

# 池塘养殖生物修复技术研究进展\*

邓来富<sup>1,2</sup> 江兴龙<sup>1,2</sup>

(1. 集美大学水产学院 厦门 361021; 2. 鳗鲡现代产业技术教育部工程研究中心 厦门 361021)

**提要** 当前我国池塘养殖多数仍沿用传统的池塘养殖模式, 普遍存在以下问题: 高密度养殖、饵料大量投喂、池塘水质恶化、病害频发等。然而传统的应对方法主要是大量换水, 由此产生的养殖废水直接排放到临近水域, 已导致污染扩散、水环境恶化、水域富营养化等系列问题。为降低池塘养殖面源污染, 确保池塘养殖业健康可持续发展, 本文介绍了目前运用于修复池塘养殖水环境的生物修复主要方法, 包括: 微生物修复法——微生态制剂和固定化微生物、植物修复、动物修复法、生物膜法、几种生物修复技术的综合运用等方法, 展望了生物修复方法在池塘养殖水环境修复方面的应用前景, 认为池塘养殖生物膜修复法因具有良好且稳定的水质改良、节能减排及增产增效等效果而具有广阔的应用推广前景。

**关键词** 生物修复; 生物膜; 池塘养殖

**中图分类号** S949

全球人均鱼类消费量在过去的 50 年增长了一倍, 水产养殖成为今后水产品供应的主力军, 在过去 30 年, 水产养殖生产量增加了 10 倍(Asha *et al*, 2010)。目前我国传统池塘水产养殖主要存在以下问题: 高密度的养殖、饵料与渔药的大量投喂, 导致大量的排泄物、残饵及残留的渔药等污染物聚集池底, 从而导致池塘水质恶化、各种病害频发。传统池塘水产养殖要大量换水, 排放的污染水被随意排放到临近水域, 从而扩散了污染。传统池塘水产养殖不仅使自身水体受到污染, 还导致周围水域的生态系统恶化, 进而演变成富营养化。在欧洲和世界其它国家, 在鱼类养殖中广泛使用抗生素, 还导致了耐药性病原菌的出现(Oliveira *et al*, 2012; 马倩倩等, 2013)。农业面源污染是指包括化肥、农药、集约化养殖在内带来的氮磷等营养物质、有机无机污染物以及病毒微生物对养殖水体自身以及周围环境的污染现象。然而, 我国以及其它一些国家对水产养殖所带来的面源污染问题认识较晚, 甚至对某些污染情况还没有研究数据, 直到近

年来各种水环境恶化现象日益突出、水域富营养化频发, 才逐渐引起对这一问题的重视(Nahuel *et al*, 2011)。1989 年, 在处理阿拉斯加海滩“埃克森瓦尔迪斯”号巨型油轮溢油事件中, 美国首次应用生物修复技术并取得了成功, 于是, 这个成本低、不产生二次污染的优于众多传统物理化学修复的生物修复技术开始成为环境科学的前沿与热点(涂书新等, 2004)。生物修复(Bioremediation)是指通过一种或几种特定的生物(植物、微生物或原生动物等)或者生物群体, 吸收、转化、清除或降解环境中的污染物的生物学方法(郑焕春等, 2009)。本文主要介绍生物修复技术在池塘养殖中的应用及研究进展, 探讨其发展趋势。

## 1 微生物修复技术在池塘养殖中的应用

微生物修复法, 是目前研究最多的一种生物修复技术, 该方法具有广泛的应用。微生物或提取物对环境污染物具有吸收、转化、降解等功能, 能抑制有害微生物的生长繁殖; 由于细菌的生命周期短, 代谢

\* 国家公益性行业(农业)科研专项项目, 201203083 号; 海洋公益性行业科研专项项目, 2012148033 号; 国家海洋局海洋经济创新发展区域示范专项, 2012FJ03 号; 厦门市科技局高校创新项目, 3502Z20113026 号; 鳗鲡现代产业技术教育部工程研究中心开放基金, ZK2013004 号。邓来富, 硕士研究生, E-mail: 523437089@qq.com

