

船舶污水处理技术研究与应用进展

张青青^{1,2}, 郑 祥¹, 程振敏², 郁达伟^{2,3}, 魏源送^{2,3,4}

(1. 中国人民大学 环境学院, 北京 100872;

2. 中国科学院生态环境研究中心, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100085;

3. 中国科学院生态环境研究中心, 水污染控制实验室, 北京 100085;

4. 江西省科学院 能源研究所, 江西 南昌 330029)

摘 要: 海运、河运增长迅速, 船舶污水处理日益受到广泛关注。本文以海洋船舶为主要研究对象, 综述了海洋船舶污水的类型、水质特征、处理技术研究与应用进展, 并展望了海洋船舶污水处理的膜生物反应器研究与应用方向。海洋船舶污水主要指压舱水以外的船舶污水, 主要包括船舶生活污水和含油污水。海洋船舶生活污水的水质、水量随乘员变化较大, 呈现污染物浓度高、变化大等特征, 其中黑水污染物浓度 BOD_5 991 ~ 5 840 mg/L, SS 1 180 ~ 4 980 mg/L; 含油污水成分复杂, 乳化程度高, 舱底水中含油量可达 50 000 mg/L。虽然海洋船舶污水排放标准随海域变化较大, 但日益严格, 这导致船舶污水处理对空间、运行维护的要求高, 因此, 膜生物反应器成为海洋船舶生活污水处理研究与应用的主流技术。

关键词: 船舶生活污水; 排放标准; 膜生物反应器; 处理设备

中图分类号: O344.7 文献标识码: A

文章编号: 1672 - 7649(2020)03 - 0006 - 06 doi: 10.3404/j.issn.1672 - 7649.2020.03.002

The state of arts for marine ship wastewater treatment

ZHANG Qing-qing^{1,2}, ZHENG Xiang¹, CHEN Zhen-min², YU Da-wei^{2,3}, WEI Yuan-song^{2,3,4}

(1. Renmin University of China, Beijing 100872, China; 2. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and

Pollution Control, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China;

3. Laboratory of Water Pollution Control Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Beijing 100085, China;

4. Energy Institute, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330029, China)

Abstract: The rapid growth of sea, river and various other ships has made the ship's sewage treatment more and more concerned. In this study, the ship type, wastewater quality characteristics and treatment progress were summarized through literature review, as well as research and application of membrane bioreactor (MBR) for the marine ship wastewater treatment. Except ballast water, marine ship drainage mainly includes domestic sewage and other sewage containing oil or toxic substances. The quality and quantity of marine ship domestic sewage vary greatly, and pollutants concentrations are high, i.e., BOD_5 991 ~ 5840 mg/L, SS 1 180 ~ 4 980 mg/L. The composition and pollutant concentration of oily sewage are complex and high, i.e., the oil content of the bilge water as high as 50 000 mg/L, and the degree of emulsification of the oily wastewater is high due to frequently shaking. Though discharge standard of marine ship wastewater depends on ocean area, its requirement is becoming increasingly stringent which results in high demand on space and operation and maintenance. Due to small footprint, excellent effluent quality, and easy operation and maintenance, membrane bioreactor has gradually become the mainstream technology for marine ship sewage treatment.

Key words: ship domestic sewage; discharge standards; membrane bioreactors; treatment equipment

0 引 言

近年来, 我国船舶运输量和总吨位增长较快, 其

中我国约 34% 的外贸出口货物由海运完成^[1]。截至 2015 年末, 全国拥有水上运输船舶 16.6 万艘, 其中内河船舶 15.2 万艘, 沿海运输船舶 1.07 万艘, 远洋运输

收稿日期: 2018 - 10 - 10

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2016YFE0118500); 国家自然科学基金资助项目 (21677161); 江西省重点研发计划资助项目 (20171ACG70018)

作者简介: 张青青 (1994 -), 女, 硕士研究生, 主要从事膜生物反应器研究。

船舶 2689 艘^[2]。随着航运业的快速发展, 海运船舶污水成为重要的海洋移动污染源。研究表明, 航线污染和港口污染是导致海洋污染的重要因素^[3]。我国船舶运输主要发生在近海岸和东海, 近海岸富营养化情况日益严重。

