

# 海水养殖对海域生态系统的影响及其生物修复

胡文佳, 杨圣云\*, 朱小明

(厦门大学海洋与环境学院, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 海水养殖业的迅速发展对海域生态系统产生了一系列的严重影响, 本文综述了海水养殖带来的营养盐污染及沉积环境变化、药物使用污染、对天然生物的影响等问题. 对于海水养殖造成的问题, 有着多种治理方式, 基于养殖生态系统的生物修复, 是近年来新兴的安全有效的修复方法. 本文介绍了微生物修复、大型海藻修复、贝-藻修复、人工湿地修复等生物修复方法及其研究进展. 随着研究的不断深入, 治理的方式也越来越多, 但要想从根本上解决海水养殖带来的污染及影响, 基于生态系统的海水养殖管理乃是实现海水养殖业可持续发展的关键.

**关键词:** 海域生态系统; 海水养殖污染; 生物修复

**中图分类号:** Q 556. 1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0438-0479(2007)SI-0197-06

人类对食物的需求导致了海水养殖业的迅速发展, 特别在近海海洋渔业资源衰退以后, 海水养殖已成为海洋渔业的重要部分, 对补充人们的食物来源及蛋白质营养起着十分重要的作用. 目前, 以网箱养殖为主的海水养殖, 其形成的海水网箱养殖系统作为一种高密度、高投饵的人工养殖生态系统, 从系统整体上看具有输入物质量大、产出量高等特点. 但是, 网箱养殖过程中过度趋于简单化的生态系统结构及食物链导致了系统内部生态效率低下、物流能流阻塞或无法得到循环等缺陷, 故在获得高产量水产品的同时, 养殖生态系统输出的废物、残饵、代谢及排泄物等也大量排入海中, 成为引发海域环境问题的主要污染源之一. 再加上网箱养殖区往往布局不合理, 通常设在水交换率较低的内湾, 当养殖容量超出了海域的环境容量时, 就会引发一系列较严重的生态环境问题.

海水养殖对海域生态系统的影响主要包括养殖过程中营养物的污染、药物的使用造成污染及其对别的海洋生物带来影响等, 其中最主要的表现就是养殖水域营养负荷增加.

## 1 海水养殖对海域生态系统的影响

### 1.1 营养盐污染

海水养殖对生态环境影响的最主要表现为养殖水域营养盐负荷的增加. 养殖过程产生的残饵和排泄物进入水体后, 会以有机或无机物的溶解态及颗粒态存在. 这些残饵和排泄物使海水中氮、磷含量升高, 原

有的水化学平衡产生相应改变, 对海水水质产生影响. 在水动力作用下, 这种影响还可能扩大到邻近水域<sup>[1]</sup>, 造成海域生态系统中的营养盐过剩, 而营养盐过多带来的水体理化环境变化又反过来影响养殖生态系统的物质能量流动, 从而造成恶性循环.

Pillay<sup>[2]</sup> 研究认为, 养殖过程产生的主要废物有残饵、排泄物、化学物质和治疗性药物残留, 养殖生物的尸体及病原体也是废物的一部分, 但是潜在污染物的主要来源是与饵料有关的废物. 王福表等<sup>[3]</sup> 研究表明, 养殖过程中 85% 的污染物来自养殖本身, 即“自身污染”, 污染物来源所占的比例分别为: 过剩饵料占 35%, 排泄物占 50%, 生活垃圾占 5%, 其他污染物占 10%.

从整个养殖生态系统的物质能量循环情况看, Funge 等人<sup>[4]</sup> 对精养虾池中的物质平衡做了研究, 发现养殖过程中只有 10% 的氮和 7% 的磷被利用, 其他的都以各种形式进入海洋环境. Hall 等<sup>[5]</sup> 的研究发现, 每生产 1 t 鱼就有 878~952 kg 的碳进入水生环境中, 约占碳输入量(包括饲料和鱼苗)的 75%~78%.

