

华南季风低压暴雨及其结构分析^{*1}

蒋建莹¹ 江吉喜¹ 布亚林² 刘年庆¹

¹ 国家卫星气象中心,北京,100081

² 河南省专业气象台,郑州,450003

摘 要

文中对 2005 年夏季华南的一次季风低压大暴雨过程进行了诊断分析,讨论了该季风低压的三维结构,并将其与南亚季风低压和梅雨锋上低压系统的结构进行了对比分析。结果表明,这次暴雨过程由华南季风低压直接引起,造成大暴雨的季风低压产生在有利的尺度环流背景下。这次华南季风低压的三维结构特征为:在水平方向上,季风低压的南侧是一条对流云带,在对流层中低层,季风低压基本上处于对流不稳定并伴随有较强的上升运动;它对应中低层的湿舌、辐合区和很强的正涡度带。在垂直方向上,季风低压在对流层中低层有明显的气旋性环流,在 300 hPa 以上无反映。它对应低层辐合和气旋性涡度,高层辐散和反气旋性涡度。季风低压的上升气流可达对流层高层,主要上升运动区位于低压的西侧,主要下沉运动区位于低压的东侧。季风低压南侧有低空急流存在,但高层急流并不明显;季风低压的热力结构为上暖下冷。华南季风低压的轴线随高度向东南方向倾斜。这种特征,与南亚季风低压和梅雨锋低压均有较大不同。

关键词: 季风低压,暴雨,结构。

1 引 言

中国地处亚洲的东南部,东亚季风和南亚季风对人民生活和社会经济发展有着显著的影响。中国夏季的降水与东亚夏季风季节性推进密切相关,夏季风到达各地的日期,常常是这些地区雨季开始的日期^[1],因此季风槽和季风低压是夏季风环流中主要的降水天气系统之一。

季风低压通常是指发生在印度季风槽中的低压,与西南季风有密切联系,因它主要产生于孟加拉湾地区,所以习惯上称为孟加拉湾低压或印度季风低压。国内外对孟加拉湾季风低压已作过许多研究^[2-11],他们对季风低压的结构和能量进行了诊断分析,计算了低压的涡度、水汽收支,进行了数值计算试验,并研究了季风低压形成的机制。梁必骥等^[12-18]在 20 世纪 80、90 年代的研究发现,夏季风时期在南海地区也有季风低压活动,它不仅会造成明显的降水,而且在合适的条件下还可以发展成台风,

这一点与孟加拉湾季风低压是不同的,因为孟加拉湾低压一般不会发展成热带风暴。梁必骥等^[12-18]对南海季风低压的结构特征和形成机制进行了较为系统的研究。结果表明,南海季风低压与孟加拉湾季风低压虽然性质相同,但由于它们所处的环境场条件不同,所以在很多方面还是有所差异的。

本文中南海季风低压是指形成于热带辐合带上,与西南季风有密切联系,并在对流层低层有明显低空急流的南海低压扰动。2005 年 8 月 19—20 日受季风低压影响,广东出现了一次大暴雨过程。本文首先分析造成这次大暴雨的季风低压产生在什么样的大尺度环流背景场下,然后对季风低压的结构进行重点分析,并将该低压的结构与南亚季风低压及梅雨锋上低压系统的结构特征进行对比。本文采用的资料有:2005 年 8 月 NCEP 再分析资料,水平格距为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,时间间隔为 6 h;1999 年 6 月 T106 再分析资料,水平格距为 $1.125^{\circ} \times 1.125^{\circ}$,时间间隔为 6 h;FY-2C 卫星红外云图资料以及极轨气象卫

* 初稿时间:2006 年 9 月 6 日;修改稿时间:2007 年 2 月 26 日。

资助课题:“十五”河南省重大科技攻关项目“河南省云水资源开发利用技术研究与示范”(0522030400)。

作者简介:蒋建莹,主要从事中尺度气象学的研究。E-mail:jiangjy@nsmc.cma.gov.cn

星 ATOVS 反演的温度资料等。

2 季风低压造成的强降水

2005 年 8 月 19—20 日受季风低压影响,广东省珠江三角洲地区和粤西南的部分地区出现了暴雨,局部地区为大暴雨或特大暴雨。其中 8 月 19 日夜至 20 日中午,深圳市普降大到特大暴雨,24 h 内平均雨量达 240 mm。季风低压造成的暴雨导致该市多处道路出现积水、山体滑坡、部分路段交通堵

塞,共造成 8 人死亡,多名群众受伤。

在 2005 年 8 月 18—21 日逐日降雨量的分布(图 1)中可以清楚地看到,强降雨首先发生在粤西,然后缓慢东移;19 日起,暴雨中心主要在 114°E 附近徘徊,21 日之后降雨明显减弱。

由此可见,造成这次暴雨过程的季风低压在南海北部海域生成后缓慢东移,沿途造成了很强的降水,直至它在广东省消失此次过程才结束。

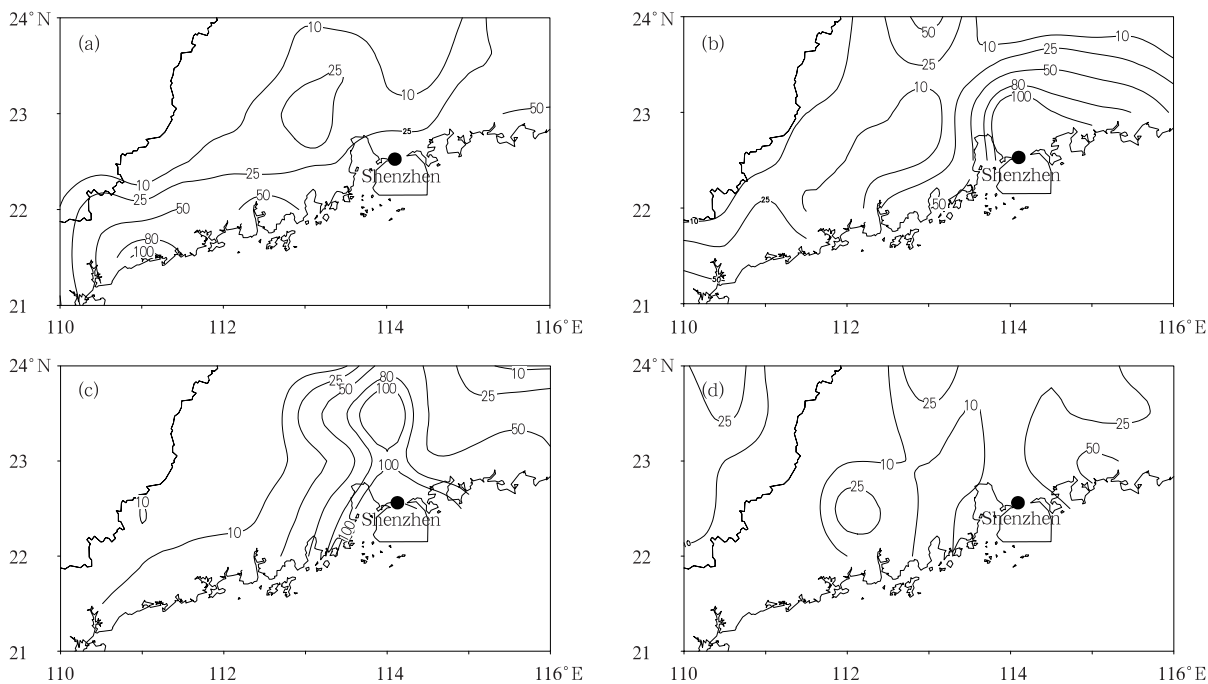


图 1 2005 年 8 月 18—21 日的逐日降雨量(a. 18 日, b. 19 日, c. 20 日, d. 21 日;单位: mm)

