

王尚宏, 汤杰, 雷小途, 2018. 登陆过程中台风高层暖心结构演变特征分析[J]. 气象, 44(5): 612-620.

# 登陆过程中台风高层暖心结构演变特征分析\*

王尚宏<sup>1,2</sup> 汤杰<sup>2</sup> 雷小途<sup>2</sup>

1 高原大气与环境四川省重点实验室, 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225

2 中国气象局上海台风研究所, 上海 200030

**提 要:** 采用美国国家环境预报中心 NCEP 提供的分辨率为  $0.5^\circ$  的再分析资料和中国气象局上海台风研究所热带气旋最佳路径集, 对 1979—2010 年于  $30^\circ\text{N}$  以南登陆中国的台风进行合成并分析其高层暖心结构, 主要结论如下: (1) 登陆台风暖心在登陆前 18 h 左右强度有较明显的加强趋势; (2) 登陆阶段台风暖心有着明显的非对称性, 向陆地侧的暖心面积更大; 而在登陆方向两侧暖心结构也存在较弱的非对称性, 登陆前暖心面积左侧大于右侧, 登陆后暖心面积右侧大于左侧。 (3) 登陆台风暖心的温度梯度分布是不均匀的。越靠近暖心外围, 温度梯度越大, 越靠近暖心中心, 温度梯度相对较小。当暖心强度变化后, 暖心内层温度的变化率大于外层。 (4) 登陆过程中暖心强度在垂直方向的衰减比水平方向更为显著。 (5) 文中几种台风暖心特征的计算简便, 物理含义明确, 为实际业务提供了较为不错的量化参考, 方便理解台风暖心结构与台风强度变化之间的关系, 具备一定的业务应用价值。

**关键词:** 登陆台风, 高层结构, 非对称性, 暖心

**中图分类号:** P458.1+24

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.05.002

## Evolution of Warm-Core Structure in Upper Level of Landfalling Typhoons

WANG Shanghong<sup>1,2</sup> TANG Jie<sup>2</sup> LEI Xiaotu<sup>2</sup>

1 Key Laboratory of Plateau Atmospheric and Environment in Sichuan Province, College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 Shanghai Typhoon Institute, CMA, Shanghai 200030

**Abstract:** Based on the  $0.5^\circ$  reanalysis data of National Centers for Environmental Prediction (NCEP) and typhoon best track data from China Meteorological Administration-Shanghai Typhoon Institute (CMA-STI), the warm-core structure of upper level in typhoons making landfall in China during 1979—2010 are diagnosed. The results of this study are shown as follows. (1) The intensity of landing typhoon cases always strengthens at the moment of 18 h before landing. (2) The structure of warm-core shows a remarkable asymmetry during landing, and the area of the onshore part is more remarkable. In the coastline region before landing, the warm-core structure is slightly asymmetrical in both left and right sides. And the left half of landing typhoons will go on developing until landing, and vice versa. (3) The distribution of warm-core temperature gradient is non-uniform. The closer to the periphery, the bigger the temperature gradient is. And in the inner core area, the temperature gradient is much smaller. When the intensity of warm-core changes, the change rate of central temperature is increased. (4) The warm-core intensity would decay

\* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB430305)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406010)和国家自然科学基金项目(41475060 和 41275067)共同资助

2016 年 6 月 24 日收稿; 2017 年 2 月 27 日收修定稿

第一作者: 王尚宏, 主要从事台风机理研究. Email: wangsh@mail.typhoon.gov.cn

通信作者: 雷小途, 主要从事台风机理研究. Email: leixt@mail.typhoon.gov.cn

more tempestuously in vertical direction in the landing process. (5) The several calculation methods proposed in this paper for the typhoon warm-core feature are relatively simple, and the physical meaning is very clear as well. When data is not complete or computational time requirements of operational forecast is higher, it can provide relatively better quantified reference, and especially help understand the relationship between typhoon warm-core structure and variation of typhoon intensity. Thus, it could have practical application values.

**Key words:** landing typhoon, upper level structure, asymmetry, warm-core

## 引言

在全球范围内,广阔的沿海区域和数以亿计的人口遭受着台风及其他类型的热带气旋所带来的不同程度的影响(埃尔斯本里,1994)。我国作为世界上受台风影响最严重的国家之一(Zhang et al, 2009),平均每年会遭受约6~7个台风的侵袭,从而导致数百人死亡以及高达370多亿人民币(2008年经济水平)的直接经济损失(张娇艳等,2011)。而台风造成的主要灾害通常是在其登陆前后的一段时间内发生的,因此防范台风灾害,关键在于对台风登陆过程进行深入的研究和预报。

