

“96.8”河北特大暴雨成因的中尺度分析*

江吉喜 项续康

(国家卫星气象中心, 北京 100081)

提 要

该文用卫星云图和常规气象资料, 分析了1996年8月3~5日河北省的特大暴雨过程. 分析认为: 这次特大暴雨出现在东亚强经向环流形势下的副高西北部边缘特定的有利地区, 主要受两个中尺度云团的直接影响. 该云团的形成和发展, 是偏南风低空急流与华北北部南下的近地面层弱冷空气相互作用的结果.

关键词: 特大暴雨 中尺度云团 低空急流

引 言

1996年8月3~5日, 河北、山西两省出现了自“63.8”以来的最强暴雨并遭受了最严重的洪水灾害, 山东省西部和京津地区也相继出现了暴雨. 据河北省气象台统计, 全省100多个县(市)的雨量 >100 mm, 其中30多个县(市)达200~400 mm, 位于暴雨中心附近的石家庄市的井陘、平山、元氏等县的雨量 >500 mm, 邢台县的野沟门水库达616 mm. 在山西省中南部的大部分地区, 过程总雨量均在50 mm以上, 东部地区100 mm以上的有18个县(市), 其中昔阳县达213.7 mm. 这场暴雨强度大、面积广、持续时间长.

本文以卫星云图为主要手段, 并结合常规气象资料, 分析这场特大暴雨中的中尺度系统的活动及其环境场条件, 试图揭示这场暴雨的成因.

1 暴雨形成的云图特征

在分析8月3~5日逐时GMS IR云图的基础上, 挑选了3 h间隔的云图作简单的线性增强处理, 形成了云图序列(图1).

第一个云团活动在8月3日09:00~4日06:00 UTC. 3日06:00 UTC, 河南郑州附近的中云区内嵌有几个小对流单体, 它们是原在 35°N 、 113°E 附近的涡旋状云系西移中留下的(图中箭头所指). 随着9608号台风低压北侧外围云系附近的3个小对流单体向北涌进和并入, 于09:00 UTC上述的小对流单体迅速发展成中- β 尺度的椭圆形对

* 1997-01-27收到, 1997-06-02收到修改稿.

