

发射燃气扩散过程数值模拟及安全性分析

孙伟, 杨培源

(91550 部队 41 分队, 辽宁 大连 116023)

摘要: **目的** 研究发射燃气扩散过程及对附近安全的影响。**方法** 以 CFD 方法建立发射阵地气体扩散数学模型, 空间内的湍流采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型, 结合 FLUENT 软件, 对某燃气发生器产生的有毒气体的扩散过程进行数值模拟。以氯气为标的物, 计算不同风速、地形影响下氯气的扩散过程, 分析风速、山地对氯气扩散速度、距离、覆盖范围、浓度变化的影响。**结果** 山顶发射时, 风速越大, 氯气的扩散速度越快, 覆盖范围越广, 最大扩散距离为 249 m; 山底发射时, 在相同风速下, 氯气的扩散距离、扩散速度均小于山顶发射时, 最大扩散距离为 221 m。山地对氯气扩散的影响主要是减缓氯气团的运动速度, 减小氯气的影响距离, 在山地的迎风面与背风面氯气浓度较高。**结论** 不同风速和起伏山地对氯气扩散会产生较大影响, 采用该分析方法可以归纳出有毒气体扩散及影响范围的一般规律。

关键词: 发射燃气; 气体扩散; 风速; 山地; 数值模拟; 湍流模型

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.07.013

中图分类号: X169

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)07-0055-05

Numerical Simulation and Safety Analysis of Fire Gas Diffusion Process

SUN Wei¹, YANG Pei-yuan¹

(1. Sub-unit 41 of Unit 91550, PLA, Dalian 116023, China)

ABSTRACT: Objective To study the process of fire gas diffusion and its impact on nearby safety. **Methods** A mathematical model of gas diffusion was established at the launching position by CFD method. And the RNG $k-\epsilon$ turbulence model was adopted for turbulence in the space to numerically simulate the diffusion process of toxic gases produced by a gas generator with FLUENT software. The diffusion process of gas at different wind speed and under different terrain influences was calculated with chlorine as the target. The effects of wind speed and mountain on the diffusion speed, distance, coverage and concentration of chlorine were analyzed. **Results** When fired on the top, the higher the wind speed was, the faster the diffusion rate of chlorine and the wider the coverage were. The maximum diffusion distance was 249 m. When fired at foot, at the same wind speed, the diffusion distance and diffusion speed of chlorine gas were smaller than those on the top. The maximum diffusion distance was 221 m. The influence of the mountain on the diffusion of chlorine gas was mainly to slow down the movement speed of chlorine gas group and reduce the influence distance of chlorine gas. The concentration of chlorine in the windward and leeward sides of the mountain was higher than other places. **Conclusion** Different wind speeds and undulating mountains have great influences on the diffusion of chlorine gas. The general rule of diffusion and influence range of toxic gases could be summarized by this analysis method.

KEY WORDS: fire gas; gaseous diffusion; wind speed; mountain; numerical simulation; turbulence model

飞行器弹射时,提供动力的燃气发生器会产生大量高温、高压、高速燃气,其中包含了大量 Cl_2 、 NO 、 NO_2 等有毒气体,还伴随有金属或金属化合物颗粒^[1],会严重威胁阵地周围操作人员的健康。分析发射燃气的扩散规律、覆盖范围,对提高作战能力,保障操作人员安全具有重要意义。

数值模拟是研究气体扩散问题的主要手段,目前已有上百种适用于气体扩散的数学模型和一系列计算软件,其中 CFD 方法及 FLUENT 软件应用最广。当前应用于气体扩散模拟的 CFD 模型主要是雷诺平均模拟(RANS)和大涡模拟(LES)。RANS 模型精度高,计算量较低,在工业界应用广泛。LES 模型的数据分辨率高于 RANS,计算更大,是近年来发展迅速的湍流模拟方法^[2]。蒋德海等^[3]采用 RANS 模型对城市街道内的污染物扩散进行了模拟,分析了决定街道峡谷内污染物质量浓度分布的因素。崔桂香等^[4]使用 LES 方法对小区内的污染物扩散进行了数值模拟,结果与实际测量十分接近。席学军等采用 LES 方法,对复杂山区内高含硫井井喷气体扩散进行模拟,分析了不同风速、风向及地形对气体扩散的影响,给出了划分安全距离的方法^[5]。FLUENT 软件功能强大,集成了包括 RANS、LES 在内的多种湍流模型,可以满足复杂地形等多种条件下的流场模拟、定常与非定常计算^[6],在气体扩散方面应用广泛。刘增莘等^[7]基于 FLUENT 三维瞬态流动的原理,模拟了有毒气体绕障碍物的扩散过程,得到了有毒气体扩散及伤害区域分布的一般规律。邵毅等^[8]用 FLUENT 对榆中县城区的流场和污染物扩散形态及规律进行了模拟研究,得到的结果与实验数据具有较好的一致性。文中采用 CFD 方法结合 FLUENT 软件模拟燃气发生器产生的有毒气体,在风、山地等因素影响下的扩散过程,分析其对周边安全的影响。

