

舟山近海海域养殖水体悬浮物沉降特性试验研究

桂福坤¹, 方 帅¹, 曲晓玉², 张清靖³, 张学芬¹, 冯德军^{1*}

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

2. 浙江海洋大学水产学院, 舟山 316022;

3. 北京市水产科学研究所, 渔业生物技术北京市重点实验室, 北京 100068)

摘 要: 了解海水中悬浮物颗粒的静沉降特性, 对于海水工厂化养殖的水源处理具有重要指导意义。该研究以舟山长峙岛海域为例, 通过 2019 年 7—9 月进行的静沉降试验, 分析总结水体中悬浮物浓度和粒径分布随时间的变化规律, 采用斯托克斯沉速公式和重复深度吸管法计算悬浮物颗粒的沉降速率。结果表明: 1) 在悬浮物静沉降特性试验中, 沉降装置直径的小幅度变化对沉降结果的影响基本可以忽略; 2) 舟山近海海域表层海水悬浮物的粒径分布属于粉砂范畴, 很难通过静沉降的方式完全除去; 3) 沉降初期, 以大颗粒悬浮物沉降为主, 沉降速率大; 沉降中后期, 以小颗粒悬浮物絮凝沉降为主, 沉降速率小; 4) 通过重复深度吸管法计算得到舟山近海海域悬浮物沉降速率范围为 0.001~0.01 cm/s, 并通过非线性拟合, 得到悬浮物平均沉降速率与悬浮物浓度之间的 Logistic 曲线关系。研究结果可以为舟山近海海域工厂化水产养殖用水悬浮物去除提供数据支撑。

关键词: 水产养殖; 粒径; 悬浮物浓度; 静沉降; 沉降速率

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.10.025

中图分类号: S238

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-10-0206-07

桂福坤, 方帅, 曲晓玉, 等. 舟山近海海域养殖水体悬浮物沉降特性试验研究[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 206-212.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.10.025 http://www.tcsae.org

Gui Fukun, Fang Shuai, Qu Xiaoyu, et al. Experimental study on settling characteristics of suspended solids in seawater of nearshore in Zhoushan of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(10): 206-212. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.10.025 http://www.tcsae.org

0 引 言

工厂化水产养殖利用现代工业技术开展高密度、集约化的水产养殖, 能够有效降低养殖过程对外界环境的依赖与污染, 提高养殖用水的利用率, 提升水产品质量和产量, 是中国未来陆基水产养殖的重要模式^[1-2]。水处理技术贯穿于工厂化养殖模式的始终^[3], 包括源头水处理、养殖池内水处理以及养殖尾水处理, 是实现养殖节水 and 减少环境污染的重要保障。

水体中悬浮颗粒物的沉降特性与颗粒粒径分布、质量浓度等密切相关^[4-5], 是研究工厂化水产养殖水处理技术的重要前提。目前, 已有的悬浮物沉降特性研究大多集中在海岸工程^[6-8]、湖泊生态环境调查^[9-10]、市政污水处理^[11-12]和网箱养殖对海区环境影响评价^[13-15]等方面, 然而在工厂化水产养殖中的研究相对较少, 且主要集中在养殖尾水内悬浮颗粒的沉降特性方面^[16]。刘长发等^[17]研究了牙鲆养殖循环系统中悬浮固体颗粒的产生量以及斜板式沉淀槽中沉积颗粒物的粒径分布和沉降特性, 得到溢

流率与去除率之间的关系, 为沉淀槽结构参数设定提供了参考。张成林等^[18]研发了用于去除养殖系统中固体悬浮颗粒物的多向流重力沉淀装置, 并研究了水力停留时间、斜管规格和固体悬浮颗粒物粒径与去除率的关系。严峻等^[19]通过静沉降试验研究了对虾大棚养殖废水中悬浮物的性质和静沉降规律, 为优化对虾养殖废水的达标处理技术提供了参考依据。季明东等^[20]研究了乌龟温室养殖水中悬浮颗粒物的沉降特性, 确定了沉淀池的溢流速率和颗粒物去除率之间的关系, 为龟鳖养殖池和沉淀池设计优化提供了依据。袁新程等^[21]测定了养殖池塘内养殖废水中总悬浮物、总氨氮、亚硝酸盐、硝酸盐、总氮和总磷等指标随沉降时间的变化情况, 结果表明自由沉降对养殖废水具有较好的沉降作用。Wong 等^[22]和 Merino 等^[23]分别测定了虹鳟鱼和比目鱼跑道式养殖池尾水区区内悬浮颗粒物的沉降特性, 为尾水区沉淀池优化设计提供依据, 结果还表明尾水区悬浮颗粒物的沉降特性与饲料的性质密切相关。综合以上分析可以发现, 已有的相关研究主要针对工厂化水产养殖尾水区悬浮物沉降特性, 专门针对工厂化养殖源头海水悬浮物沉降特性的研究却鲜有报道。

