

· 专论与综述 ·

危险化学品事故应急反应大气扩散模型及系统概述

张建文¹, 安宇², 魏利军³

(1. 北京化工大学经济管理学院, 北京 100029; 2. 北京化工大学化学工程学院, 北京 100029;

3. 中国安全生产科学研究院, 北京 100029)

摘 要:介绍了大气扩散模型的类型,以及当前应用较为广泛的 SLAB、DEGAD IS、ALOHA、ARCH IE 等应急反应大气扩散模型,概述了当前国际上较为知名的 HGSYSTEM 系统、NAME 系统、SAFER 系统、NARAC 实时操作应急系统、CAMEO 系统、GASTAR 系统、GASMAL 系统的结构与应用进展。指出应加强应急反应大气扩散模型和系统的研究与应用,建立健全应急反应体系,实现对突发性化学事故的有效控制。

关键词:环境事故;大气扩散模型;应急反应系统;危险化学品

中图分类号: X928 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-2009(2008)02-0007-05

Introduction of Atmospheric Dispersion Models and Systems for Emergency Response on Chemical Accidents

ZHANG Jian-wen¹, AN Yu², WEI Li-jun³

(1. School of Economics and Management, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2. College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

3. China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The types of atmosphere model were introduced as well as the current widespread used emergency response atmosphere diffusion models such as SLAB, DEGAD IS, ALOHA, ARCH IE and so on. The structures and developments of well-known HGSYSTEM system, the NAME system, the SAFER system, the NARAC real-time operation emergency system, the CAMEO system, the GASTAR system, the GASMAL system were described. The establishment of perfect emergency response system should base on the model and system of emergency response atmosphere diffusion to realize emergency chemistry accident control.

Key words: Environmental accidents; Atmosphere diffusion model; Emergency response system; Dangerous chemical

现代石油化工和其他相关行业生产、储存和使用各类有毒气体和液体,这些物质若处理不当或疏于管理,会引发严重的化学事故,给人类社会、环境造成严重的危害^[1-2]。如 1984 年位于印度博帕尔的美国联合碳化物公司所属农药厂的甲基异氰酸酯意外泄漏事件^[3]; 1979 年温州电化厂液氯泄漏事件^[4]; 2006 年四川仁寿县富加镇天然气输气管线爆炸事故等^[5]。为减少化学事故造成的危害和损失,相关部门必须对事故作出快速高效的处理。近年来,采用数学模型对危险气体释放扩散过程进行计算机模拟成为一种必备手段。

1 大气扩散模型概述

大气扩散模拟发展于 20 世纪 30 年代,至今已有上百种大气扩散模型^[6],但并非所有的模型都能用于应急反应。美国能源部(DOE)要求应急反应大气扩散模型能提供初始或连续评估^[6],能被

收稿日期: 2007-03-14; 修订日期: 2008-01-10

基金项目: EU-China Environment Management Cooperation Programme 基金资助项目; 国家科技支撑计划基金资助项目(2006BAK01B03)

作者简介: 张建文(1969—),男,山西夏县人,教授,博士,研究方向为化工安全与环境工程。

消防、救援人员用于快速污染评估与实施救援,或在时间允许的情况下用于持续评估。大气扩散模型按计算特定源对大气中有害组分浓度的贡献,一般可划分为筛选模型、监测模型和应急模型。筛选模型包括 SCREEN3、TSCREEN、V ISCREEN、CT-SCREEN 等;监测模型包括 ISCST3-Industrial Source Complex-Short Term、ISCLT3-Industrial Source Complex-Long Term、ISC-PR ME-Industrial Source Complex-Plume Rise Model Enhancements、AERMOD、CAL NE3、CAL NE4、CAL3QHC、FDM、Models-3/CMAQ、ADMS 等;应急模型包括 SLAB、DEGAD IS、ALOHA、ARCH IE 等。

2 应急响应大气扩散模型

2.1 SLAB 模型

SLAB 模型由美国能源部劳伦斯 - 利弗莫尔 (Lawrence Livermore) 国家实验室^[6]开发,是用于重气释放源的大气扩散模型,能处理 4 种不同的释放源:地面池蒸发、高于地面的水平射流、一组或高于地面的射流,以及瞬时体积源^[6]。SLAB 模型通过云层分布的空间平均浓度和某些假定分布函数来计算时间平均扩散气体浓度^[7],以空气卷吸作用为假设前提,计算大气湍流云层混合和源于地面摩擦影响的垂直风速变化^[8]。在预测浓度随时间变化方面,SLAB 模型在稳定、中度稳定及不稳定的大气环境下均能得到较好的预测结果^[9]。其优点是使用简单、快速^[8],不足之处是未考虑有建筑物存在和地形变化的复杂情况,以及高度方向的浓度变化^[10]。

