

# 国内外工厂化循环水养殖模式 水质处理研究进展

王 峰<sup>1,2,3</sup>, 雷霖霖<sup>2</sup>, 高淳仁<sup>2</sup>, 黄 滨<sup>2</sup>, 翟介明<sup>4</sup>

(1. 青岛农业大学海洋科学与工程学院, 山东青岛 266109; 2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所  
青岛市海水鱼类种子工程与生物技术重点实验室, 山东青岛 266071; 3. 中国海洋大学水产学院,  
山东青岛 266003; 4. 莱州明波水产有限公司, 山东莱州 261418)

**[摘要]** 本文以循环水养殖模式工艺流程为主线, 结合近年养殖模式科学研究和国内循环水养殖产业发展现状, 围绕水质处理和应用, 分别对系统中的大颗粒物滤除、臭氧消毒、气浮综合处理、生物滤池、紫外线杀菌、pH值调节等水质处理环节进行了综合分析和探讨, 为今后创建适合中国国情的高端循环水养殖模式、推进循环水处理技术的精准化和实用化提供参考。

**[关键词]** 循环水养殖; 养殖模式; 水处理工艺

**[中图分类号]** S965.3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)10-0016-08

## 1 前言

我国是世界上最早养殖海水鱼类的国家之一。南方的“鱼塢”和北方的“港养”方式已经延续了数百年之久。但长期以来受适养品种少、水温调控难、沿海多遇风暴潮侵袭, 以及生产力低下等诸多因素的影响, 导致养殖产业发展缓慢。20世纪末期, 在大菱鲆引进的强力推动下, “温室大棚+深井海水”工厂化流水养殖模式面世, 我国海水养殖的落后面貌才开始得以改变, 并掀起了国内第四次海水养殖产业化浪潮<sup>[1]</sup>。工厂化循环水养殖模式是从21世纪初才开始定向研究和推广应用的, 它以节能、节水、节地、减排、安全、高效、不受季节限制等优点<sup>[2]</sup>, 正在迅速推动以大菱鲆为首的鲆鲽类养殖产业朝现代化和规模化方向发展。这种养殖模式之所以具有强大的生命力, 与国内产学研业界同仁全力研究解决水质处理的核心技术密切相关。

工厂化养殖早期采用“温室大棚+深井海水”工厂化流水养殖模式, 由于实现了节能并且利用了恒

温井水和大棚保温, 使鱼类能够在工厂化条件下连续养到上市规格, 开创了我国工厂化养鱼的先河。10多年来, 在环渤海沿岸的大菱鲆养殖, 就是基于这一模式获得高速发展。但是, 随着养殖规模的不断扩大和井水资源的无度、无序利用, 这种初级工厂化模式不可避免会遭遇到井水资源枯竭、病害增多、用药风险加大、食品安全等问题频发的挑战。加之沿海工业用地挤压和国家倡导节能减排生产等压力, 其发展已经面临一个新的瓶颈。因此, 当前的工厂化养殖亟待适应新的战略需求, 加快转变经济增长方式, 朝着节能减排的循环水养殖模式方向转变。

养殖废水虽属轻度污染水, 但要达到循环利用, 水质处理是关键, 它的处理技术要求的等级较高, 因此, 在生产上, 一般需要采用物理过滤、化学过滤、生物过滤等过程; 技术上一般采用包括微滤机、弧形筛、泡沫分离、臭氧消毒、生物滤池、紫外线杀菌、加热恒温、纯氧增氧等一系列手段进行处理。因此, 循环水的水处理技术工艺就成为工厂化

**[收稿日期]** 2013-01-24

**[基金项目]** 国家鲆鲽类产业技术体系建设专项资金(nycytx-50); 农业公益性行业科研专项(nyhyzx07-046); 农业公益性行业科研专项(201003024)

**[作者简介]** 雷霖霖(1935—), 男, 福建宁化县人, 中国工程院院士, 研究员, 博士生导师, 主要从事海水鱼类生态、繁殖和增养殖技术研究;

E-mail: leijl@ysfri.ac.cn

循环水养殖模式的关键核心环节。只有优质、高效的水处理工艺才能使养殖废水中的有害物质得到有效去除,尤其对其中一些危及养殖生物健康、安全的病原微生物和可溶性的有机物的处理,是工厂化循环水处理中的重中之重。

图1为工厂化封闭式循环水养殖一般工艺流程。现将国内外应用于循环水养殖模式的主要水处理工艺,按其功能进行综合分析,希望能够从中得到新的启示或提供有益的借鉴。

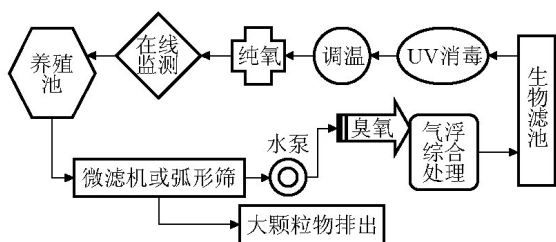


图1 工厂化封闭式循环水养殖一般工艺流程

Fig.1 General technological process of factory closed recirculating aquaculture

## 2 大颗粒物滤除

工厂化养鱼属于集约化养殖模式,养殖鱼类的单位水体密度较高,产生的固体废弃物量很大,首先要求滤除大颗粒物(TSS)。目前生产上使用得比较成熟的是微滤机和弧形筛。转鼓式微滤机为当前去除TSS的主要设备之一,滤网是转鼓式微滤机的主要工作部件,其网目数(孔径)直接影响转鼓式微滤机的TSS去除率、反冲洗频率、耗水耗电等。宿墨等研究发现,200目滤网的技术经济效果最为明显,其TSS去除率达到54.90%<sup>[3]</sup>。Samir Ahmad Ali研发了由水流驱动的转鼓式微滤机,将其用于罗非鱼循环水养殖系统(RAS),其颗粒物的平均去除率为34.22%~52.41%。此种微滤机采用水轮驱动,每天可节约能源18 kW<sup>[4]</sup>。总体而言,微滤机在初次使用过程中过滤效果较好,但在长期运行过程中,养殖水体中黏性物质会逐步附着到滤网上,导致滤网孔径变小,影响过滤能力,且由于体积庞大,不容易维护。

