

TCM-90 现场试验台风能量频散波列特征*

徐祥德 陈联寿

(中国气象科学研究院, 北京, 100081)

解以扬

(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(台风运动-90)台风现场科学试验资料,对台风 FLO,ED 个例进行了诊断分析,并做了有关数值试验研究。分析研究结论揭示了台风涡旋作为一动力、热力强迫源或 CISK 不稳定结构,其与环境场相互作用可激发出动能频散波列;台风扰源通过频散机制可构成类似 2 维 Rossby 波的经向波列;台风涡旋的移动路径与上述能量传播特征有一定的相关关系。

关键词: 能量频散, 波列特征, 台风运动。

1 引 言

从动力学观点出发,台风系统中强烈的积云、潜热释放驱动了水平尺度达 1000 km 的扰动。如此庞大的动通、热量源的维持、发展及其变异可视为大尺度环境中嵌入的天气尺度的“强迫源”,其与环境基本气流相互作用可表现出非线性动力学特征,此类动力结构可能形成类似 2 维 Rossby 波频散特征的扰动形态。

对于台风结构本身的惯性内波传播特征及其频散效应亦可属上述台风“强迫源”及其与环境场相互作用的动力学特征的内在基本影响因素之一。台风涡旋的能量频散波可具有各类不同尺度特征,例如,对于次天气尺度而言,台风涡旋的强对流云团或雨带往往呈明显的波状螺旋型特征;台风移动亦与其外围云团相关,即存在向外围密蔽云团运动的趋势。

台风结构理论模态的研究^[1]揭示出旋转力场中能量频散可引起台风环流下游方向形成低—高—低型波列,且扰动波列成员在台风移动中相伴存在,反映出台风涡旋与环境基流的相互作用效应。

* 初稿时间: 1996 年 8 月 9 日; 修改稿时间: 1996 年 12 月 12 日。

资助课题: “八五攻关项目“台风科学、业务试验和天气动力学理论研究”。

对于台风动力结构及其环境场相互作用机理的认识,由于海洋观测资料缺乏的限制,始终存在障碍。1990年8~9月,西北太平洋上同时开展了3个台风科学现场试验,其代号为 SPECTRUM-90(台风异常运动特别试验-90),TCM-90(台风运动-90),TYPHOON-90(台风-90)。本文试图采用 SPECTRUM 目标台风(FLO,ED)时空加密观测资料,揭示台风涡旋与环境场动力、热力结构的相互作用机理,并探讨台风扰动能量频散“波导”路径特征。本文还采用数值试验与诊断-统计分析相结合的方法,探讨环境场动力、热力结构的变化与台风涡旋运动的统计相关特征,研究台风能量频散“波导”路径问题。

本文所采用的加密资料为1990年9月14~17日加密观测期间(IOP)获得的探空加密(6h间隔)、地面加密(3h间隔、地面站网加密),海面加密观测(4个船舶控空,23个加密浮标观测)和对台风FLO的飞机下投控空仪的观测(图1)。本文以国家气象中心T₄₂模式分析场(2.5 Pat × 2.5 Pong)格点资料为第一猜测场,利用Cressman方法,把上述加密观测资料与T₄₂资料一起分析,因此,得到较高分辨率的客观分析资料(110 km间隔),用于以下的诊断分析和数值模拟。

