

阿拉伯海夏季季风气旋气流结构 和次天气尺度现象的一些特征

陈瑞荣

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文利用1979年夏季季风实验期间稠密的飞机下投探空仪资料,对一次阿拉伯海季风气旋的垂直气流分布、云层分布、水平螺旋辐合气流和强风环等结构以及它们之间的关系等进行了分析研究。并指出了高空次天气尺度和中尺度的一些现象。垂直气流速度是根据探空仪落速变化算出,把它用在天气系统分析是初次尝试。

一、前 言

夏季阿拉伯海气旋是与印度洋季风活动密切相关的天气系统。有的人把它叫做中层对流层气旋,因为它在700到600毫巴上最为明显^[1]。在今年夏季由联合国世界气象组织主办的夏季季风实验期间,在阿拉伯海广大海域上空,通过美国和印度的多架飞机的联合观测,尤其是在三架美国气象飞机上每隔200公里左右投下的无线电探空仪观测,在6月14—18日对阿拉伯海夏季季风气旋演变过程取得了详细的温、湿、压、风等气象资料,关于这次气旋系统的大尺度天气背景和结构、成因等,丁一汇^[2]进行了研究。本文主要是利用飞机下投探空仪原始记录计算垂直气流速度,并配合水平风等资料,对这个气旋系统的气流和云结构及次天气尺度的一些现象进行初步分析。J. H. Smalley^[3]曾提出过,这种飞机下投探空仪是有可能进行垂直气流测量的。但是利用这种探空仪的原始资料计算空气垂直速度,并用到天气系统中进行分析,这还是初次尝试。

二、资料和分析方法

从6月14—18日,每天有2—3架飞机在阿拉伯海海域上空500到300毫巴的高度进行观测,并从飞机上每天施放11—35个探空仪,每隔200公里左右下投一个。探空仪挂在降落伞下,相对于空气的落速为6.5米/秒左右。根据各个下投探空仪气压随时间的变率,可以计算对地落速 $W_g(z)$,并通过统计分析,求出探空仪相对于空气的落速 $W_a(z)$ 。

1979年11月17日收到。

由二者之差可算出空气的垂直气流速度 $W(x)$, 即:

$$W(x) = W_g(x) - W_e(x) \quad (1)$$

关于 $W_e(x)$ 的求法及观测精度问题在附录中讨论。

由于探空仪一般不在对流云单体中下投, 因此大部分观测结果不反应强对流特征。但由于中小尺度系统的普遍存在, 所得结果还是包含了一些中小尺度的扰动。在实际计算中, 垂直气流速度是在两分钟时间间隔里算出的, 这值反应大约 700 米厚气层的平均垂直气流速度, 在做系统结构与分析时, 还将加以适当的光滑平均, 以进一步消除中小尺度的不规则扰动。

云层分布主要是由相对湿度大于 92% 的气层范围确定。

由于相当一部分观测资料限于 500 毫巴以下, 所以本文分析的主要是 500 毫巴以下对流层中下部的情况。

在飞行观测中, 除了观测常规气象参数外, 还有各种云物理参数、垂直颠簸、垂直气流速度和雷达回波强度等。但这些资料尚未全部处理出来, 本文只就部分资料进行初步分析。

三、气旋系统的平均垂直气流和云厚分布特征

6 月 14—18 日, 在阿拉伯海先后有两个气旋发展。6 月 14 日的气旋, 尺度较小, 生命期短。6 月 15 日另一个气旋在印度中部西海岸开始发展, 并逐渐向西偏北移动, 19 日在沙特阿拉伯登陆。这气旋在 6 月 17 日发展到最强盛阶段, 18 日趋于减弱。下面将分别讨论 6 月 15、17 和 18 日 500 毫巴以下平均垂直气流和云厚分布特征。6 月 16 日资料较少, 这里不着重分析。图 1 是 6 月 17 日 850mb 流场图。

