

上海

环境科学集

上海环境科学编辑部 编

SHANGHAI

HUANJIANG KEXUEJI

上海科学技术出版社

Shanghai Scientific & Technical Publishers

(第

22

辑)

上海环境科学集 (第 22 辑)

上海环境科学编辑部 编

上海科学技术出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

上海环境科学集. 第22辑 / 上海环境科学编辑部编.
— 上海 : 上海科学技术出版社, 2019. 4
ISBN 978-7-5478-4378-9

I. ①上… II. ①上… III. ①环境科学—上海—文集
IV. ①X-125. 1

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第042493号

上海环境科学集·第22辑

上海环境科学编辑部 编

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社
(上海钦州南路71号 邮政编码200235 www.sstp.cn)
上海*****印刷
开本 889×1194 1/16 印张 9.5
字数 200千字
2019年4月第1版 2019年4月第1次印刷
ISBN 978-7-5478-4378-9/X·49
定价: 45.00元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题,
请向工厂联系调换

编委会

主 编：夏德祥

副 主 编：林卫青

执行副主编：唐东雄

编 委：夏德祥 林卫青

顾友直 唐东雄

梁丹涛 张 弛

目 次

上海市畜禽养殖行业资源化利用模式排污许可证制度的探索与实践

.....	王振旗 钱晓雍 饶文中等	(1)
船舶含油压舱水处理技术研究综述.....	康蒙蒙 李晶晶 刘梅等	(6)
悬浮填料生物膜工艺的应用与研究进展.....	朱松梅 余宙 王建翔等	(13)
我国污染场地问题研究发展趋势分析.....	赵琳	(18)
环境样品中多氯联苯同系物检测方法的研究进展.....	夏兵 方楠 张颖纯等	(23)
两级微电解协同催化氧化深度处理发酵类制药废水.....	王坤 王忠泉 孙小飞等	(27)
有序介孔碳负载纳米零价铁 / 铂材料去除水体硝酸盐实验研究	张颖纯	(31)
基于工业代谢分析的焦化生产能源系统优化研究.....	孙丽	(36)
某典型加油站场地环境调查与健康风险评估.....	邱志浩	(40)
电感耦合等离子体发射光谱法测定土壤中总铬负干扰分析.....	刘榜城 张金湖 谭冯茂	(47)
干涂料漆膜中 VOC 含量测定方法研究	何国青 潘浩晨 蒋家奎等	(51)
不同接种泥的活性炭生物转盘挂膜启动及运行效果比较研究.....	周丽 魏超 许雯佳等	(58)
宁波市环保产业发展现状及产业结构地区差异分析.....	王益澄 汪聪聪 马仁锋等	(64)
我国与发达国家畜禽养殖业环保政策的比较研究.....	孟祥海	(71)
基于 GIS 的合肥市 2000 ~ 2015 年生态系统服务价值的时空变化	刘崇刚 曹玉红 李露露	(76)
经济发展增量与环境污染关联性分析.....	刘丰旋 董小林 冯文昕	(82)
黄河兰州段污染因子变化趋势研究.....	汪文琦 廉耀康 段辉等	(88)
飞灰螯合剂研究进展与应用.....	景学森 刘玉坤 邵敏等	(93)
宝钢股份焚烧窑处置厂内废塑料桶的探讨.....	蒋家安	(96)

固定化微生物制备及其处理放射性废水能力探讨·····	何颖 蒋定文 王庆蓉 等	(100)
环境因素对城市氮污染河流水体氨氧化作用的影响效应·····	林天祥 王皓杰 徐昕昱 等	(105)
城市环境宜居性的参与式评价·····	吕越 陈忠清	(111)
绿色建筑室内空气质量检测与控制策略探讨·····	田恬	(115)
基于满意度调查的象山小镇生态化水平测度及障碍因素分析·····	汪佳瑜 胡求光	(119)
上海市集成电路制造业危险废弃物处置分析·····	厉亚军	(125)
柑橘罐头生产废水的电絮凝预处理试验研究·····	郝飞麟 金倩	(129)
突发大气污染事故辅助决策系统设计探讨·····	粟小东 王勤 徐展国	(133)
工业园区炼化企业 VOCs 排放源项调查及减排建议 ·····	牛鹏飞 王西兵 李新峰 等	(136)
厦门市燃气、燃油公交车污染物排放对比分析·····	庄马展 周海锋 欧健	(140)
3 种评价方法在某矿区土壤重金属污染评价中的应用比较 ·····	刘赟	(143)

上海市畜禽养殖行业资源化利用模式排污许可证制度的探索与实践

The Exploration and Practice on a Pollutant Discharge Permit System for Livestock and Poultry Farming in Resource Utilisation Mode in Shanghai

王振旗¹ 钱晓雍¹ 饶文中² 汤正泽¹ 付侃¹ 沈根祥^{1*} (1.上海市环境科学研究院,上海 200233; 2.上海环科综达水务有限公司,上海 200233)

Wang Zhenqi¹ Qian Xiaoyong¹ Rao Wenzhong² Tang Zhengze¹ Fu Kan¹ Shen Genxiang^{1*}
(1. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233; 2. Shanghai SAES-Winda Water Co., Ltd., Shanghai 200233)

摘要 以上海市为例,阐述了畜禽养殖业资源化利用模式排污许可证制度的基本原则:从基本信息填报内容简化、产排污节点及许可排放限值优化、自行监测管理要求强化等方面,对畜禽养殖业资源化利用模式排污许可证申请核发体系进行了深入探讨,以期为我国畜禽养殖业排污许可证申请核发提供参考。

关键词: 畜禽养殖 排污许可证 粪污还田 资源化利用 环境管理 上海市

Abstract Taking Shanghai as an example, a pollutant discharge permit system for livestock rearing in a resource utilisation mode was presented. Its permit application and issuance system was discussed in detail from aspects of simplifying basic information filling, optimising pollutant generation/discharge nodes and permitted emission limits, strengthening the requirements for self-monitoring management, and etc. It could provide a reference for the application and issuance of pollutant discharge permits for livestock and poultry farming in China.

