

李晓燕, 孟庆瑶, 赵宜范, 等. 生鲜食品冷链过程中消毒杀菌技术的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(11): 414-418. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021010017

LI Xiaoyan, MENG Qingyao, ZHAO Yifan, et al. Research Progress of Disinfection and Sterilization in Cold Chain of Fresh Foods[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(11): 414-418. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021010017

· 专题综述 ·

# 生鲜食品冷链过程中消毒杀菌 技术的研究进展

李晓燕, 孟庆瑶, 赵宜范, 张丽红, 杨笑琳, 刘昌通

(哈尔滨商业大学能源与建筑工程学院, 黑龙江哈尔滨 150028)

**摘要:** 本文旨在概述适用于新冠肺炎疫情阶段且可同时用于冷链过程中生鲜食品表面及外包装的消毒杀菌技术, 并讨论其现存的问题, 为研发更加安全高效的消毒杀菌技术, 实现更有效的疫情防控提供参考。本文主要从臭氧杀菌技术和紫外线杀菌技术的工作机理、对新型冠状病毒的灭活作用、对冷链过程中生鲜食品保鲜效果的影响、食品外包装消毒的有效性及应用现状进行论述。臭氧杀菌技术和紫外线杀菌技术对新型冠状病毒的灭活、生鲜食品表面及外包消毒具有积极作用, 在新冠疫情期间具有较大的应用前景。但由于臭氧和紫外线具有一定的物理化学特性限制, 加快臭氧覆盖速度与挥发时间、避免紫外线对低温贮藏食物有机分子结构的破坏以及探究其他冷杀菌技术在疫情阶段的适用性是今后的研究方向。

**关键词:** 生鲜食品, 冷链, 疫情防控, 臭氧杀菌技术, 紫外线杀菌技术, 新型冠状病毒

中图分类号: TS205.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2021)11-0414-05

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021010017

## Research Progress of Disinfection and Sterilization in Cold Chain of Fresh Foods

LI Xiaoyan, MENG Qingyao, ZHAO Yifan, ZHANG Lihong, YANG Xiaolin, LIU Changtong

(School of Energy and Building Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China)

**Abstract:** This paper outlines the disinfection and sterilization technologies which are suitable for the novel coronavirus pneumonia epidemic stage and can be used on the surface and outer packaging of fresh foods in the cold chain process, and discusses their existing problems, in order to provide a reference for the development of more secure and efficient disinfection technology, more efficient epidemic prevention and control. This paper mainly discusses the working principle of ozone sterilization technology and ultraviolet sterilization technology, the inactivation effect of SARS-CoV-2, the effect of fresh food preservation in the cold chain progress, the effectiveness of food packaging disinfection and its application status. This paper has shown that ozone sterilization technology and ultraviolet sterilization technology have positive effects on the inactivation of SARS-CoV-2, fresh food surface and outsourcing disinfection, which will have a great application prospects during the period of novel coronavirus pneumonia. However, due to the limited physical and chemical properties of ozone and ultraviolet light, the future research direction is to accelerate the coverage rate and evaporation time of ozone, avoid ultraviolet radiation damage to organic molecular structure of food stored at low temperature and explore the applicability of other cold sterilization technologies in the epidemic stage.

**Key words:** fresh foods; cold chain; epidemic prevention and control; ozone sterilization technology; ultraviolet sterilization technology; SARS-CoV-2

收稿日期: 2021-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(51476049)。

作者简介: 李晓燕(1962-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 制冷节能技术与蓄能材料, E-mail: mylx6168@sina.com。

自新冠肺炎疫情暴发以来,国内进入常态化疫情防控状态,但全球疫情仍在持续蔓延,目前已扩散到全球 200 多个国家和地区<sup>[1]</sup>。随着气温的下降,新型冠状病毒的活性得以增强,当温度低于 3 ℃ 时,平均温度与新冠肺炎病例数呈正线性关系<sup>[2]</sup>。生鲜食品冷链过程中也存在新型冠状病毒传播的风险。有研究表明,将新型冠状病毒添加到鸡肉、三文鱼和猪肉中并在 4 ℃ 标准冷藏和-20 ℃ 标准冷冻 21 d 后,新型冠状病毒的传染性仍未下降<sup>[3]</sup>。在 2020 年 6 月北京新发地疫情和 2020 年 7 月大连疫情中,于进口冷链食品相关的环境拭子样本检测中均显示新型冠状病毒核酸阳性;在 2020 年 9 月青岛疫情中,进口冻鳕鱼外包装也分离出新型冠状病毒<sup>[4]</sup>。由此可见,关于生鲜食品冷链过程中消毒杀菌技术的研究十分关键。

