

## 地形对中尺度风场影响的数值诊断

张树亮 周发秀

(青岛海洋大学, 266003)

**提要** 本文通过对历史(1979—1987年)资料的统计分析,说明山东半岛地形对风场的转向作用在强风、强温度平流情况下是显著的,并在分析 Danard 一层中尺度风场诊断模式在强背景场下不能适用的原因基础上,应用尺度分离方法,改进了原模式。通过对实际天气过程的计算表明,改进以后的模式能较好地反映半岛地形对风场的影响,从而说明改进后模式的有效性。

Danard<sup>[2]</sup> 于 1977 年提出了一个一层、原始方程数值诊断模式,该模式能较好地诊断受地形强迫的中尺度风场。此后, Danard 模式和其它一些类似的模式得到了广泛的应用<sup>[1,3]</sup>。然而,以上模式仅限于描述那些弱背景场下(即弱风、弱温度平流)地形强迫的中尺度现象。本文在应用实测资料进行统计分析后指出,强背景场下地形对风场的影响仍然是明显的。而且,对 Danard 模式应用尺度分离方法,将背景场和中尺度场分开,只对中尺度控制方程组进行积分调整,然后再将背景场和中尺度场叠加起来。这样改进后的模式在弱背景场和强背景场下都可应用。通过对几个实际天气过程的数值诊断分析,说明改进以后的模式的确能够较好地模拟强背景场下地形对风场的影响。

### 一、对 Danard 模式的改进

#### 1. 观测事实

为了证实在强背景场下地形对风场的转向作用是明显的,选用大连、烟台、龙口三个气象观测站的逐时测风资料进行统计分析。对于 1979—1987 年间 10 次较强冷空气过程,在大连站出现 6m/s 以上的偏北风情况下,比较烟台、龙口两站的风速和风向的差别。可以认为,大连、烟台、龙口三站彼此相隔不到 200km,在冷空气过程中,一般都处在同一天气系统的一个部位。如果没有地形影响,其风向和风速不会有明显的差别。表 1 给出了大连出现 6m/s 以上 N, NW, NE 风条件下,烟台、龙口两站分别出现 NW, N, NE 风的频数及平均风速,表明山东半岛地形对风场有转向作用,在大尺度背景场为偏北风的情况下,龙口站多为 NE—NNE 风,而烟台站多为 NW—NNW 风。

#### 2. Danard 模式在强背景场下不能适用的原因

在静止的稳定层结大气中位温分布为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\theta}{T} (\gamma_d - \gamma) \quad (1)$$

表 1 大连、烟台、龙口三站风速风向对比

Tab. 1 Comparison among wind speeds and directions from Dalian, Yantai, Longkou Stations

大 连			龙 口						烟 台					
风向	样本数	平均风速 (m/s)	NW		N		NE		NW		N		NE	
			N%	$\bar{v}$	N%	$\bar{v}$	N%	$\bar{v}$	N%	$\bar{v}$	N%	$\bar{v}$	N%	$\bar{v}$
N	209	10.6	5	5.5	23	8.2	68	8.9	62	7.9	20	7.6	12	8.4
NW	103	11.3	24	4.6	19	7.3	54	7.9	72	8.1	19	8.4	3	2.8
NE	64	11.4	2	3.9	2	1.4	88	7.0	44	7.6	28	8.5	25	7.8

式中,  $\theta$  为位温;  $\gamma_d$  为干绝热直减率;  $\gamma$  为实际大气直减率。在地面附近  $\frac{\theta}{T} \approx 1$ , 所以:

$$\theta_s = \theta_0(x, y) + (\gamma_d - \gamma)Z_s \tag{2}$$

式中,  $Z_s$  为地形高度;  $\theta_s$  为表面层位温;  $\theta_0(x, y)$  为  $Z = 0$  等高面上的位温, 它仅与天气尺度背景场有关;  $(\gamma_d - \gamma)Z_s$  为仅由地形起伏引起的位温在表面层的分布。

