



## 潜水推流器作用下八边形养殖池的集污性能

吴彦飞<sup>1,2</sup>, 张清靖<sup>2</sup>, 桂福坤<sup>1</sup>, 张泽坤<sup>3</sup>, 陈庆龙<sup>4</sup>, 冯德军<sup>1\*</sup>

(1. 浙江海洋大学, 国家海洋设施养殖工程技术研究中心, 浙江 舟山 316022;

2. 北京市农林科学院水产科学研究所, 渔业生物技术北京市重点实验室, 北京 100068;

3. 浙江海洋大学水产学院, 浙江 舟山 316022;

4. 广东海洋大学海洋工程学院, 广东 湛江 524088)

**摘要:** 为了探究潜水推流器作用下八边形养殖池内的污物聚集特点, 本研究利用物理模型试验的方法, 研究潜水推流器不同的布设角度  $\theta$ 、布设距离比  $d/a$  (中垂线模式:  $d_1$  为推流器叶轮轴线中点与最近的池壁之间的距离,  $a_1$  为八边形养殖池长边边长; 对角线模式:  $d_2$  为推流器叶轮轴线中点与最近的短边边长之间的距离,  $a_2$  为八边形养殖池排污口与最近的短边边长之间的距离)、推流器数量  $n$  和布设模式对八边形养殖池内污物聚集的影响。试验利用高清相机记录养殖池内的污物分布情况, 并使用 MATLAB 分析计算污物与池中心的距离。实验中通过比较不同工况下污物与池中心距离的最大值的大小, 衡量养殖池集污性能的优劣。结果显示, 潜水推流器的布设角度  $\theta$ 、布设距离比  $d/a$ 、推流器数量  $n$  以及布设模式都影响池内污物聚集的效果。在本研究设置的布设距离比工况下, 潜水推流器布设角度  $\theta$  为  $45^\circ$  时集污效果最优, 而当布设角度  $\theta$  大于  $70^\circ$  时, 随着布设角度增加, 八边形养殖池周边出现集污死角, 残饵及粪便距离排污口中心变远且饲料离散程度变大; 在  $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $50^\circ$  工况下, 污物聚集效果随布设距离比  $d/a$  的增大逐渐增强, 当布设距离比为  $1/2$  时集污效果最好。养殖池集污性能随潜水推流器数量的增加而整体呈现增强的趋势, 尤其是潜水推流器数量从 1 增加至 2 时, 集污性能明显提升, 但是持续增加后, 集污性能不再有明显的提升。其余设置条件相同的情况下, 对角线布设模式下的养殖池集污性能明显优于中垂线布设模式。研究表明, 潜水推流器采取对角线模式, 布设时不少于 2 个, 布设角度  $\theta$  为  $45^\circ$  附近, 此时八边形养殖池集污性能较优。研究结果可为八边形养殖池内潜水推流器的布设方式提供依据与指导。

**关键词:** 八边形养殖池; 物理模型; 水动力学; 潜水推流器; 布设方式; 集污效果

**中图分类号:** S 969

**文献标志码:** A

池塘养殖是中国重要的水产养殖模式, 根据 2020 年渔业统计年鉴, 中国池塘养殖面积达到  $2.645 \times 10^3 \text{ hm}^2$ , 占淡水养殖总面积比重的 51.69%<sup>[1]</sup>。近年来, 我国的池塘养殖产业有了较大的发展,

对我国水产养殖业产生了促进作用<sup>[2-3]</sup>。但是, 由于缺乏统一规划, 水域养殖水环境容量、污染负荷缺乏科学研究, 投饵养殖过程中产生的残饵、粪便等固态污染物累积造成的池塘养殖水质恶化

收稿日期: 2021-08-07 修回日期: 2022-03-01

资助项目: 国家自然科学基金 (31902425); 浙江省自然科学基金 (LGN21C190010); 现代农业产业技术体系北京市渔业创新团队项目 (BAIC07-2022-06); 国家级大学生创新创业训练项目 (202010340011)

第一作者: 吴彦飞 (照片), 从事工厂化水产养殖工程研究, E-mail: 528626774@qq.com

通信作者: 冯德军, 从事工厂化水产养殖工程研究, E-mail: fengdj@zjou.edu.cn



等问题亟待解决<sup>[4]</sup>。饲料残饵和动物粪便是养殖水质污染的主要来源, 如果不及时处理将会严重影响养殖对象的生长<sup>[5]</sup>。目前, 池塘养殖集排污方式比较粗糙, 通过水车式增氧机驱动养殖池内的污物聚集至养殖池的中央, 然后拔管进行底部排污是主要的集排污方式。但是, 水车式增氧机的主要作用是增氧, 而且其动力有限, 只能驱动小范围内的水体。潜水推流器作为一种重要的污水处理设备<sup>[6-7]</sup>, 被广泛地应用于生物法污水处理工艺中, 其主要作用是防止生物池内产生活性污泥沉积。潜水推流器的工作原理是通过潜水电机经过减速装置带动叶轮低速旋转<sup>[8]</sup>, 从而推动水体混合流动, 因此具有混合水体和推流的双重作用。目前, 已有养殖企业将潜水推流器应用于大型室外养殖池内, 是驱动池塘养殖池水体并将污物聚集至养殖池中央的一种尝试。然而, 养殖池内潜水推流器的布置方式尚没有理论依据, 大多仅凭水产养殖者的主观经验, 缺乏专业的科学指导。因此, 如何设置潜水推流器实现水体混合搅拌的同时还能增强池塘养殖池的集污能力是亟待解决的问题。

目前, 潜水推流器的研究主要集中在污水处理方面。李正勇<sup>[9]</sup>在研究潜水推流器对于炼油污水的作用中发现氧化沟的充氧和推流之间必须通过潜水推流器实现, 潜水推流器的投入使用, 起到混合污物, 提供足够的水平流速作用。陈云峰等<sup>[10]</sup>通过数值模拟研究了推流器布置对实验池水流速度场的影响, 提出三推流器方案, 并通过加设导流板和调节潜水推流器的角度得到了较为理想的环流速度场。但针对潜水推流器布置方式对养殖池内残饵粪便等污物运动聚集方面还未见研究报告, 很难为潜水推流器布置方式提供科学全面的指导。目前常用的养殖池塘集排驱动设备是射流管和水车式增氧机。于林平等<sup>[11]</sup>在单进水管结构对单通道矩形圆弧角养殖池进行了水动力特性研究, 通过流体动力学仿真技术, 基于有限体积法和有限差分法进行三维数值计算模拟, 结果显示, 进水管采用圆弧角位置布置, 同一日循环次数(射流孔数恒定)工况下, 弧壁单管布置位置的养殖池底部速度分布均匀性明显优于直壁单管布置位置。赵乐等<sup>[12]</sup>研究了循环水养殖系统管式射流池内的集污效果。桂福坤等<sup>[13]</sup>通过水车式增氧机驱动下方形圆切角养殖池集污水动力试验, 研究了水车式增氧机在不同的布置角度、布置距

离比、驱动流速对方形圆切角养殖池内污物聚集和流场特性的影响。这些研究之间虽然不直接相关, 但可以为在室外大型养殖池中潜水推流器的布置方式提供参考依据。

本研究以典型的八边形养殖池为对象, 通过物理模型试验的方法, 尝试探究潜水推流器的布置角度 $\theta$ (叶轮轴线与养殖池池壁方向组成的锐角), 布置距离比 $d/a$ (中垂线模式:  $d1$ 为推流器叶轮轴线中点与最近的池壁之间的距离,  $a1$ 为八边形养殖池长边边长; 对角线模式:  $d2$ 为推流器叶轮轴线中点与最近的短边边长之间的距离,  $a2$ 为八边形养殖池排污口与最近的短边边长之间的距离)、潜水推流器数量 $n$ 以及布置模式(潜水推流器在八边形养殖池的布置模式, 分为对角线模式和中垂线模式两种)等布置参数对池内污物聚集特性的影响规律, 研究结果可为八边形养殖池内潜水推流器的布置方式提供参考与依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置

