

# 1996年7月洞庭湖流域持续性暴雨过程分析\*

张小玲 陶诗言 张顺利 张庆云

(中国科学院大气物理研究所,北京 100029)

## 摘要

1996年7月洞庭湖流域发生了严重的洪涝灾害。利用观测资料进行诊断分析表明:(1)这次大洪水是由梅雨锋西端高空槽前的持续性大面积暴雨引起;(2)引起持续性暴雨的直接原因是MCS形成后停滞少动,并在同一地区连续多次生消;(3)由于高空槽长时间维持在长江中游地区,对流层低层的暖平流等大尺度强迫使暴雨区能较长时间维持上升运动,同时低层持续强的水汽辐合和位势不稳定能量的输送为暴雨持续地发生提供了充足的水汽和能量。

关键词:梅雨锋 高空槽 MCS 大尺度强迫

## 引言

我国梅雨锋上的两类主要暴雨——中- $\beta$ 尺度的对流性暴雨和梅雨锋东部(115°E以东)的初生气旋暴雨主要发生在我国大陆境内的梅雨锋东段。过去的研究<sup>[1-3]</sup>指出,梅雨锋具有东西差异:东部(日本)具有斜压性,西部的正压性强。梅雨锋东西段的动力热力差异必然导致梅雨锋东西段上的暴雨具有不同的性质。位于梅雨锋西端的鄂西、湘西以及四川,在梅雨后期有时候会出现对流层深厚的低压槽,由于这类高空槽移动甚慢,高空槽前出现持续的暴雨。这类暴雨会造成严重的洪水灾害。1935年7月3~5日宜昌、1981年7月9~14日川西、1996年7月14~17日洞庭湖流域持续性大暴雨都属于这种类型的暴雨。陶诗言<sup>[4]</sup>在《中国之暴雨》一书中,已对1935年7月3~7日的这次大暴雨进行了详细、深入的分析。Kuo等<sup>[5]</sup>对1981年7月川西大暴雨也进行了数值模拟分析。

1996年7月14~17日洞庭湖流域出现了大暴雨和特大暴雨,4天的降水量接近年平均值的1/3。持续、频繁的暴雨使雨水和梅雨前期降水所造成的洪水叠加,洞庭湖水位急剧上涨。1996年7月下旬洞庭湖水位全面超过1954年,达到历史最高水位。高水位使得洞庭湖出现145个堤垸溃决,洞庭湖区大堤出现3000多处险情,直接经济损失303.64亿元<sup>[6]</sup>。本文对这次持续性暴雨过程进行分析。

## 1 资料说明

本论文分析所用的资料主要是1996年7月的地面观测资料 and 对应时间湖南省的探

\* 本文得到国家重点基础研究发展规划项目“我国重大气候和天气灾害形成机理与预测理论研究”第一部分(G1998040903)第二部分(G1998040908)的共同资助。

2002-12-25收到,2003-03-10收到修改稿。

空资料、NCEP/NCAR 再分析的  $1^\circ \times 1^\circ$  格点资料、GMS 的  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  的 3 h 一次的 TBB 资料。

## 2 天气背景分析

1996 年梅雨锋异常活跃,长江中、下游于 6 月 2 日进入梅雨期,7 月 21 日梅雨结束,梅雨期长达 50 天。长江中、下游地区出现了大范围的洪涝灾害,尤其是 7 月在长江中游的洞庭湖流域出现了严重的大洪水,湖南省出现了 50 年一遇的特大洪水。6 月 2 日入梅后,洞庭湖流域强降水不断(图略),7 月 14~17 日连续几天流域内的区域日平均降水超过 20 mm,16 日达最大,超过 45 mm。14~18 日,洞庭湖流域的大部分地区出现了暴雨(图略),部分地区出现了特大暴雨。在这次持续性强降水过程之前,洞庭湖水系一直降水不断,土壤已经达到饱和,湘江水位已超过警戒水位。这次突发性大暴雨过程使洞庭湖水系的径流增加,使已经出现的高水位再增加,最终导致洞庭湖围湖所建的几个县、市遭受严重洪涝灾害。

1996 年 7 月 10 日 20:00~13 日 08:00(北京时,下同),地面梅雨锋一直维持在我国  $25^\circ \sim 30^\circ \text{N}$  之间的江南地区,13 日 20:00,梅雨锋移到  $30^\circ \text{N}$  附近,与此同时,在宜昌附近有低涡生成。随后的几天时间内,梅雨锋一直在  $30^\circ \text{N}$  附近摆动(图略)。7 月 13 日,广西桂平地区出现  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上的强西南风;14 日强西南风中心出现在湖南的湘江上游,衡阳和南岳以及双峰的风速超过  $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,持续的强西南风一直维持到 7 月 19 日才有所减弱,表明低空西南急流很强。对流层中层的 500 hPa 上,西太平洋副热带高压 13 日向西深入我国大陆,华南和长江下游的浙江、江西西部处于强大的副高控制之下,直到 7 月 21 日,副高逐渐东退到台湾以东的洋面上。夏季在我国,西风带南缘和副高北侧之间的地区最容易发生暴雨,而 7 月 13~20 日的几天内,长江中游的洞庭湖流域正好位于副

