

海岸地区空气污染物输送与扩散 的数值模拟*

蒋维楣 蒋亚洪

(南京大学大气科学系)

提 要

本文建立了求解三维扩散方程的数值模式,以经过处理地形影响经连续方程调整模式计算得到的三维风场和实测铅直湍流扩散系数作为输入,模拟了沿海城市秦皇岛地区海陆风演变过程中空气污染物(SO_2)浓度的时空分布(x - y 和 y - z 两个剖面)。模式的数值求解,在水平方向采用伪谱方法,铅直方向采用上游格式和六点格式,对三维扩散方程运用分步求解的数值方法,用计算所得的地面 SO_2 浓度分布和实测值比较,一致性相当好。显示在早晨和傍晚出现极大值,午后出现极小值。计算所得的日平均浓度与实测结果相比,也相当吻合。分析表明,本文所建模式行之有效,且数值计算稳定性表现良好。

一、引 言

运用三维数值(K)模式进行区域空气污染物的输送与扩散规律的研究,尤其对于象海岸地区,流场形式多变,存在一些较为复杂的大气现象条件下,此类模拟研究更具重要意义,目前,还是一种处于研究级的工作,尤其是能较为成功地付诸实际应用的例子尚不多见。数值模式对于诸如,扩散方程中平流项的伪扩散的处理;流场输入,尤其是空间流场存在明显上升和下沉气流时的处理;以及模拟域网格分辨率、周期边界条件、数值解的稳定性处理等方面都存在有许多值得深入探讨和有待解决的问题。本文的模式处理在以上诸方面作了比较切实可行的考虑。作者运用经连续方程调整的实测流场和实测湍流扩散系数,模拟了存在局地海陆风环流情况下的空气污染物(SO_2)的三维浓度分布,获得了良好的运用效果,得出了令人满意的模拟结果。这就为在海岸地区进一步进行区域空气质量模拟研究开辟了新的实际应用的前景。

二、模 式

求解扩散方程的数值模式为数不少,Sheih^[1],Ludwig^[2]等对各种模式作了评述。分析表明,Christensen和Prahm^[3]的伪谱(pseudospectral)模式性能较好,在很大程度上克服了数值求解扩散方程中平流项的“伪扩散”问题,比较适合于中远距离的输送与扩散问题的研究。

完整的扩散方程为:

* 本文于1987年4月20日收到,1987年8月3日收到修改稿。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = K_x \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + Q - S \quad (1)$$

式中, c 为污染物浓度, u, v, w 为风速的三个分量, K_x 为水平扩散系数, K_z 为铅直扩散系数, Q 为污染物源强, S 为损耗项(包括化学转化、干湿沉积等过程)。

海岸地区空间流场存在明显的上升与下沉气流, $w \frac{\partial c}{\partial z}$ 项的影响较大, 不能略去。

参照 Yanenko^[4] 的分步求解法, (1) 式的数值求解可写成如下形式:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = K_x \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) + Q - S \quad (2)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + w \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (4)$$

即在一个时间步长内, 各用三分之一的步长分别求解(2)、(3)、(4)式, 这样依次求解的方式与直接求解(1)式等效。

初始条件:

$$c|_{t=0} = \frac{Q_s \Delta x}{|\mathbf{V}| \Delta z} + \frac{Q_p}{|\mathbf{V}| \Delta y \Delta z} \quad (5)$$

式中, Q_s 为面源源强, Q_p 为点源源强, $|\mathbf{V}| = (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}}$, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 分别为 x, y, z 方向的网格距。

边界条件:

$$K_z \frac{\partial c}{\partial z} = V_s c \quad \text{当 } z=0 \quad (6)$$

$$K_z \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad \text{当 } z=H \quad (7)$$

$$c \rightarrow 0 \quad \begin{array}{l} \text{当 } x=0, X \\ \text{或 } y=0, Y \end{array} \quad (8)$$

式中, V_s 为沉积速率, H 为混合层高度, $(0, X)$ 和 $(0, Y)$ 分别为 x 和 y 方向的区域边界。

1. 求解格式

方程(2)的求解采用伪谱方法^[3], 即把浓度分布 $c = c(x, y, z)$ 在水平面内展为傅氏级数, 即:

$$c(x, y, z) = \sum_{\bar{K}} A(\bar{K}) e^{i \bar{K} \cdot \bar{x}} \quad (9)$$

其中:

$$\begin{cases} \bar{K} = (K_x, K_y), \quad \bar{x} = (x, y) \\ K_x = \frac{2\pi n_x}{\Delta x N_x}, \quad K_y = \frac{2\pi n_y}{\Delta y N_y} \end{cases} \quad (10)$$

这里的 N_x, N_y 分别为 x, y 方向的网格数, n_x, n_y 则在下列范围内取整数:

$$\begin{cases} -N_x/2 < n_x \leq N_x/2 \\ -N_y/2 < n_y \leq N_y/2 \end{cases} \quad (11)$$