Key words: Livestock and poultry rearing Pollutant discharge permit Return of livestock muck to farmland Utilisation as resources Environmental management Shanghai City

排污许可证制度是固定污染源环境管理的有效手段,美国、欧盟等发达国家和地区已经过数十年的努力建立了完善的排污许可制度,并构建了完整的排污许可技术体系。通过排污许可证制度的全面实施,我国将构建固定污染源环境管理的核心制度,并衔接环评制度、整合总量控制制度,为排污收费、环境统计等提供统一的污染排放数据^[1-3]。

党的十八届三中全会明确将“完善污染物排放许可制”作为改革生态环境保护管理体制的重要内容,新颁布实施的《环境保护法》也明确规定国家依照法

律规定实行排污许可管理制度。《控制污染物排放许可制实施方案》(国办发[2016]81号)要求,到2020年完成覆盖所有固定污染源的排污许可证核发工作,全

2018年度国家环境保护标准计划项目(编号:2018-33),上海市环保科研项目(编号:沪环科[2017]第31号),上海市环保科研项目(编号:沪环科[2018]第22号)共同资助。

第一作者王振旗,男,1985年生,2010年毕业于东华大学环境学院,硕士,工程师。

*通信联系人, shengx@saes.sh.cn。

国排污许可证管理信息平台有效运转;《水污染防治行动计划》(国发[2015]17号)要求全面推行排污许可制度,并将排污许可证制度作为我国固定污染源排放控制的核心和主体制度,即对固定污染源实行“一证式”的环境管理模式。针对规模化畜禽场污染治理和环境管理的长效机制,上海市早在2004年颁布实施的《上海市畜禽养殖管理办法》中就明确规定,畜禽养殖场除了要向动物防疫监督机构申领《动物防疫合格证》,还要按照国家规定向环境保护部门申领《排污许可证》;《上海市水污染防治行动计划实施方案》(沪府发[2015]74号)进一步明确,全市实施排污申报制度和许可证管理制度,推进规模化畜禽养殖场污染减排,并建立长效运行管理机制^[4-6]。

“十二五”期间,为完成国家主要水污染总量减排目标任务,持续改善郊区水环境质量,上海市共建成88个以资源化循环利用为主的规模化畜禽场污染减排工程,极大地提高了上海市畜禽养殖业污染治理水平。“十三五”期间,上海市又启动实施了新一轮以“减量提质”为目标的畜禽养殖业布局规划,近期规划保留规模化畜禽养殖场152家,预计到2020年上海市规模化畜禽养殖场将不足100家,其中95%以上采用粪污还田资源化利用的污染治理模式^[7]。但是,按原国家环境保护部《排污许可管理办法(试行)》和《固定污染源排污许可分类管理名录(2017年版)》的相关规定,国家目前仅对设有污水排放口的规模化畜禽养殖场(养殖小区)核发排污许可证,《排污许可证申请与核发技术规范 总则》的内容设计也更加侧重于工业企业,尚未对采用资源化利用模式的畜禽养殖业排污许可证申请核发体系进行明确规定。

因此,为贯彻实施国家对固定污染源实施排污许可管理政策的规定,近年来上海市在前期畜禽养殖业排污申报、畜禽养殖场污染减排等相关科学研究和技术应用工作的基础上,结合《上海市环境保护条例》和《上海市排污许可证管理实施细则》(沪环规[2017]6号)对排污许可证的管理要求,开展了畜禽养殖业排污许可证制度的探索和实践,重点针对畜禽养殖业资源化利用模式,构建了基于畜禽养殖业生产方式差异性、污染治理模式特殊性的排污许可证申请核发体系。

1 畜禽养殖业资源化利用模式排污许可证制度基本原则

1.1 严格保持与整个排污许可证制度的一致性

排污许可证制度是我国环境管理的核心制度,畜

禽养殖业作为农业固定污染源,其排污许可证制度应与我国整个排污许可证制度保持高度一致。畜禽养殖业资源化利用模式排污许可证申请核发体系的一般性原则、基本框架、操作流程等内容要与《排污许可证申请与核发技术规范 总则》等相关技术规范相统一,以便为地方环境保护部门核发排污许可证提供标准化、规范化的工作规程。

1.2 充分认识畜禽养殖业生产方式的差异性

畜禽养殖业以猪、鸡、牛等畜禽的饲养繁殖为主,品种繁多、方式各异,对自然条件和经济水平有较大的适应性,在生产过程中涉及的产品(新鲜的肉类、蛋类、奶类等初级农产品)及产能(存栏量、出栏量等养殖规模)、原辅料(垫料、菌剂等养殖投入品)等基本信息与工业企业差异较大,需要根据畜禽养殖业生产方式的差异性确定针对性的基本信息填报内容,以便为畜禽养殖主体申请排污许可证提供明确化、简便化的填报要求。

1.3 深入了解畜禽养殖业资源化利用模式的特殊性

畜禽养殖业粪污还田的资源化利用模式作为畜禽养殖污染治理的鼓励方向,在养殖生产和粪污还田过程中产排污节点(废水、废气等)、排放口(无污水排放口)、许可排放限值(无许可排放量)、监测管理要求(水、气、土壤等环境介质)等相关内容相比于工业企业较为特殊,需要根据畜禽养殖业资源化利用模式的特殊性确定针对性的环境管理措施要求,以便为地方环境监察部门后续监管提供可参照的执行依据。

2 畜禽养殖业资源化利用模式排污许可证申请核发重点内容

2.1 简化基本信息填报内容

畜禽养殖业排污单位的生产方式与工业企业相比有较大差异、管理制度也不够完善,除了单位名称、统一社会信用代码、法定代表人、生产经营场所等一般信息外,产品及产能、原辅料等基本信息根据上海地区采用资源化利用模式的规模化畜禽养殖场场内自行生产有机肥及个别使用生物发酵床工艺的特点,从有机肥质量和微生物菌剂环境安全的角度出发,在确保基本信息完整的情况下进行适当简化。

畜禽养殖业排污单位产品及产能信息包括养殖类型、养殖量、场区占地面积、棚舍面积、棚舍类型、年用水量、用水类型等内容;原辅料信息则指直接用于固体粪和污水处理利用过程中添加的各类原料、辅料使用情况,主要涉及自行生产有机肥的畜禽养殖场

(堆肥原料仅为本场畜禽粪便)中使用的堆肥辅料和菌剂以及采用生物发酵床养殖工艺的畜禽养殖场使用的垫料和菌剂等,明确其基本理化性质、来源、使用量、环境安全证书编号等内容。

2.2 优化产排污节点及许可排放限值

畜禽养殖业排污单位产排污节点与工业企业相比,废水、废气、固废、噪声等产排污节点的确定及许可排放限值的设置相对简单,但需要根据上海地区采用资源化利用模式的畜禽养殖业排污单位无污水排放口、粪污还田利用的具体特点,在客观反映实际排放的情况下进行适当优化(见表1)。

畜禽养殖业排污单位废水产排污节点根据粪污资源化利用模式无污水排放口的特点,重点关注污水类型、产生规律、产生量、污染物种类、排水去向、配套农田类型及其面积和液肥施用方式等内容;废气产排污节点则根据上海地区畜禽养殖场基本无锅炉设施且臭气扰民信访投诉较多的情况,侧重于废气(恶臭)无组织排放的产生单元、排放规律、控制措施等内容。此外,根据《上海市环境保护条例》,畜禽养殖业排污单位固废和噪声污染也纳入排污许可证的管理范围。固废产排污节点重点关注固废类型、产生规律、产生

