

# DEM空间分辨率对毒气扩散模型模拟结果的影响分析

何浩鹏<sup>1</sup>, 孙海燕<sup>2</sup>, 王晓醉<sup>3</sup>

(1. 中国地震局地震研究所, 武汉 430071; 2. 武汉大学测绘学院, 武汉 430079;  
3. 武汉大学科学技术发展研究院, 武汉 430072)

**摘要:** 突发性毒气泄漏事故的频繁发生对市民的安全造成了极大威胁, 有必要对常见毒气泄漏事故发生后的成灾模型进行探讨, 以便从理论上指导应急部门实施应急救援行动。本文在研究和分析典型毒气泄漏扩散模型的基础上, 引入地形因子对原有毒气泄漏扩散模型进行改进, 使之适应三维地形下的危化品气体扩散模拟, 并将模型与GIS集成可视化, 分析比较了模型修正前后气体扩散浓度的分布情况。在此基础上, 进一步分析了DEM空间分辨率对毒气扩散浓度的分布影响, 发现DEM空间分辨率对毒气浓度分布区域有一定影响, 并分析了其影响原因。结果表明, 加入地形因子的高斯烟羽模型比之前没有考虑地形因子的高斯模型计算要更加精确, 更贴近现实状况; 同时, DEM分辨率对改进后的高斯烟羽模型的模拟影响较大, 选择适当分辨率的DEM能帮助应急部门在短时间内模拟出真实可靠的浓度分布区域, 对毒气泄漏事故的应急有一定的实际参考价值和指导意义。

**关键词:** 气体泄漏扩散模型; 地形因子; DEM分辨率; GIS

**DOI:** 10.3724/SP.J.1047.2013.00527

## 1 引言

随着化工业的快速发展, 大量易燃易爆、有毒有害等危险性化学品陆续问世, 化学品在生产、存储和运输等过程中, 发生的泄漏造成的灾难性事故也越发频繁<sup>[1-3]</sup>。据统计, 2006–2012年全国发生气体危险化学事故23起, 造成989人死亡<sup>[4]</sup>。2007年四川攀枝花发生氯气泄漏事故107人住院抢救<sup>[5]</sup>。1984年发生在印度博帕尔的毒气泄漏事故造成2500多人死亡, 20余万人受到不同程度的毒害<sup>[6]</sup>。另一方面, 破坏性地震中发生的次生毒气的泄漏与扩散对周围人们的生存也有极大的威胁<sup>[7-8]</sup>。因此, 有必要对常见毒气泄漏事故发生后的成灾模型进行探讨, 以便从理论上指导应急部门实施应急救援行动。现有的毒气扩散模型一般适用于模拟平原地区的毒气扩散情况, 对于地形变化明显地区的毒气扩散模拟存在一定缺陷。此后不少学者将高斯烟羽模型引入地形分析的理论研究, 却鲜有将改进后的模型应用于实际应急救援的例子, 在DEM分辨率对计算结果影响方面, 则几乎没有人进行研

究。针对已有研究的薄弱方面, 本文深入研究了DEM分辨率对模拟毒气扩散浓度分布情况的影响。

## 2 毒气泄漏扩散模型

### 2.1 高斯烟羽模型

目前, 发展比较成熟的危化品气体扩散模型主要有: 高斯模型、BM模型、FEM3模型, 及Sutton模型<sup>[9-13]</sup>。高斯模型包括高斯烟羽模型和高斯烟团模型<sup>[14]</sup>, 可分别模拟中性气体的连续性泄漏和瞬时泄漏2种泄漏方式。由于高斯模型的计算量小、参数相对较少、计算结果与实验值也能较好吻合, 本文选择高斯烟羽模型作为研究对象。

高斯烟羽模型适用于连续点源的泄漏扩散, 而连续源平均烟流的浓度分布是符合正态分布的, 因此, 高斯烟羽模型通常是假定事故现场的下垫面是平坦、开阔、性质均匀的。我们将三维空间的坐标系确定为: 取通过排放点源且垂直于地面的轴为Z轴, Z轴与地面的交点为原点, 主风向为X轴, Y轴在水平面内垂直于X轴, 则上述假设条件下的高架

收稿日期: 2012-12-21; 修回日期: 2013-03-31.

