

# 工厂化循环水养殖消毒技术的 研究进展

曹淑全<sup>1,2</sup>, 朱智文<sup>1</sup>, 张现红<sup>1</sup>, 唐小千<sup>2</sup>, 李文升<sup>3</sup>, 刘宝良<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>中国水产科学研究院黄海水产研究所海水养殖生物育种与可持续商品国家重点实验室, 山东 青岛

<sup>2</sup>中国海洋大学水产学院, 山东 青岛

<sup>3</sup>莱州明波水产有限公司, 山东 莱州

收稿日期: 2024年1月17日; 录用日期: 2024年3月20日; 发布日期: 2024年3月28日

## 摘要

工厂化循环水养殖系统(RAS)是未来水产养殖的主要发展方向之一, 系统环境菌群失衡、特定病原侵入等问题时有发生, 因此病害防控已成为循环水养殖管理的重要技术环节之一。本文重点综述了国内外常用的RAS消毒方法和应用技术, 从消毒方式、消毒效果等多个层面比较分析了各个消毒法的优缺点, 以期为工厂化循环水养殖水处理工艺的优化和生物安保体系的构建提供参考。

## 关键词

工厂化循环水养殖, 消毒技术, 病害防控

# Research Progress on Disinfection Technology of the Factory-Based Recirculating Aquaculture

Shuquan Cao<sup>1,2</sup>, Zhiwen Zhu<sup>2</sup>, Xianhong Zhang<sup>1</sup>, Xiaoqian Tang<sup>2</sup>, Wensheng Li<sup>3</sup>,  
Baoliang Liu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Mariculture Biobreeding and Sustainable Goods, Yellow Sea Fisheries Research  
Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao Shandong

<sup>2</sup>Fisheries College, Ocean University of China, Qingdao Shandong

<sup>3</sup>Laizhou Mingbo Aquatic Products Co., Ltd., Laizhou Shandong

Received: Jan. 17<sup>th</sup>, 2024; accepted: Mar. 20<sup>th</sup>, 2024; published: Mar. 28<sup>th</sup>, 2024

\*通讯作者。

文章引用: 曹淑全, 朱智文, 张现红, 唐小千, 李文升, 刘宝良. 工厂化循环水养殖消毒技术的研究进展[J]. 水产研究, 2024, 11(1): 38-48. DOI: 10.12677/ojfr.2024.111005

## Abstract

Factory-based recirculating aquaculture system (RAS) is one of the main development directions of aquaculture in the future, and problems such as imbalance of system environmental flora and invasion of specific pathogens occur from time to time, so disease prevention and control has become one of the important technical aspects of recirculating aquaculture management. This paper focuses on the review of the commonly used RAS disinfection methods and application technologies at home and abroad, and compares and analyzes the advantages and disadvantages of each disinfection method from the disinfection method, disinfection effect and other levels, with a view to providing references for the optimization of the water treatment process of factory-based recirculating water aquaculture and the construction of the biosecurity system.

## Keywords

Factory-Based Recirculating Aquaculture, Disinfection Technology, Disease Prevention and Control

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

工厂化循环水养殖系统(Factory-based recirculating aquaculture system)具有节水、节地、节能、减排、高产等优势,是水产养殖业实现绿色可持续发展的重要生产方式之一[1]。RAS通过一系列水处理工艺调节养殖水体环境,以保证系统的平稳运行和养殖对象的健康状态[2]。但高密度的养殖可能会引起鱼类疾病的发生,养殖用水、鱼苗和鱼卵、空气、饲料、系统设备和养殖人员等也会带来包括细菌、真菌、病毒、寄生虫等鱼类病原体[3] [4]。为了降低病害发生几率、延缓病害传播速度以及提高鱼类生长速度和提高水产品品质,对RAS进行科学高效的消毒显得尤为必要。

目前,对RAS水处理环节最常用的消毒方法有物理消毒法、化学消毒法、高级氧化法和电化学消毒法。本研究旨在结合国内外相关文献概述总结现有的RAS消毒技术,分析列举各种消毒方法的利弊及适用场景,以期对RAS适宜消毒方式的选用提供科学参考,并为RAS中养殖水体消毒技术标准的建立提供理论依据。

## 2. 物理消毒法

### 2.1. 紫外线消毒法

紫外线(200~280 nm, UVC)消毒法通过破坏微生物DNA和RNA分子结构,杀死大多数细菌、病毒、寄生虫以及其他病原体,是一种高效广谱、清洁无污染的物理消毒技术[5] [6]。目前RAS中紫外线消毒灯主要包括两种基本类型的汞灯:低压(LP)紫外线汞灯,发射单色波长,峰值为253.7 nm;中压(MP)紫外线汞灯,在整个220~300 nm杀菌紫外线范围及以上范围内以多个波长输出[7]。低压紫外线灯系统通常提供6~30 s的曝光时间,而中压紫外线汞灯由于具有更高的输入功率、汞蒸气压和更大范围的广谱,并且每单位弧长有很高的特定紫外线通量,所以杀死同一种微生物所需的曝光时间通常比低压紫外线汞

灯要短[8]。

根据所需杀灭的目标病原体,紫外线照射剂量可以从 20~2300 J/m<sup>2</sup> 不等,300 J/m<sup>2</sup> 的紫外线剂量即可灭活大多数的鱼类病原体,但有一些病原体,例如白斑综合征杆状病毒(WSSV)、胰腺坏死病毒(IPNV),需要 20~23,000 J/m<sup>2</sup> 倍的照射剂量才能将其灭活[9]。对于一些特殊的 RAS 可能不太适合使用高剂量的紫外线杀菌,如 Attramadad 等[10]使用高强度紫外线作为大西洋鳕鱼幼苗养殖系统中的消毒环节,由于高强度紫外线的强力消毒,导致 RAS 的微生物群落遭到破坏,幼苗存活率较低。