由此可见, 养殖生态系统作为一种集约型的人工生态系统, 主要的物质来源有两个方面, 一是养殖对象, 二是饵料. 因此, 生态系统结构过于简单, 生产者过少, 能量主要依赖系统外输入; 而且, 自然生态系统中物质的分解者, 在养殖生态系统里也相对缺乏. 这个生态系统具有食物链短, 生态效率不高, 许多物质和能量无法得到有效利用的缺陷. 所以, 人工养殖生态系统缺乏自然生态系统的物质循环功能、系统的自适应与反馈机制, 在这种系统中, 污染物往往呈积累上升的态势, 由于系统无法发挥有效的自净功能, 从

而使得养殖区域污染状况越发严重。

研究认为,目前水产养殖排出的废水使邻近水域营养物质的负载正在逐年增加,而氮磷等物质又是水体富营养化的重要污染源<sup>[6]</sup>。这些污染物以溶解物和颗粒物的形式存在,溶解的部分氮、磷会直接进入水体中,而大约含有7%~32%的总氮和10%~84%的总磷的颗粒物积累能导致养殖水质的下降和养殖水域有机物负荷量的增加,这些颗粒物还会引起鱼鳃呼吸困难窒息死亡,或者直接影响生物体的繁殖。在养殖生态系统中,养殖生物死亡和腐烂还会增加溶解氧的消耗<sup>[7]</sup>。即使是普遍认为对水体状况影响较小的深水网箱养殖,其对环境也具有一定的影响<sup>[8]</sup>。

养殖废水中的营养盐尤其是氮、磷的大量存在,使水体产生富营养化作用。这种水体一旦伴有适当的生物、水文和气象条件时,就有产生赤潮的可能<sup>[9]</sup>。近年来,不少学者开始探讨网箱养殖与赤潮发生之间的关系。研究指出:高密度的网箱养殖,投饵等废物对附近海域造成的营养盐负荷增加必然提高水体的富营养化程度,为赤潮发生提供了物质基础,成为赤潮发生的诱因<sup>[10]</sup>。唐森铭等<sup>[11]</sup>利用香港东部水域牛尾海1998年3月到1999年1月每星期一次的浮游生物连续监测数据研究发现,赤潮与营养水平环境有关,网箱养殖规模是赤潮发生的主要影响因子。

此外,网箱养殖废物(有机质)沉积到海底,导致海底表层沉积物氧化还原电位降低<sup>[12]</sup>;沉积物间隙水中微生物的活动增加了底质的需氧量,造成沉积物环境缺氧<sup>[13-14]</sup>;厌氧状态下,异养细菌将有机质分解转化为硫化氢和氨,引起底质中硫化物含量的升高,对网箱内鱼类造成危害<sup>[15-16]</sup>。Paez-Osuna等<sup>[17]</sup>研究了养殖海域底泥中的物质平衡,发现在水产养殖过程中,输入水体的总氮、总磷和颗粒物分别有24%、84%和93%沉积在底泥里,而富集在底泥里的这些污染物,在一定条件下又会重新释放出来,成为水体污染最重要的内源。也就是说,有机质在底泥内的沉积会使得底泥成为营养物质库,即沉积物中营养盐向上覆水中释放,在动力作用下营养盐再悬浮,从而造成内源污染<sup>[18]</sup>或称之为“二次污染”,使得富营养化的情况进一步加剧。

## 1.2 药物污染

在海水养殖中常使用化学药物(如消毒剂、杀虫剂、治疗剂、抗生素和防腐剂等)来防治病虫害、消除敌害生物等。这些药物有相当一部分会散失到海洋环境中,直接或间接地造成海洋环境及海洋生态系统的短期或长期退化。例如,珠江三角洲沿岸曾经大量使用 $\text{CuSO}_4$ 来治理虾病,造成现在该地区水环境中存

在着相当严重的Cu污染<sup>[19]</sup>。Gowen<sup>[20]</sup>发现,在5个养鱼网箱的下面,底泥的四环素残留量为2.0~6.3 mg,并可持续达7个月,这些抗生素的存在肯定会减弱养殖水体降解有机碳的能力。

同时,养殖过程中药物的施放在杀灭病虫害的同时,也使水中的浮游生物和有益菌、虫受到抑制、杀伤甚至死亡。例如,水中的微生物、单细胞藻类等具有抑制细菌繁殖的作用,有益微生物群落有助于提高对虾抗病能力。因此,不加选择的使用消毒剂、抗生素会造成养殖生态系统中的微生态严重失衡,而生态系统中微生物组份的变化,将影响到整个生态系统的物质生产及能量循环。同时,多种药物大剂量重复使用,会使细菌发生基因突变或转移,容易产生抗药性<sup>[21]</sup>。Russell等<sup>[22]</sup>通过培养网箱鲑鱼养殖的表层沉积物中的细菌,对所选取的三种抗生素的抗药性情况加以研究,结果发现,在沉积物中,约有5%的可培养细菌对上述三种抗生素产生了抗药性。