Fig. 1 Daily rainfall (mm) on (a) 18, (b) 19, (c) 20, and (d) 21 August 2005

3 引发这次季风低压大暴雨过程的高低空环流形势及其活动特征

低空急流对于暴雨形成的作用十分重要,它一方面输送水汽和能量,另一方面帮助维持必要的动力学条件。在这次过程的 850 hPa 风矢量和风速图上,自 8 月 19 日 06:00 UTC(图 2a)开始,广东沿海出现了一支强劲的西南低空急流,急流中心风速达 24 m/s,急流核的左前方风速梯度最大的地方对应强降水中心。在急流轴的左侧,气旋性风速切变产生正涡度,为低空的辐合起到了加强的作用,强烈的辐合随之可以触发不稳定能量的释放,进而又有利

于上升运动的产生。因此,在急流轴最大风速中心的左前方上升运动最强处,十分有利于低压的形成和发展。随着急流核沿低空急流轴向东北方向传播和逐渐减弱(图略),广东的强降水过程结束。

在对应的 200 hPa 图上(图 2b),南亚上空为一个庞大的高压系统控制,高压主体位于青藏高原东南部上空。在高压的东南侧为强辐散气流区,华南地区正处于其下方,这十分有利于低层辐合及产生强烈的上升运动。这种低层辐合、高层辐散的流场配置为暴雨形成提供了十分有利的大尺度环流背景场,同时也非常有利于季风低压的形成和发展。

与之对应的是,在 850 hPa (图略)上有一个低

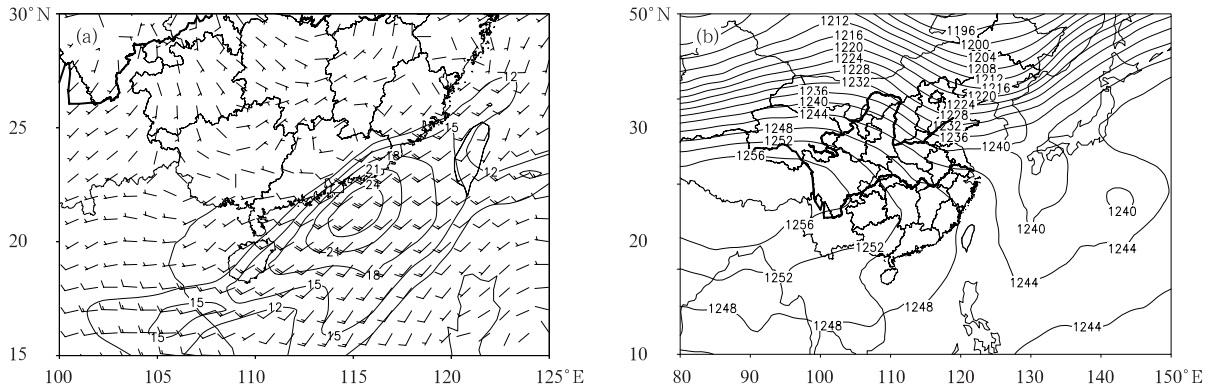


图2 2005年8月19日06:00 UTC (a) 850 hPa风矢量和风速图(单位:m/s)(b)200 hPa高度场(单位:dagpm)
Fig. 2 (a) 850 hPa wind vectors and isotachs (m/s), and (b) 200 hPa geopotential heights (dagpm) at 06:00 UTC 19 August 2005

值系统从南海北部上空逐渐东移,18日18:00 UTC开始出现148 dagpm的低压环流,以后逐渐加深并东移,至19日06:00 UTC发展成为146 dagpm的季风低压,并一直持续到21日00:00 UTC。这在地面图上反映较弱,仅出现了1000 hPa的低压(图略)。而从纬向风的高度-时间剖面图(图3a)中可以看到,自19日00:00 UTC开始,中层西风出现并向上传播,19日12:00 UTC一次明显的西风下传到

达地面,而此时正是季风低压发展最强盛、结构最清晰的时刻(见第4节)。虽然低层风速没达到急流强度,但这种中层的动量下传使得暴雨明显增幅。经向风的高度-时间剖面图(图3b)显示:从一开始,季风低压中下层就受南风气流控制,随着中高层的冷空气入侵,20日06:00 UTC北风分量到达低层,由此可能破坏了南海地区低层西南季风、高层偏东北气流的配置,导致系统逐渐减弱。

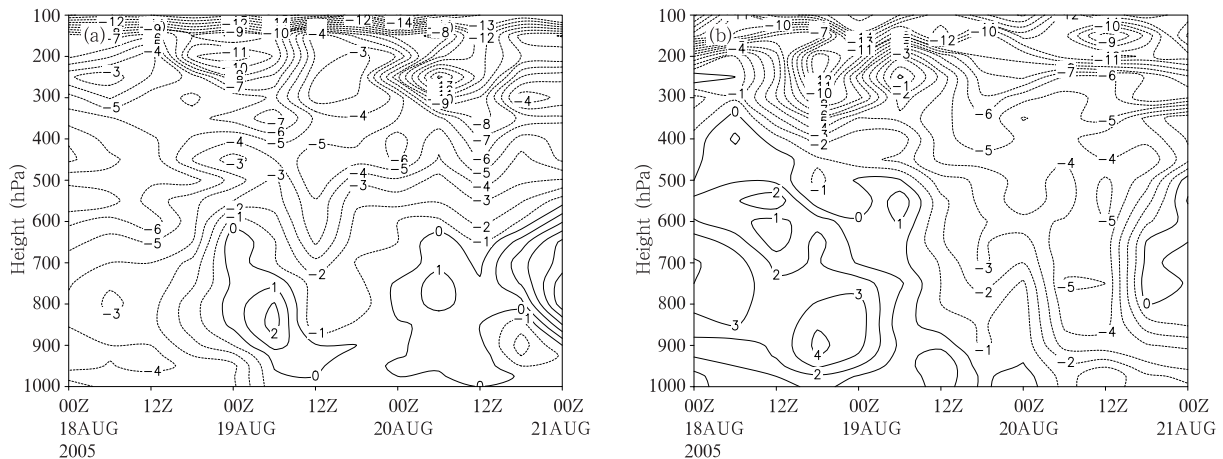


图3 2005年8月18—21日(a)纬向风和(b)经向风在(23.6°N,114°E)的高度-时间剖面
Fig. 3 Height-time cross sections of (a) zonal/(b) meridional wind over 23.6°N, 114°E from 18 to 21 August 2005

在上述有利的环境场条件下,源源不断的水汽输送和汇聚也是这次强降雨形成及季风低压维持的最重要因素之一。850 hPa的水汽通量图(图4a)显示:这次暴雨过程华南地区的水汽主要源自孟加拉湾、南海和西太平洋,来自孟加拉湾的西南季风与

100°—110°E的越赤道气流在中南半岛汇合,之后在南海转向华南地区,与此同时副热带高压南缘的偏东气流也是重要的水汽输送带。此时,季风低压所在区域处在强劲的偏西南气流之中,这支稳定维持的西南气流把低纬度的水汽和热量源源不断地输

送到低压区,为这场大暴雨的产生提供了极为有利的水汽和热力条件。另外,整层的水汽通量散度(图4b)也表明,广西南部、广东大部分地区直至台湾海

峡南部为大范围的水汽通量辐合区,季风低压所在区域整层都为水汽通量辐合,展示了低压周围有水汽向低压区输送。随着辐合极值中心区缓慢东移至

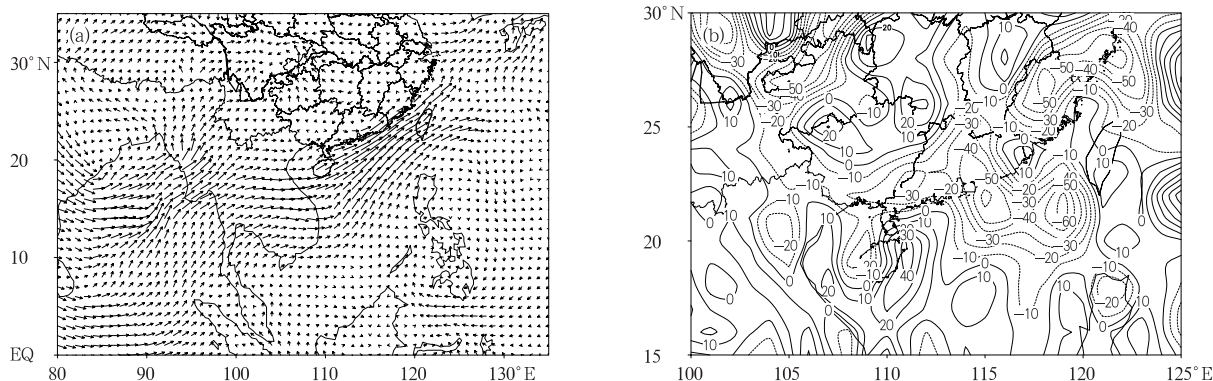


图4 2005年8月19日06:00 UTC (a) 850 hPa水汽通量(单位: $\text{g}/(\text{s} \cdot \text{cm} \cdot \text{hPa})$)
(b) 整层的水汽通量散度(单位: $10^{-5} \text{g}/(\text{s} \cdot \text{cm} \cdot \text{hPa})$)