现代船舶按照国际海事组织 (International Maritime Organization, IMO) 标准, 在船级社初次入级检验后, 在船级符号后面附加一个或数个标志, 如船舶类型、货物装载、特种任务、航区限制、冰区加强等。船舶分类方式包括船舶用途、航行区域等。根据船舶用途, 分为客船、普通货船、集装箱船等; 根据航行区域, 分为远洋船、近洋船、沿海船和内河船等。客轮通常靠近沿海航行, 对生活污水排放有严格限制; 远洋货轮尽管有时会航行在非限制区域 (远洋航区), 但各国港口接收设施的完善程度不一, 领海及近陆水域保护要求不同^[4], 因此, 船舶污水排放标准主要按照海域、船舶类型管理, 并且日益严格。

因此, 本文以海运船舶为主要对象, 通过文献综述, 分析海运船舶污水的水质特征和新排放标准、海运船舶污水处理技术研究与应用现状, 以期为研制船级社认证船舶生活污水处理装置提供借鉴, 改善海域环境。

1 船舶污水来源及其水质特征与排放标准

船舶产生的水污染物主要包括生活污水、含油污水、含有毒液体物质的污水和船舶垃圾。据估算, 我国船舶生活污水总量约为 1 800 万吨/年, 含油污水约

为 1 200 万吨/年^[5], 其中沿海船舶生活污水产生量约为 1125 万吨/年, 船舶含油污水产生量约为 350 万吨/年。

1.1 船舶生活污水

船舶生活污水 (黑水) 具有水质水量变化大、污染负荷高的特征。船舶污水以厕所污水为主。由于船舶生活污水较难获得, 现有研究通常采用城市生活污水^[6-9]、初沉池出水^[10-11]、公厕粪便污水^[12]等代替船舶生活污水进行试验研究 (见表 1), 但人工模拟船舶生活污水的 COD 浓度普遍较低。相较于传统城市黑水, 船舶生活污水的污染物浓度更高^[13], 例如, BOD₅ 991 ~ 5 840 mg/L, SS 1 180 ~ 4 980 mg/L, 这主要是由于船舶卫生系统排泄周期比较短和用水量的限制, 导致较高的污染物浓度和污染负荷^[4, 11]。通常邮轮载客人数远多于货轮, 但由于邮轮乘员人数的明显变化, 导致船上污水处理设施的水力负荷变化较大^[11], 例如, 邮轮上的游客人均日产生约 31.8 L 黑水, 253 L 灰水^[14], 灰水占比 85% ~ 95%^[15]。另外, 远洋船舶近海岸航行时对污水排放要求严格, 而远海岸航行时允许生活污水直排, 导致生活污水处理系统的污染负荷变化较大, 这对处理设备调控要求较高。

表 2 比较了国内外船舶生活污水排放标准。最早的防止船舶污染国际公约-MARPOL73/78, 仅对大肠杆菌、悬浮物、生化需氧量等卫生指标做出了要求。2006 年 4 月国际海事组织 (IMO) 对 IMO73/78 附则 IV 进行了修改, 生活污水排放标准更严格, 同时新增 COD、pH、余氯等指标。2006 年 10 月 13 日颁布的

表 1 船舶生活污水 (含模拟船舶生活污水) 的水质特征及其处理工艺
Tab. 1 Characteristics of ship sewage water quality and treatment process

污水来源	处理工艺	有效容积/L	进水水质				COD去除率/%
			pH	SS/mg·L ⁻¹	BOD ₅ /mg·L ⁻¹	其他/mg·L ⁻¹	
稀释公厕粪便污水	生物接触氧化池	500	6.8	320~400	280~410	NH ₃ -N 25~40	85 ^[12]
市政生活污水	SBR流化床	—	—	520	180	—	85 ^[6]
初沉池后污水/舱底水	A/O MBR	12	6.8	380~550	180~360	NH ₃ -N 22.3~29.8	98 ^[11]
市政生活污水	电絮凝+电解耦合	—	8.9 ^[8]	—	1800 ^a	—	—
模拟船舶生活污水	MBR	24	7.66/7.5	—	2020/2150	NH ₃ -N 85~150	>87 ^[7]
模拟船舶生活污水	多层生物曝气滤池	0.4	8.5	—	150~2 100	NH ₃ -N 40~60	>90 ^[17]
舱底污水	MBBR	—	—	—	1 000~1 500 ^a	TPH 31.5	89 ^[18]
舱底污水	电絮凝+纳滤	1	8.0	—	4 200 ^a	Se 641; Zn 68; Cu 13	74 ^[19]
舱底废水	电解法	—	—	—	2 500	Zn 20; Pb 0.1	20~50 ^[20]
模拟含油废水	电解法	—	7.5	760	3 080 ^a	Oil 2000	68.5~96.8 ^[21]
舱底废水	上流式厌氧污泥床	2.951	8-9	20~200	2 200~1 760 ^b	Oil 80	75 ^[22]

