文章编号:1000-0615(2019)04-0946-12

DOI: 10.11964/jfc.20180511298

## 以CFD-DEM为基础的养殖槽排污性能及底坡优化

孙頔,刘飞\*

(江南大学物联网工程学院,轻工过程先进控制教育部重点实验室,江苏无锡 214122)

摘要:由于能提高资源利用率,减少环境污染,低碳高效池塘循环流水养殖(IPA)作为一项新型养殖技术被大力推广。为了提高养殖过程中的集污排污效率,本研究拟采用构造负坡底面的方法对养殖槽结构进行优化。通过建立二维养殖槽简化模型,结合计算流体力学—离散单元法(CFD-DEM)模拟计算与核偏最小二乘(KPLS)建模方法,建立槽内垂向流速分布与底面坡度和粗糙度的关系模型。在此基础上结合泥沙运动理论,获得了槽内颗粒起动流速与单宽输沙率模型,在构建颗粒起动和输运两方面的性能指标后,利用基于偏好的多目标粒子群算法(DP-MOPSO)寻求最优底面坡度。寻优结果显示,随着底面粗糙度的增加,最优坡度略有减小,范围为0.013~0.015;仿真实验结果显示,构造最优底坡可有效提高颗粒的起动概率和槽体的颗粒运输能力,且对于表面较为粗糙槽体,坡型底面在颗粒起动方面的优越性更为显著,说明通过构建底坡来改变水流结构,从而实现养殖槽排污性能的优化是合理的。

低碳高效池塘循环流水养殖IPA (intensive pond aquaculture)技术是美国大豆协会于2013年引 入中国的一种新型养殖技术,也是实现水产养 殖从农业生产过渡到工业化生产的有效手段。 该技术针对传统养殖模式造成的环境污染问题, 采用循环流水推动的方式,将饲料残渣、鱼类 排泄物等污染颗粒推送至养殖槽尾部,并通过 微滤机等集污排污设备对这些污染物进行集中 回收处理,在实现集约型养殖的同时,一定程 度上减少水体污染,提高鱼类的存活率<sup>[1]</sup>。

虽然排出污染颗粒、实现生态化养殖是工 业养殖的一个重要目标,但对于大容重、强黏 性的污染颗粒,目前的排污率仍较为有限<sup>[2]</sup>。综 合考虑增氧装置的理论动力效率、氧利用率以 及鱼类适应流速、能耗费用等问题,单纯的增 大推水力度并不能使养殖效益最大化<sup>[3]</sup>,因此通 过优化养殖槽结构,在有限流速的情况下使排 污性能最大化具有重要的研究意义。 研究发现,具有一定倾斜角度的含坡底面 会使水流的流速分布产生明显变化<sup>[4-5]</sup>,这为提 高水体的排污性能提供了可能。但对于含射流 水槽内的水流分布,以及槽体的底坡、粗糙度 等因素对流场的影响还缺乏研究。同时,以 Coleman<sup>[6]</sup>、张红武<sup>[7]</sup>和孙志林等<sup>[8]</sup>为代表的一批 学者对泥沙颗粒的起动和输运与水流的关系进 行了深入研究,在规律表述和计算公式方面获 得了相当的进展。

本研究以计算流体力学(CFD-DEM)为基础, 结合泥沙动力理论,针对悬移质和推移质2种颗 粒的不同优化目标,对颗粒的起动和输运2方面 进行研究。通过数学建模和CFD-DEM模拟相结 合的方式,对不同条件下含斜坡槽体中的水流 对颗粒状污染物的排放情况进行定量分析,并 利用多目标寻优的方法对斜坡角度进行优化,为 进行池塘循环流水养殖的养殖槽结构优化提供 了思路和理论依据。

收稿日期: 2018-05-25 修回日期: 2018-07-15 资助项目: 国家自然科学基金(61833007, 61773183) 通信作者: 刘飞, E-mail: fliu@jiangnan.edu.cn

#### 1 材料与方法

一般情况下,流动的水流中的颗粒根据其 运动状态不同可分为推移质和悬移质两类。对 于一个悬移质颗粒,当颗粒所受的水下重力与 水流作用在颗粒上的上举力相当时,颗粒保持 悬浮状态;当颗粒重力作用远大于水流对颗粒 的上举作用时,颗粒会发生沉底成为推移质, 此时若水流提供给颗粒的动力大于颗粒受到的 阻力,则颗粒会以滚动或滑动的方式起动,否 则颗粒一直沉积在底部产生污染(图1)。根据对 颗粒运动情况的分析,养殖槽结构优化的目标 可描述为,在相同的循环水流条件下,提高沉 底颗粒的起动概率,同时使悬移质颗粒尽可能 保持悬浮直至被成功输运。



#### 图1 颗粒运动示意图

实线颗粒为悬移质,虚线颗粒为推移质

#### Fig. 1 A schematic diagram of particle motion

Solid lines represent suspended particles and dashed lines represent bedload particles

由于需要结合数学模型对养殖槽的结构参 数寻优,本研究针对养殖槽内的水流结构与颗 粒运动情况分别建立仿真模型以辅助数学模型 的建立,最后利用含气液固的三相流模拟对结 果进行验证。

