

梅雨锋的典型结构、多样性和多尺度特征^{*}

郑永光¹ 陈炯¹ 葛国庆² 朱佩君³

1 国家气象中心,北京,100081

2 CAPS, The University of Oklahoma, USA

3 浙江大学地球科学系,杭州,310027

摘 要

在天气尺度梅雨锋的天气学定义基础上,利用 GMS-5 静止卫星红外云图、常规气象探空资料、NCEP 再分析与最终分析资料对 2002 年长江流域典型梅雨期 6 月 26—28 日和二度梅期间 7 月 23 日、1998 年 5 月梅雨与 7 月二度梅共 4 个梅雨锋个例进行了分析与比较,归纳了梅雨锋结构多样性;并着重对典型梅雨期的梅雨锋发展过程、水平以及垂直结构进行了多种物理量场(包括风场、温度场、急流、锋区、假相当位温、散度、垂直速度、静力稳定度等)的综合分析。结果表明,不同的个例,不同的地区和时期,一次梅雨过程的不同阶段,梅雨锋的结构和性质都有可能不同,它可以从比较接近极锋的性质过渡到接近赤道锋的性质。在水平结构上梅雨锋是在高、低纬度不同尺度的环流系统共同作用下形成的,从而造成了梅雨锋结构具有丰富的多样性。

对典型梅雨锋结构进行综合分析表明梅雨锋对流层中下层锋面由强假相当位温水平梯度形成;梅雨锋南侧为暖湿气团、北侧为变性气团;梅雨锋南面为西南季风、北面为偏东气流;梅雨锋的上升运动和强降水主要发生在梅雨锋的前沿;梅雨锋上方对流层上半部存在与副热带高空急流相配合的高空副热带锋;对流层上部的高空热带东风与副热带高空西风急流构成了梅雨锋降水的高空辐散流场。

根据典型期梅雨锋以及二度梅倾斜型梅雨锋的对流层上、中、下水平环流特征,给出了梅雨锋的多尺度概念模型,主要包括中低纬度系统相互作用、对流层高层的行星尺度的环流系统副热带高空西风急流、高空热带东风急流与南亚高压、对流层中层的副热带高压与北方的短波槽以及对流层低层的行星尺度季风和切变线。

关键词: 梅雨锋,典型,结构,多样性,多尺度性。

1 引 言

梅雨锋降水经常导致江淮流域出现洪涝灾害,特别是 1954、1991、1998、2003、2007 年的梅雨使得江淮流域出现大洪水。从 20 世纪 30 年代竺可桢^[1]、涂长望^[2]就开始了梅雨锋与季风关系的研究,50、60 年代谢义炳^[3]、王作述^[4]分别研究了梅雨锋的热力性质与结构特征,20 世纪 90 年以来涌现出更多的梅雨锋的研究成果。其中张丙辰等^[5]对梅雨锋系统进行了较全面的总结;王建捷与陶诗言^[6]对 1998 年 6 月一次暴雨过程的梅雨锋结构及形成与维持进行了诊断分析;周玉淑等^[7-8]对 1998 年 7 月

二度梅的天气尺度特征与双锋结构的动力与热力特征进行了仔细分析;柳俊杰等^[9]使用 NCEP $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 资料给出了 1999 年一次典型梅雨锋的锋面结构及其示意图。日本和朝鲜半岛也有与中国梅雨相类似的降水集中时段,它们分别被称为“Baiu”和“Chang-Ma”,相关的研究也很多,例如 Matsumoto 等^[10]、Ninomiya^[11-13]、Nagata 和 Ogura^[14]、Kato^[15]等。

谢义炳^[3]把梅雨锋降水归结为两种形式:一种是季风初期及末期的极锋式降水,一种为季风盛期的赤道锋式降水。谢义炳^[16]还提出中国夏季的极锋降水与赤道锋降水可以相互转换。谢义炳^[16]指

^{*} 初稿时间:2007 年 6 月 26 日;修改稿时间:2007 年 8 月 12 日。

资助课题:国家 973 项目(2004CB418300),国家自然科学基金项目(40305004)。

作者简介:郑永光,主要从事中尺度气象学研究。E-mail:zhengyg@cma.gov.cn

出中国盛夏季风降水受高低纬大型天气控制因素的影响,并且高低纬大型天气的变化又有其独立性。Yoshino^[17]根据地面锋区的位置与 500 hPa 纬向风的南北移动把东亚的夏季降水划分为 4 个阶段,第 1 阶段即为我们所称的华南前汛期降水^[18],日本称为梅雨的前兆(forerunner of Baiu);第 2 阶段即为在中国或者日本通称的狭义梅雨的开始阶段;第 3 阶段即为狭义梅雨的鼎盛期;第 4 阶段为 500 hPa 西风回撤至 40°N,标志季风降水结束。雷雨顺等^[19]提出用能量锋来代替(补充)切变线与梅雨锋的概念,并得出梅雨期间能量锋的结构大致有后倾、前倾与铅直 3 种情况。张小玲^[20]等把长江流域与华南地区出现的梅雨锋暴雨归结为 3 类,并对其进行了比较分析。

郑永光等^[21]比较系统地回顾了几十年来对天气尺度梅雨锋的性质和结构进行研究所得到的各种观点。众多文献中列举的有关梅雨锋的观点和名称数量很多,充分说明了梅雨锋的结构具有多样性^[21]。不同的个例,不同的地区和时期,一次梅雨过程的不同阶段,梅雨锋的结构和性质都有可能不同。用一句话来概括地说明梅雨锋的多样性,即为梅雨锋的性质可以从比较接近极锋的性质过渡到接近赤道锋的性质。也就是说,梅雨锋的结构可以有相当大的差别^[21]。

郑永光等^[21]在综合国内外不同观点的基础上,给出了梅雨锋的天气学定义,即:梅雨锋具有一条数千公里长的横贯东亚和西太平洋地区的雨带;梅雨雨带随季风的进退而进退,梅雨锋是季风气团和其他气团之间的锋面;梅雨锋区是位于夏季风北侧的相当位温强梯度带。因此在梅雨锋的天气学定义的基础上,关于梅雨和梅雨锋的地域概念就从早期的长江和淮河流域扩大到华南和台湾地区,时间概念也从 6 月中旬至 7 月上旬扩大到 5 月。由于梅雨锋的天气学定义扩大了梅雨锋的空间与时间范围,因此,梅雨锋的性质有所差异是容易理解的。而且,即使在同一季节和同一地区,由于北半球西风带形势的差异,也会使梅雨锋的性质有所不同。

虽然众多的关于梅雨锋的研究成果都表明梅雨锋有多样性的特点,但大都从一个或几个侧面给出了梅雨锋的一些典型特征,因此多年来并未能形成一个完整的综合的梅雨锋结构概念,所以本文的主要目的就是希望通过对一次比较典型梅雨过程的详

细分析给出一个水平和垂直相互配合的,各种物理量之间(风场、温度场、急流、锋区、位温、切变、散度、垂直速度、静力稳定度等)相互配合的比较完整的典型梅雨锋结构及天气尺度环流概念模型。为了说明梅雨锋结构的多样性以及梅雨锋天气系统水平环流的多尺度特征,本文也给出比较接近极锋性质的梅雨锋和更加接近赤道锋性质的梅雨锋的结构。典型梅雨锋是指气候上 6 月中下旬到 7 月上旬这段时间经常维持在长江中下游一带的梅雨锋;比较接近极锋性质的梅雨锋更多地出现在季风爆发的初期,即 5、6 月间;而更加接近赤道锋性质的梅雨锋则更多地出现在季风的盛期,即 7、8 月间。本文中的个例选自 1998 与 2002 年的梅雨期。

2 资料与方法

本文所用的资料包括常规气象探空资料、NCEP(National Center for Environmental Prediction, 美国环境预报中心)再分析与最终分析(final analyses)资料、日本 GMS-5 地球静止卫星红外云图资料。NCEP 再分析资料每 6 h 1 次,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,对流层内垂直分辨率为 11 个标准等压面;NCEP 最终分析资料的时间分辨率为 6 h 1 次,水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,垂直分辨率 1000—900 hPa 为 25 hPa,900—100 hPa 为 50 hPa。

本文的分析方法为使用 GMS-5 红外云图资料展示梅雨锋的形态及发展过程,然后使用常规气象探空资料、NCEP 再分析与最终分析资料进行多种物理量的诊断来分析梅雨锋的水平结构,并使用沿不同经线垂直剖面的方法综合分析梅雨锋不同阶段的垂直结构。根据对流层高、中、低层的 200, 500, 850 hPa 流场给出了梅雨锋水平结构的多尺度环流模型。

