

# 一次强降水天气过程的中尺度分析<sup>1)</sup>

薛秋芳 王建中

(中国气象科学研究院,北京 100081)

## 提 要

利用每小时增强显示红外云图、云顶黑体温度( $T_{BB}$ )和常规气象资料,分析了1993年8月3—6日华北平原及西北地区东部一次暴雨—大暴雨过程,揭示了产生大暴雨的中 $\alpha$ 尺度对流系统的发生发展,讨论了环境场条件及天气尺度系统间的相互作用对暴雨云团的重要性,并用物理量诊断探讨雨团形成的物理机制。

关键词: 中 $\alpha$ 尺度对流系统 暴雨云团 对称不稳定

## 引 言

暴雨是由有组织的强对流系统造成,强对流系统由于其范围小,历时短,来势猛,雨量集中,有很强的局地性与骤发性,且受资料的限制,给人们的认识和预报造成极大困难。本文试图用较详细的资料,仔细分析1993年8月3—6日我国华北平原及西北地区东部一次较大范围的暴雨—大暴雨天气过程,研究强对流系统发生发展的规律和其中的细结构,探讨暴雨云团形成的物理机制,提高人们对中尺度天气系统的认识和暴雨预报能力。

### 1 天气概况

这次暴雨过程从8月3日起到8月6日止,其中强降水分为3个时段:第1次从8月3日22时—8月4日06时,陕西延安地区的延安、志丹、吴旗、安塞、延川及灵石等县市降了暴雨和大暴雨,降雨量 $>50\text{mm}$ ,其中延安降雨量为128mm,灵石为150mm,引起山洪水灾。这次过程波及38个乡镇,据不完全统计,受灾农田25万多亩,倒房千余间,直接经济损失1亿多元;第2次强降水从8月4日16时—5日12时,山东省济宁、临沂、菏泽、聊城、枣庄等市(地)和德州地区西部普降暴雨,部分地区降特大暴雨,降雨时伴有6—8级大风,部分县有龙卷风,有28个县(市、区)

降雨量 $>100\text{mm}$ ,其中7个县 $>200\text{mm}$ ;2个县 $>300\text{mm}$ ,最大降雨量位于临沂市盛庄镇达540mm,费县探沂镇520mm。这次过程使鲁西南、鲁南地区100多万人被水围困,1千多万亩农田绝产,全省因灾直接经济损失约达50亿元以上。河北省邢台地区也有200多万亩农田积水。第3次过程从5日下午开始到6日上午,江苏省东台、大丰、射阳等地降雨量 $>200\text{mm}$ 。这是1993年汛期范围最大、影响最广(影响陕北、山东中部和南部、河北南部、河南北部、江苏北部以及安徽的淮北地区)、强度最强的一次降水过程(图略)。

### 2 中 $\alpha$ 尺度对流系统的发生发展

这次降水是由在黄河气旋上所生成的一系列对流云团所致。我们分析了这段时间内中尺度云团的基本特征发现,气旋波上有17个云团活动,其中3个达中 $\alpha$ 尺度,水平尺度400—700km,生命史5—12小时,为中 $\alpha$ 尺度对流系统,这3个中 $\alpha$ 系统对应于3次强降水过程。其余为中 $\beta$ 尺度对流系统,水平尺度100—200km,生命史1—5小时。中 $\alpha$ 对流系统形成主要是由两个或两个以上中 $\beta$ 对流系统相互作用的产物,中 $\beta$ 系统合并、分裂、再合并的过程即为中 $\alpha$ 对流系统发展、减弱、再发展,直至成为中尺度暴雨云团。