通讯作者: 江兴龙, 博士, 教授, E-mail: xinlongjiang@jmu.edu.cn

收稿日期: 2013-05-23, 收修稿日期: 2013-08-14

速度快, 因此其降解污染物的速度也比其它生物快许多, 微生物修复法在养殖水环境修复中具有重要作用(马倩倩等, 2013)。

### 1.1 微生物制剂

按菌种微生物制剂可以分为单一菌群微生物制剂: 主要包括光合细菌、硝化细菌、芽孢杆菌、蛭弧菌、酵母菌和乳酸菌等, 以及复合微生物制剂: 主要包括益生菌、EM 菌和生物抗菌肽等。它们或降解水体中的残饵、排泄物等有机物来达到净化水质的作用, 或抑制水体中的病原菌进行病害防治, 或因自身含有多种营养物质而添加进饲料中, 提高养殖效率。其中光合细菌在水产养殖中得到广泛应用(夏蒙等, 2013)。微生物制剂可以通过从自然界中筛选出或者通过基因技术生产出能有效降解污染物的细菌(史红文, 2004)<sup>1)</sup>。Saijai 等(2010)从虾塘中分离出两株细菌研究其对该池塘重金属的去除效果。尹艳娥等(2009)从底泥中筛选分离出反硝化细菌, 探讨了其对养殖池塘水质改良的效果, 得出反硝化细菌的最佳净化效果的条件: pH 6—7, 温度 25—35 , 并且在同一 pH 值和温度条件下, 硝酸盐氮和亚硝酸盐氮浓度越低, 反硝化菌对其去除效果越好, 如在 1mg/L 的硝酸盐氮和亚硝酸盐氮浓度组中, 6d 的硝酸盐氮与亚硝酸盐氮的去除率分别为 93.8%和 87.8%, 而在 50mg/L 的浓度组中, 它们的去除率分别为 89.7%和 78.7%。通过微生物制剂修复的方法, 可以很好地改良底质, 从而改善池塘水质(侯勤成, 2009)。蔡惠凤等(2006)通过使用 3 种不同制剂, 结合水底界面曝气的方法, 有效促进了底泥中有机质的分解, 削减了底泥的厚度。外源微生物的引入, 不但要求引入菌群对有机污染物有较强的针对性, 而且能否成为优势群体还与其在环境中的竞争力有关。外来菌株的生存受到许多生物和非生物因素的影响。因此, 利用外源微生物修复污染底泥, 不仅要求实施前的本底调查及预备实验, 而且实施效果往往受环境条件的变化而变化(蔡惠凤等, 2006)。因为单一的微生物的修复效果有限, 所以开发出了复合型菌制剂和固定化微生物, 如使用高活性的复合型微生物制剂, 对中后期的南美白对虾池塘进行了试用, 结果显示, 该复合型菌剂能改善水体 pH, 缓解养殖池塘的富营养情况(王彦波等, 2005)。微

生物制剂的不足表现在: 微生物制剂的活性受水体中的各种环境因子影响较大; 某些极端条件下微生物的缺乏; 在养殖过程中使用的抗生素、抗菌药物会对微生物制剂有抑制作用; 有时候只使用单一的微生物制剂手段来治理效果并不理想, 需要结合其它的方法才能起到预期效果, 如与高等植物联合使用等; 单一微生物只对某一类降解污染物具有降解效果(贺永华等, 2007)。也有研究显示微生物自身就能够产生抗生素从而出现抗生素二次残留的情况(谢春等, 2011), 有的污染物会被转化成毒性更高的产物, 因此全面了解微生物降解过程很有必要(张逸飞等, 2007)。

### 1.2 固定化微生物

郑忠明等(2009)通过野外围隔实验比较了固定化微生物和游离微生物对养殖池塘污染底质的修复能力, 结果显示利用载体固定微生物技术比游离的微生物更显著提高了对污染底质的修复能力。蔡惠凤(2005)<sup>2)</sup>通过室内外实验, 表明载体的微生物表现出更好的改良效果。金春华等(2010)通过在凡纳滨对虾池塘中使用固定化微生物, 能有效降解底泥有机污染物, 并能调节水质调整浮游植物群落结构。在选用固定化微生物时, 需要注意固定化载体的选择, 固定化微生物技术的修复水质效果受固定化载体的影响, 陈爱玲(2010)<sup>3)</sup>通过比较珊瑚石和竹节两种固定化载体与广泛应用的陶粒在净化效果, 发现珊瑚石和竹节这两种载体在氨氮、亚硝酸氮和有机物上的净化效果要比陶粒的更好。武玉强等(2011)研究发现固定化微生物的载体海藻酸钠小球胶体易分解, 不仅造成水体浑浊, 而且该载体的分解又会促使水体中的原生动植物等大量繁殖进而导致水体更严重的水质问题。固定化微生物的载体需要进一步改进, 如廉价高效的载体的开发, 载体重复使用率、使用寿命的提高以及更高效的固定化微生物反应器的开发等(姜浩等, 2005)。

