

文章编号:1000-4653(2025)04-0160-07

核污水排放对船舶压载水的影响及应对对策

魏耀明¹, 张建宝², 汪虎¹

(1. 上海海事大学 商船学院, 上海 201306;

2. 交通运输部水运科学研究院, 北京 100088)

摘要:通过采用 MARIS 模型和对流扩散模型,模拟了核污水的扩散过程。基于研究结果优化船舶压载水换水方式,以防止含放射性物质的压载水直接排放至我国港口,从而减少对生态环境的潜在威胁。以福岛核泄漏事件及其后续 130 万吨核污水持续排海为研究对象,发现放射性物质主要集中在海洋表层,且福岛核电站周边水域的海水和水生生物已检测到铯等放射性元素的富集现象,从而导致船舶在福岛附近的日本东部港口泵入含有放射性物质(如¹³⁴铯, ¹³⁷铯)的压载水。通过采用对流-扩散算法,模拟了船舶在不同距离进行换水时放射性物质浓度的变化,为优化船舶压载水的换水方案提供理论支持。结果表明,船舶在距离日本沿岸 20 n mile 以外增加排空压注法的二次换水,可以将压载水中放射性物质的浓度降低至换水前的十万分之一。本研究结论可辅助海事主管机构制定相关管理措施,有助于保障海洋生态环境的安全。

关键词:福岛核电站事故;放射性压载水;核污水;海洋污染;船舶压载水

中图分类号:U697.1

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.04.018

Impact of nuclear water discharge on ships' ballast water and response countermeasures

WEI Yaoming¹, ZHANG Jianbao², WANG Hu¹

(1. Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

2. Water Transport Research Institute of the Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: This study employs the MARIS model and a convective diffusion model to simulate the diffusion of nuclear wastewater released from Japan. Based on the simulation results, it proposes optimized methods for ballast water exchange to prevent the direct discharge of radioactive ballast water into ports, thereby mitigating potential threats to the ecological environment. The research focuses on the Fukushima nuclear incident and the subsequent continuous release of 1.3 million tons of nuclear wastewater into the ocean. Results indicate that radioactive substances are mainly concentrated in the surface layer of the ocean, with detectable enrichment of radioactive elements such as cesium in seawater and aquatic organisms near the Fukushima nuclear power plant. Consequently, ships operating near eastern Japanese ports are taking in ballast water contaminated with radioactive materials, including cesium-134 and cesium-137. Using a convective diffusion module, the study simulates the variation in radioactive substance concentrations during ballast water exchange at different distances, providing theoretical support for optimizing exchange strategies. The findings show that performing a secondary ballast water exchange more than 20 nautical miles from Japan's coast can reduce radioactive substance concentrations in ballast water to one ten-thousandth of the pre-exchange levels. The conclusions of this study can assist maritime regulatory authorities in formulating effective management measures, thereby contributing to the protection of marine ecosystems.

Key words: fukushima nuclear power accident; radioactive ballast water; ballast water; nuclear wastewater;

收稿日期:2024-12-13

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFB4301403)资助

第一作者:魏耀明(1986—),男,船长,研究方向为船舶安全管理与防污染。E-mail:ymwei@shmtu.edu.cn

通信作者:张建宝(1987—),男,副研究员,研究方向为交通运输安全与智慧交通。E-mail:zhangjianbao@wti.ac.cn

引用格式:魏耀明,张建宝,汪虎.核污水排放对船舶压载水的影响及应对对策[J].中国航海,2025,48(4):160-166.

WEI Y M, ZHANG J B, WANG H. Impact of nuclear water discharge on ships' ballast water and response countermeasures[J]. Navigation of China, 2025, 48(4): 160-166. (in Chinese)

marine pollution

2011年3月11日14时46分,日本东北海域发生强烈地震引发了巨大海啸,袭击了日本福岛第一核电站,导致国际核事件评分系统7级的核污染事故,大量放射性物质释放到环境中^[1]。福岛核泄漏之后,泄漏的核物质质量相当于切尔诺贝利事的十分之一,该事故是迄今为止最为严重的海洋放射性污染事故。2023年8月24日,日本政府无视国际社会的强烈反对,单方面强行将130万m³含有放射性物质的核污水排入海洋,此举将对海洋环境和人类健康造成严重损害。

