第46卷 第3期 气 象 学 报 Vol. 46, No. 3
1988年8月 ACTA METEOROLOGICA SINICA Aug., 1988

一次快速发展气旋的诊断分析*

田生春 刘苏红

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文研究的春季北方气旋，发生突然、发展迅速、天气强烈，与国外所谓"气象炸弹"(Bomb)的爆发性气旋相似。结果指出：这种气旋是在中小尺度积云集聚和大尺度斜压发展过程中，由两种尺度互相作用而发生发展的，在潜热释放阶段CISK不稳定对气旋发展起重要作用。还发现副热带急流异常强劲，高低空急流耦合形式与以往所见不同，也指出非对称结构使系统快速前进并有利于云滴冲拼增长形成暴雨。

一、引 言

气旋发展问题，国内外已有不少研究[1-3]，但对春季爆发性快速气旋，还了解较少。本文对1983年4月25日—27日快速发生发展的一次春季温带气旋暴风雨过程做了天气动力分析和诊断分析。

二、突发的春季气旋及其天气概况

1983年4月25日06Z在原大尺度锋尾的前方，出现一个新生的低压（开封地面气压下降到1000 hPa[4]），它生成以后迅速发展并向东北方向快速移动。在途经渤海湾时，气旋强度加深。据锦州气象台探测，该站地面气压在18 h内下降了22.5 hPa(见图1)。国外所谓"气象炸弹"的爆发性气旋(Bomb)平均降压率每小时1 hPa[5]，这次气旋降压率与国外的爆炸气旋相似。过锦州后气旋迅速向吉林移动，同时环流加速并系统伸长，到26日发展成一个很深的气旋。图2是高空、地面天气图，由图可见26日12Z 500 hPa低压中心位于沈阳和长春之间，中心强度544 dagpm；地面中心在长春东北约百公里地方，强度为981.8 hPa。气旋到26日18Z达到最强(979 hPa)。

随着气旋发展和移动发生了强烈的对流天气。黄海、东北大部地区，黄海中部、南部以及冀东地区普遍出现了5—7级大风[4]，渤海、黄海北部出现了6—7级大风，阵风达10—12级，有些山区还发生了龙卷、冰雹。上述地区大多发生了暴雨，过程雨量大于80 mm的站不下9—10个，其中以河北省玉田、唐山以及辽宁省锦州市最大，分别为139，121和115 mm。6 h雨量多数在30—40 mm左右，其中安达县多达71 mm。因此这次过程

