

砂滤罐处理工厂化养鱼循环水效果

周 阳^{1,2}, 陈有光^{1*}, 段登选¹, 王 妹²

(1. 山东省淡水水产研究所, 济南 250117; 2. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 200090)

摘 要: 根据石英砂粒径与颗粒密度的关系, 研究砂滤罐处理工厂化养鱼循环水效果, 该试验采用了 2 组并联的 3 层滤料普通砂滤罐, 根据几何、物理原理, 以石英砂最大颗粒密度, 粒径 3 mm 作为中层, 粒径 2 mm 和 5 mm 作为上下层, 且颗粒密度均小于中层的设计。进行砂滤罐工厂化循环水处理效果和反冲洗再生效果的试验, 结果表明: 悬浮物去除效果极为显著 ($P < 0.01$), 去除率达 99.83%, 达到了去除悬浮物的要求。砂滤罐经过反冲洗后, 能够再生使用。

关键词: 水处理, 颗粒粒径, 养鱼池, 石英砂, 工厂化养鱼, 砂滤罐, 养殖循环水

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.12.045

中图分类号: S951.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-12-0254-05

周 阳, 陈有光, 段登选, 等. 砂滤罐处理工厂化养鱼循环水效果[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 254—258.

Zhou Yang, Chen Youguang, Duan Dengxuan, et al. Quality improvement of industrial aquaculture recycled water by sand filters[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 254—258. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

目前, 砂滤罐在工厂化养鱼中应用十分普遍。养殖循环水预处理后, 紧接着需要去除水中的悬浮物, 通常采用最多的设备就是砂滤罐。砂滤罐中最常用的材料是石英砂和无烟煤, 处理效果与颗粒粒度(粒径和不均匀系数)、机械强度、化学稳定性、颗粒的形状和滤层孔隙率有关。对于颗粒构成的滤层, 还需要考虑过滤过程中的水头损失、滤层的清洗与配水系统^[1-6]。

在工厂化养鱼系统中, 砂滤罐的使用往往认为滤料颗粒越细越好, 其实不然。这是因为对于某一种固体滤料都存在着相对的质量密度, 滤料具有固定的机械强度和化学成分; 同一种加工制成的滤料颗粒, 其不均匀系数是定值。因此, 对于不同大小的颗粒, 总存在着最大的颗粒密度或最小空隙率。本试验目的就是利用几何学原理, 以最小空隙率对石英砂粒径进行选择, 研究了颗粒粒径与空隙率的关系, 根据滤层污物截留的机理, 通过砂滤罐运行和反冲洗等进行水处理效果试验加以评估, 为砂滤罐设计和使用的合理性提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验水源

山东省淡水水产研究所现有一座工厂化养鱼车间 2 150 m², 养殖水体为 1 100 m³, 采用封闭式循环水养殖方式。水源主要来自于研究所院内温井水, 井深 700 m, 水温 25 ℃, 出水量为 80~120 m³/h 作为补充水; 养殖循

环水作为砂滤罐试验用水。

1.2 工厂化养鱼封闭循环水处理工艺流程

在工厂化养鱼封闭循环水处理系统中, 为了保证后续水处理装置的正常运行, 沉淀预处理后还需对循环水做进一步的处理, 而悬浮物对活性炭吸附器、生物接触氧化滤池、紫外线消毒作用很敏感(见图 1)^[7-9]。本试验着重分析砂滤罐水处理效果, 其他设备设施另有相关研究报告。

1.3 砂滤罐过滤机理

砂滤罐过滤机理涉及到 2 个过程: 首先是水中悬浮颗粒向滤料颗粒表面输送的过程, 其次是靠近滤料颗粒表面的悬浮颗粒由于某些力的作用而发生粘附的过程。

水流通过滤层时, 滤层孔隙中的水流一般处于层流状态, 且存在一个速度梯度, 即从滤料颗粒表面滤速接近于零到孔隙中心滤速达到最大值。随水流一起流动的悬浮颗粒, 之所以能脱离水流流向滤料颗粒表面靠近, 是由于某些物理因素的作用。这些物理因素有拦截、惯性、扩散、沉降和流体动力作用等^[10-11]。

