

一次强降水系统的演变和细结构分析^{*}

薛秋芳 丁一汇 王建中

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

提 要

文章分析 1992 年 7 月 23 日河北省东部平原地区一次突发性暴雨过程, 研究了产生特大暴雨的中- α 尺度对流系统的演变及其细结构, 讨论了该系统内部中心暖区形成的物理机制, 并指出几种不同尺度的天气系统相互作用对这次暴雨系统的重要影响.

关键词: 中- α 尺度对流系统; 弧形云线; 对称不稳定.

1 引 言

强降水过程由于其突发性强、变化剧烈、影响因素复杂、观测资料缺乏, 给人们认识和预报造成极大困难, 使人们对造成强降水过程的中小尺度系统的认识远不如天气尺度系统那么完善.

本文试图用逐时增强显示的红外云图、云顶黑体温度(TBB)、每小时降水量和加强观测的地面资料, 仔细分析一个产生强降水天气过程的中- α 尺度对流系统. 这个系统具有类似热带气旋的结构(环流作气旋式旋转, 中心出现暖区等). 通过研究其演变过程及内部的细结构, 探讨强降水系统形成的物理机制, 以求提高超短期预报的精度.

2 中- α 尺度对流系统的演变及细结构

这次过程的主要降水出现于 7 月 23 日 17 时至 24 日 03 时. 根据当地气象台站实测资料统计, 24 小时降水量大于 50mm 的测站有 31 个, 大于 100mm 的测站 13 个, 大于 200mm 的测站 4 个, 大于 300mm 的 1 个. 其中东光日降水量和最大 1 小时降水量分别为 368mm 和 92.8mm, 有些乡镇达 420mm. 图 1 为 7 月 23 日 08 时至 24 日 08 时 24 小时雨量分布.

造成这场特大暴雨的天气系统是一超级中尺度暴雨云团, 其空间尺度为 700km, 生

1993-07-01 收到, 1993-09-17 收到修改稿.

* 本文由强风暴实验室提供资助.

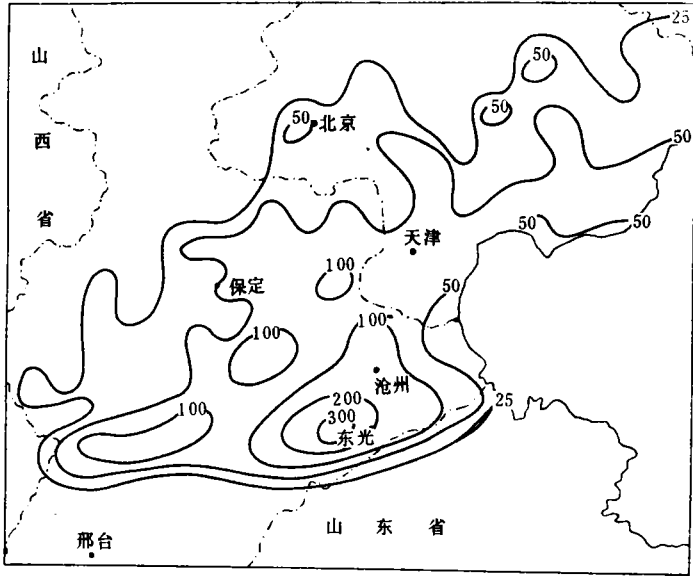


图1 1992年7月23日08时至24日08时24小时雨量分布

命史约 11h, 相当于中- α 尺度对流系统(M α CS). 图(2a)为 7 月 23 日 9 时 30 分至 24 日 1 时 30 分逐时 TBB 图(由于篇幅有限只给出 6 个时次的图). 云区取云顶温度为 -62°C 至 -32°C 的温度范围, 等值线间隔 10°C . 由图可见: M α CS 的形成主要是由两个中- β 尺度对流系统(M β CS)相互作用的结果, 在此称作 β_1 、 β_2 . β_2 云区逐渐东移、发展, β_1 北抬并不断

