

治理压载水微生物入侵性传播方法的研究进展

Advances in study of several methods on the treatment of introduced organism intruding spread

依成武^{1,2}, 白敏葭², 沈欣军², 董克兵², 刘兴旺²

(1. 江苏大学生物与环境工程学院 江苏 镇江 212013 2. 大连海事大学 环境工程研究所, 辽宁 大连 116026)

中图分类号: U698.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2004)03-0055-04

20世纪70年代北美水母(*combjelly*)侵入黑海,嗜食浮游生物、鱼卵及鱼苗,给凤尾鱼和鲱鱼养殖业带来了灭顶之灾。80年代末,美国、加拿大和澳大利亚成为面临外来生物入侵最严重的国家。1990年,一种美国生物 *mnemiopsis* 侵入黑海,吞噬了大量浮游生物,使得黑海鱼苗几乎枯竭^[1]。目前有450种物种入侵地中海,其中半数以上是通过压载水入侵传播的^[2]。1996年侵入到美国和加拿大交界处的五大湖生物有130余种,到2000年为止,已造成了50亿美元的经济损失^[3]。1997年,据澳大利亚检疫局(AQIS)估计,被传播到澳大利亚水域的外来生物已达170种以上,仅腰鞭毛藻(*Dinoflagellate*)就造成8000万美元的损失^[1],同时又通过贝壳类进入人体,损害了人类健康。2002年,已有81种外来水生动植物被传播到英国北海,其中中华绒螯蟹在英伦三岛大面积泛滥,它们破坏河岸和防洪堤坝,吃掉鱼类,给当地生态平衡和经济造成了严重破坏。综上所述,有害的外来生物物种的存活和传播,对港口水域的生态平衡和健康造成严重影响,因此成为海洋面临的四大威胁之一^[4]。

船舶排放压载水是造成地理性隔离水体间有害生物传播的最主要途径^[5-7]。每年全球船舶携带的压载水大约有100亿t,一艘载重19万t货船携带的压载水量超过了8万t,压载水有浮游动植物平均1.1亿个/m³^[2,5],每天全球在压载水中携带的生物超过了3000种^[8],在一个压载水舱中有存活腰鞭毛虫胞囊3亿个^[9],到目前为止已有约500种生物物种被确认是由船舶压载水入侵传播的^[10]。它们以不同方式生活在压载水中,一旦入侵到新的适宜生存区域中就能发生不可控制的大量繁殖,掠夺本地生物食物,吞食鱼类,破坏河岸堤坝,阻塞运输通道。有害寄生虫和病原体的传播,甚至引发本地物种灭绝^[11]。对当地港口水

域的生态平衡和居民健康造成了严重的危害。

船舶压载水微生物的入侵性传播已经引起了全世界的极大关注。目前,许多科学家进行了治理船舶压载水有害入侵生物的研究工作,提出了机械过滤、加热、氯及氯化物、过氧化氢、臭氧、超声波、磁场以及紫外线辐射等许多种机械、物理、化学方法。其中机械过滤法、加热法和氯及氯化物法被认为是具有应用潜力的压载水治理方法。2000年,IMO^[11]海上环境保护委员会建议采用“在航深海(水深2000m以下,距海岸200n mile以外)更换压载水的方法”。2002年,白希尧等^[12]提出了羟基自由基治理船舶压载水外来入侵生物方法。

1 治理压载水微生物入侵传播的研究方向及标准

由于船舶装载压载水量巨大,而要求处理压载水时间要短,再加上海洋环境和海洋经济可持续发展的制约,一般杀灭微生物的方法(或药剂)都不能满足治理船舶压载水外来入侵生物的要求。虽然在微宇宙试验时都是成功和有效的,可是一旦用在治理船舶压载水上,它们都难以满足海洋环境及其可持续发展的要求。考虑到海洋可持续发展及科学技术进步,提出

收稿日期:2003-03-04,修回日期:2003-05-30

基金项目:国家自然科学基金重点项目(60031001);国家重大基础研究前期研究专项(2002CCC00900)