1) 本文由强风暴实验室提供资助。

8月3日20时30分 $T_{BB}$ 图上,500hPa槽前正涡度平流云系内有3块云顶温度 $< -52^{\circ}\text{C}$ 的强对流区,21时30分西面的云团减弱消失,东面两个云团合并加强,对流发展,22时延安地区开始出现较大降水,23时30分在河套东部生成第一个中 $\alpha$ 系统(图略),空间尺度约为400km, $T_{BB}$ 于4日00时20分达 $-70.8^{\circ}\text{C}$ 的低值,云顶高于16.8km,在其后部西南气流水汽输送带中有新的中 $\beta$ 系统生成,在中 $\alpha$ 对流系统西侧可见陡的 $T_{BB}$ 梯度,这是伴有强降水的对流系统的特征<sup>[1]</sup>。8月4日03时30分后中 $\alpha$ 对流系统开始减弱,中心温度升高, $T_{BB}$ 低于 $-60^{\circ}\text{C}$ 的云区分裂,到05时30分云团分裂成3个中 $\beta$ 系统云团,中间云团减弱,南、北两个云团东移过程中逐步靠近并加强,11时30分合并,在其后部又有新的对流云团发展,16时30分4个分散的中 $\beta$ 对流系统组织成一体,形成马蹄形云区(第2个中 $\alpha$ 系统),第二次强降水过程从此时开始,云区东南侧有一块云与主

体分离,中间部份继续发展,云顶温度迅速降低(图略),到18时20分中心出现云顶温度低于 $-72^{\circ}\text{C}$ 的深对流区,中 $\alpha$ 对流系统达到成熟阶段,形成近于圆形的中尺度暴雨云团。在19时30分 $T_{BB}$ 图上,35.14°N、115.5°E有一温度值为 $-80.7^{\circ}\text{C}$ 的冷点,在其北偏西方向不远处35.19°N、115.2°E有一温度值为 $-71.5^{\circ}\text{C}$ 的暖点,冷暖点间组成热力对子(thermal couplet)<sup>[2]</sup>,两者温差为 $9.2^{\circ}\text{C}$ 。从4日18时20分到5日00时20分的连续6张图上可以看到, $T_{BB}$ 低于 $-72^{\circ}\text{C}$ 的深对流区有围绕中 $\alpha$ 对流系统中心作气旋式旋转的现象,由此可判断,中 $\alpha$ 对流系统是一旋转的涡旋。从5日02时30分始,中 $\alpha$ 对流系统在向ESE方向移动过程中减弱(图1)。6时20分当它移到近海地区时再次加强,发展为第3个中 $\alpha$ 对流系统(图略),使河南拓城、江苏沐阳、大丰和射阳等地产生强降水。当其移到黄海海面后,由于有充足的水汽供应,延续了较长时间。

