

地面风诊断模式的数值试验和模拟

李慧武 蔡菊珍 简根梅

(浙江省气象科学研究所, 杭州 310021)

提 要 本文用一个简化的一层地面风数值诊断模式, 在台湾岛及海峡地区对6个个例进行了数值试验。结果表明, 假定的地形影响层较厚时, 地面流场中台湾岛周围的流线更趋于与地形线平行, 地形效应更明显; 地表粗糙度增大时, 地面风向逆时针偏转, 风速减小; 考虑非绝热加热后, 地面流场中分流现象明显减弱, 并在山脊附近形成辐合线, 同时岛后辐合减弱甚至消失; 而地形高度的动力作用则是分流、绕流和岛后辐合等现象的内在根源。在上述研究基础上, 对同样个例进行了数值模拟。结果在一定程度上反映了实际风场。

关键词 地面风场 诊断模式 数值试验 数值模拟

1 引言

复杂地形的动力和热力作用以及由此产生的中尺度环流经常会强烈地影响甚至控制局地天气的变化。因此, 考虑局地地形的动力和热力特征, 比较精确地模拟近地层大气活动的“细微结构”, 对提高短时、短期天气预报能力和加强环境保护等方面都具有重要的意义。Danard^[1]、Mass 和 Dempsey^[2]提出和修改了一个简化模式, 取得了较好的效果。本文将 Mass 和 Dempsey 的修改模式(简称 MD 模式)用于台湾岛及海峡地区, 作了适当的改进, 并对6个个例进行了数值试验和数值模拟。

2 模式简介

MD 模式是一层 σ 坐标原始方程模式, 其垂直温度结构如图1, 假定地面上空存在一个厚度为 H 的地形影响层和一个无扰动层。

模式基本方程是地面($\sigma=1$)上的动量方程和热量方程, 并考虑静力平衡假定, 即

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{V}_S}{\partial t} = & -\vec{V}_S \cdot \nabla_\sigma \vec{V}_S - f\vec{k} \times \vec{V}_S + \vec{F}_S + K_M \nabla_\sigma^2 \vec{V}_S - g\{[(e_1 - H)/T_H] \nabla_\sigma T_S \\ & - [e_1 + (e_2/\gamma T_R) \times (T_H - T_R)] \nabla_\sigma T_R + (\gamma e_1 - e_2 + 1) \nabla_\sigma z_S \\ & + (e_2 - \gamma e_1) \nabla_\sigma z_R\}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_S}{\partial t} = & -\vec{V}_S \cdot \nabla'_\sigma T_S - (A_2/A_1) \vec{V}_S \cdot \nabla_\sigma T_H - (A_3/A_1) \vec{V}_S \cdot \nabla_\sigma T_R \\ & + Q/(A_1 c_p) + K_T A_1^{-1} \nabla_H^2 T, \end{aligned} \quad (2)$$

式中下标 S 代表地面, R 代表参考等压面, H 代表地形影响层顶, 其它参见文献[2]。

方程中参考面温度高度场及自由大气温度直减率 γ 是已知的, 初始地面温度通过假定 $\gamma_2 = \gamma$ 由参考面温度求出, 初始地面风由假定地面气压梯度力、科里奥利力和摩擦力平衡来确定。

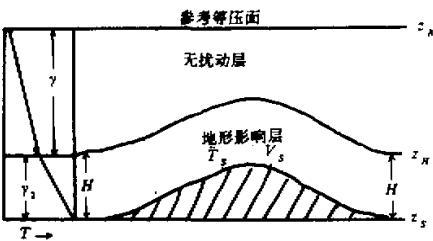


图1 模式的垂直温度结构示意图

图中 γ 是自由大气温度直减率,
 $\gamma_2 = (T_S - T_H) / H$ 是地形影响层
内的大气温度直减率, 参考等压面
就是“无扰动层”顶, 一般取 850 或 700 hPa

3 模式的数值方案

数值试验及模拟的积分区域取 45×45 个格点, 格距为 15 km, 大致在 $21^{\circ}\text{N} \sim 27^{\circ}\text{N}$, $118^{\circ}\text{E} \sim 125^{\circ}\text{E}$ 范围内。时间步长取 180 s。地形高度由地形图上读取, 并适当平滑。

模式的水平变量分布采用 Arakawa“C”型跳网格^[4]。建立差分方程时, 所有线性项采用中央差分格式, 扩散项采用九点差分格式, 其余非线性项使用 Gerrity 提出的方案^[6]。时间积分则采用改良的第二序 Adams–Bashforch 方案^[4]。

