

一个中尺度模式中高分辨边界层的参数化

高会旺* 黄美元 姚小红

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要 建立一个高分辨大气边界层模式。然后, 把该模式与一个中尺度数值预报模式进行耦合并把模式计算结果与实测结果进行了对比。结果表明, 该耦合模式能够模拟出大气边界层的流场、温度场和气压场的特征。

关键词 大气边界层 高分辨边界层模式 中尺度预报模式

1 引言

从影响中尺度大气运动的一些主要物理过程考虑, 最值得注意的是湿热力-动力过程、行星边界层过程、辐射加热过程以及摩擦和地形的影响。行星边界层是大气中的一个主要的能量源和动量汇, 它在自由大气和地表之间的动量、热量和水汽的交换中起着极为重要的作用, 对天气系统的演变有很大的影响。因此, 在数值预报模式中要很好地描述这个过程。由于边界层中发生的物理过程相对于天气尺度的现象是次网格的小尺度过程, 需要通过参数化的方法来联系边界层和自由大气之间的相互作用。从垂直分辨率来分, 边界层参数化方案主要有 2 类: 一是简单的整体边界层参数化 (Bulk Aerodynamic PBL)。这种参数化的特点是把行星边界层看作是由近地层和混合层组成的一个整体, 对于这样一个整体, 必须使近地层过程和混合层能够耦合与匹配。然后, 用这些耦合公式对地面通量的交换系数进行定义和参数化。最后, 再将这些交换系数代入相应的地面通量公式对影响中尺度过程的边界层内的通量进行计算。另一类是高分辨率的边界层参数化 (Blackadar PBL)。即用比较多的层次对边界层进行分层, 在每层上给出边界层内平均量的预报方程, 并对其中的高阶项进行参数化。这种方案有利于描述边界层内的风、温、湿结构, 对空气污染和大气扩散的研究非常重要。中尺度数值预报模式 LASG-REM^[1]中采用了整体边界层参数化方法。这种方案计算简单, 然而对描述发生在边界层内的扩散过程就造成了困难, 因为无法给出边界层内合理的气象场分布, 为把该模式用于研究我国的污染物输送和扩散问题, 在 LASG-REM 中引入高分辨率的边界层模式是非常必要的。我们把 Blackdar^[2], Zhang 和 Anthes^[3]设计并发展的高分辨边界层模式加以简化和改造, 使其适合 LASG-REM 的需要, 并实现了与 LASG-REM 的耦合。

2 中尺度模式介绍

LASG-REM 是宇如聪博士设计的考虑陡峭地形的 E 网格有限区域数值预报模

1997-05-09 收到, 1997-06-18 收到修改稿

* 现为青岛海洋大学博士后

式, 其基本方程组以 IAP GCM 的动力框架为基础。下面对模式做简单介绍。

为考虑陡峭地形, 模式的垂直坐标选用了 η 坐标。 η 坐标保留了 σ 坐标具有简单下边界条件的特点, 同时避免了 σ 坐标在陡峭地形情况下 σ 等值面过于倾斜造成的气压梯度力的计算不准确的缺点。 η 坐标把地形表示为三维阶梯状, 在模式内部形成地形侧边界。

$$\eta = \sigma \eta_s, \quad (1)$$

$$\eta_s = \frac{p_{rf}(z_s) - p_t}{p_{rf}(z_b) - p_t}, \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{p - p_t}{p_s - p_t}, \quad (3)$$

其中, $p_{rf}(z)$ 是标准层结大气在 z 高度处的气压, z_s 是模式的地形高度, z_b 是用来构造坐标面的平缓地形, p_t 、 p_s 和 p 分别表示模式层顶气压, 地面气压和气压。可见, 当 $z_s = z_b$ 时, η 坐标退化成 σ 坐标。模式中选用 E 网格作为变量的水平分布形式, H 和 u , v 交错分布。对 E 网格的两个子 C 网格来说, 它水平分辨率是 $1^\circ \times 1^\circ$, 实际 E 网格模式的水平分辨率约为 80 km。在垂直方向上, 模式顶取为 100 hPa, 即只考虑对流层, 从海平面到模式层顶按 η 坐标值等分为 8 层。模式变量在垂直方向上的分布形式如图 1。

模式在物理过程的处理上考虑了对短期天气过程有重要意义的物理过程, 且考虑到目前国内计算机水平的限制, 选取并设计了相对计算量小, 但物理图像清楚的方案。模式的物理过程主要包括: (1) 大尺度凝结降水; (2) 对流调整及对流降水; (3) 水平扩散和垂直通量输送; (4) 地面辐射收支和边界层参数化。在处理大尺度降水时, 假定出现过饱和状态则发生水汽凝结, 并调整这种过饱和状态到饱和状态。降水只发生在模式的最低层。对流降水选取了 Betts^[4] 基于 GATE 试验资料的分析, 提出的一种新的对流调整方案, 其基本思想是: 在对流区存在着特征温湿结构, 当判断有对流活动时, 对流调整使得大气的温湿结构向着这种特征结构调整。LASG-REM 在边界层过程的描述上选用了总体参数化方案。

