

华南一些城市近地层大气扩散与输送特征

向可宗

(广东热带海洋气象研究所)

提 要

本文利用1980—1983年广州、湛江、汕头等地的实测资料,讨论了华南一些城市近地层大气污染物扩散与输送特征。发现由于垂直扩散较强,最大浓度常于近源处发生,且向下风方浓度衰减较快。受近地层局地小扰动的影响,大气污染浓度分布常呈现不规则起伏。

季风对华南一些城市污染物输送规律有较大影响,从而使平均污染浓度高值区具有明显的季节性变化。沿海城市大气污染还在一定程度上受到海陆风的作用,而使浓度分布有明显的日变化。最后讨论了雨水的冲洗作用。

一、引 言

中尺度和城市尺度的大气扩散是制约不同地区和城市近地层污染物浓度分布的主要因素之一。它受着各种气象条件的影响,而这些气象条件又与各地区之地理、地形、下垫面状况等有密切关系。D. 斯莱德(1979)曾指出^[1]:在不同的时间和空间尺度上,与各种系统相关联的风型及某些湍流特性是决定排入大气中物质扩散的最重要因素,这些因素又受到不同地域的能量平衡和动力条件的明显影响。中国科学院大气物理研究所曾对浙江东部山区大气边界层与大气扩散问题作过深入研究^[2],发现由于地理、地形条件的不同,其边界层气象条件及大气扩散特征与平原地区是有很大不同的。兰州高原大气所和兰州大学也曾对我国西北高原地区的大气扩散特征进行过专门探讨,同样表明扩散的地域性差异明显。华南地处低纬亚热带,某些气象条件与中高纬地区相比有很大差异,从而导致大气中污染物的输送与扩散也具有其不同的特点。下面根据华南区一些城市的气象与污染监测资料,就上述问题作一初步分析。

二、华南一些城市近地层大气扩散特征及对 污染浓度分布的影响

1. 稳定度与混合层厚度

表1系根据1980—1983年广州、湛江、汕头等地观测资料统计的冬夏不同时段帕斯奎尔稳定度。表2是根据低空探空仪测定结果得到的不同季节混合层厚度。从表1可以

看出即使在秋冬季清晨华南一些城市稳定度仍可保持 D 类, 即保持在近中性条件下, 比中高纬同时段的多种情况下要小 1—2 级。帕斯奎尔稳定度实际上是一种扩散稳定度^[9], 它直接和大气扩散强度或扩散方差密切相关, 稳定度愈小扩散强度愈大。上述情况表明这些城市的扩散强度比中高纬地区要大些。从表 2 则可以看出混合层厚度平均皆在 500 米以上, 冬季清晨也都大于 300 米。表明华南一些城市湍流垂直混合的上限较高。

表 1 华南一些城市冬夏不同时段帕斯奎尔稳定度

季节	时段	广州	湛江	汕头	茂名	韶关	佛山
冬(一月)	夜	D	D	D	D	D	D
	白天	C	C	C	C	B—C	C
夏(七月)	夜	D	D	D	D	D	D
	白天	B—C	C	C	B—C	B—C	C

表 2 一些城市混合层厚度(\bar{L})及七时混合层厚度(L_7)

城市	项 目	一月		四月	七月	十月	全年
		\bar{L}	L_7 时	\bar{L}	\bar{L}	\bar{L}	\bar{L}
广州		735	440	758	921	841	814
汕头		627	400	582	777	717	676
湛江		642	340	613	713	618	647
茂名		661	314	592	697	637	647
珠海		666	375	573	705	672	654
深圳		653	403	576	729	687	661
海口		604	365	655	744	579	646

2. 湍流强度

湍流强度是以风速脉动均方差与平均风速比值来表示的^[1]即:

$$i_h = \left(\frac{v'^2}{v^2} \right)^{1/2} = \frac{\sigma_v}{v} \quad (1)$$

$$i_z = \left(\frac{w'^2}{v^2} \right)^{1/2} = \frac{\sigma_w}{v} \quad (2)$$

i_h, i_z 分别为水平和垂直湍强, D. 斯莱德指出它们亦能直接显示出湍流扩散的强弱。平衡气球可作为标记示踪粒子对其进行观测, 从而求得 v' 及 w' 值和平均风速, 并可根据上式导出湍强; 然后再用泰勒公式求取扩散参数。在近几年的大气环境评价中, 我们曾于深圳、广州、梅县、茂名、湛江等地进行了多次平衡气球观测, 并用三向风速表于深圳, 广州等地直接测定了湍强。两种方法测定结果如表 3。从中可以发现几个地区的垂直湍流扩散强度都很强, 比 D. 斯莱德给出的中纬度典型值^[2] 0.087—0.174 (相当于风向垂直脉动角标准差 $\delta_\varphi = 5—10^\circ$) 要大很多, 而以深圳为最强。