台风登陆过程中,下垫面环境由相对光滑的洋面移至较为粗糙的大陆架、沿海山地、岛屿等地区,受外围环境场变化、下垫面摩擦作用、地形辐合引起的局部中尺度对流天气系统等因素影响,台风自身的结构也发生改变,引起台风强度和移动路径的急剧变化、同时大大增强了台风降水分布及强度的不确定性(陈联寿等,2002),从而给预报和防台减灾带来极大的难度。继专项研究台风登陆的“可预报性和动力学(Predictability and Dynamical, PDP)计划”(Marks,1998)在国内开展后,台风的登陆问题作为一个独立方向受到学者们的广泛关注,相关研究迅速发展。通过对登陆台风的大尺度环流进行讨论,影响登陆台风长久维持或迅速衰减的大尺度环流特征被发现(Chen,1998;李英等,2004)。季亮和费建芳(2009)从等熵面位涡的角度对登陆台风温妮的位涡收支关系进行分析,研究了其登陆过程中的结构变化。登陆台风的“湿心”结构在不同环境场下存在3种不同的变化方式(徐健,2007)。冀春晓等(2011)的研究发现台风登陆过程中中尺度扰动提供的正涡度有利于台风维持,而台风中近地层湍流(宋丽莉等,2005)和内核区湍流(魏超时等,2011)在登陆过程中的分布变化也已被揭示。

高层暖心作为台风形成的指示特征之一(陈联寿和丁一汇,1979),其形成得益于眼区附近的下沉增温作用和潜热加热作用(喻世华和陆胜元,1986)。热带气旋无论是在西太平洋还是在西北大西洋,其高层均存在暖心和局地正湿度距平(McBride, 1981)。台风暖心结构在不同海温加热场下有着明显的不同(徐祥德和朱复成,1989)。台风中扰动的发展与否和暖心结构的强弱息息相关(费建芳, 1996)。垂直风切变对暖心发展的负反馈作用影响着台风的发展(Knaff et al,2004)。李亿平和罗哲贤(2008)通过研究南海台风形成个例,分析了台风形成过程中,其暖心结构变化特征。学者们对暖心在台风形成和成熟阶段的研究已取得相当丰硕的成果,而对于暖心结构在登陆过程中的变化关注也日益加强,付驹等(2011)分析了18个登陆台风个例的暖心变化,得出登陆台风暖心结构图形不规则化、暖心面积缩小化的趋势,并依据其暖心衰减程度将登陆台风登陆点划分为两大类。

对于登陆台风高层暖心结构开展的研究虽然已有成果,但受限于使用资料的水平分辨率和垂直方向层数,上述研究对于登陆台风高层的精细化结构描述较少,同时研究限于个例的分析,所表现的特征不一定适用于反映大量样本的平均水平。对登陆问题的研究,还应考虑登陆台风登陆方向和海岸线的相对位置。针对以上不足,本文使用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)提供的具有较高分辨率( $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ )的气候预报系统再分析资料(climate forecast system reanalysis, CFSR),利用旋转坐标系和Cressman插值技术构建以登陆台风海岸分界线及其垂线为坐标轴的坐标系,并对1979—2010年于 $30^\circ\text{N}$ 以南登陆中国(含我国大陆地区、海南岛、台湾岛)的台风进行合成,对高层暖心和相关量化参数进行分析,意在找出其在台风登陆过程中结构分布及变化特征,加强对台风登陆过程的认识,同时讨论了

几种量化参数在实际应用中的参考作用。

## 1 资料与方法

通过参考国外学者对比多种常用再分析资料后的结果(Decker et al, 2012; Murakami, 2014)发现,在综合考量热带气旋的年均数量、全球分布、季节变化、资料对热带气旋的命中率和误报率及其反映热带气旋结构特征的能力以及资料数据本身的分辨率等条件下, NCEP 中心提供的 CFSR 资料有较好的效果。CFSR 资料是全球第三代高分辨率再分析资料,它耦合了海-气-陆-冰系统,数据集提供 1979 年至今(CFSRv1: 1979—2010, CFSRv2: 2011 至今)的数据。本文将使用的 CFSRv1 资料时间跨度为 1979—2010 年,其水平分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ,垂直方向上有 37 层,涵盖范围 1000~1 hPa,其中 500 hPa 以上层次有 22 层,数据在高层也有较好的分辨率,资料时间分辨率为 6 h。

本文还使用了取自中国台风网(www.typhoon.gov.cn)的“中国气象局上海台风研究所(China Meteorological Administration-Shanghai

Typhoon Institute, CMA-STI)热带气旋最佳路径数据集”(Ying et al, 2014)作为登陆台风强度和位置数据的参考。台风强度判定以正点时刻前 2 min 至正点时刻间的风速平均值为基准,参见《热带气旋等级》国家标准(GB/T 1920—2006)(表 1)。本文所统计的登陆台风样本为 1979—2010 年于  $30^\circ\text{N}$  以南(考虑到  $30^\circ\text{N}$  为中低纬度分界线,且在其以北登陆的台风后续多有变性,在此暂不讨论)登陆我国(包括中国大陆、海南岛、台湾岛)的台风(表 2)。同时,为了比较台风在登陆期间不同时刻的结构变化,记各台风样本登陆时刻为 +00 h 时,取前后各延伸 24 h 内的逐 6 h 数据进行分析。

表 1 热带气旋等级国家标准(GB/T 1920—2006)

Table 1 National standard for tropical cyclone grades

等级	风速范围/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
弱于热带低压(WTD)	$\leq 10.7$
热带低压(TD)	10.8~17.1
热带风暴(TS)	17.2~24.4
强热带风暴(STS)	24.5~32.6
台风(TY)	32.7~41.4
强台风(STY)	41.5~50.9
超强台风(SPTY)	$\geq 51.0$

