

区域地形影响下冷锋后飑线的 数值模拟^{*}

茅卫平

何齐强

陆汉城

吕 梅

(空军气象中心, 北京 100843)

(南京空军气象学院, 南京 211101)

提 要

本文设计了一个加地形并含详细边界层参数化方案的十三层有限区域细网格模式, 并对1983年4月28日冷锋后方、大别山东侧干锋触发形成的近似垂直于冷锋的飑线过程进行了模拟。通过和无地形模式模拟结果的比较, 表明区域地形的诱发作用是大别山东侧一类飑线形成的可能原因。文中还模拟了冷区飑线的热力、动力结构, 其主要特征和观测研究的结果是一致的。

关键词: 地形; 侧向阻挡作用; 干锋; 飑线; 数值模拟。

一、引 言

中尺度系统的触发机制主要有两类: 一类是和非均匀下垫面的强迫作用有关, 如地形诱发的中尺度系统; 另一类是和大气内部的扰动不稳定有关, 如重力波不稳定、对称不稳定等。对飑线的研究很早已经开始, Newton^[1,2], Ogura 和 Liou^[3]利用特殊观测站网资料, 分析了中纬度飑线的热力和动力结构。1988年 Johnson 根据 Pre-storm 资料^[4], 详细分析了飑线层状云的结构特征, 改进了 Fujita 提出的概念模式。1962年, Ogura 和 Charney 模拟发现飑线的形成与传播的重力波有关。Ross 和 Orlanski^[5]模拟过锋面触发飑线的例子。区域地形对对流活动的影响, 早已为人们所重视。气流遇山的强迫作用, 容易在迎风坡产生不稳定天气; 在山脉的背风面由背风波导致的强烈天气也越来越被人们所认识。1975年, Klemp 和 Lilly 应用线性模式计算落矶山背风面的下坡风发现, 当逆温层在山顶上游出现、温度与风廓线使地形诱发的波在地面和对流层之间近似反相时, 就会发生极强的下坡风, 而下坡风又与下坡风暴紧密相联。那么区域地形的侧向阻挡对中尺度系统的发生、发展有什么作用呢? 本文就是要研究大别山区域地形的侧向阻挡作用。对1993年4月28日发生在华东地区的强天气过程, 何齐强等^[6]作过详细的天气学分析; 费建芳等^[7]曾用不含地形的有限区域细网格模式(以下简称F模式)进行过数值模拟, 较好地模拟了冷锋的重要特征, 但飑线的特征没有模拟出来。本文在他们研究的基础上, 设计了一个加地形并含详细边界层参数化方案的十三层有限区域细

1991年9月23日收到, 1992年7月8日收到修改稿。

^{*} 国家自然科学基金资助课题。

网格模式 (以下简称 M 模式), 并对 1983 年 4 月 28 日冷锋后飑线过程进行数值模拟。

二、模式和计算方案

1. 模式方程

我们采用 σ 坐标系中原始方程组, $\sigma = (p - p_t) / \pi$, $\pi = p_s - p_t$, p_s , p_t 分别为地面气压和模式大气层顶气压, p_t 取为 1000hPa。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\pi u) = -\frac{\partial}{\partial x}(\pi u^2) - \frac{\partial}{\partial y}(\pi uv) - \frac{\partial}{\partial \sigma}(\pi u \dot{\sigma}) + f\pi v' + \pi F_u - g\left(\frac{\partial \tau}{\partial \sigma}\right)_x, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\pi v) = -\frac{\partial}{\partial x}(\pi uv) - \frac{\partial}{\partial y}(\pi v^2) - \frac{\partial}{\partial \sigma}(\pi v \dot{\sigma}) + f\pi u' + \pi F_v - g\left(\frac{\partial \tau}{\partial \sigma}\right)_y, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\pi c_p T) = & -\frac{\partial}{\partial x}[\pi(c_p T + \varphi)u] - \frac{\partial}{\partial y}[\pi(c_p T + \varphi)v] - \frac{\partial}{\partial \sigma}[\pi(c_p T + \varphi)\dot{\sigma}] \\ & + \left(\frac{\sigma \pi R T}{\sigma \pi + p_t} - \varphi\right) \frac{\partial \pi}{\partial t} + \pi(ufv_g - vfu_g) + c_p \pi F_T + L\pi \dot{Q} + g \frac{\partial H}{\partial \sigma}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\pi q) = -\frac{\partial}{\partial x}(\pi qu) - \frac{\partial}{\partial y}(\pi qv) - \frac{\partial}{\partial \sigma}(\pi q \dot{\sigma}) + \pi F_q + \pi \dot{Q} + g \frac{\partial E}{\partial \sigma}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\pi) = -\frac{\partial}{\partial x}(\pi u) - \frac{\partial}{\partial y}(\pi v) - \frac{\partial}{\partial \sigma}(\pi \dot{\sigma}), \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial \varphi}{\partial \ln(\sigma + p_t / \pi)} \right] = -R \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (6)$$

