

# Application Advantages and Problems of Ultraviolet Irradiation Technology in Treating Ship's Ballast Water

Tianqi Li<sup>1</sup>, Ying Yang<sup>2</sup>, Lixuan Xu<sup>3</sup>, Wenting Guan<sup>2</sup>, Yong Liang<sup>4</sup>, Manxia Zhang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Law, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning

<sup>2</sup>College of Environmental Sciences and Engineering, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning

<sup>3</sup>School of Maritime Economics and Management, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning

<sup>4</sup>College of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning

Email: \*zhangmanxia@163.com

Received: Nov. 5<sup>th</sup>, 2018; accepted: Nov. 23<sup>rd</sup>, 2018; published: Nov. 30<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

Ship ballast water plays an important role in ensuring the safety of navigation of ships during ship transportation. However, the harmful organisms carried during the injection and discharge process will cause serious damage to the coastal countries. In order to effectively control the emission of algae and other harmful organisms in ballast water, IMO introduced the *International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments* in 2004, which came into effect on September 8, 2017. The Convention provides for clear international ballast water discharge standards, but today there are still no mature and effective treatment technologies that can fully meet this emission standard. Among them, the widely studied ultraviolet irradiation technology has its own advantages. The technology uses ultraviolet light to irradiate microorganisms in water, and can achieve the purpose of killing harmful algae in water without pollution. There are some potential problems in this technology that need to be solved. Therefore, it is necessary to study the UV irradiation technology in depth and further improve it so that it can give full play to its advantages and benefit the marine environment. This paper combines the current ballast water treatment method with ballast water treatment system to focus on the advantages and disadvantages of UV irradiation technology.

## Keywords

Ship Ballast Water, Ballast Water Convention, Ultraviolet Irradiation Technology

---

# 紫外辐照技术处理船舶压载水的应用优势与存在问题

李天琦<sup>1</sup>, 杨盈<sup>2</sup>, 徐俪轩<sup>3</sup>, 管文婷<sup>2</sup>, 梁勇<sup>4</sup>, 张曼霞<sup>2\*</sup>

\*通讯作者。

<sup>1</sup>大连海事大学法学院, 辽宁 大连  
<sup>2</sup>大连海事大学环境科学与工程学院, 辽宁 大连  
<sup>3</sup>大连海事大学航运经济与管理学院, 辽宁 大连  
<sup>4</sup>大连海事大学船舶与海洋工程学院, 辽宁 大连  
Email: zhangmanxia@163.com

收稿日期: 2018年11月5日; 录用日期: 2018年11月23日; 发布日期: 2018年11月30日

## 摘要

船舶压载水在船舶运输中具有保证船舶航行安全的重要作用,但在注入和排出过程中其携带的有害生物会对沿海国家海域造成严重破坏。为有效控制压载水中藻类等其他有害生物的排放,IMO于2004年出台了《船舶压载水和沉积物控制和管理国际公约》,并已于2017年9月8日生效。该公约规定了明确的国际压载水排放标准,然而现今仍没有成熟的有效的处理技术可以完全地达到该排放标准。其中广为研究的紫外辐照技术有其本身的优势,该技术是利用紫外线对水中微生物进行照射,在没有污染的情况下即可达到杀死水中有害藻类的目的。该技术存在着一些潜在问题亟待解决。因此有必要深入研究紫外辐照技术并进一步完善,使其可以充分发挥优势,造福海洋环境。本文结合目前的压载水处理方法与压载水处理系统,着重探究紫外辐照技术的优势与缺点。

## 关键词

船舶压载水, 压载水公约, 紫外辐照技术

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

通过船舶运输货物是全球物流链中的重要环节,80%的国际贸易货物均采用了船舶运输方式。然而在运输中,船舶压载水携带的一定数量的藻类等海洋生物,例如浮游植物、浮游动物、细菌/病原体等,会不可避免地排放到异地,这已经给沿海国家海域环境与经济造成了严重的破坏和恶劣的影响。据IMO统计,每年全球所有海上运输船舶携带的压载水大约有120亿吨,每天存在于船舶压载水中随船周游世界的生物多达7000种。当压载水在异地排放时,由于没有天敌的制约,这些生物的入侵可能会打破排放地原有生态系统的平衡,甚至可能造成大面积的传染病爆发,加剧海洋生态环境的恶化。因而,船舶压载水已经被确认为是世界范围内传播外来海洋生物的四大威胁因素之一[1]。压载水的处理方法多样,基于公约D-2标准,各大公司和学者也正在积极研究可满足要求并投入使用的压载水处理系统。例如DESMI OCEAN GUARD出品的OxyClean压载水处理系统[2]、基于Labview和PLC的船舶压载水控制系统[3]等。