传统紫外线汞灯的发光效率和寿命受温度、供电电压波动影响较大,而紫外发光二极管(UV-LED)光源具有节能环保、寿命长、发光效率较高和辐射强度易控等特点,发展前景较为广阔[11]。UV-LED 工作原理是利用新一代半导体固态紫外光源,通过电子和空穴复合作用释放能量发光。在相同照射剂量下,部分紫外波长组合消毒的效果要明显好于单波长照射消毒。Chevremont 等[12]发现 280/365 nm 和 280/405 nm 的紫外波长组合能够显著减少废水中嗜温细菌的含量,而 265 nm、280 nm、310 nm 三种波长无论怎么组合都不具备协同消毒的效果[13] [14]。目前由于 UV-LED 价格较高、低功率等特点的制约,无法替代传统的低压/中压紫外线汞灯。因此研究人员需在 UV-LED 的制造工艺、外延层生长技术以及散热能力等方面进行深入研究。

## 2.2. 超声波消毒技术

超声波(Ultrasound, UT)包括低频超声波(15~100 kHz, LFUS)和高频超声波(100 kHz~10 MHz, HFUS),在极端条件下超声波会发生空化现象,产生突然内爆的蒸汽腔和局部热点,主要通过机械效应产生的羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ )实现消毒杀菌[15] [16] [17]。超声波杀菌不受水体溶解有机质和悬浮物的影响,对于水体中的真核寄生虫(纤毛虫、线虫、甲壳动物等)具有较好的杀灭率,而对于细菌则需要大量的能量输入[18] [19]。表 1 中列出了超声波灭活水中不同真核生物所需输出能量。

Table 1. Ultrasonic inactivation of different eukaryotic effects in water

表 1. 超声波灭活水中不同真核生物效果

生物名称	波段(kHz)	能量(kJ/L)	灭活率(%)	参考文献
卤虫( <i>Artemia salina</i> )	20	4	99%	Nam-Koong [20]
鳃线虫( <i>Anguillicola</i> )	25	19	81%	
微藻( <i>Microalgae</i> )	20	21~172	90%	
	850	1.3~77.3	90%	
纤毛虫( <i>Ciliate</i> )	20	4.4	99%	
	850	0.4	99%	
垂水蚤( <i>Acartia tonsa</i> )	20	12.1	99%	
草履虫( <i>Paramecium</i> )	25	19	95%	Lakeh [21]
卤虫( <i>Artemia salina</i> )	25	1.9	99%	
卤虫无节幼体( <i>Artemia nauplii</i> )	20	18	100%	Sassi J [22]
牛首吸虫尾蚴( <i>Bucephalus polymorphus cercaria</i> )	—	6.3	100%	Wolber [23]

RAS 系统中鱼类病原体不仅只有原生动物和寄生虫,还存在许多致细菌、病毒等,目前大多将超声

波与紫外线结消毒技术结合使用, 超声波可有效杀灭真核生物并降低水体中悬浮颗粒物的平均大小, 提高紫外线的杀菌效率。Lakeh 等[24]将 LFUS (25 kHz)消毒技术与紫外线(UVC)消毒技术结合应用于 RAS, 发现 LFUS 能够有效减少养殖水体中的寄生虫, 并可以对水体进行预处理, 使得紫外线杀菌效率提高了 0.6 个对数单位。

### 2.3. 微波消毒技术

微波(Microwave)是一种波段为 100~100,000 MHz 的电磁波, 其杀菌机理主要依靠电场作用(渗透压的挤压和震荡效应)和电离作用(破坏微生物蛋白质、遗传物质)两方面, 具有杀菌效率高、节能、无残留物等优点[25]。李鲁晶等[26]采用 8 个 2450 MHz 的微波发生器建设了一套全封闭工厂化循环水养殖微波消毒养殖系统, 可杀灭养殖水体中 96%大肠杆菌, 具有很好的杀菌消毒、降解氨氮和增氧的作用; 微波电磁转化率达 70%, 大大节省用电成本。目前有研究者在工厂化养殖贝类净化生产中应用微波消毒技术, 杀菌率高达 96%, 简易、高效实现贝类的净化生产, 并大大节约养殖成本[27]。

## 3. 化学消毒法

### RAS 常用消毒剂

化学消毒剂消毒的原理是利用化学药物渗透到细菌的体内, 使菌体蛋白凝固变性, 干扰细菌酶活性, 损害细胞膜的结构, 抑制细菌代谢和生长, 从而起到消毒灭菌作用[28]。化学消毒剂虽然杀菌效果较好, 且具有持续消毒能力, 但由于 RAS 的整体性, 可能会影响生物滤池的菌群平衡, 并且化学消毒剂在系统中循环, 其残留物会危害养殖生物的安全。目前 RAS 中应用较为广泛的化学消毒剂主要有福尔马林(甲醛水溶液)、过氧乙酸(PAA)和过氧化氢( $H_2O_2$ )等, 这几种消毒剂降解或挥发为水、氧气等无毒副产品, 对养殖生物危害较小。化学消毒剂应用于 RAS, 应考虑养殖对象和生物滤池两方面。表 2 中列出了化学消毒剂应用于 RAS 实例及对生物滤池的影响。研究表明, 采用半连续的添加方式会显著降低其对生物滤池的损害作用。Pedersen 等[29]发现批量添加过氧乙酸(PAA)以达到 1 mg/L 对硝化作用的影响最小。Davidson 等[30]认为在 RAS 中使用 1.0 mg/L PAA 半连续添加(一月给药周期)以达到养殖水体 0.30 mg/L 以上的浓度, 不会影响生物滤池以及养殖生物健康状态, 并能够起到消毒作用。

