

多酚类化合物及其在水产品保鲜中的应用研究进展

王 帅, 任丹丹*, 吴 哲, 邱丽超, 梁馨元, 李思彤, 姜 昕

(大连海洋大学食品科学与工程学院, 大连 116023)

摘 要: 多酚类化合物(polyphenols)是植物体受到胁迫而引发自我防御机制时产生的一种次级代谢产物, 因自身带有大量羟基, 使其具有抗氧化、抗菌、抗肿瘤等多种生物活性, 目前已成为研究热点。多酚类化合物良好的抗氧化及抑菌作用使其成为极具潜力的生物保鲜剂。本文对多酚类化合物按照来源进行分类, 简述了其组成和性质以及与保鲜相关的生物活性, 重点论述了其在水产品保鲜领域的研究进展及发展趋势, 以期为进一步拓展多酚类化合物在生物保鲜剂领域的应用提供参考。

关键词: 酚类化合物; 水产品; 保鲜

Research progress on polyphenols and its application in aquatic products preservation

WANG Shuai, Ren Dan-Dan*, WU Zhe, ZHI Li-Chao, LIANG Xin-Yuan, LI Si-Tong, JIANG Xin

(College of Food Science and Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

ABSTRACT: Polyphenols are secondary metabolites produced by plants when they are under stress and initiate self-defense mechanisms. Because of their large number of hydroxyl groups, they have many biological activities such as anti-oxidation, anti-bacterial and anti-tumor. It has become a research hotspot. The good antioxidant and bacteriostatic effects of polyphenols make it a highly promising biological preservative. In this paper, polyphenols were classified according to their sources, and its composition and properties as well as the biological activities related to preservation were briefly described. And focus on the research progress and development trend in the field of aquatic product preservation in order to provide reference for further expanding the application of polyphenols in the field of biological preservatives.

KEY WORDS: phenolic compounds; aquatic product; preservation

1 引 言

多酚类化合物(polyphenols)是植物体内一种独有的次级代谢产物, 广泛存在于自然界中。近年来, 多酚类化合物的生物活性作用受到人们的广泛关注, 一方面由于其羟

基取代的高反应性和其吞噬自由基的能力, 使大部分多酚类化合物具有良好的抗氧化活性^[1]; 另一方面多酚类化合物还可以抑制微生物的生长繁殖, 并抑制有害细菌分泌毒素, 因此可作为潜在的生物保鲜剂原料^[2]。随着人们对健康及生活品质要求的不断提高, 天然的多酚类物质在抗氧

基金项目: 辽宁省海洋与渔业厅科研项目(201721)

Fund: Supported by Ocean and Fisheries Department Project of Liaoning Province (201721)

*通讯作者: 任丹丹, 博士, 副教授, 主要研究方向为海洋生物资源利用。E-mail: rdd80@163.com

*Corresponding author: REN Dan-Dan, Ph.D, Associate Professor, College of Food Science and Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China. E-mail: rdd80@163.com

化、生物保鲜等领域的开发与应用越来越受到消费者的青睐。早在 1991 年第十一届全国添加剂标准化技术委员会上, 就确定了茶多酚(不含茶碱)天然抗氧化剂可以应用于食品^[3]。随着人们对多酚类物质研究的不断深入, 越来越多的多酚类物质作为抗氧化剂及抑菌剂应用在水产品保鲜领域。

水产品味道鲜美、营养丰富, 具有多种功能性活性物质, 其中的 ω -3 不饱和脂肪酸可转化为调节大脑许多功能的介质^[4], 具有抗血栓、降低血脂、提高记忆力的功能。然而水产品不同于其他动植物, 由于水分含量高, 原料极易受细菌、分解酶以及环境温度影响而腐败变质。因此, 如何延长水产品保质期一直是改善水产品品质的重要问题。目前实际应用于水产品中的保鲜技术有低温保鲜、高压保鲜、辐照保鲜、气调保鲜、保鲜剂保鲜等技术。低温是水产品保鲜的传统保鲜手段, 除低温外, 还经常应用栅栏原理控制多种条件对水产品进行协同保鲜^[5]。保鲜剂保鲜是较热门的协同保鲜技术, 其中的生物保鲜剂在安全性方面比化学保鲜剂更具有发展优势^[6]。

水产品腐败变质通常伴随着不同种类细菌数量的增加、水产品内活性氧增加、脂肪分解等变化, 然而多酚类化合物的抑菌、抗氧化、抑制酶活性以及形成保护膜的作用为水产品保鲜提供了依据。本文概述了多酚类化合物的分类和理化性质, 重点论述了其抗氧化、抑菌活性以及多酚类物质在水产品保鲜领域的应用, 并展望了多酚在水产品保鲜领域的发展, 以期为进一步研究开发多酚类生物保鲜剂提供参考。

2 多酚类化合物的分类及理化性质

2.1 多酚类化合物的分类

多酚类化合物又称为单宁, 广泛认为是植物体内一种次级代谢产物, 可分为简单酚类化合物和复杂多酚类化合物。最初研究的多酚类化合物主要是简单酚类化合物, 根据其化学结构特征可分为水解单宁和缩合单宁 2 大类^[7], 水解单宁即鞣酸或其衍生的酚羧酸与多元醇组成的酯在酸、碱和酶的作用下产生的多元醇和酚羧酸。缩合单宁则是 C6·C3·C6 的黄烷类和 C6·C2·C6 的芪类的衍生物^[7,8]。复杂多酚类化合物则同时含有水解类多酚和缩合类多酚的特征。多酚是一类混合物^[9]。一般根据提取物来源命名如茶多酚、葡萄多酚、苹果多酚、褐藻多酚等, 其主要组成、含量受多酚来源^[10]、加工方法^[11]以及环境变化^[12]影响。