近海海水的静态沉降, 是水产养殖用水处理的第一步, 是保证海水工厂化养殖成功的关键环节。目前, 养殖人员对沉降时间的判断大多凭借主观经验, 缺乏科学指导。一般说来水力停留时间越长, 沉降效果越明显^[18], 但考虑到养殖高峰期换水的迫切性和需求量大, 仅增加

收稿日期: 2019-12-05 修订日期: 2020-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(31902425); 浙江省属高校科研院所基本科研业务费(2019J00030); 舟山市科技项目(2018C21011、2020C21003)

作者简介: 桂福坤, 博士, 教授, 主要从事设施养殖工程研究。

Email: gui2237@163.com

*通信作者: 冯德军, 博士, 讲师, 主要从事工厂化水产养殖工程研究。

Email: fengdj@zjou.edu.cn

沉淀时间并不是最佳选择。因此，本研究以长峙岛海域 7—9 月悬浮物沉降特性为切入点（7—9 月一般为养殖的高峰时节，用水量），综合考虑水体悬浮物浓度和粒径分布随时间的变化，并进一步得到悬浮物沉降速率范围，进而得到最佳的沉降时间，为后续的水体处理提供科学依据，以期对舟山海水工厂化养殖水源处理提供科学的指导和参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

舟山群岛海域既是杭州湾向东输运泥沙的主要通道，也是东海沿岸流携带泥沙向南输运的过渡地带^[24]。特殊的地理位置导致舟山海域海水悬浮物浓度大，可见度低。长峙岛位于舟山本岛东南处，距本岛 350 m，陆域面积 6.3 km²，地势平坦，四面环海，有利于成片开发，形成规模效应，极具工厂化海水养殖基地开发潜能。

1.2 静态沉降试验装置

本研究利用有机玻璃圆筒制作沉降装置 3 套（如图 1 所示），沉降装置 A、B、C 用于研究悬浮颗粒物质量浓度、粒径分布随时间的变化等沉降特性及装置直径对沉降特性的影响；沉降装置 B 用于研究悬浮颗粒物的沉降速率。沉降装置 A、B、C 内径分别为 10、20、30 cm，相应的截面积分别为 78.5、314.0 以及 706.5 cm²，高度为 200 cm（常见海水养殖厂源水沉淀池水深约为 200 cm）。在沉降装置底部中心开孔并设置 1 根内径为 1 cm、长度为 20 cm 的有机玻璃细管，其中上部分 10 cm 在沉降装置内部，用于取距沉降装置底部 10 cm 处的水样做沉降特性分析。此外，在沉降装置 B 外壁从上至下设置 3 个取样口，用于测定悬浮物的沉降速率，与沉降装置底部的距离分别为 110、60、10 cm。

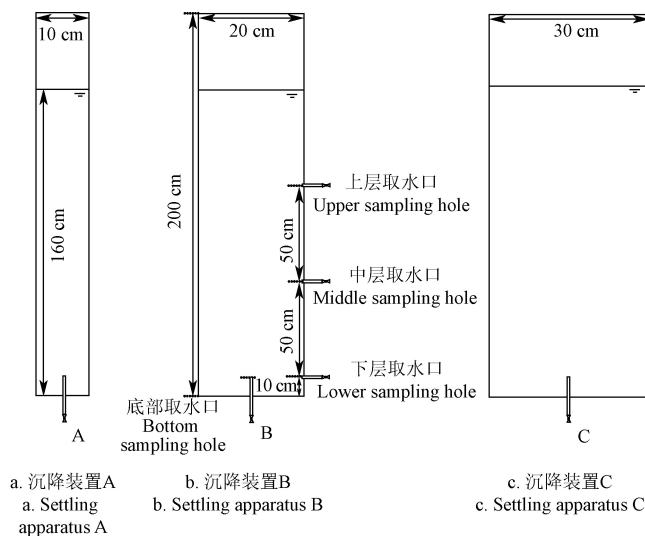


图 1 沉降装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of settling apparatus

1.3 取样时间与方法

试验过程中先后在舟山长峙岛海域（29°57'N，112°11'E）共取表层水样 4 次，分别是如下日期的高潮时段：2019 年 7 月 12 日，8 月 2 日，8 月 17 日，9 月 7 日。

7、8 月份的 3 次水样用来测量近底层悬浮物浓度和粒径分布变化，9 月份的水样用于测量悬浮物沉降速率，试验组次安排见表 1。取样时风力等级为 2~3 级，可反映该海域夏季小风情况下表层海水悬浮物的分布情况。取样成功后，将水样移至实验室充分搅拌。在试验组次 1~3 中，沉降时间达到预设的取样时间时，从底部取样口取样 150 mL，用于测量近底层水体粒径分布和悬浮物浓度，并分析沉降装置直径对沉降效果的影响。在试验组次 4 中，除了从沉降装置 B 的底部取样口取样 150 mL 外，还在侧壁 3 个取样口处取样 50 mL（防止取样过多，导致液面下降明显），用于测量沉降装置内不同深度剖面水体悬浮物粒径分布和浓度，进而计算浮物沉降速率。为了保证在沉降初始阶段，沉降装置内悬浮物浓度上下分布均匀，试验前人工充分搅拌水样。试验中，沉降装置液面高度保持在 160 cm，水样温度稳定在 25 °C 左右，取样时间 t 为试验开始的 0、7、15、22、30、45、60、120、240、360、540、720、960、1 200、1 440 min。

