

张杰, 党斌, 杨希娟. 植物多酚的生理活性、抑菌机理及其在食品保鲜中的应用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(24): 460–468. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022010070

ZHANG Jie, DANG Bin, YANG Xijuan. Research Progress on Physiological Activity, Antibacterial Mechanism of Plant Polyphenols and Its Application in Food Preservation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(24): 460–468. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022010070

· 专题综述 ·

植物多酚的生理活性、抑菌机理及其在食品保鲜中的应用研究进展

张 杰^{1,2,3}, 党 斌^{1,2,3,*}, 杨希娟^{1,2,3}

(1. 青海大学农林科学院, 青海西宁 810016;

2. 青海省农林科学院, 青海省青藏高原农产品加工重点实验室, 青海西宁 810016;

3. 青藏高原种质资源研究与利用实验室, 青海西宁 810016)

摘 要: 植物多酚是植物特有的次生代谢产物, 主要存在于植物体的果实、根、皮与叶等组织器官中, 具有抗氧化活性、抑菌活性、抗癌活性、抗炎活性、抗肥胖及调节血糖、血脂等功效, 其中植物多酚的抑菌作用已广泛应用于食品保鲜防腐等方面, 引起了国内外学者的研究兴趣, 已成为当前的研究热点。为此, 本文从植物多酚生理活性、抑菌机理及在部分食品中应用的研究现状进行了综述, 并展望植物多酚的未来研究方向, 为植物多酚的研究和利用提供一定的参考价值。

关键词: 植物多酚, 生理活性, 抑菌机理, 食品保鲜, 应用

中图分类号: TS201.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)24-0460-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022010070



本文网刊:

Research Progress on Physiological Activity, Antibacterial Mechanism of Plant Polyphenols and Its Application in Food Preservation

ZHANG Jie^{1,2,3}, DANG Bin^{1,2,3,*}, YANG Xijuan^{1,2,3}

(1. Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining 810016, China;

2. Qinghai Tibetan Plateau Agricultural Processing Key Laboratory, Qinghai Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Xining 810016, China;

3. Laboratory for Research and Utilization of Qinghai Tibet Plateau Germplasm Resources, Xining 810016, China)

Abstract: Plant polyphenols are plant-specific secondary metabolites, which mainly exist in the tissues and organs of plants such as fruits, roots, skins and leaves. Plant polyphenols have antioxidant activity, antibacterial activity, anti-cancer activity, anti-inflammatory activity, anti-obesity and regulating hyperglycemia and blood lipids. Among them, the antibacterial effect of plant polyphenols has been widely used in food preservation, which has aroused the research interest of scholars in domestic and overseas, and has become a current research hotspot. Therefore, the physiological activity, antibacterial mechanism and application of plant polyphenols are summarized. And the future research directions of plant polyphenols are also predicted. It would provide certain reference value for the research and utilization of plant polyphenols.

Key words: plant polyphenols; physiological activity; antibacterial mechanism; food preservation; application

植物多酚是一类植物次生代谢产物, 主要存在于植物的根、茎、皮、叶和果实中, 参与植物的多种

功能, 是植物生存所必需的, 能够为植物带来特殊的颜色并赋予苦、涩、酸、甜的味道, 且在自然界中能

收稿日期: 2022-01-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31960454); 青海省农林科学院创新基金项目 (2021-NKY-01); 青海省创新平台建设专项项目 (2022-ZJ-Y19, 2022-ZJ-Y01)。

作者简介: 张杰 (1989-), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 农产品精深加工理论与技术, E-mail: zjzj89zjzj@163.com。

* 通信作者: 党斌 (1980-), 男, 硕士, 副研究员, 研究方向: 农产品精深加工理论与技术, E-mail: 156044168@qq.com。

够协助植物防御病原体、天敌等的侵害^[1]。植物多酚在植物体内的含量仅次于纤维素、木质素和半纤维素^[2],且其含量的高低主要取决于许多内在因素(属、种、栽培品种)和外在(农艺、环境、处理和储存)因素的影响^[3]。流行病学研究表明,食用富含多酚的食物和饮品会降低代谢紊乱的风险,如能够降低肥胖^[4]、II 型糖尿病^[5]、心血管疾病^[6]及一些与年龄相关的神经性疾病和某些癌症等。随着消费者对饮食、健康和疾病预防之间的关系越来越感兴趣,植物多酚因其分布广泛、生理特性多样的特点,已成为食品科学及其相关领域的研究热点之一。

近年来,植物多酚的生理特性如抗氧化性、抑菌性、抗癌性等已引起科学学者的广泛关注,其中大量试验研究结果表明植物多酚抑菌活性突出^[7],能够作为一种良好的天然保鲜剂,目前已广泛应用于蔬菜瓜果^[8]、畜禽肉及其制品^[9]、水产品^[10]等的储存保鲜,能够有效提高保鲜效果,延长货架期。因此,深入研究多酚类物质抑菌作用及机理,对于促进食品保鲜产业的发展有着极其重要的意义和应用价值。然而当前国内外学者针对植物多酚生理活性及抑菌机理实验性报道越来越多,但缺乏系统性概括和分析,为此,本文从植物多酚生理活性、抑菌机理及在部分食品中应用的研究现状进行了综述,旨在为国内外学者给予一定的参阅价值,同时为食品保鲜研究提供理论参考。

1 植物多酚的生理活性

1.1 抗氧化性

自由基是一类含有不成对价电子的原子、分子或基团,通常在光、热、超声处理、辐射、氧化还原反应和电解的作用下产生。在生物体内,过量的自由基能够导致衰老、组织损伤和各种疾病,如帕金森病、糖尿病和心血管疾病等^[11],另外自由基可以通过激活原始的癌基因转录来增加患癌症的风险。因此,消除过量的自由基达到抗氧化目的,是长期以来科研人员关注的热点。而植物多酚化合物由于其结构中含有活性较高的酚羟基,能够释放氢离子,从而破坏并终止氧化链式反应;同时,部分多酚类化合物还具有相对较强的还原性,能捕获活性较强的自由基^[12]。王钊等^[13]采用酸法提取黑蒜多酚并对其抗氧化性进行研究,结果发现酸性条件下提取的黑蒜多酚其清除 DPPH 自由基和羟自由基的能力更强。郭子微等^[14]研究 3 种不同品种苹果在果实发育过程中总酚、原花青素、类黄酮的含量及抗氧化活性的动态变化,结果发现幼果期果实的总酚、原花青素、类黄酮的含量及抗氧化活性较高,随发育进程其酚类物质含量及抗氧化活性呈减少趋势,但 3 个品种苹果果实均表现出较高的 ABTS⁺自由基清除活性,且酚类物质含量与抗氧化活性之间存在较强的正相关性。Csepregi 等^[15]采用常见的评价抗氧化活性的方法(TEAC、FRAP、DPPH 和 FCR)对 37 种(天然和合成)多酚类

