

长江中游一次暴雨中尺度天气系统的观测分析

赵玉春 王仁乔 郑启松 彭 军

(武汉中心气象台, 430074)

提 要

利用多种加密观测资料,详细分析了长江中游一次暴雨中尺度天气系统的观测特征。结果发现:(1)暴雨由各种尺度的天气系统相互作用造成,直接造成这场暴雨的是中 α 尺度切变线上活动的多个并不深厚的中 β 尺度对流系统,该对流系统在发生发展过程中一直伴有明显的中尺度雨团活动。(2)这次中 β 尺度对流系统活动可能的物理图像为:在切变线东北方和西南方各有一支气流在切变线上辐合抬升并汇入对流系统中,在暖平流的作用下,气流在倾斜的 θ_w 锋前上升(或沿锋区爬升)并随高度发生顺转,到7km高度以上开始以西南气流发散,在离对流区400~500km处下沉,并在 θ_w 锋区附近构成中尺度垂直环流圈,对流云团发生在该垂直环流的上升支一侧。

关键词: 暴雨 中尺度系统 切变线 对流

引 言

对暴雨的研究,20世纪取得了长足的发展。气象学家逐渐认识到暴雨的发生必须具备有利的大尺度环流背景条件^[1~3],而暴雨的强度和出现的地点又与中尺度扰动的活动有密切的关系^[4]。但是由于暴雨发生的多尺度活动的复杂性,中尺度系统的强地域性和观测资料时空分辨率的局限性,过去的研究^[1]主要集中于大尺度环流条件和中 α 尺度(或中间尺度)天气系统,但也逐渐开始注意到中 β 尺度天气系统的作用^[4]。近年来,随着计算机技术的高速发展和中尺度数值模式分辨率的不断提高,以及野外加密观测资料的获取,人们开始研究暴雨的直接影响系统——中 β 尺度天气系统。胡伯威等^[5]对“98·7”武汉、黄石突发性强暴雨的中尺度系统进行了研究,认为大暴雨是由一系列与特殊的中尺度地形作用密切相关的中 β 尺度强对流系统所造成。贝耐芳等^[6]对暴雨系统的中尺度分析认为,一系列具有局地性和突发性的中 β 尺度天气系统是强暴雨发生的

最直接的原因。王建捷等^[7]对引发暴雨的中 β 尺度对流系统进行的诊断分析发现,暴雨发生地附近具有强的对流有效位能,并揭示了中 β 尺度对流系统可能的流场结构。本文以2002年7月22~23日发生在长江中游特别是湘鄂交界附近的暴雨过程为例,利用常规和加密观测的探空、地面观测资料和多普勒天气雷达探测资料,分析了与暴雨相联系的中 β 尺度天气系统,揭示暴雨中 β 尺度天气系统活动特征和可能的物理图像。

1 过程概况及天气尺度背景分析

1.1 降水过程概况

2002年7月22日08时~23日08时(北京时,下同),湘鄂交界地带和鄂豫皖交界地带普降暴雨,其中石门、澧县、枝城、五峰、荆州、大悟、光山、颖上等10多个观测站24h降水量达100mm以上(图1a),荆州24h雨量为148.7mm,最大雨强为39.8mm·h⁻¹。从降水分布来看,整个雨带在石门—荆州—大悟—光山—颖上一带,呈东北—西南向,雨带上有3个强降水中心,分别在五峰、荆州和

