

微藻在水产养殖尾水治理中的应用研究

庄艳敏, 乔洪金

鲁东大学生命科学学院, 山东 烟台

收稿日期: 2023年2月16日; 录用日期: 2023年3月16日; 发布日期: 2023年3月24日

摘要

响应中共中央“绿色”“可循环”的号召, 水产养殖尾水的处理一直以来都是备受关注的。水产养殖过程中由于投放饲料和抗生素导致水产尾水中含有较高含量的氮磷。微藻作为一种高耐受氮磷的生物, 可以吸收氮磷转化为自身的蛋白质等。同时还可以进行碳的固定, 是极为适合处理水产养殖尾水的生物。现在研究热点将微藻和细菌真菌共生, 处理效果优于单一的藻种。同时, 微藻作为高蛋白、多糖含量也很高的生物, 不但可以作为养殖鱼虾贝类的饲料, 还可以作为家禽的饲料。同时还有研究指出, 微藻可以用来炼制生物柴油, 如果普及的话, 也可以成为一种新的干净清洁能源。总的来说, 用微藻处理水产养殖的尾水, 前景还是十分可观的。

关键词

微藻, 水产养殖, 尾水处理, 菌藻共生

Study on the Application of Microalgae in Aquacultural Tail Water Management

Yanmin Zhuang, Hongjin Qiao

College of Life Science, Ludong University, Yantai Shandong

Received: Feb. 16th, 2023; accepted: Mar. 16th, 2023; published: Mar. 24th, 2023

Abstract

According to the CPC Central Committee's call of "green" and "recyclable", the treatment of aquaculture tail water has always been concerned. In the process of aquaculture, feed and antibiotics lead to higher nitrogen and phosphorus content in aquatic tail water. As a kind of organism with high tolerance to nitrogen and phosphorus, microalgae can absorb nitrogen and phosphorus into their own proteins. At the same time, it can also fix carbon, which is very suitable for the treatment

of aquaculture tail water. Now the research focus is microalgae and bacteria fungi symbiosis, treatment effect is better than a single algae species. At the same time, as organisms with high protein and polysaccharide content, microalgae can not only be used as feed for aquaculture fish, shrimp and shellfish, but also as feed for poultry. It has also been suggested that microalgae could be used to make biodiesel and, if widespread, could be a new source of clean energy. In general, the prospect of using microalgae to treat aquacultural tail water is very promising.

Keywords

Microalgae, Aquaculture, Tail Water Treatment, Ymbiosis of Bacteria and Algae

Copyright © 2023 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. 水产养殖尾水的治理

1.1. 水产养殖发展现状

水产养殖就是通过人工饲养,完成从育苗到水产品的过程。我国作为人口大国,水产养殖业在世界也处于领先地位。现阶段的水产养殖有淡水养殖和海水养殖两种,在沿海地区海水养殖较为常见。海水养殖常见的有三种类型:一是海产经类鱼的养殖;二是潮汐和海岸带的虾、蟹养殖;三是近海滩贝类的养殖[1]。而我国作为淡水面积最大的国家,淡水养殖业也十分成熟。目前,我国淡水养殖主要集中在池塘、湖泊、稻田等,由于水产品营养价值极高,风味独特,近些年从事水产养殖的人逐年累加。面对着庞大的养殖数目,解决好水尾水排放的问题显得尤为重要,如果没有良好的水质何谈养殖。

1.2. 水产养殖尾水特点及危害

在传统养殖行业中,通常是直接向水体中投放饲料,养殖物的排泄物和未消耗的饲料也会滞留在水体中,增加了生物降解的负担,改变了沉积物质量,导致水产养殖尾水问题日益严峻,对沿海地区的营养负荷产生了重大影响。养殖尾水中不可溶部分会作为沉积物在排放区附近积累,增大了海底的压力,使海底的氧气需求量增加,从而导致生物缺氧和有毒气体的产生,进而减少了海底生物多样性。同时过度的养殖尾水排放还会导致海洋环境营养水平、浊度和有机物的增加,以及酸碱度、氧气浓度和电导率的降低[2]。

