# 冷链物流中海水鱼的腐败机制及保鲜技术研究进展

梅　俊，　许振琨，　郁慧洁，　谢　晶*
（上海海洋大学 食品学院，上海 201306）

**摘要**：海水鱼营养成分丰富、水分含量高，在冷链物流中容易发生腐败变质。因此，通过了解冷链物流中海水鱼的腐败机制并有针对性地开展海水鱼产品保鲜，进而提升冷链物流中海水鱼产品品质。作者论述了海水鱼冷链物流中的自溶性腐败、氧化腐败和微生物腐败机制，并重点阐述了控制微生物腐败的保鲜技术研究进展。通过臭氧水、电解水、低温等离子体、辐照杀菌、高静压杀菌技术、光动力杀菌技术等减菌技术，可有效减少海水鱼表面微生物；采用温度控制、气调包装、活性包装等可有效控制冷链物流中海水鱼的微生物增长、蛋白质和脂质氧化，从而控制海水鱼的腐败变质，维持海水鱼的鲜度品质。这些研究发现可为进一步开发应用于冷链物流中海水鱼的保鲜技术提供借鉴和参考。

**关键词**：冷链物流；海水鱼；腐败机制；减菌技术；抑菌技术
**中图分类号**：TS 201.6　**文章编号**：1673-1689(2022)07-0084-16　**DOI**：10.3969/j.issn. 1673-1689.2022.07.008

# Research Progress on Spoilage Mechanism and Preservation Technology of Marine Fish in Cold Chain Logistics

*MEI Jun*，　*XU Zhenkun*，　*YU Huijie*，　*XIE Jing**
(College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract**: Marine fish are rich in nutrients and high in water content, and are prone to spoilage in the cold chain logistics. Therefore, understanding the spoilage mechanism of marine fish in cold chain logistics, and then carrying out targeted preservation of marine fish products, greatly improve the quality of marine fish products in cold chain. This review discusses the mechanisms of autolytic spoilage, oxidative spoilage and microbial spoilage in the cold chain logistics of marine fish, and focuses on the research progress of the preservation technology for controlling microbial spoilage. The surface microbial of marine fish can be effectively reduced by the ozone water, electrolyzed water, low temperature plasma, irradiation sterilization, high hydrostatic pressure, photodynamic sterilization technology and other bacteria-reducing technologies. Then the low temperature control, modified atmosphere packaging and active packaging technologies are used to control the microbial growth, protein and lipid oxidation of marine fish in the cold chain logistics, which could maintain the freshness quality of marine fish. These findings can provide a reference for the further

**收稿日期**：2022-03-30
**基金项目**：现代农业产业技术体系建设专项(CARS-47-G26)；上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心能力提升项目(19DZ2284000)。
**作者简介**：梅　俊(1986—)，男，博士，副教授，硕士研究生导师，主要从事食品冷链保鲜技术研究。E-mail：jmei@shou.edu.cn
* **通信作者**：谢　晶(1968—)，女，博士，教授，博士研究生导师，主要从事食品冷藏链设备与技术研究。E-mail：jxie@shou.edu.cn

development of preservation technology applied to the marine fish in the cold chain logistics.
**Keywords:** cold chain logistics, marine fish, spoilage mechanism, reducing bacteria technology, antibacterial methods

海水动物产品是优质动物蛋白的重要来源之一，其高蛋白质、低热量、高不饱和脂肪酸的特点深受消费者喜爱，是居民膳食结构的重要组成部分。我国是水产品生产和消费大国，其中海水鱼产品在众多水产资源中占据重要地位。据《2021 年中国渔业统计年鉴》数据显示，2020 年我国海水鱼养殖 174.98 万吨，捕捞 648.78 万吨。消费者对海水鱼产品的需求不断增加，促进了我国深远海水鱼类捕捞产业和海水鱼养殖产业的发展。冷链物流泛指冷藏冷冻类食品在生产、加工、贮藏、运输和销售等环节始终处于规定的低温环境下，以保障食品质量的供应链系统。在此期间，水产品特别是海水鱼产品极易在微生物和酶的作用下发生腐败变质，产生不良口感、色泽与风味，导致品质劣变，失去商品价值[1]。探明海水鱼冷链物流腐败机制，开发新型海水鱼保鲜技术，降低海水鱼冷链物流中的损失，是提高我国海水鱼市场竞争力的关键。

海水鱼死后不久就会发生内源性酶促反应、氧化和微生物活动，并导致感官和营养特性发生变化，从而缩短保质期[2]。变质被描述为海水鱼的初始状态的任何变化，包括令人不快的气味、味道、外观或质地。海水鱼的腐败可分为自溶性腐败、氧化腐败和微生物腐败。其中，微生物腐败是海水鱼冷链物流中腐败变质的主要原因。作者对海水鱼冷链物流中发生腐败的机制进行探讨，通过海水鱼包装前的减菌处理，以减少海水鱼表面微生物数目，结合冷链物流的抑菌技术，延长海水鱼在冷链物流中的货架期。

## 1　海水鱼冷链物流中的腐败机制

我国海水鱼的流通销售多以冷鲜或冷冻形式进行，虽然海水鱼在冷链物流中可以保持较长时间的新鲜度，但海水鱼的腐败变质难以避免。研究表明，海水鱼在冷链物流中的腐败变质主要由自溶性腐败、氧化腐败和微生物腐败引起。

### 1.1　自溶性腐败

自溶性腐败始于海水鱼被宰杀后尸体僵硬阶段，其肌肉和内脏中的内源酶被释放，主要自溶变化是 5′-三磷酸腺苷（adenosine 5′-triphosphate，ATP）及其相关产物的酶促降解，其次是内源蛋白酶和脂肪酶的作用[3]。内源蛋白酶主要参与鱼肌肉和其他组织的死后退化，其水解产物（小分子肽和游离氨基酸等）可以作为冷链物流中腐败微生物生长的营养物质。内源蛋白酶可以将氧化三甲胺（trimethylamine oxide，TMAO）转化为三甲胺（trimethylamine，TMA），提高海水鱼鱼肉的 pH。内源脂肪酶或磷脂酶可以水解海水鱼体内的脂质，如甘油三酯酰基水解酶可以水解甘油酯成甘油和游离脂肪酸。对于海水鱼来讲，游离脂肪酸容易被氧化生成醛类等化合物，产生鱼腥味[1]。自溶性腐败的产物有利于后续微生物的生长，使得感官属性发生变化，造成变质。但在冷链物流中由于温度较低，海水鱼的自溶速度较慢[4]。

### 1.2　氧化腐败

如图 1 所示，冷链物流中海水鱼脂质氧化主要包括启动、传播和终止 3 个阶段[5]。海水鱼的氧化过程可以通过催化剂（光、热和金属离子等）促进脂肪酸中双键附近氢原子的失去以形成自由基，开始启动阶段。在传播阶段，自由基与氧反应形成过氧自由基，过氧自由基再次与其他脂质分子反应形成氢过氧化物和新的自由基。当有大量自由基形成非自由基产物时，该过程终止。冷链物流中海水鱼脂质氧化启动和传播机制有多种，包括自氧化、脂氧合酶作用、微粒体酶作用、光敏氧化和过氧化物酶作用等。其中，自氧化被定义为大气中的氧气与脂质的自发反应，是导致冷链物流中海水鱼氧化变质的最常见原因[6]。自氧化的主要产物是脂质氢过氧化物，然而，由于它们不稳定，氢过氧化物会分解产生复杂的次级氧化产物混合物，例如醛、酮、醇、烃、挥发性有机酸和环氧化合物等，导致肌肉酸败和品质劣变[7]。氧化通常涉及氧与脂肪酸双键的反应，而海水鱼中含有较高的多不饱和脂肪酸（polyunsaturated fatty acids，PUFA）特别容易氧化。此外，海水鱼肌肉中的铁结合蛋白，如血红蛋白、铁蛋白、肌红蛋白、

含铁血黄素、转铁蛋白等含有金属离子,在海水鱼冷链物流中会被释放出来,并在启动和(或)激活脂质氧化中发挥重要作用[8]。脂质氧化产物也可以造成蛋白质变性、蛋白质电泳谱的修饰、营养损失、内源性抗氧化系统损失和荧光化合物的产生。因此,脂质氧化导致消费者对海水鱼的接受度下降。

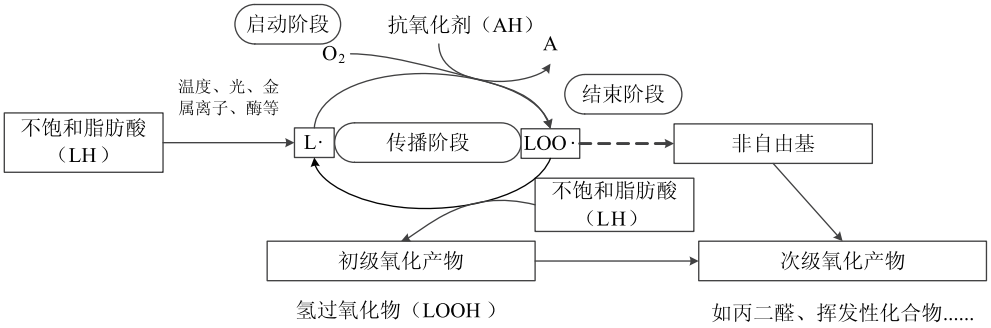



**图 1　脂质氧化步骤的概述**

**Fig. 1　An overview of the steps of lipid oxidation**

### 1.3　微生物腐败

海水鱼的生化成分为微生物生长提供了理想条件,使得微生物腐败是冷链物流中海水鱼品质劣变的主要原因,导致海水鱼损失高达 25%~30%。微生物生长和新陈代谢会产生腐胺、组胺和尸胺等生物胺,以及具有刺激性和有害异味的有机酸、硫化物、醇、醛和酮等化合物[9]。每种海水鱼都有自己独特的微生物群,这取决于微生物环境、原材料、加工条件、储存条件以及微生物耐受保存条件的能力等[10]。海水鱼在冷链物流中,并不是所有的微生物都会使海水鱼变质，只有一小部分会导致海水鱼腐败变质，称之为特定腐败微生物（specifics spoilage organisms,SSOs)。特定腐败微生物可以通过非蛋白氮的同化作用产生挥发性风味化合物,产生令人不快和不受欢迎的异味[11]。特定腐败微生物因海水鱼种类和贮藏条件会发生变化,表 1 中列出了不同海水鱼在不同冷链物流条件下的特定腐败微生物。

