

9403 号强热带风暴水汽通量非对称研究

吴迪生¹, 闫敬华², 张红梅¹, 白毅平¹, 庞海龙¹, 张俊峰¹

(1. 国家海洋局南海预报中心, 广东 广州 510300; 2. 广州热带海洋气象研究所, 广东 广州 510080)

摘 要:用实测资料对 9403 号南海强热带风暴(简称 TC, 以下同)登陆前后的物理结构变化作了分析, 对其水汽通量、动力学等特征量进行了计算。研究结果表明: TC 的水汽通量分布不对称, 辐合主要在边界层中, 辐合最大值出现在 TC 登陆前南半圆边界层附近; 风速分布不对称, 气旋性切向风大值区位于 TC 东半圆; 风速垂直切变随 TC 加强而减弱。强流入位于 TC 南半圆 400 hPa 以下, 流入大值区在 850 hPa 附近; 高层反气旋流出在 150~100 hPa 层附近, 流出主要位于 TC 北半圆。TC 垂直运动分布不对称, 上升最大值出现在南半圆。TC 整个生命期均具有暖心结构, 300 hPa 附近增暖最明显。

关键词: TC; 水汽通量; 动力学特征; 非对称

中图分类号: P714² **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6392(2004)05-0025-08

南海热带低压发展成台风, 时间短, 移动路径复杂, 登陆快, 预报活动规律非常困难。目前对南海 TC 的研究已有不少的成果。文献 [1, 2] 用综合法研究了南海台风的结构和南海 TC 大风分布特征以及 TC 大风预报, 并取得了一些成果。文献 [3-5] 对南海 TC 数值预报作了准业务实验研究等。由于资料原因, 对南海 TC 结构研究较少。为进一步了解南海 TC 的结构变化, 本文对 9403 号(1994 年 03 号)南海 TC 在登陆前后结构变化作了重点研究。

1 资料的选用及计算分析

本文选用广东省气象局整理的常规、非常规及船舶探空资料, 航空、卫星、地面雷达天气报告资料, 南海分局海洋站、浮标等资料。研究区域为 $60^{\circ}\text{N} - 20^{\circ}\text{S}$, $40^{\circ}\text{E} - 180^{\circ}\text{E}$, 计算区域为以各时次南海 TC 中心对称的 9×9 格点正方形区域, 水平格距为 1.5 纬距, 铅直分为 10 层(地面, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100 hPa), 研究对象是 9403 号南海 TC 的扰动(风力 6~8 级, 1994 年 6 月 3 日 08:00 时至 6 月 4 日 08:00 时)、发展(风力 9~11 级, 6 月 4 日 20:00 时至 6 日 20:00 时)、登陆前(6 月 7 日 08:00 时至 8 日 08:00 时)和登陆后减弱(6 月 8 日 20:00 时至 9 日 20:00 时)4 个时期各种物理量非对称性。

首先对各个探空站的各要素值用有限元插值进行客观分析, 读取网格点上的 dd, ff, TT 和 TdTa 值, 由此计算区域内 TC 的流场、涡度、散度、垂直运动、水汽、温度场和假相当位温等空间分布及演变过程, 垂直运动是根据运动学方法算出并根据文献 [6] 的方法作了进一步的订正。切向风和径向风根据文献 [7] 的方法算出。

2 水汽通量分布

TC 的水汽通量分布不对称, 辐合主要在边界层中, 辐合最大值出现在 TC 登陆前南半

收稿日期: 20030609; 收修改稿日期: 20030820

基金项目: 国家海洋局海洋科学技术研究经费资助项目

圆海气边界层附近。

由 TC 北半部 (图 1a) 可以看到, 在 TC 的扰动、发展和登陆前阶段, 水汽辐合主要在边界层中, 尤其在 850 hPa 以下有很大的增加, 近海 (地) 面几乎增加 1 倍; 600 hPa 以上均是水汽辐散。在登陆后减弱时期, 仅在边界层中有微弱的水汽辐合; 850 hPa 以上均是水汽辐散。在 TC 南半部 (图 1b) 是以水汽辐合为主。水汽辐合最大值出现在 TC 登陆前时刻的边界层附近, 登陆后水汽辐合迅速减小, 但水汽辐合的垂直厚度却在增加。400 hPa 以下均为水

