

基于熵值法的船舶污染事故区域应急联防成本分担机制研究

刘桂云^{1,2}, 陈家炫¹, 朱家毅¹

(1. 宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315832; 2. 浙江 2011 港口经济协同创新中心, 浙江 宁波 315832)

摘要: 在一定的区域范围内建立污染事故应急联防体系, 对于共享区域应急资源、提高船舶污染事故应急能力具有非常重要的意义. 本文在分析船舶污染事故区域联防体系建设及运营成本构成的基础上, 从污染物种类、污染量、泊位参数、船舶艘次、货物吞吐量、管理因素等方面分析了影响联防体系成本分担责任的影响因素, 并基于熵值分析方法建立了联防体系成本分担模型. 研究的目的在于促进建立合理有效的区域联防成本分担机制, 以保障联防体系的有效运行和可持续发展.

关键词: 船舶污染; 应急联防; 成本分担; 熵值法

中图分类号: X55

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2021) 06-0099-06

近些年, 我国沿海港口吞吐量快速增长. 2019 年, 沿海港口的货物吞吐量达到 91.88×10^8 t 之多, 与过去一年相比增长了 4.3%. 货物吞吐量的增长促使沿海及港口水域通航密度不断增加, 船舶交通事故也会随之频繁发生, 因此污染应急工作方面面临着严峻的挑战. 2019 年 11 月, 交通运输部等九部委联合发布了《关于建设世界一流港口的指导意见》, 明确提出了我国要建设“安全便捷、智慧绿色、经济高效、支撑有力、世界先进的世界一流港口”. 基于绿色港口的发展要求, 我国针对海上船舶污染事故的应急处理制定了相应的法律法规及技术导则. 2017 年 7 月, 交通运输部发布了《水上溢油环境风险评估技术导则》, 旨在指导防治船舶污染海洋环境能力建设. 按照技术导则的要求, 若各个码头单独建设各自的溢油应急能力, 需要配备数量较多的溢油应急物资和设备, 如吸油毡、溢油分散剂、溢油分散剂喷洒装置等. 但发生船舶污染事故时, 只有具备专业的应急人员、应急船舶等大型设备, 才能将应急物资高效利用起来, 形成真正的溢油应急力量. 否则, 某个区域内大量配备消耗性溢油应急物资, 一方面会产生对资源的不充分利用, 另一方面也很难形成有效的

溢油应急能力. 为了更好地发挥应急资源的利用效率, 并保证区域应急能力, 可以通过联防共建的方式, 以区域为单位进行相应的溢油应急能力建设, 区域内码头共同承担区域溢油应急能力建设任务.

在船舶污染事故应急区域联防问题的研究中, 陈立家等^[1]研究了港区溢油应急联防设备库选址问题; 马强等^[2]、刘广强等^[3]研究了船舶污染事故联防体组建的必要性、可行性及建设模式、建设注意事项等问题; 张运兴等^[4]对京唐港码头溢油应急联防体的建设模式进行了研究; 鲁东青^[5]、刘辉^[6]分别研究了广州港及长三角区域环境污染区域联防联防问题; Lü 等^[7]研究了区域海上污染事故应急物资调度问题; 王慈云等^[8]分析了船舶污染事故区域应急联动体系的组成要素. 区域应急联防体系建设以科学的污染风险评估为基础, Lee 等^[9]、Jin 等^[10]、Amir-Heidari 等^[11]等研究了船舶污染风险评价方法和模型. 这些研究成果针对区域联防的可行性、运作模式等问题提出了相关建议和要求, 而关于联防体系各参与主体的建设和运营成本分担机制的关键问题研究很少, 亟需提出科学合理的成本分担方案.

收稿日期: 2021-03-04.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal1g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省基础公益研究计划项目(LGF19G030003).

第一作者: 刘桂云(1972-), 女, 满族, 辽宁鞍山人, 博士/教授, 主要研究方向: 港口和物流管理. E-mail: liuguizun@nbu.edu.cn

1 船舶污染事故区域联防的内涵及成本构成

1.1 区域联防内涵

船舶污染事故区域联防指的是区域内的码头自发地进行联动,并建立联防机制,实现应急设备资源的整合、优化和统一调配使用,作为一个整体进行污染事故的联防联治,不再各自布局、单独应对。在日常事故预防时,统一培训、演练;处理污染事故时,统一指挥、统一调配、统一应对。建立区域联防机制,可提高区域应对海域突发污染事故的整体处置能力,预防和减少海域突发溢油事件的发生,提升突发性污染事故的响应和应急能力,减轻或消除海域突发溢油所引起的危害。

