

华北首次暴雨试验过程的分析

杨克明 王维国 陈桂祥

(国家气象中心)

提 要

本文利用华北地区中尺度暴雨监测联防业务试验的加密观测资料,综合分析了1988年7月30—31日出现的暴雨过程。讨论了这次暴雨发生发展的天气形势,各种物理量场及中尺度天气系统的活动特征。从中得出一些有意义的结果。

一、引 言

1988年7月30—31日,在华北地区首次进行了中尺度暴雨监测联防试验。在试验期间,华北地区和陕西省的所有气象台站每小时都进行一次地面观测和雷达探测,另外还增加了06和18时的测风观测,从而获得了比较丰富的资料。

所监测的这次暴雨过程发生在7月30日02时至31日14时,降水出现在陕西中部、河南西北部及中部、河北中南部的部分地区及鲁西北和北京的局部地区。各省6小时最大降雨量为87 mm(河北阜平)、41 mm(河南栾川)、34 mm(山东宁津)、38 mm(陕西铜川)。

二、降水的影响系统

1. 大尺度环流

过程初,29日08时500 hPa图上,亚洲中高纬是两脊一槽型,65—90°E为脊,100°E附近为影响槽,苏联东滨海为脊。中低纬,西环副高在我国华东沿海至朝鲜一带稳定少动,其西侧湖南省有一冷涡缓慢西移,在冷涡与副高之间有一支较强的东南气流。30日08时,中亚脊前的偏北气流加强并向南扩展,影响槽往南加深于31日08时与西移冷涡北侧的南北向切变线相连接,形成一个明显

南伸至28°N附近的深槽。与此同时,西环副高也西伸增强。环流特征类似于华北暴雨型中的深槽型^[1],有利于产生暴雨。此后,极涡后部冷空气侵袭中亚脊,使中亚环流变平直,深槽断裂减弱,北段沿40°N东北移消失,南段退至102°E附近。

2. 影响系统活动

这次暴雨过程是西风槽与低涡北侧的南北向切变线共同影响的结果。30日08时,北方西风槽线与南方冷涡北侧的南北向切变线相交处新生一个小低涡,小涡周围及前部开始出现大到暴雨。当冷涡西移到西南东部地区同西风槽连接成深槽时,雨区连成一片,暴雨中心合并,雨强加大并略向东发展。北方冷锋活动对河北中部、北京的局地暴雨有重要作用,当冷锋移到吉尔嘎朗图庙至银川一线时,与东部副高西侧的西南气流交汇产生暴雨。31日20时,冷锋东移减弱,华北降雨结束。