表1比较了福岛和切尔诺贝利核事故中¹³⁷铯和¹³¹碘的释放估算值^[2]。放射性核素的活性以贝克勒尔(Becquerel, Bq)为单位。1 Bq表示每秒发生一次核衰变,是放射性物质活度的国际单位。在环境监测中,Bq常用于表示每立方米海水、每千克沉积物或生物量中的放射性水平。当讨论总累积量时,通常使用PBq(1 PBq = 10¹⁵ Bq)作为单位;对于较小的通量,通常使用TBq(1 TBq = 10¹² Bq)和GBq(1 GBq = 10⁹ Bq)作为单位。放射性同位素¹³⁴铯(半衰期2.06年)和¹³⁷铯(半衰期30.2年)是核污染的主要关注对象。日本自2012年4月1日起,对海产品中放射性铯的限值设定为每千克不超过100 Bq^[3]。

表1 福岛核事故、切尔诺贝利核事故部分放射性物质泄漏量对比

Tab. 1 Comparison of Fukushima and Chernobyl nuclear accident leakage 单位:10¹⁵ Bq

放射性	福岛		切尔诺贝利	
	大气	海洋	大气	海洋
¹³¹ 碘	160	11	1 760	0
¹³⁷ 铯	15	4	85	16

如图1所示,在福岛核泄漏后的5年内对周边水域进行采样,发现放射性物质含量仍然超标。¹³⁴铯和¹³⁷铯在鱼体内的含量超过日本设定的放射性安全值100倍以上,数据来源 Ken Buesseler^[4]。这表明,自2011年3月12日福岛地震以来,放射性元素泄漏已对海洋环境造成严重破坏,加上后续排海的130万m³的核污水,导致日本周边港口的海水和水生物出现放射性物质的富集效应。这些海水和水生生物随洋流输送至日本东岸主要港口,如东京湾和横滨,并在此繁殖,持续威胁海洋环境。

尽管福岛第一核电站计划排放的130万m³的核污水在排放前经过了先进水处理系统(Advanced

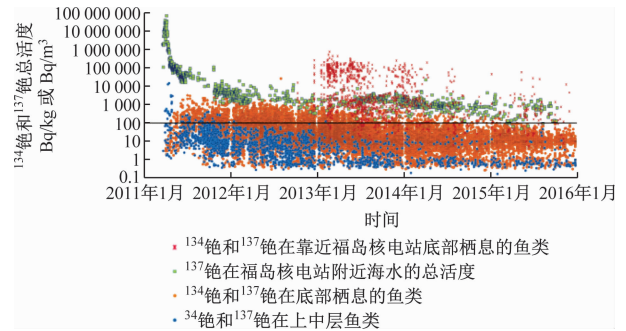


图1 福岛核电站附近水域事故五年后鱼体内¹³⁴铯和¹³⁷铯的含量^[4]

Fig. 1 Levels of ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs in marine five years after the accident near the Fukushima nuclear power plant^[4]

Liquid Processing System, ALPS)的处理,但其放射性活度依然未能显著降低。研究表明,即使经过处理,核污水中仍然残留大量的放射性元素,这些放射性物质随压载水的扩散,对其他国家造成了巨大的安全隐患^[5]。

目前针对日本压载水管理政策方面的研究中,项丽媛等^[6]指出船舶压载水和沉积物是放射性核素转移的重要途径,对在日本福岛核电站50 n mile内水域压注压载水的船舶实行单独报告管理,并在这些船舶进入我国管辖水域前24 h,要求其在距离我国领海基线200 n mile且水深超过200 m的水域进行压载水置换。SHAN等^[7]人提出了应对福岛核污水继续排海的应急响应政策。CHEN等^[8]对外来物种通过压载水进入生态系统的风险进行了评估研究。在技术规范方面,乔红宇等^[9]对船舶压载水监控系统进行了设计。在核污水扩散研究中,SONG等^[10]着重强调了核污水中的铯等放射性物质对生态污染的巨大影响,指出这些放射性元素在日本沿岸附近水域呈现出富集趋势。LEE等^[11]通过扩散模型,分析了南海和黄海采集的海水和海底沉积物样本中放射性核物质,并对其放射性风险进行了评估。LIN等^[12]研究了福岛核事故发生后,周围水域中鱼类放射性物质的富集情况。WU^[13]等同样检测了福岛核污染对环境10年后的影响,提出了海水中放射性物质富集的理论模型。

