Helen 台风 (9505) 异常路径的诊断分析与数值模拟

张胜军 陈联寿 徐祥德

中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081

摘 要 南海台风西行北翘是小概率事件,预报具有一定的难度。作者应用中尺度模式 MM5,对具有南海台风 西行北翘路径特征的 9505 号强热带风暴(Helen)的异常路径进行了诊断分析和数值模拟。研究结果表明:副热带 高压出现断裂,副高主体减弱东撤,导致 Helen 在断裂点处北翘,此异常路径是环境场与 Helen 本身非线性相互 作用的结果。环境场的主要天气系统(如副热带高压、高空冷涡)与 Helen 之间的相互作用并未影响副热带高压薄 弱地带的出现以及 Helen 在副热带高压断裂点处的北翘,但对 Helen 北翘后的路径有较为明显的影响。Helen 的 水平结构(包括风廓线的非对称结构、最大风速、最大风速半径等)变化对其异常路径影响有一定影响,其中风场 的非对称结构变化对其异常路径的影响更为明显,当最大风速位于台风环流的东北象限,模拟得到的 Helen 路径 无明显的北翘过程,为持续的西北行;当最大风速位于台风环流的西南象限,Helen 路径为显著的西行北翘异常 路径。

关键词 热带气旋 台风西行北翘 异常路径 **文章编号** 1006-9895(2005)06-0937-10 **中图分类号** P444 **文献标识码** A

The Diagnoses and Numerical Simulation on the Unusual Track of Helen (9505)

ZHANG Sheng-Jun, CHEN Lian-Shou, and Xu Xiang-De

State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract It is difficult to predict the track of typhoon moving westward and turning northward in the South China Sea. In the context of potential vorticity (PV), the track of severe subtropical storm "Helen" (9505, briefly 9505TC) is investigated, which moved in the South China Sea with the track mentioned above. The diagnostic results of PV at 325 K isentropic surface reveal that the southerly in the east of 9505TC transports high PV into the subtropical high, leading to a rupture in the long, zonal subtropical high with the main of the subtropical high moving eastward, which results in the northward turning of 9505TC. After that, the trough with high PV over the Japan Sea at middle and high latitudes and the easterly wave system at low latitudes transfer positive PV advection into the subtropical high, on the one hand, to reduce the intensity of the subtropical high, on the other hand, to induce the southward moving of the subtropical high, and 9505TC finishes the northward turning steered by the southerly. Following the above, it can be considered that the rupture of the subtropical high and the breakpoint in the wind field are key factors to induce the abnormal track of 9505TC, and it is a result of nonlinear interaction between the environment filed and 9505TC.

Using the nonhydrostatic version of meso-scale numerical model MM5, and introducing a bogus typhoon into the initial field, the numerical simulations are performed to investigate the abnormal track of 9505TC. In control ex-

收稿日期 2004-09-29, 2004-12-03 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40175019 和 403050114

作者简介 张胜军,男,1971年出生,博士,助理研究员,研究方向:天气动力学。E-mail:zhangsj@cams.cma.gov.cn

periments, the rupture in the subtropical high and the northward turning of 9505TC across the breakpoint are simulated successfully, and the landing point as well. Further sensitive experiments results display, though with a changed initial field by modifying the strength of the subtropical high and cold vortex, there still exists a rupture in the subtropical high during the integration, which induces the northward turning of 9505TC at the breakpoint. And the intensity change of the subtropical high and the deepening of cold vortex are not key factors responsible for the abnormal track of 9595TC, except for obvious effect on the track of 9505TC after its northward turning by virtue of interaction with 9505TC and other systems around it. In this paper, by modifying the maximum wind speed, maximum radius of wind speed, attenuation coefficient of the maximum wind speed and the abnormal track of 9505TC is detected. It is found that the change of structure has some effect on the environmental flow and the northward turning of 9505TC cross the breakpoint, of which, the asymmetric structure in 9505TC has more remarkable effect on the abnormal track. When there exists an asymmetry of maximum wind speed in northeast quadrant, 9505TC will move northwestward without an obvious northward turning; conversely, 9505TC will move westward and turn northward in the South China Sea with an asymmetry of maximum wind speed in southwest quadrant. **Key words** tropical cyclone, north turning of westward moving typhoon, unusual track

1 引言

台风是一种破坏性极强的猛烈风暴,准确预报 台风的路径是减轻台风带来灾害的关键之一。但台 风的异常路径往往增加了路径预报准确性的难度。 本文所研究的南海台风西行北翘路径即属于此类路 径。

