

## 山谷风转换期的漫烟扩散模式\*

李宗恺 潘云仙\*\* 周朝辅 蒋维楣

(南京大学大气科学系)

唐士豹 朱曾望

(渡口市环境保护科研监测站)

### 提 要

根据渡口市空气污染监测资料首次鉴别出一种特殊形式的空气污染过程——山谷风转换期的漫烟过程。这种类型的空气污染在春、秋、冬季都经常发生,尤以冬季较严重。为此,发展了山谷风转换期的漫烟扩散模式,可以满意地解释上述观测事实。分析表明,模式不但能对高地面污染浓度的大小、而且能对其发生的时间和地点给出较准确的推断。

在上述情况下,SO<sub>2</sub>地面浓度比该地区日平均浓度大几倍至一个数量级以上,是影响渡口市的主要空气污染过程之一。模式的分析为进一步开展空气质量预测及控制污染的对策研究提供了基础。

### 一、引 言

渡口市环境质量评价、预测和污染治理的对策研究是一项综合性的课题。在此项工作的第一阶段,从1979年10月至1980年7月,按四个季节进行了空气污染监测及相应的气象观测。在发展渡口市山区大气扩散模式的过程中,进一步分析了SO<sub>2</sub>地面浓度的日变化特征。图1是该市弄弄坪地区四季SO<sub>2</sub>地面浓度平均的日变化曲线。该地区SO<sub>2</sub>浓度日变化的主要特点有两个:一是呈明显的单峰型,峰值出现在每天上午11:30—11:50左右,比前后的浓度大几倍至一个数量级以上;另一个特点是高地面浓度就出现在高架烟源的所在地,在方圆数公里范围内,所有监测点的浓度在短时间内骤然上升,维持数十分钟以后急剧下降。这些现象无法用现有的扩散模式来解释。

在有高架烟源的地方,日出后夜间形成的地面逆温自下而上崩溃时,可能出现短暂的地面高浓度。这种现象为许多观测所证实,一般称为漫烟(熏烟)过程,并已发展了相应的数学模式<sup>[1,2]</sup>。根据不同的烟源高度、平均风速及铅直混合速率等条件按模式推算,漫烟形成的地面高浓度一般出现在高架源下风向几公里至几十公里以远的狭长地带内,且已被大量观测所证实<sup>[2,3]</sup>。弄弄坪地区主要的SO<sub>2</sub>烟源是烧结厂的烟囱,其源强占总源强的90%以上,有效源高为500m左右。根据现场实测的气象资料用上述模式保守地推算,漫烟时的地面高浓度至少离源3—5km以远,即在弄弄坪地区以外的狭长地带内。可是,实际上却出现在高架烟源所在的整个弄弄坪地区。这种地面高浓度在时间、地点和数值上的综合特征,未见过类似的报导,也不能直接用现有的扩散模式来模拟。

\* 本文于1984年9月17日收到,1985年4月30日收到修改稿。

\*\* 潘云仙同志现在浙江省气象局工作。

分析同步观测的 SO<sub>2</sub> 浓度、风速廓线、温度廓线 以及它们随时间的变化资料后,发现上述特殊的空气污染现象是由于漫烟过程和山谷风转换过程同时出现而形成的。因地形影响,弄弄坪地区夜间逆温在次日 9:00 以后才自下而上逐渐破坏,开始将高架源排放在稳定气层内的污染物带向地面。11:00 左右逆温溃散高度约 300—350 m,11:30 达到 450—500 m,混合层发展到大量污染物积聚的高度,使高浓度的烟气迅速向下混合。另一方面,该地区夜间山风(WNW)在次日 11:00 左右转变为谷风(ESE),因此,11:15—11:30 左右在下风向因漫烟下落的污染物,在 11:30—11:50 左右又回到烟源附近地区。在回程中,烟云在横风向继续扩展,形成弄弄坪地区广阔范围内普遍的高浓度,而不像一般的漫烟污染出现在下风向较远的狭长地带内。

