

地形性中尺度环流的数值模拟及验证*

张美根 韩志伟 雷孝恩

(中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

摘 要 建立了一个高分辨三维边界层诊断模式以模拟下垫面热力和动力的非均匀性对边界层结构的影响。模式模拟了广东大亚湾核电站厂址区域 ($12\text{ km} \times 12\text{ km}$) 47个典型天气系统下的地形性中尺度环流, 其大坑的模拟风向, 风速和温度与观测值相比, 风向差小于 17.5° 的概率为 87.5%, 风速比值在 0.7~1.3 之间的概率为 72.9%, 温度差小于 0.4°C 的概率为 72.9%。

关键词: 地形性中尺度环流; 诊断模式; 边界层结构

1 前言

城市大气污染预报包括城市尺度天气预报和污染物浓度预报。城市尺度天气预报与通常的概念不一样, 不仅要预报风、温、湿等气象因子, 还要预报混合层厚度、大气稳定度类等边界层结构参数。目前还没有这样的天气预报模式, 而要做到这一点, 在城市尺度天气预报模式中不仅要考虑大尺度天气对城市尺度天气的影响, 而且要提高模式分辨率, 以反映地形性中尺度环流和边界层结构。

根据目前的计算条件, 我们将城市尺度天气预报模式分为 α 中尺度气象模式和 β 中尺度气象模式 (按 Orlanski^[1] 尺度划分标准, α 中尺度的空间长度为 200~2 000 km, β 中尺度的空间长度为 20~200 km)。用 α 中尺度气象模式的预报场 (水平格距 30~80 km, 边界层内有 5 层) 作为 β 中尺度气象模式 (水平格距 1~5 km, 100 以下有 5 层) 的时变的侧边界和顶边界条件, 初始场和同化场。

本文建立的 β 中尺度气象模式是流体静力的, 地面气温由实测资料诊断, 目的是检验模式模拟下垫面热力和动力作用的能力, 为建立可预报的非流体静力 β 中尺度气象模式积累检验。由于城市下垫面的特殊性, 难以区分热力和动力的影响, 所以我们选取了广东大亚湾核电站厂址区域 ($12\text{ km} \times 12\text{ km}$) 为实验范围。

2 模式构造

2.1 模式方程组

地形性中尺度环流主要是由地面非均匀性强迫产生的, 包括下垫面的起伏不平或冷热不均所引起的机械性强迫运动 (如地形波、下风波、尾流等) 和热力性强迫运动 (如

热岛环流、海陆风、山谷风等), 对局地天气以及天气尺度天气都会产生明显的影响, 有时甚至是支配性的影响^[2]。

模拟地形性中尺度环流可以采用三维原始方程模式^[2~5]。为了便于处理复杂地形, 我们采用地形追随坐标系 $[z^* = (z - z_g)/D]$ 且 $D = (z_t - z_g)/z_t$, 其中 z_t 和 z_g 为模式顶高度和地形标高。忽略大气的辐射加热和凝结过程, 在不可压假设下得到模式的基本方程组^[1]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial x} (Du u) - \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial y} (Duv) - \frac{\partial}{\partial z^*} (uw^*) - \Theta \frac{\partial \pi'}{\partial x} + g \frac{\theta'}{\Theta} \left(1 - \frac{z^*}{z_t}\right) \frac{\partial z_g}{\partial x} + fv + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial x} \left(DK_h \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial y} \left(DK_h \frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{1}{D^2} \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_v \frac{\partial u}{\partial z^*}\right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial x} (Duv) - \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial y} (Dvv) - \frac{\partial}{\partial z^*} (vw^*) - \Theta \frac{\partial \pi'}{\partial y} + g \frac{\theta'}{\Theta} \left(1 - \frac{z^*}{z_t}\right) \frac{\partial z_g}{\partial y} - fu + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial x} \left(DK_h \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial y} \left(DK_h \frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{1}{D^2} \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_v \frac{\partial v}{\partial z^*}\right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial z^*} = \frac{\theta' g}{\Theta^2} D, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (Du) + \frac{\partial}{\partial y} (Dv) + \frac{\partial}{\partial z^*} (Dw^*) = 0, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta'}{\partial t} = & -\frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial x} (Du \theta') - \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial y} (Dv \theta') - \frac{\partial}{\partial z^*} (w^* \theta') - DS w^* \\ & - S \left(1 - \frac{z^*}{z_t}\right) \left(u \frac{\partial z_g}{\partial x} + v \frac{\partial z_g}{\partial y}\right) + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial x} \left(DK_h \frac{\partial \theta'}{\partial x}\right) \\ & + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial y} \left(DK_h \frac{\partial \theta'}{\partial y}\right) + \frac{1}{D^2} \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_v \frac{\partial \theta'}{\partial z^*}\right), \end{aligned} \quad (5)$$

