

水产养殖环境生物修复技术的研究进展

Advances in bioremediation researches on aquacultural environment

冯敏毅¹, 马 甦¹, 文国樑², 于明超¹

(1.中国海洋大学 教育部海水养殖重点实验室, 山东 青岛 266003; 2.中国水产科学研究院 南海水产研究所, 广东 广州 510300)

中图分类号: S949 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2006)09-0085-04

据预测,人类对鱼类的消费量在今后 15 a 内将增加 50%^[1], 水产养殖业发展迅猛。但是由于水产养殖业发展不规范, 养殖与水域生态环境的矛盾也越来越突出, 水产养殖已对周围环境产生了较大压力。中国是世界水产养殖第一大国, 养殖对周边生态环境的影响也更为严峻, 李秋芬等^[2]的调查表明中国黄渤海沿岸重要对虾养殖区已经受到了严重的有机污染, 许多地区难以满足对虾养殖的需要, 更不能满足苗种生产的需要。

许多学者^[3-6]的研究表明在养殖过程中饵料利用率较低, 残饵、养殖生物粪便等是水产养殖环境污染的主要来源, 主要污染是有机氮污染, 造成水体的富营养化和底泥的 C、N、P 富集污染以及底泥氧化还原电位降低。因此, 水产养殖环境修复技术的研究已经成为迫切的需要。

环境修复技术有物理修复、化学修复法及生物修复。物理、化学修复方法主要是通过清淤、沉淀、过滤等物理过程去除污染物或施用化学试剂等使污染物质发生一定的化学变化, 转化为无害物质的技术工程, 速度快但费用较高, 而且二次污染的可能性大。生物修复方法是利用微生物、植物及其他生物, 将环境中的危险性污染物降解为二氧化碳和水或转化为其他无害物质的工程技术系统, 可分为原位修复和异位修复^[7]。相对于其他修复技术来说, 生物修复具有费用低廉, 处理操作简单以及安全性较高等优点, 是一项发展潜力较大、环境友好的处理技术^[8-11]。把生物修复技术应用到水产养殖环境修复中, 对恢复和优化水产养殖环境, 推动中国水产养殖业的可持续发展具有重大意义。

1 水产环境生物修复技术的研究现状

1.1 微生物修复技术

1.1.1 微生物修复原理

微生物修复在生物修复中应用较早, 早期生物修复就是专指微生物修复。微生物修复的原理是: 微生物分解有机物作为碳源和能源而生活, 有机物在微生物各种酶的作用下, 经过厌氧或好氧的过程, 发生一系列的化学反应, 最后被降解, 转化为无害物质的过程^[7]。微生物修复早期主要应用于石油泄漏造成的环境污染, Prichard 等^[12,13]利用微生物进行阿拉斯加石油泄漏后的环境修复, 取得很好的效果。

由于微生物修复技术的优点, 生物修复技术在水环境修复方面的研究引起重视, 逐渐应用到水产养殖的污染处理中。在养殖环境中主要利用微生物的脱氮作用, 去除养殖污水的氮和分解有机污染物。微生物脱氮主要是通过硝化和反硝化来完成的。硝化是指 NH_4^+ 氧化为 NO_2^- , 然后再氧化为 NO_3^- 的过程。反硝化作用就是在厌氧的条件下由反硝化菌将 NO_3^- 还原为 N_2 的过程。

1.1.2 微生物修复在水产养殖环境修复中的研究现状

微生物修复技术在水产养殖中主要应用于养殖环境的原位修复中, 主要处理底泥的有机污染和水体的富营养化问题。

在底泥有机物处理方面, 1994 年日本利用枯草杆菌处理鱼池底泥取得显著效果, 底泥中的有机污染得到有效处理^[14]。李卓佳^[15]用芽孢杆菌为主的复合微生物制剂分解养殖鱼池的有机污染实验, 一个月池底 3~5 cm

收稿日期: 2004-03-25; 修回日期: 2004-12-14

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2002AA648010)

作者简介: 冯敏毅 (1978-), 男, 广西合浦人, 硕士, 主要从事养殖生态研究, 电话: 0532-82032195, E-mail: fffny@163.com; 马甦, 通讯作者, 博士生导师, E-mail: mashen@mail.ouc.edu.cn



