

台风异常运动及其外区热力不稳定 非对称结构的影响效应

陈联寿¹⁾ 徐祥德¹⁾ 解以扬²⁾ 李文弘¹⁾

¹⁾ (中国气象科学研究院, 北京 100081)

²⁾ (天津市气象科学研究所, 天津 300074)

摘 要 本文数值模拟研究揭示了台风外区热力不稳定非对称结构对其异常路径的影响问题, 提出了台风运动非对称结构的影响, 不仅表现在台风涡旋动力结构特征上, 而且反映在台风外区三维非对称热力结构特点方面, 即包括温、湿不稳定层结分布特征及其强弱程度因素。台风外区不同热力非对称分布特征将导致台风移动轨迹的显著差异, 且构成各类“旋转”、“打转”、“转向”等复杂异常路径。

关键词 热带气旋 热力不稳定 非对称结构

1 引言

热带气旋运动理论研究是气象界共同关注的重要课题之一。Holland^[1]指出, 热带气旋运动是环境引导气流和 β 效应相互作用的结果。近年来, 有关观测与研究结果亦强调了下垫面地形及其热力状况对热带气旋运动的影响问题。Fiorino^[2]则指出, β 效应可产生非对称环流系统, 即涡旋东、西侧互为反环流的“ β 偶极涡”(gyres), 且非对称偶极涡之间通风流代表了涡旋运动方向和速度。徐祥德、陈联寿等采用 SPECTRUM 目标台风现场科学试验资料, 分析了飞机下投加密观测(dropsonde)反映台风 Flo 内部非对称结构的偏差场物理图象, 提出了实际台风涡旋动力结构存在类似 W. Gray 认为的非对称偶极子型系统, 即中低层“ β 陀螺”、“通风流”; 高层亦存在辐散-辐合变型偶极子结构, 且高层辐散中心位于中低层“通风流”前方, 即台风未来运动方向(图 1)^[3]。

对于此类台风涡旋非对称“ β 陀螺”高低层偶极子三维动力结构可描述为图 2 所示的物理图象, 图中三维动力结构揭示出台风涡旋非对称偶极子“通风流”及其高层辐散区对台风涡旋移动“引导”作用及其可能的动力机制。台风非对称动力模型(图 2)中台风外区前方垂直环流圈上升支, 对台风未来运动方向具有“引导”作用, 这类 SPECTRUM 资料所揭示的概念模型, 特征恰与观测事实中有关台风朝外区附近强上升运动区移动现象吻合, 即台风涡旋往往有向其前沿强辐合对流区(浓密云团区)移动的趋势。

上述分析表明, 影响台风运动的非对称结构的概念已不只是指台风涡旋的动力特征, 而可更广泛的包含其外区热力因子的非轴对称特征, 其中亦可表现在形成强对流云的层结不稳定热力因素。这类热力结构的非对称特征能否显著影响台风运动状况, 甚至

