

严控标准下船舶生活污水治理的技术瓶颈与发展趋势

程宇航^{1,2}, 胡 凯^{1,2}, 许 航^{1,2}, 陈 卫^{1,2}

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室; 2. 河海大学环境学院)

摘要:为明确排放标准升级及国内外差异背景下船舶生活污水处理技术的研发方向、识别技术瓶颈、推动行业可持续发展,系统分析了我国船舶生活污水排放标准、处理装置应用现状及技术研发进展。通过对比新旧排放标准及国内外海洋与内河船舶排放标准的指标,阐明了标准趋严的核心特征及其对处理工艺的更高要求;通过文献调研与排放数据统计分析,梳理了主流处理工艺及装置配备现状,分析了其技术适用性与局限性,并结合长江流域典型处理装置的实地调研与案例分析,识别了影响船载应用的关键技术瓶颈,指出了技术突破的主攻方向。结果表明:我国排放标准在指标数量和数值上较国外标准更为严格,对处理工艺的多目标协同去除能力和系统运行稳定性提出了更高要求,传统生化/物化法处理效果难以保证;400 总吨以下小型船舶受空间限制和技术适配性影响,装置安装率极低;膜生物反应器及电化学耦合工艺已成为主流技术方向,但仍面临抗冲击负荷不足、船舶环境约束、数字化运维与监管能力薄弱等难题。因此,船舶生活污水治理应采用系统思维,构建空间适配、运行稳定、黑灰水处理兼顾的技术路径,重点围绕黑灰水协同处理、抗冲击工艺开发、船岸数字化运维与监管三个方向布局,并以分质回用和零排放技术为重要突破方向,促进船舶生活污水治理的节能、减污与降碳协同。

关键词:船舶生活污水;污水处理;船载污水处理装置;技术瓶颈;发展趋势

中图分类号:X703;U664.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2026)05-0011-09

Technological bottlenecks and development trends for shipboard domestic wastewater management under stringent discharge standards//Cheng Yuhang^{1,2}, Hu Kai^{1,2}, Xu Hang^{1,2}, Chen Wei^{1,2}(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education; 2. College of Environment, Hohai University)

Abstract: To clarify the research and development direction of shipboard domestic wastewater treatment technology under the background of upgraded discharge standards and differences between domestic and international standards, identify technological bottlenecks, and promote the sustainable development of the industry, this paper systematically analyzes China's discharge standards for shipboard domestic wastewater, the current application status of treatment equipment, and technological research progress. First, by comparing previous and current discharge standards as well as the indicators of domestic and international discharge standards for seagoing and inland waterway vessels, the core characteristics of increasingly stringent standards and their higher requirements for treatment processes are clarified. Second, through literature review and statistical analysis of discharge data, mainstream treatment processes and the current status of equipment installation are reviewed, and their technical applicability and limitations are analyzed. Third, by combining field surveys and case analyses of typical treatment equipment in the Yangtze River Basin, key technological bottlenecks affecting shipboard application are identified, and the main directions for technological breakthroughs are pointed out. The results show that China's discharge standards are more stringent than foreign standards in terms of both the number and values of indicators, imposing higher requirements on the multi-objective synergistic removal capacity and operational stability of treatment processes, while conventional biochemical/physicochemical treatment processes can hardly guarantee satisfactory treatment performance. For small vessels below 400 gross tonnage, the installation rate of treatment equipment is extremely low due to space constraints and limited technical adaptability. Membrane bioreactors and electrochemical coupling processes have become mainstream technological directions, but they still face challenges such as insufficient shock-loading resistance, shipboard environmental constraints, and insufficient capacity for digital operation and maintenance as well as supervision. Therefore, a systematic approach should be adopted for the treatment of shipboard

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3208900)

作者简介:程宇航(2000—),男,硕士研究生,主要从事污水处理技术研究。E-mail:trnhnqc9796@163.com

通信作者:胡凯(1983—),男,副研究员,博士,主要从事船舶污水处理及循环利用理论与技术研究。E-mail:hukaihit@hhu.edu.cn

domestic wastewater to establish a technical pathway featuring spatial adaptability, stable operation, and simultaneous treatment of blackwater and graywater. Efforts should focus on three directions: synergistic treatment of blackwater and graywater, development of shock-resistant processes, and ship-shore digital operation, maintenance, and supervision. In addition, source-separated reuse and zero-discharge technologies should be taken as important breakthrough directions, so as to promote the coordinated energy conservation, pollution reduction, and carbon reduction in shipboard domestic wastewater treatment.

Key words: shipboard domestic wastewater; wastewater treatment; shipboard sewage treatment equipment; technical bottleneck; development trend

随着全球贸易迅速发展,航运业已成为现代经济的重要支柱。与此同时,规模庞大且航行频繁的船舶队伍成为重要的流动污染源,对通航水域生态环境形成持续压力。研究表明,航运活动造成的污染约占海洋环境污染总量的 35%^[1]。因此,严格控制船舶污染物排放、加强船舶生活污水治理,已成为当前环保领域的紧迫任务。

船舶污染具有流动性强、分布范围广、排放点分散等特征。其中,船舶生活污水作为主要污染源之一,排放量占比高。船舶生活污水通常包括黑水(厕所和小便池排出物)、医务室的面盆和洗澡盆排水、活畜禽货舱排出物以及混入上述废水的其他排水。以长江干线为例,每人每天生活污水产量约为 27.7 L^[2],三峡库区船舶生活污水排放量约为 336.7 万 m³/a^[3]。可见,船舶生活污水排放总量巨大,对水域环境构成显著压力。