#### 1.1 养殖槽模型

图2为池塘循环流水系统中养殖槽及配套设备的结构图。由于实际养殖设备体积较大且结构复杂,为提高仿真效率,需要将养殖槽模型进行合理简化。由于微滤机和阻隔网过水性能良好,增氧管供氧平缓,不会对水流结构产生明显影响,且养殖槽外部有大面积水域,槽内水位无明显变化,因此将模型简化为含气液混合射流入口的二维非均匀流明渠。养殖槽模型长20m,高2.5m,其中水位高1.5m。上游入水口处的挡气板水平方向长2m,竖直方向高1m,其中0.5m位于水下(图3)。

模型边界条件设置:射流入口为0.5 m/s的速度入口,入口宽度为0.2 m,气相体积分数为0.5; 上游水流入口为明渠压力入口,入口宽度为0.8 m; 顶部为空气压力出口;下游出口为明渠压力出口; 壁面采用无滑标准壁面。考虑到入射流处的高 应变率,采用RNG k - ε模型作为湍流模型,并 通过标准壁面函数对近壁面流场进行求解<sup>[9]</sup>。对 于气液接触的自由表面,采用VOF法实现界面重 构,考虑到两相流界面瞬态变形的问题,采用 适合于非稳态流场的PISO算法对压力—速度场 进行求解<sup>[10]</sup>。

#### 1.2 离散元耦合模型

对于颗粒(离散相)在水(连续相)中的耦合模 拟,考虑离散相为稀疏相且含有自由液面,采 用欧拉—拉格朗日模型联合VOF模型处理明渠中 的固液气多相流问题<sup>[11]</sup>。联合计算的方法:首先 用VOF模型进行无颗粒的气液两相流计算,待流 场稳定后加入离散相进行计算。



#### 图 2 养殖槽结构示意图

Fig. 2 A schematic diagram of the structure of aquaculture tank



图 3 养殖槽仿真模型 Fig. 3 Simulation model of aquaculture tank

在欧拉—拉格朗日模型中,以受力平衡为基础的离散颗粒的运动方程<sup>[12]</sup>:

$$m_i \frac{\mathrm{d}\mathbf{v}_i}{\mathrm{d}t} = \sum_{j=1}^{k_i} \mathbf{F}_{pp,ij} + \mathbf{f}_{pf,i} + \mathbf{G}_i \qquad (1)$$

$$I_i \frac{\mathrm{d}\omega_i}{\mathrm{d}t} = \sum_{j=1}^{k_i} \mathbf{T}_{pp,ij} \tag{2}$$

式中,  $m_i$ 为颗粒i的质量, kg;  $I_i$ 为颗粒i的转动 惯量, kg·m<sup>2</sup>;  $\mathbf{v}_i$ 为颗粒i的速度, m/s;  $\omega_i$ 为颗粒 i的角速度, rad/s;  $\mathbf{F}_{pp,ij}$ 为颗粒i受颗粒j的合力, N;  $\mathbf{G}_i$ 为颗粒i所受重力, N;  $\mathbf{f}_{pf,i}$ 为颗粒i受流体 的力, N;  $\mathbf{T}_{pp,ij}$ 为颗粒i受颗粒j的合力矩, N·m;  $k_i$ 为颗粒i的接触颗粒个数(加粗字母表示向量, 下同)。

连续流体的计算通过求解N-S方程实现:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon \mathbf{u}) = 0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial \left(\rho \varepsilon \bar{\mathbf{u}}\right)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \varepsilon \bar{\mathbf{u}} \bar{\mathbf{u}}\right) =$$

$$-\nabla P - \mathbf{F}_{e} + \nabla \cdot \left(\varepsilon \tau\right) + \rho \varepsilon \mathbf{g} + \nabla \cdot \left(-\rho \overline{\mathbf{u'u'}}\right)$$
(4)

式中, $\varepsilon$ 为体积分数项;**u**为流体速度,m/s;**ū** 为流体平均流速,m/s;**u**'为流体脉动流速,m/s;  $\rho$ 为流体密度,kg/m<sup>3</sup>;g为重力加速度,m/s<sup>2</sup>;*P* 为流体压力,N;**F**<sub>e</sub>为动量汇,N/m<sup>3</sup>; $\tau$ 为流体 黏性应力张量,N/m。

颗粒计算时引入曳力(Gidaspw曳力模型)、 升力(Saffman升力模型)、虚拟质量力和压力梯度 力<sup>[13]</sup>。在颗粒间的相互碰撞和颗粒对流场作用可 忽略的情况下,如计算悬移质输运时,采用基 于欧拉—拉格朗日的离散相模型(DPM)直接获得 颗粒的运动轨迹和分布信息<sup>[11]</sup>。

沉积的推移质颗粒在水流中的运动情况与

颗粒的形状、密度等物性特征相关,使用EDEM 仿真软件构建不同物性的颗粒与Fluent耦合模拟, 可更精确地还原颗粒对流场的作用以及颗粒与 颗粒、颗粒与壁面的碰撞情况<sup>[14]</sup>。粒间与粒壁的 接触模型采用适用于含湿物料的Hertz-Mindlin with JKR模型。将颗粒直径D和尺寸比例k<sub>l</sub>作为 颗粒的形状参数,颗粒密度以及颗粒与壁面接 触的摩擦系数作为颗粒的物性参数(图4)。实验 时将以上会明显影响颗粒运动的参数设置为可 变参数,其余各参数设置为定值,参数设置如 表1所示<sup>[15]</sup>。