1.4 石英砂的选择

当水流通过滤层时, 水流呈层流状态, 能绕过滤料颗粒流动, 接着又在颗粒后面汇合。在任何地方, 当水流中的悬浮颗粒随水流绕过滤料颗粒时, 如果悬浮颗粒粒径 d_1 较大, 且它的中心和滤料颗粒 d_2 中心之间的距离小于它们的碰撞直径, 即 $(d_1 + d_2)/2$, 流线中的悬浮颗粒就会直接碰到滤料颗粒产生拦截作用。拦截作用的几率与颗粒直径比 d_1/d_2 有关。悬浮颗粒直径大, 则拦截作用的几率就大。因此, 正确选择石英砂粒径尤为重要。

不考虑石英砂和滤出物吸附、粘贴和变形作用, 将它们都看成刚性物质时, 一种粒径石英砂不被另一种粒径造成排序混乱^[6], 则对滤层的粒径级差要求, 下层的颗粒直径与上层的直径之比 $\geq 57.735\%$; 当其 $\leq 15.4701\%$ 时, 上层颗粒就容易进入下层, 产生颗粒排序混乱或上

收稿日期: 2009-03-25 修订日期: 2009-07-24

基金项目: 山东省科技攻关计划项目(2004GG2209 134)

作者简介: 周 阳(1984—), 男, 从事生态渔业研究。上海 上海水产大学水产与生命学院, 200090。Email: yangzhou1984816@163.com

*通信作者: 陈有光(1961—), 男, 研究员, 从事水产养殖与设施渔业专业研究。济南 山东省淡水水产研究所, 250117。

Email: chenyouguang2000@yahoo.com.cn

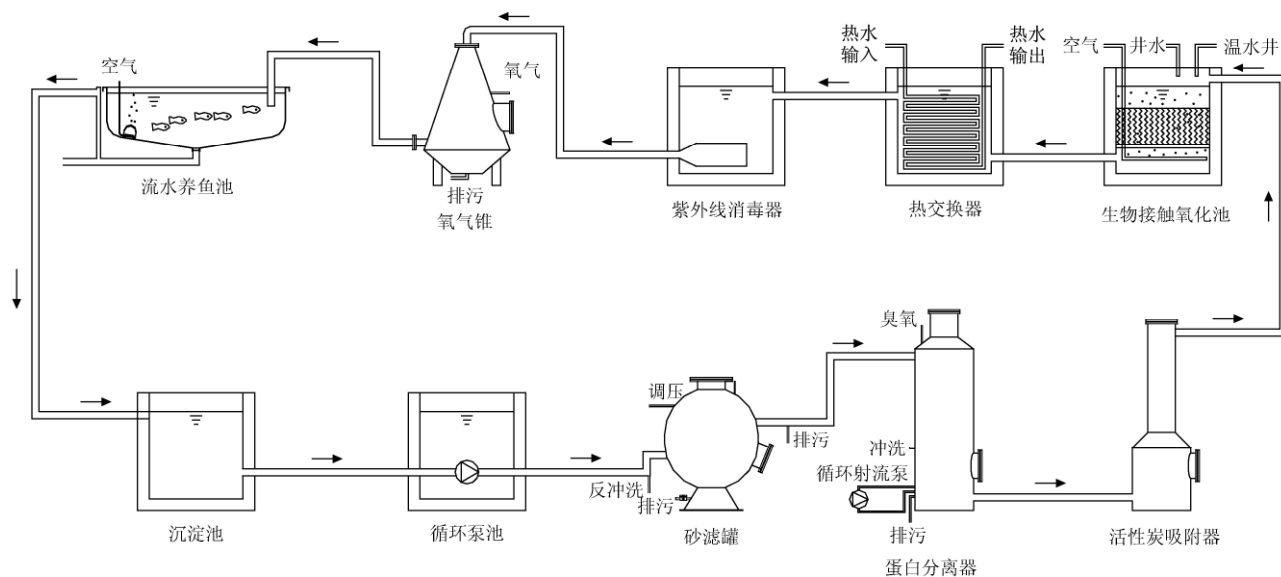


图 1 工厂化养鱼封闭循环水处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of recycled water treatment system for closed-end industrial aquaculture

