

综述

水产养殖池塘沉积物有机质富集的环境效应与修复策略

刘华丽¹, 曹秀云², 宋春雷², 周易勇²

(1. 武汉纺织大学化学与化工学院, 湖北 武汉 430073;

2. 中国科学院水生生物研究所, 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

Environmental Effects of Organic Matter Enrichment and Restoration Strategy in Sediment of Aquaculture Ponds

LIU Hua-li¹, CAO Xiu-yun², SONG Chun-lei², ZHOU Yi-yong²

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Wuhan Textile University, Wuhan 430073, China;

2. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China)

摘要: 沉积物有机质富集是养殖池塘的重要特征,有机质的分解将驱动营养物质的释放,其主要机制在于自身的矿化与底层厌氧状态的形成,后者将进一步促进有毒有害物质的产生和累积,进而影响水产品的产量与质量。因此,必须针对沉积物有机质富集的特征开展及时而准确的监测,同时采用选择性去除、原位氧化和生态修复相结合的方法对其实施有效地处置,以调节养殖池塘生态系统的结构与功能,最大限度地利用可再生资源 and 天然饵料,进而实现渔业生产与水环境的可持续发展。

关键词: 养殖池塘;沉积物;有机质;底层缺氧;环境效应

中图分类号: X503 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2011)06-0130-05

池塘养殖是我国淡水养殖业的重要组成部分,其产量和面积分别占总淡水养殖的 69.88% 和 42.99% (农业部渔业局, 2010)。目前,池塘养殖产量和效益的提高多靠增大放养密度和投入商品饲料来实现,施肥和投饵已成为提高池塘鱼产量的两大有效措施。此外,我国池塘养殖设施在结构上仍停留在较为原始的阶段,缺乏必要的水体净化功能,因此,未被利用的残饵和鱼类排泄物大量沉积,且难以得到有效的分解与去除,对于饵料系数较高的饲料而言,上述效应更为明显,故沉积物有机质的富集已成为养殖池塘的重要特征。本文就养殖池塘沉积物中有机质的来源、分布格局、分解过程与环境效应进行分析,提出池塘底质修复和水环境改善的策略。

1 沉积物有机质富集对生态系统的影响

养殖活动导致沉积物有机质的富集。鱼塘有机质的年沉积速率为 5 cm (Jens & Nanna, 1997)。网箱下有机质沉积速率比对照值高 8~25 倍 (Holmer et al, 2007)。幼鱼饵料是养殖场颗粒有机碳沉积通量的主要来源,表层沉积物有机碳含量与养殖场总载鱼量的季节变化趋势相同 (黄洪辉等, 2003)。残饵、衰亡藻类与鱼类排泄物是鱼塘沉积物有机质的主要组成部分 (Hisashi et al, 2006; Jimenez-Montealegre et al, 2005),其中富含蛋白质与淀粉等 (王亚南等, 2004)。

池塘沉积物有机质含量丰富、性质复杂,其累积和分解将对生态系统的结构和功能产生重要影响。一方面,有机质组成的差异可影响沉积物中营养物质的释放量,进而影响水体或沉积物中生物可利用性营养的组成与浓度,在一定程度上决定了藻类、微生物和浮游动物的群落组成;另一方面,性质各异的有机质本身就影响到微生物群落的结构,对有机质的分解速率与效率起到举足轻重的作用。

收稿日期: 2011-08-10

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项 (2009ZX07106-001); 国家自然科学基金 (41073066); 淡水生态与生物技术国家重点实验室 (2011FBZ)。

