



摘 要 随着海水养殖的快速发展,养殖水体的自身污染和富营养化已成为严重的环境问题。作为生物滤器的大型海藻可以有效地吸收、利用养殖环境中多余的氮、磷等营养物质,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,对富营养化海水养殖区进行生物修复。文章概述了大型海藻对富营养化海水养殖区进行生物修复的原因、原理、优点、研究进展以及应用大型海藻产生的效益和需要注意的问题。并指出在富营养化海水养殖区养殖大型海藻进行生物修复的方法可以实现海水养殖业的可持续发展。

关键词 大型海藻;富营养化;生物修复;效益

据 FAO (2002) 统计,水产养殖向全球提供的鱼、甲壳类和软体动物,已从 1970 年占总产量的 3.9% 增加到 2000 年的 27.3%,1970 年以来世界水产养殖的年均增长率为 9.2%,其中中国海水养殖产量的年均增长率为 14%。据 FAO (2001) 统计,有 1/3 的海产食物是通过水产养殖提供的。海水养殖能在近 30 余年来得到如此快速地发展,是由于它是重要的潜在蛋白质源,可弥补世界粮食产量的不足,缓解人口增长对食物生产的巨大压力。近年来随着我国相继推出海洋捕捞“零增长”、“负增长”政策,海水养殖开始成为渔业经济的新增长点。2004 年我国海水

水产品总产量达 2 715 万 t,其中海水养殖产量为 1 309 万 t,比上年增长 4.4%。海水养殖如此快速的发展,使得人们开始考虑由此而对环境带来的各种负面影响,尤其是需要提供外加能量(食物)的鱼、虾、贝养殖。近海海域由海水养殖排放的 N、P 等营养物质引起的水体富营养化污染日益加剧,已经成为全球近海环境恶化的主要原因。如何改善目前海水养殖区的水质状况,研究快速消除养殖环境中 N、P 等污染物的方法、恢复和优化养殖环境、实现海水养殖业的可持续发展,是摆在我们面前的重要研究课题。目前国内外的学者普遍认为养殖大型海藻是吸

*基金项目:国家专项 (908-02-04-02)。

收、利用营养物质、延缓水域富营养化的有效措施之一。

本文综述了国内外的相关研究成果,认为大型海藻对富营养化海水养殖区进行生物修复是实现我国海水养殖业可持续发展的有效途径之一。

一、海水养殖区的富营养化

(一) 原因与现状

随着我国海水养殖的蓬勃发展,在集约化网箱养殖过程中,由于养殖密度高、投饵量大,养殖动物进食后留下的残饵以及排泄物的量也比较大。这些养殖动物粪便、残饵及排泄物等已成为除陆源污染外养殖海域的重要污染源。养殖区自身污染物的排放、沉积也可引起局部海域水体富营养化,造成水质恶化。尤其是在一些水体交换较弱而养殖密度较高的网箱养殖海区,水体DO通常较低,N、P的含量较高。高浓度N、P为主要特征的水体富营养化是影响海水养殖区功能发挥的主要因素,已成为困扰我国海洋资源可持续利用的严重环境问题。

集约化海水养殖需要投入大量的原料,但其养殖种类只能利用很小一部分,剩余下来的原料会当作废料排到环境中。通常在鱼类养殖中只能收获通过进食所吸收转化的不到1/3的营养物质。而养虾则更少,吸收范围在6%~21%之间。在养殖动物的饲料中添加的营养物质大部分会释放到水环境中,以饲料中N的含量100%计,双壳贝类排放到水体中的N占总投入N的75%,鲍鱼、鲑鳟鱼和虾类排放到水体中的N分别为投入N的60%~75%,70%~75%和77%~94%。而且鱼类网箱养殖还会增加其周围海域的溶解态营养物质的浓度。在鱼类网箱养殖中,有大约50%~60%的供应N以溶解态的形式(主

要是 $\text{NH}_4\text{-N}$)排放到邻近的水体中。Wallin和Haknis对养殖过程中P的平衡进行了研究,发现饲料中能被鱼类所利用的P仅有15%~30%,水体中约有16%~26%的溶解态P和51%~59%颗粒态P。Funge-Smith等曾对精养虾池中的物质平衡作过研究,发现在养殖过程中只有10%的N和7%的P被收获,其他都以各种形式进入环境。也有研究表明,养虾排出的N、P废物占投喂食物营养物质总量的77%~94%。在贝类养殖中,贝类所排泄的粪便含有大量C、N、P等营养物质。Kawlsky和Evans研究了自然种群的贻贝(*Mytilus edulis*)产生粪便的情况,结果显示每年每克干重贻贝产生粪便量为1.76 g干重物,其中含有0.13 g的C、0.001 7 g的N和0.000 26 g的P。据Schramm估计,波罗的海每年由贝类再生的无机氮和无机磷都超过了陆源输入量,分别可达25万t和7.7万t。

