

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20191218001

http://www.yykxjz.cn/

蓝蔚青, 赵亚楠, 刘琳, 谢晶. 臭氧水处理在水产品杀菌保鲜中的应用研究进展. 渔业科学进展, 2020, 41(4): 190–197
Lan WQ, Zhao YN, Liu L, Xie J. Research progress on the applications of ozonated water in the sterilization and preservation of aquatic products. Progress in Fishery Sciences, 2020, 41(4): 190–197

臭氧水处理在水产品杀菌保鲜中的应用研究进展*

蓝蔚青^{1,2} 赵亚楠¹ 刘琳¹ 谢晶^{1,2①}

(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
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)

摘要 水产品自身带有或贮运期间污染的微生物是导致其腐败变质的主因。为减少微生物对水产品品质影响, 延长其货架期, 减菌化前处理是减少其加工贮藏过程中微生物污染的关键技术。本文在分析比较水产品常用减菌化处理水的作用机理与主要特点的基础上, 重点介绍了臭氧水在水产品杀菌保鲜中的应用研究进展, 提出其存在问题与解决办法, 阐明将臭氧水与流化冰、气调保鲜及其他保鲜处理技术相结合的优势, 并对臭氧水在水产品贮藏加工中的应用前景予以展望。

关键词 水产品; 臭氧水; 杀菌; 保鲜

中图分类号 S983 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2020)04-0190-08

我国渔业蓬勃发展, 据《2019 年中国渔业统计年鉴》显示, 2018 年的水产养殖面积达 $7449.03 \times 10^3 \text{ hm}^2$, 总产量为 $6457.66 \times 10^4 \text{ t}$, 进出口量为 $954.42 \times 10^4 \text{ t}$, 其中, 总产量和进出口量同比 2017 年分别增加 0.19% 和 3.33%(农业农村部渔业渔政管理局, 2019)。目前, 市场上供应的水产品主要是鲜活水产品, 其次为加工制品, 截至 2018 年底, 水产品加工总量达 $2156.85 \times 10^4 \text{ t}$, 同比下降 1.79%。由于水产品易受季节、地域与运输条件等影响, 其在品质与风味上易发生劣变(Jiang *et al.*, 2019)。水产品产量呈逐年递增的同时, 中国水产品在综合加工利用程度方面与发达国家相比, 仍存在一定差距。

水产品因其特殊口感风味, 且富含不饱和脂肪酸与优质蛋白源等特点, 广受消费者喜爱。然而, 其死

后由于内源酶和微生物的作用, 易发生自溶、蛋白质与氨基酸分解、产生碱性胺类物质等一系列变化, 极易腐败变质(冯豪杰等, 2019)。目前, 水产品加工方式趋于多样化, 生食水产品为保证其原有口感, 须在低温条件下减菌化处理。在保证其安全卫生的同时, 最大程度保留其营养与风味。

目前, 国内外常用的减菌化处理方式有电解水、臭氧水、二氧化氯水及有机酸处理等。其作用机理与主要优缺点见表 1。由表 1 可知, 臭氧水与其他减菌化用水相比, 存在一定优势。首先, 臭氧水具有强氧化性和抑菌杀菌能力, 其作用食品后能分解成 O_2 , 无残留, FDA 早在 2001 年就将 O_3 列入可直接与食品接触的添加剂中(袁成豪等, 2019)。目前, 被广泛应用于果蔬农副产品、畜禽类、水产品与乳制品的灭菌

*“十三五”国家重点研发计划重点专项(2019YFD0901602)、现代农业产业技术体系建设专项(CARS-47-G26)和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)共同资助 [This work was supported by National Key Research and Development Program of China (2019YFD0901602), China Agriculture Research System (CARS-47-G26), and Ability Promotion Project of Shanghai Municipal Science and Technology Commission Engineering Center (19DZ2284000)]. 蓝蔚青, E-mail: wqlan@shou.edu.cn

① 通讯作者: 谢晶, 教授, E-mail: jxie@shou.edu.cn

收稿日期: 2019-12-18, 收修改稿日期: 2020-01-08

保鲜中, 效果良好(李娜等, 2018; 肖子寒等, 2018; Papachristodoulou *et al*, 2017)。O₃ 溶于水制得臭氧水, 作为杀菌剂用于水产品贮藏前期的减菌化处理, 也可作为脱腥剂和漂白剂使用(李学鹏等, 2019)。

O₃ 的制备方式根据其工作原理, 可分为电解法、电晕放电法、紫外线照射法等(黄玉婷, 2014; 宣伟, 2011), 其工作原理及优缺点等如表 2 所示。

本文在对比分析水产品常用减菌化处理水作用机理与主要优缺点的基础上, 对臭氧水在水产品杀菌保鲜中的应用研究进展及存在的主要问题予以介绍, 提出将臭氧水与流化冰、气调保藏、微纳米气泡水等技术相结合的解决途径, 并对其应用前景予以展望, 以期臭氧水处理技术在水产品贮藏保鲜中的应用提供理论参考。

表 1 不同减菌化处理水的主要作用机理与优缺点比较

Tab.1 Comparison of main action mechanism, advantages and disadvantages of different antibacterial treatment water