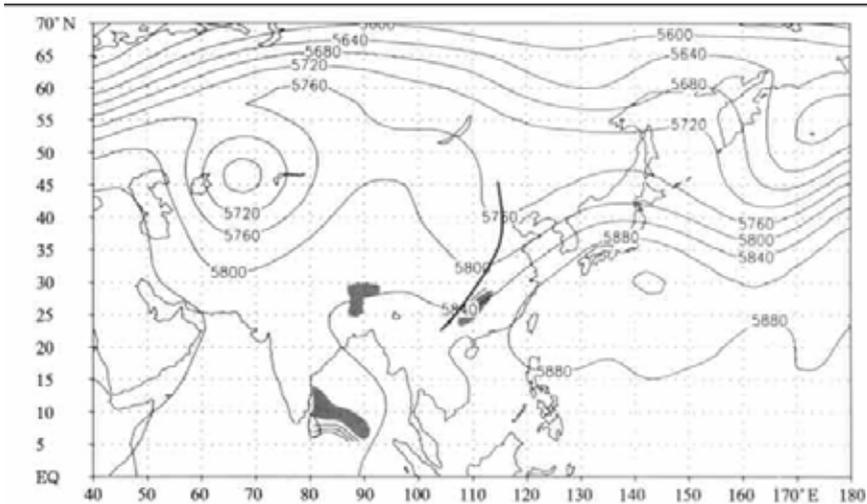


图1 1996 年 7 月 14~18 日 500 hPa 平均位势高度分布(单位:gpm)  
(阴影表示  $TBB < -32^\circ \text{C}$ ;粗实线表示槽线)

高脊线的西北侧和西风带南缘之间的过渡带。7 月 14 ~ 18 日,深厚的高空低压槽一直维持在 30°N,110°E 附近(图 1),来自西伯利亚的冷空气随高空低压槽后不断流入长江中游地区。这支干冷气流与对流层低层随低空急流北上的暖湿气流交汇,在低压槽前形成大片持续暴雨区。

为了更直观地反映这次持续大暴雨过程中水汽输送的三维结构,我们作了等熵分析。图 2 是表示对流层低层的 1996 年 7 月 13 ~ 18 日逐日 08:00 的  $\theta=310$  K 等熵面的风、气压、比湿的分布(其中 105°E 以西的高水汽中心位于青藏高原所在区域,是虚假值)。7 月 13 ~ 14 日,来自南海的湿空气沿等熵面向北上升,将大量水汽输送到长江中游。7 月 13 日当地面最大西南风出现在广西西北部时,低空急流携带大量的水汽到达 25°N 附近(以  $\theta=310$  K 等熵面上的等  $10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  线为标准);14 日随着低空急流的加强,洞庭湖西南面的水汽含量增加,超过  $12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。7 月 15 日,中高纬度的等压线在 105°~120°E 的范围

