

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2017.02.014

基于不同疏浚绞刀结构的底泥污染物释放情况分析

余义瑞^{1,2}, 杨白露^{1,2}, 董苗苗^{1,2}, 朱家悦^{1,2}

(1. 重庆交通大学省部共建水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074)

摘要:分别采用普通绞刀、加罩普通绞刀、螺旋绞刀和加罩螺旋绞刀进行疏浚模拟试验,通过比较疏浚点周围上覆水中各污染物浓度变化情况,分析不同结构绞刀的环保性能。结果表明:采用螺旋绞刀疏浚下,底泥中污染物释放量较采用普通绞刀疏浚时小;在这两类绞刀上加装罩壳均能有效抑制底泥中污染物释放,特别是疏浚后1 h内营养盐氮释放;理想的绞吸式挖泥船环保功能改造方案为采用螺旋绞刀替换普通绞刀并加装罩壳(防扩散装置)。

关键词:疏浚;底泥污染物;普通绞刀;螺旋绞刀;罩壳;环保功能;污染物释放量

中图分类号:X5 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2017)02-0074-05

Study of sediment contaminants release based on different dredging cutter structures

YU Yirui^{1,2}, YANG Bailu^{1,2}, DONG Miaomiao^{1,2}, ZHU Jiayue^{1,2}

(1. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Dredging simulation experiments were carried out using a general cutter, a housing-general cutter, a spiral cutter, and a housing-spiral cutter, in order to study the change of contaminant concentration in overlying water and compare the environmental performance of cutters with different structures. The results were as follows: dredging with the spiral cutter, the amount of released sediment contaminants was less than that with the general cutter; dredging with both the spiral cutter and the general cutter equipped with housings could effectively reduce the amount of released sediment contaminants, particularly the amount of released nutrient nitrogen one hour after dredging; and the ideal transformation scheme for a cutter suction dredger (CSD) in terms of its environment-friendly function is dredging with a spiral cutter equipped with an anti-diffusion device (housing).

Key words: dredging; sediment contaminants; general cutter; spiral cutter; housing; environmental protection function; pollutants release amount

航道疏浚作为一种为了满足航行需求和清除底泥物质而开展的水下开挖工序^[1],对维持现存航道具有非常重要的作用^[2-3];同时,对支撑贸易以及经济可持续发展也具有重大意义^[4]。长江作为“黄金水道”,其货物运输量在全球内河位居第一,在全球内河经济带中发挥着独特的作用。根据国务院颁发的[2014]39号文件,国家将推进长江经济带的发

展,把长江建成畅通的内河航道以满足“万吨”级货轮航行要求。因此,为了实现这一目标就必须加快对长江航道的整治,特别需加强对浅滩、暗礁、回水淤积段的疏浚工作。相关研究表明,疏浚工作通常以水力或机械切割机挖掘底泥的形式开展,但是传统的疏浚设备在疏浚过程中不可避免地引发富含营养物质、重金属、持久性有机物的底泥再悬浮^[1,5-6]。

基金项目:重庆市教育委员会科研创新项目(CYS15189)

作者简介:余义瑞(1991—),男,硕士研究生,研究方向为水污染控制。E-mail:984064042@qq.com

而当底泥颗粒受到扰动时,结合在其表面及内部的污染物就会释放出来^[7-8],对水体造成二次污染。然而,国内目前在航道疏浚工程方面还很少考虑到水环境保护问题。长期以来,人们对应用于湖泊污染治理的底泥疏浚技术进行了大量的研究^[9-10],而对疏浚过程中清淤泥沙对环境的影响缺乏必要的检测及研究。迄今,大多数研究主要集中在悬浮物质的扩散规律上^[11-13],而对因底泥再悬浮所引发的污染物释放规律研究则较为少见。

因此,本文针对航道疏浚工程中使用较为广泛的绞吸式挖泥船(cutter suction dredger, CSD),考察不同绞刀结构对底泥污染物释放情况的影响以及对分析各结构类型绞刀的环保性能,以期提出较佳的 CSD 环保功能改造方案,为研发环保型疏浚设备提供理论依据及技术支撑。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