$$\pi \dot{\sigma} = \int_{\sigma_T}^{\sigma} \frac{\partial \pi \sigma}{\partial \sigma} d\sigma = - \int_{\sigma_T}^{\sigma} \frac{\partial \pi}{\partial t} d\sigma - \int_{\sigma_T}^{\sigma} \left(\frac{\partial \pi u}{\partial x} + \frac{\partial \pi v}{\partial y} \right) d\sigma, \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} f v_g &= \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\sigma R T}{\sigma \pi + p_t} \cdot \frac{\partial \pi}{\partial x}, & -f u_g &= \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \frac{\sigma R T}{\sigma \pi + p_t} \cdot \frac{\partial \pi}{\partial y}, \\ u' &= u_g - u, & v' &= -v_g + v. \end{aligned}$$

方程组中 F_u 、 F_v 、 F_T 、 F_q 分别为动量、热量和比湿的水平湍流扩散, $\dot{Q}$ 为水汽凝结率, L 为凝结潜热, τ 为水平动量的垂直湍流通量的应力矢量, 即 $\tau = -\frac{\rho^2 g}{\pi} K_m \frac{\partial \vec{V}}{\partial \sigma}$ 。

热量和比湿的垂直湍流通量分别为 $H = \frac{c_p \rho^2 g}{\pi} K_h \frac{\partial \theta}{\partial \sigma}$ 和 $E = \frac{\rho^2 g}{\pi} K_h \frac{\partial q}{\partial \sigma}$, K_m 为动量的湍流交换系数, K_h 为热量和比湿的湍流交换系数, φ 为位势高度, 其他为气象上常用符号。

2. 模式结构

为了充分利用边界层资料, 更好地考虑垂直湍流输送等边界层特征, 模式的垂直分层是不等距的。模式共分十三层, 半层上 σ 值分别为: 0.0785、0.2365、0.374、

0.491、0.608、0.711、0.793、0.858、0.908、0.947、0.973、0.9875、0.9965；整层上 σ 值分别为 0.0、0.157、0.316、0.432、0.550、0.666、0.756、0.830、0.886、0.930、0.964、0.982、0.993、1.0。我们把变量 u 、 v 、 φ 、 T 、 T_D 、 q 定义在模式的半数层上， σ 和垂直湍流交换系数 K_m 、 K_h 定义在整数层上。模式水平格距为 30km，水平格点数为 21×21 。

3. 空间和时间差分

在方程组 (1) — (7) 式中，空间差分为两种，一种为 $\nabla_h \cdot \pi \vec{V} A$ 型， A 为任意变量， $\vec{V}$ 为水平风矢量；一种是计算气压梯度力所用的 $\frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\sigma RT}{\sigma \pi + p_t} \cdot \frac{\partial \pi}{\partial x}$ 型。

对水平通量散度项 $\nabla_h \cdot \pi \vec{V} A$ 给出如下差分表达式：

$$\nabla_h \cdot \pi \vec{V} A \rightarrow (\pi \bar{u}^x \bar{A}^x)_x + (\pi \bar{v}^y \bar{A}^y)_y.$$

为了减小因引入地形产生的计算误差，我们对气压梯度力项作如下数学变换：

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\sigma RT}{\sigma \pi + p_t} \cdot \frac{\partial \pi}{\partial x} = \frac{\partial \varphi}{\partial x} + RT \frac{\partial}{\partial x} [\ln(\sigma \pi + p_t)].$$

然后采用 Corby 格式：

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\sigma RT}{\sigma \pi + p_t} \cdot \frac{\partial \pi}{\partial x} &\rightarrow \bar{\varphi}_x^x + \overline{RT^x [\ln(\sigma \pi + p_t)]}_x^x, \\ \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \frac{\sigma RT}{\sigma \pi + p_t} \cdot \frac{\partial \pi}{\partial y} &\rightarrow \bar{\varphi}_y^y + \overline{RT^y [\ln(\sigma \pi + p_t)]}_y^y. \end{aligned}$$