SLAB 模型已用于内部边界层变化预测,且预测结果较好。刘和平等曾应用 SLAB 模型预测了中国香港地区在选择风向条件下内部边界层的变化,但由于该地区具有复杂地形和锯齿状海岸线等特点,难以对内部边界层高度作出正确预测^[10]。

2.2 DEGAD IS 模型

DEGAD IS 模型由美国海岸警备队和气体研究所开发,能对短期环境浓度及预期将暴露在高于特定有毒化学品限制浓度水平的区域进行精细模拟评估^[11]。其基本模型是标准形式的高斯扩散模型,主要优点是:①作用于高密度蒸气重力对扩散和混合的影响;②风导致的燃气收聚作用;③对区域而不单是对点的实际处理;④泄露状况随时间改变情况。局限在于只能限制于由平面泄露的燃气

泄漏后果预测,只考虑了燃气云在光滑表面的泄漏扩散,而没有考虑有障碍物的情况^[12]。

DEGAD IS 是一个综合扩散后果模型,已在全世界应用于评估高危险性的高密度燃气和气溶胶泄露事故后果。1992 年,美国用其计算了规范要求的液化天然气扩散防护区域^[12];2003 年,研究者用其对意大利北部一农药生产线 HCl 气体泄漏的安全性进行了分析^[13];我国北京染料厂的危险源预警监测监控系统将其用于有毒有害气体动力扩散模型的重气仿真部分^[14]。

2.3 ALOHA 模型

ALOHA (Area Location of Hazardous Atmospheres, 有害大气区域定位)模型利用提供的信息和自身的综合化学物性参数库,预测发生化学事故后,有害气云如何在大气中扩散^[15]。能处理的问题包括^[15]:①洒在地面的液体蒸发(不能处理洒在水面的液体);②基面向蒸气云的传热;③压力容器的气体、液体及气溶胶质量通量;④闪蒸;⑤气溶胶对未闪蒸液体的夹带。不能处理的问题包括^[15]:①多组分混合物;②气溶胶蒸发;③燃烧、爆炸和化学反应副产物;④散粒、岩体和危险物碎片。ALOHA 模型在使用中存在着以下限制^[15]:①极低风速时,计算可接受最低风速为 10 m 高处的平均风速 1 m/s;②非常稳定的大气条件;③风速变化和地形变化影响;④浓度突变区域,特别是在释放源附近。

ALOHA 模型最初被美国国家海洋大气局 (NOAA) 用作室内工具^[15],经多年的发展,成为反应、规划、培训及学术研究工具。Chakraborty 等用 ALOHA 模型对 1993 年发生在美国阿华州得梅因的一起液氯泄漏事故进行了评价,考虑了事发地附近的复杂地形条件^[16]。2005 年,Alhajraf 等将 ALOHA 模型应用于科威特油田实时反应系统,预测了危险区域瞬时泄漏的有害烟团释放方向和浓度,计算结果可迭加在整个区域的卫星图片上,使预测结果更易理解^[17]。

2.4 ARCH IE 模型

ARCH IE (Automated Resource for Chemical Hazard Evaluation, 化学危害品评估自动资源)模型能模拟燃烧、爆炸的有害物(非霰弹有害物)及大气扩散过程^[18],计算在多种条件下各种储罐、管线和容器的逸出率及逸出化学品的挥发速率,并以表格形式输出结果。该模型集合了高斯烟团模型的

许多特点,可以为危险物释放到大气后产生的蒸气扩散、火灾和爆炸影响评估提供若干种完整的评价方法^[19]。虽未提供化学数据库,但可在线储存事故场景文件,包括必要的化学性质信息。模型本身不包含重气扩散模型,因而不能处理重气扩散。模型假设所有气体都是中性浮力气体且沿下风方向扩散,不能用于粗糙地面或相对潮湿的扩散计算,因而常被用于模拟挥发化学品在泄漏点沿顺风方向的扩散^[18]。

