

# Research Progress of Microalgae in Treatment of Nitrogen and Phosphorus in Tail Water from Aquaculture

Xiaojuan Hu<sup>1,2</sup>, Yucheng Cao<sup>1,2</sup>, Min Lu<sup>1,3</sup>, Yu Xu<sup>1,2</sup>, Haochang Su<sup>1,2</sup>, Wujie Xu<sup>1,2</sup>, Jianshe Zhang<sup>3</sup>, Guoliang Wen<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment Guangdong Province, Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation and Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou Guangdong

<sup>2</sup>Shenzhen Base of South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shenzhen Guangdong

<sup>3</sup>National Engineering Research Center of Marine Facilities Aquaculture, Zhejiang Ocean University, Zhoushan Zhejiang

Email: xinr129@163.com, \*guowen66@163.com

Received: Nov. 19<sup>th</sup>, 2019; accepted: Dec. 2<sup>nd</sup>, 2019; published: Dec. 9<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

Microalgae widely exist in various water environments. As a primary producer, microalgae play an important role in the material cycle and energy flow in aquatic ecosystems. In this paper, the feasibility of microalgae degrading nitrogen and phosphorus nutrients in aquaculture tail water was discussed by analyzing the function, type and mechanism of microalgae degrading nitrogen and phosphorus.

## Keywords

Microalgae, Tail Water from Aquaculture, Nitrogen, Phosphorus, Treatment

---

## 微藻处理水产养殖尾水氮磷的研究进展

胡晓娟<sup>1,2</sup>, 曹煜成<sup>1,2</sup>, 鲁敏<sup>1,3</sup>, 徐煜<sup>1,2</sup>, 苏浩昌<sup>1,2</sup>, 徐武杰<sup>1,2</sup>, 张建设<sup>3</sup>, 文国樑<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业农村部南海渔业资源开发利用重点实验室, 广东省渔业生态环境重点实验室, 广东 广州

<sup>2</sup>中国水产科学研究院南海水产研究所深圳试验基地, 广东 深圳

<sup>3</sup>浙江海洋大学, 国家海洋设施养殖工程技术研究中心, 浙江 舟山

\*通讯作者。

文章引用: 胡晓娟, 曹煜成, 鲁敏, 徐煜, 苏浩昌, 徐武杰, 张建设, 文国樑. 微藻处理水产养殖尾水氮磷的研究进展[J]. 水产研究, 2019, 6(4): 172-178. DOI: 10.12677/ojfr.2019.64023

Email: xinr129@163.com, \*guowen66@163.com

收稿日期: 2019年11月19日; 录用日期: 2019年12月2日; 发布日期: 2019年12月9日

## 摘要

微藻广泛存在于各种水体环境中, 作为初级生产者, 在水生生态系统中是物质循环与能量流动的重要组成部分。文章结合微藻的功能、微藻类型、微藻处理氮磷机理等相关研究进展, 探讨利用微藻处理水产养殖尾水中氮磷营养盐的可行性。

## 关键词

微藻, 养殖尾水, 氮, 磷, 处理

Copyright © 2019 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

2018年我国水产养殖总产量近5000万吨, 占水产品总产量的77%以上, 是世界上唯一养殖水产品总量超过捕捞总量的渔业国家。在水产养殖过程中, 投入的饵料不能完全被水产动物吸收利用[1], 养殖系统中累积的残饵、排泄物及水生动物尸体, 可能会产生具有较高浓度污染物的养殖尾水, 其主要污染物有氨氮、亚硝氮、有机物、磷及污损生物[2] [3]。其中, 氨氮、亚硝氮等有害氮素已成为影响水产养殖环境的主要胁迫因子[4], 如过高的氨氮、亚硝氮、硫化物将会影响对虾一系列生理生化指标的变化, 使其抵抗力降低而易引发疾病[5] [6] [7]。养殖尾水若未经处理直接排放进入附近水域, 可能导致附近水域的富营养化, 引发水华、赤潮等灾害, 影响周边的生态环境, 制约水产养殖业可持续发展[8] [9] [10]。在当前加快推进水产养殖业绿色发展的背景下, 推进养殖尾水治理成为改善养殖环境的重要抓手[11]。

