

混合层厚度、风速和稳定度 对地面 SO₂ 浓度分布影响的数值试验*

陈万隆 肖静玟**

(南京气象学院应用气象学系, 南京 210044)

摘要 利用 Euler 平流扩散方程和 K 模式闭合方案的数值解, 讨论了混合层厚度、风速和稳定度 3 因子对银川市冬季地面 SO₂ 浓度分布的影响。结果表明, 在极不稳定层结(A 级)下混合层厚度增加 250m 时能使地面 SO₂ 浓度减少 40%~75%, 而在稳定层结下混合层厚度增加 200m 时仅减少 20% 的浓度; 而当混合层厚度和风速分别增加 250m 和 3.8m·s⁻¹、层结由稳定(F)变为极端不稳定(A), 并且当混合层最大厚度和最大风速分别限制在 650m 和 4m·s⁻¹ 时, 老城西部地面浓度减少了 90%, 稀释效应最显著。

关键词 混合层厚度, 风速, 稳定度, 数值试验

分类号 X511

众所周知, 空气污染浓度分布除了与污染源的分布和源强大小有直接关系外, 还与气象条件, 如风向、风速、降水、温度、云量、天气形势、稳定度和混合层厚度等有着密切联系。李宗恺^[1] 已对此问题作过概述, 故这里不再重复。其中降水、湿度、云和风向等气象条件与污染浓度的关系, 需要通过长期观测资料才能确定。而有些气象因素, 如风速、稳定度和混合层厚度等则可利用数值模式的敏感性试验来研究它们对浓度分布的影响。本文拟对银川市特定的污染源结构, 采用三维 Euler 平流扩散方程和 K 模式闭合方案的数值方法, 对此问题作一初步研究。

1 数值模式与污染源结构

1.1 模式

(1) 方程及数值方案 不考虑对流和污染物的化学转化等损耗项的 Euler 平流扩散方程为

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

式中, c 为 SO₂ 浓度值(mg·m⁻³); Q 为污染物释放率(mg·s⁻¹·m⁻³); u 和 v 分别表示 x 和 y 方向风速分量(m·s⁻¹); 而 K_H 和 K_z 则分别为水平扩散系数和垂直扩散系数(m²·s⁻¹)。

初始条件取为大气的本底浓度值, 即

* 宁夏回族自治区气象局气象基金资助项目

** 现在宁夏回族自治区气候资料中心工作

收稿日期: 1994-07-08; 改回日期: 1995-05-15

$$c|_{t=0} = 0.01(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (2)$$

边界条件分别是:假定下边界是平坦地面,视为全反射面,即

$$K_z \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \quad (3)$$

上边界为混合层顶高度,也假设为全反射面,即

$$K_z \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=H_D} = 0 \quad (4)$$

式中, H_D 表示混合层厚度。

侧边界取零梯度边界条件,即

$$\frac{\partial c}{\partial x} \Big|_{x=0, x=x_D} = 0 \text{ 和 } \frac{\partial c}{\partial y} \Big|_{y=0, y=y_D} = 0 \quad (5)$$

其中,下标 0, x_D 和 y_D 表示区域的边界。

按 Yanenko 的分步求解法^[2], (1)式可分解为

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = K_H \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + Q \quad (6)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v \frac{\partial c}{\partial y} = K_H \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \quad (7)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial c}{\partial z}) \quad (8)$$

并在一个时间步长内分别依次求解方程(6)、(7)、(8)式与直接求解(1)式是等效的。

本文采用有限元的 Chapeau 函数并加阻尼的 Dendy 方法将(6)~(8)式离散化,进而求其数值解。在此过程中,时间差分用向前差分,而平流项和扩散项用 Crank-Nicholson 差分格式。

(2)K 模式闭合方案 很显然,方程(6)~(8)是不闭合的。为了对其闭合并求数值解,本文采用 K 模式闭合方案,具体方法为:首先采用 Pasquill-Turner 法根据太阳高度角、云量确定辐射等级,再由辐射等级和风速确定稳定级别^[3];其次按上述不同的稳定度对水平扩散系数取不同的值,稳定度级别为 A、B、C、D、E、F 且分别对应的 K_H 为 12、10、6、4、0.8、0.5 $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

