

不同池型结构循环水养殖池水动力特性研究

张俊^{1,2} 王明华¹ 贾广臣³ 曹守启¹

(1. 上海海洋大学工程学院, 上海 201306; 2. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306;
3. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024)

摘要: 为构建兼具良好水动力性能和高空间利用率循环水养殖池, 对比研究了正方形、六边形、八边形、圆形、方形切角、方形圆弧角 6 种池型养殖池的水动力特性及综合性能。在试验数据验证计算方法有效的基础上, 研究了池型结构对流动均匀性、流速分布、涡量分布、水体混合均匀性及自净化效能的影响作用, 并从适渔性、循环水的利用率、空间利用率等方面分析了养殖池的综合效能。研究表明: 随着养殖池的切角距离和圆角半径增大, 底流速度增大, 水流均匀性、涡流强度和二次流强度增强, 有利于提高循环水养殖池的水体混合与自净化效能, 但养殖池的空间利用率降低; 随着切角距离和圆角半径减小, 水体平均速度降低, 要维持适宜的速度范围就要增大射流速度, 产生更多废水, 降低循环水利用效率; 正六边形、 $0.4396 < k_1 < 0.5858$ 的方形切角养殖池、 $0.6667 < k_2 < 0.8333$ 的方形圆角养殖池具有更高的综合性能。

关键词: 循环水; 养殖池; 水动力学; 流场; 净化效能; 空间利用率

中图分类号: S955 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)03-0311-10 OSID: 

Effect of Structures on Hydrodynamic Characteristics of Recirculating Aquaculture Pond

ZHANG Jun^{1,2} WANG Minghua¹ JIA Guangchen³ CAO Shouqi¹

(1. College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China
2. National Distant-water Fisheries Engineering Research Center, Shanghai 201306, China
3. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to build an industrial recirculating aquaculture pond with good hydrodynamic performance and high space utilization, the hydrodynamic characteristics and comprehensive performance of aquaculture ponds with six types of structures were compared and studied, including square, hexagon, octagon, circle, square with chamfer and square with fillet. On the basis of verifying the effectiveness of the numerical method, the influence of different structures on the velocity distribution, flow uniformity, vorticity distribution, water mixing uniformity and purification efficiency of the flow field were studied. The comprehensive performances of recirculating aquaculture ponds with different structures were evaluated from the aspects of fishing suitability, utilization rate of circulating water and space utilization rate. The results showed that with the increase of the chamfering distance and fillet radius, the water velocity distribution became more uniform, the underflow velocity was increased, and the flow uniformity, eddy current intensity and secondary flow intensity were increased gradually, which was conducive to improve the water mixing and self-purification efficiency but reduce the space utilization rate. With the decrease of the chamfering distance and fillet radius, the average velocity of the aquaculture water was gradually decreased, and the utilization efficiency of input energy of the jet was decreased. To maintain the appropriate speed range, it was necessary to increase the jet velocity, so as to produce more wastewater and reduce the utilization efficiency of the circulating water. Regular hexagon, square corner pond with k_1 from 0.4396 to 0.5858 and square fillet pond with k_2 from 0.6667 to 0.8333 had higher comprehensive performance. The research result could provide a theoretical basis and reference for the optimal design of recirculating aquaculture ponds, and had application value and scientific significance.

Key words: circulating water; aquaculture tank; hydrodynamics; flow field; purification efficiency; space utilization rate

收稿日期: 2021-09-13 修回日期: 2021-11-29
基金项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”重点专项(2020YFD0900502)、上海市科技兴农项目(沪农科推字(2021)第3-1号)和国家远洋渔业工程技术研究中心开放基金项目(AI-2006-21-202025)
作者简介: 张俊(1983—),男,副教授,博士,主要从事渔业工程水动力学和计算流体力学研究,E-mail: zhangjun@shou.edu.cn
通信作者: 曹守启(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事渔业工程技术研究,E-mail: sqcao@shou.edu.cn

0 引言

循环水养殖系统 (Recirculation aquaculture system, RAS) 具有节水、高产、环保等优点, 受到了水产养殖业的广泛关注。近年来, 随着 RAS 养殖模式的迅速发展, 养殖池水动力状况不理想而出现的集污排污效能差、水循环过程中的能量利用率和空间利用率低等问题日益凸显, 已成为 RAS 模式进一步发展的技术瓶颈^[1]。作为循环水养殖系统的重要组成部分, 养殖池的结构合理设计是创立最佳养殖对象生长条件、提高自净化效能及空间利用率的关键。在全封闭或半封闭 RAS 中, 矩形和圆形养殖池应用广泛。SUMMERFELT 等^[2]指出矩形池易于管理、成本低、空间利用率高, 但水体混合能力与集污排污能力差。圆形池具有良好的水流均匀性和水体混合性, 自净化能力强, 但空间利用率低^[3]。因此, 如何设计和优化养殖池的结构参数, 使养殖池既保持良好的水动力条件, 又能拥有较高的空间利用率, 是当前 RAS 领域的重点研究方向^[4-5]。

国内外学者针对 RAS 养殖池的结构优化和进出水装置改进等开展了大量研究^[6-18]。主要针对 RAS 养殖池的结构设计、水动力特性和自净效能, 但对切角、圆角参数对水动力特性的影响以及不同池型结构对养殖池综合性能影响的研究较少。本文以正方形、六边形、八边形、圆形、方形切角、方形圆弧角 6 类 RAS 养殖池为研究对象, 通过与实验数据对比分析, 验证计算方法的有效性, 研究不同池型养殖池的水动力学特性。首先, 建立六边形、圆形、不同切角距离和圆角半径方形养殖池的结构模型, 基于计算流体力学 (Computational fluid dynamics, CFD) 方法建立三维流场模型; 其次, 利用不同的流场指标, 包括速度分布、涡量分布、流动均匀性指数等, 全面分析不同池型结构养殖池的流场特性, 研究池型结构对养殖池水体混合均匀性、排污能力、能量利用效率的影响; 最后, 从适渔性、循环水的利用效率、养殖空间利用率角度评估不同池型结构养殖池的综合性能。

1 计算模型

1.1 结构模型

以一种双通道排水 RAS 养殖池为研究对象, 其结构模型如图 1 所示。

建立 12 组同体积、不同池型结构的养殖池三维模型, 并具有相同位置和结构参数的进水口和出水口, 无底部坡度。进水装置为单进水管结构, 底部中心座标如图 1a 所示, 其中坐标系原点为养殖池底部

