

文章编号:1672-9331(2021)04-0024-08

螺旋桨射流对底泥起悬及铅在底泥—水界面处迁移规律的研究

沈小雄^{1,2,3}, 杨敏妮¹, 余志^{1,2,3}, 胡旭跃^{1,2,3}

(1. 长沙理工大学 水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙理工大学 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 3. 长沙理工大学 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要: 河道中船舶螺旋桨射流会引起河道底泥悬浮并引发其中的重金属元素向水体释放。以物理模拟试验的方法, 探讨了不同螺旋桨射流条件对底泥悬浮及底泥中重金属污染物——铅向水体释放的影响。试验设计了3个桨径和转速, 在螺旋桨后2倍桨径处设置取样点, 采集水体样品, 并分析悬浮物的浓度。在不同条件下, 采用薄膜扩散梯度技术原位获取了上覆水和底泥中铅的垂向分布规律。试验结果表明: 在静水条件下转动螺旋桨, 螺旋桨桨径越大、转速越高、桨叶叶尖距离床面的高度越小, 上覆水悬浮物浓度的峰值越大。同时, 增大桨径和转速, 表层底泥中铅(界面以下8 cm)的垂向浓度和释放量均有所增大。

关键词: 螺旋桨射流; 悬浮物; 薄膜扩散梯度技术; 底泥—水界面; 重金属污染物; 铅

中图分类号: X8

文献标志码: A

Research on sediment incipient motion and suspension caused by propeller jet and migration rules of Pb at sediment-water interface

SHEN Xiao-xiong^{1,2,3}, YANG Min-ni¹, YU Zhi^{1,2,3}, HU Xu-yue^{1,2,3}

(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Ship propeller jet in river may cause the suspension of sediment and lead to the release of heavy metal elements into water. The effects of different propeller jet conditions on sediment suspension and release of heavy metal pollutant—Pb into water were discussed through physical simulation test. Three diameters and rotating speeds of propeller were set-up in the test. Water samples were collected at a place of 2 times of the propeller diameter behind the propeller to analyze the concentration of suspended solid. Also, the vertical distribution of Pb in overlying water and sediment was obtained in situ by using the technique of diffusive gradients in thin films. The test results show that the larger the propeller diameter, the higher the rotor speed, and the smaller the distance between the blade tip and the riverbed surface, the bigger the peak value of the suspended matter concentration in the

收稿日期: 2021-06-10

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ50672); 湖南省水利厅一般科技项目(20cslg026); 长沙理工大学青年成长计划项目(2019qjcz023)

通讯作者: 沈小雄(1961—), 男, 教授, 主要从事河流动力学及河湖水环境方面的研究。E-mail: 418864786@qq.com

overlying water when turning the propeller in still water. Meanwhile, the vertical concentration and release amount of Pb in and from the surface sediment (8 cm below the interface) increase with the propeller diameter and rotating speed increasing.

Key words: propeller jet; suspended solid; technique of diffusive gradients in thin films; sediment-water interface; heavy metal pollutant; Pb

在一定条件下,船舶螺旋桨的扰动使河床底泥起动并悬浮,改变了河道的水流特性和水沙的输送过程^[1]。螺旋桨射流扰动这一水动力因素增加了泥水界面的剪切作用,使底泥受到冲刷,进而发生悬浮、扩散,也使附着在底泥上的污染物被大量释放。此时悬浮物作为载体,在很大程度上决定了污染物的迁移转化^[2-5]。国内外学者研究了悬浮物质量—体积浓度(以下简称为悬浮物浓度)的时空变化、颗粒分布情况^[6-9]。赵盖博等^[10]通过原位连续观测,分析得到了风浪对悬浮物浓度的影响规律。

底泥向水体释放污染物,是水体污染的主要原因之一。蓄积在底泥中的污染物在受到物理和化学扰动后被释放并进入水体,造成水体的内源性污染^[11],即二次污染。因此,在外源重金属污染得到有效控制的情况下,底泥作为主要的内源性污染源向上覆水体释放污染物的情况不容忽视。

各种物理、化学条件的变化影响着内源重金属的释放。物理条件主要指水文水动力条件和人为扰动。有机物与水体中的颗粒悬浮物相结合,并以表层底泥的形式沉积在底泥中^[12-13]。当环境受到物理扰动后,一方面稀松的底泥开始悬浮,一部分由沉积状态转变为悬浮状态,并携带着污染物进入水体;另一方面受扰动的底泥中的污染物被释放进孔隙水中,并通过孔隙水向上扩散进入水体,造成水体重金属污染。

目前,关于化学因素,如温度、溶解氧、氧化还原电位和生物扰动对底泥重金属释放的研究较多^[14-15],而对螺旋桨射流造成的河床冲刷及悬浮物变化的关注相对较少。

本文旨在研究当船舶经过河流时,水动力条件变化引起的悬浮对底泥中重金属释放的影响。在水槽中模拟螺旋桨的扰动,观察不同桨径、桨速以及桨叶高度对底泥悬浮的影响。同时,利用薄膜扩散梯度(diffusive gradients in thin films, DGT)技术,将螺旋桨射流、悬浮物浓度和污染物迁移相结合,以危害较大的重金属污染物——铅

