

山体尾流对烟羽扩散影响的风洞实验

张茂栓 张志勇 倪东旗

(中国辐射防护研究院)

摘要 本文以中性模拟的相似参数为判据,用四种不同的方法探测组合山体的流场,根据探测结果,探讨了尾流的结构并进行了较细致的区划,指出复杂地形的摩擦速度(u^*)在近地层不为常数。文中还讨论了尾流中扩散参数的变化及烟羽轴线下倾角分布,指出用修正的高斯烟羽模式描述尾流浓度场的可行性。风洞的实验结果与现场实验结果基本一致。

关键词 尾流;烟羽;扩散。

复杂地形上的烟羽扩散是人们关注的重要课题之一。组合山体形成的极其复杂的山体尾流对气载污染物的迁移、扩散有显著的影响。

下面以秦山核电厂风洞实验流场探测结果,讨论复杂山体尾流结构及其对烟羽扩散的影响。地形图见图 1。

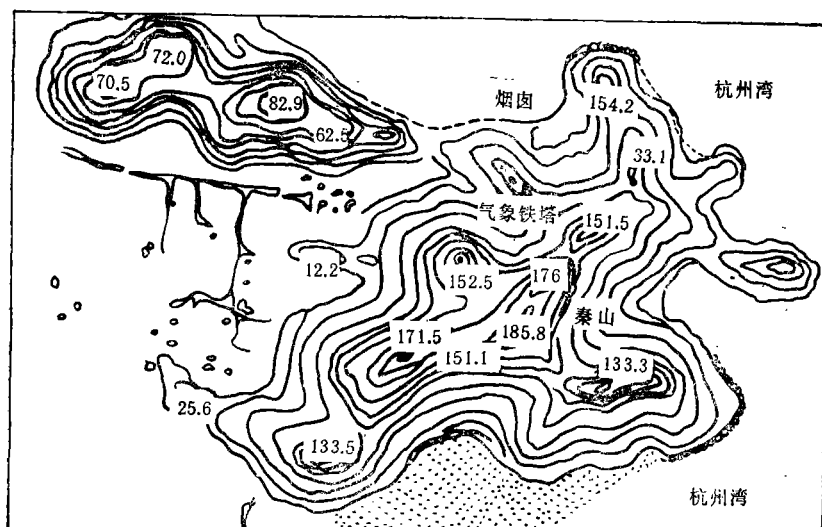


图 1 厂址地形图

一、模拟的理论和方法

环境风洞是在小尺度流场中再现大气中的流动和扩散,基本理论依据是相似性理论,就是保证两个流场(大气与模拟)气流和扩散的相似。Cermak J E.^[1] 等把这些基本要求概

括为使两个流场的一组无量纲参数分别相等。Nemoto, S.^[2] 经过进一步分析,对中性环境风洞而言,主要模拟湍流雷诺数相等和湍强分布一致。

$$\text{湍流雷诺数: } R_{ek} = \frac{UL}{K_m}$$

式中 U 为来流风速; L 为参考长度; K_m 为动量交换系数。

K_m 和能量耗散率 ε 和湍流的平均尺度 Λ 有如下关系:

$$K_m \propto \varepsilon^{1/3} \Lambda^{4/3}$$

模型尺度 L_m 和原型尺度 L_p 满足如下关系:

$$\frac{L_m}{L_p} = \frac{\Lambda_m}{\Lambda_p}$$

模型实验风速 U_m 和原型风速 U_p 之比为:

$$\frac{U_m}{U_p} = \left(\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_p} \right)^{1/3} \left(\frac{L_m}{L_p} \right)^{1/3}$$

模型和原型流动结构相似时: $\varepsilon_m = \varepsilon_p$

$$\text{则 } \frac{U_m}{U_p} = \left(\frac{L_m}{L_p} \right)^{1/3}$$

我们用速度车调节来流的风速廓线,用速度车和地面粗糙元相结合的方法控制来流的湍强分布。

二、实验设备和实验方法

实验是在本院环境风洞内进行的。风洞为直吹式,全长 24.5m。试验段长 10m,宽 1.5m,高 1—1.4m,带有可调顶板。风洞装有可推出的速度车。试验段风速 0.2—9m/s。

