

# 不同材料对水源水石油类物质的吸附性能研究

郑正雄<sup>1,2</sup>, 张肸同<sup>3</sup>, 魏秀丽<sup>1,2</sup>, 周晓阳<sup>1,2</sup>, 张天阳<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092; 3. 亚太建设科技信息研究院, 北京 100120)

**摘要:** 分析了传统吸油材料对饮用水水源中石油类污染物质的去除效能。通过对比市面上常用的4类共8种吸油材料对不同油品的吸附容量发现, 饱和吸附容量最大的是棉花, 最小的是蛭石; 吸附材料PP吸油棉的纯相油类的饱和吸附容量为 $9.0 \sim 13.0 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ , 保油性根据油品不同30 min的保油率大致为60%~70%; PP吸油棉对油水混合物中石油类物质的吸附完全属于物理吸附, 吸附动力学符合拟一级动力学模型, 10 min能达到60%~70%的去除率, 120 min能达到80%~90%的去除率; 影响吸附速率的关键因素是吸油棉与含油水的接触面积, 覆盖面积越大吸附效果越好。

**关键词:** 突发性石油类污染; PP吸油棉; 吸附容量; 应急处理  
**中图分类号:** X524 **文献标志码:** A

## Oil Adsorption Performance of Different Oil-absorbing Materials in Source Water

ZHENG Zhengxiong<sup>1,2</sup>, ZHANG Xitong<sup>3</sup>, WEI Xiuli<sup>1,2</sup>,  
ZHOU Xiaoyang<sup>1,2</sup>, ZHANG Tianyang<sup>1,2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Asia Pacific Institute of Construction Scitech Information Co., Ltd., Beijing 100120, China)

**Abstract:** The paper studied and analyzed the removal efficiency and influencing factors of 8 types of oil-absorbing materials on the petroleum pollutants in the source water. By comparing the adsorption capacity of 8 types of oil absorption materials of 4 sorts commonly used in the market to different oil products, it is found that the largest saturated adsorption capacity is cotton and the smallest is vermiculite. The absorbent material PP absorbent cotton has a saturated adsorption capacity of  $9.0 \sim 13.0 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$  for pure phase oil and oil retention is

approximately 60% ~ 70% for 30 minutes depending on the sort of oil. The adsorption of PP oil absorbent cotton on petroleum substances in oil-water mixture is completely physical adsorption, and the adsorption kinetics conforms to the pseudo-first-class kinetic model. The removal rate can reach 60% ~ 70% in 10 minutes, and 80% ~ 90% in 120 minutes. The key factor affecting the adsorption rate is the contact area between oil-absorbing cotton and oily water. The larger the coverage area, the better the adsorption effect.

**Key words:** accidental petroleum pollution; PP oil-absorbing cotton; adsorption capacity; emergency treatment

水是城市生存最基本的要素之一, 清洁、充足、稳定的水源是城市发展的基础保障<sup>[1]</sup>。随着城市化进程的加速, 城市对水的依赖越发明显, 水源的科学保护受到了前所未有的重视<sup>[2]</sup>。国内外很多水源地位于航运区域, 船舶以及相配套的各种航运设施、二手船舶交易市场、船舶维修保养、船舶码头和船舶建造业等的存在给水源地带来了突发性石油污染安全隐患, 威胁着城市水源地环境安全, 进而威胁城市安全供水<sup>[2-4]</sup>。世界上第一个有报道的石油泄漏事件发生在1907年, 当时托马斯·W·劳森(Thomas W. Lawson)在无人居住的安内特岛(Annet)附近被毁, 释放了225万加仑的石蜡油<sup>[5]</sup>。根据国际油船船东污染联合会(International Tanker Owners Pollution Federation)数据统计显示<sup>[6]</sup>, 从1970年到2018年期间石油泄漏事故发生次数呈直线下降趋势, 由70年代的年平均78.8次下降到21世纪的年平均6.4次, 但是即使石油泄漏事故显著减少, 大型石油泄漏事

收稿日期: 2021-06-07

基金项目: 国家自然科学基金(52070144, 51808222); 水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07207004)

第一作者: 郑正雄(1998—), 男, 博士生, 主要研究方向为饮用水处理技术。E-mail: 605681835@qq.com

通信作者: 张天阳(1990—), 男, 副研究员, 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

故还是不可避免的偶有发生,例如2000年11月28日,1 925t尼日利亚原油泄漏进入密西西比河,导致沿河两岸35 km均受到污染<sup>[7]</sup>。根据中华人民共和国生态环境部环境统计公报(2015年)<sup>[8]</sup>,我国2006年到2012年,已公开报道的重大水源污染事件发生65起,2011年到2015年共发生水污染事件373起。同时石油水污染事件问题严重,根据文献资料,在1998年至2018年期间,华东地区太浦河流域共发生水污染事件106次,其中石油类水污染事件74起,占总污染事件的69.8%<sup>[3]</sup>。

由于石油主要组成物质是长链脂肪烃<sup>[9]</sup>,脂肪烃为分子中只含有碳和氢两种元素,碳原子彼此相连成链,碳原子间通过共价键连接形成链状的碳架的一类化合物。而脂肪烃性质较稳定难于通过化学反应去除,生物处理方法则成本高,微生物培养难度大<sup>[10]</sup>。因此针对突发性石油类污染,常采用的应急处理措施是物理吸附,该方法具备环保、廉价且有良好的可回收性等优势<sup>[11]</sup>。常用的多孔吸附材料有聚丙烯吸油棉和拦油索<sup>[12]</sup>。

