

基于改进高斯烟羽模型的二氧化氮泄漏模拟分析

胡爽¹, 汤亚玲^{1,2}

1. 安徽工业大学 计算机科学与技术学院, 安徽 马鞍山 243032

2. 安徽工业大学 特种重载机器人省重点实验室, 安徽 马鞍山 243032

摘要:针对因缺乏实际环境因素的考虑而对二氧化氮气体扩散预测不准确的问题,提出可引入降雨量与地形来对气体扩散进行一定的研究分析。以原有高斯烟羽模型为基础,引入雨强以及粗糙度分别代表降雨量与地形来进行改进并进行数值模拟分析。通过对比分析,首先模拟了在同一高度下不同雨强以及不同粗糙度单独对气体扩散的影响;然后再从分别通过对下风向、横风向与气体浓度之间的关系对比;最后,将粗糙度与雨强同时作用并将结果与原模型进行对比分析。根据实验结果发现:降雨量和地势影响了在一定高度上气体扩散浓度值以及扩散范围,对比起传统的高斯烟羽模型,此模拟结果更符合实际。

关键词:高斯烟羽模型;二氧化氮泄漏;降雨量;粗糙度;地理位置

中图分类号:TP391.9 **文献标识码:**A **doi:**10.16055/j.issn.1672-058X.2023.0001.004

Simulation Analysis of Nitrogen Dioxide Leakage Based on Improved Gaussian Plume Model

HU Shuang¹, TANG Yaling^{1,2}

1. School of Computer Science and Technology, Anhui University of Technology, Anhui Ma'anshan 243032, China

2. Provincial Key Laboratory of Special Heavy Duty Robot, Anhui University of Technology, Anhui Ma'anshan 243032, China

Abstract: Aiming at the problem that the prediction of nitrogen dioxide gas diffusion is not accurate due to the lack of consideration of actual environmental factors, this paper proposed that rainfall and terrain can be used to study and analyze the gas diffusion. Based on the original Gaussian plume model, the rain intensity and roughness were introduced to represent rainfall and terrain respectively to carry out numerical simulation analysis. Through comparative analysis, the effects of different rain intensities and different roughness on gas diffusion at the same altitude were first simulated, and then the relationship between downwind direction, crosswind direction and gas concentration were compared separately. Finally, the roughness and rain intensity were applied simultaneously and the results were compared with the original model. According to the experimental results, rainfall and topography affect the gas diffusion concentration and diffusion range at a certain height. Compared with the traditional Gaussian plume model, the simulation results are more practical.

Keywords: Gaussian plume model; nitrogen dioxide leakage; rainfall; roughness; geographical location

1 引言

二氧化氮是一种有毒的刺激性红棕色气体,分子式为NO₂。它常被用作化学反应和火箭燃料中的氧化剂,亚硝基法生产硫酸中的催化剂,并可用于工业生产

硝酸。二氧化氮形成硫酸和硫酸盐雾,比二氧化硫更 有毒,可以渗透人体肺部。即使短间接接触NO₂,肺功 能也会受损;长期接触NO₂会增加呼吸道感染的机会, 并可能导致肺部永久性的器质性改变。

研究二氧化氮泄露后的扩散分布,是制定以及预测

收稿日期:2021-09-13 修回日期:2021-11-16 文章编号:1672-058X(2023)01-0022-06

基金项目:安徽省重点实验室研究课题(TZJQR002-2021);安徽高校协同创新项目(GXXT-2019-008)。

作者简介:胡爽(1997—),女,安徽铜陵人,硕士研究生,从事为虚拟现实、气体扩散研究。

引用格式:胡爽,汤亚玲.基于改进高斯烟羽模型的二氧化氮泄漏模拟分析[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2023,40(1): 22—27.

HU Shuang, TANG Yaling. Simulation analysis of nitrogen dioxide leakage based on improved Gaussian plume model[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2023, 40(1): 22—27.