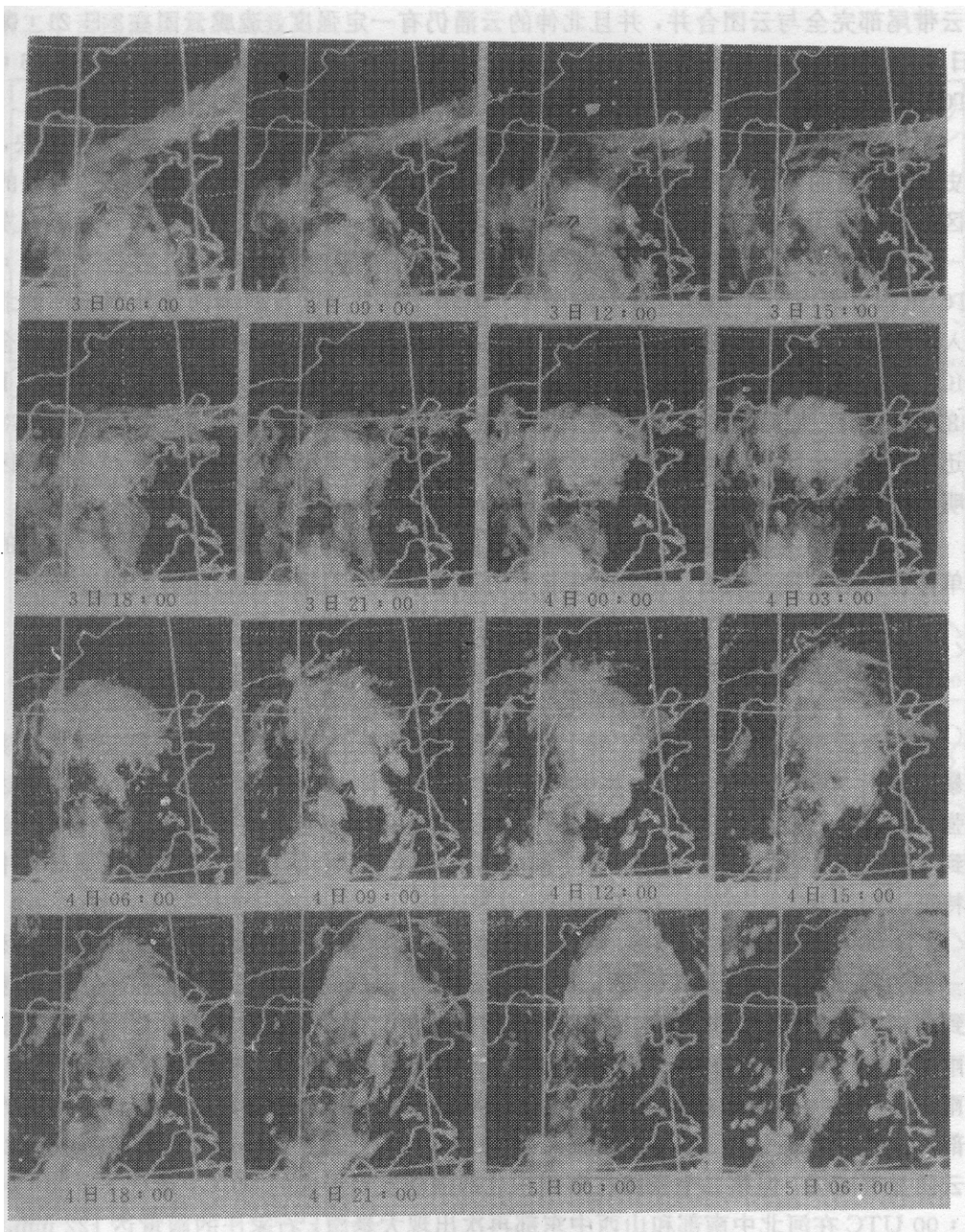


图1 1996年8月3~5日华北及其周围地区GMS IR云图序列图(箭头所指为云团前期的对流单体)

流系统, 云顶亮温(TBB)低至 -61.3°C , 对流十分旺盛。接着, 台风低压东侧和副高西侧之间的云系北伸并入, 并出现爆发性发展, 12:00 UTC已成为一个准圆形的中- α 尺度对流云团。在随后的3h中, 该云团在北移中逐渐与缓慢东移南下的弱冷锋云带尾部靠近且部分合并, 云团面积再次迅速扩大。18:00 UTC前后还出现涡旋状结构。以后冷

锋云带尾部完全与云团合并,并且北伸的云涌仍有一定强度,造成云团在3日21:00~4日03:00 UTC再次发展,表现为涡旋状结构消失,云区变得密实白亮。4日06:00 UTC云团开始减弱,09:00 UTC前后呈倒“V”字形,并减弱消散。

第二个云团活动在4日03:00~15:00 UTC,其特点是发展迅猛,衰减也极快,生命史较短。它的前期胚胎可以追溯到4日00:00 UTC,在第一个云团南部边缘处的中云区内嵌有两个小对流单体,03:00 UTC合并成一个(图中箭头所指)。3 h后迅速发展成一个弧状中- β 尺度对流系统,并与上一个云团南部残存的对流云区合并,09:00 UTC急剧发展成一个中- α 尺度对流云团。随着云团合并以及副高西侧外围云涌的北伸并入,于12:00 UTC形成一个密实白亮云区几乎覆盖华北中南部的中尺度对流复合体(MCC)。云顶最低TBB达 $-62.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{TBB} \leq -32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-52\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的面积分别为 129285 km^2 和 87204 km^2 ,大大超过了MCC定义中所规定的面积标准^[2]。在以后的数小时中,对流的云迅速衰减,云团变为倒“V”字形对流云带,呈现出较典型的涡旋状云系结构,云区主体明显向东北方向移动。