1.4 测定内容及分析方法

海水悬浮物质量浓度的测量使用海洋监测规范中的重量法^[25]。具体方法简单阐述如下：

质量测定：电子分析天平（梅特勒 ME104），精度为 0.000 1 g。

固体悬浮颗粒物质量浓度的测定：在 45 °C 烘干恒质量的醋酸纤维滤膜（孔径 0.45 μm，直径 47 mm）质量为 W_1 (mg)，该滤膜抽滤体积为 V (L) 的水样后，在 45 °C 烘干 6 h，冷却后质量为 W_2 (mg)，空白滤膜校正值为 ΔW (mg)，依据下式计算悬浮物的质量浓度：

$$\rho = (W_2 - W_1 - \Delta W) / V \quad (1)$$

其中空白滤膜校正 ΔW 的依据计算下式：

$$\Delta W = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (W_n - W_b) \quad (2)$$

式中 W_n 为过滤后空白滤膜的质量，mg； W_b 为过滤前空白滤膜质量，mg； n 为空白校正滤膜个数。

颗粒物体积粒径分布：Betttersize2000 激光粒度仪，仪器的测量范围 0.02~2000 μm，重复测量误差小于 1%。

1.5 悬浮颗粒物沉降速率计算

关于悬浮颗粒物沉降速率的计算，国内外常见的研究方法有理论法、室内测定与现场测定^[26]。本文结合水体悬浮物浓度与粒径分布变化，使用斯托克斯沉速修订公式^[27]和重复深度吸管法^[28]分别计算悬浮颗粒物沉降速率。

1.5.1 斯托克斯沉速修订公式

本研究中悬浮物的中值粒径均在 10 μm 左右，属于黏性细颗粒泥沙范畴，对于黏性细颗粒泥沙（ $d < 0.1$ mm， $R_e < 0.50$ ），斯托克斯公式修订为^[27]：

$$\omega = \frac{g}{24\nu} \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) d^2 \quad (3)$$

式中 g 为重力加速度，m/s²； ν 为水的运动学黏性系数，m²/s； γ_s 和 γ 分别为泥沙和水的容重，N/m³； d 为泥沙的粒径，mm； ω 为沉降速率，cm/s。

1.5.2 重复深度吸管法

由于悬浮泥沙在静水中絮凝沉降基本上是一维的, McLaughlin^[28]对泥沙连续性方程(4)进行积分得到方程(5):

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\omega}S)}{\partial z} = 0 \tag{4}$$

式中 S 为含沙浓度, mg/L ; t 为时间, s ; $\bar{\omega}$ 为泥沙平均沉降速率, cm/s ; z 为水深, cm 。

$$(\bar{\omega}S)_{z=H} = -\int_0^H \frac{\partial S}{\partial t} dz = -\frac{\partial}{\partial t} \int_0^H S dz \tag{5}$$

通过测定不同时间的含沙量垂线分布, 运用图积分的方法, 即可求出不同深度 z 处的瞬时速率 ω 随沉降时间 t 的变化。

需要注意的是, 该瞬时速率随深度和时间而变化, 本文根据不同时刻沉降装置 B 上、中、下 3 层悬浮物质量浓度计算颗粒悬浮物的沉降速率。同时采用浓度加权的方法求取 3 个取样口的平均沉降速率, 计算方法^[29]如下:

$$\bar{\omega} = (\omega_1 C_1 + \omega_2 C_2 + \omega_3 C_3) / (C_1 + C_2 + C_3) \tag{6}$$

$$\bar{C} = (h_1 C_1 + h_2 C_2 + h_3 C_3) / (h_1 + h_2 + h_3) \tag{7}$$

式中 $\bar{C}$ 为沉降装置水深加权平均浓度, mg/L ; C_1, C_2, C_3 分别为沉降装置上、中、下取样口处悬浮物浓度, mg/L ; $\bar{\omega}$ 为沉降装置内浓度加权平均沉速, cm/s ; $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 分别为沉降装置上、中、下取样口高度处平均沉速, cm/s ; h_1, h_2, h_3 分别为沉降装置上、中、下取样口的深度, cm 。

2 结果与讨论

2.1 悬浮物初始质量浓度与粒径分布

沉降试验中悬浮物初始浓度与累积分布粒径值的测定结果如表 1 所示(需要指出的是, 由于真空泵的抽吸方式和悬浮物颗粒的不均匀分布, 很难保证转移至 3 个沉降装置内的水体初始浓度与粒径分布完全一致)。前 3 组试验中 3 个装置(为了探究沉降装置内径对沉降特性的影响)内悬浮物初始浓度, 以及第 4 组试验装置 B 内的悬浮物初始浓度分别为 206.7、260.7、234.0 和 250.0 mg/L , 相应的悬浮物粒径累积分布 D_{90} 平均值分别为 20.727、

