

海水闭合循环系统生物滤器微生物特性研究

刘艳红¹, 罗国芝^{2,3}, 朱学宝²

(1. 云南蒙自高等师范专科学校, 云南 蒙自 661100; 2. 上海水产大学设施渔业研究所, 上海 200090;
3. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 利用扫描电镜观察、荧光显微镜计数、氘化胸苷示踪等方法, 研究了盐度为 35 的海水闭合系统生物滤器稳定成熟过程中, 生物膜生物相的构建及系统中三态氮等水质指标的变化情况等。结果表明, 海水闭合循环系统生物滤器可以建立完整的硝化作用, 其稳定成熟过程与淡水及咸淡水生物滤器的情况相同, 只是亚硝酸氧化滞后现象比较明显。细菌及其他生物的变化与水化学指标的变化相吻合。试验系统达成熟状态需 75 d 左右。

关键词: 海水闭合系统; 生物滤器; 生物膜培养; 微生物特性

中图分类号: X832 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 – 2043(2004)03 – 0540 – 05

Microbial Characteristics of Biofilter in a Closed Marine System

LIU Yan-hong¹, LUO Guo-zhi^{2,3}, ZHU Xue-bao²

(1. Mengzi High Teachers Training School, Yunnan, Mengzi 661100, China; 2. Research Institute of Engineering – Aquaculture, Shanghai Fisheries University, Shanghai 200090, China; 3. School of Environmental Science and Engineering of Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The microbial characters of film and its relation of the chemical characters have been reported in this paper. Changes in bacterial colonization on initially clean zeolite grains in experimental system were studied by scanning electron microscopy (SEM). Total bacterial numbers and growth rates in experimental system have been studied with the method of ³H – thymidine, incorporation into DNA and technique of AODC. Stabilization of inorganic nitrogen after sequential changes of ammonia – N, nitrite – N, and nitrate – N in experimental system takes about 75 days at (25 ± 1) °C. There was a clear relation between the change of the bacterial number and the concentrations of the chemical indexes. For the highly specific surface area of zeolite, the highest number of the bacteria was 1016, much more than other related reports. All the results showed that the complete nitrification could be set up in full closed seawater system. The procedure was similar to which in freshwater system, but it needed a much longer start – up period in which nitrite accumulates. The results can be used in the sea fish aquaculture and seawater treatment.

Keywords: seawater closed system; biofilter; cultivation; microbial characteristics

生物过滤在闭合循环水产养殖水处理系统中起着核心作用。生物过滤作用包括了生物滤器上的所有细菌及藻类的活动, 其核心机理是氮的动力学变化。在生物滤器使用之前需要对其进行培养、驯化, 这个过程的实质是在滤料表面形成适合该系统理化条件的具有水质净化功能的包括细菌、原生动物等很多种

类在内的微生物群落, 在系统中建立完整的硝化作用, 使系统具有充分的硝化能力的过程。滤料表层的微生物群落是一种混合体系。随着微生物尤其是细菌研究方法的不断改进和完善, 对这一特殊的微生物群体的综合研究已具有一定的可行性。国内外关于生物过滤在养殖水处理系统中应用的研究, 主要包括生物膜的培养、成熟及其控制技术^[1]; 各种生物滤器的使用效果及生物滤器的设计参数^[2~5]; 影响生物过滤效果的理化因子及其作用的动态模型^[6~8]; 生物膜细菌 (主要是硝化细菌) 的生化特性等内容。本文选择了盐度为 35 的海水生物滤器作为研究对象, 将常规的水化学指标与生物膜生物相 (生物膜微生物生态系) 组成及

收稿日期: 2003 – 12 – 24

基金项目: 上海市科技兴农重点攻关项目 [农科攻字 (2000) 第 6 – 10 号]; 上海市科委西部开发项目 – 超高密度循环水工厂化养殖系统 [(2001) 013258034]

