

大气中对称不稳定机制的动力学分析及暴雨的分析与预报

景 丽 陆汉城

(解放军理工大学气象学院大气科学系, 南京 211101)

提 要

用气块法从力学角度对对称不稳定机制及在对称不稳定条件下产生的环流进行分析,更全面地定义了对称不稳定及它的产生机制和中尺度环流形成的过程。对暴雨两个例诊断分析表明,有些强降水区在降水前和降水过程中存在着对称不稳定,说明对称不稳定条件下形成的环流对暴雨有引发和加强作用。在以往研究的基础上,总结出了利用常规观测资料分析对称不稳定是否存在,及其能量大小的方法,用它来预报是否产生降水及降水的强度,从而提高降水预报准确率。

关键词: 对称不稳定 动力学分析 中尺度环流 暴雨分析与预报

引 言

一些研究认为,对称不稳定是大气在垂直方向上为对流稳定,在水平方向上为惯性稳定的情况下,做倾斜上升运动时仍可能发生不稳定扰动的一种大气不稳定机制^[1]。那么,气块作下沉运动时还会不会产生不稳定,即远离平衡位置做加速运动呢?显然上面的定义并没有说明。如果气块作下沉运动时会产生不稳定,那么,上面的定义又是不全面的,需要进行补充。环流包括上升和下沉运动,虽然上升运动是产生降水的直接原因,但下沉运动和上升运动之间有密切联系,所以有必要对两者都进行分析。研究表明,对称不稳定的尺度为几十到几百公里,它是产生许多中尺度雨带和雪带的直接原因^[2]。对称不稳定条件下会产生倾斜中尺度环流,环流与大气的上升和下沉运动相联系,在水汽充沛的条件下就有可能引发暴雨。在雨区由于潜热释放,即使初始时刻是对称稳定的,经过一段时间后也有可能产生对称不稳定扰动,

使上升运动加强,相应对降水有加强作用。在预报中,由于常规分析没有包括对对称不稳定的分析,所以,对称不稳定引发的暴雨具有了“突发性”。实际上,在分析常规资料的基础上,通过对温度场、湿度场和大尺度环境场的分析,由这种不稳定机制引发的暴雨是可以预报的。本文运用气块法对对称不稳定机制进行了全面分析并通过对暴雨两个例的分析,揭示出对称不稳定条件下中尺度环流对暴雨的作用,以及这种情况下产生暴雨时的温度、湿度等物理量场的特征。

1 对称不稳定形成的动力学分析

运用气块法从力学的角度出发可以得到以下结论:气块朝 M 减小方向运动时,受到动量恢复力的作用,从而水平方向上是惯性稳定的;气块朝 θ 增大方向运动时,受到向下的浮力恢复力作用,从而垂直方向上是对流稳定的(图 1)。

从图 1 可以看出,当气块向 X 负(左)方向移动时: M 减小, θ 减小。此时气块受到浮

力和水平方向恢复力的作用。

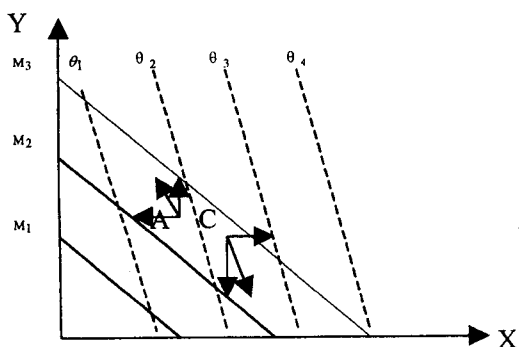


图 1 对称不稳定的垂直剖面图

当气块向 X 正方向(右)运动时: M 增大, θ 增大。气块受到向左的强迫作用力及向下的浮力恢复力的作用。

当气块向 Y 正方向(上)移动时: M 增大, θ 增大。气块受到向左的强迫作用力及向下的浮力恢复力的作用。

当气块向 Y 负方向(下)运动时: M 减小, θ 减小。气块受到浮力和水平方向恢复力的作用。

气块的倾斜运动总是可以分解为水平和垂直两部分,因此,在此过程中气块要受到四种力的作用,对于不同的倾斜运动如上升和下沉运动,这四种力各起着不同的作用。有些力起平衡作用,有些力使气块产生远离平衡位置的加速运动,从而产生不稳定。下面应用例子进行具体分析说明。