本文基于上述研究,采用MARIS模型,在福岛核污水事故后,持续跟踪放射性物质的扩散趋势。国际原子能机构的MARIS模型是用于监测和预测海洋中放射性物质扩散与转移的系统,优势在于模型的数据基于检测站点的实际采样数据,主要帮助评估核事故对海洋环境的影响。本文以MARIS模型

数据为基础,使用 Python 语言转化为可视化的日本东部海域¹³⁷Cs 浓度的变化趋势。

研究表明,若船舶在日本东部沿海港口泵入大量含有放射性物质(如¹³⁴铯,碘和¹³⁷铯)的压载水,并将其排放至卸货港,会对当地生态环境造成影响。本文的研究明确了这一问题,凸显了其研究的价值和警示作用。

1 核污水排放的扩散及影响

1.1 福岛核污水的扩散路径

如图2所示,基于 MARIS 模型的分析,显示福岛核电站排放的核污水已扩散至日本东岸的重要港口。我国对一艘曾停靠东京港的入境船舶进行了放

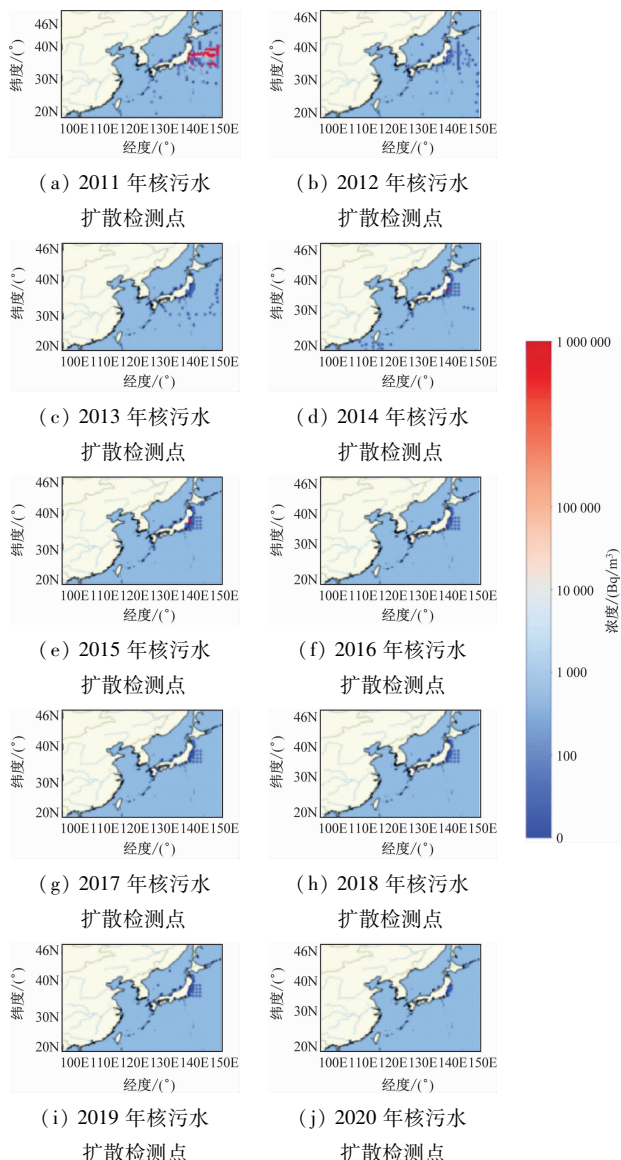


图2 通过 MARIS 模型模拟的北西太平洋海域¹³⁷铯浓度的变化趋势

Fig.2 The changes in the concentration of ¹³⁷Cs in the North Western Pacific Ocean simulated by the MARS-3D model

射性检测,发现船舶甲板和集装箱表面存在放射性异常。

此外,马来西亚海事局对来自日本的船舶中压载水和沉积物进行了取样分析,检测到沉积物中存在福岛核事故引发的放射性同位素,如¹³¹碘、¹³⁴铯、¹³⁷铯。

1.2 船舶压载水的潜在影响

船舶压载水是指船舶在港口泵入的海水或淡水,其用途在于调节船舶稳性、降低干舷、减少受风面积。当船舶装载货物后,这些压载水会被排出。图3基于 MARIS 模型,显示出高放射性活度的放射性物质主要集中在海水表面,这意味着高放射性活度海水和水生生物有可能通过压载水被船舶吸入。受污染的压载水排放至我国卸货港后,会导致放射性元素在卸货港的生态环境中长期富集,这一问题应引起足够的重视。

