

植物多酚保鲜机制及其在鱼类中的应用进展

孙美君¹, 崔姗¹, 杨佳华¹, 陶浩¹, 亢春雨^{1*}, 赵春青^{2*}

(1. 河北农业大学食品科技学院, 河北保定 071001) (2. 保定开放大学继续教育处, 河北保定 071001)

摘要: 脂质、蛋白质氧化和微生物污染是造成鱼产品品质劣变的主要因素。植物多酚, 作为一类广泛存在于自然界的次级代谢产物, 因其良好的抗氧化、抑菌性能, 同时具有来源广泛、安全环保等优点, 成为极具潜力的生物保鲜剂之一, 受到食品保鲜领域的广泛关注。然而植物多酚易被氧化, 稳定性较差, 单一使用植物多酚已不能满足更高要求的保鲜需求。因此, 植物多酚结合其他保鲜剂/保鲜技术的协同保鲜技术应运而生。该文概述了当前常见的鱼类保鲜技术及其各优缺点, 重点阐述了植物多酚的保鲜机制及其在鱼类保鲜领域的应用现状, 探索植物多酚在鱼类保鲜中的发展前景。本文旨在为研究植物多酚在鱼类保鲜领域的应用提供理论参考。

关键词: 植物多酚; 保鲜机制; 鱼类; 研究进展

文章编号: 1673-9078(2025)11-378-385

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.11.1041

Progress in the Preservation Mechanism of Plant Polyphenols and Their Application in Fish

SUN Meijun¹, CUI Shan¹, YANG Jiahua¹, TAO Hao¹, KANG Chunyu^{1*}, ZHAO Chunqing^{2*}

(1.College of Food Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China)

(2.Department of Continuing Education, Baoding Open University, Baoding 071001, China)

Abstract: Lipid and protein oxidation, along with microbial contamination, are the main factors leading to the quality degradation of fish products. Plant polyphenols, as a class of secondary metabolites widely found in nature, have gained significant attention as highly promising biological preservative in the field of food preservation, due to their excellent antioxidant and antibacterial properties, as well as advantages such as broad availability, safety, and environmental friendliness,. However, plant polyphenols are prone to oxidation and have poor stability, making their single use insufficient to meet higher preservation demands. Therefore, synergistic preservation technologies that combinesg plant polyphenols with other preservatives or conservation techniques, have emerged. The paper firstly outlines the current common fish preservation methods, along with their pros and cons, with focuses on the preservation mechanisms of plant polyphenols and current status of their applications in fish preservation. In this paper, the development prospects of plant polyphenols in fish preservation are also explored. This review aims to offer theoretical references for studies on the applications of plant polyphenolse in fish preservation.

Key words: plant polyphenols; fresh-keeping mechanism; fish; application progress

引文格式:

孙美君,崔姗,杨佳华,等.植物多酚保鲜机制及其在鱼类中的应用进展[J].现代食品科技,2025,41(11):378-385.

SUN Meijun, CUI Shan, YANG Jiahua, et al. Progress in the preservation mechanism of plant polyphenols and their application in fish [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(11): 378-385.

收稿日期: 2024-07-19; 修回日期: 2024-09-01; 接受日期: 2024-09-11

基金项目: 河北省重点研发计划项目(22327102D); 河北省2020年度引进留学人员资助项目(C20200504)

作者简介: 孙美君(2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品安全; E-mail: 1359162988@qq.com

通讯作者: 亢春雨(1972-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 淡水产品加工、食品安全, E-mail: kangcy1406@163.com; 共同通讯作者: 赵

春青(1975-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 畜产品加工、食品安全, E-mail: zhaoc-q@126.com

据联合国粮农组织发布的报告^[1]，2022 年全球渔业和水产养殖业产量（不包括藻类）创 1.854 亿 t，人均年消费量已达 20.7 kg。同时水产品是蛋白质、脂肪、矿物质和维生素的良好来源，在保障 21 世纪粮食安全和营养方面正发挥着越来越重要的作用。全球养殖水产品与捕捞水产品以鱼类居多，且以其肉质鲜嫩、味道鲜美、营养价值较高等优点而受许多消费者欢迎^[2]。同时鱼类凭借易获取、价格低廉以及接受度高等优势促使鱼类加工业迅猛发展，成为经济发展的新热点。但我国渔业起步较晚，大部分仍处于初级加工阶段，鱼类深加工程度与发达国家间存在明显差距^[3]，当前的加工能力远无法满足渔业生产日益增长的需求。

《2023 年中国食物与营养发展报告》^[4]统计，2022 年我国食物总体损耗量达 4.6 亿 t，损耗率达 22.7%，占比较大。鱼类在捕捞后由于脂类化合物的氧化、微生物的代谢活动和内源酶活性的自溶降解使其迅速腐败变质，从而引发了鱼肉品质、质地、风味等劣变^[5-9]，食用价值和安全性大大降低，严重影响其后续加工和商业价值。因此，对捕获后的鱼类采取及时、有效的

保鲜措施，以延长其货架期、保障食用价值，已经成为国内外研究热点之一。常见鱼类保鲜技术作用形式及其主要优缺点如表 1 所示。其中化学保鲜剂因其成本低、见效快、操作简单等优点而得到普遍应用，然而化学添加剂的毒性和残留等问题引发了人们对其安全性的担忧。天然、安全、绿色、易降解的生物保鲜剂逐渐引起人们的关注，开始被广泛用于水产品保鲜领域^[10-12]。

植物多酚，作为一类具有多元酚结构的次生代谢物^[13]，广泛存在于植物的表皮、根、叶、果实等部位。因其独特的化学结构和生物活性，在食品保鲜领域展现出了巨大的潜力。据报道，植物多酚的抗氧化、抗菌等特性对抑制不同肉类中脂质和 / 或蛋白质氧化具有积极影响，能有效抑制腐败变质^[14]。特别是在鱼类保鲜方面，为延长鱼类产品的货架期、保持其新鲜度和品质提供了新思路。