第三个云团很弱,是第二个云团南部消散中的残余部分与副高西北侧外围活跃的对流单体合并后发展而成的,并在向东北方向移动中并入到第二个云团的减弱云系中。

2 中尺度云团的降雨特征

分析3日06:00~5日12:00 UTC期间6 h间隔的雨量图(图2)。可知河北这场特大暴雨始于3日12:00 UTC,其中3日18:00~4日12:00 UTC的18 h中雨量达到最强,暴雨中心在石家庄市;以后该中心向北偏东移动,强度有所减弱,但暴雨一直持续到5日12:00 UTC。雨量的分布、演变以及强降雨中心的移动,表现出了显著的中尺度特征。

3日06:00~12:00 UTC,随着上述第一个云团的初始发展,强降水出现在云团西南一侧的郑州(57 mm)及其西部。在紧接着的云团强烈发展和北移中,强降水区迅速北移到河南省的黄河以北地区和山西省的东南部及河北的南部,云团北部边缘处的石家庄市雨量达34 mm。3日18:00 UTC起随着云团再度发展和强度持续,降雨量急剧加大,暴雨中心移经河南安阳(103 mm)后迅速停滞在石家庄市,暴雨区西部覆盖了山西的中东部,石家庄的雨量从3日18:00~4日00:00 UTC的74 mm猛增至129 mm。以后该云团显著减弱,但第二个云团在郑州东北部强烈发展形成的MCC,造成4日06:00~12:00 UTC在河北中南部和山西中东部再次出现大暴雨,石家庄的雨量达122 mm。以后该云团减弱,在向东北移动过程中,以第三个云团为主的多个小对流单体或小云团的发展和并入,5日在京津地区和河北的东北部产生了大到暴雨,保定和北京地区先后出现了大暴雨。该云团最后减弱和消失在辽宁南部,降雨随之结束。

另外,由分析可以清楚地看到:整个雨区虽然呈南北走向,但是华北的中尺度云团暴雨和华中西北部的台风低压暴雨区呈明显的分离状态,二者之间始终隔着一个弱降雨区,并且北强南弱,表明两者没有直接关系;河北的最强降水开始于弱冷锋云系尾部并入云团,而其持续则主要由于台风低压与副高西侧之间的北涌云系并入第一个云团和造

成第二个云团强烈发展所致.