作者简介: 刘艳红 (1968 –), 女, 云南蒙自人, 讲师, 从事设施渔业集约化养殖研究。

联系人: 罗国芝, E – mail: gzhluo@shfu.edu.cn

其变化结合起来,从基础理论的角度系统地研究了海水生物滤器的稳定成熟过程。

1 材料与方法

1.1 试验水槽及环境控制

本试验采用自制 PVC—玻璃循环水族箱,尺寸为(长×宽×高) 50 cm×30 cm×40 cm,水体体积 50 L,滤床尺寸为 8.9 cm×27 cm×18.9 cm。选择沸石滤材,粒径 5~10 mm,试验前充分冲洗并煮沸以消除沸石本身携带细菌的影响。试验水体采用浓缩海水和 INSTANT OCEAN 海盐及陈化自来水调配成盐度为 35 左右的人工海水。试验系统运行 24 h 后添加营养负荷,配方为:葡萄糖:谷氨酸:氯化铵:氯化钙:硫酸镁:氯化钾: KH_2PO_4 : $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$: $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ = 150: 150: 50: 7: 5: 7: 11: 29: 1 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。整个试验过程中水温控制在 $25\text{ }^\circ\text{C} \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ 范围。溶氧控制在 $6\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。试验过程中除每日补充陈化自来水或调制相同盐度的人工海水以弥补因蒸发、取样造成的水体体积及盐度的变化外,不换水。

1.2 常规水化学指标的监测及方法

本次试验每日监测盐度 (YSI—Model—33, S—C—T METER), 温度, pH 值 (pH—3D 型, 上海三信仪表厂), 氨氮 $\text{NH}_4\text{—N}$ (次氯酸酚盐法), 亚硝酸氮 $\text{NO}_2\text{—N}$ (重氮—偶氮比色法), 碱度 (酸碱滴定)。化学耗氧量 COD (碱性高锰酸钾氧化法) 每周测量 2 次。溶氧 DO (修正碘量法), 硬度 (EDTA 容量法) 及硝酸氮 $\text{NO}_3\text{—N}$ (硫酸肼还原法) 每周测 1 次。

1.3 生物相指标的检测及方法

1.3.1 生物膜的剥离

每周取滤床表层 5 g 左右的沸石于用无菌海水 ($0.22\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜过滤) 充分冲洗的 150 mL 三角烧瓶内, 立即添加 50 mL 无菌海水放在医用涡旋混合器上, 利用其高频振荡特性将生物膜从滤料表面剥离^[22, 23]。取得的振荡液立即分析或加入 40% 福尔马林、鲁哥氏液放于 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱保存。

1.3.2 细菌生长速率的测定

采用氘化胸苷示踪 DNA 的方法 (即 TTI 法)。根据姜新跃^[10]推荐的公式与 Fuhrman 经验常数 (1.4×10^{18} 个 $\cdot \text{mol}^{-1}$) 计算样品中细菌生长速度, 再根据取得的滤料重量及稀释倍数计算出单位重量滤料的细菌生长速度。

1.3.3 细菌总数 (TBN) 的测定

计数采用吡啶橙染色、荧光显微镜直接计数即

AODC 法^[11]。每周计数 1 次。荧光显微镜系 Olympus (HBS) 研究用显微镜与上海光学仪器厂生产的落射荧光装置装配而成。活菌、死菌的判断参考郑天凌提供的方法^[12]。同时用最大可能数量法即 MPN 对氨化细菌、亚硝化细菌、硝化细菌、反硝化细菌进行选择培养计数。

1.3.4 藻类、原生动动物及后生动动物的计数

采用普通光学显微镜直接计数方法。

1.3.5 生物膜的扫描电镜观察

使用扫描电镜对滤料表面的生物膜状况进行观察并拍照。采取滤床表层的沸石颗粒, 每周 1 次, 放于 9 mL 2.5% 的戊二醛中固定, $10\text{ }^\circ\text{C}$ 保存。经过乙醇, 丙酮脱水, 临界点干燥, 镀膜等制样处理, 对样品进行电镜观察, 随机选取视野拍照, 放大倍数视情况定。

2 结果

2.1 生物滤器培养过程中三态氮的变化

试验系统中氨氮和亚硝酸氮的减少不是一个缓慢的过程, 而是在相对较短的时间内从循环水中几乎完全消失, 既骤降变化。由图 1 可以看出, 第 4 d 时氨氮浓度明显升高, 此后氨氮浓度稳定下降, 下降速度相当缓慢, 需 40 d 左右才降至 $1\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 此后发生较明显的下降。仅 3~4 d 降至低于 $0.05\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的水平。本次试验氨氮的高峰值出现在系统运行后第 10 d 左右。亚硝酸氮的浓度随氨氮浓度的降低开始缓慢升高, 至氨氮明显下降 (第 50 d 左右, $\text{TAN} < 1.0\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 时, 亚硝酸氮上升幅度明显加大, 1 周时间即升至高峰值, 持续 12 d 左右, 4 d 剧烈下降至 $0.01\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。硝酸氮浓度的变化情况与亚硝酸氮变化呈一致性, 虽然有所升高, 但出现较明显的波动, 随生物滤器的稳定成熟呈下降趋势, 并未出现积累。本系统生物滤器稳定成熟需要 75 d。