对于静力方程，本模式采用周晓平的方法^[8]。时间差分采用中央差分。时间积分从 1983 年 4 月 28 日 10 时开始，时间步长为 1min，采用欧拉后差和中央差交替进行。本模式从 13 时开始每小时输出一次物理量。

4. 模式中考虑的大气物理过程

(1) 边界层参数化

表面层中使用 Monin-Obukhov 的相似理论计算动量、热量和水汽的垂直湍流通量，其中摩擦速度 u_* 、通量温度 θ_* 、通量湿度 q_* 的计算用迭代法求得。 z_0 粗糙度取为 0.05m， z 取为模式最低层高度与地形高度之差。

表面层以上我们采用 Brien(1975)的三段系数法计算动量、热量和水汽的垂直湍流输送。模式中取第十三层高度为表面层顶高度，计算 $\partial k_{h_s} / \partial z$ 、 k_{h_s} 时要考虑地表高度。

行星边界层顶高度取为锋面的逆温层顶，如无锋面逆温存在则取第八层为行星边界层顶。

(2) 降水过程

大尺度降水我们采用饱和凝结法计算。对流降水采用郭晓岚 1965 年积云对流参数化方案。

(3) 水平湍流扩散

$$\pi F_u = \pi A_u \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \quad \pi F_v = \pi A_v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right),$$

$$\pi F_T = \pi A_T \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad \pi F_q = \pi A_T \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} \right),$$

取 $A_u = A_T = 1.5 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

5. 地形处理和边界条件

(1) 地形处理

我们根据安徽省气科所提供的 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 经纬度华东地区实测地形资料, 进行平滑处理后的地形等高线如图 1。它与实际地形吻合, 但平滑后的高度稍有降低, 输入大别山最高高度为 1000m, 平滑后最高为 793.7m。

(2) 边界条件

上下边界条件取为: $\dot{\sigma} = 0$ 。

侧边界条件采用固定边界条件。在模拟试验中曾用过海绵边界条件, 计算稳定性也是不错的, 模拟结果与用固定边界条件相似。

6. 模式计算稳定性

在数值模式中, 微分方程的积分性质, 在方程差分时也应保持。本模式计算表明总能量是守恒的。

三、初始场特征和飚线过程概况

模拟用的初始场取自华东中尺度天气试验 1983 年 4 月 28 日 10 时的资料, 其范围

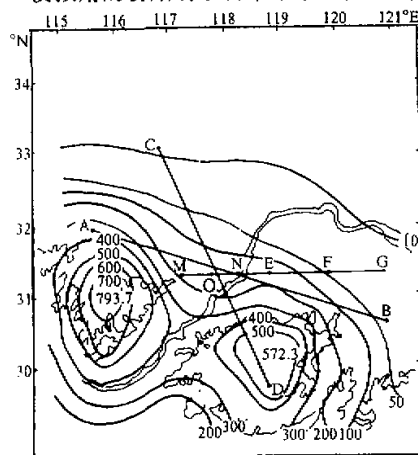


图 1 地形等高线图

单位: m. AB、CD 为后面作垂直剖面用;
MN、OE、EF、FG 为后面计算梯度用

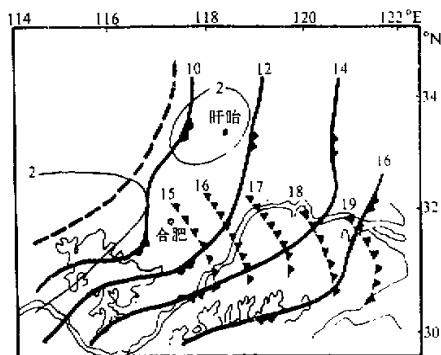


图 2 1983 年 4 月 28 日飚线形成后的发展、减弱、消失阶段
粗断线为 850hPa 槽线

在 $30^{\circ}\text{--}35^{\circ}\text{N}$, $115^{\circ}\text{--}121^{\circ}\text{E}$, 水平格距为 90km , 细网格化到 30km 。资料分析表明 500hPa 为一致的西南气流, 沿长江有一中尺度浅温度槽 (图略); 在 700hPa 上有两个湿中心, 一个在盱眙附近, 另一个在合肥西部 (图略), 850hPa 上的槽线在睢宁-怀远-固始一线, 即图 2 中粗断线。

