

## 复杂地形条件下大气风场的三维数值模拟研究

谢东<sup>1,2</sup>, 王汉青<sup>2,3</sup>, 李向阳<sup>1</sup>

(1. 南华大学 城市建设学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 中南大学 能源科学与技术学院, 湖南 长沙 410083;  
3. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412008)

**摘要:** 基于  $k-\varepsilon$  湍流模型建立了大气风场的数学模型, 本文计算了不同粗糙度复杂地形下风场, 模拟结果给出了不同环境风速条件风场的速度等值线, 粗糙度为 0.1 m 的地形的气流输运能力要大于粗糙度为 1.0 m 地形, 这为下一步研究污染物的迁移扩散打下了基础。

**关键词:** 大气污染; 风场; 数值模拟; 粗糙度

**中图分类号:** P43      **文献标识码:** A

## Three Dimensional Numerical Simulation Research on Air Flow Field on Complex Terrains

XIE Dong<sup>1,2</sup>, WANG Han-qing<sup>2,3</sup>, LI Xiang-yang<sup>1</sup>

(1. School of Urban Construction, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;  
2. School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;  
3. Department of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan 412008, China)

**Abstract:** Based on  $k-\varepsilon$  turbulent mathematical model, the model of air flow field were built. Air flow field were computed on complex terrains on different roughness degrees. The velocity contours of different environment air flow field were given in this paper. The transportation capacity of the terrain for roughness degree of 0.1 m is greater than the terrain for roughness degree of 1.0 m, which provides the foundation for next contamination migration and diffusion research.

**Key words:** atmosphere pollution; air flow field; numerical simulation; roughness degree

### 0 引言

分析和预报污染物在大气中的扩散过程必须

要考虑大气自身的运动特点, 只有掌握了大气的运动规律才能很好地研究污染物扩散以及污染源对周边环境的影响。目前, 国内外多数学者普遍采

收稿日期: 2009-02-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10775047)

作者简介: 谢东(1978-), 男, 湖北荆州人, 南华大学城市建设学院讲师, 中南大学博士研究生。主要研究方向: 通风安全及污染物控制。

用传统的高斯模式来研究污染物在大气中的扩散问题,而高斯模式是基于对大气流动、下垫面条件和污染物扩散等几点假设的前提下建立的,因而,在应用过程中存在一定的局限性<sup>[1-2]</sup>.随着计算技术的飞速发展,应用数学模型可以求解更为复杂的流动问题,省却了大量复杂的实验准备工作,节约了实验设备的投资,排除了实验方法的不确定因素,具有经济、高效的特点.目前通过计算机模拟来分析大气污染的过程已成为研究大气污染的最有效手段之一<sup>[1-2]</sup>.

大气污染物的对流扩散作用是靠风的作用来完成的,风场在对流扩散求解中是一个非常重要的输入量,所以对风场估算的正确与否,在污染物扩散的计算中是至关重要的.本文利用 Fluent 自编程序对两种地面粗糙度情况下不同环境风速的产生的风场进行了研究.

### 1 大气湍流流动过程及风场的初始化

对于近地面局部区域的大气运动规律应该具备这样的特点:1)地面是风场的固体边界,具有湍流流动固体边界的作用;2)地面上的山体对风场有扰动作用,扰动作用的大小取决于山体高度和迎风面积;3)大气层结造成的空气上下对流作用对近地面风场影响相对于主风向风力影响可以忽略;4)在选取相对山体足够大的范围研究近地风场时,可以近似认为风沿主风向平行流动<sup>[3-4]</sup>.

考虑到山体表面的粗糙度对气流的影响,拟将山体粗糙度分别设置为 0.1 m 和 1.0 m.假定大气边界层风速剖面符合简单的幂指数分布规律,指数  $\alpha$  在梯度高度内保持不变,即:

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{Z}{Z_0}\right)^\alpha$$

式中  $V_0$  为在  $Z_0$  高度的平均风速.参考高度  $Z_0$  一般取为 10 m,即  $V_0$  取 10 m 高度的平均风速.不同的地面条件,幂指数  $\alpha$  不同,一般来说,  $\alpha$  在 0.14 - 0.40 内取值<sup>[5]</sup>.