实验在浙江海洋大学国家海洋设施养殖工程技术研究中心设施养殖实验室进行, 实验装置如图1所示, 养殖池为八边形(图1-a), 池壁长 $a=120$  cm, 切角边 $b=30$  cm, 内壁高40 cm(图1-b), 池底中心设有半径为1 cm的圆形排污口。按照1:10的几何比例制作潜水推流器模型, 模型主要由电机(常州市丽控机电有限公司, 转速400 r/min)、叶轮(图1-c, 半径6.9 cm)、固定装置等组成(图1-d)。试验中使用自来水, 中心水深25 cm, 边长:水深=24:5。根据物理模型试验中的模型相似原则, 在潜水推流器模型缩放比为1:10时, 污物模拟物也应该缩小10倍, 但实际中难以获得此尺寸的污物替代物, 考虑到污物尺寸对试验结果影响较小并且参照已有的研究<sup>[14]</sup>, 使用直径1.6 mm, 长度3.0 mm的柱形沉性对虾饲料替代养殖池内的残饵等固体颗粒污物。通过养殖池集污试验照片(图1-b)可以看出, 不锈钢板上固定量角器, 在量角器上用指针规定起始方向和角度, 通过转动不锈钢棒调节潜水推流器与池壁的角度, 通过调节推流器在铝型材轨道上的位置调节潜水推流器的布置距离。使用固定在养殖池正上方的高清相机(aoni 奥尼 C95)拍摄池内污物的分布情况。

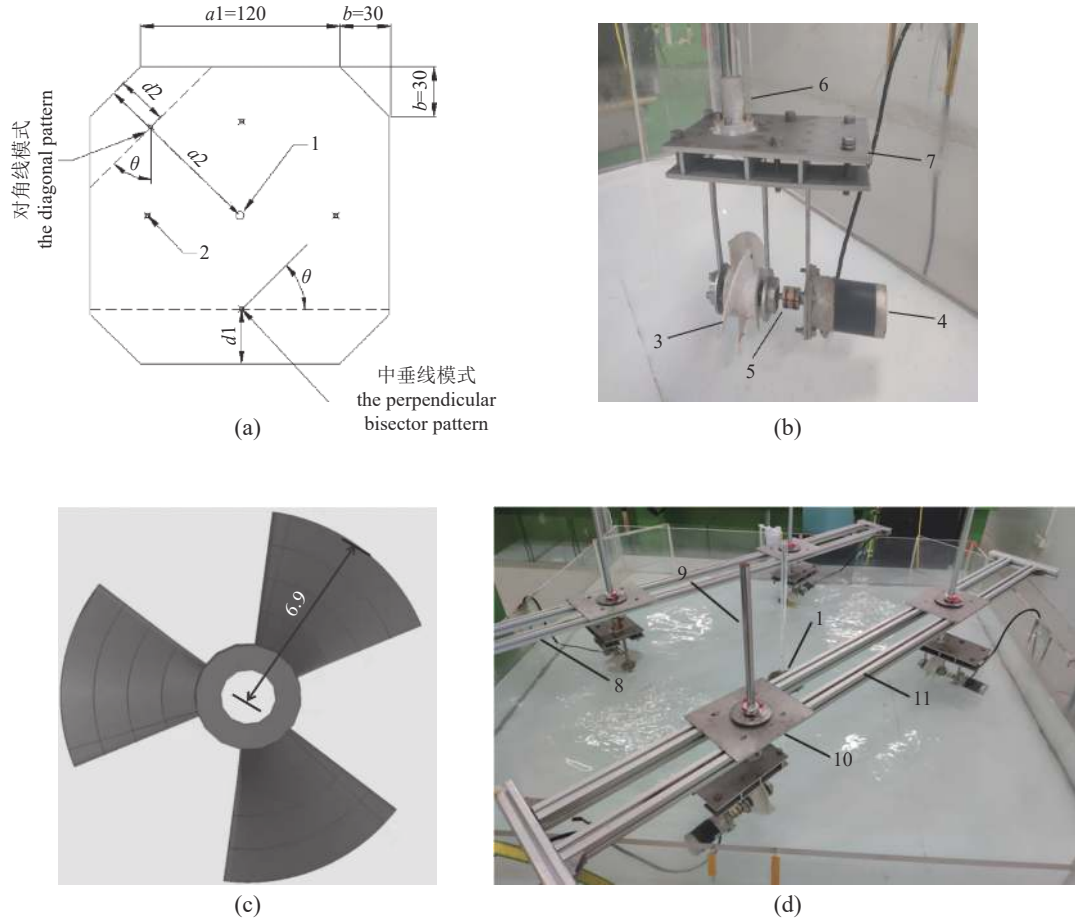


图 1 实验装置图

(a) 养殖池结构示意图; (b) 潜水推流器模型照片; (c) 叶轮模型; (d) 集污实验照片。1. 排污口, 2. 潜水推流器, 3. 叶轮, 4. 防水电机, 5. 联轴器, 6. 法兰, 7. 304 不锈钢板, 8. 支撑架, 9. 不锈钢棒, 10. 量角器, 11. 铝型材轨道。中垂线模式:  $d_1$  推流器叶轮轴线中点与最近的池壁之间的距离,  $a_1$  八边形养殖池长边边长; 对角线模式:  $d_2$  推流器叶轮轴线中点与最近的短边边长之间的距离,  $a_2$  八边形养殖池排污口与最近的短边边长之间的距离,  $\theta$  叶轮轴线与养殖池池壁方向组成的锐角。图内单位为 cm。

Fig. 1 Experimental setup

(a) schematic diagram of aquaculture tank, (b) photo of submersible flow propeller model, (c) impeller model, (d) waste collection test photos. 1. outfall, 2. submersible flow propeller, 3. blower wheel, 4. waterproof motor, 5. rigid coupling, 6. flange, 7. 304 stainless steel plate, 8. support frame, 9. stainless steel bars, 10. protractor, 11. aluminum trolley. The perpendicular bisector pattern:  $d_1$  is the distance between the midpoint of the impeller axis of the flow propeller and the nearest pool wall,  $a_1$  is the length of the long side of the octagonal culture tank; the diagonal pattern:  $d_2$  is the distance between the midpoint of the impeller axis of the flow propeller and the nearest short side,  $a_2$  is the distance between the sewage outlet of the octagonal aquaculture tank and the nearest short side,  $\theta$  represents the direction of the impeller axis and the wall of the aquaculture tank (dotted line in the figure). unit: cm.

## 1.2 实验设计

**实验方案** 本研究通过物理模型试验的方法研究潜水推流器布设角度  $\theta$ 、布设距离比  $d/a$ 、数量  $n$  以及布设模式对八边形养殖池内污物聚集特性的影响。具体实验方案及试验工况如下。

① 布设角度  $\theta$  对池内污物分布特性的影响: 在潜水推流器数量为 2, 布设模式为对角线模式, 布设距离比为 1/4 的设置工况下, 分别将布设角度  $\theta$  依次调整为  $0^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $70^\circ$ 、 $80^\circ$ 、 $90^\circ$ , 观察八边形养殖池内

污物运动及聚集情况。

② 布设距离比  $d/a$  对池内污物分布特性的影响: 在上一步的基础上选取试验效果较好的布设角度:  $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $50^\circ$ , 分别选取 2 个潜水推流器中垂线放置、对角线放置, 然后将布设距离比  $d/a$  依次调整为 0、1/2 (1/4 工况在试验方案①做过), 研究 2 个推流器作用下中垂线及对角线两种布设模式情况下布设距离比对养殖池内污物聚集效果的影响。

③ 潜水推流器数量  $n$  对池内污物分布特性的



影响。依据①②的研究结果, 选取推流器推流角度  $\theta$  为  $40^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $50^\circ$ , 布设距离比为  $1/4$  中垂线放置, 将推流器数量分别调整为 1、2、3、4 个, 研究潜水推流器数量对八边形养殖池集污性能的影响。①、②中已经做过的工况, 不再重复。

④潜水推流器布设模式对池内污物分布特性的影响。在上述实验的基础上选取 2 个潜水推流器, 选择试验聚污效果较好的推流角度  $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $70^\circ$ , 布设距离比为  $1/4$ , 研究 2 个推流器作用下中垂线及对角线两种布设模式下养殖池污物聚集情况。①、②、③中已经做过的工况, 不再重复。

**实验流程** ①检查潜水推流器能否正常运行, 按照试验方案依次调节潜水推流器数量  $n$ 、布设角度  $\theta$ 、布设距离比  $d/a$  以及布设模式, 为了模拟养殖池的实际养殖情况, 将 1 根亚克力管插在排水口处, 防止污物从中心的排污口流出。②开启潜水推流器直至养殖池内水体运动稳定 (约需 5 min), 然后开启相机。③称取 30 g 沉性固体颗粒饲料均匀撒于养殖池内, 观察并记录养殖池内污物的运动聚集过程。④ 30 min 后关闭潜水推流器和相机, 拔掉排污口处的亚克力管, 排净池内的污物, 然后进行下一组试验。