弧形筛是目前国内外工厂化循环水养殖模式中应用较为成熟的一种微筛过滤器,优点是无动力消耗、结构简单、维护成本低,缺点是国内尚未解决弧形筛面的自动清洗难题,养殖负荷较高,每天不

定时地需要进行人工清洗。弧形筛主要利用筛缝排列垂直于进水水流方向的圆弧形固定筛面实现水体固液分离。最常用的筛缝是0.25 mm,可有效去除约80%的粒径大于70 μm的TSS。

除上述两种过滤器外,科技工作者也做过其他方式的尝试,顾川川等设计了一种旋流颗粒过滤器,利用进水产生的旋流和塑料珠填料截留的共同作用,可以去除100 μm以上的可沉淀颗粒物质,截留部分100 μm以下的悬浮颗粒物质。该过滤器利用鱼池与过滤器液位差驱动,无需额外机械动力<sup>[5]</sup>。

## 3 臭氧消毒

臭氧是一种强氧化剂,其灭菌过程属于生物化学氧化反应。臭氧灭菌有3种形式:a.能氧化分解细菌内部葡萄糖所需的酶,灭活细菌;b.直接与细菌、病毒作用,破坏它们的细胞器和DNA、RNA,使细菌的新陈代谢遭到破坏,导致细菌死亡;c.透过细胞膜组织侵入细胞内部,作用于外膜的脂蛋白和内部的脂多糖,使细菌产生通透性畸变而溶解死亡。臭氧灭菌为广谱杀菌和溶菌方式,杀菌彻底,无残留,可杀灭细菌繁殖体和芽孢、病毒、真菌等,并可破坏肉毒杆菌毒素。另外,臭氧由于稳定性差,很快会自行分解为氧气或单个氧原子,而单个氧原子能自行结合成氧分子,不仅能对养殖水体增氧,而且不存在任何有毒残留物,所以臭氧是一种比较理想的、无污染的消毒剂。

臧维玲等利用臭氧仪开展室内凡纳滨对虾工厂化养殖,初始水经臭氧处理后细菌总数可杀灭99%,弧菌量小于1 cell/mL<sup>[6]</sup>。祝莹等用臭氧配合复合光合细菌处理虹鳟高密度养殖水体,结果表明,可有效预防水霉病和烂鳃病的发生<sup>[7]</sup>。宋奔奔等试验结果表明,在海水RAS中,臭氧不但杀菌效果显著,而且对去除系统TSS、总氨氮和亚硝酸盐氮效果良好<sup>[8]</sup>。Christopher Good等研究了RAS低水循环率条件下臭氧对虹鳟生长、健康的影响,研究表明,使用臭氧可以缩短养殖对象的养殖周期;尽管臭氧使用组易出现一些亚临床症状如鳃上皮细胞增生和肝脏脂肪沉积,但臭氧在使用过程中对养殖对象的健康没有构成明显的威胁<sup>[9]</sup>。Jeonghwan Park等研究了海水RAS养殖黑鲷在两种不同臭氧剂量蛋白分离滤除TSS和细菌的效果,研究表明,20 g/d的臭氧使用提高了颗粒去除率且明显降低了细菌含量<sup>[10]</sup>。John Davidson等研究了臭氧和不同水

交换率对RAS中水质和虹鳟养殖状况的影响。研究表明,臭氧在低循环率的情况下对水质有很好的提升作用;臭氧可以降低RAS中的TSS、生化需氧量(BOD)、Cu、Fe和水色;养殖对象相对于没有使用臭氧的对照组其生长率会加快<sup>[11]</sup>。

臭氧尽管杀菌效果较好,但如果过量使用对养殖生物会造成较大危害。Schroeder等研究表明,臭氧在不超量的情况下可以被有效地利用来去除亚硝酸盐和黄色杂质,泡沫分离配合短期使用臭氧可以有效降低细菌生物体繁殖;但是如果使用过量则会产生大量的高致毒性氧化剂<sup>[12]</sup>。Silva等研究表明,臭氧尽管在水产中有很好的提高水质稳定性和控制疾病发生的功用,但臭氧导致的基因毒性会使养殖生物的细胞受损,亦可以转变为有机体水平上的损害,最终造成鱼类健康和养殖产量下降等负面影响<sup>[13]</sup>。因此,在水产养殖过程中,定时、定量、安全、规范使用臭氧非常重要,应采取严格措施尽力避免过量使用;并要防止臭氧溢出造成空气环境污染。

#### 4 气浮综合处理

此环节使用的主要设备是蛋白分离器。其工作原理为:空气与水之间形成的接触面具有一定的表面张力,因此纤维素、蛋白质和食物残渣等有机杂质必然会在被吸附汇集。如果能够尽力扩大此表面积,例如产生气泡(制造泡沫),则会有更多的纤维素、蛋白质和食物残渣等在此表面被吸附。泡沫的黏度将随着表面的扩大而增强,并随气泡的逐渐消失而改变。因此,蛋白分离器的有效性就在于扩大气体和液体之间的表面区域及其特定的表面张力。另一种理论是:有机分子表面有两个极端,一个是亲水,一个是疏水,在与气泡接触时,亲水的极端被水分子吸引,这种表面活性的增大与增强可促使有机微粒吸附于气泡表面并被聚集在一起。显然,蛋白分离器的处理工作需要在一个特定的反应罐内进行,以利于空气和水得到充分接触,在相互作用下吸附更多的悬浮有机物。