Danard 模式是在这样的一个初始条件下对热力学方程和动量守恒方程进行积分调整的。

显然, 在有地形的弱背景场(见图 1a)下, 文献[2]中(4)式右端第一项可以近似为:

$$-\vec{v}_s \cdot \nabla \theta_s = -(\gamma_d - \gamma)\vec{v}_s \cdot \nabla Z_s \tag{3}$$

这一项的变化将引起地面位温的局地变化, 从而引起地面气压场和风场的变化。经过一段时间的积分调整,  $\vec{v}_s, P_s, \theta_s$  将达到相互适应的状态, 这时的风场就是受地形强迫的、包括天气尺度和中尺度特征的风场。

在强背景场(见图 1b)下, 由于天气尺度的位温梯度较大, 所以文献[2]中(4)式右端第一项为

$$-\vec{v}_s \cdot \nabla \theta_s = -\vec{v}_s \cdot \nabla \theta_0 - (\gamma_d - \gamma)\vec{v}_s \cdot \nabla Z_s \tag{4}$$

上式右端第一项为背景场的位温平流项, 它的变化应该引起天气尺度位温场的局地变化, 作为反映中尺度地形作用的 Danard 模式, 含有天气尺度位温平流项是不合理的。正是因为这一项的存在, 使得 Danard 模式在强背景场下不能适用。

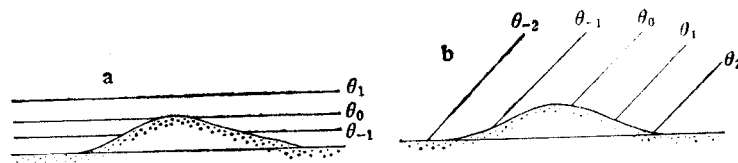


图 1 弱(a)、强(b)背景场下位温分布示意图

Fig. 1 Potential temperature distributions under weak (a) and strong (b) background  $\theta_{-2}, \theta_{-1}, \theta_0, \theta_1, \theta_2$  为等位温线数值。

以下运用尺度分离方法, 对原模式进行改进, 使之适用于强背景场的情况。

### 3. 改进的 Danard 模式

为了描述强背景场下地形对风场的影响, 将各物理量场看作不受地形影响的背景场

和仅受地形影响的扰动场两部分之和。根据两种不同尺度的物理量的特征，将两种尺度的运动分开。

$$\text{令: } \alpha = \bar{\alpha} + \tilde{\alpha} \quad (5)$$

式中,  $\alpha$  表示  $P_s, T_s, \theta_s, \vec{v}_s$  等任一物理量, 上标“—”表示不受地形影响的背景场, “~”表示仅由地形引起的扰动场。应该指出, 除  $\tilde{v}_s$  以外, 各扰动量都比背景场的量小一个以上的量级, 即  $\tilde{\alpha}/\bar{\alpha} \ll 1$ 。

将(5)式代入原模式方程组<sup>[2]</sup>中, 得

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \bar{\theta}_s}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{\theta}_s}{\partial t} = -(\bar{\vec{v}}_s + \tilde{\vec{v}}_s) \cdot (\nabla \bar{\theta}_s + \nabla \tilde{\theta}_s) + K_t \nabla^2 \tilde{\theta}_s + Q \end{array} \right. \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial t} [\ln(\bar{P}_s + \tilde{P}_s)] = -\frac{gH}{2R(\bar{\theta}_s + \tilde{\theta}_s)(\bar{T}_s + \tilde{T}_s)} \left( \frac{\partial \bar{\theta}_s}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{\theta}_s}{\partial t} \right) \end{array} \right. \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\vec{v}}_s + \tilde{\vec{v}}_s) = -(\bar{\vec{v}}_s + \tilde{\vec{v}}_s) \cdot \nabla (\bar{\vec{v}}_s + \tilde{\vec{v}}_s) \\ \quad - [g\nabla Z_s + R(\bar{T}_s + \tilde{T}_s)\nabla \ln(\bar{P}_s + \tilde{P}_s)] \\ \quad - f\vec{K} \times (\bar{\vec{v}}_s + \tilde{\vec{v}}_s) + \bar{\vec{F}} + \tilde{\vec{F}} + K_m \nabla^2 \tilde{\vec{v}}_s \end{array} \right. \quad (8)$$

