

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2021.10.035

冻藏对水产品脂质氧化影响研究进展

Research progress on the effect of frozen storage on lipid oxidation of aquatic products

郁慧洁¹ 谢晶^{1,2,3,4}YU Hui-jie¹ XIE Jing^{1,2,3,4}

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306; 3. 教育部海洋食品精深加工关键技术省部共建协同创新中心,

辽宁 大连 116034; 4. 食品科学与工程国家级实验教学示范中心[上海海洋大学], 上海 201306)

(1. School of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Aquatic Product Processing & Preservation, Shanghai

201306, China; 3. Collaborative Innovation Center of Seafood Deep Processing, Ministry of

Education, Dalian, Liaoning 116034, China; 4. National Experimental Teaching Demonstration

Center for Food Science and Engineering [Shanghai Ocean University], Shanghai 201306, China)

摘要:文章综述了水产品冻藏过程中脂质氧化的危害、影响脂质氧化的内源促氧化因子与外源促氧化因子,并总结了当前延缓脂质氧化的方法,如添加抗氧化剂、改进包装和新型技术的辅助等,指出既能控制冻藏过程中水产品脂质氧化,又能实现产业化推广的技术是水产品冻藏急需解决的问题。

关键词:水产品;冻藏;脂质氧化;控制措施

Abstract: The harm of lipid oxidation on aquatic products during the freezing process, the endogenous and exogenous pro-oxidation factors that led to lipid oxidation were reviewed. It summarized the current methods of delaying lipid oxidation, such as adding antioxidants, improving packaging and new technology, and pointed out that the technology which can not only control the lipid oxidation of aquatic products in the process of frozen storage but also realize industrial promotion is an urgent problem to be solved.

Keywords: frozen storage; lipid oxidation; aquatic products; control measures

水产品脂质氧化可分为酶促反应、自动氧化与光敏

基金项目: 国家“十三五”重点研发项目(编号: 2019YFD0901604);上海市科委科技创新行动计划(编号: 19DZ1207503);上海市科委能力建设项目(编号: 19DZ2284000)

作者简介: 郁慧洁,女,上海海洋大学在读硕士研究生。

通信作者: 谢晶(1968—),女,上海海洋大学教授,博士。

E-mail: jxie@shou.edu.cn

收稿日期: 2021-04-09

氧化。酶促氧化是指脂质在脂氧合酶催化作用下的反应;自动氧化是由基态氧与不饱和油脂发生的自由基链式反应;光敏氧化是由单线氧与不饱和油脂发生的直接反应。水产品冻藏过程中主要发生的是自动氧化。

水产品中富含不饱和脂肪酸而极易发生脂肪氧化,是其贮藏过程中发生品质变化的主要原因之一^[1]。食品冻结使水变成冰晶抑制了微生物生长并降低了酶活力,减少了微生物酶、脂肪酶和磷脂酶等降解脂质生成游离脂肪酸,因此冻结后的冻藏被广泛应用于水产品保鲜中。然而,冻藏虽能一定程度上缓解水产品因脂质氧化引起的品质变差等问题,但高度不饱和脂肪酸即使在很低的温度下也很难凝固,所以水产品冻藏过程中脂质氧化还会发生。这是由于水结冰膨胀的压力,使脂肪酸从细胞内部移动到细胞表面,增加了其与空气中氧气相互作用的机会,脂肪酸很容易被分解。冻藏期间,脂质氧化通常与蛋白质分解产生氨基酸、含氮化合物分解产生碱性氮等同时发生,导致水产品颜色、气味和风味变化,使产品品质劣变,降低了营养还产生了有害物质^[2]。为此,文章拟概述水产品冻藏过程中因脂质氧化而发生的品质变化的原因,影响脂质氧化的自由基、金属离子等因素,以及近年来对脂质氧化各种控制方法等的研究现状,以为水产品冻藏期间脂质氧化的研究提供依据。

1 冻藏过程中食品脂质氧化的危害

冻藏能延长水产品的货架期,但仍会发生脂质自动氧化。脂质氧化过程是由链引发、链增值和链终止 3 个阶段组成。脂质自动氧化的基础是氢过氧化物与自由基

的产生。如图 1 所示,过渡金属等引发剂的存在使自由基 RH 被氧化生成 $R\cdot$; $R\cdot$ 与 O_2 反应生成 $ROO\cdot$, $ROO\cdot$ 夺取周围脂肪酸分子中的质子产生新 RH 与 $ROOH$,使氧化反应链逐渐增长。但 $ROOH$ 不稳定,会分解生成醛类、酮类、醇类等稳定化合物,反应终止。此过程中水产品的蛋白质特性和感官品质会受到较大影响^[3]。

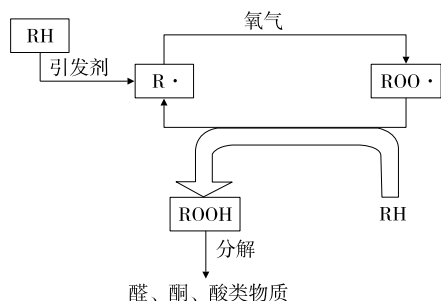


图 1 脂质自动氧化过程示意图

Figure 1 Schematic diagram of lipid oxidation

1.1 促进蛋白质的氧化

Zheng 等^[3]发现蛋白质氧化的发生与脂质氧化有关, Hematyar 等^[4]证实了这个观点,尤其是冻藏期间脂质氧化对蛋白质氧化的促进作用更大。这可能是因为脂质氧化过程会产生过氧自由基、羟基和烷氧基等活性氧成分,引起蛋白质分子交联;且其提供了大量促使蛋白发生氧化反应的羰基物质^[5],如丙烯醛(ACE)、丙二醛(MDA)与 4-羟基壬烯醛等,随着脂质氧化程度的增加,蛋白质氧化随之加强。脂质氧化对肌原纤维蛋白的影响远大于肌浆蛋白^[6],因为脂质氧化产生的 MDA 可直接引起肌原纤维蛋白羰基化,MDA 通过促进高价肌红蛋白的形成和非血红素铁的释放影响活性氧(ROS)的生成,进而促进肌原纤维蛋白氧化。

此外,脂质氧化还会加速蛋白质的变性。脂质氧化促进蛋白氧化,使蛋白的主链与氨基酸残基侧链变化加快,如肽主链断裂、氨基酸残基侧链的氧化修饰和蛋白质分子间的交联物形成等^[7],从而加速蛋白质的变性。