包装内的食品常采用的杀菌方法主要分为加热杀菌和非加热杀菌两大类,其中非加热杀菌(冷杀菌)即不用热能来杀死微生物,而是通过物理或化学的方法进行杀菌,在保证食品在微生物方面安全性的同时保持食物固有的营养成分<sup>[5]</sup>。冷杀菌技术包括超高压杀菌、臭氧杀菌、脉冲强光杀菌、紫外线杀菌、辐照杀菌等新型杀菌技术<sup>[6]</sup>。现行冷链食品装卸、运输等物流过程中常用醇类、过氧化物类、季铵盐类以及含氯消毒剂进行生鲜食品外包装消毒<sup>[7]</sup>。然而,过度接触消毒化学品可能会导致意想不到的人类健康风险<sup>[8]</sup>,并且被洗掉的大部分消毒剂可能存在于城市废水中,并且延伸到水生环境<sup>[9]</sup>。因此,探究可同时用于食品表面及外包装的相对安全高效消毒杀菌技术有利于生鲜食品在冷链过程中的疫情防控。

针对现行冷链食品消毒技术的不足,本文综述了可同时用于生鲜食品表面及外包装的相对安全高效的消毒杀菌技术,且基于不同杀菌方法对新型冠状病毒的灭活作用及其在食品冷链过程中的应用,本文目前重点研究臭氧杀菌技术和紫外线杀菌技术。

## 1 臭氧杀菌技术

### 1.1 臭氧杀菌技术的工作机理

臭氧(O<sub>3</sub>)是氧(O<sub>2</sub>)的同素异形体,分子量为 48,常温下是一种不稳定且具有特殊刺激性气味的淡蓝色气体。液态臭氧为深蓝色,比重为 1.71,熔点为-183 ℃;固态臭氧为紫黑色,熔点为-251 ℃,气态臭氧的临界温度为-12 ℃,沸点为-119 ℃<sup>[10-11]</sup>。臭氧化学性质活泼具有极强的氧化能力,可以同细菌的细胞壁中存在的蛋白质等有机物发生化学反应,使细胞壁通透性增加,细胞内容物流出,臭氧在破坏和分解细胞壁后迅速进入细胞,氧化细胞内酶或核糖核酸(Ribonucleic Acid, RNA)、脱氧核糖核酸(Deoxyribonucleic Acid, DNA),从而生成死菌原体,故臭氧对病毒、细菌和霉菌等微生物具有很好的灭活效果<sup>[12]</sup>。

### 1.2 臭氧杀菌技术对新型冠状病毒的灭活作用

在疫情阶段,探究臭氧杀菌技术对新型冠状病毒的灭活作用在保证生鲜食品冷链过程中的安全方面至关重要,许多学者在臭氧杀菌技术对新型冠状病毒的灭活作用、传播速度等方面进行了研究。Tizaoui 等<sup>[13]</sup>研究发现臭氧可能是对抗新型冠状病毒的有效氧化剂,臭氧可以攻击病毒尖峰和包膜的蛋白质和脂质,从而破坏病毒的完整性,抑制病毒感染,臭氧灭活病毒的潜在攻击部位如图 1 所示<sup>[13]</sup>。Fernández-Cuadros 等<sup>[14]</sup>研究发现臭氧可以直接或间接氧化灭活病毒,并可以刺激细胞和体液免疫系统,在早期新冠肺炎感染阶段有用,臭氧可以改善气体交换,减少炎症,并调节抗氧化系统,因此它可用于过度炎症或细胞因子风暴期,以及低氧血症和/或多器官衰竭期。Wang 等<sup>[15]</sup>研究表明臭氧可以通过调节一种负责产生白细胞介素 IL-1β 和白细胞介素 IL-18 的细胞溶质复合物来显示其抗炎活性,它可以保护受新型冠状病毒肺炎影响的患者肺部免于发生缺血再灌注损伤。Ran 等<sup>[16]</sup>使用基本繁殖数(R<sub>0</sub>)对新冠肺炎的传染性进行了量化,根据中国国家环境中心获得的 2019 年 12 月 10 日~2020 年 2 月 29 日期间 1642 个站的空气污染物(包括臭氧在内的其他标准污染物)监测数据,提取污染物的值,并通过有温度和绝对湿度调整的回归分析来探索 R<sub>0</sub> 和每种污染物之间的关联,研究发现新冠肺炎 R<sub>0</sub> 与每日 1 h 最大臭氧浓度呈负相关,如图 2 所示<sup>[16]</sup>,表明环境臭氧与降低新冠肺炎传播率有关。Cattel 等<sup>[17]</sup>对 2011 年 1 月~2020 年 7 月发表的 280 篇关于臭氧治疗方面的文章进行研究,通过分析臭氧作为辅助手段联合药物进行治疗时得到的有益效果,提示了一种全身臭氧治疗的新的免疫治疗方法,提出了对于新型冠状病毒肺炎患者,全身臭氧治疗联合抗病毒药物是合理可行的。

