

# 实际大气中对称不稳定的存在及特征

## ——对称不稳定理论的应用现状分析

王建中 丁一汇

(中国气象科学研究院)

**摘要** 文章从多个方面分析了对称不稳定在实际大气中的存在和特征,总结了对称不稳定理论在锋面降水带、雪暴、雷暴、飑线和爆发性气旋等领域中的应用现状。并且指出对称不稳定分析中的不确定性和以后的发展方向。

**关键词** 对称不稳定, 中尺度雨带, 湿对称不稳定

### 1 引言

最近二、三十年来,许多国家开展了有组织各种中尺度观测试验,这大大改变了人们对锋面降水分布的认识。对锋面中尺度降水带形成机理的分析是气象学家们非常感兴趣的课题。对称不稳定作为一种中尺度不稳定,首先由 D A Bennetts 和 B J Hoskins<sup>[1]</sup>将它应用到锋面雨带的解释中来,随后对称不稳定理论被广泛地应用到雪暴、飑线、雷暴和爆发性气旋等不同天气形势当中。沈新勇、丁一汇<sup>[2]</sup>详尽地回顾了对称不稳定理论的发展现状;王鹏云<sup>[3]</sup>介绍了对称不稳定的一些结果和在锋面雨带中的应用。本文分析了对称不稳定理论的应用现状,同时讨论了实际大气中对称不稳定的存在与特征。

### 2 湿对称不稳定与雨带

#### 2.1 湿对称不稳定与锋面雨带

锋面降水雨带的宽度约在 80—300km,雨带大体与热成风方向平行。由于对称不稳定形成的滚轴状环流的排列方向与热成风方向平行,因此它成为中尺度雨带的可能触发机制之一。D A Bennetts 和 B J Hoskins<sup>[1]</sup>将雷达和卫星观测到的锋面雨带和非带状降水

同有限湿大气的条件性对称不稳定理论结果作了比较和验证,发现两者之间还是比较一致,并提出了一种锋面雨带形成的尺度假说:在第一阶段,空气向北移动,上升穿过斜压波,由于在热成风方向上湿度增加和(或)非绝热作用,湿球位涡变成负的;第二阶段,空气上升到一定程度开始饱和,于是大气变成条件性对称不稳定,这种不稳定产生一种滚轴状环流,差不多沿着热成风方向排列,导致一种带状云结构;第三阶段,这种滚轴状环流发展,在对流层中层带状云区的有利部位,产生了条件性重力不稳定,形成垂直对流,导致了强烈的带状降水。这种云带发展模式可能更适合于暖锋雨带的形成。

Hobbs<sup>[4]</sup>等按照雨带尺度、在锋面系统中所处的部位和雨带的走向,把中尺度雨带分为六类:暖锋雨带、暖区雨带、窄和宽冷锋雨带、锋前冷涌雨带、锋后雨带和波状雨带。Parsons 和 Hobbs<sup>[5]</sup>对中纬度气旋中这几种类型雨带的形成机制作了比较,发现条件对称不稳定理论能够解释许多暖区雨带和宽冷锋雨带的观测特征。并且指出对于暖区雨带,特别是美国中部的暖区飑线而言,风暴的发展图象经常是尺度增大的,即小尺度对流先发展而中尺度云带形成在后。首先,当逆温层

被冲破时,小尺度倾斜或垂直对流在对流不稳定环境中迅速发展。当积云数目在中尺度区域变得足够大时,积云混合使得湿层结稳定,涡动粘性增加,这样第二阶段开始,条件性对称不稳定(CSI)表现为近似沿环境风切变方向的中- $\beta$ 和中- $\alpha$ 滚轴状环流特征。在第三阶段,环流进一步在中尺度或更大的区域上辐合低层的水汽,反过来,水汽辐合的加强又将对流组织成带状结构。

Jascourt<sup>[6]</sup>等研究了五条对流云带同时在已经存在的自由对流区迅速发展起来的个例。这种对流云带的发展是尺度增长的一个范例,他们认为这是条件性对流—对称不稳定的作用所致,即小尺度对流云塔能够触发CSI中尺度环流的迅速增长,这种中尺度环流反过来加强对流的发展。