化合物进行测定,结果发现多酚类化合物具有较好的抗氧化活性,但不同抗氧化性评价方法对多酚的抗氧化性测定结果不同,且主要与多酚类化合物的结构相关。以上研究表明,植物多酚类化合物是天然抗氧化成分的良好来源,但由于植物多酚来源广泛,不同植物中多酚的组成、含量及结构存在较大的差异,造成了抗氧化能力的不同,因此,在针对植物多酚抗氧化活性的研究中,应进一步明确不同植物中植物多酚的抗氧化活性组分及其结构特征,同时有必要采用相应的富集技术手段对其进行深入研究,促进其开发利用。

1.2 抑菌性

植物提取物含有大量的多酚类化合物,对食品腐败微生物和食源性病原体都有抑制作用,被称为天然的抑菌剂,在抑菌方面具有广泛的应用。微生物对植物多酚的敏感性主要取决于植物多酚的种类、微生物菌株的类别以及多酚类化合物的分子结构等,其中提取物的成分和浓度也起着重要作用。目前,关于植物多酚抑菌的研究,大多以苹果多酚、茶多酚、葡萄多酚为主,其他植物多酚的抑菌活性研究也日益增长。Cardoso 等^[16]通过对由绿茶或红茶发酵的康普茶进行多酚分析及抑菌研究,结果发现绿茶康普茶对所有测试的细菌均表现出抗菌活性且对癌细胞系均具有增加的抗增殖活性,这与其儿茶素密不可分。Daoud 等^[17]对两种不同品种的椰枣花粉提取物的总酚含量(TPC)和总黄酮含量(TFC)以及抗氧化和抗菌活性进行研究,结果表明两个品种的椰枣花粉对受试菌表现出抑制作用,其中对尖孢菌抑制作用显著。Makwana 等^[18]以五种重要的植物来源的酚类物质(姜黄素、白藜芦醇、肉桂醛、对香豆酸和松柏醇)为研究对象,探究其对大肠杆菌 W1485 和蜡状芽孢杆菌的抑菌活性的影响,结果发现白藜芦醇和肉桂醛具有相对较高的抑菌活性。Deng 等^[19]探究黑果腺肋花楸中花青素(AMAs)对大肠杆菌的抗菌作用及机制,结果显示花青素对大肠杆菌具有很强的抗菌活性,对大肠杆菌的最低抑菌浓度(MIC)和最低杀菌浓度(MBC)分别为 0.625 和 1.25 mg/mL,另外,研究还表明花青素可诱导大肠杆菌的细胞壁和膜损伤,达到抑菌的目的。以上研究证明,植物多酚在抑菌方面具有较强的生物活性,但由于微生物的生长繁殖可能有多种途径^[20],且不同受试菌对同一多酚类化合物表现出不同的抑菌效果,因此,其抑菌机制较为复杂,也有可能是多种因素共同作用的结果,需进一步研究。

1.3 抗癌性

癌症是全世界第二大死因,已成为人类健康的巨大威胁^[21]。因此,寻找有效控制及预防癌症的方法迫在眉睫。据报道,目前已有 1000 种植物被鉴定具有抗癌特性,其中萜类、生物碱、皂苷、多糖和多酚,已被证明是有效的抗癌化合物^[22]。多酚类化合物因其天然存在于多种植物中,来源广泛,而深受国内外

学者的广泛关注。流行病学研究已证实饮食中多酚的消费与癌症的风险呈负相关,植物多酚能够抑制致癌物活化、癌细胞增殖、转移和血管生成。目前,已有部分学者对植物多酚抗癌活性进行了研究,如结肠癌^[23]、皮肤癌^[24-25]、胃癌^[26-27]、乳腺癌^[28-29]、口腔癌^[30]、肺癌^[31]等,其中白藜芦醇(RSV)、槲皮素、异黄酮、表没食子儿茶素没食子酸酯(EGCG)、木脂素和姜黄素等物质的化学预防癌症特性受到广泛关注。Yang 等^[32]比较了超声辅助提取法和常规溶剂提取法对姜黄提取物中的酚类物质组成及抗氧化活性、抗增殖活性的影响。结果发现,两种方法提取的姜黄多酚物质的酚类成分、抗氧化活性和抗增殖作用存在显著差异,其中超声波法能够提高酚类化合物的提取效率,且获得的提取物对癌细胞系(MCF7、MDA-MB-231、HCT116、HT29、HepG2、HeLa)具有更强抗增殖作用。牛晋平等^[33]探究小麦麸皮的结合酚对 HepG-2 细胞增殖和凋亡的影响,结果发现,不同浓度的小麦麸皮结合酚对肝癌 HepG-2 细胞增殖的抑制作用不同,且通过 Caspase 依赖的线粒体凋亡路径抑制肝癌细胞的增殖。李原等^[34]采用 4 种不同极性有机溶剂萃取凤眼果壳的多酚,并探究其抗氧化活性和抗人肺癌细胞 A549 增殖活性,结果显示乙酸乙酯相萃取的多酚和黄酮含量最高、抗氧化活性最强,且对人肺癌细胞 A549 的增殖抑制作用显示出剂量依赖关系,抑制 A549 增殖的 EC_{50} 值为 85.70 $\mu\text{g/mL}$ 。这些研究结果均证实植物多酚能够在抗癌方面发挥重要作用,但目前对于植物多酚抗癌方面的研究多以验证为目的,对于植物多酚的构效关系、抗癌机制等方面的研究还未见报道,因此需进一步深入研究植物多酚抗癌作用机制,为开发天然的抗癌药物提供理论依据。

1.4 抗炎性

炎症被认为是人体对感染或损伤的第一生理反应,在先天性免疫和适应性免疫中都起着至关重要的作用^[35]。目前,针对植物多酚抗炎活性的研究比较广泛,已有几种多酚已被证明可以降低多种炎症性疾病,如结肠炎^[36]、胃炎^[37]、血管炎症^[38]等。Sangiovanni 等^[39]以黑莓和覆盆子提取物为研究对象,对胃部炎症进行抗炎分析,得到黑莓和覆盆子提取物中的主要成分为单宁酸,黑莓和覆盆子的提取物对溃疡指数分别降低了 88% 和 75%,并保护大鼠免受乙醇诱导的氧化应激。张莉等^[40]探究茶多酚对不同处理组的小鼠肺泡巨噬细胞炎症模型的影响,研究发现茶多酚可抑制由脂多糖诱导的肺泡巨噬细胞的炎症因子表达。Li 等^[41]以樱桃多酚提取物为研究对象,探讨樱桃游离多酚提取物在缓解溃疡性结肠炎中的潜在作用及其可能的作用机制,得到樱桃多酚提取物通过抑制 Wnt/ β -Catenin 信号通路改善葡聚糖硫酸钠诱导的小鼠溃疡性结肠炎。彭珂毓等^[42]以丹参茎叶为原料,研究其酚酸组分对溃疡性结肠炎模型小鼠的影