国际海事组织(IMO)于 20 世纪 70 年代通过《MARPOL 73/78》,附则Ⅳ同期纳入公约文本,该附则于 2003 年正式生效。自此,全球船舶生活污水管控逐步走向规范化,我国也制定了相关法规与政策。2015 年《水污染防治行动计划》明确了船舶港口污染控制要求;同年,交通运输部印发《船舶与港口污染防治专项行动实施方案(2015—2020 年)》,推动港口接收设施建设;2021 年长江海事局发布《关于严控长江干线船舶污染物排放的通告》,要求实施“禁排-处罚”联动机制,禁止不达标船舶通过三峡等船闸。针对内河船舶,我国在管理实践中逐步形成差异化的治理体系。例如:2020 年《400 总吨以下内河船舶水污染防治管理办法》明确禁止小型船舶(占内河船舶总量 60%以上^[4])在饮用水水源保护区等敏感水域排放生活污水;2021 年施行的《中华人民共和国长江保护法》对长江水域船舶污染防治作出专项规定,表明我国已基本形成覆盖不同水域、吨位和污染源的全链条治理框架。

目前,船舶生活污水处理技术研发尚缺乏对国内外排放标准的系统梳理,难以明确技术装备的升级方向和适配性;同时,对现有技术短板与瓶颈缺乏系统性、精准化的识别,技术研发方向存在一定的盲目性。因此,本文对我国船舶生活污水排放标准、处

理装置应用现状及技术研发进展进行了综合分析,以期厘清关键技术瓶颈,明确技术突破方向。

1 国内外排放标准体系的演进与对比

1.1 国外排放标准

《MARPOL 73/78》是一部旨在防止船舶污染的国际法规,其中附则Ⅳ是规范船舶生活污水排放的标准,其适用范围包括 400 总吨及以上国际航行船舶,以及小于 400 总吨且经核定许可载运 15 人以上的小型国际航行船舶,其核心要求包括排放距离与速率、设备合规与处理标准、检验与记录。为应对可能加剧的污染风险,IMO 陆续通过了一系列决议:MEPC. 2(VI)决议(1976 年),引入生活污水处理装置性能试验指南,建立了基础排放框架;MEPC. 159(55)决议(2006 年),修订了排放标准;MEPC. 200(62)决议(2011 年),增加了对特殊区域(如波罗的海)的针对性管控;MEPC. 227(64)决议(2012 年),全面收紧了指标,新增总氮、总磷等营养盐控制,并引入基于进出水流量比的动态排放限值。虽然这些决议本身不具备追溯性,但从表 1 所示的变化历程中,可以观察到国际标准的收紧趋势:不仅船舶生活污水排放的限制指标数量逐渐增多,而且指标限值持续降低。

1.2 国内排放标准

我国于 1983 年成为 MARPOL 公约缔约国,此后逐步建立起较为完善的船舶污染防治法规体系。该体系以《中华人民共和国海洋环境保护法》《中华人民共和国水污染防治法》《防治船舶污染海洋环境管理条例》等为核心,确立了船舶污染防治的原则、责任与要求。其中,1983 年施行的《中华人民共和国海洋环境保护法》对废弃物倾倒、船舶作业等行为作出了防治规定;2008 年施行的《中华人民共和国水污染防治法》为包括船舶污染在内的各种污染源提供了系统的源头控制要求与治理措施;2010 年施行的《防治船舶污染海洋环境管理条例》则进一步细化了船舶污染物的排放、接收以及污染防治的要求,为执法监督提供了法规依据。此外,“十二五”“十三五”期间《国家环境保护“十二五”规划》《“十三五”生态环境保护规划》及《船舶工业

表 1 IMO 决议以及 GB 3552—2018 关于船舶生活污水排放的指标限值要求

决议/标准	分类	SS/ (mg/L)	BOD ₅ / (mg/L)	COD/ (mg/L)	耐热大肠菌 群数/(个/L)	pH 值	余氯/ (mg/L)	氨氮/ (mg/L)	总氮/ (mg/L)	总磷/ (mg/L)
IMO 决议	MEPC. 2(VI)	≤50	≤50		≤2 500					
	MEPC. 159(55)	≤35	≤25	≤125	≤1 000	6. 0~8. 5	≤0. 5			
	MEPC. 227(64)	≤35 <i>Q_i</i> / <i>Q_e</i>	≤25 <i>Q_i</i> / <i>Q_e</i>	≤125 <i>Q_i</i> / <i>Q_e</i>	≤1 000	6. 0~8. 5	≤0. 5		≤20 <i>Q_i</i> / <i>Q_e</i> 或 <i>r</i> ≥70%	≤ <i>Q_i</i> / <i>Q_e</i> 或 <i>r</i> ≥80%
GB 3552— 2018	2012 年 1 月 1 日以前	≤150	≤50		≤2 500					
	2012 年 1 月 1 日及以后	≤35	≤25	≤125	≤1 000	6. 0~8. 5	<0. 5			
	2021 年 1 月 1 日 及以后(客船内河排放)	≤20	≤20	≤60	≤1 000	6. 0~8. 5	<0. 5	≤15	≤20	≤1. 0

注:*Q_i* 为污水处理装置的进水量;*Q_e* 为污水处理装置的排水量;*r* 为去除率。

“十二五”发展规划》《船舶工业深化结构调整加快转型升级行动计划(2016—2020 年)》的陆续出台,持续推动我国船舶行业污染治理与削减工作。

在排放标准方面,2018 年我国发布了 GB 3552—2018《船舶水污染物排放控制标准》(表 1),对原 1983 年版进行了修订。

1.3 国内外排放标准的对比与启示

通过对比国内外排放标准(表 1),结合新版 GB 3552—2018 对旧版(1983 年版)的重大修订,可以看出我国船舶生活污水管控政策的三大特征,即排放指标的细化、排放限值的收紧、适用范围扩大及管理

