

不同发展阶段台风大气边界层暖区变化特征

刘学刚^{1,2}, 罗哲贤¹, 滕代高¹, 代刊¹

(¹ 南京信息工程大学 江苏省气象灾害重点实验室, 江苏 南京 210044 ² 青岛市气象局, 山东 青岛 266003)

摘要: 采用 NCEP/NCAR 全球对流层 $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析格点资料, 选取 6 个登陆台风个例, 分析了不同发展阶段台风大气边界层暖区变化的特征及其与强度变化的关系。结果表明: 在台风的不同发展阶段, 其大气边界层相对涡度场和温度场的结构有着明显的不同特征, 暖中心与正涡中心的距离与台风强度为反相关关系, 暖中心与正涡中心的距离越小, 台风强度越强。

关键词: 台风; 台风结构; 强度变化

中图分类号: P447 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2022(2007) 03-0320-08

Warm Sector Structure Change of Typhoons in Atmospheric Boundary Layer during Its Whole Life Period

LU Xue-gang^{1,2}, LUO Zhe-xian¹, TENG Dai-gao¹, DAI Kan¹

(¹ Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Disaster, NUIST, Nanjing 210044 China

² Weather Bureau of Qingdao, Qingdao 266003 China)

Abstract The NCEP/NCAR globally tropospheric $1^\circ \times 1^\circ$ reanalysis data have been employed to select six landfall typhoon cases in order to diagnose variations of typhoon warm sectors in atmospheric boundary layer during their whole life periods. Results show that typhoons had different characters of boundary layer temperature and vorticity fields at different life stages, and the intensity of typhoons was inversely proportional to the distance between warm center and maximum positive vorticity center; that is to say, the smaller the distance, the stronger the typhoon.

Key words typhoon; typhoon structure; intensity change

0 引言

台风结构变化是当前台风界关注的一个前沿问题, 余晖等^[1]做过综述。陈联寿等^[2]指出: 冷空气入侵低纬度地区与热带气旋相遇, 会造成眼壁、强对流及暖心结构的破坏, 眼壁附近的最大风速环流突然消失。罗哲贤^[3]认为, 线性平流, β 效应和非线性平流三者的共同作用会产生台风的非对称结构以及台风边缘区域涡度场的破碎分布。田洪军等^[4]数值模拟认为, 中尺度涡旋和台风涡旋相互作用可使台风结构发生变化。田永祥等^[5]认为可利用台风的非对称结构理论来预报台风路径, 罗哲贤^[6]则指出, 台风的非对称结构对台风的异常路径也有影响。在弱引导环境中会使其路径产生摆动甚至打转^[7]。岛屿诱生涡旋^[8]、海洋加热场^[9]、涡列涡量内传^[10]

也会影响台风的结构变化。

在台风结构的研究工作中, 台风的暖心结构问题占有重要的地位。陈联寿等^[2]指出: 台风是在比较均匀的热带海洋气团中发展起来的, 所以气压、温度、风的分布常常都有对称性; 可以近似地把台风看成圆对称的涡旋, 对于成熟的台风尤其如此。同时, 台风是暖心的涡旋, 中心温度很高, 尤其在对流层上部 (300~200 hPa), 它的温度比周围热带大气可高出 10~15 $^\circ\text{C}$ 。暖心的温度结构是台风最明显的特征之一。Hawkins 等^[11-12]对台风 Hilda 和台风 Inez 的温度场结构做过分析, 也认为台风呈暖心结构。和田等^[13]认为, 台风最强阶段, 温度分布几乎是轴对称的, 垂直上升运动几乎到达 100 hPa 附近。台风减弱为低压后, 温度场不再是均匀上突地对称分布, 从低层到高层暖心结构破坏无遗。赖振成等^[14]

收稿日期: 2006-07-29 改回日期: 2006-12-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40333028); 上海台风研究基金 (20060601)

作者简介: 刘学刚 (1970-), 男, 安徽滁州人, 硕士, 主要研究方向: 台风, liuxu1969@126.com.

分析表明, 虽然在温度结构上具有暖心特点, 但暖中心轴却是向西南方向倾斜的, 台风不会持续不断地加深。台风减弱后, 500 hPa 以下层次的暖心结构消失, 但高层仍存在明显的暖心结构。Kurhara 等^[15]认为, 暖区出现在近 335 hPa 在低压发展阶段, 继续增暖且暖心向下延伸。而 Velden 等^[16]表明, 暖心通常在 250 hPa 最强, 暖心向低层发展的过程与台风地面强度减弱的过程相一致。Anthes^[17]认为, 台风主要是由水汽凝结和湿对流中的潜热释放来维持系统的暖心结构和斜压性, 并产生有效位能, 通过转换而获得动能的。后来, 王继志等^[18]进一步分析了台风暖心结构随时间的变化及其与台风暴雨形成的联系。他们指出, 2001 年 16 号台风 (百合) 在登陆台湾省以前为暖心结构; 在台湾岛登陆后, 百合台风的暖心结构消失, 呈现了湿心结构, 并带来大暴雨。钟敏等^[19]对由暖心结构引起的台风降水云系雨强的三维结构进行了分析, 类似的研究也一直在做^[20-23]。

上述研究表明: 作为一个气候特征, 暖心结构是台风的一个主要特征; 在一个台风的整个生命史中, 它的暖心结构可以是变化的。成熟时, 暖心结构最明显, 登陆衰减后暖心结构消失, 而且暖心结构的变化与台风的强度变化和风雨变化之间可能有联系。

