

华南前汛期锋面垂直环流及其与中尺度对流系统的相互作用^{*1}

陈 敏¹ 陶祖钰² 郑永光² 王洪庆²

1 中国气象局北京城市气象研究所,北京,100089

2 北京大学物理学院大气科学系,北京,100871

摘 要

对 1998 年华南暴雨试验加密观测期间(IOP)5 月 23 日强降水个例的数值模拟结果分析指出,锋面对于中尺度对流系统而言除了提供对流运动的触发机制外,两者之间还可能存在着复杂的相互作用。华南前汛期伴随对流活动的冷锋具有独特的垂直环流结构。它主要表现为暖湿气流不是沿锋面上滑,而是在冷锋前沿的对流雨团中直接上升到高空,锋面上方上滑的暖空气完全被对流雨团北侧的补偿性下沉气流所代替;而在锋后以及锋前暖区内均有对流活动发生的情况下,低空流入锋区前沿和锋区上方雨团的空气不是来自锋前暖区,而是来自锋后。对对流系统内部雨团进行的三维轨迹追踪也揭示出锋面上空对流雨团内存在一部分来自锋后并穿越锋区的上升气流。这是因为锋面并不是真正意义上的物质面,它只是大气温、湿属性有显著差别的界面,因此存在穿越锋区的运动并不是完全不可能发生的。在华南前汛期,锋区两侧温度对比比通常意义上的锋面要小,这也是可能发生穿越锋面运动的原因之一,表明中尺度对流系统由于具有与梅雨锋在跨锋方向相类似的尺度而有可能对梅雨锋的流场结构产生影响。

关键词: 锋面,数值模拟,中尺度对流系统。

1 引 言

对于华南前汛期暴雨已有的天气尺度分析指出,冷空气南下到华南沿海的过程中常常会发生锋前暖区降水或锋面降水,但无论哪种降水形式暴雨都是由一次次中尺度系统活动造成的。通常认为,由于锋前暖输送带携带暖湿的具有高相当位温值的空气沿锋面上升,因而锋面对于发生在锋前的中尺度对流系统而言提供了一种对流的触发机制。但是也有研究指出,尽管梅雨锋长约数千公里,但其横跨锋面的宽度可以看作属于中尺度范畴^[1]。因此或许可以考虑这样的问题:锋面在跨锋方向的尺度与中尺度对流系统相当,两者是否存在一定的相互作用?对流的发生发展能否影响到南下冷锋的跨锋面构造?

1998 年 5 月 23—24 日,在广东省中部和沿海发生了一次特大暴雨,这是 1998 年华南暴雨试验(HUAEMX)IOP 期间一次典型的暴雨个例,简称 IOP523。2000 年,仪清菊等^[2]在华南暴雨科学试验的总结中指出,这是一次西路冷空气南下和梅雨锋经过华南而引起的暴雨过程,主要由伴随冷锋南下的大尺度锋面雨带和锋前暖区的中尺度暴雨区构成,暴雨同时出现在冷锋附近及锋前 200 km 范围内的暖区中^[3]。2005 年,陈敏等^[4]对这次暴雨过程进行了数值模拟,成功地模拟出锋面南下以及与之相伴随的中尺度对流系统在锋面上和锋前暖区中发展消亡的过程,并且模拟降水的落区和强度与实况也吻合得较好。由于模拟结果提供了具有较高时空分辨率和动力上连续的数据集,因此为研究锋面次级环流及其与锋面对流之间的相互关系提供了一个很好的研究样本。

