

9414号热带气旋移动路径异常 影响因子的数值研究*

蒋贤安 朱永禔

(上海台风研究所, 上海 200030)

提 要

文章运用一个10层原始方程模式对9414号热带气旋(DOUG)(下称TC)的异常路径进行了数值模拟, 对该TC路径异常的主要原因作了探讨, 并在数值模拟基础上研究了各因素在TC移动中所起作用的大小. 结果表明: 环境流场演变是造成该TC移动路径突变的最主要原因, 而TC自身结构对其移动突变的影响相对较小.

关键词: 环境场调整 异常路径 热带气旋 数值模拟

引 言

以往对影响热带气旋移动的一些主要因子的研究大多是在正压条件下进行的, 而实际的热带气旋是一个由高低层的涡旋相互耦合的系统, 用正压方法来研究其与周围具有斜压性质的大尺度系统相互作用, 是不全面的.

近年来, 人们开始利用简单的三维模式来研究热带气旋运动^[1~4]. 但关于斜压情况下影响热带气旋移动机制的研究还不多, 斜压环境系统和热带气旋相互作用的机制也没有达到一致的认识. 如研究发现, 即使不考虑 β 项的作用, 环境气流的垂直切变亦会导致和 β 平面上非常相似的涡旋对的形成, 但对热带气旋移动方向与环境气流垂直切变矢量方向的关系还存在着不同的意见. 而且这些工作大多是在理想化基础上进行的, 在实际的环境场中各因子所起的作用还需验证.

本文以一个具有异常路径的9414TC(DOUG)的数值模拟为例, 试图在实际大气环境场中验证以前得到的一些结论, 并揭示影响该TC路径发生突变的原因, 获得一些有关热带气旋移动规律的新认识.

1 模式及初始条件

1.1 模式简介

本文采用 σ 坐标的原始方程模式^[3].

* 本文由“八五”国家科技攻关 85-906-07 课题资助.
1996-07-08 收到, 1997-03-03 收到修改稿.

模式控制方程组如下:

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} &= fv - \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} + c_p \theta \frac{\partial p}{\partial x} \right) - \dot{\sigma} \frac{\partial u}{\partial \sigma} + F_u + D_u \\ \frac{dv}{dt} &= -fu - \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} + c_p \theta \frac{\partial p}{\partial y} \right) - \dot{\sigma} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + F_v + D_v \\ \frac{\partial \pi}{\partial t} &= - \left(\frac{\partial \pi u}{\partial x} + \frac{\partial \pi v}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial \sigma} (\pi \dot{\sigma}) \\ \frac{\partial \phi}{\partial p} &= -C_p \theta \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} &= -\dot{\sigma} \frac{\partial \theta}{\partial \sigma} + Q + F_\theta + D_\theta \\ \sigma \text{ 坐标为: } \sigma &= \frac{p - p_t}{p_s - p_t} = \frac{p - p_t}{\pi} \end{aligned}$$

其中 p_s 是海平面气压, p_t 是模式大气层顶气压, 模式中分别取 50 hPa 和 0 hPa, $\pi = p_s - p_t$. $\dot{\sigma} = d\sigma/dt$ 是 σ 坐标中的垂直速度; $u, v, \phi, \theta, f, c_p, R$ 均为气象常用符号; $p = \left(\frac{p}{1000}\right)^{\frac{R}{c_p}}$; Q 是单位质量的非绝热加热(文中仅取常用的积云对流参数化方案计算). D_u, D_v, F_u, F_v 分别表示动量的水平和垂直方向的扩散, F_θ, D_θ 则表示热量的垂直和侧向扩散.

模式的水平网格点数为 81×51 , 格距为 70 km, 水平范围取 $99.8^\circ \sim 150.19^\circ \text{E}$, $20.0^\circ \sim 51.49^\circ \text{N}$. 模式在垂直方向被等分成 10 层, 各层的 σ 值间隔为 0.1. 在模式的时间积分方案中采用了显式时间分裂算法, 将整个过程分成调整过程和平流过程两个部分. 模式中未考虑水汽、地图投影放大因子及地形的影响.