作者简介: 何浩鹏(1987-), 女, 湖北黄冈人, 硕士, 助理工程师, 研究方向为地理信息系统原理与应用。E-mail: hphe\_whu@126.com

点源的连续排放,下风向任一点的高斯烟羽模型的污染物浓度  $C(x,y,z)$  为:

$$C(x,y,z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{\frac{(-y)^2}{2\sigma_y^2}} \left( e^{\frac{[-(z-H)^2]{2\sigma_z^2}}{2}} + e^{\frac{[-(z+H)^2]{2\sigma_z^2}}{2}} \right) \quad (1)$$

其中,  $C(x,y,z)$  为下风向某点  $(x,y,z)$  处的空气中污染物浓度( $\text{mg}/\text{m}^3$ );  $Q$  为污染物单位时间排放量( $\text{mg}/\text{s}$ );  $\sigma_y$  为垂直于主导风方向的横向扩散系数( $\text{m}$ );  $\sigma_z$  为铅垂方向的扩散系数( $\text{m}$ );  $u$  为平均风速( $\text{m}/\text{s}$ );  $t$  为扩散时间( $\text{s}$ );  $x$  为下风向距离( $\text{m}$ );  $y$  为横风向距离( $\text{m}$ );  $z$  为离地面的距离( $\text{m}$ );  $H$  为有效源高度( $\text{m}$ )。

## 2.2 高斯烟羽模型的改进

前面介绍的高斯烟羽模型对平原地区预测的污染物浓度和实际吻合较好。但是,在山区、丘陵及城市等下垫面较复杂的地区,其污染物扩散可能不一定呈正态分布,因而采用高斯模型预测扩散结果与实际有较大出入<sup>[15]</sup>。要准确预测这些地区的毒气扩散情况,我们可以在高斯烟羽模型中引入地形因子对其加以改正,使之适应三维地形下的危化品气体扩散模拟。

根据式(1),在高斯模型中引入地形修正因子,对污染源排放高度进行修正,分2种情形<sup>[16]</sup>:①在中性和不稳定时,假设烟流中心和地形的高度差始终保持初始的有效高度,地形的影响被排除了。②稳定时,假定烟流中心始终保持其初始的海拔高度不变,则污染源的排放高度为  $H$ (有效源高)  $-h_t$ (评价点地面高于烟囱底的高度,或者说是地形的高度),此时改正后的模型为<sup>[17]</sup>:

$$C(x,y,z) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{\frac{(-y)^2}{2\sigma_y^2}} e^{\frac{[-(H-h_t)^2]{2\sigma_z^2}}{2}} \quad (2)$$

当  $h_t > H$  时,  $H - h_t$  为 0。

这种修正方法能很好地把地形因子考虑到高斯烟羽模型的计算中,方便模型与GIS平台的集成,得到更真实可靠的危化品气体扩散浓度范围。

## 3 DEM分辨率对改进后模型的影响

### 3.1 改进前后模型模拟结果的对比

鉴于GIS具有较强的可视化表达和空间分析能力,将高斯烟羽模型和GIS平台进行整合集成,可更好地展示模型改进前后模拟结果的差异,并验证改进后模型的合理性。

证改进后模型的合理性。

以湖北省大冶市的DEM数据和导航数据作为地图数据的来源,按照图1所示输入参数,模拟计算假设事故点的毒气浓度扩散分布情况。

图1 扩散模型参数输入界面

Fig.1 Diffusion model parameters input interface

按照不同气体在不同浓度下对人体影响的不同,将计算生成的毒气浓度扩散等值面划分为不同的区域:致死区域、危险区域、警戒区域<sup>[18-20]</sup>,对不同区域赋予不同的颜色值,便可得到如图2所示的满足应急需求的危化品扩散浓度分布图,图中致死区、危险区、警戒区的颜色分别为红、蓝、黄。

图2是在同一比例尺下截取的同一区域的地图,图中绿色点为事故发生的坐标点。事故发生点在下风向距离泄漏点1000m内,其地形有一定的起伏,如图3所示。

结合图3,对比图2(a)、(b),我们发现,引入地形因子后模拟的扩散分布图比改进前模拟的分布图接近于事故发生点,而且在主导风向上各浓度区域都有所拉伸,这说明,地形的起伏影响了毒气的扩散,处于高地势的地形阻挡了毒气的扩散,靠近地面的毒气浓度值明显增大,导致距离事故点区域的浓度累计增高,不易扩散,以致于致死浓度区域面积明显扩大,从而形成了图2(b)所示的扩散分布图。这表明加入地形因子的高斯烟羽模型比之前没有考虑地形因子的高斯模型计算要更加精确,更贴近现实状况,验证了改进后模型正确性,可以运用于模拟在山区、丘陵,以及城市等下垫面较复杂的地区的毒气泄露扩散分布情况。

