

一次中层低涡的发展及其MCC结构

孙淑清 田生春

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

1982年7月29日至8月2日黄河中游大暴雨过程,是继1958年7月特大暴雨过程以来最强的一次。其间洛阳地区的陆浑水库站29日12h降水量达544mm。本文对造成该过程后一段强降水的低涡系统进行了研究。用中尺度滤波分析和诊断方法揭示了:该低涡系统不是由登陆台风变性而成,而是在台风外围的东风急流影响下新发展起来的,并取代了原来的台风环流。它的涡旋结构在对流层中层最为清楚,低层的暖湿平流突出,具有较强的斜压性。在对流层高层有明显的流出,形成一个中尺度的辐散中心。因此它的发展过程和结构与Maddox所总结的MCC系统相类似。卫星云图上云团的演变特点证实了上述对发展过程的描述。

一、前 言

1982年第9号台风于7月30日00时在我国福建莆田登陆后,迅速减弱为低压。它与西风带低涡系统的相互作用,造成河南、山西及河北交界处一次区域性连续暴雨过程,从7月29日20时至8月2日持续了四天之久。嵩山气象站过程降水量达477mm;洛阳地区陆浑水库29日12h的降水量544mm;泌河出现了1958年以来最大的洪峰,影响之大是1958年7月14—19日黄河中游大暴雨以来最强的一次。持续四天的暴雨过程主要分为两个阶段:第一阶段是29日17时至30日17时,降水主要集中在河南洛阳和南阳地区;第二阶段是从7月31日20时至8月2日20时,暴雨集中在黄河的三花间及其北侧的山西境内。在后一阶段内,林县的过程降水量达346mm。这个时段的主要影响系统就是与登陆台风有一定关系的低压系统。本文研究该低压系统的演变发展及其中尺度结构。

二、中层低涡的生成

7月31日前后东亚环流形势比较稳定,500hPa副热带高压与西风带高压脊联成一体,在我国沿海和东北地区稳定少动。同时贝加尔湖地区长波槽中,不断有短波系统向下游移动。7月30日20时西风槽中切断出一个低涡,它在与台风低压靠拢过程中略有加强。台风30日登陆后,中心强度迅速减弱。表1给出各层低压中心值的演变情况。由此看出各

1985年12月20日收到,1987年5月20日收到再改稿。

层中心—高度从30日08时起明显升高, 正变高达30—40GPM。但是31日08时以后低压停止了填塞, 500hPa上低压中心值又有所降低, 负变高达20GPM, 直至8月2日20时, 对流层低层的低压中心值基本稳定, 变高很小。

导致低压再度加强的主要原因是对流层中层的斜压性低涡的作用。它在31日08时以后与原台风低压相互作用并取代了热带气旋系统而发展成完整的中层低涡。30日08时(图略)强正涡度中心位于福建江西一带, 这就是削弱中的台风涡旋。同时陕西、川北一带出现一个低涡, 在高度场上有一条5800GPM的闭合等高线。至31日08时, 这个低涡系统发展, 而台风所对应的正涡度中心则明显减弱, 两个涡度中心在不断靠近。图1给出31日20时(a)和1日08时(b)的500hPa涡度图。在31日20时, 新生涡旋强度达到 $6.4 \times 10^{-5}/s$, 而原台风低压的正涡度则由刚登陆时的 $11 \times 10^{-5}/s$ 减弱至 $4 \times 10^{-5}/s$, 正涡度中心孤立且分散。至1日08时(图1b), 西部涡旋强烈发展, 中心达 $8.6 \times 10^{-5}/s$, 而原台风区内只留下一个很弱的正涡度区, 至1日20时则全部消失, 变为负涡度区。从涡度的演变看出: 7月30日至8月1日东西两个正涡度区的靠近实际上不是一个简单的合并过程, 而是一次新生的涡旋取代旧涡旋的过程。

为了进一步考察新的中尺度涡旋的生长和发展, 我们作了中尺度滤波分析。根据选择

表1 低压中心高度及12小时变高表(单位: GPM)

层次(hPa)	项	$\frac{H}{\text{时}}$ m	30 ⁰⁸	30 ²⁰	31 ⁰⁸	31 ²⁰	1 ⁰⁸	1 ²⁰	2 ⁰⁸	2 ²⁰
850	高度		1317	1351	1388	1390	1398	1416	1416	1420
	变高			34	37	2	8	18	0	4
700	高度		2968	3001	3038	3040	3044	3054	3066	3068
	变高			33	37	2	4	10	12	2
500	高度		5720	5750	5790	5790	5770	5780	5790	5800
	变高			30	40	0	-20	10	10	10