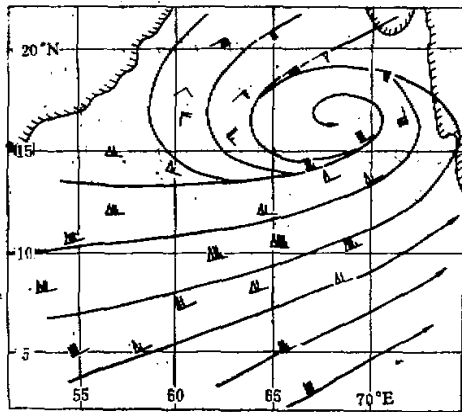


图 1 1979 年 6 月 17 日阿拉伯海气旋 850mb 流场

(1) 垂直气流

在 6 月 15 和 17 日气旋处在发展和最强盛阶段时, 在气旋中心附近是很明显的系

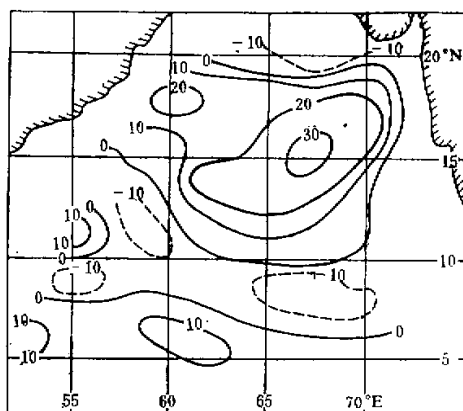


图2 1979年6月17日阿拉伯海气旋500mb以下平均垂直气流速度(厘米/秒)分布图

统性上升气流区,最强平均上升气流速度分别为30和27厘米/秒。在6月17日气旋里,上升气流区只占气旋中部的部分面积,外部不少区域是下沉气流,最大值可到-15厘米/秒(图2)。如果取气旋形状为椭圆形,长轴为2100公里,短轴为1600公里,面积为 2.6×10^6 公里²,则平均上升气流区域只占气旋面积的50%左右,气旋外围近于一半的面积为下沉气流。在6月15日气旋处在发展阶段时,平均上升气流范围所占气旋面积的比例约为85%,但其最大平均上升气流速度和较强上升气流(20厘米/秒)范围则比气旋发展最强盛阶段的小,这是气旋在不同发展阶段里平均垂直气流分布的不同特征。

在这两天的气旋里,垂直气流分布是不对称的,在气旋中心的南部和西南部平均上升气流范围更大一些。此外,在气旋发展强盛阶段,平均上升气流区主要处在气旋的强风环之内,这点在下面还将讲到。

6月18日,气旋强度减弱,这时垂直气流分布比较不规则,平均上升速度普遍减小,两

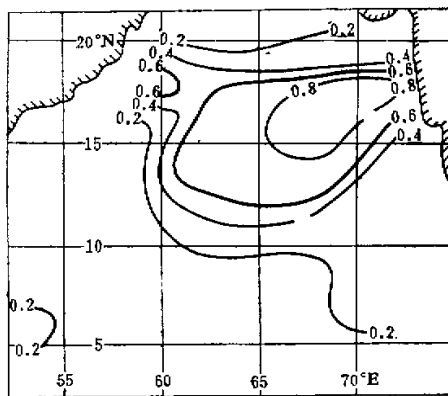


图3 1979年6月17日阿拉伯海气旋500mb以下相对云厚分布图

个强中心都不是在气旋中心,而是分布在气旋东侧和西南侧,在那里,流场气旋性弯曲较大和低层辐合较大。

(2) 云厚

图 3 是 6 月 17 日气旋区域 500 毫巴以下相对云厚分布图(相对云厚是实际云厚与 500 毫巴高度之比)。比较图 2 和图 3 可看出,厚云层区域与较强上升气流区域的分布是比较一致的。但是在气旋发展强盛时期(15 日)较厚云层所占面积比例要比发展时期(17 日)大,这点与平均上升气流分布的对比是不相同的。

四、气旋系统垂直气流和云层的空间结构

本节主要分析 6 月 17 日气旋的结构,其特征有一定的典型性。

(1) 垂直气流

根据 1.5 公里厚层滑动平均的垂直速度值,从 950 到 500 毫巴作出每隔 50 毫巴的等压面上垂直速度分布图(图略),并在气旋的短轴方向($340^{\circ}-160^{\circ}$)和长轴方向($250^{\circ}-70^{\circ}$)作出通过气旋中心的两个垂直气流剖面图(图 4(a)(b)),由这些图可以看出气旋垂