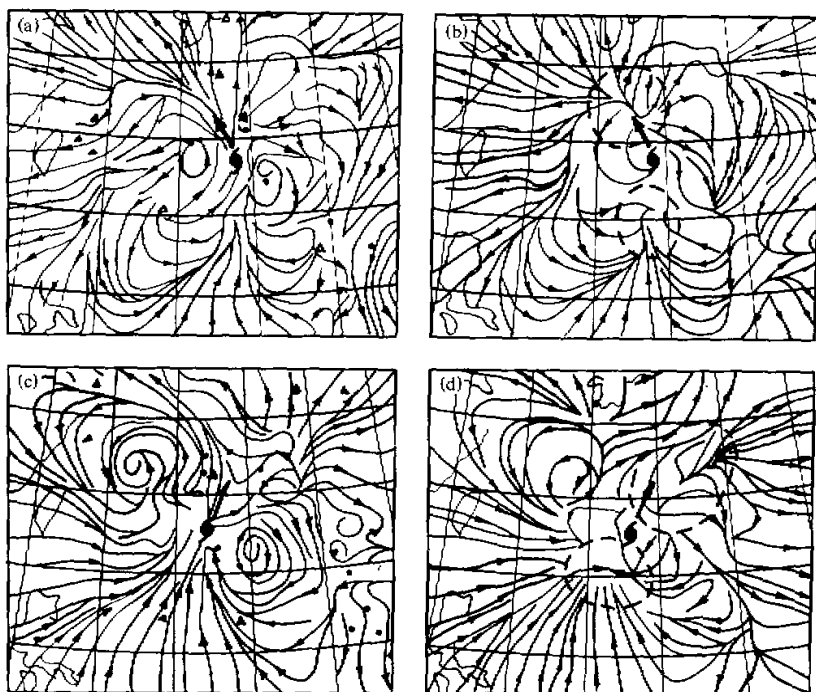


图1 台风Flo (16~17日)流线图

(a) 16日00时500 hPa; (b) 16日00时200 hPa; (c) 17日00时500 hPa; (d) 17日00时200 hPa

包括各类异常运动(突然转向、打转等异常运动现象),将是本文数值试验研究的重点。此问题的探讨有助于我们构造出更新的台风异常运动成因的概念模型,即在关键预报因子中引进动力与热力两类非对称因子,并形成两因素综合的三维非对称物理图象。

2 台风运动的“引导”因素

图2描述的台风涡旋三维非对称动力结构,反映出台风涡旋非对称偶极子“通风流”前方上升支对台风涡旋的“引导”作用。本文选取国际台风现场试验 SPECTRUM 期间若干“右折”、“左折”或西行台风个例资料,即“右折”台风为 Abe、Flo、Gene,“左折”台风为 Abe,西行台风为 Ed。

分析上述个例可发现,转向台风的移动轨迹与台风外区上升运动非对称特征相关。图3a、b分别为转向时刻左转、右转和西行台风运动方向的左前、右前象限的合成垂直速度分布图。

由图3可发现,“左折”台风在其运动方向左侧上升运动明显,“右折”台风在其运动方向右侧上升运动明显。这种相关关系充分揭示出台风外区上升运动非对称特征对台风运动的影响作用及其上升支的“引导”或“吸引”作用。另外,台风外区上升运动相伴的强对流云分布亦与台风移动轨迹有很好的相关关系。强热带风暴 Cecil 在中国东南近海的加