量、污染物种类、最终去向等内容;噪声产排污节点则侧重于产生单元、排放规律、控制措施等内容。

畜禽养殖业排污单位产排污节点对应排放口排放限值根据各类产排污节点排放口污染物排放方式确定。规模化畜禽养殖场在粪污还田资源化利用过程中,液肥灌溉出水口不属于污水排放口范畴,对其不作相关规定要求;考虑到目前规模化养殖场废气(恶臭)属于无组织排放,对废气有组织排放口也不作相关规定要求。对于水污染物,由于无污水排放口,不设置许可排放浓度,许可排放量(化学需氧量、氨氮、总氮、总磷)均为零,须按照国家和地方相关还田技术规范要求进行粪污还田资源化利用;对于无组织废气(恶臭),按照厂界确定许可排放浓度,依据《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596-2001)以及上海市地方标准从严确定,但不设置许可排放量;对于固废污染物,按照国家或地方污染物排放标准等法律法规和管理要求,提出畜禽粪污还田应达到的污染物控制要求;对于噪声按照厂界确定许可环境噪声排放限值,参照《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB 12348-2008)以及上海市地方排放标准从严确定,按照其所在的环境功能区设置许可排放限值。

表1 畜禽养殖业排污单位产排污节点重点内容

类型	内容	说明
废水	污水类型	采用干清粪工艺的养殖场污水包括棚舍冲洗水、畜禽生产废水(含尿液)、回用中水、冷却/降温废水、锅炉和电站废水等;采用水泡粪工艺的养殖场包括固液分离污水、沼液、回用中水、冷却/降温废水、发电站废水等。上海市不允许采用水冲粪工艺,采用水冲粪工艺的应在申请排污许可证前改造为干清粪等其他污染风险可控的清粪工艺
	污染物种类	化学需氧量、氨氮、总氮、总磷,视具体还田利用要求,可增加粪大肠菌群数、蛔虫卵、pH等
	配套农田类型	按蔬菜瓜果、粮食和林木三大类还田农作物类型划分。其中:蔬菜瓜果作物包括叶菜类、茄果类、块根类等生食和熟食的蔬菜,草莓、西甜瓜、葡萄和桃、梨等瓜果类作物;粮食作物包括水稻、小麦、大麦、油菜和饲料等粮食、油料和饲料作物;林木作物包括苗木、绿化林木、花卉和草坪等用于经济和绿化的草木类作物
	配套农田面积	产生的粪肥产品(垫料肥、自制有机肥、液肥等)还田利用的农田总面积,应在还田协议中明确,不包括运至有机肥厂后生产的商品有机肥还田利用的农田面积
	专用还田管网	专门用于输送液肥还田的管道设施,污水管道、沟渠输送系统应采用防漏、防渗结构,防止污水输送过程中因流失而污染环境;针对管网无法送至农田区域,液肥运输和施用主要靠专用还田车辆完成的,应符合国家道路运输废弃物的管理规范,具有防渗漏、滴漏和冒流等防止污水运输过程中污染环境的结构措施
	液肥施用方式	喷灌、漫灌、沟灌、滴灌等,休耕期基肥指在两茬作物种植间歇期或休耕期施用,耕作期追肥指在农作物生长期施用
废气	产生单元	养殖棚舍、堆粪棚(堆放鲜粪、沼渣、干粪等)、堆肥车间、成品有机肥车间、污水储存池(敞口式)、病死畜禽暂存间、病死畜禽处理池等
	现有控制措施	在不改变现有畜禽养殖和粪污处理方式的情况下,采取的恶臭控制管理性措施
	计划改造措施	为减少恶臭排放,对畜禽养殖和粪污处理工艺开展的工程性改造内容

(续表)

类型	内容	说明
固废	固废类型	采用生物发酵床的排污单位固废主要指垫料肥;采用粪污还田的排污单位固废主要指畜禽粪便(鲜粪、干粪等,未生产有机肥部分)、沼渣(未生产有机肥部分)、有机肥等
	污染物种类	用于还田利用的填写砷、汞、铅、镉、铬等重金属,根据具体还田利用要求,可增加蛔虫卵死亡率、粪大肠菌群数等
	最终去向	有机肥厂、配套农田所在村镇或种植公司、托管公司(个人),并注明详细去向
噪声	产生单元	养殖棚舍、饲料生产车间、青(黄)储秸秆破碎制备、堆肥车间,其他生产单元视实际情况选择性填报
	现有控制措施	在不改变现有畜禽养殖和粪污处理方式的情况下采取的噪声控制管理性措施
	计划改造措施	为减少噪声污染,对畜禽养殖和粪污处理工艺采取的工程性改造内容

2.3 强化自行监测管理要求

畜禽养殖业排污单位采用粪污还田的资源化利用模式,与工业企业相比所产生的环境影响并不局限于排污单位自身,更应将配套还田农田作为一个整体来考虑粪污还田对农田水土环境的长期影响,主要包括农田土壤重金属累积和地下水污染风险等问题,需要根据上海地区畜禽养殖业排污单位粪污还田资源化利用的施用方式,对配套还田农田土壤和地下水环境质量的自行监测管理要求,在不大幅增加畜禽养殖业排污单位经济负担的情况下进行适当强化^[8]。

除了对畜禽养殖业排污单位废气(恶臭)、固废、噪声等产排污节点根据相关技术规范要求开展手工监

测外,要求畜禽养殖业排污单位在配套还田农田中设置常年监测点位,于排污许可证申领当年,对配套还田农田耕作层(0~20 cm)土壤进行基础养分(全氮、全磷)和重金属(砷、汞、铬、镉、铅、铜、锌、锰)采样监测,作为排污单位申领许可证的基准年检测值(见表2)。此外,畜禽养殖业排污单位在取得排污许可证后,应每年至少1次,采集配套还田农田耕作层(0~20 cm)土壤和地下水样品,检测常规指标和特征重金属的含量水平,出具畜禽粪污还田农田土壤和地下水环境质量影响评估报告,确保配套还田农田土壤氮磷养分平衡以及土壤和地下水环境质量无恶化趋势。

表2 畜禽养殖业排污单位自行监测管理要求重点内容

类型	监测点位	监测指标	监测频次
废气	厂界	臭气浓度	1次/季
噪声	厂界	噪声	1次/季
固废	固废处理点	蛔虫卵、粪大肠菌群	1次/季
土壤	配套还田农田	全氮、全磷、砷、汞、铬、镉、铅、铜、锌、锰	1次/年
地下水	配套还田农田	化学需氧量、氨氮、硝酸盐	1次/年