对于南海西行北翘台风,陈联寿和丁一汇[1]、 王志烈和费亮^[2]较早就做过研究;费亮等^[3, 4]和赖 碧波等[5,6]通过诊断分析和数值模拟研究了高空冷 涡对此类台风运动的影响;杨美川和朱永禔[7]用通 量型正压模式对副高与台风的关系进行了研究。随 着陈联寿^[8]提出非对称结构对台风路径的影响,仰 国光^[9]和范淦清^[10]用非对称结构理论对 Gray (9504)、Helen(9505)两个南海台风西行北翘异常 路径进行了应用研究,发现这一理论对于这类异常 路径有一定的预报作用。但值得指出的是,这些研 究主要集中在台风周围系统对其异常路径影响的诊 断分析上,为数不多的模拟研究也是在理想场中进 行的,而对于实际台风个例的模拟研究^[6]较少。本 文则在前人工作的基础上,选取了具有南海台风西 行北翘路径特征的 9505 号强热带风暴(Helen, 以 下简称 9505TC),结合中尺度非静力模式 MM5, 对其异常路径进行了诊断分析和进一步的数值模 拟,并且得到了一些有意义的结果。

2 个例简介及位涡诊断分析

由台风年鉴^[11]可知,9505TC于1995年8月9

日 00 时(国际协调时,下同)在菲律宾东北部达到 热带风暴强度。8 月 9 日 00 时至 10 日 06 时向偏 西方向移动,并于 10 日 06 时开始北翘向西偏北方 向移动,强度逐渐加强。至 11 日 00 时基本完成北 翘过程,以后持续北上,于 12 日 01 时~02 时在深 圳附近登陆,13 日凌晨在广东省北部减弱为热带 低压(图 1)。

由 9505TC 北翘期间 500 hPa 位势高度场形势 演变图(10 日 00 时至 11 日 00 时共 5 个时次,图 略)可知,8 月 10 日 00 时~06 时,副热带高压为狭 长的带状结构,588 脊线位于 27°N 附近呈东北-西 南走向,9505TC 位于副热带高压南侧的偏东气流



图 1 9505TC 实际路径 (●) 与控制试验模拟路径 (+) 比较 (控制试验开始积分时间为 8 月 10 日 00 时,每 6 小时给出台风 位置)

Fig. 1 Observed track (\bullet) of 9505TC and the simulated track (+) in control experiment (the control experiment is begun from 0000 UTC 10 Aug, and the position of 9505TC is shown every 6 h)

里。如果依据外推法只考虑环境场的引导气流来预 报 9505TC 的北翘是很困难的。但事实上由客观分 析场可知,06 时,副高强度已有所减弱,9505TC 开始北翘,向西北方向移动。12 时,副热带高压断 裂,副高主体减弱东撤,高度场上为副高西侧有残 留的闭合小高压,风场则有明显的断裂点(图 2)。 而 9505TC 继续向西北方向移动,并于 11 日 00 时 完成北翘过程,由西北转为偏北方向移动,此时, 副高从狭长的纬向带状结构转为经向的块状闭合高 压系统,副高西侧的偏南气流加强,以后,9505TC 在此偏南气流的引导下一直向偏北方向移动。由此 环境场演变可以推论,副热带高压断裂,副高主体 减弱东撤,而 9505TC 位于断裂点处的薄弱地带, 这几个因素是 9505TC 北翘的关键。本文将进一步 对此环境场的演变进行诊断分析。

1985年,Hoskins^[12]采用位涡动力学,给出 清晰简洁的切断低压、阻塞高压的结构物理图像, 并指出位涡具有反演性和守恒性。Davis等^[13]进 一步提出 Ertel 位涡的反演诊断方法,通过松弛迭 代法求解位涡反演诊断方程,然后利用实际观测 资料,定量诊断天气尺度的演变规律和发展机制, 这为动力学研究和天气分析提供了一种行之有效 的诊断方法。中国学者^[14~18]应用此理论做了大量 的理论研究工作,但此技术较少应用于台风异常 路径的诊断分析^[19]。本节将从位涡的角度探讨环 境场的演变及 9505TC 异常路径的形成。

在等熵坐标系中, Ertel 位涡可以近似定义为

$$P_{\rm E} = \rho^{-1} \boldsymbol{\xi}_{\rm q} \bullet \nabla_{3} \theta = -g \left(\frac{\partial p}{\partial \theta}\right)^{-1} (f + \boldsymbol{\xi}_{\theta}), \quad (1)$$