* 本文于1985年9月13日收到，1986年9月10日收到修改稿。

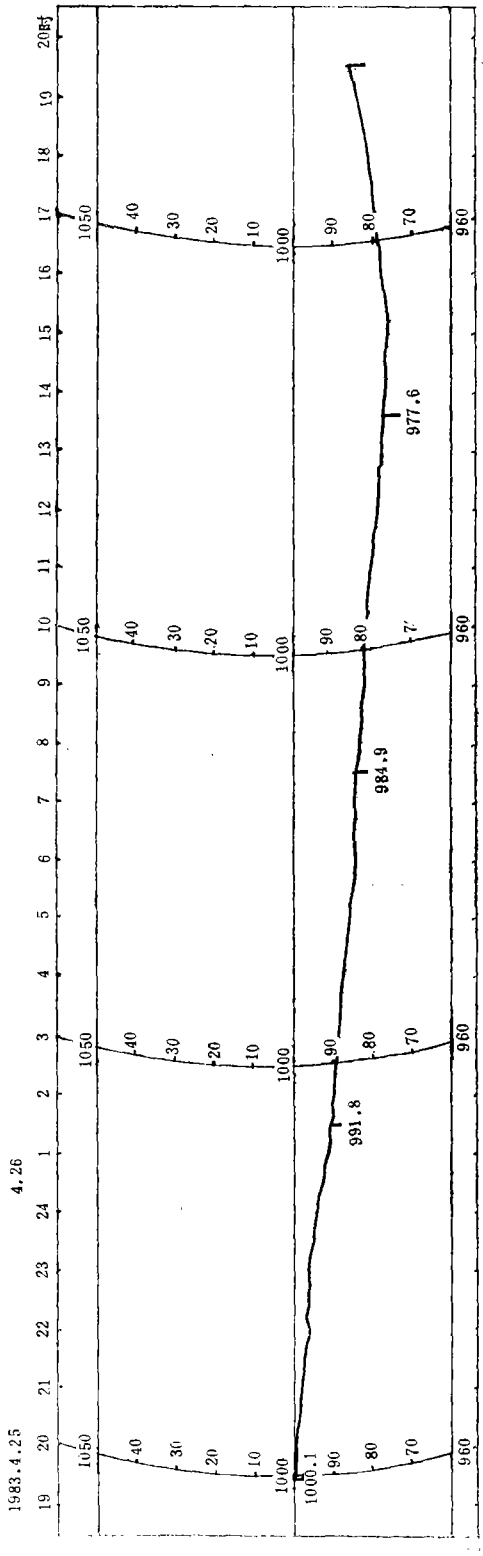
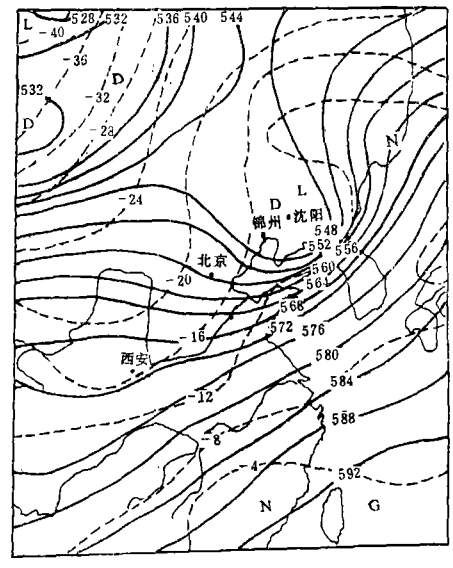
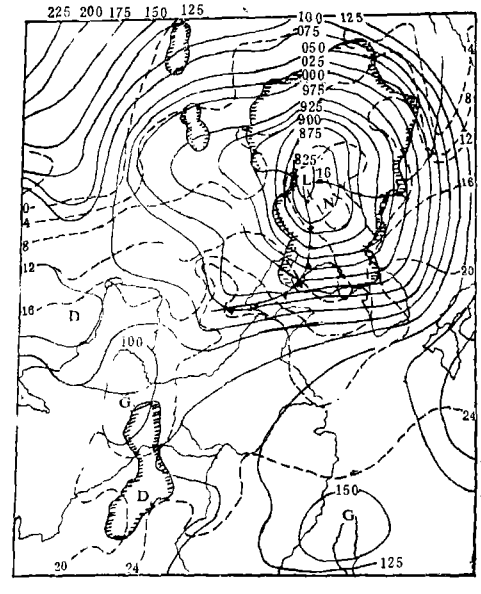


图 1 1983 年 4 月 26 日锦州台气压自记曲线



a 500 hPa



b 地面

图 2 1983 年 4 月 26 日 12Z 天气图
(实线 等高线(a)或等压线(b);
虚线 等温线,带阴影区为雨区)

是一次较强的暴风雨过程。降雨特点是强雨集中于短时间内(25 日 12 Z 后)，强雨区呈东北-西南向带状，空间尺度亦较小。

三、环 流 特 征

这次气旋发生前的环流特征有以下二点：

1. 西太平洋副热带高压位置偏北，我国东部地区偏暖

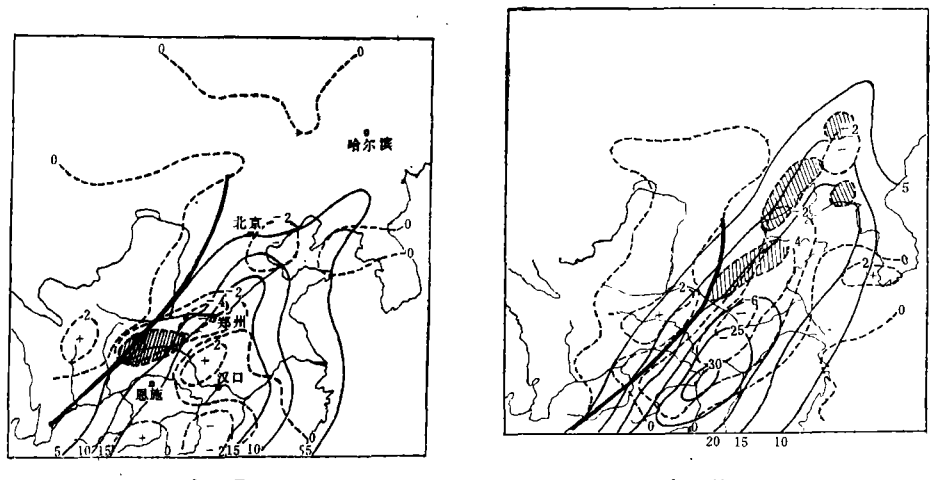
四月份平均副热带高压脊线一般在 15°N 以南，但这次已北伸到我国台湾，588 dagpm 线已达我国东南沿海杭州和日本九州，甚至朝鲜及苏联滨海省地区均受高脊控制。因此，东亚槽较常年偏西，我国东部地区受脊后偏南气流影响异常偏暖，经比较看出有些站地面气温至少比多年月平均值高 6°C，最多的可高出 12°C以上（长春）。25 日低空急流出现后，暖湿空气对过程影响尤其显著。