1 控制方程

1.1 基本假设

基于以下假设建立方程:把有毒气体的扩散过程看作是不可压缩流运动,所有气体均为理想气体,遵守理想气体状态方程;忽略热损失,不考虑燃烧及气体间的化学反应;不考虑多相流,忽略燃气中的固体颗粒和液体。

1.2 基本方程

1) 连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为混合物密度; u_j 为 x 、 y 、 z 三个方向上的速度。考虑混合气体不可压,密度 ρ 为常数,则式(1)可变为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

2) 动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + (\rho - \rho_a)g \quad (3)$$

式中: μ 是流体的动力黏度; g 是重力加速度; p 是绝对压力; ρ_a 是空气密度。

3) 组分质量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho c_s)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j c_s) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_s \frac{\partial(\rho c_s)}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

式中: c_s 为组分 s 的体积浓度; ρc_s 是该组分的质量浓度; D_s 是该组分的扩散系数^[9]。

4) 湍流方程。采用得到 RNG k - ε 湍流模型,通过在大尺度运动和修正后的黏度项体现小尺度的影响,而使小尺度运动有系统地控制方程中去除。所以得到 k 方程和 ε 方程为^[10]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon}^* \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

式中: $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, $C_\mu = 0.0845$;

$\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$; $C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}$, $C_{1\varepsilon} = 1.42$,

$\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon}$, $E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$, $\eta_0 = 4.377$,

$\beta = 0.012$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$; G_k 是由于平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项; α_k 和 α_ε 是 k 方程和 ε 方程的湍流 Prandtl 数; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 是经验常数。

2 计算步骤

2.1 网格模型

在 DEM 高程图上截取 $1 \text{ km} \times 0.6 \text{ km}$ 的矩形区域,保存为海拔高程数据,如图 1 所示。将海拔高程数据导入 Geomagic Studio 逆向工程软件,经过拟合处理后,进行网格划分。发射阵地的选择分别为山顶和山底,建立一个高 10 m ,直径 2 m 的发射筒。坐标系的选择:原点为发射筒底面圆心, x 轴沿风的来流方向, y 轴竖直向上, z 轴符合右手法则。计算区域沿 y 轴的远场范围设为 200 m 。在进行网格划分时,发射筒附近应当加密,而后向其他方向逐渐稀疏。网格单