一些低浓度或性质稳定药物的残留,还可能在一些水生生物体内产生累积并通过食物链放大。例如,长期使用抗生素促进海底沉积物中产生耐药菌株,出现药效减弱或完全无效的现象,而动物身体组织内的这些生物活性物质的存活寿命比我们目前所认识的要长的多,药物会通过食物链,富集到鱼类等生物体中,最终将有一部分进入人体,由此对整个水体生态系统中的生物乃至人体造成危害,但目前暂缺少这方面的相关资料<sup>[16]</sup>。

## 1.3 养殖对其它海洋生物的影响

在海水养殖过程中,由于各种原因造成养殖鱼类逃逸。这些逃逸的鱼类可能会将养殖中产生的流行病传给野生种群,造成野生种群的数量下降,而很多鱼类寄生虫病是人畜共传的<sup>[23]</sup>。因此,养殖鱼类逃逸有可能对自然生态系统内的种群及人类健康产生威胁。但是,养殖鱼类逃逸带来的最大的危害,还是在于其对生物多样性的影响。

首先,逃逸鱼会与土著鱼类竞争食物和生境,极大地影响了土著鱼类的生存空间,因此外来种逃逸可能对本地种群造成生物入侵的潜在威胁。有人认为,逃逸的养殖种群的野外存活力差,长期与野生种群竞争资源的可能性较小,但暂时性的竞争也可能造成野生种群的变动,从而影响到野生种群的自然变化与自我调控。据Mills研究发现,从网箱出逃或有意移植的鱼类对土著鱼类群落的影响包括通过掠食或摄食竞争造成当地种群灭绝<sup>[24]</sup>。

其次,逃逸鱼可能对自然生态系统中的基因多样性产生破坏。养殖鱼类为了适应养殖需求,往往是从

外来引进的,或者经过人为的基因改造,例如转基因或定向育种.这些种类的引入虽然有助于提高养殖产量、丰富种质资源,但是此类以养殖为目的鱼类种群仅适宜于养殖生态系统,往往具有生长率高、基因型单一、生存能力不强的特点.这些鱼类逃逸到自然环境中后,可与天然群体进行杂交,造成种质混交,可能导致某些有害基因的扩散,给天然基因库带来潜在的基因污染,甚至对某些优良性状基因造成不可逆转的破坏.由于养殖鱼类的生存活力不如野生种群,逃逸后再行杂交产生出变种,会对野生种群的数量、产卵习性等均产生影响.据报道,经过基因改造的大西洋鲑逃逸后与野生鲑鱼交配产生变种鱼类,使缅因湾和芬迪湾的野生鲑鱼面临灭种危险<sup>[25]</sup>.

同时,养殖引种过程中,非本土物种的引进也会带来疾病和病原生物,从而造成病原生物污染或入侵的潜在威胁.本土种对外来种引入的病原生物可能缺乏相应的抵抗能力,如日本的牡蛎和扁形虫被引入北美洲后,直接导致了西部沿海太平洋牡蛎数量的下降.而法国政府基于可能引发寄生类疾病的传播的考虑,严格禁止贝类养殖业者从加拿大进口美国牡蛎或太平洋牡蛎<sup>[26]</sup>.

## 2 养殖污染的生物修复

一系列的研究和事实表明,养殖污染已经对海洋环境及生态系统产生了严重影响.养殖引起的一系列问题已经开始受到人们的重视,如何对已被污染的水域或受损海洋生态系统进行修复,已成为当前的研究重心.修复的方法有物理的、化学的和生物的.而相比较理化方法的修复,生物修复受污染水体有其独到的优越之处.生物修复具有安全、高效、无残留残毒的特点.此外,生物修复不但能治理受污染环境,还可以修复受损的生态系统.生物修复往往从生态系统内部入手,利用生态系统中的某一种或几种组份(如某种特定的生产者、消费者或分解者),来达到调节生态系统内部能流物流的目的,较之理化方法仅仅修复环境因子的特点,生物修复对受损生态系统的恢复和维持更加有效,故近年来这方面研究已成为水域生态系统研究的热点之一.