实验模型严格按 1/2000 缩比制作,为弥补单一探测手段的不足,采用四种探测方法,其探测结果相互比较,相互印证,以提高探测工作的质量。

1. 热线风速仪探测

该实验使用丹麦 DISA 公司热线风速仪。使用之前,首先由仪器的标定装置对探针进行标定,然后用 B&K 公司频谱分析仪 (Heterodyne Analyzer Type 2010) 发出标准信号对热线风速仪系统进行标定,求出仪器的修正因子。为了探测流场结构,研究烟羽轴线越山倾斜机制,用 X 型探针同时探测气流的二个平均量 ($\bar{U}$ 、 $\bar{W}$) 三个湍流量 ($\sqrt{u'^2}$ 、 $\sqrt{w'^2}$ 、 $\sqrt{u'w'}$) 及气流平均倾角

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{\bar{W}}{\bar{U}} \right).$$

2. 标记物方法

将蒲公英的绒毛以 0.1—0.2mm 的丝线系于热线探针的顶端,作为探测的标记物。当标记物处于自由流中,它水平飘动。当标记物进入尾流区时,由于湍强增加,标记物不仅水平飘动,而且上下抖动。当标记物进入强湍流区时,绒毛上、下抖动加剧。标记物一旦进入回流区,不时向相反的方向(来流方向)飘动。热线探针只给出垂直于热丝的风速分量,用标记物探测到热线风速仪不能完全确定的回流区。

3. 放烟照相方法

为了检验探测结果,同时使探测结果具有可视性,采用放烟照相方法。利用潮湿空气通过四氯化钛液体产生 TiO_2 和 HCl 的原理,而 TiO_2 呈白色烟雾由模型烟囱排出,在黑色背景下照相。烟羽照片通常用来观察流动特点,也可检验近距离的扩散参数。

4. 乙烯示踪方法

模型烟囱排出 99.9% 的乙烯。在烟囱的下风向不同距离垂直地面放置内径为 2mm 的聚四氟乙烯管作为取样器,它埋于模型板内,入口和地面齐平,作为地面采样器。空中采样器类似于总压排管。所采样品由碳氢分析仪检出,空中采样和地面采样可给出水平和垂直扩散参数,空中和地面浓度分布。

三、实验结果

秦山核电厂位于秦山北麓。秦山长 2.5 km,宽 1.5 km,山高 186 m,是位于沿海平原较复杂的山体。我们以厂区主排放烟囱为中心进行了 16 个方位,4 种实验风速 (0.3、0.8、1.5、3 m/s),7 个典型剖面的探测。探测点 100 余个,获得了 1600 多组实验数据。同时还进行了放烟照相和乙烯示踪实验。实验表明,气流流过复杂山体时,其水平流场和垂直流场结构都很复杂。基本上可区分为过山气流和



图2 尾流的烟流显示

绕流。过山气流包括爬坡风和山体尾流(图2)。在山地高度以下还存在着山体绕流。绕流近似随山体变化。山体绕流有时和山沟的通道效应相结合,使烟羽明显水平偏转。

1. 位于山丘边缘的厂区可能处于不同的尾流层中(见表1)。

表1 排放源处16个风向尾流层高度

尾流状况	厚 尾 流 层						薄 尾 流 层				其 他					
风向	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	NNE	NE	ENE	E	WSW	W	WNW	NW	NNW	N
尾流高度(m)	240	270	250	270	270	230	190	170	190	190	150	114	160	123	114	114

较厚的尾流层: 当主排放烟囱位于主山体下风向时, 由于受主山体的影响, 尾流层最厚。

较薄的尾流层: 当主排放烟囱位于山体支脉下风向时, 尾流层较薄。

受尾流边缘及爬山风影响: 当排放点位于山体近上风向时, 会产生此类状况。

2. 尾流结构

山体的存在引起流场的气体动力学畸

变。经典的作法是把这种畸变场划分为位移区、尾流和空腔。由于位移区包含的范围大而与本文讨论的排烟状况关系不是很密切, 我们这里重点讨论由气体动力学脱体而形成的尾流和空腔。