颖上附近。

加密观测站逐小时的雨量资料(图 1b)分析发现,这场暴雨由两场强降雨形成(荆州观测站的逐小时降水呈明显的双雨峰分布),

第一场发生在 22 日 12~19 时,第二场发生在 23 日 00~08 时。两场暴雨皆表现为发生时间短,范围小,强度大,具有明显的中尺度特征。

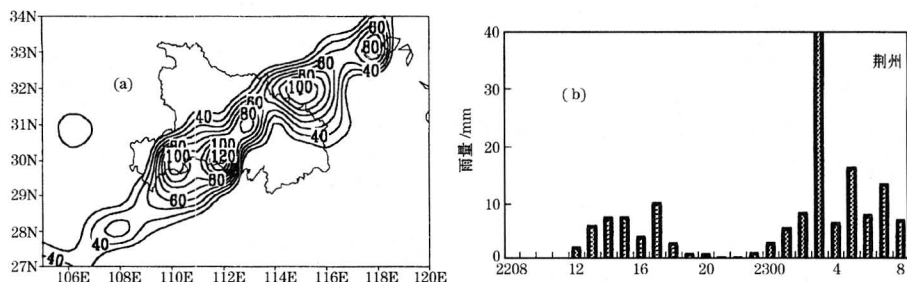


图 1 22 日 08 时~23 日 08 时 24 小时 25mm 以上降雨量分布(a)和荆州逐小时雨量演变图(b)

1.2 天气尺度背景

2002 年 7 月 22 日 08 时,500hPa 中高纬环流呈稳定的“两槽一脊”型(图略),即乌拉尔山东侧和华北地区各有一低压槽,贝加尔湖地区为高压脊,呈明显的阻塞形势,西太平洋副热带高压表现为东北—西南向且稳定少动(120°E 副高脊线在 18~20°N,130°E 副高脊线位于 30°N 附近),长江中下游处于两高之间的宽阔槽区,贝加尔湖高压脊前不断有短波槽东移影响长江中下游地区。暴雨是在上述有利的大尺度环流背景下,由各种天气系统相互作用而造成的。图 2 给出了各种天气系统和物理量的综合示意图,可以看出:(1)对流层中层不断有冷空气沿华北槽后的西北气流南下影响长江中下游地区;(2)两场降水的天气尺度影响系统不同,第一场降水的天气尺度影响系统为 700hPa 弱气旋性低涡(图 2a),第二场降水的天气尺度影响系统

为对流层中低层切变线(图 2b);(3)暴雨发生在低空急流核的左侧,高空急流核的右后方,暴雨与高、低空急流的耦合有关。值得指出的是,第一场暴雨发生前(22 日 08 时),850hPa 低空急流已经建立,低空急流轴在长沙—南昌一线,呈东北—西南向,高空急流轴在 37°N 附近。第二场暴雨发生前(22 日 20 时),低空急流明显减弱,这可能与其日变化有关,但高空急流增强且南压至 35°N 附近(每 6 小时加密的武汉探空资料表明,23 日 02 时 850 和 700hPa 西南气流增强不明显)。暴雨发生后(23 日 08 时),低空急流明显增强,此时,高空急流轴略东移北收。可见,第一场暴雨与低空急流有关,第二场暴雨可能与高空急流加强的关系更为密切,低空急流的增强可能与强降水造成的非绝热加热有关,而低空急流的增强又为强降水提供水汽辐合条件^[8]。

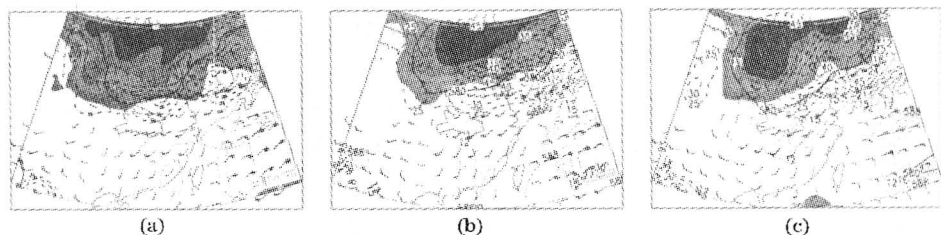


图 2 22 日 08 时(a)、22 日 20 时(b)和 23 日 08 时(c)天气尺度系统与物理量的综合示意图

阴影区为 500hPa $T \leq -6^{\circ}\text{C}$ 区域,虚线为 200hPa $|V| \geq 25\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 全风速,点线为 850hPa $|V| \geq 12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 全风速,实线 588 为副高特征线,580 指示 500hPa 槽的位置,风标描述 700hPa 风场

