

# 空气污染的长距离输送模式\*

桑 建 国

(北京大学地球物理系)

所谓长距离输送一般是指区域尺度(几十公里到几百公里)和大陆尺度(几百公里到上千公里)中的污染输送问题。本文讨论一种可用于区域评价的长距离污染物输送模式。考虑到硫化物在大气污染问题中的重要性及其化学性质相对简单的特点,这个模式首先用于讨论硫化物输送和转换规律。做为模式发展的初期阶段,本文只讨论模式本身结构、计算方法及参数选取等问题。目前区域尺度监测资料尚不足以对模式进行验证,因此关于模式在实际评价工作中的应用,将放在今后模式的进一步改进中去解决。

## 1. 长距离输送模式

这里给出一个一层的混合层模式,它描述污染物在一个垂直方向上充分混合的边界层内的输送过程。当污染物离开源点超过几十公里,它在混合层中垂直方向上均匀分布的假定一般是合理的。

如果用  $c_1$  和  $c_2$  分别表示二氧化硫和硫酸盐的浓度,它们在一层模式中所遵循的方程为,

$$\frac{dc_1}{dt} = -u \frac{dc_1}{dx} - v \frac{dc_1}{dy} + Q_1/h - k_1 c_1 + K_H \left( \frac{\partial^2 c_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_1}{\partial y^2} \right) - \frac{c_1}{h} \frac{dh}{dt} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dc_2}{dt} = & -u \frac{dc_2}{dx} - v \frac{dc_2}{dy} + \frac{3}{2} (k_1 c_1 + Q_2/R) - k_2 c_2 + K_H \left( \frac{\partial^2 c_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_2}{\partial y^2} \right) \\ & - \frac{c_2}{h} \frac{dh}{dt} \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $u, v$  为混合层内垂直方向上平均的水平风速;  $K_H$  为水平扩散系数;  $Q_1$  为  $SO_2$  的面源源强,它可以表示成为  $\sum S_i / (\Delta x \Delta y)$ , 其中  $\Delta x$  和  $\Delta y$  分别为网格距,  $S_i$  为网格元  $\Delta x \Delta y$  中个别点源的源强(单位: /s);  $Q_2$  表示排放中直接以硫酸盐形式出现的部分;  $3/2$  是硫酸盐和  $SO_2$  分子量之比;  $k_1$  和  $k_2$  分别为  $O_3$  和硫酸盐的清除率;  $k_1$  为  $SO_2$  向硫酸盐的化学转换率; 方程右端最后一项表示边界层高度随时间变化对浓度的影响;  $h = h(t)$  为混合层的高度。

下面将分别讨论模式的结构及参数的选取。

1) 计算区域。如果考虑山西煤炭基地排出的污染物对华北平原的影响,典型的天气可选择为地面冷高压前部的冷锋天气过程。图 1 为 1970 年 11 月 14 日 08 时的地面风场图。地面冷高压中心位于蒙古,华北处在高压前缘的西北风区,而在长江流域吹北偏东风。在这种天气条件下,山西中部(太原附近)工矿区排出的污染物沿西北气流可影响河北、河南等地。图 1 中,格点取为  $21 \times 21$ , 水平格距为 40 km。

2) 源强。在山西取一网格元代表典型面源。例如根据评价报告<sup>1)</sup>,太原附近的古交工矿区未来  $SO_2$  排放的面源源强度可达到  $1 \text{ kg}/(\text{s} \cdot 1551 \text{ km}^2)$ , 这近似于面源源强为  $Q_1 = 1 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \Delta x \Delta y)$ 。为计算简便起见,硫酸盐的初始排放  $Q_2$  设为零,即认为硫酸盐都是从  $SO_2$  转化而来。

3) 水平风场。混合层中的平均水平风,可以由地面气象资料中获得。将地面站测风资料经反平方内插得出每个网格点上的地面风速,再利用幂指数规律,得到混合层内的平均风,

\* 本文于 1985 年 11 月 2 日收到, 1986 年 4 月 12 日收到修改稿。

<sup>1)</sup> 核工业部第七研究所, 古交工矿区环境影响评价报告书, 1985, 1。

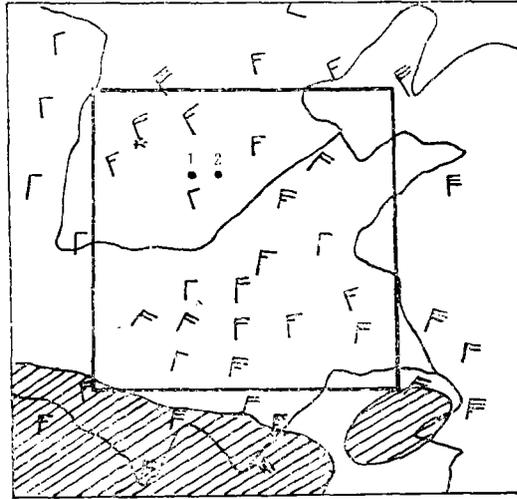


图 1 1970 年 11 月 14 日 08 时地面风场  
(方框内为计算区域, 阴影为雨区, \* 为源点, 1 和 2 分别为两个评价点)

$$\bar{V} = \frac{1}{h} \int_{10}^h V_{10}(Z/10)^p dZ = \frac{V_{10}}{1+p} (h/10)^p \quad (3)$$

