

刺参养殖池塘底泥理化指标和细菌数量变化的检测

迟 爽¹ 刘海军² 刘 冉¹ 赵振军¹ 马家好² 崔龙波^{1*}

(¹ 烟台大学生命科学院, 264005)

(² 广东利洋水产科技有限公司, 广州 510510)

摘 要 通过检测刺参养殖池塘底泥的 6 项理化指标和 8 类细菌数量, 研究了山东省莱州刺参养殖池塘底质的周年变化规律。实验结果显示, 底泥的 pH 值和氧化还原电位变化趋势相同, 变化范围分别为 $(7.15 \pm 0.40) \sim (7.80 \pm 0.21)$ 和 $(42.8 \pm 85.5) \sim (-351.0 \pm 61.5)$ mV。硫化物的变化趋势与 pH 值和氧化还原电位相反, 其含量变化范围为 $(47.66 \pm 47.01) \sim (496.12 \pm 418.57)$ $\mu\text{g/g}$ (干重)。总氮、总磷和有机碳含量变化范围分别为 $(457.42 \pm 103.40) \sim (865.83 \pm 187.85)$ 、 $(166.83 \pm 17.12) \sim (241.32 \pm 27.21)$ $\mu\text{g/g}$ 和 $0.27\% \pm 0.08\% \sim 0.37\% \pm 0.10\%$ 。异养细菌、弧菌和芽孢杆菌数量的变化范围分别为 $(3.27 \pm 5.55) \times 10^5 \sim (6.41 \pm 8.48) \times 10^6$ 、 $(5.39 \pm 4.32) \times 10^3 \sim (1.62 \pm 2.01) \times 10^5$ 和 $(1.31 \pm 1.57) \times 10^4 \sim (7.57 \pm 1.66) \times 10^4$ CFU/g。氨化细菌、反硝化细菌和亚硝化细菌数量的变化范围分别为 $(6.80 \pm 1.16) \times 10^5 \sim (1.31 \pm 1.64) \times 10^7$ 个/g、 $(2.67 \pm 2.48) \times 10^3 \sim (5.11 \pm 5.88) \times 10^4$ 个/g 和 $(8.08 \pm 8.99) \times 10 \sim (1.45 \pm 1.73) \times 10^3$ 个/g, 氨化细菌和反硝化细菌在 1 年内的变化趋势相同。硫还原细菌和硫氧化细菌数量的变化范围分别为 $(5.62 \pm 5.53) \times 10^2 \sim (7.22 \pm 5.52) \times 10^4$ 个/g 和 $(6.50 \pm 5.17) \times 10^1 \sim (1.00 \pm 1.16) \times 10^4$ 个/g, 两种细菌数量在一年内的变化趋势相反。研究表明, 底泥的氧化还原电位与硫氧化细菌数量呈显著正相关 ($P < 0.05$), 硫化物含量分别与芽孢杆菌、反硝化细菌、氨化细菌及硫还原细菌的数量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 有机碳含量与硫还原细菌的数量呈显著正相关 ($P < 0.05$)。刺参养殖池塘底泥的多项理化指标和细菌数量之间显著相关, 关系复杂。

关键词 刺参池塘; 底泥; 理化指标; 细菌数量

中图分类号 S912; S917 文献标志码 A 文章编号 1000-7075(2014)01-0111-07

Variation of physicochemical indices and bacterial numbers in sediment of *Apostichopus japonicus* culture ponds

CHI Shuang¹ LIU Hai-jun² LIU Ran¹

ZHAO Zhen-jun¹ MA Jia-hao² CUI Long-bo^{1*}

(¹ College of Life Science, Yantai University, 264005)

(² Guangdong Li-Yang Aquaculture Technology Co., Ltd, Guangzhou 510510)

ABSTRACT Annual variation of sediment quality in the *Apostichopus japonicus* culture ponds in Laizhou, Shandong Province, was studied by measuring six physicochemical indices