## 2　减菌技术

海水鱼在冷链物流运输之前经历了捕捞、宰杀、清洗等过程，其微生物污染来源包括空气、水源、内脏、宰杀工具、工作人员等,污染的方式和程

**表 1　海水鱼在冷链物流中的特定腐败微生物情况**

**Table 1　Specifics spoilage organisms of marine fish in cold chain logistics**

| 水产名称 | 保存方法 | 贮藏温度/℃ | 优势腐败菌属 | 参考文献 |
|---|---|---|---|---|
| 金头鲷鱼 | 融化的冰 | 4.0 | *Pseudomonas*、*Psychrobacter* | [12] |
| 黄鳍金枪鱼 | 真空 | 3.0 | *Pseudomonas* spp. | [13] |
| 三文鱼 | 真空 | 3.0 | *Photobacterium* spp. | |
| 金头鲷鱼 | | 0 | *Pseudomonas*、*Shewanella*、*Psychrobacter*、*Arthrobacter* | [14] |
| 尖吻鲈 | 葡萄籽提取物活性包装 | 4.0 | *Pseudomonas*、*Aeromonas*、*Shewanella* | [15] |
| 小黄鱼 | — | 4.0 | *Planococcus migula*、*Shewanella glacialipiscicola*、*Proteus hauseri* | [16] |
| 小黄鱼 | MAP($V(N_2)$:$V(CO_2)$=1:1) | 4.0 | *Shewanella glacialipiscicola*、*Carnobacterium maltaromaticum* | |
| 海鲈鱼 | 流化冰 | −1.8 | *Pseudomonas*、*Shewanella* | [17] |
| 鲐鱼 | 真空包装 | 4.0 | *Photobacterium*、*Shewanella*、*Vibrio* | [18] |
| 鲐鱼 | MAP($V(N_2)$:$V(CO_2)$=1:1) | 4.0 | *Pelagibacteraceae*、*Halomonadaceae*、*Psychrobacter* spp. | |
| 大眼金枪鱼 | — | 4.0 | *Brochothrix thermosphacta*、*Endophytes*、*Ralstonia solanacearum*、*Acinetobacter* spp.、*Bacillus* spp.、*Pseudomonas* spp. | [19] |

度取决于加工和处理方法、卫生控制措施及贮藏和配送环境。此外，海水鱼在冷链运输中受运输时间与运输条件的影响也会发生腐败变质。为尽量减少海水鱼宰杀过程中的微生物污染，保证海水鱼的质量和安全，国内外许多专家致力于减菌技术与措施的应用研究。减菌技术是海水鱼冷链物流中亟须采取的关键技术，合理的减菌措施可以减少海水鱼的初始微生物数量，提高其在冷链物流中的安全性并延长货架期。

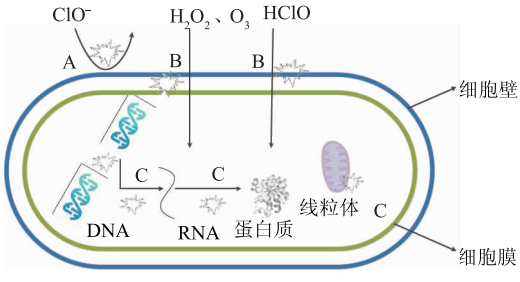
### 2.1　臭氧水

臭氧是一种可直接接触食品的高效杀菌剂，通过对微生物细胞成分的逐步氧化，破坏成分中的脂肪酸和蛋白质。臭氧的杀菌机制主要是两种灭活机制，包括：1）肽、蛋白质和酶的巯基、氨基酸氧化成更小的肽；2）多不饱和脂肪酸氧化成酸过氧化物，最终导致细胞渗漏而死亡[20]。已经证明了臭氧对革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌都具有致命性，尤其是革兰氏阴性菌。而海水鱼冷链物流中的特定腐败微生物多为革兰氏阴性菌，因此，臭氧适合海水鱼加工的减菌处理。Aponte 等利用臭氧处理大口羊舌鲆（*Arnoglossus laterna*），发现臭氧对嗜冷菌、产 $H_2S$ 菌、气单胞菌和布罗丝菌属具有显著的杀菌作用[21]。Zhao 等研究发现臭氧流态冰显著抑制微生物生长，延缓大黄鱼（*Pseudosciaena crocea*）硫代巴比妥酸（thiobarbituric acid，TBA）、总挥发性盐基氮（total volatile basic nitrogen，TVB-N）、*K* 值和生物胺的升高，有效提高大黄鱼的质量[22]。但是，臭氧非常不稳定，即使暴露在光线下也会降解，在实际应用中需要现场生产；其次，臭氧不溶于水，因此需要特殊的混合装置。这限制了臭氧在海水鱼减菌处理中的工业应用。

### 2.2　电解水

电解水是通过在电解水发生装置中电解稀 NaCl（有时是 KCl 或 $MgCl_2$）溶液而产生的，由于其有效的杀菌活性，已经成为最有前途的杀菌剂之一。根据电解水装置的种类、电解质和电解参数，可以生成不同的电解水类型。根据生成溶液的 pH，电解水可分为酸性电解水（pH 2.2~2.7）、弱酸性电解水（pH 2.7~5.0）、微酸性电解水（pH 5.0~6.5）、中性电解水（pH 6.5~7.5）和碱性电解水（pH 11.0~13.8）。电解水的基本特性包括有效氯浓度（available chlorine content，ACC）、pH 和氧化还原电位（oxidation reduction potential，ORP），被认为是直接影响电解水消毒效果的 3 个主要因素。弱酸性电解水仅通过电解 HCl 或在无膜电子水反应器中与 NaCl 结合产生[23]。在 pH 为 5.0~6.5 和 ORP 为 800~900 mV 的情况下，其活性成分是 HOCl（10~80 mV），其杀菌效果是同等浓度 $ClO^-$ 的 80 倍[24]。弱酸性电解水的 pH 由于腐蚀性较小，使其成为优于酸性电解水的首选杀菌剂。Li 等利用弱酸性电解水（ACC 为 31 mg/L、pH 为 6.1、ORP 为 947.6 mV）处理暗纹东方鲀（*Takifugu obscurus*），经过处理的暗纹东方鲀初始菌落数下降 1 lg（CFU/g），同时，假单胞菌、腐败希瓦氏菌和乳酸菌数量也有所降低[25]。Jung 等利用弱酸性电解水（ACC 为 45 mg/L、pH 为 5.07）和葡萄柚籽提取物处理尖吻黄盖鲽（*Pleuronectes herzensteini*），能明显抑制尖吻黄盖鲽冷藏期间的菌落总数（total viable count，TVC）、*Pseudomonas*、产 $H_2S$ 菌的增长，减缓 TVB-N 和 *K* 值的升高，保持其良好的感官品质[26]。但是，有研究认为酸性电解水可以改变蛋白质的二级结构，从而影响冷链物流中海水鱼的质量[27]。

电解水杀菌主要是电解水中的活性氯引起的，包括 HOCl 和 $ClO^-$（见图 2）。由于细胞膜脂双层的疏水性，带电荷的 $ClO^-$ 难以穿过细胞膜自由进入细胞（见图 2 中 A），同时，细胞壁对 $ClO^-$ 也有一定的阻隔作用。HClO 为中性，且相对分子质量小，可以通过被动扩散自由进入微生物内部，然后直接从内部破坏微生物的核酸和蛋白质（见图 2 中 B 和 C）。因此，HClO 的杀菌能力比 $ClO^-$ 强。除 HClO 和 $ClO^-$ 外，电解水也会产生 $O_3$ 和 $H_2O_2$ 等活性氧物质，也会破坏微生物细胞膜的脂质成分和蛋白质，从而破坏




A 为 $ClO^-$ 仅破坏细胞壁和细胞外膜，B 为 HClO、$H_2O_2$ 和 $O_3$ 破坏细胞壁和细胞膜，C 为对细胞内 DNA、RNA、蛋白质的氧化和线粒体破坏。

**图 2　电解水中 $ClO^-$、HClO、$H_2O_2$、$O_3$ 对微生物的作用机制[27]**

**Fig. 2　Mechanisms of $ClO^-$, HClO, $H_2O_2$ and $O_3$ of electrolyzed water against microorganisms**

细胞膜的通透性。同时,$O_3$ 和 $H_2O_2$ 也可直接穿过微生物的细胞壁和细胞膜,与蛋白质反应破坏微生物的代谢过程,导致微生物迅速失活[27]。

### 2.3 低温等离子体

低温等离子体是物质的第 4 种状态,可以由不同的能源产生,包括辐射能(伽马辐射、X 射线、电磁辐射)、电能、光能(紫外线等)和热能等,能够电离气体,产生自由基、带电粒子和紫外线辐射[28]。低温等离子体的主要杀菌机制有:1)增加细胞膜和细胞壁的渗透性(孔的形成、渗透性增加和破裂等),导致细胞成分(钾、核酸和蛋白质等)的泄漏;2)损伤细胞内蛋白质;3)破坏核酸的结构和组成[29]。低温等离子体的杀菌性能受多种因素控制或影响,包括电压、频率、处理时间、工作气体成分、后处理时间(暴露时间)和样品表面积等[30]。关于低温等离子体对海水鱼品质的影响见表 2。真菌孢子因为细胞壁更厚,化学成分也不同,不受等离子体处理的影响。多糖类物质,如几丁质、纤维素和核膜保护的二倍体基因组的非编码区(内含子),是降低 DNA 和细胞壁的损伤额外屏障。活性氧和活性氮可以加速海水鱼脂质氧化,促进不饱和脂肪酸分解和修饰为脂质过氧化物。受低温等离子体作用物的影响,不同海水鱼的脂质氧化有所增加。有研究者在利用低温等离子体延长鲭鱼货架期时发现低温等离子体系统在 80 kV 下处理 5 min 会加速与蛋白质氧化有关的羰基化合物的形成[31]。Koddy 等评估了低温等离子体对带鱼(*Trichiurus lepturus*)肌肉蛋白特性的影响,发现处理样品中的羰基含量显著增加,比对照样品高约 3 倍。但是,肌肉蛋白的质地分布、持水能力和颜色特性显著改善[32]。