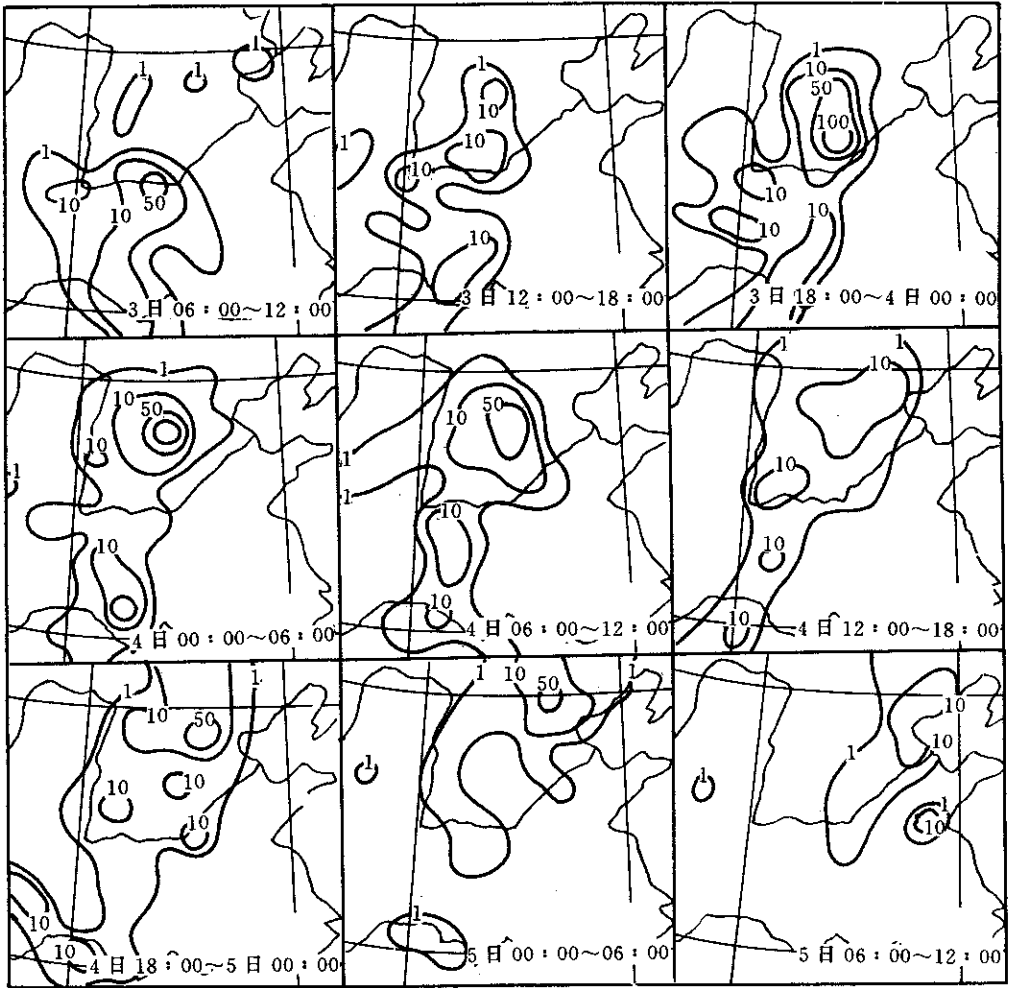


图2 1996年8月3日06:00~5日12:00 UTC华北周边地区每6h雨量图(等雨量线从外向内依次为1, 10, 50 mm)

3 云团的移动和冷云顶的变化

在对图1中IR云图定量处理的基础上,以各个时次云顶最低TBB中心位置连线作为云团的移动路径,并且素描出了各个时次中云顶 $TBB \leq -32^\circ\text{C}$ 的廓线,得到图3. 由图可见,第一、二两个云团的最冷TBB中心均活动在河北省境内,并且它们在前中期向准正北方向移动,后期减弱阶段中才转向东北方向移动. 对照上述的雨量分布,暴雨中心与第一个云团的最冷TBB中心相当一致,并随着它一起移动;雨区范围与这两个云团的 $TBB \leq -32^\circ\text{C}$ 廓线区也十分吻合. 两个云团的移速还出现了跳跃现象,即所谓的

“不连续传播”，并且一些时次中冷中心不在 $TBB \leq -32^\circ\text{C}$ 区的几何中心，从而造成强降雨中心的非均匀移动和云团中雨量的非对称分布。出现这种现象，可能是由于低空偏南风急流中的风速波动导致了环境场中向云团附近输送的水汽和热量的不连续。

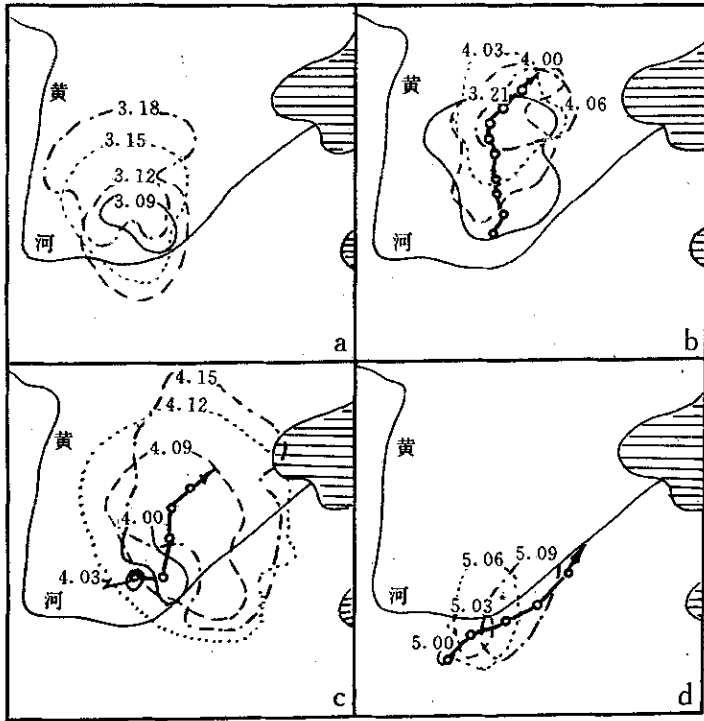


图3 1996年8月3日09:00~5日06:00 UTC 3个云团的移动路径及其云顶 $TBB \leq -32^\circ\text{C}$ 区廓线素描图(a、b属第一个云团，c、d分别为第二、三云团。粗线箭头为云团路径，细线为各时次 $TBB \leq -32^\circ\text{C}$ 区廓线，其中的数字为日、时)

