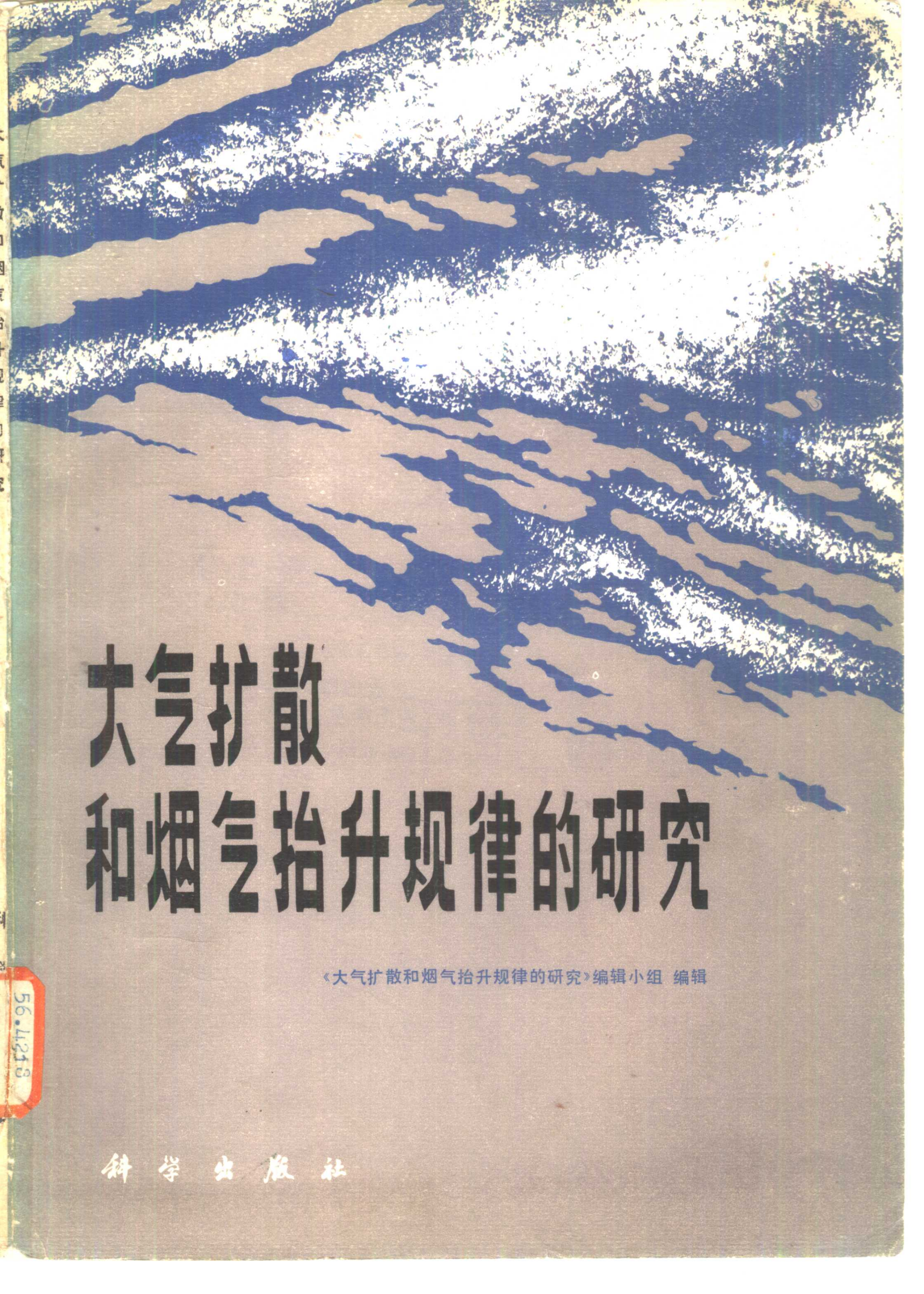




大气扩散 和烟气抬升规律的研究

《大气扩散和烟气抬升规律的研究》编辑小组 编辑

科学出版社

56.4218

大气扩散 和烟气抬升规律的研究

《大气扩散和烟气抬升规律的研究》编辑小组 编辑

科学出版社

1985

内 容 简 介

本文集介绍了大气示踪扩散实验中最新的六氟化硫连续检测技术和色谱分析方法,以及用上述方法进行的中距离(70公里)大气扩散实验结果;用数值计算方法研究了小风扩散中的浓度积累过程及其影响因子,并根据实测资料探讨了大气不平稳性和下垫面对扩散的影响;利用现场气象观测资料和立体摄影、激光雷达探测的烟气抬升资料,研究了电厂高烟囱烟气抬升规律以及地形和热力湍流对扩散的影响。

本集可供从事大气物理、大气污染方面的研究人员以及大专院校有关师生参考;对环境部门从事大气扩散和污染方面的科研工作者也有参考价值。

大 气 扩 散 和烟气抬升规律的研究

《大气扩散和烟气抬升规律的研究》编辑小组 编辑

责任编辑 侯建勤 许贻刚

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

长春新华印刷厂

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1985年5月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1985年5月第一次印刷 印张: 9 1/4