## 2 植物修复技术在池塘养殖中的应用

植物修复技术, 指通过应用特定植物进行水质改良。张家洋等(2013)概述了水生植物对水体中氮磷的去除效果, 包括水生植物的选择, 不同品种相同器官之间和同种品种不同器官对氮磷吸收能力的差异;

1) 史红文, 2004. 生物制剂在水处理中的应用研究. 湘潭: 湘潭大学硕士学位论文, 1—43

2) 蔡惠凤, 2005. 利用载体微生物修复养殖池塘污染底泥的初步研究. 宁波: 宁波大学硕士学位论文, 1—53

3) 陈爱玲, 2010. 对虾池塘精养环境的综合微生物修复技术研究. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文, 1—71

水体富营养化的程度;氮磷比例;季节的不同;植物使用量、品种及种类等。熊卿(2010)<sup>1)</sup>通过使用水生植物修复的方法,得出该方法不仅在水体总磷的控制上具有显著作用,而且对底泥磷的控制具有明显效果,同时认为,在底泥富营养化的控制上,底泥清淤受到水体面积和深度的影响,而且也会破坏水生生态系统,使用水生植物,配合桑基鱼田的互生互养原理,不仅控制了底泥的富营养化,而且还能回收利用集中的氮磷,而且因为系统中含有几种经济动物和植物,因此具有多输出的特点,具有一定的经济价值(Daniel *et al.*, 2011)。但是在进行池塘养殖的水质改良中,通常不会大量使用水生植物,因为它占地面积大、处理时间较长、季节影响比较大,以及有时需要注意水体采光面积的影响等,而这些特点都违背了高效率、高收益、方法简易的要求(张家洋等, 2013)。在池塘养殖中,也有使用藻类混养的方法,菊花江蕨作为一种大型经济藻类,在水质控制方面具有一定的应用前景。如冯美霞(2011)<sup>2)</sup>报道菊花江蕨与南美白对虾、青石斑鱼混养,菊花江蕨可以大量吸收营养盐,抑制水中微藻数量。Nilnaj 等(2011)发现缢江蕨和葡萄藻能显著提高东风螺的存活率。黄翔鸽等(2002)通过在凡纳滨对虾池塘养殖中引入波吉卵囊藻和微绿球藻两种微藻,不仅能改善养殖水体,而且还能提高凡纳滨对虾的防病能力。Luis 等(2013)发现石莼莴苣能显著降低水质中的总氮(25.9%)、亚硝酸盐(72.8%)、磷酸盐(24.6%)以及总悬浮物(12.9%),显著增加可沉淀固体颗粒(34.2%)。然而,能用于植物修复的物种比较少(陈菊等, 2006)。此外,进行植物修复,通常需要深入了解所选择植物的生理生态特性,研究分析适宜的养殖密度、与养殖水产品的搭配比例、营养需求以及时间季节上的生理变化等,使所选的植物不仅能改善水质,而且能与养殖水产品良好混养,同时,也要注意生态入侵等,然而这些问题还有待解决(蔡泽平等, 2005)。

### 3 动物修复技术在池塘养殖中的应用

动物修复技术,指通过放养特定动物进行水质改良。可通过放养一定密度的鲢鱼、鳙鱼等滤食性食藻鱼类,减少水体中的浮游植物,如蓝藻等;也可放

养一定密度的枝角类等微型植食性浮游动物,有效抑制藻类的生长、控制水体富营养化。但应投放合理,投放太少,则无法达到抑制藻类生长;投放太多,一方面会与养殖对象争夺食物,另一方面也会增加代谢排放,加重水体负荷。只有投放密度合理,才能既实现控制富营养化,又能提高经济效益(安鑫龙等, 2006)。邓锦松(2006)<sup>3)</sup>研究双齿围沙蚕和毛蚶对虾池的生物修复作用,对照组氮累积速率 1.74%,处理组氮累积速率为 1.31% ( $P < 0.05$ );对照组硫化物累积速率 0.870mg/(kg·d) 显著 ( $P < 0.05$ ) 大于处理组的 0.607mg/(kg·d),双齿围沙蚕能有效降低底质中氮磷和硫化物的积累速率,毛蚶摄食悬浮物和沉积物在一定程度上缓解了虾池有机物的积累。此外,动物在沉积物中的搅动作用能够促进营养物质等的流动(Zdeněk *et al.*, 2013)。并非沙蚕的密度越大,作用效果越好,当密度过大时,沙蚕自身的呼吸作用与排泄会导致相反的作用(周一兵等, 1995)。