2. 副热带急流异常强劲

据中央气象局气象台统计四月份 200 hPa 平均最大风速区在日本九州到我国长江流域一线，强度约 40 ms^{-1}，强风带呈准东西走向。这次气旋发生前 200 hPa 大于 60 ms^{-1}急流区位于我国昆明到上海一线，呈西南-东北走向，说明当时副热带急流十分强劲，且经向度大。气旋发生后这支副热带急流随系统向北移动，且始终位于系统的右后方，可见它与系统发生发展联系十分紧密。

四、系统结构及气旋暴风雨形成机制

我们用七层实测资料做了三天 150 km 格距的物理量计算，并配合卫星云图分析了主要因子、系统结构以及形成机制，结果看出这次气旋所以能从无到有迅速发生发展，不仅因为存在有利的大尺度环境条件，还和有中小尺度积云对流的聚集伴随以及两种尺度



a　1983 年 4 月 25 日 00 Z　　b　1983 年 4 月 25 日 12 Z

图 3　水汽通量(实线)及水汽辐合量(虚线)图

(粗实线：槽线，阴影区：雨区)

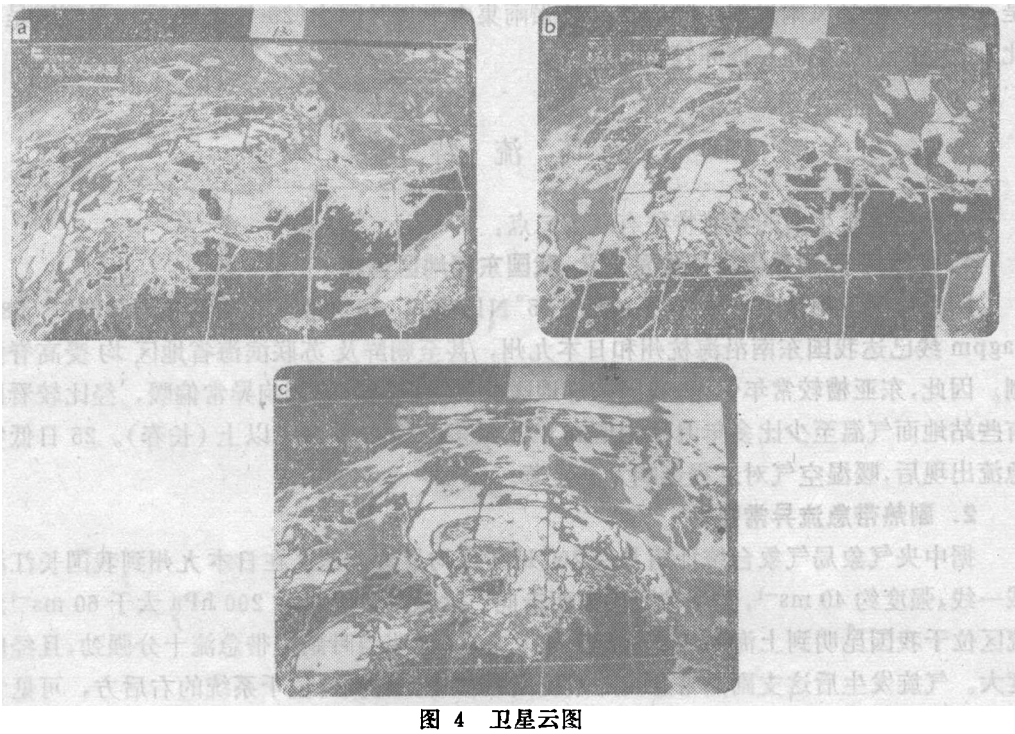


图 4 卫星云图
(a 1983 年 4 月 25 日 06 z, b 1983 年 4 月 25 日 18 z, c 1983 年 4 月 26 日 18 z)