(Pb)为研究对象,研究螺旋桨射流强度对悬浮物浓度及铅的垂向迁移的影响。

1 试验概况

在自制的室内高精度循环水槽中进行模拟试验,水槽长 5.0 m,宽 0.8 m,深 0.8 m。在抽水过程中,安装在水槽后端的整流栅可对管道中紊动的高速水流进行调整,使水流均匀平缓地流入水槽,以确保沙床平整。在水槽上方架设钢架,使螺旋桨固定在水槽的中上方。电机与螺旋桨的传动轴相连,开启电机即可使螺旋桨旋转并射流。利用直流电机调速器和数字式高精度激光转速表调节螺旋桨的转速。试验水槽的布置如图 1 所示。

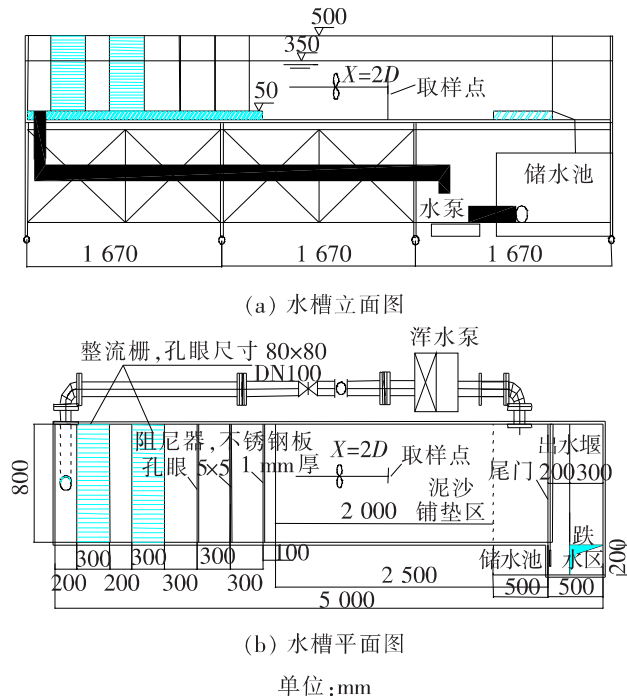


图 1 试验水槽的布置

Fig. 1 Layout of test flume

在水槽工作段铺设长 2.0 m、宽 0.8 m、深 0.1 m 的底泥,在铺设段两端设置硬质假层。泥沙样品为采自湘江黑石铺(112°58'9.8"N,28°0'21.3"E)、粒径为 0~10 cm 的表层沉积泥沙。试验所用黏性土的中值粒径 $d_{50} = 8.146 \mu\text{m}$,其级配曲线如图 2 所示。

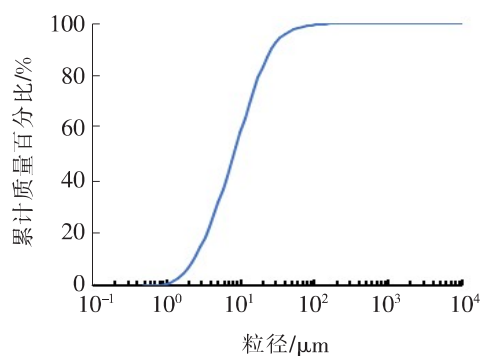


图 2 黏性土级配曲线

Fig. 2 Grading curve of cohesive soil

试验前先将水槽底部的泥沙整平,并在静水中静置 24 h。在试验过程中保持水槽的水位不变,试验水深 $H=25$ cm。以 2 000 t 货船的五叶桨为原型,采用三维打印螺旋桨。螺旋桨桨径 D 分别取 4, 6, 9 cm, 转速 n 分别取 500, 700, 1 000 r/min, 桨叶离底间隙 h_j 分别取 2, 4, 6, 8 cm。离底间隙表示螺旋桨最低处桨叶的最低点距离河床床面的高度。试验工况见表 1。

表 1 试验工况

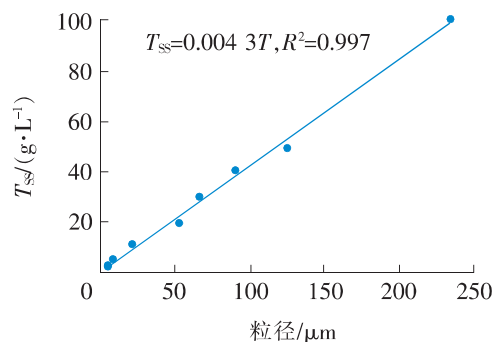
Table 1 Test conditions

工况	转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	桨径/ cm	离底间隙/ cm
1	1 000	9	2
2	700	9	2
3	500	9	2
4	1 000	6	2
5	1 000	4	2
6	1 000	9	4
7	1 000	9	6
8	1 000	9	8