处理方式 Processing methods	电解水 Electrolyzed water	臭氧水 Ozonated water	二氧化氯水 Chlorine dioxide aqueous solution	有机酸 Organic acid aqueous solution
作用机理 Mechanism	细胞膜通透性增加, 改变其内电子流动, 代谢受阻 (Ye <i>et al</i> , 2017)	破坏微生物细胞的结构、内源酶, 导致裂解死亡 (Ummat <i>et al</i> , 2018)	使原生动物、孢子、霉菌等微生物的内酶失活, 破坏蛋白质(刘志轩等, 2018)	改变细胞膜电位, 细胞超极化程度严重而致死
优点 Advantages	操作简单、速效持续、应用广泛、无残留、效果好 (丁年平等, 2018)	分解胺类与土腥素; 改善鱼糜色泽, 分解为 O ₂ , 无残留、无遗传毒性(李学鹏等, 2019)	不改变营养品质、低成本、残留少、杀菌效果好(韩强等, 2017)	明显降低初始菌数, 延长货架期, 杀菌效果好 (Cho <i>et al</i> , 2017)
缺点 Disadvantages	有效氯含量易降解; 只能杀灭食品表面微生物 (Afari <i>et al</i> , 2018)	分解后杀菌率低; 活性氧自由基, 加速蛋白质变性, 与脂肪氧化, 稳定性差 (Cao <i>et al</i> , 2012)	不稳定, 浸泡水产品易发白, 残余菌生长速率加快 (季晓彤等, 2018)	过量存在安全性问题, 对色泽、气味、总体可接受性有影响

表 2 臭氧制备方法的主要工作原理及优缺点比较

Tab.2 Comparison of main working principles, advantages and disadvantages of ozone preparation methods

制备方式 Methods	电晕放电法 Corona discharge	紫外线照射法 Ultraviolet radiation	电解法 Electrolysis
工作原理 Operating principle	高压点击条件下 O ₂ 电解为氧原子, 与 O ₂ 结合成 O ₃	紫外光产生的光子使 O ₂ 分解成原子, 再聚合成 O ₃	直流电源电解含氧的电解质生成 O ₃
优点 Advantages	产量大	对温度、湿度不敏感; 重复性好	O ₃ 浓度及纯度高; 无有毒有害物质产生
缺点 Disadvantages	浓度低、杀菌效果差; 产生有害氮氧化合物	产量小, 核心部件紫外灯管寿命短	产量有待提高
应用范围 Application scope	不适宜食品加工	水消毒、实验室消毒	食品行业、养殖业、医疗领域

1 臭氧水处理在水产品贮藏保鲜中的应用研究进展

O₃ 具有强氧化性与抑菌杀菌能力, 在鱼片及鱼糜制品漂白脱色、异味去除及杀菌保鲜, 甚至是加工设备清洗消毒、循环水养殖等领域中得到广泛应用(赵永强等, 2013; 黄滨等, 2016)。目前, 已有学者从臭氧水处理浓度、温度、时间与处理方式等方面研究其对水产品减菌效果与品质风味影响, 也将其作用

后对人体的安全性予以评价。其中, 赵永强等(2014)通过急性毒性与遗传毒性实验得出, 经 4.5 mg/L 臭氧水减菌化处理 30 min 的罗非鱼(*Oreochromis mossambicus*)鱼片对 SD 大鼠(*Sprague dawley*)未表现有遗传毒性, 骨髓微核试验和染色体畸变试验均为阴性, SD 大鼠的最大耐受剂量大于 15 g/kg; Wedemeyer 等(1979)研究表明, 经臭氧水处理后虹鳟鱼(*Oncorhynchus mykiss*)的急性毒性, 结果得出臭氧平均致死阈值为 8 μg/L, 2 μg/L 的臭氧水不会对虹鳟鱼

引起明显的生物损伤。因此,采用适宜浓度的臭氧水处理,对鱼体及人体都不会产生毒副作用。

1.1 减菌处理

微生物的种类与含量同水产品新鲜程度与腐败程度关系密切,臭氧水对鼠伤寒沙门氏菌(*Salmonella typhimurium*)、大肠杆菌(*Escherichia coli*)、李斯特菌(*Listeria monocytogenes*)等均有高效灭活能力,是广谱杀菌和高安全性的杀菌剂(Gibson *et al*, 2019)。其中, Cao 等(2010)研究发现,以牡蛎(*Ostrea gigas thunberg*)为实验对象,经 5.0×10^{-6} g/L 臭氧水处理后,可有效减少牡蛎表面的初始菌数,保持新鲜品质,延长货架期 2 d;鲁建云等(2018)实验得出,臭氧水在制得后 0~10 min 内,其浓度衰减速度较快,且在 20℃~30℃时,0.3 mg/L 的臭氧水对金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)、大肠杆菌等病原微生物杀菌效率达 100%;刘伟等(2016)采用 3.60 mg/L 的臭氧水喷淋减菌处理冷鲜草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)发现,喷淋时间为 3 min 时,其对金黄色葡萄球菌与大肠杆菌的杀菌率分别达 60%与 80%,臭氧水减菌前处理后样品置于 4℃环境贮藏可延长保质期 2 d;Silva 等(2017)研究不同浓度的臭氧水和不同处理时间对罗非鱼的减菌效果及理化影响,研究表明,采用 1.5 mg/L 的臭氧水处理 15 min,对罗非鱼鱼片的减菌率达 88.25%,且不影响鱼片 pH 和色泽;Gelman 等(2005)研究 O₃ 处理对活鱼在 0℃和 5℃下贮藏期间的品质变化及货架期,经微生物检测,与 5℃下贮藏经臭氧处理的罗非鱼相比,在 0℃下结合 O₃ 贮藏是其延长保质期的有效手段。可见,臭氧水对细菌、真菌、原生动物及病毒等有不同程度的抑制或灭活作用,具有处理时间短、抑菌浓度低的优点;此外,臭氧水浓度与减菌率正相关,振动状态的臭氧水还可在实际生产中增加臭氧利用率和杀菌效果(孙继英等, 2013)。

