

·综述·

大型藻类在综合海水养殖系统中的生物修复作用

毛玉泽^{1,2}, 杨红生², 王如才¹

(1. 中国海洋大学水产学院, 山东青岛266003; 2. 中国科学院海洋研究所, 山东青岛266071)

摘要:减少水产养殖自身对环境的负面影响是维持水产业持续健康发展的关键所在。大型藻类生物滤器可以有效地吸收、利用养殖环境中多余的营养物质,从而减轻养殖废水对环境的影响,并提高养殖系统的经济输出,被广泛应用于鱼、虾和贝类等的综合养殖系统中,是控制水体富营养化、增进食品安全和对污染水体进行生物修复的有效措施之一。本研究概述了大型藻类生物滤器用于养殖废水生物修复和环境控制的原理、依据、研究现状、修复效果以及应用大型藻类生物滤器产生的效益和存在的问题。

关键词:大型藻类;海水养殖;生物修复

中图分类号:X171.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-8737-(2005)02-0225-07

海水养殖是重要的潜在蛋白质源,能缓解人口增长对食物产生的巨大压力,备受世界关注,在过去的10年内得到快速发展,据FAO(2001)统计,有1/3的海产食物是通过水产养殖提供的^[1]。据预测,到2050年水产养殖要提供50亿t产量才能满足人们对水产品的需求^[2]。如此快速增长会带来各种各样的问题,而其中主要是其对环境的影响和养殖生物疾病的发生^[3-5]。生物技术的发展可能是解决这一问题的有效途径之一,例如蛋白质表达、DNA疫苗和转基因技术等在水产养殖上的应用。然而,如果没有对水产业规模发展及其对环境影响的清醒认识,水产业不可能发挥其最佳潜能和维持现有渔业的可持续发展,只有选择适宜的养殖种类和采用相应的养殖技术,才能维持水产养殖业现有的发展水平。这些技术包括使水产养殖废物产出最小化和清洁生物的养殖^[6-8]。清洁生物主要包括滤食性贝类、某些棘皮动物、浮游植物和大型藻类等,它们可以去除养殖废水中的营养物质,并转化成有价值的产品^[9-10]。其中大型藻类作为清洁生物在水产养殖中的应用近年来得到迅速发展。

大型藻类作为生物滤器技术是20世纪70年代发展起来的^[11],后来被很多学者所重视,逐渐发展

和完善了大型藻类与鱼^[12-17]、虾^[18-21]、贝类^[22-25]和大型藻类与多种生物^[26-28]的综合养殖模式,大型藻类与养殖动物具有生态上的互补性,它们能吸收养殖动物释放到水体中多余的营养盐,并转化为具有较高经济价值的产品。这些营养物质通过被大型藻类吸收而去除,同时大型藻类能固碳、产生氧气,调节水体的pH值,从而达到对养殖环境的生物修复和生态调控作用。

1 大型藻类对养殖废水生物修复作用的依据

1.1 养殖废水的特点

水产养殖动物是排氮生物,氮是其排出废物中的主要组成成分。尽管养殖系统的特性、养殖种类、饲料的质量和管理等因素都会对污水排放的数量和质量产生影响,但不同的养殖生物,其在饲料中添加的营养物质通常大部分被释放到水环境中,以饲料中氮的含量100%计,双壳贝类排放到水体中的氮占总投入氮的75%,鲍鱼、鲢鳙鱼和虾类排放到水体中的氮分别为投入氮的60%~75%,70%~75%和77%~94%^[29]。养殖废水中如此高的含氮量为大型藻类对水产养殖废水的生物修复作用提供了依据。

收稿日期:2004-02-13; 修订日期:2004-08-31.

基金项目:国家重点基础研究规划项目(G1999012012);山东省科技攻关项目;山东省自然科学基金项目(QZ2002J03);中国科学院海洋生态与环境科学重点实验室开放课题。

作者简介:毛玉泽(1970-),男,讲师,博士,从事鱼类和贝类生理生态学的研究。E-mail:maoyuz@263.net

通讯作者:杨红生。E-mail:hsyhg@ms.qdio.ac.cn

1.2 大型藻类用于养殖废水生物修复是清洁生产的发展趋势

传统的养殖废水的处理方法是经过沉积和微筛选后,用机械方法去除水体中颗粒有机物^[29-30]。然而,这种方法通常因溶解物质仍留在水中而失去作用,并且要求较高的技术和大量的资金投入。Krom 等^[31]曾尝试用浮游植物去除养殖鱼塘中过量的营养和颗粒物,但是该系统中,浮游植物的数量难于控制,或爆发性增殖,或群体崩溃,或被原生动物等敌害生物摄食、抑制而不能起到净化作用,并且浮游植物的密度波动常引起水质的剧烈变化,对养殖生物构成危害。因此,陆基生态系统的大多数生物过滤技术只是在某种程度上把营养物质转换为其他形式,并不是真正的从环境中去除,它们的净化功能也受环境中高营养浓度而被限制。

