

Doi: 10.11840/j.issn.1001-6392.2018.01.005

美国化学品泄漏应急辅助决策技术体系

林雨霏^{1,2}, 郑洋^{1,3}, 许国栋¹, 谭骏¹, 梁荣贵⁴,
武江越¹, 王国善¹, 孙田力¹

(1. 国家海洋局海洋减灾中心, 北京 100194; 2. 中国海洋大学 化学化工学院, 山东 青岛 266100; 3. 中国海洋大学
环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 4. 国家海洋局日照海洋环境监测站, 山东 日照 276800)

摘 要: 随着社会经济的快速发展, 化学品生产种类不断丰富, 沿海化工企业规模不断扩大, 化学品泄漏入海对公共安全、经济发展和海洋环境造成的危害越来越突出, 加强化学品泄漏入海应急辅助决策技术体系建设已成为当务之急。美国化学品应急响应体系处于世界领先地位, 相关应急辅助决策技术体系较为完善。鉴于此, 本文概述了 CAMEO Chemicals、CAMEO suite 风险源数据管理模块和 CAFÉ 化学品数据库的指标及其作用, ALOHA 模拟和 MARPLOT 绘图软件的基本原理和功能, 以期为中国化学品泄漏入海应急辅助决策技术体系提供较好的参考。

关键词: 化学品; 泄漏; 应急响应; CAMEO; ALOHA; 突发事件

中图分类号: X928.02; X928.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932(2018)01-0033-05

US emergency response technology system for chemical leakage

LIN Yu-fei^{1,2}, ZHENG yang^{1,3}, XU Guo-dong¹, TAN Jun¹, LIANG Rong-gui⁴,
WU Jiang-yue¹, WANG Guo-shan¹, SUN Tian-li¹

(1. National Marine Hazard Mitigation Service, Beijing 100194, China; 2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 4. Rizhao Marine Environmental Monitoring Center, SOA, Rizhao 276800, China)

Abstract: With the rapid growth of social economy, the enrichment of chemical, and the scaling up of coastal chemical enterprises, the harm of chemical leakage into sea on public safety, economic development, and ocean environment has become increasingly prominent. Therefore, it is imperative to enhance the establishment of emergency assistance decision-making technology system for chemical leakage into sea. US chemical leakage emergency response system has been a world leader and related assistance technologies to make emergency decisions are perfect. In view of this, the paper summarizes the indicators and roles of CAMEO Chemicals, risk source data management module in CAMEO suite, and CAFÉ, and the principles and functions of ALOHA and MARPLOT. It provides a better reference for Chinese emergency assistance decision-making technology system for chemical leakage into sea.

Keywords: chemicals; leakage; emergency response; CAMEO; ALOHA; environmental sudden accidents

随着经济和对外贸易的高速发展, 化学品产量迅速增加, 种类不断更新, 化学品生产、使用、储存和运输等活动向海聚集。化学品本身的危险性和人为因素导致化学品泄漏事故频发。据不完全统计, 2011-2013 年, 我国共发生 569 起化学品泄漏事故, 累积死亡 638 人, 受伤 2283 人 (李建等,

2014)。海上化学品泄漏污染事故时有发生, 如天津港“8.12”危险化学品仓库特大火灾爆炸事故 (2015 年 8 月 12 日)、福建莆田“巴莱里”集装箱船搁浅事故 (2012 年 3 月 15 日)、广东汕尾“雅典娜”号沉船事故 (2012 年 3 月 13 日) 等, 严重危害了人类生命健康和财产安全, 严重威胁海洋生

收稿日期: 2017-10-09; 修订日期: 2017-11-23

作者简介: 林雨霏 (1981-), 博士, 高级工程师, 主要从事海洋环境灾害和突发事件应对研究。电子邮箱: yflin@nmhms.gov.cn。

<http://hytb.nmdis.org.cn>

态环境安全和海洋经济平稳快速发展。

化学品泄漏应急响应是指针对化学品泄漏造成的险情或灾害采取的一系列措施,主要包括事件爆发后的处置、响应及救援活动,以最大限度降低灾害损失。面对具有突发性、多变性、随机性、公害性和长久性等特征的化学品泄漏事件,如何实现高效、快速应急响应无疑是至关重要的。目前,我国初步建立了基于灾前风险防范-灾中应急响应-灾后影响评估的化学品泄漏入海应急响应技术体系,开展化学品泄漏入海风险评估与区划、影响快速评估等方法或模拟模型研究,并编制化学品泄漏入海应急预案初稿。但对于处于应急响应能力建设核心部分的应急辅助决策技术体系建设,尚处于起步阶段。