印数: 0001—2,400 字数: 209,000

统一书号: 13031·2902

本社书号: 4027·13—15

定价: 2.20元

前 言

近二十年来,在我国有关大气污染的问题,日益受到人们的重视。各研究单位和大专院校对大气扩散和大气污染都做了不少工作。早期的工作是六十年代开始的山区大气边界层的观测和大气扩散实验研究,这些工作为山区建厂的布局提供了必要依据。在七十年代,工业区和城市大气污染问题成为关心的问题。1973—1975年在北京西郊进行了环境质量评价工作,从近距离大气污染的输送和扩散规律的研究进入复杂的城市边界层、多源的输送与扩散规律的研究。以后沈阳、兰州和南京等地也都相继开展了这项工作。1978年后,我国区域大气污染问题已提到日程。京津渤区域环境质量研究比较全面地综合地研究了一个区域的污染物输送、扩散和迁移转化规律;同时在我国首次成功地进行了中距离(10—100公里)的示踪扩散实验,取得70公里距离的浓度连续水平分布,并归纳出影响中距离扩散的主要因子。在此基础上设计了区域大气污染模式。对山区大气扩散实验仍在继续深入地进行。至于近距离大气扩散数值模拟、城市大气扩散规律和大气污染模式的研究以及工厂烟气抬升和扩散规律的研究等方面也取得不少成果。当然,这些成果还是初步的,有待于今后深入研究。

本集收集了这几方面的论文共八篇,可供从事大气扩散研究人员以及从事环境科学研究人员参考。

陶 诗 言

目 录

京津地区中距离大气扩散实验.....	
.....张锡福、赵翼凌、邹孝恒、陈泮勤、贾新媛、杨锦德、邓玉珍、李 军	(1)
六氟化硫示踪实验的色谱分析.....李 军、张锡福、贾新媛、杨锦德、邓玉珍	(18)
山区小风条件下浓度积累过程的数值模拟..... 邓玉珍、邹孝恒、张锡福	(26)
稳定大气小风扩散模型的数值研究.....杨锦德、雷孝恩	(35)
非均匀下垫面条件下扩散特征的实验研究.....贾新媛、雷孝恩	(55)
近地层大气不平稳性对扩散影响的初步研究.....邹孝恒、张锡福、庄 磊	(70)
闭塞山谷地形上空的风和扩散..... 陈长和、施介宽、黄建国	(78)
火电厂烟流上升和扩散的试验研究..... 南京大学气象系湍流组	(87)
I. 复杂地形流场特征及对烟流抬升和扩散的影响.....	(87)
II. 火电厂烟气抬升研究.....	(98)
III. 高烟囱浮升烟流的扩散参数的研究.....	(108)
IV. 用高斯模式预报高架源浮升烟流扩散的一种计算方法.....	(118)
V. 高烟囱瞬时烟流性状的激光雷达研究.....	(127)

京津地区中距离大气扩散实验*

张锡福 赵翼浚 邹孝恒 陈泮勤

贾新媛 杨锦德 邓玉珍 李 军

(中国科学院大气物理所)

一、前 言

北京、天津和渤海(简称京津渤)地区环境质量综合研究需要掌握该地区百公里距离的大气扩散规律。自1970年以来,在该地区的山区、城市、沿海等地区只进行过近距离大气扩散实验,最远为7公里距离的扩散规律。该地区的西部和北部为山区,平原地区有京津两大城市,东部为海面。因此,地形风、城市热岛环流、海陆风等中尺度环流使得中尺度湍流及其相应的大气扩散规律有其特殊性。因此需要进行中距离大气扩散实验。

为探索区域大气污染的规律和寻求治理途径,国外广泛地开展了近百公里距离和近千公里距离的大气扩散实验^[1—5]。相应地开展了扩散实验技术,其中以用六氟化硫(SF_6)及碳氟化物(C_6F_{12} , C_7F_{14} , C_8F_{18})作示踪气体应用最广且最有成效。用自控取样仪布点克服了人工采样所带来的耗费大量人力和通讯联络上的困难,用自控色谱分析技术和数据处理系统减少了人力和分析误差,但这需要大量的昂贵的自控仪器,也只能得到离散的浓度分布。我们希望一种能装载在飞机或汽车上连续检测而当时又能得到结果的仪器,即可减少人力和物力的消耗,又可得到浓度的连续分布,从而能够通过浓度的结构和谱分析以探索中距离扩散与中尺度湍流的关系。根据我们的要求,美国布鲁克海文国立实验室Dietz博士为我们研制了两台连续示踪物检测仪(COPS)^[6],提供了中距离扩散实验有效的手段。我们还用汽车载人往返穿行烟羽,人在车上用塑料针筒取样再回到实验室用色谱仪分析的方法探测近距离高浓度的 SF_6 分布。

自1981年10月23日—11月3日在京津地区进行了 SF_6 示踪实验,取得3, 5公里(针筒取样)和9, 20, 36, 50, 70公里(连续检测)距离的 SF_6 浓度分布资料。配合水平轨迹及其它气象资料着重分析了中距离扩散特征及其影响因子,综合了城市和郊区的水平扩散参数随距离的变化。本文介绍了实验方法和主要的实验结果。

二、实 验 方 法

1. SF_6 的释放

实验要求 SF_6 的排放率保持在30—40公斤/小时。钢瓶内的液态 SF_6 要吸收汽化热变

*美国Brookhaven National Laboratory的R. Dietz博士提供了COPS仪器, Argonne National Laboratory的谢锦铭博士对此热情地协助;在工作中得到周明煜和王毓德两位同志的支持,北京气象台服务科的同志提供了天气预报,对此表示感谢。