为了进一步了解山体的尾流结构, 同时也为了研究尾流中烟羽的扩散特征, 经过多种手段探测和比较, 参考近年来的研究成果, 将山体尾流划分为三个区域: 尾流阴影区,

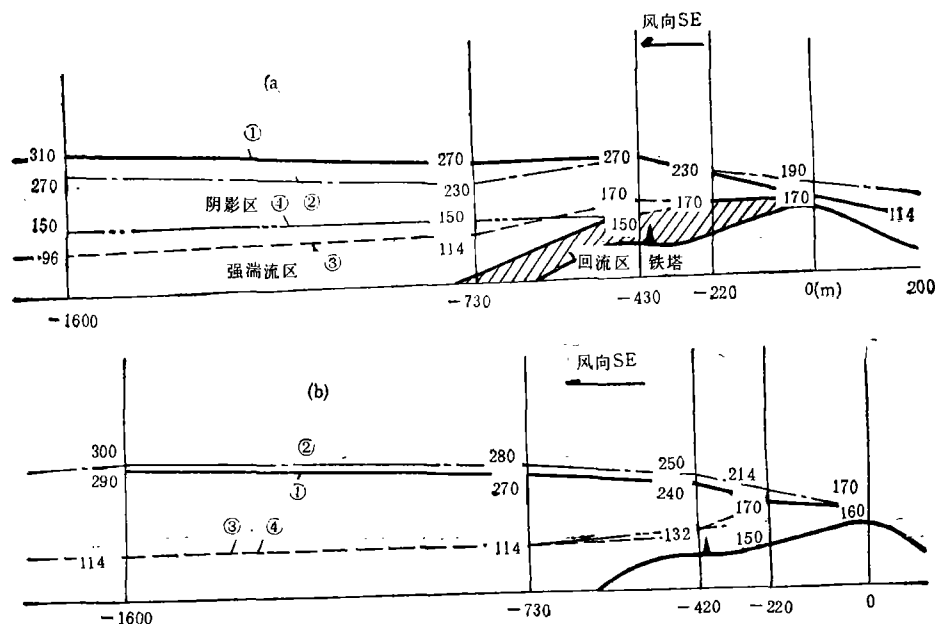


图3 山体尾流结构

a: ① 表示 $U = 1.5\text{m/s}$ 尾流边界线 ② 表示 $U = 3\text{m/s}$ 尾流边界线 ③ 表示 $U = 1.5\text{m/s}$ 强应力线 ④ 表示 $U = 3\text{m/s}$ 强应力线 b: ① 表示 $U = 0.3\text{m/s}$ 尾流边界线 ② 表示 $U = 0.8\text{m/s}$ 尾流边界线 ③ 表示 $U = 0.3\text{m/s}$ 强应力线 ④ 表示 $U = 0.8\text{m/s}$ 强应力线

强湍流区和回流(空腔)区(图 3a)。

尾流阴影区: 位于尾流区的上部。此区湍强和雷诺应力较自由(未扰动)流略大, 到阴影区下部可达数倍。其高度为山高的 2—2.5 倍, 长度为山高的十几倍以上。烟羽在此区的特点是扩散参数变大, 烟羽轴线由上至下倾斜加剧, 但仍不破坏烟羽的轮廓。

强湍流区: 尾流区竖直向下, 湍强和雷诺应力逐渐变大。我们把同一剖面最大湍强和剪应力点连成一线, 称为强应力线。由于目前强湍流区没有一个严格的定义, 经探测将最大应力点高度的 1.1—1.2 倍定为强湍流区的边界。这个区域湍强和雷诺应力较尾流阴影区大, 较厚尾流层湍强和雷诺应力为自由流的 4—8 倍, 较薄尾流层湍强和雷诺应力为自由流的 2—4 倍。强湍流区的起始点大多和回流区相切, 其边界向下游变平或略向下倾。进入强湍流区的烟羽大都呈熏烟型, 烟羽轮廓不分明(图 4)。