### 3.2 DEM分辨率对气体分布的影响

DEM分辨率越高,通过DEM数据获取的地形

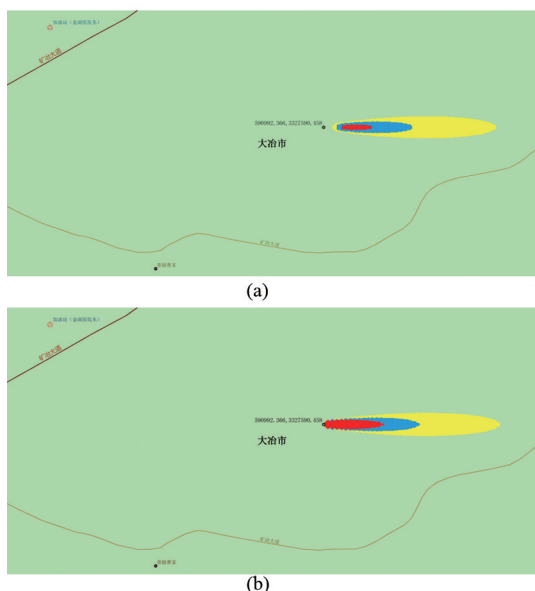


图2 模拟结果:(a)改进前;(b)改进后  
Fig.2 Simulated result: (a) original; (b) improved

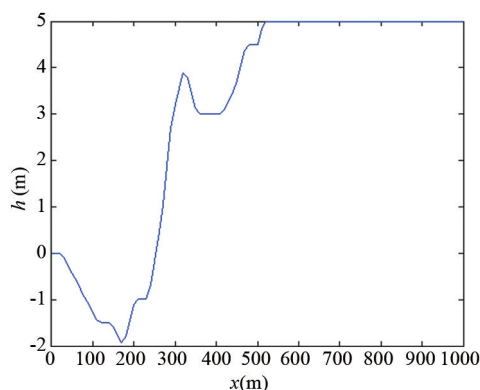


图3 下风向不同距离地形高度的变化曲线  
Fig.3 The changing curve of terrestrial height at different distances downwind

注:①图中的地形高度是以泄漏点的高程值所在平面为参考面计算而得到的

②根据改进后的模型,地形实际高程值大于有效源高 $H$ 处,地形高度替换为 $H(H-h_i$ 为0)

数据就会越接近实际情况,模型分析结果就越真实可靠;反之模型分析结果就不可靠。但是,获取高分辨率的DEM数据在实际生产和应用中代价较大,因此,我们需要探索选择既满足应用分辨率要求和实际分析需求,又充分顾及计算机容量与处理能力的最佳DEM分辨率数据。

本文选择了分辨率为30m、60m、90m的DEM数据,分别模拟这3种条件下的氨气泄漏扩散分布情况。模拟参数的设置类似图1,通过程序获取选

定区域的各个格网点的地形高程值,然后与图中的泄漏参数一起计算各格网点的浓度值,最后,利用ArcGIS的插值分析得到3种DEM分辨率下的氨气扩散浓度分布图,如图4所示。

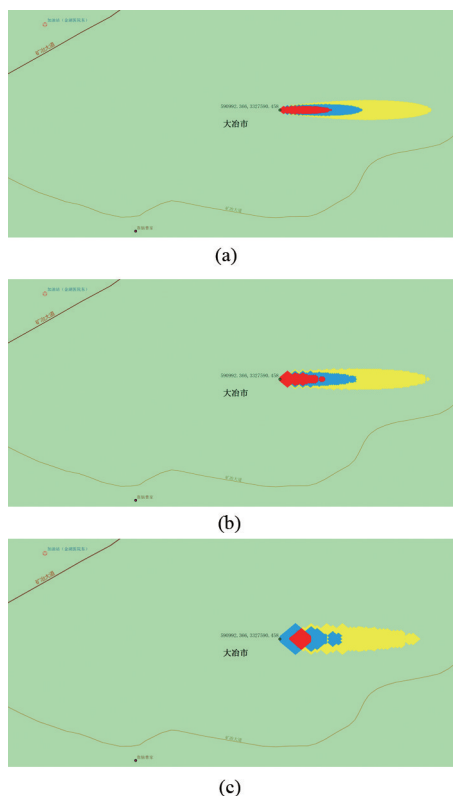


图4 不同DEM分辨率的分析结果:(a) 30m;(b) 60m;(c)90m  
Fig.4 Analysis result under different DEM resolution. (a) 30m; (b) 60m; (c) 90m