(二) 危害

随着我国海水养殖规模的不断扩大和养殖密度的不断增加,海水养殖区的富营养化也越来越严重,其危害主要如下。

(1) 许多养殖区多设在风浪小、水流平缓的内湾或有人工防波堤的半封闭性海湾。湾内水浅,养殖区的筏架和网衣使水流速度明显减慢,N、P等营养物质不能尽快地通过水体交换输出湾外,而长期积累超过了环境容量。由于生态系统具有滞后性和缓冲能力,一个区域的富营养化作用过程可能会有点缓慢,会在数年的时段内起作用。据报道,南海海区海水网箱养殖水域在开始养殖后短则2~3年,长则3~5年就会出现不同程度的老化。其特征是:网箱养殖水域营养指数偏高,与非养殖水域相比相差数倍至数十倍;下层水体贫氧;表层沉积物中硫化物、有机质和营养盐含量很高。



(2) 在网箱养殖中为了提高产量,养殖者大量投喂配合饲料和鲜活饵料,许多未被食用的残饵沉入水底,与粪便、排泄物一起堆积于网箱底部,导致底质淤泥变黑发臭,养殖区底层水体高度富营养化。这些沉积在底层的 N 和 P 在适宜的条件下就会重新释放到水里,造成二次污染,延续水体的富营养化过程从而加剧水体的恶化。而且沉积物中有机物的积累使网箱底质耗氧量明显增加,很容易形成缺氧层。在缺氧条件下,沉积物中释放的氨、硫化氢和甲烷严重威胁鱼类和其他海洋生物的生存,同时溶氧低的底层海水上涌也会很容易导致鱼类死亡。

(3) 鱼类养殖场排出水的 N/P 比非常高,可能生成有毒的或无毒的藻类水华。海水养殖区自身污染严重,常引起浮游生物数量异常增殖,病害和赤潮频发,严重影响海水养殖业的发展。养殖水域高浓度的 N、P 可加快浮游植物的生长,浮游植物的快速生长就有可能导致水华,而水华中的有毒种类严重威胁鱼、虾、贝类的生存,藻类的死亡又消耗水中的溶氧,从而导致养殖品种的伤害和死亡。另外在对虾养殖中,由于虾池需要经常排换水,导致大量污水排入海中,这些带有大量残饵、粪便的水中含有氨氮、尿素、尿酸及其他形式的含氮化合物,加速了海水富营养化进程,为赤潮生物提供了适宜的营养环境。

二、大型海藻对富营养化海水养殖区进行生物修复的原理及优点

(一) 原理

大型海藻的生物修复作用是指通过大型海藻对污染物的吸收、降解和转移等作用,达到减少或最终消除海水养殖环境污染,使受损的沿海生态系统得以恢复。养殖废水中如此高的 N、P 含量,为大型海藻对海水养殖的生物修复提供了

依据。

大型海藻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。在有大量 N 和 P 的富营养化海水养殖区混养的大型海藻生长良好,许多海藻只需经过几个月的生长就能形成相当高的生物量,同时大量的 C、N 和 P 被藻体吸收。当这些海藻被收获时,营养盐就从海水中转移到陆地。对大型海藻化学成分的分析表明,大型海藻组织中具有丰富的氮库,可以高效地吸收并储存大量的营养盐。大型海藻组织中的氮库一般包括:无机氮库、氨基酸氮库和非蛋白可溶性有机氮库(如叶绿素、藻红素等)、蛋白质氮库(如酶类)等。大型海藻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。

在大型海藻与鱼、虾、贝等多种生物混养的综合养殖系统中,鱼、虾、贝和细菌的代谢消耗水体 DO,降低 pH 值,释放 N、P 等无机营养盐;大型海藻则进行光合作用,吸收利用水体中 N、P 等无机营养盐,产生氧气,提高水体 pH 值。因而,养殖系统中因饵料输入、体内代谢造成的 N、P 等营养负荷,可以通过大型海藻的吸收得到减缓。从而达到大型海藻对养殖环境的生物修复。

