

# 2002年8月湖南致洪强降水 过程与成因分析<sup>\*</sup>

张小玲 孙建华 陶诗言 赵思雄

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

**摘要** 利用2002年8月的常规观测资料,  $1^\circ \times 1^\circ$  的NCEP逐日再分析资料,  $1^\circ \times 1^\circ$  的云顶黑体亮度温度(TBB)逐时资料, 水利部发布的2002年5~8月水情资料, 以及1960~1997年中国315站的逐日降水资料, 对2002年8月中下旬湖南百年难遇的大洪水发生原因以及致洪强降水进行分析。发现: (1) 2002年8月受12、14号台风影响的湖南南部大暴雨和8月中旬持续高空槽前的大面积强降水, 是引起8月中下旬湖南严重洪涝灾害的直接原因之一; (2) 2002年4~5月以及梅雨期湘南地区的强降水使得土壤水份饱和, 江河湖库维持较高的水位, 导致8月上中旬先后3次强降水过程产生的雨水只能作为径流入洞庭湖水系, 使洞庭湖水系的来水与长江上游的洪峰来水遭遇, 造成8月中下旬洞庭湖水系的严重洪涝灾害; (3) 8月上中旬的强降水过程中, 中尺度对流系统(MCS)十分活跃, 而MCS的发生、发展又与有利于出现对流活动的大尺度环境场有关。

**关键词:** 强降水; 台风; 高空槽

**文章编号** 1006-9895 (2004) 03-0475-19 **中图分类号** P458 **文献标识码** A

## 1 引言

湖南地处长江流域中部, 境内江河湖泊众多, 是我国水患最严重的地区之一。进入20世纪90年代后, 湖南省出现洪涝的频次增多, 如1993、1994、1995、1996、1998年都出现了大洪水, 这主要与湖南省集中出现强降雨过程的时段从5~6月份向7~8月份推移有关<sup>[1]</sup>。就长江全流域而言, 引起洪涝灾害的降水可分为两种<sup>[2]</sup>: 第一种是长江流域某些支流、河段发生强度大、面积广、并且频繁的持续性暴雨, 如1996年7月湖南洞庭湖流域大暴雨; 另一类是全流域频繁发生强降水, 梅雨持续时间长、出梅晚, 上下游雨季重迭, 造成上下游干支流洪水泛滥, 如1954、1998年发生了包括湖南在内的长江全流域大洪水。

在一般情况下, 长江中下游的梅雨从6月19日前后开始, 持续到7月中旬(图1a)。长江中下游的汛期降水主要集中在6月下旬和7月上旬, 7月下旬随着梅雨的结束, 长江中下游进入高温伏旱期。这时长江上游尤其是川西地区却进入降水高峰期, 降水主要集中在7月下旬至8月中旬。因此, 通常长江上游和中下游的降水峰期错开, 上、下游雨季出现时间先后不一, 洪水先后错开, 不会发生灾难性的特大洪水。但是,

2003-05-26 收到, 2004-08-05 收到再改稿

<sup>\*</sup>中国科学院大气物理研究所知识创新工程和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”(G199804)资助

在一些特殊的年份（如 1931、1954、1998 年），长江中下游的梅雨持续时间长、出梅晚，或长江上游的雨季开始早，上下游的雨季重迭，造成上下游干支流洪水泛滥。2002 年夏季，长江中下游的降水主要集中在两段时间：6 月 16 日~7 月 2 日，7 月 16~26 日（图 1b）。7 月下旬到 8 月中旬，长江上游的雨季开始。当上游降水不断时，8 月上中旬长江中游（主要是湖南）出现持续性降水。异常的降雨使洞庭湖及湘、资、沅、澧四水的汛情均较往年来得早去得迟，使 2002 年湖南省年降雨量达 1 958 mm，比多年平均多出 35.3%，比 1998 年的 1 631 mm 多 327 mm。湖南省许多地区降雨强度超过历史记录，出现了历史上少见的 6 次洪峰和全省性秋汛，湖区经济损失达 142 亿元。本文分析导致这次严重洪涝灾害的强降水过程和成因。

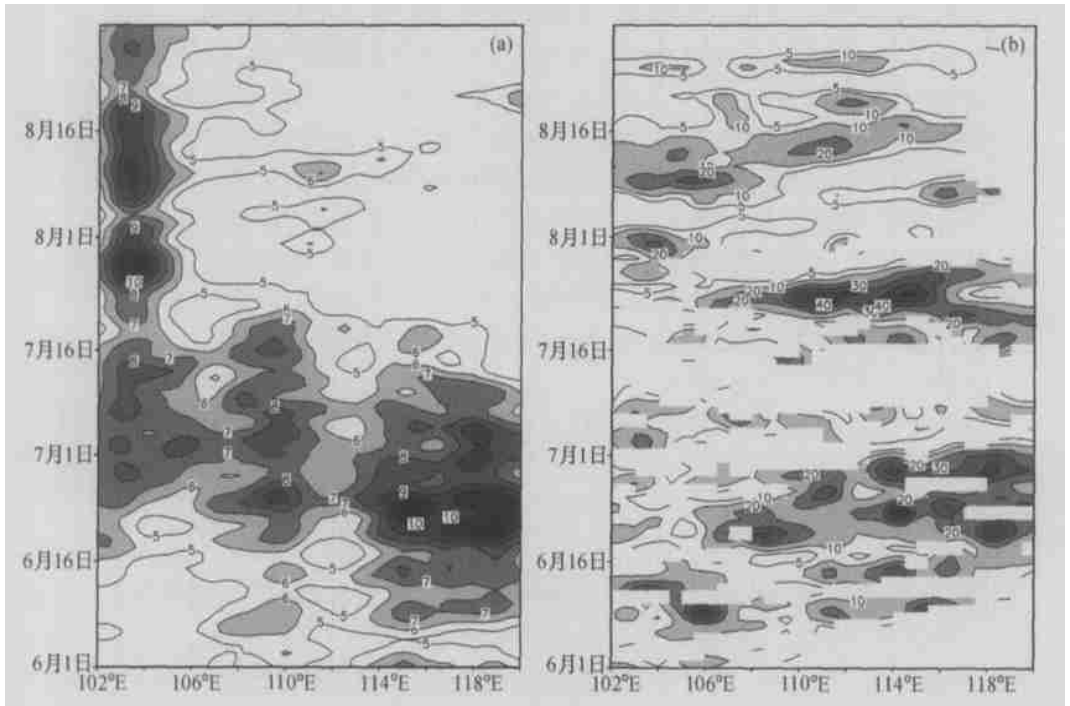


图 1 6~8 月长江流域 (27.5~32.5°N) 逐日降水演变 (单位: mm)

(a) 1960~1997 年平均; (b) 2002 年

## 2 雨情和水情分析

2002 年 4 月长江中下游沿江地区降水比常年同期偏多 5 成，洞庭湖流域降水偏多 1 倍以上，5 月洞庭湖流域的降水仍然偏多 5 成以上，洞庭湖支流湘江、沅江和资水出现两次超警戒线水位。湘江长沙水文站（湖南长沙）17 日 8 时（北京时间，下同）洪峰水位 36.13 m，超过警戒水位（35.00 m）1.13 m；沅江桃源水文站（湖南桃源）14 日 5 时洪峰水位 43.12 m，超过警戒水位（42.50 m）0.62 m；资水桃江水文站（湖南桃江）14 日 5 时洪峰水位 42.64 m，超过警戒水位（41.00 m）1.64 m，洞庭湖城陵矶水文站（湖南岳阳）5 月 19 日 2 时出现当年最高水位 31.52 m，超过历史同期 5 月最高水位（30.68 m，1975 年）0.84 m；鄱阳湖湖口水文站（江西湖口）5 月 21 日 6 时最高水位

18.48 m, 亦为历史同期较高水位。

2002 年 6~8 月, 湖南省出现了 3 段持续性降水(图 2), 分别对应第 1 段、第 2 段梅雨和 8 月上中旬湖南秋汛。2002 年 6 月 16 日, 长江流域进入梅雨期。7 月初, 西太平洋副热带高压(下称副高)控制长江流域, 第 1 段梅雨结束。这段时期降雨主要在江南地区, 降水中心位于湖南南部、江西南部、福建北部和浙江西部地区, 降水量超过 600 mm。持续的大面积降水使洞庭湖城陵矶水位再创新高, 7 月 1 日 08 时水位 31.93 m, 超过历史同期最高水位(31.50 m, 1949 年) 0.43 m。7 月中旬, 副高南落, 长江流域进入第 2 段梅雨期。从 7 月 16~26 日, 湖南省多次发生大面积的强降水过程。因此, 7 月湖南、江西的降水比常年同期偏多 1 倍以上。由于 4、5 月多雨以及第 1 段梅雨期暴雨已经使土壤水份饱和, 尤其是在洞庭湖水系一直维持高水位, 第 2 段梅雨期的暴雨只能作为径流进入湘江、洞庭湖, 加剧了洞庭湖水位的迅猛上涨。7 月底, 副高再一次北跳, 长江流域的第 2 段梅雨结束, 长江上游进入主汛期。通常情况下, 梅雨结束后, 湖南地区的汛期结束。但是, 2002 年 8 月 6~8 日, 受第 12 号台风影响, 湖南湘江流域中上游普降大到暴雨, 部分地区出现大暴雨, 资水流域也普降中到大雨。8 月 10 日 19 时, 湘江第 5 次特大洪峰通过长沙段, 最高水位达 37.06 m。8 月 11~20 日, 湖南省出现持续降水, 其中 8 月 18~19 日, 受 14 号台风影响, 湖南省大部分地区出现了大到暴雨, 部分地区出现特大暴雨。持续的降水使 8 月洞庭湖水系的降水较常年同期偏多 50%, 部分地区偏多 100% 以上。8 月中旬长江干流洪峰陆续到达长江中游, 由于前期土壤含水量已经达到饱和, 江河湖泊的底水充盈, 受长江上游来水影响, 8 月湖南省洞庭湖、湘江、资水、沅江、澧水水位迅猛高涨。洞庭湖湖区出现了自 1998 年以来最严峻的洪涝灾害。

从 2002 年湖南的雨情来看, 12 和 14 号台风影响下的大面积暴雨过程和 8 月中旬的持续性强降水, 是湖南 8 月大洪水发生的最主要、最直接的原因之一。下面分析 12、14 号台风降水以及 8 月中旬的持续性降水过程。

