 其中低聚体的抗氧化活性远大于高聚体。由于原花青素中含有多个酚羟基, 研究表明其抗氧化性较 $V_C$ 和 $V_E$ 更强<sup>[3]</sup>, 因此, 原花青素常被用做天然的抗氧化剂、防腐剂, 应用于食品、药品、

化妆品等多领域。

## 1 原花青素提取及纯化

### 1.1 原花青素的提取

原花青素是一种略带苦味的红棕色粉末, 可溶于水和大多数有机溶剂。张晓冰等<sup>[4]</sup>借助超声波辅助乙醇提取法优化提取欧李果渣中原花青素, 通过优化试验使原花青素的得率达到15.37 mg/g。王文华等<sup>[5]</sup>利用低共熔溶剂温浸法提取葡萄皮籽渣, 得到原花青素含量为143.53 mg/g, 提取率是传统乙醇回流浸提工艺的

基金项目: 山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2023CXGC010414)

作者简介: 田艳杰(1998—), 女(汉), 硕士研究生, 研究方向: 食品加工。

\*通信作者: 姜华(1974—), 男(汉), 副教授, 研究方向: 食品加工。

2.3倍。郭建峰等<sup>[6]</sup>采用超声辅助提取工艺提取沙棘籽粕中的原花青素,通过优化试验得到最优提取条件:沙棘籽粕与70%乙醇液料比1:15(g/mL)、超声时间28 min、提取温度45℃、pH值为2.85时原花青素得率为6.556%,提取出的物质主要为二聚体和三聚体以及黄酮类物质。提取原花青素的方法中溶剂提取法和超声波辅助提取法是应用最为广泛两种方法。

## 1.2 原花青素的纯化

原花青素初始提取得到的粗提物中含有大量的多糖、蛋白质和其他杂质。如不进行纯化处理,会对原花青素的生物活性造成影响。常用于原花青素纯化的工艺包括大孔吸附树脂法、柱层析法、高效液相色谱法等,其中,柱层析法、高效液相色谱法等纯化效率高,但存在成本高的问题,不适合实际应用。而大孔吸附树脂法具有制备量大、操作简单、生产成本低等优点,成为原花青素纯化的一种常用方法。相关研究通过AB-8型大孔吸附树脂法分离纯化原花青素,采用香草醛-硫酸方法测定原花青素含量,在最优条件下,原花青素纯度达到94.7%,研究表明,大孔吸附树脂法具有吸附效果好、速度快等优点<sup>[7]</sup>。赵文娟等<sup>[8]</sup>利用101型树脂对黑枸杞中的原花青素进行分离纯化,研究结果表明纯化后的原花青素含量增加了1.17倍。冉思蛟等<sup>[9]</sup>利用大孔吸附树脂法纯化紫象草原花青素粗提物,对比3种不同大孔吸附树脂(D101、HP-20、ADS-17)吸附纯化能力,通过单因素试验确定最优的纯化条件,结果表明,利用D101型大孔吸附树脂,在乙醇洗脱浓度90%(体积分数),上样体积480 mL,洗脱体积155 mL时,效果最好,此时原花青素B<sub>2</sub>纯度提升36.06%,且研究测定纯化后的原花青素平均聚合度基本不受影响。原花青素在提取后进行纯化是十分必要的,对于应用具有重要意义。

## 2 原花青素的生物活性

由于传统的抗生素及机体耐药性对人体存在不良影响,原花青素因其安全性及天然性受到人们的青睐。原花青素含有多个酚羟基,是一种高效的抗氧化剂,在促进人体营养健康中发挥优异的功能活性,因此以抗氧化性为基础的抗菌、抗心血管疾病、抗癌等生物活性也被广泛研究。

### 2.1 抗氧化作用

原花青素是目前发现自由基清除能力及抗氧化性较强的成分之一,其抗氧化活性是近年来的研究热点。一般正常细胞代谢会基于谷胱甘肽、超氧化物歧化酶和过氧化氢酶等通过解毒产生过氧化氢、羟自由基等氧化中间体。在正常生理条件下,代谢过程处于动态平衡状态,但如果氧化中间体发生异常积累,会影响体内氧化与抗氧化平衡状态,进而加速机体衰老。活性