目前 ARCHIE 模型已经在美国联邦危机管理局 (FEMA)、运输部 (DOT) 及环保署 (EPA) 得到应用。在我国,天津消防科学研究院的秘义行等采用该模型对液化石油气泄漏事故进行了研究,用其模拟持续泄漏的释放速率、蒸气云的形成和闪燃、沸液蒸气爆炸等,并确定了液化石油气事故处置的区域半径^[19]。

3 应急响应系统

3.1 HGSYSTEM 系统

HGSYSTEM 系统由美国壳牌研究有限公司 (Shell Research Inc.) 在 20 家化工和石油化工公司的支持下开发,用于评估蒸气从气体、液体的扩散或包括多元混合物的两相释放,最初用于模拟有浮力的中性气体或重气、氟化氢及理想气体的释放 (1.0 版),后来扩展到模拟多元混合物的释放 (3.0 版)。

HGSYSTEM 系统可用于模拟以下几种泄漏情形^[20]: ①压力容器的孔或管线破裂; ②容器破裂产生的瞬时泄漏; ③孔或烟囱的泄漏; ④溢出物的蒸发。HGSYSTEM 3.0 主要用于轻、重、中气体及 HF 和 UF₆ 的释放与扩散,但在模拟原始组成和释放方向上有限制,可用于气体逸出、闪喷、蒸发池、重气扩散、纯扩散过程及伴有化学反应的 UF₆ 气体扩散。当用于伴有化学反应的事故时,其基础模型是一套用于模拟气体和云的稳定轨道的方程组,可用于 UF₆ - H₂O 和 4HF - UO₂F₂ 反应体系模拟^[21]。

3.2 NAME 系统

NAME (Nuclear Accident Management) 系统为英格兰的核事故管理模型,主要用于偶发放射性物质排放到地球大气时的应急处理,是事故分析的重要工具,也能用于非核事故的应急^[22]。通过跟踪流体粒子的三维轨迹,采用蒙特卡罗方法计算空气

浓度,将大量的粒子释放到“模拟大气”来模拟事故地点的真实释放。每个粒子代表一团空气,其中含有一种或多种污染物,被模拟风携带并以随机游走方式扩散。在模型限度内,使用的粒子越多,积分结果越精确,但消耗的计算时间也越长^[23]。

NAME 系统已在多种警报和失效事故中应用,也曾用于模拟科威特油田大火。英国的 Maryon 等用该系统对 1986 年发生在苏联乌克兰北部切尔诺贝利的 Cs-137 泄漏事故的前 108 h 进行了模拟^[24]。2006 年,英国的 Nelson 等用其对 1954 年发生在英国坎伯兰海岸的放射性物质泄漏进行了研究,验证了放射性物质传递的方向和时间,指明了事故中放射性物质在欧洲范围的最大可能扩散区域^[25]。

3.3 SAFER 系统^[26]

SAFER 系统是由美国加州 SAFER 系统有限公司开发的实时集成化学事故应急管理软件。实时反应系统是 SAFER 的固定应急反应工具,与天气和气体传感器数据连接。当发生紧急事故时,启动系统决策对事故进行应对和处理。在应急管理、快速生成结果及记录事故过程中,实时系统易于使用并能快速集中结果。

在最新的 SAFER 实时反应系统中,加入了拥有专利权的高级反算功能。该算法依靠在线更新的大气数据和现场测量的泄漏物浓度变化等变量,可以迅速估算出物质的泄漏速率,更加准确地判断泄漏源强。若在事故过程中风向等因素发生变化,实时反应系统则不断监测并更新大气数据,根据最新数据实时演算,模拟气云的扩散和运动情况,结果迭加在 GIS 地图上,并在用户的操作界面显示危险区域位置。

SAFER 系统目前已广泛应用于化工生产、石油炼制、运输、造纸、制药等行业,同时也是员工培训、练习、事故分析及校核应急反应计划的良好工具。自 1988 年以来,SAFER 系统就应用于美国杜邦化学公司对德克萨斯州萨宾河的应急反应计划与预案管理。1996 年,美国发生了一起由火车出轨引起的液化石油气泄漏事故,在其后的 14 d 中,SAFER 系统作为辅助手段成功得到应用^[27]。