(二) 优点

利用大型海藻对富营养化海水养殖区进行生物修复最大的特点是系统不引入大量的外来物质,靠养殖体系自身的营养物质和能量而起作用,大型海藻在适宜的条件下自行生长,不需要人为施加能量,是一个自发的过程。因此,大型海藻的生物修复是一个自然过程,而且比较经济。在富营养化海水养殖区混养大型海藻具有以

下优点。

(1) 大型海藻处于第一营养级,直接收获有利于海洋生态系统的能量向人类流动,从而可以取得更大的生态效率。

(2) 可以降低无机营养物质的近海排放量,减少可能暴发的毁灭性和造成巨大损失的超营养事件。比较适合大面积的富营养化污染治理,而且不易带来二次污染。

(3) 对养殖者而言,当前氮和磷的排放(未摄食和/或排泄)意味着投入产出比降低,而采用大型海藻进行营养物质的吸收则可通过各种海藻食品和生化产品的形式挽回一定损失。

(4) 行政执法部门对无机营养物质排放量的控制日益严格,养殖水体可以通过混养大型海藻来进行生物修复,从而避免违法行为。

(5) 大型海藻对水体营养物质的去除可以为海水养殖管理者提供新型可持续发展、环境友好的技术支持,有利于保持近岸海域生态的健康。

(6) 大型海藻的快速生长能力和可再生能力,可使其在一个生长季节中重复收获,如 *Porphyra* 可以每 9~15 天采收一次,从而可以连续地去除近岸水体中的营养物质。

三、大型海藻对富营养化海水养殖区进行生物修复的研究进展与应用

(一) 研究进展

生物修复 (bioremediation) 是指受污染环境中的污染物在自然条件或可控环境条件下通过各种土著生物、外来生物或强化生物(突变体和基因工程转化体等)作用转化为无毒物质或对该污染环境无害化的一种生物净化过程。而现在人们普遍能够接受的、更加安全可靠的方法是利用植物对环境进行修复,即植物修复(photoreme-

diation)技术。大型海藻的生物修复是植物修复的一种,它是一个自然过程,易被公众接受。藻类生物修复技术是近年来发展起来的新型环境生态技术,主要用于污水处理。大型海藻通过对营养物质的吸收和同化,在富营养化水体的净化过程中起着关键作用,是从真正意义上消除营养负荷、并是对富营养化水体进行长效控制的有效途径。

国外采用大型藻类处理封闭海水养殖系统的废水始于 20 世纪 70 年代中期。后来在 90 年代被很多学者所重视,他们认为集约化和半集约化海水养殖的废水适合作为海藻生产的营养来源,并且这种混养海藻的方法可以有效减少环境对溶解态营养物质的负荷量。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,其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。正是这些研究成果逐渐发展和完善了鱼、虾、贝类和大型海藻等多种生物混养的综合养殖模式。

(二) 应用

在鱼、虾、贝类等海水养殖系统中混养大型海藻可以有效的减轻养殖废水中营养物质对沿海生态系统的影响,从而达到对富营养化海水养殖区进行生物修复的目的。

1. 鱼类养殖

Neori 等在鱼类集约化养殖中混养大型海藻,研究表明:两年中养殖水体的 DO、pH、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 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。据一些研究表明:在集约化鱼类网箱养殖中混养大型海藻,可以吸收高达 90% 的铵态氮。Troell 等发现在鲑鱼网箱养殖区附近养殖大型海藻江蓠,至少可以减少养殖水体中 6.5% 的氮盐和 27% 的磷酸盐,从而达到了对富营养化鱼类养殖区进行生物



修复的目的。Haglund 等和 Troell 等通过在鱼类养殖区养殖江蓠,利用鱼类养殖过程中产生的废物作为海藻生长的营养源,降低了养殖水域中 N 和 P 的浓度,并同时提高了单位水体综合养殖的经济效益:1 ha 的海区每年可生产江蓠 258 t,通过江蓠的收获,可从水体去除 1 020 kg N 和 374 kg P。Troell 等还证实,江蓠与鲑鱼共养,可去除鱼类养殖过程中排放到环境中可溶性铵的 80%~95%。