21.147、25.482 和 45.800 μm 。虽然 4 组试验所取水样悬浮物浓度稍有差别, 但粒径分布基本处在粉砂粒级范围内。

2.2 悬浮颗粒物质量浓度与沉降时间的关系

一般而言, 水体中悬浮物的沉降方式分为 2 种: 一种是粒径较大的颗粒, 往往以单颗粒形式沉降, 沉降速度较快; 一种是直径 $<30 \mu\text{m}$ 的颗粒, 由于在沉降时会与水体中其他颗粒结合, 往往以絮凝^[4-5]的方式沉降。黄建维等^[18-19]对太湖淤泥的静水沉降特性进行了初步研究, 得出随着含沙量的不同, 按淤泥沉降机理, 大致可以分为 3 种不同性质的阶段, 其中水体初始悬浮颗粒物浓度介于 0.0046~10.6 kg/m^3 时, 由于含沙浓度低, 泥沙颗粒以絮团方式沉降, 处于絮凝沉降段。本文所研究的水体也处于该阶段。试验组次 1~3 中, 3 种沉降装置内近底层悬浮颗粒物质量浓度随沉降时间变化情况如图 2 所示。

表 1 7—9 月沉降试验中悬浮物初始浓度与累积分布粒径值
Table 1 Initial suspended solids concentration and accumulating particle size of settlement experiments from Jul. to Sep.

组次 Case	沉降装置 Settling apparatus	悬浮物浓度 Suspended solids concentration / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	累积分布粒径值 Accumulating particle size/ μm		
			D_{10}	D_{50}	D_{90}
1	A	216	2.782	10.026	20.710
	B	198	2.515	11.890	21.450
	C	206	2.609	9.038	20.020
	均值	206.7±7.4	2.635±0.111	10.318±1.182	20.727±0.584
2	A	260	3.134	11.720	22.850
	B	248	2.603	9.013	20.730
	C	274	2.663	8.898	19.860
	均值	260.7±10.6	2.800±0.237	9.877±1.304	21.147±1.256
3	A	244	3.339	11.410	24.930
	B	226	2.874	10.313	25.205
	C	232	3.047	10.580	26.310
	均值	234.0±7.5	3.087±0.192	10.768±0.467	25.482±0.596
4	B	250	3.067	16.920	45.800

注: D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 分别指累积粒度分布达到 10%、50%、90%时所对应的粒径值, 下同。
Note: The particle size when the accumulating particle volume reaches 10%、50%、90% is referred to as D_{10} , D_{50} , D_{90} . The same as below.

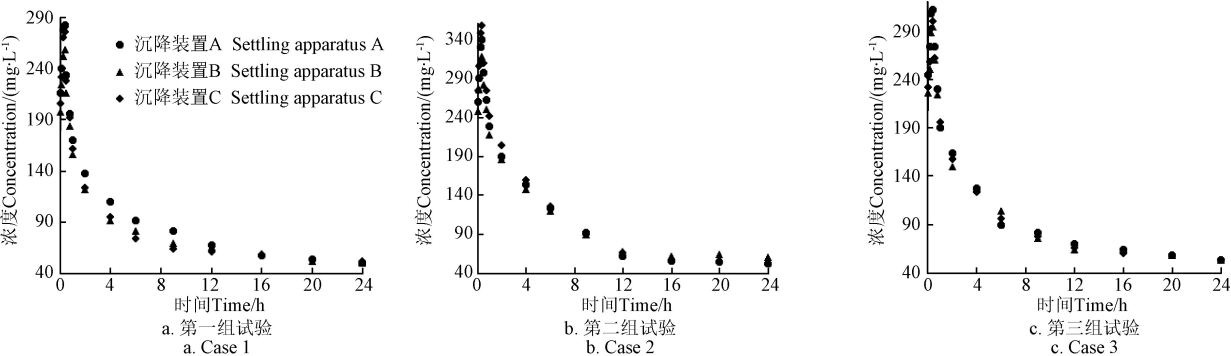


图 2 悬浮颗粒物质量浓度随沉降时间的变化
Fig.2 Variation of suspended particle solids concentration with settling time

如图 2 所示, 沉降初期, 虽然 3 次沉降试验初始浓度不同粒径分布略有差异, 但沉降趋势大致相同, 均出

现近底层悬浮物浓度随沉降时间先上升后下降再趋于平缓的趋势。试验结果与关山月等^[12]研究的低浓度生活污

水中悬浮物自由沉降以及袁新程等^[21]研究的池塘养殖水自由沉降变化趋势接近。在前 22 min 内, 悬浮物浓度随时间急剧变化, 这是因为沉降初期上部的大颗粒悬浮物快速下沉导致浓度的急剧变化。22 min 后悬浮物浓度出现下降趋势, 40 min 时悬浮物浓度恢复至初始浓度附近。之后, 由于小颗粒物的絮凝沉降, 下层浓度逐渐下降, 但沉速变小, 6~9 h 后悬浮物浓度降为初始浓度的 40% 以下, 12 h 后悬浮物浓度虽有降低, 但稳定在 50~60 mg/L。这也说明, 由于舟山长峙岛海域悬浮物基本处在粉砂粒级范围, 仅仅用自然沉降的方法很难完全除去。