本文研究中性大气层结条件下,粗糙度为 0.1 m 和 1.0 m 时的  $\alpha$  的取值分别为 0.16 和 0.27.

## 2 数值模拟

### 2.1 计算模型

某矿井总排风井地形处于一山凹中,排风井三面环山,井口离山顶坐标高 10 ~ 15 m.总排风井断面直径 3 m,实际运行风压 754 Pa,出口风速 3 m/s.总排风井高出地面 2 m,为方形筑结构.按

照实际的山体结构建模,按 10 m 一个网格线划分四面体网格,计算模型大小 350 m × 300 m × 150 m,见图 1.排风井尺寸为 2.7 m × 2.7 m × 2 m,排风井中心点坐标为(0,0,41),单位为 m.地形的  $x, y$  坐标是以排风井中心点为原点,  $z$  坐标是以海拔 200 m 高处为原点.地形的最低点是(90, 200, 12.3),最高点是(60, -200, 137),单位均为 m.计算模型的网格图见图 2.

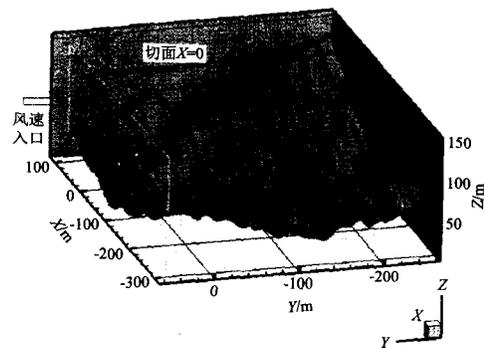


图 1 计算模型示意图

Fig. 1 Schematic illustration of computation model

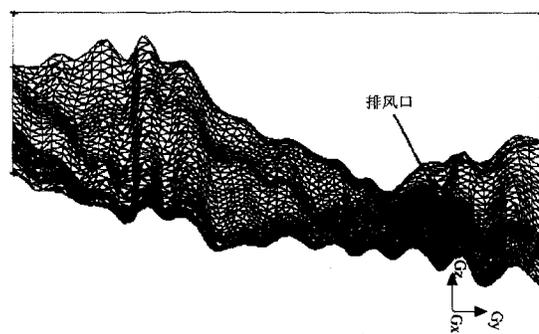


图 2 计算模型网格图

Fig. 2 Grid map of computation model

### 2.2 控制方程

采用三维定常 N-S 方程描述复杂下垫面下大气风场的流动,包括连续性方程、动量方程和湍流方程.

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial X_i}(\rho u_i) = 0$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial X_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial X_i} - \frac{\partial}{\partial X_j}[\mu_{eff}(\frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \frac{\partial u_j}{\partial X_i})] - g(\rho - \rho_{ref})$$

描述湍流的  $k - \epsilon$  方程:

$$\frac{\partial}{\partial X_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial X_i}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial X_i}] + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial X_j} (\frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \frac{\partial u_j}{\partial X_i}) - \rho \varepsilon$$

$$\frac{\partial}{\partial X_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial X_i}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_i}] + \frac{\varepsilon}{K} C_{1\mu} \mu_t (\frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \frac{\partial u_j}{\partial X_i}) - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{K}$$

其中:

$$\mu_{eff} = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \text{ 湍流参数的取值为:}$$

$$C_\mu = 0.10; \sigma_k = 1.00; \sigma_\varepsilon = 1.30; C_{1\varepsilon} = 1.44;$$

$$C_{2\varepsilon} = 1.92$$

### 2.3 边界条件的设定及计算方法的选取

1) 物理描述: 实际大气流动为湍流流动, 选择  $k-\varepsilon$  两方程湍流模型来计算大气流场. 空气为不可压流体, 物性为常数.

2) 边界条件: 环境风速见表 1. 主风向上入口设置为速度入口, 其他出口均设置为压力出口, 顶部按自由边界处理; 地面粗糙度分别设置为 0.1 m 和 1.0 m, 无滑移壁面条件, 采用非平衡壁面函数, 不考虑温度对流动的影响. 各种算例的参数设置见表 1.

