中国科学: 地球科学 2012 年 第 42 卷 第 2 期: 290 ~ 300
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

眉状中尺度涡影响热带气旋路径的机理研究

罗哲贤[①③*], 平凡[②]

① 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044;
② 中国科学院大气物理研究所云降水物理和强风暴国家实验室, 北京 100029;
③ 无锡环境科学和技术研究中心, 无锡 214031
* E-mail: Luozxma@yeah.net

收稿日期: 2010-12-28; 接受日期: 2011-08-03
国家自然科学基金(批准号: 40775038, 40875031, 40975036, 40730948)资助

摘要 应用准地转正压涡度方程数值研究了初始眉状中尺度涡影响热带气旋(TC)路径的机理. 结果显示, 环境场引导气流、TC 非对称结构和非对称对流系统这三个影响 TC 路径的基本因子均具有时变特征, 它们在不同的时段具有不同的重要性, 其中眉状中尺度涡有两种作用. 一种是直接作用, 在 0~11 h, 眉状中尺度涡引入后, TC 外区风场呈现非对称结构, 100~300 km 圆环区经向风速平均值大于零, 直接导致 TC 向偏北方向移动. 另一种是间接作用, 从初始非轴对称流型启动, TC 环流经历了一个轴对称化的过程. 在 12 h 以后, 轴对称化的 TC 的空间尺度加大, TC 非对称结构改变, TC 能量频散高值系统环境场引导流增强, 间接导致 TC 移速加快, 移向向北偏折. 在直接、间接的作用下, TC 移动具有异常路径的特征. 这个异常路径的形成可以归因于环境场引导气流、TC 非对称结构和非对称对流系统三者的共同作用.

关键词
热带气旋
异常路径
环境场引导气流
非对称结构
非对称对流系统

环境场引导气流、台风环流的非对称结构和非对称对流系统被认为是影响热带气旋(TC)路径的三个基本因子[1]. 环境场的一个例子是西太平洋副热带高压脊. 当一个 TC 位于副热带高压脊南侧时, 南侧的东风气流将引导 TC 从东向西移动. 环境场的另一个例子是 TC 能量频散生成的高值系统[2]. 当一个 TC 向偏西方向移动时, 向偏东方向频散出去的 TC 能量会形成一个反气旋的高值系统. 在这个反气旋高值系统环境场气流的引导下, TC 具有偏北方向移动的分量. 环境场对 TC 路径影响的研究已取得进展[2~9]. 台风环流的非对称结构主要是地球自转偏向力随纬度的变化, 即 β 项造成的. 此外, 局域热源和地形也可导致非对称结构的形成. 台风环流非对称结构影响 TC 路径的工作也有结果提出[10~15]. 非对称对流系统在卫星云图上表现为中尺度对流系统(MCS). 一个 MCS 往往相应于对流层中层的一个中尺度涡(MSV). 目前, 已经积累了 MCS 或 MSV 影响 TC 路径的观测事实和动力学结果[16~18]. 上述三方面的成果归于台风移动动力学的内容, 为 TC 路径业务预报提供了科学认识.

值得注意的是, 上述工作分别研究了单个基本因子的作用, 限于单因子的工作框架. Elsberry[19]近来指出了单个基本因子工作框架的缺陷. 他认为, TC 路径预报的问题比单个基本因子的理想框架要困难

英文引用格式: Luo Z X, Ping F. Mechanism for initial brows-like meso-scale vortex effects on tropical cyclone track. Sci China Earth Sci, 2011, doi: 10.1007/s11430-011-4246-6

得多. 其理由有二. 一是三个基本因子都是时变的, 并非是固定的影响源. 二是三个基本因子之间存在相互作用, 并非相互割裂. 因此, 需要分析三个基本因子的时变特征和共同作用. 我们认为, Elsberry 提出了台风移动动力学研究的新思路. 但是, 截至目前, 尚未见到用这个新思路研究 TC 路径问题的结果发表.

观测表明, 在 TC 向西北方向移动的过程中, 如果在TC的西北象限出现一个眉状中尺度云带, TC往往将转向北上, 形成异常路径[20,21]. 这是中尺度系统影响 TC 路径的一个范例. 本文将结合该范例, 在多因子的工作框架内, 分析三个基本因子的时变特征和共同作用.

1　模式和试验概述

取准地转正压涡度方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}\nabla^2\psi + J(\psi,\nabla^2\psi) + \beta\frac{\partial\psi}{\partial x} = -\nu\nabla^4\psi, \tag{1}$$

式中, ψ为地转流函数, $\nabla^2\psi$ 为相对涡度, J 为 Jacobian 算子, β=df/dy, f 为柯氏参数, ∇^2 为拉普拉斯算子, ν为双曲粘滞系数, 本文取ν= 1.0×10^{-7} m^4 s^{-1}.

在东西和南北边界, 取周期边条件.

令初始相对涡度:

$$\xi(x,y,0) = \xi_L(x,y,0) + \xi_S(x,y,0), \tag{2}$$

式中, $\xi_L(x,y,0)$ 代表一个 TC. 令[10]

$$\xi_L(x,y,0) = (2V_m/R_m)\times[1-0.5(r/R_m)]\mathrm{Exp}[1-(r/R_m)], \tag{3}$$

式中, V_m 为涡旋最大风速, R_m 为最大风速半径, r 为径向距离. 令 V_m=20 m s^{-1}, R_m=100 km. TC 中心(x_0, y_0)位于模式区域的中心, (x_0, y_0)=(0, 0) km.

Holland 和 Dietachmayer[22]在他们的模式中, 用一个中尺度涡近似描述一个中尺度云团. 本文参照他们的方法, 用一个眉状中尺度涡描述眉状云带. (2)式中的 $\xi_S(x,y,0)$ 代表一个眉状中尺度涡. 它分两步求出. 首先, 求出具有以下形式的 $\xi_A(x,y,0)$:

$$\xi_A(x,y,0) = \xi_{S0}\sin\left(\frac{x-x_1}{x_2-x_1}\pi\right)\times\sin\left(\frac{y-y_1}{y_2-y_1}\pi\right), \tag{4}$$

式中, ξ_{S0} 描述了中尺度涡的强度. 中尺度涡中心(x_{S0}, y_{S0})=((x_2+x_1)/2.0, (y_2+y_1)/2.0). (x_1, x_2)=(−280, 0) km, (y_1, y_2)=(0, 280) km, (x_{S0}, y_{S0})= (−140, 140) km.

其次, 将ξ_A(x, y, 0)绕涡中心(x_{S0}, y_{S0})逆时针旋转 45°, 得到ξ_S(x, y, 0). ξ_L(x, y, 0)和ξ_S(x, y, 0)代入(2)式, 可得相对涡度的初始场(图 1(a)).