为研究黏性土溶液的浊度与悬浮物浓度的相关关系,将不同质量的黏性土加入相同体积的水中测量浊度。首先称取一定量烘干后的黏性土,将其与定量蒸馏水充分混合,然后测量溶液的浊度。根据配置的黏性土溶液的悬浮物浓度与浊度绘制拟合曲线,结果如图 3 所示。拟合曲线的公式为:

$$T_{ss} = 0.004 \ 3T, R^2 = 0.997 \quad (1)$$

式中: T 为黏性土溶液的浊度, NTU; T_{ss} 为悬浮物浓度, g/L。

图 3 黏性土 T_{ss} 与 T 的拟合曲线Fig. 3 Fitting curve of T_{ss} and T of cohesive soil

利用 DGT 技术原位获取底泥—水界面有效态铅的垂向分布。DGT 技术利用自由扩散原理获取污染物在环境中的分布,具有高空间分辨率、原位测量、操作简单等特点,与传统的采样技术相比能够更真实地反应环境的污染水平^[16-17]。使用 DGT 技术测量并计算水槽中污染物浓度 C 的公式为:

$$C = \frac{M\Delta g}{DA t} \quad (2)$$

式中: t 为 DGT 装置的放置时间, s; M 为 DGT 装置放置时间段固定膜对金属离子的累积量; Δg 为扩散膜厚度; D 为金属离子在扩散层中的扩散系数; A 为 DGT 装置暴露的窗口面积。

用 DGT 装置测量污染物垂向分布的过程为: 分别在不同工况螺旋桨扰动 1 h 后的水槽中插入 DGT 装置, 位置为桨轴线上距离桨叶 $X=2D$ 处。将 DGT 插入水槽底部, 使其充分接触采样处的底泥和水, 静置 24 h 后取出测量。首先用纯净水将从水槽中取出的 DGT 装置表面的杂质冲洗干净, 取出 DGT 装置内的吸附膜并放置于试管中, 加入 2 mL 浓度为 1 mol/L 的 HNO_3 溶液, 充分脱洗 24 h; 再用去离子水定容混匀, 吸取 1.0 mL 的溶液并用 ICP-MS(安捷伦 7700)测定 DGT 在 24 h 内吸附的污染物的量, 得到静水状态下 24 h 内污染物的垂向平均浓度; 最后, 由污染物某一深度处的平均浓度与该垂向上最大平均浓度的比值得到浓度百分比, 绘制浓度百分比分布图。

2 试验结果分析

2.1 螺旋桨射流对悬浮物浓度的影响

使用自制的采样器对螺旋桨射流轴线上 $X=$

2D 处的水体进行采样,得到不同工况下水体中悬浮物浓度的变化情况。

2.1.1 螺旋桨转速的影响

选取工况 1,2,3,分别冲刷 1 h,分析不同转速下螺旋桨射流对水体中悬浮物浓度的影响。图 4 所示为不同转速下扰动 1 h 内 T_{ss} 的变化过程,图 5 所示为不同转速下扰动 1 h 后 24 h 内 T_{ss} 的变化过程。

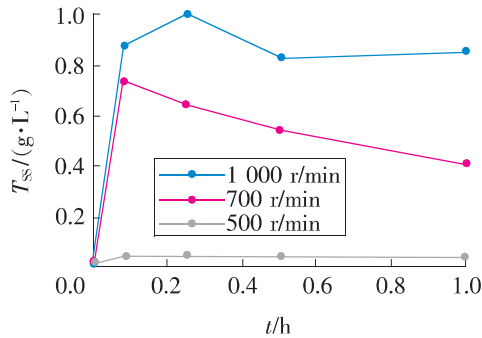


图 4 不同转速下扰动 1 h 内 T_{ss} 的变化过程

Fig. 4 Changing process of T_{ss} with one-hour disturbing at different rotating speeds

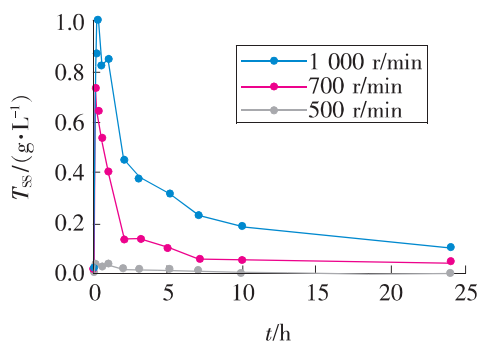


图 5 不同转速下 24 h 内 T_{ss} 的变化过程

Fig. 5 Changing process of T_{ss} within 24 hours at different rotating speeds

从图 4 可以看出:在试验初期,在 3 种螺旋桨转速条件下,水体中的悬浮物浓度均迅速增大。当转速为 500 r/min 时,悬浮物浓度在 0.083 h 达到峰值,为 0.042 g/L,是其初始浓度的 3.03 倍;当转速为 700 r/min 时,悬浮物浓度也在 0.083 h 出现峰值,为 0.740 g/L,是其初始浓度的 37.71 倍;当转速为 1000 r/min 时,悬浮物浓度以 0.083 h 为界,先迅速增大后缓慢增大,在 0.25 h 出现峰值,为 1.0 g/L,是其初始浓度的 52.42 倍。

在悬浮物浓度达到峰值后,3 种螺旋桨转速条件下的悬浮物浓度均呈现缓慢减小的趋势。峰值过后,当转速为 500 r/min 时,扰动 1 h 后,悬浮物

浓度为 0.038 g/L,减小为初始浓度的 2.74 倍;当转速为 700 r/min 时,扰动 1 h 后,悬浮物浓度为 0.407 g/L,减小为初始浓度的 20.76 倍;当转速为 1000 r/min 时,扰动 1 h 后,悬浮物浓度为 0.84 g/L,减小为初始浓度的 44.57 倍。