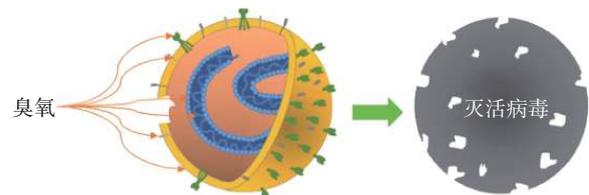


图 1 臭氧灭活病毒的潜在攻击部位

Fig.1 Potential attack site of ozone inactivation virus

### 1.3 臭氧杀菌对冷链过程中生鲜产品保鲜效果的影响

在臭氧杀菌技术对新型冠状病毒有效灭活的基础上,探究其对冷链过程中生鲜产品保鲜效果的影响更有利于臭氧杀菌技术在疫情阶段的实施。臭氧杀菌技术因具有高效、无残留以及经济适用性的特点,被广泛应用于食品行业<sup>[18]</sup>。肖岚等<sup>[19]</sup>将冷却猪肉放置在臭氧保鲜液中浸泡 2 min 后置于(3±0.5) ℃ 环境中冷藏,试验结果表明经臭氧处理可有效抑制冷却猪肉中细菌的生长繁殖,从而改善冷却猪肉在贮藏期的保鲜效果,且臭氧浓度在 4 mg/L 时保鲜效果最佳。石英子等<sup>[20]</sup>将新鲜鸡胸肉放置在 5 mg/L 的臭

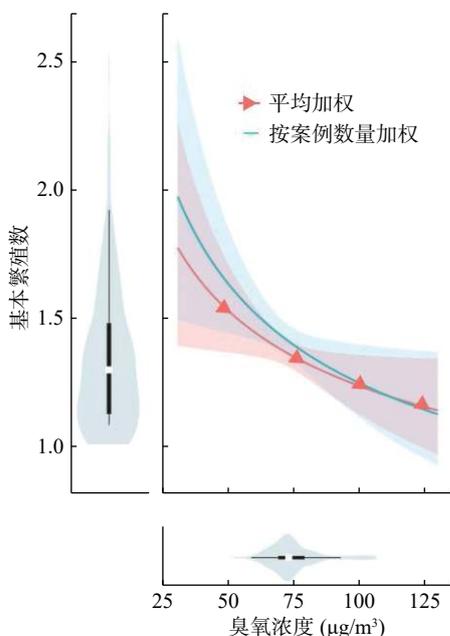


图2 基本繁殖数和每日1 h最大臭氧浓度的变化关系

Fig.2 Relationship between basic reproduction number and maximum ozone concentration per 1 h per day