层颗粒从下层漏出。因此, 本试验从济南建材市场购进精制石英砂(相对质量密度为 2.6 g/cm^3), 选择了 5 种颗粒粒径, 分别为 1.0、2.0、3.0、4.0 和 5.0 mm, 依次对颗粒粒径之比进行了比较, 最后选择颗粒粒径之比为 $2.0/3.0 = 66.667\% \geq 57.735\%$; $3.0/5.0 = 60\% \geq 57.735\%$, 符合分层粒径级差的要求。

1.5 砂滤罐结构

砂滤罐材质为玻璃钢^[12-13], 见图 2。外形是由 2 个半球中间加了 100 mm 的圆柱组成的, 球体直径为 1 200 mm, 净高 1 300 mm。顶部检查孔直径 350 mm, 下部检查孔直径 300 mm。上部为循环水输入口, 下部为循环水输出口, 直径均为 110 mm。上部设有放空阀和压力表; 下部设有排污阀, 阀门直径均为 25 mm, 总体积为 1.02 m^3 。

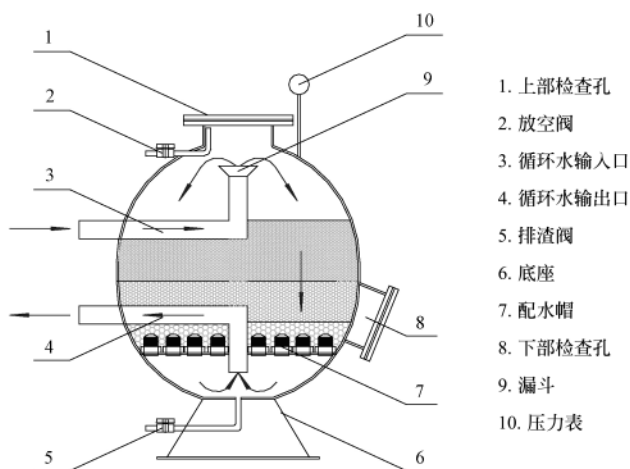


图 2 砂滤罐剖面示意图

Fig.2 Schematic description of sand filter tank profile

砂滤罐顶部中间设有进水装置, 进水装置为向上的漏斗, 进水通过漏斗和滤层上的水层进入滤层。由于此水层的缓冲作用, 这种最简单的漏斗形进水装置基本上

能做到布水均匀。

砂滤罐运行与反冲洗的水流方向相反, 它是通过一组运行阀和冲洗阀的启闭与循环泵和反冲洗泵连接来实现水流方向的切换(见图 2)。为了反冲洗时水流分配均匀, 常设有配水系统。

配水系统的种类较多, 目前常用的有配水帽式、支管开缝式或开月、孔式等。配水帽是一个带有缝隙的部件, 它安装在过滤器底座上或支管管道上。本试验设置 56 个配水帽, 配水能力为 $1.0 \sim 1.2 \text{ m}^3/\text{h}$, 见图 3。

1.6 试验设计

1.6.1 石英砂颗粒密度的检测

从购置的 5 种规格石英砂中, 随机取样, 用 100 mL 的烧杯装满石英砂, 然后用玻璃棒刮平后称质量, 再对烧杯装水量出实际的体积, 每种样品重复 3 次。

1.6.2 砂滤罐循环水处理效果试验

采用 2 个砂滤罐并联使用。砂滤罐上午 10:00 和下午 16:00 各排污 1 次。

对砂滤罐运行中输入口和输出口进行水质检测, 观察水处理效果。

1.6.3 反冲洗再生效果试验

切换为砂滤罐反冲洗运行工况, 用秒表记取污水变为清水所用的时间。

1.7 水化学分析方法与数据处理

1) 水化学分析方法: pH 值(电极法) GB/T6920—1986; 化学耗氧量(高锰酸钾法) GB/T11892—1989; 溶解氧(碘量法) GB/T7489—1987; 氨氮(纳氏比色法) GB/T7479—1987; 亚硝态氮(分光光度法) GB/T7493—1987; 硝态氮(酚二磺酸法) GB/T7480—1987; 总氮(碱性过硫酸钾法) GB/T11894—1989 和总磷(钼酸胺法) GB/T11893—1989^[14]。