其中, ξ_q 为旋转流体绝对涡度, ρ 为气体密度, θ 为



位温, ξ_θ 为等熵面上相对涡度的垂直分量。在绝热 无摩擦运动中, Ertel 位涡是一个守恒量。

图 3 给出 9505TC 北翘期间 325 K 等熵面上 (相当于 500 hPa)等熵位涡的时间演变。可以看到 初始时刻,中高纬度有两个相对高位涡中心,分别 位于日本海上空和青藏高原东北部,对应两个高位 涡槽(图 3a)。副热带高压在 325 K 等熵面上表现 为一狭长的低位涡带,9505TC 位于低位涡带的西 南侧。值得注意的是,副高和日本海上空高位涡槽 之间有一小的高位涡中心。

随着 9505TC 的西行, 9505TC 右侧的偏南气 流向副高内部输送高位涡,10日06时,在风场上, 副高断裂, 西侧已有闭合的风场环流, 同时有闭合 的低位涡中心生成(图 3b), 而 9505TC 位于断裂处 并开始向西北方向移动。同时,日本海上空高位涡 槽槽后西北气流向槽底部输送高位涡, 使得此槽一 方面向南伸,另一方面受中纬度西风带影响,槽线 东移,至10日12时与其南部的小高位涡区合并, 槽后的西北气流将高位涡向副高主体内部输送(图 3c),进一步减弱副高的强度。另外,可以看到受低 纬东风波的影响,10日12时在140°E左右有闭合 的高位涡中心生成,东风波槽前的偏东气流向副高 内部输送正的位涡平流,它一方面减弱副高主体的 强度使其向东侧收缩,另一方面使副高向南伸展, 使得副高西侧的偏南气流得到加强。至10日18 时,副高已从狭长的纬向低位涡带演变为经向的闭 合低位涡中心。9505TC 位于副高西侧的偏南气流 里向偏北方向移动(图 3d)。

因此,从325 K等熵面上位涡变化可以清楚看 到这样一个系统演变过程:9505TC 东侧的偏南气 流向副高内部输送高位涡,使狭长的纬向副高低位 涡带断裂,副高主体东撤,9505TC 北翘;之后,中 高纬日本海上空的高位涡槽以及低纬东风波向副高 内部输送正的位涡平流,一方面减弱副高强度,另 一方面使副高南伸,其西侧的偏南气流加强,副高 变成经向块状低位涡中心。9505TC 在这样的偏南 气流的引导下完成北翘。可见,325 K等熵面上位 涡演变更细致地描述了9505TC 和副高相互作用以 及副高的断裂过程,因此,可以认为副热带高压断 裂、风场和气压场出现薄弱地带是9505TC 北翘的 关键,这是环境场与9505TC 非线性相互作用的结 果。



图 3 9505TC 北翘期间 325 K 等熵面上等熵位涡及风矢量时间演变: (a)10 日 00 时; (b)10 日 06 时; (c)10 日 12 时; (d)10 日 18 时; (e) 11 日 00 时。阴影区≥1×10⁻⁶m² • s⁻¹ • K • kg⁻¹, 虚线是青藏高原轮廓线

Fig. 3 Change of isentropic potential vorticity and wind vector with time at 325 K isentropic surface during turning of 9505TC: (a) 0000 UTC 10 Aug 1995; (b) 0600 UTC 10 Aug 1995; (c) 1200 UTC 10 Aug 1995; (b) 1800 UTC 10 Aug 1995; (c) 0000 UTC 11 Aug 1995. Shaded area: $\ge 1 \times 10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$; dashed line: the Qinghai-Xizang Plateau outline

3 数值试验

本文所采用的模式为非静力中尺度模式 MM5V2^[20],基本物理过程选用了非流体静力平衡 方案、MRF(NCEP Medium-Range Forecast Model)高分辨率行星边界层方案、Kuo 积云对流参数 化方案以及客观分析场提供的时变的侧边界条件。 研究区域中心为(20°N, 115°E),格距 60 km,格点 数 82×82,积分时间步长为 150 s。模拟时段为 1995 年 8 月 10 日 00 时~12 日 00 时,这段时间基 本包括了台风的北翘及登陆过程。本文所采用的资 料为美国国家环境预报中心(NCEP)和美国国家大 气科学研究中心(NCAR)合作收集整理的再分析资 料(Reanalysis Data),其水平分辨率为 2.5°×2.5°, 垂直方向上为 17 层,同时模式中还使用了 30′× 30′的地形资料。