成气体排放出来。一个 40 升的钢瓶在无加热装置的条件下, 每小时只能释放 10 公斤左右, 因此需要 4 个钢瓶同时释放。钢瓶放在铁塔下, 用五通阀联接四个钢瓶。另一通道联接一条系在塔柱上的直径为 25 毫米长 100 米的塑料管。每个钢瓶和五通阀之间联接一个转子流量计以调整流量。实验前后对每个钢瓶称重, 以确定实际的平均排放量。

每次实验结束时, 用氮气将塑料管中存留的 SF_6 冲掉, 以避免对附近地区的污染, 防止对分析实验室本底的干扰。

2. 取样和分析方法

1) 针筒取样与色谱分析方法¹⁾

两人乘坐一辆汽车往返行驶在距源 3 公里和 5 公里弧线的街道上 (见图 1), 人在车上每间隔 4.5° 用 30 毫升的塑料针筒取样, 取样时间为 10 秒。每穿行一次弧线取 10—13 个样品。每次实验取 100 多个样品, 然后回到实验室内用两台 SP-2308 气相色谱仪分析。

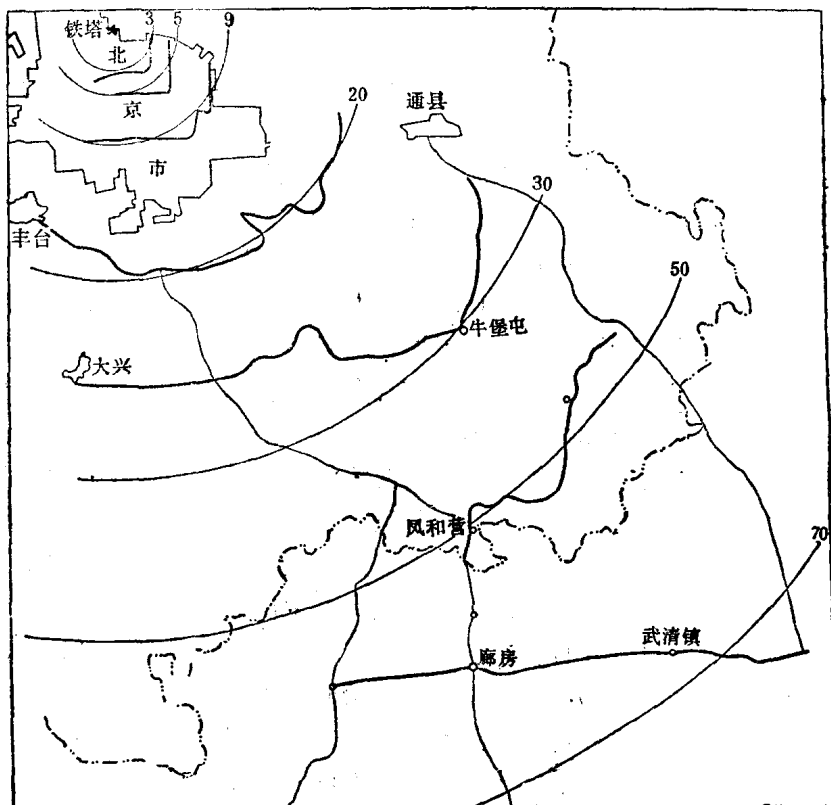


图 1 各弧行车路线图

2) 连续示踪物检测仪 (COPS) 检测

COPS 是一种可携式连续检测仪, 可装在汽车或飞机上连续采样, 并实时地显示检测结果。仪器只需一组 12 伏 (直流) 1.5 安培的电源。全机总重量约 7 公斤。