如图 2 所示,假定有一气块 A 做倾斜上升运动,运动分解为垂直上升和水平向左运动。

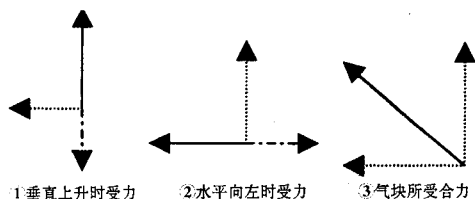


图 2 气块受力分析示意图

实线表示气块运动方向,虚线表示受力方向

上述四种力中,水平方向恢复力和向下

的浮力恢复力使气块保持惯性稳定和对流稳定,浮力和向左的强迫作用力的合力方向与气块运动方向相一致,当有初始扰动时将促使气块远离平衡位置,加速倾斜上升,从而产生不稳定。

气块 B 做倾斜下沉运动时,运动分解为两部分(如图 3 所示):垂直下降和水平向右运动。四种力中,向上的浮力和向左的强迫作用力使大气在垂直和水平方向上保持稳定,水平向右的强迫作用力和向下的浮力恢复力的合力与气块初始运动方向相一致,当有扰动发生时气块将远离平衡位置,加速倾斜下降,从而产生不稳定。

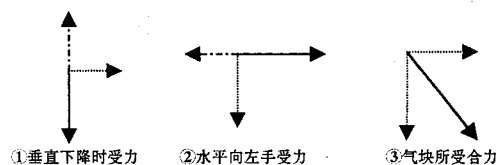


图 3 气块受力分析示意图

实线表示气块运动方向,虚线表示受力方向

从以上的分析中可以看出,水平方向上为惯性稳定,垂直方向上为对流稳定的大气有倾斜上升或倾斜下降运动时都会产生远离平衡位置的加速运动,即产生不稳定。因此,在两种惯性稳定的大气中,只要存在倾斜运动,就会发生对称不稳定。惯性不稳定在形态上而言,其实是一种惯性对流不稳定。

2 实际大气中对称不稳定的产生的有利条件及其引发的中尺度环流

2.1 实际大气中对称不稳定形成的有利条件

研究表明,初始状态是对称稳定的大气经过一段时间之后,有可能变成对称不稳定的^[1]。下面对这两种状态转化的有利条件进行分析。对称不稳定的判据为: $q_w < 0$, 因为实际大气往往是潮湿的,所以,这里只对潮湿大气进行讨论,即只考虑湿位涡 $q_w < 0$ 的情

况。一些研究只考虑方程右边的三项,但由于一个站点的位置是固定的,它的物理量场应该受到周围环境场的影响,尤其是上游效应的作用。所以这里也引入了平流及垂直输送项。

$$\begin{aligned} \frac{dq_w}{dt} &= \frac{\partial q_w}{\partial t} + u \frac{\partial q_w}{\partial x} + v \frac{\partial q_w}{\partial y} + w \frac{\partial q_w}{\partial z} \\ &= f \left(\frac{g}{\theta_0^2} \right) \mathbf{k} \cdot (\nabla \theta_w \times \nabla \theta) + \\ &\quad f \left(\frac{g}{\theta_0} \right) \boldsymbol{\zeta} \cdot \nabla Q + f \left(\frac{g}{\theta_0} \right) \mathbf{F} \times \nabla \theta_w \\ \frac{\partial q_w}{\partial t} &= f \left(\frac{g}{\theta_0^2} \right) \mathbf{k} \cdot (\nabla \theta_w \times \nabla \theta) + \\ &\quad f \left(\frac{g}{\theta_0} \right) \boldsymbol{\zeta} \cdot \nabla Q + f \left(\frac{g}{\theta_0} \right) \mathbf{F} \times \nabla \theta_w \\ &\quad - u \frac{\partial q_w}{\partial x} - v \frac{\partial q_w}{\partial y} - w \frac{\partial q_w}{\partial z} \end{aligned}$$

从上式可以看出,一个固定地点的湿位涡随时间的变化与以下几个过程有关:

①水平方向上 θ 与 θ_w 之间的角度;②非绝热加热的作用;③摩擦的影响;④水平湿位涡平流作用;⑤垂直湿位涡的输送。

第一项主要取决于热成风方向上湿度的变化,如果湿度增大,湿球位涡将变小,有可能导致对称不稳定的发生。第三项摩擦所起作用与地形有关,不同的地形有不同的效果,当摩擦项的作用远远大于其它项时,对称不稳定的形成就具有地方性的特点,即在某种地形下有利于形成对称不稳定,导致暴雨等灾害性天气的发生,但目前还没有研究对此进行验证。第四项位涡平流的作用可用下面方法判断:通过计算可以得到湿位涡的分布图,位涡守恒情况下,当平均风向从湿位涡大值区指向小值区时,有正的湿位涡平流;当平均风向从小值区指向大值区时,有负的湿位涡平流。一个站上空如果长时间有负的湿位涡平流,该站的湿位涡就有可能变成负值,从

