

## 台风内区中尺度结构研究

张婉佩 陈善敏\*

(气象科学研究院)

### 一、引言

三十多年来,人们想弄清楚成熟台风的眼区结构,已作了很大的努力。Bergeron<sup>[1]</sup> (1954) 利用一系列通过菲律宾群岛的台风资料,研究给出了台风内区的风和降水最大值的位置,以及眼壁有明显的向外倾斜的特点。Riehl、Malkus<sup>[2]</sup> (1961) 和 Gray、Shea<sup>[3,4]</sup> (1973) 等人利用机载探测仪器得到的资料,研究台风眼的结构。Gray 等人根据 1957—1969 年 21 个飓风的 533 次飞机穿行飓风的观测资料,进行综合分析,揭示台风内区的结构特征和变化。七十年代后期以来,飞机探测技术迅速发展,使以研究为目的的飞行计划能付诸实施。这些飞行大大加密了探测时间和层次,增加了探测项目,有针对性,致使研究台风的发展演变过程有可靠的细微的资料。如 1980 年对台风 Allen 的飞机探测,飞机穿行次数增加到 90 次,在 10 个层次上飞行。有时在同一高度上不同的象限多次飞行,有时在不同的高度对某一象限多次飞行,以便获取各种目的的资料,使研究效果大大提高。Willoughby 等人<sup>[5]</sup> (1982) 讨论了 Anita 和 David 两个台风的结构,并与 Allen 作了对比。他着重讨论了同心双眼台风的结构和演变。指出同心双眼现象是大西洋热带气旋的一个普遍特征,尤其在强的对称风暴系统中常可观测到。当台风在原有的眼壁周围形成次级对流云环时,就出现了次大风值和同心眼区。观测事实还说明,内眼减弱以至最终消失时,外眼往往是收缩的,但涡旋的强度减弱或至少不再加强。Jorgensen<sup>[6,7]</sup> (1984) 利用对 4 个成熟台风的飞机观测,常规观测资料与雷达定量资料相结合的方法,研究中尺度和对流尺度的特征。这 4 个台风中,有 3 个具有同心双眼结构,特别对 Allen 作了详尽的分析。他认为这些资料揭示了台风在径向方向有很强的二维的中尺度特征,并可由时间的连续和空间尺度(10—40 公里)的变化来确认。而对流尺度的特征却小得多,生命史也更短。与此同时,陈善敏<sup>[8,9]</sup> (1986, 1987) 利用飞机探测、雷达和卫星云图的资料,研究了 1949—1985 年西北太平洋台风中同心双眼的结构和特征,以及眼区演变的中尺度特征。他认为研究台风眼区双环云墙演变的过程能很好地表征这种中尺度的特点。从 83 个同心双眼台风中发现,随着内外云墙消失、收缩,台风强度有明显的振荡。有些台风在形成双眼结构后,强度并不减弱,而有所加强。Willoughby<sup>[5]</sup> 也曾提到在更早些时候出现的双环,表示台风的加强的事实。Willoughby 和金汉良<sup>[10]</sup> (1984) 等设计了一个非静力

本文 1987 年 3 月 23 日收到,9 月 10 日收到修改稿。

\* 现在国家气象局专业气象司

轴对称数值模式,利用两个不同的微物理参数,模拟飓风的结构和演变,都能得出同心对流双环的结构。这些对流环在发展过程中不断地被替换,当它围绕涡旋中心收缩时,外环代替了内环。张铭、李崇银<sup>[11]</sup>(1986)采用轴对称静力平衡下的原始方程,设计了模拟方案。在 21 小时后,也模拟出同心双眼结构。

Frank<sup>[12]</sup>(1985)曾指出,风暴内最大降水是发生在风暴有双眼结构的时候。在双眼期间,眼壁的平均降水率是随风暴的加强而增加的。但眼壁的范围很小,对总降水量的贡献只有 40%左右。眼壁区的最大降水发生在风暴移动路径方向的右侧 15—20°之内。同心双眼台风的移动路径,根据陈善敏<sup>[13]</sup>对西北太平洋上 76 个同心双眼台风的统计,多数是转向台风,并指出双眼结构一般均发生在转向点之前。