本文主要概述了植物多酚的保鲜机理，并对植物多酚在鱼类保鲜上的研究现状、前景进行综述，旨在为植物多酚在鱼类保鲜实践中的应用提供理论依据与指导。

表 1 常见保鲜技术及优缺点

Table 1 Frequently-used preservation technologies and their primary advantages and disadvantages

保鲜技术	作用方式	优点	缺点	参考文献
低温保鲜技术	冷藏保鲜	快速降温并在 0~4 ℃ 下保藏	操作简便、成本低	货架期较短
	冰藏保鲜	降低温度至接近冰点保藏	对细胞破坏小，解冻汁液流失少	浸泡时间长，鱼肉吸水膨胀，加速品质劣变
	微冻保鲜	降低温度至冰点以下 1~2 ℃ 保藏		操作技术要求高
	冻藏保鲜	降低温度至 -18 ℃ 以下并在 -18 ℃ 保藏	抑制微生物生长繁殖、酶活性	冰晶破坏细胞结构、极易发生反复冻融现象
物理保鲜技术	气调保鲜技术	人为改变环境气体成分比例、湿度、温度及气压等条件	防止虫害滋生以及外界环境破坏	仪器设备成本高
	超高压保鲜技术	在液体介质中加压	杀菌效率高、无污染	原有质地、外形变化
	辐照杀菌技术	利用辐照杀灭微生物	杀菌均匀彻底且迅速	对内部营养物质有一定影响
	脉冲电场杀菌技术	强电场所引起微生物细胞穿孔效应	时间短、升温小、绿色安全	电极容易被腐蚀；设备复杂
	超声波技术	空化作用破坏细胞膜、损伤细胞内大分子	速度快	杀菌能力一般；适用范围小、处理量小
化学保鲜技术	涂膜保鲜技术	阻隔外界微生物、水、氧气等组分	安全性高、专一性强	膜厚度难以控制、不易操作、增塑剂等有害物质会对人体造成危害
	烟熏	熏烟中的酚类防止脂肪氧化；酚、醛、酸抑制微生物生长	独特风味、操作简单、成本低	原有质地、外形、营养成分变化
	腌渍	加食盐、糖等，提高渗透压，降低水分活度		
生物保鲜技术	食品添加剂	使用具有抑菌、抑制酶活性等特性的化学试剂	简便、经济、高效	食品添加剂安全性、使用剂量等问题
	生物保鲜剂	利用生物代谢成分，抑制微生物生长繁殖、酶活性和产物化学反应	安全可降解、无二次污染	技术性强、成本高

1 植物多酚的分类及保鲜机理

1.1 植物多酚分类

化学结构上将具有苯环和多个酚羟基的化合物统称为多酚。植物多酚结构复杂,可以从多个角度进行分类。根据化学结构进行分类,将其分为黄酮类、酚酸类、单宁类、木脂素、芪类等^[30],如图1所示。当前,科学界对多酚类化合物的研究焦点主要集中在黄酮类和酚酸类两大类上。黄酮类化合物是一类以C6-C3-C6为基本骨架结构的化合物,它们在植物界中广泛存在,且多数情况下,黄酮类化合物会与糖类结合,形成苷类(也称为糖苷)或碳糖基化的形式,从而以更为复杂的化学结构在植物体内发挥作用^[31]。依据杂环和芳香环相连部位及杂环不饱和程度,将黄酮进一步细分为黄酮、黄酮醇、二氢黄酮、二氢异黄酮、二氢黄酮醇等;酚酸化合物是指同时具有酚环以及一个以上的有机羧酸基团的一类化合物,也是合成许多其他酚类物质的前体物质^[30]。其中羟基苯甲酸型(C6-C1)和羟基肉桂酸(C6-C3)是酚酸类化合物中的两大主要类别,主要以结合态形式存在,通过酯键等结构与细胞壁组分结合,或与糖类、有机酸等反应生成酚酸衍生物^[32,33]。还可根据植物来源对多酚进行分类,如洋葱多酚、绿豆多酚、苹果多酚等。

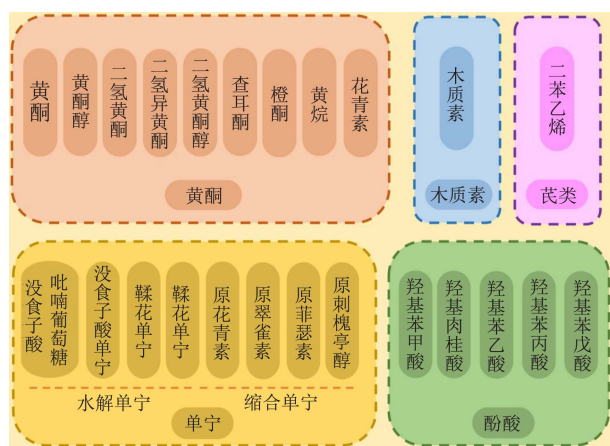


图1 植物多酚类别

Fig.1 Classification of plant polyphenols

1.2 植物多酚保鲜机理

植物多酚具有抗氧化和广谱抗菌活性,可抑制脂质、蛋白质氧化和微生物生长繁殖,延缓食品腐败变质、延长货架期^[34,35]。目前已经有大量研究证实,植物多酚可用作食品防腐剂,已经单独使用或与其他保鲜技术联合使用应用于食品工业^[36,37]。

1.2.1 抗氧化机理

由于植物多酚的来源广、种类多、结构复杂,不同植物多酚的抗氧化机理也有所不同。基于目前的研究成果,植物多酚抗氧化机制可以概括为三个方面:图2是对目前已知植物多酚的主要抗氧化机制的总结。

