

工厂化养殖循环水固液分离特性及处理工艺选择分析

张俊新^{1,2}, 刘长发^{1,2}, 何洁^{1,2}, 邓刚³, 李默然³

(1.大连水产学院海洋环境工程学院, 辽宁 大连 116023; 2.辽宁省高校近岸海洋环境科学与技术重点实验室, 辽宁 大连 116023; 3.山东济宁供水集团, 山东 济宁 272037)

摘要:采用固体颗粒去除率累积计算法,以牙鲆 (*Paralichthys olivaceus*) 养殖循环水为例,研究了其固液分离特性。结果表明,120 min 时固体颗粒去除率可达 49.3%±0.02%,对应表面负荷为 0.39 m³·m⁻²·h⁻¹,与城市污水处理中二次沉淀池设计表面负荷接近。大于 100 μm 的固体颗粒水力粒径占 50%左右,此部分颗粒适于用重力沉降或水力旋流工艺去除。小于 60 μm 的颗粒占 37%左右,此部分难于水力分离。应基于养殖循环水的固液分离特性选择适合的固液分离工艺处理养殖循环水。

关键词:固体废物;固液分离;表面负荷;水产养殖;水力粒径

中图分类号:X703.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)03-1173-04

Analysis of the Solid-liquid Separation Characteristics and Treating Process Choice of Industrial Recycled Aquaculture Wastewater

ZHANG Jun-xin^{1,2}, LIU Chang-fa^{1,2}, HE Jie^{1,2}, DENG Gang³, LI Mo-ran³

(1. College of Marine Environmental Engineering, Dalian Fisheries University, Dalian 116023, China; 2. Key Laboratory of Nearshore Marine Environmental Research, Dalian 116023, China; 3. Jining Water Supply Parent Company, Jining 272037, China)

Abstract: The solid-liquid separating characteristics in the recirculating aquaculture system (RAS) of Japanese flounder (*Paralichthys olivaceus*) cultivation was investigated by using the cumulative particle removal rate calculus to process data. From test data the key parameters can be obtained including overflow rate, removal rate and hydraulic particle size. The results showed that the removal rate of solids waste was 49.3%±0.02% at 120 min and 0.39 m³·m⁻²·h⁻¹ of overflow rate, close to that of the second sedimentation basin used in municipal sewage plant. The distribution of particle size above 100 μm varied obviously while that below 60 μm varied narrowly. Hydraulic particle size of solid above 100 μm made up about 50% of all solids. The processes of gravity settling and swirl separation were suitable for separating this part of solids. Particle size of solid less than 60 μm made up about 37% and was difficult to separate by hydraulics. Suitable process of solid-liquid separation should be chosen based on the solid-liquid separating characteristics of recycled aquaculture wastewater. Finally foam separating and hollow fibre membrane process were discussed. Fine filters used in industry maybe suit for recycled aquaculture wastewater treatment.

Keywords: solids waste; solid-liquid separation; overflow rate; aquaculture; hydraulic particle size

在循环水养殖系统 (RAS) 中主要存在的固体颗粒为投喂残饵和鱼类粪便。这些固体废物大小不一,性质以有机颗粒物居多。这些物质存在于水中会消耗水中溶解氧,使溶解氧降低。在氨氧化和硝化作用下

产生氨氮和亚硝氮,危害鱼类等养殖生物。同时,在水力剪切作用下,会产生细小悬浮颗粒,可能损害鱼鳃^[1]。研究表明,直排式的养殖污水中固体颗粒物浓度在 5~50 mg·L⁻¹ 之间。这些颗粒物中含有 7%~32% 的总氮,30%~84% 的总磷^[2]。有效地去除掉废水中的固体颗粒物是养殖水质稳定的保证,是工厂化养殖系统脱氮除磷,实现“零排放”的第一步。

为确定养殖循环水固体颗粒的分离工艺及工艺参数,需要对养殖循环水的分离特性进行研究。本研究以牙鲆工厂化养殖循环水为例,通过试验研究其固液分离特性,从数据中获得关键参数。在理论分析的

收稿日期:2007-12-03

基金项目:国家 863 计划项目 (2007AA10Z410);欧盟第五框架计划国际合作项目 ZAFIRA (CA4-CT-2001-10025);辽宁省自然科学基金项目 (20072141)