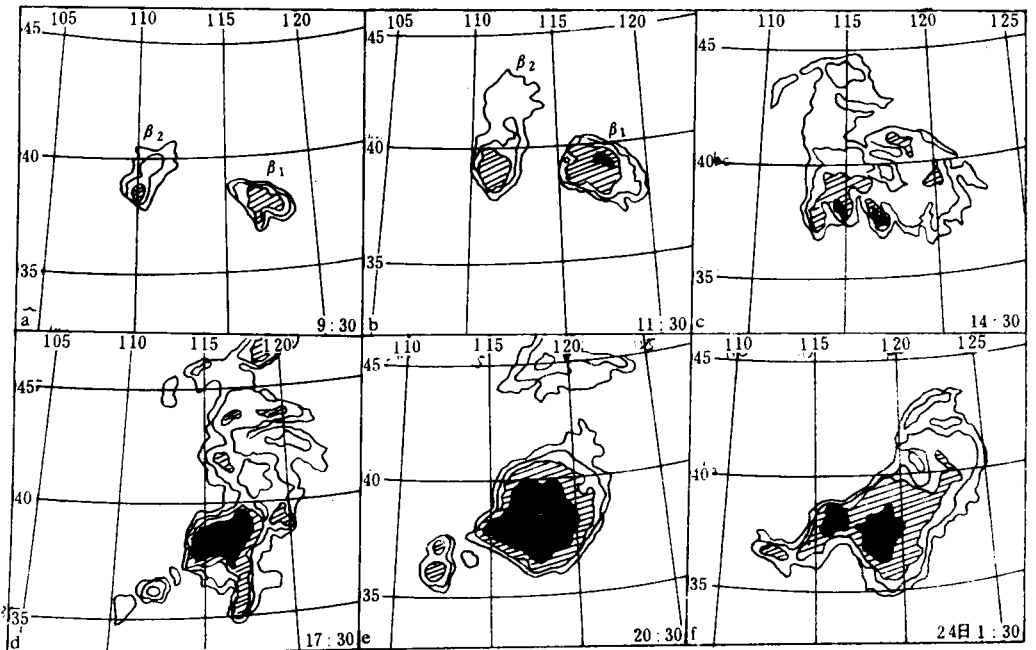


图2 7月23日09时30分至24日01时30分TBB图(图上黑区、阴影区、无影区分别表示云顶温度低于 -62°C 、 -52°C 与 -32°C 的云区, 等值线间隔 10°C)

加强,于10时30分前后与黄河下游一对流云区合并、加强,受其影响,京、津、冀地区从南到北出现了一次小到中等强度降水,其中涿州于上午11时30分遭受罕见的龙卷并伴有冰雹袭击,北仓也出现龙卷(图2b).14时30分 β_1 云区中云顶温度低于 -52°C 的云区一分为三(图2c),北面一块继续北移,影响河北北部地区,中间一块减弱,南部一块与 β_2 合并,发展成MaCS(图2d).在它生命过程中,尾部偏南风气流中另有两个M β CS与它相接,对其维持起到一定作用.到了19时30分MaCS达到其最强盛的阶段(图2e),之后逐渐减弱(图2f).

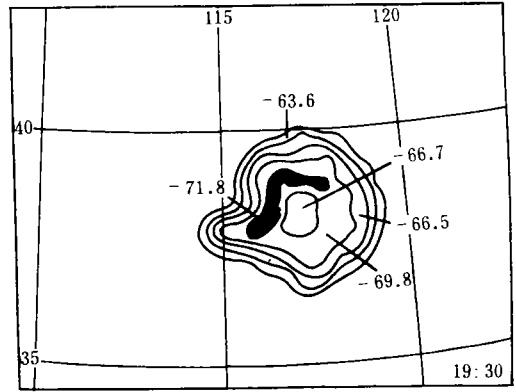


图3 23日19时30分TBB图(温度范围 -72°C 到 -62°C ,等值线间隔 2°C ,黑区为云顶温度低于 -70°C 的区域)

