

茶多酚抑制冷冻金鲳鱼蛋白质氧化与脂质劣变的机制研究进展

陈依依, 谭 婷, 蒋娜娜, 吴雪滢, 韦金蓉, 龚受基*

北部湾海产健康养殖与绿色加工实验室/广西壮族自治区海洋食品营养与加工技术创新工程研究中心/北部湾大学食品工程学院, 广西 钦州

收稿日期: 2026年6月3日; 录用日期: 2026年7月3日; 发布日期: 2026年7月15日

摘 要

冷冻贮藏是金鲳鱼长期保鲜的核心手段, 但冰晶损伤、蛋白质冷冻变性、脂质氧化及微生物增殖等过程会导致鱼肉品质持续劣变。茶多酚作为一种天然多酚类活性物质, 在冷冻金鲳鱼保鲜中展现出多维度、协同性的保护作用。在蛋白质层面, 茶多酚通过清除活性氧自由基抑制蛋白质氧化, 并通过氢键、疏水相互作用及 π - π 堆积等非共价作用稳定肌原纤维蛋白的空间构象, 从而延缓其冷冻变性; 在冰晶调控层面, 茶多酚分子可能通过羟基与冰晶表面发生氢键吸附, 抑制冰晶重结晶与大冰晶形成, 减轻对肌纤维的机械损伤; 在脂质氧化层面, 茶多酚通过自由基链式阻断与金属离子螯合, 有效抑制多不饱和脂肪酸的氧化降解, 减少丙二醛等次级产物对蛋白质的交联损伤; 此外, 茶多酚还通过抑菌与抑制酶活性, 显著降低挥发性盐基氮的积累, 延缓腐败气味的产生。当前研究趋势表明, 茶多酚与壳聚糖、抗菌肽、气调包装及冰衣技术等联合应用可进一步提升保鲜效果。尽管茶多酚在冷冻金鲳鱼品质保持中具有广阔前景, 但在适宜添加浓度、风味影响及挥发性风味物质调控机制等方面仍需深入探索。本文系统综述了茶多酚对冷冻金鲳鱼的保鲜机制, 以期为高品质冷冻水产品加工提供理论参考。

关键词

金鲳鱼, 茶多酚, 冷冻保鲜, 蛋白质氧化, 脂质氧化

Research Advances on the Mechanisms of Tea Polyphenols against Protein Oxidation and Lipid Deterioration in Frozen Golden Pomfret during Frozen Storage

Yiyi Chen, Ting Tan, Nana Jiang, Xueying Wu, Jinrong Wei, Shouji Gong*

*通讯作者。

文章引用: 陈依依, 谭婷, 蒋娜娜, 吴雪滢, 韦金蓉, 龚受基. 茶多酚抑制冷冻金鲳鱼蛋白质氧化与脂质劣变的机制研究进展[J]. 食品与营养科学, 2026, 15(4): 492-500. DOI: 10.12677/hjfn.2026.154053

Laboratory of Beibu Gulf Marine Product Healthy Aquaculture and Green Processing/Guangxi Zhuang Autonomous Region Engineering Research Center of Marine Food Nutrition and Processing Technology Innovation/College of Food Engineering, Beibu Gulf University, Qinzhou Guangxi

Received: June 3, 2026; accepted: July 3, 2026; published: July 15, 2026

Abstract

Frozen storage is a fundamental method for the long-term preservation of golden pompano. However, processes such as ice crystal damage, protein freezing denaturation, lipid oxidation, and microbial proliferation continuously compromise the quality of the fish meat. Tea polyphenols, a type of natural polyphenolic active substance, exhibit multi-dimensional and synergistic protective effects in the preservation of frozen golden pompano. At the protein level, tea polyphenols inhibit protein oxidation by scavenging reactive oxygen species and stabilize the spatial conformation of myofibrillar proteins through non-covalent interactions, such as hydrogen bonding, hydrophobic interactions, and π - π stacking, thereby delaying freeze-induced denaturation. In terms of ice crystal regulation, tea polyphenol molecules may adsorb onto the ice crystal surface through hydrogen bonding with hydroxyl groups, inhibiting recrystallization and the formation of large ice crystals, thus reducing mechanical damage to muscle fibers. At the lipid oxidation level, tea polyphenols effectively inhibit the oxidative degradation of polyunsaturated fatty acids through free radical chain termination and metal ion chelation, minimizing cross-linking damage to proteins caused by secondary products such as malondialdehyde. Furthermore, tea polyphenols significantly reduce the accumulation of volatile basic nitrogen through antibacterial activity and inhibition of enzyme activity, thereby delaying the production of spoilage odors. Current research trends indicate that the combined application of tea polyphenols with chitosan, antimicrobial peptides, modified atmosphere packaging, and ice-glazing technology can further enhance preservation effects. Although tea polyphenols hold great promise in maintaining the quality of frozen golden pompano, further exploration is needed regarding appropriate addition concentrations, effects on flavor, and the regulatory mechanisms of volatile flavor compounds. This paper systematically reviews the preservation mechanism of tea polyphenols on frozen golden pompano, aiming to provide a theoretical reference for the processing of high-quality frozen aquatic products.