元总量为 97 万。两种不同位置发射阵地的网格划分如图 2、图 3 所示。

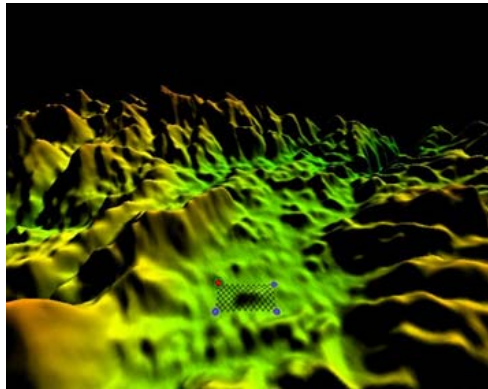


图 1 山地 DEM 图截取

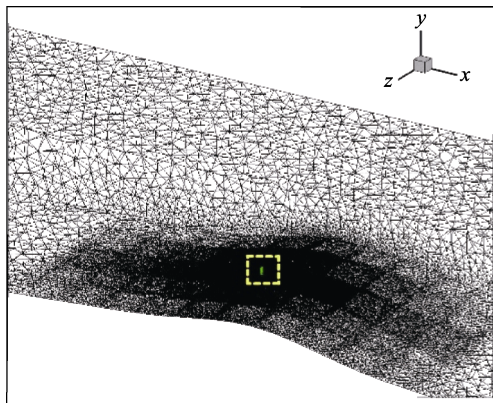


图 2 山顶发射阵网格

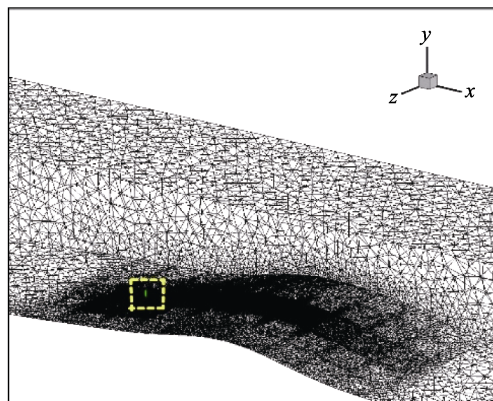


图 3 山底发射阵网格

2.2 参数设置与边界条件

火工品采用含高氯酸铵的 CTPB，其快速燃烧后可产生 245 kg/s 的质量流量，工作时间为 1 s，燃烧温度 3000 K，定压比热 $C_p=1800 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ^[1,11]。发射燃气为多种气体混合物，其相对空气密度的大小会影响气体的扩散性。选用氯气 (Cl_2) 作为研究对象，密度是空气的 2.45 倍。氯气属于剧毒气体，氯浓度过高或接触时间较长，会致使深部呼吸道病变、细支气管及肺泡受损、肺炎及中毒性水肿；高浓度氯吸入

后，还可刺激迷走神经，引起反射性的心跳停止^[1]。氯气体积分数为 $1\times 10^{-6}\sim 3\times 10^{-6}$ 时（短时间内允许），会引起轻微的黏膜刺激；体积分数为 $5\times 10^{-6}\sim 15\times 10^{-6}$ 时，将引起中度的上呼吸道刺激；体积分数为 30×10^{-6} 时，会引起突发性咳嗽、胸痛、呕吐；体积分数为 $40\times 10^{-6}\sim 60\times 10^{-6}$ 时，会引起中毒性肺炎，肺水肿；体积分数为 430×10^{-6} 时，人体暴露 30 min 将导致死亡。根据氯气对人体伤害情况^[12]，文中考察的氯气最低体积分数为 30×10^{-6} 。

计算 6 种风速下的污染物扩散情况，分别为 0、2、5、10、15、18 m/s，空气温度为 25 °C，水力直径 $D_H=4S/L$ ， L 为入口周长， S 为入口截面积，湍流尺度 $l=0.07D_H$ 。风来流为速度入口，燃气射流为质量入口，出口为 x 轴正向，设为压力出口，地面及发射筒表面设为无速度滑移、无质量渗透壁面，剩余三个面设为对称面。计算时先用稳态定常算法，得到收敛后的数据作为初场，再开始非定常的流场计算，时间步长为 0.1 s。当氯气最大体积分数低于 30×10^{-6} 时，停止计算。

3 数值模拟结果与分析

3.1 风速影响分析

山顶发射，风速 0 m/s 时，氯气污染物不同时刻的扩散情况如图 4 所示。可以看出， $t=1 \text{ s}$ 时，燃气从筒中喷出，此时氯气扩散距离较小。随着时间推移，氯气影响范围逐渐扩大，到 $t=50 \text{ s}$ 时，氯气的扩散距离几乎达到最大值 ($x=36.6 \text{ m}$)。随后氯气的影响范围逐渐减小，浓度迅速降低。到 $t=139 \text{ s}$ 时，氯气基本消散，体积分数小于 30×10^{-6} 。

风速为 10 m/s 时，氯气污染物不同时刻的扩散情况如图 5 所示。由图 5 可以看出，氯气团的运动速度明显更快。 $t=1 \text{ s}$ 时，扩散距离已经达到 $x_+=22.7 \text{ m}$ ；到 $t=6 \text{ s}$ 时，氯气团覆盖范围基本达到最大， $|x|=107.3 \text{ m}$ ； $t=18 \text{ s}$ 时，氯气大部分已消散，此时扩散距离为 $x=219.9 \text{ m}$ 。

