

# 本溪地区三维流场的数值模拟试验

杨洪斌 张明敏 (沈阳区域气象中心研究所 110015)

## 1 引言

本溪市位于辽宁省东南部山区,为一东西狭长形地域。城区四周环山,东南部有平顶山,海拔 623m,东北部有骆驼岭,地势东高西低。市区内人口稠密,工业集中。因此,该地区具有典型的复杂地形特色。

由于山坡的方位、坡度不同,下垫面条件不一致,它们受到的日照时间、强度和热量收支的条件就不一样。因此,气温的水平分布就不均匀。这种不均匀性会引起局地环流,如山谷风和更小尺度的局地环流。而复杂的地形又使低层的气流路径受到影响,使流场更加复杂。因而一般的计算流场和浓度场的公式就很不适用。为了解该地区所形成的各类局地环流,如山谷风、城市热岛及热内边界层,地形动力作用引起的气流阻塞、背风波和地形绕流,我们采用了三维准静力学模式<sup>[1]</sup>,模拟大气的三维运动,为该地区三维浓度场的计算提供基本流场。

## 2 三维流场模式

### 2.1 控制方程

采用三维准静力模式模拟大气运动,以便了解本溪地区流场的三维特征。首先,假设大气运动是准静力的,即:对流活动较弱,因而垂直运动速度较小;地形坡度 $\ll 45^\circ$ ;地形特征尺度不小于几公里。

为了反映下边界地表的起伏,模式采用地形追随的垂直坐标变换:

$$\bar{Z} = H \frac{Z - Z_g}{H - Z_g}$$

式中,  $Z_g = Z_g(x, y)$ , 为地形高度;  $Z$  为笛卡尔坐标系  $(x, y, z)$  中的垂直坐标;  $\bar{Z}$  为变换后的垂直坐标;  $H$  为模式的顶部高度。

经过变换后的三维大气动力——热力学方程组包括水平动量方程、准静力方程、连续方程和热力学方程。它们的形式分别为:

$$\frac{du}{dt} = -\theta \frac{\partial \pi}{\partial x} + fv + g \frac{\bar{Z} - H}{H} \frac{\partial Z_g}{\partial x} + Fu$$

$$\frac{dv}{dt} = -\theta \frac{\partial \pi}{\partial y} - fu + g \frac{\bar{Z} - H}{H} \frac{\partial Z_g}{\partial y} + Fv$$

$$\frac{d\theta}{dt} = F_\theta$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \bar{W}}{\partial \bar{Z}} = \frac{u}{H - Z_g}$$

$$\frac{\partial Z_g}{\partial x} = \frac{v}{H - Z_g}$$

$$\frac{\partial Z_g}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial \bar{Z}} = -\frac{H - Z_g}{H} \cdot \frac{g}{\theta}$$

其中,  $\pi = C_p(p/p_0)^{R/C_p}$  为表示气压的 Exner 函数,  $P_0 = 1000\text{hPa}$ ,  $\bar{W}$  为  $(x, y, \bar{z})$  坐标系中的垂直速度,

$$\bar{W} = W \frac{H}{H - Z_g} + \frac{\bar{Z} - H}{H - Z_g} u \frac{\partial Z_g}{\partial x} + \frac{\bar{Z} - H}{H - Z_g} v \frac{\partial Z_g}{\partial y}$$

在  $(x, y, \bar{z}, t)$  坐标系中的全微分  $\frac{d}{dt}$  为:

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + \bar{W} \frac{\partial}{\partial \bar{z}}$$

$F_u, F_v, F_\theta$  分别为  $u, v, \theta$  的湍流扩散项。

$$F_u = K_H \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \left( \frac{H}{H - Z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \bar{Z}} (K_z \frac{\partial u}{\partial \bar{Z}})$$

$$F_v = K_H \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \left( \frac{H}{H - Z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \bar{Z}} (K_z \frac{\partial v}{\partial \bar{Z}})$$

$$F_\theta = K_H \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) + \left( \frac{H}{H - Z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \bar{Z}} (K_z \frac{\partial \theta}{\partial \bar{Z}})$$