2) 数据处理: 数据统计分析与制图处理采用 SPSS

15.0 (statistical package for social science) 社会学统计软件^[9]和 Auto CAD2004 软件处理^[15]。采用 t 检测对各种设

施和设备进出口水质指标进行成对双样本均值分析, 观察其试验效果。

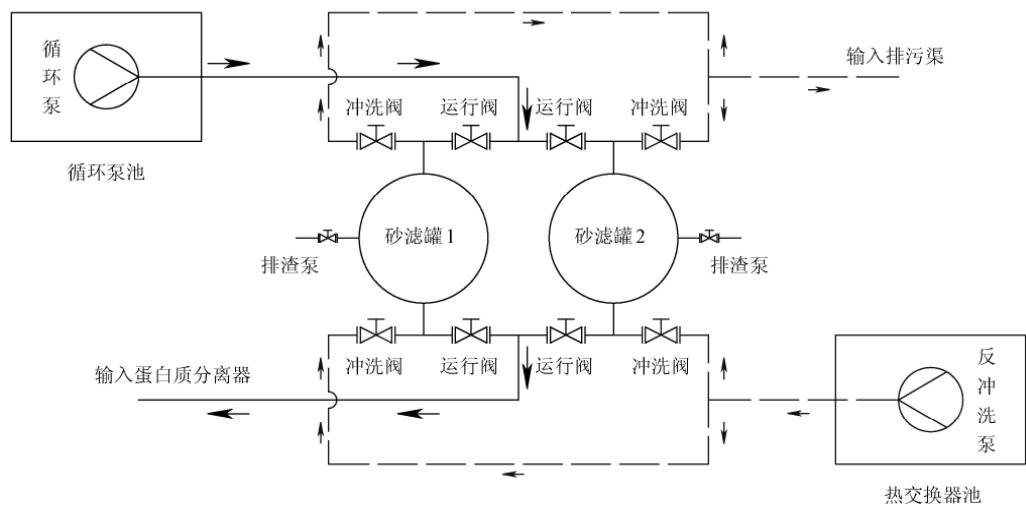


图 3 砂滤罐运行与冲洗的切换

Fig.3 Switch of sand filter tank for running and flushing

2 结果与分析

2.1 石英砂颗粒密度检测结果

石英砂颗粒密度检测结果见表 1。

表 1 石英砂颗粒密度检测结果

Table 1 Test results of quartz particle density

($n=3, \bar{x} \pm SD$)

序号	粒径/mm	空隙率/%	颗粒密度/(g·cm ⁻³)
1	1.0	45.95	1.405±0.023
2	2.0	44.50	1.443±0.021
3	3.0	43.77	1.462±0.005
4	4.0	44.15	1.452±0.017
5	5.0	45.04	1.429±0.012

注: 石英砂的相对质量密度为 2.6 g/cm³, 空隙率 (%) = (相对质量密度 - 颗粒密度) / 相对质量密度 × 100%。

2.2 颗粒空隙率与滤料层

表 1 试验结果表明: 石英砂的颗粒粒径与空隙率的关系式

$$y = 0.4136x^2 - 2.6984x + 48.228 \quad (r = 0.9968) \quad (1)$$

式中: y——石英砂的颗粒空隙率, %; x——石英砂的颗粒粒径, mm。

式(1)求导, 则: 拐点(粒径 3.2616 mm, 43.827 %), 所以, 选择颗粒粒径为 3.0 mm 位于中层。

根据水力分层作用, 本试验石英砂分为 3 层: 细小颗粒在上层, 颗粒粒径 2.0 mm; 中等颗粒在中层, 颗粒粒径 3.0 mm; 较大颗粒在下层, 颗粒粒径 5.0 mm。

在循环水过滤时, 颗粒上小下大的排列是普通过滤器的一个特点。颗粒的孔隙率上层、中层和下层分别为 44.50 %、43.77 %和 45.04 % (见图 4); 上层颗粒较小, 阻挡了大颗粒的污物, 而下层空隙率较大, 有助于穿过滤层, 减少水头损失, 中层空隙最小, 起到了拦截作用^[16]。