作者简介:依成武(1966-),男,辽宁鞍山人,硕士研究生,从事强电离气体放电理论及其应用技术研究,电话:0411-4729677 E-mail: yichengwu0943@163.com

解决船上处理压载水问题的以下 7 条标准,建议以此 7 条标准评价治理压载水方法的有效性、可行性。(1) 采用低药剂浓度杀灭压载水浮游微生物。(2) 剩余药剂能自身分解成无害物质,不存在残留物;既能分解微生物尸体、毒素及其尸体产生的硫化氢、氨、甲烷等有害物质,同时又能净化压载水。(3) 杀灭微生物时间要短,要在压载水输送过程中加以杀灭。(4) 对海洋环境不产生负面影响,不对海洋形成新的污染。(5) 成本低廉。(6) 易制取、易操作。(7) 生产药剂过程应是安全清洁,无污染,无废料和副产物。

前 4 项是治理压载水必须具有的缺一不可的条件,治理压载水难就难在如何同时达到这 4 项要求。各国研究人员已经用了近 20 年时间去寻找一种能满足前 4 项要求的压载水治理方法,但到目前为止仍没有研究出一种令人满意的有效方法。同时能达到这 7 项标准的治理压载水方法是今后科学家研究治理船舶压载水的研究方向。

2 几种有应用潜力的治理方法

目前治理压载水方法主要采用 2 种方式:一是船上治理压载水;二是在目的地港口进行岸上压载水处理。由于后者存在当地政府投资及港口维护设置管理等问题,从长远角度看,最好的方法是在船上直接杀死压载水中的大量微生物。为此,目前不少科技工作者着手研究一种有效船上治理船舶压载水有害生物入侵的新方法,以便解决地域限制以及阻碍贸易等问题。目前世界上公认的具有潜力的治理压载水方法有以下几种。

2.1 机械过滤法

过滤法处理压载水被认为是对环境最无害的方法。过滤超过过滤器筛网孔径物体的有效性为 95%~98%。一般用于压载水的过滤系统的粗滤孔径分别为 500 和 50 μm ,如果进一步减小孔径,可以去除稍小一些的物体,但成本也会相应增加。过滤法最大优点是可在压载水装载的过程中使用;用于反冲洗过滤器水可以直接流入装载压载水的港口,而不需要任何处理,且不会对环境造成污染。

但是,过滤法也存在许多问题。1993 年, Aqis^[14] 的研究表明,过滤器成本非常高。安装 1 000 m^3/h 处理量的压载水过滤装置的费用大约为 290 万美元,每处理 1 000 m^3 压载水的费用为 1 000 美元。1996 年, Sipes^[15] 认为,要处理的压载水量非常巨大,过滤法还没有经过处理大量压载水的实践验证。而且,需要重新考虑泵的选取来弥补过滤器带来的阻力。如果不作任何修改的话,就会使泵的性能降低,随之会延长压

载水的装载时间。此外,还存在过滤器很难去除微型藻、细菌以及弧菌等问题。

2.2 加热法

1993 年, Aqis^[14] 认为杀灭压载水中的微生物温度为 40~60 $^{\circ}\text{C}$,这个区间温度被认为是杀死大多数海洋生物的恰当温度。例如,斑马贝在此温度停留 2~6 h 可被杀死。1997 年, Bloch^[16] 的实验数据表明杀灭微生物水温为 35~38 $^{\circ}\text{C}$,作用时间为 4~5 h 可有效的杀死有毒和无毒的腰鞭毛虫的孢囊和植物细胞藻。1993 年, Bolch 和 Hallegraef^[17] 认为,有效的杀死压载水中含有的抵抗力很强的藻类的孢囊,需要高于 50 $^{\circ}\text{C}$ 的温度,而且需要几小时甚至几天的杀灭时间。因此,必须把压载水加热到 40 $^{\circ}\text{C}$ 以上才有可能有效杀死有毒海洋生物。升高压载水温度的主要方法有 (1) 压载水与引擎的冷却回路接触;(2) 压载水在热交换系统里反复流动来加热压载水;(3) 采用外加热源加热压载水。