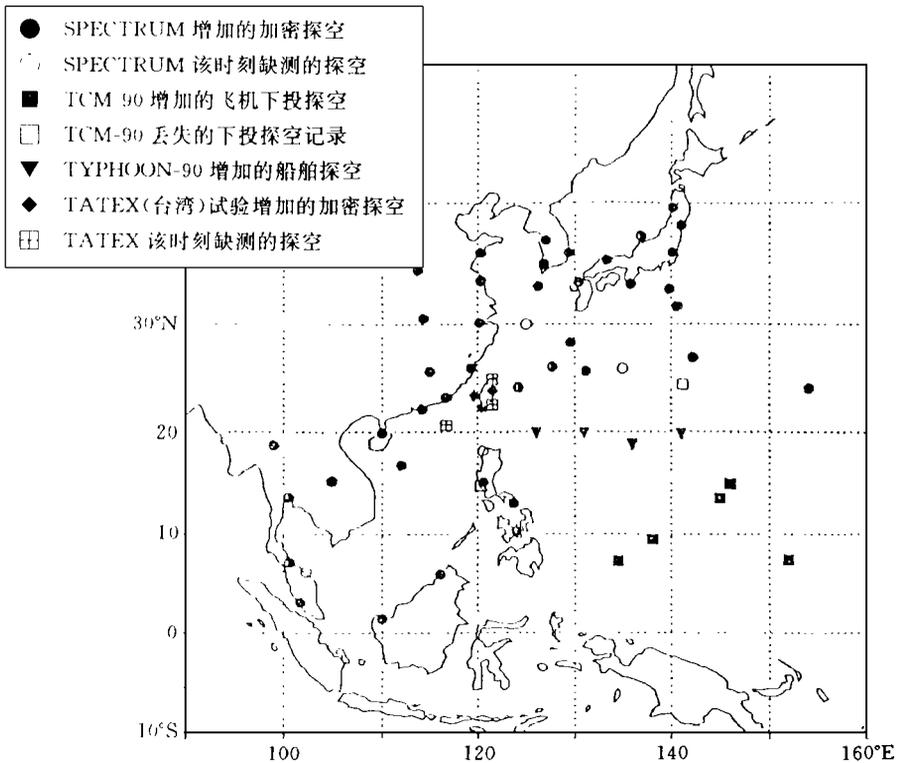


图1 台风FLO观测布点示意图

2 台风扰源环境场基流动力结构特征

若将台风涡旋作为一动力、热力因素的强迫源,此扰源与环境非均匀动力、热力因

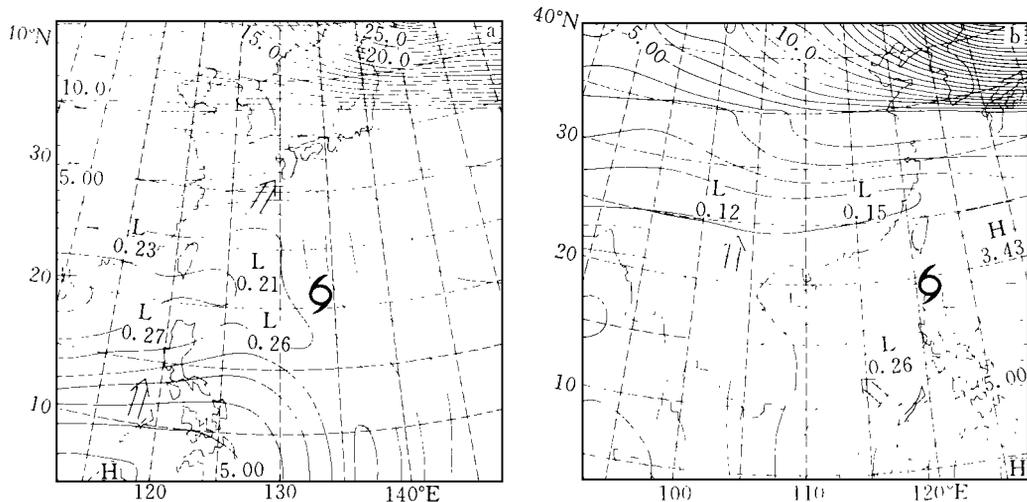


图2 目标台风平均等风速(m s^{-1})线场

(a. FLO(15日12时); b. ED(14日18时))

素的相互作用可形成环流异常的动力结构。2维 Rossby 波波列特征亦反映扰源与环境流场间的相互影响机理。这类频散波结构与环境基流特征存在显著相关, 正如有文献^[2]的研究所指出的, 环境基流对于2维 Rossby 波的传播形态起着关键作用。台风扰源引起的波列结构在时空尺度上远不同于遥相关波列。本文采用9点平滑方法对台风 FLO, ED 个例求取了大尺度平均风速结构(平均等风速线场)。由计算分析结果可发现, 台风环境场存在明显的基本气流的非均匀分析, 即自南向北呈类似高一低中心相间的波列特征, 值得思考的是, 此类基流的等风速线分布特征是否与台风扰源波动传播及其形态的结构有关? 由计算结果可发现, 现场加密资料每间隔6h平均等风速场台风 FLO 与 ED 个例呈近于南—北向波列, 但 FLO 个例南—北向波列特征更为显著; ED 个例呈东南—西北—东北波列趋势, 这说明两者大尺度平均风速场动力结构特征亦有差异(图2a, b)。