生物滤器稳定成熟后, 在系统中加入 $10\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ TAN 和同培养初期等量的有机负载, 系统中的 TAN 第 2 d 便降至 $2\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 第 3 d 便达 $0.05\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的水平; 亚硝酸氮 4 天内既由 $12\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $0.01\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。可以认为经过 75 d 的培养, 系统中的生物滤器已经具备较强的硝化能力。

2.2 pH 值与碱度的变化

系统中 pH 值的变化是系统中硝化作用与反硝化作用的结果。试验系统的 pH 在运行过程中开始 (第 2 d) 有所升高, 由 8.07 跃升至 8.39, 而后保持在 8.5 左右, 最高值达 8.53 (第 7 d)。此后虽然呈下降趋

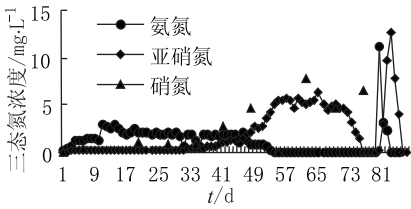


图 1 试验系统中三态氮的变化

Figure 1 Changes in ammonia - N, nitrite - N and nitrate - N in the experiment I: ammonia - N, II: nitrite - N, III: nitrate - N

势,但直到系统稳定(第 76~77 d),pH 值一直保持在 8.3~8.5 之间。试验初期碱度由 0.75 mmol·L⁻¹ 跃升至 3.8 mmol·L⁻¹,而后随氨氮的变化稍有波动。第 40 d 左右亚硝氮开始明显升高时,碱度明显下降,至试验结束时稳定在 3~3.5 mmol·L⁻¹ 的范围内。

2.3 系统中细菌总数、异养细菌生长率及其与三态氮之间的关系

在本次试验过程中,海水循环水槽滤床内的细菌在系统启动后的半个月左右时间内,细菌数目增长率剧烈增加,异养菌的生长率也为整个培养过程的最高值,见图 2,图 3。总菌数增加了 7 个数量级 (10⁹~10¹⁶),增长率由 7 857% 增至 7 999 000%。由图 1 可知,此时氨氮浓度值增至高峰值,此后(第 3 周)细菌数下降 2 个数量级,氨氮浓度值虽然依然比较高,但呈下降趋势。第 4 周时,总菌数再一次升高,此时亚硝酸氮浓度增加比较明显。第 5 周时虽然亚硝酸氮浓度依然保持增势,但比较缓慢,氨氮剧降,总菌数下降 1 个数量级。此后硝酸氮浓度值很快升高,异养菌的数量及代谢活性均降低,见表 1。第 6~7 周,亚硝酸氮

和硝酸氮浓度值上升很快,总菌数增长速度再一次加快,达 10¹⁶。此时异养菌生长率一直保持降低趋势。此后三态氮浓度均下降,系统中建立完整的硝化作用,总菌数保持稳定,异养菌生长率明显升高却保持相对稳定状态,见图 3。由表 1 可知在此期间硝酸氮浓度明显降低。整个系统从构建至稳定成熟过程中,细菌的群体生长按指数速度进行,其生长曲线出现明显的对数期和稳定期。

由表 1 可以看出细菌增长率、死亡细菌及与系统中三态氮的变化情况存在明显的关系。由死亡细菌所占总菌数的比例可知,系统趋于稳定时,死亡细菌所

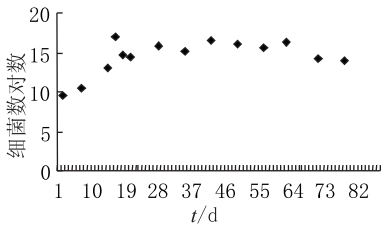


图 2 试验系统中总菌数的变化

Figure 2 Changes in TBN in experiment system

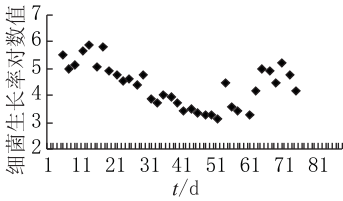


图 3 试验系统中异养细菌的生长率

Figure 3 Changes in the growth - rate of heterotrophic in experiment system

表 1 试验系统中细菌生长情况与三态氮的变化之间的关系

Table 1 The relations between the growth of bacteria and the change of nitrogen in the experimental system