的污染底质被分解。在菌类筛选方面,李秋芬^[16]报道,从虾池底泥中分离出 331 株细菌,筛选到 10 株有机降解菌,72 h 内化学耗氧量(COD_{Mn})去除率分别在 60% 和 70% 以上,同时李秋芬^[17]对虾池修复作用菌生长影响因素作了研究。近几年来,固定化细菌处理工艺等高效处理系统也在研究应用中。Lekang 等^[18]2001 年报道了一种生物膜处理法,生物膜能大量吸附小颗粒物质,能去除 43.2% 的总磷和 7.3% 的总氮。2002 年, Paniagua^[19]报道用玻璃纤维固定化细菌处理对虾养殖废水,在 20 d 的处理周期中氨氮和亚硝氮的去除率分别达到 97% 和 95%。

微生物修复优点明显,微生物修复已经逐渐从应用机理和基础研究转向实际应用方面,并且取得了明显的效果,但仍没能真正大规模、大范围地应用到水产养殖的环境修复工程中。微生物修复也有缺点:对磷的处理方面的研究较少,而且微生物处理相对于物理化学方法来说处理速度较慢,受处理环境变化的影响较大。因此建议加强以下几个对养殖环境的微生物修复方面的研究:(1)加强修复作用菌的研究,筛选出高效作用菌或利用现代生物技术构建高效基因工程菌^[2];(2)加强环境因子对修复菌修复能力影响的研究,提高微生物修复在实际应用中的效率;(3)加强微生物修复技术的应用性以及大范围推广的研究以及微生物技术在中国水产环境修复的应用。

1.2 植物修复技术

1.2.1 植物修复的原理

植物修复就是利用植物根系(或茎叶)吸收、富集、降解或固定受污染土壤、水体、空气中的污染物,以实现消除或降低污染环境的污染强度,达到修复环境的目的^[20]。植物修复主要是通过以下几种方式实现^[21]:

(1)植物提取;(2)植物挥发;(3)根系过滤;(4)植物钝化。植物修复相对于其他修复技术方式有着自身的优点^[22,23]:适用于大面积、低浓度的污染位点,成本低;适用范围广,可处理多种污染物和多种环境;是一个自然过程,安全性更高;收获相对容易,而且有相当的种类可获得额外的经济效益。

植物对污染物的修复研究最多的是关于植物对各种有机物污染、重金属污染的处理,均取得不错的效果。把植物修复应用到水产养殖环境的修复中主要是利用高等水生植物或者藻类的根系、茎叶等功能单位吸收提取养殖废水中的氮、磷等主要污染物以达到净化底质水质的目的。

1.2.2 植物修复在水产养殖环境修复中的研究现状

在植物种类筛选方面,刘剑彤^[24]对高效去除污水中的氮、磷的植物作了筛选研究。研究表明,以皇草(*Pennisetum purpurem schumach* × *Pennisetum alopecaroides*)为植被的垄沟系统具有较高的净化效能,N 和 P 的去除率分别为 83.2% 和 76.3%;以水稻远透 1 号(*Oryza sativa* L.)和水稻 Suakoko8(*Oryza glaberrima*)为植被的漫灌系统对污水中的氮有很高的去除利用效能,去除率分别为 84.7% 和 84.3%。Wang 等^[25]在实验室中对几种湿地植物在生物修复方面的应用作了研究,其中的两栖蓼(*Polygonum amphibium* L.)对氮、磷有着较强的吸收能力。在应用处理方面,吴振斌等^[26]研究了淡水沉水植物:苦草(*Vallisneria spiralis* L.)、狐尾藻(*Myriophyllum spicatum* L.)、菹草(*Potamogeton crispus* L.)等对富营养化水体的处理效果,结果表明其对降低化学耗氧量(COD_{Cr})和 5 日生化需氧量(BOD₅)作用明显,COD_{Cr} 和 BOD₅ 只为对照的一半,并能有效处理水体中的氮、磷。藻类应用于海水养殖废水处理效率高、费用低,有着巨大的前景^[23],研究方向着重于大型海藻方面。Chung 等^[27]讨论了大型藻类为生物滤器处理鱼类养殖产生的富氮废水的可能性,认为大型海藻是非常好的水质净化生物滤器。Haglund^[28]及 Troell^[29]等分别利用细基江篱(*Gracilaria tenuistip*)处理鱼类养殖用水获得了很好的效果。Troell 等^[29]使用细基江篱也同样效果良好。Troell 等^[30]的研究表明,江篱能去除鱼类养殖过程中排放到环境中可溶性铵的 50%~95%。Brown 等^[31]研究了耐盐植物对盐碱地养殖废水的处理,结果表明,其可有效去除养殖废水中的总氮(98%)、无机氮(94%)、总磷(99%)和溶解活性磷(97%)。Nelson^[32]提出利用可食用红藻类处理对虾养殖废水,藻体的氮含量从 1% 上升到 3%,收获 100 kg 藻就从废水中提取 3 kg 氮,效果显著。

