

条件性对称不稳定与梅雨锋暴雨^{*}

寿绍文 励申申 彭 广 吴书君^{**}

(南京气象学院)

摘要 通过江淮地区一次梅雨期暴雨的诊断分析,探讨了梅雨锋暴雨的一种可能机制。指出条件性对称不稳定或等 M 面上的位势不稳定、锋生次级环流以及次天气尺度气旋的发展是形成暴雨的重要因子。

关键词 对称不稳定,次级环流,梅雨锋,暴雨

暴雨是一种对流性天气,暴雨的形成一般需要有较大的水汽通量辐合、位势不稳定层结以及较强的上升运动。但在梅雨锋附近的暴雨有时发生在位势稳定或中性的层结条件下,而且暴雨区的范围常常达到中- β 尺度或更大。本文试图通过一次暴雨过程的分析探讨这类暴雨过程发生和发展的机制,主要讨论降水最强时段制约降水发生、发展的可能机制。

这次暴雨过程发生在1984年6月12—14日,降水集中在长江中下游地区,江淮流域的过程降水量普遍达到200mm以上。降水中心在芜湖附近,中心值为293.8mm。6月13日08—20时为降水最强时段,12小时降水量中心位于阜阳附近,中心值达170mm。文中利用20—40°N,110—130°E的常规探空资料,采用高斯权重插值方案进行客观分析^[1],并用带通滤波器分离出中尺度扰动流场,分析其与降水的关系。

1 稳定度分析

1.1 位势稳定度的分析

由于1984年6月13日08—20时的12小时暴雨中心位于阜阳附近,所以用6月13日08时阜阳站的探空分析(图略),代表暴雨前期或初期的大气层结情况。由图可见,阜阳上空有较大的负不稳定能量面积,说明该地区大气层结是条件性稳定的。因为此时实际上降水已经发生,低层较冷,因此对一个来自地面的垂直上升气块而言,就可能有负的不稳定能量。图1是6月13日08时穿过暴雨中心的经向垂直剖面图。由图1可见,在未来12小时暴雨区的上空,仅在900hPa高度以下有弱的位势不稳定层次,900hPa以上则几乎都是位势稳定或中性的。这与阜阳单站探空分析的结果基本一致。

1.2 条件性对称不稳定性的分析

以上分析表明,在暴雨区上空,大气层结基本上是位势稳定或中性的,显然不利于对流的发展。为了说明对流产生的机制,再来考察大气的条件性对称不稳定性,对称不稳定是一种浮力-惯性不稳定,也就是倾斜对流的不稳定性。它的基本判据是,当等相当位温(θ_e)面的斜率大

^{*} 国家自然科学基金资助项目

^{**} 彭 广、吴书君现分别在湖北省气科所和山东惠民气象局工作

收稿日期:1992-09-09

于等绝对动量(M)面的斜率(即 $\partial z/\partial y|_{\theta_e} > \partial z/\partial y|_M$)或里查逊数 $Ri < 1$ 或 Ertel 位涡 $q < 0$ 时,为对称不稳定,反之则为对称稳定。

由图1可见,在未来12小时的暴雨区上空,900—600hPa $\partial M/\partial y < 0$, $\partial \theta_e/\partial z > 0$ (其中, $M = u_y - f_x$, u_y 为地转风的西风分量, f 为地转参数, y 为经向坐标, z 为高度)。这说明在该地区既是惯性稳定,也是重力稳定。但在900—600hPa层次中,等 θ_e 面的斜率明显地大于等 M 面的斜率,表明该地区上空,在900—600hPa层次中,层结是条件性对称不稳定。因而暴雨的发生和发展可能与条件性对称不稳定层结有着密切的联系。

图2是沿图1中 $M = -50\text{m/s}$ 的等 M 线作出的层结曲线和状态曲线图。图中的层结曲线和露点曲线分别表示沿等 M 线的大气温度和露点随高度的分布。状态曲线表示假设气块沿等 M 线倾斜上升时,气块随高度的变化。由图2可见,一个从1000hPa沿等 M 线倾斜上升的气块,在900hPa以下,其温度低于环境温度,而到900hPa以上时,温度则高于环境温度,气块获得向上加速度,即具有了正的不稳定能量。