本文对比研究了8种吸油材料对石油类污染物质的去除效能,并对比分析了不同吸油棉对石油类污染物质的吸附和保油性能,深入研究了PP吸油棉对石油类污染的吸附动力学特性,以及吸油棉投加量对石油类污染的去除效能影响,以便于科学指导应对突发性石油类污染。

## 1 实验部分

### 1.1 实验试剂与仪器

实验所需的药品均为优级或分析纯试剂。石油类标准物质(1 000 mg·L<sup>-1</sup>)购自中国标准物质网(北京普天同创生物科技有限公司);实验所需柴油购自附近加油站;四氯化碳和硅酸镁购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司;无水硫酸钠、硅酸镁、氯化钠、硫酸和盐酸购自国药集团化学试剂有限公司(上海)。测定水中石油类物质质量浓度使用的仪器是华夏科创测油仪oil 460红外测油仪(华夏科创);超纯水由Milli-Q纯水机制备。

### 1.2 分析方法

实验过程中水中石油类物质的检测方法采用《水质石油类的测定红外分光光度法》(HJ 637 - 2018)方法,检测仪器使用华夏科创oil 460红外石油检测仪,萃取方法为手动萃取。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 典型吸油材料油类饱和吸附容量实验

实验中选取了8种吸油材料,分别是:PP(聚丙烯)吸油棉1、PP吸油棉2、PP吸油棉3、软质聚氨酯型泡沫塑料拦油索、头发、棉花、丝瓜络、蛭石。选取了3种具有代表性的油品分别为:柴油、植物油(大豆油)和润滑油。实验过程中将PP吸油棉和丝瓜棉裁剪为1 cm×1 cm的方形,其他材料选取适量(1 g左右),将准备好的材料浸入装有200 mL油的烧杯中,完全吸附 $t$  min,取出排油10 s,称量吸附后材料和油的总质量计为 $m_t$ ,称量原始材料质量计为 $m_0$ ,该种材料的在吸附时间 $t$  min后的吸附容量 $q_t$ 计算方法如下:<sup>[13]</sup>

$$q_t = (m_t - m_0) / m_0 \quad (1)$$

式中: $m_0$ 为吸附前干材料的质量,g; $m_t$ 为吸附时间 $t$  min后湿材料的质量,g; $q_t$ 为吸附时间为 $t$  min时材料的吸附容量,g·g<sup>-1</sup>; $q_s$ 为饱和吸附能力,即吸附材料浸入待吸附溶液中达到最大吸附能力时的吸附容量<sup>[13]</sup>。按上述实验方法分别对8种材料进行了最大吸附容量 $q_s$ 的实验探究。

#### 1.3.2 吸油棉对油类物质的吸附和保油性能对比实验

材料的保油性反映了材料在吸附油类以后对油类物质的保留状况,可以更好地反映干材料用于油类去除的能力,动态保油性计算方法如下:<sup>[13]</sup>

$$\eta_i = (m_t - m_0 - m_i) / (m_t - m_0) \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\eta_i$ 为动态持油百分比; $m_i$ 为排油时间为 $i$ 时排出的油的质量,g。

将PP吸油棉1、PP吸油棉2、PP吸油棉3裁剪成直径为3 cm的圆形,将准备好的材料浸入装有100 mL不同油品的烧杯中,测试计算PP吸油棉浸入不同油品中不同时刻的吸附容量。同时将达到饱和和吸附容量的材料分别排油一定的时间,探究PP吸油棉的动态持油能力。

#### 1.3.3 吸油棉对不同质量浓度柴油的吸附实验

在1 000 mL的烧杯中加入500 mL华东地区某水库原水,同时加入适量柴油配制不同质量浓度梯度的油水混合物。将PP吸油棉3裁剪成直径为5 cm的圆形,质量约为0.855 g。搅拌设备使用六联搅拌机,实验过程中转速控制为90 r·min<sup>-1</sup>,模拟水面自由流动速度。测定PP吸油棉3浸入不同柴油质量浓度的油水混合物不同时间后油水混合物中柴油质量浓度。

### 1.3.4 不同投加量吸油棉对柴油吸附实验

在1 000 mL的烧杯(口径为10 cm)中加入500 mL华东地区某水库原水,同时加入适量柴油配制一定质量浓度梯度的油水混合物,初始水中柴油质量浓度 $q_0 = 0.96 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。针对不同投加量将PP吸油棉3裁剪成不同直径的圆形。搅拌设备使用六联搅拌机,实验过程中转速控制为 $90 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,模拟水面自由流动速度。测定不同投加量PP吸油棉3浸入油水混合物不同时间后油水混合物中柴油质量浓度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同吸油材料的对不同油类物质的饱和吸附容量对比

实验选取的3种油品的物理性质如表1所示。分别列出了3种油品的密度(20℃条件下测得)和运动粘度(50℃条件下测得)。油品的密度和粘度是油类的一般性质,油品的密度可以反应油品的质量,以及油品的纯度和组成特点,密度越大沸点越高,芳烃和胶质含量越高;油品的粘度包括动力黏度、运动黏度、恩氏黏度、赛氏黏度和雷氏黏度,黏度是油品流动性的一种表征,它反映了液体分子在运动过程中相互作用的强弱,作用强,黏度大,流动难<sup>[14]</sup>。3种油品密度相近,黏度差距较大,其中黏度最大的是润