表 1 各种算例的参数设置

Table 1 Parameters settings for each case

粗糙度	环境风速/(m · s <sup>-1</sup> )			
	0.5	1.0	2.0	4.0
0.1 m	A1	B1	C1	D1
1.0 m	A2	B2	C2	D2

3) 离散方法: 采用 SIMPLEC 法压力速度修正方法, 湍流动能  $K$  和湍流耗散率  $\varepsilon$  选用二阶迎风格式.

4) 计算精度: 考虑到计算时间和计算效率, 各流动项残差设定小于  $10^{-3}$ .

### 2.4 结果及分析

从图 3 ~ 图 10 中可以看出粗糙度对复杂地形大气流场有较大影响. 粗糙度为 0.1 m 的风场速度等值线中心流场速度要大于粗糙度为 1.0 m 的风场(从等值线的形状可以看出), 即前者的输送能力强. 相同水平风速条件下, 粗糙度大的壁面附近风速小, 即受到的阻力大, 污染物不易扩散, 局部地面污染浓度较高. 随着风速的增加, 风的输送能力增强, 污染物被大量输送到下风向地区. 受入口气流速度增大的影响, 在出口段产生的旋涡

中心区的速度增大, 因此在此处可能导致污染物的积聚.

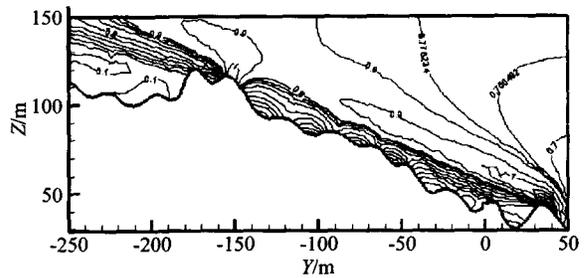


图 3 Case A1 的速度等值线图  
Fig. 3 Velocity contour map of case A1

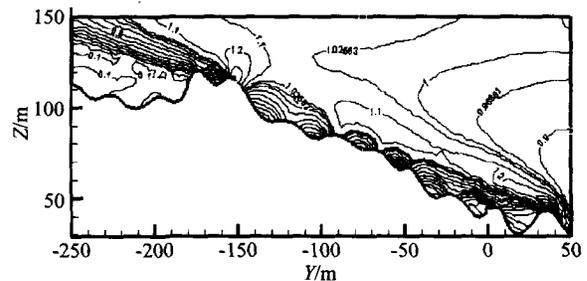


图 4 Case A2 的速度等值线图  
Fig. 4 Velocity contour map of case A2

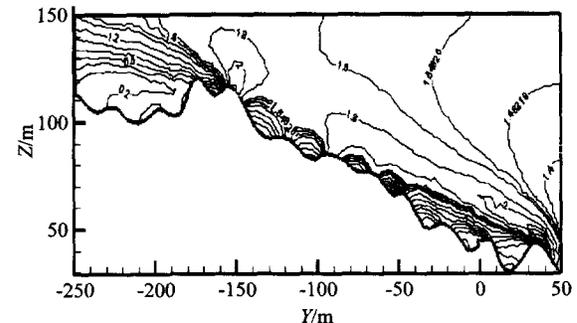


图 5 Case B1 的速度等值线图  
Fig. 5 Velocity contour map of case B1

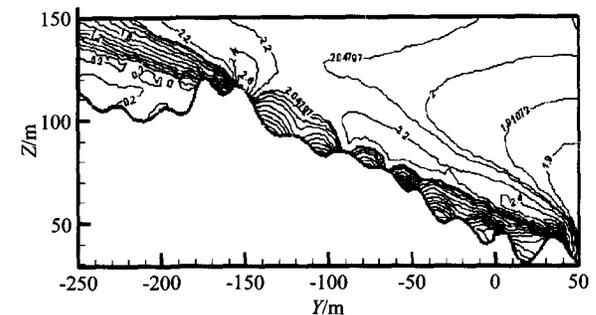


图 6 Case B2 的速度等值线图  
Fig. 6 Velocity contour map of case B2