1.2 鲜度保持

在适当条件下,适宜浓度的臭氧水处理水产品及其鱼糜制品可显著提高其凝胶强度和肌原纤维蛋白巯基含量,延缓总挥发性盐基氮值(Total volatile base nitrogen, TVB-N)与 K 值的升高,抑制 pH 变化与水分流失,具有较好的保鲜作用(李学鹏等, 2019)。同时, O₃ 的强氧化性也会导致样品发生轻微的蛋白质氧化变性和脂肪氧化,但相较于其能延长货架期的保鲜能力相比,该作用可忽略不计(Okpala *et al*, 2017; 安玥琦等, 2015)。其中,张红杰等(2015)研究发现,罗非鱼片经 4.0 mg/L 流动臭氧水处理后,在冰藏期间

可加快蛋白质变性,其肌原纤维蛋白盐溶性、巯基含量与 Ca²⁺-ATPase 活性较对照组低,而巯基含量与肌动球蛋白表面疏水性较对照组高;Karamah 等(2019)研究臭氧水接触时间、温度与剂量对金枪鱼(*Thunnus sp.*)品质影响,研究表明,在一定浓度范围内,臭氧水浓度越高,其品质劣变越缓慢,金枪鱼采用 0.3 mg/L 减菌化处理 120 min 后,在 8℃时贮藏 168 h 后,水分含量增加 1.20%、蛋白质仅减少 0.67%、pH 降至 5.58、减菌率达 91.2%;Okpala 等(2017)研究发现,当臭氧水排放浓度、处理温度、洗涤时间分别为 100 mg/h、25℃、1~5 min 时,随臭氧水接触时间的延长,太平洋白虾(*Litopenaeus vannamei*)冰藏期间的蛋白质、脂肪与水分含量无明显变化,且对黏度、硬度也无显著影响;安玥琦等(2015)采用 7.8 mg/L 臭氧水淋洗鳙鱼(*Aristichthys nobilis*)头 5 min,发现可显著降低其 K 值与 TVB-N 值,减菌率达 90.43%,处理后对硫代巴比妥酸值与 pH 无显著影响;刁石强等(2011)研究表明,凤尾鱼(*Coilia mystus*)经 2~3 mg/L 的臭氧水处理后,在 -1.1℃~0℃下可延缓其脂质氧化变质,贮藏 3~4 d 后仍保持二级鲜度,可延长货架期 1~2 d;Xie 等(2009)研究表明,插溃工序中,在 40℃、水浴 35 min 下,添加 0.8 mg/L 臭氧水处理,鲢鱼(*Hypophthalmichthys molitrix*)鱼丸的持水性、色泽与质构特性最佳。臭氧水减菌处理可有效保持水产品的鲜度,延长其货架期,但会加速蛋白质变性与脂肪氧化。

1.3 漂白除味

臭氧水具有高氧化性,会增加鱼体白度与亮度,在一定条件下会产生与 H₂O₂ 相同的漂白效果(Al-Omiri *et al*, 2018)。同其他减菌化处理水相比,还可有效去除水产品中的土腥素,保持其水分含量和良好的蛋白特性,且对其质构特性影响不显著。其中,闫师杰等(2010)研究得出,浓度为 5 和 7 mg/L 的臭氧水可有效延缓鲶鱼(*Silurus asotus*)TVB-N 值、pH 值、b*值的升高,延缓 L*值和 a*值的下降,尤其是 5 mg/L 臭氧水处理效果最佳;Zhang 等(2016)研究表明,3.3~7.6 mg/L 臭氧水与 0.3 m³/h 臭氧气体浮选洗涤 5~20 min 可分别消除鱼肉中 42.09%~54.28%与 42.78%~69.19%的土腥素,臭氧水处理是一种更温和和有效的处理方式,可改善鳙鱼蛋白的理化特性并消除不良风味;Chen 等(1997)用臭氧水洗涤鲭鱼(*Pneumatophorus japonicus*)肉末 10~20 min 具有较好的脱色效果,但会使脂肪氧化, pH 值下降显著,凝胶强度不理想。

2 存在问题与解决办法

臭氧水虽具有高氧化性,但其易分解为 O_2 ,稳定性不佳;同时,其在水溶液中半衰期短,杀菌能力也会随之下降; O_3 制取条件严格(纯氧、低温、干燥),且在相对湿度大的水产品加工车间,以空气这种混合气体为介质制得的 O_3 气体纯度不高,一般为3%~6%,加之 O_3 的溶解度小,故制得的臭氧水浓度极低且浓度不可控,其实际利用率达不到预期效果。同时,高压电晕条件下制 O_3 伴随 N_2O 、 NO 与 N_2O_3 等毒氮氧化物产生,会损伤深部呼吸道与肺泡,甚至引发呼吸道窘迫综合征(袁成豪等,2019)。此外,臭氧水产生的活性氧自由基还会加速鱼肉蛋白质变性与脂肪氧化,使质地口感下降(刘慈坤,2019)。水产品长时间浸泡在臭氧水中,会使其蛋白质溶解性与交联聚集等功能特性随之下降,影响其弹性、嫩度及风味等(Bao *et al.*, 2018)。在实际生产中使用低浓度臭氧水或短时间处理会使其减菌效果不理想,高浓度长时间处理又会对水产品品质造成不可逆影响,且操作人员长期在高浓度臭氧水环境下可能会损害呼吸道,出现头疼乏力与记忆减退等症状。人体对 O_3 的嗅觉临界值浓度为0.15 mg/L,而当浓度达到10 mg/L以上时为中毒限值。因此,将臭氧水与其他处理方式相结合,既可减少其用量,还能更好发挥协同效应,实现综合作用效果。