3 台风能量频散特征的诊断分析

李崇银 1983 年就指出, 积云对流加热通过 CISK 机制可以产生一种振荡型不稳定, 其空间尺度比较大, 可以造成热带大气中的一些周期振荡现象^[3]。台风系统的生成与发展、维持往往被认为与 CISK 机制紧密相联, 这类 CISK 机制所维持的庞大动力系统, 其与环境场基流的相互作用是否亦存在不同频率特征的不稳定振荡。本文基于 TCM-90 台风国际现场加密观测资料, 探讨台风 FLO, ED 个例是否存在与涡旋扰动相关的能量频散波列结构。

将台风 FLO, ED 个例经尺度分离(滤波处理)后获取不同时刻扰动动能6h变量场, 计算结果可以发现, 台风 FLO, ED 个例扰动动能($\frac{dK}{dt}$)变量场台风附近均呈与扰源相关

的波列特征;此波列特征与台风未来路径有一定的相关关系,且台风路径转向,与扰动动能频散方向的变化一致,即此类扰动动能频散特征对台风移向有一定的前兆意义。例如,台风FLO 15~17日转向前后波列路径发生变化,15日12~18时扰动动能波列亦呈与转向前路径相类似的特征,但17日06~12时扰动动能变量场上,虽然台风移动路径未明显改变方向,但其扰动能量波列已发生了“转向”;同样台风ED亦有相似的相关现象(图3)。