### 1.3 数据分析

利用 MATLAB 软件处理相机采集到的污物分布图像<sup>[15-17]</sup>: ①利用 `rgb2gray` 函数将原始图像转化成灰度图<sup>[18]</sup>。②将灰度化的图像进行二值化处理, 通过设定阈值将污物与池底面分离。该研究将灰度索引值阈值设置为 140, 即像素点的灰度索引值大于 140 时, 将像素点的颜色设为白色, 像素点的灰度索引值小于 140 时, 将像素点的颜色设为黑色, 进而确定污物的位置<sup>[19]</sup>。③根据每个污物点的坐标计算出其到养殖池中心(排污口)的距离, 找出所有污物距离中的最大值。为了后续表达简洁, 本研究将污物分布距离的最大值记为  $L_{\max}$ 。每种工况下,  $L_{\max}$  数值越大, 表明污物距离池中心越远, 排污时越不容易排出。因此, 通过比较不同试验工况下污物的  $L_{\max}$  可以衡量潜水推流器的设置对八边形养殖池集污性能的影响。

## 2 结果

### 2.1 布设角度对污物聚集的影响

2 个潜水推流器形成的水流方向为逆时针,

除  $80^\circ$  和  $90^\circ$  之外, 其余布设角度下养殖池内的饲料均聚集在养殖池的中心排水口附近, 饲料总体倾向于集中分布在排污口附近, 随着推流角度  $\theta$  增大, 污物聚集度明显升高, 当推流器角度  $\theta$  为  $45^\circ$  时聚集度最高, 之后, 污物聚集度随着推流角度逐渐增大而降低, 当推流角度超过  $70^\circ$  时污物聚集度明显降低, 饲料的离散度也较大 (图 2)。

进一步利用 MATLAB 图像分析量化不同布设角度  $\theta$  条件下的污物聚集情况 (图 3),  $x$  轴代表潜水推流器的布设角度, 单位 ( $^\circ$ ),  $y$  轴代表各工况下污物分布距离的最大值  $L_{\max}$ , 单位 cm。不同布设工况下的污物距离 (最大相对距离) 随着推流角度从  $0^\circ \sim 45^\circ$  的增大而逐渐减小, 之后污物距离随着推流角度从  $45^\circ \sim 70^\circ$  的增大而逐渐增大, 污物的聚集度开始降低 (图 3)。当推流角度  $\theta$  为  $45^\circ$  时,  $L_{\max}$  在 10 cm 附近, 此时污物距离最短。当推流角度  $\theta$  为  $0^\circ$  时, 最大相对距离  $L_{\max}$  为 17.78 cm, 此时污物距离最长。而  $80^\circ$ 、 $90^\circ$  集污效果极差且养殖池边缘存在集污死角, 因此不再对其进行定量分析 (图 2)。综上所述, 2 个潜水推流器对角线放置, 布设距离比  $1/4$ , 当推流角度  $\theta$  为  $45^\circ$  时, 污物距离最小, 集污效果最好。

### 2.2 布设距离比对污物聚集的影响

图 4 为中垂线模式下不同布设距离比工况下的污物分布原图, 图中 3 行 4 列分别代表 3 种布设距离比和 4 种布设角度。分析图中的 4 列可以清晰地发现, 在布设角度  $\theta$  为  $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $50^\circ$  工况下, 污物距离排污口最大相对距离  $L_{\max}$  均随潜水推流器布设距离比的增加 ( $0$ 、 $1/4$ 、 $1/2$ ) 而逐渐减小, 污物的聚集效果也逐渐变好。当潜水推流器布设距离比为  $0$  时, 此时污物及其饲料聚集呈椭圆形, 而且随着布设距离比的增加, 污物的聚集形状也在发生变化, 八边形养殖池内污物的聚集效果较差。当潜水推流器布设距离比为  $1/2$  时, 污物距离最小, 污物形状变成了圆, 更有利于八边形养殖池集污, 因此, 在此布设工况下八边形养殖池集污效果最好。进一步利用 MATLAB 图像分析量化不同布设距离比工况下污物距池心的最大相对距离, 当布设距离比为  $0$  时, 污物分布最大相对距离随着推流角度  $\theta$  在  $30^\circ \sim 50^\circ$  区间内的增大而减小; 当布设距离比为  $1/4$  或  $1/2$  时, 污物分布最大相对距离随着推流角度  $\theta$  在  $30^\circ \sim 45^\circ$  区间内的增大而减小, 随着推流角度  $\theta$  在  $45^\circ \sim 50^\circ$  的增大而逐渐增大。当布设距离比为较小值 (近似

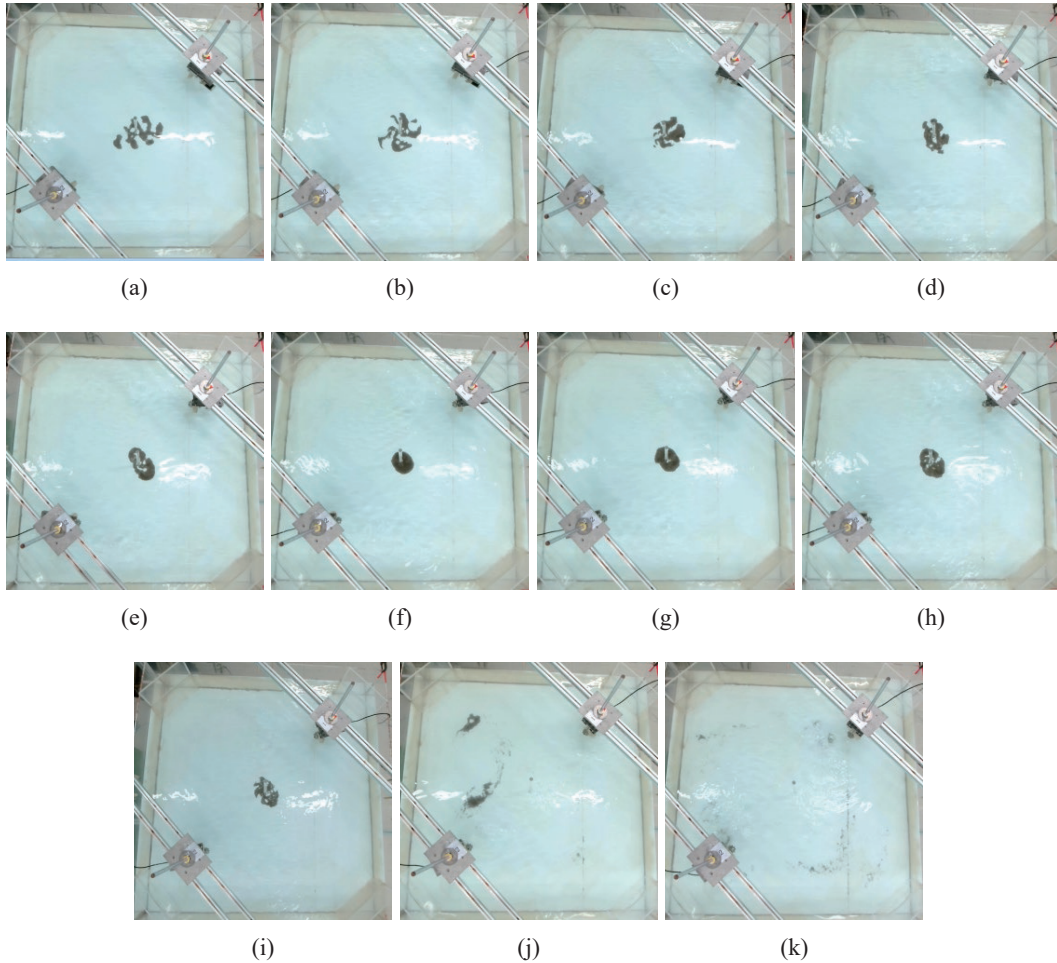


图 2 不同推流角度 ( $\theta$ ) 下污物分布原图

水流方向为逆时针, 下同。

Fig. 2 Original photo of waste distribution under different deployment angles ( $\theta$ )

Water flow direction is counterclockwise, the same below.  $d/a=1/4$ , (a)  $\theta=0^\circ$ , (b)  $\theta=10^\circ$ , (c)  $\theta=20^\circ$ , (d)  $\theta=30^\circ$ , (e)  $\theta=40^\circ$ , (f)  $\theta=45^\circ$ , (g)  $\theta=50^\circ$ , (h)  $\theta=60^\circ$ , (i)  $\theta=70^\circ$ , (j)  $\theta=80^\circ$ , (k)  $\theta=90^\circ$ .