* 初稿时间:2007 年 6 月 4 日;修改稿时间:2007 年 8 月 24 日。

资助课题:国家自然科学基金项目(40505020)和北京市科技新星计划 A 类(2006A02)。

作者简介:陈敏,主要从事中尺度数值天气业务预报。E-mail:mchen@iun.cn

本文将在该模拟结果的基础上着重给出该个例中跨锋面方向上不同寻常的流场结构,并试图探讨锋面对流与锋面之间可能存在的相互作用。

2 数值模拟方案简介

本文使用 PSU/NCAR 开发的 MM5 数值模式的 V2 版本,其中取两重嵌套网格(图 1),以 23°N 、 113°E 为中心,粗网格(Domain1)格距为 45 km,格点数为 41×61 ;细网格(Domain2)格距为 15 km,格点数为 61×85 ;垂直方向的 σ 层从 1 到 0 不等距取 26 层。模拟的物理方案配置采用了 Reisner 多相显式水汽方案^[5]计算可分辨尺度降水,其中包含水汽、云水、雨水、云冰、雪水、雹和冰晶数的预报方程;Grell 积云参数化方案^[6]计算次网格尺度降水;改进的 Blackadar 边界层参数化方案^[7]计算行星边界层的感热、潜热、动量和湍流混合的垂直通量;多层土壤模式^[8];包括长波及短波的云辐射方案^[9];浅水对流方案。两重网格的模拟均从 1998 年 5 月 23 日 00:00 UTC 开始至 5 月 24 日 12:00 UTC 为止,积分 36 h,这段时间覆盖了中尺度对流系统形成、成熟

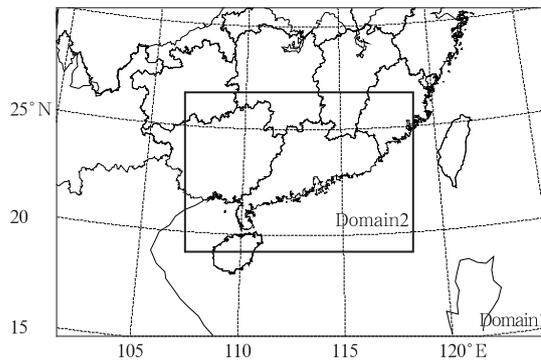


图 1 预报区域

Fig. 1 The simulated domain area

到消散的整个过程以及降水最为集中的时段。陈敏等^[4]给出了本文所述数值模拟的更多细节。

3 锋面垂直环流

从大尺度环流的角度看,数值模拟积分的过程是一次较强的西路冷空气影响华南的过程。锋区在 925 hPa 相当位温等值线图(图 2)上表现得十分明显。积分 10 h 后,对流性降水与锋面降水同时影响广东省西北部及其西部沿海地区。

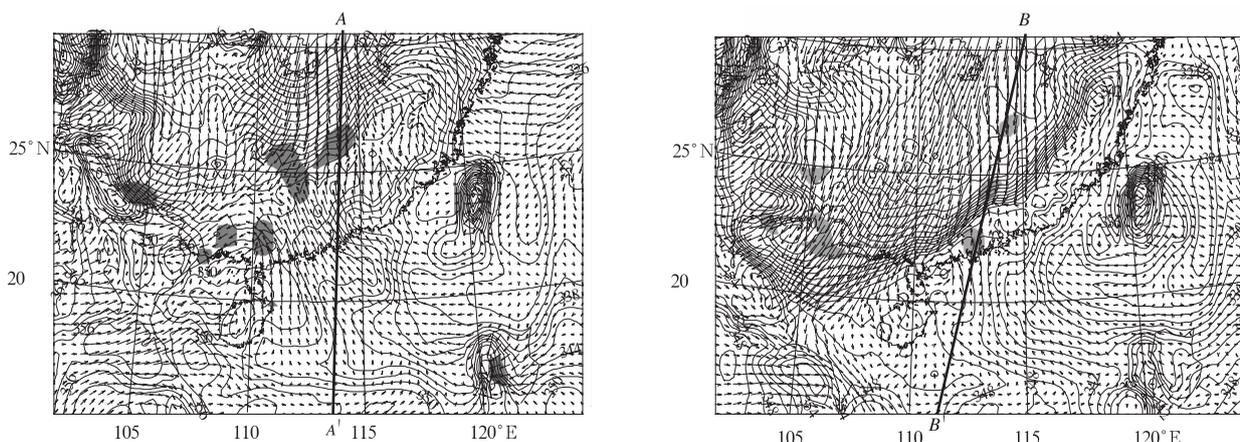


图 2 $t=12$ h (a), 24 h (b) 时 925 hPa 相当位温(实线)和风场分布

(图中阴影区代表模拟雷达回波 ≥ 30 dBz 的区域)

Fig. 2 The equivalent potential temperature (solid line) and wind field at $t=12$ h (a) and $t=24$ h (b) at 925 hPa

(Shaded is the area with simulated radar echo 30 dBz)

3.1 锋区前沿存在对流时的锋面垂直环流

在 $t=12$ h 时 925 hPa 相当位温等值线图(图 2a)中可见,冷锋前缘刚刚进入广东省北部,锋前暖区中的东南风和锋后偏北风在锋区两侧的对峙非常明显。此时对流活动主要发生在锋面前沿附近。