Keywords

Trachinotus Ovatus, Tea Polyphenols, Frozen Storage, Protein Oxidation, Lipid Oxidation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

金鲳鱼，学名卵形鲳鲹，隶属于鲳形目、鲳科、鲳鲹属，是中国南方沿海地区，特别是广东、广西、海南等地的重要海水养殖经济鱼类[1]。其具有生长速度快、养殖周期短、肉质肥厚、细嫩味美、肌间刺少等优点，深受市场欢迎[2]。随着水产养殖技术的成熟和规模的扩大，金鲳鱼的产量逐年攀升，已成为我国海水鱼养殖的支柱产业之一[3]。

然而，金鲳鱼作为一种鲜活水产品，捕捞后其品质会因内源酶的自溶作用和微生物的繁殖而迅速下

降[4]。为了突破地域和季节的限制,满足长途运输和长期储存的需求,冷冻保藏成为当前金鲳鱼供应链中最为核心和普遍的保鲜手段[5]。冷冻技术通过将鱼体温度降低至冰点以下,极大地抑制了微生物的生长繁殖和多数酶的活性[4],从而在宏观上延长了产品的保质期。

2. 冷冻贮藏对金鲳鱼品质的负面影响

冷冻对保持金鲳鱼品质是必要的,蛋白质是决定鱼肉品质和功能特性的关键组分。金鲳鱼在冷冻、贮藏及解冻过程中会发生一系列复杂的物理化学变化,导致其品质显著下降。

在缓慢冻结或温度波动的贮藏条件下,鱼肉组织中的水分会形成较大且不规则的冰晶[6]。这些冰晶会对肌纤维细胞膜和细胞器造成不可逆的机械穿刺和挤压损伤[7]。解冻时,细胞结构被破坏,导致大量汁液流失(即解冻损失),宏观表现为鱼肉口感干柴、弹性下降[8]。

冰晶的形成导致细胞内溶质浓度升高(冷冻浓缩效应)、pH 值变化以及分子间距离的改变,这些因素共同诱导蛋白质发生变性[8]。肌原纤维蛋白(特别是肌球蛋白)对冷冻尤为敏感,其空间结构展开、亚基解离、发生聚集和交联,导致其溶解度和 Ca^{2+} -ATPase 酶活性显著下降[9]。蛋白质的变性直接削弱了其束缚水分的能力,是造成鱼肉持水性降低、质地变硬、变韧的主要原因[10]。

金鲳鱼富含二十碳五烯酸(EPA)和二十二碳六烯酸(DHA)等高度不饱和脂肪酸,这些脂肪酸在冷冻贮藏期间极易受到活性氧自由基的攻击而发生氧化[11]。脂质氧化不仅会产生令人不悦的哈败味(腐臭味),降低产品的风味品质,其产生的醛、酮等二级氧化产物(如丙二醛 MDA)还会与蛋白质的氨基发生交联反应,进一步加剧蛋白质的变性、聚集,导致鱼肉质变得粗糙、坚硬[12][13]。

虽然低温能抑制大多数微生物和酶的活性,但并不能完全使其失活[14]。一些嗜冷微生物在冷冻温度下仍能缓慢生长,而某些内源酶(如蛋白酶、脂肪酶)在冰点以下仍保留部分活性,长期贮藏下会缓慢降解蛋白质和脂肪,导致鱼肉结构软化、风味劣变[15][16]。

3. 茶多酚作为天然抗冻保鲜剂的巨大潜力

茶多酚(TP)是从茶叶中提取的多酚类化合物的总称,主要成分包括儿茶素(如表没食子儿茶素没食子酸酯 EGCG)、黄酮类、酚酸类等[13]。大量研究证实,茶多酚具有强大的抗氧化、抑菌、抗病毒等多种生物活性[17]-[19]。茶多酚分子结构中含有大量的酚羟基,可以作为氢供体,有效清除诱导蛋白质和脂质氧化的活性氧自由基(ROS),同时还能螯合 Fe^{2+} 、 Cu^{2+} 等促进氧化的金属离子,从源头上阻断氧化链式反应[20][21]。茶多酚能通过破坏多种微生物细胞膜的完整性、抑制关键酶的活性以及影响其代谢过程等多种途径,广泛抑制多种腐败菌和致病菌的生长[15][16]。基于这些优良特性,茶多酚已被广泛应用于各类水产产品的保鲜研究中,包括鱼糜、罗非鱼、鲈鱼、马鲛鱼等[22]-[24],并显示出显著的品质改善效果。

