

大型海藻孔石莼在工厂化海水养殖中的生物修复及其应用前景

The integrated development and application of macro algae *Ulva pertusa* on factory marine aquaculture

吕冬伟, 刘 峰, 李兴佐

(中国农业大学 烟台研究院 海洋学院, 264670)

中图分类号: Q178.53

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2012)12-0095-05

海水养殖业是山东半岛蓝色经济区建设产业集群的重要组成部分。在大力发展蓝色经济的宏观指导下,海水养殖业特别是工厂化海水养殖业得以快速发展。近几年,除了较早发展的室内鲍鱼养殖外,我国许多海水养殖品种和养殖规模都有所扩大,如真鲷、牙鲆、美国红鱼、大西洋鲑等。在以低碳养殖(低能耗、低排放、低污染)为产业发展方向的政策指引下,一种对环境友好、对生物无害、可高值化利用的养殖模式——海基(生态型)和陆基(集约型)两大类型的工厂化养殖模式成为养殖业发展的方向。大型藻类由于生长速度快,海水净化能力强,用其在水产养殖过程中替代化学和微生物方法净化水质,维持养殖生态平衡,取得了良好的效果。

孔石莼(*Ulva pertusa*)又名海白菜、海菠菜等,属大型海洋经济藻类,因其适温范围宽,适盐范围广,在我国各沿海地区都有丰富的资源。孔石莼具有生长快、适应环境能力强等优点,广泛应用于生态养殖以及养殖水质调控的研究。另外,孔石莼本身营养丰富,可以发展成为一种经济作物,提高养殖经济效益,具有良好的综合开发和应用前景。本文重点阐述孔石莼在工厂化海水养殖中的生物修复作用以及应用前景。

1 养殖废水的特点

工厂化养殖池养殖动物种类少,以目标养殖动物为主。养殖废水中的污染物主要来自于外部投饵残留和养殖生物的新陈代谢产物。在海水鱼类养殖

中,投喂饲料中大约 72%的 N 和 70%的 P 不被鱼利用^[1],这些营养元素均以固态养殖废物(粪便和残饵)和溶解态养殖废物(排泄物和分解物)进入水体,对养殖水环境造成一定的污染,其中氨态氮的含量最受到重视。

2 养殖水质调控

2.1 吸收 N、P 等营养物质

许多大型海藻在生长过程中,能够大量吸收海水中溶解态的 N、P 生源要素,可以利用其作为养殖环境中对 N、P 等污染物的有效生物吸收器^[2-4]。在多种速生大型海藻中,孔石莼对营养盐 N、P 尤其是氨氮的吸收更胜一筹。如 Liu 等^[5]在比较研究了绿藻 *Ulva pertusa*, 红藻 *Gelidium amansii* 和褐藻 *Sargassum enerve* 三种大型海藻对 N 的吸收时发现,绿藻孔石莼的生长速度和对氨氮的吸收速率要快于其他两种藻类。何洁等^[6]也对包括孔石莼在内的三种大型海藻对 N、P 的吸收动力学研究表明,孔石莼对硝酸态氮的吸收不占优势,但是对氨氮和磷酸盐的去除率优于其他两种藻类。在王萍等^[7]的研究中同样发现孔石莼对 N、P 营养盐的吸收胜于繁枝蜈蚣藻。类似于此的报道还有很多^[8-9]。

收稿日期:2012-06-12; 修回日期:2012-10-21

基金项目: 烟台市科学技术发展计划项目(2008154)

作者简介: 吕冬伟(1980-),女,山东烟台人,博士,主要从事海洋化学和环境科学研究,电话: 0535-6923253, E-mail: lvdw716@163.com; 李兴佐,通信作者, E-mail: lixingzuo@126.com