## 2. 国际立法概况

### 2.1. 国际立法发展历程

自二十世纪八十年代初IMO就将解决船舶压载水问题列入其海上环境保护委员会的议程,在十多年的时间里通过了多个指导性文件。1991年《关于防止船舶压载水及沉积物的排放传播有害的水生物及病

原体国际指南》提出压载水排放的管理措施[4]；1992年出台了《防止来自船舶压载水和沉积物的有害生物及病原体引入的指南》；1997年发布了《控制和管理船舶压载水以减少有害水生物及病原体传播的指南》；1998年发布了《关于外来物种对生态系统、栖息地和物种的威胁》[5]。直到2004年，IMO正式出台了《船舶压载水和沉积物控制和管理国际公约》(以下简称《压载水公约》)，旨在通过公约管理来约束港口国压载水和沉积物排放，防止有害藻类对生态的严重破坏。

## 2.2. 《压载水公约》生效条件

由于船舶压载水处理技术在2004年还不能完全满足《船舶压载水和沉积物控制和管理国际公约》，因此公约第18条规定：

- 1) 本公约应在其合计商船队不少于世界商船总吨位的35%；
- 2) 至少30个国家签署该公约并交存了必要的批准文件；

满足以上2个条件之日起12个月后生效。2016年9月8日，随着芬兰向国际海事组织(IMO)秘书长林基泽递交接受书，压载水公约达到生效条件。该公约于2017年9月8日正式生效。这意味着2017年9月8日及以后建造的新造船应于交付日起符合D-2标准(《船舶压载水处理的生物和卫生标准》)；对于9月8日前交付的现有船，允许其在2019年9月8日或以后的首次《国际防止油污证书》(《IOPP证书》，五年一次的特检时换取)换证时符合D-2标准，为市场上的现有船舶创造了缓冲期。

## 2.3. 压载水性能排放标准

公约制定目的在于约束港口国压载水及其沉积物的排放，为更好地统一控制与减少藻类对生态的破坏，所以公约缔约国在排放压载水时必须满足第D-2条规定的公约船舶压载水性能标准：

- 1) 每立方米中最小尺寸大于或等于50微米的可生存生物少于10个。每毫升中最小尺寸小于50微米但大于或等于10微米的可生存生物少于10个。
- 2) 作为一种人体健康标准，指示微生物应包括：  
有毒霍乱弧菌：少于每100毫升1个菌落形成单位(cfu)或小于每一克(湿重)浮游动物样品1个cfu；  
大肠杆菌：少于每100毫升250个cfu。

## 3. 压载水处理方法

压载水处理方法依据处理原理的差异可大致分为物理方法、化学方法以及生物方法[6]。

### 1) 物理方法

目前主要应用的物理方法包括过滤、离心分离、稀释与置换、加热、紫外线光辐射等。

过滤主要是通过过滤装置将颗粒物等杂质以及部分水生生物滤除。通过选择合适的网目，可以有效地去除不同的生物种群及群落。但由于压载水中含有大量的絮状物，会经常阻塞滤网网孔，操作起来不是十分简便，难以广泛应用。旋流式分离法是去除压载水中较大颗粒和生物的方法，固体颗粒从边界处缓慢落下，剩下的液体由上部旋流流出。这种操作方法成本低廉，操作简便，但处理效果不是十分理想，仍会存留部分与海水比重近似相同的难以去除的微生物[7]。