4 模式的数值试验及初步分析

数值试验个例从 1991 年历史资料中选取, 共有 6 个(表 1)。数值试验不考虑非绝热加热率将模式运行到常定状态(即 $\partial u_S / \partial t, \partial v_S / \partial t < 10^{-6}$)。考虑到 700 hPa 等压面高度更接近台湾岛附近的地形高度, 本文取 700 hPa 等压面为参考层顶。

表1 数值试验个例一览表

个例编号	1	2	3	4	5	6
时间(北京时)	07-05-08:00	08-21-08:00	08-27-08:00	09-04-08:00	09-17-08:00	09-27-08:00
参考等压面流场	SW	NW	NE	SE	E	WNW

4.1 地形影响层厚度

为了解地形影响层厚度对模式风场的影响, 我们取不同的地形影响层厚度 ($H=1.0、1.5、2.0、2.5\text{ km}$) 进行对比试验。

分析地面流线图(图略)可知, $H \leq 1.5\text{ km}$ 时, 经过台湾岛的流线有一定弯曲, $H \geq 2\text{ km}$ 时出现明显的地形分流、绕流现象, 岛后海面上形成风向辐合, 且随 H 值增大, 台湾岛附近流线更接近与地形线平行。图 2 是 6 个个例 $H=2.5\text{ km}$ 对 $H=2\text{ km}$ 的地面风向差分布图和 $H=2\text{ km}$ 的地面风场, 由图可见, 对于大部分个例在台湾岛迎风面分流点的左侧有风向差的负值中心, 右侧为正值中心, 说明随着 H 值的增大左侧地面风

向逆时针偏转, 右侧顺时针偏转, 从而岛前地形阻挡作用引起的分流现象更明显; 同时气流绕过岛之后, 在背风面汇合点左侧有风向差的正值中心, 右侧为负值中心, 且大部分个例风向差零线与岛后辐合线对应。说明左侧地面风向顺转, 右侧逆转, 从而绕流现象、岛后风向辐合更加显著。



图 2 取 $H = 2.0 \text{ km}$ 时常定状态地面风场及 H 值增大时风向差分布图
实线为等风向差线, 粗线段为辐合线, 点划线为地形廓线, 箭头为计算格点风
(a), (b), (c), (d), (e), (f) 分别对应表 1 的个例 1, 2, 3, 4, 5, 6

4.2 地表粗糙度

模式中地面摩擦力采用下式进行参数化:

$$\bar{F}_s = -\frac{acC_d \bar{V}_s |\bar{V}_s|}{H}, \quad (3)$$

式中 a 是日夜差别订正系数, c 是大气稳定度因子的修正系数, C_d 是拖曳系数。

文献[2]中, 拖曳系数取常数。本文考虑地表粗糙度的作用, 拖曳系数由下式求得:

$$C_d = [\kappa / \ln(z/z_0)]^2, \quad (4)$$

其中 z_0 是地表粗糙度, κ 为 von Karman 常数, 取 0.4, z 是标准风速仪高度, $z = 10 \text{ m}$ 。

图 3 是取海面粗糙度为 0.0001 m , 陆面分别为 0.05 和 0.1 m 时, 模式计算风场的地面风向差和风速差分布图。由图可见, 在陆面上风向风速差均有负中心存在, 在海面上风向风速差较小。这说明当陆面粗糙度增大时, 陆面风向逆转, 风速减小, 海面风向风速基本不变。同样, 陆面粗糙度不变, 海面粗糙度增大时(图略), 海面风向逆转, 风