而满足对称不稳定条件。应该注意的是,实际大气一般是有摩擦和非绝热的,所以不能满足位涡守恒条件,空气在流动过程中,位涡的值有可能发生变化。

2.2 中尺度环流的形成

在对称不稳定区,尤其在锋面附近的对称不稳定区里,由于锋生强迫、低空急流这些适当的过程提供初始的强迫上升条件,使大气产生倾斜上升运动。并且低空急流场伴随水汽输送带,又具有强的水平切变,为上升运动的加强和降水的形成提供了有利的环境条件。高空大气辐合下降区受到倾斜向下的力的作用,加速下降,到地面后产生空气的质量堆积,并向四周扩散,在其他区域形成空气的辐合,造成上升运动,进一步加强了倾斜环流的上升支,中尺度环流得到加强。发展初期的环流为向冷区倾斜的对称倾斜环流,由于非线性平流项的作用,当扰动增长到一定程度时原来对称的环流则被破坏^[3]。研究表明,对称不稳定条件下形成的倾斜环流,其尺度为介于对流和水平惯性运动之间的中 β 尺度^[4]。因此可以推断中 β 尺度雨带的形成与这种环流有一定的关系。Hoskins, Emannel 和 Ogura 等用此理论解释了锋面雨带及飑线的启动,在一定程度上揭示了环流与雨带的关系。

3 由对称不稳定引发的暴雨个例

从上面的分析可以得出,有对称不稳定存在时,如果水汽充沛并有适当的抬升机制,就会引发降水。已经有人对对称不稳定引发的暴雪过程进行了分析^[2]。这里将对暴雨个例进行分析,来揭示由对称不稳引发的暴雨的特征。

图4是1981年6月24日16时的等 θ_w 和等 M 线图^[5],从图上可以看出,800hPa到700hPa之间有逆温存在,因此垂直方向是对

流稳定或弱不稳定的,不会产生对流性降水,用一般的预报方法有可能产生漏报,而在19时却产生了暴雨。所以应该进行进一步的分析,看是否有其它不稳定存在。可以看出,图中的等 θ_w 线在此区间有转折点存在,转折点以下 θ_w 等值线向左倾斜,与等 M 线相交。且倾角大于等 M 线的倾角。由此可判别该区域有对称不稳定存在。而在高层大气中,没有逆温存在,等 θ_w 线较平直,且倾角小于等 M 线倾角,所以没有对称不稳定存在。实况资料表明,这个区域的探空曲线表明大气是对流稳定和弱不稳定的。但在19时却出现了强暴雨,并且出现中尺度暴雨带。理论认为,在对称不稳定条件下引发的中尺度环流引起的降水具有倾斜带状结构。实况的中尺度暴雨带的存在证实了理论的正确。

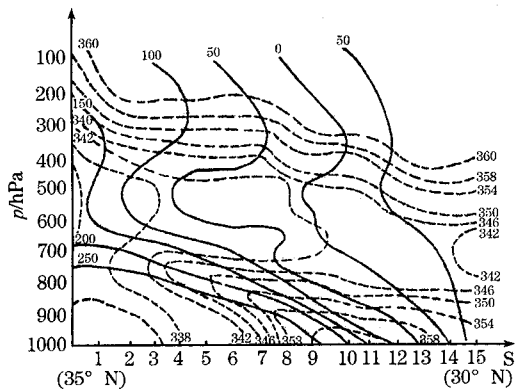


图4 纬向平均的经向等 θ_w 和等 M 垂直剖面图

实线是等 M 线;虚线是等 θ_w 线;

θ_w 单位:K, M 的单位: $\times 10^{-12} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

4 用常规探空资料判定并计算对称不稳定能量的方法

上面对对称不稳定及其引发的暴雨进行了理论分析,在实践中如何利用得到的第一手资料即常规探空资料来分析对称不稳定呢?下面介绍一些方法。

4.1 用常规探空资料绘制等 θ_w 和等 M 线图

常规探空资料主要包括温、压、湿、露点及风速、风向。 M 值由站点的相对位置及风速决定,一个站点的相对位置可以是固定值,风速从常规探空资料得到,编制程序算出每个站点各高度上 M 值。 θ_w 的值与 T 有关,某站点任一高度上的 θ_w 值,均可带入探空资料算出^[6]。再运用绘图软件可得到等 θ_w 和等 M 线图。通过他们来判断是否有对称不稳定存在,并确定其发生的具体范围。存在逆温,并且等 M 线倾角小于等 θ_w 线倾角的区域即为存在对称不稳定的区域,如果环境大气湿度比较大,并有适当的抬升机制,就应该在暴雨预报中进一步分析对称不稳定能量的大小,从而为预报暴雨的强度做好准备。

