

TCM-90 现场科学试验台风 FLO“ β 陀螺” “通风流”非对称动力结构特征*

徐祥德 陈联寿

解以扬

(中国气象科学研究院,北京,100081)

(天津气象台,天津,300074)

亢迪

(中国气象科学研究院,北京,100081)

摘 要

采用 TCM-90 台风现场科学试验期间加密观测资料,揭示出目标台风 Flo 非对称动力、热力结构及其转向运动的特征,尤其通过分离处理的偏差场,突出了 TCM-90 现场试验有关飞机下投(dropsonde)加密探测资料对台风 Flo 内部非对称结构物理图象的描述,提出了实际台风动力结构存在类似 Gray 认为的非对称偶极子型,即中低层“ β 陀螺”偶极子型(β -top dipole),及其“通风流”(Ventilation flow)特征,高层辐合-辐散结构的变形偶极子系统概念模型,并认为这类三维非对称结构对台风运动(转向现象)有一定“引导”作用。文中还强调了“ β 陀螺”偶极子非对称结构的垂直差异,并揭示了目标台风暖心结构及其热力非对称结构特征。

关键词: “ β 陀螺”,“通风流”,辐散-辐合偶极子,非对称结构。

1 引 言

近年来,涡旋自身结构及其环境场的相互作用、 β 效应对于热带气旋移动的影响是一引人注目的课题。数值预报的业务实践表明,模式初始场若嵌入对称的人造台风涡旋,而未考虑台风实际的非对称成分,往往可能造成路径预报的失误和偏差。关于涡旋结构与运动特征的相关问题,也曾被观测事实所证实。例如,飞机探测发现,台风涡旋东北方形成的最大风区对涡旋运动有指示意义。

Demaria^[1](1985)从动力学角度指出,平均气流空间水平分布的不均匀性以及环境风场的相对涡度梯度对热带气旋移动的影响。Chan 和 Williaws^[2](1989)利用正压无辐散模式研究了 β 效应对热带气旋移动的影响。Fiorino^[3](1989)详细讨论了对称和非对称环流之间的相互作用对涡旋移动的影响,并指出线性 β 项引起涡旋以东的反气旋非对称环流及涡旋以西的气旋性非对称环流,称为“ β 陀螺”。在这非对称陀螺之间向西北的“通风流”可使涡旋朝西北漂移。

* 初稿时间:1994 年 6 月 17 日;修改稿时间:1995 年 3 月 11 日。

资助课题:85-906-07 国家重点科技攻关项目。

热带气旋结构的分析往往依赖于资料的获取程度。这方面研究工作进展缓慢,主要障碍在于缺乏热带气旋内部及其临近区域的探测资料与信息。1990 年 7—9 月西北太平洋海域举行了台风现场试验。该试验包括三个独立部分,即亚太台风委员会的台风特别试验(SPECTRUM-90),美国的热带气旋现场试验(TCM-90)和苏联的台风试验(TYPHOON-90)。试验的手段是用飞机、船舶、卫星探测、雷达探测、机载多普勒雷达、垂直风廓线测风仪、漂浮站以及加密的常规地面观测和探空,对选定台风的内部和外围连续观测^[4]。选用 1990 年 9 月 16—18 日美国热带气旋现场试验(TCM-90)资料,此资料包括有关台风 Flo T₄₂客观分析、加密探空、飞机下投探测三部分。图 1 为加密探空点与飞机下投探测点、飞行路径。本文试图采用上述现场加密观测资料,进一步揭示台风实际非对称特征及其物理图象,研究台风非对称结构与其运动特征的相关关系。

2 分析方法

为了揭示 TCM-90 加密观测资料对于目标台风 Flo 非对称结构的可描述性程度,采用如下数学处理,分离不同尺度系统,即:

$$\begin{bmatrix} S_i^*(\varphi_d) \\ S_i^*(\varphi) \\ S_i^*(\varphi_s, \varphi_d) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_i(\varphi_r, \varphi_s, \varphi_d) \\ S_i(\varphi_r, \varphi_s) \\ S_i(\varphi_r, \varphi_s, \varphi_d) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} S_i(\varphi_r, \varphi_s) \\ S_i(\varphi_r) \\ S_i(\varphi_r) \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