图 3a 给出了沿锋后入流方向(即图 2 中的 AA' 基线)的流场垂直剖面,该剖面同时穿过了 925 hPa

锋面附近的对流性雨团。剖面上左下角密集的相当位温等值线表明了锋区的位置。图中黑色虚线为模拟回波强度高于 30 dBz 的区域,直立而高耸的回波显示出发生在地面锋区前沿的对流雨团。从风场垂直剖面图可以看到,锋后冷气团中北风沿锋面有微弱的下沉运动,锋前暖区的整个对流层几乎都由暖湿的东南气流控制,锋面如同一个楔子从底层插入

暖湿气流中。

从图 3a 可见,在垂直于锋面的剖面上,北边是锋面垂直环流圈,它由锋面上方的上升气流和锋面下方的下沉气流组成。来自锋前暖区的上升气流从低空流向锋面,在锋区前沿进入雨团后急速上升到对流层上部,表现为雨团中强烈的对流上升运动。不难看出,来自南面的暖湿气流并未沿锋面向上爬升,而是在到达锋面前沿进入对流性雨团后急速上

升到高空。锋区内(包括锋区上界)都是下沉的。锋面上方的下沉气流来源于对流雨团上部向后的流出。因此可以认为,锋区前沿对流雨团的存在改变了通常暖湿空气沿锋面向上爬升的锋面垂直环流,而表现为雨团的补偿性下沉气流沿锋面下滑。

与图 4 所给出的上滑冷锋模型^[10]相比较,华南前汛期中伴随对流活动的冷锋具有独特的垂直环流结构。它主要表现为暖湿气流不是沿锋面上滑,而

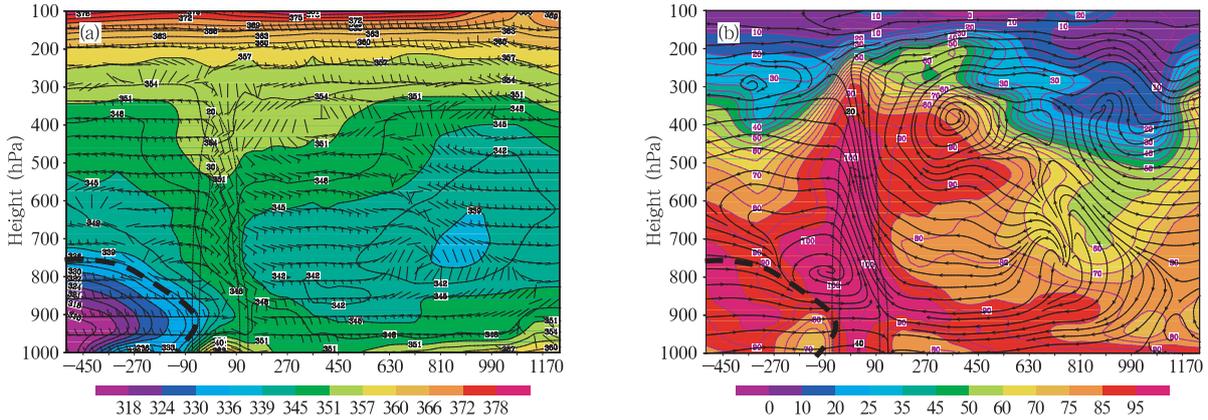


图 3 沿图 2a 中剖面基线 AA' 的垂直剖面上模拟雨团的回波(黑色虚线,间隔 10 dBz)分布、风场和相当位温(黑色实线,间隔 3 K)(a) 以及流场和相对湿度(灰色实线,间隔 5%)(b)

Fig. 3 The simulated radar echo (black dash line, interval; 10 dBz), wind and equivalent potential temperature (black solid, interval; 3 K) (a), the stream and relative humidity (purple solid, interval 5%) (b) on the cross-section along AA' in Fig. 2

