

水库围油桶与拦藻网对石油类污染的防控优化

徐斌¹, 张志¹, 侯伟昶², 杨生巧³, 唐玉霖¹, 任小孟⁴, 张天阳¹

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 上海城投原水有限公司, 上海 200125;

3. 中铁上海工程局集团市政环保工程有限公司, 上海 201906; 4. 中国人民解放军海军特色医学中心, 上海 200433)

摘要: 当水源地航运设施密集时, 会使原水面临较高的突发石油类污染风险。分析了围油桶和拦藻网及组合工艺在不同流速和溢油量下的除油效能。实验探究了围油桶不同安装方式在不同流速下对持续溢油的去除情况。结果表明, 淹没深度为 0 cm 对溢油的去除效果最差, 淹没深度为 1.5 cm 在各种流速下出口质量浓度均较低 ($0.14 \sim 0.61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。考察了拦藻网的不同布设方式(自由平铺, 竖直放置, 双层放置, 垂直平铺)以及不同藻浓度下对溢油的吸附性能。结果表明, 垂直平铺的方式在各初始情况下均有较低的出口质量浓度且效果稳定 ($0.15 \sim 0.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$); 组合式工艺相较于围油桶有较好的性能提升, 12 min 出口处质量浓度较单独围油桶分别降低了 78.8%, 84.6% 和 78.5%; 高浓度藻液处理后的拦藻网除油效果下降, 与活性位点的减少有关。

关键词: 突发性石油类污染; 围油桶; 拦藻网; 拦截除油; 效能优化

中图分类号: X524

文献标志码: A

Optimization of Petroleum Pollution Prevention and Control by Oil Containment Booms and Algae Barriers in Reservoir

XU Bin¹, ZHANG Zhi¹, HOU Weiyi², YANG Shengqiao³, TANG Yulin¹, REN Xiaomeng⁴, ZHANG Tianyang^{1*}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Chengtou Raw Water Co. Ltd., Shanghai 200125, China; 3. Municipal Environmental Protection Engineering Co. Ltd. of CERC Shanghai Group, Shanghai 201906, China; 4. PLA Naval Medical Center, Shanghai 200433, China)

Abstract: High risk for accidental petroleum pollution in raw water when there is a congestion of shipping facilities in the water source area. The effectiveness in removing oil

at different flow velocities and oil spill volumes was analyzed for oil containment drums and algal nets, as well as for the combined process. The removal performance under different flow velocities by different installation methods of oil containers for continuous oil spill was experimentally investigated. The results show that a submergence depth of 0 cm is the least effective in removing oil spills, where 1.5 cm results in lower outlet concentrations ($0.14 \sim 0.61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) at all flow rates. Various laying methods (free laying, vertical laying, double laying, vertical laying) and different algal concentrations were investigated for the adsorption performance of the algal nets. The results show that the vertical laying method has lower outlet concentration and stable effect ($0.15 \sim 0.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) in each initial situation; the combined process has better performance improvement compared with the oil drum, and the concentration at the 12 min outlet reduces by 78.8%, 84.6%, and 78.5%, respectively; the decrease in the oil removal effect of the algal nets after treatment of high algal concentration is related to the reduction of active sites.

Key words: accidental petroleum pollution; oil drums; algal nets; oil interception and removal; optimization of effectiveness

城市可持续发展的首要任务就是提供安全的饮用水、为公共卫生事业处理污废水以及防止洪水^[1]。坚持系统观念治水, 从生态系统整体性出发, 保障水源水供应量质并举, 为城市高质量发展铺平道路^[2]。目前, 国内外许多城市的水源地处于航运区域, 因此均面临各种污染事件的威胁, 其中包括固定源(如工业污染源, 水源地河流沿线加油站、船舶维修保养等)、流动源

收稿日期: 2023-08-09

基金项目: 国家自然科学基金(52270010, 51978483); 国家重点研发计划(2021YFC3201303); 上海市青年科技启明星(22QC1400500)

第一作者: 徐斌(1976—), 男, 教授, 工学博士, 主要研究方向为饮用水安全保障技术. E-mail: tjwenwu@tongji.edu.cn

通信作者: 张天阳(1990—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为饮用水安全保障技术.