4 台风运动影响因子的数学模型

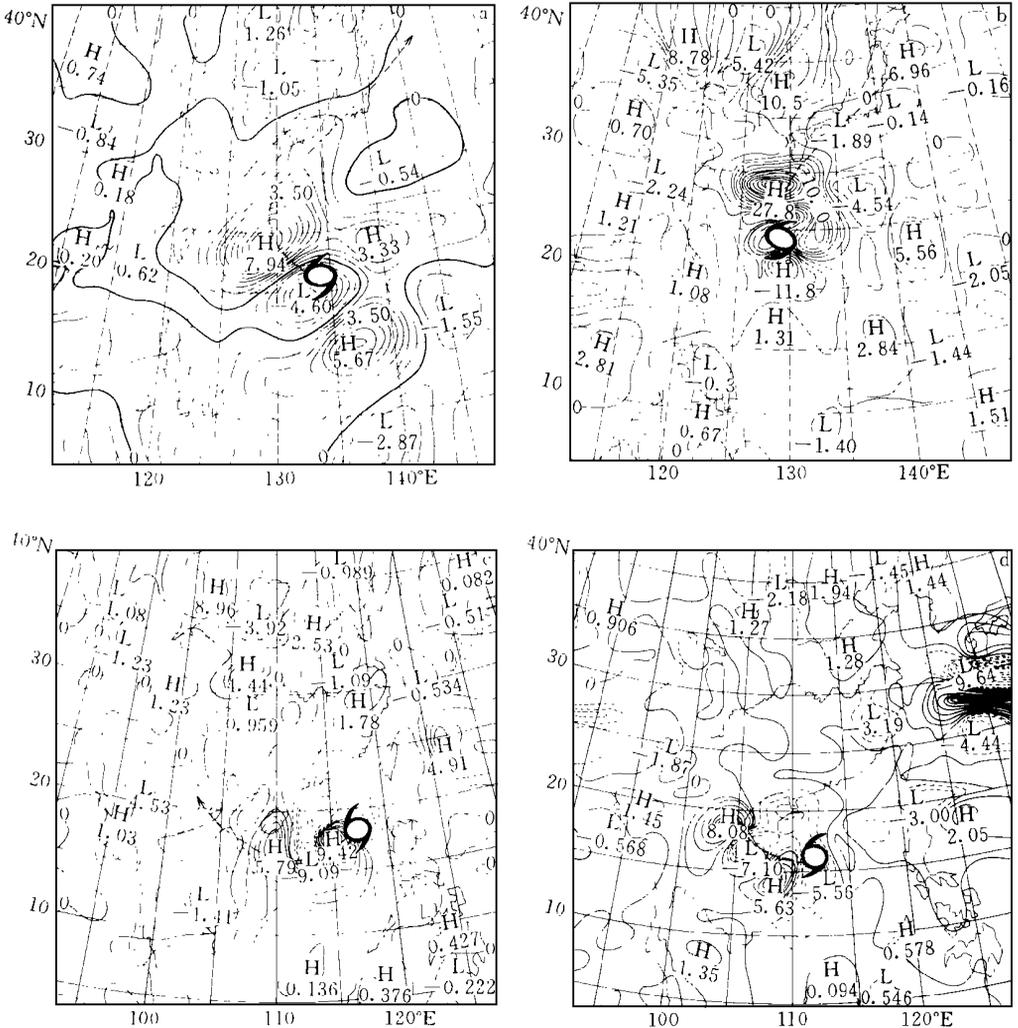


图3 实际目标台风资料经滤波处理的扰动动能6h变量场(m^2/s^2)

(a. FLO(15日18~12时); b. FLO(17日12时~6时); c. ED(16日00时~15日18时);

d. ED(17日18~12时)。虚线目标台风移动的实际路径)

文献[4]指出,若将台风运动作为一受力系统控制的状态变化,科氏力、环境场、摩擦力项相对台风系统均为非定常因子,这些因子的变化或渐变可能导致台风运动的路径异常。

台风路径相路方程及其曲率可以写为

$$\frac{d\tilde{U}}{d\tilde{V}} = \frac{f^* \tilde{V} - \mathcal{Q} + \tilde{F}_u}{-f^* \tilde{U} - \mathcal{Q} + \frac{2\omega \cos \mathcal{Q}}{R^2 a} \int_0^R V_{\theta}(r) r^2 dr + \tilde{F}_v} \quad (1)$$

$$k_n = -\frac{f^*}{\tilde{K}^{1/2}} + \frac{(\mathcal{Q} + \frac{2\omega \cos \mathcal{Q}}{R^2 a} \int_0^R V_{\theta}(r) r^2 dr + \tilde{F}_v) \tilde{U} - (-\mathcal{Q} + \tilde{F}_u) \tilde{V}}{\tilde{K}^{3/2}} \quad (2)$$

其中, \tilde{U} , \tilde{V} 为 TC 区域平均值; \mathcal{Q} , \mathcal{Q} 为环境气压强及其梯度; V_{θ} 为 TC 切向风速; R 为 TC 半径; \tilde{F}_u , \tilde{F}_v 为摩擦力项; k_n 为台风路径曲率; \tilde{K} 为动能, 即

$$\tilde{K} = \tilde{U}^2 + \tilde{V}^2$$

台风路径曲率变化亦可写为

$$\begin{aligned} \delta k_n = & -\frac{\delta f^*}{\tilde{K}^{1/2}} + f^* \frac{\delta \tilde{K}}{\tilde{K}^{3/2}} + \\ & \frac{(-\mathcal{Q} + H^* + \tilde{F}_v) \delta \tilde{U} - (-\mathcal{Q} + \tilde{F}_u) \delta \tilde{V}}{\tilde{K}^{3/2}} + \\ & \frac{(-\delta \mathcal{Q} + \delta H^* + \delta \tilde{F}_v) \tilde{U} - (-\delta \mathcal{Q} + \delta \tilde{F}_u) \tilde{V}}{\tilde{K}^{3/2}} + \\ & \left\{ -\frac{3}{2} \left[\frac{\tilde{U}(-\mathcal{Q} + H^* + \tilde{F}_v) - \tilde{V}(-\mathcal{Q} + \tilde{F}_u)}{\tilde{K}^{5/2}} \right] + \frac{f^*}{\tilde{K}^{3/2}} \right\} \delta \tilde{K} \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $H^* = \frac{2\omega \cos \mathcal{Q}}{R^2 a} \int_0^R V_{\theta}(r) r^2 dr$

本文将上述式(3)简写如下形式:

$$\begin{aligned} \delta k_n = & \tilde{a}_0 \delta f^* + \tilde{b}_0 \delta \mathcal{Q} + \tilde{c}_0 \delta \mathcal{Q} + \tilde{a}_1 \delta H^* + \\ & \tilde{b}_2 \delta \tilde{F}_u + \tilde{c}_2 \delta \tilde{F}_v + \tilde{a}_3 \delta \tilde{U} + \tilde{b}_3 \delta \tilde{V} + \tilde{c}_3^* \delta \tilde{K} \end{aligned} \quad (4)$$