目前, 养殖尾水的传统处理方法包括物理处理法、化学处理法、生物膜法、耐盐植物处理法、人工湿地处理法等, 但这些方法普遍存在对养殖尾水处理效率偏低、工程造价高、设施运行费用贵等问题。对于养殖户特别是小型水产养殖户而言, 各种尾水处理设施的应用在很大的程度上受到了限制, 应用率不高, 进而出现了养殖尾水处理不当, 甚至是不处理直接排放的现象, 严重影响了生态环境。近年来, 国内外有很多研究发现藻类在养殖尾水处理应用上具有很大潜力, 受到众多研究者的广泛关注。微藻作为养殖生态系统的生产者, 对维持健康稳定的生态系统, 促进环境中物质循环和能量流动具有举足轻重的作用[12]。利用微藻处理养殖尾水不仅符合绿色可持续的生态理念, 而且可以实现安全可靠的原位处理和水资源的循环利用, 因此, 具有重要的生态意义和良好的应用前景。

## 2. 微藻的功能及类型

微藻(microalgae)是一类个体微小, 具叶绿素, 营自养生活, 没有真正的根、茎、叶分化, 以单细胞的孢子或合子进行繁殖的低等植物。微藻广泛存在于各种水体中[13] [14], 甚至是潮湿的陆地表面也有其踪迹。微藻作为初级生产者, 参与了生态系统中的众多物质循环, 是物质循环与能量流动的重要组成部分。

分。我国藻类学家主张将藻类分为 11 个门[15]，即蓝藻门、绿藻门、红藻门、黄藻门、金藻门、甲藻门、轮藻门、裸藻门、隐藻门、硅藻门和褐藻门。常用于尾水处理的微藻有蓝藻门的螺旋藻(*Spirulina*)；绿藻门的普通小球藻(*Chlorella*)，栅藻(*Scenedesmus*)、蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)、衣藻(*Chlamydomonas*)；硅藻门的角毛藻(*Chaetoceros*)、舟形藻(*Navicula*)等，其中小球藻和栅藻在尾水处理中的应用比较多[16]-[21]。

### 3. 微藻处理水产养殖尾水氮磷的机理

早在 20 世纪，Geider 等[22]测定了海洋浮游植物在最大生长率条件下所需大量营养离子间的比率为 106C:16N:1P。这个结论对淡水浮游植物同样适用。微藻对氮的去除主要依靠细胞体的同化作用。微藻细胞内生命所需的氨基酸、核酸、叶绿素以及其他含氮有机化合物需要从外界吸收。藻类吸收氮源分为有机氮源和无机氮源，两种类型的吸收存在明显差异[23]。有些藻类能吸收有机氮，如尿素、氨基酸。无机氮源包括氨氮( $\text{NH}_4^+$ )和硝酸盐( $\text{NO}_3^-$ )，通过藻类细胞膜吸收，大多数藻类都能吸收  $\text{NH}_4^+$  或  $\text{NH}_3$ ，因其能在氨基酸生物合成中直接被利用[24]。

