

# 湿斜压性与热带气旋强度突变<sup>\*</sup>

余 晖

(上海台风研究所, 上海, 200030)

吴国雄

(中国科学院大气物理研究所,  
大气科学和地球流体力学国家重点实验室(LASG), 北京, 100029)

## 摘 要

应用湿位涡方程和倾斜涡度发展理论, 研究了热带气旋内部相当位温结构的演变与其强度突变的可能关系, 并用一套高分辨率的模拟资料对所得结论进行验证。结果表明, 由于热带气旋眼壁附近相当位温面陡立, 湿斜压性变化所激发的倾斜涡度发展是引起该区域垂直涡度突然增大或突然减小的主要原因。当热带气旋中心附近大部分区域的垂直涡度显著增长时, 热带气旋就会在整体上表现为爆发性或迅速发展。最后还据此对同心双眼结构的出现和消失如何影响热带气旋强度变化进行了探讨。

关键词: 热带气旋, 强度突变, 倾斜涡度发展。

## 1 引 言

位涡分析是研究气旋性涡度发展机制的有效工具, 已有不少研究应用它分析、解释热带气旋的强度变化。但是, 常用的 Ertel (1942) 位涡在低纬度和对流层低层一般很弱, 并且不包含水汽因子, 在热带气旋研究中的应用受到很大的限制。吴国雄等<sup>[1, 2]</sup>从严格的原始运动方程出发, 将饱和大气中水汽凝结潜热的作用引进位涡分析, 证得饱和湿空气的湿位涡守恒特性。在湿位涡守恒的前提下, 他们应用外切平面定律分析指出, 由于  $\theta_e$  面的倾斜, 大气垂直稳定度、湿斜压性和水平涡度的合适分布可诱发垂直涡度强烈发展, 并根据此类涡度发展的特点称之为倾斜涡度发展。

目前, 人们对热带气旋强度突变物理机制的认识还很不足, 而上述湿位涡的概念和倾斜涡度发展理论为对流层低层和低纬度气旋性涡度爆发性发展的诊断及预报提供了一个有力工具。文中第2节将据此分析眼壁附近相当位温结构的演变与热带气旋强度突变的可能关系。第3, 4, 5节将应用一套高分辨率的模拟资料对所得结果进行验证。第6节将尝试对

\* 初稿时间: 2000年7月5日; 修改稿时间: 2001年1月18日。  
资助课题: 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学国家重点实验室(LASG) 开放课题“强度突变台风的湿位涡分析”和国家自然科学基金项目(49975014, 49823002和49825504)。

同心双眼结构演变与热带气旋强度变化的可能关系进行探讨。

## 2 湿位涡与倾斜涡度发展理论

吴国雄等<sup>[1]</sup>从严格的原始运动方程出发, 推导得到精确形式的湿位涡方程

$$\frac{dP_m}{dt} = \alpha(\nabla p \times \nabla \alpha) \cdot \nabla \theta + \alpha \nabla \theta \cdot F_\zeta + \alpha \bar{\zeta}_\rho \cdot \nabla Q \quad (1)$$

式中,  $\alpha$  为比容,  $p$  为气压,  $\theta$  为相当位温,  $F_\zeta$  为涡度摩擦耗散,  $\bar{\zeta}_\rho$  为绝对涡度,  $Q$  为非绝热加热

$$P_m = \alpha \bar{\zeta}_\rho \cdot \nabla \theta \quad (2)$$

为湿空气位势涡度, 简称湿位涡(MPV)。它等于单位质量气块的绝对涡度在相当位温梯度方向的投影与这一梯度绝对值的乘积。

由湿位涡方程可得, 无摩擦、湿绝热的饱和大气满足

$$\frac{dP_m}{dt} = 0 \quad (3)$$

即湿位涡守恒。

将湿位涡在等压面上展开, 定义其垂直和水平分量分别为  $P_{m1}, P_{m2}$ <sup>[1]</sup>, 即

$$P_m = P_{m1} + P_{m2} \quad (4)$$

$$P_{m1} = -g(\bar{\zeta}_\rho + f)\theta_p \quad (5)$$

$$P_{m2} = -g\mathbf{k} \times \frac{\partial \boldsymbol{\alpha}}{\partial \rho} \cdot \nabla_p \theta \quad (6)$$

