

河谷盆地冬季大气输送扩散的六氟化硫示踪模拟*

郇 桂 芬

(甘肃省环保所)

彭 楚 渊

(西北电力设计院)

施 介 宽

(兰 州 大 学)

因为六氟化硫(SF_6)的化学性质稳定、无毒、大气本底低和检测灵敏度高,故它常被用作大气扩散研究的示踪物质。

为预测某河谷城市一新建电厂 210m 烟囱的排放物对大气环境的影响,我们在冬季进行了 SF_6 示踪大气扩散试验,以模拟污染物的空间分布,探讨大气输送扩散规律。

一、 SF_6 示踪大气扩散试验

示踪试验的释放源位于拟建电厂的烟囱处。模拟高度 400m,相当于烟源的有效高度。

采样网的布设是以源点为中心,在其周

围按 0.5、1、2、3、4、5、6、7 km 的 8 道弧上布设 68 个地面采样点。两条采样线间的夹角为 $6-20^\circ$,并沿主导风方向分别在东 1km 处和西 1、2、4、6km 处设置 5 个垂直采样点(图 1)。垂直采样点 10、115、235、315、365、415、465m 7 个高度。每次试验根据气象条件,挑选 48 个地面点和 4 个垂直点采样。静风时为圆周采样,偏东风时沿下风向按 70° 扇形采样网采样。

每次连续释放 1.5—4.5h。采样 1.5—5h。每道弧开始采样的时间根据释放时地面到释放高度处的平均风速以及该采样弧与释放点

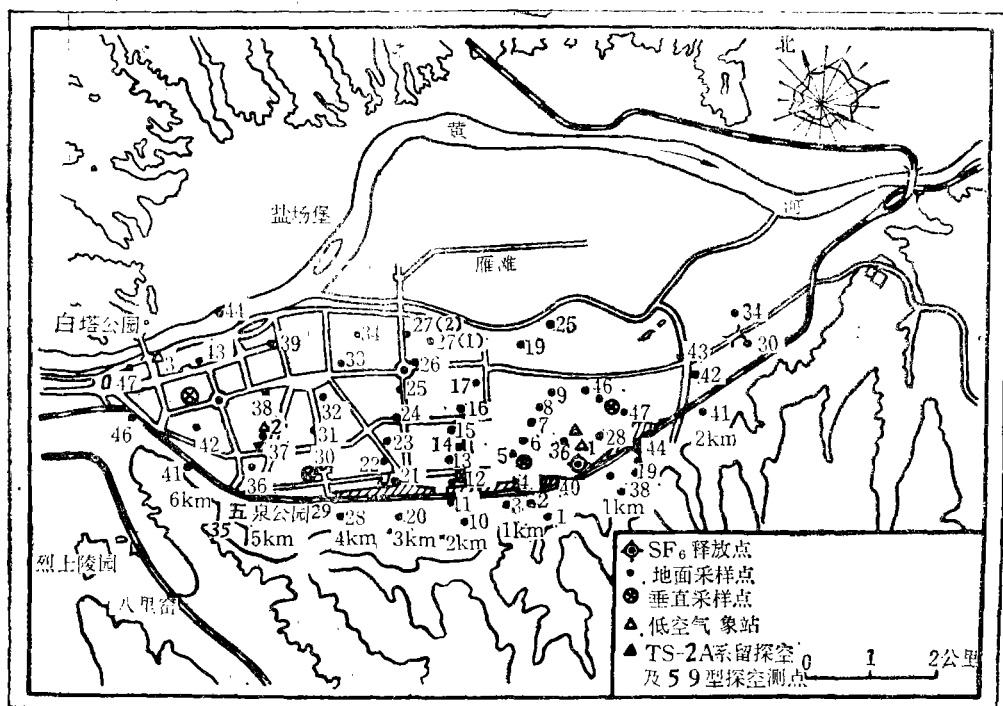


图 1 地形及试验布点图

的距离决定。由于该地风速小(多在 1m/s 左右),较近的弧线(0.5、1km)一般在释放后 10—20min 开始采样,并随弧线距离的增加,

* 参加本工作的还有李炎泉、朱丽霞、王瑞丰同志。兰州大学陈长河、黄建国对本工作进行了指导。人民解放军 84664 部队承担 SF_6 采样,省环保所、省监测站负责 SF_6 分析。

