

影响热带气旋结构和运动的两类因子的数值研究*

陈联寿

罗哲贤

(中国气象科学研究院,北京,100081) (南京气象学院,南京,210044)

摘 要

利用一个 β 平面正压准地转模式,实施了 4 组时间积分大于 5d 的试验。结果表明:涡度平流和 β 效应同样重要,它们对热带气旋的结构和移动均具有明显影响。

关键词: 热带气旋,结构,移动, β 效应,涡度平流。

1 引 言

关于热带气旋移动物理机制的研究,大多限于线性范畴,着重分析 β 效应的作用。如 Rossby^[1]、叶笃正^[2]、Adem^[3]、Holland^[4]、Chan 和 Williams^[5]等。

众所周知,热带气旋移动所遵循的基本物理约束是绝对涡度守恒,其数学形式为准地转正压涡度方程。该方程包含 β 效应和涡度平流两项。即使对 β 效应的作用有透彻了解,若对涡度平流的作用分析不够,对热带气旋移动的物理机制仍缺乏整体性的认识。

本文将着重分析涡度平流过程的作用。指出涡度平流和 β 效应均十分重要,它们对热带气旋的结构和移动都具有明显影响。

2 模式描述和试验设计

模式方程为 β 平面准地转正压涡度方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} \nabla^2 \psi + J(\psi, \nabla^2 \psi) + \beta \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

式中 ψ 为地转流函数, $\beta = df/dy$, f 为科氏参数。取 β 平面中线处 $\varphi = 25^\circ\text{N}$ 。

计算区域的南北、东西距离均为 5000km,计 101×101 个格点,水平格距为 50km。时步为 10min。取周期侧边界条件,并令背景风速为零。所用模式与文献[5]、[6]相似。

文中设计与实施了 4 个试验:

试验 1,仅含有 β 项,令涡度平流项为零。积分时间为 7 个模式日。初始涡度场为^[5]:

$$\xi_0(r) = (2V_m/r_m)(1 - 0.5(r/r_m)^b) \exp\{(1/b)(1 - (r/r_m)^b)\} \quad (2)$$

式中 $r = \sqrt{(x - x_\epsilon)^2 + (y - y_\epsilon)^2}$, (x_ϵ, y_ϵ) 为初始时刻热带气旋中心的坐标, V_m 为热带

* 初稿时间: 1994 年 6 月 30 日;修改稿时间,1995 年 11 月 20 日。

资助课题:国家重大科技攻关项目 85-906-07-02 资助。

式中 $r = \sqrt{(x - x_\varepsilon)^2 + (y - y_\varepsilon)^2}$, $(x_\varepsilon, y_\varepsilon)$ 为初始时刻热带气旋中心的坐标, V_m 为热带气旋最大风速, r_m 为出现最大风速处的半径, b 为形状参数, 令 $b = 1$ 。

试验 2, 先令涡度平流项为零, 以式(2)为涡度分布场开始积分, 用只含 β 项的模式积分 48h。再令 β 项为零, 涡度平流项不为零, 涡度平流项单独起作用的试验。接着积分 6h, 得到一个沿东西、南北向均不对称的涡度分布。以此为试验 2 的初始场, 积分 5d。

试验 3, 令初始时刻的涡度分布为:

$$\xi_{\omega}(r) = (2V_m/r_m)(1 - 0.5(r/(s_i r_m))^b) \exp\{(1/b)(1 - (r/(s_i r_m))^b)\} \quad (3)$$

式中 $i = 1, 2, 3, 4$, 分别相应于热带气旋环流的 NE, NW, SW, SE 象限。令 $S_2 = S_4 = 1.0$, $S_1 = 0.9, S_3 = 1.1$ 。这样, 形成一个 NE—SW 向初始非对称的涡度场。令 β 项为零, 用只含涡度平流项的模式积分 5d。

试验 4, 除了令涡度平流项不为零外, 与试验 1 相同。这是一个 β 项与涡度平流项共同起作用的试验, 积分 8d。

在试验 1 中, 初始涡度场由式(2)给出, 初始流函数场可由初始涡度场求出。涡度场的中心与流函数场的中心重合, 等涡度线与等流函数线平行, 均为轴对称同心圆分布。在这种情况下, 涡度平流项为零。