式中

$$\bar{\zeta}_\rho = \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)_\rho$$

$$\theta_p = \frac{\partial \theta}{\partial p}$$

由上述定义, 得

$$g(\bar{\zeta}_\rho + f)\theta_p = P_{m2} - P_m$$

外切平面定律对此进行了说明, 并根据此类涡度发展的特点称之为倾斜涡度发展(SVD)。

式(7)表明, 在诱发SVD的过程中, 风垂直切变、大气垂直稳定性和湿斜压性的影响不是孤立的。为此, 文献[2]引入热力学参数

$$C_M^M = \frac{P_{m2}}{\theta_p} = -g\mathbf{k} \times \frac{\partial \boldsymbol{\alpha}}{\partial \rho} \cdot \frac{\nabla_p \theta}{\theta_p} \quad (8)$$

该参数为水平涡度  $-g\mathbf{k} \times \frac{\partial \boldsymbol{\alpha}}{\partial \rho}$  向垂直涡度的映射,  $\left| \frac{\nabla_p \theta}{\theta_p} \right|$  为  $\theta_c$  面的倾斜角度。由式(7)可求得SVD的充分必要条件

$$C_M^M(t + \Delta t) - C_M^M(t) > P_m \left[ \frac{1}{\theta_p(t + \Delta t)} - \frac{1}{\theta_p(t)} \right] \quad (9)$$

只要式(9)得到满足, 风垂直切变、大气垂直稳定性和湿斜压性的变化都有可能导致SVD。更准确地可写为

$$\frac{d\bar{\zeta}_\rho}{dt} \frac{dC_M^M}{dt} \quad (10)$$

即垂直涡度的个别变化正比于热力学参数  $C_M^M$  的个别变化。

众所周知,热带气旋眼壁附近等相当位温面近于陡立,应是发生SVD的良好环境。但是,对于热带气旋而言,风垂直切变、大气垂直稳定性和湿斜压性三者的作用是否有主次之分呢?大量研究结果表明,非绝热加热对于热带气旋强度变化至关重要,因此相当位温空间分布的演变(即大气垂直稳定性和湿斜压性的变化)应与热带气旋强度变化有密切的关系。而热带气旋眼壁附近等相当位温面已近于陡立,大气垂直稳定性不易发生十分明显的变化,由此可以预见,湿斜压性变化所激发的SVD应是导致热带气旋强度突变的主要原因。下面将用一套高分辨率的模拟资料对这一推测进行验证。

### 3 飓风 Andrew (1992) 和资料概述

飓风 Andrew (1992) 是美国历史上受灾最严重的飓风之一。该风暴于1992年8月14日由非洲西海岸附近的一个热带扰动发展而成,于8月22日达飓风强度(表面最大风速大于33 m/s)。8月21日00时00分(世界协调时,下同)到23日18时00分,Andrew的中心气压从1014 hPa降至922 hPa,平均每小时下降2.2 hPa,超过爆发性发展的标准( $> 1.5$  hPa/h)。此后,Andrew略有减弱,在登陆佛罗里达之前又重新增强至922 hPa,表面最大风速达67 m/s。8月24日08时30分,Andrew登陆佛罗里达,4 h后进入墨西哥湾,8月25日开始转向西北方向移动,并于26日登陆路易斯安那,而后迅速减弱消失。

Liu 等<sup>[3]</sup>利用一个非静力的中尺度模式(MM5)对Andrew爆发性发展和登陆Florida的过程(8月21日12时00分到24日12时00分)进行模拟,很好地重现了它的路径、爆发性发展过程、登陆前的最低海平面气压、海岸线附近的强风、最大风速环、眼、眼墙、螺旋云带以及其它云系结构。模拟的该区动力、热力和降水结构与已有的观测分析非常一致。文献[3]已对模拟结果进行详细的分析与论证,在此不再赘述。

上述模拟使用了3层嵌套、移动网格技术。最细网格(文献[3]称之为网格C)的水平分辨率为6 km,格点数为 $124 \times 94$ ,垂直方向共23层。该网格随着Andrew的移动每3 h移动一次,用于描述飓风的内核和螺旋雨带结构。在此就应用网格C每3 h输出一次的结果,分析8月23日12时00分到24日09时00分期间(共8个时次)Andrew内核附近的相当位温和湿位涡结构(以下为叙述方便起见,简称这8个时次为时次1到时次8)。

### 4 飓风强度与垂直涡度

在研究时段内,飓风Andrew持续西行。图1为模拟所得Andrew在这一时期的强度变化曲线(注:如无特别说明,后文所指Andrew均为模拟再现的飓风)。

图1表明,在这一阶段,Andrew持续增强,其强度变化大致经历了3个阶段:首先是爆发性发展阶段。从时次1到时次3,中心最低气压( $P_{\min}$ )从938 hPa降至929 hPa,达到爆发性发展的标准;然后是一缓慢发展阶段。从时次3到时次5的6 h内, $P_{\min}$ 仅降低2 hPa;时次5之后,Andrew再次迅速发展,进入强度变化的第3阶段,并于时次8达到其生命史的最强强度917 hPa。