氧处理 45 min 后置于 4 °C 冷藏, 试验结果表明 5 mg/L 的臭氧抑菌效果显著且可使鸡胸肉保鲜期延长至 7 d。李梦钗等<sup>[21]</sup>将新鲜草莓经不同浓度的臭氧处理后放置于-1~1 °C 的保鲜库中储存, 试验结果表明经浓度为 20 mg/kg 臭氧处理后的草莓储藏期可达到 30 d 左右, 果实色泽鲜艳, 有效保持了其原有的品质。Glatman 等<sup>[22]</sup>研究发现经臭氧处理冷冻前的罗非鱼, 可使冷冻罗非鱼的贮藏寿命延长 12 d, 在 0 °C 贮藏条件下提高了罗非鱼的品质。Cárdenas 等<sup>[23]</sup>研究了气态臭氧对牛肉品质的影响。在 0 和 4 °C 时表面颜色不变的牛肉样品中, 141.12 mg/m<sup>3</sup> 的臭氧剂量确保了大肠杆菌的数量下降, 且随着温度的降低牛肉中微生物大量减少。Tabakoglu 等<sup>[24]</sup>研究发现将桑葚放置在臭氧浓度为 5.14 mg/m<sup>3</sup> 温度为(2±1) °C 的冷室中, 可有效降低大肠杆菌的数量, 具有良好的保鲜效果。综上所述, 臭氧杀菌技术可有效抑制冷链过程中生鲜食品表面微生物的生长繁殖, 具有保证冷链过程中生鲜食品品质、延长生鲜食品贮藏期的特点。

#### 1.4 臭氧杀菌技术对冷链过程中食品外包装消毒的有效性及应用现状

臭氧的强氧化作用使其成为了一种新型消毒剂与杀菌剂<sup>[25]</sup>, 对装载于冷藏集装箱内的进境食用动物产品, 采用 ZA-YD-20G 型臭氧发生器向冷藏集装箱内输入 10 g 臭氧 1 h 并静置 15 min 后可使动物产品外包装纸箱表面自然菌杀灭率达到 99.7%<sup>[26]</sup>。采用 XFG-K30 开放式臭氧发生器与微机控制进行食品冷库消毒, 可使真菌和细菌杀灭率控制在 80% 以上<sup>[27]</sup>。20 世纪 80 年代末, 日本夏普公司将电子自动除臭器(由交流供电的微型臭氧发生器)安装在冰箱内构成的新一代“无臭冰箱”, 可有效杀灭多种细菌病毒, 延

长食品贮藏期<sup>[28]</sup>。此外, 国内目前已有企业将臭氧杀菌技术应用在生鲜产品的保鲜及冷冻包装前的消毒过程中<sup>[29]</sup>。由于臭氧具有一定的毒性, 即当臭氧浓度大于 200 µg/m<sup>3</sup> 时会引起人眼、鼻、喉刺痛; 臭氧浓度在 1300~2000 µg/m<sup>3</sup> 时会引起呼吸困难; 臭氧浓度在 2000~4000 µg/m<sup>3</sup> 时会使人眼和呼吸器官有急性灼烧感, 以及神经发生障碍等现象<sup>[30]</sup>。故涉及臭氧的过程中应采用适当的预防措施进行规划, 防止出现明火或人员操作过程中暴露于臭氧的现象发生<sup>[31]</sup>。综上所述, 臭氧杀菌技术对冷链过程中生鲜食品外包装消毒具有积极作用, 且可用于冷库、冰箱等生鲜食品低温储藏场所的消毒, 但由于臭氧毒性的限制, 应用时能够加速臭氧覆盖与挥发时间的消毒杀菌技术还需进一步研究。

## 2 紫外线杀菌技术

### 2.1 紫外线杀菌技术的工作机理

紫外线可分为波长为 315~400 nm 的长波紫外线(Ultraviolet A, UVA), 波长为 280~315 nm 的中波紫外线(Ultraviolet B, UVB), 波长为 200~280 nm 的紫外线照射区(Ultraviolet C, UVC), 以及波长为 100~200 nm 的真空紫外线区(Ultraviolet D, UVD), 其中 UVA 波长最长, 能量最低; UVB 可导致皮肤晒黑、晒伤和皮肤癌; UVC 具有适合微生物灭活的高能量; 真空紫外线可被所有物质吸收<sup>[32]</sup>。UVC 的杀菌机制是对 RNA 和 DNA 进行破坏, 往往会导致核酸链中嘧啶残基之间形成二聚体, 这种修饰的结果是环丁烷嘧啶二聚体(Cyclobutane Pyrimidine Dimers, CPDs)的产生导致 DNA 分子的变形, 这可能导致细胞复制的缺陷并导致细胞死亡<sup>[33]</sup>。有研究表明, 260~270 nm 的紫外线波长能量能够被微生物的核酸强烈吸收, 可以有效消灭微生物<sup>[34-35]</sup>。故采用 UVC 进行消毒杀菌可起到良好的灭杀效果。