由上可见,研究台风眼区内结构的演变,是研究台风发展的一个重要组成部分。对同心双眼结构的研究,也成为人们日益关注的课题之一。它不仅更深入细致地揭示眼区中尺度特征,而且对台风预报有一定实际意义。

## 二、成熟飓风的观测事实

对成熟飓风观测事实的众多分析中, Jorgensen<sup>[6,7]</sup>(1984)的工作是较为细致的。其它作者也从各个不同角度研究分析了飓风眼区的各种特征。下面我们对成熟飓风的眼区主要特征作一概述,并作些比较。在有详细探测资料的 Anita、David、Allen 和 Frederic 等飓风中, Allen 飓风的眼区特征更具有代表性。

### 1. 切向风特征

图 1 表示飓风 Allen 的切向风剖面。观测表明:

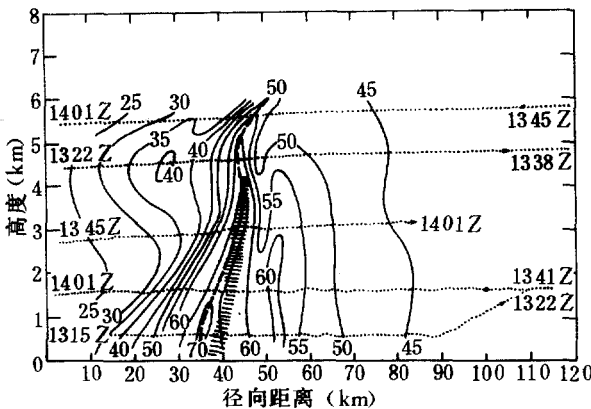


图 1 飓风 Allen 的切向风剖面(单位米/秒)<sup>[7]</sup>  
粗虚线: RMW, 阴影区: >37 dBZ 雷达反射率区, 箭头、点线: 飞行路线方向, 及终止时间

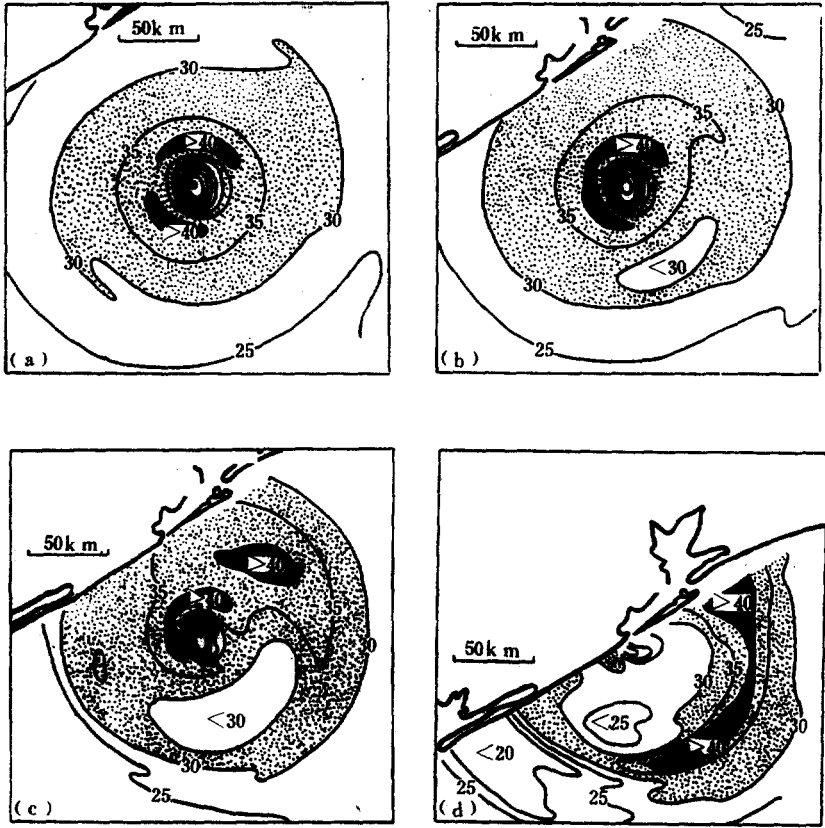
(1) 最大风速值半径 (RMW) 随高度明显倾斜, 斜率为 1 : 2 (30°) 左右。这与雷达回波反射率的探测结果一致。