山东省科技发展计划项目(2010GSF10214)资助

* 通讯作者。E-mail: lbcai@163.com, Tel: (0535)6903162

收稿日期: 2012-12-05; 接受日期: 2013-05-06

作者简介: 迟 爽(1985-), 女, 硕士研究生, 主要从事海洋生物学研究。E-mail: 690028425@qq.com, Tel: 18861938006

and eight kinds of bacteria. The results showed that the physicochemical indices and bacterial numbers kept changing throughout the year. The variation trends of pH value and redox potential of sediment in the ponds were similar, in the ranges of (7.15 ± 0.40) - (7.80 ± 0.21) and (42.8 ± 85.5) - (-351.0 ± 61.5) mV, respectively. Meanwhile, the variation of sulfide concentration was in the range of (47.66 ± 47.01) - (496.12 ± 418.57) $\mu\text{g/g}$ (dry weight). The variation ranges of total nitrogen, total phosphorus and organic carbon were (457.42 ± 103.40) - (865.83 ± 187.85) $\mu\text{g/g}$, (166.83 ± 17.12) - (241.32 ± 27.21) $\mu\text{g/g}$, and $(0.27 \pm 0.08)\%$ - $(0.37 \pm 0.10)\%$, respectively. The numbers of heterotrophic bacteria, *Vibrios* and *Bacillus* varied in the ranges of $(3.27 \pm 5.55 \times 10^5)$ - $(6.41 \pm 8.48 \times 10^6)$, $(5.39 \pm 4.32 \times 10^3)$ - $(1.62 \pm 2.01 \times 10^5)$, and $(1.31 \pm 1.57 \times 10^4)$ - $(7.57 \pm 1.66 \times 10^4)$ CFU/g, respectively. The numbers of ammonifying bacteria, denitrifying bacteria, and nitrite bacteria were $(6.80 \pm 1.16 \times 10^5)$ - $(1.31 \pm 1.64 \times 10^7)$, $(2.67 \pm 2.48 \times 10^3)$ - $(5.11 \pm 5.88 \times 10^4)$, and $(8.08 \pm 8.99 \times 10^1)$ - $(1.45 \pm 1.73 \times 10^3)$ cell/g, respectively. The annual variation trends of ammonifying bacteria and denitrifying bacteria were same. The numbers of sulphur-reducing bacteria and sulphur-oxidizing bacteria varied in the ranges of $(5.62 \pm 5.53 \times 10^2)$ - $(7.22 \pm 5.52 \times 10^4)$ and $(6.50 \pm 5.17 \times 10^1)$ - $(1.00 \pm 1.16 \times 10^4)$ cell/g, respectively, and they showed a contrary annual variation trend. The study suggests that there were significant positive correlations between redox potential and the number of sulphur-oxidizing bacteria ($P < 0.05$), between sulfide concentration and the number of *Bacillus*, denitrifying bacteria, and sulphur-reducing bacteria ($P < 0.01$), and between concentrations of organic carbon and the number of sulphur-reducing bacteria ($P < 0.05$), respectively. The study suggests that there are significant correlations and complex relationships among various physicochemical indices and bacterial numbers in the *A. japonicus* culture ponds.

KEY WORDS Culture ponds of *Apostichopus japonicus*; Sediment; Physicochemical indices; Number of bacteria

刺参 *Apostichopus japonicus* 在我国自古被誉为“海产八珍”之首,具有很高的营养与药用价值。广阔的市场前景促进了刺参养殖业的发展,在振兴海洋经济、优化产业结构、增加渔民收入等方面的作用十分显著(李成林等 2010)。然而,养殖的过快发展及集约化养殖模式下的不规范操作,导致病害问题日趋严重,给刺参养殖业造成巨大经济损失(张春云等 2011)。越来越多的学者已认识到,水产动物疾病的根本原因是养殖生态环境的恶化,必须治理养殖环境才能从根本上解决这一问题(贾俊涛等 2003)。底质作为碳、氮、磷等元素的富集库,直接影响到养殖动物生存的内外环境(丁美丽等 1997)。底质环境的恶化对底栖生存的刺参的影响则更为直接,因此对刺参养殖环境特别是池塘底质进行深入的调查研究势在必行。关于鱼虾养殖池塘底质的研究已有报道(王岩等 1999;王娟娟等 2006;张立通等 2011;Ray *et al.* 1992),但迄今为止,关于刺参养殖池塘底质理化及生物指标的变化规律研究尚未见报道。本研究通过对刺参养殖池塘底泥的6项理化指标和8类细菌数量进行了为期1年的跟踪检测,以探索底质变化的规律和特点,为刺参池塘养殖提供技术资料。