三、暴雨形成的物理条件分析

采用华北有限区域细网格数值预报模式计算的物理量,对暴雨形成发展阶段进行诊断分析,以探讨暴雨的成因。

1. 暴雨的二维流场结构

由30日08时暴雨区附近东西向垂直环流剖面(图1a)可知,在西安以东至郑州附近

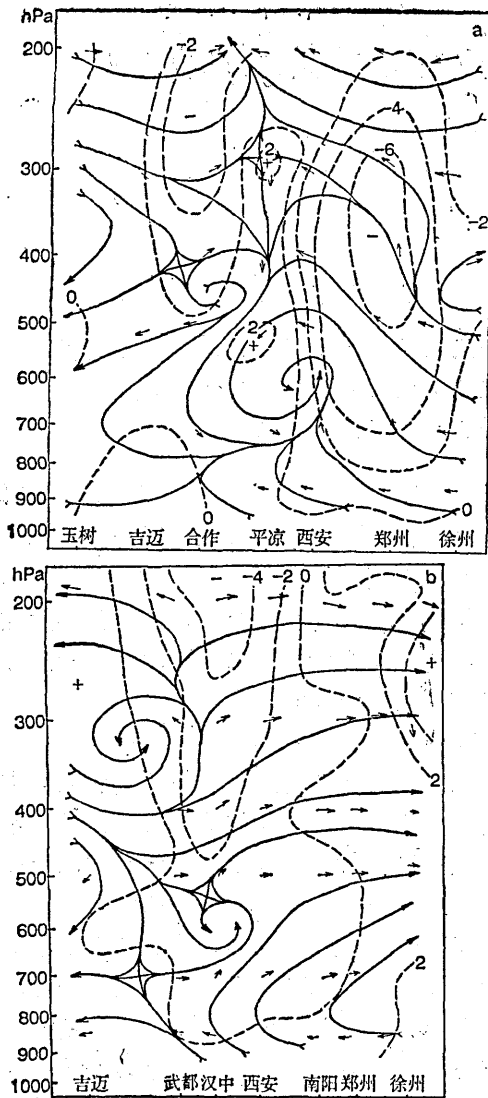


图 1 沿暴雨区附近的垂直剖面
 a. 1988年7月30日08时; b. 1988年7月31日08时
 图中实线为流线, 虚线为 ω 等值线, 单位为 $10^{-3} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$
 大约500km范围内, 从低层到高层均为上升气流, 400—300hPa之间上升速度达最大。在以西, 平凉附近为高层辐合的下沉运动区, 在合作至郑州上空, 700—500hPa间形成一个完整的垂直环流, 对暴雨发生有重要作用。31日08时, 东西向垂直环流, 已发生很大变化, 上升气流区西退减弱(图1b), 郑州以东为下沉运动所替代, 显然, 暴雨不能向东发展。

2. 温度场特征

图2a、b是暴雨发生发展时穿过暴雨区附近的東西向温度场结构垂直剖面图。从图中温度场看, 玉树至合作上空400—200hPa间等温线略有下凹, 低层在西安以西有一明显锋区。从 θ_{se} 场看, 西安以西较以东低层大气的 θ_{se} 要小得多, θ_{se} 的梯度很大, 说明

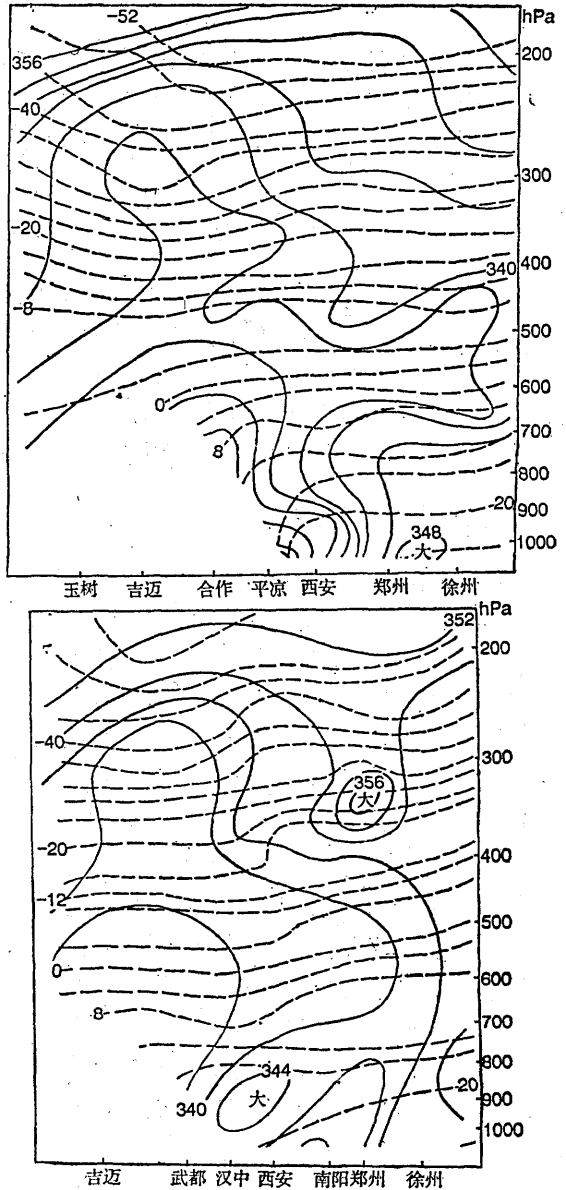


图 2 1988年7月30日08时(a)和31日08时(b)垂直剖面
 实线为等 θ_{se} 线; 虚线为等温线

西部的空气干而冷，以东温度高、湿度大，对应副高西侧的东南气流区。西安、郑州一带700—500hPa层间存在一个 θ_{se} 小值舌区，其下 θ_{se} 很大，形成一个较强的不稳定层。暴雨即产生在这种层结的 θ_{se} 密集区中。31日空间剖面图特点同30日大体相似，但低空锋区斜压结构已显著减弱。