### 2) 化学方法

通过改变压载水中一些化学物质的相对含量抑制环境，以进一步地处理压载水，包括氯化、臭氧、脱氧、丙烯醛等。

臭氧是一种强氧化剂，足以迅速杀死病菌和细菌。但是臭氧会加快腐蚀，投加量不方便控制，所需的技术要求较高，不宜用于船舶压载水的处理。脱氧是向压载水舱注入惰性气体或耗氧物质，营造缺氧环境，杀死有害生物。这种方法虽然可以保护舱室不受氧化腐蚀，但它对装置喷射器内混合的容量比以

及混合后的水降压要求很严格,而且由于舱内始终要保留有惰性气体,会带来必要的维修费等其他成本[8]。氯化是指加入氯酸钠或者采用电解手段,利用产生的次氯酸钠有效杀死病原体、藻类等有害生物。但电解会造成压载舱金属一定程度的腐蚀,不适用于船舶压载水的处理。

### 3) 生物方法

主要指生物清除技术,即利用一种生物吞噬或抑制另一种生物。这种方法虽然针对性强,但操作复杂,费用高,有可能会产生新的物种。

一种单一方法很难在保证“安全、有效、环保、操作性强、经济可行”的前提下达到IMO处理要求控制压载水中有害生物,所以两种或两种以上方法联合使用成为了目前该领域主要的新的研究方向[9]。目前研究最多的是将过滤或旋流/离心分离作为一级处理手段,紫外、臭氧或电解作为二级处理手段。Mamlook [10]和 Cebi [11]等人评估了各处理方法的收益与成本之间比率,结果发现过滤法与紫外法优势明显而过滤与紫外联用被认为是最具有可行性以及广阔发展前景的一种联合处理方法。

全球目前共有65家压载水处理系统通过型式认可,其中采用紫外(UV)技术设备的约占40%左右,如挪威Pureballast系统利用50微米级过滤与紫外/二氧化钛联用[12],美国Hyde GUARDIANTM系统采用自动反冲洗旋转圆盘过滤与紫外辐照方法[13]。目前,我国现有14家通过型式认证,其中10家采用了UV(紫外线)技术,可见,UV技术已经得到了实际应用。如中远海盾系统采用过滤/旋流分离/紫外辐照联用[14],九江海博士系统采用过滤/紫外/光催化联用,AHEAD系统采用过滤与紫外联用方法,无锡BSKYTM采用水力旋分过滤/超声波预过滤/紫外方法[15]。在这些方法中,紫外辐照往往作为二级处理手段以达到灭活压载水中微生物与微藻的目的。下面将具体介绍紫外线处理技术的原理以及研究进展。

## 4. 紫外线处理技术研究进展

### 4.1. 紫外线处理技术原理

紫外线处理压载水是用波长为253.7 nm的紫外线对压载水进行照射。水中微生物一旦受到紫外线照射,紫外线照射的能量将被吸收,其实质是核酸对紫外线能量的吸收。核酸是一切生命体的基本物质和生命基础,分为核糖核酸(RNA)和脱氧核糖核酸(DNA)两大类。核酸吸收紫外线达到一定剂量时,DNA分子发生变异,从而引起微生物体内蛋白质和酶的合成障碍;另一方面,紫外辐照产生的自由基可引起光电离,从而导致细胞死亡[16]。

### 4.2. 紫外线处理技术的优点

相较于其他处理方法,紫外线处理技术有高效性、经济性、安全性等优点。在紫外线处理下,基本可以杀死所有微生物,且可以有效检测处理过程,不产生任何有害产物,减少对附近海域的污染。UV(紫外线)技术是水处理中最为经济的方法,成本较为低廉,具有较大的经济优势。

### 4.3. 紫外线处理技术的可行性

目前,紫外线处理技术已经成为多数学者推荐的压载水处理方法,主要原因在于其处理装置对杀灭海洋细菌、微生物效果显著。韩国PANASIA有限公司[17]发明了标准化紫外线压载水处理系统。经证实这种装置可以有效地杀死藻类,并且处理后的水质也满足公约要求;挪威的OPTIMAR紫外线压载水处理设备也已经开始应用。与此同时,紫外线处理技术在国内也引发了一些学者的热议,并积极调研实验加以考究。大连海事大学船舶防污染实验室刘飞、谭辉、阎玫姬[18][19][20]等人研究了紫外线处理技术,并指出紫外线处理技术相对于其他处理技术的绝对优势,紫外线处理船舶压载水技术是最具潜力和优势