### 2.4 辐照杀菌

辐照杀菌是一种非热杀菌技术,通过将食品暴露于一定量的机械或自然来源的电离辐射下以实现微生物的灭活。辐照杀菌主要有电子束 (e-beam)、X 射线和 γ 射线 3 种。水产品的加工中通常采用 γ 射线进行辐照处理[33]。在直接辐射中,电离辐射会破坏目标微生物的 DNA, 随后通过抑制 DNA 合成来阻止细胞分裂。间接效应是由辐照与水分子的相互作用而发生的。这种相互作用将导致活性分子的产生,例如羟基自由基,随后与产生氧气的氧化剂结合,氧化剂的积累最终会导致细胞裂解[34]。由世界卫生组织、国际原子能机构和联合国粮食及农业组织建立的食品辐照联合专家委员会已经证明了食品辐照在特定剂量(10 kGy 以下)下的安全性,因此,在辐照过程中要精确控制辐照剂量,以免造成感官和营养价值的重大损失。Shankar 等利用 γ 辐射(1 kGy)处理太平洋无须鳕鱼(*Merluccius* sp.)发现 γ 辐射可以显著降低微生物含量,且外观没有明显变化,但是 pH 略微降低[35]。Mahmoud 等研究发现X 射线(1.0 kGy/min)可以显著降低金枪鱼鱼片中*Salmonella* 和腐败菌群, 金枪鱼受到 X 射线照射时其颜色发生明显变化,但在冷藏过程中未观察到对照样品和处理样品的颜色或硬度有显著差异[36]。

### 2.5 高静压(high hydrostatic pressure,HHP)杀菌技术

HHP 杀菌技术是一种非热技术,能够灭活病原微生物和腐败微生物的营养细胞, 改变酶活性,从而保持海水鱼的新鲜度和营养价值。HHP 灭菌的机制的主要有:1)蛋白质变性和酶失活;2)破坏微生物细胞的形态和膜通透性, 造成膜内物质泄漏;3)基因组成发生变化等。当 HHP 处理造成的损伤超过微生物细胞自身修复能力,甚至使原有功能被破坏或者发生不可逆转的变化时,会影响微生物正常的生理机能。在施加 500~600 MPa 的压力时可以提供与巴氏杀菌相似的杀菌效果[37]。杨华等研究超高压处理对养殖大黄鱼保鲜效果的影响,结果发现养殖大黄鱼经 500 MPa、15 min 处理后进行 4 ℃冷藏,在第 45 天时大黄鱼的菌落总数为 $5.7\times10^4$ CFU/mL,TVB-N 和 TMA 分别不超过 35 mg/hg 和 5 mg/hg[38]。

HHP 会影响离子相互作用、疏水性、氢键、二硫键等非共价键,因此,会直接作用于蛋白质、酶、脂类、碳水化合物等大分子物质,而小分子化合物(维生素、矿物质等)不受影响。其中,海水鱼中蛋白质是 HHP 修饰的关键分子, 其内部空间的维度排列可以被压缩,通过蛋白质四级、三级和二级结构的折叠导致蛋白质体积的减小,从而导致蛋白质的解离、展开、变性、聚集、沉淀和不同强度的糊化[39]。HHP<150 MPa 时主要影响蛋白质四级结构,200 MPa 时主要影响三级结构,而 300~700 MPa 的压力可以诱导二级结构的变化和蛋白质变性[40]。HHP 处理海水鱼在灭菌的同时, 也会引起一些不良结果,如蛋白质和脂质氧化。HHP 条件下的蛋白质氧化与形成的自由基有关, 自由基会引发各种氧化反应,从而通过必需氨基酸降解和蛋白质消化率降低而

形成异味并降低营养价值。Zhou 等利用 HHP(200、400、600 MPa，10、30、50 min)诱导鲽鱼(*Nemipterus* spp.)肌动球蛋白的理化性质变化，结果发现 HHP 导致蛋白质聚集体的出现使得肌动球蛋白浊度增加与蛋白质溶解度降低，随着压力和加压时间的增加肌动球蛋白表面疏水性增加、总巯基含量降低、表面活性巯基含量增加[41]。在 HHP 对脂质氧化方面，脂质氧化不是由于 HHP 对脂质的直接影响，而是由于氧气和金属离子、蛋白质或酶等催化剂的联合作用。

### 2.6　光动力杀菌技术

光动力杀菌技术基于可见光、光敏剂(可以是内源性或外源性的)和分子氧的组合，在有氧的情况下用足够的光照射光敏剂将产生丰富的活性氧，其进一步与微生物细胞内的多个靶点发生反应并最终导致细胞死亡。这个过程(见图 3)产生的活性氧主要是单线态氧($^1O_2$)、羟自由基(·OH)、超氧阴离子($·O_2^-$)和过氧化氢($H_2O_2$)[42]。活性氧与靶细胞包膜的相互作用可能引发膜脂肪酸链的脂质过氧化，诱导膜结构发生变化，例如相分离和孔形成等[43]。对蛋白质靶标的额外损伤导致蛋白质等电点的变化、蛋白质氧化和蛋白质交联，而活性氧损伤 DNA 可能会导致脱氧鸟苷的氧化(dG)产生 8-羟基-脱氧鸟苷(8-OHdG)[44]。从自然界获得的光敏剂主要有金丝桃素、香豆素、呋喃香豆素、叶绿素(Chl)、姜黄素和核黄素(维生素 $B_2$)等。Kim 等利用核黄素作为光敏剂，通过 460 nm LED 以 0.22 kJ/cm² 的强度照射 30 min，可以有效灭活冷熏三文鱼表面的 *Listeria monocytogenes*，增加细胞膜的通透性，导致 DNA 泄漏[45]。同时光动力处理也会导致细菌细胞内 DNA、RNA 和蛋白质等成分的损伤。Gong 等利用姜黄素介导的光动力杀菌技术，在 15 W LED 灯(470 nm)功率条件下，处理鲟鱼 (*Acipenser gueldenstaedti Brandt* ♀ × *Acipenser schrenckii Brandt* ♂)90 s，发现经过光动力杀菌技术处理的鲟鱼微生物数量减少，在 4 ℃冷链过程中鲟鱼肉氧化程度降低，肉质腐烂变慢，腐败微生物的新陈代谢水平较低，营养成分分解较少[46]。

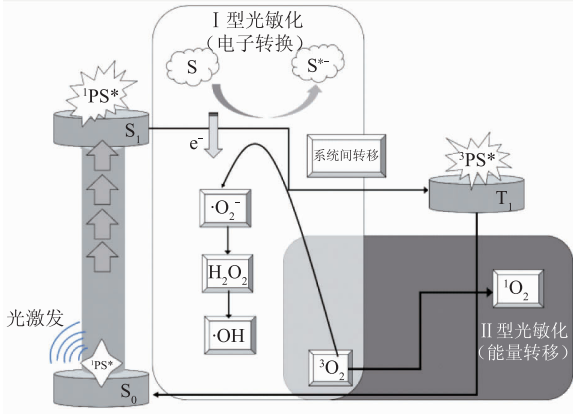



**图 3　光敏过程产生活性氧的机制**

**Fig. 3　Mechanisms of production of reactive oxygen species from the photosensitisation process**

不同减菌技术处理对冷水鱼冷链物流中的品质见表 2。

**表 2　不同减菌技术处理对海水鱼冷链物流中品质的影响**

**Table 2　Effects of different bacteria-reducing technologies on the quality of marine fish in the cold chain logistics**

| 水产名称 | 减菌方式 | 减菌参数 | 主要结果 | 负面结果 | 参考文献 |
|---|---|---|---|---|---|
| 带鱼 | 低温等离子体 | 电压 50 kV，处理时间 30、60、120、180、240 、300 s | 粗酶活性随着处理时间的增加而降低，肌肉蛋白的质地分布、持水能力和颜色特性显著改善 | 总巯基含量降低，羰基含量显著增加 | [32] |
| 三文鱼 | 电子束 | 0、1、2、4 kGy | 辐照剂量越高，杀菌效果越好；抑制 *K* 值和 TVB-N 增加 | 高剂量处理导致色泽变淡，轻微辐照产生异味 | [33] |
| 太平洋无须鳕鱼 | 臭氧处理 | $O_3$(10 mg/L)洗涤 15 min | pH 进一步略微降低，处理后未检测到微生物 | 未指出 | [35] |
| 鲐鱼 | 低温等离子体 | 电压 80 kV，处理 120 s | pH、TVC 保持相对较低水平 | 未指出 | [47] |
| 大黄鱼 | 低温等离子体 | 工作电流 0.024 mA，电压 19 kV，频率 20 kHz | 抑制贮藏过程中的腐败 | 鱼肉的脂质氧化值和亚硝酸盐含量有所增加 | [48] |