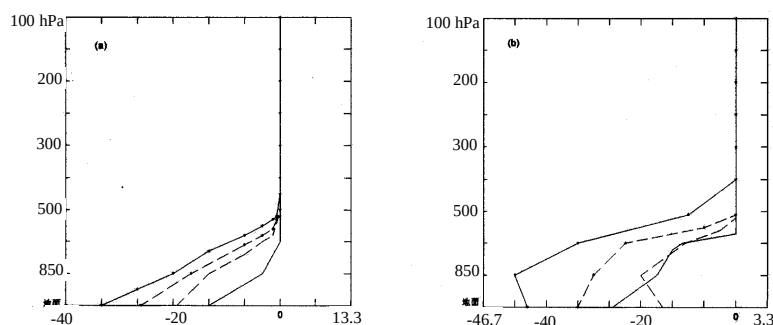


图 1 TC 北半部 (a) 和南半部 (b) 550 km 半径范围内平均水汽通量散度廓线/ $10^{-6} \cdot \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$)

图中曲线分别代表: 扰动阶段--虚线 (6 月 3 日 08:00 时至 6 月 4 日 08:00 时); 发展阶段--虚线带星号 (6 月 6 日 08:00 时); 登陆前实线带星号 (6 月 7 日 08:00 时); 登陆后减弱实线 (6 月 9 日 08:00 时) 的平均分布

Fig.1 Profile of the average water-vapour flux divergence in the range of 500 km's radius in the north (a) and south (b) of TC (unit: $10^{-6} \cdot \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$)

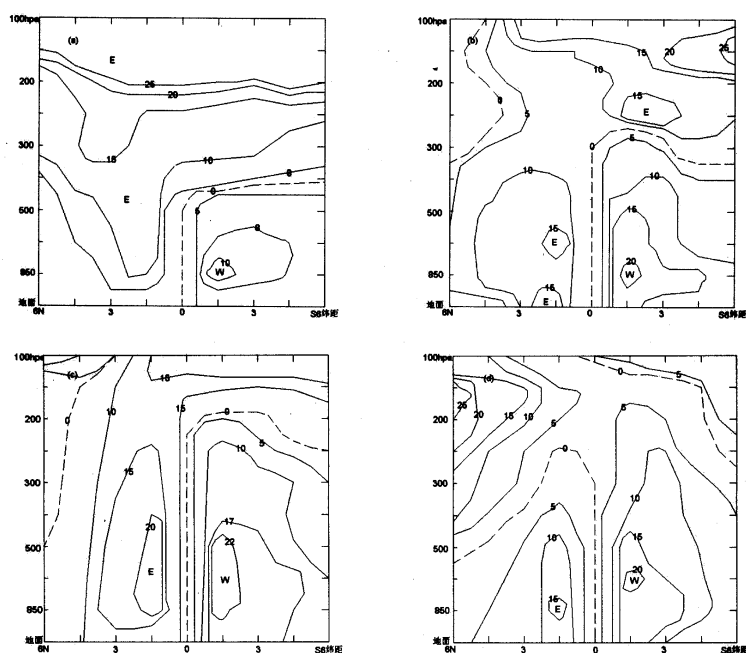
The curve represents the average distribution of different stages: disturbing stage--dash (08:00 am, 3rd, Jun--08:00 am, 4th, Jun), developing stage--dash with asterisk (08:00 am, 6th Jun), pre-landing stage--solid with asterisk (08:00 am, 7th, Jun), decreasing stage after landing--solid (08:00 am, 9th, Jun)

汽辐合层。TC 的主要水汽来源是来自南边界, 其次是东边界。这两个界面的流入层却很深厚, 达 300 hPa 附近。最强的流入是在 700 hPa 以下。TC 的西边界与中南半岛高压为邻, 因而造成西边界整层为流出, 而南边界和东边界的强流入, 主要由 TC 南侧低空中越赤道潮湿偏南及东南气流造成。对整个 TC 区而言, 由于输入的水汽远大于流出的水汽, TC 得到大量的水汽供应逐渐加强。