注: COD_{Cr}, mg/L; TPH-total petroleum hydrocarbons.

表 2 IMO 和我国有关船舶生活污水污染物排放限值

Tab. 2 The limits of ships domestic sewage pollutant discharge standards of IMO and China

标准	MEPC2 (MEPC159 MEPC227)			GB3552-83			GB3552-2018	
	VI)	(55)	(64)					
	距最近陆地3 nmile以内			距最近陆地4~12 nmile以内	距最近陆地3 nmile以内		内河及距最近陆地3 nmile以内	其他船舶
排放区域/处理系统				内河	陆地	距最近陆地4~12 nmile以内	内河客船	其他船舶
耐热大肠杆菌 (个/L)	250 ^a	100	100	250	250	1 000	100	100
TSS/mg·L ⁻¹	50	35	35	150	150	—	20	35
BOD ₅ /mg·L ⁻¹	50	25	25	≤50	≤50	—	20	25
COD/mg·L ⁻¹	—	125	125	—	—	—	60	125
pH	—	6~8.5	6~8.5	—	—	—	6~8.5	6~8.5
余氯/mg·L ⁻¹	—	0.5	0.5	—	—	—	0.5	0.5
TN/mg·L ⁻¹	—	—	20 ^b	—	—	—	20	—
TP/mg·L ⁻¹	—	—	1.0 ^c	—	—	—	1	—

注: a. 粪大肠杆菌; b. TN出水标准为20 mg/L或至少70%去除率; c. TP出水标准为1.0 mg/L或至少80%去除率。

MEPC.159 (55) 决议规定自 2010 年 1 月 1 日开始, 凡是吊装到不论新老船舶上的船用生活污水处理装置都应满足新标准的要求。2012 年, 该标准又增加了总氮和总磷的排放标准, 并经后续修订, 该标准的排放限值于 2016 年 1 月 1 日起开始全面实施。我国于 2018 年 1 月 16 日发布的《船舶水污染物排放控制标准》^[16], 针对不同类别船舶航线和不同的吨级, 分别给出了排放控制与实施要求。

针对海运船舶生活污水的水质、水量特征及处理需求, 船舶生活污水处理的难点主要如下: 1) 船舶空间紧张, 要求污水处理系统紧凑, 因此容积负荷率 (Volume loading rate, VLR) 高; 2) 受船舶航行海域、载客运营状况影响, 船舶生活污水进水量、水质波动较大, 出水排放标准也因离岸距离而不同, 这对污水处理系统快速启停、功能切换等的自动化要求高; 3) 船舶行驶过程中的震动和颠簸给污水处理系统的液位调控带来了较大挑战。

1.2 船舶含油污水

船舶含油污水主要包括含油压载水、含油洗舱水和机舱水 (见表 3)。根据国际海事组织 (IMO) 的统计, 全世界由运输造成的进入海洋环境的石油类污染物总量每年约为 147 万吨, 其中大约 70 万吨来自船舶压舱水、洗舱水和舱底水^[23]。这些含油污水主要包括原油、润滑油、重柴油等, 乳化程度高, 较难处理。压舱水占含油废水的 10%, 舱底水约占船舶总重的

表 3 含油污水来源及特征

Tab. 3 The sources and characteristics of oily wastewater

类型	来源及用途	特征
压舱水	主要来自油船压载系统, 主要用来改变和调整船舶吃水。	多以上浮油和分散油的形态存在 ^[27]
洗舱水	主要是针对油船, 用于修船或换载时冲洗油舱或货舱。	主要是油、泥沙和铁锈还有洗涤剂 and 微量的酚, 油多以乳化油的形态存在 ^[27]
舱底水	主要来自管路、水柜、油柜及机械设备中油水的漏泄和泄放等。	新鲜水和海水的混合物, 具有较强腐蚀性, 分散油和乳化油为主 ^[5, 24, 28]