(2) 最大风值位于近地层, 强度随高度减弱, 在 6 公里处约为地面强度的 30%。Gray (1973) 在综合分析中曾给出同样的结果, 但倾斜度不明显。Frank<sup>[12]</sup>(1985) 则认为眼壁在直径较大时, 倾斜更甚(45°)。

(3) RMW 并不总是单一的, 有时会出现两个 RMW。Willoughby<sup>[5]</sup>(1982) 也发现这种现象。

(4) 从 Allen 切向风演变中发现, 最初外围切向风次大值形成于距中心 100

公里以外的地方, 1—2 天内, 切向风次大值半径逐渐缩小, 对应内眼减弱, 外眼收缩, 出现同心双眼结构。

图2 飓风 Alicia 风场演变<sup>[14]</sup>

(a)1983. 8. 17. 2000GMT (b)1983. 8. 18. 0000GMT (c)1983. 8. 18. 0400GMT (d)1983. 8. 18. 0800GMT

Willoughby<sup>[14]</sup> (1985) 给出飓风 Alicia 的风场演变图(图2), 十分清楚地显示出内外眼的变化过程。图2a表示飓风只有一个与眼壁对应的风速最大值, 外围风的极值并不清楚; 图2b可看到在原风速最大值的外围东南—东象限, 开始形成外环的风速最大值; 图2c中, 外环风速最大值在东北象限已达到原来眼壁的强度; 图2d则表示飓风接近陆地时, 外围风速最大值已成为主要的风区了。

## 2. 径向风与径向辐散特征

图3是飓风 Allen 的径向风( $V_r$ )与径向辐散( $RDIV$ )剖面。图中表示:

(1) 在中高层, RMW 以内, 距风暴中心 30—40 公里附近有很强的流出, 径向风速达 15—20 米/秒; 低层有很强的向内流入, 距风暴中心 40—60 公里附近, 风速达 25 米/秒, 大约为切向风的 40%。随着半径增加, 径向风减小, 其与切向风减少比例相似(图3a)。