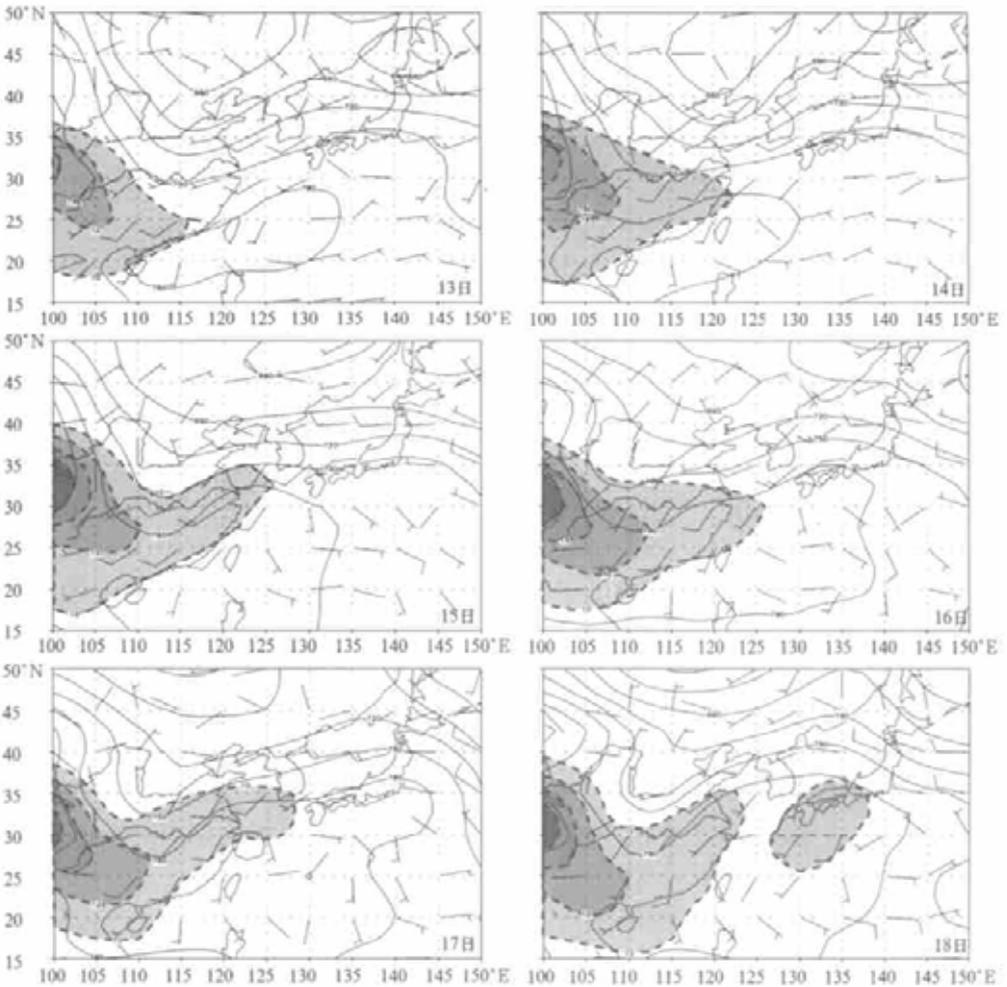


图 2 1996 年 7 月 13 ~ 18 日逐日 08:00  $\theta=310$  K 等熵面天气形势分布  
 (实线为等压线(单位:hPa);风标表示风场(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ );粗虚线为比湿(单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ );  
 阴影区为比湿  $\geq 10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

内呈漏斗状分布,来自高纬地区的冷空气沿等熵面随“漏斗”边缘下滑,与来自南面随等熵面爬升的西南暖湿气流在  $30^{\circ}\text{N}$  附近交汇。持续的水汽积累到 7 月 18 日 08:00 随着低空急流的减弱才有所减弱。

$\theta=330\text{K}$  等熵面上的风、气压、比湿和蒙哥马利流函数的分布与  $\theta=310\text{K}$  等熵面基本一致(图略)。该等熵面上的蒙哥马利流函数的分布清楚反映出西太平洋副热带高压向西深入我国大陆的过程。7 月 13 日 08:00,蒙哥马利流函数的等  $3306 \times 10^2 \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$  线最西端位于台湾海峡上空,14 日 08:00,等  $3306 \times 10^2 \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$  线西伸到华南地区,并一直持续到 17 日东退到西太平洋上空。从 7 月 13 日开始,有大量来自孟加拉湾和南海的水汽在长江上、中游地区积累,随后的几天这些地区一直保持高的水汽积累,水汽舌正好位于副热带高压的西北侧。

等熵分析表明,持续维持在  $30^{\circ} \sim 50^{\circ}\text{N}$ 、 $105^{\circ} \sim 120^{\circ}\text{E}$  之间的高空低压槽有利于槽后冷空气下沉南侵,与来自孟加拉湾和南海沿等熵面上升的暖湿气流在洞庭湖水系交汇,促发中尺度对流系统(MCS)持续发生。

Maddox<sup>[7]</sup>曾经将美国的暴雨划分为三类:天气型、锋面型和中尺度高压型,即中尺度对流复合体(MCC)。前面的分析表明,1996 年 7 月 14~17 日的洞庭湖流域大暴雨与美国的天气型暴雨相似。美国气象预报员<sup>[8~9]</sup>在预报天气型暴雨时,给出暴雨预报的 7 个指标:(1)气层的水汽含量情况(美国的指标为可降水量达到多年平均的 120%~150%);(2)低层的水汽通量;(3)K 指数( $K \geq 30$ );(4)整层水汽的相对湿度达到 70%以上;(5)高空急流的结构;(6)低空  $\theta_c$  的分布;(7)1000~500 hPa 厚度散开区。

针对长江流域梅雨锋暴雨的特点,我们对这 7 个指标作了某些修正,分析这次梅雨锋西端的暴雨。

### 3 中尺度物理过程及机制分析

7 月 14 日 20:00,在芷江附近尺度约为 300 km、TBB 值低于  $-50^{\circ}\text{C}$  的 MCS 发生(图 3);23:00, MCS 移到洞庭湖流域的暴雨区上空,并有新的对流单体在芷江西南面生成。此后的 7 月 15 日,不断有新的对流单体在暴雨区的西南面生成并移入暴雨区。7 月 15 日 20:00,贵州南部有新的中- $\beta$  尺度的 MCS 生成,中心值超过  $-75^{\circ}\text{C}$ ,对流非常旺盛。7 月 15 日 23:00,该 MCS 发展东移,16 日进入暴雨区,16 日 23:00, MCS 逐渐减弱,向长江下游移去。17 日 02:00,西南面的 MCS 又逐渐移入暴雨区,持续到 17 日 17:00 减弱消失(图略)。13 日 08:00 至 14 日 14:00 也不断有 MCS 在暴雨区的南、西南生成,移入暴雨区。MCS 多次在洞庭湖水系生消,其中 14~16 日在暴雨区持续超过 48 h,是造成洞庭湖流域和沅江、湘江连日暴雨的一个重要原因。