E-mail: tianyang1815@126.com



论文
拓展
介绍

(如航运船舶事故漏油等)等,均为水源地带来了突发石油类污染的风险,威胁城市的供水安全^[3-4]。据报道,在2003年至2019年之间,我国记录了200多起由交通事故引起的水体污染事件,而水上交通事故以航运事故污染尤其是柴油泄露排放为重要污染^[5]。青岛海事局于2021发布消息,“交响乐”轮在黄海附近发生船舶漏油事故,影响半径超过10海里,预计溢油量超过500t,对周围环境造成严重的污染威胁^[6]。在内陆,2017—2018年一年间,太浦河全线监测点位石油污染物超标率达到了62.96%^[7]。太浦河是上海市西南部的大河,上接太湖下承黄浦江,同时具有防洪、排涝、航运和供水的功能,为了满足沿线工业、企业和船舶的运输需求,加油站、码头等风险事故源沿河岸均有分布^[8],因此突发性石油类污染问题在内陆同时存在^[9]。而当溢油事故发生时,常规的处置技术可分为物理法(围油栏、撇油器等)、化学法(表面活性剂、吸附剂、凝油剂、燃烧法等)、生物法等^[10]。

水库设有围油桶、拦藻网等工艺用于去除水中石油类物质。围油桶串联后漂浮在水面上,横贯水面;拦藻网最上部漂浮在水面上,下部分浸入水中。先前的研究表明拦藻网和围油桶对不同浓度的油水混合物都有一定的吸附效果,但整体来说拦藻网效果要优于围油桶,这可能与吸附材料的放置方式和性质有很大关系^[4]。因此考虑到溢油事件的影响,如何高效利用现有应急处理工艺,提高溢油事故发生时对溢油的处理效能,具有重要意义。

本文探究了在不同溢油量和流速的情况下,围油桶和拦藻网的不同安装方式对吸附拦截溢油效果的影响,研究了不同藻浓度情况下拦藻网的拦油性变化,为提高物理法除油效能、应对突发性石油类污染提供技术支撑。

1 实验部分

1.1 实验试剂与仪器

实验中所用的油品为0#柴油,购于附近加油站。石油类标准物质为GBW(E)080913海洋环境检测石油标准物质($1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。无水硫酸钠、硅酸镁、盐酸购自国药集团化学试剂有限公司(上海)。测定仪器为UV-9000S紫外分光光度计,测定波长为225nm。pH通过pH计(Mettler,瑞士)测定,型号为FE20-FiveEasy。实验水箱定制于淘宝商店云达有机玻璃,材料为10mm亚克力板。

1.2 分析方法

《水质 石油类的测定 紫外分光光度法(试行)》(HJ970—2018)中规定,该方法适用于地表水、地下水和海水中的石油类物质的测定。文中采用紫外分光光度法。

1.3 实验装置的搭建

模拟溢油事故发生时的实验装置如图1所示,该装置由水流进口,溢流堰,围油桶安置区,拦藻网安置区,流量出口堰和水流出口6个部分组成。其中水流进口是连接蠕动泵,作为装置的水流入口,水流进入入口区后通过翻越堰流入装置的主体区域,在进入装置的水面处有一道速度消能装置,防止在起始段形成较大的漩涡,阻碍水流的平稳推进。随后是到围油桶布置区,模拟实际溢油到达的第1个处理装置,围油桶。经过了围油桶区后到达拦藻网区,模拟的是第2个处理装置,拦藻网,随后通过堰流翻越进入出口区,通过管嘴流出,在实际操作时通过测量管嘴处500mL流出水的柴油浓度来确定装置的处理效果。通过改变入口处流量的大小来改变在装置内部溢油的表面流动速度来模拟不同流速下的情况。该测试装置着重考虑溢油的表面流动情况和应急处理装置的布置情况,方便准确,易于操作。

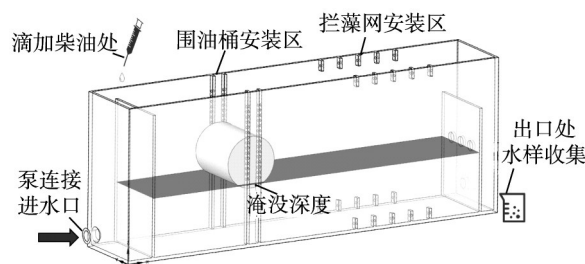


图1 实验水箱装置

Fig.1 Experimental water tank setup

1.4 实验步骤

为了探究在流动情况下围油桶和拦藻网对溢油的吸附处理性能,搭建了模拟河道流动情况下的溢油吸附拦截实验装置。以0#柴油为模拟事故泄露油品,对水库现有应急处理装置进行了不同布置方式的吸附拦截实验。考察了围油桶和拦藻网在不同布置方式的情况下,对不同流速和油量下的拦截吸附效果,并进行了布置方案的优选比较。

(1) 溢油在流动水面上从起始端到出口段的流动距离除以流动时间得到溢油的扩散流速,通过改变进口流量的不同而改变此流速;