滤波原理, 用文献[1]所设计的高通滤波器对流场和高度场进行了中尺度滤波, 并计算了滤出后的中尺度涡度场和散度场。取滤波系数 S_1 和 S_2 分别为 $1/2$ 和 $1/3$, 这就突出了2—3倍格距的波动系统(计算格距为150km)。从滤波后所得的高度偏差 H' 场可以看出这两个低值系统的演变。31日08时(图略), 江淮沿海至川鄂一带, 存在两个中尺度的低压区。一个强达-8GPM的 H' 低中心在南京、蚌埠一带, 范围比较大, 这是台风低压的位置。另一个在宜昌以北, 尺度还很小, 这是新发展的中纬度低涡。至7月31日20时(图2a), 这两个负的 H' 中心区被正值所隔开, 台风低压变得更小, 而东移之低压加强, 并向东北伸展, 出现了两个 $H' < -8\text{GPM}$ 的低压中心。至8月1日08时(图2b), 低压发展至最强(中心强达-16GPM), 范围也大为扩大, 从长江、汉水直至甘肃天水一带均是 $H' < -8\text{GPM}$ 的区域, 与同一时刻的大尺度平均场 \bar{H} (大于2—3倍格距的波)进行比较可见: \bar{H} 场从长江中游至黄河河套皆为低压槽区, 东部登陆台风已无迹可寻, 变成一个相对高值区(图略)。由图2看强低压中心位于西部而不是在原台风位置。因此可以肯定这次黄河流域三花间暴雨的影响系统——低压不是直接由台风变性而成, 而是在台风系统影响下发展的一个新的低涡。下面着重讨论它的发展过程及结构特点。