滑油,约是柴油的10倍,植物油的25倍。

对8种吸油材料的性质包括材料材质、材料筛孔(目)、材料纤维直径( $\mu\text{m}$ )、材料厚度(mm)、材料的亲疏水性以及再生或处置方法进行了归纳,如表2所示。选取的吸油棉主要有两种类型,纤维直径约为10  $\mu\text{m}$ 的密实性PP吸油棉1,纤维约为24  $\mu\text{m}$ 的普通PP吸油棉2和PP吸油棉3,吸油棉的厚度均约为10 mm,为完全疏水亲油材料。实验所用拦油索主要内置物为软质聚氨酯型泡沫塑料,拦油索直径约为76 mm,长度约为1.2 m,为疏水亲油性材料。头发为研究者自己头发,直径约为40~70  $\mu\text{m}$ ,为亲水性物质。实验选取的棉花纤维直径约为20  $\mu\text{m}$ ,为亲水性材料。选用的蛭石矿物材料,粒径大小约为80~120目。实验所用丝瓜棉材料其植物纤维直径约为250~290  $\mu\text{m}$ ,试验中只使用丝瓜棉外层,其厚度为10~20 mm。

将备用材料选取适量浸入超纯水中浸泡24 h,然后用超纯水洗涤3遍,放入真空烘箱中70℃烘至质量不再发生改变,将烘干材料密封保存备用。

表1 油品基本性质

Tab.1 Basic physical properties of oil products

物理性质	油品		
	柴油	植物油	润滑油
密度(20℃)/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	0.855	0.926	0.850
运动黏度(50℃)/( $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-10}$ )	20.19	8.50	180~220

表2 吸油材料基本性质

Tab.2 Basic properties of oil absorption materials

序号	材料种类	材质	筛孔(目)	纤维直径/ $\mu\text{m}$	厚度/ mm	亲疏水性	再生或处置方式 <sup>[15-16]</sup>
1	PP吸油棉1	聚丙烯(熔喷)	/	10~30	10	疏水	绞、挤压
2	PP吸油棉2	聚丙烯(熔喷)	/	20~50 (均匀)	10	疏水	绞、挤压
3	PP吸油棉3	聚丙烯	/	20~50 (不均匀)	10	疏水	绞、挤压
4	拦油索	软质聚氨酯型泡沫塑料+PE	/	/	76	疏水	绞、挤压
5	头发	动物毛发	/	40~70	/	亲水	/
6	棉花	植物纤维	/	20	/	亲水	/
7	丝瓜棉	植物纤维	/	250~290	10~20	亲水	肥皂和水浴清洁,通过硬脂酸功能化
8	蛭石	矿物	80~120	/	/	亲水	肥皂和水浴清洁

分别对8种材料进行了最大吸附容量 $q_s$ 的实验探究,实验结果如图1所示(图中横坐标1~8分别对应表2中序号1~8吸附材料)。从图中可以明显看出来8种吸附材料对大豆油的饱和吸附容量最大,对柴油的饱和吸附容量最小,由表1可知植物油密度最大黏性最小,流动性最强,当植物油与吸附材料固体表面接触的时候能较易沿孔道扩散进入材料内部微孔中。在这8种材料中植物纤维棉花饱和吸附

容量最大,约是自身重量的20~30倍,其一棉花的纤维直径远小于其他吸附材料,所形成的微孔材料比表面积远大于其他材料;其二棉花材质较轻,同等条件下,单位质量表面积远大于其他材料<sup>[17]</sup>。3种PP吸油棉饱和吸附容量范围在10~15  $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间,相比较而言PP吸油棉1吸附性能略优于PP吸油棉2和PP吸油棉3,原因是PP吸油棉1孔隙率更高,比表面积更大。PP吸油棉2和PP吸油棉3饱和吸附容



量差别不大,PP吸油棉3略好于PP吸油棉2。蛭石材料作为矿物材料虽然密度低能漂浮与水面,且饱和吸附容量为自身质量的5~10倍,但是该材料为细小颗粒状,使用后回收较麻烦,一般不用于水厂和海洋油类石油的吸附去除。