垂直扩散系数采用 Shir-Shieh 修正的指数形式^[4],即

$$K_z = K_{z_1} \frac{z}{z_1} \exp[-P(z - z_1)/H_D] \quad (9)$$

其中, z_1 为地面测站高度(取为 10m); K_{z_1} 与参数 P 的数值依大气稳定度的不同取为不同的常数,如表 1 所示。至此,水平扩散系数 K_H 已确定,而垂直扩散系数可以通过稳定度级别、混合层厚度 H_D 、(9)式和表 1 加以确定。在此基础上,方程(6)~(8)即可闭合求解。

1.2 城市污染源结构

银川市工业及民用燃料以煤为主,污染源分布不均,根据该市环保监测站 1990 年对城市污染源进行普查的结果,全市共有参数齐全、充分利用的工业及采暖锅炉 521 台,每年释放 SO₂ 约 2.6 万吨;污染源主要集中在老城、新城和新市区,工业及采暖锅炉按源高不同的分布,老城源数最多,占总数的 59%,但其较低矮且源强较小,而新城和新市区面积较老城大,但其源总数较老城少,源几何高度较高,强度较大。本文用国家标准式 GB/T13201-91 中推荐的一组公式计算每个污染源的抬升高度。另外,还考虑了居民区燃煤污染排放量,全市有 9.6 万户用煤,居民住户用煤投放大气的 SO₂ 约为 288t · a⁻¹。

表 1 K_{z_1} 和 P 的取值
Table 1 Evaluations of K_{z_1} and P

	A	B	C	D	E	F
$K_{z_1}/m^2 \cdot s^{-1}$	45	15	4	2	0.4	0.2
P	6	6	3	3	2	2

由于银川市大多数污染源强较小,高度较低,相对集中连成一片,所以可视为面源,进而转化为体源。只有少数位于新市区的烟囱有效源高达到 100 多米。一般认为,当网格距为 10 倍的源高时,体源的浓度趋近于点源所造成的浓度^[5]。所以只要取合适的网格,将点源、面源转化为体源是有一定合理性的。

1.3 区域及网格

考虑到银川市东西长,南北短,故取 30km×20km 的范围作为模式输出区域。垂直方向的范围是从地面到混合层顶 H_D 格距为不等间隔且用分段函数表示如下

$$\begin{cases} z_1 = 0 \\ z_2 = 10 \\ z_i = z_{i-1} + \frac{H_D - 10}{1000}, \quad i = 3, 4, 5 \\ z_i = z_{i-1} + \frac{0.9(H_D - 10)}{L_z - 5}, \quad i = 6, 7, \dots, L_z \end{cases} \quad (10)$$

其中, L_z 为 Z 方向的网格数,本文取 $L_z = 15$ 。

时间步长取为 100s。对上述模式检验表明,1986 年 1 月 15 日 15 个站次的计算值与观测值的相关系数为 0.877,达到信度为 0.05 的显著性水平,初步说明计算效果较好。其他检验也相仿*。

2 数值试验及其结果分析

2.1 数值试验方案

利用上述模式和银川市冬季污染源结构的资料以及银川市冬季混合层厚度的计算结果,设计出 2 种极端稳定度条件和 3 个等级的水平风速的试验方案,如表 2 所示。风向取北风。由表看出,不同组合的试验具有不同的含意。例如,试验 1 和 2 用来考察在其他条件相同情况下混合层厚度对稳定层结大气扩散能力的影响,而试验 2 和 3 则说明不同层结稳定度对大气扩散能力的影响;试验 3、5 和 7 或 4、6 和 8 可用来研究在冬季不稳定层结条件下通风量对大气污染的稀释能力。

2.2 结果分析

(1)混合层厚度的影响 层结稳定和弱风时情况:弱风情况取混合层平均风速为 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (下同)。由图 1 看出,混合层厚度为 200m 的 SO_2 浓度高于 400m 时的浓度,且前者仅在老城西部出现一个高中心(浓度达 $520 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$),而后者分别在老城和新城的西部各有一个高中心(浓度在 $400 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下)。造成这种分布差异的原因,除了混合层厚度外,