1.2 初始场的形成

在初始场中, 我们引入了一个具有三维暖心结构的轴对称理想涡旋, 其位势高度表达式如下^[5]:

$$\phi(i, j, k) = \phi_e(k) - \Delta\phi(k) \cdot \exp\left(-4.0 \cdot \frac{r^2}{R^2}\right) \cdot \left(1 + 1.55 \cdot \frac{r^2}{r_m^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

($k=1, 2, \dots, 11$)

其中 r 是网格点 (i, j) 与 TC 中心的距离, r_m 为 TC 最大风速半径, R 为 TC 范围的平均半径, $\phi_e(k)$ 是第 k 层 TC 外围的环境位势高度, 文中采用了第 k 个等压面距 TC 中心 8~12 个格距环带范围内的位势高度的平均值. $\Delta\phi(k)$ 代表第 k 层环境位势高度和 TC 中心的位势高度之差, 文中采用了如下表达式:

$$\Delta\phi(k) = \Delta\phi \cdot \frac{p(k) - p_{10}}{1000 - p_{10}} \quad (2)$$

式中 $p(k)$ 为第 k 层等压面的气压值, p_{10} 为 TC 环流由气旋式转为反气旋式高度的气压, $\Delta\phi$ 表征了 TC 的强度.

文中采用的初始资料为上海区域气象中心数值预报业务系统的客观分析场(以国家气象中心 T63 模式提供的资料为预备场), 包括 1994 年 8 月 10 日 08 时, 11 日 08 时, 11 日 20 时, 12 日 08 时, 12 日 20 时(北京时, 下同)5 个时次的共 11 个层次的位势高度场.

首先将初始位势高度资料经插值转化到模式各 σ 层的网格点上,进而利用静力平衡关系及地转风和梯度风关系得到各 σ 层的 θ , u , v 场,其中在TC范围内采用了梯度风关系,在环境场中则采用了地转风关系.为使初始风场和气压场之间具有更好的协调性,我们对上述初始场进行了18 h的动力初值化.

为了保证模式积分中大尺度形势的正确,同时也避免模式侧边界的能量反射,文中采用了水平侧边界的大尺度强迫处理^[6].另外还将位于TC9414南侧的TC9415(ELLIE)作为边界条件加入到模式中,故将南部边界大尺度强迫的区域相应地取得比其余3个方向的边界域要宽一些.水平侧边界的大尺度资料和模式计算结果的耦合采用如下形式:

$$x(i) = w(i) \cdot x_m(i) + (1 - w(i)) \cdot x_f(i) \quad (3)$$

其中 i 是由边界向内格点序号,边界上 $i=1$.对于东、西、北侧边界取 $i=1, 2, \dots, 12$,对于南侧边界取 $i=1, 2, \dots, 16$. $x_m(i)$ 是模式计算结果, $x_f(i)$ 是实况大尺度资料强迫, $w(i)$ 是权重系数,其取值如下(见表1):

表1 各边界 $w(i)$ 的取值

	i									
东、西、北侧	1~3	4	5	6	7	8	9	10	11	≥ 12
南侧	1~7	8	9	10	11	12	13	14	15	≥ 16
$w(i)$	0.0	0.12	0.24	0.375	0.564	0.795	0.894	0.952	0.989	1.0

2 实况

9414号TC于8月1日形成于关岛附近洋面,之后向西移动,并逐渐转成西北—北向,于8月8日02时到达我国浙江温州东南洋面,而后则以与海岸线近乎平行的路径移动,于10日08时移到了苏北以东海面(123.8°E, 32.8°N),其后的路径如图1(a)中“*”所示,先向北移动一段时间,接着在朝鲜半岛西南海面完成了一个顺时针打转过程,打转后的TC向西—西南方向移动,最后于12日20时至13日02时之间在我国苏北登陆并减弱消失^[8].

图1(b)、(c)分别是11日08时和12日08时500 hPa的位势高度场.可以看到,在这段时间里,TC北侧的西风带较平直,且维持在较高的纬度,TC东侧的副热带高压强度有所减弱,且范围减小,相反,TC西侧的大陆高压的强度却逐渐增强并向山东半岛伸展,将TC与西风带隔离开来.另外,TC9414南侧的TC9415与9414TC的中心距离逐渐缩小,而强度、范围均显著增强、扩大.