模式区域是一个 4000 km×4000 km 的正方形, 水平格距 10 km, 时间步长 180 s. 积分 144 h. 采用 Asselin[23]的时间中央差滤波方案.

本文共计实施了 9 个试验. EX0 中, β项及初始场上ξ_S(x, y, 0)均设为零. EX1 中, β项为零, 初始场上ξ_S(x, y, 0)不为零. 令[24] ξ_{S0} = 3.48×10^{-4} s^{-1}. EX2 中, β项不为零, 初始场上ξ_S(x, y, 0)为零(图 1(b)). EX3 中, β项和ξ_S(x, y, 0)均不为零. EX4 和 EX5 中, 限定在

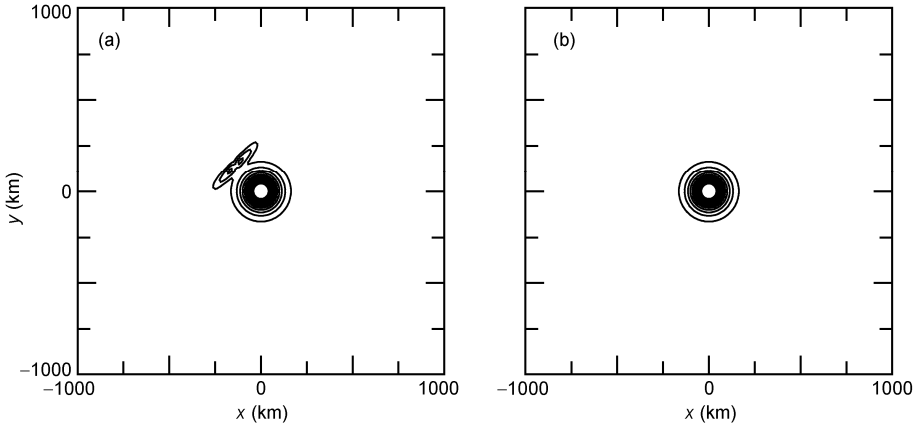

图 1　EX1(a)和 EX2(b)初始时刻相对涡度场

等值线间隔 0.5×10^{-4} s^{-1}

t=36 h 以后, 在 TC 东侧区域和南侧区域, 一旦在某个格点上流函数为正值, 即令该流函数取值为零. 这样可以保证能量频散高值系统不能形成. 除此差别外, EX4 与 EX2 试验条件相同; EX5 与 EX3 试验条件相同. EX6 和 EX7 是不同中尺度涡强度的试验, ξ_{S0} = 1.74×10^{-4} s^{-1} (EX6), ξ_{S0} =6.96×10^{-4} s^{-1} (EX7), 其余试验条件与 EX1 相同. 这样, EX0 与 EX1 的比较可讨论眉状中尺度云带的作用, EX0 与 EX2 的比较可讨论 β项的作用, EX0 与 EX3 的比较可讨论眉状中尺度云带和β项的共同作用. EX1, EX6 与 EX7 的比较可讨论结果对中尺度涡强度的敏感性.

2 结果和讨论

2.1 眉状中尺度涡影响 TC 路径的时变特征——f 平面的结果

EX0 中, 影响 TC 移动的只有非线性项和耗散项. 若初始 TC 为轴对称涡, 则等ζ线和等ψ线平行, 非线性项为零, 耗散项对 TC 移动影响很小, TC 停留在初始位置.

眉状中尺度涡引入后, 初始涡旋不再是轴对称的(图 1(a)), 等ζ线和等ψ线不再平行, 非线性项不再为零. TC 在非线性项作用下将离开初始位置.

TC 离开初始位置移动的方向和速度与 TC 外区的水平风速场关系密切[25]. 这里, 外区是 $r_1<r<r_2$ 的圆环区, r=0 代表 TC 中心, $R_m\leqslant r_1$. Gray[25]取不同的(r_1, r_2)值计算. 结果显示, (r_1, r_2)=(100, 300) km 时, 圆环区的水平风速矢与 TC 移动的方向和速度相关最好.

用眉状中尺度涡的初始涡度场$\xi_S(x, y, 0)$求出水平风速场. 本文主要关注 TC 转向北上的问题, 故主要讨论中尺度涡经向风速 v_S 的分布(图 2(a)). 可见, 眉状中尺度涡的引进导致了(100, 300) km 圆环区经向风速 v_S 的非对称分布. 类似地, 用初始涡度场$\xi(x, y, 0)$可求出水平风速场, 经向风速 v 也呈现非对称分布(图 2(b)). 作为对比, EX2 中, 初始时刻不存在眉状中尺度涡, 经向风速 v 呈现对称分布(图 2(c)).

圆环区所有格点上经向风速 v 的平均值 v_m 可以近似反映 TC 移动的方向和速度. 若 v_m>0, TC 将向北移动; v_m<0, TC 将向南移动. v_m 取值愈大, TC 移动愈快. v_m 的计算结果显示: EX1 中, v_m =0.63 m s^{-1}(图 2(b)). 这意味着, 眉状中尺度涡引入后, TC 将向北移