曹剑香等研究了蛋白分离器对南美白对虾养殖水质的调控作用,结果表明,使用蛋白分离器后,水体的pH值维持在8.0~8.3,氨氮小于0.917 mg/L,亚硝酸盐小于0.324 mg/L,化学需氧量(COD)含量小于14.27 mg/L,溶解氧(DO)含量为3.775~6.300 mg/L,起到了很好的水质调控效果<sup>[14]</sup>。

装置化的蛋白分离器功效较好,但其单位时间

内处理水体有限,不适于大型化循环水养殖车间使用。循环水车间则可采取工业废水处理模式,使用气浮综合处理工艺,用气液混合泵(曝气机)在水的底层打出微气泡,通过气泡扩散盘将水中的蛋白质等污染物收集于表层气泡中,然后通过表层的污物收集槽将污染物排出系统外。此种装置不受处理水体限制,可大可小,处理效果也较好,适合工厂化RAS的使用。宋奔奔等比较了各式曝气器的性能参数,为RAS曝气机的选择提供了参考。气浮综合处理环节不仅有效去除了纤维素、蛋白质和食物残渣,而且还能促进CO<sub>2</sub>的去除。John Colt等研究了RAS对CO<sub>2</sub>的脱除方法和脱除效果,发现真正的脱除值要比表观检测值大得多,尤其是高碱度的水和海水,而低碱度的淡水相对误差却小得多<sup>[15]</sup>。

气浮综合处理不但能将蛋白质等有机物分离出来,减轻生化系统的负担,而且增加了水中的溶氧量,在增氧的同时会排出CO<sub>2</sub>。但同时也存在一些缺点,例如会氧化水中如铁、钼、锰等重要的微量元素;会造成盐分的丧失;海水被雾化后会无孔不入,对循环水车间造成腐蚀等。

#### 5 生物滤池

RAS的核心是生物滤池,包括生物滤料的选择、生物滤膜的培养等技术环节。循环水养殖模式属高密度集约化养殖,其残饵、粪便产生的氨氮、亚硝酸氮是整个循环水系统中主要的代谢废物,也是重点过滤对象,而生物滤池主要承担养殖废水氨氮、亚硝酸氮的转化、脱除等功能环节。可以说,生物滤池对氨氮、亚硝酸氮的处理能力代表了整个RAS工艺的先进性,也代表了整个RAS的最大养殖承载量。

##### 5.1 生物滤池菌群组成

Tomoko Sakami等研究了RAS生物滤池里的古细菌和细菌的生物多样性,获得了3个不同RAS的76%~80%的古细菌和100%的细菌,在系统树上,所有的古细菌聚成一簇——泉古菌,所有的细菌均属于亚硝化螺菌属<sup>[16]</sup>。陈珠等研究了河鲢RAS中多级生物滤池内异养细菌的群落结构,发现运行良好的系统中多样性指数较高,且随滤池逐级增大,物种分布均匀,各级滤池之间微生物群落结构存在差异<sup>[17]</sup>。

张海耿等采用传统微生物培养方法,对不同时期生物载体上的异养细菌、氨氧化细菌及硝化菌进



行培养计数。结果发现,随着时间的推移,3类细菌的数量都呈现出先增高后逐渐降低直至达到稳定的趋势;各个时期生物载体上微生物群落的组成非常丰富,并且微生物群落的变化与演替是缓慢而有规律的;生物载体上存在多类细菌共同作用于养殖水体污染物的去除,而且同时存在硝化和脱氮途径<sup>[18]</sup>。刘长发等采用改良的扩增片段长度多态性(AFLP)方法分析了RAS硝化滤器载体上附着的氨氧化细菌,结果表明,其大部分属于亚硝化单胞菌属,仅少数序列属于亚硝化螺菌属<sup>[19]</sup>。李秋芬等对成熟生物膜及水体样品中的异养菌、氨氧化菌、亚硝酸盐氧化菌进行培养计数,结果表明,随着生物滤池初始氨氮浓度的增大,生物膜上的氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌数量呈逐渐增加趋势,且均高出水样3~4个数量级;生物膜和水中都有较高的细菌多样性,研究证实,挂膜初期,提高水体中初始氨氮浓度有利于硝化细菌的富集和固着,并提高生物滤池的除氮效率<sup>[20]</sup>。

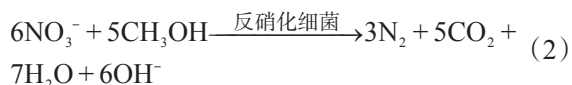
Bärbel U Foesel从海水RAS生物过滤器中分离了3种革兰氏阴性菌。它们没有色素,嗜温且适度嗜盐,有很好的化学适应性,能以糖、脂肪酸和氨基酸为营养来源,以氧气作为电子受体。其中D9-3<sup>T</sup>和D11-58菌株具有脱氮功能。16S rRNA基因序列进化分析表明,D9-3<sup>T</sup> aD11-58和D1-19<sup>T</sup>3菌株属于alpha-3变形杆菌的两支具有明显差异的分支<sup>[21]</sup>。