Fig. 4 (a) 850 hPa water vapor flux ($\text{g}/(\text{s} \cdot \text{cm} \cdot \text{hPa})$), and (b) the divergence of the whole-layer integrated water vapor flux ($10^{-5} \text{g}/(\text{s} \cdot \text{cm} \cdot \text{hPa})$) at 06:00 UTC 19 August 2005

海上(图略),广东的这次降雨过程结束。

综上所述,造成这次大暴雨的季风低压产生在有利的大尺度环流背景下:低层辐合、高层辐散的流场配置有利于上升运动的建立和加强,加上源源不断的水汽输送,导致了这次季风低压大暴雨过程。

4 华南季风低压的结构特征

关于孟加拉湾季风低压结构和活动的研究表明^[2-4,7,11]:孟加拉湾季风低压的水平尺度约为2000 km,垂直尺度约10 km;对流层低层为明显的冷心结构,高层为暖心结构;上升运动位于其西侧,下沉运动位于其东侧;其对流层中层的环流比低层更加清晰^[11];这些形成于孟加拉湾北部的季风低压,通常向西或西北方向移动影响印度,有的低压生命史较长,甚至穿越印度影响巴基斯坦^[19];季风低压的西移与强上升运动区的低层强烈辐合有关^[4,11]。近年来为了深入研究季风和季风低压,国际上还专门开展了孟加拉湾季风试验(BOB-MEX)^[20]。梁必骥等^[12-14,18]利用合成方法得到南海季风低压的平均三维结构特征:低压环流以700 hPa最明显;在700 hPa以下,中心轴线随高度变化基本

是垂直的,700 hPa以上则向东倾斜;低层冷心,中上层为暖心;低层辐合、高层辐散;低压中心附近气旋性涡度可达300 hPa,低层最强;低压中心附近整层为上升运动,最强上升出现在中层。

这里要探讨的主要问题就是这次南海季风低压的结构与梁必骥等^[12-14,18]的结构有何共性和特性,及其与南亚季风低压的结构有什么异同;且由于在此期间,正好获得了极轨气象卫星ATOVS反演的温度资料,为我们从另一个角度了解南海季风低压结构提供了很好的契机。

850 hPa的逐日流线演变图(图略)展示,本次造成广东大暴雨的季风低压是先南海北部海域生成,然后缓慢东移,这与南亚季风低压的西移^[2-3,11,19]是截然不同的。

这里选取8月19日12:00 UTC季风低压发展最强盛、结构最清晰时刻的资料为代表,研究它的结构特征。在850、700、500和200 hPa的流场图(图5)中,该季风低压在对流层中低层具有明显的气旋性环流,并且还清楚地显示出了该低压系统随高度向南倾斜;而200 hPa(图5d)上该低压处在南亚高压南缘的辐散状东风气流中。

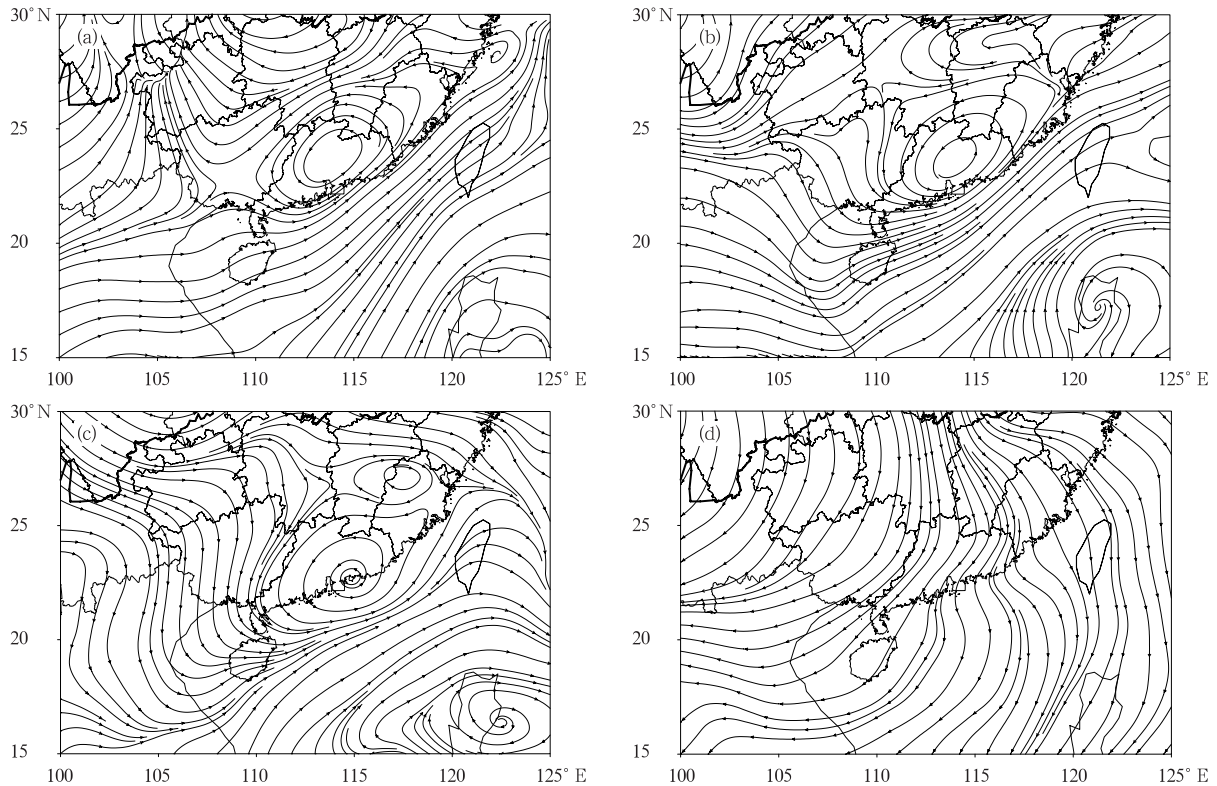


图5 2005年8月19日12:00 UTC流场图(a. 850 hPa, b. 700 hPa, c. 500 hPa, d. 200 hPa)

Fig. 5 (a) 850 hPa, (b) 700 hPa, (c) 500 hPa, and (d) 200 hPa streamline fields at 12:00 UTC 19 August 2005

4.1 华南季风低压低层的水平结构特征

从8月19日00:00 UTC至21日00:00 UTC间隔12 h的FY-2C红外云图(图略)中可以看出,这次过程中一条对流云带一直在广东沿海徘徊,且云带上有多中尺度对流系统在原地生消发展,正是该云带的停滞造成了此次灾害性季风低压暴雨过程。

在850 hPa的比湿图(图6a)中,华南地区处于14 g/kg的东北—西南向湿舌区中,表明季风低压在低层为一高湿区。

为了分析这次暴雨过程中大气的稳定度状况,这里选用华南地区中层和低层 θ_e 的差值来分析对流层中低层大气的对流稳定度。在 $\theta_{e,500} - \theta_{e,850}$ 的差值分布图(图6b)中,华南地区为负值区,表明中低层大气处在不稳定状态中。

另外,该季风低压在中低层对应一个辐合区(图6c)和很强的正涡度带(图6d),且涡度的极值中心与图1中强降水中心有很好的对应关系,这个正涡度带向西南方向延伸,与图2a中低空急流轴的走向