但是, 台风整个生命史过程中暖心结构的具体形成过程、暖心结构与台风强度变化关系的具体演变过程如何, 目前尚不清楚。前述研究大都采用常规的探空资料, 网格分辨率较低, 主要是定性分析。本文采用高分辨率的 NCEP/NCAR 全球对流层 $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析格点资料, 选择 6 个登陆台风, 定量分析这些台风整个生命史过程中大气边界层暖区变化特征及其与强度变化的关系, 结果可供实际业务工作参考。

1 资料和方法

本文使用 2002—2004 年 6—9 月的 NCEP/NCAR 全球对流层再分析格点资料, 其水平分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$, 垂直 26 层, 时间分辨率 6 h, 即逐日 00 时、06 时、12 时和 18 时 (世界时, 下同)。在西太平洋区域, 选取在东亚沿岸不同地点登陆的 6 个台风个例展开研究, 它们分别是: 0310 号台风艾涛 (2003 年 8 月 3 日 00 时—9 日 12 时, 登陆日本), 0307 号台风依布都 (2003 年 7 月 17 日 06 时—24 日 18 时, 登陆广东), 0205 号台风亚马逊 (2002 年 6 月 26 日 06 时—7 月 6 日 12 时, 登陆朝鲜半岛), 0414 台风云娜

(2004 年 8 月 6 日 12 时—13 日 12 时, 登陆浙江), 0418 台风艾利 (2004 年 8 月 20 日 00 时—26 日 18 时, 登陆福建) 及 0312 台风科罗旺 (2003 年 8 月 15 日 06 时—26 日 12 时, 登陆海南)。

用再分析格点上垂直方向各层 (26 层) 的水平风场 (u 场和 v 场) 资料, 求出相应层上的相对涡度 (ξ) 场 (因为 NCEP/NCAR 再分析资料中, 相对涡度 (ξ) 无法直接获取, 只能用水平风场间接求得), 再根据某一层次 (1 000 hPa, 500 hPa, 300 hPa) 上的相对涡度 ξ 的资料, 绘出该层上的相对涡度场, 确定该涡度场上台风涡旋范围内 $\xi_{\max}$ 的位置: 如果该涡度场上台风涡旋区内相对涡度最大值在格点上, 则此最大格点值即为 $\xi_{\max}$; 如果相对涡度最大值不在格点上, 而是有一大值区, 则对大值区若干格点用差值法求取 $\xi_{\max}$ 。本文中这个 $\xi_{\max}$ 的位置就是台风涡旋中心的位置。再用温度 T 的资料, 类似地可以确定 $T_{\min}$ 的位置, 这个 $T_{\min}$ 的位置即为暖中心的位置。本文中台风涡旋中心与暖中心对应于同一层, 若正涡中心与暖中心位置基本重合, 则台风为暖心结构。

2 6 个登陆台风概况及对我国影响

台风艾涛^[24]在我国东海中转向, 登陆日本南部的四国岛, 对我国未造成影响。台风依布都^[24]西北行路径, 2003 年 7 月 24 日 02 时登陆广东阳江—电白, 登陆时中心最大风力达 12 级, 中心气压 965 hPa, 造成广西合浦降水 387 mm (3 d), 广东上川岛最大风速 29 m/s 阵风 47 m/s。台风亚马逊^[25]西转向路径, 登陆韩国西南部, 造成我国定海降水量 147 mm (2 d), 浙江大陈岛出现 37 m/s 的最大风速, 阵风 46 m/s 均为本年热带气旋影响的极值。台风云娜^[26]于 2004 年 8 月 12 日 12 时在浙江温岭登陆, 登陆时中心气压 950 hPa, 中心最大风力达 12 级, 造成河南商城降水 371 mm (3 d), 浙江大陈岛最大风速 42 m/s 阵风 53 m/s 风力强, 雨量大, 潮位高, 对我国影响极为严重。台风艾利^[26]掠过台湾北部沿海后, 于 2004 年 8 月 25 日 15 时登陆福建石狮沿海, 登陆时中心气压 975 hPa, 中心最大风力达 12 级, 造成福建拓荣降水 535 mm (3 d), 厦门最大风速 21 m/s 阵风 33 m/s。台风科罗旺^[24]于 2003 年 8 月 25 日起先后登陆海南文昌、广东徐闻及越南, 登陆我国时中心最大风速均为 35 m/s 中心最低气压 965 hPa 海南、两广大部普降大到暴雨, 广西涠洲岛出现最大风速 42 m/s 阵风 53 m/s。