(2) 根据实验装置尺寸取围油桶的1/4作为模

拟围油桶装置,外表面按照不同的淹没深度包裹不同长度的围油桶外表面材料,并保证两侧不留缝隙,在实验前安装完成;

(3) 在进水堰上按照一定的时间间隔向进水堰中滴加0#柴油,保证出口处的质量浓度趋于稳定,由于油水不溶且整个装置为流动状态,难以控制水中石油类质量浓度在较低水平,因此设置装置质量浓度为地表水石油类质量浓度限定值($0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)的100倍左右,即 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右作为测试质量浓度;

(4) 在滴加实验开始时即先从出口处用烧杯接500mL空白水样测定水中的空白浓度,作为背景浓度;

(5) 按照一定的时间间隔(0,2,3,4,6,12min)在出口处取样测定,由于水样流出500mL需要时间较长,尤其是在较小流速的情况下,因此时间间隔在前期以1min为间隔,后续到达稳定后,查看在较大时间间隔的值;

(6) 在取样结束后关闭入口处泵的电,取出围油桶材料,并依次测定取样的0#柴油浓度。

值得注意的是:①每次实验前均保证更换围油桶材料,保证结果互不影响;②每次实验前将装置内流道区使用表面活性剂清洗并冲洗干净,避免附着在内壁上的溢油干扰下一次实验。

2 结果与讨论

2.1 围油桶淹没深度对溢油去除效率的影响

为初步确定实验的最佳设置情况,对围油桶装置的淹没深度进行了预实验探究,当突发事故漏油时,围油桶仅在前端与水面的交界处以及往上的一小段距离会和溢油接触,与溢油的接触面积有限,因此不能较好的利用到绝大部分的围油桶面积。此时,如果两侧有缝隙,溢油就会从缝隙中穿过,造成拦油失效,此种情况较简单,本文不再探究。而在没有缝隙的情况下,水流会携带溢油从围油桶的下方穿过,淹没深度的多少直接决定了溢油穿过围油桶的难易程度。

通过探究在 $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的流速、水中油量为 $5.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的情况下,测定了在直接放置情况(淹没0cm)、淹没0.5、1.5、3和5cm的深度情况下,5min后出口处的石油质量浓度,结果如图2所示,柴油的去除效果与淹没深度的关系非常密切。在直接放置的情况下,由于围油桶中心为软质聚氨酯型泡沫塑料,外围包裹的材料PE棉,因此具有重量轻、疏水亲油的特点,在不加任何外力的情况下会直接漂浮在水面上。因此并没有起到很好的拦截效果,拦截率为88.2%。随着淹没深度的增加,拦截

效果有了非常明显的增大,可能与围油桶外表面材料与溢油的接触面积增大、淹没深度的增加改变了围油桶周围的流场情况等因素有关。当淹没深度为1.5cm时达到最大,在当前流速下去除率达到了96.8%。而随着继续增大淹没深度,去除效果反而有较小的下降(96.3%和95.7%),说明并非淹没的越深越好,因此后续的实验选择围绕淹没0cm、1.5cm和3cm进行。

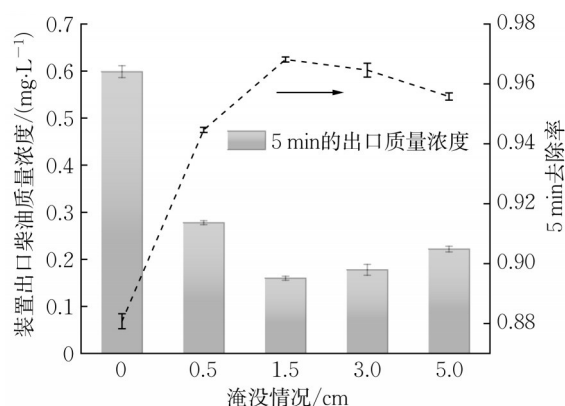


图2 不同淹没情况的5min出口浓度及去除率

Fig.2 5min outlet concentration and removal rate for different inundation scenarios

2.2 单独围油桶对溢油的拦截情况

在不同的水流流速和溢油量的情况下,分别以淹没0cm, 1.5cm和3cm为淹没深度指标,探究其对吸附溢油效能的影响,结果如图3所示。可以看出,在不同的流速情况下,由于滴加的油量速率是一定的,在较慢的流速会携带更多的油抵达出口,较快的流速情况下,携带的油量反而会更少。