3 风场的分布

图 2 是通过 TC 中心南北轴线上的切向风。在 TC 环流内, 东风大值区是随 TC 的发展而由中层逐渐向低层下传, 风速逐渐加大, 范围逐渐变窄; 西风则相反, 是由低层逐渐向上伸展, 风速逐渐加大, 所覆盖的范围逐渐变宽变厚。扰动及发展时期, TC 环流主要限于 300 hPa 以下, 风场分布很不对称, TC 登陆前环流向上伸展到 200 hPa 附近, 风场较对称分布, 登陆后, 东风逐渐减弱, 范围更加窄小, 在 TC 环流内西风也减弱, 但范围更宽阔。在 100 hPa 图的北边出现了强劲的西风。TC 登陆前后, 东风气流变化较明显。

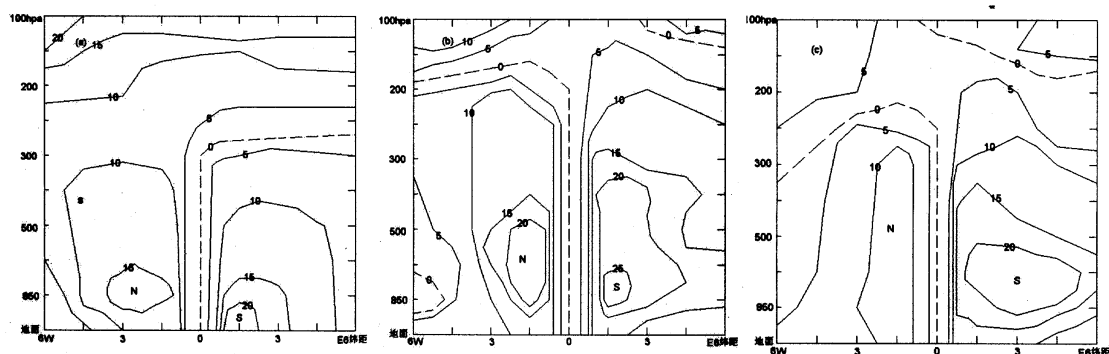
图 3 是通过 TC 中心的的东西方向轴线上的切向风, 在 TC 环流内, 南风是随 TC 的加强而增大, 范围逐渐扩大, 北风范围随 TC 的加强而逐渐缩小。登陆前 (1994 年 6 月 8 日 08:00 时), 南风 and 北风分布近似准对称分布, 登陆后时 (1994 年 6 月 9 日 08:00 时), 北风逐渐减弱, 范围更加缩小, 南风也是减弱但范围更加扩大, 这是一个非常有趣的现象。分析表明:

图2 TC 中心的 u 分量南北剖面图

(a) 1994 年 6 月 3 日 14:00 时; (b) 1994 年 6 月 6 日 08:00 时; (c) 1994 年 6 月 8 日 18:00 时; (d) 1994 年 6 月 9 日 08:00 时; 实线：东风、西风等值线；虚线：东风、西风分界线。单位：m/s

Fig.2 North and south profile of u component in the central of TC

(a) 14:00 pm, Jun. 3, 1994; (b) 08:00 am, Jun. 6, 1994; (c) 18:00 pm, Jun. 8, 1994; (d) 08:00 am, Jun. 9, 1994; Solid: the contour lines of eastern and western winds; Dash: the dividing line of eastern and western winds (unit: m/s)

图3 TC 中心的 v 分量东西剖面图

(a) 1994 年 6 月 6 日 08:00 时; (b) 1994 年 6 月 8 日 08:00 时; (c) 1994 年 6 月 9 日 18:00 时; 实线：南风、北风等值线；虚线：南风、北风分界线。单位：m/s

Fig.3 Eastern and western profiles of v component in the centre of TC

(a) 08:00 am, Jun. 6, 1994; (b) 08:00 am, Jun. 8, 1994; (c) 18:00 am, Jun. 9, 1994; Solid: the contour lines of southern and northern winds; Dash: the dividing lines of southern and northern winds (unit: m/s)