其中 π 和 π' 为天气尺度的 Exner 函数和相对于天气尺度的偏差 $[\pi = c_p(p/p_0)^{R/c_p}]$, Θ 和 θ' 为天气尺度的位温和相对于天气尺度的偏差, u 和 v 为风速的水平分量, p_0 为海平面气压, S 为初始位温递减率($S = d\Theta/dz$), K_h 和 K_v 为水平和垂直扩散系数, w^* 为坐标系中的垂直速度 $[w^* = \frac{z^* - z_t}{z_t - z_g} \left(u \frac{\partial z_g}{\partial x} + v \frac{\partial z_g}{\partial y}\right) + \frac{w}{D}]$, f 为科里奥利参数。

2.2 计算方案

数值差分格式采用交错网格^[4]。这种交错网格的优越性是能利用一阶差分格式达到二阶差分的精度。其中对平流项选用施主格式^[5]。

$\partial u / \partial t = -u(\partial u / \partial x)$ 写为

$$u_{i,j,k}^{n+1} = u_{i,j,k}^{n-1} - \frac{\Delta t}{\Delta x} u_{i,j,k}^n (u_{i,j,k}^n - u_{i-1,j,k}^n), \quad u_{i,j,k}^n > 0,$$

$$u_{i,j,k}^{n+1} = u_{i,j,k}^{n-1} - \frac{\Delta t}{\Delta x} u_{i,j,k}^n (u_{i+1,j,k}^n - u_{i,j,k}^n), \quad u_{i,j,k}^n < 0,$$

$\partial u / \partial t = -v(\partial u / \partial x)$ 写为

$$\begin{aligned} u_{i,j,k}^{n+1} &= u_{i,j,k}^{n-1} - \frac{\Delta t}{\Delta y} \bar{v}_{i,j,k}^n (u_{i,j,k}^n - u_{i-1,j,k}^n), & \bar{v}_{i,j,k}^n > 0, \\ u_{i,j,k}^{n+1} &= u_{i,j,k}^{n-1} - \frac{\Delta t}{\Delta y} \bar{v}_{i,j,k}^n (u_{i+1,j,k}^n - u_{i,j,k}^n), & \bar{v}_{i,j,k}^n < 0, \end{aligned}$$

其中 $\bar{v}_{i,j,k}^n = \frac{1}{4}(v_{i-1,j,k}^n + v_{i-1,j+1,k}^n + v_{i-1,j,k}^n + v_{i,j+1,k}^n)$.

在垂直方向（各层高度见表 1）上，垂直速度定义在 z^* 的全位面上，其他变量定义在半位面上。半位面上的变量代表了整层的平均。

表 1 模式垂直网格点高度

单位: m

层次	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
全位面	0	4	16	34	66	84	120	280	520	680	920	1080	1920	2080	2920
半位面	/	2	10	25	50	75	100	200	400	600	800	1000	1500	2000	2500

模式的时间差分采用蛙跃格式。为了避免蛙跃格式带来的解的分离，对所有诊断变量作频率滤波。

$$\tilde{a}^\tau = (1 - \nu)a^\tau + \frac{1}{2}\nu(a^{\tau+1} + \tilde{a}^{\tau-1}),$$

式中 $\tilde{a}$ 是滤波后的变量。在本模式中系数 ν 取为 0.1。

2.3 初值及其边界条件

初始条件：风场、温度场和温度扰动场的初值是由计算范围内的实测资料确定的。风场为风向和风速的实测值经客观内插和无辐散调整后的格点资料；温度场是将实测温度按下垫面特性插值而得；温度扰动场为开始积分时刻的温度与 24 小时平均温度的差值。