设计试验 2, 3 的目的, 主要是想了解涡度平流过程对热带气旋结构的作用。因此, 在试验 2, 3 中, 不能用类似于式(2)描述的初始涡度场。在非对称结构的条件下, 涡度平流项不等于零。因而, 试验 2, 3 应当应用非对称结构的初始场。

本文用两种方法给出非对称的初始场。第一, 试验 2 中从式(2)描述的涡度场出发, 令涡度平流项为零, β 项不为零。积分 48h, 得到沿 y 轴非对称但沿 x 轴仍对称的流型。再令 β 项为零, 涡度平流项不为零, 积分 6h。这时, 涡度平流项的引进使得流型沿 x 轴也不对称了。这个沿 y 轴和 x 轴均不对称的流型即为试验 2 的初始场。第二, 试验 3 中直接用公式(3)给出初始涡度场。由于公式(3)中, 在热带气旋的不同象限, 涡度取值可以不同, 故初始涡度场沿 y 轴和 x 轴也是都不对称。

将试验 2, 3, 4 的结果与试验 1 对比, 可以分析涡度平流过程在热带气旋结构变化中的作用。

3 涡度平流在热带气旋结构变化中的作用

Chan 和 Williams^[5]曾经分析过 β 项影响热带气旋结构的机制。他们认为, 在台风环流所包含的不同波长的谐波中, 波长愈长(短), 向西的 Rossby 波相速愈大(小)。因此, 在热带气旋中心以西区域, 流线分布愈来愈疏; 以东区域, 流线分布愈来愈密。又因为在频散关系式中, 只出现 y 方向波数的平方项, 形成南北方向对称, 东西方向非对称的流型, 并且东西方向的非对称性随时间不断加大。

在试验 1 中, 初始时刻的流函数场为同心圆分布, 南北方向和东西方向均为对称分布(图 1a)。在 β 项的作用下, 经过 7d 的积分, 南北方向的对称性依然维持, 东西方向的对称性明显破坏(图 1b)。为了清楚地描述非对称性随时间的演变, 引进参数 K_r 。即过台风中心沿东西方向作一直线, 该直线与从台风中心 O 点往外数的第 M 根闭合线相交于 M_w 和

M_E 点。若线段 OM_w 大(小)于 OM_E , 或 K_x 大(小)于 1, 则流场分布为西疏东密(西密东疏)的流型分布。定义 $K_x = OM_w / OM_E$, 并令 $M = 6$ 。闭合等值线间隔为初始场流函数最大值的 $1/10$ 。

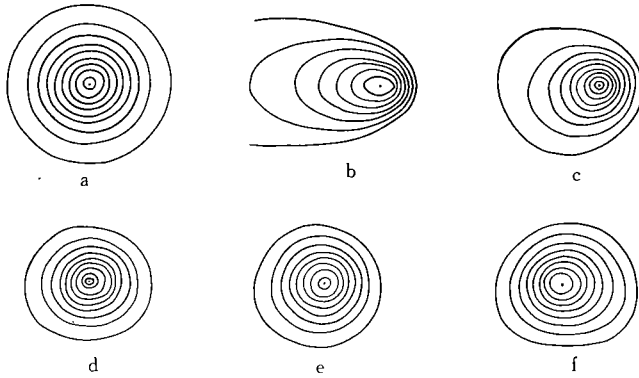


图 1 试验 1, 2, 3 中流函数的分布

(a, 试验 1, 初始场; b, 试验 1, 第 168 小时; c, 试验 2, 初始场; d, 试验 2, 第 120 小时; e, 试验 3, 初始场; f, 试验 3, 第 120 小时)