水体中总磷(Total Phosphorus, TP)的大多数是以活的或死的颗粒形式存在的[24]。可溶性的磷有两种，一种是无机磷(Dissolved Inorganic Phosphorus, DIP)，另一种是有机磷(Dissolved Organic Phosphorus, DOP)。大多数可溶性磷主要是  $\text{PO}_4^{3-}$ ，只有少量的  $\text{HPO}_4^{2-}$  和  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ 。微藻只能利用可溶性的无机磷酸盐，称之为可溶性反应的磷酸盐(Soluble Reactive Phosphate, SRP)。当提供的 SRP 消耗殆尽时，微藻就能够将结合在有机物中的磷酸盐游离出来。当 SRP 的提供时多时少时，许多藻类能吸收过量的磷酸盐并以多磷酸盐体(polyphosphate bodies)的形式储存在细胞内，以备缺少时之需，这种现象被称为“奢侈消费”(luxury consumption)，是对付磷酸盐缺乏的一种重要的有效机制[24]。磷元素在细胞进行能量传递和核酸合成等过程中起到重要的作用。微藻是使磷通过磷酸化作用进入能量传递物质 ATP 中，从而对水中的磷进行同化去除。微藻细胞内的磷酸化过程有底物水平磷酸化、氧化磷酸化和光合磷酸化 3 种形式。微藻通过此方式利用的磷元素的形态主要包括  $\text{PO}_4^{3-}$  和  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  [25]。有些学者研究表明，正磷酸盐也可以被微藻有效的去除，并且固定化使其利用效果更佳[25] [26] [27] [28] [29]。

### 4. 微藻在水产养殖尾水的处理体系

微藻在养殖尾水的处理体系分为两种：悬浮培养体系和固定化培养体系。两种培养体系都要控制好光照、温度、pH 值、二氧化碳等参数[30]。悬浮培养体系的研究和利用比较广泛、尾水处理量大、适用于大规模操作，但存在处理尾水之前需要收获微藻、微藻与尾水分离困难等问题。而固定化培养体系能有效防止藻细胞流失，维持系统稳定性，还可增强细胞耐受性，有更高的抗性来抵御恶劣的环境条件，解决了藻水分离困难的问题，但存在与共聚物基质的固定化成本高、需要很大的表面积去形成生物膜、受光源的限制、仅适用于小型和中试规模操作等缺陷。

#### 4.1. 微藻的悬浮培养体系

微藻悬浮体系通常有两种类型：一种是悬浮态微藻通过在一定反应容器中与尾水充分接触，从而去除尾水中的污染物质。悬浮培养体系是有利于微藻生长的最常用形式。另一种是悬浮藻与菌的共生体系，又称为活性藻反应系统，其是利用微藻和细菌或者真菌之间的种间互利共生关系来处理尾水的一种新型生态系统。去除效果的好坏取决于藻类的光合作用和细菌的氧化代谢作用，并受到水温、光强、光暗循环、进水负荷、停留时间以及生物浓度等一系列基本参数的影响。活性藻反应系统首先人工培养藻一菌，形成混合絮凝物，然后利用需净化处理的养殖尾水对其进行继续培养。藻一菌絮凝团以好气性细菌和各

种活性微藻为主。Tiron 等[31]利用活化的藻类颗粒在生物反应器中处理废水, 实验结果发现可以去除废水中大部分的氮磷以及约 86%~98% 的 COD。况琪军等[32]利用活性藻反应系统对合成污水进行处理, 得出在  $26^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  条件下, 在停留时间为 24 h 时, 总氮、总磷、化学需氧量和生化需氧量的平均去除率分别达到 77.62%、33.23%、90.89% 和 95.77%。

## 4.2. 微藻的固定化培养体系

微藻固定化最早开始于 20 世纪 80 年代, 是以细菌固定化技术为基础而发展的一种生物技术[33]。利用物理或化学方法将游离的藻细胞固定于某个区域, 进而可以保持细胞的活性, 提高利用率。微藻固定化方法主要分为以吸附、包埋和交联三种传统固定化方法和以双层系统(PBR)为代表的新型固定化方法两大类。不同的微藻或者处理的尾水成分不同, 对固定化方法以及载体材料的适用性也不同, 就目前应用来说, 包埋法因固定化强度较高, 对微藻伤害较小, 应用最为广泛[34]。李陈清等[35]采用海藻酸钠固定化包埋技术开展了四尾藻固定化培养, 并对 TN 约 0.8 mg/L, TP 约 0.3 mg/L 的石斑鱼养殖尾水进行处理, 试验第 3 天,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除率 98.87%、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$  去除率 98.33% 和  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  去除率 83.70%。台湾学者 Chen 等[36]将四尾栅藻固定在海藻酸盐钙胶珠内用于鱼类养殖水质的控制, 在有藻类胶珠的水体中氨的浓度明显降低。郑耀通等[37]以聚乙烯醇(PVA)为主要包埋骨架, 添加  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaCO}_3$  等载体, 固定菌藻系统处理氨氮浓度为 149.6 mg/L 的人工合成污水, 氨氮去除率达 96.8%。王翠红等[38]将分离培养所得的对酚具有高效降解作用的小球藻(*Chlorella vulgaris*)细胞、紫色非硫光合细菌混合菌株(PBS)混合体系用海藻酸钠包埋后, 在好氧条件下处理含酚废水, 可明显地提高除酚效率, 缩短废水停留时间, 其共生体系对温度及 pH 适应范围广, 对焦化厂工业废水 24 h 去除率为 95% 以上。