生物修复包括微生物修复、大型海藻修复、贝藻等生物修复、生境修复等.

### 2.1 微生物修复

微生物是生态系统中的分解者,其在水产养殖环境中用于生物修复的主要作用机制是:利用微生物(细菌、真菌、酵母菌或提取物)对环境污染物的吸收、

代谢、降解等功能,去除或消除环境污染.在环境中,微生物对污染物直接降解或在降解中起催化作用,这是一个受控或自发的过程.

长久以来利用微生物修复受损环境一直受到人们的重视,从上世纪 80 年代后期开始开展相关研究及应用实验<sup>[27]</sup>,目前已发展为一项较为成熟的技术.利用细菌等降解环境污染物也是经典的生物修复方法,在经典定义中,生物修复往往专指“微生物降解有机污染而消除污染和净化环境的过程”<sup>[28-29]</sup>.

然而在海水养殖污染修复方面,微生物修复技术的相关研究报道目前尚不多见.国外有几家公司生产了水质净化菌剂(粉),1995 年以来,对这些水质净化菌剂已有初步研究的报道,但论文数量极少<sup>[30]</sup>.国内也曾有过应用光合细菌(红螺菌科)改善水质的报道<sup>[31]</sup>.

### 2.2 大型海藻修复

大型海藻用作生物净化器,主要是降低养殖水体的营养盐负荷,从而达到清洁生产的目的.大型海藻作为水体生态系统中的生产者,能够吸收养殖动物释放的营养盐,从而达到营养物质在系统内部的循环和再利用,提高生态效率;此外,将大型海藻用作生物过滤器,还可以直接净化处理养殖过程中向养殖系统外排出的有机废物.目前的研究表明,在养殖生态系统中混养大型藻类是吸收、利用营养物质和延缓水质富营养化的有效措施之一<sup>[32-33]</sup>.

国外已有较多报告报道了利用大型海藻吸收水中营养盐净化废水的试验.例如,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,研究水域跨越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<sup>[34]</sup>.瑞典科学家 Haglund 和 Pedersen<sup>[35]</sup>和智利科学家 Troell 等<sup>[36]</sup>通过在鱼类养殖区栽培江蓠,利用鱼类养殖过程中产生的废物作为海藻生长的营养源,从而降低养殖水域中氮和磷的浓度,同时提高了单位水体综合养殖的经济效益.研究显示,1 hm<sup>2</sup> 的海区每年可生产江蓠 258 t,通过江蓠的收获,可去除 1 020 kg 氮和 374 kg 磷. Troell 等<sup>[37]</sup>还证实,江蓠与大麻哈鱼共养,可去除鱼类养殖过程中排放到环境中的 50%~95% 可溶性铵.

近年来,国内在这方面的研究也取得了一定的进展.黄道建等<sup>[38]</sup>通过比较几种大型海藻在生长旺盛时期体内的总氮和总磷含量,筛选出石莼和羽藻可以作为近海富营养化水环境修复的优选海藻.而岳维忠等<sup>[39]</sup>则以吸收速度为指标,筛选出蛎菜和草叶马尾藻为净化水质的优良材料.通过氨氮浓度梯度实验

(磷含量充足)测定了蛎菜等对营养盐的最佳吸收浓度范围及最大吸收速度,结果表明,蛎菜和草叶马尾藻对氮氮的平均吸收速度分别为 $0.0064$ 和 $0.0054$   $\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$ ;草叶马尾藻对氮氮的最佳吸收范围为 $(4.0\pm 0.4)\text{mg}/\text{L}$ ,而蛎菜的最佳吸收范围有两个,分别为 $(1.5\pm 0.2)$ 和 $(4.5\pm 0.4)\text{mg}/\text{L}$ .

### 2.3 贝藻、海绵等生物过滤修复

传统的化学废水处理方法效率很低,并且由于成本高而难以用于海水养殖的污染控制. T ones 等<sup>[40]</sup>研究了一种包括沉淀—贝类过滤—藻类吸附的综合处理方法.海水养殖的废水中含有的主要污染物为溶解营养盐和悬浮颗粒物,为了有效的控制这些物质,他设计了三个处理过程.第一步是通过自然沉淀减少颗粒物的浓度;第二步是采用贝类过滤,进一步降低悬浮颗粒物的浓度,同时减少无机颗粒物、浮游植物及细菌的数量;最后一步是用藻类吸收营养盐.这种综合处理方法对污染物有较高的去除效率,可以分别去除88%的总悬浮固体、72%的总氮、86%的总磷、24%的氨态氮、70%的硝态氮和65%的活性磷酸盐.