1.2 降低感官品质

影响水产品色泽的主要成分为肌红蛋白^[8]。脂质氧化产生的自由基能够使肌红蛋白发生变性从而导致肌红蛋白氧化。肌红蛋白氧化会影响肉色的稳定性,使肉呈现消费者难以接受的暗褐色^[9]。Wongwichian 等^[10]研究表明,随着贮藏时间的延长,竹荚鱼的硫代巴比妥酸值(TBA 值)和肌红蛋白显著增加($P < 0.05$),相对红度值下降,说明脂质氧化对肉色稳定性造成了不良影响。

水产品的腥味物质主要有 3 个来源:外界环境、脂质氧化和微生物作用^[11]。脂质氧化导致水产品产生腥味主要是因为贮藏过程中游离脂肪酸(FAA)的氧化,不饱和

脂肪酸氧化会生成醛类、酮类、醇类等物质。王帮国^[12]研究发现,解冻后白鲢中的 *E*-2-癸烯醛、*E*,*E*-2,4-癸二烯醛、*E*,*E*-2,4-庚二烯醛等醛类物质明显增加,其对白鲢鱼肉的臭味有较大贡献,因此,可以认为脂质氧化会加重水产品的腥味和腐臭味。Liang 等^[13]用壳聚糖对牡蛎脱脂来除臭,该方法可去除 92% 的脂肪,利用气相色谱质谱分析发现鱼腥味成分含量明显降低,说明脂肪酸氧化降解会加剧水产品腥味物质的产生。

综上,脂肪氧化促进了蛋白质的氧化,加速了水产品的腐败变质,影响了水产品的色泽,导致腥味和腐臭味产生,严重影响了消费者的购买欲。因此,脂质氧化的抑制或缓解对保持水产品冻藏期间的品质、延长水产品货架期十分重要。

2 影响水产品脂质氧化的主要因素

2.1 内源促氧化因子

自由基^[14]、金属离子^[15]与血红蛋白^[16]是重要的内源促氧化因子。

自由基是脂质氧化反应第二阶段的主产物之一,是影响脂质氧化的一个重要因素。Chen 等^[17]研究发现,随着自由基产生量的增加,自由基信号强度增加,脂质氧化水平提高。李云菲等^[18]在抑制自由基诱导的鱼肝油脂质氧化试验中也发现减少自由基的产生量能够一定程度地抑制脂质氧化。

水产品冻藏过程中,金属离子促进脂质氧化的主要原理是冰晶造成细胞损伤,细胞由此释放出金属离子,金属离子诱导不饱和脂肪酸反应生成了自由基,自由基参与脂质氧化链式反应,使氧化过程加速。其中起作用的金属离子主要为 Fe^{2+} 。Zhang 等^[19]研究发现,与未添加 Fe^{2+} 相比,添加 Fe^{2+} 能够显著增加鲮鱼匀浆液的脂质氧化程度($P < 0.05$)。Gomez 等^[20]通过抑制三甲胺氧化物(TMAO)去甲基化酶来抑制鲑鱼脂质氧化,其使用多酚类物质作为金属螯合剂,能在自由基攻击脂质之前中和自由基、螯合包括 Fe^{2+} 在内的金属离子,从而延缓脂质氧化。

血红蛋白是造成水产品脂质氧化的主要诱导因子之一,其原理是脂质自动氧化产生的高铁血红蛋白释放血红素和 Fe^{2+} 促进脂质氧化的发生^[21],并且 pH 影响其促氧化程度^[22]。酸性条件下,精氨酸能更稳定地抑制血红蛋白与氧气结合,降低血红蛋白内铁离子的键合强度,促进氢过氧化物的生成。此外,参与脂质氧化的过氧自由基和羟基自由基的生成速率加快,促进脂质氧化。Richards 等^[23]发现随着 pH 的降低,虹鳟鱼血红蛋白催化的脂质氧化反应明显提高,当 pH 为 7.8 时,氧化速率明显降低,与 Maqsood 等^[24]的结论一致。这可能是因为 pH 能影响血红蛋白自动氧化的各种因子,从而影响其诱

导肌肉脂质氧化的反应进程。

2.2 脂肪酸的组成

水产品中含有丰富的 *n*-多不饱和脂肪酸,主要是二十碳五烯酸(EPA)与二十二碳六烯酸(DHA),高比例的长链 *n*-多不饱和脂肪酸是鱼类肌肉容易发生脂质氧化的关键。不饱和脂肪酸的氧化速率和双键的数量相关,一般双键数目越多脂质氧化速率越快,例如油酸、亚油酸、亚麻酸与花生四烯酸的氧化速率比为 1:10:20:40,多不饱和脂肪酸比单不饱和脂肪酸更容易被氧化。不同种类鱼脂肪酸组成不同、同种鱼不同部位脂肪含量不同,其脂质氧化速率也不同,如鲑鱼冻藏期间 TBA 值会低于一般水产品,因为鲑鱼的脂肪含量较低^[24];干腌鱼因多不饱和脂肪酸含量较高,脂质氧化较为严重^[25]。

徐坤华等^[26]将蓝鳍金枪鱼的赤身、中腹与大腹分别于-18℃冻藏 170 d,其 TBA 值显著高于黄鳍金枪鱼^[27]的,且蓝鳍金枪鱼各部位 TBA 值的易氧化度为大腹>中腹>赤身,可能是因为同一种鱼不同部位的脂肪酸组成不同,脂肪含量高的鱼肉比脂肪含量低的更容易发生脂质氧化。Bao 等^[1]研究发现,以蒲公英多糖处理的南极磷虾的不饱和脂肪酸含量在冻藏过程中均无显著变化,未经处理的样品的脂质氧化程度高于处理组,这从侧面反映了不饱和脂肪酸的氧化是脂质氧化过程中非常重要的一个环节。因此,若要探求可缓解脂质氧化的方法可以优先选择多脂鱼进行研究,如大黄鱼、金枪鱼、鳗鱼、带鱼等。

2.3 温度

2.3.1 冻结速度和冻藏温度 冻结速度会影响细胞中冰晶的形成和生长,进而影响水产品脂肪氧化。刘书来等^[28]研究发现,当乌鳢块冻结温度为-20,-30,-40℃时,通过最大冰晶生成带的时间分别为 310,226,125 s,冻结速率分别为 3.42,5.63,8.65 cm/h,TBA 值分别为 0.72,0.70,0.65 mg/kg,说明冻结速率越快 TBA 值上升越缓慢,这主要因为冻结速率越快,通过最大冰晶生成带的时间越短,对细胞造成的破坏越小,细胞内的一些促氧化剂也不会被释放出来,所以脂质氧化程度越低。