如图3a所示,在较慢的流速情况下,淹没0cm情况在小流速下表现也很好,可能是因为小流速情况下,水流动能不足以裹挟在围油桶装置前方累积下来的油,造成溢油失效。在实验结束的12min时,3种淹没深度的去除效果顺序为淹没深度 $1.5 \text{ cm} > 0 \text{ cm} > 3 \text{ cm}$,与预实验不同的是,在 $0.06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的流速情况下,3cm的淹没深度反而在12min表现不佳,原因可能是过深的淹没深度让围油桶下方的流速过高,虽然增加了42.27%的接触面积,但是流速的增加导致接触时间的减少。其中未设置淹没状态的水样中的柴油浓度在6—12min并没有明显的变化,原因可能是此时的围油桶与溢油的接触面积最少,导致在6—12min可能就达到了吸附饱和,剩下的油以一个均匀、平缓的流量泄露到出口。

值得注意的时,在每条曲线的2—3min之间浓度均有波动,是因为溢油会先随着水流来到围油桶前端

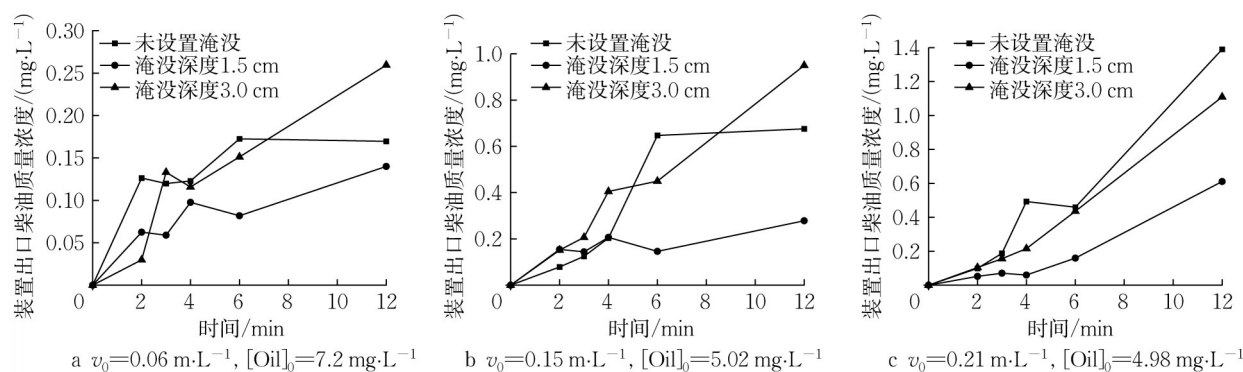


图3 单独围油桶在不同条件下的出口质量浓度

Fig.3 Export concentrations of individual drums under different conditions

聚积,最开始接触到围油桶的部分被吸附下来,当材料达到吸油饱和而前端又源源不端的冲下来溢油时,多出来的油就会和水流一起穿过围油桶下方,此时因为随着淹没深度的增加,接触面积也在增加,而油也会被这部分材料吸收掉一部分,随后到达围油桶的后端。因为围油桶的存在在围油桶后方区域会有一个流速相对较小的区域,因此到达围油桶后端的溢油会在此处富集,并且会形成漩涡。随着溢油的不断涌入,漩涡达到了最大容量后水流就会携带大部分的溢油流向出口,因此可以看到在2min时有一个浓度峰值,而因为柴油相对水而言具有较大的黏性,前端冲走了溢油会携带走后端的溢油,因此就又会空出来漩涡空间。但是整个过程也并不能完全带走所有的溢油,只会在一个较低的浓度水平上波动。

图3b表明,在流速从 $0.06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,由于流量增加,在出口处收集到500mL取样水体积的时间会减少,导致背景水样中的柴油质量浓度从 $7.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降到了 $5.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。3种情况的柴油穿透曲线与小流速情况相似,3cm淹没情况的出口质量浓度最高是因为增加淹没深度的同时增加了下方穿过流速,减少了接触时间;未设置淹没情况达到一个相对稳定的泄油状态;淹没深度1.5cm拦截效果最好,出口处的柴油浓度最低。

当将流速增加到 $0.21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,如图3c所示,情况发生了一些变化:由于流速继续增大,未设置淹没已经不能在围油桶前形成相对稳定的拦油区域,因此出口处的溢油浓度并未到达稳定值,且3种情况的小折点消失,也是高流速导致拦油区间消失所导致。

随着流速的增加,各情况下装置的出口柴油浓度呈现逐渐上升的趋势,说明水流流速是携带溢油突破第1道屏障的关键因素,在实际情况下,河道流速以 $0.21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为主,说明即使在不考虑两侧、缝隙溢油的情况下,亟需考虑添加额外的拦油措施,保障