2.1 臭氧水结合流化冰

流化冰作为一种可直接利用海水制作的高效低耗冷却介质,其冰晶细小圆润,易流动,可迅速降低水产品的体表温度;用其完全浸没鱼体,可增大其接触表面积,抑制微生物的生长繁殖(张皖君等,2016)。目前,流化冰在日本、美国、加拿大等国家已应用广泛,在我国还刚起步。将 O_3 与流化冰结合,能保持 O_3 原有的性能功效;抑制肌肉软化,减缓蛋白质变性,延长水产品货架期(刘锋等,2018)。其中,黄玉婷(2014)将 (0.82 ± 0.04) mg/L 臭氧水与流化冰结合用于梅鱼(*Chollichthys niveatus*)保鲜,发现该处理在维持梅鱼良好感官品质的同时,还可延长其冰藏货架期9 d,而使用流化冰仅延长7 d;Chen等(2016)使用0.1 mg/kg 臭氧流化冰保鲜鳙鱼,通过凝胶电泳与扫描电镜综合分析发现, O_3 结合流化冰可延迟鳙鱼肌原纤维蛋白的降解,鳙鱼货架期达18 d,比单独使用流化冰、片冰分别延长了3与9 d。 O_3 联合流化冰处理可有效保护肌原纤维蛋白的空间结构,减缓鱼体蛋白质的降解变性。在延缓水产品感官品质下降的

同时,低温能降低 O_3 分解,提高 O_3 的利用率。将高效环保的流化冰与 O_3 处理相结合,将兼具双重保鲜作用,且操作性好,该技术应用于水产品保鲜将成为必然趋势。

2.2 臭氧水结合气调保鲜技术

气调保鲜是将食品放置在保护性的气体内并进行成分和浓度调控,能起到抑制或延缓微生物的繁殖及品质劣变速度,实现其理想的保鲜效果(Nikzade *et al.*, 2019)。将臭氧水与低温气调保鲜相结合,利用 O_3 杀菌性能可杀灭或抑制水产品中腐败微生物生长,钝化内源酶,减缓ATP降解,最大程度保持其品质。其中,陈丽娇等(2012)研究臭氧水与气调(50% CO_2 +10% O_2 +40% N_2)处理结合对1℃下冷藏鲟鱼(*Acipenser sinensis*)片的保鲜效果,结果发现,臭氧水预处理20 min的鱼片,其初始菌数由1000减至30 CFU/g,货架期延长3~5 d;Gonçalves等(2019)将太平洋白虾浸入1.0 mg/L的15℃冷臭氧水中进行10 min预处理,沥干后100% CO_2 气调包装,发现能使其冷藏货架期达11~24 d,得出 O_3 预处理可更好替代氯水来保鲜虾。因此,臭氧水减菌处理能提高气调处理对微生物的控制作用,二者联用可更好达到延长水产品货架期及防腐保鲜的目的。

2.3 臭氧水结合其他保鲜技术

除上述主要保鲜技术外,臭氧水还可与微纳米气泡、液氮冷冻、镀冰衣技术以及其他保鲜剂等相结合,发挥其协同增效作用。微纳米臭氧气泡可对水产品进行清洗,增大杀菌剂与制品的接触面积,深入到食品内部,提高 O_3 利用率,延长其货架期,且对肉质损伤小(刘玉德等,2017)。将微纳米气泡技术与 O_3 相结合处理,能共同发挥其在水产品清洗消毒与贮藏保鲜中的作用,强化 O_3 在水中传质与氧化能力,用于鱼体净白处理(鲍旭腾等,2016);Shirade(2012)将水中含 O_3 的微泡添加到鱼酱产品原料中,使鱼酱制品的原材料中具有含气体的微气泡,能保持含 O_3 微气泡寿命,通过该法可生产无菌鱼酱产品;还有学者提出,将可食用涂膜用于水产品,隔绝微生物与污染物,来延长水产品的保质期(Yu *et al.*, 2019; 张杰等,2010)。贮藏初期,臭氧水可有效减少初始菌数,后期 O_3 分解迅速导致浓度下降,不能抑制微生物繁殖,因此,需要结合保鲜剂维持其原有保鲜效果。如宣伟(2011)研究了壳聚糖植酸复配结合臭氧水处理中国对虾(*Fenneropenaeus chinensis*),得出先用1.0 mg/L臭氧