## 2.2 湿对称不稳定与非锋面雨带

Seltzer等<sup>[7]</sup>提供了15个与地面锋区无关的带状与非带状降水例子(都为冬季个例),将对称不稳定线性扰动理论和气块理论同这些降水的特征进行比较,发现对称不稳定能够解释雨带的许多特征。所有的雨带沿热成风方向排列。当雨带出现时可以观测到强的切变和接近中性的静力稳定度。这项研究支持对称不稳定为降水带的形成机制之一的假设。

## 2.3 湿对称不稳定与多雨带

在粘性大气中对称不稳定的线性理论指出多雨带之间的距离与不稳定区的厚度和等熵面的倾斜程度有关,并且雨带相对于不稳定区的基本气流并不传播。

Seltzer等<sup>[7]</sup>将四个观测到的多雨带(冬季个例)同对称不稳定(SI)理论作了比较,发现这些多雨带之间的距离同SI理论预测出的波长符合得比较好。

Jascourt等<sup>[6]</sup>对夏季中午前后同时发展起来的五条对流云带作了分析。这些带状的云结构在不到三个小时内从分散、破碎的积云中发展起来。这样有组织的对流在宽广的区域内同时并且快速发展起来,这就意味着

一种中尺度不稳定过程的存在。在排除了锋生强迫、边界层过程和重力波(包括Wave-CISK)对它的主要影响之后,考虑到云带上空500hPa以下有一个弱的对称稳定层存在,并且这些对流云带的方向与这个弱稳定层的平均切变方向一致,所以认为这块弱对称不稳定区改变了大气对自由对流的响应,决定了这种非常有组织的云带结构。

当然有些多雨带是其它机制作用的结果。Parsons等<sup>[5]</sup>研究了1976年12月8日出现在宽冷锋雨带附近的小的波状雨带,仅存在两小时,雨带间隔在11—15km,并且垂直于2—5km之间的风切变方向,Parsons等将它归结为内重力波作用的结果。

另外,从表面上看,多雨带结构不会是锋生强迫的结果。不过,Hoskins等人<sup>[8]</sup>进行了一次数值试验,将大尺度锋生风场作用在具有温度梯度极大值的初始温度场上,结果产生了多锋面雨带。他们发现各自的锋面上升气流只能在低层观测到,再往上则合并到单个云体中。

## 3 湿对称不稳定与锋生强迫

由于对称不稳定是一种中尺度斜压不稳定,因此它最可能在斜压性比较强的冬季天气形势中有所表现。

Sanders和Bosart<sup>[9]</sup>讨论了锋生强迫和对称不稳定对1983年2月11—12日出现在华盛顿到波士顿的雪暴带的作用,结果发现这个大降雪带主要是锋生强迫的结果,对称不稳定很可能只对云体高层的瞬变结构和这个大降雪带的细微结构起作用。特别有意思的是Sanders<sup>[10]</sup>重新对Seltzer等人 and Passarelli等人<sup>[7,11]</sup>研究过的大雪暴作了更深入的研究。在没有明显的地面锋区的情况下,Seltzer等和Passarelli等认为1981年12月5—6日出现在新英格兰地区的大雪暴为对称不稳定的作用所致,锋面机制在这里并不重要。而Sanders认为应该考虑地面以上对流的锋生作用。他直接计算了地转锋生强

迫项,并且在考虑了地转气流的曲率之后重新计算了对称不稳定性,结果指出这次大雪暴主要是锋生强迫的结果。随之,Moore 和 Blakley<sup>[12]</sup>探讨了锋生强迫和对称不稳定对 1982 年 1 月 30—31 日出现在美国中西部的大雪暴的相对作用,结果同前类似,这似乎意味着对称不稳定对强雪带的形成并不起主要作用。

Emanuel、Xu<sup>[13,14]</sup>等从半地转坐标下的锋面次级环流方程出发,探讨了(湿)对称稳定性与锋生强迫的相互联系。结果表明,如果暖区位涡趋于零(也就是暖区变为对称中性),那么上升气流会变得强盛和狭窄,也就是说这时候锋面抬升对锋生强迫的响应要来得强。这种上升气流必定会在水平范围上受到限制即出现尺度缩小的现象,从而有产生中尺度降水带的可能。因此,(湿)对称不稳定与锋生强迫实际上在强降水过程中扮演着不同的角色。前者表征着气流结构的中尺度的稳定性,是内因;后者则反映的是外在的强迫作用的大小,是外因。A J Thorpe 和 K A Emanuel 等<sup>[15]</sup>指出由地转强迫产生的锋面次级环流在结构上非常类似于由对称不稳定性引起的倾斜对流,尽管他们讨论的大气对倾斜对流只是具有较小的不稳定性。