孔石莼对氨氮和磷酸盐高的去除率和去除速率为利用其净化工厂化养殖废水中的 N、P 提供了有力保障。将孔石莼引入养殖池塘, 利用其高效的吸收 N、P 能力, 可以对池塘中氨氮和磷酸盐的浓度进行原位控制, 防止氨氮对养殖生物的危害以及富营养化水体排放对外部海域的污染。据王吉桥等^[10]报道, 在适宜的光照和水温条件下, 1 g 鲜质量的孔石莼日降解氨氮 1.4 mg, 加上水中细菌的降解作用, 孔石莼可以有效地消除对虾新陈代谢过程中产生的氨氮。刘建国^[11]等应用孔石莼吸收大菱鲆养殖废水中的无机氮效果显著, 在不同的换水量和光照条件下, 孔石莼都能够将养殖废水中的无机氮浓度降低至达到国家一级海水水质排放标准。对于循环水工厂化养殖, 将孔石莼引入水处理系统, 亦能发挥调控水体营养盐的作用。Wang 等^[12]将孔石莼应用于海参的循环水养殖系统, 养殖水体经重力作用进入孔石莼生物滤池后再经循环泵回流养参池, 孔石莼能够吸收海参养殖水体中 68% 总氨态氮和 26% 的正磷酸盐, 有效控制了氨氮和磷酸盐的浓度。杨凤等^[13-14]将孔石莼应用于循环水养鲍水质的调控, 发现孔石莼能快速地吸收总氨氮, 使水中氨氮维持在 0.3 mg/L 的幼鲍安全生长限值以下, 其对氨氮的调控能力不亚于臭氧, 甚至低于流水养殖中的氨氮含量。经孔石莼净化处理的养殖废水, 无残留, 无毒副作用, 有利于为养殖生物提供良好的生存环境。

2.2 调节水体溶氧及 pH 水平

孔石莼在光合放氧方面作用明显。郭赣林等^[15]研究发现, 不同温度下孔石莼光合作用产氧速率在 20.17~25.32 mg/(g·h), 产氧效果显著。在孔石莼和对虾混养实验中, 1 g 鲜质量的孔石莼日提供环境净氧气 5.5~12.5 mg, 可以有效地为等质量养殖对虾提供代谢过程中所需的氧气^[10]。日本学者 KITADAI 和 KADOWAKI 将孔石莼引入鲷鱼 (*Seriola quinqueradiata*) 的养殖水域, 研究发现孔石莼的最高产氧速率为 6.39 mg/(g·h), 最少 0.21 kg 鲜孔石莼即可维持一条鲷鱼对氧气的需求^[16]。在孔石莼和鲍鱼的循环水混养系统中, 水体的 pH 水平始终保持稳定的状态且处于较高的水平, 孔石莼明显改善了幼鲍的养殖水环境, 降低了换水量^[14-15]。在孔石莼与养殖生物混养系统中, 养殖生物通过呼吸作用消耗水中溶氧, 排出 CO₂, 降低了水环境的 pH 值, 而孔石莼通过光合放氧并吸收鱼

类产生的 CO₂, 能增加水体的 pH 值。通过孔石莼对水体中的碳酸体系的调节, 使得水体 pH 不会因为养殖生物的代谢作用而发生较大波动。

同其他水生植物一样, 夜间石莼要呼吸耗氧。不同温度下, 孔石莼呼吸耗氧速率在 7.44~8.35 mg/(g·h)^[15]。另外, 孔石莼在高营养盐水体中生长速度快, 控制不好即有可能导致爆发性生长, 大量藻体如不能及时清除, 在水体中腐烂降解的过程会消耗大量溶解氧, 重新释放回水体的降解物质还会再次成为污染物质。这不仅不能起到修复水体的作用, 反而加剧了水体的生态恶化, 更不利于养殖生物的健康生长。因此要使孔石莼与所养水生动物在一个养殖系统内处于互利的地位, 达到最佳的利用状态, 必须深入开展孔石莼和养殖生物的生理与生态特性及不同条件下的代谢规律研究, 探索最佳的生态养殖模式。