3 控制试验

控制试验中我们将一个对称的理想TC($r_m=120.0$ km, $R=960.0$ km, $p_0=200.0$ hPa, $\Delta\phi$ 为20.0 dagpm)嵌入到8月10日08时的环境场中,经过18 h的初值化,在 β 平面上进行了60 h的积分.(在下文中,若没有特别说明,理想TC均采用了以上这种结构).

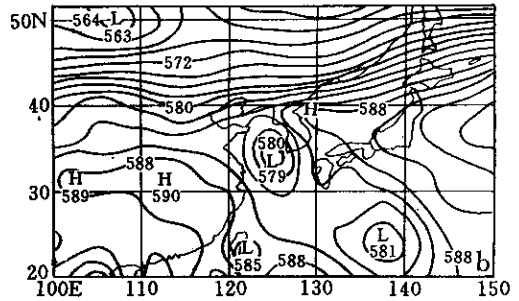
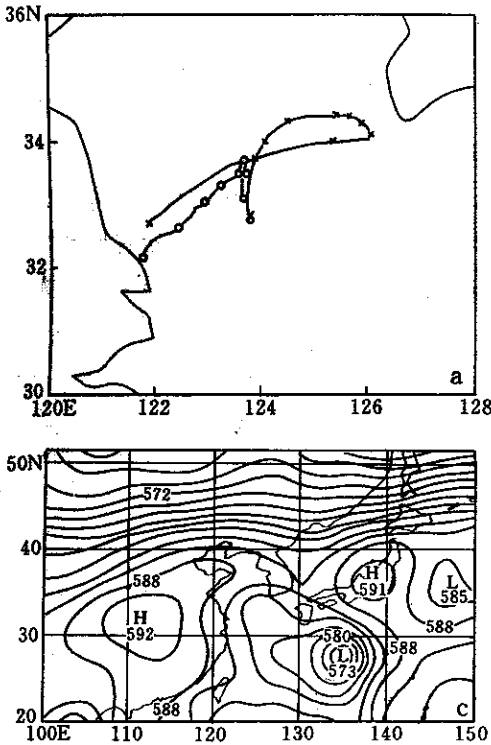


图 1 (a) 实况和控制试验中 TC 的路径(10 日 08 时~12 日 20 时) (*—实况、o—控制试验, 间隔为 6 h(下同)) (b) 11 日 08 时 (c) 12 日 08 时 500 hPa 实况位势高度场(等值线间隔为 2.0 dagpm)

积分的路径见图 1(a)。由模拟路径和实况路径比较可以看出, 模拟路径没有模拟出实况 TC 顺时针打转的过程。但从图中也可以看到, 模式 TC 在积分第 18 h 到第 30 h 的 12 h 中, 移速很小, 基本上保持停滞状态, 在积分 24 h 后朝偏西南方向移动, 这与实况颇为接近。由此我们认为模拟的结果在一定程度上能较好反映实况 TC 的移动趋势。

4 试验方案设计及其结果

4.1 热带气旋的水平尺度、垂直结构和强度对其移动的影响

在本试验中, 通过改变 TC 的水平尺度、垂直结构和强度来试验这些因子对 TC 移动的影响(试验方案略)。结果发现(图略), TC 水平尺度和强度的改变并没有改变 TC 的移动趋势。而强度的增强(减弱)则会引起 TC 移速的略微减小(增大)。另外, 最大风速半径的减小亦会使 TC 的移动速度加快, 但它们所引起的 TC 移速变化的程度是很小的。相对而言, TC 尺度的减小对于 TC 的移动要敏感得多, 它加速了 TC 的向北移动。垂直结构对于 TC 移动的影响并不敏感。

4.2 TC 结构非对称性对 TC 移动的影响

由于实际的 9414 号 TC 具有明显的非对称结构, 在 TC 的东侧环流强大, 而西侧环流则比较弱。为了试验这种非对称结构对 TC 移动之影响, 我们选择了 3 种具有非对称结构的理想 TC 涡旋。