氧(reactive oxygen species, ROS)在细胞信号传导和体内氧化/抗氧化活性的控制中起重要作用<sup>[10]</sup>。相关研究证明原花青素可以通过增强超氧化物歧化酶活性,降低丙二醛和一氧化氮含量,从而有效减轻脑缺血/再灌注损伤,保护缺血性脑组织<sup>[11]</sup>。超声辅助提取的原花青素(半抑制浓度为29.88 μg/mL)对DPPH自由基清除能力高于V<sub>C</sub>(半抑制浓度为36.04 μg/mL),提取物脂质过氧化的抑制作用(15%)高于V<sub>C</sub>(13%)和V<sub>E</sub>(11%)<sup>[12]</sup>。在痛风小鼠模型中,原花青素抑制尿酸单钠诱导的NLRP3炎症小体活化和白细胞介素1β(interleukin-1β, IL-1β)升高,它还降低了RAW 264.7细胞中的ROS水平<sup>[13]</sup>。体外和体内实验证明,原花青素降低了电离辐射诱导的小鼠睾丸基质细胞TM3和人小肠隐窝上皮细胞HIEC的凋亡和增殖抑制作用,缓解了DNA双链断裂。原花青素改善了电离辐射引起的睾丸和肠道的病理损伤,保护了睾丸的内分泌功能和肠道的屏障功能,初步证明原花青素的辐射防护作用与其抗氧化作用和抑制丝裂原活化蛋白激酶(mitogen-activated protein kinase, MAPK)信号通路有关<sup>[14]</sup>。Puiggros等<sup>[15]</sup>研究表明葡萄籽原花青素可以调节抗氧化系统的表达,借助谷胱甘肽合成途径来改善细胞氧化还原状态。同样相关研究发现,原花青素可通过调节超氧化物歧化酶及谷胱甘肽过氧化物酶的活性来清除衰老小鼠心肌细胞中的自由基<sup>[16]</sup>。原花青素超强的抗氧化性是其应用在食品、化妆品行业的前提条件,可延长食品保质期,延缓皮肤老化。

### 2.2 抗菌作用

由于微生物中抗生素耐药性、传统药物抗生素不良作用的存在,原花青素因其天然来源和相对安全的性质是新型天然抗菌剂的首选<sup>[17]</sup>。其中,原花青素二聚体是目前发现的有效抗菌剂<sup>[18]</sup>。研究证明,花生皮来源的原花青素三聚体可以破坏蜡样芽孢杆菌的细胞膜以及细胞壁完整性,葡萄籽提取物可以抑制单核细胞增生李斯特菌<sup>[19]</sup>。蒋秀秀<sup>[20]</sup>研究了不同浓度的葡萄籽原花青素对变形链球菌的抑制作用,结果表明,当原花青素的浓度为25 mg/mL和12.5 mg/mL时,具有明显抑菌效果;抗菌测试表明,原花青素对革兰氏阳性和革兰氏阴性细菌均有抑制作用,扫描电镜结果显示原花青素可以破坏细菌的超微结构<sup>[21]</sup>。原花青素以其抗菌作用成为预防和治疗牙周疾病的一类的植物营养素<sup>[22]</sup>,研究表明,原花青素可以减少细菌生物膜形成,主要抑制牙龈卟啉单胞菌<sup>[23]</sup>。原花青素作为新型天然抗菌剂可以有效抑制细菌繁殖,降低细菌的活性。

### 2.3 防治心血管疾病

随着人们生活水平的提高,心血管疾病已经成为导致死亡的第一危险因素。研究表明,全球死亡人数中的1/3是由于心血管疾病导致的,严重威胁人类生

命健康。葡萄籽原花青素可以通过缓解血清胰岛素抵抗水平,修复受损的 $\beta$ 细胞,调节 $\beta$ 细胞增殖和凋亡等方面进而调节糖脂代谢,对2型糖尿病患者有明显的降糖降血脂作用,且不会对肝肾和造血功能产生不良影响<sup>[24]</sup>。Rathinavel等<sup>[25]</sup>还证明,PCs通过骨形态发生蛋白4(bone morphogenetic protein 4, BMP-4)改变细胞外基质蛋白可以应对心肌梗死和随后心脏纤维化造成的氧化损伤。同时,葡萄酒中含有能降低血压的原花青素,研究人员给轻度高血压患者饮用葡萄酒提取物后可使患者收缩压降低3 mm Hg(399.96 Pa),而舒张压降低2 mm Hg(266.64 Pa)<sup>[26]</sup>。原花青素已被证明对于心肌缺血再灌注损伤、糖尿病、动脉粥样硬化具有较好的防治作用,促进血液循环、新陈代谢,增加血液中的氧含量,在医学领域具有广阔的发展前景。

