

# Research Progress on the Treatment Technology of Tail Water from Factory Farming of Marine Fish

Xiaobo Liu\*, Tihong Cao, Zhongquan Wang, Zhiwei Xiang, Wei Chen#

Shandong Key Laboratory of Marine Ecological Restoration, Shandong Marine Resource and Environment Research Institute, Yantai Shandong

Email: \*lxb19780101@163.com, #yantaichenwei@126.com

Received: Jan. 6<sup>th</sup>, 2020; accepted: Jan. 28<sup>th</sup>, 2020; published: Feb. 4<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

The tail water of aquaculture is one kind of waste water which contains a lot of residual bait and feces. It is rich in nitrogen and phosphorus, and it is easily to cause water eutrophication and secondary ecological problems if tail water discharged into water environment directly. Factory aquaculture of marine fish is one of the encouraged aquaculture methods in the 13th five-year plan for national fishery development (2016~2020). However, due to the high intensification, the technical requirements for the treatment of farming tail water are higher. In order to provide reference for the development of the treatment technology of the tail water from the factory, it was summarized on the common technologies for the treatment of the tail water, and the advantages and disadvantages of various technologies are also analyzed in this paper.

## Keywords

Marine Aquaculture, Recirculating Aquaculture, Tail Water, Treatment

---

# 海水鱼类工厂化养殖尾水处理技术研究进展

刘晓波\*, 曹体宏, 王忠全, 相智巍, 陈 玮#

山东省海洋资源与环境研究院, 山东省海洋生态修复重点实验室, 山东 烟台

Email: \*lxb19780101@163.com, #yantaichenwei@126.com

收稿日期: 2020年1月6日; 录用日期: 2020年1月28日; 发布日期: 2020年2月4日

\*第一作者。

#通讯作者。

## 摘要

养殖尾水是养殖过程中产生的含有大量残饵、粪便的污水，其中氮磷元素的含量较为丰富，直接排放到水环境中容易导致水体富营养化，引起继发性的生态问题。海水鱼类工厂化养殖是我国《全国渔业发展第十三个五年规划(2016~2020)》中提倡鼓励发展的养殖方式之一。但由于其集约化程度高，对养殖尾水的处理技术要求较高。本文综述了目前我国海水鱼类工厂化养殖尾水处理常用的技术，并分析了各种技术的优缺点，以期海水鱼类工厂化养殖尾水的处理技术的发展提供参考。

## 关键词

海水养殖，循环水养殖，尾水，处理

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

我国是世界上唯一一个水产养殖产量超过捕捞产量的国家。2018年，我国海水鱼类养殖面积为75.12千公顷，同比下降16.45% [1]，养殖面积的下降，一方面与经济结构的供给侧改革有关，另一方面与国家环境保护政策的变化有关。但2018年海水鱼类养殖产量为149.51万吨，同比上涨5.33% [1]，这意味着单位面积养殖产量出现了较大提升，即提高了养殖的集约化。工厂化养殖是集约化养殖模式的典型代表，其特点是单品种、高密度、装备化，养殖过程中产生的废弃物需要经由养殖水及时处理。根据养殖尾水处理设施与养殖设施是否存在同一体系中，养殖尾水处理技术可分为原位水处理技术和异位水处理技术。

## 2. 海水鱼类工厂化养殖尾水原位水处理技术

原位水处理技术常见于循环式或半循环式海水工厂化养殖体系中，养殖尾水一般经过机械过滤、蛋白分离、生物膜接触氧化、消毒增氧、调温等工艺处理后，进行循环或部分循环利用(图1)。该工艺的关键点有以下几处：① 机械过滤的效率及抗腐蚀性；② 生物膜处理工艺；③ 消毒增氧的方式；④ 调温的方式。