非对称 TC 的引入参考了李天明和朱永祺(1990)^[7]的方法, 在式(1)中加入方位角 θ :

$$\phi(i, j, k) = \phi_e(k) - \Delta\phi(k) \cdot \exp\left(-4.0 \cdot \frac{r^2}{R^2(\theta)}\right) \cdot \left(1 + 1.55 \cdot \frac{r^2}{r_m^2(\theta)}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中:

$$R(\theta) = R_0 [1 + b_0 \cos(\theta - \theta_0)]$$

$$r_m(\theta) = r_{m0} [1 + b_1 \cos(\theta - \theta_1)]$$

b_0, b_1 分别表征 TC 范围 R 和最大风速半径 r_m 的非对称程度. 其中 R 的非对称性称外区非对称, 而最大风速半径 r_m 的非对称性称为内区非对称. θ_0, θ_1 分别表示它们的非对称方位角, 为了和实况一致, 选取内区(θ_1)、外区(θ_0)非对称方位角均为 225° , 即最大风速位于东北象限.

在文中 $\phi_e(k), \Delta\phi(k)$ 的选取同控制试验中对称情形一致, 而 R_0, r_{m0} 也分别选取为 $960.0 \text{ km}, 120.0 \text{ km}$.

在本方案中共设计了 3 组试验, 分别选取了内外非对称、外区非对称和内区非对称 3 种情形的初始理想 TC:

试验 1: 内外非对称 ($b_0 = 0.2, b_1 = 0.2$);

试验 2: 外区非对称 ($b_0 = 0.2, b_1 = 0.0$);

试验 3: 内区非对称 ($b_0 = 0.0, b_1 = 0.2$).

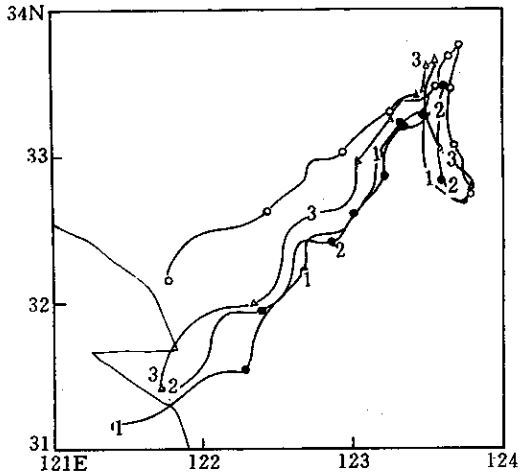


图 2 TC 环流非对称性对其移动的影响 (O 为基础试验, 1, 2, 3 分别表示试验 1, 2, 3)

试验结果见图 2. 从图中可以看到, 无论是内外非对称、内区非对称还是外区非对称的初始 TC, 都没有使 TC 的突然转折的运动趋势发生很大的变化. 3 种非对称形式均可导致 TC 移速的加快, 并使 TC 转折之后的运动方向更偏向南. 同时发现, 内区非对称(试验 3)与外区非对称(试验 2)在影响 TC 移动方面其效果是基本一致的. 而内外非对称形式(试验 1)较单一内部非对称或外部非对称形式对于 TC 移动影响更大些.

4.3 环境场调整对热带气旋移动的影响

4.3.1 双 TC 相互作用对 TC 移动的影响 为进一步研究位于 TC9414 南侧的 TC9415 对于 TC9414 路径突变的影响, 设计了两组试验方案:

试验 1: 在各时次的实况侧边界条件中, 在各层次均剔除了 TC9415 号的环流;

试验 2: 在 10 日 08 时、11 日 08 时、11 日 20 时 3 个时次的实况侧边界条件中剔除了 TC9415 的环流, 而在 12 日 08 时和 12 日 20 时两个时次的侧边界中保留了 TC9415 的环流.

其中 TC 环流的剔除是通过在实况 TC 的位置上叠加一个范围、强度与 TC 环流相符的反气旋环流来实现的.