水产养殖废水中主要是有机污染物,同时氮磷含量高,COD值偏高,但有害物质极少,重金属含量也较少,因此与工业污染废水和生活用水相比安全性较高,但是如果不加以处理,对水环境影响也是极大的。同时为防止养殖物生病虫害,养殖过程中还会向水体投放药剂和消毒剂等,在杀灭有害细菌的同时,水体中的有益菌和共生菌种也会被消灭[3],这不利于生态水环境的平衡和其他水生生物的生存。同时,这样做还会使水质恶化,水体透明度降低,水体含氧量降低,导致硝化反应受阻, NH_4^+ 和 NO_2^- 含量升高,尤其当气温升高,水体pH低的时候,会导致硝化作用减弱,从而亚硝酸盐含量升高更明显[4]。

水产养殖尾水中的氨分为 NH_4^+ 和 NH_3 , NH_3 的毒性更为严重。随着pH和温度的提高,尾水中的分子氨含量也会增加[5]。氨会侵袭粘膜特别是鱼的鳃表皮和肠粘膜,再就是神经系统,这会影响到水生动物的肝肾系统引起充血、肌肉增生及诱发肿瘤,严重的导致死亡[6]。亚硝酸盐与胺类反应会导致亚硝酸

胺类物质的产生, 这类物质有致癌的隐患, 同时水体呈酸性时有更利于亚硝酸胺的形成[7]。种种情况表明, 尾水处理在养殖过程中的重要性。这不光是为了养殖户自己, 更是为了可持续性发展, 为了人类自己。

1.3. 养殖尾水处理工艺

水产养殖业与水生态环境息息相关, 中共中央提出“加快生态文明改革”, 提出要“加强水产品产地保护和环境修复, 控制水产养殖, 构建水生动植物保护机制”。为响应中共中央的号召, 尾水处理迫在眉睫。

养殖尾水消耗水资源较大、污泥含量较多。养殖尾水水体中所含有的有机物较多, 水体黏滞系数高, 如果仅靠传统处理工艺, 水体中的营养物质处理起来较为麻烦。并且由于水产养殖户经营分散, 给尾水收集增加了困难。每个尾水点的排放标高很低, 尾水通过自流排出, 不需要动力助流, 给尾水收集管道的建造和尾水蓄水池设计造成巨大压力[8]。同时尾水排放时间分配存在不合理, 集中度极高。种种这些问题增加了尾水处理的技术难度。

常见的尾水处理方法分为三种, 物理处理、化学处理和生物处理。

早期物理处理较为常见。物理处理就是不改变水体性质, 过程中使用物理方法。常见的物理处理方法有: 机械过滤、泡沫分离和膜分离等技术达到清除水体杂质[9]。但这种方式适用于大颗粒杂质的去除, 对于水体中的无机成分以及微粒子去除存在欠缺。

而化学方法是通过改变其尾水的化学性质, 一般来说首先将尾水物理处理, 去除水体中的大颗粒物, 接着再添加相应化学试剂, 例如漂白剂、絮凝剂、氧化剂等, 将尾水中的有害成分去除[10]。但由于这些药品耗价高, 无疑增加了处理过程中的成本。

上述两种方法都存在一定缺陷, 对水体环境造成一定影响, 不能从根本上解决问题。而生物处理法是通过调节尾水中的生物环境, 从而达到绿色循环, 符合环境友好的处理方式。除此之外, 生物处理还有许多物理处理和化学处理没有的优势。首先, 生物处理相较于化学处理来说大多反应比较温和, 不需要添加太过强烈的化学试剂, 也不会有太多有害物质的产生。再者生物处理一般有一定的附加产物, 提供一定的经济价值产物, 可以带来一定的经济效益, 减轻废水处理中的投入, 同时对环境的影响也会更少一点, 是一种健康养殖水调控的方法。

2. 微藻在养殖尾水中的应用

2.1. 微藻处理尾水的原理

微藻是一种单细胞生物, 它们对生存条件的要求不高, 既可以自养也可以混养或者异养。微藻在尾水处理中养殖非常广泛, 因为它品种多样, 繁殖能力强, 光合速率高, 培养条件要求不高。微藻可以利用氮磷等物质, 利用光能合成有机质, 微藻的高氮磷耐受度和它自养能力强的特点, 决定了它在尾水处理中有巨大的作用。水产养殖尾水中的污染物主要是饵料残留物、排泄物、悬浮颗粒等有机物以及氨氮、亚硝酸盐、磷等[11]。有研究指出, 在海水养殖过程中, 饲料中大部分的氮、磷、碳会通过饲料残留、排泄及呼吸等方式流到养殖水体中[12]。