### 2.2 紫外线杀菌技术对新型冠状病毒的灭活作用

Kitagawa 等<sup>[36]</sup>研究发现波长为 222 nm 的紫外线在照射强度为 0.1 mW/cm<sup>2</sup> 条件下照射 30 次可将新型冠状病毒的活菌数降低至无法检测的水平, 研究结果表明 222 nm 紫外线照射对新型冠状病毒的灭活有效, 紫外线杀菌技术可用于新冠肺炎的感染预防和控制。Heilingloh 等<sup>[37]</sup>研究发现波长为 254 nm, 照射剂量为 1048 mJ/cm<sup>2</sup> 的紫外线, 照射浓度为 5×10<sup>6</sup> TCID<sub>50</sub>/mL 的新型冠状病毒 9 min 可致其完全失活, 研究结果表明紫外线可以对高滴度的新型冠状病毒起到快速灭活作用。Gerchman 等<sup>[38]</sup>通过研究发现波长在 286 nm 的紫外线发光二极管可使冠状病毒得到有效灭活。Inagaki 等<sup>[39]</sup>研究发现强度为 3.75 mW/cm<sup>2</sup> 的紫外线持续辐射 60 s 能够使新型冠状病毒失活, 并中断病毒 RNA 的转录、翻译和复制。Rathnaainghe 等<sup>[40]</sup>研究了由两个高功率紫外线汞灯相对垂直配置以及一个简单的机动传送系统共同制成的紫外线照射系统, 研究结果表明波长为 254 nm, 照射剂量为 1.5 J/cm<sup>2</sup> 的紫外线照射每 2.5 cm<sup>2</sup>

接种的 106 点状单位新型冠状病毒的 N95 口罩 120 s 可导致新型冠状病毒减少 100%。

### 2.3 紫外线杀菌对冷链过程中生鲜食品保鲜效果的影响

紫外线杀菌技术具有环保简便且不会造成二次污染的优点,被广泛应用于食品贮藏、物质养护及水质洁净等方面<sup>[41]</sup>。许多学者对此进行了研究。贺莹<sup>[42]</sup>将波长为 253.7 nm 的紫外线杀菌灯照射抽真空的带鱼样品 15 min 后对试验样品进行气调包装,并置于 4 ℃ 条件下贮藏,试验结果表明使用紫外线杀菌技术结合气调处理的带鱼其贮藏期可延长至 15 d。Hassan 等<sup>[43]</sup>研究了添加剂量分别为 3.5、7.0 和 10 kJ/m<sup>2</sup> 的紫外线照射后对 4 ℃ 冷藏情况下辣椒、茴香和香菜中微生物、生物活化性化合物和抗氧化活性的影响,试验结果表明辐射量的增加可有效抑制微生物的生长,提高辣椒、茴香和香菜的抗氧化活性,故紫外线辐射杀菌处理可用于提高食品营养价值,延长货架期。González-Aguilar 等<sup>[44]</sup>研究了不同紫外线照射时间对鲜切芒果 5 ℃ 冷藏情况下的影响,研究发现紫外线辐照提高了鲜切芒果的抗氧化能力,但其内的维生素 C 含量会随贮藏时间的延长而降低。Wang 等<sup>[45]</sup>将鲜切莲藕分别进行 1、5、10、20 和 40 min 的紫外线辐照,并将紫外线辐照后的鲜切莲藕置于 4 ℃ 冷藏保存 8 d,发现 1.5~3 kJ/m<sup>2</sup> 强度的紫外线对鲜切莲藕的褐变度具有显著的抑制作用,可提高鲜切莲藕的品质。综上所述,紫外线杀菌技术可有效抑制冷链过程中生鲜食品微生物的生长,提高鲜切果蔬的抗氧化能力,延长货架期。