扩散规律的关键。为研究有毒气体的扩散,国内外的专家提出多种气体扩散模型。目前气体扩散模型主要有高斯模型、BM (Bitter and McQuaid) 模型、Sutton 模型及 FEM3 模型(3-D Finite Element Model, 三维有限元计算模型)等^[1]。其中,对高斯烟羽模型有多种改进,这些改进都是在传统的高斯烟羽下加入环境因素进行讨论研究,使得改进的高斯烟羽模型更加真实。潘旭海等^[2]详细讨论了气象条件及地形条件这两个因素对气体泄漏扩散过程的影响;华风胶等^[3]提出降雨对气体的可溶性清除特性;孙志宽^[4]在传统高斯烟羽模型中修正了风元素;李云云^[5]改进了模型中风速、源强、地面墙体反射作用等;梁俊雨等^[6]在何浩鹏等^[7]提出的地形因子的基础上加入数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据并结合地理信息系统(Geographic Information System, GIS)空间插值技术模拟地形对高斯烟羽模型的影响。在众多研究因素中,研究者先从传统高斯烟羽模型公式中的元素进行研究分析,而在公式中环境因素只有风元素。因此对于风元素的研究改进已经足够多了,而后渐渐意识到地形因素也会对气体扩散有一定的影响力。对于地形元素的研究大部分都结合了 GIS 空间插值算法,采用标准公式的方法,但是缺少对于其他自然环境因素的研究,尤其是降雨这一自然因素,其对于一些可溶于水的气体扩散来说,影响能力十分强大。因此,本文在对地形元素的研究上提出在不同高度地面粗糙度系数这一概念,结合降雨这一经常出现的环境因素进行研究分析和仿真。

因此,在工厂环境中,充分考虑不同降雨量以及不同粗糙度在一定高度时对扩散的影响,将改进后的高斯烟羽模型与传统的高斯烟羽模型进行对比,分析这两个因素与扩散浓度、扩散距离的数值关系,模拟出气体扩散的浓度范围,为预测气体泄漏提供一个有效的方法,从而制定相应的逃生方案以减少人员伤亡。

2 计算模型

2.1 高斯烟羽模型

基于高斯烟羽模型对气体泄漏仿真过程模拟效果较真实,概念清晰,应用广泛等特点,选取该模型模拟泄漏事故。对该模型进行假设:在泄漏的整个过程中,风速是均匀稳定且风向不变,温度呈均匀分布,不存在热传导、热对流和热辐射,遵循质量守恒定律^[8-10]。

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

式(1)中:点 (x, y, z) 处的污染物浓度为 C (单位记作: mg/m^3); Q 为泄露时气体的释放速度(kg/s); σ_y, σ_z 为对应方向上的扩散系数,取值按照 Pasquill 方法; \bar{u} 为平均风速(m/s); x, y, z 为对应方向的距离(m); H 为有效源高度(m)。

2.2 高斯烟羽模型的改进

气体扩散遵循一定的物理规律,但仅根据这些物

理规律所得出的传统高斯烟羽模型无法解释实际气体的扩散过程,是因为其将环境设为理想状态,没有考虑气体扩散时存在的实际环境因素。为了使模型更加精确和实用,根据雨洗和粗糙度两个因素对高斯烟羽模型算法进行了修正。

2.2.1 雨洗作用

降雨可以清洗扩散气体中的颗粒和气溶胶,最终导致降雨和气体的混合物沉淀到地面,这种沉积可以称为湿沉积。通常会以冲洗系数 Λ 来表示,表达式如下:

$$\Lambda = aI^b \quad (2)$$

式(2)中: I 为雨强(mm/h); a, b 为经验系数,可按照是否含有碘来进行取值(含碘: $a = 8 \times 10^{-5}, b = 0.6$;不含碘: $a = 1.2 \times 10^{-5}, b = 0.5$)。由式(2)可知可使用雨强的值大小来代替降雨量的大小。对于雨洗作用所导致的烟羽消耗,可用湿沉降消耗系数来修正源强度:

$$Q_1(x) = Q \exp\left(\frac{-\Lambda x}{\bar{u}} \right) \quad (3)$$

根据式(3)可得到修正的高斯烟羽公式:

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q_1(x)}{2\pi\bar{u}\sigma_y\sigma_z} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{y^2}{\sigma_y^2} \right) \left[\exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(z-H)^2}{\sigma_z^2} \right) + \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(z+H)^2}{\sigma_z^2} \right) \right] \quad (4)$$

2.2.2 地面粗糙度

地面粗糙度有两种含义,一种是表示地面凹凸不平的程度,另一种表示物体表面对流体影响的一个综合力学参数,是地表和大气之间的相互作用。公式采取了不同数值的取值:

$$\sigma_{y1} = \sigma_y (1 + 0.38Z_0) \quad (5)$$

其中, Z_0 为粗糙度系数, σ_{y1} 为加入粗糙元素后垂直于主导风方向的横向扩散系数。

$$\sigma_{z1} = \sigma_z (2.53 - 0.13 \times \log x) \times \frac{Z_0^{(0.35 - 0.03 \times \log x)}}{0.55 + 0.042 \times \log x} \quad (6)$$