## 5. 微藻在降解养殖尾水氮磷的应用

微藻在去除养殖尾水中的氮磷等元素及修复污染环境方面有显著作用, 不仅效率高而且成本低。刘梅等[39]通过室内微藻培养试验, 研究了 8 株微藻在 TN 为 6.8 mg/L、TP 为 2.8 mg/L 的南美白对虾养殖尾水中的生长性能及不同时间内其对氮磷的去除效果。实验结果表明, 8 株藻均能在南美白对虾养殖尾水中生长, 其中铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)、衣藻(*Chlamydomonas*)和蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidesa*)生长较好, 8 种微藻对 TN、TP 的去除效果差异较大, 其中铜绿微囊藻、衣藻和蛋白核小球藻对 TN 去除效果较好, 去除率分别达到 74%、69% 和 60%; 铜绿微囊藻和衣藻均具有较好的 TP 去除效果, 去除率达 60% 以上, 其次为蛋白核小球藻。不同藻类对不同形态氮的吸收存在较大差异, 铜绿微囊藻和衣藻具有较好的硝态氮去除效果, 去除率达到 70% 左右; 衣藻对氨氮具有较快且持久的去除率, 去除率高达 100%, 铜绿微囊藻和蛋白核小球藻稍慢, 而斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)、针杆藻(*Synedra* sp.) 和舟形藻(*Navicula graciloides*)最慢, 在培养 16 d 后, 去除率均达到 90% 以上; 隐藻(*Cryptomonas obovata*)和蛋白核小球藻对亚硝态氮具有较好的去除效果, 培养至第 8 天时即达到 80% 的去除率, 且隐藻去除效果较持久。刘林林等[29]在实验室条件下调查了 15 株淡水微藻在猪场养殖污水中的生长情况及各微藻对污水中氮磷的去除效果。结果表明: 在处理总氮为 35.5 mg/L、总磷 2 mg/L 的猪场养殖尾水时, 15 株微藻均可有效降低猪场养殖污水中的氮磷含量, 但不同藻株对污水中不同形态氮的去除效果差异明显。多棘栅藻(*Scenedesmus spinosus*) SHOUF7、多棘栅藻 SHOU-F8 和四尾栅藻(*S. quadricanda*) SHOU-F35 去除总氮效果最佳。多棘栅藻 SHOU-F7、多棘栅藻 SHOU-F8 和斜生栅藻(*S. obliquus*) SHOU-F21 去除硝态氮效果最好, 最大去除率可达到 100%。椭圆小球藻(*Chlorella ellipsoidea*) SHOU-F3、单生卵囊藻(*Oocystis solitaria*) SHOU-F5 和四球藻(*Tetrachlorella alternans*) SHOU-F24 达到 97.82% 的氨氮去除率。各株微藻对污水中总磷的去除率均很高, 可达 91.00% 以上。此外, 刘林林等[40]还利用狭形小桩藻净化总氮约为