MCS 在洞庭湖水系长时间停滞少动,有利于降水的持续发生。那么,水汽的输送如何呢?图 4 是 1996 年 7 月 12~17 日逐日的整层(地面至 300 hPa)的水汽通量  $\frac{1}{g} \int_{p_0}^{p_T} q V d p$  和水汽通量散度  $\frac{1}{g} \int_{p_0}^{p_T} \nabla \cdot q V d p$  分布,反映了水汽的较大尺度的辐合积累情况。7 月 12 日,整层水汽的辐合中心位于华南沿海一带;13 日,整个长江流域都处于水汽

辐合区,水汽的辐合中心位于长江中游的暴雨区;14日,水汽辐合中心仍然维持在长江中游,并且水汽的辐合明显加强,中心值由13日 $2.5 \times 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 上升到 $7 \times 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;15日水汽辐合中心向长江下游地区偏移,但16日又移到长江中游地区,且辐合再一次加强,中心值超过 $8 \times 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;随后的17日水汽辐合有所减弱,但辐合中心仍维持在长江中游地区。

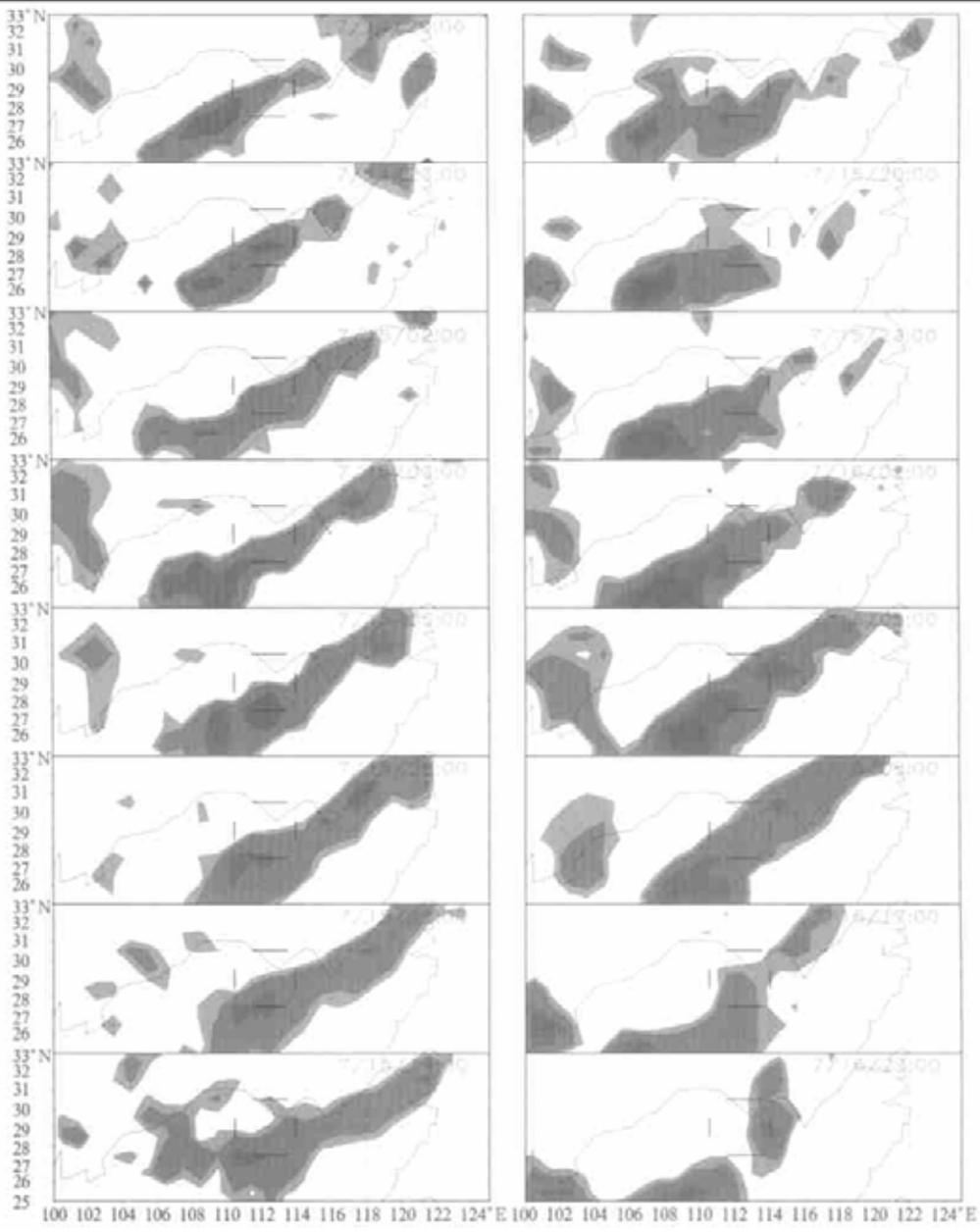


图3 1996年7月14日20:00~16日23:00每3h一次的TBB分布  
(阴影区由浅到深分别代表TBB值为-32、-40、-50、-60、-70℃)