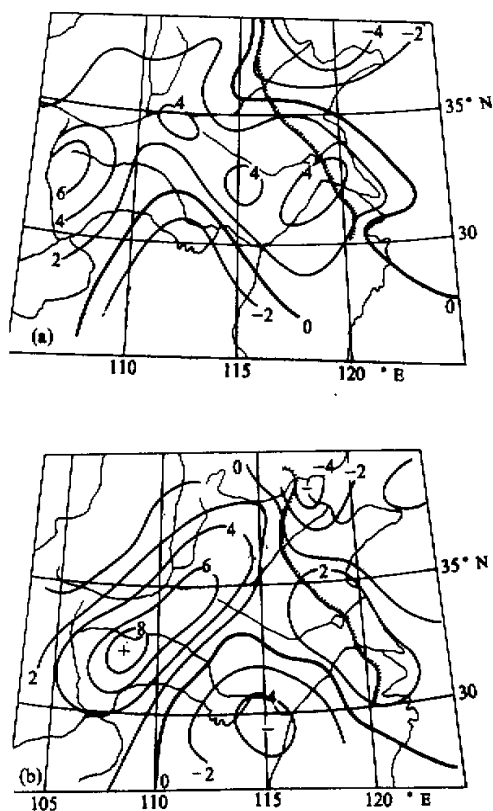


图1 500hPa 涡度场的演变

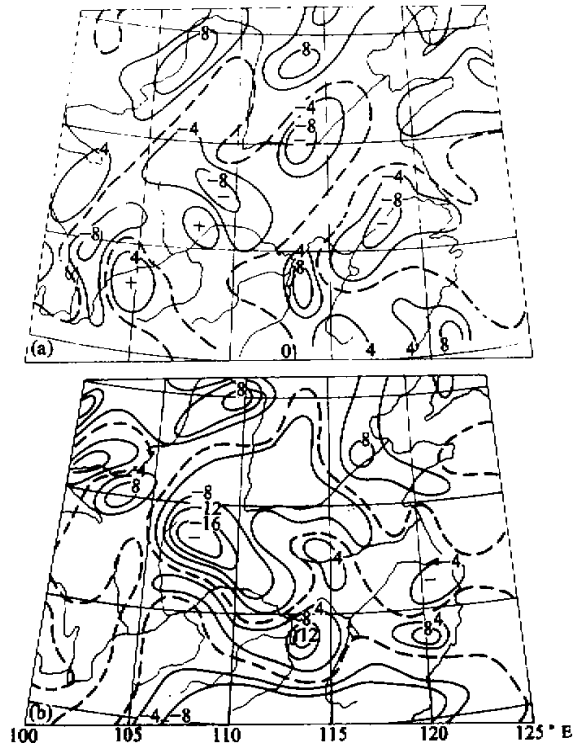
(a) 1982年7月31日20时 (b) 1982年8月1日08时

单位: $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$

三、台风外围东风急流的作用

在登陆台风与副热带高压之间存在着一支狭窄的偏东风急流。新生低涡的发展加强与这支东风急流有一定关系。850hPa上低空急流的最大风速在20m/s以上,大风中心逐渐由东南向西北传播,前方到达郑州以北。从850hPa上的风速时间剖面可见(图3),29日08时以前大风中心位于海上,从30日08时至8月2日伸入内陆。31日08时,大风中心在南京和徐州之间。虽然这时新的低涡已在西北部生成,但是它与东风急流相距还远,因而没有明显发展。至31日20时强东风中心到达徐州以北,850hPa徐州的风速达26m/s,而急流轴前方西安的风速只有5m/s,两站间形成了很强的辐合区。计算沿急流轴的水汽通量发现:低空急流轴线与水汽通量轴线基本一致。急流将水汽源源不断地输送给低涡区。风场的最大辐合区和水汽通量通道还与暖平流区一致。新的低涡正是在强的暖平流区域内发展的。

人们在分析中尺度对流复合体(简称MCC)时十分强调暖湿平流和充足的水汽补给在其发展中的重要性。足够的水汽随着辐合上升而发生凝结,造成大暴雨。而降水释放的潜热使对流层中上层出现暖中心,使高层低涡北侧的风速加大而流出增加有利于低涡的进一步发展。这被看成是MCC系统发展的一个重要机制。大量观测事实表明,中尺度的中心上升区正是低层暖湿空气的最大流入区。大多数的MCC在其风暴发展的初级阶段,对流层下部的强暖湿平流对 α 中尺度的上升区起了很大的强迫作用。它构成了中尺度对流复合体的主要特征。本个例中新低涡的发展过程比较符合MCC系统发展的机制,即台风外围的东风急流带着大量的暖湿空气向低涡区推进,并在该地区造成很强的辐合上升,强暖湿空气的辐合区与低涡区靠拢时,低涡得到了明显的加强和发展。在暖湿空气的强辐合区的前方——黄河中游,这时的暴雨强度也达到最大。总之,这次台风低压及其相联系的东风急流的深入,对于新的中层深对流性涡旋的生成起了不可忽视的作用。下面进一步研究这次低涡过程的MCC状结构。

图 2 滤波后 500hPa 的 H' 场

(a) 1982 年 7 月 31 日 20 时, (b) 1982 年 8 月 1 日 08 时.
实线为 H' , 虚线为 H' 零线.

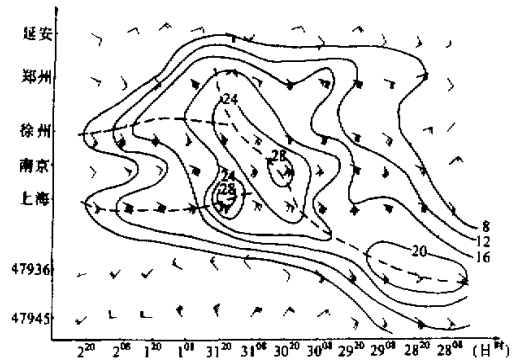


图 3 850hPa 风速的时间剖面图

虚线为大风轴线, 实线为等风速线 (m/s)

四、低涡的MCC状结构

这次低涡具有与一般中纬度低涡不完全相同的结构, 与原登陆台风的结构也不相同, 而与 MCC 的结构类似.

1. 中尺度的中层涡旋

首先, 它是一个对流层中层的系统. 最强的涡旋结构发生在对流层中层. 现用流场的物理量变化来说明这一点. 图 4a, b 分别为涡旋区最大的涡度(ζ)和散度(D)值的时间变化. 500hPa 上的正涡度中心从 30 日 08 时(此时为台风)的 $11 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 迅速下降至 31 日 20 时的 $3.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 左右, 以后又迅速变大, 可见中层流场的涡旋结构经历了一个衰亡又重建的过程. 散度变化也与涡度相对应. 辐合值随着台风的消亡而减小到几近于零. 31 日以后随着新涡旋的发展, 中心又迅速增加, 至 1 日 08 时达到最大. 在同一张图上, 可以看到 200hPa 的涡度、散度变化与 500hPa 十分相似. 200hPa 上的气旋涡旋结构及流场辐合仍旧十分清楚. 图上的点划线反映了低层流场的另一种趋势. 从登陆至 8 月 2 日