长江航道整治工程所需的 CSD 为中型规模,其生产率为 500 m³/h。通过特定计算可得出实物绞刀的主要几何参数及运动参数,然后根据几何相似和动力学相似理论可确定试验模型绞刀的几何参数及运动参数(表 1)。试验模型绞刀如图 1 所示。

表 1 实物绞刀及试验模型绞刀的具体参数

项目	长度/ m	直径/ m	刀片 螺旋角 /(°)	绞刀 圆锥角 /(°)	转速/ (r·min ⁻¹)	横移速度/ (m·min ⁻¹)
实物 螺旋绞刀	2.5	2	7.5	16	40	10
试验 螺旋绞刀	0.025	0.02	7.5	16	40	0.1
实物 普通绞刀	2.5	2	0	16	40	10
试验 普通绞刀	0.025	0.02	0	16	40	0.1

试验所用泥样采自三峡常年回水区淤积较为严重的忠县河段天然底泥。为确定底泥污染物的最大释放量,称取 25 g 泥样置于 1 L 的锥形瓶中,加入 500 mL 纯水,于恒温振荡器(18.2℃,三峡库区年均水温)中振荡 24 h,分别于 1 h、2 h、4 h、6 h、8 h、12 h、24 h 取样,样品经离心过滤(离心机转速为 4 000 r/min,时间为 20 min)后测定污染物含量。试验泥样中污染物 TN、NH₃-N、COD 的最大释放量分别为 77.8 mg/kg、45.2 mg/kg、2 484.8 mg/kg。

1.2 试验方法

分别采用普通绞刀、加装罩壳的普通绞刀、螺旋绞刀以及加装罩壳的螺旋绞刀进行疏浚模拟试验,考察疏浚点周围上覆水中各污染物(COD、TN、NH₃-N)



(a) 加罩螺旋绞刀



(b) 普通绞刀

图 1 试验模型绞刀

的浓度变化情况,对比分析各结构型式绞刀的环保性能。另外,试验采用自来水作为上覆水,以使底泥中污染物的释放现象更加显著。取样时间分别为 0.25 h、0.5 h、1 h、3 h、5 h、7 h、12 h 和 24 h。

根据测得的营养盐氮(NH₃-N 与 TN)的累积释放量,可通过式(1)计算出营养盐氮的释放速率,以深入分析底泥中污染物的释放规律。

$$v = (R_n - R_{n-1})/n \tag{1}$$

式中: v 为氮的释放速率,g/(m³·h); R_n, R_{n-1} 分别为第 n 次和第 $n-1$ 次采样时的累积释放量,g/m³; n 为两次采样间隔时间,h。

2 结果与讨论

2.1 不同型式绞刀对底泥污染物释放情况的影响

采用螺旋绞刀替换普通绞刀疏浚能有效减少底泥中污染物累积释放量,底泥中 COD、TN 和 NH₃-N 等污染物释放效果在采用螺旋绞刀疏浚下均受到不同程度的抑制作用,三者的最大累积释放量分别为 40 g/m³、1.28 g/m³ 和 0.64 g/m³;而底泥中 COD、TN 和 NH₃-N 的最大累积释放量在采用普通绞刀疏浚下则分别高达 47 g/m³、1.48 g/m³ 和 0.69 g/m³(图 2)。

由图 3 可知,底泥中 TN 及 NH₃-N 释放速率在采取不同结构绞刀疏浚下均随时间逐渐降低。但是,采用螺旋绞刀替换普通绞刀对疏浚后 1 h 内营养盐氮的释放速率影响较显著。采用螺旋绞刀疏浚时,底泥中 TN 及 NH₃-N 释放速率较采用普通绞刀疏浚时小。1 h 后,对于采用不同结构绞刀疏浚,就营养盐氮释放速率而言,影响程度的差异性逐渐减少。同时,底泥中 TN 及 NH₃-N 释放速率降低的趋势均随着时间逐渐变缓;约 7 h 后,两者均趋于保持稳定状态,并接近于零(图 3)。

