

水汽凝结过程与高低空急流对 冷锋环流的作用*

吕克利 赵德明

(南京大学大气科学系, 南京 210093)

摘 要 文中利用包括水汽凝结过程的湿大气原始方程模式, 研究了高空西风急流和低空南风急流中冷锋环流和垂直运动场的演变, 计算结果显示: 水汽凝结过程的加入, 使锋区垂直运动和锋面环流大大增强, 上升运动随时间发生剧烈的变化; 湿过程对锋面环流的作用发生在水汽饱和并发生凝结之后, 未饱和水汽的存在对锋面环流没有什么作用; 与干大气模式中高空西风急流是造成冷锋环流演变的主要因子情况不同, 低空南风急流在湿大气中对锋面环流有极为重要的作用, 其作用至少与高空西风急流相等; 在激发锋区重力波上, 低空南风急流的作用可能更加明显; 水汽凝结湿过程的加入, 不论是在高空西风急流下还是在低空南风急流中, 都能在锋区激发出波长约为 300 km 的重力波, 并以大于锋面移速的相速传入暖区。

关键词 湿过程 高低空急流 冷锋

1 引言

前文^[1]我们利用干大气原始方程模式讨论了高低空急流中冷锋环流的演变, 指出, 对于不考虑水汽凝结过程的干大气, 影响冷锋非地转环流、锋面结构和锋区垂直运动的主要因子是高空西风急流, 低空南风急流的作用不大, 并且指出, 作为动量源, 低空南风急流远没有高空西风急流重要。但是, 天气观测显示, 锋区中尺度系统的发展往往不仅与高空的强西风有关, 还与低层的湿南风急流相联系; 此外, 锋区中尺度系统的发展时常伴有降水甚至暴雨产生, 这意味着, 当存在水汽凝结过程时, 低空南风急流和水汽凝结过程对锋面环流、锋区结构和垂直运动可能有重要影响。

本文将利用湿大气原始方程模式^[2]研究高空西风急流和低空南风急流中水汽凝结过程对冷锋环流、锋面结构和垂直运动的作用, 讨论水汽凝结过程对冷锋锋区降水的增幅作用。

2 湿大气模式简介

对 y 方向无限伸展的平直锋面, 包括大尺度背景气流 u_g 、 v_g , 和水汽凝结过程的滞弹性方程组可写为

1995-08-03 收到, 1996-07-12 收到再改稿

* 本文得到国家自然科学基金资助

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} - J(\psi, \alpha_0 \zeta) = & f \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial \ln \alpha_0}{\partial z} f v_g - \frac{g}{\theta_0} \frac{\partial \theta}{\partial x} - f \frac{\partial v_g}{\partial z} \\ & - g \frac{\partial}{\partial x} [0.001(0.608q - c)] + \frac{\partial}{\partial x} (\kappa v_e \frac{\partial \zeta}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (v_e \frac{\partial \zeta}{\partial z}), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} - \alpha_0 J(\psi, v) = -\alpha_0 f \frac{\partial \psi}{\partial z} + f u_g + \frac{\partial}{\partial x} (\kappa v_e \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (v_e \frac{\partial v}{\partial z}), \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} - \alpha_0 J(\psi, \theta) = & E - \alpha_0 \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{f \theta_0}{g} \frac{\partial v_g}{\partial z} + \frac{f \theta_0}{g} v \frac{\partial u_g}{\partial z} + \alpha_0 \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\theta_0}{g} N^2 \\ & + \frac{\partial}{\partial x} (\kappa k_e \frac{\partial \theta}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_e \frac{\partial \theta}{\partial z}), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} - \alpha_0 J(\psi, q) = \frac{\partial}{\partial x} (\kappa k_e \frac{\partial q}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_e \frac{\partial q}{\partial z}), \quad (4)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} - \alpha_0 J(\psi, c) = \frac{\partial}{\partial x} (\kappa k_e \frac{\partial c}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_e \frac{\partial c}{\partial z}), \quad (5)$$