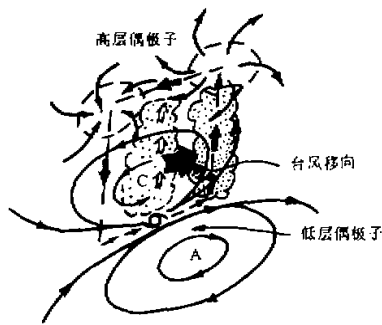


图2 台风“β陀螺”高低层偶极子三维物理图及次级偏差垂直环流结构

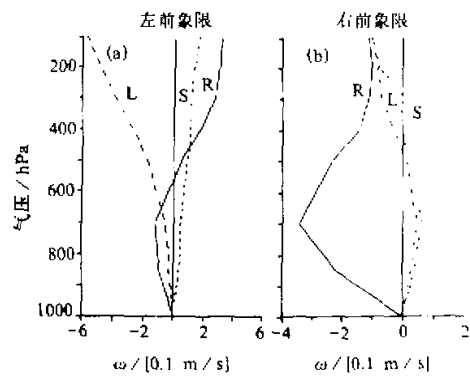


图3 (a) 转向时刻左转, 右转和西行台风在台风运动左前象限垂直速度的分布图; (b) 转向时刻左转, 右转和西行台风在台风运动右前象限垂直速度的分布图

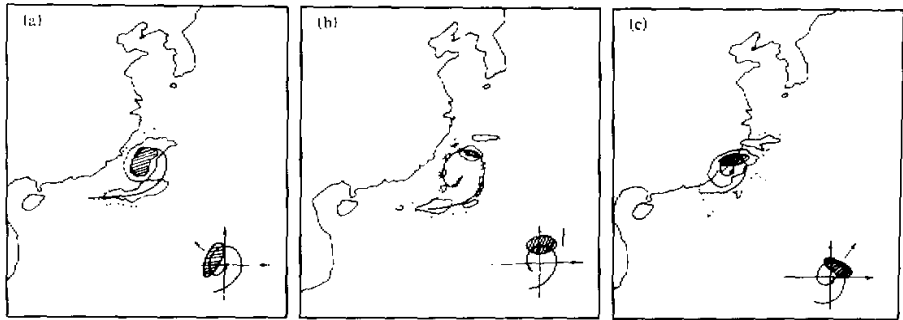


图4 台风结构对运动的影响
图中为强热带风暴 Cecil(9017)的积云分布, 右下角为示意图, 箭头指向台风运动方向

强以及路径的异常可作为一个典型个例。由图 4 可见, 在环境流场较弱的条件下, Cecil 路径多次转向(左折、右折)均呈向风暴外缘强对流云区移动的趋势。

观测事实亦表明, 台风 Gene 的移动同样有朝积云对流活跃区一侧转向的现象。

3 模拟试验及其方案

本文数值试验的目标是探讨类似上述个例台风异常运动与其外区热力非对称结构特征的相关关系, 认识台风外区不稳定强上升运动区对台风运动的“吸引”作用。本文数值试验所指的台风外区为 r (半径) ≥ 350 km 范围, 数值试验时将台风外区($r \geq 350$ km)的不同象限叠加不稳定层结作为不同类型的外区非对称热力结构特征。上述做法可区别于台风涡旋本身的热力结构因素的影响问题。有关不稳定结构的设置为叠加“上干下湿”、“上冷下暖”热力层结特征构成台风外区上升运动的非对称分布特征, 模拟此类台风外区非对称热力结构对台风异常运动的影响效应, 即

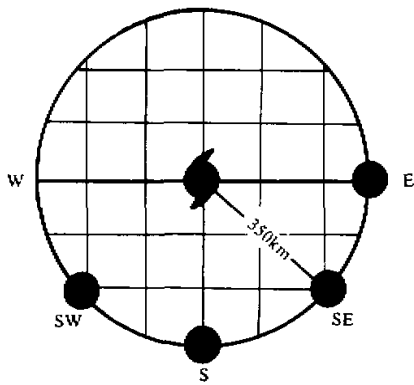


图 5 模拟方案 A 示意图
方案 A: 在台风外区东、东南、南和西南方位叠加不稳定热力结构 ΔS

方案 A: 在台风外区周围不同象限, 如图 5 所示, 东部、东南部、南部、西南部方位, 初始温度场、湿度场叠加-上冷-下暖, 上干-下湿的不稳定热力结构, 叠加量值相当于台风中心对周围区域的温、湿距平。

方案 B: 在台风东部地区, 温度场、湿度场叠加不同程度的不稳定层结热力结构, 如图 6 所示, 叠加量值为 $0, \frac{1}{3} \Delta S, \frac{2}{3} \Delta S, \Delta S, \frac{4}{3} \Delta S, \frac{5}{3} \Delta S$, 其中 ΔS 为温、湿距平, 即 $\Delta T, \Delta q$ 。

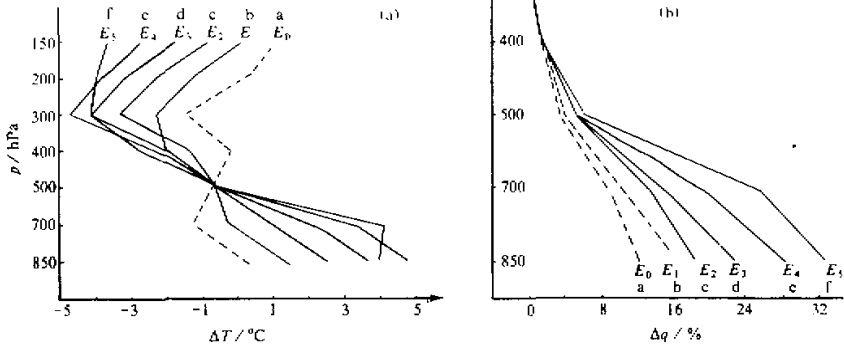


图 6 模拟方案 B 中使用的各种热力结构垂直廓线
其中 $E_0, E_1, E_2, E_3, E_4, E_5$ 分别代表叠加 $0, \frac{1}{3} \Delta S, \frac{2}{3} \Delta S, \Delta S, \frac{4}{3} \Delta S, \frac{5}{3} \Delta S$ 的不稳定热力结构
(a)温度距平, (b)湿度距平

4 数值模式简介

本文采用 PSU/NCAR^[4]中尺度模式对上述台风热力非对称三维结构与异常运动轨迹的相关问题进行数值模拟试验。试验模式水平范围取 $3100 \times 3100 \text{ km}^2$, 水平格距为 100 km, 垂直分辨率为 10 层(σ 坐标), 模式采用 Lambert 投影和静力平衡 σ 坐标, 即