十分吻合,并位于其左侧。与此同时,中低层的垂直速度分布表明(图略),季风低压基本对应一个上升运动区。

4.2 华南季风低压的垂直结构特征

季风低压中低层的流场(图略)显示其中心位于23.6°N、114°E,300 hPa上季风低压环流已不清楚,对流层高层反气旋开始影响低压北部。由此可见,该低压环流的垂直伸展范围约8—9 km,这个结果在一定程度上支持了孔期等^[11]的看法。

在2005年8月19日12:00 UTC沿低压中心所在经度(114°E)的散度(图7a)和涡度(图7b)的垂直剖面图中,低压区的上空是辐合区,辐合的最大值出现在800 hPa以上,较梁必骥等^[13]850 hPa的最大辐合中心要高,最大辐散出现在200 hPa以下。同样的,低压对应的气旋性涡度一直伸展到300 hPa,再往上为反气旋性涡度,这与梁必骥等^[13]的结论是一致的。对流层中低层的气旋性涡度中心和辐合中心对应较好。

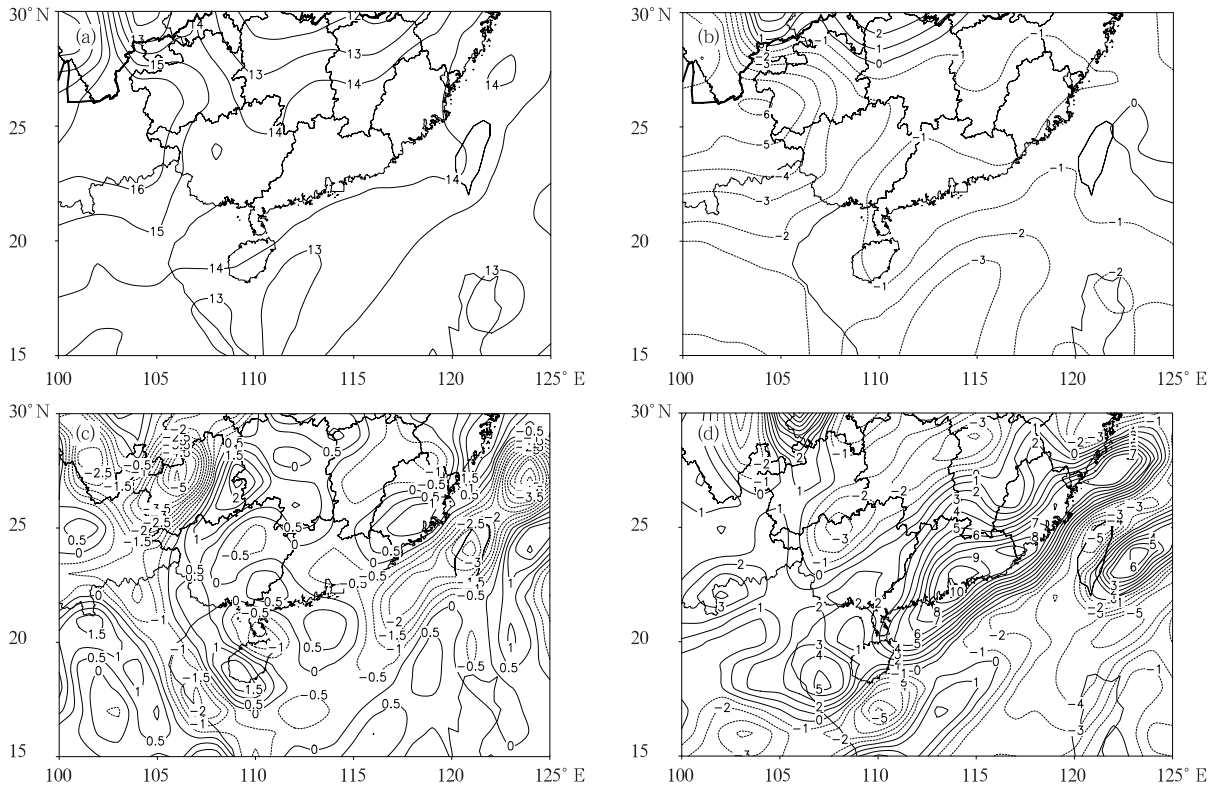


图 6 2005 年 8 月 19 日 12:00 UTC 850 hPa(a)比湿(g/kg)、(b) $\theta_{e,500} - \theta_{e,850}$ (K)、
(c)散度(10^{-5} s^{-1})、(d)涡度(10^{-5} s^{-1})分布

Fig. 6 850 hPa (a) specific humidity (g/kg), (b) $\theta_{e,500} - \theta_{e,850}$ (K), (c) divergence (10^{-5} s^{-1}),
and (d) vorticity (10^{-5} s^{-1}) at 12:00 UTC 19 August 2005

在垂直速度的垂直剖面图(图 7c、d)中,低压中心附近存在强烈的上升运动,上升区可达 300 hPa 以上(较梁必骥等^[13]的 400 hPa 要高,说明这次南海季风低压的上升运动比较旺盛),最强上升速度出现在 700 hPa,且上升运动的极值中心与中低层的低压中心有较好的对应;主要上升运动区位于季风低压的西侧,主要下沉运动区位于低压的东侧,这与孔期等^[11]的结论是一致的。

沿季风低压中心所在位置 114°E 纬向风(图 7e)垂直剖面图表明,低压南侧的西风有两个极值中心,分别位于 800 和 550 hPa,极值为 18 m/s,但高空急流并不明显。东西风带的过渡层约为 300 hPa,此层也标志着低压的垂直伸展范围。在此高度之上,东风随高度加强。低压北侧,东风最大风速位于 800 hPa,极值为 6 m/s,比南侧西风风速的最大值要小。沿季风低压中心所在位置 23.6°N 经向风(图 7f)的垂直剖面图表明:低压所在处基本上是南

北风对吹,低压西侧整层为北风,低压东侧中低层为南风,高层为北风。考虑到经纬向风垂直剖面图(图 7e、f)中零线代表了季风低压的轴线^[11]。纬向风垂直剖面图(图 7e)显示 0 线向南倾斜,经向风垂直剖面图(图 7f)显示 0 线向东倾斜,反映了季风低压的轴线随高度向东南方向倾斜的特点。这与南亚季风低压轴线随高度向西南方向倾斜是不一样的。由此可见,这次华南季风低压与南亚季风低压的结构特征既有相似之处,也有不同的地方。

沿季风低压中心所在经度(114°E)的比湿垂直剖面图及各层的比湿分布图(图略)显示低压区对应一湿舌,低层的湿度较大,高层的湿度较小。

沿季风低压中心所在纬度(23.6°N)的温度离差(取纬向平均)垂直剖面图(图 7g)显示,低压上空对流层中上层几乎都为暖心结构,仅在对流层低层存在一冷区,冷心限于 800 hPa 以下。关于这一点,我们再利用 NOAA-16 卫星 2005 年 8 月 19 日 19:01 UTC