路昊等^[27]研究发现,冻藏温度越低,黄鳍金枪鱼 TBA 值越小。屈彤彤等^[29]发现玻璃态(-80℃)冻藏的南美白对虾品质比-60,-40,-18℃的更好、货架期更长,-18℃冻藏的南美白对虾的脂质氧化程度最高,主要是因为非冻结相中溶液浓度不断提高,最终到达最大冻结浓缩状态后溶液中的剩余水分不再结晶而达到玻璃态,高黏度下分子移动性大幅度降低,从而降低了受分子扩散控制的氧化反应速率,所以玻璃态下的水产品品质稳定,但-80℃的冻藏成本高,难以在产业中推广。

2.3.2 冻融循环 温度波动会造成水产品品质恶化^[30],冻融循环放大了温度波动对脂质氧化的影响,可以更直

观地反映其对水产品品质的影响。冻融循环会破坏肌纤维完整性,对细胞膜造成破坏,促使血红素铁等促氧化物释放,提高脂质氧化速率。快速冻结时,通过最大冰晶生成带时间短,形成的冰晶细小、分布均匀,此过程中冰晶几乎不会对细胞产生伤害,但解冻后再冻结会使细胞失水、产生大冰晶导致细胞结构被破坏,脂质氧化速率加快^[31]。Wang 等^[32]研究显示,随着冻融次数的增加,鲤鱼 TBA 值增大。Zhang 等^[33]研究发现,鲮鱼鱼片的 FAA 含量、POV、TBA 值和荧光化合物值均随冻融次数的增加而增加,且呈递增关系。综上,冻融循环会加剧脂质氧化程度。

运输或销售过程中难免会存在温度波动,对冻品品质尤其是富含不饱和脂肪酸的水产品而言是极大的伤害。现已有研究通过添加新型抗冻剂^[34]、使用新型包装^[35]等来减少温度波动对水产品脂质氧化的影响。

此外,干耗会加剧产品的脂质氧化^[36]。干耗是水产品冻藏过程中,冻藏室内空气的蒸汽压小于饱和水蒸汽压,水产品表面的蒸汽压接近饱和蒸汽压,因此在蒸汽压差的作用下,会有一些水分从水产品表面蒸发,造成其质量减少。水蒸气蒸发会促使空气进入水产品,加速其脂质氧化反应。

3 冻藏水产品脂质氧化的控制措施

3.1 天然抗氧化剂

3.1.1 多肽类 肽不仅能够清除自由基,还能螯合金属离子,具有供电子能力,可一定程度上抑制冻藏过程中水产品的脂质氧化^[37]。赵翊君^[38]以鲈鱼为原料制备抗氧化肽,经分析确认其对细胞的氧化损伤有保护作用,该肽的抗氧化活性主要得益于鲈鱼中丰富的色氨酸、酪氨酸等抗氧化活性氨基酸。Zhang 等^[19]用胰蛋白酶和碱性磷酸酶水解鲢鱼鱼鳍并将水解产物用于鲮鱼鱼片保鲜,多次冻融循环后鲢鱼鱼鳍水解物降低了鲮鱼鱼片的 FAA、POV、TBA 值与荧光化合物值。这可能是因为鲢鱼鱼鳍的胰蛋白酶和碱性磷酸酶水解物对 ABRs 自由基具有较强的体外清除活性,并且能螯合 Fe²⁺,抑制了初级氧化产物和二级氧化产物的生成,降低了鲮鱼鱼片中脂质氧化程度。该水解物可以作为一种潜在天然抗氧化剂用于鱼片保鲜。

除了水产来源的肽外,一些植物肽也能够抑制脂质氧化^[39]。与鱼源抗氧化肽不同的是植物源抗氧化肽能减少活性氧的产生并增强内源酶和非酶抗氧化剂的防御能力,从而减缓脂质氧化。但这些多肽提取过程比较繁琐,提取量也较少,限制了其使用。目前已有研究^[40]采用超声波等新型技术辅助提取这些多肽类物质,并得到了更高的提取率。

3.1.2 多酚类 一些水果、蔬菜具有较好的抗氧化性主

要是因为其含有较多的多酚类物质,如类黄酮、白藜芦醇、酚酸、芪、木酚素等。多酚类提取物通过破坏水产品冻藏过程中的自氧化链反应和/或抑制自由基的形成^[41],其作为特殊的氢或电子供体,可以快速将氢原子给脂质自由基来阻碍脂质氧化,所以常被用来缓解脂质氧化引起的水产品品质劣变。多酚类抗氧化剂在冻藏水产品中的应用见表 1。

其中使用较多的是茶多酚,其抗氧化作用主要来源于类黄酮,并且在茶多酚结构中有相连或相邻的苯酚基,因此茶多酚的抗氧化活性要比单酚或非酚性基类抗氧化效果好^[45]。茶多酚能够抑制氧化酶并促进抗氧化酶活性^[46],有效控制脂肪酸的氧化分解,对不饱和脂肪酸氧化抑制明显,尤其是高不饱和脂肪酸,可显著降低 C₂₂ 和 C₂₀ 系脂肪酸的氧化分解速度,抑制血红素铁氧化、保持肌红蛋白的红色^[47]。Xie 等^[48]用茶多酚处理冻结前的干贝,其货架期是对照组的 1.7 倍以上,多不饱和脂肪酸损失率从 27.37% 降至 12.00% 以下,有效抑制了脂质氧化。Zhang 等^[33]用茶多酚处理冻结前的鲮鱼,其 TBA 值和 POV 均低于其他对照组。但茶多酚溶解性差,会对其抗氧化活性的发挥造成影响。此外,茶多酚本身不稳定易发生氧化,新产生的自由基和强氧化性物质达到一定量后,会抵消其本身的抗氧化活性^[45]。

3.1.3 香辛料提取物 香辛料是具有辛香、芳香等风味的植物性制品,或是从植物的根、茎、叶等提取的精油。其抗氧化成分主要为酚类物质,如百里香精油中的香芹酚与百里香酚、丁香精油中的丁子香酚等。其阻断了脂肪自动氧化链,螯合了金属离子。通常情况下,精油的抗氧化效果随精油种类、浓度的不同而不同。比较常用的是迷迭香和一些精油。迷迭香提取物中含有丰富的黄酮类物质和缩合单宁,能延缓 ω -3 脂肪酸的氧化^[36]。He 等^[37]发现丁香精油具有明显的抑菌和抗氧化活性,用丁香精油处理鲈鱼并冻藏,试验组的 TBA 值明显低于空白对照组。研究^[49]表明,多种精油混合使用的脂质氧化抑制效果要优于单一精油。然而多酚类物质和精油独有的气味使大部分消费者不能接受,且其提取工艺复杂、成本