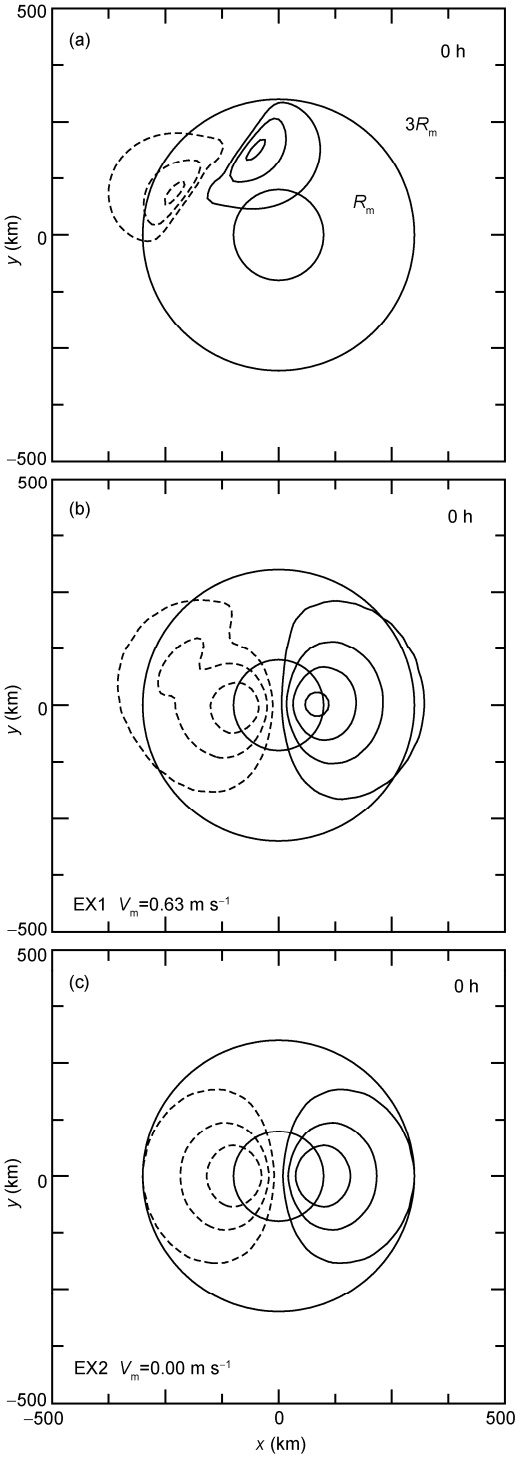

图 2 初始时刻经向风速的空间分布

(a) EX1 眉状中尺度涡经向风速; (b) EX1 眉状中尺度涡加 TC 经向风速; (c) EX2 TC 经向风速. 等值线间隔 1.0 m s^{-1}(a), 5.0 m s^{-1}((b), (c)). 实线为正值, 虚线为负值. 内圈同心圆代表以 TC 中心为圆心, 以 R_m 为半径的圆周; 外圈同心圆代表以 TC 中心为圆心, 以 $3R_m$ 为半径的圆周. 两个同心圆之间代表 100~300 km 圆环区

动. EX1 中 TC 路径显示, 0~6 h 期间, TC 向偏北方向快速移动(图 3, 曲线 EX1). 这个结果与图 2(b)是一致的. EX2 中, 没有眉状中尺度涡, TC 路径显示, 0~6 h 期间 TC 几乎维持不动(图 3, 曲线 EX2). 这个结果与图 2(c)中 v_m=0.0 也是一致的.

中尺度涡和主涡的相互作用可以导致主涡的轴对称化[20]. 在流型演变的过程中, 初始的中尺度涡会被主涡吸收,形成准轴对称流型. 眉状中尺度涡和 TC 主涡的相互作用同样经历了轴对称化过程(图 4). 随着非轴对称程度的减小, 眉状中尺度涡对 TC 路径的影响能力不断减弱. 与 100~300 km 圆环区经向风速的初始值相比, 24, 36, 48 h 的经向风速分别是初始值的 56%, 44%和 40%.

概括而言, 一个眉状中尺度涡在 TC 西北象限的出现, 造成涡度场和 TC 外区风场轴对称结构的破坏和非轴对称结构的形成, 导致 100~300 km 圆环区经

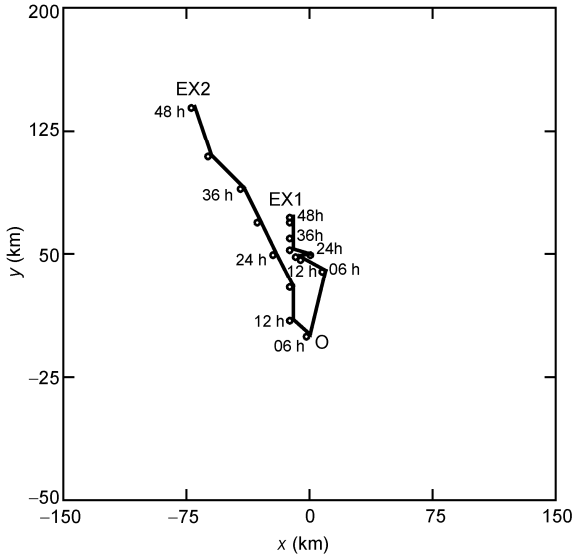

图 3　EX1 和 EX2 TC 路径

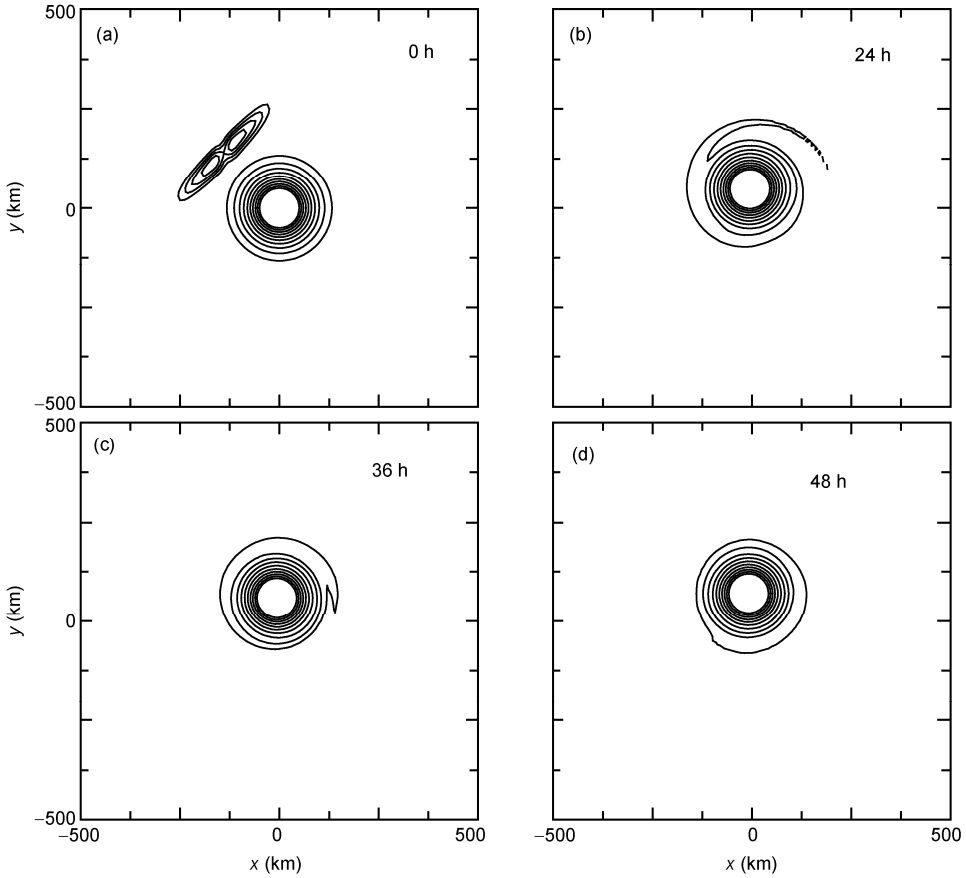

图 4　EX1 中 0~48 h 相对涡度场

等值线间隔 0.5×10^{-4} s^{-1}

向风速平均值大于零. 这个正值的经向风速将引导 TC 向北移动. 这是眉状中尺度涡引起 TC 路径转向北上的一个物理原因. 随着涡度场非轴对称结构的轴对称化, 眉状中尺度涡对 TC 路径的影响能力逐渐减弱(图 3, 曲线 EX1), 显示了中尺度涡这个 TC 路径影响因子的时变特征.