表 2 1979—2010 年  $30^\circ\text{N}$  以南登陆我国的不同时刻和强度的台风样本数

Table 2 Numbers of typhoon samples with different times and intensities to the south of  $30^\circ\text{N}$  during 1979—2010

相对登陆时间/h	总样本数	WTD	TD	TS	STS	TY	STY	SPTY
-24	285	1	22	46	82	84	32	18
-18	286	0	12	49	85	93	30	17
-12	286	0	11	49	80	99	33	14
-06	287	0	16	45	86	98	30	12
+00	287	4	18	55	98	79	31	2
+06	284	9	47	78	103	43	3	1
+12	270	14	75	84	65	29	2	0
+18	252	31	80	70	45	21	1	0
+24	220	32	76	59	35	9	0	0

为了方便分析大量台风在登陆期间的特征变化,本文对所选台风样本进行了旋转坐标系的处理,即以登陆点海陆分界线及其垂线方向为  $X-Y$  轴重新建立坐标系进行讨论。在常见的客观分析法中(王跃山, 2001), Cressman 客观分析法得到的结果与原始数据最为接近(张红杰等, 2009),因此本文对经旋转变换之后的数据,采用 Cressman 插值进行重构后使用合成分析。总而言之,本文分析过程中主要选取原数据以台风中心向外  $10^\circ$  经纬度范围进行合成,合成后的数据场以台风中心为坐标原点,  $X$

轴、 $Y$  轴分别为海陆分界线垂线方向和海陆分界线方向。

## 2 台风登陆过程其高层暖心结构演变特征

台风在登陆过程中,其下垫面由海洋区移往陆地地区,两者不同的摩擦效应、水汽状况、热力作用使得台风的结构发生明显变化,水汽补充和热力来源的减弱使得登陆台风强度显著减弱,并逐渐消失。

图 1 为合成台风的温度距平场沿登陆方向的垂直剖面图。X 轴 0 点处为台风中心, 负值方向为靠陆地侧, 正值方向为靠海洋侧。其中所用的温度距平值为数据各层次上每一点的温度值减去该层次的温度平均值, 每个层次的温度平均值为该层次取台风中心向外  $10^{\circ}$  经纬距范围的区域平均值。

从图 1 中可以看到, 台风高层的暖心结构在台风登陆的过程中, 其形态发生了明显的变化。登陆

前期暖心形态大体为狭长的椭圆形, 其长轴在垂直方向, 暖心向上延伸的高度最高到 150 hPa。随着登陆过程进行, 椭圆形的暖心的长轴有所缩短。垂直方向上数值为 2 K 的等值线由登陆前 24 h 的 200 hPa 以上降至登陆后 24 h 的 200 hPa 以下。以登陆台风中心为界, 暖心的左右形态也呈现不对称结构, 暖心向陆地方向的部分(左侧)比向海方向(右侧)更加圆润, 等值线分布更松散。