作者简介:张俊新 (1975—),男,吉林通化人,硕士,讲师。主要从事农业生物环境工程与科学研究。E-mail: junxin_zhang@dlfu.edu.cn

通讯作者:刘长发 E-mail: liucf@dlfu.edu.cn

基础上给出合理、高效的工艺选择,供实际工程参考。以期能为养殖循环水固液分离提供研究方法上的借鉴。

1 背景

George在其著作中阐述了分散颗粒物去除率累积计算公式的推导形成^[3]。累积去除率可用下式表示:

$$\eta = (1 - P_0) + \int_0^{P_0} \frac{v_t}{v_0} dP$$

式中: η 为累积去除率; v_0 为某特定时刻截留速度, v_t 为 t 时刻时的沉降速度; P_0 为特定时刻未分离剩余量, P_t 为 t 时刻系统中颗粒物浓度 C_t 与特定时刻系统中颗粒物浓度 C_0 的百分比值,即沉速小于和等于 v_0 的固体颗粒所占总颗粒物的质量百分比。

对于非凝聚性的颗粒在沉降分离过程中彼此不发生影响,并且保持粒径尺寸不发生变化皆可应用此公式进行沉淀效率的计算。令公式中 $B = \int_0^{P_0} v_t dP$,则 B 为在以 v_t 为横坐标, P 为纵坐标的坐标系中,曲线与纵轴围成的面积^[4]。

$$\text{对于特定的为常量,则 } \eta = (1 - P_0) + \int_0^{P_0} \frac{v_t}{v_0} dP$$

$$= (1 - P_0) + \frac{B}{v_0}$$

由Stocks公式,

$$v = \frac{g(\rho_s - \rho)}{18\mu} d^2$$

式中: v 为颗粒沉降速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; μ 为水的绝对粘度, $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$; ρ_s 为固体颗粒的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ 为液体的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; g 为重力加速度, $9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; d 为固体颗粒的水力粒径, m 。

对于不同沉速 v 所对应的时刻 t ,可测得此时的水样浊度 I_t 。 I_t 与初始浊度 I_0 的比值即为小于或等于沉速 v_t (或沉速对应的粒径 d)的颗粒所占的百分数^[5]。

由以上2个公式即可确定分离具有特定粒径的固体颗粒的去除率和水体中固体颗粒的水力粒径的分布。

2 材料与方法

2.1 试验装置及操作

沉降柱材质为有机玻璃管,内径150 mm,高1.5 m。沉降高度(溢流口至取样口距离) H 为0.9 m。储水箱用于储存试验用水,容积为2 m³。试验前开启水泵和搅拌机使箱内水混合均匀。通过水泵将试验用水

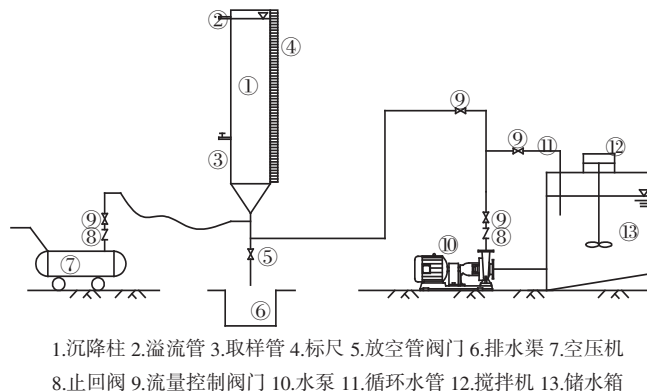


图1 试验装置示意图

Figure 1 Diagram of apparatus for trial

经配水管道注入沉降柱内至溢流管高度。开启空压机并调整气量将试验水搅拌均匀后,开始试验。空压机和水泵管路上均设有止回阀,防止柱内水倒灌入设备内。

2.2 试验材料及方法

2.2.1 试验材料

试验用水为牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)养殖循环水。牙鲆养殖密度为 $0.85 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,平均重量 $(140 \pm 0.8) \text{ g}$,按鱼体重0.8%~1.5%投喂山东升索渔用饲料研究中心生产的商品饲料。水温 $(18 \pm 0.4) ^\circ\text{C}$ 。水样取样用100 mL容量瓶,计时用秒表,液面高度通过读取标尺确定。浊度用光电式浊度仪测定。