模式对青藏高原背风气旋的发生发展^[1]和著名的“雅安天漏”^[5]都进行了成功的数值模拟。

3 高分辨边界层模式

一些中尺度和大尺度数值模式, 虽然也包括了高分辨边界层, 但对大气边界层的处理和数值模拟方法都比较简单和粗糙, 不论白天还是晚上均采用 K 理论求解边界层方程组, 并且假定边界层中 K 为线性随高度递减。Blackadar^[2,6]的方法则前进了一步, 在近中性和稳定情况下仍采用 K 理论, 但 K 则运用非线性理论与流场、温度场联系起来。在白天根据自由对流特征建立的传输模式描写不同高度大气间的交换过程, 由此得到自由对流时的动量、热量、水汽含量的方程组, 从物理上讲更切合实际过程。Blackadar 方法的另一特点是用简单的土壤薄层模式求解土壤热传导方程, 从而使计算大大简化。我

们根据这一思想, 设计了一个高分辨边界层模式, 模式包含两个子模块, 分别描写夜间边界层和自由对流边界层。模式的垂直结构如图 2。

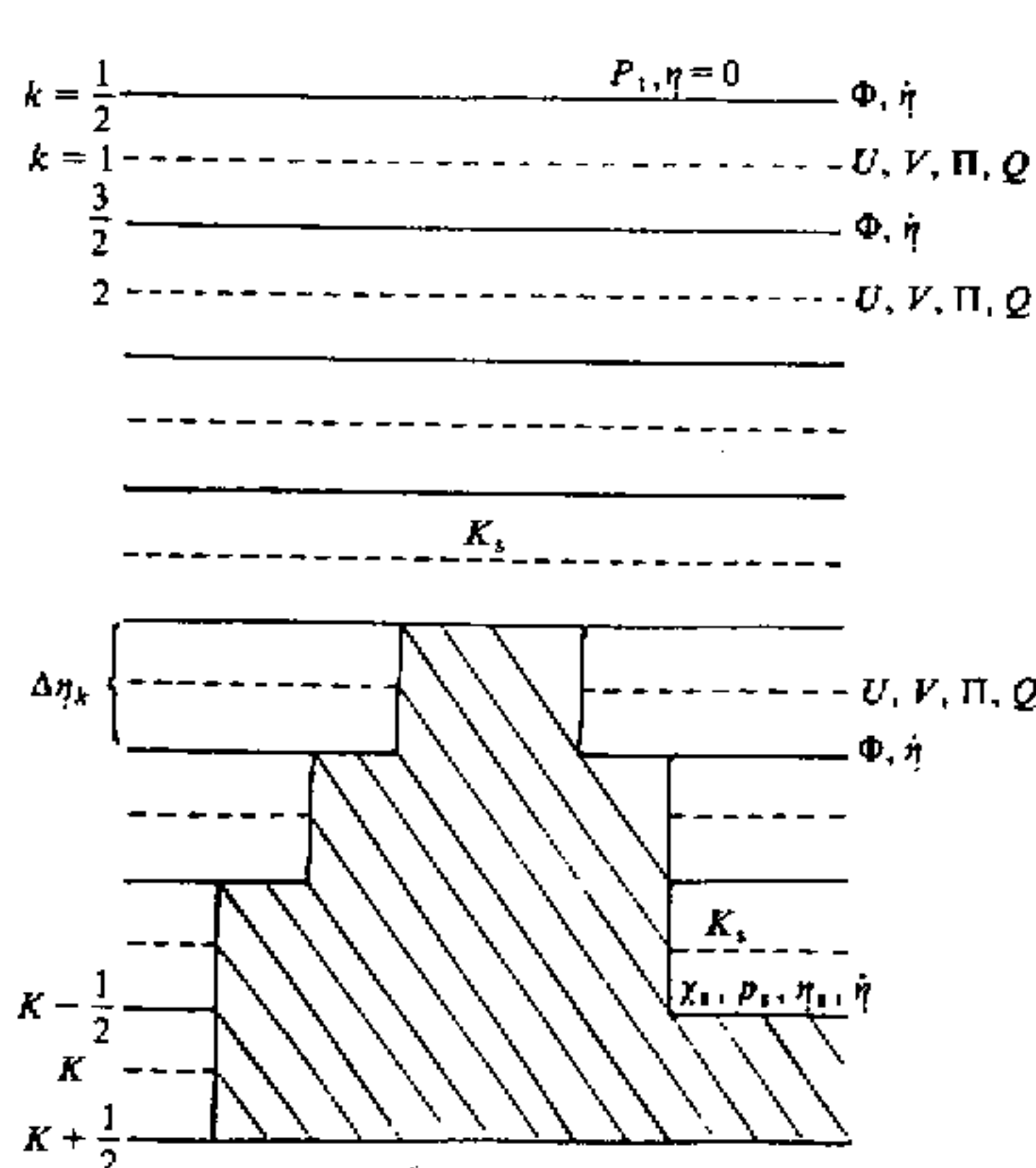


图 1 模式变量在垂直网格上的分布形式