高,较大程度上限制了其在水产品中的应用。

3.2 包装

3.2.1 真空包装 真空包装因其成本低、操作简单、保鲜效果好而被广泛应用于各领域。真空包装是通过抽去包装内的空气(氧气)从而抑制需氧微生物的生长和脂质氧化。Sofra 等^[50]用真空包装处理刚宰杀完的金枪鱼并进行冻藏,与一般包装的金枪鱼相比,其脂质氧化程度明显降低,与 Dang^[51]用真空包装处理鲶鱼的结论相同。将抗氧化剂与真空包装结合使用的效果比各自单一使用的要好^[52]。此外,有学者^[53]对包装材料进行了研究,通过改变材料的氧气透过率、水蒸气透过率来调节产品的水分含量和水分活度,水分会加大 O₂ 的溶解度加速脂质氧化反应过程使 POV 增大。此外,解决封口破损、易撕裂、材料有毒有害性等基本问题的关键因素也是真空包装材料的选用。

3.2.2 气调包装 气调包装(MAP)是由 CO₂、O₂、N₂ 三者中的 2 种或 3 种气体以不同比例混合并替代袋内原有的空气以抑制食品劣变的包装技术。Imazaki 等^[54]用体积分数为 70%/30% 的 O₂/CO₂ 的气调包装处理南美白对虾,与直接冻藏相比,虾的色泽和脂质氧化程度均有较大改善,延长了货架期。相较于真空包装,气调包装保藏的鱼肉质更好、货架期更长,这主要是因为气调包装时水产品的汁液损失小^[53]。同时还有将抗氧化剂^[55]、超高压^[56]等方法结合气调包装用于冷藏、冻藏水产品,也很好缓解了脂质氧化对水产品品质的影响。气调包装材料也是影响水产品品质的重要因素,不同的贮藏方式、不同的水产品应选择不同的气调包装材料^[57]。但气调包装的气体比例没有普适性,不同水产品最适的 CO₂/O₂/N₂ 比例不同;此外气调包装会增大产品的体积,不方便运输且存在挤压破损的风险。

3.2.3 抗氧化活性包装膜 抗氧化活性包装膜是在聚合物基质中加入抗氧化剂,其操作方法主要有:① 将抗氧化剂直接加入到薄膜中;② 将抗氧化剂涂覆或吸附于薄膜基质表面^[58]。抗氧化活性包装膜的主要成分包括聚合物基体、增塑剂、抗氧化剂等。聚合物基体用于增强活性包

表 1 多酚类抗氧化剂在冻藏水产品中的应用

Table 1 Application of polyphenol antioxidants in frozen aquatic products

物质	抗氧化成分	对象	结论
茶多酚	类黄酮	鲮鱼	TBA 值、POV 均低于其他对照组 ^[33]
鼠尾草提取物	咖啡酸	鲢鱼	鼠尾草提取物显著抑制鲢鱼的 TBA 值、酸价以及 POV 的上升,且鼠尾草提取物浓度越大抑制效果越好,3% 鼠尾草提取物能更好地抑制鲢鱼脂肪的氧化 ^[42]
生姜醇提取物	姜黄素	鲮鱼	0.05% 与 0.10% 的生姜醇粗提取物浸渍组 TBA 值显著低于空白对照组,延缓了脂质氧化 ^[43]
迷迭香提取物	黄酮类、单宁	中华管鞭虾	脂肪含量、FAA、TBA 值、POV 显著优于空白组,延缓了脂质氧化,延长了货架期 ^[44]

装膜的功能,增塑剂可以提高膜的机械性能。在活性包装膜的基质中,抗氧化活性物质的添加表现出了较好的降低水产品脂质氧化速率的作用^[59],且由两种及以上聚合物基质组成的混合膜具有更好的效果^[60]。De^[61]用含有大麦壳提取物的薄膜包装大西洋比目鱼并对其进行冻藏,冻藏12个月时试验组的FAA含量与9个月时的空白组的相近,且试验组的MDA含量显著低于空白组,证实了抗氧化活性包装膜能延缓脂类水解,并提高大西洋比目鱼肉的氧化稳定性。De^[61]使用含大麦壳提取物的低密度聚乙烯膜包装处理冻藏前的蓝鲨,与Pereira等^[62]用含琉璃苣籽提取物的鱼胶膜包装马鲛鱼饼后冻藏得到了相似结论,说明抗氧化活性包装膜能缓解冻藏期间水产品的脂质氧化。

但是,抗氧化剂的添加会对薄膜的厚度、阻隔性能、颜色等造成不良影响;抗氧化剂的释放也存在不确定性;此外,薄膜制备工艺的繁琐等均对抗氧化活性包装膜的使用造成了一定影响。

3.3 镀冰衣

镀冰衣是通过将水产品的温度降至冻结点以下,快速喷淋或浸渍冰衣液,在水产品表面形成一层薄冰的保鲜方法。研究^[63]表明,水产品进行镀冰衣处理后能缓解脂质氧化,保持冻藏期间产品品质。这可能是因为冰衣层会使水产品与空气隔绝,阻碍脂质氧化,也可以防止冻藏期间的干耗氧化。还可在冰衣液中加入不同抗氧化物

质,加强保鲜效果。谭明堂等^[64]研究发现冰衣液中添加迷迭香酸、异抗坏血酸钠和聚丙烯酸钠的效果要优于直接冻藏空白组。这可能是因为迷迭香酸和异抗坏血酸钠本身就有一定的抗氧化性,因此效果会优于纯水冰衣。聚丙烯酸钠遇水膨润,会变成黏稠液体,使冰衣不易破裂,因而其也具有较好的水产品品质保藏效果。

因此镀冰衣时,不仅可通过抗氧化活性物质的添加改善冰衣对水产品的保鲜效果,而且要考虑如何防止冰衣层的破裂、冰衣量、镀冰衣的方式等。

3.4 其他

为了能更好保持水产品冻藏期间的品质,越来越多的人选择新型技术辅助冻结来减少冻结对冻藏食品品质的影响,这些方法主要是通过抑制冰晶生成来缓解冻藏期间水产品脂质的氧化。如磁场的存在可以提高过冷度,通过加快冻结速率来缓解因生成大冰晶而造成的脂质氧化^[65];基于空化效应的超声波能促进晶核的生成加快冻结速率^[66],并且超声波处理会降低脂肪酶、磷脂酶和脂氧合酶活性,从而抑制脂质氧化^[67]。目前关于新型技术辅助冻结缓解水产品脂质氧化的研究见表2。但是这些技术也存在一些问题,如高压处理投入成本高,而且压力过高会导致肌红蛋白变性,促进脂质氧化^[68];微波、射频、磁场等会对水产品的肌肉造成损伤,如肉质变硬、失去弹性等,目前这些方法在水产品保鲜中的应用还停留在研究阶段。

