

次天气尺度与中尺度正、斜压模演变 揭示的武汉暴雨过程

陈建萍¹ 周伟灿² 单九生¹ 齐 冰³

(1. 江西省环境预报中心, 南昌 330046; 2. 南京信息工程大学;
3. 浙江省杭州市气象局)

提 要: 利用滤波原理提取出大气流场中的次天气尺度和中尺度信息, 再把大尺度和中尺度水平风场分别分解为正压分量(垂直平均)和斜压分量(扰动)流场。对1998年7月21~22日发生在武汉附近的强暴雨过程进行了次天气尺度与中尺度流场正、斜压分量演变特征的分析。结果表明: 次天气尺度与中尺度流场正压分量的演变与此次强暴雨的酝酿、发展和消亡具有内在的联系; 次天气尺度与中尺度流场高层200hPa斜压分量很强, 低层850hPa正压分量很强; 次天气尺度与中尺度流场斜压性占主导地位, 随着暴雨的发展, 中尺度流场的正压性减弱而斜压性进一步增强, 而次天气尺度流场的正压性增强而斜压性减弱。以上结论对于揭示中尺度暴雨过程发生发展的本质有一定的意义。

关键词: 滤波 次天气尺度 中尺度 正斜压分量 正、斜压平均相对模

Heavy Rainfall Event in Wuhan Revealed by Barotropic and Baroclinic Mode Evolution of Sub-synoptic and Mesoscale Systems

Chen Jianping¹ Zhou Weican² Shan Jiusheng¹ Qi Bing³

(1. Environment Forecast Center of Jiangxi Province, Nanchang 330046;
2. Nanjing University of Information Science & Technology; 3. Hangzhou Meteorological Office)

Abstract: With the filtering method, the sub-synoptic scale and mesoscale informations of the atmosphere flow field are extracted. Then the horizontal wind field of large-and meso-

scale are decomposed into barotropic component (vertical mean) and baroclinic component (perturbation) respectively. An analysis of the evolution of barotropic and baroclinic modes of sub-synoptic scale and mesoscale system in a heavy rainfall event in Wuhan during 21—22 July of 1998 is made. The results show that the evolution of barotropic component of the flow field of sub-synoptic scale and mesoscale is closely related to the brewing, development and disappearance of the event. The baroclinic component at 200hPa is strong, the barotropic component at 850hPa is strong, the baroclinicity is dominant. With the development of heavy rainfall, the barotropy will weaken while baroclinicity will get more strong, but the barotropy of current field in sub-synoptic scale will get strong and the baroclinicity get weak-en.

Key Words: filter sub-synoptic scale mesoscale barotropic and baroclinic components mean relative mode in barotropic and baroclinic modes

引言

中尺度暴雨形成的机理研究是当前大气科学中的一个热点问题。由于实际大气的演变过程十分复杂,特别是在强暴雨天气过程中,局地大气流场随着暴雨的发生、发展和衰亡,大气的斜压性发生显著变化,它从一般性斜压大气变成强斜压大气,然后又演变成一般性斜压大气。因此,分析暴雨中局地大气斜压性的演变过程是项有意义的工作。

而关于正、斜压分解的思想,首先由 Wiin-Nielsen^[1]于1962年在研究大气中垂直平均流(vertical mean flow)与垂直切变流(vertical shear flow)动能相互转换时提出。管兆勇等^[2,3]、朱乾根等^[4]、周伟灿等^[5]相继把这种思想用于研究亚洲夏季风结构和变动、季风环流的分类和阻塞生命史形成过程中,得到了有意义的结果。运用这种方法已经对1998年7月21~22日发生在武汉的暴雨过程研究了大气正、斜压流场的演变过程^[5],研究发现:暴雨前后,大气流场的斜压性一直占主导地位,并且随着暴雨的发展,大气的正压性减弱而斜压性进一步增强。但是此次武汉暴雨主要还是以次天气与

中尺度为特征,单纯的分析大尺度流场的正、斜压分量演变还不足以揭示中尺度暴雨发生、发展的本质。因此,本文对原始流场进行尺度分离,提取出次天气尺度与中尺度流场特征,然后再分别进行正、斜压分解,对此次武汉暴雨的发生机制进一步深入分析。