通讯作者: 周易勇。E-mail: zhouy@ihb.ac.cn

作者简介: 刘华丽, 1957年生,女,副教授,主要研究方向为环境化学。

2 沉积物有机质分解影响营养释放的机制

2.1 有机质分解影响营养释放的表现

沉积物有机质分解将有效驱动营养物质的释放。欧洲鱼塘厚积的有机质是营养物质的持久性内源(Jan & Václav, 2002),水产养殖设施下沉积物营养释放的速率最大(Marion et al, 2007a),泻湖水产养殖区有机质多富集于沉积物表层,间隙水中的营养盐浓度比对照值高10~20倍(Valerie et al, 2007),与1年软体动物养殖区相比,持续2年的养殖区沉积物有机质较多,且泥水界面硅、氮与硫酸盐的释放速率明显较高(Marion et al, 2007b)。养殖池塘淤泥主要释放铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)(周劲风等, 2006)。含淤泥的水族箱中,硝酸盐($\text{NO}_3^-\text{-N}$)和亚硝酸盐($\text{NO}_2^-\text{-N}$)浓度明显较高(郁桐炳等, 2006),而经过筛分的沉积物较少释放 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ (Porter et al, 2006)。养殖水体沉积物总有机碳和总氮的释放量比自然过程显示的数值分别高2.5倍和2.2倍(Tsutsumi et al, 2006)。氮、磷和硅等营养物质的释放源于沉积物有机质的分解(Marion et al, 2006),养殖有机废物可扩散至500~900 m外,其颗粒有机碳和有机氮含量较低,故有机质已被大量分解(Tina et al, 2007)。渔场沉积物矿化速率随有机质的富集而增加(Anna et al, 2006)。随着残饵的腐烂分解, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 等营养物质的浓度明显升高(蒋艾青等, 2006)。不同来源和性质的有机质将通过其分解作用有效调节池塘水柱中生物可利用性营养的浓度、形态及其比例,进而从根本上影响初级生产力以及水产品的产量和质量。

2.2 有机质分解影响营养释放的机制

微生物在沉积物有机质分解过程中具有关键作用。鱼塘沉积物表层多见具较强水解淀粉能力的芽孢杆菌(王亚南等, 2004)。碳水化合物的加入增加虾塘沉积物中异养细菌的数量(Ram et al, 1982)。对虾养殖围隔多种细菌能分解有机态二磷酸盐和卵磷脂,并转化磷酸钙和有机磷(刘国才等, 1999)。有机氮经微生物介导的氨化作用生成 NH_3 。养殖水体中过剩饵料、生物代谢产物和残体的沉积均导致氨化细菌的剧增(刘国才等, 2000; Yoram & Gad, 2003)。此外,分解过程引起的底层缺氧将促进沉积物营养物质的解离与释放。底层缺氧与酸挥发性硫化物增加的现象可发生在距养殖网箱600 m之外的区域(Hisashi et al, 2006)。随着养殖时间的增加,沉积物细菌呼吸量渐增(Beatriz et al, 2006)。

加入养殖废物后,沉积物氧的耗用比对照值高15倍,氮释放量为对照值的3.6倍(Hilke & Conrad, 2006)。厌氧与好氧条件的交替致使沉积物有机质的积累量达最低限度(方秀珍等, 1999)。养殖水体沉积物细菌能在厌氧条件下通过控制铁的氧化—还原状态与有机质的矿化促进磷酸盐的释放(Ahmed & Naim, 2005)。

简言之,有机质的矿化对沉积物的营养释放具有直接的贡献,而与分解过程相伴随且不断加剧的底层缺氧状况将有效促进沉积物营养的解吸附,上述双重效应将以持续补给或脉冲的方式向水体提供营养。

3 有机质富集的环境效应与修复策略

3.1 环境效应

沉积物有机质引起的水质改变在初级生产力、水产品的产量和质量等方面均有直接的体现。稳定性氮同位素标记的鱼肉投入养殖网箱之后,其周围迅速可见同位素标记的再悬浮颗粒与初级生产者(Felsing et al, 2006),草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)和鲤(*Cyprinus carpio*)的粗蛋白和粗脂肪含量与总氮和总磷浓度极显著正相关,而其水分含量则与总氮浓度极显著负相关(郑陶生等, 2004)。养殖池塘沉积的大量有机质能向水柱持续地提供生物可利用性营养,显著提高水体生产力,并通过食物网影响水产品的数量与质量;因此,系统研究养殖池塘沉积物有机质富集的环境效应与修复策略具有重要的理论和实践意义。

有机质富集的重要环境效应是导致底层缺氧。因此,充氧、水体交换和氧化剂(如硝酸钠)的施用等措施均有利于池塘环境质量的改善(Boyd, 1997)。在高强度养殖的虾塘中,桨轮式充氧装置多沿与池塘堤岸平行的方向推动水流,由此引起池水溶解氧浓度分布的非均一性,外部的溶氧浓度相对较高,而位于池塘中心的内部水体则基本未受机械扰动的影响,且始终处于相对静止的状态,其底层有机质含量明显较高,而溶解氧浓度则明显较低,这种不利于养殖虾类健康生长的区域可超出池塘总面积的30%;因此,主要作用于池塘表层水的人工强化充氧措施往往具有一定程度的局限性(Delgado et al, 2003)。