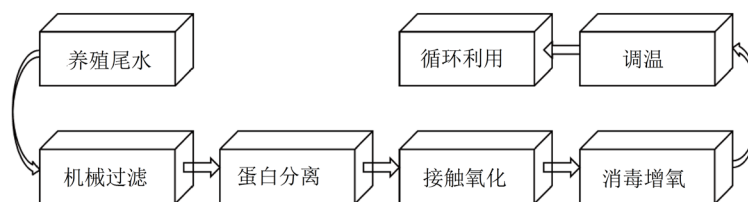


Figure 1. Sketch map of *in-situ* treatment of aquaculture tail water

图1. 养殖尾水原位处理过程示意图

### 2.1. 物理过滤

物理过滤主要分为机械过滤和泡沫分离两种。目前常用的养殖尾水机械过滤装置有微滤机、弧形筛

两种；常用的泡沫分离装置有气浮机和蛋白质分离器两种。

机械过滤装置的原理均为养殖尾水在经过装置滤网后，固体物质被过滤收集起来，而养殖尾水顺利通过筛绢或金属网进入下一个处理装置。常见的微滤机有转鼓式、转盘式、格栅式和履带式四种，目前海水养殖尾水处理中常用的是转鼓式和履带式微滤机。制造成本高、占地面积大、过滤效率低、滤布更换频繁是困扰微滤机应用的主要问题。弧形筛在使用过程中无机械运动部件，不产生能耗，且安装操作维护均较为简单，但弧形筛对材料的刚性和韧度要求较高，整体造价较高。

过滤效率及抗腐蚀性是机械过滤装置的核心问题。随着机械过滤的进行，过滤装置表面的微孔会被水体中的固形物堵塞，严重影响过滤效率。反冲洗是过滤网再生的重要环节，反冲洗效果的好坏对过滤系统有极大影响。反冲洗的工作原理是：使用反冲洗泵抽取过滤后的水或者新源水，通过喷头喷射水柱对滤网进行由外往内的冲洗，从而清除堆积在滤网表面的固体悬浮物[2]。由于机械过滤装置长期在海水中工作，因此其抗腐蚀性尤为重要，其金属组成部件一般均需采用 316L 不锈钢制作。

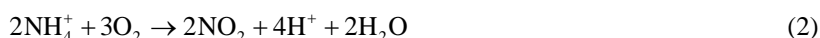
泡沫分离装置的原理是通过在水中产生大量的微细气泡，使空气以高度分散的微小气泡的形式附着在悬浮物颗粒上，造成密度小于水的状态，利用浮力原理使其浮在水面，从而实现固-液分离。目前气浮机及蛋白分离器装置已非常成熟，并广泛应用在海水养殖中[3] [4]，其关键点是微细气泡的产生及射流距离。

## 2.2. 生物接触氧化处理

生物接触氧化处理是原位水处理工艺的核心，其主要目的是通过生物接触氧化法降低水体中氨元素，提高养殖水的重复利用率。生物接触氧化处理工艺主要由微生物附着基和微生物组成[5]。微生物附着基的来源和形状多种多样，如无机材料、有机材料、粒状、环状、球状、线状等。目前常见的微生物附着基有沸石、麦饭石、活性炭、纤维球、纤毛刷、陶瓷环、高分子材料等，这些材料均具有合适的比表面积，既能作为硝化细菌和反硝化细菌提供充足的附着场所，又不易被堵塞；微生物附着基还要具有较高的机械强度，能够抵抗水流的冲击[6]；此外，微生物附着基的形状和空隙不能阻碍水的流动。

生物接触氧化法的核心是微生物的挂膜，完全成熟的生物膜由硝化细菌、反硝化细菌、微藻、净化细菌和一些原生生物组成[7]，且以硝化细菌和反硝化细菌为主。硝化细菌又分为亚硝酸菌(氨氧化剂)和硝酸菌(亚硝酸氧化菌)，前者负责将  $\text{NH}_4^+$  氧化为亚硝酸，后者将亚硝酸氧化成硝酸氮；反硝化细菌负责将硝酸氮转化为氮气。