响,结果发现经丹参茎叶的总酚酸、丹酚酸 B 和迷迭香酸单独或混合给药干预后,模型小鼠的结肠组织 TNF- α 、IL-6 和 IL-4 水平及 IL-6、COX2 和 IL-17A mRNA 表达得到改善,炎症反应减轻。综上研究表明,不同种类的植物多酚在体外和体内模型中主要是通过抑制促炎细胞因子表达从而发挥抗炎活性,其作用机制还有待于进一步的研究。

1.5 调节血糖、血脂

当前的研究中,已经发现植物多酚具有调节血糖、血脂的作用,在预防和调节血糖、血脂方面具有巨大潜力。陈丽莉等^[43]以黑树莓为材料,探究其多酚对糖尿病模型小鼠的影响及其可能的作用机制,结果发现黑树莓多酚能够改善糖尿病模型小鼠的血糖代谢水平,且其作用机制是通过激活胰岛素信号通路来促进葡萄糖代谢。Arshad 等^[44]采用超声波辅助提取苏铁叶片中的多酚类物质,并对其体外抗氧化及抗糖尿病特性研究,结果发现 60% 乙醇提取物其提取率及 DPPH 自由基清除活性最高,500 mg/kg 体重剂量的植物提取物能显著降低糖尿病小鼠的血糖水平,并对其血脂有改善效果。Bansode 等^[45]使用高血脂大鼠模型研究了花生皮多酚的生物利用度,并评价其多酚的降血脂作用,结果表明采用花生皮多酚饮食干预 5 周后能够降低模型大鼠的总血脂和血浆脂肪酸。以上关于植物多酚调节血糖及血脂的研究大多集中在体内及体外试验,其副作用较小、效果显著,有较大的优越性。而随着国内外学者对多酚研究不断深入,对植物多酚调控血糖的具体机制还需进一步明确,且应用先进的代谢组学技术也将成为相关科研工作探索研究的重要手段。

1.6 抗肥胖

植物多酚现已被证明可以调节参与能量代谢的生理和分子途径。目前,针对植物多酚干预肥胖的作用机制主要包括以下三个方面^[4]:调节脂质代谢功能;对脂肪细胞的增殖、分化和凋亡产生影响;加速机体的能量消耗,刺激代谢产热。研究发现姜黄素具有多种生物学功能,Jayarathne 等^[46]研究发现姜黄素在增加脂质氧化、抑制脂肪酸合成和减少脂肪储存方面发挥作用。左丽丽等^[47]探究狗枣猕猴桃多酚对肥胖模型小鼠减肥降脂的影响,结果显示与模型组相比,多酚处理组对肥胖小鼠的体质量降低显著,对血清中的 LDL-C、TG、AST、ALT、TC 和 GLU 表现出不同程度的下降水平,但对 HDL-C 含量显著提高。Song 等^[48]研究覆盆子多酚提取物对小鼠饮食性肥胖、肝脂肪变性和胰岛素抵抗的影响,研究发现覆盆子多酚通过改善脂质代谢和成纤维细胞生长因子 21 水平,从而达到抑制受饮食引起的肥胖症及代谢紊乱。Huang 等^[49]研究发现表没食子儿茶素没食子酸酯(EGCG)能够显著降低肠道胆汁酸的浓度,从而进一步抑制降低脂质的吸收,使得脂质在肝脏中的累积减少。由于植物多酚具有来源广泛且安全性较

高的优势,且随着科学技术手段的不断发展,植物多酚的抗肥胖研究将成为今后的研究热点之一,另外植物多酚通过调控肠道微生物菌群结构和功能,从而发挥抗肥胖作用的相关机制也必将成为科研工作者所关注的重点。

2 植物多酚的抑菌机理

植物多酚因其特有的抑菌活性成为当期的研究热点,但植物多酚的来源广泛、种类较多、结构复杂,且针对不同受试菌株其抑菌机制还尚不清晰,也可能是由于多种因素共同作用产生的结果。根据目前的研究成果和报道,可将植物多酚抑菌机理概括为以下几个方面。

2.1 植物多酚对微生物细胞结构的影响

细胞壁和细胞膜是微生物维持其细胞形态结构、发挥正常生理代谢所必需的基础。植物多酚能够与微生物细胞膜的相互作用导致膜结构的破坏,从而导致细胞内容物的损失^[50],或者引起细胞膜电子传递,导致细菌的去极化,从而在一定程度上降低了穿过细胞膜的 pH 梯度和电子热能^[51],造成细胞膜通透性的改变^[52]。另外,一些对微生物细胞壁的影响研究表明,酚类化合物与细菌细胞壁相互作用,导致细胞壁破裂和细胞内容物的释放,细胞壁损伤降低了细胞对不利条件如高或低渗透压和不同外部因素的抵抗力。现有数据表明,革兰氏阴性菌对酚类化合物更具抗性,这可能与亲脂性外层的存在有关^[53]。Cao 等^[54]以茶多酚中含量较高的儿茶素单体 EGCG 为对象,探究其对大肠杆菌细胞膜的影响,研究发现 EGCG 可以增加大肠杆菌外膜和内膜的通透性,从而使细胞膜去极化,达到抑制大肠杆菌的目的。Bhattacharya 等^[55]已证明,康普茶多酚物质中的儿茶素和异鼠李素具有通过产生氧化应激渗透细菌细胞膜的能力。

2.2 植物多酚对微生物蛋白质合成和酶活性的影响

蛋白质是微生物体内重要的基本物质,且绝大多数酶类物质是蛋白质,维持和参与微生物的生命体征及生理代谢,研究表明植物多酚可抑制蛋白质合成和酶活性,使其生长代谢受阻,从而达到抑菌作用^[56]。Dadi 等^[57]证明了多酚类化合物中白藜芦醇、白皮杉醇、槲皮素、槲皮苷及异槲皮苷能够抑制大肠杆菌中的 ATP 合成酶的活性。Chen 等^[58]探究甜菜糖蜜多酚对食源性致病菌的抗菌机制,通过 SDS-PAGE、SEM 和 TEM 分析发现甜菜糖蜜多酚对金黄色葡萄球菌、单核细胞增生李斯特菌、大肠杆菌和沙门氏菌的生长具有抑菌活性。同时,由于条带变浅,说明甜菜糖蜜多酚可导致四种食源性病原体细胞蛋白质受损。Pasqua 等^[59]探究百里香酚对沙门氏菌抑制过程中其蛋白质的变化,研究发现百里香酚能够抑制沙门氏菌的蛋白质合成及表达,从而有效地阻断柠檬酸代谢途径,起到抑制沙门氏菌的作用。