(2) 最大流出层的高度是多变的(图略)。从 Allen 其它时次的飞机探测表明, 最大流出层变化范围是在 1.5—5.5 公里。

(3)  $RDIV$  是成对出现的, 正负中心相间隔地出现在 RMW 以内(图3b)。

(4) 在最大流出层上, 出现最大辐合中心, 这个区域也正是上升运动最强的地方。因

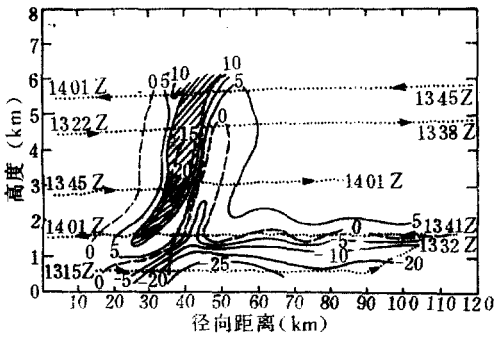


图 3a 台风 Allen 的径向风剖面(单位米/秒)<sup>[7]</sup>  
说明同图 1, 阴影区为 >10 米/秒

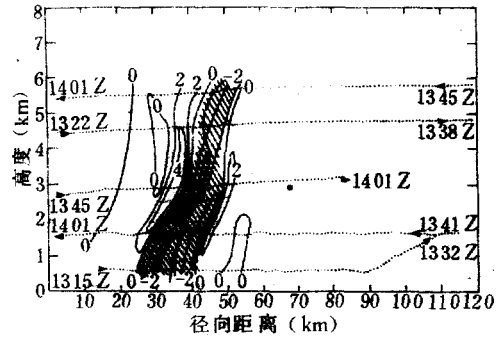


图 3b 台风 Allen 的径向辐散剖面  
(单位  $10^{-3} \text{秒}^{-1}$ )<sup>[7]</sup>说明同图 1,  
阴影区为  $RDIV < 0$ 。

此,至少从中尺度观点来看,上升气流肯定是向外运动的。而紧临最大辐合中心的是最大辐散中心,约相距 10 公里。对于二维运动,这表示在接近眼壁处有一狭窄的下沉运动区,并向下延伸至 2 公里处。低层的最大辐合区,与对流尺度的上升气流中心也是一致的。

3. 重直运动与质量通量特征

为了获取中尺度垂直速度 ( $W_m$ ),可用  $RDIV$  分析结果,根据柱坐标中简化的连续方程计算得到,如下式:

$$\frac{\partial}{\partial E}(\rho W_m) = -\rho(RDIV)$$

也可用 LeMone 和 Zipser<sup>[15]</sup>(1980)的对流中心判据方法测得垂直运动,两种方法得到的剖面几乎是一致的(图略)。台风 Allen 的垂直运动特点:

- (1) 在 RMW 以内有一上升运动中心为 7 米/秒,向中心 15 公里处出现下沉运动为 2—3 米/秒,眼壁外也有弱的下沉运动。Gray<sup>[9]</sup>的综合分析结果,垂直运动值要小得多。
- (2) 从 4 个成熟台风垂直速度的平均值与极值计算结果比较,约小一半左右。垂直运动无论是上升运动还是下沉运动均随高度增强,在 3—4 公里以上稍有减弱。
- (3) 从 Allen 的雷达垂直反射率结构上可知,在距中心 120 公里外的雨带区,有一个很强的上升气流约为 6 米/秒,相应地切向风也出现次大值,这正是 Allen 出现同心对流眼壁的证明。
- (4) 由中尺度垂直速度计算的眼壁质量通量,随高度是增加的。最大值出现在 3.5—4.5 公里处,量值为  $50-150 \times 10^8$  千克/秒。根据 Shea 等<sup>[4]</sup>(1973)的综合分析结果,垂直运动及质量通量的量级均比个例计算的小,他们认为垂直运动只占眼壁内区范围的很小一部分,约为 10%。

4. 相当位温特征

图 4 给出了 Allen 的  $\theta_e$  剖面。图中反映  $\theta_e$  观测特征为:

- (1)  $\theta_e > 365 \text{ K}$  的通道槽位于 RMW 以内距风暴中心 15—25 公里处,并随高度向外倾斜。
- (2) 在 RMW 以内,  $\theta_e$  开始是随半径减小增加的,以后由于干空气的卷入,  $\theta_e$  又减小,接近