相对于中心最低气压的变化而言,三维空间相对涡度 $\zeta$ 的演变较为复杂,但从总体上说,相对涡度的强弱基本反映了飓风的强弱。当中心附近大部分区域的涡度都同时得到迅速发展,飓风就在整体上体现为爆发性或迅速发展;而在缓慢发展阶段,大部分区域的

涡度均无显著增长, 甚至在某些区域明显减弱。 $\zeta$  的演变特征在其  $X-Z$  剖面图(图2)上得到了清楚的体现:

(1) 在研究时段内, Andrew 中心附近  $\zeta$  的量级高达  $100 \times e^{-5} s^{-1}$ , 垂直方向的正涡度高值区在 200 hPa 以上, 但水平范围仅有几十公里。 $\zeta$  在 900 hPa 左右最大, 随高度升高逐渐减小。

(2) 飓风中心与正涡度中心不一致。低层最大涡度出现在飓风中心附近 10 ~ 30 km 处, 水平剖面图表明最大涡度出现方位随时间而变化(图略)。两中心之间的距离随高度升高而增大, 在垂直剖面图上表现为飓风中心两侧存在向外倾斜的两个高涡度区。

(3) 尽管研究区域很小, 低层大气并不是均一的正涡度区, 而是存在零星的负涡度区。有些负涡度区距中心不超过 100 km。

(4) 在 Andrew 爆发性发展(图2a ~ c)和迅速发展阶段(图2e ~ h), 中、低层涡度均有显著的增长。对高层(约 500 hPa 以上)  $\zeta$  的水平分布进行分析后发现, 高空涡度中心分布较零乱, 不同区域涡度变化不太一致, 但是在这两个阶段总有某些区域的涡度显著增大(图略)。这一特点在图2中也有所反映。例如在爆发性发展阶段, 从时次1(图2a)到时次2(图2b), 高空 300 hPa 附近飓风中心东侧的  $\zeta$  即明显增大。

(5) 在缓慢发展阶段, 从时次3(图2c)到时次4(图2d), 各层涡度均无显著增长, 甚至在某些区域明显减弱, 如低层(800 ~ 900 hPa) 中心西侧。从时次4(图2d)到时次5(图2e), 中心东侧中低层涡度显著减小, 高空涡度也只在 300 hPa 以上略有发展, 因此尽管低层中心西侧的  $\zeta$  有较明显的增大, 飓风在整体上仍表现为缓慢发展。

## 5 湿斜压性与垂直涡度

为了验证第2节的推测, 对各时次相当位温、流场及  $P_{m2}$  结构的演变进行了分析, 发现 Andrew 眼壁附近等相当位温面陡立, 与以往的观测研究结果非常一致(图3是时次1到时次4过飓风中心的相当位温和流场的  $X-Z$  剖面图)。

对等相当位温面陡立区相对涡度显著增长区域的分析结果表明, 这些区域的湿斜压性均明显增大,  $|P_{m2}|$  的变化与湿斜压性的变化基本一致, 而  $|\theta_p|$  的变化幅度相对较小。这一特点在各层次的平面图和垂直剖面图上均体现得非常清楚。以时次1到时次2为例, 从垂直剖面图可以看到, 飓风中心东侧高层大气(300 hPa 左右)的等相当位温面由疏变密(图3a, b), 湿斜压性增大,  $|P_{m2}|$  亦显著增大(图4a, b), 而  $|\theta_p|$  仅略有增加(图5a, b), 相应地, 这一区域  $\zeta$  强烈发展(图2a, b)。相对于时次1而言, 时次2, 3的中、低层中心西侧等相当位温面逐渐由疏变密, 湿斜压性增大,  $|P_{m2}|$  亦增大,  $|\theta_p|$  的增长幅度则相对较小, 相应区域  $\zeta$  得到发展。其他时次相对涡度显著增长区域也有类似特征, 在此不再列举。