王建中、丁一汇<sup>[16]</sup>分析了 1986 年 11 月 22 日至 23 日在内蒙古林东、林西地区和河套地区产生的一条狭长的东北—西南走向的降雪带,结果指出整个降雪带的形成与暖区西南低空急流左侧存在的狭长的湿球位涡负值区密切相关,并且河套地区的强降雪中心主要为在暖区具有弱的对称不稳定的情形下锋生强迫所致,而林东、林西地区的强降雪中心则是明显由湿对称不稳定所致。Howard 和 Tollerud<sup>[17]</sup>合成分析 60 个科罗拉多冬季风暴之后提供证据表明沿着落基山山前由这些风暴造成的强降雪由于环境大气之中的条件性对称不稳定而加强。Tollerud 和 Howard 等<sup>[18]</sup>指出可以尝试将冬季风暴中条件性对称不稳定的气流结构作为区分产生强降雪

风暴和弱降雪风暴的指标。Saarikivi 和 Puhakka<sup>[19]</sup>对一个锢囚很深的冬季风暴作湿位涡和锋生强迫方面的分析。结果表明大尺度锋面系统已经锢囚很深,条件性对称不稳定很可能与锢囚锋内冷涌、暖舌这样的中尺度特征有关。这个观测结果与 Xu<sup>[14]</sup>在讨论湿位涡比较小或为负值以及锋生强迫比较小的情形时得到的关于多个中尺度锋面结构(冷涌)特征的结果相一致。G W Reuter 和 M K Yau<sup>[20]</sup>从 CASP 外场试验中选择 7 个冬季气旋附近的降雪带,使用三小时一次的加密探空资料估价了倾斜对流不稳定(即湿对称不稳定)的重要性。7 个个例的结果一致地表明倾斜对流至少对加拿大大西洋这样活跃的斜压区不是一个罕见的现象,很可能是无时不在的。位于高层的潜在对称不稳定区由于缺乏水汽实际上不能释放出不稳定能量;而在大气经常可以达到饱和的对流层低层,条件性对称不稳定能量容易释放出来导致强降雪带,有时形成多降水带。

#### 4 湿对称不稳定与气旋生成和锋生

Thorpe 和 Emanuel<sup>[15]</sup>在半地转框架内探讨了在大气对倾斜对流具有弱的稳定性或中性的情形下湿锋生的特征和斜压波的增长,结果表明倾斜对流引起的潜热释放产生了大的位涡源,导致了地面锋生的快速增长(比起干模式)。对斜压波而言,在大气对倾斜对流为中性的状态下气旋的增长率要高于干模式两倍还多。

爆发性气旋的成因分析是目前气象研究的热门课题,而关于湿对称不稳定在爆发性气旋生成过程中的存在和作用的研究也渐渐开始有人涉及。Reed 和 Albright<sup>[21]</sup>发现在一个湿倾斜对流不稳定的环境中气旋生成非常强。关于爆发性气旋的数值模拟结果也指出倾斜对流支持了暖锋的发展。Reuter 和 Yau<sup>[22]</sup>分析了 ERICA 外场试验中捕捉到的一个爆发性气旋个例,结果指出在爆发性气旋生成的早期,条件性对称不稳定空气沿着



通过饱和区的倾斜对流进行着向倾斜对流中性的状态调整。调整的时间小于3小时。这很好地支持了Emanuel的上述推断。

## 7 对称不稳定诊断的不确定性

由于受到观测资料时空分辨率的限制和其它原因,在诊断实际大气中的对称不稳定时存在着许多误差和模糊。湿对称不稳定是一种中尺度不稳定,因此最好用中尺度观测资料来分辨这种不稳定性。K A Emanuel<sup>[26]</sup>用常规资料和加密的现场试验资料作了试验,发现用美国东部的常规资料作剖面分析图,只能凑凑合合地估价这种倾斜对流不稳定,而在GALE期间分辨率小于100公里的观测网能够很好地分辨这种不稳定性。