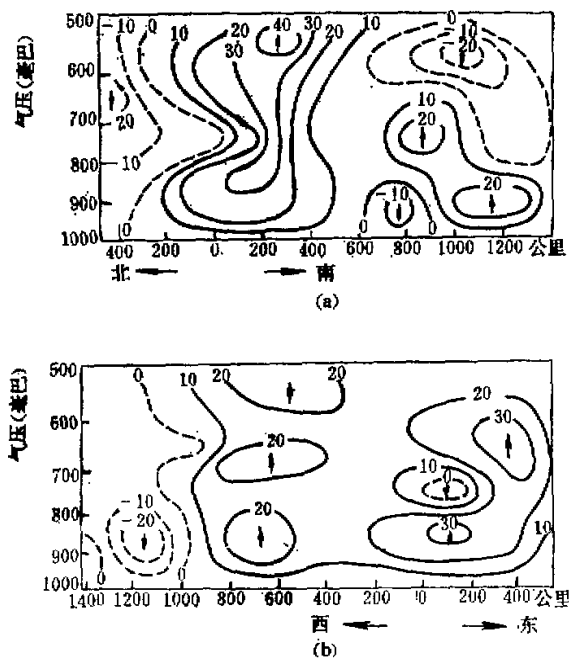


图4 1979年6月17日通过气旋中心沿短轴(a)和长轴(b)垂直气流速度(厘米/秒)剖面图。原点为气旋中心位置

直气流结构的一些主要特征。

(i) 在气旋中心附近是主要上升气流区,但最大中心偏在右侧,最大值可达 40 厘米/秒,出现在 550 毫巴高度上。

(ii) 在气旋周围不同高度上,几乎都有下沉气流存在,其范围与图 2 的下沉气流范围大致相同。

(iii) 气旋里的上升气流分布并不对称,除了气旋中心区域以外,在气旋中心西偏南侧 700 公里和东偏北侧 400 公里附近还各有一个上升气流中心,这些地方都是低层流线显著辐合的区域。

(iv) 气旋中的上升气流在垂直方向的变化往往不是单一的,常有 2—3 个极大值。对于气旋中部水平平均垂直速度的垂直变化也是这样,在 750 毫巴附近是极小值,在 850 和 550 毫巴是两个极大值。

(2) 云层

图 5 (a)、(b) 是通过气旋中心的长轴和短轴方向云层的剖面图,比较图 4 和图 5 可以看出,气旋中的云层分布和上升气流速度分布是十分相像的。在气旋中心附近的主要上升气流区也是深厚云层区,云区中心偏在气旋中心的西南部位。气旋中云的分层现象比较普遍,除了气旋中心 300 公里范围里,其他云区大多分为 2—3 层云,并有垂直气流的垂直波动相对应。图 6 是气旋区域云量随高度的变化曲线(云量指云面积与气旋面积—— 2.6×10^6 公里² 的比值),在 950—900 毫巴云量最大,在 550—500 毫巴云量也较大,但在