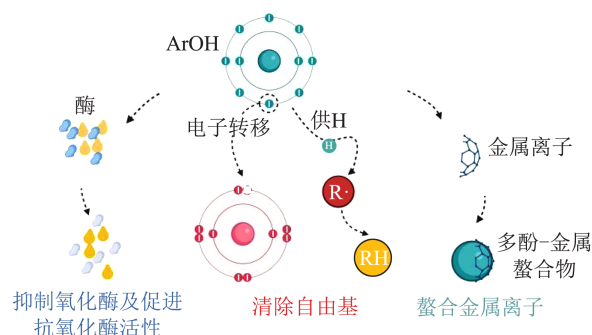


图2 植物多酚主要抗氧化机制

Fig.2 Primary antioxidant mechanisms of plant polyphenols

1.2.1.1 螯合金属离子

鱼体内的 Fe^{2+} 、 Cu^{+} 等低氧化态金属离子能够催化超氧化物阴离子自由基(O_2^-)歧化为过氧化氢(H_2O_2),进而转变为活性更高的羟基自由基($\text{HO}\cdot$)^[38,39]。植物多酚可以通过螯合金属离子形成稳定配合物,抑制催化过程中 $\text{HO}\cdot$ 的生成从而抑制脂质和蛋白质氧化^[40,41],延长货架期。殷凯欣等^[42]研究发现,在1.4~3.5 mg/mL质量浓度范围内田菁纳豆多酚对 Fe^{3+} 的还原作用明显优于维生素C(Vitamin C);Luo等^[43]研究发现,槲皮素通过螯合 Ca^{2+} 、 Zn^{2+} 等金属离子形成配合物来清除 O_2^- ;Yang等^[44]探究铁蛋白、离子铁和绿原酸之间的相互作用,研究发现绿原酸易与 Fe^{2+} 螯合形成配合物,抑制 $\text{HO}\cdot$ 生成并保护细胞免受氧化损伤。

1.2.1.2 清除自由基

植物多酚清除自由基,主要有两种途径^[38]:一是H原子转移。植物多酚苯环上羟基基团的氢原子转移至自由基,形成稳定的多酚自由基,中断自由基链式反应,阻止脂肪氧化。朱恒杏等^[45]研究发现,黑枸杞花青素(BWA)、表没食子儿茶素没食子酸酯(EGCG)都具有较强的 Fe^{3+} 还原能力和自由基清除能力,体外抗氧化活性可能通过H原子转移;二是电子转移。植物多酚将电子转移至R形成自由基阳离子 ArOH^+ ,中断自由基链式反应,阻止脂肪氧化。Zhang等^[46]研究发现红杨梅叶片中的表没食子儿茶素没食子酸酯含有大量的酚羟基,可以为自由基提供电子,从而中断自由基反应,延缓脂质氧化;王凯^[47]在研究中也发现了类似的结果,抗氧化剂通过转移电子至游离

的脂质过氧化自由基，形成正离子自由基，破坏了自由基链式反应。

1.2.1.3 抑制氧化酶及促进抗氧化酶活性

植物多酚的邻位酚羟基被氧化成醌类结构，消耗环境中的氧气，减少了蛋白质、脂质与空气中氧气的接触，抑制氧化^[48]。Li 等^[49]研究发现，茶多酚能抑制多酚氧化酶的活性以及抑制醌的形成。植物多酚可以通过疏水相互作用抑制酶的活性、抑制氢键与氧化酶结合的能力^[50]；Daniel 等^[51]研究发现，槲皮素能有效提高谷胱甘肽过氧化物酶（GSH-Px）和超氧化物歧化酶（SOD）活性，削弱氧化应激损伤；禹华娟等^[52]研究证实，莲藕原花青素可以通过作为氢供体抑制脂质过氧自由基（ROO[•]）的作用，抑制脂氧合酶活性和减缓脂质的酶促氧化，与氧化链反应竞争并延缓自氧化；Nirmal 等^[53]研究发现，0.5% 银合欢籽提取物可抑制多酚氧化酶活性和黑色素沉积，有效延缓黑变病的形成。植物多酚还可以通过调控基因表达的方式增强抗氧化酶活性。例如，张佳婵等^[54]将秀丽隐杆线虫浸泡在不同浓度的沙棘粕醇提取物中，以探究沙棘粕醇提取物的抗氧化机制，结果表明，沙棘粕醇提取物可以通过增强抗氧化酶活性和基因表达，来达到抑制秀丽隐杆线虫衰老的效果。

1.2.2 抗菌机理

植物多酚，一类来源广泛、种类繁多且结构复杂的化合物，近年来因其潜在的抑菌作用而备受科学界的关注。然而，尽管其抑菌效果引人注目，但针对不

同菌株的抑菌机制尚不明确。基于已报道的研究成果，将植物多酚的抑菌机制概括为以下几个方面：图 3 是对目前已知植物多酚的主要抑菌机制的总结。

1.2.2.1 改变微生物细胞结构

植物多酚通过特异性作用于微生物细胞膜的磷脂双分子层中的疏水性羟基，能够显著改变细胞膜的结构与功能，进而引发细胞内物质外泄、质子动力失衡及电子流紊乱，干扰细胞代谢过程，最终导致微生物细胞的凋亡^[55]。

Guo 等^[56]通过 SEM 图形观察到经橄榄油提取物处理后的金黄色葡萄球菌、伤寒沙门氏菌细胞形态均发生变化并显示出现细胞质渗漏现象；Nie 等^[57]从分子动力学模拟阐述了没食子酸酯部分对绿茶多酚与脂质膜相互作用的影响，研究发现儿茶素的抗菌机制是没食子酸部分与脂质双层的亲水区结合以及间苯二酚环与疏水区相互作用，限制了磷脂分子的运动；Cheftel 等^[58]研究发现花青素破坏了大肠杆菌的细胞壁、细胞膜结构，造成细胞内酶和蛋白质等内容物渗漏、溢出，最终使细胞发生不可逆变化，致使细胞死亡。同时细胞结构的改变影响了细菌细胞的代谢，抑制细菌生长繁殖，最终导致细菌死亡。