其中 $S_i(\varphi_r)$ 、 $S_i(\varphi_r, \varphi_s)$ 、 $S_i(\varphi_r, \varphi_s, \varphi_d)$ 分别为北京气象中心 T₄₂客观分析场、T₄₂与 TCM-90 试验加密探空合成分析、T₄₂与 TCM 加密探空,飞机下投探测三者合成分析。本文采用 TCM-90 加密观测时空插值的方案同化资料,获取上述合成分析场。为了检验计算的可靠性,并将合成分析结果与美国海军研究生院(NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL)有关 TCM-90 试验资料(1°×1°经纬网格)进行对比分析。将 $S_i(\varphi_r)$,即 T₄₂客观分析场,视为大尺度特征场,其中台风涡旋仅反映出“准对称”的大尺度系统;而 $S_i(\varphi_r, \varphi_s, \varphi_d)$,即三者合成分析场,则属较高分辨率的现场观测试验资料分析结果,它即包含 T₄₂客观分析的大尺度系统信息,又反映了 TCM-90 试验所获取的次天气尺度或中小尺度系统的信息,尤其对于台风涡旋内部动力、热力结构,可能提供颇有实际价值的信息。上述公式(1)左端 $S_i^*(\varphi_s, \varphi_d)$ 、 $S_i^*(\varphi)$ 、 $S_i^*(\varphi_s, \varphi_d)$ ($i=1, 2, 3$) 分别代表分离后的加密探空与飞机下投探测、加密探空、飞机下投探测三类加密资料对台风与环境场系统的可描述性。这里值得指出的是,对于台风内部结构的描述,围绕目标台风分布点的飞机下投探测将是所有加密探测工具中最理想的手段。分离后的偏差场 $S_i^*(\varphi_d)$ 可更清晰地揭示出台风动力结构特征。若不采用加密观测与常规观测资料(背景场)合

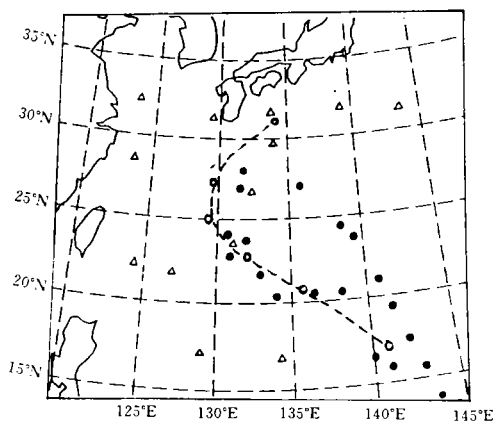


图 1 TCM-90 试验(台风 Flo)加密探空点
与飞机下投探测点分布
(1990 年 9 月 17 日 0 时(UTC))
(△:加密探空点;●:飞机下投探测点)

成场的分离处量方法,而直接使用有限的飞机下投探测布点资料亦无法取得台风结构的系统性描述结果与实际的物理图象。上述处理方法某种程度上与 Gray 扣除对称涡旋的平均风合成分析做法有类似之处。

3 TCM-90 试验对目标台风 Flo 非对称偶极子特征的描述

Gray^[5]曾在柱坐标中扣除对称涡旋后 850—300hPa 间平均风合成分析图上清晰显示出台风中心周围流函数有一偶极子环流,即左侧为气旋,右侧为反气旋环流。