2.2 β作用影响 TC 路径的时变特征

EX2 中, $\beta\neq0$, 初始场上不存在中尺度涡, 流函数场呈现轴对称结构(图 5(a)). 在β项的作用下, TC 的非对称结构逐渐形成(图 5(b)~(d)). Chan 和 Williams[10]详细讨论过这个问题. 对比图 4, 5 可见, EX1 和 EX2 中, 0~48 h 的流型经历了相反的演变过程. EX1 是轴对称化的过程, 从初始非对称向轴对称结构演变; EX2 是非轴对称化的过程, 从初始轴对称向非对称结构演变.

EX2 中, 初始时刻 100~300 km 圆环区经向风速平均值 v_m 为零(图 2(c)); β 项引入后, TC 环流的非对称性不断加大(图 5). 从图 6 和表 1 可见, (1) 0~12 h, 眉状中尺度涡引起的 v_m 等于 0.51 m s^{-1} (EX1), 0.28 m s^{-1} (EX7) 和 0.87 m s^{-1} (EX8); β项引起的 v_m 等于 0.23 m s^{-1}, 眉状中尺度涡对 TC 路径的影响相对较大. (2) 12~96 h, 眉状中尺度涡引起的 v_m 等于 0.26 m s^{-1} (EX1), 0.15 m s^{-1} (EX7) 和 0.35 m s^{-1} (EX8); β项引起的 v_m 等于 1.25 m s^{-1}, 影响 TC 路径的主要因子是β项. (3) 眉状中尺度涡对 TC 路径的影响归因于不同尺度涡之间的非线性作用, 这是一种较短时间尺度的作用; β项对 TC 移动的影响归因于科氏力随纬度变化引起的 TC 的非对称结构, 这是一种较长时间尺度的过程. 这两种作用都具有时变特征.

从非对称 TC 环流场减去相应的轴对称环流场以后, 得到差值场. 差值场的主要特征是, 存在一个正

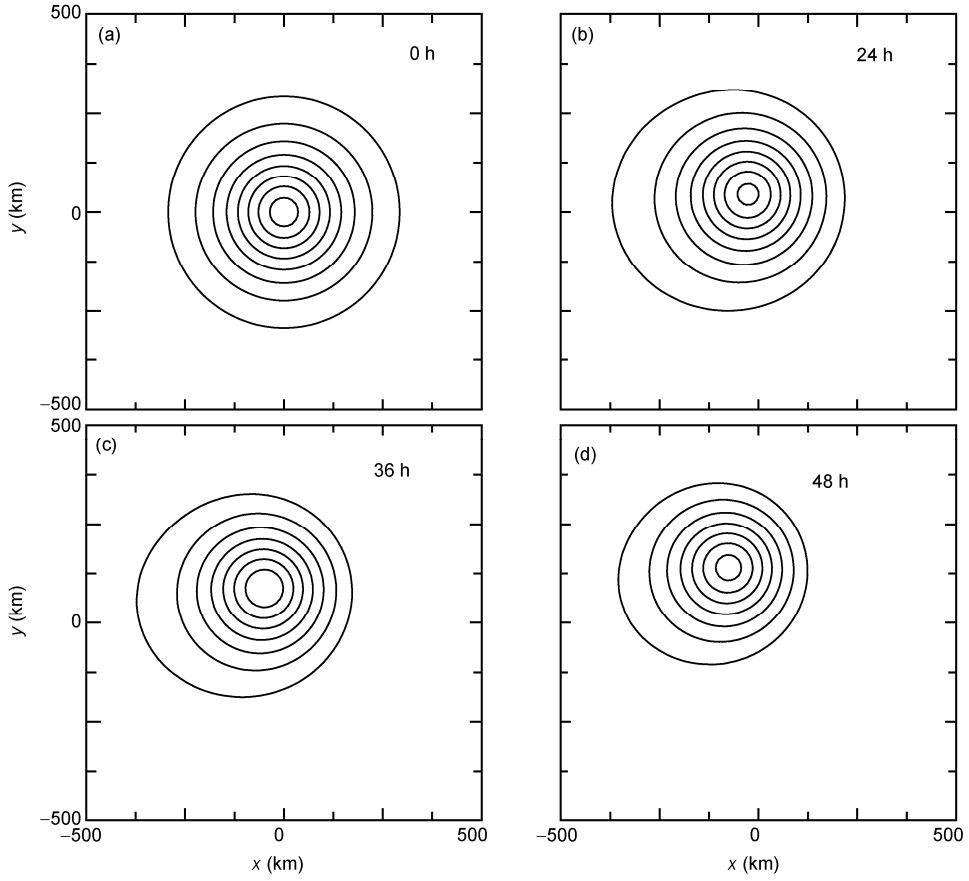

图 5 EX2 中 0~48 h 流函数场

等值线间隔 0.5×10^6 m^2 s^{-1}

表 1　EX1, EX2, EX7 和 EX8 中不同时段 100~300 km 圆环区经向风速平均值 v_m 的对比 [a)]

试验	眉状中尺度涡强度	beta 项	v_m (0~12 h)	v_m (12~96 h)	v_m (0~96 h)
EX1	3.48	NO	0.51	0.26	0.30
EX2	0.00	YES	0.23	1.25	1.11
EX7	1.74	NO	0.28	0.15	0.17
EX8	6.96	NO	0.87	0.35	0.45

a) 眉状中尺度涡强度单位: 10^4 s^{-1}, 经向风速平均值单位: m s^{-1}

值涡旋和一个负值涡旋, 称之为β涡对[11,13]. 从差值场上正、负涡中心连线中心绘一根垂直线 OB(图 7), OB 指示了准均匀流的方向; 差值场上等值线的疏密程度指示了准均匀流的强度. 准均匀流的方向和强度可以代表 TC 的移向和移速[11]. 与 24 h 的情况相比, 48 h 时准均匀流的强度增加了. 这与 100~300 km 圆环区经向风速平均值增加的结果(图 6)是一致的.

2.3　能量频散高值系统环境流影响 TC 路径的时变特征

EX2 中, 初始场上没有眉状中尺度涡. 在β项作用下, TC 的能量向外频散, TC 环流外圈等值线变形(图 8(a)). t=60 h, 在 TC 区域以东出现了一个反气旋的高值系统(图 8(c)). t=132 h, 高值系统中心和 TC 中心连线呈 NW-SE 走向(图 8(e)). t=156 h,在高值系统东南方向出现了一个闭合的低值系统 D, 一个(TC-G-D)的波列形成了(图 8(g)). 图 8 上的高值系统来源于 TC 能量的频散, 反过来频散生成的高值系统对 TC 的移动又起着一个环境场引导的作用. 由于高值系统是一个反气旋系统, 在高值系统的西侧为偏北分量的气流. 这支偏北分量的气流被认为是 TC 的一支引导流[2].