当 $v_g = 0$ 时, 上述方程组即为 Ross 和 Orlanski^[2]给出的湿模式方程组。(1)~(5)式的计算和差分方案以及边界条件可参阅文献[2]。

本文的初始风场由锋面尺度风场 v 和大尺度背景气流 u_g, v_g 组成。为构造与实际冷锋结构相近的成熟冷锋, 锋面尺度风场设为

$$\begin{aligned} v(x, z) = & -\frac{x}{2x_0} v_m \{1 - \tanh[\beta(x - x_j - x_0)]\} \\ & + v_m \exp\{-R_j^{-2}[(z - z_j)^2 + (\gamma(x - x_j))^2]\}, \end{aligned}$$

式中 v_m 为风速强度, 本文取为 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $x_j = x_0 = 500 \text{ km}$, 并按文献[2], 取 $x = 100$, $\beta = 1/50$, $z_j = 4 \text{ km}$, $R_j = 4000/\sqrt{2}$, $\gamma = 0.03$ 。 v 的廓线如图 1a 所示。初始锋面尺度位温场 θ 由 v 场根据热成风公式确定, 在积分域的右边界利用 $\partial \theta / \partial z = \theta_0 N^2 / g$ 由给定的层结分布确定 θ 。本文给定的层结分布为分段线性稳定层结, 即

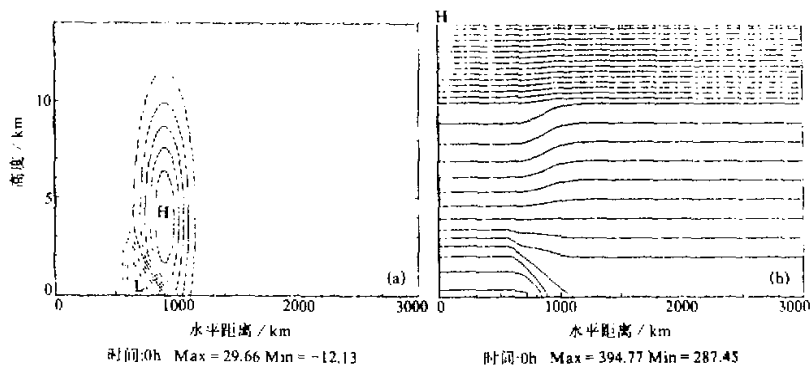


图1 锋面尺度速度场和位温场
(a) v 场; (b) θ 场

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \begin{cases} 2.0 \times 10^{-3}, & z < 2000 \text{ m} \\ 4.0 \times 10^{-3}, & 2000 \text{ m} \leq z \leq 10000 \text{ m} \\ 14.5 \times 10^{-3}, & z > 10000 \text{ m} \end{cases}$$

得到的初始位温场如图 1b 所示。

为讨论不同垂直切变的背景气流在水汽凝结过程中对冷锋系统的作用, 我们仍考虑文献[1]给出的 4 种背景气流, 即理想西风气流, 高空西风急流, 低空南风急流和高低空急流并存的情况 (详见文献[1])。

计算中初始时刻不考虑水汽凝结, 到某时刻 t_m , 加入水汽。本文取 $t_m = 5 \text{ h}$, 即锋面发展演变过程在开始 5 小时内是干过程, 以后为湿过程, 这时 q 的分布设为 $q = q_s R(z)$, 其中 $q_s = 0.8$, $R(z)$ 为 z 的分段线性函数, 在 $z = 0$, $R = 0.8$, 以后向上线性增大, 到 $z = 2 \text{ km}$ 处, $R = 0.9$, 再向上线性减小, 以模式顶 $z = 15 \text{ km}$, $R = 0.4$ 。