互相作用有关。

1. 暖湿输送带的作用

由图 3 可以看出，随低空急流的出现，25 日 00 Z 850 hPa 上有一条大于 10 g/(cm·hPa·s) 的水汽通量带呈西南-东北走向，槽与通量轴间有水汽辐合区与雨区对应，25 日 12 Z 该水汽通量带(下称暖湿输送带)更加北伸、中心也大为加强(达 30 g/(cm·hPa·s))、水汽辐合与降水也都更为加强。因此，850 hPa 的水汽含量迅速增多，比湿 24 日只约 5—6 g/kg，25 日达 9—12 g/kg，其实际含量已达夏季暴雨日程度[6]。

与此暖湿输送带对应，有一条大尺度云系(图略)，说明暖湿输送并不只限于对流层低层，在垂直方向上暖湿层也相当深厚。它为对流发展提供充分水源，而且其中层状云与积状云并存有利于提高降水效率。所以它是这次气旋暴风雨的重要因子之一。

2. 积云聚集伴随气旋发生发展

从图 4a 可见 25 日 06 Z 河南上空已有几块白亮积云，最大尺度相当于奥伦斯基所给尺度分类中的 β-中尺度。它是由前一天零星对流云聚集而成的。由图还可看出暖湿输送带北面云区有反气旋弯曲现象，根据冈林俊雄[7]所做云图模式，这种反气旋弯曲现象象征气旋将要发展，果然，25 日 18 Z，上述积云块已进一步合并成大片白亮云团，其上风方边缘清楚，象征该处是迎风面、积云新生、发展旺盛，北面边缘不清并有弧形次冷云区相接，象征该处有云向外消散铺成云砧。这时北边还有弧形反气旋弯曲所以系统还要发展，到26 日 18 Z 变成准对称环状云区。由此图可见整个气旋发生发展过程均有中小尺度积云聚集活动伴随。