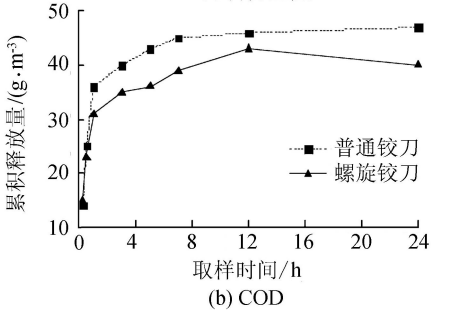
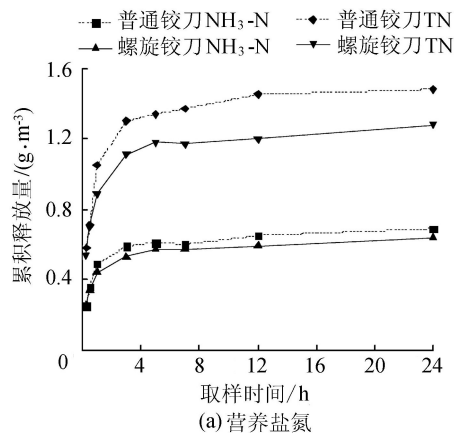


图2 采用螺旋铰刀/普通铰刀疏浚时底泥中污染物累积释放量

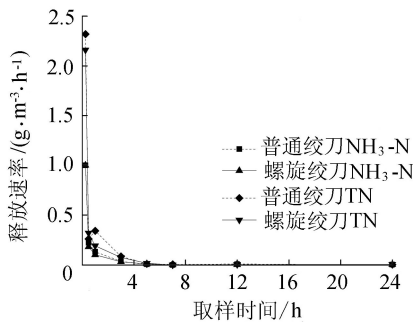


图3 采用螺旋铰刀/普通铰刀疏浚下底泥中营养盐氮释放速率变化

试验结果表明,螺旋铰刀在有效控制疏浚中底泥污染物释放量方面优于普通铰刀。采用螺旋铰刀进行疏浚作业均能减少由于疏浚引起的底泥中各类污染物释放量,但在程度上存在差异。其中,对COD和TN释放的抑制作用较为显著,相比于采用普通铰刀疏浚下,两者的累积释放量分别减少14.9%和13.5%;对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放效果的影响则较弱,相比于采用普通铰刀疏浚下,其累积释放量减少7.2%。相关研究^[14]表明,工程疏浚旨在增加河道的容量,主要用于航道疏通、港口建设;而环保疏浚的目的主要是为改善水域系统环境,清除水域系统中污染底泥。另外,由于环保疏浚所清除的污染底泥比工程疏浚所清除的泥层软,故其不仅利于切削,也更易于悬浮扩散。分析认为,螺旋铰刀具有连续线型刀刃,故其对底泥的切削相对平稳,对泥面的冲击小,最大限度地降低了对底泥的扰动;而普通

绞刀为了具备更强的破土能力,导致其刀刃不连续,舍弃了环保性能。因此,其在疏浚过程中对底泥的扰动相对较大,而底泥颗粒受到扰动时,结合在其表面及内部的污染物就会释放出来^[7-8],对水体造成二次污染。

2.2 加罩普通绞刀对底泥污染物释放特性的影响

普通绞刀加装罩壳能有效抑制疏浚过程中底泥污染物释放。底泥中COD、TN和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放量在采用加罩普通绞刀疏浚下均有所降低,三者的最大累积释放量分别为 34 g/m^3 、 1.16 g/m^3 和 0.57 g/m^3 ,相比于采用螺旋绞刀疏浚下,分别减少15.0%、9.4%和1.1%(图4)。