3 数值结果分析

我们对上述 4 种背景风场作了计算。

3.1 理想西风气流

图 2a 显示, 从水汽加入的第 5 小时开始, $w_{\max}$ 有短时间的突然增大, 达到

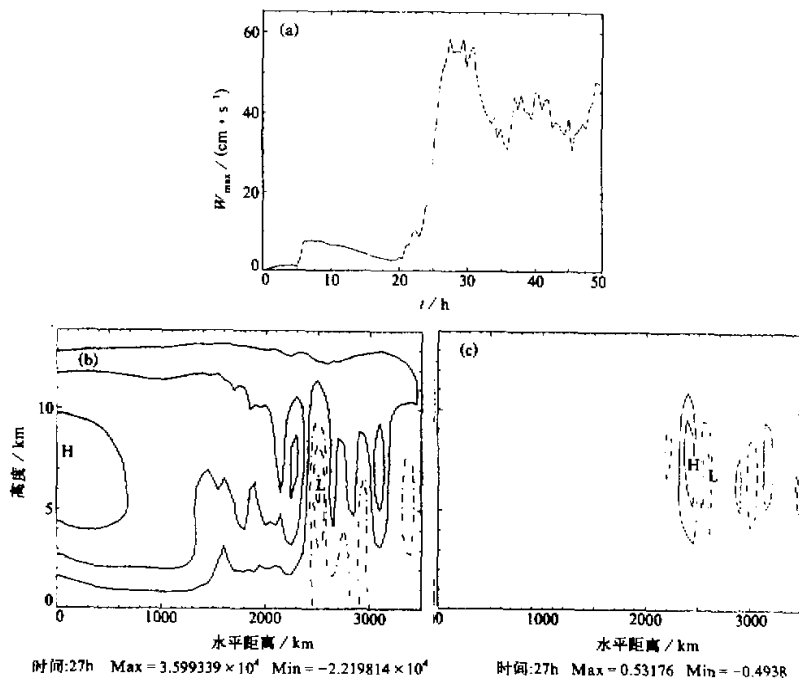


图 2 理想西风气流中的湿冷锋环流
(a) $w_{\max}$ 的时间变化; (b) ψ 场; (c) w 场

8 cm/s, 然后缓慢地减小, 到 $t=20$ h, $w_{\max}$ 开始急速增大, 在 6~7 h 内增大约 50 cm/s, 达到 58 cm/s, 而后有些波动, 约在 $t=31$ h, $w_{\max}$ 开始急速减小, 到 $t=36$ h, 减小到 30 cm/s, 随后在 40 cm/s 上下摆动。由上可见, 从水汽加入开始, 到因锋面抬升使水汽饱和凝结发生(约 $t=20$ h)为止, 锋面垂直速度变化不大, 就是说, 未饱和水汽的存在对锋面环流并没有多大影响。当水汽饱和并发生凝结, 锋区上升速度开始急剧增大, 锋面环流也发生重大变化。图 2b 显示, 锋前非地转 ψ' 场出现了正负环流相间的波状分布, 其波长约为 300 km。与之相对应, 垂直速度场中, 也出现了上升运动和下沉运动的波状分布, 其波长也是 300 km 左右, 其垂直范围, 从 3~4 km 伸展到 11 km 高层, 这显然是重力内波, 它可能是由于因冷锋抬升使锋前暖湿空气饱和、凝结而发展成深对流, 再由深对流激发出重力波, 它们以比锋面移速更快的速度传入暖区, 从而在暖区显示出锋面环流和垂直运动的波状分布。与干过程(图略)相比, 显见水汽凝结过程对锋面环流和垂直运动有重大的作用。

3.2 高空西风急流

与理想西风气流类似, 图 3a 显示, 水汽加入后直到发生水汽凝结, 未饱和水汽对锋面环流及其垂直运动没有什么作用, $w_{\max}$ 几乎没有变化, 维持在 8 cm/s 左右, 到 $t=20$ h, 水汽饱和并发生凝结, $w_{\max}$ 随之剧烈增大, 在 7 个小时内增大 50 cm/s, 达到 59 cm/s, 然后又急剧减小, 经过 6~7 个小时, 降到 18 cm/s, 降幅达 40 cm/s,