在扰动阶段，北侧和西侧切向风均大于东侧和南侧的切向风，但随着 TC 的发展，这一情况则发生变化，在 TC 发展及登陆阶段，东侧和南侧切向风均大于西侧和北侧的切向风，尤以

南侧的切向风最大。TC 登陆前 (图 3b), 北风仍很强, 南风则更强, 最大值为 26 m/s。所以, TC 整个过程风速分布均不对称, 除扰动阶段外, 强风区均位于 TC 东南部, 南风大于北风, 西风大于东风。TC 登陆后时, 东风速度减弱, 分布面积进一步缩小, 西风也减弱, 但分布的面积有所扩展。

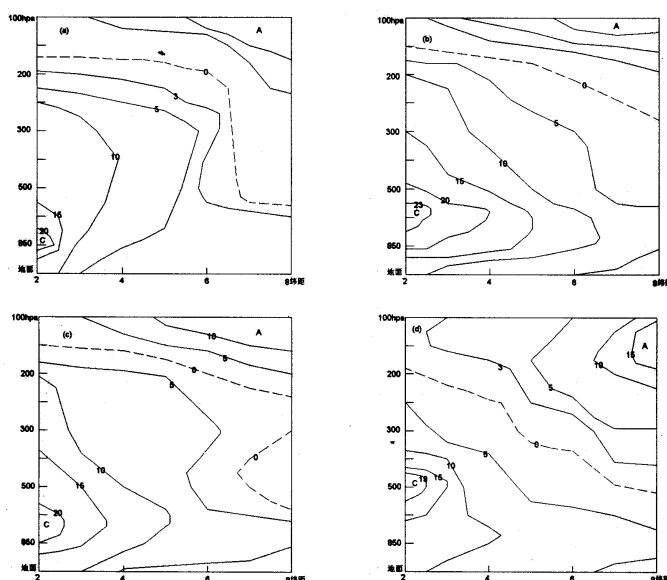


图 4 切向风的径向垂直剖面图

(a), (b), (c) 1994 年 6 月 8 日 08:00 时; (d) 1994 年 6 月 9 日 08:00 时; 其中 (a) 西半圆; (b) 东半圆; (c), (d) 整个台风平均; 实线为气旋和反气旋风速等值线 (m/s); 虚线为气旋与反气旋风向分界线

Fig.4 Radial vertical profile of shear wind

(a), (b), (c) 08:00 am, Jun. 8, 1994; (d) 08:00 am, Jun. 9, 1994; in which (a) west half-round, (b) east half-round; (c), (d) average of the entire typhoon

TC 的切向风和径向风表明 (图 4), 气旋性切向风最大值 (23.4 m/s) 出现在 TC 登陆前的东半圆 700 hPa 层离 TC 中心 220 km 附近。东半圆的切向风明显大于西半圆, 在 700 hPa 层东半圆风速达 20 m/s 的半径约 400 km, 而西半圆切向风达 20 m/s 的仅在 850 hPa 层半径为 220 km 左右。对流层上部的反气旋性切向风东半圆明显大于西半圆, 尤其在台风外区观测到 17.7 m/s 的风速。图 4c 表明, 气旋性切向风最大值 (21.7 m/s) 出现在登陆前离 TC 中心 220 km 的 700 hPa 层附近, 气旋性风的上界在 200~150 hPa 附近, 此高度以上是较强的反气旋性风。图 4d 表明, 对流层上部的反气旋性气流明显减弱, 最大气旋性切向风 (19.1 m/s) 出现在 500 hPa 层离 TC 中心约 220 km, 切向风速明显减弱。

在 TC 北半圆 (图 5b) 流入主要在边界层, 850 hPa 以上主要流出。在 TC 南半部 250 hPa 以下都是较强的流入区, 200 hPa 以上是流出区, 因而在 TC 登陆前时刻, 强流入并不限于边界层, 而在中层也有较强流入。径向风的这种分布导致台风南半部有较强的上升运动, 而在北半部上升运动较弱 (图 6b)。TC 登陆前, 主要的流入在 TC 的南半部 (图 5c), 而在北半部 700 hPa 层以上, 主要是流出, 尤其在 TC 的东北部流出最强, 这种情况一直到 200 hPa 仍很明显。在 150 hPa 层整个 TC 上空转变为流出。但最强的流出仍在 TC 的东北象限, 因而对整个 TC 登陆前而言, 流出层均是在 150 hPa。TC 的这种径向风分布与一般的对称分布