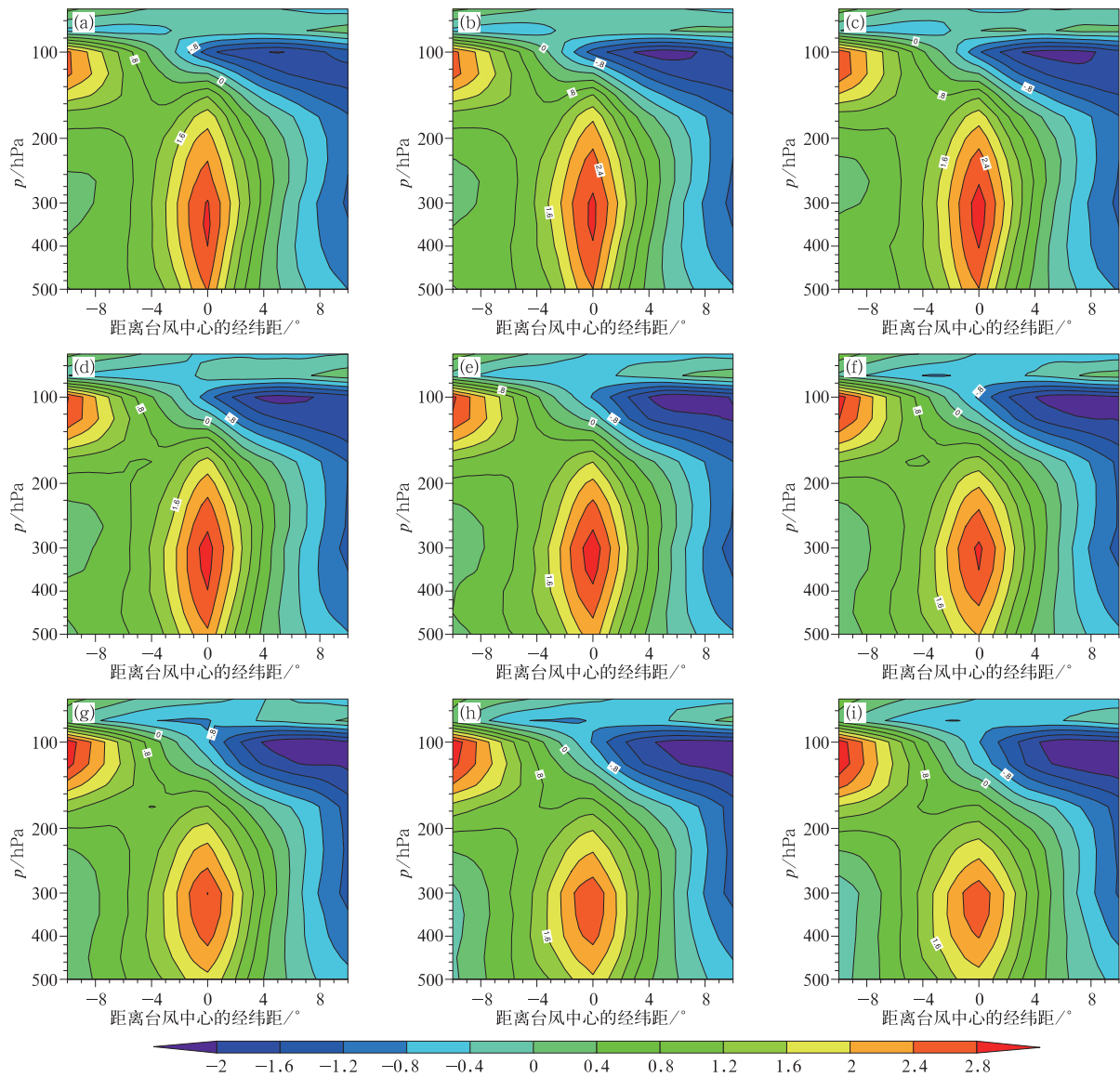


图 1 合成台风温度距平场沿海陆分界线垂直方向的垂直剖面(单位:K)  
(a) -24 h, (b) -18 h, (c) -12 h, (d) -06 h, (e) +00 h, (f) +06 h,  
(g) +12 h, (h) +18 h, (i) +24 h

Fig.1 The warm-core temperature anomaly profiles in the landing direction (unit: K)  
(a) -24 h, (b) -18 h, (c) -12 h, (d) -06 h, (e) +00 h, (f) +06 h,  
(g) +12 h, (h) +18 h, (i) +24 h

移,这种左右不对称性渐渐减弱。结合表 3 所示的不同时刻暖心最大温度距平值可以看到,从登陆前 24 h 至登陆时刻,暖心温度正异常缓慢增加,从 2.89 K 升至 3.02 K,说明在该过程中,台风的水汽

和热量的输送仍然维持。登陆时刻暖心最高温度达到最大值后进入迅速下降的阶段,登陆时刻后 24 h 降至 2.64 K,降幅达 12.58%。

表 3 登陆过程各时刻暖心温度距平最大值变化

Table 3 The maximum value changes of warm-core temperature anomaly at every moment during typhoon landing

时刻	-24 h	-18 h	-12 h	-06 h	+00 h	+06 h	+12 h	+18 h	+24 h
最大值/K	2.89	2.89	3.0	2.97	3.02	2.88	2.81	2.69	2.64

为简便起见,本文暂定义 2 K 指数为合成台风温度距平场沿海陆分界线垂线方向的垂直剖面图中  $\geq 2$  K 的格点数为暖心面积指数(记为 2 K 指数)。其中向陆地侧部分的暖心面积指数记为 2 KF,向海侧部分记为 2 KB。格点划分标准为水平方向以  $1^\circ$  为分辨率,垂直方向以 50 hPa 为分辨率。图 2 为 2 K 系列指数随登陆时间变化的时序图。图中 2 K 指数在登陆前 18 h 较前 24 h 有所增加,说明一直到登陆时刻前 18 h,台风暖心一直都在持续加强;而在此之后,2 K 指数一直维持至登陆时刻保持不变;登陆后 2 K 指数迅速衰减,至登陆后 24 h 的衰减率达 35%,说明当台风中心部分登陆后其结构才发生较为剧烈的变化。对比使用“CMA-STI 热带气旋最佳路径数据集”中统计的台风强度变化结果(图 3)可见:在登陆时刻前 18 h,出现强度增加的样本最多,所占比例为 15.74%,且大于强度衰减的样本数(6.99%),随着登陆过程发展,强度增加和强度保持不变的样本数量减少,而强度衰减的样本数增加,和前述 2 K 指数反映的台风暖心强度变化类似;其中,在登陆前 6 h 及登陆后 6 h 时期,由于台风中心核心区受登陆影响,反映台风强度改变的样本数变化幅度最大。在整个过程中,表征指向陆地一侧的前侧暖心指数(2 KF)在整个过程中均大于台风后侧暖心指数(2 KB),呈现非对称性。但两者差异随着登陆过程逐渐缩小。2 KF 于登陆前的 4 个时刻保持不变,2 KB 则在登陆前 18 h 有所增加,这表明之前所判断的出现在此时间点暖心加强现象得益于台风靠海部分的水汽及热量补给。登陆发生后,2 KF 及 2 KB 均出现了明显的减小,但 2 KF 的减弱更快,24 h 内衰减率为 41.67%,而 2 KB 则为 33.33%,说明登陆过程中能量的消耗更多地发生在登陆方向的前部,同时由于该指数为高层特征,可能和台风衰减过程中对流层上层的正压过程有关(谢安等,1982)。