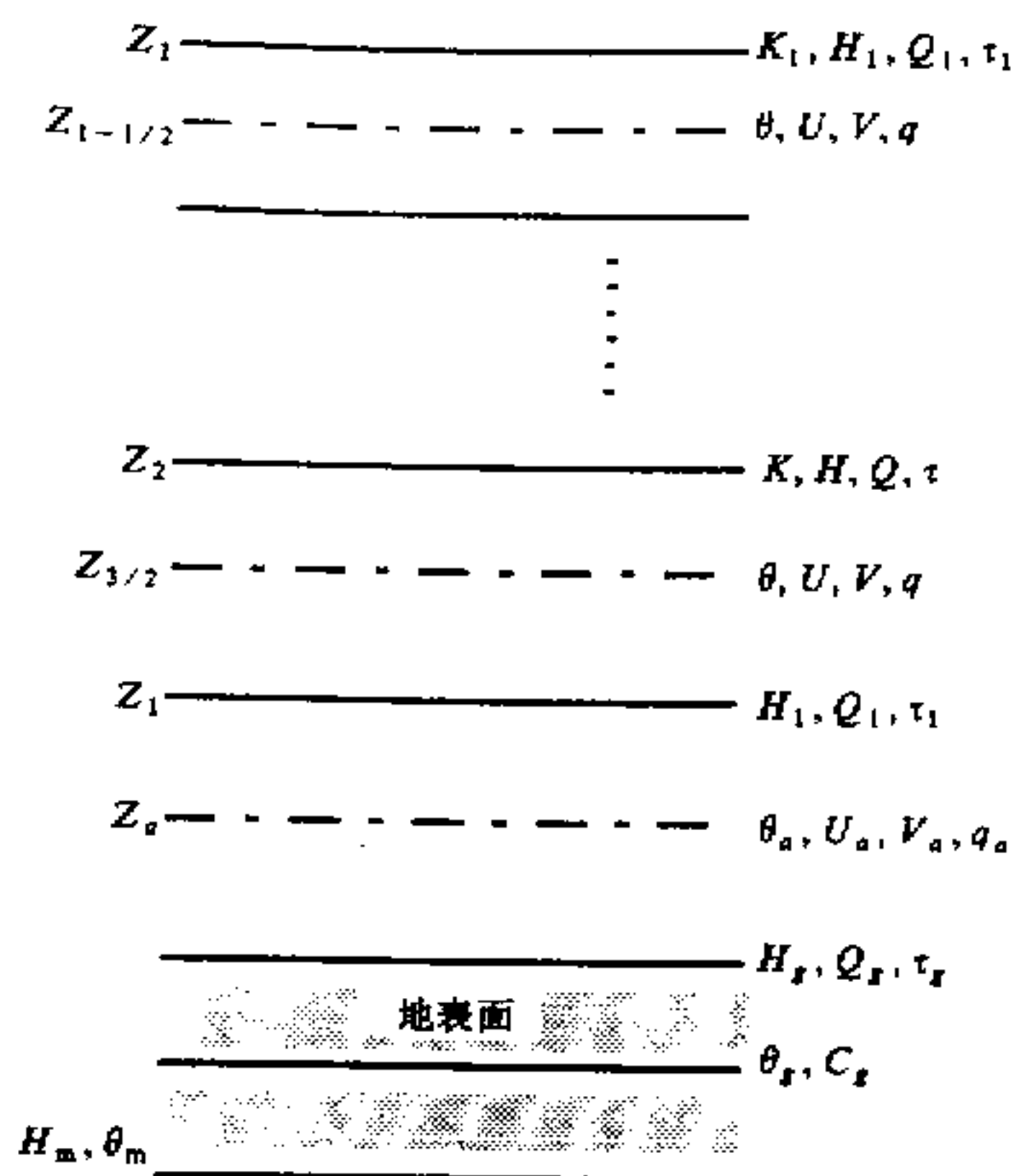


图 2 高分辨边界层的垂直结构

3.1 地温预报

模式对地温的预报采用了地面能量守恒方程:

$$C_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = R_n - H_m - H_s - E, \quad (4)$$

$$H_m = C_g K_m (\theta_g - \theta_m), \quad (5)$$

其中, C_g 是单位面积的地面层的热容量 ($J \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$), R_n 是净辐射, H_m 是由分子热传导作用引起的热量向地下土壤的输送, H_s 是地面向大气的感热输送, E 是地面向大气的潜热输送, K_m 是热量输送系数, θ_g 和 θ_m 分别为地面薄层位温和土壤基层位温。为了简化计算, 我们采用了感热相关法, 假定 H_m 与感热通量 H_s 成正比, 而与土壤的性质无关, 取 $H_m = H_s / 3$ [7]。