2 现行压载水处理标准

国际海事组织于通过了《2004 年船舶压载水和沉积物控制与管理国际公约》,并于 2024 年 9 月 8 日正式执行。该公约规定了压载水管理的两种措施:最初的压载水置换标准(D-1 标准),和最新生效的处理标准(D-2 标准),D2 标准要求泵入的压载水经过压载水处理装置后存活生物的数量低于规定的限值。根据公约的要求,D-2 压载水排放标准已在国际航行的船舶上强制执行。这为后文阐述的压载水处理方式提供了必要的技术依据和政策支持^[14]。

当前施行的 D-2 标准只适用于清除浮游生物($\geq 50 \mu\text{m}$)和指标微生物(如有毒霍乱弧菌等),而忽略了处理海水中的放射性元素。

图4展示了压载水处理系统的工作原理,该系统通过电解方法处理压载水中的浮游生物和有害微生物。在电解海水的过程中,所产生的活性物质水平低于国际海事组织规定的限值。

3 压载水置换的优化设计

基于指数衰减模型和对流扩散模型,研究了船舶在更换压载水过程中,核污水的浓度随时间和扩散距离变化的情况。以中日航线上常见的 Handy-max 型散货船和 3 000 TEU 集装箱船为研究对象(如表2所示),量化从日本东部主要港口到中国主要港口的航程、航行时间及不同方式的压载水更换所需的时间。通过分析不同离岸距离与放射性物质浓度的变化关系,优化了压载水更换方式。