### 4 生物膜修复技术在池塘养殖中的应用

生物膜是指细菌在附着生长时产生的胞外聚合物及其基质网包裹的细菌群体(贾文祥, 2012)。细菌之间能够相互协作,增强彼此的生存能力,由一种群体感应来调节,并且根据这种机制,可以在挂膜的启动、菌群的优化以及生物的强化上进行人为的调节,可以达到提高调控水质的净化效果(李俊英等, 2008)。生物膜技术广泛应用于工业污水及生活污水的处理中,生物膜修复法较其它修复方法表现出很多优点,如:占地小、空间利用率高,耐冲击力强,污泥的发生量很少,自动化管理等(师存杰, 2001)。虽然有许多相关生物膜修复技术在工业及生活污水处理系统中的研究与应用报道,然而,有关生物膜技术在池塘水产养殖原位水处理中的研究与应用,近些年才始有报道,江兴龙(2012)、江兴龙等(2010)率先在日本鳗鲡的精养殖水体中开展了生物膜原位水处理技术的系统研究与应用,发明了水产养殖专用生物膜净水栅,创建了池塘生物膜低碳养殖技术,并在规模土池鳗鱼养殖中示范与应用。研究发现,生物膜上微生物群落主要由细菌、藻类、真菌以及原生动物等组成,形成了良好微生态系统,抗干扰能力强,能有效减少病

1) 熊卿, 2010. 水产养殖对水体富营养化的影响及其控制研究. 南昌: 南昌大学硕士学位论文, 1—65

2) 冯美霞, 2011. 菊花心江蕨对富营养化海水的生物修复研究. 福州: 福建师范大学硕士学位论文, 1—64

3) 邓锦松, 2006. 投放双齿围沙蚕和毛蚶对虾池的生物修复作用. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文, 1—67

害的发生。应用结果表明, 在 172 天的土池鳊鱼养殖期间, 处理组平均日换水率为 1.6%, 比对照组显著减少用水 78%; 处理组氨氮、NO<sub>2</sub>-N、COD<sub>Mn</sub>、溶解性正磷酸盐和浊度显著低于对照组 31.7%、49.7%、29.6%、24.2%和 26.2% (表 1); 藻类密度的变化量及蓝藻的相对密度显著低于对照组 58.8%、52.6%; 净产量、起捕尾重和生长速度显著高出对照组 38%、22.7%和 27.1%; 饲料系数显著低于对照组 14.2% (表 2)。获得显著的节水、节能减排、节约饲料、增产增收等效果, 且具有易操作、投入少、安全环保等特点, 在池塘养殖中具有很好的应用推广前景。现在, 池塘生物膜低碳养殖技术已在福建、广东、广西、海南、浙江、江苏、四川、内蒙古、辽宁、天津、上海及重庆等 12 个省、自治区和直辖市得到了在海淡水池塘养殖南美白对虾、鳊鱼、罗非鱼、鲤鱼、草鱼、泥鳅、黄鳝等的示范应用, 均取得了良好经济、社会与生态效益, 深受养殖业者好评。CCTV7 农业节目《科技苑》栏目曾于 2012 年 11 月 5 日播出了反映该技术的专题

片。目前该技术已被农业部全国水产技术推广总站列入全国水产养殖节能减排技术推广目录(全国水产技术推广总站, 2013)。此外, 安阳等(2012)将生物挂膜填料技术与扬水造流设备以及沉淀斜管等相结合, 进行原位法处理凡纳滨对虾养殖池塘, 有效改善了水质。