付晚涛等<sup>[41]</sup>研究还发现,繁茂膜海绵(*Hy-meniacidon perleve*)对滤食养殖水体中生物残饵和排泄物等颗粒污染物具有显著效果,可以减轻过剩饵料对养殖区的污染,同时还可增加海绵生物量,为生物制药提供原料来源.

### 2.4 生境修复

对受损的生境进行修复也是生物修复的一个组成部分,人工湿地(Constructed Wetlands)修复就是生境修复一种方式,它是人为创造的一个适宜于水生植物或湿生植物生长的、根据自然湿地模拟的人工生态系统,可用于养殖废水的处理.自然湿地生态系统具有净化废水的生态系统服务功能,但由于在地理位置、负荷量等方面难以满足实际需要,同时自然湿地基本上是一个不可控制的环境.而人工建造的湿地,其生态系统中生物种类多种多样,并处于人为的控制之下,综合处理废水的能力受到人工设计控制,处理能力大大超过了自然湿地<sup>[42]</sup>.

Lin 等<sup>[43]</sup>在实验规模的废水处理湿地系统中测定了系统在去除无机氮和磷方面的效率.得到的结果是此湿地系统中氮的去除效率非常高,能够去除86%~98%的氨态氮和95%~98%的总无机氮,并且去除效率受水力条件影响小;而磷的去除效率是32%~71%,受水力条件影响比较大.

## 3 海水养殖的可持续发展

随着全球人口增长及气候变化,人类对食物来源

的需求越来越大,而可耕地面积却日益减少.海洋是蓝色的宝库,相较于目前日益短缺的陆地资源,海洋资源尚有进一步开发利用的余地.然而,早期对天然渔业资源的掠夺式开发已导致了全球渔业资源的严重衰退,当人们意识到这个问题时为时已晚.目前虽然大多数国家都制定了相应的渔业资源养护政策,但很多资源的破坏已经达到了不可逆的程度,即使能够恢复,也需要花费几十年乃至更多的时间.

近岸天然渔业资源的衰退,使得人们将目光投向了海水养殖.密集型的人工养殖具有产量大、效益高的特点,但是,如果仍然走以前的老路,只知利用而不知保护,当海域自然条件及生态系统状况恶化乃至崩溃,人们仍只能得到一个杀鸡取卵的后果.那么该如何对养殖过程进行管理和调控,以达到可持续发展的目的呢?我们知道,自然界中所有的物质和能量都是通过生态系统进行循环流动,最后才能转化为我们人类的食物.因此,基于生态学原理,对生态系统内部的进程及机制加以研究,通过人为的管理及技术手段调整养殖生态系统中不合理的组份,用人工技术辅助有缺陷的养殖生态系统中能量及物质的流动,才是解决海水养殖业可持续发展问题的根本途径.传统的处理思路是,哪里发现污染再去哪里治理.事实上,由于系统反馈的延时性,往往当显著的污染出现时,生态系统其实已经受到了严重损害.故传统方法只能救一时之急,却不利于长久的可持续发展,所以我们提出基于生态系统的管理与控制理念.以生物修复为例,作为新兴的治理方式,生物修复正是在考虑到生态系统本身运作规律的基础上,从系统自身组份入手,用人工的方式加以补充和调节,以达到使系统健康运转的目的.事实上,生物修复本身与其说是一种治理手段,不如说是对原本不健康的养殖生态系统的调整与完善.由此,要想有效控制养殖污染问题,就必须从养殖生态系统本身入手,将生态学的理念贯穿到整个养殖过程.