图 1 给出了据 NCEP/NCAR 再分析资料和热

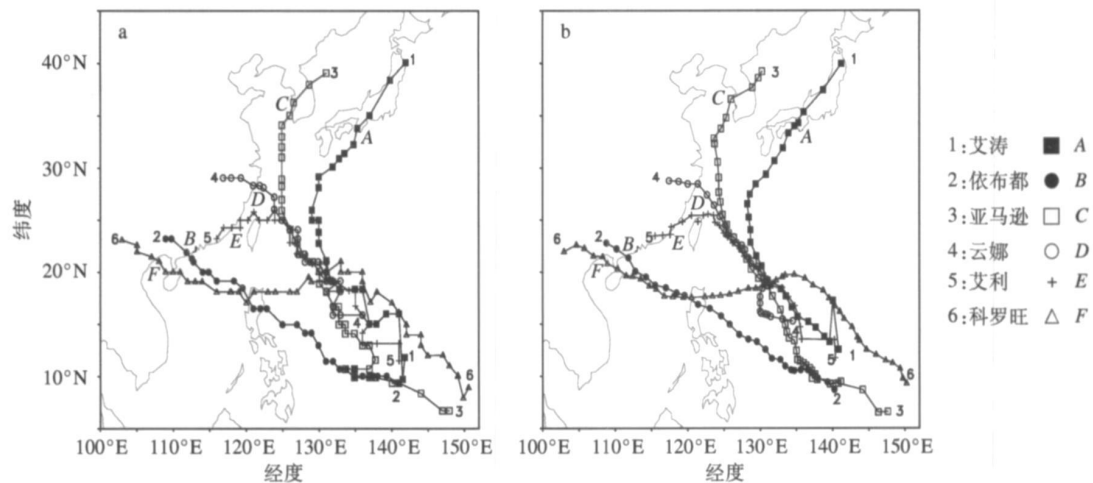


图 1 6 个登陆台风路径 (■、●、□、○、+、△ 为 6 h 间隔符; A、B、C、D、E、F 为登陆点)
a NCEP/NCAR 再分析格点资料; b 热带气旋年鉴资料

Fig 1 Tracks at 6 h time interval of 6 landfall typhoons (■, ●, □, ○, +, △ and A, B, C, D, E, F denote tracks and landing sites of Etau (2003), Imbudo (2003), Ramason (2002), Rananin (2004), Aere (2004) and Kovanh (2003), respectively)
a NCEP/NCAR reanalysis grid data; b Annual catalog of tropical cyclone data

带气旋年鉴资料 (作为观测资料对本文所用资料加以验证) 绘出的 6 个登陆台风路径。比较图 1a 和 1b 可以看出, 两幅图基本相似, 相应的登陆点尤其接近, 由此说明本文所用 NCEP/NCAR 再分析 $1^\circ \times$

1° 格点资料可用性较高。
图 2 为 6 个登陆台风的强度变化曲线 (以 1 000 hPa 台风中心附近水平最大切向风速表示强度, 此台风中心指 1 000 hPa 水平气旋性风场中心, 中心

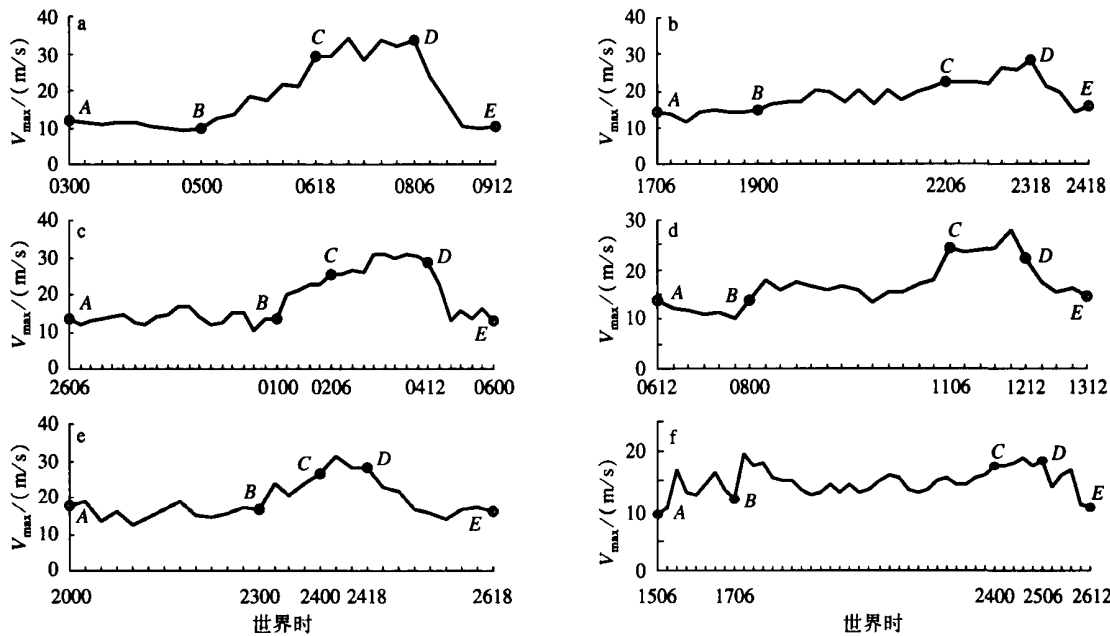


图 2 6 个登陆台风在不同发展阶段的强度变化特征
(AB: 形成初期, BC: 发展期, CD: 成熟期, DE: 登陆后迅速衰减期)
a 艾涛; b 依布都; c 亚马逊; d 云娜; e 艾利; f 科罗旺

Fig. 2 Evolution of the intensity of 6 landfall typhoons during their whole life periods
(AB: nascent stage; BC: development stage; CD: mature stage; DE: rapidly decaying stage after landfall)
a Etau; b Imbudo; c Ramason; d Rananin; e Aere; f Kovanh

附近最大切向风速 $V_{\max}$ 用差值方法求取)。由图 2 可以看出, 6 个台风的强度变化都经历了 4 个阶段: 形成初期(维持时间较长), 发展期, 成熟期(强度最强)和登陆后的迅速衰减期。