水处理对虾,再用 2%壳聚糖植酸溶液涂膜后样品置于 -2°C 微冻真空保鲜,发现该处理能使其货架期延长 10 d;姜琼一(2009)发现在 10°C 时,使用 2.0 mg/L 臭氧水处理鲍鱼 8 min 后,与液氮冷冻结合贮藏,其 TVB-N 值与菌落数均小于传统冷冻工艺处理组,且感官品质更接近新鲜样品。施建兵等(2013)评价冷藏、超冷和超冷结合臭氧水对鲳鱼(*Pampus argenteus*)片品质影响,结果显示,冷藏组货架期为 6 d,而超冷和 1.8 mg/L 臭氧水与超冷结合的货架期能分别增至 10 与 11 d,超冷与臭氧水联合使用具有预处理的辅助功能,且运行成本低。综上所述, O_3 与其他杀菌保鲜技术结合具有协同增效的优点,可从不同程度上抑制有害微生物生长,提升水产品品质,延长其货架期。

3 前景与展望

目前,随着消费者对生鲜水产品需求量的逐年增长与健康饮食理念的深入人心,要保障水产品在市场上的正常供应,不仅应聚焦于水产品的运输流通方面,还需重视减菌化前处理,从源头确保其良好品质和安全性。未来水产品减菌化处理技术不再是使用某种单一杀菌技术,而是将其与其他保鲜技术或保鲜剂相结合,在抑制微生物生长和酶钝化的同时,保持其原有的色泽风味、质构与营养成分。20 世纪 80 年代以来, O_3 及臭氧水在美国、欧洲等发达国家已广泛用于与食品贮藏保鲜,而我国对 O_3 及臭氧水的研究由于起步晚仍然有待完善。

随着水产品保鲜技术的发展,臭氧水以其广谱杀菌、处理时间短、安全无残留与运营成本低廉等优势,在水产品杀菌保鲜中应用前景广阔。臭氧水能分解鱼、贝类的异臭,改善色泽,保持其鲜度,延长货架期,是对人体安全无毒、环境友好的杀菌保鲜剂。 O_3 通过喷淋、浸泡与流动水处理等方式,还可与其他保鲜技术和杀菌保鲜剂相结合,发挥其综合保鲜作用,为臭氧水在非热杀菌中的应用提供新思路。合理利用臭氧水,既可保证水产品品质又能延长货架期,而使用不当,也会对水产品品质及操作人员带来不利影响。因此,研究人员还应根据不同水产品的特性差异,考虑如何获得 O_3 最适处理浓度、处理时间与处理方式,制定适用于不同水产品的减菌化最佳工艺参数。水中 O_3 溶解度在 0.1~10 mg/L,而根据 O_3 行业标准,在对生鱼片、虾仁等水产品进行臭氧水处理时,其浓度应为 $0.8\sim 1.0\times 10^{-6}$ 。因此,政府、研究机构与相关企业须完善 O_3 杀菌技术标准,确保臭氧水理论研究成果与实际生产生活相适应,以实现水产品理想

的减菌化与综合保鲜效果。最后, O_3 的使用安全性问题仍可作为研究切入点。由于,国际臭氧协会制定的 O_3 安全标准为在 0.1×10^{-6} 时,人体可接触 10 h。因此,操作人员需控制 O_3 的操作时间与使用浓度。此外,为使 O_3 在水产品加工贮藏中的使用更加安全、方便且有效,应继续推进其作用机理与耐受臭氧微生物抗臭氧机制分析,以期臭氧水更好发挥其综合作用效果提供理论依据。

参 考 文 献

- Afari GK, Hung YC. A meta-analysis on the effectiveness of electrolyzed water treatments in reducing foodborne pathogens on different foods. *Food Control*, 2018, 93: 150–164
- Al-Omiri MK, Lamfon HA, Nazeh AAA, *et al.* Randomized clinical trial on the comparison of bleaching outcomes using either ozone or hydrogen peroxide. *Quintessence International*, 2018, 49(8): 625–634
- An YQ, Guo DJ, Jia L, *et al.* Effect of ozone water on sterilization pretreatments and freshness quality of bighead carp heads. *Journal of Food Safety and Quality*, 2015, 6(11): 4571–4577 [安玥琦, 郭丹婧, 贾磊, 等. 臭氧水浓度对鳙鱼头减菌效果及鲜度品质的影响. *食品安全质量检测学报*, 2015, 6(11): 4571–4577]
- Bao XT, Chen QY, Xu ZQ, *et al.* Overview of research advances and application of micro-nano bubbles technology in fishery and aquaculture sector. *Water Purification Technology*, 2016, 35 (4): 16–22 [鲍旭腾, 陈庆余, 徐志强, 等. 微纳米气泡技术在渔业水产行业的研究进展及应用综述. *净水技术*, 2016, 35(4): 16–22]
- Bao YL, Boeren S, Ertbjerg P. Myofibrillar protein oxidation affects filament charges, aggregation and water-holding. *Meat Science*, 2018, 135: 102–108
- Bureau of fishery and fishery administration, ministry of agriculture and rural areas, national aquatic technology promotion station, China fisheries society. 2019 China fisheries statistics yearbook. Beijing: China Agriculture Press, 2019 [农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2019 年中国渔业统计年鉴. 北京: 中国农业出版社, 2019]
- Cao H, Shi CL, Jia XY, *et al.* Toxicity mechanism of cadmium-induced reactive oxygen species and protein oxidation in testes of the frog *Rana nigromaculata*. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(13): 4199–4206
- Cao R, Liu Q, Yin BZ, *et al.* Combined effect of ozonated water and chitosan on the shelf-life of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*). *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2010, 11(1): 108–112
- Chen HH, Chiu EM, Huang JR. Color and gel-forming properties of horse mackerel (*Trachurus japonicus*) as related to