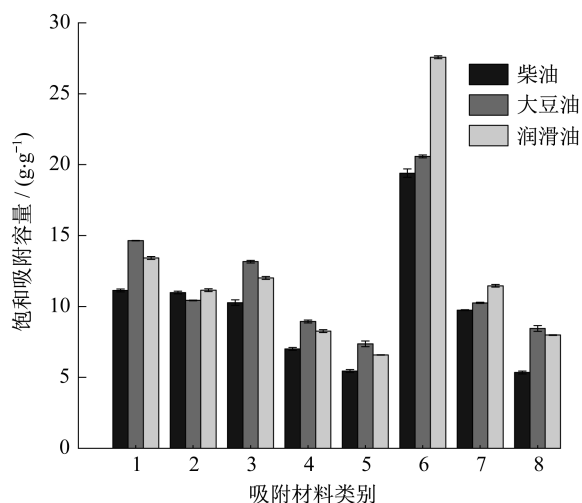


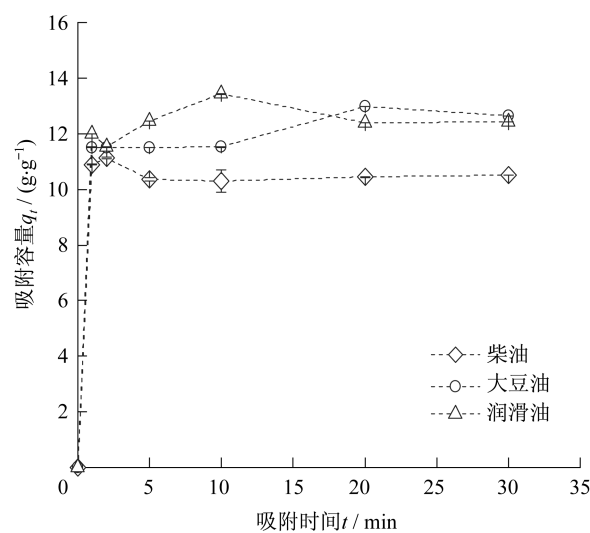
图1 不同吸油材料对柴油、大豆油和润滑油的饱和吸附容量

Fig.1 Saturated adsorption capacity of different adsorbent materials for diesel, soybean oil and lubricant

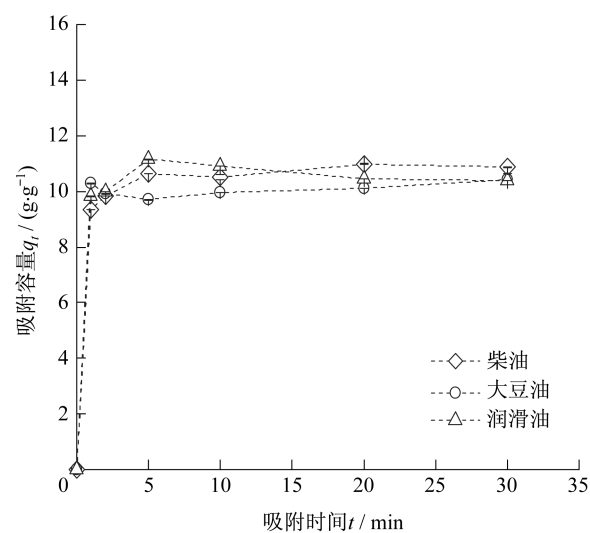
## 2.2 不同吸油棉对不同油类物质的吸附和保油性能对比

为了更深一步了解水厂常用PP吸油棉的吸油状况,对3种PP吸油棉进行了吸附动力学实验和材料保油性实验,实验结果如图2和图3所示。

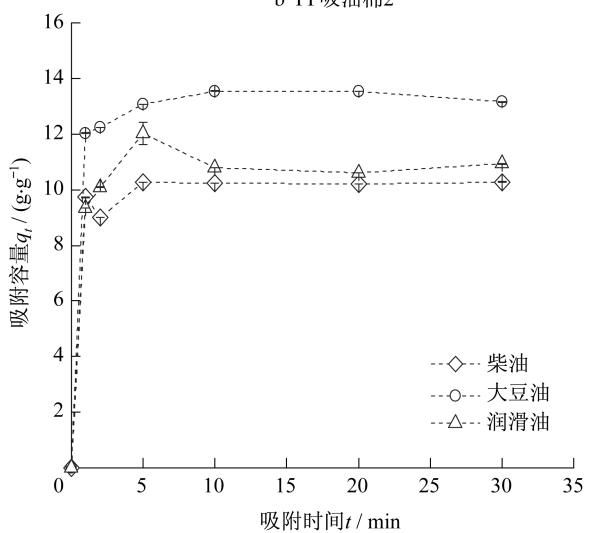
从图2中可以看出,3种吸油材料对于柴油类物质的吸附在2~5 min达到最大吸附容量,对于润滑油类黏度比较大的油品约在5~10 min达到最大吸附容量,对于植物油这种密度比较大的油品约在20 min达到最大吸附容量,原因是油品的密度是影响PP吸油棉类吸附材料的主要因素。同时从图2中还可以看出,同种吸附材料对不同油品的吸附优越性不同,PP吸油棉1对润滑油类的吸附要优于柴油,PP吸油棉2对于3种油类的吸附状况相差不大,PP吸油棉3对于大豆油的吸附比较有优势。原因是PP吸油棉3的纤维直径较PP吸油棉2吸油棉更不均匀,造成孔径形式多样,对密度较大的油品也有比较好的吸附能力。同一种油品对于不同吸油材料吸附状况也略有不同,对于柴油3种吸附材料吸附状况相差不大,证明对于这3种PP吸油棉来说材料的孔径不是影响吸附状况的主要因素,而油品的性质是