3. 湿度场特征

从30日08时和31日08时地面Td的分布(图略)可看出，在暴雨区内，Td均在23—24℃之间，比湿约为17—18g/kg。此大比湿区沿东南气流向东南方海上开口；另有一个向南面海上开口的狭长水汽通道，两支通道在江淮地区汇成一支。对500、700、850hPa和地面四层水汽输送计算表明，各层水汽输送以850hPa层最大。30日的输送比31日强，各层比值为500 : 700 : 850 : 地面 = 1 : 2.0

: 2.7 : 1.3。31日，南部沿海水汽通道趋于堵塞。因此，暴雨区内水汽明显减弱，对暴雨持续发展不利。

4. 涡度、散度和铅直速度的垂直分布

(1) 涡度的垂直分布

暴雨区中涡度垂直廓线如图3a所示。对流层中高层为正涡度，低层和高层为负涡度，是这次暴雨发生发展时涡度垂直分布的基本特征，与通常暴雨的涡度场低层为正、上层为负不太一样。低层零涡度层位于700hPa附近，高层分别在200hPa和400hPa附近。30日，正负涡度极值分别在300 hPa和900hPa附近，其值约为 $2.1 \times 10^{-5} s^{-1}$ 和 $-0.7 \times 10^{-5} s^{-1}$ ；31日出现在500hPa和300 hPa附近，其值为 $2.8 \times 10^{-5} s^{-1}$ 和 $-2.1 \times 10^{-5} s^{-1}$ ，但正涡度伸展的高度及范围明显减小。

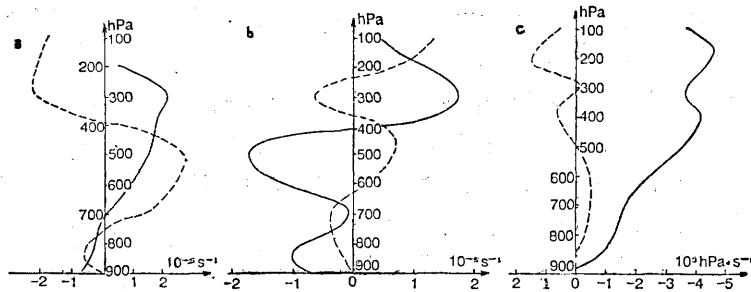


图3 暴雨区中的涡度(a)、散度(b)和垂直速度(c)

实线为7月30日08时鹤壁—汲县上空；
虚线为7月31日08时洛阳—汝县上空

(2) 散度的垂直分布

由暴雨上空的散度廓线(图3b)可见，在30日08时暴雨发生阶段，500 hPa以下辐合、以上辐散较明显，从最大辐合到最大辐散层，散度几呈线性递增，无辐散层约在400 hPa附近，辐散极值是 $-1.8 \times 10^{-5} s^{-1}$ 和 $1.8 \times 10^{-5} s^{-1}$ ，分别出现在500 hPa和300hPa层附近。同时，850hPa也存在一个较大辐合层，出现“双层辐合”现象，说明上升运动比较复杂。31日08时又出现了“双层辐合、辐散”。最大辐合、辐散分别位于300hPa和100hPa层上，极值达 -0.7

$\times 10^{-5} s^{-1}$ 和 $1.3 \times 10^{-5} s^{-1}$ ，下层分别位于700 hPa和500 hPa层上，极值为 $-0.4 \times 10^{-5} s^{-1}$ 和 $0.7 \times 10^{-5} s^{-1}$ ，强度已减弱。

(3) 铅直运动的垂直分布

图3c给出暴雨发生发展阶段的垂直运动速度。图中30日与31日垂直速度分布存在着明显差别，30日暴雨发生时，中高层上升速度较强，最大值约在200hPa附近，位置较高；31日只中层有较弱的上升运动，以700hPa最强，500hPa以上基本是下沉运动。最大上升速度30日08时($-4.5 \times 10^{-3} hPa \cdot s^{-1}$)是31日08时($-0.5 \times 10^{-3} hPa \cdot s^{-1}$)的9倍。