3.1 控制试验

由于 9505TC 的北翘过程发生在海上,考虑到 海上资料较少,因此,我们直接将格点资料放在模 式里积分,研究影响 9505TC 运动的因子。积分过 程中,注意到 9505TC 减弱很快,模式积分 24 小时 500 hPa 流场上 9505TC 已没有闭合的涡旋,且走 向一直为偏西; 850 hPa 流场虽有闭合的涡旋结构, 但强度已经很弱,而地面 9505TC 始终为一热带低 压(图略)。因此,可以得出初步结论,只用格点资 料较难模拟出 9505TC 的北翘路径。这可能来自两 方面的原因:一方面是由于初始场资料格距太大, 另一方面是由于没有实况观测资料进行客观场订 正,从而导致不能更详细地反映初始场 9505TC 的 结构特征。因此,我们采用王玉清^[21]设计的一个 人造台风方案,将一人工构造的台风加到实际的初 始场中来研究它的北翘路径及影响因子。

王玉清在 Kurihara 等^[22]的工作基础上,设计 了一个修正的平衡方程方案。其方案是:

在σ面上,

 $\frac{\partial \Phi}{\partial \ln \sigma} = -RT, \qquad (2)$

 $\nabla^2 \Phi + \nabla \cdot (RT \nabla \ln p_*) = G,$ (3) 上述公式中, $\sigma = p/p_*, G$ 为高层风场的强迫函数, p为气压, p_* 为地面气压,R为气体常数,T为温 度, Φ 为位势高度。由方程(2)、(3)消去 ϕ 场,同 时G可由风场分布得到:

 $G(u,v) = 2J_{x,y}(u,v) + f\xi - \beta u$, (4) (4)式右边第一项为 Jacobi 算子, f 为科里奥利参数, ξ 为相对涡度, β 为科里奥利参数的经向梯度, u 为风场的纬向风分量。这样得到一个温度距平场 和风场强迫的椭圆方程, 解此椭圆方程即可得到与 此风场平衡的涡旋温度场。相应的高度场则可以利 用静力方程诊断得到。

地面气压由如下泊松方程求得:

$$\nabla^2 \ln p^* = \frac{G^*}{RT_0^*}, \qquad (5)$$

其中, G*为地面风场的强迫函数, T^{*}为台风区域 地面平均温度。

基于以上理论,我们只需设定最大风速 (V_{max})、最大风速半径(R_{max})、衰减系数(b),即可 完成人造台风的构造,而且人造台风是作为偏差场 叠加到环境场上的,环境场又消去了分析台风,因 此分析台风的初始位置误差也被消除了。这样做虽 然有一定的人为性,但是从人造台风的形成速度、 对于分析台风初始位置误差的消除等方面,都不失 为对海上资料缺乏的一种弥补。

根据台风资料可知, 1995 年 8 月 10 日 00 时, 9505TC 位于(18.5°N, 118.2°E),最大风速为 20 m/s,台风中心海平面最低气压为 990 hPa。我 们根据此信息在模式的初始场嵌入一人造台风,其 中 R_{max}取为 200 km, V_{max}取为 20 m/s, *b* 取为 0.8, 计算得到的台风中心海平面最低气压值为 993.5 hPa, 与实况较为接近。

将这样的人造台风嵌入到模式的初始场中并积分48小时,得到台风路径(图1)。比较实际路径与模拟路径发现,模拟路径的北翘点偏东,即北翘比实况略偏早偏快,但北翘以后的路径趋势与实况较为一致,尤其是登陆点,除登陆偏早4~5h,登陆点误差只有几十公里。

对照模拟路径,进一步分析模拟实况场的演 变。从控制试验可以看出,9505TC 初始时刻受 500 hPa 副高南侧偏东引导气流的影响向偏西方向 移动。模式积分 6 h 后, 500 hPa 高度场和风场上 副高断裂为东西两块,高度场上,副高主体减弱东 撤,其西侧残留一小高压(图略),而风场上则有明 显的断裂出现(图 4a), 9505TC 位于两块高压之间 的断裂处。在此环流形势下,9505TC 移向发生变 化,即由偏西运动转为向西北方向运动。以后, 9505TC 西侧的高压闭合环流逐渐减弱消失, 东侧 的副高主体也减弱东退且向南伸展,其西侧偏南气 流加强,9505TC则维持持续的向西北方向运动。 由该时段客观分析场演变过程可知,10日06时副 高在风场上为一狭长的带状结构(图 4b), 10 日 12 时副高断裂,其主体减弱东撤,9505TC位于断裂 点处有一加速北翘的过程。因此,可以认为模拟预 报基本模拟出 500 hPa 副高的断裂, 但时间上有所