近年来许多学者应用微生物和酶制剂方法进行水产养殖废水的净化。Westerman 等^[32]应用生物滤器进行水产养殖废水的处理都获得某种程度的成功。高效复合微生物菌群(EM)在生长过程中能迅速分解污水中的有机物,抑制有害微生物的生长繁殖,激活水中具有净化功能的原生动物和微生物,起到净化水质的作用。从虾池筛选的有益菌株也可以降解虾池底部 50%—80% 的有机污染物,并提高虾的成活率和产量^[33-34]。尽管这些方法取得了一定的成功,但其规模和处理程度受到一定限制。

基于大型藻类的综合养殖系统中,鱼、虾和贝类等养殖生物的排泄物,在太阳能的协助下可以转化为藻类生物量,利用过剩的营养物质转化为有价值的产品而从水体中去除,并提供更多的有效资源。与浮游植物和其他清洁生物相比,大型藻类的生长机制较为保守,体内的营养贮存机制使它们更适合在营养盐波动的水体环境中生长,并反过来调节改善水体环境,从而达到较好的净化效果。

2 大型藻类生物滤器的研究进展

2.1 基于大型藻类的综合养殖系统

欧洲等国家从 20 世纪 80 年代中期就开始对生物修复进行研究,并完成了一些实际的研究项目和处理工程,取得了明显的效果。大型藻类生物滤器的研究在近 10 年得到迅速发展,实验研究的系统包括实验室模拟系统、小规模土池实验系统、循环水处理系统和开放水域系统,对污水的处理包括鱼类养殖废水、对虾养殖废水、贝类养殖废水和开放水域的富营养化控制。例如,20 世纪 90 年代以来,欧盟启动了有关富营养化和大型海藻的 EUMAC 研究计划,研究水域从波罗的海到地中海的欧洲沿岸海区,以研究海藻在海区富营养化过程中的响应和作用。我国近年来也在积极开展大型藻类生物修复作用的研究^[35-37]。表 1 列举了近年来基于大型藻类的综合养殖系统中大型藻类的种类、实验规模和研究方法。

表 1 大型藻类在综合海水养殖系统中的应用

Tab.1 Application of seaweed as biofilters in marine polyculture system

大型藻类种类 Species	养殖类型 Culture model	实验时间/月 Period/month	应用系统 System	参考文献 Reference
角叉菜 <i>Chondrus</i> /石莼 <i>Ulva</i>	实验室/水池	3-6	贝、藻	Ryther 等 ^[1]
石莼 <i>U. lactuca</i>	实验室规模	12	养殖废水、藻	Cohen 等 ^[38]
石莼 <i>U. lactuca</i>	实验室/水池	12	鱼、贝、藻	Shpigal 等 ^[39]
江蓠 <i>Gracilaria</i>	水箱	12	鱼、藻	Buschmann 等 ^[40]
石莼 <i>U. lactuca</i>	循环水	>12	鱼、藻	Krom 等 ^[41]
石莼 <i>U. lactuca</i>	100 m ³	>12	鱼、藻	Necri 等 ^[42]
卡帕藻 <i>Kappaphycus alvarezii</i>	实验室和现场	3-6	贝、藻	Qian 等 ^[25]
江蓠 <i>Gracilariales</i>	开放式/网箱	1-3	鱼、藻	Troell 等 ^[36]
石莼 <i>U. lactuca</i>	实验室/水族箱	12	鱼、鲍鱼、藻	Necri 等 ^[22]
江蓠 <i>Gracilariaopsis</i>	池塘/水族箱	1-3	鱼、藻	Alcantara 等 ^[43]
紫菜 <i>Porphyra</i>	开放式/网箱	>12	鱼、藻	Chopin 等 ^[37]
红皮藻 <i>Palmaria</i>	实验室规模	3-6	鲍鱼、藻	Evans 等 ^[24]
石莼 <i>U. lactuca</i> /江蓠 <i>G. conferta</i>	实验室/水族箱(3.3 m ²)	12	鱼、贝、藻	Necri 等 ^[27]
江蓠 <i>Gracilaria</i>	实验室	6-12	鱼、贝、海胆、藻	Chow 等 ^[28]
江蓠 <i>G. puvisspora</i>	两阶段混养	>1	虾、藻	Nelson 等 ^[38]
江蓠 <i>G. edulis</i>	试验室规模	<1	虾、贝、藻	Jones 等 ^[19]
江蓠 <i>G. lemaneiformis</i>	实验室	3-6	鱼、藻	胡海燕 ^[37]
红皮藻 <i>P. mollis</i>	实验室规模	1	鲍鱼、藻	Demetropoulos ^[25]
江蓠 <i>G. lemaneiformis</i>	现场	>12	贝、藻	杨红生等 ^[44]

① 杨宇峰,费修健. 大型海藻对富营养化海水养殖区的生物修复[C]. 海洋渔业和水产加工技术国际研讨会论文集,山东: 荣成, 2001.