2.2.2 测定方法

固体颗粒悬浮物浓度及海水密度按照GB17378-1998进行分析测定。

2.2.3 数据处理

数据处理及曲线绘制由Origin7完成。其中积分运算求 B ,使用origin工具中baseline里的area计算工具。

2.2.4 试验参数确定

利用固体颗粒去除率累积计算法计算出不同沉淀时间的累积去除率和具有不同沉淀速度(沉淀表面负荷)的颗粒的对应去除率。为沉淀高度 H 与沉淀时间 t 的比值。沉淀高度 H 为液面到取样口的距离,本实验中初值为0.9 m。 P_t 为 t 时刻系统中颗粒物浓度 C_t 与特定时刻系统中颗粒物浓度 C_0 的比值,本实验中 C_0 为原水悬浮物浓度,经测定为 $263.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。取样时间为第0、2、5、10、20、30、60、120、240、360、480、600、720 min,其中停止曝气搅拌后计0时刻。

在不同的表面负荷条件下,用stocks公式计算出相应的水力粒径并确定水样中水力粒径分布规律,分

析不同负荷下可分离的最小颗粒粒径。水温 18 ℃ 时水的绝对粘度为 $1.055\ 9\times10^{-3}\ \text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$; 水样密度 (海水密度) 为 $1\ 025\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; 养殖固体废物有机颗粒平均密度为 $1\ 050\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ [6]。

3 结果与分析

3.1 经不同沉淀时间颗粒累积去除率

数据处理分析后,沉淀时间与颗粒去除率之间的关系曲线见图 2 所示。

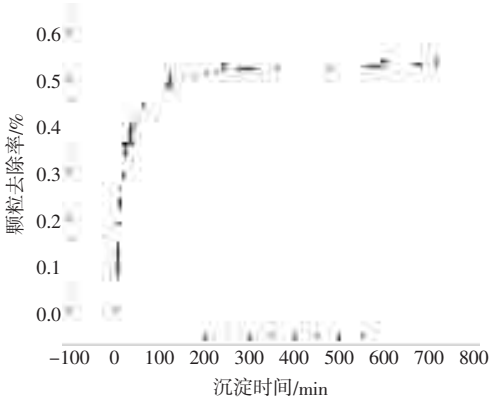


图 2 沉淀时间与颗粒去除率之间的关系曲线
Figure 2 Relationship between settling time and particle removal rate

沉淀时间在 30 min 以内,去除率增加最快。30 min 时累积去除率为 $37.9\%\pm0.02\%$,这主要是由于较大颗粒较快速地沉淀下来。在 30 min 到 240 min 之间,去除率增加趋于缓慢,120 min 时达到 $49.3\%\pm0.02\%$,240 min 时达到约 $51.8\%\pm0.02\%$ 。沉淀时间在 240 min 以后,去除率变化曲线接近平直,说明去除率大于 51% 后,剩余细小颗粒难于沉降或沉淀效率很低。

根据以上实验数据,选用普通沉淀槽 (池) 形式,停留时间可选择在 60~120 min,去除率最大可达 49.3%。虽然在 240 min 后,去除率可达 50% 以上,但停留时间增加 1 倍,很大程度上会增加设备的投资和占地面积。

3.2 颗粒累积去除率与对应的表面负荷

由图 3 可见,表面负荷越大,去除率越低。即在单位沉淀面积内,需要沉淀的水量越多,去除效果越差。反之,要求去除率越高,则需要越小的表面负荷。对照图 3,去除率在 44%~49% 时 (沉淀时间 60~120 min),表面负荷为 $0.39\sim0.78\ \text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。接近二次沉淀池设计表面负荷 $0.6\sim1.0\ \text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 的范围 [7]。这也说明在养殖循环水固体废物中有机质较多。已有研究表明,沉淀槽分离出的固体废物有机质含量可达 81% [8]