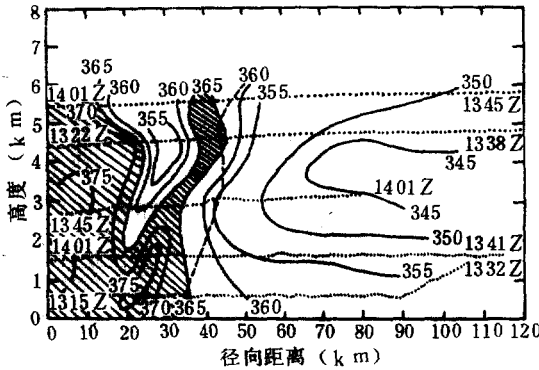


图4 飓风 Allen 的  $\theta_e$  剖面(单位 K)说明  
同图1, 阴影区为  $>365K$   
层所致。

中心处又增加。在中层有明显的干冷舌存在, 恰与径向辐散正值区相一致。作者<sup>[13]</sup>曾对西太平洋台风对流层中下层结构分析中指出, 在台风出现同心双眼结构时, 800—900hPa 高度附近  $\theta_e$  是增加的, 低层出现湿性冷舌, 而其上部是干的。图4中在距中心15—25公里附近, 在2公里以下也有  $>375K$  的  $\theta_e$  高值中心, 这一结构特点与径向辐散与垂直运动相联系。

(3) 在 RMW 外, 低层  $\theta_e$  随径向距离缩小而增加, 表明由于感热和潜热从洋面输送到流入

### 5. 绝对角动量与风切变特征

绝对角动量可由下式得到:

$$M_r = V_\theta R + \frac{fR^2}{2}$$

式中  $M_r$  为绝对角动量,  $V_\theta$  为切向风。由 Allen 两天的变化作综合分析可知(图略):

- (1) 在 RMW 处,  $M_r$  等值线是向外倾斜的, 与 RMW 本身倾斜一致。  $M_r$  倾斜度随半径增大而加大。
- (2) 在眼壁附近, 低层空气通过拖曳力把角动量传给海面。两天后, 随着 Allen 半径缩小, 角动量也减小 40—50%。
- (3) 由于角动量的垂直变化与水平变化的差异, 切向风随高度减小, 眼壁直径随高度扩展, 形成眼壁向外倾斜的特点。
- (4) 风切变值随 RMW 缩小而减小。根据观测值得到, Allen 的风切变值两天后由 3.1 米/秒·公里减小到 1.4 米/秒·公里, 计算值与此相近。但 Gray 等人<sup>[3,4]</sup> (1973) 根据热成风计算的切变值与观测值相差甚大。这是由于 Gray 用的是综合资料, 往往与个例有较大差异。另外, Allen 飓风的强度比较大。

### 三、 同心双眼台风与单眼台风的比较

1. 同心双眼台风有眼壁收缩的特点。这是指台风强度加强时, 外围出现次大风值, 随着内眼的减弱, 外眼往往是收缩的。最终, 内眼消失, 外眼替代了原有的眼。而一般台风无此特点。

2. 同心双眼台风眼直径的变化与其强度的振荡。内、外眼的直径在演变过程中, 常常伴随着台风强度的振荡。根据作者<sup>[9]</sup>的研究, 这现象与台风外围多次涌入环状闭合云墙有关。下面给出台风 Dot (8521) 的台风强度与眼直径演变图(图5)。此例比较明显地反映台风内外眼壁演变中, 地面中心气压开始迅速下降到最低, 然后维持、略有回升, 继而又出现维持、下降等强度振荡的特征。

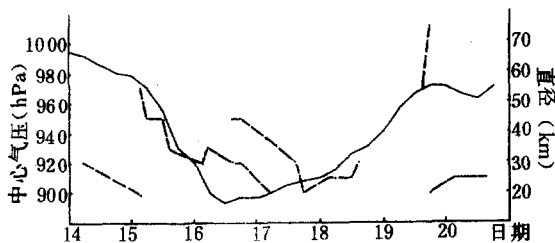


图 5 台风 Dot(8521)强度与眼直径演变

图[<sup>a</sup>]——中心气压 --- 眼直径

3. 对称的风场分布。根据观测事实表明,大部分同心双眼台风切向风的分布是十分对称的,而单眼台风的风场分布常出现不对称的现象,它的螺旋雨带的环流中心与雷达反射率图的几何中心是不相合的,切向风分布明显不对称。