从图 5 可以看出:螺旋桨在扰动 1 h 并停止后,悬浮物由悬浮状态变为沉淀状态,水体中的悬浮物浓度开始迅速下降,而后缓慢下降。至 24 h 试验结束时,转速 500,700,1000 r/min 对应的悬浮物浓度分别为 0.009,0.051,0.110 g/L,分别为其初始浓度的 0.63,2.60,5.78 倍。说明水体中悬浮物浓度越大,沉淀所需的时间越长。

2.1.2 螺旋桨桨径的影响

选取工况 1,4,5,通过试验得到不同螺旋桨桨径下扰动 1 h 内悬浮物浓度的变化过程,如图 6 所示;扰动 1 h 后 24 h 内悬浮物浓度的变化过程,如图 7 所示。

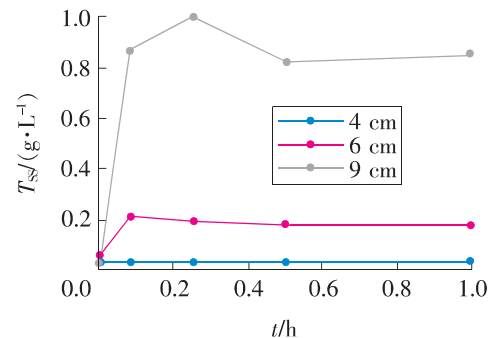


图 6 不同桨径下扰动 1 h 内 T_{ss} 的变化过程

Fig. 6 Changing process of T_{ss} with one-hour disturbing with different propeller diameters

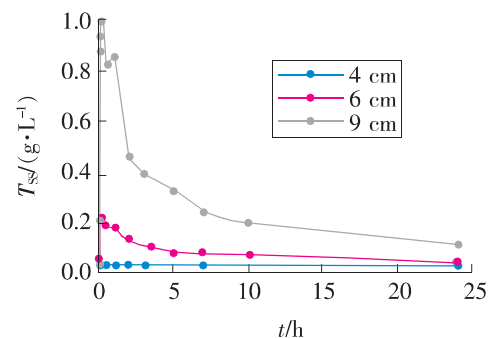


图 7 不同桨径下 24 h 内 T_{ss} 的变化过程

Fig. 7 Changing process of T_{ss} within 24 hours with different propeller diameters

从图 6 可以看出:在开始扰动的 0.083 h 内,螺旋桨桨径为 4,6,9 cm 对应的悬浮物浓度分别从初始浓度 0.023,0.054,0.019 g/L 增大至

0.027, 0.172, 0.873 g/L, 分别为其初始浓度的 1.09, 3.88, 45.86 倍。

对于不同桨径螺旋桨的扰动, 悬浮物浓度的变化有明显差异。在桨径为 4 cm 时, 水体中的悬浮物浓度基本没有增大, 说明在转速为 1 000 r/min、桨径为 4 cm 时, 泥沙起动的动力条件较小, 起动高度不高; 在桨径为 6 cm 时, 螺旋桨扰动 1 h 后, 水体中的悬浮物浓度为 0.172 g/L, 是其初始浓度的 3.2 倍; 在桨径为 9 cm 时, 螺旋桨扰动 1 h 后, 水体中的悬浮物浓度为 0.849 g/L, 是其初始浓度的 44.57 倍。

从图 7 可以看出: 随着桨径的增大, 水体中悬浮物浓度的变化也随之增大。在扰动停止后, 悬浮物开始迅速沉淀, 而后缓慢沉淀。在 24 h 试验结束时, 螺旋桨桨径为 4, 6, 9 cm 对应的悬浮物浓度分别为 0.021, 0.039, 0.110 g/L, 分别为其初始浓度的 0.89, 0.72, 5.78 倍。

当桨径为 9 cm 时, 水体中悬浮物的浓度在扰动停止后的 6 h 内迅速减小; 当桨径为 6 cm 时, 扰动停止后的 2 h 内水体中悬浮物的浓度迅速减小; 当桨径为 4 cm 时, 水体中悬浮物浓度的变化很小, 泥沙的悬浮量也很少。综上所述, 当螺旋桨桨径越大、动力作用越强时, 泥沙悬浮得越多、越高, 采样点上方悬浮物的沉降量也越大, 黏性土颗粒从迅速下沉到缓慢下沉所需要的时间也越长。

2.1.3 离底间隙的影响

选取工况 1, 6, 7, 8, 分析螺旋桨叶尖离底不同高度时悬浮物浓度的变化。图 8 所示为不同离底间隙下扰动 1 h 内悬浮物浓度的变化过程, 图 9 所示为扰动 1 h 后 24 h 内悬浮物浓度的变化过程。

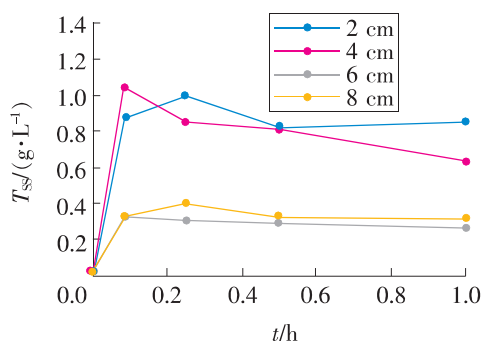


图 8 不同离底间隙下扰动 1 h 内 T_{ss} 的变化过程

Fig. 8 Changing process of T_{ss} with one-hour disturbing with different bottom clearances