由(9)式得:

$$A(\bar{K}) = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{\bar{x}} c(x, y, z) e^{-i \bar{K} \bar{x}} \quad (12)$$

$$\frac{\partial c}{\partial x} = \sum_{\bar{K}} i K_x A(\bar{K}) e^{i \bar{K} \bar{x}} \quad (13)$$

$$\frac{\partial c}{\partial y} = \sum_{\bar{K}} i K_y A(\bar{K}) e^{i \bar{K} \bar{x}} \quad (14)$$

$$\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} = \sum_{\bar{K}} [-(K_x^2 + K_y^2) A(\bar{K})] e^{i \bar{K} \bar{x}} \quad (15)$$

于是, 只要根据 $c(x, y, z)$ 求得 $\bar{A}(\bar{K})$, 然后由 $i K_x A(\bar{K})$ 、 $i K_y A(\bar{K})$ 、 $-(K_x^2 + K_y^2) A(\bar{K})$ 的逆变换就可以求得 $\frac{\partial c}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial c}{\partial y}$ 、 $\frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$, 这样便得到了以时间 t 为变量的常微分方程, 就可采用 Adams 方法^[5]求解。

方程(3)的求解采用上游格式, 即:

$$c_K^{n+1} = c_K^n - V_K \Delta t \quad (16)$$

$$V_K = \begin{cases} w_K (c_K^n - c_{K-1}^n) / (z_K - z_{K-1}), & \text{当 } w_K \geq 0 \\ w_K (c_{K+1}^n - c_K^n) / (z_{K+1} - z_K), & \text{当 } w_K < 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中, Δt 为时间步长, n 表示时间, w_K 为铅直速度,

方程(4)的求解采用六点格式(Crank-Nicolson 方法)^[6], 即:

$$\left. \frac{\partial c}{\partial t} \right|_K = \frac{c_K^{n+1} - c_K^n}{\Delta t} \quad (18)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \Big|_K^n = \frac{K_{z, K+\frac{1}{2}} \frac{c_{K+1}^n - c_K^n}{z_{K+1} - z_K} - K_{z, K-\frac{1}{2}} \frac{c_K^n - c_{K-1}^n}{z_K - z_{K-1}}}{\frac{1}{2}(z_{K+1} - z_{K-1})} \quad (19)$$

其中:

$$K_{z, K+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}(K_{z, K+1} + K_{z, K})$$

$$K_{z, K-\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}(K_{z, K} + K_{z, K-1})$$

令:

$$\begin{cases} \alpha_{K+1} = \frac{(K_{z, K+1} + K_{z, K}) \Delta t}{(z_{K+1} - z_K)(z_{K+1} - z_{K-1})} \\ \alpha_{K-1} = \frac{(K_{z, K} + K_{z, K-1}) \Delta t}{(z_K - z_{K-1})(z_{K+1} - z_{K-1})} \end{cases} \quad (20)$$

得:

$$c_K^{n+1} = (1 - \alpha_{K+1} - \alpha_{K-1}) c_K^n + \alpha_{K+1} c_{K+1}^n + \alpha_{K-1} c_{K-1}^n \quad (21)$$

当 K 取到边界的顶部和底部时,用(6)式和(7)式计算。

2. 周期边界条件

在(9)式把浓度分布 $c(x, y, z)$ 展开为傅氏级数时,要求 $c(x, y, z)$ 的分布满足周期性条件。为此,在边界网格上增加衰减项 $-c(x, y, z)/\tau_x$, 其中 $\tau_x = (\tau_x, \tau_y)$, 为衰减常数,其取值如下^[3]:

$$\tau_x = \frac{\Delta x}{u}, \quad \tau_y = \frac{\Delta y}{v} \quad (22)$$

如果水平扩散较强,则取作:

$$\tau_x = \frac{\Delta x}{u} + \frac{K_x}{\Delta x^2}, \quad \tau_y = \frac{\Delta y}{v} + \frac{K_y}{\Delta y^2} \quad (23)$$

在(22)式和(23)式中的 u, v 为相应边界网格上的风速分量。

3. 稳定条件

用伪谱方法求解(2)式,不稳定性则主要来自平流项,稳定条件为^[7]:

$$\Delta t \leq 0.22 \text{Min} \left(\frac{\Delta x}{u_m}, \frac{\Delta y}{v_m} \right) \quad (24)$$