茶多酚对纤维蛋白的保护机制

蛋白质,特别是占肌肉蛋白总量 55%~60%的肌原纤维蛋白,是构成鱼肉三维凝胶网络结构、赋予其质地和持水性的骨架[25]。保护蛋白质的结构完整性是维持冷冻鱼肉品质的核心[26]。冷冻过程通过物理和化学双重途径损伤蛋白质。物理上,冰晶的机械力直接破坏肌纤维结构[7];化学上,冷冻浓缩效应导致离子强度升高、pH 偏移,破坏了维持蛋白质天然构象的静电作用力和氢键,导致蛋白质分子发生解折叠、暴露内部疏水基团,进而发生不可逆的聚集和沉淀[8][10]。同时,冷冻过程会产生活性氧(ROS),攻击蛋白质侧链的氨基酸残基(特别是含硫氨基酸和芳香族氨基酸),导致羰基化、二硫键形成和分子交联,即蛋白质氧化[27]。蛋白质氧化与冷冻变性常常相互交织,共同导致蛋白质功能(如溶解性、乳化性、凝胶性)丧失[28]。

茶多酚分子结构中的酚羟基能优先于蛋白质与活性氧自由基反应,生成稳定的半醌式自由基,从而中断自由基链式反应,保护蛋白质的氨基酸侧链不被氧化,是卓越的自由基清除剂[18][20][21]。多项研究证实,在冷冻鱼肉或鱼糜体系中添加茶多酚,能显著降低蛋白质羰基含量,并保护对氧化敏感的巯基(-SH)含量,维持蛋白质的天然构象和功能[10][29]。一项针对草鱼肉的研究发现,经茶多酚处理的样品在冷冻贮藏后,其盐溶性蛋白提取率、 Ca^{2+} -ATPase 活性(肌球蛋白头部完整性的标志)均显著高于对照组,表明茶多酚有效延缓了肌原纤维蛋白的降解和变性[9]。

茶多酚分子上的大量酚羟基可以作为氢键的供体和受体,与蛋白质分子表面或内部的肽键、氨基酸侧链(如丝氨酸、谷氨酸)形成多点氢键连接[30][31]。此外,茶多酚的苯环结构还可以与蛋白质中的芳香族氨基酸残基(如色氨酸、酪氨酸)发生疏水相互作用和 π - π 堆积[32][33],这些非共价相互作用如同一个分子夹板,能够稳定蛋白质的二级和三级结构,增加其构象刚性,提高其抵抗由冷冻浓缩、pH变化等因素引起的解折叠的能垒[34][35]。这种相互作用在一定程度上替代了蛋白质与水分子之间的氢键,在水分结晶时扮演了替代水的角色,减轻了脱水胁迫对蛋白质结构的破坏[36][37]。通过各种保护机制,茶多酚有效维持了蛋白质的溶解度和功能特性,进而保护了由蛋白质构成的肌纤维网络结构的完整性,维持了优秀的持水能力和弹性质构。但需要注意的是,茶多酚与蛋白质的相互作用可能会受到浓度的影响,浓度过高或许会带来一些不必要的结构变化及负面影响。因此,未来有必要深入研究茶多酚浓度对蛋白质相互作用的具体作用机制,从而优化其在水产品保鲜中的应用条件。

4. 茶多酚对冰晶形成的调控作用

冰晶的大小、形态和分布是决定冷冻食品品质的另一个关键物理因素[38]。理想的冷冻状态是在组织内形成大量、细小、均匀分布的胞内冰晶,最大限度地减少对细胞结构的物理损伤[39]。

在典型的商业慢速冻结条件下,胞外的水首先结冰,导致胞外溶液浓度升高,形成渗透压差,使胞内水分向外迁移,在细胞间隙形成大的、破坏性的冰晶。这些大冰晶会挤压、刺穿肌细胞膜,破坏肌纤维的连续性和完整性[7][28]。在冻藏期间,由于温度的微小波动,会发生奥氏重结晶现象,即小冰晶融化,水分迁移附着到大冰晶上,导致冰晶平均尺寸进一步增大,加剧物理损伤[8]。

茶多酚与魔芋葡甘聚糖联用的研究发现,该复合体系能有效抑制冻融循环过程中鱼糜的冰晶生长,稳定蛋白质网络结构,这为茶多酚参与冰晶调控提供了间接证据[40]。茶多酚分子可能通过其表面的多个羟基与正在生长的冰晶晶格表面发生氢键吸附。这种吸附会钉扎在冰晶的生长界面上,阻碍水分子有序地并入晶格,从而抑制冰晶的持续长大,特别是抑制其在特定晶面上的快速生长。这种效应类似于已知的抗冻蛋白(AFPs)和一些多糖的作用机制[41][42]。

茶多酚处理的鱼肉解冻后汁液流失减少,可以推论出茶多酚可能具有冰晶调控作用。目前茶多酚对冰晶的调控作用仍然属于合理假说,未来还需要通过X-射线衍射、冷冻扫描电镜、低温电镜等结构生物学与热力学证据进一步确证茶多酚分子与冰晶表面的相互作用,得以验证冰晶形成和生长的具体影响。

