

doi: 10.3969/j. issn. 2095 - 0780. 2013. 05. 023

· 综述 ·

臭氧在水产品加工中应用综述

赵永强^{1,2}, 李来好¹, 杨贤庆¹, 郝淑贤¹, 吴燕燕¹, 林洪²

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业部水产品加工重点实验室, 国家水产品加工技术研发中心,
广东 广州 510300; 2. 中国海洋大学食品科学与工程学院, 山东 青岛 266003)

摘要: 臭氧(O_3)作为一种高效的抑菌剂已广泛应用于食品工业中, 具有高反应性、强渗透性、低残留性等优点。臭氧在水产品加工中主要用于产品保鲜、去异味、漂白脱色及加工设备清洗消毒等方面。文章概述了臭氧的产生原理、基本性质及其应用发展史, 并对臭氧在水产品加工领域中的应用研究进行综述与展望。

关键词: 水产品加工; 臭氧; 应用

中图分类号: S 985

文献标志码: A

文章编号: 2095 - 0780 - (2013)05 - 0149 - 06

Applications of ozone in aquatic products processing: a review

ZHAO Yongqiang^{1,2}, LI Laihao¹, YANG Xianqing¹, HAO Shuxian¹, WU Yanyan¹, LIN Hong²

(1. Key Lab. of Aquatic Product Processing, Ministry of Agriculture; National R&D Center for Aquatic Product Processing; South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China; 2. College of Food Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Abstract: As an effective antimicrobial agent, ozone (O_3) has been widely applied in food industry with characteristics of high reactivity, strong penetrability and low residual. In the processing of aquatic products, ozone is used for products preserving, odor removing, bleaching and decoloring, as well as equipment cleaning and sanitizing. In this article, we summarize the generation principle, properties and application history of ozone; moreover, we overview and forecast the application of ozone in the field of aquatic products processing.

Key words: aquatic products processing; ozone; application

中国是世界第一水产大国。据统计, 中国2011年水产品总产量为 $5\ 603.21 \times 10^4$ t, 水产品加工总量 $1\ 783 \times 10^4$ t, 出口量 391.2×10^4 t, 出口额 177.9×10^8 美元, 连续12年居国内大宗农产品出口首位^[1]。水产品及其加工品是食品中优质蛋白质的主要来源之一。受水产品保鲜及货架期延长技术的制约, 水产品消费通常以鲜活水产品、腌制品和干制品为主。因此, 近年来关于水产品的低温保藏、气调保鲜与臭氧(O_3)处理等技术的研究与应用越来越广泛, 尤其是臭氧处理技术。臭氧处理过程中, 过量臭氧在空气中

会自然分解为氧气, 因此, 臭氧作为环境友好型技术正不断被消费者接受。笔者主要对臭氧的产生与性质及其在水产品加工中的应用进行综述。

1 概述

臭氧是氧气(O_2)的同素异形体, 是一种不稳定的无色气体。顾名思义, 臭氧具有一种特殊的刺激性气味, 其英文名 ozone 源自希腊语“ozein”, 意为“难闻”。自然界中的臭氧是由于地球大气层受到闪电或高能紫外辐射作用而产

收稿日期: 2013-04-19; 修回日期: 2013-05-07

资助项目: 国家自然科学基金项目(31271957); 现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-49); 国家科技支撑计划项目(2012BAD28B00, 2012BAD28B05); 广东省海洋渔业科技推广专项(A201101F02)