* 宁夏气候资料中心,银川环保监测站. 银川地区空气污染潜势分析及浓度趋势预测(结题报告). 1994

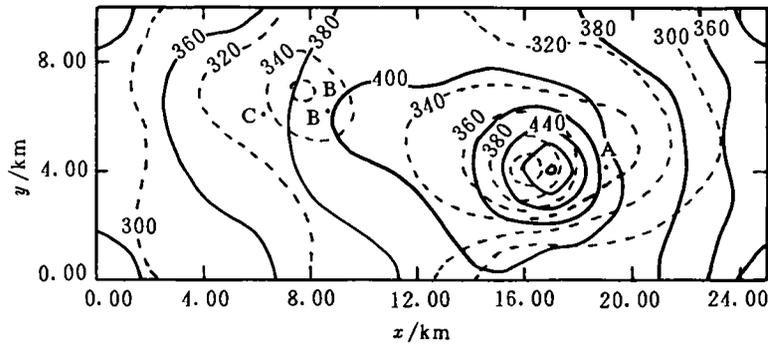


图 1 稳定层结(F级)和弱风时地面 SO₂ 浓度($10^{-6} \text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)的分布

实线和虚线表示混合层厚度分别为 200m 和 400m 情况; A:老城; B:新城; C:新市区

Fig. 1 Distribution of surface SO₂ concentration ($10^{-6} \text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) under the condition of stable stratification (category F) and weak wind. Solid (dotted) lines denote the mixed layer depth of 200 (400) m. Letter A (B) marks the old (new) city and C the urban area of the new city

表 2 数值试验方案

Table 2 Scheme for the numerical experiment

No.	稳定性(级别)	混合层厚度(m)	风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	通风量($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
1	F	200	0.2	40
2	F	400	0.2	80
3	A	400	0.2	80
4	A	650	0.2	130
5	A	400	1.5	600
6	A	650	1.5	975
7	A	400	4.0	1600
8	A	650	4.0	2600

还与冬季污染源结构有关。

层结不稳定和弱风时情况:混合层厚度由 400m 增至 650m 时,三个地区边缘的 SO₂ 浓度由 $160 \times 10^{-6} \text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 减小至 $40 \times 10^{-6} \text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右,其中老城的浓度由 $200 \times 10^{-6} \text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 减至 $60 \times 10^{-6} \text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (图 2)。

层结不稳定和风速为 $1.5 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时情况:当混合层厚度由 400m 增至 650m 时,老城和新市区地面 SO₂ 浓度分别减少 50% 和 40% (图 3)。

层结不稳定和风速为 $4 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时情况:当混合层厚度的增加与风速为 $1.5 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的情况相同时,老城西部地面 SO₂ 浓度可减少 50% 左右,但是新市区地面浓度却变化较小(图 4)。显然,这与该两区污染源的结构不同有较大关系。

(2) 风速的影响 表 3 列出在不稳定层结(A级)条件下老城西部地面 SO₂ 浓度与平均风速的关系。其中当混合层厚度为 400m 时的地面 SO₂ 浓度随风速减小的效率超过了混合层厚度为 650m 时减小的效率,即当风速由 $0.2 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增至 $4 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,混合层厚度为 400m 和 600m 的老城西部地面 SO₂ 浓度分别减小了 66% 和 50%。新城和新市区地面 SO₂ 浓度的相对减小也类似,即减小了 66% (由 $180 \times 10^{-6} \text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 减至 $60 \times 10^{-6} \text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)。

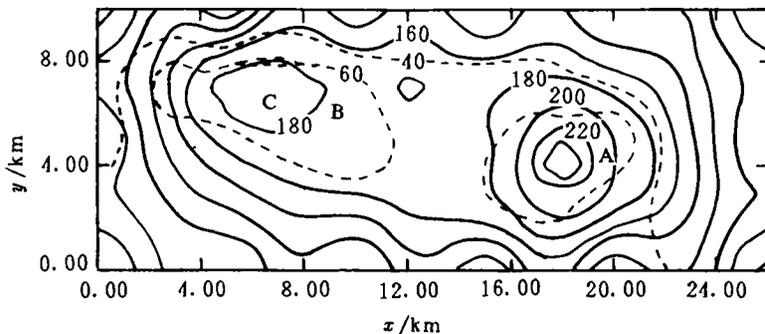


图2 不稳定层结(A级)和弱风时地面 SO_2 浓度($10^{-6}\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)的分布
实线和虚线表示混合层厚度分别为400m和650m情况