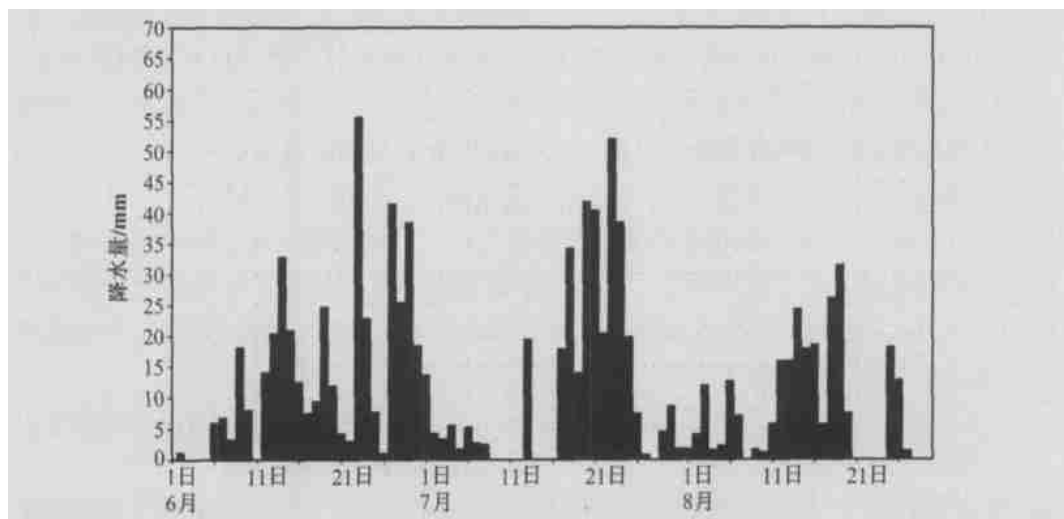


图2 2002 年 6~8 月湖南省 11 站平均的逐日降水演变(单位: mm)

11 站分别为: 桑植, 常德, 岳阳, 沅陵, 长沙, 芷江, 邵阳, 衡阳, 通道, 零陵, 郴州

### 3 台风影响下的湖南南部暴雨分析

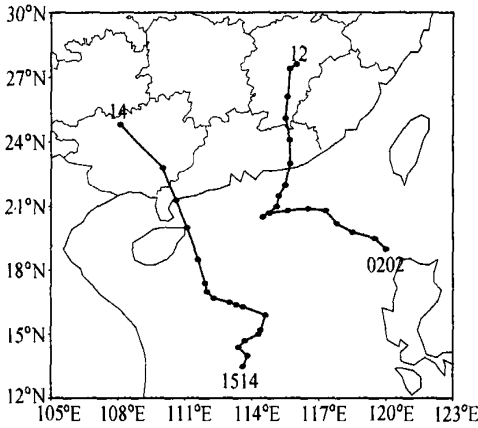


图3 2002年8月第12、14号台风移动路径

标号12、14分别表示12和14号台风，0202表示12号

台风生成时间为2日02时，1514表示14号  
台风生成时间为15日14时

2002年8月，先后有两个台风登陆北上影响湖南的降水（图3）。8月2日，第12号台风在南海生成，5日在广东登陆并继续向北移动。6日08时到达江西，中心位置位于（116.0°E，27.6°N），最大风速减弱到 $12\text{ m s}^{-1}$ ，随后逐渐减弱为热带低压，并继续向西移动，到达湖南境内。14号台风15日14时在南海南部生成后，沿北偏西路径经海南岛东北于19日14时广东登陆，并继续向西北移动。20日02时到达广西西北部减弱为热带低压，继续北行。当12、14号台风登陆北上后，在广东、湖南引起了大面积的强降水过程。

图4是12、14号台风登陆北上后的天气形势分布。从图4可见，两个台风登陆后，大尺度的环流形势比较相似，也略有差异，

主要表现为：在对流层中上层，贝加尔湖上空是强大的高压脊，其东侧的东北亚上空维持强的低压槽，这种形势有利于冷空气随高压脊前的偏北气流南下到达我国南方地区。其中19日08时200 hPa上的东亚大槽尤其深厚，使得我国东部地区由南到北都在高空槽的控制之下。这就使得19日长江中游地区位于高空急流轴的左前侧，具有强的高空辐散。而8月6日长江中游的高空辐散主要是南亚高压西侧的偏北大风引起。在对流层低层，热带低压控制了长江以南的大部分地区，低压中心分别位于湖南东部（8月6日）和广东南部（8月19日）。其中8月6日的低压已扩展到淮河流域，而19日低压主要活动在华南和江南地区。由于6日的低压范围大，位置偏北，使得沿低压东侧输送到湖南境内的暖湿气流（水汽通量散度中心值超过 $-6 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ ，相当位温 $\theta_e$ 高达344 K）明显强于19日（水汽通量散度中心值 $-4 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ ， $\theta_e$ 小于340 K）。8月6日和19日的高低空环流形势分布表明，当台风登陆北上影响湖南时，在湖南上空的对流层上层有强的辐散，对流层中低层维持强的辐合，使湖南上空维持上升运动。同时，热带低压东侧的偏南气流向湖南地区输送大量的暖湿气流，为湖南省境内的大面积暴雨过程的发生提供了充足的水汽和位势不稳定能量。

2002年8月6日大气环流高低空配置使热带低压控制的长江中游和华南地区出现了大面积的降水（图略），降水中心位于广西北部 and 湖南南部地区。

8月7日和20日，在对流层中上层东亚中高纬地区的大气长波槽脊向东移约7个经距，热带低压逐渐减弱，气旋性闭合环流已不能到达对流层中层。但8月7日随低压东南侧和副高外围的西南气流北上的暖湿气流到达长江中下游地区。在这些地区西南风和东北风的切变非常明显，大量水汽在此辐合积累。因此，在江南地区出现一条西

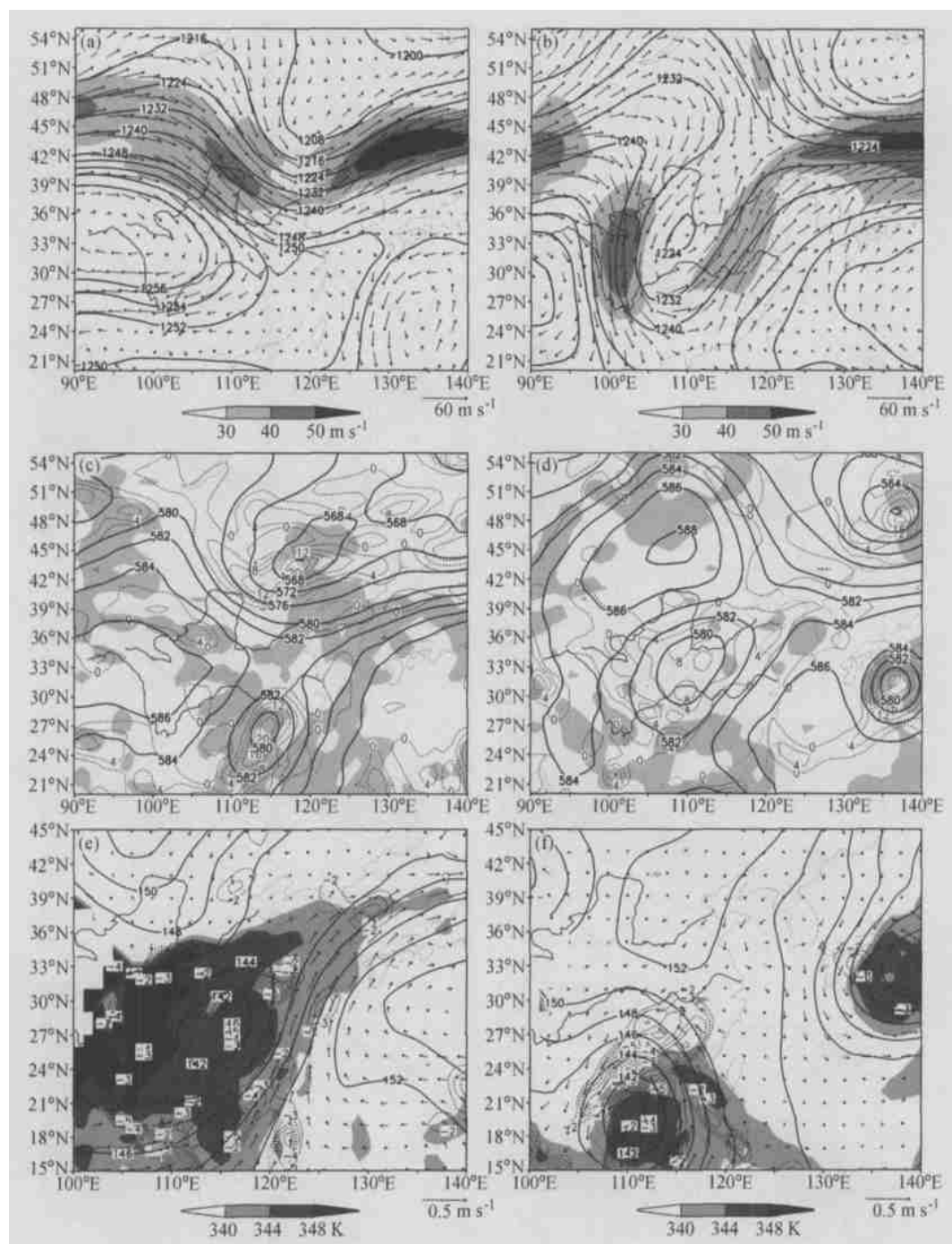


图4 2002年8月6日(左)、19日(右)200 hPa (a、b)、500 hPa (c、d)、850 hPa (e、f) 天气形势

200 hPa 图上实线为位势高度(单位: 10 gpm), 阴影区为水平风速  $> 30 \text{ m s}^{-1}$ , 箭矢线为水平风速(单位:  $\text{m s}^{-1}$ ); 500 hPa 图上实线为位势高度(单位: 10 gpm), 虚线为相对涡度(单位:  $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ), 阴影区为 ( $> 0 \text{ Pa s}^{-1}$ ); 850 hPa 图上实线为位势高度(单位:  $\times 10 \text{ gpm}$ ), 箭矢线为水汽通量(单位:  $\text{m s}^{-1}$ ), 虚线为水汽通量散度(单位:  $\times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ ), 阴影区为  $> 340 \text{ K}$