垂直剖面分析中每张剖面图除了给出假相当位温(θ_{se})的分布以决定梅雨锋的位置外,还给出了温度分布,目的是为了考察此次梅雨锋是否具有极锋的性质。另外经向剖面图中还同时给出了纬向风速分量(纬向剖面给出经向风速分量)的分布。之所以没有用全风速的原因是,经向剖面图中纬向风速分量的零值线是东、西风之间的分界线(纬向剖面为南、北风之间的分界线),它不仅清楚地区分出垂直剖面图上高空副热带西风急流和热带东风急流,而且低空的纬向风速分量零线还可以表示梅雨

锋附近低空风场中切变线的垂直轴线,它是梅雨锋结构分析的一个重要组成部分。

剖面图中还分析了高 θ_{se} 区的垂直轴线。它与图中给出的上升运动区相配合,可以反映梅雨锋附近降水带的位置和强度,因为沿着高 θ_{se} 垂直轴线 θ_{se} 垂直方向的梯度非常小,是梅雨降水湿绝热过程中 θ_{se} 守恒的反映。在垂直剖面图上还分析了 θ_{se} 低值区的水平轴线,目的是为了显示对流性不稳定层结大气的厚度,因为在它的下方 θ_{se} 随高度的增加而减小。

需要说明的是,由于没有 1998 年 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 的较高水平分辨率的最终分析资料,因此 1998 年个例使用 NCEP $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 水平分辨率较低的再分析资料作为常规探空资料的补充来进行物理量的客观分析与诊断;2002 年的个例直接使用 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 最终分析资料进行物理量的诊断计算与结构分析,并把常规探空资料作为天气探测实况进行补充显示。

3 2002 年的典型梅雨锋

3.1 个例概况

2002 年 6 月 26—28 日长江流域发生一次典型梅雨过程。27 日 00:00 UTC 的云图上(图略),覆盖长江流域的云带呈明显的波动状,东部向北凸起,

西部向南凸出,类似于气旋发展初期的锋面波动。虽然这是一天中对流活动最不活跃的早晨,但云带中已有明显的对流云团存在,表明大气层结很不稳定。随着午后对流的进一步活跃,入夜后(图 1a 27 日 12:00 UTC 云图)在长江以南形成一条相当典型的纬向的梅雨锋云带,其上有多个对流云团活动。整个梅雨锋云带从中缅边境经长江上游和下游,直到日本。在梅雨锋的发展过程中云带的位置略有南移。

在梅雨锋开始发展的 26 日 12:00 UTC(图略),从印度到长江上游以及华南地区有一个很强的高 θ_{se} 区,其东部为偏南气流所控制,其中在偏南风 and 东南偏东风之间有一条暖锋式的切变线。这时虽然高 θ_{se} 区东北部的等 θ_{se} 线非常密集,但等 θ_{se} 线密集带的走向略呈西北—东南向,和切变线的西南偏西—东南偏东的走向相交,两者并不重合。但是,从 500 hPa 上升运动区的分布看, θ_{se} 的锋区和上升运动区相配合,并且就是云图上对流云团所在的位置。

27 日 00:00 UTC(图略),高 θ_{se} 区向东伸展到长江中游,成为一个东西向的高 θ_{se} 舌。切变线的性质已发生转变,北侧为偏东风,南侧为西南季风,其最大风速达到 18 m/s,成为很强的西南风低空急流。其中 θ_{se} 的锋区走向基本与 26 日 12:00 UTC 接近,变化不大,锋区和切变线并未重合。

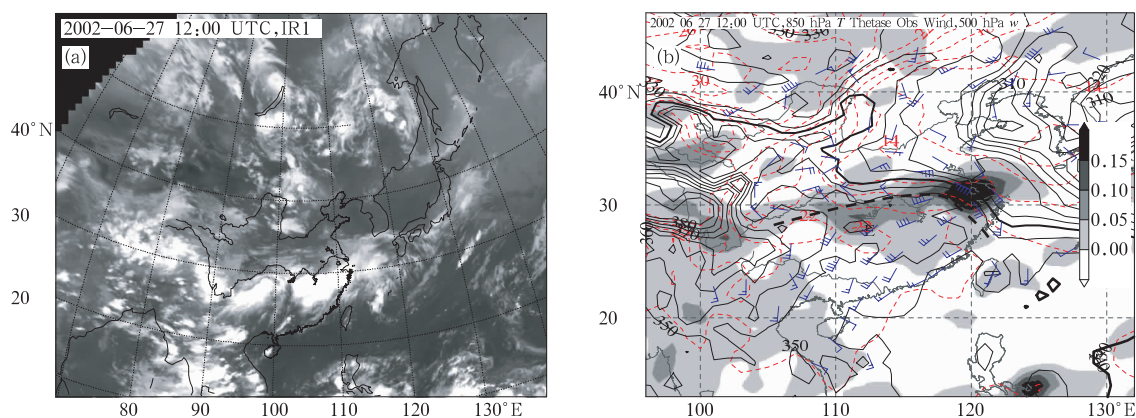


图 1 2002 年 6 月 27 日 12:00 UTC 的 GMS 卫星红外云图(a)与 850、500 hPa 物理量分布(b)

(b 中实线为 850 hPa 等 θ_{se} 线,间隔 5 K,340 K 等值线加粗显示;虚线为 850 hPa 等温线,间隔 2°C ;

粗虚线为 850 hPa 切变线;阴影区为 500 hPa 上升运动区,间隔 0.05 m/s)

Fig. 1 IR cloud image of GMS5 (a) and variables of 850 and 500 hPa (b) at 12:00 UTC 27 June 2002

(solid lines denote isolines of 850 hPa θ_{se} at interval 5 K and thick solid lines the θ_{se} isoline of 340 K;

red dot lines are the isotherm at interval 2°C and thick dash line is the shear line at 850 hPa; and

shaded areas are the 500 hPa upward motion at interval 0.05 m/s)

27 日 12:00 UTC(图 1b),高 θ_{sc} 区向东伸展到长江中游,高 θ_{sc} 舌为东西向。切变线的性质已发生转变,北侧为偏东风,南侧为西南季风,其最大风速达到 18 m/s,成为很强的西南风低空急流。另一个明显的变化是 θ_{sc} 的锋区也转为东西走向,锋区和切变线已接近重合。长江中下游已形成一个典型的東西向的高 θ_{sc} 舌,其北侧的 θ_{sc} 锋区和东西向的切变线及上升运动带相配合,成为一种比较典型的梅雨锋。梅雨锋南侧始终存在很强的西南风低空急流。

需要指出的是,从 850 hPa 的温度分布(图 1b)可以发现,此例梅雨锋的温度对比还比较明显,虽然它比 θ_{sc} 的对比要小得多。也就是说,在此例的梅雨锋北侧存在变性的极地气团。仔细观察图 1b 中的测站风和等温线的变化可以发现,梅雨锋北侧的冷空气是来自东面较冷的中纬度洋面。卫星云图上梅雨锋云带向南缓慢移动也反映了此次梅雨锋发展过程中北方的冷空气活动还有一定的强度。

3.2 垂直结构

从 850 hPa θ_{sc} 场演变(图略)来看这次梅雨锋过程的纬向 θ_{sc} 梯度密集带是从 30° — 35° N 向南移到 30° N 以南,因此本文使用 110° E 和 115° E 两个经向垂直剖面来考察不同地区梅雨锋的垂直结构。

3.2.1 梅雨锋形成前夕的垂直结构

在 26 日 12:00 UTC 110° E 的垂直剖面(图略)上,等 θ_{sc} 线显示在 35° — 40° N 存在一条向北倾斜的贯穿整个对流层的锋区,并有同样是向西倾斜的深厚的上升运动及高相当位温垂直轴线与它配合。等温线在穿越锋区时向上折表明锋区两侧有一定的温度对比。锋区上方西风迅速增大并在对流层 200 hPa 以上出现急流中心,也说明此时的锋面具有比较明显的斜压性。这条斜压锋区表明,这次梅雨锋的形成和西北方渭河和汉水流域有冷空气活动有关。但是锋面未到达地面,仅存在于 850 hPa 以上。接近水平走向的西风分量的零线也表明,低空没有切变线存在。上述剖面结构表明,此时在 110° E 附近梅雨锋还未形成。