2.2 净化能力与效果

大型海藻的生物滤器作用通过对水体过剩营养盐的吸收、利用来实现。与浮游植物对营养盐的利用不同,大型海藻吸收水体的营养盐,合成自身的生物量,可以通过收获的途径向外界输出,从而减少了水体的富营养化,并同时产生较高的经济价值。Krom等^[41]比较了海水网箱养殖、浮游植物调节和大型海藻调节3种不同养殖系统中N的流向,发现鱼产量相近的情况下,浮游植物调节的养殖系统中,在浮游植物生物量较高时,70%的N以颗粒态的形式存在于水体中,浮游植物量很少时,N的存在形式与网箱养殖系统相似,主要是以颗粒N和溶解态N的形式存在,而养殖海藻的系统中大部分的N可以通过鱼体和藻体的收获输出。

2.2.1 净化能力 大型藻类是海区重要的初级生产者,生命周期长、生长快,能通过光合作用吸收固定水体的C、N、P等营养物质来合成自身,同时增加水体溶解氧。人工养殖的大型藻类生长速度快,产量高,龙须菜等大型海藻在我国福建等沿海养殖区进行的栽培试验表明,它们可以增重20~800倍,对江篱组织N、P的含量分析发现,江篱含0.25%的N和0.003%的P(质量分数),每收获1t江篱,相当于从水体转移出2.5kg的N和0.03kg的P,可见,大型海藻减轻水体营养负荷的效果非常明显^①。

大型海藻改善了养殖环境,自身也能从中受益,投饵及鱼类活动通过系统的物质转化源源不断的向大型海藻输送养料,保证了大型海藻较高的生长率和产量。例如在鲑鱼网箱养殖区内养殖的江篱,产量可达48.9 kg/(m²·a),并且冬季可以减少水体氨氮含量的50%,春季可减少氨氮含量的90%~95%;在网箱养殖区附近绳养江篱,可以使江篱的生长率提高40%,江篱的产量和对溶解氮盐的吸收比单养江篱高2倍左右^[45]。

2.2.2 吸收营养盐的特点 大型海藻对营养盐的吸收和生长之间存在非偶联关系^[46-47],海藻的氮吸收率高于生长率使海藻能够克服氮营养元素的缺乏。这种剧烈的吸收机制表现在夜间脉冲式添加铵盐以减少附生藻类的竞争。多数大型海藻具有体内储存营养的能力,当介质营养盐含量较高时,即使光照不足,也会吸收超过自身生长需要的营养盐,以备光照合适时快速生长对营养盐的需要,这一点在生

产上具有很大意义。当养殖水体营养盐含量急增时,大型藻类可以做出反应,调节N的吸收率,起到净化水质的作用。Fujita^[48]报道过对3种大型藻类石莼(*U. lactuca*)、浒苔(*Enteromorpha sp.*)和江篱(*G. tikvahiae*)的研究结果,当养殖在营养盐不足的环境中时,它们体内的氮库可以维持生长的天数分别为6d、8d和14d。另外,对大型海藻营养盐吸收和同化的研究表明,同样浓度的营养盐,大型藻类对N的吸收速率大于对P的吸收速率,对NH₄⁺-N的吸收速率大于对NO₃⁻-N的吸收速率,并且对光的依赖性较小,而NH₄⁺-N又是养殖水体无机营养盐的主要存在形式,因而大型藻类对环境NH₄⁺-N具有很好的清除作用。

大型海藻对污染环境还有较强的耐力和清洁作用,可以有效地减轻有机污染和提高水体的DO水平。在受金属和有机污染的海区种植大型海藻,水体污染情况得到了减轻,海区DO恢复到较高水平,降低了生态因子指标BOD、POC,以及水体和沉积物中的金属含量如铜、锌、铅和镉等重金属,使水体生态系统得到恢复。