水库水源水质的安全。

2.3 单独拦藻网对溢油的拦截情况

由于拦藻网的主要功能是除藻,但是在前期的调研中发现,拦藻网也具有较好的拦截浮油的效果。在现场取样时发现,水体经过围油桶后,石油质量浓度下降至 $0.042 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,去除率达34.38%。随后水体流经拦藻网,石油质量浓度继而下降至 $0.034 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,拦藻网对石油的去除率达19.05%。因此,有必要探究拦藻网的除油效果,找出最为有效的拦藻网放置方案。

在安装方式方面,结合实际生产运行情况,对单独拦藻网的做了4种安装方式的探究,如图3所示。由于拦藻网的去除效果在实验室条件下较好,因此取样时间点选择了2,6,12,20min这4个点。实验结果如图4所示。

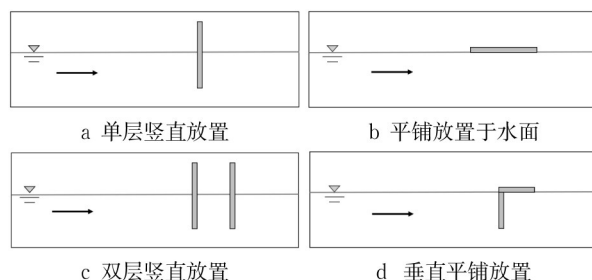


图4 拦藻网的安装方式

Fig.4 Installation of algal screens

如图5a所示,在小流速情况下,综合20min时间内,4种方式的去除效果为垂直平铺>双层放置>单层放置>平铺放置排列。其中单层放置效果最差,原因可能是单独增加拦藻网材料与水面的接触面积,并不能增大溢油的吸附,如果不对流道内的水流进行干扰,即便是在小流速的情况下,溢油也会很轻易的被水流带走,形成拦油失效;对比单层放置的拦藻网,去除效果就有明显的提高,拦藻网材料疏松多孔,疏水亲油,如果竖直放置在流道内,水流仅会从

拦藻网的孔隙中流过,同时携带的溢油也会因为黏性、分子间的力等作用^[11]黏附在材料表面上从而去除。因此,若多加一层拦藻网,效果也会比单层放置好,一方面增加了吸油材料,另一方面,两层拦藻网之间由于拦藻网特性的原因,难以通过水流,所以会形成水流滞留区,这一部分也间接成为了容纳溢油的天然区域,溢油直接漂浮在滞留区表面上,溢油需要突破两次拦藻网才能最终突破。其中垂直平铺放置的效果最好,一方面是改变了来流的流动轨迹,使得溢油被拦截在拦藻网前,另一方面也可能与该种放置方式的后端水流的流动轨迹有关。

当流速增加到 $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,如图 5b 所示。整体趋势的变化与小流速情况下一样,单层放置去除效果最差,垂直平铺放置去除效果最好。说明在 $0.06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \sim 0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的流速变化中,拦藻网的去除效果趋于稳定,各种布置方式均有一个较好的去除溢油的能力。而在高流速情况下,如图 5c 所示,平铺并不能阻止水流携带溢油扩散出去,与单层一样,在较快时间内达到较高的出油水平,且随着时间的推移,前端积累的油量越多,平铺携带的油扩散的就越多;双层和垂直平铺效果均较好。

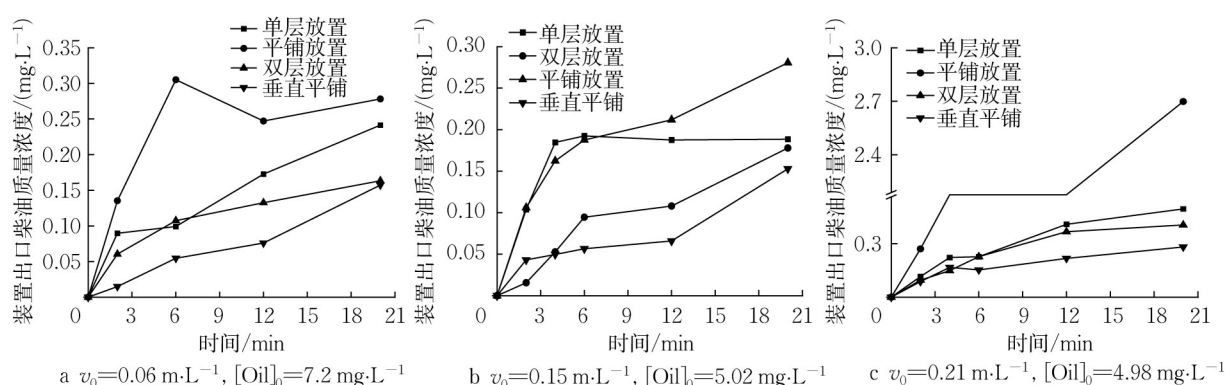


图 5 单独拦藻网在不同初始条件下的出口质量浓度

Fig. 5 Outlet concentrations of individual algal nets at different initial conditions