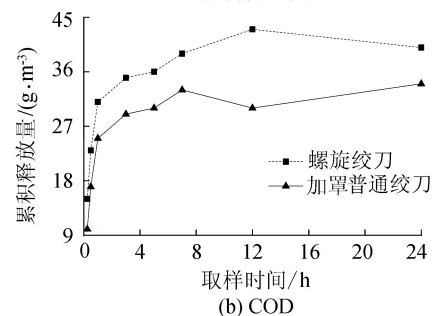
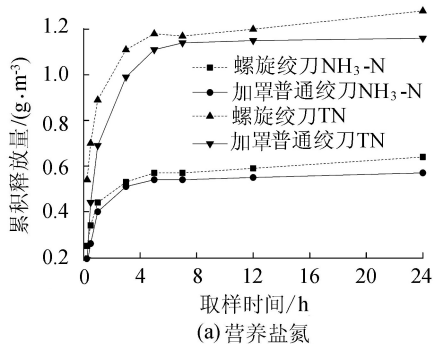


图4 采用螺旋铰刀/加罩普通绞刀疏浚时底泥中各污染物累积释放量

采用不同结构的绞刀疏浚后底泥中营养盐氮释放速率均随时间逐渐减小。但是,普通绞刀加装罩壳对疏浚后1 h内底泥中营养盐氮的释放速率影响较显著,如图5所示,采用加罩普通绞刀进行疏浚作业时,底泥中TN及 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放速率较采用螺旋绞刀疏浚时小。1 h后,影响程度的差异性逐渐减少,同时底泥中TN及 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放速率降低的趋势均随着时间逐渐变缓;约7 h后,两者均趋于保持稳定,并接近于零。

试验结果表明,普通绞刀加装罩壳能在一定程度上减少疏浚过程中底泥污染物的释放量,对污染物释放的抑制效果优于螺旋绞刀。其中对COD释放的抑制效果最为显著,其累积释放量比采用螺旋绞刀疏浚时减少15.0%;其次为TN,比采用螺旋绞刀疏浚减少9.4%;对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的影响则相对较弱,比采用螺旋绞刀疏浚减少1.1%。总体上,普通绞刀

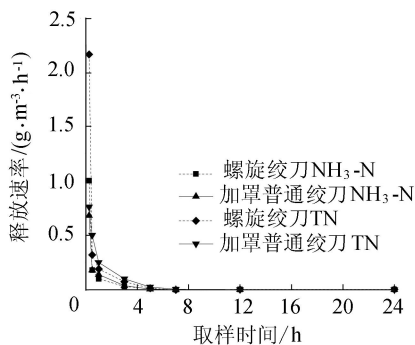


图5 采用螺旋绞刀/加罩普通绞刀疏浚下底泥中营养盐氮释放速率变化

加装罩壳后,对减少疏浚过程中底泥污染物的释放量较显著。分析认为,在CSD疏浚过程中,绞刀在切削底泥的同时也会引发其周围的水随着转动,形成一个奇特的流场,导致绞刀切削下的底泥分散成与水混合的颗粒物。同时,生成的泥水混合物将脱离泥泵的吸力场,并向疏浚点四周扩散,成为新的污染源,向水体释放结合在底泥颗粒表面或内部的各类污染物^[9],形成二次污染。而在绞刀上加装防扩散装置,则能有效防止泥水混合物扩散,避免其脱离泥泵的吸力场,有效降低二次污染。

2.3 加罩螺旋绞刀对底泥污染物释放特性的影响

由图6可知,采用加装罩壳的螺旋绞刀进行疏浚有助于减少由于疏浚引起的底泥中污染物累积释放量。底泥中COD、TN和NH₃-N释放量在采用加罩螺旋绞刀疏浚下均受到不同程度抑制作用,三者的最大累积释放量分别为30 g/m³、1.07 g/m³和0.54 g/m³,相比于采用加罩普通绞刀疏浚下,三者的累积释放量分别减少11.8%、7.8%和5.3%。

底泥中营养盐氮释放速率在采用不同结构绞刀疏浚后均随时间逐渐降低。但是,螺旋绞刀加装罩壳对疏浚后1 h内底泥中营养盐氮的释放速率影响较明显,如图7所示,底泥中TN及NH₃-N释放速率在采用加罩螺旋绞刀疏浚下均比采用加罩普通绞刀时小。1 h后,两者间的差异性逐渐减少。同时,底泥中TN及NH₃-N释放速率降低的趋势均随着时间逐渐变缓,约7 h后,两者均趋于稳定并接近于零。