## 5 生物修复技术在池塘养殖中的综合应用

马旻(2011)<sup>1)</sup>通过单种植物、组合植物和植物与微生物的联合三种方式进行对比, 在氨氮的去除率上, 植物微生物组(92.92%)显著高于微生物组(85.38%); TN、TP 的去除率都是植物微生物组(62.27%、71.82%)和植物组(67.02%、71.56%)显著高于微生物组(38.47%、20.74%), 表明植物-微生物的联合方式生物修复的效果最强。杨琳(2008)<sup>2)</sup>构建了由人工基质固定化微生物菌膜、浮床植物系统和沉水植物群落三个部分组成的多级生物系统, 不仅改善了池塘水质, 而且还能多级利用营养物质, 减少了资源消耗和环境成本。王铁楼(2009)<sup>3)</sup>构建了虾-鱼-贝-藻等多池循环系统, 即在不同池塘中放养生态位互补的经济动植物, 通过水循环将它们联系在一起, 该方式不仅使得各类废弃物得到充分利用而且还能实现水质调控的效果。林更铭等(2011)通过控制各种类比例构建了凡纳滨对虾、黄鳍鲷、鲮鱼、腺带刺沙蚕和细基江蓠这种生态位互补的养殖模式, 不仅能发挥生物修复的作用, 而且能够提高池塘利用率, 提高了虾池的经济效益。也有关于固着生物的研究, 即由植物和动物附着在放置于水底中的基质中, 该方法也能在一定程度上提高生产效率(Dénes *et al*, 2013)。

## 6 生物修复技术在池塘养殖中的应用展望

生物修复法具有成本低、修复能力强等特点, 将成为未来主要的研究方向。微生物法是目前研究最多

表 1 试验期间对照组与处理组水质因子浓度

Tab.1 The concentrations of water quality parameters in the control and treatment during the trial

水质指标	对照组	处理组	增减幅度(%)
T (°C)	28.3 ± 2.8	28.3 ± 2.8	—
Sec (cm)	18.9 ± 1.4	21.1 ± 1.9	11.6
Tur (NTU)	38.9 ± 15.0	28.7 ± 11.0	- 26.2
pH	6.86 ± 0.02	6.89 ± 0.04	0.4
DO (mg/L)	4.58 ± 0.32	4.92 ± 0.22	7.4
TAN (mg/L)	0.928 ± 0.22	0.634 ± 0.20	- 31.7
NO <sub>2</sub> -N (mg/L)	0.0778 ± 0.060	0.0391 ± 0.025	- 49.7
NO <sub>3</sub> -N (mg/L)	2.706 ± 2.1	3.074 ± 2.7	—
COD <sub>Mn</sub> (mg/L)	11.62 ± 1.9	8.18 ± 1.0	- 29.6
SRP (mg/L)	1.515 ± 0.50	1.149 ± 0.35	- 24.2

除水温和硝酸盐氮在对照组与处理组之间均无显著差异 ( $P > 0.05$ )外, 其它均有极显著差异 ( $P < 0.01$ )

表 2 对照组和处理组鳊鱼养殖结果

Tab.2 Production results in the control and treatment

组别及增减	毛产量(kg/ha)	净产量(kg/ha)	出池规格(g/尾)	生长速度(g/d)	饲料系数
对照组	21951 ± 4200	16758 ± 3135	286.8 ± 46	1.26 ± 0.20	1.67 ± 0.02
处理组	29188.5 ± 2835	23121 ± 2670	351.9 ± 8.7	1.60 ± 0.08	1.43 ± 0.04
增减幅度(%)	33.0	38.0	22.7	27.1	- 14.2

- 1) 马 旻, 2011. 水产养殖废水的植物-微生物联合修复研究. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 1—52
- 2) 杨 琳, 2008. 利用多级生物系统修复池塘养殖环境. 南京: 南京农业大学硕士学位论文, 1—63
- 3) 王铁楼, 2009. 昌邑对虾养殖模式研究. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 1—26

的一种生物修复法,但是游离的微生物易受水环境因子的影响,作用效果不稳定,甚至会产生毒性更强的产物(郑忠明等,2009)。而固定化技术所需的成本较高,进行推广应用较难。植物修复技术通常占地面积较大,动物修复技术有可能会加重水体的负荷,这两种方式很少在养殖池塘中采用或作为配套技术被采用。而生物膜法因为能形成良好的微生态系统,在节水节能减排、水质改良、病害控制、蓝藻控制等方面已表现出优越的特性,尽管该方法因为发展时间较短,在机理等方面还需要进一步深入研究,但该方法具有投入成本低、操作简便、安全环保、增产增收显著等特点,更具有应用推广前景(耿亮等,2005;江兴龙,2012)。未来的池塘养殖水质修复技术,应该是一种综合技术,以一种修复方法为基础,其它修复方法为辅的方式进行更全面的水质改良(李树文等,2005)。池塘养殖生物修复技术的发展方向之一,可以采取以生物膜修复技术为主,辅以微生物修复法、动植物修复法以及物理化学修复法等的综合,以期实现对池塘养殖生物修复过程的人工操纵控制,实现全面改善池塘水环境,确保池塘养殖生态系统健康、稳定和平衡。