1 天气过程概述

1998年7月21日02~14时(世界时,下同)和22日08~14时武汉(30.5°N、114.5°E)及其附近地区发生两次大暴雨过程,降水量分别达到271mm和131mm。

2 资料及方法

2.1 资料

采用国家气象局提供的全球T106谱模式分析资料。每天4个时次,分别为世界时00、06、12、18时,垂直分为17层,经纬度网格分辨率为 $1.125^\circ \times 1.125^\circ$,物理量场包括等压面位势高度场、温度场、 u 、 v 风场和相对湿度场等。

2.2 方法

首先,根据滤波原理^[7],把原始场分解成两部分:大尺度场、次天气尺度场。滤波常数 $C=150000$, $G=0.3$ 。然后,对次天气尺度流场再进行滤波,提取中尺度流场信息,滤波常数 $C=10000$, $G=0.3$ 。

然后再根据气候物理学原理^[8],分别把大尺度和中尺度水平风场分解为两部分,即 $\mathbf{V}=\mathbf{V}_M+\mathbf{V}_S$ 。 \mathbf{V}_M 为正压分量(垂直平均流场), \mathbf{V}_S 为斜压分量(扰动流场)。

其中正压分量

$$\mathbf{V}_M = \frac{1}{P_s - P_0} \int_{P_0}^{P_s} \mathbf{V} dp \quad (1)$$

斜压分量

$$\mathbf{V}_S = \mathbf{V} - \mathbf{V}_M \quad (2)$$

P_s 、 P_0 分别为地面和大气顶层气压。

由式(1)(2)可知 \mathbf{V}_M 不随高度变化,而 \mathbf{V} 随高度的变化,即大气流场的斜压性完全由 \mathbf{V}_S 决定。

3 次天气尺度和中尺度正、斜压流场演变特征

3.1 次天气尺度正、斜压流场演变特征

通过式(1)可以计算出次天气尺度流场的正压分量大小,由此做出从地面 $P_s=1000\text{hPa}$ 到大气顶层 $P_0=100\text{hPa}$ 垂直平均积分的次天气尺度流场正压分量演变图。由图可见,暴雨发生前 20 日 02 时(图 1a),武汉北方为一弱的低压系统,南方为一弱的高压系统,中心位置分别位于 $(31.5^\circ\text{N}, 114^\circ\text{E})$ 和 $(28.5^\circ\text{N}, 105^\circ\text{E})$,武汉暴雨区主要受西风气流控制。20 日 08 时、14 时,20 时(图略)低压、高压系统逐渐加强,

中心则分别向正西、正东移动。到第一次暴雨过程(21 日 02~14 时)的第一时刻 21 日 02 时(图 1b),低压和高压系统已变得十分强大,中心位置分别位于 $(31.5^\circ\text{N}, 108^\circ\text{E})$ 和 $(28.5^\circ\text{N}, 118^\circ\text{E})$,此时武汉暴雨区受其西北方向的低压和其东南方向的高压之间密集的西南气流控制。第一次暴雨与第二次暴雨的间歇阶段 21 日 20 时~22 日 02 时(图 1c),低压系统虽然也较为强大,但其中心位置向南移动到 30°N ,与武汉的纬度几乎平行,且武汉东南侧的高压系统中心位置不明显,强度较弱,武汉暴雨区受南风控制。而到了第二次暴雨过程 22 日 14 时(图 1d),武汉暴雨区的流场配置又恢复到与第一次暴雨阶段相似。第二次暴雨结束后,低压和高压系统逐渐向东南方向移动,到 23 日 08 时(图略),武汉暴雨区已在低压系统控制范围内。由此得出,次天气尺度流场中武汉西北侧的低压系统与其东南侧的高压系统在武汉地区形成的西南急流与此次武汉大暴雨的发生有其内在的联系。