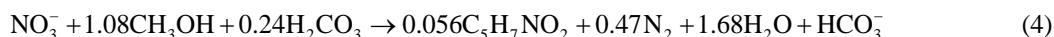
亚硝酸菌转化水体中氨氮的反应式如下：



硝酸菌转化水体中亚硝酸的反应式如下：



反硝化细菌转化水体中硝酸的反应式如下[8]：



由上述反应式可见，硝化和反硝化反应的适宜条件是不一样的，硝化过程需要有氧环境，反硝化过程需要厌氧和偏碱性环境。实验条件下，硝化反应过程中，水体中的溶氧下降的很快，如不及时充气，硝化反应将会停止。因此在实际生产中，水处理的生物滤池硝化部分需要充气。反硝化细菌需要厌氧和偏碱性环境，而在实际生产中，厌氧条件较容易满足，而水体的酸碱度调节较为复杂。此外，由于硝化细菌属于自养型细菌，而反硝化细菌属于异养型细菌，故反硝化细菌比硝化细菌更为脆弱，不易培养，

但工作效率更高。理想的生物滤池可分为两个独立的部分，前一部分为硝化部分，保证充足供氧，同时也可以通过吊养大型藻类，降低水体中磷酸盐、增加溶氧[9]；后一部分为反硝化部分，要求保持厌氧环境，同时能够方便的调整酸碱度。

影响生物接触氧化法对养殖尾水处理效果的因素主要有菌水接触时间、菌种纯度与密度、温度、酸碱度、溶氧、盐度、附着基的物理性状等。一般来说，生物膜处理养殖尾水要求保证尾水与生物膜的接触超过一定时间，使菌水有充足的反应时间。故在建设生物反应池时，需要考虑尾水的流经速度、时间。其次，微生物菌种的纯度、密度与养殖尾水的处理效果密切相关。在适宜的温度下，保证充足的溶氧及氨氮和亚硝酸氮含量，有助于硝化细菌的生长，并保持优势菌种的地位；而在厌氧环境下，适当调节水体酸碱度，有助于反硝化细菌的生长，并保持优势菌种的地位；细菌的密度与微生物附着基的物理性状有关，附着基的比表面积大，可以为微生物提供更多的繁衍场所，有利于提高微生物的密度。此外，附着基的物理性状还与生物滤池的体积密切相关，物理性状好(比表面积大)的附着基可以降低生物滤池的体积。

目前常用于养殖尾水处理的微生物多来自池塘[10]、城市污水[11]、工业废水[12]等，其工作时的最佳环境因子(如温度、溶氧、酸碱度、底物种类与浓度)并不一致[13] [14] [15]。海水养殖尾水的水体一般较大，且为了提高海水的循环利用率，海水的温度、酸碱度和盐度需要保持相对稳定，而这些环境因子是影响微生物工作效率的关键因素。在海水工厂化养殖中，生物滤池中的微生物主要以定向条件下的自然繁殖为主。一般的工艺流程为：在已经构建好的生物滤池中，加入适量的  $\text{NH}_4\text{Cl}$  和  $\text{NaNO}_2$ ，充气，定向培养，一定时间后，通过检测水体中  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_2^-$  浓度的变化，判断生物滤池是否熟化完全。由于微生物生长存在指数增长期、平台期、老化期，故水体中  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_2^-$  浓度变化会出现相应的规律，这种工艺一般耗时较长[16] [17] [18]。针对这一问题，研究者从微生物的定向筛选方面入手，筛选出了异养硝化细菌[19] [20]，好氧反硝化细菌[14] [21] [22]，采用固定化硝化细菌[12] [23] [24]、建立同步短程硝化反硝化[25]等方式，缩短生物滤池熟化时间，提高生物滤池处理效率。

### 2.3. 消毒、增氧及调温

水产养殖中常用的消毒方法分为物理消毒(紫外光)和化学消毒(二氧化氯、臭氧)，海水工厂化养殖中常用的是物理消毒法，即紫外杀毒法和臭氧杀毒法，关于这两种方法的研究报道已经较多[9] [26] [27]，在此不再赘述，这两种技术的关键点是要控制好杀毒的时间和距离。