3.2 大气边界层分类及有关参数

根据总体理查逊数 Ri_b 和稳定度参数 (h/L) 可将大气边界层分为 4 种情况, 分别称为稳定、机械湍流、强迫对流和自由对流, 其中前 3 类归入夜间边界层模块, 最后一个由自由对流模块来描述。

边界层分类如下:

(1) 稳定 ($Ri_b > 0.2$)

这种类型的边界层, 相当于夜间时段, 表面层非常稳定, 湍流消失, 因此, 一般认为表面层顶处的热通量、水汽通量、应力及 z_a/L 、 ψ_m 、 ψ_b 均为 0。但在 NCAR 的中尺度模式 MM4^[3] 中取

$$\psi_m = \psi_h = -10 \ln(z_a / z_0), \quad (6)$$

$$H_s = \max \left\{ \begin{array}{l} -c_p \rho_a \kappa u_* T_* \\ -25.0 \end{array} \right., \quad (7)$$

其中, z_a 是模式最低层的高度, z_0 是粗糙度, ψ_m 和 ψ_h 分别为关于动量和热量与水汽的无量纲稳定度参数, c_p 为地表热容量, ρ_a 为模式最低层的大气密度, κ 是埃克曼常数, T_* 为地面摩擦温度, u_* 为摩擦速度。我们在模式中也选取了 MM4 中的值。

(2) 弱机械湍流 ($0 \leq Ri_b \leq 0.2$)

此类边界层, 相当于傍晚日落后时段。此时,

$$\psi_m = \psi_h = -5z_a / L, \quad (8)$$

其中

$$\frac{z_a}{L} = \frac{Ri_b}{1.0 - 5Ri_b} \ln(z_a / z_0), \quad (9)$$

$$H_s = -c_p \rho_a \kappa u_* T_*. \quad (10)$$

(3) 强迫对流 ($Ri_b < 0$, $|h/L| \leq 1.5$)

这种边界层属于不稳定情况, 但未达到自由对流阶段, 相当于早晨日出后时段。由不稳定时近地面层公式可求 z_a/L , 但需要迭代求解, 比较复杂, Blackadar 将此弱不稳定状态的强迫对流边界层, 当作准中性处理, 从而简化了计算^[3], 取

$$\psi_m = \psi_h = 0 \quad (11)$$

$$z_a / L = Ri_b \quad (12)$$

$$H_s = -c_p \rho_a \kappa u_* T_*. \quad (13)$$

(4) 自由对流 ($Ri_b < 0$, $|h/L| > 1.5$)

边界层为极不稳定, 相当于中午前后时段, 此时有

$$\psi_m = 0.0954 - 1.86(z_a / L) - 1.07(z_a / L)^2 - 0.249(z_a / L)^3, \quad (14)$$

$$\psi_h = 0.201 - 3.23(z_a / L) - 1.99(z_a / L)^2 - 0.474(z_a / L)^3, \quad (15)$$

$$z_a / L = Ri_b \ln(z_a / z_0).$$

非自由对流边界层和自由对流边界层不但其物理量 ψ_m 、 ψ_h 等的取值不同, 其求解方法也很不同, 这也是把模式分成两个子模式的原因。

3.3 边界层模式求解

表面层变量的预报方程为

$$\frac{\partial \theta_a}{\partial t} = -\frac{H_1 - H_s}{\rho_a c_p z_1}, \quad (17)$$

$$\frac{\partial q_a}{\partial t} = -\frac{E_1 - E_s}{\rho_a z_1}, \quad (18)$$

$$\frac{\partial u_a}{\partial t} = -\frac{\tau_{1,x} - \tau_{s,x}}{\rho_a z_1} + f(v_{a,n} - v_{g,n}), \quad (19)$$

$$\frac{\partial v_a}{\partial t} = -\frac{\tau_{1,y} - \tau_{s,y}}{\rho_a z_1} + f(u_{a,n} - u_{g,n}), \quad (20)$$