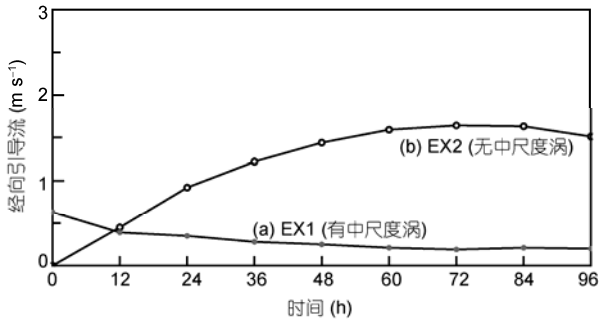

图 6　EX1, EX2 中 100~300 km 圆环区经向风速平均值 v_m 随时间的变化

(a) EX1 有眉状中尺度涡无β项; (b) EX2 无眉状中尺度涡有β项

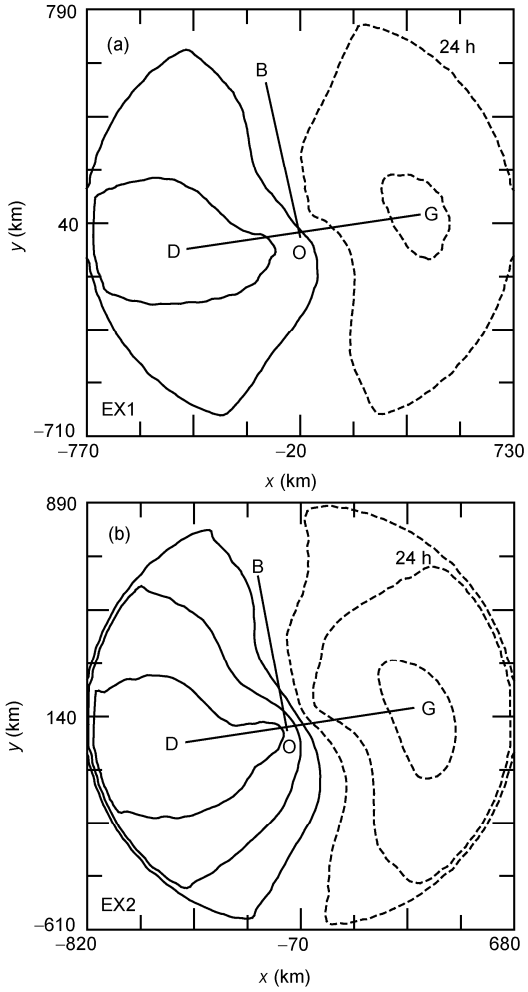

图 7　EX2 24 h(a)和 48 h(b)流函数差值场

等值线间隔 0.5×10^6 m^2 s^{-1}. 实线为负值, 虚线为正值

EX3 中, 初始场上有眉状中尺度涡. 在β项作用下, 同样出现了能量频散高值系统(图 8(b), (d))和(TC-G-D)波列(图 8(f), (h)).

EX2, EX3 不同时刻 100~300 km 圆环区经向风速平均值 v_m 的计算结果显示, v_m 是时变的(图 9). 图 9 所示的 v_m 值是 TC 环流非对称结构和能量频散高值系统环境场引导流两者共同作用的结果.

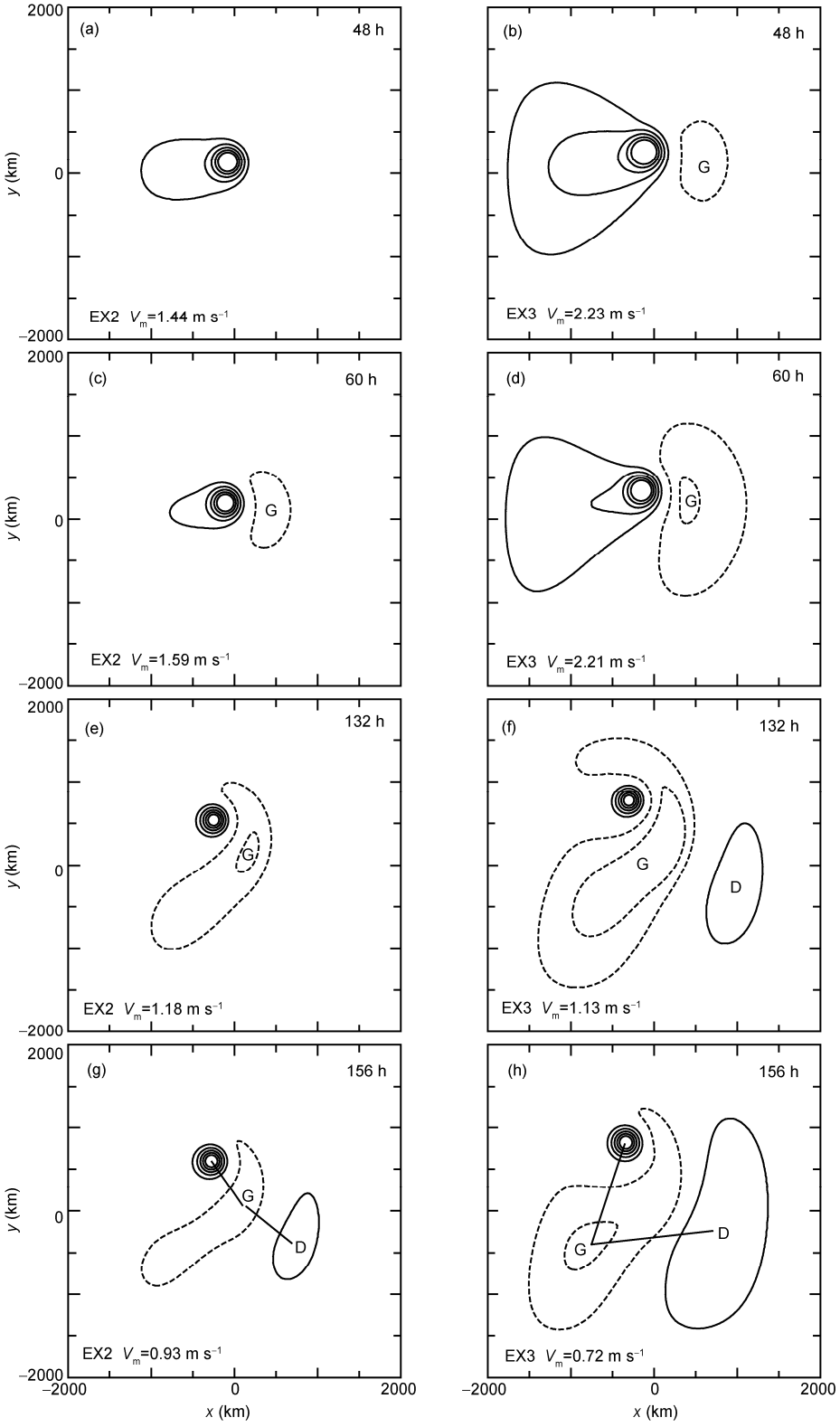

图 8　EX2, EX3 中 48~156 h 流函数场

EX2((a), (c), (e), (g)), EX3((b), (d), (f), (h)). 负值(实线), 正值(虚线). 等值线间隔 0.5×10^6 m^2 s^{-1}