作者简介: 赵永强(1985-), 男, 博士研究生, 从事水产品安全与质量控制研究。E-mail: zhaoyq1122@qq.com

通信作者: 李来好(1963-), 男, 研究员, 从事水产品加工与质量安全研究。E-mail: laihao@163.com

生, 暴风雨后空气中特有的清新的气味即为臭氧产生的。臭氧同样也是各种光化学氧化反应过程中的副产物^[2-4]。

1839年SCHÖNBEIN发现了臭氧, 1895年SORET确定了臭氧的分子式^[5-6]。1886年欧洲最早使用臭氧进行污水处理, 1891年德国科学家的试验研究结果表明臭氧具有显著的杀菌效果, 2年后荷兰科学家首次试验在饮用水生产中应用了臭氧; 1906年法国在市政饮用水工厂中使用了臭氧。1909年德国在肉类保存时使用臭氧, 标志着臭氧首次在食品中的应用; 1936年法国应用臭氧进行贝类净化, 这是臭氧首次在水产品中应用^[7]。1982年美国食品与药品管理局(US Food and Drug Administration, FDA)承认瓶装水生产中应用臭氧属于一般公认安全(generally recognised as safe, GRAS), 此外, GRAHAM^[2]研究结论认为臭氧为GRAS化学制品; 同时电力研究院(Electric Power Research Institute, EPRI)专家通过讨论一致认为臭氧作为GRAS化学品可以直接接触食品, 而FDA并没有反对臭氧的GRAS认定。1999年美国农业部(United States Department of Agriculture, USDA)驳回了关于臭氧在肉类食品中的应用草案, 驳回的依据是FDA仅认可在瓶装水生产中使用臭氧, 其他应用必须提交食品添加申请书。由此可见, 当时臭氧在食品工业中的应用仍存在争议。2000年EPRI向FDA提交申请, 请求批准在食品工业中, 臭氧可直接接触食品。2001年FDA正式批准臭氧为二级食品直接接触添加剂与微生物抑制剂^[8]。

2 臭氧的产生与性质

2.1 臭氧的产生

使用臭氧时, 根据对臭氧浓度需求的不同, 可以通过电晕放电作用、光化学作用、电解作用及放射化学的作用产生^[3]。臭氧通常是由氧气或空气通过紫外光照射或电晕放电作用的方法产生。这2种方法源自自然界空气中臭氧的产生途径^[9]。紫外照射体系产生臭氧需要紫外光的波长为185 nm, 此方法的优点是成本低且不需要干燥空气或氧气源, 但产率较低, 最大质量分数约为0.1% (干基质量比), 此含量下溶于25 ℃水的臭氧质量浓度约为0.35 mg·L⁻¹^[10]; 而通过放电电离作用产生的臭氧可以提供更高的含量, 最大质量分数约为1.5% (干基质量比), 研究表明, 采用放电法每产生454 g臭氧需要消耗大约6~8 kW·h的电量^[9]。

通过高能量的输入, 导致了氧气分子分裂形成的单个氧原子(O·), 随后迅速与氧分子(O₂)结合形成臭氧(O₃)^[11](图1)。

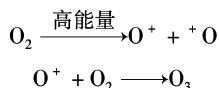


图1 臭氧形成过程

Fig. 1 The forming process of ozone

2.2 臭氧的理化性质

高浓度的臭氧呈微蓝色, 臭氧的氧化电势为2.7 mV, 具有比高锰酸盐高的强氧化性^[12](表1)。臭氧的熔点为(-192.5±0.4)℃, 沸点为(-111.9±0.3)℃, 临界温度为-12.1℃, 临界压力为54.6 atm。当臭氧质量分数为0.01~0.05 mg·kg⁻¹时很容易被检测到^[13]。

表1 不同氧化剂的氧化电位^[14]

Tab. 1 Oxidation potential of oxidizing agents

氧化剂 oxidizing agent	氧化电势/mV oxidation potential
氟 fluorine	3.03
臭氧 ozone	2.07
高锰酸盐 permanganate	1.68
亚氯酸盐 chlorine dioxide	1.57
次氯酸 hypochlorous acid	1.49
氯气 chlorine gas	1.36

臭氧浓度测定的方法主要有物理方法、物理化学方法与化学方法。物理方法主要测定臭氧在紫外、可见及红外光区的吸收光谱; 物理化学方法一般是基于由于臭氧发生反应产生的发热及化学发光等现象; 而化学方法是通过测定臭氧与某些化学试剂(如碘化钾)发生反应生成的反应产物的含量而对臭氧进行间接定量。1983年国际臭氧协会(International Ozone Association)批准了使用碘量滴定法测定臭氧含量, 该方法是目前臭氧含量测定的通用方法^[15]。

臭氧部分溶于水, 其溶解性与温度成反比。臭氧在水中的溶解度高于氧气与氮气, 而低于二氧化碳与氯气。臭氧在水中的溶解度还与臭氧流速与压力、水的纯度及与水的接触时间有关^[15]。臭氧中第3个O与其他O之间的化学键键能较低, 因此臭氧具有不稳定的性质, 可发生伪一级反应(pseudo first-order reaction)而持续降解。受空气温度与湿度的影响, 臭氧的半衰期通常为4~12 h^[10,16-17]。臭氧分子具有偶极亲电与亲和性质, 水溶液中臭氧与无机、有机化合物反应的主要途径: 直接以游离态与有机化合物反应、水溶液中分解为自由基后与化合物反应^[18]。