其中, 下标 1 表示表面层顶的量, 下标 a 表示表面层内的量, H 为热通量, E 为湿通量, τ 为切应力, z_1 为模式最低层的厚度。

表面层以上各变量的预报采用 K 理论, 用隐式差分方案求出湍流项, 详见文献[3]。

自由对流情况下, Blackadar 建立了对流传输模式方程。自由对流是在强的太阳加热情况下形成的, 在低层大气形成超绝热层, 气块受浮力作用而上升, 在上升过程中, 每个高度上都与周围空气进行热量和水汽交换。然后, 上升的气团冲出上层逆温, 导致混合层的加热, 同时逆温层抬升和冷却。因此, 热量、水汽和动量的交换并不能由局地的梯度决定, 而是由整个混合层的热力结构决定。所以, 这种垂直交换被想象成发生在表面层与其上各层之间, 而并不是像 K 理论假设的那样, 交换仅发生在相邻两层之间。

这种自由对流产生的垂直混合的强度取决于表面层顶的热通量, 也就是太阳对地面的加热强度。分析了大量的观测资料之后, Priestly 导出了表面层顶热通量的经验公式:

$$H_1 = \rho c_p z_1 b (\theta_{a,n-1} - \theta_{3/2,n-1})^{3/2}, \quad (21)$$

b 为常数

$$b = \left(\frac{2g}{27\theta_a} \right)^{1/2} \frac{1}{z_1} [z_1^{-1/3} - (2z_{3/2})^{-1/3}]^{-3/2}. \quad (22)$$

定义单位时间内各层与表面层之间的物质交换系数 $\bar{m}$ 为

$$\bar{m} = -H_1 \left\{ \rho c_p (1 - \varepsilon) \int_{z_1}^{z_m} [\bar{\theta}_a - \bar{\theta}(z)] dz \right\}^{-1}, \quad (23)$$

ε 为夹卷系数, 这里取 $\varepsilon = 0.2$ 。表面层以上各层的热通量定义为

$$H_r = H_1 - \bar{m} \int_{z_1}^{z_K} c_p [\theta_a - \theta(z)] dz. \quad (24)$$

在混合层顶 h 位面上没有通量穿过, 即 $H_h = 0$ 。根据以上定义的物理量, Blackadar 建立了自由对流传模式, 对表面层和混合层进行了不同的处理。

表面层中各预报量由下式计算:

$$\alpha_a^{t+1} = \alpha_a^t + \left(\frac{F_s z_1}{\bar{m} h^2} - \frac{F_s}{\bar{m} h} + \frac{F_1}{\bar{m} h} \right) \times \left[\exp \left(-\frac{\bar{m} h \Delta t}{z_1} \right) - 1 \right] + \frac{F_s \Delta t}{h}, \quad (25)$$

α 表示预报量, F_s 是表面层通量, F_1 是表面层顶的通量, h 为 PBL 层的厚度。

表面层以上各预报量的方程为

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} = \bar{m} (\alpha_a - \alpha_i), \quad \alpha = 0, q_v, q_v, \quad (26)$$

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} = \omega \bar{m} (\alpha_a - \alpha_i) \pm \begin{cases} f(\bar{v} - v_g) & \alpha = u, \\ f(\bar{u} - u_g) & \alpha = v, \end{cases} \quad (27)$$

ω 是权重系数, $\omega = 1 - z/h$ 。

在进行边界层变量预报之前, 首先需计算 Ri_0 和稳定度参数 (h/L), 以便决定边界层的层结稳定度; 然后根据不同状态和稳定度情形, 采取不同的预报方程和求解方法。

4 高分辨参数化方案与中尺度模式的耦合

为了减小计算量, 我们就高分辨边界层模式与 LASG-REM 间的耦合问题作了如下尝试: 把数值预报模式的最低层作为边界层模式的最高层 (平坦地区约为 1000 m), 在此以下非均匀地分为 3 层, 3 个模式面离地面的高度分别约为 30、300、700 m。

为了描述自由大气和边界层之间的相互作用, 在数值预报模式的最低层考虑边界层的影响, 同时, 把自由大气对边界层的作用通过 LASG-REM 的最低层加到边界层各层。设 p_{free} 表示数值预报模式最低层的预报量, p_{PBL} 表示边界层最高层的预报量, 则

$$p_{free,t+1} = p_{free,t} + \frac{\partial p_{PBL}}{\partial t} \Delta t \quad (28)$$

$$p_{PBL,t+1} = p_{PBL,t} + \frac{\partial p_{free}}{\partial t} \Delta t \quad (29)$$

