

微风时局地大气扩散及SO₂浓度分布 的初步研究

曹文俊 朱 汶

提 要

本文利用微风时的定容球资料, 计算了微风时南京大厂地区的扩散参数, 并与兰州等地的扩散参数作了对比。还分别用两组不同的点源、面源公式, 计算大厂地区在微、静风条件下SO₂的瞬时浓度分布。揭示了在微、静风条件下大厂地区容易出现污染的地域, 为该地区的建设、规划及环保工作提供参考依据。

在完成“扬子乙烯工程大气环境影响评价”工作中, 课题组并未研究在微风(风速为0.5~1.5米/秒)及静风(风速小于0.4米/秒)条件下南京大厂地区的大气扩散规律及SO₂污染物的浓度分布。大厂地区的主导风向是偏东, 静风频率秋季高达15%, 冬季达14%, 全年为12%*, 因此, 研究大厂地区微、静风条件下的大气扩散规律及污染物的浓度分布是必要的。

微风条件下的扩散规律有其特殊性。Sagendorf(1976)^[1]发现, 用高斯(正态)模式计算的污染物浓度值, 远远超过实际的浓度值。本文用移动烟团积分模式^[2]等两组公式, 分别计算了大厂地区在微、静风条件下的SO₂污染物瞬时浓度分布。所用的扩散参数, 是大厂地区扩散试验中, 微风时满足下列条件的8个定容球扩散资料(表1)求得。即(1)离地10米高处风速小于1.5米/秒; (2)定容球在飘移过程中不出现急升、降现象; (3)在定位计算中引入一个误差指标, 舍去不符指标的资料, 以保证定容球定位的精度。

本文所用的大气稳定度分类是文献[3]中已修订的帕斯奎尔-吉福德大气稳定度分类法(简称P-G法), 故表1中的中性类相当于P-G法中的D级; 稳定类包括了P-G法中的E级、F级。

1986年10月23日收到, 1987年4月14日收到修改稿

*扬子乙烯工程环境影响报告书(大气专题), 12, 扬子石油化工公司, 1984年10月

表1 微风时定容球飞行资料统计表

稳定度	编号	日期	采样时间	平均风速 (m/s)		样本数	平均飞行高度 (米)
				地面	高空		
中性	J ₁	83,11,13	16:02	1.0	1.22	120	420
	J ₂	83,11,13	16:02	1.0	1.42	119	450
	J ₃	83,11,18	8:43	1.2	1.17	114	510
	平均值			1.06	1.27	118	460
稳定	k ₁	83,11,4	18:25	0.0	0.93	28	210
	k ₂	83,11,4	18:25	0.0	0.59	91	270
	k ₃	83,11,4	19:26	1.0	0.12	39	230
	k ₄	83,11,4	20:28	1.0	0.87	50	260
	k ₅	83,11,5	18:36	0.0	1.14	45	230
	平均值			0.40	0.73	51	240

一、微风时的大气扩散参数

由风速脉动值计算大气扩散参数的公式^[4]为

$$\sigma_x^2(T) = \langle \overline{u'^2} \rangle_{(\tau, T)} \cdot T^2 \quad (1)$$

$$\sigma_y^2(T) = \langle \overline{v'^2} \rangle_{(\tau, T)} \cdot T^2 \quad (2)$$

$$\sigma_z^2(T) = \langle \overline{w'^2} \rangle_{(\tau, T)} \cdot T^2 \quad (3)$$

其中 τ 为取样时间, T 为旅程时间(即质点经历的时间)。 u' 、 v' 、 w' 分别为 x 、 y 、 z 方向上的脉动风速。 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 分别是 x 、 y 、 z 方向上的扩散参数。 $\langle \overline{u'^2} \rangle_{(\tau, T)}$ 、 $\langle \overline{v'^2} \rangle_{(\tau, T)}$ 、 $\langle \overline{w'^2} \rangle_{(\tau, T)}$ 分别是滑动平均后的 x 、 y 、 z 方向上的速度分量的方差^[5]。