Table 2. Use of chemical disinfectants in recirculating aquaculture systems

表 2. 化学消毒剂在循环水养殖系统中的使用

化学消毒剂名称	养殖对象	添加剂量与方式	消毒效果	生物滤池	参考文献
福尔马林	虹鳟( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	半连续添加	—	菌群轻微变化	Pedersen [31]
福尔马林	虹鳟( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	70 ppm~167 ppm	—	无明显影响	Heinen [32]
过氧乙酸(PAA)	镜鲤( <i>Cyprinus carpio</i> var. <i>specularis</i> )	1 mg/L 2 次/周	细菌丰度下降 90%	无明显影响	Liu [33]
过氧乙酸(PAA)	虹鳟( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	1.1 mg/L 0~4 次/周	—	0~1 次无显著影响 2~4 次硝化率降低了 50%。	Suurnäkki [34]
过氧化氢( $H_2O_2$ )	欧洲鲈鱼( <i>Dicentrarchus labrax</i> )	15.8 $H_2O_2$ mg/L 连续添加五天	细菌丰度明显下降	无明显影响	Bögner [35]

## 4. 高级氧化法

### 4.1. 臭氧氧化法

臭氧(O<sub>3</sub>)是一种具有特殊气味的强氧化剂,能够通过破坏微生物的细胞膜(壁)、脂蛋白和脂多糖来灭活养殖水体中的病原体[36]。臭氧易分解,所以RAS中使用臭氧通常需要现场制备,并且养殖对象对残留臭氧的敏感性很高,所以要保持低剂量和短时间的原则,残留臭氧浓度大于0.01 mg/L时可能对鱼有毒害作用,但实际浓度取决于物种和生命阶段[37]。臭氧需要通过混合装置与养殖水体混合,其混合效率是影响臭氧消毒效果的主要因素。因此,臭氧应用于RAS,需要做好臭氧的制备、臭氧的混合以及臭氧残留物检测和去除四个过程。

臭氧可由空气、氧气或氮气等混有氧气的惰性气体制成,由于空气产生臭氧氧化养殖水体后没有臭氧残留,而纯氧产生臭氧氧化养殖水体后残余臭氧浓度最高可达0.025 mg/L,因此空气制备臭氧可以应用于各种养殖对象的RAS中,而纯氧制备臭氧只能用在臭氧残留耐受性较高的养殖对象中[38]。目前用于臭氧制备的方法主要有电晕放电法、紫外线臭氧发生器和电解纯水臭氧发生器等[39]。臭氧混合装置主要包括氧锥、U形管、气泡扩散器、微孔扩散板式鼓泡塔、多级接触池、流量喷射器、静态混合器和填料塔等,表3中总结了目前常用的臭氧混合装置的原理以及混合率和主要影响因素。

**Table 3.** Comparative analysis of various ozone mixing devices applied to RAS [40] [41] [42] [43]

**表 3.** 应用于 RAS 的各种臭氧混合装置对比分析[40] [41] [42] [43]

装置	原理	混合率	混合率影响因素
氧锥	由上端至下端横截面积逐渐增加,增加气液接触时间	80%以上	氧锥高度、进气、水速度、进出口直径等
U形管	利用高度差使水的静压力逐渐增加,臭氧自气泡由底部向上进行气液混合	55%~80%	气体压力、U形管高度等
微孔扩散板式鼓泡塔、多级接触池	通过微孔介质后形成微小气泡打入液体中进行气液混合	80%~90%	扩散孔孔径、扩散器材质
流量喷射器	通过加压泵使高速水流与臭氧气体充分压缩混合	/	喷射系数、喷嘴直径、混合管长度和直径等
静态混合器	相邻两片螺旋桨叶片有相反的方向,水流在旋转分割运动中与臭氧接触而产生许多微小的旋涡,使气液充分混合	87%左右	倾斜角度、交叉板夹角的角度
填料塔	液体由填料缓慢滴下。臭氧从底部进入,在上升过程中与下滴的养殖水体气液接触	78%左右	水流流向、填料性能、高度布置、气水比、进水速度等

在RAS中使用臭氧消毒时,既要保证在转移装置时能够起到消毒杀菌的作用,又要保证臭氧及其残留物在养殖水体中的浓度不会过高,以防对养殖对象产生危害,因此,检测臭氧是否存有残留十分必要[44]。目前检测臭氧残留物浓度的方法主要有三种:① 中性缓冲碘量法:臭氧氧化碘化钾(KI)生成游离碘(I<sub>2</sub>),臭氧被还原为氧气;② 紫外线吸收法:利用臭氧对254 nm紫外线的吸收特征;③ 膜电极法:利用阴极还原产生的扩散电流来计算臭氧浓度[45]。目前兴起的RAS臭氧在线监测技术具有灵活,控制精度高的优点。戚翠战等[46]设计了一种基于PLC编程语言的PID控制系统,能够有效控制鱼池臭氧残留浓度在0.008 mg/L以下;刘鹏等[47]设计了一套臭氧自动化在线监控系统,实现了对臭氧的实时监测。

对剩余臭氧以及残留物的去除是臭氧消毒关键环节之一,主要有四种方法:① 通过小剂量的还原剂,例如1 mg/L的硫代硫酸钠(Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)去除残留物;② 通风、曝气实现残留物剥离[48];③ 通过使水经过

生物过滤器或活性炭床,与低水平的过氧化氢( $\text{H}_2\text{O}_2$ )反应或与高强度紫外线接触(催化  $\text{O}_3$  到  $\text{O}_2$ )实现残留物去除[49]。