其中: σ_{z1} 为加入粗糙元素后铅直方向的扩散系数。扩散系数的大小受地面粗糙度,风速等因素影响。根据式(5)、式(6)可得修正的高斯烟羽公式:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\bar{u}\sigma_{y1}\sigma_{z1}} \left(\frac{y^2}{2\sigma_{y1}^2} \right) \times \left\{ \exp\left[\frac{-(z-H)^2}{2\sigma_{z1}^2} \right] + \exp\left[\frac{-(z+H)^2}{2\sigma_{z1}^2} \right] \right\} \quad (7)$$

由上述公式可知,雨洗作用影响源强的大小,地面粗糙度影响扩散系数的大小。在基本高斯烟羽模型公式中引入式(3)、式(5)、式(6),得到修正的高斯烟羽公式:

$$C(x, y, z) = \frac{Q_1(x)}{2\pi\bar{u}\sigma_{y1}\sigma_{z1}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_{y1}^2} \right) \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_{z1}^2} \right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_{z1}^2} \right) \right] \quad (8)$$

2.2.3 关键技术步骤

本研究利用 C 语言和 Origin 平台实现了在降雨量

以及地面粗糙度两个因素下高斯烟羽模型的模拟仿真。具体步骤如下:

(1) 首先确定了泄露源位置,作为扩散坐标系原点;

(2) 根据国家标准大气环境设定源强、大气稳定度、温度、气压、风速等参数;

(3) 根据泄露源向四周扩散到一定距离的椭圆形区域作为可能受影响区域,以 x, y 方向整体的椭圆形面积作为扩散影响范围。并且以 x 方向距离与扩散浓度之间的关系以及 y 方向距离与扩散浓度之间关系作为气体扩散浓度变化的总体预测趋势。

3 仿真模拟与分析

以河北邢台钢管厂的泄露事故为研究对象,据调查可知环境为自然环境,恒温等压且白天日照为弱,风速为正常风速,根据中国气象局所给标准规定可知取 2.5 m/s ,大气稳定度根据 Pasquill 法可知取 C 级,选取钢管厂的高度作为扩散高度数值为 20 m 。源强根据质量流速公式,计算得出结果为 7.8 kg/s 。由式(1)可绘制出图 1 所示二氧化氮扩散分布图。本研究根据美国工业卫生协会制定的应急响应规划指南 (Emergency Response Planning Guidelines, erpg),采用 ERPG-1, ERPG-2, ERPG-3 作为浓度阈值来划分有毒气体的影响范围^[10-11],扩散图按照红橙黄绿蓝 5 种颜色,代表浓度值不断减小。用气体扩散面积来对比模拟气体扩散的范围影响程度。

如图 1 所示,可以从图 1 中看出最大横风向距离为 150 m ,最大下风向距离为 1800 m ,扩散范围可近似为椭圆形面积为 $270\,000 \text{ m}^2$ 。

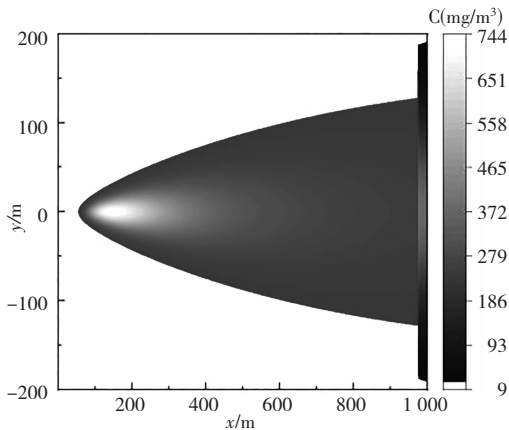


图 1 二氧化氮扩散等浓度曲线
Fig. 1 Isoconcentration curve of nitrogen dioxide diffusion

3.1 雨洗作用影响仿真模拟

根据国家气象总局给定的雨强级别分类表选出 $I = [1.5, 3, 12] \text{ mm/h}$ 作为代表,分布代表小雨,暴雨,特大暴雨 3 种降雨量。代入式(4)计算并绘制出不同雨强下二氧化氮扩散分布图,如图 2 所示。在横风向距离 10 m 处,研究在 3 种不同雨强级别下,浓度与下风向距离之间的变化关系并绘制其相关曲线图,如图 3 所示。