5. 茶多酚对脂质氧化的抑制作用

金鲳鱼是一种中等偏高脂肪含量的鱼类,其脂肪中富含易氧化的多不饱和脂肪酸,这使其在冷冻过程中极易发生脂质氧化[43]。脂质氧化是一个自由基链式反应过程,一旦引发,会迅速传播。该过程不仅产生具有哈败味的挥发性小分子化合物,严重破坏产品的风味,更重要的是,其产生的二级产物,如丙二醛(MDA),具有高度的反应活性[12]。MDA可以与蛋白质分子中的赖氨酸、精氨酸等氨基酸的自由氨基发生希夫碱反应,形成分子内或分子间的共价交联[44][45]。这种交联会降低蛋白质溶解度,改变了蛋白质的构象,使其功能(如酶活性、持水性)丧失,蛋白质网络因交联而变得过度紧密和刚硬,导致鱼肉质

地变得粗糙、坚韧、缺乏弹性[46] [47]。

茶多酚作为一种链式反应阻断型抗氧化剂,能非常有效地抑制脂质氧化[48]。茶多酚能高效清除引发脂质氧化的各种自由基,如羟自由基($\cdot\text{OH}$)和超氧阴离子($\text{O}_2^{\cdot-}$),从源头上阻止氧化反应的启动[20]。在链式反应的传递阶段,茶多酚的酚羟基能提供一个活泼氢原子给脂质过氧化自由基($\text{ROO}\cdot$),使其还原成稳定的氢过氧化物(ROOH),而茶多酚自身则形成一个低活性的、稳定的酚氧自由基,从而有效中断链式反应[49]。铁、铜等过渡金属离子是脂质氧化的强力催化剂,而茶多酚分子中的邻苯二酚结构能与这些金属离子形成稳定的螯合物,使其失去催化活性[21]。

一项针对风干金鲳鱼的研究明确指出,添加茶多酚或其主要成分 EGCG 能显著降低贮藏过程中的硫代巴比妥酸反应物(TBARS)值,有效抑制脂肪氧化和不良风味物质的产生[13]。茶多酚通过抑制脂质氧化,不仅能保持产品的良好风味,更重要的是能阻止氧化产物对蛋白质的交联损伤,从而间接但有效地保护了蛋白质结构,维持了鱼肉的嫩度和弹性[50] [51]。

6. 茶多酚对风味与微生物的调控

茶多酚能显著抑制鱼糜在冻融循环中质构的劣变。与对照组相比,添加茶多酚的鱼糜样品表现出更高的硬度、弹性和咀嚼度,对鱼糜品质有显著的影响[29]。原因可能与茶多酚有效抑制了蛋白质氧化,保护了肌原纤维蛋白的结构,维持了凝胶网络的强度和完整性有关[29]。

茶多酚对提高水产品持水性的积极作用。在风干金鲳鱼的研究中,茶多酚处理组的持水率显著高于对照组[13]。在冷冻鱼糜的研究中,茶多酚的添加显著降低了冻融循环后的汁液流失率,提高了持水性[29] [52]。

冷冻金鲳鱼的不良气味主要源于脂质氧化产生的哈败味,以及微生物和内源酶降解蛋白质产生的氨、胺类等腐败气味(以挥发性盐基氮 TVB-N 值为代表) [53]。茶多酚还具有优异的抗脂质氧化能力,可有效防止哈败味的产生[12] [13]。研究表明,茶多酚能显著抑制 TVB-N 值的上升,其机制在于茶多酚具有抑菌和抑制酶活性的双重作用[13] [15] [52],一方面降低产品的菌落总数(TVC),有效抑制腐败菌的生长[54]-[56],另外破坏微生物的细胞膜和细胞壁的结构与功能、使蛋白质酶变性失活、螯合生长所必需的金属离子等[16] [22]。

7. 茶多酚与其他保鲜技术的联用

茶多酚与其他保鲜技术联用已成为当前的研究趋势,从不同策略、不同靶点对金鲳鱼品质进行保护。茶多酚联合壳聚糖是研究最为广泛和成熟的组合之一,壳聚糖致密涂膜发挥物理屏障,隔绝氧气、延缓水分蒸发,同时次分子上的氨基正电荷吸附并破坏带负电的细菌细胞膜[57] [58]。当与茶多酚复配时,发挥协同抑菌作用,使复配剂功能互补,形成外防内控的立体保护体系。茶多酚联合抗菌肽(如 Nisin)可扩大抑菌谱[55] [59]。植物精油(如迷迭香提取物、百里香酚)则可提高茶多酚抗氧化和抗菌活性功效,还调和或改良金鲳鱼的风味[59]。

