基于 CHARM 的复杂地形下风险评估方法

胡翠娟 丁 峰 伯 鑫 易爱华

（环境保护部环境工程评估中心）

摘 要 针对复杂地形条件下有毒有害物质泄漏问题，采用 CHARM 模型对污染物扩散进行模拟。算例表明，该模型能够有效用于有毒有害物质在复杂地形下泄漏扩散的精细分析，能确定污染物聚集高浓度区域、致死概率分布曲线，对于我国复杂地形下的环境风险评价具有一定的参考价值。

关键词 复杂地形 CHARM 风险评估

一、前 言

随着经济的飞速发展，近年我国突发性环境污染事故频发，特别是一些重特大事故的发生对社会安定和民众健康带来了严重的危害。据统计，2002－2011 年，我国共发生较大突发环境污染事件 849 起，其中大气污染事件 354 起，占总数的 41.7%[1]。日益频发的突发性环境污染事故不仅对人类健康造成威胁，对群众财产造成损失，还可能造成混乱，危害社会稳定；突发性环境污染事故已经成为构建和谐社会的严重挑战。因此必须加强环境风险评价，科学预测突发性事故可能产生的危害程度和危害范围，提出环境风险防范和应急管理措施。

石化行业涉及到大量危险化学品的生产和储存，一旦发生泄漏事故，对环境可能产生较大影响，是环境风险评价的重点关注行业。危险化学品泄漏形成的气云在空气中扩散，根据其与空气密度的差异，可分为重气体、中性气体和轻气体。根据原劳动部的有关统计数据，在因毒物泄漏造成的人员伤亡中，约有 90% 与重气泄漏有关[2]。

重质气云沿地表进行扩散，地形是影响其扩散的重要因素。对复杂地形，重气受下垫面特性的影响很大，从而在水平和垂直方向上形成非常特殊的流场和浓度场，同时又由于地形的阻塞与分流，使得复杂地形上的气体扩散和稀释规律比平坦地面复杂得多，因此，采用合适的方法对复杂地形下的有毒有害物质扩散进行模拟具有重要的意义[3]。

本文以福建某复杂地形下工业园区风险评价为例，介绍一种基于 CHARM 的风险评估方法，以期为复杂地形下环境风险评价提供参考。

二、模型介绍

目前用于模拟危险物质泄漏扩散的方法较多，如 SLAB、DEGADIS、UDM、AFTOX、CHARM、FEM3C 等模型[4,5]，各模型均有其优缺点和适用范围。综合考虑模型适用条件，本文选择 CHARM 模型对复杂地形下的有毒有害物质扩散进行模拟。

CHARM（Complex Hazardous Air Release Model）是一个基于有限差分的三维欧拉网格模型（3D Eulerian grid model），由 Mark W. Eltgroth 博士于 1981 年开发，是一个集源模型和扩散模型于一体的综合性模型。该模型能较好的模拟地形变化对扩散的影响，并在 1991 年 EPA 进行的重气体扩散模型验证中表现良好[6]。

CHARM 对三维风场的描述采用 West Wind Field 模型，通过诊断模式，使用一个或多个气象资料用于对整个区域气象场的风速风向进行初猜，然后根据地形数据进行反复迭代计算调整，使

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

得三维辐散达到最小值，以获得风场所受到的地形动力学影响。

此种模式采用固定于地面的坐标系统，利用有限差分法法求出各个网格上的浓度，垂直方向速度分量根据空气与网格内污染物密度差异进行调整，因此既可以考虑浮力抬升的作用，也可以考虑重气下沉影响，适用于轻气体、中性气体和重气体的扩散。CHARM 可用于模拟反应性物质的扩散，此一模式考虑垂直温度结构对风及扩散的影响，同时也考虑地形效应，因此适合于复杂地形地区使用[7]。

CHARM 中采用的控制方程组如下。

守恒参数（p－动量和能量）控制方程：

$$-\frac{\partial up_i}{\partial x}-\frac{\partial vp_i}{\partial y}-\frac{\partial wp_i}{\partial z}$$

$$\frac{\partial p_i}{\partial t}=+\frac{\partial p_i}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}K_y\frac{\partial p_i}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial z}K_z\frac{\partial p_i}{\partial z}+S_i \tag{1}$$

气体浓度方程：

$$-\frac{\partial uc_i}{\partial x}-\frac{\partial vc_i}{\partial y}-\frac{\partial wc_i}{\partial z}$$

$$\frac{\partial c_i}{\partial t}=+\frac{\partial}{\partial x}K_x\frac{\partial c_i}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}K_y\frac{\partial c_i}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial z}K_z\frac{\partial c_i}{\partial z}+S_i-Peond_i+Pevap_i \tag{2}$$