计算步骤: 把表1的资料用方位角平均法决定平均风向, 求出 x 、 y 、 z 方向的脉动速度。应用公式(1)—(3)用滑动平均法求得 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 。再将同一类稳定度条件下的各定容球的 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 值进行回归分析, 即可求出扩散参数的表达式。

计算垂直方向的脉动速度时, 还需考虑定容球在预定飞行高度释放后, 常会出现缓升或缓降型^[6]。缓降型说明定容球存在缓慢漏气或净举力略不足(定容球所受的阿基米德浮力略小于其重力)。缓升型表明定容球在定高释放处净举力具有小的正值。无论是缓

升或缓降, 都表明它们存在各自的平均垂直速度($\bar{w}$)。缓升(降)型定容球的 $\bar{w}$ 只是由净举力的取值不恰当而引起的。为了消除 $\bar{w}$ 对 w' (脉动速度)的影响, 在求 w' 时先求 w (瞬时速度)与 $\bar{w}$ 之差, 然后再计算 σ_z 。所求的 x 、 y 、 z 方向上大气扩散参数表达式见表2。

表2 三维扩散参数表达式

稳定度	中 性	稳 定
σ_x	$1.22 \cdot T^{0.85}$	$0.87 \cdot T^{0.83}$
σ_y	$0.52 \cdot T^{0.91}$	$0.66 \cdot T^{0.78}$
σ_z	$0.54 \cdot T^{0.89}$	$0.30 \cdot T^{0.87}$

图1绘出了不同稳定度条件下的 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 随时间的变化曲线。

为了验证大厂地区的 σ_y 、 σ_z 是否可信, 把微风条件下中性和稳定层结时的 σ_y 、 σ_z 分别与兰州(微风)、渡口(微风)^[7]、Briggs公式(城市)及大厂(有风)*等 σ_y 、 σ_z 进行了比较(见表3), 由表3可知: (1)大

厂地区的 σ_y 小于兰州(微风)、渡口(微风)的 σ_y , 其原因可能是大厂地区仅有少量土丘, 属城郊状况; 而兰州是城市下垫面, 渡口是山区地形, 粗糙度较大。(2)大厂地区的

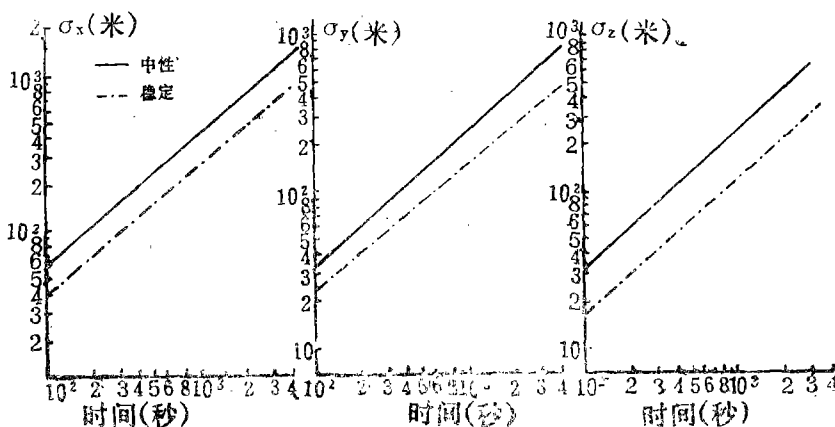


图1 三维扩散参数图

σ_y 大于Briggs(城市)和大厂(有风)时的 σ_y 。文献[7]表明, 渡口地区微风时的 σ_y 与有风时 σ_y 之比为3—5。兰州微风时的 σ_y 是Briggs(城市)值的3倍^[2]。李世奎等^[8]在北京西部山谷和粗铁林等^[9]在昆明附近的扩散试验也都表明, 微风时的扩散参数远大于Briggs(城市)的扩散参数(3倍以上)。故大厂地区的 σ_y 基本可信。(3)总的来看, 微风时大厂地区的 σ_z 偏大, 可能原因是大厂紧靠长江, 微风时可能有江陆风。而用的定容球资料多在白天测得, 若出现江风, 陆上会有弱上升气流。另外, 大厂区为工业区, 人口密集, 相对周围农村形成“城市热岛”^[10], 在其上空也会出现弱上升气流。这种弱上升气流会导致 σ_z 偏大。