目前, 对多酚的研究以茶多酚为主, 除此之外还有海藻多酚、水果中的多酚以及中药材多酚等。茶多酚(tea polyphenols, TP)是一类含有大量侧链的芳香族化合物, 以儿茶素(黄烷醇类)为主要成分, 约占茶叶干重的四分之一^[13]。其中红茶在发酵工艺中多酚被氧化, 因此其含量低于绿茶, 乌龙茶属于半发酵茶, 其化学成分也介于红茶和绿茶之

间。葡萄多酚(grape procyanidins, GPC)则是以花色素、白藜芦醇为主要成分的一类多酚, 广泛存在于葡萄籽、葡萄皮、葡萄汁中, 红葡萄皮中, 多酚含量可达 25%~50%, 而籽中更高可达 50%~70%。赵谋明等^[14]对青苹果、皇冠梨、番石榴、金桔、脐橙、芒果、菠萝和木瓜 8 种亚热带水果多酚含量以及组成进行分析, 发现番石榴果肉的总酚含量最高, 青苹果、金桔和脐橙的果肉次之, 皇冠梨和木瓜的果肉的总酚含量最低。其中绿原酸、儿茶素和表儿茶素的含量在 8 种水果中均最高。海藻多酚以褐藻多酚为主, 褐藻多酚是一类以间苯三酚为基本结构单元的多酚类物质, 其含量受种属的影响差异较大, 其次也受季节变化的影响^[14]。严小军^[15]测得中国常见的 5 种褐藻多酚, 含量最高的海黍子(*Sargassum kjellmanianum*)多酚为藻体的 2.8%, 羊栖菜(*Sargassum fusiforme*)为 2%, 鼠尾藻(*Sargassum thunbergii*)、海带(*Laminaria japonica*)、裙带菜(*Undaria pinnatifida*)均不足 1%。杨会成等^[16]利用超声波、微波复合提取海带(*Laminaria japonica* Aresch)多酚将总酚浸出率提高到 2.08%。有研究表明褐藻多酚的分布并不因藻体组织结构不同而存在差异, 而且同一藻体多酚提取率与该结构比表面积有关^[17]。综上所述, 多酚类物质种类繁多, 结构较为复杂, 类陆生植物中多酚含量高于海洋植物中多酚含量, 目前研究成果中未明确指出多酚具体结构。

2.2 多酚类化合物的理化性质

多酚类化合物不易挥发, 略有吸潮性, 在潮湿的空气中能被氧化, 溶于水及甲醇、乙醇、丙醇、四氢呋喃等有机溶剂, 微溶于油脂、不溶于氯仿^[7]。一般多酚对酸较稳定, 在碱性环境中易发生氧化褐变^[18], 对热较稳定。

3 多酚类化合物的抗氧化活性

多酚类物质的抗氧化特性来源于其特殊的酚羟基结构^[19], 多酚大量的酚羟基结构可以提供氢供体, 对多种活性氧(reactive oxygen species, ROS)具有清除作用, 可将激发态氧分子还原成活性较低的基态, 减少氧自由基产生的可能, 同时也是各种自由基有效的清除剂, 生成活性较低的多酚自由基^[20], 打断自由基氧化的链反应, 多酚发挥抗氧化作用是综合效应的结果。多酚抗氧化作用的强弱受分子结构和羟基数量、键长、分子内氢键数目影响^[21,22]。如连三羟基的供氢能力大于间三羟基, 苯环提供的羟基自由基加成位点数量越多清除自由基能力越强, 抗氧化能力越强。Wang 等^[23]研究冰岛不同的海藻物种发现萃取剂的类型对海藻提取物的总酚含量(total phenolics, TPC)和抗氧化活性都有很大影响。中高极性的多酚组分其抗氧化活性相对强。具有较高分子量的多酚组分, 通常表现出最强的脂质过氧化抑制活性($IC_{50}=2.32$ mg/mL 干重)和最强的透明质酸酶(HAase)抑制能力($IC_{50}=0.73$ mg/mL 干重)^[24]。杨小青

等^[25]分别研究羊栖菜多酚乙酸乙酯相和水相分子质量大于 30000、10000~30000、5000~10000 小于 5000 各组分抗氧化活性,发现乙酸乙酯萃取的相对分子质量大于 30000 的羊栖菜多酚综合抗氧化活性最好也印证了这个理论。而也有研究表明高聚合度的多酚影响了其空间构象,影响了羟基活性,随着聚合度的增加其抗氧化活性降低^[26]。多酚邻位二酚羟基可与金属离子螯合,减少金属离子对氧化反应的催化, Perron 等^[27]证实了多酚化合物可与游离态铁离子螯合有效的抑制由铁介导的 DNA 损伤。多酚还能与 VC 和 VE 等抗氧化剂之间产生协同效应,具有增效剂的作用^[28]。多酚类化合物的抗氧化能力使其成为极具潜力的保鲜剂之一。