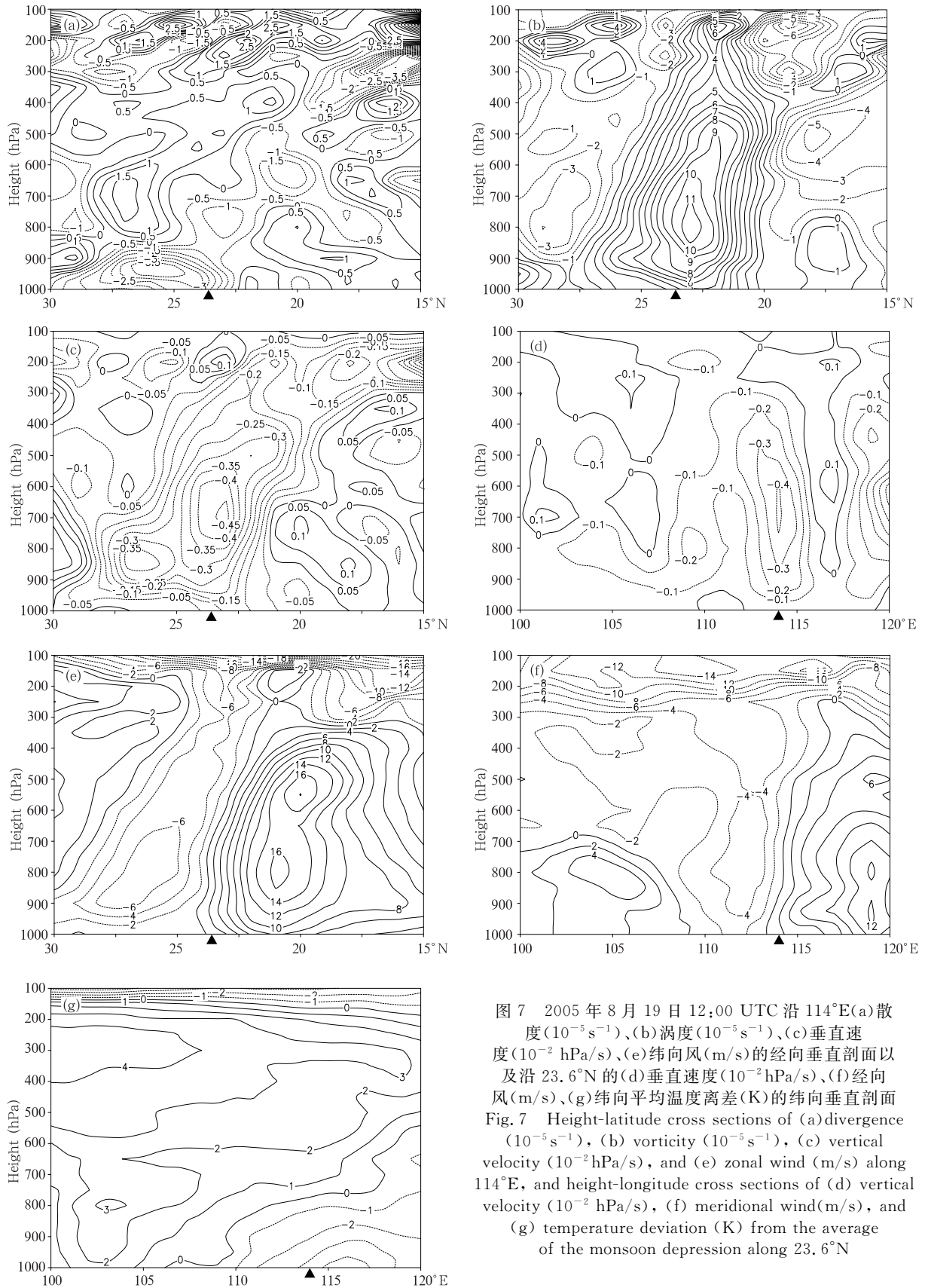


图7 2005年8月19日12:00 UTC沿114°E(a)散度(10^{-5} s^{-1})、(b)涡度(10^{-5} s^{-1})、(c)垂直速度(10^{-2} hPa/s)、(e)纬向风(m/s)的经向垂直剖面以及沿23.6°N的(d)垂直速度(10^{-2} hPa/s)、(f)经向风(m/s)、(g)纬向平均温度离差(K)的纬向垂直剖面
 Fig. 7 Height-latitude cross sections of (a) divergence (10^{-5} s^{-1}), (b) vorticity (10^{-5} s^{-1}), (c) vertical velocity (10^{-2} hPa/s), and (e) zonal wind (m/s) along 114°E, and height-longitude cross sections of (d) vertical velocity (10^{-2} hPa/s), (f) meridional wind (m/s), and (g) temperature deviation (K) from the average of the monsoon depression along 23.6°N

的 ATOVS 资料对该低压的温度结构进行分析(由于轨道过境的问题,只在 8 月 19 日 19:01 UTC 获得了 ATOVS 资料,没有获得季风低压结构最清晰时刻对应的资料),此时低压中心位于 21.7°N 、 113.8°E 。由图 8a 可以看到,低压在 850 hPa 上有两个冷中心,分别位于 21.7°N 、 113.8°E 和 22.7°N 、 114.7°E 。图 8b 为不同层次的温度距平分布,其中

底图为探测点分布图。图中显示:随着高度增加,低压中心逐渐变暖;这从沿低压中心的垂直剖面图(图 8c、d)上也可以清楚地看到:低压上空对流层中上层为暖心结构,在对流层低层为一冷区,从图 8d 上还可以看到低压中心东、西两侧的两个冷区在垂直方向上的伸展高度要低于低压中心,强度也较弱。由此可见,在季风低压发展逐渐减弱的时候,其上暖下

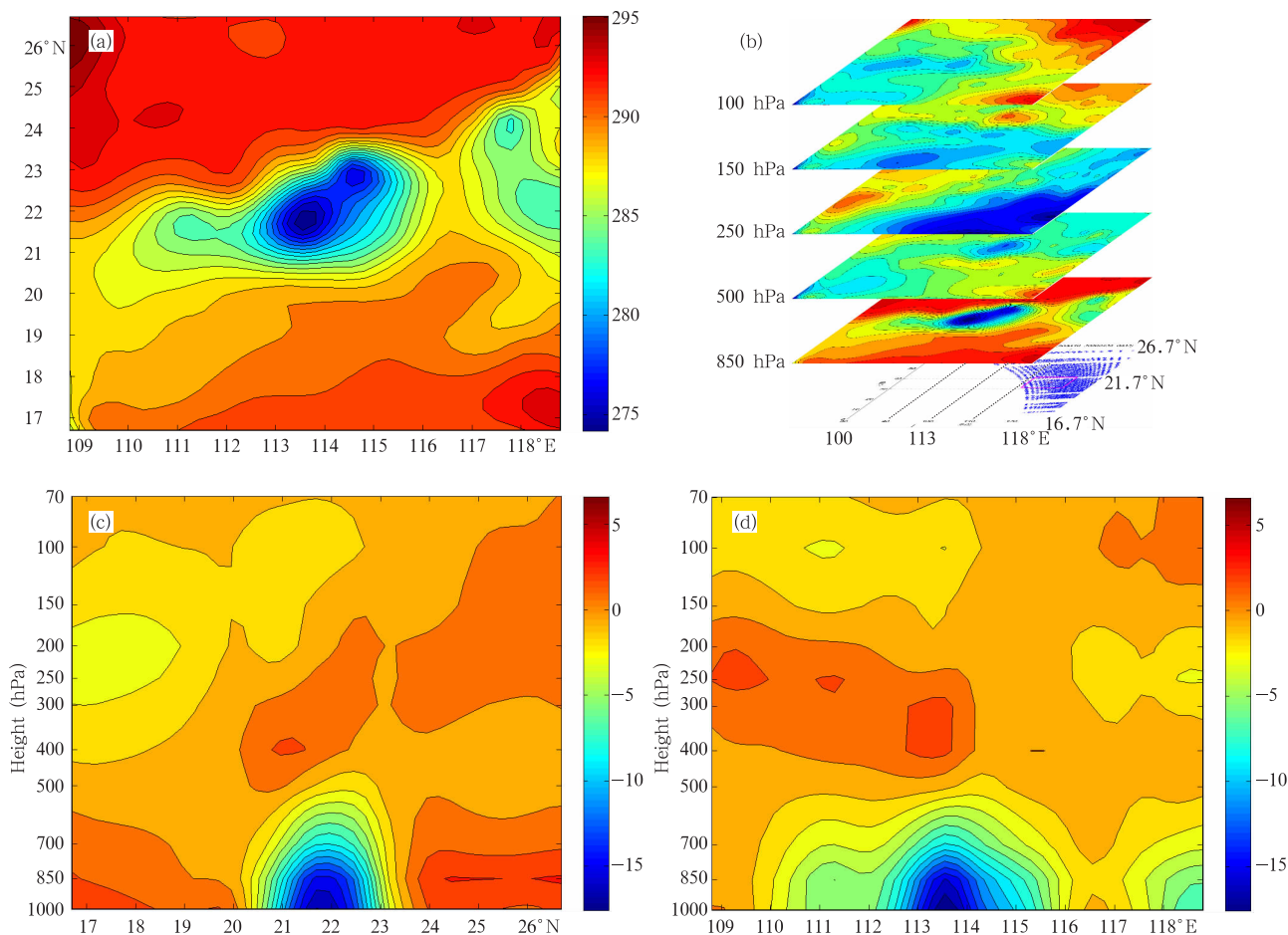


图 8 2005 年 8 月 19 日 19:01 UTC NOAA-16 ATOVS 资料

(a. 850 hPa 温度分布, b. 垂直方向上各个层次的温度距平分布, c. 沿低压中心所在经度(113.8°E)的温度距平垂直剖面图, d. 沿低压中心所在纬度(21.7°N)的温度距平垂直剖面图(单位:K))