$$\sigma = (p - p_1) / (p_s - p_1),$$

这里 p_s 代表地面气压, p_1 为模式层顶气压。模式主要之物理过程包括 Kuo-Anthes 积

云对流参数化方案^[5], 次网格尺度水平辐散和行星边界层方案。模式中选用时变边条件, 通量形式基本方程组为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} p^* u \\ p^* v \\ p^* T \\ p^* \end{bmatrix} = & -m^2 \frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} p^* u^2 / m \\ p^* uv / m \\ p^* uT / m \\ p^* u / m \end{bmatrix} - m^2 \frac{\partial}{\partial y} \begin{bmatrix} p^* vu / m \\ p^* v^2 / m \\ p^* vT / m \\ p^* v / m \end{bmatrix} - \frac{\partial}{\partial \sigma} \begin{bmatrix} p^* u \dot{\sigma} \\ p^* v \dot{\sigma} \\ p^* T \dot{\sigma} \\ p^* \dot{\sigma} \end{bmatrix} \\ & - mp^* \frac{RT_v}{(\sigma + p_t / \sigma)} \begin{bmatrix} \frac{\partial p^*}{\partial x} \\ \frac{\partial p^*}{\partial y} \\ \frac{p^{*-1} \omega}{c_{pm} m^2} \\ 0 \end{bmatrix} - mp^* \begin{bmatrix} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \\ \frac{\partial \varphi}{\partial y} \\ \frac{Q}{c_{pm} m} \\ 0 \end{bmatrix} \\ & + fp^* \begin{bmatrix} v \\ u \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + F_H \begin{bmatrix} u \\ v \\ T \\ 0 \end{bmatrix} + F_V \begin{bmatrix} u \\ v \\ T \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

上述模式动量、热流量和连续方程中, $p^* = p_s - p_t$, $\dot{\sigma} = d\sigma / dt$, T_v 为虚温, m 为地图投影系数, c_{pm} 为常压湿空气比热, F_H 和 F_V 分别为水平和垂直扩散系数, Q 为非绝热加热项。

地表温度计算方法依据“能量存贮”板块模式的地表能量收支方程

$$c_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = R_n - H_m - H_s - L_v E_s,$$

这里, c_g 是单位区域上板块热容量, R_n 是净辐射, H_m 是流入基层的热量, H_s 是流入大气的显热, L_v 是汽化潜热, E_s 是地表水汽通量。

模式水分循环系统处理方案分为积云对流参数化方案(Kuo-Anthes)。

热力学方程与水汽方程可写为

$$\begin{aligned} \frac{\partial p^* T}{\partial t} = & -m^2 \left(\frac{\partial p^* uT / m}{\partial x} + \frac{\partial p^* vT / m}{\partial y} \right) - \frac{\partial p^* T \dot{\sigma}}{\partial \sigma} + \frac{RT_v \omega}{c_{pm} (\sigma + p_t / p^*)} \\ & + \frac{L_v}{c_{pm}} N_h(\sigma)(1-b)gM_1 + F_H T + F_V T, \\ \frac{\partial p^* q_v}{\partial t} = & bgM_1 N_m(\sigma) + v_{gf}(\sigma) + F_H q_v + F_V q_v, \end{aligned}$$

其中, $N_h(\sigma)$ 、 $N_m(\sigma)$ 、 $V_{gf}(\sigma)$ 分别为对流加热廓线、对流水汽垂直廓线、水汽垂直涡动通量散度廓线, M_1 为水汽辐合量, b 是气柱平均相对湿度函数, q_v 为水汽混合比。

5 数值模拟结果

上述观测分析表明, 台风运动路径有朝积云对流加强侧运动的趋势, 例如强热带风暴 Cecil。这意味着台风“转向”路径及其移动轨迹均与强对流上升运动区的位置相关, 有关文献指出, 台风路径基本上沿台风附近上升运动中心路径移动, 两者偏差仅约一个纬距左右。从动力学角度可认为, 台风外区的不稳定温、湿层结特征必然导致该区域相应的上升运动与积云对流的加强。本文数值试验已证实了此问题。图 7 为模式初始温、

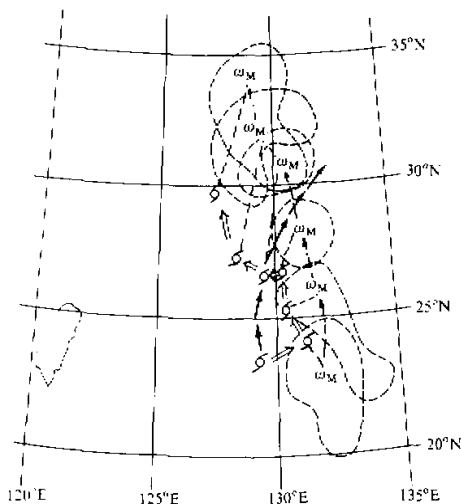


图 7 台风 Flo 外区东南象限云加不稳定热力结构 ΔS 时
台风中心位置与垂直速度极大值间的相互关系
实线箭头指示 Flo 台风实际路径, 断线指某一时刻上升
运动区, 点断线表示相对台风中心强上升运动中心的路径