集约化养殖过程中，养殖密度较大，水体中溶氧消耗很快，因此需要及时向水体中增加氧气。通常是利用空气压缩机通过管道将空气输送至养殖水体中，养殖水体中溶氧的含量要保持在  $6 \text{ mg/L}$  以上。有研究表明，随着养殖水体中溶氧含量的增加，养殖生物的生长速度加快，而水体水质指标更稳定[28]，且能缓解养殖密度带来的胁迫[29]。因此，纯氧充气已成为高密度循环水养殖必不可少的装备之一。

研究表明，水体温度直接影响养殖鱼类的存活、生长和摄食[30] [31] [32]，工厂化养殖的优点是能维持养殖环境的相对稳定，其中维持养殖水体的温度是整个养殖过程中能耗最大部分，也是限制海水工厂化养殖规模发展的主要瓶颈问题。由于国家环保政策的改变，燃煤调温被逐渐取缔，电能、地热、空气热逐渐成为海水工厂化养殖的主要调温手段。冷水机组常被用来降低养殖水的温度，而热泵机组常被用来提高养殖水的温度[33] [34]，前者主要依赖的是电能，而后的能源有地热、空气热等多种形式。随着技术的进步，毛细管换热器[35]、温室调温[36]、太阳能调温等技术发展日趋成熟，为海水工厂化养殖的快速发展提供基础。

## 3. 海水鱼类工厂化养殖尾水异位水处理技术

海水鱼类工厂化养殖尾水异位处理的设计理念是针对原位水处理设备集成度高、造价高、能耗高等

问题,将尾水引出养殖系统,利用各种方法处理养殖尾水后循环使用,其特点是占地面积大、营养素利用充分、系统稳定、维护方便。按照处理养殖尾水的方法,可分为物理处理法、化学处理法、生物处理法,按照处理的形式,可分为生物浮床法、人工湿地法、生物絮团法、藻类藕联法等。下面按照养殖尾水的处理形式对其一一介绍。

### 3.1. 生物浮床法

生物浮床法目前多见于淡水池塘养殖水处理中[37] [38],其原理是在池塘养殖水上部建立浮床,上面栽种空心菜、水雍菜等挺水性或漂浮性水生植物[39] [40],利用水生植物的生长吸附水体中氮磷等营养素。鱼菜共生模式是生物浮床法的具体体现。海水池塘中常用的浮床植物有海马齿[41]、碱蓬[42]、海蓬子和碱菀[43]。海水养殖生物浮床对水生植物的要求是根系发达、耐盐碱、温度耐受度高,一般选择海水养殖当地土著植物为宜。

### 3.2. 人工湿地法

人工湿地处理养殖尾水的原理是利用“土壤-植物-微生物”三者构成的生态系统,通过物理和生物的方法去除水体中的悬浮物、氮磷元素[44] [45]。目前研究最多的、应用最为成熟的处理养殖尾水的人工湿地是红树林人工湿地[46] [47]。红树林被称为海洋“清道夫”,具有“抗污”和“降污”的功能。但红树林生长于热带、亚热带,不适应于北方海水工厂化养殖尾水的处理。张海耿等[48]利用芦苇、细沙、蛭石等构建了人工湿地处理海水工厂化养殖尾水,得到了较好的处理效果。

### 3.3. 生物絮团法

生物絮团是通过人为调节水体中的 C/N,提高水体中异养微生物的活性和数量,将水体中的氨氮转化为菌体蛋白,形成的絮团状物质。这些絮团状物质可被养殖动物摄食,从而降低水体中的氮元素。研究表明:生物絮团可以有效控制水质,增加水体微生物的代谢活性,影响水体微生物代谢功能[49] [50]。但生物絮团除了培养时要额外添加碳源外[51],对维护的技术要求也相对较高[52]。