植物修复的优点让植物修复技术的研究得到不断的加强,但是植物修复也存在不足之处:植物修复过程较慢;营养物质集中在植物体内并没有真正去除,植物的收获需要增加额外的费用;环境因子对植物的生长和去除效率影响较大。因此建议加强植物修复技术以下几个方面的研究:(1)高效高适应性植物品种的选择或通过现代生物技术研究新型植物;(2)加强经济修复植物的研究,降低处理成本提高效益;(3)修复植物大规模生产培育技术以及实际应用过程中工程管理技术的研究有待加强。

1.3 其他生物修复技术

除了微生物修复以及植物修复以外,还有一些特殊的生物应用到水产环境的修复中,这一类的修复技术主要是通过一些底栖生物或者滤食性生物对养殖环境中的残饵等有机碎屑利用,减少人工投入的有机物浸出物对水体的污染,并可获得一定的经济效益,相对于前两种修复技术来说此类研究报道较少。

1993年堤裕昭^[33]报道了使用多毛类处理养殖池底的有机污染的效果明显。Brooks等^[34]在三文鱼养殖场使用化学方法和环节动物方法来修复养殖底质,有效地降低底泥中硫化物的含量,提高底泥中的氧化还原电位。Jones等^[35]利用澳洲囊牡蛎(*Saccostrea commercialis* (Iredale and Roughley))、可食江蓠(*G.edulis*)等处理系统处理对虾养殖废水,结果表明,牡蛎能使废水中的细菌数量降到对照的35%,总颗粒物(2.28~35.2 μm)降为对照组的29%,总氮和总磷分别下降为对照组的66%和56%。

此类生物修复方式研究很少,选择使用的多为适应养殖环境的养殖池塘土著生物,个体生物量较小或者生长周期长,单位时间内对养殖中产生的大量残饵利用少,而且对残饵等有机碎屑利用后同样产生废物排泄。滤食性生物能大量减少水体中的有机颗粒,减少颗粒浸出物质对水质的影响,但是由于滤食性生物的真粪、生物沉降作用,生物密度过大会加快池塘底质的有机污染^[36]。因此,此类修复技术的使用要求较高,单独使用难度较大。

1.4 综合生物修复技术

由于各种生物修复技术都有一定的缺点,因此近几年来对高效综合生物修复系统进行了一些研究,主要利用现有的各种修复技术的优点,综合使用两种或两种以上的修复技术高效处理养殖污水。

Lin等^[37]在实验室中研究了人工湿地系统对养殖废水的处理,主要是通过湿地系统中沉淀、沉积、吸附等物理过程去除颗粒,微生物的脱氮作用以及植物吸收处理水体溶解性污染物。实验的结果表明,人工湿地系统能去除86%~98%的氨态氮,95%~98%的总无机氮,磷的去除率是32%~71%。王晓玥等^[38]利用菩提子和美人蕉湿地系统处理西湖非点源污染,构建的人工湿地充氧能力较强,对总氮的去除率维持在73%以上,总磷的去除率为49%~71%,出水水质总体达到国家II、III类地面水标准,认为该人工湿地可用于中等程度污水的治理。

Jones等^[39]在实验室设计了一种综合对虾养殖污水

处理系统,通过3个步骤处理水体中的污染物质:第一步通过自然沉积去除悬浮颗粒污染物,第二步通过滤食性贝类(牡蛎等)进一步处理颗粒磷污染物,还能处理细菌和微藻。第三步经过大型藻类(江蓠等)吸收去除溶解性营养盐。实验结果表明处理效果明显,TSS、TN、TP、NH₃⁺、NO₃⁻、PO₄³⁻等降为初始浓度的12%、28%、14%、76%、30%和35%,细菌数量降为初始的30%,叶绿素a降为初始的0.7%。