结合分析图1和图2,说明气块在作垂直上升运动时是稳定的,但当其沿等 M 面倾斜上升时却是不稳定的。因为该地区层结是条件性对称不稳定的。如上所述,条件性对称不稳定时,等 θ_e 面的斜率大于等 M 面的斜率。设 $\partial \theta_e/\partial y < 0$, 则沿等 M 面有 $\partial \theta_e/\partial z < 0$, 由此可见对称不稳定即等 M 面上的重力不稳定。因此当条件性不稳定时,沿着等 M 面倾斜上升的气块就可能具有正的条件性不稳定能量。这样看来,对流的产生仍然是和条件性不稳定相联系的,只不过常规的探空分析方法难以使人觉察这种不稳定的存在。

2 梅雨锋次级环流的分析

上面的讨论说明暴雨的形成与条件性对称不稳定相联系。但是条件性对称不稳定是潜在的不稳定,只有在发生倾斜运动时,才可能释放不稳定能量,而斜升运动的发生可能与锋生环流的发展相联系。为此利用 Sawyer-Eliassen 次级环流方程^[2]对锋生次级环流进行诊断。该方程可写成

$$-r \frac{\partial \theta}{\partial p} \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + 2 \frac{\partial M}{\partial p} \frac{\partial \psi^2}{\partial y \partial p} - \frac{\partial M}{\partial y} \frac{\partial^2 \psi}{\partial p^2} = -2J(u_y, v_y) - r \frac{\partial H}{\partial y} \quad (1)$$

其中, $r = \frac{R}{f p_0} \left(\frac{p_0}{p} \right)^{c_p/c_v}$, $p_0 = 1000\text{hPa}$, M 为绝对动量, ψ 为流函数, H 为非绝热加热, J 为 Jacobi 算子,其余均为常用符号。(1)式右端的强迫项包括地转形变和非绝热加热强迫。地转强迫项包括

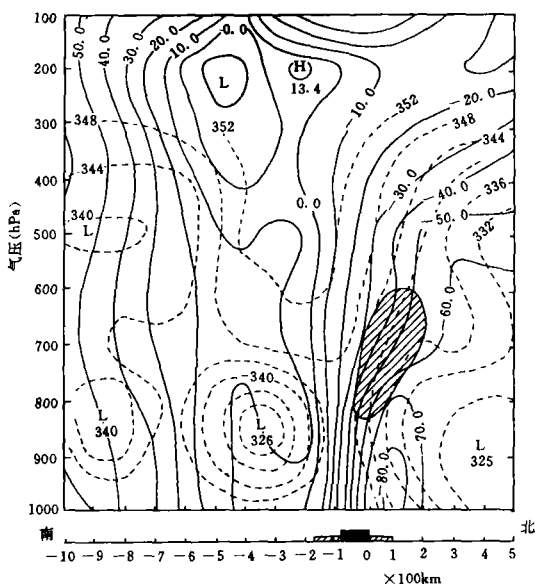


图1 穿过暴雨中心的经向垂直剖面图
(虚线为等 θ_e 线,间隔4K;实线为等 M 线,间隔为10m/s。水平轴上的斜线影区和黑影区分别代表12小时降水量达50mm和100mm以上的地区)

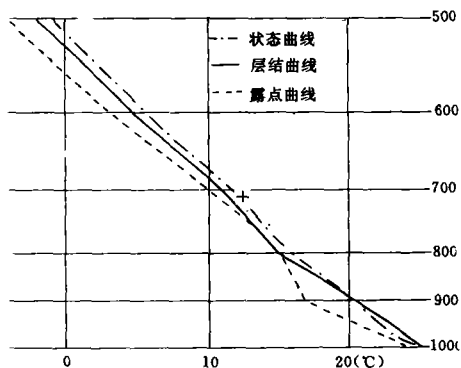


图2 1984年6月13日08时沿图1中 $M = -50\text{m/s}$ 的等 M 线所作的 T -lnp 图

地转拉伸变形和地转切变形,加热项包含大尺度加热和积云对流加热。其中大尺度加热 H_L 的计算方法是,在满足条件:(a) 大气是绝对稳定的 ($\partial\theta/\partial p > 0, \partial\theta_e/\partial p > 0$); (b) 大气近似饱和 ($q/q_s > 0.8$); (c) 有上升运动 ($w < 0$) 时,令 $H_L = -L_w \partial q_s / \partial p$, 否则 $H_L = 0$ 。积云对流加热 H_c 的计算采用 Krishnamurti (1980) 等提出的改进的郭晓岚对流参数化方案^[3]。