### 3.4. 藻类藕联法

藻类是海水中的土著植物,适应力强、生长速度快,是处理养殖尾水的最佳生物。研究表明大藻[53]、微藻[54]均能快速处理尾水中的无机氮和活性磷酸盐。目前常用的方法有菌藻藕联处理法[55]、虾-贝-藻藕联处理法[56]、及鱼-贝-藻-参藕联处理法等。该方法的优点是能充分利用养殖尾水中的营养素,但缺点也十分明显,即藕联的生物种类越多,各生物容量和最适生长环境越难调和,系统越脆弱。

上面介绍的几种养殖尾水的异位处理方法,比较适合对养殖尾水进行二级处理,一级处理(养殖尾水中固体悬浮物的去除)需提前进行。一级处理过滤出的主要为残饵和粪便等固形物,这些固形物中氮元素含量较高,但由于盐度较高,较难重复利用,目前已在研究将其开发为刺参配合饲料原料,或者利用特种蚯蚓将其转化为生物有机肥料。

## 4. 展望

工厂化使水产养殖实现了从农业向工业的转变,尾水处理是工厂化养殖的核心问题,其技术的发展与材料学、生物学等学科的发展密切相关。小型化、高效化、集成化、通用化、低能耗化和营养素的充分利用是养殖尾水处理技术发展的方向,且要求尾水处理系统稳定化程度高、易操作维护。随着国家社会和产业的发展,水产养殖尾水的无害化处理和循环利用是必然的趋势,也是维持养殖业健康可持续发展的关键,循环式工厂化养殖的发展前景广阔。

## 基金项目

国家重点研发计划子课题(2016YFC1400606-2); 山东省农业重大应用创新项目(201703003)。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国农业农村部. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019.
- [2] 潘雁艳. 养殖用微滤机反冲洗装置构成及喷嘴选型[J]. 福建农机, 2018, 153(3): 31-34.
- [3] 朱林, 车轩, 刘晃, 等. 气浮机对高位池养虾水质的调控效果[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 149-154.
- [4] 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.
- [5] 何春丽. 循环水养殖生物氧化系统构建及效果研究[D]: [学位论文]. 大连: 大连海洋大学, 2014.
- [6] 江帆, 陈维平, 张弢, 等. 新型水环境治理材料的研究进展[J]. 水处理技术, 2006, 32(2): 1-4.
- [7] 吕善志, 孟飞, 李文彩, 等. 养殖水体生物脱氮技术研究进展[J]. 水产科学, 2006, 25(4): 210-213.
- [8] 车轩, 吴嘉敏, 谭洪新, 等. 自养反硝化研究进展及在循环水养殖系统中的应用[J]. 渔业现代化, 2007, 34(1): 13-16.
- [9] 杜守恩, 曲克明, 桑大贺. 海水循环水养殖系统工程优化设计[J]. 渔业现代化, 2007, 34(3): 4-7.
- [10] 李文甫, 杜柳冰, 刘思莹, 等. 一株高效好氧反硝化细菌的分离鉴定及脱氮性能的研究[J]. 生物技术通报, 2019, 35(9): 202-209.
- [11] 赵志瑞, 萧未, 刘硕, 等. 一株反硝化细菌在尾水中的脱氮性能研究[J]. 河北工业科技, 2019, 36(5): 297-302.
- [12] 李祥蕾, 张英红. 固定化硝化菌去除污水中氨氮工艺参数优化[J]. 工业用水与废水, 2019, 50(2): 35-37.