其中 \tilde{a}_0 , \tilde{b}_0 , \tilde{c}_0 , \tilde{a}_1 , \tilde{b}_1 , \tilde{c}_1 , \tilde{a}_3 , \tilde{b}_3 , \tilde{c}_3^* 均为与环境诸要素相关的系数。

由式(4)可知,台风路径曲率的变化亦与科氏参数、动能、环境场诸要素、台风涡旋强度、摩擦力项的变化状态相关。由此可知,台风动能特征以及环境场要素的变化可能导致台风路径变异。

5 台风与环境场相关特征

有关 SPECTRUM 资料的诊断分析已揭示出台风扰动的能量频散的波列特征,这类

环境场扰动波列或“波射线”特征,不仅反映了台风涡旋与环境动力、热力因素的相互作用效应,而且与台风运动轨迹可能存在一定的相关关系。本文采用目标台风 FLO 的数值试验结果,研究台风运动与环境因素之间的相关域形态,进而揭示台风结构、运动变化与环境场关键因子的统计相关特征。本文采用 PSU/NCAR MM4 模式,选取 TCM-90 目标台风 FLO 资料(加密观测、飞机下投探测等)以及国家气象中心 T₄₂合成客观分析,1990年9月15日20时作为模式初始场,数值积分6h。模拟台风路径与实况趋势基本相似,亦呈转向路径特征。

本文将台风 FLO 模拟试验输出的动能、温、压、湿等要素场时间间隔变量作为台风移动(经度、纬度位移 $\Delta Q, \Delta \lambda$)的诸相关因子,即

$$\Delta S_{i,n}(x, y, k_0, t_i) = S_i(x, y, k_0, t_i) - S_{i-1}(x, y, k_0, t_i - n\Delta t) \quad i = 1, 2, 3, 4, \dots, N \quad (5)$$

其中

$$\Delta S_{i,n} = \begin{pmatrix} \Delta H_{in} \\ \Delta K_{in} \\ \Delta T_{i,n} \\ \Delta q_{in} \end{pmatrix}$$

上式中 S 为某物理量或要素 $\Delta H_n, \Delta K_n, \Delta T_n, \Delta q_n$ 分别为高度、动能、温度、湿度要素场 n h 间隔变量序列, i 为序列数,即某时间层次, N 为序列样本总数。 k_0 为某垂层次(常数)。

台风移动轨迹 n h 间隔纬向、经向移动距离作为预报对象序列,即

$$\begin{pmatrix} \Delta \varphi_{,n} \\ \Delta \lambda_{,n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi_{+1}(t + n\Delta t) \\ \lambda_{+1}(t_j + n\Delta t) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \varphi(t_j) \\ \lambda(t_j) \end{pmatrix} \quad (j = 1, 2, 3, 4, \dots, N) \quad (6)$$

本文采用台风移动纬、经度变量序列(即 $\Delta \varphi_{,n}, \Delta \lambda_{,n}$)与前期各环境要素变量序列($\Delta H_i, \Delta K_i, \Delta T_i, \Delta q_i, n$),求取二维相关系数场,即

$$\begin{cases} R_{x,y}^{\varphi} = \frac{1}{N} \frac{\Delta \varphi \Delta S_i(x, y) - N \overline{\Delta \varphi} \overline{\Delta S(x, y)}}{\sqrt{\left\{ \Delta \varphi^2 - N(\overline{\Delta \varphi})^2 \right\} \left\{ [\Delta S_i(x, y)]^2 - N(\overline{\Delta S(x, y)})^2 \right\}}} \\ R_{x,y}^{\lambda} = \frac{1}{N} \frac{\Delta \lambda \Delta S_i(x, y) - N \overline{\Delta \lambda} \overline{\Delta S(x, y)}}{\sqrt{\left\{ \Delta \lambda^2 - N(\overline{\Delta \lambda})^2 \right\} \left\{ [\Delta S_i(x, y)]^2 - N(\overline{\Delta S(x, y)})^2 \right\}}} \end{cases} \quad (7)$$

相关系数 $R^{\varphi}(x, y), R^{\lambda}(x, y)$ 描述了台风移动(移速经、纬度参数 $\Delta \varphi, \Delta \lambda$)与前期环境要素场之间的相关空间分布特征。