式中, u_m, v_m 分别表示计算时刻整个区域内风速分量 u, v 的最大值。

上游格式(16)、(17)求解的稳定条件为^[8]:

$$\left| \frac{w_m \Delta t}{\Delta z} \right| \leq 1 \quad (25)$$

式中, w_m 为整个区域内铅直风速 w 的最大值。

六点格式(21)求解的稳定条件要求(20)式中的所有 α 都小于 0.5^[9], 即:

$$\alpha_{k-1}, \alpha_{k+1} < 0.5, \text{ 对所有的 } k \quad (26)$$

具体计算中,只要选取(24)、(25)、(26)三式中的最小时间步长即可。

4. 混淆误差及滤波方法

由于在计算中采用了离散的傅氏展开,使得能求解波动的最大频率有一定限制。也就是说,能求解的最高频率的波动,其波长只能有两个网格宽度。这就产生了所谓的“混淆误差”(aliasing errors),这种误差使得求解的结果产生偏差。

方程(2)的右端各项能引进高频分量。为了减小混淆误差,我们采用这样的滤波方法^[7,10],即在求傅氏逆变换之前,置较长波长的波数为零。其原则是,只要大于最大波数二分之一的所有波数,都置零。计算表明,这种方法是稳定且行之有效的。

三、流场调整

在扩散方程求解过程中,需要比较细致的三维流场数据。由于实测风场资料往往不能满足连续方程,故需对实测流场进行调整,方法如下述。

为了考虑地形影响,参照 Bhumralkar^[11]的方法,对铅直坐标进行变换:

$$\sigma = \frac{z - z_0(x, y)}{Z(x, y) - z_0(x, y)} \quad (27)$$

式中, $z_0(x, y)$ 为地形高度(海拔高度), $Z(x, y)$ 为区域顶高度, z 为高度坐标。

σ 坐标和 z 坐标中的铅直速度 w 有如下关系:

$$w = \dot{\sigma}(Z - z_0) - (\sigma - 1)\mathbf{V} \cdot \nabla z_0 + \sigma \mathbf{V} \cdot \nabla Z$$

利用下列变换式:

$$\begin{cases} u^* = u[Z(x, y) - z_0(x, y)] \\ v^* = v[Z(x, y) - z_0(x, y)] \\ w^* = \sigma[Z(x, y) - z_0(x, y)] \end{cases} \quad (29)$$

得到 σ 坐标中的连续方程(已假定由 σ 表面坡度引起的铅直运动与水平运动相比甚小):

$$\frac{\partial u^*}{\partial x} + \frac{\partial v^*}{\partial y} + \frac{\partial w^*}{\partial \sigma} = 0 \quad (30)$$

式中 u, v, w 为直角坐标中的风速分量, u^*, v^*, w^* 为 σ 坐标中的风速分量。

由泛函分析式:

$$S(u^*, v^*, w^*) = \iiint [\alpha_1^2 (u^* - u_0^*)^2 + \alpha_1^2 (v^* - v_0^*)^2 + \alpha_2^2 (w^* - w_0^*)^2 + \lambda \left(\frac{\partial u^*}{\partial x} + \frac{\partial v^*}{\partial y} + \frac{\partial w^*}{\partial \sigma} \right)] dx dy d\sigma \quad (31)$$

得到:

$$\begin{cases} u^* = u_0^* + \frac{1}{2\alpha_1^2} \frac{\partial \lambda}{\partial x} \\ v^* = v_0^* + \frac{1}{2\alpha_1^2} \frac{\partial \lambda}{\partial y} \\ w^* = w_0^* + \frac{1}{2\alpha_2^2} \frac{\partial \lambda}{\partial \sigma} \end{cases} \quad (32)$$

式中, 下标带“0”的表示未经调整的风速分量, λ 为拉格朗日乘子, α_1, α_2 为权重因子。

把(32)式代入(30)式得:

$$\frac{\partial^2 \lambda}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \lambda}{\partial y^2} + \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)^2 \frac{\partial^2 \lambda}{\partial \sigma^2} = -2\alpha_1^2 \cdot \nabla \cdot \mathbf{V}_0^* \quad (33)$$

假定区域内的流场不受区域外流场的影响, 即边界条件为:

$$\lambda = 0 \quad (34)$$

至此, 只要将风场实测数据代入(33)式, 用超松弛迭代法求解^[6], 并代入(32)式便可求得满足连续方程的三维风场。

四、数据预处理

1. 风资料

在计算区域内, 设有 17 个测风点(包括 10 个地面测风站, 2 个基线测风站, 3 个 ADAS 低空探测站, 1 个多普勒声雷达站和 1 个铁塔观测点), 布置如图 1 所示。

为求取各测点不同高度上的实测风数据, 遵循如下原则¹⁾:

- 1) 凡有不同高度的风向风速实测数据者, 则直接使用。
- 2) 凡仅有 10 m 处的风资料的, 则对 200 m 高度以下层按公式:

$$v(z) = v_{10} \left(\frac{z}{z_{10}} \right)^P \quad (35)$$

估算得出不同高度的风速。其中 v_{10} 为 $z_{10} = 10$ m 处的风速, P 取决于大气稳定度和测点所在位置, 由实测资料确定, 列于表 1。在 200 m 以下假定风向不变。