## 5.2 生物滤池应用效果

生物滤池的主要作用是创造条件,培养微生物菌群,对养殖废水中的氨氮、亚硝酸氮加以处理,最终使其对养殖对象的毒害作用减为最小,甚至将氮元素完全从水中脱除,从而达到净化水质的最终目的。生物滤池中同时存在硝化反应和反硝化反应。硝化反应是在好氧条件下,由硝化细菌将NH<sub>4</sub><sup>+</sup>转化为NO<sub>2</sub><sup>-</sup>和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的过程,其总反应式见式(1)



反硝化反应是在无氧条件下,由反硝化菌将NO<sub>2</sub><sup>-</sup>和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>转化为N<sub>2</sub>的过程,其总反应式如式(2)所示



养殖水体中,氮的3种存在形式以NH<sub>4</sub><sup>+</sup>对养殖生物的毒害性最强,NO<sub>2</sub><sup>-</sup>次之,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>毒害性最弱,所以生产环节更多考虑的是硝化反应步骤。而反硝化环节主要是对氮的脱除,除需要设置专门的脱氮

厌氧环境外,还需要为其补充甲醇或其他有机物作为碳源。

### 5.2.1 硝化反应

Liu Huang等研制了一种用于RAS的新型可自我清洁的序批式生物过滤器,其总氮去除率可达到600 g/(m<sup>3</sup>·d),用其来饲养宝石鲈可以做到连续52 d将RAS总氮和亚硝酸氮浓度控制在1.6 mg/L和0.9 mg/L<sup>[22]</sup>。Díaz等的研究表明,氨氮浓度在生物滤池进水口随着喂食呈现规律性变化,氨氮浓度在喂食之后呈升高趋势,8 h后达到最高值,随后持续降低直至下次喂食。亚硝酸盐在生物滤池处理前后差异不显著,其浓度为0.08~3.66 mg/L<sup>[23]</sup>。

Jonas Prehn等的研究证实,水表层气体的扩散速度制约着生物滤池硝化速率,将生物滤池水流速度从2.5 m/h提高到40 m/h,会使硝化反应速率提升2倍<sup>[24]</sup>。Simon P Gregory等的研究发现,淹没/排干和水下浸没两种生物滤器的细菌群体存在显著差异;对于有机氮和氨氮的去除率,淹没/排干处理方式要大于水下浸没,而对于亚硝酸氮和硝酸氮的去除效果,却是第二种处理方式的效率较高<sup>[25]</sup>。

秦继辉等采用自行设计的抽屉式生物滤器应用于漠斑牙鲆RAS,研究其对循环养殖水的处理效果。结果表明,抽屉式生物滤器对于NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N和COD的去除率分别为10.61%、14.90%和16.11%,可满足漠斑牙鲆养殖水体的水质要求<sup>[26]</sup>。Iván Andrés Sánchez O等研究了需氧三相流化床在罗非鱼RAS中对养殖废水处理的效果。研究表明,BOD、COD、磷、总氨氮、总氮的平均去除率分别是47%、77%、38%、27%和24%<sup>[27]</sup>。宋奔奔等研究水力停留时间(HRT)和曝气量变化对移动床硝化效率的影响。研究表明,低氨氮负荷条件下,移动床总氨氮(TAN)去除率随着HRT的延长而升高,HRT在10 min时,TAN的去除率较高且水流量较大,硝化效率最高,单位体积TAN去除率(VTR)平均达63.11 g/(m<sup>3</sup>·d),最高达到110.19 g/(m<sup>3</sup>·d);曝气流化状态的移动床TAN去除率和VTR均显著高于未曝气移动床<sup>[28]</sup>。

### 5.2.2 反硝化反应

Luo Cuozhi等研究了厌氧序批式反应器(ASBR)在厌氧条件下对淡水RAS污泥的处理情况。结果表明,ASBR在HRT为20 d时平均每天产生的气体为0.013~0.022 L/g,总化学需氧量(TCOD)、平均TCOD、TSS和污泥中可挥发性固体(VSS)的去除率

分别超过97%、96%和91%；低盐度适应性试验时，当废水盐度超过8.7时，产气反应会停止<sup>[29]</sup>。

唐成婷等专注于生物脱氮技术在RAS中的应用，提出聚丁二酸丁二醇酯(PBS)反硝化反应器具有良好的脱氮能力，且PBS具有很好的降解能力<sup>[30]</sup>。李秀辰等以养殖固体废弃物为碳源，进行反硝化工艺的试验研究。结果表明，利用厌氧活性污泥对养殖废水的水解液进行反硝化净化， $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 和TCOD的3 h去除率分别达99.6%和88.3%，而养殖废水直接反硝化， $\text{NO}_3^--\text{N}$ 和TCOD的去除速率则分别为36.5%和75.9%。这表明，在海水RAS中，利用养殖固体废弃物为碳源，将养殖废水先水解然后进行反硝化能有效脱氮和补充有机碳源，增强反硝化效果<sup>[31]</sup>。

李平等用ASBR处理RAS中产生的固体有机物(残饵和粪便)。结果表明，在第117天时系统开始产气，TCOD产气量为0.013~0.022 L/g。该类固体有机物经厌氧消化后有效体积减少了93.75%，有机物含量减少了41.61%，取得了一定的减量化、稳定化的效果<sup>[32]</sup>。

### 5.3 生物滤池的菌群培养

Lu Lu等将枯草芽孢杆菌应用于序批式生物反应器(SBR)，用来处理RAS中的固体废物。研究表明，粗蛋白的生物絮凝作用从21.52%提高到29.65%；对无机氮的去除率为0.41 mg/(L·d)，对总有机氮的利用率为1.42 mg/(L·d)，对溶解有机碳的去除率为138.39 mg/(L·d)，分别是不用枯草芽孢杆菌的1.17倍、1.71倍和1.95倍<sup>[33]</sup>。