综上,解决问题的根本方式还是要对海水养殖进行基于生态系统的统一管理,以生态学思想为指导,改进养殖技术、改变养殖观念,开展生态养殖.进行可持续发展、解决养殖污染问题,并非是要限制养殖业发展,而是要注意建立合理高效的人工养殖生态系统,做好养殖废物循环利用的工作,将生态学思想贯彻到生产实践中,将原来有缺陷的人工生态系统中物质能量的单向流动,向“资源→产品→再生资源”的物质反复循环流动的过程引导,开展循环经济.这才是目前解决渔业可持续发展问题的最佳途径和方法,也是我国渔业经济发展到一定阶段的客观要求<sup>[44]</sup>.只

靠科技力量是不能维持养殖业整体的可持续发展的,必须优化养殖管理方式,从整体上建设资源节约型和环境友好型社会,这才是保护环境和预防污染的根本,也是走上可持续发展道路的必经之路。

### 参考文献:

- [1] 阵应毕,杨宇峰,焦念志.海水养硝对浮游生物群落和水环境的影响[J].海洋科学,2001,25(10):20-22.
- [2] Pillay. Aquaculture and Environment[C]. Fishing News Books, UK: Oxford, 1992: 56-77.
- [3] 王福表.网箱养殖水污染及治理对策[J].海洋科学,2002,26(7):24-26.
- [4] Funge S, Briggs M R P. Nutrient budgets in intensive shrimp ponds: implications for sustainability aquaculture, 1998, 164(18): 117-133.
- [5] Hall P O, Anderson L G, Holby O, et al. Chemical fluxes and mass balances in a marine fish cage farm Carbon[J]. Mar Eco Prog Ser, 1990 (61): 61-73.
- [6] Paez-osuna F, Saul R, Ruizac. Discharge of nutrients from shrimp farming to coast waters of the Gulf of California [J]. Marine Pollution Bulletin, 1999, 38(7): 585-592.
- [7] Welch E B, Lindell T. Ecological effects of waste water: applied limnology and pollutant effects [M]. London: Champan and Hall, 1992: 76-81.
- [8] 金卫红,周小敏.深水网箱养殖海域水质状况评价[J].浙江海洋学院学报,2006,25(1):46-49.
- [9] 李红山,黎松强.水体富营养化的防治机理—污水深度处理与脱氮除磷[J].海洋科学,2002,26(6):31-34.
- [10] 黄小平,黄良民,谭焯辉,等.近海赤潮发生与环境条件之间的关系[J].海洋环境科学,2002,21(4):63-69.
- [11] 唐森铭,黎可茜.海水网箱养殖与赤潮关系的研究——香港牛尾海三星湾 1998 年赤潮原因探讨[J].海洋学报,2003,2(增刊2):202-207.
- [12] 张雅芝,苏永全.论我国海水鱼类网箱养殖的可持续发展[J].海洋科学,2001,25(7):52-56.
- [13] 计新丽,林小涛,许忠能,等.海水养殖自身污染机制及其对环境的影响[J].海洋环境科学,2000,19(4):66-71.
- [14] Felipe A G, Benjamin G G. Assessment of some chemical parameters in marine sediments exposed to offshore cage fish farming influence: a pilot study[J]. Aquaculture, 2004(242):283-295.
- [15] 何悦强,郑庆华,温伟英,等.大亚湾海水网箱养殖与海洋环境相互影响研究[J].热带海洋,1996,15(2):22-27.
- [16] 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,2002,21(2):74-79.
- [17] Paez-Osuna F. The environmental impact of shrimp aquaculture: a global perspective[J]. Environmental Pollution, 2001, 112(2): 229-231.
- [18] 王鹏.富营养化湖泊营养盐的来源及治理[J].水资源保护,2004,20(2):9-12.
- [19] 贾晓平,蔡文贵,林钦.我国沿海水域的主要污染问题及其对海水增养殖的影响[J].中国水产科学,1997,4(4):78-82.
- [20] Gowen R J. Aquaculture and environment[M]//Aquaculture and environment. De Pauw N, Joyce J, eds. Ghent (Belgium): European Aquaculture Society Special Publication, 1992.
- [21] 国家科学技术部.浅海滩涂资源开发[M].北京:海洋出版社,1999.
- [22] Herwig R P, Gray J P, West on D P. Antibacterial resistant bacteria in surficial sediments near Salmon net cage farms in Puget Sound[J]. Washington Aquaculture, 1997, 149: 263-283.
- [23] Ogawa K. Marine parasitology with special reference to Japanese fisheries and mariculture[J]. Veter Parasitol, 1996, 64: 95-105.
- [24] Mills D H. Britain's native trout is floundering[J]. New Scientist, 1982, 96(17): 199-213.
- [25] Svendrup Jensen S. Fish demand and supply projections [J]. Naga, 1997, 20(3/4): 77-79.
- [26] Anon. Oyster warning[J]. Fish Farming International, 1999, 27(8): 37.
- [27] 李秋芬,袁有宪.海水养殖环境生物修复技术研究展望[J].中国水产科学,2006,7(2):90-92.
- [28] Madsen E L. Determining in situ biodegradation: facts and challenges[J]. Environ Sci Technol, 1991, 25(10): 1663-1672.
- [29] Tomas A E. The basics of bioremediation[J]. Pollution Engineering, 1994, 26(6): 46-47.
- [30] Saman P. Microorganism for waste water treatment of marine shrimp cultrue[D]. Bangkok, Chulalongkorn University, 1995.
- [31] 于伟君.光合细菌在对虾养殖中应用的初步试验[J].水产科学,1991,10(1):16-18.
- [32] Ahn O, Petrell R J, Harrison P J. Ammonium and nitrate uptake by Laminaria saccharina and Nereocystis leutkeana originating from a Salmon sea cage farm. [J]. Appl Phycol, 1998, 10: 333-340.
- [33] 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.
- [34] Schramm W. Factors influencing seaweed responses to eutrophication: some results from EU-project EU-MAC [J]. Appl Phycol, 1999, 11: 69-78.
- [35] Haglund K, Pedersen M. Outdoor pond cultivation of the subtropical marine red alga *Gracilaria tenuistipitata* in brackish water in Sweden. Growth, nutrient up-