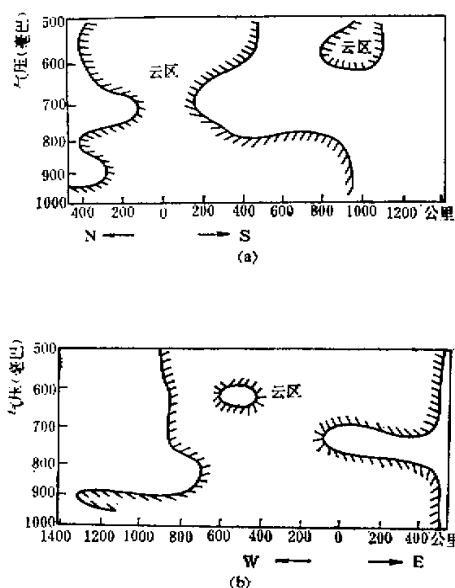


图 5 1979 年 6 月 17 日通过气旋中心沿短轴(a)和长轴(b)云的剖面图。原点为气旋中心位置

750—700 毫巴却是少云区,云量只有 2/10 左右,这与垂直速度在这一高度上的极小值特征也是相对应的。

气旋中部 750—700 毫巴高度上的上升气流速度和云量都是极小值,这一特征是气旋垂直结构的一个很突出的现象。

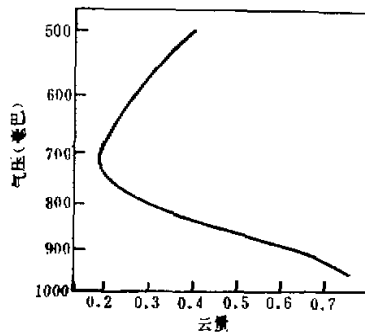


图 6 1979 年 6 月 17 日云量随高度的变化

五、气旋系统的水平流场

这里只着重分析气旋系统中与垂直气流结构明显相关的水平流场的一些特征,主要是分析 6 月 17 日气旋发展强盛阶段的情况。

当阿拉伯海气旋发展到最强盛阶段,在其中间区域附近存在一个强风环,这有点像台风中的强风环现象。图 7 是通过气旋中心沿 340°—160° 方向 8 个等压面上水平风速曲

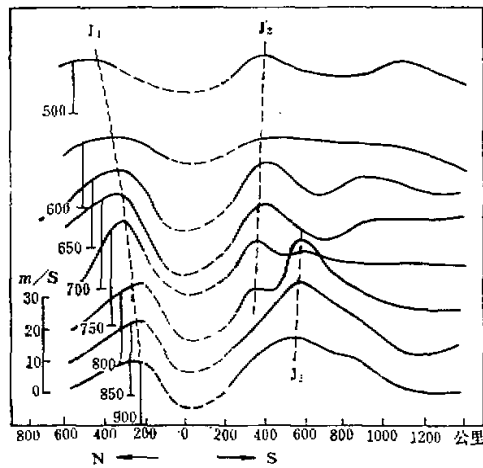


图 7 1979 年 6 月 17 日通过气旋中心沿 340°—160° 方位 8 个等压面上水平风速的变化曲线,原点为气旋中心位置

线。北侧是偏东风,南侧是偏西风,图中 J_1 和 J_2 曲线是各高度上气旋强风环中心位置。这一强风环的南北宽度随高度是逐渐扩大的,在 850 毫巴以下约为 600 公里,在 500 毫巴扩大到 850 公里,最强风速出现在 750—700 毫巴,此外,这一气旋是在索马里低空急流北侧发展的,图 7 中 J_3 曲线是这一急流的中心位置,它在 850—800 毫巴上最强,在 700 毫巴上已不明显。 J_2 与 J_3 相隔 250 公里,它们是性质上不同的两支急流。在气旋的东西轴线上,强风环宽度要大一些,但风速小一些。在气旋中心,这一强风环位置大致上是主要上升气流区域的外界,不同高度上的下沉气流几乎都是出现在强风环的外侧,这是气旋结构的另一个很有意思的特征。

根据上面气旋中垂直气流的分析,在气旋中部存在较大区域的上升气流,通过 500 毫巴高度向上输送的空气质量,需要其下气层有相应的水平气流辐合补偿。对于 6 月 17 日气旋个例,向气旋中部辐合的气流主要有四支,分别以 A、B、C、D 表示它们。第一支辐合气流 A 来自索马里低空急流,它主要在 750 毫巴以下从气旋的西南侧绕过气旋的东南侧和东侧以后,在气旋的东北部分向气旋中部辐合,并逐渐上升到 600—500 毫巴,其总辐合量约为 3.8×10^7 吨/秒,其中 70% 是在 850 毫巴以下输入的。第二支气流 B 来自气旋的东北侧和北侧。它从地面到 600 毫巴都有空气绕过气旋中心西侧逐渐进入气旋中部,并逐渐上升到 600—500 毫巴,其总辐合量约为 3.1×10^7 吨/秒,在低层大一些,但随高度递减不明显。第三支气流 C 来自气旋西侧 700 毫巴以下的西北风气流。它从气旋中心西南侧辐合进气旋中部区域,并逐渐上升到 600—500 毫巴,它的总辐合量约为 1.9×10^7 吨/秒,大部分是在 850 毫巴以下输入的。第四支气流 D 来自气旋西侧 650—550 毫巴上的偏北风气流,它绕过气旋南侧和东侧后,从气旋中部东北方辐合进入气旋,它的总辐合量约为 7×10^6 吨/秒。这四支气流的总辐合量为 9.4×10^7 吨/秒,它可以补偿 500 毫巴上 10^6 公里² 平均上升速度为 16 厘米/秒的向上输出的空气质量。这四支气流的辐合量占总辐合量的百分比分别为 40%、33%、20% 和 7%。由此可见,来自气旋西南侧和北侧的 A、B 气流是补偿气旋中部上升气流向上输出空气的主要来源。而低层的辐合又是最主要的,50% 来自 850 毫巴以下,80% 来自 700 毫巴以下。以上这四支气流是气旋的主要气流结构,据此可归纳出一个阿拉伯海季风气旋气流结构的示意模式如图 8。