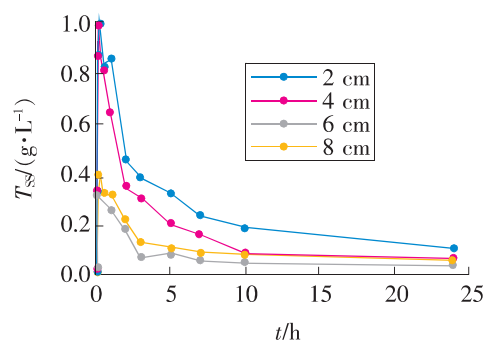


图 9 不同离底间隙下 24 h 内 T_{ss} 的变化过程

Fig. 9 Changing process of T_{ss} within 24 hours with different bottom clearances

从图 8 可以看出: 在螺旋桨叶尖离底间隙分别为 2, 4 cm 的情况下扰动水体, 水体中悬浮物浓度的变化趋势相似, 悬浮物浓度的峰值分别为 0.998, 1.038 g/L, 分别是其初始浓度的 51.42, 46.58 倍; 扰动 1 h 后水体中悬浮物浓度分别为 0.849, 0.641 g/L, 分别是其初始浓度的 44.58, 28.75 倍。在螺旋桨叶尖离底间隙分别为 6, 8 cm 的情况下扰动水体, 水体中悬浮物浓度的变化趋势也相似, 但整体上悬浮物浓度的大小与离底间隙 2, 4 cm 的有所不同。

离底间隙不同时, 采样点的高度也有所不同。离底间隙越小, 螺旋桨扰动的动力条件越大, 泥沙起悬的高度也越高。当 $0.5D \leq h_j \leq 1.0D$ 时, 在扰动的 1 h 内悬浮物浓度基本没有发生变化。

从图 9 可以看出: 不同离底间隙下, 水体中悬浮物浓度的变化趋势基本一致。在 24 h 试验结束时, 离底间隙 2, 4, 6, 8 cm 对应的水体中的悬浮物浓度分别为 0.110, 0.073, 0.040, 0.060 g/L, 分别是其初始浓度的 5.78, 3.26, 1.46, 1.82 倍。

在离底间隙为 2, 4 cm 的情况下, 在停止扰动的前 1 h 内水体中的悬浮物浓度下降迅速, 在 1~6 h 内下降速度开始放缓, 在 6~23 h 内下降速度进一步放缓; 在离底间隙为 6, 8 cm 的情况下, 在停止扰动的 1~2 h 内水体中的悬浮物浓度迅速下降, 在 2~23 h 内下降速度变得平缓直至恢复到初始浓度。

2.2 螺旋桨射流对污染物垂向浓度分布的影响

2.2.1 对照试验

利用 DGT 技术获取静水和工况 3 扰动 1 h 后第 24 h 以铅为代表的污染物的垂向平均质量百分

浓度,并对照分析。以深度为纵坐标(其原点 0 为静止状态下底泥—水的界面),以底泥和上覆水体中污染物的质量百分浓度为横坐标,绘制静水和工况 3 污染物平均质量百分浓度的垂向分布图,结果如图 10 所示。将扰动 1 h 后第 24 h 采样垂线上的底泥—水的分界面定义为该工况下的新生界面。图 10~13 中不同颜色的虚线分别表示相应颜色数据系列的新生底泥—水界面,其中黑色虚线代表静水情况下的底泥—水界面。

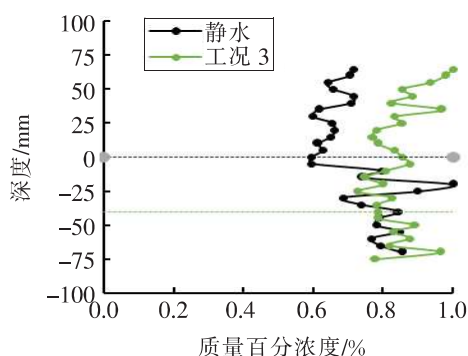


图 10 静水与工况 3 污染物平均质量百分浓度的垂向分布

Fig. 10 Vertical distribution of average mass percentage concentration of pollutant of still water and working condition 3

从图 10 可以看出:在螺旋桨扰动的底泥—水界面,工况 3 中污染物质量百分浓度的突变点比静水时的低,且没有明显分层。由于螺旋桨扰动使大量表层底泥发生悬浮,地形发生改变,扰动后的底泥—水界面向下移动,下移深度基本上与螺旋桨扰动后在 $X=2D$ 断面射流轴线上的冲刷坑的深度一致。不同的螺旋桨射流环境将产生不同高度的新生底泥—水界面。

2.2.2 螺旋桨转速的影响

选取工况 1,2,3,用螺旋桨分别扰动 1 h,用 DGT 技术采集扰动 1 h 后第 24 h 污染物的垂向平均质量百分浓度。图 11 所示为不同转速下污染物平均质量百分浓度的垂向分布。