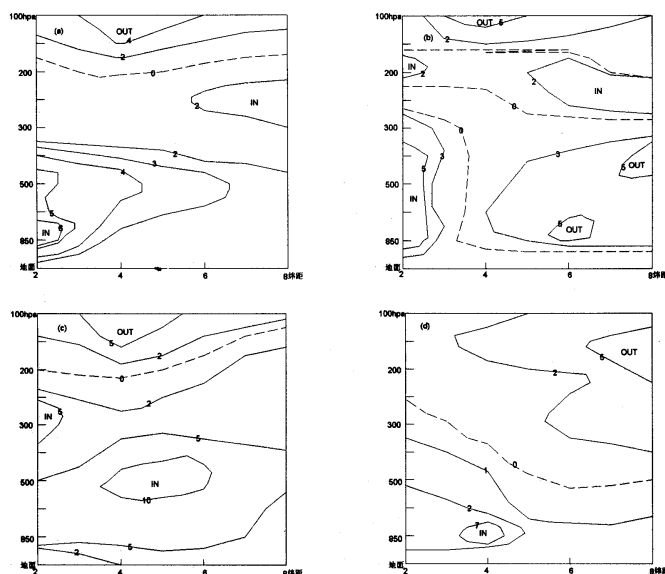


图 5 径向风的径向垂直剖面图 [IN—流入；OUT—流出 (m/s)]

(a), (b), (c) 1994 年 6 月 8 日 08:00 时; (d) 1994 年 6 月 9 日 08:00 时; 其中 (b) 北半圆; (c) 南半圆;

(a), (d) 整个台风平均

Fig.5 Radial vertical profile of radial wind (IN--indraft, OUT--outflow, m/s)

(a), (b), (c) 08:00 am, Jun. 8, 1994; (d) 08:00 am, Jun. 9, 1994; in which (b) north half-round; (c) south half-round

(a), (d) average of entire typhoon

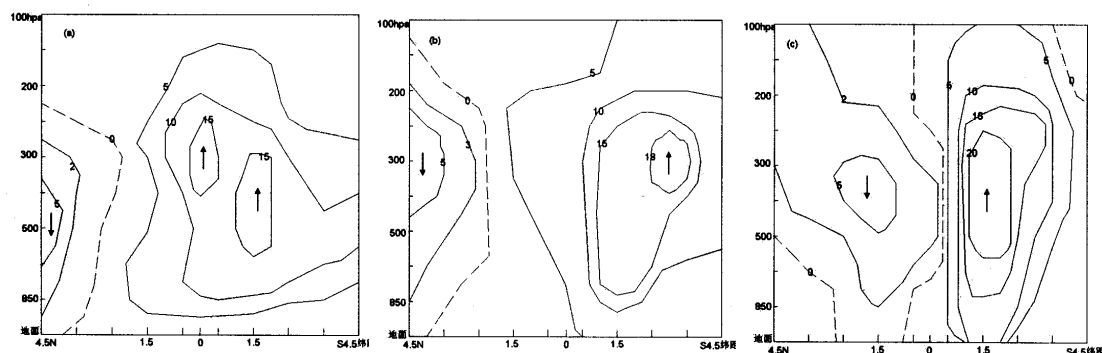


图 6 通过 TC 中心的垂直速度南北剖面图 (↑：表示上升运动；↓：表示下沉运动) / $10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$

(a) 1994 年 6 月 6 日 08:00 时; (b) 1994 年 6 月 8 日 08:00 时; (c) 1994 年 6 月 9 日 08:00 时

Fig.6 North and south profiles of vertical velocity across the center of TC (↑: upward motion; ↓: downward motion) / unit: $10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$