为进一步讨论台风高层温度场精细结构在登陆过程中的变化,本文计算了台风高层暖心的温度梯

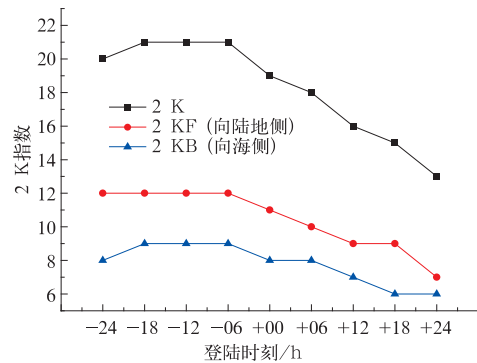


图 2 2 K 系列指数随登陆时间的变化

Fig. 2 The changing trend chart of the 2 K series indexes during typhoon landing

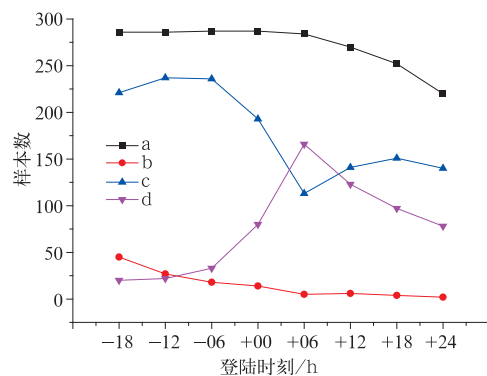


图 3 台风强度相对变化样本数的时序图 (a 表示总样本数, b, c, d 分别为强度变化为增强、不变和衰减的样本数)

Fig. 3 The changing trend chart of numbers of typhoon samples with different intensity changes (a: all samples, b: increased, c: retained, d: decayed)

度和拉普拉斯算子作为量化讨论的指标。取 200 hPa 为特征面,定义  $gu$ 、 $gd$  为台风中心轴线上 200~100 和 300~200 hPa 高低两层的温度距平梯度, $gf$ 、 $gb$ 、 $gl$ 、 $gr$  分别为台风中心轴线上 200 hPa 高度处向四周(前后左右四个方向)2℃ 距离处的温度距平的梯度, $la_1$  和  $la_2$  为温度距平分别在垂直方向和水平方向上的拉普拉斯算子。

图 4 为参数  $gu$  和  $gd$  随登陆时间变化的时序图。同时刻的上部温度距平梯度值( $gu$ )是大于下部温度距平梯度值( $gd$ )的,说明暖心上部温度差异是大于下部温度差异的。 $gu$  在经历登陆前 18 h 的增加后呈减少趋势,和上文中台风强度变化趋势相符,而  $gd$  在登陆过程中变化形势恰恰与  $gu$  相反,且  $gd$  的变化幅度不及  $gu$ ,这意味着登陆过程中,温度在垂直方向上的变化并不是均匀线性的,越靠近暖心上部,变化率越大。这可能是因为台风登陆期间往往有大量高层冷空气侵入,从而导致高层暖心迅速减弱,进而导致台风减弱。

图 5 为台风暖心前后左右四个方向的温度梯度值( $gf$ 、 $gb$ 、 $gl$ 、 $gr$ )随登陆时间变化的时序图。在相同时刻,梯度值越小则表明该部分与台风中心温度差异越小,反之则越大。从图中可以看到,暖心前部温度差异( $gf$ )在整个过程中均远远小于暖心后部温度差异( $gb$ ),这表明在登陆过程中暖心向陆地侧是倾斜的,即表现出较强的相对于台风前后侧非对称性。这和前面 2 K 指数所得到的结论相一致。而在登陆时刻(+00 时),暖心左侧温度差异( $gl$ )和暖心右侧温度差异( $gr$ )的差异则相较不大,台风非对称性并不是很强。在登陆前,左侧温度梯度  $gl$  的

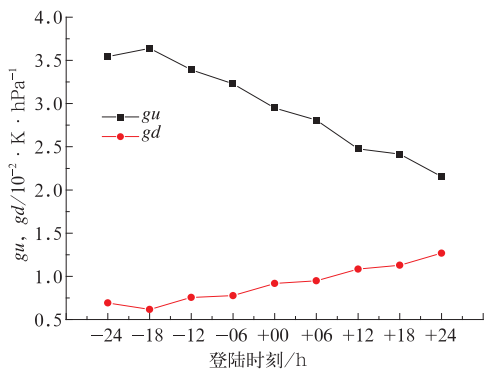


图 4 同图 2,但为暖心温度距平梯度值  $gu$  和  $gd$

Fig. 4 Same as in Fig. 2, but for parameters:  $gu$  and  $gd$

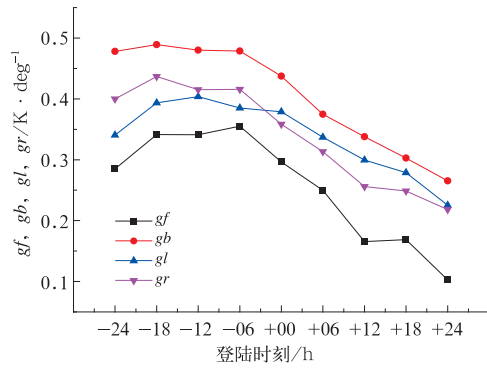


图 5 同图 2,但为暖心温度距平梯度值参数  $gf$ (前部)、 $gb$ (后部)、 $gl$ (左方)、 $gr$ (右方)