表3 几种扩散参数的比较 ($\sigma = Ax^b$)

稳定度	扩散参数	σ_y (米)				σ_z (米)			
		A	b	200米	500米	A	b	200米	500米
中 性	(1)兰州(微风)	0.56	0.91	90.3	207.9	0.65	0.85	75.0	163.4
	(2)渡口(微风)	1.2968	0.8968	148.1	336.0	1.0047	0.7826	63.5	130.1
	(3)Briggs* (城市)	$\alpha=0.16$	$\beta=0.0004$	30.8	73.0	$\alpha=0.14$	$\beta=0.0003$	27.2	65.3
	(4)南京大厂 (有风)	0.38	0.83	30.9	66.1	0.30	0.81	22.0	46.0
	(5)南京大厂** (微风)	0.52	0.91	84.0	193.1	0.54	0.89	78.0	176.1
	(5)/(1)	—	—	0.93	0.93	—	—	1.04	1.08
	(5)/(2)	—	—	0.57	0.57	—	—	1.23	1.35
	(5)/(3)	—	—	2.73	2.65	—	—	2.87	2.70
	(5)/(4)	—	—	2.72	2.92	—	—	3.55	3.83
	(5)/(5)	—	—	—	—	—	—	—	—
稳 定	(1)兰州(微风)	0.35	0.93	63.1	148.0	0.32	0.87	41.3	91.6
	(2)Briggs (城市)	$\alpha=0.11$	$\beta=0.0004$	21.2	50.2	$\alpha=0.08$	$\beta=0.0015$	14.0	30.2
	(3)南京大厂 (有风)	0.31	0.80	21.5	44.7	0.20	0.78	12.4	25.5
	(4)南京大厂 (微风)	0.66	0.78	51.5	105.2	0.30	0.87	38.7	85.9
	(4)/(1)	—	—	0.82	0.71	—	—	0.94	0.94
	(4)/(2)	—	—	2.43	2.10	—	—	2.76	2.84
	(4)/(3)	—	—	2.40	2.35	—	—	3.12	3.37

* Briggs公式(城市): $\sigma = \alpha \cdot x (1 + \beta x)^{-1/2}$ 米** 时间 $t = x / \bar{u}$, 取 $\bar{u} = 0.75$ 米/秒

二、计算SO₂瞬时浓度的有关参数及公式

(一)污染源的有关参数

大厂地区大气的主要污染物是SO₂, 其排放量较大的是热电厂、南化公司、钢铁厂。扬子乙烯工程投产后, SO₂的排放量也很大。因大厂地区的污染源较多(老区高度

≥45米以上的烟囱有15个, 乙烯工程有5个), 表4为一部分污染源资料*。

表4 部分污染源的有关参数 1983年

源属单位		源序	SO ₂ 源强度 (克/秒)	源高 (米)	烟囱口内径 (米)	烟气温 (°C)	排烟气速度 (米/秒)
热 电 厂		1	422.96	120	5.34	44.0	18.0
		2	416.8	80	5.3	123.0	19.0
南 化 公 司	氮 肥 厂	3	12.54	67	2.0	65.0	12.7
	磷 肥 厂	4	9.0	62	2.0	65.0	12.7
扬 子 乙 烯	自备电厂	5	1015.08	180	4.5	120.0	19.67
	对二甲苯烟囱	6	90.28	140	4.8	260.0	7.38
	开工锅炉	7	43.89	150	4.5	80.0	7.09
	对二甲苯 硫回收炉	8	13.89	84	0.76	260.0	7.91
南钢烧结高炉		9	30.09	60	1.5	—	—