3 结语

排污许可证制度是我国固定污染源环境管理的核心制度,但我国工业、农业、生活等各类污染源行业特点、区域条件、管理水平均差异较大,因此对于不同类型的固定污染源,应在排污许可证制度的大框架下,既保持整个排污许可证制度的一致性,同时又考虑差异性和特殊性,制定针对性的排污许可证申请核发体系。尤其是作为农业污染源的畜禽

养殖业,生产方式较为特殊、污染防治起步较晚、环境监管水平较低,且绝大部分采用粪污还田资源化利用模式而无污水排放口,因此上海市基于畜禽养殖业的生产特点、污染治理模式、环境监管需求,构建了畜禽养殖行业资源化利用模式排污许可证申请核发体系,可为其他省份开展相关工作提供参考借鉴,推动畜禽养殖业的可持续发展和农业污染治理水平的进一步提升。

4 参考文献

- [1] 王伟. 排污许可的行政主导模式及其转向——兼评《排污许可证管理暂行规定》[J]. 生态经济, 2018, 34(3): 218-224.
- [2] 张静, 蒋洪强, 周佳. 基于排污许可的环境标准制度改革完善研究[J]. 中国环境管理, 2017, 9(6): 30-33, 40.
- [3] 周俊, 梁鹏. 关于我国土壤与地下水环境管理承接“排污许可证制度”的探讨[J]. 环境保护, 2017, 45(4): 40-43.
- [4] 吴根义, 廖新伟, 贺德春, 等. 我国畜禽养殖污染防治现状及对策[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(7): 1261-1264.
- [5] 王振旗. 畜禽规模养殖污染治理项目管理机制研究——以上海市为例[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(9): 100-103.
- [6] 王振旗, 张心良, 郑恺, 等. “十二五”农业源污染减排绩效分析与评价——以上海市为例[J]. 环境保护, 2016, 44(18): 60-62.
- [7] 王振旗, 钱晓雍, 沈根祥. 上海市规模化畜禽场污染减排模式分析与应用[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(10): 2030-2035.
- [8] 张心良. 猪场污水还田与化肥配施对农田水土环境和作物产量的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(4): 645-650.

责任编辑 张弛 (收到修改稿日期: 2017-07-13)

船舶含油压舱水处理技术研究综述

A Review of the Research on Technologies for Treating Vessels' Oil-Containing Ballast Water

康蒙蒙¹ 李晶晶² 刘梅² 翁益松³ 赵晓栋¹ 陈庆国^{2*} (1. 浙江海洋大学船舶与机电工程学院, 舟山 316022; 2. 浙江海洋大学海洋科学与技术学院, 舟山 316022; 3. 舟山市水利勘测设计院, 舟山 316000)

Kang Mengmeng¹ Li Jingjing² Liu Mei² Weng Yisong³ Zhao Xiaodong¹ Chen Qingguo^{2*} (1. School of Naval Architecture and Mechanical-Electrical Engineering, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022; 2. School of Marine Science and Technology, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022; 3. Zhoushan Survey and Design Institute of Water Conservancy, Zhoushan 316000)

摘要 概述了船舶含油压舱水的来源及其对海洋生态环境的危害。阐述了常用的吸附法、膜分离法、絮凝法、化学氧化法、气浮法、生物法对含油废水处理的研究和应用进展。介绍评价了磁分离法、超声波法、微电解法和联合处理技术等国内外处理含油废水新工艺的特点及效果。提出了含油废水处理技术面临的问题、挑战及发展前景展望。

关键词: 含油压舱水 处理技术 海水污染 船舶 海洋环境保护

Abstract Regarding vessels' oil-containing ballast water, its sources and harms to the marine ecological environment were briefed. Relevant research and application progresses in the various processes for treating oil-containing wastewater were presented including adsorption, membrane separation, flocculation, chemical oxidation, air flotation, biological methods, and etc. The features and effects of magnetic separation, ultrasonic method, micro-electrolysis and combined treatment processes were summarised and evaluated. Finally, the problems faced, challenges and development prospects of treatment technologies for oil-containing wastewater were put forward.

Key words: Oil-containing ballast water Treatment technology Marine water pollution Vessels Marine environment protection

世界航运业发展、各国船舶吨位增加,特别是超大型船舶数量的增加,对海洋环境造成严重污染。据国际海事组织(IMO)资料统计,由于运输损失,每年进入海洋的 147×10^4 t石油中,约有 70×10^4 t是船舶压载水、洗舱水和舱底水入海造成的,其中 30×10^4 t是由于舱底水排放入海造成的^[1]。随着含油废水处理技术的不断发展,大部分处理技术已经被应用到实际处理中,并取得了良好的效果。本文对含油废水处理技术的最新研究进展进行了综述。

1 船舶含油压舱水的来源与危害

1.1 船舶含油压舱水的来源

油轮卸完油后,为确保安全航行和提高推进器的效

国家自然科学基金项目,编号:41506126;浙江省科技计划项目,编号:2016C33054;舟山市科技计划项目,编号:2014C11006。

第一作者康蒙蒙,男,1994年生,2016年毕业于海南医学院热带医学与检验医学院,在读硕士研究生。

* 通信联系人, qgchen@zjou.edu.cn。

率,需要在货油舱内装一定量的水,装入的水和附着在舱壁上的黏油混合即为压载油污水。一般压载水占持水油轮载重量的 25% 左右,含油量约为 3 000 mg/L。压舱水中间层平均含油量一般为 12~15 mg/L^[2]。

1.2 含油压舱水的危害

船舶排放至海洋的含油污水若超过海洋自净能力,就会造成海洋污染,给海洋环境、人类生存以及生态平衡等造成严重影响^[3]。压载水肆意排放造成的油污染则更为突出,如一般的 10×10^4 t 级油轮,若压舱水不经处理就排放,每航次有 100~150 t 的油排入海中^[4]。

2 常见的含油废水处理技术

2.1 吸附法

固体吸附材料含有较多孔隙,比表面积大大提高,含油污水流过时,水中的杂质被吸附在表面,降低水中溶解油的含量,达到对含油污水中的油滴进行有效吸附的目的。

Abdeen^[5]等利用多孔 PVA 水凝胶作为吸油材料处理含油废水,胞外结构对原油和聚合物固定化具有稳定作用,由 HPV 处理的原油去除率为 82%,表明使用 HPV 和 HPV 膜作吸附材料可以对含油废水进行有效吸附。Mancini^[6]等通过颗粒活性炭混凝填充柱处理油轮清洗产生的含油废水,经比较,当聚合氯化铝和硫酸铝的剂量分别为 40 mg/L 和 90 mg/L 时, COD 去除率为 20%~30%。柱过滤试验表明,处理后污水浓度为 0.1~0.3 kg/m³,达到排放限值。