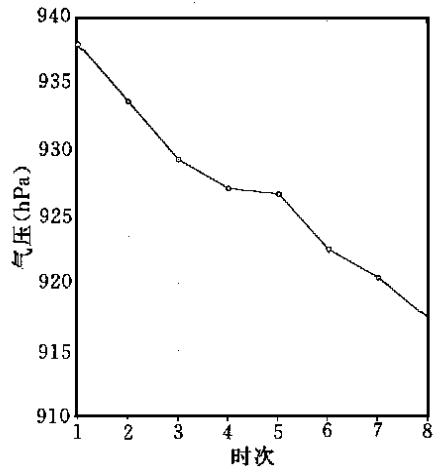


图1 模拟所得飓风 Andrew 中心最低气压随时间的变化曲线  
(横坐标为时次, 纵坐标为气压(hPa))

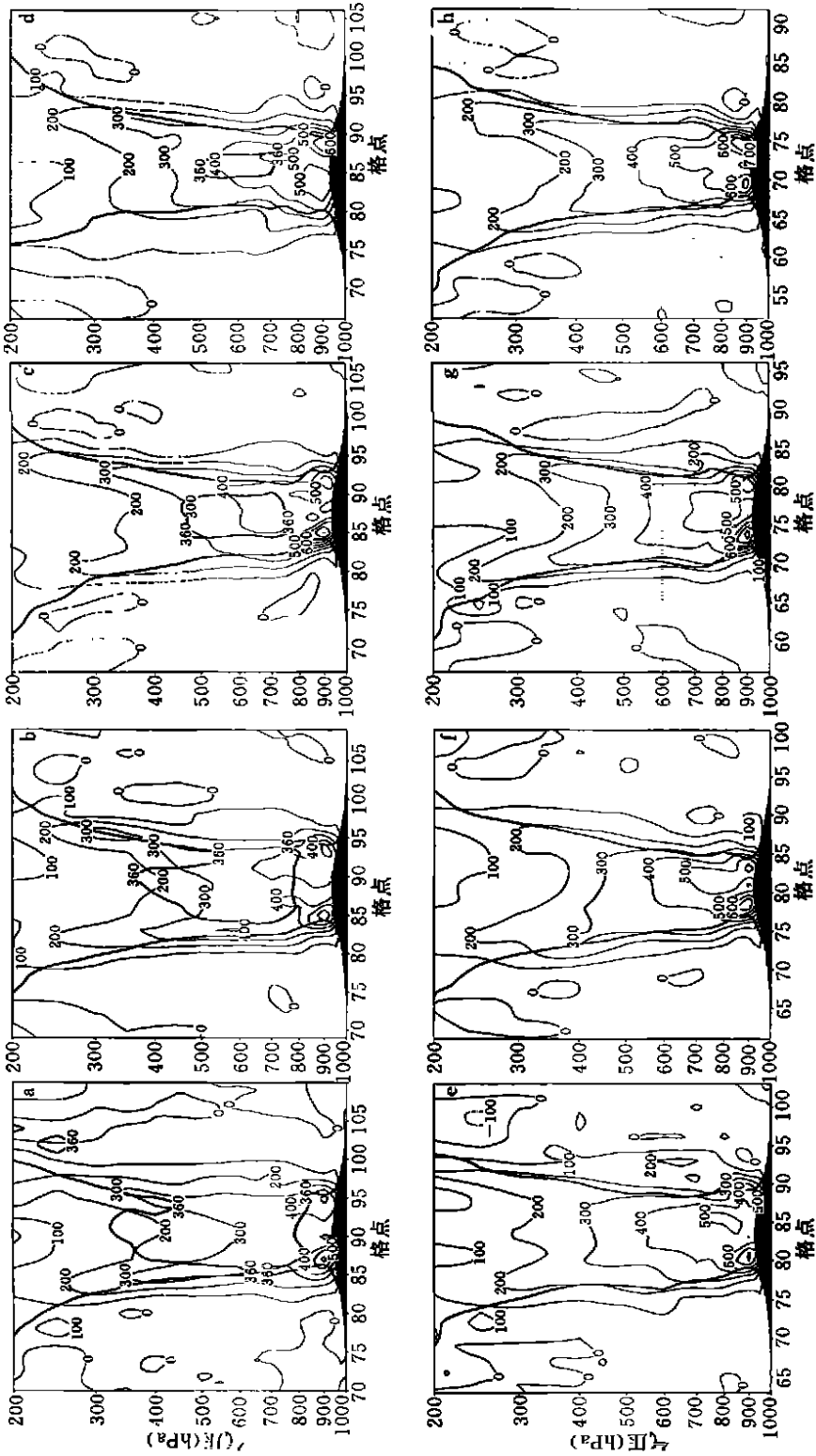


图2 相对湿度的 X-Z 剖面(单位:  $1 \times 10^{-3} s^{-1}$ )