植物多酚能够与微生物细胞膜作用，使膜电位变化，细胞膜去极化，致使微生物死亡^[59]。焦超芹^[60]研究发现，甜菜根提取物处理显著提升了蜡样芽孢杆菌、单增李斯特菌、沙门氏菌和阪崎克罗诺杆菌这四种食源性致病菌的相对荧光值，并观察到这些细菌均发生了去极化现象。

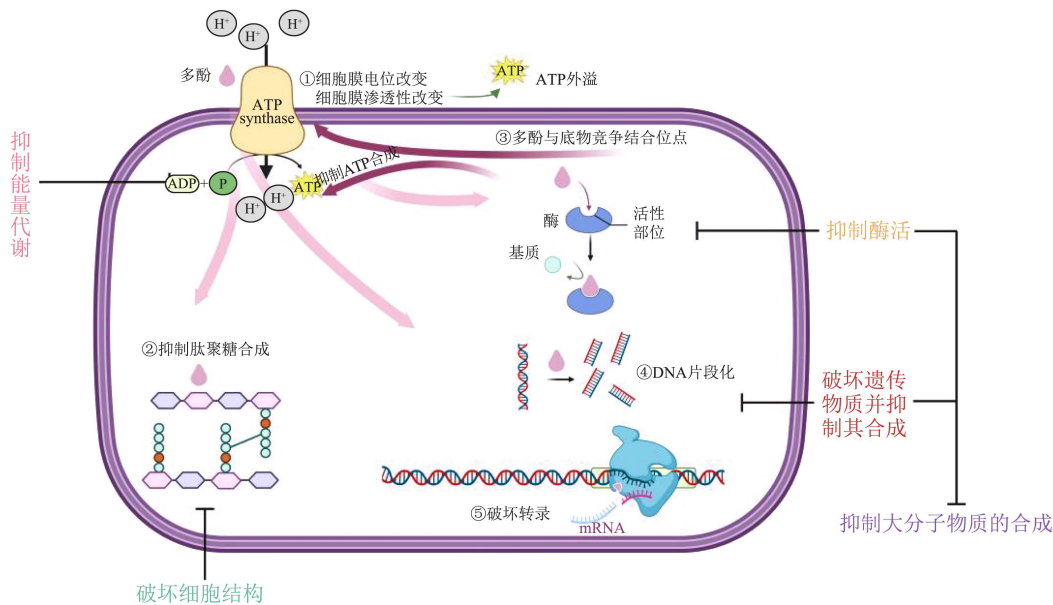


图 3 植物多酚主要抑菌机制

Fig.3 Primary bacteriostatic mechanisms of plant polyphenols

1.2.2.2 抑制能量代谢

ATP 是参与微生物细胞能量代谢的重要物质^[61]。细胞膜损伤和离子泄漏都会影响与细胞膜相关的能量转换系统。Wang 等^[62]研究证实, 栗壳多酚通过抑制生物膜中 $\text{Na}^+ \text{K}^+ \text{-ATPase}$ 和 $\text{Ca}^{2+} \text{Mg}^{2+} \text{-ATPase}$ 活性, 破坏胞内外离子平衡, 导致 ATP 能量供应中断; 仪淑敏^[63]探究茶多酚对铜绿假单胞菌的抑菌作用及机制, 结果显示, 经茶多酚处理的铜绿假单胞菌中乙酰-CoA 的表达量明显降低, 间接地干扰了三羧酸循环; 在另一项研究中, 通过探究不同植物多酚的体外抗菌活性, 证实了植物多酚能够抑制 ATP 合成酶活性, 进而抑制 ATP 合成, 破坏细胞正常的能量供应^[64]。

1.2.2.3 抑制生物大分子合成

植物多酚可以通过阻止微生物生命活动所需的生物大分子(如蛋白质、DNA、RNA)的合成来延缓微生物的生长繁殖, 从而发挥抗菌作用。

抑制蛋白质合成: 大量研究表明, 植物多酚可通过与细胞膜蛋白结合抑制其正常表达、抑制细胞蛋白酶的活性, 抑制蛋白质合成, 从而抑制微生物生长繁殖^[65]。Chen 等^[66]研究了甜菜糖蜜多酚对食源性致病菌的抗菌机制, 结果显示甜菜糖蜜多酚损伤了金黄色葡萄球菌、单增生李斯特菌、大肠杆菌和沙门氏菌四种食源性病原体细胞蛋白。

绝大部分的酶是蛋白质, 它们在维持和促进微生物生命特征和生理新陈代谢中发挥着重要作用。多酚可以通过抑制酶的活性来起到保鲜的效果。Cui 等^[67]探究牛至精油的抑菌机制, 研究发现牛至精油通过影响柠檬酸循环中关键酶活来抑制金黄色葡萄球菌生长繁殖; 百里香酚可通过抑制三羧酸循环中的关键酶琥珀酸脱氢酶活性来抑制荧光假单胞菌生长繁殖^[68]; 此外, 有研究者证实了植物多酚对大肠杆菌中的 ATP 合成酶活性有抑制作用, 并对抑制机制进行了探索^[69,70]。