2.3 臭氧的抑菌作用

臭氧是一种高效广谱类的抗菌剂, 可抑制的微生物包括真菌、病毒、原生生物及细菌与真菌孢子。有学者认为, 臭氧作为抗菌剂主要是通过分子形式的臭氧作用于微生物产生抑菌作用; 亦有部分学者认为臭氧对微生物的抑菌活性是其降解产物[如羟基自由基(-OH), 超氧阴离子自由基(-O₂⁻)及氯化臭氧自由基(HO₃⁻)]产生的。臭氧抑菌的作用机理是氧化破坏微生物细胞中重要组成部分, 如细胞壁、细胞膜、线粒体与细胞核等^[15]; 另外, 一些学者认为细胞

内主要酶类的失活也是臭氧杀死细胞的重要机理^[19~20]。臭氧抑菌作用的研究主要有以下5个方面。

2.3.1 细菌及其孢子 FOEGEDING^[21]早期研究发现,与完整孢子相比,臭氧处理后蜡质芽孢杆菌(*Bacillus cereus*)孢壁蛋白迅速脱落,其孢子结构完整性遭到破坏,因此推断孢子外被是抵御臭氧的主要屏障; KIM 和 YOUSEF^[22]研究表明在杀灭孢子试验中臭氧水比其他大多数氧化剂的效果更好; BROADWATER 等^[23]报道芽孢杆菌的孢子具有比其营养细胞高15倍的耐受性;而 YOUNG 和 SETLOW^[24]研究了臭氧对枯草芽孢杆菌(*B. subtilis*)的灭活作用,臭氧杀死孢子的作用是由于臭氧水氧化作用破坏了其孢子内膜,而不能通过DNA损伤作用杀死枯草芽孢杆菌孢子。KANG等^[25]研究了低浓度臭氧水与金属离子联合作用对大肠杆菌(*Escherichia coli* O157: H7)与单核细胞增多性李斯特氏菌(*Listeria monocytogenes*)的抑制作用,结果表明,使用0.4 mg·L⁻¹的臭氧水处理30 min的抑菌效果最好,且当金属离子存在时可显著提高臭氧水的抑菌效果。

2.3.2 酵母 FAROOQ 等^[26]发现,酵母灭活度主要是受初始微生物数量的影响。当假丝酵母菌(*Candida parapsilosis*)初始菌落数为 1.4×10^5 cfu·mL⁻¹时菌落总数可减少4个数量级,而当初始菌落数为 1.6×10^7 cfu·mL⁻¹时未见假丝酵母菌失活现象。ZORLUGENC 等^[27]研究表明,使用臭氧水处理酵母15 min后可完全将其杀灭,而使用质量浓度为13.8 mg·L⁻¹的臭氧气体处理15 min后酵母灭活现象不明显。

2.3.3 真菌及其孢子 SPOTTS 和 CERVANTES^[28]评价了臭氧水对霉菌导致梨采后腐败的抑制作用,结果表明葡萄孢属(*Botrytis*)、毛霉菌属(*Mucor*)与青霉菌属(*Penicillium*)的抗灭活能力均不同。ZHAO 和 CRANSTON^[29]报道了青霉菌属(*Penicillium* spp.)对臭氧灭菌的耐受程度高于曲霉属真菌(*Aspergillus* spp.)。BEUCHAT 等^[30]研究发现,臭氧水pH为5.5与7.0时黄霉菌属(*Aspergillus flavus*)与寄生曲霉(*Aspergillus parasiticus*)分生孢子对臭氧的敏感程度未受到显著性影响。MOORE 等^[31]发现臭氧质量分数为2.0 mg·kg⁻¹时可显著降低不锈钢器具中的真菌数量,而FOARDE等^[32]报道,臭氧质量分数需大于6.0 mg·kg⁻¹。AMES等^[33]研究了臭氧环境对几种真菌分生孢子生长的影响,当互隔交链孢霉(*Alternaria alternata*)、黄曲霉(*Aspergillus flavus*)、黑曲霉(*Aspergillus niger*)、指状青霉(*Penicillium digitatum*)、扩展青霉(*Penicillium expansum*)及意大利青霉(*Penicillium italicum*)的分生孢子暴露在体积分数为150 nL·L⁻¹的臭氧环境中21~28 d,约50%的分生孢子未生长,当暴露时间延长至60~90 d时95%的分生孢子未见生长。