1 材料与方法

1.1 实验池塘

用于实验的6个池塘(已使用两年)位于山东省莱州刺参养殖区,每个池塘面积为 $(5\ 000 \sim 6\ 000)$ m^2 ,水深

(1.8~2)m,池塘水为引自海湾的海水,自然纳潮换水,换水量为10%~30%,底质为泥沙底,底部附着基为地笼和石礁。刺参放养密度为10只/m²,养殖期间在春、秋季刺参摄食旺盛期投喂人工饵料。

1.2 底泥的采集

2011年10月~2012年9月(2012年1月和2月结冰期不采),每月初采集底泥,每个池塘设5个取样点。使用Ekman-Binge/Lenz采泥器(德国HYDRO-BIOS公司)采集底泥。取(0~2)cm深度的底泥,先取部分底泥放入无菌采样袋中用于细菌数量测定,其余底泥放入普通采样袋中用于理化指标测定。

1.3 理化指标的检测

本研究检测底泥的pH值、氧化还原电位(Eh)、硫化物、有机碳、总氮和总磷6项理化指标。pH值和氧化还原电位使用5-star水质分析仪(美国Orion公司)当场测定。总磷使用IRIS Intrepid II XSP电感耦合等离子体原子发射光谱仪(美国热电公司)测定。其他指标根据海洋监测规范GB17378.5-2007检测,硫化物采用亚甲基蓝分光光度法,有机碳采用重铬酸钾氧化-还原容量法,总氮采用凯氏滴定法(国家质量技术监督局2007)。

1.4 细菌数量的检测

本研究检测底泥中的异养细菌、弧菌、芽孢杆菌、氨化细菌、反硝化细菌、亚硝化细菌、硫氧化细菌及硫还原细菌8类细菌的数量。细菌培养基配方如下:

异养细菌和芽孢杆菌培养基:蛋白胨5g,酵母膏1g,磷酸铁0.01g,琼脂15g,陈海水1000ml,pH7.6~7.8;弧菌培养基:TCBS培养基购于北京陆桥技术有限责任公司;氨化细菌培养基:蛋白胨10g,K₂HPO₄1g,FeSO₄0.001g,MgSO₄0.5g,NaCl0.5g,微量元素溶液1ml,陈海水1000ml;反硝化细菌培养基:酒石酸钾钠20g,KNO₃2g,K₂HPO₄0.5g,MgSO₄·7H₂O0.2g,陈海水1000ml,pH7.2~7.6;亚硝化细菌培养基:(NH₄)₂SO₄2.0g,NaH₂PO₄0.25g,MnSO₄·4H₂O0.01g,K₂HPO₄0.75g,MgSO₄·7H₂O0.03g,CaCO₃5g,陈海水1000ml,pH7.2;硫氧化细菌培养基:Na₂S₂O₃10g,NH₄Cl2g,K₂HPO₄3g,MgCl₂0.5g,CaCl₂0.2g,无SO₄²⁻海水1000ml,pH6.0~6.2;硫还原细菌培养基:酒石酸钾钠5g,天门冬素2g,FeSO₄0.01g,MgSO₄·7H₂O1.2g,K₂HPO₄1.0g,陈海水1000ml,pH7.0~7.5。

异养细菌、弧菌及芽孢杆菌计数采用平板涂布法,计数菌落形成单位数(Colony forming units,CFU),其中芽孢杆菌菌悬液经80℃水浴20min预处理,静置10min后再进行稀释及涂布。其余细菌计数采用最大或然数(MPN)法(许光辉等1986;陈绍铭等1985)。

1.5 数据处理

运用Excel进行均值计算,用SPSS 19.0数据分析软件中的Correlate程序进行相关性分析, $P>0.05$ 表示相关性不显著, $P<0.05$ 表示相关性显著, $P<0.01$ 表示相关性极显著。

2 结果

2.1 刺参养殖池塘底泥理化指标的变化规律

2.1.1 pH的变化

池塘底泥pH值波动于(7.15±0.40)~(7.82±0.21),最高值出现在3月,最低值出现在8月(图1-A)。pH值在冬季较高,从春季开始,底泥pH值逐渐下降。