3 登陆台风艾涛不同阶段的三维结构

下面分析登陆台风艾涛在不同发展阶段的三维

结构特征。

第 1 阶段(图 2a 上 AB, 从 2003 年 8 月 3 日 00 时—5 日 00 时), 台风处于形成期, 强度较弱。在 1 000、500 和 300 hPa 上台风暖中心 (W) 和正涡中心 (H) 逐渐形成, 但两者相距较远(图 3a-c)。再给出该台风的相对涡度和温度距平的纬向—垂直剖面(图 4a), 具体方法如下: 先求出所研究区域垂直方

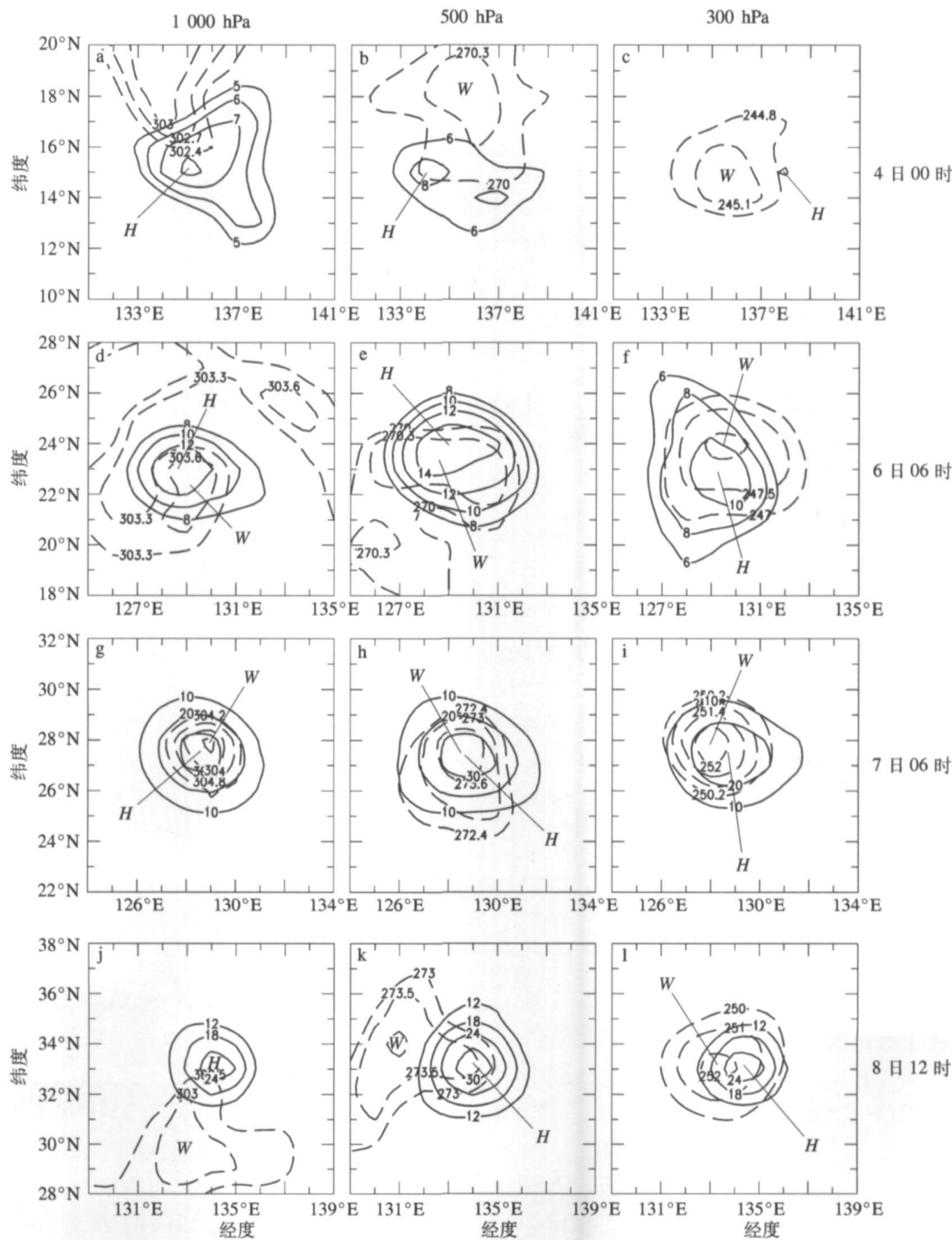


图 3 台风艾涛的涡度和温度分布 (实线: 涡度场, 单位: 10^{-5} s^{-1} ; 虚线: 温度场, 单位: K)

Fig 3 1 000、500 and 300 hPa vorticity(solid line, units 10^{-5} s^{-1}) and temperature(dash line, units K) distributions for typhoon Etau