5. 能量场分布

总能量由

$$E_t = c_p T + gZ + Lq + \frac{1}{2} V^2 \text{ 求出 [2],}$$

图4为得到的850hPa总能量场。30日08时，

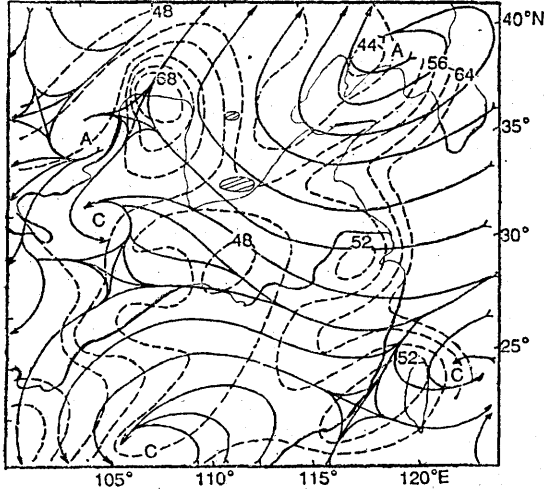


图4 1988年7月30日08时850hPa流线和T分布(单位:°C,斜线区为暴雨区)

暴雨发生时的大范围总能量场呈鞍型分布,在河套和华东沿海海区各有一个高能区,沿海高能舌伸到黄淮一带,起着供应能量的作用,两中心强度分别达69°C和66°C,与通常认为暴雨能级在64°C以上相符。两高能区分别与槽线、槽前西南气流和副高西侧东南气流相对应。渤海至东北南部、豫中南到汉水流域为两个低能区,与干冷空气及副高中的下沉气流相关联,起到启动或抬升潮湿空气上升运动的作用。高低能区之间的能量锋区在晋、冀交界到豫北一带,能量锋区水平梯度为5°C/100km,不甚强,这可能也是过程未达到强暴雨之原因。暴雨出现在能量锋区上,雨区偏于高能区东南侧。到31日08时,能量场发生很大变化(图略),高低能区明显减弱,能量锋区也减弱,南端能量锋区残留在晋、陕的中部到豫西一带,暴雨与能量锋区的关系已开始不明显。

四、暴雨的中分析

本节用试验期间加密的降水资料,分析

暴雨的中尺度特征。

1. 降水时空分布

从30日23时—31日18时河南太康及河北吴桥站的逐时降水量可知,太康的雨量主要由两次降水过程所造成,吴桥雨量主要由5次降水过程所引起,每次过程呈现出2—3小时的周期变化。太康在30日23时—31日1时和31日2—4时两次中尺度降水过程的雨量占总量的97%,吴桥则在31日1—3时,4—6时以及11—13时3次中尺度降水过程的雨量占总量的89%,反映出有显著的中尺度天气特征。30日共出现8个降雨量≥50mm的暴雨中心,其中有一个中心雨量>100mm;31日,≥50mm的暴雨中心有11个,>100mm有2个。每个暴雨区的水平尺度一般为几十公里,但也有几个暴雨连成片,空间尺度在100km以上。

2. 雨团活动的一般规律

把1小时降水量为5mm的等雨强线所包围的区域称为雨团,其生命史≥2小时,空间尺度在100km以内。据此得出雨团活动的概况(表1)。暴雨试验过程中共出现12个

表1 雨团活动概况

雨团编号	维持时间(日·时)	源地	移向	移速(km·h ⁻¹)	1小时最大雨量
1	30.23—31.02	河南西华	NE	55.0	48.6
2	30.23—31.04	山东东阿	NNE	48.4	16.3
3	31.01—31.04	河南获嘉	NE	42.2	10.5
4	31.03—31.06	河南夏邑	NNE	48.1	31.1
5	31.04—31.07	山东德州	NE	30.5	16.6
6	31.04—31.06	河北武强	NE	20.6	27.6
7	31.06—31.08	河南虞城	N	34.4	9.7
8	31.07—31.08	河北深济	NE	36.7	19.5
9	31.07—31.10	天津西郊	NE	41.3	5.4
10	31.08—31.10	山东高密	NE	41.2	14.8
11	31.08—31.11	河南虞城	N	22.9	8.6
12	31.11—31.13	山东德州	N	27.5	11.9
平均	3.6小时			37.7	