开始采样的时间逐渐推后。

释放速率及数量根据释放高度、气象条件及粗略估计的扩散参数计算确定。我们以最后一道弧上偏离烟云轴线的点能采到可检测浓度 ($\geq 1 \times 10^{-11} \text{m}^3/\text{m}^3$) 所需的最小源强为释放量的依据。20 次试验的平均释放量在 5—6kg/h 之间, 最小释放量为 4.3kg/h。

将 $\phi = 6\text{mm}$ 聚氯乙烯管的一端与转子流量计和装有减压阀的 SF_6 钢瓶连接, 另一端用 33m^3 系留气球将其携带到预定高度, 地面操作释放。试验时气温低于零下 10°C , SF_6 释放不畅。在距 SF_6 钢瓶 2m 远处明火烘烤后, 释放效果理想。

地面用 100C.C 玻璃针管手动抽气采样, 垂直采样用气球携 DQ-3 型采样器于预定高度自动采样。每个样品采 10min。地面样间隔 10—20min, 每次试验采 6—10 个样。垂直采样间隔 30min, 每次试验采 3—6 组样。

样品分析用带电子捕获鉴定器的气相色谱仪, 仪器最小检出量分别为 1×10^{-12} 、 2×10^{-11} 、 $8.8 \times 10^{-11} \text{m}^3/\text{m}^3$ 。

为了掌握试验时的气象条件, 试验期间在释放点、5km、7km 处设置三个低空气象站(图 1), 进行低空风场观测; 释放点与 5km 两站同时进行低空温度场探测。在释放点还安排了 161m 铁塔风、单向风标、定高气球、平衡气球等观测项目。小球测风、平衡气球、探空仪等均用双经纬仪跟踪, 定高气球用雷达和双经纬仪跟踪。探空仪器为 TS-2A 型系留探空仪及 59 型低空探空仪。铁塔风观测使用日本数字风速表。

二、试验期间的气象背景和大气稳定度

20 次试验中, 一般天气为晴间多云, 风速较小, 早晨多逆温, 下午为近中性或弱不稳定, 有时出现下沉气流。

为确定试验时的大气稳定度, 我们分别用帕斯奎尔法、特纳尔法、USAEC 法、TVA

法及理查逊数法进行大气稳定度划分, 结果见表 1。由表 1 可见, USAEC 和 TVA 因都以温度梯度为分类判据, 其结果具有极好的一致性。理查逊数的划分结果和前两者的吻合程度也较好, 唯有特纳尔和帕斯奎尔的划分结果偏差较大。我们认为, 帕斯奎尔法和特纳尔法是根据地面风速和辐射等级来划分稳定度, 仅能反映近地面的大气稳定状况。而我们这次试验是在冬季低风速、大气中性偏稳的条件下进行, 研究高架源的输送扩散, TVA 法与我们的条件更接近。为此, 本次大气稳定度划分基本参照 TVA 的标准, 我们按

表 1 稳定度划分结果比较

试验序号	本次试验	帕斯奎尔	特纳尔	USAEC*		TVA**		理查逊数	
				0—400m	400—600m	0—400m	400—600m	0—400m	400—600m
1	D ₁	B	B	D	D	D ₁	D ₁	D	D
2	D ₂	B	B	D	D	D ₂	D ₂	D	D
3	E ₁	F	F	E	E	E ₁	E ₃	E	E
4	D ₂	F	E	D	E	D ₂	E ₄	D	D
5	E ₂	F	F	E	E	F ₂	F ₂	E	E
6	E ₁	B	B	E	E	F ₁	F ₂	F	E
7	E ₂	F	E	E	E	F ₂	F ₄	E	D
8	D ₁	B	B	D	D	D ₁	E ₁	D	D
9	D ₂	B	B	D	E	D ₂	E ₂	E	E
10	E ₁	B	B	D	D	E ₁	E ₁	D	D
11	D ₂	B	B	D	E	D ₂	E ₂	C	D
12	E ₁	F	D	E	D	E ₁	D ₂	D	E
13	D ₁	B	D	D	E	D ₁	F ₂	C	D
14	E ₂	F	F	E	E	E ₂	E ₄	E	D
15	E ₄	F	F	E	E	E ₄	E ₂	E	D
16	E ₃	F	F	E	F	F ₄	F	E	F
17	E ₄	F	F	E	E	E ₄	E ₄	E	E
18	E ₂	B	E	E	E	E ₂	E ₁	E	E
19	D ₂	B	D	D	D	D ₂	D ₂	D	D
20	D ₁	B	D	D	D	D ₁	D ₂	D	E