傅雪军等分别采用海水中自然微生物和微生物制剂辅助在生物载体上进行人工挂膜，挂膜两周后，进行40 d循环水养殖牙鲆试验。结果表明，自然微生物挂膜成熟周期为35~40 d，具有很好的硝化效果，高浓度 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 更利于微生物的扩繁生长和生物膜形成；微生物制剂的使用有利于自然微生物挂膜<sup>[34]</sup>。张正等进行了海水RAS生物膜快速挂膜试验，采用悬挂多层针状聚乙烯丝作为生物载体，在滤池中添加初始浓度 $10^3$  cfu/mL的水质净化菌和5 g/L的质量比为4:1的“黏土-沸石粉”超细颗粒混合物悬液，静水充气培养8 d后就可可在生物载体上形成较牢固的生物膜，所采用的挂膜方法将海水RAS生物膜的挂膜成熟提前了20 d以上<sup>[35]</sup>。王威等采用微生物生态净水剂作为菌种，对陶环、弹性毛刷和爆炸棉构建的生物滤器进行生物膜培养，并以

3种生物滤器为基础，构建简易RAS进行黑鲷幼鱼养殖试验。结果表明，不同滤料在相同工况条件下挂膜成熟时间不同；微生物生态净水剂作为挂膜菌种效果良好；RAS养殖模式不仅可以提高鱼体的生长速度，还能增强鱼体免疫性能<sup>[36]</sup>。

尽管水产研究人士对生物滤池非常重视，做了大量的研究工作，但在工艺上，生物滤膜微生物种群、生物滤池与养殖水体的体积比、生物滤池最佳气水比、各级生物滤池的合理比例和滤料选择仍需要进行细致的研究。

## 6 紫外线杀菌环节

紫外线杀菌工艺被广泛地应用在循环水处理环节上。紫外线是一种肉眼看不见的光波，存在于光谱紫外线端的外侧，故称之为紫外线。依据不同的波长范围，被割分为A、B、C这3种波段，其中的C波段紫外线(UVC)波长为240~260 nm，为最有效的杀菌波段，波段中波长最强的点是253.7 nm。适当波长的紫外线会破坏微生物机体细胞中的DNA或RNA分子结构，造成长性细胞死亡或再生性细胞死亡。因此，当应用紫外杀菌技术于RAS中，水中的各种细菌、病毒、寄生虫、水藻以及其他病原体受到一定剂量的UVC辐射后，其细胞中的DNA、RNA结构受到破坏，从而在不使用任何化学药物的情况下杀灭水中的细菌、病毒以及其他致病体，达到消毒和净化的目的。

紫外线杀菌效果是由微生物所接受的照射剂量决定的，同时，也与紫外线的输出能量、灯的类型、光强和使用时间有关。紫外照射剂量是指达到一定的细菌灭活率时，需要特定波长紫外线的量

$$\text{照射剂量}(\text{J}/\text{m}^2) = \text{照射时间}(\text{s}) \times \text{UVC强度}(\text{W}/\text{m}^2) \quad (3)$$

照射剂量越大，消毒效率越高。由于设备尺寸要求，一般照射时间只有几秒，所以灯管的UVC输出强度就成了衡量紫外光消毒设备性能最主要的参数。在城市污水消毒中，一般平均照射剂量在300 J/m<sup>2</sup>以上，低于此值，有可能出现光复活现象，即病菌不能被彻底杀死，当从渠道中流出接受可见光照射后，重新复活，降低了杀菌效果。杀菌效率要求越高，所需的照射剂量越大。

紫外线杀菌具有杀菌力强、速度快(通常为0.2~5 s)等优点，其杀菌效率可达99.9%。紫外线杀菌器以不锈钢为主体材料，以高纯石英管为套



管,配合高性能石英紫外低压汞消毒灯管,具有寿命长、性能稳定可靠等优点,进口灯管使用寿命可达9 000 h,因此在绝大多数的循环水养殖模式中均被采用。

Kari J K Attramadal等研究了稳健的臭氧消毒或高强度紫外线用于RAS海水鱼苗中微生物环境的影响。研究表明,两种RAS相比于流水系统(FTS)拥有组成不同但更稳定的微生物菌群,RAS O<sub>3</sub>拥有比RAS UV更成熟和稳定的微生物群体环境;RAS UV入水口处的养殖池细菌的密度和活力要低于后面的养殖池,而RAS O<sub>3</sub>在各养殖池中的细菌密度和活力却均是相同的;大西洋鳕幼鱼在RAS O<sub>3</sub>表现出最好的存活率和生长率。此研究同时说明,RAS对于幼苗来说不能进行很强的消毒,这会减少微生物数量从而可能导致水体中微生物菌群的稳定性受到破坏<sup>[37]</sup>。

在实际生产运营中,当污水流经紫外线消毒器时,其中有许多无机杂质会沉淀、粘附在套管外壁上。尤其当污水中有机物含量较高时更容易形成污垢膜,而且微生物容易生长形成生物膜,这些都会抑制紫外线的透射,影响消毒效果。因此,石英套管外壁的清洗工作至关重要。除定期清洗外,也应时刻检查,紫外线灯管是有寿命的,目前国内灯管有效寿命一般为1 000~3 000 h。如果有条件,也可采用低压高强度和中压高强度紫外灯系统,由于产生高强度的紫外线可能使灯管数量减少90%以上,从而缩小了占地面积,节约了安装和维修费用。