表2 新技术辅助冻结

Table 2 New technology assisted freezing

研究对象	方法	结论	参考文献
鲤鱼	空气冷冻、浸水冷冻和超声波辅助冷冻(75 W/30 kHz)	所有样品的TBA值均呈上升趋势,超声波处理组的TBA值最低	[69]
长鳍金枪鱼	200 MPa, 6 min的高压辅助冷冻,12个月冻藏	与空白组相比TBA值降低了53.9%	[70]
虹鳟鱼	射频(RF)处理,不同时间占空比(RF-10 s-20 s、RF-20 s-20 s、RF-30 s-20 s)的2 kW,27.12 MHz恒定射频模式,3,4,5 cm 3种不同的电极间距	在最小电极间隙时,冰晶尺寸约为无射频冷冻对照样品的75%,TBA值最小	[71]
鳕鱼	用150.00,169.27,300.00,430.73,450.00 MPa压力处理,分别达到50.00,56.42,100.00,143.58,150.00 s时,使用3 MPa/s的速率,保压时间2 min,减压时间3 s	与空白组比TBA值均下降,300.00 MPa处理组的TBA值最低	[72]

4 总结与展望

冻藏是水产品最常用的保存方式,其能较长期贮藏水产品,但冻藏过程中自由基、金属离子、血红蛋白等内源促氧化因子的存在会使水产品发生脂质氧化。脂质氧化不仅会降低水产品原有的营养价值,还会使其变质甚至不能食用,因此研究脂质氧化的控制措施很有必要。

虽然实验室中一些预处理方法能够在一定程度上抑制脂质氧化,但若要进行工业化应用,还要考虑到生产成

本和操作工序。此外,一些处理方式虽然效果比较好,但也存在各种问题,如抗氧化剂残留的异常气体会使消费者难以接受,高压、磁场这些新兴技术运用的可行性和安全性问题。因此,水产品冻藏过程中需要更多既能控制脂质氧化,还能产业化推广的技术。

参考文献

[1] BAO Jia-qi, CHEN Li, LIU Tian-tian. Dandelion polysaccharide

- suppresses lipid oxidation in Antarctic krill (*Euphausia superba*) [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 133: 1 164-1 167.
- [2] XU Li-rong, YU Xiu-zhu, LIU Lei, et al. A novel method for qualitative analysis of edible oil oxidation using an electronic nose[J]. Food Chemistry, 2016, 202: 229-235.
- [3] ZHENG Yao, QIU Ze-hui, WANG Xi-chang. Protein oxidation and tandem mass tag-based proteomic analysis in the dorsal muscle of farmed obscure pufferfish subjected to multiple freeze-thaw cycles [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(9): e14721.
- [4] HEMATYAR N, RUSTAD T, SAMPELS S, et al. Relationship between lipid and protein oxidation in fish[J]. Aquaculture Research, 2019, 50(5): 1 393-1 403.
- [5] JIANG Yi, LI Da-hu, TU Jun-cai, et al. Mechanisms of change in gel water-holding capacity of myofibrillar proteins affected by lipid oxidation: The role of protein unfolding and cross-linking[J]. Food Chemistry, 2021, 344: 128587.
- [6] ZAREIAN M, TYBUSSEK T, SILCOCK P, et al. Interrelationship among myoglobin forms, lipid oxidation and protein carbonyls in minced pork packaged under modified atmosphere[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2019, 20: 100311.
- [7] 牛思思. 氧化对蛋清蛋白结构及功能特性的影响[D]. 天津: 天津科技大学, 2017: 18-19.
NIU Si-si. Effect of oxidation on structure and functional properties of egg white protein[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2017: 18-19.
- [8] 刘文轩, 罗欣, 杨啸吟, 等. 脂质氧化对肉色影响的研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(21): 238-247.
LIU Wen-xuan, LUO Xin, YANG Xiao-yin, et al. Research progress on the effect of lipid oxidation on meat color[J]. Food Science, 2020, 41(21): 238-247.
- [9] WANG Zhao-ming, HE Zhi-fei, GAN Xiao, et al. Interrelationship among ferrous myoglobin, lipid and protein oxidations in rabbit meat during refrigerated and superchilled storage[J]. Meat Science, 2018, 146: 131-139.
- [10] WONGWICHIAN C, KLOMKLAO S, PANPIPAT W, et al. Interrelationship between myoglobin and lipid oxidations in oxeye scad (*Selar boops*) muscle during iced storage [J]. Food Chemistry, 2014, 174: 279-285.
- [11] SHINFUKU Y, TAKANASHI H, NAKAJIMA T, et al. Exploration of an odorous aldehydes and ketones produced by *Uroglena americana* using high resolution mass spectrometry, GC-Olfactometry, and multivariate analysis[J]. Chemosphere, 2020, 257: 127174.
- [12] 王帮国. 白鲢鱼肌脂氧合酶构象和酶学特性及其脂氧氧化调控研究[D]. 安徽: 合肥工业大学, 2017: 34-37.
WANG Bang-guo. Conformation and enzymatic properties of lipoxygenase in silver carp muscle and its regulation of lipid oxidation[D]. Anhui: Hefei University of Technology, 2017: 34-37.
- [13] LIANG Shan-quan, ZHANG Tan, FU Xiao-dan, et al. Partially de-graded chitosan-based flocculation to achieve effective deodorization of oyster (*Crassostrea gigas*) hydrolysates[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 234: 115948.
- [14] PAZIN W M, RUIZ G C M, DOS SANTOS M J, et al. The protective effect of Artepillin C against lipid oxidation on model membranes[J]. Journal of Molecular Liquids, 2021, 324: 115089.
- [15] LI Ru-yi, DAI Tao-tao, ZHOU Wei, et al. Impact of pH, ferrous ions, and tannic acid on lipid oxidation in plant-based emulsions containing saponin-coated flaxseed oil droplets[J]. Food Research International, 2020, 136: 109618.
- [16] TATIYABORWORNTHAM N, YIN J, RICHARDS M P. Factors influencing the antioxidant effect of phospholipase A2 against lipid oxidation promoted by trout hemoglobin and hemin in washed muscle[J]. Food Chemistry, 2021, 343: 128428.
- [17] CHEN Qing-min, XIE Yun-fei, XI Jin-zhong, et al. Characterization of lipid oxidation process of beef during repeated freeze-thaw by electron spin resonance technology and Raman spectroscopy[J]. Food Chemistry, 2018, 243: 58-64.
- [18] 李云菲, 郭晓莉, 曹腾正, 等. 迷迭香提取物对自由基诱导鱼肝油氧化及模拟消化过程中脂质氧化的抑制作用研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(21): 28-33.
LI Yun-fei, GUO Xiao-li, CAO Teng-zheng, et al. Inhibitory effect of rosemary extract on free radical induced oxidation of cod liver oil and lipid oxidation during simulated digestion [J]. Food Research and Development, 2020, 41(21): 28-33.
- [19] ZHANG L, SHAN Y, HONG H, et al. Prevention of protein and lipid oxidation in freeze-thawed bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) fillets using silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) fin hydrolysates[J]. LWT, 2020, 123: 109050.
- [20] GÓMEZ-ESTACA J, GÓMEZ-GUILLEN M C, MARÍN-PENÁLVER D, et al. Functional aptitude of hake minces with added TMAO-demethylase inhibitors during frozen storage [J]. Food Chemistry, 2020, 309: 125683.
- [21] 米红波, 郭鑫, 李学鹏, 等. 鱼类血红蛋白诱导脂质氧化及其控制的研究进展[J]. 现代食品科技, 2016, 32(4): 297-304.
MI Hong-bo, GUO Xin, LI Xue-peng, et al. Research progress on lipid oxidation induced by fish hemoglobin and its control [J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(4): 297-304.
- [22] KARIN J L, INGRID K U. Effect of caffeic acid on haemoglobin-mediated lipid and protein oxidation in washed cod mince during ice and frozen storage[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2010, 90(14): e4121.
- [23] RICHARDS M P, HULTIN H O. Effect of pH on lipid oxidation using trout hemolysate as a catalyst: A possible role for deoxyhemoglobin[J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 2000, 48(8): 3 141-3 147.
- [24] MAQSOOD S, BENJAKUL S. Effect of bleeding on lipid oxidation and quality changes of Asian seabass (*Lates calcarifer*) muscle during iced storage[J]. Food Chemistry, 2011, 124(2):