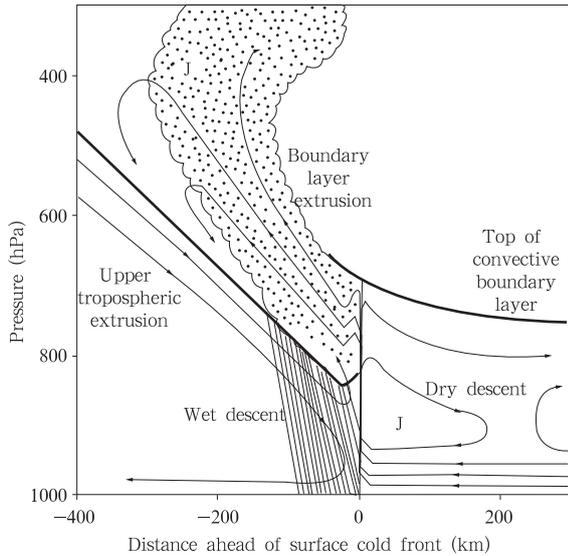


图 4 上滑冷锋概念模型^[5] (粗黑线表示锋面界面和对流边界层顶,细黑线表示流线,J 表示急流中心)

Fig. 4 A schematic of the cold front^[5] (The wide solid represents the boundary of front and tropopause, the thin solid represents the stream line, J is the center of jet stream)

是在冷锋前沿的对流雨团中直接上升到高空,锋面上方上滑的暖空气完全被对流雨团北侧的补偿性下沉气流所代替。在图 3b 用流线表示的垂直环流及相对湿度分布中可以清楚地看到,从对流雨团中向外流出的空气开始是接近饱和的;当它流到地面锋线后才下沉,相对湿度变小。

3.2 锋面两侧均存在对流雨团时的垂直环流

在积分到 $t = 24$ h 时的 925 hPa 风场分布(图 2b)中,锋面已移入广东省境内,呈东北—西南走向。此时该气压层上表征锋区的相当位温等值线集中在约 100 km 宽的狭窄区域内,相当位温梯度较 12 h 前明显加强;在 925 hPa 锋后以及锋前暖区内均有对流活动发生。

图 5a 给出了沿 925 hPa 锋后入流气流方向的流场垂直剖面 BB',该剖面同时穿过发生在锋面上和锋前暖区内的对流雨团。图中等位温线密集的锋区已比图 3a 明显南移,锋后、锋面前沿和锋前暖区均有对流发展,其中锋后和锋面前沿的对流较弱,回

波顶高还不到 500 hPa;而锋前暖区的对流非常强,回波顶高超过了 200 hPa,20 dBz 的强回波也达到了 300 hPa 的高度。冷锋(图中相当位温线的密集处)前约 150 km 处,强烈的上升运动直达对流层顶,雨团中的最大上升速度接近 1 m/s(图 5b)。而锋面前沿和锋面上方对流雨团中的上升气流比锋前暖区中的对流弱得多,最大上升速度几乎比暖区对流小一个数量级。在温度和比湿的垂直剖面图(图 5c)中,锋区逆温非常明显,表明冷空气比较强。锋区逆温层的上方有一个很清晰的暖湿舌,锋面和锋后的对流就发生在锋面上方的暖湿空气中。值得特别指出的是,虽然从锋面上方对流雨团上部向北的流出气流和锋面下方向南的冷空气也组成了与图 3a 类似的跨越锋面的垂直环流圈,但是在锋面上方

同时存在对流雨团的情况下,锋区下方的空气有明显的穿越锋区的现象。这在图 5d 给出的流场、相当位温垂直剖面与水平剖面相配置的三维图像上展现得更加清楚。从图中可以看到,低空流入锋区前沿和锋区上方雨团的空气不是来自锋前暖区,而是来自锋后。这一现象可能表明,当锋面上方层结不稳定的大气中有对流发生时,对流运动可将锋面下方的空气(至少是锋区中的空气)抽吸到对流云团中。严格地讲,锋面并不是一个真正的物质面,它只是大气温、湿属性有显著差别的界面(在图 5a 中表现为相当位温梯度的差别),因此存在穿越锋区的运动并不是完全不可能发生的。在华南前汛期,锋区两侧温度对比比通常意义上的锋面要小。这也是可能发生穿越锋面运动的原因之一。