(a)条形颗粒; (b)球形颗粒

Fig. 4 Polluting particle model

(a) stripe particles; (b) spheroidal particles

#### 1.3 颗粒起动流速模型

针对沉积颗粒的起动,通过受力平衡原则 建立颗粒起动流速模型。在传统的起动受力模 型中,颗粒在水下主要受力:水流提供的拖曳 力F<sub>D</sub>与上举力F<sub>L</sub>,水下重力G以及在大水深和细 粒径情况下不能忽略的附加水下压力W和颗粒黏 结力F<sub>P</sub>。它们的表达式及相关系数的取值<sup>[7]</sup>:

$$F_D = C_D \,\frac{\pi}{4} \,\frac{\rho}{2} \,D^2 u_b^2 \tag{5}$$

$$F_L = C_L \left(\frac{\pi}{4} + k_l - 1\right) \frac{\rho}{2} D^2 u_b^2$$
(6)

#### 表1 颗粒参数设置

 Tab. 1
 Setting of particle parameters

参数	数值
parameters	value
颗粒泊松比	0.4
poisson ratio of particles	
壁面泊松比	0.2
poisson ratio of wall	
颗粒剪切模量/Pa	$1.1 \times 10^{7}$
shear modulus of particles	
壁面剪切模量/Pa	$1.8 \times 10^{10}$
shear modulus of wall	
粒壁恢复系数	0.45
coefficient of restitution between particles and wall	
粒间恢复系数	0.6
coefficient of restitution between particles	
颗粒密度/(kg/m³)	1.05×10 <sup>3</sup> ~
density of particles	$2.65 \times 10^{3}$
粒壁滑动摩擦系数	0.1~0.9
coefficient of sliding friction between particles and wall	
粒壁滚动摩擦系数	0.01~0.09
coefficient of rolling friction between particles and wall	
粒径/mm	1~10
particles' diameter	
尺寸比例	1~3
length-width ratio of particles	

$$G = \left[\frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{4} \left(k_l - 1\right)\right] \left(\rho_s - \rho\right) g D^3 \tag{7}$$

$$F_P = a_P \rho k_l D \left(\frac{\gamma'}{\gamma_c'}\right)^{6.6} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right) g^{0.33} \upsilon^{1.34} \tag{8}$$

$$W = a_W \left(\frac{\gamma'}{\gamma_c'}\right)^{6.6} \rho D \left[\pi + 2\left(k_l - 1\right)\right] \mathsf{g}h\delta \qquad (9)$$

式中, D为粒径, m;  $C_D$ 为拖曳力系数, 取0.47 (滚动)和0.78(滑动);  $C_L$ 为上举力系数, 取0.1(滚动) 和0.18(滑动);  $a_W$ 为附加质量力系数, 取0.0059;  $a_P$ 为黏结力系数, 取3.45;  $\rho_s$ 为颗粒密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\gamma'$ 为颗粒干容重, N/m<sup>3</sup>;  $\gamma_c'$ 为颗粒稳定干容重, N/m<sup>3</sup>; h为水深, m;  $u_b$ 为瞬时起动底速, m/s;  $\delta$ 为薄膜水厚度参数, 取0.213×10<sup>-6</sup> m。

颗粒起动通常分为滑动和滚动两种模式<sup>[16]</sup>。 由于养殖槽材料表面较为光滑,颗粒起动的阻力效果主要来自于滑动摩擦力*F*<sub>s</sub>和滚动摩擦力*F*<sub>r</sub>, 图5为颗粒在滑动起动和滚动起动模式下的坡面 起动受力模型,根据受力分析可以得到各模式 下的起动条件:

$$\begin{cases} F_D + f_s F_L \ge (G + F_P + W) \\ \times (\sin \theta + f_s \cos \theta) & \mbox{ $\Re$} \mbox{ $\Pi$} \mbox{ $\Pi$$



**图 5 颗粒受力模型** (a)滑动受力模型; (b)滚动受力模型

Fig. 5 Particle force model

(a) sliding force model; (b) rolling force model

式中 $f_s$ 为滑动摩擦系数; $f_r$ 为滚动摩擦系数; $\alpha$ 为拖曳力到颗粒质心的相对垂直距离,m; $\beta$ 为上 举力到颗粒质心的相对水平距离,m; $\theta$ 为坡角。

对于单个颗粒而言,起动模式取决于颗粒 处于临界起动状态时率先满足的起动条件。通 过对不同物性颗粒的起动模拟实验,在收集了 189组实验数据后,采用二项逻辑回归法构建起 动模式判别式:

$$P_m(z) = \frac{1}{e^{-z} + 1}$$

$$z = -66.49k_l - 3.10\rho_s + 193.76f_s \qquad (11)$$

$$-249.06f_r + 207.70$$

当P<sub>m</sub> ≥ 0.5时认为颗粒以滚动模式起动,否则以滑动模式起动。将式(5)~(9)带入式(10)整理,综合考虑起动模式可以得到颗粒起动流速模型:

$$\begin{cases} u_{sb} = \sqrt{M_s \varphi} & P_m \leqslant 0.5 \\ u_{rb} = \sqrt{M_r \varphi} & P_m > 0.5 \end{cases}$$
(12)

$$M_s = \frac{8(\sin\theta + f_s\cos\theta)}{0.78 + 0.72\left(\frac{1}{4} + \frac{k_l - 1}{\pi}\right)f_s}$$
(13)

$$M_r = \frac{8\left[(f_r + k_l - 1)\cos\theta + \sin\theta\right]}{0.47 + 0.4\left(\frac{1}{4} + \frac{k_l - 1}{\pi}\right)\left[0.3 + f_r\left(k_l - 1\right)\right]} \quad (14)$$

$$\varphi = \left(\frac{k_l}{4} - \frac{1}{12}\right) \frac{\rho_s - \rho}{\rho} gD + 1.1 \frac{k_l}{D} \left(\frac{\gamma'}{\gamma_c'}\right)^{6.6} \frac{\rho_s - \rho}{\rho} g^{0.33} \nu^{1.34} + (15)$$
$$0.001 9 \left(\frac{\gamma'}{\gamma_c'}\right)^{6.6} \left(1 + \frac{2k_l - 1}{\pi}\right) \frac{gh\delta}{D}$$