体系的系统化:
a. 排放指标细化体现在指标数量增加和范围拓宽。新版标准不仅涵盖常规指标(五日生化需氧量(BOD₅)、化学需氧化量(COD)、悬浮物(SS)等),还将氨氮、总氮、总磷等营养盐指标纳入强制控制范围,这与 MEPC. 227(64)决议所确立的国际趋势一致,也有利于从源头控制船舶生活污水造成的水体富营养化。

b. 排放指标的限值要求日益收紧。以 SS 为例,其限值从 150 mg/L 下降至 35 mg/L,又进一步下降至 20 mg/L;以 COD 指标为例,我国对 2021 年及以后安装的船舶,内河排放的 COD 限值为 60 mg/L,明显优于国际标准 MEPC. 227(64)的限值(125 mg/L)。上述变化不仅体现了我国保护水环境的决心,也体现出中国特色的治污理念。国内外标准之间的这种差异的深层根源在于:从水域环境看,MEPC. 227(64)主要针对海洋船舶,海洋水体水量大、交换能力强、稀释扩散条件好,环境容量远高于内河,而我国内河船舶航行于长江、珠江等内河水系及湖泊水库,这些水体流速缓慢、换水周期长、富营养化敏感性高,因此必须采用更严格的 COD 和营养盐限值;从管理模式看,MARPOL 公约作为国际协定需平衡各缔约国差异,标准制定往往取“最大

公约数”,而 GB 3552—2018 作为国家强制性标准,可依据本国环境承载力独立决策,体现了“源头严控、分类施策”的本土化治理逻辑。上述标准变化对处理工艺的选型产生了明确的导向作用。一方面,指标细化要求以 BOD₅ 和 SS 为去除目标的传统单一生化工艺必须升级为具备脱氮除磷功能的处理工艺,如厌氧-缺氧-好氧法(A²/O)、膜生物反应器(MBR)等;另一方面,COD 和 SS 限值的收紧,促使船舶优先采用处理效率更高、出水水质更稳定的膜分离技术,以替代传统重力沉淀工艺。

c. 防治范围逐渐涵盖船舶污染全过程。GB 3552—2018 不仅规定了各项指标限值,还完善了包括采样方法、监测技术、指定排放水域、日常管理在内的各项监督管理制度,使船舶污染管控范围逐渐涵盖船舶污染全过程。

因此,GB 3552—2018 的出台既顺应了国际标准变化趋势,又是针对我国水域特点所做的主动、系统的本土化升级,虽然短期内会对现有处理工艺及技术装置带来升级压力,但长远来看,必然有力促进行业技术向更高标准发展。

2 船舶生活污水特征

船舶生活污水产生于密闭、紧凑、结构复杂的船舱环境,其概念与岸上生活污水(即市政生活污水)既有共同点,也存在差异性。《MARPOL 73/78》附则Ⅳ与 GB 3552—2018 对船舶生活污水的界定基本一致,包括黑水(厕所和小便池排出物)、医务室的面盆和洗澡盆排水、活畜禽货舱的排出物以及混入上述废水的其他排水^[5]。对于我国大部分内河船舶,生活污水主要包括黑水(粪尿废水)和灰水(洗涤、厨房等废水)。需要指出的是,虽然 GB 3552—2018 并未将单独排放的灰水纳入强制处理范畴,但若黑水与灰水在管道系统内混合,则混合污水必须接受处理,且其排放需满足与黑水同等的标准。GB

3552—2018 体现出对黑水排放的严格要求,是船载污水处理系统设计的重要考量。

2.1 水量的波动性特征

船舶用途、生活习惯、水资源获取便利程度、季节等多种因素共同作用,使船舶生活污水水量呈现明显的波动性特征。通常,货船因船员数量及生活习惯相对固定,用水特性较为稳定,用水量呈周期性变化;而客轮因人员流动性大,用水不确定因素多,用水量的日变化系数和时变化系数均相对较大。随着社会发展和生活水平提高,船舶人均生活用水量逐渐增加。从每日用水量变化曲线来看,船员三餐、交接班以及洗浴时段为每天的用水高峰,构成典型的冲击负荷,导致灰水瞬时流量波动较大^[6]。此外,船舶在港口停泊或近海航行时,由于补给便利及清洁活动增加,人均用水量通常高于在远洋航行且水资源补给受限时的水平。水量(尤其是灰水)还与季节有关:夏季因船员清洁活动频繁,灰水量增加;冬季则相应减少。目前,污染负荷相对较轻的灰水已占船舶生活污水总量的 70%~75%^[7],其巨大的水量和冲击性排放^[8],将对下游处理工艺构成持续压力。

2.2 水质的高污染物浓度特征

船上有限的空间和稀缺的淡水资源,决定了节水型器具成为普遍的选择,因而冲洗水量较少;同时,有限的空间也使得船舶卫生系统的排水路径较短。这两方面因素导致污水有机物在微生物作用下的分解量明显小于岸上市政管网内的分解量。因此,与市政生活污水相比,船舶生活污水的污染物浓度更高^[9-11]。

由典型船舶生活污水的水质和水量(表 2)可知,船舶黑水的 BOD₅ 质量浓度是市政污水的几倍甚至几十倍,即便经灰水稀释,处理负荷依然较高。厨房灰水(含油脂、食物残渣和洗涤剂)和洗涤灰水等灰水的污染物浓度较低,但排放量较大(为黑水水量的 4~7 倍),也是造成内河水域污染的潜在污染源^[12]。

表 2 典型船舶生活污水的水质指标和水量			
污水种类	SS/(mg/L)	BOD ₅ /(mg/L)	人均日用水量/(L/d)
船舶黑水	1 000~1 500	2 000~8 000	10~40
厨房灰水	800~1 000	1 000~1 500	10~20
洗涤灰水	50~100	50~100	25~50

与海洋船舶相比,内河船舶航行水域的水体交换能力弱,污染物易累积,使得同等生活污水排放量下对水体的影响更显著。海洋水体稀释能力强,但海洋船舶黑水排放总量大,总有机负荷高。