茶多酚冰衣将茶多酚持续、缓慢地释放到表面,形成动态的保护层,持续发挥抗氧化和抑菌作用,能更好地维持水产品品质,冷冻储存效果更好[60] [61]。茶多酚协同气调包装通过改变包装内的气体组分(如降低 O_2 浓度,提高 CO_2 和 N_2 浓度)来抑制需氧微生物生长和氧化反应,能更彻底地延缓脂质和蛋白质氧化[62] [63]。超高压冻结等新型冻结技术从物理上促进了细小冰晶的形成,与茶多酚结合应用有望实现产品品质的维持[64]。

8. 结论与展望

作为一种安全、高效的天然保鲜剂,茶多酚在维持冷冻金鲳鱼质构品质方面展现出巨大的应用潜力。

其作用机制是多维度的、协同的,核心机制是通过高效清除自由基和与蛋白质非共价相互作用,茶多酚从根本上抑制了蛋白质的氧化与冷冻变性,保护了肌原纤维蛋白网络的结构完整性,物理保护、化学防护减少大冰晶对肌纤维的机械损伤和阻断脂质氧化链式反应,从而在微观层面上发挥保护作用,最终在宏观上体现为冷冻金鲳鱼具有更优异的质构特性、更高的持水性、更佳的感官品质以及更长的贮藏寿命。

尽管前景广阔,但目前茶多酚在冷冻金鲳鱼保鲜中的应用研究仍处于初级阶段,存在诸多理论和技术问题亟待深入探索。茶多酚浓度过高可能引入涩味,影响产品最终的适口性,需要通过系统的感官评价小组和电子舌技术,确定消费者可接受的茶多酚添加阈值,这样可以在确保保鲜效果的同时,将对产品口感的影响降至最低。

此外,茶多酚在加工和贮藏过程中可能会发生氧化降解,导致其活性减弱。把茶多酚作为天然抗冻保鲜剂添加到冷冻金鲳鱼中,可以通过缓解引起鱼肉品质劣变和茶多酚降解的多种反应速率,来提高鱼肉品质的稳定性。茶多酚处理对冷冻金鲳鱼贮藏过程中挥发性风味物质组成和特征香气/异味变化的影响仍然未明,对整体风味的调控机制依然不清楚,需要对其进行深入研究。

基金项目

自治区级创新训练项目:茶多酚复合冰藏技术维持金鲳鱼品质的作用机制 S202511607062

参考文献

- [1] Li, A., An, C., Wang, H., Che, S., Liu, S. and Zhuang, Z. (2025) DNA Barcode and Correct Scientific Name of Golden Pompano, an Important Marine Aquaculture Fish Species in China. *Fishes*, **10**, Article 129. <https://doi.org/10.3390/fishes10030129>
- [2] Chen, F., Lou, Y., Guan, J., Lan, X., Su, Z., Xu, C., *et al.* (2025) Rapeseed and Palm Oils Can Improve the Growth, Muscle Texture, Fatty Acids and Volatiles of Marine Teleost Golden Pompano Fed Low Fish Oil Diets. *Foods*, **14**, Article 788. <https://doi.org/10.3390/foods14050788>
- [3] 刘建村, 王桦. 广东省金鲳鱼产业发展及对策探究[J]. 广东蚕业, 2023, 57(7): 107-110.
- [4] Xu, J., Sun, Q., Zheng, O., Wang, Z., Wei, S., Han, Z., *et al.* (2024) Novel Insights into the Microbial Succession and Quality Variation of Golden Pompano (*Trachinotus ovatus*) Driven by Storage Temperatures Based on High-Throughput Sequencing. *LWT*, **199**, Article 116087. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116087>
- [5] 杨柳, 钱怡霖, 贾飞, 等. 磁场辅助水产品冷冻保藏技术研究进展[J]. 生物加工过程, 2025, 23(2): 226-232.
- [6] Mao, Y., Ren, J., Li, H., Ramaswamy, H.S., Xiao, T., Zhang, S., *et al.* (2025) Effect of Liquid Nitrogen Spray Freezing Conditions-Temperature, Sample Volume and Exposure Depth-On the Resulting Temperature Fluctuation, Microstructure, and Quality of Large Yellow Croaker Fish during Frozen Storage. *Food Chemistry*, **476**, Article 143466. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.143466>
- [7] Leelapongwattana, K., Benjakul, S., Visessanguan, W. and Howell, N.K. (2010) Effects of Trimethylamine-n-Oxide Demethylase (Tmaoase) Inhibitors and Antioxidants on Physicochemical and Biochemical Changes of Haddock Muscle Induced by Lizardfish Tmaoase during Frozen Storage. *Journal of Food Biochemistry*, **34**, 1032-1048. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4514.2010.00347.x>
- [8] Rayeni, M.F. (2016) Quality-Related Changes in Frozen Fish Muscle. *International Journal of Multidisciplinary Research and Development*, **3**, 194-197.
- [9] 姜佳星. 茶多酚对冷冻淡水鱼糜蛋白质生化和功能特性的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南农业大学, 2013.
- [10] Yingchutrakul, M., Wasinnitwong, N., Benjakul, S., *et al.* (2022) Asian Carp, an Alternative Material for Surimi Production: Progress and Future. *Foods*, **11**, Article 1318.
- [11] Wang, Y., Wang, H., Wu, Y., Xiang, H., Zhao, Y., Chen, S., *et al.* (2022) Insights into Lipid Oxidation and Free Fatty Acid Profiles to the Development of Volatile Organic Compounds in Traditional Fermented Golden Pomfret Based on Multivariate Analysis. *LWT*, **171**, Article 114112. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114112>
- [12] 黎柳, 谢晶, 苏辉, 等. 含茶多酚、植酸生物保鲜剂冰对鲳鱼保鲜效果的研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(1): 338-343.
- [13] 王睿, 王琦, 周敏, 等. 茶多酚和 EGCG 对风干金鲳鱼品质相关理化指标的改善效果比较[J]. 食品科学, 2023,