图4为模式计算台风 FLO 移动过程后6h经向位置变化与前6h500hPa动能变化的相关系数场,可发现,前6h动能扰动变化与后6h台风路径存在显著相关,且显著相关域呈经向波列特征,其波列路径与台风 FLO 移动趋势相似。这说明台风作为强迫源嵌入基本流场,扰源与基流的相互作用及强迫源的能量频散效应均与台风涡旋移动路径相

关。可以说,台风涡旋移动的流体力学规律与一般强迫源引起 2 维 Rossby 波频散机制可能有一定相似之处。

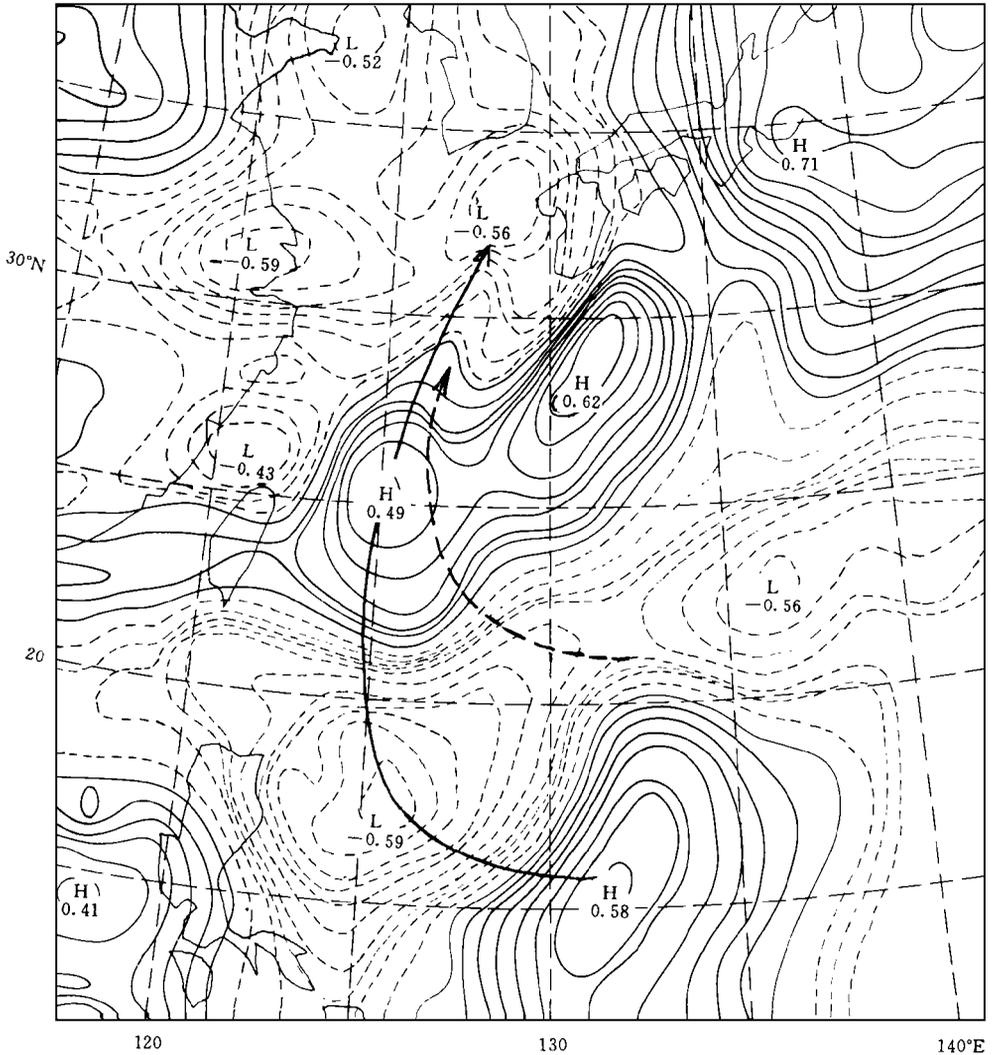


图 4 模式计算台风 FLO 移动过程后 6 h 经向位置变化与前 6 h 扰动动能变化的相关系数场(%)
(虚线为台风 FLO 模拟路径,实线为台风位移与动能变化)