综合生物修复技术结合了多种修复技术的优点,能对养殖污水进行多方面处理,处理效率较高,并且养殖者能获得一定的额外经济效益,是一种有潜力的养殖废水处理技术。但综合生物修复技术相对复杂,需要更高的管理技术与工程技术,近年来的研究主要还是停留在实验水平上,建议加强以下方面的研究:(1)加强综合处理系统基础研究,进一步提高效率;(2)加强相关应用工程技术开发以及规模化应用的可行性分析;(3)加强生态效益与经济效益的综合评价。

2 总结

无论从养殖产量还是从养殖规模来说,中国都是世界第一水产养殖大国,但是中国的水产养殖技术水平相对较低,养殖废水的排放也没有相关的法律法规约束,因此给局部环境造成了非常大的压力,水产养殖的可持续发展受到了严重挑战,养殖环境的修复已经刻不容缓。养殖环境生物修复技术在20世纪80年代末90年代初起步,相对于物理化学修复技术而言其低费用、高安全性、简单易行等引起了许多科学工作者的关注,近年来在基础性研究方面取得了较大的进步,实践应用也取得了一定的成果。把现代生物技术应用到修复生物的改良中,加快生物修复技术规模化、工程化培育等应用技术以及相关领域的研究,生物修复技术必定能在修复养殖环境中起到重要作用。

参考文献:

- [1] Svendrup jenson S. Fish demand and supply projections [J]. *Naga*, 1997, 20: 77-78.
- [2] 李秋芬,袁有宪. 海水养殖环境生物修复技术的研究展望 [J]. *中国水产科学*, 2000, 7 (2): 90-92.
- [3] Gowen R J, Bradbury N B. The ecological impact of salmonid farming in coastal waters: a review [J]. *Oceanogr Mar Biol Ann Rev*, 1987, 25: 563-575.
- [4] Ackefors H, Enell M. Discharge of nutrients from Swedish fish farming to adjacent sea areas [J]. *Ambio*, 1990, 19: 28-35.
- [5] Robertson A I, Phillips M J. Mangroves as filters of shrimp pond effluent: predictions and biogeochemical research needs [J]. *Hydrobiologia*, 1995, 295: 311-321.