3. 副热带急流和一种新的高低空耦合形式

前已指出这次过程中副热带急流异常强劲，如图 5a 所示这支副热带急流和北支高

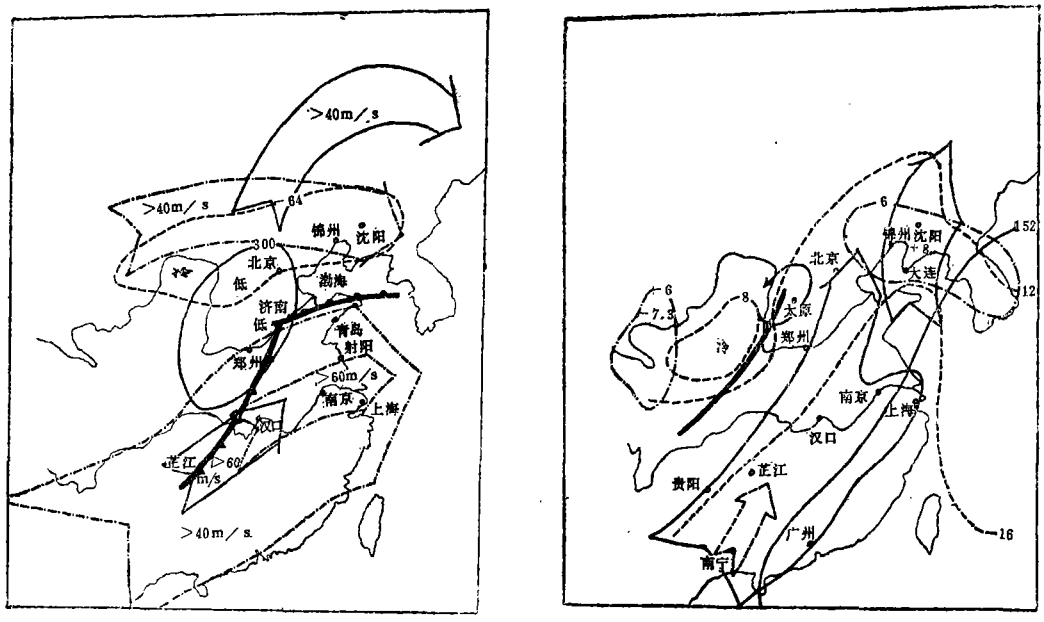


图 5　高低空急流特征图

(a　实线：4 月 25 日 12 Z 700 hPa 低涡和 200 hPa 急流区，带矢的点划线：4 月 24 日 12 Z 200 hPa 急流区，虚线：≤−60℃区。b　实线：25 日 00 Z 850 hPa 152 dagpm 等高线，实线矢区为同时间风速大于 12 m/s 低空急流区；虚线矢区为 24 日急流区。带矢的实线表示风场环流，粗实线为槽线，虚线：等温线，点划线：500 hPa 24 小时变温中心)

空急流迥然不同，北支急流大于 40 ms^{-1} 的大风区较窄且和 200 hPa 上最低温度区（$T \leqslant -64℃$）对应，它略呈反气旋弯曲并迅速向下游移动。而这支副热带急流不论是强度还是急流区宽度都比北支大得多，而且它相对较暖并始终伴随气旋向北推移。如图 5a 所示新生气旋位于这支副热带急流左前方、极锋急流的右后方。

低空急流较副热带急流出现得晚，由图 5b 看出它的走向与副热带急流走向不同，风自下而上是顺转的，此外低空急流轴线和温度脊有一位相差，并且轴线与等温线有交角。这都表明我国东部对流层中下层盛行暖平流（强达 5.0×10^{-4} ℃/s），而新生气旋后部高层为强冷平流（-12.0×10^{-4} ℃/s）。在低空急流前锋发生气旋性弯曲后出现暴风雨。

这次副热带急流不仅为气旋的发生发展提供强气旋式切变和动力辐散流场，还通过高空动量下传造成局地大风。对比不同时次的强风区看出实测风速≥60 ms^{-1} 的强风区是随系统移动而向北向下扩展的（图略）。由图 6b 上点划线区可以看出 26 日 00 Z，大于 60 ms^{-1} 的强风区已北移到郑州并下伸到 400 hPa，系统后的 28 ms^{-1} 区界线顺涡轴向下直伸到 800 hPa 附近，而系统前方 54527 站的风速仅约 6—20 ms^{-1}，系统前后风速相差极大。由此可见系统的快速前进及局地大风的发生是和副热带急流强劲有关的。

这里所揭露的副热带急流与气旋的联系虽属个例，但并非个别现象，冈林[7]所做气旋发展最盛期云型模式中也有副热带急流和极锋急流互相靠拢现象。很明显这次过程中的

高低空急流耦合关系与以前常见者不同[8]。梅雨锋暴雨和长江切变低涡暴雨的雨区常位于高空急流出口区右前方，该处是反气旋辐散分流区。我们这次气旋则是在北支急流右后方、副热带急流左前方，是在它们和低空西南急流耦合下产生的，这是一种新的高低空耦合形式，其物理作用很值得进一步研究。

4. 大尺度斜压不稳定发展

这次过程的西风槽是向上向西倾斜的。25 日 00 Z 槽从高原移出，冷空气南下、暖湿空气受激北上，这时(见图 5 b)温度槽落后于高度槽，500 hPa 槽前后出现强烈 24 小时正负变温(各达 7℃ 以上)。850 hPa 低空急流左前方发生气旋性弯转、同时冷暖空气对比加大出现了局地非地转环流，低层暖平流（700，850 hPa 上分别为 5.4×10^{-4} 和 4.0×10^{-4} ℃/s)和高层正涡度平流($7.4\times10^{-9}\ s^{-2}$)互相叠置的现象也更加明显。由此可见气旋系统是在大尺度斜压不稳定发展过程中产生的。