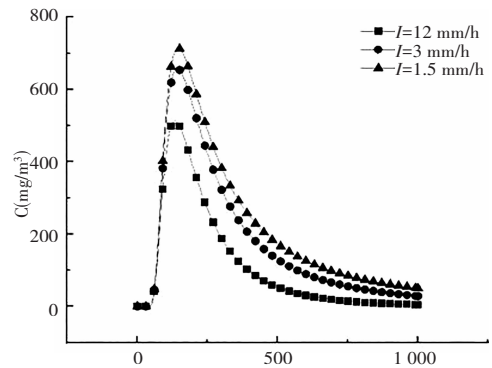
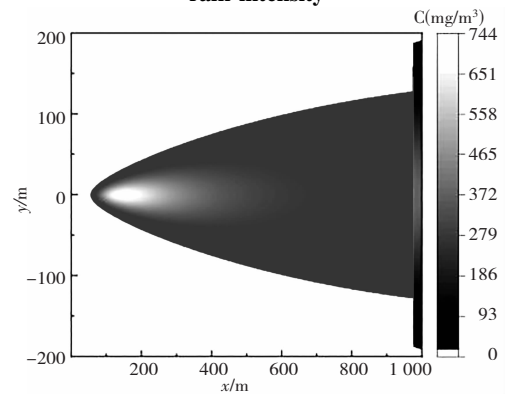
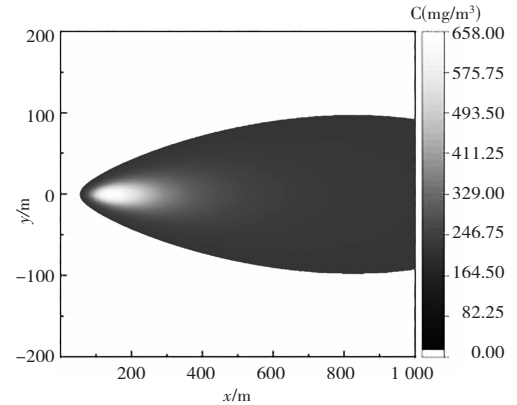


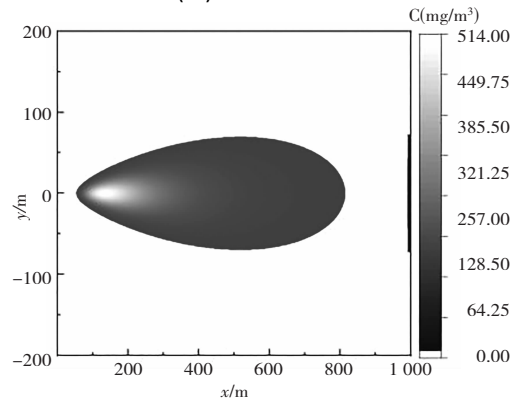
图 2 扩散距离随雨强的变化曲线
Fig. 2 Curves of the diffusion distance varying with rain intensity



(a) $I = 1.5 \text{ mm/h}$



(b) $I = 3 \text{ mm/h}$



(c) $I = 12 \text{ mm/h}$

图 3 不同雨强下的扩散等浓度曲线
Fig. 3 Diffusion isoconcentration curves under different rain intensities

根据图 1 和图 3(a)对比可得,当 $I = 1.5 \text{ mm/h}$ 时

虽然整体面积没有明显的变化,但是最高浓度由 744 mg/m^3 降为 714 mg/m^3 。根据图 1 和图 3(b) 对比可得,当 $I=3 \text{ mm}/\text{h}$ 时在下风向距离为 1 000 m 时,横方向单边距离减小为 90 m,整体的面积可根据图形中所展示椭圆形面积计算,大概为 240 000 m^2 。根据图 1 和图 3(c) 对比可得,当 $I=12 \text{ mm}/\text{h}$,椭圆形面积明显变小,下风向距离最远为 800 m,横风向单边距离为 70 m。所以整体的面积计算结果为 128 000 m^2 。

由图 2 可知,当 $I=12 \text{ mm}/\text{h}$ 时,浓度在下风向距离为 200 m 处达到最大值 514 mg/m^3 ,在下风向距离为 500 m 左右曲线接近平滑,扩散浓度趋向稳定。当 I 为 1.5 mm/h 和 3 mm/h 时,都是在下风向距离为 240 m 处达到浓度最大值,分别为 714 mg/m^3 、658 mg/m^3 ,在下风向距离为 750 左右浓度值才趋向于稳定。