- [6] 罗琳, 舒廷飞. 水产养殖对近海生态环境的影响 [J]. 水产科学 2002, **21** (3): 28-30.
- [7] 马文漪, 杨柳燕. 环境微生物工程 [M]. 南京: 南京大学出版社, 1998.
- [8] Autry A R, Ellis G M. Bioremediation: An effective remedial alternative for petroleum hydrocarbon-contaminated soil[J]. **Environ Prog**, 1992,**11**(4):318-323.
- [9] Hicks B N, Caplan J A. Bioremediation: A natural solution[J]. **Pollution Engineering**, 1993,**25**(2):30-33.
- [10] Macdonald J A, Rittman B E. Performance standards for in situ bioremediation[J]. **Environ Sci Technol**, 1993,**27**(10):1 974-1 979.
- [11] Sangamaheswaran A P, Kumar R S. Bioremediation technology for the treatment of shrimp farm effluent: an ecofriendly approach[J]. **Perspectives In Mariculture**, 2001, 413-420.
- [12] Pichard P H. EPA's Alaska oil spill bioremediation project [J].**Environ Sci Technol**, 1991,**25**(3):372-379.
- [13] Pichard P H. Oil spill bioremediation: experience, lessons and results from the Exxon Valdex oil spill in Alaska [J]. **Biodegradation**, 1992,**3**(2-3):315-335.
- [14] 佐贺新闻. 用枯草菌净化海底堆积物[J]. 养殖[日], 1994, **3**(7): 135.
- [15] 李卓佳, 张庆. 有益微生物改善养殖生态研究 I. 复合微生物分解有机底泥及对鱼类的促生长效应[J]. 湛江海洋大学学报, 1998, **18** (1): 5-8.
- [16] Li Qiu-fen, Qu Ke-ming, et al. Isolation and selection of functional bacteria for bioremediation of shrimp culture environment [J]. **Chinese Journal of Applied & Environment Biology**, 2001,**7**(3):281-285.
- [17] 李秋芬, 辛富言. 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.
- [18] Lekang O I, Anne M B, Ingrid S. Biological lamella sedimentation used for wastewater treatment[J]. **Aquacul Eng**, 2001,**24**:115-127.
- [19] Paniagua M J, Garcia O. Ex-situ bioremediation of shrimp culture effluent using constructed microbial mats [J]. **Aquacultural Engineering**, 2003, **28**: 131-139.
- [20] 喻龙, 龙江平. 生物修复技术研究进展及在滨海湿地中的应用[J]. 海洋科学进展, 2002, **20** (4): 99-108.
- [21] Scragg A. Environmental Biotechnology [M]. Beijing: World Books Press, 2000, 23-46.
- [22] Gopal B. Nature and constructed wetlands for wastewater treatment: potentials and problems [J]. **Wat Sci Tech**, 1999,**40**(3):27-35.
- [23] 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展望[J]. 中国海洋大学学报, 2003,**33** (1): 53-57.
- [24] 刘剑彤, 丘昌强. 复合生态系统工程中高效去除磷、氮植被植物的筛选研究[J]. 水生生物学报, 1998, **22** (1): 1-8.
- [25] Wang Q, Cui Y, Dong Y. Phytoremediation of polluted waters potentials and prospects of wetland plants [J]. **Acta Biotechnologica**, 2002,**22**(1-2): 199-208.
- [26] 吴振斌, 邱东茹. 水生植物对富营养水体水质净化作用研究 [J]. 武汉植物学研究, 2001, **19** (4): 299-303.
- [27] Chung I K, Kang Y H, Yarish C et al. Application of seaweed cultivation to the bioremediation of nutrient-rich effluent [J]. **Algae**, 2002,**17**(3): 187-194.
- [28] Haglund K, Pedersen M. Outdoor pond cultivation of the subtropical marine red alga *Gracilaria tenuistipitata* in brackfish water in Sweden. Growth, nutrient uptake, co-cultivation with rainbow trout and epiphyte control[J]. **Appl phycol**, 1993,**5**:271-284.
- [29] Troell M, Halling C, Nilsson A, et al. Integrated marine cultivation of *Gracilaria chilensis* (Gracilariales, Rhodophyta) and salmon cage for reduced environmental impact and increased economic output[J]. **Aquaculture**, 1997, 156:45-61.
- [30] Troell M, Ronnback P, Halling C, et al. Ecological engineering in aquaculture: some results from EU-project EU-MAC [J]. **Appl Phycol**, 1999, 11:69-78.
- [31] Brown J J, Glenn E P, Fitzsimmons K M, et al. Halophytes for the treatment of saline aquaculture effluent[J]. **Aquaculture** 1999,**175**:255-268.
- [32] Nelson S G, Glenn I P, Moore D, et al. Use of an edible seaweed to improve effluent from shrimp farms [J]. **Journal of Phycology**, 2001,**37**(s3):38-38.
- [33] 堤裕昭. 鱼类养殖场直下堆积したヘドロのイグカイによる浄化の試み[J]. Nippon Suisan Gakkaishi 1993, **59** (8): 1 343-1 347.
- [34] Brooks K M, Stierms A R, Mahnken C V et al. Chemical and biological remediation of the benthos near Atlantic salmon farms [J]. **Aquaculture**, 2003,**219**(1-4): 355-377.
- [35] Jones A B, Preston N P, Dennison W C. The efficiency and condition of oysters and macroalgae used as biological filters of shrimp pond effluent[J]. **Aquaculture Research**, 2002,**33**(1): 1-19.
- [36] 韩家波, 木云雷. 海水养殖与近海水域污染研究进展[J]. 水产科学, 1999, **18** (4): 40-43.
- [37] Lin Ying-Feng, Jing Shun-Ren, Lee D Y, et al. Nutrient removal from aquaculture wastewater using a constructed wetlands system[J]. **Aquaculture**, 2002, **209**: 169-184.
- [38] 王晓玥, 徐青山, 葛滢. 人工湿地对西湖非点源污染源的治理研究[J]. 杭州师范学院学报(自然科学版), 2001, **18**(6): 6-10
- [39] 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.

(本文编辑: 谭雪静)