侧边界条件：在模式的西侧边界，如果 $u > 0$ ，则为流入边界，变量保持其值不变；如果 $u < 0$ ，则为流出边界，变量取其邻近内点上的值。在模式的东侧边界，如果 $u > 0$ ，则为流出边界，变量取其邻近内点上的值；如果 $u < 0$ ，则为流入边界，变量保持其值不变。同理，在模式的南侧边界，如果 $v > 0$ ，则为流入边界，否则为流出边界；在模式的北侧边界，如果 $v > 0$ ，则为流出边界，否则为流入边界。

垂直边界条件：在模式上部引入吸收层，目的是为了避免扰动在模式顶部的反射。若模式顶层为第 N 层，则从第 $N-4$ 层开始向上逐步消减扰动量。

$$\bar{a}_{i,j,k} = a_{i,j,k} - \gamma(\alpha_{i,j,k} - \alpha_{i,j,N}), \quad k = N-4, N,$$

其中 $\gamma = 0.8, 0.6, 0.4$ 。

在底边界（ $k=1$ ）取固定边界，由实测资料提供。如速度 u 和温度扰动量的下边界条件为

$$u_{i,j,1}^{t+n\Delta t} = \hat{u}_{i,j,1}^t + \frac{n\Delta t}{\Delta T} (\hat{u}_{i,j,1}^{t+\Delta T} - \hat{u}_{i,j,1}^t),$$

$$\theta_{i,j,l}^{n+\Delta t} + \theta_{g,i,j}^l + \frac{n\Delta t}{\Delta T} (\theta_{g,i,j}^{l+\Delta T} - \theta_{g,i,j}^l) - \bar{\theta}_{g,i,j},$$

这里 $n=0, 1, 2, \dots, N$ 。其中 $N=\Delta T/\Delta t$, 且 ΔT 和 Δt 分别为插值时间间隔和时间积分步长。在本模式中 ΔT 为 1 h。

此外, $\hat{u}_{i,j,k}^l$ 为实测风速经客观内插和无辐散调整而得到的格点资料; $\theta_{g,i,j}$ 和 $\bar{\theta}_{g,i,j}$ 是实测地表位温及其 24 小时的平均值。

2.4 四维资料同化

四维资料同化是模式在积分过程中引入与模式积分时刻一致的观测资料, 使得模式的计算值逼近观测值^[6~8]。四维资料同化的优点在于利用观测资料改进模式结果。四维资料同化是通过引入强迫项来实现的, 如 x 方向的运动守恒方程以含有强迫项的形式可写成

$$\partial u / \partial t = F_u + G_u(u_{\text{obs}} - u),$$

式中 F_u 为方程 (1) 的右端项; G_u 为同化系数, 其大小取决于模式所模拟的空间尺度, 本模式取为 $1 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-4} (\text{s}^{-1})$; u_{obs} 为观测值。

3 输入资料及模式参数

3.1 地形及其下垫面特征

广东大亚湾核电站位于南中国海大亚湾西岸, 三面靠海。厂址周围地形以海拔 100 m 以下的小山丘为主, 710 m 高的排牙山位于厂址以北 3500 m 处。按 500 m 等高线地势呈东北—西南走向 (见图 1)。

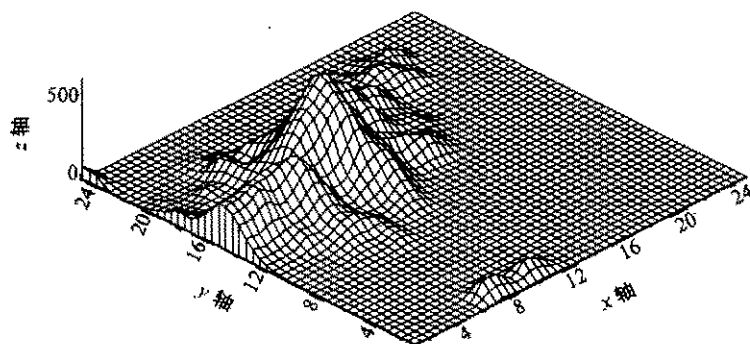


图 1 模拟区域地形标高 (水平分辨率 500 m)

根据下垫面的生态特征, 厂址周围的下垫面可以分为小城镇、水面、灌木林和田园与灌木林混合区¹⁾。在计算中地面粗糙度 Z_0 取为 0.4、0.001、0.8 和 0.3 m。