2. 对虾养殖

大型海藻江蓠(*G. parvispora*)能利用虾池废水作为肥料,产出高质量对虾,其相对生长速率(RGRs)高达 4.7%/d。江蓠生长在富营养的虾池废水环境中,体内 N 含量迅速增加,5 天时间就高了 3%,其 C/N 比接近 10;而生长在非富营养环境中的江蓠,其 C/N 比值在 20~30 之间,体内 N 含量明显降低。这就表明江蓠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。在养虾污水中的混养牡蛎和江蓠,总 N 和总 P 可以分别减少 41%和 52%(去除超过 90%的铵盐、硝酸盐、亚硝酸盐和磷酸盐)。裴鲁青等进行了不同密度的江蓠与不同的水产动物(虾、贝和鱼)混养的初步研究,认为混养大型海藻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,具有明显的增氧和保持水体 pH 值稳定的效果。Enander 和 Hasselström 同样证明了在养虾污水的池塘中混养贻贝和海藻,可以减少排出水中 81%的铵盐、19%的硝酸盐、72%的总氮、83%的磷酸盐和 61%的总磷。大型海藻大叶藻与对虾混养,可以净化虾池水质,改善虾池底质条件,丰富饵料生物,促进对虾的生长,提高对虾产量。每亩虾池的产量可提高 26.6%,纯利润可提高 190.5%,经济效益显著增加。

3. 贝类养殖

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,在贝类养殖中间养大型海藻可大大降低养殖水体中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的含量。在扇贝养殖区中间养海带,结果是海带在混养获得的效益比单养高出 132.0%,生产成本减少了 27.6%,扇贝生产成本降低了 41.9%,这表明混养大大优于单养。同样贻贝与海带混养试验等,都取得显著的经济效益和生态效益。韦玮等系统研究了桑沟湾栉孔扇贝和海带混养模式,表明利用海带等可利用氨氮生物控制扇贝养殖所产生 $\text{NH}_4\text{-N}$ 水平,具有一定的可行性。1993—1995 年间, Qian 等在海南岛三亚进行了大型海藻异枝麒麟菜和马氏珠母贝小规模混养研究,发现异枝麒麟菜和马氏珠母贝在混养区较各自的单养区都具有较高的生长率,其中异枝麒麟菜生长快的原因是得益于珠母贝排泄物中的营养。这也就说明在贝养殖场混养大型海藻可以通过吸收水体中的营养物质来改善水质和提高养殖贝类的产量。大型海藻孔石莼(*U. pertusa*)对养殖鲍鱼的污水具有生物修复作用,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,试验后 3 h 对氨氮、亚硝酸盐和硝酸盐的去除率分别达到 70.1%、45.0%和 31.3%,试验 9h 后已检不出氨氮,24 h 中对亚硝酸盐和硝酸盐的去除率分别为 50.6%和 64.1%,孔石莼对磷酸盐的吸收相对三氮较少,3 h 和 34 h 去除率分别为 10.9%和 19.4%,孔石莼具有净水、节能和收获饵料的综合效果。

四、大型海藻对富营养化海水养殖区进行生物修复产生的效益

采用大型海藻对富营养化水体进行修复不

仅仅具有环境效益,还具有很大的经济效益和生态效益。

(一) 环境效益

大型海藻能大量吸收海水中的氮、磷、有机物和 CO_2 , 同时放出 O_2 。Chopin 等采用红藻 *Porphyra* 与鲑鱼混养, 并经常收割来去除养殖水体的营养盐污染。法国 Lannion 湾每年接受陆源无机氮 1 500~2 000 t, 而该湾每年可从水体转移 10 000~15 000 m^3 绳养藻类, 沿法国布列塔尼半岛 (Brittany) 的海岸线, 每年收获藻类的湿重高达 1 万 t, 藻类的大量收获可以将大量的 N、P 等营养物质带出水体, 从而使两个海域的富营养化得以缓解, 环境效益显著。

(二) 经济效益

大型海藻是人类重要的食物、医药和轻工原料, 也是海洋动物的饵料供应者, 通常具有较高的经济价值。大型海藻能充分地利用养殖废水中的溶解态营养盐而转化成具有较高价值的产品从养殖系统里输出, 可提高养殖系统单位面积的产出, 降低养殖成本, 并可增加提高养殖品种的产量、提高养殖品种质量, 经济效益非常显著。某些海藻及提取物既是传统的海洋蔬菜, 又是现代海洋食品。如红藻江蓠 (*Gracilariae*) 等是重要的经济海藻, 可以直接供人类消费, 也可作为生物工程原料 (琼脂、多糖、藻蓝蛋白、藻红蛋白和血凝素等生物活性物质) 进入市场创造效益, 在国际市场上需求量很大。

(三) 生态效益

大型海藻的生态效益可以从以下四个方面来衡量。

(1) “生态足迹 (ecological footprint)” 的降低程度。Kautsky 等将“生态足迹”的概念引入海洋养殖, 定义为消除 1 m^2 养殖活动带来的