注意:  $\ln(\bar{P}_s + \tilde{P}_s) = \ln \bar{P}_s (1 + \tilde{P}_s/\bar{P}_s) \approx \ln \bar{P}_s + \tilde{P}_s/\bar{P}_s$

$$\frac{1}{(\bar{\theta}_s + \tilde{\theta}_s)} \cdot \frac{1}{(\bar{T}_s + \tilde{T}_s)} \approx \frac{1}{\bar{\theta}_s \bar{T}_s}$$

将以上两个关系式代入方程组(6)–(8), 忽略高阶小量, 将背景场和扰动场分离, 得以下两个方程组:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \bar{\theta}_s}{\partial t} = -\bar{\vec{v}}_s \cdot \nabla \bar{\theta}_s \end{array} \right. \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \ln \bar{P}_s}{\partial t} = -\frac{gH}{2R\bar{\theta}_s \bar{T}_s} \frac{\partial \bar{\theta}_s}{\partial t} \end{array} \right. \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \bar{\vec{v}}_s}{\partial t} = -\bar{\vec{v}}_s \cdot \nabla \bar{\vec{v}}_s - [g\nabla Z_s + R\bar{T}_s \nabla \ln \bar{P}_s] - f\vec{K} \times \bar{\vec{v}}_s + \bar{\vec{F}} \end{array} \right. \quad (11)$$

和

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \tilde{\theta}_s}{\partial t} = -(\bar{\vec{v}}_s + \tilde{\vec{v}}_s) \cdot \nabla \tilde{\theta}_s + K_t \nabla^2 \tilde{\theta}_s + Q \end{array} \right. \quad (12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\tilde{P}_s}{\bar{P}_s} \right) = -\frac{gH}{2R\bar{\theta}_s \bar{T}_s} \frac{\partial \tilde{\theta}_s}{\partial t} \end{array} \right. \quad (13)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \tilde{\vec{v}}_s}{\partial t} = -(\bar{\vec{v}}_s + \tilde{\vec{v}}_s) \cdot \nabla \tilde{\vec{v}}_s - R\bar{T}_s \nabla \left( \frac{\tilde{P}_s}{\bar{P}_s} \right) - f\vec{K} \times \tilde{\vec{v}}_s + \tilde{\vec{F}} + K_m \nabla^2 \tilde{\vec{v}}_s \end{array} \right. \quad (14)$$

式中,  $\bar{\vec{F}} = -\frac{\sqrt{2}C|\bar{\vec{v}}_s|}{H} \bar{\vec{v}}_s$  和  $\tilde{\vec{F}} = -\frac{\sqrt{2}C|\tilde{\vec{v}}_s|}{H} \tilde{\vec{v}}_s$  分别为背景场和扰动场的摩擦力参数化形式,  $C$  为与拖曳系数有关的系数。

方程组(9)–(11)只含背景场的量, 可以看作背景场的预报方程, 对于诊断问题它是无意义的, 在此不予考虑。方程组(12)–(14)为扰动量的控制方程组, 给定适当的初值, 仍采用原模式的基本思想, 积分调整到定常状态, 即得到给定背景场下的扰动场。将背景

风场和扰动风场相加,就得到受地形影响的风场。

作为背景场的量,  $\bar{V}_s, \bar{P}_s, \bar{T}_s$  和  $\bar{\theta}_s$  在扰动量的方程组(12)–(14)中为已知量。其中  $\bar{P}_s$  和  $\bar{T}_s$  为观测值,  $\bar{\theta}_s$  由  $\bar{P}_s$  和  $\bar{T}_s$  计算得出,  $\bar{V}_s$  可以由求解气压梯度力、摩擦力和科氏力三者的平衡关系得到。下面给出扰动方程组的初始条件。