1) 中国科学院大气物理研究所, 1996, 重庆市大气污染控制规划研究——大气环境参数及大气污染诊断和预测模式, 312 页

3.2 气象资料及其处理

收集了 1984 年 9 月至 1985 年 8 月有关站点的气象观测资料, 其中有惠东、惠阳、深圳和横澜岛站的地面风; 香港站的地面风及高空风、温度和湿度; 大亚湾核电站大坑铁塔 5 层 (10、25、50、75 和 100 m) 的风温; 欧洲中心诊断的高空 (3000 m 以下) 风、温和湿度; 惠阳和铁塔的地温和降水量以及凌角、大万山和遮浪的水温。

地面风场由加权插值法插值获得。在垂直方向 200 m 以下各层风场由风速的幂次率推算得到, 并利用已有的高空实测风进行订正, 而 200 m 以上则根据实测风廓线经加权插值获得。

地面温度场是由实测值按下垫面特征插值而得¹⁾, 地面以上各层温度场由观测资料确定。

3.3 参数化方案

对于水平扩散系数 K_h , 采用 Pielke^[3] 的非线性动力扩散参数化方法,

$$K_h = \alpha \Delta x \Delta y \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \right\}^{1/2},$$

其中 $\alpha = 5.0$, Δx 和 Δy 为水平网格距。

对垂直扩散系数 K_v , 采用雷孝恩^[9] 的经验参数化方法。

中性条件下,

$$K_v(z) = \begin{cases} 1.24z / [(1 + 2.86e^{-4} z^{1.483})(1 + 4.32e^{-18} z^{6.29})(6.17 - \ln z_0)], & z \leq z_i, \\ K_v(z_i), & z > z_i; \end{cases}$$

稳定条件下,

$$K_v(z) = \begin{cases} [3.13z^{0.58} / (1 + 2.23e^{-8} z^{3.155}) - 0.025z^{0.421}] / (6.24 - \ln z_0), & z \leq z_i, \\ K_v(z_i), & z > z_i; \end{cases}$$

不稳定条件下,

$$K_v(z) = \begin{cases} 1.73z^{0.762} / [(1 + 2.15e^{-43} z^{14.345})(1 + 1.18e^{-8} z^{2.79})(6.14 - \ln z_0)], & z \leq z_i, \\ K_v(z_i), & z > z_i. \end{cases}$$

3.4 模式参数

模式模拟区域为 $12 \text{ km} \times 12 \text{ km}$, 格距为 500 m, 时间积分步长为 2 s。为保证模式的稳定和 01:00 时刻的值可靠, 我们采用了预积分 2 小时的方法, 使得模式达到稳态。

4 数值试验

我们对搜集到的气象资料进行了分析, 找出了 47 个具有代表性的天气类型, 一方面用以检验模式的适用性, 另一方面检验模式的可靠性。划分天气类型的因子有季节

1) 中国科学院大气物理研究所, 1996, 重庆市大气污染控制规划研究——大气环境参数及大气污染诊断和预测模式, 312 页

(春、夏、秋、冬)、天气(阴、晴)、风向和风速。

47 个个例的顺利模拟表明, 模式能用于多种天气条件。限于篇幅, 模拟结果仅介绍模式模拟热力和动力作用的能力及大坑点 47 个 24 小时风向、风速和温度的计算值与铁塔 5 层观测值的比较结果。

4.1 热力作用

为了检验模式对热力作用的敏感性, 我们模拟了晴天小风天气条件下风场随时间的演变过程。图 2 为模拟区域 10 m 高度上 04:00、13:00 和 19:00 时的陆风、海风和海风向陆风转变的过渡期环流。04:00 时(图 2a)以最高点排牙山山脊为中心, 气流向四周发散, 较冷空气沿山坡向下流入相对暖和的海面; 13:00 时(图 2b)气流从四周流向排牙山山脊, 在最高点形成气流辐合中心, 较暖空气从海面沿山坡向上抬升; 19:00 时(图 2c)强的海陆热力对比消失, 研究范围为偏西风控制(排牙山山脊后的风速减小和风向辐合是地形引起的), 这是海风向陆风过渡时的流型。