从图 11 可以看出:底泥—水界面被扰动后,界面向下移动,界面处的污染物被释放,新生界面处污染物的质量百分浓度与上覆水体的质量百分浓度大体一致。当转速为 500 r/min 时,扰动流速较小,且扰动后界面的下移深度较小,随着深度的增加,底泥中的底层污染物的质量百分浓度较大。

在转速分别为 500,700,1 000 r/min 时,扰动后新生界面上覆水体中污染物的平均质量百分浓度分别为 84.7%,78.8%,61.6%,新生界面以下的平均质量百分浓度分别为 84.1%,81.9%,67.7%。由此可见,新生界面以下底泥间隙中污染物的平均质量百分浓度与上覆水体中污染物的平均质量百分浓度接近。将转速按照扰动后新生界面处污染物平均质量百分浓度的大小,从大到小排列依次为:1 000,700,500 r/min。

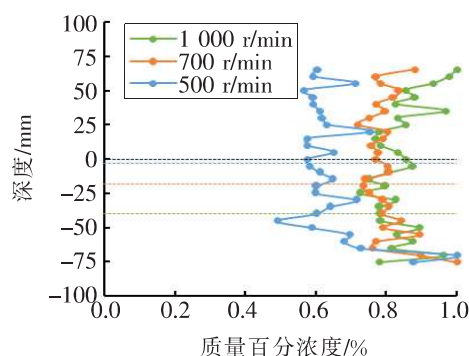


图 11 不同转速下污染物平均质量百分浓度的垂向分布

Fig. 11 Vertical distribution of average mass percentage concentration of pollutant at different rotating speeds

2.2.3 螺旋桨桨径的影响

选取工况 1,4,5,用不同桨径的螺旋桨分别扰动 1 h 后,得到第 24 h 污染物垂向平均质量百分浓度的分布,如图 12 所示。

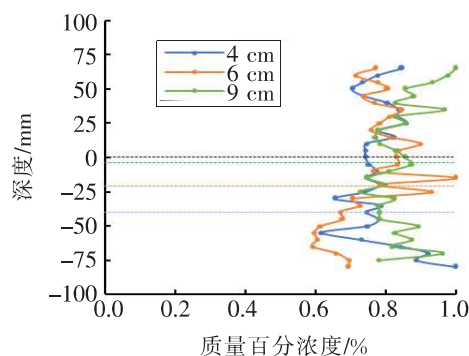


图 12 不同桨径下污染物平均质量百分浓度的垂向分布

Fig. 12 Vertical distribution of average mass percentage concentration of pollutant with different propeller diameters

从图 12 可以看出:桨径越大,新生的底泥—水界面向下移动的深度越大,螺旋桨对底泥的扰动作用越强烈。当桨径分别为 9,6,4 cm 时,新生

界面以下底泥间隙中污染物的平均质量百分浓度分别为 78.5%, 68.1%, 84.1%, 上覆水体中污染物的平均质量百分浓度分别为 78.1%, 81.2%, 84.7%。将桨径按照扰动后新生界面处污染物平均质量百分浓度的大小, 从大到小排列依次为: 9, 6, 4 cm。

2.2.4 离底间隙的影响

选取工况 1, 6, 7, 用螺旋桨分别扰动 1 h 后, 得到第 24 h 污染物垂向平均质量百分浓度的分布情况, 如图 13 所示。

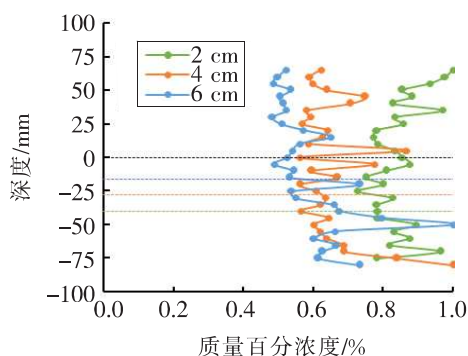


图 13 不同离底间隙下污染物平均质量百分浓度的垂向分布

Fig. 13 Vertical distribution of average mass percentage concentration of pollutant with different bottom clearances

从图 13 可以看出: 当螺旋桨桨叶离底间隙分别为 2, 4, 6 cm 时, 扰动 1 h 后第 24 h 新生界面以下的底泥中污染物的平均质量百分浓度分别为 84.1%, 69.7%, 67.8%; 上覆水体中污染物的平均质量百分浓度分别为 84.7%, 63.7%, 54.0%。在新生界面处, 离底间隙 2, 4, 6 cm 对应的平均质量百分浓度分别为 78.5%, 56.4%, 53.8%, 说明离底间隙越大, 界面的平均质量百分浓度越小。

3 讨论

螺旋桨的转速、桨径越大, 水动力作用越强, 螺旋桨对河床的扰动就越大, 悬浮物的浓度也就越大。因此, 螺旋桨的转速越大, 悬浮物浓度的峰值越高, 扰动 1 h 后, 悬浮物浓度与初始浓度之比也越大。

扰动初期过后, 冲刷坑深度和范围的发展逐渐放缓, 螺旋桨射流对底泥的扰动作用也略有减

小, 扰动产生的悬浮物浓度也逐渐减小。在上覆水体中泥沙沉降和底部泥沙上浮的平衡过程中, 当上浮的泥沙少于沉降的泥沙时, 水体中悬浮物浓度在出现峰值后开始缓慢下降。