Hosny^[7]等从虾壳中提取天然高分子(壳聚糖)并与混凝剂[壳聚糖/羧甲基纤维素(CMC)和壳聚糖/硫酸铝]混合,从含油污水中吸附油。结果发现,脱乙酰壳多糖的油去除率在 pH4、pH9 时分别达到 96.35%、59%,平均搅拌时间 30~60 min,在加入不同 CMC 或硫酸铝后,壳聚糖去油能力提高。同时还发现,混凝剂去除率为 85%~99%。Gao^[8]等在白泥浸出液中加入碱性含油废水,在原位生成金属氢氧化物(IGMHs),通过 IGMHs,从模拟碱/表面活性剂/聚合物驱采出水中评价乳化油的去除效果。结果发现,通过共沉淀/吸附过程,95%~99%的乳化油被去除。

由于传统吸附剂,如活性炭、沸石等,吸附容量有限、吸附时间较长,且成本较高,所以需要进一步研制新的吸油材料。多孔 PVA 水凝胶、颗粒活性炭、壳聚糖与混凝剂混合物等均对含油废水除油有良好的效果。

2.2 膜分离法

膜分离法是一种物理方法,是利用多孔膜介质来截留水中的杂质,从而达到净水的目的。膜分离法可分为微滤膜法、超滤膜法和反渗透膜法等。

丁慧^[9]等对油田采出水使用陶瓷膜进行处理研究,结果表明,最佳实验条件为:温度 50℃,膜面流速 5.0 m/s,跨膜压差 0.16 MPa,处理后采出水的油质量浓度小于 1 mg/L,悬浮物质量浓度小于 1 mg/L。Kumar^[10]等使用廉价的黏土混合物通过挤压技术制备管状陶瓷微滤膜,在 69~345 kPa 压力、50~200 mg/L 原料浓度和 $5.55 \times 10^{-7} \sim 1.66 \times 10^{-6}$ m³/s 错流速率下,进行含油废水乳化微滤实验。实验表明,压力和流量增加,油截留率反而降低,油浓度增加导致排斥反应加强。在 69 kPa 压力下,含油废水截留率最高达 99.98%,渗透通量为 3.16×10^{-5} m/s。

Yeom^[11]等在 1 000℃下,使用廉价原料通过简单的压制和浸涂,制备无裂纹氧化铝黏土硅藻土复合膜,发现在 101 kPa 压力下,当再生膜的孔隙率、孔径、抗折强度、稳态通量分别为 36.5%、0.12 μm、32 MPa、 6.91×10^{-6} m/s 时,对浓度为 600 mg/L 的原油表现出非常高的油截留率,高达 99.9%。Li^[12]等通过设计加电场的煤基炭膜处理含油废水,发现酸性条件利于炭膜油水分离,电极距离减小,而处理系统分离性能提高,得出最佳操作条件:电场强度 0.31 V/cm、泵转速 7.5 r/min 和电解质浓度 5 g/L。

膜分离法对于含油污水处理具有很好的效果,管状陶瓷微滤膜、硅藻土复合膜和煤基炭膜等均表现出非常高的油截留率,但其依旧存在问题,主要是膜污染。如果较长时间使用膜分离法处理含油污水,膜表面截留的污染物会对膜本身造成污染,而且污染物易将膜孔堵住,降低污水处理效果。需要定时检查并清理膜孔。

2.3 絮凝法

絮凝法是通过向废水中加入一定比例的絮凝剂,生成亲油性的絮状物,使微小油滴附于其上,达到油水分离、降低 COD 的目的。

Hassan^[13]等通过填充铝气缸固定阳极对油-水乳液进行电解电凝,在最佳条件下,于 5 min 后分离效率达到 85%,并且在 35 min 后达到最大值 99%。随着电流密度、NaCl 浓度和床层高度的增加,油去除率和分离效率均提高。Yang^[14]等通过动态膜/电凝混合系统,用高岭土预涂-微滤陶瓷膜,对膜污染和除油效果的影响进行研究。实验发现,电流密度增大,

初始 pH 下降,都会导致除油率增加。在低电流密度时,这种变化趋势较明显,表明动态膜/电凝法是一种有前途的污水处理耦合技术。

Fouad^[15] 在一个圆柱形间歇式反应器中通过电絮凝法对油-水乳液中棉籽油的去除进行研究。结果表明,在高电流密度、高初始油浓度和 pH 为 7 条件下,乳液除油效率达到最佳。而 Safari^[16] 等研究电絮凝法对含油废水 COD 和柴油的去除,试验发现,当 pH 为 7、时间 40 min、电压 10.5 V、NaCl 浓度 0.5 g/L、柴油浓度 3 500 mg/L 时,去除效率达最大,COD 和柴油去除率分别为 $(99.1 \pm 0.2)\%$ 和 $(98.8 \pm 0.2)\%$ 。结果表明,电凝法处理重度污染的含油废水是可行的,去除效率较高。

Sun^[17] 等制备聚合硅酸铝铁(PAFSi)复合混凝剂处理含油废水,把 COD 和油去除率作为指标来评价 PAFSi 混凝能力。工艺制备的有利条件: Si/Fe 量比 1:4,铝铁量比 1:1,碱度 0.5,制备温度 70℃。试验得出最佳条件:在初始浓度 60~120 mg/L, pH4~9, G 值为 300~600/s 下, COD 和油去除率分别为 98.2% 和 98.4%, PAFSi 复合混凝剂在高含油废水处理上具有良好的混凝-絮凝性能。

絮凝法处理含油废水,效率很高。虽然絮凝法对含油废水处理效果不错,但普通絮凝剂会对海洋生态环境造成破坏,不宜长期使用,研制出一种安全无毒的试剂是必要的,如 Sun^[17] 等制备的 PAFSi 复合混凝剂不仅具有良好的除油效果,还对水环境污染较小。

2.4 化学氧化法

氧化法也可说是化学氧化法,利用氧化剂,经氧化分解反应,将含油废水中的油和其他有机污染物进行分解,达到除油的目的。Fenton 氧化法是一种高级的氧化法,适用于难降解的高浓度废水的处理^[18]。

魏祥甲^[19] 等选用复合絮凝剂对采油污水进行预处理,再对混凝后的上清液进行 Fenton 氧化,投加 50 mg/L 的 H₂O₂, H₂O₂ 与 Fe²⁺ 的量比 5。经处理后,污水出水水质 SS 9 mg/L、COD 48 mg/L、色度 16 倍。付丽丽^[20] 等采用微电解-絮凝法预处理含油乳化废水,结果表明,当铁投加量 60 g/L、铁炭质量比 20:1、反应时间 16 h、絮凝剂 PAC 用量 120 mg/L、PDA 用量 12 mg/L 时, COD 去除率可达 45% 以上,达到最佳预处理效果。