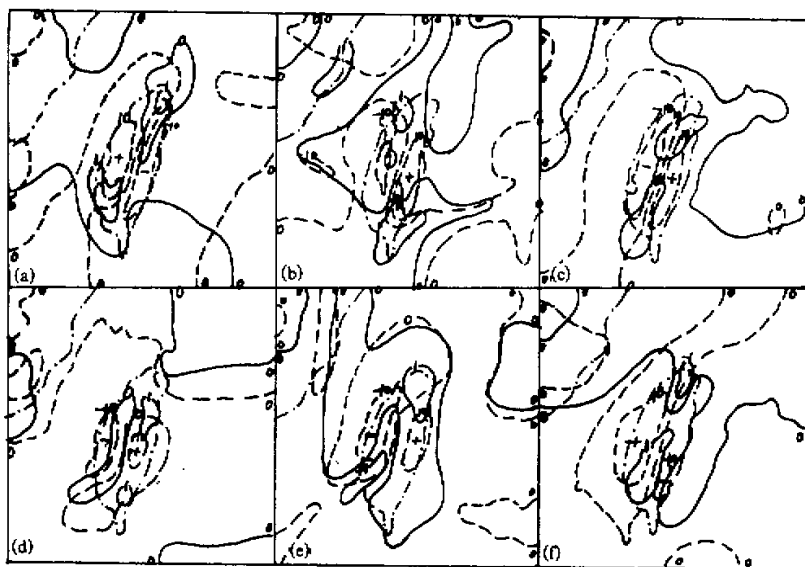


图3 陆面粗糙度增大时计算风场的风向风速差分布图

实线为等风速差线, 虚线为等风向差线, 其余同图2

速减小, 陆面变化较小。同时, 我们还发现当海面和陆面粗糙度相等时, 海面风速普遍大于陆面风速, 这种差别可能是地形阻挡作用而造成的。

4.3 地形高度

从前面讨论已看到地形对地面风场有一定的动力作用, 为进一步研究这种作用, 我们将地形高度压缩 0.5 倍和取均一高度进行对比试验。结果表明, 当地形高度压缩后, 台湾岛附近的分流、绕流及辐合区开始减弱, 大部分地区风速增大, 陆地上, 尤其是迎风面, 风速增大较多。而取均一高度时, 由于没有地形起伏, 台湾岛附近的分流、绕流及辐合区完全消失, 岛上的风向变得较为一致, 海陆风速差异也减小。因此, 地形的动力作用是台湾岛附近产生分流、绕流及辐合区等现象的内在根源。

4.4 非绝热加热率

非绝热加热是一个非常复杂的物理过程, 文献[2]的非绝热加热率系数仅考虑了日变化, 没有考虑空间分布特征。本文参考文献[7]用下式对非绝热加热率进行参数化:

$$Q = \begin{cases} A_h [\cos\alpha\cos z + \sin\alpha\sin z\cos(\beta - \varphi)], & (\text{白天}) \\ A_c < 0, & (\text{夜间}) \end{cases} \quad (5)$$

式中 α 为地形坡度, φ 为地形坡度方位角, β 为太阳方位角, z 为天顶角, A_h 和 A_c 分别为最大加热率和最大冷却率。

由(5)式计算的非绝热加热率分布图(略)可见, 上午非绝热加热率高值区位于台湾岛的东部, 低值区位于西部; 下午正好相反。各时刻高低中心与台湾岛地形高度中心对

应, 分别在山脊的东西两侧。此外, 各地非绝热加热率呈周期变化, 正午时值最大。因此, 该方案在一定程度上反映了复杂地形附近非绝热加热率日变化和空间分布的特征。

由图 4 可见, 台湾岛山脊两侧分别有风向差正负中心。结合风场可知, 地面风向朝陆地偏转, 结果造成流线穿越地形线, 岛前的分流现象减弱, 岛后辐合减弱或消失, 但在岛上形成与山脊对应的地形辐合线。此外, 台湾岛迎风面有正中心, 风速增大, 背风面则有负值, 风速有所减小。

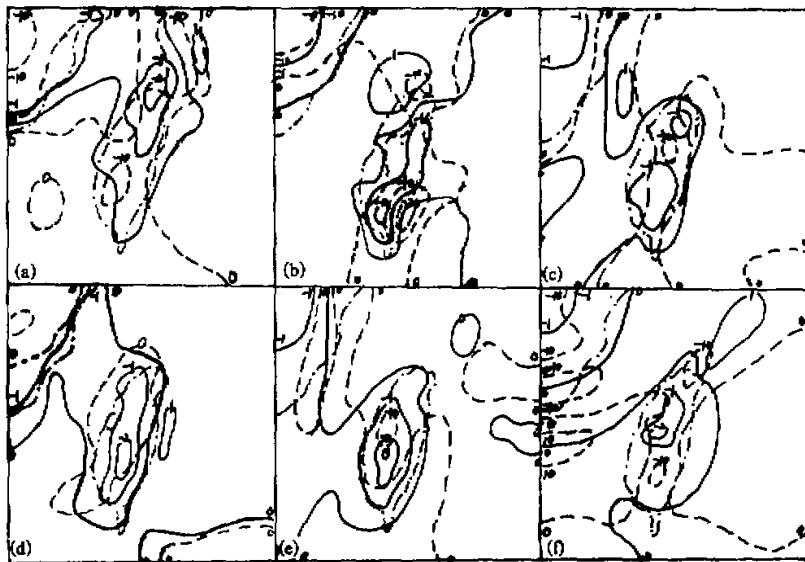


图 4 有无非绝热项计算风场的风向风速差分布图

说明同图 3

5 模式的数值模拟及效果

数值模拟首先不考虑非绝热加热将模式运行到常定状态, 其结果作为“中性”时刻(日出、日落)的风温场, 然后加入非绝热加热项, 积分到模拟时刻。数值模拟的主要参数分别为 $H=2\text{ km}$, $z_0=0.001\text{ m}$ (海面)、 0.5 m (陆面), K_M , $K_T=3.4\times 10^4$ 。