2.3 植物多酚对微生物遗传物质的影响

DNA 和 RNA 是微生物维持其生命活动、调控

生物遗传的物质基础,研究者发现植物多酚亦能作用于微生物细胞中的 DNA 和 RNA 等生物大分子物质,继而影响干扰微生物的遗传表达及增殖^[60]。Hara-guchi 等^[61]研究发现,一些黄酮类化合物可能通过抑制 DNA 合成来达到抑菌的目的,且在较小程度上抑制 RNA 的合成。姜在祥^[62]以牛蒡为原料,对其功能酚类物质进行提取分离,并对其抗氧化性及抑菌活性进行分析,在对其抑菌活性研究中发现牛蒡中的对香豆酸、绿原酸都能够结合微生物的 DNA,使其双螺旋结构松散,导致微生物 DNA 构象变化,最终影响微生物的生理代谢而导致其死亡。综上研究表明,植物多酚对微生物遗传物质的影响主要包括两个方面:一是对遗传物质起到损伤作用;二是抑制遗传物质的合成。另外,在植物多酚作用下微生物细胞结构及细胞膜通透性的变化也是引起胞内物质含量变化的原因之一。

2.4 植物多酚对微生物能量代谢的影响

ATP 是参与微生物细胞的能量代谢至关重要的物质^[9]。已有研究证实,植物多酚能够抑制 ATP 的合成及其相关酶类的活性。Dadi 等^[57]证明白藜芦醇、槲皮素、异槲皮苷能够抑制大肠杆菌中的 ATP 合成酶。Chinnam 等^[63]证实了多酚对大肠杆菌 ATP 合成酶的抑制作用,其中桑色素、水飞蓟素、黄芩素、水飞蓟宾等对其影响最大,而橙皮苷、山奈酚、芹菜素、芦丁等对其抑制相对较弱。Fei 等^[64]探究橄榄油多酚提取物对阪崎克罗诺杆菌的抑菌活性,并以细胞内 ATP 浓度、细胞膜电位、细菌蛋白质含量和细胞形态的变化来揭示抑菌机制,结果表明,橄榄油多酚提取物的抑菌机制与细胞内 ATP 浓度降低、细胞膜去极化、细胞质渗漏、细菌蛋白含量减少和细胞质渗漏有关。

3 植物多酚在食品保鲜中的应用

食品原料在采后、加工、储藏过程中,容易受到多种因素如品种、微生物、害虫、温度、湿度、光照、包装和加工方式的影响,导致植物性食品的生化特性和变质速率发生巨大变化。在大量学者的研究中已证实植物多酚具有显著的抑菌活性,可在食品中作为天然防腐剂而使用,目前对植物多酚的保鲜应用主要以肉类及肉制品、水产品为主,对于水果蔬菜的保鲜也略有涉及,但对其他食品的保鲜研究相对较少,下面就植物多酚在食品保鲜中的应用进行介绍。

3.1 植物多酚在肉制品保鲜中的应用

肉类及肉制品因其水分活度高、营养成分丰富,且 pH 通常为 5.5~6.5,是微生物(主要是细菌)生长的良好环境^[65]。在肉类及肉制品中经常检测到的微生物包括明串珠菌属、乳球菌属、假单胞菌属、肠球菌属、肠杆菌属、耐冷菌属、沙雷氏菌属等^[66-68]。肉类工业通常采用化学防腐剂对其进行防腐保鲜,最常用的肉类防腐剂是硝酸盐及亚硝酸盐等物质,但这些防腐剂通过抑制腐败菌、致病菌的生长和减少肉类

成分的氧化来延长肉制品的保质期,然而,它们可能对人体健康有害,能与氨基化合物如蛋白质、氨基酸或胺相互作用产生致癌的 N-亚硝胺物质^[65],因此,寻求新型、安全、天然的保鲜物质及技术已成为当前研究热点方向。目前,已有很多学者将植物多酚用于肉类及肉制品的保鲜抑菌研究,且取得了显著的效果。Nowak 等^[69]以酸樱桃叶及黑加仑叶的多酚提取物为研究对象,分析了提取物的多酚成分,探究了多酚提取物对猪肉香肠的微生物指标、脂质氧化、颜色和感官评价的影响,研究发现添加两种提取物的猪肉香肠在经过 14 d 的冷藏后均可显著降低香肠中嗜温菌、耐冷菌、乳酸菌和热杀索丝菌的菌数,且感官特性较好。Vaithyanathan 等^[70]采用石榴汁多酚溶液对鸡肉进行浸泡处理,并在 4 ℃ 条件下包装冷藏,探究其对鸡肉货架期的影响。结果发现与对照组相比,经石榴汁多酚处理的鸡肉其脂质氧化和微生物水平显著下降。Al 等^[71]将阿格尔(*Solenostemma argel*)叶多酚掺入鸡肉丸中,探究不同贮存期内的鸡肉丸的品质特性变化,研究发现其多酚能够降低鸡肉丸的酵母和霉菌数量,且能够改善脂质氧化、提高抗氧化活性,而对产品的感官特性无显著影响。Wang 等^[72]采用茶多酚、壳聚糖及山梨酸钾为成膜材料涂抹冷鲜羊肉,探究总大肠菌群、TVB-N 值和 pH 的变化,结果发现贮藏 12 d 后,经茶多酚涂层处理的羊肉其 pH 为 6.0,TVB-N 和总大肠菌群均显著低于壳聚糖和山梨酸钾涂层处理的羊肉,且符合国家标准对肉品质量的要求。Zhang 等^[73]探究玫瑰花多酚对发酵香肠抑菌性及安全性的影响,结果发现玫瑰花多酚能够抑制香肠 pH 的升高,且与对照组相比,含有玫瑰花多酚的香肠具有更低的硫代巴比妥酸活性物质值和生物胺。此外,玫瑰花多酚还能够改善发酵香肠的总细菌数及乳酸菌的生长速度。综上,在肉及肉制品中添加植物多酚能够有效抑制致病和腐败微生物的生长繁殖,还可以提升并改善肉及肉制品的颜色及感官品质,抑制或减弱脂质氧化和蛋白质氧化,具有广阔的应用前景。

3.2 植物多酚在水产品保鲜中的应用

随着人们对食品品质要求越来越多,在水产品的消费中更加重视其质量及新鲜度,因此,近几年对于水产品的保鲜引起了科研工作者的极大关注,成为当前研究的热点问题。目前,已有部分学者将植物多酚应用于水产品保鲜中,其效果显著,具有可观的应用前景。Su 等^[74]以杨梅叶提取物为研究对象,分析确定了杨梅叶提取物的成分组成,评估了杨梅叶提取物的抗菌作用,并进一步研究其对大黄鱼保鲜的功