对比山顶发射时不同风速下的氯气扩散情况。如图 6 所示，可以看到，风速越大，氯气的扩散速度越快。风速小于 10 m/s 时，扩散距离随着风速增大呈减小趋势；风速大于 10 m/s 时，风速越大，扩散距离越远。风速为 2 m/s 时，扩散时间最长 ($t=139 \text{ s}$)；风速为 18 m/s 时，扩散距离最远， $x_{\max}=249 \text{ m}$ 。从图 7 中可以看出，风速越大，任意时刻氯气的覆盖范围越广，影响的时间越短。风速为 2 m/s 时，氯气团的影响时间最长。由以上分析可知：风速越大，氯气扩散速度越快，影响时间越短；风速越小，氯气扩散得越慢，影响时间越长。

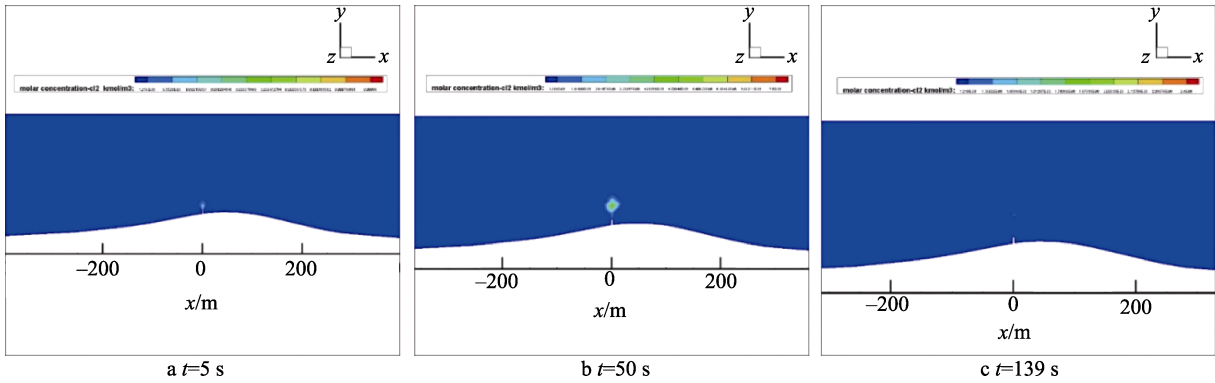


图4 风速为 0 m/s 时不同时刻氯气浓度 2D 云图

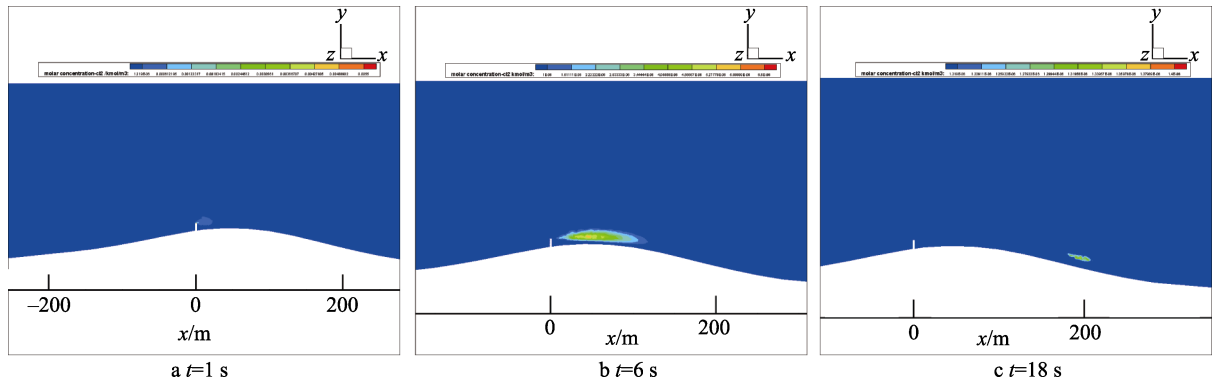


图5 风速为 10 m/s 时不同时刻氯气浓度 2D 云图

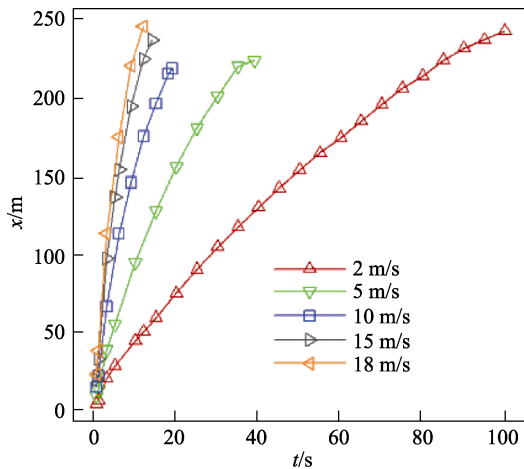


图6 不同风速氯气扩散情况

3.2 山地影响分析

为考察起伏地形对氯气扩散的影响,将发射阵地移至山底,计算 2、5、10、15 m/s 共四种风速下氯气的扩散情况,对比山顶发射与山底发射时氯气的扩散距离、扩散浓度,分析山地对氯气扩散运动的影响。

不同风速时,氯气扩散距离随时间的变化曲线如图 8 所示。可以看出,山顶发射时,氯气扩散的距离更远,运动速度更快;山底发射时,氯气的扩散运动受到山地影响,扩散距离短,运动速度慢,而且越靠近山地坡度大的位置,氯气扩散运动越缓慢。风速为 15 m/s 时,山底发射氯气扩散的最远距离为 221 m。由图 8 还可以看出,无论在何种风速下, t_0 后任意相

同时刻,山顶发射的氯气团扩散距离都比山底发射要远,这说明起伏的山地能够减小氯气扩散距离与扩散速度。

风速为 5m/s 时, $x=50\text{ m}$ 、 $x=100\text{ m}$ 和 $x=200\text{ m}$ 处氯气浓度随时间的变化曲线如图 9 所示。观察氯气浓度变化可以看出:初始阶段山顶发射氯气浓度高于山底发射,但是随着时间推移,山底发射的氯气浓度逐渐高过山顶发射。这是由于气流在迎风面上坡处堆积,速度梯度与浓度均增大;在山底背风面下坡处,由于气流的回流作用,氯气浓度也比较大。以上分析说明,山地地形迎风面上坡处与背风面下坡处,氯气浓度均较大,是危险区域。

