

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2017.15459

工厂化对虾养殖池管式射流集污水力特性

赵乐¹, 张清靖², 许静¹, 韩录维¹, 桂福坤¹

1. 浙江海洋大学, 浙江省海洋养殖装备与工程技术重点实验室, 浙江 舟山 316000;
2. 北京市水产科学研究所, 北京 100068

摘要: 工厂化养殖池内水体的流场分布特性直接决定了其对残饵、粪便等的排污性能。本实验研究了管式射流驱动模式下, 射流角度与射流流速对养殖池内水体流场与污物聚集特性的影响。养殖池流场特性采用点式流速仪进行布点测量, 利用 MATLAB 软件对流场特性进行分析。采用相机采集的养殖池集污效果图像, 并利用 Photoshop 软件与自行开发的不规则图形面积分析软件对图像进行分析。研究表明, 流速从池心向外呈“V”型变化, 在射流角度固定的情况下, 射流速度越大, 池心低流速区域越小, 污物向池心的聚集效果越好; 在流速固定的情况下, 存在一个最佳的射流角度, 本实验在 24 cm/s 流速条件下, 射流角度为 40°时, 池内污物聚集效果最优。结论认为在保证养殖对象生长的前提下, 可尽量提高射流流速; 在 24 cm/s 流速条件下, 最佳射流角度在 40°左右。本研究成果可为工厂化养鱼池、养虾池等管式射流水力驱动系统的优化设计提供参考依据。

关键词: 工厂化养殖; 管式射流; 水力特性; 集污效果

中图分类号: S969

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2017)01-0190-09

海水工厂化养殖是我国设施渔业的重要领域, 是一种现代化、高密度、集约化的养殖模式, 越来越受到重视并不断发展起来^[1-2]。工厂化养殖多采用循环水养殖模式, 水处理技术是其核心所在。对养殖者而言, 如何控制好养殖池内水质环境, 成为养殖成败的关键所在, “养虾先养水”已成为养殖者和该领域学者的共识, 如何及时地清除养殖池内污物(残饵、粪便等)是改善水质条件的重要手段^[3]。尤其对于对虾养殖企业, 养殖过程产生的残饵、粪便等污物长时间滞留池内, 容易导致水质恶化^[4]。养殖池作为养殖对象的生存场所, 其结构和流态直接关系到养殖对象的生长^[5], 以及不同粒径区间的颗粒物在养殖池内的移动状况^[6]。目前, 大多数养殖企业, 尤其是对虾养殖, 往往凭借主观经验, 在现有养殖模式下, 采用大排放模式, 通过布置于池塘底部中心的排污口进行集中排污, 以期达到污物清排的目的。而事实

上, 由于养殖池内水色浑浊, 无法掌握池底的污物聚集情况, 排污效果难以掌控。因此, 针对工厂化养殖池尤其是当前对虾大棚养殖池的集排污特性研究已成为热点问题。魏武^[7]通过数值模拟研究了不同进水口方式和流速对流场分布特性的影响, 结果表明, 水池中流场特性受射流流速的影响较大, 射流流速越大, 池中水流流速越大, 并且水流流速的大小和测试点距养殖池中心的距离成线性增长关系; 与单向进水方式相比, 双向进水方式的养殖池能提供相对均匀的流场。Davidson 等^[6]研究了进水口结构对养殖池内流场特性的影响, 结果表明, 调整进水口结构方向会影响养殖池内的流场特性。Oca 等^[8]研究了循环水养殖池的水力特性, 结果表明, 流场特性受流速、水深、进水量与出水量的影响。李琦等^[9]利用实验研究了不同循环水量对对虾养殖水质的影响, 结果表明, 提高循环水量有利于改善水质。Benoit^[10]的研

收稿日期: 2015-12-08; 修订日期: 2016-07-09.

基金项目: 浙江省自然科学基金重点项目(Z16E090006); 国家自然科学基金项目(51239002); 舟山市海洋专项(2015C41001).

作者简介: 赵乐(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为海洋环境动力学. E-mail: 252281767@qq.com

通信作者: 桂福坤(1976-), 教授. E-mail: gui2237@163.com

究表明,射流管的角度与类型是影响水池中切向流速与径向流速的重要参数。

本研究针对常见的方形圆切角型水池模型(主要为对虾养殖池)^[11],研究其在边侧管式射流水力驱动条件下,池内的流场分布特性与污物聚集特性,以期获得最优水利驱动条件,为工厂化养殖池的工程设计提供参考依据。

1 实验材料与方法

1.1 实验模型

实验系统由方形圆切角模型水池、水泵、排水系统、边侧射流管以及筛网罩组成,如图 1 和图 2 所示。模型水池高度为 70 cm,大小为 200 cm×200 cm。水池的底部坡度 1:15,池中心距池面 30 cm,池边底部距池面 24 cm。为了便于污物聚集,在池心设有一直径 10 cm 的漏斗形排污口。为防止饵料排出,在排污口处布置直径 10 cm 的半球形网罩,网罩由钢圈及 70 目筛网构成。射流管采用直

径 15 mm 的 PVC 管,垂直设置于模型水池两对边侧中心位置。射流管自上而下均匀设有 6 个射流孔,孔径 0.35 cm,孔中心距 3.35 cm。射流管下端封口,上端与软管连接,软管与可调速直流水泵连接,水泵再通过软管与模型水池中心排污孔底部连接,形成外循环水流。为便于污物观测和计量,在水池底部设置同心圆圈,间距 10 cm。