雨团,分别形成在冀中南、鲁西、豫东北和天津。由此看来,雨团初生源地具有分散、范围广的特点。其主要源地位于河南东部颍河和安徽浍河上游的支流汇合地区,另

一个在河北子牙河、山东马颊河、徒骇河流域河谷地带,共生成7个。这可能与水面蒸发影响水陆之间温度对比及湿度条件较好有关。雨团的生命史最长达6小时,最短2小时,平均3.6小时,以2—3小时频次最多,占8次。所有雨团都是移动性的,移动方向与500hPa气流方向基本一致,并偏其右侧10—20度,大多数呈东北方向。移速最快55.0km/h,最慢20.6 km/h,平均37.7 km/h。1小时最大雨量达48.6mm,有的仅5.4 mm,说明不同雨团的移速、降水量差别较大。这些雨团都是单独活动,没有发生合并现象,大多东移后就减弱。到31日11时便没有新生雨团。总之,雨团分布散、移动较快、雨强大多较弱是未造成较大范围强暴雨的原因。

3. 中尺度气压系统

(1) 活动概况

间隔0.5hPa一条等压线,分析了试验期间生命史>3小时的10个中尺度低压和5个中尺度高压,得到了以下一些主要特征(表2)。

试验过程中,中低压主要生成在泰山以北的黄河下游地区及太行山东侧子牙河上游的石家庄和邢台地区。发生的相对集中时段在23时—2时(共6个),与湘中中小尺度系统试验基地夜间所测结果一致^[3]。中高压主要源于中低压源地东北部的沧州、保定和廊坊交界地区,集中发生时段在5时—11时。这些中系统的水平尺度大多在50—200 km,一般为100 km左右;生命史最短1小时,最长8小时,以3—6小时最多。

(2) 与雨团的关系

中尺度气压系统与雨团关系极为密切,把中系统演变和雨团活动对照分析,发现上述12个雨团中有7个产生在中低压后部和南部;5个产生在中尺度辐合线上及周围辐合区内。在有雨团配合的中低压中,中低压比雨团早发生的有4个,同时发生的有3个;中尺度辐合线比雨团早发生的有4个,同时发

表 2 中尺度低压和高压活动概况

编号	维持时间 (日·时)	源地	移向	移速 (km·h ⁻¹)	生成时 强度 (hPa)
低压					
1	30.23—31.02	河南淮阳	E	21.4	1003
2	30.23—31.01	河北赵县	E	68.8	1009
3	30.23—31.02	河北武安	NE	20.6	1009
4	30.23—31.06	河北献县	NE	37.3	1009
5	30.24—31.05	河北赞皇	NE	32.1	1009
6	31.02—31.04	河北赞皇	SE	55.0	1009
7	31.03—31.09	山东乐陵	EN转SE	40.1	1008
8	31.06—31.09	河北赞皇	SE	29.8	1008
9	31.06—31.11	河北定县	NE	50.8	1008
10	31.10—31.13	山东临邑	NE	36.7	1009
平均	4.9			33.9	1008
高压					
1	30.23—31.04	山东禹城	SE	43.5	1009
2	31.05—31.08	河北清河	NE	77.9	1009
3	31.09—31.12	河北威县	旋转	27.5	1010
4	31.10—31.12	山西晋城	E	41.3	1009
5	31.11—31.13	河北满城	SE	72.1	1010
平均	4.0			52.5	1009

生的有1个,均无相反情况。表明多数中低压、中尺度辐合线是雨团产生的原因。

(3) 中低压的发生和发展

通常认为中高压多是降水反馈的结果,中尺度低压则与降水的形成相关。因此,本节只分析中低压的发生和发展。

试验期间,西太平洋副高稳定在黄渤海到朝鲜一带,地面上华北中东部盛行偏东风,气流受燕山、太行山的阻挡,易产生中尺度辐合线和辐合中心。同时,一条冷锋已东移逼近,使地面辐合加强,触发一个个中低压生成。中低压位于地面能量锋区上或偏于高能区一侧,其强度较弱,多数没有发展,少数中心气压加深1—3hPa。太行山东侧子牙河上游以南产生的中低压向东南移发展,而后消亡;偏北的向东北移发展后消亡;黄河下游产生的东移发展后消亡,它们都随着降压幅度增大而发展,并向1小时最大负变压中心移动。伴随中低压的雨团,随低压的加强而发展,雨强和范围增大。当中低压移入正变压区域或低能区时,中低压则减