通过式(2)可以计算出次天气尺度流场各层的斜压分量大小,由此可做出 200hPa、850hPa 次天气尺度流场斜压分量图。从图中可以看出,暴雨发生过程中,200hPa 次天气尺度流场斜压分量(图 2a)与同时刻的次天气尺度流场正压分量相比有显著不同,武汉西北部为一高压系统,东南部为一低压系统,武汉处于东北气流控制下,这与正压分量形势正好相反。而 850hPa 次天气尺度斜压分量(图 2b)则和次天气尺度流场正压分量大致相同,武汉北部为低压系统,南部为高压系统,武汉处于西风气流控制下。这说明暴雨期间次天气尺度流场高层的斜压分量很强,而低层的斜压分量较弱。

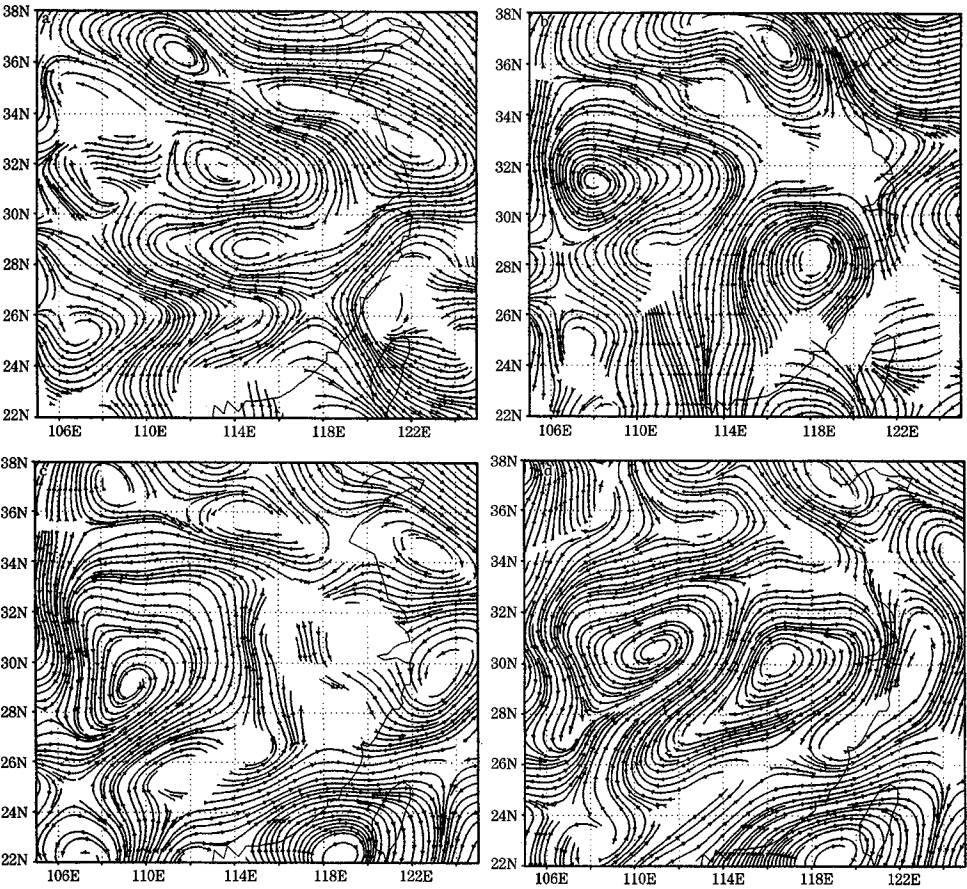


图 1 1998 年 7 月 20 日 02 时 (a)、21 日 02 时 (b)、22 日 02 时 (c)、22 日 14 时 (d) 次天气尺度正压分量流场演变