a PP吸油棉1



b PP吸油棉2



c PP吸油棉3

图2 不同吸油材料对不同油品的吸附动力学

Fig.2 Adsorption kinetics of different oil-absorbing materials

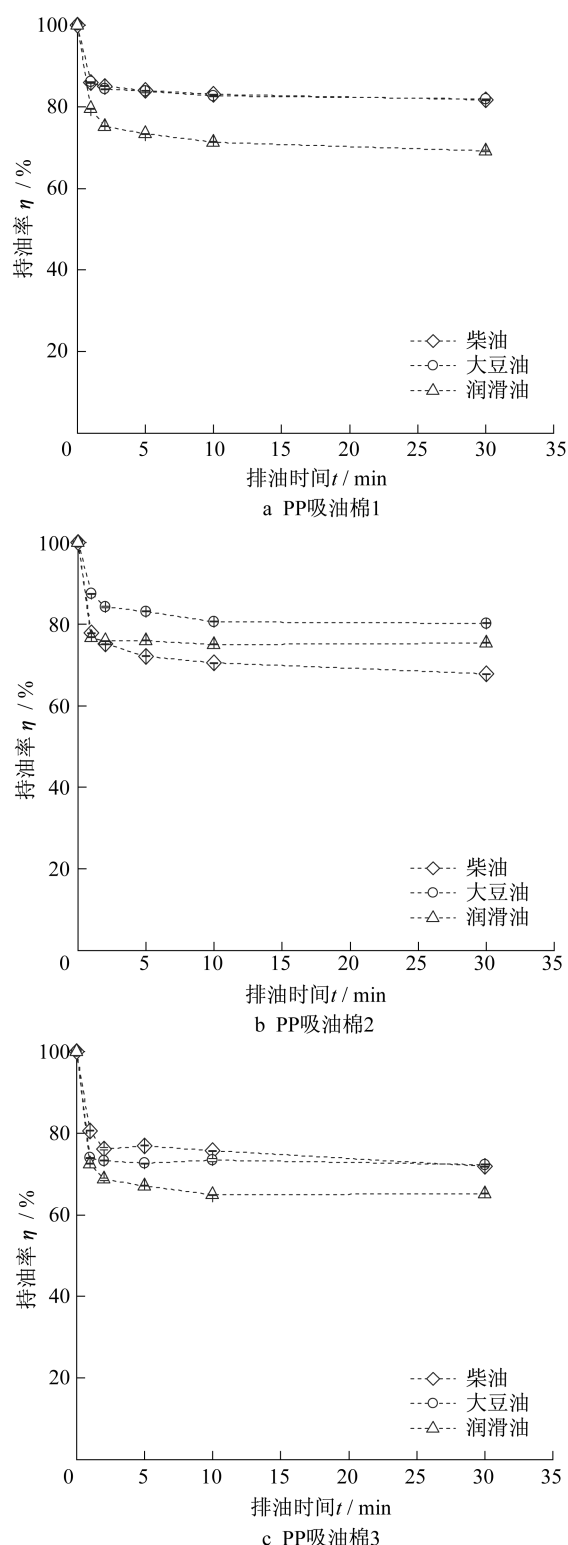


图3 不同吸油材料对不同油品的保油率

Fig.3 Oil retention rate of different oil absorption materials

主要影响因素。对于润滑油类黏度较大的油品来说,存在较明显吸附容量先增大后减小的状况。原因其一是润滑油黏度较大,流动性较慢,随着材料浸入润滑油类的时间的增长吸附材料逐渐达到饱和吸

附量,同时由于流动性较差多余的吸附量没有完全排除,达到吸附平衡的时间较长,所以很明显能够看到吸附容量先增大后渐小的现象。其二是随着浸泡时间的增长材料本身存在溶胀性,使得材料纤维直径变粗,孔径变小,吸附容量变小<sup>[14]</sup>。

同时本文也对不同材料对于不同油品的保油性能进行了讨论。由于油品性质和材料孔径差异较大,PP吸油棉吸附材料对不同油品的持油性相差较大,实验结果如图3所示。由图3可知,3种吸油材料排油时间在2~5 min左右几乎都能达到排油平衡,对于PP吸油棉1和PP吸油棉2排油时间30 min后保油率依然能达到70%以上,PP吸油棉3对润滑油的持油率略差为60%左右。3种吸油棉中PP吸油棉1的保油性最好,PP吸油棉3的持油性最差,原因是PP吸油棉1纤维直径最小约是PP吸油棉2和PP吸油棉3的0.5倍,形成的比表面积较大,油类与吸附材料表面接触时形成的液层更薄更能稳定存在。同时3种材料整体来看对润滑油的保油最差大豆油最好,这是因为润滑油黏性较大流动较慢,在以吸附完成排油时间为10 s为排油开始点进行持油性计算时,润滑油由于流动速度慢,造成起始点过高。大豆油持油性较好是因为密度较大,更容易粘附在吸附材料表面,形成稳定平衡;同时大豆油密度较大排油10 s几乎能很好排掉多余的油类。

### 2.3 吸油棉对柴油的吸附动力学特性

水厂中的PP吸油棉多用来处理油水混合物中的石油类污染,并不存在完全纯相油类物质的情况。同时突发性石油污染多是船舶漏油造成,油品主要以柴油类为主,因此研究了在以柴油污染为主要污染物的油水混合中PP吸油棉的吸附状况。选取的吸油棉为PP吸油棉3。

固体吸附材料对于液体溶质的吸附动力学及其动力学模型主要有拟一级动力学模型和拟二级动力学模型。拟一级动力学模型计算公式如式(3)所示,拟二级动力学计算公式如式(4)所示

$$q_t = q_e (1 - e^{-k_1 t}) \quad (3)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 \times q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (4)$$