## 4.2. 光化学消毒法

光化学消毒法是指在紫外光( $\lambda < 380 \text{ nm}$ )的辐射作用下,可以加强氧化剂的氧化作用,促进氧化自由基( $\cdot\text{OH}$ )的生成,从而实现消毒杀菌,主要包括  $\text{UV}/\text{O}_3$ 、 $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{UV}/\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{UV}/\text{HSO}_5^-$ 、 $\text{UV}/\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$  等方法[50]。光化学氧化消毒法在 RAS 中应用最多的是  $\text{UV}/\text{O}_3$  方法,其中紫外线可有效去除臭氧残留物,臭氧又可以补充增加紫外线的杀菌效果。管崇武等[51]设计了一种用于 RAS 的  $\text{UV}/\text{O}_3$  反应系统,将臭氧采用静态混合器的方式溶解到水中,使得臭氧溶解率为 82.7%、利用率为 97.7%,杀菌率可达 97%,同时紫外线可去除 83.32%的臭氧残留物,效果显著优于单独使用臭氧或紫外线杀菌。Sharrer 等[52]研究发现仅仅使用 0.1~0.2 mg/L 的臭氧剂量与  $50 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  的紫外线剂量结合,就可以在循环水再次进入养殖池之前将水中的大肠杆菌群和异养菌群几乎全部杀死,这比单独使用紫外线杀菌或单独使用臭氧杀菌或不使用任何杀菌的情况下测得的细菌数量要低上好几个数量级。除此之外,还有许多其他的光化学氧化法可应用于 RAS,例如  $\text{UVA-LED}/$ 低浓度过氧单硫酸盐(PMS)、 $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{UV}/\text{HSO}_5^-$ 、 $\text{UV}/\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$  [53] [54] [55]。

## 4.3. 光催化氧化消毒法

光催化氧化法是在光化学氧化法的基础上发展而来,是在有催化剂的条件下进行光降解的过程,包括非均相光化学催化和均相光化学催化,其中非均相光化学催化是结合  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{ZnO}$  等光敏半导体材料,使其在光辐射条件下发生空穴作用,产生  $\cdot\text{OH}$  等氧化能力极强的自由基,实现消毒杀菌。均相光化学催化是以  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$  和  $\text{H}_2\text{O}_2$  为介质,发生芬顿反应产生羟基氧化自由基,从而实现消毒杀菌[56] [57]。

RAS 中均相光化学催化消毒法使用较少,大都使用非均相光催化氧化法,且由于非均相光化学催化结合  $\text{TiO}_2$  光敏半导体材料的稳定性好、无毒性、活性高等优点,已成为目前应用最多的催化剂[58]。吴斌等[59]设计了一种  $\text{TiO}_2$  紫外复合消毒机应用于大菱鲂(*Scophthalmus maximus*)及虹鳟 RAS 中,发现  $\text{TiO}_2$  紫外复合机对大肠杆菌的灭活率显著高于紫外消毒机。Rodriguez 等[60]对紫外线- $\text{TiO}_2$  工艺应用于 RAS 进行了评价,发现此工艺并不会对养殖生物产生影响,表明紫外线- $\text{TiO}_2$  工艺可以安全地整合到 RAS 中。除  $\text{TiO}_2$  外,  $\text{ZnO}$  也可以作为光催化剂, Song 等[61]采用纳米  $\text{ZnO}$  作为紫外光催化剂,能够有效去除养殖水体中绝大部分病原微生物。

## 5. 电化学消毒

### 5.1. 电化学消毒的原理

电化学消毒法依照是否牺牲阳极分为电絮凝消毒和电氧化消毒,电氧化消毒又可分为电物理场直接消毒和电化学间接消毒[62]。RAS 中应用较多的是电化学间接消毒法,通过阳极析氯( $\text{Cl}_2$ 、 $\text{HClO}$ 、 $\text{ClO}^-$  等)和阴极产生的其他活性物质( $\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $^1\text{O}_2$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{OH}^-$  等)实现杀菌消毒。与其他消毒技术相比,电化学消毒不需要消毒剂的运输、储存和剂量,消毒效果可根据现场需求进行调整,并且成本低、维护少[63]。

电化学间接消毒是一种很少使用但方便且高效的生产无菌水的方法,该技术无需对待处理的水中添加化合物,但仍然需要基于部分化学物质才能发挥杀菌作用,如果将电化学消毒应用于 RAS 中,其效果主要基于次氯酸/次氯酸盐的电化学生成,这种方法在含有较高浓度氯离子海水养殖系统中具有较高的次氯酸盐产生效率,但目前大量研究证明,即使在非常低的氯化物浓度(低于  $100 \text{ mg}/\text{L}$ )下,电化学也可以产生足够的游离氯来有效消毒养殖水体,所以电化学消毒法在淡海水 RAS 中均可使用[64]。

次氯酸/次氯酸盐等消毒剂是阳极的反应产物,氯是由溶解在水中的氯离子以电化学方式产生的(1) [65]



氯在水中水解并形成次氯酸(HClO) (2)



次氯酸和次氯酸根阴离子形成 pH 依赖性平衡(3)



次氯酸和次氯酸盐浓度的总和通常称为“游离氯”或“活性氯”。游离氯的消毒效果基于原子氧的释放(4)、(5):



在消毒过程中, 电化学产生游离氯所消耗的氯离子会重新生成。因此, 在电化学生物消毒过程中, 水的化学成分没有整体变化, 且能够产生次氯酸/次氯酸盐, 通过原子氧的释放实现消毒效果。

## 5.2. 电极的选择

海水 RAS 氯化物浓度较高, 所以在电极材料方面并无严格要求, 而在淡水 RAS 中, 水中的氯化物浓度较低, 不同电极材料之间的游离氯生产效率存在很大差异, 选择合适的电极材料将会事半功倍。Jeong 等[66]评级发现阳极材料活性氯生产量级排列顺序为:  $\text{Ti}/\text{IrO}_2 > \text{Ti}/\text{RuO}_2 > \text{Ti}/\text{Pt}-\text{IrO}_2 > \text{BDD} > \text{Pt}$ 。