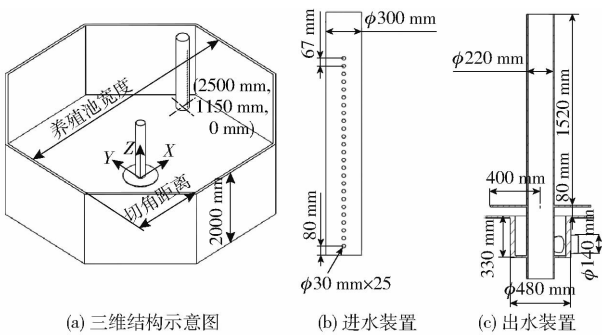


图 1 养殖池结构示意图

Fig. 1 Structure diagrams of aquaculture pond

中心点, 模型高度为 2 000 mm, 最底部进水口 (直径 30 mm) 中心与池底距离为 80 mm, 纵向排列共 25 个, 间距为 67 mm, 如图 1b 所示; 双通道排水装置包括中心溢流口 (直径 220 mm) 和底流口 (直径 140 mm), 如图 1c 所示, 养殖水体在通过底流口前要先流入集污斗 (直径 480 mm), 集污斗上方距池底 80 mm 处安装了圆形板 (直径 800 mm), 有利于固体颗粒物的排出^[19]。

为便于比较, 得到综合性能最好的池型参数, 将方形切角养殖池中切角距离与半宽比定义为 k_1 , 在正方形 ($k_1 = 0$) 与正八边形 ($k_1 = 0.5858$) 之间取 3 组 k_1 值; 将方形圆角养殖池中的圆角半径与半宽比定义为 k_2 , 在正方形 ($k_2 = 0$) 与圆形 ($k_2 = 1$) 之间取 5 组 k_2 值; 其中养殖池宽度为对边距离 (圆形养殖池宽度为直径), 则 12 组养殖池结构参数如表 1 所示。在同体积下, 养殖池宽度越小, 空间利用率越高, 从表 1 可看出, 切角距离和圆角半径小的养殖池具有更高的空间利用率。

表 1 RAS 养殖池结构参数

Tab. 1 Structure parameters of RAS pond

池型结构	养殖池宽度/mm	k_1	k_2
正方形	5 461.08	0	0
正六边形	5 868.31		
正八边形	6 000.00	0.5858	
圆形	6 162.16		1.0000
切角距离 402.05 mm	5 490.60	0.1465	
切角距离 817.50 mm	5 582.11	0.2929	
切角距离 1 262.11 mm	5 745.36	0.4394	
圆角半径 456.45 mm	5 477.43		0.1667
圆角半径 921.23 mm	5 527.37		0.3333
圆角半径 1 403.44 mm	5 613.74		0.5000
圆角半径 1 913.92 mm	5 741.76		0.6667
圆角半径 2 466.66 mm	5 919.99		0.8333

1.2 控制方程与湍流模型

将流场中的液相、气相、固相视为具有不可压缩性和连续性的混合流体相, 其三维非定常复杂流动过程满足连续性方程和动量守恒方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = F_x + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = F_y + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = F_z + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{cases} \quad (2)$$

式中 x, y, z ——坐标分量

ρ ——混合流体连续相的密度, kg/m^3

μ ——混合流体连续相的动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$

F_x, F_y, F_z ——直角坐标系下 3 个体积力分量, N

u, v, w ——直角坐标系下 3 个速度分量, m/s

采用 RNG $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型, 该模型考虑了涡流和低雷诺数对湍流的影响, 提高了存在旋涡流动的计算精度, 尤其适用于描述具有大应变率剪切流、有旋流、分离等复杂流动现象, 湍流动能 k 及湍流耗散率 ε 方程为

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \frac{\partial (ku_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_k \\ \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \frac{\partial (\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_\mu G_b) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{其中 } G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (4)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

式中 u_i, u_j ——速度分量

x_i, x_j ——坐标分量

S_k, S_ε ——根据实际情况选择的自定义源项

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ ——与 k, ε 相关的湍流普朗特数

G_b ——由浮力产生的湍流动能, J

Y_m ——可压缩湍流中波动膨胀对总耗散率的贡献

G_k ——平均速度梯度引起的湍流动能生成项

μ_t ——湍动黏性系数

C_1, C_2, C_μ ——经验系数

1.3 计算方法

采取基于压力耦合的 SIMPLEC 算法, 使速度场与压力场的迭代同步进行, 湍流动能及湍流耗散率均采用二阶迎风格式, 收敛精度为 10^{-5} 。将进水口设置为速度入口, 射流速度为 $1.5 \text{ m}/\text{s}$, 溢流口和底流口均采用压力出口, 养殖池壁面和管道壁面设置

为固体壁面, 假设水面无剪切力和滑移速度, 按自由液面处理, 压力值为标准大气压。为研究不同池型养殖池内部流场特性, 设置 1 个通过池中心并平行于 OYZ 坐标平面的垂直监测面, 在该监测面的 0.2 、 1.0 、 1.8 m 处设置速度监测线, 设置 5 个平行于养殖池底部的水平监测面, 高度分别为 0.2 、 0.6 、 1.0 、 1.4 、 1.8 m , 如图 2 所示。

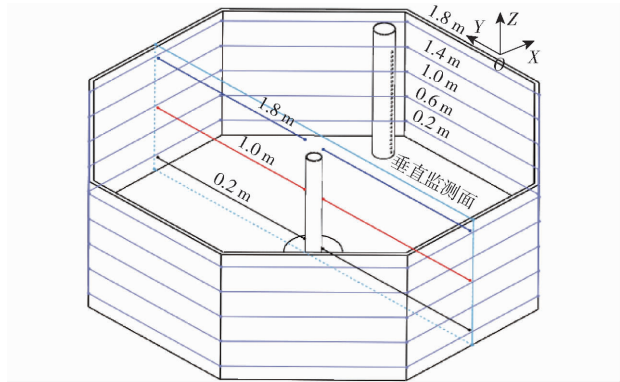


图 2 监测线和监测面

Fig. 2 Monitoring lines and planes

2 方法有效性验证

依据 GORLE 等^[17]提出的 Cornell-type 双通道养殖池试验模型和试验数据验证数值计算方法的有效性, 试验模型如图 3 所示。

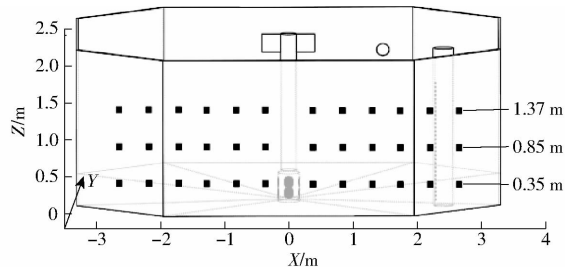


图 3 试验验证模型

Fig. 3 Experimental verification model

为满足数值计算精度要求且提高计算效率, 进行网格无关性验证。划分四面体网格, 在养殖池的进水管、射流口、溢流口、底流口等部位进行网格加密, 选择两种数量的网格模型进行验证, 其中 mesh1 和 mesh2 网格数量分别为 144 万和 197 万。从图 4 中可以看出两种网格划分方案计算结果的速度曲线基本吻合, 因此本文采用 140 万网格数量进行计算。参照文献^[17]的试验结果, 在 $Y=0.1 \text{ m}$ 平面的 3 个深度线上各选 12 个速度监测点, 数值计算与试验结果见图 4。从图 4 中可看出, 数值计算结果与试验结果的整体趋势基本一致, 绝大多数监测点误差在 10% 以内, 存在个别点误差较大, 但平均误差在 15% 以内, 验证了本文采取的数值计算方法有效可行。