由图3(a)可见,6月13日08时在暴雨区南部高空300hPa附近,有一个反环流中心,中心流函数数量值为 $345 \text{ m} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$, 低层在暴雨区北部有一正环流,中心位于800hPa附近,流函数数量值为 $-251 \text{ m} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$, 正、反环流的上升支正好在暴雨区上空重叠,形成一支明显的倾斜上升气流。这支斜升气流的发展促使条件性对称不稳定能量释放,从而导致暴雨的发生发展。所以暴雨最强时段发生在6月13日08—20时的12小时之内,图3(b)中,环流发生了调整,高空锋消,中空锋生,形成正环流,中心位于600hPa附近,强度为 $-355 \text{ m} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$, 低层900hPa附近则出现反环流中心,中心流函数值为 $147 \text{ m} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$, 降水开始减弱。图3(c)中,环流又出现了明显变化,暴雨区转为由反环流的下沉支控制,使降水明显减弱并趋于结束。可见,暴雨区的演变与锋生环流的演变有着十分密切的联系。

3 中尺度气旋的分析

由800hPa的中尺度扰动流场(图略)可见,6月13日08—20时的暴雨区位于中- α 尺度气旋中心及其东部的切变线附近。该气旋的水平尺度约为500km,中心有明显的气流辐合,该气旋在500hPa上仍有反映,但到300hPa转变成一个气流辐散带。这种中低层辐合、高层辐散的结构使上升运动得以发展。最大降水区主要在气旋中心附近,并随气旋移动。6月13日20时以后气旋减弱,降水随之减弱。可见这次暴雨过程与中低层的中尺度气旋也有密切的关系。

图4是6月13日08时800hPa的温湿场。图中C为800hPa等压面上气旋中心所在。斜线影区为08—20时降水最大的区域。从湿球位温 θ_w 的分布可见,在江淮流域的中尺度气旋中心附近为一明显的 θ_w 高值舌,它由东南伸向西北。高值舌两侧为 θ_w 低值区。高、低值之间有很大的 θ_w 水平梯度。在中尺度气旋环流作用下,气旋西部的干冷空气向东平流,使 θ_w 高值舌西部的 θ_w 水平梯度 $|\nabla \theta_w|$ 增大。同时在 θ_w 高值舌西部 θ_w 的升度矢量 $\nabla \theta_w$ 和 θ 的升度矢量 $\nabla \theta$ 形成交角,而且呈现 $\vec{k} \cdot (\nabla \theta_w \times \nabla \theta) < 0$ 的关系(其中 $\vec{k}$ 为垂直方向的单位矢量)。这种温湿场结构可能导致湿球位涡 q_w 的减小。根据湿球位涡方程^[4]

$$\frac{dq_w}{dt} = f(g^2/\theta_0^2) \vec{k} \cdot (\nabla \theta_w \times \nabla \theta) + f(g/\theta_0) \vec{\xi} \cdot \nabla Q + f(g/\theta_0) \vec{F} \cdot \nabla \theta_w \quad (2)$$

其中 $\vec{\xi}$ 为三维绝对涡度矢量, Q 为非绝热加热, $\vec{F}$ 为摩擦力。在绝热、无摩擦条件下, $\frac{dq_w}{dt} \propto \vec{k} \cdot (\nabla \theta_w \times \nabla \theta)$, 在 θ_w 高值舌西侧, $\nabla \theta_w$ 和 $\nabla \theta$ 的配置,正好有利于出现 $dq_w/dt < 0$ 的情形。显然这是一种有利于条件性对称不稳定发展的形势。因为当 $q_w < 0$ 时,就有条件性对称不稳定发生,而在 $dq_w/dt < 0$ 的情况下,即使初始时刻 $q_w > 0$,也可能演变成 $q_w < 0$,而在初始时刻已经是 $q_w < 0$