由图 3 与表 1 可知,随着降雨量逐渐增大,图 3(a),图 3(b),图 3(c) 所对应的扩散面积逐渐减小,也就意味着二氧化氮的扩散范围逐渐减小。图 3(b) 与图 3(c) 面积差为 112 000 m^2 ,图 3(a) 与图 3(b) 面积差为 29 900 m^2 ,可知雨强值越大,扩散面积减小地就越明显。由图 3 和表 1 可知,当 $I=12 \text{ mm}/\text{h}$ 时,浓度在下风向距离为 200 m 处达到最大值 514 mg/m^3 ,当 I 为 1.5 mm/h 和 3 mm/h 时,都是在下风向距离为 240 m 处达到浓度最大值,分别为 714 mg/m^3 、658 mg/m^3 。从表 1 可以看出,当雨强逐渐从 0 开始增加,扩散距离与面积不断减小,最大浓度值也逐渐减小。这是因为二氧化氮可溶于水,因此可使用消防栓直接喷水等增加雨强的方法来减小二氧化氮扩散范围。

表 1 二氧化氮在不同雨强下的扩散范围

Table 1 Diffusion range of nitrogen dioxide under different rainfall intensities

| 雨强/ (mm/h) | 最大浓度值/ (mg/m^3) | 最大横风 向距离/m | 最大下风 向距离/m | 扩散面 积/ m^2 |
|---------------|--------------------------------------|---------------|---------------|------------------------|
| 0 | 744 | 150 | 2 000 | 270 000 |
| 1.5 | 714 | 130 | 1 800 | 269 900 |
| 3 | 658 | 100 | 1 200 | 240 000 |
| 12 | 514 | 70 | 800 | 128 000 |

3.2 地面粗糙度影响仿真模拟

由式(5)、式(6)可知地面粗糙度是通过影响扩散系数进而去影响气体扩散,地面粗糙度大致可分别 A 类, B 类, C 类。A 类是指近海海岛、沙漠地区等荒无人烟的地方; B 类是指田野、村庄、丛林、山丘、城镇、郊区等人烟稀少的地方; C 类是指建筑密集的城区。对于地面粗糙度的取值由表 2 所示。

表 2 粗糙度取值

Table 2 Values of roughness

| 高地高度/m | 粗糙度类别 | | |
|--------|-------|------|------|
| | A | B | C |
| 5 | 1.09 | 1.00 | 0.65 |
| 10 | 1.28 | 1.00 | 0.65 |
| 15 | 1.42 | 1.13 | 0.65 |
| 20 | 1.52 | 1.23 | 0.74 |

根据表 2 可知,在不同高度情况下,同类别的粗糙度大小不相同。对于 A 类,接近平原地形,高度越高,粗糙度系数越大,之间的差值也很大。对于 B 类,它区别 A 类的不同在于它设置的情景已经出现一些建筑类或者对于地形学上来说已经出现一些凸起。但是对于 C 类,由于建筑密集,当气体开始扩散时,会很快受到凸起物的干扰。在高度为 5 m, 10 m, 15 m 时粗糙度系数并没有受到影响,只在高度为 20 m 的时候引起了粗糙度系数的增大。根据国家规定,一般住户楼层的总高度至少在 15 m~20 m,而山峰或者凸起山丘的高度也会高于 20 m。而本研究主要是当烟气扩散时,针对人员疏散提供一些预防方法的模拟。所以在本文中选取高度为 20 m 处地面粗糙度进行计算,根据式(7)可绘制出在不同地面粗糙度下二氧化氮的扩散模拟分布图,如图 4 所示。不同扩散方向下扩散距离与粗糙度的关系曲线,如图 5 所示。