由于第一个云团在这场暴雨中起着主导作用，为此对它再作进一步的定量分析。如图4所示，该云团的云顶最低 $TBB(-61.3^\circ\text{C})$ 出现在它初始发展时刻，云顶只接近对流层顶；以后 TBB 虽然连续缓慢上升，但至消散之前仍低达 -49.2°C 。这说明它是一个对流云团，但在华北地区它的对流又不很强盛，并且特大暴雨出现期间云顶的 TBB 一直在 -55°C 以上，与过去见到的个例很不一样。由常规资料计算出的总对流指数(TTI为 $45 \sim 48^\circ\text{C}$)，也显示出了对流不强盛的结果(图略)。 $TBB \leq -32^\circ\text{C}$ 及 $TBB \leq -52^\circ\text{C}$ 的冷云顶面积，也只是在它发展初期出现急剧扩张，而后前者缓慢增大，后者在3日12:00 UTC以后就连续减小。21:00 UTC以后就变得很小，可是降雨却急剧加强，并持续出现大暴雨。这与 Scofield^[3]的对流性降水估计方法中的对流系统降雨强度、与云顶亮温和冷云顶面积变化特征很不一样。

4 云团形成和发展的环境场条件

4.1 东亚强经向型天气形势

上述这两个云团和这场大暴雨的出现，与东亚地区强经向环流的建立及其演变有着极其密切的关系。

8月1日和2日9608号台风的偏西移动，引导其东侧副高西伸；3日以后台风低压的偏北向上，阻碍了副高的进一步西进，并且副高南侧20°N附近活跃的ITCZ阻止副高南落。在这两个因子的共同作用下，副高在台风低压东侧向西北、西南两个方向伸展，从而在我国东部构成了强经向型环流；与此同时，内蒙古中东部的西风槽正在副高北侧减弱收缩，3日12:00 UTC槽后小高压并入副高北部之中，造成东亚经向环流进一步加强(见图5a)。在副高西侧和台风低压之间的气压梯度很大，形成了一支较为宽广的偏南风低空急流，自低纬度地区直抵河北、山西两省南部。4日这种形势依然维持，并且随着北部高压区东移，副高轴线顺转，华北中北部高度下降，偏南风急流进一步加强北伸(见图5b)。700、850 hPa上的形势及其演变与此类似。这支低空急流将低纬度地区的水汽和热量源源不断地向北输送，是导致华北出现较大范围暴雨的原因^[4]。