其中,  $K_H$  和  $K_z$  分别为水平和垂直湍流扩散系数。

$K_z$  取如下形式:

$$K_z(Z) = K_z(Z_1) \frac{Z}{Z_1} \exp[-p(Z - Z_1)/h]$$

其中,  $Z_1$  为参考高度,  $Z_1 = 10\text{m}$ 。  $K_z(Z_1)$  是  $Z = Z_1$  高度上的交换系数值。

$K_x$  和  $K_y$  主要根据如下关系导出:

$$K_x : K_y : K_z = 30 : 15 : 1$$

## 2.2 差分格式

差分格式采用交错网格, 其中在  $x$  方向上, 格点的编号顺序为  $i = 1, 2 \dots i \dots, l$ , 在  $y$  方向上,  $j = 1, 2 \dots j \dots, m$ , 在  $Z$  方向上  $K = 1, 2 \dots k \dots, n$ 。

上述交错网格能利用一阶差分格式达到二阶的精度。差分格式采用时间分裂法 (time splitting)。平流项取为施主格式。例如:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -u \frac{\partial u}{\partial x} \text{ 写为:}$$

$$u_{i,j,k} = u_{i,j,k} - u_{i,j,k}(u_{i,j,k} - u_{i-1,j,k})/\Delta x \cdot \Delta t \quad \text{当 } u_{i,j,k} > 0$$

$$u_{i,j,k} = u_{i,j,k} - u_{i,j,k}(u_{i,j,k} - u_{i,j,k})/\Delta x \cdot \Delta t \quad \text{当 } u_{i,j,k} < 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -v \frac{\partial u}{\partial y} \text{ 写为:}$$

$$u_{i,j,k} = u_{i,j,k} - \bar{V}_{i,j,k}(u_{i,j,k} - u_{i,j-1,k})/\Delta y \cdot \Delta t \quad \text{当 } \bar{V}_{i,j,k} > 0$$

$$u_{i,j,k} = u_{i,j,k} - \bar{V}_{i,j,k}(u_{i,j+1,k} - u_{i,j,k})/\Delta y \cdot \Delta t \quad \text{当 } \bar{V}_{i,j,k} < 0$$

其中

$$\bar{V}_{i,j,k} = (V_{i-1,j,k} + V_{i-1,j+1,k} + V_{i,j,k} + V_{i,j+1,k})/4$$

气压梯度力项

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -\theta \frac{\partial \pi}{\partial x} \text{ 写为}$$

$$u_{i,j,k} = u_{i,j,k} - 0.5(\theta_{i,j,k} + \theta_{i-1,j,k})(\pi_{i,j,k} - \pi_{i-1,j,k})/\Delta x \cdot \Delta t$$

用连续方程计算垂直运动, 其差分格式为:

$$\begin{aligned} \bar{W}_{i,j,k} = & \bar{W}_{i,j,k-1} - [(u_{i+1,j,k-1} - u_{i,j,k-1})/\Delta x + (v_{i,j+1,k-1} - v_{i,j,k-1})/\Delta y] \\ & \Delta \bar{Z} + [0.5(v_{i,j+1,k-1} + v_{i,j,k-1})(Z_{gi,j+1} - Z_{gi,j-1})/2\Delta x + 0.5 \\ & (v_{i,j+1,k-1} + v_{i,j,k-1})(Z_{gi,j+1} \end{aligned}$$

$$- Z_{gi,j-1})/\Delta y] \Delta Z / (H - Z_{gi,j})$$

## 2.3 计算域、边界条件和初始条件

在  $18 \times 16 \text{km}^2$  的范围内对三维流场进行了计算。网格距  $1 \text{km}$ , 且网格内坡度角  $\alpha \ll 45^\circ$ 。考虑到强扰动在边界处的反射, 只输出了  $16 \times 14 \text{km}^2$  范围内的流场。垂直范围为  $10 \sim 4000 \text{m}$ 。