美国自 20 世纪 70 年代开始建立化学品应急辅助决策技术系统。至今,美国环保署 (Environmental Protection Agency, EPA) 的应急管理办公室和美国海洋大气管理办公室 (NOAA) 的应急响应部已共同研发了涵盖化学品数据库、化学品泄漏范围数值模拟模型及基于 GIS 的绘图展示工具的应急辅助决策技术体系 (如图 1),并集成计算机辅助管理应急操作系统 (Computer-Aided Management of Emergency Operations Suit, CAMEO suite),专门用于化学品泄漏事故应急响应、应急规划和应急人员培训。美国在化学品泄漏应急辅助决策技术方面具有丰富的经验和完善的应对机制,可为中国化学品泄漏入海应急辅助决策技术体系的建设提供很好的借鉴。

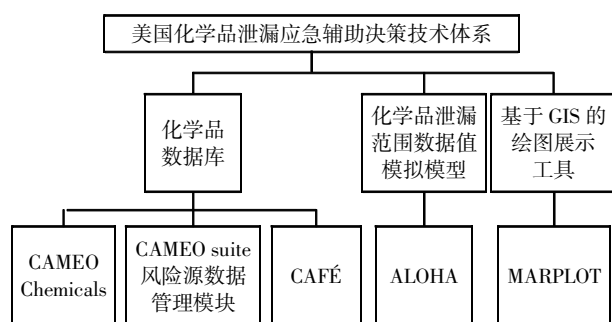


图 1 美国化学品泄漏应急辅助决策技术体系构成图

1 化学品数据库

1.1 CAMEO 化学品数据库 (CAMEO Chemicals)

CAMEO Chemicals 作为化学品泄漏应急响应的基础数据库汇总了《美国联邦法典》(Code of Fed-

eral Regulations, CFR)、《应急响应计划指南》(Emergency Response Planning Guidelines)、《美国设施反恐标准》(Chemical Facility Anti-Terrorism Standards, CFATS)、《保护设施准则》(Protective Action Criteria, PAC)、《极度危害物质化学组成和急救指南》(Extremely Hazardous Substances (EHS) Chemical Profiles and Emergency First Aid Guides)、《应急计划与社区知情权法》(EPCRA)、《综合环境反应、赔偿和责任法》(CERCLA)、《应急指导手册》(Emergency Response Guidebook)、《急性暴露水平指南》(Acute Exposure Guideline Level, AEGL)、《危险材料防火指南》(Fire Protection Guide to Hazardous Materials)、《化学危害袖珍指南》(NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards)等政策法规、标准文件和耐化学数据库 (Chemical Resistance Database)、美国国家毒理学计划数据库 (National Toxicology Program Chemical Repository Database)、化学危害反应信息系统 (Chemical Hazard Response Information System, CHRIS) 等数据库在内的化学品应急信息。

CAMEO Chemicals 涵盖约 8000 种化学品,包括化学品基本信息、UN/NA 信息和化学反应信息。该数据库为与化学品泄漏应急响应有关的核心能力提供了较为完备的数据支撑。在应急响应过程中, CAMEO Chemicals 主要功能包括: ①为应急管理和规划者提供化学品标识符、化学品危险性、应急建议等泄漏化学品基本信息; ②为 ALOHA 模拟提供参数, 如用于模拟事故污染范围的挥发、溶解系数等, 用于事故毒性伤害、闪火伤害、爆炸伤害以及火灾伤害范围划分的 CAMEO Chemicals 急性暴露指导浓度 (Acute Exposure Guideline Levels, AEGL)、紧急响应规划指导浓度 (Emergency Response Planning Guidelines, ERPG)、临时紧急暴露极限 (Temporary Emergency Exposure Limits, TEEL)、爆炸上下线等; ③基于化学品物化信息和反应基团, CAMEO Chemicals 还可以模拟两种化学品之间可能的化学反应, 判断反应物之间的相容性、预测反应过程的剧烈程度 (如爆炸等)、气压和热量变化以及潜在副产物, 评估反应产物的腐蚀性、易燃性和毒性。CAMEO Chemicals 不能模拟催化反应、3 种及以上化学品反应, 预测结果不包括反应率。