本文模拟的冷锋后飑线发生在 1983 年 4 月 28 日 15 时, 在大别山东侧的舒城、巢县之间。飑线形成后沿偏东方向移动, 16—18 时处于发展强盛阶段, 19 时后飑线减弱消失, 见图 2。文章首先通过分析露点差、垂直速度的演变来说明干锋触发飑线形成的过程; 其二, 利用模拟结果分析 θ_{se} 密集带的逐时变化 (M、F 两个模式), 再与实际飑线位置相比较, 来说明两个模式的性能; 其三, 用 ΔT 、 ΔT_D 、 Δv 、 Δp_s 来表现飑线的特征, 并比较模拟结果与实际值; 其四, 用 θ_{se} 垂直剖面来反映飑线热力学方面结构, 用 u 、 v 和 u 、 σ 来表现飑线区水平流场和垂直环流结构。

四、飑线的生成机制及其演变

1. 飑线的生成机制

飑线的生成机制是本文模拟的重点内容之一。根据模拟结果, 我们分析了 12—13、13—14、14—15 时露点差及 13、14、15 时风速, 图 3a 分别是 M 模式、F 模式 900m 高度上 14—15 时的 ΔT_D 和 15 时风速模拟结果, 从图中看到含地形的 M 模式能较明显地模拟干锋的特征, 与地面实际资料分析结果基本一致 (见图 3b), 而不含地形的 F 模式只模拟出一条与冷锋相平行的负 ΔT_D 带。

在图上我们还看到模拟的 15 时风速在冷锋后分布是不均匀的, 靠近大别山东侧的霍山—合肥之间风速达到 $16\text{--}20\text{m/s}$, 这与实况相一致, 表明冷空气接近大别山时受

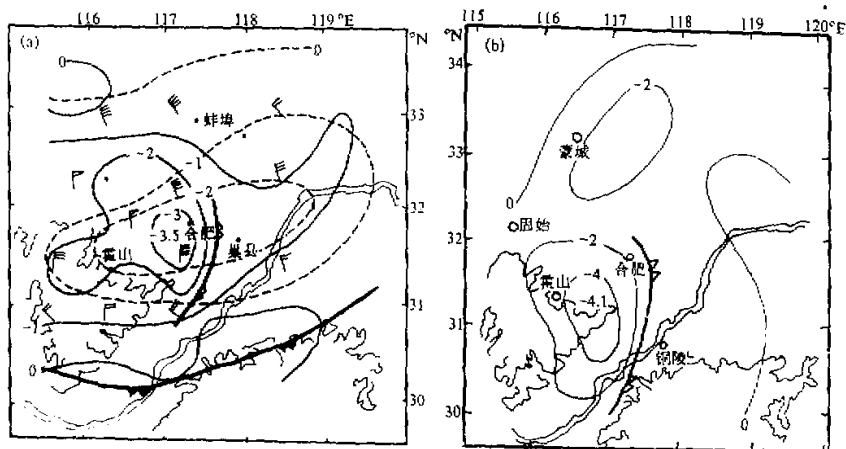


图 3 900m 高度上 ΔT_D 和风速模拟结果, 以及与地面实际资料的比较

(a) 15 时干锋和冷锋; 实线和虚线分别是 M 和 F 模式 14—15 时 ΔT_D 模拟结果, 图上风向、风速是 M 模式 15 时模拟结果; (b) 实际地面 14—15 时 ΔT_D 分布

山脉的侧向阻挡，以山脉边缘流形式加速南下，从而形成了上面分析得到的干锋，这充分说明了区域地形在触发中尺度系统中的作用。

图 4 是 13、14、15 时干锋移动情况和 900m 高度上 13、14、15 时垂直运动随时间演变图，在大别山东侧，三个时次都有一条与干锋相配合、近似平行于地形等高线的上升运动带，这种上升运动带的分布显然与地形有关（对照无地形 F 模式模拟结果图略），而且上升运动随着冷空气在山前堆积而逐渐加强，13、14、15 时上升运动中心值分别为 $-9.8 \times 10^{-6} / \text{s}$ 、 $-12.9 \times 10^{-6} / \text{s}$ 、 $-15.9 \times 10^{-6} / \text{s}$ ，15 时上升运动大值区与强对流回波相对应（图略），这表明到 15 时干锋触发了飊线的形成。