弱或消失。这里以4号、5号中低压、2号雨团和2号中高压的活动及作用为例加以说明。

30日23时(图5a), 4号和5号中低压分别在河北赵县、献县附近初生, 其北侧有一条能量锋区配合, 强度为 $1^{\circ}\text{C}/10\text{ km}$, 南侧有 76°C 高能中心对应。与两低压相对应为一

条东西向辐合区, 两低压中心有两个辐合中心相伴, 位于沧州和宁晋附近, 强度为 $-12.0 \times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 和 $-15.7 \times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$, 同中低压的形成有关。此时2号中高压在鲁西禹城附近生成, 其西侧并出现一个弱中低压, 在中低、高压之间气流汇合的地方形成了2号雨团。由于该地是低能区域(总温度在 $67-68^{\circ}\text{C}$), 中低压仅存在1小时便减弱消失。

24时(图5b), 2号中高压脊轴顺转, 它西侧的西南风清楚, 与高空风一致, 2号雨团沿其北移且雨强有所减弱。但与4号、5号中低压配合的两高能中心已合并, 原东西向地面辐合区变成南北向辐合区, 强度为 $-11.3 \times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$, 并且同2号中高压西南面弱辐合区相通, 1小时负变压的范围及幅度明显加大, 与4号、5号中低压对应, 中心值达 -0.7 和 -0.5 hPa , 从而4号、5号中低压的范围、中心强度都加大, 有所发展。

31日01时(图5c), 地面高能区明显减弱, 4号中低压也明显减弱。但5号中低压东南侧气流向中心流入较清楚, 有 $-15.0 \times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 辐合中心配合, 故强度不变。2号中高压脊轴转成东西向, 2号雨团基本沿着辐合轴线方向北移到4号中低压外围。02时, 2号中高压明显北移, 可能与另一中高压并入有关, 进而使2号雨团移入较强的辐合区, 雨团显著加强, 雨强达每小时 16.3 mm , 雨区扩大并持续2小时后, 随着5号中低压减弱而消亡。04时, 当西部另有中低压东移及雨区东移时, 2号中高压消失。