2.3 悬浮颗粒物粒径分布变化与沉降时间的关系

以第 3 次沉降试验装置 C 中水样为例, 在 0、7、360、1 440 min 的悬浮颗粒的累积分布粒径值如表 2 所示。

表 2 不同沉降时间的悬浮物累积分布粒径值

Table 2 Accumulating particle size of suspended solids settling for different settling time

沉降时间 Settling time/min	累积分布粒径值 Accumulating particle size/ μm		
	D_{10}	D_{50}	D_{90}
0	3.047	10.580	26.310
7	3.386	12.060	34.540
360	2.627	7.204	10.280
1 440	2.117	5.431	8.074

如表 2 所示, 在沉降初期, 近底层悬浮颗粒物各项累积分布粒径值均出现增大趋势, 这与中上层大颗粒物沉降有关。在沉降 6 h 后, 水体中的 D_{90} 值小于沉降初期 D_{50} 值, 这说明大部分粒径大于 $10\ \mu\text{m}$ 悬浮物沉降完成。根据公式 (3), 粒径为 $10\ \mu\text{m}$ 的颗粒物, 其沉降速率为 $0.007\ \text{cm/s}$, 完全沉降至底层需 6 h, 与试验结果一致。

2.4 悬浮颗粒物沉降速率计算

以第 4 组试验为例, 沉降装置上、中、下层取样口悬浮物浓度与沉降时间关系如图 3 所示。上层和中层处水体悬浮物浓度随沉降时间均呈下降趋势, 下层水体浓度变化趋势与前 3 次试验一致。不同的是, 由于第 4 次试验 D_{50} 、 D_{90} 偏大, 导致沉降初期大颗粒悬浮物沉降速率快, 引起下层浓度急剧变化, 浓度下降阶段出现的更早。随着沉降时间的增加, 沉降装置中各位置悬浮物浓度差别变小。为了研究沉降期间沉降装置内悬浮物的垂直粒径分布, 特别在 2 h 上层、4 h 中、下层、6 h 下层和 24 h 上、中、下 3 层取样, 其粒径分布见表 3。

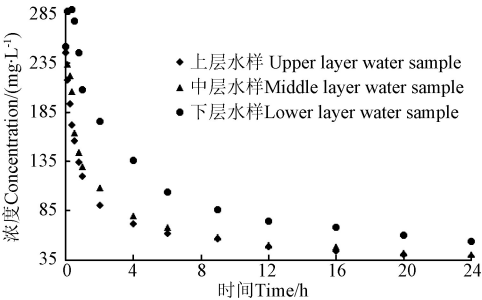


图 3 不同水层内悬浮颗粒物质量浓度随沉降时间变化
Fig.3 Variation of suspended solid concentration with settling time in different layers

表 3 第 4 组沉降试验中不同沉降时间、水层的悬浮物累计分布粒径值

Table 3 Accumulating particle size in the fourth experiment at different settling time and layers

时间 Time/h	取样层 Sampling layer	累积分布粒径值 Accumulating particle size/ μm		
		D_{10}	D_{50}	D_{90}
2	上层	1.669	6.964	16.910
4	中层	1.589	6.832	18.430
	下层	1.812	8.770	27.600
6	下层	1.681	5.015	10.470
24	上层	2.697	3.199	3.738
	中层	1.180	2.521	4.804
	下层	1.929	3.201	4.951

结合表 3 与表 1 数据可以看出, 沉降 2 h 后, 上层水体 D_{90} 值接近初始状态 D_{50} 值, 这说明上层水体大颗粒悬浮物沉降完毕; 4 h 后, 中层水体大部分大颗粒悬浮物完成沉降, 但下层水体仍然残留较多大颗粒悬浮物, 其 D_{90} 值接近 $30\ \mu\text{m}$; 6 h 后, 下层水体 D_{90} 值为 $10.470\ \mu\text{m}$ 且小于 $16.910\ \mu\text{m}$, 较大粒径悬浮物沉降完全; 24 h 后, 3 层水体颗粒分布均匀, 悬浮物质量浓度稳定在 $40\sim55\ \text{mg/L}$ 。

其次, 通过测量沉降装置内不同水层悬浮物浓度随时间的变化, 可以得到相应水深处悬浮物的沉降速率。需要注意的是, 下层悬浮物浓度随沉降时间先上升后下降, 故利用重复深度吸管法计算沉速时, 起始沉降时间设置为 30 min。30 min 后, 沉降装置悬浮物平均沉速与时间关系见图 4。