回流区: 由于过山气流在背风坡产生的负压而形成的背风涡的运动, 支配着回流区

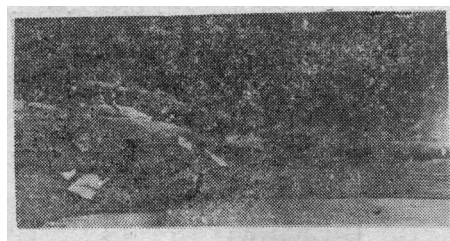


图 4 尾流中烟羽轴线下倾

的流动。其流动特点为部分气流倒流, 烟羽很快被混合到地面, 形成污染。此区湍强和雷诺应力都比较大。回流区的高度较主山体略高, 长度为山体高度的 3—5 倍。

3. 尾流区高度对实验风速不很敏感

我们采用实验风速为 0.3、0.8、1.5、3—3.4 m/s, 实验结果表明, 尾流高度对实验风速不甚敏感(图 3)。

4. 地形效应

尾流及强湍流区的高度, 不但受主山体的影响, 而且受主山体上下游山体的影响。由于尾流内山体的影响, 最大应力线有时随地形起伏, 呈波浪形(图 5)。

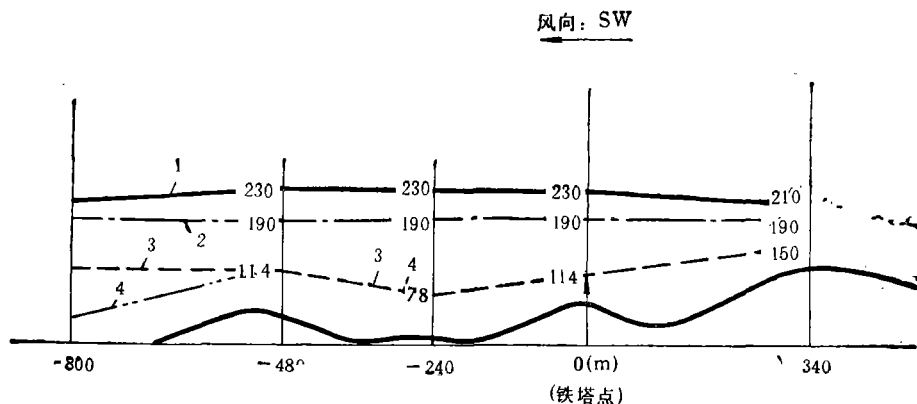


图 5 地形对尾流结构的影响

1 表示 $U = 1.5 \text{ m/s}$ 尾流边界线 2 表示 $U = 3 \text{ m/s}$ 尾流边界线 3 表示 $U = 1.5 \text{ m/s}$ 强应力线 4 表示 $U = 3 \text{ m/s}$ 强应力线