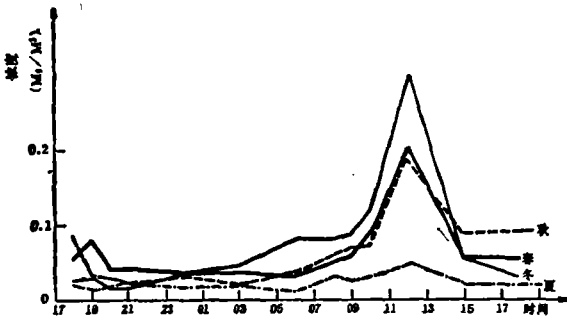


图 1 弄弄坪地区四季 SO<sub>2</sub> 地面浓度平均日变化

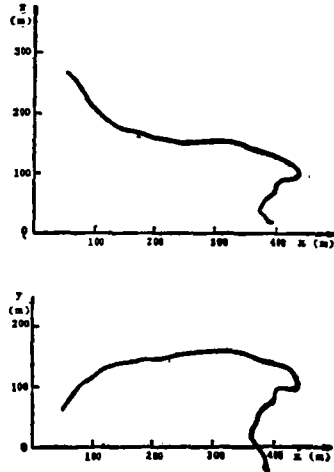


图 2 发生漫烟时典型的平衡气球迹线

山谷风转换及漫烟过程同时发生时的流场特征,在平衡气球的观测中得到了形象的反映。图 2 是典型的平衡气球迹线(1981 年 12 月 28 日 11 时 27 分释放)。可见,此时水平方向风向很不稳定,平均风速很小(0.48 m/s),轨迹呈大幅度弯曲,铅直方向显示有明显的混合。

根据以上分析,发展了山谷风转换期的漫烟扩散模式。利用当地实测的气象资料确定模式参数,计算结果在高浓度出现的时间、地点和数值上,均与实况符合较好。

## 二、山谷风转换期的漫烟扩散模式

### 1. 浓度计算公式

假定污染物在稳定气层内铅直向为正态分布,在混合层内铅直向均匀混合,水平方向则始终符合正态分布,但在不同的气层内取不同的扩散速率。于是在漫烟和山谷风转换的联合作用下,某高架源造成的地面浓度为,

$$C = \frac{Q}{(2\pi)^{1/2} \bar{u} \sigma_{yy} H_f} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_{yy}^2}\right) \left[1 - \int_0^\infty \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} e^{-\frac{1}{2}t^2} d\xi\right] \quad (1)$$

$$p = \frac{H_f - H_e}{\sigma_{zz}} \quad (2)$$

以上二式中,  $Q$  为源强,  $\bar{u}$  为计算时刻的平均风速,  $H_f$  为计算时刻的混合层高度,  $\sigma_{yy}$  为污染物返回到计算位置的横向扩散参数,  $H_e$  为山谷风转折时刻的有效源高,  $\sigma_{zz}$  为转折

点的铅直扩散参数。

(1) 式及(2) 式所代表的扩散模型寓意于各个参数的涵意及求取方法之中。显见, 这里计算的不是一般意义下的漫烟地面浓度, 而是在漫烟过程中向下混合的污染物被谷风带回到计算点的浓度。

## 2. 参数求取方法

### 1) 平均风速 $\bar{u}$

山谷风转换期间的风速不大, 观测资料表明, 可以用线性内插的方法近似计算不同时刻的平均风速, 即

$$\bar{u}(t) = \begin{cases} \bar{u}(t_1) = \frac{t_0 - t}{t_0 - t_1} & \text{当 } t_1 \leq t < t_0 \\ \bar{u}(t_2) = \frac{t - t_0}{t_2 - t_0} & \text{当 } t_0 \leq t \leq t_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $t_0$  为山谷风转折时刻, 即  $\bar{u}(t_0) = 0$ ;  $t_1$  和  $t_2$  分别为山谷风转换期的开始和结束时刻。