2.1.2 氧化还原电位的变化

池塘底泥氧化还原电位在(42.8±85.5)~(-351.0±61.5)mV范围变化。氧化还原电位从10月逐渐升高,翌年3月达到最高值,此后急剧下降,且一直维持在(-330.7~-351.0)mV之间,此时底泥为高度还原态(Chien 1989),直到9月才出现上升趋势。氧化还原电位的变化趋势与pH值相同(图1-A)。

2.1.3 硫化物含量变化

池塘底泥中硫化物含量在 $(47.66 \pm 47.01) \sim (496.12 \pm 418.57) \mu\text{g/g}$ (干重) 范围内变化, 夏、秋季较高, 冬、春季低(图 1-B)。底泥中硫化物含量从 4 月开始呈明显的上升趋势, 直到 7 月达到最高, 之后逐渐降低。池塘底泥中硫化物含量的变化趋势与 pH 值和氧化还原电位的趋势相反。

2.1.4 总氮、总磷和有机碳含量变化

池塘底泥中总氮含量为 $(457.42 \pm 103.40) \sim (865.83 \pm 187.85) \mu\text{g/g}$, 最高值出现在 3 月, 最低值出现在 9 月。池塘底泥中总磷含量波动于 $(166.83 \pm 17.12) \sim (241.32 \pm 27.21) \mu\text{g/g}$, 最高值出现在 7 月, 最低值出现在 9 月。除 3 月外, 其他月总氮与总磷变化趋势相同, 在 11 月和翌年 5 月的投饵期间含量升高, 在结冰期和夏眠期降低。池塘底泥中有机碳含量波动于 $0.27\% \pm 0.08\% \sim 0.37\% \pm 0.10\%$, 最高值出现在 6 月, 最低值出现在 9 月, 整体变化范围较小。

2.2 刺参养殖池塘底泥中细菌数量的变化规律

2.2.1 异养细菌、弧菌和芽孢杆菌的变化

池塘底泥中异养细菌数量的变化范围为 $(3.27 \pm 5.55) \times 10^5 \sim (6.41 \pm 8.48) \times 10^6$ CFU/g, 最高值出现在 10 月, 最低值出现在翌年 9 月。弧菌的变化范围为 $(5.39 \pm 4.32) \times 10^3 \sim (1.62 \pm 2.01) \times 10^5$ CFU/g, 最高值出现在 11 月, 最低值出现在翌年 9 月。芽孢杆菌的变化范围为 $(1.31 \pm 1.57) \times 10^4 \sim (7.57 \pm 1.66) \times 10^4$ CFU/g, 最高值出现在 3 月, 最低值出现在 6 月。由图 2 可以看出, 刺参养殖池塘底泥中异养细菌、弧菌和芽孢杆菌数量的升降起伏有一定的规律性, 异养细菌和芽孢杆菌的变化趋势基本相同, 而弧菌的变化趋势与异养细菌和芽孢杆菌相反, 弧菌的数量在春季和夏季出现两个高峰。

2.2.2 氨化细菌、反硝化细菌和亚硝化细菌的变化

池塘底泥中氨化细菌数量的变化范围为 $(6.80 \pm 1.16) \times 10^5 \sim (1.31 \pm 1.64) \times 10^7$ 个/g, 最高值出现在 8 月, 最低值出现在 3 月。反硝化细菌数量的变化范围为 $(2.67 \pm 2.48) \times 10^3 \sim (5.11 \pm 5.88) \times 10^4$ 个/g, 最高值出现在 11 月, 最低值出现在翌年 3 月。亚硝化细菌数量的变化范围为 $(8.08 \pm 8.99) \times 10^1 \sim (1.45 \pm 1.73) \times 10^3$ 个/g, 最高值出现在 5 月, 最低值出现在 7 月(图 3-A)。刺参养殖池塘底泥中氨化细菌和反硝化细菌数量的变化趋势相同, 均是冬季数量较少, 从 4 月开始细菌数量逐渐升高。亚硝化细菌的数量变化则相反, 从 5 月开始呈现降低的趋势。