其中  $V_{10}$  为地面风速, 一般指 10 m 高处的  $u$  或  $v$  分量。指数  $p$  决定于大气稳定性和地表粗糙状况。

4) 混合层高度。混合层高度表示污染物在垂直方向上可以发生混合的低层大气的上限。在本模式中, 我们设计如下的函数来粗略地表示混合层高度的日变化:

$$h = \begin{cases} 750 \{1 - \exp[-0.4(t-8)]\} + 250 & 8 \leq t \leq 18 \\ 250 & t < 8 \text{ 或 } t > 18 \end{cases} \quad (4)$$

其中  $t$  是以小时为单位的当地时间,  $h$  的单位是米。

5) 干湿沉积率。式(1)和(2)中的  $k_1$  和  $k_2$  表示污染物由于物理和化学过程从大气中清除出去的能力。 $\text{SO}_2$  的清除率  $k_1$  由干沉积率  $k_{d1}$ 、湿沉积率  $k_{w1}$  和化学转换率  $k_t$  构成,

$$k_1 = k_{d1} + k_{w1} + k_t \quad (5)$$

干沉积率  $k_d$  可表示成为  $k_d = v_d/h$ , 其中  $v_d$  为干沉积速度, 它的数值约在 0.1 到 1 cm/s 之间。这里我们取了北方平原地区秋季的典型数值 0.005 m/s。

式(5)中的湿沉积率  $k_w$  表示由于云雨作用污染气体在大气中被清除的比率。在我们计算的区域内没有降水发生, 因而可不考虑湿沉积过程, 即设  $k_{w1} = 0$ 。

类似地, 对于硫酸盐的清除率,

$$k_2 = v_{d2}/h + k_{w2} \quad (6)$$

其中取  $v_{d2} = 0.0065$  m/s,  $k_{w2} = 0$ 。

6) 化学转换率。 $\text{SO}_2$  向硫酸盐的转换率  $k_t$  受多种因素支配, 如城乡差别、季节、大气稳定性和地理纬度等。其典型数值为 0.5—10%  $\text{h}^{-1}$ 。在本模式中取为 2%  $\text{h}^{-1}$ 。

7) 水平扩散系数。水平扩散系数受风速切变和大气稳定度等因素支配。它的典型数值范围在  $10^3$ — $10^5$   $\text{m}^2/\text{s}$  之间。尽管有若干种关于水平扩散系数的表达式, 但比较可靠的方法还是取为常数, 例如  $10^4$   $\text{m}^2/\text{s}$ , 这样可节省计算时间又避免出现极端的数值。

## 2. 数值模拟结果及讨论

方程(1)和(2)的差分方程中的平流项和扩散项采用 Chapeau 函数, 这种差分格式的优点是具有

较小的人工耗散<sup>[1]</sup>。

$c_1$  和  $c_2$  的初始场都设为零。计算从地方时 08 时开始,在计算过程中源强和水平风速 都保持不变。图 2 中的实线表示源所在网格上的  $SO_2$  浓度随时间的变化。可以看出在积分开始 8 小时之后,浓度值就已脱离了零初始场的影响,以后的变化主要受混合层高度日变化的支配。在源点附近,日落之后,随着稳定边界层的建立,浓度开始积累,在 4 小时之后达到最大值,并一直保持到日出后两小时。日出后,随着对流边界层升高,浓度开始降低,午后达到最低值。图中的虚线为评价点 2 上的  $SO_2$  浓度 随时间的变化,这一点上,高浓度值延续的时间较短,只发生在日出前后。图中的点划线表示评 价值点 1 上的硫酸盐浓度随时间的变化。它的最大浓度也发生在日出前后。由于受源点处  $SO_2$  浓度最大值平流的影响,硫酸盐浓度在下午到日落这一段时间内还略有起伏。