4 多酚类化合物的抑菌活性

多酚类化合物对微生物具有普遍的抑制作用。但同种多酚化合物对不同菌体的抑制作用有着明显的差异。张添菊等^[29]采用同一质量浓度的蓝莓叶多酚处理供试致病菌,其抑菌活性为:金黄色葡萄球菌>大肠杆菌>单增李斯特菌>鲍氏志贺氏菌>肠炎沙门氏菌>枯草芽孢杆菌。林超等^[30]通过透析方法将鼠尾藻多酚分为分子量不同的 2 部分,研究其对溶藻胶弧菌(*Vibrio alginolyticus*)和鳃弧菌(*V. anguillarum*)、鳃弧菌和副溶血弧菌(*V. parahaemolyticus*)的抑制作用,研究发现不同分子量的多酚组分抑菌效果也不同。付慧等^[31]发现茶多酚的抑菌能力与茶多酚的浓度、与菌种的作用时间以及环境 pH 和氯化钠含量有关。Taguri 等^[32]从多酚结构角度考虑研究发现连苯三酚显示出比邻苯二酚或间苯二酚基团更高的抗菌活性,然而连苯三酚基团的数量与多酚的抗菌活性之间没有明确的关系。当化合物或植物提取物的抗菌活性不能简单地通过羟基数量来估计时,可考虑 pH 和细菌特性等因素的影响。孙爱东等^[33]在研究苹果多酚抑菌能力时发现酸性条件下(pH 值 5.5 附近)有利于苹果多酚的抑菌,且对革兰氏阳性菌的抑制效果强于革兰氏阴性菌^[34]。

多酚类物质对微生物的抑制作用是一个反应链。多酚作用于菌体细胞后,能够逐步破坏其细胞壁的完整性,使得碱性磷酸酶渗出,继而使细胞膜的通透性增加,导致金属离子、蛋白质的渗漏使细胞代谢发生紊乱。董璐等^[35]将茶多酚与大肠杆菌(*Escherichia coli*)作用后提取其 DNA,进行琼脂糖凝胶电泳可观察到处理后菌体的 DNA 条带变暗甚至拖尾,发现茶多酚可以作用于 *E. coli* 的遗传物质 DNA,从而在一定程度上发挥着抑菌作用。多酚还可与蛋白质高度结合,使原生质中蛋白质沉淀变性或抑制酶活反应来破坏代谢过程,从而起到抑菌作用^[36]。仪淑敏^[37]借助双向电泳技术分析多酚处理后的细菌(铜绿假单胞菌和粘质沙雷氏杆菌)膜蛋白变化,并应用 MALDI-TOF-MS 鉴定了差异蛋白点,结果表明茶多酚虽然对铜绿假单胞菌和粘质沙雷氏杆菌均存在

抑菌作用,但对细菌内部改变存在差异。

5 酚类化合物在水产品领域的应用

多酚类化合物因其较强的还原能力以及对微生物的抑制作用可作为一种良好的生物保鲜剂。目前,多酚类化合物在水产品保鲜中的研究以陆生植物为主,其中茶多酚应用较为广泛,其余还有水果和药材来源的多酚化合物,而对于海洋来源的褐藻多酚类保鲜剂还需进一步研发。多酚类保鲜剂对水产品的保鲜涉及鱼类、虾和扇贝以及其制品。有研究表明低温冷冻对微生物及酶活具有一定的抑制作用^[38],其货架期比冷藏的水产品保存时间长,但温度过低会导致水产品品质下降。因此,这种生物多酚类化合物在水产品保鲜中的应用变得更有价值。

5.1 茶多酚

茶多酚是常见的植物源性生物保鲜剂,刘楠等^[39]通过顶空固相微萃取-气相色谱-质谱(headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)检测发现草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)鱼肉中的挥发性物质(主要是醛类及醇类物质)有 161 种,检测出茶多酚处理组鱼肉中挥发性物质明显少于未处理组,且微生物检测结果表明茶多酚可抑制微生物生长,对新鲜的冷藏鱼肉有良好的保鲜效果。鞠健等^[40]在 4 °C 下冷藏条件下,使用茶多酚处理鲈鱼(*Lateolabrax japonicus*)有效的抑制了其 K 值、挥发性盐基氮值(total volatile basic nitrogen, TVB-N)和表面疏水性的增加($P<0.05$),直至物流末期第 20 d 检测鱼体腐败指标仍低于空白对照组^[41],这表明茶多酚作为水产品保鲜剂在模拟水产品冷链物流运输(0 °C)、冷藏(4 °C)、冷冻(-18 °C)、销售(2 °C)等环节中均有良好的保鲜作用。茶多酚不仅可以有效抑制水产品中微生物的生长,在研究茶多酚对草鱼鱼肉保鲜效果时发现,茶多酚能抑制蛋白质降解速度和 ATP 酶活性,并且发现茶多酚改善了蛋白质的凝胶性和乳化性,这种改善未发现与添加多酚剂量呈一定关系^[42]。汪金林^[43]研究茶多酚处理大黄鱼(*Pseudosciaena crocea*)蛋白质的变化,茶多酚处理大黄鱼鱼肉,可以降低其中含量最高的肌原纤维蛋白中盐溶性蛋白溶出速率;延缓随着冻藏时间延长鱼肉肌原纤维组织结构疏松劣化;抑制肌原纤维蛋白中游离巯基含量的升高,证明了茶多酚对鱼肉蛋白质具有一定的保护作用。邵颖等^[44]也曾提到多酚的这种保护作用使多酚在鱼肉保鲜中可以充当良好的抗冻剂。

杨少玲等^[45][44]比对了壳聚糖、茶多酚以及山梨酸钾 3 种保鲜剂对金枪鱼(tuna)的保鲜效果,发现 3 种保鲜剂浸渍金枪鱼鱼肉对其 K 值、TVB-N 和颜色抑制脂质氧化方面都有着不同程度的改善。其中,壳聚糖在保持金枪鱼肉的 K 值、红色方面效果最佳,优于山梨酸钾和茶多酚,而茶多酚在抑制 TVB-N 值方面的效果优于壳聚糖和山梨酸