2.3.4 病毒 臭氧处理可以破坏大量的病毒,如委内瑞拉马脑脊髓炎病毒(*Venezuelan equine encephalomyelitis virus*)、甲肝病毒A(*hepatitis A*)、流感病毒A(*influenza A*)、水泡型口炎病毒(*vesicular stomatitis virus*)及传染性牛鼻气

管炎病毒等^[34]。BEUCHAT 等^[30]研究表明,低浓度的臭氧水对大量病毒而言是致命性的。

2.3.5 原生生物 WICKRAMANAYAKE 等^[35]报道了臭氧水对尾刺耐格里原虫(*Naegleria gruberi*)及鼠贾第鞭毛虫(*Giardia muris*)囊胞的作用,结果表明尾刺耐格里原虫囊胞对臭氧水的抵抗力强于鼠贾第鞭毛虫囊胞。KORICH 等^[36]研究表明肠内寄生虫*Cryptosporidium parvum*暴露在1.0 mg·L⁻¹的臭氧水中1 min后灭活率可达90%。DUMETRE 等^[37]研究了臭氧与紫外照射处理对传染性刚地弓形虫(*Toxoplasma gondii*)卵囊的灭活作用,发现紫外光照射处理可作为饮用水中刚地弓形虫卵囊有效的灭活方法,而臭氧处理方法却无效果。

综上,臭氧减菌化处理具有抑菌浓度低、抑菌时间短与抑菌谱广泛等优点,越来越多的食品加工及保鲜工艺中开始使用臭氧,而关于臭氧抑菌作用的最佳条件及抑菌机理方面的研究应引起研究者的重视。

3 臭氧减菌化技术在水产品加工中的应用

臭氧已经被公认为一种通用抗菌剂,既可以空气为媒介使用,亦可以水为载体,这2种形式对微生物的抑制作用方式是相同的^[38]。臭氧作为一种强氧化剂,被广泛应用于水处理、食品加工设备的杀菌消毒与清洗、异味清除以及水果、蔬菜、肉类、谷物和水产品等食品货架期的延长^[39~42]。臭氧在水产品中的应用主要有以下几个方面。

3.1 漂白作用

臭氧的漂白作用主要应用于水产品鱼糜制品及鱼片的加工中。郝淑贤等^[43]研究了臭氧水处理对罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)鱼片色泽的影响,并分析色素蛋白及一氧化碳(CO)结合量的变化,表明臭氧处理后发色罗非鱼片的亮度(L*)变大,其作用机理可能跟肌红蛋白含量降低及其存在形式有关。谢三都等^[44]在鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)鱼丸制作的漂洗擂溃工艺中使用臭氧水处理,表明在擂溃工序中添加0.8 mg·L⁻¹臭氧并于40℃水浴保持35 min后鱼丸的色泽最佳。CANTALEJO^[45]研究了臭氧对新鲜大西洋鳕(*Gadus morhua*)品质及货架期的影响,表明由臭氧化引起鳕鱼片的颜色指标[L*、红绿色值(a*)与黄蓝色值(b*)]的变化是不同的,臭氧处理时间不同,鳕鱼片的L*变化不显著,而a*与b*均有显著性变化。

臭氧处理不仅改善了水产加工品的色泽,同时还可以改善产品品质及延长货架期。CHEN 等^[46]研究表明,当使用臭氧水漂洗处理竹筴鱼(*Trachurus japonicus*)碎肉10~20 min后可对其起到有益的漂白效果,且当在低温及碱性条件下需适当延长处理时间,但臭氧漂白处理会显著降低竹筴鱼碎肉pH及鱼糜凝胶特性并导致鱼肉脂质氧化。

3.2 去异味作用

臭氧具有很好的去异味作用,它主要是通过将异味中主要成分胺类(臭味)、土腥素、2-甲基异莰醇(腥味)及由

美拉德反应产生的吡嗪类等物质氧化物分解，最后生成无味的产物，并对水产品本身的鲜味具有一定的保护作用。薛勇^[47]使用质量浓度为 $3.0\sim7.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的臭氧水漂洗鱠(*Hoplothalichthys nobilis*)鱼肉可以脱除鱼肉中42.1%~54.5%的土腥素，采用臭氧气体漂浮处理鱼肉5~20 min，可以脱除鱼肉中42.8%~77.0%的土腥素。杜国伟^[48]研究了应用臭氧法脱除鲢鱼肉糜中的鱼腥味，臭氧水初始质量浓度为 $2.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、脱腥时间15 min、pH为8、水温为0~5 °C时可以有效去除鲢鱼糜中的土腥味。COUDRAINS和STARCK^[49]发明了一种鱼肉去除异味及脱色的装置，该装置通过使用臭氧水对鱼肉长时间浸泡处理的方法以达到去除异味及脱色的作用。