图 5 为模拟计算结果中台风中心温度(暖心)后 2 h 与前 2 h 湿度场变化两者的相关系数场,变可知,不仅台风移动路径与能量频散相关,而且台风热力结构变化与环境湿度场变化的相关亦呈经向波列特征。这表明,台风移动趋向于雷达强回波区,即浓密对流云团的现象存在着一定的流体力学机理。

图 6a, b 分别为模式计算 6 h, 18 h 动能差 ($\frac{dk}{dt}$), 其中 $\frac{dk}{dt}$ 代表 6 h 间隔的动能差。可

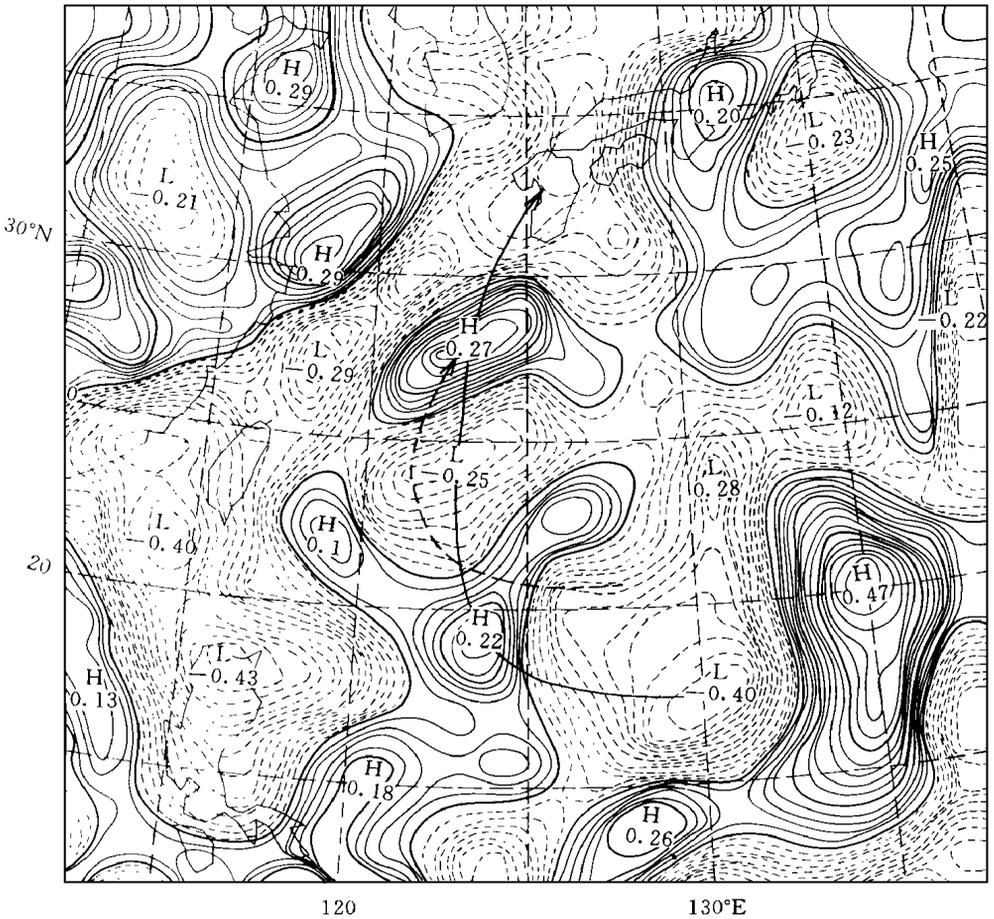


图5 400 hPa 台风移动过程中 2 h 中心温度变化与前 2 h 环境湿度场变量的相关系数场(%)
(虚线为台风 FLO 模拟路径, 实线为台风中心温度变化与环境湿度场变量的相关波列路径)

知, 模式积分初期台风扰源的能量频散波列为东南—西北向, 此初期能量频散波列路径与台风初期移动趋势吻合; 模式积分 18 h, 台风扰源方向, 即传播方向发生了转变, 由原来东南—西北向移为偏南—北走向, 且出现路径转向趋势。此能量频散波列转向特征恰与台风路径未来 6 h 后的转折点变异相符。