续表 2

| 水产名称 | 减菌方式 | 减菌参数 | 主要结果 | 负面结果 | 参考文献 |
|---|---|---|---|---|---|
| 鲭鱼 | 低温等离子体 | 离散电压 70/80 kV,空气温度 15 ℃,相对湿度 50% | 腐败细菌显著减少 | 脂质氧化参数 (PV、二烯)的显著增加 | [49] |
| 冷熏大西洋鲑 | 电解水处理 | 电解水(pH 2.7,ORP1 150 mV,游离氯 60 mg/L) | *Listeria monocytogenes* 减少 | 未指出 | [50] |
| 鲭鱼 | γ 辐照 | 1、3 、5 kGy | 假单胞菌属的数量显著减少，增加剂量会显著降低组胺的浓度，但只会略微降低 $NH_3$ 的浓度 | 未指出 | [51] |
| 鲈鱼 | 电子束 | 0、1、3、5、7 kGy | 有效降低鲈鱼肉的菌落总数,延缓 TVB-N 增加 | 鱼肉 TBA 增加，略微提高鱼肉的亮度 | [52] |
| 遮目鱼 | 高静压 | 200、300、400、500、600 MPa，5 min | 更高的压力更有效地减少了肉中的微生物数量和 TVB-N | 随着压力的增加,鱼肉具有更白和不透明的外观和颜色 | [53] |
| 带鱼 | 高静压 | 220、290 MPa,3、6、9 min | 抑制微生物和 TMA-N 的增长 | 鱼肉透明度减少,持水力有所降低 | [54] |
| 菊黄东方豚 | 高静压 | 0、200、300、400、500、600 MPa,3 min | 延缓了色泽的变化,减缓 TVB-N 产生,有效抑制微生物的生长 | 500/600 MPa 产生过于熟化的颜色 | [55] |
| 三文鱼 | 光动力杀菌 | 姜黄素 ,455 ~460 nm，0.5 (9.36 J/cm$^2$)、1.0 h (18.72 J/cm$^2$)和 1.5 h(28.08 J/cm$^2$) | 抑制微生物生长、pH 升高、TVB-N 产生,防止颜色变化,延缓水分流失 | 未指出 | [56] |
| 金枪鱼 | 光动力杀菌 | 455 nm,40 min (18.72、56.16、93.60 J/cm$^2$) | 抑制微生物生长 | 促进了肌原纤维固定水向自由水的转变,加速脂质氧化 | [57] |

## 3 抑菌技术

利用减菌技术减少海水鱼表面微生物的数量，然后经过(不经过)包装将海水鱼送入冷链物流。然而,在冷链物流中,海水鱼中的微生物处于增长状态。因此,为保证冷链物流中海水鱼的新鲜品质,需要采取一些措施抑制微生物的生长。目前,常用的抑菌技术有温度控制、气调包装、活性包装等。

### 3.1 温度控制

低温是海水鱼贮藏的主要方式，冷却贮藏、过冷贮藏和冷冻贮藏可以延缓海水鱼的品质劣变,更长时间维持海水鱼的高品质。

**3.1.1 冷却贮藏** 冷却贮藏是海水鱼最常用的贮藏方式之一,是将海水鱼冷却至接近融冰温度进行保藏。通过低温抑制酶的活性和微生物的生长,减缓物理和化学变化,从而维持海水鱼的高品质。但仍有一些嗜冷微生物能缓慢生长繁殖,最终导致海水鱼的腐败变质。在海水鱼捕捞中,一般采用碎冰进行冷却贮藏,温度在 0 ℃附近,可以将保质期延长至 20 d 左右[17]。在零售场所或者家庭中,4 ℃是最常见的贮藏方式,保质期会缩短至 7 d 左右。因此,为了延长海水鱼的货架期需要栅栏技术保鲜,如气调包装、活性包装等。

**3.1.2 过冷贮藏** 过冷贮藏是一种将海水鱼冷却到低于初始冰点($T_f$)1~2 ℃,导致海水鱼内部 5%~30%的水形成冰晶,在海水鱼表面形成一层薄冰(1~3 mm),内部也会有冰晶生成,也称为部分冷冻[58]、深度冷冻[59]。过冷贮藏是位于冷冻和冷藏之间,大多数食物的初始冰点在 −0.5~−2.8 ℃,对于渔业产品,初始冰点在 −0.8~−1.4 ℃[3]。过冷贮藏会显著抑制微生物生长繁殖,延缓海水鱼的变质,并且在短时间运输或储存过程中可能不需要额外添加冰。在理想情况下,过冷贮藏会导致少量水分转化为冰,因此与冷冻贮藏相比,冰晶造成的冷冻蛋白质和结构损伤(肌纤维的分离和断裂)较少。同时,在过冷贮藏过程中,由于微生物数量和酶活性的降低,与冷藏相比,过冷贮藏食品的保质期可以延长 1.5~4.0 倍[3]。作者所在团队研究发现，将海鲈鱼(*Lateolabrax maculatus*)置于 4 ℃下冷藏,其货架期为 7 d,而将海鲈鱼置于过冷贮藏(−0.9 ℃)下其货架期可以达

到 18 d[60]。

然而，过冷贮藏海水鱼也可能对质量产生负面影响。Bahuaud 等报道过冷贮藏会在大西洋鲑鱼（*Salmo salar*）鱼片的外层形成细胞内和细胞外的冰晶，造成溶酶体破裂，随后释放组织蛋白酶 B 和 L，并且加速了肌纤维之间的分离，导致更高的液体泄漏和肌纤维断裂；并且在过冷过程中形成的冰晶大到足以破坏鱼肌肉的完整性，对形态变化、细胞破坏以及细胞成分的变性有很大的影响，从而导致解冻过程中的质地变化和滴水损失增加[61]。Duun 等还发现，与冰冻鳕鱼片相比，过冷贮藏样品中的液体损失率更高[58]。高液体损失率与盐溶性蛋白质的含量减少相关，盐溶性蛋白质含量在过冷贮藏样品中明显低于在冰冷样品。过冷贮藏过程中波动的温度也会加速形成的冰晶尺寸的增长，随着储存温度的轻微升高，小冰晶可能会比大冰晶融化得更快，当温度再次下降时，形成越来越大的晶体。同时，有研究者发现大西洋鲑鱼（*Salmo salar*）红肉片和白肉片在–1.7 ℃下，其细胞内冰晶的当量直径分别为 17、29 μm，形成的冰晶大小存在显著差异[62]。在过冷贮藏方式上，Kaale 等研究发现大西洋鲑鱼鱼片在冲击式冷冻机以慢速（–20 ℃、153 W/(m$^2$·K)、4.2 min）或快速（–30 ℃、227 W/(m$^2$·K)、2.1 min）条件下所形成的冰晶等效直径分别为 60、23 μm[63]。

**3.1.3** *冷冻贮藏*　冷冻贮藏是将海水鱼贮藏于–10 ℃以下，海水鱼中大约有 80%的水会转化为冰。温度低于–18 ℃时被认为是深度冷冻，传统上，海水鱼冷冻贮藏期间的温度在–18~–30 ℃[64]。冷冻贮藏可以防止海水鱼因微生物和酶的作用而变质，保质期可长达一年。但是冷冻贮藏也会引发物理和化学变化导致海水鱼结构被破坏，冰晶的大小和位置可能会导致海水鱼细胞受损和品质下降。在冰结晶过程中，结合水的损失或活性物质的泄漏间接触发了生化过程，包括蛋白质降解、氧化和聚集，以及脂质氧化等。冰晶的形成是冷冻引起的海水鱼品质劣变的主要原因。一般来说，冰晶的大小和分布取决于冷冻速度，而冰晶的数量很大程度上取决于冷冻贮藏温度。在海水鱼冷冻贮藏过程中，难以控制的温度波动易造成冰重结晶并增加晶体尺寸。然而，通过避免温度波动来完全控制冰再结晶仍然难以实现，因此，利用冷冻保护剂可以最大限度地减少冷冻引起的海水鱼品质劣变。Trigo 等利用不含皂苷的藜麦（*Chenopodium quinoa*）提取物作为大西洋鲭鱼（*Scomber scombrus*）的冷冻保护剂，可以有效抑制大西洋鲭鱼在冷冻贮藏过程中的脂质氧化和水解，延长其货架期[65]。蓝蔚青等研究发现迷迭香提取物镀冰衣可以显著抑制卵形鲳鲹（*Trachinotus ovatus*）在冷冻贮藏过程中的蛋白质氧化变性和脂质氧化损伤，有效减少鱼体内水分流失，延长其货架期[66]。

### 3.2　气调包装（modified atmosphere packaging，MAP）

MAP 是将一定比例的混合气体充入具有一定阻隔性和密封性的包装材料中，通过改变海水鱼所处的气体环境，并利用气体间的不同作用来抑制冷链物流过程海水鱼品质劣变的生理生化过程，从而达到延长海水鱼保鲜期或货架期的技术。气调包装可以隔离外界微生物，避免二次污染。此外，气调包装因其可以抑制海水鱼中好氧微生物的生长繁殖，降低酶促反应速度，减缓脂质氧化等，已经成为海水鱼冷链物流中重要的包装方式之一。MAP 中气体的比例组成由产品特性、预期的保质期、包装材料的渗透性和储存条件等决定[67]。在冷链物流中，海水鱼中微生物新陈代谢、包装材料对气体的特定渗透性，会导致包装内的气体比例随着时间和温度的变化而发生变化。

二氧化碳（$CO_2$）、氮气（$N_2$）和氧气（$O_2$）是 MAP 中常用的 3 种气体，$CO_2$ 易溶于水和脂肪，形成碳酸。碳酸可以破坏细菌的细胞膜，降低细胞内 pH 并裂解细胞，并通过破坏营养吸收、抑制或减少酶促反应以及促进细胞蛋白质的理化性质改变等影响微生物的生长。$CO_2$ 对嗜冷菌有效，而且革兰氏阴性菌对其更为敏感，适合海水鱼冷链过程 MAP 包装[68]。作者所在团队研究发现高 $CO_2$ 体积分数的 MAP（60%$CO_2$、5%$O_2$、35%$N_2$，体积分数）可以显著抑制养殖暗纹东方鲀（*Takifugu obscurus*）在冷藏过程（4 ℃）中的微生物生长，维持暗纹东方鲀水分含量及水分迁移，降低了蛋白质的降解[69]。Chan 等研究发现高 $CO_2$ 体积分数的 MAP（60%$CO_2$、40%$N_2$，体积分数）可以显著抑制大西洋鲑鱼冷藏过程（0 ℃）中微生物生长，维持较低的 pH，且鱼体颜色更深、更红和更黄[70]。$N_2$ 可防止包装塌陷，而 $O_2$ 可减少海水鱼体内的渗出物并保持肉色[71]。然而，由于 MAP 中 $O_2$ 的存在，海水鱼在冷链过程中容易发生过脂质氧