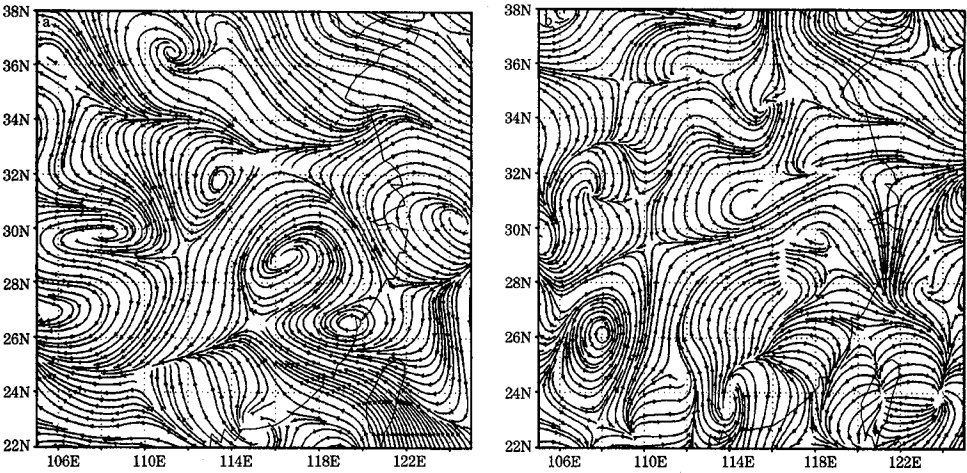


图 2 1998 年 7 月 21 日 02 时 200hPa (a)、850hPa (b) 次天气尺度斜压分量流场

3.2 中尺度正、斜压流场演变特征

从中尺度流场正压分量演变图(图3)可以看出,中尺度流场的正压分量与次天气尺度的正压分量相比有显著不同,暴雨发生前20日02时(图3a),武汉西北方为强大的高压系统,此高压系统有两个高压中心,分别位于 32°N 、 108°E 和 32.5°N 、 112°E ,武汉东南方为一强低压中心,中心位于 28.5°N 、 117°E ,西北高压与东南低压在武汉暴雨区形成平直东风气流,这与同时刻的

次天气尺度正压流场正好相反。随着暴雨时刻的临近,西北高压越来越强大,东南低压逐渐向东南方向移动,到第一次暴雨发生阶段21日08时(图3b),西北高压的两个高压中心已分裂成两个独立的高压系统,其中西面的高压中心位置几乎不动,东面的高压中心北移到 34°N 、 112°E ,西边的高压在武汉暴雨区西北方向形成西北气流,而东边的高压系统在武汉暴雨区形成东南气流,西北气流与东南气流正好在武汉地区交汇。到第一次暴雨发生的另一时刻21日14时