显然, K_x 值与 1.0 的偏离愈大, 则东西向的非对称性愈强。类似地, 引进参数 K_y , 用以描述南北向非对称的程度。定义 $K_y = OM_S / OM_N$, M_S, M_N 分别为过热带气旋中心的南北方向直线与第 M 圈等值线的交点。再令 $A_s = 0.5(|K_x - 1.0| + |K_y - 1.0|)$, A_s 近似描述整个热带气旋的非对称程度。

图 2 给出了试验 1 K_x, K_y 和 A_s 随时间的演变。可见, 随着时间的增长, K_x 和 A_s 均非线性地增加, K_y 始终等于 1。这意味着 β 效应使东西方向和热带气旋环流总体的非对称程度均不断增加, 对南北方向的非对称性没有影响能力。这些结果与文献[5]一致。不过文献[5]没有分析非对称程度随时间的变化。

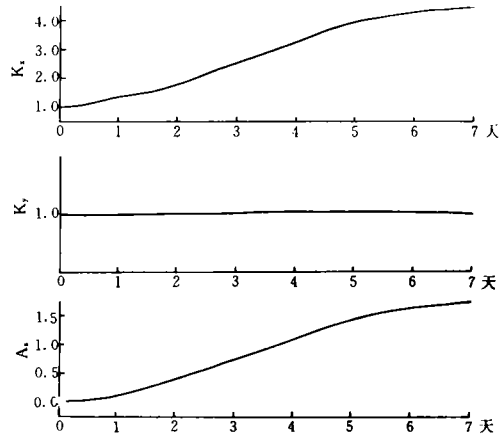


图 2 试验 1 中, 非对称参数 K_x, K_y, A_s 随时间的变化

在试验 2 中, 初值场呈非对称分布(图 1c)。等值线在 NE 象限密集, SW 象限疏松, 反映了向西北方向移动的热带气旋的典型结构。相应地, 热带气旋东半部区域流线密, 西半部区域流线疏, K_x 大于 1; 北半部流线密, 南半部流线疏, K_y 大于 1; 衡量热带气旋总体非对称程度的 A_s 大于零(图 3)。如上所述, 在试验 2 中, 已略去 β 效应, 只含涡度平流。因此, 模式计算的关于非对称性演变的结果, 可以归因于涡度平流单独的作用。由图 3 可见, 随着时间的增加, K_x, K_y 和 A_s 均呈下降的趋势。这一趋势与图 2 中 β 效应使非对称性增加的上升趋势恰成鲜明的对比。在积分的第 120 小时, 尽管热带气旋

在积分的第 120 小时, 尽管热带气旋

环流呈椭圆形,但无论是沿东西方向还是沿南北方向,流线分布都比较均匀(图 1d),这与初始场(图 1c)NE 象限等值线密集,SW 象限等值线疏松的图形明显不同。

概括图 2、图 3 的结果,可以初步认为,在热带气旋结构的演变过程中,存在着作用方向相反的两类过程。一类是 β 效应,它使本来轴对称的等值线间隔均匀分布的流型(如图 1a)非对称化,形成南北方向维持对称,东西方向和总体环流的非对称分布,并且非对称性不断加大。一类是涡度平流,它使本来非轴对称的等值线间隔非均匀分布的流型(如图 1c)在某种意义上对称化,形成沿南北方向和东西方向均准对称的分布。不过,这些只是在一定的参数条件下,一组对比试验的结果。更一般的结论需要更多的数值研究。