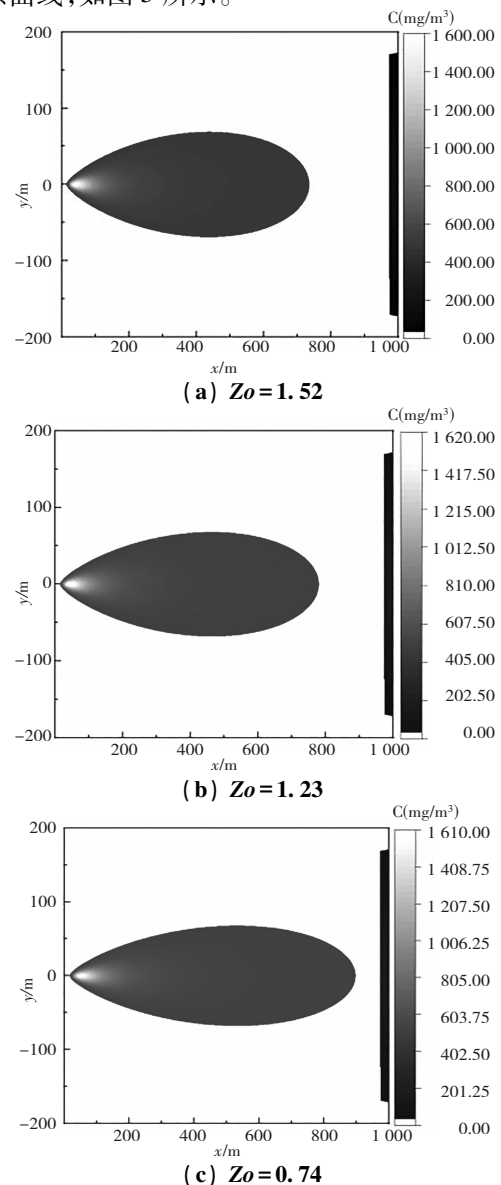


图 4 不同粗糙度类别下的等浓度扩散
Fig. 4 Diffusion of equal concentration under different roughness classes

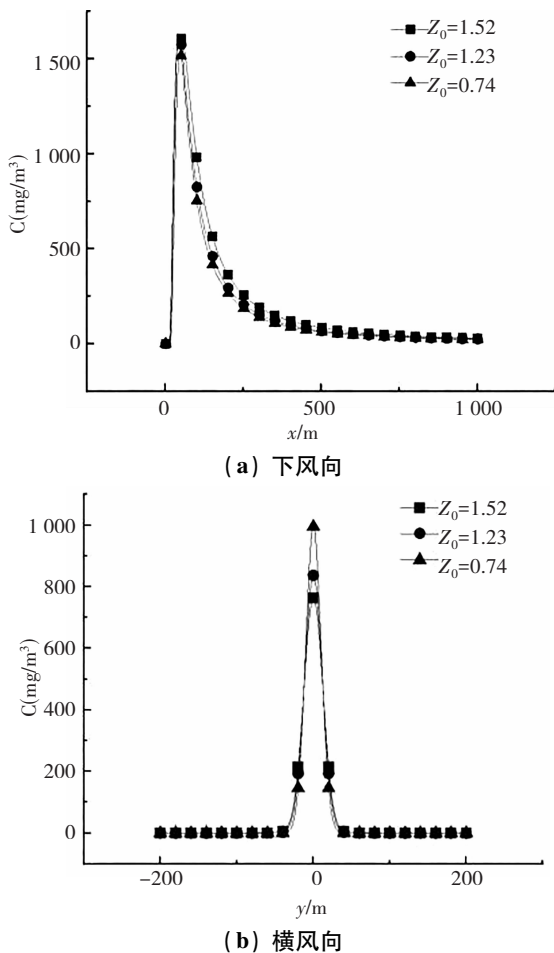


图 5 不同扩散方向的距离与粗糙度关系

Fig. 5 The relationship between distance and roughness in different diffusion directions

根据图 1 与图 4(a) 对比可得, 当粗糙度系数为 1.52 时, 整体面积有明显变化, 最高浓度由 744 mg/m^3 变为 $1\,600 \text{ mg/m}^3$ 。虽然数值变大, 但是达到最高浓度值的下风向距离不同。传统的高斯烟羽模型在下风向距离 200 m 处左右即可获得, 引入地面粗糙度的高斯烟羽模型其浓度最高值在下风向距离 10 m 处左右即可获得。在实际生活中, 气体扩散时浓度值最大的就是在泄漏源附近或者说就是泄露源处。因此, 传统的高斯烟羽模型在这一模拟上存在不足, 而加入粗糙度系数的高斯烟羽模型更加贴近实际。

根据图 1 与图 4(b) 对比可得, 当粗糙度系数为 1.23 时, 最高浓度由 744 mg/m^3 变为 $1\,620 \text{ mg/m}^3$ 。根据图 1 与图 4(c) 对比可得, 当粗糙度系数为 0.74 时, 最高浓度由 744 mg/m^3 变为 $1\,610 \text{ mg/m}^3$ 。由以上可知, 浓度最大值并不是跟随粗糙度系数的线性变化而进行线性变化, 且从图形来看, 粗糙度系数从大到小, 扩散范围就像一张面饼被逐渐向 x 方向摊开。

由图 5(a)、图 5(b) 对比可知, 在同一气体扩散时, 下风向上浓度的最大值大小和横风向大小取值不同。且从图形看出, 下风向上随着粗糙度系数的改变, 浓度改变并不明显且三条曲线下趋势类似。而从横风向