2 暴雨中尺度系统的观测特征

2.1 中尺度雨团活动特征

暴雨一般由中尺度系统活动造成,研究中尺度雨团的活动规律可以从侧面揭示中尺度天气系统的活动特点。贝耐芳等^[6]和邓秋华等^[9]研究表明中尺度对流系统活动伴有明显的中尺度雨团活动。分析此次暴雨过程逐小时雨量的加密观测资料分析发现,在湘西北—鄂西交界地带存在4个明显的中 β 尺度雨团活动(1小时降水 $\geq 10\text{mm}$,且维持时间在2h以上定义为一个雨团)。(1)22日14时,随着700hPa一个中尺度低涡从川东移到鄂西,第一个雨团开始在公安附近形成,之后逐渐加强东移,16时移到监利,1小时降水达到36.2mm,后迅速减弱消失,仅维持了3个小时。(2)16时第二个雨团在长阳附近形成,17时东移到枝江,18时维持在枝江—松滋附近,此雨团降水强度不大,为 $13.0\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$,该雨团也只维持了3个小时左右。随着这两个雨团的消失,第一场暴雨过程结束。(3)23日00时,鄂西南开始有对流云发展,第三个雨团在五峰—鹤峰附近形成,观测到的雨强达 $15.9\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$,01时东移到长阳,02时到达枝江附近,03时在荆州—公安附近突然增强(从雷达回波演变来看,这与该雨团和荆州南部北抬的雨团合并有关),荆州1小时降水达39.8mm,之后该雨团一直维持在荆州—公安附近,直到08时才减弱消失,该雨团维持了9个小时左右。(4)随着第三个雨团的东移,湘西北开始有对流云发展,23日02时第四个雨团开始在桑植形成,之后东移经过大庸,04时在石门附近加强,石门最大雨强达 $30.0\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$,05~06时维持在石门附近呈准静止状态,07时减弱消失,发生在湘西北—鄂西交界地带的第二场暴雨随之结束。另外,大别山西侧存在3个明显的中 β 尺度雨团活动。可见,暴雨由多个中尺度雨团活动造成。

2.2 多普勒雷达回波特征

多普勒天气雷达不仅能提供大范围降水

的空间分布及降水强度的变化,还能进一步提供空气质点的运动信息^[10]。多普勒雷达所提供的降水质点的多普勒速度资料使人们有可能更加深入地了解暴雨产生的中尺度系统及其流场特征。由于多普勒速度图上的冷暖色只定性的描述了降水质点相对于雷达流入流出情况,下面根据计算机模拟得出与特定风场对应的多普勒速度图像^[10],简要地分析第二场暴雨发生期间的多普勒速度特征。

图3a为23日00时35分荆州多普勒雷达探测到的径向风速。由图可见,速度零线经过荆州近似呈“>”状,结合850hPa和地面加密观测的流场,可以判断在荆州—公安附近存在一条东北和西南气流构成的中尺度切变线;另外,在荆州以西90km处有一明显的正的径向风速大值中心(相对雷达流出),这表明对流层中低层可能存在强风速扰动(或中尺度急流核脉动)。01时29分~03时29分(图略),切变线缓慢向东移动,风速大值中心以 $25\sim 30\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的速度向东传播至荆州附近。04时29分切变线移到荆州以东,荆州西西南方向和东东北方向0~90km处皆出现多普勒风速模糊,这表明切变线两侧的气流可能又出现了强的风速扰动,这一特征一直维持到07时30分,之后缓慢减弱。结合逐小时雨量演变发现,暴雨发生在强风速扰动阶段,这表明切变线两侧的强风速扰动(或中尺度急流核脉动)与暴雨密切相关,但出现强风速扰动的原因尚不十分清楚,根据逐小时观测到的负压这一特点,这可能与对流层中高层正涡度平流、中低层暖平流以及强降水非绝热加热等因素造成的低层减压有关。