5. 摩擦速度 u^* 不为常数

u^* 为常数是在均匀粗糙下垫面成立的。复杂地形则不同, 不同风向, 不同地点各点的粗糙度不同, 因而对气流的扰动和近地层产

生的剪应力也不相同。因此, 用通常近地层风速廓线公式

$$U = \frac{u^*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

描述复杂地形的风速廓线存在较大误差。不同风向,不同地点速度廓线及湍强和雷诺应力垂向分布明显不同也是一个很好地证明(图6)。湍强和雷诺应力较大的区域,大多

出现在回流区附近的强湍流区和回流区内。在回流区内,由于回流作用,速度廓线呈亏型(图6a)。排烟避开回流区是十分必要的。

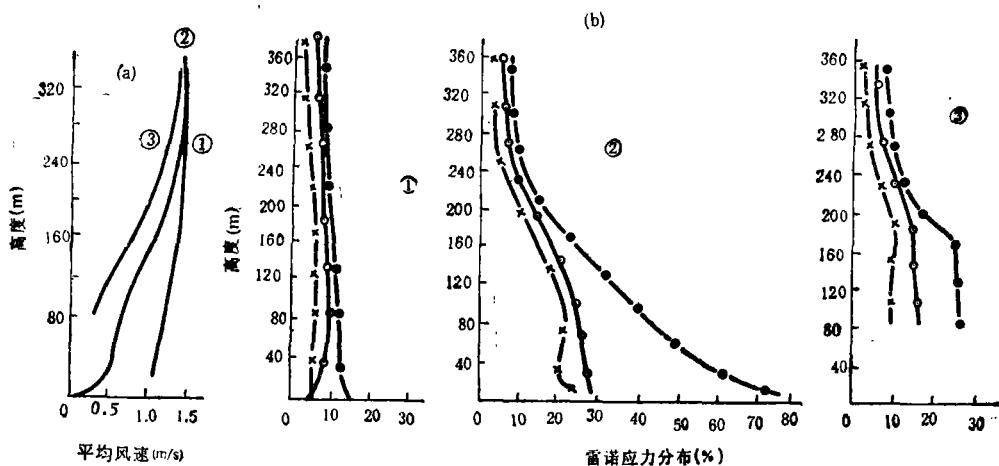


图6 过铁塔垂直剖面风速廓线和湍强雷诺应力分布(风向:SE 试验风速:1.5m/s)

(a): 过铁塔垂直剖面各测点风速廓线 ① 铁塔下风向 2010m ② 铁塔下风向 300m

③ 铁塔点 (b): 过铁塔垂直剖面湍强和雷诺应力分布

($\times$: $\frac{u^*}{U}$, $\bullet$: $I_x = \frac{\sqrt{u'^2}}{U}$, $\circ$: $I_x = \frac{\sqrt{w'^2}}{U}$), ① ② ③ 意义同 a

6. 尾流中烟羽的扩散特性

由于山体的存在而产生的尾流区其流动特征极其复杂,以致用通常的扩散公式或参数描述山体尾流中的浓度场时,常常是不可靠的。这种畸变场的特征是随距山体距离的增加而衰减。这种流场对烟羽弥散的影响表现为:一是在近尾流区内扩散参数变大;二是烟羽轴线下倾的趋势。

(1) 扩散参数 处于尾流中扩散的烟羽,在近距离扩散参数变大,随着下风距离的增加,扩散参数逐渐趋于平原值。风洞实验结果与野外实验结果基本一致(图7)。这是因为近距离受山体的扰动,近地面湍强和雷诺应力急剧增加,因此在排放源下风向200—500m处扩散参数一般较P-G曲线相应值高1.5—2级。随着下风距离的增加,湍强和雷诺应力逐渐变小,垂向分布渐趋均匀(图5b)。由于烟羽在近尾流区内扩散参数变大和

烟羽轴线下倾,虽然下风向2—3km以后烟羽逐渐摆脱山体尾流的影响,而扩散参数仍然大于P-G曲线的相应值。仅在10km之后扩散参数逐渐趋于平原值。风洞实验结果:

$$H_c = 180\text{m 时}$$

$$\sigma_y = 0.808x^{0.733}$$

$$\sigma_z = 2.681x^{0.462}$$

(2) 烟羽轴线下倾角 在尾流中扩散的烟羽,其轴线明显下倾。地形不同,风向不同,排烟高度不同,烟羽轴线下倾角各异。用热线风速仪X型探针探测表明,山前合成速度矢上倾,山后合成速度矢下倾。这和烟羽轴线山前上倾,山后下倾是一致的。来流合成速度矢倾角(β)分布与烟羽轴线下倾角(α)分布基本一致,且前者较小(图8)。这表明, $\bar{W}$ 影响烟羽轴线倾斜;另一方面尾流中湍强的增加也对烟羽轴线倾斜有贡献。