3.4 NARAC 实时操作应急系统

美国国家大气释放咨询中心 (NARAC) 提供了一套针对有害物质的范围广泛的多尺度大气流动和扩散模型,可处理核、放射性、化学、生物及自然

泄放。其特色在于^[28]: ①自动设置、经过校核的实时 3-D 集成模拟系统,能模拟复杂的风流、详尽的颗粒扩散、多种空间尺度的干湿沉降过程; ②实时重新设置世界任何地点; ③具有核爆炸沉降模型; ④快速、便于应用的局部扩散模型。

NARAC 模拟系统多年来经过了大量的检验,已成为一个有效、稳定的应急响应系统。应用实例包括:切尔诺贝利核电站事故、科威特油田大火、轮胎火灾、工业事故、西班牙阿尔赫西拉斯铯释放 (Algeciras Spain Cesium)、1999 年日本东海村核转化工厂临界事故 (Tokaimura Criticality Incident)、2000 年洛思阿拉莫斯 Cerro Grande 森林火灾、后“9·11 威胁”等。

3.5 CAMEO 系统^[29]

CAMEO (Computer Aided Management of Emergency Operation, 应急行动计算机辅助管理)是一套用于化学紧急事故规划制定和应急反应的软件系统,由 CAMEO 研究小组为化学事故应急计划人员和应急反应人员开发,包括数据库模块、ALOHA 毒性气体扩散模型和 MAPLOT 电子地图。

CAMEO 系统有两种主要应用方式,一是获取、储存并评估有害物质事故应急响应所需要的信息;二是为公众提供有害物质应急计划。其化学数据库能够对超过 6 000 种化学物质提供应急响应推荐模式,还包括 80 000 个化学同义词和标识号,在事故发生时可以快速搜索、辨别化学物质,并提供消防和泄漏反应推荐模式、物性、健康危害及急救指南。该系统还可用于预测两种或多种化学物质混合时潜在的反应性能,与化学反应性工作表所提供的功能相同。

CAMEO 系统已被联合国环境计划 (UNEP) 选为帮助发展中国家对化学事故预警和反应的工具,并列为 UNEP 地区级告知与应对计划 (APPELL) 的一部分。目前该系统已在 50 个国家进行了演示或教学,作为 APPELL 公众化学事故预警研讨会的一部分,已被翻译成法语和西班牙语,美国的 Chakraborty、科威特的 Alhajraf 等都曾用其进行过相关的模拟研究^[18-19]。

3.6 GASTAR 系统

GASTAR 是英国剑桥环境研究咨询公司 (CERC) 开发的重气扩散模拟系统,用于模拟可燃物和有毒物质释放的安全、事故及应急反应,效果比较理想。除了一般性事故如连续释放、瞬时释

放、动量射流源、重气和中性释放外, GASTAR 系统还可对地形 (地面坡度和粗糙度变化) 和障碍物 (多孔栅栏和建筑物) 影响、池塘上吸模型、时变释放及可能沿不同方向的射流等模拟。采用云团的不同守恒律及最近扩散研究获得的半经验关系式,计算云团的空间平均性质、下风方向变化,提供任意点的云团分布情况,同时具有计算坡度、障碍物等影响的新功能。系统还带有常见毒性物质和可燃物质物性数据库,用户可根据需要加入更多的物质^[30-31]。

GASTAR 系统已经过大量的校核, Hanna 等^[32]的比较校核表明其对平坦地形的标准数据输入使用效果最好。该系统已被英国健康和安全理事会选用,其应用包括 LNG 泄漏、可燃烃类废料射流和现场安全规划。

3.7 GASMAL 系统^[26]

GASMAL 是由荷兰应用科学研究院 (TNO) 开发的决策支持系统,包括用户界面、计算模块、数据文件 3 个模块。用户界面是系统的核心,是工作表的电子版本,使用户能够通过计算机屏幕与系统通讯;计算模块基于事故位置、所涉及的有毒化学品及天气状况,确定浓度模板或色标;数据文件包括危险化学品及其特性数据。