暴雨发生期间,宜昌多普勒雷达VAD垂直风廓线(图略)上,2.4km以下为东北风,2.4km高度处由东北风转为西南风,对流层中低层(7km以下)风随高度发生顺转;另外,1.5°以上仰角探测到的多普勒径向风速零线呈“S”型分布,这表明对流层中低层有暖平流^[10]。23日06时后,对流层中上层

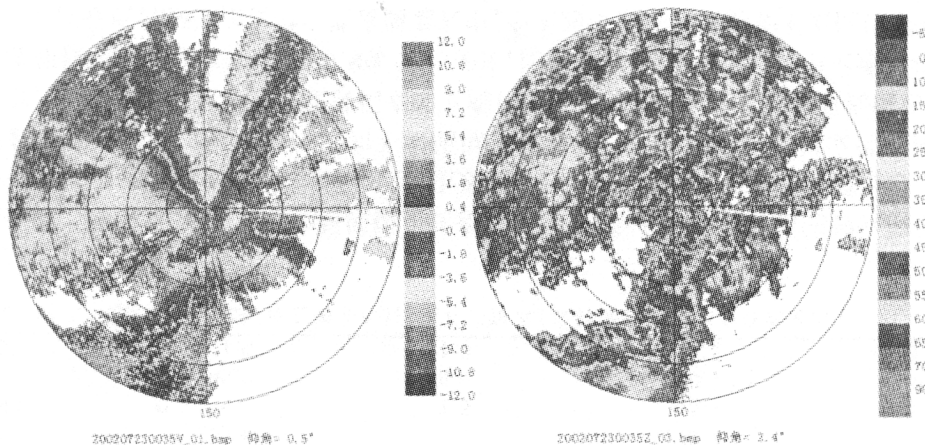


图3 23日00时35分荆州多普勒雷达0.5°仰角上探测的径向风速(a)与反射率因子(b)

(5km以上)风开始随高度发生弱的逆转,高层出现弱的冷平流。

从多普勒雷达反射率回波演变来看,配合切变线有一东北—西南向的降水回波带缓慢东移,回波带上有强降水中心生消、移动。荆州多普勒雷达逐小时的回波图上,22日23时35分(图略),荆州西侧90km处开始形成弱的降水回波,此时宜昌—五峰一带有弱的降水发生。23日00时35分(图3b),西侧的弱回波带突然增强,回波最大强度达35dBz,这时五峰—鹤峰一带雨团开始活动;此外有一狭窄的降水回波区经过荆州。之后西侧的回波带缓慢东移,03时29分到达荆州附近与南部的强降水回波区结合,在荆州附近造成强烈的降水(从每10分钟的雷达回波演变来看,强反射率回波的水平尺度很小,强降水可能由中 γ 尺度系统造成)。07时29分后回波带东移影响荆州以东地区。另外,从雷达回波顶高及其演变可以看出,降水回波高度一般在7~8km左右,回波顶高分布不均匀,局部地区达到9~10km。可见降水并非由强烈的深对流系统造成,而是对流层中低层对流造成。

3 中尺度对流系统结构特征分析

3.1 流场与热力结构

图4为22日08时~23日08时沿112°E流场和位温场的垂直剖面图,第一场暴雨

发生前(22日08时),29~30°N附近(暴雨区)600hPa以下 θ_{se} 随高度降低,存在明显的对流不稳定。 θ_{se} 锋区位于33°N且随高度先向南后向北倾斜。30°N附近有一支上升气流支,气流在500hPa附近开始沿锋前斜升至200hPa,然后发散分成两支,一支向北走,在 θ_{se} 锋后37°N附近下沉,但并未构成完整的直接热力环流;另一支向南走,在25°N附近下沉后在500hPa折向北,构成一支中 α 尺度的间接环流圈,这与以前的研究结果一致^[4]。第二场暴雨发生前(22日20时),29~30°N附近仍存在对流不稳定,且较第一场暴雨发生前有所加强, θ_{se} 锋区也加强并略向南压至32°N附近。30°N处的上升气流明显加强,并在700hPa附近沿着 θ_{se} 锋区向上斜升,到400hPa便开始有气流在锋后下沉,500hPa以上另有一支上升气流在对流上升带以北500km处。南支环流圈也明显加强,其干冷的下沉气流使得600hPa附近出现 θ_{se} 低值区。暴雨发生后(23日08时),暴雨区600hPa以下大气层结稳定,对流不稳定能量得到充分释放, θ_{se} 锋区仍维持在32°N附近。30°N处的上升气流减弱,南支环流圈也明显减弱。北侧开始形成一支完整的直接热力环流,气流在锋区内上升锋后下沉,这支环流的形成可能与对流上升带内降水非绝热加热