损伤遗传物质及抑制其合成: DNA 与 RNA 作为微生物维持生命活动、调节生物遗传的物质基础, 其重要性显著。大量研究证实, 植物多酚能作用于微生物细胞中的 DNA 和 RNA 等生物大分子物质, 干扰微生物的遗传表达及增殖过程^[8]。Upadhyay 等^[71]研究发现香芹酚和百里香酚能够增强单增李斯特菌攻击的大蜡螟幼虫中抗菌肽基因的表达; 仪淑敏^[63]研究发现, 茶多酚处理使铜绿假单胞菌中单链结合蛋白(SSDBP)含量显著降低, 显著抑制了铜绿假单胞菌体 DNA 复制; 焦超芹^[60]研究发现, 甜菜根提取物可使细菌 DNA 片段化, 抑制细胞遗传物质的表达; Asha 等^[72]研究发现, 光亮甘草提取物对幽门螺杆菌的 DNA

旋转酶和 DHFR 具有很强的抑制作用, 可抑制细菌核酸合成; 田琦^[73]也报道了类似结果, 通过 DNA 绑定实验证实茶多酚能抑制空弯曲杆菌的 DNA 旋转酶活性。

2 植物多酚在鱼类保鲜领域的应用

植物多酚因其良好的抑菌、抗氧化能力, 同时具有来源广泛、安全环保等优点, 近年来备受关注。然而植物多酚易被氧化, 稳定性较差, 单一使用植物多酚已不能满足更高要求的保鲜需求。因此, 植物多酚结合其他保鲜剂/保鲜技术的协同保鲜技术应运而生。结合多种保鲜技术协同效应, 在提升植物多酚的稳定性, 最大化发挥其抑菌、抗氧化效果优势, 同时在确保产品品质与安全性的基础上, 有效减少保鲜剂的使用量, 实现更环保、高效的保鲜方案。

2.1 植物多酚与其他保鲜剂复配

植物多酚与其他保鲜剂复配后, 保鲜效果往往优于单一保鲜剂处理。杨华等^[74]将丁香酚和月桂精油进行复合, 结合涂膜技术, 探究其对大西洋鲑鱼片品质的影响, 结果显示复合保鲜剂及复合保鲜技术都发挥协同增效作用; Wang 等^[75]研究发现曲酸(KA)和茶多酚(TP)对革兰氏阴性腐败菌(腐臭链球菌和荧光假单胞菌)具有协同抑制作用。此外, 在 KA 和 / 或 TP 浸泡处理(KA、TP 和 KA-TP)后, 观察到 KA-TP 处理能更好地抑制冷藏过程鲑鱼片中的脂质氧化和微生物生长繁殖; 余小亮等^[76]将茶多酚与肉桂精油复配形成复合保鲜剂, 并将其保鲜效果与单一保鲜剂处理组进行比较, 结果显示, 茶多酚-肉桂精油复合保鲜剂清除 DPPH 自由基、羟基自由基和超氧阴离子自由基能力要显著高于茶多酚和肉桂精油的单一保鲜剂处理组, 能够有效抑制金黄色葡萄球菌的生长繁殖, 具有很强的抗氧化活性, 可以较好地保持淡水产品品质。

目前植物多酚与其他保鲜剂复合在鱼保鲜领域中广泛应用, 且作用效果明显。但其作用机制仍需进一步探索。

2.2 植物多酚与涂膜技术联合应用

涂膜技术能够较好地阻隔氧气、水分及微生物, 延长产品货架期。但抑菌及抗氧化能力有限, 添加植物多酚可改善涂膜的保鲜性能。

杨华等^[74]向以亚麻籽胶和壳聚糖为成膜材料的涂膜中添加丁香酚和月桂精油, 探究其对三文鱼贮藏品质的影响, 研究发现丁香酚和月桂精油复合使用发挥协同增效作用, 在改善多层涂膜阻隔性能、拉伸性能的同时涂膜缓释体系也有效地延长了保鲜剂的作用时

间；邓雅心^[77]也报道了类似结果。纳米系统涂层是近年的研究热点，利用纳米系统负载活性成分可以控制活性成分的释放，达到更好的保鲜效果，葡萄籽提取物中含大量原花青素且具有较强的自由基捕捉能力，抗氧化性能良好^[78]。为了进一步优化其应用效果，科研人员创新性地结合了纳米技术与生物材料，郭雅娟等^[79]将葡萄籽提取物纳米粒子添加到普鲁兰多糖的成膜基质中，制备了一种生物降解涂层，并评估了其对于4℃冷藏条件下大西洋鲑品质的影响。实验结果表明，相较于单一使用普鲁兰多糖涂膜，融合了葡萄籽提取物纳米粒子的复合涂膜在抑制氧化反应与微生物滋生方面表现更为出色。这一突破性进展不仅得益于葡萄籽提取物本身的强抗氧化性，还与利用 γ -聚谷氨酸作交联剂，对葡萄籽提取物进行包埋处理的纳米技术提升其稳定性相关。将葡萄籽提取物纳米粒子加入到普鲁兰多糖涂膜液中增加了涂膜液的抑菌和抗氧化性能，可以更好地延长货架期。

2.3 植物多酚与包装联合技术

目前，真空包装和气调包装是鱼产品加工中常见的主要包装方式。

Güner等^[80]探讨了红洋葱皮提取物和气调包装(MAP)对鲑鱼脂质品质的影响，结果显示，经MAP处理的鲑鱼的过氧化值和硫代巴比妥酸反应物质含量最低，可减缓脂质氧化率；王康宇等^[81]研究发现， α -生育酚结合真空包装复合处理可以有效地维持鲑鱼糜质构特性、延缓脂肪氧化和感官风味劣变。但由于真空包装使鱼肉处于低氧环境，厌氧或兼性厌氧菌往往成为贮藏期间的优势菌群^[64]。不同微生物菌群对O₂、CO₂、N₂等气体的敏感程度不同，气调包装通过调控气体所占比例抑制微生物生长繁殖。Mastromatteo等^[82]研究发现，相较于单一保鲜剂处理组，用百里香酚结合气调包装(5% O₂+95% CO₂)复合处理组的氧含量低，可抑制肌原纤维蛋白氧化，抑制二硫键交联、聚集，延缓巯基含量下降，有效抑制嗜温细菌的生长繁殖的同时也增强了百里香酚的抑菌和抗氧化能力，有效延长货架期。