2.3 大型海藻对海水鱼虾贝养殖系统优化的调控原理

大型海藻与海水鱼、虾(贝)等的混养构成一种复合养殖系统。该系统中大型藻类是自养型生物,鱼、虾(贝)等是异养生物,前者主要是吸收水体中的无机营养盐,转化为有机体,后者主要依靠人工饲料,养殖废物加速沿岸水体的富营养化进程。二者在生态功能上互相补充,构成一种复合式的养殖系统,其中鱼、虾(贝)的代谢消耗水体DO,降低pH值,释放无机营养盐;大型海藻则进行光合作用,吸收利用水体无机营养盐,产生氧气,提高水体pH值,鱼、虾(贝)养殖系统中因饵料输入、鱼体代谢造成的营养负荷,可以通过大型藻类的吸收得到减缓。一般来说,对一个特定的养殖生态系统,其环境容量和养殖容量是一定的^[49-51],要使大型海藻对水体无机营养盐达到高效吸收的目的,必须进一步研究大型藻类与鱼、虾、贝等互利机制,探讨大型藻类与鱼、虾、贝综合养殖的适合比例,增加复合系统的自净能力,提高养殖水体的养殖容量,达到清洁生产和零排污的目的,促进海水养殖的可持续发展。

① 杨宇峰,费整理. 大型海藻对富营养化海水养殖区的生物修复[C]. 海洋渔业和水产加工技术国际研讨会论文集,山东·荣成,2001.

3 生物修复作用研究与应用实例

3.1 鱼类养殖系统

Ryther 等^[11]较早利用大型海藻 (*Chondrus*, *Gracilaria*, *Aquardhiella*, *Hypnea*) 作为综合海水养殖系统的清洁生物去除贝类和其他养殖动物的可溶性排泄物,使系统最终的排除物中无机氮的含量保持在正常水平,减少了水体的富营养化。Cohen 等^[36]利用大型藻类石莼作为生物滤器处理精养鱼塘排除废水,在面积为 1 m²(水深 0.6 m)的水族箱中,放置石莼 1 kg/m²,当流速为 10 μmol/(L·h)时,能吸收废水中 90% 的 NH₄⁺-N;流速为 40 μmol/(L·h)时,能吸收废水中 40% 的 NH₄⁺-N。Neori 等^[42]利用大型藻类作为生物滤器,对鱼、藻集约化综合养殖系统进行调控,在长达两年的实验中,养殖水体的 DO、pH、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 及无机 P 等水质指标基本能稳定在适合鱼类生长的范围内。Shpigel 等^[26]报道了用滤食性贝类和大型藻类处理鱼类养殖废水,鱼、贝和藻的收获量占总氮投入的 63%,排放到海里的悬浮物质和溶解物质仅占总氮收支的 4.3%,达到清洁生产的目的。在循环水养殖系统中,大型藻类石莼可以去除溶解营养元素(N和P),能使系统水体安全循环,并最终达到相对无污染排放。在该系统中,石莼对 NH₄⁺-N 有较强的吸收作用,使最终的排除废水中 N 的含量仅占食物供给的 20%~27% 远远低于传统精养鱼塘排除废水中 N 的含量(39%~47%)^[41]。网箱养鱼对浅海的生态环境影响很大^[52],网箱养殖区与大型藻类的综合养殖可以减轻对环境的危害,大型藻类江蓠 (*G. chilensis*) 在距离网箱养殖区 10 m 处的生长率较距离 150 m 处高 40%,SGR 达 7% /d,藻体的 N 含量具有相似的特点,靠近网箱养殖区和远离网箱区 N 含量分别为 1.9~2.1 mmol(N)/g(DW) 和 0.28~0.34 mmol(N)/g(DW),在网箱区附近养殖江蓠,1 hm²江蓠至少可以去除水体中 5% 的无机氮盐和 27% 的磷酸盐^[16]。Neori 等^[22]的研究表明,在鱼、大型藻类和鲍鱼的综合养殖系统中,大型藻类可以促进营养盐的循环,减少海水的使用量,减少营养流失,并增加产量。该系统中,利用鱼排泄营养收获大型藻类石莼 78 kg/(m²·a),并吸收 80% 的 NH₃,使 NH₄⁺-N 含量由鱼类排泄物中的 45% 减少到石莼过滤后的 10%,收获的石莼喂养鲍鱼,同时收获

鲍鱼 9.4 kg/(m²·a)。

3.2 对虾养殖系统

大型植物大叶藻与对虾混养,可以净化水质,改善虾池底质条件,丰富了饵料条件,促进对虾生长,虾池产量提高 26.6%,经济效益显著增加^[53]。大型藻类江蓠 (*G. parvispora*) 利用虾池废水作为肥料,能生产出高质量的产品,其相对生长速率(RGRs)达 4.7%/d, *G. parvispora* 生长在富营养的虾池废水环境下,体内 N 含量迅速增加,5 d 高达 3%,C:N 比接近 10,而生长在非富营养的环境下,C/N 比值在 20 到 30 之间,体内 N 含量明显降低^[48],表明 *G. parvispora* 能利用虾池废水作为营养源,减轻虾池废水对环境的影响,并提高自身的生长速度。王吉桥等^[20]用大型藻类孔石莼 (*U. pertusarum*) 和中国对虾 (*Penaeus chinensis*) 混养,结果表明孔石莼能有效吸收 N、P 营养盐,提高对虾对饲料中氮的利用率,并能净化水质,可以进行不充气养殖。