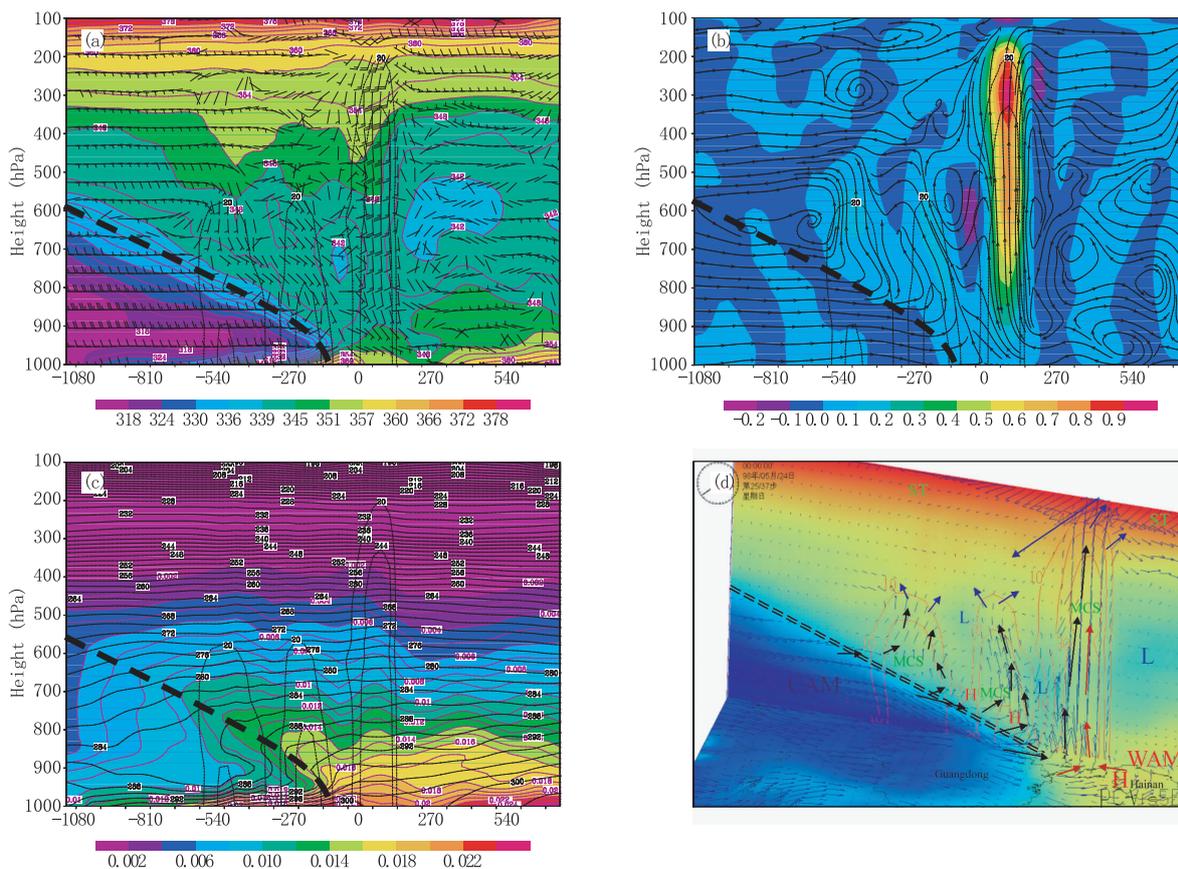


图 5 通过图 2b 的 BB' 基线垂直剖面上模拟的雷达回波(黑色虚线,间隔 10 dBz)分布以及(a)风场和相当位温(紫色实线,间隔 3 K);(b)流线和垂直速度(等值线间隔 0.1 m/s);(c)比湿(紫色实线,间隔 0.0001 kg/kg)和温度(黑色实线,间隔 3K)分布;(d)垂直剖面和水平剖面相配置的三维图像(兰色为低相当位温,表示冷空气;黄色为高相当位温,表示暖湿空气;红色为平流层的高相当位温)

Fig. 5 The simulated echo (black dash line, interval: 10 dBz) and wind and equivalent potential temperature (purple solid, interval: 3 K) (a); streamline and vertical velocity contours (interval: 0.1 m/s) (b); specific humidity (purple solid, interval: 0.0001 kg/kg) and temperature (black solid, interval: 3 K) (c); the three-dimensional schematic of the vertical and horizontal cross sections (d) on the vertical cross section along the BB' in Fig. 2b

4 穿越锋面运动的空气三维轨迹分析

上文给出的流场垂直剖面揭示了与华南前汛期暴雨相联系的锋面垂直环流结构,但是垂直剖面图可以被认为仅仅是三维运动在垂直平面上的投影,不能全面地反映流场的空间结构。因此,下面将进一步用数值模式输出的逐小时三维风矢量资料计算的三维轨迹^[11],来揭示穿越锋面的空气运动。