对于可以实施联防的区域范围和码头数量并没有明确的限定。一般来说,最远距离码头之间的应急物资运输及使用时间能够满足应急要求的区域,都可以在一定约束条件下建立区域联防体系。同时,联防体系不会对各个码头依据有关法律、法规和规章规定的防治船舶污染海洋环境的责任和义务产生影响,各码头业主必须按照相关法律法规要求,承担设施设备的购置、日常维护和保养等费用。建立区域联防体系本质上是为了提高区域整体对船舶污染海洋环境的防治能力。

构建区域联防体系时,经海事主管部门许可,联防体系成员应该签订溢油应急联防协议,并报送海事部门备案。联防体系的成立旨在实现应急设备资源的优化、整合和统一调配使用,并不减轻任何一个联防体系成员在防治船舶溢油海洋环境应承担的责任和义务;联防体系不得随意解散,任何成员不得随意退出;联防体系成员有任何变化,包括加入和退出,都需经海事部门许可;联防体系应共同委托某位成员或附近船舶溢油清除单位负责联防体系应急设备的使用、管养和维护。联防体系成立后,在其营运期间,允许区域内的其他码头申请加入。需要由加入单位委托专业机构评估自己能否被覆盖到原有的联防体系内,若能覆盖,则重新测算出各自的责任分担比例;若不能覆盖,则评估出新增的能力(由新加入的单位承担)及各自的责任分担比例。

联防体系构建的模式一般可以分为三种。一是自营型,即由共建区域各成员单位共同成立自

营管理实体;二是托管型,由成员单位共同成立股份公司,再委托第三方专业公司对应急能力建设和营运进行托管;三是服务外包型,由共建区域成员单位直接委托第三方专业公司进行建设和运营。有关共建成员的责任、义务、权利和共建区域的进入和退出机制以及营运管理等都应该通过协议确立,由所有成员单位的法人(或代表)签字确认。其中,区域联防体系成员单位的建设和运营成本承担比例是需要解决的核心问题。

1.2 区域联防成本构成

区域联防成本主要为建立及维护联防体系有效应急能力的成本,包括设施设备成本、应急人员队伍成本、应急演练成本以及其他临时性支出成本。

(1)设施设备成本。区域联防体系需要根据确定的区域应急防备目标购置防污染设施设备,包括应急船舶、应急物资等,并要对这些设施设备进行定期的维护保养和更换。根据要求建设应急仓库,并配备相应的搬运、装卸设备。设施设备成本占比高,在具体分担比例设定时,要充分考虑到各个参与主体码头的差异性。

(2)应急人员队伍成本。应急人员队伍是应急能力建设的重要内容,其成本主要包括应急人员的工资、保险支出及其他补贴和办公费用等。

(3)应急演练成本。联防体系要定期进行应急演练,其成本包括参与演练的船舶费用(模拟事故船、专业清污船、清污辅助船等)、消耗的应急物资费用等。

(4)其他成本。其他临时性支出成本。

在区域联防体系中,各个码头均需要配置的设备及建设的应急队伍、应急演练等费用需要联防体系成员按照比例共同承担,而个别需要特殊建设能力(比如特有化学品的防污染设备)的码头,则由此码头单独建设或者同类码头按照相同的计算原则共同承担。本文研究的成本分担问题主要是指所有码头均需要建设的应急能力所对应的成本,在成本分担机制构建中,要充分考虑共赢、贡献补偿等原则。

2 船舶污染事故区域联防成本分担的影响因素

船舶发生污染事故的总体风险是船舶污染事

故应急能力建设的主要依据。而港口船舶污染风险的影响因素复杂,主要包括码头泊位靠离船舶的类别和吨级、事故发生概率、码头管理水平、自然环境因素等。区域联防成本分担比例也主要根据这些因素确定,具体可以量化为污染物种类、污染量、泊位参数、船舶艘次、货物吞吐量、管理因素等。由于参与区域联防的码头均处在同样的自然环境中,所以环境因素可以不作为成本分担的依据。

2.1 污染物种类

船舶污染事故泄漏的主要污染物包括油品及化学品。油品有不同的种类,包括原油、燃料油、成品油、润滑油等,而化学品的种类繁多、特性各异。另外,船上会产生一些含油污水、生活污水、船舶垃圾等污染物,也会对海洋环境造成污染。