值得一提的是,垂直平铺效果一直较好,是因为逸油不仅需要突破一层拦藻网,还要突破后续在水中的部分,由于水面上的拦藻网为静置状态,很可能垂直平铺放置方式在下端形成了漩涡,水流并不能携带溢油以油水混合物的形式从后续平铺的部分突破。虽然后端也是大部分孔隙被水流占据,但是由于流速较慢给了材料与溢油充分接触的时间,而且也与低流速的水流裹挟溢油能力不足、需要突破的材料长度更长有关。

2.4 优选布置方式的拦油效果

前面的研究发现,单独围油桶的拦截效果有限,且与淹没深度有关,淹没深度设置在在 1.5 cm 的时候在任何流速、油量的情况下均有最好的去除溢油效果。不同布置方式的拦藻网单独放置时,垂直平铺方式在不同初始条件下的去除溢油效果最好,因此,结合生产实际的需要,将两种最优工况相结合,充分利用各自的拦截特点,形成高效的拦截溢油的屏障。

如图 6a 所示,探究了 3 种流速情况下,在 40 min 内组合工艺对溢油的拦截效果。结果表明,在 3 种典型流速情况下,穿透曲线相似说明淹没 1.5 cm 拦藻网垂直平铺的工艺在去除溢油方面效果稳定,且与单独围油桶相比,除油效果均有明显提升。出口质量浓度在

$30\text{—}40 \text{ min}$ 出现了下降说明在拦藻网后端,由于柴油具有黏性,黏附在拦藻网上的部分会挂住一部分溢油,当这种油—油黏附作用达到阈值时($20\text{—}30 \text{ min}$),会形成一次高油量的泄露,随后后端的储油空间又被空出来,就又能进行下一次蓄积,因此需要进一步考察在长时间运行的情况下,出口浓度值的变化。

如图 6b 所示,探究了在水源地原水背景的情况下,组合工艺在 $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的流速情况下 3 h 内出口质量浓度值变化。发现装置中油的浓度呈现波动,在 25 、 50 、 150 min 达到浓度峰值,在经历浓度峰值后出口浓度均有降低的变化,说明溢油排放并不是均匀泄露的,而是有规律、有波动的泄露,其中间隔约为 25 min 。说明在该装置的条件装置末端形成的溢油区能够容纳的溢油时间为 25 min 左右。

2.5 用不同藻浓度处理后的拦藻网的拦截效果

由于拦藻网的主要功能是拦截水体中的藻类并非除油,因此需要探究在不同藻浓度情况下,拦藻网的拦截能力。将相同的大小的拦藻网泡入经过不同叶绿素 a 浓度 (0.11 、 1.81 、 4.98 、 8.28 和 $17.46 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) 的 500 mL 小球藻溶液中并以 $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度搅拌 1 h 后,探究单独拦藻网竖直放置时的除油效