1.2 实验条件

分别研究射流流速和射流角度对水池流场分布特性及污物聚集效果的影响,分两种情况进行实验设计:(1)固定射流角度为 40°,6 组射流流速及对应流量:10 cm/s (1136.4 L/h)、15 cm/s (1704.5 L/h)、20 cm/s (2272.3 L/h)、22 cm/s (2500 L/h)、24 cm/s (2727.3 L/h)、28 cm/s (3181.2 L/h),研究射流流速对流场及污物聚集效果的影响。(2)固定射流流速为 24 cm/s,8 组射流角度(流向与池壁夹角:0°、10°、20°、30°、40°、50°、60°、70°),研究射流角度对污物聚集效果的影响。

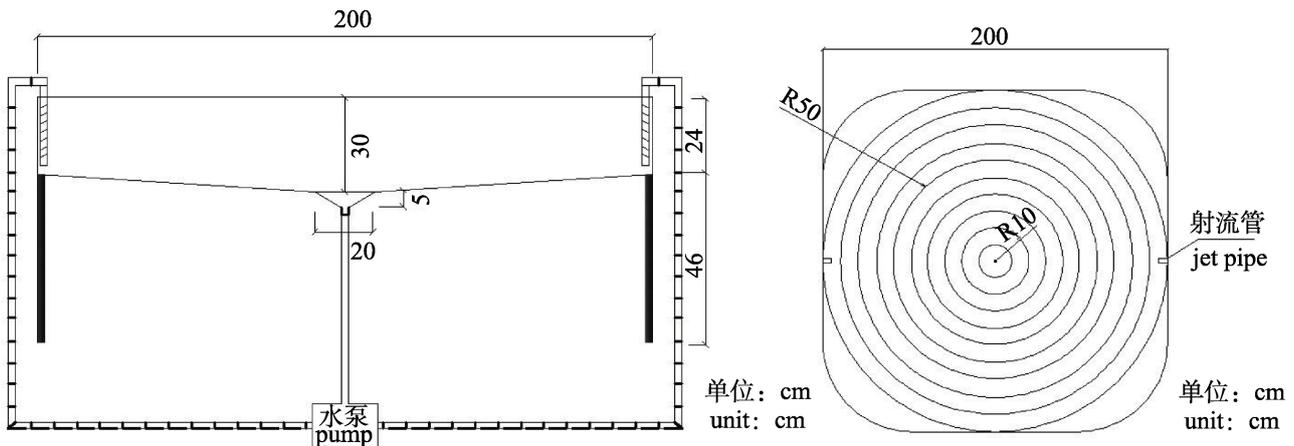


图 1 模型水池结构图

Fig. 1 Plan and side view of the model tank

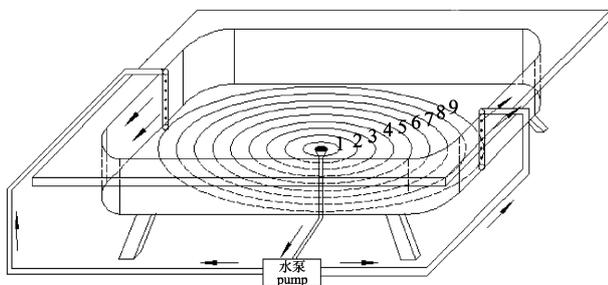


图 2 模型水池系统示意图

Fig. 2 Sketch of the model tank experimental system

实验开始前先安装模型水池,连接好外循环边侧管式射流驱动装置,调试设置 Vectrino 声学多普勒点式流速仪与图像采集系统,调整水位至 20 cm (边侧深度),根据实验设计的射流角度与射流流速进行分组设置。在模型水池各类条件调试正常后,称取 100 g 的 1 号对虾专用饲料(购于宁波天邦股份有限公司)作为污物替代物(残饵)均匀撒于池中,开启水泵,用点式流速仪反复测量射流管上端第一个孔正前方 5 cm 处的流速,取其均值

作为各组流速条件的代表值(该数值在仪器设备调试时进行系统测定), 然后开始观测记录实验现象。

1.3 数据采集与处理

流场观测。水泵开启后, 待池内水体流动稳定后, 开始按照图 3 所示布点方案, 测量表层和底层流速分布情况。测点分为横竖和交叉共 4 个断面, 横竖每个断面各 11 个点, 斜向交叉断面各 10 个点, 中心点测量 1 次, 数据共用。每个测点位置垂向包含表层和底层两个测点, 表层距离水面 5 cm, 底层距离池底 5 cm。累计表层和底层分别有 37 个测点, 每个测点持续采集 1 min 连续数据, 进行滤波处理后取其均值。

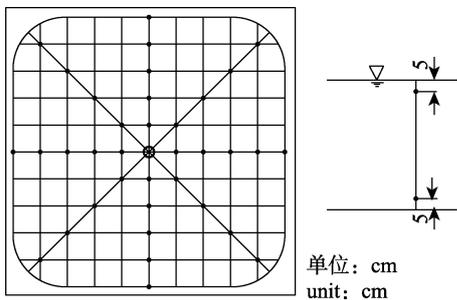


图 3 流场测点分布图

每个小方格 20 cm×20 cm; 每条测线包括表层测点(距水面 5 cm)和底层测点(距底 5 cm)。

Fig. 3 Distribution of the flow field measuring points. The size of each small box is 20 cm×20 cm. Each measuring line is divided into two layers: surface measuring points (5 cm from the surface) and bottom measuring points (5 cm from the bottom).