5 结果及分析

利用耦合模式, 做了几个个例的 24 h 预报试验, 模式的模拟区域为 $95^{\circ}\text{E} \sim 125^{\circ}\text{E}$, $20^{\circ}\text{N} \sim 40^{\circ}\text{N}$ 。图 3~6 给出了 1992 年 6 月 13 日 UTC00 至 14 日 UTC00 的 24 h 的预报场和 6 月 14 日 UTC00 时的实测场。由图可见, 700 hPa 和 850 hPa 预报的天气形势与实时资料诊断的比较一致, 低压中心位置都在华中地区, 预报的低压系统较诊断的稍强。预报的风场和实测风场也比较一致。边界层内三层的预报温度场和诊断温度场也有较好的对应, 风场预报场和诊断场相比, 风向比较一致, 只是风速稍偏小。

高分辨边界层模式的引入, 为利用 LASG-REM 进行大气扩散和污染物输送与分布的研究提供了可能。

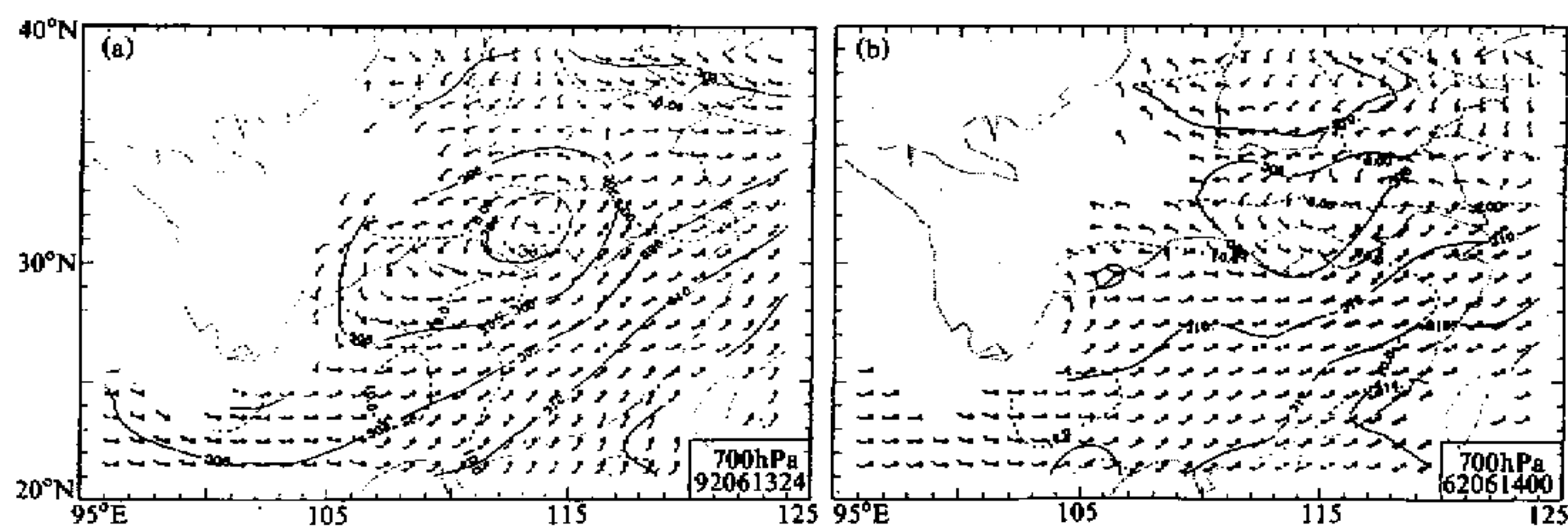


图 3 模式 24 小时预报场和实时资料诊断场 (700 hPa)
图中的等值线为等高度线。(a) 预报场; (a) 诊断场

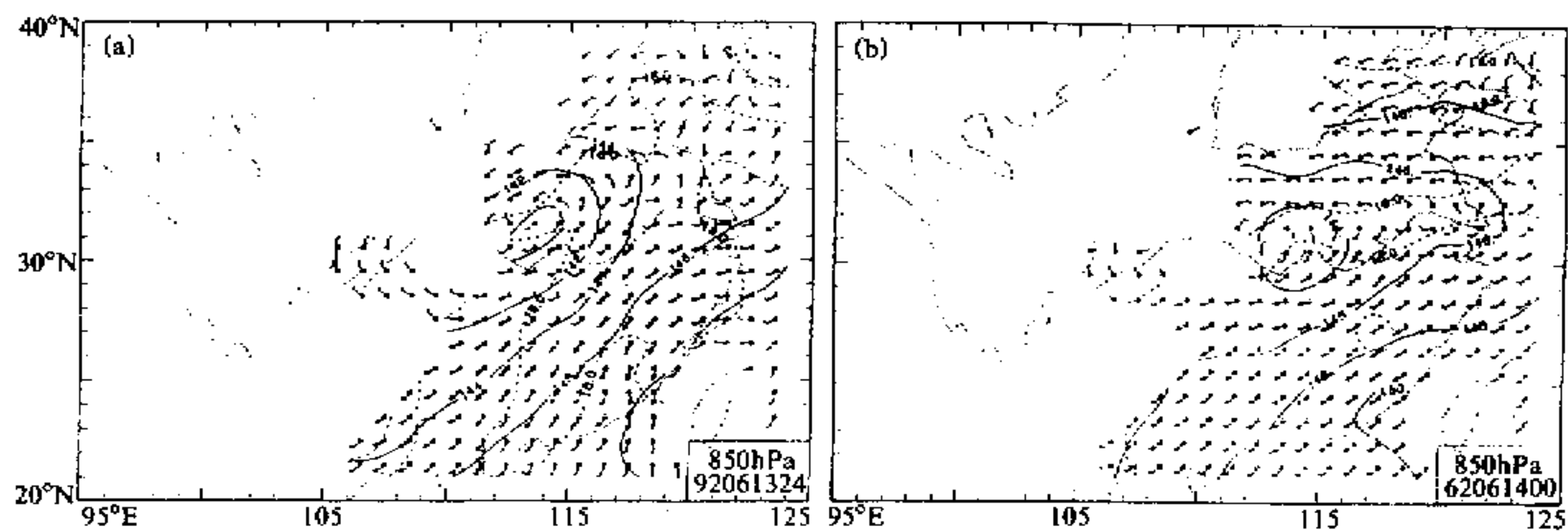


图 4 模式 24 小时预报场和实时资料诊断场 (850 hPa)

图中的等值线为等高度线。(a) 预报场; (a) 诊断场

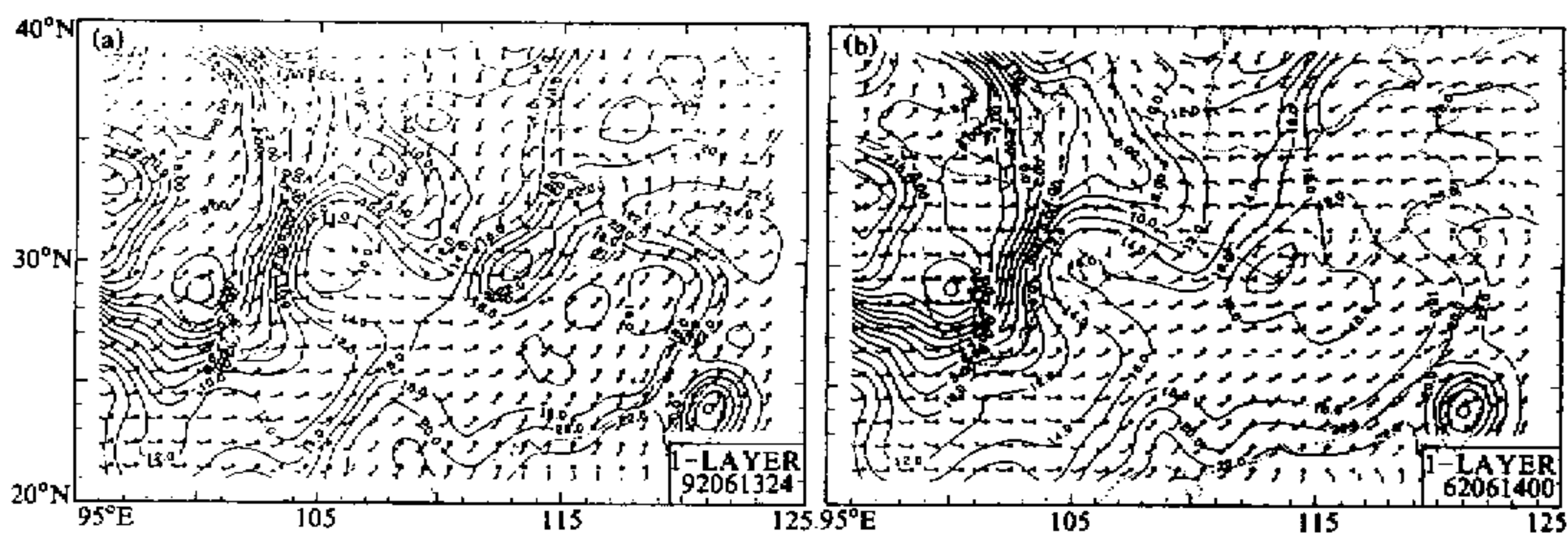


图 5 模式 24 小时预报场和实时资料诊断场 (边界层第 1 层)