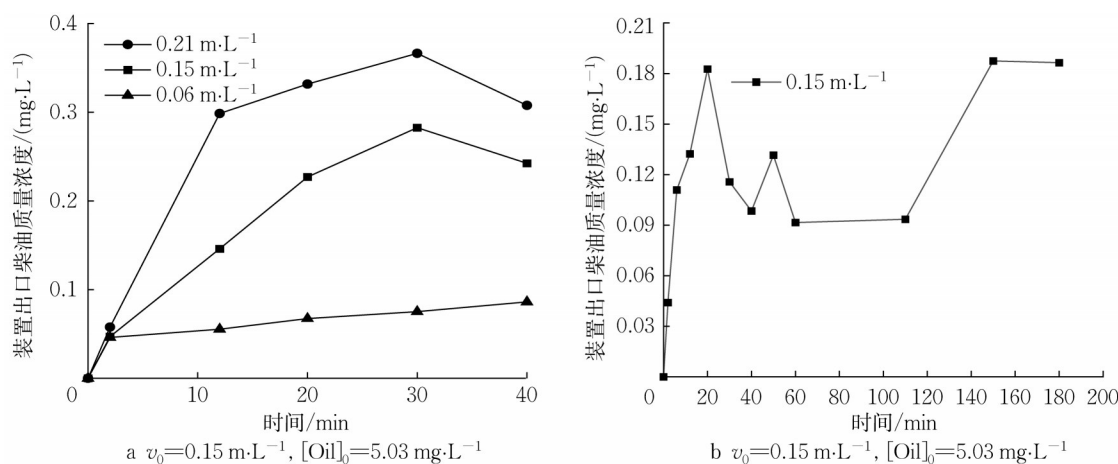


图6 组合工艺的去除性能

Fig.6 Removal performance of combined processes

果。结果如图7所示。

如图7a所示,测定了搅拌前和搅拌后烧杯中的叶绿素a的浓度,发现拦藻网对叶绿素a的去除效果较好,原因可能是干净的拦藻网材料表面具有较多的活性位点,可以在搅拌的过程中将烧杯中的藻类附着在了拦藻网上。同时也制备了不同藻浓度情况下的拦藻网材料。结果表明,拦藻网对小球藻具有较好的吸附效果,在搅拌1h后水样中的叶绿素a浓度下降了73.6%~91.7%,原因是拦藻网材料本身具有较大的孔隙,可以在旋转的条件下吸附掉水中的藻类;

如图7b所示探究了不同叶绿素a浓度下的拦藻网吸附拦截溢油的性能,在低浓度下处理过后的拦藻网与空白浓度的拦藻网拦截能力相似,并没有太

大的变化,虽然有藻类吸附在拦藻网上,但是活性位点较为充足,不会影响拦截除油。但是在高浓度尤其是藻类爆发的浓度下,拦截溢油能力降低,可能是因为过多的藻类黏附在拦藻网材料表面,将大部分活性位点占据,导致吸附能力下降。

因此,在实际情况下,为了提高拦油效果,可选择增加溢油区的长度达到增加时间的效果,建议现有围油桶装置通过垂吊重物等方式向下淹没1.5cm,在现有拦藻网安装的后方,增加一道垂直平铺放置的拦藻网,有效利用双层放置和垂直平铺放置的特性,大幅提高现有应急处理溢油污染的能力,保障供给市区的原水水质安全。

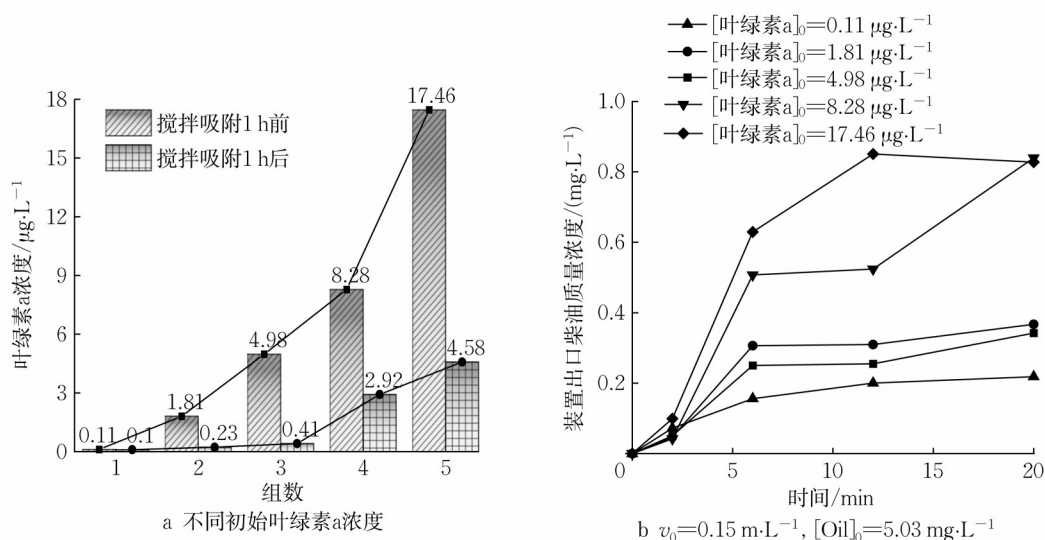


图7 模拟拦藻网吸附藻类后的拦油性能变化

Fig.7 Simulated variation of oil interception performance after algae adsorption on algal nets

3 结论

(1) 单独围油桶情况下,随着流速的增加,各情况下的12min的出口浓度呈现逐渐上升的趋势,说明水流流速是携带溢油突破水源地的第1道屏障的关键因素,出口处柴油浓度并非随淹没深度的增加而线性增加,其中淹没深度为1.5cm在各种流速下出口质量浓度均较低($0.14\sim 0.61\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$);

(2) 单独拦藻网情况下,垂直平铺放置表现最佳,且拦油效果优于围油桶,可能是拦藻网更能改变流道中的水流情况,出现了漩涡区可蓄油,其中垂直平铺方式的在各初始情况下的出口质量浓度均较低,且比单独围油桶情况更稳定($0.15\sim 0.28\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$);