污物聚集效果观测。将代表残饵的对虾 1 号专用饲料均匀撒于模型水池中, 开启水泵, 自系统运行 30~40 min 后, 流场和污物聚集处于稳定状态后, 再采用高分辨率照相机进行图像采集, 利用 Photoshop 软件对采集图像进行格式转换、灰度变换、滤波、线性变换以及二值化等一系列处理, 最后采用自行开发的不规则图形面积分析软件进行污物聚集分布效果分析。

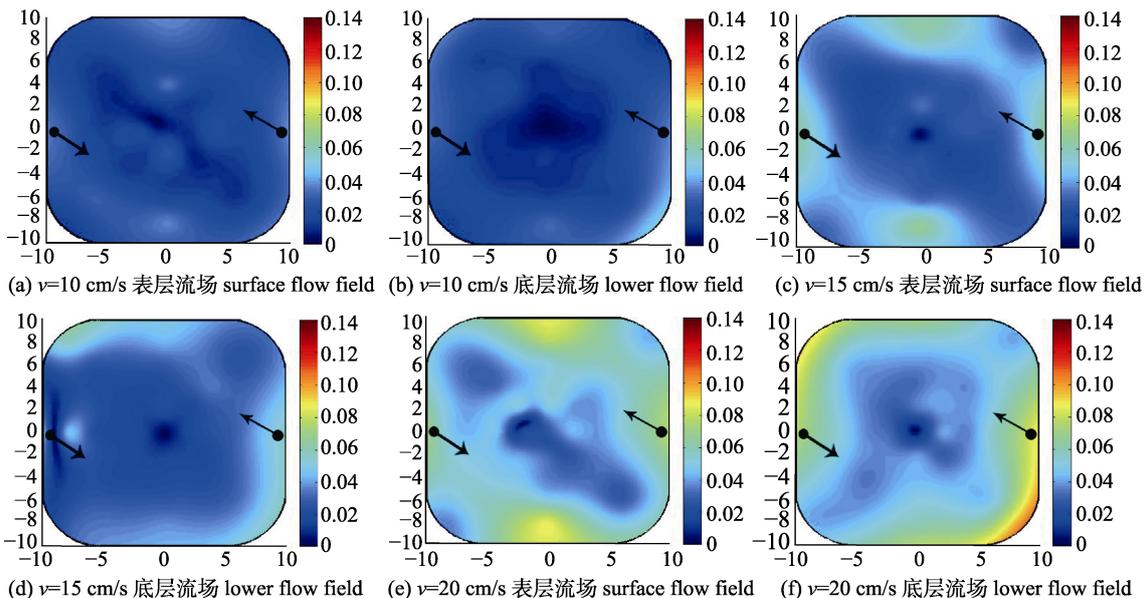
2 实验结果与分析

2.1 流场特性

实验研究了射流角度固定为 40°(流向与池壁夹角), 6 种不同射流流速对池内流场特性的影响, 结果如图 4 所示。图中流速大小采用颜色标尺显示, 黑色实心圆圈代表射流管位置, 箭头方向代表射流方向。由图 4 可见, 池中高流区集中分布于池壁附近, 低流区位于池心处; 随着流速增大, 高流区域范围与流速均增大, 低流区域范围减小; 表层流场高流区分布于横竖断面贴近池壁处, 底层流场高流区分布于左交叉断面贴近池壁转角处。

2.2 不同射流流速下的污物聚集特性

实验研究了射流角度固定为 40°(流向与池壁夹角), 6 种不同射流流速对池内污物聚集特性的影响, 结果如图 5 所示。由图 5 可见, 流速增大,



(待续 to be continued)