这些泄漏的油品的黏性、比重等特性不同,对海洋环境的污染后果也会有区别。黏性大、难挥发的油品会大量附着在岸线及其他海洋结构物上,很难清除;黏性小、易挥发的油品粘附性小,泄漏一段时间后会大量挥发,持久性的污染后果相对黏性大的油品轻一些,但突然大量泄漏时,爆炸及着火风险更高一些。如果事故泄漏的是化学品,则更加复杂,化学品的毒性、水溶性、挥发性、易爆性等均不同,码头需要增加配备有针对性的化学品污染清除设施设备和物资。

2.2 污染量

污染溢油量主要根据可能最大水上溢油事故溢油量来预测。《水上溢油环境风险评估技术导则》(JT/T 1143-2017)中规定,新建水运工程建设项目的可能最大水上溢油事故溢油量按照设计代表船型的1个货油边舱或燃料油边舱的容积确定;已营运的水运工程项目按照实际航行和作业船舶中载油量最大船型的1个货油边舱或燃料油边舱的容积确定;化学品船则参考此规定,以靠泊的最大化学品船单舱容量作为事故可能的污染泄漏量。

2.3 泊位参数

泊位参数主要指的是码头的泊位数量和等级。对于多泊位码头来说,虽然多个泊位同时作业并发生污染事故的概率较小,但总体上还是比单个泊位码头作业船舶的溢油风险更大。从区域联防角度来看,多泊位码头的业主在设施设备配备、防

污染费用分担方面需要承担更多责任。

2.4 船舶艘次

进出码头的船舶艘次与溢油事故发生概率密切相关。污染事故发生概率一般是以船舶艘次或者货物吞吐量为依据,通过与本区域事故总数量及船舶总艘次或吞吐量对比算出。船舶进出艘次多的码头,交通事故的发生概率相对较高,事故引起的污染风险也随之加大。

2.5 货物吞吐量

码头货物吞吐量与船舶在港装卸时间、船舶进出港频度等密切相关,也是衡量污染事故发生概率的重要因素。同样规模的码头,吞吐量越大,事故发生的风险也就越大。

2.6 管理因素

管理因素指的码头防污染管理制度及人员配备的完善性。码头是否编制污染事故专项应急预案,管理和操作人员是否参加了船舶污染事故应急人员培训等均会对污染事故发生风险产生影响。

3 船舶污染事故区域联防成本分担的熵值模型

3.1 熵值模型

3.1.1 指标的熵值权重

熵的概念源于热力学,表示不能用来做功的热能,是热能变化量除以温度所得的商。其概念由德国物理学家 Clausius 和 Boltzman 首次提出来的,后来美国数学家、控制论及信息论创始人 Wiener 和 Shannon 提出了更广阔的信息熵,现已在工程技术、社会经济等领域得到了十分广泛的应用。采用熵理论来确定比例或者权重可消除主观影响,使得相应的研究结果更加客观可信。

在确定熵权时,要考虑到对应指标的类型。指标可分为成本型(越小越好)和效益型(越大越好)指标。

$$V^+ = \left\{ (\max_i v_{ij} | j \in J_1), (\min_i v_{ij} | j \in J_2) | i = 1, 2, \dots, n \right\},$$

$$V^- = \left\{ (\min_i v_{ij} | j \in J_1), (\max_i v_{ij} | j \in J_2) | i = 1, 2, \dots, n \right\},$$

式中: J_1 为效益型指标集; J_2 为成本型指标集。

本文中所用的影响因素均为效益指标,其分值越大,表示承担的比例越高。

设评价指标为 $u_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 码头 $j (j = 1, 2, \dots, m)$ 的第 i 个指标参数分值为 y_{ij} . $y_j^* = \max(y_{1j},$

$y_{2j}, \dots, y_{mj}$), y_{ij} 与 y_j^* 的接近度可用 d_{ij} 表示, $d_{ij} = y_{ij} / y_j^*$, d_{ij} 越大, 则评价指标 i 在综合评价中所起的作用越大; 如果某个因素的各指标分值全部相等, 则该因素在综合评价中几乎不起作用. 根据各指标的接近度 d_{ij} , 利用熵的定义, 评价指标 i 相对重要性的归一化熵值可由下式来表示:

$$e_i = -\frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^m d_{ij} \ln d_{ij}.$$

显然, $0 \leq e_i \leq 1$. 由于熵最大时, 该指标的评价贡献最小, 因此, 质量指标 u_i 的权重可由 $1 - e_i$ 来度量. 对其进行归一化处理, 得到评价指标 u_i 的权重 a_i 为:

$$a_i = \frac{1 - e_i}{n - E}, 0 \leq a_i \leq 1,$$

其中, $E = \sum_{i=1}^n e_i$, $\sum_{i=1}^n a_i = 1$, $A_i = (a_1, a_2, \dots, a_n)$.