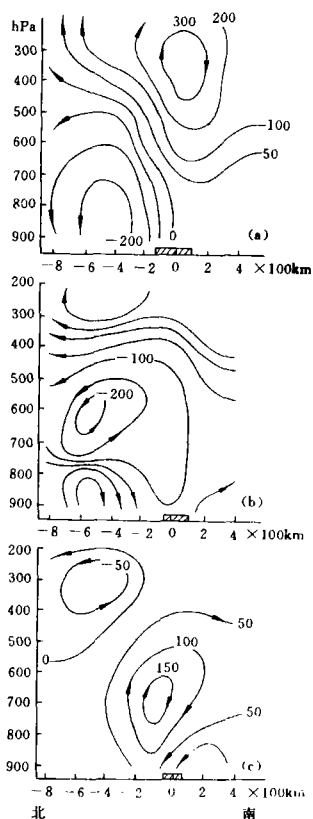


图3 穿过暴雨中心的经向垂直剖面上的锋生次级环流

(a) 6月13日08时,

(b) 6月13日20时,

(c) 6月14日08时,

(实线表示流函数等值线,

单位: $\text{m} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$;

箭头表示环流方向)。

的情形,则条件性对称不稳定性将会变得更大。由于对称不稳定性的加强有利于对流的加强,所以6月13日08—20时的最大降水中心正好位于这一部位。

4 结 论

根据江淮地区一次梅雨期暴雨过程的诊断分析,表明这次过程暴雨区的大气层结是位势稳定的,但是由于层结是条件性对称不稳定(即当气块沿等 M 面上升时是条件性不稳定),所以倾斜对流得到发展,这是造成暴雨的原因之一。此外,梅雨锋附近高、低层的横向次级环流上升支的上下叠置,使垂直上升运动得以发展,以及在中尺度气旋附近湿球位涡随时间减小,造成 $q_w < 0$ 的形势使对称不稳定性加强等因素也是造成暴雨的重要原因。

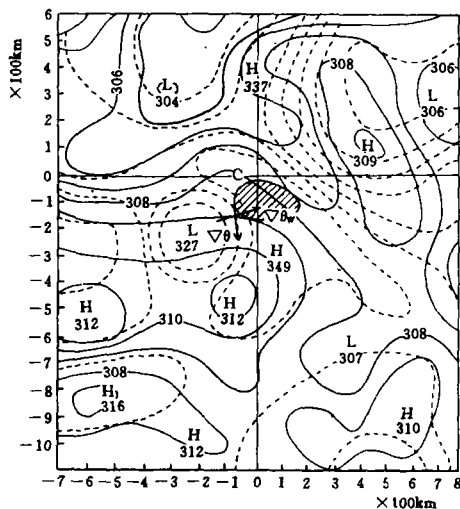


图4 1984年6月13日08时800hPa等压面上的
和 θ_w 分布图(实线为等 θ 线,虚线为等 θ_w 线,单位:K)

参 考 文 献

- 1 寿绍文,励申申,王 信. 南京气象学院学报,1990,13(4):535—539
- 2 寿绍文. 中尺度天气动力学. 北京:气象出版社,1993,220—223
- 3 丁一汇. 天气动力学中的诊断分析方法. 北京:科学出版社,1989,118—129
- 4 Bennetts D A, Hoskins B J. *Quart J Roy Met Soc*, 1979, 105, 945—962

CONDITIONALLY SYMMETRIC INSTABILITY AND MEIYU-FRONT RAINGUSH*

Shou Shaowen Li Shenshen Peng Guang Wu Shujun**

(Nanjing Institute of Meteorology)

Abstract Based on the diagnostic analysis of a raingush event in the Meiyu period over the Changjiang-Huaihe basin, a study is conducted of possible mechanisms responsible for the formation of Meiyu front torrential rain, indicating that it occurs under the conditions of potential stability or neutral stratification and the mechanics causing convection may be either due to conditionally symmetric instability or to potential instability on the equi- M surface. Further, Frontogenetical secondary circulation and sub-synoptic cyclone are the important factors for the heavy rain as well.

Key words symmetric instability, secondary circulation, Meiyu-front, raingush

* Funded by the National Natural Science Foundation

** Peng Guang, Wu Shujun now works respectively in Hubei Meteorological Science Institute and Huiming Meteorological Bureau of Shangdong Province