3.3 贝类养殖系统

Qian 等^[23]在实验室和现场进行大型藻类卡帕藻 (*Kappaphycus alvarezii*) 和珠母贝 (*Pinctada martensi*) 混养,现场研究发现(卡帕藻养殖在珠母贝养殖区的中心区),大型藻类和珠母贝在混养区较各自的单养区都具有较高的生长率;实验室研究表明,卡帕藻可去除珠母贝排泄物中的氮,生长在珠母贝养殖废水中的卡帕藻生长速度比对照组生长的快,而和添加营养盐的组的生长速度相当,说明卡帕藻生长快的原因是得益于珠母贝排泄物中的营养。大型藻类孔石莼 (*U. pertusa*) 对养鲍鱼污水具有净化作用,孔石莼能同时吸收水中的三氮和磷酸盐,尤其对氨氮具有较强的吸收作用,实验后 3 h 对氨氮、亚硝酸盐、硝酸盐的去除率分别是 70.1%、45.0% 和 31.3%,孔石莼具有净水、节能和收获饲料的综合效果^[34]。大型海藻海带和贝类的综合养殖是生产上应用较多的模式,20 世纪 70 年代中期,贝藻间养和轮养技术得到推广,近年来有报道表明,山东荣成市采用海带和贝类间养、混养的养殖模式,显著提高了海带的产量和贝类的质量^[55]。裴鲁青等^[56]在大小不同水体中作过江蓠与水产动物混养的初步研究,认为混养江蓠提高了养殖生物的存活率、生长率,也提高了自身的产量,改善了水质条件,具有明显的增氧效果和保持水体 pH 值的稳定。杨红生等^[44]在浅海贝类养殖区进行大型藻类龙须菜 (*G. lemaneiformis*) 的移植和养殖研究,龙须菜具有

较高的生长率,其光合作用速率不受营养盐的添加所影响,养殖龙须菜和低温大型藻类海带具有季节上的互补性,对浅海贝类养殖环境具有一定的生态调控作用。

4 效益分析

4.1 生态效益

在以大型藻类为基础的综合宇宙系统中,系统中某些组分的输出成为另一些组分的输入,这种方式能最好的利用输入到养殖系统中的营养物质和能量组成,可以把营养损耗及潜在的经济价值损耗降低到最少。使系统达到多样性、循环性、稳定性的统一,使系统具有最高的容纳量和经济产出。系统中生物的多样性的维持和提高是综合养殖系统的重要目标,高度多样性有利于把风险降到最低,能有效地提高资源的利用效率和控制疾病的发生。对于资源稳定、守恒的系统,营养物质的再循环是生态系统中的一个重要过程,单一品种养殖系统中其营养物质的损失严重,要维持系统稳定,只能依赖大量的外部输入。以大型藻类为基础的综合养殖生态系统通常比其他的系统具有更强的抗扰动性和稳定性,尤其是在环境胁迫的情况下。生态系统的协调运作,能保证养殖环境的良性发展,支持和提高生物所赖以生存环境的容纳量。

4.2 经济效益

大型藻类通常具有较高的经济价值^[7,16,27],它们充分地利用养殖废水中的溶解营养盐而转化成具有较高价值的产品从系统里输出,可提高系统单位面积的产出,降低了养殖成本。江篱(*Gracillaria*)是一种重要的经济海藻,既可作为人类的食物,也是鲍鱼的饵料,同时还是生产琼脂的来源,作为医院和实验室里的微生物研究的原料在国际上需求量很大。研究表明,经过两个夏季的养殖,江篱(*G. chilensis*)能有效去除剩余营养,同时作为产品可创造经济价值^[16]。

5 存在的问题

5.1 影响大型藻类作为生物滤器的因素

大型藻类对水产养殖废水的净化作用,效果,对营养盐的吸收速率随物理、化学和生物因素的变化而变化。如温度、光照、盐度、浑浊度、水流、pH值和营养盐的浓度和存在形式等理化因素。海藻的营养史、组织类型、生活史、年龄、表面积和体积比以及藻

体形态的变化等生物因素也都会影响营养盐的吸收。营养和光照是制约水产养殖系统生物量和生产率的关键环境因子。现场的营养和对营养的管理可以控制海藻的生物量、生产率、附生藻类和产品的质量,光照通过光合作用影响大型藻类对营养盐的吸收和生物过滤作用,光能刺激一些海藻对硝酸盐的吸收,而氮的吸收可能较少地依赖于光,在黑暗状态下也能吸收;光周期和光质也可以影响海藻对营养盐的吸收。