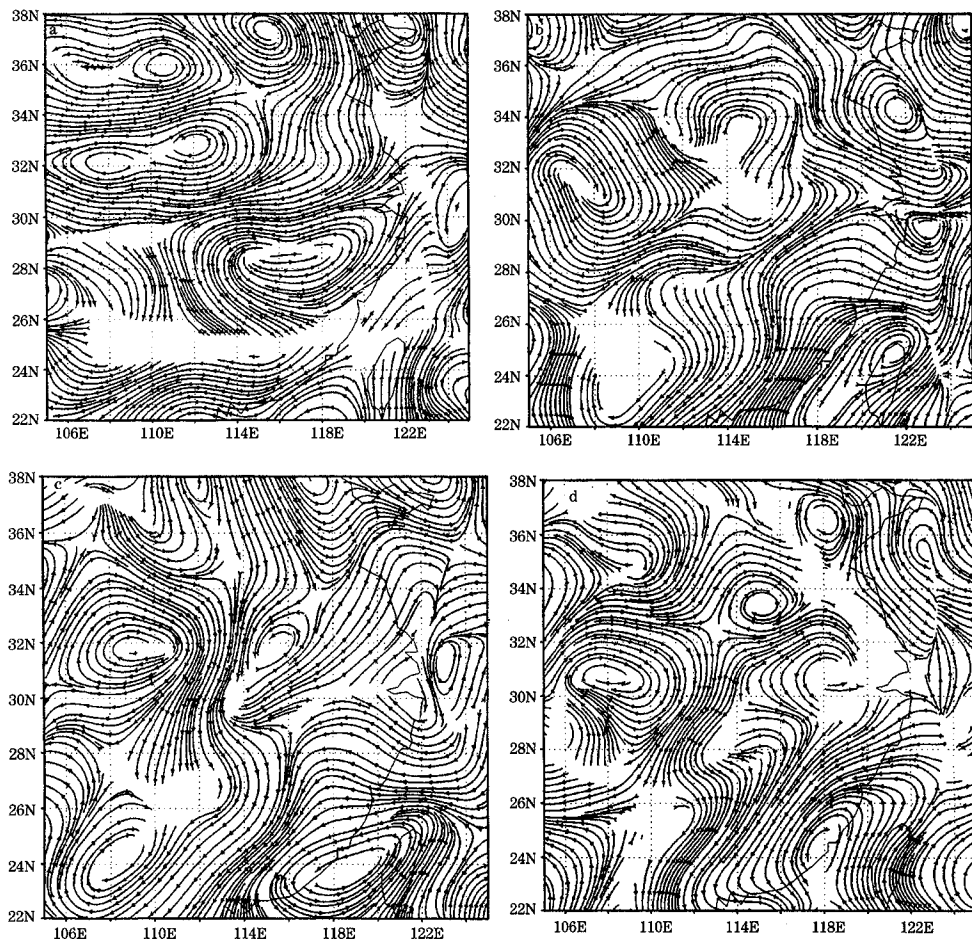


图3 1998年7月20日02时(a)、21日08时(b)、21日14时(c)、22日14时(d)中尺度正压分量流场演变

(图 3c), 正压流场形势又有所不同, 位于武汉西北的高压系统减弱为一个高压中心, 中心位置位于 32°N 、 110°E , 而在武汉暴雨区的东北附近出现一低压系统, 中心位置位于 32°N 、 115°E , 西北高压与东北低压的共同作用在武汉暴雨区的北方形成东北气流的流入, 同时在武汉暴雨区的南方有向南和向东北方向气流的流出, 即武汉暴雨区的北方有气流的辐合, 而在南方有气流的辐散。第一次暴雨与第二次暴雨间歇阶段 21 日 20 时~22 日 02 时, 武汉暴雨区位于高低压之间的东北气流控制下, 未见气流的辐合辐散。到第二次暴雨发生 22 日 08~14 时 (图 3d), 武汉暴雨区西边及东北方各有一高压中心, 中心位置分别位于 30.5°N 、 108°E 和 33.5°N 、 115°E , 东边有一低压中心, 中心位置在 30.5°N 、 118°E , 它们的共同作用在武汉暴雨区北方形成西北气流及东北气流的辐合, 在暴雨区南方形成气流向东南和西南方向的辐散, 这与第一次暴雨 21 日 14 时的正压流场形势相似。第二次暴雨结束后, 中尺度正压流场形势在武汉暴雨区又未见流场的辐合辐散 (图略)。综上所述, 此次武

汉暴雨中尺度正压流场形势在暴雨前后变化很大, 经常出现某一区域上一时刻还是受高压控制而到下一时刻却为低压控制, 但是, 从暴雨发生时刻中尺度正压流场形势可以得出结论, 此次中尺度正压流场中高、低压之间的配置在武汉暴雨区北方形成气流的辐合、在南方形成气流的辐散与此次武汉暴雨的发生有密切的联系。

从中尺度流场斜压分量的演变图可以看出, 21 日 02 时 200hPa 中尺度斜压分量流场 (图 4a) 与同时期的中尺度正压分量流场相比, 形势几乎相反, 武汉暴雨区西北方主要受低压系统控制, 东南方主要受高压控制, 武汉暴雨区在高、低压之间的西南气流控制下。21 日 02 时 850hPa 中尺度斜压分量流场 (图 4b) 与同时期的中尺度正压分量流场相比, 形势则相似, 武汉暴雨区西北方主要受高压系统控制, 东南方主要受低压控制, 武汉暴雨区在高、低压之间的东北气流控制下。说明暴雨期间中尺度流场高层的斜压分量很强, 而低层的斜压分量较弱, 这也与次天气尺度斜压分量流场特征是一致的。