日期	TBN/个·g ⁻¹ 滤料	TBN 增长率/%	DBN/TBN/%	氨氮变化/%	亚硝酸氮变化/%	硝酸氮变化/%
2	3.5×10 ⁹	28.6				
7	3.1×10 ¹⁰	785.7	7.4	215.6	50.49	
14	1.2×10 ¹³	38609.8	58.3	110.6	52.06	
18	3.9×10 ¹⁴	3150	1.7	-24.9	0.5	
20	2.2×10 ¹⁴	-0.436	6.4	-4.15.1		
28	5.2×10 ¹⁵	2263.6	8.7	10	55.06	
35	1.3×10 ¹⁵	-43.6	6.4	-71.9	78.3	117.6
42	3.7×10 ¹⁶	2746.2	3.2	-168.9	162.1	58.5
49	9.3×10 ¹⁵	-25.1	12.9	-62.3	93.0	75.9
56	4.5×10 ¹⁵	-51.6	16	-96.3*	104.1	-27.7
62	2.2×10 ¹⁶	388.9	5.5	*	-9.3	170.9
70	1.9×10 ¹⁴	-99.1	3.2	*	-6.6	-24.5
77	8.3×10 ¹³	-56.3	1.6	*	*	-32

注: TBN 增长率等于 2 次测量值之间的差与较前一次 TBN 的比值, NH₄-N, NO₂-N, NO₃-N 同。* 为 NH₄-N <0.05 mg·L⁻¹ 或 NO₂-N <0.01 mg·L⁻¹。DBN 为死亡细菌总数。

占比例越来越低。初期异养菌占优势,细菌死亡现象比较明显。自养菌占据优势后死亡细菌比例很小。反硝化作用加强时(反硝化菌为异养菌),总菌数中死亡细菌所占比例再度上升,异养菌的生长率再度升高。

表 2 系统中生物相的组成及其变化情况

Table 2 The constitution of biophase and the change in experimental system

生物组成	运行时间									
	第 7 d	第 14 d	第 18 d	第 28 d	第 35 d	第 42 d	第 49 d	第 56 d	第 70 d	第 77 d
原生动物	0. 75	1. 93	2. 59	2. 45	3. 60	4. 83	2. 78	2. 94	2. 98	2. 96
轮虫	1. 92	1. 63	2. 90	2. 62	2. 08	4. 61	3. 00	2. 77	2. 78	2. 48
寡毛类	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	0. 22	1. 86	2. 23	2. 32	2. 84
线虫	未检出	未检出	未检出	未检出	0. 90	1. 95	2. 11	2. 30	2. 54	3. 62
挠足类	未检出	未检出	4. 53	4. 84	5. 45	5. 90	5. 34	4. 90	4. 89	2. 08

注:表中数字为每克滤料含各生物个数的对数值。

系统运行第 2 d 测得藻类为 10^5 个 $\cdot$ g⁻¹ 滤石, 1 周后降至 10^3 个 $\cdot$ g⁻¹ 滤石, 第 90 d 检测时已检测不出。

2. 4. 2 原生动物

生物膜中原生动物大量出现, 主要是一些肉足类、鞭毛虫类和纤毛虫类, 高峰值达 10^4 个 $\cdot$ g⁻¹ 滤料。其变化趋势与细菌总数的变化情况相反, 既随着细菌数目的减少而增加, 反之亦然。但总落后于细菌。本次试验未对循环水体中的细菌进行监测。

2. 4. 3 后生动物

生物膜中后期出现了挠足类、寡毛类、线虫类等高级的后生动物, 标志着本生物小生境趋于稳定^[27]。由表 2、图 2 可以看出, 系统运行至第 42 d 前后, 原生动物、轮虫和挠足类均出现最高值, 寡毛类开始出现, 线虫类也明显增加, 总菌数达第二次高峰。由图 1 可以看出, 此时系统中 NH₄ - N 开始明显下跌、NO₂ - N 积累速度加快, 所以此时应是生物膜活性较强的时期。