图中的等值线为等温线。(a) 预报场; (a) 诊断场

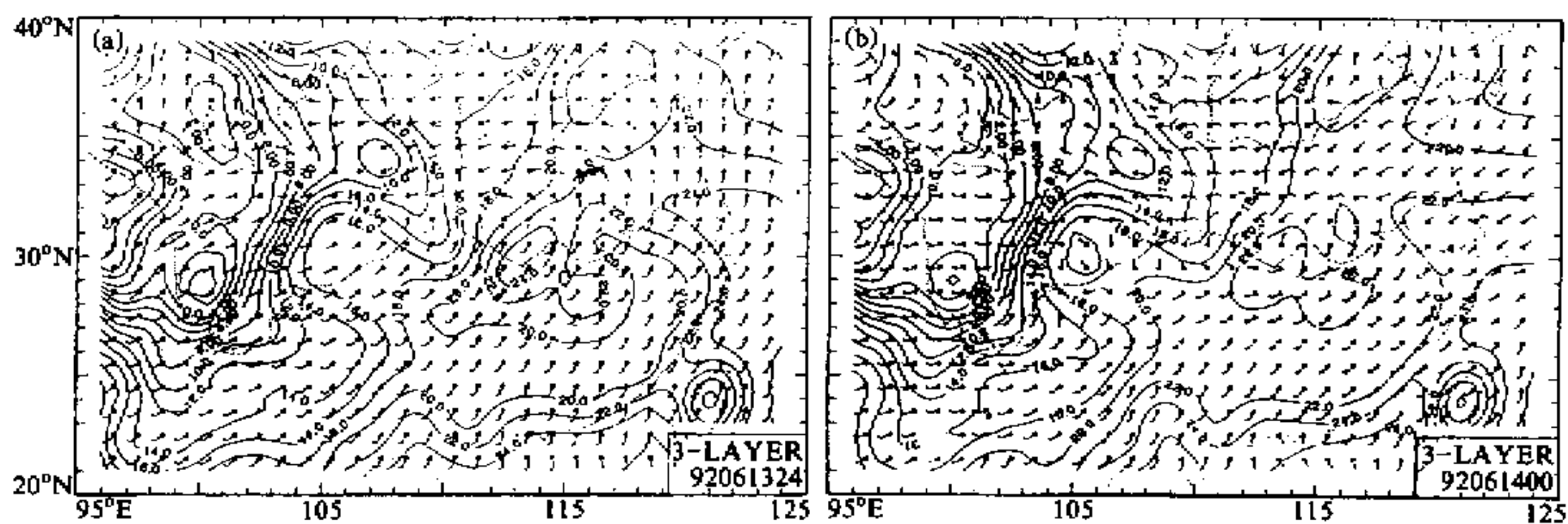


图 6 模式 24 小时预报场和实时资料诊断场 (边界层第 3 层)

图中的等值线为等温线。(a) 预报场; (a) 诊断场

参 考 文 献

- 1 宇如聪, 1989, 陡峭地形有限区域数值预报模式设计, 大气科学, 13, 139~149.
- 2 Blackadar, A.K., 1979, High resolution models of the planetary boundary layer, *Advance in Environmental and Science Engineering*, 1, Ed. by J.R. Pfafflin and E.N. Ziegler, Gordon and Breach, New York, 50~85.
- 3 Zhang D.L. and R.A. Anthes, 1982, A high-resolution model of the planetary boundary layer-sensitivity tests and comparisons with SESAME-79 data, *J. Appl. Meteor.*, 21, 1594~1609.

- 4 Betts, A.K., 1986, A new convective adjustment scheme part I: Observational and theoretical basis, *Q.R. Meteor. Soc.*, **112**, 677~691.
- 5 Yu Rucong and Zeng Qingcun, 1992, The design of a limited area model with steep mountains and its application to heavy rain simulation in the East Periphery of Tibetan Plateau, 22nd international conference on Alpine Meteorology, TOULOUSE (FRANCE), 7-11, September, 1992, 316~320.
- 6 Blackadar, A.K., 1976, Modeling the nocturnal boundary layer, Preprints of the third symposium on Atmospheric Turbulence, Diffusion and Air Quality, Raleigh, NC, 19-22 October, Amer. Meteor. Soc., Boston, 46~49.
- 7 骆美霞、张道民, 1980, 在一个原始方程模式中计算地面温度及下垫面感热和蒸发通量的实验, 第二次全国数值预报文集, 北京: 科学出版社, 73~86.

A High-Resolution Parameterization Scheme of the Atmospheric Boundary Layer for A Meso-Scale Numerical Model

Gao Huiwang, Huang Meiyuan and Yao Xiaohong

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract A high-resolution model of atmospheric boundary layer is developed and is coupled with a meso-scale numerical model. It is indicated that the simulated results by the coupled model are consistent with the results of observations.

Key words atmospheric boundary layer high-resolution boundary layer model meso-scale numerical model