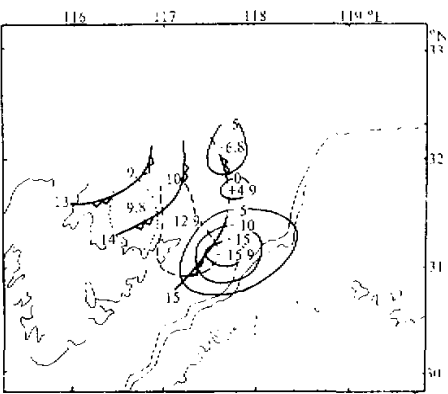


图 4 干锋移动情况和 900 m 高度上垂直运动随时间的演变
点线、断线、实线分别是 13、14、15 时垂直速度等值线

2. 飊线的演变

为了精确地考察飊线的移动和强度变化、及比较 M、F 模式的性能，我们根据 M、F 模式 13—18 时 300m 高度上 θ_{se} 的模拟结果制作了表 1。表中 θ_{se} 、 $\partial\theta_{se} / \partial t$ 是芜湖站的值，这样选取是因为 16 时左右飊线过芜湖站，另外根据实况 15、16、17、18 时飊线的位置，在图 1 上选取东西向在 MN、OE、EF、FG 线段（也就是说 15、16、17、18 时实况飊线的位置 MN、OE、EF、FG 线段上），分别计算 $\partial\theta_{se} / \partial x$ 随时间变化。从表中我们看到 15、16、17、18 时由 M 模式计算的 θ_{se} 时间变化率比 F 模式计算结果大，特别是 16 时 $(\partial\theta_{se} / \partial t)_M \approx 2(\partial\theta_{se} / \partial t)_F$ （M、F 分别代表 M、F 模式）。这说明含地形作用的 M 模式能明显地模拟出飊线过芜湖时的特征。从 13—18 时，由 M 模式计算的 $(\partial\theta_{se} / \partial x)_{MN}$ 、 $(\partial\theta_{se} / \partial x)_{OE}$ 、 $(\partial\theta_{se} / \partial x)_{EF}$ 、 $(\partial\theta_{se} / \partial x)_{FG}$ 比 F 模式计算的梯度值大（除 13 时 $(\partial\theta_{se} / \partial x)_{OE}$ ）。特别是 15 时 $(\partial\theta_{se} / \partial x)_{MN,M} \approx 2.5(\partial\theta_{se} / \partial x)_{MN,F}$

表 1 300m 高度上 M 模式与 F 模式 θ_{se} 的模拟结果

时间 (时)	θ_{se} (芜湖)		$\partial\theta_{se} / \partial t$		$(\partial\theta_{se} / \partial x)_{MN}$			$(\partial\theta_{se} / \partial x)_{OE}$			$(\partial\theta_{se} / \partial x)_{EF}$			$(\partial\theta_{se} / \partial x)_{FG}$		
	M	F	M	F	M	F	实际值	M	F	实际值	M	F	实际值	M	F	实际值
13	59.0	58.6			0.28	0.08	0.46	0.08	0.14	0.23	0.40	0.29	0.50	0.27	0.20	0.48
14	57.1	56.2	-1.9	-2.4	0.54	0.18		0.28	0.22		0.49	0.22		0.43	0.29	
15	52.0	52.5	-4.9	-3.7	<u>0.68</u>	0.29		0.64	0.32		0.57	0.33		0.52	0.45	
16	45.7	48.9	<u>-6.3</u>	-3.6	0.52	0.40	0.72	<u>0.68</u>	0.38	0.94	0.59	0.42	0.78	0.54	0.50	0.64
17	40.8	46.1	-4.9	-2.7	0.43	0.43		0.41	0.38		<u>1.09</u>	0.47		0.60	0.50	
18					0.40	0.41		0.39	0.35		0.69	0.42		<u>1.07</u>	0.58	

注：M、F 分别代表 M 模式、F 模式， θ_{se} 的值为表中值加上 273，单位为 K， $\partial\theta_{se} / \partial t$ 单位为 K/h， $\partial\theta_{se} / \partial x$ 单位为 K/10km， $\partial\theta_{se} / \partial x$ 的下标字母代表线段名，画线数值为关键数值。