图 6a 给出的是在 $t=18$ h 时锋面对流雨团(如图 6a、b 中虚线所示)内气块的 36 h 运动轨迹的水平投影,是从 $t=18$ h 时雨团范围内 850 hPa 高度上选取 3 个空气块,分别向前和向后追踪 18 h 所得到的轨迹。它们表示在模拟的 t 取 1—36 h 积分过程中空气块是如何进入雨团,又如何从雨团中流出的。

从图 6a 可见,气块 L_1 来自锋前暖区(珠江口附近),从其相邻时刻轨迹点之间的距离来看, L_1 移动

很慢,并且在接近冷锋时更趋缓慢,这与此次暴雨过程华南沿海没有偏南低空急流是相应的。气块 L_2 来自锋后冷空气(湖南省北部),受锋后偏西气流的控制,逐渐转为西北气流最终转为偏北气流,因此 L_2 的轨迹也表现为沿顺时针方向的运动,具有典型的锋后冷气团运动轨迹的反气旋性曲率特征。气块 L_3 来自锋后冷区内(湖北、湖南两省交界处),比 L_2 更为偏北。 L_3 的轨迹也表现出冷气团运动轨迹的反气旋性曲率特征,但它受锋后强东北气流控制,南下的速度更快,到 $t=36$ h 时已抵达海南省西侧冷锋的位置。因此,雨团中的气块既有来自南方的暖湿空气,又有来自北方锋后较冷的空气。如图 6a 所示,气块 L_1 和 L_2 在进入雨团后都转向东北偏东方向流出;而气块 L_3 的轨迹在穿过雨团后方向没有改变,继续向西南方向运动,其移动速度明显大于气块 L_1 和 L_2 。

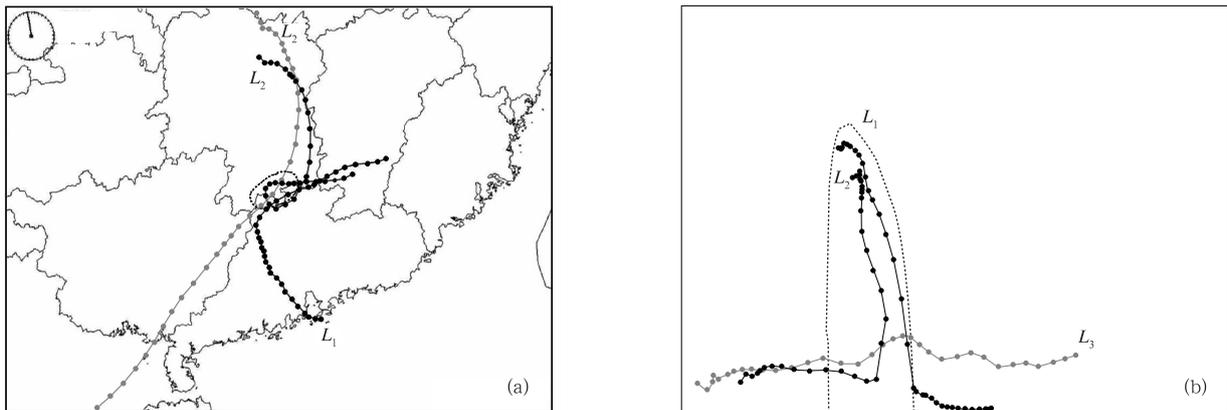


图 6 $t=18$ h 时锋面雨团范围内 850 hPa 上的 3 个空气块 1—36 h 的运动轨迹在 Oxy 平面(a)和 Oxp (b)上的投影

Fig. 6 The projection of the trajectories from $t=1$ h to 36 h of 3 selected air masses in the MCS on front at $t=18$ h on Oxy surface (a) and Oxp surface(b) at 850 hPa

图 6b 是上述 3 条空气轨迹在 Oyp 平面上的投影,它显示了气块在南北方向和垂直方向上的运动。气块 L_1 是从珠江口附近的近地面层出发的,它代表雨团的水汽主要来自南海北部。从图中可见,在进入对流前 L_1 的上升运动十分有限,但从相邻时刻轨迹点之间的垂直距离可知,进入对流后显示出对流雨团内部存在较强的上升运动。到达对流雨团顶部后, L_1 的上升速度显著减小。结合图 6a 可知,它反映了气块已流出雨团的强对流区,并在对流层上部向东移动(在 Oyp 平面上,这些轨迹点几乎重合在