将利用仿真数据验证模型的有效性,验证 结果如图6所示,相对RMSE=9.60%,决定系数 *R*<sup>2</sup>=0.982,模型的精度较高,可以满足工程计算 需要。





#### 1.4 流速分布模型

对养殖槽内的水流情况进行模拟,约300 s 后流场不随时间产生明显变化。图7为壁面粗糙 度为1 mm时,各坡度槽体内水流流速云图。由 于射流与周围水体间存在明显压力差,使养殖 槽上游的一段区域内出现紊乱的回流,约8 m后 水流分布趋于平稳(回流长度与射流流速有关)。 为满足工程设计需要,考虑底坡η= tanθ和底面材 料粗糙度n对流速分布的影响,为确保建模时量 纲的一致性,采用粗糙度与水深的比值作为无 量纲的相对粗糙度(n'=n/h),将测量点高度与水 深的比值作为无量纲的相对高度(n'=n/h),测量 点流速与垂线平均流速的比值作为无量纲的相

从图7中可以看出,一定程度的底坡下槽体 底部的低流速区变窄,相较于平底而言,近底



#### 图 7 不同底坡下流速云图

#### Fig. 7 Velocity contours of different bottom slopes

部相对流速明显增大。为了避免结果的偶然性, 在与入流口的水平距离x分别为11、13、15、17 m 的截面处设置4组流速监测点。图8为底面粗糙度 为0.3 mm时,各断面处流速分布情况。显然,虽 然同一工况下不同断面处的流速云图略有不同, 但流速分布曲线形状大体相同。说明在经过回 流区后,随着水流发展,流速分布虽会有所变 化但总体趋于稳定。将各截面处的流速分布取 平均值以表征各工况下的流速分布情况,处理 后的流速分布曲线与图8中的曲线形状类似,即 近底区域的流速符合对数分布,远底处则近似 直线分布<sup>[17]</sup>,因此可将流速分布律表示为:

$$\begin{cases} \frac{u_c}{U} = a \ln \frac{1\ 000y}{h} + b \\ \frac{u_f}{U} = c \frac{y}{h} + d \end{cases}$$
(16)

式中y为流速点高度, m; U为垂线平均流速, m/s; u<sub>c</sub>为近底区流速, m/s; u<sub>f</sub>为远底区流速, m/s; a, b,c,d为待定系数。

对20种不同粗糙度[0.1, 0.3, 1, 2, 3]mm和不同 底坡[0, 0.005, 0.010, 0.015]组成的各种工况进行全 实验分析。利用牛顿迭代法对式(16)中的待定系 数*a、b、c、d*进行拟合,拟合结果如图9所示。 可以看出,各系数与η、*n*/之间均呈现非线性关 系,其中*a、b*的变化较为规律,故采用核偏最小 二乘(KPLS)算法建立*a、b*与η、*n*/间的预测模型。 KPLS算法可以通过非线性映射函数将低维的非 线性关系投射到高维的特征空间,将其转化为 高维的线性关系继而实现非线性建模。由于参 数模型没有先验知识,因此选用高斯核函数进



图 8 不同工况下的垂线流速分布



(a) x=11 m; (b) x=13 m; (c) x=15 m; (d) x=17 m





Fig. 9 Variation of parameters with relative roughness

行非线性映射,具体算法可参考文献[18]。

参数c、d与a、b之间具有强耦合关系(垂线 平均流速不变),直接采用线性回归拟合,各系 数的函数表达式:

$$c = -10.05a - 2.37b + 2.41 \tag{17}$$

$$d = 6.1a + 1.18b - 0.22 \tag{18}$$

将以上各系数的计算结果带入式(16),并利 用n'=0.0004时各坡度的测试数据对计算结果 进行交叉验证。验证结果如图10所示,决定系数 R<sup>2</sup>=0.991,相对RSEM=2.46%,表明上述建模方 法可以有效预测养殖槽内的垂线水流分布情况。







#### 1.5 悬移质输沙率

一般用于投食上层鱼类的饲料密度与水相 当,不易沉底,此时提高水体对悬浮颗粒的运 输能力显得更为重要。通过计算理论的悬移质 输沙率,可以对水槽的悬移质输运能力进行定 量分析。

对于不冲不淤的平衡床面,悬移质单宽输 沙率可通过含沙量与水流流速分布延垂线的积 分获得<sup>[19]</sup>。

$$q = \int_{h_o}^{h} u(y) C(y) dy$$
  
=  $\int_{h_o}^{h_s} u_c(y) C_c(y) dy + \int_{h_s}^{h} u_f(y) C_f(y) dy$  (19)