3 船舶生活污水处理技术研发与瓶颈分析

由于船舶生活污水特殊的水量和水质特点,为满足 GB 3552—2018 要求,有效的处理工艺应当同步高效去除高浓度有机物、氮、磷及 SS,以减少对水体的污染。

3.1 船舶生活污水处理技术研发

3.1.1 船舶生活污水处理技术类型

3.1.1.1 物化法

该方法以重力沉降、过滤等固液分离原理为基础,并与氧化、膜技术等物理化学方法联合使用,优点是占地面积小、启动时间快、操作简便、受船体摇晃影响较小等。但是该方法的许多弊端也不容忽视:①需要长期投加氧化剂(如次氯酸盐)、絮凝剂(如聚合氯化铝)等化学药剂,药剂费用高,且占用了船上储存空间,管理不当时会造成二次污染;②脱氮除磷的效率不佳,难以满足 GB 3552—2018 新增的氮磷限值要求;③固体废物处理困难,投加化学药剂产生的化学污泥需作为危险废物,经船上收集贮存后运送上岸处置,从而增加了末端的处理成本。

因此,物化法可作为深度处理或应急处理单元,但是难以独立构成满足新标准要求的完整处理方案,尤其在面对水质和水量冲击负荷时,该方法的经济性 & 处理稳定性仍面临挑战。

3.1.1.2 电化学法

该方法通过在电极表面发生氧化还原反应直接降解污染物或生成强氧化剂(如电解氯产生次氯酸钠)、絮凝剂(电絮凝)从而间接去除污染物,具有工艺集成度高、反应速度快、易于控制等优点。但是,该方法也存在以下问题:①能耗与电极成本较高。电解需消耗较多电能,电极材料不仅因采用贵金属或特殊涂层导致成本较高,且使用过程中面临钝化与损耗问题,使得更换成本和运维专业性要求较高。②技术成熟度有待提升。除了电解氯(投资与安全性要求高)和电絮凝(无需外加药剂、占地面积小)等技术已在部分特种行业废水处理中应用外,多数电化学技术(如电催化氧化)仍处于实验室或中试阶段^[13],反应副产物控制和能量效率优化是制约其工程化应用的两大因素。

因此,电絮凝技术因无需外加药剂、受船体晃动影响小,常被用作生化处理前端的强化预处理单元,以解决重力沉降在动态航行条件下效率下降的问题。

3.1.1.3 生化法

该方法依据微生物代谢原理,因其投资和运行成本相对较低,在市政生活污水处理领域应用最为

广泛。然而,船载应用时该方法的缺陷被进一步放大,主要体现在以下方面:①系统启动缓慢且环境适应性差。微生物系统培养驯化周期长,且极易受到船体晃动、温度变化(如高温机舱环境),尤其是水质和水量冲击负荷的干扰,导致系统失稳、出水水质波动。②装置体积大且运维复杂。为满足微生物生长需求,装置需要较大容积;同时,其稳定运行依赖于对曝气、污泥回流等参数的精细调控,这凸显了操作人员专业性要求与船员环保知识有限的现状之间的矛盾。

目前,主流船载生化技术主要包括以下方法:①活性污泥法与生物膜法。该类方法易受船体晃动和污水水量波动的冲击,导致固液分离效果不佳、出水水质无法稳定。②膜生物反应器(MBR)。该技术被认为是当前最具前景的船载生化处理方法。它将高效的微生物降解与膜的高效物理截留功能相结合,可有效延长污泥停留时间,提升出水水质稳定性,增强系统抗冲击能力,同时具有占地面积小、自动化程度高等优势,尤其适合缺乏专业环保人员的船舶环境。

然而,MBR在实际工程中仍面临膜污染导致通量衰减、曝气能耗高以及频繁物化清洗造成膜寿命缩短等突出问题。其中,曝气能耗通常占总能耗的一半以上,而膜污染又会进一步推高能耗和清洗频率^[14]。此外,传统MBR对氮磷的去除能力有限,需采取工艺强化或升级,如集成A²/O-MBR、间歇曝气MBR、缺氧/好氧(A/O)-MBR-化学除磷等组合工艺,才能满足排放标准要求。

工程案例表明,MBR工艺在优化条件下具有较好的稳定运行特性。例如,采用空气提升多级循环膜生物反应器(AMCMBR)处理实际船舶污水的试验表明^[15],在船舶空间有限的前提下,系统仍能在较短水力停留时间(如4 h)下实现COD去除率86.93%与总氮去除率70.49%,并在整个试验周期内保持COD与总氮达标率分别为100%与89%,反映该类船载MBR装置在膜污染与能耗挑战下仍具备较强的工程稳定性。

针对船舶生活污水SS质量浓度高(约1 500 mg/L)且含油的特性,可参考高负荷MBR工况中的化学清洗周期(建议值12~44 h)^[16],并结合

高频轻度物理清洗;同时,优先采用具备抗油污、生物污染抑制或自清洁功能的改性膜材料,以显著降低不可逆污染,并提升膜系统的运行稳定性^[17]。

3.1.1.4 膜分离与集成技术

该方法基于物理原理,与过滤等传统固液分离方法不同,是一种以超滤、纳滤、反渗透等技术为代表的压力驱动膜分离方法,已成为研究与应用热点。该方法主要适用于以下两种场景:①作为生物处理的强化环节。超滤或微滤技术与生化反应器组合形成MBR,可解决传统生化法固液分离难题,显著提高泥水分离效率。②作为污水再生回用的主力技术。以纳滤或反渗透技术为核心,可有效实现水的深度净化,达到盥洗、冲洗等回用或杂用水标准,因而成为船上污水“零排放”及资源回收的关键技术。

可见,膜技术既是现有生化法升级的“催化剂”,也是实现“船内再生循环”的“金钥匙”。膜技术的研发,应聚焦膜污染控制,并探索与其他技术的耦合集成,以兼顾效能与成本。

如表3所示^[18-20],不同处理方法在COD去除率、脱氮除磷能力、能耗、占地面积及运维要求等方面差异显著。例如,膜技术具有去除率高、占地面积小的优势,但能耗与清洗维护成本较高,而生化法脱氮效果较好,但对进水波动敏感,因此需综合考虑各方法的技术经济性与适用场景,合理选择适宜工艺。