南-东北走向的雨带, 强降水中心位于湖南南部地区(图略)。8月8日08时, 位于湖南上空的低压槽减弱东移(图略), 湖南地区的降水也逐渐减弱。

当热带低压控制长江中游时, 湖南省境内中尺度对流系统(MCSs)非常活跃。图5和图6分别是8月6~8日和18~20日的云顶黑体亮度温度(TBB)的分布。本文取 $TBB < -32$  的云团为MCS。8月6日12时, 以(27°N, 110.5°E)为中心有一尺度约为20 km且 $TBB$ 值低于-32 的MCS(图5a中云团A)。14时(图5b), MCS发展为尺度约100 km的 中尺度对流系统。同时, 其东北以(28°N, 112°E)为中心、东南以

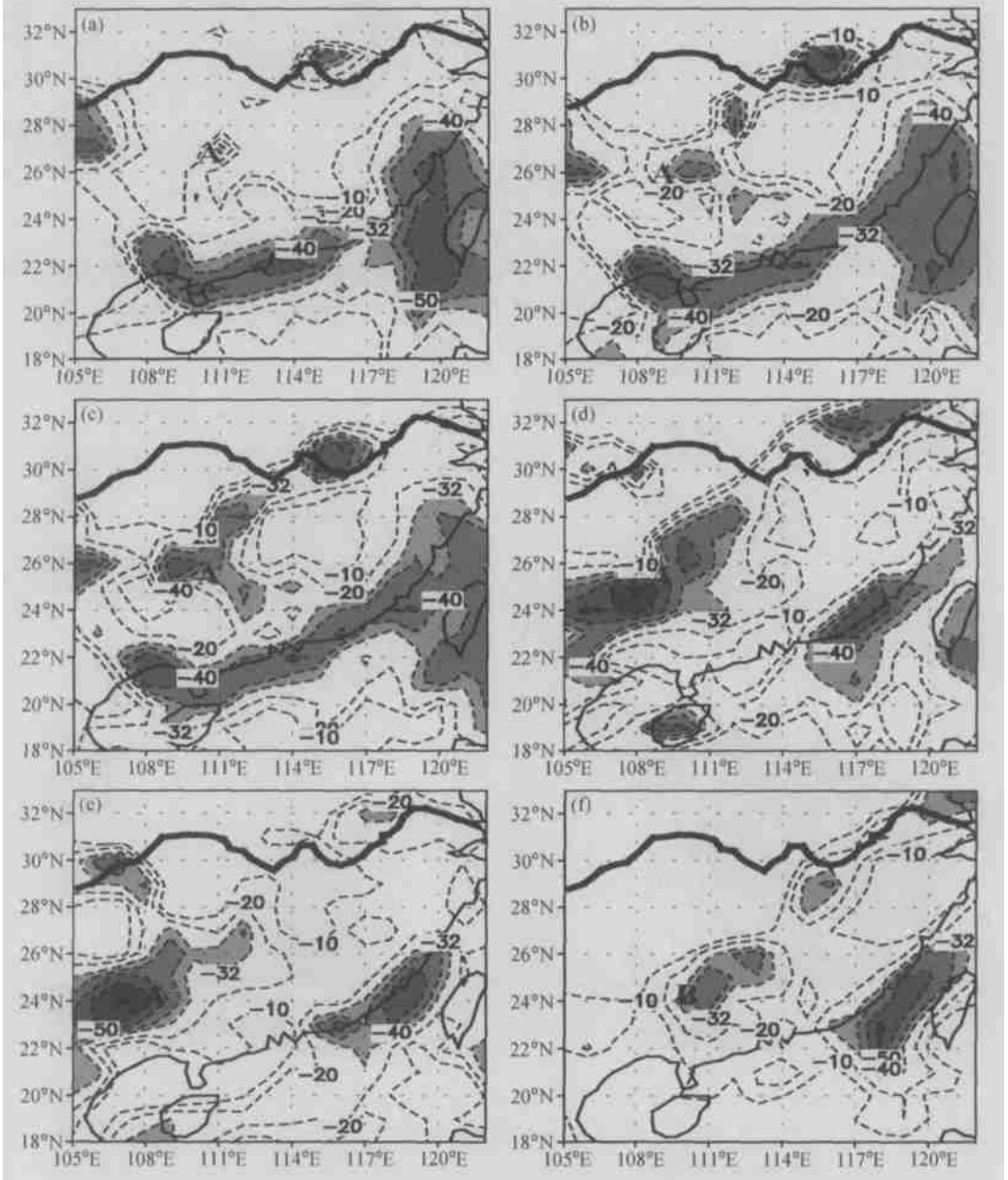


图5 2002年8月6~8日 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的TBB逐时分布(单位: , 阴影表示 $TBB < -32$ )  
(a) ~ (f) 分别对应6日12、14、15、19、22时, 7日08、10、12、14、16时, 8日03和06时

(25°N, 112°E) 为中心各有一个 50 km 的 MCS 发生。15 时 (图 5c), 上述 3 个 中尺度的 MCS 合并发展, 最低温度低于 -50 ; 16 时, MCS 发展并与其西侧的中尺度系统合并为尺度超过 600 km 的中尺度系统, TBB 最低温度低于 -50 。该 MCS 在随后的几小时一直在原地发展, 19 时 TBB 的最低温度低于 -70 , 几乎达到对流层顶的高度, 表明对流已经非常旺盛 (图 5d)。之后, MCS 逐渐减弱、消亡。

当 6 日的 MCS 逐渐消亡时, 7 日凌晨以 (25°N, 112°E) 为中心, 又有 TBB 值低于

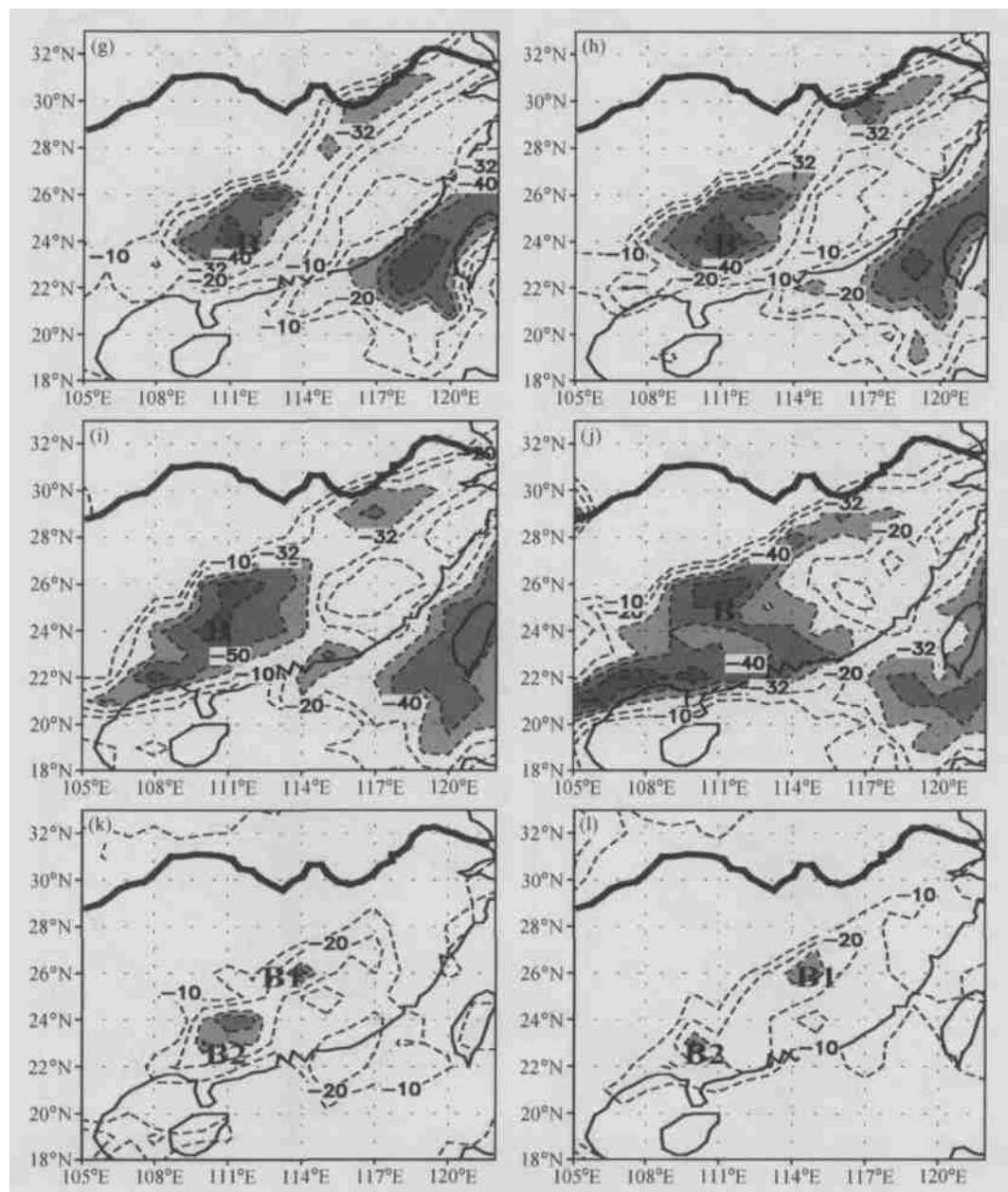


图 5 (续)

- 32 的中尺度 MCS 发生。08 时 (图 5f 中云团 B), 该 MCS 发展为直径约 200 km, 09 时 TBB 最低温度低于 - 50 , 随后几小时 MCS 在原地强烈发展; 16 时 (图 5j), MCS 的水平尺度已经达到上千公里, 并持续维持数小时。8 日 03 时, 该 MCS 减弱分裂为两个水平尺度小于 200 km 的系统, (图 5k 中云团 B1 和 B2)。到 8 日 08 时, MCS 在 (23°N, 110°E) 减弱消亡。

当 14 号台风登陆后, 也有两个生命史超过 10 h 的 MCS 活跃在湖南省境内。18 日 10 时, 一个 MCS 已经在海南岛上空发展 (图 6a 中云团 A)。13 时, 该 MCS 沿东北方向