(a) 08:00 am, Jun. 6, 1994; (b) 08:00 am, Jun. 8, 1994; (c) 08:00 am, Jun. 9, 1994

有很大差别。在对称情况下，空气质量从 TC 中低层周围流入 TC 内，在内区上升，然后在上层向外流出。但在本研究个例中，空气主要从 TC 南部的中低层流入，除一部分仍在上层的南部向外流出外，相当大一部分从 TC 北半部流出，因而可能存在着明显的穿越 TC 区的空气质量流动。这种径向分布的形成与 TC 北部，尤其是东北方有一个强热带高压有关。在更大尺度的副热带高压辐散下沉环流作用下，可显著地抑制 TC 环流的发展，结果使 TC 的

切向和经向风都出现高度的不对称性。在卫星云图和地面天气图中可以看到(图略), 主要云区和雨区均位于 TC 南半部。图 5d 表明, TC 登陆后, 低层的流入和高层的流出均是减弱。

4 垂直运动和温度的分布

由于本文计算的水平格较大, 很难分析 TC 环流内的小尺度结构, 但对于描述 TC 内较大尺度 (200 km 以上) 的机构还是可能的。TC 中心的南北向垂直剖面图表明(图 6), 强上升运动主要在 TC 中心以南, 上升中心最大值随 TC 的加强有抬升的趋势, 6 日 08:00 时上升运动最大值在 500 hPa 层附近, 8 日 08:00 时上升运动最大值在 300 hPa 层附近。登陆后 (9 日 08:00 时) TC 内区仍有强而深厚的上升运动, 但最大值有向 TC 中心靠近的趋势, 在 TC 中心以南 160~200 km 处, 最大值在 600~400 hPa 之间, 由 $-16 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $-27 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$, 但上升运动的范围是在缩小。比较图 6 可以发现, TC 中心以北的下沉运动, 随着 TC 的发展和登陆, 量值在增大, 下沿运动的面积也增大, 这与冷空气的侵入有关。

温度场的分析表明了三个特点(图 7), 一是 TC 扰动至登陆后时期在对流层均存在明显的暖心, 最大值在 300 hPa 层附近; 200 hPa 以上是冷区, 因而 9403 号 TC 的早期扰动, 实际上已具有明显的暖心结构。二是 TC 中心附近温度最高, 即最大加热在台风中心附近 (约在离中心 150 km 半径内, 此半径以外是冷区)。三是上层加热比低层更强。随着 TC 的发展和加强, 增温的量值不但增加, 而且最大增温暖核也上移到 300 hPa 附近。增温最大值高度的抬升现象主要与积云对流活动的发展有关, 因为对流加热主要发生在对流层上部, 低层及海平面温度场的径向梯度很小, 这可能是降水的原因。冷中心在 100 hPa 层附近。

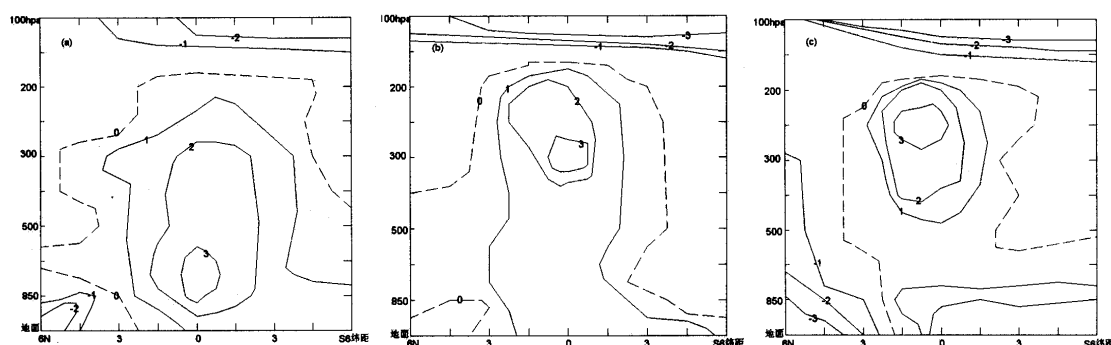


图 7 通过中心的南北向垂直剖面温度距平值 (对空间平均)/ $^{\circ}\text{C}$

(a) 1994 年 6 月 6 日 08:00 时; (b) 1994 年 6 月 8 日 08:00 时; (c) 1994 年 6 月 9 日 08:00 时