式中: $q_e$ 为该实验条件下的最大吸附容量, $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $q_t$ 为该实验条件下吸附时间为 $t$ 时材料的吸附容量, $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $k_1$ 为拟一级动力学常数; $k_2$ 为拟二级动力学常数。

PP吸油棉3对于不同底物质量浓度的油水混合物柴油污染的吸附动力学、拟一级吸附动力学模型、拟二级吸附动力学模型及去除率如图4所示。所使用红外

测油仪对于水中石油类物质的最大检测质量浓度为  $80\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 由于《地表水环境质量标准》规定的饮用水源水中石油类总含量不能超过  $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 实验中配制石油类物质质量浓度为规定的 100 倍、200 倍和 300 倍。同时由于油类和水为两不相溶物质, 很难准确配到要求质量浓度溶液, 因此配得的溶液实测质量浓度为  $4.85$ 、 $8.56$  和  $14.74\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。从图 4a 可以看出, 吸油棉对油水混合物中柴油的吸附主要集中在前  $10\text{ min}$ ,  $10\text{ min}$

后溶液中柴油类物质的质量浓度变化不是很大。同时原始底物质量浓度越高, 达到吸附饱和后, 溶液中柴油类物质的质量浓度越高, 当底物质量浓度大于  $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 吸附后水中柴油质量浓度大于  $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 是规范要求水源水体三类水体的 60 倍; 当底物质量浓度低于  $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 吸附后水中石油类物质质量浓度为  $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右, 是规范要求水源水体三类水体的 20 倍左右。

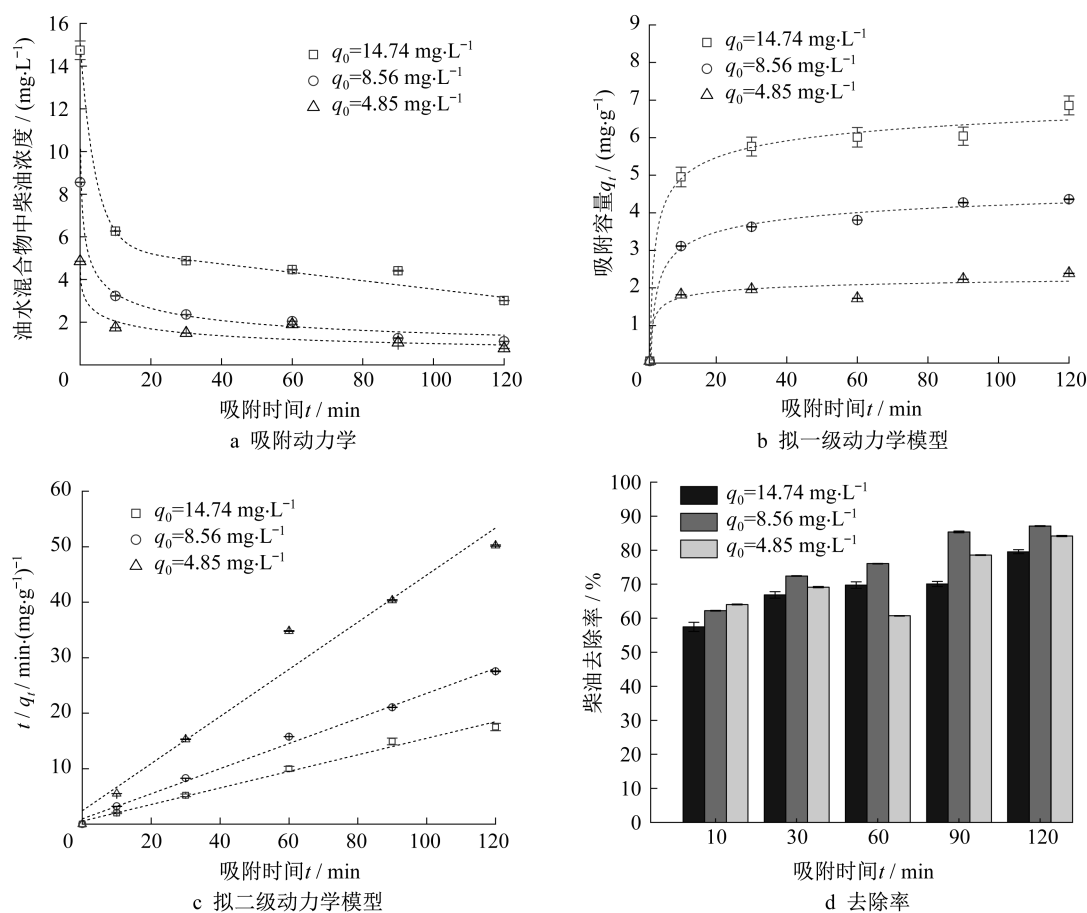


图 4 PP 吸油棉 3 对水中不同质量浓度柴油类物质吸附状况

Fig.4 Absorption of oil-absorbing cotton 3 and diesel substances in water by oil-absorbing cotton

表 3 拟一级和拟二级吸附动力学模型参数

Tab.3 Parameters of pseudo-primary and pseudo-secondary adsorption kinetics model

底物质量浓度 / ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	拟一级动力学模型			拟二级动力学模型		
	$q_e$	$k_1$	$R^2$	$q_e$	$k_2$	$R^2$
14.74	5.371	0.235	0.996	6.702 4	0.039 7	0.991
8.56	3.398	0.224 5	0.998	4.420 9	0.053 6	0.994
4.85	1.715	10.81	0.973	2.354 6	0.074 7	0.969