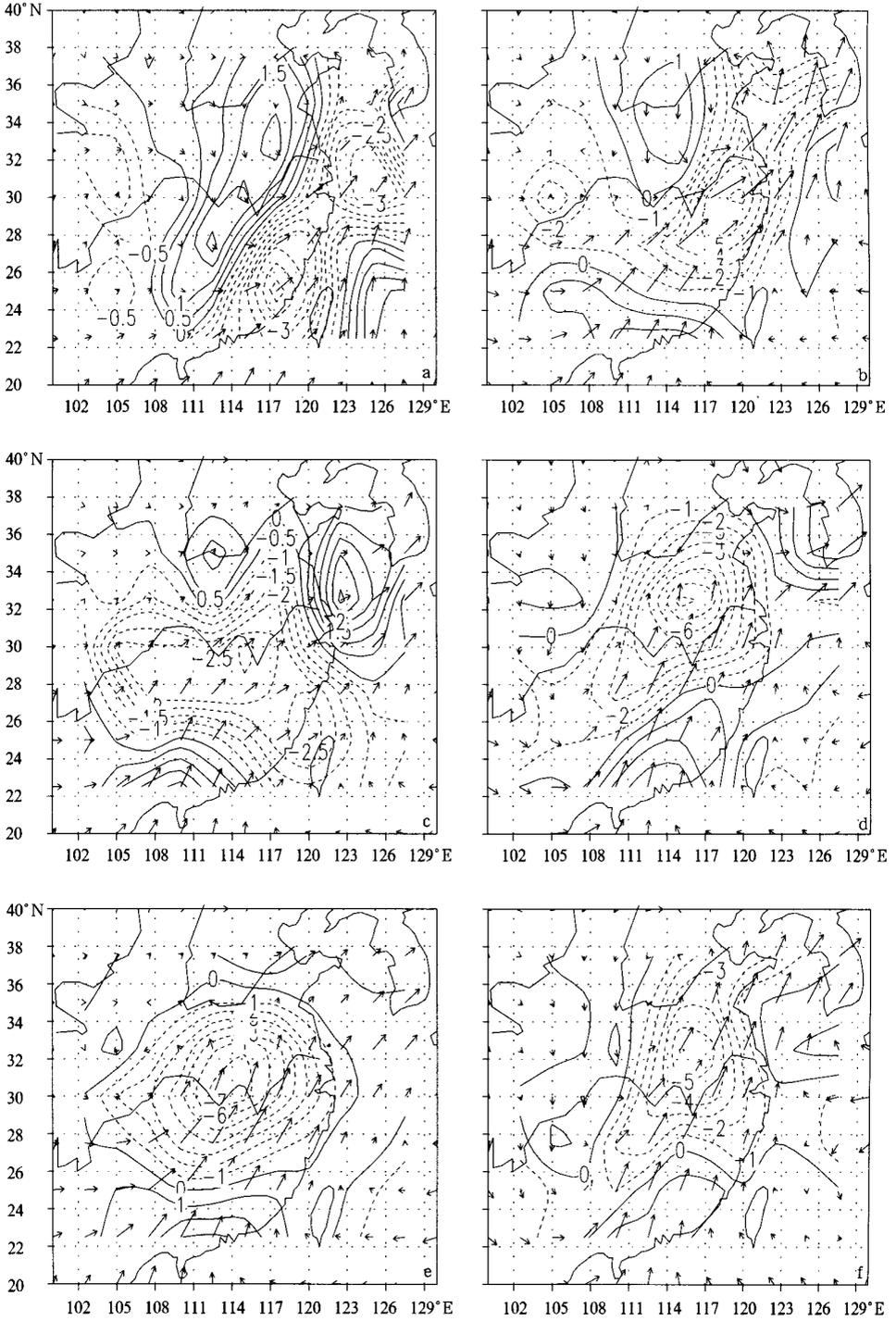


图4 1996年7月12~17日逐日的整层(地面至300 hPa)水汽通量  
(箭矢所示,单位: $10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )和水汽通量散度(单位: $10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )分布  
(a) 12日,(b) 13日,(c) 14日,(d) 15日,(e) 16日,(f) 17日

7月14~18日湖南省大部分地区出现强降水,雨带呈西南—东北向(图略)。由于资料所限,湖南省的探空资料甚少,我们只能用怀化的探空资料分析这次暴雨过程。怀化的探空记录计算结果(表1)表明:7月14~15日的K指数值均超过37,并在7月14日08:00达到最大,为40;可降水在7月15日最大,08:00和20:00分别为69.8 mm和68.6 mm,14日08:00和20:00的可降水也超过60 mm;整层水汽分布显示,从13日20:00到16日20:00,整层水汽都很充足,14日地面水汽含量最高,超过 $18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;15日08:00~16日08:00,对流层中上层维持较高的水汽含量,地面到300 hPa整层空气的相对湿度都在85%以上。怀化的探空计算分析结果表明,各项物理指标有利于在7月14~15日发生强降水,16日08:00,怀化上空的各项物理指标仍然比较有利于强降水的发生,但由于对流有效位能在15日已完全释放,其降水远远低于14日和15日。14~15日怀化的探空曲线图(图略)还表明,怀化上空从行星边界层到对流层上层均为西南风,风的垂直切变很小,这保证强降水都降在怀化,有利于大暴雨的发生。