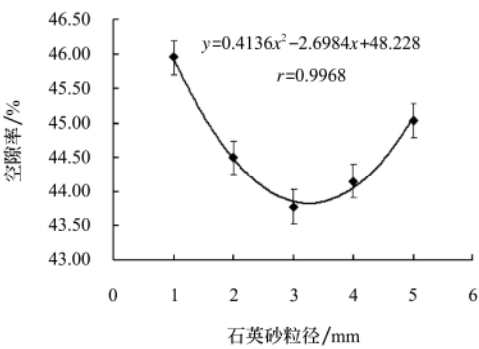


图 4 石英砂颗粒粒径与颗粒空隙率的关系

Fig.4 Relation between quartz sand particle size and particle voidage

在反冲洗时, 上层颗粒较小, 与中层相比空隙率大, 有助于流体动力作用, 上层被截留的污物脱离石英颗粒, 随水排出, 便于排污。

2.3 砂滤罐排放水量的确定

循环泵型号 QS65-18-5.5, 水量 65 m³/h, 扬程 18 m, 功率 5.5 kW, 作为本次工厂化养鱼循环水的设计流量为 65 m³/h。砂滤罐为 2 个并联使用, 反冲洗泵的型号 QS40-28-5.5, 水量 40 m³/h, 扬程 28 m, 功率 5.5 kW, 每天反冲洗 2 次, 连续进行了 3 d 对排放水量的检测, 结果如表 2。

表 2 砂滤罐排放量测试结果

Table 2 Test results of sand filter tank flushing

($n=3, \bar{x} \pm SD$)

编号	测量排污时间/s	次数/d ⁻¹	排放量/m ³	实际排放时间/min	次数/d ⁻¹	实际排放量/m ³
砂滤罐 1	58.7±4.5	2	2.12	5	2	10.75
砂滤罐 2	60.3±3.8	2	2.18			

注: 为了方便养殖操作管理, 砂滤罐反冲洗时间, 设定为每次 5 min。

2.4 砂滤罐循环水量与排污量

砂滤罐采用正向过滤运行方式，过滤层高为 0.7~0.8 m，双罐并联使用，由于循环泵型号 QS65-18-5.5 水量 65 m³/h、扬程 18 m、功率 5.5 kW，则砂滤罐流速为 28.75 m/h，压力表压力在 0.2~0.4 MPa 之间，超过 0.4 MPa，就需要及时反冲洗处理，过滤周期为 12~24 h。由于反冲洗水泵的型号 QS40-28-5.5 水量 40 m³/h、扬程 28 m、功率 5.5 kW，采用单罐冲洗方式，反冲洗压力为 0.28 MPa，反冲洗强度 9.83 L(s·m²)，反冲洗时间

5 min^[13]。

2.5 砂滤罐循环水处理效果

表 3 试验结果表明：砂滤罐循环水输入与出口相比 pH 值、悬浮物（SS）、化学耗氧量（COD_{Mn}）、溶氧（DO）、氨氮（NH₄⁺-N）和总磷（TP）下降率分别为 3.27%、99.83%、9.19%、97.20%、23.56%和 4.78%，尤其 SS 去除效果好，但 DO 降低也很明显；亚硝酸盐（NO₂⁻-N）、硝酸盐（NO₃⁻-N）和总氮（TN）分别上升 49.86%、0.30%和 5.01%。

表 3 砂滤罐循环水处理检测结果
Table 3 Test results of recycled water quality treated by sand filter tank

(n=3, $\bar{x} \pm SD$)

检测项目	水质检测指标								
	pH 值	悬浮物	化学耗氧量	溶氧	氨氮	亚硝态氮	硝态氮	总氮	总磷
输入口	7.35±0.16	13.4±0.82	9.25±0.31	5.50±0.21	2.96±0.02	1.23±0.00	2.20±0.25	7.72±0.31	3.00±0.19
输出口	7.11±0.08*	0.0±0.02**	8.40±0.16*	0.20±0.05**	2.26±0.14*	1.84±0.04**	2.20±0.25	8.11±0.17	2.85±0.13*
去除率(下降率)/%	3.27	99.83	9.19	97.20	23.65	-49.86	-0.30	-5.01	4.78