(a~h 分别对应时次 1~8, 横坐标为水平格点序号, 纵坐标为气压(hPa), 粗实线是  $\theta_e = 360$  K 的等值线, 每幅图下方灰色区域的外围廓线是海平面气压)

在 Andrew 缓慢发展阶段, 从时次3到时次4, 各层涡度均无显著增强。不仅如此, 图2c, d 还表明, 中、低空 (700 ~ 900 hPa 左右) 中心西侧  $\zeta_0$  明显减小。对比图3, 4, 5 的 c 和 d 可以发现, 从时次3到时次4, 相应区域等相当位温面由密变疏,  $|P_{m2}|$  显著减小,  $|\theta_p|$  虽也有所减小, 但变化幅度相对较小。根据式 (7), 当湿位涡守恒时, 如果  $|P_{m2}|$  减小, 而  $|\theta_p|$  的变化不足以补偿  $|P_{m2}|$  的变化, 会导致相对涡度的减小, 而且在相当位温面陡立时, 其减小幅度会很大。由此可见, 由湿斜压性变化所激发的 SVD 不仅仅是垂直涡度强烈发展的重要机制, 也是其迅速减弱的重要机制。

## 6 同心双眼结构与热带气旋强度变化

同心双眼结构是在强台风或飓风中经常被观测到的一种现象。由于热带洋面资料的缺乏, 有关的研究多为对某些个例同心双眼云墙演变的观测分析, 对于这一结构的形成与消失如何及为什么会影响热带气旋的强度变化并不清楚。陈善敏<sup>[4]</sup> 利用飞机探测、雷达和卫星云图资料, 对西北太平洋地区的同心双眼台风进行了气候统计分析, 并根据观测事实提出一种同心双眼结构的理想化模型(参见原文图6)。如果不考虑内、外云墙高度与厚度的差异, 这一结构模型可简略地用图6a 来表示。图中 C 为热带气旋中心, I 和 O 分别示出

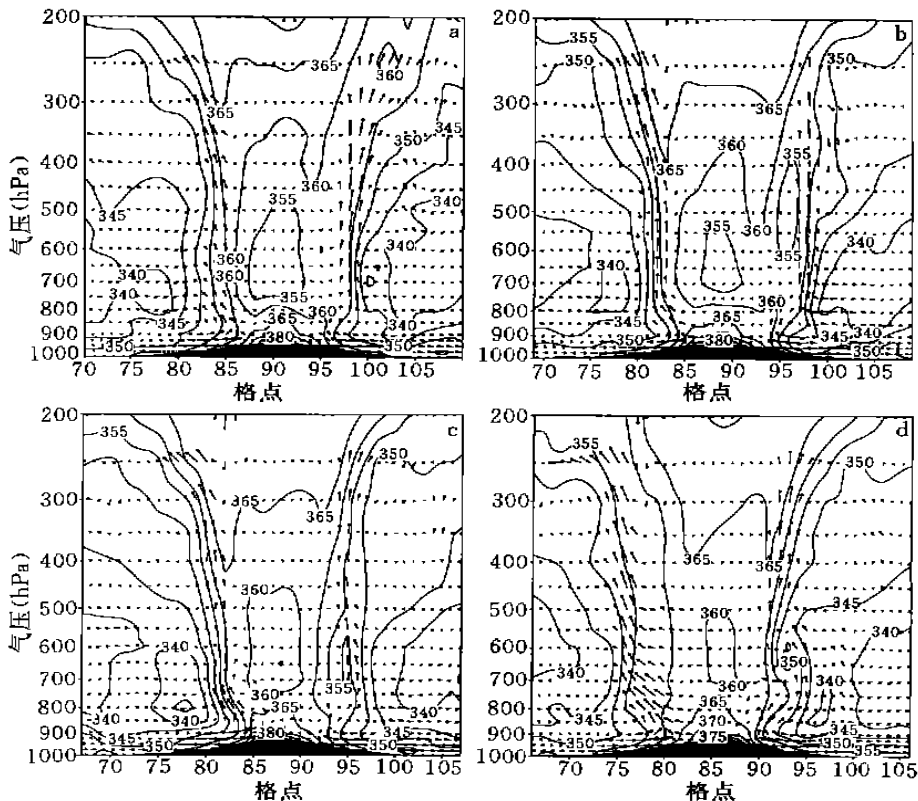
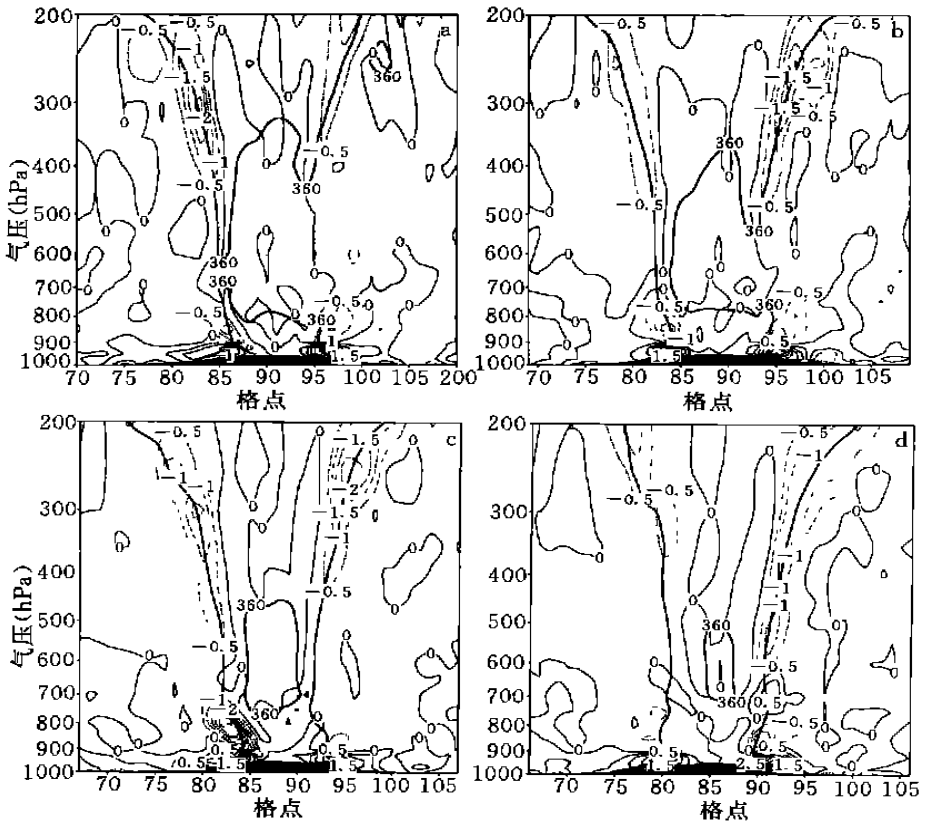