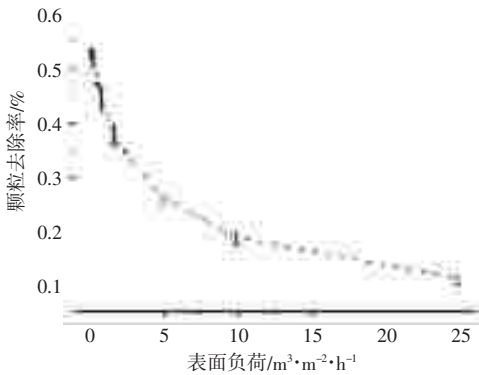


图 3 颗粒累积去除率与表面负荷的关系曲线
Figure 3 Relationship between particle cumulating removal rate and overflow rate

3.3 循环水中固体废物颗粒的粒径分布规律

试验获得粒径分布规律如图 4 所示。由 stocks 公式可知,颗粒粒径的平方与沉速成正比。沉淀试验开始时,粒径较大的颗粒很快沉淀到取样口以下,随着时间的推移,所取水样中颗粒粒径越来越小。此分散颗粒的理论沉淀过程可用图 5 形象地表现。图 4 所示的粒径分布规律与图 5 所表现的内容是一致的。

由 4 图中可直观地看出粒径小于 100 μm 的颗粒

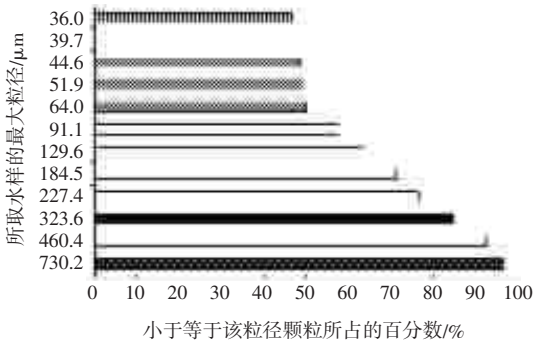


图 4 牙鲆养殖循环水中颗粒物的粒径分布规律
Figure 4 Regularity of distribution of particles in RAS of Japanese flounder cultivation

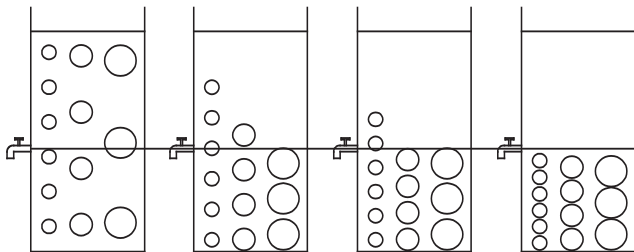


图 5 分散颗粒的理论沉淀过程
Figure 5 Theoretical settling process of discrete particles

占 50% 左右,而粒径小于 $60\ \mu\text{m}$ 的颗粒粒径分布变化很小,说明小于 $60\ \mu\text{m}$ 的颗粒通过重力沉降难于去除。

经计算,表面负荷与颗粒粒径和去除率的关系可用图 6 表示。

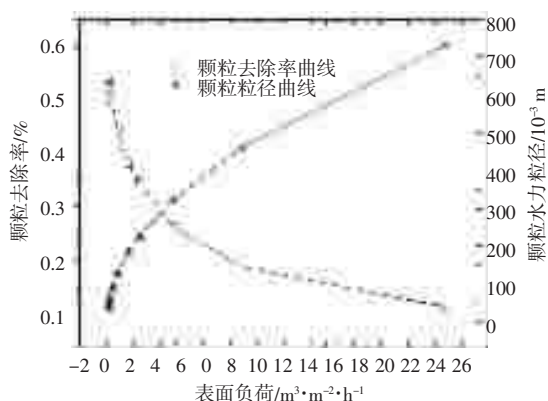


图 6 表面负荷与颗粒粒径和去除率的关系曲线

Figure 6 Relationship between overflow rate, particle size and removal rate

当选择表面负荷在 $0.39\sim 0.78\ \text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ (对应颗粒去除率 44%~49%) 区间时,可去除的颗粒最小粒径在 $91\sim 129\ \mu\text{m}$ 之间。若去除更微小颗粒,则需表面负荷大大降低。这会直接导致沉淀面积增大,效率降低,并且在工程造价上也难于接受。沉淀法去除大于 $100\ \mu\text{m}$ 颗粒是高效、合理和经济的,但不宜处理更细微的颗粒。