若侧边界远离环流变化的区域, 则侧边界上可设为要素是均匀的, 即:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial x} = \dots = \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0$$

或者梯度连续,

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \dots = \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = 0$$

当计算域中有较强的内波发生时, 为避免波在侧壁的反射, 可采用辐射边界条件。例如, 在  $x$  方向上取

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} + (u + c) \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0$$

其中  $\psi$  为要素  $u, v, \theta$  等,  $c$  为内波波速。为避免波速估计上的不可靠性,  $c$  可取一确定的较大的数值, 例如  $c = 30 \text{m/s}$ , 即可较有限地防止波在边界的反射。

## 3 模拟结果

为了了解本模式的模拟效果, 做了一系列的数值试验。其中时间步长取  $10$  秒, 模式稳定需要  $30$  分钟。在整个计算区域中, 输入了本溪地区的实际地形资料, 进行数值模拟。

由于本溪市的姚家低空观测点与肉联厂低空观测点分别位于计算区域的东北和西南角, 因此, 本次模拟中以姚家低空探空资料作为东风或东北风的入流边界条件, 而以肉联厂低空探空资料作为西风或西南风的入流边界条件, 进行数值计算。

对于平均风速较大的流场, 设整个区域的初始风场与入流风向一致, 进行动力扰动的环流模拟。对于平均风速较小的流场, 试图考察热力扰动引起的环流。

图 1~图 3 是模拟的 1989 年 1 月 11 日 16 时各高度的风场图。其初始风场和入流边界条件均为东北风。取姚家低空探空实测资料。初

始温度场设为中性层结,即

$$\theta = 273.0(K)$$

假设地面温度不变。

图1是地面风场。由图1可见,此时风场很不均匀。这是由于在地形的约束下,地面风遇地形而产生顺地形绕流。在图1的右下方是平顶山地区,该处风速较大,说明过山气流在越过山顶时,流速加大。在太子河谷地区,风速较小,且有风场辐合。在这种条件下,不利于该地区污染物的扩散,容易产生污染物的高浓度区。

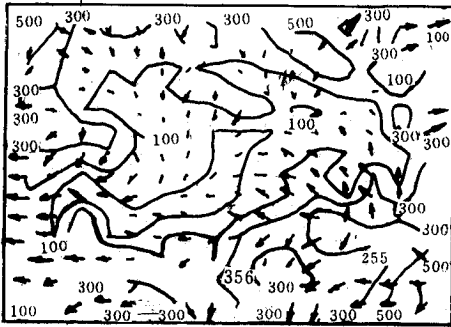


图1 地面流场

图2是低空100m处的风场。由图2可见,此时平均风速较大,气流有足够的动能克服阿基米德浮力翻越山脊。气流的绕流成分减少,爬流成分增多。大范围内盛行东南风,风速不是很均匀。平顶山地区风速仍然较大,太子河上空风速较小。在这种条件下,不利于太子河周围污染物的输送与扩散。

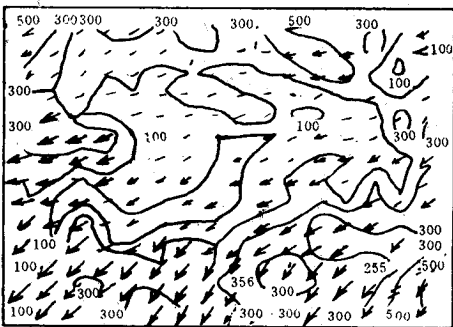


图2 100m 高度流场

图3是低空300m处的风场。此时,地形约束已经很小,风向趋于一致。但平顶山地区风速

仍然相对较大,太子河上空风速相对较小。

本溪地区四周地形较高,中间是河谷凹地。通常日出后山坡上接受了较多的太阳辐射,因此气温比周围空气高。午后山坡温度开始下降,而河谷气温下降较慢。这种下垫面增热和冷却的不一致会导致局地环流的产生,其中最明显的就是山谷风。为了掌握这种现象的发生、演变过程,进行了山谷风的数值模拟。