(3) 组合工艺与单独围油桶相比,除油效果均有明显提升,相较于单独围油桶淹没深度0cm而言,12min出口处质量浓度分别降低了78.8%、84.6%和78.5%,拦截能力大幅提高,且在原水背景下溢油排放并不是均匀泄露的,而是有规律、有波动的泄露;

(4) 用不同初始藻浓度处理完拦藻网后,拦藻网的吸油性能也有较大的变化,其中拦藻网对小球藻具有较好的吸附效果,在搅拌1h后水样中的叶绿素a浓度下降了73.6%~91.7%;在低浓度下处理过后的拦藻网与空白浓度的拦藻网拦截能力相似,并没有太大的变化,但是在高浓度情况下,拦截溢油能力降低明显,可能是因为过多的藻类黏附在拦藻网材料表面,将大部分活性位点占据,导致吸附能力下降;

(5) 建议在实际使用时,适当增加围油桶的淹没深度(1.5cm),且将后续的拦藻网采用垂直平铺方式放置,充分利用二者材料的拦油、除藻的功能特性,以及淹没深度和垂直平铺对水流运动的有利改变,有效应对突发性石油类污染。

作者贡献声明:

徐斌:提供思路与研究支持;
张志:实验开展与论文撰写;
侯伟昶:采样方案制定;
杨生巧:工程设计与应用指导
唐玉霖:数据分析与论文修订;
任小孟:论文修订;
张天阳:实验方案设计与指导。

参考文献:

[1] LARSEN A T, HOFFMANN L. Emerging solutions to the water challenges of an urbanizing world[J]. *Science*, 2016, 352 (6288): 928.

- [2] 李国英. 坚持系统观念 强化流域治理管理[J]. *水利发展研究*, 2022, 22(11): 1.
LI Guoying. Adhere to the concept of system and strengthen the governance and management of river basin [J]. *Water Resources Development Research*, 2022, 22(11) : 1.
- [3] 周婕. 城市水源地船舶流动风险源风险评价方法与实证研究[D]. 上海:华东师范大学, 2012.
ZHOU Jie. Empirical studies on risk assessment methods of vessel liquidity risk in urban water sources[D]. Shanghai: East China Normal University.
- [4] 郑正雄, 张胖同, 魏秀丽, 等. 不同材料对水源水石油类物质的吸附性能研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2021, 49 (9): 1218.
ZHENG Zhengxiong, ZHANG Xitong, WEI Xiuli, *et al.* Oil adsorption performance of different oil-absorbing materials in source water [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2021, 49(9): 1218.
- [5] 张官兵, 李欣洁, 赵荣, 等. 我国水源污染事故风险点定量识别方法[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(1): 341.
ZHANG Guanbing, LI Xinjie, ZHAO Shen, *et al.* Quantitative identification of causation points for water source pollution accident in China [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(1): 341.
- [6] 杜剑, 王军, 王美蓉, 等. 水上重大溢油事故围油栏鲁棒优化调度研究[J]. *中国航海*, 2023, 46(2) : 113.
DU Jian, WANG Jun, WANG Meirong, *et al.* Robust optimal arrangement of oil containment booms for major marine oil spill accident[J]. *Navigation of China* , 2023, 46(2) : 113.
- [7] 谢伊涵. 太浦河水源地石油污染特征与环境风险评估[D]. 上海:华东师范大学, 2019.
XIE Yihan. Characteristics of oil pollution and environmental risk assessment in taipu river water source area[D]. Shanghai: East China Normal University, 2019
- [8] 牛小丹. 基于上下游合作的跨界河流环境保护研究[D]. 上海:华东师范大学, 2018.
NIU Xiaodan. Study on transboundary river environment protection based on the cooperation of the upstream and downstream[D]. Shanghai: East China Normal University, 2018
- [9] 刘增贤, 王元元, 蔡梅. 太浦河溢油污染数值模拟及对策措施研究[J]. *江苏水利*, 2018(1): 25.
LIU Zengxia, WANG Yuanyuan, CAI Mei. Numerical simulation and countermeasures of spilled oil pollution in Taipu River[J]. *Jiangsu Water Resources*, 2018(1): 25.
- [10] 王雪蓉. 三峡库区航道溢油应急处置技术研究[J]. *珠江水运*, 2021(24): 76.
WANG Xuerong. Research on oil spill emergency disposal technology for waterways in three gorges reservoir area [J]. *Pearl River Water Transport*, 2021(24): 76.
- [11] ZHOU Xiangyu, WANG Feifei, *et al.* Fabrication of hydrophilic and hydrophobic sites on polypropylene nonwoven for oil spill cleanup: two dilemmas affecting oil sorption[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(7): 3860.