- washing conditions. *Journal of Food Science*, 1997, 62(5): 985–991
- Chen J, Huang J, Deng SG, *et al.* Combining ozone and slurry ice to maximize shelf life and quality of bighead croaker (*Collichthys niveatus*). *Journal of Food Science and Technology*, 2016, 53(10): 3651–3660
- Chen LJ, Liu Y, Cheng Y, *et al.* Modified atmosphere packaging combined with ozone treatment for keeping sturgeon fillets quality. *Journal of Fujian Fisheries*, 2012, 34(1): 26–30 [陈丽娇, 刘杨, 程艳, 等. 气调包装结合臭氧预处理保鲜鲟鱼片. *福建水产*, 2012, 34(1): 26–30]
- Cho WI, Chung MS. Antimicrobial effect of a combination of herb extract and organic acid against *Bacillus subtilis* spores. *Food Science and Biotechnology*, 2017, 26(5): 1423–1428
- Diao SQ, Li LH, Cen JW, *et al.* Preservation effect of ozone water on anchovy (*Engraulis japonicus*) during controlled freezing-point storage. *South China Fisheries Science*, 2011, 7(3): 8–13 [刁石强, 李来好, 岑剑伟, 等. 冰温臭氧水对鲱保鲜效果的研究. *南方水产科学*, 2011, 7(3): 8–13]
- Ding NP, Xia FG, Zhao PJ, *et al.* Disinfection effect and safety evaluation of slightly acidic electrolyzed water on cucumber. *Journal of Food Safety and Quality*, 2018, 9(4): 930–934 [丁年平, 夏枫耿, 赵培静, 等. 微酸性电解水对黄瓜的消毒效果及安全性评价. *食品安全质量检测学报*, 2018, 9(04): 930–934]
- Feng HJ, Lan WQ, Liu DY, *et al.* Effect of different ways of reducing bacteria on quality change of puffer fish during cold storage. *Food Science*, 2020, 41(7): 210–217 [冯豪杰, 蓝蔚青, 刘大勇, 等. 不同减菌化处理方式对暗纹东方鲀冷藏期间品质变化影响. *食品科学*, 2020, 41(7): 210–217]
- Gelman A, Sachs O, Khanin Y, *et al.* Effect of ozone pretreatment on fish storage life at low temperatures. *Journal of Food Protection*, 2005, 68(4): 778–784
- Gibson KE, Almeida G, Jones SL, *et al.* Inactivation of bacteria on fresh produce by batch wash ozone sanitation. *Food Control*, 2019, 106: 106747
- Gonçalves AA, Santos TCL. Improving quality and shelf-life of whole chilled Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) by ozone technology combined with modified atmosphere packaging. *LWT—Food Science and Technology*, 2019, 99: 568–575
- Han Q, Gao HY, Chen HJ, *et al.* Effects of ClO₂ Treatment and packing methods on storage quality of fresh walnut kernel. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2017, 17(5): 130–137 [韩强, 郜海燕, 陈杭君, 等. ClO₂处理和包装方法对鲜核桃仁贮藏品质的影响. *中国食品学报*, 2017, 17(5): 130–137]
- Huang B, Ma T, Liu BL, *et al.* Effects of ozone concentration on the activity of biofilm and its effectiveness of purification in recirculating aquaculture systems. *Progress in Fisheries Science*, 2016, 37(3): 143–147 [黄滨, 马腾, 刘宝良, 等. 不同浓度臭氧对循环水养殖系统生物膜活性及其净化效能的影响. *渔业科学进展*, 2016, 37(3): 143–147]
- Huang YT. Study on the effect of ozone fluidizing ice on preservation of Meiyu. Master's Thesis of Zhejiang Ocean University, 2014 [黄玉婷. 臭氧—流化冰对梅鱼保鲜效果的研究. *浙江海洋学院硕士研究生学位论文*, 2014]
- Ji XT, Nian YY, Xue P, *et al.* Effect of chlorine dioxide on pomfret quality during superchilled storage. *Meat Research*, 2018, 32(2): 60–65 [季晓彤, 年益莹, 薛鹏, 等. 二氧化氯对鲷鱼微冻贮藏品质的影响. *肉类研究*, 2018, 32(2): 60–65]
- Jiang QQ, Nakazawa N, Hu YQ, *et al.* Changes in quality properties and tissue histology of lightly salted tuna meat subjected to multiple freeze-thaw cycles. *Food Chemistry*, 2019, 293(4): 178–186
- Jiang QY. Study on the application of ozone sterilization combined with liquid nitrogen deep freezing technology in abalone processing. Master's Thesis of Fujian Agricultural and Forestry University, 2009 [姜琼一. 臭氧杀菌结合液氮深冷冻技术在鲍鱼加工中的应用研究. *福建农林大学硕士研究生学位论文*, 2009]
- Karamah EF, Ilmiyah AP, Ismaningtyas N. The application of ozonated water to maintain the quality of tuna meat: The effect of contact time, contact temperature and ozone dosage. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 509(1): 137–145
- Li N, Xie J. Research progress of preservation technology of squid. *Packaging Engineering*, 2018, 39(1): 40–46 [李娜, 谢晶. 鱿鱼保鲜技术的研究进展. *包装工程*, 2018, 39(1): 40–46]
- Li XP, Liu CK, Wang JX, *et al.* Research progress on protein oxidation and its effect on the structure of protein and the quality of aquatic products during storage and processing. *Food Industry Technology*, 2019, 40(18): 319–325, 333 [李学鹏, 刘慈坤, 王金厢, 等. 水产品贮藏加工中的蛋白质氧化对其结构性质及水产品品质的影响研究进展. *食品工业科技*, 2019, 40(18): 319–325, 333]
- Liu CK. Effect of ozone mediated myofibrillar protein oxidation on water holding capacity of grass carp surimi gel. Master's Thesis of Bohai University, 2019 [刘慈坤. 臭氧介导的肌原纤维蛋白质氧化对草鱼鱼糜凝胶持水性的影响机制研究. *渤海大学硕士研究生学位论文*, 2019]
- Liu F, Xie J. Application of slurry ice combined with ozone in preservation of aquatic products. *Food and Machinery*, 2018, 34(5): 173–176 [刘锋, 谢晶. 流化冰结合臭氧在水产品保鲜中的应用. *食品与机械*, 2018, 34(5): 173–176]
- Liu W, Sun J, Liu Q, *et al.* Application of ozone water sterilization in cold and fresh fish. *Jiangsu Agricultural Science*, 2016, 44(7): 343–346 [刘伟, 孙杰, 刘芹, 等. 臭氧水减菌化处理在冷鲜鱼肉中的应用. *江苏农业科学*, 2016, 44(7): 343–346]
- Liu YD, Wu G, Zhang H, *et al.* Characteristics of micro-nano-bubble and its application in fruits and vegetables. *Journal*