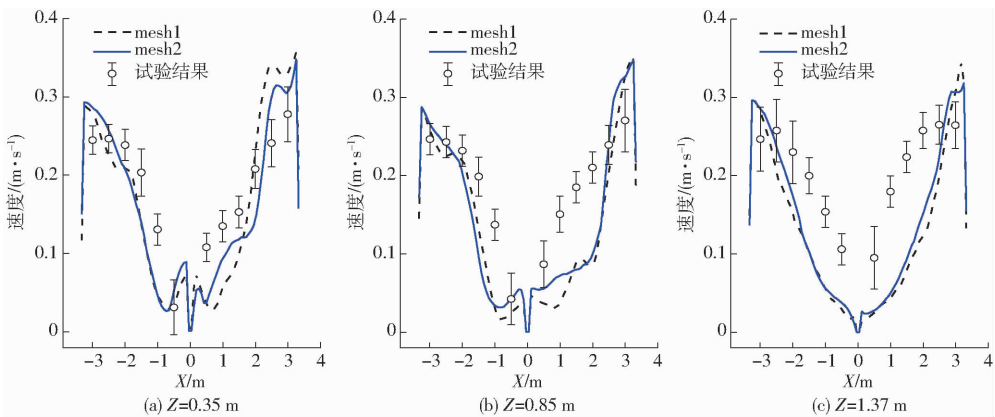


图4 监测点速度的数值计算与试验结果对比

Fig.4 Comparison between numerical calculation and experimental results of monitoring point velocity

3 计算结果与分析

3.1 池型结构对速度分布的影响

图5为不同池型结构的养殖池各监测线上的速度分布曲线。总体来看,由于射流速度导致的

水流旋转,养殖池水体呈现外围速度大、中间速度小的规律。对比正方形、正六边形、正八边形到圆形养殖池的速度分布曲线可以发现:当养殖池趋于圆形,各检测线上的速度绝对值增大,不同高度检测线的速度分布也逐渐相似,除正方形养殖池

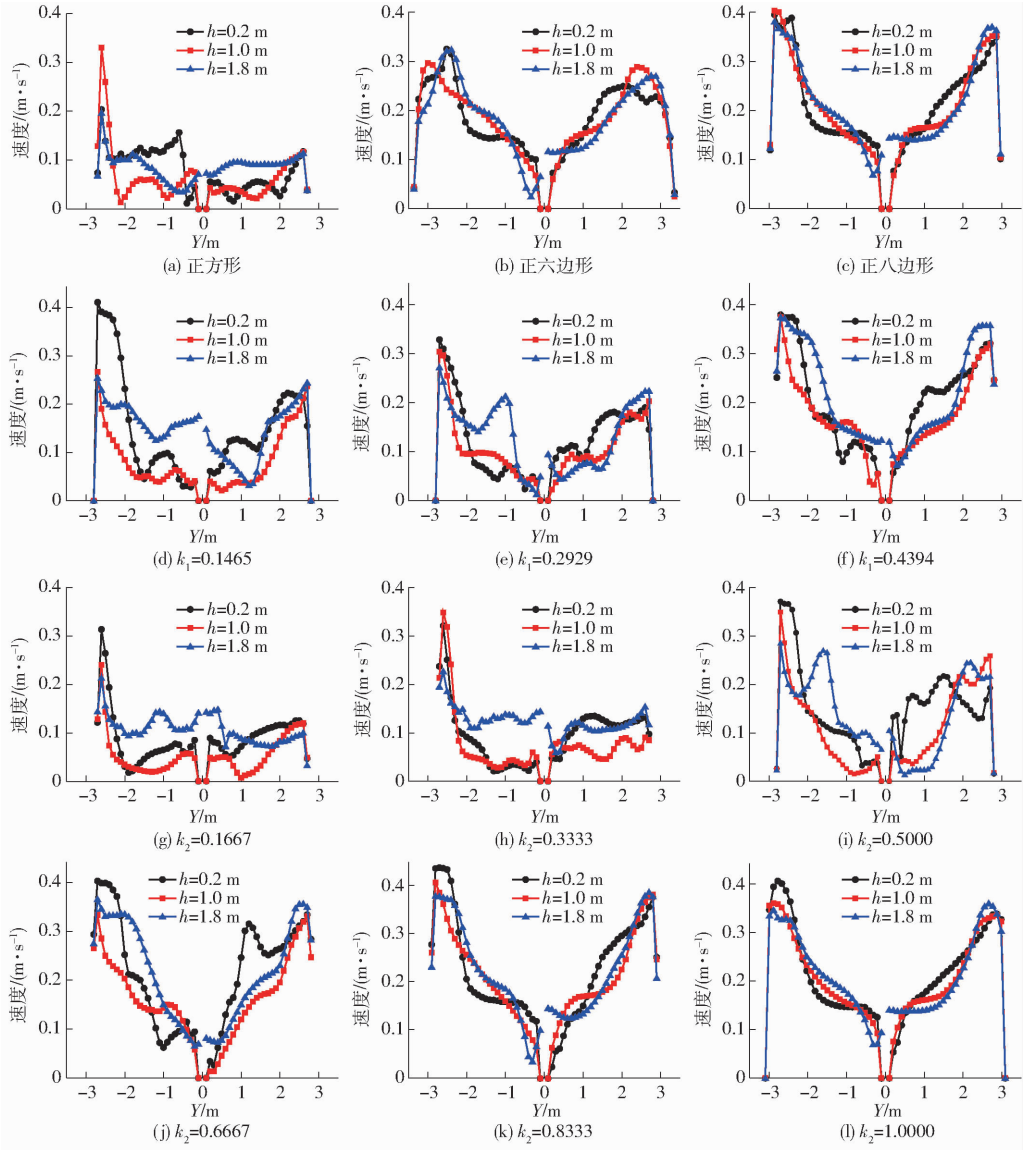


图5 不同池型结构的养殖池各监测线上的速度分布

Fig.5 Velocity distributions of monitoring lines in ponds with different structures

外,其他 3 种养殖池检测线速度都表现出明显的“M”型对称分布规律。对比图 5a、5c、5d、5e、5f 可以看出:当方形养殖池的切角距离较小时,速度产生了较大的不规则波动,各监测线上的速度差别较大,这是由于水流经过池壁后,水体质点之间的相互作用使得湍流动能和涡流粘度增大,对速度产生了较大扰动。对比图 5a、5g、5h、5i、5j、5k、5l 可以发现:当方形圆角养殖池的 k_2 从 0 增加到 0.166 7 时,速度的变化较小;当 $k_2=0.5$ 时,各监测线上的速度差异最大,说明此种情况的养殖池中的流速大且流动混乱;随着圆角半径继续增大,养殖池速度分布不均匀现象逐渐好转,流速基本