化，将 PUFA 和单不饱和脂肪酸(monounsaturated fatty acid,MUFA)氧化[72]。其他气体(Ar、He、Xe、Ne、NO、$N_2O$ 等)在气调包装中的应用也有所研究,但其主要缺点是成本明显高于 $N_2$(4~5 倍),在实际生产中使用较少[68]。

真空包装(vacuum package,VP)是指在密封之前从包装中去除空气的技术，在抽真空过程中,包装中的 $O_2$ 体积分数降低了 97%~99%，从而抑制了导致海水鱼变质的需氧微生物增殖。同时,氧浓度的降低也抑制了冷链过程中的脂质氧化。Genc 等利用真空处理研究大西洋白姑鱼(*Argyrosomus regius*)在 4 ℃冷藏过程中的品质变化,发现真空包装处理可以显著抑制好氧微生物的生长和脂质氧化,延长货架期[73]。Lahreche 等利用真空包装处理扁舵鲣(*Auxis thazard*)研究中也发现真空包装可以显著抑制扁舵鲣的脂质氧化[74]。

### 3.3 活性包装

活性包装是一种新兴技术,在包装材料中结合了除氧剂、抗氧化剂和杀菌剂等活性成分,可以将活性物质释放或吸收到包装或海水鱼周围环境中。活性包装分为两大类:1)非迁移性活性包装,无须刻意迁移即可发挥作用;2)主动释放包装,允许非挥发性化合物受控迁移或挥发性物质释放到包装海水鱼周围的环境中。目前有以下方法应用于活性包装[75]:1)制得含有挥发性活性物质的小袋/垫;2)将挥发性和非挥发性活性物质直接掺入活性包装基材聚合物结构中;3)在与海水鱼接触的活性包装基材聚合物表面上施加涂层或吸附活性物质;4)通过离子或共价键等方法将活性物质固定在活性包装基材聚合物中;5)直接应用活性包装基材聚合物(壳聚糖等),其本质上可以作为活性物质。选择合适的活性包装要考虑活性包装基材聚合物的类型、要掺入的活性物质和海水鱼的物理化学特性。活性包装基材聚合物可以为合成或天然来源。最常用的合成聚合物是低密度聚乙烯和聚苯乙烯,虽然生产成本低,但由于难降解,其广泛使用易引起环境问题。因此,主要由蛋白质、多糖、脂质等组成的天然聚合物成为研究热点。多糖和蛋白质的亲水性有助于降低防潮性和阻隔性,多糖是合适的氧气屏障,而蛋白质显示出相对较好的机械强度,脂质显示出较低的水蒸气透过性和良好的防潮性能。基于脂质的活性包装通常是不透明的、蜡质的、光滑的,可以保持海水鱼的颜色、风味。然而,脂质基质包装材料相对较厚且易碎,具有较差的机械和光学特性[76]。因此,研究中常用复合活性包装基质,由至少两种成分组成,其中单个物质的弱点通过添加其他成分来补偿。例如可以通过添加脂质来提高多糖和蛋白质复合膜的水蒸气渗透性,形成兼具亲水性和疏水性的活性包装膜。此外,通过添加蛋白质或多糖来提高脂质的机械强度,甚至可以调节可食用材料中的整体传质性能[76]。再结合精油、植物提取物、抗菌肽等活性物质的使用,活性包装成功应用于冷链物流中海水鱼的保鲜研究中[77]。

**3.3.1 抑菌活性包装** 抑菌活性包装含有杀菌剂或由杀菌基质制成,是将杀菌材料(抗生素、精油、花青素、壳聚糖等)掺入或者包含在活性包装基材中。同时,纳米技术领域的进步、可生物降解及生物相容性材料的发展促进抑菌活性包装的研发与应用。

细菌素的杀菌活性根据每个类别呈现出特殊性。然而,一般而言,细菌素可以通过吸附和插入细胞膜起作用,有助于在膜中形成孔,从而导致膜通透性增加和细胞成分(金属离子、ATP、氨基酸和其他化合物)的泄漏[78]。Sarika 等研究发现细菌素 GP1(来自 *Lactobacillus rhamnosus* GP1) 可以显著抑制石斑鱼冷藏过程中 *Aeromonas* sp.、*Lactobacillus* sp. 和 *Vibrio* sp.的增长,延缓 TVB-N 和 TMA 的增加,有效保持石斑鱼的鲜度[79]。Fu 等研究发现分离自 *Bacillus coagulans* L1208 凝固蛋白 L1208 可以抑制大黄鱼(*Pseudosciaena crocea*)冷藏过程中腐败微生物的生长,延缓蛋白质降解、脂质氧化和 ATP 降解,显著提高了大黄鱼的保鲜效果[80]。但是,细菌素对于革兰氏阳性菌的效果要比革兰氏阴性菌好,而多数海水鱼的特定腐败微生物是革兰氏阴性菌,因此限制了细菌素应用于冷链物流中海水鱼的保鲜。同时,Anacarso 等研究发现在接近贮存期结束时细菌素活性降低,可能是由于蛋白酶将细菌素降解或由于细菌素与食物成分的相互作用[81],因此,需要开发控制释放细菌素的方法以避免这种现象的发生。

精油作为活性包装中的天然杀菌剂得到广泛研究,醛类、酚类和含氧萜类化合物是精油中主要杀菌活性成分[75]。精油具有疏水性,有利于与微生物细胞膜和线粒体的脂质相互作用,从而降低结构的组织性,使细胞膜更具渗透性。渗透性的增加导致

细胞内物质的泄漏，导致微生物死亡，从而延长海水鱼冷链物流中的货架期。Lan 等研究发现牛至精油可以抑制大黄鱼（*Pseudosciaena crocea*）冷藏（4 ℃）过程中的微生物生长繁殖，减缓脂质氧化、TVB-N 的升高，延长大黄鱼的货架期[82]。Echeverría 等利用丁香精油制作活性包装膜，并将其应用于 2 ℃冷藏贮藏的蓝鳍金枪鱼（*Thunnus thynnus*），结果发现含丁香精油的活性包装可以抑制微生物生长，特别是有效抑制假单胞菌属，延缓 TVB-N 的增加，更好地保持蓝鳍金枪鱼的鲜度品质[83]。

植物提取物的杀菌活性可能是由于提取物中多酚吸附在细菌膜上，导致膜破裂，细胞内容物渗漏，以及与多酚反应产生氢过氧化物的共同作用[84]，植物提取物可以通过抑制微生物生长和延缓脂质氧化来延长冷链物流中海水鱼的货架期。Khodanazary 等研究发现质量分数 1%绿茶提取物可以抑制冷藏红牙鱾（*Otolithes ruber*）微生物的生长，延缓 TVB-N、TBA、过氧化值（peroxide value，POV）和游离脂肪酸的增加[85]。Homayounpour 等制作小茴香（*Cuminum cyminum* L.）乙醇提取物的纳米脂质体，将其应用于冷藏沙丁鱼的保鲜，结果发现小茴香提取物脂质体可以抑制总活菌数和乳酸菌的增长，显著降低了 POV、TVB-N、pH 和 TBA，更好地维持沙丁鱼的鲜度品质[86]。

壳聚糖是一种存在于节肢动物和甲壳动物外骨骼中的聚阳离子生物聚合物。壳聚糖对包括某些细菌和真菌在内的各种微生物都有很好的抑制作用，其杀菌作用受壳聚糖种类和聚合度、寄主、基质的营养成分或化学成分以及环境条件等影响[87]。此外，壳聚糖具有延缓氧气、水分、溶质运输的能力，可以作为活性包装膜的基材，单独或者与其他活性物质一起延长冷链物流中海水鱼的货架期。有研究报道了壳聚糖作为活性包装基材在海水鱼保鲜中的应用[88-89]，本文中不再讨论。

溶菌酶是一种天然存在于奶和禽蛋中的酶，可以破坏革兰氏阳性菌细胞壁肽聚糖中 N-乙酰氨基葡萄糖和 N-乙酰胞壁酸之间的 $\beta(1\rightarrow4)$ 键。溶菌酶难以破坏革兰氏阴性菌外膜的脂多糖层，其抑制效果较差，但外膜可以被 nisin 或乙二胺四乙酸（ethylene diamine tetraacetic acid，EDTA）破坏，从而显著增加溶菌酶的杀菌谱。张家涛等利用茶多酚微胶囊/溶菌酶保鲜美国红鱼（*Sciaenops ocellatus*），保鲜过程中处理组微生物生长繁殖减慢，pH 变化幅度较小，延缓 TBA 和 TVB-N 的增长，可维持较好的鲜度[90]。武娇等以壳聚糖为成膜基材，在经原位合成的纳米SiOx 改性基础上，添加溶菌酶，采用流延法制备了复合保鲜涂膜，并将其应用于海鲈鱼冷藏保鲜，抑制了鱼片中微生物的生长，延缓 pH、TBA、*K* 值、TVB-N 的增加，延长了货架期[91]。

**3.3.2　抗氧化活性包装**　冷链物流中的海水鱼脂质和蛋白质氧化会引起品质劣变，开发具有抗氧化活性的包装，通过抗氧化剂的持续释放或者添加氧气/自由基清除剂可以限制氧化劣变。活性包装中的抗氧化剂可以根据反应机制分为释放型和清除剂型抗氧化剂[92]。释放型抗氧化剂以可持续的速度将活性物质从活性包装材料释放到海水鱼中，在整个冷链贮藏期间保持恒定的抗氧化剂浓度，以延长保质期。相比之下，清除型抗氧化剂具有减少或抑制海水鱼氧化的预防机制。除了抗氧化剂外，螯合剂、紫外线吸收剂和单线态氧猝灭剂也可以在活性包装中使用[93]。