有机质是养殖池塘底层环境质量的重要检测指标,池塘有机碳的含量与潜在的呼吸强度显著正相关,后者可用二氧化碳的释放量或氧的消耗量加以

表征。因此,有机碳含量可以作为量度沉积物呼吸速率的常用检测参数(Boyd & Jiang, 2006)。

3.2 修复策略

3.2.1 清淤 清淤是去除养殖池塘有机质最为直接的手段,养殖过程中大量新鲜有机质沉积是底层缺氧的主要原因,在2次渔获之间去除池塘沉积物并不能有效减少下一轮养殖过程中沉积物耗氧量。池塘清淤和水交换的实质是将污染从池塘转移至周边环境,不至引起矿质沉积物有机质再悬浮,具有改善底层环境质量的潜质(Boyd, 1997),面积为24 hm²鱼塘的排水悬浮颗粒浓度较高,其中富含磷和有机质,经旁路沟渠作用之后,排水水质大为改善,并对接受其排放的溪流已无明显的污染效应(Vallois & Sarrazin, 2010)。

3.2.2 酶学方法 微生物利用胞外酶催化沉积物有机质的分解。养殖网箱产生的鱼类有机废物将提高湖泊沉积物与间隙水中碱性磷酸酶的活性(Zhou et al, 2001;张敏等,2002)。沉积物中的有机质可能通过调节不同的动力学因素在池塘底层实现高效率酶的诱导(Verdegem et al, 2002)。无机磷的施用对鱼塘沉积物磷酸酶活性无显著影响,而有机磷的输入则极大地促进酶的活性(Olah & Toth, 1978)。水产养殖期间,沉积物碱性磷酸酶活性显著增加,总磷和总碳明显正比于碱性磷酸酶活性,而总氮含量则与之负相关(Su et al, 2005)。浅水池塘中粗颗粒与细颗粒有机质的分解与葡糖苷酶、酚氧化酶与碱性磷酸酶密切相关(Alvarez & Guerrero, 2000)。红海养殖区沉积物高有机负荷明显促进氨肽酶与葡糖苷酶活性,前者介导氮循环,后者介导碳循环,但2者比例甚低,因此,养殖水体有机质的输入能从数量与质量上改变其自身的分解过程(Sakami et al, 2005)。在上述研究的基础上可逐步建立和发展养殖池塘沉积物监测的酶学方法,即不同来源有机质的富集将诱导微生物产生胞外酶,其中水解酶系促使有机质中的无机态小分子发生解离,当易变组分基本得以分解之后,氧化—还原酶系将催化所余残基耦合成腐殖质,并进一步导致底层缺氧,由此加速沉积物营养物质(如正磷酸盐与铵)的释放。换言之,胞外酶的活性、动力学参数与表现时序可勾勒有机质的分解过程与强度,并表征其对营养释放的贡献。

3.2.3 生态修复 生态修复是养殖池塘污染控制和水质改善的重要手段。植物能有效去除养殖池塘

的污染,模拟试验结果表明,红树林树种海桑(*Sonneratia caseolaris*)幼苗的种植明显提高了虾塘污水中氮和磷的去除率,尽管污水中有机质和无机态营养的浓度甚高,微生物群落结构并无明显变化(Shimoda et al, 2009),因此,植物对养殖废水中有机质的分解过程具有一定调节作用。在养殖池塘加入沙蚕(*Hediste diversicolor*)之后,大型底栖生物的种类丰富度和生物量均明显提高,即使不考虑新引入的沙蚕,试验与对照池塘底栖生物的群落结构依然明显不同,故2者的差异主要源于其他物种密度的变化,多毛类生物密度的增加将促进有机质的矿化,从而明显减少其在沉积物中的含量(Carvalho et al, 2007)。围隔试验证明,鲤的引入可明显减少沉积物中硫化物、溶解态锰、易氧化物与可交换铵的含量,同时增加表层沉积物的密度,鱼类扰动致使更多的颗粒进入厚达3 cm的土层,其功效在于增加氧的交换,减少有毒有害物质的产生,并促进营养物质在食物链中的有效循环(Ritvo et al, 2004)。总之,养殖池塘水质和沉积物管理具有其内在规律和原则,即池塘只能有限量地吸收和接纳营养与有机质,超越阈值之后,水质和沉积物质量必将恶化(Boyd, 1997),故有机质数量和质量的有效监测已成为养殖池塘科学管理的首要步骤。

养殖池塘沉积物有机质含量丰富,性质复杂多变。就数量和分布而言,有机质沉积与扩散速率较高,故纵向分布极不均匀,表层含量极高(>50%),而1~2 cm层的平均含量则明显较低(<10%);就性质而言,有机质或易变,或难以降解,分解过程主要发生于前者,难降解部分将长期累积,进而逐渐构成沉积物有机质的主体(腐殖质),并不再进行耗氧分解。可见,常规分析方法难以准确测定沉积物有机质,其总量亦无法表征可分解性及其对营养释放过程的重要影响。