烟囱高度≥45米的排放源作高架源处理, 小于45米的源并入面源。在广泛调查的基础上, 面源中还包括小手工业低矮源的排放及生活(家庭炉灶)源的排放。鉴于低于45米的烟囱排放量一般较小, 上述处理方法是合理的。

(二)有效源高的计算

1. 微、静风条件下稳定层结时抬升高度的计算 微、静风时的稳定大气条件下, 烟气的抬升高度按下式计算^[3]

$$\Delta H = 11.26 Q_H^{1/4} \left(\frac{dT_a}{dz} + 0.0098 \right)^{-3/8} \quad (4)$$

其中ΔH(米)为烟气抬升高度, Q_H(焦耳/秒)为烟气热释放率, dT_a/dz(°C/米)是排放源高度上环境温度垂直变化率。

2. 微、静风条件下中性层结时抬升高度的计算 微、静风条件下中性层结时的抬升高度计算式^[11]为

$$\Delta H = 11.26 Q_H^{1/4} \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^{-3/8} \quad (5)$$

本文所用的满足微风(静风)、中性层结条件的定容球, 因缺乏同步的探空资料, 故(5)

*污染源资料取自“扬子乙烯工程环境影响评价报告书”(大气专题), 扬子石化公司, 1984.10和“污染源调查和评价”(南京大厂镇地区环境现状评价之一), 现状评价组, 1984.6

式中的 $d\theta/dz$ (环境空气位温的垂直变化率)的值,采用文献[11]的规定值,即 $d\theta/dz$ 取 $0.003^\circ\text{C}/\text{米}$ 。

3.当污染源参数不全时抬升高度的决定法 实际工作中常会遇到点源的参数(如烟囷口内径、烟气温、排烟速度等)不齐全而无法计算它的抬升高度。大厂地区也有许多这样的情况。对此,我们参考文献[12]所提供的资料(表5),决定它们的抬升高度。

表5 烟囷有效高度和允许 SO_2 的排放量

烟囷几何高度(米)	35	40	45	50	60
出口内径(米)	1.6	1.8	2	2.5	2.8
出口处烟速(米/秒)	15	15	18	18	20
抬升高度(米)	23	28	39	56	75
允许排放量(千克/小时)	23	32	48	77	125

4.有效源高计算值与实测值的对比 为了验证由(4)、(5)式计算的抬升高度是否在大厂地区基本可用,我们用照像法研究了热电厂120米高烟囷的抬升高度。在中性条件下取资料4组,稳定时取3组。结果(表略)表明,有效源高的计算值与实测值之间的相对误差:中性时为 $-26.7\sim 22.1\%$ 、稳定时为 $-3.5\sim 22.8\%$,平均相对误差是 -6.4% (中性)和 8.2% (稳定)。其计算值接近于实测平均值,与文献[13]的结果相当一致,故(4)、(5)式基本可用。

(三)微、静风时 SO_2 瞬时浓度的计算模式

1.微风时 SO_2 瞬时浓度的计算模式 用移动烟囷积分模式^[2]计算高架点源的 SO_2 污染物的地面瞬时浓度场,其式为

$$q(x, y, 0, H_e) = \int_0^T \frac{Q}{\sqrt{2\pi^3} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \cdot \exp \left[-\frac{(x - \bar{u} \cdot T)^2}{2\sigma_x^2} \right] \cdot \exp \left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right] \cdot \exp \left[-\frac{H_e^2}{2\sigma_z^2} \right] \cdot dT \quad (6)$$

其中 $q(x, y, 0, H_e)$ (毫克/米³)是 SO_2 污染物的地面瞬时浓度, Q (毫克/秒)是 SO_2 的源强。 $\bar{u}$ 取 0.75 米/秒,其它符号同前。