Fig.7 North and south vertical profiles of temperature anomaly value across the center of TC (for spatial average)/ $^{\circ}\text{C}$

(a) 08:00 am, Jun. 6, 1994; (b) 08:00 am, Jun. 8, 1994; (c) 08:00 am, Jun. 9, 1994

在 TC 区上空有大量的对流云存在, 一般层结是对流不稳定的 ($\frac{\partial Q_{se}}{\partial P} > 0$)。随着 TC 的发展加强, 层结趋于湿中性化, 即 Q_{se} 随高度不变。通过 9403 号 TC 中心的南北向垂直剖面假相当位温 (Q_{se}) 图表明(图 8), 这种中性化过程在台风爆发性发展阶段最为明显。在扰动期(图略), 600 hPa 以下对流不稳定明显, $\frac{\partial Q_{se}}{\partial P} \approx 6.2 \times 10^{-2} \text{ K/hPa}$, 600 hPa 层 Q_{se} 达最

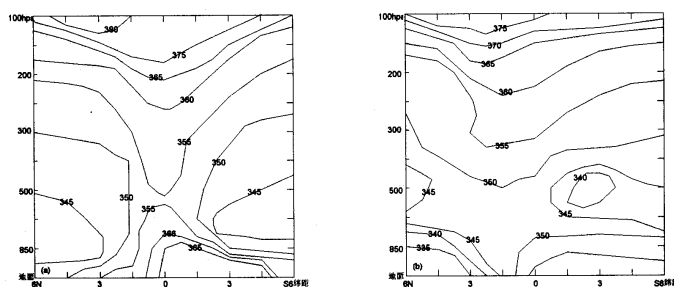


图 8 通过台风中心的南北向垂直剖面假相当位温 (Q_{se}) 图 / K

(a) 1994 年 6 月 8 日 08:00 时; (b) 1994 年 6 月 9 日 08: 时

Fig.8 North and south vertical profiles of Q_{se} across the center of TC / K

(a) 08:00 am, Jun. 6, 1994; (b) 08:00 am, Jun.9, 1994

小值为 342 K。9403 号 TC 登陆前时刻, 不稳定层却相对变浅, 但对流不稳定却明显增强, $\frac{\partial Q_{se}}{\partial P} \approx 1.29 \times 6.2 \times 10^{-2} \text{ K/hPa}$, 600 hPa 层的 Q_{se} 上升至 352 K, 增加了 10 K, 这显然是 TC 中对流云引起水汽和热量输送的结果。实际上这个时期在 250 hPa 以下已接近中性层结。9403 号 TC 登陆后 (图 8b) 的 Q_{se} 等值线在 TC 中心附近比登陆前 (图 8a) 平坦, 这表明湿对流有所减弱。

5 结 论

a) 9403 号 TC 的水汽通量分布不对称, 辐合主要在边界层中, 辐合最大值出现在 TC 登陆前南半圆边界层附近。TC 登陆后, 水汽辐合迅速减弱, 但水汽辐合的垂直厚度却在增加。

b) 9403 号 TC 整个过程风速分布均不对称, 强风区均位于 TC 东南部, 登陆前和登陆后, 南风在剖面图上的分布面积及风速均大于北风。登陆前, 西风在剖面图上的分布面积大于东风, 登陆后则相反。在 TC 环流内, 登陆前和登陆后, 西风风速均大于东风。

c) 气旋性切向风最大值出现在 TC 登陆前的东半圆 700 hPa 附近。对流层上部的反气旋性切向风最大值也是出现在东半圆 100 hPa 层附近。登陆后, 气旋性切向风减弱, 但最大值有抬升至 500 hPa 附近的现象。

d) 9403 号 TC 登陆前, 主要流入在 TC 的南半部, 而在北半部 700 hPa 层以上主要是流出, 尤其在 TC 的东北部流出最强。在 150 hPa 层附近整个 TC 均为流出。TC 登陆后, 低层的流入和高层的流出均是减弱。