试验的结果如图 3(a)所示. 从图中可以看出, 在整个过程中均剔除了 TC9415 环流的影响(试验 1), TC9414 前期向北的移动时间比控制试验稍长些, 之后路径发生转折,

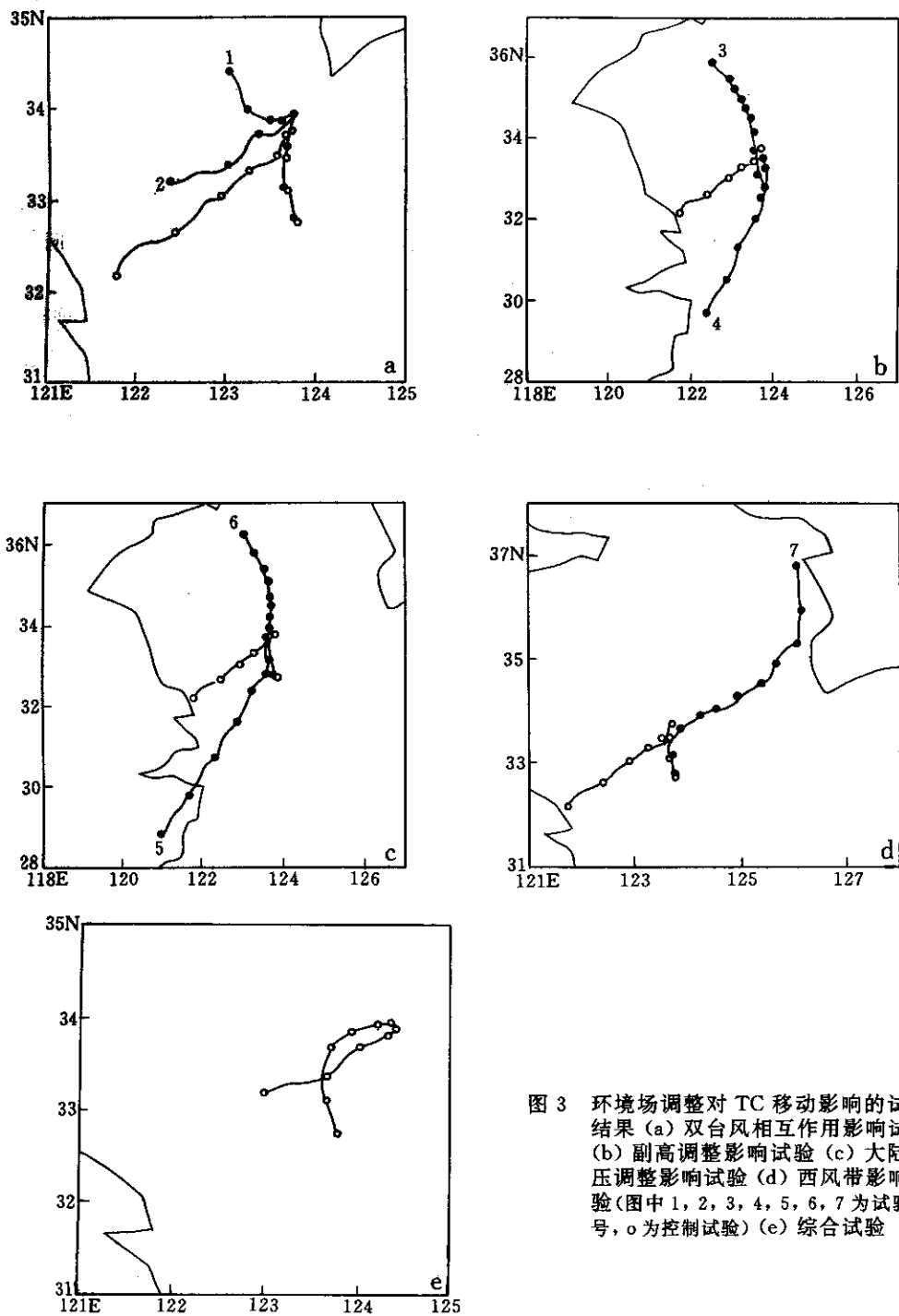


图3 环境场调整对TC移动影响的试验结果 (a) 双台风相互作用影响试验 (b) 副高调整影响试验 (c) 大陆高压调整影响试验 (d) 西风带影响试验 (图中1, 2, 3, 4, 5, 6, 7为试验序号, o为控制试验) (e) 综合试验

而转折后 TC 并未象控制试验中那样, 一直朝着西南方向移动, 最终的移动却转成了西北方向. 而在试验 2 中, 由于 TC9415 环流的引入是在 48 h 之后, TC 的转折则发生在 36 h 之前, 可见 TC9415 环流的引入与 TC9414 的路径转折是无关系的. 试验 2 的结论还表明, TC9415 环流与 TC9414 环流的相互作用, 使得 TC9414 在转折后沿着西南方向移动.