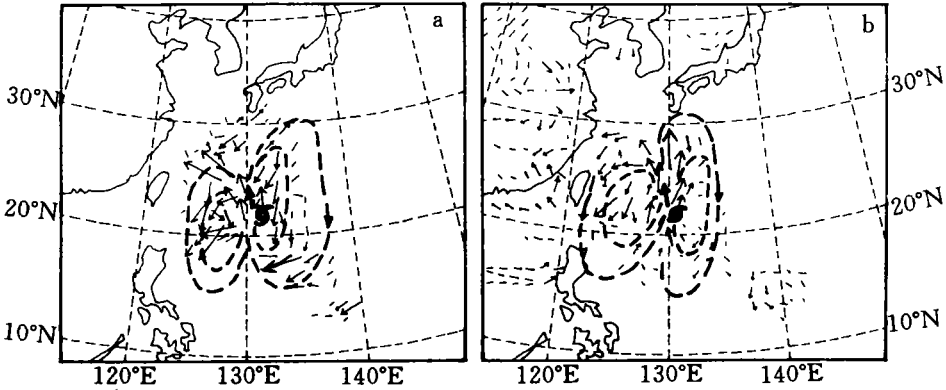


图 2 偏差场 $S_i^*(\varphi_s, \varphi_a)$ 风矢分布(1990 年 9 月 16 日 0 时(UTC))
(a. 850hPa, b. 500hPa, 其中虚线为偶极子环流)

图 2(a)、(b)分别表明, $S_i^*(\varphi_s, \varphi_a)$ 偏差矢量场(1990 年 9 月 16 日 0 时(UTC))在不同层次呈类似于 Gray^[5]提出的非对称偶极子环流特征,即 850hPa, 500hPa 偏差图清晰地突出了 TCM-90 现场试验有关加密探空与飞机下投探测合成分析资料对台风非对称动力结构的描述。风矢偏差场台风区域东西两侧为一对气旋与反气旋环流的偶极子,且这对偶极子系统间气流特征呈指向西北偏北方向的“通风流”,其中 850hPa 与 500hPa 两层非对称结构特征有所差异,但“通风流”指向及其偶极子基本特征相似。

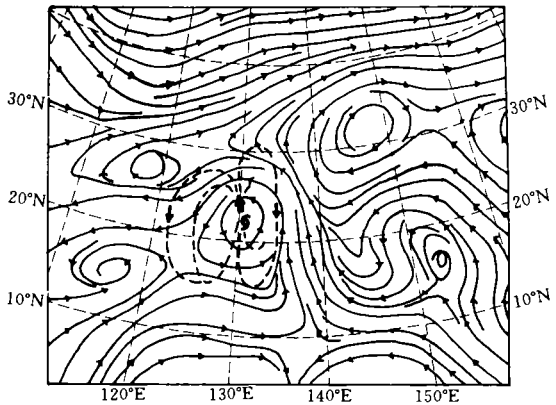


图 3 500hPa 流场
(1990 年 9 月 16 日 0 时(UTC))
(虚线为 $S_i^*(\varphi_s, \varphi_a)$ 偏差场偶极子环流)