湿场, 台风外区东南方位, 叠加一温、湿不稳定层结结构, 模式积分 24 小时各时段的台风中心移动轨迹与台风外区环境最强上升运动区相对台风中心“旋转”或移动路径。由图 7 可发现, 台风中心移动方向、路径与强上升运动区位置变化有显著相关。值得注意的是, 初始场台风外区东南方位叠加的“上冷-下暖”, “上干-下湿”不稳定结构, 可导致偏东部位呈显著的上升运动, 这一强上升运动或不稳定层结区域对台风运动有较强烈的“吸引”作用, 即促使台风偏离了原西北偏北路径而呈偏东移动的趋势。这表明, 台风热力非对称结构亦可显著地影响台风运动规律, 即台风外区某方位温、湿不稳定层结所形成的上升运动 (类似 CISK 积云对流) 区域可改变台风路径, “诱导”台风移动。由图 7 可见, 模拟台风 24 小时各时段的移向均与其外区垂直运动高值区相关, 表现

出台风趋向于强上升运动区的特征, 此现象与观测事实相符。另外, 台风外区的上升运动区亦呈相对移动的台风中心的“旋转现象”, 这模拟结果与卫星云图上所发现的台风外围云团相对台风中心的旋转路径特征类似。

图 8 为方案 B 模拟台风路径与温、湿层结稳定度强度的相关特征, 由图 8 可发现, 台风外区不稳定层结强弱程度可显著地影响台风移动路径, 图 8 中虚线(0)为控制试验台风移动路径, 实线(1)、(2)、(3)、(4)、(5)分别为初始温、湿不稳定叠加量为 $\frac{1}{3}\Delta S$ 、 $\frac{2}{3}\Delta S$ 、 ΔS 、 $\frac{4}{3}\Delta S$ 、 $\frac{5}{3}\Delta S$ 所模拟的台风路径。图 8 表明, 初始温、湿不稳定叠加量越大, 对台风运动的“吸引”越强, 即台风偏离原路径“弯曲”程度越显著。这表明, 台风外区对流云团的强弱亦可导致台风的不同特征的运动轨迹。

观测事实可揭示出台风转向往往与其外区对流云团的非对称分布密切相关, 对连云

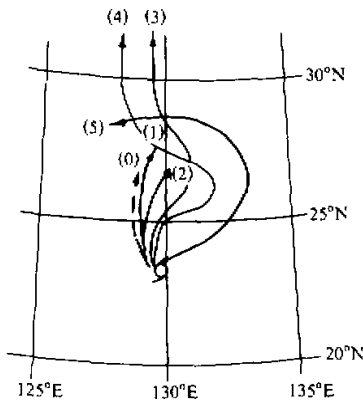


图8 方案B中Flo外区东部象限叠加不同强度不稳定热力结构后, 台风模拟路径
其中0、1、2、3、4、5分别代表叠加强度为0、 $\frac{1}{3}\Delta S$ 、 $\frac{2}{3}\Delta S$ 、 ΔS 、 $\frac{4}{3}\Delta S$ 、 $\frac{5}{3}\Delta S$ 的不稳定热力结构后模拟路径

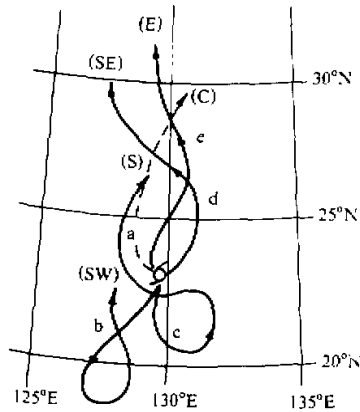


图9 方案A中台风东、东南、南、西南象限叠加不稳定热力结构后模拟路径
(分别为E、ES、S、WS)
断线为台风实际路径(C)

总的估计量可能为热带气旋的异常运动(包括转向)提供有效的线索。例如 Miyakojima 岛观测到的台风 Gene 明显转向积云对流活跃(强雷达回波区域)的现象。