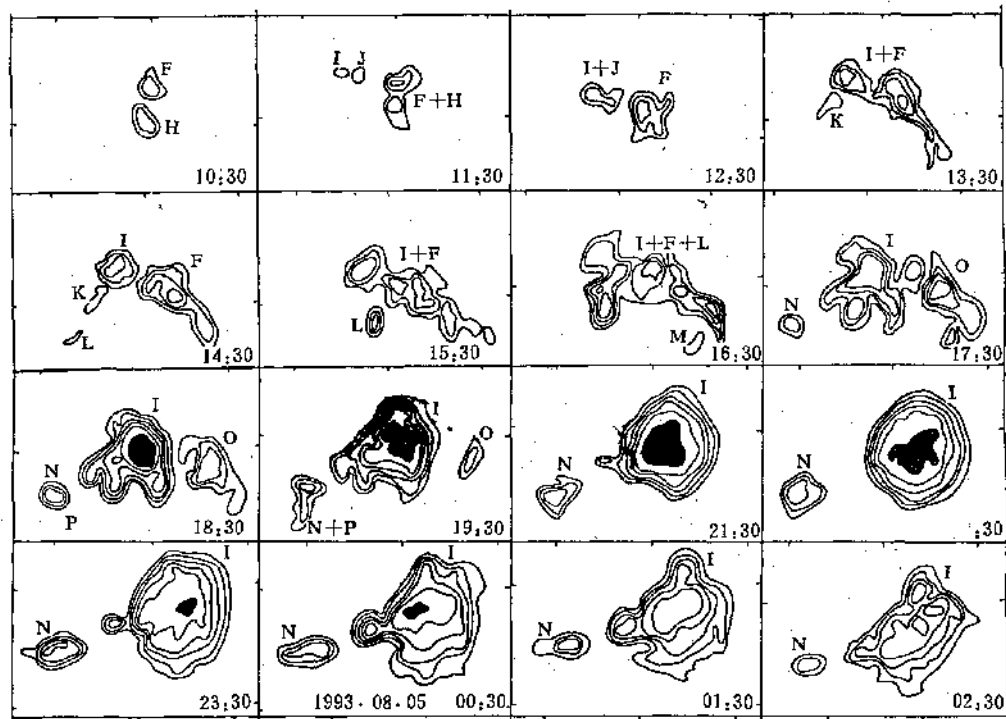


图1 第2个中 $\alpha$ 对流系统的发生发展过程

### 3 中 $\alpha$ 对流系统形成的环境场条件

中尺度对流系统与其环境条件有密切的关系,大尺度环境条件不但制约了对流系统的种类、演变过程,而且还可影响对流系统内部的结构、强度、运动和组织的程度。

对这次强降水过程起主要作用的天气系统是:

#### 3.1 黄河气旋

图2为黄河气旋与地面冷峰移动路径。由图可见,2日08时柴达木盆地有一中心气压为1000hPa的地面低压向偏东方向移动,此时新疆东部有一条冷锋往东南移,逐步向低压靠近,当冷锋进入低压后,在冷暖空气的作用下,生成黄河气旋。中 $\alpha$ 对流系统形成于气旋冷锋前的暖区里。此气旋向东偏南方向移动,进入黄海后沿朝鲜半岛北上,在朝鲜半岛中部的泰安附近减弱消失。

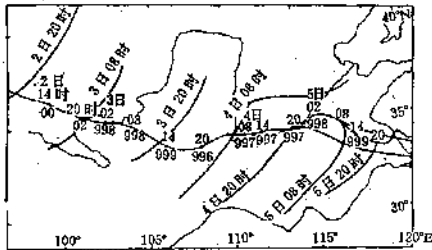


图2 黄河气旋移动路径图

细实线为地面低气压位置,  
数字分别为日期和中心气压值

黄河气旋在700hPa高空图上的反映是一起源于青海湖以西的暖性西北涡,500hPa图上有一西风槽与之配合,当槽后有弱冷空气侵入低涡时,暖性低涡转变为斜压冷性低涡。8月3日20时此低涡位于河套西部地区,涡前部在西南暖湿气流影响下(700hPa图上西南风风速为 $14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),由于水汽凝结反馈的作用,促使低涡进一步发展,降水加大,强降水出现于低涡前部的东南象限。

#### 3.2 低空急流

图3、4分别为4日08时700hPa高空流场和4日15时30分红外卫星云图。由图3可见,低涡东侧为几乎近南北向的高压。在500hPa图上原位于河套西南部的大陆高压加强东移,与其北侧的高压同位相叠加,在河套东部地区形成一高压坝,使西风槽东移受阻,高压西部辐合加强,产生一支强劲的西南风急流,在850hPa图上风速达 $17\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。水汽通量图上,在贵阳和芷江附近有一水汽通量的大值区,中心数值 $>24\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ,水汽通量的主轴表示:水汽由此处经长沙、汉口、南阳、郑州向北。在图4上,可见两条水汽输送带:一条是从高原东部经四川盆地向东北输送;另一条从南昌、景德镇向东北到安徽的蚌埠后转向北偏西方向,两支水汽在太行山以东的华北平原汇合,使得云团合并,对流发展,生成第2个中 $\alpha$ 对流系统,加强为中尺度暴雨云团,使鲁西南、鲁南等地在4日17—23时的6小时内出现特大降水,定海20—21时的降雨量为 $124\cdot8\text{mm}$ ,成武20时10分—20时40分半小时内下了70mm的雨。4日20时水汽通量散度图上,河北西部、河南北部有一水汽通量辐合中心,另一辐合中心在山东的济宁、临沂地区,与强降水中心基本一致。