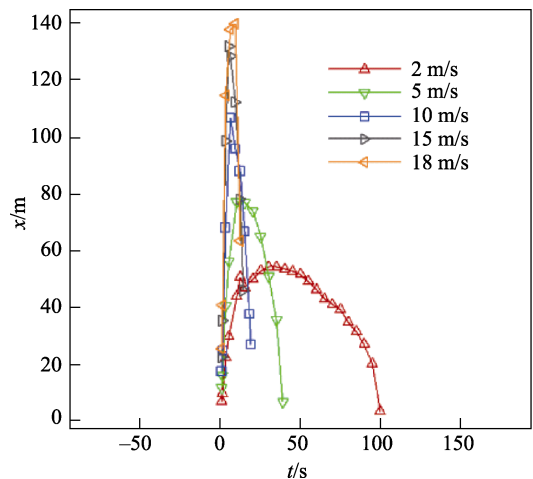


图7 不同风速氯气覆盖情况

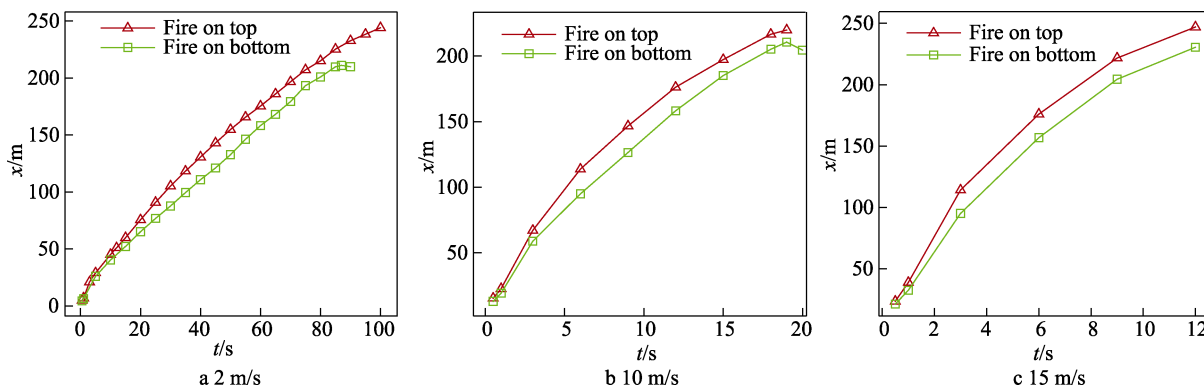


图 8 不同发射点氯气扩散情况

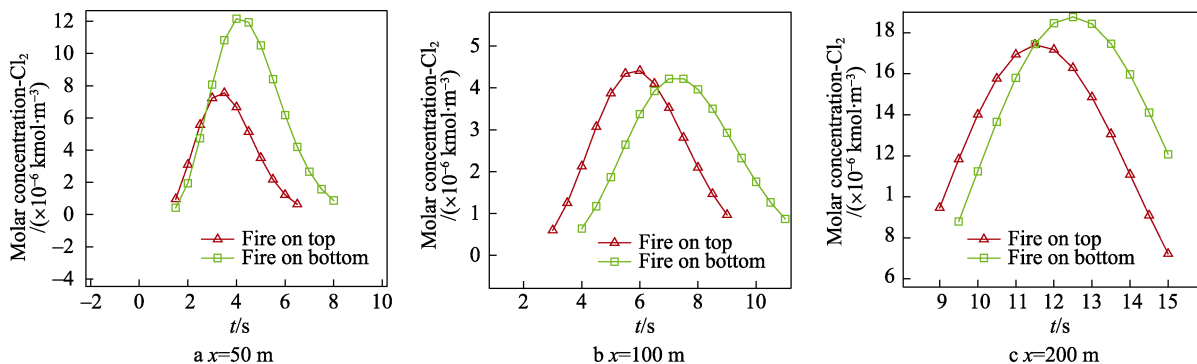


图 9 氯气浓度变化情况

4 结论

文中采用 CFD 方法及 FLUENT 软件，以氯气为标的物，对燃气发生器产生的有毒气体在不同风速、山地影响下的扩散过程进行了数值模拟，并进行了安全性分析。通过以上分析可知，不同风速和起伏山地对氯气的扩散会产生重要影响。

1) 山顶发射时，风速越大，氯气的扩散速度越快，风速为 18 m/s 时，扩散距离最远， $x_{max}=249$ m。

2) 山底发射时，在相同风速下，氯气的扩散距离、扩散速度均小于山顶发射。风速为 15 m/s 时，扩散距离最远， $x_{max}=221$ m。

3) 山地对氯气扩散的影响主要是减缓氯气团的运动速度，减小氯气污染物的影响距离。在山地迎风面上坡与背风面下坡，由于气流的积聚与回流作用，氯气浓度降低较慢，影响时间更长。

4) 在制定安全距离策略时，应当根据发射位置、风速风向和山地起伏划出合理的安全距离。文中计算结果受计算地形所限，不能包括所有情况，但理论与方法是合理的，在划定安全距离时可以将文中的最大扩散距离作为参考。

参考文献：

- [1] 韦佳辉. 弹道导弹发射阵地燃气流场数值模拟及人员安全性分析[D]. 太原: 中北大学, 2015.
- [2] 刘玉石. 城市大气微环境大涡模拟研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- [3] 蒋德海, 蒋维楣, 苗世光. 城市街道峡谷气流和污染物分布的数值模拟[J]. 环境科学研究, 2006, 19(3): 7-12.
- [4] 崔桂香, 张兆顺, 许春晓, 等. 城市大气环境的大涡模拟研究进展[J]. 力学进展, 2013, 43(3): 295-328.
- [5] 席学军, 董文彤, 郭再富. 复杂山区地形高含硫气井安全防护距离研究[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(12): 66-73.
- [6] 郭文星. 复杂山地地形风场 CFD 多尺度数值模拟[D]. 深圳: 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 2010.
- [7] 刘增苹, 张有忱. 有毒气体泄漏障碍物扩散的安全性分析[J]. 装备环境工程, 2010, 7(1): 89-93.
- [8] 邵毅, 张述文, 左洪超, 等. 榆中县城大气污染物扩散的观测实验与数值模拟[J]. 中国环境科学, 2013, 33(7): 1223-1230.
- [9] 王治华. 受限空间内气体扩散的数值模拟及分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [10] 王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 124.
- [11] 李广裕. MX 导弹冷发射技术[J]. 国外导弹与航天运载器, 1987, 7(1): 63-67.
- [12] 王建. 氯气职业危害防护导则研制[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2012.