上述不同工艺在船舶应用中的能耗与碳足迹,可参考市政污水处理工艺的数据。总体来看,生化法能耗最低,约为0.26~1.20 kW·h/m³,碳足迹多为0.2~1.3 kgCO₂e/m³^[21]。物化法能耗约为0.23 kW·h/m³,能耗与碳排放随投药量和加压程度增加^[22]。电化学法能耗波动大,为0.15~86.4 kW·h/m³,碳排放与电耗呈线性相关^[23]。膜技术整体能耗较高,反渗透(RO)为0.46~0.56 kW·h/m³,集成正渗透-膜生物反应器或压力延迟渗透-膜生物反应器为1.28~1.42 kW·h/m³^[24],而低能耗厌氧膜生物反应器-反渗透可降至0.33~0.50 kW·h/m³^[25]。因此,在船舶应用中,生化法最为节能,而电化学法与膜技术需权衡能耗带来的碳负荷。

3.1.2 国内外船舶生活污水处理装置研发

全球船舶生活污水处理技术的研发历程,本质

表3 不同船舶生活污水处理方法的性能对比

处理方法	COD去除率	脱氮除磷能力	能耗	占地面积	运维要求
物化法	一般	总氮去除较差、总磷去除较好	较低	一般	需定期加药和清理过滤设备
电化学法	较高	一般	较高	较小	需要日常运营维护较少,但对电力稳定性要求高
生化法	较高	较高	较低	一般	需定期更换污泥,对进水波动与温度敏感
膜技术	高	较高	较高	小	需定期更换污泥,进行膜清洗

上是岸上市政生活污水成熟工艺的“船上适应性改造”与“集成化、标准化”相互融合、相互推进的发展史。自 20 世纪 60 年代起,发达国家开始研发船载生活污水处理装置,从英国 Hamworthy 公司的超三叉机(生化法)、日本大晃株式会社的 SBT 系列(生化法)、丹麦 ATLAS 公司的 WSH 型(物化法)到美国 Severn Trent De Nora 公司的 Omnipure 系列(电化学法),工艺路线多样,但都致力于满足当时的排放公约^[26]。

国内研究起步于 20 世纪 70 年代,所研发的 MBR 系列装置和 CSWA 系列装置(生物接触氧化+紫外消毒)均致力于提高处理效率和环境适应性^[27-28]。目前,市场上船舶生活污水处理装置品牌众多,包括英国的 Hamworthy、美国的 EnviroVac ORCAII 系列、中国 704 所的 MBR 系列、东方船舶的 SWCB/SWCM 系列等^[29]。而在标准化方面,国际标准化组织(ISO)已发布多项设备标准(如 ISO 13617:2001、ISO 17325 系列)。虽然国内外持续探索,船舶生活污水处理技术仍面临一个根本难题:缺乏一种工艺路线能彻底、稳定地同时满足“严苛排放标准”“恶劣船载工况”“紧凑安装空间”“简易运维要求”这 4 个关键约束条件。

从处理对象来看,传统装置主要针对高浓度黑水,技术路径以生化法为核心。然而,随着水资源短缺问题日益突出和可持续发展理念不断推进,船舶生活污水中水量巨大的灰水逐渐显现出回用潜力,但相关处理技术研究较少,目前主要集中在市政生活污水中的灰水回用,以“过滤-(活性炭吸附)-消毒”或“超滤-消毒”工艺为核心方案。与黑水的生化处理路径不同,灰水处理更侧重于物理过滤与消毒,两者应加以区分。

3.2 处理技术的瓶颈分析

船舶生活污水具有高浓度、水质水量剧烈波动等特征,对污水处理装置的运行稳定性构成严峻挑战。同时,受船载空间有限等因素制约,目前我国船载生活污水处理装置的配备率并不高。以 2017 年江苏省内河流域为例,400 总吨及以上大型内河船舶生活污水处理装置配备率较为理想(约 90%);而 400 总吨以下的小型船舶配备率极低(仅约 10.5%)^[9]。截至 2022 年,广州新港海事处辖区调研结果显示,靠泊内河船舶生活污水处理装置配备率仅为 26.2%^[30]。这些数据折射出我国船舶生活污水处理技术面临的三大瓶颈。

3.2.1 技术受到船载空间的极大限制

船舶特殊的环境对处理技术造成了空间适配性差、管理对象失衡、环境适应性缺失等诸多难题。

3.2.1.1 船载环境制约

a. 内河船舶(尤其是 400 总吨以下船舶)受限于有限的船舱空间和现有船体结构(受船龄、船型、吨位等影响),对处理装置的小型化、集成化有着更高的要求。传统岸上市政生活污水处理技术即使经过定向优化,其体积和几何尺寸也难以直接适配,尤其现有船体高度可能无法满足处理装置对有效水深的要求,难以保证沉淀和曝气效果,这是许多船舶无法安装处理装置的重要原因之一。处理单元的几何尺寸(如高度、宽度和内部构造)会直接影响流态,进而决定混合、曝气与沉降能否正常形成。例如,电化学反应器高度不足时,会形成大面积“死区”,使流体偏离理想流动状态^[31]。

b. 船舶电力系统难以提供稳定、持续的功率输出。由于船舶电力系统是孤立电网,易受负荷波动及恶劣水文条件(如风浪、水流冲击)的影响,且电力负荷冗余有限,难以支持高能耗处理装置(如膜生物反应器、电化学氧化等)的加装。同时,船舶生活污水处理器的正常运行依赖于关键机电设备(如曝气、泵送与膜系统)的持续运行^[32],一旦供电不稳或中断,便可能引发水质波动,甚至导致污染物超标排放。

c. 船体结构不足以承受新增设备的重量和局部荷载。内河小型船舶的船体强度安全裕度较小,开口(如管道、电缆穿孔)或局部高荷载会破坏结构连续性,导致应力集中,使极限承载力进一步降低,并在循环荷载下加速疲劳损伤^[33]。