式中, q为悬移质单宽输沙率, kg/s;  $C_c$ 为近底 区悬移质浓度分布;  $C_f$ 为远底区悬移质浓度分布;  $h_o$ 为浓度参考高度, m;  $h_s$ 为垂线流速分布临界 高度, m。

根据仿真得到的垂线流速分布情况, h<sub>o</sub>和 h<sub>s</sub>分别取1000/h和0.07h。基于泥沙扩散平衡理论 和Larsen的修正紊动扩散系数<sup>[20]</sup>,利用已有的流 速分布式(16)计算悬移质浓度分布:

$$C_{c}(y) = \left(\frac{h_{o}}{y}\right)^{A} C_{s}$$

$$C_{f}(y) = e^{(0.07h - y)B} \left(\frac{h_{o}}{0.07h}\right)^{A} C_{s}$$
(20)

$$A = \frac{aU\omega}{\sigma u_*^2}, B = \frac{cU\omega}{\sigma u_*^2 h}$$
(21)

式中,A,B为悬浮指标; $C_s$ 为参考点悬移质浓度;  $\omega$ 为悬移质沉降速度,m/s; $u_*$ 为摩阻流速,m/s;  $\sigma$ 为混掺比例系数。

将式(20)带入式(19)积分可得:

$$q = U \frac{C_{s}h_{o}^{A}}{1-A} \left[ 0.07h^{1-A} \left( a \ln \frac{1\ 000h_{s}}{h} - a + b \right) -s^{1-A} \left( a \ln \frac{1\ 000h_{o}}{h} - a + b \right) \right]$$
(22)  
$$-U \frac{C_{s}}{B} \left( \frac{h_{o}}{0.07y} \right)^{A} \left[ e^{-(h-h_{s})B} \left( c + \frac{c}{Bh} + d \right) - \left( 0.07c + \frac{c}{Bh} + d \right) \right]$$

可见单宽输沙率与断面平均流速成正比, 并与参考点含沙量、水深和悬浮指标有关。

2 结果

#### 2.1 性能指标建立

为了对底面坡度进行寻优求解,必须构建 合理的性能指标以构成寻优的目标函数。对于 底面淤积颗粒和水流中的悬浮颗粒,分别从颗 粒起动和水流输沙率2方面构建性能指标。 起动性能指标 根据流量守恒原则,当 水深不变时,垂线水流平均流速与曝气口流量 成正比。利用式(16),将颗粒的底面瞬时起动流 速*u*<sub>b</sub>转换为起动所需的垂线平均流速*U*<sub>b</sub>:

$$U_b = \frac{u_b}{a \ln \frac{1\ 000\lambda}{h} + b} \tag{23}$$

式中, $\lambda$ 为流速作用点,取 $\frac{2}{3}D$ 。显然,相同流 量下 $U_{0}$ 的值越小,颗粒起动的概率越大。

为了只体现坡度对颗粒起动的影响而不考 虑颗粒本身的起动流速,将不同坡度下起动垂 线平均流速的比值作为评价起动性能的标准。由 于颗粒的物性各异,将颗粒的D、k<sub>l</sub>、f3个参数 采样后,采用平均化的方法去除颗粒结构差异 的影响,构建如下起动性能指标:

$$Q_{1}(\eta, n) = \frac{1}{N} \sum_{f} \sum_{k_{l}} \sum_{D} \frac{U_{b,\eta}}{U_{b,0}}$$
(24)

式中,N为采样颗粒个数。由于底面粗糙度与养 殖槽材料有关,性能指标中的参数n需要结合实 际情况确定。

输沙性能指标 与起动性能类似,通过 比较不同底坡下的单宽输沙率来体现坡度对悬 移质运输性能的影响。根据式(22)可以看出输沙 率与垂线平均流速U成正比,为了去除其影响, 同样用比值的形式作为评价槽体输沙性能的标 准,其值与悬浮指标A、B有关。

悬浮指标体现了悬浮颗粒分布的不均匀程度,悬浮指标越小则悬移在垂线上的分布越均匀,反之则说明悬移质集中于底部区域<sup>[19]</sup>。由于底部流速较慢,水流对颗粒的带动能力弱,因此当悬浮指标越大时,悬移质输沙率q越小,意味着水流能够输运的悬浮颗粒减少,颗粒沉底概率增大。在养殖槽中,悬浮颗粒的分布情况由饲料投放方式、鱼类密度和流场等多个复杂因素决定,悬浮指标难以测量,因此采用平均化的方法减小悬浮指标对性能指标的影响,构建如下输沙性能指标:

$$Q_2(\eta, n) = \frac{1}{M} \sum_B \sum_A \frac{q_0}{q_\eta}$$
(25)

式中, M为采样工况个数。

图11显示了不同悬浮指标下,无坡槽体输 沙率与含坡槽体输沙率比值的变化情况。可以 看出q<sub>0</sub>/q<sub>n</sub>随A的变化曲线近似"S型",且当A小于 0.1或大于3时,输沙比接近定值。根据曲线特征,



图 11 输沙比随悬浮指标的变化关系 Fig. 11 Variation of sediment transport ratio with suspension indexes

A的采样值可选为[0.1, 1, 1.5, 2, 3], B的采样值可 等间隔选取。同时从图中可以发现,当悬浮指 标很小时,输沙比的值趋近于1,这是由于此时 的悬浮颗粒垂向分布均匀,大多数颗粒处于远 底的直线流速分布区,而底坡对流速分布的主 要影响在于增大近底区流速,因此坡面对均匀 分布的悬移质的输沙性能的改善效果不甚显著。