3.1.2 码头分担比例的计算

计算得出每个码头的得分 Q_j 为:

$$Q_j = \sum_{i=1}^n a_i y_{ij}.$$

在此基础上, 确定每个码头的分担比例 D_j 为:

$$D_j = \frac{Q_j}{\sum_{j=1}^m Q_j}.$$

3.2 模型参数

根据船舶污染事故区域联防成本分担的影响因素, 建立成本分担评价指标, 主要包括污染物种类、污染量、泊位参数、船舶艘次、货物吞吐量和管理因素. 在评价指标选取时, 充分考虑了科学性、有效性、独立性等原则.

在评价指标参数分值确定时, 根据指标内涵, 污染量、船舶艘次、货物吞吐量直接使用各个码头的实际数量; 污染物种类、泊位参数、管理因素则通过专家讨论后主观赋值. 具体评价指标参数见

表 1 成本分担评价指标的参数

参数	参数表示	参数内涵
污染物种类	u_1	轻质油品为主, 参数设定为 1; 重质油品为主, 参数设定为 1.5; 化学品泄漏根据种类数量另外核算
污染量	u_2	靠泊最大船型的可能最大水上污染事故泄漏量
泊位参数	u_3	综合泊位数量和船舶艘次得出, $a_3 = k \times (1 + t_1 / t + \dots + t_i / t + \dots + t_n / t)$, k 为常数系数; t_i 为第 i 个泊位的吨级, $i = 1, 2, \dots, n$; n 为本码头总泊位数
船舶艘次	u_4	码头年平均进出船舶艘次
货物吞吐量	u_5	码头年货物平均吞吐量
管理因素	u_6	根据码头防污染制度及人员的配备情况, 分别赋值 1、2、3(数值越大, 管理情况越差)

表 2 区域内码头评价指标参数分值

码头	污染物种类	污染量/t	泊位参数	船舶/艘次	货物吞吐量/($\times 10^4$ t)	管理因素
码头 1	1.5	530	1.02	1 515	390	2
码头 2	1.5	300	1.10	756	470	2
码头 3	1.0	150	1.30	167	180	2
码头 4	1.0	150	1.00	227	84	2
码头 5	1.5	53	1.50	7	20	2
码头 6	1.0	25	2.00	107	43	2
码头 7	1.5	25	1.50	168	30	1
码头 8	1.0	17	1.00	201	30	1
码头 9	1.0	25	1.00	150	25	3
码头 10	1.5	50	1.20	80	90	1

表 3 区域内码头的成本分担比例

码头	污染物种类	污染量/t	泊位参数	船舶/艘次	货物吞吐量/($\times 10^4$ t)	管理因素	码头比例
码头 1	1.5	530	1.02	1 515	390	2	0.394
码头 2	1.5	300	1.10	756	470	2	0.254
码头 3	1.0	150	1.30	167	180	2	0.086
码头 4	1.0	150	1.00	227	84	2	0.077
码头 5	1.5	53	1.50	7	20	2	0.015
码头 6	1.0	25	2.00	107	43	2	0.029
码头 7	1.5	25	1.50	168	30	1	0.036
码头 8	1.0	17	1.00	201	30	1	0.039
码头 9	1.0	25	1.00	150	25	3	0.032
码头 10	1.5	50	1.20	80	90	1	0.038
参数权重	0.173	0.197	0.174	0.160	0.197	0.099	—

表 1.

(1)污染物种类. 黏性小、比重低的轻质油品(如柴油、汽油)易挥发, 对比黏性大、比重高的油品污染后果要轻. 所以, 如果码头进出的船舶发生事故, 可能泄漏的油品主要为轻质油, 在溢油种类参数上可取小值; 如果可能泄漏的主要油品主要为重质油, 则取大值. 对于化学品来说, 区域内的化学品码头可以根据泄漏的化学品种类来确定污染物种类参数.

(2)污染量. 污染量是确定联防参与主体责任的主要因素, 用码头靠泊最大船型的可能最大水上污染事故溢油量(或者化学品污染量)来表示.