早在二十世纪五十年代, 用微藻处理废水的想法就被提出来了。微藻利用水中溶解的 CO_2 , CO_3 等作为碳源进行光合作用, 同时还可以利用水体中的硝酸盐、亚硝酸盐和铵盐来合成蛋白质和氨基酸等有机物。研究发现, 藻类优先利用水中的氨态氮和还原态氮, 只有在水中氨态氮浓度降低或耗尽的情况才会使用硝酸盐和亚硝酸盐[13]。因此, 微藻可以有效降低尾水中的氨氮和磷的含量, 是十分理想的处理

尾水的生物。

2.2. 微藻的筛选和选用

作为一种非常古老的单细胞生物,微藻的种类有很多。现在应用于废水处理最广泛的微藻是螺旋藻、小球藻、栅藻、颤藻、栅列藻等,尤以小球藻的能应用范围最广[14][15]。当今对利用小球藻进行尾水处理的研究开始成熟。Prakash Bhuyar [16]利用小球藻在罗非鱼养殖尾水中进行培养,12天后细胞密度达到了 1.765×10^6 细胞/毫升。Faiz等[17]用尼罗罗非鱼养殖尾水作培养基来培养斜生栅藻、小球藻和纤维藻,结果显示,氨态氮去除率为86.45%~98.21%,总氮去除率为75.76%~80.85%,总磷去除率约为100%,COD去除率为42%~69%。Alva等人[18]利用栅藻处理水产养殖尾水将各项指标去除率达到:总氮去除率为 $95.5\% \pm 0.4\%$,正磷酸盐去除率为 $94.4\% \pm 0.5\%$,化学需氧量去除率为 $61.4\% \pm 3.9\%$ 。随着现代科技的发展,人们通过不断优化藻种以及培养条件,将处理效果不断优化。

2.2.1. 根据不同的尾水选择适合的藻种

由于不同养殖尾水所含有的元素含量不同,不同的微藻对不同元素浓度耐受度也不同,高耐的微藻往往在处理效果上更占优势,在处理过程中可以减少稀释浓度而达到较好的处理效果,从而减少水资源的浪费和降低处理成本。刘梅等在利用南美白对虾养殖尾水培养微藻时发现,不同微藻对不同元素的去除效果存在差异,利用这一特点许多研究尝试寻找不同养殖尾水最适合的藻种[19]。在尾水处理时尽量优先选择培养起来简单,氮磷去除效率高的藻种。赵秀霞用龟鳖尾水实验不同微藻对废水中氮磷去除效果各不相同,栅藻去除总氮效果最好,最大去除率为93.65%,小球藻去除总磷效果最好,最大去除率为99.46%,螺旋藻去除 NH_4^+-N 效果最好,最大去除率为98.79% [20]。

2.2.2. 处理效果与因素

尾水中的氮磷营养物等对微藻有直接影响。一般来说水体中氮磷含量增加,微藻的吸收率也随之增大。蒯玉琴等研究了尿素、 KNO_3 、 NH_4NO_3 和 NH_4Cl 四种氮源对普通小球藻生长的影响[21]。刘盼等[22]用不同浓度的氨氮、亚硝氮培养基培养斜生栅藻和蛋白核小球藻,结果表明,蛋白核小球藻耐受高浓度氮,生长速率较快,而斜生栅藻在低浓度条件下更易增殖。同样,尾水中氮磷含量的比也十分重要。陈春云等[23],研究了不同氮磷比对小球藻去除对虾养殖尾水中氮磷效率的影响。结果显示,小球藻在尾水中生长状况良好, NH_4^+-N 去除率达80%以上,磷去除率在85%以上,并发现在此情况下,小球藻最适合生长氮磷比为8:1。

微藻对营养物质的去除和光合作用密切相关,过低或过高的光照强度都会影响微藻对水体中营养物质的去除;不同的光照周期也会影响微藻对于尾水中氮磷含量的去除。欧阳峥嵘等[24]研究了光强对不同藻光合作用的影响,结果发现,海洋小球藻其生长需要较强光照。一般来说,光照越强微藻的生物量浓度越高,处理尾水中的氮磷效果越好,时间也越短。但是过高的藻密度会影响藻类自身的生长状态,藻类富集会使光合作用效率下降,从而影响尾水中氮磷的去除。