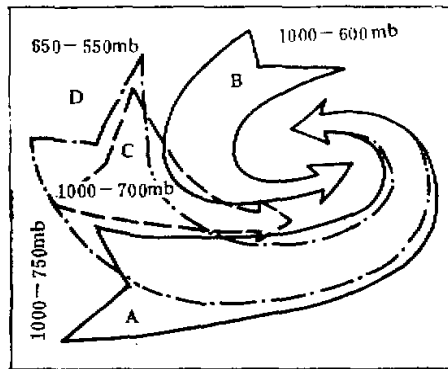


图 8 阿拉伯海季风气旋四支辐合气流水平投影示意图

六、一些次天气尺度和中小尺度现象

6月15—18日阿拉伯海气旋的流场形态,粗略地看大致上是一个椭圆形大涡旋。但是仔细分析其内部结构,不难发现一些几百公里尺度的特殊流场。此外,从垂直气流的垂直变化,还可以看到一些更小尺度的现象。这些现象主要有以下几种。

(1) 高空涡旋

在700—500毫巴气旋中心部位,有时看到同时出现2—3个中尺度到次天气尺度的气旋性涡旋,例如在6月17日600毫巴等压面上,在气旋东西轴线附近,可清楚分析到三个涡旋的存在,像是涡街结构(图略)。每个涡旋附近都是深厚云层。此外在300毫巴上空,根据飞机航线测风资料,也曾发现一些几百公里尺度的涡旋。气旋中这些高空次天气尺度涡旋的出现,估计主要是由于母气旋中的涡度通过对流辐合流场集中至较小区域而产生。

(2) 高空切变线

根据5月15日和17日阿拉伯海上空飞机观测,在气旋上空300毫巴上见到过三次高空切变线。在这些切变线附近存在强烈的对流活动,飞机上可以看到有强对流云存在,在飞机穿过切变线附近时,遇到较强烈颠簸,这种强天气,曾使得6月15日的飞机观测不得不改变原订的继续向西南方向飞行观测的计划。

以上这些高空次天气尺度系统,在气旋中估计不是少有的现象。

(3) 阿拉伯海次天气尺度涡旋

6月14日是一个个例(图略)。涡旋尺度为500公里左右。其流场主要是由弯曲度较大的螺旋辐合线组成,辐合很强。涡旋流场直到500毫巴仍很明显,最强在800毫巴,在涡旋中心是深厚的云层区,其西南侧是强对流云活动区。飞机在500毫巴上观测到强降水和遇到强烈颠簸,并有强雷电活动。这种涡旋生命期估计不太长,它在6月15日流场上已不能明显看出。

(4) 垂直气流的垂直波

垂直气流速度在垂直方向上的波动现象在阿拉伯海气旋中是相当普遍的,尤其在气旋中部更为明显。这些垂直气流的垂直波,其波长多数为2—3公里。在发展和强盛气旋里,垂直波大部以上升气流为主,在减弱的气旋里,垂直波的波幅虽也很强,但这时的波谷区主要是下沉气流,整层平均速度不大。在这种垂直波出现的同时,云也往往有相应的分层现象。

七、结 语

以上各节所分析的主要是阿拉伯海季风气旋里气流结构的一些特征, 关于它们的物理本质、成因、典型性和它们在天气过程中的作用等问题还有待进一步研究。关于利用飞机下投探空仪资料计算空气和垂直速度, 这里是初次尝试, 可能还有些问题需要作进一步考虑。

致谢: 作者对参加 1979 年夏季季风实验的科学家和技术人员对本工作所提供的支持, 特别是对 R. Grosman 和 F. Kuettner 博士表示感谢。并感谢陶诗言同志对本文初稿提出宝贵意见。

参 考 文 献

- [1] Milles, F. R., R. N. Keshavainurthy, Structure of An Arabian Sea Summer Monsoon System, HIOE Meteorological Monograph, No. 1., East-west Center Press, Honolulu, 1968.
- [2] 丁一汇, 阿拉伯海低压形成和结构的个例分析(本刊).
- [3] Smalley, J. H., Aircraft Dropwindsonde System, Atmos. Technol. 10, 24-28, 1978.