图3 相当位温和流场的 X-Z 剖面图

(黑色实线是等相当位温线, 单位: K, 等值线间隔: 5 K; 水平风速单位: m/s,

垂直速度单位为 0.1 m/s; a ~ d 分别对应时次 1 ~ 4, 其余同图 2)

图4  $P_{m2}$ 的X-Z剖面

(单位: 10 PVU, 1 PVU =  $1 \times e^{-6} \text{m}^2/\text{s} \cdot \text{Kkg}^{-1}$ , 等值线间隔:  $0.5 \times 10 \text{ PVU}$ , 其余同图3)

内、外云墙的位置。由图可见, 内、外云墙区由上升气流所控制, 积云对流发展旺盛, 内眼区和两云墙之间则为下沉气流。已有研究结果表明, 热带气旋眼壁上升气流区等相当位温面陡立, 眼内和眼壁外围是相当位温的相对低值区。据此, 理想情况下同心双眼台风的相当位温分布应如图6b所示, 即内、外云墙区等相当位温面陡立, 内眼区、两云墙之间和外云墙外围则为相对低值区, 图中分别表示为L1, L2和L3区。

根据图6b, 热带气旋由单眼变为双眼, 应是两云墙之间的相当位温低值区L2从无到有的过程。显然, 这一低值中心的发生与发展必然导致内、外云墙区等相当位温面密集, 湿斜压性增大。如前所述, 在这种情况下, 垂直涡度将会迅速增长, 热带气旋的强度迅速增强。图3a~c表明, 从时次1到时次3, 飓风Andrew中心西侧, 即其移动的前方700~800 hPa高度附近, 有一个相当位温的低值中心从无到有, 并逐渐发展, 与同心双眼结构的出现过程非常类似: 这一中心所在区域有下沉运动, 两侧为上升运动, 而随着该中心的出现与发展, 两侧等相当位温面陡立区湿斜压性增强, 垂直涡度明显增长(图2a, c)。但是在这一个例中, 相当位温低值中心外侧的上升运动较弱, 整个系统也不对称, 所以并未出现典型的双眼结构。