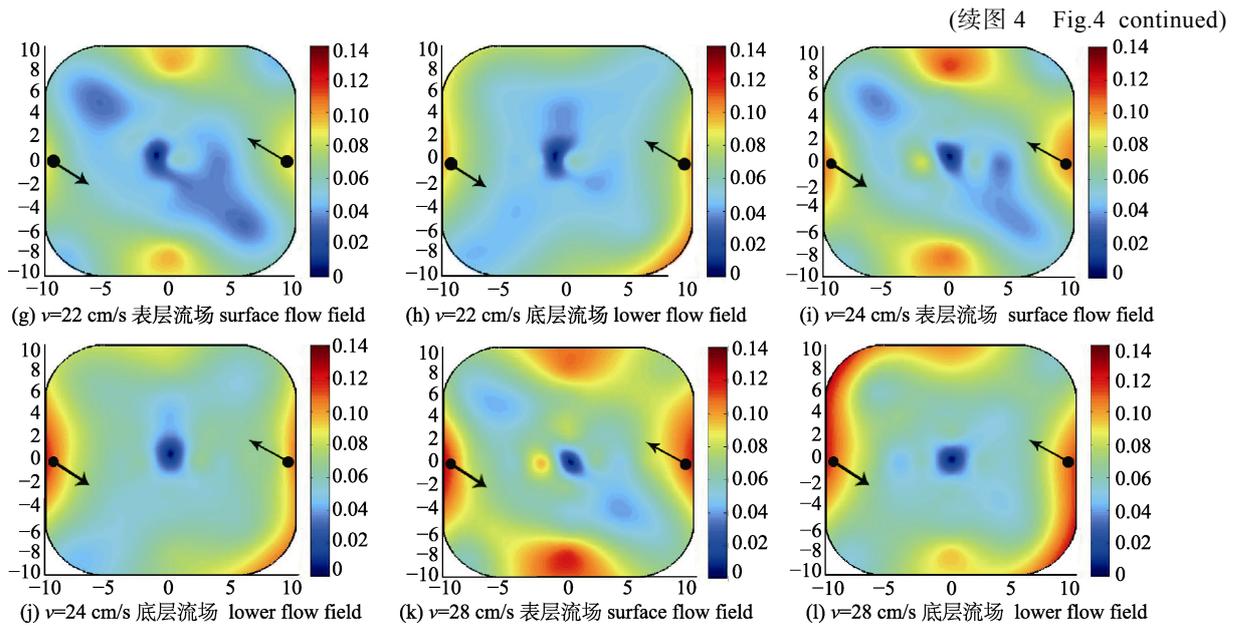


图 4 不同射流流速对池内流场特性的影响

图中流速(cm/s)大小采用颜色标尺显示,黑色实心圆圈代表射流管位置,箭头方向代表射流方向。

Fig. 4 Effect of flow velocity on the flow field distribution characters in the tank

Jetting flow velocity (cm/s) is indicated by colorful ruler; black solid circle indicates the flow tube; arrow points to the direction of jetting flow.

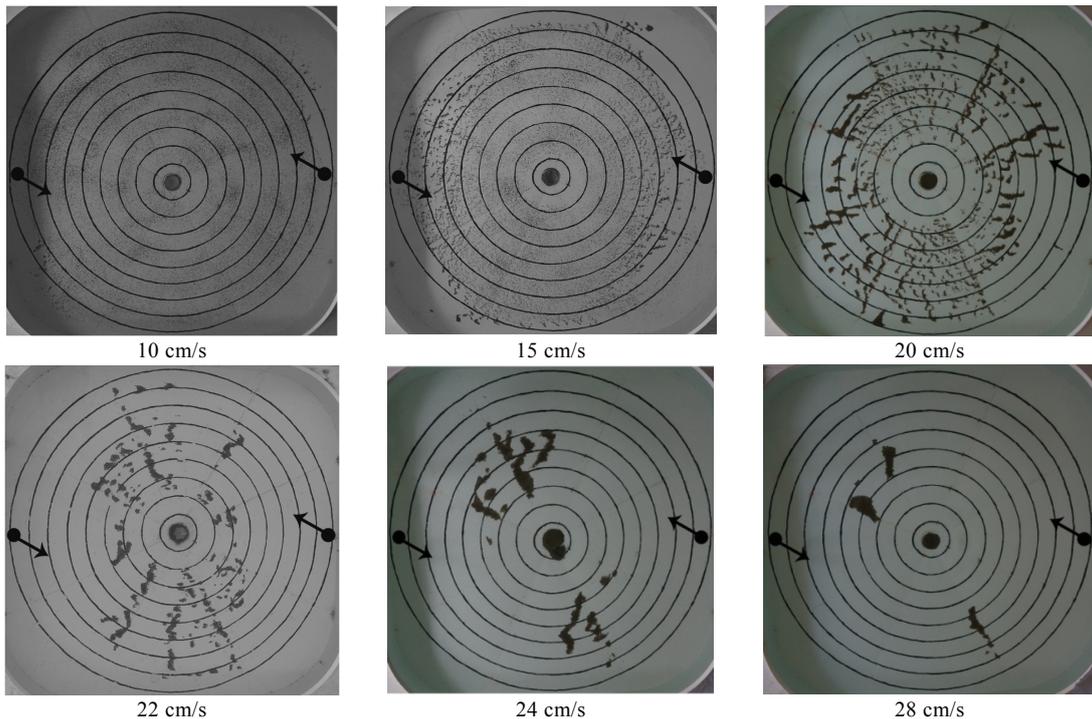


图 5 不同射流流速对池内污物聚集特性的影响

Fig. 5 Effect of flow velocity on the waste distribution characters in the tank

污物聚集度升高。同一驱动条件下,污物集中分布于池心排污口处与左斜断面的第 5、6 环内。

为量化分析污物的聚集效果,实验运用不规则图

形面积分析软件进行污物聚集分布效果分析。不同射流流速 v 对污物聚集效果的影响如图 6 所示。 x 轴代表各环序数, y 轴为各环中污物所占面积,单位为 m^2 。