#### 2.4 抗癌、抗肿瘤作用

近年来,原花青素预防癌症和肿瘤的相关研究较多,其作用机制主要包括调节分子信号通路,抑制和诱导肿瘤细胞死亡,其中主要包括调节核转录因子(nuclear transcription factor- $\kappa$ B, NF- $\kappa$ B)、MAPK、磷脂酰肌醇-3激酶(phosphatidylinositol 3 kinase, PI3K)/蛋白激酶B(protein kinase B, AKT)信号通路。相关研究发现,原花青素可以对乳腺癌、结肠癌、前列腺癌等多种癌症发生途径进行干扰<sup>[27]</sup>。Zhang等<sup>[28]</sup>研究中首次报道了原花青素和白藜芦醇对抑制人乳腺癌细胞具有协同作用。原花青素 $B_2$ 通过下调信号通路中的p-PI3K、p-Akt及p-mTOR蛋白的表达,从而抑制直肠癌细胞生长,诱导癌细胞的凋亡。在卵巢癌细胞中也观察到原花青素对血管内皮生长因子(vascular endothelial growth factor, VEGF)和缺氧诱导因子1亚基 $\alpha$ 表达的抑制作用<sup>[29]</sup>。同时,原花青素聚合物还通过氧化应激和线粒体损伤启动宫颈癌细胞系的凋亡<sup>[30]</sup>。李晓民等<sup>[31]</sup>基于PI3K/Akt信号通路研究了葡萄籽原花青素对人皮肤鳞状细胞癌的作用。通过设置梯度研究不同浓度的原花青素对癌细胞的影响,研究发现,原花青素浓度分别为40  $\mu$ g/mL和80  $\mu$ g/mL时,PI3K/Akt通路蛋白磷酸化水平显著降低。原花青素通过抑制癌细胞的生长,减少癌细胞的毒性,有效预防癌症。

### 3 原花青素与蛋白的相互作用

为增加或改善食物的功能特性,将蛋白质与多酚进行结合改变食物的品质和营养价值成为研究的热点,且在食品、医药等方面具有较为广阔的应用前景。研究表明,蛋白质和多酚类物质间的相互作用可以分为物理相互作用和化学相互作用,物理相互作用主要是氢键、离子键、范德华力、疏水相互作用等非共价键结合,化学相互作用主要是通过共价键(化学键)结合发生的相互作用。

目前研究人员研究了大量多酚与蛋白质之间的相互作用,原花青素作为酚类物质的一种, $\beta$ -乳球蛋白和 $\alpha$ -乳清蛋白和原花青素能自发形成复合物,主要基于疏水相互作用、氢键和范德华力产生。傅里叶变换红外光谱和圆二色光谱表明,蛋白质的二级结构在与寡聚原花青素结合后重新排列<sup>[32]</sup>。与麦醇溶蛋白相比,原花青素更能与谷蛋白反应,这表明原花青素促进了麸质间的交联。原花青素-麦醇溶蛋白相互作用主要是氢键驱动的,而原花青素-谷蛋白络合主要是氢键和疏水相互作用<sup>[33]</sup>。采用傅里叶红外光谱分析与内源荧光光谱分析推断糖基化蛋白与原花青素为氢键和疏水相互作用相结合,且证明了糖基化蛋白与原花青素形成复合物后抗氧化能力显著提高<sup>[34]</sup>。

### 4 原花青素在食品领域的应用

原花青素作为一种天然的抗氧化剂以及天然的防腐剂,可以赋予食物丰富口感,因而可用于果汁、茶、饮料中。同时,人们将其应用于食品中以延长食品的货架期,采用天然防腐剂代替合成防腐剂、抗氧化剂等消除对食品带来的安全风险。因此,原花青素以其多种生物活性,在食品领域有着广阔的应用前景。