温度对于微藻生长速率、酶反应动力学以及营养物的溶解度等有重要影响,因而对于污染物分解、转化起着至关重要的作用。吕福荣等[25]研究指出,一定范围内,温度的升高和光强的增加会促进小球藻N、P的吸收。

微藻对水产养殖尾水的处理效果主要取决于微藻的光合作用,并受到氮磷初始浓度、氮磷组合、温度、光强、微藻细胞初始浓度等多种因素的影响。因此要控制好藻类浓度、温度、pH值、尾水中氮磷浓度比甚至光照强度对微藻处理尾水会有很大影响。除此之外,还有一些研究表示,添加一定的离子也可以显著提高微藻处理尾水的能力,例如添加铁离子乙酸根离子等[26]。

3. 微藻处理养殖尾水技术工艺

微藻处理水产养殖尾水有两种方式, 一种单一藻株处理尾水, 另一种是微藻和其他生物形成共生系统。单一藻种的处理在实验室研究已经非常常见了, 在尾水处理研究中也较多。一般采用从尾水水体中分离的本地优势微藻, 这些藻种较藻种库中的藻种具有更强的环境适应能力, 因此减少了当地气候和水体环境的变化对其产生的影响, 同时尾水中优势藻种通常也对污染物去除率和生长速率也更高。

3.1. 菌藻共生系统

由于仅使用微藻只能针对氮磷等无机物起作用, 对水产养殖水体中的粪便、残饵等有机颗粒物难以分解。早在 20 世纪 50 年代, Oswald [27]首次提出了菌藻共生处理废水的概念, 通过微藻和细菌的协同作用, 大大提高了废水中的氮磷和有机物的去除率。Lei 等[28]通过对藻菌共生系统和纯藻系统的比较, 发现菌藻共生系统促进藻类生长, 生物量更高, 尾水中化学需氧量和 N、P 的去除率也高于仅使用纯藻。刘娥等人[29]通过培养蛋白核小球藻及光合细菌, 进行了固定化藻菌去除水产养殖废水中 N、P 的实验, 结果表明, 在适宜温度和光照条件下, 固定化藻菌对 P 和 N 的去除率分别高达 84.00%和 95.00%。

在菌藻共生系统中如何构建藻菌的共生关系至关重要。受菌种、藻种和环境的影响, 藻菌之间可能存在互利共生或者竞争关系。微藻消耗一部分有机物, 实现固碳释放氧气, 促进好氧菌的生长代谢。菌种分解释放的小分子有机物和二氧化碳又可以被微藻利用。同时微藻分泌的胞外糖等可以促进细菌的等生长, 部分细菌也会产生能影响微藻代谢生长的促生长因子。

3.1.1. 菌藻共生系统中菌种的选择

目前, 可用于调控水体生态环境的微生物制剂种类比较多, 常见的降低水体氨氮的菌种有光合细菌、芽孢杆菌、硝化细菌、乳酸菌[30] [31]等。由多类菌种组成的复合微生态制剂能够更好起到降低氮磷、净化水体、改善水环境、减少鱼类病害、提高成活率、维持水生生物多样性的作用, 因而是微生态制剂主要研究方向。张庆[32]等研究了以芽孢杆菌为主制成的复合微生态制剂对罗非鱼生长及养殖水体的影响, 结果表明此类制剂能有效降低水体氮磷含量, 同时对罗非鱼生长有正向作用。

3.1.2. 菌藻共生的培养方式

菌藻共生是研究热点, 培养方式也分为开放式培养和封闭式培养。开放式培养有藻类塘、人工湿地等, 这类培养方式的优点是: 操作较为简单, 不需要占用额外的处理面积。缺点是受环境影响较大, 且在藻类收获过程中有较大难度。从成本造价来说, 开放系统的建设和运营比封闭系统的低。但是, 开放式系统的生产率较低, 主要因为温度不稳定、CO₂ 转移效率低、光传输有限以及其他生物的影响。而封闭系统这类问题较少, 易于控制光照、温度和 CO₂ 浓度[33]。封闭式反应器具有许多开放反应器没有的优势, 包括但不限于控制培养参数, 稳定的培养条件, 易于创造无菌环境, 生物密度大, 占地面积小, 高二氧化碳利用率, 水分蒸发减少, 藻类生物质便于收获等[34]。封闭式反应器适用于快速培养纯种微藻, 或者生产高附加值的经济微藻等, 操作简单, 运行可控性高, 但成本造价也相对较高。