2. 5 利用扫描电镜(SEM)观察生物膜

依据取样时间及生物膜生长状况, 可以将本系统滤料表面生物膜的生长情况分为以下几个阶段:

第Ⅰ期(第 1 ~ 7 d) 可以清晰地看到单个细菌及小菌落, 一根根纤细的纤维状物将其相连固定(图 7. b)。滤料表面的生物膜已经连成片状。棒状菌个体较大, 长 5. 4 ~ 5. 7 μm, 宽 1. 0 ~ 1. 4 μm。

第Ⅱ期(第 7 ~ 14 d) 随着细菌的快速增殖, 棒状菌迅速分泌粘液, 已分辨不出单个细菌的存在。滤料表面成一粘絮状积聚体, 形成真正的薄膜状物。

第Ⅲ期(第 14 ~ 21 d) 滤料表面形成一些指状突起, 突出膜外, 生物膜越来越结实。突出的生物膜部分

2. 4 生物相

由表 1、表 2 中可以看出, 海水生物滤床生物膜中的生物相组成及其变动情况。

2. 4. 1 藻类

其基部主要是小型棒状细菌。滤石表面呈紧密的片状。

第Ⅳ期(第 21 ~ 35 d) 大部分生物膜脱落。制样过程中亦发现片状膜脱落。生物膜紧凑性、结实性降低。

第Ⅴ期(第 35 ~ 42 d) 生物膜大面积脱落, 丝状连接残存。

第Ⅵ期(第 42 ~ 49 d) 生物膜脱落处可见单个细菌的生长, 部分开始相连, 新的生物膜开始形成。

3 讨论

山形阳一^[14]认为, 循环过滤饲养系统内, 亚硝酸氮被充分氧化、滤床发挥高效净化能力的状态称之为滤床的成熟。本试验硝化作用建立、系统稳定成熟的判断标准为氨氮值低于 0. 05 mg $\cdot$ L⁻¹、亚硝酸氮值低于 0. 01 mg $\cdot$ L⁻¹, 同 Bower 和 Turner^[2]。

本次试验发现, 系统中硝酸氮的形成并未发生明显的滞后现象, 这是系统中同时进行了反硝化作用的结果。MPN 检测结果表明, 系统运行第 2 d 反硝化菌为 $1. 67 \times 10^3$ 个 $\cdot$ g⁻¹ 滤料; 第 27 d 时, 反硝化细菌达 $2. 08 \times 10^5$ 个 $\cdot$ g⁻¹ 滤料; 第 50 d 左右时达 $2. 5 \times 10^5$ 个 $\cdot$ g⁻¹ 滤料。

本次试验系统稳定需 75 d, 长于已报道的 26 ~ 60 d^[2], 这可能是因为本次试验水体的盐度(本次试验水体的盐度为 35) 高于有关报道的试验盐度(低于 25)。在某些报告中显示, 氨的氧化在纯海水中因为高氯含量的缘故几乎完全被抑制, 对亚硝酸氮的氧化的抑制作用更明显^[3], 从而大大延长了系统建立完整硝化作用的时间。

在一个新系统中, 氨化、硝化和脱氮几乎是按顺

序一个接一个地进行,随着系统的良性运转,它们之间的时滞逐渐缩短,在一个调整好的系统中,它们将同时发生。本次试验的缓冲试验结果表明,系统第一次达稳定状态后,加入 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{NH}_4 - \text{N}$, 仅需 7 d 便再次达稳定状态。这说明生物滤器已具备完整的硝化能力。

每个阶段细菌种群的数目及优势种群均有变化,表现为三态氮及总菌数的起伏变动。因异养菌自身代谢比较快,所以系统初期总菌数的变化亦比较明显和剧烈。系统中后期,硝化细菌为主的自养菌逐渐增加,其优势度增强,因其自身增殖代谢速度比较慢,所以总菌数变化幅度降低。异养菌开始出现时就有较大的量,在系统稳定过程中其优势地位逐渐为硝化菌所取代,后者则是逐渐增加的。