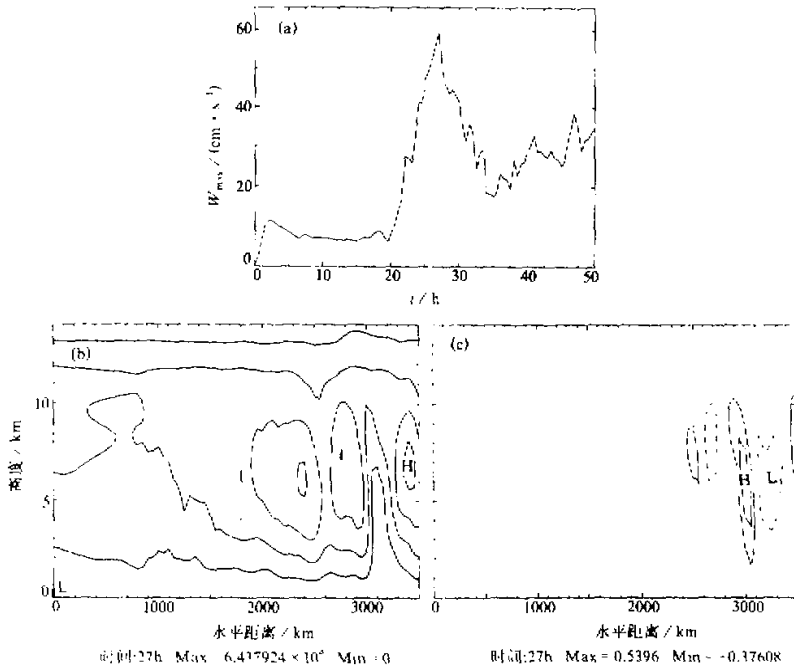


图 3 高空西风急流中的湿冷锋环流
(a) $w_{\max}$ 的时间变化; (b) ψ' 场; (c) w 场

随后在 30 cm/s 上下变化。与理想西风气流相比, 高空西风急流中锋区垂直速度的时间变化更加剧烈, 这显示了气流垂直切变的影响, 切变越大, w 的变化越激烈。图 3b 和 3c 也显示, 在水汽饱和并发生凝结后, 也产生了深达 10 km 的深对流和波长约为 300 km 向暖区传播的重力波。

3.3 低空南风急流

图 4a 也显示, 在水汽未饱和之前, 水汽对锋面环流没有什么作用, 到 $t=20 \text{ h}$, 水汽饱和并发生凝结, $w_{\max}$ 随之剧烈增大, 从 $3\sim 4 \text{ cm/s}$ 增大到 78 cm/s , 在 3 个小时内增大 75 cm/s , 远比高空西风急流为大, 而后又迅速减小到 30 cm/s , 随后在 50 cm/s 上下变化, 与干大气情况(图略)相比, 其差异非常巨大。这说明低空南风急流虽然在干大气中作为动量源对冷锋环流的作用比西风气流小得多, 但在包括水汽凝结过程的湿大气中, 低空南风急流的作用明显增大, 超过高空西风急流的影响, 可见低空南风急流作为水汽源所起的重要作用。同样, 图 4b 和 4c 也显示, 在低空南风急流中, 当水汽饱和并发生凝结, 能在锋面下游激发出波长约为 300 km , 位于 $4\sim 11 \text{ km}$ 高度之间的向下游传播的重力波, 而且, 在南风急流背景气流中产生的这种重力波更加完整、明显、清晰。