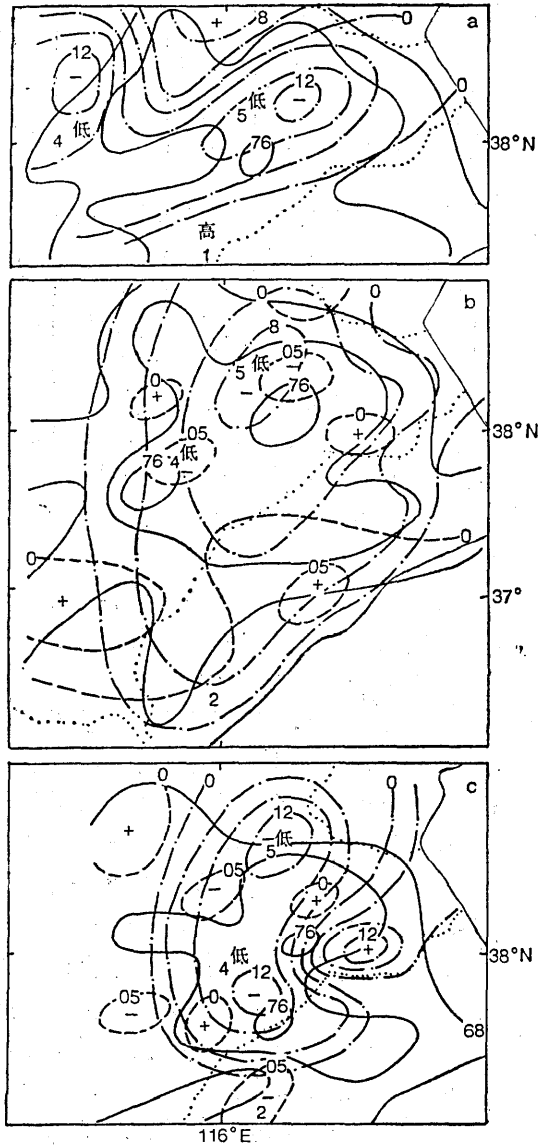


图5. 1988年7月30日和31日地面能量(实线)、散度(点划线)、1小时变压(断线)和中系统(左下数字为编号)分布

a为30日23时, b为30日24时, c为31日01时

五、降水云团的卫星云图和雷达回波分析

1. 云团与雨团的关系

在红外云图上把结构紧密的或增强显示红外云图上, 云顶温度 $\leq -33^{\circ}\text{C}$ 、尺度 $\geq 1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的云块定为云团。试验期间共出现三个云团(表3), 其尺度在 300 km 之内, 生命史 ≤ 12 小时, 属于中尺度系统。其中I号云

团于30日14时生成在豫西山地，Ⅱ号、Ⅲ号云团分别在30日22时、31日01时生成在平原地区。这些云团都受高空偏南气流引导向偏北方向移动。

表 3 实验期间的云团统计

序号	源地	生成时间 (日·时)	生命史 (小时)	尺度 (经纬度)	移向	移速 ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)
I	豫西山地	30.14	12	2.5×2	NE	38
II	山东西部	30.22	10	1×2	N	27
III	鲁豫皖交界	31.01	5	2×1.5	NE	少动

经云团和雨团的对比分析，发现每个云团都与生命史 ≥ 3 小时的雨团相对应，有时一个云团对应几个雨团。Ⅱ号云团同2、5、6、8号4个雨团对应，Ⅰ号云团与1号雨团，Ⅲ号云团与4、10号雨团对应。并且云团及雨团都是向东北方向移动，路径非常一致。雨团与云团的相对位置与云团的特征有关。以Ⅰ号云团为例说明，Ⅰ号云团南部边缘结构紧密、色调白亮、边界光滑清晰（图略），是温度梯度最大的地方，亦是降雨最强的区域；而云团北部结构松散，色调呈浅灰，出现卷云纹理，虽有云覆盖，但1小时雨量多在1 mm以下。这种明显差异与云团所在环境场、高低空风的垂直切变有关。当云团处在强的高低空风的垂直切变中，云团上风侧往往温度梯度大，对流旺盛，雨团中心位于该地区。Ⅰ号云团附近的郑州上空，200和850hPa的垂直切变经向风为 $25.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，纬向风为 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，表明Ⅰ号云团处于强的垂直切变中，因此，云团上风和下风方明显不同。在增强显示红外云图上，Ⅱ号云团是镶嵌在未增强灰色云区中的一块黑色云区，尺度为 $1^\circ\times 1^\circ$ ，云顶温度为 $-37\sim -43^\circ\text{C}$ 。经分析它与1小时、6小时的现时（实况）及未来降雨量得出，1小时的1 mm雨量与 -33°C 的温度廓线很接近，5 mm雨量的范围要比它小得多，其内最大1小时雨量可达10几毫米，它们相对位置基本是同步对应的。而现

时6小时的10 mm降雨量的范围比温度廓线小得多，未来6小时雨量范围和数值明显增大，并出现55.3和30.6 mm的两个强中心，反映出未来6小时云团是发展增强的。

2. 雷达回波与雨强的关系

对北京、石家庄试验期间所测雷达回波及对应现时、未来1小时降雨量的统计分析结果如表4。雨强除直接取决于回波强度外，又同回波顶高度、回波形状、回波发展趋势相关。同等强度的回波，波顶高的，降雨亦强。回波形状中，块状产生的降雨大于零散的，絮状又大于块状的，发展中的回波则未来雨量增大，反之则降雨减弱。如31日03

表 4 雷达回波强度与对应1小时降雨量

回波强度 (dBz)	现在1小时降雨量		未来1小时降雨量	
	mm %	mm %	mm %	mm %
<30	≤ 2.5 86	> 2.5 14	<1 84	≥ 1 16
30—40	≤ 2.5 40	≥ 2.5 60	<1 40	≥ 1 60
40—55	≤ 8 17	≥ 8 83	<8 33	≥ 8 67