效,结果发现与对照组相比,两种组合涂层均具有抗氧化、抗菌和气体阻隔作用,可使鱼的保质期延长 6~8 d。Jia 等^[76]采用茶多酚处理鲢鱼鱼片并将其储存于 4 ℃ 下,探究不同储存期内鲢鱼鱼片的微生物群组成和品质特性变化,研究发现茶多酚能够改变其微生物菌群,并能抑制相应微生物的生长,延长其保质期。Yi 等^[77]以不同浓度的茶多酚处理梅鱼鱼丸并于 0 ℃ 下储存 17 d,结果发现与对照组相比,当茶多酚处理浓度为 0.25 g/kg 时,梅鱼鱼丸中的微生物活菌数显著降低,且鱼丸的挥发性盐基氮值、2-硫代巴比妥酸值和质构显著优于对照组,且当茶多酚处理浓度高于 0.25 g/kg 时,经 17 d 储存后能够保留更多鱼丸优良的感官特性。程荻等^[78]将茶多酚、苹果多酚及葡萄多酚添加到鱼糜经加工制成鱼糜制品,探究在 4 ℃ 下鱼糜制品的储藏品质,研究发现添加多酚能抑制或杀死腐败微生物,且与对照组相比,TBARS 与 TVB-N 值的升高速度显著降低,其中以茶多酚的储藏效果最佳。步婷婷等^[79]采用三种不同浓度的杨梅多酚溶液浸泡处理金枪鱼肉,分析 4 ℃ 贮藏过程中其鲜度、色泽和脂质氧化的变化。结果发现杨梅多酚对菌落总数、挥发性盐基氮值、高铁肌红蛋白含量、K 值和硫代巴比妥酸值的抑制作用显著,且对肌红蛋白损失、色泽衰败和感官品质降低具有较好的延缓效果。目前,除了植物多酚直接处理水产品外,还通常与其他生物保鲜剂复配,如乳酸链球菌素、壳聚糖等,且在水产品保鲜中作用效果明显,已得到较好应用,但目前关于植物多酚及复配物的综合作用机制仍需进一步探索,以发挥其最佳效果。

3.3 植物多酚在果蔬保鲜中的应用

植物多酚除了用于肉制品与水产品的保鲜外,目前也应用于鲜切果蔬、果汁等的保鲜,但目前针对果蔬保鲜方面的研究相对较少。Yu 等^[80]探究不同品种桑叶的多酚对鲜切哈密瓜保鲜的影响,结果发现与对照组相比,不同品种桑叶多酚处理的样品在颜色、硬度、可溶性固形物含量、可滴定酸度、总酚含量和重量等方面均表现出更好的品质,且桑叶多酚能够抑制细菌生长,有助于提高鲜切哈密瓜的安全性。司宝华等^[81]提取枸杞叶片中的多酚类化合物,研究不同浓度的枸杞叶片提取物对樱桃番茄的保鲜作用,研究结果表明不同浓度的提取物对樱桃番茄的保鲜效果存在显著差异,其中提取物浓度为 0.4 g/L 时,对樱桃番茄的保鲜最佳。刁春英等^[82]以香椿树嫩芽为原料,采用茶多酚与壳聚糖复配溶液对其保鲜作用进行研究,结果发现 0.3% 茶多酚与 0.5% 壳聚糖复配液能够显著维持香椿芽的感官特性,且在此条件下能够降低腐烂率。敬思群^[83]探究沙棘叶多酚在苹果汁保鲜中的作用,研究发现当沙棘叶多酚的添加量在 0.05%~0.15% 范围时,在 2 h 内能够显著抑制苹果汁的褐变。石飞等^[84]采用不同浓度的茶多酚喷涂处理

新鲜玫瑰香葡萄,探究其对葡萄货架品质的影响,研究发现经茶多酚处理的葡萄能够显著降低果实腐烂率、失重率,且 1.5% 和 2.0% 茶多酚溶液处理组保鲜效果较优。目前,植物多酚在果蔬保鲜中的应用相对较少,且针对果蔬保鲜的研究也大多集中在对果蔬生理生化指标和营养价值等方面,而对保鲜机制研究甚少,需进一步深入研究。

4 结论与展望

植物多酚在自然界中来源广泛,且是植物体内非常重要的生物活性化合物,具有很强的抗氧化性、抑菌性、抗癌性、抗炎性及抗肥胖作用,且对调节血糖血脂均具有较高的生理活性,因此,将植物多酚合理的开发并应用于食品领域有着十分可观的前景。目前,对植物多酚的应用主要集中在抗氧化剂和抑菌剂的使用,其中多酚类化合物可以影响微生物细胞中蛋白质、DNA 的生物合成和改变代谢过程,且对 ATP 合成有抑制作用,另外,还可以影响生物膜形成,从而达到抑菌的目的。但目前,植物提取物的活性成分、多酚种类及其结构较为复杂,且不同受试菌对其敏感性不同,其抑菌机理尚不清晰。为了更好的利用植物多酚的抑菌作用,并提高食品的货架期及其保鲜品质,应不断加强对有效抑菌酚类物质单体的挖掘及植物多酚抑菌机理的探索,并将其应用于更多食品的保鲜上,不断提供新型、安全、天然的保鲜物质及技术,为食品保鲜工业的发展提供新思路。