为揭示MaCS内部细结构,我们对23日17时30分至22时30分TBB图进行了处

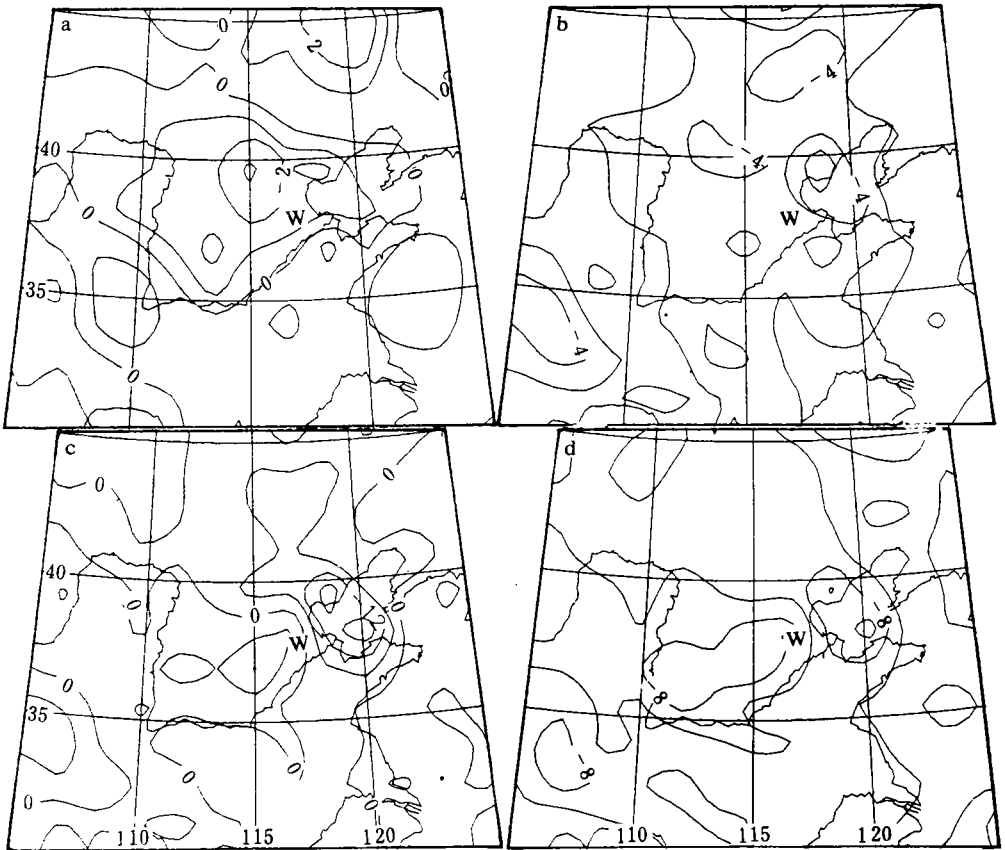


图4 23日20时(a)800hPa (b)600hPa (c)400hPa (d)200hPa垂直运动场
($10^{-3}\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$)(W为中心暖区所在位置)

理,把云顶温度低于 -62°C 的强对流云区从大片云区中分离出来,温度范围取 -72°C 到 -62°C ,等值线间隔 2°C (图略)。由图可见两种有趣的现象:(1)云顶温度低于 -70°C 深对流区围绕中心作气旋式旋转,这表明整个系统是一旋转的涡旋。(2)在19时30分出现了云顶温度比周围高的中心暖区,温度比最冷点温度高 5.1°C (图3)。另外,中心暖区里基本没有出现大于 10mm/h 以上的强降水,只有边缘个别站出现降水;23日18时20分到19时30分深对流区的形状为绕中心近半圆的弧形云线,弧形云线的形成是由于雷暴系统中有下沉的冷空气,这种冷空气在地面上向外扩展与环境的暖空气之间形成了具有锋面性质的边界,称为雷暴的外流边界。在高分辨的卫星云图上,表现为弧形云线^[1]。我们用23日20时客观分析资料计算垂直运动表明(图4):云团中心所在处中低层 800hPa 和 600hPa 为弱的上升运动, 500hPa 层以上的 400hPa 和 200hPa 层为下沉运动,强上升运动区位于中心东北方。这可能与系统的移动、旋转及沿海地形有关。因此,我们认为 MaCS 的中心暖区是由中高层补偿的下沉运动所造成。以上现象表明这个系统具有热带气旋相似的结构。

3 MaCS 形成的天气学分析

强降水均产生于有利的环流形势条件下,天气尺度系统直接提供暴雨云团生成的条件和背景场。超级中尺度暴雨云团的形成是几种不同尺度天气系统共同作用的结果。图5为红外卫星云图及云图与 500hPa 高度场的叠加,23日08时至20时,根据卫星云图判断,在 48°N 、 105°E 附近有一高空冷涡,东南侧有一条螺旋云带;河套东部 500hPa 槽前正涡度平流区有一片对流云系,地面图上此处为一中低压,与 β_2 相对应。 β_1 位于 850hPa 暖性切变以东低空急流前方偏南气流辐合区中。