0.02% ~ 0.05%^[24]。由表 1 可知, 船舶舱底含油废水的油浓度 6.5 ~ 2 000 mg/L, SS133 ~ 660 mg/L, 表面活性剂 500 mg/L^[21, 25], 三丁基锡 (tributyltin, TBT) 25.4 ~ 50 μgSn/L^[26], 还含有 Pb, Zn, Cu, Cd 等金属元素^[26]。

1954 年国际海洋防止油污公约主要针对原油、燃油、重柴油和润滑油制定了排放标准, 1981 年炭黑原油排放事故, 在排放标准 (MARPOL73/78) 中将炭黑原油列入, 涉及所有油类, 随后根据海洋生态条件及交通条件, 将波罗的海区域、西北欧区域、海湾区域等规定为特殊区域。当在特殊区域内时, 任何油船和 400 总吨及以上的非油船, 禁止将任何油类或油性混合物排入海; 小于 400 总吨的非油船, 未经稀释的排出物含油量不超过 15 mg/L。参照 IMO 制定的 MARPOL73/78 有关规定, 我国制定并颁布了 1983 年《船舶污染物排放标准》, 船舶离海岸距离不同, 最高允许排放浓度不同。最新修订的标准 GB3552-2018 将含油污水分为两类含, 分别是货油残余物的油污水和机器处所油污水, 其中船舶排放含油污水的控制要求及含油量的最高允许排放浓度如表 4 所示。

2 船舶污水处理技术研究与应用现状和进展

从应用现状和发展趋势来看, 远洋船舶污水就地处理达标排放, 即将污染在船上消除是未来的主导方向, 存储排放形式将被逐渐淘汰^[14]。为了处理船舶污水, 首先必须收集各种污水, 然后输送到船用卫生设备 (Marine Sanitation Device, MSD)。以往船舶上的粪便污水与其他污水分开收集, 也有些船舶为了敷设管路方便起见, 采用了混合收集系统。目前大多数国家采取不同方式处理不同类型的船舶污水, 通常黑水采用生活污水处理设施处理后排放, 灰水直接排放, 但也有部分船舶将黑水、灰水、舱底废水混合后处理排放。

2.1 船舶生活污水处理技术现状

20 世纪 60 年代末期, 国内外相继开展船舶生活污水处理工艺与技术研究^[4]。从船舶生活污水处理工艺的发展过程来看, 成功借鉴了岸上的水处理技术。随

表 4 IMO 和我国船舶有关含油污水排放控制要求与排放限值
Tab. 4 IMO and China's ship oily wastewater discharge control requirements and emission limits

标准	MARPOL73/78	GB3552-83	GB3552-2018
船舶 (污水)			
内河	不在特殊区域; 正在航行途中; 距最近陆地50 nmile以上; 油 量瞬间排放率不 超过30 L/ nmile	内河不大于 15 mg/L	收集并排入 接收装置
沿海 (150 总吨以下船 舶)			收集并排入 接收装置
沿海 (150 总吨及以上 船舶)			收集并排入 接收装置; 收集并排入 接收装置;
含货油残余 物的油污水		距离陆地最近 12 nmile以内海 域不大于 15 mg/L	距最近陆地 50 nmile以 上; 油瞬间 排放率不超 过30 L/ nmile;
400总吨及以 上机器 处所的舱底	不在特殊区域; 正在航行途中; 未经稀释的排出 物含油量不超过 15 mg/L	距离陆地最近 12 nmile以外海 域, 不大于 100 mg/L	收集并排入 接收装置
400总吨及以 上非油船	不在特殊区域; 正在航行途中; 未经稀释的排出 物含油量不超过 15 mg/L		
机器处所油 污水	不在特殊区域; 正在航行途中; 将残油留存在 船上并能将其排 入接收设备 或处理设备		
400总吨以下 非油船			