GASMAL 3.1 与 GIS 系统结合形成了 GASMAL - GIS 地理信息系统,其应用范围包括一系列与化学事故及其涉及化学物质性质相关的问题。通过设定的问题,引导用户选择浓度色标 (透明的雪茄状等值线图,可直接迭加在事故区域地图上)。该系统可帮助用户快速、连贯地了解事故影响区域的总体状况,主要优点是省时、误差范围降低,能够直接在地图上显示结果及其他重要信息,并针对不同化学品和气象条件迅速改变等值线显示。此外,警报和监测专家能够使用自己的地图,而不必使用昂贵的电子地图。系统为了便于现场消防人员使用,还制作了快速使用模板,包括 7 张连续源和 7 张离散源算图,根据源的特性、天气状况、事故时间、风向、风速,在几分钟内即可确定事故影响的区域和程度。

目前 GASMAL 系统已应用于地方消防局、环境服务机构及化学工业。在荷兰 Rijnmond 化工区及上海化工区实地进行图上作业时,普通消防人员应用该系统在几分钟内即可判定事故危害区域及程度。

4 结语

(1) 大气扩散模型是大气环境监测、化学事故应急响应与疏散管理的基础, 应急响应大气扩散模型是应急响应系统的核心, 文中介绍了 4 种常用模型。

(2) 文中介绍了目前广泛应用的 7 种应急响应系统, 所采用的气体扩散应急响应模型各不相同, 数值计算方法也各异, 因开发、应用背景的不同而各具特点, 适用于不同情况并能满足不同要求。近年来, 应急响应系统已逐渐与地理信息系统相结合, 对缩短响应时间、提高应急效率起到了重要作用。

(3) 应急响应系统已广泛应用于石油、化工、运输、造纸、核能等多个领域, 也成为员工培训、员工练习、事故分析及校核应急响应计划的良好工具。在对多种国际重大突发化学事故的处理和评价过程中, 应急响应系统都得到了应用, 有效降低了事故给生命和财产带来的威胁。

(4) 近年来, 突发性化学事故时有发生, 并存在着数量持续增加的势头^[33]。要实现对突发性化学事故的有效控制, 应加强预防, 建立健全应急响应体系, 提高事故处理的应变能力, 规范事故管理。因此, 应加强应急响应大气扩散模型和系统的研究, 其应用空间也将更加广阔。

参考文献

- [1] 杜建科. 毒气泄漏过程及其危险区域分析[J]. 中国安全科学学报, 2002(12): 55 - 59.
- [2] 程云书. 化学事故应急救援知识讲座[J]. 劳动保护, 2003(10): 20 - 22.
- [3] 冯志华, 聂百胜. 危险气体泄漏扩散的实验方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2006(7): 18 - 23.
- [4] 高建明, 曾明容. 我国危险化学品安全生产现状与对策[J]. 中国安全生产科学技术, 2005(3): 52 - 55.
- [5] 冯雪梅. 4 000 余处“火山口”威胁输气动脉[N]. 四川日报, 2006 - 07 - 28(6).
- [6] MAZZOLA C A, ADDIS R P. Atmospheric dispersion modeling resources[M]. 2th ed United States: United States Department of Energy, 1995: 10 - 172.
- [7] ERMAK D L. User's manual for SLAB: An atmospheric dispersion model for denser-than-air releases[M]. USA: Lakes-Environmental, UCRL-MA-105607, 1997.
- [8] SKLAVOUNOS S, RIGAS F. Simulation of coyote series trials Part I: CFD estimation of non-isothermal LNG releases and comparison with box-model predictions[J]. Chemical Engineering Science, 2006(61): 1434 - 1443.
- [9] 潘旭海. 事故性泄漏动力学过程的理论与实验研究[M]. 南京: 南京工业大学出版社, 2004.
- [10] L U H P, CHAN J C L, CHENG A Y S. Internal boundary layer structure under sea-breeze conditions in Hong Kong[J]. Atmospheric Environment, 2001(35): 683 - 692.
- [11] DALLBAUMAN L. Safe sitting and operation of liquefied natural gas facilities: software update[J]. Gas TIPS, 2004(6): 24 - 25.
- [12] 彭世尼, 段萍. LNG 泄露后果的预测模型[J]. 重庆大学学报, 2006(29): 93 - 96.
- [13] RIGAS F, KONSTANDINIDOU M, CENTOLA P, et al. Safety analysis and risk assessment in a new pesticide production line[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2003(16): 103 - 109.
- [14] 杨铸, 谢增信, 李增源, 等. 多种有毒易燃气体并存的预警监测监控系统[J]. 中国安全科学学报, 2000(10): 73 - 77.
- [15] U. S. Environmental Protection Agency, National Oceanic and Atmospheric Administration. ALOHA: A real-time locations of hazardous atmospheres-user's manual[M]. U. S. NOAA (EPA) Publication, 2006.
- [16] CHAKRABORTY J, ARMSTRONG M P. Using geographic plume analysis to assess community vulnerability to hazardous accidents[J]. Computer, Environment and Urban Systems, 1996(16): 341 - 356.
- [17] ALHAJRAFI S, AL-AWADHI L, AL-FADALA S, et al. Real-time response system for the prediction of the atmospheric transport of hazardous materials[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2005(18): 520 - 525.
- [18] EVANS M. ALOHA™ and ARCHIE: A comparison[R]. U. S. NOAA (EPA) Publication, 1993.
- [19] 秘义行, 杜霞. 液化石油气 LPG 泄漏及火灾事故的早期救援[J]. 消防技术与产品信息, 2002(10): 55 - 59.
- [20] Shell Research Inc. HGSYSYSTEM technical reference manual[M]. UN: Shell Research Inc. Publication, 2001.
- [21] HAVENS J A, SPICER T O. Development of an atmospheric dispersion model for heavier-than-air gas mixtures, CG-D-22-85[R]. Fayetteville Arkansas: University of Arkansas Chemical Engineering Department, 1985.
- [22] NELSON N, KITCHEN K P, MARYON R. Assessment of routine atmospheric discharges from the sellafeld nuclear installation-Cumbria UK[J]. Atmospheric Environment, 2002(36): 3203 - 3215.
- [23] CULLEN M J P. The unified forecast/climate model[J]. Meteorological Magazine(UK), 1993(1449): 81 - 94.
- [24] MARYOM R H, BEST M J. Estimating the emissions from a nuclear accident using observations of radioactivity with dispersion model products[J]. Atmospheric Environment, 1995(29): 1853 - 1869.
- [25] VENKATESAN R, MATHIYARASU R, SOMAYAJI K M. A study of movement of radioactive material discharged during the windscale fire in October 1957[J]. Atmosphere Environment, 2006(36): 2933 - 2942.

