

北仑、镇海地区风场的数学模拟计算

蒋燕霞 黄诗坚
(能源部南京电力环境保护研究所)

提 要

本文主要介绍 Mark A. Yocke^[1]的三维诊断风场模式,并用以模拟计算北仑、镇海地区的流场。就其所选取的网格距离及其所需要输入的边界条件等而言,模拟的结果与实测值基本一致。

一、引 言

为了适应经济发展的需要,沿海地区大中型的火电厂愈来愈多。这对人口密集的沿海地区的大气污染问题的研究已成为一个重要的课题。70年代以来,国内外在这方面的研究进展较快,尤其对沿海气象过程、污染物中尺度扩散和输送的数值模拟计算方面,取得了一定的成果^[2-5]。

沿海大气污染问题的研究除了必须很好地了解沿海地区可能发生的各种大气过程外,最终还是归结为如何建立合理的物理模型来模拟这些过程,并通过模式计算,以求得该地区所受的污染程度。三维风场的确定通常有两种模式:一类就是具有预报能力的模式;另一类模式就是诊断模式,这类模式的一般特点是根据质量守恒方程,控制风场分布的动力过程,并利用所建立的理论或经验关系式对这些过程进行参数化。

本文选择 Mark A. Yocke 的三维诊断风场模式来计算北仑、镇海地区的流场。该模式原是为模拟复杂地形的三维风场而设计的,主要用于处理地形对流场的影响和城区热岛效应等问题。由于沿海地区局地海陆环流的形成主要是水陆的热性质不同而造成的,我们试图引用该模式来模拟该地区的流场,同时也考虑到陆地上山坡对流场的影响。

二、模式介绍

1. 模式方程

模式方程是基于三维不可压缩流体的连续方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

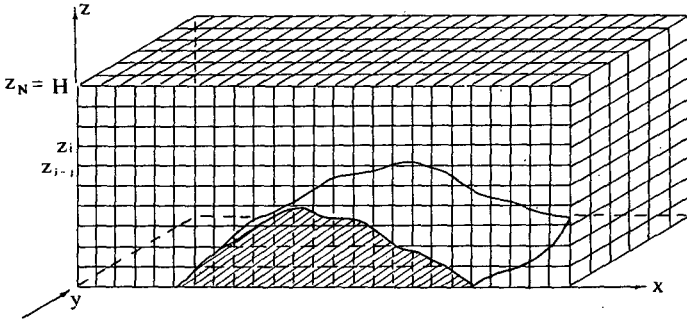


图1 模拟区域网格划分示意图

如图1所示,模拟区域可垂直划分成若干层,并允许垂直层与地形相交,因此,图1中阴影部分在计算中略去。垂直层距为非均匀。当垂直层数确定后,通过对方程(1)的积分(垂直方向),可以得到以下一组方程:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial y} = -\Omega_i(x, y) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

这里 N 表示垂直层数, \bar{u}_i 和 \bar{v}_i 定义如下:

$$\begin{aligned} \bar{u}_i &= \frac{1}{\Delta z_i} \int_{z_{i-1}}^{z_i} u dz \\ \bar{v}_i &= \frac{1}{\Delta z_i} \int_{z_{i-1}}^{z_i} v dz \\ \Delta z_i &= z_i - z_{i-1} \\ \Omega_i(x, y) &= \frac{w(z_i) - w(z_{i-1})}{\Delta z_i} \end{aligned}$$

$\Omega_i(x, y)$ 为第 i 层的风速散度,对于每一垂直层,假设气流是无旋运动(或旋度很弱),那么可定义以下的二维势函数:

$$\begin{aligned} \bar{u}_i &= \frac{\partial \varphi_i}{\partial x} \\ \bar{v}_i &= \frac{\partial \varphi_i}{\partial y} \end{aligned}$$

那么方程(2)可表示为:

$$\nabla^2 \varphi_i = \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial y^2} = -\Omega_i(x, y) \quad (3)$$

当求得散度场 $-\Omega_i$ 之后,在一定的边界条件下,解泊松方程,即得 φ_i , 求出第 i 层的风速 \bar{u}_i 和 \bar{v}_i 。