图 5 是各个例的数值模拟风场和实况风。由图可见, 模拟风场中, 气流经过台湾岛时, 出现明显偏转, 从而引起了台湾岛周围的分流和绕流现象, 并在岛上形成了一条与山脊相对应的地形辐合线, 当气流为 SW 或 NE 向时(个例 1、3、5), 海峡地区有明显的狭管效应, 与实际风在总体上基本一致。把模拟风内插到如图各站进行误差统计分析可知, 各站的模拟风对实际风的平均绝对风向误差除个例 3 达 38 度外, 其它各例均小于 25 度, 平均绝对风速误差在 1.3 m/s 内。因此, 模拟结果在一定程度上反映了实际风场。

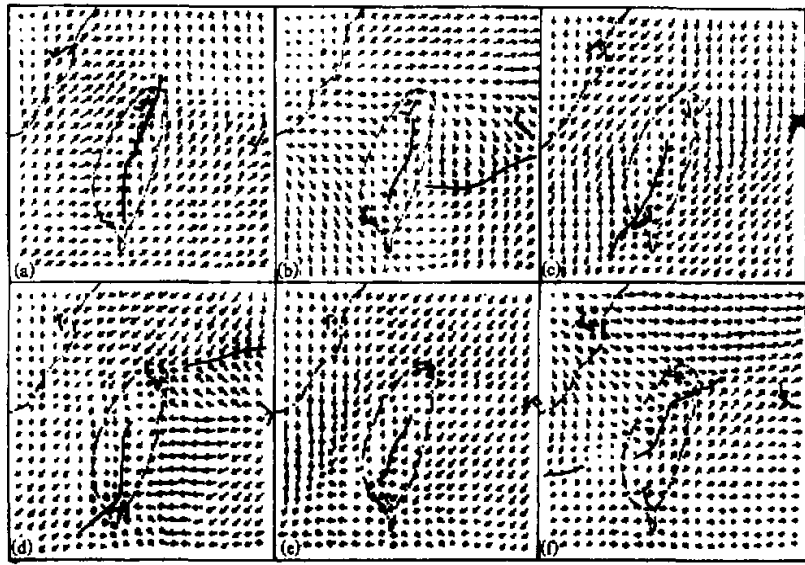


图 5 模拟风场和实际地面风

风向风速符号为实际风, 箭头为模拟格点风, 其余同图 2

6 结论

(1) 地形影响层厚度加大后, 台湾岛周围的流线更趋于与地形线平行, 地形阻挡引起的分流、绕流现象更明显, 并形成岛后辐合线。

(2) 地表粗糙度增大后, 地面风向将逆时针偏转, 风速减小。

(3) 地形的动力作用是分流、绕流、狭管效应以及山后辐合等现象的内在根源。

(4) 考虑非绝热加热影响后, 岛前的分流以及岛后的辐合现象减弱消失, 气流穿越地形线朝向山脊汇集, 形成相应的地形辐合线。

(5) MD 模式能够较好地模拟出台湾岛附近的分流、绕流、狭管效应以及地形辐合线等现象, 风向风速与实际情况基本一致, 在一定程度上反映了地面风场。

参 考 文 献

- 1 Danard, M., 1977, A simple model for mesoscale effects of topography on surface wind, *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 572-580.
- 2 Mass, C., F., 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.
- 3 Cressman, G. P., 1959, An operative objective analysis scheme, *Mon. Wea. Rev.*, **87**, 367-374.
- 4 Mesinger, F., and A. Arakawa, 1976, Numerical methods used in atmospheric models, GARP Publ. Ser. Vol. I, No. 17, 64pp.

- 5 Danard, M., 1971. Numerical study of the effects of longwave radiation and surface friction on cyclone development, *Mon. Wea. Rev.*, **99**, 831-839.
- 6 Gerrity, J.P., R. D. McPherson and P. D. Polger, 1972, On the efficient reduction of truncation errors in numerical prediction models, *Mon. Wea. Rev.*, **100**, 637-643.
- 7 张杏珍、杨长新译, 1990, 中尺度气象模拟, 气象出版社.

Numerical Experiments and Modeling by a Diagnostic Model of Surface Winds

Li Huiwu, Cai Juzhen and Jian Genmei

(Zhejiang Meteorological Institute, Hangzhou 310021)

Abstract In this paper, the numerical experiments by a one-level model of surface winds have been made for the Taiwan Strait area. The effect of topographic influence layer, surface roughness, topographic height and diabatic heating on the results has been studied. Based on the above studies, a numerical model is created. It is suggested that the model is better to simulate the surface winds field in the Taiwan strait area, and the selection of appropriate parameter value is helpful to modify modeling results.

Key words one-level diagnostic model surface wind field numerical experiment numerical modeling