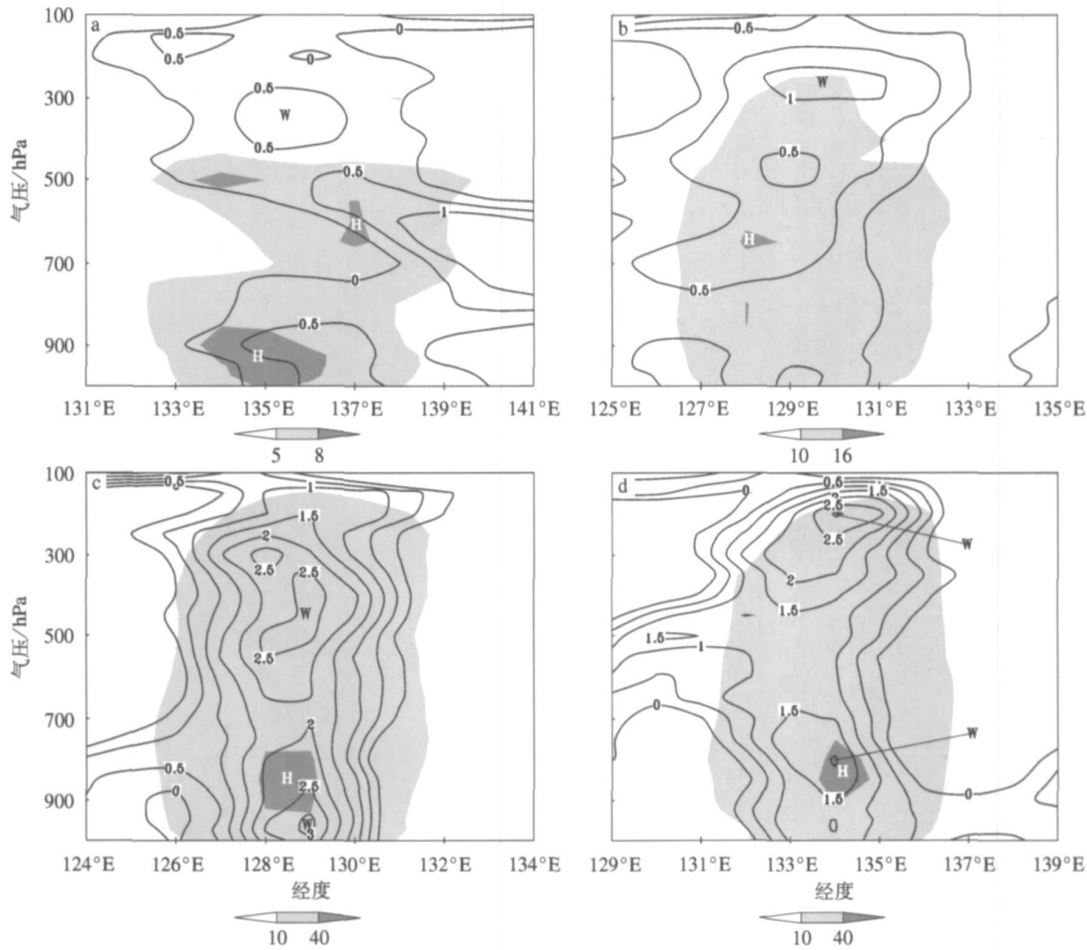


图 4 台风艾涛的相对涡度和温度距平的纬向—垂直剖面

(阴影为正涡度,单位: $10^{-5} s^{-1}$; 等值线为温度距平,单位: K)

a 4 日 00 时, $17^{\circ}N$; b 6 日 06 时, $23^{\circ}N$; c 7 日 06 时, $28^{\circ}N$; d 8 日 12 时, $33^{\circ}N$

Fig. 4 Longitude-height cross sections of vorticity (positive vorticity areas are shaded, units $10^{-5} s^{-1}$) and temperature (solid line, units K) anomalies for typhoon Etau

a 0000 UTC 4 $17^{\circ}N$; b 0600 UTC 6 $23^{\circ}N$; c 0600 UTC 7, $28^{\circ}N$; d 1200 UTC 8 $33^{\circ}N$

向每层的温度平均值,再由每层上各点的温度值减去同一层上的温度平均值,即得温度距平值,相对涡度求法见第 1 节。由图 4a 可见,对流层中层和低层各有涡度高值中心,台风未发展到对流层上层;300 hPa 附近正温度距平中心位于正涡度区正上方。

第 2 阶段(图 2a 上 BC,从 2003 年 8 月 5 日 00 时—6 日 18 时),台风迅速加强,且变化幅度大。此时台风在垂直方向上暖中心和正涡中心明显加强,两中心逐渐相互靠拢,但并未完全重合(图 3d-f)。在图 4b 中,涡度高值中心向上发展到对流层高层;300 hPa 附近正温度距平向中低层伸展,台风的正压结构初步形成。

第 3 阶段(图 2a 上 CD,2003 年 8 月 6 日 18 时—8 日 06 时),台风达到最强,且基本维持。此时台风在垂直方向上暖中心和正涡中心都达到最强,温度和涡度等值线基本重合,尤其是在 1 000 hPa (图 3g-i)。图 4c 中,正温度距平垂直贯穿整个对流层,台风的正压结构较明显。

第 4 阶段(图 2a 上 DE,2003 年 8 月 8 日 06 时—9 日 12 时),台风迅速减弱。台风暖中心和正涡中心逐渐减弱,水平距离再次增大,且对流层低层分离速度快于中上层(图 3j-l)。在图 4d 中,高层正温度距平中心回缩,低层台风西部温度距平等值线向西倾斜,表现出一定的斜压性,而东部维持正压,形成热力非对称结构。