Fig. 5 Same as Fig. 2, but for parameters:  $gf$ ,  $gb$ ,  $gl$  and  $gr$

值是小于右侧的温度梯度  $gr$  的值而登陆以后出现反转,即  $gr$  小于  $gl$ 。这种登陆前后暖心左右对称性的反转是由于登陆台风路线右前方多有降水中心(梁必骥,1995),其释放的能量减缓了暖心右侧的衰减。结合前文暖心温度随登陆变化规律,在登陆前 18 h 时刻,暖心温度升高,此时  $gb$  的增加率为 2.3%, $gf$  的增加率为 19.77%,暖心靠海方向的温度差异变化小于向陆侧,即靠海侧的温度增加更强。表明在该时刻暖心强度的加强偏向于向海部分。与前文 2 KF、2 KB 指数的分析结果类似。登陆时刻过后,暖心温度迅速下降,对应各指数也迅速下降,其中,尤其以  $gf$  的下降幅度最大。登陆后 24 h 的衰减率为 65.33%,远高于  $gb$  的 39.35%、 $gl$  的 40.57% 和  $gr$  的 39.09%,说明登陆过程中暖心的衰减、能量的消耗主要集中在登陆方向的前部。

由于台风暖心具有三维特点(即垂直方向和水平方向同时存在暖心),在这里我们进一步用垂直方向( $la_1$ )和水平方向( $la_2$ )的温度拉普拉斯算子来表征暖心的结构。如图 6 所示,两个方向暖心趋势在随登陆时间变化形势上大体相同,均在登陆前 18 h 有最大值,随登陆过程进行,其数值逐渐下降。登陆后 24 h 内,垂直方向的暖心( $la_1$ )的变化率为 56.3% 大于 44.83% 的水平方向暖心变化率( $la_2$ ),这也说明在登陆过程中暖心衰减在垂直方向上要比在水平方向上更加剧烈。两个算子的变化趋势和前文所述台风强度变化趋势一致。在实际业务应用中,对台风暖心附近区域温度进行拉普拉斯算子计算(即  $la_1$  和  $la_2$ )对于理解台风暖心结构演变乃至台风结构和强度变化趋势有较为直接的量化参考意

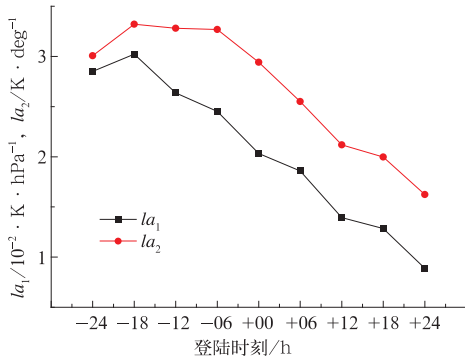


图 6 同图 2, 但为温度拉普拉斯算子参数  $la_1$  (垂直方向) 和  $la_2$  (水平方向)

Fig. 5 Same as Fig. 2, but for parameters:  $la_1$  and  $la_2$

义。同时相关计算也较为简便, 物理含义也非常明显, 因此具有较强的业务应用潜力。

### 3 台风登陆过程其高层暖心结构随强度演变特征

上述表征台风高层结构的参数除了随着登陆时间变化有着不同之外, 由于台风自身强度的不同, 其特征也有着明显的差别。

图 7 为高低层两层暖心参数 ( $gu$ 、 $gd$ ) 随强度分布盒形图, X 轴为强度分类。在各个强度,  $gu$  的值均大于  $gd$  的值, 表明台风暖心靠高层的温度差异

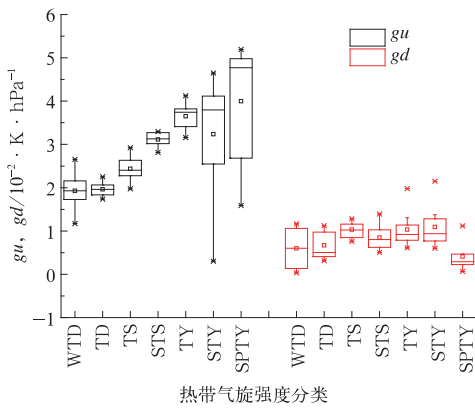


图 7 暖心温度距平梯度值参数  $gu$  (上部)、 $gd$  (下部) 随强度分布的盒形图 (强度分类标准参照表 1)

Fig. 7 The box-and-whisker plot of the parameter:  $gu$  and  $gd$  with different intensities