钾。且茶多酚对金枪鱼的最佳保鲜浓度为 6 g/L, 优于壳聚糖和山梨酸钾, 由此可以推断不同的保鲜剂在保鲜过程中发挥作用的途径存在差异。对于水产品而言, 其白度往往是其品质的重要参考指标, 而茶多酚含量越多其色素颜色对色泽影响越大, 使白度降低^[46], 因此, 根据水产品及其制品研发不同特性的生物保鲜剂成为研究的一大热点。于林等^[47]发现茶多酚的添加可有效改良原有的胶原蛋白-壳聚糖保鲜剂对冷藏石斑鱼的保鲜效果。刘开华等^[48]对鱼丸制品的保鲜研究发现用 0.2% 茶多酚、0.2% 虾青素以及 0.2% 茶多酚和 0.2% 虾青素混合保鲜剂均可延长鱼丸货架期。其中茶多酚对于细菌总数抑制效果优于虾青素, 综合感官指标的变化, 并测定其硫代巴比妥酸(thiobarbituric acid, TBA)值、TVB-N、细菌总数的变化方面考察, 发现茶多酚与虾青素的混合保鲜作用明显优于单因素组。证明了虾青素抗氧化剂与多酚具有协同作用。王当丰等^[49]用 0.1 g/kg 茶多酚和 0.3 g/kg 溶菌酶复配保鲜可有效抑制鲢鱼丸中微生物生长。茶多酚在水产品保鲜中既可以抑制微生物的生长繁殖, 又可以延缓蛋白质冷冻变性。其作为保鲜剂还可充当抗冻剂及护色剂, 在实际应用中茶多酚保鲜剂已朝着“1+1>2”的方向发展, 目前茶多酚复合保鲜剂已经应用于水产品保鲜^[50,51]。

5.2 褐藻多酚

我国海藻资源丰富, 海藻中同样含具有强大生物活性的多酚类化合物。Wang 等^[52]从墨角藻(*Fucus vesiculosus* Linnaeus)中提取的多酚抑制了试验鳕鱼(*Gadus morhua*)肉脂质的氧化, 不同的多酚组分具有不同的抗氧化活性, 其低聚多酚组分抑制脂质氧化效果明显, 其 300 mg/kg LH-2 亚组分有效性相当于 100 mg/kg PG 的当量, 该研究证明了多酚低聚物在作为鱼和鱼产品新型天然抗氧化剂方向存在巨大潜力。王亮等^[53]在研究南美白对虾保鲜时, 发现 0.2 g/L 的海带多酚对于青灰色的对虾白度影响并不会显著降低其感官品质的影响, 并且该浓度下的海带多酚可有效的改善随着时间的推移南美白对虾产生的腥臭味等现象。有研究发现不同的海藻多酚对同种水产品保鲜效果有差异, 如石莼多酚、裙带菜多酚、马尾藻多酚, 通过感官品质、菌落总数、TVB-N 值的变化来评价在 4 °C 时为大菱鲆的保鲜效果, 石莼多酚可有效将大菱鲆冷藏货架期由 9 d 延长至 15 d, 而裙带菜多酚和马尾藻多酚均可将其延长 1~2 d^[54]。海藻种类繁多, 海藻多酚被证明了其有和茶多酚相同的活性, 甚至其部分活性优于茶多酚^[55], 但目前的褐藻多酚保鲜剂还停留在研发阶段, 没有相关的保鲜剂产品。

5.3 其他多酚

除研究较为广泛的茶多酚以外, 还有一部分来源于果蔬以及药材中的多酚类化合物, 同样具有保鲜作用。李颖畅团队研究蓝莓叶多酚复合保鲜剂, 保鲜了鱼类及其制

品和虾类产品。研究表明蓝莓叶多酚与溶菌酶复配保鲜鲈鱼鱼片, 可有效的抑制菌落的生长、减缓脂质氧化可将其冷藏状态延长 7~8 d^[56]。蓝莓叶多酚与壳聚糖复配能有效抑制贮藏过程南美白对虾微生物的繁殖, 减缓脂肪氧化, 减慢肌肉中蛋白质和内源酶的降解, 延缓腐败变质, 使其货架期延长 3~4 d^[57]。蓝莓叶多酚-壳聚糖保鲜剂加入鱼糜制品增加了其硬度但没有改变鱼丸的凝胶网状结构, 各组分处理后的鱼丸白度也没有显著影响^[58]。蓝莓叶多酚还可与大蒜汁或姜汁混合使用, 对冷藏鱿鱼鱼丸以及鱿鱼丝制品都具有良好的保鲜作用, 且复合效果显著($P<0.05$)^[59]。婷婷等^[60]研究低温(2~4 °C)浸泡于不同浓度的杨梅多酚溶液的肉, 发现在鱼肉外形成了高浓度的保鲜膜, 且杨梅多酚还可作为金枪鱼的护色剂。葡多酚中含有较多的白藜芦醇, 有研究表明白藜芦醇-壳聚糖对鲑鱼鱼肉有保鲜效果, 在脂肪氧化、和降低甲醛产生方面白藜芦醇的保鲜效果表现优于壳聚糖^[61], 结果表明白藜芦醇不同的生物保鲜剂在保鲜中承担的职责略有不同, 不同的保鲜剂起到协同保鲜作用。