目前国内外应用最多的是微藻 - 细菌氧化池系统。最多的是高速率藻塘(HRAP), 又称高负荷氧化塘, 是好气塘中有机负荷最高的一种。这种系统分解和净化废水中的有机物都更为高效[35]。同时, 由于微藻能将光能、水、二氧化碳和无机盐(如 NH₄⁺)等物质通过光能转化为体内有机化合物, 产生大量氧气, 提高溶氧效率, 缓解水体酸化现象; 同时细菌利用硫化氢变成无毒的硫酸盐, 从而达到净化废水和维持水生态环境。Li 等[36]通过实验, 利用 SRB 和斜生栅藻构建固定化藻菌共生体系、处理含铜废水, 证明了在藻菌共生体系中, 微藻能够为 SRB 提供碳源, 同时去除铜矿废水中的硫酸盐和重金属。微藻和细菌间

除了互利共生的关系外, 细菌对藻类也存在着竞争、抑制等机制。但微藻与细菌所组成的系统, 共同完成了菌藻的生长、污染物的去除和水生态环境的平衡。

3.2. 微藻和其他生物共生

随着废水处理的发展, 藻类和大型水生植物共同作用净化尾水也逐步被使用。还有一些研究在此基础上建立了藻-菌-动物的生态平衡系统。将藻菌体系行优化, 利用微藻、菌种、滤食性贝类三者结合形成“贝-藻-菌”耦合共生体系来处理水产养殖尾水[37][38]。滤食性贝类和有益菌是“贝-藻-菌”共生体系中除微藻之外的两个关键点。滤食性贝类最主要的摄取单胞藻类、细菌、有机物和小型浮游动物。这个过程中, 有益菌可以快速分解水产生物的粪便、残饵及其他有机物, 生成藻类促生长因子, 促进氮的转化; 活菌的代谢产物能够有效抑制单胞菌、夜光弧菌、哈维氏弧菌等有害菌的滋生; 有益菌进入水生动物体内, 在消化道内可抑制腐败菌群, 阻止外来有害菌的侵入, 降低水产动物氨氮的释放。藻菌共生系统能有效调节鱼虾等水产动物的水环境。养殖尾水通过藻菌系统净化水体后, 再进行水生生物过滤, 过量的微藻以及有机悬浮物可被贝类滤食和沉降, 从而整个过程实现了养殖尾水的资源化利用, 这一举措既可以保护水环境生态平衡, 又能够增加经济效益, 一举多得。

3.3. 微藻采收

公式微藻废水处理的成本消耗一大部分都花费在微藻采收阶段。由于反应器中微藻生物量密度低, 使用离心法采收微藻, 对于能量损耗巨大。若在水体中添加絮凝剂或者固定剂来对微藻进行采收, 还需要进行二次处理, 影响微藻的进一步应用。目前, 大多数藻类生物反应器依赖于悬浮法培养, 其培养可分为开放式和封闭式两种系统。无论哪种培养系统, 都需要大量的消耗来收获藻类细胞并减少下游的水[39]。

在营养物质丰富的尾水中, 藻菌的共生关系比较脆弱。为强化藻菌共培养系统的稳定性, 提高采收效率, 建立了一些固定化生物膜的藻菌共培养系统。藻类固定化方法主要有吸附法、包埋法和交联法[34]。选择合适的固定化载体对于藻类的固定化有着重要的作用。适合的固定化载体应满足以下几个条件: 毒性较低, 能维持细胞活力和性质; 稳定性好, 传质性好, 不会细胞泄露; 机械强度高, 不易被分解等。

藻类生物膜是指藻类通过分泌一些黏性物质吸附在载体表面并在营养物质、水、光照等充沛的环境中形成的生物群体。一般生物膜的形成具分为: 首先, 细胞最初通过吸附附着在固体基质上; 接着, 由于细胞产生胞外糖, 发生第二次不可逆黏合。蛋白质、有机分子和阳离子附着在表面, 对藻类的生长和藻类生物膜的形成有益[40]。藻类生物膜反应器的突出优点是便于微藻采收。由于生物膜中的生物种类多样, 比如蓝藻、绿藻、硅藻、细菌和真菌等, 不同的生物膜, 处理性能也有很大差异。