在 115° E 的垂直剖面(图略)上,对流层上半部(400 hPa 以上)的高空副热带锋区和急流相当明显。对流层下半部(500 hPa 以下) 27° — 35° N 等 θ_{sc} 线存在有赤道锋性质的向南倾斜,但西风分量零线接近水平,只在对流层底部(850 hPa 以下) 25° N 附近存在向北倾斜的西风分量零线。从上升运动的分

布来看,此时 30° — 35° N 的上升运动还比较微弱。

3.2.2 梅雨锋形成初期的垂直结构

在 850 hPa 纬向的 θ_{sc} 密集带开始形成的 27 日 00:00 UTC,无论是 110° E 还是 115° E 的垂直剖面图(图略)上都出现了明显的梅雨锋结构。在对流层中下部有等 θ_{sc} 线的密集带,而且在 700 hPa 以下都有切变线与锋区相配合,上升运动区呈铅直分布,强度和范围显著增加,显示出梅雨锋已经形成。同时,前面提到的 27 日 00:00 UTC 伴随梅雨锋形成西南季风增强,850 hPa 图上长江以南出现 18 m/s 的西南风低空急流,在剖面图上表现为低空切变线的南侧出现了 5—10 m/s 西风分量。

由于这次梅雨锋的形成和北方的冷空气活动有关,因此虽然梅雨锋已接近垂直状态,但仍略微向北倾斜,表明在梅雨锋形成的初期,它还保留一定的斜压性。这一点从等温线走向的倾斜上也可以看出来。卫星云图上梅雨锋云带出现的波动,可能也与这种斜压性有关。垂直速度的分布则表现为东面 115° E 剖面的较强上升速度区比西面 110° E 剖面分布范围更广。西风分量的经向垂直剖面清楚地显示出梅雨期对流层高层的两支基本气流,一支是中心位于 35° — 40° N 副热带西风急流,另一支是位于 20° — 25° N 热带东风急流。需要指出的是,与梅雨锋向联系的上升运动位于高空东、西风急流的分界线附近靠近西风的一侧。它实际上反映了梅雨雨带的发生和高空南亚高压东端脊线附近西风转为东风的辐散流场有关。

3.2.3 成熟期的梅雨锋垂直结构

到 27 日 12:00 UTC(图 2),850 hPa 上的高 θ_{sc} 舌及其北侧的强 θ_{sc} 梯度、500 hPa 上纬向的上升运动带、卫星云图上梅雨锋云带的纬向特征都更加明显,它们之间的配合显示此时此刻具有最典型的梅雨锋特征。同时从卫星云图上还可以看到,梅雨云带上的中尺度对流系统发展得非常强大(图 1a)。从垂直剖面图(图 2)可以看到,500 hPa 以下对流层下半部的梅雨锋和高空的副热带锋是分离的。梅雨锋的坡度比副热带锋更陡,甚至稍为南倾,说明梅雨锋的斜压性相当弱。而且,此时在 1 km 以下的行星边界层中,梅雨锋是明显向南倾斜的,它显示出在低空梅雨锋已具有赤道锋的性质^[3]。

对流层下部的梅雨锋有东、西风之间的切变线与 θ_{sc} 锋区相配合,对流层上部副热带锋与高空副热

带西风急流相配合。上升运动位于梅雨锋前,并有垂直方向的高 θ_{se} 舌相配合,说明梅雨雨带主要位于梅雨锋的南侧。 115°E (图2)梅雨锋前的较强上升速度区显著大于 110°E (图略),反映了卫星云图上

此处的对流云团较强。梅雨锋的南侧有西南风低空急流。高空副热带西风和热带东风之间为上升运动区。梅雨锋两侧的气团都是对流性不稳定的,但南侧的气团更不稳定。

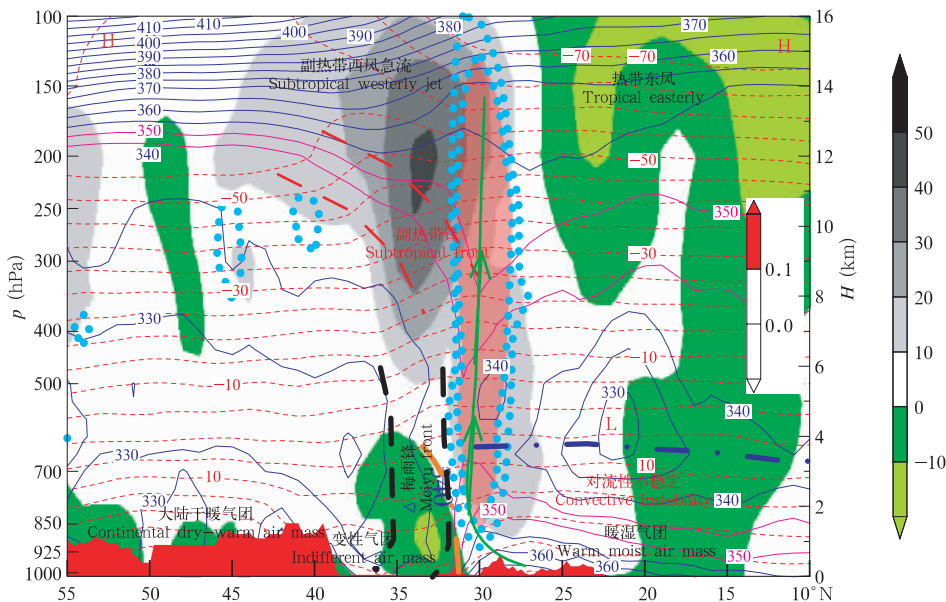


图2 典型梅雨锋的三维结构模型(基于2002年6月27日12:00 UTC沿 115°E 经线的垂直剖面构建)(红色填充区域为地势高度;蓝色粗实线为330,335和340 K的等 θ_{se} 线;粉红色粗实线为345和350 K的等 θ_{se} 线,黑色粗断线为梅雨锋的上、下界,高空副热带锋区的上下界用红色粗断线表示;L和H为 θ_{se} 的小值中心和最大值中心,蓝色粗点划线为低 θ_{se} 区的轴线;红色细虚线为等温线;灰色阴影区和绿色阴影区分别为西风带和东风带,低空的桔黄色粗点划线为东西风的分界线;淡蓝色粗圆点线为上升速度等值线,红色半透明阴影区为上升速度大于0.1 m/s的区域;绿色粗矢线为高、低空 θ_{se} 舌的垂直轴线,代表梅雨降水过程中 θ_{se} 守恒的湿绝热上升运动)

Fig. 2 Three-dimensional structure model for typical Meiyu front constructed based on the vertical cross section along 115°E at 12:00 UTC 27 June 2002 (Red shaded areas are the topography; blue/magenta thick solid lines are the θ_{se} isolines of 330 K, 335 K, 340 K/345 K, 350 K as indicated, respectively; black/red thick dash lines are the upper and lower boundaries of the Meiyu front/upper subtropical front; L/H denotes the minimum/maximum center of θ_{se} and the blue dot line the axis of low θ_{se} ; red thin dot lines are the isotherm at interval 5°C ; gray/green shaded areas are the westerlies/easterlies area, with their boundary orange thick dot-dash lined; thick light blue dot lines are the contour of upward motion with those more than 0.1 m/s semi-transparent red shaded; and the thick green arrow denotes the axis of high θ_{se})

3.2.4 典型梅雨锋垂直结构模型

以上对2002年6月下旬梅雨锋的不同阶段以及东段(115°E)与西段(110°E)的垂直剖面结构特征进行分析表明一次梅雨过程的不同阶段以及梅雨锋的东段与西段,梅雨锋的结构和性质都有所不同。在6月27日12:00 UTC沿 115°E 的经向剖面的基础上归纳出长江中下游典型梅雨期的梅雨锋三维结

构模型(图2)。典型梅雨期梅雨锋三维结构的动力学和热力学特征包括以下几个主要方面:

(1) 梅雨锋的基本特征是对流层中下层(500 hPa以下)的由强 θ_{se} 水平梯度形成的锋面。锋区在等压面图上和垂直剖面图上都表现为等 θ_{se} 线的密集带。在剖面图上梅雨锋的坡度很陡,有时会接近垂直,甚至向南倾斜,特别是在850 hPa以下的行星