- 3) 在 200 m—1000 m 层间, 风向 $\phi(z)$ 为高度的对数函数, 风速 $v(z)$ 为高度的线性函

1) 王彦昌、钟世远、蒋维楣等, 秦皇岛电厂工程大气环境影响评价研究分报告之二: 厂址地区空气污染气象条件, (1986年12月)。

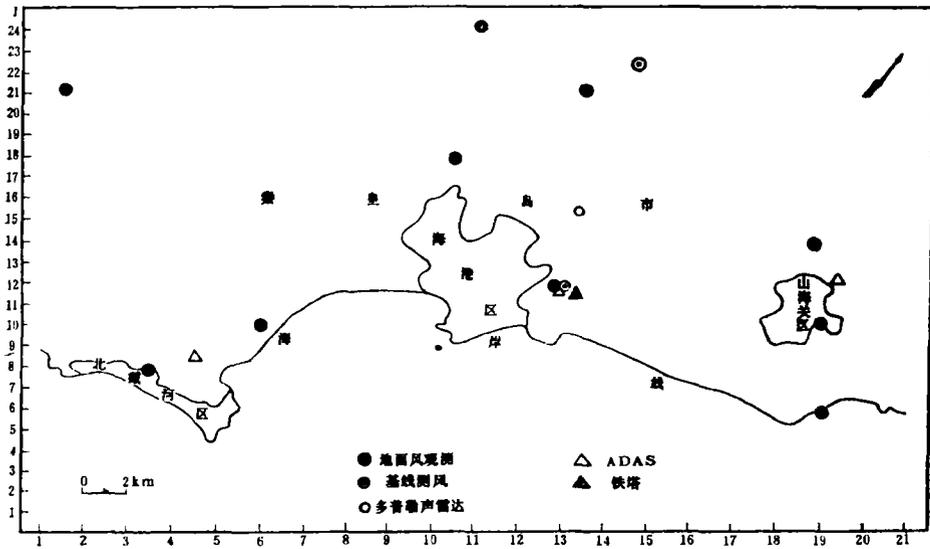


图 1 计算区域网格及测点布置

表 1 P 指数 (适用于 ≤200 m 高度)

大气稳定度级别	A—B	C	D	E—F
近海岸地区	0.20	0.25	0.30	0.41
离岸内陆地区	0.26	0.29	0.32	0.46

数,即,

$$v(z) = a + bz \tag{36}$$

$$\phi(z) = \phi_0 + 0.62(\phi_T - \phi_0) \ln \frac{z}{z_{200}} \tag{37}$$

式中, a, b 由 200 m 和 1000 m 处的风速确定。 ϕ_0, ϕ_T 分别表示 $z_{200} = 200$ m 和 1000 m 处的风向。

4) 1000 m 处的风向风速则根据基线测风和 ADAS 低空探测资料, 参考 850 hPa 的天气图资料确定。凡遇缺测值, 则由内插得出。

按照上述方法, 可求得各测点不同高度的风数据; 然后用距离平方反比方法内插到各网格点上去; 再用前述的风场调整模式求得相应时刻的流场。图 2 所示为经风场调整后部分时刻的地面流场例。图 3 为相应的 $y-z$ 剖面 ($I=10$) 的流场分布。计算中取 $\alpha_1 = 0.5, \alpha_2 = 0.75$ 。

2. 湍流扩散系数

观测事实表明, 一日中混合层内, 不同时刻、不同高度的铅直湍流扩散系数其值是不同的。故实际计算时采用了几个时间实测的湍流扩散系数 K_z 值, 见表 2 所列。有关实测与计算方法及 K_z 的特性分析详见参考资料¹⁾。

1) 同前页的 1)