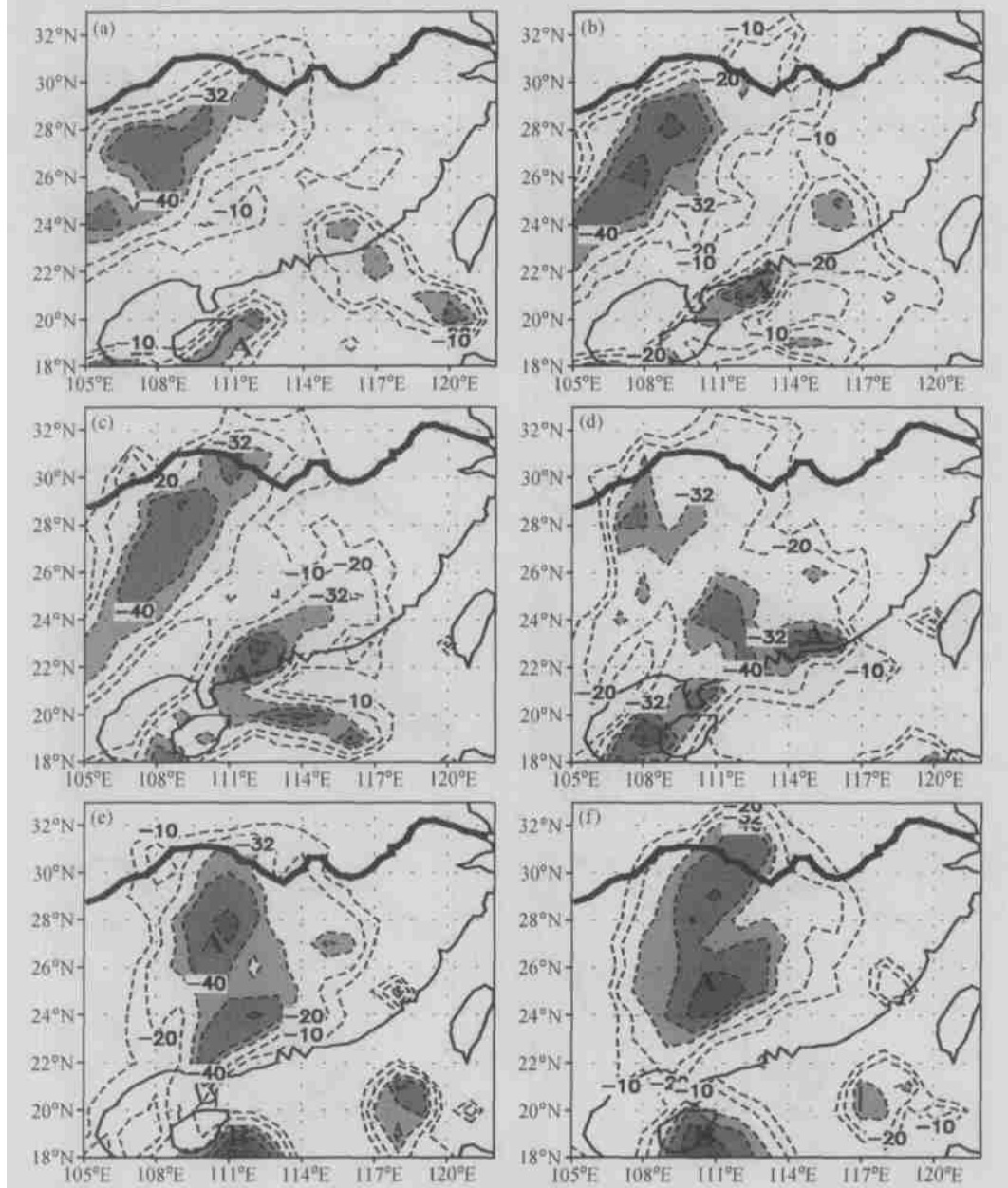


图 6 2002 年 8 月 18~20 日  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  的 TBB 逐时分布 (单位:  $^{\circ}\text{C}$ , 阴影表示 TBB  $< -32$ )  
(a) ~ (f) 分别对应 18 日 10、13、16、20 时, 19 日 02、06、13、16、22、24 时, 20 日 04 和 06 时



移动到珠江口, 中心的 TBB 值低于 - 50 (图 6b), 该 MCS 在珠江口强烈发展, 并继续向北运动; 20 时, MCS 的北界已经到达湖南境内 (图 6d); 19 日 02 时, 该 MCS 北移与从青藏高原东麓西移过来的 MCS 合并、发展 (图 6e 中云团 A), 并在原地停滞约 10 h, 在贵州东部和湖南西部造成强降水; 19 日 13 时, MCS 向北移动, 并逐渐减弱消失 (图 6g~i)。当第一个 MCS 北移发展时, 新的对流单体又在海南岛东侧生成 (图 6e 中云团 B), 此 MCS 比前一个 MCS 发展更加旺盛; 到 19 日 13 时, MCS 北移影响湖南南部降水, 中心 TBB 值达到 - 75 (图 6g 中云团 B)。19 日 22 时, MCS 逐渐减弱 (图 6i), 24 时分裂为两个小的系统, 随后减弱消亡。

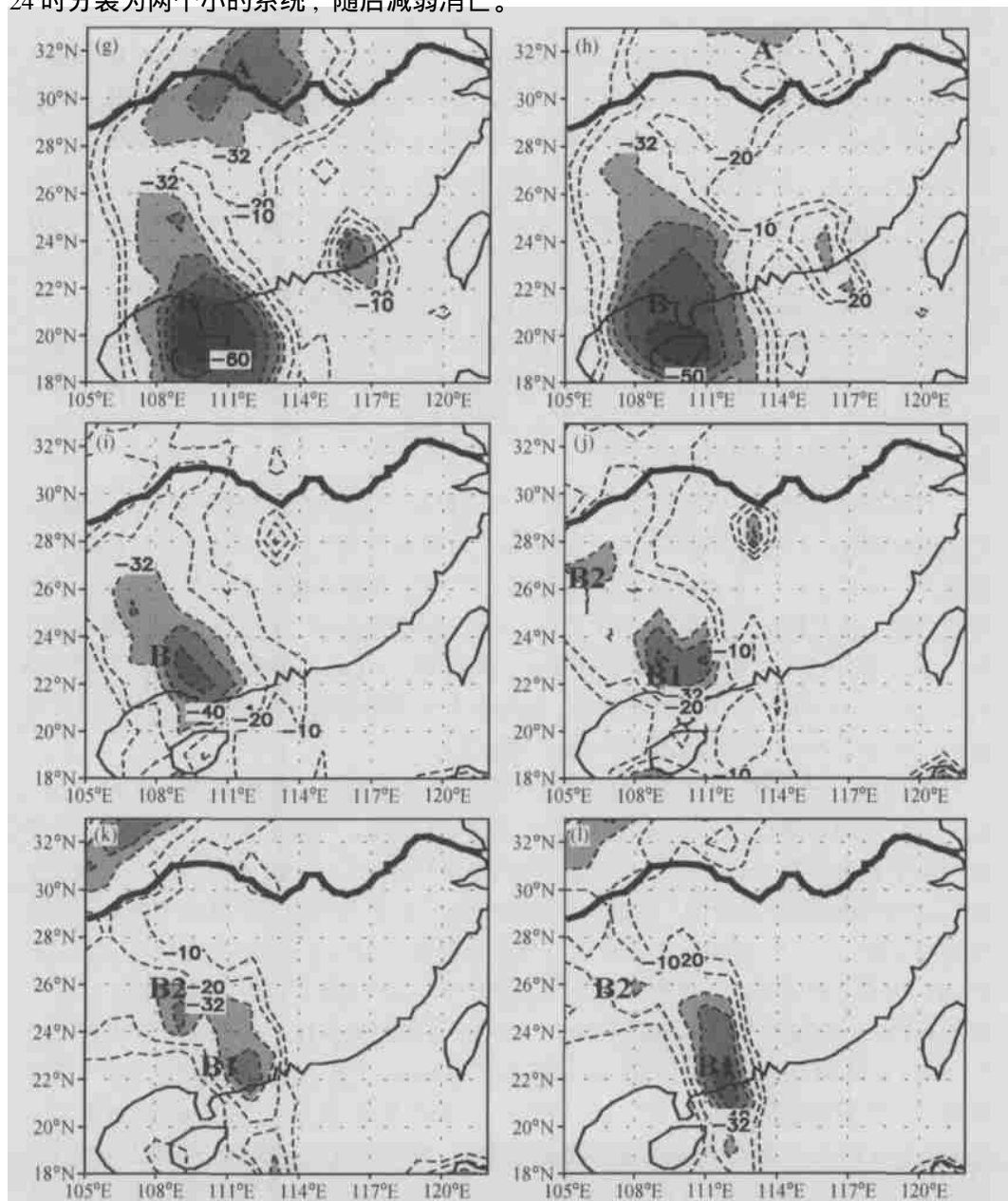


图 6 (续)

8月6~7日和18~19日MCS移动到湖南境内后,都在原地发展并长时间维持,其中生成于7日和19日的两个MCS的生命史更是长达24 h以上。将图5和图6与图3比较,可以发现,当12和14号台风登陆北上时,不断有长生命史的MCS发生并沿台风移动路径缓慢移动,表明这期间MCS在湖南省境内发展停滞与12和14号台风登陆后的有利环境场条件有关。考虑到篇幅,下面就12号台风影响下湖南暴雨的中尺度条件进行分析。

8月5日,随着12号台风在广东登陆并向湖南移动,来自热带洋面的大量暖湿气流到达湖南上空,使得(28°N以南,112°E以东)的湖南东南部地区空气逐渐变得潮湿。5日20时可降水量达60 mm(图略),气层非常不稳定,最有利抬升指数超过-4,部分地区达-8,空气中蕴涵大量的位势不稳定能量,地面 $\theta$ 达355 K,对流有效位能(CAPE)超过1 000 J kg<sup>-1</sup>。当有某种促发机制使得高湿且不稳定气层中的能量释放并产生强的上升运动,这将在湖南南部地区发生强的对流性降水。6日08时,部分对流有效位能释放,但气层仍然非常潮湿而不稳定,地面 $\theta$ 仍然高达355 K。6日20时,大量暖湿气流继续随低压东南侧的强西南风北上,湖南东部和江西西部地区气层潮湿且不稳定,可降水量达到70 mm,对流有效位能超过2 000 J kg<sup>-1</sup>。7日,当大量的CAPE释放后,在湖南东部和江西西部出现强的对流上升运动,对流高度到达对流层顶,产生了大面积的对流性强降水。