着船舶生活污水排放标准的日益严格, 常规生化/物化技术已经无法满足处理要求^[26, 29-30], 膜处理技术已成为极具前景的船舶污水处理技术^[7, 9]。

传统生化技术, COD 去除效率 85% 以上时, 每日吨水所需高达 150 L^[12], 而 Sun^[31-32] 等利用 MBR 技术, 采用 2~8 kgCOD/m³·d 较高容积负荷处理船舶综合污水, 形成了紧凑型船上综合污水处理系统。为适应船舶船体摇摆和水力冲击负荷的影响, 研究者探索了不同类型的膜生物反应器 (见表 5), 如复合式膜生物反应器 (Hybrid MBR, HMBR)^[9]、移动床膜生物反应器 (moving bed membrane bioreactor, MB-MBR)^[33-35]、一体化 A/O MBR^[11]。HMBR 是在一体式 MBR 中投加填料或粉末活性炭, 使反应器中同时存在悬浮型和附着型微生物, HMBR 在较高容积负荷下处理船舶生活污水时, COD 平均去除率可达 91.63%^[9]。一体化 A/O-MBR 在处理实际综合船舶污水时, COD、TSS 的去除率分别达到 94.5%, 99.9%^[11]。由于船舶在海上航行, 污水的含盐量变化较大^[36]。Kargi F 等^[37] 指出常规生物处理技术不能用于处理氯化钠浓度大于约 3% 的含盐污水。而通过膜的截留作用, MBR 在活性污泥适应 5~30 g/L 含盐污水的条件下处理效果良好^[36, 38-40], 但盐度相对较高时, 膜污染率更大^[17]。

表 5 MBR 处理船舶生活污水部分工艺参数
Tab. 5 The process parameters of MBR treatment of ships domestic sewage

处理 工艺	反应器 容积/L	膜材料	膜孔径 /μm	膜通量 /L·m ⁻² ·h	容积负荷 /kgCOD·m ⁻³ ·d	HRT/h	盐度 /g·L ⁻¹	COD去 除率/%
HMBR		中空纤维 维/PP	0.1~0.2	<8.0	2.4	18	—	≥91 ^[9]
MB- MBR		中空纤维	0.04	—	—	12~15	0~15	70~90 ^[3]
MBR	24	中空纤维	0.04	15	2.52、2.79	18	0~10	87~97 ^[7]
MB- MBR	30.4	平板/陶 瓷膜	0.04	12.2	0.75~3.5	4	0~30	~89 ^[36]
A/O MBR	13.6	平板 /PVDF	0.22	—	—	12/10/8/6	—	≥98 ^[11]

2.2 船舶含油污水处理技术现状

现有含油污水处理技术研究主要是去除舱底水中的石油、表面活性剂、有机锡化物^[26, 41]、重金属^[19, 20]等污染物。与常规含油废水处理方法类似, 有重力分离、浮选分离、吸附^[30, 42, 43]、过滤及基于过滤技术的膜分离工艺^[44, 45]等。重力分离是利用油水密度差对油水进行重力分离, 代表装置为 YSCZ 型油污水分离装置^[46], 目前只作为含油污水初级处理。由于舱底含油污水多为乳化油, 通常采用混凝/絮凝法破乳, 除油率可达 90% 以上^[47, 48], 紫外照射和高级氧化可有效降解含油废水中的多环芳烃^[49]。这类方法的缺点在于会产生待处理的新固体废物。随着电化学技术的发展, 电解法、电絮凝、光催化^[41, 50]等技术用于处理含油污水, 其中电解法的油去除率可达 84.8%~99.9%^[21], 膜分离产生的浓缩物的油浓度范围为 25%~65%, 再次浓缩后, 最终浓缩物仅占 5%~10%^[28, 51]。

2.3 船舶污水处理装置

以“船舶 and 污水 and 处理”为关键词在国家知识产权局上检索, 一共可检索到 444 项专利, 分析整理发现, 2010 年前, 专利大多数采用传统生化处理技术处理内河船舶污水, 而在 2010 年后, 专利研究设备开始以膜技术为工艺主体, 且不再仅针对内河船舶, 已扩展为海洋船舶污水处理。