(下标分别代表线段名和模式名), 16 时 $(\partial\theta_{sc}/\partial x)_{OE,M} \approx 2(\partial\theta_{sc}/\partial x)_{OE,F}$, 17 时 $(\partial\theta_{sc}/\partial x)_{EF,M} \approx 2.3(\partial\theta_{sc}/\partial x)_{EF,F}$. 与 13、16 时的实际梯度值相比较, M 模式模拟结果较接近于实际值; 另一方面, 我们看到 15 时 θ_{sc} 的梯度最大值出现在 MN 线段, 而 15 时实际飊线就形成在 M、N 之间, 同样 16、17、18 时 θ_{sc} 梯度的最大值分别出现在 OE、EF、FG 之间, 而 16、17、18 时飊线也分别移到 O、E、E、F 和 F、G 之间 (见图 2), 而且从 15—18 时飊线区 $(\partial\theta_{sc}/\partial x)$ 有增大趋势. 从以上分析, 我们可得到两点认识: 一是含地形的 M 模式对冷空气强度的模拟明显好于 F 模式, 且较接近于实际情况; 二是由实况 15—18 时飊线不断发展到成熟, 而 M 模式模拟结果 θ_{sc} 的梯度值随时间也是增大的, 这对预报飊线的移动和发展到强盛有一定的指示意义.

五、飊线的特征和结构

1. 飊线的特征

(1) 地面特征

实况表明, 本例飊线过测站时, 伴有气象要素较明显的变化. 表 2 给出了飊线过巢县和芜湖站, 15—16 时的 1 小时实际温度、露点、风速和气压的变化值, 同时列出由 M 模

表 2 飊线过境时, 实况、M 模式和 F 模式模拟结果制作 1 小时 ΔT 、 ΔT_D 、 Δv 、 Δp ,

站名	ΔT (°C)			ΔT_D (°C)			Δv (m/s)			Δp (hPa)		
	实际值	M	F	实际值	M	F	实际值	M	F	实际值	M	F
巢县	-2.2	-1.9	-0.7	-1.6	-1.7	-1.5	3.0	2.5	-1.1	2.0	1.6	-0.5
芜湖	-2.0	-1.7	-0.8	-2.6	-2.5	-1.5	2.0	1.6	-0.3	1.4	1.2	-0.4

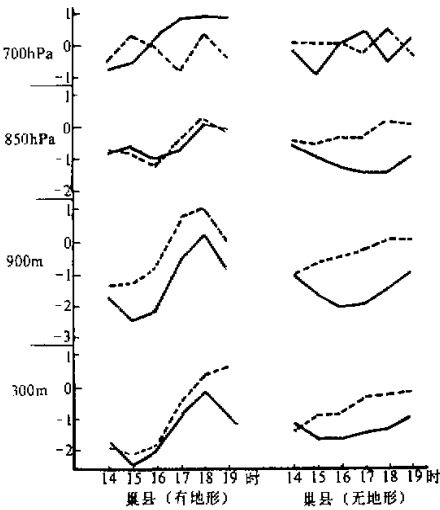


图 5 有地形和无地形 ΔT 、 ΔT_D 时空变化图
实线为 ΔT_D , 断线为 ΔT . 单位为 °C

式和 F 模式模拟的结果, 明显可见, M 模式模拟结果中 1 小时的变化量和实际值相当接近; F 模式和实际相差较大, 不仅未显示出飊线过境时风速和气压的增加, 反而表现出数值减小. F 模式没有加进大别山地形, 因而地形对其东侧冷空气加速南下作用未能表现出来, 出现上述结果是容易理解的, 这说明区域地形作用对中尺度过程是重要的.

(2) 上空 ΔT 和 ΔT_D 的特征

图 5 是分别根据 M、F 模式模拟结果作出的巢县站飊线过境 (15 时 30 分左右) 在 300m、900m 和 850、700hPa 高度上 14—19 时每小时变温和变露点曲线. 由 M 模式模

拟结果(图左)看到, 飑线过境特征主要表现在边界层中, 且露点降低比温度降低明显, 如 900m 高度, 飑线过境前后一小时 ΔT_D 为 -2.5°C , 而 ΔT 为 -1.0°C 。这些特征和观测结果一致。由无地形的 F 模式模拟结果(图右)看到, 曲线平缓, 飑线特征没有表现出来。