(下转第 21 页)

30.7 mg/kg, Zn 为 1.01×10^3 mg/kg, 2.48×10^3 mg/kg 和 156 mg/kg, Cu 为 42.9 mg/kg, 68.8 mg/kg 和 69.4 mg/kg, 废水排泄沟和霜降河底泥重金属明显高于武江段。整个区域底泥重金属 Pb、Zn、Cu 最高值分别为 3.76×10^3 mg/kg, 3.71×10^3 mg/kg 和 97.6 mg/kg, 远远高于对照点质量比。与全球背景值相比, 武江 (乐昌段) 水道沉积物中重金属污染严重程度为 $Pb \approx Zn \gg Cu$ 。

(2) 3 段支水道中污染程度最为严重的是霜降河段, 其次是矿山废水排泄沟段, 武江干流段则最低, 相应污染负荷指数 I_{PL} 值分别是 14.0、10.6 和 1.46, 表明相应污染程度为极强度污染、极强度污染和中度污染。整个研究区域 I_{PL} 值为 6.19, 达到极强度污染程度。

(3) 与国家农用污泥标准相比, 霜降河和废水排泄沟段底泥危险性非常高, 不宜农用; 而武江底泥则可安全用于农业用途。底泥疏浚安全性评估表明, 上述两段水道底泥需要进行疏浚和转运, 且在过程中需加以特别防范, 以防止污染物泄露, 而武江段底泥则基本无需疏浚, 疏浚与转运过程中无需特别安全防范措施。

[参考文献]