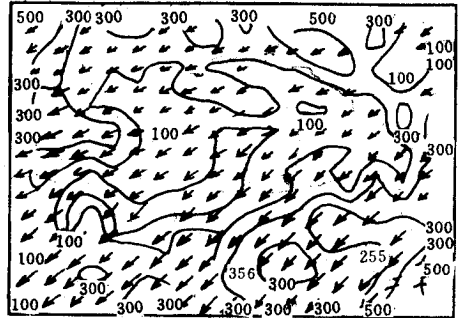


图3 300m 高度流场

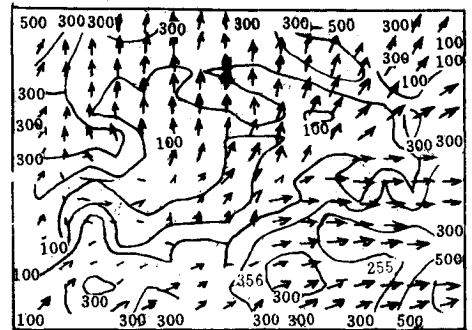


图4 地面流场

图4~图6是模拟的各高度的谷风流场。为了突出谷风效应,我们假设一个弱的初始风场:

$$u = 0.1 \ln(Z/0.1)$$

$$v = 0.1 \ln(Z/0.1)$$

$$\theta = 267 + 0.02Z(K) \quad Z \leq 300m$$

$$\theta = 273(K) \quad Z > 300m$$

地面温度:

$$T = T + 2.0/3600.0 \times \Delta T \times Z_g/400.0(K)$$

式中, $\Delta T$ 为时间步长, $Z_g$ 为地形高度。

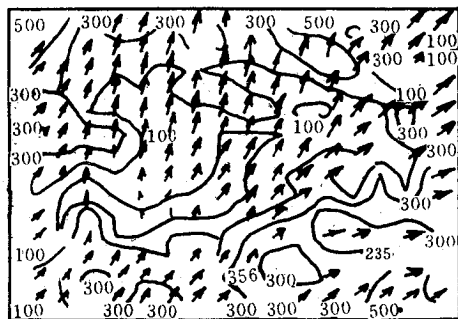


图5 100m 高度流场

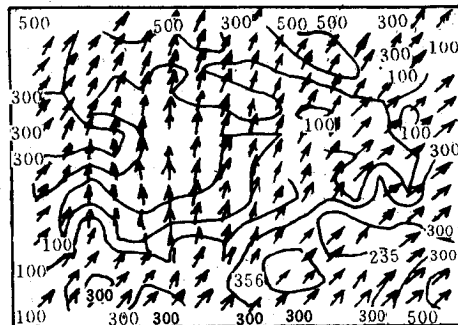


图6 300m 高度流场

图4为地面风场,从图4中可清晰地看到由河谷吹向山坡的气流,风场在市区有一个强的辐散区。图5是低空100m 处的风场,在这一高度上,风场仍然向四周辐散。图6是低空300m 的风场,此时,辐散较弱,风向逐渐趋于一致。

#### 4 小结

本文采用三维准静力动力学模式对本溪地区的三维流场进行数值模拟。根据对各种情况的模拟分析得到如下结论:本溪地区地形复杂,在地形的影响下,气流遇地形会产生绕流,气流翻越山顶时流速加大;上午日出后,气温逐渐升高,由于向阳山坡接受了较多的太阳辐射,气温比周围高,因而产生谷风。当系统风较弱时,谷风较明显,在河谷地带产生一个辐散区,厚度可达400m。

#### 5 参考文献

- 1 桑建国,温市耕. 大气扩散的数值计算. 北京:气象出版社,1992