Fig. 2 Distribution of surface SO_2 concentration ($10^{-6}\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) under the condition of unsteady stratification (category A) and weak wind. Solid (dotted) lines denotes the depth of 400 (650) m

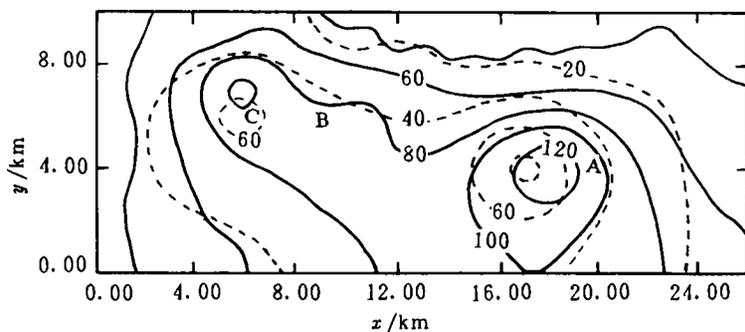


图3 不稳定层结(A级)和风速为 $1.5\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时地面 SO_2 浓度($10^{-6}\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)的分布
其他同图2

Fig. 3 As in Fig. 2 but for wind of $1.5\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

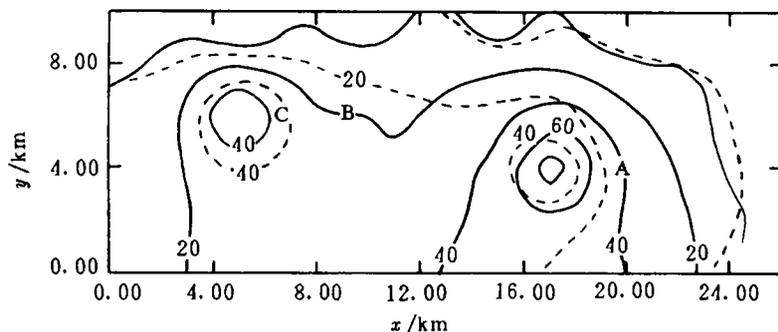


图4 不稳定层结(A级)和风速为 $4\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时地面 SO_2 浓度($10^{-6}\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)的分布
其他同图2

Fig. 4 Same as in Fig. 2 except for wind of $4\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

(3)大气层结的影响 将图1中的虚线与图2中的实线相比,容易发现在混合层厚度和平均风速分别为400m和 $0.2\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 情况下,稳定层结(F级)的地面 SO_2 浓度比不稳定层结(A级)要高出 $100 \times 10^{-6}\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右。需要指出的是,在模式数值计算中,大气层结的作用是

通过 K 模式参数化表示的,不稳定层结(A 级)的扩散系数比稳定层结的扩散系数要大几十倍。尽管 K 的取值受人为主因素的影响^[4],但在上述(图 1 与图 3)对比情况下,实际引起银川市地面浓度的减小仅为 30%~40%。这与冬季银川市的观测结果是一致的^[1]。

表 3 不稳定层结(A 级)下风速对银川市老城区地面 SO₂ 浓度($10^{-6}\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)分布的影响

Table 3 Wind effect on the SO₂ concentration ($10^{-6}\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) under the condition of category A in the west part of the city

混合层厚度 (m)	风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		
	0.2	1.5	4
	SO ₂ 浓度		
400	240	120	80
650	80	60	40

(4)混合层厚度、风速和稳定度的综合影响 通过图 1 与图 4 两图中的虚线相比,可以判断混合层厚度、风速的稳定度等 3 个因子对地面浓度分布的综合影响。即在此情况下,稳定度由 F 级变为 A 级,平均风速和混合层厚度分别增加 $3.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 250m,与此同时,老城西部地面 SO₂ 浓度变为稳定层结(F 级)时的 1/10,新市区的浓度变为稳定层结时的 1/8。根据图 1 和图 3 两图中的虚线相比也可得出类似结论,即当平均风速增加 $1.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 而其他因子变化情况同上时,老城西部的地面 SO₂ 浓度减小至稳定层结的 1/7,新市区变为原来的 1/6 左右。由此可见,冬季混合层厚度、平均风速和稳定度 3 个因子对地面 SO₂ 浓度的综合影响要比单一因子的影响大得多。此结果对于污染潜势预报具有重要的参考意义。