5.2 亟待解决的问题

尽管大型藻类作为生物过滤器的理论研究和实践探索在最近的10年中得到迅速发展,但仍然有很多问题亟待解决。

(1)基于大型藻类的综合养殖是否对作为食品的大型藻类和养殖生物产生影响,大型藻类的养殖是否对主要养殖动物产生影响。

(2)如何由小规模试验系统到大规模的商业化系统的转变。

(3)封闭式循环系统中大型藻类及其养殖生物的生物学和生物化学特性研究。

(4)理化环境因子和生物因子对大型藻类吸收和利用营养盐的机制更深层次的研究。

(5)不同来源营养盐对海藻生长率差异影响的进一步研究。

参考文献:

- [1] FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). The State of World Fisheries and Aquaculture 2000 [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2001.
- [2] Tacon A G J, Forster I P. Global Trends and Challenges to Aquaculture and Aquan Feed Development in the New Millennium [M]. International Aquan Feed Directory and Buyer's Guide. Turret RAI PLC, Uxbridge, 2001. 4-24.
- [3] Banner H A. Kaneohe Bay, Hawaii: Urban pollution and a coral reef ecosystem [A]. Proc Second Int Coral Reef Symposium 2. Great Barrier Reef Verminitee, Brisbane, 1974, 685-702.
- [4] 张福绥, 杨红生. 山东沿海夏季稚孔扇贝大规模死亡原因的分析 [J]. 海洋科学, 1999(2): 44-47.
- [5] Naylar R L, Goldberg R J, Primavera J H, et al. Effect of aquaculture on world fish supplies [J]. Nature, 2000, 405: 1017-1024.
- [6] 杨红生. 清洁生产: 海水养殖业可持续发展的新模式 [J]. 世界科技研究与发展, 2000, 23(1): 62-65.
- [7] Buschmann A, Troell M, Kautsky N. Integrated algal farming: a review [J]. Cah Biol Mar, 2001, 42: 83-90.