提前。通过模拟得到的路径和环境场的演变与客观 分析场的比较,可以认为人造台风方案相对比较合 理,模拟的台风路径与实况比较接近,登陆点的模 拟也比较成功。因此,本文将这个试验作为控制试 验,进一步做敏感性试验来研究影响 9505TC 异常 运动的因子。另外,由此模拟结果还可以看到, 9505TC 初始时刻向偏西方向移动是受环境场偏东 气流的影响;随着 9505TC 与环境场相互作用,副 高断裂,副高主体减弱东撤,在其西侧出现薄弱地 带,9505TC 则在此薄弱地带开始北翘;此后, 9505TC 受副高主体西南侧偏南气流的影响,其路 径为西北偏北。9505TC 的这种异常路径是 9505TC 与环境场非线性相互作用的结果。我们将 进一步通过敏感性试验验证此分析结果的可靠性。

3.2 敏感性试验初始场的设计

由前面初始场形势的分析(图 2、图 3b)可知, 9505TC 北翘期间其周围可能的影响系统有副热带 高压、高空冷涡等。以下将主要对这些系统进行改 造,研究它们对 9505TC 运动的影响。

为了减弱(加强)这些系统,本文采用卢咸池 等^[23]提供的 Legendre 滤波方法,对影响 9505TC 的系统设计了几组敏感性试验,即副高减弱(加 强)、冷涡加深等,此方法是从底层到高层对各个 要素场同时进行的,以得到尽量协调的初始场。

3.2.1 高空冷涡强度变化对 9505TC 异常路径的 影响

由 500 hPa 形势图可知,冷涡与 9505TC 之间 为狭长的副热带高压,冷涡的强度减弱可能对副高 的影响不大,因此,本文只给出了冷涡加深的敏感



图 5 冷涡强度加深试验模拟路径(●) 与控制试验路径(+)
 对比(时间说明同图 1)

Fig. 5 The simulated tracks in the experiment with deepened cold vortex (\bullet) and in the control experiment (+) (time is the same as in Fig. 1)

性试验。取三角形截断, 纬向取十波截断,初始场 (H_0)被分为高频场(H_h)和低频场(H_d)。冷涡加深 取 $H=80\%H_h+H_0$,其中, $H_0=H_h+H_d$ 代表初 始场的高度值。由敏感性试验与控制试验路径的比 较(图 5)可知, 当高空冷涡加深, 减弱了初始场上 副高的强度。模式积分 6 h, 副高断裂, 其主体减 弱东撤更加明显,因此 9505TC 的北翘点比控制试 验提前。

3.2.2 副热带高压强度变化对 9505TC 异常路径的影响

试验基本思路同上述两个敏感性试验,但副热带高压加强,取 $H=20\%H_h+H_d$;副热带高压减弱,取 $H=50\%H_h+H_o$,分别将加强和减弱的副高放到模式里积分48小时。图6给出了控制试验路径与敏感性试验路径的对比,比较发现,副高加





图 6 副高加强(●)、减弱(○)试验模拟路径与控制试验路径 (+)对比图(时间说明同图 1)

Fig. 6 The simulated tracks in the experiment with strengthened (\bullet) or weakened (\circ) subtropical high and in the control experiment (+) (time is the same as in Fig. 1)

强和减弱都不影响模式积分 6 h 副热带高压薄弱地 带的生成以及 9505TC 的北翘(图略)。加强副高, 副高西伸更加明显(图 7a),比较模式积分 6 h 后得 到的 500 hPa 模拟风场(图 7b)与控制试验得到的 同时刻的模拟风场,注意到虽然也模拟出副高断裂 以及减弱东撤,但副高向南伸的程度不如控制试 验,副高南侧依然维持较强的偏东风,因此, 9505TC 北翘后保持向西北方向运动。而减弱副高 强度,环境场演变类似冷涡加深敏感性试验,副高 减弱东撤更加明显,9505TC 北翘后为持续的向偏 北方向运动。