精油是常用的抗氧化剂，其抗氧化活性通过清除活性氧和修饰内源性抗氧化系统来实现。香芹酚、丁香酚和百里香酚等酚类化合物是精油抗氧化活性的主要成分[94]。酚类化合物延缓鱼肌肉中脂质氧化主要是由于酚类化合物的氧化还原特性，使其能够充当氢供体、还原剂、单线态氧猝灭剂以及金属螯合剂[95]。多数精油在冷链物流中海水鱼保鲜研究中，既可抑制微生物的生长，也会抑制脂质氧化。但是，高浓度的精油用作天然杀菌剂/抗氧化剂会导致海水鱼感官较差，甚至会引起过敏反应[95]。不同活性包装对海水鱼冷链物流中品质的影响如表 3 所示。

## 4　展　望

目前，国内外对海水产品在冷链物流中的减菌技术、抑菌技术的研究已取得长足的进步，开发出一大批如电解水杀菌、低温等离子体杀菌、高静压杀菌、光动力杀菌等减菌技术以及气调包装、活性包装等抑菌技术。然而，部分杀菌、抑菌技术的成本过高，制约了其大范围推广应用。如电解水杀菌的配套设备一次性投入较高，限制了其大范围应用。目前，海水鱼传统的保鲜方法是低温保鲜，但是单一低温保鲜技术存在保存时间短、能耗高等问题。因此，在了解海水鱼冷链物流腐败机制的基础上，

表 3　不同活性包装对海水鱼冷链物流中品质的影响

Table 3　Effects of different active packages on the quality of marine fish in the cold chain logistics

| 水产名称 | 活性物质及处理方式 | 贮藏温度/℃ | 主要结果 | 参考文献 |
|---|---|---|---|---|
| 尖吻鲈 | 葡萄籽提取物涂膜,真空 | 4 | 抑制总活菌数和腐败菌、减少腐胺的积累 | [15] |
| 三文鱼 | 细菌素 EFL4(*Enterococcus faecalis*)涂膜 | 4 | 降低 TVC、TVB-N 和 *K* 值 | [96] |
| 大菱鲆 | 细菌素 DY4-2(*Lactobacillus plantarum*)涂膜 | 4 | TVC 和 TVB-N 显著下降 | [97] |
| 鲭鱼 | 双歧杆菌细菌素 A(*Bifidobacterium animalis*)涂膜 | 4 | 抑制微生物生长，尤其是假单胞菌和肠杆菌科,抑制 TVB-N、TBA 和 Hx 的积累 | [98] |
| 尖吻鲈 | 肉桂精油涂膜 | 4 | 抑制细菌的生长,尤其是副溶血性弧菌 | [99] |
| 鲣鱼 | 薄荷精油涂膜 | 4 | 抑制微生物生长,延长货架期 2 d | [100] |
| 大黄鱼 | 牛至、生姜精油涂膜 | 4 | 抑制总活菌数和产 $H_2S$ 的增加,延缓 pH、TBA 和 TVB-N 的升高,抑制 ATP 的降解 | [101] |
| 马鲛 | 龙蒿(*Artemisia dracunculus*)精油涂膜 | 4 | 抑制微生物生长,延缓蛋白质的降解率 | [102] |
| 三文鱼 | 月桂精油涂膜 | 4 | 抑制微生物生长,延缓脂肪氧化、蛋白质分解和色差值的变化 | [103] |
| 美国红鱼 | 茶多酚和溶菌酶涂膜 | 4 | 抑制微生物生长,延缓鱼片 pH、TBA 的升高和质构变化 | [104] |
| 鳕鱼 | 藻类(*Bifurcaria bifurcata*)水提物和乙醇提物涂膜 | 2 | 抑制微生物生长、脂质水解速率、脂质氧化 | [105] |
| 沙丁鱼 | 螺旋藻（*Spirulina platensis*）和小球藻(*Chlorella vulgaris*)提取物涂膜 | 4 | 有效地防止氨以及生物胺,如组胺和酪胺的产生 | [106] |
| 三文鱼 | 竹叶抗氧化物涂膜 | 0 | 抑制微生物生长、TVB-N 和 *K* 值增加 | [107] |
| 大黄鱼 | 壳聚糖和溶菌酶涂膜 | 4 | 抑制微生物生长和脂质氧化 | [108] |

采用减菌技术减少海水鱼表面微生物数量,并结合抗菌技术的应用,发挥不同保鲜技术之间的协同效用,提高海水鱼货架期,最大限度地保持海水鱼固有的营养及感官特性将是未来冷链物流中海水鱼产品保鲜领域的趋势。此外,在提高保鲜效果的基础上进一步降低单一保鲜技术的运行成本也是未来冷链物流中海水鱼产品保鲜领域亟须解决的关键问题。

## 参考文献:

[1] 蓝蔚青,郎艾,梅俊,等. 植物精油对微生物作用机制及在鱼类保鲜中的应用研究进展[J].食品与发酵工业,2021,47(13):296-302.

[2] OLATUNDE O O,BENJAKUL S. Natural preservatives for extending the shelf-life of seafood:a revisit[J]. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**,2018,17(6):1595-1612.

[3] TAVARES J,MARTINS A,FIDALGO L G,et al. Fresh fish degradation and advances in preservation using physical emerging technologies[J]. **Foods**,2021,10(4):1-20.

[4] DUARTE A M,SILVA F,PINTO F R,et al. Quality assessment of chilled and frozen fish-mini review[J]. **Foods**,2020,9(12):1-26.

[5] FRANKEL E N. Chemistry of free radical and singlet oxidation of lipids[J]. **Progress in Lipid Research**,1984,23(4):197-221.

[6] HASSOUN A,KAROUI R. Quality evaluation of fish and other seafood by traditional and nondestructive instrumental methods advantages and limitations[J]. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**,2017,57(9):1976-1998.

[7] XU J L,RICCIOLI C,SUN D W,et al. An overview on nondestructive spectroscopic techniques for lipid and lipid oxidation analysis in fish and fish products[J]. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**,2015,14(4):466-477.

[8] ALISHAHI A,AIDER M. Applications of chitosan in the seafood industry and aquaculture:a review[J]. **Food & Bioprocess Technology**,2012,5(3):817-830.

[9] 江凯,王韦华,陈伟,等. 秋刀鱼中组胺菌的分离及其理化性质研究[J]. 食品与生物技术学报,2019,38(8):32-38.
[10] CHAILLOU S,CARDINAL M,CHRISTIEANS S,et al. Origin and ecological selection of core and food-specific bacterial communities associated with meat and seafood spoilage[J]. **The ISME Journal**,2014,9(5):1105-1118.
[11] BOZIARIS I S,PARLAPANI F F. Specific spoilage organisms(SSOs) in fish[M]. Cambridge:Woodhead Publishing,2017.
[12] PARLAPANI F F,MICHAILIDOU S,PASENTSIS K,et al. A meta-barcoding approach to assess and compare the storage temperature-dependent bacterial diversity of gilt-head sea bream (*Sparus aurata*) originating from fish farms from two geographically distinct areas of Greece[J]. **International Journal of Food Microbiology**,2018,278:36-43.
[13] JÄÄSKELÄINEN E,JAKOBSEN L M A,HULTMAN J,et al. Metabolomics and bacterial diversity of packaged yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) and salmon (*Salmo salar*) show fish species-specific spoilage development during chilled storage [J]. **International Journal of Food Microbiology**,2019,293:44-52.
[14] BIKOULI V C,DOULGERAKI A I,SKANDAMIS P N. Culture-dependent PCR-DGGE-based fingerprinting to trace fishing origin or storage history of gilthead seabream[J]. **Food Control**,2021,130:1-9.
[15] ZHAO X,CHEN L,WONGMANEEPRATIP W,et al. Effect of vacuum impregnated fish gelatin and grape seed extract on moisture state,microbiota composition,and quality of chilled seabass fillets[J]. **Food Chemistry**,2021,354:1-10.
[16] 黄佳奇,向迎春,邵颖,等. 分析包装条件对小黄鱼优势腐败菌的影响[J].食品研究与开发,2018,39(8):176-181.
[17] 张皖君,蓝蔚青,段贤源,等. 基于高通量测序分析不同保鲜冰处理对鲈鱼菌群组成与代谢功能的影响[J]. 食品科学,2019,40(5):234-241.
[18] 姜晓娜,孟璐,冯俊丽,等. 鲐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.
[19] 蓝蔚青,车旭,巩涛硕,等. 基于高通量分析流通方式对大目金枪鱼品质与微生物种群变化影响[J]. 食品科学,2019,40(20):178-184.
[20] 肖淑婷,尹涛,胡杨,等. 臭氧漂洗过程中鱼肉组分溶出及其对鱼糜品质的影响[J]. 中国食品学报,2021,21(12):155-163.
[21] APONTE M,ANASTASIO A,MARRONE R,et al. Impact of gaseous ozone coupled to passive refrigeration system to maximize shelf-life and quality of four different fresh fish products[J]. **LWT – Food Science and Technology**,2018,93:412-419.
[22] ZHAO Y,LAN W,SHEN J,et al. Combining ozone and slurry ice treatment to prolong the shelf-life and quality of large yellow croaker(*Pseudosciaena crocea*)[J]. **LWT – Food Science and Technology**,2022,154:1-10.
[23] FORGHANI F,PARK J,OH D. Effect of water hardness on the production and microbicidal efficacy of slightly acidic electrolyzed water[J]. **Food Microbiology**,2015,48:28-34.
[24] NAN S,LI Y,LI B,et al. Effect of slightly acidic electrolyzed water for inactivating *Escherichia coli* O157:H7 and *Staphylococcus aureus* analyzed by transmission electron microscopy[J]. **Journal of Food Protection**,2010,73(12):2211-2216.
[25] LI P,CHEN Z,TAN M,et al. Evaluation of weakly acidic electrolyzed water and modified atmosphere packaging on the shelf life and quality of farmed puffer fish(*Takifugu obscurus*) during cold storage[J]. **Journal of Food Safety**,2020,40(3):1-14.
[26] JUNG S,KO B S,JANG H J,et al. Effects of slightly acidic electrolyzed water ice and grapefruit seed extract ice on shelf life of brown sole(*Pleuronectes herzensteini*)[J]. **Food Science and Biotechnology**,2018,27(1):261-267.
[27] IRAM A,WANG X,DEMIRCI A. Electrolyzed oxidizing water and its applications as sanitation and cleaning agent[J]. **Food Engineering Reviews**,2021,13(2):411-427.
[28] NIVEDITHA A,PANDISELVAM R,PRASATH V A,et al. Application of cold plasma and ozone technology for decontamination of *Escherichia coli* in foods:a review[J]. **Food Control**,2021,130:1-11.
[29] HERNÁNDEZ-TORRES C J,REYES-ACOSTA Y K,CHÁVEZ-GONZÁLEZ M L,et al. Recent trends and technological development in plasma as an emerging and promising technology for food biosystems[J]. **Saudi Journal of Biological Sciences**,2022,29(4):1957-1980.
[30] OLATUNDE O O,BENJAKUL S,VONGKAMJAN K. High voltage cold atmospheric plasma:antibacterial properties and its effect on quality of Asian sea bass slices[J]. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**,2019,52:305-312.
[31] PÉREZ-ANDRÉS J M,DE ALBA M,HARRISON S M,et al. Effects of cold atmospheric plasma on mackerel lipid and protein

oxidation during storage[J]. **LWT – Food Science and Technology**,2020,118:1-10.