工作原理^[6] 在气泵作用下, 仪器不断对周围空气连续采样, 样本空气经高温催

1) 见本文集“六氟化硫示踪实验的色谱分析”一文。

化、脱氧、干燥去掉杂质后，将样本中剩有的氮气作载气与SF₆一起进入电子捕获检测器检测。从而获得样本连续变化的信息。

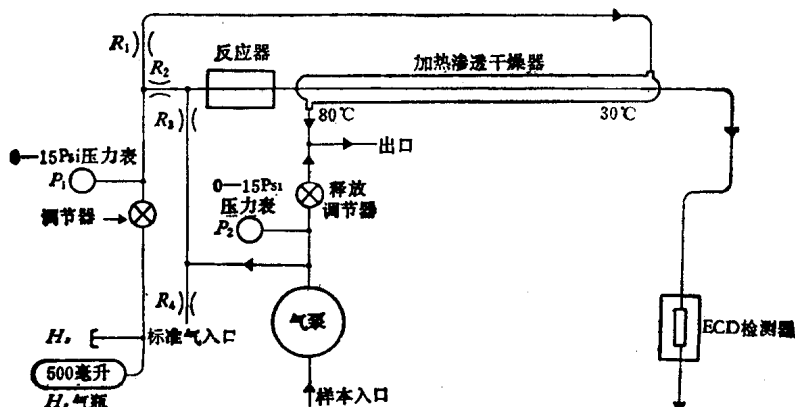


图2 连续示踪物检测仪 (COPS) 部件图

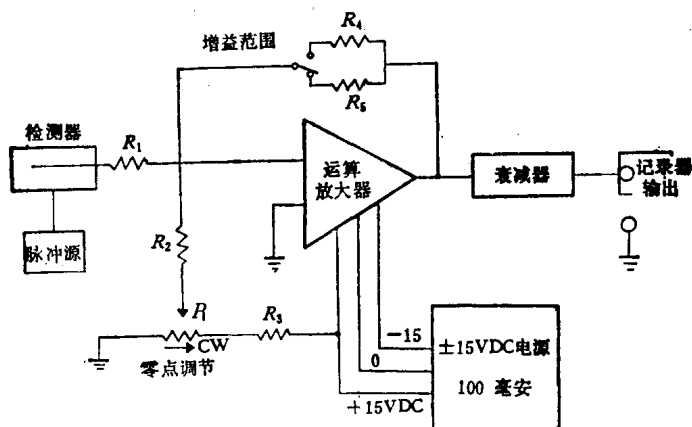


图3 电路板方框图

图2显示气泵抽入的样本在限流阀R₃和后压调节器的作用下以20毫升/分流量进入催化反应器，从氢气瓶来的氢气在限流阀R₂的作用下以9—10毫升/分的流量在反应器内与样本中的氧气化合成水汽，样本中的杂质及氟里昂等其它成份则在200℃左右的高温下被烧掉，另一路氢气在R₁的限流下以50毫升/分的流量反向流入加热渗透干燥器，将渗透干燥器中从内管渗透出来的水汽带走，从而使含氮和SF₆的样本进入电子捕获检测器检测。其中的氮气因其纯度极高而用作检测器的载气，形成检测器基流。样本中的SF₆是电负性物质，它捕获电子而改变基流的大小，因而改变了检测器输出信号的大小。其响应值在理论上可作如下的估计。假定每个进入检测仪的电负性分子只捕获一个电子，对于以16毫升/分的流量F进入检测器的样本，浓度C为1 ppt (10⁻¹²厘米³/厘米³)的电负性物质捕获电子的速率为

$$\frac{CFN}{V} = \frac{1 \times 10^{-12} \times 16 \times 6.023 \times 10^{23}}{60 \times 24500} = 6.56 \times 10^6 \text{ 分子/秒}$$

其中 N 为Avogadro常数 (6.023×10^{23} 分子/克分子量), V 为克分子体积¹⁾。

在此捕获电子的速率下所引起的电子捕获检测器电流的变化为

$$\frac{6.56 \times 10^5}{6.2 \times 10^{18} \text{e}^{-1}/\text{库伦}} = 1.0574 \times 10^{-12} \text{安培}$$

若图3中 $R = 50$ 毫欧, 运算放大器的增益为100倍, 则对以16毫升/分的流量进入检测器的电负性物质引起的输出电压变化为5.2毫伏/ppt。

仪器的最大动态范围不仅取决于通过检测器的流量, 而且取决于基流的大小。COPS的基流为 10^{-8} 安培的量级。如上所述, 每个ppt的浓度引起的电流变化为 1.0574×10^{-12} 安培, 则仪器的动态范围在 10^4 ppt左右。实际上线性范围仅能达到仪器动态范围的百分之几, 而有用的动态范围大约可达最大动态范围的30%。

检定曲线 从检测器出来的信号经过运算放大器后即送到记录器记录(图3)。连续检测的样本中 SF_6 的含量变化造成信号大小的变化。用标准浓度样本作电压-浓度检定曲线, 则可得到 SF_6 浓度的变化。

由于仪器灵敏度很高, 需要配制低浓度的标样。而用于检定曲线的样本量既大且要连续进入检测器, 就需要在6—9升的玻璃钢瓶内容纳50个大气压的标样。因此标样的配制是件极细致而又繁重的工作。

用称重及逐级稀释法得到一组标样 (10^4 , 10^3 , 10^2 , 10^1 ppt)。由于国内技术水平, 在配制低浓度 (10^1 , 10^0 ppt) 时会产生较大的误差, 因此我们用两台线性范围比COPS大的SP-2308气相色谱仪对标样进行标定。由高浓度 (10^3 , 10^2 ppt) 样本并参考美国配制的 97ppt 的标样作出直线, 用此直线标定低浓度样本值, 然后用标定的样本对