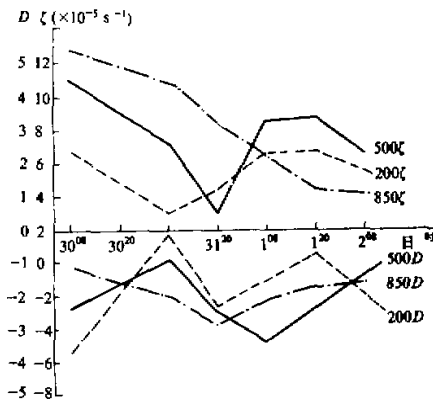


图 4 涡旋区最大涡度和散度时间变化图
500hPa (粗实线), 200hPa (虚线), 850hPa (点划线).

不论是 850hPa 或是 700hPa 流场上的正涡度中心值都是单调下降的, 而辐合量基本上维持少变. 从这条曲线看不出台风的衰亡和低涡的重建过程. 因此可以断言这次新生的低压主要是一个对流层中上层的现象, 低涡的取代过程在 500hPa 上最明显, 向上可发展到 200hPa, 而在对流层低层却只能看到台风低压北上填塞的一个简单过程. 低涡中心上升运动的演变(图略)也可进一步说明这一点. 台风登陆时的上升速度最大值发生在对流层 600hPa 以下, 强度为 $-7 \times 10^{-3} \text{ hPa/s}$ 左右, 而在新低涡发展时不但垂直速度强度猛增(最大值达 $-10 \times 10^{-3} \text{ hPa/s}$), 而且最大值的高度也升到 600hPa 以上, ω 在对流层

中层较强, 也就是说这个新发展的低涡无论是环流的气旋性结构还是中心的上升速度, 都可与刚登陆的台风相比拟, 甚至比它更强. 但其最强的高度却在对流层中、高层而不是低层. 人们已经知道, 在 MCC 系统中, 最强的涡旋性结构是在对流层中层, 低层却无明显的低压系统, 强的辐合上升运动贯穿低涡的中心. 这次低涡过程的特点正与这种结构相似.

2. 低层的强斜压性

新发展的低涡是一个斜压性很强的系统. 冷空气自北向南侵入, 在涡旋西南部形成很强的冷区, 它与东南方的强暖平流相遇构成温度对比很强的锋区. 通过 500hPa 低涡中心作垂直剖面图(图 5), 可见高空锋区是十分清晰的. θ_{se} 的低值舌从中层浸入低涡内, 而东