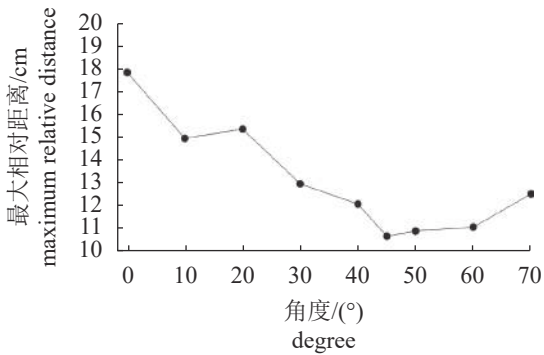


图 3 不同推流角度 ( $\theta$ ) 下污物距池心的最大相对距离

Fig. 3 Maximum relative distance of waste from the centre of tank under different deployment angles ( $\theta$ )

取 0), 推流角度  $\theta$  为  $30^\circ$  时, 污物最大相对距离为 28.23 cm; 相同的推流角度  $\theta$  下, 当布设距离比为 1/2 时集污效果最好, 各推流角度工况下污

物距离整体在 10 cm 附近, 推流角度  $\theta$  为  $45^\circ$  时, 污物最大相对距离最小,  $L_{max}$  仅为 6.39 cm。在中垂线模式下研究的  $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $50^\circ$  工况范围内, 潜水推流器布设距离比为 1/2 时, 污物聚集效果最好 (图 5)。

图 6 为对角线模式下不同布设距离比工况下的污物分布原图, 图中 3 行 4 列分别代表 3 种布设距离比和 4 种布设角度。分析图中的 4 列可以清晰地发现, 推流角度在布设角度  $\theta$  为  $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $50^\circ$  工况下, 污物距离排污口最大相对距离  $L_{max}$  均随潜水推流器布设距离比的增加 (0、1/4、1/2) 而逐渐减小, 污物的聚集效果逐渐变好。当潜水推流器布设距离比为 0 时, 污物及其饲料聚集呈椭圆形, 而且随着布设距离比的增加, 污物的形状也在发生变化, 八边形养殖池内污物的聚

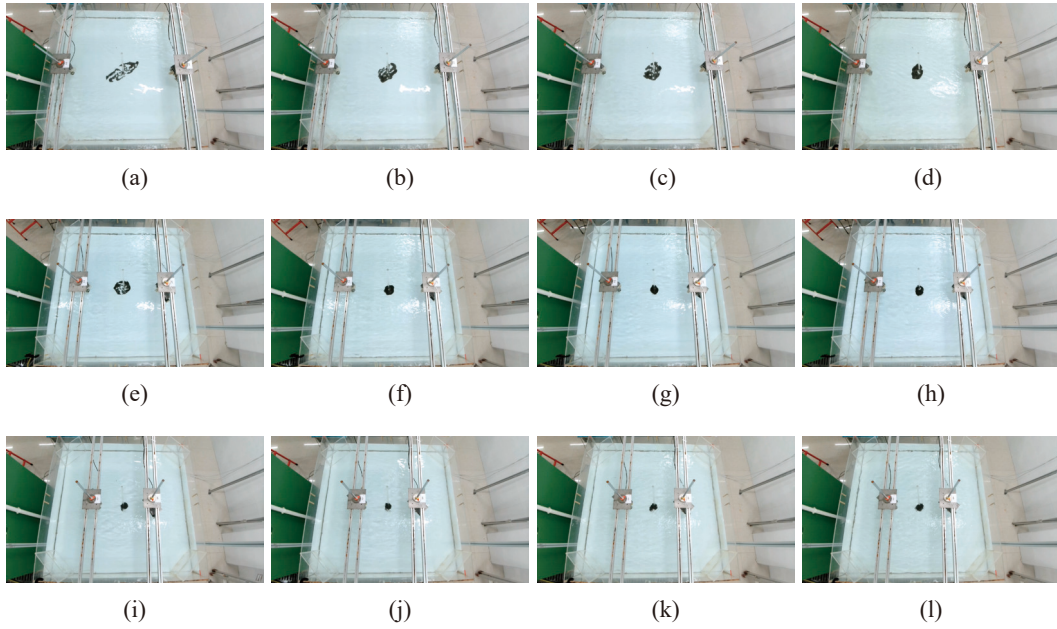


图 4 中垂线模式下不同布设距离比 ( $d/a$ ) 工况下污物分布原图

Fig. 4 Original photo of waste distribution under different installation distance ratios ( $d/a$ ) in the perpendicular bisector pattern

(a)  $\theta=30^\circ, d/a=0$ ; (b)  $\theta=40^\circ, d/a=0$ ; (c)  $\theta=45^\circ, d/a=0$ ; (d)  $\theta=50^\circ, d/a=0$ ; (e)  $\theta=30^\circ, d/a=1/4$ ; (f)  $\theta=40^\circ, d/a=1/4$ ; (g)  $\theta=45^\circ, d/a=1/4$ ; (h)  $\theta=50^\circ, d/a=1/4$ ; (i)  $\theta=30^\circ, d/a=1/2$ ; (j)  $\theta=40^\circ, d/a=1/2$ ; (k)  $\theta=45^\circ, d/a=1/2$ ; (l)  $\theta=50^\circ, d/a=1/2$ , the same as Fig. 6.

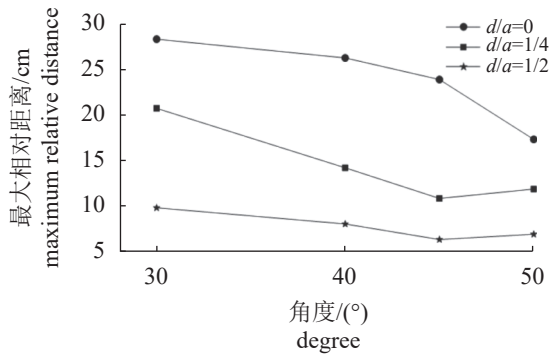


图 5 中垂线模式下不同布设距离比 ( $d/a$ ) 工况下污物距池心的最大相对距离

Fig. 5 Maximum relative distance of waste from the centre of tank under different installation distance ratios ( $d/a$ ) in the perpendicular bisector pattern

集效果较差。当潜水推流器布设距离比为 1/2 时, 污物距离最小, 污物形状变成了圆, 更有利于八边形养殖池集污, 因此, 在此布设工况下八边形养殖池集污效果最好。进一步利用 MATLAB 图像分析量化不同布设距离比工况下污物距池心的最大相对距离 (图 7), 无论布设距离比为 0、1/4 还是 1/2, 污物分布最大相对距离随着推流角度  $\theta$  在 30°~45° 区间内的增大而减小, 随着推流角度  $\theta$  在 45°~50° 的增大而逐渐增大; 当布设距离比为较

小值 (近似取 0), 推流角度  $\theta$  为 30° 时, 污物最大相对距离为 22.80 cm。相同的推流角度  $\theta$  下, 当布设距离比为 1/2 时集污效果最好, 各推流角度工况下污物距离整体在 10 cm 附近, 推流角度  $\theta$  为 45° 时, 污物最大相对距离最小,  $L_{max}$  仅为 6.07 cm。在对角线模式下研究的 30°、40°、45°、50° 工况范围内, 潜水推流器布设距离比为 1/2 时, 污物聚集效果最好。

### 2.3 推流器数量对污物聚集的影响

潜水推流器数量对集污性能的影响见图 8 和图 9。图 8 中  $n$  代表此时运转的推流器数量, 图 9 给出了不同潜水推流器数量下污物距池心的最大相对距离。综合图 9 可以发现, 在推流角度  $\theta$  为 40°、45° 和 50° 工况下, 只使用 1 个推流器时污物分布距离最大, 污物聚集效果最差; 各推流角度工况下的污物分布最大相对距离随着潜水推流器数量从 1~2 的增大而减小。当布设角度为 40° 时, 污物最大相对距离随着推流器数量从 2~4 区间的增加而逐渐减小; 当布设角度为 45° 时, 污物最大相对距离随着推流器数量从 2~4 区间内的增大而逐渐增大且污物距离增加较平缓; 当布设角度为 50° 时, 污物最大相对距离随着推流器数量从 2~4