#### 2.2 坡度优化

综合对以上2个性能指标的分析,底坡优化 问题可以描述为如下含约束的多目标寻优问题:

$$\min_{\eta} \quad Q_1(\eta, n), Q_2(\eta, n) 
st. \quad Q_1 \leq 1 
\quad Q_2 \leq 1 
\quad 0 \leq \eta \leq 0.02$$
(26)

对于多目标寻优问题,采用基于帕累托最优的DP-MOPSO算法进行求解<sup>[21]</sup>。首先通过性能指标*Q*<sub>1</sub>和*Q*<sub>2</sub>获取优化问题的帕累托前列,然后根据距离函数从中挑选出与偏好点最接近的解群,经多次迭代后寻找出最优解。为了避免出现多组最优解,使用如下改进后的距离函数<sup>[22]</sup>:

$$d_{P} = \frac{\left| w_{1} \frac{Q_{1} - r_{1}}{Q_{1}^{\max} - Q_{1}^{\min}} - w_{2} \frac{Q_{2} - r_{2}}{Q_{2}^{\max} - Q_{2}^{\min}} \right|}{-\ln\left[ \sqrt{\sum_{i} w_{i} \left( \frac{Q_{i} - r_{i}}{Q_{i}^{\max} - Q_{i}^{\min}} \right)} \right]} \quad (27)$$

式中, $w_i$ 为目标权重; $r_i$ 为目标偏好值; $Q_i^{\max}$ 、

 $Q_i^{\min}$ 分别为目标最大、最小值。

与传统的加权欧氏距离相比, d<sub>p</sub>保证了在 出现多组最优解对应一个最优值时, 使性能指 标差异间最小的一组解可以被挑选出来。在确 定每一次迭代的全局最优解时的适应度函数可 表示为:

$$fitnessX_i = \frac{1}{r_{n,i} + d_{p,i}}$$
(28)

式中,r<sub>n</sub>为帕累托级数。

不同权重下的寻优结果显示,随着相对粗糙度的增大,最优坡度逐渐减小。同时对于不同的权重比例,寻优结果差别不大,各寻优条件下的最优坡度范围为0.01~0.015(图12),说明2个性能指标的最优解较为接近,水流结构是影响排污性能的主要因素。

#### 2.3 结果验证

在实际情况中,由于水流存在不规则的湍 流,槽体内的颗粒状态难以确定为悬浮或是沉 底。为了避免结果的偶然性,对2种状态的颗粒 及相应的性能指标分别进行验证,以避免在坡 度优化后,出现某一性能的提高是以折损另一 性能为代价的情况。

为了简化计算,构造长宽高为1m×1m× 1.5m的三维槽体,将流场分布实验得到的断面 流速分布作为初始入口流速,待水流平稳后在槽



#### 图 12 不同权重下最优坡度随相对粗糙度的变化关系

# Fig. 12 Variation of optimal slopes with relative roughness under different weights

体底部随机生成沉积颗粒,以验证槽体的推移 质起动性能。仿照正交实验的做法,将颗粒的 摩擦系数、尺寸比例和密度作为影响因素,按 表2所示水平构造9种实验颗粒共900个,颗粒半 径符合以1.5 mm为均值、0.5 mm为方差的正态分 布。在断面平均流速均为0.36 m/s,壁面相对粗 糙度为0.000 3、0.001时的颗粒起动情况如表3 所示。当槽底为最优坡度时,颗粒的起动率较 无坡底面提高20%~50%,且明显大于其他坡度, 说明一定程度的坡型底面可有效提高槽体的颗 粒起动性能。

表 2 验证实验的颗粒模型参数

 Tab. 2
 Particle model parameters for verification experiment

水平 - levels	影响因素	influence factor	
	摩擦系数 $(f_s, f_r)$ friction coefficient	密度/ (kg/m <sup>3</sup> ) density	尺寸比例 size ratio
1	(0.5, 0.02)	1 200	1
2	(0.6, 0.05)	1 500	1.75
3	(0.7, 0.08)	1 800	2.5

对槽体输沙性能的验证采用二维悬移质模 拟的方式<sup>[11]</sup>。在二维槽体*x*=10 m断面处入射颗粒 共3 500个,粒径符合均值为5 mm的roain-rammler分布,颗粒初始速度与水流速度相同。槽体 底部使用捕捉条件以确保发生沉底的颗粒不再 被输运,尾部水流出口使用逃逸条件获取被成 功输运的悬浮颗粒。由于入射颗粒的质量流量 具有一定的随机性,通过统计60 s内逃逸颗粒与

http://www.scxuebao.cn

入射颗粒的总质量的比值来体现槽体对悬浮颗 粒的输运性能。出于对最坏情况的考虑,在进 行验证实验时,颗粒在截面内的射入位置是随 机的,即颗粒的垂向分布均匀。根据对输沙性 能指标的分析,此时的悬浮指标趋于0且输沙比 接近1(图11)。验证结果显示,在最优坡度附近 槽体的悬移质输运性能提高了2%左右(图13), 说明在颗粒分布均匀的情况下,底坡对输沙性 能的影响较小,但仍有一定程度的改善,这与 输沙性能分析结果相吻合。