- [1] STEELE J H. The structure of marine ecosystems[M]. Cambridge MA: Harvard University Press, 1974.
- [2] WRIGHT P, MASON C F. Spatial and seasonal variation in heavy metals in the sediments and biota of two adjacent estuaries, the orwell and the stour, in eastern england[J]. The Science of the Total Environment, 1999, 226: 139 - 156.
- [3] SOTO D, JARA E. Using natural ecosystem services to diminish salmon - farming footprints in southern chile[C]// Bert T M. Ecological and Genetic Implications of Aquaculture Activities Netherlands: Springer, 2007: 459 - 475.
- [4] USEPA. Update: Listing of fish and wildlife advisories, Fact Sheet(EPA Publication No. EPA - 823 - R - 97 - 007) [R]. Washington DC: Office of Water, USEPA, 1997.
- [5] 利锋, 韦献革, 余光辉, 等. 佛山水道底泥重金属污染调查[J]. 环境监测管理与技术, 2006, 18(4): 12 - 14, 18.
- [6] 沈敏, 于红霞, 邓西海. 长江下游沉积物中重金属污染现状与特征[J]. 环境监测管理与技术, 2006, 18(5): 15 - 18.
- [7] 牛红义, 吴群河, 陈新庚. 珠江 (广州河段) 表层沉积物中的重金属污染调查与评价[J]. 环境监测管理与技术, 2007, 19(5): 23 - 25.
- [8] 城乡建设环境保护部环境保护局. 环境监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1986.
- [9] TOMLINSON D L, WILSON J G, HARRIS C R, et al. Problems in the assessment of heavy metal levels in estuaries and the formation of a pollution index[J]. Helgolander Meeresunters, 1980, 33: 566 - 575.
- [10] FÖSTNER U, WITTMANN G T W. Metal pollution in the aquatic environment 2nd Edition[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1981: 133 - 135.
- [11] 许炼烽, 刘腾辉. 广东土壤环境背景值和临界含量的地带性分异[J]. 华南农业大学学报, 1996, 17(4): 58 - 62.
- [12] 李朝方, 赖炳秀. 深圳市河道淤泥污染程度分析[J]. 中国农村水利水电, 2006(9): 47 - 50.
- [13] 中国 21 世纪议程管理中心, 环境无害化技术转移中心. 化学工业区应急响应系统指南[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 83 - 89.
- [14] SAFER. Real-time integrated software for chemical emergency management[EB/OL]. [2007 - 02 - 04]. <http://www.safersystem.com>.
- [15] DILLON M B, BASKETT R L, FOSTER K T, et al. The NARAC emergency response guide to initial airborne hazard estimates[M]. U. S: NARAC Publication, 2004.
- [16] U. S. Environmental Protection Agency, National Oceanic and Atmospheric Administration. CAMEO: Computer-aided management of emergency operations[M]. U. S: NOAA (EPA) Publication, 2004.
- [17] CERC. Gastar-dense gas dispersion model[EB/OL]. [2007 - 02 - 04]. <http://www.cerc.co.uk/software/gastar.htm>.
- [18] LUKETA-HANLIN A. A review of large-scale LNG spills: Experiments and modeling[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006(A132): 119 - 140.
- [19] HANNA S R, CHANG J C, STRAMITIS D G. Hazardous gas model evaluation with field observations[J]. Atmosphere and Environment, 1993(27A): 2265 - 2285.
- [20] 郁建桥, 张璘, 徐亮, 等. 环境污染事故应急监测装备的配置思路[J]. 环境监测管理与技术, 2007, 19(2): 4 - 6.

本栏目责任编辑 姚朝英

(上接第 11 页)

- [26] 中国 21 世纪议程管理中心, 环境无害化技术转移中心. 化学工业区应急响应系统指南[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 83 - 89.
- [27] SAFER. Real-time integrated software for chemical emergency management[EB/OL]. [2007 - 02 - 04]. <http://www.safersystem.com>.
- [28] DILLON M B, BASKETT R L, FOSTER K T, et al. The NARAC emergency response guide to initial airborne hazard estimates[M]. U. S: NARAC Publication, 2004.
- [29] U. S. Environmental Protection Agency, National Oceanic and Atmospheric Administration. CAMEO: Computer-aided management of emergency operations[M]. U. S: NOAA (EPA) Publication, 2004.
- [30] CERC. Gastar-dense gas dispersion model[EB/OL]. [2007 - 02 - 04]. <http://www.cerc.co.uk/software/gastar.htm>.
- [31] LUKETA-HANLIN A. A review of large-scale LNG spills: Experiments and modeling[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006(A132): 119 - 140.
- [32] HANNA S R, CHANG J C, STRAMITIS D G. Hazardous gas model evaluation with field observations[J]. Atmosphere and Environment, 1993(27A): 2265 - 2285.
- [33] 郁建桥, 张璘, 徐亮, 等. 环境污染事故应急监测装备的配置思路[J]. 环境监测管理与技术, 2007, 19(2): 4 - 6.

本栏目责任编辑 姚朝英