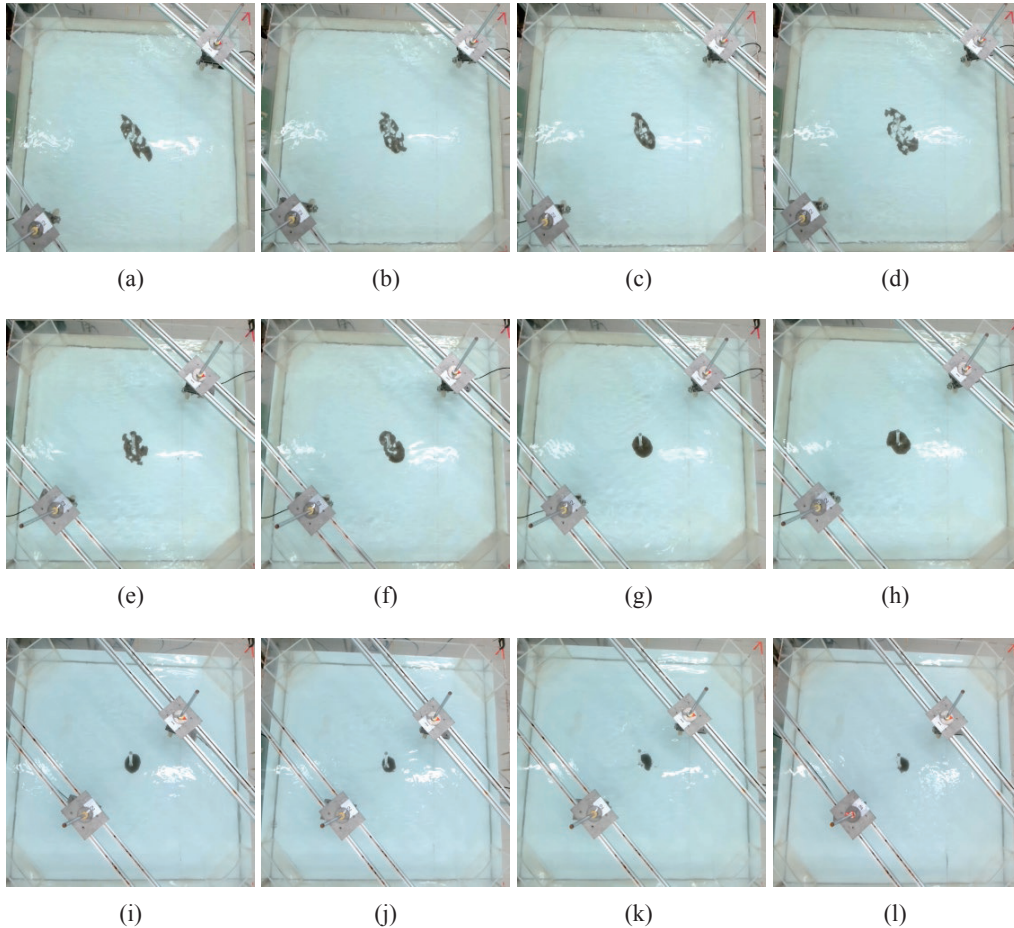


图 6 对角线模式下不同布设距离比 ( $d/a$ ) 工况下污物分布原图

Fig. 6 Original photo of waste distribution under different installation distance ratios ( $d/a$ ) in the diagonal pattern

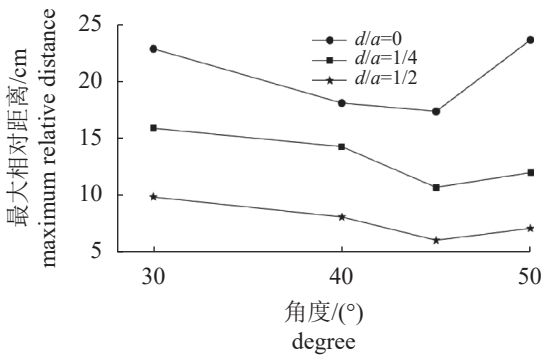


图 7 对角线模式下不同布设距离比 ( $d/a$ ) 工况下污物距池心的最大相对距离

Fig. 7 Maximum relative distance of waste from the centre of tank under different installation distance ratios ( $d/a$ ) in the diagonal pattern

区间内的增大而先增大后减小, 且推流器数量为 4 个时污物最大相对距离最小,  $L_{max}$  为 11.13 cm, 此时聚污效果最好。但是当 4 个潜水推流器同时工作的时候, 八边形养殖池右上角出现了污物的

残留。当推流器数量为 2~4 个时, 各推流角度工况下污物最大相对距离在 10 cm 上下波动, 此时养殖池聚集效果较好, 污物最大相对距离较为接近 (图 9)。

### 2.4 布设模式对污物聚集的影响

潜水推流器中垂线和对角线两种不同布设模式下污物聚集情况如图 10 和图 11 所示。两个中垂线潜水推流器不同布设角度工况下的污物距离 (最大相对距离) 随着推流角度在 20°~45°区间的增大而逐渐减小, 在 45°~60°区间内的增大而逐渐增大; 当推流角度为 70°时, 污物没有在排污口附近聚集且饲料分散程度较大; 当推流角度  $\theta$  为 45°时, 此时污物距离排污口最大相对距离最小, 集污效果最好 (图 10)。当两个对角线潜水推流器推流角度  $\theta$  为 45°时, 污物距离排污口最大相对距离最小, 池心附近出现了最佳的污物聚集效果 (图 11)。两个对角线推流器不同布设角度工况下的污物距离也随着推流角度在 20°~45°区间内的增大而逐渐减

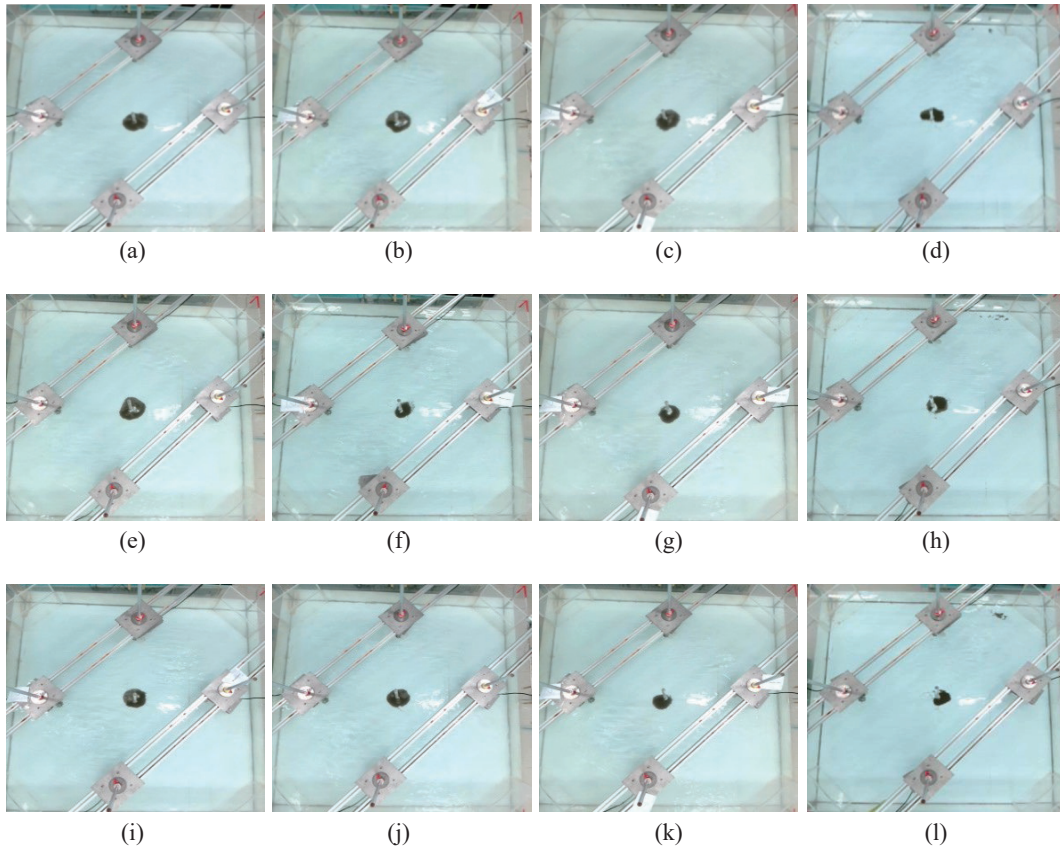


图 8 不同推流器数量下污物分布原图

n. 此时运转的推流器数量。

Fig. 8 Original photo of waste distribution under different numbers of flow propellers

n. the number of flow propellers. (a)  $\theta=40^\circ, n=1$ ; (b)  $\theta=40^\circ, n=2$ ; (c)  $\theta=40^\circ, n=3$ ; (d)  $\theta=40^\circ, n=4$ ; (e)  $\theta=45^\circ, n=1$ ; (f)  $\theta=45^\circ, n=2$ ; (g)  $\theta=45^\circ, n=3$ ; (h)  $\theta=45^\circ, n=4$ ; (i)  $\theta=50^\circ, n=1$ ; (j)  $\theta=50^\circ, n=2$ ; (k)  $\theta=50^\circ, n=3$ ; (l)  $\theta=50^\circ, n=4$ .

