

喜度,韩桂荣,殷笑茹,等,2020. CPS法对影响江苏台风的适用性研究[J]. 气象,46(6):765-775. Xi D, Han G R, Yin X R, et al, 2020. Study on application of CPS method to typhoons affecting Jiangsu Province[J]. Meteor Mon, 46(6):765-775 (in Chinese).

CPS法对影响江苏台风的适用性研究^{*}

喜度^{1,4} 韩桂荣² 殷笑茹³ 李杨² 刘寅¹ 唐云志¹

1 江苏省气象探测中心, 南京 210009

2 江苏省气象台, 南京 210008

3 江苏省气象信息中心, 南京 210008

4 江苏省气象科学研究所, 南京 210009

提 要: 利用 NCEP FNL $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料、江苏省地面自动站资料以及长三角地区新一代天气雷达资料, 使用气旋相空间法(CPS)对 2000—2015 年影响江苏台风的相空间参数进行统计分析。经过和台风年鉴比对, CPS法能较为客观准确地描述各类路径影响江苏台风的变性过程, 而结果表明: 影响江苏的台风发生变性的多为登陆北上、变性前强度较强的台风。进一步分析台风“海葵”和“麦德姆”两个 CPS 轨迹不同的台风相空间参数, 发现其参数轨迹能较好地反映台风变性过程中的热力结构和环流特征演变, 与台风降水的落区和强度有一定关联, CPS 参数变化明显的“海葵”, 台风降水范围和强度变化较大, 参数变化较小的“麦德姆”, 降水基本位于台风本体周边。

关键词: CPS法, 台风变性, 冷空气, 冷心, 暖心

中图分类号: P456, P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.06.004

Study on Application of CPS Method to Typhoons Affecting Jiangsu Province

XI Du^{1,4} HAN Guirong² YIN Xiaoru³ LI Yang² LIU Yin¹ TANG Yunzhi¹

1 Jiangsu Meteorological Observation Center, Nanjing 210009

2 Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008

3 Jiangsu Meteorological Information Center, Nanjing 210008

4 Jiangsu Research Institute of Meteorological Science, Nanjing 210009

Abstract: Based on NCEP FNL ($1^\circ \times 1^\circ$) reanalysis data, observation data from automatic weather stations in Jiangsu Province and new generation weather radar data in Yangtze River Delta area, the cyclone phase space (CPS) method was used to analyze the phase space parameters of typhoons that occurred in Jiangsu from 2000 to 2015. The results show that the CPS method could objectively and accurately describe the transition process of typhoons in Jiangsu affected by various paths according to Typhoon Almanac (CMA-STI). Typhoons affecting the transition of typhoons in Jiangsu are mostly landing northward and show strong intensities before the transition. We further analyze phase space parameters of “Haikui” and “Matmo” with different CPS trajectories. The results show that the phase space parameter can better reflect the evolution of the thermal structure and circulation characteristics during the transition process of typhoon, and it is related to the location and intensity of typhoon precipitation. “Haikui” with obvious changes of

^{*} 江苏省“333工程”科研项目(BRA2017521)、江苏省气象局科研基金面上项目(KM202005)、江苏省自然科学基金(BK20161074)和江苏省气象局开放研究基金(BJG201511)共同资助

2019年1月8日收稿; 2020年4月14日收修定稿

第一作者: 喜度, 主要从事热带气旋研究和雷达资料分析与应用. Email: tmitty2@hotmail.com

通讯作者: 韩桂荣, 主要从事天气学预报技术研究. Email: hgrong@vip.sina.com

CPS parameter has significant variations in the location and intensity of typhoon precipitation. “Matmo” with small CPS parameter changing basically has rains around the typhoon itself.

Key words: CPS method, extratropical transition of typhoon, cold air, cold core, warm core

引言

江苏位于较高纬度地区,根据历史资料显示,台风影响造成的强风暴雨往往是其北上与西风带系统结合的结果,在此区域变性概率较大。关于台风的变性研究,多年来国内外在该领域有了很大的进展。在变性机制上, Sekioka (1956)、张雪蓉等 (2013) 揭示了台风半暖半冷的热力非对称结构;徐祥德等 (1998)、曹晓岗和王慧 (2016) 认为环境场的锋面特征可以显著地影响台风的变性;陈联寿等 (2002) 发现中高层冷空气对台风的入侵会造成或加剧斜压不稳定,斜压的位能转变成动能是台风变性的主要原因;有研究人员将台风的变性分为变性和温带气旋再发展阶段 (Klein et al, 2002),同时对台风变性过程中的结构特征 (钱燕珍等, 2013; 黄蔚薇等, 2015) 和风雨影响 (许爱华等, 2006; 李英等, 2013; 梁红丽和程正泉, 2017; 郑艳等, 2018) 进行了深入分析。