看, 虽然整体走势相似, 但在原点处浓度的最大值区分十分明显。因此, 可以猜测地面粗糙度对扩散的影响主要在于对横风向的影响。

表 3 二氧化氮在不同地面粗糙度下的扩散面积
Table 3 Diffusion range of nitrogen dioxide at different surface roughness

| 地面粗糙度 | 最大浓度值 /(mg/m^2) | 最大横风向距离 /m | 最大下风向距离 /m | 扩散面积 / m^2 |
|-------|-------------------------------|---------------|---------------|------------------------|
| 0 | 744 | 150 | 2 000 | 270 000 |
| 1.52 | 1 600 | 80 | 750 | 120 000 |
| 1.23 | 1 620 | 70 | 800 | 112 000 |
| 0.74 | 1 610 | 60 | 900 | 108 000 |

从图 4 和表 3 可知, 随着粗糙度增大, 图 4(a)、图 4(b)、图 4(c) 所对应的扩散面积逐渐减小, 意味二氧化氮的扩散范围逐渐减小, 面积差值为 $150\,000 \text{ m}^2$, $8\,000 \text{ m}^2$, $4\,000 \text{ m}^2$ 。对比数值可以看出, 粗糙度逐渐增大, 最大横风向单边距离逐渐减小, 最大下风向距离却逐渐增大。但面积差值并没有很明显, 只在有粗糙度影响和没有粗糙度影响时面积差值达到万以上。再将表 3 和表 1 对比, 降雨量逐渐增大对扩散面积的影响强于粗糙度系数的逐渐增大。

将图 4(a) 与图 3(a) 对比可知, 地面粗糙度的影响比雨洗作用影响效果要强。对比图 3 与图 5 又可知, 在 3 种不同类别的地面粗糙度下, 下风向距离与浓度的关系曲线图走势和雨强的相似, 但是雨强对浓度在下风向距离影响比地面粗糙度强。因而, 可采用种植树木等增大地面粗糙度的方法来减小二氧化氮扩散范围。

以上实验, 主要研究的都是气体扩散范围的变化, 因此, 主要衡量标准是扩散面积。可取雨强为 12 mm/h , 地面粗糙度为 1.52 代入式 (8) 进行计算, 可模拟出当雨洗作用和地面粗糙度共同作用于传统的高斯烟羽模型时, 二氧化氮泄漏的扩散分布。可绘制出传统的高斯烟羽模型与改进的高斯烟羽模型两种情况下, 下风向距离与浓度之间的关系曲线图, 如图 6 所示。

从图 6 可知: 同一下风向距离, 改进的高斯烟羽模型的二氧化氮扩散浓度小于传统的高斯烟羽模型的二氧化氮扩散浓度; 改进的高斯烟羽模型在下风向距离近似为 150 m 处, 取得浓度最大值 180 mg/m^2 , 传统的高斯烟羽模型在下风向距离近似为 250 m 处, 取得浓度最大值 744 mg/m^2 。改进的高斯烟羽模型扩散范围可近似为椭圆形面积为 $60\,500 \text{ m}^2$, 小于采用传统的高斯烟羽模型时的扩散范围。得出雨洗作用与地面粗糙度的结合可有效减小二氧化氮扩散范围, 降低扩散浓度且将浓度最大值提前至更接近泄漏点处, 使改进的高斯烟羽模型更接近于实际情况。

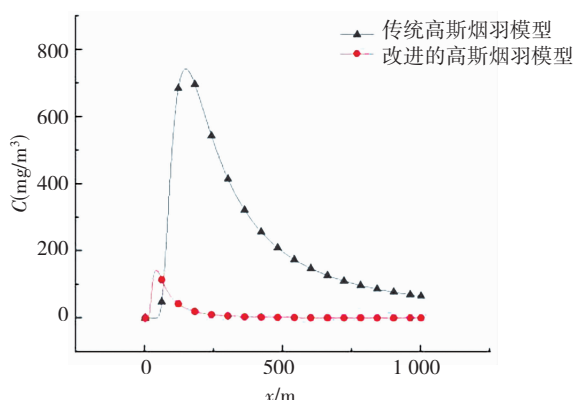


图 6 下风向距离与浓度关系

Fig. 6 Relationship between downwind distance and concentration

4 结 论

通过对工厂环境中二氧化氮扩散问题的研究,分析二氧化氮气体泄漏时,地面粗糙度和雨洗作用的影响能力,确定了给定条件以后的扩散距离以及扩散范围,找出扩散规律并改进高斯烟羽模型。

对比在不同雨强下的下风向距离与浓度关系曲线图,在不同地面粗糙度下的横风向距离与浓度关系曲线图,进而分析得出雨洗作用对下风向距离的影响随着降雨量的增大而增大。地面粗糙度对距离的影响随着粗糙度系数的增大而减小,且对横风向距离的影响能力比对下风向距离影响深。