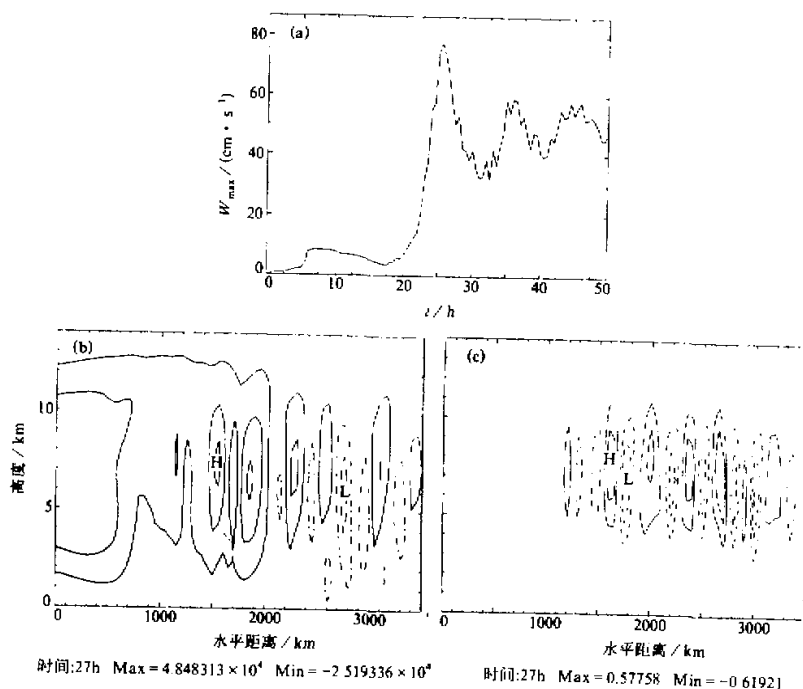


图 4 低空南风急流中的湿冷锋环流

(a) $w_{\max}$ 的时间变化; (b) ψ' 场; (c) w 场

3.4 高空西风急流和低空南风急流并存的情况

与前面一样, 图 5 也显示, 当水汽未饱和时, 水汽的存在作用很小, 这时锋区的垂

直运动基本不变, 约为 10 cm/s , 到 $t=16 \text{ h}$, 水汽饱和并发生凝结, 垂直速度急剧增大, 到 $t=22.5 \text{ h}$, 达到 110 cm/s , 6 个小时内增大竟达 100 cm/s , 然后急速减小, 到 $t=29 \text{ h}$, 减小到 30 cm/s , 7 个小时内减小 80 cm/s , 随后 w 在 50 cm/s 上下振动。 $w_{\max}$ 的时间变化曲线显示, 在水汽饱和和凝结过程中, 高低空急流的共同作用并不是两者的简单叠加, 而是相互作用的结果。图 5b 和 5c 显示, 水汽饱和和凝结过程在高低空急流同时存在的气流中激发的重力波, 其振幅比西风急流或南风急流中更大, 垂直伸展从 1 km 到 12 km , 波长仍为 300 km 左右。这意味着, 在高空西风急流和低空南风急流组成的背景气流中, 会产生更强的中尺度系统。