值得指出的是,上述偶极子系统属次天气尺度系统。如图 3 所示,其在空间尺度上显著区别于大尺度副热带高压与台风天气尺度涡旋。

4 “β 陀螺”三维动力结构

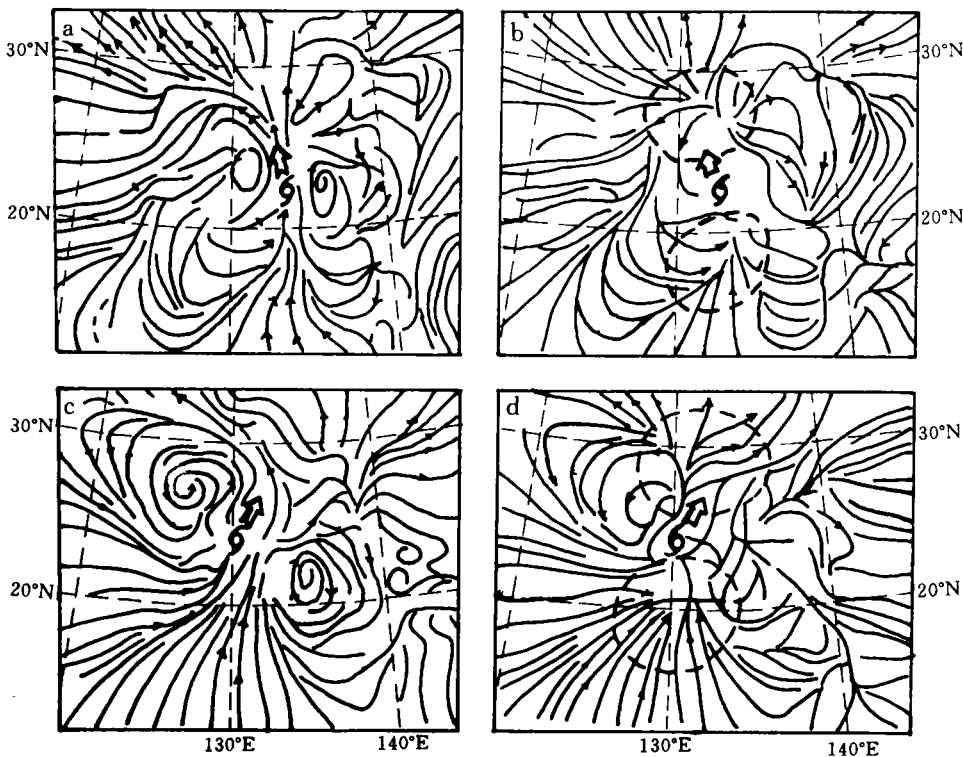


图 4 台风 Flo16—17 日 $S_i^*(\varphi_a)$ 偏差场流线图
 (a. 16 日 0 时(UTC) 500hPa; b. 16 日 0 时(UTC) 200hPa;
 c. 17 日 0 时(UTC) 500hPa; d. 17 日 0 时(UTC) 200hPa)

Fiorino 指出“β 陀螺”的“通风流”使涡旋漂移。Chan^[2]也发现台风左折、右转与直行移动方向与涡旋偶极子水平平流旋转相近。

图 4(a)—(d)为目标台风 Flo16—17 日中层(500hPa)与高层(200hPa) $S_i^*(\varphi_a)$ ($i = 1, 2$)偏差场台风域非对称结构特征。由图 4 可发现,台风位置近偏差场 $S_i^*(\varphi_a)$ ($i = 1, 2$)中、高层均呈不同类型的偶极子动力系统,500hPa 上 16,17 日台风区域流场呈典型的“β 陀螺”,即气旋性与反气旋性偶环流系统。如图 4a,c 所示,台风区域流场一对偶环流间“通风流”特征亦明显,但两者指向存在差异,且“通风流”指向均与台风涡旋未来移向有关。另外,200hPa 上 $S_i^*(\varphi_a)$ ($i = 1, 2$)台风区

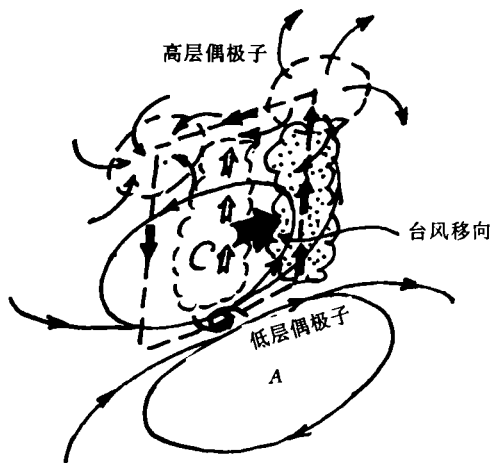


图 5 台风“β 陀螺”高低层偶极子三维物理图象
 域则为为一对辐散-辐合区域的变形偶极子系统,两者连线与中层“通风流”指向吻合,对涡旋移动亦有“引导”效应(如图 4b,d 所示)。可见上述“β 陀螺”在中低层表现为“旋转性”偶