- 44(2): 54-63.
- [14] 沈萍, 李学英, 杨宪时, 等. 低温贮藏过程中鲑鱼细菌组成的变化及优势腐败菌鉴定[J]. 现代食品科技, 2015, 31(6): 236-242.
- [15] 欧阳涛, 赵利, 苏伟, 等. 茶多酚对冷藏草鱼片保鲜效果的研究[J]. 食品科技, 2011, 36(9): 157-160.
- [16] 李虹, 娄永江. 常用防腐剂对蟹糊抑菌作用的研究[J]. 食品科技, 2009, 34(1): 74-77.
- [17] 蓝蔚青, 杜金涛, 梅俊, 等. 茶多酚抑菌机理及在水产品保鲜中的应用进展[J]. 包装工程, 2021, 42(5): 73-79.
- [18] 潘俊娴, 刘均, 吕杨俊, 等. 茶多酚对水产品保鲜作用的研究进展[J]. 中国茶叶加工, 2018(3): 10-14.
- [19] 陈文慧, 徐莉, 禚开智. 茶多酚在水产品保鲜中的应用研究[J]. 粮食与油脂, 2018, 31(4): 12-15.
- [20] Nie, X., Zuo, Z., Zhang, R., Luo, S., Chi, Y., Yuan, X., *et al.* (2025) New Advances in Biological Preservation Technology for Aquatic Products. *npj Science of Food*, **9**, Article No. 5. <https://doi.org/10.1038/s41538-025-00372-4>
- [21] 李颖畅, 张笑, 仪淑敏, 等. 茶多酚对水产品的保鲜机理及其应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2013, 34(8): 365-368.
- [22] Temdee, W., Singh, A., Hong, H., Zhang, B., Yesilsu, A.F. and Benjakul, S. (2023) Influence of Epigallocatechin Gallate on Quality of Cooked Harpiosquillid Mantis Shrimp (*Harpiosquilla raphidea*) Subjected to Multiple Freeze-Thaw Cycles. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **23**, 1-14. <https://doi.org/10.4194/trjfas23374>
- [23] Xue, J., Jing, L., Pan, H. and Shi, W. (2023) Exploring the Quality Change Mechanism of Tea Polyphenol-Assisted Cured Grass Carp from Perspectives of Physicochemical and Flavor. *CyTA-Journal of Food*, **21**, 302-312. <https://doi.org/10.1080/19476337.2023.2196319>
- [24] Mirza, Z.S., Chatta, A.M., Shafi, J., Waheed, K.N., Saleem, S. and Hanif, M.M. (2023) The Effect of Natural Edible Coatings on Chemical, Microbial, and Sensory Quality of Tilapia during Frozen Storage. *Journal of Food Quality and Hazards Control*, **10**, Article No. 2351. <https://doi.org/10.18502/jfqhc.10.3.13647>
- [25] Ma, Y., Xiong, S., You, J., Hu, Y., Huang, Q. and Yin, T. (2017) Effects of Vacuum Chopping on Physicochemical and Gelation Properties of Myofibrillar Proteins from Silver Carp (*Hypophthalmichthys molitrix*). *Food Chemistry*, **245**, 557-563. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.10.139>
- [26] Gao, S., Liu, Y., Fu, Z., Zhang, H., Zhang, L., Li, B., *et al.* (2023) Uncovering Quality Changes of Salted Bighead Carp Fillets during Frozen Storage: The Potential Role of Time-Dependent Protein Denaturation and Oxidation. *Food Chemistry*, **414**, Article 135714. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135714>
- [27] Al-Shibli, M.A., Al-Ali, R.M., Hashim, A.Z., Altemimi, A.B., Elsayed, N. and Abdelmaksoud, T.G. (2024) Evaluation of Meat and Meat Product Oxidation and Off-Flavor Formation: Managing Oxidative Changes. *Theory and practice of meat processing*, **8**, 302-315. <https://doi.org/10.21323/2414-438x-2023-8-4-302-315>
- [28] Li, H., Wang, Q., Li, W., *et al.* (2023) Cryoprotective Effect of NADES on Frozen-Thawed Mirror Carp Surimi in Terms of Oxidative Denaturation, Structural Properties, and Thermal Stability of Myofibrillar Proteins. *Foods*, **12**, Article 3530.
- [29] 李佳, 李艳青. 茶多酚对反复冻融鱼糜品质的影响[J]. 中国调味品, 2025, 50(7): 55-60.
- [30] Dai, S., Xu, T., Yuan, Y., Fang, Q., Lian, Z., Tian, T., *et al.* (2023) Combination and Precipitation Mechanism of Soy Protein and Tea Polyphenols. *Food Hydrocolloids*, **146**, Article 109197. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109197>
- [31] Ni, X., Li, M., Huang, Z., Wei, Y., Duan, C., Li, R., *et al.* (2025) Study on the Regulation of Tea Polyphenols on the Structure and Gel Properties of Myofibrillar Protein from *Neosalanx taihuensis*. *Food Chemistry: X*, **25**, Article 102243. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102243>
- [32] Jin, D., Wei, J., He, F., Chai, T., Ren, S., Fu, J., *et al.* (2023) Effect of Tea Polyphenols on Sturgeon Myofibrillar Protein Structure in the in Vitro Anti-Glycation Model Mediated by Low Temperature Vacuum Heating. *Food Chemistry*, **407**, Article 135133. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135133>
- [33] Li, N., Shou, Z., Yang, S., Cheng, X., Chen, C., Zheng, S., *et al.* (2023) Subtle Distinction in Molecular Structure of Flavonoids Leads to Vastly Different Coating Efficiency and Mechanism of Metal-Polyphenol Networks with Excellent Antioxidant Activities. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, **229**, Article 113454. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2023.113454>
- [34] Zhao, Y., Li, J., Gu, H., *et al.* (2015) Conformational Preferences of π - π Stacking Between Ligand and Protein, Analysis Derived from Crystal Structure Data Geometric Preference of π - π Interaction. *Interdisciplinary Sciences: Computational Life Sciences*, **7**, 211-220.
- [35] Zhou, F., Lu, B., Chen, X., Jia, Z., Tao, F. and Peng, J. (2025) Interaction of Major Tea Polyphenols with Bovine Milk Proteins and Its Effect on in Vitro Bioaccessibility of Tea Polyphenols. *Food Chemistry*, **475**, Article 143341. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.143341>
- [36] Chen, G., Wang, S., Feng, B., Jiang, B. and Miao, M. (2019) Interaction between Soybean Protein and Tea Polyphenols