综上所述，在鱼保鲜过程引入植物多酚能够有效抑制腐败微生物的生长繁殖，延缓脂质、蛋白质氧化速度，有助于维持贮藏过程中鱼类的营养价值和感官品质，达到更好的保鲜效果。植物多酚与其他保鲜剂/保鲜手段结合的复合保鲜技术在鱼类保鲜领域的研究也日渐成熟，具有广阔的应用前景。

3 展望

目前，国内鱼类保鲜技术研究尚处于初级阶段，保鲜技术存在诸多不足，致使鱼类在运输、贮藏过程中食用价值和安全性大大降低，严重影响其后续加工和商业价值，制约了鱼类产品的发展。根据栅栏理论以及生产实践面对的问题，更大程度地使用复合技术加强对鱼类保鲜技术的研究，对提高鱼类保鲜技术水平和促进我国渔业产业化发展具有重要的意义。目前，尽管利用植物多酚开展鱼类产品保鲜的研究越来越多，也取得了许多重要进展。但植物多酚的提取成本问题仍是影响其工业化应用的瓶颈，仍需进一步优化植物多酚的提取工艺，提高多酚得率，降低提取成本，以适应生产实践的需要。同时，植物多酚提取或加工过程可能会改变其理化性质，因此，尚需进一步关注植物多酚提取物及其衍生物在鱼类产品中的安全限量和毒理作用等研究领域，进一步探索植物多酚生物活性机制及功能，拓展其应用范围。

参考文献

- [1] 联合国粮农组织《2024年世界渔业和水产养殖状况》报告[J]. 世界农业, 2024(7): 145.
- [2] AHMED I, JAN K, FATMA S, et al. Muscle proximate composition of various food fish species and their nutritional significance: A review [J]. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 2022, 106(3): 690-719.
- [3] 李水红, 吴帮志, 罗来全, 等. 鱼制品加工技术研究[J]. 现代食品, 2021, (17): 115-117.
- [4] 赵艺璇. 厉行节俭 减少消费端食物浪费[N]. 农民日报, 2024-01-22.
- [5] YU D, REGENSTEIN J M, XIA W. Bio-based edible coatings for the preservation of fishery products: A review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(15): 2481-2493.
- [6] YU D, ZHAO W, DONG J, et al. Multifunctional bioactive coatings based on water-soluble chitosan with pomegranate peel extract for fish flesh preservation [J]. Food Chemistry, 2022, 374: 131619.
- [7] HEMATYAR N, RUSTAD T, SAMPELS S, et al. Relationship between lipid and protein oxidation in fish [J]. Aquaculture Research, 2019, 50(5): 1393-1403.
- [8] ALI A, WEI S, ALI A, et al. Research progress on nutritional value, preservation and processing of Fish-A review [J]. Foods, 2022, 11(22): 3669.
- [9] RATHOD N B, RANVEER R C, BENJAKUL S, et al. Recent developments of natural antimicrobials and antioxidants on fish and fishery food products [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(4): 4182-4210.
- [10] 蓝蔚青, 赵欣宇, 刘嘉莉, 等. 植物多酚的主要抑菌机制及在水产