上述空间、电力、结构三方面因素相互叠加,加剧了船载适配难度。

3.2.1.2 管理对象失衡

基于现行法规及成本因素,小型船舶现行的“收集贮存上岸”模式主要针对高污染的黑水,这种集中处置黑水与放任灰水排放并存的模式造成两大问题:①灰水排放量可达黑水的 5~10 倍,却处于监管真空区,成为被忽视的重要污染源^[34];②污水处理系统丧失了将总量巨大的灰水作为再生资源加以利用的机会。更严峻的是,目前行业内尚无成本低廉、操作简便的灰水处理及资源回用的可靠技术。

3.2.1.3 环境适应性缺失

由于船舶具有特殊的动态环境及运行条件,传统工艺的缺陷被放大。封闭船舱内持续存在高温、剧烈震动等情况,且污染物浓度及水量波动较大。在此环境下,对投加量固定的化学药剂法的处理稳定性、生化反应效率以及系统运行安全性(如防止硫化氢等有害气体积累)等方面的要求较陆地更为严苛。

上述问题共同指向一个趋势,即技术研发不能简单地陆地工艺缩小化,而需从船舶环境特点出发,进行有针对性的优化与创新。

3.2.2 技术稳定性受到动态冲击、运维能力和基础设施等方面的挑战

a. 抗冲击负荷能力差。船舶的航行姿态扰动(震动、摇摆、倾斜、转弯)和船员作息引起的冲击式排污(瞬时大流量、高负荷)属于典型的“动态冲击”,将持续对船载生化处理系统施加压力,抑制硝化-反硝化的脱氮过程和沉淀池的固液分离效果。

b. 运维能力不足。船载处理装置,特别是生化系统,其正常运行需监测污泥性状、间歇投加药剂、定期加入菌剂等,而这些操作所需的专业技术与现有船员的知识储备存在显著差距,也与船员工作重心严重偏离,导致处理装置闲置或低效运行。此外,剩余污泥、浮渣等副产物还需要收集后上岸处置,进一步加剧了系统运维管理的难度和复杂性。例如,污泥膨胀、毒性冲击等故障在实际污水处理厂中极为常见,会直接导致污泥沉降性能恶化和污泥流失,需要具备专业诊断能力的运维人员及时处理^[35]。对于船载系统而言,负荷变化更为剧烈,全规模试验显示 HRT 和进水浓度是最敏感因素,当 HRT 降至 9 h 时总氮便无法达标^[36]。同时,现有装置普遍缺乏在线监测与智能故障诊断功能,难以对关键运行参数进行实时感知、异常预警和自动调整,对处理装置的运行稳定性构成了严峻挑战。

c. 基础设施限制。船舶电力供应有限,且存在间断性停电(如夜间停航),会影响处理装置的连续运行。有限的船体空间也极大地制约了生化反应器高度、曝气系统等相关设计要素,经济性和处理效能之间的矛盾迫使设计人员在投资、能耗、占地面积等因素之间进行权衡取舍。

3.2.3 船-岸衔接机制不畅

面向污水船内再生循环回用的场景,技术有效性主要依赖于船载设备;而面向污水收集储存上岸处理的场景,技术有效性则主要取决于从船上到岸上的衔接过程,但是现有船-岸的衔接机制不畅,主要表现在以下 3 个方面:

a. 经济方面的驱动力不足。船舶生活污水的回收价值低且上岸处置需额外费用,致使接收方(尤其是小型码头及老旧船舶的服务方)对建设和完善污水接收及处理设施的意愿不大。此外,一些老旧、客流量少的船舶用于设备改造的资金亦有限。政府层面则缺乏对接收设施建设和运营的补贴机制以平衡各方成本。成本和收益的失衡导致船-岸衔接的经济动力不足。

b. 接收点与船舶和处理设施未能有效衔接。部分码头和港口设有生活污水接收点,可是由于设施不匹配、船舶少或操作衔接不畅等原因,其服务覆盖面和服务响应能力受限。此外,这些接收点通常未与具备足够处理能力的城镇污水处理厂或处理设施有效联通^[37],使收集的污水不能及时送入终端处理设施,可能引起二次污染、设施空转。上述“最后一公里”梗阻现象也使得前端船载处理的价值大打折扣。

c. 制度因素导致责任模糊。船舶生活污水上岸处理涉及船东、码头、城镇污水处理厂以及交通与环保等多个管理部门,但缺乏跨部门的权责划分标准和协同监管机制。制度层面不够明确,导致各方推诿、衔接脱节。此外,现有法规对“上岸处理”的强制性要求不足,对违规排放的处罚力度偏弱,进一步削弱了船-岸衔接的制度约束力。

4 结 语

在生态文明建设背景下,我国船舶生活污水治理正处于“高标准要求”与“低装置安装率”相矛盾、“复杂运行瓶颈”与“薄弱处置系统”相冲突的困局。解决之道不在于追逐单一技术指标,而在于立足系统思维,提出一套契合船舶环境特点的系统性技术与管理创新方案,以破解空间限制、适应动态扰动、匹配运维能力,并贯通水陆处置链条。

此外,国内外相关研究虽聚焦船舶生活污水污染控制,但技术方面照搬岸上市政生活污水处理工艺,工程应用方面则主要关注大型渡船、游船以及海事航线船舶,缺乏面向内河船舶的污水处理技术装置体系,尤其面临以下核心问题有待突破创新:

a. 对象不完整。高浓度黑水的处理技术较为成熟,少见关于低浓度灰水的处理技术研究,黑灰混合污水处理更呈现技术孤岛的现状。

b. 视角有偏差。现有研究未对内河航道船舶生活污水排放规律及船舱环境特性进行系统分析,所用技术在实船应用时面临处理装置繁多、过程控制复杂、效果不稳定等问题,不仅技术水平亟待提高,适配性也有待改善。未来宜从开发抗冲击负荷强、耐船体晃动的复合式生物-膜分离工艺入手,例如将具有脱氮除磷效果的 A²/O 技术与 MBR 技术耦合,以实现碳、氮、磷污染物的同步去除。

c. 目标需升级。随着船舶生活污水处理对象范围的扩大和处理标准的不断提高,为彻底解决船舶生活污水污染问题、缓解航行中水资源短缺压力,迫切需要研发新型船舶生活污水零排放及分质回用技术。目前,相关研究主要依托超滤膜分离技术,聚