表1 1996年7月13~16日怀化探空记录计算结果

	7月13日		7月14日		7月15日		7月16日		
	08:00	20:00	08:00	20:00	08:00	20:00	08:00	20:00	
K 指数	38	39	40	39	37	38	37	34	
可降水(mm)	58.2	65.0	63.9	64.5	69.8	68.6	65.4	58.3	
CAPE( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	535	64	411	487	0	0	0	6	
比湿 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	地面	18.1	17.8	18.4	18.6	16.8	17.0	16.4	17.7
	850	14.6	15.2	15.7	15.6	15.8	15.8	16.0	13.8
	700	8.6	11.7	10.8	10.4	12.2	11.7	11.9	11.3
	500	4.3	5.7	5.3	5.6	7.3	6.6	7.2	4.9
	400	2.7	2.4	2.5	3.1	3.9	3.7	3.6	1.9
	300	0.7	0.7	0.7	1.0	1.3	1.1	-	0.7
相对 湿度 (%)	地面	89	98	91	78	98	97	98	94
	850	92	100	92	84	99	95	99	91
	700	76	100	94	84	99	95	96	92
	500	81	97	88	87	99	94	99	71
	400	83	83	74	80	93	91	93	48
	300	74	69	65	72	89	85	-	48
24 h 降水(mm)	0		104		102		48		

前面的分析表明,大尺度环流背景有利于持续性暴雨的发生。与中- $\beta$ 尺度的对流性暴雨<sup>[10]</sup>相比,对流有效位能(CAPE)不大,中小尺度的条件很难产生强的持续性的上升运动。这种情况下,大尺度的强迫就显得尤为重要。

图5是7月12~17日的对流层中层(600~400 hPa)Q矢量及其散度的分布。7月12日,洞庭湖流域处于Q矢量的辐散区,表明这些地区维持下沉运动;13日,长江以南的地区处于Q矢量的辐合区,辐合中心位于洞庭湖的南面;14日,Q矢量的辐合区扩展到长江中游的江北地区,在贵州和湖北分别出现了辐合中心,辐合强度增加,表明大尺度的强迫在长江中游地区产生了强的上升运动;15~17日在长江中游仍然维持强的Q矢量辐合,大尺度的强迫使得这些地区一直长时间保持较强的上升运动。