Fig. 8 (a) 850 hPa temperature distribution, (b) vertical distributions of temperature deviations at various levels, (c) height-latitude cross section of temperature deviations along 113.8°E across the center of the depression, (d) height-longitude cross section of temperature deviations along 21.7°N across the center of the depression based on the NOAA-16 ATOVS data at 19:01 UTC 19 August 2005(units: K)

冷的结构依然存在,但趋于复杂。

综上所述,在水平和垂直两个方面,华南季风低

压的三维结构具有以下特征:华南季风低压的南侧是一条对流云带,在对流层中低层,季风低压基本上

处于对流不稳定并伴有较强的上升运动;它对应中低层的湿舌、辐合区和很强的正涡度带。在垂直方向上,季风低压在对流层中低层有明显的气旋性环流,在 300 hPa 以上无反映。它对应低层辐合和气旋性涡度,高层辐散和反气旋性涡度。低压的上升气流可达对流层高层,主要上升运动区位于季风低压的西侧,主要下沉运动区位于低压的东侧。低压南侧有低空急流存在;低层冷心,中上层暖心;季风低压的轴线随高度向东南方向倾斜。

由上述的分析,华南季风低压的三维结构概略模型图可能如图 9 所示,其中对流层低层的冷心结构以 850 hPa 上冷色系的凹区表示,而对流层中上层的暖心结构以 500 hPa 上暖色系的上凸区表示,其他结构如图 9 所示。

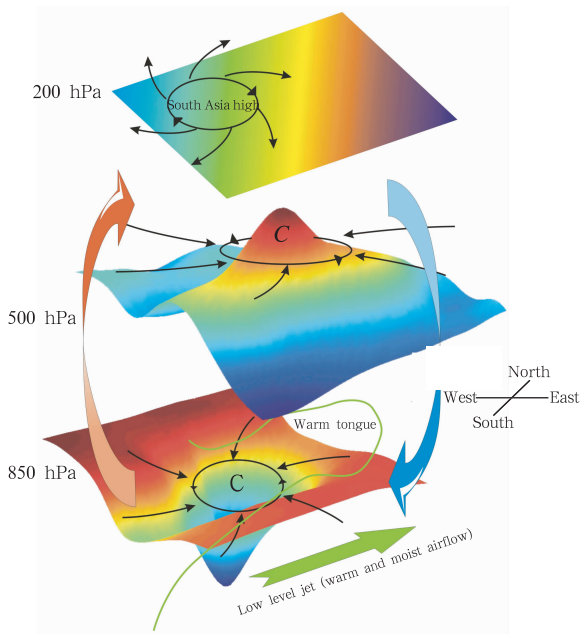


图 9 华南季风低压的三维结构概略模型

Fig. 9 3-D conceptual model for the monsoon depression in South China

上述的分析表明,发生在南海和孟加拉湾的季风低压虽然性质相同,但由于它们所处的环境场条件不同,所以这次华南季风低压与南亚季风低压的结构既有相似之处,也存在差异。如两者都随高度南倾;涡度、散度场比较相似,仅强度上有所不同;低压的上升气流可达对流层高层,上升运动位于低压的西侧,下沉运动位于低压的东侧;低压的热力结构为上暖下冷。但是,不同之处也很明显,如南亚季风

低压一般向西移动,而华南季风低压向东移动;南亚季风低压的轴线随高度向西南方向倾斜,而华南季风低压的轴线随高度向东南方向倾斜。

而这次华南季风低压与梁必骥等^[12-18]季风低压合成结构的共性为:低压环流在对流层中层明显;热力结构、涡度、散度场类似,仅伸展高度有所不同。不同之处为:前者的主要上升运动区位于低压的西侧,主要下沉运动区位于低压的东侧;后者低压中心附近存在强烈的上升运动,在低压周围,特别是其西北侧和东北侧存在明显的下沉运动。

5 华南季风低压与梅雨锋低压的异同

早在 20 世纪 70 年代初人们就发现梅雨锋面上存在一系列连续发展的中尺度对流云团和与之相对应的地面中尺度气旋^[21-26]。在日本 1968—1972 年集中暴雨研究计划期间,提出了在梅雨锋上存在中间尺度系统^[27-28,21],即指在梅雨锋雨带中产生的水平尺度 1000 km 左右(即 α 中尺度)的扰动,这种扰动在对流层低层表现明显,具有上暖下冷的结构特征,它们一般沿梅雨锋向东北方向移动,与中尺度雨带及降水中心有很好的对应关系。赵思雄^[29]在 1988 年就注意到在梅雨锋上存在着两类中尺度低压扰动,一类是时间和空间尺度比较小的中尺度低压,其水平尺度大约 500—1000 km,生命史大约 1 d,它们与梅雨锋上的暴雨中心常有密切关系。对于另一类气旋,它们开始发生时,在梅雨锋上仅为了一小的扰动,而在有利的环境下,扰动增幅,发展为一低压(气旋),尺度可超过 1000 km,生命史可达数日。华南季风低压与梅雨锋上的低压系统分别是造成华南和江南地区强降雨的主要系统,因此我们有必要对两者进行比较,找出它们之间的异同。

我们注意到,从 1999 年 6 月 22 日开始,长江中下游发生长达 10 d 之久的连续性暴雨,每日均出现日雨量大于 100 mm 的特大暴雨,685 mm 的过程降水中心位于浙皖边界的黄山地区。柳俊杰^[30]对 1999 年梅雨锋中的低涡结构及发展机制进行了分析,认为 1999 年 6 月 22 日 00 时到 7 月 2 日 18 时有 3 个低涡影响长江中下游的降水。这里借用柳俊杰^[30]的结果,以 1999 年 6 月 30 日 18:00 UTC 的低涡(表 1 为第 2 个低涡 1999 年 6 月 30 日 18:00 UTC 各个层次低涡中心的位置)为例来研究梅雨锋上低压(涡)系统与华南季风低压结构的异同。

表 1 第 2 个低涡 1999 年 6 月 30 日 18:00 UTC 各个层次低涡中心的位置
Table 1 Positions of the low vortex center at different levels at 18:00 UTC 30 June 1999

层次(hPa)	1000	925	850	700	600	500
纬度(°N)/经度(°E)	30.6/117.6	31.3/117.3	32.0/117.5	32.6/117.1	33.5/118.8	34.8/117.4

对流层中低层水平结构的分析表明(图略):梅雨锋低压基本对应低层的正涡度带、辐合带和上升运动带,低层大气是弱对流不稳定的。

这里我们以 6 月 30 日 18:00 UTC 850 hPa 的低涡中心(32°N,117.5°E)作为梅雨锋低压的中心,做各种物理量的垂直剖面图(图 10)。结果表明:梅雨