电极寿命也是选择适合电极材料的重要标准, 目前寿命较长的电极材料是  $\text{IrO}_2/\text{RuO}_2$  涂层电极。Ruan 等[67]使用  $\text{Ti}/\text{RuO}_2-\text{IrO}_2$  阳极材料进行电化学处理产生的活性氯能快速杀灭大肠杆菌和副溶血性弧菌 (*Vibrio parahaemolyticus*), 不需要额外的消毒处理; Xing 等[68]将  $\text{Ti}/\text{IrO}_2-\text{SnO}_2-\text{Sb}_2\text{O}_5$  阳极材料用于海水 RAS 的电化学处理, 可净化养殖废水。RuO<sub>2</sub> 和 IrO<sub>2</sub> 涂层电极最适合基于次氯酸盐生成的消毒, 能够从氯化物含量非常低的水中高效的生产次氯酸盐, 因此在 RAS 中, 应尽量选用这些电极材料。

## 6. RAS 消毒技术对比

目前国内 RAS 中最常用的消毒方法是紫外线和臭氧消毒法, 这两种消毒方法适用于绝大多数场景, 而育苗过程中不能够使用较高强度的紫外线, 会导致过度消毒引起鱼苗成活率偏低, 同时臭氧消毒法也要根据养殖生物、臭氧混合率、臭氧残留物去除和检测以及生物滤池负荷来选择适合浓度。化学消毒法也要根据 RAS 养殖生物和生物滤池负荷来选择适合浓度。微波和超声波两种物理消毒法目前在 RAS 实际应用中较少, 但超声波消毒法对真核生物的杀灭效果较好, 可与紫外线消毒法互补。国外研究者常常将光化学消毒法和光催化消毒法应用于 RAS 已实现杀菌消毒, 同时能够去除养殖生物的土腥味[69][70]。工厂化循环水养殖消毒技术原理、效果以及适用场景等对比如表 4 所示。

电化学消毒最常见的应用是消毒, 也可以用于氧化复杂的、可缓慢降解的化合物[71]和氨等溶解的营养物质[72], 能够同时实现杀菌和净化水质, 是一种较为清洁的消毒方式。

**Table 4.** Comparative analysis of RAS disinfection technologies

**表 4.** RAS 消毒技术对比分析

项目	RAS 常用	主要消毒机理	消毒能力	消毒是否持久	是否有残留物	RAS 应用前景	影响消毒因素
化学消毒法	福尔马林、过氧乙酸、过氧化氢	菌体蛋白凝固变性	一般	是	是	一般	消毒剂浓度、消毒剂种类等
物理消毒法	紫外线消毒法、超声波消毒法	破坏微生物蛋白质、DNA 和 RNA 分子结构	优秀	否/是	否/是	优秀	照射剂量、照射方式、灯管类型灯等

续表

臭氧消毒法	臭氧消毒法	能够破坏微生物的细胞膜(壁), 破坏脂蛋白和脂多糖	良好	是	是	优秀	臭氧浓度、臭氧混合效率等
光化学氧化消毒法	UV/O <sub>3</sub> 、UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	紫外线加强氧化剂的氧化作用	优秀	是	是	优秀	氧化剂类型 紫外线照射剂量等
光催化氧化消毒法	TiO <sub>2</sub> -紫外线	催化剂的条件下进行光降解, 产生·OH等氧化能力极强的自由基	优秀	是	是	优秀	催化剂类型、光照类型等
电化学消毒法	RuO <sub>2</sub> 和/或 IrO <sub>2</sub> 涂层电极	生成次氯酸盐或次氯酸	一般	是	是	一般	电极材料、使用电压、阴阳极距离等

## 7. 总结与展望

工厂化循环水养殖系统(RAS)的发展使水产养殖业蓬勃兴起, 但病害问题时有发生, 通过消毒技术可提高 RAS 生产安全和水产品品质。目前 RAS 应用最多的消毒技术是臭氧、紫外线单独或二者结合使用, 臭氧/紫外线组合消毒工艺能够相互补充, 具有更好的杀菌效果和安全性。目前消毒方法多种多样, 如何建立规范的 RAS 消毒标准, 改进消毒技术工艺, 实现安全、高效、低成本的科学消毒, 是未来 RAS 消毒技术发展过程中的一大挑战。

在未来 RAS 消毒技术研究中, 一方面要对现有的紫外线、臭氧杀菌技术进行改进, 例如紫外线灯管、紫外线运行参数、臭氧混合装置等; 另一方面要注重消毒方法的组合技术, 可以将重心放在光化学、光催化和电化学等清洁高级氧化技术。以期获得一种从制造工艺、新技术应用层面实现高效率、低成本消毒的消毒技术广泛应用于 RAS 中。