- 品保鲜中的应用研究进展[J].食品与发酵工业,2021,47(10):259-264.
- [11] 单珂,郭全友,姜朝军,等.生物保鲜剂在水产品保鲜中的应用[J].食品与发酵科技,2018,54(3):4-8.
- [12] DO NASCIMENTO K D O, PAES S, AUGUSTA I M. A review “Clean Labeling”: Applications of natural ingredients in bakery products [J]. Journal of Food and Nutrition Research, 2018, 6(5): 285-294.
- [13] LUTZ M, FUENTES E, ÁVILA F, et al. Roles of phenolic compounds in the reduction of risk factors of cardiovascular diseases [J]. Molecules, 2019, 24(2): 366.
- [14] 蓝蔚青,刘琳,巩涛硕,等.迷迭香提取物镀冰衣对卵形鲳鲹冻藏期间品质变化影响[J].广东海洋大学学报,2021,41(5):101-108.
- [15] 刘明爽,李婷婷,马艳,等.真空包装鲑鱼片在冷藏与微冻贮藏过程中的新鲜度评价[J].食品科学,2016,37(2):210-213.
- [16] 许铭强,苏文贵,曹双瑜,等.不同冻藏温度对新疆高白鲑鱼肉的品质变化[J].新疆农业科学,2022,59(12):3093-3103.
- [17] 王蒙,蓝蔚青,邱泽慧,等.苹果多酚处理后冰鲜大黄鱼贮藏期间品质与水分迁移的变化[J].食品与发酵工业,2019,45(21):93-101.
- [18] 陈依萍,崔文萱,高瑞昌,等.冷藏与微冻贮藏过程中鲟鱼肉品质变化[J].渔业科学进展,2020,41(1):178-186.
- [19] 宋敏.冻结方式和低盐腌制对鲟鱼片品质影响研究[D].无锡:江南大学,2018.
- [20] 姜晓娜,孟璐,冯俊丽,等.鲑鱼贮藏过程中的品质变化及腐败微生物多样性分析[J].中国食品学报,2019,19(10):197-205.
- [21] 罗华彬,盛珍珍,司永利,等.超高压处理对冷藏带鱼鱼丸保鲜效果的影响[J].食品科学,2021,42(1):157-162.
- [22] 陈方雪,王世哲,邱文兴,等.超高压和辐照杀菌对鲑鱼冷藏期间品质的影响[J].肉类研究,2023,37(6):34-40.
- [23] 郑读,白婵,熊光权,等.⁶⁰Co-γ射线辐照对鳙鱼品质及挥发性物质的影响[J].食品安全质量检测学报,2022,13(8):2457-2464.
- [24] 徐斌.低温等离子体对鲑鱼杀菌保鲜的研究[D].舟山:浙江海洋大学,2016.
- [25] 姜昕,陈晴,田志航,等.超声时间对鲑鱼糜凝胶特性和蛋白结构的影响及相关性[J].水产学报,2023,47(6):165-175.
- [26] 杨福馨,王金鑫,石秋霞,等.柚皮浆/聚乙醇醇保鲜膜的制备及其在鱼品防霉包装中的应用[J].包装学报,2017,9(2):50-55.
- [27] 焉丽波.鳕鱼液熏制品的研制及品质特性的研究[D].青岛:中国海洋大学,2013.
- [28] 姜悦,杨福馨,程龙.新鲜鲑鱼片的保鲜包装研究[J].包装与食品机械,2020,38(3):1-6.
- [29] 李萌,马永生,李智博,等.不同基质条件下食品防腐剂对冷藏河鲢鱼片腐败菌的抑菌差异[J].中国食品学报,2019,19(6):185-192.
- [30] MARK R, LYU X, LEE J J L, et al. Sustainable production of natural phenolics for functional food applications [J]. Journal of Functional Foods, 2019, 57: 233-254.
- [31] OLAGARAY K E, BRADFORD B J. Plant flavonoids to improve productivity of ruminants-A review[J]. Animal Feed Science and Technology, 2019, 251: 21-36.
- [32] 夏婷,赵超亚,杜鹏,等.食品中多酚类化合物种类、提取方法和检测技术研究进展[J].食品与发酵工业,2019,45(5):231-238.
- [33] 赵盈,於天,郑志刚,等.多酚在植物中的分布及其生物活性研究进展[J].中草药,2023,54(17):5825-5832.
- [34] WEI P, ZHU K, CAO J, et al. The inhibition mechanism of the texture deterioration of tilapia fillets during partial freezing after treatment with polyphenols [J]. Food Chemistry, 2020, 335: 127647.
- [35] GUTIÉRREZ-DEL-RÍO I, FERNÁNDEZ J, LOMBÓ F. Plant nutraceuticals as antimicrobial agents in food preservation: terpenoids, polyphenols and thiols [J]. International Journal of Antimicrobial Agents, 2018, 52(3): 309-315.
- [36] EFENBERGER-SZMECHTYK 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, 61(1): 149-178.
- [37] MARTINENGO P, ARUNACHALAM K, SHI C L. Polyphenolic antibacterials for food preservation: Review, challenges, and current applications [J]. Foods, 2021, 10(10): 2469.
- [38] 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.
- [39] 向思佳,刘扬中.微量元素铜与人体生理功能和疾病[J].大学化学,2022,37(3):7-13.
- [40] STADTMAN E R, LEVINE R L. Free radical-mediated oxidation of free amino acids and amino acid residues in proteins [J]. Amino Acids, 2003, 25: 207-218.
- [41] SUN L, SUN J, LIU D, et al. The preservative effects of chitosan film incorporated with thinned young apple polyphenols on the quality of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) fillets during cold storage: Correlation between the preservative effects and the active properties of the film [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2018, 17: 1-10.
- [42] 殷凯欣,梁宝静,王家林,等.田菁纳豆多酚提取工艺优化及其抗氧化活性[J].食品研究与开发,2024,45(3):156-162.
- [43] LUO D, WANG Y A. Theoretical investigation of the superoxide anion free radical elimination by quercetin-metal complexes [J]. Theoretical Chemistry Accounts, 2018, 137: 1-14.
- [44] YANG R, TIAN J, LIU Y, et al. Interaction mechanism of ferritin protein with chlorogenic acid and iron ion: The structure, iron redox, and polymerization evaluation [J]. Food Chemistry, 2021, 349: 129144.
- [45] 朱恒杏,邵孟茹,洪天畅,等.黑枸杞花青素、EGCG对波紫外线诱导HaCaT细胞氧化损伤的协同保护作用[J].现代食品科技,2024,40(8):106-115.
- [46] ZHANG Y, ZHOU X, TAO W, et al. Antioxidant and antiproliferative activities of proanthocyanidins from Chinese bayberry (*Myrica rubra* Sieb. et Zucc.) leaves [J]. Journal of Functional Foods, 2016, 27: 645-654.
- [47] 王凯.迷迭香提取物与茶多酚棕榈酸酯协同抗油脂氧化及机理解析[D].无锡:江南大学,2020.
- [48] 王颂萍,钟强,杨欣悦,等.多酚抑制脂肪氧化的作用机理及其在肉制品中应用的研究进展[J].食品工业科技,2022,43(10):417-425.
- [49] LI Y, LEI Y, TAN Y, et al. Efficacy of freeze-chilled storage combined with tea polyphenol for controlling melanosis, quality deterioration, and spoilage bacterial growth of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) [J]. Food Chemistry, 2022, 370: 130924.
- [50] AGREGÁN R, MUNEKATA P E S, ZHANG W, et al. High-pressure processing in inactivation of *Salmonella* spp. in food products [J].