4 其他 5 个登陆台风暖心结构随时间的变化

由图 5 可以看出, 台风形成阶段, 暖中心和正涡中心逐渐形成, 但水平相距较远, 台风强度较弱 (图

5a, e, i, m 和 q)。台风发展阶段, 暖中心和正涡中心逐渐相互靠拢, 台风明显加强 (图 5b, f, j, n 和 r)。台风成熟阶段, 暖中心和正涡中心基本重合, 台风达到最强, 且基本维持 (图 5c, g, k, o 和 s)。台风登陆后, 暖中心和正涡中心水平距离再次增大, 台风逐渐

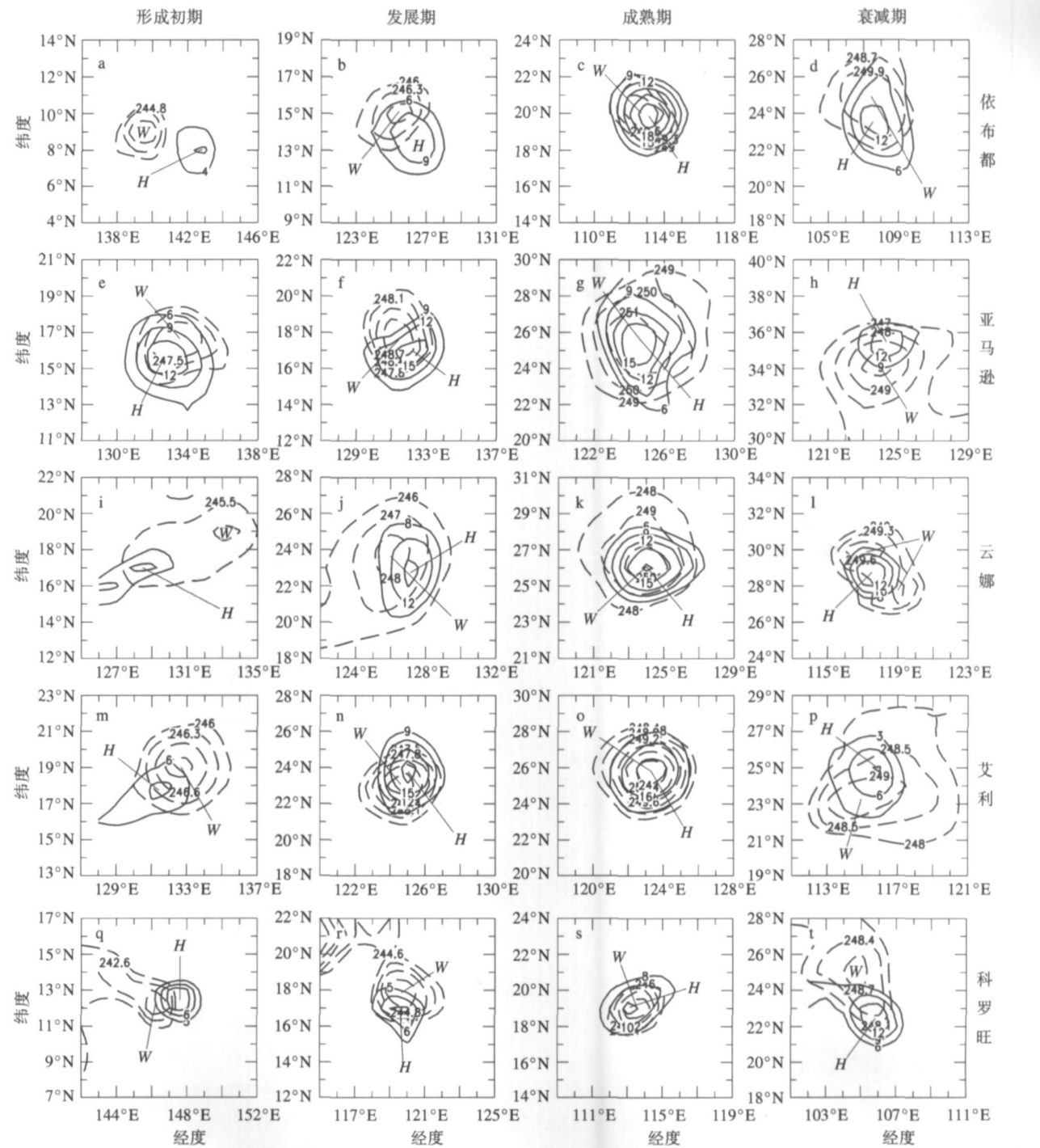


图 5 依布都、亚马逊、云娜、艾利和科罗旺台风在不同阶段的 300 hPa 涡度和温度分布
(实线为涡度, 单位: 10^{-5} s^{-1} ; 虚线为温度, 单位: K)

Fig 5 300 hPa vorticity (solid line, units 10^{-5} s^{-1}) and temperature (dashed line, units K) distributions for Imbudo, Ran asoon, Ranan in, Aere and Korvanh typhoons at various life stages

减弱(图 5d h l p和 t)。本文研究的暖中心指近台风中心的暖区中心。

5 暖中心和正涡中心距离与台风强度的联系

由图 6可见,台风暖中心与正涡中心的距离随着台风不断发展、加强,呈现逐渐减小的趋势。当台风发展成熟时,两中心的距离减小到最小,随着台风登陆减弱,两中心的距离逐渐增大。由图 6a可见,距离 d 在 B 点(5日 00时)前就小于 100 km 了,而此时尚未成熟,在 6日 00时以后,距离稳定小于 100 km,随后强度达到成熟。此外,由图 6d可见,台风云娜在 B 点时 d 约为 100 km,甚至更小,但不