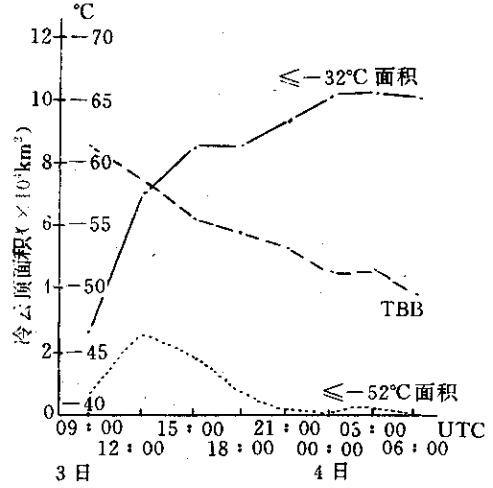


图4 1996年8月3~4日第一个云团云顶TBB及TBB ≤ -32°C、≤ -52°C区面积随时间变化

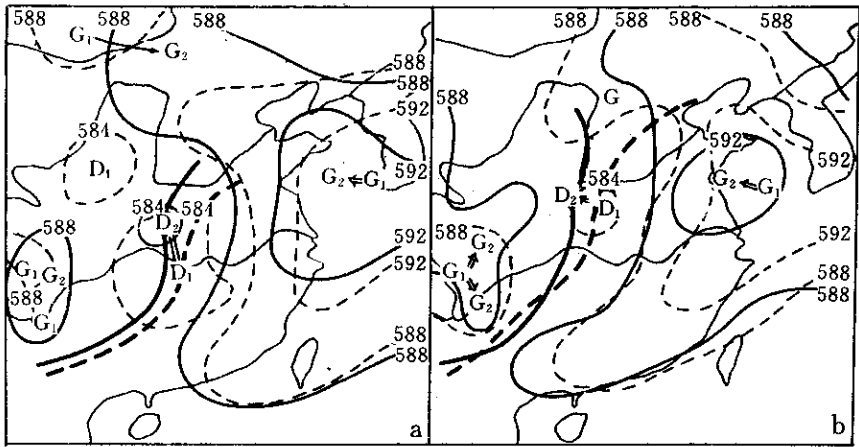


图5 1996年8月3日(a)、4日(b)东亚500 hPa高度场(虚线:00:00 UTC,实线:12:00 UTC)

4.2 低层水汽场和急流

对流层低层的丰沛水汽和低空急流，是暴雨云团形成和发展的两个十分重要条件。在第一个云团形成前夕的3日00:00 UTC，850 hPa上我国中东部为 $\theta_{e} > 350$ K的南北

向舌状区,北界抵达河北、山西两省北部附近;华南西部有一个 θ_{e} 为355~360 K的主中心区,武汉西部的台风低压中心附近有一个 θ_{e} 为355 K的次中心区(图6a).以后 θ_{e} 值进一步增大,至4日00:00 UTC(图6b),上述主、次 θ_{e} 中心并为一体,并向北伸至华北南部.这种舌状 θ_{e} 场表明低纬度地区高温高湿的不稳定区已移向华北地区.同时,从内蒙古东南部向东偏南移动的 θ_{e} 低值区,4日已抵达山西、河北两省的北部,表明低层干冷空气已扩散南下,并且与上述北伸的舌状 θ_{e} 之间在华北中北部形成较强的 θ_{e} 梯度区,从而导致第一个云团北移中强度维持甚至略有加强,并出现涡旋状云系结构.第二个云团恰好在 $\theta_{e}>355\text{K}$ 舌端内侧中形成和发展,这与 Scofield 概括出的概念模型图一致^[5].

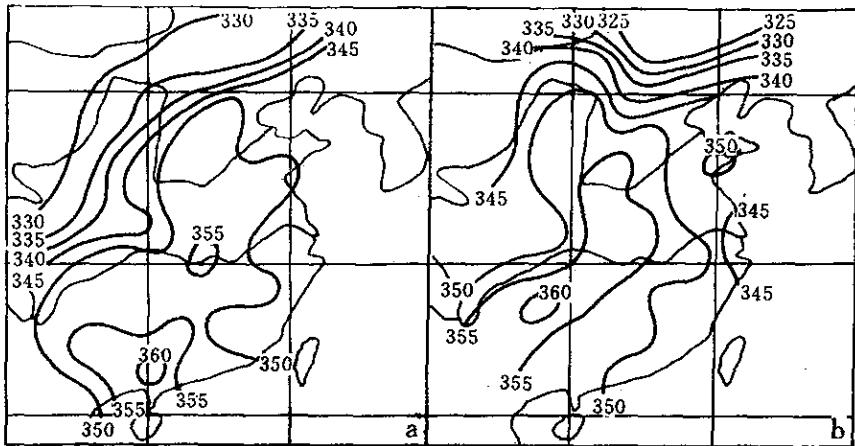


图6 1996年8月3日(a)、4日(b)00:00 UTC东亚850 hPa θ_{e} (间隔5 K)

由850 hPa水汽通量散度图(图略)可知,3日00:00 UTC的水汽辐合区与图6a中 $\theta_{e}>350\text{K}$ 区比较一致,北部最强辐合区在山西东南部至河南西北部一带,中心值为 $-95 \times 10^{-5} \text{g} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$,位于郑州西部;4日00:00 UTC,该区东移至河北中西部,中心值为 $-72 \times 10^{-5} \text{g} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$,位于邢台附近(图略).700 hPa垂直运动图上,3日00:00 UTC华北西北部为一个较宽广的SW-NE向上升运动区,主中心在郑州以西;次日该中心东移至河北中南部至河南北部,强度略有减弱.就在上述这种较强水汽通量辐合和上升运动场中,促成了第一、二两个云团的形成和迅速发展.