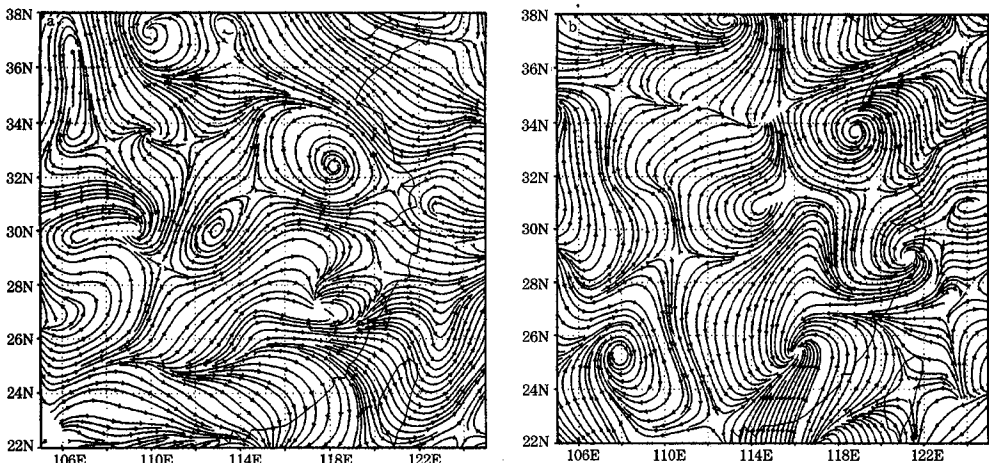


图 4 1998 年 7 月 21 日 02 时 200hPa (a)、850hPa (b) 中尺度斜压分量流场

4 次天气尺度与中尺度正、斜压模特征

通过以上对次天气尺度、中尺度流场正、斜压分量的分析,发现次天气尺度流场正压分量及中尺度流场正压分量的演变特征与此次暴雨的酝酿、发展和消亡过程相对应,为进一步了解次天气尺度、中尺度正斜压分量在暴雨期间的强弱变化以及正斜压分量在整个流场演变过程中所起的作用,引入正、斜压相对模的概念。

4.1 正、斜压相对模

定义正、斜压相对模:

$$\|V_m\|' = \frac{\sqrt{(V_m, V)}}{\|V\|}, \|V_s\|' = \frac{\sqrt{(V_s, V)}}{\|V\|} \quad (3)$$

式中 对任矢量 a, b 定义内积为 $(a, b) = \frac{1}{P_s - P_0} \int_{P_0}^{P_s} a \cdot b dp$ 。

$\|V_m\| = \sqrt{(V_m, V_m)}$ 表示正压流场的模 (简称正压模), $\|V_s\| = \sqrt{(V_s, V_s)}$ 表示斜压流场的模 (简称斜压模)。正压模反

映大气水平流场正压分量的大小,而斜压模反映整层大气水平流场斜压分量的大小,如果正压模大、斜压模小说明大气水平流场中正压分量占主导地位,而斜压分量占次要地位;反之如果斜压模大、正压模小则说明大气水平流场中斜压分量占主导地位而正压分量占次要地位。因此可将正、斜压模作为正、斜压分量强弱的度量参数,而通过正、斜压相对模的分析便可知道正斜压分量在整个流场演变过程中所起的作用。

通过式 (3) 可计算出正、斜压相对模,再分别定义正、斜压平均相对模为:

$\frac{1}{|\Sigma|} \iint_{\Sigma} \|V_m\|' d\sigma$ 和 $\frac{1}{|\Sigma|} \iint_{\Sigma} \|V_s\|' d\sigma$, 正、斜压平均相对模则分别代表区域内平均正、斜压分量在整个流场中所起的作用。

4.2 次天气尺度正、斜压平均相对模的演变

图 5 给出了 7 月 20 日 14 时至 7 月 22 日 20 时武汉附近地区次天气尺度正、斜压平均相对模的逐日演变图 (图 5), 平均区域为 $27 \sim 33.75^\circ N$ 、 $110.25 \sim 117^\circ E$ 。