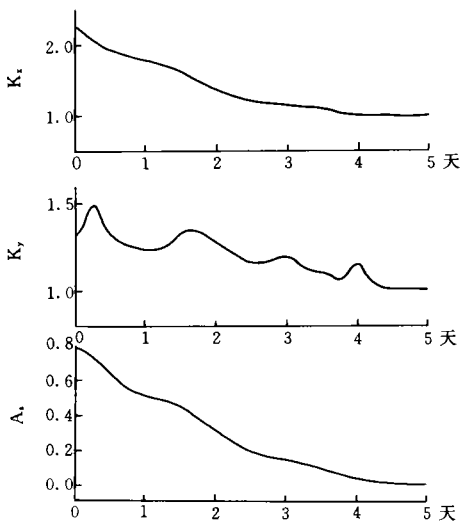


图 3 试验 2 中非对称参数 K_x, K_y, A_s 随时间的变化

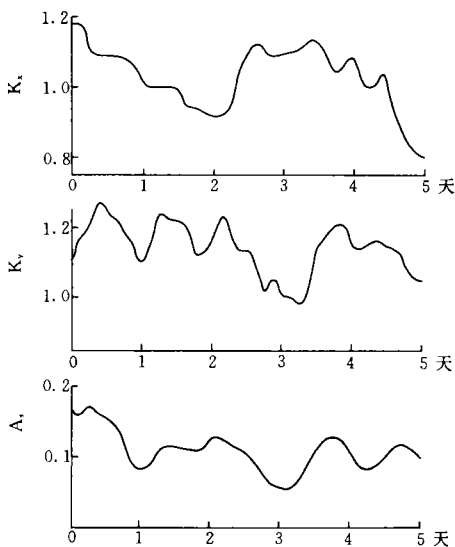


图 4 试验 3 中 K_x, K_y, A_s 随时间的变化

4 涡度平流和热带气旋结构的非周期演变

最近,陈联寿和罗哲贤^[7]根据 1990 年热带气旋特别试验期间加强观测的资料,计算了 9012 号热带气旋移速序列的分维数。结果表明,在这次热带气旋移动过程中,移速的变化具有非周期演变的特征。至于引起这种非周期演变的物理原因,尚待进一步分析。如所周知,线性系统并不能显示非周期行为,非周期演变的根源在于非线性。因而,移速的非周期变化与 β 效应似无直接联系。这需要分析涡度平流过程与移速非周期演变之间的联系。作为一个中间环节,先分析涡度平流与热带气旋结构非周期演变之间的联系。

与试验 2 类似,试验 3 中只含涡度平流。初始流函数场是非对称的(图 1e)。每隔 3h 输出一组热带气旋区域的流函数场和涡度

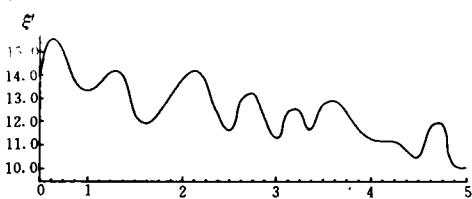


图 5 试验 3 中热带气旋中心涡度值 ξ 随时间的变化

场,计算一次非对称参数 K_x, K_y 和 A_s 。 K_x, K_y, A_s 随时间演变的总趋势是减小的(图 4),但减小的幅度不如试验 2(图 3)明显。图 4 上曲线演变的一大特点,是非对称参数 K_x, K_y 和 A_s 随时间的非周期变化。类似的特征在热带气旋中心涡度值随时间的变化曲线上,也有清楚的表现(图 5)。图 5 纵坐标为相对涡度 ξ 的无量纲量 ξ' , $\xi' = 1$ 相当于 $\xi = 0.583 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。

5 涡度平流与热带气旋涡旋的绕轴旋转

在试验 3 中,每隔 3h 输出一个热带气旋区域的流函数场。积分 120h 计有 41 张图。这些图形清楚地显示出热带气旋涡旋的绕轴旋转现象。注意到试验 3 中仅含涡度平流过程,可以推断,这种旋转似乎是涡度平流引起的。如上述,试验 3 的初始场上,NE 象限等值线密集,SW 象限等值线疏松。过热带气旋中心作一条 NE-SW 向的直线,该直线与第 8 圈等值线的交点为点 A(图 6a)。经过 12h,点 A 逆时针旋转到热带气旋中心的 SSE 方向(图 6b)。从第 12 小时至第 24 小时,点 A 的位置变化缓慢(图 6c)。在第 36 小时,点 A 已旋转到热带气旋中心的 NE 方(图 6d)。对比图 6a 与图 6d,可见:初始场为东北—西南向非对称的流型;图 6d 为东北—西南向大致对称的流型。说明涡度平流使台风涡旋从非对称转为大致对称约需 1—2d。随着时间的增加,点 A 继续逆时针旋转(图 6e—6j)。根据图 6 判断,绕轴旋转一周的时间约为 90h,即 3.75d。