边界层内。

(2) 构成梅雨锋的气团是南面的以高 θ_{sc} 为特征的暖湿气团和北面的温度较低、湿度也较小的变性气团。变性气团可以是来自中纬度洋面上温度较低的空气,也可以是变性的陆地极地气团。在这两种情况下,梅雨锋两侧有不同程度的温度对比,剖面图上梅雨锋区内的等温线存在一定程度的倾斜。但是在有的情况下,梅雨锋北面的变性气团被大陆干暖气团所代替,则梅雨锋两侧几乎没有水平温度对比,有时甚至会出现北侧的温度反而高于南侧的现象。

(3) 构成梅雨锋的风场是南面的西南季风和北面的偏东气流。因此,在很多情况下对流层低层(700 hPa 以下)都有切变线(如图 2 中的东西风分量的交界处)和梅雨锋相配合。西南季风的强度常常可达到 12 m/s 以上的低空急流的强度,它携带充沛的水汽向梅雨区输送。

(4) 梅雨锋的上升运动和降水主要发生在梅雨锋的前沿。其原因一方面是由于梅雨锋降水和季风带来的暖湿空气在切变线附近辐合上升,另一方面是由于季风气团低空暖湿空气的高 θ_{sc} 使梅雨锋前的大气层结是对流性不稳定的,有利于对流的发生和发展。

(5) 梅雨锋上方对流层上半部存在高空副热带锋,但它和对流层下半部的梅雨锋并不相连,其位置偏于梅雨锋的南侧。高空副热带锋两侧的温度对比比梅雨锋显著,锋区内等温线的斜率较大,锋区上方

还有西风急流相伴随。高空副热带锋具有明显斜压性的原因可能和梅雨降水释放的潜热对中高层大气的加热有关。

(6) 梅雨雨带南面的对流层上部存在高空热带东风,它与梅雨锋上方的副热带高空西风急流构成了梅雨锋降水的高空辐散流场。

3.3 梅雨锋环流的天气尺度模型

梅雨锋是发生在特定的大气环流背景内的现象,因此它与夏半年北半球行星尺度的大气环流系统有关。同时梅雨锋作为一个水平长度达数千公里的天气系统,它内部又可能包含一些尺度更小的天气系统。张顺利等^[22]提出了影响长江流域梅雨锋降水的 4 个主要系统(环流因子)为副热带高压、季风涌、北方冷空气和来自高原东北侧的 β 中尺度的高原槽。所以,梅雨锋的水平结构显然不仅仅是指梅雨锋本身在对流层下部等压面上的 θ_{sc} 梯度密集带和西南风与偏东风之间的切变线,而是应该包括与梅雨锋区和切变线直接关联的大尺度环流系统以及梅雨锋上的中尺度系统;而且也不仅仅只包括对流层下部,还应该包括对流层上部。因此,梅雨锋的水平环流应该是多尺度同时并存的,高、低空环流相互配合的。与上述垂直结构分析相同,我们也用 2002 年 6 月 27 日 12:00 UTC 为例来说明梅雨锋的天气尺度水平环流结构。图 3 给出了梅雨锋水平环流的天气尺度模型。

图 3 表明对流层高层是 3 个行星尺度的环流系

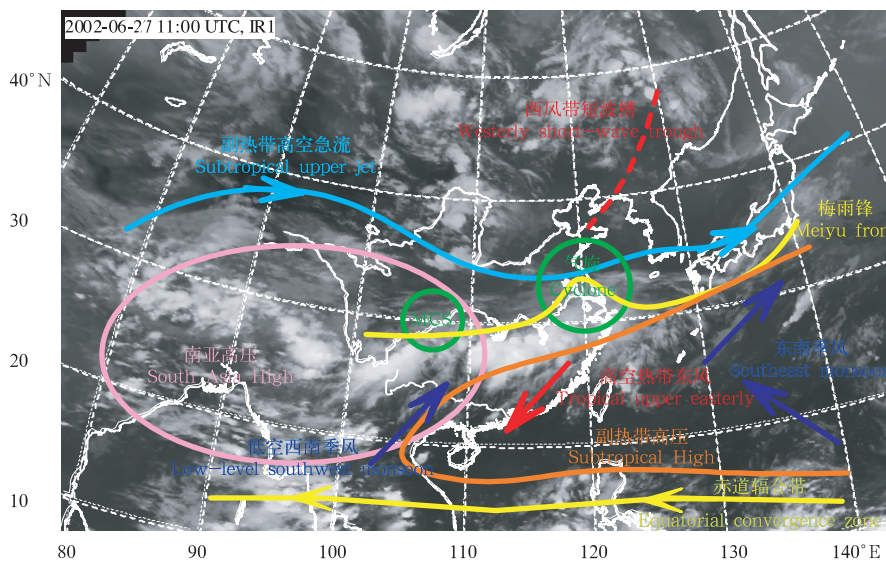


图 3 典型梅雨锋水平环流天气尺度结构模型

Fig. 3 Synoptic-scale horizontal circulation model of typical meiyou front

统:副热带高空西风急流,高空热带东风急流,南亚高压,它们组成的高空辐散流场是梅雨锋上升运动的高空流出机制;对流层中层西太平洋副热带高压,其西北侧的西风带中可能有短波槽活动;对流层低层是行星尺度的西南季风(南海季风和印度季风),天气尺度的西南风低空急流和切变线以及其上的中尺度波动或涡旋,它们一方面使梅雨锋具有很强的 θ_{se} 梯度,同时它们也提供了梅雨降水所需的水汽和低空流场的辐合。

4 2002 年的二度梅倾斜型梅雨锋

4.1 水平垂直结构分析

2002 年 7 月 23 日前后的一次强降水过程是发生在该年长江流域科学试验期间季风盛期的梅雨过程。从时间上看,7 月下旬应属于季风盛期的二度梅降水过程。但是从卫星云图来看(图 4a)降水云带虽然具有梅雨锋云带的共同特征,但云带的走向具有很大的经向成分,呈明显的西南—东北走向,在外表上似乎和梅雨锋云带有很大的差别,因此有必

要考察它的结构和性质。

图 4b 表明,云图中的东北—西南向云带和等 θ_{se} 线密集的锋区相配合,其南面是从中越边境附近向东北方向一直伸展到朝鲜半岛南部的高 θ_{se} 舌的轴线,而且,东北风和西南风之间的切变线就位于锋区的前沿,切变线南侧西南风的强度达到 16 m/s 以上。因此从温湿场和风场看,也具有梅雨锋的特点,只是锋面的走向有很大的经向成分。

由于此例的锋面走向不是纬向的,所以图 5a 与 5b 分别给出了沿 118°E 的经向垂直剖面图和沿 32°N 的纬向垂直剖面图,以考察它的垂直结构。在经向垂直剖面上,锋面的结构和 1998 年的例子(第 5 部分)有一定的相似性,即由于锋面两侧的南北温度对比都很小,因此锋面的坡度很大,只是此例的锋面坡度接近垂直而没有向南倾斜。另为对流层下部东、西风切变线的垂直轴线几乎和锋区下界相重合,但东风的数值很小,因为锋后主要是偏北风;而 1998 年二度梅梅雨锋和切变线的偏离非常显著。

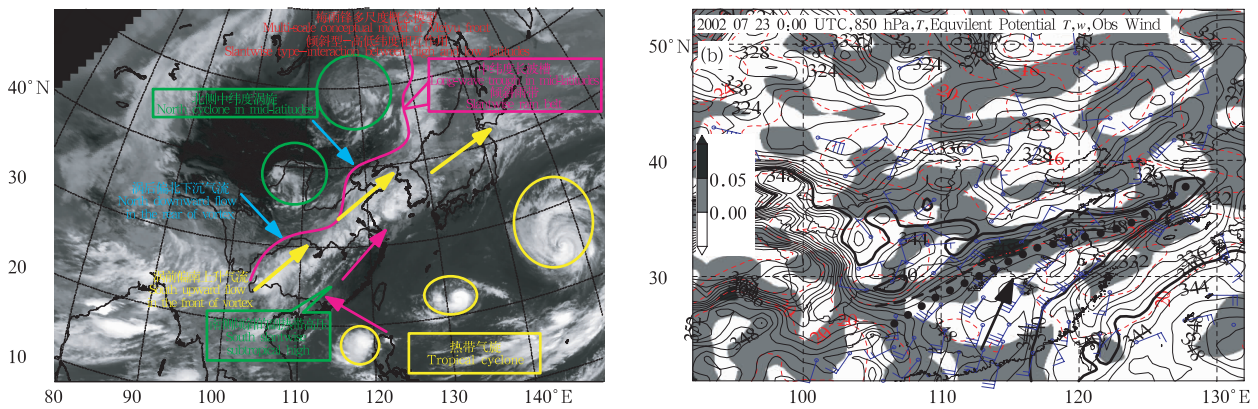


图 4 2002 年 7 月 23 日 03:00 UTC 红外云图及多尺度模型(a)与 00:00 UTC 850 hPa 的温度、 θ_{se} 和风场(b)
(图 b 中红色虚线为等温线,间隔 2 °C; 黑色实线为等 θ_{se} 线,间隔 2 K; 阴影区为上升速度区,间隔 0.05 m/s;
粗断线为切变线;粗点线为高 θ_{se} 舌的轴线;粗箭头为低空急流)