通过以上两个试验, 我们认为 TC9414 路径的突然转折与 TC9415 无关, 而在其路径发生突然转折之后, TC9414 和 TC9415 的双台风相互作用对其沿着西南方向移动具有重要作用.

4.3.2 副热带高压的调整对 TC 移动的影响 通过对副热带高压的强度演变进行调整, 来讨论副热带高压对 TC 移动的影响. 副热带高压的调整是通过在副高中心位置强迫一个非绝热加热源而实现的. 图 4 给出各种非绝热加热形式及其垂直廓线的分布. 每一层次上加热源的分布形式由图 4(a) 所示. 只是每个层次上的权重系数不同, 而且正是这种权重系数的垂直分布廓线决定了副热带高压的强度在演变过程中是增强还是减弱及增强或减弱的程度在垂直方向的不同分布.

本方案共设计了两组试验(称试验 3, 试验 4), 试验 3 中选取了图 4(d) 中形式 A 的廓线, 副高在演变过程中逐渐增强, 试验 4 中则选取了形如 A' 的廓线形式, 副高在演变的过程中逐渐减弱.

图 3(b) 是试验的结果. 从图中可以看出, 当副热带高压持续增强时, TC 向北的速度增大, 且不再发生路径的突然转折, TC 朝着北—西北的方向稳定地移动. 而当副热带高压持续减弱时, 相对控制试验而言, TC 初期的向北移动速度较小, 并在较早的时间发生路径突然转折, 最后稳定地朝着西南—南的方向移动.

由以上的结果我们认为, 副热带高压对于初期 TC 的向北运动具有重要的作用, 且副热带高压的强度在演变过程中的减弱可能是造成 TC 路径发生突然转折的原因之一.

4.3.3 大陆高压的调整对 TC 移动的影响 通过非绝热加热的引入来控制大陆高压强度调整, 以试验大陆高压在 TC 移动中的作用. 非绝热加热在每个层次均采用了图 4(b) 的形式.

按照两组不同的加热系数的廓线分布, 进行了两组试验. 试验 5 和试验 6 亦分别采用了和图 4(d) 中的廓线分布 A 和 A'. 试验 5 为大陆高压增强的情况, 试验 6 是大陆高压减弱的情况.

图 3(c) 是两组试验模拟的结果. 当大陆高压的强度随时间逐渐增强时, TC 初期的向北运动速度减小, 并且相对控制试验较早地发生了路径的突然转折, 之后朝着南—西南方向移动; 而当大陆高压的强度随时间逐渐减弱时, TC 的路径不再发生转折, 较稳定地向着北—西北的方向移动. 这一结果恰好和副热带高压的调整所得到的结果相反.

从以上结论我们可以得出, 在 TC 移动初期, 较弱的大陆高压有利于 TC 向北移动速度的增大, 而大陆高压保持一定的强度则是 TC 后期路径发生转折的关键因素.

4.3.4 西风带系统调整对 TC 移动的影响 为了验证西风带对 TC 移动的影响, 参照前面的方法设计了一组试验(称试验 7), 在试验中引入了形如图 4(c) 的加热场, 各层加热系数的垂直廓线如图 4(d) 的 A' 所示.