TBB和各物理量分析表明,12号台风登陆以后,大量暖湿气流在湖南上空辐合,使湖南南部地区的气层非常不稳定,并蕴涵大量的对流有效位能。对流有效位能的释放使这一地区在6~7日对流活跃,持续活跃的MCS使湖南南部的永州、衡阳、郴州等地出现了特大暴雨(图略),其中郴州6日08时至8日08时的48 h累积降水量为222 mm,桂阳159.4 mm,宜章115 mm,临武180.3 mm,嘉禾169 mm,资兴213 mm,永兴131 mm。由于降雨强度大,郴州全市大小河流水位都暴涨,水库山塘大量溢洪,郴州市29座大中型水库中14座出现溢洪。

暴雨中心所在的郴州探空资料计算出有利于强降水发生的参数演变(表1)显示,8月5日08时,郴州上空的气层已经非常潮湿而不稳定,可降水量达65.6 mm,K指数为41,抬升指数为-4,对流有效位能为1 734 J kg<sup>-1</sup>。5日20时(图7),郴州上空的气层仍然是潮湿不稳定的,整层空气的相对湿度都在70%以上,气层中的对流有效位能尚未释放。6日08时,部分对流有效位能释放,但气层仍然是潮湿而不稳定的。20时,大部分对流有效位能释放,CAPE值从08时的1 028 J kg<sup>-1</sup>下降到232 J kg<sup>-1</sup>,表明在这之间对流有效位能释放了796 J kg<sup>-1</sup>,使得郴州6日08~14时的6 h降水达55 mm。6日08时至7日08时的24 h降水约98 mm。8月7日,郴州上空的空气更加潮湿,整层相对湿度都在75%以上(图略),可降水高达70 mm。8日08时(图7b),在600 hPa以下,温度曲线和露点温度曲线重合,空气湿度达到饱和,可降水量由7日20时的70 mm下降到64.3 mm,对流有效位能已经完全释放,气层变得稳定。郴州上空的探空风垂直剖面表明,8月7日晚至8日早晨,郴州上空从对流层上层到低层盛行东北风,风的垂直切变很小,有利于降水集中落在郴州。因此,7日20时至8日08时,郴州12 h的降水量达111 mm,其中7日20时~8日02时的6 h降水为77 mm。

图8是强降雨发生时(7日20时)沿113°E的相当位温( $\theta_e$ )、比湿( $q$ )、水汽通量

散度( $\nabla \cdot qV$ )、垂直速度( $\uparrow$ )、涡度( $\zeta$ )和散度( $\nabla \cdot V$ )的经向垂直剖面。从图8a

表1 2002年8月5~8日郴州探空记录计算结果

	8月5日		8月6日		8月7日		8月8日	
	08:00	20:00	08:00	20:00	08:00	20:00	08:00	20:00
K指数	41	36	37	39	38	38	34	35
可降水量/mm	65.6	62.3	62.0	68.5	70.0	70.0	64.3	63.0
CAPE/ $J\ kg^{-1}$	1734	1624	1028	232	163	468	0	0
CIN/ $J\ kg^{-1}$	11	10	0	0	1	0	0	0
抬升指数LI	-4	-4	-3	-1	0	-2	3	4
地面 $\nearrow K$	363	366	359	355	355	358	346	344
比湿/ $g\ kg^{-1}$								
地面	20.7	20.4	19.6	19.3	19.3	20.0	17.1	16.6
850 hPa	16.8	14.3	14.7	15.7	15.6	15.5	13.8	14.7
700 hPa	10.3	9.8	10.2	11.8	11.8	11.4	11.3	11.4
500 hPa	5.0	5.4	5.1	5.7	6.3	5.7	6.3	4.9
400 hPa	2.0	2.8	2.6	3.1	3.4	3.0	3.0	1.9
300 hPa	0.6	0.9	0.9	1.0	1.0	—	0.9	0.5
24 h降水量/mm	0.2		98		124.0		18.2	

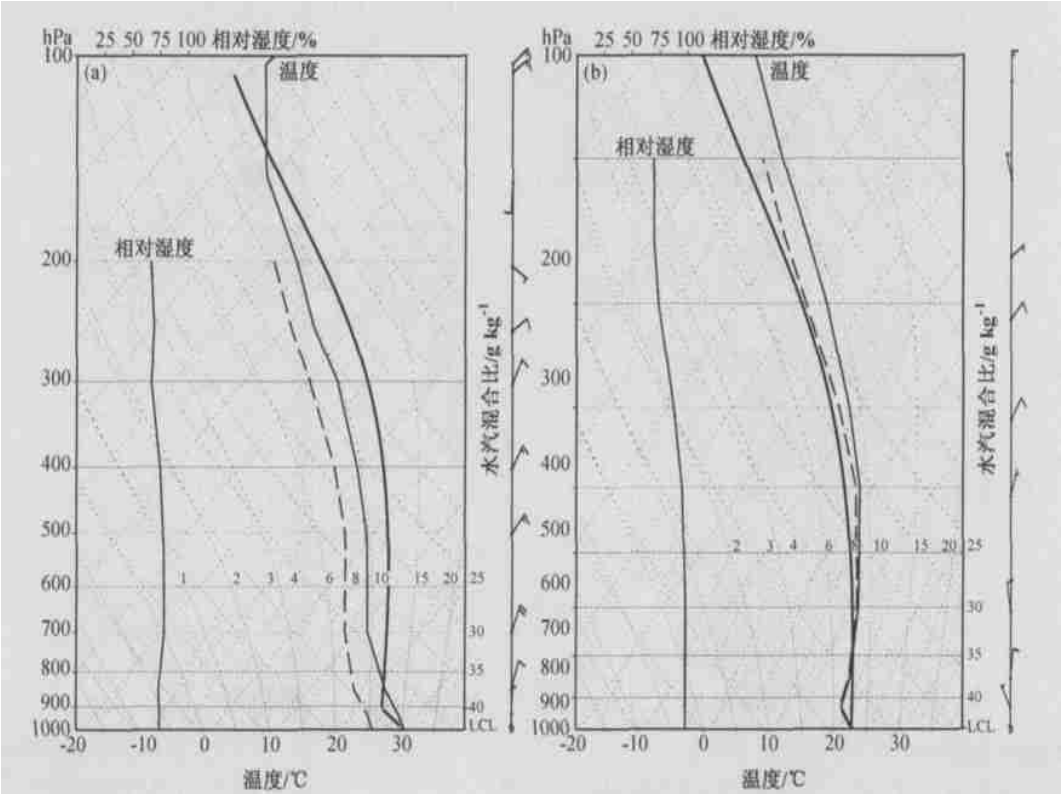


图7 2002年8月5日20时(a)、8日08时(b)郴州的探空曲线  
时间为世界时,虚线为露点温度曲线,粗实线为状态曲线

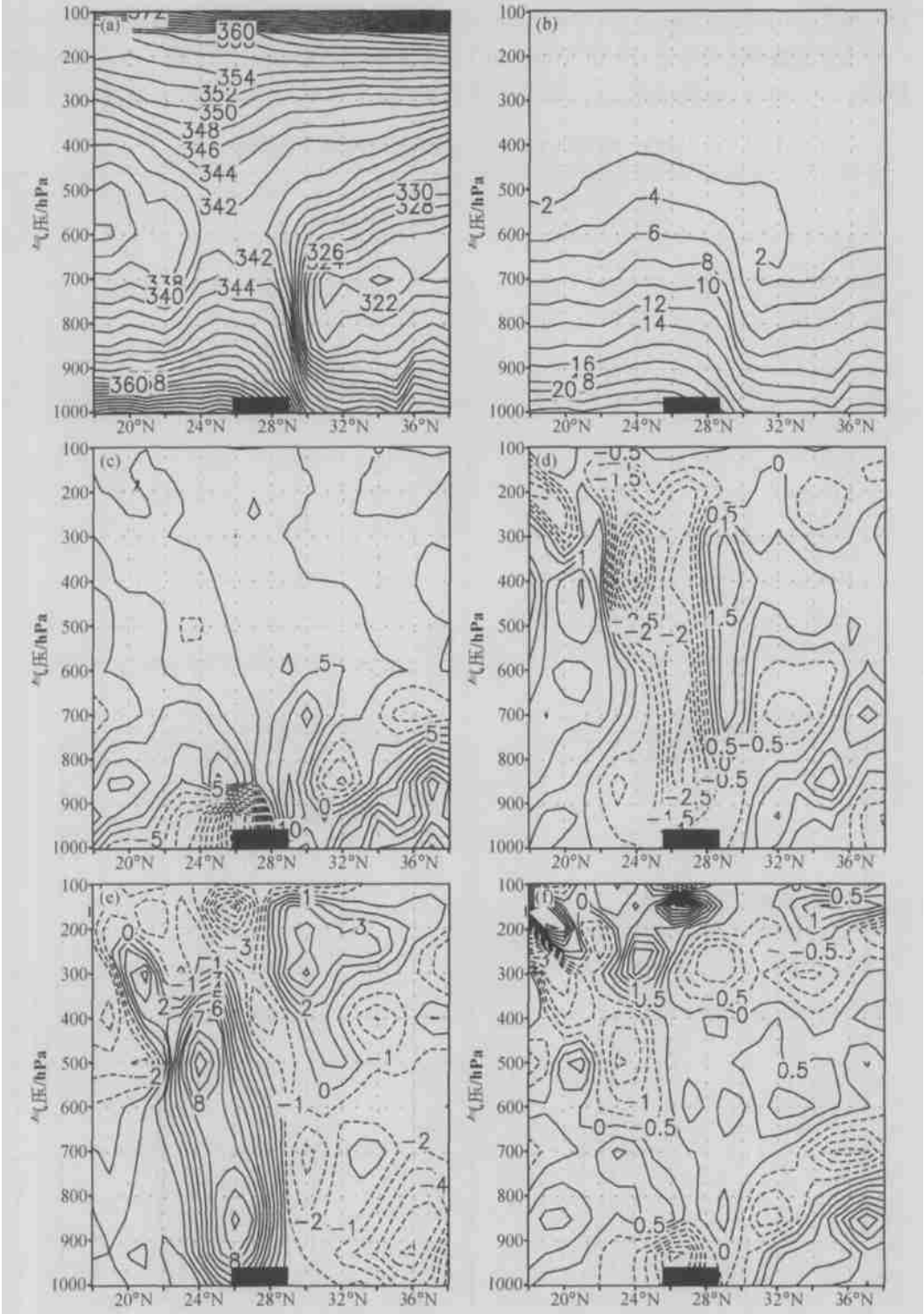


图8 2002年8月7日20时沿113°E的相当位温 (a, 单位: K)、比湿 (b, 单位:  $\text{g kg}^{-1}$ )、水汽通量散度 (c, 单位:  $\times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ )、垂直速度 (d, 单位:  $\text{Pa s}^{-1}$ )、涡度 (e, 单位:  $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )、散度 (f, 单位:  $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) 的经向垂直剖面 (阴影表示暴雨区)