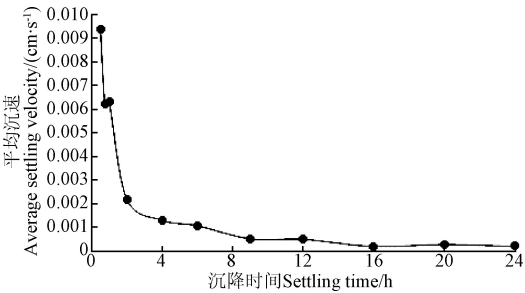


图 4 平均沉速-沉降时间的关系
Fig.4 Relationship between average settling velocity and settling time

综合分析表 3 和图 4 可以发现: 悬浮物沉降前期以大颗粒悬浮物为主, 沉降速率较大; 后期主要为小颗粒悬浮物, 沉降速率减慢; 6 h 后的沉降过程中, 悬浮物浓度和粒径分布的变化均较之前有大幅度减缓。因此, 选取 $0.001\sim0.01\ \text{cm/s}$ 作为该时段舟山近海海域水体悬浮物的特征沉降速率范围。陈鋈等^[29]在研究悬浮物的静沉降特征时发现, 悬浮物浓度和平均沉降速率的关系符合 Logistic 曲线, 在此基础上, 将第 4 组试验所测平均沉速 ω 与悬浮物浓度 C 进行非线性拟合, 如图 5 所示, 其关系式为

$$\omega = 0.0117 / (1 + \exp(-28.844C + 5.1)), R^2 = 0.967 \quad (8)$$

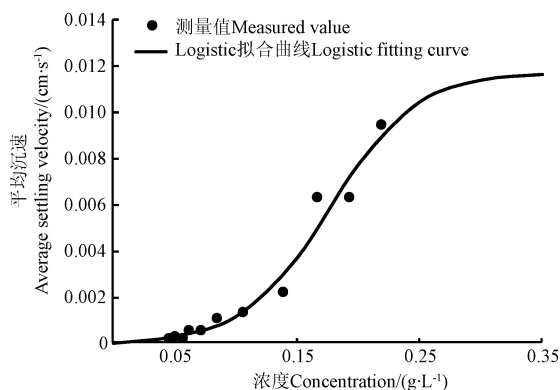


图5 平均沉降速率-悬浮物浓度的关系

Fig.5 Relationship between suspended solid concentration and average settling velocity

3 结 论

为了获取舟山近海海域悬浮物沉降特性, 该研究以长峙岛海域海水为例, 通过 2019 年 7—9 月进行的静沉降试验, 对水体中悬浮物浓度和粒径分布进行分析, 并采用斯托克斯沉降公式和重复深度吸管法计算颗粒悬浮物的沉降速率, 研究结果表明舟山近海海域, 7—9 月海水悬浮物粒径分布基本处在粉砂粒级范围, 经过 12 h 静沉降后浓度稳定在 50~60 mg/L, 说明舟山近海海水中的悬浮物很难通过沉降的方式完全除去; 海水沉降前期以大颗粒悬浮物为主, 沉降速率大, 后期沉降以小颗粒悬浮物絮凝沉降形式为主, 沉降速率急剧减小后趋于平稳, 沉降速率范围为 0.001~0.01 cm/s; 悬浮物浓度与平均沉降速率符合 Logistic 模型, 平均沉降速率随悬浮物浓度增大先增大而后接近渐进值趋于稳定; 沉降装置直径小范围变动对沉降试验结果基本无影响。

悬浮物静态沉降是养殖源头水质管理的重要环节, 本文通过研究舟山近海海域悬浮物静沉降特性, 以期对养殖工作的水源处理提供科学依据。但水体悬浮物沉降特性具有季节差异性, 下一步需要针对一年内养殖高峰期多时段采样, 更全面地掌握舟山近海海域海水悬浮物沉降特性。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
Yang Jing, Ni Qi, Zhang Yulei, et al. Construction technology on RAS for shrimp culture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(8): 136-140. (in Chinese with English abstract)
- [2] 赵乐, 张清靖, 桂福坤, 等. 工厂化对虾养殖池管式射流集污水力特性[J]. 中国水产科学, 2017, 24(1): 190-198.
Zhao Le, Zhang Qingjing, Gui Fukun, et al. Experimental study on the hydraulic characteristics of waste concentrated in an industrial aquaculture pond equipped with a pipe jet flow system[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2017,