在食品加工方面,原花青素作为天然的抗氧化剂可以代替丁基羟基茴香醚、二丁基羟基甲苯等人工合成的抗氧化剂,改善兔肉、羊肉等肉制品的品质<sup>[35-36]</sup>。张成浩<sup>[37]</sup>研究发现原花青素可以增加大米淀粉和马铃薯淀粉的稳定性,同时还延缓了淀粉的老化。宋佳琳<sup>[38]</sup>将制备的原花青素微胶囊添加到鸡肉肠中,结果表明,添加原花青素能延缓鸡肉香肠的品质变化,显著降低了肉肠的硬度和咀嚼性。同样相关研究探究了原花青素对米糕品质变化的影响,适量添加原花青素可使得米糕中气孔更均匀、风味物质的种类更丰富<sup>[39]</sup>。相关研究表明山楂原花青素可以有效地清除自由基和亚硝酸,以及阻断亚硝酸胺的合成<sup>[40]</sup>。肖珍等<sup>[41]</sup>在模拟发酵条件的基础上,观察了添加和不添加莲房原花青素的紫甘蓝泡菜发酵过程中各项指标的变化。结果表明,添加莲房原花青素可有效降低紫甘蓝泡菜中氯化钠以及亚硝酸盐的含量;黄武等<sup>[42]</sup>以不同浓度原花青素对猪肉肥膘进行浸渍处理,经过原花青素处理后猪肉肥膘中的酸价、过氧化值和硫代巴比妥酸值明显比空白对照低,这表明原花青素对猪肉脂肪氧化有一定抑制作用。因此,在制备食品过程中加入适量的原花青素,能够有效改善食品品质,减少腌制食品中的亚硝酸盐含量,提高食品安全性。

在食品包装领域,天然食品级原料制备的可食用包装源于其可持续性备受关注,与传统包装相比,可食用薄膜/涂层可直接应用于食品表面改善其品质。包括原花青素在内的天然酚类物质被用作其中的活性物

质,可以显著改善食品包装的性能。如原花青素与壳聚糖通过氢键结合制备的一种高抗氧化活性的食品膜,原花青素加入使壳聚糖膜结构变得致密,并增加食品膜抑菌性能效果<sup>[43]</sup>。王爱玲<sup>[44]</sup>将原花青素加入到明胶溶液中,发现能显著增强明胶膜的机械性能,并赋予复合膜抑菌性和抗氧化性,起到良好的食品保鲜效果。Genskowsky等<sup>[45]</sup>利用马基莓花青素与壳聚糖制备出可食膜,其具有较高的抗氧化活性,可提高食品品质,延缓食品氧化,对黏质沙雷氏菌、粪产碱杆菌、嗜水气单胞菌、荧光假单胞菌、弗氏柠檬酸杆菌、反硝化无色杆菌具有明显抑制作用。沈洁等<sup>[46]</sup>将葡萄籽原花青素与醋酸纤维素制备成具有抗氧化性的可降解膜,确定原花青素添加量为2%时,薄膜的抗氧化性最佳,该膜对油脂氧化的抑制率达到38%。基于原花青素的抗氧化、抗菌等多种功能特性,将其应用于可降解包装材料以及食品的冷藏保鲜具有重要意义。

## 5 结论

原花青素以其自身强大的自由基清除能力、多种生物活性以及天然安全等优势,被广泛应用在食品领域。尽管关于原花青素的研究较多,但目前还存在以下问题:普遍研究相对较浅,不能较好地为原花青素的实际应用提供理论基础;原花青素稳定性较差,容易受到pH值、温度等方面的影响,虽然现在关于原花青素的运载体系证明可以显著提高原花青素的稳定性,但是制备比较繁琐,成本较高,应用较难;市面上已有的原花青素产品,存在原花青素纯度不高,在水或醇溶液中溶解性较差,产品抗氧化效果不够好的问题。针对以上问题,研究人员应加强对原花青素高效提取,高效利用,多方面测定功效验证方面的研究,研发适合工业生产,工业应用的运载体系,进而提高原花青素的生物活性,拓宽其在食品行业的进一步发展,同时对富有原花青素的莲房、葡萄皮、花生皮等进一步开发。作为天然无害的高效抗氧化剂,原花青素在食品领域具有广阔的市场发展前景。