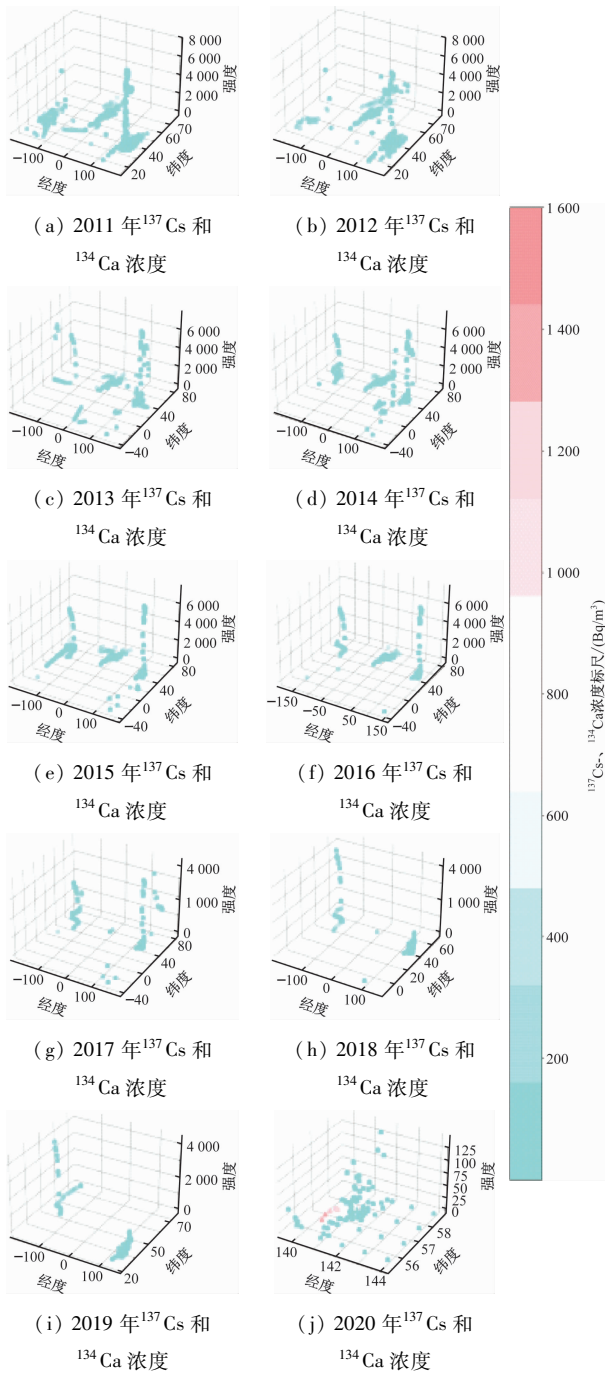


图3 放射性核素浓度不同水深的浓度变化

Fig. 3 The concentration of radionuclides is differentiated by depth

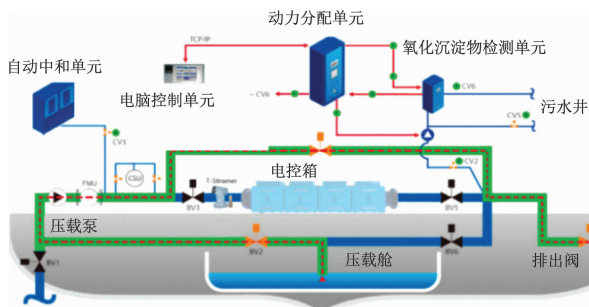


图4 压载水处理系统的工作原理

Fig. 4 Working principle of ballast Water Treatment System

表2 船舶常规压载水注入量
Tab.2 Normal ship ballast water capacity

船型	船舶尺寸	压载舱容/m ³	压载泵流量/(m ³ /h)
散货船	57 000 载重吨	14 000	2 000
集装箱船	3 000 TEU	8 000	2 000

3.1 指数衰减模型

使用D1排空压注法进行压载水置换时,舱内压载水的浓度变化基于指数衰减模型,呈现出递减趋势,具体过程如下。

假设某量 N 随时间 t 以比例的线性速率衰减:

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t) \quad (1)$$

$$\int \frac{1}{N(t)} dN(t) = -\lambda \int dt \quad (2)$$

$$\ln |N(t)| = -\lambda t + C \quad (3)$$

$$N(t) = e^{-\lambda t + C} = e^C \cdot e^{-\lambda t} \quad (4)$$

设 $e^C = N_0$ (即初始量),得到:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (5)$$

指数衰减模型是描述舱内压载水中某物质的浓度随时间的变化,即某种物质的浓度 C 随时间 t 按指数速率减少。

$C = 1$, 设定目标浓度: $0.05C$

$$C(t) = C \cdot e^{-\lambda t} \quad (6)$$

计算浓度降至原始浓度 0.05 倍时所需时间。

$$C(t) = 0.05C = C \cdot e^{-\lambda t} \cdot 0.05 = e^{-\lambda t} \quad (7)$$

$$\ln(0.05) = -\frac{Q}{V} \cdot t \quad (8)$$

$$t = -\frac{V}{Q} \cdot \ln(0.05) \quad (9)$$

式中: $C(t)$ 为浓度,单位 Bq/m^3 ; C 为初始浓度,单位 Bq/m^3 ; Q 为压载泵流量,单位 m^3/h ; V 为总容积,单位 m^3 ; t 为时间,单位 h ; λ 为衰变常数,表示单位时间内衰事件的发生频率。

基于上述计算过程,得到目标集装箱船舶和散货船的换水浓度与时间变化表。

结合表3和图5集装箱船和散货船的换水时间与浓度变化来看,集装箱船采用排空压注法的换水时间整体优于溢流法。在排空压注法中,浓度迅速下降,约7.6 h后接近5%。相比之下,溢流法的浓度下降较慢,需约12 h才能达到300%的换水要求。散货船采用排空压注法时,浓度在约13.3 h降至5%以下。溢流法同样需要更长的时间,约20.9 h,才能达到300%的换水要求。从两组数据对比来