试验结果表明,对比其他结构型式绞刀,螺旋绞刀加装罩壳能最大程度抑制疏浚过程中底泥污染物释放。另外,采用任意种环保型绞刀疏浚对底泥中NH₃-N释放的抑制效果均弱于其对COD及TN释放的抑制效果。分析认为,主要原因可能为上覆水中TN和COD均与悬浮颗粒物紧密相关,而环保型绞刀均能在不同程度上减少疏浚中对底泥造成的扰动,有效控制颗粒物再次悬浮,因而对这二者释放的抑制作用较显著;而NH₃-N为易溶解于水的离子

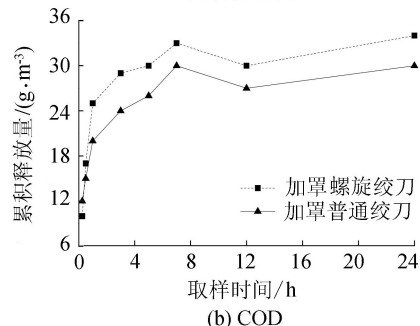
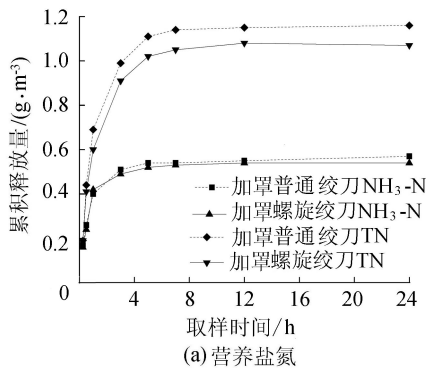


图6 采用加罩螺旋绞刀/加罩普通绞刀疏浚时底泥中污染物累积释放量

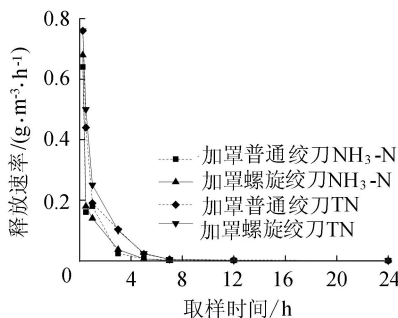


图7 采用加罩螺旋绞刀/加罩普通绞刀疏浚下底泥中营养盐氮释放速率变化

态,与悬浮颗粒的相关性弱于其余两者,故而其释放受到的抑制作用较弱。

3 结 论

a. 相比于采用普通绞刀疏浚下,采用螺旋绞刀疏浚时,底泥中COD、TN和NH₃-N的累积释放量分别减少14.9%、13.5%和7.2%;采用加罩普通绞刀疏浚时,底泥中COD、TN和NH₃-N的累积释放量比采用螺旋绞刀时分别减少15.0%、9.4%和1.1%;采用加罩螺旋绞刀疏浚时,底泥中COD、TN和NH₃-N的累积释放量比采用加罩普通绞刀时分别减少11.8%、7.8%和5.3%。

b. 在任何型式绞刀上加装防扩散装置和采用螺旋绞刀替换普通绞刀进行疏浚都能在一定程度上抑制疏浚中底泥污染物的释放;对于抑制疏浚中底泥污染物的释放,普通绞刀加装防扩散装置比单独采用螺旋绞刀疏浚更具优势;对比其他结构式的

绞刀,采用加装防扩散装置的螺旋绞刀疏浚,对底泥中污染物释放的抑制效果最佳,为理想的 CSD 环保功能改造方案。

参考文献:

[1] MANAP N, VOULVOULIS N. Environmental management for dredging sediments: the requirement of developing nations [J]. Journal of Environmental Management, 2015, 147: 338-348.

[2] PAZOS M, IGLESIAS O, GÓMEZ J, et al. Remediation of contaminated marine sediment using electrokinetic-Fenton technology [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2013, 19(3): 932-937.

[3] WANG L, YUAN X, ZHONG H, et al. Release behavior of heavy metals during treatment of dredged sediment by microwave-assisted hydrogen peroxide oxidation [J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 258: 334-340.