由以上两组敏感性试验可以看到,初始场形势 的变化并没有改变副热带高压薄弱地带的出现,这 是导致 9505TC 北翘的关键。而副高强度变化、高 空冷涡加深都不是导致 9505TC 北翘的决定性因 子,但它们通过与其他系统及 9505TC 的相互作用 对于 9505TC 北翘后的路径趋势有较明显的影响。 从模拟结果可以发现,高空冷涡、副热带高压、 9505TC 本身之间的相互作用是非线性的,导致路 径更加复杂。

3.3 9505TC的水平结构变化对其异常路径的影响

正如引言所提到的,台风的水平结构也会对台 风的运动发生影响,在某些特定的情况下,台风的 结构是导致台风异常路径的决定性因子。本文设计 了几组关于 9505TC 结构的实验,以检验其结构变 化对路径及环境场演变的影响。

3.3.1 人造台风方案中参数的选择

由于本文的人造台风方案只涉及 R_{max} 、 V_{max} 、b这三个参数,我们据此设计了三组试验。图8给出 了控制试验模拟路径与这三组试验中结构变化模拟 路径的对比。从图 8 中可以看到, 9505TC 的水平 尺度和强度变化并没有改变环境场的演变趋势以及 9505TC运动的趋势,其中衰减系数变小,北翘后 路径趋势更加偏北(图 8a),而最大风速半径变大也 导致北翘后路径趋势偏北目北行更快(图 8b),二 者在某种程度上有共同之处。这里特别强调, 9505TC 强度变化(体现在 V_{max})虽没有改变 9505TC北翘后路径趋势,但随着 9505TC 强度的 加强,路径偏北且有逐渐加速的趋势(图 8c),我们 认为这是 9505TC 内力的作用。台风强度加强,其 内力增大,而台风的内力有使台风向西北方向运动 的趋势。在本敏感性实验中,9505TC沿着副高的 断裂处保持持续的向西北方向移动。

3.3.2 9505TC 非对称结构对路径的影响



125°F



图 7 副高加强试验的 500 hPa 风场: (a)初始时刻; (b)模式积分 6 h

Fig. 7 500 hPa flow field in the experiment with strengthened subtropical high: (a) Initial time; (b) 6 h after integration





图 8 三组试验模拟的 9505TC 水平结构、强度变化的路径与 控制试验路径对比 (时间说明同图 1): (a) 试验 1 (*b*=1.5) 和 试验 2 (*b*=0.6); (b)试验 3 (R_{max} =300 km) 和试验 4 (R_{max} = 150 km); (c)试验 5 (V_{max} =30 m/s) 和试验 6 (V_{max} =18 m/s) Fig. 8 Comparison of the simulated tracks between three groups of experiments with different bogus typhoon parameters and the control expt (time the same as in Fig. 1): (a) Expt 1 (*b* =1.5) and expt 2 (*b*=0.6); (b) expt 3 (R_{max} =300 km) and expt 4 (R_{max} =150 km); (c) expt 5 (V_{max} =30 m/s) and expt 6 (V_{max} =18 m/s)

$$V(r) = V_{\max} [1 + 0.4 \cos(\theta - \theta_1)] \frac{r}{r_{\max}} \cdot \exp\left\{\frac{1}{b} [1 - \left(\frac{r}{r_{\max}}\right)^b]\right\},$$
(6)

$$V(r) = V_{\max} [1 - 0.4 \cos(\theta - \theta_1)] \frac{r}{r_{\max}} \cdot \exp\left\{\frac{1}{b} [1 - \left(\frac{r}{r_{\max}}\right)^b]\right\},$$
(7)

式中, θ₁ 表示非对称的方位角,本文取 θ₁ 等于 30°, 即取最大风速位于东北象限或西南象限 [本文给出 了模式中嵌入最大风速位于东北象限的人造台风的 初始场(图 9)],得到路径图(图 10)。

正如陈联寿^[8]曾指出的,台风的非对称结构对 台风路径有一定影响。在本研究可以注意到,如果 最大风速加在台风环流的东北侧,则 9505TC 迅速



图 9 850 hPa 初始风场(嵌入的人造台风最大风速位于东北象限)(单位: m/s)



图 10 初始场中加入非对称结构人造台风(○非对称位于东北 象限,●非对称位于西南象限)模拟 9505TC 路径与控制试验路 径(+)对比(时间说明同图 1)