4.2 常规探空资料在等 M 面上绘制不稳定能量图

在判定对流不稳定时,可在埃玛图上点绘层结曲线求得不稳定能量。同样在判定对称不稳定能量时也可用埃玛图,主要是通过点绘沿等 M 面的探空曲线。方法是由探空资料得到的温度层结曲线 $\bar{T}(p)$ 代替虚温层结曲线,由上升气块的温度绝热变化曲线 $T(p)$ 代替上升气块的虚温绝热变化曲线。未饱和气块温度干绝热变化曲线再由该气块初态的温度、气压所确定的 θ 等线来代替。当气块达到饱和时,它的温度湿绝热变化曲线由通过温度与露点相同的点的等 θ_w 线来代替。在埃玛图中, $\bar{T}(p)$ 层结曲线与 $T(p)$ 变化曲线所夹面积的大小就可以表示对称不稳定能量的大小。

5 结论

(1)大气在满足水平方向上是惯性稳定和垂直方向上是对流稳定的情况下,作倾斜上升和下降运动时都可以产生远离平衡位置的加速度,产生不稳定,这就是对称不稳定。由于锋面抬升或急流的作用,在对称不稳定

条件下可以产生倾斜上升和下沉运动,形成中 β 尺度倾斜环流。当环境水汽充沛时,就会出现暴雨暴雪等灾害性天气。

(2)形成对称不稳定的有利环境条件是:热成风方向上湿度增大,有非绝热加热,平均风方向上有负位涡的输送。当大气中有逆温存在,垂直方向上为对流稳定时或弱不稳定,并且大尺度场环境水汽充沛时,有必要对其进行进一步的分析,确定是否有对称不稳定存在及会不会引发降水,从而提高暴雨预报的准确率。

(3)对暴雨个例的分析表明,降水前虽然没有对流发生,但存在对称不稳定,环境场水汽充沛,有可能产生降水。实况证明,后来出现降水,并且有雨带存在。说明对称不稳定在这次降水中起着决定性的作用。利用常规探测资料对对称不稳定引发的暴雨的分析和预报可以参考本文中总结的方法。

从上面的分析我们可以得出,对称不稳定是大气中的一种不稳定机制,对暴雨有引

发和加强作用,本文从力学角度对此机制进行了分析,并阐述了它与暴雨的关系。但是,对称不稳定机制引发中尺度环流的具体情况,尤其是有些动力学机制还不清楚。对称不稳定的形成是否具有地方性的特点?这些都有待进一步探讨。

参考文献

- 1 陆汉城. 中尺度大气运动的动力不稳定. 中尺度天气原理和预报, 北京:气象出版社, 2000: 31~38.
- 2 王建中, 丁一汇. 一次华北强降雪过程的湿对称不稳定性研究. 气象学报, 1995, 53(4): 457.
- 3 张颖, 张明. 线性与非线性对称不稳定的数值试验. 气象学报, 1995, 53(4): 225.
- 4 张可苏. 斜压气流的中尺度稳定性 I 对称不稳定. 气象学报, 1998, 46(3): 261~262.
- 5 郑良杰, 陆汉城. 对称性不稳定. 中尺度天气系统的诊断分析和数值模拟, 北京:气象出版社, 1989: 139~141.
- 6 丁一汇. 热力学量和运动学量的计算. 现代天气学中的诊断分析方法, 中国科学院大气物理研究所, 1984: 42~44.

Dynamical Analysis of Atmospheric Symetric Instability Mechanism and Its Torrential Rainfall forecast

Jing Li Lu Hancheng

(Department of Atmospheric Science IM, PLAUST, Nanjing 211101)

Abstract

An air parcel method is used to analyse the symmetric instability mechanism and the circulation caused by it. The diagnoses of the case of torrential rain indicate that there is symmetric instability before the precipitation and in the process of it in some area. So it could be concluded that the circulation induced by symmetric instability could induce and strengthen the torrential rain. A method to conform whether there is symmetric instability and the power of it by using conventional observation and radiosonde data is introduced. Furthermore, the forecast of precipitation and its intensity can be made by the method and the accuracy of torrential rain and flood forecast can be greatly improved.

Key Words: symmetric instability dynamic analysis mesoscale circulation analysis and forecast of torrential rain fall