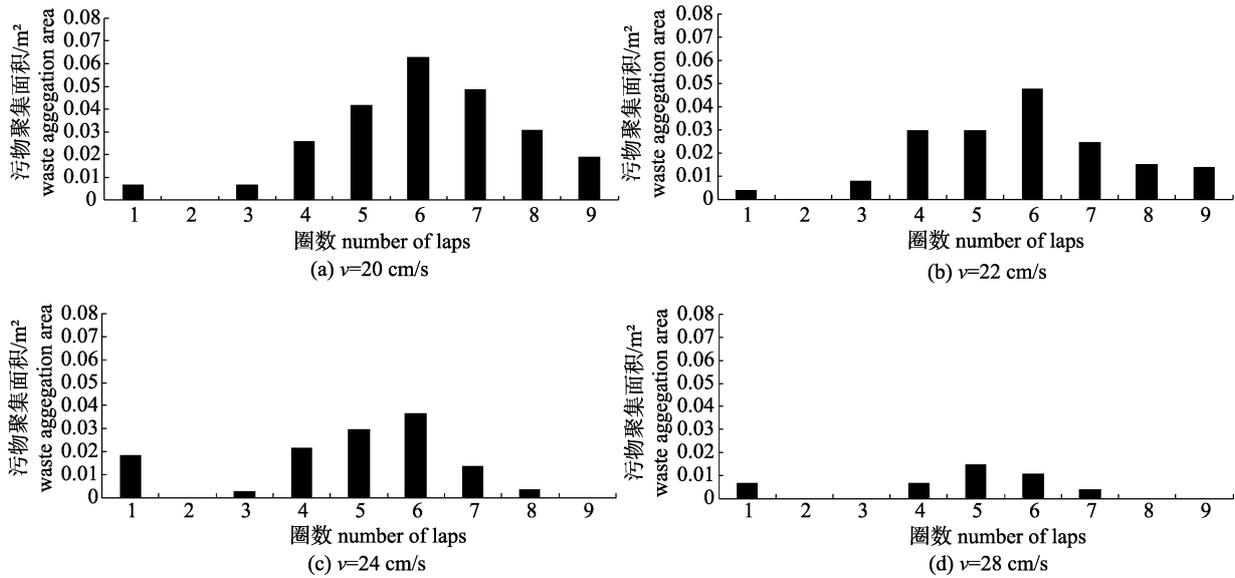


图 6 射流流速对池内污物聚集效果的影响

Fig. 6 Effect of flow velocity on the waste distribution characters in the tank

在射流流速为 10 cm/s 与 15 cm/s 的两组实验条件下, 污物聚集效果不明显, 实验结果不做分析。由图 6 可见, 射流流速 20~28 cm/s 的 4 组实验, 其第二环内污物面积均为 0, 面积峰值位于第 6 环; 随流速增大, 除第一环外各环污物聚集面积减小, 外环降为 0。

不同流速下, 污物聚集面积的变化分如图 7 所示。图中 x 轴为射流流速, y 轴为饵料所占总面积, 单位 m^2 。由图可见, 流速增大, 污物总面积呈递减趋势。

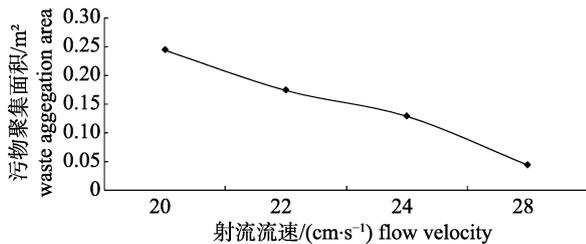


图 7 射流流速对污物所占总面积的影响

Fig. 7 Effect of flow velocity on the total waste distribution characters in the tank

2.3 不同射流角度下的污物聚集特性

实验研究了射流流速固定为 24 cm/s, 8 种不同射流角度 α 对池内污物聚集特性的影响, 结果如图 8 所示。由图 8 可见, 污物总体倾向于集中在左斜方向的区域内; 随着驱动角度增大, 污物聚集度升高, 当射流角度为 40° 时, 出现最高

污物聚集现象。之后, 随着射流角度进一步增大, 聚集度开始降低, 污物的离散度较大。

进一步利用图像分析技术, 量化分析不同射流角度条件下的污物聚集情况, 如图 9 所示。图 9 中 x 轴代表各环序数, y 轴为各环饵料所占面积, 单位为 m^2 。由图可见, 第二环内污物面积均为 0, 面积峰值位于第 5、6 环处, 角度增大至 50° 时, 外环内面积开始增大。

射流角度 α 对池内污物所占总面积的影响如图 10 所示, 图 10 中 x 轴代表射流角度 α , y 轴代表饵料所占总面积, 单位 m^2 。由图 10 可见, 污物所占总面积随角度增大减小, 40° 为谷值, 之后开始增大。

3 讨论

3.1 流场特性分析

射流流速的调整对各测量位点的切向流速与径向流速均产生影响, Oca 等^[8]的研究结果相同, 池内各点位流速随着射流流速增大其总体趋势增大, 高流区位于池壁处, 低流区在池心处接近 0 cm/s。本实验研究发现, 养殖池内的流速大小与测试点距养殖池中心的距离成线性增长关系, 在临近池心出水系统处有一个小的速度峰, 这是由于池心出水系统的存在, 易形成涡流, 造成水体流速增大。在相同射流流速条件下, 表层流速大