- of Food Science and Technology, 2017(3): 87–92 [刘玉德, 吴刚, 张浩, 等. 微纳米气泡的特性及其在果蔬中的应用. 食品科学技术学报, 2017(3): 87–92]
- Liu ZX, Wang YG, Zhang Z, *et al.* Germicidal effect of several disinfectants on the pathogenic bacteria of acute hepatopancreatic necrosis disease (AHPND) in *Litopenaeus vannamei*. *Progress in Fishery Science*, 2018, 39(3): 112–119 [刘志轩, 王印庚, 张正, 等. 几种消毒剂对凡纳滨对虾致病性弧菌的杀灭作用. 渔业科学进展, 2018, 39(3): 112–119]
- Lu JY, Li MM, Gao LH, *et al.* Attenuation rules and germicidal efficacy of ozonated water. *Journal of Central South University (Medical Edition)*, 2018, 43(2): 143–146 [鲁建云, 李苗苗, 高丽华, 等. 臭氧水浓度衰减及其杀菌作用. 中南大学学报(医学版), 2018, 43(2): 143–146]
- Nikzade V, Sedaghat N, Yazdi FT, *et al.* Development of shelf life kinetic model for fresh rainbow trout (*Oncorhynchus Mykiss*) fillets stored under modified atmosphere packaging. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 56(2): 663–673
- Okpala COR. Changes in some proximate, colour and textural characteristics of ozone processed shrimp: Combined effects of increasing ozone discharge and iced storage. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 2017, 16(2): 625–638
- Papachristodoulou M, Koukounaras A, Siomos AS, *et al.* The effects of ozonated water on the microbial counts and the shelf life attributes of fresh-cut spinach. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2017, 42(1): e13404
- Shi JB, Xie J, Gao ZL, *et al.* Effects of ozone water dipping and super-chilling on improving preservation quality of pomfret fillet. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(6): 274–279 [施建兵, 谢晶, 高志立, 等. 臭氧水浸渍后冰温贮藏提高鲳鱼块的保鲜品质. 农业工程学报, 2013, 29(06): 274–279]
- Shirade T. Process for sterilization and production of fish meat paste product with use of microbubble and sterile fish meat paste product obtained by the process. *Patent Application*, 2012
- Silva AMDM, Gonçalves AA. Effect of aqueous ozone on microbial and physicochemical quality of Nile tilapia processing. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2017, 41(6): e13298
- Sun JY, Wu YY, Yang XQ, *et al.* Sterilization and quality effects of ozone water on cobia fillets. *South Fisheries Science*, 2013, 9(6): 66–71 [孙继英, 吴燕燕, 杨贤庆, 等. 臭氧水对军曹鱼片的减菌效果和品质的影响. 南方水产科学, 2013, 9(6): 66–71]
- Ummat V, Singh AK, Sidhu GK. Effect of aqueous ozone on quality and shelf life of shredded green bell pepper (*Capsicum annuum*). *Journal of Food Processing and Preservation*, 2018, 42(10): 1–14
- Wedemeyer GA, Nelson NC, Yasutake WT. Physiological and biochemical aspects of ozone toxicity to rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1979, 36(6): 605–614
- Xiao ZH, Wang L, Fan XL, *et al.* Effect of ozone treatment on quality and physiological indexes of Korla pears. *Packaging Engineering*, 2018, 39(5): 58–62 [肖子寒, 王亮, 樊晓岚, 等. 臭氧处理对香梨品质和生理指标的影响. 包装工程, 2018, 39(5): 58–62]
- Xie SD, Chen LH, Zhang Y, *et al.* Effect of ozone on the quality of fish-ball made from silver carp. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science)*, 2009, 38(5): 552–557
- Xuan W. Studies on application of ozone sterilization combined with chitosan on chinese shrimp. *Master's Thesis of Zhejiang University of technology*, 2011 [宣伟. 臭氧杀菌结合壳聚糖涂膜对中国对虾保鲜的研究. 浙江工商大学硕士研究生学位论文, 2011]
- Yan SJ, Liang LY, Song ZM, *et al.* Preservative effect of ozone water treatment on catfish meat. *Food Science*, 2010, 31(24): 465–468 [闫师杰, 梁丽雅, 宋振梅, 等. 臭氧水对鲶鱼肉保鲜效果的研究. 食品科学, 2010, 31(24): 465–468]
- Ye ZY, Wang S, Chen T, *et al.* Inactivation mechanism of *Escherichia coli* induced by slightly acidic electrolyzed water. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 6–279
- Yu D, Regenstein JM, Xia W. Bio-based edible coatings for the preservation of fishery products: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(3): 41–46
- Yuan CH, Liu YL, Huang YQ, *et al.* Ozone ice preparation technology and its research advances in food preservation. *Food and Machinery*, 2019, 35(5): 224–230 [袁成豪, 刘永乐, 黄轶群, 等. 臭氧冰制备技术及其在食品保鲜中的应用研究进展. 食品与机械, 2019, 35(5): 224–230]
- Zhang HJ, Zhao YQ, Li LH, *et al.* Changes in biochemical properties of muscle protein from Nile tilapia fillets sterilized by ozone treatment during iced storage. *Journal of Fisheries of China*, 2015, 39(10): 1569–1576 [张红杰, 赵永强, 李来好, 等. 臭氧减菌化处理罗非鱼片冰温贮藏过程中蛋白质生化特性的变化. 水产学报, 2015, 39(10): 1569–1576]
- Zhang J, Wang YJ, Liu JZ, *et al.* Study on application of antimicrobial sodium alginate films in Tilapia fillet preservation. *Progress in Fishery Science*, 2010, 31(2): 102–108 [张杰, 王跃军, 刘均忠, 等. 抗菌性海藻酸钠涂膜在罗非鱼片保鲜中的应用. 渔业科学进展, 2010, 31(2): 102–108]
- Zhang T, Xue Y, Li ZJ, *et al.* Effects of ozone on the removal of geosmin and the physicochemical properties of fish meat from bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*). *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2016, 34: 16–23
- Zhang WJ, Lan WQ, Xiao L, *et al.* Research progress on application of slurry ice for aquatic products preservation. *Food and Machinery*, 2016, 32(7): 214–218 [张皖君, 蓝蔚青, 肖蕾, 等. 流化冰在水产品保鲜中的应用研究进展.