1.2 CAMEO suite 风险源数据管理模块

CAMEO suite 风险源数据管理模块是 CAMEO 化学品数据库中的化学品泄漏风险源管理工具。该模块包括化工企业、化学存储、紧急联系方式、历史事件、重点关注对象、化学输运路线、应急资源储备、危险区划分与方案筛选 8 部分。CAMEO 套件数据管理模块的数据输入格式以危险化学品存量报告中的化学品特殊信息报告表为主。根据《应急规划和社区知情权法》(The Emergency Planning and Community Right-to-Know Act, EPCRA) 规定,当有害物质数量超过一定限度时,其相关责任单位须提交一份包含工厂信息、化学品清单和联系方式等信息的化学品特殊信息报告表。CAMEO 套件可直接将化学品特殊信息报告表中信息转化至数据管理模块中,并共享至州和地方级管理者及应急人员。在应急响应中,CAMEO 套件数据管理模块提供:①化工企业的化学品清单、储运位置及线路、事故发生后化工企业紧急联系人等;②医院、学校等重点关注对象的地理位置、敏感性等数据。

1.3 化学品水环境归宿与生物毒性效应数据库 (Chemical Aquatic Fate and Effects, CAFÉ)

CAFÉ 是独立于 CAMEO 套件的化学品数据库,主要应用于化学品水环境影响评估。CAFÉ 分为水环境归宿和水生生物毒性效应模拟两部分。水环境归宿部分涵盖约 40 000 种化学品的物化参数、生物降解、环境分布等数据,数据来源为 PHYSPROP 数据库、国家医学图书馆的危险物质数据库、美国环境部颁布的国家标准、美国环保署研发的化学品定性评估套件 (Estimation Programs Interface Suite, EPI) 等。水生生物毒性效应部分涵盖超过 30000 种化学品的生物毒性数据,数据主要来自美国生态毒理数据库 (Ecotoxicology Knowledgebase, ECOTOX)、欧洲化学工业生态学与毒理学中心 (European Chemical Industry Ecology and Toxicology Centre, ECETOC) 数据库、相关文献和报告。在应急响应中,CAFÉ 可为应急人员提供:①化学品的物理属性(可燃温度、密度等)、蒸发和生物降解率、环境分布和监测分析方法数据;②针对 200 多种水生生物种在不同暴露时间(24 h、48 h、72 h 和 96 h)下的急性毒性数据;③基于生物毒性数据,CAFÉ 可绘制物种敏感度分布(SSD)曲线,并提供化学品对某物种 1%和 5%的生物个

体产生危害的危害浓度 HC1 (Hazardous Concentration for 1% of the species) 和 HC5 (Hazardous Concentration for 5% of the species) (Wheeler et al, 2002)。

2 化学品泄漏扩散预测模型

ALOHA (有害气体区域范围计算, Areal Locations of Hazardous Atmospheres,) 是美国国家海洋和大气管理响应和恢复办公室 (Office of Response and Restoration, OR&R) 唯一官方认可的化学品泄漏模拟工具。该模型根据化学品理化性质、泄漏位置、泄漏状况等信息模拟不同泄漏源(存储罐、水池或管道)化学品泄漏后的扩散路径,不同模拟情形(毒性、火灾和爆炸)产生的毒性、热辐射和冲击波等,快速预测对公共安全造成威胁的区域范围及程度,计算源强(释放速率)、浓度和剂量随时间的变化。模型基本参数包括:①基本信息:发生时间、泄漏位置(经纬度、海拔高度)、周围建筑类型及其覆盖物等;②化学品信息:化学品名称、CAS、分子量、毒性伤害阈值(优先级依次为:AEGL、ERPG、TEEL、IDLH)、沸点、蒸汽压等;③气象条件:风速、风向、温度、湿度、云层覆盖量等;④泄漏源描述:储存容器形状和大小、储存量、化学品储存形态、容器内温度等。

考虑到泄漏气团密度对附近大气风场以及泄漏化学品扩散路径的影响,ALOHA 以 Richardson 数(R_i) (孙启悦等, 2008) 为判断指标,将化学品传输扩散过程分为中性浮力气体($R_i \leq 1$, 与空气浮力相差不大的气体)传输扩散和重气($R_i > 1$, 比空气密度大的气体)传输扩散。针对中性浮力气体传输扩散,ALOHA 以常规的高斯模型为主进行模拟,基于连续排放、有风、下垫面比较开阔等条件,添加了泄漏时间的影响。对于重气泄漏,ALOHA 以重气体扩散模型(Dense Gas Dispersion Model, DEGADIS)为主。一般情况下,重气泄漏由于“重力塌陷”现象,即横向扩散扩大,垂向扩散减小,会对公共安全造成更大影响。