极子,而在高层表现为“辐散性”偶极子系统。

对于本文有关台风 Flo 非对称动力结构的描述,可采用三维物理图象(如图 5 所示)。图 5 揭示了台风区域高、中层偶极子的“耦合”动力机制,即高层辐散、辐合中心与中层“通风流”形成由台风前部(移动方向)上升支与后部下沉支相配置的垂直环流圈。

图 5 中三维非对称动力结构亦揭示了台风涡旋偶极子“通风流”,高层辐散区的“引导”机理,即这类三维动力结构的存在可能与观测事实中台风趋向其前方强对流、密蔽云区的特征有关。

5 台风转向运动与“β 陀螺”偶极子特征的相关

由图 4 可知,目标台风 Flo 转向运动与偏差场 $S_i^*(\varphi_i)$ ($i = 1$) 的“β 陀螺”及其“通风流”指向有关,即 Flo 的“通风流”指向为台风未来 24h 运动方向。尤其,值得注意的是 16—17 日台风“β 陀螺”的“通风流”指向发生明显变化,其指向由原西北偏北转向东北,17—18 日台风 Flo 亦发生路径的转向。除了“通风流”指向的变化外,“β 陀螺”气旋性与反气旋性“环流偶”的相互配置亦产生变异,即当台风涡旋转向,一对东西向排列“环流偶”变成西北—东南向排列的“环流偶”。图 6 为台风 Flo“β 陀螺”偶极子“通风流”指向与台风转向运动的相关示意图。

6 台风涡旋“强风核”非对称特征

台风非对称动力结构不仅表现在偏差场“β 陀螺”偶极子型及其“通风流”特征,而且还体现在风场(风速场)的非对称特点。同样,这类风速场非对称特征的描述与资料时空密度相关。图 7a, b 与 c, d 分别为 1990 年 9 月 16 日 0 时(UTC)与 17 日 0 时(UTC)的 T_{42} 客观分析风速场与 TCM-90 加密观测合成分析风速场。对比图 7a 与 b 或图 7c 与 d 可发现,TCM-90 台风区域加密探空、飞机下投探测与常规资料的合成分析对描述台风涡旋次天气尺度非对称结构有明显效应,即合成分析可使台风大风区(强风核)更为显著,其表现在台风 Flo 右侧风速极值明显增强,且空间尺度变小,“强风核”与台风中心距离变短,非对称特征更为突出。另外,台风转向运动(16—17 日)与非对称“强风轴”(“强风核”)的走向相关显著(如图 7b 与 d 所示)。

7 台风暖心结构特征的描述

暖心结构是台风最显著特征之一,暖心的形成与台风发展、消亡状况有关。本文采用 TCM-90 现场试验加密资料,揭示出“β 陀螺”偶极子动力非对称结构。考虑 TCM-90 试验资料对台风内部热力结构特征的可描述性,本文还采用类似式(1)的分离方法,即

$$Z^*(t_d, t_s) = Z(t_d, t_s, t_T) - Z(t_T) \quad (2)$$

其中 $Z(t_T)$ 为 T_{42} 温度垂直分布, $Z(t_d, t_s, t_T)$ 为飞机下投探测、加密探空、 T_{42} 合成分析温度垂直分布, $Z^*(t_d, t_s)$ 为分离后反映台风内部次天气尺度热力结构垂直分布。数值分析的结果表明,采用 TCM-90 试验资料,经上述分离处理, $Z^*(t_d, t_s)$ 偏差场垂直剖面图可描述出台风 Flo 的暖心结构及其演变特征。计算结果亦反映了台风 Flo 转向前后(16—

18 日)温度偏差场东西向垂直剖面图暖心位置呈下降趋势,这可能与台风 Flo 强度变化相关。图 8 为 $Z^*(t_d, t_s)$ 温度偏差垂直结构,由图 8 可见,位于对流层中层(500hPa)呈一显著的暖心特征。

8 结 论

综上所述得到如下结论:

(1)TCM-90 试验加密观测,尤其飞机下投探测资料对目标台风动力、热力结构特征具有显著的可分析性。此类试验资料不仅能揭示出“β陀螺”偶极子系统,而且可清晰地描述目标台风暖心结构及其演变特征。