4 小结

综上所述,为了稳步提高养殖水产品的产量与质量,延长养殖池塘的高效率使用期限,防止养殖活动对外界环境的污染,必须针对沉积物有机质富集的特征开展及时而准确地监测,同时采用选择性去除与原位氧化和生态修复相结合的方法对其实施有效的处置,以调节养殖池塘生态系统的结构与功能,最大限度地利用可再生能源和天然饵料,进而实现渔业生产与水环境的可持续发展。

参考文献

- 方秀珍,谢骏,郭贤桢,等. 1999. 池塘淤泥中细菌对含氮物质转化效率的研究[J]. 大连水产学院学报,14(1):71-74.
- 黄洪辉,林钦,贾晓平,等. 2003. 海水鱼类网箱养殖场有机污染季节动态与养殖容量限制关系[J]. 集美大学学报,8(2):101-105.
- 蒋艾青,郑陶生,杨四秀. 2006. 池塘残饵分解对养殖水环境影响的研究[J]. 水利渔业,26(5):81-85.
- 刘国才,李德尚,董双林,等. 2000. 对虾综合养殖生态系统底泥细菌的数量动态[J]. 应用生态学报,11(1):138-140.
- 刘国才,李德尚,董双林,等. 1999. 对虾养殖围隔生态系统中的细菌碳代谢[J]. 水产学报,23(4):357-362.
- 中国农业部渔业局. 2010. 中国渔业统计年鉴2010[M]. 北京:中国农业出版社.
- 王亚南,王保军,戴欣,等. 2004. 近海养虾场底泥中产芽孢细菌的生态特征[J]. 应用与环境生物学报,10(4):484-488.
- 郁桐炳,沈丽红. 2006. 池塘淤泥对水中氮营养盐影响的初步研究[J]. 海洋湖沼通报,(1):82-85.
- 张敏,李建秋,周易勇. 2002. 网箱养殖对东湖沉积物有机质含量以及磷的酶促水解与吸附行为的影响[J]. 水产学报,26(6):510-518.
- 郑陶生,蒋艾青,杨四秀. 2004. 不同水源池塘氮磷含量对鱼体主要成分的影响[J]. 水利渔业,24(3):17-19.
- 周劲风,温琰茂,李耀初. 2006. 养殖池塘底泥—水界面营养盐扩散的室内模拟研究:I 氮的扩散[J]. 农业环境科学学报,25(3):786-791.
- Carvalho S, Barata M, Gaspar M B, et al. 2007. Enrichment of aquaculture earthen ponds with *Hediste diversicolor*: Consequences for benthic dynamics and natural productivity [J]. *Aquaculture*, 262(2/4): 227-236.
- Ahmed H A, Naim U. 2005. Bacterial diversity of tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultured in brackish water in Saudi Arabia [J]. *Aquaculture*, 250(3/4):566-572.
- Alvarez S, Guerrero M C. 2000. Enzymatic activities associated with decomposition of particulate organic matter in two shallow ponds [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(13): 1941-1951.
- Anna C, Heilskov A, Marc A, et al. 2006. Benthic fauna bio-irrigation effects on nutrient regeneration in fish farm sediments [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 339:204-225.
- Beatriz T B, Marc V, Eva K, et al. 2006. Decomposition of high protein aquaculture feed under variable oxic conditions [J]. *Water Research*, 40(7):1341-1350.
- Boyd C E, Jiang X L. 2006. Relationship between organic carbon concentration and potential pond bottom soil respiration [J]. *Aquacultural Engineering*, 35(2): 147-151.
- Boyd C E. 1997. Practical aspects of chemistry in pond aquaculture [J]. *Progressive Fish-Culturist*, 59(2): 85-93.
- Delgado P C, Avnimelech Y, McNeil R, et al. 2003. Physical, chemical and biological characteristics of distinctive regions in paddlewheel aerated shrimp ponds [J]. *Aquaculture*, 217(1/4): 235-248.
- Felsing M, Telfer T, Glencross B. 2006. ¹⁵N-enrichment of an aquaculture diet and tracing of cage culture waste in an estuarine environment [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 22: 419-426.
- Hilke G, Conrad A P. 2006. Effects of mussel (*Perna canaliculus*) biodeposit decomposition on benthic respiration and nutrient fluxes [J]. *Marine Biology*, 150:261-271.
- Hisashi Y, Katsuyuki A, Yuka I. 2006. Quantifying aquaculture-derived organic matter in the sediment in and around a coastal fish farm using stable carbon and nitrogen isotope ratios [J]. *Aquaculture*, 254(1/4): 411-425.
- Holmer M, Marba N, Diaz-Almela E, et al. 2007. Sedimentation of organic matter from fish farms in oligotrophic Mediterranean assessed through bulk and stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) analyses [J]. *Aquaculture*, 262:268-280.
- Jan P, Václav H. 2002. The restoration of fish ponds in agricultural landscapes [J]. *Ecological Engineering*, 18(5):555-574.
- Jens C R, Nanna R. 1997. Benthic metabolism and the effects of bioturbation in a fertilised polyculture fish pond in north-east Thailand [J]. *Aquaculture*, 150:45-62.
- Jimenez-Montealegre R, Verdegem M, van Dam A, et al. 2005. Effect of organic nitrogen and carbon mineralization on sediment organic matter accumulation in fish ponds [J]. *Aquaculture Research*, 36(10):1001-1014.
- Marion R, Philippe A, Gérard T, et al. 2006. Influence of suspended mussel lines on the biogeochemical fluxes in adjacent water in the Îles-de-la-Madeleine (Quebec, Canada) [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 63: 1198-1213.
- Marion R, Philippe A, Gerard T, et al. 2007a. Influence of suspended Scallop cages and mussel lines on pelagic and benthic biogeochemical fluxes Havre-aux-Maisons Lagoon, Îles-de-la-Madeleine (Quebec, Canada) [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 64:1491-1505.
- Marion R, Philippe A, Gerard T, et al. 2007b. Summer influence of 1 and 2 yr old mussel cultures on benthic fluxes in Grande-Entrée lagoon, Îles-de-la-Madeleine (Québec, Canada) [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 338: 131