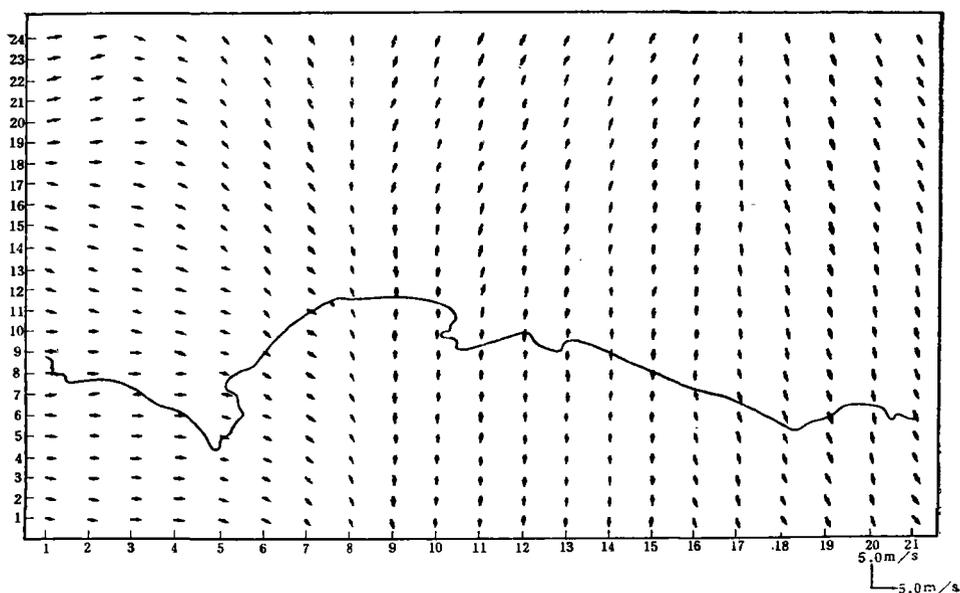


图 2a 1986 年 5 月 29 日地面流场(01:30)

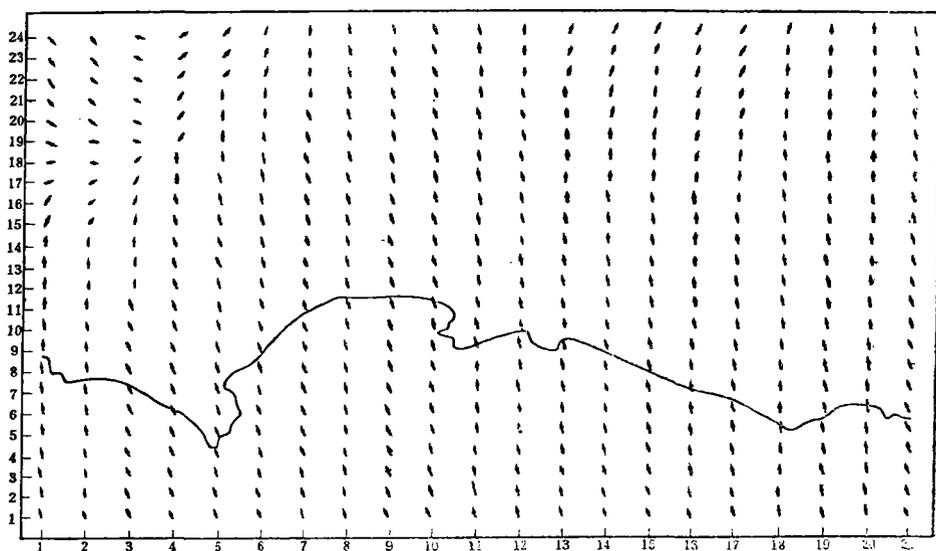


图 2b 1986 年 5 月 29 日地面流场(11:30)

水平湍流扩散系数 K_h 一般取作常数。在数值计算中, 显然 K_h 与网格大小有关, 即网格越大, 所包含的湍涡尺度越大, K_h 亦增大。同时, K_h 与当时的气流特性有关, 即与铅直扩散特性亦有关。考虑到这些, 我们取:

$$\begin{aligned} K_h &= K_{h_0} + \alpha(\Delta x \Delta y)^\beta [K_z]_{\max} \\ &\approx \alpha(\Delta x \Delta y)^\beta [K_z]_{\max} \end{aligned} \quad (38)$$

式中, α, β 为经验常数, K_{h_0} 为理论的水平扩散系数值, $[K_z]_{\max}$ 为最大铅直扩散系数。计算中取 $\alpha = 0.5, \beta = 0.25$ 。

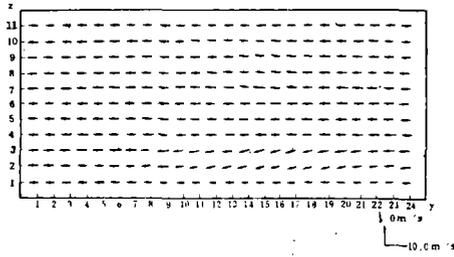


图 3a 对应图 2 时刻的 $y-z$ 剖面的流场 ($I=10$) (01:30)

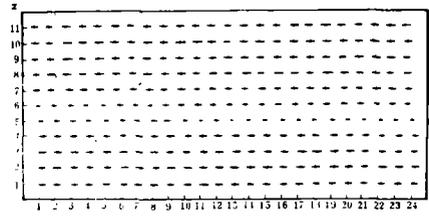


图 3b 对应图 2 时刻的 $y-z$ 剖面的流场 ($I=10$) (11:30)