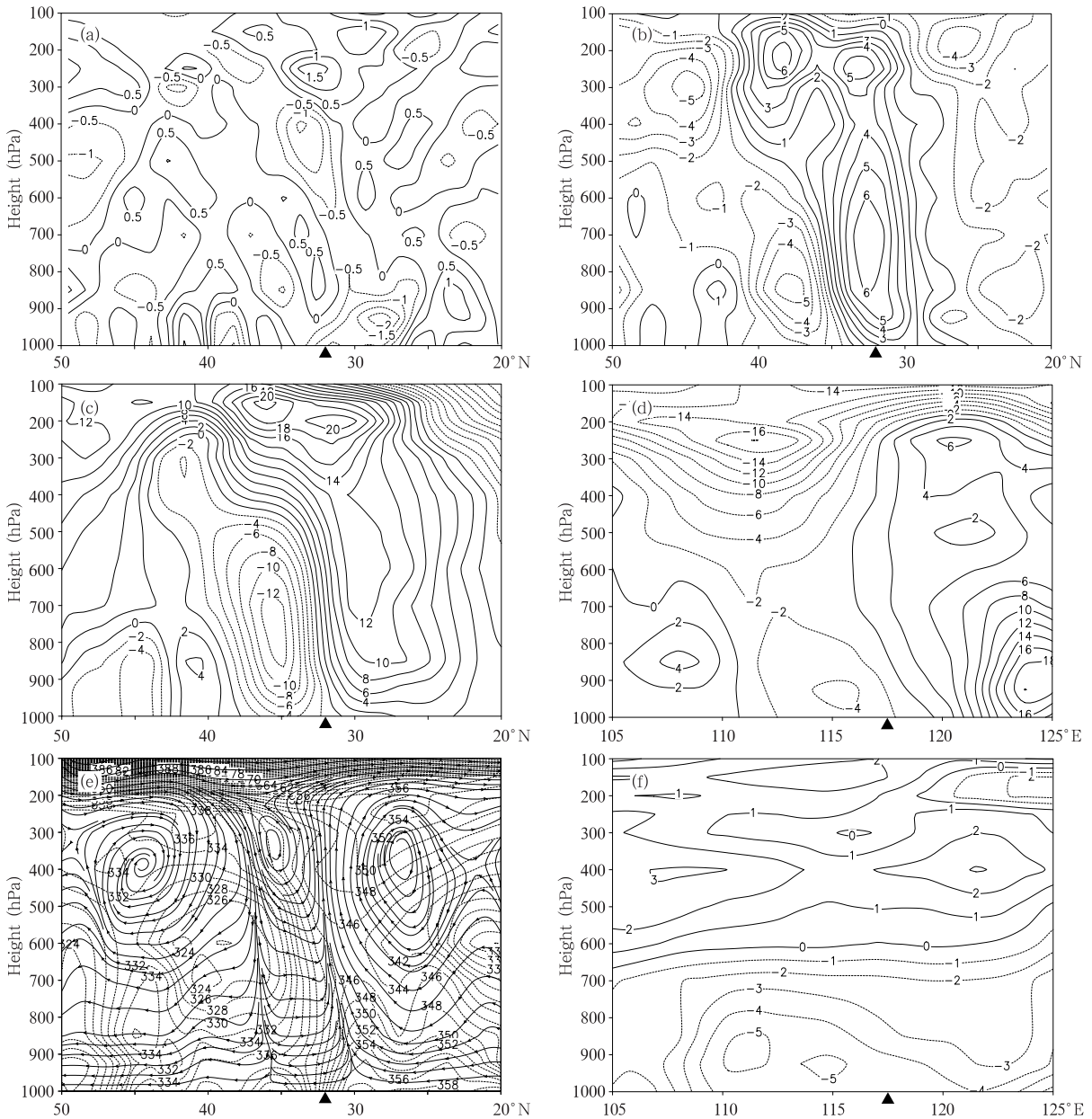


图 10 1999 年 6 月 30 日 18:00 UTC 沿 117.5°E (a)散度($10^{-5} s^{-1}$)(b)涡度($10^{-5} s^{-1}$)(c)纬向风(m/s) (e) θ_e (K)和 $v-w$ (w 放大 10 倍)(m/s)的经向垂直剖面图以及沿 32°N 的(d)经向风(m/s)(f) 纬向平均温度偏差(K)的纬向垂直剖面

Fig. 10 Height-latitude cross sections of (a)divergence ($10^{-5} s^{-1}$), (b) vorticity ($10^{-5} s^{-1}$), (c) zonal wind (m/s), and (e) equivalent potential temperature (dashed line; K) and $v-w$ ($w \times 10$; m/s) along 117.5°E, and height-longitude cross sections of (d) meridional wind (m/s), and (f) temperature deviations from the average of the meiyu front depression (K) along 32°N at 18:00 UTC 30 June 1999

锋低压对应低层辐合、高层辐散,呈正负相间似波状分布的散度中心(图 10a);低压上空 150 hPa 以下为正涡度区,以上为负涡度区(图 10b);并且沿 117.5°E 的纬向风垂直剖面图(图 10c)显示,梅雨锋低压南侧整层为深厚的西风气流,该西风带随高度向北倾,且风速随之加大;低压北侧中低层为东风,高层为西风。沿梅雨锋低压中心所在位置 32°N 的经向风垂直剖面图(图 10d)表明:低压西侧整层为北风,低压东侧中低层为南风,高层为北风,这与华南季风低压是一致的。图 10e 是 θ_e (K) 和 $v-w$ (w 放大 10 倍)沿梅雨锋低压中心所在位置 117.5°E 的经向垂直剖面图,图中一方面表明梅雨锋低压低层大气是弱对流不稳定的,另一方面也表明低压所在处的上升气流可达 200 hPa 甚至以上高度,值得注意的是上升气流在进入对流层高层后折向偏南,并在 22°—25°N 下沉,在对流层中高层梅雨锋低压的南侧形成次级环流,这在华南季风低压中是不存在的,也从另一方面说明了梅雨锋低压的垂直上升运动要强于华南季风低压。沿 32°N 的温度离差(取纬向平均)垂直剖面图(图 10f)表明,低压所在处 650 hPa 以下为冷心,对流层中上层为暖心结构。

由上述分析,梅雨锋低压的水平结构特征可以概括为:在对流层中低层,梅雨锋低压基本对应一正涡度带、辐合带和上升运动带,低层大气基本都是对流不稳定的。在垂直方向上,梅雨锋低压对应低层辐合和正涡度,高层辐散和负涡度;低压的上升气流可达 200 hPa 甚至以上高度,并在对流层中高层梅雨锋低压的南侧形成次级环流。低层冷心,中上层为暖心。

由此,华南季风低压与梅雨锋低压的异同可以概括如下:两者在对流层中低层都表现为一条正涡度带、辐合带和上升运动带,低层大气基本都是对流不稳定的;涡度、散度场类似。在垂直方向上,梅雨锋低压的上升气流可达 200 hPa 甚至以上高度,并在对流层中高层梅雨锋低压的南侧形成次级环流,这在华南季风低压中是不存在的;华南季风低压的主要上升运动区位于低压的西侧,主要下沉运动区位于低压的东侧。梅雨锋低压和华南季风低压都对应上暖下冷的热力结构,但梅雨锋低压冷心的伸展高度要高于华南季风低压。

6 结论与讨论

本文对 2005 年 8 月 19—20 日一次华南季风低

压大暴雨过程进行了诊断分析,讨论了该季风低压的三维结构特征。结果表明,华南季风低压的结构特征不仅与南亚季风低压存在差异,而且与梅雨锋上的低压系统也有所不同。

华南季风低压的主要特点为:低压环流在对流层中低层有明显的气旋性环流,在 300 hPa 以上无反映;季风低压对应低层辐合气旋性涡度、高层辐散反气旋性涡度;低压的上升气流可达对流层高层,主要上升运动区位于季风低压的西侧,主要下沉运动区位于低压的东侧。低压南侧有低空急流存在;低压低层冷心,中上层暖心;季风低压的轴线随高度向东南方向倾斜。

华南季风低压与南亚季风低压的相似之处:两者都随高度南倾,热力结构、涡度、散度场类似;低压的上升气流可达对流层高层,上升运动位于季风低压的西侧,下沉运动位于低压的东侧。差异为:南亚季风低压一般向西移动,而华南低压向东移动;南亚季风低压的轴线随高度向西南方向倾斜,而华南季风低压的轴线随高度向东南方向倾斜。