为了将高值系统环境场引导流的作用分离出来, 实施了 EX4 和 EX5. 在 EX4 和 EX5 中, 限定在 t=36 h 以后, 在 TC 东侧区域和南侧区域, 一旦在某个格点上流函数为正值, 即令该流函数取值为零. 这个限定可以保证能量频散高值系统不能形成. 除此差别外, EX4 与 EX2 试验条件相同; EX5 与 EX3 试验条件相同. 这样, t=36 h 以后, EX4 和 EX5 中 100~300 km 圆环区经向风速平均值 v_m 或 纬向风速平均值 v_z 的变化可归因于 TC 环流非对称结构单独的作用. 差值 Dv_{m24}, Dv_{m35} 或 Dv_{z24}, Dv_{z35} 的变化可归因于能量频散高值系统环境场引导流单独的作用. 这些差值的曲线描述了高值系统环境场引导流的变化. 这里, $Dv_{m24}=v_{mEX2}-v_{mEX4}$, $Dv_{m35}=v_{mEX3}-v_{mEX5}$; $Dv_{z24}=v_{zEX2}-v_{zEX4}$, $Dv_{z35}=v_{zEX3}-v_{zEX5}$.

100~300 km 圆环区高值系统环境场引导流经向分量(图 10, 11)和纬向分量(图 12)曲线显示, 能量频散高值系统环境场引导流对 TC 路径的作用也是时变的.

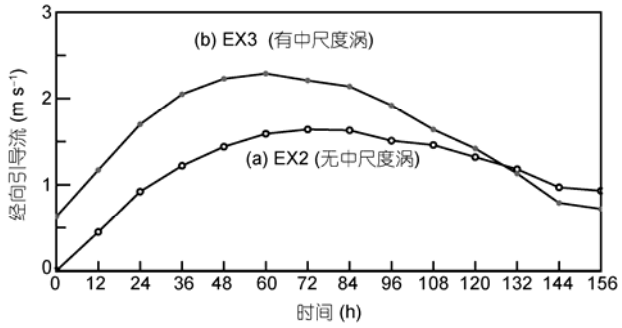

图 9　EX2 和 EX3 中 100~300 km 圆环区经向风速平均值 v_m 随时间的变化

(a) EX2 无眉状中尺度涡有β项; (b) EX3 有眉状中尺度涡有β项

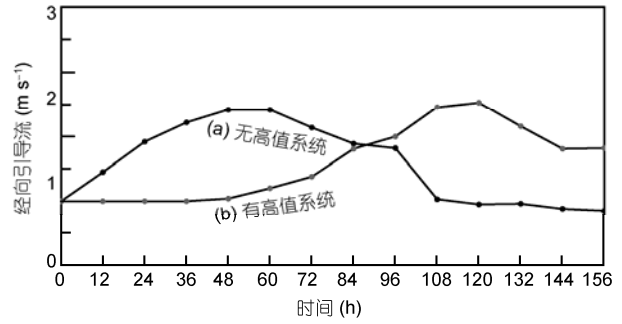

图 10　无眉状中尺度涡条件下(EX2 和 EX4)TC 非对称结构产生的引导流经向分量(a)和高值系统产生的引导流经向分量(b)随时间的变化

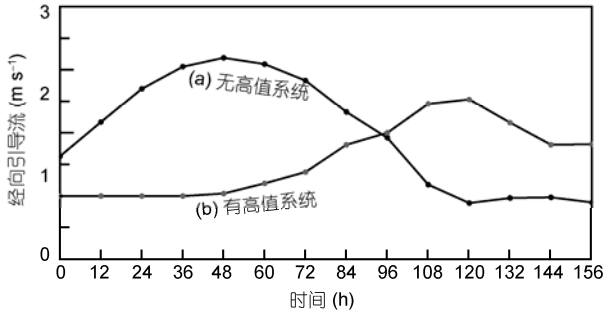

图 11　有眉状中尺度涡条件下(EX3 和 EX5)TC 非对称结构产生的引导流经向分量(a)和高值系统产生的引导流经向分量(b)随时间的变化

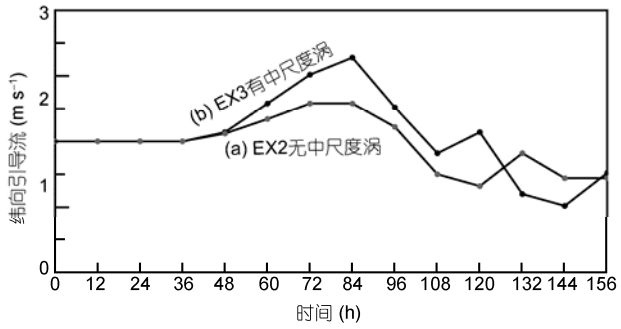

图 12　有、无眉状中尺度涡条件下高值系统产生的引导流纬向分量的比较

(a) EX2 无眉状中尺度涡; (b) EX3 有眉状中尺度涡

2.4　眉状中尺度涡的引入导致 TC 空间尺度加大

如上所述, 在 EX3 中, 初始非轴对称流型在 t=48 h 已经演变为准轴对称流型(图 4). 但是, 这并不意味着, 初始眉状中尺度涡对 TC 路径的作用就此结束.

TC 环流区域的流函数分布图显示, 无眉状中尺度涡时(EX2), TC 的空间尺度小(图 13(a), (c)); 有眉状中尺度涡时(EX3), TC 的空间尺度大(图 13(b), (d)). 图 13 上, EX2 和 EX3 两个试验结果的最外一圈等值线取相同的数值. 最外一圈等值线围成区域的格点数 N 可以定量反映 TC 空间尺度的大小. 结果: t=48 h 时, N_{EX3} 是 N_{EX2} 的 1.83 倍; t=72 h 时, N_{EX3} 是 N_{EX2} 的 1.31 倍.