云团活动的低层大气湿度和急流(图略)特征如下:(1)低层大气非常潮湿,3~4日长沙至邢台(石家庄缺测)的 T_d 维持在 $18 \sim 20^\circ\text{C}$,并且水汽相当饱和($T - T_d$ 为 $0 \sim 2^\circ\text{C}$),为云团形成和发展提供了充足的水汽条件.(2)3~5日出现了3次偏南风急流向北涌进,3日00:00 UTC首次北涌至郑州,导致当日下午至夜间的第一个云团初生和发展;4日00:00 UTC再次北涌至邢台,第一个云团维持和北移,第二个云团形成和强烈发展;4日12:00 UTC第三次北涌至北京,造成第二个云团的维持和显著北移.(3)郑州和邢台的高度场变化极小,表明台风低压的影响只在郑州以南,对云团的形成和发展没有直接关系.

4.3 近地面层弱冷空气的活动

夏季近地面层中变性的浅薄冷空气堆对我国北方暴雨的影响过去已有过研究^[6]。其主要作用是与南来的暖湿气流相遇形成一个冷垫，引起上升运动，在暖湿不稳定大气中促使中尺度暴雨云团形成和发展。在河北省这场特大暴雨中，近地面层这种弱冷空气对云团的形成和发展也起到了至关重要的作用，并有其自身的特点。

在分析了3~5日3h间隔地面流场和气压场的基础上，挑选出了几个有代表性的关键时次作进一步分析(图7)。3日00:00 UTC(图7a)，流场中山西的东北部有一个反气旋辐散中心，华北为一致的偏北风，黄河下游以南为一致偏东风，二者之间形成了一条