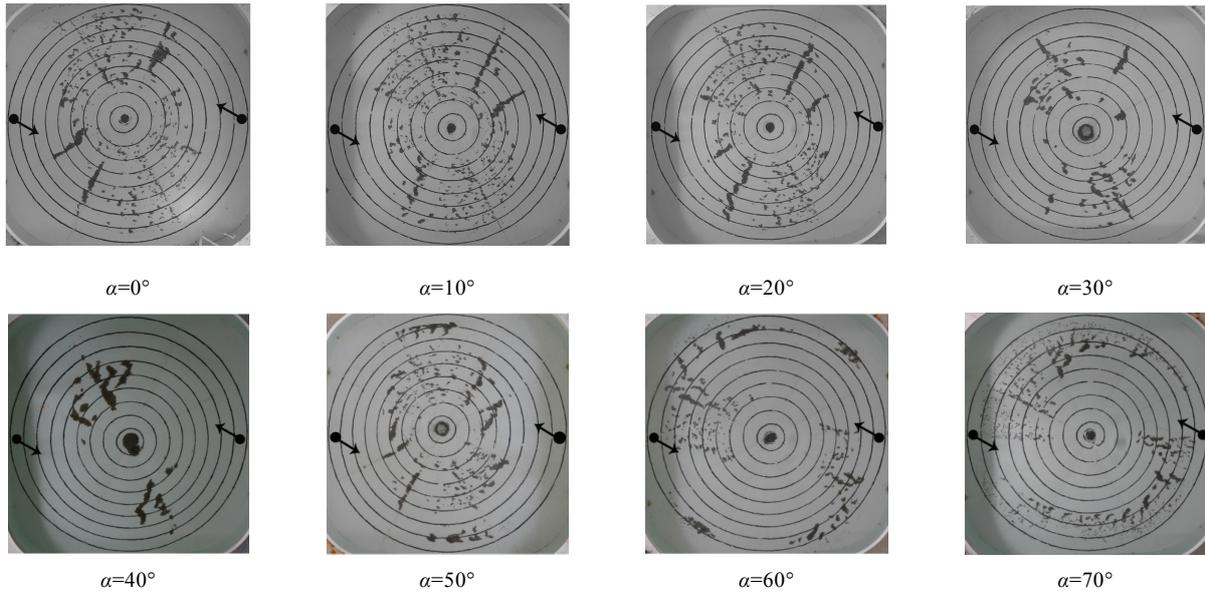


图 8 不同射流角度下污物聚集效果图

Fig. 8 Effect of flow angle on the waste distribution characters in the tank

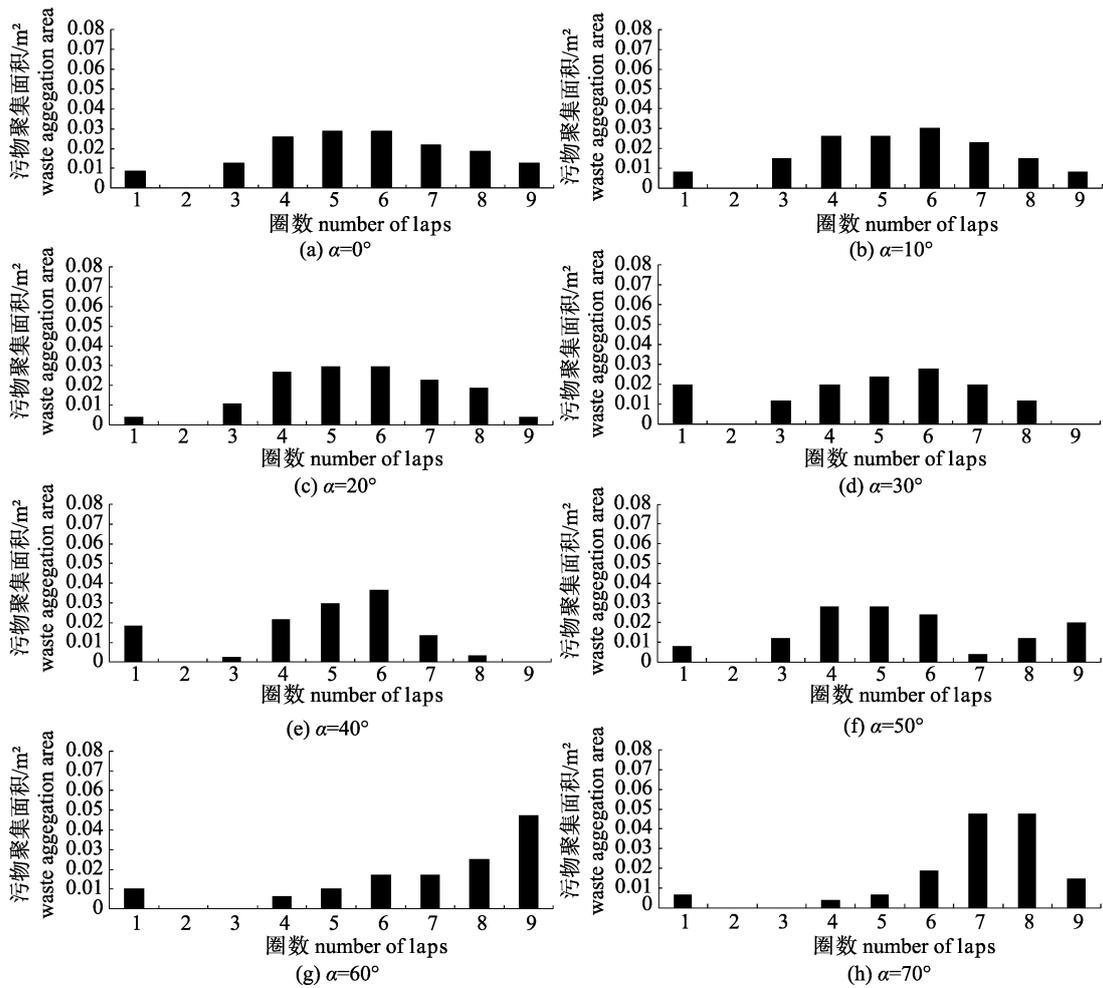


图 9 射流角度 α 对池内污物聚集效果的影响

Fig. 9 Effect of flow angle on the waste distribution characters in the tank

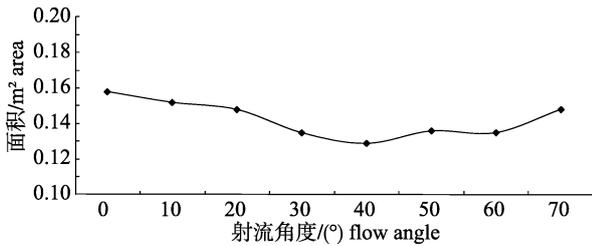


图 10 射流角度 α 对污物所占总面积的影响

Fig. 10 Effect of flow angle on the total waste aggregation area in the tank

小与底层流速大小基本保持一致,但表层流场高流区分布于横竖断面贴近池壁处,底层流场高流区分布于交叉断面贴近池壁转角处(图 4)。这是由于表层流向趋向于向外流动,而底层流向趋向于向内流动,在养殖池池壁处形成平衡性垂向分量,而养殖池的圆切角处为凹形,该处流速分量的方向向下,形成螺旋流,与唐宏涛等^[12]所研究的河道弯流特性结果相似。在各射流流速条件下,表层流速位于池心处的流速大于底层流速位于池心处的流速,这是由于底层流速受到底面摩擦力的作用,池心处流速较外围流速小,受摩擦力作用明显。另外,由于中心涡流的出现,也是导致这一现象的重要原因。总的来说,池中水体环流状况良好,各射流流速条件下的断面流速大小呈现中间流速小、外围及中心附近的流速较大的特点,与污物聚集规律基本一致。