呈对称分布,表明养殖池内的水流均匀稳定,形成了强度较高的涡流;当方形养殖池切角距离和圆角半径较大或养殖池趋于圆形时,均匀的速度分布和较高的底部速度将更有利于颗粒物的排出,从而确保良好的水质条件。

3.2 池型结构对涡流结构的影响

在水流注射过程中,水体围绕养殖池的中心旋转,形成了主旋转流,根据漩涡特征可分为涡柱、涡环和涡丝。漩涡特征可用 Q 准则识别^[20], Q 准则被定义为流场的速度旋度 ($\nabla \times \boldsymbol{u}$) 的正第二不变量。本文 Q 取 0.014,来定位养殖池中的涡量分布,表示各个位置涡的强弱^[21],如图 6 所示。

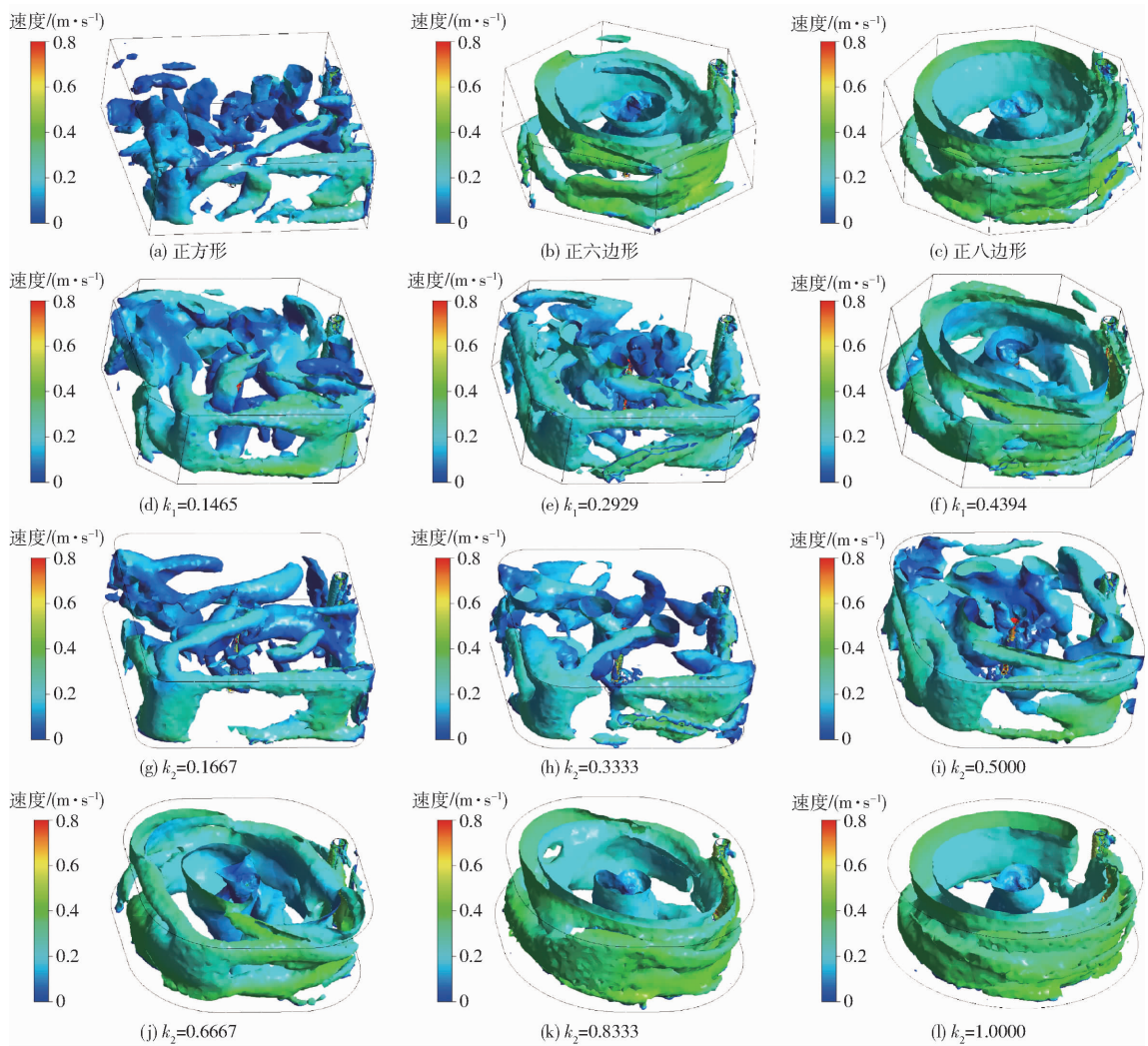


图 6 不同池型结构养殖池的涡量分布

Fig. 6 Vorticity distributions of aquaculture ponds with different structures

总体来看,池型结构对于涡流的空间分布和结构形态有明显影响。正方形养殖池形成的涡柱和涡环特征不明显,涡丝分布紊乱;随着养殖池趋于圆形,有旋流动现象凸显,涡柱和涡环体积逐渐增大,同时由于旋转流与池壁的作用力减小,涡丝量减少,涡流强度逐步增大。对比图 6a、6c、6d、6e、6f 可以

发现:随着养殖池切角距离的增加,即切角距离与养殖池半宽比 k_1 增大,涡柱、涡环体积增大,池内环流运动逐渐明显,低速混合区逐渐减少;同时,靠近池壁的水流速度大、池中心速度较小的特征也逐渐显现。对比图 6a、6g、6i、6j、6k、6l 可以看出:随着养殖池的圆角半径增加,即圆角半径与养殖池半宽比 k_2

增大,养殖池流场呈现出与上述相似的规律;涡流形态和强度影响养殖池中固体颗粒分散和冲洗速率^[19];当方形养殖池切角距离和圆角半径增大或养殖池趋于圆形时,水体混合更加均匀,死水区减少,有助于提高养殖池的自净能力;然而,涡流强度过大也会增加养殖生物的应激水平^[22]。

图 7 为不同池型结构养殖池的三维流线图,结果表明:方形养殖池的切角距离和圆角半径较小时,水质质点运动规律性差、流态紊乱,随着方形养殖池切角距离和圆角半径的增加,切角和圆角对水流的引导作用加强,减少了水质质点与壁面间的正向碰撞,水质质点之间的不规则碰撞也相对减少,其运动轨迹逐渐转为围绕养殖池中心的有旋流动,流态较为稳定。

此外,由于主旋转流和养殖池底部的无滑移条件,养殖池内会产生二次流。二次流由池底的内径向流和养殖池表面外径向流构成,通过“通道涡原理”促进了养殖池中水体混合作用,其中内径向流