附录: 关于 W_s 的确定、订正以及计算精度问题

根据飞机下投探空仪的重力与降落伞所受阻力的平衡关系, $W_s(z)$ 可表示为:

$$W_s(z) = [mg/c_d s \rho(z)]^{1/2} \quad (2)$$

式中 m 为探空仪的质量, g 为重力加速度, c_d 是阻力系数(这里可取为常数), s 为降落伞的横截面积, $\rho(z)$ 为 z 高度的空气密度。对于相同规格的探空仪, $mg/c_d s$ 可取为常数, 所以在层结大致相同的大气中, W_s 只是高度的函数。如果多次观测的空气垂直速度在相同高度上的平均值为零, 即 $\overline{W}(z) = 0$, 由 (1) 式可有:

$$W_s(z) = \overline{W_s(z)}. \quad (3)$$

符号上的长划表示平均值。我们从 6 月 14—25 日的 193 次个例计算中, 选出 10 次个例用作求取 $W_s(z)$, 这 10 次个例都是在少云且垂直气流很弱的大气中观测的。另外, 对于 40 次落速波动变化不大的个例, 所算得的 $\overline{W_s(z)}$ 与前十次个例的结果非常接近, 相差不到 0.5 毫巴/分。由此看来, 所确定的 $W_s(z)$ 数值可以比较精确地代表各次正常降落伞(即无荷水附加重量、伞布或伞绳无受损、探空仪重量和伞形相同)相对于空气的落速。估计其精度不小于 0.5 毫巴/分(或 10 厘米/秒)。

当探空仪在云中或雨中降落时, 荷水影响可作适当订正。通过尼龙绳(它和降落伞材料相似)吸水率试验, 降落伞的最大荷水量为 300 克(在一般云中穿越 0.6 公里时可荷这一水量)。由公式(2)计算, 对所用探空仪, 300 克附加荷水量可使 $W_s(z)$ 增加 2.5%。在实际计算中, 遇到穿云 0.6 公里后即在 $W_s(z)$ 中加到这一订正值, 出云后两分钟逐渐取消这一订正值。由于这一订正值不是一个大数量(约为 15 厘米/秒), 因此即使订正不太严格也不致于过多影响计算精度。根据 17 日 9 次个例的每隔 10 秒钟的气压随时间变化曲线中的不规则小波动(它主要由非系统性气压误差造成)的幅度统计分析, 非系统性误差绝大多数小于 1 毫巴。至于系统性的气压误差只要不超过 10 毫巴, 它对计算结果影响很小, 因为 $W_s(z)$ 是用气压变率计算的。

由以上分析, 当以两分钟时间间隔计算落速时, 垂直气流速度的总误差一般不会超过 20 厘米/秒。对于 1.5~2 公里厚气层的平均值, 精度可到 10 厘米/秒左右。落速若包含高频的不规则波动, 这可能是由于开伞时过强的张力使伞布或伞绳受损, 因此破坏了降落伞的正常降落状态。对这种个例, 以及气压的系统性误差大于 15 毫巴的个例在计算中不宜采用。

CHARACTERISTICS OF THE AIR CURRENT AND SUB-SYNOPTIC SCALE EVENTS WITHIN A SUMMER MONSOON CYCLONE OVER THE ARABIAN SEA

Chen Rui-rong

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

Using the dense dropsonde data from 1979 Summer MONEX, the structure of the vertical current, cloud layers, horizontal spiral convergence current and ring of strong wind within a summer monsoon cyclone over the Arabian Sea is studied. Some sub-synoptic and mesoscale events on the surface and at high levels are described. The vertical velocity is calculated directly from the raw dropsonde data, it is a preliminary attempt to use the vertical velocity for synoptic analysis.