6 展 望

水产品因为其营养成分丰富越来越受到人们的青睐。如何保证其在原有品质基础上延长其货架期, 成为水产品保鲜的重点, 受到广泛关注。生物保鲜剂的安全性将水产品推向了发展的前线。而多酚类物质的强抗氧化活性和抑菌效果使多酚作为保鲜剂具有潜在的能力。目前, 多酚类化合物作为一种生物保鲜剂在水产品中的应用以茶多酚类物质为主, 研究的比较深入。其他多酚类物质仍未能得到应用, 就多酚类物质的共性而言, 其他来源的多酚同样有着不可估量的潜力。多酚类化合物也具有抗癌细胞^[62]、修复纤维细胞光老化^[63]、改善人体肠道微环境^[64]等生物活性, 因此在对水产品保鲜的同时, 微量的酚类化合物也可能对人体健康有着改善作用。但多酚应用于水产保鲜时也存在局限性: 其一, 多酚有着不可忽视的色泽, 在保鲜中对白度要求较高的水产品品质可能有一定的影响。因此, 多酚类物质作为保鲜剂, 更适合保存有颜色的水产品, 如鱼籽以及各种红肉鱼, 该类水产品脂肪含量较高, 相对应的保鲜效果也较好。或者将多酚与壳聚糖、溶菌酶、虾青素等复合使用, 不仅可有效解决多酚类物质颜色对水产品品质的影响, 而且可改善保鲜效果。其二, 多酚脂溶性较差。在复配保鲜剂时添加方式有待研究, 如在改良时可选择乳化法、分子修饰和溶剂法等。保鲜剂添加方式对保鲜效果有无影响有待进一步研究。以上问题的解决, 将有助于多酚类物质在水产品保鲜领域的应用, 使其应用范围更加广泛。

参考文献

- [1] 宋立江, 狄莹, 石碧. 植物多酚研究与利用的意义及发展趋势[J]. 化

- 学进展, 2000, 12(2): 161–170
- Song LJ, Geng Y, Shi B. Significance and development trend of research and utilization of plant polyphenols [J]. Prog Chem, 2000, 12(2): 161–170.
- [2] Rossi R, Pastorelli G, Cannata S, *et al.* Effect of long term dietary supplementation with plant extract on carcass characteristics meat quality and oxidative stability in pork [J]. Meat Sci, 2013, 95(3): 542–548.
- [3] 戴滢. 全国食品添加剂标准化技术委员会第十一届会议内容摘要[J]. 现代食品科技, 1991, (2): 9–11.
- Dai Y. Abstract of the eleventh session of the national technical committee on standardization of food additives [J]. Mod Food Sci Technol, 1991, (2): 9–11.
- [4] Bazinet RP, Sophie L. Polyunsaturated fatty acids and their metabolites in brain function and disease [J]. Nat Rev Neurosci, 2014, 15(12): 1–15.
- [5] 谢晶, 蓝蔚青. 水产品流通过程中保鲜技术研究进展[J]. 中国食品学报, 2017, 17(7): 1–8.
- Xei J, Lan WQ. Research progress on preservation technology in the circulation of aquatic products [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2017, 17(7): 1–8.
- [6] 王硕, 谢晶, 刘爱芳. 生物保鲜技术在海产品中的应用及展望[J]. 包装工程, 2017, (1): 137–142.
- Wang S, Xei J, Liu AF. Application of bio-preservation technology in marine products and the prospects [J]. Packaging Eng, 2017, (1): 137–142.
- [7] 石碧, 狄莹. 植物多酚 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- Shi B, Di Y. Plant polyphenols [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [8] Ignat I, Volf I, Popa VI. A critical review of methods for characterisation of polyphenolic compounds in fruits and vegetables [J]. Food Chem, 2011, 126(4): 1821–1835.
- [9] Samoticha J, Wojdyło A, Golis T. Phenolic composition, physicochemical properties and antioxidant activity of interspecific hybrids of grapes growing in Poland [J]. Food Chem, 2017, 215: 263–273.
- [10] Fu L, Xu BT, Xu XR, *et al.* Antioxidant capacities and total phenolic contents of 62 fruits [J]. Food Chem, 2011, 129(2): 345–350.
- [11] Sójka M, Guyot S, Kołodziejczyk K, *et al.* Composition and properties of purified phenolics preparations obtained from an extract of industrial blackcurrant (*Ribes nigrum* L.) pomace [J]. J Hort Sci Biotechnol, 2009, 84(6): 100–106.
- [12] 严小军, 周天成, 姜清香, 等. 褐藻多酚含量的季节变化[J]. 海洋科学, 1996, 20(5): 39–42.
- Yan XJ, Zhou TC, Lou QX, *et al.* Seasonal variation of polyphenol content in brown algae [J]. Marine Sci, 1996, 20(5): 39–42.
- [13] 王佩华, 赵大伟. 茶多酚在食品工业中的应用[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(33): 19075–19076, 19089.
- Wang PH, Zhao DW. Application of tea polyphenols in the food industry [J]. J Anhui Agri Sci. 2010, 38(33): 19075–19076, 19089.