上述结果清楚地表明, 模式能很好地模拟出热力作用下海陆风及山谷风环流典型的

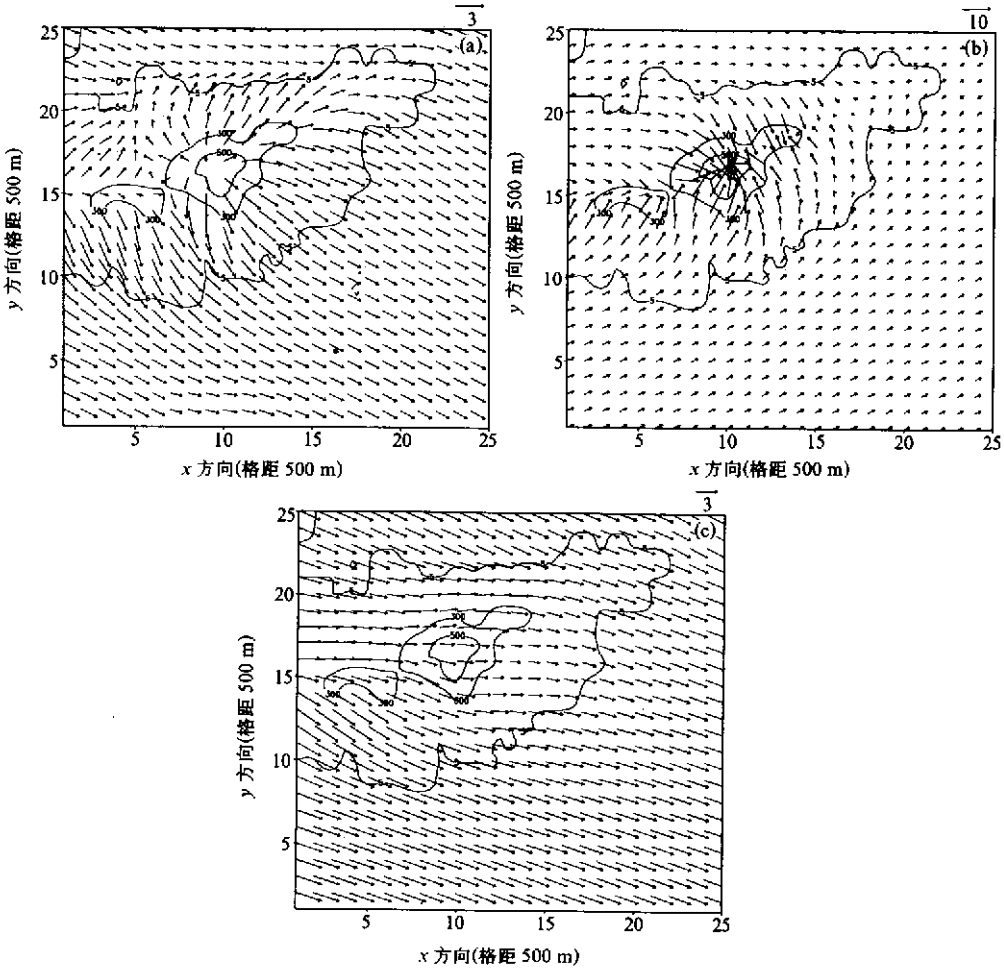


图 2 模拟区域晴天 10 m 高度 04:00 (a)、13:00 (b)、19:00 (c) 流场
5、300 和 500 等值线为地形标高

日变化过程。

4.2 动力作用

为了检验模式对动力作用的敏感性，我们分析阴天大风天气条件下的模拟结果。图 3 是 10 m 高度上 05:00 时的水平流场和垂直速度。可以看到，东南气流流经排牙山山脊时形成明显的侧向绕流（图 3a），同时在迎风坡和背风坡形成上升和下沉相间的气流区（图 3b）。

为了看出计算的中性大风特征，我们仔细分析了大坑点的风、温度随时间和高度变化。图 4 和图 5 表示阴天大风情况下大坑 10 m 高度上风速、风向与温度随时间的变化和 12:00 时风速与风向随高度的分布：10 m 高度风速均大于 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，在 $5\sim7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