$t_0, t_1, t_2$  以及  $\bar{u}(t_1)$  和  $\bar{u}(t_2)$  均由观测资料确定。利用平衡气球资料作每天山谷风转换期风速随时间变化的曲线, 令风速开始持续下降的时刻为  $t_1$ , 曲线最低点(通常接近零)的时刻为  $t_0$ 。此后, 风向逆转, 风速开始缓缓增加, 至停止持续增长的时刻, 即为  $t_2$ 。一般山谷风转换期维持二小时左右。如图 3 所示。

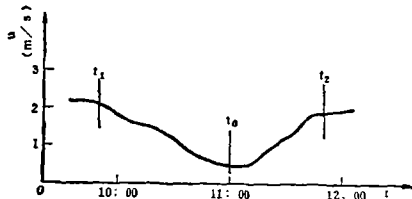


图 3 山谷风转换期风速随时间的变化(冬季)

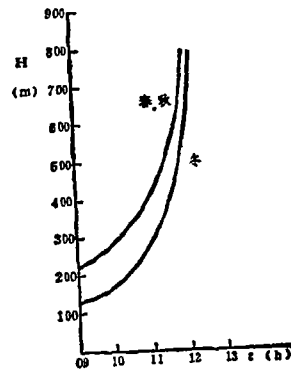


图 4 混合层高度的变化

### 2) 混合层高度 $H_F$

已有若干确定混合层高度的公式和方法, 例如, Benkley 和 Schulman<sup>[4]</sup>, Van Dop<sup>[5]</sup> 等, 但一般只适合对平原地区混合层的高度作粗略估计, 与渡口市山区地形条件的实况相差很大。故本模式采用实测资料拟合经验曲线的方法确定不同时刻的混合层高度。图 4 是冬季及春、秋季混合层高度随时间变化的经验曲线。

### 3) 有效源高 $H_e$

模式中的  $H_e$  系指山谷风转变时刻烟流达到的终极高度。从温度的铅直分布来看, 此时低层为混合层, 高层为稳定气层。烟气抬升高度分别用 Briggs 中性及稳定抬升公式计算<sup>[6,7]</sup>。当烟气抬升层一部分在混合层, 另一部分在稳定气层时, 有效源高按以下经验公式确定:

$$H_e = H_{F0} + \left(1 - \frac{H_{F0} - H_s}{\Delta H_N}\right) \Delta H_s \quad (4)$$

式中,  $H_{r_0}$  为山谷风转变时刻的混合层高度,  $H_s$  为烟囱高度,  $\Delta H_N$  为中性或不稳定时的抬升高度,  $\Delta H_S$  为稳定时的抬升高度。

在中性及不稳定条件下, 烟气抬升都是在经验假定下人为截止的, 至今还没有严格的理论方法。(4) 式中,  $(H_{r_0} - H_s) / \Delta H_N$  是在混合层中的抬升高度占中性时总抬升高度的成数, 以此确定稳定层中的剩余抬升, 显然是一种近似。

现场试验时, 还获得一些个例, 具有同步观测的烟流抬升照片和湍流资料, 可用李宗恺<sup>[8]</sup>给出的公式计算, 与实况符合尚好。但多数个例属下部为混合层, 上部为稳定层的情形, 不能用单一的中性层结公式计算, 需要积累更多的资料才能作更详尽的分析与比较。

#### 4) 横风向扩散参数 $\sigma_{yF}$

在渡口市山区大气扩散模式的研究过程中, 已获得弄弄坪地区在中性、稳定、不稳定和小风几种条件下的扩散参数<sup>[9,10]</sup>。本模式中的  $\sigma_{yF}$  系漫烟与山谷风转换同时发生时的扩散参数, 需要利用上述结果进一步推求。