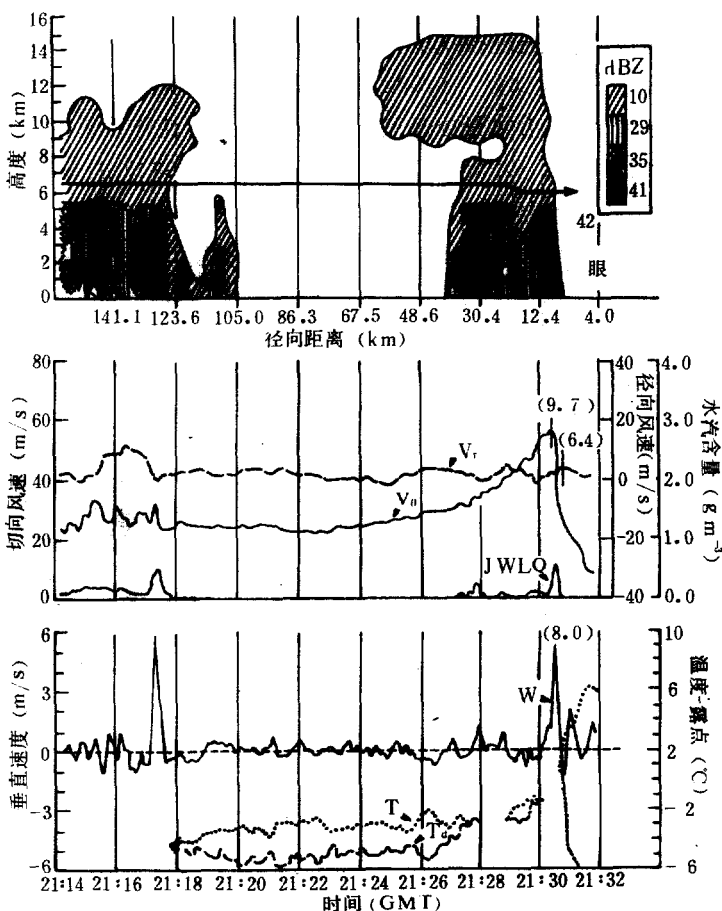


图 6 飓风 Allen 的雷达反射率剖面[<sup>6</sup>]

括号中数字表示离中心的距离,单位:公里

4. 同心双眼台风的内区有两个上升运动极大值,与切向风的两个极大值是一致的。Jorgensen<sup>[6]</sup>曾指出,在对称风暴中,上升运动最强区,也是地面风速最大区。只是切向风极大值的位置比上升气流极大值位置更偏离中心 2 公里左右。图 6 给出飓风 Allen 的雷达反射率剖面。在单眼台风的剖面图中(图略),没有两个切向风极大值,也没有两个上升

运动极大值,眼区内的变化是非常平缓的。

5. 在台风螺旋雨带区,切向风的变化在 20 公里径向距离内,可达 5 米/秒以上,上升运动可达 6 米/秒以上。而在单眼台风中,一般无明显的变化。

6. 作者<sup>[16]</sup>对 1983 年的 Abby 和 Forrest 台风眼区附近的卫星云图资料分析表明,同心双眼结构是与单眼结构交替出现的,这是由于内眼与外眼眼壁不同尺度的对流云泡消长演变的结果。通过对特征指标晴空区的跟踪分析,得到其按逆时针方向旋转,速度为 19.6 米/秒,这一特点是由于受水平传播的内重力波影响。

### 四、 飓风结构数值模拟试验

近年来,飓风结构的数值模拟试验进展较快,这对深入研究飓风眼区结构无疑是十分有益的。Shapiro 和 Willoughby<sup>[17]</sup> (1982) 研究设计了轴对称平衡分析模式,较逼真地模拟出风暴的流场结构,并对由热量或动量源导致的次级环流作了诊断,证明飓风点涡是处于梯度平衡和静力平衡的。Willoughby 和金汉良等<sup>[10]</sup> (1984) 进一步研究了一个非静力轴对称数值模式,模拟飓风结构及其演变过程。他们在 Klemm 和 Wilhelmson<sup>[18]</sup> (1978) 的对流模式基础上作了有益的改进,使用了两个不同的微物理参数,并把声学变量用显式表示,而不用半隐含模式。用这个模式,最初仅先模拟液体水过程;第二步包括冰晶过程。特别引人注目的是当冰晶过程加入时,更能出现同心对流环的结构。模式积分到 44 小时的结果表明,涡旋演变中形成许多对流环,如图 7a 中的 II、V、VII、VI、VII、环等。一般这些