图9为方案A中初始场叠加温、湿不稳定定层结区域分别位于台风中心外东、东南、南与西南方位, 模拟台风路径。由图9可发现, 相应于不同象限的不稳定层结叠加区, 台风路径呈显著差异, 并表现出各类复杂轨迹, 如路径b、c为打转轨迹, 路径d、e则为抛物线轨迹。这说明, 台风热力非对称结构分布特征是台风移动路径的关键影响因素之一。台风运动不仅受到环境场引导气流、台风自身动力非对称结构、 β 效应等因素的“牵引”或“制约”, 而且对台风外区热力非对称结构十分敏感, 由此类热力因素的作用, 可激发出台风各类异常运动现象, 甚至包括“旋转”或打转轨迹, 如图9所示。例如, 不稳定层结叠加在台风南侧或西南侧, 台风将被“吸引”, 先移向偏南方向后“打转”北上; 由于环境场基本气流等因素的综合作用效应, 几类不同初始不稳定层结分布条件下的模拟台风路径后期总趋势均为偏北移向, 但各自轨迹仍有显著差异。

6 结论

综上所述, 本文的数值试验揭示出台风外区非对称热力结构(湿、湿不稳定层结)对台风移动轨迹的影响作用, 如图10所示。这反映出台风外围积云对流云团或上升运动区对台风的“吸引”机理,

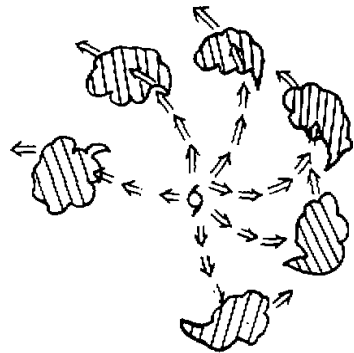


图10 显示热带气旋趋向于强对流区运动示意图
箭头指热带气旋路径, 阴影区指强对流云区

进一步证实了台风运动与热力非对称因子的相关关系。通过本文数值模拟试验,可得出如下结论:

(1) 热带气旋运动非对称结构的影响,不仅表现在热带气旋系统动力结构特征上,而且反映在台风外区三维非对称热力结构的特点方面,如温、湿场的不稳定层结的非对称分布。

(2) 热带气旋外区热力结构的非对称分布可导致热带气旋路径的显著改变,即热带气旋中心趋于强温、湿不稳定层结区域。

(3) 热带气旋的异常运动特征与其外区热力不稳定层结构的强弱程度相关。

(4) 热带气旋运动对于其外区热力不稳定结构的分布特征具有较显著的敏感性,不同的外区热力非对称结构分布可导致热带气旋轨迹的显著差异,并可形成各类复杂运动路径,其中包括“旋转”或“打转”、“转向”等异常运动。

参 考 文 献

- 1 Holland, G.J., 1983, Environmental interaction plus a Beta effect, *J. Atmos. Sci.*, **40**, 328~342.
- 2 Fiorino, M. and R.T. Elsberry, 1987, Some aspect of vortex structure related to tropical cyclone motion, *J. Atmos. Sci.*, **46**, 975~990.
- 3 Xu Xiangde and Chen Lianshou, 1993, The effect of the interaction among multi-scale systems and the asymmetric dynamic and thermodynamic structure of tropical cyclone on its track, WMO Tropical Cyclone Programme Report No. TCP-33, III 1~7.
- 4 Anthes, R. A. and T. T. Warner, 1978, Development models suitable for air pollution and other meso- meteorological studies, *Mon. Wea. Rev.*, **106**, 1045~1078.
- 5 Kuo, Y.H. and R.A. Anthes, 1984, Semiprognostic tests of Kuo-type cumulus parameterization scheme in an extratropical convective system, *Mon. Wea. Rev.*, **112**, 1498~1509.

The Effect of Tropical Cyclone Asymmetric Thermodynamic Structure on Its Unusual Motion

Chen Lianshou¹⁾, Xu Xiangde¹⁾, Xie Yiyang²⁾ and Li Wenhong¹⁾

¹⁾(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

²⁾(Tianjing Meteorological Institute, Tianjing 300074)

Abstract The tropical cyclone (TC) asymmetric thermodynamic structure of unstable stratification in TC outer region and its effect on tropical cyclone unusual motion have been investigated. Studies show that the tropical cyclone asymmetric feature exists not only in its dynamic structure but also in its three dimensional thermodynamic structure which includes temperature and humidity unstable stratification and their intensities. Difference in the asymmetric thermodynamic structure in the outer region of a tropical cyclone can cause different tropical cyclone motion, even lead to phenomena such as the meandering, looping and recurving of tropical cyclones.

Key words tropical cyclone thermodynamic instability asymmetric structure