MBR 的容积负荷高、占地面积小, 对解决海洋船舶上空间有限的实际问题具有重要的现实意义^[52]。2014 年 ACOMarine 公司陆续推出了 Maripur NF 和 Clarimar MF 系列处理设备, 可满足 IMO MEPC 227 (64) 认证要求。Wärtsilä 开发了以生化技术为原理的超三叉戟污水处理设备, 以及适合小型邮轮和海军舰艇的 MBR 污水处理系统 (Hamworthy miniMBR)。2015 年威立雅旗下的 RWO 公司推出了以 MBBR 为主要技术的新型 CleanSewage Bio 污水处理系统。芬兰的 EVAC 公司污水处理产品包括适用于大型邮轮的 MBBR, 适用于其他各类船舶的 MBR 和适用于海军应用的电解

污水处理设备（见表 6）。然而调查表明，40% 的邮轮仍在使 20 世纪 80 年代开发的污水处理技术^[53]。

表 6 部分船舶污水处理装置参数

Tab. 6 The parameters of some ship sewage treatment equipment

型号	水力负荷 /m·d ⁻³	BOD5 负荷 /kg·d ⁻¹	整体尺寸			干重/t	湿重/t
			长/m	宽/m	高/m		
Clarimar MF-0.5	1.2	0.77	1.445	1.130	1.607	0.300	1.025
Clarimar MF-20	37.8	24.28	3.855	5.193	2.077	3.000	25.062
Evca MBR 2 k	2.25	1.15	1.430	2.510	2.200	1.230	3.480
Evca MBR 145 k	145	75	6.898	2.969	2.20	8.472	37.286
Maripur NF 25	5.75		2.190	1.560	1.800		
Maripur NF 250	57.5		6.100	2.310	2.230		

3 结 语

1) 海洋船舶的生活污水水质水量变化较大，污染负荷高；含油污水乳化程度高。

2) 海洋船舶污水排放标准主要按照海域、船舶类型管理，并且日益严格。针对上述标准和难点，应当大力研发操作简单、易于维护的集约型智能化污水处理装置。

3) 膜生物反应器技术可在较高容积负荷条件下高效处理船舶生活污水，可大大减小处理装置所占容积，是极具前景的海洋船舶生活污水处理技术。

4) 我国现有海洋船舶采用的污水处理装置多采用国外技术，仍需要加大力度研制符合船级社认证的处理技术与装备。

参考文献：

- [1] 尹静波. 海事安全管理中的量化风险评估 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2015 2-6.
- [2] RESEARCH, S C. Shipping Intelligence Weekly[R]. July 7th, 2017.
- [3] HALPERN, B S, S WALBRIDGE, K A SELKOE, et al. A global map of human impact on marine ecosystems[J]. Science, 2008, 321(5895): 948-951.
- [4] 董良飞. 船舶生活污水污染特征及控制对策研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2005.
- [5] 中国环境保护部. 船舶水污染物排放标准 (二次征求意见稿) 编制说明 [R]. 2018.
- [6] 单立志, 陈孟林, 施汉昌, 等. SBR 式流化床船用生活污水处理设备及其处理效果 [J]. 环境工程学报, 2006, 7(10): 128-131.
- [7] DI BELLA, G, D DI TRAPANI, M TORREGROSSA, et al. Performance of a MBR pilot plant treating high strength wastewater subject to salinity increase: analysis of biomass activity and fouling behaviour[J]. Bioresource Technology,

2013, 147(11): 614-6188.