富营养需要的开阔近海面积。1 m^2 鲑鱼养殖释放的氮和磷分别需要 340 m^2 和 400 m^2 浮游植物同化, 对应的生态足迹分别是 340 m^2 和 400 m^2 , 智利通过江蓠 (*Gracilariae*) 与鲑鱼混养, 将氮和磷的生态足迹分别降低到 150 m^2 和 25 m^2 。

(2) 物质和能量利用效率的提高。在以大型海藻为基础的混合养殖系统中, 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, 可以把营养损耗及潜在的价值损耗降低到最少。

(3) 生物多样性提高。系统中生物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。以大型海藻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) 生态系统功能的增强。大型海藻虽然比浮游植物生长缓慢, 但可以提供比生命周期短的浮游植物更多的生物量, 提高了养殖系统的容纳量。更重要的是大型海藻是沿海生态系统重要的空间组成部分, 可以为附生生物群落提供稳定的基底, 为海水养殖动物提供栖息地 (物质支撑、庇护所、产卵场), 并可通过降低浊度和流速、沉积物传输和再悬浮来改变水动力条件。如果长期生长的水生植物 (大型海藻) 向生命周期短的水生植物 (浮游植物) 转变, 产生的严重后果是加速了碳和营养物质的转换率, 随之而来的异养活动导致生态系统能流的变化, 从而也就降低了生态系统的功能。



五、大型海藻对富营养化海水养殖区进行生物修复需要注意的问题

尽管大型海藻对富营养化海水养殖区能进行非常有效的生物修复,其理论研究和实践探索也在得到迅速发展,但在筛选大型海藻进行生物修复时仍然有很多问题值得注意。

(1) 首先要考虑到大型海藻养殖的经济价值,所以最好筛选净化能力大的经济型海藻作为富营养海水的修复生物。比如一些褐藻和红藻既对鱼类养殖废水中的营养物质有很高的净化能力,又有较高的经济价值。

(2) 在选择大型海藻时一定要筛选适于当地近岸海域水体富营养化修复的合适大型藻类。Chopin 等指出利用海藻进行生物修复时,需根据海藻对营养物质吸收效率的差异来选择最合适物种。在将实验室系统中得到的最佳结果按比例放大到现场时需要对所选物种的生理学特征有足够的了解,实现由小规模试验系统转变到大规模的商业化系统。此外,还要注意筛选出的大型海藻在富营养物质胁迫下的生理生长特性,确定其发挥富营养水体修复作用的生长范围。

(3) 大型海藻与养殖品种进行综合养殖时要采取合理的搭配密度。因为对一个特定的养殖生态系统,其养殖容量和环境容量是一定的。尽管在大型海藻与鱼、虾、贝类等构成的复合养殖生态系统中,通过大型海藻对水体中无机营养盐吸收,系统的自净能力增强,水体的养殖容量提高,但养殖生物间的密度搭配仍然是系统维持较长时期稳定的关键。如果大型海藻的养殖密度太低,就起不到修复养殖水体的目的;而大型海藻的养殖密度过高,又会导致水体营养盐含量过低。

六、结语

实现海水养殖业的可持续发展,只有选择适宜的海水养殖种类和采用相应的海水养殖技术。其关键在于运用“整体、协调、循环、再生”的生态学原理,发展生态型的健康养殖技术,将海水养殖的废物控制在水体的容纳量内,人为干预调控海水养殖系统,使养殖种类内部呈现互为目的良性循环,协调养殖生物与养殖环境的关系。

作为生物滤器的大型海藻能有效地吸收、利用养殖环境中多余的 N、P 等营养物质,显著降低养殖环境中的营养盐含量,使水体保持较低的营养盐状态,从而减轻养殖废水对环境的影响,同时又提高了养殖系统的经济输出,因此被广泛应用于鱼、虾和贝类等的综合养殖系统中。在富营养化海水养殖区养殖大型海藻进行生物修复的方法是实现我国海水养殖业可持续发展的有效途径之一。

参考文献

- 1 <http://www.fao.org/docrep/005/y7300c00.htm>, 2004-04-15. [FAO.2002.The state of world fisheries and aquaculture 2002 EB/OL]
- 2 FAO.The State of World Fisheries and Aquaculture 2000 Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2001
- 3 董波.我国海水养殖动物病害发生现状及其基础研究进展[J].生物技术世界,2005,(04M):29~30
- 4 Beveridge. M.C.M.Cage Aquaculture. 2nd ed..Fishing News Books Ltd., Cambridge, 1996,346(余略)

(作者单位¹ 国家海洋局第二海洋研究所

² 国家海洋局海洋生态与生物地球化学重点实验室
³ 浙江大学环境与资源学院)