沿着池底携带沉淀固体颗粒物至水池中心排水口,从而实现养殖水体自净。垂直面的流线图(图 8)显示了二次流的存在。由于养殖池型结构的不同,垂直平面中次旋转流的分布和强度表现出显著差异。图 8b、8c、8h、8k、8l 中二次流特征明显,在溢流管两侧分布也较为均匀和对称;图 8f、8j 中的二次流强度相对较弱;图 8a、8d、8e、8g、8i 中二次流被破坏,强度降低。二次流的强度是水流产生混合作用的重要因素之一,固体颗粒被水流带走而无法沉积在池底,从而确保养殖池中的水质均匀^[23]。因此,能否产生强度高的二次流是评价养殖池性能的重要指标。

结合图 6~8 可以发现:方形养殖池切角距离和圆角半径较小时,水质质点之间以及水体与养殖池壁之间存在大量不规则碰撞和摩擦,引起较大的能量损耗,导致养殖池内出现许多低速混合区,池内水体混合性较差,不利于溶解氧等物质的均匀扩散,另一方面也使得池内湍流强度增大,水流紊乱,不利于

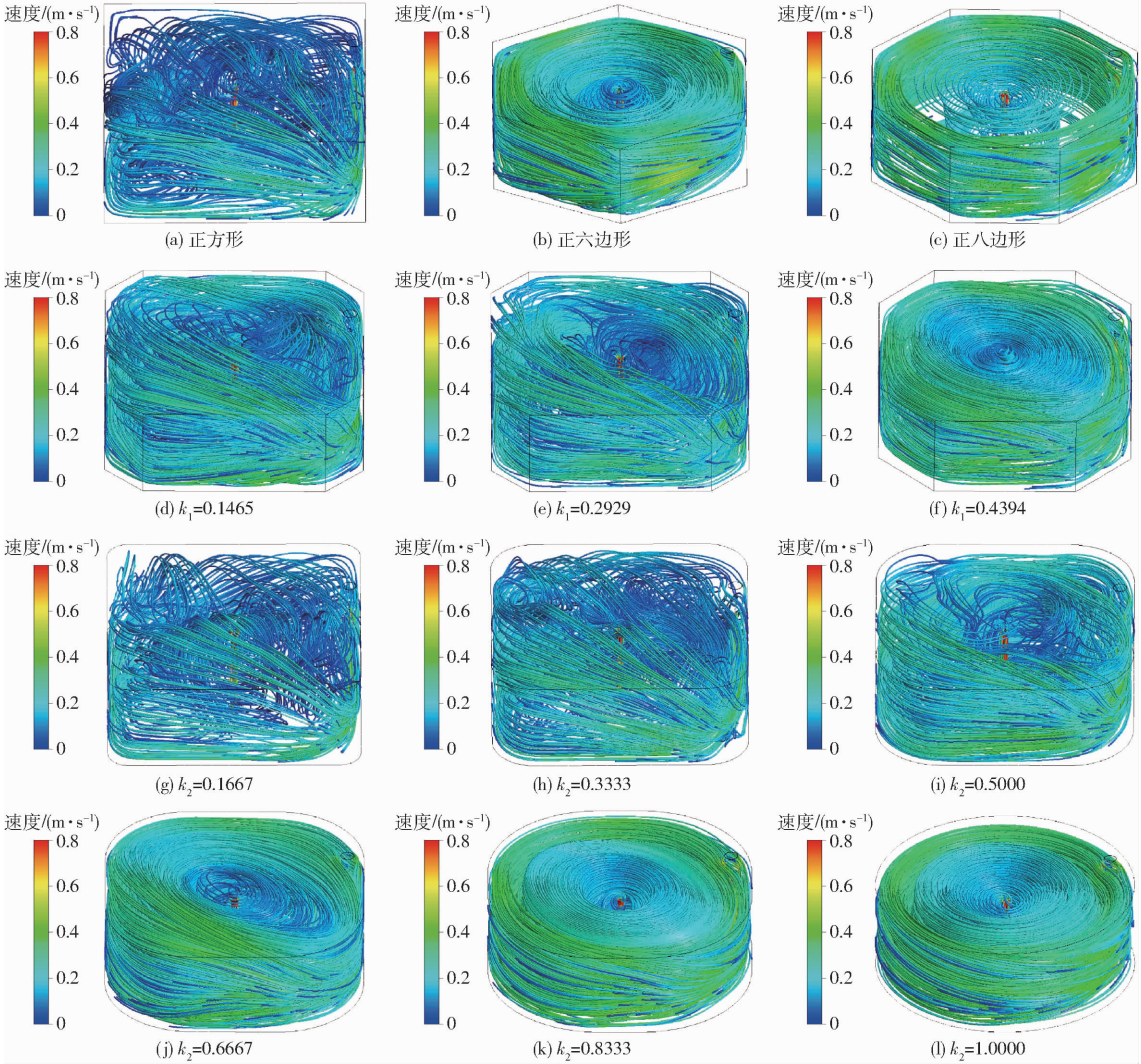


图 7 不同池型结构养殖池的流线图

Fig. 7 Velocity streamlines of aquaculture ponds with different structures

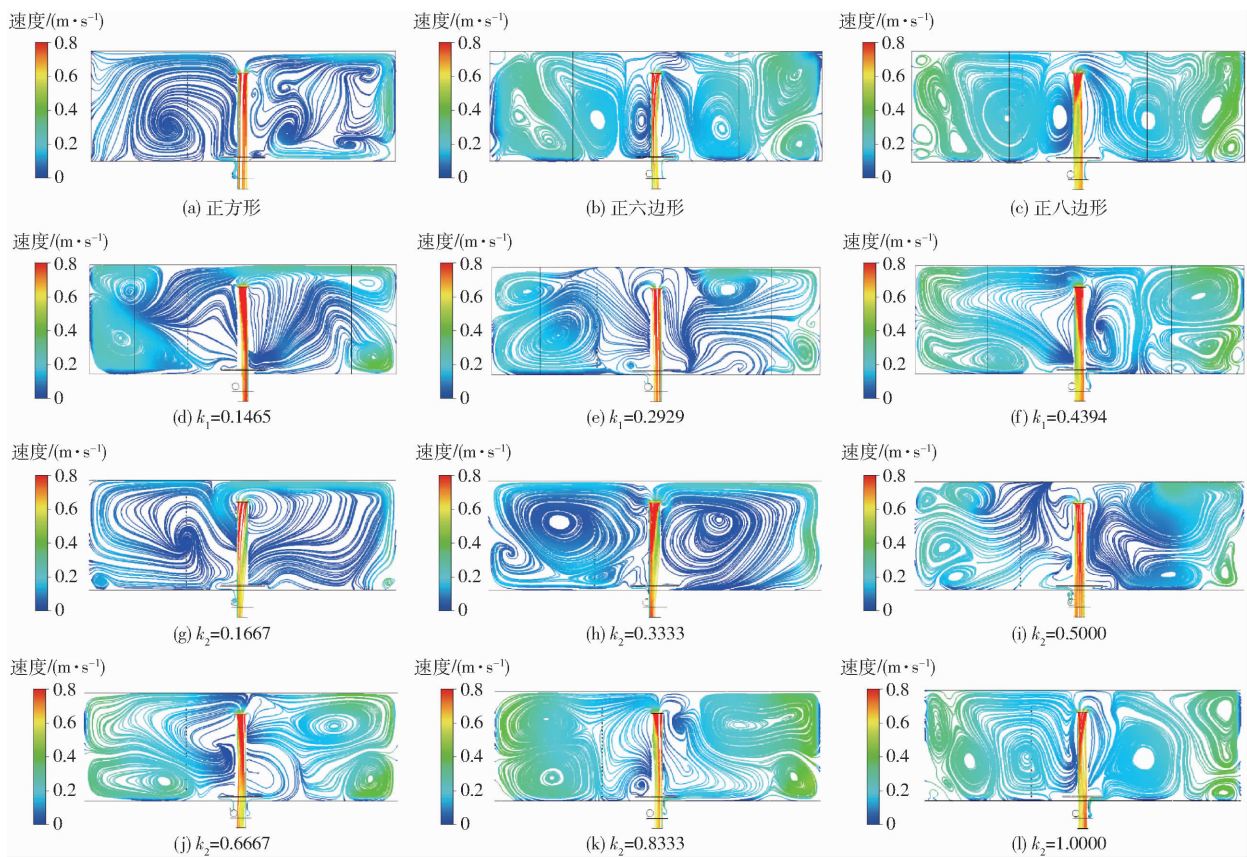


图 8 不同池型结构养殖池垂直监测面流线图

Fig. 8 Streamline diagrams of vertical monitoring planes in aquaculture ponds with different structures

固体颗粒物的沉淀和排出；当方形养殖池切角距离和圆角半径增加或养殖池趋于圆形时，池内有旋流动逐渐凸显，呈现出围绕养殖池中心的规律性环流运动，涡流强度更高，二次流现象明显，使得池内水体混合均匀性更好，促进溶解氧等物质的扩散和颗粒物的排出，从而创造更有利养殖生物生长的水环境。

3.3 水流均匀性指数特征

水流均匀性指数可作为衡量养殖池性能的水动力学指标和评估养殖生物生存条件的水文参数。在循环水养殖系统中，养殖池的水流均匀性指数越高，流动均匀性越好，对养殖生物的生长更有利^[24]。另外，提高流动均匀性是减少大直径颗粒物破碎的方