## 参考文献:

- [1] 田艳杰,石爱民,刘哲,等.原花青素脂质体的制备及其理化性质研究[J].中国粮油学报,2023,38(10):170-176.  
TIAN Yanjie, SHI Aimin, LIU Zhe, et al. Preparation and physicochemical properties of proanthocyanidins liposomes process[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(10): 170-176.
- [2] ZENG Y X, WANG S, WEI L, et al. Proanthocyanidins: Components, pharmacokinetics and biomedical properties[J]. The American Journal of Chinese Medicine, 2020, 48(4): 813-869.
- [3] LIU X W, LE BOURVELLEC C, GUYOT S, et al. Reactivity of flavanols: Their fate in physical food processing and recent advances in their analysis by depolymerization[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(5): 4841-4880.
- [4] 张晓冰,张羽师,王雨,等.欧李果渣原花青素提取工艺优化及其体外抗氧化和降糖活性评价[J].食品工业科技,2024,45(1):178-184.  
ZHANG Xiaobing, ZHANG Yushi, WANG Yu, et al. Optimization of proanthocyanidin extraction from *Cerasus humilis* pomace and evaluation of its *in vitro* antioxidant and hypoglycemic activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(1): 178-184.
- [5] 王文苹,任凤英,赵智杰,等.低共熔溶剂温浸提取葡萄皮籽渣中原花青素的工艺优化研究[J].宁夏医科大学学报,2023,45(1):92-98.  
WANG Wenping, REN Fengying, ZHAO Zhijie, et al. Optimization study on DES warm infusion process of proanthocyanidin from grape pomace[J]. Journal of Ningxia Medical University, 2023, 45(1): 92-98.
- [6] 郭建峰,郗浩然,胡培毅,等.沙棘籽粕低聚原花青素的制备及结构与抗氧化活性分析[J].中国食品学报,2023,23(6):232-245.  
GUO Jianfeng, QIE Haoran, HU Peiyi, et al. Preparation of oligomeric proanthocyanidins from seabuckthorn seed meal and analysis of structure and antioxidant activity[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(6): 232-245.
- [7] 马小琴,王晓敏,周凡.大孔吸附树脂法分离纯化葡萄籽中原花青素[J].食品研究与开发,2017,38(16):54-57.  
MA Xiaoqin, WANG Xiaomin, ZHOU Fan. Separation and purification of procyanidins in grape seed with macroporous adsorption resin[J]. Food Research and Development, 2017, 38(16): 54-57.
- [8] 赵文娟,宋扬,杨洪江.大孔吸附树脂纯化黑果枸杞中的原花青素[J].食品工业科技,2017,38(22):189-194.  
ZHAO Wenjuan, SONG Yang, YANG Hongjiang. Purification of the proanthocyanidins from *Lycium ruthenicum* Murr. by macroporous resin[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(22): 189-194.
- [9] 冉思蛟,王元龙,倪海花,等.紫萼草原花青素的大孔吸附树脂纯化、平均聚合度测定及体外抗氧化活性[J].饲料工业,2024,45(3):72-81.  
RAN Sijiao, WANG Yuanlong, NIN Haihua, et al. Purification process by macroporous sorbent resin, determination of average polymerization, and *in vitro* antioxidant activity of proanthocyanidins from *Pennisetum Purpureum* Schumab[J]. Feed Industry, 2024, 45(3): 72-81.
- [10] 田艳杰,石爱民,刘红芝,等.白藜芦醇的生物活性及其运载体系研究进展[J].食品科学,2023,44(1):371-379.  
TIAN Yanjie, SHI Aimin, LIU Hongzhi, et al. Progress in research on biological activities and delivery systems of resveratrol[J]. Food Science, 2023, 44(1): 371-379.
- [11] CAO W L, HUANG H B, FANG L, et al. Protective effect of ginkgo proanthocyanidins against cerebral ischemia/reperfusion injury associated with its antioxidant effects[J]. Neural Regeneration Research, 2016, 11(11): 1779-1783.
- [12] LUO S Q, ZHANG X L, ZHANG X, et al. Extraction, identification and antioxidant activity of proanthocyanidins from *Larix gmelinii* Bark[J]. Natural Product Research, 2014, 28(14): 1116-1120.
- [13] LIU H J, PAN X X, LIU B Q, et al. Grape seed-derived procyanidins alleviate gout pain via NLRP3 inflammasome suppression[J]. Journal of Neuroinflammation, 2017, 14(1): 74.
- [14] GAO W L, LI X H, DUN X P, et al. Grape seed proanthocyanidin extract ameliorates streptozotocin-induced cognitive and synaptic plasticity deficits by inhibiting oxidative stress and preserving AKT and ERK activities[J]. Current Medical Science, 2020, 40(3): 434-443.
- [15] PUIGGROS F, LLÓPIZ N, ARDÉVOL A, et al. Grape seed procyan-