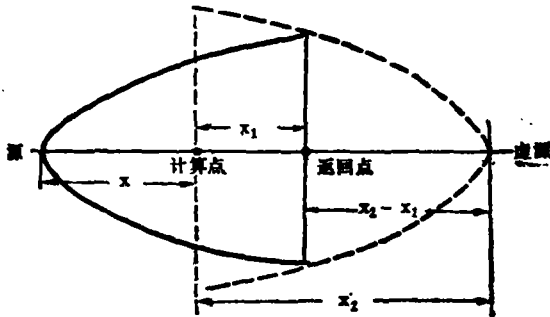


图 5 用虚源法计算  $\sigma_{yF}$

污染物的横向扩散可分为两个阶段。第一阶段从烟源到返回点之间的扩散, 是在逆温层中进行的, 应遵循稳定条件下的扩散规律, 第二阶段是从转折点返回计算点的过程, 应采用小风扩散参数。本文用虚源扩散法合成上述两个阶段的扩散过程, 求得  $\sigma_{yF}$  值, 如图 5 所示。设烟源到计算点的距离为  $X$ , 返回点到计算点的距离为  $X_1$ , 虚源到计算点的

距离为  $X_2$ 。

由文献[10]已知稳定及小风时的横向扩散参数为:

$$\sigma_{yS} = 0.5649 x^{0.8836} \quad (5)$$

$$\sigma_{yL} = 1.2968 x^{0.8942} \quad (6)$$

式中, 下标  $S$  及  $L$  分别表示稳定及小风状况。

根据虚源算法有:

$$\sigma_{yS}(X + X_1) = \sigma_{yL}(X_2 - X_1) \quad (7)$$

(7) 式中,  $X$  为已知的计算点的坐标,  $X_1$  可根据计算时刻和山谷风转折时刻的时差以及这个期间的平均风速求得。于是, 联立 (5)、(6)、(7) 三式可解出  $X_2$ 。

从图 5 可知, 污染物返回到计算点时的横向扩散参数, 相当于小风条件下虚源在  $X_2$  距离上的数值, 所以

$$\sigma_{yF} = 1.2968 X_2^{0.8942} \quad (8)$$

#### 5) 铅直向扩散参数 $\sigma_{zS}$

(2) 式中的铅直扩散参数应取稳定条件下位于转折位置的数值。由文献[10]已知:

$$\sigma_{zS} = 0.6267 x^{0.7459} \quad (9)$$

将此式应用于转折点, 得到模式中应取的铅直扩散参数为:

$$\sigma_{zs}(X + X_1) = 0.6267(X + X_1)^{0.7469} \quad (10)$$

### 三、模式验证

我们利用 1979 年 10 月至 1980 年 7 月的  $\text{SO}_2$  浓度监测资料检验了模式的适用程度。因夏季漫烟过程不明显, 实际上只检验了春、秋及冬季的情形。用模式计算了九个高架点源在漫烟及山谷风转换期对地面浓度的影响, 这九个点源的  $\text{SO}_2$  排放量占弄弄坪地区全部  $\text{SO}_2$  排放量的 95% 以上。

模式的计算范围是一个相对较平坦的  $2.5 \text{ km} \times 2.0 \text{ km}$  的长方形。共选择 12 个计算点, 其中七个点取在与浓度监测点相同的位置上, 见图 6。根据观测资料, 冬季取 NW, WNW, W 三种风向计算, 春、秋季取 WNW 一种风向计算。从每天山谷风转折时刻开始, 每隔 15 min (冬季) 或 20 min (春、秋季) 计算一个浓度值, 得到模式推断结果。

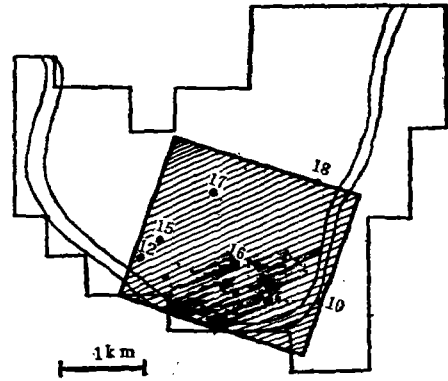


图 6 模式计算范围

实际的地面浓度应包括近地面线源及面源的影响, 它们的浓度可以用小风条件下的“烟团”模式计算。因此, 最终的计算浓度应该是高架源及地面源浓度计算值之和。结果表明, 地面浓度的陡然上升, 完全是高架源烟流在山谷风转换和漫烟的协同作用下造成的, 地面烟源的贡献相当于整个过程开始前的本底值, 高架源的贡献比它大几倍至一个数量级以上。