这个模式的关键之处就是如何确定 Ω_i , 实际上它是几个部分组成的,当气流经过不平坦地形时, Ω_i 是地形影响、地表摩擦效应与地面热力作用之和,即 Ω_i 可表示为:

$$\Omega_i = \sum_j a_j w_{ij} \quad (4)$$

式中 a_j 为经验系数, w_{ij} 则表示地形等对流场的影响。它是通过以下参数化实现的。

2. 垂直速度的参数化

(1) 地形影响

由于地形是模拟区域的一部分,但地形影响的形式是不直接作为边界条件的,当气流遇到山坡时,按照动力学考虑,垂直速度可表示为:

$$w = u \cdot \sin(\arctg \nabla h) \cdot e^{-k_1 z} \cdot B(F_r) \quad (5)$$

$$B(F_r) = \begin{cases} 1 & \text{若 } r - \Gamma \leq c \\ F_r / F_{rc} & \text{若 } r - \Gamma > c \end{cases} \quad (6)$$

(5) 式中 $h(x, y)$ 为地形高度;指数项主要是考虑到地形对 w 的影响随高度的增加而衰减(这里 k_1 取 0.5);式(6)中 r 为环境温度递减率; Γ 为干绝热递减率; F_{rc} 为标准 Froude 数, ∇h 称地形散度,等于 $\partial h / \partial x + \partial h / \partial y$, F_r 和 c 的表达式为:

$$F_r = u / \sqrt{g(r - \Gamma) \Delta H / T_\infty} \quad (7)$$

$$c = u^2 / [g(F_{rc} \Delta H) / T_\infty] \quad (8)$$

$$\Delta H = h_{max} - h(x, y) \quad (9)$$

式(7)~(9)中的 T_∞ 为上游气温(未扰动的); h_{max} 为网格中的最高地形高度,而 $h(x, y)$ 则是该网格的平均地形高度。根据 Lilly(1973)^[6]的分析, F_{rc} 的值对于椭球形的山坡取 0.5,而对于圆锥形的山坡取 1.0。

(2) 地表摩擦效应

由于大气边界层中的地表摩擦,使得水平风速的垂直变化一般呈指数律形式,按照 Blasius(1908)^[7]的结论,可推出以下结果:

$$\begin{aligned} w(z_i) - w(z_{i-1}) &\cong - \frac{\Delta z_i}{\Delta x} [u(z_i) - u(z_{i-1})] \\ &\cong \frac{u_*}{k} \cdot \frac{\Delta z_i}{\Delta x} \left[\frac{ku(z_i)}{u_*} - \frac{ku(z_{i-1})}{u_*} \right] \\ &\cong \frac{u_*}{k} \cdot \frac{\Delta z_i}{\Delta x} [f(z_i) - f(z_{i-1})] \\ &\cong u(z_{i-1}) \cdot \frac{\Delta z_i}{\Delta x} \left[\frac{f(z_i)}{f(z_{i-1})} - 1 \right] \end{aligned} \quad (10)$$

式中的 u_* 为摩擦速度,无量纲速度 $f(z)$ 用 Businger(1973)^[8]的结果表示:

$$f(z) = \begin{cases} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + 4.7\left(\frac{z - z_0}{l}\right) & \text{(对稳定情况)} \\ \ln\left[\frac{1 - g\left(\frac{z}{l}\right)}{1 + g\left(\frac{z}{l}\right)}\right] - \ln\left[\frac{1 - g\left(\frac{z_0}{l}\right)}{1 + g\left(\frac{z_0}{l}\right)}\right] & \\ + 2\text{tg}^{-1}\left[\frac{1}{g\left(\frac{z}{l}\right)}\right] - 2\text{tg}^{-1}\left[\frac{1}{g\left(\frac{z_0}{l}\right)}\right] & \text{(对不稳定情况)} \end{cases} \quad (11)$$

$$g\left(\frac{z}{l}\right) = [1 - 1.5\left(\frac{z}{l}\right)]^{-1/4} \quad (12)$$

(3) 地面热力作用

由于地面受热的不均匀,可能影响局地的气流形式。考虑两种情况:

(a) 海陆环流与城区热岛对流场的影响

根据经过热岛地区的气流与气流经过山坡时具有相似的形式 Stern and Malkus (1953)^[9]的结论,我们定义:

$$M(x, y) = \begin{cases} \frac{T(x, y)}{r - \Gamma} & r - \Gamma > 0 \\ 0 & r - \Gamma \leq 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中的 $T(x, y)$ 是地面气温,与方程(5)相似,对海陆环流与城区热岛效应所产生的影响可定义类似的垂直速度:

$$w = U \cdot \sin(\arctg \nabla M) \cdot e^{-kz} \quad (14)$$

应当注意到,在没有大风的情况下,城区热岛产生的垂直通量等于零。对于平坦的地形,这种结果与前面的地形影响的结果相似,而对于起伏地形条件下的热力作用对流场的影响将在下面讨论。 ∇M 的意义类似于上述的 ∇h 。

(b) 山谷风对流场的影响

夜间由于斜坡辐射的加剧,使其表面的空气密度比相同高度的空气密度大,因此气流向下运动,产生流泄风。而白天的情况则相反。

使用下面简化公式求山谷气流:

$$U_s = \text{常数} \left[\left(\frac{T_c - T_E}{T_c} \right) \cdot \left(\frac{h_{\max} - h}{h_{\max}} \right) \right] \quad (15)$$

式中的 T_c 和 T_E 分别为冷流和环境温度, h_{\max} 和 h 的意义同式(9);常数的取值范围在 -0.1 到 0.1 (m/s) 之间,当此值小于零时为下山风,而大于零时则为上山风。

(4) 数值求解

为了求解方程(3),选取如下差分格式:

$$\frac{\varphi_{i-1,j} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i+1,j}}{(\Delta x)^2} + \frac{\varphi_{i,j-1} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i,j+1}}{(\Delta y)^2} = -\Omega_{i,j} \quad (i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n) \quad (16)$$

我们选择修正的 Gauss-Seidel 叠代法求解。

三、模式输入和模拟计算

模拟区域位于浙江宁波市的东边,范围为 400km^2 。镇海电厂、北仑港电厂、小港开发区热电站、镇海石化总厂、北仑港均在模拟区域内。该区的北部约 5km 范围为海面,东北角为金塘岛(见图2)。模拟区域共分成 25×16 个网格点。

模式计算需输入模拟区域内平均温度垂直递减率,逆温层高度和常规的云量观测值等。模式计算的边值是通过给出边界上的若干点的实测值(随高度变化的)经加权内插产生的。这里采用的是以距离平方倒数为权重的加权平均方法。利用常规的气象观测值,可以计算出稳定度参数 s 和 Monin-Obukhov 长度 l :

$$s = -\frac{1}{2} (3 - c_w + |c_e|) \cdot \text{sign}(c_e) \quad (17)$$

$$\text{sign}(c_e) = \begin{cases} 1 & c_e > 0 \\ 0 & c_e = 0 \\ -1 & c_e < 0 \end{cases} \quad (18)$$

c_w 和 c_e 分别定义如下:

$$c_w = \begin{cases} u_r/2 & 0 \leq u_r \leq 8(\text{m/s}) \\ 4 & u_r > 8(\text{m/s}) \end{cases} \quad (19)$$

$$c_e = \begin{cases} \left. \begin{matrix} 3 & \text{强} \\ 2 & \text{中等} \\ 1 & \text{弱} \end{matrix} \right\} & \text{白天日照情况} \\ 0 & \text{多云} & \text{白天或晚上} \\ \left. \begin{matrix} -1 & \text{云覆盖面} \geq \frac{4}{8} \\ -2 & \text{云覆盖面} \leq 3/8 \end{matrix} \right\} & \text{晚上的情况} \end{cases} \quad (20)$$

上式中 u 表示在近地层内10m高度测得的风速。

$$l = z_0(b_1 - b_2|s| + b_3s^2)/(a_1s + a_2s^3) \quad (21)$$

式中 $a_1=0.004349$, $a_2=0.003724$, $b_1=0.5034$, $b_2=0.2320$, $b_3=0.0325$, 假如 s 等于零, 则 l 等于 $1.0 \times 10^6(\text{m})$ 。