- under High Pressure. *Food Chemistry*, **277**, 632-638. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.024>
- [37] Yang, J., Zhao, Y., Shan, B., Duan, Y., Zhou, J., Cai, M., *et al.* (2023) Study on the Interaction and Functional Properties of Dolichos Lablab L. Protein-Tea Polyphenols Complexes. *International Journal of Biological Macromolecules*, **250**, Article 126006. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126006>
- [38] Sun, L., Zhu, Z. and Sun, D.W. (2023) Regulating Ice Formation for Enhancing Frozen Food Quality: Materials, Mechanisms and Challenges. *Trends in Food Science & Technology*, **139**, Article 104116.
- [39] Zheng, O., Zhang, L., Sun, Q. and Liu, S. (2024) Basic Theory of Ice Crystallization Based on Water Molecular Structure and Ice Structure. *Foods*, **13**, Article 2773. <https://doi.org/10.3390/foods13172773>
- [40] 李佳, 李艳青, 李博, 等. 魔芋葡甘聚糖联合茶多酚对冻融鲤鱼鱼糜蛋白的保护作用[J]. 食品工业科技, 2025, 46(20): 349-357.
- [41] Liu, J. and Li, Q. (2006) Theoretical Model of Antifreeze Protein-Ice Adsorption: Binding of Large Ligands to a Two-Dimensional Homogeneous Lattice. *Chemical Physics Letters*, **422**, 67-71. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2006.02.031>
- [42] Guerreiro, B.M., Freitas, F., Lima, J.C., Silva, J.C., Dionisio, M. and Reis, M.A.M. (2020) Demonstration of the Cryoprotective Properties of the Fucose-Containing Polysaccharide Fucopol. *Carbohydrate Polymers*, **245**, Article 116500. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116500>
- [43] 郁慧洁, 谢晶. 冻藏对水产品脂质氧化影响研究进展[J]. 食品与机械, 2021, 37(10): 193-201.
- [44] Wang, Z., Chen, G., Chen, X., Xia, Q., Yin, Y., Xiao, N., *et al.* (2025) Molecular Mechanism of Golden Pomfret Myofibrillar Protein Digestion Inhibition by Malondialdehyde-Mediated Oxidation Based on Peptidomics Analysis. *Food Chemistry: X*, **29**, Article 102713. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102713>
- [45] Slatter, D.A., Avery, N.C. and Bailey, A.J. (2004) Identification of a New Cross-Link and Unique Histidine Adduct from Bovine Serum Albumin Incubated with Malondialdehyde. *Journal of Biological Chemistry*, **279**, 61-69. <https://doi.org/10.1074/jbc.m310608200>
- [46] Tironi, V.A., Tomás, M.C. and Añón, M.C. (2002) Structural and Functional Changes in Myofibrillar Proteins of Sea Salmon (*Pseudoperca semifasciata*) by Interaction with Malonaldehyde (RI). *Journal of Food Science*, **67**, 929-935. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb09430.x>