表 1 和表 2 是冬季各采样点上  $\text{SO}_2$  计算浓度与实测浓度的比较。表中的计算浓度为 11:15 和 11:35 两次漫烟浓度计算值的均值与线源、面源计算浓度之和。两个表中的实测浓度是 1980 年 1 月 17 日至 22 日冬季采样期间发生明显漫烟过程的四天的平均漫烟浓度, 表中的风向是指发生漫烟之前的山风的风向。根据河谷走向和风向观测记录, 山风的主导风向是 WNW 风, 表 1 是这个风向的计算值与实测结果的比较。考虑到发生漫烟的四天风向可能不完全一致, 测风气球资料也很难给出十分准确的风向值, 因此又计算了  $\text{WNW} \pm 22.5^\circ$  两个风向的漫烟浓度。表 2 中三种风向的平均值与实况更接近。

图 7 是表 2 的图示。图 6、图 7 中的外边界线系整个弄弄坪地区的评价范围, 本模式计算的长方形内, 地形相对较平坦, 漫烟污染亦较严重。从图 7 可以看出, 计算浓度与实测浓度的分布及中心位置均相当一致。对漫烟并伴随风向改变这样复杂的扩散过程来说, 这一结果进一步表明模式基本上是成功的。

### 四、结 论

1. 在山区的城市或工业区, 若漫烟过程与山谷风的转换同时发生, 则地面高浓度可能出现在高架烟源所在的工业及人口稠密区, 这是一种值得重视的空气污染现象。在确定主要烟源的位置和高度时, 应考虑避免发生这种情况。

表 1 实测浓度与计算浓度的比较(风向 WNW)

采样点编号	漫烟浓度			线源、面源 浓度	计算浓度	实测浓度 <sup>1)</sup>	计算/实测
	11:15	11:35	均 值				
$C_{12}$	0.040	0.218	0.130	0.076	0.206	0.356	0.579
$C_{14}$	0.717	0.259	0.488	0.011	0.499	0.360	1.39
$C_{15}$	0.261	0.268	0.265	0.131	0.396	0.474	0.835
$C_{16}$	0.697	0.287	0.492	0.035	0.526	0.427	1.23
$C_{17}$	0.335	0.251	0.293	0.040	0.333	0.202	1.65
$C_{18}$	0.189	0.178	0.183	0.035	0.218	0.362	0.602
$C_{19}$	0.900	0.269	0.585	0.002	0.587	0.398	1.48

<sup>1)</sup> 采样时间与计算时间差五分钟

表 2 实测浓度与计算浓度的比较

采样点编号	计 算 浓 度 <sup>1)</sup>				实测浓度	计算/实测
	W	WNW	NW	平 均		
$C_{12}$	0.183	0.206	0.277	0.222	0.356	0.624
$C_{14}$	0.154	0.499	0.538	0.397	0.360	1.10
$C_{15}$	0.284	0.396	0.441	0.374	0.474	0.789
$C_{16}$	0.329	0.526	0.364	0.407	0.427	0.953
$C_{17}$	0.468	0.334	0.159	0.320	0.202	1.58
$C_{18}$	0.559	0.218	0.150	0.310	0.362	0.856
$C_{19}$	0.231	0.588	0.376	0.398	0.398	1.00