所有这些方法都需要外加热交换装置及管路。方法 1 需要管道把压载水引回到引擎,使压载水成为主引擎冷却水系统的一部分,这一方法并不总是可行的,因为尺寸的问题,尤其是主引擎的产热能力,压载水由单通道进入热交换系统不足以使其水温升高并保持。如果使用其他的热源需要另外安装这些设备,而且还需要安装很长的管路。

通常要保证加热过程的时间不会比航行时间长。1993 年, Bolch 和 Hallegraef^[17] 认为,从现有船的成本方面考虑,很多因素不利于这种方法的使用。一艘可以盛装 4.5 万 t 压载水的船所需要的 45 000 kW 的热量中有 20 000 kW 的余热可以从船的主引擎中获取,但在更冷一些的水域如北海,将压载水加热到理想的温度还需要更多的热量。为减少热量损失,可相继加热每一个压载舱,或者在压载水装载或卸载时将压载水泵入一个甲板上的热交换器和一个稍小的隔热舱。估计这一系统可以减少热量损耗 5%~10%。但 1990 年 Yount^[18] 和 1997 年 Armstrong^[19] 认为,升高单个压载舱的压载水温度,由于金属膨胀会引起船体的结构变形,对船舶安全十分不利,又会破坏船舱的涂层。

在压载水加热处理中会遇到很多困难,尤其是得考虑船的热应力问题,几乎没有关于船上大量水的热交换的热动力学的数据。压载舱越靠近船的外壳处热损失越快,压载舱不论形状如何,在试图使要处理的压载水温度均匀一致时,都存在难以解决的问题。同时加热处理法可能会对管道、泵和舱涂层带来副作用。对于一些喜温的生物和抵抗力强的浮游动植物、芽孢、细菌和弧菌,很可能需要更高的温度和更长的

时间才能将其杀死。相反, 30~40℃的水温更有利于一些单胞藻、原生动物、细菌和弧菌的生长, 如霍乱弧菌等。

2.3 氯及氯化物

2.3.1 氯

氯是一种强氧化剂, 作为消毒剂的有效性 与温度和接触时间有关。在 2~20℃之间, 生物的死亡率会随温度变化。低温时, 死亡率大幅度降低。氯的消毒性能也会随 pH 值的升高而大幅度降低。

1993 年, Aqis^[14]认为, 用于压载水消毒的氯的剂量为 100~500 mg/L, 这样高的药剂是近岸海洋环境所不能承受的。而且, 这一高剂量浓度会给储存和使用带来问题, 存在爆炸、中毒等安全隐患。在过滤完后加氯时, 浓度可降到 5 mg/L。然而, 改进过滤工艺需要额外高额的修改费用, 要占用更多的空间。

而且, 1997 年 Armstrong^[12]认为, 很难预计氯治理海洋环境的有效性。与氨、有机物、铁和镁反应及温度、pH 值和作用时间都会影响氯的作用效果。为了确保氯的消毒作用, 加氯的时候通常加入过量的氯, 它对海洋环境的危害远远超出了微生物入侵所造成的灾害。

1998 年 Smethurst^[20]的研究表明, 氯与有机化合物反应可以生成大量的有机氯化物, 其中的一些还是致癌的物质。考虑到液氯的存储引起的中毒和爆炸等安全问题, 以及由于压载舱的漏气和氯化的压载水排放对环境所造成的污染, 氯作为生物杀灭剂难以用在压载水处理上。

2.3.2 二氧化氯

1991 年, Ridgway 和 Safarik^[21]提出二氧化氯杀菌浓度值为 0.5~2 mg/L, 认为 ClO₂ 比氯有一定优势。

1991 年, Flemming^[22]认为, 由于压载水中含有氨、有机物和铁、锰等物质, 很可能需要大量的氯, 由氯引发的健康和安全问题仍然存在。而且存在气体的爆炸性引发的安全问题和产生有毒的致癌副产物。

2.3.3 次氯酸钠 (NaClO)