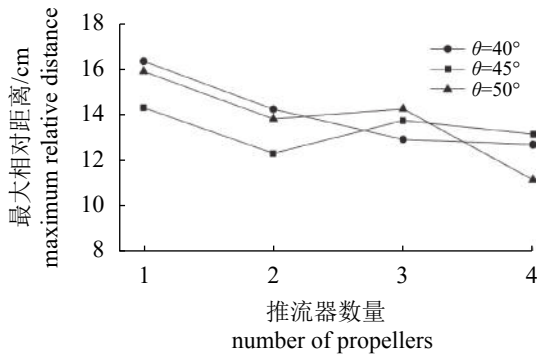


图 9 不同推流器数量下污物距池心的最大相对距离

Fig. 9 Maximum relative distance of waste from the centre of tank under different number of propellers

小, 在  $45^\circ\sim 60^\circ$  区间内的增大而逐渐增大, 所有推流角度也会出现一定污物的聚集, 且对角线放置的潜水推流器污物聚集离散度相对中垂线放置潜水推流器较小。无论潜水推流器中垂线放置, 还是对角线放置, 在  $20^\circ\sim 60^\circ$  范围内, 角度的改变对  $L_{max}$  影响不大 (图 12)。中垂线放置最大相对距

离在 20~25 cm 范围内, 对角线放置最大相对距离在 10~15 cm 范围内。相对而言, 当布置角度为  $45^\circ$  时, 对角线模式优于中垂线模式。因此此时潜水推流器选择对角线布设集污效果较好。

### 3 讨论

八边形养殖池内集污效果的好坏直接关系到养殖池内水质的优劣, 是池塘养殖过程中的核心问题。潜水推流器是氧化沟内常见的推流器械, 潜水推流器作为污水处理中的一项重要设备, 具有搅拌和推流的双重功能<sup>[20-21]</sup>。将潜水推流器应用在户外养殖池塘, 具有很大的应用前景, 其工作原理与射流管和水车式增氧机相同, 都是通过推动水流运动从而起到污物聚集的效果。与其他推流设备类似, 如果潜水推流器布设不合适, 将会在养殖池边壁附近产生集污死角, 此区域流速低, 污物容易沉积, 且溶解氧也较低。因此, 系统地研究潜水推流器的设置方式对养殖池内污物



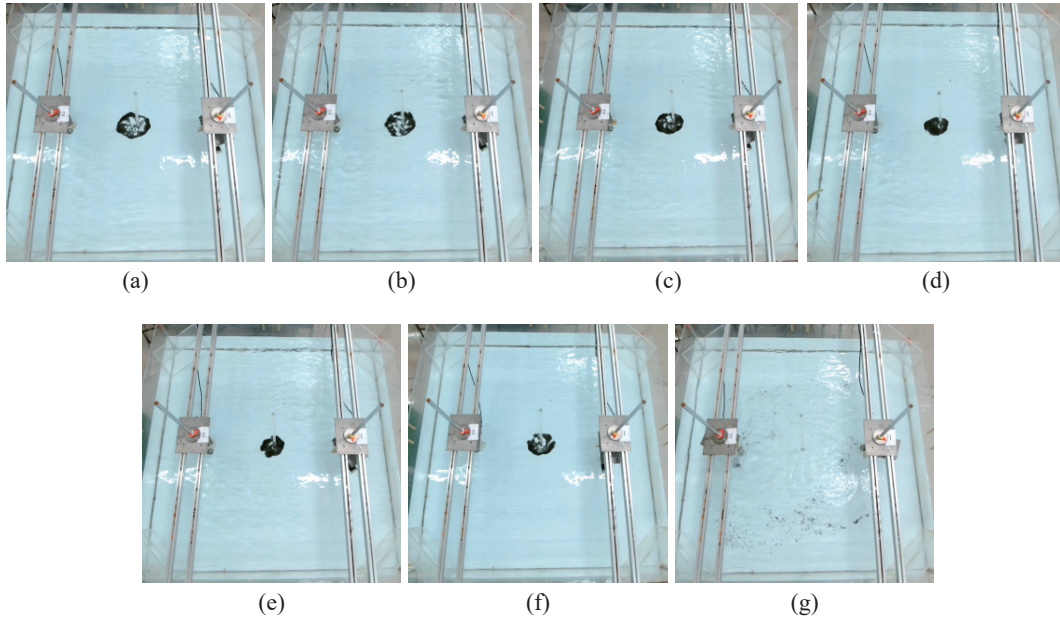


图 10 中垂线模式下两个推流器不同推流角度污物分布原图

Fig. 10 Original photo of waste distribution of two propellers with different deployment angles in perpendicular bisector pattern

$d/a=1/4$ , (a)  $\theta=20^\circ$ , (b)  $\theta=30^\circ$ , (c)  $\theta=40^\circ$ , (d)  $\theta=45^\circ$ , (e)  $\theta=50^\circ$ , (f)  $\theta=60^\circ$ , (g)  $\theta=70^\circ$ , the same as Fig.11.

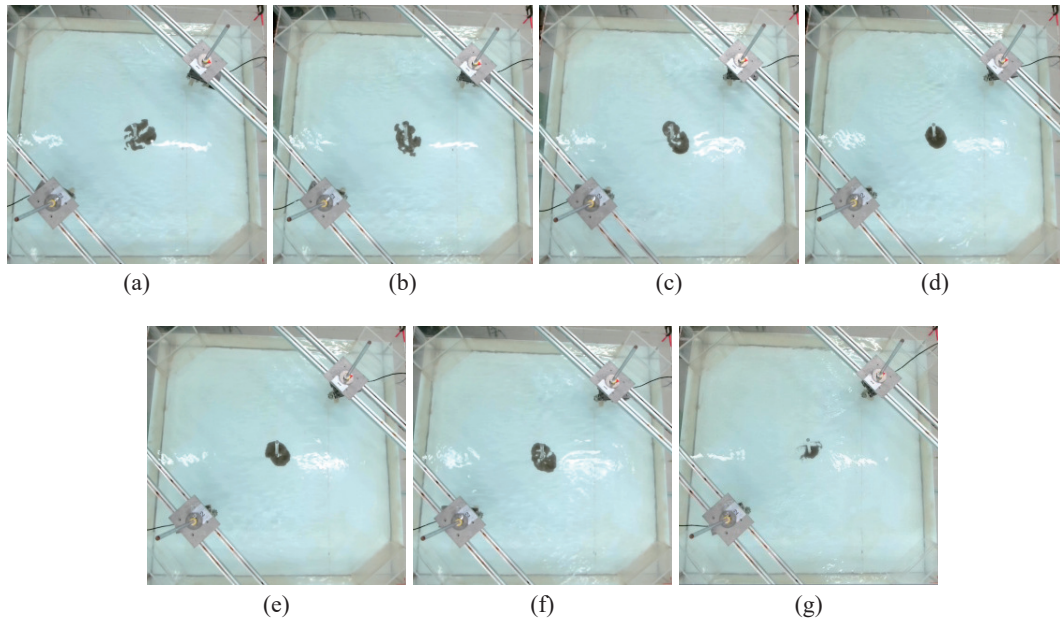


图 11 对角线模式下两个推流器不同推流角度污物分布原图

Fig. 11 Original photo of waste distribution of two propellers with different deployment angles in the diagonal pattern