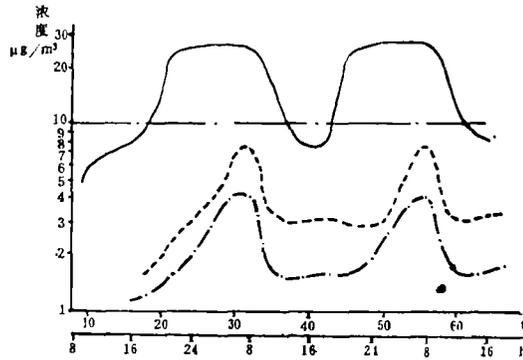


图 2 污染物浓度随时间变化 (t 为积分时间, h 为地方时)

图 3 中的(a) 和(b) 分别为积分 24 小时后,即第二天 08 时的  $SO_2$  和硫酸盐浓度分布。值得注意的是硫酸盐浓度最大值发生在源点下风向几百公里的地方。最大值出现的位置由化学转换率和风向风速决定。源强增加时,浓度数值也相应增加,但最大浓度的位置不会改变。

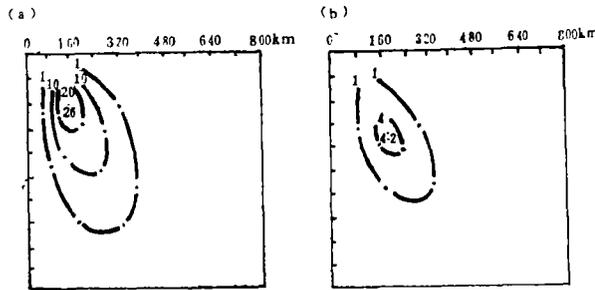


图 3 积分 24 小时后的污染物浓度分布 (等值线单位:  $\mu g/m^3$ , 中心数值表示最大浓度值)

### 3. 参数的敏感度试验

模式的输入参数,如干湿沉积率、化学反应转换率、混合层高度和扩散系数等,由于大气状况、地表状况和实验方法等差别,使它们的数据相当离散。这些参数选取不准确,会引起模式输出浓度的误差。下面分别讨论模式对这些参数变化的敏感度。

取  $19 \times 15$  的矩形网格,格矩仍为 40 km。取参数的基本状态为  $u=7.5$  m/s,  $v=0$ ,  $v_{d1}=0.005$  m/s,  $v_{d2}=0.0065$  m/s,  $k_t=2\%$   $h^{-1}$ , 夜间混合层高度  $h=250$  m。对方程(1) 和(2) 积分 24 小时后的  $SO_2$

和硫酸盐浓度分布见图 4 的(a) 和(b)。

取  $v_{d1}=0.01$  m/s,其他条件不变,得到的浓度分布见图 5 的(a) 和(b)。对比图 4 和 5,可以看出,增大干沉积速度  $v_{d1}$ ,使  $\text{SO}_2$  和硫酸盐的浓度都相应降低。 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  等值线所覆盖的面积也相应减少。但硫酸盐浓度最大值出现的位置没有显著变化。

令化学反应转换率增加一倍,即  $k_t=4\%$   $\text{h}^{-1}$ ,其他参数维持基本状态不变。得到浓度分布如图 6 的(a) 和(b)。比较图 4 与 6,可以看出,增大  $k_t$  对  $\text{SO}_2$  浓度并无显著影响。原因在于在方程(1)中, $\text{SO}_2$  的耗损是由于干沉积和化学反应两项构成的,当混合层很低时( $h=250$  m), $k_t$  比  $v_{d1}/h$  小一量级,因而  $\text{SO}_2$  的耗损主要由干沉积控制。 $k_t$  的变化对硫酸盐浓度影响很大,因为如果设  $Q_2=0$ , $k_t c_1$  就相当于硫酸盐的唯一源项。

如果取夜间混合层高度  $h=150$  m,其他参数不变,得到浓度分布如图 7 所示。比较图 4 和 7,可以看出混合层降低,使  $\text{SO}_2$  浓度在源点附近明显增加,但  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  的等值线形状变化不大。原因在于  $h$  变化所影响的两项  $Q_1/h$  和  $-c_1 v_{d1}/h$ ,符号是相反的。在离源远一些的距离上,这两项的作用相互抵消。

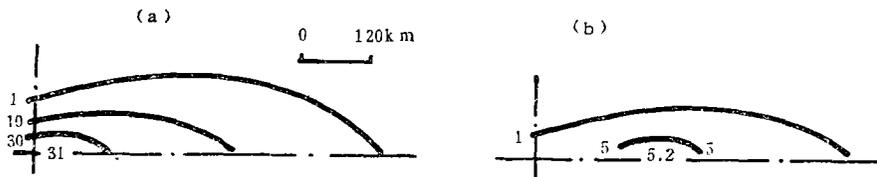


图 4 积分 24 小时后的  $\text{SO}_2$  浓度(a) 和硫酸盐浓度(b)