Fig. 4 IR cloud image of GMS5 at 03:00 UTC overlaid with the multi-scale model (a) and 850 hPa temperature, θ_{se} , and wind fields at 00:00 UTC (b) 23 July 2002

(thin red dot lines are the isotherm at interval 2 °C; black solid lines the isoline of θ_{se} at interval 2 K; gray shaded areas the upward motion at interval 0.05 m/s; and the thick dash line is the shear line; the thick dot line the axis of high θ_{se} ; the thick arrow the low level jet)

在纬向垂直剖面上,我们用经向风速分量代替纬向风速分量,所以图 5b 中锋区东西两侧分别为南风 and 北风非常明显,与高空槽两侧的经向风速分布相似。值得注意的是,虽然锋后的偏北风相当显著,

其垂直范围几乎占据整个对流层,但是,锋区两侧并未表现出有明显的温度对比,因此锋面的坡度仍是很大,只是略微有一点向西倾斜。

从上述的垂直剖面分析可见,2002 年 7 月下旬

走向具有明显的经向成分的锋面仍属于季风盛期的梅雨锋,其性质接近于赤道锋,锋面两侧的温度对比很小,锋面坡度接近直立状态,即虽然其锋后有明显

的偏北风,但可能因时值盛夏,冷空气活动并不显著。不过在图 5b 中我们注意到,对流层中层的锋区并未到达地面,在 850 hPa 以下有一个小的低

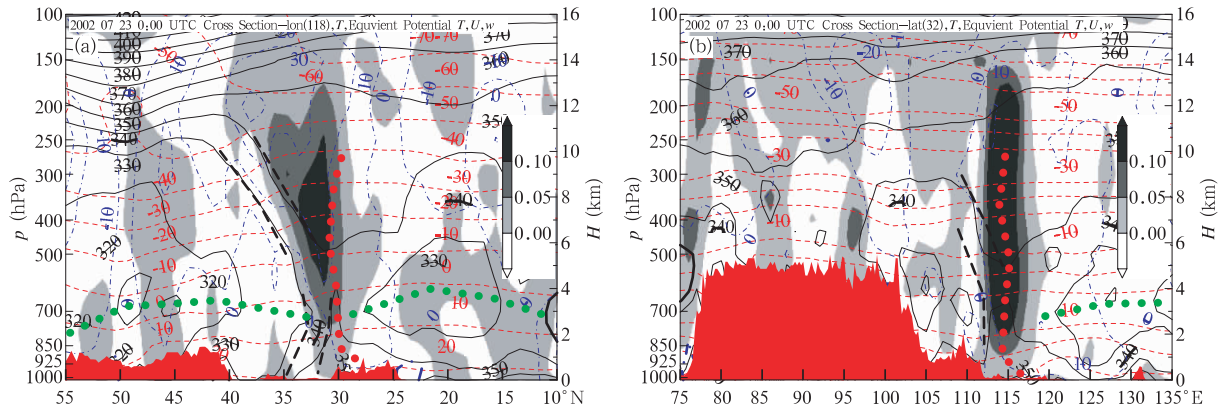


图 5 2002 年 7 月 23 日 00:00 UTC 沿 118°E 的经向垂直剖面(a)与沿 32°N 的纬向垂直剖面(b)

(图形下方红色填充区域为地势高度;等温线为红色细虚线,间隔 5 °C;等 θ_{se} 线为黑色细实线,间隔 5 K,340 K 加粗显示;阴影区为上升速度区,间隔 0.05 m/s;粗虚线为梅雨锋或高空副热带锋的上、下界;红色点线为高 θ_{se} 舌的垂直轴线;绿色点线为低 θ_{se} 区的水平轴线;经向剖面中蓝色点划线为纬向风速分量等值线,纬向剖面中蓝色点划线为经向风速分量等值线,间隔 10 m/s)

Fig. 5 Vertical cross sections along (a) 118°E and (b) 32°N at 00:00 UTC 23 July 2002

(Red shaded areas are the topography; red thin dot lines are the isotherm at interval 5 °C; isolines of θ_{se} are black thin solid lined at interval 5 K, with the 340 K isoline thick solid lined; gray shaded areas are the upward motions at interval 0.05 m/s; thick dash line are the upper and lower boundaries of the meiyu front or the upper subtropical front; the thick red/green dot line is the axis of high/low θ_{se} ; the blue dot-dash line in a/b is the isoline of zonal/meridional wind component at interval 10 m/s with the zero isoline thick lined)

θ_{se} 区,等温线的走向也表现出一定程度的倾斜,因此或许在近地面的 1 km 之内还是有比较明显的冷空气活动。这点还有待今后进行仔细的分析。

4.2 水平流场的多尺度结构

此例一方面说明在季风盛期具有明显的经向成分的锋面也具有梅雨锋的性质,同时从前面的云图(图 4a)中可以发现,它也说明在水平结构上,梅雨锋不仅是多尺度的,而且是高纬度和低纬度环流系统联合作用下的产物。图 6 所给出的 500 hPa 环流形势可以很好地说明这一点。图中东亚地区的大尺度环流形势清楚地表明倾斜的梅雨锋和经向度非常发达的中纬度西风带的长波槽、脊,及东北—西南走向的西太平洋副热带高压的长轴相联系的。长波槽中的 3 个涡旋与梅雨锋带的 3 个波动配合得相当一致,充分地显示出梅雨锋上的扰动也是中低纬度环流系统相互作用的产物。

总结相应的云图动画以及图 4a 表明,梅雨锋暴雨发生在中低纬系统交界处;在高纬度为长波

槽;中纬度为梅雨锋与短波槽,以及中尺度云团;在低纬度为副热带高压和热带气旋(台风)。其中的中纬度东北—西南向长波尺度倾斜雨带整个系统缓

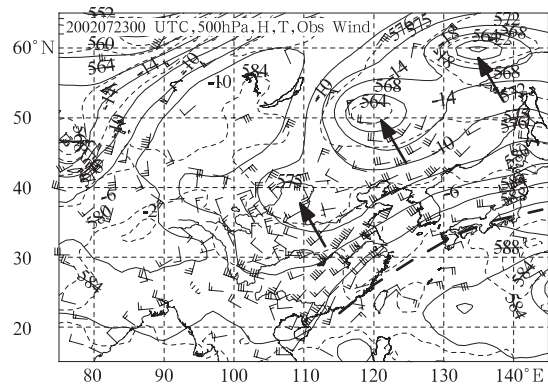


图 6 2002 年 7 月 23 日 00:00 UTC 500 hPa 的高

度场、温度场和风场(粗箭头指向低涡环流)

Fig. 6 500 hPa height, temperature and wind fields at 00:00 UTC 23 July 2002

(thick arrows denote the circulations of low vortices and the thick dash line the shear line)

慢东移；雨带包含的 3 个短波扰动，快速北移；在雨带北侧有 2 个低涡，涡后有偏北下沉气流，涡前有偏南上升气流；雨带南侧为倾斜的副热带高压；在低纬度有 3 个热带气旋；中尺度对流雨团发生在中、低纬系统交界处。

5 1998 年二度梅雨锋

1998 年的梅雨是半个世纪来最强的几次之一，其中 7 月下旬的二度梅尤其突出，湖北东部创造了 1 h 雨量超过 80 mm 的记录。本文以 1998 年 7 月 22 日为例来说明二度梅期间梅雨锋的性质。

仅用图 7a 所给出的卫星红外云图就可以基本认定 1998 年 7 月 22 日长江中下游的降水属于梅雨

锋降水。其理由是：(1) 有一条西起 105°E、东至 145°E 的长达数千公里的纬向云带；(2) 其南侧有许多西南—东北走向的对流云线，它们可追溯到南海北部和孟加拉湾，表明雨带与西南季风相联系；(3) 雨带的南面是西太平洋副热带高压的晴空区，说明它不是赤道辐合带的云带。因此它符合文献 [21] 中归纳出的梅雨锋的前两个条件。