本次试验测得的总菌数比已报道的值要高,可能与本文选择的滤料有关。已报道的研究结果所采用的滤料为石砾^[8]、砂砾^[15, 16]或活性炭^[17]。本次试验选择沸石作滤料。由三者的扫描电镜的照片可以看出,石砾表面结构为尖峰状突起,砂砾的表面结构为片状、蜂窝状结构,而沸石的表面结构与两者存在明显的不同。即使在放大 3 500 倍的情况下,沸石的表面依然有数不清的细微的纹理结构存在,其比表面积高达 $491.803 \text{ m}^2 \cdot \text{in}^{-3}$ (注: $1 \text{ in} \approx 0.025 \text{ m}$), 石砾的比表面积仅为 $0.016 \text{ m}^2 \cdot \text{in}^{-3}$ ^[18]。本次试验细菌计数方法使用 AODC 法,有关研究表明,这种方法比常规的培养计数法所得到的数据高 $10 \sim 10^5$ 倍。考虑到硝化细菌的分类复杂性、种类不确定性尤其是海水硝化细菌的培养难度,本次试验并未对细菌进行分类。

参考文献:

- [1] Nijhof M, Bovendeur J. Fixed film nitrification characteristics in sea - water recirculation fish culture systems[J]. *Aquaculture*, 1990, 87(2): 133 - 143.
- [2] 徐元勤, 韩月玲. 好氧生物膜滤床去除 COD 及 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的研究. 大连水产学院学报, 1997, 12(1): 43 - 50.
- [3] 陈哲俊. 循环水鳗鱼养殖 - 生物过滤系统之运用[J]. 养鱼世界

- (台湾), 1995, (11): 22 - 27.
- [4] 臧维玲, 等. 简易过滤装置对罗氏沼虾亲虾越冬池水质净化的作用[J]. 上海水产大学学报, 1995, 4(1): 20 - 26.
- [5] Summerfelt S T. Engineering design of modular and scalable recirculating systems containing circular tanks, microscreen rites, fluidized - sand biofilters, cascade aerators, and low - head or U - tube oxygenators[A]. *Aquacultural Engineering Society Proceedings II: Successes and Failures in Commercial Recirculating Aquaculture*, 1996, 1: 245 - 256.
- [6] 钟国南. 养殖设施中的有氧生物过滤及无氧生物过滤 - 硝化作用与非硝化作用造成的亚硝酸盐的积累[J]. 养鱼世界(台湾), 1992, 16(7): 58 - 66.
- [7] 曾国峰. pH 及水体停留时间对循环水养鳗系统中浸没式生物滤床除氨效率之影响[J]. 台湾水产学会会刊, 1996, 23(4): 323 - 333.
- [8] Nijhof M. Bacterial stratification and hydraulic loading effects in a plug - flow model for nitrifying trickling filters applied in recirculating fish culture systems[J]. *Aquaculture*, 1995, 134: 9 - 64.
- [9] Parssons T R, et al. A manual of chemical and biological methods for seawater analyses, 60 - 65. Pergamon prerss Oxford, 1984.
- [10] 姜新跃. 鬲湖水域中细菌生长速率的测定及其动态研究[J]. 上海水产大学学报, 1997, 6(4): 258 - 262.
- [11] 门田元, 贺信夫. 海洋微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社(京), 1985. 305.
- [12] 郑天凌, 等. 水产养殖水体细菌数量、生物量、生长速率研究方法评价及现场结果[A]. 中国鱼池生态学[C]. 上海: 上海科学出版社, 1995. 127 - 133.
- [13] 须滕隆一. 俞辉群等译. 水环境净化及废水处理微生物学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社(京), 1988. 182 - 191.
- [14] 山形阳一. 梅志平译. 循环过滤装置的维护和管理[J]. 水产科技情报, 1991, 18(2): 58 - 60.
- [15] Sich H, van Rijn J. Distribution of bacteria in a biofilter - equipped, semiclosed intensive fish culture unit Progress in Aquaculture research. Moav B, Hilge V and Rosenthal H. eds. 1992, 17: 55 - 78.
- [16] Sich H and van Rijn J. Scanning electron microscopy of biofilm formation in denitrifying, fluidized bed reactors[J]. *Water Res*, 1997, 31(4): 733 - 742.
- [17] Ng W J, et al. Ammonia removal from aquaculture water by means of fluidised technology[J]. *Aquaculture*, 1996, 139: 55 - 62.
- [18] Martin A. The Marine Aquarium Reference Systems and Invertebrates. 1993. 182 - 185.