(1)  $\tilde{P}_s, \tilde{V}_s = 0$ 。

(2) 初始  $\tilde{\theta}_s$  场由  $\theta_s$  场分离出来,它仅与地形有关,由前述讨论可知,  $\tilde{\theta}_s$  的初值应是(2)式右端第二项,即:  $\tilde{\theta}_s = (\gamma_d - \gamma)Z_{so}$ 。

## 二、数值实验

应用改进的 Danard 模式,采用数值方法,计算山东半岛地形对风场的影响。所采用的差分格式及边界条件与原模式相同,初始条件如上所述,计算范围为  $119.5\text{--}122.5^\circ\text{E}$ ,  $36.5\text{--}38.5^\circ\text{N}$ , 网格距为  $\frac{1}{8}$  纬(经)距,时间步长取为  $180\text{s}$ 。

本文计算范围内的地形是经过平滑的,如图 2 所示。这样,地形对风场的影响只反映在中尺度上,而小的地形对风场的扰动被忽略。

为了说明数值模式的合理性,构造一均匀的背景场,如图 3a。风速为  $12.4\text{m/s}$ , 风向为北。在计算  $\tilde{\theta}_s$  初值时,取大气直减率  $\gamma$  为典型值  $0.6 \times 10^{-2}\text{C/m}$ 。积分调整以后的风场如图 3b。从图 3b 可以看出,地形对风场的转向作用是明显的,而且在迎风坡受阻风速减小和背风坡风速增加也有明显的体现。

修改以后的模式可以适用于强冷空气过程的地面风场的诊断。表 2 为 1980 年 4 月 5 日 08 时和 1986 年 12 月 18 日 08 时两个时刻的龙口和烟台两站计算结果与实测值的比较。其中结果 1 为根据实测海平面气压场,求解气压梯度力、科氏力、摩擦力之间的平

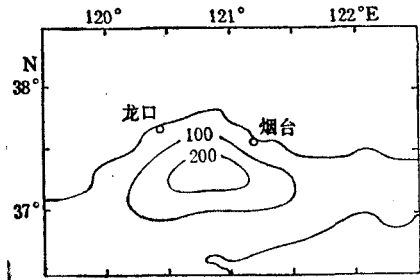


图 2 计算范围内的地形图  
Fig. 2 Topography map of the model area  
图中曲线为地形等高线,单位: m。

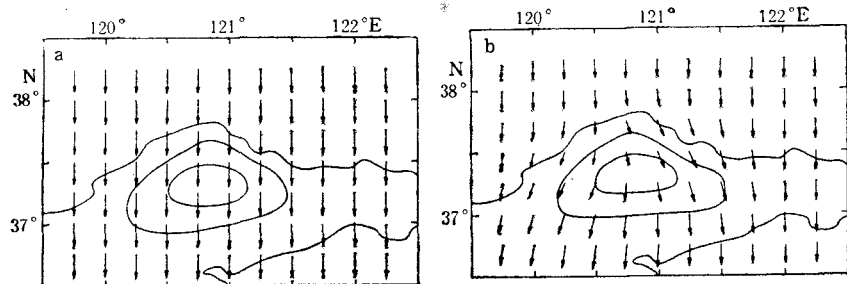


图 3 理想均匀风场 ( $V = 12.4\text{m/s}$ ) (a) 和受地形影响的理想风场 ( $V_{\text{max}} = 15.9\text{m/s}$ ) (b)  
Fig. 3 Idealized wind field (a) and Model result under background wind field (b)

图中箭头方向为风的方向。

衡关系而得；结果 2 为在上述背景场下应用修改以后的模式经过积分调整的结果。在计算中，取地形影响高度  $H$  为 1500m；拖曳系数  $C_D$  在海上取  $1.0 \times 10^{-3}$ 、陆上取  $1.4 \times 10^{-2}$ ；自由大气温度直减率  $\gamma$  用大连站 700hPa 和 850hPa 的高度和温度实测值算出，上述两个时刻的  $\gamma$  值分别为  $0.3 \times 10^{-2} \text{°C/m}$  和  $0.5 \times 10^{-2} \text{°C/m}$ 。从表 2 可以看出，考虑地形影响的结果比未考虑地形影响的结果更接近于实测值。