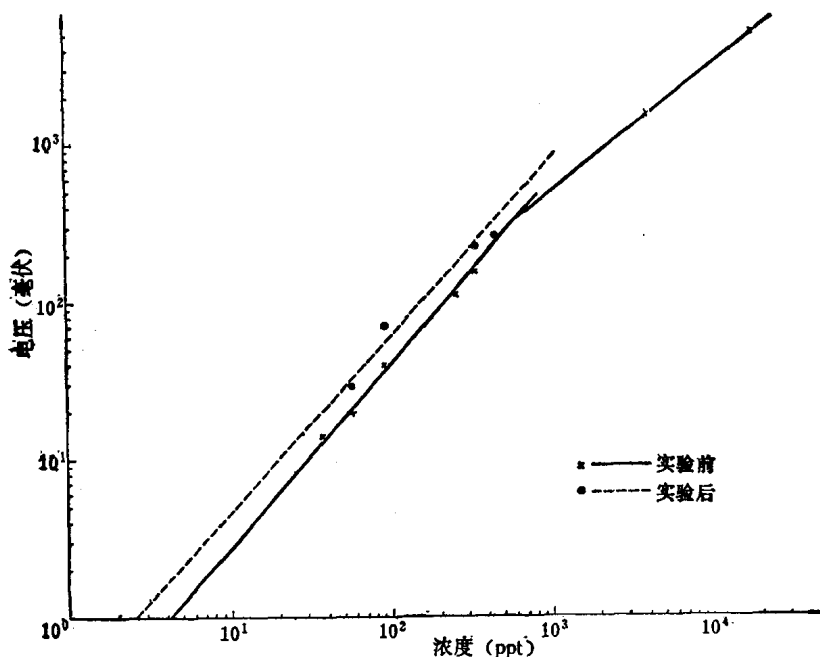


图4 浓度检定曲线

1) 在1个大气压, 温度为0℃下, 一克分子体积为22410毫升, 这里24500毫升相当温度为25.5℃的体积。

COPS进行标定, 得出电压-浓度检定曲线。

图4显示仪器的响应值在线性范围内分别为0.33毫伏/ppt(实验前)和0.38毫伏/ppt(实验后), 线性范围可达500ppt。

仪器的稳定性 仪器的噪音和瞬时飘移小于3毫伏, 取信噪比为3, 则仪器的检测下限约为30ppt。但若有过量氢存在, 仪器的系统零点飘移小于50毫伏/小时, 这对仪器使用是不利的。另外, 空气中CO₂的含量变化对零点的飘移虽然影响不大, 但也有影响。目前, 研制者已进行脱氢等改进措施。我们在实验时, 为避免零点飘移的影响, 在每次穿行前后, 用钢瓶中压缩干洁空气考查零点是否飘移, 以便进行订正。根据我们在实验中的经验, 在每次穿行期间, 零点飘移一般是不明显的。

仪器的误差主要来自标样浓度的准确性、检定曲线的精度和读数误差。由于电子捕获检测器受温度、流量和载气纯度微小变化的影响, 实验前后所作的检定曲线可不相同(图4), 可引起50%的误差, 因此, 要用实验前后两条曲线的平均值。而后两个误差来源可以通过标样校准和多次读数的方法将误差减至最小程度。最好的办法是配接终端数据处理仪。

COPS装在汽车内, 另用一气泵联接橡皮管将车外空气抽入并送到COPS的进气口。为了避免灰尘对气泵的堵塞而影响流量, 在汽车外的橡皮管进气口装上滤膜取样头。

两辆装载COPS的汽车分别根据距源9, 20公里弧线和36, 50, 70公里的弧线所选定的行车路线(图1)往返行驶, 连续地记录地面浓度分布。在9和20公里弧线行驶的车速为20—30公里/小时, 而在36—70公里弧线上行驶的车速为50公里/小时左右。穿行烟道经历时间一般为5—8分钟, 仪器后延时间为3秒。

3. 大气本底值的测量

SF₆作为良好的绝缘气体还用于电器工业。在工业区或城市的SF₆本底值可能较高, 其它卤族化合物有可能造成干扰。这就有必要测定大气中SF₆或卤族化合物的本底值。在实验前, 为熟悉行车路线和通讯联系, 三台汽车分别到各自的取样路线上行驶, 与此同时进行大气本底值的测量。

一辆汽车上的人用针筒取样, 再回到实验室分析, 并未检测出SF₆气体, 也无信号输出。由于国产气相色谱仪的灵敏度为10⁰—10⁻¹ppt, 因此可判断本底值不大于0.1ppt。而实验取得样本浓度为1000, 10000ppt, 远高于本底值。

在两辆装载COPS的汽车上, 备有内装北京西北郊清洁空气的钢瓶。汽车行驶时, COPS的记录器始终没有信号反映, 基线平稳。我们间断地输入钢瓶内的空气, 基线也不改变。这表示在北京地区, SF₆的本底值低于1ppt, 而COPS在实验期间检测的SF₆浓度值大于10ppt, 所以实验结果受本底干扰不明显。

在铁塔的32米高度上装有指挥电台, 而在三辆汽车上分别装有一部电台。在实验过程中, 根据风向风速和某些弧线上取样情况, 通过电台相互联络, 以调整汽车穿行位置和实验进程。

三、气象条件

为了考察北京市污染源对廊坊和天津地区的影响，需要在西北风条件下进行实验。由于北京市区西方和北方20—30公里处已是山区，因此，只有在铁塔东南方向才有百公里距离的平原便于用汽车进行地面检测。考虑到经济上的限制，每次实验只能连续释放3—4小时SF₆。而要在源连续释放期间能输送到近100公里的距离，又需要在6—8米/秒的大风条件下进行。我们选择了四次寒潮过程进行了实验，实验期间，连续记录铁塔上各高度的风向风速。