* 美国原子能委员会提出的方法。

** 美国田纳西州流域管理局提出的方法。

它的指标进行延拓, 延拓后的稳定度划分标准见表 2。用该标准划分的大气稳定度见表 1。

在进行的 20 次试验中, 早上有 8 次是 E 类 1 次是 D 类, 下午 11 次有 8 次是 D 类 3 次是 E 类。

表 2 本次试验稳定度划分标准

稳定度分类	Y(°C/100m)
A	$\geq Y > 1.9$
B	$1.9 \geq Y > 1.7$
C	$1.7 \geq Y > 1.5$
D ₁	$1.5 \geq Y > 0.87$
D ₂	$0.87 \geq Y > 0.55$
E ₁	$0.55 \geq Y > 0.18$
E ₂	$0.18 \geq Y > -0.18$
E ₃	$-0.18 \geq Y > -0.54$
E ₄	$-0.54 \geq Y > -1.5$
F	$-1.5 \geq Y$

三、SF₆ 模拟的大气污染状况

本次试验自 1980.12.18 至 1981.1.19 共进行了 20 次。其中大气层结稳定的有 11 次(早晨 8 次,下午 3 次),中性条件 9 次(上午 1 次,下午 8 次)。共采得地面浓度值 6284 个,空中浓度值 1545 个。采得的 SF₆ 浓度与释放量成正比。为使各次试验的浓度便于比较,将采得浓度都换算成每秒钟释放 1g 时的浓度(m³/m³),称为归一化浓度。

为从 SF₆ 地面浓度得知电厂运行后 SO₂ 的污染状况,作了相当于 SO₂ 超标的 SF₆ 浓度换算。已知电厂 SO₂ 实际排放量为 1260 kg/h,国家规定的 SO₂ 一次浓度值的二级标准为 0.5mg/m³。根据 SO₂ 和 SF₆ 的容重以及释放时的大气压力和温度,换算得到本试验 SF₆ 归一化浓度大于 2.58×10^{-10} m³/m³,即为电厂运行后的超标浓度。

换算方法如下:

标准状况下(101324.72Pa, 20°C) SO₂ 容重为 2.927kg/m³, SF₆ 容重为 6.16kg/m³。

本区冬季(84792.792Pa, 0°C)每小时释放 3.6 公斤 SF₆ 相当的体积为:

$$V_{\text{SF}_6} = 3.6\text{kg/h} \times \frac{1}{6.16\text{kg/m}^3} \\ \times \frac{273}{273 + 20} \times \frac{760}{636} \\ = 0.6507\text{m}^3/\text{h}$$

同样条件下(84792.792Pa, 0°C)每小时

释放 1260kg SO₂ 相当的体积为:

$$V_{\text{SO}_2} = 1260\text{kg/h} \times \frac{1}{2.927\text{kg/m}^3} \\ \times \frac{273}{273 + 20} \times \frac{760}{636} \\ = 479.29\text{m}^3/\text{h}$$

SO₂ 的一次浓度标准为 0.5mg/m³, 换算为体积浓度为:

$$V_{\text{SO}_2\text{标准}} = 0.5 \times 10^{-6}\text{kg/m}^3 \\ \times \frac{1}{2.927\text{kg/m}^3} \times \frac{273}{273 + 20} \\ \times \frac{760}{636} \\ = 0.190 \times 10^{-6}\text{m}^3/\text{m}^3$$

电厂排放 SO₂ 达到该标准时相应 SF₆ 的体积浓度为:

$$0.190 \times 10^{-6} \div \frac{479.29}{0.6507} \\ = 2.58 \times 10^{-10}\text{m}^3/\text{m}^3$$

这样,根据 20 次 SF₆ 示踪试验归一化浓度的分布,就可知道电厂运行后 SO₂ 的污染状况。

20 次试验中,8 次出现超标,其中下午 7 次,早晨 1 次。污染气象条件分析表明:超标原因首先是风向有利,8 次超标风向均为偏东风,采样区恰处于源的下风向。第 7 次试验在早晨,大气稳定度属 E 类,试验区也有 4 个点超标,原因是当时风向有利,源点风向为 N61°E。其次,试验期间有 6 个下午出现下沉气流,均出现超标。最后,超标的 8 次有 7 次在下午,这除与风向和下沉气流有关外,与下午大气趋向于不稳定也有关系。由此认为:偏东风,下沉气流,中性不稳定的大气层结,是造成试验区污染的气象条件。