参考文献

- [1] 冯丽,宋曙辉,赵霖,等.植物多酚种类及其生理功能的研究进展[J]. *江西农业学报*, 2007(10): 105-107. [FENG L, SONG S H, ZHAO L, et al. Progress in plant polyphenols and their physiological functions[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2007(10): 105-107.]
- [2] 马力,陈永忠.植物多酚的生物活性研究进展[J]. *农业机械*, 2012, 21(7): 119-122. [MA L, CHEN Y Z. Research progress on the biological activity of plant polyphenols[J]. *Farm Machinery*, 2012, 21(7): 119-122.]
- [3] BALASUNDRAM N, AI T Y, SAMBANTHAMURTHI R, et al. Antioxidant properties of palm fruit extracts[J]. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition*, 2005, 14(4): 319-324.
- [4] 宋海昭,汪芳,沈新春.植物多酚干预肥胖发生作用机制的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(21): 7721-7728. [SONG H Z, WANG F, SHENG X C. Research progress on the anti-obesity effect and mechanism of plant polyphenols[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2020, 11(21): 7721-7728.]
- [5] 黄修晴,初众,房一明,等.植物多酚降血糖机制的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(18): 461-469. [HUANG X Q, CHU Z, FANG Y M, et al. Research progress on hypoglycemic mechanism of plant polyphenols[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(18): 461-469.]
- [6] 李露,吕佳倩,江承佳,等.茶多酚对心血管保护作用的研究进展[J]. *食品科学*, 2016, 37(19): 283-288. [LI L, LÜ J Q, JIANG C J, et al. Advances in research on protective effect of polyphenols in cardiovascular disease[J]. *Food Science*, 2016, 37(19): 283-288.]
- [7] 唐敏.沙棘叶多酚在苹果汁保鲜中的应用[J]. *现代食品*, 2022, 28(1): 93-95. [TANG M. Application of seabuckthorn leaf polyphenols in apple juice preservation[J]. *Modern Food*, 2022, 28(1): 93-95.]
- [8] BAI H, XU J, LIAO P, et al. Mechanical and water barrier properties of soy protein isolate film incorporated with gelatin[J]. *Journal of Plastic Film and Sheeting*, 2013, 29(2): 174-188.
- [9] 张嵘,相启森,王利敏,等.植物多酚在肉及肉制品中的应用研究进展[J]. *中国调味品*, 2021, 46(10): 183-187. [ZHANG R, XIANG Q S, WANG L M, et al. Research progress on application of plant polyphenols in meat and meat product[J]. *China Condiment*, 2021, 46(10): 183-187.]
- [10] 李典典,郝晓庆,张培培,等.植物多酚抑菌性及其复合保鲜技术在水产品中的应用进展[J]. *中国食品添加剂*, 2022, 33(2): 210-217. [LI D D, HAO X Q, ZHANG P P, et al. Advances in the antibacterial activity of plant polyphenols and their combined fresh-keeping technology in aquatic products[J]. *China Food Additives*, 2022, 33(2): 210-217.]
- [11] UMENO A, BIJU V, YOSHIDA Y. *In vivo* ROS production and use of oxidative stress-derived biomarkers to detect the onset of diseases such as Alzheimer's disease, Parkinson's disease, and diabetes[J]. *Free Radical Research*, 2017, 51(4): 413-427.
- [12] 符莎露,吴甜甜,吴春华,等.植物多酚的抗氧化和抗菌机理及其在食品中的应用[J]. *食品工业*, 2016, 37(6): 242-246. [FU S L, WU T T, WU C H, et al. Antioxidation and antibacterial mechanisms of plant polyphenols and application in food industry[J]. *The Food Industry*, 2016, 37(6): 242-246.]
- [13] 王钊,李长滨,李凤娇,等.酸法提取黑蒜多酚及抗氧化性研究[J]. *中国食品添加剂*, 2021(10): 15-22. [WANG Z, LI C B, LI F J, et al. Acid extraction and antioxidant activity of black garlic polyphenol[J]. *China Food Additives*, 2021(10): 15-22.]
- [14] 郭子微,侯文赫,付鸿博,等.不同苹果果实发育过程中酚类物质含量及抗氧化能力变化研究[J]. *山东农业科学*, 2021, 53(11): 35-44. [GUO Z W, HOU W H, FU H B, et al. Changes of phenolic substances and antioxidant capacity during fruit development of different apple varieties[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2021, 53(11): 35-44.]
- [15] CSEPREGI K, NEUGART S, SCHREINER M, et al. Comparative evaluation of total antioxidant capacities of plant polyphenols[J]. *Molecules*, 2016, 21(2): 208-225.
- [16] CARDOSO R R, NETO R O, D'ALMEIDA C T D S, et al. Kombuchas from green and black teas have different phenolic profile, which impacts their antioxidant capacities, antibacterial and antiproliferative activities[J]. *Food Research International*, 2020, 128: 108782.
- [17] DAOUD A, MALIKA D, BAKARI S, et al. Assessment of polyphenol composition, antioxidant and antimicrobial properties of various extracts of Date Palm Pollen (DPP) from two Tunisian cultivars[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2019, 12(8): 3075-3086.
- [18] MAKWANA S, CHOUDHARYA R, HADDOCK J, et al. *In-vitro* antibacterial activity of plant based phenolic compounds for food safety and preservation[J]. *Food Science and Technology*,

2015, 62(2): 935–939.

[19] DENG H T, ZHU J Y, TONG Y Q, et al. Antibacterial characteristics and mechanisms of action of *Aronia melanocarpa* anthocyanins against *Escherichia coli*[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 150: 112018.

[20] 张笑, 李颖畅. 植物多酚的抑菌活性及其在食品保鲜中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2013, 4(3): 769–773. [ZHANG X, LI Y C. The antibacterial activity of plant polyphenols and its application in food preservation[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2013, 4(3): 769–773.]

[21] 伊娟娟, 王振宇, 曲航, 等. 植物多酚抗肿瘤活性及其机制研究进展[J]. 食品工业科技, 2016, 37(18): 391–395. [YI J J, WANG Z Y, QU H, et al. Research progress in the antitumor activities and related mechanisms of plant polyphenols[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(18): 391–395.]

[22] RAYAN A, RAIYN J, FALAH M. Nature is the best source of anti-cancer drugs: Indexing natural products for their anticancer bioactivity[J]. *PLoS One*, 2017, 12(11): e0187925.

[23] VILLOTA H, MORENO C M, SANTA G G A, et al. Biological impact of phenolic compounds from coffee on colorectal cancer[J]. *Pharmaceutics*, 2021, 14(8): 761.

[24] NIRMALA J G, CELSIA S E, SWAMINATHAN A, et al. Cytotoxicity and apoptotic cell death induced by *Vitis vinifera* peel and seed extracts in A431 skin cancer cells[J]. *Cytotechnology*, 2018, 70(2): 537–554.

[25] BALUPILLAI A, NAGARAJAN R P, RAMASAMY K, et al. Caffeic acid prevents UVB radiation induced photocarcinogenesis through regulation of PTEN signaling in human dermal fibroblasts and mouse skin[J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2018, 352: 87–96.

[26] HAN M L, LI A, SHEN T, et al. Phenolic compounds present in fruit extracts of *Malus* spp. show antioxidative and pro-apoptotic effects on human gastric cancer cell lines[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2019, 43(11): e13028.

[27] JANG M G, KO H C, KIM S J. Effects of p-coumaric acid on microRNA expression profiles in SNU-16 human gastric cancer cells[J]. *Genes & Genomics*, 2020, 42: 817–825.

[28] ÁVILA G M Á, GIMÉNEZ B J A, ESPÍN J C, et al. Dietary phenolics against breast cancer. A critical evidence-based review and future perspectives[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21(16): 5718.

[29] GARDEAZABAL I, ROMANOS N A, MARTÍNEZ G Á, et al. Total polyphenol intake and breast cancer risk in the Seguimiento Universidad de Navarra (SUN) cohort[J]. *British Journal of Nutrition*, 2019, 122(5): 542–551.

[30] HOSOKAWA Y, HOSOKAWA I, OZAKI K, et al. Honokiol and magnolol inhibit CXCL10 and CXCL11 production in IL-27-stimulated human oral epithelial cells[J]. *Inflammation*, 2018, 41(6): 2110–2115.

[31] SIRIWARIN B, WEERAPREEYAKUL N. Sesamol induced apoptotic effect in lung adenocarcinoma cells through both intrinsic and extrinsic pathways[J]. *Chemico-Biological Interactions*, 2016, 254: 109–116.

[32] YANG Q Q, CHENG L Z, ZHANG T Z, et al. Phenolic profiles, antioxidant, and antiproliferative activities of turmeric (*Curcuma longa*)[J]. *Industrial Crops and Products*, 2020, 152: 112561.

[33] 牛晋平, 单树花, 赵惠玲, 等. 麦麸结合态多酚对肝癌 HepG-2 细胞增殖及凋亡效应研究[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(9): 22–29. [NIU J P, SHAN S H, ZHAO H L, et al. Effects of bound polyphenols from wheat bran on cell proliferation and apoptosis of HepG-2 cell[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2021, 36(9): 22–29.]

[34] 李原, 赵振刚. 凤眼果壳多酚的抗氧化和抗人肺癌细胞 A549 增殖活性[J]. 现代食品科技, 2021, 37(4): 16–24. [LI Y, ZHAO Z G. Antioxidant and anti-proliferative activities of polyphenols from *Sterculia nobilis* Smith huskon human lung cancer cells A549[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2021, 37(4): 16–24.]