图 6 是沿气旋移动方向剖制的东北-西南向垂直剖面。由图 6a 可见这次新生气旋是个涡轴向后倾斜的正涡度系统(强中心在 300 hPa，16.8×10^{-5}/s)，涡度平流零线几乎与涡轴平行，系统前后各有一个强的正负涡度平流中心（分别为 6.4 和 $-13.4\times10^{-9}\ s^{-2}$)，这两个平流中心又各与一个正负散度中心对应(分别为 5.7 和 -3.0×10^{-5}/s)。由图 6b 可以看出它们分别位于暖湿区和冷干区。同时低层暖湿冷干汇合处的强辐合中心($-3.9\times10^{-5}\ s^{-1}$）与高层辐散中心上下对应。因此，系统前半部发生上升运动（-12.9×10^{-3} hPa/s）后半部出现弱下沉补偿（5.9×10^{-3} hPa/s)。从这看出经大尺度斜压发展产生的新生气旋系统，除具有水平旋转特征外，还是具有局地垂直环流的非地转系统，图中所给平流分布必然导致系统前进。

5. 水汽凝结潜热释放的正反馈作用

在暖湿输送带里作上升运动的暖湿空气 $T-T_d$ 也小，所以容易很快升到凝结高度，其中有积云对流活动地方更会自由对流释放凝结潜热，这个热量使环境温度增加正反馈影响系统的发展变化。保证凝结潜热释放发生的重要过程是水汽向气柱辐合并凝结降水。水汽辐合量 25 日 12 Z 增加到 -7×10^{-7} g/(cm^2 hPa s)，雨区与辐合区大体配合，证明有凝结潜热释放过程。从锦州各层 θ_{se} 变化也可看出凝结潜热释放过程明显，该站 25 日 12 Z 后 12 小时雨量 73 mm，这段气压下降也最快(图 1)，由于凝结潜热释放，该站 500 hPa 及其以下各层 24 小时 θ_{se} 变化比前一天无降水时的变化大 4—10℃，在剖面图上(图 6 b)，该站上空出现前所未有的等值线下凸上凹的 θ_{se} 高值区。这些都说明当时确有明显凝结潜热释放过程。

栗原宜夫[9]曾指出“第二种条件不稳定是种以不同尺度现象相互作用这种复杂机制为基础的不稳定”，在大气处于条件不稳定状态、低层十分潮湿情况下，如果有较大范围旺盛气流促使对流群发展，它们释放凝结潜热的综合效果会使扰动有效位能增加，从而扰动动能也就越发增加，“这样大范围扰动发展的不稳定性叫第二种条件不稳定性”，所以这种不稳定的扰动能量是由非绝热加热增加扰动位能过程转换得来的。这次过程始终有积云聚集伴随，凝结潜热释放也明显，所以气旋的快速发展除由于斜压不稳定过程外，还有第二种条件不稳定过程。在这个过程里尺度大的扰动和尺度小的对流群是互相加强的，从而使自己发展起来。由图 7 可见原来只在低层有正旋和辐合，其后无辐散层抬高、涡度变