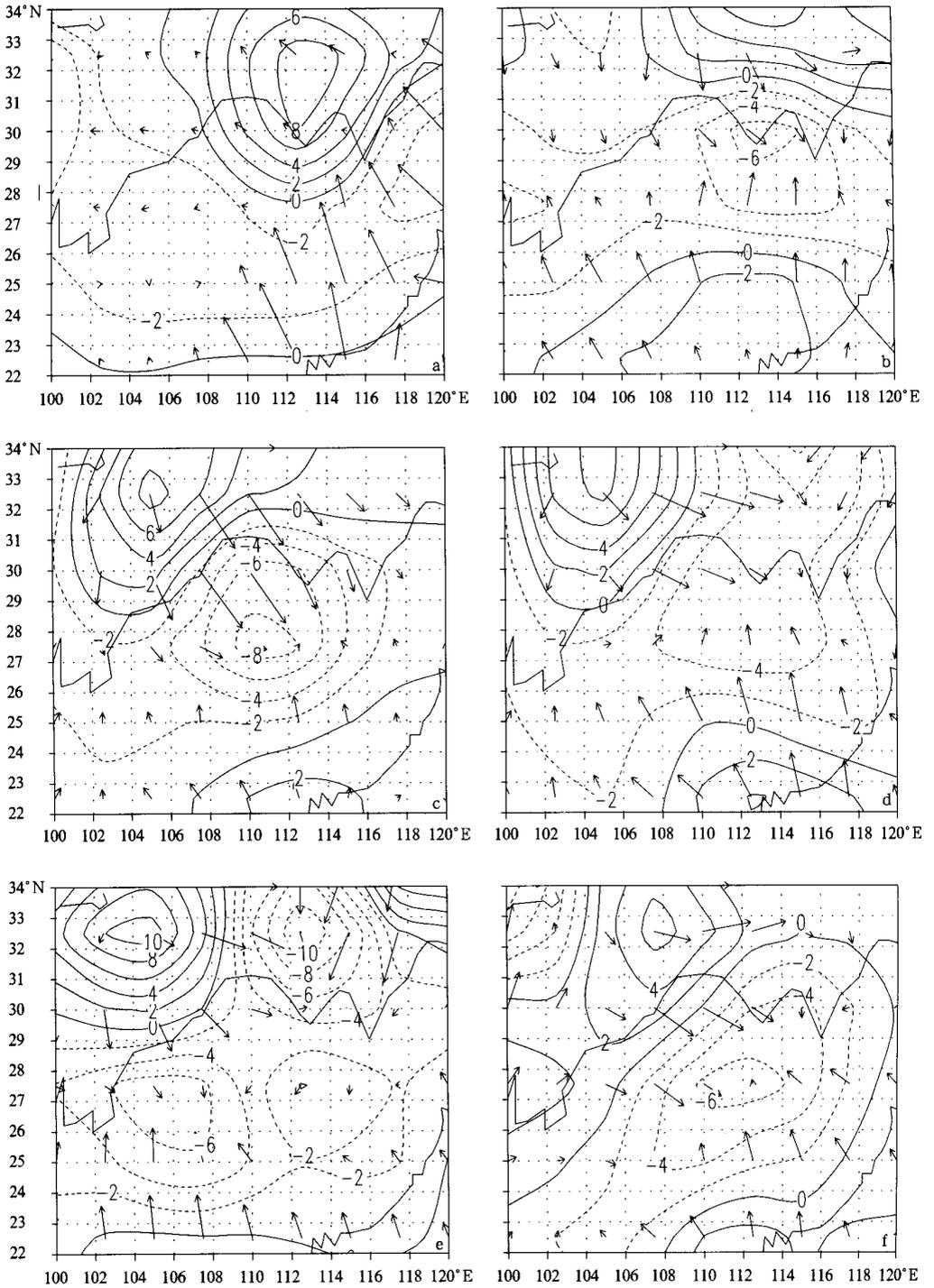


图5 1996年7月12~17日  $Q$  矢量(单位:  $10^{-12} \text{ m} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ )  
及其散度  $\nabla \cdot Q$ (单位:  $10^{-17} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ )的分布  
(a) 12日,(b) 13日,(c) 14日,(d) 15日,(e) 16日,(f) 17日

7月13~17日20:00,在对流层低层的700 hPa长江中、上游地区一直维持强的暖平流(图略)。对流层低层的暖平流通过天气尺度的强迫,触发了中尺度对流系统(MCS)的发生。当MCS发生后,低空急流携带大量具有高位势不稳定能量的暖湿气流向暴雨区辐合,使MCS形成后得以长时间维持。图6是1996年7月12~19日暴雨区 $\theta_e$ 、比湿( $q$ )、水汽通量散度( $\nabla \cdot qV$ )、涡度( $\zeta$ )、散度( $\nabla \cdot V$ )、垂直速度( $\omega$ )的时间-高度剖面。低层随西南气流持续北上的暖湿气流使7月13~17日暴雨区在对流层中层以下的空气具有高的位势不稳定能量,最不稳定是在16日,其次是14日。13~18日,暴雨区从地面到对流层低层都维持很强的水汽辐合,其中13日08:00~14日08:00以及15日08:00~16日08:00,水汽的辐合高度直到300 hPa。持续的水汽辐合和位势不稳定能量的输送,使洞庭湖流域从7月13日起对流层中低层出现辐合,高层辐散,长时间维持上升运动,上升运动到达对流层上层。