3 探索复合生态养殖模式

孔石莼在维持健康的复合养殖系统方面有很重要的作用。养殖动物是排氨生物。水中氨氮浓度增高对养殖生物有强烈毒性, 是高密度循环水养殖系统最常遭遇的问题。故养殖池水中氨氮浓度必须控制于养殖生物可承受的浓度以下。在孔石莼与鱼、虾类共生的水体中, 通过控制孔石莼的生物量, 可有效地降低水中氨氮的浓度, 维持水体较高的溶氧量和适宜的 pH 值, 降低鱼类发生窒息和水质恶化的危险性^[10, 16-18]。在循环水养殖系统中, 氨氮等水溶性有害物质的去除技术是整个系统的关键。80 年代以来, 已有利用浮游植物净化养殖污水的研究报道, 但因藻水分离困难, 使这种微藻净水模式在循环水养殖系统中的应用受到限制。大型藻类孔石莼能够突破该限制。相对于微藻而言, 将孔石莼引入鱼虾等的综合养殖中, 其数量和密度可控, 更有利于创造良好而稳定的水质。孔石莼由于对氮盐尤其是铵盐和磷酸盐具有良好的吸收作用, 在循环水养殖的水处理中能发挥良好的水质净化作用。将孔石莼引入工厂化循环水养殖, 将工厂化循环水养殖和生态养殖相结合, 在水处理系统中利用孔石莼去除水体中的氨氮, 辅以必要的杀菌消毒, 实现海水循环利用。国外利用此种方式在循环水水处理系统中修复水质研究较早, 并且已经得到了较好的应用^[19-20]。宋协法等^[21]也做过相关研究, 发现孔石莼对氨氮的去除效果良好, 能够达到养殖水质要求。

但是孔石莼在工厂化水产养殖中水处理系统的应用还受到多方面条件的限制,如维持孔石莼的最佳生长状态需要一定的光照和盐度等外部条件,如若满足不了,孔石莼的生长状态将会受到较大影响,其对水中营养盐的去除效果也会受到较大影响,产生的氧气量也会显著减少。另外,孔石莼本身新陈代谢过程中也会产生部分有机物质释放到水体中,控制不好反而会增加水中有机物的含量,不利于养殖水质的管理。因此需要结合养殖动物的习性特征,在不影响养殖生物的适宜生长环境下,为孔石莼的生长创造适宜的生长条件,达到改善养殖环境,提升生态效益的目的。这种孔石莼与养殖生物混养系统对日益提倡环境友好养殖、生态养殖的可持续无污染海水综合养殖具有重要意义。

在我国,根据工厂化养殖方式的现状和特点,可探索并实施适宜的生态养殖模式。对于海基型和陆基型流水养殖,孔石莼对养殖废水中N、P营养盐的吸收,可探索养殖动物与孔石莼的原位混养技术(如养殖密度,孔石莼投放密度,孔石莼回收频率,光照强度等),降低养殖水体的富营养化程度,减轻富营养化水体排放对周边海洋造成的环境污染,达到清洁生产的目的。对于陆基型循环水养殖,可以进一步探索孔石莼在水处理系统中的水质净化技术,寻求一种新型的实用性、操作性和可控性强的节能环保水处理技术,解决化学处理存在的残留问题和微生物处理出现的活性降低等问题带来的不便。循环水养殖对水质造成影响的主要是养殖动物的溶解态代谢产物,粪便、残饵等颗粒物,以及有害微生物。可以将孔石莼的生物修复功能与经典的物理沉降以及紫外线、臭氧消毒技术结合应用,改善养殖环境的水环境质量,实现海水养殖的可持续发展。除此之外,还要进一步改进投饵技术、改进饵料成分,使所投饵料更有利于养殖生物的摄食,减少颗粒留存,提高饵料利用率,防止或减轻水质的败坏程度。

4 资源化利用前景

将孔石莼引入综合性水产养殖的水质管理,可以起到调控水质的作用,利于改善养殖环境,提升生态效益。同时,孔石莼增质量明显,日均增质量3.3%^[12]。作为综合性水产养殖的副产物,孔石莼具有较高的附加值。可以对孔石莼进行资源化利用,助于增加企业经济效益。作者从以下几方面阐述其资源化利用前景。

4.1 作为藻类食品原材料

孔石莼含有丰富的粗纤维、碳水化合物及蛋白质,并含有少量的脂肪。从已分析出的17种氨基酸中,有8种为人体必需氨基酸;孔石莼含有丰富的维生素V_E和V_C,其含量高于角叉菜^[22]。孔石莼含有K、Na、Ca、Mg、Ni、Zn、Mo、Cu、I、F等多种微量元素,这些微量元素对人体的生长发育、新陈代谢和生理调节等方面有着广泛的作用。不论是提供营养物质还是预防疾病方面,孔石莼都可作为人类良好的食物来源,可以充分利用水质调控副产物孔石莼作为原材料,开发新的藻类食品。