### 参 考 文 献

- 马倩倩,孙敬锋,邢克智,2013. 养殖水环境微生物修复技术应用研究进展. 水产科技情报, 40(2): 89—96
- 王彦波,许梓荣,郭笔龙,2005. 高活性生物修复菌制剂改善虾池水质的研究. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 31(2): 199—202
- 尹艳娥,沈新强,晁敏等,2009. 反硝化技术对模拟养殖池塘修复的研究. 农业环境科学学报, 28(8): 1727—1732
- 师存杰,2001. 生物膜技术在水处理中的应用. 青海大学学报(自然科学版), 19(5): 32—40
- 全国水产技术推广总站,2013. 关于开展水产养殖节能减排技术集成的指导意见. 农渔技示函[2013]104号, 1—5
- 江兴龙,2012. 日本鳗鲡(*Anguilla japonica*)土池生物膜原位修复低碳养殖技术的研究. 海洋与湖沼, 43(6): 1134—1140
- 江兴龙,关瑞章,2010. 日本鳗鲡(*Anguilla japonica*)精养殖水体生物膜原位修复低碳养殖技术的研究. 海洋与湖沼, 41(5): 769—775
- 安阳,曾国权,陈雪初等,2012. 凡纳滨对虾养殖池塘水体原位复合生态净化技术研究. 渔业现代化, 39(3): 28—33
- 安鑫龙,周启星,2006. 水产养殖自身污染及其生物修复技术. 环境污染治理技术与设备, 7(9): 1—6
- 李树文,孟文芳,巩学敏等,2005. 污染环境生物修复技术的应用前景. 河北建筑科技学院学报, 22(2): 7—9
- 李俊英,王荣昌,夏四清,2008. 群体感应现象及其在生物膜法水处理中的应用. 应用与环境生物学报, 14(1): 138—142
- 张家洋,陈丽丽,李慧,2013. 水生植物对富营养化水体除磷去氮的研究概述. 西北师范大学学报(自然科学版), 49(1): 115—120
- 张逸飞,钟文辉,王国祥,2007. 微生物在污染环境生物修复中的应用. 中国生态农业学报, 15(3): 198—202
- 陈菊,周青,2006. 土壤农药污染的现状与生物修复. 生物学教学, 31(11): 3—6
- 武玉强,陈学豪,周立红等,2011. 海藻酸钠固定化微生物处理淡水水产养殖废水可行性研究. 水产科学, 30(8): 476—480
- 林更铭,项鹏,杨清良,2011. 基于腺带刺沙蚕和细基江蕨调控水环境的池塘养殖模式研究. 海洋科学, 35(9): 62—67
- 金春华,陆开宏,郑忠明等,2010. 固定化微生物在凡纳滨对虾养成池中的应用. 水产学报, 34(2): 285—291
- 周一兵,谢祚浑,1995. 虾池中日本刺沙蚕的次级生产力研究. 水产学报, 19(2): 140—150
- 郑忠明,陆开宏,蔡惠凤等,2009. 固定化微生物修复养殖池塘污染底泥的围隔试验. 水产学报, 33(3): 462—469
- 郑焕春,周青,2009. 微生物在富营养化水体生物修复中的作用. 中国生态农业学报, 17(1): 197—202
- 侯勤成,2009. 生物修复技术在水产养殖中的应用. 安徽农学通报, 15(02): 29—30
- 姜浩,高红梅,2005. 固定化微生物技术及其在养殖水体中的应用. 水利渔业, 25(4): 27—29
- 贺永华,胡立芳,沈东升等,2007. 污染环境生物修复技术研究进展. 科技通报, 23(2): 271—276
- 耿亮,陆光华,万蕾,2005. 应用生物修复技术治理城市污染水体. 江苏环境科技, 18(1): 50—52
- 贾文祥,2012. 微生物生物膜研究的新进展. 微生物学免疫学进展, 40(5): 1—9
- 夏蒙,李朋富,2013. 微生态制剂作用机理及其在水产养殖中的应用. 江西水产科技, 134(2): 42—44
- 黄翎翥,李长玲,刘楚吾等,2002. 两种微藻改善虾池环境增强凡纳对虾抗病力的研究. 水生生物学报, 26(4): 342—347
- 谢春,刘军义,朱斌等,2011. 生物修复菌剂中抗生素残留的初筛. 江西水产科技, (4): 1—4
- 蔡泽平,胡超群,张俊彬,2005. 真鲷与石莼池塘混养试验. 热带海洋学报, 24(4): 1—6
- 蔡惠凤,陆开宏,金春华等,2006. 养殖池塘污染底泥生物修复的室内比较实验. 中国水产科学, 13(1): 140—145
- Asha A Juwarkar, Sanjeev K Singh, Ackmez Mudhoo, 2010. A comprehensive overview of elements in bioremediation. Rev Environ Sci Biotechnol, 9: 215—288
- Daniel Robledo, Yolanda Freile-Pelegrin, 2011. Managing the interactions between plants and animals in marine multi-trophic aquaculture: integrated shrimp and valuable low food chain organisms with seaweeds. Cellular Origin, Life in Extreme Habitats and Astrobiology, 16: 365—381