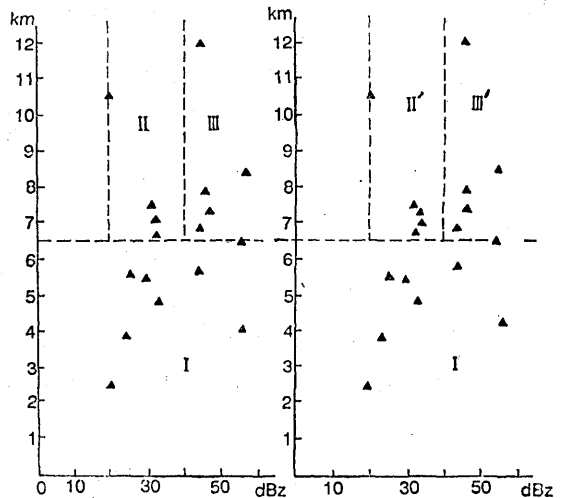


图 6 雷达回波强度、波顶高度与1小时降雨量点聚图

左为现时1小时降雨量，右为未来1小时降雨量
 I区： $< 2.5\text{ mm}$ 降水频率71%；II区： $\geq 6\text{ mm}$ 降水频率60%；III区： $\geq 8\text{ mm}$ 降水频率82%；I'区： $< 2.5\text{ mm}$ 降水频率71%；II'区： $\geq 4\text{ mm}$ 降水频率40%；III'区： $\geq 8\text{ mm}$ 降水频率67%

时, 石家庄探测到的絮状回波, 强度为 46 dBz, 波顶高度达 8 km, 1 小时最大降水为 13.7 mm; 而到 31 日 04 时, 回波强度仍为 46 dBz, 但波顶高度为 12.1 km, 1 小时最大降水达 16.3 mm, 未来 1 小时最大雨量 27.6 mm, 是试验中极端最大的, 回波顶也是极端最高的。

从石家庄雷达回波强度、回波顶高度及其对应的现在和未来 1 小时的降水量点聚图可知 (图 6), 强的回波和较高的回波顶高度同降雨量对应关系更为密切一些。

六、结语

通过对华北首次暴雨试验过程的分析, 得到以下一些主要结果。

1. 这次暴雨是在东亚环流经向发展, 冷暖空气交绥下发生的。降雨的发生、强度和落区受 500 hPa 的低槽、南北向切变线以及地面冷锋等天气系统的影响, 后期在东亚环流急速向纬向变化的过程中终止。

2. 物理量垂直分布较复杂, 这可能与垂直层结情况较为复杂, 影响系统又不够很

强有关。

3. 暴雨的水汽主要来源于东海及以东洋面上, 其次来自南海, 从中低层输送至暴雨区。

4. 暴雨发生在低层能量锋区上, 偏在 高能区的东南侧。

5. 中尺度气压系统、云团和雨团有一定对应关系。雨团主要生成在中低压和中尺度辐合线的辐合区内, 位于中低压后部或南部及云团的上风侧。它们的移向比 500 hPa 气流方向偏右, 平均移速 $20-50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。云团生命史一般是 8—12 小时, 中气压系统 3—6 小时, 雨团 2—3 小时。当中低压、云团和雨团移入地面高能辐合区时发展加强, 雨量也随即加大, 这对短时暴雨发生和发展有预报指示意义。

参考文献

- [1] 陶诗言等著, 中国之暴雨, 36—37, 科学出版社, 1980。
- [2] 雷雨顺, 能量天气学, 4, 气象出版社, 1986。
- [3] 湘中中、小尺度系统试验基地暴雨组, 中尺度暴雨分析和预报, 112, 气象出版社, 1988。

An analysis of a heavy rain process during the first Mesoscale Rainstorm Experiment in North China

Yang Keming Wang Weiguo Chen Guixiang

(National Meteorological Center)

Abstract

With the intensive observations from the Joint Defence Operational Experiment of the Mesoscale Rainstorm of North China, a cloudburst process from 30 to 31 July, 1988 was analysed comprehensively. We discussed the weather situation of the process which initiated the cloudburst and various parameter fields, as well as the characteristics of the mesoscale weather system. In this paper, some significant results have been given.