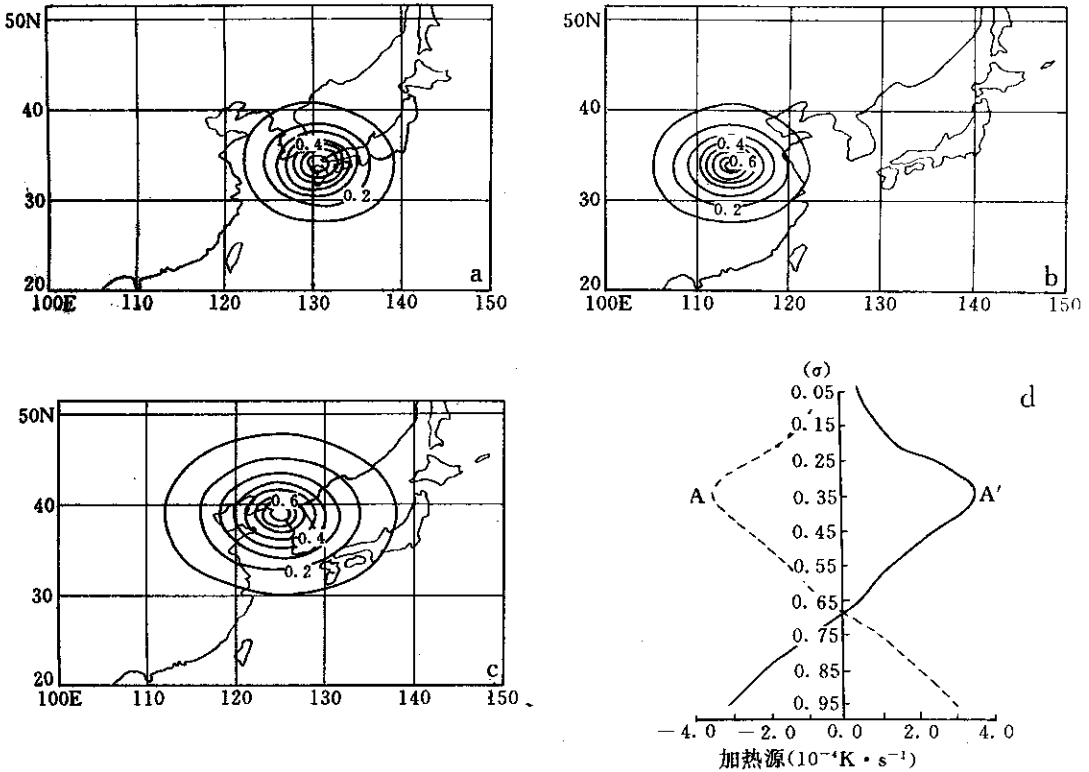


图 4 调整大尺度环境场而引入的非绝热加热形式(a) 副高中心上强迫(b) 大陆高压上强迫(c) 西风带上强迫及(d) 加热的垂直廓线分布(其中 d 中廓线 A 和廓线 A' 分别用来控制高压系统随时间增强和减弱, 或低压系统随时间减弱和增强)

图 3(d) 是积分 60 h 的路径. 可见由非绝热加热所引起的西风带的加强导致了 TC 稳定地向东北方向移动, 且未出现路径的突变.

以上试验表明, 西风带的影响并非本次个例中 TC 路径突然转折的原因. 但它和 TC 北缘的相互作用可能对 TC 路径转折之前向东北—东方向的移动作出了贡献.

4.3.5 环境系统变化的综合试验 根据以上分析, 我们认为引起此次 TC 路径突然转折的主要原因在于其所处环境场的演变, 而并非其自身的因素. 开始 TC 先后受到副热带高压西侧的偏南气流及西风带和副高西北侧之间西南气流的作用, 向北—东北方向移动. 之后, 副热带高压有所削弱且东移, TC 向北的移速减小, 与此同时 TC 西侧的大陆高压的势力有所增强且东进. 随着 TC 东西侧两个高压力量对比的这种变化, TC 初期的向北移动的趋势受到遏制, 最终当西侧大陆高压的强度增加到一定程度, TC 经一段时间的停滞少动之后发生突然转折. 之后, TC9415 的强度不断增强且移速加快, 它和 TC9414 的距离逐渐缩小, 同时 TC9414 的范围较小、强度较弱, 故对 TC9415 作用的响应较为敏感, 使转折后的 TC9414 继续沿西南方向移动, 但移速偏慢. 之后, 大陆高压增强且在 TC 北侧东伸使 TC 向西南方向的移动速度增大.

模式(控制试验)的结果和实况相比, 初始时刻向北的移动速度较小, 而且顺时针打

转的过程不很明显,根据以上的分析,原因在于模式没有能十分精确地对这次 TC 过程环境场调整进行描述.为了进一步验证,通过引入热力强迫方法调整 TC 周围的环境场,进行环境场调整的综合试验.