法之一^[17]。水流均匀性指数计算式为^[18, 25]

$$\gamma = 1 - \frac{1}{2A} \int_A \frac{|u_{avg} - u'|}{u_{avg}} dA \tag{6}$$

式中 γ ——水流均匀性指数
 u_{avg} ——横截面上的加权平均速度，m/s
 u' ——横截面上的流体微元速度，m/s
 A ——横截面积，m²

图 9a 表明正方形养殖池各截面的水流均匀性指数 γ 相对较小， $h = 0.6$ m 的水平截面 γ 最小，低于 0.7，正六边形、正八边形和圆形养殖池的 γ 普遍大于 0.85，随着养殖池趋于圆形， γ 变化不大。图 9b 表明随着切角距离与养殖池半宽之比 k_1 增大，方形切角养殖池各截面水流均匀性指数 γ 总体

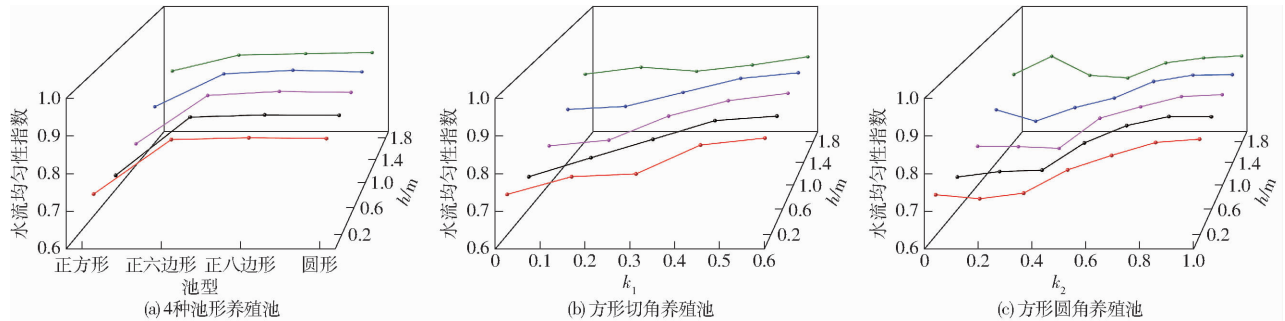


图 9 不同池型结构养殖池水平监测面的水流均匀性指数

Fig. 9 Flow uniformity indexes of horizontal monitoring planes in aquaculture ponds with different structures

呈现先平稳后快速增加的趋势。从图 9c 看出,当方形圆角养殖池的圆角半径与养殖池的半宽比 $k_2 < 0.5$ 时, γ 随 k_2 增大呈现一定的波动,增长趋势不明显,当 k_2 从 0.5 到 1.0 时,水流均匀性指数有明显增长趋势。从不同高度来看, $h = 1.8\text{ m}$ 横截面上的水流均匀性指数整体较高,随着池型改变而增长的趋势较小,这可能是由于养殖池顶部进水口的高度为 1.7 m,射流对该横截面上流场影响较小,速度相对稳定变化不大;另外,二次流对该横截面上速度变化的影响较小,减小了流动不均匀性。

3.4 能量利用效率特征

水体环流运动的能量主要由进水口射流提供,能量损耗主要来自于克服养殖池阻力和水体质点间相对运动的粘性阻力。利用体积加权水体速度 v_{avg} 与射流速度 v_{in} 的比值评估不同池型结构养殖池的能量利用率,如图 10 所示。整体来看,当方形养殖池 k_1 和 k_2 增大或养殖池趋于圆形时, $v_{\text{avg}}/v_{\text{in}}$ 呈上升趋势。图 10a 表明,养殖池从正方形