次氯酸钠溶液是一种很容易获取的常用消毒剂, 能够产生 1%~15% 的氯。其最常用的获取方法是电解海水产生次氯酸盐。它需要一个大型沉淀调节池, 接触反应池及附加设置 (容积约为被处理量的 1/10 左右), 压载水需在池内停留 1h 以上。1985 年 Twort 等人^[23]认为, 电解的过程中会产生氢气, 存在气体的爆炸性引起的安全问题。而且耗能很大, 含有 ≥8 g/L 氯的溶液所需要的电能为 5~6 (kWh)/kg, 所以使用电

解法必须要经过仔细的论证。

尽管 NaClO 溶液作为消毒剂已在医院污水处理上得到应用, 但是处理压载水需要大量高浓度的 NaClO 溶液。例如, 杀死 *Gymnodinium catenatum* 孢囊所需要的游离氯的浓度为 500×10^{-6} , 治理 5 万 t 压载水大概需要 400 t 浓度为 12.5% 的工业用 NaClO 溶液。因此, 成本、健康和安全等因素, 以及产生有毒副产物和腐蚀等问题都会阻碍 NaClO 用于压载水的治理上。

2.4 公海更换压载水

1990 年, 国际联合会和五大湖渔业组织提出了公海更换压载水减少生物入侵性传播的措施, 在公海 (2 000 m 以下) 换掉由沿海、港湾加入的海水。与沿岸海水相比, 深海海水含有的生物和生物物种相对要少一些, 而且它们很难在沿海地区存活。如果不能在公海更换压载水, 那么也要至少在距离原岸边 200 n mile 的地方更换^[5]。排放压载水可采用排空法和直流法两种方式。排空法是将船舶压载水全部排空, 但在更换压载水过程中会产生自由液面效应, 导致船舶的稳定性降低, 产生剪切弯矩导致强度降低, 甚至造成损坏等; 另一方法是直流法, 至少需要更换相当于 3 倍舱体积的水, 但也只能更换掉 95% 压载水。而在剩余的 5% 的原有压载水中, 发现仍有 25% 的原有物种存在^[24]。所以, 船舶即使在公海更换压载水后, 仍然存在压载水带来的外来有害生物入侵性传播问题。

另外公海交换压载水也存在能量消耗过高、操作运行时间过长的的问题。例如, 一艘 30 万 t 油轮更换压载水需 36 h, 每年至少多支出 200 余万元^[25], 其运行费用远远高于物理、化学法治理压载水外来生物入侵的费用。因此, David Smith^[26]认为, 公海交换压载水只是一个暂时的措施, 从长远角度看, 最好的方法是在船上直接杀死压载水中的大量微生物。

2.5 羟基自由基法

羟基自由基 [OH·] 是自然界存在的一种原子团物质, 具有极强的氧化性能, 与氟的氧化能力相当, 可有效杀死海洋微生物。羟基参与的反应属于游离基反应, 杀死海洋微生物的反应极快, 在压载水输送过程中就可致死微生物, 剩余羟基及微生物尸体均分解成无害物质 H₂O, CO₂, O₂ 及微量无机物, 不存在药剂长期污染问题^[13]。

近期, 周晓见等^[27]的研究表明, 羟基药剂可有效杀灭压载水单胞生物。他们得出的实验结果表明, 羟基药剂作用 6s 后对海洋细菌的杀灭效果明显。用 0.15 mg/L 的羟基药剂就可使细菌致死总数达到

99%以上;当羟基比值浓度为 0.8 mg/L 时,硅藻、盐藻、扁藻的致死率达到 99% 以上;当羟基比值浓度为 1.12 mg/L 时,可 100% 致死硅藻、盐藻、扁藻等单胞藻类。羟基自由基法不仅可杀灭单胞微生物,而且可使海洋微藻的光合色素脱色,无法进行光合合成,并很快死亡。当羟基比值浓度为 0.55~0.68 mg/L 时,可以使叶绿素 a 完全分解。羟基不仅能致死入侵微生物,还可以使压载水中的有机物、微生物尸体及毒素等有害物质分解成 H₂O, O₂, CO₂ 等无害物质,同时又能净化压载水,可望成为一种有效治理压载水的新方法。