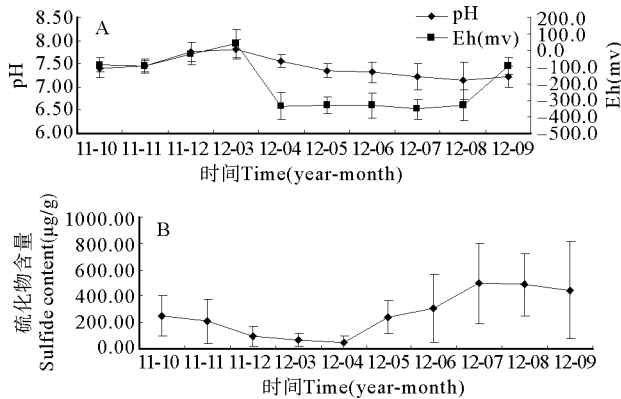


图 1 养殖池塘底泥 pH、Eh 和硫化物含量的变化

Fig. 1 The variation of pH, Eh and sulfide content in sediment of the culture ponds

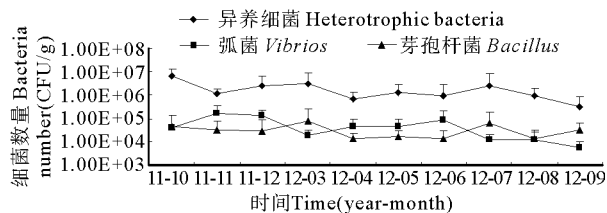


图 2 养殖池塘底泥中异养细菌、弧菌和芽孢杆菌数量的变化

Fig. 2 The variation of heterotrophic bacteria, *Vibrios* and *Bacillus* numbers in sediment of the culture ponds

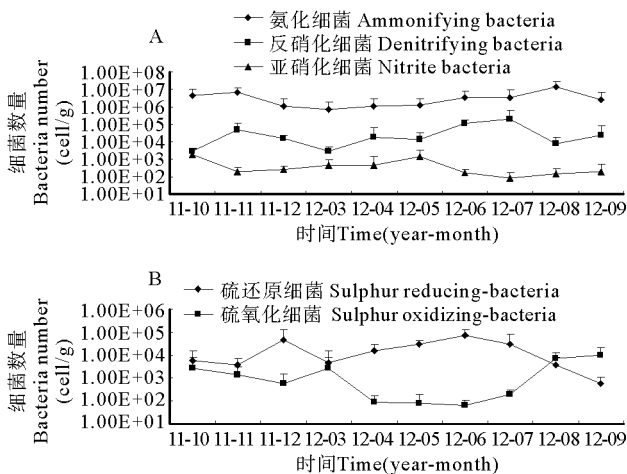


图 3 养殖池塘底泥中氨化细菌、反硝化细菌、亚硝化细菌、硫还原细菌和硫氧化细菌数量的变化

Fig. 3 The variation of ammonifying, denitrifying, nitrite, sulphur-reducing and sulphur-oxidizing bacteria numbers in sediment of the culture ponds

刺参养殖池塘底泥中氨化细菌和反硝化细菌数量的变化趋势相同, 均是冬季数量较少, 从 4 月开始细菌数量逐渐升高。亚硝化细菌的数量变化则相反, 从 5 月开始呈现降低的趋势。

2.2.3 硫还原细菌和硫酸化细菌的变化

池塘底泥中硫还原细菌数量的变化范围为 $(5.62 \pm 5.53) \times 10^2 \sim (7.22 \pm 5.52) \times 10^4$ 个/g,最高值出现在6月,最低值出现在9月。硫酸化细菌数量的变化范围为 $(6.50 \pm 5.17) \times 10^1 \sim (1.00 \pm 1.16) \times 10^4$ 个/g,最高值出现在9月,最低值出现在6月(图3-B)。底泥中硫还原细菌和硫酸化细菌数量的变化趋势相反,随着温度的升高,硫还原细菌数量逐渐增加,而硫酸化细菌则随之减少,硫还原细菌数量在6月呈最高值,而此时硫酸化细菌数量呈最低值。