Fig. 10 The simulated tracks in the experiment inserted by an asymmetric bogus typhoon (\circ asymmetry in northeast quadrant, •asymmetry in southwest quadrant) and in the control experiment (+) (time is the same as in Fig. 1)

穿越副热带高压的薄弱地带,其路径表现为西北 行,没有明显的北翘过程;当最大风速位于台风环 流的西南侧,9505TC路径表现为显著的西行北翘 路径。本文中9505TC的非对称结构对其异常路径 的影响,其物理机制还有待于进一步的研究。

由以上的综合分析可以得出结论:9505TC的 水平结构变化对其路径有一定的影响,其中非对称 结构的变化对其路径的影响更为明显。

4 结论

通过对 9505TC 南海西行北翘异常路径的诊断 分析和数值模拟,研究了 9505TC 的水平结构的改 变及环境场的变化对于 9505TC 西行北翘异常路径 所起的作用,初步得到以下结论:

(1)狭长的副热带高压断裂,风场和气压场出 现薄弱地带是9505TC北翘的关键,这是环境场与 9505TC非线性相互作用的结果。高空冷涡、副高 的强度变化不是9505TC北翘的决定因子,它们的 强度变化并未影响副高的薄弱地带的出现以及 9505TC在薄弱地带的北翘北上,它们同9505TC 之间非线性相互作用对9505TC北翘后的路径有较 为明显的影响。

(2) 9505TC 的水平结构变化(包括风场非对称结构、强度变化等)对 9505TC 路径也有一定的影响,其中非对称结构对其路径的影响更为明显: 当最大风速位于 9505TC 东北象限时,其路径为 西北行,没有明显的北翘过程;当最大风速位于 环流的西南侧,9505TC 路径表现为显著的西行北 翘路径。

(3)应用王玉清的人造台风方案^[21]模拟得到 的路径以及环境场的演变与实况较为接近,这在一 定程度上弥补了海上观测资料的不足。

参考文献 (References)

[1] 陈联寿,丁一汇.西太平洋台风概论.北京:科学出版社, 1979.491pp

Chen Lianshou, Ding Yihui. An Introduction to Western Pacific Typhoons (in Chinese). Beijing: Science Press, 1979. 491pp

[2] 王志烈,费亮. 台风预报手册. 北京: 气象出版社, 1987. 360pp

Wang Zhilie, Fei Liang. *Typhoon Forecasting Manual* (in Chinese). Beijing; China Meteorological Press, 1987. 360pp

- [3] 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(4): 385~393
 Fei Liang, Li Xiaofan. Numerical simulation and dynamic analysis of influence of upper tropospheric cold vortex on the track of typhoon. *Quarterly Journal of Applied Meteorolo*gy (in Chinese), 1992, 3(4): 385~393
- [4] 费亮,李小凡. 高层冷涡的不同结构对台风运动的影响. 应 用气象学报, 1993, 4(1): 1~7
 Fei Liang, Li Xiaofan. The influence of structure of uppertropospheric cold vortex on typhoon motion. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1993, 4(1): 1~7
- [5] 赖碧波, 亢迪, 陈联寿, 等. 台风与冷涡 bogus 方案及其相互 作用的数值试验. 台风科学、业务试验和天气动力学理论的 研究(第二分册). 北京: 气象出版社, 1996. 153~164 Lai Bibo, Kang Di, Chen Lianshou, et al. Numerical experiments of typhoon and cold vortex bogus and their interaction. *Research of Science*, *Operation Experiment and Synoptic Dynamic Theory of Typhoon* (second fascicule) (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1996. 153~164
- [6] 赖碧波, 陈联寿, 徐祥德. 冷涡对 9009(Tasha)台风相互作用的数值模拟. 台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究(第二分册). 北京: 气象出版社, 1996. 165~167 Lai Bibo, Chen Lianshou, Xu Xiangde. Numerical simulation of interaction of cold vortex and typhoon 9009(Tasha). Research of Science, Operation Experiment and Synoptic Dynamic Theory of Typhoon (second fascicule) (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1996. 165~167
- [7] 杨美川,朱永禔. 热带气旋穿越副热带高压的数值试验. 热带气象学报. 1998, 14(1): 85~90
 Yang Meichuan, Zhu Yongti. Numerical experiment with tropical cyclone moving across subtropical high. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1998, 14(1): 85~90
- [8] 陈联寿. 热带气旋运动研究和业务预报的现状和发展. 台风 会议文集(1985). 北京: 气象出版社, 1987. 6~30
 Chen Lianshou. The overview on research and operational forecasting of tropical cyclone motion. *Corpus of Typhoon Conference* (1985) (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1987. 6~30
- [9] 仰国光.非对称结构理论在 9504 号台风路径预报中的应用. 台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究(第二分册). 北京:气象出版社,1996.81~84
 Yang Guoguang. Application of asymmetric structure theory of typhoon to track forecasting of typhoon 9504. *Research of Science*, *Operation Experiment and Synoptic Dynamic Theory of Typhoon* (second fascicule) (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1996. 81~84
- [10] 范淦清.非对称结构理论在 9505 号台风路径预报中的应用. 台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究(第二分册). 北京:气象出版社,1996.85~87 Fan Ganqing. Application of asymmetric structure theory of