四、污染物的散布和扩散参数

1. 地面浓度随横风距离分布类型

20 次试验,在同一道弧上相邻三个以上的采样点均采到 SF₆ 浓度,且峰值浓度 $\geq 5 \times 10^{-11}$ m³/m³ 的资料共 123 组。将其绘成浓度

随横风距离分布图,其分布形式可分为两种类型。

(1) 正态型: 地面浓度在横风向基本呈正态分布(图 2), 计有 53 组。另有 15 组呈靠山半峰型, 浓度分布表现为一个不完整的峰, 峰值都出现在靠山的点。二者共 68 组, 占总数的 55%。

(2) 散布型: 浓度较小, 在横风向上大

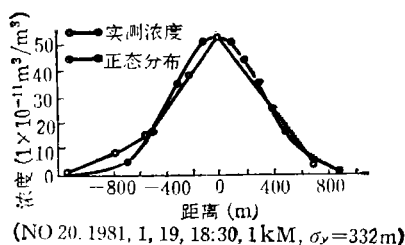


图 2 似正态横向浓度分布

No. 20: 1981. 1. 19, 18: 30, 1km, $\sigma_y = 332\text{m}$

致均匀分布, 计有 46 组。另有 9 组为不规则的多峰型, 二者共 55 组, 占总数的 45%。

2. 横向扩散参数

对基本符合正态分布的 53 组数据, 按稳定度分类, 用图解法求出横向浓度分布标准差, 所求得的 σ_y 值变化范围如表 3、表 4, 并分别按距离点绘在图 3、图 4 上。

表 3 D 类稳定度的横向扩散参数

距离 x (km)	1	2	3	4	5	6
最低值 σ_y (m)	182	257	217	355	340	379
最高值 σ_y (m)	370	408	514	431	416	694
平均值 $\bar{\sigma}_y$ (m)	260	328	368	393	364	535
数据组数	9	3	6	2	4	6

表 4 E 类稳定度的横向扩散参数

距离 x (km)	1	2	3	4
最低值 σ_y (m)	106	181	228	220
最高值 σ_y (m)	276	339	240	507
平均值 $\bar{\sigma}_y$ (m)	190	279	234	337
数据组数	15	3	2	3

对 $\log \sigma_y$ 与 $\log x$ 进行回归相关分析, 两类稳定度分别得到 0.7041(D 类)和 0.5859

(E 类)的相关系数, 相关显著度 $\alpha = 0.001$ 。为此, 建立 σ_y 随 x 变化的回归方程:

$$\text{中性 D: } \sigma_y = 13.02x^{0.4168} \quad (\gamma = 0.7041) \quad (1)$$

$$\text{稳定 E: } \sigma_y = 15.07x^{0.3635} \quad (\gamma = 0.5859) \quad (2)$$

把方程(1)、(2)绘在图 3、图 4 上, 并绘出相应稳定度下 Briggs (城市) 的扩散参数值。由图可以看出, 本试验的扩散参数在 1km 处约为 Briggs 的 1.7—2 倍, 4km 以后二者差别变小。说明在本区的特殊地形和中性偏稳定气象条件下, 烟云在近距离内有较大的扩散参数, 随着距离的增加, σ_y 的增大比较平稳。

3. 垂向扩散参数

因本区风向多变, 而本试验所设的垂向

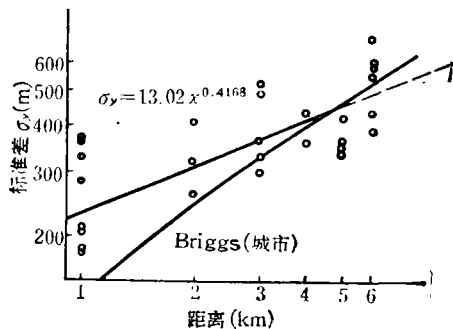


图 3 D 类稳定度下 σ_y 随距离的变化

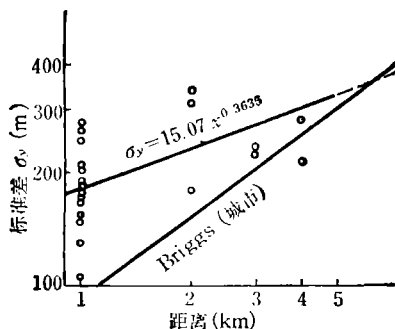


图 4 E 类稳定度下 σ_y 随距离的变化

采样点系固定位置, 经常不处于主导风向的下风向, 故采得的空中 SF_6 浓度较少。在同一垂向采样点, 连续两个高度以上都采到浓度 (连同地面浓度共有 3 个以上浓度点), 且