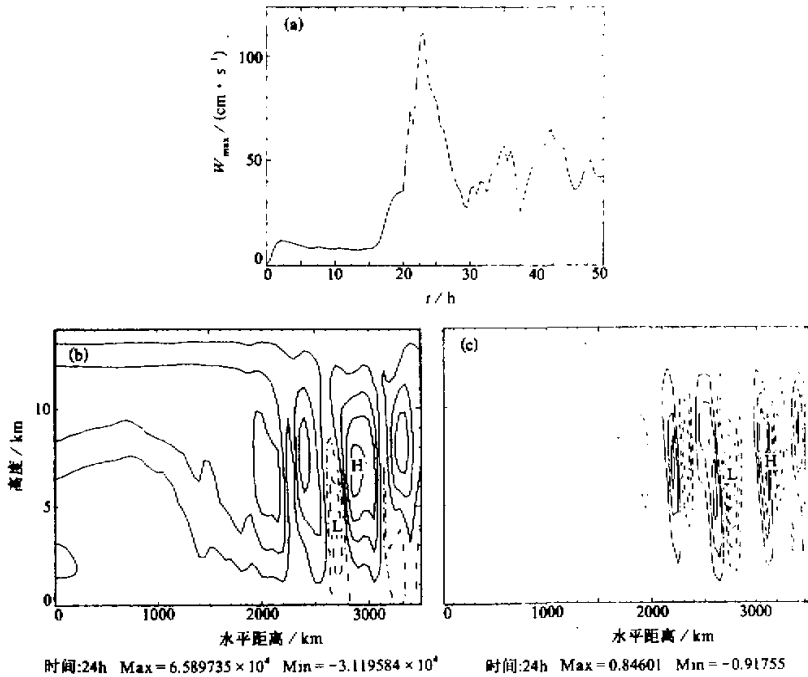


图 5 高低空急流并存时的湿冷锋环流
(a) $w_{\max}$ 的时间变化; (b) ψ' 场; (c) w 场

4 小结

文中分别对不同垂直切变的背景气流研究了湿模式大气中冷锋环流的演变, 得到以下一些主要结果:

(1) 在包括水汽凝结的湿大气中, 低空南风急流对冷锋环流的影响至少与高空西风急流同等重要, 这与干大气中影响冷锋环流演变和锋区垂直运动的主要因子是高空西风急流的情况不同, 在激发锋区重力波上, 低空南风急流的作用也可能更加重要。

(2) 在湿大气中, 高空西风急流和低空南风急流的结合, 能在冷锋锋区产生更大的上升速度和振幅更大的重力波, 使锋区垂直运动和锋面环流的变化更加剧烈。

(3) 水汽凝结过程对冷锋环流和锋区上升运动的增强有极其重要的作用, 其影响在水汽饱和并发生凝结之后, 可使冷锋环流和上升运动有极大的增强, 并使锋区最大上升速度发生剧烈的变化。

(4) 未饱和水汽的存在对冷锋环流和锋区垂直运动没有什么作用, 在水汽饱和并发生凝结之前, 锋面环流和垂直运动的变化很小, 锋面处于稳定状态。

(5) 冷锋抬升使暖区湿空气饱和并发生凝结, 进而发展成深对流, 然后由深对流激发出波长为 300 km 左右的重力波, 并以快于冷锋移速的相速传播。

参 考 文 献

- 1 吕克利, 钱渭滔, 1996, 高空西风急流和低空南风急流中的冷锋环流, 大气科学, 20(6), 679~690.
- 2 Ross, B.B. and I. Orlanski, 1978, The circulation associated with a cold front. Part II: Moist case, *J. Atmos. Sci.*, 35, 445~465.

Effects of Both the Condensation Process of Moisture and Upper and Low-Level Jets on the Cold-Front Circulation

Lu Keli and Zhao Deming

(Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract The evolutions of both the cold-front circulation and vertical motion fields in the upper-level westerly jet and low-level southerly jet are investigated by using a two-dimensional primitive equation model including moisture condensation process. The analysing results show that the moisture condensation enhances greatly the frontal circulation and vertical motion in the frontal zone, and causes a severe change of the upward motion with time. The effect of moist process on the frontal circulation occurs as the moist air saturated and condensation produced, and the presence of the unsaturated moist air is shown to have little effect on the frontal circulation. In moist case, the low-level southerly jet plays an extremely important role for the evolution of cold-front circulation which is very different compared to the dry case in which the upper westerly jet plays a main role. The effect of low-level jet in the moist case on exciting gravity wave in the frontal zone may be more important than that of the upper-level jet. The condensation process of moisture also plays an important role on the excitation of gravity wave which has wavelength 300 km and propagates into the warm sector with wave velocity greater than the frontal velocity.

Key words moist process upper-lower jet cold front