#### 3.3 高层辐散

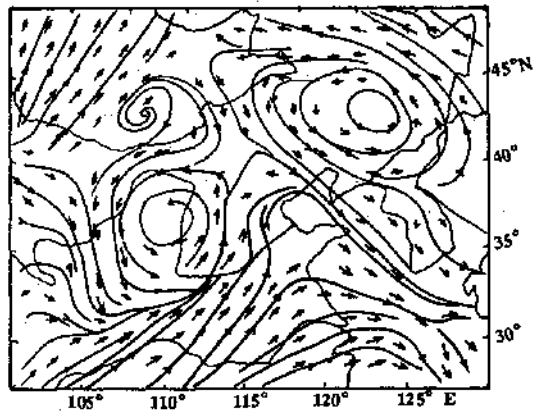


图3 4日08时700hPa流场

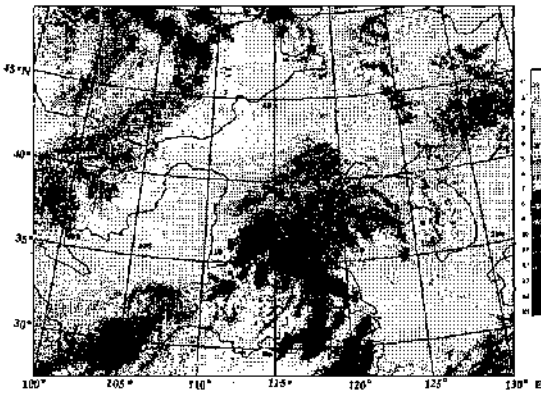


图4 4日15时30分红外卫星云图

在200hPa高空图上,由于南亚高压加强东移,使得国内大部地区处在对流层上部反气旋环流中;在散度图上,低层辐合区上空为辐散区。高低空流场的这种配置,形成强烈的垂直环流,促使对流云的发展。

### 3.4 诊断分析

为了进一步分析中 $\alpha$ 对流系统气象要素场的三度空间结构,了解其生成的物理条件,我们进行了物理量诊断。从4日20时涡度场可见与前述散度场相同的结果,即中 $\alpha$ 对流系统上空从低层850hPa直到300hPa都为辐合,辐散仅在200hPa一层上出现。垂直运动场,800hPa和600hPa强对流系统内部都为上升运动;400hPa和200hPa系统中心西侧为上升运动,东侧为下沉运动;在850hPa上因受入流影响上升气流不是很强,强的上升气流出现于600hPa, $\omega = -8 \times 10^{-5} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

### 4 夏季风和温湿条件

暴雨的产生必须有充足的水汽供应,夏季风为这次降水过程输送了大量的水汽。在850hPa  $\theta_{se}$ 图上,一条高能舌从长江中游到华北平原呈西南—东北向,另一条从江南沿海往西北方向伸,河南省境内出现一 $\theta_{se} = 384\text{K}$ 的大值中心, $\theta_{se}$ 舌再由此向北偏东方向伸展,344K北界到达45°N。如果把850hPa  $\theta_{se} = 340\text{K}$ 等值线代表季风云团的前

锋<sup>[3]</sup>,这次过程季风云团北推到45°N以北地区,在卫星云图上可见中低纬云系的耦合作用,中尺度暴雨云团形成于低层能量锋区上。温度平流图上,从低层到中层中 $\alpha$ 对流系统上空都为暖平流区,且愈往上暖平流愈强,500hPa出现 $24 \times 10^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 的等值线,冷平流出现于400hPa层。在 $\omega$ 方程中,暖平流造成上升运动,冷平流造成下沉运动<sup>[4]</sup>,这次过程强盛的上升运动与深厚的暖平流区有关。由中低层 $T - T_d$ 可知,从四川盆地经长江中下游、黄河中下游地区一直到华北平原,( $T - T_d$ ) $\leq 5^{\circ}$ ,为大范围的湿区,500hPa除重庆到安庆向北至南阳地区为相对干区外,其他地区也为湿区,如此深厚的湿层,十分有利于深对流的组织和发展。