3 化学品泄漏绘图程序

MARPLOT (应急响应、计划和运行绘图软件,

Mapping Application for Response, Planning and Operational Tasks) 是以 GIS (地理信息系统, Geographic Information System) 软件为基础, 用于集成应急响应信息的空间数据管理系统。MARPLOT 可在地图上显示并管理 ALOHA 模拟结果、化工企业、化学品储运、学校等的地理空间信息和属性数据。在此基础上, MARPLOT 利用 GIS 的显示、绘画、注释等工具, 调整底图和显示对象, 制作用于应急响应和应急规划的专题图。

4 化学品泄漏应急辅助决策技术的应用

根据国家应急计划, 美国构建了由联邦、地区、地方 3 个层次组成的国家应急反应机制。具体应急响应程序包括接警、应急等级判断、应急响应、应急终止和后续工作这 5 部分 (如图 2)。化学品应急响应的目的是减少化学品泄漏事故对公共安全、社会经济和环境的危害。在应急响应过程中, 化学品泄漏应急辅助决策技术体系回答了“泄漏物是什么”、“如何漂移扩散”、“受损资源有哪些”、“化学品泄漏损害有哪些”和“可选择的应急措施是什么”这五个关键问题, 是开展及时有效应急响应的核心所在。

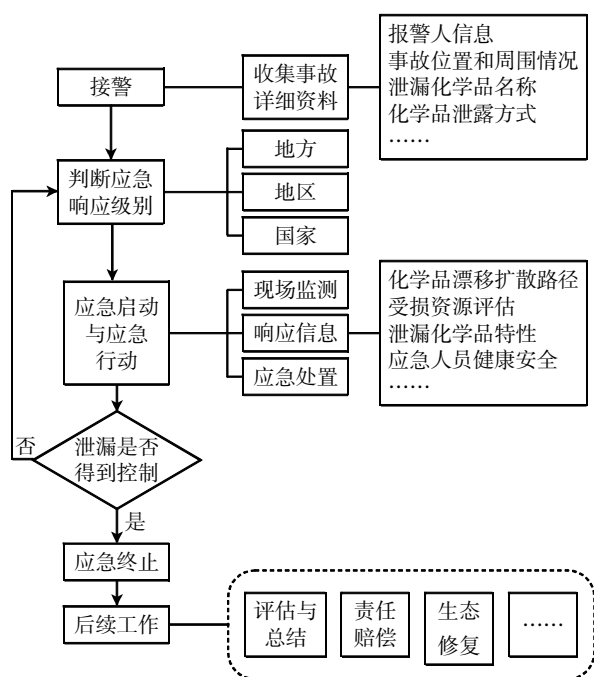


图 2 美国化学品泄漏应急响应程序图

在接到化学品泄漏报警后 1 h 内, 应急响应人员基于 CAMEO Chemicals 中的化学品物理化学性质和有毒有害化学反应预测功能, 以及 CAFÉ 中 SSD 曲线的 HC1 和 HC5 值等信息, 开展化学品泄漏的损害初评估。根据损害初评估结果, 结合 CAMEO Chemicals 中的应急处置措施和应急人身防护等信息、CAMEO suite 风险源数据管理模块中的化工企业化学品清单、应急联系人等信息, 制定具体应急处置方案。在应急响应启动 2~4 h 内, 应急响应人员利用 ALOHA 模拟出的泄漏化学品在大气或水中漂移扩散路径和不同危险等级区域, 与环境敏感资源 (Environmental Sensitivity Index, ESI) 分布图和社会经济统计值一同加载至 MARPLOT 软件中绘制出应急专题图, 分析潜在受影响的人口数量和资源量, 划定重点应急或防灾区, 进一步优化应急响应方案, 指导现场应急行动。同时, 随着应急过程中现场监测和数据不断更新, 应急响应人员需及时更新化学品泄漏模拟、损害评估和风险评估结果, 以满足现场应急响应规划的要求。

5 启示

近年来, 我国化学品泄漏入海突发事故时有发生, 相关应急响应工作面临着严峻挑战。美国是化学品泄漏频发的国家之一, 其应急辅助决策技术处于国际领先地位。通过对美国化学品应急响应技术及其在应急处置中发挥的作用进行剖析可以获得启示。