看,排空压注法较快地降低了浓度。

表3 船舶压载水置换时间

Tab.3 Ship ballast water exchange time

船型	置换方法	最大预计时间/h
散货船	排空压注法	13.3
	溢流法	20.97
集装箱	排空压注法	7.6
	溢流法	11.98

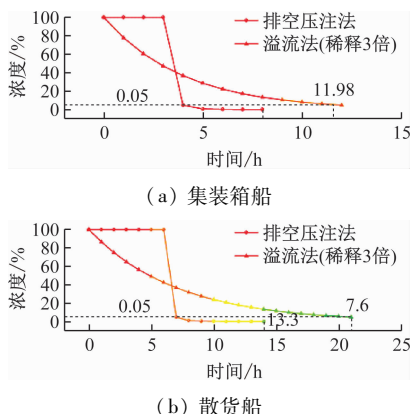


图5 集装箱与散货船压载水置换浓度变化

Fig.5 Change of ballast water concentration between container and bulk carrier

表4展示了从日本东京、横滨到中国主要港口的航行距离。按照航速15 kn推算,可得出换水时间 $t \geq 68$ h,航行时间大于有效的换水时间,说明在常规压载的情况下,增加二次换水具有可操作性。

表4 东京、横滨到我国主要港口的航行距离
(数据来源 HI-FLEET)

Tab.4 Sailing distances from Tokyo, Yokohama to China main ports

始发港	变量	上海	青岛	广州
东京	时间/h	68.5	74.9	115.3
	海里/nm	1 029	1 123	1 673
横滨	时间/h	68	74.2	110.8
	海里/nm	1 020	1 113	1 663

3.2 对流-扩散模型

对流-扩散模型应用范围是研究海洋中放射性物质的扩散规律,评估放射性物质在船舶压载水中积累的潜在风险,从而为优化压载水置换策略提供科学依据,有效减少核污水对船舶压载水的影响。此外,核污水的扩散过程可通过质量守恒定律加以描述。根据该定律,任一体积单元内的质量变化由流入与流出量之差以及源项共同决定。对于一个污染物浓度 P ,其守恒方程为^[15]

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{P}\vec{V}) = S \quad (10)$$

其中 S 为源项,表示物质在单位体积内的生成或消耗量,包括扩散、放射性衰变等因素对浓度的影响。在水体中,对流可以通过水流速度 \vec{V} 和浓度梯度共同作用描述。假设 \vec{V} 不随污染物浓度 P 变化,对流项可以简化为

$$\nabla \cdot (\vec{P}\vec{V}) = \vec{V} \cdot \nabla P \quad (11)$$

自然界中的扩散过程通常遵循菲克定律,该定律认为物质的扩散流速与浓度梯度成反比。考虑到垂直于流动方向的扩散,该过程可以用二阶导数表示,并引入扩散系数 $K_p = -\nabla \cdot (K_p \nabla P)$ 在垂直方向(一般是 z 方向),这一项变为 $-\frac{\partial}{\partial z} \left(K_p \frac{\partial P}{\partial z} \right)$ 。某些污染物可能会因为重力沉降,这可以通过一个线性项 $v_p P$ 来模拟,其中 $v_p P$ 表示沉降速率,反映了由于重力作用污染物在水中的下沉。垂直扩散系数通常由水体湍流强度决定。

将这些项合并到初始的质量守恒方程中,得到核物质在海水中的扩散方程:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla P = -\frac{\partial}{\partial z} \left(K_p \frac{\partial P}{\partial z} + v_p P \right) + S \quad (12)$$

使用对流-扩散型模拟距离海岸 $N \in (10, 30)$ 海里的核污染物浓度。

假设和简化模型: \vec{V} 为流速,日本-中国海流受黑潮影响流速是常数 $1 \sim 2$ m/s,这里取平均 1.5 m/s; P 为模拟的标量场,例如浓度; S 表示源项,用于描述系统内其他物质的增减来源; $v_p P$ 因高放射性活度的物质主要集中于海水表层,沉降作用影响较小,沉降速率假设为 0 ,即忽略沉降;初始条件在源点处,浓度 $C = 1$;边界条件远离源头,浓度渐近为 0 。

上述公式计算所需的数据来源于表2和表3,并结合MARIS数据进行分析。计算结果用于研究船舶在不同离岸距离(10、20、30 n mile)进行压载水置换时,核污水浓度的变化情况。该研究结论为本文优化具体的换水方案提供了重要依据,相关浓度变化结果如表5所示。

图6显示了在离岸10、20、30 n mile的距离内,使用排空压注法和溢流法进行二次换水后,放射性物质浓度随距离的变化趋势。结果表明,使用排空注入法的换水效率为优,且当距岸20 n mile与30 n mile位置处换水时核污水的浓度变化不大。该计算结果与李冰在“放射性物质扩散分析研究”的结论基本一致^[16]。