- 459-467.
- [25] ZHANG Qi, CHEN Xiao-cao, DING Yu-ting, et al. Diversity and succession of the microbial community and its correlation with lipid oxidation in dry-cured black carp (*Mylopharyngodon piceus*) during storage[J]. Food Microbiology, 2020: 103686.
- [26] 徐坤华, 廖明涛, 林森森, 等. 蓝鳍金枪鱼脂质和肌红蛋白的氧化动力学研究[J]. 中国食品学报, 2015, 15(2): 64-71.
- XU Kun-hua, LIAO Ming-tao, LIN Sen-sen, et al. Oxidation kinetics of lipid and myoglobin in bluefin tuna[J]. Chinese Journal of Food, 2015, 15(2): 64-71.
- [27] 路昊, 包建强. 在不同冻藏温度下黄鳍金枪鱼腹部肌肉的脂质氧化和肌红蛋白氧化的动力学研究[J]. 食品科学, 2007, 28(11): 63-66.
- LU Hao, BAO Jian-qiang. Kinetics of lipid oxidation and myoglobin oxidation of yellowfin tuna abdominal muscle under different frozen storage temperatures[J]. Food Science, 2007, 28(11): 63-66.
- [28] 刘书来, 张振宇, 唐文燕, 等. 不冻液冻结乌鳢块冻藏过程中品质变化[J]. 食品科学, 2019, 40(1): 256-262.
- LIU Shu-lai, ZHANG Zhen-yu, TANG Wen-yan, et al. Quality changes of ophioccephalus Argus during frozen storage in unfrozen solution[J]. Food Science, 2019, 40(1): 256-262.
- [29] 屈彤彤, 赵金红, 李仙仙, 等. 不同冻藏状态下南美白对虾品质与微观结构的变化[J]. 现代食品科技, 2020, 36(10): 147-156.
- QU Tong-tong, ZHAO Jin-hong, LI Xian-xian, et al. Changes of quality and microstructure of *Penaeus vannamei* under different frozen storage conditions [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(10): 147-156.
- [30] ZHANG Bin, CAO Hui-juan, WEI Wan-ying, et al. Influence of temperature fluctuations on growth and recrystallization of ice crystals in frozen peeled shrimp (*Litopenaeus vannamei*) pre-soaked with carrageenan oligosaccharide and xylooligosaccharide [J]. Food Chemistry, 2020, 306: 125641.
- [31] 钱晓庆, 朱萌, 石钢鹏, 等. 冻融循环过程中鲷鱼片 K 值的近红外预测模型研究[J]. 食品与机械, 2021, 37(1): 137-142, 203.
- QIAN Xiao-qing, ZHU Meng, SHI Gang-peng, et al. Near infrared prediction model for K value of channel catfish fillets during freeze-thaw cycles [J]. Food & Machinery, 2021, 37(1): 137-142, 203.
- [32] WANG Hang, LUO Yong-kang, SHI Ce, et al. Effect of different thawing methods and multiple freeze-thaw cycles on the quality of common Carp (*Cyprinus carpio*) [J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2015, 24(2): 153-162.
- [33] ZHANG Long-teng, SHAN Yuan-kai, HONG Hui, et al. Prevention of protein and lipid oxidation in freeze-thawed bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) fillets using silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) fin hydrolysates [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 123: 109050.
- [34] 赵启蒙. 鲢鱼冻结特性及镀冰衣和腌制处理对其冻藏品质影响的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015: 15-22.
- ZHAO Qi-meng. Study on the freezing characteristics of catfish and the effects of ice coating and salting treatment on its frozen storage quality [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015: 15-22.
- [35] 吕颖, 谢晶. 温度波动对冻藏水产品品质影响及控制措施的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(10): 290-295.
- LU Ying, XIE Jing. Effect of temperature fluctuation on quality of frozen aquatic products and research progress of control measures [J]. Food and Fermentation Industry, 2020, 46(10): 290-295.
- [36] MARGEIRSSON B, LAUZON H L, PÁLSSON H, et al. Temperature fluctuations and quality deterioration of chilled cod (*Gadus morhua*) fillets packaged in different boxes stored on pallets under dynamic temperature conditions [J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 35(1): 187-201.
- [37] 陈日春, 熊文飞, 蔡一楠, 等. 鲢鱼鱼鳞胶原蛋白肽抗氧化作用研究[J]. 食品科学技术学报, 2013, 31(6): 28-35.
- CHEN Ri-chun, XIONG Wen-fei, CAI Yi-nan, et al. Study on antioxidant activity of collagen peptides from silver carp scales [J]. Journal of Food Science and Technology, 2013, 31(6): 28-35.
- [38] 赵翊君. 鲈鱼鱼肉抗氧化肽的分离鉴定及其对 HepG2 细胞氧化损伤的保护作用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018: 73-75.
- ZHAO Yi-jun. Isolation and identification of antioxidant peptides from *Lateolabrax japonicus* and their protective effects on HepG2 cells against oxidative damage [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018: 73-75.
- [39] 王晓杰, 曲悦, 丛万锁. 玉米肽的抗氧化活性及其对熟猪肉脂质氧化抑制作用的研究[J]. 食品科技, 2018, 43(4): 251-257.
- WANG Xiao-jie, QU Yue, CONG Wan-suo. Antioxidant activity of corn peptide and its inhibition on lipid oxidation of cooked pork surimi [J]. Food Science and Technology, 2018, 43(4): 251-257.
- [40] ÁLVAREZ C, LÉLU P, LYNCH S A, et al. Optimised protein recovery from mackerel whole fish by using sequential acid/alkaline isoelectric solubilization precipitation (ISP) extraction assisted by ultrasound [J]. LWT, 2018, 88: 210-216.
- [41] CAO Qiong-ju, YUAN Huang, ZHU Quan-fei, et al. The mechanism of chlorogenic acid inhibits lipid oxidation: An investigation using multi-spectroscopic methods and molecular docking [J]. Food Chemistry, 2020, 333: 127528.
- [42] 窦川林. 鼠尾草提取物对鲢鱼肉保鲜效果的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2019: 44-46.
- DOU Chuan-lin. Study on the effect of salvia extract on the preservation of silver carp [D]. Chongqing: Southwest University, 2019: 44-46.
- [43] 郑筠. 生姜醇提物改善冻藏鲷鱼品质特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016: 67-69.
- ZHENG Jun. Study on the quality improvement of frozen mullet by ginger alcohol extract [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016: 67-69.
- [44] 石径. 中华管鞭虾冻藏过程中品质变化规律及机理研究[D].