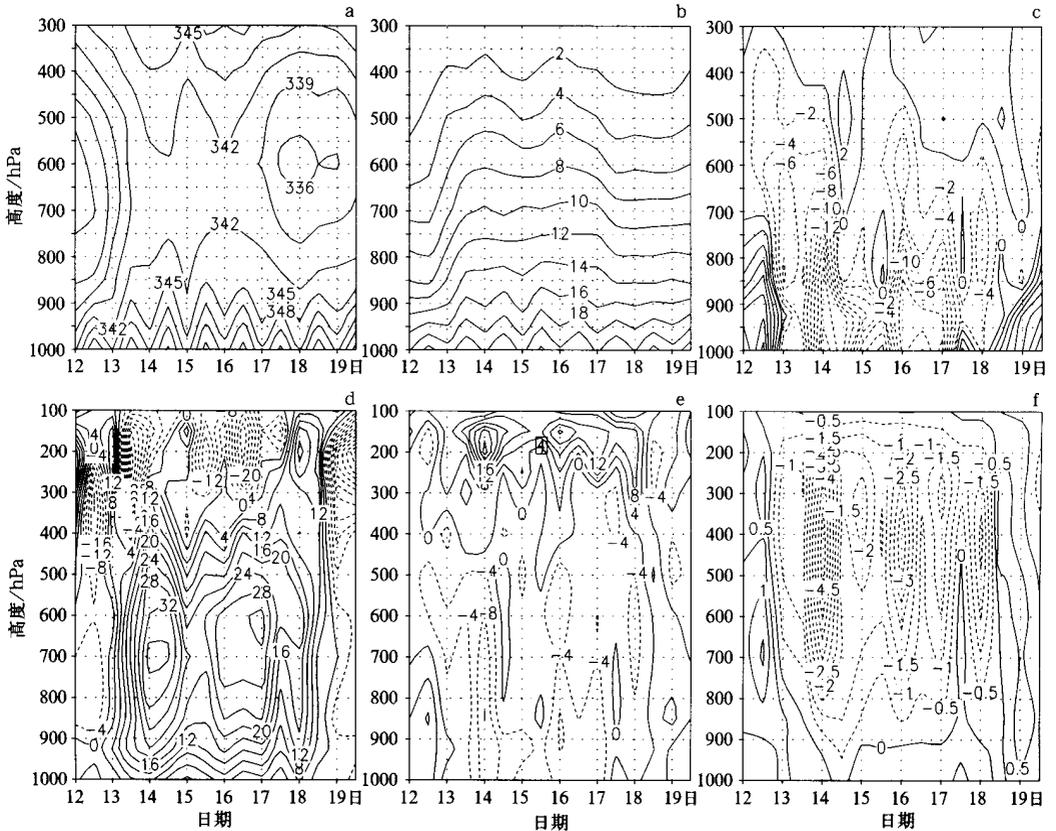


图6 1996年7月12~19日暴雨区各物理量的时间-高度剖面

(a)  $\theta_e$ (单位: K), (b)  $q$ (单位:  $g \cdot kg^{-1}$ ), (c)  $\nabla \cdot qV$ (单位:  $10^{-7} s^{-1}$ ),  
 (d)  $\zeta$ (单位:  $10^{-5} s^{-1}$ ), (e)  $\nabla \cdot V$ (单位:  $10^{-5} s^{-1}$ ), (f)  $\omega$ (单位:  $10^{-1} Pa \cdot s^{-1}$ )

## 4 结论和讨论

通过前面的分析,归纳出长江中游的洞庭湖流域 1996 年 7 月持续性大暴雨的一些主要特征及降水成因:

(1) 这次大暴雨是出现在洞庭湖流域及沅江、湘江的大范围持续性暴雨;

(2) 高空槽长时间维持在长江中游地区, MCS 不断在槽前的暴雨区生消,导致高空槽前对流活动持续活跃,引起长时间的强降水;

(3) 对流层低层的暖平流通过天气尺度的强迫,触发了中尺度对流系统(MCS)的发生。当 MCS 发生后,低空急流携带大量具有高位势不稳定能量的暖湿气流向暴雨区辐合,使 MCS 形成后得以长时间维持。

用产生降水的物理条件分析 1996 年 7 月洞庭湖流域的大暴雨的结果说明,美国的暴雨预报指标对我国暴雨预报有一定参考意义,二者产生降水的物理条件是相同的:即降水的多少决定于水汽的含量、降水持续时间和水汽的垂直输送速度。但由于地理位置的差异、气候因素的不同,暴雨的成因和暴雨的预报也有不同。

## 参考文献

- 1 Kato K. Airmass transformation over the semi-arid region around north China and abrupt change in the structure of the Baiu front in early summer. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1987, **65**: 737 ~ 750.
- 2 Kato K. On the abrupt change in the structure of the Baiu front over the China continent in late May of 1979. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1985, **63**: 20 ~ 36.
- 3 Akiyama T. Large, synoptic and mesoscale variations of the Baiu front during July 1982. Part I: Cloud features. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1989, **67**: 57 ~ 81.
- 4 陶诗言. 中国之暴雨. 北京:科学出版社, 1980. 1 ~ 225.
- 5 Kuo Y H, Cheng L S, Anthes R A. Mesoscale analysis of the Sichuan flood catastrophe 11-15 July 1981. *Mon. Wea. Rev.*, 1986, **114**: 1984 ~ 2003.
- 6 骆承政, 乐嘉祥. 中国大洪水—灾害性洪水述要. 北京:中国书店出版, 1996. 1 ~ 434.
- 7 Maddox R A, Chappell, Hoxit. Synoptic and meso- $\alpha$  scale aspects of flash floods. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1979, **60**: 116 ~ 123.
- 8 Doswell C A, Brooks H E, Maddox R A. Flash flood forecasting: An ingredients-bases methodology. *Weather and Forecasting*. 1996, **11**: 560 ~ 581.
- 9 Junker N W. Heavy rain forecasting manual. National Weather Service Training Center. 1992. 1 ~ 91.
- 10 张小玲, 陶诗言, 张庆云. 1998 年 7 月 20 ~ 21 日武汉地区梅雨锋上突发性中- $\beta$  系统的发生发展分析. *应用气象学报*, 2002, **13**(4): 385 ~ 397.

## A CASE STUDY OF PERSISTENT HEAVY RAINFALL OVER HUNAN PROVINCE IN JULY 1996

Zhang Xiaoling Tao Shiyan Zhang Shunli Zhang Qingyun  
(*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

### Abstract

The heavy rainfall over Hunan province in July 1996 was studied. The main conclusions is made as follows: (1) Persistent rainstorms causing flash-flood in Hunan province lied in the front of 500 hPa short wave troughs. (2) MCS generated and detained in the same area, which is the direct reason causing lasting heavy rainfall. (3) By warm advection in the lower troposphere and other large-scale forcing, the upper troughs maintained over the middle of the Yangtze River Basin, which brought continuous lifting movement in the rainstorm area. At the same time, continuous moisture convergence and potential instable energy transport in the lower layers provided enough water and energy for lasting heavy precipitation over the rainstorm area.

**Key words:** Meiyu front Upper trough MCS Large-scale forcing