稳定,此时尚未达到成熟,到 C 点时经历了连续多个时次的 d 小于 100 km,此时强度达到成熟。总的看来,台风暖中心和正涡中心距离与其强度变化呈反相关,即两中心的距离越小,台风强度越强;反之亦然。

表 1给出了 1 000 hPa6个台风各个阶段暖中心与正涡中心的平均距离,表 2给出 3层 4阶段所有个例的平均距离,由此可看出:第 1阶段两中心距离 d 都大于 200 km,这时台风为一般强度;第 2阶段 d 在 100~ 200 km 之间,台风加强;当 d 稳定小于 100 km 时,台风成熟。

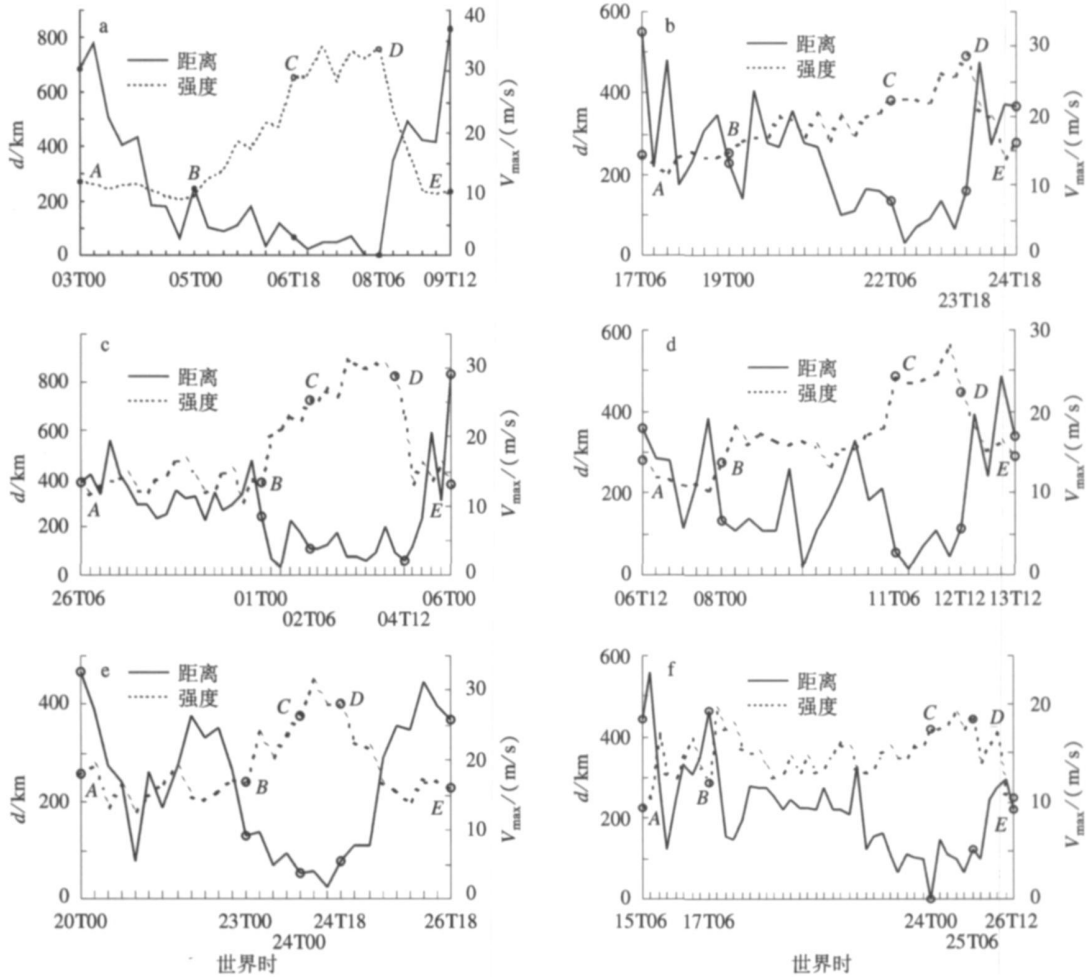


图 6 6个台风 1 000 hPa 暖中心与正涡中心距离及强度随时间的变化
(AB: 形成初期,BC: 发展期,CD: 成熟期,DE: 登陆后迅速衰减期)
a 艾涛; b 依布都; c 亚马逊; d 云娜; e 艾利; f 科罗旺
Fig 6 Temporal variation of the distance between warm-center to positive vortex-center at 1 000 hPa and typhoon intensity for 6 typhoons
(AB: nascent stage,BC: development stage,CD: mature stage,DE: rapidly decaying stage after landfall)
a E tai; b Inbudo; c Ram asoon; d R ananin; e A ere; f K rovanh

表 1 不同阶段 1 000 hPa 台风
暖中心与正涡中心的平均距离

Table 1 Averaged distance from warm-center to positive vortex-center at 1 000 hPa at various life stages of typhoons

	km			
	d _{AB}	d _{BC}	d _{CD}	d _{DE}
艾涛	386.36	117.89	36.34	418.35
依布都	316.91	192.86	97.81	330.78
亚马逊	334.82	142.91	110.97	317.85
云娜	254.25	155.53	68.04	314.84
艾利	279.57	98.24	53.17	278.46
科罗旺	346.14	204.53	91.23	227.41
平均	319.67	151.99	76.26	314.61