2.3 刺参养殖池塘底泥各理化指标和细菌数量相关性分析

将各理化指标和细菌数量进行相关性分析,结果表明,养殖池塘底泥的pH值与氧化还原电位呈极显著正相关($P < 0.01$),与总氮含量呈显著正相关($P < 0.05$);氧化还原电位分别与总氮含量和硫酸化细菌数量呈显著正相关($P < 0.05$);硫化物含量分别与芽孢杆菌、反硝化细菌、氨化细菌及硫还原细菌的数量呈极显著正相关($P < 0.01$);有机碳含量与硫还原细菌的数量呈显著正相关($P < 0.05$)。总氮和总磷的含量与细菌数量相关性不显著。各细菌数量间有显著的相关性,其中异养细菌的数量与芽孢杆菌、反硝化细菌及亚硝化细菌呈极显著正相关($P < 0.01$),芽孢杆菌的数量与反硝化细菌和硫酸化细菌呈极显著正相关($P < 0.01$),反硝化细菌的数量与硫还原细菌呈极显著正相关($P < 0.01$)(表1)。

3 讨论

3.1 刺参养殖池塘底泥中各理化指标间的关系

在养殖池塘的泥-水界面以及在底泥中,溶解氧浓度很低甚至缺乏,加之微生物呼吸对溶解氧的消耗,从而引起氧化还原电位下降(Boyd 1995)。本研究表明,刺参养殖池塘底泥的氧化还原电位在冬季较高,自春季随着池塘水温的上升,刺参代谢耗氧率和微生物耗氧率迅速上升,底泥中反硝化细菌、氨化细菌及硫还原细菌等厌氧细菌繁殖,形成大量还原性物质,导致底泥的氧化还原电位急剧降低,使底泥处于高度还原态。同时,大量繁殖的厌氧细菌对有机质分解,产生甲酸、乳酸及丙酸等有机酸,并释放 HCO_3^- ,使pH值降低,导致底泥的pH值与氧化还原电位的变化趋势一致,且二者呈极显著正相关(表1)。

自春季随着温度的升高,刺参池塘底泥的硫化物含量迅速上升,这与虾贝混养池塘底泥中硫化物的变化相一致(彭 斌 2008)。据Takai等(1966)报道,在氧化还原电位为 $(-150 \sim -200)$ mV时,底泥中 SO_4^{2-} 被还原成硫化物。本研究表明,刺参池塘底泥的硫化物含量与氧化还原电位呈负相关(表1),在4月氧化还原电位低于 -300 mV时,硫化物含量上升,此时在采样过程中发现底泥变为黑色,并且随着温度的升高,黑色加重并有明显的硫化氢的臭味。与海洋沉积物质量中第一类标准($300 \mu\text{g/g}$,适用于海水养殖区)比较,莱州刺参养殖池塘底泥中在6~8月硫化物含量超标,超标1.03~1.65倍(国家质量监督检验检疫总局 2002)。

王 岩等(1999)报道对虾与罗非鱼混养的海水围隔底泥中有机碳含量为0.40%~1.48%,本研究中刺参养殖池塘底泥有机碳含量为0.28%~0.37%,低于前者。这可能与刺参的沉积食性有关,刺参主要以底层中的泥沙、有机质、某些细菌和原生动物为食,并可将残饵及粪便等未经矿化的沉积物作为营养源再次利用,从而降低了底泥有机碳的含量(杨红生等 2000;Kang *et al.* 2003)。

3.2 刺参养殖池塘底泥中硫化物含量与细菌数量的关系

理化指标与细菌数量相关性分析结果表明,刺参养殖池塘底泥中的硫化物含量分别与芽孢杆菌、反硝化细菌、氨化细菌及硫还原细菌的数量呈极显著正相关,且硫化物与硫还原细菌的变化趋势相同,说明细菌的繁殖代谢直接影响底泥中硫化物的变化。Ramn等(1974)报道,有机质经细菌分解还原产生硫化物,在 $(10 \sim 30)^\circ\text{C}$ 范围内,水温越高,溶解氧越低,硫还原细菌的活性就越强。本研究发现,有机碳含量与硫还原细菌数量呈显著正相关,表明底泥中有机质含量的升高也能促进硫还原细菌的繁殖,从而加快了硫化物的产生。由此可见,底泥中硫化物的变化是诸多因子相互作用的结果,随着温度的升高,池塘积累的有机质降解速率加快,溶解氧降低,底泥形成厌氧环境,硫还原细菌等厌氧细菌大量繁殖,并且硫还原细菌活性增强,从而促进硫化物的生成。

表 1 养殖池塘底泥中各理化指标和细菌数量的相关性分析

Table 1 The correlation analysis among the physicochemical indexes and the bacteria numbers in sediment of the culture ponds