表 2 计算用铅直湍流扩散系数 K_z

K_z (m^2s^{-1}) \ 高度(m)	时 间	0:00	9:30	12:30	15:00	22:00
10		0.50	1.50	1.00	2.00	0.30
100		2.41	6.58	5.18	10.41	2.29
200		2.21	6.26	7.06	10.81	1.99
300		1.07	2.64	6.64	7.67	1.32
400		0.69	0.77	5.64	6.45	1.03
500		0.61	0.19	4.95	6.23	0.94
600		0.63	0.05	4.66	6.05	1.01
700		0.64	0.02	4.46	5.66	1.01
800		0.61	0.02	3.77	5.58	1.08
900		0.43	0.02	2.18	3.76	0.84
1000		0.00	0.0	0.0	0.0	0.0

3. 污染源

模拟区域内主要空气污染物的面源和点源位置及源强(以计算网格分布)分布参见参考资料 1)。计算中,面源源高平均取 10 m,点源源高则在 50—150 m 范围内各不相同。

五、计算结果与分析

考虑(1)式中损耗项 $S=KC$, 计算中取 $K=5.56 \times 10^{-6}s^{-1}$, 并取(7)式中 $V_d=0.01 ms^{-1}$ 。

计算网格取水平方向 $N_x=21, N_y=24, \Delta x=2 km, \Delta y=1 km$ (见图 1), 铅直方向 $N_z=11, \Delta z=100 m$ 。

我们计算了一些存在局地海陆风环流过程(由实测分析确定)所造成的三维 SO_2 浓度分布(包括 $x-y$ 剖面和 $y-z$ 剖面), 详见参考资料 1)。这里由图 4 给出了相应于图 2 b 与图 3 b 所示流场的时刻的计算浓度分布的例子。

图 5 为计算所得 SO_2 地面日平均浓度例; 图 6 为实测 SO_2 地面日均浓度分布²⁾, 与计

1) 蒋亚洪、蒋维楣, 海岸地区空气污染物输送与扩散的数值模拟, 技术报告(1986年 12 月)。

2) 华北电力科学研究所, 秦皇岛电厂建厂前大气污染监测和大气环境现状评价, (1986年 9 月)。

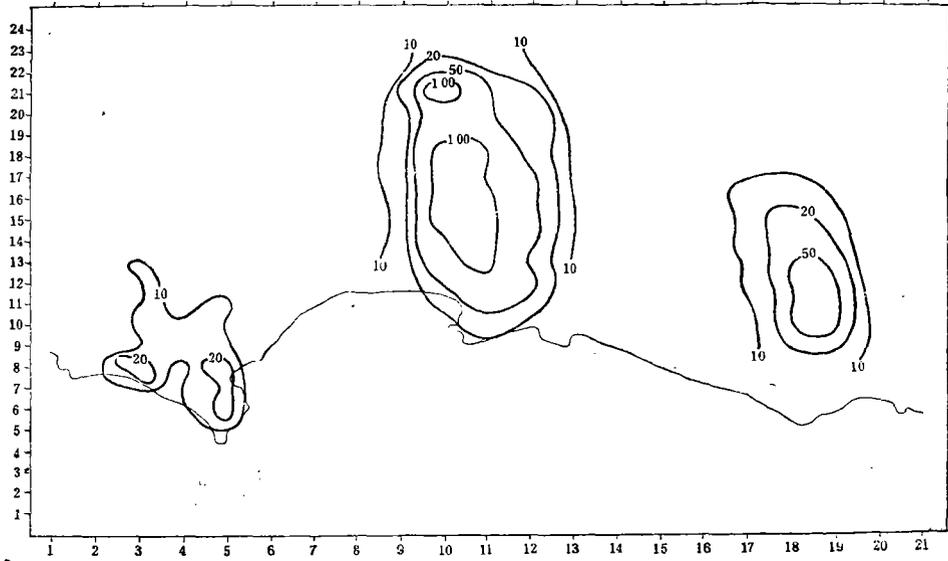


图 4a 计算的 SO_2 ($x-y$ 剖面) 浓度分布 (1986.5.29, 11:30)

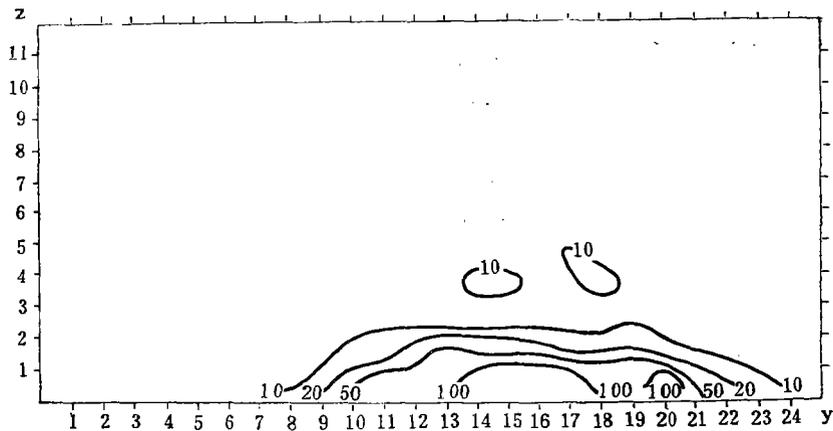


图 4b 计算的 SO_2 ($y-z$ 剖面) 浓度分布 (1986.5.29, 11:30)