梅雨锋的第 3 个条件是梅雨锋是高温高湿舌北侧的 θ_{se} 强梯度带。在图 7b 所给的 850 hPa 分布图上可以清楚地看到从印度东北部经长江上游一直向东延伸到东海的一条高 θ_{se} 舌，其北侧有一条等 θ_{se} 线的密集带。所以它也具备了梅雨锋的第 3 个条件。

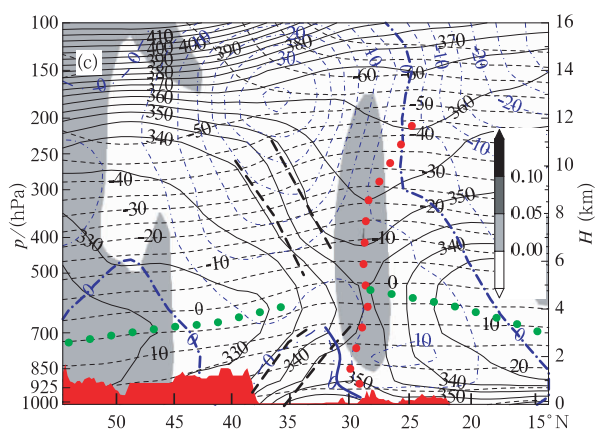
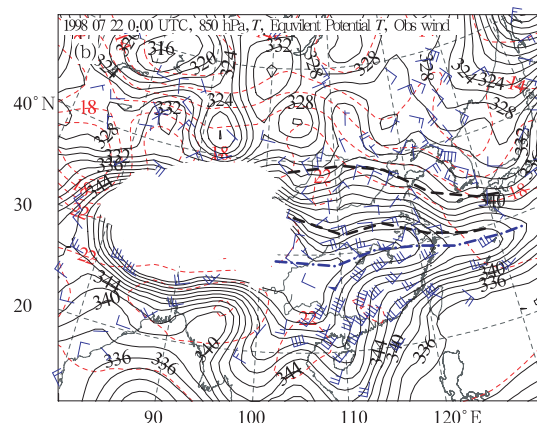
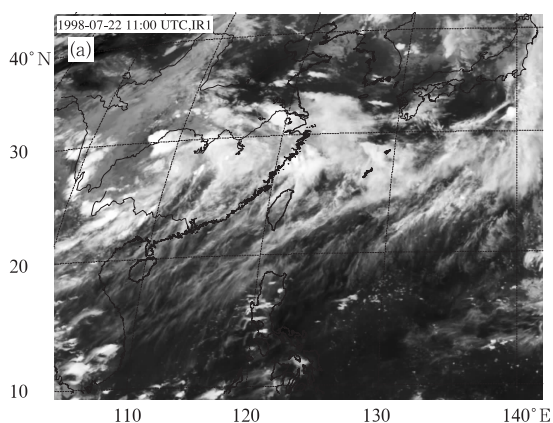


图 7 1998 年 7 月 22 日 11:00 UTC 红外云图(a)与 00:00 UTC 850 hPa 温度场、 θ_{se} 场和风场(b)以及沿 115°E 的垂直剖面(c)
(b 图中实线为等 θ_{se} 线, 间隔 2 K; 细虚线为等温线, 间隔 2 °C; 粗断线为梅雨锋区; 粗点划线为高相当位温轴线, 同时也是西南风和偏东风之间的切变线; c 图说明同图 5a, 其中东、西风分界处的蓝色粗线代表切变线的垂直轴)

Fig. 7 (a) IR cloud image of GMS5 at 11:00 UTC, (b) 850 hPa temperature, θ_{se} and wind fields at 00:00 UTC, and (c) vertical cross section along 115°E on 22 July 1998
(In b θ_{se} isolines/isotherms are black solid/red dot lined at interval 2 K/2 °C, respectively, the thick dash line is the Meiyu front, and the thick dot-dash line the axis of high θ_{se} as well as the wind shear line; and the labeling conventions in c are the same as in Fig. 5a, and the thick blue line denotes the vertical axis of the shear line)

但是需要强调指出的是, 图中的高 θ_{se} 轴线, 同时也是西南风和偏东风之间的切变线, 它位于等 θ_{se} 线的密集带的南边, 两者相距达 500 km 左右, 但它和云图中的云带位置相重合。换言之, 等 θ_{se} 的锋区和雨带及切变线分离得很远, 降水完全发生在梅雨锋的锋前。此外还可看到, 在整个高 θ_{se} 舌中, 甚至

包括其北侧的等 θ_{se} 线密集带, 几乎没有一条等温线, 直到 40°N 以北才有数条等温线。它说明在整个长江流域和黄河中下游的温度非常均匀, 等 θ_{se} 锋区几乎完全是由湿度对比造成的。因此, 从这两点就反映出季风盛期梅雨锋和季风爆发初期的梅雨锋及典型梅雨锋之间是存在显著差异的。

图 7c 的沿 115°E 的垂直剖面图可以很清楚地说明季风盛期二度梅的梅雨锋和季风爆发初期的梅雨锋及典型梅雨锋之间是有很大的不同的,它具有明显的赤道锋的性质。它们之间的主要差别表现为对流层下部的梅雨锋区是向南倾斜的,而对流层上部的高空副热带锋区仍是向北倾斜的。其次是对流层低层的切变线与梅雨锋相距较远,两者不相配合,切变线的垂直轴线整体上呈向北倾斜。第三是上升运动区位于切变线的上方,因此降水区位于梅雨锋的南面,与低层的梅雨锋相距较远。

6 季风爆发初期的梅雨锋

在 1998 年华南暴雨试验的暴雨外场观测期间捕捉到的 5 月 23—24 日的暴雨过程,是一次比较典型的季风爆发初期的梅雨锋个例。在 850 hPa 图(图 8)上和垂直剖面图(图 9)上都可以看到密集的等 θ_{se} 线所构成的锋区(图中的粗虚线)。垂直剖面图上等温线的走向和折角表明,锋区两侧存在明显的温度对比,因此它具有明显的极锋的特征,锋区向北倾斜,并一直向上延伸到 10 km 左右高度的对流

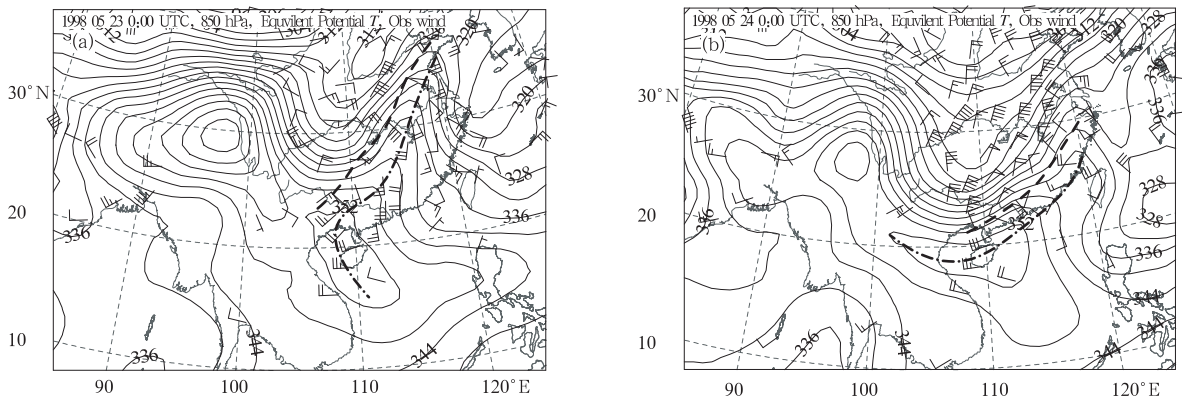


图 8 1998 年 5 月 850 hPa 等压面 θ_{se} 分布

(a. 23 日 00:00 UTC, b. 24 日 00:00 UTC; 等值线间隔 4 K, 图中断线为切变线, 点划线为高 θ_{se} 舌的轴线)

Fig. 8 850 hPa θ_{se} distributions at interval 4 K at (a) 00:00 UTC on 23 and (b) 00:00 UTC on 24 May 1998 (the thick dash line is the shear line, and the thick dot-dash line the axis of high θ_{se})