表1给出四次实验的日期、源释放的起止时间、源强和实验期间每小时的风向风速

表 1

日期	SF ₆ 释放时间	源强 公斤/小时	时间	风速(米/秒)			稳定度		取样时段							
				铁 塔		地 面	100米	地 面	距 离(公 里)							
				100米	33米				3	5	9	20	36	50	70	
1981年 10月23日	16:40 19:30	26.2	16	13.9	11.0	7.7	D	D								
			17	8.4	6.6	8.3	D	D								
			18	11.0	8.0	7.7	D	D								
			19	8.8	5.6	5.7	D	D								
			20	8.7	5.1	7.7	D	D								
10月24日	18:10 21:40	42.5	18	12.5	7.7	5.0	D	D								
			19	9.1	4.5	2.7	D	F								
			20	8.9	4.2	3.0	D	E								
			21	8.1	2.5	1.3	D	F								
			22	7.1	1.0	0.3	D	F								
			23	1.7	0.9	0.3	F	F								
			24	6.1	4.2	1.0	D	F								
10月28日	10:15 13:12	20.2	10	7.7	6.1	7.0	D	C								
			11	8.2	6.9	5.7	D	C								
			12	8.1	7.0	4.0	D	B								
			13	8.1	7.2	2.3	D	A-B								
			14	8.1	7.3	3.0	D	B								
11月3日	14:55 17:16	30.7	14	10.7	8.4	5.3	D	C								
			15	9.6	7.9	6.7	D	C								
			16	8.7	7.2	6.7	D	D								
			17	7.4	6.0	4.3	D	C								
			18	6.8	5.9	2.0	D	C								

速、大气稳定度类、各弧线取样的起止时段。

按照 Pasquill 的分类法, 在这四次实验期间, 100 米高度的大气稳定度都是中性 (D 类), 但地面稳定度却互不相同。23 日的实验是在日落前后进行的, 在过渡时期的大风条件下, 高低空都是 D 类, 除此以外, 其它三次实验, 各地区互有差异, 而且同一地区的稳定度也随时间变化。

由于源高为 100 米, 而检测的是地面浓度, 因此应当考虑 100 米以下整层大气的输送和扩散过程。但是用什么方法表示整层大气的湍流结构, 又怎样用大气稳定度来区分它, 这是描述整层大气扩散规律要解决的问题。对此, 我们采取以下的处理方法。对于 10 月 23 日, 100 米高空和地面都属中性, 可认为整层大气都属中性条件 (D 类)。10 月 24 日夜间, 低层大气受地面辐射冷却比较稳定, 微弱的垂直交换而减少了上下层的联系, 高空强风速下的中性混合主导着扩散过程。特别是在 50—70 公里下风距离, SF_0 落地后不能被地面风输送到此处, 而是由高空风输送再向下扩散到地面。因此地面浓度分布主要反映中性条件下扩散特征, 故仍定为 D 类。

10 月 28 日在白天的晴朗天气下实验, 地面因日辐射而产生的热对流可传到高空。尽管高空因风速大而划为 D 类, 但由于受地面热力影响大, 大气不稳定, 应属 $B-C$ 类。11 月 3 日是在下午到傍晚进行实验, 热力湍流也影响到高空, 地面风速较大, 稍不稳定, 而定为 C 类。

对于中距离大气扩散、大气稳定度的分类应着眼于整层大气 (扩散过程进行的厚度)。我们认为, 当整层稳定度一致时, 容易划分。而当高空为中性, 地面大气稳定时, 对高架源则应根据高空条件划分, 而对地面源, 则应以地面条件划分。当地面大气不稳定而高空为中性时, 则无论对高架源或地面源, 都应按地面条件划分。当然, 分类的标准还需进一步研究。

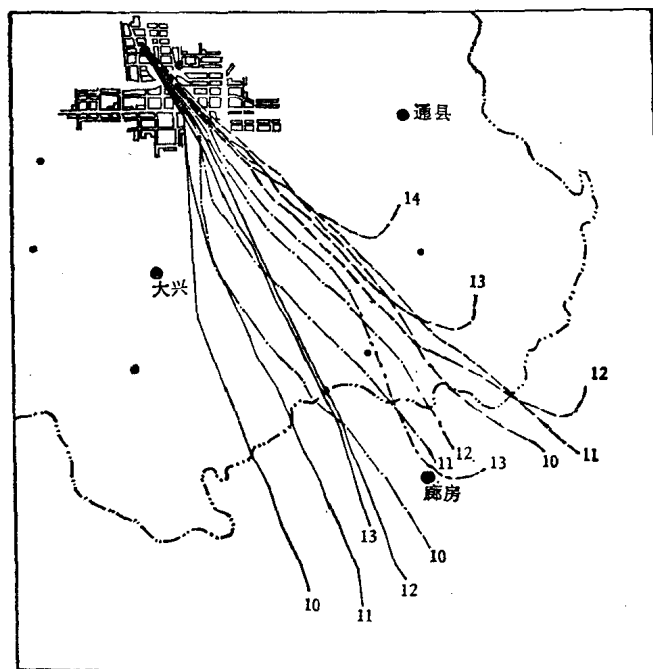
四、水 平 轨 迹

对中距离扩散过程, 风向风速垂直切变以及水平风的空间变化都使高低空的 SF_0 气体运行路径不同, 并影响地面浓度的分布。水平轨迹的分析有助于对中距离扩散规律的了解。