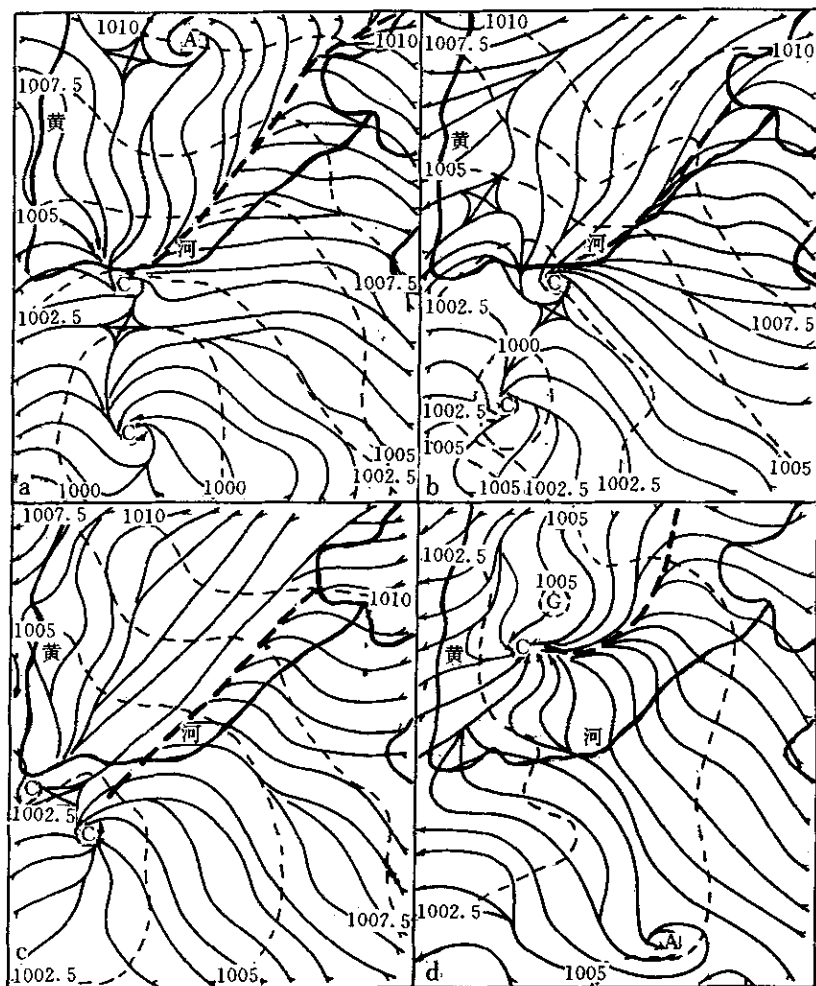


图7 1996年8月3日00:00 UTC (a)、12:00 UTC (b)和4日00:00 UTC(c)及5日00:00 UTC (d)的地面流场(实线)和气压场(虚线)(粗虚线为辐合线,等压线间隔2.5 hPa)

SW—NE 向辐合线，在其西南一侧顶端的郑州以西还有一个辐合中心，这里就是当日下

午第一个云团早期对流单体的初生处；气压场中，华北中部的等压线开始向南凸起，冷空气开始向南扩散。12 h后(图 7b)，河北省为一个自北向南伸的舌状脊区，而辐合线移至黄河下游北岸，表明冷空气已扩散到这里，第一个云团此时出现强烈发展。4日 00:00 UTC(图 7c)，南下冷空气开始变性，1010 hPa 等压线已明显南移至河北的中部偏北处，流场中的北风已变成东北风，第一个云团的云系呈现涡旋状结构，降雨量急剧加大。在随后的几小时中，第二个云团在辐合线西南段顶端附近形成并强烈发展。5日 00:00 UTC(图 7d)，弱冷空气在华北地区的影响已基本结束，辐合线已向西北方向移至河北的中东部，第二个云团在其东北段中缓慢地东北移和逐渐减弱，造成京津地区和河北东北部的暴雨。第三个云团在辐合线东南一侧的单一气流中发展，强度弱，属局地对流系统活动。

5 小结与讨论

河北省这场特大暴雨发生在东亚强经向环流形势下的副高西北侧边缘处，并且主要由两个中尺度云团直接造成。

在这两个云团生命史的大部分时段中，对流并不十分强盛，但降水却异常剧烈，并且最强降水出现在近地面层弱冷空气侵入云团，云团的云顶 TBB 逐渐升高和出现涡旋状结构的过程中。这表明云团在变性，低层斜压性在增强，但地面尚未出现低压环流。这个事实为使用卫星云图估计降水量和制作短时预报，提供了新认识。

另外，低空急流中向北涌进的水汽和不稳定能量以及北方地区近地面层弱冷空气的活动，在卫星云图上更容易直观地分析出来，显示了卫星云图对直接产生暴雨和强对流的中尺度系统形成和发展的监测能力，也是暴雨和强对流出现的时间、地区及强度监测和短时预报的有力工具。

致谢：崔小平、王大昌及王宣吉先生帮助收集和整理了部分卫星云图，特致谢意。

参考文献

- 1 丁一汇. 暴雨和中尺度气象学问题. 气象学报, 1994, 52(3): 274~283.
- 2 Maddox R A. Mesoscale convective complex. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1980, 61: 1374~1387.
- 3 Scofield R A. The NESDIS operational convective precipitation estimation technique. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, 115(8): 1773~1792.
- 4 陶诗言, 等. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980. 36~41.
- 5 Wasslia Thiao, Scofield R A and Robinso J. The relationship between water vapor plumes and extreme rainfall events during the summer season. NOAA Technial Report, NESDIS 67, 1993, 8~12.
- 6 华北暴雨编写组. 华北暴雨. 北京: 气象出版社, 1992. 13~20.

MESOSCALE ANALYSIS OF CAUSES FOR“96.8” EXTREME TORRENTIAL RAIN OF HEBEI PROVINCE

Jiang Jixi Xiang Xukang

(National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract

The cause of the extreme torrential rain event which occurred in Hebei Province during 3~5 August 1996 has been analysed using satellite and conventional data. The results show that this event appeared in favorable area nearby northwestern side of subtropical high under strong meridional circulation, and it was caused by two mesoscale convective cloud clusters directly. The interaction between the southern low level jet and weaker cold air of ground layer from northern North China led to initiation and development of the cloud clusters.

Key words: Extreme torrential rain Mesoscale cloud cluster Low-level jet