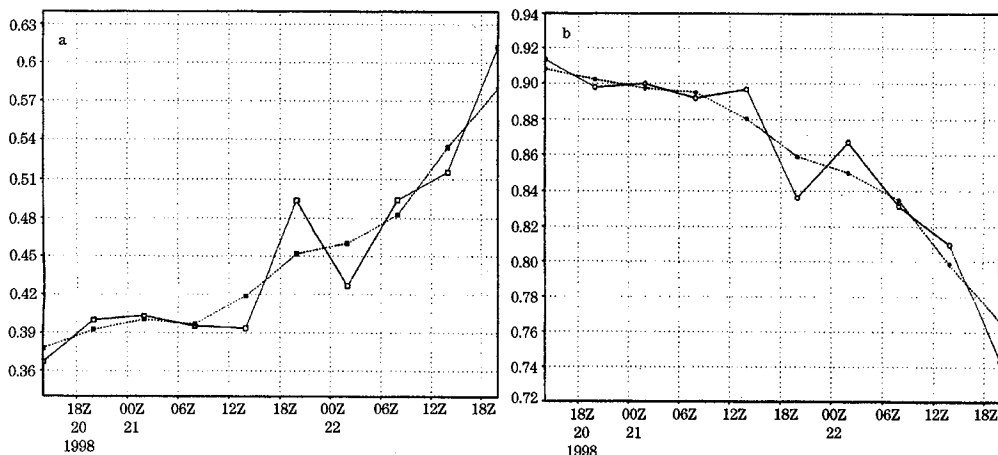


图 5 1998 年 7 月 20 日 14 时~22 日 20 时平均区域 ($27 \sim 33.75^\circ N$ 、 $110.25 \sim 117^\circ E$) 次天气尺度正压平均相对模 (a)、斜压平均相对模 (b) 随时间演变图

从图5可以看出,暴雨前后次天气尺度正压平均相对模的值在0.37~0.62之间变化,而斜压平均相对模的变化范围为0.74~0.92,这说明暴雨期间次天气尺度流场中斜压分量是起主要作用的。但是,次天气尺度正压平均相对模在第一次暴雨过程21日02~14时变化很小,暴雨间歇阶段正压平均相对模先增加随后减小,在第二次暴雨阶段正压平均相对模逐渐增加,平滑后的曲线则反映出随着暴雨的发生,正压平均相对模有增加的趋势。斜压平均相对模的演变情况与正压平均相对模的变化相反,第一次暴雨阶段斜压平均相对模变化不大,间歇阶段则是先减小后增大,第二次暴雨过程斜压平均

相对模逐渐减小,平滑后的曲线则反映出随着暴雨的发生,斜压平均相对模有减小的趋势。以上分析表明:随着暴雨的发展和消亡,次天气尺度正压平均相对模逐渐减小,而斜压平均相对模有增加的趋势,这说明暴雨过程次天气尺度的正压性在增强而斜压性减弱。但是,暴雨前后次天气尺度的斜压平均相对模都比正压平均相对模大,即次天气尺度的斜压性仍然是占主导地位的。

4.3 中尺度正、斜压平均相对模的演变

图6是7月20日14时至7月22日20时武汉附近地区中尺度正压平均相对模(a)和中尺度斜压平均相对模(b)的演变图。

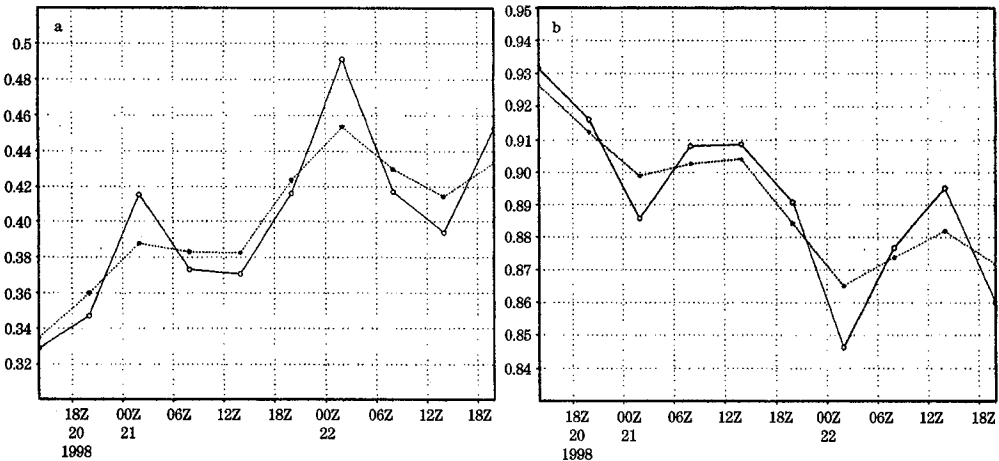


图6 1998年7月20日14时~22日20时平均区域(27~33.75°N、110.25~117°E)中尺度正压平均相对模(a)、斜压平均相对模(b)随时间演变图