- [14] 赵谋明, 董红竹, 林恋竹. 八种水果多酚的定量分析与抗氧化活性研究[J]. 现代食品科技, 2017, 33(10): 225–236.
- Zhao MM, Dong HZ, Lin LZ. Comparative study on the phenolic profiles of eight fruits and their antioxidant activities [J]. Mod Food Sci Technol, 2017, 33(10): 225–236.
- [15] 严小军. 中国常见褐藻的多酚含量测定[J]. 海洋科学集刊, 1996, (1): 61–65.
- Yan XJ. Determination of polyphenol content in common brown algae in China [J]. Marine Sci J, 1996, (1): 61–65.
- [16] 杨会成, 曾名勇, 刘尊英, 等. 超声波、微波复合提取海带多酚的工艺研究[J]. 食品与发酵工业, 2007, 33(11): 132–135.
- Yang HC, Zeng MY, Liu ZY, *et al.* Study on ultrasonic and microwave composite extraction of laminaria japonica areach polyphenols [J]. Food Ferment Ind, 2007, 33(11): 132–135.
- [17] 许亚如. 褐藻多酚的抗氧化活性研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2014.
- Xu YR. Studies on antioxidant activities of phlorotannins [D]. Ningbo: Ningbo University, 2014.
- [18] 孙健, 蒋跃明, 彭宏祥, 等. 影响荔枝果皮褐变底物(–)表儿茶素稳定性的因素[J]. 果树学报, 2010, 27(1): 45–49.
- Sun J, Jiang YM, Peng HX, *et al.* Influencing factors on property of browning substrate (–)epicatechin from litchi pericarp tissues [J]. J Fruit Sci, 2010, 27(1): 45–49.
- [19] Kim SY, Jeong SM, Park WP, *et al.* Effect of heating conditions of grape seeds on the antioxidant activity of grape seed extracts [J]. Food Chem, 2006, 97(3): 472–479.
- [20] Rajan VK, Muraleedharan K. A computational investigation on the structure, global parameters and antioxidant capacity of a polyphenol, Gallic acid [J]. Food Chem, 2017, 220: 93–99.
- [21] 严小军, 姜清香, 吴真真, 等. 藻多酚连三羟基的测定[J]. 海洋科学, 2000, 24(12): 3–5.
- Yan XJ, Lou QX, Wu ZZ, *et al.* Determination of vicinal phenolic hydroxyl in brown algal polyphenol [J]. Marine Sci, 2000, 24(12): 3–5.
- [22] 周北斗, 曾丽兰, 胡栋宝. 天然酚类化合物根皮素与根皮苷的抗氧化活性的 DFT 研究[J]. 分子科学学报, 2018, 34(6): 517–520.
- Zhou BD, Zeng LL, Hu DB. Study on antioxidant activity of natural phenolic compounds about phloretin and phlorizin by DFT method [J]. J Molecular Sci, 2018, 34(6): 517–520.
- [23] Wang T, Rósa J, Guérin ó. Total phenolic compounds, radical scavenging and metal chelation of extracts from Icelandic seaweeds [J]. Food Chem, 2009, 116(1): 240–248.
- [24] Federico F, Graciliana L, Angel GI, *et al.* Phlorotannin extracts from fucals characterized by HPLC–DAD–ESI–MSn: Approaches to hyaluronidase inhibitory capacity and antioxidant properties [J]. Marine Drugs, 2012, 10(12): 2766–2781.
- [25] 杨小青, 卢虹玉, 李延平, 等. 羊栖菜不同分子量褐藻多酚抗氧化活性研究[J]. 海洋科学, 2013, 37(4): 47–51.
- Yang XQ, Lu HY, Li YP, *et al.* Antioxidant activity of polyphenols from different molecular weights of sargassum [J]. Marine Sci, 2013, 37(4): 47–51.
- [26] 杨玉莹, 王倩, 郝豪奇, 等. 海带多酚的提取分离纯化及其体外活性[J]. 生物加工过程, 2018, 16(6): 56–60.
- Yang YY, Wang Q, Hao HQ, *et al.* Separation and purification of laminaria japonica polyphenols and its biological activity *in vitro* [J]. Chin J Bioprocess Eng, 2018, 16(6): 56–60.
- [27] Perron NR, Hodges JN, Jenkins M, *et al.* Predicting how polyphenol antioxidants prevent DNA damage by binding to iron [J]. Inorg Chem, 2008, 47(14): 6153–6161.
- [28] 郭静婕, 杨昌鹏, 陈智理. 杨桃多酚对猪肉的抗氧化保鲜作用[J]. 湖北农业科学, 2015, (9): 2189–2192.
- Guo JJ, Yang CP, Chen ZL. Antioxidant and preservative effects of carambola polyphenol on pork [J]. Hubei Agric Sci, 2015, (9): 2189–2192.