焦“MBR-活性炭吸附-消毒”典型工艺开发。对于大中型船舶,灰水排放量大,回用潜力更高;对于小型船舶,灰水可在满足标准的前提下排放。

d. 系统缺整合。随着排放标准的不断提升,一方面,现行处理技术在氮磷同步脱除方面的效能亟待提高;另一方面,针对船舶及港口污染防治监督执法的实际需要,目前尚缺乏全流程监管方法及基于“互联网+”等信息化技术的数字化监管平台。未来应着力发展船岸协同的数字化运维与监管技术,构建集在线监测、数据传输、远程诊断与执法辅助于一体的智能监管体系,既呼应处理装置低维护、智能化的运维需求,也有效提升监管效率。

综上所述,今后行业领域研究应针对船舶生活污水排放不均匀系数较大、污染物负荷高等特点,以“污水零排放”为理念,以“技术创新、性能可靠、设备集成”为核心,以“优质优用,低质低用”的分质回用为突破,解决船舶生活污水处理运行不稳定、操作管理烦琐等主要症结,开展高效收集及预处理技术、污染物净化技术、基于优质回用途径的纳滤技术和船舶生活污水一体化处理系统集成等全流程、全链条综合解决方案研究,攻关复杂船舱环境与污染负荷波动双重适配的船舶黑灰混合水高效脱氮除磷技术,实现船舶生活污水“节能降碳减污协同增效”的处理目标,以推动“双碳”背景下我国船舶生活污水污染控制与资源再利用的理论建立和工程应用。

参考文献:

[1] Čovič M, Bacalja B, Krčum M, et al. From ballast water to harmful air emissions: how to reduce the impact of shipping on the pollution of the marine environment: a review[J]. WIT Transactions on The Built Environment, 2021, 204: 105-116

[2] Zhong Huiling, Gao Jiajue, Gu Yimiao. Promoting ship sewage recycling in China's inland waterways: a balanced funding approach for advanced disposal fees and subsidies [J]. Ocean & Coastal Management, 2025, 267: 107728.

[3] Xiang Rong, Wang Lijing, Li Hong, et al. Temporal and spatial variation in water quality in the Three Gorges Reservoir from 1998 to 2018 [J]. Science of the Total Environment, 2021, 768: 144866.

[4] 苏杰, 胡汉强. 400 总吨以下内河船舶生活污水排放控制[J]. 世界海运, 2020, 43 (10): 37-40. (Su Jie, Hu Hanqiang. Domestic sewage discharge control for inland vessels under 400 gross tonnage [J]. World Shipping, 2020, 43 (10): 37-40. (in Chinese))

[5] 郑金明. 船舶生活污水处理与港口国监督检查[J]. 大连海事大学学报, 2010, 36 (增刊 1): 96-98. (Zheng Jinming. Ship domestic sewage treatment and port state

control inspection [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2010, 36 (S1): 96-98. (in Chinese))

[6] 张青青, 郑祥, 程振敏, 等. 船舶污水处理技术研究与应用进展[J]. 舰船科学技术, 2020, 42 (3): 6-11. (Zhang Qingqing, Zheng Xiang, Cheng Zhenmin, et al. The state of arts for marine ship wastewater treatment [J]. Ship Science and Technology, 2020, 42 (3): 6-11. (in Chinese))

[7] Kalnina R, Demjanenko I, Gorbacenko D, et al. Nutrient analysis of food waste from ships' greywater in the Baltic Sea [J]. Water, 2021, 13 (17): 2421.

[8] 刘玲花, 张盼伟, 李昆, 等. 灰水处理及回用技术研究综述[J]. 水利水电技术, 2019, 50 (8): 146-153. (Liu Linghua, Zhang Panwei, Li Kun, et al. Review on grey water treatment and recycling technology [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50 (8): 146-153. (in Chinese))

[9] 徐文文, 殷承启, 张玮, 等. 江苏省内河船舶废水污染现状及影响研究[J]. 环境科技, 2020, 33 (1): 55-60. (Xu Wenwen, Yin Chengqi, Zhang Wei, et al. The situation and impact of wastewater pollution by inland vessels in Jiangsu Province [J]. Environmental Science and Technology, 2020, 33 (1): 55-60. (in Chinese))

[10] Butt N. The impact of cruise ship generated waste on home ports and ports of call: a study of Southampton [J]. Marine Policy, 2007, 31 (5): 591-598.

[11] Chen Qing, Wu Wanqing, Guo Yafei, et al. Environmental impact, treatment technology and monitoring system of ship domestic sewage: a review [J]. Science of the Total Environment, 2022, 811: 151410.

[12] Mujingni J T, Ytreberg E, Hassellöv I M, et al. Sampling strategy, quantification, characterization and hazard potential assessment of greywater from ships in the Baltic Sea [J]. Marine Pollution Bulletin, 2024, 208: 116993.

[13] Compton P, Dehkordi N R, Knapp M, et al. Heterogeneous Fenton-like catalysis of electrogenerated H₂O₂ for dissolved RDX removal [J]. Frontiers in Chemical Engineering, 2022, 4: 864816.

[14] Lebron Y A R, Moreira V R, Da Costa P R, et al. Chemical cleaning procedures on permeability recovery and lifespan of MBR membranes treating petroleum refinery wastewater: from bench- to pilot-scale applications [J]. Journal of Water Process Engineering, 2021, 44: 102411.