当改变螺旋桨转速时, 由图 5 可以看出: 对于工况 1, 在扰动停止后的 6 h 内悬浮物浓度迅速下降, 这是因为土颗粒浮起得较高, 较粗的土颗粒率先沉淀, 致使水体中的土颗粒越来越细, 悬浮物浓度越来越小; 对于工况 2, 水体中悬浮物浓度的衰减趋势与工况 1 相似, 都是先迅速减小再平缓减小, 不同的是工况 2 中土颗粒迅速下降的时间较短。在停止扰动后, 水槽中的水由紊动状态变为静止状态, 河床底部的黏性土颗粒随扰动的停止而不再上浮, 水体中的土颗粒以沉淀状态为主。

水槽中的污染物由底泥间隙中的污染物、吸附在悬沙上的污染物和上覆水体中的溶解态污染物组成。被螺旋桨扰动后, 上覆水体迅速紊动, 并带动底部泥沙开始运动, 此时表层底泥间隙中的污染物迅速向上覆水体中扩散, 污染物界面处的交换通量也迅速增大。因此, 在底泥—水的新生界面处, 污染物的平均质量百分浓度的波动范围较小。

螺旋桨的转速和桨径越大, 螺旋桨叶尖的离底间隙越小, 水体的紊动强度越大, 悬浮物浓度越大, 重金属污染物在新生的底泥—水界面处的释放浓度也越大。螺旋桨扰动后新生的底泥—水界面与水体充分接触, 底泥间隙中的污染物被充分释放。因此, 螺旋桨转速越大, 底泥和上覆水体中污染物的平均质量百分浓度就越大。

4 结论

1) 螺旋桨扰动能促进底泥中污染物的释放, 使底泥中的污染物加速扩散到上覆水体中。增大螺旋桨的转速和桨径, 使水体紊动强度增大, 促进泥沙悬浮, 也使污染物在底泥—水界面的交换通量有所增大, 这将对污染物在底泥和水体两相间的分配产生影响。

2) 当底泥为黏性土时, 在不同的扰动工况下, 水体中悬浮物浓度与动力条件和采样点的位置有

关。螺旋桨桨径和转速越大、桨叶离底间隙越小,扰动 1 h 后悬浮物浓度与初始浓度的比值越大。黏性土颗粒从迅速下沉到缓慢下沉所需的时间与扰动停止时水体中悬浮物的浓度呈正相关关系。

减小螺旋桨的转速,有利于减小船舶螺旋桨对底泥的扰动,减少底泥悬浮,能有效防止底泥由沉积态转化为悬浮态。对于一般的航道,河床质较粗,泥沙不易起动或即使起动也以推移质运动为主。因此,建议船舶在航道范围内航行,以减少底泥的悬浮。

〔参考文献〕

- [1] WANG F F, HUAI W X, GUO Y K. Analytical model for the suspended sediment concentration in the ice-covered alluvial channels[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 597(1): 126338.
- [2] CORBETT D R. Resuspension and estuarine nutrient cycling: insights from the Neuse River Estuary[J]. *Biogeosciences*, 2010, 7(10): 3 289-3 300.
- [3] KALNEJAISL H, MARTIN W R, BOTHNER M H. The release of dissolved nutrients and metals from coastal sediments due to resuspension[J]. *Marine Chemistry*, 2010, 121(1-4): 224-235.
- [4] 华祖林,王苑. 水动力作用下河湖底泥污染物释放研究进展[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(2): 95-105.
HUA Zu-lin, WANG Yuan. *Journal of Hohai University(Natural Science Edition)*, 2018, 46(2): 95-105.
- [5] 张莉,史玲珑,王圣瑞,等. 洱海悬浮颗粒物时空分布特征及其环境学意义[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(5): 787-794.
ZHANG Li, SHI Ling-long, WANG Sheng-rui, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of suspended particulate matter in Erhai Lake and its environmental significance[J]. *Environmental Science Research*, 2019, 32(5): 787-794.
- [6] 李建鸿,黄昌春,查勇,等. 长江干流表层水体悬浮物的空间变化特征及遥感反演[J/OL]. *环境科学*. [2021-06-07]. <https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202103245>.
LI Jian-hong, HUANG Chang-chun, ZHA Yong, et al. The characteristics of the spatial variation of suspended matter in the surface water of the Yangtze River and its remote sensing retrieval[J/OL]. *Environmental Science*. [2021-06-07]. <https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202103245>.
- [7] 吴晓东,王露,晁建颖,等. 太湖流域漏湖水体悬浮物分布特征及其影响因素[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(6): 1 848-1 857.
WU Xiao-dong, WANG Lu, CHAO Jian-ying. Distribution characteristics and influencing factors of suspended solids in Gehu Lake in Taihu Lake Basin[J]. *Lake Science*, 2020, 32(6): 1 848-1 857.
- [8] 李文建,王珍岩,黄海军. 夏季南黄海悬浮体粒度分布及其影响因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(6): 49-60.
LI Wen-jian, WANG Zhen-yan, HUANG Hai-jun. The particle size distribution of suspended matter in the South Yellow Sea in summer and its influencing factors[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2020, 40(6): 49-60.
- [9] 高炜程,李修岭,胡长伟. 沂蒙山区大型水库水体悬浮物的时空变化[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(S2): 80-87.
GAO Wei-cheng, LI Xiu-ling, HU Chang-wei. The temporal and spatial changes of suspended solids in large reservoirs in Yimeng Mountains[J]. *Environmental Science and Technology*, 2018, 41(S2): 80-87.
- [10] 赵盖博,边昌伟,徐景平. 潮流和风浪对海底边界层剪切应力和悬浮物浓度影响的观测研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(11): 83-91.
ZHAO Gai-bo, BIAN Chang-wei, XU Jing-ping. Observational study on the effects of tidal currents and wind waves on the shear stress and suspended solids concentration in the seafloor boundary layer[J]. *Journal of Ocean University of China(Natural Science Edition)*, 2019, 49(11): 83-91.
- [11] 王建军,范成新,张路,等. 太湖底泥间隙水中金属离子分布特征及相关性[J]. *中国环境科学*, 2004, 24(1): 120-124.
WANG Jian-jun, FAN Cheng-xin, ZHANG Lu, et al. Distribution characteristics and correlation of metal ions in sediment gap water of Taihu Lake. *China Environmental Science*, 2004, 24(1): 120-124.