- anidins prevent oxidative injury by modulating the expression of antioxidant enzyme systems[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(15): 6080-6086.
- [16] 张勃, 汪晟坤, 连秀仪, 等. 夏黑葡萄花青素在 D-半乳糖致衰老小鼠心肌细胞抗氧化和清除自由基中的作用[J]. 河南医学研究, 2019, 28(20): 3649-3652.
- ZHANG Qing, WANG Shengkun, LIAN Xiuyi, et al. The antioxidant and free radical scavenging effects of Xiahei grape anthocyanin in myocardial cells of aging mice induced by D-galactose[J]. Henan Medical Research, 2019, 28(20): 3649-3652.
- [17] DAGLIA M. Polyphenols as antimicrobial agents[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2012, 23(2): 174-181.
- [18] KARIOTI A, SOKOVIC M, CIRIC A, et al. Antimicrobial properties of *Quercus ilex* L. proanthocyanidin dimers and simple phenolics: Evaluation of their synergistic activity with conventional antimicrobials and prediction of their pharmacokinetic profile[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(12): 6412-6422.
- [19] TAMURA T, OZAWA M, TANAKA N, et al. *Bacillus cereus* response to a proanthocyanidin trimer, a transcriptional and functional analysis[J]. Current Microbiology, 2016, 73(1): 115-123.
- [20] 蒋秀秀. 葡萄籽原花青素对变形链球菌活性与 NO 浓度影响的实验研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
- JIANG Xiuxiu. Study on the effect of grape seed procyanidins on the activity and NO concentration of *Streptococcus mutans*[D]. Nanchang: Nanchang University, 2018.
- [21] DING Z D, MO M M, ZHANG K, et al. Preparation, characterization and biological activity of proanthocyanidin-chitosan nanoparticles[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 188: 43-51.
- [22] ODAI T, TERAUCHI M, KATO K, et al. Effects of grape seed proanthocyanidin extract on vascular endothelial function in participants with prehypertension: A randomized, double-blind, placebo-controlled study[J]. Nutrients, 2019, 11(12): 2844.
- [23] NAWROT-HADZIK I, MATKOWSKI A, HADZIK J, et al. Proanthocyanidins and flavan-3-ols in the prevention and treatment of periodontitis-antibacterial effects[J]. Nutrients, 2021, 13(1): 165.
- [24] 刘灵, 余利, 周敏, 等. 葡萄籽提取物原花青素对 2 型糖尿病患者血糖、血脂影响的干预研究[J]. 国际检验医学杂志, 2019, 40(15): 1844-1849.
- LIU Ling, YU Li, ZHOU Min, et al. Intervention study on that effect of grape seed extract proanthocyanidins on blood glucose and blood lipid in the patients with type 2 diabetes mellitus[J]. International Journal of Laboratory Medicine, 2019, 40(15): 1844-1849.
- [25] RATHINAVEL A, SANKAR J, MOHAMMED SADULLAH S S, et al. Oligomeric proanthocyanidins protect myocardium by mitigating left ventricular remodeling in isoproterenol-induced postmyocardial infarction[J]. Fundamental & Clinical Pharmacology, 2018, 32(1): 51-59.
- [26] LI X P, SUI Y, WU Q, et al. Attenuated mTOR signaling and enhanced glucose homeostasis by dietary supplementation with *Lotus* seedpod oligomeric procyanidins in streptozotocin (STZ)-induced diabetic mice[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(19): 3801-3810.
- [27] RAUF A, IMRAN M, ABU-IZNEID T, et al. Proanthocyanidins: A comprehensive review[J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2019, 116: 108999.
- [28] ZHANG R J, YU Q Y, LU W Q, et al. Grape seed procyanidin B2 promotes the autophagy and apoptosis in colorectal cancer cells via regulating PI3K/Akt signaling pathway[J]. OncoTargets and Therapy, 2019, 12: 4109-4118.
- [29] ZHANG Y, CHEN S G, WEI C Y, et al. Dietary Compound Proanthocyanidins from Chinese bayberry (*Myrica rubra* Sieb. et Zucc.) leaves inhibit angiogenesis and regulate cell cycle of cisplatin-resistant ovarian cancer cells via targeting Akt pathway[J]. Journal of Functional Foods, 2018, 40: 573-581.
- [30] KAPLUM V, RAMOS A C, CONSOLARO M E L, et al. Proanthocyanidin polymer-rich fraction of *Stryphnodendron adstringens* promotes *in vitro* and *in vivo* cancer cell death via oxidative stress[J]. Frontiers in Pharmacology, 2018, 9: 694.
- [31] 李晓民, 梁韦巍, 韩志强, 等. 基于 PI3K/Akt 信号通路探讨葡萄籽原花青素对人皮肤鳞状细胞癌 A431 细胞凋亡的作用研究[J]. 环球中医药, 2022, 15(5): 759-763.
- LI Xiaomin, LIANG Weiwei, HAN Zhiqiang, et al. Grape seed proanthocyanidins induces A431 cell apoptosis through PI3K/Akt pathway[J]. Global Traditional Chinese Medicine, 2022, 15(5): 759-763.
- [32] TANG C Y, TAN B, SUN X J. Elucidation of interaction between whey proteins and proanthocyanidins and its protective effects on proanthocyanidins during *in-vitro* digestion and storage[J]. Molecules, 2021, 26(18): 5468.
- [33] GIRARD A L, BEAN S R, TILLEY M, et al. Interaction mechanisms of condensed tannins (proanthocyanidins) with wheat gluten proteins[J]. Food Chemistry, 2018, 245: 1154-1162.
- [34] 刘佩. 糖基化乳清分离蛋白/原花青素复合物的制备及抗油脂氧化乳液体系的构建[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2021.
- LIU Pei. Preparation of glycosylated whey protein isolate/proanthocyanidins compounds and fabrication on anti-lipid oxidation emulsion[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2021.
- [35] 汪水平, 杨大盛, 李艳莎, 等. 葡萄籽提取物原花青素对肉兔抗氧化功能、脂质含量及血清代谢产物浓度的影响[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(10): 72-76, 82.
- WANG Shuiping, YANG Dasheng, LI Yansha, et al. The effects of grape seed proanthocyanidin extracts on antioxidant function, lipid content and serum concentrations of metabolites of meat rabbit[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2014, 29(10): 72-76, 82.
- [36] 杨文军, 牟春堂, 王鹏举, 等. 饲料中添加葡萄籽原花青素对羔羊生长性能、屠宰性能、肉品质及血清抗氧化指标的影响[J]. 动物营养学报, 2020, 32(6): 2755-2764.
- YANG Wenjun, MU Chuntang, WANG Pengju, et al. Effects of dietary supplementation of grape seed proanthocyanidins on growth performance, slaughter performance, meat quality and serum antioxidant indexes of lambs[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2020, 32(6): 2755-2764.
- [37] 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 Chenghao. Effects of proanthocyanidins on physicochemical properties of different starches[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.
- [38] 宋佳琳. 原花青素微胶囊对鸡肉肠品质影响研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2022.
- SONG Jialin. Study on the influence of the quality of chicken sausages by the microencapsulated procyanidins[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2022.
- [39] 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 Jiahui. Study on the effect of polymeric proanthocyanidins on starch properties and product development[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.
- [40] 宓伟, 韩丽珍, 韩富磊, 等. 山楂原花青素抗氧化、清除亚硝酸 (下转第 199 页)