6 结 论

本文采用 TCM-90 台风国际现场试验加密资料, 对台风 FLO, ED 进行的诊断分析以及有关数值模拟试验可以揭示出如下有关台风能量频散的动力学特征:

(1) 台风涡旋作为一动力、热力强迫源, 其与环境动力、热力因素的相互作用及其能量频散可形成经向能量频散波列。

(2) 台风扰源经向能量频散波列的传播路径反映了环境场和台风扰源的相互影响特征, 且与台风移动路径及未来趋向有关。

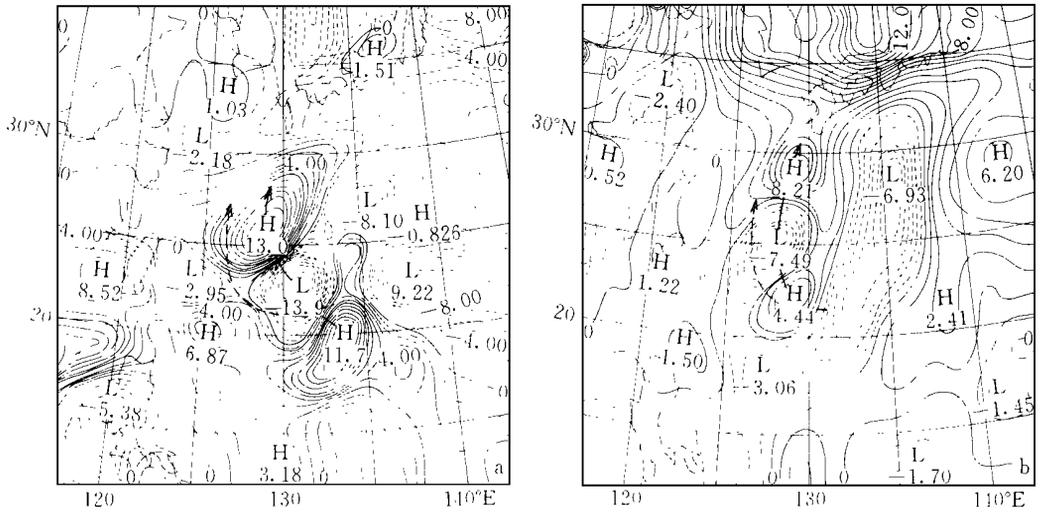


图 6 目标台风 FLO 模式模拟 6 h 动能差(m^2/s^2)

(a. $K_{6h} - K_{0h}$; b. $K_{18h} - K_{12h}$ 。实线为能量频散路径,虚线为数值模拟台风移动路径)

- (3) 模拟台风运动与环境因素的非定常变化的相关场亦呈“波列”或“波射线”特征。
- (4) 数值试验结果亦进一步揭示台风能量频散波列路径与台风运动有一定相关关系。

参考文献

- 1 罗哲贤. 能量频散对台风结构和移动的作用. 气象学报, 1994, 52(2): 149~156
- 2 Hoskins B J and Karoly D. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. J Atmos Sci, 1981, 38: 1179~1196
- 3 李崇银. 第二类条件不稳定—振荡型对流. 中国科学(b), 1983, 857~865
- 4 徐祥德, 解以扬. 热带气旋运动曲率的数学模型与路径异常的月尖突变判据. 热带气象学报, 1993, 9(4): 308~316

THE WAVE TRAIN CHARACTERISTICS OF TYPHOON ENERGE DISPERSION IN TCM-90 FIELD EXPERIMENT

Xu Xiangde Chen Lianshou

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

Xie Yiyang

(*Tianjing Meteorological Center, Tianjing, 300074*)

Kang Di

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

Abstract

By using TCM-90 typhoon field experiment IOP data, the motion characteristics of target typhoons FLO and ED are investigated. The diagnostic analysis and numerical experiment results show that typhoon can be regarded as a source of dynamic and thermodynamic forcing to its environmental atmosphere, and the interaction between a typhoon and its environment may lead to the dispersion of kinetic energy and excite a horizontal Rossby-wave like wave train. The correlation analysis with the diagnostic results shows that the motion of target typhoon agrees with this wave train, and so the diagnosis of typhoon perturbation energy dispersion is meaningful for the forecasting of typhoon motion.

Key words: Energy dispersion, Wave train character, Typhoon motion.