3.4. 微藻处理养殖尾水工艺流程及影响因素

3.4.1. 微藻养殖尾水处理工艺流程

由于水产养殖尾水复杂的成分, 在处理时往往不能采用单一的处理工艺, 对微藻尾水处理来说, 光生物反应器的选择就显得尤为重要了。微藻处理尾水的过程种能够降低水体种的化学需氧量, 但培养时间过长反而会升高水体中的化学需氧量, 因此, 选择合适的光反应器就变成了突破技术瓶颈的关键。

在一般研究中多会采用生物塘等天然半天然的生物反应器, 在保护环境的同时也减少了人力消耗和财力消耗, 多数研究中都是共培养处理废水, 但也有先经过预处理再培养处理的情况。由于养殖尾水性质的不同, 在浓度过高时需要先进行稀释等步骤。为了减少废水中污染物对藻类带来的负面影响, 也为了方便藻类采收, 还会使用藻类生物膜。生物膜中的生物包括蓝藻、绿藻、硅藻、细菌和真菌等, 不同

的生物膜, 处理性能也有很大差异。

3.4.2. 处理工艺中的影响因素

由于尾水处理过程中大多在生物塘等开放式环境或者半开放式环境中, 因此在处理过程中环境的因素对尾水处理效果也会造成一定程度的影响。由于废水的性质的特殊性, 其中的营养元素未必适合藻类的生长。氮磷比也可能存在不合理性。废水中某些性质过高也可能抑制藻类的生长, 因此很多情况下需要将尾水进行稀释。尾水中若是缺乏某些微量元素也不利于微藻的生长, 因此在处理过程中可能需要进行一定的补充。

有些尾水中会含有较多重金属, 重金属在一定程度上可以吸附到微藻表面或者富集到微藻体内。因此, 需要根据富集的重金属具体情况, 选择合适的途径处理微藻, 并需要注意这些重金属的回收。

4. 应用前景及存在问题

论文随着社会经济的发展和人民生活水平的提高, 尾水排放标准中对氮、磷浓度的控制会越来越严格, 这就导致水产养殖尾水需要对氮、磷作进一步的处理。由于尾水中有丰富的有机化合物作为营养源, 因此, 制定出一套环境良好的切实可行性计划, 培养适用于处理尾水的藻种, 投放到水产养殖的水体中, 在净化水体的同时改良环境, 拓展藻类这种经济类生物生长繁殖范围, 从而取得更大的社会效益。菌藻共生近年国内外发展很快, 水体生态-生物修复技术顺应自然规律修复生态环境, 增江自然界自身的自净能力去治理废水, 这是符合人类与自然和谐发展的修复技术。

但该应用具体实施起来还面临着许多问题: 如何将藻类进行投放, 如何进行微藻和各生物的搭配以求得最大净化效果, 水体净化后, 如何高效的对藻类进行回收以免引起藻类再次污染水体, 回收的藻类如何最大化处理等。

微藻尾水处理是有潜力的绿色技术, 需要针对不同废水的处理需求, 选择合适的藻种(及菌种)和工艺, 进一步提高废水处理效率。目前, 多数研究还停留在实验室阶段, 需要更多中试规模以上的实验来突破技术瓶颈; 同时需要从处理效率、能量需求和经济性效益等多方面进行考察, 从而推动微藻尾水处理的更广泛应用。

5. 结论

微藻作为一种利用光合作用吸收碳, 同时利用氮磷有机物的生物, 是新能源的开发有重要意义的经济生物。同时, 微藻可以作为动物饲料, 在一定程度上也可以减少尾水处理所带来的经济压力。但目前研究大多数还在实验室阶段, 如何将实验实施到现实生产发展中去, 成为我们需要攻克的难题。