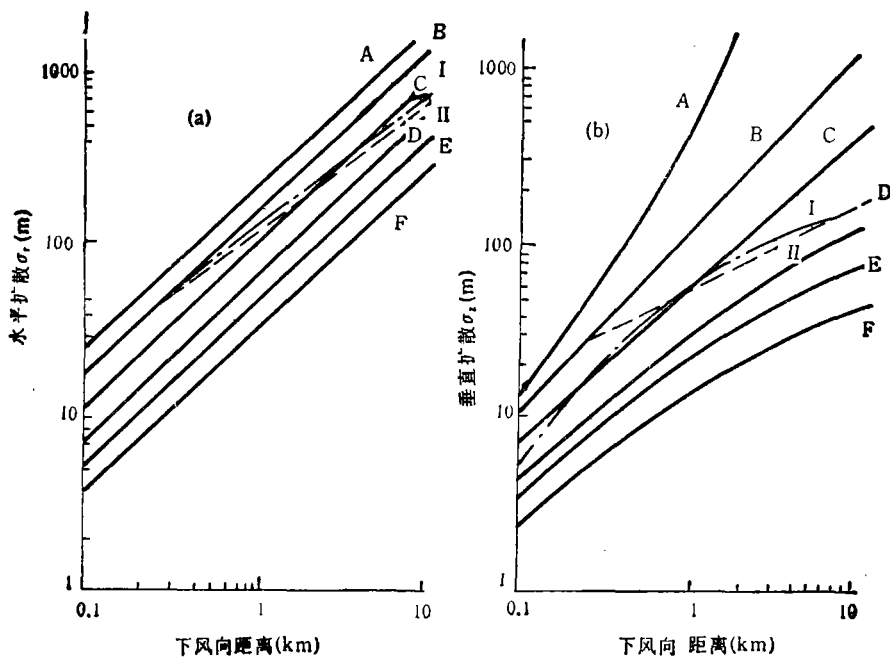


图 7 风洞和现场实验扩散参数比较
(a): I SF₆ 实验值 $\sigma_y = 0.907x^{0.73}$ II 风洞实验结果 $\sigma_y = 0.808x^{0.73}$
(b): I 现场实验结果 $\sigma_z = 1.208(x-77.5)^{0.336}$ II 风洞实验结果 $\sigma_z = 2.681x^{0.462}$

图 9 表示不同高度排放源当地的烟轴平均倾角分布。

表 2 表示两个特定高度排放源当地及下风向气流的倾角分布。

目前，对复杂地形上地面污染物浓度的估算，国内外已进行了不少研究。其中变型

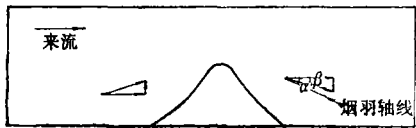


图 8 山前山后平均合成速度矢示意图

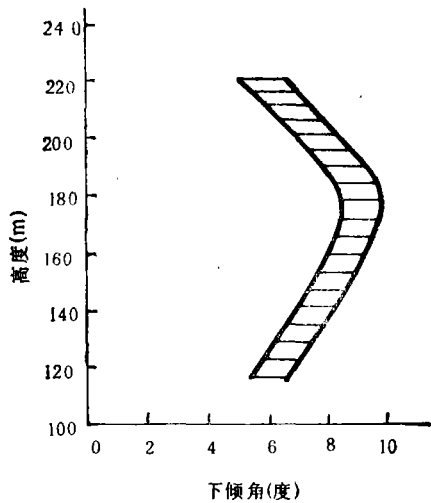


图 9 排放源处垂直方向烟轴下倾角分布

表 2 气流倾斜特性

释放高度 (m)	释放点气流倾角(度)	释放点下风向 200m 烟轴处气流倾角(度)	其 他 特 性
120	6	5	释放点下风向 900m 处气流倾角小于 2 度
180	9	5	释放点下风向 900m 处气流倾角小于 2 度