## 参考文献

- [1] 刘宝良, 雷霖霖, 黄滨, 等. 中国海水鱼类陆基工厂化养殖产业发展现状及展望[J]. 渔业现代化, 2015, 42(1): 1-5, 10.
- [2] 王峰, 雷霖霖, 高淳仁, 等. 国内外工厂化循环水养殖模式水质处理研究进展[J]. 中国工程科学, 2013, 15(10): 16-23, 32.
- [3] 谷雪勤. 鱼类循环水养殖系统中细菌群落结构研究进展[J]. 南方农业, 2022, 16(6): 200-202.
- [4] Rurangwa, E. and Verdegem, M.C.J. (2015) Microorganisms in Recirculating Aquaculture Systems and Their Management. *Reviews in Aquaculture*, 7, 117-130. <https://doi.org/10.1111/raq.12057>
- [5] 文尚胜, 左文财, 周悦, 等. 紫外线消毒技术的研究现状及发展趋势[J]. 光学技术, 2020, 46(6): 664-670.
- [6] 肖茂华, 李亚杰, 汪小岳, 等. 水产养殖尾水处理技术与装备的研究进展[J]. 南京农业大学学报, 2023, 46(1): 1-13.
- [7] 王涛. 中压紫外线技术——实现彻底杀菌[J]. 流程工业, 2011(4): 18-19.
- [8] Roy, P.F.Y. (2015) Fish Health Management Considerations in Recirculating Aquaculture Systems—Part 2: Pathogens 1. Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, Gainesville.
- [9] Liltved, H. (2002) Ozonation and UV-Irradiation. *Recirculating Aquaculture Systems*, NRAC Publication, 393-425.
- [10] Attramadal, K.J.K., Øie, G., Størseth, T.R., et al. (2012) The Effects of Moderate Ozonation or High Intensity UV-Irradiation on the Microbial Environment in RAS for Marine Larvae. *Aquaculture*, 330-333, 121-129. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.11.042>
- [11] 宋昌斌, 郭亚楠, 闫建昌, 等. 紫外发光二极管在水产养殖杀菌消毒中的应用与展望[J]. 渔业现代化, 2021, 48(1): 1-8.
- [12] Chevremont, A.C., Farnet, A.M., Coulomb, B., et al. (2012) Effect of Coupled UV-A and UV-C LEDs on both Micro-



- biological and Chemical Pollution of Urban Wastewaters. *Science of the Total Environment*, **426**, 304-310. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.043>
- [13] Beck, S.E., Ryu, H., Boczek, L.A., *et al.* (2017) Evaluating UV-C LED Disinfection Performance and Investigating Potential Dual-Wavelength Synergy. *Water Research*, **109**, 207-216. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.024>
- [14] Oguma, K., Kita, R., Sakai, H., *et al.* (2013) Application of UV Light Emitting Diodes to Batch and Flow-Through Water Disinfection Systems. *Desalination*, **328**, 24-30. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.08.014>
- [15] 钟丽琼. 超声波在水处理中的应用研究进展[J]. 广东化工, 2010, 37(7): 202-203, 208.
- [16] 周红, 生许小芳, 王欢, 等. 超声波灭菌技术的研究进展[J]. 声学技术, 2010, 29(5): 498-502.
- [17] Doosti, M.R., Kargar, R. and Sayadi, M.H. (2012) Water Treatment Using Ultrasonic Assistance: A Review. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*, **2**, 96-110.
- [18] Nam Koong, H. (2020) Water Treatment in Recirculating Aquaculture Systems (RAS) by Ultrasonically Induced Cavitation. Master's Thesis, Christian-Albrechts-Universität Zu Kiel, Kiel.
- [19] Svendsen, E., Dahle, S.W., Hagemann, A., *et al.* (2018) Effect of Ultrasonic Cavitation on Small and Large Organisms for Water Disinfection during Fish Transport. *Aquaculture Research*, **49**, 1166-1175. <https://doi.org/10.1111/are.13567>
- [20] Nam-Koong, H., Schroeder, J.P., Petrick, G. and Schulz, C. (2020) Preliminary Test of Ultrasonically Disinfection Efficacy towards Selected Aquaculture Pathogens. *Aquaculture*, **515**, Article ID: 734592. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734592>
- [21] Lakeh, A.A.B., Kloas, W., Jung, R., *et al.* (2013) Low Frequency Ultrasound and UV-C for Elimination of Pathogens in Recirculating Aquaculture Systems. *Ultrasonics Sonochemistry*, **20**, 1211-1216. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.01.008>
- [22] Sassi, J., Viitasalo, S., Rytönen, J., *et al.* (2005) Experiments with Ultraviolet Light, Ultrasound and Ozone Technologies for Onboard Ballast Water Treatment. *Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus*, **2313**, 1-86.
- [23] Wolber, J.E. and Pietrock, M. (2004) Ultrasonic Water Treatment as an Alternative Means of Controlling Fish Mortality Caused by *Bucephalus Polymorphus* Cercariae. *European Association of Fish Pathologists*, **24**, 153-160.
- [24] Lakeh, A.A.B. (2015) Effect of Low Frequency Ultrasound and Ultraviolet-C Light for Water Disinfection in Recirculating Aquaculture Systems. <https://doi.org/10.18452/17146>
- [25] Liu, L., Wang, N., Laghari, A.A., *et al.* (2023) A Review and Perspective of Environmental Disinfection Technology Based on Microwave Irradiation. *Current Pollution Reports*, **9**, 46-59. <https://doi.org/10.1007/s40726-022-00247-2>
- [26] 李鲁晶, 郭文, 景福涛, 等. 全封闭工厂化循环水微波消毒养殖系统的组成及运行[J]. 齐鲁渔业, 2010, 27(7): 26-30.
- [27] 李鲁晶, 郭文, 简玉霞, 等. 基于微波消毒的工厂化养殖设施的贝类净化试验[J]. 齐鲁渔业, 2012, 29(3): 11-14.
- [28] Musee, N., Ngwenya, P., Motaung, L.K., *et al.* (2023) Occurrence, Effects, and Ecological Risks of Chemicals in Sanitizers and Disinfectants: A Review. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, **5**, 62-78. <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2023.01.003>
- [29] Pedersen, L.F., Pedersen, P.B., Nielsen, J.L. and Nielsen, P.H. (2009) Peracetic Acid Degradation and Effects on Nitrification in Recirculating Aquaculture Systems. *Aquaculture*, **296**, 246-254. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.08.021>
- [30] Davidson, J., Summerfelt, S., Straus, D.L., *et al.* (2019) Evaluating the Effects of Prolonged Peracetic Acid Dosing on Water Quality and Rainbow Trout *Oncorhynchus mykiss* Performance in Recirculation Aquaculture Systems. *Aquacultural Engineering*, **84**, 117-127. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2018.12.009>
- [31] Pedersen, L.F., Pedersen, P.B., Nielsen, J.L. and Nielsen, P.H. (2010) Long Term/Low Dose Formalin Exposure to Small-Scale Recirculation Aquaculture Systems. *Aquacultural Engineering*, **42**, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2009.08.002>
- [32] Heinen, J.M., Weber, A.L., Noble, A.C. and Morton, J.D. (1995) Tolerance to Formalin by a Fluidized-Bed Biofilter and Rainbow Trout *Oncorhynchus mykiss* in a Recirculating Culture System. *Journal of the World Aquaculture Society*, **26**, 65-71. <https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.1995.tb00210.x>
- [33] Liu, D., Straus, D.L., Pedersen, L.F. and Meinelt, T. (2018) Periodic Bacterial Control with Peracetic Acid in a Recirculating Aquaculture System and Its Long-Term Beneficial Effect on Fish Health. *Aquaculture*, **485**, 154-159. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.11.050>
- [34] Suurnäkki, S., Pulkkinen, J.T., Lindholm-Lehto, P.C., *et al.* (2020) The Effect of Peracetic Acid on Microbial Community, Water Quality, Nitrification and Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) Performance in Recirculating Aquaculture Systems. *Aquaculture*, **516**, Article ID: 734534. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734534>
- [35] Bögner, D., Bögner, M., Schmachtl, F., *et al.* (2021) Hydrogen Peroxide Oxygenation and Disinfection Capacity in