30 mg/L、总磷约为 2 mg/L 的猪沼液,发现高压灭菌组微藻对沼液中氨氮去除率能达到 96.88%,总磷去除率能达到 95.88%。姜红鹰等[41]在设置 6 种不同氮、磷含量梯度(① TN: 2.85 mg/L, TP: 0.30 mg/L, ② TN: 4.93 mg/L, TP: 1.58 mg/L, ③ TN: 12.25 mg/L, TP: 3.90 mg/L, ④ TN: 24.50 mg/L, TP: 7.90 mg/L, ⑤ TN: 49.00 mg/L, TP: 15.80 mg/L, ⑥ TN: 98.00 mg/L, TP: 31.80 mg/L)的养殖污水环境,分析小球藻对氮、磷的去除效果。结果表明,小球藻在 3~6 天后对模拟污水的氨氮去除率可达 80%,对磷酸盐的最高去除率接近 100%。

## 6. 微藻在降解水产养殖尾水氮磷的可行性

微藻作为养殖生态系统的生产者,对维持健康稳定的生态系统,促进环境中物质循环和能量流动具有举足轻重的作用[12]。研究表明,养殖水体中各理化因子对藻类生长影响的次序依次为磷酸盐、氨氮、铁离子、亚硝氮、酸碱度、硝氮、温度、锰离子、溶解氧[42],微藻通过吸收养殖水体中的氮磷,转化为自身生长所需物质进行繁殖,这为利用微藻净化养殖尾水中氮磷提供了条件。微藻通过光合作用产生氧气,增加了水体中的溶解氧,从而更充分地氧化分解水中的耗氧性有机质,促进池塘环境的物质循环,优化养殖水体环境,降低集约化养殖的自源性污染,进而减轻其对周边水源环境的负面影响[43][44]。多项研究[45][46]表明:微藻处理技术适用于各类养殖废水的处理。微藻不但能去除总氮、总磷,同时,通过不同的后续处理回收藻体,还可获得油脂、蛋白质等资源,是一种兼具除污并资源化的废水处理新技术[47][48][49][50]。综上所述,利用微藻净化水产养殖尾水,降解吸收其中的氮磷营养盐具备可行性且应用前景良好。

## 资助项目

现代农业产业技术体系建设专项虾蟹体系岗位科学家经费(编号: CARS-48);广东省现代农业产业技术体系创新团队建设专项资金(编号: 2019KJ149);广东省促进经济发展专项资金(现代渔业发展用途)项目(编号: 粤农 2019B12)。

## 参考文献

- [1] 李金亮,陈雪芬,赖秋明,等.凡纳滨对虾高位池养殖氮、磷收支研究及养殖效果分析[J].南方水产,2010,6(5): 13-20.
- [2] 徐升.水产养殖废水生物处理技术介绍[J].中国环保产业,2011(10): 56-58.
- [3] 舒廷飞,罗琳,温琰茂.海水养殖对近岸生态环境的影响[J].海洋环境科学,2002(2): 74-79.
- [4] Tovar, A., Moreno, C., Manuel-Vez, M.P., et al. (2000) Environmental Impacts of Intensive Aquaculture in Marine Waters. *Water Research*, 34, 334-342. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00102-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00102-5)
- [5] 姜令绪,潘鲁青,肖国强.氨氮对凡纳对虾免疫指标的影响[J].中国水产科学,2004(6): 537-541.
- [6] 邱德全,杨士平,邱明生.氨氮促使携带白斑综合症病毒凡纳滨对虾发病及其血细胞、酚氧化酶和过氧化氢酶变化[J].渔业现代化,2007(1): 36-39.
- [7] 王克行,马牲,李晓甫.试论对虾白斑病暴发的环境因子及防病措施[J].中国水产,1998(12): 34-35.
- [8] 方金龙,王元,房文红,等.氨氮胁迫下白斑综合症病毒对凡纳滨对虾的致病性[J].南方水产科学,2017,13(4): 52-58.
- [9] 刘健,侯冬伟,曾燊正,等.凡纳滨对虾封闭式养殖池塘水体氨氮、亚硝氮、硝氮变化规律及消减措施[J].中山大学学报(自然科学版),2017,56(6): 116-122.
- [10] 陈佳毅,孙龙生,吴骏,等.氨氮和亚硝氮对不同发育阶段罗氏沼虾幼体的急性毒性研究[J].水产养殖,2015,36(10): 1-6.
- [11] 农业农村部,生态环境部,自然资源部,国家发展和改革委员会,财政部,科学技术部,工业和信息化部,商务部,国家市场监督管理总局,中国银行保险监督管理委员会.关于加快推进水产养殖业绿色发展的若干意见(农