在流体力学中,由于且仅由于相对涡度的平流作用,涡度值为常值的椭圆形涡旋会绕轴旋转,旋转周期由下式决定(见文献[8]):

$$T = \frac{2\pi}{\bar{\xi}} \left[\frac{(a+b)^2}{ab} \right] \quad (4)$$

式中 $\bar{\xi}$ 为常值涡旋的涡度值。 a, b 为涡旋的长、短轴长度。

我们先取一个热带气旋涡旋,其涡度场分布由式(2)决定。用式(2)可以求出 ($0 < r$

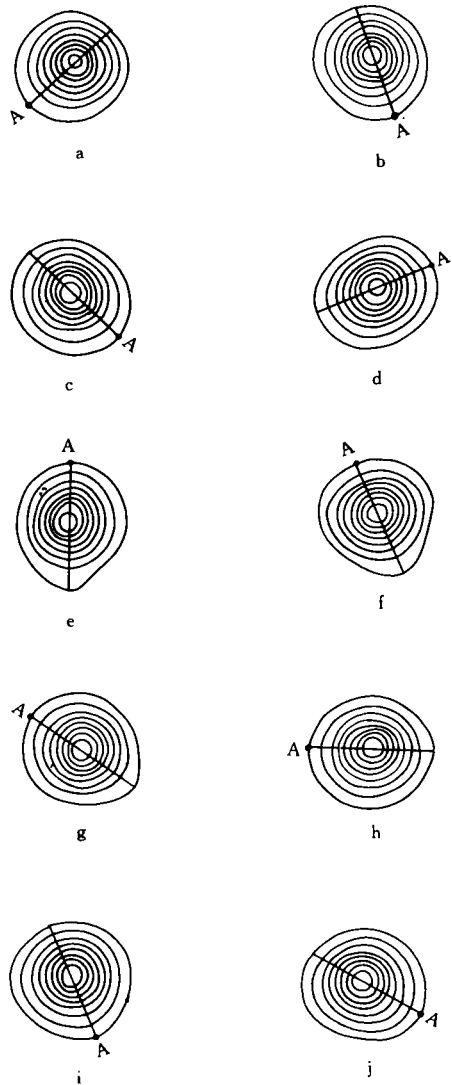


图 6 试验 3 中台风涡旋绕轴旋转的现象
(a, 0; b, 12h; c, 24h; d, 36h; e, 48h; f, 60h; g, 72h;
h, 84h; i, 96h; j, 108h。120h 的图形见图 1f)

$< r_2$) 圆形区域内相对涡度的平均值 $\bar{\xi}$ 。其次,用式(4) 计算相对涡度值为常值 $\bar{\xi}_0$ 的半径为 r_2 的圆形涡旋的旋转周期。在 $V_m = 20\text{m/s}$, $r_m = 100\text{km}$, $r_2 = 400\text{km}$ 的条件下,这个常值涡旋的旋转周期为 3.8d。这个结果与图 6 比较一致。

在试验 1 中,每隔 12h 也输出一个热带气旋区域的流函数场;只含 β 项,涡度平流项为零。热带气旋结构的演变特征是:等值线分布东密西疏的非对称性愈来愈明显,沿南北方向的对称性始终维持。在试验 3 中,只含涡度平流项, β 项为零。涡度平流使热带气旋绕轴旋转,等值线分布最密或最疏的方位随时间改变。同时,由于旋转角速度随时间的变化不是规则的,时快时慢,这就使得热带气旋非对称参数 K_x, K_y, A_i 随时间的演变呈现出某种非周期的特征。由上述可见, β 效应和涡度平流对热带气旋结构演变的影响有着清楚的区别。

6 热带气旋结构演变与移速的联系

试验 4 中,积分 8d。每隔 6h 输出一带热带气旋区域流函数场和涡度场。根据流函数分布图计算非对称参数 K_x ,根据涡度分布图确定热带气旋中心的位置和沿纬圈方向的移速分量 V_x 。规定 $V_x > 0$ 代表向西移动。为消除小的扰动,对 K_x 和 V_x 的序列做三点平滑,记平滑值为 \tilde{K}_x 和 \tilde{V}_x 。