注：*差异显著（P<0.05）；**差异极显著（P<0.01）。除 pH 值以外，单位均为 mg/L。

试验结果分析表明：SS 去除和 DO 降低差异极为显著（P<0.01），pH 值、COD_{Mn}、NH₄⁺-N 和 TP 降低差异显著（P<0.05）；NO₂⁻-N 上升差异极显著（P<0.01）；其余指标变化不大。因此，砂滤罐作为工厂化养鱼封闭循环水处理的一个环节，达到了去除悬浮物效果，满足渔业用水对悬浮物的要求（<10 mg/L）^[17]。

2.6 循环流量与动力消耗

在工厂化养鱼水处理系统中，值得注意的是砂滤罐是一个压力式过滤设备，而工厂化养鱼多为封闭式循环水养殖，鱼池通过水体交换，才能将池中的粪便、残饵等污物排出，这就产生了悬浮物去除与循环水量提供的矛盾。目前，供水较为经济的方法是采用轴流泵，水泵供水功率为

$$\eta=Q/N$$
 (2)

式中：Q——水泵流量，m³/h；N——水泵配用功率，kW。

根据中国泵阀网提供的轴流泵产品样本得知，轴流泵平均扬程 4.26 m、平均供水效率为 47.30 m³/(kW·h)^[18]；而经过本试验用的砂滤罐扬程 18 m、供水效率为 11.82 m³/(kW·h)，轴流泵功效是砂滤罐的 4 倍，砂滤罐之所以供水功耗过高，是因为用于克服砂滤罐滤层的水头损失和沿程损失。虽然本试验的砂滤罐，在流量、功耗方面与其他砂滤罐相比有所改善，但完全采用砂滤罐去除悬浮物，会相应增加供水成本。

3 结论与讨论

1) 本试验采用了 2 组并联的 3 层滤料普通砂滤罐，根据几何、物理原理，以石英砂最大颗粒密度，粒径 3 mm 作为中层，粒径 2 mm 和 5 mm 作为上下层，且颗粒密度均小于中层的设计。砂滤罐中层颗粒密度最大有助于去除循环水中的污物，降低反冲洗功耗。

2) 通过砂滤罐对工厂化循环水处理效果和反冲洗再

生效果的试验，试验结果表明：悬浮物去除效果极为显著，去除率达 99.83%，满足达标养鱼用水要求；砂滤罐反冲洗后，容易再生重复使用。

3) 工厂化养鱼系统完全采用砂滤罐去除悬浮物，供水成本将会相应增加。如何充分利用新材料、新工艺、新方法进行改进，研制出大流量、低功耗、易再生、悬浮物去除率高的砂滤罐，尚需进一步做深入细致的研究。

[参 考 文 献]

[1] 朱学宝, 谭洪新, 罗国芝. 封闭循环工厂化水产养殖水质净化系统的技术构成[J]. 内陆水产, 2000, (10): 24—25. Zhu Xuebao, Tan Hongxin, Luo Guozhi, Technologies of factory closed cycle aquaculture system of water purification[J]. Inland Fisheries, 2000, (10): 24—25.(in Chinese with English abstract)

[2] 雷霖霖. 海水鱼类养殖理论与技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 365—408.

[3] 胡金成, 杨永海, 张树森. 循环水养殖系统水处理设备的应用技术研究[J]. 渔业现代化, 2006, (3): 15—18. Hu Jincheng, Yang Yonghai, Zhang Shushen. The application technology research of water treatment equipment in the recycled water aquaculture system[J]. Fisheries Modernization, 2006, (3): 15—18. (in Chinese with English abstract)

[4] 丁永良, 沈宜萱. 水族馆与养鱼工厂的高效净水微生物及其净水机理[J]. 现代渔业信息, 2001, 16(3): 3—6. Ding Yongliang, Shen Yixuan. Efficient water micro-organisms and their purification mechanism in aquarium and fish factory[J]. Modern Fisheries Information, 2001, 16(3): 3—6. (in Chinese with English abstract)

[5] 陈有光, 段登选, 马荣棣, 等. 无公害工厂化温流水养鱼技术操作规程要点[J]. 渔业现代化, 2003, (5): 19—21. Chen Youguang, Duan Dengxuan, Ma Rongdi, et al. The