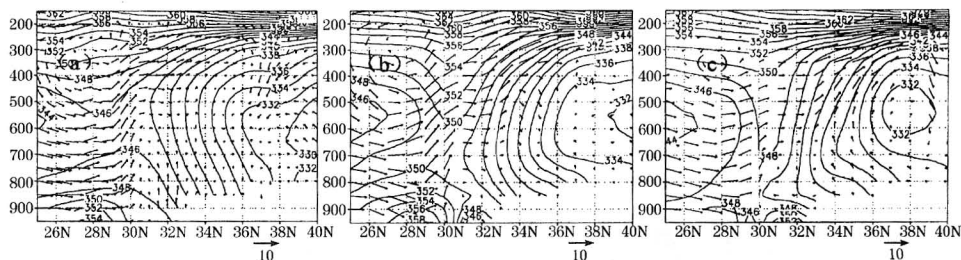


图4 2002年7月22日08时(a)、22日20时(b)和23日08时(c)沿112°E流场和位温场的垂直剖面图

图中 ω 放大1000倍,单位: $\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$,位温单位: K

造成的南北温度梯度加大有关,而该环流圈形成后又有利于上升运动带的维持。

3.2 动力结构

22日08时850hPa等压面(图略)上,30°N附近为一准东西向的正涡度带,涡度带上存在两个大值中心,一个在118°E附近,一个在110°E附近,其西侧配合有明显的辐合中心;22日20时,118°E附近涡度中心北抬至32°N附近,正涡度带演变为东北—西南向,且有所加强,涡度带西侧的辐合中心移到112°E附近;23日08时,随着低空急流加强,切变线南北两侧的风速加大,整个涡度带进一步加强,涡度中心的西南侧的辐合中心也略有加强。由此可见,两场暴雨皆发生在正涡度带上涡度大值中心西南侧的辐合区。

从垂直结构上看,两场暴雨皆发生在最大正涡度柱的西侧,低层辐合高层辐散。涡度和散度场沿30°N的垂直剖面图上(图略),22日08时110~120°E为一正涡度柱,最大正涡度在750hPa附近,最大负涡度在300hPa附近,正涡度柱高层辐散低层辐合,辐散中心略向西倾斜。22日20时正涡度柱略西移,110°E处正涡度柱伸至200hPa高度处,此时辐合发生在700hPa以下浅薄的大气层内。23日08时400hPa以下维持正涡度柱,但在113°E附近出现了一个强烈的正涡度中心,此时110°E附近辐合仍发生在700hPa以下浅薄的大气层内。22日08时~23日08时沿112°E涡度和散度垂直剖面图上(图略)可以看出正涡度柱略向北倾斜,辐合中心在700hPa以下的对流层中低层,暴雨

发生在正涡度柱大值中心的南侧。辐合层的浅薄从侧面证实了雷达探测的结果(对流发生在并不深厚的大气层内)。

4 小结

利用常规和加密观测资料及多普勒雷达探测资料,通过对2002年7月22日08时~23日08时(北京时)发生在长江中游的暴雨中尺度天气系统的分析,可以初步得出如下结论:

(1)2002年7月22~23日发生在长江中游的暴雨天气过程是在中高纬稳定的“两槽一脊”大尺度环流及典型的高、低空急流耦合的背景下发生的,暴雨的天气尺度影响系统是中 α 尺度的切变线,直接引发暴雨的是切变线上的并不深厚的中 β 尺度对流系统,它的发生发展伴有明显的中尺度雨团活动,且强降雨核的活动与对流层中低层强风速扰动(或中尺度急流核脉动)密切相关。