(2)台风 Flo 转向阶段中低层偏差场存在类似

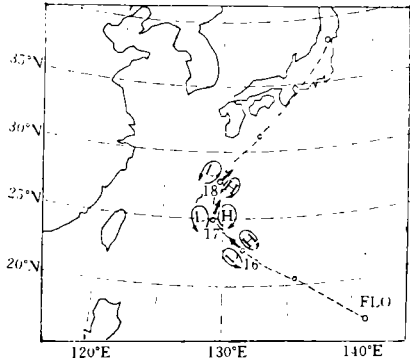


图 6 台风 Flo16--18 日移动路径及其偶极子系统示意图

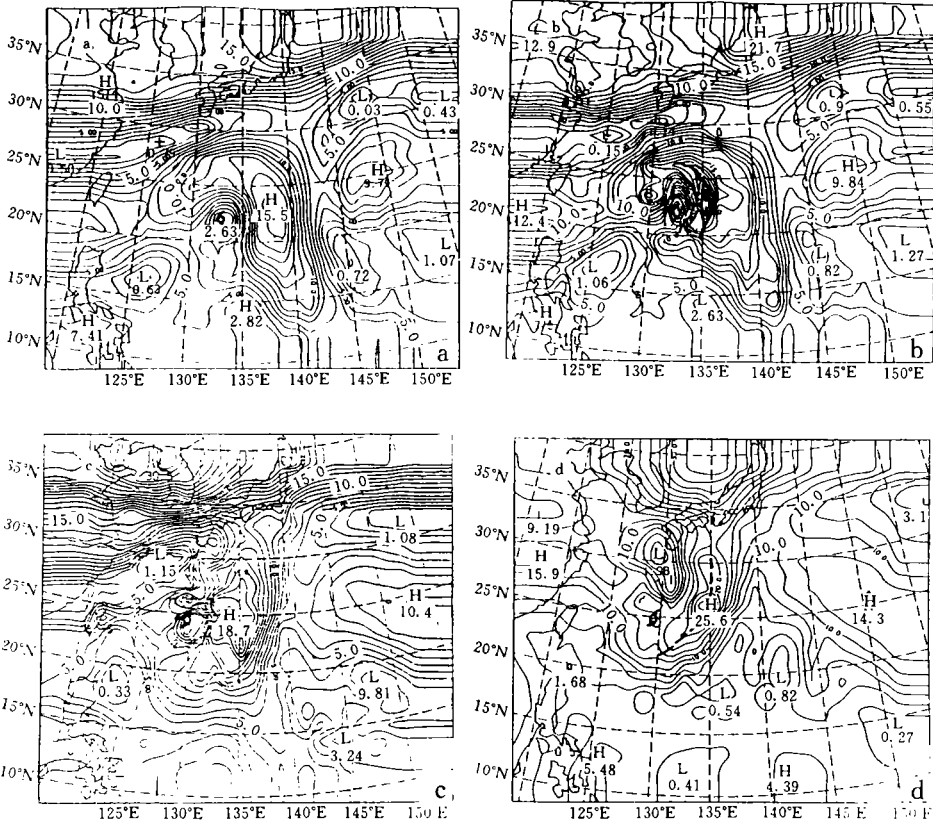


图 7 500hPa T_{42} 客观分析风速场与 TCM-90 加密观测合成分析风速场的对比(m/s)
 (a. T_{42} (1990 年 9 月 16 日 0 时(UTC)); b. TCM-90 合成分析(1990 年 9 月 16 日 0 时(UTC))
 ;c. T_{42} (1990 年 9 月 17 日 0 时(UTC)); d. TCM-90 合成分析(1990 年 9 月 17 日 0 时(UTC))