参考文献

- [1] 纪东平, 赵乃乾, 吴一桂, 等. 浅析防城港市海水养殖尾水处理模式及其在水产养殖业绿色发展中的作用[J]. 中国渔业质量与标准, 2020, 10(3): 69-74.
- [2] 王光辉. 海水养殖污染控制对策研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [3] 张进凤, 李瑞伟, 刘杰凤, 等. 淡水养殖水体氨氮积累危害及生物控制的研究现状[J]. 河北渔业, 2009(6): 41-44.
- [4] 岳冬冬, 吴反修, 方海, 等. 中国海水养殖业绿色发展评价研究[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(6): 1-12.
- [5] Lefebvre, S., Hussenot, J. and Brossard, N. (1996) Water Treatment of Land-Based Fish Farm Effluents by Outdoor Culture of Marine Diatoms. *Journal of Applied Phycology*, **8**, 193-200. <https://doi.org/10.1007/BF02184971>
- [6] Paolacci, S., Stejskal, V. and Jansen, M.A.K. (2021) Estimation of the Potential of *Lemna minor* for Effluent Remediation in Integrated Multi-Trophic Aquaculture Using Newly Developed Synthetic Aquaculture Wastewater. *Aquaculture International*, **29**, 2101-2118. <https://doi.org/10.1007/s10499-021-00736-z>
- [7] 傅红梅, 曾维农, 付新梅. 水产养殖废水污染危害及其处理技术研究[J]. 农业与技术, 2020, 40(1): 126-127.

- [8] Lau, P.S., Tam, N.F.Y. and Wong, Y.S. (1995) Effect of Algal Density on Nutrient Removal from Primary Settled Wastewater. *Environmental Pollution*, **89**, 59-66. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(94\)00044-E](https://doi.org/10.1016/0269-7491(94)00044-E)
- [9] 杨明举, 吴丹, 王伟, 闵文武. 水产养殖尾水处理研究进展[J]. 农技服务, 2020, 37(9): 114-116.
- [10] Takaya, Y., Kadokura, M., Kato, T. and Tokoro, C. (2021) Removal Mechanisms of Arsenite by Coprecipitation with Ferrihydrite. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **9**, Article ID: 105819. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105819>
- [11] 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.
- [12] Wu, R.S.S. (1995) The Environmental Impact of Marine Fish Culture: Towards a Sustainable Future. *Marine Pollution Bulletin*, **31**, 159-166. [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(95\)00100-2](https://doi.org/10.1016/0025-326X(95)00100-2)
- [13] Przytocka-Jusiak, M., Duszota, M., Matusiak, K. and Mycielski, R. (1984) Intensive Culture of *Chlorella vulgaris*/AA as the Second Stage of Biological Purification of Nitrogen Industry Wastewaters. *Water Research*, **18**, 1-7. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(84\)90040-X](https://doi.org/10.1016/0043-1354(84)90040-X)
- [14] 马红芳, 李鑫, 胡洪营, 等. 栅藻 LX1 在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性[J]. 环境科学, 2012, 33(6): 1891-1896.
- [15] 李攀荣, 邹长伟, 王金保, 黄学平. 微藻在废水处理中的应用研究[J]. 工业水处理, 2016, 36(5): 5-9.
- [16] Bhuyar, P., Trejo, M., Dussadee, N., et al. (2021) Microalgae Cultivation in Wastewater Effluent from Tilapia Culture Pond for Enhanced Bioethanol Production. *Water Science and Technology*, **84**, 2686-2694. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.194>
- [17] Ansari, F.A., Singh, P., Guldhe, A. and Bux, F. (2017) Microalgal Cultivation Using Aquaculture Wastewater: Integrated Biomass Generation and Nutrient Remediation. *Algal Research*, **21**, 169-177. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.11.015>
- [18] de Alva, M.S., Luna-Pabello, V.M., Cadena, E. and Ortíz, E. (2013) Green Microalga *Scenedesmus acutus* Grown on Municipal Wastewater to Couple Nutrient Removal with Lipid Accumulation for Biodiesel Production. *Bioresource Technology*, **146**, 744-748. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.07.061>
- [19] 刘梅, 原居林, 何海生, 等. 微藻在南美白对虾养殖废水中的生长及净化效果[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(4): 866-872.
- [20] 赵秀侠, 杨坤, 方婷, 等. 3 种微藻在龟鳖养殖废水中的生长与脱氮除磷特性[J]. 水资源保护, 2018, 34(1): 83-87+94.
- [21] 蕙玉琴, 崇梅, 朱巧巧, 等. 不同氮源对混养小球藻生长和部分生化组成的影响[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2015, 51(1): 82-86.
- [22] 刘盼, 贾成霞, 杨慕, 等. 2 种微藻对养殖水体中氨氮和亚硝态氮的净化作用[J]. 水产科学, 2018, 37(3): 389-393.
- [23] 陈春云, 庄源益, 方圣琼. 小球藻对养殖废水中 N、P 的去除研究[J]. 海洋环境科学, 2009, 28(1): 9-11.
- [24] 欧阳峥嵘, 温小斌, 耿亚红, 等. 光照强度、温度、pH、盐度对小球藻(*Chlorella*)光合作用的影响[J]. 武汉植物学研究, 2010, 28(1): 49-55.
- [25] 吕福荣, 杨海波, 李英敏. 小球藻净化污水中氮磷能力的研究[J]. 生物学杂志, 2003, 20(2): 25-26+34.
- [26] Liu, J.-Z., Yin, J.-Y., Han, H.-F., et al. (2021) Enhancements of Lipid Productivity and Phosphorus Utilization Efficiency of *Chlorella pyrenoidosa* by Iron and Acetate Supplements in Actual Municipal Wastewater. *Renewable Energy*, **170**, 927-935. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.148>
- [27] Oswald, W.J., Gotaas, H.B., Golueke, C.G., et al. (1957) Algae in Waste Treatment [with Discussion]. *Sewage and Industrial Wastes*, **29**, 437-457.
- [28] Lei, Y.-J., Tian, Y., Zhang, J., et al. (2018) Microalgae Cultivation and Nutrients Removal from Sewage Sludge after Ozonizing in Algal-Bacteria System. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **165**, 107-114. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.08.096>
- [29] 刘娥. 藻菌固定及其净化水产养殖废水的效果研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海海洋大学, 2017.
- [30] 巫小丹, 阮榕生, 王辉, 等. 菌藻共生系统处理废水研究现状及发展前景[J]. 环境工程, 2014, 32(3): 34-37+69.
- [31] 李小霞, 解庆林. 菌藻共生系统处理污水的研究及应用前景[J]. 广西民族学院学报(自然科学版), 2006, 12(3): 112-114+117.
- [32] 林东年, 叶宁, 周志锋. 芽孢杆菌对罗非鱼土池水质和浮游生物的影响[J]. 茂名学院学报, 2006, 16(4): 18-21+26.
- [33] Arora, N., Patel, A., Sartaj, K., Pruthi, P.A. and Pruthi, V. (2016) Bioremediation of Domestic and Industrial Waste-