- Dénes Gál, Ferenc Pekár, Tünde Kosáros *et al*, 2013. Potential of nutrient reutilisation in combined intensive-extensive pond systems. *Aquacult Int*, 21: 927—937
- Luis Otavio Brito, Rafael Arantes, Caio Magnotti *et al*, 2013. Water quality and growth of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone) in co-culture with green seaweed *Ulva lactuca* (Linnaeus) in intensive system. *Aquacult Int*, Published Online, DOI 10.1007/s10499-013-9659-0
- Nahuel Francisco Schenone, Lenka Vackova, Alicia Fernández Cirelli, 2011. Fish-farming water quality and environmental concerns in Argentina: a regional approach. *Aquacult Int*, 19: 855—863
- Nilnaj Chaitanawisuti, Wannanee Santhaweesuk, Sirusa Kritsanapuntu, 2011. Performance of the seaweeds *Gracilaria salicornia* and *Caulerpa lentillifera* as biofilters in a hatchery scale recirculating aquaculture system for juvenile spotted babylons (*Babylonia areolata*). *Aquacult Int*, 19: 1139—1150
- Oliveira J, Castilho F, Cunha A *et al*, 2012. Bacteriophage therapy as a bacterial control strategy in aquaculture. *Aquacult Int*, 20: 879—910
- Saijai Panwichian, Duangporn Kantachote, Banjong Wittayaweerasak *et al*, 2010. Factors affecting immobilization of heavy metals by purple nonsulfur bacteria isolated from contaminated shrimp ponds. *World J Microbiol Biotechnol*, 26: 2199—2210
- Zdeněk Adámek, Blahoslav Maršálek, 2013. Bioturbation of sediments by benthic macroinvertebrates and fish and its implication for pond ecosystems: a review. *Aquacult Int*, 21: 1—17

## THE APPLICATION AND RESEARCH PROGRESS OF BIOREMEDIATION IN POND AQUACULTURE

DENG Lai-Fu<sup>1,2</sup>, JIANG Xing-Long<sup>1,2</sup>

(1. Fisheries College, Jimei University, Xiamen, 361021; 2. Engineering Research Center of the Modern Industry Technology for Eel, Ministry of Education, Xiamen, 361021)

**Abstract** The traditional pond aquaculture models have been used mostly so far, which generally have resulted in many problems: high density culture, excessive feed, water quality deterioration and disease occurrence frequently, etc. However, water exchanged or supplemented has been the traditional main method used to solve those problems, which has caused pond contaminated effluence discharge into adjacent water directly, which has resulted in series problems such as pollution diffusion, water environment deterioration, water eutrophication. To reduce pond aquaculture non-point source pollution, and ensure pond aquaculture sustainable development, this presentation introduced main bioremediation methods to restore water ecological environment in pond aquaculture, including: microbial remediation method, such as the application of microbial agents and immobilized microorganism, phytoremediation, animal-remediation, biofilm-remediation and several bioremediation techniques integration. On the base of the application prospect of bioremediation methods in pond aquaculture, biofilm-remediation method would have prosperous extension prospect, for its good and stable effect of water quality improvement, energy saving, effluence reduction, yield and profit increase.

**Key words** bioremediation; biofilm; pond aquaculture