表 3 根据各地平衡气球观测及三向风速表(有 * 号者)观测结果计算出的湍强

地 点	观测次数	$\overline{i_u}$	$\overline{i_z}$
深圳*	15	0.214	0.291
广州*	15	0.203	0.245
海县	12	0.194	0.267
湛江	12	0.225	0.217
茂名	15	0.205	0.236

3. 湍流扩散系数

我们曾根据广州 1981—1982 年铁塔风资料分析,证实该市一百米以下风速能以很高的精度符合对数分布规律^[4];其他华南城市多半也有类似情况。这样就使我们能够较方便地利用近地层风资料求取摩擦速度 u^* 及粗糙度 z_0 ,近地层风廓线可通过下式计算:

$$u = \frac{u^*}{k} \ln(z/z_0) \quad (3)$$

式中 $k=0.4$ 为卡曼常数,如令: $x = \ln z$; $a = u^*/k$; $b = -(u^*/k) \cdot \ln z_0$,则上式变为:

$$u = ax + b \quad (4)$$

用回归分析方法求出 a, b 值后,由下式可得到 u^* 及 z_0 ,即

$$u^* = ka = 0.4a$$

$$z_0 = \exp(-b/a)$$

而且还可根据

$$K_z = ku^*z \quad (5)$$

确定湍流扩散系数 K_z 。表 4 是不同城市的 u^* 值及湍流扩散系数 K_z 。从中可看出 K_z 值皆比 A. Dobbins^[5] 给出的典型值 ($0.11z$) 要大,从而进一步表明华南某些城市的垂直扩散较强。

表 4 不同城市的 u^* 及 K_z 值

城市	u^* (米/秒)	K_z (米 ² /秒)	$\overline{K_z}$ (米 ² /秒)
广州	0.32	0.128z	9.6
汕头	0.37	0.148z	11.1
湛江	0.36	0.144z	10.8
连平	0.42	0.168z	12.6
海口	0.33	0.132z	9.9
茂名	0.35	0.140z	10.5

4. 污染浓度

为了分析上述扩散特征对大气污染的影响,我们将根据所得到之扩散系数,估算下风方轴线上的污染浓度分布并与实测结果相对比。众所周知,对于瞬时源在有风条件下,

其地面污染浓度可用下式计算:

$$C(x, y, o, t) = \frac{Q}{(4\pi Kt)^{3/2}} \exp\left[-\frac{(x - \bar{u}t)^2 + y^2 + H^2}{4Kt}\right] \quad (6)$$

式中假定 $K = K_x = K_y = K_z$, 如果为连续排放源, 可看成是由许多相继喷出的烟团迭加结果。令每个瞬时烟团源强为 Qdt , Q 为单位时间排放率。欲求某一时刻 t 的污染浓度, 须将上式对时间积分, 并注意达稳态时的浓度是和 $t \rightarrow \infty$ 的浓度是等价的, 于是得到:

$$C(x, y, o) = \int_0^{\infty} \frac{Q}{(4\pi Kt)^{3/2}} \exp\left[-\frac{(x - \bar{u}t)^2 + y^2 + H^2}{4Kt}\right] dt \quad (7)$$

上式积分结果为

$$C(x, y, o) = \frac{Q(x^2 + y^2 + H^2)^{1/2}}{4\pi K} \exp\left\{\frac{\bar{u}}{2K}[x - (x^2 + y^2 + H^2)^{1/2}]\right\} \quad (8)$$

而下风方主轴线上 ($y = 0$) 的浓度则为:

$$C(x, o, o) = \frac{Q(x^2 + H^2)^{1/2}}{4\pi K} \exp\left\{\frac{\bar{u}}{2K}[x - (x^2 + H^2)^{1/2}]\right\} \quad (9)$$

茂名电厂两个 SO_2 排气筒相距极近, 故作为一个点源处理。源高 115 米, 烟气抬升高度为 80 米, SO_2 排放率为 106 克/秒。表 5 是 1980 年 1 月 31 日 06 时实测与用上式得出的计算结果对比, 两者基本吻合, 从中可以发现:

(1) 由于垂直扩散较慢, 最大落地浓度常于近源处发生。本例最大 SO_2 地面浓度出现在源下风方不到 1 公里处。

表 5 茂名电厂下风方主轴线上计算浓度与实测值

源下风方距离(米)		250	500	750	1000	1500	2000	3000	4000	5000	6000	7000
SO_2 浓度	计算值	0.024	0.076	0.101	0.107	0.102	0.091	0.072	0.059	0.050	0.043	0.038
(毫克/米 ³)	实测值	0.03	0.07	0.10	0.12	0.07	0.09	0.06	0.05	0.03	0.04	0.02