到正六边形, $v_{\text{avg}}/v_{\text{in}}$ 大幅增长,而从正六边形、正八边形到圆形养殖池, $v_{\text{avg}}/v_{\text{in}}$ 增长缓慢。图 10b 表明,随着方形养殖池的切角距离与养殖池半宽比 k_1 增大, $v_{\text{avg}}/v_{\text{in}}$ 呈先慢后快的增长趋势。图 10c 表明,随着圆角半径与养殖池半宽比 k_2 的增大, $v_{\text{avg}}/v_{\text{in}}$ 增长速率呈现与图 10b 相似的变化特征,但 k_2 从 0.833 3 到 1.0 对 $v_{\text{avg}}/v_{\text{in}}$ 影响不大。因此,由于大距离切角和大半径圆角对于水流的引导作用更强,减少了水流与池壁的撞击能量消耗,同时使水体质点轨迹趋于有规律的环流运动,减小了湍流动能和涡流粘度,提高了能量利用效率。由于不同池型结构养殖池能量利用率不同,要维持相同的适合水生生物生长的水动力条件,就要调整养殖池的入口流量,与圆形养殖池相比, k_1 和 k_2 较小的养殖池会产生更多废水,水循环利用效率低。综合分析可知,正六边形养殖池、 $0.439\ 6 < k_1 < 0.585\ 8$ 的方形切角养殖池、 $0.666\ 7 < k_2 < 0.833\ 3$ 的方形圆角养殖池的综合效能更好。

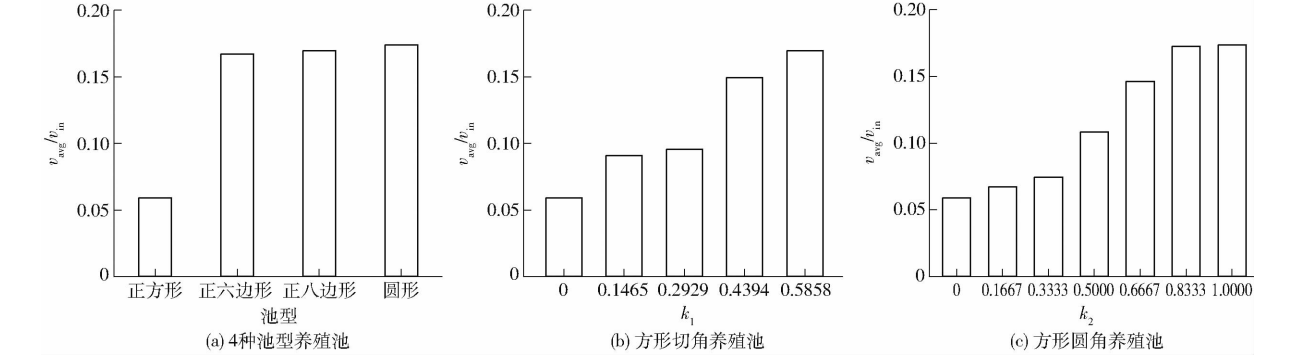


图 10 池型结构对能量利用效率的影响
Fig. 10 Effects of pond structures on energy efficiency

4 讨论

本文研究了不同池型养殖池在 1.5 m/s 的射流速度下的水动力学特性。一般来说,养殖池最佳水流回转速度可取每秒 0.5 ~ 2.0 倍的鱼身长度,既能维持鱼的正常呼吸又能促进肌肉的增强^[26]。另外, TIMMONS 等^[27]研究表明:为达到期望的颗粒物去除效率,应适当提高底流流速,且池壁处的流速至少为 15 cm/s。在养殖系统实际运行中,可根据养殖生物的生长需求、颗粒物沉淀及排出要求调整入口流量,获得最佳的速度分布等水动力条件,文中速度分布特征及能量利用效率分析可为调整流量过程提供参考。

在构建节能、减排、高效的循环水养殖系统过程中,要综合考虑养殖池的水动力特性、水体混合、自净化能力、能量利用效率、土地利用率等因素。本文研究了不同池型结构养殖池的速度、涡量、流线分布

特征,得到了流动均匀性指数、平均速度等参数,分析了养殖池水体混合及排污能力、能量及循环水利用效率、空间利用率,以此评估不同池型养殖池的综合性能。养殖池水体混合及排污能力可通过溶解氧、颗粒废物分布特征来体现,该方面有待进一步研究。另外,本研究得到的是理想状态下的流场,未考虑养殖生物的影响。养殖生物的存在影响水体速度及固相颗粒的沉积^[28],因此,有养殖生物分布的养殖池水动力特性是下一步的研究方向。

5 结论

(1)从适渔性角度来看,在相同的养殖体积下,较大切角距离和圆角半径的方形养殖池或池型趋于圆形的养殖池具有更好的水动力特性,包括均匀的速度分布、更高的底流速度、良好的水体混合性能和水体流动均匀性,高强度的涡流和二次流,这种水环境有助于溶解氧的混合和固体颗

粒物的集聚和排出,实现最佳的养殖对象生长条件。

(2)从循环水利用效率来看,当切角距离与养殖池半宽比 k_1 和圆角半径与养殖池半宽比 k_2 较小时,养殖水体平均速度较低,对射流的输入能量利用效率低,要维持适宜的速度范围就要增大射流速度,进而产生更多废水,降低了循环水养殖系统的循环水利用率和经济效益。

(3)从养殖池的空间利用率来看,在相同的养殖体积下,方形养殖池的切角距离和圆角半径较大或养殖池趋于圆形时,养殖池的宽度也越大,不利于提高养殖空间的利用率。综合分析可知,正六边形养殖池、 $0.439\ 6 < k_1 < 0.585\ 8$ 的方形切角养殖池、 $0.666\ 7 < k_2 < 0.833\ 3$ 的方形圆角养殖池具有更高的综合性能,在工厂化循环水养殖系统构建中应综合考虑。