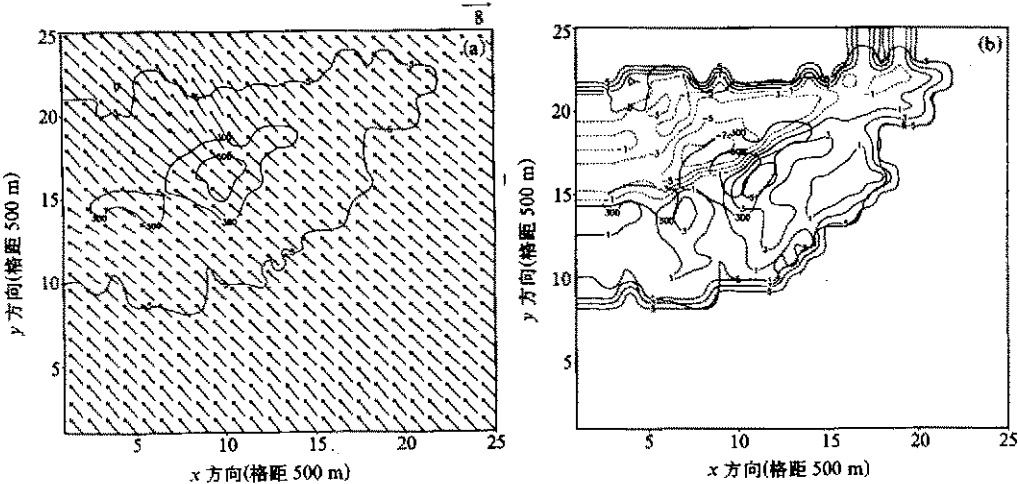


图 3 模拟区域阴天 10 m 高度 05:00 时流场 (a) 和垂直高度 (b)，其余同图 2

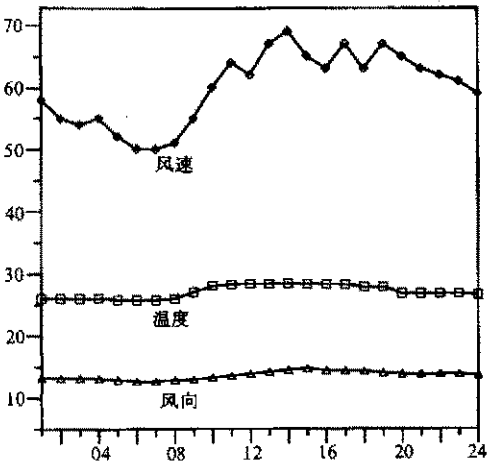


图 4 模拟区域阴天大风 10 m 高度风速、风向和温度的日变化
风速的单位为 $0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；温度的单位为 $^{\circ}\text{C}$ ；
风向的单位为 10°C

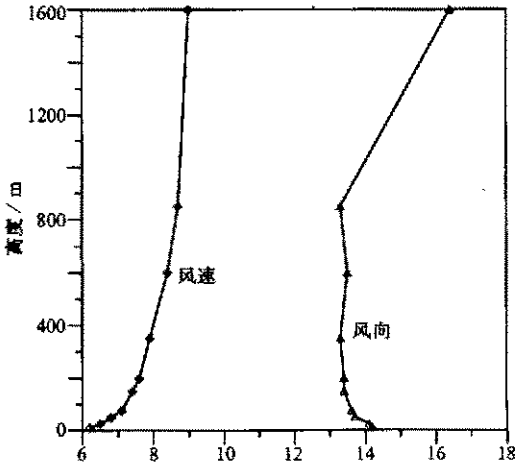


图 5 模拟区域阴天大风 12:00 时大坑风速和风向随高度的变化
风速的单位为 $0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；风向的单位为 10°C

之间, 风向基本为东南风 (在 135° 附近), 没有明显的日变化; 温度日变化不明显, 日较差为 3.3°C , 基本上属中性大气层结; 风速随高度增加而增加, 并满足幂指数规律 (幂指数为 0.08), 风向随高度没有明显变化, 1000 m 以下基本是东南风气流, 1500 m 以上高度风向为偏南气流。