的高斯烟羽模式仍被经常采用。根据本文的实验结果,参考现场 SF₆ 示踪部分结果,把尾流对烟羽扩散的影响归结为近距离扩散参数的增加和烟轴的下倾。

为了检验风洞结果的合理性,根据修正的高斯烟羽模式计算得到轴线归一化浓度

$$\left(\bar{c} = \frac{cU}{Q} \right)$$

的预测值。图 10(曲线)预测值与风洞地面轴线采样结果有较好的一致性。同一图中还画出根据现场 SF₆ 示踪计算得到的轴线归一化浓度值。可以看出,预测结果与示踪实验结果基本一致。因此,采用实验得到的扩散参数和烟羽轴线下倾角对高斯模式修正是可行的。

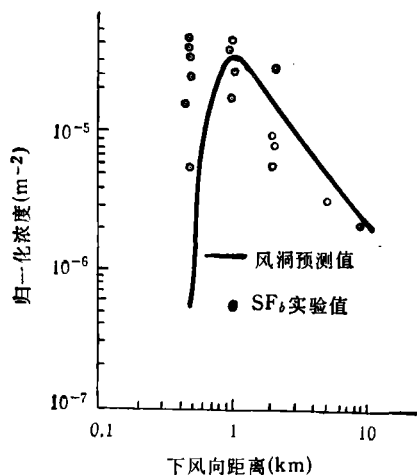


图 10 风洞与现场实验轴线归一化浓度值比较

四 结 论

1. 采用四种探测手段相结合的方法研究复杂山体尾流结构及其对排烟的影响是一个可行而有效的方法。多种探测手段并用,互相补充互相印证,对所研究问题能获得更深入的了解。

2. 实验风速对尾流高度影响不大;风向

不同尾流结构不同;主山体及其上下游的山体对尾流结构有明显的影响。

3. 对复杂地形近地层各测点的雷诺应力探测表明,摩擦速度 u^* 不为常数。因此,用

$$U = \frac{u^*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

描述复杂地形近地层速度廓线存在较大误差。

4. 尾流的结构可分为:尾流阴影区、强湍流区和回流区。尾流高度约为主山体高度的 2—2.5 倍。尾流区长度为山体高度的十几倍以上。回流区的高度较主山体略高,长度为主山体高度的 3—5 倍。强湍流区起始点大多和回流区相切,向下游平直伸展或略向下倾。

5. 在尾流中扩散的烟羽有以下特征:一是在近尾流区扩散参数变大;二是烟羽轴线明显下倾,二者明显影响地面最大浓度及其下风距离,应用实验获取。采用修正的高斯烟羽模式预测尾流中浓度场是可行的。

五、结 束 语

应当指出,山体尾流结构及其对烟羽扩散影响是一个十分复杂的课题。不同地点、不同方向的来流、山体尾流结构是各不相同的。即使同一地点,同一来流,不同高度,其扩散参数和烟羽下倾角也不尽相同。我们仅讨论了较为概括和一般的情况,今后准备对该问题作进一步探讨。

致谢 本文的测试工作曾得到航天部七〇一所傅光明高级工程师的帮助,在此表示谢意。

参 考 文 献

- [1] Cermak, J. E., *AIAA*, 9, 1746—1754, (1971).
- [2] Nemoto, S., *Met Geophys*, 12, 30—52, (1961).

(收稿日期: 1990 年 3 月 17 日)

Correlations between TTC-Dehydrogenase Activity and Other Active Parameters during Aerobic Digestion of Excess Activated Sludge.

Zhou Chun-sheng, Han Xiang-kai (Jinlin Institute of Architecture and Civil Engineering): *Chin. J. Environ. Sci.*, **12**(1), 1991, pp. 2—7

The results obtained shows that TTC-dehydrogenase activity (DHA) correlates significantly with oxygen uptake rate (OUR), activated bacteria number (most probable number, MPN) and suspended solid (MLSS), of which the correlative coefficients are 0.952($n=22$), 0.889($n=19$) and 0.778($n=19$) respectively. In addition there also exist significant correlations among OUR, MPN and MLSS each other. However, correlation between TTC-DHA and MLSS is more significant than that between OUR and MLSS, and the detection sensitivity of TTC-DHA was higher than that of OUR. Therefore TTC-DHA would be an efficient parameter in the experiments or in operational control. It can also be used to estimate non-degradable MLSS concentration during aerobic digestion of excess activated sludge.