typhoon to track forecasting of typhoon 9505. Research of Science, Operation Experiment and Synoptic Dynamic Theory of Typhoon (second fascicule) (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1996. 85~87

- [11] 中国气象局. 热带气旋年鉴. 北京: 气象出版社, 1995 China Meteorological Administration. *Tropical Cyclone Annual* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1995
- Hoskins B J. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1985, 111: 877~946
- [13] Davis C A, Emenuel K A. Potential vorticity diagnostic stability and instability. Mon. Wea. Rev., 1991, 119: 1929~ 1953
- [14] 侯定臣. 夏季江淮气旋 Eterl 位涡诊断分析. 气象学报, 1991, **49**(2): 141~150

Hou Dingchen. The potential vorticity structure of summer cyclones over the Changjiang-Huaihe valley. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1991, **49**(2): 141~150

[15] 吴国雄,蔡雅萍, 唐晓菁. 湿位涡和倾斜涡度发展. 气象学报, 1995, **53**(4): 387~405
 Wu Guoxiong, Cai Yaping, Tang Xiaojing. Moist potential

vorticity and slantwise vorticity development. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 1995, **53**(4): 387~405

- [16] 吕筱英,孙淑清. 气旋爆发性发展过程的动力特征及能量学研究. 大气科学, 1996, 20(1): 90~100
 Lu Xiaoying, Sun Shuqing. A study on the dynamic features energy conversion of the development of explosive cyclones. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1996, 20(1): 90~100
- [17] 王建中,马淑芬,丁一汇. 位涡在暴雨成因分析中的应用. 应用气象学报,1996,**7**(1):19~27

Wang Jianzhong, Ma Shufen, Ding Yihui. Application of potential vortivity theory to analysis of formative mechanism of torrential rain. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1996, 7(1): 19~27

- [18] 周毅, 寇正, 王云峰. 气旋生成机制的位涡反演诊断. 气象 科学, 1998, 18(2): 121~127
 Zhou Yi, Kou Zheng, Wang Yunfeng. Potential vorticity invertibility of diagnostic of cyclogenesis mechanism. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1998, 18(2): 121~127
- [19] 徐晶,陈联寿,徐祥德. 青藏高原高空流型对西太平洋台风路 径影响的诊断研究. 应用气象学报,1999,10(4):410~420 Xu Jing, Chen Liangshou, Xu Xiangde. Diagnosis on the impact of middle troposphere circulation pattern over the Qinghai-Xizang Plateau on the track of typhoon over west Pacific. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1999, 10(4):410~420
- [20] Grell G A, Dudhia J, Stuaffer D R. A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR Technical Note, NCAR/TN-398 + STR, 1994, 138pp
- [21] Wang Yuqing. On an inverse balances equation in sigma-coordinate for baroclinic vortex initialization. Mon. Wea. Rev., 1995, 123: 482~488
- [22] Kurihara Y M, Bender M A, Ross R J. An initialization scheme of hurricane model by vortex specification. Mon. Wea. Rev., 1993, 121: 2020~2045
- [23] 卢咸池,何斌.初值格谱变换的分析比较.计算物理,1992, 9(4):768~770

Lu Xianchi, He Bin. Two ways to perform initial data grid spectral transform. *Chinese Journal of computational physics* (in Chinese), 1992, **9**(4): 768~770

[24] 李天明,朱永禔. 热带气旋运动的分析和模拟: I. 非轴对称 结构和路径突变. 中国科学(B), 1990, 13(1): 104~112
Li Tianming, Zhu Yongti. Analysis and simulation of tropical cyclone motion: I. Asymmetric structure and abrupt changed track. Science in China (Series B) (in Chinese), 1990, 13 (1): 104~112