- [47] 蒋祎人, 李涛, 刘友明, 等. 丙二醛氧化修饰对白鲢肌原纤维蛋白结构性质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(6): 1-7.
- [48] 赵磊, 高民, 马燕芬. 茶多酚的抗氧化作用及其机制[J]. 动物营养学报, 2017, 29(6): 1861-1865.
- [49] Viji, P., Venkateshwarlu, G., Ravishankar, C.N., *et al.* (2017) Role of Plant Extracts as Natural Additives in Fish and Fish Products—A Review. *Fishery Technology*, **54**, 145-154.
- [50] 刘焱, 刘伦伦, 赵晨, 等. 茶多酚对氧化脂肪-蛋白质体系的作用研究[J]. 激光生物学报, 2015, 24(5): 490-494.
- [51] 李鹏鹏, 关志强, 李敏, 等. 茶多酚对冻藏罗非鱼片品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(3): 112-117.
- [52] 刘焱, 丁玉珍, 娄爱华, 等. 茶多酚在鱼糜贮藏中的应用[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2008, 34(6): 724-727.
- [53] 吴燕燕, 陈茜, 石慧, 等. 不同干燥方式对卵形鲳鲹鱼片风味的影响[J]. 水产学报, 2022, 46(7): 1188-1200.
- [54] 姜佳星, 刘焱, 阮林浩, 等. 茶多酚对冷藏鱼糜保鲜作用的研究[J]. 茶叶通讯, 2013, 40(2): 6-8.
- [55] Hao, J., Yang, W., Yang, H. and Ma, L. (2013) The Application of a Compound Natural Preservative Solution to Chilled Beef and Mutton under Vacuum Packaging during Refrigerated Storage. *Food Science and Technology Research*, **19**, 591-599. <https://doi.org/10.3136/fstr.19.591>
- [56] 陈晓眠, 吴晓萍, 邓楚津, 等. 壳聚糖和茶多酚对罗非鱼冷藏保鲜效果比较[J]. 现代食品科技, 2011, 27(3): 279-282.
- [57] 张冉, 杨丽丽, 李秋莹, 等. TP-Lips/LZM-CS 复合缓释涂膜对美国红鱼鱼片贮藏品质的影响[J]. 包装工程, 2020, 41(1): 44-50.
- [58] Pei, J., Mei, J., Yu, H., Qiu, W. and Xie, J. (2022) Effect of Gum Tragacanth-Sodium Alginate Active Coatings Incorporated with Epigallocatechin Gallate and Lysozyme on the Quality of Large Yellow Croaker at Superchilling Condition. *Frontiers in Nutrition*, **8**, Article ID: 812741. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.812741>
- [59] 鞠健, 汪超, 李冬生, 等. 茶多酚和迷迭香结合 Nisin 对冷藏鲈鱼品质的影响[J]. 食品科学技术学报, 2017, 35(1): 70-75.
- [60] Wang, X.S. and Xie, J. (2021) Quality Attributes of Horse Mackerel (*Trachurus japonicus*) during Frozen Storage as Affected by Double-Glazing Combined with Theaflavins. *International Journal of Food Properties*, **24**, 713-725. <https://doi.org/10.1080/10942912.2021.1919702>
- [61] 雷雨田, 石径, 桂萍, 等. 冰衣结合茶多酚对南美白对虾冻藏中品质变化的影响[J]. 中国农业大学学报, 2018,

- 23(6): 92-99.
- [62] 王佳媚, 符腾飞, 刘雅夫. 不同气调包装组分协同壳聚糖基复合涂膜对金鲳鱼冷藏品质的影响[J]. 肉类研究, 2021, 35(1): 59-65.
- [63] 齐凤生, 刘红英, 王颀. 复合生物保鲜剂结合气调包装对海湾扇贝柱冷藏保鲜效果的研究[J]. 现代食品科技, 2014, 30(7): 154-159.
- [64] 崔姗, 刘凯, 孙美君, 等. 水产品劣变机制及其保鲜技术研究进展[J]. 肉类研究, 2024, 38(12): 55-62.