## 7 pH值调节

鱼类最适生长pH值一般偏碱性(7.5~8.2较好),但RAS中由于养殖密度大,会有大量CO<sub>2</sub>的产生,尽管通过气浮处理可以脱去部分,并且生物滤池的反硝化作用会利用部分,但仍然很容易使得养殖水体pH值降低,这时需人工调节pH值。一般可以往水体中添加适量的NaHCO<sub>3</sub>、Mg(OH)<sub>2</sub>等碱性溶液。

王振华等采用NaOH、NaHCO<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>溶液对采集于淡水RAS中的水样进行滴定实验,得到相应的滴定曲线,与同等条件下滴定的去离子水曲线比较后发现,淡水RAS中的水体具有缓冲性。NaOH的滴定曲线与NaHCO<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>的滴定曲线相比,在突越点前和突越点后pH值的变化都相对剧烈,为了避免加碱后会对水体pH值产生较大波动,宜选择NaHCO<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>等弱碱性物质。同时,在pH值降

至突越点之前补充碱性试剂是一个较合适的时机<sup>[38]</sup>。

## 8 对循环水养殖模式水质处理环节的几点思考

### 8.1 生物滤池是整个工厂化循环水养殖模式的核心

微生物是生物界的重要组成部分,其个体虽小,但能量很大,尤其在治理环境污染中潜力巨大,实践证明:一个完美的RAS水处理工艺,如果没有微生物的参与将不可想象,因为微生物在水处理过程中有着强大的硝化和脱氮功能。

在生物滤池中,硝化反应和反硝化反应并不能被独立分割开来。近年研究证实,生物滤池中存在同步硝化与反硝化反应(SND)。就宏观环境而言,生物反应器中无论采用何种曝气装置,都无法使反应器内的氧气在污水中得到充分扩散,最终在反应器内部的不同区域形成缺氧和好氧段,分别为反硝化菌和硝化菌的作用提供了有利环境,实际上造成了硝化和反硝化反应的同步进行。除反应器不同空间上的溶氧不均衡外,反应器在不同时间点上的溶氧变化也可以导致SND的发生。Gwang-Yeol Yoo等研究发现,SBR反应器在曝气反应阶段反应器内DO浓度先减小后升高,并伴随出现SND现象<sup>[39]</sup>。就微环境而言,在生物滤池内形成的滤膜上,膜表面至其内部的不同层次上,由于氧传递的限制,氧的浓度分布不均匀,生物膜外表面氧的浓度较高,内层浓度较低。在生物膜厚度足够大的情况下,可以在生物膜内部形成缺氧区。在这种情况下,生物膜外层好氧硝化菌占优势,主要进行硝化反应;在内层异养反硝化菌占优势,则主要进行反硝化反应。

目前,一些水产专家围绕生物滤池中微生物菌群的组成进行了重点研究<sup>[16~20]</sup>,想搞清楚其菌群组成及变动规律,并开始从中分离一些对水质处理起关键作用的菌株<sup>[21]</sup>。将来很有可能会出现可直接应用于生物滤池生物膜培养的商品工程菌,从而缩短生物滤池挂膜时间,提升生物滤池滤除容量和效率,使RAS更稳定和安全。展望未来,对相关工程微生物开展基因组研究,在深入了解特殊代谢过程的遗传背景前提下,有选择地加以利用,例如找到氨氮降解和反硝化的关键基因,将其在某一菌株中组合,构建高效能的基因工程菌株,达到一菌多用,则可大大提升其污染物降解能力,极大地发挥其改善环境、排除污染源的潜力。

## 8.2 工厂化循环水养殖模式水处理环节要求首尾衔接、效率优先

工厂化循环水养殖模式建立在生物科学、环境科学、机电工程、信息科学、建筑科学等多学科的基础上,进行多学科的交叉融合,其形成的历史并不长,在我国水产养殖总量中所占比重尚不高。究其原因水处理工艺设置不尽合理是造成效率不高的主因。

养殖废水虽属于轻度污染水,但循环利用时其水质处理的等级却要求非常高,因此,在生产上,微滤机、弧形筛、泡沫分离、臭氧消毒、生物滤池、紫外线杀菌、加热恒温、纯氧增氧等环节的排列顺序和工艺设置,对RAS的水处理效果和最大养殖容纳量设置具有举足轻重的作用。水处理环节的紧凑性和合理性是建成循环水养殖模式和节约投资的必备条件。目前,一些水产工作者对不同的工艺进行了总结,并对其优劣作了比较。但这些工艺有些并不完善,有些来自国外,但并不一定符合国情。而且如果要评价某种工艺的真正效果,必须在实际生产应用中来考证其处理效果的稳定性,这就需要经历较长时间运行的实际考验。

目前,国家倡导转变经济增长方式,越来越多的水产企业将工厂化循环水养殖模式纳入自身的重点改革方向,甚至已有一些企业在内陆地区使用全人工配制海水开展工厂化循环水养殖珍稀鱼类,这对水质处理的要求显然会更高。上述运作都是对循环水处理工艺的有益尝试,其积累的经验将为创建有中国特色的循环水处理工艺提供参考。

## 8.3 工厂化循环水养殖模式水处理环节重在节能减排,并要通盘优化成本核算

在当前产业转型提升的新形势下,集约化的循环水养殖模式已经受到国家和产学研各界的高度重视,一个庞大的科研计划正在通过农业产业技术体系等项目在全国沿海各地广泛展开。但目前市场上出现的多种水处理设施与设备,不仅价位较高、效率低,其总体建设成本要比普通工厂化流水养殖高出1~2倍,其运行成本也比流水养殖模式要高得多。因此要想普及发展循环水养殖,就必须精心设计、优化各个系统工程环节,落实建设成本合理投入和运行成本的最大幅度降低。国内在循环水设备方面的研发明显滞后,以往一些应用于水处理方面的设备普遍小型化,在生产营运中价位偏高,而且其中有一些关键设备需依赖进口。这种现