Yeom^[21] 等通过纳米二氧化硅(SiNP)制备超疏水网状海绵,十六烷基三甲氧基硅烷(HDTMS)被当作超疏水表面的疏水剂, HDTMS-SiNP 网状海绵

显示,当出水接触角大于 150° 时,含油废水/海水中油分离效率高达 99%。

如果单一应用化学氧化法处理含油废水,处理效率不是很高,如与物理、生物方法等进行组合,油水分离效率、COD 去除率大大提高。

2.5 气浮法

气浮法即在含油污水中通入大量分散的气泡,与悬浮油滴接触并发生黏附作用,形成的聚合体密度小于水而上浮,实现油水分离。

蔡宏镇^[22] 等通过在浮选柱内加入空桶,其内部形成一个环流流场,液体滞留时间增加,气泡与油滴碰撞概率加大,除油率提高,最高可达 90.48%。史博^[23] 等采用斜板溶气气浮法处理油田含油污水,试验得出:当斜板间距 60 mm、气泡层厚 30 cm、表面负荷 9 m³/(m²·h)、回流比 30% 时,处理后的污水含油量低于 10 mg/L。Li^[24] 等为提高油水乳化液分离效率,开发一种新型旋流静态微泡浮选柱(FCSMC),试验表明, FCSMC 具有较高的除油效率,当去除 37.10 mg/L 的含油废水时,在 18.75 min 停留时间、475.05 mg/L 初始油浓度、1.8 L/min 曝气量和 25.01 μm 平均油滴大小下,除油效率达 92.19%。

Cai^[25] 等采用 CFD-PBM 数值模拟方法研究了油滴动态分离特性,得出由于油滴的聚结和破裂,分离过程中油滴直径分布在不断变化。当循环流量约 0.75 m³/h、油滴碰撞和聚结效率足够强、流体剪切应力相对较弱时,油水分离效率最高,达到 75%。Ulucan^[26] 等通过电凝/电气浮工艺处理舱底水,在 10 min 内, Al 对 COD、油脂去除率分别为 64.8%、57%, Fe 则分别为 36.2%、12.5%,显然铝电极更有效。此外,相比较电絮凝法,通过电芬顿过程处理后,其 COD、油脂去除率分别为 71%、69%,效果更佳。

目前为止,气浮法只能去除含油污水中的悬浮油滴,而对于含油污水中的溶解油、乳化油难以去除干净,需进行更深入的处理。史博^[23] 等采用斜板溶气气浮法处理含油污水,处理后达到排放标准。Ulucan^[26] 等通过电凝/电气浮组合工艺处理舱底水,效果良好。

2.6 生物法

生物法是利用厌氧或好氧的微生物对污水中的石油烃类进行降解,达到净化污水的目的。常见的生物法有活性污泥法、生物膜法、生物滤池法和生物接触氧化法等。

Wei^[27] 等建立 MBR 来处理港口含油废水,通

过 A/O-MBR 进水, 采用混凝沉淀进行预处理。实验通过提高曝气量和降低 A_1/A_2 比例, 对 MBR 进行优化, 跨膜压力增加减缓, 表明优化策略可减轻膜污染。Alsahy^[28] 等采用一种新的中空纤维膜的膜式模块技术的浸没式膜生物反应器来处理 Aldaura 炼油厂的工业废水。实验发现, 增加悬浮固体浓度, COD、BOD、油含量、酚、浊度的去除效果增强; 施加不同的预热温度及时间, 其去除效率也提高。结果表明, 对于含油废水的处理, 通过浸没式 MBR, 预热初始废水是一种可能的替代方法。

而 Sichinga^[29] 等采用 MBR 技术来降解石油烃废水, 通过对 COD、溶解氧、浊度、重金属和异养细菌计数的测量, 来评估 MBR 的工艺处理性能。处理过程中, 润滑油馏分的总脂族烃、总脂肪烃、全多环芳香烃的去除率分别为 98%、96%、99.8%, 表明 MBR 法是一种有效的去除废水中石油烃的方法。Qin^[30] 等采用一种新的摆锤式振荡中空纤维膜组件构成的浸没式膜生物反应器来处理含油废水和膜污染控制问题。在通过膜振荡生物反应器对污泥絮体施加的力进行分析, 探讨膜振荡对减小滤饼层阻力的影响。结果表明, 优化后的 PTO SMBR 系统比传统的 MBR 系统的膜透性高 11 倍。摆型振动浸没式膜生物反应器被证明是一个非常具有前途的创新系统, 长期的实验表明, 动态膜过滤对振荡频率和方向较敏感, 液膜界面处的湍流增强, 膜透性显著增强。

生物法与气浮法、絮凝法等相比, 具有很多优势, 如成本较低、操作简便、处理效率高以及污泥量少等。如果将微生物法与传统的工艺方法组合应用, 则含油废水的处理效率可显著提升。

3 国内外处理含油废水新工艺

3.1 磁分离法

磁分离法是利用废水中杂质颗粒的磁性吸附分离水中的污染物, 达到净化的目的。

Liu^[31] 等利用磁聚氨酯海绵处理含油废水, 磁聚氨酯海绵不仅有较强的超疏水性和超亲油性, 还有磁性反应能力和抗腐蚀能力, 可有效分离水中的油及污染物。Ren^[32] 等采用一种高梯度磁分离技术 (HGMS) - 紫外 (UV) 组合工艺处理压载水。以金黄色葡萄球菌为参比细菌, 通过 HGMS-UV 工艺处理, 发现金黄色葡萄球菌所受损害最严重, 且 K^+ 菌泄漏为 1.73 mg/L, 高于单独的 60 min 紫外光辐照 (1.17 mg/L) 和高梯度磁分离技术 (0.12 mg/L), 表明

HGMS-UV 复合工艺处理船舶压载水是一种有效方法。

Lü^[33] 等通过合成和表征一系列 pH 敏感磁性纳米材料 (MNPs), 对从水中分离的乳化油进行评价。实验发现, 在酸性和中性条件下, MNPs 具有较高的锚固密度, 表现出较强的油水分离性能, 在碱性条件下, 油水分离性能最小。MNPs 容易合成和回收, 是一种高效处理乳化油废水的工艺。Zhang^[34] 等研究磁性 Fe_3O_4 纳米粒子 (MNP) 涂布氟化碳纤维 (CF) 膜的油水分离效率, 亚甲基蓝 (MB) 和 Cu^{2+} 作为吸附质, 用于评价 CF 膜的去除性能。MB、 Cu^{2+} 对 MNP 的吸附容量分别为 30.1 mg/g、62.5 mg/g, CF 膜显示油滴的快速去除率和油水分离效率大于 95%。