粒子质量方程：

$$-\frac{\partial un_i}{\partial x}-\frac{\partial vn_i}{\partial y}-\frac{\partial wn_i}{\partial z}$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t}=+\frac{\partial}{\partial x}K_x\frac{\partial n_i}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}K_y+\frac{\partial n_i}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial z}K_z\frac{\partial n_i}{\partial z}+S_i+\frac{\partial V_s n_i}{\partial z}\pm C_i \tag{3}$$

粒子质量方程：

$$-\frac{\partial um_i}{\partial x}-\frac{\partial vm_i}{\partial y}-\frac{\partial wm_i}{\partial z}$$

$$\frac{\partial m_i}{\partial t}=+\frac{\partial}{\partial x}K_x\frac{\partial m_i}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}K_y\frac{\partial m_i}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial z}K_z\frac{\partial m_i}{\partial z}+S_i+Peond_i-Pevap_i \tag{4}$$

三、案例应用

（一）案例背景

规划的工业区位于福建沿海地区，沿岸线布设，西侧为装备制造区，西南为石化区，南侧为仓储区；主要的规划居民点位有组团 A、组团 B 和组团 C，组团 A 三面环山，西南方向为规划的石化区，中间无山体相隔，西北最高峰蛤蟆山 770m，北部山岭最高峰尖峰山 585m，南部山脉最高峰青兰山 463.2m；组团 B 与工业区之间有天岐岭头－青兰山相隔；组团 C 距离工业区较远。

从规划区域内地形分析（见图 1），区域内地形复杂，而工业区内泄漏源位置一般较低，地形对扩散影响显著。组团 A 位于三面环山的低洼地带，一旦石化区发生有毒有害物质泄漏，将可能受到较大影响。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

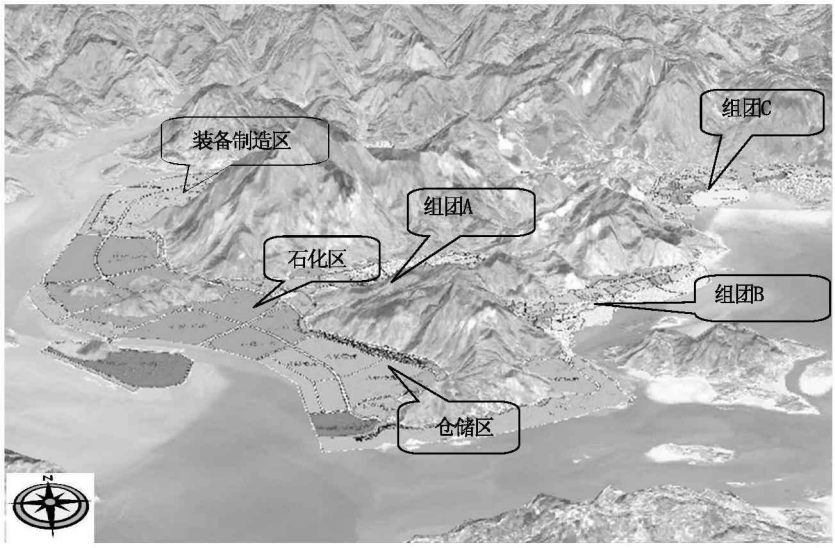


图 1　规划区域内地形示意图

（二）参数设置

1. 事故源项

石化区围绕石油化工重点建设 2000 万 t 炼油、200 万 t 乙烯，以及 10 万 t 级丙烯腈、苯乙烯等大型石化项目，由于其生产运营过程中涉及大量有毒有害物质，将可能会出现泄漏事故，通过大气扩散从而影响/损害附近区域的生态环境与人居安全。

根据物质的危险性和类比同类项目，筛选出石化区危险性较高且储存量相对较大的风险因子为丙烯腈。事故源项设定按储罐破裂产生 100mm 裂口，物料泄漏到罐区围堰形成液池，挥发进入大气，挥发时间设为 2h 考虑，CHARM 将自动计算源强并导入扩散模块进行扩散模拟。

2. 预测网格

采用 X、Y 方向上取步长间隔为 500m × 500m，Z 轴方向为 400m，将计算区域网格化，坐标系统采用 UTM 坐标。根据源在工业区中的位置及其与敏感点的相对位置，同时考虑到模型求解速度，对预测网格局部进行加密，加密网格为 100m × 100m，Z 轴方向为 100m。