图4(a)、(b)、(c)是在同一比例尺下截取的同一区域的地图,对比图4(a)、(b)、(c)可知,随着DEM分辨率的降低,氨气扩散范围在主导风向上各个区域有减小的趋势,而在垂直主导风向上各个区域扩散范围逐渐扩大。

3种DEM分辨率模拟的各个区域面积大小的对比情况如表1所示。从表1可知,各个浓度区的面积随着DEM分辨率的降低而增大。

综合分析,由于DEM分辨率越低,所包含的信息量也就越少,地形坡度坦化,对毒气扩散的障碍减小,更利于毒气在主导风向上更快速的扩散,导致各个浓度区域面积有一定的增加;而在垂直于主导风向上,由于坡度坦化,毒气也更容易向周围扩散,导致各个区域在此方向上的扩散范围逐渐扩大。

此外,DEM分辨率的大小也会影响获得危化品气体浓度分布图的时间长短。在本研究中,分别



表1 不同分辨率的DEM下各浓度区域面积  
Tab.1 Each concentration area under different DEM resolution

区域(m <sup>2</sup> )	DEM 分辨率(m)		
	30	60	90
警戒浓度区	11 020	11 870	13 740
危险浓度区	2 990	3 360	5 910
致死浓度区	2 470	3 070	3 680

表2 不同DEM分辨率下获取浓度分布区域的时间  
Tab.2 Time for obtaining concentration distribution area under different DEM resolution

计算机环境	CPU: AMD A8-4500M			CPU: intel I5-3317U		
	内存:4G			内存:4G		
	显卡:AMD Radeon HD 7450M			显卡:NVIDIA GeForce 610M		
	硬盘:500G			硬盘:500G		
DEM 分辨率(m)	30	60	90	30	60	90
时间(min)	49	13	3	40	9	2

伤员的最好时机,导致伤亡程度加大,因此,使用最大分辨率的DEM进行模拟,是不切实际的。

为了能在第一时间内大概了解危化品气体的泄漏扩散情况,应急部门可以先采用分辨率相对较低的DEM数据,如本例中采用分辨率为90m的DEM数据进行分析,这样可以在短时间内了解到受毒气影响的大概范围,应急人员可以据此立即赶到事故现场,做出初步的应急救援活动,以减少人员的伤亡。与此同时,再利用分辨率较高的DEM数据,如本例中的DEM分辨率为30m的数据进行分析,得到毒气扩散的准确范围,明确知道受各个浓度区域影响的地域,然后通过通讯设备将分析结果告知现场的救援人员,帮助他们开展进一步的救援工作。

以上分析表明,DEM分辨率对改进后的高斯烟羽模型的模拟影响较大。在合适的时机选择合适分辨率的DEM能帮助应急部门在短时间内模拟出真实可靠的浓度分布区域,这样不仅缩短响应时间,而且为方案的准确性提供了决策科学依据。

4 结论与展望

高斯烟羽模型虽然能模拟预测平原地区的毒气泄漏的扩散分布,但对于下垫面较复杂的地区,就需要考虑到地形起伏对毒气扩散分布产生的影响,有必要对高斯烟羽模型引入地形因子进行改进,本文不仅实现了对模型的改进,而且结合GIS平台论证了改进后模型模拟结果的合理性,同时进

统计了在2种不同硬软件环境下,3种DEM分辨率下获取氨气浓度分布区域图的时间,如表2所示。

由表2可知,在2种不同计算机软硬件环境下,DEM分辨率越大,获取氨气浓度分布区域图所经历的相对时间都越长,应急部门在制定应急方案前需要等待的时间也就越长,而在实际中时间对于应急救援来说十分关键,等待的时间过久会错失抢救

一步分析了DEM分辨率对改进后模型模拟结果和模拟效率的影响,研究结果对应急部门制定救援方案有一定的参考意义。本文存在的不足主要是对于复杂地形下毒气扩散分布的影响因素不仅仅是地形因素,在未来的研究中应将其他因素也一并引入到模型中进行改正,修正后模型的模拟结果势必更能接近实际情况。

参考文献:

[1] 吴宗之,张圣柱,张悦,等.2006-2010年我国危险化学品事故统计分析研究[J].中国安全生产科学技术,2011,7(7):5-9.  
[2] 魏国,杨志峰,李玉红.城市危险化学品事故统计分析与对策[J].环境污染与防治,2006,28(9):711-714.  
[3] 赵来军,吴萍,许科.我国危险化学品事故统计分析及其对策研究[J].中国安全科学学报,2009,19(7):165-170.  
[4] 国家安全生产监督管理总局.政府网站事故查询系统[DB/OL].2012-12-31.<http://media.chinasafety.gov.cn:8090/iSystem/shigumain.jsp>.  
[5] 国家安全生产监督管理总局.四川攀枝花发生氯气泄漏事故107人住院抢救[EB/OL].2007-07-15[2011-11-20].[http://www.chinasafety.gov.cn/newpage/Contents/Channel\\_5486/2007/0715/5690/content\\_5690.htm](http://www.chinasafety.gov.cn/newpage/Contents/Channel_5486/2007/0715/5690/content_5690.htm).  
[6] Bhavesh R.G.. Risk of transporting dangerous goods:South Durban case study[D]. Pietermaritzburg: University of KwaZulu-Natal, 2005.  
[7] 赵振东,余世舟,钟江荣.地震次生毒气泄漏与扩散的数值模拟与动态仿真[J].地震工程与工程振动,2002,22(5):137-142.  
[8] 钟江荣,赵振东,余世舟.基于GIS的毒气泄漏和扩散模拟及其影响评估[J].自然灾害学报,2003,12(4):106-109.  
[9] 孙莉,赵颖,曹飞,等.危险化学品泄漏扩散模型的研究现状

- 分析与比较[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(1): 37-42.
- [10] Chan S T, Ermak D L, Morris L K. FEM3 model simulations of selected thorney island phase I trials[J]. Journal of Hazardous Materials, 1987, 16(3): 267-292.
- [11] Liu Y L, Zheng J Y. Numerical simulation on the diffusion of hydrogen due to high pressured storage tanks failure[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22(3): 265-270.
- [12] Zhao P, Zhao Y S. Diffusion research of leaked coal gas in steel plants under natural ventilation conditions[J]. Communications in Computer and Information Science, 2010, 107(4): 173-179.
- [13] Hou Q M, Jiao W L, Zou P H. The analysis for the environmental impact of natural gas leakage and diffusion into the atmosphere[J]. Advanced Materials Research, 2011, 4(225): 656-659.
- [14] 沈立峰, 赵凌宇. 大气污染事故预测系统的研究[J]. 污染防治技术, 2006, 19(5): 3-6.
- [15] 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(6): 55-59.
- [16] 吴德刚. 高斯轨迹烟云扩散模型在贵阳空气质量预报中的应用[J]. 环境科学研究, 1998, 11(6): 5-8.
- [17] Dyer A J. Boundary layer meteor[J]. Atmosphere, 1974, 68(7): 363-372.
- [18] 文仁强, 黄全义, 黄东海, 等. 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[J]. 测绘通报, 2008(4): 52-54.
- [19] 董希琳. 常见有毒化学品泄漏事故模型及救援警戒区的确定[J]. 武警学院学报, 2001, 17(6): 25-28.
- [20] 陈文君, 陈锁忠, 都娥娥, 等. 突发性大气污染事故应急监测系统的设计与开发[J]. 地球信息科学学报, 2011, 13(1): 65-72.

## Influence of DEM Spatial Resolution on the Simulation Results of Gas Diffusion Model

HE Haopeng<sup>1\*</sup>, SUN Haiyan<sup>2</sup> and WANG Xiaozui<sup>3</sup>

(1. Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China; 2. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 3. Science and Technology Development Research Institute, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Sudden gas leakage accidents which happened frequently threaten the security of the public heavily and brought great panic to the society. In order to provide great guidance for emergency departments to implement emergency rescue operations theoretically, it is necessary to discuss the model which is used to analyze the pollution of common gas leakage accident. Firstly, to adapt to simulating gas diffusion of the 3D terrain, based on the research and analysis of the typical gas leakage diffusion model, the terrain factors are introduced to refine the model in this thesis. Then the model is integrated with GIS, which has an advanced space displaying and spatial analysis ability, for analysis and comparison of gas concentration distribution acquired from the previous model and the improved one respectively. And on that basis, we made a further research on gas concentration distribution situation under the conditions of different DEM spatial resolutions, found that the improvement of DEM spatial resolution has some impact on the gas concentration distribution in 3D terrain conditions, and we analyzed the reasons of its effects. The results of the study reveal that the improved model is more accurate and closer to the real urban 3D terrain conditions. At the same time, the improvement of DEM resolution has a big impact on the simulation of the improved model. So, choosing an appropriate DEM resolution in the right time can help emergency services simulate the gas concentration distribution area more reasonable, reliable and timely, which has a certain practical reference value and guiding significance on gas leakage accident emergency.

**Key words:** gas leakage and diffusion model; terrain factor; DEM resolution; GIS

\*Corresponding author: HE Haopeng, E-mail: hphe\_whu@126.com