结合2方面的验证结果可以认为,通过降低 悬浮颗粒的沉积率以及提高沉底颗粒的起动率, 坡型底面能够提高槽体内污染颗粒的排放率,且 通过建立数学模型和优化指标,采用DP-MOPSO 对底面坡度进行寻优的结果是合理的。

#### 3 讨论

本研究提出通过构造负坡型底面养殖槽的 方法改善IPA技术中排污率不足的问题。应用CFD-DEM对养殖槽模型中的水流和颗粒运动情况进 行模拟分析,结合模拟数据以及机理与回归建 模方法,建立了养殖槽内的颗粒起动流速、垂 向水流分布以及单宽输沙率数学模型。针对推 移质和悬移质颗粒间不同的运动方式,通过构 建颗粒起动及输运性能指标,采用DP-MOPSO寻 优方法对底面坡度进行优化。验证结果显示,由 于坡型底面影响了水流分布和颗粒的受力及扩 散,从而导致槽体内颗粒运动状态发生改变,因 此一定程度的底坡可以有效地提高悬浮颗粒的 不沉积概率和沉底颗粒的再起动概率。

由于IPA技术的应用对象为大型养殖池塘, 设备规模较大,考虑到设备建造及施工时的可 实施性,研究坡度约束在0~0.02范围内,寻优结 果显示,最优底面坡度约为0.013~0.015,满足寻 优约束。在IPA技术中,污染的排放完全依赖于 水流的推动,因此优化的本质是寻找使排污效 果达到最优的流场。需要注意的是,在利用构 建底坡的方法进行槽体改造时,坡度不仅会影 响水流的分布而且会直接改变推移质颗粒的受 力情况。但在进行理论计算和仿真实验时发现, 由于推移质颗粒的起动阻力主要来自于自身形 状或表面粗糙度带来的摩擦阻力,在一定的坡 度内,颗粒受力的变化远不及水流流速的变化。 因此与利用颗粒自身重力实现集污的方法相比,

Tab. 3Verification of particles incipient performance										
相对粗糙度	坡度	起动个数/个	起动率/%	相对粗糙度	坡度	起动个数/个	起动率/%			
relative roughness	slope	number of particles in motion	motion ratio	relative roughness	slope	number of particles in motion	motion ratio			
0.000 3	0	272	30.3	0.001	0	2	0.5			
	0.005	259	28.7		0.005	164	18.3			
	0.01	432	48		0.01	328	36.5			
	0.014 7	520	57.7		0.014 2	457	50.7			
	0.02	425	47.2		0.02	245	27.2			



#### 图 13 输沙性能验证结果

#### Fig. 13 Verification of sediment transport performance

基于改变水流分布的排污优化方法对养殖槽的 改建成本较小,更适用于大型养殖系统。

此外,目前的IPA技术中养殖槽的材料还没 有统一的标准,往往是养殖者根据自己的经济 情况自行选择。由于IPA技术的电气自动化程度 高,整体设备的成本偏高,导致小规模的养殖 者在选择养殖槽时往往不会使用表面光滑、排 污性能好但价格昂贵的玻璃钢等材料, 而选择 价格低廉、表面相对粗糙的混凝土等。根据验 证结果,在槽体表面粗糙度较大时,坡型底面 在颗粒起动方面的优越性更为显著,这意味着 养殖者可以通过优化养殖槽结构大幅减少养殖 设备的成本,从而提高经济效益。

#### 参考文献:

- [1] Midilli A, Kucuk H, Dincer I. Environmental and sustainability aspects of a recirculating aquaculture system[J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2012, 31(4): 604-611.
- [2] 黄滨,刘滨,雷霁霖,等.工业化循环水福利养殖关键 技术与智能装备的研究[J]. 水产学报, 2013, 37(11): 1750-1760.

Huang B, Liu B, Lei J L, et al. The research on key

technology and intelligent equipment of aquaculture welfare in industrial circulating water mode[J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(11): 1750-1760(in Chinese).

- 王玮,陆庆刚,顾海涛,等.微孔曝气增氧机的增氧能 [3] 力试验[J]. 水产学报, 2010, 34(1): 97-100. Wang W, Lu Q G, Gu H T, et al. The oxygen-enriched capacity experiment of micropore aerator[J]. Journal of Fisheries of China, 2010, 34(1): 97-100(in Chinese).
- [4] 万俊,何建京,王泽.光滑壁面明渠负坡流速分布特 性[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(4): 32-35. Wan J, He J J, Wang Z. Velocity distribution characteristics in smooth open channel with adverse slope[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(4): 32-35(in Chinese).
- Song T, Graf W H. Velocity and turbulence distribution [5] in unsteady open-channel flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 122(3): 141-154.
- Coleman N L. Effects of suspended sediment on the [6] open-channel velocity distribution[J]. Water Resources Research, 1986, 22(10): 1377-1384.
- 张红武. 泥沙起动流速的统一公式[J]. 水利学报, 2012, [7] 43(12): 1387-1396. Zhang H W. A unified formula for incipient velocity of sediment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(12): 1387-1396(in Chinese).
- [8] 孙志林, 邵凯, 许丹, 等. 浑水推移质分组输沙研究[J]. 水利学报, 2012, 43(1): 99-105. Sun Z L, Shao K, Xu D, et al. Fractional bedload transport in turbid waters[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(1): 99-105(in Chinese).
- 曲延鹏,陈颂英,王小鹏,等.不同湍流模型对圆射流 [9] 数值模拟的讨论[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(6): 957-959.