- operation points of pollution-free factory warm water fish culture technology[J]. *Fisheries Modernization*, 2003, (5): 19—21. (in Chinese with English abstract)
- [6] 张婧一, 陈有光, 宿金莲. 等. 工厂化循环水与静水养鱼模式综合效益分析[J]. *渔业现代化*, 2009, 36(1): 5—8. Zhang Jingyi, Chen Youguang, Su Jinlian, et al. Experimental study on ultra-high pressure treatment of fresh marine shrimp[J]. *Fisheries Modernization*, 2009, 36(1): 5—8. (in Chinese with English abstract)
- [7] 彭树锋, 王云新, 叶富良. 工厂化养殖水处理系统水质净化效果分析[J]. *广东海洋大学学报*, 2007, (27) 3: 69—73. Peng Shufeng, Wang Yunxin, Ye Fuliang. Water treatment effects for water treatment system of industrialized fish farming[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2007, (27)3: 69—73. (in Chinese with English abstract)
- [8] 孙栋, 陈有光, 段登选. 等. 工厂化循环水养鱼池曝气释放器养殖效果的研究[J]. *长江大学学报*, 2009, 6(2): 36—41. Sun Deng, Chen Youguang, Duan Dengxuan, et al. The study of culturing effect with the release of aeration devices in factory recycled water aquarium[J]. *Journal of Yangtze University*, 2009, 6(2): 36—41. (in Chinese with English abstract)
- [9] 陈有光, 段登选, 陈秀丽, 等. 工厂化养鱼中氧气锥的增氧规律[J]. *渔业现代化*, 2009, 36(3): 26—30. Chen Youguang, Duan Dengxuan, Chen Xiuli, et al. Study on the oxygen increasing law of oxygen cone in industrialized fish farming system[J]. *Fisheries Modernization*, 2009, 36(3): 26—30. (in Chinese with English abstract)
- [10] 顾夏声, 黄铭容, 王占胜, 等. 水处理工程[M]. 清华大学出版社, 1990: 114—149.
- [11] 丁磊, 王萍. 沸石强化过滤的中试及生产性试验研究[J]. *矿物学报*, 2008, 28(3): 289—293. Ding Lei, Wang Ping. On pilot-scale and full-scale production test on enhanced filter with zeolite[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2008, 28(3): 289—293. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王世和, 周飞, 吴铭铭. 长纤维高速过滤器的运行特性与性能优势[J]. *过滤与分离*, 2008, 18(1): 38—41. Wang Shihe, Zhou Fei, Wu Mingmin. Analysis of performance superiority of a long fiber efficient filter[J]. *Journal of Filtration & Separation*, 2008, 18(1): 38—41. (in Chinese with English abstract)
- [13] 刘鹰, 王朝夕, 杨红生, 等. 玻璃纤维海水专用砂滤器[P]. 中国专利: 2005 1 0047991.X, 2006-06-30.
- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第 4 版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 123—207.
- [15] 刘大海. SPSS15.0 统计分析——从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [16] 黄朝禧. 水产养殖工程学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 250—314.
- [17] GB 11607—89, 渔业水质标准[S].
- [18] 中国泵阀网. 水泵产品样本[EB/OL]. [2009-03-18] <http://www.zgbfw.com/product/Productshow.aspx?id=20601>.

Quality improvement of industrial aquaculture recycled water by sand filters

Zhou Yang^{1,2}, Chen Youguang^{1*}, Duan Dengxuan¹, Wang Mei²

(1. Fresh Water Fisheries Research Institute of Shandong Province, Jinan 250117, China;

2. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 200090, China)

Abstract: Two groups of three parallel ordinary sand filter tanks were used in the experiment. According to the physical and geometric principles, quartz sand with particle size of 3 mm was selected as the middle-level, while 2 mm and 5 mm as the upper and lower level, respectively. The particle densities of the upper and lower levels were less than that of the middle one. An experiment of water treatment on factory recycled water by sand filter and its backflushing renewable effect was carried out. The results showed that suspended solids removal efficiency was extremely significant ($P < 0.01$), which removal rate reached 99.83%, and sand filter tank after backflushed was renewable to be used.

Key words: water treatment, particle size, fish ponds, quartz sand, industrial aquaculture, sand filter tank, culturing recycled-water