从图6可以看出,暴雨前后,中尺度正压平均相对模的值在0.33~0.49之间变化,而斜压平均相对模的变化范围为0.85~0.93,这说明暴雨期间中尺度流场中斜压分量也是起主要作用的。另外从图6a可以看出,21日02时和22日02时两次武汉暴雨开始时正压平均相对模都是为极大值,暴雨发生后则逐渐减少,暴雨结束后,正压平均

相对模又有所增加。平滑后的曲线则反映出随着暴雨的发生,正压平均相对模有减小的趋势。而斜压平均相对模的演变情况(图6b)与正压平均相对模的变化也是相反。两次武汉暴雨开始时斜压平均相对模都是为极小值,暴雨发生后则逐渐增加,暴雨结束后,斜压平均相对模又有所减小。平滑后的曲线则反映出随着暴雨的发生,斜压平均相

对模有增加的趋势。通过以上分析表明:暴雨前后,中尺度的斜压平均相对模都比正压平均相对模大,即中尺度的斜压性占主导地位,且随着暴雨的发展和消亡,中尺度正压平均相对模先增大后减小,而斜压平均相对模先减小后增加,这说明暴雨过程中尺度的斜压性占主导地位,而且正压性在减弱而斜压性增强。

通过以上对次天气尺度、中尺度流场正、斜压平均相对模的演变可以看出,次天气尺度、中尺度流场中斜压平均相对模都是处于主导地位。但是随着暴雨的发生次天气尺度斜压平均相对模逐渐减小、正压平均相对模逐渐增大,而中尺度正、斜压平均相对模的演变却与之相反,即斜压平均相对模逐渐增大、正压平均相对模逐渐减小。

5 结 论

根据以上分析可以将这次武汉暴雨次天气尺度与中尺度的正斜压分量的演变特征概述如下:

(1) 次天气尺度流场与中尺度正压分量的演变与此次暴雨的酝酿、发展和消亡都有很好的对应。

(2) 暴雨期间次天气尺度流场与中尺度流场的高层的斜压分量很强,而低层的正压分量很强。

(3) 暴雨前后,次天气尺度与中尺度流场的斜压性都是占主导地位,随着暴雨的发展,中尺度流场的正压性减弱而斜压性进一步增强,而次天气尺度流场的正压性增强而斜压性减弱。至于次天气尺度与中尺度流场的正压性和斜压性在暴雨期间是如何的相互转换,我们将在以后的研究中进一步论述。

参考文献

- 1 Wiin-Niesen, A. On the transformation of kinetic energy between the vertical shear flow and the vertical mean flow in the atmosphere. *Mon. Wea. Rev.*, 1965, 90: 79—92.
- 2 管兆勇,徐建军,郭品文等. 亚洲夏季风结构和变动与大气运动的斜压和正压特征:斜压模分析. *气象学报*, 1997, 55 (2): 146—153.
- 3 管兆勇,徐建军,哈承智等. 亚洲夏季风结构和变动与大气运动的斜压和正压特征:正压模分析. *气象学报*, 1997, 55 (5): 513—520.
- 4 朱乾根,刘宜飞. 季风的正斜压分解与季风类型. *气象学报*, 2000, 57 (2): 113—119.
- 5 周伟灿,朱乾根. 偶极型阻塞过程中正斜压流场的演变特征及机理研究. 南京气象学院博士学位论文, 1999.
- 6 陈建萍,周伟灿. 正斜压模演变揭示的武汉暴雨过程. *南京气象学院学报*, 2003, 26 (3): 395—401.
- 7 丁一汇. 天气动力学中的诊断分析方法. 北京: 科技出版社, 1989: 18—20.
- 8 吴国雄,刘辉. 气候物理学. 北京: 气象出版社, 1995: 47—49.