表 2 考虑与不考虑地形结果比较

Tab. 2 Comparison between calculated winds with and without topographical effect

实 例		1980.4.5.08		1986.12.18.08	
		风速 (m/s)	风向	风速 (m/s)	风向
龙 口	实测值	9.7	NE	6.3	NNE
	结果 1	11.4	34°	9.8	356°
	结果 2	10.2	47°	6.5	2°
烟 台	实测值	7.8	NNE	7.7	NNW
	结果 1	10.7	35°	8.6	7°
	结果 2	9.2	20°	8.5	356°

结果 1 为未考虑地形之结果；结果 2 为考虑地形之结果。

此外，还计算了 1980.4.5.08:00—6.08:00, 1985.10.16.08:00—17.08:00, 1986.12.18.08:00—19.14:00 三个冷空气过程中 02:00, 08:00, 14:00, 20:00 时的风场。每小时一次的风场由上述 4 个时刻的风场通过时间线性内插得出，并将龙口和烟台两站计算的逐时风与实测风进行了比较。结果(表略)表明，考虑地形影响后的过程，平均风向、风速误差均小于未考虑地形影响的平均风向、风速误差。

### 三、讨论与结语

1. 就描述地形效应来说，改进后的 Danard 模式能在强背景场下应用，克服了原模式的局限性。但改进后的模式与原模式在描述地形效应方面的物理机制是一样的。所以从这一点可以说本文对 Danard 模式的改进，是一种方法上的改进。通过对实际天气过程的模拟结果可以看到，对模式的改进是成功的。

2. 必须指出的是，原模式和改进后的模式虽然是以原始方程组的形式表示，但它不是预报模式，而是类似于数值预报模式中形成初值时的动力调整模式。

3. 模式所反映的地形对风的转向作用是在大气层结稳定条件下实现的，层结越稳定，地形转向作用越显著。

4. 本模式可以嵌套在预报模式中，作短期中尺度风场的预报，只要取得预报模式的大尺度背景场和一些必要的参数，就可随时作出诊断。

### 参 考 文 献

- [1] Clifford, F. M. and D. P. Dempsey, 1985. A one-level, mesoscale model for diagnosing surface winds in mountainous and coastal regions. *Mon. Wea. Rev.* **113**: 1211—1227.  
 [2] Danard, M., 1977. A simple model for mesoscale effects of topography on surface winds. *Mon. Wea.*

*Rev.* 105: 572—580.

- [ 3 ] Danard, M., 1978. A model for computing small-scale wind variations over water surface. *Boundary Layer Meteorology* 14: 35—57.

## NUMERICAL DIAGNOSE OF TOPOGRAPHICAL EFFECT ON MESO-SCALE WIND

Zhang Shuliang and Zhou Faxiu

(*Ocean University of Qingdao*, 266003)

### ABSTRACT

A one-level, meso-scale diagnosing wind model based on primitive equations designed by Danard can show the characteristics of surface winds in mountainous and coastal regions. But the model results largely depend on large-scale background. In weak large-scale background (little wind, little temperature advection), the model works well. In strong background (often appears in cold surge), the model often runs into computational instability. The analysis of observational wind data (1979—1987) from Longkou and Yantai meteorological stations, which are located at the northwestern and northeastern coast of Shandong Peninsula, shows that the topography has also marked effects on wind field during cold surge. This paper is to prove that Danard model cannot be used in the latter case if not being improved. The model is improved by expressing the variables in two parts, one is background field which is known and the other is meso-scale field produced only by topographic disturbance, and a new model equations for meso-scale variables are obtained by using scale-splitting method. Application of the new model to several weather processes shows that the improvement to the original Danard model is successful.