根据在热成风方向上湿度增大是导致条件性对称不稳定的一种有利形势,也是一条具有实际预报意义的判据<sup>[5]</sup>,我们计算了湿球位涡,计算表明:暴雨发生前和发生时,对流层下层775hPa和600hPa是对称不稳定的。我们把从3日20时—5日08时每隔12小时计算出的 $q_w < 0$ 负值中心与4日08时和5日08时24小时降水 $> 50\text{mm}$ 的强降水区相对照(图5),发现两者有较好的对应关

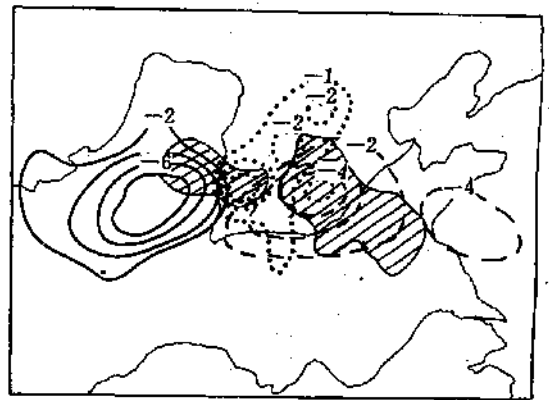


图5 3日20时—5日08时(分别以实线、点线、虚线、点划线表示)湿球位涡低值区与4日08时和5日08时 $> 50\text{mm}$ 的降水区域(阴影区)

系,可为强降水预报提供一定的依据。

## 5 小结

5.1 强位势不稳定区中出现低空暖平流时所产生的抬升作用可以产生显著的强天气过程。

5.2 气旋系统降水强度的变化与中 $\alpha$ 对流系统的活动有密切关系,此次大暴雨过程生成3个中 $\alpha$ 对流系统,降水出现3次峰值。

5.3 对流云团的加强,主要以云区的合并为主,尤其是高空槽前的正涡度平流云系与季风云系北侧的对流云团合并,即为中低纬云系的耦合作用,可使对流迅猛发展,产生突发性暴雨。

5.4 中 $\alpha$ 对流系统生成于高温高湿的大气中,其湿层和强的温度平流可向上一一直伸展到对流层中层500hPa,上升运动也可达到9km以上。

5.5 湿球位涡的计算对判断强降水的发生和中 $\alpha$ 对流系统的对称不稳定机制有较好的指示作用。

## 参考文献

- 1 Ninomiya, K. T. Akiyama and M. Ikawa. Evolution and fine structure of a long-lived meso- $\alpha$ -scale convective system in Baiu frontal zone, Part I. Evolution and meso- $\beta$ -scale characteristics. J. Met. Soc. Japon, 66, 1988: 331—350.
- 2 Gerald, M. Heymsfield. Satellite-observed characteristics of midwest severe thunderstorm anvils. Mon. Wea. Rev., 116, 11, 1988: 2200—2223.
- 3 丁一汇. 夏季风及其变率. 高等天气学. 北京: 气象出版社, 1991: 289—299.
- 4 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文. 温带气旋与反气旋. 天气学原理和方法. 北京: 气象出版社, 1981: 91—101.
- 5 寿绍文. 条件性对称不稳定. 中尺度天气动力学. 北京: 气象出版社, 1993: 117—134.

# The Mesoscale Analysis of a Heavy Rain Process

Xue Qiufang Wang Jianzhong

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

## Abstract

By using the hourly GMS infrared imagery and conventional meteorological data, an analysis of the heavy rain over Huabei plain and the east of Northwest China during 3—6 August 1993 is made. It is mainly to inquire into the problems with the genesis and development of the meso- $\alpha$ -scale convective systems which caused severe convective weather. The results shown that the environmental conditions, especially the interaction between the cloud system of the middle and low latitudes for the formation of large cloud clusters is very important. The negative area of the wet-bulb potential temperature is helpful to the prediction of the emergence of heavy rainfall.

**Key Words:** meso- $\alpha$ -scale convective system heavy rain cloud cluster