- [J]. 岩土力学, 2005(9): 1 508-1 516.
- ZHANG Gui-jin, XU Wei-ya. Summary about risk analysis of geotechnical engineering and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005(9): 1 508-1 516.
- [22] HENDERSON N, BRÉTTAS J C, SACCO W F. A three-parameter Kozeny-Carman generalized equation for fractal porous media [J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(15): 4 432-4 442.
- [23] 敖雪菲. 基于精细地质建模的水利工程灌浆数值模拟及稳定性分析[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- AO Xue-fei. Research on numerical simulation and stability analysis of grouting engineering based on three-dimensional refined geological model in hydraulic project [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [24] 伍宇腾, 韩增强, 王川婴, 等. 基于裂隙充填特征的坝基岩体灌浆效果评价[J]. 岩土力学, 2017, 38(S2): 311-316.
- WU Yu-teng, HAN Zeng-qiang, WANG Chuan-ying, et al. Grouting effect evaluation of dam foundation rock mass based on fracture filling characteristics [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(S2): 311-316.
- [25] 袁敬强, 陈卫忠, 黄世武, 等. 全风化花岗岩注浆加固特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S1): 2 876-2 882.
- YUAN Jing-qiang, CHEN Wei-zhong, HUANG Shi-wu, et al. Experimental study on physico-mechanical properties of grouted completely weathered granite [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S1): 2 876-2 882.
- [26] 郭芳, 梁正召, 龚斌, 等. 岩土工程边坡稳定性分析中的拉伸破坏问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S1): 3 192-3 205.
- GUO Fang, LIANG Zheng-zhao, GONG Bin, et al. Tensile failure in stability analysis of rock and soil slopes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S1): 3 192-3 205.
-
- (上接第 31 页)
- [12] 王龙飞, 程逸群, 胡晓东, 等. 江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状[J]. 环境科学, 2021, 42(2): 749-760.
- WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, et al. The current status of antibiotics and resistance genes in representative water sources of Jiangsu Province [J]. Environmental Science, 2021, 42(2): 749-760.
- [13] 程逸群, 王龙飞, 胡晓东, 等. 江苏省代表性水源地持久性有机污染物污染特征及风险评价[J]. 江苏水利, 2020(4): 1-9.
- CHENG Yi-qun, WANG Long-fei, HU Xiao-dong, et al. Pollution characteristics and risk assessment of persistent organic pollutants in representative water sources in Jiangsu Province [J]. Jiangsu Water Resources, 2020(4): 1-9.
- [14] 王华, 冯启言, 郝莉莉. 我国底泥重金属污染防治[J]. 污染防治技术, 2004, 17(1): 75-78.
- WANG Hua, FENG Qi-yan, HAO Li-li. Prevention and control of heavy metal pollution in sediments in my country [J]. Pollution Control Technology, 2004, 17(1): 75-78.
- [15] DAVISON W, ZHANG H. Insitu speciation measurements of trace components in natural waters using thin film gels [J]. Nature, 1994, 367: 546-548.
- [16] 李希媛, 滕辉, 赵玉杰, 等. 薄膜扩散梯度 (DGT) 技术在环境微界面物质运移过程研究中的应用[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1 649-1 660.
- LI Xi-yuan, TENG Hui, ZHAO Yu-jie, et al. Application of diffusion gradient in thin-films (DGT) technology in the study of the transport process of environmental microinterfaces [J]. Journal of Agro-Environment Sciences, 2020, 39(8): 1 649-1 660.
- [17] 李财, 任明漪, 石丹, 等. 薄膜扩散梯度 (DGT): 技术进展及展望[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(12): 2 613-2 628.
- LI Cai, REN Ming-yi, SHI Dan, et al. Thin film diffusion gradient (DGT): technological progress and prospects [J]. Journal of Agricultural Environment Sciences, 2018, 37(12): 2 613-2 628.