- [13] 李誉琦, 马佩钰, 刘涵, 等. 一株耐高温亚硝酸盐型反硝化细菌的鉴定及脱氮特性[J]. 生物技术通报, 2019, 35(9): 194-201.
- [14] 白洁, 郭晓旭, 康兆颜, 等. 一株异养硝化-好氧反硝化菌 *Pseudomonas* sp. GK-01 的筛选及脱氮能力研究[J]. 中国海洋大学学报, 2019, 49(Sup. 1): 74-84.
- [15] 章霞, 徐志进, 柳敏海, 等. 不同滤料和碳氮比对对虾养殖尾水处理效果的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2018, 33(5): 620-624.
- [16] 刘意康, 刘洋, 徐爱玲, 等. 微生态制剂对海水养殖系统硝化功能建立过程的影响[J]. 微生物学杂志, 2019, 39(3): 16-21.
- [17] 朱建新, 刘慧, 徐勇, 等. 循环水养殖系统生物滤器负荷挂膜技术[J]. 渔业科学进展, 2014, 35(4): 118-124.
- [18] 傅雪军, 马绍赛, 曲克明, 等. 循环水养殖系统生物挂膜的消氮效果及影响因素分析[J]. 渔业科学进展, 2010, 31(1): 95-99.
- [19] 蒙海林, 刘复荣, 何敬愉, 等. 异养硝化细菌的分离鉴定及组合菌群硝化性能分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2019, 47(9): 113-120.
- [20] 杨垒, 崔坤, 任勇翔, 等. 异养硝化细菌 *Pseudomonas aeruginosa* YL 的脱氮过程及 N<sub>2</sub>O 产生特性[J]. 环境科学, 2020, 41(2): 831-838.
- [21] 黄志涛, 江玉立, 宋协法. 好氧反硝化技术处理水产养殖废水研究进展[J]. 渔业现代化, 2018, 45(5): 7-13.
- [22] 张海涵, 钊珍芳, 李苏霖, 等. 生物脱氮技术中好氧反硝化细菌的代谢及应用研究进展[EB/OL]. 环境科学研究. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1827.X.20190905.1056.003.html>
- [23] 祁自忠, 杨匡, 程成, 等. 固定化硝化菌群联合芽孢杆菌处理对虾养殖废水[J]. 微生物学通报, 2018, 45(9): 1922-1939.
- [24] 杨宏, 胡银龙. 硝化细菌的培养及包埋固定化中试[J]. 环境科学, 2018, 38(6): 2763-2769.
- [25] 乌兰, 王俊, 吴晓彤, 等. 海水养殖废水短程硝化反硝化基础研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2017, 38(5): 1-6.
- [26] 曹广斌, 韩世成, 周煊亦, 等. 工厂化养鱼水体的臭氧处理系统设计及安全性研究[J]. 环境工程, 2014, 32(6): 48-52.
- [27] 姜妍君, 强志民, 董慧峪, 等. 海水循环养殖系统水处理工艺综述[J]. 环境化学, 2013, 32(3): 410-418.
- [28] 高晓田, 马爱军, 陈超, 等. 纯氧充气对大菱鲆生长及水质指标的影响[J]. 海洋水产研究, 2007, 28(4): 110-117.