微风条件下由面源排放的 SO_2 污染物造成的瞬时浓度贡献,可按下列式计算^[10]

$$q_s(x, y, 0, H_e) = \frac{Q_i}{\pi \bar{u} (\sigma_{y0} + \sigma_y) (\sigma_{z0} + \sigma_z)} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{y^2}{(\sigma_{y0} + \sigma_y)^2} + \frac{H_e^2}{(\sigma_{z0} + \sigma_z)^2} \right] \right\} \quad (7)$$

其中 q_s (毫克/米³)为面源造成的 SO_2 地面瞬时浓度, Q_i 是面源第 i 单元的源强(毫克/米²·秒)

秒),它包括了该面源单元内的低矮源及生活污染源的排放量。根据经验,一般取 $\sigma_{y0}=L/4.3$ (L 是面源单元的边长), $\sigma_{z0}=H_e/2.15$ (若面源单元中的各分散源的高度不等,则 H_e 应取它们的平均有效源高)^[10]。在实际计算中,因面源中的各源高均较低,故可用各源的几何高度代替。据调研结果,大厂地区面源的平均源高约8.4米, $\bar{u}$ 取0.75米/秒,其余各量含义同前。

为了验证(6)、(7)式是否基本适用,对大厂老区的现有污染源按(6)、(7)式分别计算了中性层结、微风(南风)条件下SO₂瞬时浓度分布,并与相同条件(即稳定度、风向、风速)下的1984年1月14日08时的SO₂实测浓度值作了比较(表6)。由表6可见,在12个测点中,计算值有的比实测值高(最高相对误差达46.5%),有的低于实测值(最低相对误差达-52.3%,平均误差为-4%)。从实测与计算的浓度场分布图(图略))也可看出,两者分布的形式相似,中心位置基本一致,处于磷肥厂一带。因此,(6)、(7)式在大厂地区是基本可用的。

表6 中性、微风条件下SO₂瞬时浓度计算值与实测值之比较

地 点	计 算 值 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	实 测 值 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	相 对 误 差 (%)
马 庄	140	188	-25.5
三村幼儿园	180	322	-44.0
南钢厂门口	240	257	-6.6
省电一处	300	343	-12.5
氮肥厂门口	390	388	0.5
小 门	520	350	46.5
磷肥厂门口	550	587	-6.3
丁家山	380	360	5.6
区 委	180	377	-52.3
十 村	350	258	35.7
二 招	400	355	12.7
葛 塘	140	143	-2.1
平 均 值	314.2	327.3	-4.0

2. 静风条件下SO₂瞬时浓度的计算模式 静风时,高架点源的计算式^[10]为

$$q(x, y, 0, H_e) = \frac{2Q}{(2\pi)^{3/2}} \frac{b}{b^2R^2 + a^2H_e^2} \cdot \exp \left[\frac{b^2R^2 + a^2H_e^2}{-2(abm\Delta)^2} \right] \quad (8)$$

其中 a 、 b 是与稳定度有关的参数, $R^2 = x^2 + y^2$, $m\Delta$ 为静风持续时间 ($\Delta = 3600$ 秒), 其余符号同前。若静风持续时间达数小时, 则(8)式可近似写为

$$q(x, y, 0, H_e) = \frac{2Q}{(2\pi)^{3/2}} \cdot \frac{b}{b^2 R^2 + a^2 H_e^2} \quad (9)$$

根据文献*, 在静风、稳定条件下, $a = 0.24$, $b = 0.06$; 在静风、中性层结时, $a = 0.47$, $b = 0.11$ 。

静风时由面源造成的 SO_2 地面瞬时浓度分布, 根据文献[5], 连续点源的横风向 SO_2 积分浓度(瞬时值)的计算式为

$$q_1(x, y, 0, H_e) = \frac{\sqrt{2} \cdot Q_i}{\sqrt{\pi} \cdot \sigma_z \cdot u} \exp \left[-\frac{H_e^2}{2\sigma_z^2} \right] \quad (10)$$