3. 地形数据

地形数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站（http：//datamirror. csdb. cn），为空间分辨率为 30m 的数字高程数据。

4. 气象条件

气象条件选取参考 EPA 风险管理计划（RMP）规定，采用最不利情况下的气象条件（worst - case release scenario analysis）进行预测分析。即为：1. 5m/s 风速，F 类稳定度，当地湿度取年平均值 72%，当地近三年最高气温取 38. 9℃。

5. 评价标准

描述突发性大气污染事故给周围地区带来的影响时，主要从有毒物质的浓度解释潜在后果对人、环境的不利作用。把影响后果用距离表示，可以预测潜在影响区域。潜在影响区域分为为致死区、重伤区、吸入反应区。为了更准确的描述造成人类伤害和死亡的有毒气体的浓度，采用三级划分标准，下图描述了此标准。本次评价将致死区浓度标准设定为 LC_{50}（半致死浓度），将重伤区浓度标准设定为 IDLH 浓度（立即威胁生命或健康浓度，NIOSH），将吸入反应区的浓度标准设定为短时间接触容许浓度 PC - STEL（工作场所有害因素职业接触限值 GBZ 2. 1 - 2007），对于缺乏 PC - STEL 值的，取 MAC 值或者 PC - TWA 代替。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

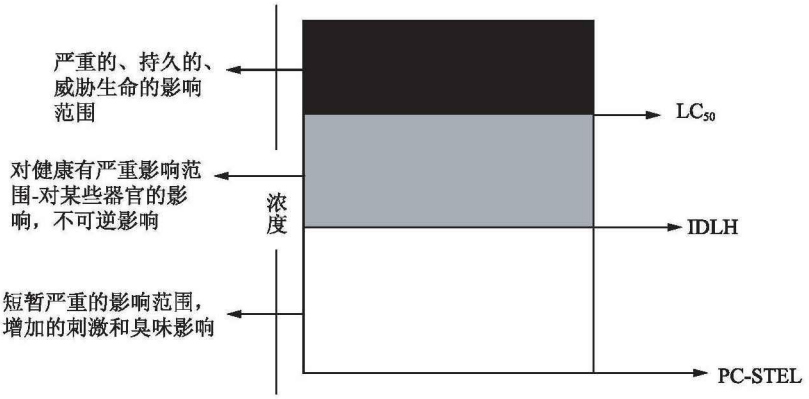


图3　影响区标准划分

表2　评价标准

项目	LC50/（ppm）	IDLH/（ppm）	PC－STEL/（ppm）
丙烯腈	1110	85	1
液氨	2000	300	30

此外，结果表述还可给出事故情境下主要预测点有毒有害物质的时间积分浓度及影响范围内个体致死概率分布。

部分有毒有害气体物质造成的伤害可采用下式估算死亡概率（P）。

$$Y = A + B * \ln\left(T \times C^{N}\right)$$

式中，Y——中间值，死亡概率 P 可通过计算出 Y 值后查到，

A、B 和 N——与毒物性质有关；

C——接触的浓度，ppm；

T——接触时间，min。

（三）结果与讨论

根据预测，当风向为258°时，丙烯腈储罐泄漏后将迅速向组团A扩散，在距离源较近的区域内，丙烯腈浓度基本呈现随距离增大而减小的趋势，但由于东边山体的阻挡作用，在组团A内距源较远的部分区域出现了较高浓度（图4所示）。

IDLH浓度能达到的最远距离为11.87km，出现在泄漏后174min；PC－STEL浓度能达到的最远距离21.01km，出现在泄漏后200min。扩散时间与IDLH浓度/PC－STEL浓度能达到的最远距离之间的关系曲线如图5和图6所示。

图7为计算得到的此风向下的致死概率分布图。可以看出，致死概率分布由于规划区域地形条件的影响，与浓度呈现相似的分布，并不是规则的，而是在源附近区域和位于洼地的组团A部分区域致死概率最高，超过0.9。对组团A中致死概率较高的区域进行分析（见图8），可知在泄漏发生后60min，污染物扩散到此处，并在较长的一段时间内，丙烯腈都处于高于IDLH浓度的水平，预测时间范围内，丙烯腈剂量达 1.74×10^{-4}ppm。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