- 渔发[2019] 1 号). 2019. [http://www.moa.gov.cn/govpublic/YYJ/201902/t20190215\\_6171447.htm](http://www.moa.gov.cn/govpublic/YYJ/201902/t20190215_6171447.htm)
- [12] 彭聪聪, 李卓佳, 曹煜成, 等. 虾池浮游微藻与养殖水环境调控的研究概况[J]. 南方水产, 2010, 6(5): 74-80.
- [13] Zhu, J., Rong, J. and Zong, B. (2013) Factors in Mass Cultivation of Microalgae for Biodiesel. *Chinese Journal of Catalysis*, **34**, 80-100. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(11\)60497-X](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(11)60497-X)
- [14] Chen, G., Liu, Z. and Yun, Q. (2015) Enhancing the Productivity of Microalgae Cultivated in Wastewater toward Bio-fuel Production: A Critical Review. *Applied Energy*, **137**, 282-291. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.032>
- [15] 李攀荣, 邹长伟, 万金保, 等. 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] 姚旭东. 生活污水培养小球藻和栅藻及其生物质分析[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东师范大学, 2017.
- [17] 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.
- [18] 杨坤, 卢文轩. 小球藻对养殖水体水质净化作用的研究[J]. 环境与发展, 2014, 26(7): 62-64, 67.
- [19] Zhou, L.N. (2013) Water Purification Research on Cultivation of *Chlorella vulgaris* with Industrial Wastewater. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, **41**, 13325-13329.
- [20] 聂呈荣, 曾琪, 肖燕, 等. 两种微藻与水蚤的两种组合对污水的净化效果研究[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2018, 36(5): 15-22.
- [21] 程海翔. 一株栅藻的分离培养及其应用于养猪废水处理的潜力研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [22] Geider, R. and La Roche, J. (2002) Redfield Revisited: Variability of C:N:P in Marine Microalgae and Its Biochemical Basis. *European Journal of Phycology*, **37**, 1-17. <https://doi.org/10.1017/S0967026201003456>
- [23] Barsanti, L. and Gualtieri, P. (2014) *Algae: Anatomy, Biochemistry, and Biotechnology*. CRC Press, Boca Raton.
- [24] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [25] 邢丽贞. 固定化藻类去除污水中氮磷及其机理的研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2005.
- [26] Ji, F., Liu, Y., Hao, R., et al. (2014) Biomass Production and Nutrients Removal by a New Microalgae Strain *Desmodesmus* sp. in Anaerobic Digestion Wastewater. *Bioresource Technology*, **161**, 200-207. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.034>
- [27] Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A.A. and Ibraheem, I.B.M. (2012) Microalgae and Wastewater Treatment. *Saudi Journal of Biological Sciences*, **19**, 257-275. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.04.005>
- [28] De-Bashan, L.E. and Bashan, Y. (2010) Immobilized Microalgae for Removing Pollutants: Review of Practical Aspects. *Bioresource Technology*, **101**, 1611-1627. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.09.043>
- [29] 刘林林, 黄旭雄, 危立坤, 等. 15 株微藻对猪场养殖污水中氮磷的净化及其细胞营养分析[J]. 环境科学学报, 2014, 34(8): 1986-1994.
- [30] Moi, P.S. (2010) Handbook of Microalgal Culture. Biotechnology and Applied Phycology. *Journal of Phycology*, **40**, 1001-1002. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2004.40502.x>
- [31] Tiron, O., Bumbac, C., Patroescu, I.V., et al. (2015) Granular Activated Algae for Wastewater Treatment. *Water Science & Technology*, **71**, 832-839. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.010>
- [32] 况琪军, 谭渝云. 活性藻系统对氮、磷及有机物的去除研究[J]. 中国环境科学, 2001, 21(3): 212-216.
- [33] 范志翔, 沈英, 徐新苗. 固定化技术在微生物与微藻培养中运用与进展[J]. 机电技术, 2015(1): 130-132.
- [34] 于光辉, 翟晓峰, 张英, 等. 微藻固定化技术在环境监测和污水处理中的应用[J]. 南方农业, 2014(7X): 151-152.
- [35] 李陈清, 王珺, 陈国华, 等. 固定化四片藻的制备及其去除养殖废水中氮磷的效果[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(5): 81-84, 104.
- [36] Chen, Y.C. (2001) Immobilized Microalga *Scenedesmus quadricauda* (Chlorophyta, Chlorococcales) for Long-Term Storage and for Application for Water Quality Control in Fish Culture. *Aquaculture*, **195**, 71-80. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(00\)00540-8](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(00)00540-8)
- [37] 郑耀通, 吴小平, 高树芳. 固定化菌藻系统去除氨氮影响[J]. 江西农业大学学报, 2003(1): 99-102.
- [38] 王翠红, 徐建红, 辛晓芸, 等. 固定化藻菌系统处理含酚废水[J]. 水处理技术, 2000, 26(4): 236-239.
- [39] 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.
- [40] 刘林林, 黄旭雄, 危立坤, 等. 利用狭形小桩藻净化猪场养殖污水的研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(11): 2765-2772.
- [41] 姜红鹰, 周玉玲, 张桂敏, 等. 普通小球藻对养殖污水脱氮除磷的效果研究[J]. 生物资源, 2017, 39(3): 204-210.