[32] KODDY J K,MIAO W,HATAB S,et al. Understanding the role of atmospheric cold plasma(ACP) in maintaining the quality of hairtail(*Trichiurus lepturus*)[J]. **Food Chemistry**,2021,343:1-8.

[33] 郭红霞,冯涛,戚文元,等. 电子束辐照对储藏期间三文鱼鲜度的影响[J]. 保鲜与加工,2020,20(6):14-19.

[34] LI X,FARID M. A review on recent development in non-conventional food sterilization technologies[J]. **Journal of Food Engineering**,2016,182:33-45.

[35] SHANKAR S,DANNEELS F,LACROIX M. Coating with alginate containing a mixture of essential oils and citrus extract in combination with ozonation or gamma irradiation increased the shelf life of *Merluccius* sp. fillets[J]. **Food Packaging and Shelf Life**,2019,22:1-5.

[36] MAHMOUD B S M,NANNAPANENI R,CHANG S,et al. Improving the safety and quality of raw tuna fillets by X-ray irradiation[J]. **Food Control**,2016,60:569-574.

[37] GUYON C,MEYNIER A,DE LAMBALLERIE M. Protein and lipid oxidation in meat:a review with emphasis on high-pressure treatments[J]. **Trends in Food Science & Technology**,2016,50:131-143.

[38] 杨华,陆森超,刘丽君,等. 超高压处理对养殖大黄鱼保鲜效果的影响[J]. 食品科学,2014,35(24):331-336.

[39] OLIVEIRA F A D,NETO O C,SANTOS L M R D,et al. Effect of high pressure on fish meat quality:a review[J]. **Trends in Food Science & Technology**,2017,66:1-19.

[40] BHAT Z F,MORTON J D,BEKHIT A E D A,et al. Emerging processing technologies for improved digestibility of muscle proteins[J]. **Trends in Food Science & Technology**,2021,110:226-239.

[41] ZHOU A,LIN L,LIANG Y,et al. Physicochemical properties of natural actomyosin from threadfin bream (*Nemipterus* spp.) induced by high hydrostatic pressure[J]. **Food Chemistry**,2014,156:402-407.

[42] WAINWRIGHT M,MAISCH T,NONELL S,et al. Photoantimicrobials: are we afraid of the light?[J]. **The Lancet Infectious Diseases**,2017,17(2):49-55.

[43] TSUBONE T M,BAPTISTA M S,ITRI R. Understanding membrane remodelling initiated by photosensitized lipid oxidation[J]. **Biophysical Chemistry**,2019,254:1-17.

[44] MARCO C,LUIGI L,ANDREA C. Emerging trends in the photodynamic inactivation(PDI) applied to the food decontamination [J]. **Food Research International**,2021,144:1-13.

[45] KIM M J,LIANTO D K,KOO G H,et al. Antibacterial mechanism of riboflavin-mediated 460 nm light emitting diode illumination against *Listeria monocytogenes* in phosphate-buffered saline and on smoked salmon[J]. **Food Control**,2021,124:1-9.

[46] GONG C,LI Y,GAO R,et al. Preservation of sturgeon using a photodynamic non-thermal disinfection technology mediated by curcumin[J]. **Food Bioscience**,2020,36:1-10.

[47] 徐斌,蒋晓青,施姿鹤,等. 冷源等离子体对鲐鱼保鲜效果研究[J]. 安徽农业科学,2015,43(26):333-335.

[48] 钱婧,仲安琪,王露丹,等. 等离子体活性水对生鲜黄鱼杀菌效果及品质的影响[J]. 食品工业科技,2020,41(10):277-283.

[49] ALBERTOS I,MARTÍ N A B,CULLEN P J,et al. Effects of dielectric barrier discharge (DBD) generated plasma on microbial reduction and quality parameters of fresh mackerel(*Scomber scombrus*) fillets[J]. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**,2017,44:117-122.

[50] GHORBAN S S,OVISSIPOUR M,ROSS C F,et al. Efficacy of electrolyzed oxidizing water as a pretreatment method for reducing *Listeria monocytogenes* contamination in cold-smoked Atlantic salmon (*Salmo salar*)[J]. **Food Control**,2016,60:401-407.

[51] PINTER N,MALTAR-STRMECKI N,KOZACINSKI L,et al. Impact of radiation treatment on chemical,biochemical and sensory properties,and microbiological quality of mackerel[J]. **Radiation Physics and Chemistry**,2015,117:23-25.

[52] 张晗,吕鸣春,梅卡琳,等. 电子束辐照对鲈鱼肉杀菌保鲜效果及品质的影响[J]. 食品科学,2018,39(21):66-71.

[53] KUNG H,LIN C,LIU S,et al. High pressure processing extend the shelf life of milkfish flesh during refrigerated storage[J]. **Food**

**Control**,2022,134:1-9.

[54] 杨茜,谢晶. 超高压对冷藏带鱼段的保鲜效果[J]. 食品与发酵工业,2015,41(6):200-206.

[55] 曹妍妍,吴靖娜,陈晓婷,等. 超高压处理对冷藏菊黄东方纯品质的影响[J].食品工业科技,2020,41(24):277-285.

[56] HUANG J,CHEN B,ZENG Q H,et al. Application of the curcumin-mediated photodynamic inactivation for preserving the storage quality of salmon contaminated with *L. monocytogenes*[J]. **Food Chemistry**,2021,359:1-14.

[57] LI H,TAN L,CHEN B,et al. Antibacterial potency of riboflavin-mediated photodynamic inactivation against *Salmonella* and its influences on tuna quality[J]. **LWT – Food Science and Technology**,2021,146:1-14.

[58] DUUN A S, RUSTAD T. Quality changes during superchilled storage of cod (*Gadus morhua*) fillets[J]. **Food Chemistry** ,2007, 105:1067-1075.

[59] WU C H,YUAN C H,YE X Q,et al. A critical review on superchilling preservation technology in aquatic product[J]. **Journal of Integrative Agriculture**,2014,13(12):2788-2806.

[60] ZHOU Q Q,LI P Y,FANG S Y,et al. Preservative effects of gelatin active coating enriched with eugenol emulsion on chinese seabass(*Lateolabrax maculatus*) during superchilling(-0.9 ℃) storage[J]. **Coatings**,2019,9(8):1-13.

[61] BAHUAUD D,MØRKØRE T,LANGSRUD Ø,et al. Effects of -1.5 ℃ super-chilling on quality of Atlantic salmon (*Salmo salar*) pre-rigor fillets:cathepsin activity,muscle histology,texture and liquid leakage[J]. **Food Chemistry**,2008,111(2):329-339.

[62] KAALE L D,EIKEVIK T M. A histological study of the microstructure sizes of the red and white muscles of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets during superchilling process and storage[J]. **Journal of Food Engineering**,2013,114(2):242-248.

[63] KAALE L D,EIKEVIK T M,RUSTAD T,et al. Ice crystal development in pre-rigor Atlantic salmon fillets during superchilling process and following storage[J]. **Food Control**,2013,31(2):491-498.

[64] TOLSTOREBROV I,EIKEVIK T M,BANTLE M. Effect of low and ultra-low temperature applications during freezing and frozen storage on quality parameters for fish[J]. **International Journal of Refrigeration**,2016,63:37-47.

[65] TRIGO M,RODRÍGUEZ A,DOVALE G,et al. The effect of glazing based on saponin-free quinoa (*Chenopodium quinoa*) extract on the lipid quality of frozen fatty fish[J]. **LWT – Food Science and Technology**,2018,98:231-236.

[66] 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.

[67] 姚倩儒,陈历水,李慧,等. 冷鲜肉保鲜包装技术现状和发展趋势[J]. 包装工程,2021,42(9):194-200.

[68] DJENANE D,RONCALÉ S P. Carbon monoxide in meat and fish packaging:advantages and limits[J]. **Foods**,2018,7(2):1-34.

[69] LI P,FANG S Y,WANG J B,et al. Influence of high $CO_2$ modified atmosphere packaging on some quality characteristics of fresh farmed pufferfish(*Takifugu obscurus*) during refrigerated storage[J]. **Czech Journal of Food Sciences**,2020,38(2):123-130.

[70] CHAN S S,SKARE M,ROTABAKK B T,et al. Evaluation of physical and instrumentally determined sensory attributes of Atlantic salmon portions packaged in modified atmosphere and vacuum skin[J]. **LWT – Food Science and Technology**,2021, 146:1-8.

[71] OLATUNDE O O,BENJAKUL S. Nonthermal processes for shelf-life extension of seafoods:a revisit[J]. **Comprehensive Reviews in Food Science & Food Safety**,2018,17(4):892-904.

[72] OLATUNDE O O,BENJAKUL S,VONGKAMJAN K. Comparative study on nitrogen and argon-based modified atmosphere packaging on microbiological,chemical,and sensory attributes as well as on microbial diversity of Asian sea bass[J]. **Food Packaging and Shelf Life**,2019,22:1-10.