- [29] 张添菊, 王帆, 李春阳, 等. 蓝莓叶多酚组成及其抗食源性致病菌活性分析[J]. 食品科学, 2016, (23): 103–107.
Zhang TJ, Wang F, Li CY, *et al.* Quantitative analysis and antimicrobial activity of polyphenols from blueberry leaves [J]. Food Sci, 2016, (23): 103–107.
- [30] 林超, 于曙光, 郭道森, 等. 鼠尾藻中褐藻多酚化合物的抑菌活性研究[J]. 海洋科学, 2006, 30(3): 94–97.
Lin C, Yu SG, Guo DS, *et al.* Antibacterial activity of brown algae polyphenols from *Sargassum* [J]. Marine Sci, 2006, 30(3): 94–97.
- [31] 付慧, 杨萍, 汪秋宽. 茶多酚的制备及其抑菌活性的研究[J]. 食品科技, 2012, (6): 273–276.
Fu H, Yang P, Wang QK. Preparation and antimicrobial activities of tea polyphenols [J]. Food Sci Technol, 2012, (6): 273–276.
- [32] Taguri T, Tanaka T, Kouno I. Antibacterial spectrum of plant polyphenols and extracts depending upon hydroxyphenyl structure [J]. Biol Pharm Bull, 2006, 29(11): 2226–2235.
- [33] 孙爱东, 孙建霞, 白卫滨, 等. 苹果多酚抑菌作用的研究[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(4): 150–152.
Sun AD, Sun JX, Bai WB, *et al.* Anti microbial functions of apple polyphenols [J]. J Beijing Forestry Univ, 2008, 30(4): 150–152.
- [34] 戚向阳, 陈福生, 陈维军, 等. 苹果多酚抑菌作用的研究[J]. 食品科学, 2003, 24(5): 33–36.
Qi XY, Chen FS, Chen WJ, *et al.* Study on antibacterial effect of apple polyphenols [J]. Food Sci, 2003, 24(5): 33–36.
- [35] 董璐, 代增英, 韩晴, 等. 茶多酚对大肠杆菌抑菌机理的研究[J]. 生物学杂志, 2015, (1): 72–75.
Dong L, Dai ZY, Han Q, *et al.* Research on the antibacterial mechanism of tea polyphenols on *Escherichia coli* [J]. Biol J, 2015, (1): 72–75.
- [36] 蓝蔚青, 车旭, 谢晶, 等. 复合生物保鲜剂对荧光假单胞菌的抑菌活性及作用机理[J]. 中国食品学报, 2016, 16(8): 159–165.
Lan WQ, Che X, Xie J, *et al.* Antibacterial activity and mechanism of compound biological preservative against *Pseudomonas fluorescens* [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2016, 16(8): 159–165.
- [37] 仪淑敏. 茶多酚对鱼糜制品的冷藏保鲜作用及抑菌机理[D]. 浙江工商大学, 2011.
Yi SM. Effect of tea polyphenols on quality of chilling fish surimi products and antibacterial mechanisms [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [38] Abdullah AM, Sorrowar MG, Hasan MZ, *et al.* Effect of low temperature, radiation and their combination treatments on microorganisms associated with fresh water mola fish, amblypharyngodonmola (hamilton–buchanan 1822) [J]. Asian J Biotechnol, 2011, 3(5): 507–518.
- [39] 刘楠, 李婷婷, 仪淑敏, 等. GC–MS 结合电子鼻分析茶多酚对冷藏草鱼片挥发性成分的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(22): 237–243.
Liu N, Li TT, Yi SM, *et al.* Effects of tea polyphenols on volatile compounds of grass carp fillets during refrigerated storage as analyzed by GC–MS and electronic nose [J]. Food Sci, 2016, 37(22): 237–243.
- [40] 鞠健, 乔宇, 李冬生, 等. 茶多酚对冷藏鲈鱼鲜度变化及肌原纤维蛋白氧化的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(2): 290–294.
Ju J, Qiao Y, Li DS, *et al.* Effect of tea polyphenols on the freshness and the oxidation of myofibrillar protein of weever during cold storage [J]. Sci Technol Food Ind, 2018, 39(2): 290–294.
- [41] 鞠健, 程薇, 乔宇, 等. 茶多酚结合包装对鲈鱼冷链物流过程中品质的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(23): 333–337.
Ju J, Cheng W, Qiao Y *et al.* Effect of tea polyphenols combining with packaging on quality of weever in cold chain logistics [J]. Sci Technol Food Ind, 2016, 37(23): 333–337.
- [42] 刘焱. 茶多酚对草鱼肉保鲜作用及机理研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2009.
Liu Y. The studies of fresh-keeping effect and mechanism of tea polyphenols on grass carp [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2009.
- [43] 汪金林. 茶多酚对冷藏养殖大黄鱼品质影响的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2013.
Wang JL. Effect of tea polyphenol on quality change of cultured large yellow croaker during refrigerated storage [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2013.
- [44] 邵颖, 姚洁玉, 江杨阳, 等. 抗冻剂对鱼肉蛋白质冷冻变性的保护作用[J]. 食品科学, 2018, 39(7): 291–297.
Shao Y, Yao JY, Jiang YY, *et al.* Protective effect of cryoprotectants on protein denaturation in frozen fish meat [J]. Food Sci, 2018, 39(7): 291–297.
- [45] 杨少玲, 于刚, 戚勃, 等. 3 种保鲜剂对金枪鱼冻藏品质的影响[J]. 广东农业科学, 2015, 42(6): 91–96.
Yang SL, Yu G, Qi B, *et al.* Effects of three preservation agents on quality of tuna during frozen storage [J]. Guangdong Agric Sci, 2015, 42(6): 91–96.
- [46] 熊青, 谢晶, 钱韵芳, 等. 茶多酚复合保鲜剂对冷藏南美白对虾品质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(2): 287–291.
Xiong Q, Xie J, Qian YF, *et al.* Effect of tea polyphenol complex preservative on the quality of penaeus vannamei under cold storage [J]. Food Sci, 2014, 35(2): 287–291.
- [47] 于林, 陈舜胜, 王娟娟, 等. 茶多酚改性胶原蛋白–壳聚糖复合膜对冷藏斜带石斑鱼的保鲜效果[J]. 食品科学, 2017, (3): 238–244.
Yu L, Chen SS, Wang JJ, *et al.* Preservation effect of collagen–chitosan blend film modified by tea polyphenols on grouper (*epinephelus coioides*) fillets stored at 4 °C [J]. Food Sci, 2017, (3): 238–244.
- [48] 刘开华, 邢淑婕. 虾青素联合茶多酚对南湾鲮鱼丸保鲜效果的研究[J]. 食品科技, 2013, (1): 164–167.
Liu KH, Xing SJ. Effects on fresh preservation of Nan–wan sand gurnard fish ball for astaxanthin and polyphenols [J]. Food Sci Technol, 2013, (1): 164–167.
- [49] 王当丰, 李婷婷, 国竞文, 等. 茶多酚–溶菌酶复合保鲜剂对白鲢鱼丸保鲜效果[J]. 食品科学, 2017, (7): 232–237.
Wang DF, Li TT, Guo JW, *et al.* Effect of composite preservatives consisting of tea polyphenols and lysozyme on the quality of silver carp meatballs during storage [J]. Food Sci, 2017, (7): 232–237.
- [50] 易大军. 一种安全型水产品保鲜剂: 中国, CN201510572303.5[P]. 2017–03–22.
Yi DJ. A safe aquatic product preservative: China, CN201510572303.5 [P]. 2017–03–22.
- [51] 黎建波. 一种水产品复合保鲜剂配方: 中国, CN201610663551.5[P]. 2017–01–04.
Li JP. Formula of aquatic product composite preservative: China, CN201610663551.5 [P]. 2017–01–04.
- [52] Wang T, Rósa J, Kristinsson HG, *et al.* Inhibition of haemoglobin–mediated lipid oxidation in washed cod muscle and cod protein isolates by