(2) 与北方有相同量级排放量之情况相比, 最大及平均污染浓度一般较小, 且向下风方衰减较快, 亦即同型污染企业的影响范围相对要小些。如表中 SO_2 最大一次浓度仅 0.12 毫克/米³ (实测值), 2 千米内平均浓度仅 0.08 毫克/米³, 远低于国家二级标准, 这种情况也与扩散强度有关。事实上, 将(9)式对 K 求微商, 可以得到:

$$\frac{\partial C}{\partial K} = -(1 - a)C/K \quad (10)$$

式中 $a = \frac{\bar{u}}{2K}[(x^2 + H^2)^{1/2} - x]$ 。除极近源处外, 一般 $a < 1$, 即 $\partial C/\partial K < 0$; 亦即浓度随 K 值的增大而减小, 所讨论的一些城市湍流扩散系数都较大, 故浓度一般就较小。上述事实对长期平均污染浓度也有影响。如广州氮氧化物 (NO_x) 排放量 1982 年 1 月为 4146 吨/月, 主要是汽车尾气排放造成的, 在全国大中城市中是比较大的, 但同年 1 月份平均氮氧化物污染浓度却只有 0.05 毫克/米³, 远小于二级标准。

(3) 表 5 中实测最大落地浓度出现在源下风方近 1 千米处; 但在 2 千米及 6 千米处还有小的起伏。这类起伏在其他城市也常可发现, 它们是由局地小扰动造成的, 这一点可通过分析加以说明。一般风速扰动的连续变化可用傅立叶级数来表示, 即

$$v'(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \frac{2\pi}{L_n} t + b_n \sin \frac{2\pi}{L_n} t) \quad (11)$$

由于 $v'(t)$ 的均值为零, 故 $a_0 = 0$; 而且上述风速扰动常可近似看成是由几个主要波动成份的迭加, 于是上式可近似写作:

$$v'(t) \approx \sum_{n=1}^N (a_n \cos \frac{2\pi}{L_n} t + b_n \sin \frac{2\pi}{L_n} t) \quad (12)$$

根据 $v'(t)$ 的实测资料, 通过周期分析方法可以很方便地求出 a_n 和 b_n 。通常可用下式表示对应于扰动时间尺度 L_n 的强度 S_{L_n} 即,

$$S_{L_n} = (a_n^2 + b_n^2)^{1/2} \quad (13)$$

又由于扰动的时间尺度 L_n 和空间尺度 L_x 有如下关系^[3]:

$$L_x = \bar{u} L_n \quad (14)$$

故可求出对应于不同空间尺度 L_x 的扰动强度 S_L 。我们做了 1980 年 1 月 31 日 06 时茂名对应于不同尺度的扰动强度和下风方 SO_2 浓度分布曲线(图略)。从中发现二者有明显的相对应关系, 进而表明污染浓度的不规则起伏主要是由于局地小扰动所造成的。类似的污染浓度起伏在许多地方都监测到, 说明近地层扰动是比较频繁的。

三、流场与水平输送特征

1. 图 1a 为华南七月(实线)及一月(虚线)盛行风场。根据上述两月份最多风向和平均风速绘制的, 可以反映出冬夏主要水平输送方向。其季风型特征十分明显: 冬半年近地层主导风向以偏北或东北风为主; 夏半年则盛行偏南风。与此对应平均浓度也有季节变化。例如, 根据 1982—1983 年污染监测结果发现 SO_2 高值中心, 对于不同月份有显著位移(参见图 1b)。