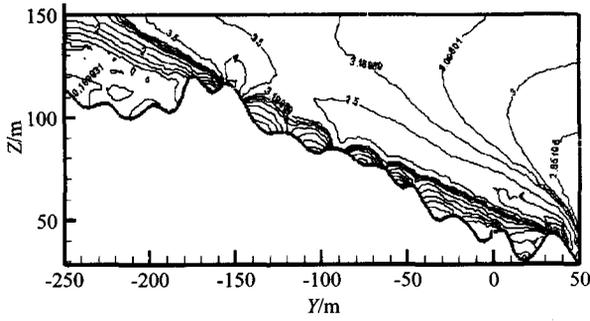


图7 Case C1 的速度等值线图  
Fig.7 Velocity contour map of case C1

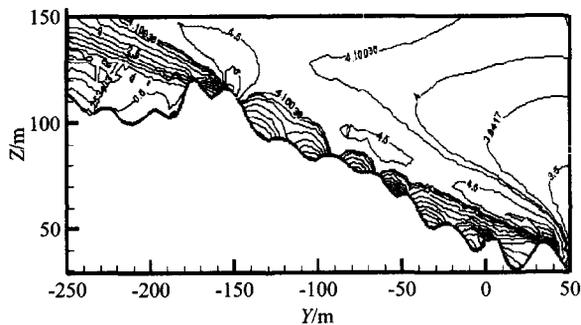


图8 Case C2 的速度等值线图  
Fig.8 Velocity contour map of case C2

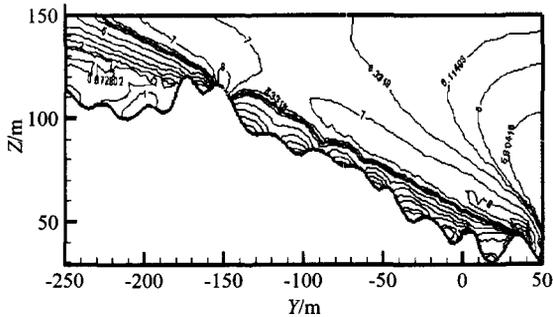


图9 Case D1 的速度等值线图  
Fig.9 Velocity contour map of case D1

### 3 结论

1) 不同的地面粗糙度对近壁面的速度影响

较大,越靠近壁面,阻力越大,对污染物的积聚作用越强.壁面粗糙度为 1.0 m 风场输送动力弱于壁面粗糙度为 0.1 m 的风场.

2) 随着环境风速的增大,风场的输送能力增大,山谷中产生的旋涡动力增强,可能导致污染物在输送过程中的积聚.

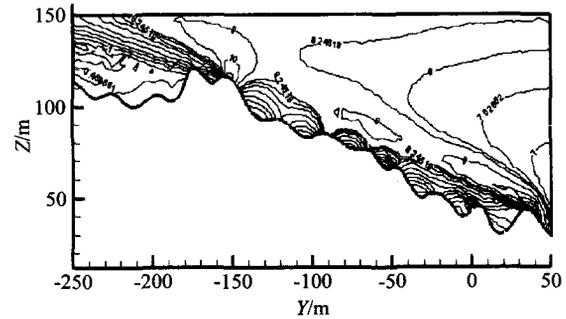


图10 Case D2 的速度等值线图  
Fig.10 Velocity contour map of case D2

3) 采用计算机数学模型模拟大气流场和污染物扩散,模拟结果与理论分析的一致性较好,该方法是研究大气污染的一种有力手段.

#### 参考文献:

- [1] 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室. 空气污染数值预报模式系统[M]. 北京:气象出版社,1999.
- [2] 郝吉明,马广大. 大气污染控制工程[M]. 北京:高等教育出版社,1989.
- [3] 刘长威,陈义胜,胡银枝. 大气风场及污染物扩散的数学模型研究[J]. 包头钢铁学院学报,2002,21(4): 376-379.
- [4] 陈义胜,孙铁. 不同风速下污染物扩散的模拟研究,第七届全国工业炉学术学会论文集[C]. 杭州:2006.
- [5] 桑建国,温市耕. 大气扩散的数值计算[M]. 北京:气象出版社,1992.