- 24(1): 190-198. (in Chinese with English abstract)
- [3] 曲克明. 海水工厂化高效养殖体系构建工程技术[M]. 北京: 海军出版社, 2010: 104-109.
- [4] Douglas R W, Rippey B, Gibson C E, et al. Estimation of the in-situ settling velocity of particles in lakes using a time series sediment trap[J]. Freshwater Biology, 2003, 48(3): 512-518.
- [5] 雷坤, 杨作升, 郭志刚. 东海陆架北部泥质区悬浮体的絮凝沉积作用[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(3): 288-295.
Lei Kun, Yang Zuosheng, Guo Zhigang. Sedimentation with aggregation of suspended sediment in a mud area of the Northern East China Sea[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2001, 32(3): 288-295. (in Chinese with English abstract)
- [6] Baldock T E, Tomkins M R, Nielsen P, et al. Settling velocity of sediments at high concentrations[J]. Coastal engineering, 2004, 51(1): 91-100.
- [7] Curran K J, Hill P S, Milligan T G, et al. Settling velocity, effective density, and mass composition of suspended sediment in a coastal bottom boundary layer, Gulf of Lions, France[J]. Continental Shelf Research, 2007, 27(10/11): 1408-1421.
- [8] Jiménez J A, Madsen O S. A simple formula to estimate settling velocity of natural sediments[J]. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 2003, 129(2): 70-78.
- [9] Rosa F. Sedimentation and sediment resuspension in Lake Ontario[J]. Journal of Great Lakes Research, 1985, 11(1): 13-25.
- [10] 向军, 逢勇, 李一平, 等. 浅水湖泊水体中不同颗粒悬浮物静沉降规律研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(1): 111-115.
Xiang Jun, Pang Yong, Li Yiping, et al. Hydrostatic settling suspended matter of large shallow lake[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(1): 111-115. (in Chinese with English abstract)
- [11] Wu J, He C. Experimental and modeling investigation of sewage solids sedimentation based on particle size distribution and fractal dimension[J]. International Journal of Environmental Science & Technology, 2010, 7(1): 37-46.
- [12] 关山月, 朱建光, 贺超, 等. 低浓度生活污水自由沉降规律及其对厌氧发酵的影响[J]. 中国沼气, 2017, 35(1): 9-12.
Guan Shanyue, Zhu Jianguang, He Chao, et al. Free sedimentation regulation of low concentration domestic sewage and its effect on anaerobic fermentation[J]. China Biogas, 2017, 35(1): 9-12. (in Chinese with English abstract)
- [13] Magill S, Thetmeyer H, Cromey C J, et al. Settling velocity of faecal pellets of gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.) and sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.) and sensitivity analysis using measured data in a deposition model[J]. Aquaculture, 2006, 251(1): 295-305.

- [14] Reid G K, Liutkus M, Robinson S M C, et al. A review of the biophysical properties of salmonid faeces: Implications for aquaculture waste dispersal models and integrated multi-trophic aquaculture[J]. *Aquaculture Research*, 2009, 40(3): 257-273.
- [15] Piedecausa M A, Aguado-Giménez F, García-García B, et al. Settling velocity and total ammonia nitrogen leaching from commercial feed and faecal pellets of gilthead seabream (*Sparus aurata* L. 1758) and seabass (*Dicentrarchus labrax* L. 1758)[J]. *Aquaculture Research*, 2009, 40(15): 1703-1714.
- [16] Bao W, Zhu S, Jin G, et al. Generation, characterization, perniciousness, removal and reutilization of solids in aquaculture water: a review from the whole process perspective[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2019, 11(4): 1342-1366.
- [17] 刘长发, 徐岩, 晏再生, 等. 牙鲆养殖循环系统中固体废物的粒径分布与沉降特征[J]. *渔业现代化*, 2009, 36(6): 1-5.
Liu Changfa, Xu Yan, Yan Zaisheng, et al. Particle size distribution and settling characteristics of solids waste settled in the recirculating aquaculture system for Japanese flounder culture[J]. *Fishery Modernization*, 2009, 36(6): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张成林, 杨菁, 徐皓, 等. 去除养殖水体悬浮颗粒的多向流重力沉淀装置设计及性能[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(增刊 1): 53-60.
Zhang Chenglin, Yang Jing, Xu Hao, et al. Design and performance of multiway gravity device on removing suspended solids in aquaculture water[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(Supp.1): 53-60. (in Chinese with English abstract)
- [19] 严峻, 章霞, 李伟业, 等. 对虾大棚养殖废水悬浮物静沉降效果初步研究[J]. *浙江海洋学院学报: 自然科学版*, 2017, 36(2): 186-189.
Yan Jun, Zhang Xia, Li Weiye, et al. A preliminary study of the static settling effect on suspended solids of prawn greenhouse aquaculture waste water[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University: Natural Sciences*, 2017, 36(2): 186-189. (in Chinese with English abstract)
- [20] 季明东, 李海军, 李建平, 等. 乌龟温室养殖水中悬浮颗粒物的沉降特性[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(21): 222-227.
Ji Mingdong, Li Haijun, Li Jianping, et al. Settling characteristics of suspended solids in greenhouse turtle aquaculture water[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(21): 222-227. (in Chinese with English abstract)
- [21] 袁新程, 施永海, 刘永士. 池塘养殖废水自由沉降及其三态氮、总氮和总磷含量变化[J]. *广东海洋大学学报*, 2019, 39(4): 56-62.
Yuan Xincheng, Shi Yonghai, Liu Yongshi. Study on the pattern of free sedimentation of pond wastewater and the change of three-state nitrogen, total nitrogen and total phosphorus[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2019, 39(4): 56-62. (in Chinese with English abstract)
- [22] Wong K B, Piedrahita R H. Settling velocity characterization of aquacultural solids[J]. *Aquacultural Engineering*, 2000, 21(4): 233-246.
- [23] Merino G E, Piedrahita R H, Conklin D E. Settling characteristics of solids settled in a recirculating system for California halibut (*Paralichthys californicus*) culture[J]. *Aquacultural engineering*, 2007, 37(2): 79-88.
- [24] 胡日军. 舟山群岛海域泥沙运移及动力机制分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
Hu Rijun. Sediment Transport and Dynamic Mechanism in the Zhoushan Archipelago Sea Area[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [25] 中国国家标准管理委员会, 海洋监测规范: GB17378.4-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [26] 万远扬, 吴华林, 沈淇, 等. 潮汐环境下细颗粒泥沙沉降速度研究述评 I-基本概念与研究方法[J]. *水运工程*, 2014(3): 18-23.
Wan Yuanyang, Wu Hualin, Shen Qi, et al. Settling velocity of fine sediment in a tidal environment 1: Definition & study methods[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2014(3): 18-23. (in Chinese with English abstract)
- [27] 黄建维. 粘性泥沙在静水中沉降特性的试验研究[J]. *泥沙研究*, 1981(2): 30-41.
Huang Jianwei. Experimental study of settling properties of cohesive sediment in still water[J]. *Journal of Sediment Research*, 1981(2): 30-41. (in Chinese with English abstract)
- [28] McLaughlin, Ronald T. Settling properties of suspensions[J]. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1961, 126(1): 1780-1786.
- [29] 陈鋈, 高光, 李一平, 等. 太湖水体中悬浮物的静沉降特征[J]. *湖泊科学*, 2006, 18(5): 528-534.
Chen Yun, Gao Guang, Li Yiping, et al. Hydrostatic settling of suspended matter of Lake Taihu[J]. *Lake Sciences*, 2006, 18(5): 528-534. (in Chinese with English abstract)
- [30] 黄建维, 张金善. 太湖泥沙静水沉降特性的初步试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2003.
Huang Jianwei, Zhang Jinshan. Preliminary experimental study in hydrostatic settling of suspended matter of Lake Taihu[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2003.