由于对称不稳定理论本身有许多假定条件,如准地转平衡假定等,所以将它应用于实际大气中必须小心。譬如在对称不稳定理论中基本气流是地转风,而我们在实际的诊断中更多地使用了实际风。在对称不稳定理论中,一个最重要的假定就是二维性,基本气流是一条直线,不考虑基本气流在它本身方向上的变化。而在实际大气中由于基本气流曲率的存在,这种二维的假定与实际就有了偏差。实际上在对称不稳定的理论研究中最早研究的是处在梯度风平衡中的圆形涡旋的对称不稳定条件。不妨可以考虑将梯度风平衡代替地转平衡来研究弯曲明显的基本气流的对称稳定性。Sanders<sup>[10]</sup>假定局地气流为一定常圆形涡旋的一部分,根据梯度风平衡计算了湿对称稳定性,使主要云区西北侧的弱稳定和不稳定区有所扩展。另一个重要的条件就是垂直切变的方向在所考虑的气层深度内改变不大。这些都是诊断湿对称不稳定时要求注意的地方。

另外各种诊断湿对称不稳定的方法有各自不同的误差特征,有时甚至会得出不太相同的结果。Reed<sup>[27]</sup>等运用一次海洋爆发性涡旋成功模拟的资料穿过暖锋作了关于绝对动量和相当位温的剖面叠加图。结果指出在气

旋迅速生成中强烈的上升气流区呈现出小或中性的对称稳定性。在计算了同样反映湿对称不稳定性的湿位涡(MPV)之后则发现在强烈的上升气流区存在着较大的MPV值,而较大的MPV值对应着较大的对称稳定性。两者的诊断结果差别较大。可能的原因是气旋内的气流呈气旋性弯曲,不再是直线,气旋性旋转在动力学上具有使系统稳定的作用。

应用气块法讨论局地湿对称不稳定时也应该注意到气块法的适用性。首先这种方法需要假定气块是在互相不受干扰的环境中位移。在对流尺度上,这一方法可以对气块位移的可能和强度给出切合实际的估计。而在更大尺度上,它的应用似乎要受到限制。Thorpe等<sup>[28]</sup>试图重新考虑气块法在不同的长度尺度上的应用(特别是在对称不稳定对锋面雨带的应用方面)。得出的结论是气块理论在更大尺度上的应用必须小心,但在某些情况下它能对大气扰动提供有效的(尽管是不完全的)考察。另外,Reuter<sup>[22]</sup>等指出在计算气块相对于环境空气的浮力时,考虑和不考虑凝结水的重量对密度的作用在对流层中层可以存在约2℃的温度差别,这个误差已大大超过仪器的观测误差,因此在估计气块的净浮力时必须考虑凝结水的作用,避免过高估计对称不稳定。

## 8 小结

可以说,尽管自从Hoskins建议将条件性对称不稳定作为雨带形成的可能机制以来已有20年的时间,但由于受到观测资料分辨率的限制和其它原因,关于大气中湿对称不稳定性的存在及特征的诊断分析研究工作还远没有准确而又清楚地揭示出湿对称不稳定在大气中的作用机理,仍有一些重大问题需要通过理论和观测分析去解决,譬如:

(a) 倾斜对流与锋生和气旋生成的相互作用,

(b) 在MCC等中尺度对流系统中对流

不稳定、湿对称不稳定和惯性不稳定相互转化的机理和对中尺度对流系统的作用,

(C)锋面次级环流与对称不稳定环流的区别与联系,

(d)倾斜对流的参数化问题,等等。

不过随着以后各种中尺度外场试验的开展和中尺度常规观测网的建立,相信不久的将来可以获得令中尺度分析满意的观测资料,从而加深对这些问题和其它问题的深入研究,推动中尺度气象学进一步向前发展。