根据图形分析可得出,本研究在传统的高斯烟羽模型中加入了雨洗作用与地面粗糙度两种因素以后形成了改进的高斯烟羽模型。这两个因素既能单独影响扩散结果,又能综合影响扩散结果。且地面粗糙度的加入使得高斯烟羽模型在初泄露时更符合实际的气体泄露。

本实验的不足在于仅仅只研究了地面粗糙度和雨强两种因素的影响能力,实际生活中影响因素会更加复杂多变且在工厂环境中,气体的种类繁多,须得加入更多的因素去使得高斯烟羽模型更加完整。

参考文献(References):

- [1] 蒋晶晶,胡迎松.复杂封闭空间中气体泄露扩散的三维仿真[D].武汉:华中科技大学,2011.
JIANG Jing-jing, HU Ying-song. Three-dimensional simulation of gas leakage and diffusion in complex enclosed space [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [2] 潘旭海,蒋军成.化学危险性气体泄漏扩散模拟及其影响因素[J].南京工业大学学报(自然科学版),2001,23(1):19—22.
PAN Xu-hai, JIANG Jun-cheng. Research on discharging dispersion of chemical dangerous gases and its influence factors[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2001, 23(1): 19—22.
- [3] 华凤胶.降雨和沉积效应对城市气溶胶的清除特性研究[D].上海:东华大学,2017.
HUA Feng-jiao. Study on the removal characteristics of urban aerosol by rainfall and deposition effects [D]. Shanghai: Donghua University, 2017.
- [4] 孙志宽.高斯烟羽扩散模型再研究[J].环境与可持续发展,2013,38(5):107—109.
SUN Zhi-kuan. Study on Gauss plume diffusion model again [J]. Environment and Sustainable Development, 2013, 38(5): 107—109.
- [5] 李云云.高斯烟羽模型的改进及在危化品泄露事故模拟中的应用[D].广州:广州大学,2013.
LI Yun-yun. The improvement of Gauss plume model and the application of simulation in for leakage accident [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2013.
- [6] 梁俊丽,孔维华,费文华,等.基于复杂地形的高斯烟羽模型改进[J].环境工程学报,2016,6(10):3126—3129.
LIANG Jun-li, KONG Wei-hua, FEI Wen-hua, et al. Improvement of Gaussian plume model based on complex terrain [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 6(10): 3126—3129.
- [7] 何浩鹏,孙海燕,王晓醉. DEM 空间分辨率对毒气扩散模型模拟结果的影响分析[J].地球信息科学学报,2013,15(4):527—531.
HE Hao-peng, SUN Hai-yan, WANG Xiao-zui. Influence of DEM spatial resolution on the simulation results of gas diffusion model [J]. Journal of Geo-information Science, 2013, 15(4): 527—531.
- [8] 王英伟,吴琦,隋祥,等.应用 Excel 模拟高斯烟团模式计算危险气体泄漏[J].环境科学与管理,2008,33(5):173—176.
WANG Ying-wei, WU Qi, SUI Xiang, et al. Application of excel to simulate Gaussian smoke mass model to calculate dangerous gas leakage [J]. Environmental Science and Management, 2008, 33(5): 173—176.
- [9] 张明广,蒋军成.基于 GIS 实时气象信息的毒害性气体泄漏扩散模拟技术[J].南京工业大学学报:自然科学版,2009,31(5):3—4.
ZHANG Ming-guang, JIANG Jun-cheng. Simulation of toxic gas Leakage and diffusion based on GIS real-time meteorological information [J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2009, 31(5): 3—4.
- [10] SADA K, MICHIOKA T, ICHIKAWA Y. Numerical simulation of atmospheric flow and stack gas diffusion under building and complex terrain conditions [J]. JSME International Journal Series B-fluids and Thermal Numerical Simulation Engineering, 2006, 49(1): 48—51.
- [11] 崔威杰,曹博,陈义学.基于贝叶斯 MCMC 方法的高斯烟羽模型不确定性分析[J].核技术,2020,43(4):1—7.
CUI Wei-jie, CAO Bo, CHEN Yi-xue. Uncertainty analysis of Gaussian plume model based on Bayesian MCMC method [J]. Nuclear Technology, 2020, 43(4): 1—7.
- [12] 梁俊杰,孔维华.基于复杂地形的高斯烟羽模型改进[J].环境工程学报,2016,10(6):3125—3129.
LIANG Jun-jie, KONG Wei-hua. Improvement of Gaussian plume model based on complex terrain [J]. Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(6): 3125—3129.