运动汇集的影响, 获取合适的推流器设置参数, 对提高养殖池的集污性能, 提升养殖池的养殖效益具有明显的实际应用价值。

本研究结果表明, 当潜水推流器沿着八边形养殖池对角线布设, 推流角度为  $45^\circ$  时, 可以在养殖池内形成良好的水平环流, 污物沿池中心扩散

半径取得最小值, 具有较好的污物聚集效果。这与赵乐等<sup>[12]</sup>通过控制变量法研究射流管的射流速度、射流角度对方形圆弧角养殖池流场特性和底部污物聚集影响的研究结果一致。研究发现, 在双射流管驱动模式下, 当管式射流管的射流角度约为  $40^\circ$  时, 污物的聚集度最高, 养殖池集污效果

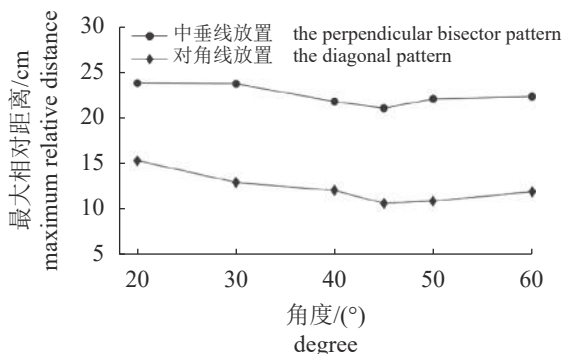


图 12 不同布设模式下污物距池心的最大相对距离

Fig. 12 Maximum relative distance of waste from the centre of tank under different position

最好。Venegas 等<sup>[22]</sup>通过现场试验研究了射流混合喷射器对圆形养殖池水动力的影响, 结果表明当喷射器的射流方向设置为 45°时, 养殖池的切向速度、均匀性、混合时间和从槽中去除固相的时间等均具有良好效果。这与本研究结果高度一致, 验证了实验结果的准确性。

在潜水推流器推流角度为 45°工况下, 布设距离比设置为 1/2 时, 可以获得良好的集污效果。薛博茹等<sup>[23]</sup>通过数值模拟研究了单射流管模式下, 射流管的布设距离比对养殖池内流场分布的影响, 此时养殖池进径比(参数  $C/B$ ,  $C$  为射流孔位置到养殖池池壁的水平距离,  $B$  为养殖池短边边长)设置在 0.02~0.04 有利于方形圆切角养殖池系统获得最佳的流场条件。薛博茹等<sup>[23]</sup>研究了中垂线模式下的布设距离比养殖池内流场分布特性, 但在对角线模式下射流管布设距离比缺少进一步研究。合理的水力驱动设备能驱动水体在养殖池内形成较好的环流形态<sup>[24]</sup>, 获得最优的污物聚集效果。因此, 综合考虑潜水推流器布设时的实际作业难度等, 建议在实际养殖过程中, 将潜水推流器布设角度设为 45°, 布设距离比保持在 1/2 池壁边长范围左右, 从而确保八边形养殖池获得较好的污物聚集效果。

桂福坤等<sup>[13]</sup>通过水车式增氧机驱动下方圆形切角养殖池集污水动力试验, 研究了水车式增氧机在不同的布设角度、布设距离比、驱动流速对方圆形切角养殖池内污物聚集和流场特性的影响。研究表明, 在 45°工况下, 随着布设距离比的增加, 污物的整体聚集效果逐渐增强。其结果与本研究潜水推流器数量基本吻合, 当推流器数量大于 2 时, 各推流角度工况下污物最大相对距离在 10 cm 处波动, 此时养殖池内污物聚集效果较

好, 污物最大相对距离相差不大。考虑到潜水推流器布设时经济效益以及实际作业等情况, 建议在八边形养殖池内布设 2 个潜水推流器。由图 12 可以发现, 中垂线放置模式下最大相对距离  $L_{\max}$  为 20~25 cm, 对角线放置模式下  $L_{\max}$  为 10~15 cm。相对而言, 当布设角度为 45°时, 对角线模式优于中垂线模式。因此潜水推流器建议按照对角线模式安装, 以期获得较好的污物聚集效果。

## 4 结论

本研究探讨了八边形养殖池中, 潜水推流器在不同推流角度、布设距离比、潜水推流器数量和布设模式工况下, 八边形养殖池底部污物聚集情况, 结论如下:

①在 2 个潜水推流器对角线放置, 布设距离比 1/4 的设置模式下, 布设角度为 45°附近时, 最有利于池内污物聚集; 当布设角度大于 70°时, 随着布设角度的增大, 八边形养殖池逐渐出现集污死角, 且饲料离散程度变大。

②在 2 个潜水推流器对角线放置, 布设角度为 30°、40°、45°、50°工况下, 污物聚集效果随着布设距离比的增大而逐渐增强, 当布设距离比为 1/2 时, 此时污物聚集效果最好。

③考虑潜水推流器布设时的经济效益情况和实际作业情况等, 潜水推流器布设时不少于 2 个, 因此在实际养殖过程中, 潜水推流器按照布设角度 45°附近布设, 并按照本试验的结果调节潜水推流器与池壁的相对距离(约 1/2 池长处)以提高污物聚集效果。

本研究针对实验室八边形养殖池在潜水推流器作用下的污物聚集特性进行了试验, 研究结果不仅可以为养殖者在布置潜水推流器时提供科学参考, 也可以为后续研究提供对比和模型验证数据。由于本研究的主要目的是直观地比较不同工况下的污物运动聚集特性, 因此并没有测量养殖池内的流场分布状况。接下来将开展不同工况下养殖池内的流场测量工作, 以期从水动力层面阐释污物聚集的机制。实际生产中养殖池的形状较多, 且模型试验工况布置具有局限性, 需要通过开展数值模拟系统全面研究潜水推流器作用下养殖池水动力特性和污物聚集特性, 为生产实际提供可靠的技术支撑。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 中国渔业统计年鉴-2020[M]. 北京: 中国农业出版社, 2020.  
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fishery statistical yearbook-2020[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2020 (in Chinese).
- [ 2 ] 何绪刚, 侯杰. 池塘圈养模式研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(3): 21-29.  
He X G, Hou J. Research progress on pond Juanyang mode[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2021, 40(3): 21-29 (in Chinese).
- [ 3 ] 苗卫卫, 江敏. 我国水产养殖对环境的影响及其可持续发展[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(S1): 319-323.  
Miao W W, Jiang M. Environmental impacts and sustainable development of aquaculture in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(S1): 319-323 (in Chinese).
- [ 4 ] 罗国芝. 水产养殖规划环境影响评价研究 [D]. 上海: 同济大学, 2007.  
Luo G Z. Study on the environmental impact assessment of aquaculture plan[D]. Shanghai: Tongji University, 2007 (in Chinese).
- [ 5 ] 苗淑彦, 王际英, 张利民, 等. 水产动物残饵及粪便对养殖水环境的影响[J]. 饲料研究, 2009(2): 64-67.  
Miao S Y, Wang J Y, Zhang L M, *et al.* Effects of aquatic animal residue bait and manure on aquaculture water environment[J]. *Feed Research*, 2009(2): 64-67 (in Chinese).
- [ 6 ] 黄进, 王月萍, 张鑫衡, 等. 潜水推流式搅拌机能效限定值及能效等级国家标准研究[J]. 标准科学, 2018(4): 128-131,159.  
Huang J, Wang Y P, Zhang X H, *et al.* Research on the national standard of minimum allowable values of energy efficiency and energy efficiency grades for submersible mixers in wastewater treatment[J]. *Standard Science*, 2018(4): 128-131,159 (in Chinese).
- [ 7 ] 郑源, 李城易, 张付林. 基于CFD的氧化沟中推流器转速与分布特性[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(11): 953-959.  
Zheng Y, Li C Y, Zhang F L. Study on characteristics of rotational speed and installation position of submerged propellers in oxidation ditch by CFD[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2019, 37(11): 953-959 (in Chinese).
- [ 8 ] 庄于方. 潜水推流器在生物法污水处理工艺中水力特性的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.  
Zhuang Y F. Study on hydraulic characteristics of submersible propeller in biological sewage treatment process[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018 (in Chinese).
- [ 9 ] 李正勇. 潜水推流器在炼油污水中的应用[J]. 广州化工, 2016, 44(6): 107-108,145.  
Li Z Y. Diving pushed inverter in the application of the refinery sewage[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2016, 44(6): 107-108,145 (in Chinese).
- [ 10 ] 陈云峰, 胡林, 张彦辉, 等. 实现环流速度场的推流器布置[J]. 应用力学学报, 2011, 28(6): 654-657.  
Chen Y F, Hu L, Zhang Y H, *et al.* Impellers layout for achieving circumfluent velocity field[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2011, 28(6): 654-657 (in Chinese).
- [ 11 ] 于林平, 薛博茹, 任效忠, 等. 单进水管结构对单通道矩形圆弧角养殖池水动力特性的影响研究[J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(1): 134-140.  
Yu L P, Xue B R, Ren X Z, *et al.* Influence of single inlet pipe structure on hydrodynamic characteristics in single-drain rectangular aquaculture tank with arc angles[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2020, 35(1): 134-140 (in Chinese).
- [ 12 ] 赵乐, 张清靖, 李宏伟, 等. 循环水养殖系统管式射流集污特性试验研究[J]. 渔业现代化, 2016, 43(4): 16-21.  
Zhao L, Zhang Q J, Li H W, *et al.* Experimental study on waste accumulation effect of pipe jetting system in circulating aquaculture system[J]. *Fishery Modernization*, 2016, 43(4): 16-21 (in Chinese).
- [ 13 ] 桂福坤, 张学芬, 曲晓玉, 等. 水车式增氧机驱动下方形圆切角养殖池集污水动力试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 275-282.  
Gui F K, Zhang X F, Qu X Y, *et al.* Hydraulic characteristics of waste convergence under paddle-wheel aerators for square aquaculture pond with round angle[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(20): 275-282 (in Chinese).
- [ 14 ] Du Y S, Chen F D, Zhou L, *et al.* Effects of different layouts of fine-pore aeration tubes on sewage collection and aeration in rectangular water tanks[J]. *Aquacultural Engineering*, 2020, 89: 102060.
- [ 15 ] 付敏, 王林, 任常兴. 基于MATLAB图像处理的层流火