- 北京: 中国农业大学, 2018: 76-79.
- SHI Jing. Study on the quality change law and mechanism of Chinese tube whip shrimp during frozen storage[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018: 76-79.
- [45] 张秀芬, 陈荣锋, 刘连军, 等. 茶多酚在食品中的应用[J]. 生物加工过程, 2019, 17(4): 424-429.
- ZHANG Xiu-fen, CHEN Rong-feng, LIU Lian-jun, et al. Application of tea polyphenols in food[J]. Biological Processing Process, 2019, 17(4): 424-429.
- [46] 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.
- PAN Jun-xian, LIU Jun, LU Yang-jun, et al. Research progress of tea polyphenols on preservation of aquatic products[J]. Chinese Tea Processing, 2018(3): 10-14.
- [47] DONG Jing-wen, ZHOU Yao-qing, LU Yun-hao, et al. Effect of tea polyphenols on the oxidation and color stability of porcine hemoglobin[J]. Journal of Food Science, 2019, 84(8): 2 086-2 090.
- [48] XIE Hong-kai, ZHOU Da-yang, LIU Zhong-yuan, et al. Effects of natural phenolics on shelf life and lipid stability of freeze-dried scallop adductor muscle[J]. Food Chemistry, 2019, 295: 423-431.
- [49] NING Li-jun, ZHANG Xiao-yong, ZHANG Dong-wei, et al. The benefits of blend essential oil for GIFT tilapia on the digestion, antioxidant, and muscle quality during cold storage [J]. Aquaculture, 2021, 533: 736097.
- [50] SOFRA C, TSIRONI TTAOUKIS P S. Modeling the effect of pre-treatment with nisin enriched osmotic solution on the shelf life of chilled vacuum-packed tuna[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 216: 125-131.
- [51] DANG H T T, GUDJÓNSDÓTTIR M, TÓMASSON T, et al. Influence of processing additives, packaging and storage conditions on the physicochemical stability of frozen Tra catfish (*Pangasius hypophthalmus*) fillets[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 238: 148-155.
- [52] LI Pei-yun, CHEN Zhi-jie, TAN Ming-tang, 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): 12773.
- [53] 欧阳锐, 王志辉, 李立鹏, 等. 生物保鲜液结合真空包装对鲢鱼保鲜的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(11): 141-144, 170.
- OU Yang-rui, WANG Zhi-hui, LI Li-peng, et al. Effect of biological preservative solution combined with vacuum packaging on the preservation of mackerel[J]. Food & Machinery, 2019, 35(11): 141-144, 170.
- [54] IMAZAKI P H, ELANSARY M, SCIPPO M L, et al. Effect of sex and sub-zero storage temperature on the microbial and oxidative stability of beef packed in a high-oxygen atmosphere after different vacuum ageing times[J]. Meat Science, 2019, 148: 198-205.
- [55] 张涵, 徐高原, 冯爱国, 等. 聚赖氨酸复合涂膜协同气调包装对金鲳鱼保鲜作用研究[J]. 食品科技, 2018, 43(11): 166-171.
- ZHANG Han, XU Gao-yuan, FENG Ai-guo, et al. Study on preservation effect of poly lysine composite coating combined with modified atmosphere packaging on Golden pomfret [J]. Food Science and Technology, 2018, 43(11): 166-171.
- [56] 谢晶, 杨茜, 张新林, 等. 超高压技术结合气调包装保持冷藏带鱼品质[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 246-252.
- XIE Jing, YANG Xi, ZHANG Xin-lin, et al. Ultra high pressure technology combined with modified atmosphere packaging to maintain the quality of refrigerated hairtail[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2015, 31(12): 246-252.
- [57] 尹磊, 谢晶. 水产品气调保鲜技术研究进展[J]. 广东农业科学, 2015, 42(5): 92-97.
- YIN Lei, XIE Jing. Research progress of modified atmosphere preservation technology for aquatic products[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2015, 42(5): 92-97.
- [58] 陈茹, 李洪军, 王俊鹏, 等. 抗氧化活性包装膜的制备及其在肉类食品中的研究进展[J/OL]. 食品与发酵工业. (2020-12-11) [2021-05-29]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.026180>.
- CHEN Ru, LI Hong-jun, WANG Jun-peng, et al. Preparation of antioxidant packaging film and its research progress in meat food[J/OL]. Food and Fermentation Industry. (2020-12-11) [2021-05-29]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.026180>.
- [59] KANG J H, SONG K B. Characterization of Job's tears (*Coix lachryma-jobi* L.) starch films incorporated with clove bud essential oil and their antioxidant effects on pork belly during storage[J]. LWT, 2019, 111: 711-718.
- [60] MAHMOOD A S, ESMAIL Mj Julian M D. Eco-friendly active packaging consisting of nanostructured biopolymer matrix reinforced with TiO₂ and essential oil: Application for preservation of refrigerated meat[J]. Food Chemistry, 2020, 322: 126782.
- [61] DE ABREU D A P, LOSADA P P, MAROTO J, et al. Lipid damage during frozen storage of Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus*) in active packaging film containing antioxidants[J]. Food Chemistry, 2011, 126(1): 315-320.
- [62] PEREIRA DE Abreu Da, PASEIRO Losada P, MAROTO J, et al. Natural antioxidant active packaging film and its effect on lipid damage in frozen blue shark (*Prionace glauca*) [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2011, 12(1): 50-55.
- [63] 储渊明, 谢晶. 水产品冻藏品质变化及镀冰衣技术的研究进展[J]. 包装工程, 2020, 41(17): 31-37.
- CHU Yuan-ming, XIE Jing. Research progress on quality change of frozen aquatic products and ice coating technology [J]. Packaging Engineering, 2020, 41(17): 31-37.
- [64] 谭明堂, 王金锋, 余文晖, 等. 冰衣结合保鲜剂处理对冻藏鲈鱼品质的影响[J]. 渔业现代化, 2019, 46(4): 73-80.
- TAN Ming-tang, WANG Jin-feng, YU Wen-hui, et al. Effect of ice coating combined with preservative on quality of frozen squid[J]. Fisheries Modernization, 2019, 46(4): 73-80.