若应用于低矮源, 则可假定 $H_e \approx 0$, (10)式变为

$$q_1 = \frac{\sqrt{2} \cdot Q_i}{\sqrt{\pi} \cdot \sigma_z \cdot u} \quad (11)$$

因静风时 SO_2 污染物的水平分布已无明显方向性, 故可假定: 从低矮源排放出来的 SO_2 , 扩散到以该源为中心、以任意长为半径(R 米)的圆周上各点的 SO_2 浓度值大致相等。把(11)式除以 $2\pi R$, 可得瞬时浓度 $q_2(R) = q_1/(2\pi R) = Q_i/(\sqrt{2}\pi^{3/2}\sigma_z u R)$, 取 $\bar{u} = 0.2$ 米/秒, 上式为

$$q_2(R) = \frac{0.635Q_i}{\sigma_z R} \quad (12)$$

式中 Q_i 是面源源强, 求法同前。在计算面源贡献时, 近似地把 Q_i 的原点取在面源单元的中心。设某计算点离开面源的 i 单元中心点之间的距离为 R , i 单元的面源源强为 Q_i , 利用(12)式就可算得 i 单元对某计算点的瞬时浓度贡献。

静风条件下大厂地区的 SO_2 地面瞬时浓度的分布, 根据文献[1]、[10], 用(9)、(12)式计算。因缺乏静风时 SO_2 实测资料, 故对它们的适用性问题不能验证。

三、大厂地区微、静风时 SO_2 瞬时浓度预测

利用大厂老区点源、面源和扬子乙烯工程的新建点源资料, 计算了 15 千米 $\times$ 9 千米范围内 SO_2 地面瞬时浓度分布。计算网格为 1 千米 $\times$ 1 千米。微风时的计算式是(6)、(7)式; 静风时是(9)、(12)式。任一计算点的浓度值, 包括了各个点源及面源各单元对该点的贡献。分别计算了中性与稳定层结、微风和静风时的 SO_2 地面瞬时浓度分布。这里仅给出中性层结下微风(西南风和东北风)时及静风时 SO_2 地面瞬时浓度分布图(图 2—4)。

* 南京大学气象系, 大气环境质量评价(讲义), 1983

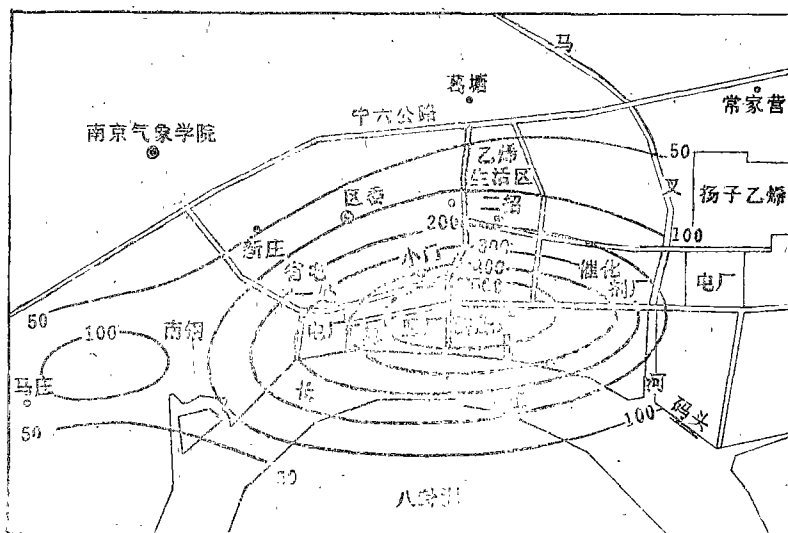


图2 中性层结、微风(SW)时 SO_2 地面瞬时浓度分布图 (单位: 微克/米³)