(Intensity classification according to Table 1)

要比低层温度差异大。随着台风强度的加强,  $gu$  和  $gd$  都有所增加, 但  $gu$  的变化幅度是大于  $gd$  的变化幅度的, 说明在台风暖心随强度变化的过程中, 越靠近外层, 温度的变化率越小, 靠近暖心核心的变化要剧烈得多, 暖心的改变大多是从中心开始的。同时, 我们注意到当台风强度大于 STY 之后,  $gu$  和  $gd$  的变化没有之前几个强度那么大, 甚至 SPTY 的  $gd$  还有所减小。

图 8 为台风水平暖心梯度参数  $gf$ 、 $gb$  随强度分布盒形图。两者随着台风强度的加大, 都呈现增加的趋势。在 TY 强度以下,  $gf$  都明显小于  $gd$ , 说明较弱的台风暖心非对称性更强, 表现在登陆方向前部分强于靠海侧部分。而在 STY 和 SPTY 强度  $gf$  和  $gd$  的差异较小, 对称性较强。但是也可以看出, 对于较强的台风 (STY 和 SPTY),  $gb$  的方差明显要比前侧大。

图 9 为参数  $la_1$ 、 $la_2$  随强度分布盒形图。  $la_1$  和

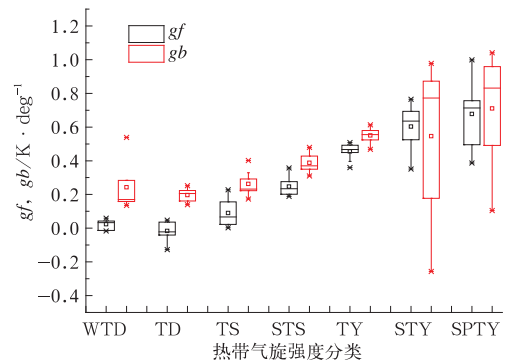


图 8 同图 7, 但为暖心温度距平梯度值参数  $gf$  (前部)、 $gb$  (后部)

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for parameters:  $gf$  and  $gb$

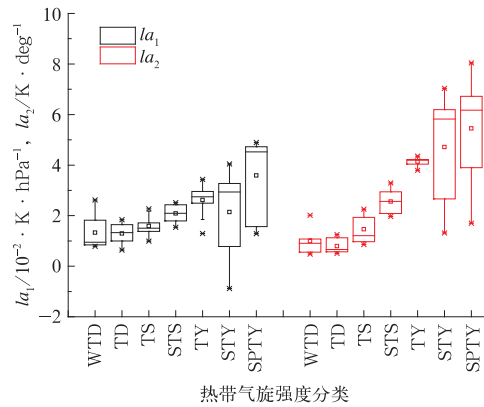


图 9 同图 7, 但为温度拉普拉斯算子参数  $la_1$  (垂直方向)、 $la_2$  (水平方向)

Fig. 9 Same as Fig. 7, but for parameters:  $la_1$  and  $la_2$

$la_2$  的值随着强度增加而增加,但强度越强, $la_2$  的变化率越大于  $la_1$  的变化率。这可能是对于发展强烈的台风,暖心垂直方向上的发展容易受到对流层顶等因素的限制,因此暖心的进一步加强更容易在水平方向上寻求发展。

## 4 结论与讨论

本文通过使用 NCEP 提供的在水平方向和垂直方向均有较高分辨率的 CFSR 再分析资料,利用旋转坐标和 Cressman 插值技术,对 1979—2010 年于  $30^\circ\text{N}$  以南登陆我国(含中国大陆、海南岛、台湾岛)的台风进行合成分析,参照登陆过程中的时间变化和强度变化,对台风高层温度场及其相关参数进行对比分析,意在挖掘登陆台风在不同强度和不同登陆时刻上暖心的非对称性结构特征,揭示其结构变化规律。结果表明:

(1) 大量样本显示,登陆台风暖心在登陆前 18 h 出现加强趋势的比例最大。登陆后台风暖心强度迅速减弱,其变化趋势与热带气旋最佳路径数据集中基于风速强度判定的台风强度的变化一致。

(2) 登陆台风暖心大体呈椭圆形,登陆前的暖心高度比登陆后暖心高度高  $50\sim 100$  hPa。如果以台风向陆地靠近移动方向确定前后方向,可以发现台风暖心前后两侧有着明显的非对称性,向陆地的台风前侧暖心面积更大、等值线分布更稀疏。而登陆方向为指向的左右的暖心也有轻微的非对称性,登陆之前路径方向左侧的暖心范围多于右侧,登陆后,暖心右侧范围多于左侧暖心。这种非对称性产生的原因可能和下垫面性质不同、环境场的差异以及雨带的非对称性分布有关。

(3) 登陆台风暖心的温度分布是不均匀、非线性性的。越靠近高层暖心上部,温度的差异性越大,而越靠近下部,温度分布则有着更好的均一性。暖心强度变化后,暖心内层温度的变化率大于外层。