- [65] GIMÉNEZ B, GÓMEZ-GUILLÉN M C, PÉREZ-MATEOS M, et al. Evaluation of lipid oxidation in horse mackerel patties covered with borage-containing film during frozen storage[J]. Food Chemistry, 2011, 124(4): 1 393-1 403.
- [66] CHOI Yun-sang, KU Su-yung, JEONG Ji-yu, et al. Changes in ultrastructure and sensory characteristics on electro-magnetic and air blast freezing of beef during frozen storage[J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 2015, 35(1): 27-34.
- [67] 索原杰, 宣晓婷, 崔燕, 等. 超声波辅助冻结在水产品及肉类产品中的应用研究进展及解冻机制[J]. 生物加工过程, 2018, 16(3): 78-83.
- SUO Yuan-jie, XUAN Xiao-ting, CUI Yan, et al. Research progress and thawing mechanism of ultrasonic assisted freezing in aquatic products and meat products[J]. Biological Processing, 2018, 16(3): 78-83.
- [68] 徐永霞, 尹一鸣, 赵洪雷, 等. 肉桂醛协同超高压处理对牙鲆鱼片冷藏期间品质变化的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(15): 225-230.
- XU Yong-xia, YIN Yi-ming, ZHAO Hong-lei, et al. Effect of cinnamaldehyde combined with ultra high pressure treatment on quality change of flounder fillets during cold storage[J]. Food Science, 2019, 40(15): 225-230.
- [69] SUN Qin-xiu, SUN Fang-da, XIA Xiu-fang, et al. The comparison of ultrasound-assisted immersion freezing, air freezing and immersion freezing on the muscle quality and physicochemical properties of common carp (*Cyprinus carpio*) during freezing storage[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 51: 281-291.
- [70] CARTAGENA L, PUÉRTOLAS E, MARAÑÓN DE I M. Evolution of quality parameters of highpressure processing (HPP) pretreated albacore (*Thunnus alalunga*) during long-term frozen storage[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 62: 102334.
- [71] HAFEZPARAST-MOADAB N, HAMDAMI N, DALVI-ISFAHAN M, et al. Effects of radiofrequency-assisted freezing on microstructure and quality of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillet[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2018, 47: 81-87.
- [72] PITA-CALVO C, GUERRA-RODRÍGUEZ E, SARAIVA J A, et al. High-pressure processing before freezing and frozen storage of European hake (*Merluccius merluccius*): Effect on mechanical properties and visual appearance[J]. European Food Research and Technology, 2018, 244(3): 423-431.
-
- (上接第 105 页)
- [17] TSUNG-YI L, DOLLÁR P, GIRSHICK R, et al. Feature pyramid networks for object detection[C]// Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. Honolulu, HI, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineering, 2017: 2 117-2 125.
- [18] REN Shao-qing, HE Kai-ming, GIRSHICK R, et al. Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2016, 39(6): 1 137-1 149.
- [19] 张顺, 龚怡宏, 王进军. 深度卷积神经网络的发展及其在计算机视觉领域的应用[J]. 计算机学报, 2019, 42(3): 453-482.
- ZHANG Shun, GONG Yi-hong, WANG Jin-jun. The development of deep convolution neural network and its applications on computer vision[J]. Chinese Journal of Computers, 2019, 42(3): 453-482.
- [20] 梁鸿, 王庆玮, 张千, 等. 小目标检测技术研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(1): 17-28.
- LIANG Hong, WANG Qing-wei, ZHANG Qian, et al. Small object detection technology: A review[J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(1): 17-28.
- [21] HU Jie, LI Shen, SUN Gang. Squeeze-and-excitation networks[C]// Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. Salt Lake City, UT, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineering, 2018: 7 132-7 141.
- [22] LI Xiang, WANG Wen-hai, HU Xiao-lin, et al. Selective kernel networks[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Long Beach, CA, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineering, 2019: 510-519.
-
- (上接第 192 页)
- [21] 周丽丽, 杨则宜, 伊木清, 等. 中国运动员膳食营养状况调查分析与改进建议[J]. 中国运动医学杂志, 2002, 21(3): 278-283.
- ZHOU Li-li, YANG Ze-yi, YI Mu-qing, et al. Investigation and analysis of dietary nutrition status of Chinese athletes and suggestions for improvement[J]. Chinese Journal of Sports Medicine, 2002, 21(3): 278-283.
- [22] KERKSICK C M, WILBORN C D, ROBERTS M D, et al. ISSN exercise & sports nutrition review update: Research and recommendations[J]. Journal of the International Society of Sports Nutrition, 2018, 15(1): 63-71.
- [23] 史文生. 全麦饮食配合体育运动改善男性雄性激素水平[J]. 食品与机械, 2019, 35(3): 48-51.
- SHI Wen-sheng. Improvement of male androgen level by whole wheat diet combined with sports[J]. Food & Machinery, 2019, 35(3): 48-51.
- [24] 黄国阳. 2种运动食品对人体运动能力的影响对比研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(4): 213-216.
- HUANG Guo-yang. Comparative study on the effects of two sports foods on human exercise ability[J]. Food & Machinery, 2019, 35(4): 213-216.
- [25] 李明. 运动饮料与口服液盐对高温环境下大鼠新陈代谢的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(4): 202-206.
- LI Ming. Effects of sports drinks and oral liquid salts on metabolism of rats under high temperature environment[J]. Food & Machinery, 2020, 36(4): 202-206.