(2)暴雨发生前,对流层中低层(600hPa以下)为明显的对流不稳定层结,暴雨发生后,对流不稳定能量得到快速释放。

(3)暴雨区附近存在两个中 α 尺度环流圈,南支环流形成于暴雨发生前,它有利于暴雨的发生和发展;北支环流为暴雨期间对流层中高层非绝热加热造成南北温度梯度加大后在 θ_{se} 锋区附近形成的直接热力环流,它有利于上升运动带和雨带的进一步维持。

(4)多普勒天气雷达速度场、中尺度流场和动力结构分析表明,这次中 β 尺度对流系统活动的物理图像可能为:在切变线东北方和西南方各有一支气流在切变线上辐合抬升

并汇入对流系统中,在暖平流的作用下,气流在倾斜的 θ_{se} 锋前上升(或沿锋区爬升)并随高度发生顺转,到 7km 高度处开始以西南气流发散,在离对流区 400~500km 处下沉,并在 θ_{se} 锋区附近构成中尺度垂直环流圈,对流云团发生在该垂直环流的上升支一侧。

(5)这种切变线上并不深厚的中 β 尺度对流系统活动造成强降水的“造雨”机制还有待进一步分析和研究。

致谢:胡伯威研究员对本项研究工作提出过宝贵意见,谨此致谢。

参考文献

- 1 陶诗言等. 中国之暴雨. 北京:气象出版社,1980:1~225.
- 2 陶诗言,张庆云等. 1998 年长江流域洪涝灾害的气候背景和尺度环流条件. 气候与环境研究,1998,3(4):90

- ~299.
- 3 张庆云,陶诗言等. 1998 年嫩江、松花江流域持续性暴雨的环流条件. 大气科学,2001,25(4):67~576.
- 4 丁一汇主编. 1991 年江淮流域持续性大暴雨研究. 北京:气象出版社,1993:47~137.
- 5 胡伯威,崔春光等. 1998 年 7 月 21~22 日鄂东沿江连日特大暴雨的成因探讨. 大气科学,2001,25(4):479~491.
- 6 贝耐芳,赵思雄. 1998 年“二度梅”期间突发强暴雨系统的中尺度分析. 大气科学,2002,26(4):526~540.
- 7 王建捷,李泽椿. 1998 年一次梅雨锋暴雨中尺度对流系统的模拟与诊断分析. 气象学报,2002,60(2):46~155.
- 8 张维桓,董佩明等. 一次大暴雨过程中急流次级环流的激发及作用. 大气科学,2000,24(1):47~57.
- 9 邓秋华,王登炎等. “987”鄂东南持续性大暴雨的分析. 暴雨·灾害,1999,1:115~124.
- 10 总参气象局. 多普勒天气雷达资料分析与应用. 北京:解放军出版社,2000:90~227.

Meso-Scale Analysis of a Heavy Rainfall over the Middle Valleys of Changjiang River

Zhao Yuchun Wang Renqiao Zheng Qisong Peng Jun

(Wuhan Central Meteorological Observatory, 430074)

Abstract

With intensive detecting data, the observational characteristics of meso-scale weather system triggering heavy rainfall over the middle valleys of Changjiang River is analyzed. The Results show that the interaction of multi-scale synoptic systems leads to heavy rainfall, and several β -scale convective systems moving along α -scale shear directly result in heavy rainfall. Several meso-scale heavy rainfall masses come into being with the forming and developing of convective system and move along the active route of the convective system. The physical image of the β -scale convective system can be described as follows. Air flow in the northeast and southwest of the shear converged into the shear and ascend and joined into the convective system, then the air current rose in the foreside of (or along) the θ_{se} front and rotated clockwise with a height under the effect of warm advection and diverge as southwest air flow at the height of 7km and subside at the range of 400~500km, and lastly a meso-scale vertical circulation formed by the θ_{se} front with convective cloud in the ascending branch of the circulation.

Key Words: heavy rainfall α/β meso-scale synoptic system shear