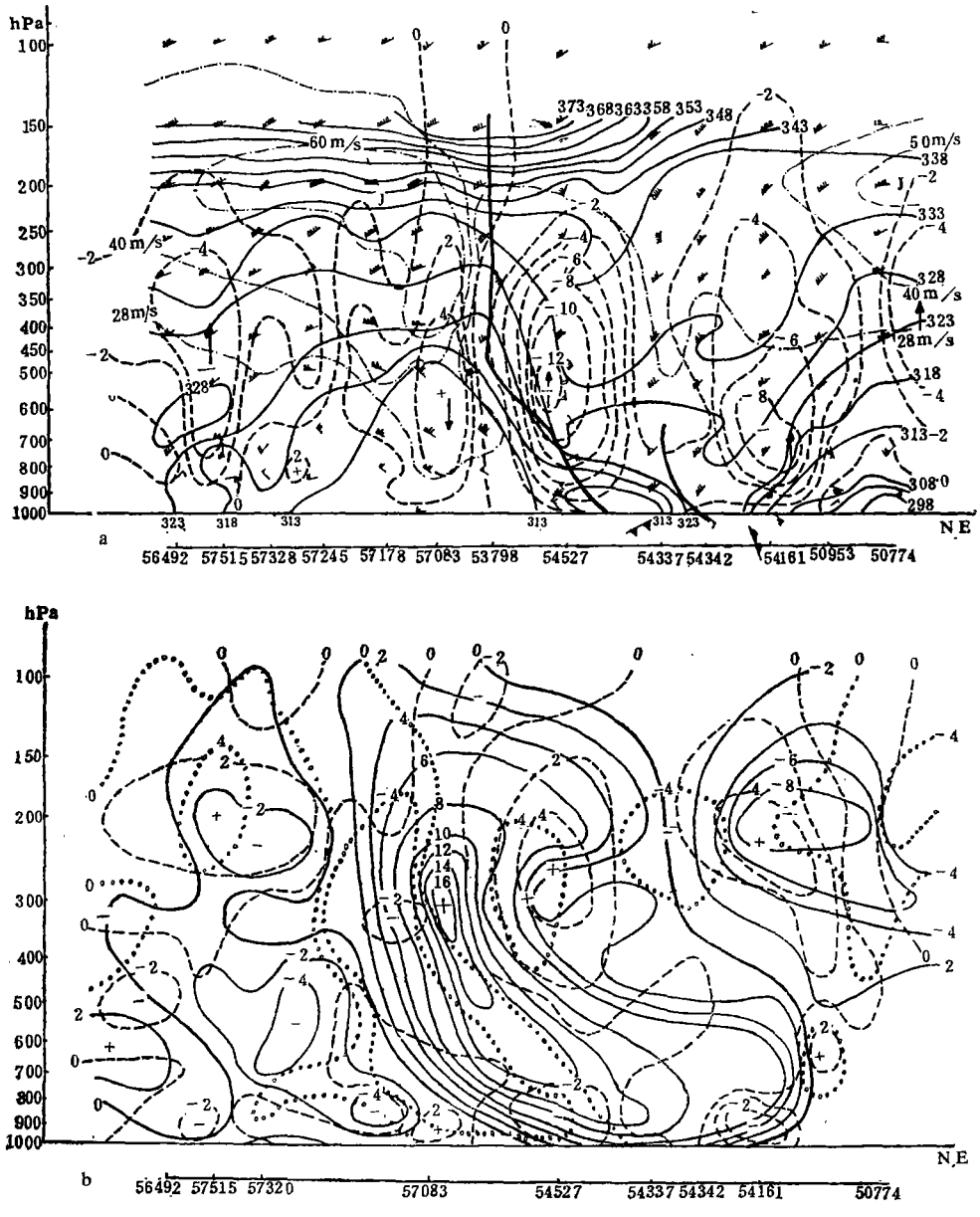


图 6　1983 年 4 月 26 日 00 Z 沿低涡路径方向的垂直剖面图

(a　实线：涡度，虚线：散度，单位为 $10^{-5}\ s^{-1}$，圈线：涡度平流特征值线，单位为 $10^{-9}\ s^{-2}$；
b　实线：θ_{se}(K)，虚线：ω，单位为 10^{-3} hPa/s，粗实线：低涡轴线，点划线：风速线，单位为 m/s)

大，垂直运动也逐次加大。25 日 12 Z 后涡度变得更大，在最强上升运动出现后不但低层涡度比原来大一个量级、高层也完全变成正涡度，从这看出聚集了的积云群确实起了使中尺度环流迅速加强的正反馈作用。

6．快速移动气旋中雨滴迅速增长机制

由图 6 可以看出涡管的物理结构很不对称，涡轴前后半暖半冷、水平风速前后不一，而且系统前方的上升运动速度比后方的下沉速度大很多。因此，从暖湿输送带进入系统

的水滴必然是边绕环流旋转边作浮沉运动，这就使水滴有可能长时间在暖湿环境中行走，而不是直线上升很快到达云顶，在这种结构中运动的水滴必会获得较多冲拼增长机会，所以能很快形成暴雨。过去一般认为我国暴雨常常是在系统停滞状态下产生的，而这一次相