图 4　丙烯腈储罐泄漏 2 小时扩散平面图

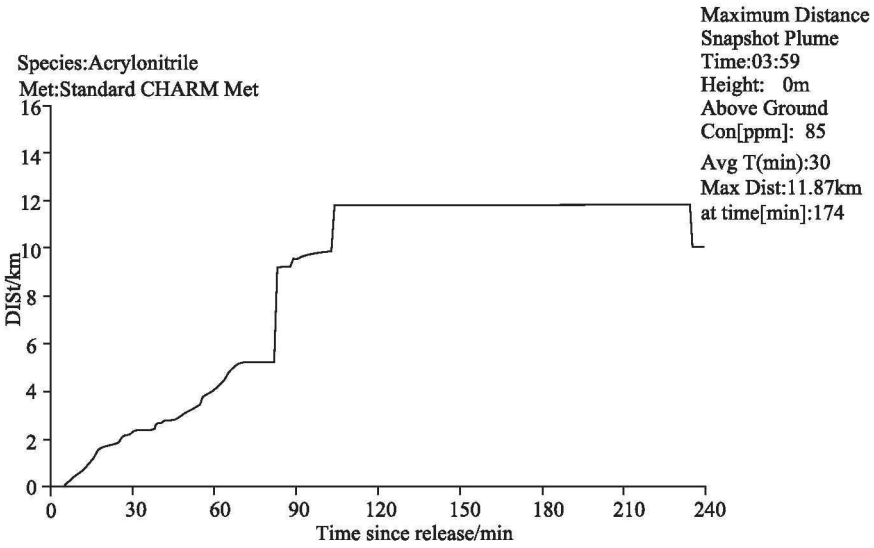


图 5　IDLH 浓度影响范围 – 时间曲线

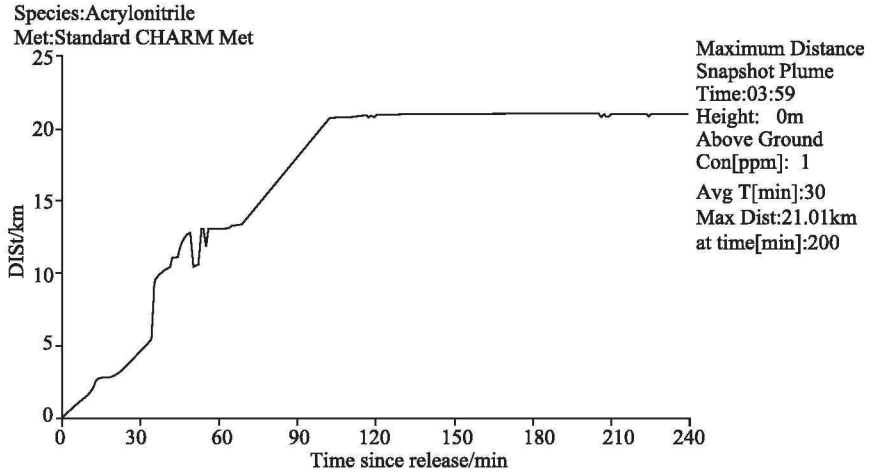


图 6　PC – STEL 浓度影响范围 – 时间曲线

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

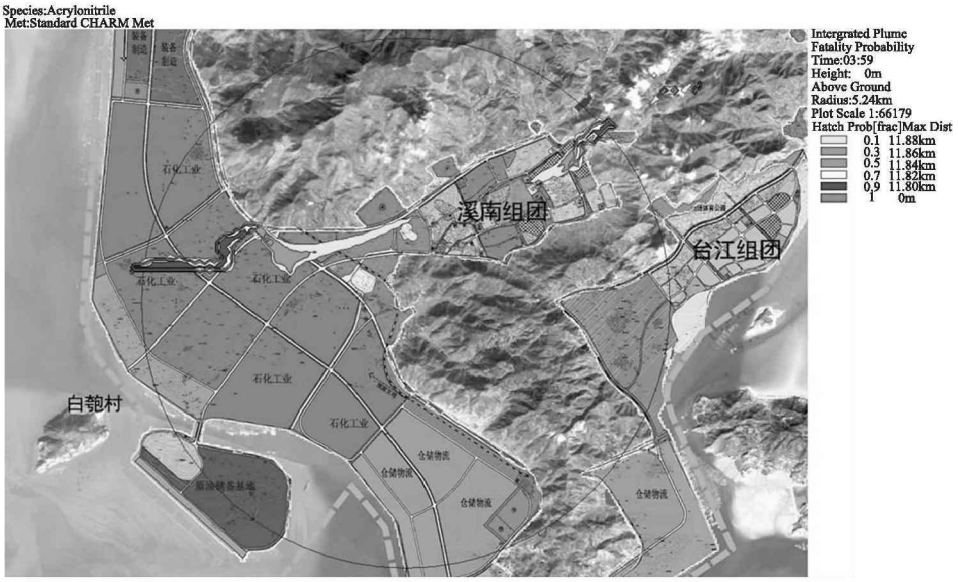


图 7　丙烯腈储罐泄漏扩散产生的致死概率分布

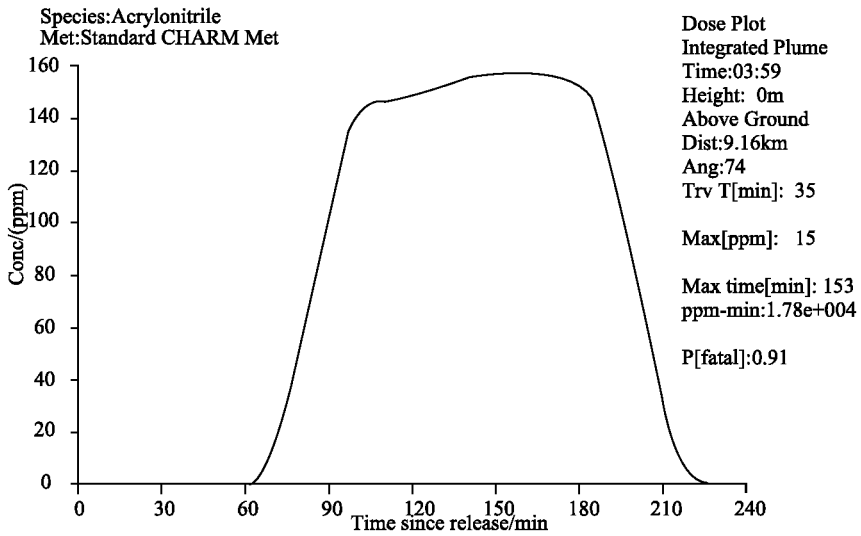


图 8　组团 A 致死概率较高的区域丙烯腈浓度－时间曲线

预测结果表明，石化区内丙烯腈储罐在发生设定情景下的泄漏事故时，污染物的泄漏扩散最大浓度达不到半致死浓度，但这并不意味着污染物影响范围内将不会出现人员中毒致死的情况。根据致死概率分布图可知，部分区域致死概率超过 90%。

由于组团 A 位于三面环山的低洼地带，地形对扩散较为不利。根据预测结果也可看出，风向适当时，污染物将在组团 A 内形成聚集，造成局部高浓度。因此在制定应急预案时应重点考虑组团 A 高浓度聚集区的防范措施。

四、结　论

本文以福建某复杂地形下工业园区风险评价为例，采用了 CHARM 模型模拟了丙烯腈储罐泄漏产生的影响。

本文得到的丙烯腈扩散范围和山体对扩散的影响可以为应急救援、工业区布局优化设计提供

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

依据，从而减小毒气扩散的危害。采用既可模拟重气体，又可模拟轻气体、中性气体，同时可以考虑地形影响的 CHARM 模型进行扩散模拟是进行复杂地形区域风险评价的一次有益的尝试，并取得较好的效果。

参 考 文 献

[1] 环境保护部．中国环境状况公报［N/OL］．http：//www.mep.gov.cn/gkml/hbb/qt/200910/t20091031_180755.htm

[2] 姜传胜，丁辉．重气连续泄漏扩散的风洞模拟试验与数值模拟结果对比分析［J］．中国安全科学学报，2003，13（12）：8－13.

[3] 高云博，蔡香萍．危险物质重气扩散研究综述［J］．工业安全与环保，2009，35（12）：29－30.

[4] S. R. HANNA，J. C. CHANG and D. G. STRIMAITIS. Hazardous gas model evaluation with field observations［J］. Atmospheric Environment，1993，27（15）：2265－2285.

[5] USEPA. Guidance on the Application of Refined Dispersion Models for Hazardous/Toxic Air Releases［Z］. EPA－454/R－93－002，1993.

[6] James G. Zapert，Richard J. Londergan. Evaluation of dense gas simulation models［Z］. Washington，DC：US Environmental Protection Agency，Office of Air Quality Planning and Standards，1991.

[7] Mark W. Eltgroth. Complex Hazardous Air Release Model Technical Reference Manual. Mark Eltgroth LLC，1998.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net