[35] SANGIOVANNI E, DELL A M. Special issue: Anti-inflammatory activity of plant polyphenols[J]. *Biomedicines*, 2020, 8(3): 64.

[36] 董晶, 王帅珂, 吴革, 等. 鱼腥草多酚对葡聚糖硫酸钠 (DSS) 诱导小鼠溃疡性结肠炎的改善作用[J]. 现代食品科技, 2021, 37(12): 7–13, 229. [DONG J, WANG S K, WU P, et al. Protective effect of polyphenol of *Houttuynia cordata* on ulcerative colitis induced by sodium dextran sulfate (DSS) in mice[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2021, 37(12): 7–13, 229.]

[37] FUMAGALLI M, SANGIOVANNI E, VRHOVEK U, et al. Strawberry tannins inhibit IL-8 secretion in a cell model of gastric inflammation[J]. *Pharmacological Research*, 2016, 111: 703–712.

[38] 刘子源, 谭泽明, 谭佳琪, 等. 有氧运动联合荔枝多酚对 2 型糖尿病大鼠血管炎症的影响及其机制探讨[J]. 中南药学, 2021, 19(9): 1833–1840. [LIU Z Y, TAN Z M, TAN J Q, et al. Effect of aerobic exercises and litchi polyphenols on the vascular inflammation and related mechanism in type 2 diabetic rats[J]. *Central South Pharmacy*, 2021, 19(9): 1833–1840.]

[39] SANGIOVANNI E, VRHOVEK U, ROSSONI G, et al. Elagitannins from rubus berries for the control of gastric inflammation: *In vitro* and *in vivo* studies[J]. *PLoS One*, 2013, 8(8): e71762.

[40] 张莉, 高炜, 孙利平. 茶多酚通过调控 XB130 对 LPS 诱导小鼠肺泡巨噬细胞炎症因子表达的影响[J]. 中国药师, 2021, 24(4): 670–674. [ZHANG L, GAO W, SUN L P. Effect of tea polyphenols on LPS induced inflammatory factor expression in mouse alveolar macrophages by regulating XB130[J]. *China Pharmacist*, 2021, 24(4): 670–674.]

[41] LI F H, YAN H M, JIANG L, et al. Cherry polyphenol extract ameliorated dextran sodium sulfate-induced ulcerative colitis in mice by suppressing Wnt/ β -catenin signaling pathway[J]. *Foods*, 2022, 11(1): 49.

[42] 彭珂毓, 顾俊菲, 宿树兰, 等. 丹参茎叶酚酸组分对溃疡性结肠炎模型小鼠的干预作用[J]. 中国药理学通报, 2020, 36(3): 334–341. [PENG K Y, GU J F, SU S L, et al. The intervention effect of phenolic acid components of stems and leaves of *Salvia miltiorrhiza* on ulcerative colitis in mice[J]. *Chinese Pharmacological Bulletin*, 2020, 36(3): 334–341.]

[43] 陈丽莉, 刘月, 牛晓琪, 等. 黑树莓多酚对糖尿病小鼠血糖代

- 谢的调控作用及机制研究[J]. *中草药*, 2021, 52(17): 5258–5266.
- [CHEN L L, LIU Y, NIU X Q, et al. Regulation and mechanism of polyphenol from *Rubus occidentalis* on blood sugar metabolism in diabetic mice[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2021, 52(17): 5258–5266.]
- [44] ARSHAD M, CHAUDHARY A R, MUMTAZ M W, et al. Polyphenol fingerprinting and hypoglycemic attributes of optimized *Cycas circinalis* leaf extracts[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 101(4): 1530–1537.
- [45] BANSODE R R, RANDOLPH P, AHMEDNA M, et al. Bioavailability of polyphenols from peanut skin extract associated with plasma lipid lowering function[J]. *Food Chemistry*, 2014(148): 24–29.
- [46] JAYARATHNE S, KOBOZIEV I, PARK O H, et al. Anti-inflammatory and anti-obesity properties of food bioactive components: Effects on adipose tissue[J]. *Preventive Nutrition and Food Science*, 2017, 22: 251–262.
- [47] 左丽丽, 高永欣, 张岚, 等. 狗枣猕猴桃多酚对肥胖小鼠的减肥降脂作用[J]. *粮食与油脂*, 2021, 34(10): 132–136. [ZUO L L, GAO Y X, ZHANG L, et al. Effects of *Actinidia kolomokta* (Maxin & Rupr.) Maxim polyphenols on reduce weight and lipid lowering in obese mice[J]. *Cereals & Oils*, 2021, 34(10): 132–136.]
- [48] SONG H, SHEN X, CHU Q, et al. Red raspberry (poly) phenolic extract improves diet-induced obesity, hepatic steatosis and insulin resistance in obese mice[J]. *Journal of Berry Research*, 2021, 11(2): 349–362.
- [49] HUANG J B, FENG S M, LIU A N, et al. Green tea polyphenol EGCG alleviates metabolic abnormality and fatty liver by decreasing bile acid and lipid absorption in mice[J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2018, 62(4): 1700696.
- [50] SIKKEMA J, DE BONT J A, POOLMAN B. Interactions of cyclic hydrocarbons with biological membranes[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1994, 269: 8022–8028.
- [51] ULTEE A, BENNIK M H, MOEZELAAR R. The phenolic hydroxyl group of carvacrol is essential for action against the food-borne pathogen *Bacillus cereus*[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2002, 68: 1561–1568.
- [52] NONHYNEK L J, ALAKOMI H, KAHKONEN M P, et al. Berry phenolics: Antimicrobial properties and mechanisms of action against severe human pathogens[J]. *Nutrition and Cancer*, 2006, 54(1): 18–32.
- [53] NEGI P S. Plant extracts for the control of bacterial growth: Efficacy, stability, and safety issues for food application[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2012, 156: 7–17.
- [54] CAO Y D, QIAN H L, FENG C M, et al. Study on the mechanism of epigallocatechin gallate (EGCG) to the cell membrane of *Escherichia coli*[J]. *Science of Advanced Materials*, 2019, 11(2): 262–268.
- [55] BHATTACHARYA D, GHOSH D, BHATTACHARYA S, et al. Antibacterial activity of polyphenolic fraction of Kombucha against *Vibrio cholerae*: Targeting cell membrane[J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2018, 66(2): 145–152.
- [56] 费鹏, 赵胜娟, 陈曦, 等. 植物多酚抑菌活性、作用机理及应用研究进展[J]. *食品与机械*, 2019, 35(7): 226–230. [FEI P, ZHAO S J, CHEN X, et al. The research progress on antimicrobial activity, mechanism and application of plant polyphenols[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(7): 226–230.]
- [57] DADI P K, AHMAD M, AHMAD Z. Inhibition of ATPase activity of *Escherichia coli* ATP synthase by polyphenols[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2009, 45(1): 72–79.
- [58] CHEN M S, ZHAO Z G, MENG H C, et al. The antibiotic activity and mechanisms of sugar beet (*Beta vulgaris*) molasses polyphenols against selected food-borne pathogens[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 82: 354–360.
- [59] PASQUA R D, MAMONE G, FERRANTI P, et al. Changes in the proteome of *Salmonella enterica* serovar Thompson as stress adaptation to sublethal concentrations of thymol[J]. *Proteomics*, 2010, 10(5): 1040–1049.
- [60] ULANOWSKA K, TKACZYK A, KONOPA G, et al. Differential antibacterial activity of genistein arising from global inhibition of DNA, RNA and protein synthesis in some bacterial strains[J]. *Archives of Microbiology*, 2006, 184(5): 271–278.
- [61] HARAGUCHI H, TANIMOTO K. Mode of antibacterial action of retrochalcones from *Glycyrrhiza inflata*[J]. *Phytochemistry*, 1998, 48: 125–129.
- [62] 姜在祥. 牛蒡功能性成分及其抗氧化、抗菌活性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2010. [LOU Z X. Studies on the burdock active components and their antioxidant, antibacterial activities[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2010.]
- [63] CHINNAM N, DADI P K, SABRI S A, et al. Dietary bioflavonoids inhibit *Escherichia coli* ATP synthase in a differential manner[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2010, 46(5): 478–486.
- [64] FEI P, ALIM A, GONG S Y, et al. Antimicrobial activity and mechanism of action of olive oil polyphenols extract against *Cronobacter sakazakii*[J]. *Food Control*, 2018, 94: 289–294.
- [65] EFENBERGER S M, NOWAK A, CZYZOWSKA A. Plant extracts rich in polyphenols: Antibacterial agents and natural preservatives for meat and meat products[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 6(1): 149–178.
- [66] DOLAN A, BURGESS C M, BARRY T B, et al. A novel quantitative reverse-transcription PCR (qRT-PCR) for the enumeration of total bacteria, using meat micro-flora as a model[J]. *Journal of Microbiological Methods*, 2009, 77(1): 1–7.
- [67] ZHANG L, XU S G, LIANG W, et al. Antibacterial activity and mode of action of *Mentha arvensis* ethanol extract against multidrug-resistant *Acinetobacter baumannii*[J]. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*, 2015, 14(11): 2099–2106.
- [68] PENNACCHIA C, ERCOLINI D, VILLANI F. Spoilage-related microbiota associated with chilled beef stored in air or vacuum pack[J]. *Food Microbiology*, 2011, 28(1): 84–93.
- [69] NOWAK A, CZYZOWSKA A, EFENBERGER M, et al. Polyphenolic extracts of cherry (*Prunus cerasus* L.) and blackcurrant (*Ribes nigrum* L.) leaves as natural preservatives in meat products[J]. *Food Microbiology*, 2016, 59(10): 142–149.
- [70] VAITHIYANATHAN S, NAVEENA B M, MUTHUKU-