3.2 污物聚集特性分析

从图 5 的实验结果可以发现,射流流速达到 15 cm/s 时,外圈污物出现聚集现象,这与 Summerfelt 等^[13]在圆形养殖池中的研究结果相近。当射流流速达到 15 cm/s 时,池中水体大体上形成环形流向,污物会集结在池底。污物密度大于水体密度,从离心力角度看,污物有从水体中分离的趋势。由于污物存在于边界层,边界层流体角速度较小,它的离心加速度不足以平衡其压力梯度,所以该流体(带着污物)被迫向池心运动。从图 6 可以发现,第一环污物所占面积随射流流速增大无明显规律,原因是水池中心设有出水口,污物会在中心产生高重叠性聚集,聚集厚度增大,但面积变化较小。在各射流流速条件下第二环面积均为 0,这是由于第二环临近出水系统,在底部抽吸作用下,在近池心附近形成速度峰,处于第二环内污

物受较大径向流速影响向池心聚集。另外,实验观测到不稳定涡旋的形成,涡旋会围绕中心出水口环形运动,将第 1 环和第 2 环内的周边污物卷起并聚集于中心。马晖扬^[14]指出涡旋流态的形成与水体切向流速有关,在流速达到一定数值时,在池心处形成涡旋,卷起部分污物,第 1 环面积减小,达到一定速度涡旋破碎,涡旋所卷污物散开,第 1 环面积增大,故第 1 环污物总面积会呈现动态的小幅度变化。第 4 至第 9 环污物聚集面积随射流流速增大渐减,这是由于射流流速增大,外环高流区增大,水体对污物驱动力增大,驱动外环污物向池心运动。由图 7 可见,射流流速增大,污物所占总面积锐减,在射流流速达到 24 cm/s 条件时,污物总面积下降至 0.044 m²,这是由于当射流流速达到 28 cm/s 时,径向流速变化梯度相对较大,这种径向流速的大小随径向距离渐减的变化趋势易在池底形成向心次生流作用,这种作用对于携带池底污物移动至排污口处是非常有利的。

在射流角度对养殖池污物聚集效果影响的实验中,射流角度为 40°时,污物聚集效果最好,饵料所占总面积为 0.129 m²。射流角度增大至 50°时,在外环处无法形成有利污物聚集的高流区,流态也变得较为凌乱,污物开始出现分散,难以形成有效的污物聚集。

养殖池中,污物向池心排污口聚集效果除与水流流速大小及射流角度有关外,还与污物自身的水动力特性有关^[15]。在实际应用中,池内流速越大,越有利于污物向池心聚集,但驱动流速应最好小于养殖对象的游泳能力。研究表明,凡纳滨对虾的临界游速为(35.67±0.62) cm/s,日本囊对虾的临界游速为(32.87±0.53) cm/s,中国明对虾的临界游速为(30.42±0.91) cm/s,均高于本研究产生最佳污物聚集效果的流速^[16]。因此在实际应用中,可在保证不影响对虾生长需求的条件下,尽量提高驱动流速,以获得更好的污物聚集效果。

4 结论

本研究探讨了方形圆切角养殖池在不同边侧射流流速和射流角度条件下的流场特性和底部污

物聚集特性, 研究获得以下基本结论。

(1) 边侧射流驱动下, 射流角度在 40° 以内时, 方形圆切角养殖池内断面流速呈“V”字形分布, 接近池心附近的流速较大, 向外先降低, 然后再增大。但当射流角度超过 40° 时, 根据集污效果可推知, 流场将较为凌乱。养殖池的表层流态和底层流态亦存在一定差异。表层流场高流速区主要出现在横竖断面贴近池壁处, 而底层流场的高流速区主要出现在射流口及其下游弯段区间内。

(2) 方形圆切角养殖池的集污效果受射流角度和射流速度影响。研究发现, 射流角度为 40° 时, 最有利于池内污物聚集。射流流速越大, 集污效果越好。

本研究仅针对直壁养殖水池的一种底坡情况下的水动力特性和集污效果进行了实验研究。实际生产中, 养殖池的池型结构类型较多, 可以通过开展数值模拟方法进行更系统全面的研究。

参考文献:

- [1] Lu W, Wang X L. Developmental status of fisheries establishments in our country[J]. Modern Fisheries Information, 2005, 20(4): 13–15. [鲁伟, 王秋玲. 我国设施渔业的发展现状[J]. 现代渔业信息, 2005, 20(4): 13–15.]
- [2] Yang J, Ni Q, Zhang Y L, et al. Construction technology on RAS for shrimp culture[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 136–140. [杨菁, 倪琦, 张宇雷, 等. 对虾工程化循环水养殖系统构建技术[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 136–140.]
- [3] Pfeiffer T J, Osborn A, Davis M. Particle sieve analysis for determining solids removal efficiency of water treatment components in a recirculating aquaculture system[J]. Aquac Eng, 2008, 39(1): 24–29.
- [4] Lai T H, Chen J F. A preliminary study on the change of water quality in the ponds for *Penaeus vannamei* factory cultivation[J]. Journal of Aquaculture, 2002, 23(4): 32–33. [赖廷和, 陈剑锋. 南美白对虾工厂化养殖水体水质变化的初步研究[J]. 水产养殖, 2002, 23(4): 32–33.]
- [5] Liu W, Zhuge Y S, Ouyang L, et al. Experimental study of the effect of hydrodynamic conditions on fish growth[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(6): 812–817. [刘稳, 诸葛亦斯, 欧阳丽, 等. 水动力学条件对鱼类生长影响的试验研究[J]. 水科学进展, 2009, 20(6): 812–817.]
- [6] Davidson J, Summerfelt S. Solids flushing, mixing, and water velocity profiles within large (10 and 150 m³) circular ‘Cornell-type’ dual-drain tanks[J]. Aquac Eng, 2004, 32(1): 245–271.
- [7] Wei w. Numerical simulation and structure optimization of circular culture tank for recirculating aquaculture systems[D]. Zhanjiang: Ocean University, 2013. [魏武. 循环水圆形养殖池数字模拟及结构优化[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2013.]
- [8] Oca J, Masalo I. Flow pattern in aquaculture circular tanks: Influence of flow rate, water depth, and water inlet & outlet features[J]. Aquac Eng, 2013, 52(1): 65–72.
- [9] Li Q, Li C H, Xie X Y, et al. Effects of a water recycling treatment system on water quality control in upper tidal shrimp ponds[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(12): 2579–2585. [李琦, 李纯厚, 颜晓勇, 等. 对虾高位池循环水养殖系统对水质调控效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(12): 2579–2585.]
- [10] Benoit D. Hydrodynamic characteristics of multi-drain circular tanks[D]. Canada: The University of New Brunswick, 2007.
- [11] Wu G L, Gao S L. Flow characteristics and resistance of circumfluence in rectangle shrimp pond[J]. Journal of Zhanjiang Ocean University, 2005, 25(1): 64–68. [吴光林, 高世伦. 矩形虾池环流的流动特点与流动阻力[J]. 湛江海洋大学学报, 2005, 25(1): 64–68.]
- [12] Tang H T, Wu W. Investigation on characteristics and scour depth of flow in river bend[J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2004, 32(1): 7–8. [唐宏涛, 吴伟. 河流弯道水流特点与冲刷深度探讨[J]. 浙江水利科技, 2004, 32(1): 7–8.]
- [13] Summerfelt S T, Davidson J, Timmons M B. Hydrodynamics in the ‘cornell-type’ Dual-Drain Tank[C]//Libey G S, Timmons M B. The Third International Conference on Recirculating Aquaculture, Virginia Polytechnic Institute and State University. Roanoke, VA, USA, 2000: 160–166.
- [14] Ma H Y. Stability analysis of vortex motion[J]. Advances in Mechanics, 1988, 18(4): 470–481. [马晖扬. 涡旋运动的稳定性分析[J]. 力学进展, 1988, 18(4): 470–481.]
- [15] Oca J, Masaló I. Design criteria for rotating flow cells in rectangular aquaculture tanks[J]. Aquac Eng, 2007, 36(1): 36–44.
- [16] Yu X M. Comparative study of swimming ability and swimming physiology of three penaeid shrimp[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009. [于晓明. 三种对虾游泳能力及其游泳生理的比较实验研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.]

Experimental study on the hydraulic characteristics of waste concentrated in an industrial aquaculture pond equipped with a pipe jet flow system

ZHAO Le¹, ZHANG Qingjing², XU Jing¹, HAN Luwei¹, GUI Fukun¹

1. Zhejiang Key Lab of Marine Aquaculture Engineering and Technology, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000, China;
2. Beijing Fisheries Research Institute, Beijing 100068, China

Abstract: Seawater factory farming is an important fisheries industry in China and a modern, high-density, intensive farming model that is receiving increasing attention as it develops. Factory farming uses circulating water culture, in which water treatment technology is key. Timely removal of waste (bait, feces) from aquaculture tanks is an important means to improve water quality. In this study, the characteristics of the flow field and waste distribution in the pool were studied in a square circle cutaway model tank (mainly used for shrimp aquaculture), in which water flow was driven by a side-tube hydraulic jet to optimally conserve water and provide a reference for engineering factory farming pools. The flow field distribution is the main factor that directly affects the waste concentration in a recirculating aquaculture tank. We investigated the effects of jet flow velocity and angle on the flow field distribution and waste concentration characteristics in the tank. The flow field characteristics were measured with a point-type flow meter and were analyzed using MATLAB software. The waste distribution characteristics were obtained using self-developed image analyzing software. The original waste distribution images were captured with a high resolution camera. The results showed that flow velocity varied in a V type trend along the sections and through the center of the tank. Waste gathered more rapidly and at a higher concentration as jet velocity was increased at a fixed jet flow angle. The optimal jet angle was 40° when jet flow velocity was fixed at 24 cm/s. These results will be useful to optimize and design a hydraulic drive system for industrial fish or shrimp aquaculture tanks. The results suggest a jet angle of 40° with as high as possible jet flow velocity to ensure optimal animal growth.

Key words: industrial aquaculture; pipe jetting system; hydraulic characteristics; waste concentration effect

Corresponding author: GUI Fukun. E-mail: GUI Fukun. E-mail: gui2237@163.com