- pect of anti-inflammatory mechanism of *Lactobacillus rhamnosus* and its prevention and treatment in livestock diseases[J]. Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica, 2023, 54(11): 4537-4550.
- [47] LI J Z, LI Q K, GAO N, et al. Exopolysaccharides produced by *Lactobacillus rhamnosus* GG alleviate hydrogen peroxide-induced intestinal oxidative damage and apoptosis through the Keap1/Nrf2 and Bax/Bcl-2 pathways *in vitro*[J]. Food & Function, 2021, 12(20): 9632-9641.
- [48] BAIN C C, SCOTT C L, URONEN-HANSSON H, et al. Resident and pro-inflammatory macrophages in the colon represent alternative context-dependent fates of the same Ly6Chi monocyte precursors[J]. Mucosal Immunology, 2013, 6(3): 498-510.
- [49] 吴洪亚, 高亚男, 王加启, 等. 乳铁蛋白对肠道屏障保护作用的研究进展[J]. 现代食品科技, 2023, 39(11): 371-380.  
WU Hongya, GAO Yanan, WANG Jiaqi, et al. Advancements on the protective effect of lactoferrin on the intestinal barrier[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(11): 371-380.
- [50] VAZQUEZ M I, CATALAN-DIBENE J, ZLOTNIK A. B cells responses and cytokine production are regulated by their immune microenvironment[J]. Cytokine, 2015, 74(2): 318-326.
- [51] ROQUILLY A, MINTER N J D, VILLADANGOS J A. Spatiotemporal adaptations of macrophage and dendritic cell development and function[J]. Annual Review of Immunology, 2022, 40: 525-557.
- [52] CISZEK-LENDI M, NOWAK B, SRÓTEK M, et al. Immunoregulatory potential of exopolysaccharide from *Lactobacillus rhamnosus* KL37: Effects on the production of inflammatory mediators by mouse macrophages[J]. International Journal of Experimental Pathology, 2011, 92(6): 382-391.
- [53] CHEN L, GU Q, ZHOU T. Statistical optimization of novel medium to maximize the yield of exopolysaccharide from *Lactocaseibacillus rhamnosus* ZFM216 and its immunomodulatory activity[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 924495.
- [54] 白娜, 李周勇, 康小红. 后生元的研究进展[J]. 食品科技, 2022, 47(1): 20-25.  
BAI Na, LI Zhouyong, KANG Xiaohong. A review of researches progress on postbiotics[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(1): 20-25.
- [55] 王琦. 日本后生元研究历史、现状及前景: [C]//第十七届益生菌与健康国际研讨会摘要集. 杭州, 2022: 146-147.  
WANG Qi. History, Current Situation and Prospect of Postbiotic Research in Japan[C]//Abstract Collection of the 17th International Symposium on Probiotics and Health. Hangzhou, 2022: 146-147.
- [56] 刘红霞, 李雪利, 吴秀英, 等. 后生元研究进展及应用现状[J]. 食品科学, 2024, 45(1): 326-333.  
LIU Hongxia, LI Xueli, WU Xiuying, et al. Progress on research and application of postbiotics[J]. Food Science, 2024, 45(1): 326-333.
- [57] CHABOT S, YU H L, DE LÉSÉLEUC L, et al. Exopolysaccharides from *Lactobacillus rhamnosus* RW-9595M stimulate TNF, IL-6 and IL-12 in human and mouse cultured immunocompetent cells, and IFN- $\gamma$  in mouse splenocytes[J]. Le Lait, 2001, 81(6): 683-697.