3 结束语

作者介绍的几种治理压载水外来入侵生物方法,被认为是当前比较有应用潜力的治理方法,但均存在一些难以解决的问题。过滤法处理压载水被认为是对环境最无害的方法,但无法去除微生物;加热法存在处理时间长、能耗过高、形成的热压力等将影响船舶的航行安全等难以解决的问题;氯及氯化物法存在气体的中毒和爆炸、二次污染、腐蚀和成本等问题;公海更换压载水存在的主要问题是能量消耗高、操作运行时间过长,其运行费用远远高于物理、化学法治理压载水外来生物入侵的费用,最重要的是没有从根本上解决生物传播的问题;羟基自由基法没有上述存在的问题,既有极强的杀灭微生物的特性,同时又具有脱色的特点,且无残留物,对海洋环境不造成新的污染,可同时满足治理压载水的 7 项标准,有望成为治理压载水有效的新方法。

参考文献:

[1] Mackenzie D. Alien invaders[J]. *New Scientist*, 1999, 162: 18 - 19.

[2] Galil, B S. Lessepsian Migration - Biological Invasion of the Mediterranean[A]. In: Boudouresque C F, Briand F, Nolan C. Introduced Species in European Coastal Waters. Report on an International Workshop. Vol. 8[C]. Luxembourg: European Commission, 1994, 63 - 66.

[3] 林火平. 压载水管理[J]. *世界海运*, 2001, 24(3): 40 - 41.

[4] 全球压载水管理项目中国国家项目实施小组. 全球更换压载水管理项目[J]. *交通环保*, 2001, 专版 1 期: 1 - 4.

[5] Gregory M R. Global spread of microorganisms by ships [J]. *Nature*, 2000, 408: 49 - 50.

[6] Rigby G. From ballast to bouillabaisse[J]. *Science*, 2000, 289: 241.

[7] Donald M. Turning back the harmful red tide[J]. *Nature*, 1997, 388: 513 - 514.

[8] 胡承兵. 阻止"搭乘"于压载水中的外来生物入侵者[J]. *交通环保*, 1999, 20(4): 35 - 39.

[9] Hallegraef, G M, Bolch, C J. Transport of diatom and dinoflagellate resting spores in ships' ballast water: Implications for plankton biogeography and aquaculture[J]. *J Plankton Res*, 1992, 14(8): 1 067 - 1 084.

[10] Holmes, J M C, Minchin, D. Two exotic copepods imported into ireland with the pacific oyster *Crassostrea gigas* (Thunberg)[J]. *Ir Nat J*, 1995, 25, 17 - 20.

[11] 李世信, 王学忠. IMO 海上环境保护委员会第 45 届会议[J]. *中国船检*, 2000, 7(6): 45 - 48.

[12] 白希尧, 白敏冬, 杨波, 等. 外来有害生物入侵性传播灾害和治理方法研究[J]. *自然杂志*, 2002, 24(4): 1 - 4.

[13] Bolch, C J S. Hallegraef G M. Chemical and physical treatment options to kill toxic dinoflagellate cysts in ships' ballast water[J]. *J Mar Env Engg*, 1993, 1: 23 - 29.

[14] Ridgway, H F, Safarik, J. Biofouling of reverse osmosis membranes[A]. In: Flemming, H C, Geesey, G G. Biofouling and biocorrosion in industrial water systems [C]. Berlin: Springer Verlag, 1991. 81 - 112.

[15] Flemming, H C. Biofouling in water treatment[A]. In: Flemming, H C, Geesey, G G. Biofouling and biocorrosion in industrial water systems[C]. Berlin: Springer Verlag, 1991. 47 - 80.

[16] 张宏旭. IMO 第 40 届海洋大会关于压载水有害有机物和病原体工作组工作情况[J]. *交通环保*, 1998, 20(1): 38 - 39.

[17] Tamburri, M N, Wasson K, Matsuda M. Ballast water deoxygenation can prevent aquatic introduction while reducing ship corrosion[J]. *Biological Conservation*, 2002, 103: 331 - 341.

[18] 周晓见, 白敏冬, 邓淑芳, 等. 羟基药剂杀灭压载水单胞生物研究[J]. *交通环保*, 2002, 23(5): 1 - 3.

(本文编辑 刘珊珊)