- 焰传播速度研究[J]. *安全与环境学报*, 2017, 17(4): 1354-1359.
- Fu M, Wang L, Ren C X. On the laminar flame spreading speed based on the MATLAB image processing technology[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17(4): 1354-1359 (in Chinese).
- [16] 张慧, 吴常文, 江丹丹, 等. 基于图像处理技术的养殖池集污特性研究[J]. *海洋与湖沼*, 2016, 47(2): 374-379.
- Zhang H, Wu C W, Jiang D D, *et al.* Monitoring waste cumulating in aquaculture ponds using image processing technology[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2016, 47(2): 374-379 (in Chinese).
- [17] 刘星桥, 孙玉坤, 赵德安, 等. 采用图像处理技术对鱼体健康状况监视和预报[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(6): 118-121.
- Liu X Q, Sun Y K, Zhao D A, *et al.* Monitoring and predicting the health condition of fish using image processing technology[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(6): 118-121 (in Chinese).
- [18] 吕行军, 韩宪忠, 陈含, 等. 改进分量法的麦穗图像灰度-二值化处理[J]. *河北农业大学学报*, 2012, 35(3): 112-116.
- Lü X J, Han X Z, Chen H, *et al.* Wheat spike image gray-binarization processing using improved G-component method[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2012, 35(3): 112-116 (in Chinese).
- [19] 吴冰, 秦志远. 自动确定图像二值化最佳阈值的新方法[J]. *测绘学院学报*, 2001, 18(4): 283-286.
- Wu B, Qin Z Y. New approaches for the automatic selection of the optimal threshold in image binarization[J]. *Journal of Institute of Surveying and Mapping*, 2001, 18(4): 283-286 (in Chinese).
- [20] 陈斌, 王强, 张华, 等. 基于检验池的潜水推流器优选方法探讨[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(19): 133-136, 141.
- Chen B, Wang Q, Zhang H, *et al.* Discussion on optimization method of submersible flow pusher based on standard testing tank[J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(19): 133-136, 141 (in Chinese).
- [21] 张莹莹. 推流器耦合尾架断裂失效行为及机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- Zhang Y Y. Investigation on fracture failure behavior and mechanism of flow booster coupling tail bracket[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019 (in Chinese).
- [22] Venegas P A, Narváez A L, Arriagada A E, *et al.* Hydrodynamic effects of use of eductors (jet-mixing eductor) for water inlet on circular tank fish culture[J]. *Aquacultural Engineering*, 2014, 59: 13-22.
- [23] 薛博茹, 于林平, 张倩, 等. 进径比对矩形圆弧角养殖池水动力特性影响[J]. *水产学报*, 2021, 45(3): 444-452.
- Xue B R, Yu L P, Zhang Q, *et al.* A numerical study of the effect of relative inflow distance on hydrodynamic characteristics in the single-drain rectangular aquaculture tank with arc angles[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2021, 45(3): 444-452 (in Chinese).
- [24] Davidson J, Summerfelt S. Solids flushing, mixing, and water velocity profiles within large (10 and 150 m<sup>3</sup>) circular 'Cornell-type' dual-drain tanks[J]. *Aquacultural Engineering*, 2004, 32(1): 245-271.

## Waste collection performance of the octagonal aquaculture tank driven by submersible flow propellers

WU Yanfei<sup>1,2</sup>, ZHANG Qingjing<sup>2</sup>, GUI Fukun<sup>1</sup>, ZHANG Zekun<sup>3</sup>,  
CHEN Qinglong<sup>4</sup>, FENG Dejun<sup>1\*</sup>

(1. National Engineering Research Center for Marine Aquaculture, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;

2. Beijing Key Laboratory of Fishery Biotechnology, Fisheries Science Institute,  
Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100068, China;

3. School of Fisheries, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;

4. Ocean Engineering College, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

**Abstract:** In order to explore the characteristics of waste collection in the octagonal aquaculture tank under the action of submersible flow propellers, this paper uses the method of physical model test to study the different deployment angle  $\theta$  and the installation distance ratio  $d/a$  of the submersible flow propellers (the perpendicular bisector pattern:  $d1$  is the distance between the midpoint of the impeller axis of the propeller and the nearest tank wall,  $a1$  is the length of the long side of the octagonal culture tank; the diagonal pattern:  $d2$  is the midpoint of the impeller axis of the propeller and the nearest short side,  $a2$  is the distance between the sewage outlet of the octagonal aquaculture tank and the nearest short side), the number of flow propellers  $n$  and the influence of the layout mode on the collection of waste in the octagonal aquaculture tank. In the experiment, a high-definition camera was used to record the distribution of waste in the culture tank, and MATLAB was used to analyze and calculate the distance between the waste and the center of the tank. In the test, by comparing the maximum value of the distance between the waste and the center of the tank under different working conditions, the pros and cons of the waste collection performance of the aquaculture tank were measured. The results show that the deployment angle  $\theta$  of the submersible flow propeller, the installation distance ratio  $d/a$ , the number of flow propellers  $n$  and the arrangement mode all affected the effect of the accumulation of waste in the aquaculture tank; when the deployment angle  $\theta$  of the device was  $45^\circ$ , the waste collection effect was the best, and when the deployment angle  $\theta$  was greater than  $70^\circ$ , with the increase of the layout angle, there would be dead corners of waste collection around the octagonal aquaculture tank, the distance between the residual bait and the feces from the center of the sewage outlet increased, and the degree of feed dispersion also become larger; under the working conditions of  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $45^\circ$ , and  $50^\circ$ , the effect of waste accumulation gradually increased with the increase of the installation distance ratio  $d/a$ . When the installation distance ratio is  $1/2$ , the waste collection effect is the best. The waste collection performance of the aquaculture tank increased with the increase of the number of submersible flow propellers, especially when the number of submersible flow propellers increased from 1 to 2. However, after the continuous increase, the waste collection performance was no longer significantly improved. Under equal conditions, the waste collection performance of the aquaculture tank in the diagonal layout mode was obviously better than that in the perpendicular layout mode. The research results can provide basis and guidance for the layout of submersible flow propellers in octagonal aquaculture tanks.

**Key words:** octagonal aquaculture tank; physical model; hydrodynamics; submersible flow propeller; layout configuration; waste collection

**Corresponding author:** FENG Dejun. E-mail: fengdj@zjou.edu.cn

**Funding projects:** National Natural Science Foundation of China (31902425); Zhejiang Natural Science Foundation (LGN21C190010); Beijing Modern Agricultural Industrial Technology System Project (BAIC07-2022-06); National College Student Innovation and Entrepreneurship Training Project (202010340011)