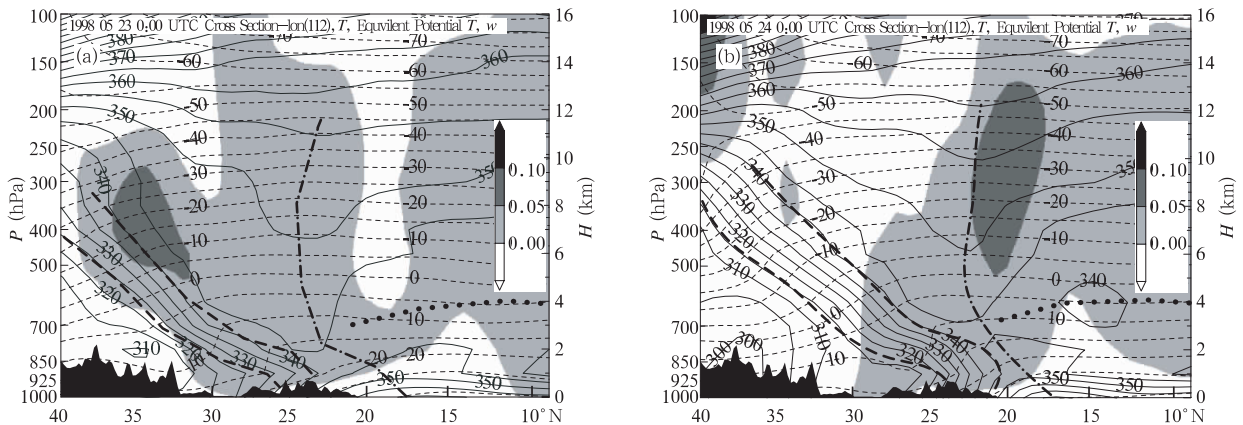


图 9 时间与图 8 相同, 但为沿 112°E 经线的垂直剖面

(图中等温度为虚线, 间隔 5 °C; 等 θ_{se} 线为实线, 间隔 5 K; 阴影区为上升速度区, 间隔 0.05 m/s; 粗断线为锋区上、下界; 点划线为高 θ_{se} 区的垂直轴线; 点线为低 θ_{se} 区的水平轴线, 其下方大气层结为对流性不稳定)

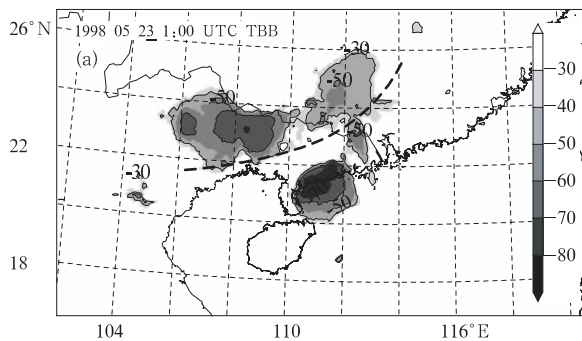
Fig. 9 Vertical cross sections along 112°E at (a) 00:00 UTC on 23 and (b) 00:00 UTC on 24 May 1998

(Black shaded areas are the topography; thin dot lines the isotherm at interval 5 °C; thin black solid lines the θ_{se} isoline at interval 5 K; gray shaded areas the upward motion at interval 0.05 m/s; thick dash lines the upper and lower boundaries of the front; thick dot-dash lines the axis of high θ_{se} ; and thick dot lines the horizontal axis of low θ_{se} under which the atmospheric stratification is convectively unstable)

层顶。从 23 日到 24 日锋面有明显的向南移动。

850 hPa 图(图 8)和垂直剖面图(图 9)上用点划线标出的高 θ_{se} 的脊线显示梅雨锋区前和梅雨锋上方的暖而湿的季风气团。剖面图(图 9)上高 θ_{se} 舌的垂直轴线在 700 hPa 以下也向北倾斜,反映了低层季风气团在锋面上的爬升。在 700 hPa 以上,高 θ_{se} 舌的轴线变为垂直向上,而且 θ_{se} 的垂直梯度非常小,反映了在锋面上方降水的湿绝热过程中 θ_{se} 接近守恒。从图中用点虚线标出的低 θ_{se} 区的水平轴线可以看出,梅雨锋前季风气团 600 hPa 以下 θ_{se} 随高度减小,因而是对流性不稳定的,是产生对流性强降水所必须具备的条件。

这两个时次锋面附近的垂直速度分布有所不同,23 日最强的上升运动主要位于地面锋区的后面,高空锋区的上方,显示出此时锋面所伴随的上升运动主要是与锋面的斜压性有关。而 24 日最强的上升运动主要位于锋区前端的上方,上升运动中心下方为季风气团的高 θ_{se} 舌,因此这种锋面所伴随的上升运动可能还和对流有关。



GMS-5 卫星红外云图的 TBB 分布(图 10)表明在季风爆发初期,梅雨锋的锋面上和锋面前均有强大的 α 中尺度或 β 中尺度对流系统发生。但从 23 日和 24 日两天云图的对比可以发现,23 日的降水主要发生在锋后,而 24 日的降水主要发生在锋前。它与两天剖面图上的垂直速度分布的变化是一致的。

对比 24 h 前后的两张垂直剖面图不难看到,最强的上升运动区从锋后向锋前的移动,以及锋面的坡度和高 θ_{se} 舌的垂直轴线都有一定程度的变陡。它可能反映了季风爆发初期的梅雨锋在向南移动过程中,其性质有从极锋向赤道锋转变的趋势。

在华南暴雨科学试验的研究中^[23],曾经对这个个例进行了数值模拟研究,并根据模式输出的数据制作了季风爆发初期梅雨锋的三维结构的虚拟图像,它清楚地展示了季风爆发初期具有极锋性质的梅雨锋向冷气团方向的倾斜,以及梅雨锋前季风气团的对流性不稳定层结和由此产生的梅雨锋上和梅雨锋前的中尺度对流系统。

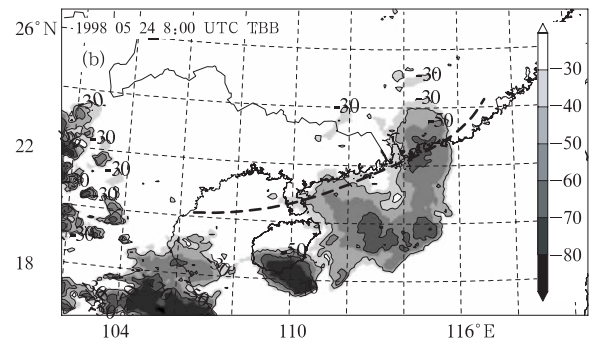


图 10 1998 年 5 月 GMS 卫星红外云图的 TBB 分布

(a. 23 日 01:00 UTC, b. 24 日 08:00 UTC; TBB 等值线从 -30°C 开始, 间隔为 10°C ; 图中粗断线表示锋面的位置)

Fig. 10 IR TBB distributions of GMS5 at (a) 01:00 UTC 23 and (b) 08:00 UTC 24 May 1998

(TBB isolines started from -30°C at interval 10°C , and thick dash lines denote the front position)

7 结论与讨论

以根据国内外各种不同观点综合的一个比较具有普适性的梅雨锋天气学定义^[21]为标准,对 2002 年期间的梅雨锋和 1998 年长江特大洪水期间和华南暴雨科学试验期间的梅雨锋进行了详细的诊断分析,本文从中挑选若干具有代表性的个例,揭示了梅雨锋的典型结构、梅雨锋结构的多尺度性以及梅雨锋结构的多样性。虽然 Yoshino 把东亚初夏的降水

根据地面锋与 500 hPa 纬向风的位置划分为 4 个阶段^[17],其中的第 1—3 阶段也体现了一定的梅雨锋多样性特征,但本文所挑选的个例既表明梅雨锋在夏季风向北推进的不同阶段具有不同的特征,也表明相同阶段不同的个例也有不同的表现特征,例如 1998 年与 2002 年二度梅的个例。

根据典型梅雨锋过程多种物理量场(包括风场、温度场、急流、锋区、假相当位温、散度、垂直速度、静力稳定度等)的相互配置特征,总结出典型梅雨锋三

维结构的综合动力学和热力学特征(图 2)主要包括以下几个主要方面:① 梅雨锋的基本特征是对流层中下层的由强 θ_{se} 水平梯度形成的锋面;② 构成梅雨锋的气团是南面的以高 θ_{se} 为特征的暖湿气团和北面的温度较低、湿度也较小的变性气团;③ 构成梅雨锋的风场是南面的西南季风和北面的偏东气流。④ 梅雨锋的上升运动和降水主要发生在梅雨锋的前沿。⑤ 梅雨锋上方对流层上半部存在高空副热带锋,但它和对流层下半部的梅雨锋并不相连,其位置偏于梅雨锋的南侧。⑥ 梅雨雨带南面的对流层上部存在高空热带东风,它与梅雨锋上方的副热带高空西风急流构成了梅雨锋降水的高空辐散流场。