Experimental study on settling characteristics of suspended solids in seawater of nearshore in Zhoushan of China

Gui Fukun¹, Fang Shuai¹, Qu Xiaoyu², Zhang Qingjing³, Zhang Xuefen¹, Feng Dejun^{1*}

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

2. School of Fishery, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;

3. Beijing Key Laboratory of Fishery Biotechnology, Beijing Fisheries Research Institute, Beijing 100068, China)

Abstract: The industrial aquaculture has been widely applied all around the world for its obvious benefits of eco-friendly, water-saving and good welfare conditions due to the excellent use of technology to manage aquaculture environments effectively. Water quality management, mainly composed of sedimentation, filtration, biological purification, oxygenation, temperature regulation and sterilization, is of vital importance to the aquaculture. Generally, sedimentation can be applied to deal with the water before the influence into the aquaculture tank and that after the effluent from the aquaculture tank. Most of the previous studies focused on the settling characteristics of suspended solid in the waste water from the aquaculture tank. However, few attentions are paid to that in the source of water, resulting in limited knowledge on the determination of the appropriate time required for solid sedimentation. In this study, settling characteristics and size distribution of the SS (suspended solid) in the nearshore seawater of Changzhi island, Zhoushan have been investigated by carrying out four hydrostatic settling experiments. In addition, settling apparatus with different diameters have been developed to examine the effect of apparatus diameter on the settling characteristics. Stokes equation and Mclaughlin method have been applied to calculate the settling velocity in the fourth hydrostatic settling experiments. The results show that the accumulating particle size D_{90} (the accumulating particle volume reaches to 90%) of suspended solids in the seawater of Changzhi island is around 45.800 μm , indicating that the suspended solids are mainly composed of silts. The mass concentration of suspended solids increases sharply with time in the first 22 min due to the quick settlement of large particles, and recovers to the initial level after 40 min. And it continues to decrease due to the flocculating settling of small particles and reaches the level less than 40% of that in the initial samples 6-9 h later. During the final stage, it decreases slightly, stabilizing at the level of 50-60 mg/L after 12 h. Thus, the settling characteristics demonstrate that it is difficult to completely remove the suspended solids in seawater by increasing settling time and other water management strategy also should be employed. The comparisons of settling characteristics among three purpose-designed settling apparatus show that the effect of apparatus diameter can be ignored in this study. As for the settling velocity, it reaches the maximum value of near 0.01 cm/s in the early stage because of the similar reason that the large particles settle first as in the concentration analysis. In the later stage, the settling velocity decreases rapidly and becomes less than 0.001 cm/s after 6 h. Moreover, the settling velocity and concentration has been fitted in a Logistic model and the fitting equation has been obtained. The results can enrich the understanding of the settling characteristics in the source water for industrial aquaculture in Zhoushan island and provide scientific guidance on how to set up appropriate setting time for source water in settling tank.

Keywords: aquaculture; particle size; suspended solids concentration; hydrostatic settling; settling velocity