算结果比较发现,在总体分布上是相当吻合的。计算结果与实测资料都表明,无论是日均浓度还是一次浓度,都是海港区最大,山海关区次之,北戴河区最小。从海港区实测浓度和计算浓度随时间变化的基本一致(见图7),也进一步表明了本文模式计算的可取性。由于早晨海风开始发展,海风锋面风速较小,造成地面浓度较高,到午后海风全面发展建立,风速达到一天中的最大值,使得地面浓度减小,至傍晚,风速又减弱,地面浓度又开始增高,这就使得地面浓度在早晨和傍晚出现浓度高值,午后地面浓度出现低值,计算结果和实测结果都证实了这一点。

六、结 语

计算结果表明,我们建立的三维数值扩散模式是有效的,数值计算的稳定性是好的。

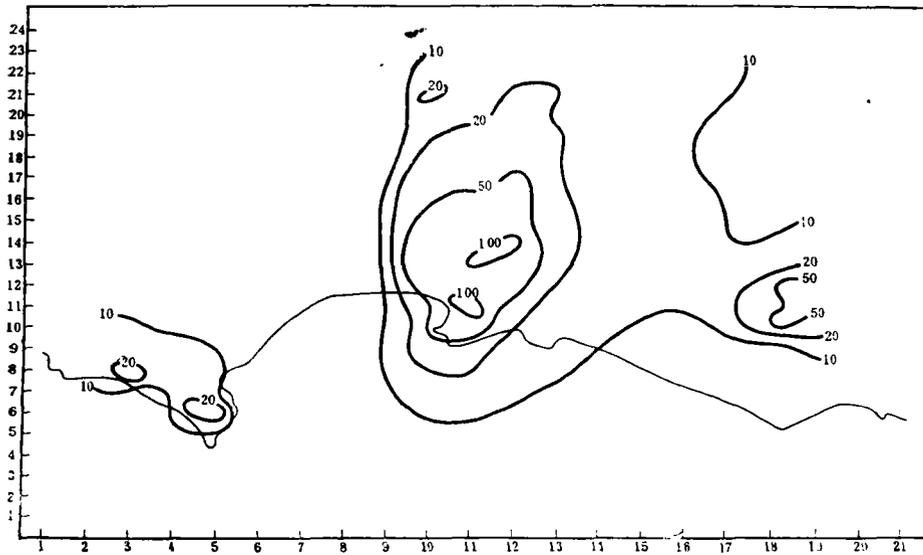


图 5 SO_2 地面日平均浓度分布(计算值,单位 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

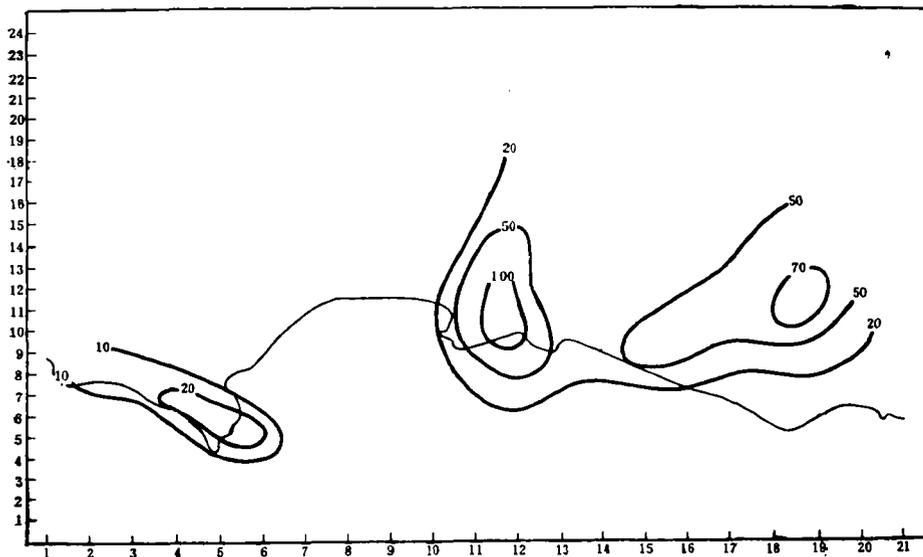


图 6 SO_2 地面日平均浓度分布(实测值,单位 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

应用表明,只要有三维流场和扩散系数等输入资料,便能计算出三维浓度分布。此模式比较适合于中远距离的输送与扩散预测应用。

由于本模式取用实测流场数据作为模式输入,因此受实测结果的一定限制,例如,在算例中对完整的海陆风环流的回流过程里污染物输送部分的模拟就未能全部模拟出来,尽管有研究及观测表明,这部分的输送造成污染浓度所占权重不大,但终究会影响预测的精度,成为一定缺陷。我们认为,这一缺陷的根本解决,关键不是模式不具备这样的能力(事实上只要有完整的实测流场资料,模式是能作出相应的预测计算的),而是改变输入流