鉴于初始几个小时 TC 的北移速度较慢,故在前 8 个小时,加强副热带高压的强度,之后减弱副高强度,使初始时刻副热带高压的强度增强不致影响 TC 路径的转折过程.另外,在实际 TC 转折前增强西风带的强度,并使其位置稍微南压,以增加 TC 向东移动的趋势,有利于 TC 发生顺时针打转.此后撤消与西风带相对应的非绝热加热强迫源.

经过以上处理,得到如图 3(e)的结果.从图中可以看出,综合试验成功地得到了 TC 的顺时针打转,此结果较好地反映了实况 TC 的移动趋势,表明环境场的调整是导致 TC 路径发生突变的原因.

5 结 论

本文通过对 TC9414 在朝鲜半岛西南海面顺时针打转过程的数值模拟,研究了 TC 自身结构及环境场调整在其打转过程中所起的作用,初步得到以下结论:

(1) 在实际的环境场中,TC 自身的水平尺度和垂直结构的改变对于 TC 移动的影响较小,它们不会改变 TC 移动的趋势.相对而言,TC 移动对于 TC 范围的变化较为敏感.

(2) TC 内部的非对称结构并不是造成 TC 突然转折的真正原因,它仅能局部改变其移速及移向,而不影响在整个过程中的运动趋势.内区非对称和外区非对称对 TC 影响的反映是基本一致的.而内外非对称形式较单一内部非对称或外部非对称形式对于 TC 移动的影响更大些.

(3) TC9414 在朝鲜半岛西南海面移向发生突然转折的原因,主要是由其东侧的副热带高压和西侧的大陆高压强度、范围随时间的演变造成的.

(4) 转折后的 TC 路径沿着西南方向移动,其中在转向后移动前期,TC9415 对其产生的双台风相互作用具有重要的影响.之后随着大陆高压强度增强且在 TC 北侧进一步东伸,加速了 TC 向西南方向的移动.

以上仅是由数值模拟得出的结果,还有待于从物理机制上进一步的研究和验证.

参 考 文 献

- 1 Wang B and Li X. The beta-drift of three-dimensional vortices: A numerical study. *Mon. Wea. Rev.*, 1992, **120**: 579~593.
- 2 Shapiro L J. Hurricane vortex motion and evolution in a 3-layer model. *J. Atmos. Sci.*, 1992, **49**: 140~153.
- 3 Holland G J and Wang Y. Baroclinic dynamics of simulated tropical cyclone recurvature. *J. Atmos. Sci.*, 1993, **52**: 410~426.
- 4 Flatau W H Schubert and Stevens D E. The role of baroclinic processes in tropical cyclone motion: The influence of vertical tilt. *J. Atmos. Sci.*, 1994, **51**: 2589~2601.
- 5 王玉清,朱永祺.双热带气旋相互作用的机制分析及数值模拟研究 I: 数值模拟. *大气科学*, 1992, **16**(6): 659~668.
- 6 费亮,李小凡.高层冷涡对台风路径影响的数值模拟和动力分析. *应用气象学报*, 1992, **3**(1): 385~393.
- 7 李天明,朱永祺.热带气旋运动的分析和模拟, *中国科学(B辑)*, 1990, (1): 104~112.

8 中国气象局编.《热带气旋年鉴》.北京:气象出版社,1990.

A NUMERICAL STUDY ON FACTORS AFFECTING UNUSUAL MOTION OF TC 9414 (DOUG)

Jiang Xian'an Zhu Yongti

(*Shanghai Typhoon Institute, Shanghai 200030*)

Abstract

Based on the numerical simulation of TC 9414, which moved in an anomalous track, by using a 10-level primitive equation model, the main causes for the TC unusual motion are studied. The role of each factor played in TC motion is studied based upon the numerical model as well. The results show that the evolution of environmental flow is the most important cause that leads to the abrupt change of TC moving track, and the structure of TC itself has a small effect on its motion.

Key words: Environmental field adjustment Unusual track Tropical cyclone(TC) Numerical simulation