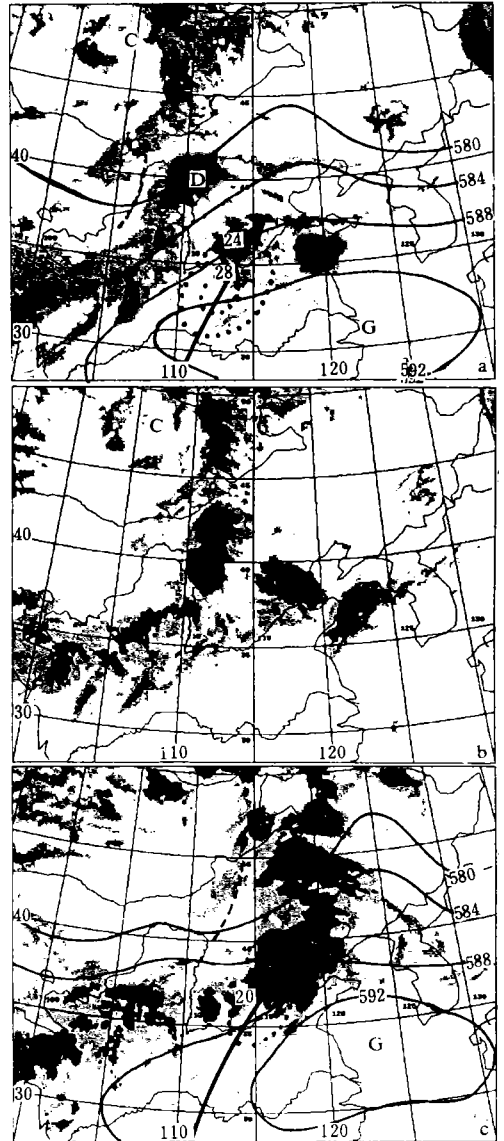


图5 (a) 23日07时30分红外云图和08时 500hPa 高度场的叠加
(b) 23日11时30分红外云图
(c) 23日19时30分红外云图和20时 500hPa 高度场的叠加
(C:高空冷涡 D:地面中低压 实线: 500hPa 等高线 虚线:槽线 点线: 850hPa 水汽通量中心 矢线: 850hPa 急流轴线)

下面从天气形势分析暴雨产生的环流背景及中低纬系统相互作用对暴雨云团生成的重要性。

(1) 副热带高压和低空急流的作用

从22日始,原稳定维持于我国东南沿海的副热带高压加强西伸,副高南侧的9206号台风在偏东气流引导下西行登陆,副高西南侧有一支强盛的东南风急流,图6(a、b)分别表示7月23日08时700hPa风场和偏南风急流的东南侧与西南侧测站的时间剖面图。由图(6a)可见, β_1 南侧的偏南风急流主要由副高西南侧的东南风急流转向而成,此急流轴上有 $32\text{g}/\text{cm}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s}$ 的强水汽通量中心,在图(6b)的时间剖面图上,可见两支急流中的一支是由东南风转成偏南风的急流,另一支为西南风急流,两支急流交汇于宜昌附近,顺

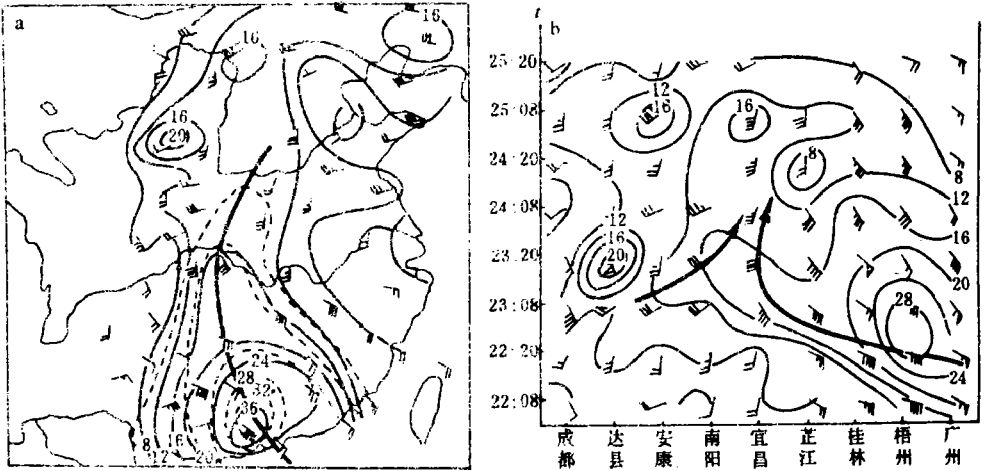


图6 (a) 7月23日08时700hPa风场(粗实线为水汽通量轴线,细实线等风速线,虚线水汽通量等值线);(b) 偏南风急流东南侧和西南侧测站的时间剖面图(粗实线急流轴线,细实线等风速线)

郑州、济南一线向东北方向输送。 β_1 在此急流带作用下迅速发展,到23日20时,由于副高加强北抬,高压中心位于 33.5°N 、 123°E ,中心北侧形成一高压坝,致使西风槽东移受阻(图5c),副高西侧偏南风进一步加强,23日08时,925hPa和850hPa偏南风的最大风速为 $18\text{m}/\text{s}$,700hPa为 $14\text{m}/\text{s}$ 。23日20时,925hPa和850hPa西南风加强到 $22\text{m}/\text{s}$,700hPa达 $26\text{m}/\text{s}$ 。这支急流一方面为暴雨区输送动量、热量和水汽,又加强了地面扰动和层结的不稳定度,触发不稳定能量释放。