- [8] 龙奎, 齐威, 杨东方, 等. 电絮凝—电解耦合技术处理船舶生活污水的研究 [J]. 工业水处理, 2014(4): 40-43.
- [9] ZHU L, HE H, WANG C. COD removal efficiency and mechanism of HMBR in high volumetric loading for ship domestic sewage treatment[J]. Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2016, 74(7): 1509.
- [10] BENDICK J, REED B, MORROW P, et al. Using a high shear rotary membrane system to treat shipboard wastewaters: Experimental disc diameter, rotation and flux relationships[J]. Journal of Membrane Science, 2014, 462(28): 178-184.
- [11] 李剑锋. 一体式 A/O 膜生物反应器脱氮性能及在船舶污水处理中的应用研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008: 90-99.
- [12] 陈志莉, 易其臻, 熊开生, 等. 生物接触氧化法处理船舶生活污水的中试 [J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2009, 24(6): 882-886.
- [13] PALMQUIST H, J HANAEUS. Hazardous substances in separately collected grey-and blackwater from ordinary Swedish households[J]. The Science of the total environment, 2005, 348(1-3): 151-163.
- [14] PERIĆ T, KOMADINA P, RAČIĆ N. Wastewater pollution from cruise ships in the Adriatic Sea[J]. Promet-Traffic & Transportation, 2016, 28(4).
- [15] PETROVIC N. The model of risk assessment of greywater discharges from the Danube River ships[J]. Journal of Risk Research, 2016(4): 1-19.
- [16] 中国环境保护部. 船舶水污染物排放控制标准 [S]. GB 3552-2018. 北京: 中国环境科学出版社, 2018.
- [17] 蔡军, 陈勇, 笪靖, 等. 沸石曝气生物滤池处理船舶生活污水的研究 [J]. 舰船科学技术, 2017, 39(17): 179-184.
- [18] CAMPO R, S MITRA, G D BELLA. Analysis of extracellular polymeric substances and membrane fouling of a MB-MBR treating shipboard slops[J]. Journal of Environmental Engineering, 2017, 143(9).
- [19] AKARSU C, Y OZAY, N DIZGE, et al. Electrocoagulation and nanofiltration integrated process application in purification of bilge water using response surface methodology[J]. Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2016, 74(3): 564.
- [20] CARLES C, N G RAMÍREZ, D CARVAJAL, et al. Electrochemical treatment of bilge wastewater[J]. Desalination & Water Treatment, 2015, 54(6): 1556-1562.
- [21] KORBAHTI B K, K ARTUT. Electrochemical oil/water demulsification and purification of bilge water using Pt/Ir electrodes[J]. Desalination, 2010, 258(1-3): 219-228.
- [22] EMADIAN S M, M HOSSEINI, M RAHIMNEJAD, et al. Treatment of a low-strength bilge water of Caspian Sea ships by HUASB technique[J]. Ecological Engineering, 2015, 82: 272-275.
- [23] 陈伟, 王祎昱, 谭琴, 等. 船舶含油污水的破乳絮凝处理研究 [J]. 工业水处理, 2016, 36(2): 25-29.
- [24] SMOOKLER A. L., HARDEN J. W., Navy shipboard investigations of oily waste[C]// International Oil Spill Conference Proceedings. 1975: 189-193.
- [25] KARAKULSKI K, M GRYTA. The application of