(等值线单位为  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。各参数为:  $u=7.5$  m/s,  $v_{d1}=0.005$  m/s,  $k_w=0$ ,  $v_{d2}=0.0065$  m/s,  $k_t=2\%$   $\text{h}^{-1}$ ,  $K_H=10000$   $\text{m}^2/\text{s}$ ,  $h=250$  m。中心数值表示最大浓度值)

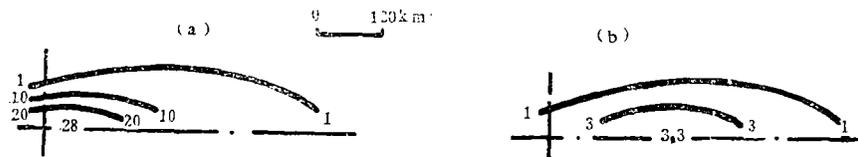


图 5 浓度分布

( $v_{d1}=0.01$  m/s,其他说明同图 4)

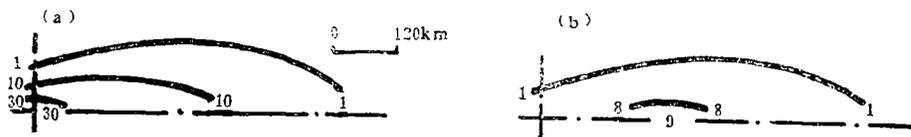


图 6 浓度分布

( $k_t=4\%$   $\text{h}^{-1}$ ,其他说明同图 4)

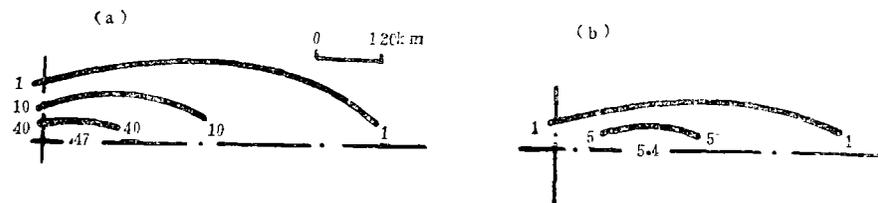


图 7 浓度分布

( $h=150$  m,其他说明同图 4)

当水平扩散系统增大 5 倍,  $K_H = 50000 \text{ m}^2/\text{s}$ , 得到浓度分布见图 8。与图 4 相比,  $\text{SO}_2$  和硫酸盐的最大浓度值降低较多, 而且边缘等值线的范围也显著扩大。

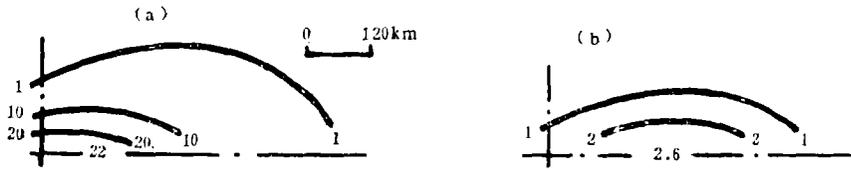


图 8 浓度分布  
( $K_H = 50000 \text{ m}^2/\text{s}$ , 其他说明同图 4)

#### 4. 结 论

这个模式可以反映污染物在长距离输送中在大气混合层内所发生的物理和化学变化, 诸如平流、扩散、沉积和化学转换等过程, 以及这些过程和大气、地表状态之间的联系。文中所给的例子, 是在简化的条件下得出的。考虑到在实际应用中各参数在空间时间分布上的变化, 模式在原则上也应是可行的。

模式取二维的混合层平均模式, 因而对计算机的存储和计算速度要求较低, 可在小型和微型计算机上使用。

敏感度分析表明了参数选择上的重要性。因而为在我国正确利用模式进行实际评价, 必须使用适合于我国不同地区、季节和大气条件的各个参数。因此在污染气象中开展对混合层变化规律及大气扩散能力方面的研究, 在大气化学中开展污染气体和气溶胶的沉积、转换等特性的研究, 以建立适用于我国的参数序列是完全必要的。

#### 参 考 文 献

- [1] Long, P. E., and D. W. Pepper, An examination of some simple numerical schemes for calculating scalar advection, *J. Appl. Meteor.*, 20, 146—156, 1981.

### A NUMERICAL MODEL FOR LONG DISTANT AIR POLLUTION TRANSPORT

Sang Jianguo

(Department of Geophysics, Peking University)

#### Abstract

A 2-D mixing-layer averaging model of long distant air pollution transport is presented. A case study is given for evaluating the concentration distributions of sulfur dioxide and sulfate in Northern China from a regional area source in Shanxi Province. The sensitivities of the model outputs to the parameters including dry deposit velocity, horizontal diffusivity, chemical transformation coefficient and mixing layer height are also examined. This model may be used as a practical tool for regional air quality evaluation.