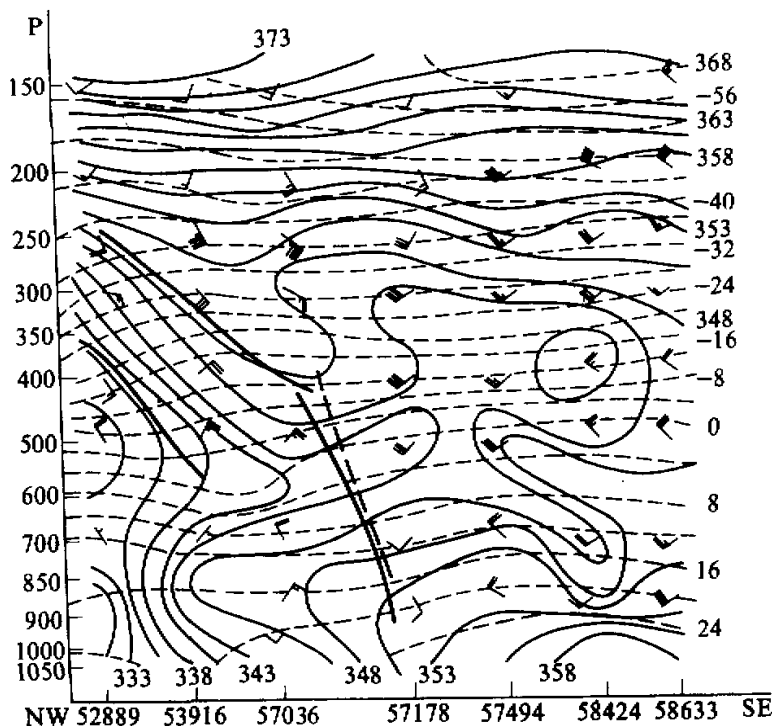


图 5 1982 年 8 月 1 日 08 时过 500hPa 低压中心的空间剖面图

实线: 等 θ_e 线 (K); 虚线: 等温线 (°C); 粗线: 锋区界; 实轴线: 气压中心轴线; 断线: 气旋中心轴线。

南方的暖湿空气舌在中层沿锋面向西北方隆起。这条锋区两侧的温度差高达 8°C ，它随低压向东北方向移动，至 1 日 08 时最强的锋区在郑州到重庆之间。这种结构显然已经不是热带气旋的对称和暖性结构，而是一种斜压性很强的不对称的中层涡旋。Maddox 等人^[2]很重视这种斜压性对 MCC 系统发展的作用，认为它是启动 MCC 发展成长的一个不可少的机制，它也是区别于热带气旋的一个重要标志，使 MCC 系统带有明显的温带特征。

3. 高层的中尺度辐散区

这次低涡过程的高空也配合辐散区。但是与一般情况不同的是，它不仅仅是位于高空急流的出口区，而且形成一个中尺度的辐散中心。我们用中尺度滤波后的风场计算高层的散度 (D')，分析了这种中尺度散度场。图 6 为 8 月 1 日 08 时新低涡发展完善时期 100hPa 的 D' 场。可见最强的高空辐散区 (中心为 $1.1 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$) 位于黄河中游三花间的西南方，中心只有 2 个经距左右，它与下游的正涡度区相对应 (最大值位于低涡中心附近)。图 6 中还给出了 500hPa 的垂直速度 ω 区，阴影区为垂直速度 $\omega \leq -4 \times 10^{-3} \text{hPa/s}$ 区，可以看出它与高空的辐散区基本上重合。低层的强辐合和锋面抬升所造成的贯穿对流层的上升运动及高层中尺辐散流出构成了一个强的中尺度对流辐合系统。

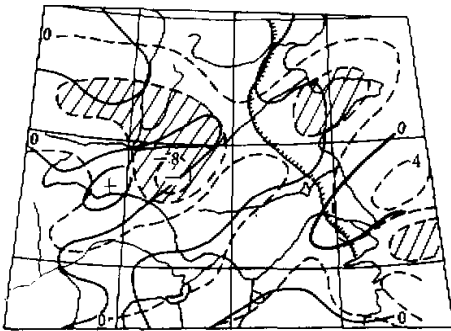


图6 1982年8月1日08时100hPa的 D' 散度场及500hPa垂直速度 ω 场
实线： $D' (10^{-5} s^{-2})$ ，虚线： $\omega (10^{-3} hPa/s)$ ，
阴影区为 $\omega < -4 \times 10^{-3} hPa/s$ 。

综合上述三个主要的特点，可以这样来概括这个新发展低涡的结构：风场上最强气旋性涡旋在500hPa，为一个深厚的对流层中高层涡旋；低涡具有明显的斜压性结构，锋面的出现起了很强的抬升作用，涡旋从下至上为极强的上升运动，最强在600hPa左右。在对流层高层，低涡的上方为中尺度的辐散区。这种中尺度的结构正是Maddox^[2]所总结的MCC的典型结构。

为了进一步说明这种MCC状低涡的发展，给出一组卫星云型变化图，图7所给几张云图是每隔六小时的卫星云图的素描图^[3]。

在30日00时(GMT)图上(a)，台风云团与低涡云团为分别独立而完整的云系，低涡云系中有数块强对流积云，最大云顶高度为15.7km，这时台风云系中高层流出已不明显，云界周围轮廓光滑而清晰。以后两块云团靠近而台风云团已成无眼系统。云顶高度也由16.4km降至12.3km。至31日00时(GMT)(图7b)两个云系合并，积云强烈发展。至31日18时(GMT)云顶高度又开始升高(图7c)，云团已完全成为一个系统，云顶高度进一步升高至14.8km，新云团内出现许多小的积雨云团，降水量也在这以后一段时间内加大。

在夏季，副热带高压西进影响我国时，副高西北部经常有对流云团引起的局地强降水^[4]，从云图上看它发生在西南季风云系和中纬度短波槽云系的交汇区，一般可维持20小时以上。它们的强降水与低层辐合和高层辐散的环境场相对应。这种过程在低层气压场上反映不明显，天气图上往往很难找到系统。但是用中尺度分析可以看出600hPa高度附近有低涡区，陈乾^[5]的分析也发现了300hPa以上的中尺度高压流出区。本文所分析的中尺度涡旋与上述的结构也是完全一致的。