TC 空间尺度加大将产生两个效应. 第一, 据 Chan 和 Williams[10]的研究, TC 的空间尺度越大, β项引起的 TC 的非对称结构越明显, TC 的移速越快, TC 的移向从偏西方向向偏北方向的偏折越大. EX2 和

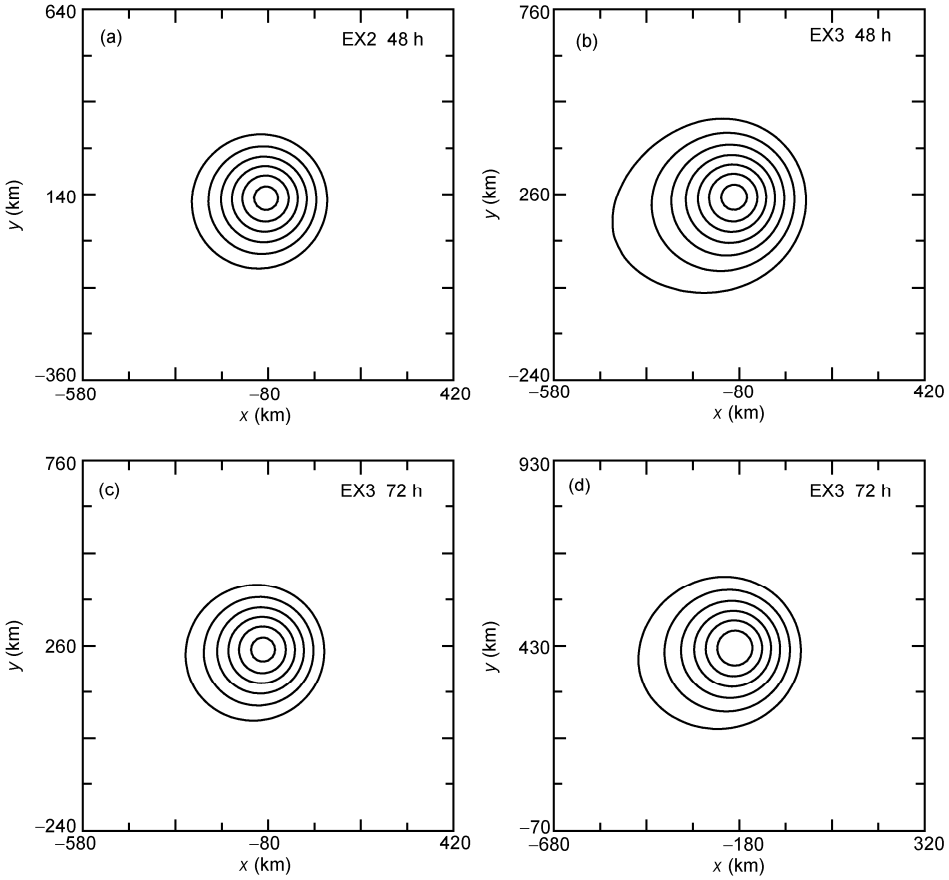

图 13　EX2 和 EX3 流函数场的比较

等值线间隔 0.5×10^6 m^2 s^{-1}

EX3 中 0~60 h TC 路径的结果(图 14)与文献[10]的结论是一致的.

第二, TC 空间尺度加大使得 TC 向外频散的能量增加, 能量频散高值系统出现的时间提前(比较图 8(a), (b)), 高值系统的强度增强(比较图 8(c), (d); 图 8(e), (f); 图 8(g), (h)), 最终导致 48~120 h 时段高值系统环境场引导流纬向分量的加大(图 12).

2.5　三个基本因子的共同作用

通过上述分析, 可以归纳出初始眉状中尺度涡影响 TC 路径的三种途径. 首先, 在 0~12 h 时段, 眉状中尺度涡的引入改变了 TC 外区的风场结构和引导气流, 对 TC 路径的转向北上产生直接作用. 其次, 增加了准轴对称 TC 的空间尺度, 改变了 TC 的非对称结构和准均匀流, 导致 TC 移速和移向的改变. 再次, 加快了 TC 能量向外频散的过程, 增强了高值系

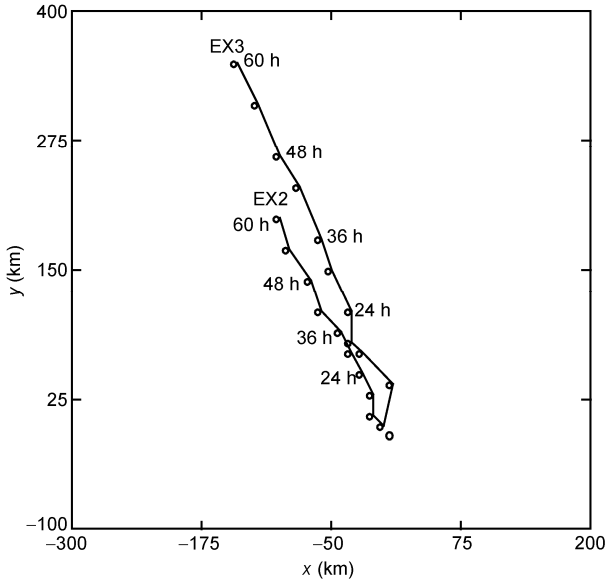

图 14　EX2 和 EX3 中 0~60 h TC 路径

统的强度, 加强了高值系统环境场的引导流, 最终影响到TC路径. 因此, 在眉状中尺度涡影响TC路径的范例中, 非对称对流系统、TC 非对称结构和高值系统环境场引导流这三个基本因子之间是彼此联系的, 眉状中尺度涡引起TC路径改变是这三个基本因子共同作用的结果.

3　结论

长期以来, 环境场引导气流被认为是影响 TC 路径最重要、最基本的因子[26,27]. 环境场既包括西太平洋副热带高压等大尺度天气系统, 也包括 TC 能量频散高值系统等天气尺度系统[2]. 在环境场影响 TC 路径的领域已有很多成果(如文献[2~9]).

20 世纪 80 年代起, TC 非对称结构影响 TC 路径的观测事实受到广泛关注.这种影响的动力学本质已经清楚[10~15].

近十多年来, 积累了不少非对称对流系统影响 TC 路径的观测事实, 这种影响的物理过程正在探索[16~18].

上述环境场引导气流, TC 非对称结构和非对称对流系统被认为是影响 TC 路径的三个基本因子[1]. 以往TC路径动力学的研究一般均分析单个基本因子的作用, 属于单因子的工作框架. 近来, Elsberry[19]指出了这个工作思路的缺陷. 他认为, 这三个基本因子之间存在着复杂的非线性的相互作用, 是一个非线性的问题. 他还认为, 这三个因子均具有时变特征. 但是, 截止目前, 尚未见到用这个新思路进行 TC 路径动力学研究的结果发表.

非线性问题不存在普遍意义下的通解. 一般的途径是从观测事实中提炼出范例来研究. 实际大气中, 眉状中尺度系统的出现往往引起 TC 转向北上, 形成异常路径. 这个观测事实为预报员所熟悉, 但是这类异常路径的动力学并不清楚. 本文以此观测事实为范例, 在多因子的工作框架内, 分析三个基本因子的时变特征和共同作用.