5.1 深化化学品泄漏入海应急辅助决策技术研究

借鉴 CAMEO Chemicals、CAMEO suite、CAFÉ、ALOHA 以及 MARPLOT 等美国成熟的应急技术方法, 有助于提高我国化学品泄漏入海应急响应水平。同时, 结合中国的实际, 加强国内科研成果在化学品泄漏入海应急响应中的应用, 实行精准减灾和定期的基础应急救援技能培训, 是有效建立符合我国国情的化学品泄漏入海应急响应技术体系的关键。

5.2 建立化学品泄漏入海应急响应体制

泄漏入海化学品主要来源于海上运输、港口码头存储和沿岸化工企业生产等人类活动, 其应急响应必须依靠多部门和多学科协同实现。考虑到化学品泄漏入海会严重危害海洋生态环境健康, 应建立

科学有效的化学品泄漏入海应急响应体系，明确由国家到沿海地方政府各相关部门的职责，保证应急响应迅速、高效和精准。

参 考 文 献

- Bryant D L, Abkowitz M D, 2007. Development of a terrestrial chemical spill management system. *Journal of Hazardous Materials*, 147: 78–90.
- Cao W H, Li J, Joksimovic D, et al, 2013. Probabilistic spill occurrence simulation for chemical spills management. *Journal of Hazardous Materials*, 262: 517–526.
- Emergency Response Division, 2015. An FOSC's Guide to NOAA Scientific Support. Seattle: NOAA.
- Tornero V, Hanke G, 2016. Chemical contaminants entering the marine environment from sea-based sources: A review with a focus on European seas. *Marine Pollution Bulletin*, 112: 17–38.
- Wheeler J R, Grist E P M, Leung K M Y, et al, 2002. Species sensitivity distributions: data and model choice. *Marine Pollution Bulletin*, 45: 192–202.
- 焦姣, 张静, 姬亚芹, 等, 2015. ALOHA 在突发性大气污染事故中的应用. *安全与环境学报*, 15(3): 151–155.
- 冷海芹, 孙海燕, 吴泽洪, 等, 2012. 危化品气体泄漏事故的扩散模拟研究与实现. *测绘科学*, 37(4): 73–78.
- 李健, 白晓昀, 任正中, 等, 2014. 2011–2013 年我国危险化学品事故统计分析 & 对策研究. *中国安全生产科学技术*, 10(6): 142–146.
- 刘志国, 徐韧, 蔡芑, 等, 2015. 沿岸化学品风险源环境风险评价与分级方法研究——以上海市为例. *海洋通报*, 34(4): 475–480.
- 路文海, 曾容, 向先全, 2013. 沿海地区海洋生态健康评价研究. *海洋通报*, 32(5): 580–585.
- 牟乃夏, 李继领, 刘峰, 等, 2015. 基于 petri 网的海上溢油应急处置 workflow 建模方法研究. *海洋通报*, 34(1): 72–75, 82.
- 齐平, 2006. 我国海洋灾害应急管理研究. *海洋环境科学*, 25 (4): 81–87.
- 孙启悦, 修光利, 张大年, 2008. CAMEO 在突发性环境污染事故应急中的应用. *安全与环境学报*, 8(3): 145–149.
- 汪靖, 林植, 靳焰, 2010. 海洋交通风险应急决策系统设计与实现. *海洋通报*, (1): 101–105.
- 文仁强, 黄全义, 黄东海, 2008. 危化品泄漏扩散预测模型与 GIS 集成及其在应急决策中的应用研究. *测绘通报*, 4: 52–54.
- 许国栋, 2014. 我国海洋灾害应急管理实现机制研究. *海洋环境科学*, 33(4): 621–630.
- 杨军, 杨玉胜, 2014. 危化品泄漏毒害区域边界快速确定方法. *安全与环境学报*, 14(6): 22–35.
- 杨振姣, 2010. 我国海洋突发事件应急管理中存在的问题及对策. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 41(3): 420–423.
- 叶涛, 郭卫平, 史培军, 2005. 1990 年以来中国海洋灾害系统风险特征分析及其综合风险管理. *自然灾害学报*, 14(6): 65–70.
- 张绪良, 2004. 山东省海洋灾害及防治研究. *海洋通报*, 23(3): 66–72.
- 张云峰, 张振克, 张静, 等, 2013. 欧美国家海洋空间规划研究进展. *海洋通报*, 32(3): 352–360.
- 赵来军, 吴萍, 许科, 2009. 我国危险化学品事故统计分析 & 对策研究. *中国安全科学学报*, 19(7): 165–170.

(本文编辑: 袁泽轶)