在同心双眼结构出现之后, 人们往往观测到外眼发展、收缩, 并最终取代内眼。与此相

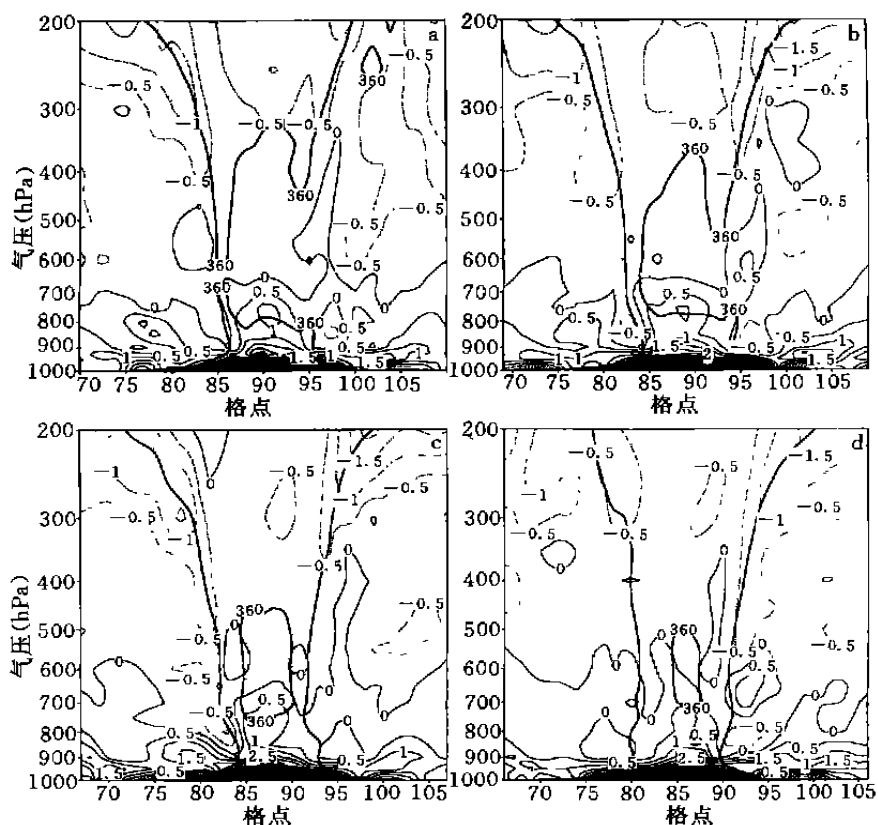


图5 相当位温的垂直梯度  $\theta_p$  的 X-Z 剖面

(单位:  $1 \times 10^{-3} \text{K/Pa}$ , 等值线间隔:  $0.5 \times 10^{-3} \text{K/Pa}$ , 其它同图3)

伴随的是热带气旋强度减弱, 或者至少其增强过程有所停顿<sup>[5]</sup>。这一过程意味着图6b) 中的外云墙逐渐向热带气旋中心靠近, 当它与内云墙足够近时, 二者合并, 此时相当位温的分布可用图6c 表述。由图可见, 随着内、外云墙的合并, 相当位温低值中心 L2 消失, 眼壁区等相当位温面往往由密变疏, 或者至少是无法变得更加密集, 因此会有相应的强度变化特征。从时次3到时次4, 前述 Andrew 移动前方低层相当位温的低值中心消失, 原本密集的等相当位温面突然变稀疏(图3c, d), 湿斜压性减弱, 相对涡度显著减小(图2c, d)。这一过程与同心双眼合并过程也非常相似, 只是在这一个例中, 整个飓风系统并不对称, 不同区域涡度的变化趋势不尽相同, 所以 Andrew 仍表现出一个较为缓慢的发展过程。

## 7 结论与讨论

文中根据湿位涡方程和倾斜涡度发展理论发现, 由于热带气旋眼壁附近等相当位温面陡立, 湿斜压性变化所激发的倾斜涡度发展应是引起该区域垂直涡度突然变化的主要原因, 并用高分辨率的模拟资料进行了验证。当湿斜压性增强诱发倾斜涡度发展, 从而导致热带气旋中心附近大部分区域的垂直涡度显著增长时, 热带气旋就会在整体上体现为爆发性或迅速发展。