- MAR M, et al. Effect of dipping in pomegranate (*Punica granatum*) fruit juice phenolic solution on the shelf life of chicken meat under refrigerated storage[J]. *Meat Science*, 2011, 88(3): 409–414.
- [71] AL J F Y, SHAHZAD S A, AHMED A S, et al. Effect of argel (*Solenostemma argel*) leaf extract on quality attributes of chicken meatballs during cold storage[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, 55(5): 1797–1805.
- [72] WANG W D, SUN Y E. Preservation effect of meat product by natural antioxidant tea polyphenol[J]. *Cellular and Molecular Biology*, 2016, 62(13): 44–48.
- [73] ZHANG Q Q, JIANG M X, RUI W, et al. Effect of rose polyphenols on oxidation, biogenic amines and microbial diversity in naturally dry fermented sausages[J]. *Food Control*, 2017, 78: 324–330.
- [74] SU H M, CHEN W, FU S L, et al. Antimicrobial effect of bayberry leaf extract for the preservation of large yellow croaker[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2014, 94(5): 935–942.
- [75] LI T T, LI J R, HU W Z, et al. Quality enhancement in refrigerated red drum (*Sciaenops ocellatus*) fillets using chitosan coatings containing natural preservatives[J]. *Food Chemistry*, 2013(2–3): 821–826.
- [76] JIA S I, HUANG Z, LEI Y T, et al. Application of Illumina-MiSeq high throughput sequencing and culture-dependent techniques for the identification of microbiota of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) treated by tea polyphenols[J]. *Food Microbiology*, 2018, 76: 52–61.
- [77] YI S, LI J R, ZHU J L, et al. Effect of tea polyphenols on microbiological and biochemical quality of Collichthys fish ball[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011, 91(9): 1591–1597.
- [78] 程荻, 李维, 杨宏. 3 种植物多酚对鱼糜制品储藏品质的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2019, 38(1): 119–124. [CHENG D, LI W, YANG H. Effects of three plant polyphenols on preservation quality of surimi products[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2019, 38(1): 119–124.]
- [79] 步婷婷, 金洋, 徐大伦, 等. 杨梅多酚对生食金枪鱼冷藏过程中品质的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(9): 225–231. [BU T T, JIN Y, XU D L, et al. Effect of bayberry polyphenols on the quality of tuna (*Thunnus albacores*) meat used for raw consumption during refrigerated storage[J]. *Food Science*, 2017, 38(9): 225–231.]
- [80] YU L, SHI H. Effect of two mulberry (*Morus alba* L.) leaf polyphenols on improving the quality of fresh-cut cantaloupe during storage[J]. *Food Control*, 2021, 121: 107624.
- [81] 司宝华, 文炳南, 葛蓓蕾, 等. 枸杞叶多酚对樱桃番茄贮藏的保鲜效果[J]. *安徽农学通报*, 2019, 25(23): 52–53, 83. [SI B H, WEN B N, GE B L, et al. Effects of Chinese wolfberry leaf polyphenols on storage of cherry tomatoes[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2019, 25(23): 52–53, 83.]
- [82] 刁春英, 高秀瑞. 茶多酚与壳聚糖复配溶液对香椿芽保鲜效果的研究[J]. *广西植物*, 2016, 36(4): 492–496, 491. [DIAO C Y, GAO X R. Fresh-keeping of *Toona sinensis* sprouts with tea polyphenol combined with chitosan solution[J]. *Guihaia*, 2016, 36(4): 492–496, 491.]
- [83] 敬思群. 沙棘叶多酚在苹果汁保鲜中的应用[J]. *食品科学*, 2010, 31(18): 147–152. [JING S Q. Ultrasonic-aided extraction of polyphenols from seabuckthorn leaves and their fresh-keeping effect on apple juice[J]. *Food Science*, 2010, 31(18): 147–152.]
- [84] 石飞, 李洋洋, 王君. 茶多酚处理对玫瑰香葡萄保鲜效果的研究[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(23): 102–106. [SHI F, LI Y Y, WANG J. Effects of tea polyphenol treatment on storage quality of muscat grape[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(23): 102–106.]