(3)泊位参数. 泊位参数主要由泊位数量和等级按照比例累加计算得出.

(4)船舶艘次. 船舶艘次参数按照每个码头的年平均进出艘次核算.

(5)货物吞吐量. 货物吞吐量按照每个码头的年货物平均吞吐量核算.

(6)管理因素. 管理因素根据防污染制度和人员情况赋值.

3.3 数据分析

假设区域内共有 10 个码头, 码头的污染物种类、污染量、泊位参数、船舶艘次、货物吞吐量及管理因素数据见表 2.

根据前述的熵值公式计算可得各个参数的权重系数, 权重系数与码头数据乘积的归一化结果

即是每个码头应该分担的成本比例(表 3).

对于同个区域的码头联防成本分担问题, 相对于模糊 AHP 等方法, 用熵值理论进行计算能够突出差异化指标的影响, 并尽量减少主观因素的干扰, 使得成本比例核算较合理可行, 进而保障联防体系的良好运作和可持续发展.

4 结论

建立区域联防是有效提高码头防污染物资使用效率, 提升区域应急能力的重要策略. 在分析码头防污染责任影响因素的基础上, 通过熵值方法合理确定联防体系各参与主体的建设成本比例, 对于保持联防体系稳定和可持续发展非常重要. 在具体实践操作中, 要仔细辨析各个参与码头的风险, 如果有特殊的风险存在, 需要根据实际情况补充计算参数, 保证分担比例的合理性和科学性.

参考文献:

[1] 陈立家, 田延飞, 黄立文, 等. 港区船舶溢油应急联防设备库选址优化研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(7):172-176.

[2] 马强, 林建国, 李光正, 等. 码头联防体船舶污染海洋环境风险评价[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(1):142-146; 155.

[3] 刘广强, 吴东峰, 李文霆. 论港口码头企业船舶污染应急联防体建设[J]. 中国水运, 2015(9):26-27.

[4] 张运兴, 刘振涛, 田海潮. 谈京唐港码头溢油应急联防

- 体建设模式[J]. 中国海事, 2016(10):43-44.
- [5] 鲁东青. 广州港防治船舶污染海洋分区域联防联控的探索与实践[J]. 交通与港航, 2017, 4(2):63-66; 80.
- [6] 刘辉. 长三角区域环境污染联防联控[J]. 中国发展, 2019, 19(6):13-15.
- [7] Lü T, Nie Y, Wang C L, et al. Cross-regional emergency scheduling planning for petroleum based on the super-network model[J]. Petroleum Science, 2018, 15(3):666-679.
- [8] 王慈云, 刘桂云, 苏鑫, 等. 船舶污染事故区域应急联动体系的组成要素[J]. 水道港口, 2020, 41(3):340-346.
- [9] Lee M, Jung J Y. Pollution risk assessment of oil spill accidents in Garorim Bay of Korea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 100(1):297-303.
- [10] Jin W W, Wei A, Zhao Y P, et al. Research on evaluation of emergency response capacity of oil spill emergency vessels[J]. Aquatic Procedia, 2015, 3:66-73.
- [11] Amir-Heidari P, Arneborg L, Lindgren J F, et al. A state-of-the-art model for spatial and stochastic oil spill risk assessment: A case study of oil spill from a shipwreck[J]. Environment International, 2019, 126:309-320.

Research on the cost-sharing mechanism of regional emergency joint prevention of ship pollution accident based on entropy method

LIU Guiyun^{1,2}, CHEN Jiaxuan¹, ZHU Jiayi¹

(1.Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315832, China;

2.Zhejiang 2011 Port Economy Collaborative Innovation Center, Ningbo 315832, China)

Abstract: Establishing a pollution accident emergency joint prevention system within a certain area is of great significance for sharing regional emergency resources and improving ship pollution accident emergency response capabilities. Based on the analysis of the cost composition of the construction and operation of the regional joint prevention system for ship pollution accidents, this paper analyzes the influencing factors that affect the cost-sharing of the joint prevention system in terms of pollutant type, pollution volume, berth parameters, ship number, cargo throughput and management factors, etc. Based on the entropy analysis method, the cost sharing model of the joint prevention system is established. The purpose of the research is to promote the establishment of a reasonable and effective cost sharing mechanism to ensure the effective operation and sustainable development of the joint prevention system.

Key words: ship pollution; emergency joint prevention; cost sharing; entropy method

(责任编辑 章践立)