- [8] Chopin T, Buschmann A H, Halling C, et al. Integrating seaweeds into marine aquaculture systems: a key towards sustainability[J]. J Phycol, 2001, 37: 975 - 986.
- [9] McVey J P, Stickney R R, Yarish C, Chopin T. Aquatic polyculture and balanced ecosystem management: new paradigms in seafood production[A]. Stickney R R, McVey J P (Eds), Responsible Marine Aquaculture[M]. Oxon: CABI Publishing, 2002. 91 - 104.
- [10] Rowson M V, Chen C, Ji R, et al. Integration of fed and extractive aquaculture [A]. Paper Collection of International Symposium on Marine Fishery and Aquatic Products Processing Technology[C]. Rongcheng, China, 2001. 263 - 278.
- [11] Ryther J H, Goldman J C, Gifford C E, et al. Physical models of integrated waste recycling marine polyculture systems[J]. Aquaculture, 1975, 5: 163 - 177.
- [12] Vandemolen H, Gordin H. Ammonium uptake using *Ulva* (Chlorophyta) in intensive fishpond systems: mass culture and treatment of effluent[J]. J Appl Phycol, 1990, 2: 363 - 374.
- [13] Neori A, Cohen I, Gordin H. *Ulva lactuca* biofilters for marine fishpond effluents: II. Growth rate, yield and C:N ratio [J]. Bot Mar, 1991, 34: 483 - 489.
- [14] Petrell R J, Aie S Y. Integrated cultivation of salmonids and seaweeds in open systems[J]. Hydrobiologia, 1996, 326: 67 - 73.
- [15] Rio M J, Ramazanov Z, Garcia-Rejón G. *Ulva rigida* (Ulvales, Chlorophyta) tank culture as biofilters for dissolved inorganic nitrogen from fishpond effluents[J]. Hydrobiologia, 1996, 326: 61 - 66.
- [16] Troell M, Halling C, Nilsson A. Integrated open sea cultivation of *Gracilaria chilensis* (Gracilariaceae, Rhodophyta) and salmonids for reduced environmental impact and increased economic output [J]. Aquaculture, 1997, 156: 45 - 61.
- [17] Chopin T, Yarish C, Wilkes R, et al. Developing *Porphyra*/salmon integrated aquaculture for bioremediation and diversification of the aquaculture industry[J]. J Appl Phycol, 1999, 11: 463 - 472.
- [18] Nelson G S, Glenn E P, Conn J, et al. Cultivation of *Gracilaria parvispora* (Rhodophyta) in shrimp-farm effluent ditches and floating cages in Hawaii: a two-phase polyculture system [J]. Aquaculture, 2001, 192: 239 - 248.
- [19] Jones A B, Dennison W C, Preston N P. Integrated treatment of shrimp effluent by sedimentation, oyster filtration and macroalgal absorption: a laboratory scale study[J]. Aquaculture, 2001, 193: 155 - 178.
- [20] 王吉桥, 靳翠丽, 张欣, 等. 不同密度的石斑与中国对虾的混养实验[J]. 水产学报, 2001, 25(1): 32 - 37.
- [21] Marinho-Soriano E, Morales C, Moreira W S C. Cultivation of *Gracilaria* (Rhodophyta) in shrimp pond effluents in Brazil [J]. Aquacult Res, 2002, 33: 1 081 - 1 086.
- [22] Neori A, Ragg N L C, Shpigel M. The integrated culture of seaweed, abalone, fish and clams in modular intensive land-based systems; II. Performance and nitrogen partitioning within an abalone (*Haliotis tuberculata*) and macroalgal culture system [J]. Aquac Engin, 1998, 17: 215 - 239.
- [23] Qian P Y, Wu C Y, Wu M, et al. Integrated cultivation of the red alga *Kappaphycus alvarezii* and the pearl oyster *Pinctada martensi* [J]. Aquaculture, 1996, 147: 21 - 35.
- [24] Evans F, Langdon C J. Co-culture of dulce *Palmaria mollis* and red abalone *Haliotis rufescens* under limited flow conditions [J]. Aquaculture, 2000, 185: 137 - 158.
- [25] Demetropoulos C I, Langdon C J. Enhanced production of Pacific dulce (*Palmaria mollis*) for co-culture with abalone in a land-based system: nitrogen, phosphorus, and trace metal nutrition [J]. Aquaculture, 2004, 235: 433 - 455.
- [26] Shpigel M, Neori A, Popper D M, et al. A proposed model for "environmentally clean" land-based culture of fish, bivalves and seaweed [J]. Aquaculture, 1993, 117: 115 - 128.
- [27] Neori A, Shpigel M, Ben-Ezra D. A sustainable integrated system for culture of fish, seaweed and abalone [J]. Aquaculture, 2000, 186: 279 - 291.
- [28] Chew F, Macciavello J, Senta Cruz S, et al. Utilization of *Gracilaria chilensis* (Rhodophyta: Gracilariaceae) as biofilters in the depuration of effluents from tank cultures of fish, oyster, and sea urchin [J]. World Aquac Soc, 2001, 32: 214 - 220.
- [29] Berghem A, Tyvold T, Seymour E A. Effluent loadings and sludge removal from land-based salmon farming tanks [M]. London: EAS Special Publication, 1991. 14 - 27.
- [30] Gowen R J, Rosenthal R, Makinen T, et al. Environmental impact of aquaculture activities [M]. London: EAS (European Aquaculture Society) Special Publication, 1989.
- [31] Krom M D, Neori A. A total nutrient budget for an experimental intensive fishpond with circularly moving seawater [J]. Aquaculture, 1989, 88: 345 - 358.
- [32] Westerman P W, Lawson T M, Wildhaber M W. Evaluation of various biofilters in an intensive recirculating fish production facility [J]. Transactions American Soc Agricul Engin, 1996, 39 (2): 723 - 727.
- [33] 李秋芬, 辛福言, 邹玉霞, 等. 虾池环境生物修复作用菌生长影响因子的研究 [J]. 水产学报, 2001, 25(5): 438 - 442.
- [34] 莫照兰, 王祥红, 于勇, 等. 虾池有机污染物降解细菌的筛选 [J]. 水产学报, 2000, 24(4): 334 - 338.
- [35] 王映明, 李少芬, 陈怡如, 等. 江蓠与新对虾、青蟹混养实验 [J]. 水产学报, 1993, 17(2): 45 - 48.
- [36] 杨红生, 周毅, 王健, 等. 烟台四十里湾栉孔扇贝、海带和刺参混合养殖的模拟测定 [J]. 中国水产科学, 2001, 7(4): 27 - 31.
- [37] 胡海燕, 卢继武, 杨红生, 等. 大型藻类对海水鱼类养殖水体的生态调控 [J]. 海洋科学, 2003, 27(2): 19 - 21.
- [38] Cohen I, Neori A. *Ulva rigida* biofilters for marine fishpond effluents: I. Ammonia uptake kinetics and nitrogen content [J]. Bot Mar, 1991, 34: 475 - 482.
- [39] Shpigel M, Lee J, Sooboo B, et al. The use of outflow water from fish ponds as a good source for Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) Thunberg [J]. Aquac Fish Manage, 1993, 24: 529 - 543.