3.3 保鲜作用

在水产品加工中传统抑菌剂的使用会造成残留，而臭氧在使用后可以自行降解，因此臭氧水及臭氧冰的保鲜方法逐渐受到水产品加工企业的青睐。KIM等^[50]研究了臭氧、过氧化氢与盐类对斑点叉尾鮰(*Ictalurus punctatus*)鱼片中微生物及品质质量的影响，结果表明以上3种处理方式对抑制斑点叉尾鮰鱼片中大肠菌群与嗜冷微生物菌落总数均有作用，可延长斑点叉尾鮰鱼片货架期1.5~3.0 d，但会引起氧化酸败与鱼片色泽的变化。臭氧质量分数为 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 可使斑点叉尾鮰鱼片货架期延长25%。MEUNPOL等^[51]测定了臭氧处理后斑节对虾(*Penaeus monodon*)臭氧与原生菌的残留情况，表明经过连续8 h臭氧处理后斑节对虾的幼体中臭氧残留质量浓度(residual ozone concentration, ROC)范围为 $0.34\sim0.50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，未见斑节对虾幼体死亡。但斑节对虾幼体暴露10 h后，其死亡率达23%，继续暴露至24 h，死亡率增加到34%。CROWE等^[52]采用质量浓度为 $1.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的臭氧喷雾处理大西洋鲑(*Salmo salar*)鱼片，可显著降低鱼片中单核细胞增生性李斯特菌的数量，并延长货架期，且臭氧处理后的大西洋鲑鱼片在4 °C贮藏条件下其鱼肉脂质氧化水平未见显著性升高。

国内方面，刁石强等^[53]采用臭氧冰处理发色后的罗非鱼片，可减少罗非鱼片中挥发性盐基氮的产生，延长罗非鱼片保质期。徐泽智等^[54]利用质量分数为 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 臭氧冰处理对虾后，对虾菌落总数比对照组减少91%，具有良好的保鲜效果。

3.4 工厂车间及设备消毒

水产品加工厂中，为减少与降低污染，采取清洗与消毒操作是必不可少的工序。常用于清洗与消毒操作的卫生消毒剂主要有氯气及其衍生物、酸类、碘酒及季铵盐类化合物。除此之外，热消毒方式对于杀灭环境中的污染微生物也比较有效^[55]。由于臭氧是一种强氧化剂，因此可用于加工企业中加工设备与车间环境的卫生消毒。GREENE等^[56]研究了使用臭氧水作为乳品工厂中消毒剂的方法，结果表明臭氧处理同使用次氯酸消毒剂均可以减少乳品加工厂中附着乳制品容器的表面微生物数量，2种方法处理后

其表面微生物数量均可减少90%；GUZEL-SEYDIM等^[57]研究了臭氧水在乳品加工设备中的应用，采用40 °C热水及10 °C臭氧水分别对不锈钢设备表面进行预清洗15 min，结果表明臭氧水处理可清洗不锈钢设备表面污染物，清洗率达84%，而温水的清洗率仅为51%。另外，在食品工业生产中若对设备的清洗与消毒不及时，这些设备上会形成一层生物膜。DOSTI等^[34]尝试使用臭氧处理来除去形成菌膜的微生物，使加工设备更易于清洗，使用臭氧处理环境中的恶臭假单胞菌(*Pseudomonas putida*)的效果要明显优于其他方法。