可见, 在  $24 \sim 28^{\circ}\text{N}$  的范围内, 对流层中层以下是  $\omega$  的高值区,  $750\text{ hPa}$  以下  $\omega$  随高度减小。表明暴雨区上空的气层层结不稳定, 且具有高的位势不稳定能量。暴雨区北侧,  $\omega$  等值线密集, 且随高度几近垂直分布。这里正好是低层风切变最大的区域。在暴雨区上空有一水汽舌 (图 8b), 尤其在暴雨区北侧干湿对比相当明显。暴雨区上空高的水汽含量是由于附近大范围区域内有强的水汽辐合 (图 8c), 并且水汽辐合区从地面到对流层顶具有整层的强上升运动 (图 8d)。上升运动区的辐合到达  $300\text{ hPa}$  以上 (图 8e、f)。上述分析表明, 7 日晚在暴雨区上空有一具有强上升运动的高湿涡柱。与梅雨锋上的暴雨相比<sup>[3, 4]</sup>, 受台风影响的暴雨具有更强的涡柱, 且涡柱随高度向南倾斜。涡柱内有两个辐合上升运动中心, 分别位于  $400 \sim 500\text{ hPa}$  之间和  $800 \sim 900\text{ hPa}$  之间。

2002 年 8 月 19 日受 14 号台风影响的湖南暴雨, 与 12 号台风影响下的暴雨系统有相似的动力、热力结构, 这里不再赘述。通过对 12 和 14 号登陆台风影响下的湖南暴雨分析, 我们发现: 当台风登陆北上后, 沿低压东南侧大量的暖湿气流北上到达长江中游地区, 使得大量水汽在湖南南部上空辐合积累; 当台风向内陆移动时, 不断有长生命史的 MCS 沿台风移动路径发展, 并在湖南停滞数小时; 在暴雨发生前暴雨区上空大气潮湿而不稳定, 并且蕴涵有大量的 CAPE; 暴雨发生时, 暴雨区上空的垂直结构表现为具有强上升运动的涡柱结构, 在涡柱内, 空气潮湿且层结不稳定。

## 4 8 月 11 ~ 17 日高空槽前的持续性降水分析

8 月 11 ~ 17 日, 位于长江中游南部的贵州、湖南出现了持续性降水 (图略), 使湖南境内的江河湖库水位再次高涨。图 9 是 2002 年 8 月 11 ~ 17 日平均的  $200$ 、 $500$  和  $850\text{ hPa}$  环流形势分布。8 月 11 ~ 17 日对流层中上层最主要的高空环流特征是: 东亚中高纬地区维持阻塞形势, 阻塞高压 (简称阻高) 位于贝加尔湖及其以南地区上空; 在阻高东南面沿  $105^{\circ}\text{E}$  附近维持一个向南伸到  $25^{\circ}\text{N}$  的深厚低压槽, 在  $108^{\circ}\text{E}$  以东, 高空急流区从黄淮流域经朝鲜半岛到日本中部。这种分布形势使高空槽前的湖南正好位于高空急流轴右后侧的高空辐散区, 而这里也正好是  $500\text{ hPa}$  上高空槽前、副高西北侧的上升运动区。这种深厚的高空槽持续维持的环流形势在历史上曾多次引起致洪暴雨的发生, 如 1996 年 7 月中旬湖南大暴雨<sup>[5]</sup>, 1981 年 7 月中旬四川大暴雨<sup>[6, 7]</sup>, 1935 年长江流域五峰暴雨<sup>[8]</sup>。 $850\text{ hPa}$  上,  $30^{\circ}\text{N}$  以南的副热带地区上空有一宽广的低压槽位于  $110 \sim 115^{\circ}\text{E}$ 。来自孟加拉湾的暖湿空气随低压槽前的西南气流北上到达长江流域, 使得大量的水汽在这些地区辐合积累。因此, 8 月中旬长江上游降水不断, 长江中游地区的湖南也持续降水。来自上游的洪水与中游的洪水遭遇, 加剧了湖南的洪水灾情。到 8 月 20 日下午, 湘江长沙站水位已到  $37.40\text{ m}$ , 超警戒水位  $2.40\text{ m}$ ; 城陵矶水位已达  $33.50\text{ m}$ , 超警戒水位  $1.50\text{ m}$ ; 23 日, 洞庭湖的水位上涨到  $34.82\text{ m}$ 。

2002 年 8 月 11 ~ 17 日  $850\text{ hPa}$  的经向风的标准差 (STD) 分布 (图 10) 显示频繁发生降水的湖南位于经向风的 STD 高值区内。这表明, 干湿气团在湖南上空频繁交汇, 对流非常活跃。这期间先后有 13 个生命史在  $6\text{ h}$  以上的 MCS 活跃在湖南省境内 (图 11)。这些 MCS 大都生成于贵州、湖南境内, 在湖南发展、成熟, 造成 8 月中旬贵州、湖南的不少地区降水都在  $200\text{ mm}$  以上。当 MCS 向东北方向移出湖南时, 系统逐渐减

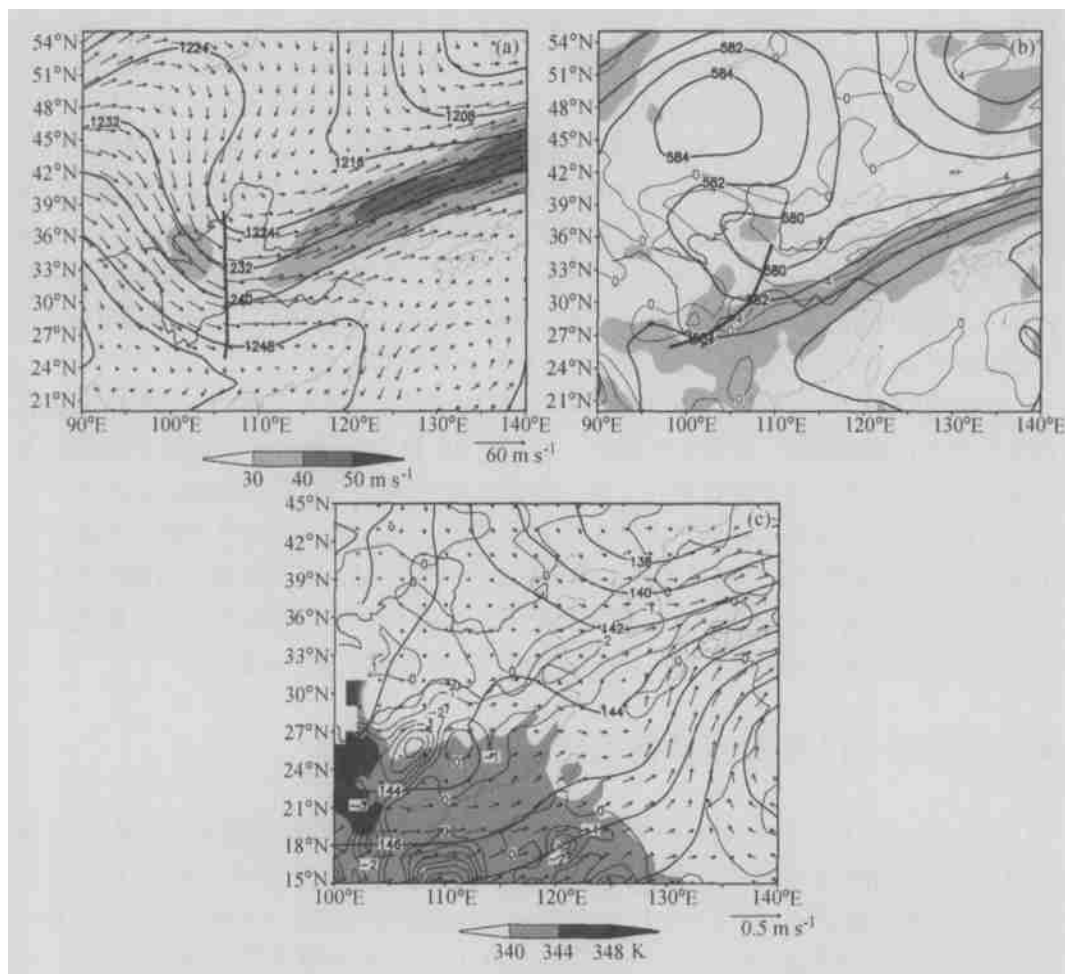


图9 2002年8月11~17日平均的200 hPa (a)、500 hPa (b)、850 hPa (c) 天气形势分布  
粗线表示槽线, 其他同图4

弱、消亡。

与8月6~7日受12号台风和8月18~19日受14号台风影响下的暴雨不同, 8月11~17日湖南境内扰动活跃, 这是受大尺度的环流强迫所致, 持续性降水所需要的上升运动主要由涡度平流和暖平流强迫产生。8月11日, 在东亚中高纬地区受阻塞形势控制, 阻高东南面100°E附近有一深厚的高空槽。随后的两天, 随着阻高东移, 高空槽也逐渐东移, 到13日槽线位于105°E附近。15日, 阻高加强并逐渐向东南方向移动, 深厚的高空槽仍然位于105°E附近。17日, 阻高加强东移到贝加尔湖的东南面, 阻高前的低压槽中发展出一个闭合冷低压, 低压控制了我国中部地区。在17日之前, 湖南省一直处于高空低压槽的前部。图12是8月10~19日111~114°E平均的500 hPa 涡度平流和850 hPa 温度平流的时间-纬度剖面。11~17日, 长江中游地区受正涡度平流影响, 其中13~14日涡度平流最强, 与此对应, 13~14日湖南省出现强降水中心(图略)。17日之后, 湖南省基本处于负涡度平流影响下。850 hPa 的温度平流随时间的演变表明(图12b), 8月10~17日长江中游地区一直有暖平流存在。这是因为, 8月11~12日,