- Fucusvesiculosus extract and fractions [J]. Food Chem, 2010, 123(2): 321–330.
- [53] 王亮, 曾名湧, 董士远, 等. 海带多酚制备及其对南美白对虾保鲜效果的研究[J]. 食品工业科技, 2009, (10): 187–191.
- Wang L, Zeng MY, Dong SY, *et al.* Study on the preparation of kelp polyphenols and the effect of kelp polyphenols on the fresh-keeping of penaeus vannamei [J]. Sci Technol Food Ind, 2009, (10): 187–191.
- [54] 曾惠. 海藻多酚 QSI 对大菱鲆腐败变质调控的初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- Zeng H. A preliminary research on regulation of the spoilage of Scophthalmus maximus by seaweed polyphenols quorum sensing inhibitor (QSI) [D]. Qingdao: Ocean U university of China, 2012.
- [55] 史建鑫, 昆布多酚提取、抗氧化与抑菌活性的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2017.
- Shi JX. Kelp polyphenols extraction, oxidation resistance and antibacterial activity of study [D]. Nanchang: Nanchang University, 2017.
- [56] 林智铭, 王媛媛, 赵珺泽, 等. 蓝莓叶多酚和溶菌酶对鲈鱼鱼片的保鲜作用[J]. 农产品加工, 2018, 467(21): 36–39, 44.
- Lin ZM, Wang YY, Zhao JZ, *et al.* Effect of blueberry leaf polyphenols and lysozyme on storage quality of perch fillets [J]. Farm Prod Process, 2018, 467(21): 36–39, 44.
- [57] 杨钟燕, 李颖畅, 王玉华, 等. 蓝莓叶多酚复合保鲜剂对冷藏南美白对虾品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(2): 197–202.
- Yang ZY, Li YC, Wang YH, *et al.* Effect of blueberry leaf polyphenol composite preservative on the quality of penaeus vannamei [J]. Food Ferment Ind, 2016, 42(2): 197–202.
- [58] 李颖畅, 王亚丽, 励建荣. 蓝莓叶多酚和壳聚糖对冷藏秘鲁鲈鱼鱼丸品质的影响[J]. 中国食品学报, 2016, 16(5): 103–108.
- Li YC, Wang YL, Li JR. Effects of Blueberry Leaf Polyphenols and Chitosan on the Quality of Frozen Peruvian Mackerel Fish Balls [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2016, 16(5): 103–108.
- [59] 李颖畅, 杨钟燕, 仪淑敏, 等. 蓝莓叶多酚和大蒜提取物对冷藏鱿鱼鱼丸品质的影响[J]. 食品工业科技, 2017, (10): 289–294.
- Li YC, Yang ZY, Yi SM, *et al.* Effect of blueberry leaf polyphenols and garlic extracts on quality of squid balls during refrigerated storage [J]. Sci Technol Food Ind, 2017, (10): 289–294.
- [60] 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, (9): 232–238.
- Bu TT, Jin Y, Xu DL, *et al.* Effect of bayberry polyphenols on the quality of tuna (thunnus albacores) meat used for raw consumption during refrigerated storage [J]. Food Sci, 2017, (9): 232–238.
- [61] 宋素珍, 李颖畅, 仪淑敏, 等. 白藜芦醇和壳聚糖复合生物保鲜剂对冷藏鱿鱼品质的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(5): 291–295.
- Song SZ, Li YC, Yi SM, *et al.* Effect of chitosan coating enriched with resveratrol on quality changes of squid during refrigerated storage [J]. Sci Technol Food Ind, 2018, 39(5): 291–295.
- [62] Rezaei PF, Fouladdel S, Hassani S, *et al.* Induction of apoptosis and cell cycle arrest by pericarp polyphenol-rich extract of Baneh in human colon carcinoma HT29 cells [J]. Food Chem Toxicol, 2012, 50(3–4): 1054–1059.
- [63] 吴永祥, 吴丽萍, 王卫东, 等. 桑白皮多酚的抗氧化和对 UV 辐射致成纤维细胞光老化的修复作用[J]. 食品与机械, 2018, 34(2): 15–18.
- Wu YX, Wu LP, Wang WD, *et al.* Antioxidant and UV-induced fibroblasts photoaging repair effects of polyphenol from Cortex Mori [J]. Food Mach, 2018, 34(2): 15–18.
- [64] 吴根梁, 侯爱香, 李珂, 等. 陈年茯砖茶多酚类对老年人肠道菌群的影响研究[J]. 茶叶科学, 2018, 38(3): 102–113.
- Wu GL, Hou AX, Li K, *et al.* Effects of polyphenols of old fu brick tea on the elderly intestinal flora [J]. J Tea Sci, 2018, 38(3): 102–113.

(责任编辑: 王 欣)

作者简介

王 帅, 硕士, 主要研究方向为海洋生物资源利用。

E-mail: 18631460986@163.com

任丹丹, 副教授, 主要研究方向为海洋生物资源利用。

E-mail: rdd80@163.com