- 
- [42] 米振琴, 谢骏, 潘德博, 等. 精养虾池浮游植物、理化因子与虾病的关系[J]. 上海水产大学学报, 1999(4): 304-308.
- [43] Muller-Feuga, A. (2000) The Role of Microalgae in Aquaculture: Situation and Trends. *Journal of Applied Phycology*, **12**, 527-534. <https://doi.org/10.1023/A:1008106304417>
- [44] Wang, J.K. (2003) Conceptual Design of a Microalgae-Based Recirculating Oyster and Shrimp System. *Aquacultural Engineering*, **28**, 37-46. [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(03\)00020-7](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(03)00020-7)
- [45] Li, Y., Chen, Y.F., Chen, P., *et al.* (2011) Characterization of a Microalga *Chlorella* sp. Well Adapted to Highly Concentrated Municipal Wastewater for Nutrient Removal and Biodiesel Production. *Bioresource Technology*, **102**, 5138-5144. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.091>
- [46] 冯敏毅, 马牲, 文国樑, 等. 水产养殖环境生物修复技术的研究进展[J]. 海洋科学, 2006(9): 84-87.
- [47] Molinuevo-Salces, B., Mahdy, A., Ballesteros, M., *et al.* (2016) From Piggery Wastewater Nutrients to Biogas: Microalgae Biomass Revalorization through Anaerobic Digestion. *Renewable Energy*, **96**, 1103-1110. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.090>
- [48] Lees, Z.M. and Senior, E. (1995) Bioremediation: A Practical Solution to Land Pollution. In: *Clean Technology and the Environment*, Springer, Dordrecht, 120-146. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-1312-0\\_4](https://doi.org/10.1007/978-94-011-1312-0_4)
- [49] Autry, A.R. and Ellis, G.M. (1992) Bioremediation: An Effective Remedial Alternative for Petroleum Hydrocarbon-Contaminated Soil. *Environmental Progress*, **11**, 318-323. <https://doi.org/10.1002/ep.670110423>
- [50] Macdonald, J.A. and Rittmann, B.E. (1993) Performance Standards for *in Situ* Bioremediation. *Environmental Science & Technology*, **27**, 1974-1979. <https://doi.org/10.1021/es00047a002>