的压载水处理技术之一。此外,哈尔滨工业大学的杜清华[21]等人也做了此方面的研究,证实了紫外线方法的有效性。

以上的实例证实,紫外线法处理船舶压载水不仅在理论上可行,而且在实船上也开始有所应用,有进一步研究的必要,具有广阔的实船应用前景。

#### 4.4. 紫外辐照技术存在的问题

但同时,紫外辐照技术也并非完美无缺的,很多研究者发现紫外辐照方法存在着潜在问题,即辐照后生物与微生物可通过自身修复机制修复受损组织结构,会恢复细胞的正常功能。紫外辐射剂量会对生物灭活效果产生直接影响,不同强度的紫外线照射会对藻类产生不同的抑制作用。剂量低于阈值则无法灭活目标生物,且可能出现生物修复现象(光修复和暗修复),即细菌、蓝绿藻类、真菌、高等植物以及主要脊椎动物体内存在 DNA 修复酶,可以修复紫外辐照后的 DNA 损伤[22] [23],修复途径分为两种:

1) 光修复,400 nm~700 nm 可见光下,由 DNA 光裂合酶(photolyase)催化,切除嘧啶二聚体之间的连键;

2) 暗修复,无光照黑暗条件下,在酶的作用可去除嘧啶二聚体或重组复制损伤的 DNA。

因而经过紫外辐照处理后的生物与微生物将有可能通过光修复/暗修复自修复机制再次恢复重生,这将使得压载水处理失去意义,无法达到公约要求。

事实上 M.M.Mahamud 课题组近期对此已展开初步研究:角毛藻(*Chaetoceros calcitrans*),自养小球藻(*Chlorella autotrophica*)均被发现能够自我修复,球形棕囊藻(*Phaeocystis globosa*)在紫外辐照剂量低于  $7.3 \times 10^5 \mu\text{Ws}/\text{cm}^2$  时会修复,而角刺藻(*C. calcitrans*)低剂量辐照时甚至会形成孢囊存活下来[24] [25]。

采用紫外线作为二级处理技术本身有着高效性、经济性、安全性等优点,但却无法避免处理后的细菌与藻类出现光修复与暗修复现象。如果单纯依靠增强紫外线剂量来实现对二级处理中的细菌和藻类的 100% 灭活,则会极大地增加运行成本。为了完善地履行压载水公约,有必要彻底抑制细菌与藻类的复活,因而需要对现有的紫外辐照方法进行改善,以避免处理后的细菌与藻类的自我修复复活,否则将会使压载水的处理失效,达不到真正的处理目的。

## 5. 结语

目前全球共有 61 个国家加入《压载水公约》,公约正式达到生效条件,已于 2017 年 9 月 8 日生效,船舶压载水及其沉积物的控制与管理迫在眉睫,各国以及船公司为达到压载水性能排放标准,必将大规模地启用压载水处理系统。目前,各国普遍利用综合处理方法对压载水进行控制,其中过滤为一级处理方法,紫外线辐照技术作为二级处理因为有着更高效益和环保无污染的特点而被广泛采用。但是紫外辐照后的细菌与藻类等生物可以依靠自身修复酶在可见光照射下或暗环境下发生光修复与暗修复,使得被处理后的压载水中的生物会出现复活再生等问题,这会极大地影响紫外辐照技术的处理效果,并阻碍了通过压载水处理控制外来物种入侵这一目的的实现。所以采用紫外线处理压载水,处理效果明显不足。现有学者提出可用臭氧进行进一步灭菌。此方法不仅能很好地对细菌、病毒、微生物起到灭活效果,而且残留在压载水中的臭氧可自行分解成氧气,不会对船舶及周围环境造成二次污染[26],但仍需考虑经济成本等因素。紫外辐照技术的优势十分明显,深入研究如何改良与完善现有的紫外辐照技术也犹显必要。这样才能使现有的采用紫外辐照技术方案的压载水处理系统能够更好地发挥优势,从而更加有效地控制外来物种入侵问题,造福海洋环境。