由本文可见,牙鲆养殖水中大于 $100\ \mu\text{m}$ 的颗粒占 50% 左右,适于用重力沉降或水力旋流工艺去除,在循环水处理中可作为预处理部分。小于 $60\ \mu\text{m}$ 颗粒的占 37% 左右,此部分难于水力分离,可通过机械过滤法或物化法进一步去除。研究表明,泡沫分离法适合分离粒径在 $10\sim 30\ \mu\text{m}$ 之间的具有表面活性的微颗粒^[9,10];对于直径在 $20\sim 25\ \mu\text{m}$ 的细小颗粒,Roger^[11]等用 $0.05\ \mu\text{m}$ 的中空纤维膜,可去除掉废水中 94% 总悬浮颗粒物和 76% 的生化耗氧量,适合高价格经济水产品生产。目前,工业水处理中普遍使用的精密过滤可以获得很高的固液分离效率。过滤设备可根据需要调整,出水中颗粒粒径一般可在 $1\sim 5\ \mu\text{m}$ 范围^[12],满足养殖用水的要求。精密过滤在养殖循环水处理中的应用尚需进一步研究。

参考文献:

- [1] Chen S, Stecheyd M R. Suspended solids control in recirculating aquaculture systems[C]// Timmons B, Losordo T M. Aquaculture water reuse systems: engineering design and management. Amsterdam: Elsevier Science BV, 1994:61-100.
- [2] Cripps, Simon J, Asbjørn Bergheim. Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems[J]. *Aquacultural Engineering*, 2000, 22:33-56.
- [3] George Tchobanoglous, Franklin L Burton, H David Stensel. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse (4th ed) [M]. McGraw-Hill Professional, Inc, 2003, 367-372.
- [4] Merino G E, Piedrahita R H, Conklin D E. Settling characteristics of solids settled in a recirculating system for California halibut (*Paralichthys californicus*) culture[J]. *Aquacultural Engineering*, 2007, 37 (2):79-88.
- [5] Kavanaugh M C, Tate C H, Trussell A R, et al. Use of particle size distribution measurements for selection and control of solid-liquid separation processes. In: Particulates in Water: Characterization, Fate, Effects and Removal[J]. *American Chemical Society Advances in Chemistry Ser*, 1980, 189:305-328.
- [6] Patterson R N, Watts K C, TAG. Micro-particles in recirculating aquaculture systems: determination of particle density by density gradient centrifugation[J]. *Aquacultural Engineering*, 2003, 27:105-115.
- [7] 北京市市政工程设计研究总院. 给水排水设计手册 (第 5 册) [M]. 第 2 版. 北京:中国建筑工业出版社, 2004. 293.
Beijing Municipal Engineering Design & Research Main Institute. Water and Wastewater design manual (The fifth book) [M]. 2th ed China Architecture Building Press, 2004.293.
- [8] 刘长发, 晏再生, 何洁, 等. 牙鲆养殖循环系统中固体废物的去除研究[J]. 大连水产学院学报, 2006, 21(4):323.
LIU Chang-fa, YAN Zai-sheng, HE Jie, et al. Removal performance of solid wastes in Japanese flounder (*Paralichthys olivaceus*) culture in a recirculating system[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2006, 21 (4):323
- [9] Timmons M B. Use of foam fractionators in aquaculture[J]. *Engineering Design and Management*, 1994, 247-279.
- [10] Chen S, Timmons M B, Bisogni J J, et al. Suspended solids removed by foam fractionation[J]. *Prog Fish Cult*, 1992, 55:69-75.
- [11] Roger C, Viadero Jr, James A Noblet. Membrane filtration for removal of fine solids from aquaculture process water [J]. *Aquacultural Engineering*, 2002, 26:151-169.
- [12] 华东建筑设计研究院. 给水排水设计手册 (第 4 册) [M]. 第二版. 北京:中国建筑工业出版社, 2002.34-36.
East-China Architecture Design & Research Institute. Water and Wastewater design manual (The fourth book)[M]. 2th ed. China Architecture & Building Press, 2002.34-36.