一起)。气块 L_2 虽然来自于冷气团内,但它的轨迹和 L_1 相似,也表现出在进入雨团后迅速上升的特点。结合图 6a, L_2 进入雨团后还具有反气旋式卷入的特征,这些都反映了锋后冷空气的运动特点。总体上来看, L_2 抬升的高度比 L_1 略低,而且上升速度也比 L_1 小。这可能是因为 L_1 来自锋前暖区近地面层,气团性质比 L_2 更为暖湿而受到更大的空气浮力。 L_2 最终也向东流出。在 Oyp 平面上来看,气块 L_3 的起始高度与 L_2 相似,但 L_3 比 L_2 更为偏北。 L_3 从东北方进入雨团范围时有微弱的上升但很快

又返回至原高度,这是由于 L_3 来源于锋后更为冷干的空气,它的轨迹代表了经过雨团但继续南下的锋后冷空气。

上述分析中,3个气块的轨迹分别代表了流经雨团范围的3支不同气流,其中 L_2 的轨迹进一步证明了其上面描述的锋后冷空气穿越锋面到达锋区上方的现象。这种穿越锋面的运动可以利用三维可视化软件生动地展示出来。

图7给出的是 $t=22$ 、26和30h时锋面和空气块的运动轨迹的三维图像。图中锋面用相当位温为

338 K的等值面表示,生动地展示出在三维空间中锋面是一个向北倾斜的曲面,其位置的连续变化反映了冷锋向南移动并到达南海的过程。空气块的运动轨迹在 $t=22$ h以前位于锋面的下方,到 $t=26$ h时已穿越锋面进入锋面的上方,再到 $t=30$ h时已到达对流层高层。穿越锋面以前的轨迹基本上是水平的;穿越锋面后的轨迹呈直立状,表现为对流系统内空气的上升运动。因此,三维立体图像很好地展示了锋面垂直环流和对流雨团之间的联系。

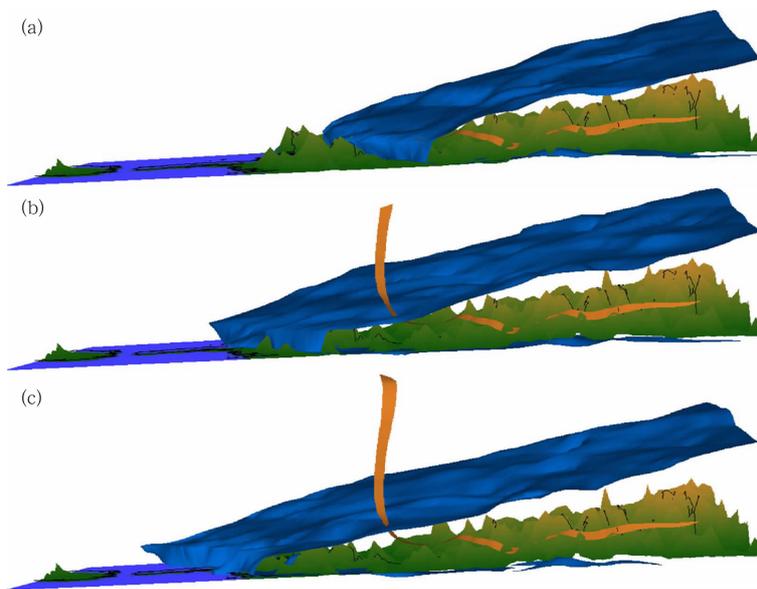


图7 $t=22$ (a)、26(b)和30h(c)时的锋面(倾斜的三维曲面)和空气块的运动轨迹(飘带)的三维图像(图中的立体地形中,左边的平面代表南海海面,右边的代表陆地和高低起伏的华南地区)
Fig. 7 The three-dimensional schematic of cold front (slant three-dimensional surface) and the trajectory (strip) of the air mass at $t=22$ h(a), 26 h(b) and 30 h(c)

5 结论

陈敏等^[4]对1998年华南暴雨试验加密观测期间(IOP)5月23日强降水个例进行了数值模拟研究,成功地模拟出锋面南下以及与之相伴随的中尺度对流系统在锋面上和锋前暖区中发展消亡的过程。基于此数值模拟结果,本文对华南前汛期锋面垂直环流及其与对流活动的相互关系进行了探讨。结果表明,当锋面上方有对流发生时,锋面的垂直流场结构发生了显著的变化,即有一部分来自锋后的冷空气穿越锋面后上升并参与了对流。而这种变化