3 结 语

通过以上数值试验,可将其主要结果列成表 4。由表可见,在混合层厚度、平均风速和稳定

表 4 数值试验小结

Table 4 Summary of the experiments

层结状态	混合层 H_D 和平均风速 u 变化情况	老城西部地面 SO ₂ 浓度的减小(%)
稳定(F 级)	混合层厚度增加 200m 时 $u=0.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	20
	$\Delta H_D=250\text{m}$ 时 $u=\begin{cases} 0.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1} \\ 1.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1} \\ 4.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1} \end{cases}$	75 50 40
不稳定(A 级)	$\Delta u=1.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时 $H_d=\begin{cases} 400\text{m} \\ 650\text{m} \end{cases}$	50 25
	$\Delta u=3.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时 $H_d=\begin{cases} 400\text{m} \\ 650\text{m} \end{cases}$	67 33
由稳定变为不稳定 (F→A)	$H_D=400\text{m}$ 时 $u=0.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	40
	$H_D=400\text{m}$ 时 $\Delta u=3.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	80
	$\Delta H_D=250\text{m}$ 时 $\Delta u=3.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	90

度等 3 个因子综合影响且地面风速增加 $3.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件下,老城西部地面 SO₂ 浓度减小最显著,可减小在稳定层结时浓度的 80%~90%。在单因子影响中,在极不稳定层结和平均风速

为 $0.2\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 条件下,混合层厚度由 400m 增至 650m 时老城西部地面 SO_2 浓度可减小 75%。其他单因子试验效果所减小的程度不及以上两类情况。其中在不稳定层结和混合层厚度为 400m 条件下,由于地面风速增大可引起老城中心的浓度减小达 50%~67%,而在混合层厚度为 650m 条件下(其他条件不变),老城中心污染浓度仅减小 25%~33%。这是因为当混合层厚度处于较高状态下,垂直扩散空间较大,地面浓度本已较低,当风速进一步增大时,地面浓度降低的幅度就不如混合层厚度较低时的浓度降低效应。

参 考 文 献

- 1 李宗恺,潘云仙,孙润桥. 空气污染气象学原理及应用. 北京:气象出版社,1985. 557~569
- 2 蒋维楣,蒋亚洪. 海岸地区空气污染输送与扩散的数值模拟. 气象学报,1989, 47(11):61~72
- 3 蒋维楣,曹文俊,蒋瑞宾. 空气污染气象学教程. 北京:气象出版社,1993. 107~110
- 4 桑建国,温市耕. 大气扩散的数值计算. 北京:气象出版社,1992. 96~97
- 5 Karanchandani P, Peters L. Analysis of the error associated with grid representation of point sources. Atmos Environ, 1983, 17: 927~933

NUMERICAL EXPERIMENT WITH EFFECT OF MIXED LAYER DEPTH, WIND AND STABILITY ON SURFACE SO_2 CONCENTRATION IN CITY OF YINCHUAN

Chen Wanlong Xiao Jingbin

(Department of Applied Meteorology, NIM, Nanjing 210044)

Abstract Effects of the mixed layer depth, windspeed and stability on winter surface SO_2 concentration distribution in the city of Yinchuan, NW China are investigated by use of the solution of Eulerian advective diffusion equation together with the closed scheme of K-model. Results show that the surface concentration would be reduced by 40%~75% under the extremely unstable stratification (category A) if the depth increased by 250 m, compared to 20% reduction with a 200 m increase in the case of stable stratification (category F). The strongest diluting effect is revealed; the SO_2 concentration will be diminished by 90% in the west part of the old city as the mixed layer depth grows by 250m and the wind by $3.8\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, and when atmospheric stratification changes from category F to A and maxima of the depth and wind are confined to 650m and $4\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively.

Keywords mixed layer depth, windspeed, stability, numerical experiment