4.2 作为饲料原材料

孔石莼营养丰富,将其作为饲料添加剂加入饲料中对畜禽、水生动物无任何毒副作用且可改善畜禽、水生动物等的生产性能。孔石莼作为饲料不仅可以提供丰富的营养物质,促进动物的健康,还可以为人类提供健康安全的畜禽产品。以鲜孔石莼磨碎液作为饵料投喂稚参,其生长速度和成活率高于鼠尾藻干粉和鲜海带磨碎液的投喂效果^[23]。另外,孔石莼还是幼鲍的优质饵料。将水质净化的副产物孔石莼作为饲料资源加以回收利用,变废为宝,既有助于降低生产成本,又实现了循环经济,一举多得。

4.3 作为提取净水制剂原材料

多项研究表明孔石莼体内含有抑制赤潮藻繁殖的有效物质^[24-27],可以从孔石莼体内提取天然除藻剂,减轻渔药的施用对养殖生物的毒害和对环境的污染。孔石莼的分泌物能够有效降低重金属的生物有效性^[28-29],可以进一步探索分析有效成分的化学结构和提取方法,充分利用水处理系统中产出的孔石莼副产物提取净水制剂,为养殖环境中的重金属污染治理开辟新径。

5 结语

工厂化海水养殖具有密度高、投入高、回报高的特点。它可以通过人工控制环境达到消除病害、减少污染的目的,还可以实现传统养殖模式无法实现的高品质养殖,具有广阔的发展前景。提高养殖废水的处理效果和效率,简化工艺,降低成本是养殖废水处理工艺的发展方向。大型海藻孔石莼对海水养殖的生态意义和经济意义在于它能降低养殖水体的营养盐负荷,改良水质,有利于养殖水体环境的稳定,提高养殖生物的产量,同时获得资源化产物。

随着生物技术的发展, 以及对养殖生物生理活动研究的深入, 结合大型藻类生物修复功能向水处理技术的引用, 养殖废水处理工艺必将会有一个很大的发展空间, 更好的为水产养殖业服务。

参考文献:

- [1] Ackefors H, Enell M. Discharge of nutrients from Swedish fish farming to adjacent sea area [J]. *Ambio*, 1990, 19 (1): 28-35 .
- [2] 毛玉泽, 杨红生, 王如才. 大型藻类在综合海水养殖系统中的生物修复作用[J]. *中国水产科学*, 2005, 12(2): 225-231.
- [3] 杨宇峰, 费修纆. 大型海藻对富营养化海水养殖区生物修复的研究与展望[J]. *青岛海洋大学学报*, 2003, 33(1): 53-57.
- [4] 汤坤贤, 尤秀萍, 林亚森, 等. 龙须菜对富营养化海水的生物修复[J]. *生态学报*, 2005, 25(11): 3044-3051.
- [5] Liu D Y, Amy P, Sun J. Preliminary study on the responses of three marine Algae, *Ulva pertusa* (Chlorophyta), *Gelidium amansii* (Rhodophyta) and *Sargassum enerve* (Phaeophyta), to nitrogen source and its availability [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2004, 3(1): 75-79.
- [6] 何洁, 刘瑶, 张立勇, 等. 三种大型海藻吸收营养盐的动力学研究[J]. *渔业现代化*, 2010, 37(1): 1-5.
- [7] 王萍, 桂福坤, 吴常文. 营养盐因子对孔石莼和繁枝蜈蚣藻氮、磷吸收的影响[J]. *水产科学*, 2010, 29(4): 208-211.
- [8] Valente L M P, Gouveia A, Rema P, et al. Evaluation of three seaweeds *Gracilaria bursa-pastoris*, *Ulva rigida* and *Gracilaria cornea* as dietary ingredients in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles [J]. *Aquaculture*, 2006, 252(1): 85-91.
- [9] 刘静雯, 董双林. 氮饥饿培养基江蓠繁枝变型和孔石莼氮氮的吸收动力学特征[J]. *海洋学报*, 2004, 26(2): 95-103.
- [10] 王吉桥, 靳翠丽, 张欣, 等. 不同密度的石莼与中国对虾的混养实验[J]. *水产学报*, 2001, 25(1): 32-37.
- [11] Liu J G, Wang Z F, Lin W. De-eutrophication of effluent wastewater from fish aquaculture by using marine green alga *Ulva pertusa* [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2010, 28 (2): 201-208.
- [12] Wang H, Liu C F, Qin C X, et al. Using a macroalgae *Ulva pertusa* biofilter in a recirculating system for production of juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicas* [J]. *Aquacultural Engineering*, 2007 (36): 217-224.
- [13] 杨凤, 雷衍之, 王仁波. 皱纹盘鲍自污染及其对幼鲍生长及成活率的影响[J]. *大连水产学院学报*, 2003, 18(1): 1-6.
- [14] 杨凤, 马燕武, 张东升, 等. 孔石莼和臭氧对养鲍水质的调控作用比较[J]. *大连水产学院学报*, 2003, 18(2): 79-83.
- [15] 郭赣林, 董双林, 董云伟. 温度及其波动对孔石莼生长及光合作用的影响[J]. *中国海洋大学学报*, 2006, 36(6): 941-945.
- [16] Kitadai K. Growth, nitrogen and phosphorous uptake and O₂ production rate of seaweeds cultured on coastal fish farms [J]. *Bulletin of Fishery Research Agen*, 2007, 19: 149-154.
- [17] Troell M, Ronnback P, Halling C, et al. Ecological engineering in aquaculture: use of seaweeds for removing nutrients from intensive mariculture [J]. *Journal of Applied Phycology*, 1999, 11: 89-97.
- [18] Wang H, Liu C-F, Qin C-X, et al. Using a macroalgae *Ulva pertusa* biofilter in a recirculating system for production of juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicas* [J]. *Aquacultural engineering*, 2007, 36: 217-224.
- [19] Ellner S, Neori A, Krom M D, et al. Simulation model of recirculating mariculture with seaweed biofilter: development and experimental test of the model [J]. *Aquaculture*, 1996, 143: 167-184.
- [20] Cahill P L, Hurd C, Lokman M. Keeping the water clean-Seaweed biofiltration outperforms traditional bacterial biofilms in recirculating aquaculture [J]. *Aquaculture*, 2010, 306: 153-159.
- [21] 宋协法, 李勋. 工厂化鱼类养殖污水处理技术研究[J]. *中国水产科学*, 2004, 11: 96-101.
- [22] 陶平, 贺凤伟. 大连沿海 3 中大型速生海藻的营养组成分析[J]. *中国水产科学*, 2001, 7(4): 60-63.
- [23] 朱建新, 刘慧, 冷凯良, 等. 几种常用饵料对稚幼参生长影响的初步研究[J]. *海洋水产研究*, 2007, 28(5): 48-53.
- [24] 南春容, 张海智, 董双林. 孔石莼水溶性抽提液抑制三种海洋赤潮藻的生长[J]. *环境科学学报*, 2004, 24(4): 702-706.
- [25] 南春容, 张海智, 林少珍. 孔石莼水溶性抽提液抑制海洋浮游植物生长[J]. *科技通讯*, 2007.23(5): 658-663.
- [26] 王悠, 俞志明, 宋秀贤, 等. 共培养体系中石莼和江蓠对赤潮异湾藻生长的影响[J]. *环境科学*, 2006, 27(2): 246-252.
- [27] Jin Q, Dong S. Comparative studies on the allelopathic effects of two different strains of *Ulva pertusa* on *Heterosigma akashiwo* and *Alexandrium tamarense* [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2003, 293: 41-55.
- [28] 魏海峰, 刘长发, 张俊新, 等. 孔石莼(*Ulva pertusa*)对铅、铜、镉的吸收[J]. *环境科学与管理*, 2008, 33(8): 51-53.
- [29] 赵元凤, 徐海生, 吕景才, 等. 牙鲆、孔石莼分泌物对混合重金属在牙鲆组织蓄积的影响[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(11): 1875-1879.

(本文编辑: 梁德海)