## 参考文献

- 1 Bennetts D A, Hoskins B J. Conditional symmetric instability — a possible explanation for frontal rainband. *Quart J R Met Soc*, 1979, 105: 945—962
- 2 丁一汇,沈新勇. 对称不稳定理论及其应用问题(一)线性理论. *应用气象学报*, 1994, 8: 361—367
- 3 王鹏云. 对称不稳定与锋面雨带. *气象科技*, 1989, 6: 1—9
- 4 Hobbs P V. Organization and structure of clouds and precipitation on the mesoscale and microscale in cyclonic storms. *Rev Geophys Space Phys*, 1978, 16: 741—755
- 5 Parsons D B, Hobbs P V. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. XI. Comparisons between observation and theoretical aspects of rainbands. *J Atmos Sci*, 1983, 40: 2377—2397
- 6 Jascourt S D, Lindstrom S S, Seman C J, Houghton D D. An observation of banded convective development in the presence of weak symmetric stability. *Mon Wea Rev*, 1988, 116: 175—191
- 7 Seltzer M A, Passarelli R E, Emanuel K A. The possible role of symmetric instability in the formation of precipitation bands. *J Atmo Sci*, 1985, 42: 2207—2219
- 8 Hoskins B J, Neto E C, H-R Cho. The formation of multifronts. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1984, 110: 881—896
- 9 Sanders F, Bosart L F. Mesoscale structure in the megalopolitan snowstorm of 11—12 February 1983. part I: frontogenetical forcing and symmetric instability. *J Atmo Sci*, 1985, 42: 1050—1061
- 10 Sanders Frederick. Frontogenesis and symmetric stability in a major New England snowstorm. *Mon Wea Rev*, 1986, 114, 1847—1862
- 11 Passarelli R E, Gordon N D, Seltzers M A. Case study

- of an intense winter snow band; The possible role of symmetric instability. *J Atmos Sci*, 1986, 43: 1906—1918
- 12 Moore J T, Blakley P D. The role of frontogenetical forcing and conditional symmetric instability in the mid-west snowstorm of 30—31 January 1982. *Mon Wea Rev*, 1988, 116: 2155—2171
- 13 Emanuel K A. Frontal circulation in the presence of small moist symmetric instability. *J Atmo Sci*, 1985, 42: 2183—2198
- 15 Xu Q. Frontal circulations in the presence of small viscous moist symmetric stability and weak forcing. *Q J R Met Soc*, 1989, 115: 1325—1353
- 15 Thorpe A J, Emanuel K A. Frontogenesis in the presence of small stability to slantwise convection. *J Atmos Sci*, 1985, 42: 1809—1824
- 16 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. 硕士研究生毕业论文, 1991, 将在《气象学报》上发表
- 17 Howard K W, Tollerud E I. The structure and evolution of heavy- snow- producing Colorado cyclones. In: Preprints, Palmén symposium on extratropical cyclones and their role in the general circulation. Helsinki, Finland, Aug 29-Sept 2, 1988: 168—171
- 18 Tollerud E I, Howard K W, Xiao-Ping Zhong. Jet streaks and their relationship to heavy precipitation in Colorado front range winter storms. In: Preprints, First International Winter Storm Symposium. 1991, paper 1B. 11
- 19 Saarikivi Pirkko and Puhakka Timo. A deeply-occluded winter storm; evolution of mesoscale circulation in the presence of CSI and frontogenetic forcing. In: Preprints, First International Winter Storm Symposium. 1991, paper 9. 4
- 20 Reuter G W, Yau M K. Observations of slantwise convective instability in winter cyclones. *Mon Wea Rev*, 1990, 118: 447—458
- 21 Reed R J, Albright M D. A case study of explosive cyclones over the eastern pacific. *Mon Wea Rev*, 1986, 114: 2297—2319
- 22 Reuter G W, Yau M K. Slantwise convection in midlatitude marine cyclones. In: Preprints, First International Winter Storm Symposium. 1991, paper 3. 6
- 23 Da-Lin Zhang, Han-Ru Cho. Moist symmetric instability in the stratiform region of a simulated squall line. In: Fifth Conference on Mesoscale Processes. 1991, paper 8. 12

- 24 Seman C J. On the role of nonlinear convective-symmetric instability in the evolution of a numerically simulated mesoscale convective system. In: Fifth Conference on Mesoscale Processes, 1991, paper 8. 13
- 25 Yoshi Ogura, Hann-Ming Juang, Ke-Su Zhang and Su-Tzai Soong. Possible triggering mechanisms for severe storms in SESAME- AVE IV (9-10 May 1979). Bull Amer Meteorol Soc, 1992, 63: 503-515
- 26 Emanuel K A. Observational evidence of slantwise convective adjustment. Mon Wea Rev, 1988, 116, 1805-1816
- 27 Reed R J, Yea-Ching Tung and Stoelinga M T. The symmetric of a rapidly deepening marine cyclone as seen in a numerical simulation. In: Preprints, First International Winter Storm Symposium. 1991, paper 8. 3
- 28 Thorpe A J, B J Hoskins, V Innocentini. The parcel method in a baroclinic atmosphere. J Atmo Sci, 1989, 46: 1274-1284