4 总结与展望

大量前期研究表明，臭氧作为一种安全和有效的抗菌剂已广泛应用于食品工业中，臭氧处理可显著降低食品中微生物菌群的种类及数量，延长产品货架期。臭氧与其他消毒剂相比主要具有处理浓度低、处理时间短的优势，且臭氧可直接分解为氧气，是一种低残留、环境友好型的灭菌剂。另外，与其他消毒剂相比，臭氧属广谱性抑菌剂，对细菌及其孢子、酵母、真菌及其孢子、病毒和寄生虫等均具有杀灭作用。同时，水产品、肉类、水果和蔬菜等经臭氧处理后除货架期延长外，多数食品的感官特性得到保持甚至增强。随着人们消费水平的提高，安全、新鲜的水产品越来越受到消费者的青睐，而水产品加工过程中合理利用臭氧可有效保证水产品品质并延长其货架期；但如果使用不当，臭氧同样可以降低水产品的感官品质，对产品质量造成一些有害的影响。此外，臭氧处理后水产品中某些有机化合物的氧化产物对产品品质及安全性的影响也应得到重视，且需要进行更多的臭氧抑菌机理研究以确定臭氧抑菌作用的内在影响因素，及造成某些微生物产生抗臭氧作用的原因，这样的研究将有助于确定臭氧最耐受微生物及臭氧的处理条件，增强臭氧抑菌过程的有效性。因此，优化臭氧在水产品加工过程中的应用条件是臭氧成功应用的一个紧迫问题。随着知识和经验的积累，操作规范化，臭氧在水产品中的使用将会更有效、更安全、更广泛。

参考文献：

- [1] 农业部渔业局. 2012 中国渔业年鉴[M]. 北京：中国农业出版社，2012：35~47.
- [2] GRAHAM D. Use of ozone for food processing[J]. Food Technol, 1997, 51(6): 72~73.
- [3] MUTHUKUMARAPPAN K, HALAWEISH F, NAIDU A S. Ozone [M] // NAIDU A S. Natural food antimicrobial systems. Boca Raton, FL: CRC Press LLC, 2000: 783~800.
- [4] BENA D W. Beverage plant sanitation[M] // HUI Y H. Handbook of food science, technology, and engineering. Boca Raton: CRC Press, 2006: 1~29.
- [5] FIELDING L, BAILEY R. Ozone decontamination in hygiene management[M] // LELIEVELD H L, MOSTERT M A, HOLAH J.