- 143.

- Olah J, Toth E O. 1978. The function of alkaline phosphatase enzyme in the phosphorus cycle of fertilized fishponds [J]. *Aquaculture Hungary*, 1:15 - 23.
- Porter E T, Owens M S, Cornwell J C. 2006. Effect of Sediment Manipulation on the Biogeochemistry of Experimental Sediment Systems [J]. *Journal of Coastal Research*, 22(6):1539 - 1551.
- Ram N M, Zur O, Avnimelech Y. 1982. Microbial changes occurring at the sediment-water interface in an intensively stocked and fed fish pond [J]. *Aquaculture*, 27:63 - 72.
- Ritvo G, Kochba M, Avnimelech Y. 2004. The effects of common carp bioturbation on fishpond bottom soil [J]. *Aquaculture*, 242(1/4): 345 - 356.
- Sakami T, Yokoyama H, Ishihi Y. 2005. Microbial hydrolytic enzyme activity in the sediments of a net cage aquaculture area [J]. *Fisheries Science*, 71(2):271 - 278.
- Shimoda T, Fujioka Y, et al. 2009. Assessment of the Water Purification Ability of Mangrove (*Sonneratia caseolaris*) in Mesocosm Tanks [J]. *Jarq-Japan Agricultural Research Quarterly*, 43(2): 145 - 156.
- Su Y, Ma S, Dong S. 2005. Variation of Alkaline Phosphatase Activity in Sediments of Shrimp Culture Ponds and Its Relationship with the Contents of C, N and P. [J]. *Journal of Ocean University of China*, 4(1):75 - 79.
- Tina K, Arne E, Pia K. 2007. Effects of organic effluents from a salmon farm on a fjord system. I. Vertical export and dispersal processes [J]. *Aquaculture*, 262:367 - 381.
- Tsutsumi H, Srithongouthai S, Inoue A, et al. 2006. Seasonal fluctuations in the flux of particulate organic matter discharged from net pens for fish farming [J]. *Fisheries Science*, 72(1):119 - 127.
- Valerie M, Sylvie O, Gabriel B, et al. 2007. Nutrient dynamics at the sediment-water interface in a Mediterranean lagoon (Thau, France): Influence of biodeposition by shellfish farming activities [J]. *Marine Environmental Research*, 63:257 - 277.
- Vallois D, Sarrazin B. 2010. Water quality characteristics for draining an extensive fish farming pond [J]. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 55(3): 394 - 402.
- Verdegem M C J, van Dam A, Verreth J A J. 2002. Conceptualization and validation of a dynamic model for the simulation of nitrogen transformations and fluxes in fish ponds [J]. *Ecological Modelling*, 147(2):123 - 152.
- Yoram A, Gad R. 2003. Shrimp and fish pond soils: processes and management [J]. *Aquaculture*, 220(1/4): 549 - 567.
- Zhou Y, Li J, Fu Y, et al. 2001. Kinetics of alkaline phosphatase in lake sediment associated with cage-culture of *Oreochromis niloticus* [J]. *Aquaculture*, 203: 23 - 32.

(责任编辑 杨春艳)