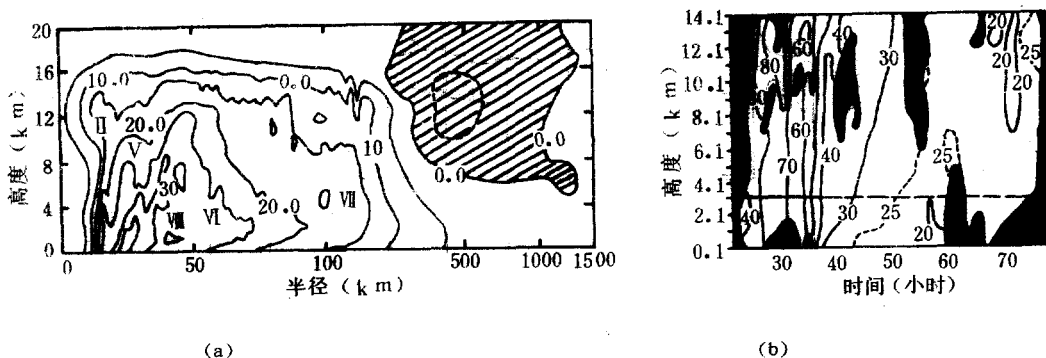


图 7 数值模拟结果<sup>[10]</sup>

(a) 44 小时后切向风剖面,罗马字表示对流环,

(b) 对流环的演变,等值线为 RMW,阴影区表示不出现 RMW

对流环维持不到 12 小时,在外围又生成一个对流环,出现内眼被外眼逐渐代替的现象。在图 7b 中表示 V 环的演变过程,最先在距中心 40 公里的低层出现次级环流,随即扩大到距中心 80 公里的整个对流层。此后对流环收缩,43 小时后在距中心 25 公里范围内代替了原来的 II 环而成为主要的环壁。这种演变过程除了对流层高层的对称不稳定的作用外,还与冰模式中存在的低层次级环流作用有关。在这两种机制的共同作用下,既能发展出更多的对流环,也能使它们维持。

## 五、 几点讨论

通过对成熟飓风的观测事实的分析与比较,以及数值模拟的试验结果分析,并着重从同心双眼结构特点,对其内区中尺度结构的基本特征值得提到的几点是:

1. 径向流入一般在 1.5 公里以下,且速度是向下增加的,最大流入值可达 25 米/秒。因此,1.5 公里以下的资料对于精确测量径向气流是很重要的。
2. 在 10—100 公里眼壁区范围内,平均垂直运动速度为 5—6 米/秒,最大垂直运动在 RMW 以内几公里处,有的风暴最大上升运动可达 9 米/秒。从中尺度观点来看上升运动通过动量的垂直输送使 RMW 以内的切向风速增加,从而使眼壁倾斜。
3. 下沉运动不是在眼中心,而是出现在眼壁的上升运动附近离眼壁内缘 10—20 公里的通道内,数值模拟的结果也是如此。
4. 眼壁的向上质量通量比向下通量大 2—3 倍,这种中尺度特征可为数值模拟提供较为可靠的依据。
5. 根据角动量守恒原理,切向风随高度减小,与眼直径随高度扩展是一致的。Frank<sup>[19]</sup> (1977) 根据综合探空资料分析指出,在积雨云内是角动量守恒的。中尺度分析曾指出,在眼壁内,中尺度上升运动几乎也是角动量守恒的。
6. 同心双眼结构是大西洋飓风和太平洋台风的一种常见现象,它多发生在强风暴中。它除了具有一般成熟飓风的特征外,更有它的特点。它们的演变更为复杂,根据数值模拟的结果,多个对流环的出现,除了高层的对称不稳定作用外,低层的次级环流作用肯定存在的。Orville 和 Chen<sup>[20]</sup> (1982) 曾用对称云模式证明,新对流环的形成是由下沉运动与边界层之间的相互作用引起的。