- Handbook of hygiene control in the food industry. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd., 2005: 507–515.
- [6] TIWARI B K, RICE R G. Regulatory and legislative issues [M] // O'ONNELL C P, TIWARI B K, CULLEN P J, et al. Ozone in food processing. Hoboken, New Jersey: Wiley Online Library, 2012: 7–18.
- [7] HILL A G, RICE R G. Historical background, properties and applications [M] // RICE R G, NETZER A. Handbook of ozone technology and applications. Ann Arbor: Ann Arbor Science Publishers Inc., 1982: 1–37.
- [8] U. S. FDA. Hazard analysis and critical control point (HACCP): procedures for the safe and sanitary processing and importing of juice, final rule [J]. Federal Register, 2001, 66(13): 6137–6202.
- [9] PRYOR A, RICE R G. Introduction to the use of ozone in food processing applications [C] // Proceedings of 14th Ozone World Congress. Dearborn, MI: Pan American Group, 1999: 22–26.
- [10] SHARMA R. Ozone decontamination of fresh fruit and vegetables [M] // JONGEN W. Improving the safety of fresh fruit and vegetables. Boca Raton, FL: CRC Press LLC, 2005: 265–299.
- [11] KARACA H, VELIOGLU Y S. Ozone applications in fruit and vegetable processing [J]. Food Rev Int, 2007, 23(1): 91–106.
- [12] LINTON R H, HAN Y C, SELBY T L, et al. Gas-/vapor-phase sanitation (decontamination) treatments [M] // SAPERS G M, GORNY J R, YOUSEF A E. Microbiology of fruits and vegetables. Boca Raton, FL: CRC Press LLC, 2006: 401–435.
- [13] MEHLMAN M A, BOREK C. Toxicity and biochemical mechanisms of ozone [J]. Environ Res, 1987, 42(1): 36–53.
- [14] LEGRINI O, OLIVEROS E, BRAUN A M. Photochemical processes for water treatment [J]. Chem Rev, 1993, 93(2): 671–698.
- [15] KHADRE M A, YOUSEF A E, KIM J G. Microbiological aspects of ozone applications in food: a review [J]. J Food Sci, 2001, 66(9): 1242–1252.
- [16] LUCAS J. Integrating MAP with new germicidal techniques [M] // AHVENAINEN R. Novel food packaging techniques. Boca Raton, FL: CRC Press LLC, 2003: 312–336.
- [17] TOMIYASU H, FUKUTOMI H, GORDON G. Kinetics and mechanism of ozone decomposition in basic aqueous solution [J]. Inorganic Chem, 1985, 24(19): 2962–2966.
- [18] STAHELIN J, HOIGNE J. Decomposition of ozone in water in the presence of organic solutes acting as promoters and inhibitors of radical chain reactions [J]. Environ Sci & Technol, 1985, 19(12): 1206–1213.
- [19] TAKAMOTO Y, MAEBA H, KAMIMURA M. Changes in survival rate enzyme activities and in *Escherichia coli* with ozone [J]. Appl Microbiol Biotechnol, 1992, 37(3): 393–395.
- [20] CHANG S L. Modern concept of disinfection [J]. J Sanit Engin Div, 1971, 97(5): 689–707.
- [21] FOEGEDING P M. Ozone inactivation of *Bacillus* and *Clostridium* spore populations and the importance of the spore coat to resistance [J]. Food Microbiol, 1985, 2(2): 123–134.
- [22] KIM J G, YOUSEF A E. Inactivation kinetics of foodborne spoilage and pathogenic bacteria by ozone [J]. J Food Sci, 2000, 65(3): 521–528.
- [23] BROADWATER W T, HOEHN R C, KING P H. Sensitivity of three selected bacterial species to ozone [J]. J Appl Microbiol, 1973, 26(3): 391–393.
- [24] YOUNG S B, SETLOW P. Mechanisms of *Bacillus subtilis* spore resistance to and killing by aqueous ozone [J]. J Appl Microbiol, 2004, 96(5): 1133–1142.
- [25] KANG S, KIM K, PARK J, et al. Effect of a combination of low level ozone and metal ions on reducing *Escherichia coli* O157: H7 and *Listeria monocytogenes* [J]. Molecules, 2013, 18(4): 4018–4025.
- [26] FAROOQ S, CHIAN E, ENGELBRECHT R S. Basic concepts in disinfection with ozone [J]. J Water Poll Control Federation, 1977, 49(8): 1818–1831.
- [27] ZORLUGENÇ B, K'ROĞLU ZORLUGENÇ F, ÖZTEKİN S, et al. The influence of gaseous ozone and ozonated water on microbial flora and degradation of aflatoxin B1 in dried figs [J]. Food Chem Toxicol, 2008, 46(12): 3593–3597.
- [28] SPOTTS R A, CERVANTES L A. Effect of ozonated water on post-harvest pathogens of pear in laboratory and packinghouse tests [J]. Plant Dis, 1992, 76(3): 256.
- [29] ZHAO J, CRANSTON P M. Microbial decontamination of black pepper by ozone and the effect of the treatment on volatile oil constituents of the spice [J]. J Sci Food Agric, 2006, 68(1): 11–18.
- [30] BEUCHAT L R, CHMIELEWSKI R, KESWANI J, et al. Inactivation of aflatoxigenic *Aspergilli* by treatment with ozone [J]. Lett Appl Microbiol, 2002, 29(3): 202–205.
- [31] MOMMA K, HASHIMOTO W, YOON H, et al. Safety assessment of rice genetically modified with soybean glycinin by feeding studies on rats [J]. Biosci Biotechnol Biochem, 2000, 64(9): 1881–1886.
- [32] FOARDE K K, VANOSDELL D W, STEIBER R S. Investigation of gas-phase ozone as a potential biocide [J]. Appl Occupational and Environ Hyg, 1997, 12(8): 535–542.
- [33] AMES Z R, FELIZIANI E, SMILANICK J L. Germination of fungal conidia after exposure to low concentration ozone atmospheres [J]. Postharvest Biol Technol, 2013, 83: 22–26.
- [34] DOSTI B, GUZEL-SEYDIM Z, GREENE A K. Effectiveness of ozone, heat and chlorine for destroying common food spoilage bacteria in synthetic media and biofilms [J]. Int J Dairy Technol, 2005, 58(1): 19–24.
- [35] WICKRAMANAYAKE G B, RUBIN A J, SPROUL O J. Inactivation of *Naegleria* and *Giardia* cysts in water by ozonation [J]. J Water Poll Control Federation, 1984, 56(8): 983–988.
- [36] KORICH D G, MEAD J R, MADORE M S, et al. Effects of o-