状期待迅速改变。我国的渔业装备工业今天应当作为战略性新兴产业受到国家的重点支持,尤其养殖工程装备的研发需要抓紧提速,以便早日实现循环系统整体装备的国产化。

目前,国家已经将养殖工程学的研究与应用列为重大需求和重要支持方向;国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)的重点领域及其优先主题是“多功能农业装备与设施”;国家“十一五”科学技术发展规划纲要的超前部署前沿技术研究是“精准农业技术与装备”;国家中长期渔业科技发展规划(2006—2020年)的六大创新方向之一是“渔业节能减排技术与重大装备开发”。国家强大的政策和资金支持将有力地促进国产化、大型化、综合性水质处理设备的研发和推广应用。

此外,探讨一些对水质处理效果起决定作用的关键水处理参数,如紫外线装置位置,臭氧消毒位置及剂量,生物滤池气水比、水力停留时间、循环次数等,也是今后需要重点探讨的内容。在研究这些工艺环节时,如何既做到水质处理效果最佳而能源消耗最小,并在试运行中按特定养殖品种及其工艺流程准确换算出各个部位的能耗、水耗,最后按日、按季,或按年度换算出一个养殖周期内的总成本核算,这对推广应用和经营管理工厂化循环水养殖模式将会起到非常重要的作用。

2011年9月,第124场中国工程科技论坛——鱼类工业化养殖与可持续发展论坛在北京召开,重点提出了“工业化养殖”是我国建设现代渔业的发展方向,也是打造水产养殖强国的必由之路。其中重点之一就是要建设陆基高密度封闭式循环水养殖模式,走节能、节水、节地、减排、安全、高效的工业化养殖道路<sup>[40]</sup>。相信在我国水产工作者的不懈努力下,必将在21世纪中开创出一个前景辉煌的工业化养鱼新时代。

### 参考文献

- [1] 雷霖霖. 中国海水养殖大产业架构的战略思考[J]. 中国水产科学, 2010(3):600-609.
- [2] Timmons M B, Ebeling J M. The role for recirculating aquaculture systems [J]. AES News, 2007, 10(1):2-9.
- [3] 宿墨, 刘晔, 宋红桥, 等. 转鼓式微滤机颗粒去除率及能耗的运行试验研究[J]. 渔业现代化, 2008(5):9-12.
- [4] Samir Ahmad Ali. Design and evaluate a drum screen filter driven by undershot waterwheel for aquaculture recirculating systems [J]. Aquacultural Engineering, 2013(54):38-44.
- [5] 顾川川, 刘晔, 倪琦. 循环水养殖系统中旋流颗粒过滤器设计研究[J]. 渔业现代化, 2010, 37(5):9-18.