对同心双眼结构的研究还有许多困难,如飞机探测的时间,不可能与其同步;双环之间甚至多环之间的相互制约作用也不容易获得可靠的资料;以及对它的预报价值尚未涉及等,这些终将成为人们关注的课题,是不必怀疑的。

## 参 考 文 献

- [1] Bergeron, T., *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **80**, 131—164, 1954.
- [2] Riehl, H., and J. S. Malkus, *Tellus*, **13**, 8—39, 1961.
- [3] Gray, W. M., and D. J. Shea, *J. Atmos. Sci.*, **30**, 1565—1576, 1973.
- [4] Shea, D. J., and Gray W. M., *J. Atmos. Sci.*, **30**, 1544—1564, 1973.
- [5] Willoughby, H. E., et al., *J. Atmos. Sci.*, **39**, 395—411, 1982.
- [6] Jorgensen, D. P., *J. Atmos. Sci.*, **41**, 1268—1285, 1984.
- [7] Jorgensen, D. P., *J. Atmos. Sci.*, **41**, 1287—1311, 1984.
- [8] 陈善敏. 同心双眼台风结构和强度的初步分析. *大气科学*, **10**, 183—188, 1986.
- [9] 陈善敏. 台风同心双环云墙特征. *气象科学研究院院刊*, **2**, 2, 1987.
- [10] Willoughby, H. E., and Han Liang Jin, et al., *J. Atmos. Sci.*, **41**, 1169—1186, 1984.
- [11] 张铭, 李崇银. 台风眼的数值模拟试验. *大气科学*, **10**, 225—231, 1986.
- [12] Frank, D., Jr. Marks, *Mon. Wea. Rev.*, **113**, 909—930, 1985.
- [13] 陈善敏. 同心双眼台风的特征分析. 1985 年台风会议文集, 气象出版社, 1987 年.



- [14] Willoughby, H. E. , Confirmatory observations of concentric eyes in hurricanes, 16th Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology, USA, 1985.
- [15] LeMone, M. A. , and E. J. Zipser, *J. Atmos. Sci.* , **37**, 2444—2457, 1980.
- [16] 陈善敏. 同心双眼台风眼区演变的云图分析. *气象*. **11**, 9—10, 1985.
- [17] Shapiro, L. J. , and H. E. Willoughby, *J. Atmos. Sci.* , **39**, 378—394, 1982.
- [18] Klemp, J. B. , and R. B. Wilhelmson, *J. Atmos. Sci.* , **35**, 1070—1096, 1978.
- [19] Frank, W. M. , *J. Atmos. Sci.* , **34**, 1553—1568, 1977.
- [20] Orville, H. D. , and J. M. Chen, *J. Atmos. Sci.* , **39**, 2807—2827, 1982.

## THE STUDY ON MESOSCALE CHARACTERISTICS OF TYPHOON INNER CORE—A SURVEY

Zhang Wanpei    Chen Shanmin

(Academy of Meteorological Science, SMA)

### Abstract

Since 1950's instrumented aircraft has been used to investigate hurricanes, resulting in many studies of the inner core (eyewall) region. Most of the studies dealt with the structure and dynamics of the eyewall. Recent advances in aircraft instrumentation technology have allowed to study the cloud and mesoscale structure of the mature hurricane in detail. Especially, the evolution of concentric double-eye typhoons has been greatly analyzed and discussed. Numerical simulation on the hurricane eyewall has also made encouraging progress.

The paper is to introduce and compare some main observation and research results above mentioned. Meanwhile, the features of hurricane inner core are physically discussed.