拟一级和拟二级吸附动力学模型参数如表 3 所示。从表 3 中可以看出当水中石油类物质低于  $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 拟合得到的平方差  $R^2$  小于 99%, 因此符合拟一级和拟二级动力学模型<sup>[18]</sup>。对于石油类质量浓度大于  $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的溶液, 拟一级得到的  $R^2$  要大于

拟二级得到的  $R^2$ , 证明该吸附更符合拟一级动力学模型。由此前的研究可知, 拟一级动力学模型是基于假定吸附受扩散步骤影响<sup>[19]</sup>。拟二级动力学模型是基于假设吸附速率由吸附剂表面未被占有的吸附空位数目的平方值决定。吸附过程中受化学机理的

控制,主要涉及到吸附剂与吸附质之间的共用电子和电子转移<sup>[20]</sup>。所以PP吸油棉对石油类物质的吸附主要控制因素为石油类物质的扩散性质。油水混合物中石油类物质质量浓度越高吸附速率越快,也是由于质量浓度越高油类物质在水面扩散速度越快,造成吸附速率越大。同时可以明显看出随着底物质量浓度的增大,最大吸附容量逐渐增大,这是因为PP吸油棉3可承受的饱和吸附容量远远大于溶液的石油类物质含量。从图4d图可以看出,10 min左右PP吸油棉3对水中的石油类物质的去除率能达到60%,120 min能达到80%左右。由此我们可

以将吸油棉用于突发性石油污染时,在10 min内快速除掉水源表面浮油和微量船舶泄漏时造成的小面积石油污染的去除。吸油棉处理过的水仍然达不到规范水质要求,仍需要进行后续进一步的水质处理。

## 2.4 吸油棉投加量对柴油吸附性能的影响

选取的PP吸油棉为PP吸油棉3,不同PP吸油棉投加量对水中柴油类物质吸附状况如图5所示。针对不同投加量将PP吸油棉3裁剪成直径为3、5、8和10 cm的圆形,PP吸油棉3对油水混合物的面积覆盖率分别为9%、25%、64%和100%。

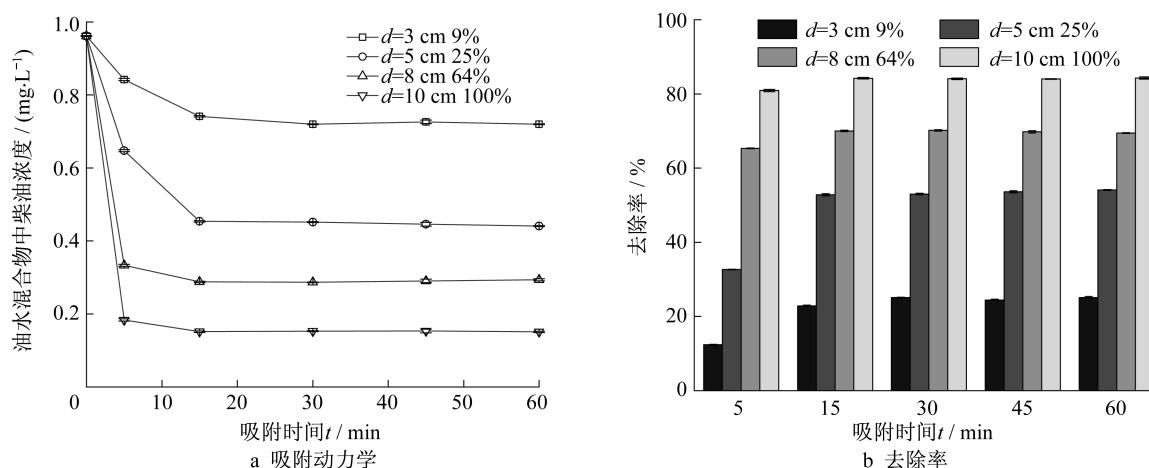


图5 不同PP吸油棉投加量对水中柴油类物质吸附状况

Fig.5 Adsorption of diesel substances in water by different amounts of PP oil-absorbing cotton

从图5中可以看出,吸油棉对油水混合物的面积覆盖率越高吸附速率越快,直径为8 cm和10 cm的吸油棉主要作用时间为前5 min,直径为3 cm和5 cm的吸油棉主要作用时间为前15 min。主要原因是,直径更大的吸油棉比直径更小的吸油棉与溶液接触面积要大,而该吸附反应为物理扩散吸附,接触面积大更有利于扩散,因此吸附速度更快。从图5b中可以明显发现,当PP吸油棉3面积覆盖率达到64%以上、吸附时间超过15 min时,油水混合物中柴油的去除率为70%以上,此时剩余石油质量浓度小于0.288 mg·L<sup>-1</sup>,满足《生活饮用水卫生标准》要求的小于0.3 mg·L<sup>-1</sup>。因此在实际生产中,如果为了达到快速除油的效果,可以增大吸油棉与含油水的接触面积。