<sup>1)</sup> 已包括线源和面源浓度在内

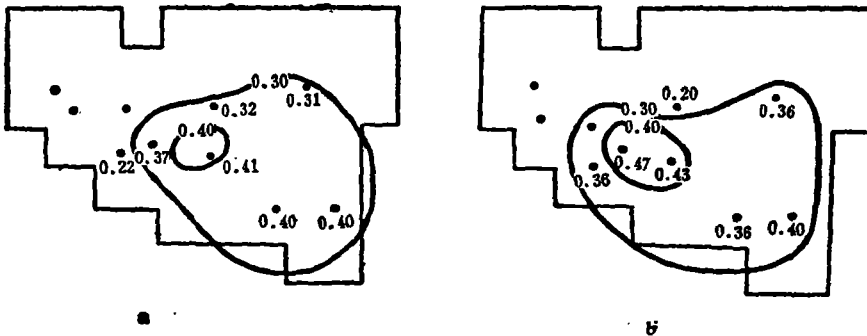


图 7 浓度分布的比较 (a. 模式推断 b. 实测)

2. 山谷风转换期的漫烟扩散模式能比较准确地推断地面高浓度的大小和出现的时间。更重要的是,它能较好地判定这种特殊过程所形成的地面高浓度区的位置和范围,这是一般的漫烟模式无法实现的。

3. 山区的气象条件和湍流状况与平原有很大差别,不同地形的山区之间也有明显差异。在确定扩散模式的输入参数时,搬用现成的结果常会造成较大的误差。本研究力求在模式设计的主要方面接近实况,并尽可能采用根据现场大量实测数据总结得出的参数和模式输入条件,获得了较好的结果。可是由于山区地形和气象条件十分复杂,是大气扩

散研究的薄弱领域;另一方面,限于现场观测试验的条件,数学模拟不可能做得很细,还采用了一些近似假定和条件。可以预期,若能在积累更多的山区扩散试验资料的基础上加以改进,将能进一步提高模式的应用价值和效能。

### 参 考 文 献

- [1] Turner, D. B., Workbook of atmospheric dispersion estimates, Office of air programs publication No. AP-26, U.S., EPA, 1970.
- [2] Carpenter, S. B. et al., Principal plume dispersion models: TVA power plants, J. APCA, 21, 1971.
- [3] Montgomery, T. L. et al., A simplified technique used to evaluate atmospheric dispersion of emissions from large power plants, J. APCA, 23, 1973.
- [4] Benkley, C. W., and L. L. Schulman, Estimating hourly mixing depths from historical meteorological data, J. Appl. Meteor., 18, No. 6, 772—780, 1979.
- [5] Van Dop, B. J. et al., Meteorological input for a three dimensional medium range air quality model, air pollution modeling and its application I, C. De Wispelarere, Ed., New Ycrk, 1981.
- [6] Briggs, G. A., Plum rise prediction, in Lectures on air pollution and environmental impact analyses, American Meteorological Society, Boston, 1975.
- [7] Briggs, GA., Some recent analyses of plume rise observations, paper presented at second international clean air congress, 1970.
- [8] 李宗恺, 考虑环境湍流作用的烟气上升路径方程, 气象学报, 第 40 卷, 第 1 期, 80—88, 1982。
- [9] 周朝辅等, 平衡气球探测方法的研究, 中国环境科学, 5, No. 3, 60—64, 1985。
- [10] 蒋维相, 用平衡气球探测法研究山区流场特征和扩散参数, 环境科学学报, 5, No. 2, 212—218, 1985。

## A DIFFUSION MODEL FOR FUMIGATION WITH MOUNTAIN-VALLEY WIND SHIFT

Li Zongkai      Pan Yunxian      Zhou Chaofu      Jiang Weimei

(Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University)

Tang Shibao      Zhu Zengwang

(Environmental Sciences Research and Monitoring Station of Dukou)

### Abstract

A special form of air pollution called fumigation with mountain-valley wind shift is first distinguished based on air pollution monitoring data in Dukou city. This kind of air pollution occurs frequently in spring, autumn, and is specially serious in winter season.

A model of fumigation accompaning shift from mountain to vally wind is developed to investigate the observed facts. It is demonstrated that the model provides not only the accurate predictions of the values of high concentration at ground level but also the times and locations of occurrence.

Ground level concentration of SO<sub>2</sub> in above stated case is several to ten or more times stronger than 24-hour means in that area. It is one of the most important processes of air pollution in Dukou city. The model might provide useful guidance for the researches on air quality prediction and control measures.