### 2.4 紫外线杀菌技术对冷链过程中食品外包装消毒的有效性及应用现状

紫外线杀菌技术可用于对空气、物体表面、水等介质的灭菌和消毒<sup>[46]</sup>。15 W 紫外线在移动的包装材料上方 20 mm 处进行垂直照射,完全灭活 0~10 个/cm<sup>2</sup> 的细菌仅需 4.8 s,完全灭活 100 个/cm<sup>2</sup> 的细菌仅需 5.6 s<sup>[47]</sup>。此外,紫外线杀菌技术也广泛应用于冷库、冰箱等食品低温贮藏的场所,如搭载异形紫外线杀菌消毒灯的冰箱,可对水、空气和物品表面等进行杀菌消毒<sup>[48]</sup>。在冷库中常用 0.33~3 W/m<sup>3</sup> 紫外光连续照射 6 h 以达到杀灭微生物的作用<sup>[49]</sup>。紫外线杀菌技术的应用限制主要集中在两方面,一个是紫外线波长对人的危害,一个是紫外线引起的食品有机分子结构破坏。Buonanno 等<sup>[50]</sup>研究发现不管细菌的耐药性如何,在 200~222 nm 波长范围内的远紫外线均可以有效杀死细菌,并且不会对人产生与常规杀菌紫外线照射相关的皮肤损伤效应。远紫外线灯可能被证明是对总有人在的空间进行消毒的理想选择<sup>[51]</sup>。由于紫外线的穿透力低,需要更高的剂量来处理大面积的食品,长时间暴露在紫外线下会影响食物的质量,因此,紫外线的照射剂量和暴露时间还需进一步优化<sup>[52]</sup>,以防止食品有机分子结构被破坏而造成的食品脂肪氧化、维生素损失等现象。

## 3 结论与展望

臭氧杀菌技术和紫外线杀菌技术对新型冠状病毒灭活有效,且二者在生鲜食品表面及外包装具有良好的杀菌效果,在消毒的同时还能起到延长贮藏时间的作用,可用于疫情下生鲜食品在冷链过程中的消毒杀菌,为疫情防控提供帮助。但由于臭氧和紫外线的物理化学特性限制,使臭氧杀菌技术和紫外线杀菌技术在疫情期间的使用具有一定的局限性,为此可从以下几个方面进行研究:

a. 由于臭氧具有一定的毒性且易爆炸,故在生鲜食品冷链运输过程中使臭氧充分覆盖生鲜食品外包装并加速臭氧挥发的技术有待进一步研究。

b. 紫外线波段会对人体产生不同程度的危害,紫外光用于生鲜产品低温贮藏时会造成食品有机分子结构的破坏,故接下来的研究可针对紫外线波长、照射距离、照射强度以及紫外线设备等方面进行改进。

c. 考虑到现阶段的疫情形势,其他冷杀菌技术如辐射杀菌、超高压杀菌等杀菌消毒技术对新型冠状病毒的灭活作用还有待研究,进而达到切断新型冠状病毒传播途径,保证冷链过程中生鲜食品的安全,并有效控制疫情的目的。

### 参考文献

- [1] 邓琨. COVID-19 疫情对全球化的影响[J]. *产业与科技论坛*, 2020, 19(23): 65-66.
- [2] Zhu Y, Xie J. Association between ambient temperature and COVID-19 infection in 122 cities from China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 724: 138201.
- [3] Fisher D, Reilly A, Zheng E K A, et al. Seeding of outbreaks of COVID-19 by contaminated fresh and frozen Food[J/OL]. *BioRxiv*, 2020. <https://doi.org/10.1101/2020.08.17.255166>.
- [4] Liu P P, Yang M J, Zhao X, et al. Cold-chain transportation in the frozen food industry may have caused a recurrence of COVID-19 cases in the destination: Successful isolation of SARS-CoV-2 virus from the imported frozen cod package surface[J]. *Biosafety and Health*, 2020, 2(4): 199-201.
- [5] 夏文水, 钟秋平. 食品冷杀菌技术研究进展[J]. *中国食品卫生杂志*, 2003(6): 539-544.
- [6] 李学鹏, 励建荣, 李婷婷, 等. 冷杀菌技术在水产品贮藏与加工中的应用[J]. *食品研究与开发*, 2011, 32(6): 173-179.
- [7] 公路、水路进口冷链食品物流新冠病毒防控和消毒技术指南[J]. *中国水运*, 2020(12): 28-31.
- [8] Li D S, Sangion A, Li L. Evaluating consumer exposure to disinfecting chemicals against coronavirus disease 2019 (COVID-19) and associated health risks[J]. *Environment International*, 2020: 145.
- [9] Li X L, Luo X J, Mai B X, et al. Occurrence of quaternary ammonium compounds (QACs) and their application as a tracer for sewage derived pollution in urban estuarine sediments[J]. *Environmental Pollution*, 2014, 185: 127-133.
- [10] 沈群, 王群. 臭氧的特性及其应用[J]. *食品科技*, 2000(6): 70-71.
- [11] 张志国. 应用在食品工业中的臭氧消毒灭菌技术[J]. *食品科技*, 2000(3): 57-58.
- [12] 蔡翠华. 臭氧杀菌及其在食品工业中的应用[J]. *食品科技*, 1998(6): 3-5.