## 3 结论

(1)实验探究的8种吸附材料中对石油类吸附

能力最好的是棉花,最大吸附容量可达20~30 g·g<sup>-1</sup>,但棉花为亲水材料,限制了其工程中的使用。8种吸附材料大多对大豆油的饱和吸附容量最大,对柴油的饱和吸附容量最小,各种吸油材料对油类的吸附和油品的基本性质密度和粘度密切相关,同时材料的单位质量表面积也是影响材料吸附容量的关键因素。

(2)3种PP吸油棉对柴油的吸附能力相似,最大吸附容量为10~15 g·g<sup>-1</sup>,其中对润滑油吸附效果最好的是PP吸油棉1,对大豆油吸附效果最好的是PP吸油棉3。3种PP吸油棉的保油性能中最好的是PP吸油棉1,30 min后依然可以维持80%以上的保油率,保油率相对较差的是PP吸油棉3,30 min后保油率为70%左右。

(3)PP吸油棉3对于含油水中石油的吸附符合拟一级动力学吸附,主要影响吸附速率的因素是油类在吸油材料中的扩散速度;影响吸附速率的另一关键影响因素是吸油棉与含油水的接触面积,工程



使用时尽量覆盖更大的面积;吸油状况为:对水中石油类物质的吸附主要集中于前15 min,当PP吸油棉3面积覆盖率达到64%以上,前15 min能够去除水中70%以上的油类物质。因此面对突发性石油污染时,尽量用PP吸油棉覆盖污染区,15 min快速吸附表面浮油,然后进行后续残油处理。

### 作者贡献说明:

郑正雄:实验开展与论文撰写;

张胖同:样品测定;

魏秀丽:数据处理;

周晓阳:论文修订;

张天阳:方案制定与论文指导。

### 参考文献:

- [1] 张羽. 城市水源地突发性水污染事件风险评价体系及方法的实证研究[D]. 上海:华东师范大学, 2006.  
ZHANG Yu. Empirical studies on risk assessment system of accidental water pollution events in city's source water area [D]. Shanghai: East China Normal University, 2006.
- [2] 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, 2012.
- [3] 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.
- [4] 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 Zengxian, WANG Yuanyuan, CAI Mei. Numerical simulation and countermeasures of spilled oil pollution in Tai Pu River [J]. Jiangsu Water Resources, 2018, (1): 25.
- [5] Biglane K E. A history of major oil spill incidents [J]. International Oil Spill Conference Proceedings 1969 (1): 5.
- [6] International Tanker Owners Pollution Federation. Oil tanker spill statistics 2018 [EB/OL]. [2021-06-01]. <https://www.itopf.org/knowledge-resources/data-statistics/statistics/>
- [7] MICHEL J, HENRY C B, THUMM S. Shoreline assessment and environmental impacts from the MIT Westchester oil spill in the Mississippi River [J]. Spill Science & Technology Bulletin, 2002, 7(4): 155.
- [8] 中华人民共和国生态环境部. 2015年环境统计年报 [EB/OL]. [2021-06-01]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtnb/>
- [9] 古林茂. 石油的化学组成 [J]. 现代化农业, 1982(5): 40.  
GU Linmao. The chemical composition of petroleum [J]. Modern Agriculture, 1982(5): 40.
- [10] LI K, YU H L, YAN J, *et al.* Analysis of offshore oil spill pollution treatment technology [C]// 2020 4th International Workshop on Renewable Energy and Development. Electr Network: Global Research Association, 2020: 042011-042016.
- [11] ZHANG T, LI Z, LU Y, *et al.* Recent progress and future prospects of oil-absorbing materials [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2019, 27(6): 1282.
- [12] PUSHKAREV V V, YUZHANINOV A G, MEN S K. Measures to combat oil pollution: Report by the international tanker owners' pollution federation [J]. Water Research, 1985, 19(5): 676.
- [13] PAN Y, SHI K, PENG C, *et al.* Evaluation of hydrophobic polyvinyl-alcohol formaldehyde sponges as absorbents for oil spill [J]. Acs Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(11): 8651.
- [14] MENDOZA C J L, CEDILLO-RAMÍREZ J C, AGUIRRE-GUTIÉRREZ A D J, *et al.* Incompatibility determination of crude oil blends from experimental viscosity and density data [J]. Energy & Fuels, 2015, 29(2): 480.
- [15] ALVARADO-GÓMEZ E, TAPIA J I, ENCINAS A. A sustainable hydrophobic luffa sponge for efficient removal of oils from water [J]. Sustainable Materials and Technologies, 2021, 28(28): 2214
- [16] ADEBAJO M O, FROST R L, KLOPROGGE J T, *et al.* Porous materials for oil spill cleanup: A review of synthesis and absorbing properties [J]. Journal of Porous Materials, 2003, 10(3): 159.
- [17] BAYAT A, AGHAMIRI S F, MOHEB A, *et al.* Oil spill cleanup from sea water by sorbent materials [J]. Chemical Engineering & Technology, 2005, 28(12): 1525.
- [18] QIAN H, LIN Y L, XU B, *et al.* Adsorption of haloforms onto GACs: Effects of adsorbent properties and adsorption mechanisms [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 349(1): 849.
- [19] VADIVELAN V, KUMAR K V. Equilibrium, kinetics, mechanism, and process design for the sorption of methylene blue onto rice husk [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2005, 286(1): 90.
- [20] HO Y S. Removal of copper ions from aqueous solution by tree fern [J]. Water Research, 2003, 37(10): 2323.