五、结 束 语

1982年7月31日至8月2日黄河中游地区的大暴雨过程，是一次由新生中层涡旋引起且与变性登陆台风有密切关系的过程。仔细分析各层的流场和湿度场，特别是用中尺度的滤波方法分析，揭示出一个新的中尺度对流复合体的生长过程。它取代了原来减弱了的台风低压，它的明显的斜压性和由低空急流带来的暖湿平流所增强的不稳定层结造成了中低层强辐合和垂直速度。而在高层则为明显的中尺度高压和辐散流出。在对流层低层这种中尺度对流系统的发展过程则不清楚，涡旋结构也较弱。

因此，虽然缺少高分辨云图和云顶温度资料来识别中尺度对流复合体，但是通过细致的中尺度分析和云图资料，可以看出两个系统相互作用、台风低压被取代的过程和它具有

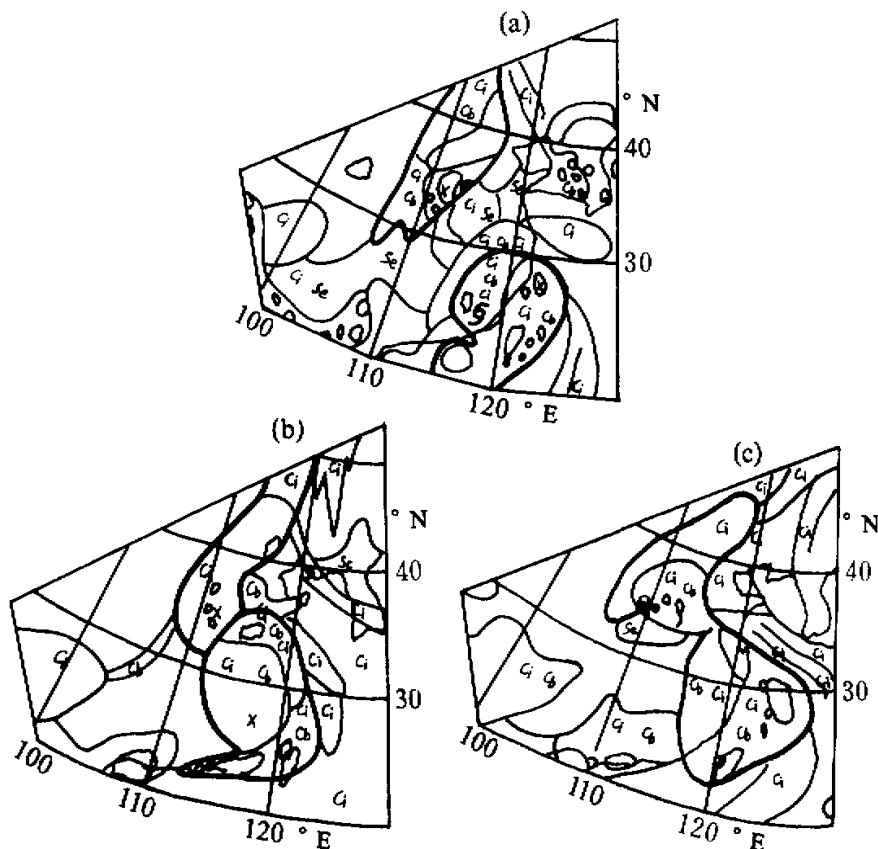


图7 卫星云图分析

(a)1982年7月30日00Z.(b)1982年7月31日00Z.(c)1982年7月31日18Z.

细实线:云区边界.粗实线:系统扩展的云区边界.

 C_1 为卷云, C_2 为发展不同阶段的积雨云, S_1 为层积云. X 为云顶高度.

强对流降水的涡旋结构. 对于在中低层气压场上不显著、较难追踪的对流性降水系统来说这种分析还是有意义的.

致谢: 陈怀义、社长董协助完成本文的计算和资料收集工作, 特此致谢.

参 考 文 献

- [1] 夏大庆等, 1982, 气象场中尺度分离算子的设计和比较, 科学通报, 27卷, 18期, 1130.
- [2] Robert A. Maddox, 1983, Large-scale meteorological conditions associated with midlatitude mesoscale convective complexes, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 111, No. 7, 1475—1492.
- [3] Monthly Report of Meteorological Satellite Center, July, 1982, Meteorological Satellite Center, Tokyo, Japan.
- [4] 陆一强, 1983, 副高北侧的强对流云团与局地暴雨, 北方天气文集(4), 50—56, 北京大学出版社.
- [5] 陈乾, 1984, 关于中尺度对流复合体的若干问题, 气象科技, 第3期, 47—54, 气象出版社.