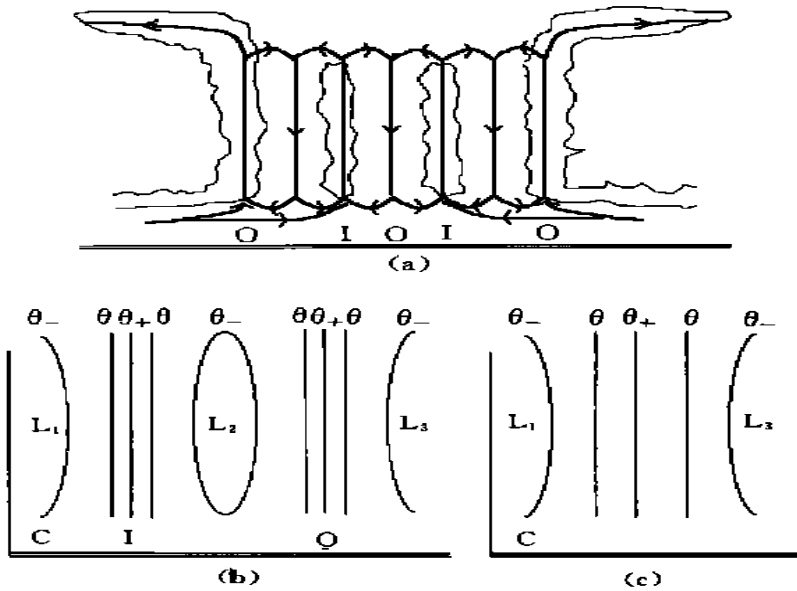


图6 同心双眼台风结构理想化模型

(a. 环流型, b. 相当位温, c. 双眼合并后的相当位温分布)

对理想化模型的分析表明,同心双眼结构的出现往往伴随着眼壁附近湿斜压性的增强,因此这一阶段热带气旋应会迅速发展。这也许是同心双眼结构往往在强台风中被观测到的可能原因之一。而双眼的合并则意味着等相当位温面由密变疏,或者至少无法变得更加密集,因此热带气旋强度减弱,或增强过程有所停顿。但是,根据这样的分析,并不能解释关于同心双眼结构的一个关键问题,即:是什么机制造成相当位温低值中心 $L_2$ 的出现或消失?此外,在实际情形中,热带气旋往往是不对称的,如何分析不同区域垂直涡度的不同变化对整个热带气旋强度变化的影响也是一个有待解决的问题。

倾斜涡度发展机制的一个重要前提是湿位涡守恒,对于热带气旋而言,在文中研究区内,这一前提可近似得到满足。但是对于靠近海平面的低层大气,海气相互作用是不容忽视的。另外,在更大的水平范围内,也往往难以满足大气处处饱和的前提条件。因此,还应进一步分析下垫面热通量的可能影响,以及凝结潜热空间分布的作用。

致谢:美国马里兰大学气象系张大林教授提供资料,解放军理工大学气象学院陆汉城教授给予了帮助,在此一并致谢。

## 参考文献

- 1 吴国雄,蔡雅萍,唐晓菁. 湿位涡和倾斜涡度发展. 气象学报, 1995, 53(4): 387~405
- 2 Wu Guoxiong, Liu Huanzhu. Vertical vorticity development owing to down-sliding at slantwise isentropic surface. Dyn Atmos Oceans, 1997, 27: 715~743
- 3 Liu Yubao, Zhang Dalin, Yau M K. A multiscale numerical study of hurricane Andrew (1992) Part I: explicit simulation and verification. Mon Wea Rev, 1997, 125(12): 3073~3093

- 4 陈善敏. 同心双眼台风结构和强度的初步分析. 大气科学, 1986, 10(2): 183 ~ 188
- 5 Willoughby H E, Clos J A, Shoreibah M G. Concentric eye walls, secondary wind maxima, and the evolution of the hurricane vortex. J Atmos Sci, 1982, 39(2): 395 ~ 411

## MOIST BAROCLINITY AND ABRUPT INTENSITY CHANGE OF TROPICAL CYCLONE

Yu Hui

(*Shanghai Typhoon Institute, Shanghai 200030*)

Wu Guoxiong

(*LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

### Abstract

Based on MPV equation and the theory of slantwise vorticity development, the possible relationship between the abrupt intensity change of tropical cyclone and the evolution of its equivalent potential temperature structure is studied in this paper. A set of high resolution model output data is used to verify the result. Analyses show that, because the moist isentropic surfaces are extremely steep in the eyewall region, the change of moist baroclinity is a main cause for abrupt change of vertical vorticity there. If the vertical vorticity increases rapidly in most regions, the tropical cyclone will experience explosive deepening. Some discussions on how the concentric eyewall structure affects the intensity of tropical cyclone are also proposed.

**Key words:** Tropical cyclone, Abrupt intensity change, Slantwise vorticity development.