Mirshahghassemi^[35] 等使用高梯度磁分离技术, 用于连续流动系统中油水混合物的快速脱油, 在高磁场 (0.56 T) 和 1 h 混合时间下, 荧光光谱和电感耦合等离子体发射光谱仪数据显示 85% ~ 95% 油和纳米粒被去除。Su^[36] 等采用一步浸渍法制备一个磁性、超亲水 / 憎油海绵, 由于其高孔隙率、超亲水疏油以及其毛细管作用的结合作用, 表现出优异的油水分离能力, 还可以选择性地吸收与连续去除散装油水。

虽然磁分离法是一种简便可行、处理效率高的处理技术, 但也有其技术难度和局限性, 如必须选择高磁饱和度的聚磁介质, 介质的剩磁在反冲洗时不能完全把吸附的磁性颗粒冲洗干净等, 因此有待进一步研究。

3.2 超声波法

超声波在处理含油污水方面, 由于其降解速率较快、降解条件温和, 故不仅可以实现油水分离, 还能提高含油废水油去除率。

Xu^[37] 等使用超声波法处理油田含油污泥, 污泥含油量降低了 50% 以上。Hu^[38] 等研究发现, 当超声波功率 75 W、处理时间 6 min、初始浆料温度 25℃、污泥与水比 1:4 时, 油回收率超过 60%。张鹏^[39] 等采用超声波 - 气浮法对油田炼油厂含油污水进行处理, 超声条件为频率 28.7 kHz、声强 0.61 W/cm²、功率 50 W、在 70℃ 下辐照 5 min; 而气浮条件为溶气压力 0.3 MPa、原水流量 300 L/h、回流比 70%、加入 40 mg/L 的 PAC, 除油率达 94.1%。

超声波法处理含油废水, 不仅能够裂解油分子, 降低油含量, 还可以与其他处理技术联合使用, 具有良好的处理效果, 不过制约超声波法使用的局限在于其能耗问题, 如何对该法进行优化, 实现低能耗运行, 是目前需要解决的问题。

3.3 微电解法

微电解技术也称为内电解技术,研究较多、较成熟的为铁碳微电解法,主要以铁作阳极,惰性碳作阴极,以废水中离子作电解质,形成原电池进行反应。

Xu^[40]等采用水解酸化单元生物处理组合和二级生物接触氧化进行实验,结果发现,当平均初始COD负荷约15 000 mg/L、pH为4、铁碳与水体积比1:1、气水比10、反应时间180 min时,内微电解对COD去除率为31.8%。袁雅妹^[41]等通过铁碳微电解对采油废水进行预处理研究,实验发现,当pH为4、铁投加量0.167 g/mL、反应时间30 min、铁碳质量比3:1时,COD去除率可达54.3%。此外,采用铁屑和碳粉对采油废水进行微电解,可达到较理想的处理效果,其中pH和铁投加量对COD去除率影响最大。

蒲博^[42]采用铁碳微电解技术处理四川某油田经预处理后的钻井废水,结果表明,在铁碳投加量0.8 kg/L、铁碳质量比1:1、pH为3.2、反应时间150 min的条件下,COD去除率达到70.25%,可有效降低后续处理的负荷。李洁^[43]采用自制规整的微电解填料(SMEP)作为微电解反应的填料,SMEP组分为Fe:Cu:C=20:1:3,发现曝气能提高微电解反应对COD及聚丙烯酰胺(HPAM)的去除率,分别为12%、10.2%,而加H₂O₂后,反应对COD、HPAM的去除率分别提高14.7%、11.5%,超声强化微电解反应对COD及HPAM的去除率分别提高27.2%、25.2%。超声微电解后,HPAM分子大量断链而被降解,在1h后,出水COD、HPAM含量分别为98.6 mg/L、33.1 mg/L,COD达到GB8978-1996一级排放标准,所以超声强化微电解反应有利于聚驱采油污水处理。

微电解技术具有处理效果好、操作简便、应用范围广、成本较低等优点,被广泛应用于各种难降解有机废水的处理中。

3.4 联合处理技术

联合处理技术即把物理、化学和生物等方法进行组合,能有效去除压载水中的生物,达到IMO的要求。目前,联合处理压载水技术成为研究处理压载水的热点。

Chen^[44]等采用一种新型PbO₂/石墨毡电极来处理压载水,所制备的电极用于处理作为模拟压载水处理指标生物的大肠杆菌、灭活粪肠球菌和卤虫。该技术无需任何额外的化学物质,即可去除船舶压载水中的微生物,失活程度随电流密度和接触时间的增加而增加。

张思源^[45]采用紫外/臭氧联合中试系统和紫外/电催化系统对船舶压载水中的微生物进行灭活实验,得出联合工艺处理船舶压载水比单一处理更有效。实验表明,紫外/臭氧联合系统在360 μW/cm²辐照度、2.12 g/h臭氧投加量、1.0 s水力停留时间反应下,水中大肠杆菌和杜氏盐藻全被杀灭;紫外/Ti/RuO₂系统在90 mA/cm²电流密度和4 h反应时间下可杀死杜氏盐藻,通过实验处理后的压载水达到排放标准。张祖云^[46]等以溶剂热-聚乙烯醇黏附法制备了负载Bi_xTiO_y-TiO₂复合膜电极钛网,利用三电极系统对模拟压载水进行灭菌研究。实验发现,Bi_xTiO_y-TiO₂复合膜电极光电催化可有效去除模拟压载水中的细菌,是一种可行的方法。

相比单一的含油压载水处理方法,采用多种联合工艺技术可有效处理含油压载水,并达到极高的除油效果,进而符合IMO标准,但此技术也有一些局限性,如腐蚀性、处理效率等,需要进一步研究、完善此技术。

4 结论与展望

对于含油废水的处理,国内外许多学者对其进行了研究,并取得一定的进展。目前含油废水的处理方法都有一定的实用性,但运行成本仍然很高、安全性较差、操作复杂,开发出简便高效的含油废水处理技术,并保持经济高速发展与维持环境生态的平衡,成为亟待解决的问题,这对于解决水体环境污染问题具有重要意义。近年来我国针对含油压载水的处理技术得到了长足进步,已研究出的多种处理方法也已初步满足排放的要求,但对于实际的含油压载水处理而言,要实现达标排放,还不够成熟。

今后含油压载水的主要处理方向:在实际处理中,单一的处理技术都有其局限性,应先对其进行完善,然后对各工艺进行有效组合,形成多级处理工艺,发挥各种技术的协同效应,获得良好的处理效果,经济高效地达到IMO要求,满足其排放标准。在新型材料、新技术研究方面,应本着绿色环保的要求,进行研发与应用。