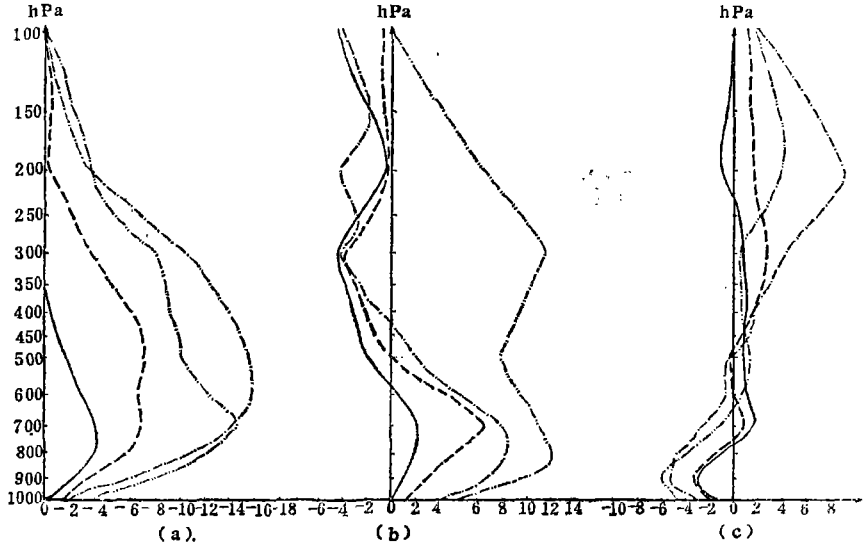


图 7 气旋中心地区平均涡度、散度、垂直速度逐次变化图
(a 垂直运动速度(10^{-3} hPa/s)，b 涡度(10^{-5} s^{-1})，c 散度(10^{-5} s^{-1})；
——24 日 00 Z，----25 日 00 Z，—·—·—25 日 12 Z，—··—··—26 日 00 Z)

反系统移动很快。快速移动系统也能造成暴雨，主要由于这种系统的不对称结构对云滴迅速增长有利，这是快速气旋暴雨的一种产生机制。

五、小结与天气概念模型

综合以上分析，可以得到一个快速发展气旋的概念模型，其要点为：

1．当大尺度斜压发展时，在异常暖的锋前暖区里可产生新气旋。条件是低层有暖湿输送带、西南低空急流与南下冷空气间发生强切变。

2．积云聚集过程伴随气旋发生发展，凝结潜热释放使两种不同尺度运动互相加强，因此除斜压不稳定外，第二种条件不稳定也是气旋快速发展重要机制。

3．副热带急流异常强劲，高低空急流耦合关系与以往所见不同，两支高空急流共同迫使系统快速发展前进。

4．系统不对称结构不仅使其快速前进，并使水滴有可能快速增长，这是气旋暴风雨一种机制。

参 考 文 献

[1] 北京大学地球物理系气象专业、河北省气象局气象台，一次黄河气旋特大暴雨过程分析，大气科学，1976年第1期，6—10。

[2] 黄士松、林元弼、韦统健，江淮气旋发生发展和暴雨过程及有关预报问题的研究，大气科学，1976 第1期，27—

41。
[3] 陶诗言，有关暴雨分析预报的一些问题，大气科学，1977 年第 1 期，64—67。
[4] 张刚、王永祥，东部气温偏高降水多西部气温偏低降水少，气象，1983 年第 7 期(总第 103 期)，45。
[5] Frederick, S., and J. R. Gyakum, Synoptic-dynamic climatology of the "Bomb", *Mon, Wea. Rev.*, 108, 10, 1589—1606, 1980.
[6] 田生春、杜长萱，暴雨落区预报的进一步研究，大气科学，9，4，387—389，1983。
[7] 冈林俊雄，气象卫星资料的使用，上册，上海市气象局上海市气象学会，1983 年印。
[8] 陶诗言等著，中国之暴雨，43—44，科学出版社，1980。
[9] 栗原宜夫著，大气动力学入门，166—169，183—184，气象出版社，1984。

DAIGNOSTIC STUDY OF A RAPIDLY DEVELOPING CYCLONE IN SPRING

Tian Shengchun　　Liu Suhong

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Abstract

In this paper, a diagnostic study of the spring cyclone developed rapidly was made. This kind of cyclone is very similar to "Bomb" in the North America. The weather caused by the cyclone was severe and the violent wind, tornadoes, hailstorms and heavy rain were observed inside it. The results show that the occurrence and development of this kind cyclone is related to the interaction between the cumulus convection and synoptic scale system in large scale course of baroclinic instability. In addition, it is found that the small scale cumulus merge frequently to form mesoscale systems, and that the instability of CISK plays a important role in the releace of condensation latent heating. On the other hand, it was discovered that the subtropical jet is very strong and the coupling between low and upper level jets is quite different from the studied previous. Finally, it is should be emphasised that the rapidly northeastwards moveing of the cyclone was caused by the asymmetric structure of the cyclone and in the meantime the asymmetric structure of cyclone is in favour of collection of cloud droplets to form raindrops, therefore, it is helpful to occurrence of heavy rain.