## 基金项目

国家社科基金 2017 年重大项目“国家海洋治理体系构建研究”,项目号为 17ZDA172。

## 参考文献

- [1] 张东方, 张善杰, 陆亦恺. 船舶压载水处理系统技术研发现状及展望[J]. 世界海运, 2012(9).
- [2] DESMI OCEAN GUARD 产品说明[EB/OL]. <http://www.desmi.com/bwts.aspx>
- [3] 包国治, 王之民, 陈宁, 白晓峰, 龚嫔. 基于 Labview 和 PLC 的船舶压载水控制系统[J]. 舰船科学技术, 2015, 37(3): 59.
- [4] 白佳玉. 船舶压载水法律规制研究[D]: [博士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [5] 王文成, 龚帆, 郑羽, 袁闻骞. 船舶压载水处理综述[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2013, 36(4): 12.
- [6] 谢承利, 翁平, 李小军, 刘喜元. 船舶压载水处理技术应用综述[J]. 航海工程, 2010, 39(6): 87-88.
- [7] 饶建荣. 船舶压载水排放处理技术研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学.
- [8] 黄德志. 文氏管脱氧方法处理船舶压载水的分析[J]. 造船技术, 2012(6).
- [9] Tsolaki, E. and Diamadopoulou, E. (2010) Technologies for Ballast Water Treatment: A Review. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, **85**, 19-32. <https://doi.org/10.1002/jctb.2276>
- [10] Mamlook, R., et al. (2008) Fuzzy Sets Analysis for Ballast Water Treatment Systems: Best Available Control Technology. *Clean Technologies and Environmental Policy*, **10**, 397-407. <https://doi.org/10.1007/s10098-007-0130-7>
- [11] Cebi, S. and Celik, M. (2008) Assessment of Technology Options for Ballast Water Treatment Onboard Merchant ships Based on Information Axioms under Fuzzy Environment. *Proceedings of the 38th International Conference on Computers and Industrial Engineering*, **1-3**, 652-657.
- [12] <http://www.ballastwater.com>
- [13] [http://www.hydweweb.com/ballast\\_water/index.htm](http://www.hydweweb.com/ballast_water/index.htm)
- [14] 方建国. 中远海盾——远洋船舶压载水物理净化系统开始船试[N]. 中国远洋报, 2012-05-25(7).
- [15] 笪靖. 船舶压载水中有害水生物的处理技术研究[J]. 船舶工程, 2016, 38(增 2): 121.
- [16] 孙永明. 紫外线法处理船舶压载水的可行性研究[J]. 上海海运学院学报, 2002, 23(2): 22-25.
- [17] 王伟. 紫外线法处理船舶压载水应用研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2010.
- [18] 刘飞, 谭辉, 杨健. 旋流—紫外线法处理船舶压载水的实用性研究[J]. 中国航海, 2007(4): 100-103.
- [19] 刘飞. 船舶压载水紫外线灭菌系统研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2008.
- [20] 谭辉. 船舶 UV 压载水处理系统反应器的设计研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2008.
- [21] 杜清华. 船舶压载水灭菌系统研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [22] 陈云浩, 林才. 紫外线辐照细菌光复活相关干预因素研究进展[J]. 上海环境科学, 2016(1): 56-60.
- [23] Muller, W.E.G., et al. (2014) A Novel TiO<sub>2</sub>-Assisted Magnetic Nanoparticle Separator for Treatment and Inactivation of Bacterial Contaminants in Aquatic Systems. *RSC Advances*, **4**, 48267-48275. <https://doi.org/10.1039/C4RA09055A>
- [24] Martínez, L.F., et al. (2012) Evolution of Phytoplankton Cultures after Ultraviolet Light Treatment. *Marine Pollution Bulletin*, **64**, 556-562. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.12.021>
- [25] Martínez, L.F., et al. (2013) The Re-Growth of Phytoplankton Cultures after UV Disinfection. *Marine Pollution Bulletin*, **67**, 152-157. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.11.019>
- [26] 林丰财. 船舶压载水处理系统的设计[J]. 技术与市场, 2017, 24(5): 94-95.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2376-4260，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[ams@hanspub.org](mailto:ams@hanspub.org)