5 参考文献

- [1] 张德荣. 我国船舶污水处理技术现状及发展趋势[J]. 武汉船舶职业技术学院学报, 2008(6): 35-37.
- [2] 董宏. 电芬顿法处理船舶油废水的动力学及其仿真系统研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2008.
- [3] 姬钰. 浅析船舶油污水的危害及处理方法[J]. 船舶,

- 2009(2): 31-37.
- [4] 鄂海亮. 我国船舶污染防治体系的分析研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2008.
- [5] ABDEEN Z, MOUSTAFA Y M M. Treatment of oily wastewater by using porous PVA hydrogels as oil adsorbent[J]. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2016, 37(6): 799-805.
- [6] MANCINIG, PANZICA M, FINO D, et al. Feasibility of treating emulsified oily and salty wastewaters through coagulation and bio-regenerated GAC filtration[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016: 1-8.
- [7] HOSNY R, FATHY M, RAMZI M, et al. Treatment of the oily produced water (OPW) using coagulant mixtures[J]. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2016, 25: 391-396.
- [8] GAO R T, LI F, LI Y J, et al. Effective removal of emulsified oil from oily wastewater using in-situ generated metallic hydroxides from leaching solution of white mud[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 309: 513-521.
- [9] 丁慧, 彭兆洋, 李毅, 等. 无机陶瓷膜处理油田采出水[J]. *环境工程学报*, 2013, 7(4): 1399-1404.
- [10] KUMAR R V, GHOSHAL A K, PUGAZHENTHI G. Elaboration of novel tubular ceramic membrane from inexpensive raw materials by extrusion method and its performance in microfiltration of synthetic oily wastewater treatment[J]. *Journal of Membrane Science*, 2015, 490: 92-102.
- [11] YEOM H J, KIM S C, KIM Y W, et al. Processing of alumina-coated clay-diatomite composite membranes for oily wastewater treatment[J]. *Ceramics International*, 2016, 42: 5024-5035.
- [12] LI CH, SONG CH W, TAO P, et al. Enhanced separation performance of coal-based carbon membranes coupled with an electric field for oily wastewater treatment[J]. *Separation and Purification Technology*, 2016, 168: 47-56.
- [13] HASSAN I, NIRDOSH I, SEDAHMED G H. Separation of Oil from Oil-Water Emulsions by Electrocoagulation in an Electrochemical Reactor with a Fixed-Bed Anode[J]. *Water Air Soil Pollut*, 2015, 226: 271-282.
- [14] YANG T, QIAO B, LI G CH, et al. Improving performance of dynamic membrane assisted by electrocoagulation for treatment of oily wastewater: Effect of electrolytic conditions[J]. *Desalination*, 2015, 363: 134-143.
- [15] FOUAD Y O. Separation of cottonseed oil from oil-water emulsions using electrocoagulation technique[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2014, 53: 199-204.
- [16] SAFARI S, AGHDAM M A, KARIMINIA H R. Electrocoagulation for COD and diesel removal from oily wastewater[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2016, 13: 231-242.
- [17] SUN Y J, ZHU CH Y, ZHENG H L, et al. Characterization and coagulation behavior of polymeric aluminum ferric silicate for high-concentration oily wastewater treatment[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2017, 119: 23-32.
- [18] 王维, 费庆志, 孙承林, 等. 混凝-芬顿氧化处理油田含油污水[J]. *现代化工*, 2015, (10): 105-109.
- [19] 魏祥甲, 耿翠玉, 乔瑞平, 等. 强化混凝与 Fenton 试剂氧化处理含聚采油废水的中试研究[J]. *环境工程*, 2015, (1): 170-173.
- [20] 付丽丽, 周思彤, 祝雷. 微电解-絮凝预处理含油乳化废水的实验研究[J]. *工业水处理*, 2014, 34(4): 44-46.
- [21] YEOM C, KIM Y. Purification of oily seawater/wastewater using superhydrophobic nano-silica coated mesh and sponge[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2016, 40: 47-53.
- [22] 蔡宏镇, 沈忱, 任满年, 等. 环流气浮法处理含油水体工艺[J]. *化工学报*, 2015, 66(2): 605-611.
- [23] 史博, 陈涛, 常旭轩, 等. 斜板溶气气浮处理油田污水实验研究[J]. *石油化工高等学校学报*, 2015, 28(5): 74-77.
- [24] LI X B, XU H X, LIU J T, et al. Cyclonic state micro-bubble flotation column in oil-in-water emulsion separation[J]. *Separation and Purification Technology*, 2016, 165: 101-106.
- [25] CAI X L, CHEN J Q, LIU M L, et al. Numerical studies on dynamic characteristics of oil-water separation in loop flotation column using a population balance model[J]. *Separation and Purification Technology*, 2017, 176: 134-144.
- [26] ULUCAN K, KURT U. Comparative study of electrochemical wastewater treatment processes for bilge water as oily wastewater: A kinetic approach[J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2015, 747: 104-111.
- [27] WEI Y J, LI G Y. Membrane fouling behavior and microbial community succession in a submerged membrane bioreactor treating harbor oily wastewater[J]. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 2016, 17(9): 745-757.
- [28] ALSALHY Q F, ALMUKHTAR R S, ALANI H A. Oil Refinery Wastewater Treatment by Using Membrane Bioreactor (MBR) [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2016, 41: 2439-2452.
- [29] SICHINGA M C, FRAZEE J, TONG A Z. Efficiency and kinetics in treatment of wastewater from garages and residential oil spills using membrane bioreactor technology[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2016, 13: 135-146.
- [30] QIN L, FAN ZH, XU L Sh, et al. A submerged membrane bioreactor with pendulum type oscillation (PTO) for oily wastewater treatment: Membrane permeability and fouling control[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 183: 33-41.
- [31] LIU SH H, XU Q F, LATTHE S S, et al. Superhydrophobic/superoleophilic magnetic polyurethane sponge for oil/water separation[J]. *Electronic Supplementary Information (ESI) available*, 2015, 5: 68293-68298.
- [32] REN ZH J, ZHANG L, SHI Y, et al. Effect and mechanism of a High Gradient Magnetic Separation (HGMS) and Ultraviolet (UV) composite process on the inactivation of microbes in ballast water[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 108: 180-185.
- [33] LÜ T, ZHANG SH, QI D M, et al. Synthesis of pH-sensitive and recyclable magnetic nanoparticles for efficient separation of emulsified oil from aqueous environments[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 396: 1604-1612.
- [34] ZHANG J H, SHAO Y W, HSIEH C T, et al. Synthesis of magnetic iron oxide nanoparticles onto fluorinated carbon