- take, co-cultivation with rainbow trout and epiphyte control[J]. *Appl Phycol*, 1993, 5: 271– 284.
- [ 36] Troell M, Halling C, Nilsson A, et al. Integrated marine cultivation of *Gracilaria chilensis* (Gracilariales, Rhodophyta) and salmon cages for reduced environmental impact and increased economic output [ J]. *Aquaculture*, 1997, 156: 45– 61.
- [ 37] Troell M, Ronnback P, Halling C, et al. Ecological engineering in aquaculture: use of seaweeds for removing nutrients from intensive mariculture[ J]. *Appl Phycol*, 1999, 11: 89– 97.
- [ 38] 黄道建, 黄小平, 岳维忠. 大型海藻体内 TN 和 TP 含量及其对近海环境修复的意义[ J]. *台湾海峡*, 2005, 24 ( 3): 316– 321.
- [ 39] 岳维忠, 黄小平, 黄良民, 等. 大型藻类净化养殖水体的初步研究[ J]. *海洋环境科学*, 2004, 23( 1): 13– 15.
- [ 40] 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.
- [ 41] 付晚涛, 张卫, 金美芳, 等. 繁茂膜海绵滤食养殖水体中过剩饵料的研究[ J]. *海洋环境科学*, 2006, 35( 3): 29– 32.
- [ 42] 顾传辉. 人工湿地处理系统概述[ J]. *中山大学研究生学刊: 自然科学版*, 2001: 22 ( 2): 34– 40.
- [ 43] Lin Y F, Jing S R, Lee D Y, et al. Nutrient removal from aquaculture wastewater using a constructed wetlands system[ J]. *Aquaculture*, 2002, 209: 169– 184.
- [ 44] 陆忠康. 发展循环经济( Circular Economy) 与可持续渔业( Sustainable Fisheries) [ J]. *现代渔业信息*, 2006: 21 ( 9): 9– 12.

## The Impact of Mariculture on the Marine Ecosystem and Studies on Bioremediation

HU Wen-jia, YANG Sheng-yun<sup>\*</sup>, ZHU Xiao-ming

( College of Oceanography and Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** The development of mariculture has brought serious problems to the marine ecosystem, including water eutrophication, impacts on the sediment, chemical pollution, and other impacts on marine organisms. Some methods has been developed to solve the problems during recent years, especially the methods of bioremediation, including using microorganisms, marine plants, shellfish-aquatic plants, and constructed wetlands, which have advantages of safety and effect. In conclusion, to achieve sustainable development of mariculture, we should manage the fishery not only using traditional methods but basing on ecological principles.

**Key words:** marine ecosystem; pollution of mariculture; bioremediation