- [13] Tizaoui C. Ozone: A potential oxidant for COVID-19 virus (SARS-CoV-2)[J]. *Ozone: Science & Engineering*, 2020, 42(5): 378–385.
- [14] Fernández-Cuadros C M E, Albalade-Florín M J, Peña L D, et al. Ozone (O<sub>3</sub>) and SARS-CoV-2: Physiological bases and their therapeutic possibilities according to COVID-19 evolutionary stage[J]. *SN Comprehensive Clinical Medicine*, 2020, 2(8): 1094–1102.
- [15] Wang Z W, Zhang A, Meng W X, et al. Ozone protects the rat lung from ischemia reperfusion injury by attenuating NLRP3-mediated inflammation, enhancing Nrf2 antioxidant activity and inhibiting apoptosis[J]. *European Journal of Pharmacology*, 2018, 15 (835): 82–93.
- [16] Ran J J, Zhao S, Han L F, et al. The ambient ozone and COVID-19 transmissibility in China: A data-driven ecological study of 154 cities[J]. *Journal of Infection*, 2020, 81(3): 9–11.
- [17] Cattel F, Giordano S, Cecilia B, et al. Ozone therapy in COVID-19: A narrative review[J]. *Virus Research*, 2021: 291.
- [18] 莫琼, 方旭波, 袁高峰. 臭氧杀菌对水产冷冻调理品的研究利用[J]. *科学养鱼*, 2012(1): 75–76.
- [19] 肖岚, 李诚, 辛松林. 臭氧对冷却肉的保鲜效果[J]. *肉类工业*, 2007(3): 3–5.
- [20] 石英子, 徐瑞欣, 杨子艺, 等. 臭氧和紫外线对鸡胸肉保鲜效果的影响研究[J]. *当代畜牧*, 2018(27): 31–34.
- [21] 李梦钗, 王玉忠, 温秀军, 等. 草莓臭氧保鲜试验初报[J]. *北方园艺*, 2010(9): 192–193.
- [22] Gelman A, Sachs O, Khanin Y, et al. Effect of ozone pretreatment on fish storage life at low temperatures[J]. *Journal of Food Protection*, 2005, 68(4): 778.
- [23] Cárdenas F C, 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.
- [24] Tabakoglu N, Karaca H. Effects of ozone-enriched storage atmosphere on postharvest quality of black mulberry fruits (*Morus nigra* L.)[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 92: 276–281.
- [25] 徐南波. 臭氧在食品加工、冷藏库中的应用[J]. *制冷*, 2005(2): 54–57.
- [26] 杨仕青, 陈娜, 吴欣荣, 等. 集装箱内食用动物产品外包装臭氧消毒方法的研究[J]. *广东畜牧兽医科技*, 2014, 39(3): 36–38, 44.
- [27] 张小敏. 臭氧在冷库消毒中的效果测定[J]. *肉品卫生*, 1999(1): 4–5.
- [28] 于治会. 冰箱用臭氧杀菌除臭保鲜器[J]. *仪器仪表与分析监测*, 2001(2): 16–18.
- [29] 周元全, 潘栋梁, 王安国. PEM 臭氧生成技术及其在食品工业中的应用[J]. *食品与机械*, 2001(4): 39–41.
- [30] 刘欣, 盖怡君, 钱涛涛. 近地表臭氧的形成机理、危害及防控对策[J]. *世界环境*, 2020(5): 36–39.
- [31] Rice R G. Health and safety aspects of ozone processing[J]. *Ozone in Food Processing*, 2012, 15: 265–288.
- [32] Song K, Mohseni M, Fariborz T. Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: A Review[J]. *Water Research*, 2016, 94 (May1): 341–349.
- [33] Yin R, Dai T H, Avci P, et al. Light based anti-infectives: Ultraviolet C irradiation, photodynamic therapy, blue light, and beyond[J]. *Current Opinion in Pharmacology*, 2013, 13(5): 731–762.
- [34] Gurzadyan G G, Görner H, Schulte-Frohlinde D. Ultraviolet (193, 216 and 254 nm) photoinactivation of *Escherichia coli* strains with different repair deficiencies[J]. *Radiation Research*, 1995, 141(3): 244–251.