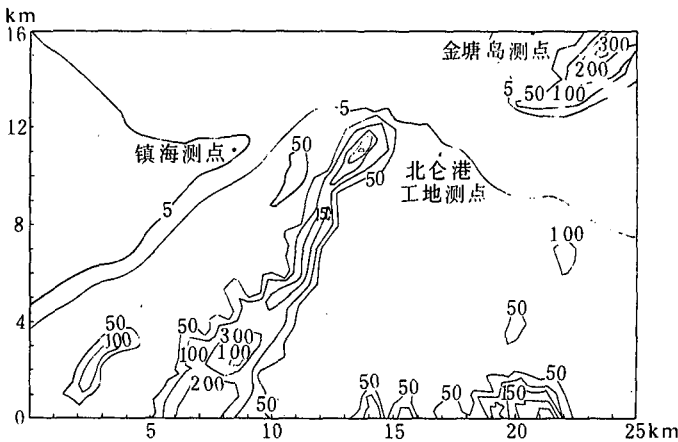


图2 模拟区域平面图

模式还需要输入每个网格点上随时间变化的地面温度, 根据实测资料, 我们可得到海面和陆地上的地面温度随时间变化的经验表达式如下:

(a)地面气温的表达式

地面气温的变化较复杂, 它是随每个网格点不同的海拔高度而变化。利用北仑港电厂工地的实测资料, 得到该点地面温度随时间变化的表达式为:

$$T_{\text{陆}} = T_0 + A \cdot \sin[(t - t_0)\pi/t] \quad (22)$$

式中 T_0 为 t_0 时刻地面气温; A 的取值等于 7°C 。

另外,根据模拟区域内天童、育王、小港、北仑港、炼油厂等地的地面观测资料,得到地面温度随海拔高度的变化有以下关系:

$$T(x, y) = T_{\text{陆}} + 0.02[h(x, y) - z_0] \quad (23)$$

式中的 $z_0, T_{\text{陆}}$ 分别为北仑港电厂工地测点的海拔高度(4m)和式(22)求得的温度值。式(23)只适用于 $5 < A < 17$ 的情况,其他的则取 $T(x, y) = T_{\text{陆}}$ 。

(b)海面气温的确定

由于海水的热容量很大,海面气温的日变化振幅较小。因此根据实测资料(每天若干次)进行线性内插,即可求得海面气温的日变化。

模式计算需要确定网格点上的粗糙度,根据实测资料推算,粗糙度的值为:

$$z_0 = \begin{cases} 0.0008 & \text{海面} \\ 0.135 & h(x, y) \leq 50\text{m} \\ 0.42 & h(x, y) > 50\text{m} \end{cases} \quad (24)$$

四、结果分析和结论

模式计算了1987年6月2日白天的流场变化情况。图3(a, b, c)分别为08h、09h、12h的一些模拟结果,所在平面的海拔高度分别为10m、10m和100m。计算结果表明,流场变化的趋势基本上与实测的相似。某些点的实测值与计算结果有些差别,主要是风向差别大些,最大的相差达 30° 左右(绝对值)。这些差别大多在10m这一层。由于近地层流场受周围的地形条件等影响较大,模式计算结果与实测值之间存在一些差别是正常的。由结果分析,我们有以下结论:

1. 本模式虽是诊断性质的,但与动力预报模式比较,有简单易用的特点,且计算费用较省,比较适合于我国目前新建电厂的大气环境影响评价。

2. 对于复杂地形条件下的流场计算,这个模式的精度不仅取决于参数化过程中参数的选取,同时取决于模式所需输入的气象资料和边值等。由于北仑港测试并不是为该模式计算设计的,因此没有足够的资料进行计算分析对比,但这个模式考虑的问题较广,具有一定的参考价值。