- Trends in Food Science & Technology, 2021, 107: 31-37.
- [51] DANIEL O O, ADEOYE A O, OJOWU J, et al. Inhibition of liver mitochondrial membrane permeability transition pore opening by quercetin and vitamin E in streptozotocin-induced diabetic rats [J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2018, 504(2): 460-469.
- [52] 禹华娟,孙智达,谢笔钧.莲原花青素在油脂体系中的抗氧化作用[J].中国农业科学,2010,43(10):2132-2140.
- [53] NIRMAL N P, BENJAKUL S. Inhibition of melanosis formation in Pacific white shrimp by the extract of lead (*Leucaena leucocephala*) seed [J]. Food Chemistry, 2011, 128(2): 427-432.
- [54] 张佳婵,王昌涛,刘瑶,等.沙棘粕醇提取物对秀丽隐杆线虫的抗衰老功效及其机制[J].食品科学,2017,38(23):141-148.
- [55] 欧凯玉,逢建龙,张一敏,等.天然酚类化合物的抑菌作用及在肉与肉制品中的应用研究进展[J].食品科学,2023,44(9):358-366.
- [56] GUO L, GONG S, WANG Y, et al. Antibacterial activity of olive oil polyphenol extract against *Salmonella typhimurium* and *Staphylococcus aureus*: Possible mechanisms [J]. Foodborne Pathogens and Disease, 2019, 17(6): 396-403.
- [57] NIE R Z, DANG M Z, GE Z Z, et al. Influence of the gallate moiety on the interactions between green tea polyphenols and lipid membranes elucidated by molecular dynamics simulations [J]. Biophysical Chemistry, 2021, 274: 106592.
- [58] CHEFTEL J C, CULIOLI J. Effects of high pressure on meat: A review [J]. Meat Science, 1997, 46(3): 211-236.
- [59] 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.
- [60] 焦超芹.甜菜根提取物对食源性致病菌的抑菌作用及在食品中的应用[D].哈尔滨:东北农业大学,2022.
- [61] 杨育静,曾珍.植物多酚抑菌机制及其在肉和肉制品中的应用[J].东北农业大学学报,2021,52(2):87-94.
- [62] WANG X, LI Y, LIU S, et al. Chestnut shell polyphenols inhibit the growth of three food-spoilage bacteria by regulating key enzymes of metabolism [J]. Foods, 2023, 12(17): 3312.
- [63] 仪淑敏.茶多酚对鱼糜制品的冷藏保鲜作用及抑菌机理[D].杭州:浙江工商大学,2011.
- [64] ANDONI E, OZUNI E, BIJO B, et al. Efficacy of non-thermal processing methods to prevent fish spoilage [J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2021, 30(2): 228-245.
- [65] MAKWANA S, CHOUDHARY R, HADDOCK J, et al. *In-vitro* antibacterial activity of plant based phenolic compounds for food safety and preservation [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 62(2): 935-939.
- [66] CHEN M, ZHAO Z, MENG H, 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.
- [67] CUI H, ZHANG C, LI C, et al. Antibacterial mechanism of oregano essential oil [J]. Industrial Crops and Products, 2019, 139: 111498.
- [68] 郭俊贤.精油对水产品特定腐败菌的抑制及其抑菌机理[D].广州:广东工业大学,2015.
- [69] 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.
- [70] LAKHANI M, AHMAD Z. Inhibition of *Escherichia coli* ATP synthase by dietary pomegranate phenolics [J]. The FASEB Journal, 2022, 213: 195-209.
- [71] UPADHYAY A, VENKITANARAYANAN K. *In vivo* efficacy of trans-cinnamaldehyde, carvacrol, and thymol in attenuating *Listeria monocytogenes* infection in a *Galleria mellonella* model [J]. Journal of Natural Medicines, 2016, 70(3): 667-672.
- [72] ASHA M K, DEBRAJ D, PRASHANTH D S, et al. *In vitro* anti-*Helicobacter pylori* activity of a flavonoid rich extract of *Glycyrrhiza glabra* and its probable mechanisms of action [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2013, 145(2): 581-586.
- [73] 田琦.丁香酚和茶多酚对空肠弯曲菌抑菌机理研究[D].天津:天津科技大学,2017.
- [74] 杨华,王雅妮,孙晓冬,等.FG/CS逐层复合保鲜涂膜对三文鱼鱼片品质的影响[J].包装工程,2022,43(1):98-105.
- [75] WANG R, HU X, AGYEKUMWAA A K, et al. Synergistic effect of kojic acid and tea polyphenols on bacterial inhibition and quality maintenance of refrigerated sea bass (*Lateolabrax japonicus*) fillets [J]. Lwt, 2021, 137: 110452.
- [76] 余小亮,陈舜胜,负三月,等.茶多酚-肉桂精油复合保鲜剂抗氧化活性及抑菌作用[J].食品工业科技,2017,38(22):226-230,45.
- [77] 邓雅心.茶多酚/山苍子精油/壳聚糖复合涂膜对冷藏黄颡鱼品质的影响[D].重庆:重庆三峡学院,2024.
- [78] AO X, KIM I H. Effects of grape seed extract on performance, immunity, antioxidant capacity, and meat quality in pekin ducks [J]. Poult Science, 2020, 99(4): 2078-2086.
- [79] 郭雅娟,范军刚,李建珍.葡萄籽提取物纳米粒子/普鲁兰多糖涂膜对三文鱼鱼片品质的影响[J].食品与机械,2023,39(8):116-121,19.
- [80] GÜNER S, BOZ Z, YAĞIZ Y, et al. Investigation of phenolic compounds and antioxidant activity in red and yellow onions and a synergistic utilization of skin extract in modified atmosphere packaging of salmon (*Salmo salar*) [J]. Packaging Technology and Science, 2021, 34(6): 371-382.
- [81] 王康宇,王瑞红,李钰金,等. α -生育酚处理与真空包装对复合鲟鱼糜冻藏期间品质的影响[J].食品科学,2021,42(11):195-204.
- [82] MASTROMATTEO M, DANZA A, CONTE A, et al. Shelf life of ready to use peeled shrimps as affected by thymol essential oil and modified atmosphere packaging [J]. International Journal of Food Microbiology, 2010, 144(2): 250-256.