- ultrafiltration for treatment of ships generated oily wastewater[J]. Chemical Papers, 2017, 71(6): 1165–1173.
- [26] VREYSEN S, A MAES, H WULLAERT. Removal of organotin compounds, Cu and Zn from shipyard wastewaters by adsorption-flocculation: a technical and economical analysis[J]. Marine Pollution Bulletin, 2008, 56(1): 106–115.
- [27] 许海梁, 熊德琪, 殷佩海. 船舶油污水处理技术进展 [J]. 交通环保, 2000, 21(3): 5–9.
- [28] PENG H, A Y TREMBLAY, D E VEINOT. The use of backflushed coalescing microfiltration as a pretreatment for the ultrafiltration of bilge water[J]. Desalination, 2005, 181(1–3): 109–120.
- [29] KORKMAZ N E, A AKSU, O S TASKIN, et al. A novel eco-friendly advanced enzymatic Fenton oxidation process for the treatment of ship wastewater[J]. Desalination and Water Treatment, 2017, 84: 160–168.
- [30] FOROUTAN R, F S KHOO, B RAMAVANDI, et al. Heavy metals removal from synthetic and shipyard wastewater using Phoenix dactylifera activated carbon[J]. Desalination & Water Treatment, 2017, 82: 146–156.
- [31] SUN C, T LEIKNES, J WEITZENBOCK, et al. Development of an integrated shipboard wastewater treatment system using biofilm-MBR[J]. Separation and Purification Technology, 2010, 75(1): 22–31.
- [32] SUN C, T LEIKNES, J WEITZENBOCK, et al. Development of a biofilm-MBR for shipboard wastewater treatment: The effect of process configuration[J]. Desalination, 2010, 250(2): 745–750.
- [33] BELLA DI, G, PRIMA N DI, TRAPANI D DI, et al. Performance of membrane bioreactor (MBR) systems for the treatment of shipboard slops: Assessment of hydrocarbon biodegradation and biomass activity under salinity variation[J]. J Hazard Mater, 2015, 300: 765–78.
- [34] MCLAUGHLIN C, FALATKO D, DANESI R, et al. Characterizing shipboard bilgewater effluent before and after treatment[J]. Environmental Science & Pollution Research, 2014, 21(8): 5637–5652.
- [35] 杨东方, 齐崑, 苏荣欣, 等. 填料表面亲水改性对 MBBR 处理船舶生活污水的影响 [J]. 环境工程学报, 2014, 8(5): 1895–1898.
- [36] SUN C, LEIKNES T, WEITZENBOCK J, et al. Salinity effect on a biofilm-MBR process for shipboard wastewater treatment[J]. Separation and Purification Technology, 2010, 72(3): 380–387.
- [37] KARGI F, DINCER A R. Effect of salt concentration on biological treatment of saline wastewater by fed-batch operation[J]. Enzyme and Microbial Technology, 1996, 19(7): 529–537.
- [38] SHARRER M J, TAL Y, FERRIER D, et al. Membrane biological reactor treatment of a saline backwash flow from a recirculating aquaculture system[J]. Aquacultural Engineering, 2007, 36(2): 159–176.
- [39] ARTIGA P, GARCIA-TORIELLO G, MENDEZ R, et al. Use of a hybrid membrane bioreactor for the treatment of saline wastewater from a fish canning factory[J]. Desalination, 2008, 221(1–3): 518–525.
- [40] YANG J, SPANJERS H, JEISON D, et al. Impact of Na⁺ on biological wastewater treatment and the potential of anaerobic membrane bioreactors: a review[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2013, 43(24): 2722–2746.
- [41] AREVALO E, CALMANO W. Studies on electrochemical treatment of wastewater contaminated with organotin compounds[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 146(3): 540–545.
- [42] FATOKI, O S, AYANDA O S, ADEKOLA F A, et al. Sorption of triphenyltin chloride to n Fe 3 O 4, Fly Ash, and n Fe 3 O 4 /Fly Ash composite material in seawater[J]. Acta Hydrochimica Et Hydrobiologica, 2014, 42(4): 472–479.
- [43] GIUSTRA M G, DI BELLA G. Shipboard wastewater treatment using granular activated carbon: adsorption test and bioregeneration[J]. Journal of Environmental Engineering, 2017, 143(10).
- [44] KARAKULSKI K, KOZLOWSKI A, MORAWSKI A W. Purification of oily wastewater by ultrafiltration[J]. Separations Technology, 1995, 5(4): 197–205.
- [45] TOMASZEWSKA M, ORECKI A, KARAKULSKI K. Treatment of bilge water using a combination of ultrafiltration and reverse osmosis[J]. Desalination, 2005, 185(1–3): 203–212.
- [46] 白韬光. 船舶污水处理技术及其发展趋势 [J]. 机电设备, 2007(1): 44–45.
- [47] 陈伟, 王祎昱, 谭琴, 等. 船舶含油污水的破乳絮凝处理研究 [J]. 工业水处理, 2016, 36(2): 25–29.
- [48] YOU Z Y, L ZHANG, S J ZHANG, et al. Treatment of oil-contaminated water by modified polysilicate aluminum ferric sulfate[J]. Processes, 2018, 6(7).
- [49] LIANG J, C BING, B ZHANG, et al. Process simulation and dynamic control for marine oily wastewater treatment using UV irradiation[J]. Water Research, 2015, 81: 101.
- [50] BOGACKI J P, H AL-HAZMI. Automotive fleet repair facility wastewater treatment using air/ZVI and air/ZVI/H₂O₂ processes[J]. Archives of Environmental Protection, 2017, 43(3): 24–31.
- [51] JONSSON A S, G TRAGARDH. Ultrafiltration applications[J]. Desalination, 1990, 77(1–3): 135–179.
- [52] 杨元晖. 膜生物反应器处理船舶污水 [J]. 机电设备, 2002, 19(3): 10–13.
- [53] MOORE R. Wastewater: the drive to convert carbon-based waste to energy, 2017[EB/OL]. http://www.mpropulsion.com/news/view,wastewater-the-drive-to-convert-carbonbased-waste-to-energy_47138.htm.