3.3 刺参发病期的环境特点

本研究发现,在 2012 年 8 月有 3 个池塘出现刺参上浮死亡的情况,而此时底泥中硫化物含量较高,氨化细菌和反硝化细菌数量也是最高值,底泥还原性最强,说明刺参的发病并非单一因素导致,而是池塘底层生态环境恶化的综合结果。本研究还表明,刺参养殖池塘底泥的氧化还原电位、硫化物含量等理化指标与细菌数量的变化关系密切,因此对刺参疾病的防治不能采取单一措施,需要从生态学的角度,针对养殖池塘底泥环境制定综合的改良措施。

参 考 文 献

- 丁美丽,林 林,李光友,朱谨剑. 1997. 有机污染对中国对虾体内外环境影响的研究. 海洋与湖沼, 28(1): 7-12
- 马悦欣,徐高蓉,张恩鹏,王品红,常亚青. 2006. 仿刺参幼参急性口围肿胀症的细菌性病原. 水产学报, 30(3): 377-382
- 王 岩,齐振雄. 1999. 不同养殖方式对海水实验围隔底泥中氮、磷和有机碳含量的影响. 海洋科学, 4: 1-3
- 王娟娟,李晓敏,曲克明,孙 耀,马绍赛. 2006. 乳山湾底质中硫化物和氧化-还原电位的分布与变化. 海洋水产研究, 27(6): 64-70
- 许光辉,郑洪元. 1986. 土壤微生物分析方法手册. 北京: 农业出版社
- 张立通,孙 耀,陈爱玲,赵从明,王彦怀. 2011. 对虾养殖中后期虾塘沉积物的硝化与反硝化作用. 渔业科学进展, 32(1): 67-74
- 张春云,陈国福,徐 仲,阎培生,王印庚. 2011. 海参疾病学研究进展. 水产科学, 30(10): 644-648
- 李成林,宋爱环,胡 炜,张艳萍,赵 斌,李翘楚,麻丹萍. 2010. 山东省刺参养殖产业现状分析与可持续发展对策. 渔业科学进展, 31(4): 126-133
- 李烁寒,李卓佳,杨莺莺,曹煜成,胡晓娟,杨宇峰. 2009. 秋冬季凡纳滨对虾养殖池塘细菌的数量动态. 暨南大学学报, 30(3): 343-348
- 杨红生,王 健,周 毅,张 涛,王 萍,何义朝,张福绥. 2000. 烟台浅海区不同养殖系统养殖效果的比较. 水产学报, 24(2): 140-145
- 陈绍铭,郑福寿. 1985. 水生微生物学实验法. 北京: 海洋出版社
- 国家质量技术监督局. 2007. 海洋监测规范(GB 17378-2007). 北京: 中国标准出版社
- 国家质量监督检验检疫总局. 2002. 海洋沉积物质量(GB18668-2002). 北京: 中国标准出版社
- 贾俊涛,吕 艳,李 筠. 2003. 对虾围隔生态系底泥中细菌数量动态研究. 动物医学进展, 24(4): 76-78
- 彭 斌. 2008. 虾贝混养池塘养殖环境中底质硫化物的研究. 现代农业科技, (9): 172-174
- Boyd CE. 1995. Bottom Soils, Sediment and Pond Aquaculture. New York, Chapman and Hall-5
- Chien YH. 1989. Study on the sediment chemistry of tiger prawn, Kuruma prawn, and red tail prawn ponds in I-Lan Hsien. In studies the Environment Improvement and the Control of the Off-Flavor in Fish II 257-275; Fisheries Series No. 16, Council of Agriculture, Taipei, Republic of China
- Kang KH, Kwon JY, Kim YM. 2003. A beneficial coculture; Charm abalone *Haliotis discus Hannai* and sea cucumber *Stichopus japonicus*. Aquaculture 216(1-4): 87-93
- Ramn AE, Bella DA. 1974. Sulfide production in anaerobic microcosms. Limnol Oceanogr 19(1): 110-118
- Ray WM, Chien YH. 1992. Effects of stocking density and aged sediment on tiger prawn, *Penaeus monodon*, nursery system. Aquaculture 104 (3-4): 231-248
- Takai Y, Kamura T. 1966. The mechanism of reduction in waterlogged paddy soils. Folia Microbiol (Prague) 11: 304-313