因此,优化后的压载水更换方案为:首先,船舶

表5 置换压载水时初始浓度与离岸距离的关系

Tab.5 The relationship between the initial concentration of ballast water and the offshore distance

距离/n mile	初始浓度/(Bq/m ³)	最终稀释浓度倍数
0	1	0.001
10	0.08	0.001
20	0.057	0.000 01
30	0.046	0.000 01

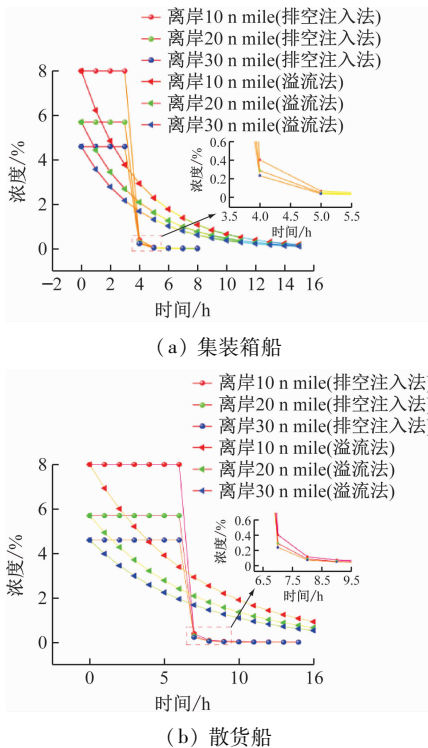


图6 当集装箱船和散货船离岸 10、20、30 n mile 时开始置换压载水时核污水浓度变化

Fig.6 Container ships& bulk carrier the concentration of nuclear water when 10, 20, 30 nautical miles offshore

在日本东部港口按照 D-2 标准泵入压载水,尽可能消除浮游生物($\geq 50 \mu\text{m}$)和指标微生物(如有毒霍乱弧菌等),并记录实际注入量以便后续监控。船舶离港后,在离岸 20 n mile 以上的区域,增加排空注入法进行压载水二次更换。经过两次处理,泵入压载水中放射性物质的活度可降低到未经处理时的十万分之一。

4 结束语

本文从福岛核污水的排放总量及其扩散的浓度变化出发,持续跟踪周边海洋生物中放射性物质活度超标的富集情况,并从实际可操作性的角度,对压载水更换方式进行了优化。

未来在含有放射性物质的压载水管理中,应关

注以下几点:

1) 船舶在日本东部港口泵入压载水时,应严格遵守 D-2 标准,通过压载水处理系统,消除浮游生物($\geq 50 \mu\text{m}$)和指标微生物(如有毒霍乱弧菌等)。在此基础上,优化航线设计,船舶离港后,在离岸 20 n mile 以上的区域增加排空注入法进行二次更换,可以将压载水中的放射性物质的活度降低至换水前的十万分之一,且不影响船舶正常的运营。海事和海关部门应加大对日本回国船舶是否按相应标准进行压载水置换的检查力度。对于未进行二次换水的船舶,进行压载水放射性活度的检测。

2) 海水中放射性元素的出现对航运业提出了新的挑战,这不仅影响船舶运营和海事监管,还涉及压载水处理设备的设计和检测技术。例如,推广具有过滤和反渗透技术的压载水处理装置,来处理含有放射性物质的压载水。目前,国际海事组织的压载水标准主要关注病毒或真菌,需要制定具体措施来完善含放射性核污水的管理方案,以确保核污染风险得到有效控制。此外,建议相关船舶配备检测设备,对船舶压载水中放射性活度能够精准快速地检测。

3) 我国目前已构建了多层次的海洋环境监测系统,包括卫星遥感、浮标观测和现场采样等方法,能够获取高质量的海洋数据。同时,通过应用高分辨率海洋环流模型,精确预测核污水的扩散路径和浓度分布,为预警信息提供科学支撑。通过发布分级预警的方式,根据污染物浓度和扩散范围划定低、中、高风险区域,并结合潜在影响提出针对性应对措施。通过科学化、精细化的预警系统,展现负责任的大国形象,进一步提升国际话语权和影响力。