[73] GENC I Y,ESTEVES E,ANÍBAL J,et al. Effects of chilled storage on quality of vacuum packed meagre fillets[J]. **Journal of Food Engineering**,2013,115(4):486-494.

[74] LAHRECHE T,DURMUS M,KOSKER A R,et al. Effects of different plant (marjoram and olive leaf) extracts on quality characteristics of red and ordinary muscles of vacuum-packaged tuna-like fillets[J]. **Applied Food Research**,2022,2(1):1-7.

[75] KHANEGHAH A M,HASHEMI S,LIMBO S J F,et al. Antimicrobial agents and packaging systems in antimicrobial food active packaging:an overview of approaches and interactions[J]. **Food and Bioproducts Processing**,2018,111:1-19.

[76] TRAJKOVSKA P A,DANILOSKI D,D'CUNHA N M,et al. Edible packaging:sustainable solutions and novel trends in food packaging[J]. **Food Research International**,2021,140:1-15.

[77] AMARAL R A,PINTO C A,LIMA V,et al. Chemical-based methodologies to extend the shelf life of fresh fish:a review[J]. **Foods**,2021,10(10):1-28.

[78] BAPTISTA R C,HORITA C N,SANT'ANA A S. Natural products with preservative properties for enhancing the microbiological safety and extending the shelf-life of seafood:a review[J]. **Food Research International**,2020,127:1-23.

[79] SARIKA A R,LIPTON A P,AISHWARYA M S. Biopreservative efficacy of bacteriocin GP1 of *Lactobacillus rhamnosus* GP1 on stored fish filets[J]. **Frontiers in Nutrition**,2019,6:1-7.

[80] FU L L,WANG C,RUAN X M,et al. Preservation of large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) by coagulin L1208,a novel bacteriocin produced by *Bacillus coagulans* L1208[J]. **International Journal of Food Microbiology**,2018,266:60-68.

[81] ANACARSO I,MESSI P,CONDÒ C,et al. A bacteriocin-like substance produced from *Lactobacillus pentosus* 39 is a natural antagonist for the control of *Aeromonas hydrophila* and *Listeria monocytogenes* in fresh salmon fillets[J]. **LWT-Food Science and Technology**,2013,55(2):604-611.

[82] LAN W,YANG X,CHEN M,et al. Oregano essential oil-pectin edible films on shelf-life extension of large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) fillet during iced storage[J]. **Journal of Aquatic Food Product Technology**,2022,31(4):321-331.

[83] ECHEVERRÍA I,LÓPEZ-CABALLERO M E,GÓMEZ-GUILLÉN M C,et al. Active nanocomposite films based on soy proteins-montmorillonite- clove essential oil for the preservation of refrigerated bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) fillets [J]. **International Journal of Food Microbiology**,2018,266:142-149.

[84] BOUARAB C L,DEGRAEVE P,FERHOUT H,et al. Plant antimicrobial polyphenols as potential natural food preservatives[J]. **Journal of the Science of Food and Agriculture**,2019,99(4):1457-1474.

[85] KHODANAZARY A,SALATI A P,BOHLOULI S,et al. Quality enhancement in refrigerated tiger tooth croaker (*Otolithes ruber*) fillets using chitosan coating containing green tea extract[J]. **Iranian Journal of Fisheries Sciences**,2019,18(2):224-241.

[86] HOMAYOUNPOUR P,JALALI H,SHARIATIFAR N,et al. Protective effect of nanochitosan incorporated with free/nanoliposome cumin (*Cuminum cyminum* L.) aqueous extract on sardine fish[J]. **Journal of Aquatic Food Product Technology**,2020,29(9):949-961.

[87] DIVYA K,SMITHA V,JISHA M S. Antifungal,antioxidant and cytotoxic activities of chitosan nanoparticles and its use as an edible coating on vegetables[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**,2018,114:572-577.

[88] TEIXEIRA-COSTA B E,ANDRADE C T. Chitosan as a valuable biomolecule from seafood industry waste in the design of green food packaging[J]. **Biomolecules**,2021,11(11):1-19.

[89] 龚易昕悦,周银颖,文建英,等. 茶多酚与壳聚糖的复配在食品保鲜中的应用研究进展[J]. 保鲜与加工,2020,20(3):217-221.

[90] 张家涛,张璇,魏旭青,等. 茶多酚微胶囊 / 溶菌酶 - 聚乙烯醇复合涂膜对美国红鱼鱼片的保鲜性能[J]. 食品工业科技,2020,41(8):273-278.

[91] 武娇,杨华,张家涛,等. 原位合成纳米 SiOx/ 溶菌酶 / 茶多酚 / 壳聚糖复合保鲜涂膜对海鲈鱼鱼片保鲜性能的影响[J]. 食品科学,2020,41(23):181-189.

[92] RANGARAJ V M,RAMBABU K,BANAT F,et al. Natural antioxidants-based edible active food packaging:an overview of current advancements[J]. **Food Bioscience**,2021,43:1-20.

[93] SHAHIDI F,ZHONG Y. Measurement of antioxidant activity[J]. **Journal of Functional Foods**,2015,18:757-781.

[94] BHAVANIRAMYA S,VISHNUPRIYA S,AL-ABOODY M S,et al. Role of essential oils in food safety:antimicrobial and antioxidant applications[J]. **Grain & Oil Science and Technology**,2019,2(2):49-55.

[95] HASSOUN A,EMIR C Ö. Essential oils for antimicrobial and antioxidant applications in fish and other seafood products [J]. **Trends in Food Science & Technology**,2017,68:26-36.

[96] MEI J,SHEN Y,LIU W,et al. Effectiveness of sodium alginate active coatings containing bacteriocin EFL4 for the quality improvement of ready-to-eat fresh salmon fillets during cold storage[J]. **Coatings**,2020,10(6):1-13.

[97] LYV X,MA H,SUN M,et al. A novel bacteriocin DY4-2 produced by *Lactobacillus plantarum* from cutlassfish and its application as bio-preservative for the control of *Pseudomonas fluorescens* in fresh turbot(*Scophthalmus maximus*) fillets[J]. **Food Control**,2018,89:22-31.

[98] LIU G,LI X,HAO X,et al. Effects of bioactive packaging films incorporated with bifidocin a on microbial reduction and quality parameters of chill-stored spanish mackerel(*Scomberomorus niphonius*) fillets[J]. **Journal of Food Quality**,2019,2019:1-11.

[99] CHUESIANG P,SANGUANDEEKUL R,SIRIPATRAWAN U J F C. Enhancing effect of nanoemulsion on antimicrobial activity of cinnamon essential oil against foodborne pathogens in refrigerated Asian seabass(*Lates calcarifer*) fillets[J]. **Food Control**,2021,122(2):1-7.

[100] KALKAN S,AKBEN S B,ÇANGA D. Modeling the microbiological effect of essential peppermint oil-supplemented chitosan film on Bonito fish(*Sarda sarda*) fillets and analysis via image processing methods[J]. **Journal of Food Process Engineering**,2019,42(6):1-10.

[101] LAN W Q,LANG A,CHEN M L,et al. Combined effects of pectin-plant essential oil coating with vacuum packaging on the quality of large yellow croaker(*Pseudosciaena crocea*) during iced storage[J]. **Journal of Food Safety**,2022,42(2):1-10.

[102] ESMAEILI M,KHODANAZARY A. Effects of pectin/chitosan composite and bi-layer coatings combined with *Artemisia dracunculus* essential oil on the mackerel's shelf life[J] **Journal of Food Measurement and Characterization**,2021,15(4):3367-3375.

[103] 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.

[104] 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.

[105] MIRANDA J M,ZHANG B,BARROS-VELÁ Z J,et al. Preservative effect of aqueous and ethanolic extracts of the macroalga *Bifurcaria bifurcata* on the quality of chilled hake(*Merluccius merluccius*)[J]. **Molecules**,2021,26(12):1-14.

[106] OZOGUL I,KULEY E,UCAR Y,et al. Inhibitory impacts of *Spirulina platensis* and *Chlorella vulgaris* extracts on biogenic amine accumulation in sardine fillets[J]. **Food Bioscience**,2021,41:1-7.

[107] 庞彩霞. 竹叶抗氧化物对冷藏三文鱼片新鲜度的影响[J]. 食品研究与开发,2017,38(11):211-215.

[108] WU T,GE Y,LI Y,et al. Quality enhancement of large yellow croaker treated with edible coatings based on chitosan and lysozyme[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**,2018,120:1072-1079.

## 科 技 信 息

**研究系统阐释全球农产品中有机磷酸酯来源与迁移机制**

近日,中国农业科学院农业质量标准与检测技术研究所饲料质量安全检测与评价创新团队与加拿大萨斯喀彻温大学合作系统阐述了农产品中有机磷酸酯污染特征与迁移机制的研究进展,相关研究成果发表在 *Science of the Total Environment* 上。

有机磷酸酯是一类可作为阻燃剂、增塑剂而广泛应用于塑料制品、家具、电子产品的化学物质,具有较强的生物毒害性和环境持久性,在空气、水等环境介质,以及动、植物等生物体中存在不同程度污染。随着有机磷酸酯生产和使用量的不断增加,其在环境和生物体中的水平也逐步增加。近年来,有机磷酸酯被视为是影响全球农产品和食品安全新的风险,其在农产品和食品中的污染特征与迁移转化机制也成为国内外研究热点。

该研究系统总结了全球范围内动、植物源农产品以及水产品中有机磷酸酯污染水平与特征,系统阐释了有机磷酸酯可通过农业生产环境、农业投入品以及农产品加工等途径,在农产品生产链条中迁移与转化。为应对全球农产品中有机磷酸酯污染风险,该研究指出应在全球范围内加强对农产品和食品总有机磷酸酯等新型环境污染物污染特征监测与风险评估、迁移转化与代谢机制分析,以及污染源头控制与污染消除等方面的研究,并提出了建议。

[信息来源]中国农业科学院农业质量标准与检测技术研究所.研究系统阐释全球农产品中有机磷酸酯来源与迁移机制[EB/OL]. (2022-6-10).https://www.caas.cn/xwzx/kyjz/321165.html