食品与机械, 2016, 32(7): 214–218]

Zhao YQ, Li LH, Yang XQ, *et al.* Applications of ozone in aquatic products processing: A review. *South Aquatic Science*, 2013, 9(5): 149–154 [赵永强, 李来好, 杨贤庆, 等. 臭氧在水产品加工中应用综述. *南方水产科学*, 2013, 9(5): 149–154]

Zhao YQ, Yang XQ, Li LH, *et al.* Acute toxicity test and genetic toxicity study of Nile tilapia fillets sterilized by ozone treatment. *Journal of Fisheries of China*, 2014, 38(8): 1182–1189 [赵永强, 杨贤庆, 李来好, 等. 臭氧减菌化处理罗非鱼片的急性毒性与遗传毒性. *水产学报*, 2014, 38(8): 1182–1189]

(编辑 陈 辉)

Research Progress on the Applications of Ozonated Water in the Sterilization and Preservation of Aquatic Products

LAN Weiqing^{1,2}, ZHAO Yanan¹, LIU Lin¹, XIE Jing^{1,2①}

(1. *Shanghai Ocean University, College of Food Science and Technology, Shanghai 201306*; 2. *Shanghai Aquatic Products Processing and Storage Engineering Technology Research Center, National Experimental Teaching Demonstration Center for Food Science and Engineering (Shanghai Ocean University), Shanghai 201306*)

Abstract Aquatic products may be contaminated by microorganisms during storage and transportation, leading to product spoilage and quality deterioration. Aquatic products are prone to deterioration by decomposition, putrefaction, degradation of proteins and amino acids, and production of basic amines. Pretreatment by sterilization is required to reduce the effects of microorganisms on the quality and shelf life of aquatic products during processing and storage. The mechanisms, main advantages, and disadvantages of common water treatment methods, including electrolysis or ozonation of water and use of chlorine dioxide solution were compared and analyzed. The research focused on the application of ozonated water in the sterilization and preservation of aquatic products. Ozone exhibits strong oxidizability as well as bacteriostatic and bactericidal effects. In addition, treatment with ozonated water is convenient and plays an important role during storage and preservation by spraying, immersion, and flowing water treatment. Ozonated water is widely used to bleach and decolorize fish fillets and surimi products and to remove strong scents. Additionally, it is also used for product sterilization and preservation, and for cleaning and disinfection of processing equipment. However, ozonated water is associated with poor stability, which may affect its sterilization ability. Therefore, the combination of ozonated water with other preservation technologies may prolong the shelf life of aquatic products to a greater extent than that by ozonated water alone. The combination of ozone water with slurry ice, modified atmosphere packaging, and other freshness preservation methods were described. Researchers should consider using orthogonal experiments or response surface methodology to identify the optimal treatment concentration and duration, and to develop optimal process parameters based on the individual characteristics of different aquatic products.

Key words Aquatic products; Ozonated water; Sterilization; Preservation

① Corresponding author: XIE Jing, E-mail: jxie@shou.edu.cn