Key Words: TTC-dehydrogenase activity, excess sludge, aerobic digestion, correlation, parameter.

Characteristics of Dephosphorization of Several Industrial Wastes Containing Calcium in the Fixed Bed. Xie Wei-min, Zhang Zhao (School of Environmental Engineering, Tongji University, Shanghai): *Chin. J. Environ. Sci.*, **12**(1), pp. 7—11

As calcium compounds had been used as efficient dephosphorus agents, the blast furnace slag(A), converter slag(3) and the wastes(C) from bone char production were used in the fixed beds for dephosphorizing. the results indicated that the waste A had some effect of phosphate removal under the proper conditions including calcium concentration and pH, the waste C was satisfactory when calcium was filled up enough to the solution. The waste B produced a lot of calcium ions with the expansion of its organization caused by the hydrolyzations process of single CaO. Considering the dissolution and adsorption of calcium ions in waste B and waste C respectively, the combination of these two wastes is expected to be a kind of efficient and inexpensive dephosphorus agent.

Key Words: calcium dephosphorus agent, fixed bed, blast furnace slag, wastes.

Experimental Investigation of Complex Mountain Wave Structure and Its Influence on Plume Diffusion in the Wind Tunnel. Zhang Mao-shuan, Zhang Zhiyong, Ni Tong-gi (China Institute for Radiation): *Chin. J. Environ. Sci.*, **12**(1), 1991, pp. 12—18

The similar parameters of neutral simulation were used as criteria in the experiments, the mountain wave structures were measured by four methods, and the effects of wind velocity, wind direction and terrain on the wave structure were given. According to the probed results, the wave structure were further investigated and the wave area was divided in details. And u^* was not a constant in approach flow of complex terrain. The changes of diffusion parameters and the distribution of declining angles of plume axis in the wave area were also discussed. The results showed that the concentration field in the wave was described by the revised Gauss model that seemed feasible enough. Experimental results obtained from wind tunnel conformed approximately with that from the field.

Key Words: mountain wave structure, plume diffusion, wind tunnel.

Soil Microorganisms and Enzyme Activity in the Formation of Sand Dunes. Chen Zhu-chun (Lanzhou Institute of Desert Research, Academia Sinica, Lanzhou): *Chin. J. Environ. Sci.*, **12**(1), 1991, pp. 19—24

The research shows that in the sand dunes which were fixed with artificial vegetation and had formed a thick and tenacious crust, the soil microbe population was in large amounts, and enzyme activity was strong. In the shifting sand dunes, however, there exists a small quantity of soil microorganisms. Although the soil microbe population and enzyme activities in the fixed sand dunes and the fixing ones, were different, their tendencies of growth upward or downward, were basically similar because of similar physicochemical properties in the identical layers of soil. Nevertheless, the results sharply contrasted with those in the shifting sand dunes.

Key Words: crust of sand dune, artificial vegetation, microorganism, enzyme activity.

Application of A New Flocculent SFC in Sludge Dewatering. Xia Xiao-ming (Xiantan University, Hunan Province); Hou Wen-hua, Zhou Ding (Harbin Institute of Technology); Xiao Jin (South China University of Technology): *Chin. J. Environ. Sci.*, **12**(1), 1991, pp. 24—27

0.5% SFC with respect to the weight of dried sludge was added to excess sludge taken from a sewage plant. After filtering at a vacuum of 0.4 bar, the water ratio of the sludge was decreased from 99.5% to 75%; its volume reduced to 1/50; its colosific value increased to 70 times of the original value; its specific resistance reduced to 1/2 or less with a better stripping property; and, the clarity of filtrate was high.

Key Words: flocculent, sludge dewatering.

A Research on Smell-Detection of Stenchy