[15] Cai Yuhang, Li Xin, Zaidi A A, et al. Effect of hydraulic retention time on pollutants removal from real ship sewage treatment via a pilot-scale air-lift multilevel circulation membrane bioreactor [J]. Chemosphere, 2019, 236: 124338.

[16] Bian Xiaozheng, Zhang Mengyuan, Huang Jinping, et al. A comparison study on membrane fouling in A/O-MBR and A/A-MBR at different mixed liquor-suspended solids

- p>concentrations [J].
- Environmental Technology*
- , 2025, 46 (10):1625-1635.
- [17] Wei Chunhai, Sun Chenxi, Chen Zebin, et al. Membrane fouling analysis and chemical cleaning optimization via membrane autopsy for membrane bioreactor from lab to engineering application [J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 377:134414.
- [18] Zhang Xingxing, Bahtiar F, Wang Yao, et al. Achieving simultaneous biological nutrient removal and sludge minimization from marine ship sewage based on an innovative Landscape Integrated Ecological Treatment System (LIETS) [J]. *Ecological Engineering*, 2020, 156: 105989.
- [19] Salih S S, Shihab M A, Kadhom M, et al. Simultaneous removal of organic and inorganic pollutants onto chitosan-coated pumice adsorbent [J]. *Water Science and Engineering*, 2025, 18(4):486-495.
- [20] Cai Yuhang, Luo Yihao, Long Xiangxing, et al. Wastewater treatment for ships experiencing large temperature changes: the activated sludge/membrane-biofilm reactor [J]. *Chemosphere*, 2022, 307:135852.
- [21] Qu Shen, Hu Yuchen, Wei Renke, et al. Carbon footprint drivers in China's municipal wastewater treatment plants and mitigation opportunities through electricity and chemical efficiency[J]. *Engineering*, 2025, 50:106-116.
- [22] Bartha C, Jipa M, Ignat D M, et al. The energy efficiency of domestic wastewater treatment processes: case analysis [J]. *Electrotehnică, Electronică, Automatică*, 2020, 68 (4):30-36.
- [23] Nabizadeh Chianeh F. Treatment of real municipal wastewater using aluminum electrode by electrocoagulation process: experimental design and process performance [J]. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 2024, 43(1):169-180.
- [24] Liu Shuyue, Song Weilong, Meng Manli, et al. Engineering pressure retarded osmosis membrane bioreactor (PRO-MBR) for simultaneous water and energy recovery from municipal wastewater [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 826:154048.
- [25] Wang Siyu, Liu Hang, Gu Jun, et al. Towards carbon neutrality and water sustainability: an integrated anaerobic fixed-film MBR-reverse osmosis-chlorination process for municipal wastewater reclamation [J]. *Chemosphere*, 2022, 287:132060.
- [26] 郭锦怡. 船舶生活污水处理装置工艺及装置运营管理建议[J]. *中国设备工程*, 2020(5):226-227. (Guo Jinyi. Process and operation management of ship domestic sewage treatment devices [J]. *China Plant Engineering*, 2020(5):226-227. (in Chinese))
- [27] 刘强. 船舶生活污水 MBR 集成化处理装置工程设计 [J]. *工业用水与废水*, 2018, 49(6):80-83. (Liu Qiang. Engineering design of MBR integrated device for marine domestic sewage treatment [J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2018, 49(6):80-83. (in Chinese))
- [28] 宗平. CSWA 系列生活污水处理装置[J]. *军民两用技术与产品*, 2005(7):24. (Zong Ping. CSWA series domestic sewage treatment device [J]. *Dual Use Technologies & Products*, 2005(7):24. (in Chinese))
- [29] 刘林, 王斌, 蒋铁俊. 船舶生活污水处理装置维修改造 [J]. *机电设备*, 2022, 39(3):83-85. (Liu Lin, Wang Bin, Jiang Yijun. Maintenance and renovation of ship domestic sewage treatment plant [J]. *Mechanical and Electrical Equipment*, 2022, 39(3):83-85. (in Chinese))
- [30] 赵彬, 李晓宇, 向元京. 内河船舶生活污水排岸接收问题及对策研究[J]. *中国海事*, 2024(1):12-14. (Zhao Bin, Li Xiaoyu, Xiang Yuanjing. Study on the problems and countermeasures of receiving domestic sewage from inland ships on shore [J]. *China Maritime Safety*, 2024 (1):12-14. (in Chinese))
- [31] Hu Bolin, Zhang Xiaoqiang, Wang Zhaofeng, et al. Hydraulic characteristics, residence time distribution, and flow field of electrochemical descaling reactor using CFD [J]. *Processes*, 2021, 9(11):1896.
- [32] Walker N L, Williams A P, Styles D. Pitfalls in international benchmarking of energy intensity across wastewater treatment utilities[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 300:113613.
- [33] Deng Hui, Yuan Tian, Gan Jin, et al. Experimental and numerical investigations on the collapse behaviour of box type hull girder subjected to cyclic ultimate bending moment[J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 175:109204.
- [34] Maljutenko I, Hassellöv I M, Eriksson M, et al. Modelling spatial dispersion of contaminants from shipping lanes in the Baltic Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 173: 112985.
- [35] Sun Huanqi, Xiong Weili, Li Zhongmei, et al. Soft sensors for industrial fault detection using multi-scale fusion temporal convolutional autoencoders [J]. *ISA Transactions*, 2026, 174:276-286.
- [36] Cai Yuhang, Sun Peiqi, Luo Yihao, et al. An integrated full-scale system for the treatment of real ship domestic wastewater: shore-test experiments [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, 53:103786.
- [37] 胡怡. 九江港长江沿线船舶污染物接收转运处置现状调查及建议[J]. *中国水运(下半月)*, 2018, 18(3):129-130. (Hu Yi. Investigation and suggestions on reception, transfer and disposal of ship pollutants along the Yangtze River in Jiujiang Port [J]. *China Water Transport (Second Half)*, 2018, 18(3):129-130. (in Chinese))

(收稿日期:2026-03-30 编辑:俞云利)