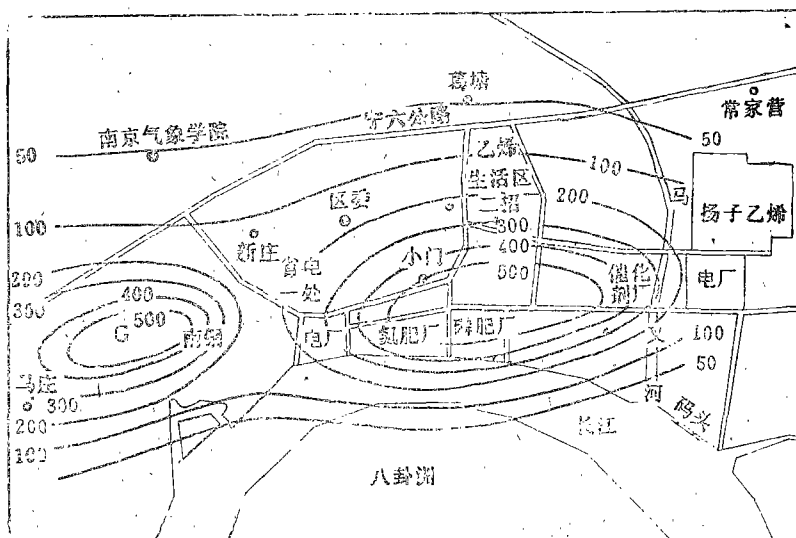


图3 中性层结、微风(NE)时 SO_2 地面瞬时浓度分布图 (单位: 微克/米³)

由图2可知,在微风(西南风)时,大厂地区存在两个 SO_2 地面瞬时浓度高值中心,最大浓度(约763微克/米³)出现在氮肥厂附近。我国规定 SO_2 瞬时浓度的大气环境质量二级标准是0.5毫克/米³[11]。若任何一次测量的 SO_2 瞬时浓度值超过0.5毫克/米³,就称超标。则超标区约3平方千米,位于热电厂、氮肥厂、磷肥厂一带。南钢附近的另一高值中心未超标。在微风(东北风)时(图3),也有两个 SO_2 地面瞬时浓度高值区,磷肥厂、氮肥厂一带是一高值区,超标面积约3平方千米,其中一部分位于乙烯工程区与扬子石化公司的职工生活区之间的隔离带内,其最大浓度值约704微克/米³。南钢一带也出现面积约1平方千米的超标区,最大浓度值约514微克/米³。

- [6] 曹文俊、朱汶，定容球飞行高度的控制及其定高释放方法的探讨，南京气象学院学报，1986，1，31—36。
- [7] 蒋维楣等，平阿气球探测研究山区风场特征和大气扩散参数，环境科学学报，5卷，2期，212—218，1985。
- [8] 李世奎等，六氟化硫示踪剂及其在大气扩散中的应用，气象学报，37卷，2期，69—78，1979。
- [9] 栾铁林，局地大气扩散试验研究，环境科学学报，5卷，1期，98—103，1985。
- [10] 李宗浩等，废气污染气象学原理及应用，400，417—419，293页，气象出版社，1985。
- [11] 《环保工作者实用手册》编写组，环保工作者实用手册，55，816—817，冶金工业出版社，1984。
- [12] 王肇润编写，工业环保概论，科学技术文献出版社，1986。
- [13] 沈觉成、曹文俊，若干烟云抬升公式的对比分析，南京气象学院学报，1983，2，173—179。

A PRELIMINARY STUDY ON LOCAL ATMOSPHERIC DIFFUSION AND SO₂ CONCENTRATION DISTRIBUTION UNDER BREEZE CONDITIONS

Cao Wenjun Zhu Wen

ABSTRACT

The atmospheric diffusion parameters in the Dachang area of Nanjing are calculated using tatroon data under breeze conditions and compared with those in the city of Lanzhou. Calculation is also performed of the SO₂ instantaneous concentration distribution in the area under breeze and calm conditions with two sets of formulas of point source and area source respectively. It is found that some places in the area are subject to pollution. This provides useful criteria for construction planning and environmental protection in the area.