(4) 登陆过程中暖心的衰减在垂直方向上要比在水平方向上更加剧烈。

(5) 本文使用的几项以暖心特征反映台风强度变化的参数表现和实际情况较为相符,能够较为精确地反映台风热力三维结构的演化。与此同时,相关计算方法比较简便,物理含义也非常明确,在面对资料不够齐全并且计算时间要求高的实际业务预报时可以提供较为不错的量化参考,特别是能够帮

助理解台风暖心结构与台风强度变化之间的关系。

本文对于登陆台风样本的选择包含了“二次登陆”的台风样本,其样本数量仅占 14.63%,由于二次登陆过程中其结构和强度已发生变化,其结果具有一定的特殊性,如相对登陆时刻前  $18\sim 12$  h(对应第一次登陆时间)时各参数的迅速衰减等,但主要结论较为一致,该部分“二次登陆”台风的单独研究结果会在后续工作中详细介绍。文章使用的再分析资料虽然在综合考量上有着较好的效果,但对于单个台风样本的效果仍不是最优,进行旋转坐标分析的海陆分界判定的分辨率也较粗,其合成分析结果仍有使用更优质再分析资料和实测资料提升的空间,同时所得结论适用于反映大量样本的共性特征,对于路径或强度变化异常的特殊台风个例,其暖心变化特征的研究将会在后续进行。文章对登陆台风物理量非对称结构特征以及登陆过程中变化特点的分析也有待更深入的讨论。

## 参考文献

- 埃尔斯本里,1994.热带气旋全球观[M].陈联寿,董克勤,金汉良,等译.北京:气象出版社:341.
- 陈联寿,丁一汇,1979.西太平洋台风概论[M].北京:科学出版社:491.
- 陈联寿,徐祥德,罗哲贤,等,2002.热带气旋动力学引论[M].北京:气象出版社:317.
- 费建芳,1996.近似实际风场条件下台风中扰动的稳定性[J].热带气象学报,12(1):18-25.
- 付驹,董贞花,谭季青,2011.台风登陆前后暖心结构变化的探讨[J].科技通报,27(1):18-24.
- 冀春晓,赵放,高守亭,等,2012.登陆台风 Matsa(麦莎)中尺度扰动特征分析[J].大气科学,36(3):551-563.
- 季亮,费建芳,2009.登陆台风等熵面位涡演变的数值模拟研究[J].气象,35(3):66-72.
- 李忆平,罗哲贤,2008.南海台风暖心结构形成的个例研究[C]//中国气象学会 2008 年会论文集.北京:中国气象学会.
- 李英,陈联寿,王继志,2004.登陆热带气旋长久维持与迅速消亡的大尺度环流特征[J].气象学报,62(2):167-179.
- 梁必骥,1995.天气学教程[M].北京:气象出版社:632.
- 宋丽莉,毛慧琴,黄浩辉,等,2005.登陆台风近地层湍流特征观测分析[J].气象学报,63(6):915-921.
- 王跃山,2001.客观分析和四维同化——站在新世纪的回望(II)客观分析的主要方法(1)[J].气象科技,29(1):1-9.
- 魏超时,赵坤,余晖,等,2011.登陆台风卡努(0515)内核区环流结构特征分析[J].大气科学,35(1):68-80.
- 谢安,肖文俊,陈受钧,1982.登陆台风的能量学分析[J].气象学报,40(3):289-299.
- 徐健,2007.台风登陆前后湿度场变化的初步研究[D].南京:南京信



- 息工程大学.
- 徐祥德,朱复成,1989. 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,13(1):52-58.
- 喻世华,陆胜元,1986. 热带天气学概论[M]. 北京:气象出版社:277.
- 张红杰,马清云,吴焕萍,等,2009. 气象降水分布图制作中的插值算法研究[J]. 气象,35(11):131-136.
- 张娇艳,吴立广,张强,2011. 全球变暖背景下我国热带气旋灾害趋势分析[J]. 热带气象学报,27(4):442-454.
- Chen L S,1998. Decay after landfall[R]. WMO/TD,875:1. 6. 1-1. 6. 7.
- Decker M, Brunke M A, Wang Zhuo, et al, 2012. Evaluation of the reanalysis products from GSFC, NCEP, and ECMWF using flux tower observations[J]. J Climate, 25(6):1916-1944.
- Knaff J A, Seseske S A, DeMaria M, et al, 2004. On the influences of vertical wind shear on symmetric tropical cyclone structure derived from AMSU[J]. Mon Wea Rev, 132(10):2503-2510.
- Marks Jr F D, 1998. Landing and falling tropical cyclone research program[R] // WMO Tropical Meteorology Research Program (TMRP) Report. 59-60.
- McBride J L, 1981. Observational analysis of tropical cyclone formation. Part 1: basic description of data sets[J]. J Atmos Sci, 38(6):1117-1131.
- Murakami H, 2014. Tropical cyclones in reanalysis data sets[J]. Geophys Res Lett, 41(6):2133-2141.
- Ying Ming, Zhang Wei, Yu Hui, et al, 2014. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database[J]. J Atmos Oceanic Technol, 31(2):287-301.
- Zhang Qiang, Liu Qiufeng, Wu Liguang, 2009. Tropical cyclone damages in China 1983 - 2006[J]. Bull Amer Meteor Soc, 90(4):489-495.