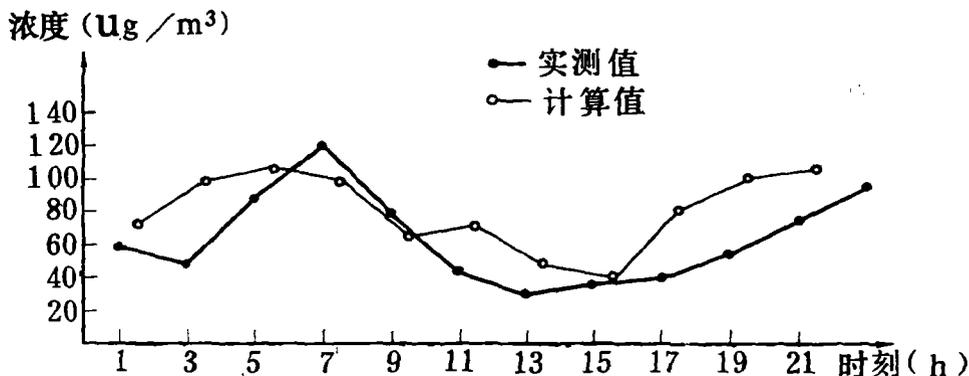


图 7 海港区 SO₂ 地面浓度实测值与计算值的时间变化比较

场的途径。应该致力于建立三维风场的动力学数值预报模式(而且是能够适合于此类问题研究的尺度范围和应用要求的),将其预测结果作为扩散模式的输入。若能实现这一途径,预期必将会获得更为完善的结果。

同样由于实测资料的限制,未能直接估算相应流场的扩散系数的时空分布,并将其作为模式计算的输入参数;也未能进行 $y-z$ 剖面浓度分布的实测检验。所有这些都还有待于进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] Sheih, C. M., A comparison of numerical pseudo-diffusion and atmospheric diffusion, *Atmos. Environ.*, **7**, 1056, 1985.
- [2] Ludwig, F. L., Air quality models suitable for use with a coastal boundary layer model, Review Paper for Stanford University, Civil Engineering Dept., 1983.
- [3] Christensen, O., and L. P. Prahm, A pseudo-spectral model for dispersion of atmospheric pollutants, *J. Appl. Meteorol.*, **15**, 1284, 1976.
- [4] Yanenko, N. N., The method of fractional steps, Springer, Beali Bealin, 160 pp, 1971.
- [5] Shampine, L. F., and M. K. Gordon, Computer solution of ordinary differential equations, W. H. Freeman and Company, San Francisco, 1975.
- [6] 南京大学数学系计算数学专业编, 偏微分方程数值解法, 科学出版社, 417, 1979.
- [7] Prahm, L. P., and O. Christensen, Long range transmission of pollutants simulated by a two-dimension pseudospectral dispersion model, *J. Appl. Meteorol.*, **16**, 896, 1977.
- [8] Molenkamp, C. R., Accuracy of finite-difference methods applied to the advection equation, *J. Appl. Meteorol.*, **7**, 160, 1968.
- [9] Egan, B. A., and J. R. Mahoney, Numerical modeling of advection and diffusion of urban source pollutants, *J. Appl. Meteorol.*, **11**, 312, 1972.
- [10] Murphy, B. D., PHENIX—A pseudospectral model of long range atmospheric transport, Oak Ridge National Lab., Contract No. W-7405-eng-26, 1981.
- [11] Bhumralkar, C. M. et al., A practical and economic method for estimating wind characteristics at potential wind energy conversion sites, *Solar Energy*, **25**, 1, 55-65, 1980.

NUMERICAL SIMULATIONS OF ATMOSPHERIC POLLUTANT TRANSPORT AND DIFFUSION IN THE COASTAL REGION

Jiang Weimei Jiang Yahong

(Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University)

Abstract

In this paper, a 3-dimensional numerical model was set up and used to compute the surface concentrations of SO_2 in the coastal region of Qinhuangdao city as the land-sea breeze prevailing.

The atmospheric diffusion equation was solved by using the method of fractional steps, the techniques used to represent terms involving the derivatives in the spatial coordinates of these differential equation including: pseudospectral method in horizontal, upstream and Crank-Nicolson method in vertical.

The computed 24-hour averaged surface concentrations of SO_2 over this region showed a good agreement with the observed values.

The computed tendency of diurnal variation of SO_2 concentrations at port station coincides fairly well with observational ones.

The analysis showed that the performance of the model in this paper is good and numerical calculation is stable.