Gray^[5]提出的非对称“β陀螺”偶极子及其“通风流”,且此偶极子系统、“通风流”特征与台

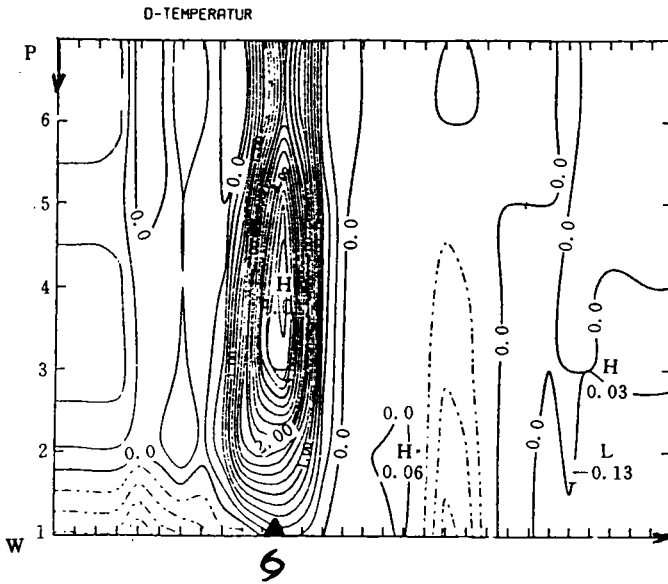


图8 台风Flo 18日0时(UTC)温度偏差垂直剖面图(°C)
(▲为台风中心位置)

风移动方向(转向运动)有很好的相关关系。

(3)台风区域低层、高层均呈非对称偶极子型结构,且存在动力特征的垂直结构差异,即中低层表现为“ β 陀螺”“旋转性”偶极子型;高层则表现为“辐散性”偶极子型。这两类高、低层偶极子系统与台风内部次天气尺度垂直环流结构相关,且垂直环流圈上升支位置与台风移向有关。

参考文献

- [1] Demaria M. Tropical cyclone motion in nondivergent barotropic model. *Mon Wea Rev.* 1985. 113. 1199—1209.
- [2] Chan J C L and Williams R T. Analytical and numerical studies of the beta effect in tropical cyclone motion. part 1: zero mean flow. *J Atmos Sci.* 1987. 44: 1257—1265.
- [3] Fiorino M and Elsberry R T. Some aspect of vortex structure related to tropical cyclone motion. *J Atmos Sci.* 1987. 46: 975—990.
- [4] 陈联寿. 热带气旋结构和结构变化研究进展. 热带气旋科学讨论会文集(1990). 北京. 气象出版社. 1992. 16—23.
- [5] Gray W M. Tropical cyclone propagation. Preprints of 19th conference on hurricanes and tropical meteorology. Amer Meteor Soc. Boston. MA 1991. 02108. 385—390.

**THE ASYMMETRIC AND DYNAMIC STRUCTURE OF THE “ β -TOP”
DIPLOE AND “VENTILATION FLOW” OF THE TARGET
TYPHOON FLO DURING TCM-90 FIELD
EXPERIMENT**

Xu Xiangde Chen Lianshou

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing, 100081)

Xie Yiyang

(Tianjing Meteorological Observatory, Tianjing, 300074)

Kang Di

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing, 100081)

Abstract

Using intense observational data during TCM-90 field experiment, the asymmetric dynamic and thermodynamic structure and its characteristics relating to typhoon recurvature movement are revealed. Based on the decomposition processing of TCM-90 target typhoon data, the actual characteristics of TC's asymmetric structure, namely, “ β -top” dipole and “ventilation flow” systems are obtained, which are quite similar to results of Gray W^[5] (1991). Moreover, it is found that by analyzing the upper level streamline field, another kind of “divergence-convergence dipole” pattern structure is related to typhoon motion. The present paper also proposed the concepts of the vertical difference of the “ β -top” dipole dynamic structure and asymmetric thermodynamic structure, the typhoon “warm core” can be described by the analysis of TCM-90 target typhoon intense observational data.

Key Words: “ β -top”, “Ventilation flow”, Divergence-convergence dipole, Asymmetric structure.