结果显示, 三个基本因子均具有清楚的时变特征. 可以用两个曲线交叉对此说明. 从图 6 可见第一个曲线交叉. 图6上曲线(a)EX1代表眉状中尺度涡对 TC 路径的影响, 曲线(b)EX2 代表 TC 非对称结构对 TC 路径的影响. 这两条曲线是交叉的, 交叉点在 t=11 h 附近. 显然, 0~11 h, 眉状中尺度涡的影响为主; 11~96 h, TC 非对称结构的影响为主. 从图 10 和图 11 可见第二个曲线交叉. 现以图 10 为例讨论. 图 10 上曲线(a)代表 TC 非对称结构对 TC 路径的影响, 曲线(b)代表能量频散高值系统环境场对 TC 路径的影响. 两条曲线也是交叉的, 交叉点出现在 t=88 h 附近. 在 t=88 h 以前, TC 非对称结构对 TC 路径的影响为主; t=88 h 以后, 高值系统环境场对 TC 路径的影响为主. 这些结果意味着, 在不同的时段, 三个基本因子具有不同的重要性, 它们的时变特征十分清楚.

三个基本因子对TC路径的共同作用可以通过眉状中尺度涡的两类效应来说明. 第一类是直接效应. 0~11 h, 眉状中尺度涡的引入导致了 TC 外区风场的非对称结构和 100~300 km 圆环区经向风速平均值 v_m 大于零. v_m 取正值是 TC 转向北上的直接原因. 第二类是间接效应. 12 h 以后, 眉状中尺度涡的引入导致准轴对称化 TC 空间尺度的加大, 进而引起 TC 非对称结构的改变和高值系统环境场引导流的加强, 最终使得 TC 移速加快, 移向向北偏折. 这些结果说明, 该范例 TC 异常路径的形成不是单个基本因子的作用, 而应归因于三个基本因子的共同作用.

多因子影响 TC 路径的动力学极其复杂. 本文只研究了热带气旋西北象限出现眉状中尺度涡旋的范例. 实际大气中, 在热带气旋东南象限往往也会出现眉状中尺度涡旋, 这是一个值得今后研究的新范例. 同时, 影响 TC 路径的三个因子之间的相互作用需要进一步分析. 本文使用的正压模式中没有加热项, 所以不能分析中尺度涡的加热作用、β 作用和频散高压之间的相互关系, 这是一个不足之处. 今后应该用复杂模式继续研究.

致谢　感谢审稿专家提出的宝贵意见.

参考文献

1　Elsberry R L, ed. Global perspectives of tropical cyclones. World Meteorological Organization WMO-/TD, 1995. 693, Rep. TCP-38, 289

2　Carr L E, Elsberry R L. Objective diagnosis of binary tropical cyclone interactions for the Western pacific basin. Mon Weather Rev, 1998,

126: 1734–1740
3 Chan J C L, Gray W M. Tropical cyclone movement and surrounding flow relationships. Mon Weather Rev, 1982, 110: 1354–1374
4 DeMaria M. Tropical cyclone motion in a nondivergent barotropic model. Mon Weather Rev, 1985, 113: 1199–1210
5 Dong K, Neumann C J. The relationship between tropical cyclone motion and environmental geostrophic flows. Mon Weather Rev, 1986, 114: 115–122
6 Velden C S, Leslie L M. The basic relationship between tropical cyclone intensity and the depth of the environmental steering layer in the Australian region. Weather Forecast, 1991, 6: 244–253
7 Wu C C, Kurihara Y. A numerical study of the feedback mechanisms of hurricane-environment interaction on hurricane movement from a potential vorticity perspective. J Atmos Sci, 1996, 53: 2264–2282
8 Wang D, Liang X, Duan Y. Impact of four-dimensional variational data assimilation of atmospheric motion vectors on tropical cyclone track forecasts. Weather Forecast, 2006, 21: 663–669
9 Wu C C, Cheung K K W, Chen J H, et al. The impact of tropical storm Paul (1999) on the motion and rainfall associated with tropical storm Rachel (1999) near Taiwan. Mon Weather Rev, 2010, 138: 1635–1650
10 Chan J C L, Williams R T. Analytical and numerical studies of beta-effect in tropical cyclone motion. Part I: Zero mean flow. J Atmos Sci, 1987, 44: 1257–1264
11 Fiorino M, Elsberry R L. Some aspects of vortex structure in tropical cyclone motion. J Atmos Sci, 1989, 46: 975–990
12 罗哲贤. 热带气旋逆时针打转异常路径的可能原因. 中国科学 B 辑, 1991, 21: 769–775
13 Tian Y, Luo Z. vertical structure of beta gyres and its effect on tropical cyclone motion. Adv Atmos Sci, 1994, 11: 43–50
14 Wu L G, Wang B. A potential vorticity tendency diagnostic approach for tropical cyclone motion. Mon Weather Rev, 2000, 128: 1899–1911
15 Chan J C L, Ko F M F, Lei Y M. Relationship between potential vorticity tendency and tropical cyclone motion. J Atmos Sci, 2002, 59: 1317–1336
16 Willoughby H E. Linear motion of a shallow-water barotropic vortex as an initial value problem. J Atmos Sci, 1992, 49: 2015–2031
17 Chen L, Luo Z. Effect of the interaction of different scale vortices on the structure and motion of typhoons. Adv Atmos Sci, 1995, 12: 206–214
18 罗哲贤, 邹立尧. 随机分布的小尺度涡旋场对台风路径影响的研究. 气象学报, 2010, 69: 211–218
19 Elsberry R L. Recent advances in tropical cyclone track forecasting techniques that impact disaster prevention and mitigation. International Training Workshop on Tropical Cyclone Disaster Reduction. WMO, CASWGTM, Guangzhou, China, 2007. 1–7
20 20 陈瑞闪. 台风. 福州: 福建科学技术出版社, 2001. 198–207
21 21 罗忠红. 利用卫星云图和天气形势分析 9914 号台风路径. 台湾海峡, 2001, 20: 426–428
22 Holland G J, Dietachmayer G S. On the interaction of tropical-cyclone scale vortices. Quart J Roy Meteor Soc, 1993, 113: 1381–1398
23 Asselin R. Frequency filter for time integrations. Mon Weather Rev, 1972, 109: 18–36
24 Enagonio J, Montgomery M T. Tropical cyclogenesis via convectively forced vortex Rossby waves in a shallow-water primitive equation model. J Atmos Sci, 2001, 58: 685–705
25 Gray W M. Summary of ONR sponsored tropical cyclone motion and future plans. Appendix D of Technical Report NPS 63-89-002, Naval Postgraduate School. Monterey, CA 93943, 1982. 68–79
26 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论. 北京: 科学出版社, 1979. 123–474
27 陈联寿, 徐祥德, 罗哲贤, 等. 热带气旋动力学引论. 北京: 气象出版社, 2002. 5–8