在前 4d, \tilde{K}_x 呈现上升趋势(图 7a)。 \tilde{K}_x 的加大意味着沿东西方向非对称性的加大。

显然,造成这种趋势的原因是 β 效应。涡度平流在 \tilde{K}_x 演变中的作用有两点表现。第一,当 \tilde{K}_x 增大到一定程度时(图 7a 上为 $\tilde{K}_x = 1.42$ 左右),中止这种增大的趋势,使 \tilde{K}_x 逐渐减小。第二, β 效应使 \tilde{K}_x 单调上升,涡度平流的引进使单调上升变为波动式上升。在 \tilde{K}_x 演变的整个过程中,均显示出波动变化。更重要的是,这种波动式的变化带有非周期的特征。

文献[7]已经给出了热带气旋结构与移速之间存在联系的观测事实。这里给出模式大气中的数值证据。在图 7 上,非对称参数 \tilde{K}_x 向西移速分量 \tilde{V}_x 随时间演变的两条曲线的峰、谷位置大致对应。两者之间的相关系数远大于 0.01 的信度值。说明沿东西方向非对称性愈大(小),热带气旋向西的移动速度愈快(慢)。同时, \tilde{V}_x 随时间的演变似乎也是非周期的。

7 结果与讨论

1940 年代以来,关于热带气旋移动的动力学研究大多限于线性范畴,偏重于 β 效应的分析,对涡度平流过程的作用较少专门研究。

本文用 β 平面正压无辐散模式对涡度平流过程的作用进行数值研究。结果表明:涡度

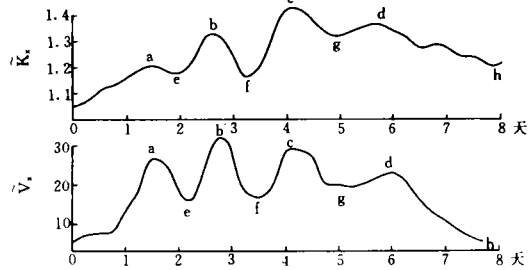


图 7 试验 4 中非对称参数 \tilde{K}_x 和向西移速分量 \tilde{V}_x 随时间的演变

(V_x 的单位: km/6h)

平流和 β 效应同样重要, 它们对热带气旋的结构和运动均具有明显影响。

涡度平流的作用主要表现在:

(1) β 效应使轴对称热带气旋涡旋非对称化, 形成东密西疏的结构。在一定的参数范围, 涡度平流可以使非对称的热带气旋涡旋在某种意义上对称化。看来, 就此而论, 它们可能是作用方向相反的两类过程。

(2) β 效应对热带气旋结构的影响主要限于沿纬圈方向。在一定的条件下, 涡度平流可以使热带气旋绕轴旋转, 使热带气旋区域等值线分布最密或最疏的方位随时间改变。

(3) 热带气旋结构的非对称性和向西移速分量随时间的演变都带有非周期性的特征。这个非周期演变的现象可能与涡度平流过程有关。

本文结果是在环境基流为零的假设下得到的, 这一假设也被其它研究使用过^[5,6]。然而, 实际大气中, 引导气流的作用十分重要。若考虑引导气流, 这里的结果是否仍然成立尚需进一步研究。另外, 在热带气旋的结构与移速的联系方面, 只分析了沿东西方向的移速分量, 没有分析沿南北方向的移速分量。这些均需继续研究。