而华南季风低压与梅雨锋低压的异同可以描述为:两者在对流层中低层都表现为一条正涡度带、辐合带和上升运动带,低层大气基本都是对流不稳定的;涡度、散度场类似。在垂直方向上,华南季风低压对流层中层的环流比低层更加清晰,其伸展高度可达 300 hPa,而梅雨锋低压多为对流层中低层的系统。梅雨锋低压的上升气流可达 200 hPa 甚至以上高度,并在对流层中高层梅雨锋低压的南侧形成次级环流;而华南季风低压的主要上升运动区位于低压的西侧,主要下沉运动区位于低压的东侧。梅雨锋低压和华南季风低压都对应上暖下冷的热力结构,但梅雨锋低压冷心的伸展高度要明显高于华南季风低压。

本文只是针对 2005 年 8 月华南季风低压的结构进行了分析,并将其结构特征与南亚季风低压及 1999 年 6 月梅雨锋低压的结构进行了对比,不能说其结果有广泛的代表性,但分析结果至少说明华南季风低压是一个比较特殊的低压系统。由于不同年份的季风低压和梅雨锋低压可能会有所不同,因此我们还需要更多的个例从理论、诊断分析等方面进行研究。

参考文献

- [1] 高由禧,徐淑英.东亚季风进退与雨季的起迄//中国科学院地

- 球物理研究所编. 东亚季风的若干问题. 北京: 科学出版社, 1962:78-87
- [2] Krishnamurti T N, Kanamitsu M, Godbole R, et al. Study of a monsoon depression (I), Synoptic structure. *J Meteor Soc Japan*, 1975, 53 : 227-240
- [3] Krishnamurti T N, Kanamitsu M, Godbole R, et al. Study of a monsoon depression (II), Dynamical structure. *J Meteor Soc Japan*, 1976, 54 : 208-225
- [4] Godbole R V. The composite structure of the monsoon depression. *Tellus*, 1977, 29 : 25-40
- [5] Daggupaty S M, Sikka D R. On the vorticity budget and vertical velocity distribution associated with the life cycle of a monsoon depression. *J Atmos Sci*, 1977, 34:773-792
- [6] Shukla J. CISK-barotropic-baroclinic instability and the growth of monsoon depressions. *J Atmos Sci*, 1978, 35:495-508
- [7] Nitta T, Murakami M. Three dimensional structure and energy cycles of a monsoon depression developed over the Bay of Bengal. *FGGE Operation Report 9*, 1980:137-144
- [8] Nitta T Masuda. Observational study of a monsoon depression developed over the Bay of Bengal during summer MONEX. *J Meteor Soc Japan*, 1981, 59: 672-682
- [9] Mak M, KAO C-Y J. An instability study of the onset-vortex of the southwest monsoon, 1979. *Tellus*, 1982, 34 : 358-368
- [10] 江敦春. 季风低压角动量收支的研究. *气象学报*, 1987, 45(4): 416-425
- [11] 孔期, 赵思雄. 一次引发南亚大暴雨的季风低压结构、涡度与水汽收支分析. *气候与环境研究*, 2005, 10(3): 526-542
- [12] 邹美恩, 梁必骐. 南海季风低压和南海台风的对比分析. *中山大学学报(自然科学版)*, 1984, 76(2): 91-99
- [13] 梁必骐, 邹美恩, 李勇等. 南海季风低压的活动和结构特征. *热带海洋*, 1985, 4(4): 60-67
- [14] 梁必骐, 刘四臣. 南海季风低压的结构演变和涡度收支. *海洋学报*, 1988, 10(5): 626-634
- [15] 刘四臣, 梁必骐. 南海季风低压发生发展机制的探讨. *中山大学学报(自然科学版)*, 1988, 80(4): 77-88
- [16] 梁必骐, 刘四臣. 加热效应对南海季风低压垂直环流的贡献. *气象学报*, 1989, 47(3): 364-370
- [17] 刘四臣, 梁必骐. 南海季风低压的扰动动能收支. *热带海洋*, 1993, 12(1): 1-8
- [18] 梁必骐. 南海热带大气环流系统. 北京: 气象出版社, 1991: 244pp
- [19] Rusul Ghulam, Qamar-uz-Zaman Chaudhry, Zhao Sixiong, et al. A diagnostic study of heavy rainfall in karachi due to merging of a mesoscale low and a diffused tropical depression during South Asian summer monsoon. *Adv Atmos Sci*, 2005, 22:375-391
- [20] Bhat G S, Gadgil S, Kumar P V V, et al. BOBMEX: The Bay of Bengal Monsoon Experiment. *Bull Amer Meteor Soc*, 2001, 82:2217-2243
- [21] Mastsumoto S, Ninomiya K, Yoshizumi S. Characteristic feature of "Baiu" front associated with the heavy rainfall. *J Meteor Soc Japan*, 1971, 49:267-281
- [22] Ninomiya K, Akiyama T. The development of the medium-scale disturbance in the Baiu front. *J Meteor Soc Japan*, 1971, 49, 663-677
- [23] Ninomiya K, Akiyama T. Medium-scale echo clusters in the Baiu front as revealed by multi-radar composite echo maps, Part 1. *J Meteor Soc Japan*, 1972, 50, 558-569
- [24] Akiyama T. Ageostrophic low-level jet stream in the Baiu season associated with heavy rainfalls over the sea area. *J Meteor Soc Japan*, 1973, 51:205-208
- [25] Akiyama T. The large-scale aspects of the characteristic features of the Baiu front. *Paper Meteor Geophy*, 1973, 24:157-188
- [26] Akiyama T. Frequent occurrence of heavy rainfall along the north side to the level jet stream in the Baiu season. *Paper Meteor Geophy*, 1973, 24:379-388
- [27] Mastsumoto S, Tsuneoka Y. Time lapse composite echo pattern of wave disturbances embedded in the Baiu front. *J Meteor Soc Japan*, 1970, 48:198-203
- [28] Mastsumoto S, Yoshizumi S, Takeuchi M. On the structure of the "Baiu front" and the associated intermediated-scale disturbances in the lower atmosphere. *J Meteor Soc Japan*, 1970, 48:479-491
- [29] Zhao Sixiong. Energetics of cyclogenesis on Meiyu (Baiu) front. *Proceedings of Palmen Memorial Symposium on Extratropical Cyclones*. Helsinki, Finland, 1988:205-209
- [30] 柳俊杰. 梅雨锋中的低涡结构及发展机制分析[D]. 南京气象学院, 2003:140pp

HEAVY RAINFALL ASSOCIATED WITH MONSOON DEPRESSION IN SOUTH CHINA: STRUCTURE ANALYSIS

Jiang Jianying¹ Jiang Jixi¹ Bu Yalin² Liu Nianqing¹

1 National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081

2 Special Meteorological Observatory of Henan Province, Zhengzhou 450003

Abstract

A heavy rainfall associated with the deepening of a monsoon depression happened in the summer of 2005. This process was first diagnosed and analysed and the 3-D structure of the monsoon depression was discussed, then this structure was compared with those of the monsoon depression in South Asia and the depression on the meiyu front. The results show that the heavy rainfall directly resulted from a monsoon depression in South China, and the large-scale environment provided a favorable background for the deepening of the monsoon depression. The 3-D structure of the monsoon depression is as follows: in the horizontal direction, there existed a convective cloud band to the south of the monsoon depression, which lay in a convectively unstable area with relatively strong ascending motion in the mid and low level of the troposphere, and the ascending motion matched well with the moist tongue, and the convergence and strong positive vorticity band in the mid and low level. In the vertical direction, the depression had an obviously cyclonic circulation in the mid and low level of the troposphere, but no cyclonic circulation above the 300 hPa. The monsoon depression corresponded to convergence and positive vorticity in the low level, but to divergence and negative vorticity in the upper level. The upward draft of the depression could reach the upper level of the troposphere in the west of the depression, while the descending motion lay in the east. There was a low-level jet to the south of the depression, while the upper-level jet was not obvious. The depression was vertically warm in the upper level and cold in the low level, and the axis of the depression tilted southeastwards with height, which characteristic is different not only from the monsoon depression in South Asia but also the depression in the meiyu front.

Key words: Monsoon depression, Structure, Heavy rainfall.