责任编辑:王艳

收稿日期:2024-04-04

(上接第 191 页)

- 盐及阻断亚硝酸胺合成的研究[J]. 滨州医学院学报, 2019, 42(2): 119-122, 160.  
MI Wei, HAN Lizhen, HAN Fulei, et al. Study on the effects of hawthorn proanthocyanidins on anti-oxidation, removing nitrite and inhibiting nitrosamine synthesis[J]. Journal of Binzhou Medical University, 2019, 42(2): 119-122, 160.
- [41] 肖珍, 谢笔钧, 孙智达. 莲房原花青素对紫甘蓝泡菜亚硝酸盐的抑制作用[J]. 食品工业科技, 2018, 39(11): 67-73, 79.  
XIAO Zhen, XIE Bijun, SUN Zhida. Inhibitory effect of LSPC on nitrite in pickled cabbage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(11): 67-73, 79.
- [42] 黄武, 侯晓杰, 侯旭杰, 等. 花生红衣原花青素对冷鲜猪肉脂质氧化的影响[J]. 食品工业, 2022, 43(2): 163-167.  
HUANG Wu, HOU Xiaojie, HOU Xujie, et al. Effect of procyanidins in peanut skins on lipid oxidation in chilled pork[J]. The Food Industry, 2022, 43(2): 163-167.
- [43] 张莉, 陈蕴智, 滕玉红, 等. 壳聚糖-原花青素高抗氧化抑菌薄膜的研究[J]. 包装工程, 2020, 41(15): 103-109.  
ZHANG Li, CHEN Yunzhi, TENG Yuhong, et al. Chitosan-procyanidine antibacterial film with high antioxidant activity[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(15): 103-109.
- [44] 王爱玲. 提取条件和原花青素对罗非鱼皮明胶成膜性的影响[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2022.  
WANG Ailing. Effect of extraction conditions and procyanidins on film formation of *Tilapia* skin gelatin[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2022.
- [45] GENSKOWSKY E, PUENTE L A, PÉREZ-ÁLVAREZ J A, et al. Assessment of antibacterial and antioxidant properties of chitosan edible films incorporated with maqui berry (*Aristotelia chilensis*)[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 64(2): 1057-1062.
- [46] 沈洁, 王家俊, 刘幸幸, 等. 原花青素/醋酸纤维素可降解包装薄膜的结构与抗氧化性能[J]. 浙江理工大学学报, 2011, 28(6): 865-870.  
SHEN Jie, WANG Jiajun, LIU Xingxing, et al. The research on the structures and antioxidant properties of procyanidins/cellulose acetate packaging membrane[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2011, 28(6): 865-870.

加工编辑:孟琬星

收稿日期:2023-12-28