参考文献

- [1] Rossby C G. On displacements and intensity change of atmospheric vortices. *J Marine Res.* 1948. 7: 175—187.
- [2] Yeh T C. The motion of tropical storms under the influence of a superimposed southerly current. *J Meteor.* 1950. 7: 108—113.
- [3] Adem J. A series solution for the barotropic vorticity equation and its application in the study of atmospheric vortices. *Tellus.* 1956. 8: 346—372.
- [4] Holland G J. Tropical cyclone motion: Environmental interaction plus a beta effect. *J Atmos Sci.* 1983. 40: 328—342.
- [5] Chan J C L and Williams R T. Analytical and numerical studies of the beta—effect in tropical cyclone motion. *J Atmos Sci.* 1987. 44: 1257—1265.
- [6] Fiorino M and Elsberry R L. Some aspects of vortex structure related to tropical cyclone motion. *J Atmos Sci.* 1989. 46: 975—990.
- [7] 陈联寿, 罗哲贤. Dynamic structures and tracks of typhoons. 国际台风特别试验技术会议论文, 广州, 1991.
- [8] Zabusky N j. et al. Contour dynamics for the Euler equation in two dimensions. *J Computational Physics.* 1979. 30: 96—106.

NUMERICAL STUDY ON THE IMPACT OF TWO KINDS OF FACTORS ON TROPICAL CYCLONE'S STRUCTURE AND MOTION OF TYPHOONS

Chen Lianshou

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing, 100081*)

Luo Zhexian

(*Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing, 210044*)

Abstract

By using a beta-plane quasigeostrophic barotropic model, four numerical experiments whose integration times are larger than five model days are performed. Results show that the vorticity advection term and beta term are two basic factors impacting on the structure and motion of typhoons.

Key words: Tropical cyclone. Structure. Motion. Beta effect. Vorticity advection.

第一届 WMO 国际季风会议将在印尼召开

世界气象组织(WMO)国际季风会议是 WMO/CAS(大气科学委员会)东亚季风研究计划(M1 计划)和亚非季风长期研究计划(M2 计划)共同联合召集的,每四年召开一次。第一届会议(IWM-1)将于 1997 年 2 月 24—28 日在印度尼西亚的巴厘岛登巴萨港召开。

IWM-1 目的是给研究工作者和预报员提供一个论坛,交流季风研究和预报的现状 & 经验。交流重点为:使预报员掌握最新的研究成果和预报技术;使研究人员改进季风分析和预报方法;确定季风基本研究和应用研究的优先领域和可行性;了解目前进行的或将要进行灼季风科学试验与资料状况。

本届会议主要交流以下方面内容:行星尺度和大尺度季风特征;季风的天气系统;季风的对流和降水;季风的多尺度变化;季风模拟、理论和可预报性;季风与重大的气象和海洋事件及过程的关系(如:暴雨、洪涝/干旱、冷涌、热带气旋和 El Nino 事件);季风预报;季风的社会和经济影响;季风外场试验的结果和有关季风外场试验的新计划。

会议将采用口头报告和大字报两种形式,工作语言为英语。

目前 IWM-1 国际计划委员会已经成立,委员会成员包括丁一汇教授(主席)、Dr. William K. L. Lau, Dr. J. McBride, Dr. Masato Murakami, Dr. Kamal Puri, Prof. C. P. Chang, Dr. Paulus Agus Winarso, Prof. T. Yasunari, Dr. T. N. Krishnamurti, Dr. Johny C. L. Chen, 陶诗言教授和 Mr. Raphael E. Okoola, IWM-1 国际计划委员会将负责研讨会的全面组织工作,例如:题目的选择、会议主持人的挑选、会前筹备、会议指导及文集准备。

WMO 秘书处将印刷论文摘要文集并于会前提供给所有与会者,因此,请将英文论文摘要(打印在 A4 纸,不超过 2 页,可包括 1 张图或表)一式两份,于 1996 年 10 月 31 日前将原件寄给 WMO 常务秘书,同时将复印件寄给 IWM-1 国际计划委员会主席丁一汇教授。

WMO 地址: The Secretary-General

World Meteorological Organization

Attn: AREP/PTR

41 Ave. Giuseppe-Motta

Case Postale No. 2300

CH-1211 Geneve 2, Switzerland

Fax: +41-22 740 0984

丁一汇教授地址: 北京海淀区白石桥路 46 号

国家气候中心(由巢清尘转收)

邮编: 100081

传真: +86-10 6217 6804