2. 飑线的结构

(1) 热力学结构

我们充分利用边界层模拟结果, 在图 1 中的 AB 垂直剖线上分析了 15、16、17 时 θ_{se} 空间分布

(这里只给出 17 时 θ_{se} 垂直剖面图 6a), AB 剖面呈 WNW—ESE 走向, 与地形等高线近似平行, 目的是便于反映地形对低层冷空气活动的影响。分析发现垂直剖面上都有两个 θ_{se} 密集带, 分别与冷锋和飑线对应, 飑线区 θ_{se} 水平梯度随时间逐渐增强, 显示出飑线的增强发展, 另一个有意义的特征是: 由 15 到 17 时, 在约 150—700m 高度之间, 飑后干冷空气向前推进更快, 以致到 17 时(图 6a)出现冷空气头, 并在其前端有鼻状突出, 鼻附近 θ_{se} 线十分密集, 和观测结果对照(图 6b), 本例飑线边界层密度流特征得到了较好的模拟, 和实际有差别的是密度流特征约迟一小时才明显表现出来, 头下干冷空气的强度较实际情形弱, 这可能与模式中对实际地形作了一定程度的平滑有关。

(2) 飑线区水平流场和垂直环流结构

(i) 水平流场

图 7a 风场为 M 模式 16 时 300m 模拟结果, 点线为实际 300m 高度风速大小等值线(风向与模拟结果相似而未表示), 我们看到模拟结果和实际风速在飑线后方、大别山的东北侧都有一个大风速中心, 模拟结果(最大 20m/s)稍小于实际风速(最大 23m/s), 中心位置相近, 差 30—50km。从飑线区的流场看, 飑线附近主要是风速辐合, 风向辐合很弱, 这与暖区飑线近地面层飑线前面有偏南的暖湿气流存在有着显著的区别(从下面的垂直环流结构我们会看得更清楚)。

(ii) 垂直环流结构

为揭示飑线区垂直环流结构, 我们根据 16 时 M 模式模拟结果制作了与飑线相交

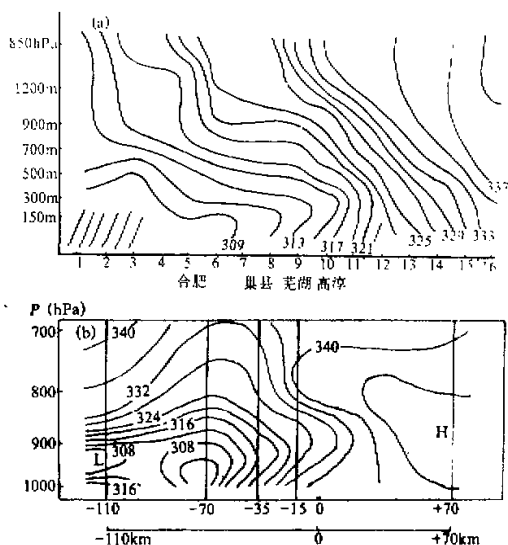


图 6 θ_{se} 垂直剖面图与观测结果对照

(a) M 模式模拟的 17 时 θ_{se} 剖面图, 斜线区表示地形;