- [40] Buschmann A H, Mora O A, Gómez P, et al. *Gracilaria chilensis* outdoor tank cultivation in Chile; use of land-based salmon culture effluents [J]. *Aquac Engin*, 1994, 13:283-300.
- [41] Krom M D, Ellner S, Rijn J, et al. Nitrogen and phosphorus cycling and transformations in a prototype "non-polluting" integrated mariculture system, Eilat, Israel [J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 1995, 118:25-36.
- [42] Neiri A, Krom M D, Ellner SP, et al. Seaweed biofilters as regulators of water quality in integrated fish-seaweed culture units [J]. *Aquaculture*, 1996, 141:183-199.
- [43] Alcántara L B, Calumpong H P, Martínez-Gass M R, et al. Comparison of the performance of agarophyte, *Gracilariaopsis bailiniae*, and in the milkfish, *Chanos chanos*, in mono- and bio-culture [J]. *Hydrobiologia*, 1999, 398:443-453.
- [44] 杨红生, 毛玉泽, 周 毅, 等. 龙须菜在桑沟湾滤食性贝类养殖海区的生态作用[J]. *海洋与湖沼*, 2003("973"专辑):121-127.
- [45] Troell M, Römbäck P, Halling C, et al. Ecological engineering in aquaculture; use of seaweeds for removing nutrients from intensive mariculture [J]. *J Appl Phycol*, 1999, 11:89-97.
- [46] Naldi M, Viarelli Naldi P. Nitrate uptake and storage in the seaweed *Ulva rigida* C. Agardh in relation to nitrate availability and thallus nitrate content in a eutrophic coastal lagoon (Scaerò di Goro, Po River Delta, Italy) [J]. *J Exp Mar Biol Ecol*, 2002, 269:65-83.
- [47] 刘靖雯, 董双林. 海藻的营养代谢和主要营养盐吸收动力学[J]. *植物生理通讯*, 2001, 37(4):325-330.
- [48] Fujita R M. The role of N status in regulation transient ammonium uptake and N storage by macroalgae *Gracilaria tenuistipitata* [J]. *J Exp Mar Ecol*, 1985, 92:283-301.
- [49] 方建光, 孙慧玲, 匡世快, 等. 桑沟湾栉孔扇贝养殖容量的研究[J]. *海洋水产研究*, 1996, 17(2):95-102.
- [50] 董双林, 李德尚, 潘克厚. 论海水养殖的养殖容量[J]. *青岛海洋大学学报*, 1998, 28(2):245-250.
- [51] 杨红生, 张福绥. 浅海筏式养殖生态系统贝类养殖容量研究进展[J]. *水产学报*, 1999, 23(1):84-89.
- [52] Gowen R J, Weston D P, Ervik A. Aquaculture and the benthic environment [A]. In: Cowey C B, Cho C Y (eds), *Nutritional strategies and aquaculture waste*, proceedings of the first international symposium on nutritional strategies in management of aquaculture waste (NSMAW) [M]. Guelph Department of Nutritional Science, Univ of Guelph. 1991. 187-205.
- [53] 任国忠, 张起信, 王继成, 等. 移植大叶藻提高池养对虾产量的研究[J]. *海洋科学*, 1991(1):52-57.
- [54] 李秀辰, 张国琛, 崔引安, 等. 孔石莼对胞污水的静态净化研究[J]. *农业工程学报*, 1998, 14(1):173-176.
- [55] Nunes J P, Ferreira J G, Gazeau F, et al. A model for sustainable management of shellfish polyculture in coastal bays [J]. *Aquaculture*, 2003, 219:257-277.
- [56] 裴鲁青, 蔡其君, 林 霞, 等. 江蓠单养混养比较的研究[J]. *海洋与湖沼通报*, 1994(1):49-54

Bioremediation capability of large-sized seaweed in integrated mariculture ecosystem: A review

MAO Yu-zc^{1,2}, YANG Hong-sheng², WANG Ru-cai¹

(1. College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 2. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract: Mariculture has become one of the most important industries in China. The rapid development of mariculture has aroused increasing concern over its impacts on water environment of coastal waters. Reducing negative environmental impacts from mariculture activities is a key issue to ensure healthy and sustainable development of this industry. In recent years, large-sized seaweed biofilters are applied world-widely into integrated culture systems of fish, shrimp and bivalve. In the integrated system, the wastes of one resource user (animals) become resources for the others (seaweeds). Such a balanced ecosystem approach provides nutrient bioremediation capability, mutual benefits to the cocultured organisms, and economic diversification by producing other value-added marine crops; they can also improve food security and increase profitability per cultivation unit for the aquaculture industry. Integrating seaweeds into fish/shrimp aquaculture not only counterbalances nutrient inputs efficiently but also alters other metabolic aspects, such as dissolved oxygen, pH and CO₂ levels. In this paper, the bioremediation capability and application of large-sized seaweeds are reviewed.

Key words: large-sized seaweed; mariculture; bioremediation

Corresponding author: YANG Hong-sheng. E-mail: hshyang@ms. qdio. ac. cn