表 2 台风在 3 层 4 阶段的平均距离

Table 2 Average distances at 1 000, 500, 300 hPa at various life stages of typhoons

	km			
	d _{AB}	d _{BC}	d _{CD}	d _{DE}
1 000 hPa	319.67	151.99	76.26	314.61
500 hPa	206.98	157.46	86.39	179.81
300 hPa	201.01	141.39	81.09	100.65

6 结论和讨论

登陆台风的 不同发展阶段, 其大气边界层相对涡度场和温度场的结构有着明显不同的特征。在台风发展阶段, 暖中心与正涡中心之间的距离逐渐减小, 台风强度增强; 当两中心完全重合时, 台风强度最强, 垂直向上发展旺盛; 而台风登陆减弱阶段, 暖中心与正涡中心由重合趋于分离, 距离增大, 台风强度减弱, 出现台风内区西冷东暖的“半冷半暖”热力非对称斜压结构。暖中心与正涡中心的距离与台风强度呈反相关, 两中心的距离越小, 台风强度越强。当暖中心和正涡中心的距离大于 200 km, 台风为一般强度; 当距离在 100~ 200 km 之间, 台风加强; 当距离稳定小于 100 km 时, 台风成熟。本文的结果可供气象台站业务预报参考, 但工作仅是初步的, 有待深入研究。

参考文献:

[1] 余晖, 王玉清. 热带气旋结构和强度变化的进展 [C] / 香山科学会议第 275 次学术讨论会. 北京, 2006

[2] 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论 [M]. 北京: 科学出版社, 1979 2-3, 137-140 40-41; 491

[3] 罗哲贤. 边缘区域扰动演变对台风结构的影响 [J]. 大气科学,

1994, 18(5): 1-8

[4] 田洪军, 罗哲贤. 中尺度涡旋和台风涡旋相互作用的数值研究 [J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(2): 159-165

[5] 田永祥, 炎利军, 赵远东, 等. 应用非对程结构理论制作台风路径预报 [J]. 南京气象学院学报, 2000, 23(4): 469-474.

[6] 罗哲贤. 热带气旋逆时针打转异常路径的可能成因 [J]. 中国科学: B 辑, 1991, 7: 769-775.

[7] Chen Lianshou Luo Zhexian. Effect of the interaction of different-scale vortices on the structure and motion of typhoons [J]. Adv Atmos Sci 1995 12(2): 207-214

[8] Meng Zhiyong Nagata Masashi Chen Lianshou A numerical study on the formation and development of island-induced cyclone and its impact on typhoon structure change and motion [J]. Acta Meteor Sinica 1996 10(4): 430-443

[9] 徐祥德, 朱复成. 海洋加热场与科氏参数对台风影响的数值试验 [J]. 大气科学, 1989 13(1): 52-58

[10] 黄世成, 马镜娴, 罗哲贤. 涡列涡量内传的数值研究 [J]. 南京气象学院学报, 2003 26(5): 588-594

[11] Hawkins H F, Rubsam D T. Hurricane Hilda 1964 II-Structure and budgets of the hurricane on Oct 1, 1964 [J]. Mon Wea Rev, 1968, 96(9): 617-636.

[12] Hawkins H F, Imbenbo S M. The structure of a small intense hurricane-Inez 1966 [J]. Mon Wea Rev, 1976 104(4): 418-442.

[13] 和田, 美铃. 台风及其预报 [M]. 陈联寿, 译. 北京: 科学出版社, 1975: 116

[14] 赖振成, 朱翠英. 台风业务实验研究文集 [C]. 北京: 气象出版社, 1986 18-23.

[15] Kurihara Y, Tuleya R E. 热带风暴发生的数值模拟 [C] / 台风译文集 (三). 北京: 海洋出版社, 1988 165-188

[16] Velden C S, Smith W L. 使用诺阿卫星的微波探测资料监视热带气旋 [C] / 台风译文集 (三). 北京: 海洋出版社, 1988 311-318

[17] Anthes R A. 成熟飓风的动力学和能量学 [M]. 王志烈, 丁一汇, 译. 北京: 科学出版社, 1980 2-9

[18] 王继志, 张光智, 杨元琴. 2001 年百合 (16 号) 特异台风结构与特大暴雨机理的研究 [C] / 第 12 届全国热带气旋科学讨论会论文摘要文集. 宁波, 2002 112-115

[19] 钟敏, 吕达仁, 杜秉玉. 9914 号台风降水云系雨强的三维结构初探 [J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(1): 41-47

[20] 建军, 余锦华. 登陆我国台风与华北夏季降水的相关 [J]. 南京气象学院学报, 2006 29(6): 819-826

[21] 吴启树, 沈桐立, 苏银兰, 等. 2000 年第 10 号台风的水汽分析与实验 [J]. 气象科学, 2006, 26(4): 384-391.

[22] 周著华, 白洁, 刘建文, 等. 基于 EOS MODIS 的台风“浣熊”云顶相态分析 [J]. 气象科学, 2006, 26(5): 494-501.

[23] 周国兵, 沈桐立, 韩余. 台风对西南低涡影响的数值模拟 [J]. 气象科学, 2006 26(6): 620-626

[24] 中国气象局. 热带气旋年鉴 [M]. 北京: 气象出版社, 2003

[25] 中国气象局. 热带气旋年鉴 [M]. 北京: 气象出版社, 2002

[26] 中国气象局. 热带气旋年鉴 [M]. 北京: 气象出版社, 2004