对比本文获得的典型梅雨期梅雨锋垂直结构与文献[9]给出的梅雨锋面示意图,二者的基本特征是一致的,但文献[9]中的示意图并没有给出梅雨锋环流的高低空风场配置关系。此外,在文献[9]中作者认为高空副热带锋是梅雨锋的一部分,我们的观点有所不同。原因主要是高空副热带锋一般与副热带急流相伴随,这被称为急流-锋系。因此本文给出副热带高空锋的出发点是强调急流和锋区在垂直方向上的合理配置,它们符合热成风关系。

本文归纳出了以下 3 种与典型梅雨锋不同的梅雨锋:① 呈东北-西南走向但斜压性很小,锋面坡度接近垂直的斜向型(经向型)梅雨锋,它突出体现了梅雨锋是高低纬度环流系统联合作用下的产物;② 季风盛期(二度梅期间)斜压性非常小,锋面坡度接近垂直甚至向南倾斜的具有赤道锋性质的梅雨锋;③ 季风爆发初期斜压性较强,锋面坡度较小的具有极锋性质的梅雨锋。这 3 种梅雨锋的结构在锋面的走向、坡度,温度对比的大小,东、西风之间的切变线的配置等都存在一定程度的差别,从而形成了梅雨锋结构的多样性。

梅雨锋的水平结构不仅仅指梅雨锋本身,而且包括与梅雨锋区和切变线直接关联的大尺度环流系统以及梅雨锋上的中尺度系统;而且不仅包括对流层下部,还应该包括对流层上部。从典型梅雨锋与二度梅梅雨锋环流系统总结的梅雨锋水平环流的多尺度结构表现在:① 对流层高层是 3 个行星尺度的环流系统,它们是南亚副热带高压、副热带西风急流、热带东风气流;② 对流层中层是西太平洋副热带高压,其西北侧的西风带中可能有短波槽或者低涡活动;③ 对流层低层是行星尺度的季风,天气尺

度的西南风低空急流和切变线及其上的中尺度波动或涡旋。

参考文献

- [1] 竺可桢. 东南季风与中国之雨量. 地理学报, 1934, 1(1): 1-27
- [2] 涂长望. 中国之气团. 中央研究院气象研究所集刊, 1938, 12(1): 2
- [3] 谢义炳. 中国夏半年几种降水天气系统的分析研究. 气象学报, 1956, 27(1): 1-23
- [4] 王作述. 一次江淮流域切变线过程的环流结构. 气象学报, 1963, 33(2): 189-204
- [5] 张丙辰, 章震越. 长江中下游梅雨锋暴雨研究. 北京: 气象出版社, 1990: 1-272
- [6] 王建捷, 陶诗言. 1998 年梅雨锋的结构特征及形成与维持. 应用气象学报, 2002, 13(5): 526-534
- [7] Zhou Y, Deng G, Chen H, et al. Synoptic features of the second Meiyu period in 1998 over China. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 19(1): 31-42
- [8] Zhou Y, Deng G, Lei T, et al. The thermodynamic and dynamical features of double front structures during 21-31 July 1998 in China. Adv Atmos Sci, 2005, 22(6): 924-935
- [9] 柳俊杰, 丁一汇, 何金海. 一次典型梅雨锋结构分析. 气象学报, 2003, 61(3): 291-301
- [10] Matsumoto S, Ninomiya K, Yoshizumi S. Characteristic features of Baiu front associated with heavy rainfall. J Meteor Soc Japan, 1971, 49: 267-281
- [11] Ninomiya K. Characteristics of Baiu front as a predominant subtropical front in the summer northern hemisphere. J Meteor Soc Japan, 1984, 62: 880-893
- [12] Ninomiya K. Moisture balance over China and the South China Sea during the summer monsoon in 1991 in relation to the intense rainfalls over China. J Meteor Soc Japan, 1999, 77: 735-751
- [13] Ninomiya K. Large- and meso-scale characteristics of Mei-yu Baiu front associated with intense rainfalls in 1-10 July 1991. J Meteor Soc Japan, 2000, 78(1): 141-157
- [14] Nagata M, Ogura Y. A modeling case study of interaction between heavy precipitation and a LLJ over Japan in the Baiu season. Mon Wea Rev, 1991, 119: 1309-1336
- [15] Kato K. Seasonal transition of the lower-level circulation systems around the Baiu front in China in 1979 and its relation to the northern summer monsoon. J Meteor Soc Japan, 1989, 67: 249-265
- [16] 谢义炳. 谢义炳文集. 北京: 北京大学出版社, 1997: 169-189
- [17] Yoshino M. Four stages of the rainy season in early summer over East Asia. Part I. J Meteor Soc Japan, 1965, 43: 231-245
- [18] 陶诗言. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980: 91-120

- [19] 雷雨顺, 吴正华, 张兰香. 产生暴雨的三种能量锋 // 北方暴雨编委会. 北方天气文集(1). 北京: 北京大学出版社, 1981: 12-23
- [20] 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
- [21] 郑永光, 陈炯, 葛国庆等. 梅雨锋的天气尺度研究综述及其天气学定义. 北京大学学报(自然科学版), 2008, 44(1)
- [22] 张顺利, 陶诗言, 张庆云等. 长江中下游致洪暴雨的多尺度条件. 科学通报, 2002, 47(6): 467-473
- [23] 周秀骥, 薛纪善, 陶祖钰等. '98 华南暴雨科学实验研究. 北京: 气象出版社, 2003: 110-154

TYPICAL STRUCTURE, DIVERSITY AND MULTI-SCALE CHARACTERISTICS OF MEIYU FRONT

Zheng Yongguang¹ Chen Jiong¹ Ge Guoqing² Zhu Peijun³

¹ National Meteorological Center, Beijing 100081

² CAPS, The University of Oklahoma, USA

³ Department of Earth Sciences, College of Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027

Abstract

Meiyu front plays an important role in summer precipitation in Central China. Based on the GMS-5 satellite images, NCEP reanalyses ($2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$) and final analyses ($1^{\circ} \times 1^{\circ}$) data, and meteorological conventional sounding observations, the horizontal and vertical structures of meiyu front are summarized using multiple diagnostic variables (including wind, temperature, jet streak, frontal area, pseudo-equivalent potential temperature, divergence, vertical motion, static instability, etc). In this paper, four cases of meiyu front were selected and analyzed, two of them are on 26–28 June and 23 July 2002 during the Experiment on Heavy Rain in meiyu Front in the Downstream of Yangtze River, and the other two cases are in May and July 1998. The two cases in July of 1998 and 2002 are the secondary meiyu front cases. The results show that the structures and characteristics of the meiyu front are different for various cases, or at various places and time, or at various stages of one case, and the frontal characteristics can be transited from the polar front to the equatorial front. Due to the interaction of the different scale circulations in the high and low latitudes, the horizontal structures of the meiyu front are plenty of various forms.

The results in this paper also show that the typical meiyu front consists of a narrow band with high gradient of equivalent potential temperature below 500 hPa, south of which is warm and moist air mass, and north of which is the indifferent air mass from the mid-latitude ocean or the polar continent. Below the mid troposphere, south of the front blows southwest wind, and north of the front the easterly. The ascending motion and precipitation usually occur ahead of the meiyu front. In the upper troposphere, the subtropical front is above the meiyu front, but they are not connected. In addition, the upper westerly jet and the easterly to the south of the meiyu front consist of the upper divergent flow field.

The multi-scale characteristics of the horizontal structure of meiyu front can be summarized as follows: in the upper troposphere, there exist the subtropical westerly jet, the easterly to the south of meiyu front, and the South Asia high; at the mid tropospheric 500 hPa, the subtropical high over the west Pacific is the main weather system, and there are also some short wave troughs in the north; in the lower troposphere, the planetary scale southwest monsoon, the large scale low level southwest jet, and the meso-scale vortex or waves near the shear line are associated with the meiyu front.

Key words: Meiyu front, Typical structure, Diversity, Multi-scale characteristics.