在台风变性的客观判定方法领域,目前比较通用的有以下方法: Open Wave 法、锋生函数法和气旋相空间法 (CPS)。台风在 500 hPa 天气图上位势高度由闭合变为不闭合的时刻,具备了温带气旋的性质,由此可以判断台风变性结束的时间,此方法称之为 Open Wave 法 (Demirci et al, 2007)。锋生函数法计算台风中心附近 500 km 范围内 500 hPa 的三维标量锋生,用平均值持续增大并出现最大增长率的时刻来判定变性过程的结束 (Harr and Elsberry, 2000),韩桂荣等 (2005) 进一步讨论了锋生函数各项的性质,认为台风变性初期锋生函数的变形项起了重要作用。对于台风变性预报来说,最需要关注的是变性的开始时间,而 Open Wave 法和锋生函数法仅能判定台风变性的结束时间。Hart (2003) 对大西洋台风进行分析研究后,首次提出了 CPS 法,认为该方法能够通过台风热力性质的转变特征来客观判定台风变性开始和结束的时间。近年来不少学者针对该方法是否适用于西北太平洋台风进行了相关研究 (郭蓉等, 2011; 宋金杰和王元, 2010; 孙泓川等, 2015)。张迎新等 (2008) 用 CPS 法对“海马”的台风变性过程进行了分析,认为该方法能较好

描述变性过程;危国飞等 (2014) 用 CPS 法和聚类分析法对西北太平洋 58 个台风进行了分类,结果表明该方法对西北太平洋的台风有一定的指示作用。

目前 CPS 法的研究对象多为显著变性的台风,在国内预报业务上使用较少,原因主要是该方法在不同区域有不同的参数分布特征。台风变性过程复杂,不少台风会处于有变性趋势但最终未完成变性的状态,有必要对其变性过程进行追踪分析。

本文首先用 CPS 法计算 2000—2015 年影响江苏台风的相空间参数,按路径归类统计其变性状况,其后进一步对严重影响江苏的台风个例“海葵”(1211)和“麦德姆”(1410)进行 CPS 轨迹分析,以期台风变性预报工作提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文使用的 2000—2015 年西北太平洋台风资料来源于中国气象局上海台风研究所最佳台风路径集 (Best Track) 以及历年《热带气旋年鉴》(中国气象局, 2000—2015)。环境场资料源自于 NCEP FNL 再分析资料,水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,包含了各等压面风速、温度、位势高度、湿度等格点场,时间间隔为 6 h。江苏省地面自动站风场和雨量数据,时间间隔为 10 min。南京、盐城、常州、上海、杭州等五部 WSR-88D 多普勒气象雷达基本反射率产品,时间间隔为 6 min,水平分辨率为 1 km。本文所用资料 and 个例时间都为世界时。

1.2 CPS 法介绍

该方法总结出了三个能够表征台风结构的参数,分别是能够描述台风热力非对称结构的参数 B 和描述台风垂直结构上冷暖分布的热成风参数 $-V_T^L$ 和 $-V_T^U$,其中 B 参数代表沿台风中心移动方向,台风左右半圈 900~600 hPa 的厚度差,该参数表征了台风低层热力非对称性程度;高低层热成风参数 $-V_T^L$ 和 $-V_T^U$ 分别代表台风内 900~600 hPa 和 600~300 hPa 位势高度扰动随着高度的变化值。

Hirschberg and Fritsch(2003)通过研究发现台风上空冷暖的垂直分布与其对应层的高度扰动有关联,可以认为台风范围某一段高度空间内位势高度扰动随着高度减小,台风的性质为暖心;反之,为冷心。具体计算公式如下。

$$B = \overline{Z_{600 \text{ hPa}} - Z_{900 \text{ hPa}}} |_{\text{R}} - \overline{Z_{600 \text{ hPa}} - Z_{900 \text{ hPa}}} |_{\text{L}} \quad (1)$$

$$\left. \frac{\partial(\Delta Z)}{\partial p} \right|_{900 \text{ hPa}}^{600 \text{ hPa}} = -V_T^L \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial(\Delta Z)}{\partial p} \right|_{600 \text{ hPa}}^{300 \text{ hPa}} = -V_T^U \quad (3)$$

其中:

$$\Delta Z = df |V_g| / f \quad (4)$$

式(1)中: Z 代表等压面高度, $L(R)$ 代表当前热带气旋移动方向的左(右)侧; B 为半径 500 km 范围内沿当前台风移动方向划分的左右半圆内的空间平均,其值在北半球取正值,在南半球取负值。式(2)和式(3)中: ΔZ 指台风 500 km 半径范围内等压面上的高度扰动。式(4)中: V_g 代表地转风,如果定义 d 为两个位势高度极值间的距离, f 为科氏力参数,那么表明 ΔZ 与地转风成正比。

2 CPS 法对 2000—2015 年影响江苏的台风统计分析

2.1 影响台风的路径分类

据上海台风研究所《热带气旋年鉴》(中国气象

局,2000—2015)统计,2000—2015 年西北太平洋一共有 380 个台风生成。当江苏省内有基准站出现 7 级及以上阵风或出现降水,台风影响开始;卫星云图显示台风云系离开江苏,且基准站阵风风力降至 7 级以下、不再出现降水,台风影响结束。按此标准筛选出 2000—2015 年影响江苏的台风有 59 个,将其按路径分为三类:第一类为移动路径在 24~48 h 警戒区内的台风;第二类为移动路径在 24 h 警戒区内但并未登陆的台风;第三类为 24 h 警戒区内且登陆我国东南沿海地区然后北上的台风。第一类台风大多在东海东部和黄海海面仍维持比较高的强度,影响的方式以大风为主;第二类台风离江苏距离相对第一类近,影响方式主要是大风和短时阵雨;第三类路径是影响江苏台风的主要路径,这类台风往往由于变性等原因带来较强的风雨影响,是台风预报服务的重点和难点。图 1 给出了这三类台风的路径分布。