上述结果充分说明模式能很好地反映大型山体的动力效应。

4.3 试验结果

为了定量地分析模式的模拟效果, 在大坑点不进行同化的情况下, 我们将大坑点的模拟风向、风速、温度与铁塔 5 层的观测值比较, 统计结果见表 2~4。

表 2 大坑点观测风向、风速与计算值的比较

风速比值范围	频率 (%)	风向差	频率 (%)
0.7~1.3	72.9	<17.5	87.5
0.6~1.5	95.2	<22.5	93.3
0.5~2.0	99.9	<45.0	99.9

表 3 大坑点观测温度与计算值的比较

温度差范围 ($^{\circ}\text{C}$)	<0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	>0.4
频率 (%)	27.4	21.4	12.5	11.6	27.1

表 4 大坑点观测与计算的稳定度类的相关频率 (%) 矩阵

稳定度类	A	B	C	D	E	F
A	69.8	63.1	6.1	0	0	0
B	22.6	17.1	26.8	0.4	0	0
C	0	13.5	64.7	12.2	0	0
D	7.5	6.3	2.4	77.6	6.9	0
E	0	0	0	9.7	90.3	18.4
F	0	0	0	0	2.8	81.6

从表 2~4 可以看到, 观测与计算的风向差小于 22.5° 的频率为 93.3%, 大于 45° 的频率为 0.1%; 观测与计算风速的比值位于 0.7~1.3 之间的频率为 72.9%, 位于 0.5~2.0 之外的频率为 0.1%; 观测与计算的温度差小于 0.4°C 的频率为 72.9%。比较结果表明, 模式的模拟结果与大坑铁塔的 5 层观测值具有相当好的一致性。

5 结论

通过对大亚湾核电站厂址区域 47 个具有代表性天气类型的模拟, 我们对模式的适用范围、模拟结果的可靠性以及复杂下垫面对局地风温场的影响进行了仔细的分析研究。研究表明: (1) 本文建立的 β 中尺度气象模式性能稳定, 在边界层内具有很高的分辨率, 能用于多种天气条件下的实际模拟, 达到了模式的设计要求; (2) 模拟的风温场正确反映了下垫面热力和动力不均匀性及天气过程的影响, 说明模式能用来模拟复杂下垫面对局地风温场的影响; (3) 大坑点 47 个 24 小时风向、风速和温度的计算值

与铁塔 5 层观测值具有相当好的一致性,说明模式的模拟结果是可靠的。

致谢: 田瑞明在模式的研制和调试过程中做了许多有益的工作,在此表示感谢!

参 考 文 献

- 1 Orlanski, I., A rational subdivision of scales for atmospheric processes, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1975, **56**, 527~530.
- 2 寿绍文, 中尺度天气动力学, 北京: 气象出版社, 1993, 27~76.
- 3 Pielke, R. A., 中尺度气象模拟, 北京: 气象出版社, 1990.
- 4 程麟生, 中尺度大气数值模式和模拟, 北京: 气象出版社, 1994, 230~308.
- 5 桑建国, 温市耕, 大气扩散的数值计算, 北京: 气象出版社, 1992, 48~65.
- 6 Kao, C-Y. J. and T. Yamada, Use of the CAPTEX data for evaluations of a long-range transport numerical model with a four-dimensional data assimilation technique, *Mon. Wea. Rev.*, 1988, **10**, 293~306.
- 7 Yamada, T. et al., Development of a nested grid, second moment turbulence closure model and application to the 1982 Ascot Brush Creek data simulation, LANL, Los Alamos, NM, 1987.
- 8 Yamada, T. et al., Airflow and air quality simulations over the western mountainous region with a four-dimensional data assimilation technique, LANL, Los Alamos, NM, 1988.
- 9 雷孝恩, 行星边界层中湍流统计量和风速随高度变化的参数化, 中国科学院大气物理研究所集刊, 第14号, 北京: 科学出版社, 1990, 1~28.

Numerical Simulations of Terrain Induced Mesoscale Circulation and Its Verification

Zhang Meigen, Han Zhiwei and Lei Xiaoen

(State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Physics and Atmospheric Chemistry,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract A three-dimensional mesoscale diagnostic model with high resolution is developed to simulate effects of inhomogeneous underlying surface upon structures of planetary boundary layers. Numerical experiments with real data in a coastal area show that the model can simulate terrain induced mesoscale circulation very well, and the simulated wind direction, speed and temperature at Dakeng are in good agreement with observations.

Key words: terrain induced mesoscale circulation; diagnostic model; boundary layer structure