(2) 高空槽的作用

从图5可见,东亚地区为北涡南槽型,在高空槽的作用下,高空槽前的正涡度平流大于低空的正涡度平流,在 ω 方程中,这时有 $\frac{f_0}{\sigma} \frac{\partial}{\partial p} [\bar{V} \cdot \nabla(\zeta + f)] > 0$,强迫引起上升运动($\omega < 0$),触发暴雨产生。另一方面槽后部有弱冷空气南下,在500hPa温度平流图上(图略),可见到河套北部有冷平流向东南方向侵入,与低层暖湿空气相遇,促使暴雨云团迅速发展、降水增幅。东光地区降水从前一小时 $4.3\text{mm}/\text{h}$ 增大到 $92.8\text{mm}/\text{h}$,这是由于中层弱的干冷空气与低空急流输送的暖湿气流的相互作用而使位势不稳定增大所致。

(3) 对流层上部辐散

在 200hPa 流线上(图略)可见,由于南亚高压加强东移,使暴雨云团上空出现强辐散区.在高空辐散流场背景下,地面又是中尺度辐合区,这种条件可以促使对流云强烈发展.

4 物理量诊断结果

为了对 MaCS 的生成给以适当的物理解释,分析了 MaCS 与各种物理量诊断场之间的关系.在 850hPa 温度平流图上(图略),黄河中游地区有强暖平流中心向东偏北方向输送.中层有冷平流南侵,由于上下层的平流差异,使大气层结不稳定性增加.在 ω 方程中,温度平流场对于垂直运动有明显的强迫作用.因而当有明显暖平流出现在强条件不稳定区时,产生的抬升作用有可能造成强对流的发生^[2].这次过程强降水发生于 $(-\vec{V} \cdot \nabla T) \geq 20 \times 10^\circ\text{C/s}$ 区域内.据 850hPa 和 700hPa $(T-T_d)$ 场可知,从黄河中游到渤海湾地区 $(T-T_d) < 5^\circ\text{C}$,为明显的湿区,湿层厚度至少达到 700hPa(图略),十分有利于暴雨产生.水汽通量散度计算表示:云团中心的南部为水汽源,北部为水汽汇.一小时雨量资料表明,强降水发生于云团中心的西北到北方(云团中心的东北方为渤海湾,无降水资料).在地面总温度图上(图略),MaCS 位于地面高能舌上.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.对称不稳定,特别是条件性对称不稳定是倾斜对流发生、发展的机制之一,而倾斜对流与暴雨、强对流天气密切相关^[3].在 23 日 08 时 775hPa 湿球位涡图(图略)上,37°N、115°E 有一负位涡中心,大于 50mm/h 的强降水发生在它东北方约 200km 处.由低层 θ_e 场和 k 指数场分析可知(图略),MaCS 形成于低层能量锋区及 k 高指数区内.

分析表明:冷涡东南部与副高西北部气流的辐合,低空急流轴北侧辐合的加强,并伴有强的暖平流所产生的强迫上升运动是本次暴雨过程的主要抬升机制.

5 小 结

(1) MaCS 在高能高湿的大气中可以发展成旋转的、具有中心暖区的涡旋.中心暖区由补偿的下沉运动造成.

(2) MaCS 的发生发展与高低空流场密切相关,是几种不同尺度天气系统(地面中低压、低空急流、高空槽、副高)相互作用的产物.

(3) 温度平流与湿球位涡等物理量对判断降水的发生和对称不稳定有一定的指示作用.

参 考 文 献

- 1 斯公望. 暴雨和强对流环流系统. 北京: 气象出版社, 1988. 17~34.
- 2 丁一汇. 高等天气学. 北京: 气象出版社, 1991. 548~573.
- 3 寿绍文. 中尺度天气动力学. 北京: 气象出版社, 1993. 117~134.

EVOLUTION AND FINE STRUCTURE OF A HEAVY PRECIPITATION SYSTEM

Xue Qiufang Ding Yihui Wang Jianzhong
(*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

Abstract

A heavy precipitation system occurring in the eastern plain of Hebei province in summer is analysed based on the detail data. Evolution and fine structure of the meso- α scale convective system are studied. And the physical mechanism of warm regions forming in this system is investigated. The results show that the interaction between different scale systems has great effects on the event.

Key words: Meso- α scale convective system; Arc cloud line; Symmetry instability.