- Recirculating Aquaculture Systems. *Aquacultural Engineering*, **92**, Article ID: 102140. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102140>
- [36] 周焯亦, 房燕, 曹广斌, 等. 臭氧处理技术在工厂化水产养殖中的应用研究[J]. 水产学杂志, 2012, 25(1): 49-57.
- [37] Powell, A. and Scolding, J.W.S. (2018) Direct Application of Ozone in Aquaculture Systems. *Reviews in Aquaculture*, **10**, 424-438. <https://doi.org/10.1111/raq.12169>
- [38] 周焯亦, 蒋树义, 韩世成, 等. 工厂化水产养殖臭氧氧化氨氮过程中臭氧残留的安全性[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(7): 222-224.
- [39] Janssen, C., Simone, D. and Guinet, M. (2011) Preparation and Accurate Measurement of Pure Ozone. *Review of Scientific Instruments*, **82**, Article ID: 034102. <https://doi.org/10.1063/1.3557512>
- [40] 胡珊, 毛澍洲, 邱光宇, 等. 应用于臭氧消毒系统的新型静态混合器结构设计[J]. 环境工程学报, 2020, 14(11): 3201-3207.
- [41] 曹广斌, 贾惠文, 蒋树义, 等. 循环水养鱼系统中臭氧射流混合设备设计与性能测试[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 73-78.
- [42] 曹广斌, 程启云, 韩世成, 等. 应用于冷水鱼养殖的臭氧-氨氮反应塔设计及试验[J]. 大连海洋大学学报, 2014(4): 403-408.
- [43] 刘鹏, 倪琦, 管崇武, 等. 水产养殖中多层式臭氧混合装置效率研究[J]. 广东农业科学, 2014, 41(10): 115-119, 131.
- [44] Wedemeyer, G.A., Nelson, N.C. and Yasutake, W.T. (1979) Physiological and Biochemical Aspects of Ozone Toxicity to Rainbow Trout (*Salmo Gairdneri*). *Journal of the Fisheries Board of Canada*, **36**, 605-614. <https://doi.org/10.1139/f79-088>
- [45] 韩世成, 戚翠战, 曹广斌, 等. 臭氧消毒杀菌技术在工厂化水产养殖中的应用[J]. 水产学杂志, 2015, 28(6): 44-52.
- [46] 戚翠战, 韩世成, 曹广斌, 等. 鱼类循环水养殖水处理中的臭氧浓度 PID 控制[J]. 渔业现代化, 2014, 41(2): 18-22.
- [47] 刘鹏. 循环水养殖系统中臭氧高效混合装置与在线监控技术研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海海洋大学, 2014.
- [48] Robson, C.M. (1982) Design Engineering Aspects of Ozonation Systems. In: Rice, R.G., Ed., *Handbook of Ozone Technology and Applications*, Butterworth Publishers, Oxford, 1.
- [49] Cryer, E. (1992) Recent Applications of Ozone in Freshwater Fish Hatchery Systems. *Proceedings of the Third International Symposium on the Use of Ozone in Aquatic Systems*, Stamford, 8-11 September 1992, 134-154.
- [50] Hunter, G.L., O'BRIEN, W.J., Hulsey, R.A., et al. (1998) Emerging Disinfection Technologies: Medium-Pressure Ultraviolet Lamps and Other Systems Are Considered for Wastewater Application. *Water Environment & Technology*, **10**, 40-44.
- [51] 管崇武, 杨菁, 单建军, 等. 工厂化循环水养殖中臭氧/紫外线反应系统的水处理性能[J]. 农业工程学报, 2014(23): 253-259.
- [52] Sharrer, M.J. and Summerfelt, S.T. (2007) Ozonation Followed by Ultraviolet Irradiation Provides Effective Bacteria Inactivation in a Freshwater Recirculating System. *Aquacultural Engineering*, **37**, 180-191. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2007.05.001>
- [53] Moreno-Andres, J., Rueda-Marquez, J.J., Homola, T., et al. (2020) A Comparison of Photolytic, Photochemical and Photocatalytic Processes for Disinfection of Recirculation Aquaculture Systems (RAS) Streams. *Water Research*, **181**, Article ID: 115928. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115928>
- [54] Villar-Navarro, E., Levchuk, I., Rueda-Márquez, J.J., et al. (2021) Inactivation of Simulated Aquaculture Stream Bacteria at Low Temperature Using Advanced UVA-and Solar-Based Oxidation Methods. *Solar Energy*, **227**, 477-489. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.09.029>
- [55] Qi, W., Zhu, S., Shitu, A., et al. (2020) Low Concentration Peroxymonosulfate and UVA-LED Combination for *E. Coli* Inactivation and Wastewater Disinfection from Recirculating Aquaculture Systems. *Journal of Water Process Engineering*, **36**, Article ID: 101362. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101362>
- [56] Wang, W., Huang, G., Jimmy, C.Y. and Wong, P.K. (2015) Advances in Photocatalytic Disinfection of Bacteria: Development of Photocatalysts and Mechanisms. *Journal of Environmental Sciences*, **34**, 232-247. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.05.003>
- [57] Gamage, J. and Zhang, Z. (2010) Applications of Photocatalytic Disinfection. *International Journal of Photoenergy*, **2010**, Article ID: 764870. <https://doi.org/10.1155/2010/764870>