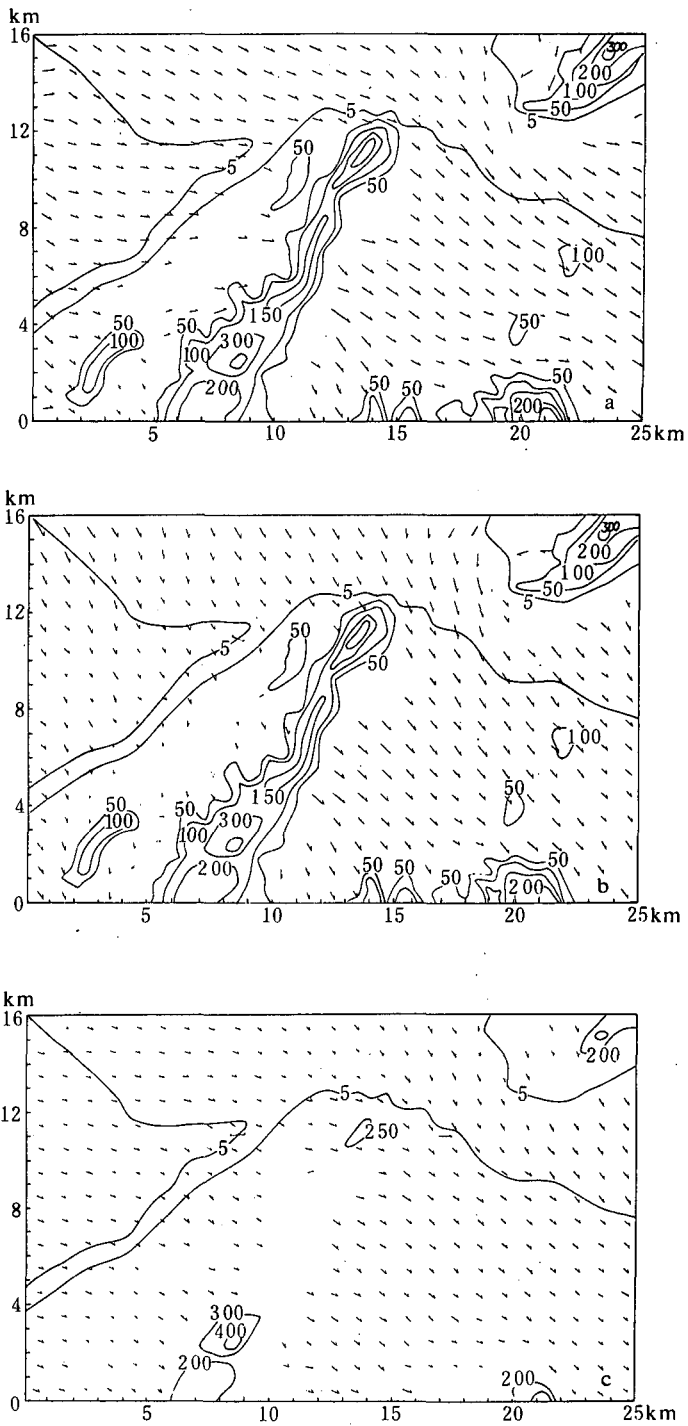


图3 模拟计算结果

(a) 08h (10m) (b) 09h (10m) (c) 12h (100m)

(括号内数据为海拔高度)

参 考 文 献

- [1] Mark A. Yocke, EF78—78 Contract No. 68-03-02446, Systems Applications, Inl. San Rafeel, California, 94903 U. S. A. 1973.
- [2] Lyons, Modeling mesoscale diffusion and transport processes for releases within coastal zone during land/sea breezes, Final Report NUREG. CR-3542, 1983.
- [3] Pechinger, Review of Selected Three-Dimensional Numerical Sea Breeze Models, Proc. of the 14th Int. Tech. Meeting on Air Pollution Modeling and Its Application, Sept. 27—30, 1983, in Copenhagen, 1985.
- [4] 蒋维楣, 关于沿海电站空气污染物散布的若干问题, 电力环境保护, 第二期, 1987年。
- [5] 姚增权, 用于沿海(湖)地区的几种熏烟模式, 电力环境保护, 第四期, 1987年。
- [6] Lilly, D. k., Calculation of stably stratified flow around complex terrain, Research Note No. 40, Flow Research, Incorporated, Kent, Washington, 1973.
- [7] Blasius, H., *Z. Angew. Math. Phys.*, Vol. 56, pp. 1—37 (English Translation, NACA Tech. Mem., 1256), 1908.
- [8] Businger, J. A., Turbulent transfer in the atmospheric surface layer, Proceeding of Workshop on Micrometeorology, (D. A. Hangen, ed.,) American Meteorological Society, Boston, Massachusetts, 1973.
- [9] Stern, M. E. and J. S. Malkus, The flow of a stable atmosphere over a heated island, Part II, *J. Meteorol.*, Vol, 10, pp. 105—120, 1953.

NUMERICAL SIMULATION OF THE WIND FIELD OVER THE BEILUN-ZHENHAI AREA

Jiang Yanxia Wang Shijian

(Nanjing Institute of Electric Environmental Protection, DOE)

Abstract

A three-dimensional diagnostic model by Mark A. Yocke is mainly introduced in this paper. Using the model, the wind fields over the Beilun-Zhenhai area are simulated. As far as the grid length and boundary condition selected is concerned, the simulative results are conformed with the observations.