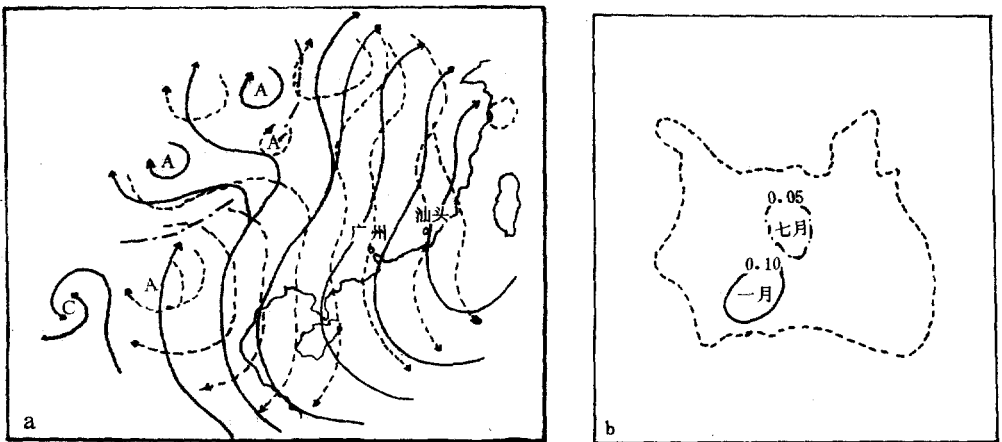


图 1 (a) 华南七月(实线)及一月(虚线)盛行风场 (b) 汕头市平均 SO_2 高值中心位置变化

2. 由于华南濒临南海, 海陆风是有一定影响的。如湛江化工厂离海仅约 1 公里, 白天盛行东南风, 夜晚盛行偏北风, 随着风的交替, 浓度分布也呈周期性的日变化。表 6 是 1979 年 10 月 27 日位于湛江化工厂北部约 1000 米的花圈监测点之风向与 SO_2 污染浓

度。可发现吹东南风时浓度较高, 偏北风则浓度急剧下降。

表 6 湛江附近花园测点 1979 年 10 月 27 日风向及 SO₂ 浓度变化

时间(时)	2	5	8	11	14	17	20	23
风向	N	NNW	N	NNE	SE	SE	SE	N
浓度(毫克/米 ³)	0.05	0.03	0.03	0.03	0.09	0.09	0.08	0.06

四、降水冲洗作用

由于华南雨季长, 降水量较大, 在估计雨季平均浓度及分析降水天气之大气污染状况时, 考虑雨水冲洗作用是十分必要的。表 7 是广州、汕头等市 1982—1983 年 SO₂ 雨季(4 月、7 月)浓度与年平均浓度对比, 从中可看出雨季平均浓度仅为年平均的 62.5%—80%, 说明华南雨洗作用是比较强的。

表 7 (SO₂) 雨季平均浓度与年平均对比

地点	年平均浓度 (毫克/米 ³)	雨季(4 月、7 月)平均浓度 (毫克/米 ³)	百分比 (%)
广州	0.08	0.05	62.5
汕头	0.06	0.04	66.7
佛山	0.05	0.04	80
梅州	0.06	0.045	75

通常雨洗作用可由下式估计:

$$C = C_0 \exp[-\tau t] \quad (15)$$

式中 C_0 为无雨时浓度, t 为降水时间, τ 为雨洗系数, 和雨强 I 成正比; 即 $\tau = aI$, a 为比例系数, 注意到雨强 $I = R/t$, 则上式变为:

$$C = C_0 \exp[-aR] \quad (16)$$

R 为降水量(毫米)。表 8 是根据 1982—1983 年 4 月和 7 月有雨及无雨日均浓度对比及降水资料求出的 a 值。

实践表明采用(16)式和表 8 估计一些城市降水冲洗作用, 效果较好。

表 8 各地比例系数

地点	广州	汕头	佛山	梅县	湛江	深圳	珠海	平均
a 值	0.0048	0.0043	0.0030	0.0034	0.0042	0.0038	0.0043	0.0040

五、小 结

华南地处低纬,通过分析发现一些城市垂直扩散较强,从而常使最大污染浓度于近源处发生,并向顺风方衰减较快,由于多局地小扰动,故浓度分布常伴有不规则起伏。

华南一些城市主要水平输送方向明显受季风所制约,平均高值污染区随季风的转换而位移。南方雨洗作用也是不可忽视的。

参 考 文 献

- [1] D. 斯莱德,气象学与原子能,张永兴等译,56—107,原子能出版社,1979年。
- [2] 中国科学院大气物理研究所,山区空气污染与气象,40—72,科学出版社,1978年。
- [3] 李宗恺等,空气污染气象学原理及应用,236—258,132,气象出版社,1985年。
- [4] 向可宗,广州近地层风的垂直分布与动力特性,热带气象,2,1985。
- [5] R. A. Dobbins, Atmospheric motion and air pollution, 260, John Wiley and Sons Inc, U. S. A, 1979。

ATMOSPHERIC DISPERSION AND TRANSPORT NEAR THE SURFACE IN SOME CITIES OF SOUTH CHINA

Xiang Kezong

(Guangdong Institute of Tropical Marine Meteorology)

Abstract

In this paper, some features of atmospheric dispersion and transport near the surface and its influence on air pollution in some cities of South China are discussed by using the observations in Guangzhou, Zhanjiang and Shantou during 1980—1983. It is found that the maximum concentration often occurs near source through intensive vertical diffusion, and the values of concentration decrease with the distance downwind rather rapidly. Due to the effects of perturbations, the distribution of air pollution often presents irregular undulations.

In addition, the effect of monsoon on transport of pollutant in South China is obvious, therefore, the high areas of the average pollutant concentration change with seasons markedly. The air pollution over coastal cities in South China is also effected by sea—and land—breezes to a certain degree, and therefore, the distribution appears daily variation. The rainwash effect of precipitation is also discussed.