- [58] Malato, S., Fernández-Ibáñez, P., Maldonado, M.I., *et al.* (2009) Decontamination and Disinfection of Water by Solar Photocatalysis: Recent Overview and Trends. *Catalysis Today*, **147**, 1-59. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2009.06.018>
- [59] 吴斌, 张华一, 吴垠, 等. TiO<sub>2</sub> 紫外复合消毒机在零污水排放的工厂化养殖系统中杀菌效果研究[J]. 水产科学, 2009, 28(6): 317-320.
- [60] Rodriguez-Gonzalez, L., Pettit, S.L., Zhao, W., *et al.* (2019) Oxidation of off Flavor Compounds in Recirculating Aquaculture Systems Using UV-TiO<sub>2</sub> Photocatalysis. *Aquaculture*, **502**, 32-39. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.12.022>
- [61] Song, K.S., Yu, X.C., Hu, D.D., *et al.* (2013) Photocatalytic Degradation of Ammonia Nitrogen in Aquaculture Wastewater by Using Nano-ZnO. *Advanced Materials Research*, **610**, 564-568. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.610-613.564>
- [62] 张珈瑜, 杨诗林, 崔崇威, 邱珊, 邓凤霞. 电化学消毒技术研究进展[J]. 武汉工程大学学报, 2021, 43(5): 473-480, 495.
- [63] Bergmann, H. (2021) Electrochemical Disinfection-State of the Art and Tendencies. *Current Opinion in Electrochemistry*, **28**, Article ID: 100694. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2021.100694>
- [64] Bergmann, M.E.H. and Koparal, A.S. (2005) Studies on Electrochemical Disinfectant Production Using Anodes Containing RuO<sub>2</sub>. *Journal of Applied Electrochemistry*, **35**, 1321-1329. <https://doi.org/10.1007/s10800-005-9064-0>
- [65] Ding, J., Zhao, Q., Zhang, Y., *et al.* (2015) The EAND Process: Enabling Simultaneous Nitrogen-Removal and Disinfection for WWTP Effluent. *Water Research*, **74**, 122-131. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.005>
- [66] Jeong, J., Kim, C. and Yoon, J. (2009) The Effect of Electrode Material on the Generation of Oxidants and Microbial Inactivation in the Electrochemical Disinfection Processes. *Water Research*, **43**, 895-901. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.11.033>
- [67] Ruan, Y., Lu, C., Guo, X., *et al.* (2016) Electrochemical Treatment of Recirculating Aquaculture Wastewater Using a Ti/RuO<sub>2</sub>-IrO<sub>2</sub> Anode for Synergetic Total Ammonia Nitrogen and Nitrite Removal and Disinfection. *Transactions of the Asabe*, **59**, 1831-1840. <https://doi.org/10.13031/trans.59.11630>
- [68] Xing, Y.Q. and Lin, J.W. (2011) Application of Electrochemical Treatment for the Effluent from Marine Recirculating Aquaculture Systems. *Procedia Environmental Sciences*, **10**, 2329-2335. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.363>
- [69] Kropp, R., Summerfelt, S.T., Woolever, K., *et al.* (2022) A Novel Advanced Oxidation Process (AOP) That Rapidly Removes Geosmin and 2-Methylisoborneol (MIB) from Water and Significantly Reduces Depuration Times in Atlantic Salmon *Salmo Salar* RAS Aquaculture. *Aquacultural Engineering*, **97**, Article ID: 102240. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2022.102240>
- [70] Lindholm-Lehto, P.C., Vielma, J., Pakkanen, H. and Alén, R. (2019) Depuration of Geosmin- and 2-Methylisoborneol-Induced Off-Flavors in Recirculating Aquaculture System (RAS) Farmed European Whitefish *Coregonus lavaretus*. *Journal of Food Science and Technology*, **56**, 4585-4594. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03910-7>
- [71] Mook, W.T., Chakrabarti, M.H., Aroua, M.K., *et al.* (2012) Removal of Total Ammonia Nitrogen (TAN), Nitrate and Total Organic Carbon (TOC) from Aquaculture Wastewater Using Electrochemical Technology: A Review. *Desalination*, **285**, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.09.029>
- [72] Lahav, O., Asher, R.B. and Gendel, Y. (2015) Potential Applications of Indirect Electrochemical Ammonia Oxidation within the Operation of Freshwater and Saline-Water Recirculating Aquaculture Systems. *Aquacultural Engineering*, **65**, 55-64. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2014.10.009>