- waters Integrated with Enhanced Biodiesel Production Using Novel Oleaginous Microalgae. *Environmental Science and Pollution Research*, **23**, 20997-21007. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7320-y>
- [34] Michelon, W., da Silva, M.L.B., Matthiensen, A., *et al.* (2021) Microalgae Produced during Phycoremediation of Swine Wastewater Contains Effective Bacteriostatic Compounds against Antibiotic-Resistant Bacteria. *Chemosphere*, **283**, Article ID: 131268. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131268>
- [35] Mayo, A.W. (2020) Effect of Pre-Treatment of Wastewater in Hrap on Nitrogen Removal in Subsurface Flow Gravel Bed Constructed Wetland. *Physics and Chemistry of the Earth*, **117**, Article ID: 102868. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102868>
- [36] Li, R., Pan, J., Yan, M., *et al.* (2020) Treatment of Fracturing Wastewater Using Microalgae-Bacteria Consortium. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **98**, 484-490. <https://doi.org/10.1002/cjce.23631>
- [37] 孙凡蛟, 宋凤芝, 范宇成. 菌藻共生系统处理污水的影响因素及其研究进展[J]. 农村实用技术, 2019(8): 90-92.
- [38] Sun, J. and Simsek, H. (2017) Bioavailability of Wastewater Derived Dissolved Organic Nitrogen to Green Microalgae *Selenastrum capricornutum*, *Chlamydomonas reinhardtii*, and *Chlorella vulgaris* with/without Presence of Bacteria. *Journal of Environmental Sciences*, **57**, 346-355. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.12.017>
- [39] Kurniawan, S.B., Abdullah, S.R.S., Othman, A.R., *et al.* (2021) Isolation and Characterisation of Biofloculant-Producing Bacteria from Aquaculture Effluent and Its Performance in Treating High Turbid Water. *Journal of Water Process Engineering*, **42**, Article ID: 102194. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102194>
- [40] Liu, Y., Guo, L., Gao, P., *et al.* (2021) Thermophilic Bacteria Combined with Alkyl Polyglucose Pretreated Mariculture Solid Wastes Using as Denitrification Carbon Source for Marine Recirculating Aquaculture Wastewater Treatment. *Science of the Total Environment*, **792**, Article ID: 148447. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148447>