- [6] 臧维玲, 戴习林, 徐嘉波, 等. 室内凡纳滨对虾工厂化养殖循环水调控技术与模式[J]. 水产学报, 2008(5):749-757.
- [7] 祝莹, 杨绍斌. 臭氧配合复合光合细菌对虹鳟鱼病的防治研究[J]. 水产科技情报, 2009(1):27-30.
- [8] 宋奔奔, 倪琦, 张宇雷, 等. 臭氧对大菱鲆半封闭循环水养殖系统水质净化研究[J]. 渔业现代化, 2011(6):11-15.
- [9] Christopher Good, John Davidson, Carla Welsh, et al. The effects of ozonation on performance, health and welfare of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* in low-exchange water recirculation aquaculture systems [J]. *Aquacultural Engineering*, 2011, 44(3): 97-102.
- [10] Jeonghwan Park, Youhee Kim, Pyong-Kih Kim, et al. Effects of two different ozone doses on seawater recirculating systems for black sea bream *Acanthopagrus schlegelii* (Bleeker): Removal of solids and bacteria by foam fractionation [J]. *Aquacultural Engineering*, 2011, 44(1): 19-24.
- [11] John Davidson, Christopher Good, Carla Welsh, et al. The effects of ozone and water exchange rates on water quality and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* performance in replicated water recirculating systems [J]. *Aquacultural Engineering*, 2011, 44(3): 80-96.
- [12] Schroeder J P, Croot P L, Von Dewitz B, et al. Potential and limitations of ozone for the removal of ammonia, nitrite, and yellow substances in marine recirculating aquaculture systems [J]. *Aquacultural Engineering*, 2011, 45(1): 35-41.
- [13] Silva J, Laranjeira A, Serradeiro R, et al. Ozonated seawater induces genotoxicity and hematological alterations in turbot (*Scophthalmus maximus*) — Implications for management of recirculation aquaculture systems [J]. *Aquaculture*, 2011, 318(1-2): 180-184.
- [14] 曹剑香, 梁道栋, 孙成波. 蛋白分离器对循环水养殖水质理化因子的调控作用[J]. 水产养殖, 2010, 31(5):9-12.
- [15] John Colt, Barnaby Watten, Tim Pfeiffer. Carbon dioxide stripping in aquaculture. Part 1: Terminology and reporting [J]. *Aquacultural Engineering*, 2012, 47: 27-37.
- [16] Tomoko Sakami, Tadashi Andoh, Tetsuo Morita, et al. Phylogenetic diversity of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in biofilters of recirculating aquaculture systems [J]. *Marine Genomics*, 2012(7): 27-31.
- [17] 陈珠, 刘鹰. 河鲢循环水养殖系统生物滤器中异样细菌的群落结构[C]//第三届水产工业化养殖技术暨封闭循环水养殖技术国际研讨会. 北京:现代教育出版社, 2013.
- [18] 张海耿, 马绍赛, 李秋芬, 等. 循环水养殖系统(RAS)生物载体上微生物群落结构变化分析[J]. 环境科学, 2011, 32(1): 231-239.
- [19] 刘长发, 姚敬元, 袁瑗, 等. 循环海水养殖系统硝化滤器中氨氧化微生物分析[J]. 渔业现代化, 2012(3):1-6, 12.
- [20] 李秋芬, 傅雪军, 张艳, 等. 循环水养殖系统生物滤池细菌群落的PCR-DGGE分析[J]. 水产学报, 2011, 35(4): 579-585.
- [21] Bärbel U Foesel, Harold L Drake, Andreas Schramm. *Defluviimonas denitrificans* gen. nov., sp. nov., and *Pararhodobacter aggregans* gen. nov., sp. nov., non-phototrophic Rhodobacteraceae from the biofilter of a marine aquaculture [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2011, 34(7): 498-502.
- [22] Liu Huang, Che Xuan, Zhang Yulei. Performance of sequencing microbead biofilters in a recirculating aquaculture system [J]. *Aquacultural Engineering*, 2013, 52: 80-86.
- [23] Díaz V, Ibáñez R, Gómez P, et al. Kinetics of nitrogen compounds in a commercial marine Recirculating Aquaculture System [J]. *Aquacultural Engineering*, 2012, 50: 20-27.
- [24] Jonas Prehn, Christopher K Waul, Lars-Flemming Pedersen, et al. Impact of water boundary layer diffusion on the nitrification rate of submerged biofilter elements from a recirculating aquaculture system [J]. *Water Research*, 2012, 46(11): 3516-3524.
- [25] Simon P Gregory, Paul J Dyson, David Fletcher, et al. Nitrogen removal and changes to microbial communities in model flood/drain and submerged biofilters treating aquaculture wastewater [J]. *Aquacultural Engineering*, 2012, 50: 37-45.
- [26] 秦继辉, 孙建明, 班同, 等. 抽屉式生物滤器在漠斑牙鲆循环水养殖中的效果研究[J]. 渔业现代化, 2012(2):6-9.
- [27] Iván Andrés Sánchez O, Tsunao Matsumoto. Hydrodynamic characterization and performance evaluation of an aerobic three phase airlift fluidized bed reactor in a recirculation aquaculture system for Nile Tilapia production [J]. *Aquacultural Engineering*, 2012, 47: 16-26.
- [28] 宋奔奔, 宿墨, 单建军, 等. 水力负荷对移动床生物滤器硝化功能的影响[J]. 渔业现代化, 2012(5):1-6.
- [29] Luo Guozhi, Li Ping, Tan Hongxin, et al. The start-up and saline adaptation of mesophilic anaerobic sequencing batch reactor treating sludge from recirculating aquaculture systems [J]. *Aquacultural Engineering*, 2013(54):9-15.
- [30] 唐成婷, 谭洪新. 聚丁酸丁二醇酯(PBS)的空间位置对其反硝化性能的影响[C]//第三届水产工业化养殖技术暨封闭循环水养殖技术国际研讨会. 北京:现代教育出版社, 2013.
- [31] 李秀辰, 李俐俐, 张国琛, 等. 养殖固体废物作碳源的海水养殖废水反硝化净化效果[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 275-279.
- [32] 李平, 杜军, 谭洪新, 等. 厌氧序批式反应器(ASBR)处理循环水养殖系统固体有机物的研究[J]. 水处理技术, 2011, 37(8):86-90.
- [33] Lu Lu, Tan Hongxin, Luo Guozhi, et al. The effects of *Bacillus subtilis* on nitrogen recycling from aquaculture solid waste using heterotrophic nitrogen assimilation in sequencing batch reactors [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 124: 180-185.
- [34] 傅雪军, 马绍赛, 曲克明, 等. 微生态制剂对生物挂膜及牙鲆生长的影响研究[J]. 海洋科学, 2011, 35(4):15-20.
- [35] 张正, 王印庚, 曹磊, 等. 海水循环水养殖系统生物膜快速挂膜试验[J]. 农业工程学报, 2012, 15:157-162.
- [36] 王威, 曲克明, 朱建新, 等. 3种滤料生物滤器的挂膜与黑鲷幼鱼循环水养殖效果[J]. 中国水产科学, 2012(5): 833-840.
- [37] Kari J K Attramadal, Gunvor Øie, Trond R Størseth, et al. The effects of moderate ozonation or high intensity UV-irradiation on the microbial environment in RAS for marine larvae [J]. *Aquaculture*, 2012, 330-333: 121-129.
- [38] 王振华, 谷坚, 管崇武, 等. 几种碱性试剂对循环水养殖系统中pH调节的研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(1): 308-311.
- [39] Gwang-Yeol Yoo, Xiaojie Wang, Semin Choi, et al. Dietary microbial phytase increased the phosphorus digestibility in juvenile Korean rockfish *Sebastes schlegelii* fed diets containing soybean meal [J]. *Aquaculture*, 2005, 243(1-4): 315-322.
- [40] 雷霖霖. 迎接鲆鲽类工业化养殖新时代——鲆鲽类走工业化养殖发展之路的战略思考[J]. 中国水产科学, 2010, 17(3): 600-609.

(下转32页)