- zone, chlorine dioxide, chlorine, and monochloramine on *Cryptosporidium parvum* oocyst viability [J]. *Appl Environ Microbiol*, 1990, 56(5): 1423–1428.
- [37] DUMÈRE A, LE BRAS C, BAFFET M, et al. Effects of ozone and ultraviolet radiation treatments on the infectivity of *Toxoplasma gondii* oocysts [J]. *Veter Parasitol*, 2008, 153(3): 209–213.
- [38] CORDS B R, BURNETT S L, HILGREN J, et al. Sanitizers: halogens, surface-active agents, and peroxides [M] // DAVIDSON P M, SOFOS J N, BRANEN A L. *Antimicrobials in food*. Boca Raton, FL: CRC Press LLC, 2005: 507–572.
- [39] TIWARI B K, MUTHUKUMARAPPAN K. Ozone in fruit and vegetable processing [M] // DONNELL C O, TIWARI B K, CULLEN P J, et al. *Ozone in food processing*. West Sussex: Wiley-Blackwell, 2012: 55–80.
- [40] COLL CÁRDENAS F, ANDRÉS S, GIANNUZZI L, et al. Antimicrobial action and effects on beef quality attributes of a gaseous ozone treatment at refrigeration temperatures [J]. *Food Control*, 2011, 22(8): 1442–1447.
- [41] LOEB B L, THOMPSON C M, DRAGO J, et al. Worldwide ozone capacity for treatment of drinking water and wastewater: a review [J]. *Ozone: Science & Engin*, 2012, 34(1): 64–77.
- [42] LULLIEN-PELLERIN V. Ozone in grain processing [M] // DONNELL C O, TIWARI B K, CULLEN P J, et al. *Ozone in food processing*. West Sussex: Wiley-Blackwell, 2012: 81–101.
- [43] 郝淑贤, 何俊燕, 李来好, 等. 臭氧水对罗非鱼片色泽影响分析 [J]. *食品科学*, 2013, 34(13): 50–53.
- [44] 谢三都, 陈荔红, 张怡, 等. 臭氧对鲢鱼鱼丸品质的影响 [J]. *福建农林大学学报: 自然科学版*, 2009, 38(5): 552–557.
- [45] CANTALEJO M J. Effects of gaseous ozone on quality and shelf-life of fresh cod (*Gadus Morhua*) [C/OL] // International Ozone Association 2007: Proceedings of the IOA Conference and Exhibition, Valencia, Spain, October 29-31, 2007. [2013-03-20]. <http://www.chimia.it/pdf/Paper 4.03.pdf>.
- [46] CHEN H H, CHIU E, HUANG J R. Color and gel-forming properties of horse mackerel (*Trachurus japonicus*) as related to washing conditions [J]. *J Food Sci*, 1997, 62(5): 985–991.
- [47] 薛勇. 鲢鱼鱼糜抗冻变性剂及土腥味脱除方法的研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
- [48] 杜国伟. 鲢鱼糜的脱腥技术研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2007.
- [49] COUDRAINS L, STARCK E. Process and device for treating animal flesh, particularly fish, for the purpose of removing color and odor: US, 5087466A[P]. 1992-02-11.
- [50] KIM T J, SILVA J L, CHAMUL R S, et al. Influence of ozone, hydrogen peroxide, or salt on microbial profile, TBARS and color of channel catfish fillets [J]. *J Food Sci*, 2000, 65(7): 1210–1213.
- [51] MEUNPOL O, LOPINYOSIRI K, MENASVETA P. The effects of ozone and probiotics on the survival of black tiger shrimp (*Penaeus monodon*) [J]. *Aquaculture*, 2003, 220(1): 437–448.
- [52] CROWE K M, SKONBERG D, BUSHWAY A, et al. Application of ozone sprays as a strategy to improve the microbial safety and quality of salmon fillets [J]. *Food Control*, 2012, 25(2): 464–468.
- [53] 刁石强, 吴燕燕, 王剑河, 等. 臭氧冰在罗非鱼片保鲜中的应用研究 [J]. *食品科学*, 2007(8): 501–504.
- [54] 徐泽智, 刁石强, 郝淑贤, 等. 用臭氧冰延长水产品保鲜期的试验 [J]. *制冷学报*, 2008(5): 58–62.
- [55] GUZEL-SEYDIM Z B, GREENE A K, SEYDIM A C. Use of ozone in the food industry [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2004, 37(4): 453–460.
- [56] GREENE A K, FEW B K, SERAFINI J C. A comparison of ozonation and chlorination for the disinfection of stainless steel surfaces [J]. *J Dairy Sci*, 1993, 76(11): 3617–3620.
- [57] GUZEL-SEYDIM Z B, WYFFELS J T, GREENE A K, et al. Removal of dairy soil from heated stainless steel surfaces: use of ozonated water as a prerinse [J]. *J Dairy Sci*, 2000, 83(8): 1887–1891.