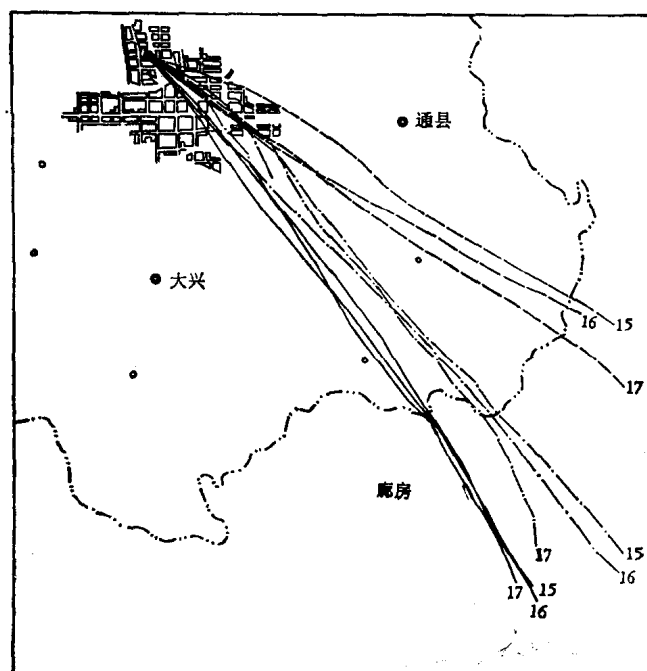
根据北京市区、郊区各县及廊坊地区各台站的每小时的地面风向风速可计算地面水平轨迹。高空的风向风速只有铁塔的观测资料。为了考虑 100 米高度风场的非均匀性, 我们用铁塔 280 米高度的风向风速作为各台站 280 米高度的风向风速 (即在该高度上的风场是均匀的)。用某台站的地面风向风速和同时刻 280 米高的风向风速按照幂指数关系求得 100 米高度的风向风速。做法是把风速向量在直角坐标 (x 轴指向正东) 分解成 u, v 分量, 然后根据关系式

$$u = u_0 \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^{\alpha_1} \quad (1)$$

$$v = v_0 \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^{\alpha_2} \quad (2)$$