[4] BATES M E, FOX-LENT C, SEYMOUR L, et al. Life cycle assessment for dredged sediment placement strategies [J]. Science of the Total Environment, 2015, 511: 309-318.

[5] GHOSH U, ZIMMERMAN J R, LUTHY R G. PCB and PAH speciation among particle types in contaminated harbor sediments and effects on PAH bioavailability [J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37 (10): 2209-2217.

[6] PALM A, COUSINS I, GUATAFSSON Ö, et al. Evaluation of sequentially-coupled POP fluxes estimated from simultaneous measurements in multiple compartments of an air-water-sediment system [J]. Environmental Pollution, 2004, 128(1): 85-97.

[7] GARRETT R G. Natural sources of metals to the environment [J]. Human and Ecological Risk Assessment, 2000, 6(6): 945-963.

[8] BURTON Jr G A. Sediment quality criteria in use around

the world [J]. Limnology, 2002, 3(2): 65-76.

[9] RULEY J E, RUSCH K A. An assessment of long-term post-restoration water quality trends in a shallow, subtropical, urban hypereutrophic lake [J]. Ecological Engineering, 2002, 19(4): 265-280.

[10] 王松, 王立彤, 魏新庆. 汉沽污水库底泥的环保疏浚试验工程设计[J]. 中国给水排水, 2011, 27(4): 54-57. (WANG Song, WANG Litong, WEI Xinqing. Design of environment-friendly dredging project of sediments in Hangu Sewage Reservoir [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(4): 54-57. (in Chinese))

[11] CAPELLO M, CUTRONEO L, FERRANTI M P, et al. Mathematical simulation of the suspended solids diffusion during dredging operations on the continental shelf off the coast of Lazio (Central Tyrrhenian Sea, Italy) [J]. Ocean Engineering, 2013, 72: 140-148.

[12] HOSSAIN S, EYRE B D, MCKEE L J. Impacts of dredging on dry season suspended sediment concentration in the Brisbane River estuary, Queensland, Australia [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2004, 61 (3): 539-545.

[13] 颜昌宙, 范成新, 杨建华, 等. 湖泊底泥环保疏浚技术研究展望[J]. 环境污染与防治, 2004, 26(3): 189-192. (YAN Changzhou, FANG Chengxin, YANG Jianhua, et al. Prospect of environment-friendly dredging technologies applied in lake dredging [J]. Environmental Pollution and Control, 2004, 26 (3): 189-192. (in Chinese))

[14] 张绍华, 蒋昌波, 陈杰, 等. 挖泥船疏浚施工引起的悬浮物扩散现场观测研究[J]. 泥沙研究, 2014 (4): 44-48. (ZHANG Shaohua, JIANG Changbo, CHEN Jie, et al. Field observation and study of turbidity plume induced by dredger [J]. Journal of Sediment Research, 2014(4): 44-48. (in Chinese))

(收稿日期:2016-05-16 编辑:徐 娟)

(上接第 21 页)

[10] 曹阳, 滕彦国, 王金生, 等. 泉州市地下水功能区划分 [J]. 地球学报, 2011(4): 469-476. (CAO Yang, TENG Yanguo, WANG Jinsheng, et al. The division of groundwater function zones in Quanzhou [J]. Acta Geosciences Sinica, 2011(4): 469-476. (in Chinese))

[11] 胡琪坤, 李发文, 冯平. 基于类型特征的天津市地下水功能区划分 [J]. 水利水电技术, 2013(9): 4-7. (HU Qikun, LI Fawen, FENG Ping. Type-character based groundwater functional zoning in Tianjin [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013(9): 4-7.

(in Chinese))

[12] 高爽, 唐蕴, 王海玲, 等. 内蒙松辽流域地下水功能区划分研究 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2015, 13 (2): 117-123. (GAO Shuang, TANG Yun, WANG Hailing, et al. Research on groundwater functional division in Songliao River Basin of Inner Mongolia [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2015, 13 (2): 117-123. (in Chinese))

(收稿日期:2016-07-27 编辑:彭桃英)