e) 9403 号 TC 登前, 强上升运动在 TC 中心以南, 上升中心最大值随 TC 的加强有抬升的趋势。TC 登陆后, 强上升运动仍在 TC 中心以南, 但强上升运动最大值有向 TC 中心靠近的趋势。

f) 9403 号 TC 全过程均有暖心结构, 上层加热比底层强, 增温暖核随 TC 的加强有抬升的趋势, 最大增温暖核出现在 300 hPa 附近。

参考文献：

[1] 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论[M]. 北京: 科学出版社, 1979, 103-198.

- [2] 杨平章, 关芬呈. 南海热带气旋大风分布特征, 南沙海域海气相互作用与天气气候特征研究[M]. 北京: 科学出版社, 1998, 237-241.
- [3] 王康玲, 万齐林. 南海热带气旋数值预报业务系统[A]. 全国热带气旋科学讨论会论文集[C]. 北京: 气象出版社, 2001, 84-89.
- [4] 闫敬华, 李崇银. 温湿结构对南海低压发展影响的数值模型研究[J]. 热带气象学报, 1991, 7: 39-47.
- [5] 闫敬华, 李崇银. 南海中层气旋发生发展的数值研究[J]. 气象学报(英文版), 1994, 4: 344-350.
- [6] 陈创买, 郭英琼. 气象常用参数和物理量查算表[M]. 北京: 气象出版社, 1980, 1-51.
- [7] 周衍柏. 理论力学[M]. 南京: 江苏科学出版, 1961, 9-23.
- [8] 金汉良. 台风高空流出层结构[A]. 1985 年台风会议文集[C]. 北京: 气象出版社, 1987, 47-54.
- [9] Liang Biqu, Wen Zhiping *et al.* The Typhoon Disasters and Related Effects in China. [J], The Journal of Chinese Geogaphy, 1996, 6(1): 61-71.
- [10] Chen Lianshou, Xu Xiangde *et al.* Tropical Cyclone Unusual Motion and the Effect of Asymmetric Thermodynamic Structure in Outer Region of the Storm, chinese [J]. Atmos, Sci., 1997, 21(1): 83-90.

作者简介: 吴迪生(1954—), 男, 学士, 高级工程师。主要从事海气相互作用研究, 1992 年获中国科学技术协会首届青年学术年会自然科学优秀论文奖, 1994 年和 1998 年分别获广东省科学技术协会自然科学优秀论文三等奖; 已正式发表论文 21 篇。

A Study on the Asymmetric Water-vapour Flux of Tropical Cyclone 9403

WU Disheng^{1,2}, YAN Jinghua², BAI Yiping¹, ZHANG Hongmei¹, PANG Hallong¹,
ZHANG Junfeng¹

(1. South China Sea Forecasting Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510300, Guangdong, China; 2. Guangzhou Institute of Tropical & Oceanic Meteorology, Guangzhou 510080, Guangdong, China)

Abstract : Based on the observed data, the article analyzes the change of physical structure of Tropical Cyclone 9403, calculates the water-vapour flux and dynamic feature of TC9403. The results show that the distribution of water-vapour flux of Tropical Cyclone 9403 isn't symmetrical. The convergence primarily appears in the boundary layer, the maximum of convergence occurs before TC9403 lands on the south half-round boundary layer. The distribution of wind is asymmetrical, the maximum of cyclonic shear of wind lies in the east half-round of TC. With TC strengthening the vertical shear becomes weaker. The strong afflux lies in the south half-round of TC below the 400 hPa layer. The maximum zone of afflux occurs in about the 850 hPa layer. The anticyclone in high yield effuses in about the 150 hPa-100 hPa layer, and the outflow mostly appears in the north half-round of TC. The distribution of TC's vertical motion is asymmetrical, and the maximum rise appears in the south half-round. There is a warm-heart structure in the TC's whole life, and TC becomes warmer obviously in the 300 hPa layer.

Key words : tropical cyclone; water-vapor flux; dynamic feature; symmetry