参 考 文 献

- [1] 柴国早,杨志义,肖军,等. 福岛核事故后核安全改进行动及安全要求研究[J]. 原子能科学技术, 2022, 56(3): 399-409.
CHAI G H, YANG Z Y, XIAO J, et al. Research on nuclear safety improvement actions and safety requirements after the Fukushima nuclear accident[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2022, 56(3): 399-409. (in Chinese)
- [2] 林武辉,陈立奇,余雯,等. 福岛核事故源项评价[J]. 中国科学:地球科学, 2015, 45(12): 1875-1885.
LIN W H, CHEN L Q, YU W, et al. Evaluation of source terms for the Fukushima nuclear accident[J]. Science China: Earth Sciences, 2015, 45(12): 1875-

1885. (in Chinese)
- [3] SHOZUGAWA K, RIEBE B, WALTHER C, et al. Fukushima-derived radionuclides in sediments of the Japanese Pacific Ocean coast and various Japanese water samples (seawater, tap water, and coolant water of Fukushima Daiichi reactor unit 5) [J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2016, 307(6): 1787-1793.
- [4] BUESSELER K, DAI M, AOYAMA M, et al. Fukushima Daiichi-derived radionuclides in the ocean; transport, fate, and impacts [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2017, 9: 173-203.
- [5] BEZHENAR R, TAKATA H, DE WITH G, et al. Planned release of contaminated water from the Fukushima storage tanks into the ocean; simulation scenarios of radiological impact for aquatic biota and human from seafood consumption [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 173(Part B): 112969.
- [6] 项丽媛, 张波. 基于日本福岛核污水排放的日本进境我国船舶压载水管理策略研究 [J]. *中国海事*, 2023(9): 9-11.
XIANG L Y, ZHANG B. Study on ballast water management strategies for ships entering China from Japan based on the discharge of Fukushima nuclear wastewater [J]. *China Maritime*, 2023(9): 9-11. (in Chinese)
- [7] SHAN G, DING Z. Emergency management of nuclear-contaminated water discharged into the ocean for marine environment security [J]. *Sustainable Horizons*, 2024, 10: 100089.
- [8] CHEN D, BAI X, WANG Z, et al. A port statistics-based generic ballast water estimation and risk assessment approach and its application to Chinese ports [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2023, 192: 115068.
- [9] 乔红宇, 杨泽宇. 船舶压载水监控系统设计 [J]. *中国航海*, 2010, 33(2): 23-26.
QIAO H Y, YANG Z Y. Design of ship ballast water monitoring system. *China Navigation*, 2010, 33(2): 23-26. (in Chinese)
- [10] SONG J H, KIM T, YEON J W. Radioactivity data analysis of ^{137}Cs in marine sediments near severely damaged Chernobyl and Fukushima nuclear power plants [J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2020, 52(2): 366-372.
- [11] LEE J, YI S C, KO M J. Monitoring of ^{137}Cs , $^{239+240}\text{Pu}$, and ^{90}Sr in the marine environment of South Korea and their impact on marine biota; 10 years after the Fukushima accident [J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 905: 167077.
- [12] LIN W, ZHANG Y, DU J, et al. Deciphering decadal observation of Fukushima-derived radiocesium in the most polluted port near the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant; from seawater to marine fish [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2024, 11: 1382229.
- [13] WU J, ZHENG X, CHEN J, et al. Distributions and impacts of plutonium in the environment originating from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident: an overview of a decade of studies [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2022, 248: 106884.
- [14] MELNYK O, SAGAYDAK O, SHUMYLO O, et al. Modern aspects of ship ballast water management and measures to enhance the ecological safety of shipping [C] // Zaporozhets, A. *Systems, Decision and Control in Energy V*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023: 681-694.
- [15] 周晨琦, 季智灵, 孔俊. 复杂海湾水质预测中油粒子模型的寻址优化法 [J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(34): 14326-14331.
ZHOU C Q, JI Z L, KONG J. Addressing optimization method of oil particle model in complex bay water quality prediction. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(34): 14326-14331. (in Chinese)
- [16] 李冰, 陈莹莹, 余少青, 等. 福岛第一核电站事故后放射性废液的泄漏/排放及辐射影响评估 [J]. *辐射防护*, 2012, 32(6): 336-347.
LI B, CHEN Y Y, YU S Q, et al. Leakage/release and radiation impact assessment of radioactive waste liquid after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *Radiation Protection*, 2012, 32(6): 336-347. (in Chinese)