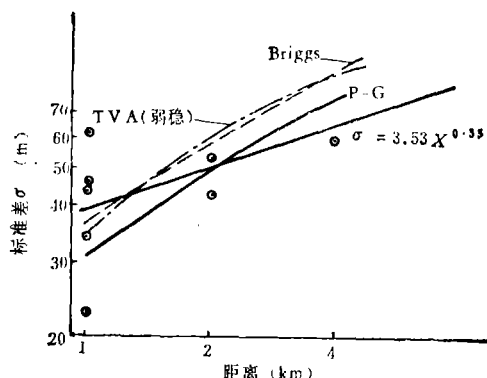


图 5 D类稳定度下 σ_z 随距离的变化

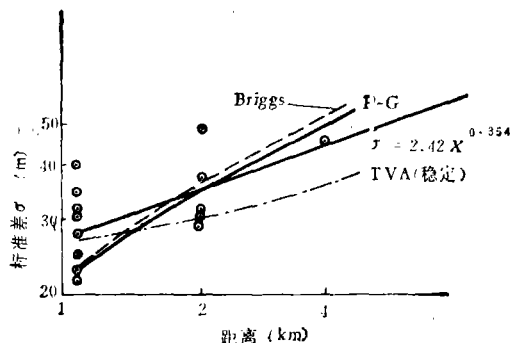


图 6 E类稳定度下 σ_z 随距离的变化

峰值 $\geq 5 \times 10^{-11} \text{m}^3/\text{m}^3$ 共有 25 组数据,其中 D 类稳定度有 9 组, E 类稳定度有 16 组。

将垂向浓度随垂直距离展开,其分布基本上都呈正态型。用图解法求出垂直浓度分布标准差 σ_z ,其变化范围如表 5,并将其点绘在图 5、图 6 上。

表 5 垂向扩散参数表

稳定度	D			E		
距离 x (km)	1	2	4	1	2	4
最低值 σ_z (m)	23	44	60	22	30	47
最高值 σ_z (m)	63	54	74	41	50	47
平均值 $\bar{\sigma}_z$ (m)	43	49	67	29	36	47
数据组数	5	2	2	9	6	1

对 $\log \sigma_z$ 与 $\log x$ 进行回归相关分析,两类稳定度下 σ_z 与 x 呈较好的对数相关,相

关显著度 $\alpha = 0.01$ 。为此,建立 σ_z 随 x 变化的回归方程。

$$\text{中性 D: } \sigma_z = 3.531x^{0.351} \quad (\gamma = 0.604) \quad (3)$$

$$\text{稳定 E: } \sigma_z = 2.425x^{0.354} \quad (\gamma = 0.623) \quad (4)$$

把这两个方程绘在图 5、图 6 上,同时绘出相应稳定度下的 P-G 扩散曲线^[3]、Briggs (农村)和 TVA 的扩散曲线。可以看出, σ_z 随距离的变化与 P-G 扩散曲线比较接近,说明本区 400m 左右的高空扩散与平原地区相近。但所求得的 σ_z 随距离变化的规律与 σ_y 一样,近源处值较大,远处值较小。

五、结 语

1. 以 SF_6 为示踪剂的大气扩散试验,可以模拟复杂地形条件下污染物质的时空分布及污染状况。是研究复杂地形条件下大气环境影响的有效研究方法。

2. 以温度梯度作为划分稳定度判据的 TVA 大气稳定度划分法,比较适合于河谷盆地冬季高架源的稳定度划分。

3. 本文所研究的河谷盆地内,大气扩散仍较符合正态型。水平扩散参数与 Briggs 的城市扩散参数相近。400m 左右的垂直扩散与 P-G 扩散曲线相近。但都是近处偏大,远处偏小,这是该处特殊的河谷地形和偏稳定的气象条件所决定的。

参 考 文 献

- [1] 陈长和等,科学通报,28(9),546—549(1983).
- [2] Turner D. B., 大气扩散估算手册,中科院大气物理所译,科学技术出版社,1978.
- [3] Pasquill, F., *Atmospheric Diffusion*, p. 209, D. Van Nostrand Company, London, 1962.