- [35] Wang C, Lu S Y, Zhang Z W. Inactivation of airborne bacteria using different UV sources: Performance modeling, energy utilization, and endotoxin degradation[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 655: 787–795.
- [36] Kitagawa H, Nomura T, Nazmul T, et al. Effectiveness of 222-nm ultraviolet light on disinfecting SARS-CoV-2 surface contamination[J]. *American Journal of Infection Control*, 2020(Sep. 4): 1–3.
- [37] Heilingloh C S, Aufderhorst U W, Schipper L, et al. Susceptibility of SARS-CoV-2 to UV irradiation[J]. *AJIC: American Journal of Infection Control*, 2020, 48: 1273–1275.
- [38] Gerchman Y, Mamane H, Friedam N, et al. UV-LED disinfection of coronavirus: Wavelength effect[J/OL]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2020, 212 (prepublish). <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2020.112044>.
- [39] Inagaki H, Saito A, Sugiyama H, et al. Rapid inactivation of SARS-CoV-2 with deep-UV LED irradiation[J]. *Emerging Microbes and Infections*, 2020: 1–8.
- [40] Rathnasinghe R, Karlicek R F, Schotsaert M, et al. Scalable, effective, and rapid decontamination of SARS-CoV-2 contaminated N95 respirators using germicidal ultraviolet C (UVC) irradiation device[J/OL]. *MedRxiv*, 2020. <https://doi.org/10.1101/2020.10.05.20206953>.
- [41] 曹小兵, 陈磊, 冉崇高, 等. 紫外线杀菌产品在消毒杀菌领域的应用研究[J]. *中国照明电器*, 2020(4): 6–10.
- [42] 贺莹. 紫外线杀菌结合气调包装技术对带鱼品质的影响[J]. *肉类研究*, 2019, 33(1): 37–41.
- [43] Hassan A B, Al-Maiman S A, Sir-Elkhatim K A, et al. Effect of UV-C radiation treatment on microbial load and antioxidant capacity in hot pepper, fennel and coriander[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020: 109946.
- [44] González-Aguilar G A, Villegas-Ochoa M A, Martínez-Téllez M A, et al. Improving antioxidant capacity of fresh-cut mangoes treated with UV-C[J]. *Journal of Food Science*, 2007, 72(3): 197–202.
- [45] Wang D, Chen L K, Ma Y, et al. Effect of UV-C treatment on the quality of fresh-cut lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn) root[J]. *Food Chemistry*, 2018, 278: 659–664.
- [46] 王卓, 侯莎. 紫外线杀菌消毒灯具的管理现状和未来发展方向[J]. *中国照明电器*, 2020(10): 1–4.
- [47] 孙书静. 食品无菌包装技术的发展概况[J]. *塑料包装*, 2015, 25(3): 13–15.
- [48] 陈芯芯, 姜翔, 俞春阳, 等. 紫外线除菌技术在电冰箱中的应用及分析[J]. *家用电器*, 2020(7): 26–28.
- [49] 陈刚, 冯梅, 曹亚军, 等. 浅议冷库消毒灭菌技术[J]. *农技服务*, 2016, 33(11): 90.
- [50] Buonanno M, Ponnaiya B, Welch D, et al. Germicidal efficacy and mammalian skin safety of 222-nm UV light[J]. *Radiation Research*, 2017, 187(4): 483–491.
- [51] Mackenzie D. Ultraviolet light fights new virus[J]. *Engineering*, 2020, 6(8): 851–853.
- [52] Singh H, Bhardwaj S K, Khatri M, et al. UVC radiation for food safety: An emerging technology for the microbial disinfection of food products[J/OL]. *Chemical Engineering Journal*, 2020. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2020.128084>.