### 表 3 颗粒起动性能验证结果

Qu Y P, Chen S Y, Wang X P, *et al.* Discussion on the numerical simulation of ax-symmetric jet with different turbulent model[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(6): 957-959(in Chinese).

- [10] Wanik A, Schnell U. Some remarks on the PISO and SIMPLE algorithms for steady turbulent flow problems[J]. Computers & Fluids, 1989, 17(4): 555-570.
- [11] 肖柏青, 李然, 戎贵文. 基于欧拉-拉格朗日方法的明渠 中悬移质淤积数值模拟[J]. 水力发电学报, 2015, 34(9): 46-51.
  Xiao B Q, Li R, Rong G W. Eulerian-Lagrangian simulations of suspended sediment deposition in open

channels[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(9): 46-51(in Chinese).

- [12] Tong Z B, Zheng B, Yang R Y, et al. CFD-DEM investigation of the dispersion mechanisms in commercial dry powder inhalers[J]. Powder Technology, 2013, 240: 19-24.
- [13] Chen X, Li Y, Niu X J, et al. A general two-phase turbulent flow model applied to the study of sediment transport in open channels[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2011, 37(9): 1099-1108.
- [14] 喻黎明, 邹小艳, 谭弘, 等. 基于CFD-DEM耦合的水力 旋流器水沙运动三维数值模拟[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 126-132.

Yu L M, Zou X Y, Tan H, *et al.* 3D numerical simulation of water and sediment flow in hydrocyclone based on coupled CFD-DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 126-132(in Chinese).

[15] 闫银发,孟德兴,宋占华,等. 槽轮式补饲机颗粒动力
 学数值模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(S1):
 249-253.

Yan Y F, Meng D X, Song Z H, *et al.* Particle kinetic simulation and experiment for flute-wheel feeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society for

Agricultural Machinery, 2016, 47(S1): 249-253(in Chinese).

- [16] 程烨,张根广,吴彰松,等. 泥沙不同起动模式的起动 概率对比分析[J]. 泥沙研究, 2017, 42(5): 31-35.
  Cheng Y, Zhang G G, Wu Z S, *et al.* Comparison of entrainment probabilities in different incipient motion models[J]. Journal of Sediment Research, 2017, 42(5): 31-35(in Chinese).
- [17] Wang X K, Wang Z Y, Yu M Z, *et al.* Velocity profile of sediment suspensions and comparison of log-law and wake-law[J]. Journal of Hydraulic Research, 2001, 39(2): 211-217.
- [18] Bai Y F, Xiao J, Yu L. Kernel partial least-squares regression[C]//Proceedings of 2006 IEEE International Joint Conference on Neural Network. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2006: 1231-1238.
- [19] 孙志林, 张超凡, 杜利华, 等. 非均匀悬移质输沙率[J]. 水利学报, 2016, 47(4): 501-508.
  Sun Z L, Zhang C F, Du L H, *et al.* Transport rate of nonuniform suspended load[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(4): 501-508(in Chinese).
- [20] Jeong G S. A sediment concentration distribution based on a revised prandtl mixing theory[J]. Journal of Korea Water Resources Association, 1997, 30(1): 3-13.
- [21] 王丽萍, 江波, 邱飞岳. 基于决策偏好的多目标粒子群
   算法及其应用[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(1):
   140-148.

Wang L P, Jiang B, Qiu F Y. Multi-objective particle swarm optimization based on decision preferences and its application[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(1): 140-148(in Chinese).

[22] Zhou X, Shen J, Li Y G. Preference-based multiobjective artificial bee colony algorithm for optimization of superheated steam temperature control[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2014, 30(4): 449-455.

# Pollution discharge performance and bottom slope optimization of aquaculture tanks for intensive pond aquaculture

SUN Di, LIU Fei\*

(Key Laboratory of Advanced Control for Light Industry Processes, College of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract**: Because of improving resource utilization and reducing environmental pollution, IPA (Intensive Pond Aquaculture) technology has been widely promoted as a new breed aquaculture technology. In order to improve the efficiency of pollution collection and discharge in the process of aquaculture, the method of constructing negative slope bottom is used to reconstruct aquaculture tanks. By establishing a two-dimensional simplified model of aquaculture tank and combining the CFD-DEM simulation and KPLS (Kernel Partial Least-Squares Regression) modeling method, a model that can reflect the relationship between the vertical velocity distribution and the bottom slope was established. On this basis, the model of the particle incipient velocity and the single wide suspended load transport rate in the tank was obtained by the theory of sediment motion. After setting up two performance indexes of particle motion and transportation, the DP-MOPSO (Preference-based Multi-objective Particle Swarm Optimization) method was used to get the optimal bottom slope. The optimization results show that with the increase of the bottom roughness, the optimal gradient is slightly reduced and the range is about 0.013-0.015. The simulation results show that the optimal bottom slope can effectively improve the moving probability and the transport capacity of particles, and for the rough surface, the superiority of the slope bottom is more significant. It shows that it is reasonable to optimize the discharge performance of aquaculture tanks by constructure.

**Key words**: intensive pond aquaculture; CFD-DEM; flow velocity distribution; particle movement; equipment optimization; numerical simulation

Corresponding author: LIU Fei. E-mail: fliu@jiangnan.edu.cn

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (61833007, 61773183)