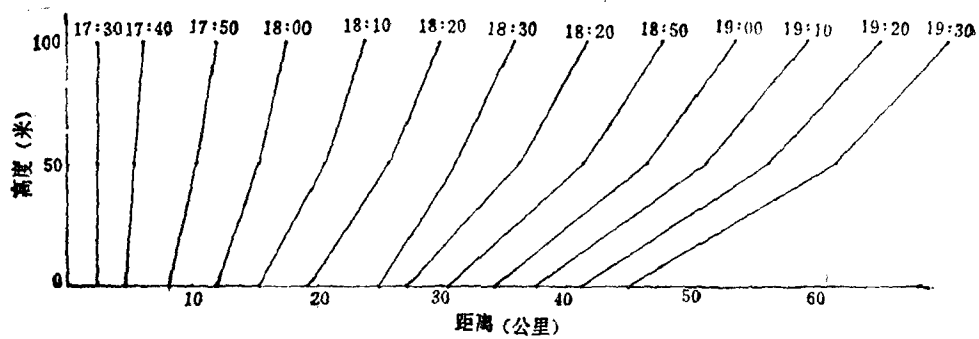


(c) 1981年10月23日

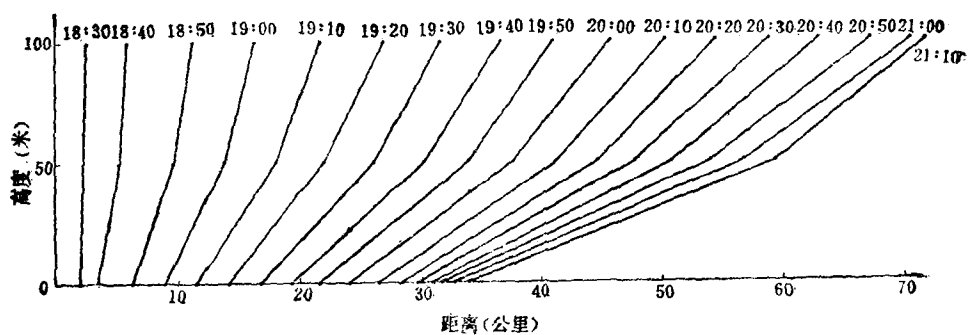


(d) 1981年11月3日

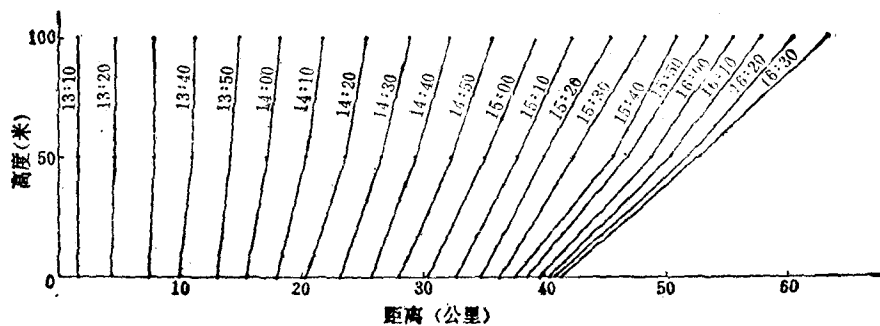
图5 水平轨迹



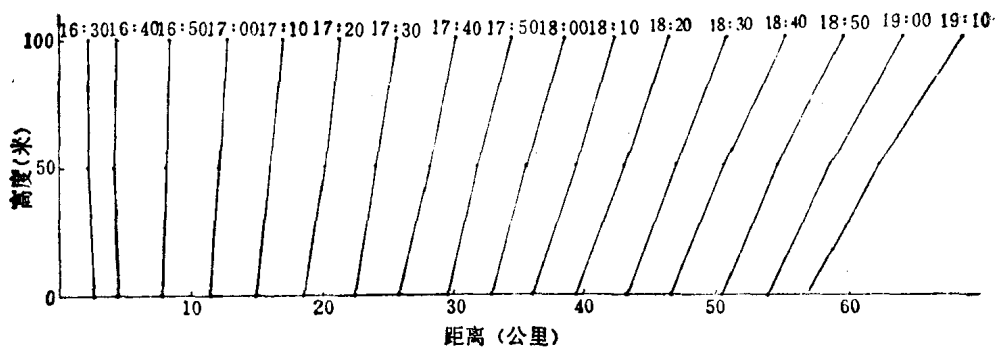
(a) 1981年10月23日



(b) 1981年10月24日



(c) 1981年10月28日



(d) 1981年11月3日

图6 水平轨迹垂直剖面等时线图

由280米的 u , v 和某一台站的地面 u_0 , v_0 求出 α_1 和 α_2 , 再令 $Z = 100$ 米, 即可算出此台站100米高度的 u , v 值。对(1)和(2)式分别由 Z_0 到100米积分, 再求平均值, 视为50米高度的 u , v 值。

网格点 (i, j) 上的 u 值是由内插公式

$$u_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^N \frac{u_k}{r_k^2}}{\sum_{k=1}^N \frac{1}{r_k^2}} \quad (3)$$

计算的(也适用于 v)。其中 r_k 为网格点 (i, j) 与台站 k 之间的距离, N 为台站个数, 网格距离为2公里。

以铁塔为起点, 取时间步长 $\tau = \frac{l}{U}$ (U 为全风速) 计算水平轨迹。每间隔10分钟取一次新的起始时间计算一条轨迹。

图5是四次实验的水平轨迹图。三层高度的水平轨迹(每间隔一小时一条)绘在一张图上。由图可看出水平轨迹由高空到地面逆时针旋转, 符合一般规律。而且50米高度的水平轨迹通过各弧线的位置与同时刻探测的 SO_2 浓度中心位置接近。这说明我们求出的100米和50米高度的风场是符合实况的。另外还可得出: 轨迹模式应取地面到源高的平均风向风速输送烟团。特别值得注意的是10月28日三个高度的水平轨迹偏离很大, 轨迹的走向由100米向下自南向东逆时针偏转, 这是地形风和热岛环流的影响。在北部山区和南部平原之间的热力差异和城市热岛作用形成偏南风的过程中, 南郊区的地面风向午后由偏北风向东偏转, 最后转成偏南风。

沿着水平轨迹方向作轨迹垂直剖面等时线图(图6)。图上绘出三个高度同一时刻为起始时间的轨迹, 把同一时刻的位置联接, 得到一系列的等时线。显然, 高空风速比地

面风速越大,等时线随着时间增长倾斜的越大。这也表示在同一时刻各高度的污染物到达的位置的差异。10月23日,风速垂直切变不大,上下层污染物在同一时刻所到达的位置(或输送的距离)差别不大〔图6(a)〕。而10月24日的风速垂直切变较大,当21时20分在70公里距离取样时,地面的 SF_6 气体不能被地面风输送到这一地区,所取到的地面浓度是由高空输送过来并扩散到地面的〔图6(b)〕。

由图5和图6还可看到,在10公里以内,各高度的水平轨迹基本重合,等时线基本垂直。因而可以认为风向风速的空间分布是均匀的,大气扩散可以用点源模式描述。而在离源10公里以外,则必须考虑风向风速垂直切变的影响。这一点与Pasquill的结论一致^[7],当然还要考虑风场的非均匀性。

五、中距离扩散特征及其影响因子

10月23日,大气稳定度为D类,各高度的水平轨迹偏离很小〔图5(a)〕,风速垂直切变也小〔图6(a)〕。在这样平稳均匀的条件下,城区9公里弧上的浓度是正态分布(图7),平原地区36公里弧上仍然呈现典型的正态分布(图8)。在19时50分到20时13分的23分钟之内,三次穿行取得的浓度分布虽然都属D类,但在大气趋向稳定时期,其烟宽变窄,峰值增高。在此距离取样,高低空的 SF_6 气体都经过这一弧线,反映了高低空扩散过程的综合影响。

10月24日,大气稳定度与23日相同,明显的不同是24日的风速垂直切变大,地面风速小得不能将 SF_6 气体输送到70公里弧线,只能由高空输送并扩散下来。值得注意的是浓度分布不再是典型的正态分布,而分裂成相连的三段(图9),每段近似正态分布,其宽度为4公里左右。这一现象在28日表现得更加明显。如前所述,在实验期间,水平轨迹走向自100米高度向地面偏离很大,水平轨迹具有较大的水平摆动,风速垂直切变也大。36公里弧上地面浓度宽度比24日70公里的还宽18公里,并分成四段,每段宽度也是4公里左右(图10)。这种分段现象不能用风向摆动来解释,因为24日的风向摆动不大,这可能是烟羽被大气中存在的中尺度湍流所撕裂的。而这种中尺度湍流的产生是以风速垂直切变为条件。风向风速垂直切变不仅由科氏力引起的,地面非均匀性引起的地形风和热岛环流也是个重要原因。



图7 1981年10月23日9公里地面浓度横风分布