(b) 用相对坐标方法得到 16 时观测结果剖面图

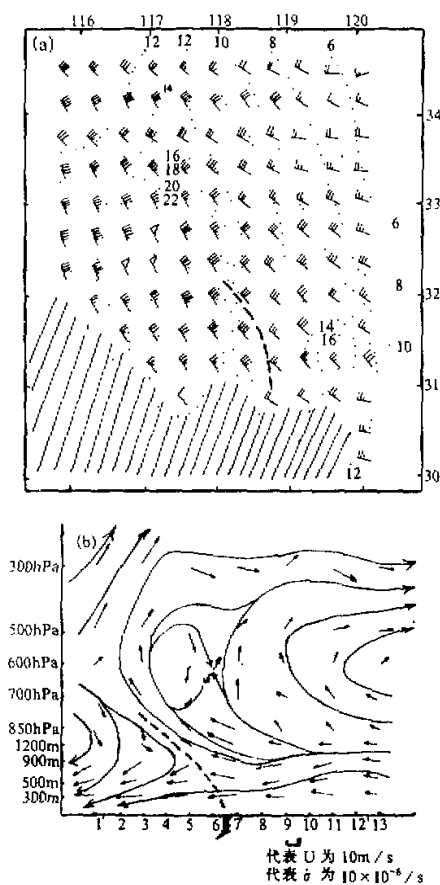


图 7 M 模式 16 时 300m 高度上模拟风场及 $u-w$ 二维环流图

(a) 粗断线代表 16 时飑线；细斜线代表模式中 $\geq 300\text{m}$ 的地形；

(b) $u-w$ 二维环流图。w 为 σ ，u 为相对飑线速度，飑线速度取为 16m/s

集带的移动和梯度变化是基本一致的。

(2) 模拟表明在飑线发展增强期，飑线前方的斜上升空气不是从近地面开始，而是来自冷锋上方的相对东南风气流，这和暖区飑线不同，是冷锋后飑线的特点。

(3) 飑线区附近，上升运动较强；在边界层，飑线具有密度流特征，这些结果和观测结果是相当一致的。

(4) 在详细比较有地形和无地形模式的模拟结果后看到：对主要和地形诱发作用有关的中尺度系统，模式中是否加进地形影响直接关系到能否模拟出中尺度过程特征。

(图 1 中 AB 线) 剖面上相对飑线的二维环流 (图 7b)，结合上面分析的 θ_{se} 垂直剖面，可见飑线后冷堆明显，飑线后方的干冷空气入流主要在 700hPa — 900m 之间。在飑线前方斜上升气流不是从近地面开始，而是来自锋面上方相对偏东南气流，这和暖区飑线不同，是冷锋后冷区飑线的特征。在飑线区上升运动较强，这和飑线附近的强烈天气对应。和观察研究结果对照 (图略)，飑线区垂直环流的主要特征在模拟中得到较好表现。但也有差别，例如模拟结果在飑线后的 600hPa 附近出现的闭合环流，在实际场中是不存在的。

六、结 论

本文用一个有地形的含详细边界层参数化方案的十三层有限区域细网格模式，较好地模拟了江淮地区冷锋后飑线的形成及其结构特征。本模式保留了原模式的许多优点，如垂直分层较细、水平格距较小、并含有诸多的物理过程，还在其中加进地形，从而对地形的强迫作用及飑线的形成机制得到了较好描述。通过对本例飑线过程的模拟，可得到如下结论：

(1) 大别山地形对南下冷空气有侧向阻挡作用，它加速其东侧冷空气以干锋形式向南推进，从而触发锋后飑线的形成。飑线移动和强度变化与 θ_{se} 线密

致谢: 本文承寿绍文和翟子航老师审阅, 也得到史汉生、费建芳、王绍龙同志的帮助。

参 考 文 献

- [1] Newton, C.W. and H.R. Newton, 1959, Dynamical interactions between large convection clouds and environment with vertical shear, *J. Meteor.*, **16**, 483-496.
- [2] Newton, C. W., 1966, Circulation in large sheared cumulonimbus, *Tellus*, **18**, 699-712.
- [3] Ogura, R. and M. T. Liou, 1979, The structure of midlatitude squall line, a case study, *J. Atmos. Sci.*, **37**, 553-567.
- [4] Johnson, R.H. and P.J. Hamilton, 1988, The relationship of surface pressure features to the precipitation and airflow structure of an intense midlatitude squall line, *Mon. Wea. Rev.*, **116**, 1444-1472.
- [5] Ross, B.B. and I. Orlanski, 1977, Circulation associated with a cold front. Part II: Moist case, *J. Atmos. Sci.*, **35**, 445-465.
- [6] 何齐强等, 1992, 飑线在相对流场中的结构分析, 空军气象学院学报, **13**, No.2, 10-18.
- [7] 费建芳等, 1992, A Fine-Mesh Numerical Model with Detailed Boundary Layer Parameterization, *Advances in Atmospheric Sciences*, **9**, No.4, 465-476.
- [8] 周晓平等, 1988, 一个东亚季风区的暴雨数值预报模式, 大气科学特刊, 60-78.

The Numerical Simulation of the Squall Line behind Cold Front Affected by the Regional Topography

Mao Weiping

(The Air Force Center of Meteorology, Beijing 100843)

He Qiqiang, Lu Hancheng and Lu Mei

(The Air Force Institute of Meteorology, Nanjing 211101)

Abstract

A limited-area fine-mesh thirteen-layer numerical model is designed, which has topography and detailed boundary layer parameterization. The squall line behind cold front is simulated by the model. It was triggered by dry front at the east side of the Dabie mountain on April 28, 1983. After comparing the simulation results of model with without topography it is seen that the induced regional topography may be the mechanism of the formation for the squall line on the east side of the Dabie mountains. The thermodynamic and dynamical structures of the squall line in cold area are simulated by the model. Their principal features are consistent with observations.

Key words: topography; lateral detaining action; dry front; squall line; numerical simulation.