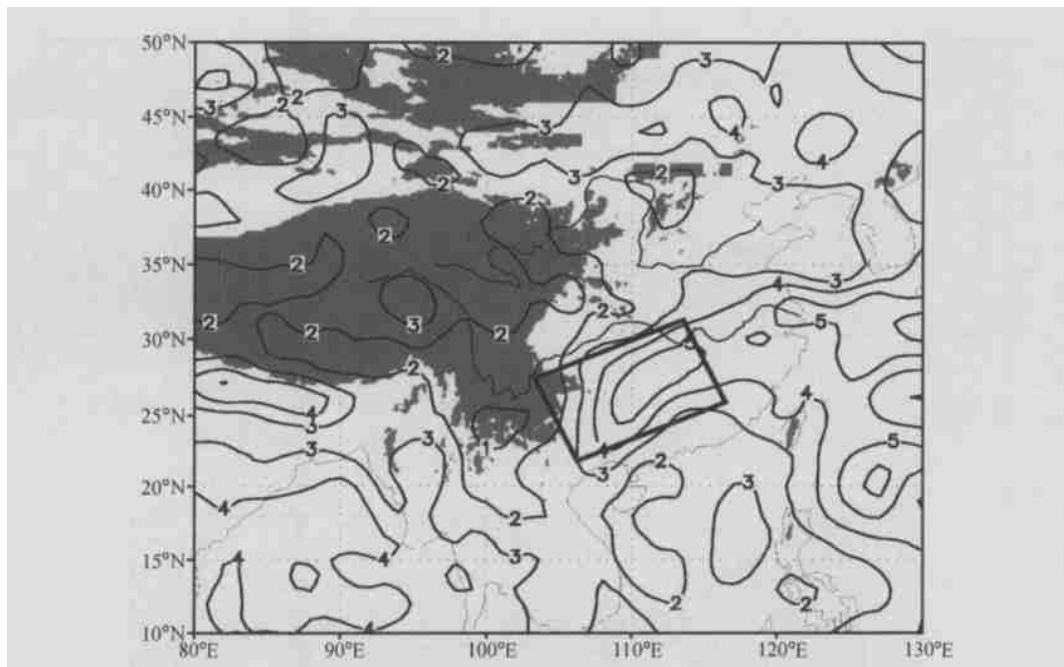


图 10 2002 年 8 月 11 ~ 17 日 850 hPa 经向风 ( $v$ ) 的标准差 (STD) 分布 (单位:  $\text{m s}^{-1}$ )  
阴影表示地形高度大于 1500 m, 矩形框表示降水高值区

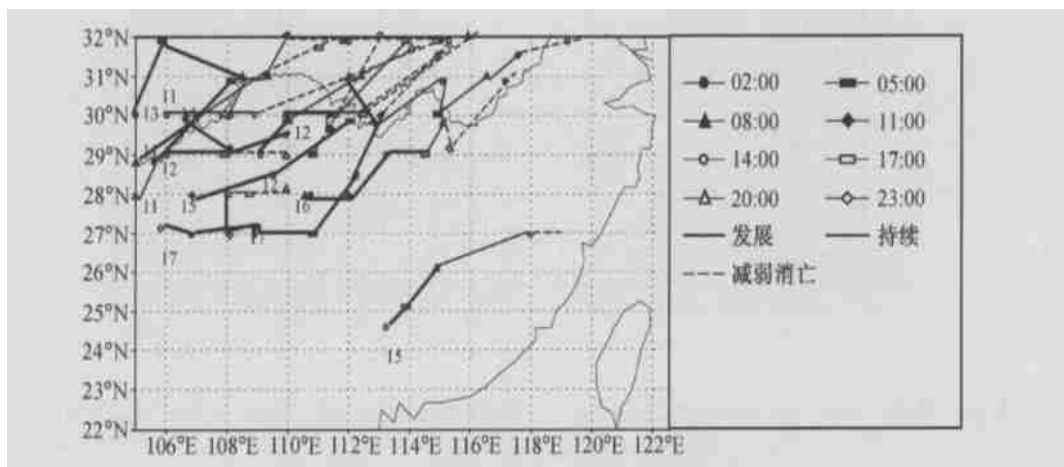


图 11 2002 年 8 月 10 ~ 17 日 MCS 的活动示意图  
MCS 根据 TBB - 32 确定, 图中数字表示日期

印度低压中心位置偏北、偏东, 低压东伸到  $105^{\circ}\text{E}$  附近, 而副高向西、向北伸到我国大陆。印度低压外围的西南气流和副高外围的东南气流将大量暖湿空气输送到长江中游。13 日, 在对流层低层,  $10 \sim 25^{\circ}\text{N}$  的亚洲低纬度地区是一个低压带, 西边是印度低压, 东边是 13 和 14 号台风低压。来自不同洋面的暖湿气流沿低压外围的西南风和东南风到达长江中上游地区。14 ~ 17 日, 14 号台风从南海中部的中沙群岛附近向广东移动, 加强了长江中游地区东南气流与西南气流的辐合, 使 850 hPa 上表现有强的暖平流中心。

8 月 11 ~ 17 日, 受高空槽前的正涡度平流和对流层低层的暖平流等大尺度强迫作用, 对流层低层的  $Q$  矢量在湖南、广东上空形成辐合中心 (图 13)。在这些地区, 8 月

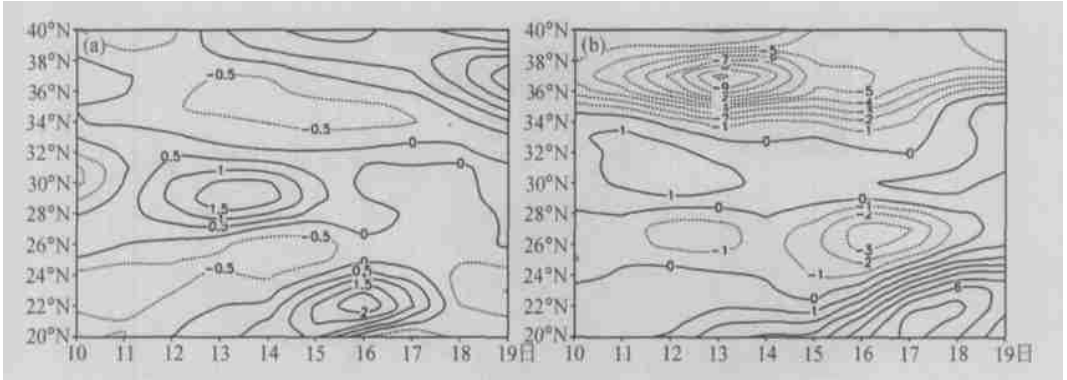


图 12 2002 年 8 月 10 ~ 19 日 111 ~ 114 °E 平均的 (a) 500 hPa 湿度平流 ( $-V \cdot \nabla$ ) (单位:  $\times 10^{-10} \text{ s}^{-2}$ ) 和 (b) 850 hPa 温度平流 ( $-V \cdot \nabla T$ ) (单位:  $\times 10^{-3} \text{ K s}^{-1}$ ) 时间-纬度剖面

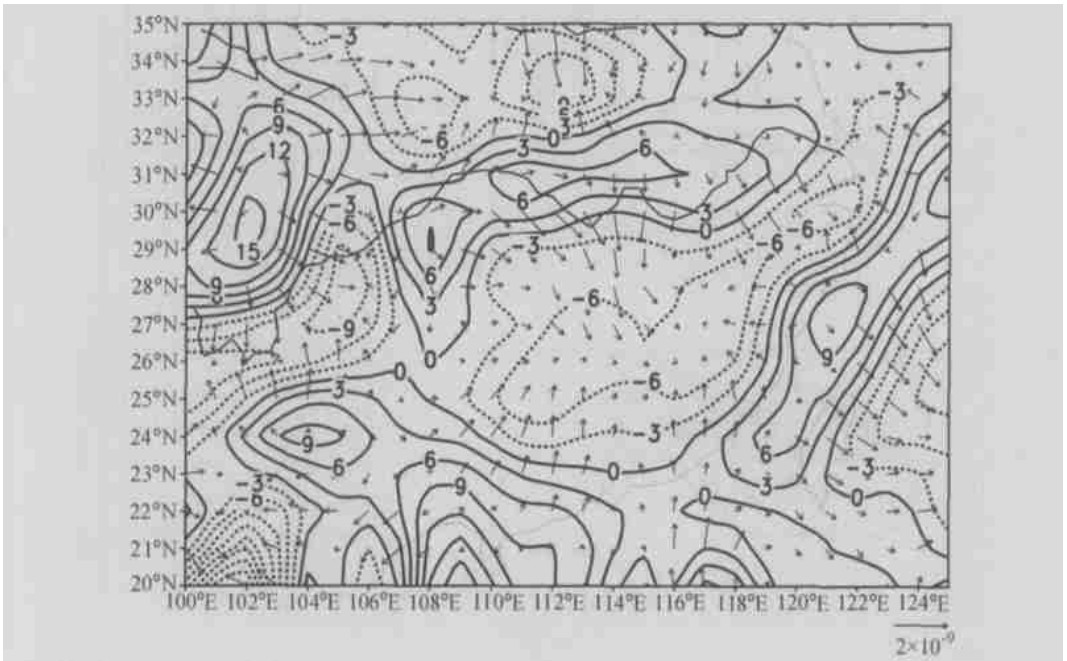


图 13 2002 年 8 月 11 ~ 17 日平均的对流层低层 (850 ~ 700 hPa) 的  $Q$  矢量 (单位:  $\times 10^{-12} \text{ m hPa}^{-1} \text{ s}^{-3}$ ) 及其散度 (单位:  $\times 10^{-17} \text{ hPa}^{-1} \text{ s}^{-3}$ ) 分布

中旬持续维持上升运动，导致湖南省 8 月中旬降水不断。

上述分析表明，8 月中旬高空槽前湖南的持续性降水与受 12 和 14 号台风影响的湖南暴雨具有不同的抬升机制。它们的动力、热力结构也不同。图 14 是 8 月 11 ~ 17 日沿 111 ~ 114 °E 平均的相当位温 ( $e$ )、比湿 ( $q$ )、水汽通量散度 ( $\nabla \cdot qV$ )、垂直速度 ( $\omega$ )、涡度 ( $\zeta$ ) 和散度 ( $\nabla \cdot V$ ) 的经向垂直剖面。从图 14a 可见，台风暴雨和梅雨锋暴雨主要位于暖区，而高空槽前的湖南持续性降水主要位于  $e$  等值线密集区，这里的气层具有层结稳定性。因此难以由中小尺度的热力不稳定导致的对流有效位能释放提供持续性降水所需的上升运动。图 14b 和图 14c 表明，这次降水过程中，强降水区主要