尚不能用一种现成的模型来描述,因为对锋面的研究往往从下述假设出发:(1)同一气块内的空气性质一般是比较均匀的;(2)锋面是气团之间的界面,是一个物质面;(3)空气运动时基本上是绝热的(除了蒸发、凝结放出的潜热外)。根据这些假设来看,锋后气流不可能有穿越锋面的运动。

但是这种“锋面”的概念也并不是完全无争议的。1958年,顾震潮等^[12]指出,锋面不是一个简单的总是由同一物质点组成的物质面,而是在锋前、锋后连续不断地经历着锋生、锋消过程,有其自身新陈代谢的一种构造。从本文的个例看,对流改变了锋

面流场的结构,但这种现象是否具有普遍性,则需要对类似的个例做更多的数值模拟研究才能确定。

参考文献

- [1] 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
- [2] 仪清菊, 刘品, 王明志. 1998 年华南暴雨试验期的暴雨过程分析//周秀骥. 海峡两岸及邻近地区暴雨试验研究. 北京: 气象出版社, 2000:13-21
- [3] 石定朴. 98 华南前汛期暴雨中尺度特征分析//周秀骥. 海峡两岸及邻近地区暴雨试验研究. 北京: 气象出版社, 2000: 175-185
- [4] 陈敏, 郑永光, 王洪庆等. 一次强降水过程的中尺度对流系统模拟研究. *气象学报*, 2005, 63(3): 313-324
- [5] Reisner J, Rasmussen R J, Bruintjes R T. Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1998, 124: 1071-1107
- [6] Grell G A, Dudhia J, Stauffer D R. A description of the fifth generation PennState/NCAR mesoscale model (MM5). NCAR Tech Note, NCAR/TN-398+STR, 1994:138pp
- [7] Blackadar A K. Modeling the nocturnal boundary layer. Preprints of Third Symposium on Atmospheric Turbulence and Air Quality. Raleigh, NC, 19-22 October 1976, Amer Meteor Soc, Boston, 1976: 46-49
- [8] Dudhia J. A multi-layer soil temperature model for MM5. Preprints of Sixth PSU/NCAR Mesoscale Model Users' Workshop. 22-24 July 1996, Boulder, Colorado, 1999: 49-50
- [9] Dudhia J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J Atmos Sci*, 1989, 46: 3077-3107
- [10] Browning K A, Pardoe C W. Structure of low-level jet streams ahead of mid-latitude cold fronts. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1973, 99: 619-638
- [11] 王洪庆, 张焱, 陶祖钰等. 五维大型复杂数据集计算机可视化. *自然科学进展*, 1998, 8(6): 742-747
- [12] 顾震潮, 陈雄山, 许有丰. 锋面假相当位温图和中国寒潮冷锋上界变化分析的应用. *气象学报*, 1958, 29(1): 44-56

THE FRONT-RELATED VERTICAL CIRCULATION OCCURRING IN THE PRE-FLOODING SEASON IN SOUTH CHINA AND ITS INTERACTION WITH MCS

Chen Min¹ Tao Zuyu² Zheng Yongguang² Wang Hongqing²

1 *Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089*

2 *School of Physics, Peking University, Beijing 100871*

Abstract

Based on the results of the numerical simulation for a heavy rainfall case occurring on May 23, 1998 during the IOP period of HUAMEX, the relation of front-related vertical circulation with convection was investigated. In addition to the convection trigger mechanism provided by cold front, there is a possible interaction between cold front and MCS. In case convection occurs on front, the structure of vertical circulation on the cross section of front may change significantly. In stead of sliding upward along the slant front, the warm and wet stream in the MCS in front of the cold front ascends to the upper air directly. However, in case that there are MCSs occurring on both sides of the cold front simultaneously, there are stream coming from the rear of the cold front and penetrate it. The trajectory of the air mass from the convection also reveals the phenomena. These results reveal that the front is not an exact 'material' surface as its definition. Actually, it is just an interface in atmosphere with significantly different temperature and moisture attributions. In the pre-flooding season in South China, the temperature difference is not so obvious as that of common sense, which could be regarded as a reason of the existence of the penetrating upstream of front. MCS should be able to affect the vertical stream structure of cold front due to its similar scale with that of front on cross-front direction.

Key words: Cold front, Numerical simulation, MCS.