- [29] 董晓煜, 张秀梅, 张沛东. 溶解氧与养殖密度对褐牙鲈幼鱼血细胞数量及血红蛋白含量影响的研究[J]. 海洋水产研究, 2008, 29(6): 40-46.
- [30] 曾本和, 周建设, 王万良, 等. 水温对异齿裂腹鱼幼鱼存活、摄食和生长的影响[J]. 淡水渔业, 2018, 48(6): 77-82.
- [31] 曾本和, 张怵怵, 牟振波, 等. 3种西藏土著鱼类幼鱼水温耐受性的初步研究[J]. 水产科学, 2019, 38(1): 115-118.
- [32] 王万良, 张怵怵, 周建设, 等. 不同水温对亚东鲑幼鱼生长及存活的影响[J]. 水产科技情报, 2019, 46(1): 24-27.
- [33] 王际英, 李宝山, 宋志东, 等. 地源热泵技术在水工厂化养殖系统中的应用[J]. 渔业现代化, 2011, 38(1): 12-15.
- [34] 武雨果, 江亚柯, 张伟忠, 等. 热泵技术在工厂化水产养殖系统中的应用研究[J]. 水产科技情报, 2019, 46(1): 32-36.
- [35] Saidu, M.M., Hall, S.G., Kolar, P., et al. (2012) Efficient Temperature Control in Recirculating Aquaculture Tanks. *Recirculating Aquaculture Applied Engineering in Agriculture*, **28**, 161-167. <https://doi.org/10.13031/2013.41269>
- [36] 李竟超. 循环水养殖调温系统技术研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
- [37] 陈琴, 高胜男, 李恩军, 等. 基于两种生物浮床的养殖池塘中浮游动物多样性与水质的灰色关联性分析[J]. 广东农业科学, 2019, 46(2): 137-146.
- [38] 郭忠宝, 王柏明, 阴晴朗, 等. 浮床种植空心菜对罗非鱼养殖池塘水质的净化效果[J]. 南方农业学报, 2019, 50(6): 1378-1384.
- [39] 杜兴华, 王妹, 蔡新华, 等. 生物浮床在泥鳅养殖中对水体生境的影响[J]. 海洋湖沼通报, 2018(1): 129-134.
- [40] 顾兆俊, 刘兴国, 车轩, 等. 一种箱式生物浮床处理养殖排放污水技术[J]. 科技创新与应用, 2014(26): 31-32.
- [41] 曾碧健, 岳晓彩, 黎祖福, 等. 生态浮床原位修复对海水养殖池塘浮游动物群落结构的影响[J]. 海洋与湖沼, 2016, 47(2): 354-359.
- [42] 常雅军, 张亚, 刘晓静, 等. 碱蓬(*Suaeda glauca*)对不同程度富营养化养殖海水的净化效果[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(11): 1023-1028.
- [43] Quintã, R., Hill, P.W., Jones, D.L., et al. (2015) Uptake of an Amino Acid (Alanine) and Its Peptide (Trialanine) by the Saltmarsh Halophytes *Salicornia europaea* and *Aster tripolium* and Its Potential Role in Ecosystem N Cycling and Marine Aquaculture Wastewater Treatment. *Ecological Engineering*, **75**, 145-154. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.11.049>
- [44] 姚燃, 刘锋, 吴露, 等. 三级绿狐尾藻表面流人工湿地对养殖废水处理效应研究[J]. 地球与环境, 2018, 40(5): 475-481.
- [45] 孙琳琳, 宋协法, 李薨, 等. 外加植物碳源对人工湿地处理海水循环水养殖尾水脱氮性能的影响[J]. 环境工程学报, 2019, 13(6): 1382-1390.
- [46] 仇建标, 陈琛, 彭欣, 等. 红树林人工湿地-养殖耦合系统构建与净化效果[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(11): 2073-2077.
- [47] 虞丹君, 罗海忠, 徐志进, 等. 不同红树处理海水养殖尾水效果初探[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(7): 271-274.
- [48] 张海耿, 崔正国, 马绍赛, 等. 人工湿地净化海水养殖外排水影响因素与效果实验研究[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(1): 20-25.
- [49] 王仁龙, 王志宝, 刘立明, 等. 生物絮团技术在水产养殖中的应用现状[J]. 水产科技情报, 2017, 44(6): 330-335.
- [50] 李志斐, 王广军, 余德光, 等. 生物絮团对养殖水体水质和微生物群落功能的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2015, 24(4): 503-512.
- [51] 赵培. 生物絮团技术在海水养殖中的研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海海洋大学, 2011.
- [52] 王晓用, 谭洪新, 罗国芝, 等. 生物絮凝反应器处理水产养殖废水的中试研究[J]. 上海海洋大学学报, 2016, 25(6): 884-893.
- [53] 郑辉. 大型海藻对水产养殖废水中无机氮和活性磷酸盐吸收作用研究[J]. 科技通报, 2018, 34(4): 258-261.
- [54] 刘庆辉, 余祥勇, 张鹤千, 等. 微藻对水产养殖尾水中氮磷去除效果的研究进展——基于水产养殖尾水资源化利用角度分析[J]. 水产科技情报, 2019, 46(5): 290-295.
- [55] 焦蓉婷, 沈强, 叶捷. 菌藻联合处理罗氏沼虾育苗废水的效果[J]. 浙江农业科学, 2018, 59(12): 2286-2288.
- [56] 周婷婷. 虾-贝-藻综合养殖结构优化的研究[D]: [硕士学位论文]. 金华: 浙江师范大学, 2018.