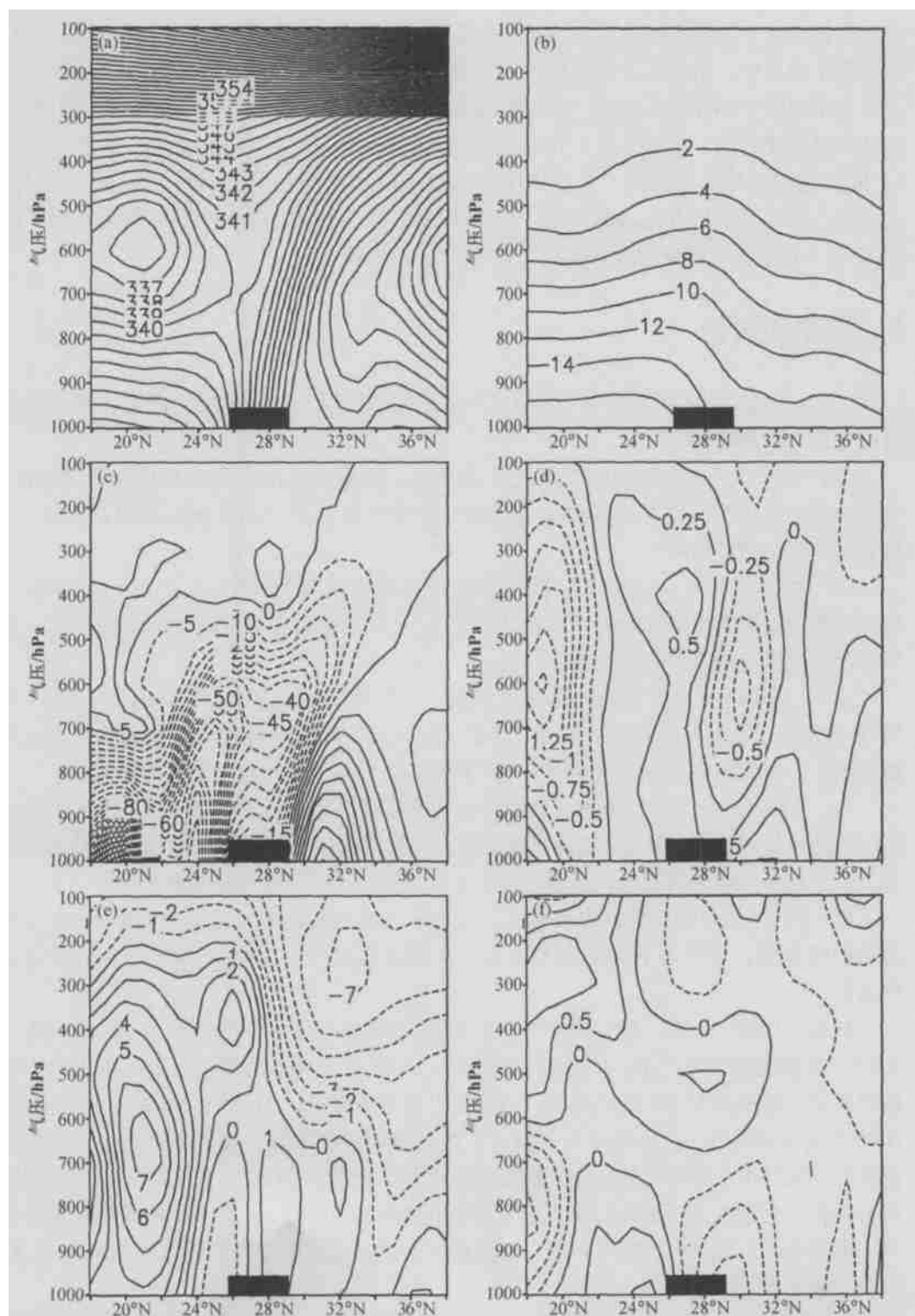


图 14 同图 8, 但为 2002 年 8 月 11~17 日沿 111°E 平均的的经向垂直剖面  
阴影表示强降水区

位于高湿区的北面,虽然在整个对流层中下层都有水汽辐合,但强降水区上空的气层没有台风影响下的暴雨区潮湿,因此降水强度远远低于台风影响时。图 14d ~ 14f 表明,这次降水过程中,系统的动力结构也与台风影响下的不同,强降水区上空没有低层辐合、高层辐散的涡柱结构出现,上升运动主要出现在对流层 900 hPa 以上。由于引发降水的两种系统不同,导致 8 月中旬高空槽前的持续性降水区上空的动力、热力结构与 12 和 14 号台风影响下不同,产生的降水强度和降水持续时间也不同。前者持续时间长、降水强度小,后者持续时间短,但降水强度大。这 3 次降水过程的共同作用,使 2002 年 8 月湖南大部分地区的降水比常年偏多 50 % 以上。

## 5 结论和讨论

本文对引发 2002 年 8 月中下旬湖南大洪水的水情以及 8 月上中旬湖南致洪强降水进行分析,结果表明:

(1) 2002 年 8 月上中旬东亚大气环流异常,阻塞高压稳定维持在贝加尔湖地区,中低纬大陆高压与西太平洋副热带高压的分布形势有利于台风沿其间的低压区北上,也有利于高空槽的停滞。

(2) 2002 年 8 月 6 ~ 7 日 12 号台风影响下的湖南南部大暴雨,8 月 18 ~ 19 日受 14 号台风影响的湖南南部大暴雨,以及 8 月 11 ~ 17 日持续高空槽前的大面积强降水,是引起湖南大洪水的重要影响系统。

(3) 12 和 14 号台风影响的暴雨过程中,中尺度对流系统(MCS)十分活跃,而 MCS 的发生、发展又与有利于对流活动出现的大尺度环境场有关。因此,在分析或预报暴雨时,应着重注意有利于暴雨发生的环境场条件以及中尺度对流系统的活动。

(4) 2002 年 4 ~ 5 月以及梅雨期湘南地区的强降水使得土壤水份饱和,江河湖库维持较高的水位。8 月上中旬先后两次暴雨过程和持续性强降水过程使洞庭湖水系的来水与长江上游的洪峰来水遭遇,造成 8 月中下旬洞庭湖水系的紧张防洪形势。

(5) 与 2002 年梅雨期的降水相比,湖南 8 月上中旬的降水量远没有第 1、2 段梅雨期的降水多,却产生了严重的大洪水,说明 8 月中下旬湖南大洪水主要由水文条件决定。

1954、1996、1998、1999 和 2002 年湖南省都出现了不同程度的大洪水,其中 2002 年洪涝灾害十分严重。从历史记录来看,湖南省大洪水的发生大都是由于梅雨持续时间长、降水强度大,或出梅晚、与长江上游雨季重迭,上游来水与下游雨水遭遇。2002 年湖南大洪水的发生与往年不同。虽然当年长江中下游出现了两段梅雨,但除湖南省外,长江中下游的大部分地区梅雨期降水基本正常。7 月底,长江中下游的梅雨结束后,长江上游进入降水峰值期。正当长江上游降水峰期时,8 月上中旬受异常环流影响,湖南地区出现秋汛,降水不断,导致长江上游来水与中游洞庭湖水系的雨水遭遇,引发了湖南省百年难遇的大洪水。

## 参 考 文 献

- 1 李吉顺、王昂生,1998 年长江流域洪涝灾害分析,气候与环境研究,3 (4), 390 ~ 397.

- 2 骆承政、乐嘉祥, 中国大洪水—灾害性洪水述要, 北京: 中国书店出版社, 1996, 1~434.
- 3 Bei Naifang, Zhao Sixiong, and Gao Souting, Numerical simulation of a heavy rainfall event in China during July 1998, *Meteor. Atmos. Phys.*, 2002, **80**, 153~164.
- 4 程麟生、冯伍虎, “987” 突发大暴雨及中尺度低涡结构的分析和数值模拟, 大气科学, 2001, **25**, 465~478.
- 5 张小玲、陶诗言、张顺利、张庆云, 1996 年 7 月洞庭湖流域持续性暴雨过程分析, 应用气象学报, 2004, **15** (1), 22~31.
- 6 Kuo Yinghua, Cheng Linsheng, and R. A. Anthes, Mesoscale analysis of the Sichuan flood catastrophe 11 - 15 July 1981, *Mon. Wea. Rev.*, 1986, **114**, 1984~2003.
- 7 张小玲、陶诗言、张顺利, 梅雨锋上的三类暴雨, 大气科学, 2004, **28** (2), 187~205.
- 8 陶诗言, 中国暴雨的特点, 中国之暴雨, 北京: 科学出版社, 1980, 1~7.

## Analysis of Flood-Producing Rainfall Events over Hunan Province during August 2002

Zhang Xiaoling, Sun Jianhua, Tao Shiyan, and Zhao Sixiong

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

**Abstract** The reasons causing the record floods and the heavy rainfalls in Hunan province in August 2002 have been studied by using conventional and special observational data, including the NCEP/NCAR reanalyzed daily  $1^\circ \times 1^\circ$  data,  $1^\circ \times 1^\circ$  hourly TBB data in August 2002, hydrological data from the Ministry of Water Resources of the People's Republic of China in May - August 2002, and daily precipitation data of 1960 - 1997. The main conclusions are as follows: (1) Unusual large scale circulation, for example, the maintenance of block high near Baikal and West Pacific Subtropical High, is very favorable to formation and development of the heavy rainfalls and flash flood. (2) Landing typhoons and upper troughs in early and middle August result in persistent severe rainfall, and then, reduce to flash flood in Hunan Province. (3) During anomaly precipitations, soil saturated, rivers and lakes had higher water level in Hunan Province in April - July. The floods in the rivers and lakes encountered the floods coming from the upper reaches of the Yangtze River, which brought severe damage in middle and later August. Saturated soil, higher water-level of the middle reaches of the Yangtze River and Dongting Lake are already produced by heavy rainfall during April - July. Therefore, the heavy rainfall of August in Hunan Province becomes runoff to the water system of Dongting Lake. Further more, disastrous flood of Hunan Province happened because of the encounter of high water level of Dongting Lake and floods from the upper reaches of the Yangtze River. (4) Mesoscale convective systems (MCSs) affected by favorable large-scale conditions are active in August. Consequently, it is very important to focus on favorable large-scale conditions and activities of MCSs for studying and forecasting of heavy rainfall.

**Key words:** rainfall; typhoon; upper trough