参 考 文 献

- [1] OCA J, MASALO I. Influence of fish swimming on the flow pattern of circular tanks[J]. *Aquacultural Engineering*, 2016, 74: 84–95.
- [2] SUMMERFELT S T, DAVIDSON J W, WALDROP T B, et al. A partial-reuse system for coldwater aquaculture[J]. *Aquacultural Engineering*, 2004, 31(3–4): 157–181.
- [3] TIMMONS M B, SUMMERFELT S T, VINCI B J. Review of circular tank technology and management[J]. *Aquacultural Engineering*, 1998, 18(1): 51–69.
- [4] FARGHALLY H M, ATIA D M, EL-MADANY H T, et al. Control methodologies based on geothermal recirculating aquaculture system[J]. *Energy*, 2014, 78: 826–833.
- [5] ELALOUF H, KASPI M, ELALOUF A, et al. Optimal operation policy for a sustainable recirculation aquaculture system for ornamental fish: simulation and response surface methodology[J]. *Computers and Operations Research*, 2018, 89: 230–240.
- [6] VEERAPEN J P. Solids removal in recirculating aquaculture: the swirl separator and double-drain fish tank[D]. Fredericton: University of New Brunswick, 2004.
- [7] LABATUT R A, EBELING J M, BHASKARAN R, et al. Modeling hydrodynamics and path/residence time of aquaculture-like particles in a mixed-cell raceway (MCR) using 3D computational fluid dynamics (CFD)[J]. *Aquacultural Engineering*, 2015, 67: 39–52.
- [8] OCA J, MASALO I. Design criteria for rotating flow cells in rectangular aquaculture tanks[J]. *Aquacultural Engineering*, 2006, 36(1): 36–44.
- [9] 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.
- [10] LIU Yao, LIU Baoliang, LEI Jilin, et al. Numerical simulation of the hydrodynamics within octagonal tanks in recirculating aquaculture systems[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2017, 35(4): 912–920.
- [11] CARVALHO R A P L F, LEMOS D E L, TACON A G J. Performance of single-drain and dual-drain tanks in terms of water velocity profile and solids flushing for in vivo digestibility studies in juvenile shrimp[J]. *Aquacultural Engineering*, 2013, 57: 9–17.
- [12] 史明明, 阮贇杰, 刘晃, 等. 基于CFD的循环生物絮团系统养殖池固相分布均匀性评价[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(2): 252–258.
SHI Mingming, RUAN Yunjie, LIU Huang, et al. Solid phase distribution simulation of culture pond with recirculating biofloc technology based on computational fluid dynamics[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(2): 252–258. (in Chinese)
- [13] 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 Linping, XUE Boru, REN Xiaozhong, 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)
- [14] 桂劲松, 张倩, 任效忠, 等. 圆弧角优化对单通道方形养殖池流场特性的影响研究[J]. *大连海洋大学学报*, 2020, 35(2): 308–316.
GUI Jinsong, ZHANG Qian, REN Xiaozhong, et al. Influence of arc angle optimization in single-drain square aquaculture tanks on flow field characteristics[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2020, 35(2): 308–316. (in Chinese)
- [15] STOCKTON K A, MOFFITT C M, WATTEN B J, et al. Comparison of hydraulics and particle removal efficiencies in a mixed cell raceway and Burrows pond rearing system[J]. *Aquacultural Engineering*, 2016, 74: 52–61.
- [16] OCA J, MASALO I. Flow pattern in aquaculture circular tanks: influence of flow rate, water depth, and water inlet & outlet features[J]. *Aquacultural Engineering*, 2013, 52: 65–72.
- [17] GORLE J M R, TERJESEN B F, SUMMERFELT S T. Hydrodynamics of octagonal culture tanks with Cornell-type dual-drain system[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 151: 354–364.
- [18] GORLE J M R, TERJESEN B F, SUMMERFELT S T. Hydrodynamics of Atlantic salmon culture tank: effect of inlet nozzle angle on the velocity field[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 158: 79–91.

- [19] EBELING J M, TIMMONS M B, JOINER J A, et al. Mixed-cell raceway: engineering design criteria, construction, and hydraulic characterization[J]. North American Journal of Aquaculture, 2005, 67(3): 193–201.
- [20] GORLE J M R, CHATELLIER L, PONS F, et al. Flow and performance analysis of H-Darrieus hydroturbine in a confined flow: a computational and experimental study[J]. Journal of Fluids and Structures, 2016, 66: 382–402.
- [21] 史明明, 孙先鹏, 朱松明, 等. 基于 PIV 的循环式生物絮团系统涡旋分离器内流场研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 299–306.
- SHI Mingming, SUN Xianpeng, ZHU Songming, et al. Investigation on flow field in hydraulic vortex separator of recirculating biofloc technology system based on PIV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 299–306. (in Chinese)
- [22] 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.
- LIU Wen, ZHUGE Yisi, OUYANG Li, et al. Experimental study of the effect of hydrodynamic conditions on fish growth[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(6): 812–817. (in Chinese)
- [23] GORLE J M R, TERJESSEN B F, HOLAN A B, et al. Qualifying the design of a floating closed-containment fish farm using computational fluid dynamics[J]. Biosystems Engineering, 2018, 175(12): 63–81.
- [24] PUMIR A, XU H, BODENSCHATZ E, et al. Single-particle motion and vortex stretching in three-dimensional turbulent flows[J]. Physical Review Letters, 2016, 116(12): 124502.
- [25] NORDIN N, SERI S M, TAIB I, et al. Secondary flow vortices and flow separation of 2-D turning diffuser via particle image velocimetry[C]//IOP Conference, 2017, 226: 012149.
- [26] LOSORDO T M, WESTERS H. Aquaculture water systems: engineering design and management[J]. Aquacultural Engineering, 1994, 43: 9–60.
- [27] TIMMONS M B, SUMMERFELT S T, DAVIDSON J. Hydrodynamics in the ‘Cornell-type’ dual-drain tank[C]//The Third International Conference on Recirculating Aquaculture, 2000: 160–166.
- [28] 史明明. 循环式生物絮团系统内部多相流的 CFD 模拟与优化[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- SHI Mingming. CFD simulation and optimization of multiphase flow in recirculating biofloc technology system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)

(上接第 174 页)

- [16] 兑瀚. 马铃薯收获机升运过程机械损伤分析与试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
- DUI Han. Mechanical damage analysis and experimental research on potato harvester elevator[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [17] 魏忠彩, 苏国梁, 李学强, 等. 基于离散元的马铃薯收获机波浪形筛面参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 109–122.
- WEI Zhongcai, SU Guoliang, LI Xueqiang, et al. Parameter optimization and test of potato harvester wavy sieve based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 109–122. (in Chinese)
- [18] 刘文政, 何进, 李洪文, 等. 基于离散元的微型马铃薯仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 125–135, 142.
- LIU Wenzheng, HE Jin, LI Hongwen, et al. Calibration of simulation parameters for potato minituber based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 125–135, 142. (in Chinese)
- [19] 曾智伟, 马旭, 曹秀龙, 等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 1–20.
- ZENG Zhiwei, MA Xu, CAO Xiulong, et al. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 1–20. (in Chinese)
- [20] 王宪良, 胡红, 王庆杰, 等. 基于离散元的土壤模型参数标定方法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 78–85.
- WANG Xianliang, HU Hong, WANG Qingjie, et al. Calibration method of soil contact characteristic parameters based on DEM theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 78–85. (in Chinese)
- [21] 刘彩玲, 王亚丽, 宋建农, 等. 基于三维激光扫描的水稻种子离散元建模及试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(15): 294–300.
- LIU Cailing, WANG Yali, SONG Jiannong, et al. Experiment and discrete element model of rice seed based on 3D laser scanning[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(15): 294–300. (in Chinese)
- [22] 吴孟宸, 丛锦玲, 闫琴, 等. 花生种子颗粒离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(23): 30–38.
- WU Mengchen, CONG Jinling, YAN Qin, et al. Calibration and experiments for discrete element simulation parameters of peanut seed particles[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(23): 30–38. (in Chinese)
- [23] 温翔宇, 袁洪方, 王刚, 等. 颗粒肥料离散元仿真摩擦因数标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 115–122, 142.
- WEN Xiangyu, YUAN Hongfang, WANG Gang, et al. Calibration method of friction coefficient of granular fertilizer by discrete element simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 115–122, 142. (in Chinese)