2.2 分类台风的 CPS 法相空间参数统计分析

研究表明(Evans and Hart,2003),当结构参数 $B > 10 \text{ m}$ 时,台风的水平热力结构开始出现不对称,台风有变性的趋势。低层热力参数 $-V_T^L > 0$ 时台风低层具备暖心结构,反之具备冷心结构。高层热力参数 $-V_T^U > 0$ 表示用来判定冷暖心结构是否深厚,具有暖心结构的台风在 $-V_T^U > 0$ 时代表暖心结构深厚,具有冷心结构的台风在 $-V_T^U < 0$ 时代表冷心结构深厚。当 $B > 10 \text{ m}$ 且 $-V_T^L$ 和 $-V_T^U$ 都小于 0

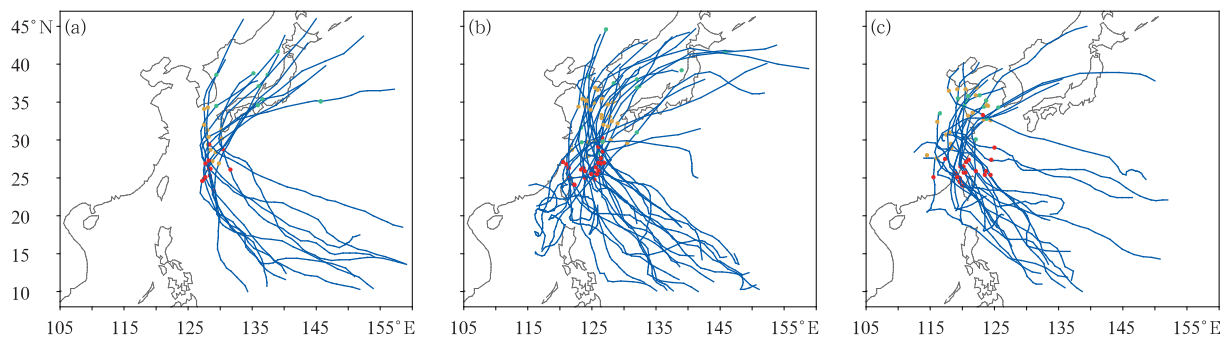


图 1 2000—2015 年影响江苏的台风路径分布

(a) 24~48 h 警戒区(未登陆), (b) 24 h 警戒区(未登陆), (c) 24 h 警戒区(登陆)
(红点表示影响开始位置, 黄点表示影响结束位置, 绿点表示台风年鉴中确定的变性位置)

Fig. 1 Tracks of typhoons affecting Jiangsu Province from 2000 to 2015

(a) 24—48 h warning zone (no landing), (b) 24 h warning zone (no landing), (c) 24 h warning zone (landing)
(Red dot indicates the location when the typhoon begins to affect Jiangsu, yellow dot indicates the location when the typhoon ends to affect Jiangsu, green dot represents the transition location in Typhoon Almanac)

时,台风最终完全变性为温带气旋。根据 2.1 节的分类,使用 NCEP FNL 资料对 2000—2015 年三类台风的 B 参数和高低层热力参数进行计算(表 1),图 2 为其影响开始和结束的相空间参数分布散点图。

计算结果显示,第一、二类(非登陆型)台风开始影响时(图 2a),绝大多数台风的 B 值集中在 10 m 以下,低层热力参数 $-V_T^L > 0$,范围在 0~80。第三类(登陆型)大部分台风 B 值在 10~20 m, $-V_T^L$ 值处于 0 附近。说明非登陆型台风开始影响时,大多

数仍处于热力对称状态且保持着完整的暖心结构;而登陆后才开始产生影响的台风,大部分已经出现热力不对称结构特征,且伴随着低层暖心结构的轻度破坏。绝大多数非登陆型台风开始影响时 $-V_T^U$ 远大于 0,为 40~120,说明其暖心结构仍较为深厚,没有变性的趋势,而大部分登陆型台风 $-V_T^U$ 同样大于 0,只是数值在 0~40,相比非登陆型台风小,暖心结构已不深厚,已有变性趋势(图 2b)。

表 1 2000—2015 年登陆型台风开始影响江苏时 B 、 $-V_T^L$ 、 $-V_T^U$ 、中心最大风速、气旋中心与江苏距离要素值

Table 1 B , $-V_T^L$, $-V_T^U$, maximum wind speed near the center, and distance between cyclone center and Jiangsu at the beginning of the impact of landfall typhoons on Jiangsu from 2000 to 2015

台风编号(名称)	B/m	$-V_T^L$	$-V_T^U$	中心最大风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	气旋中心距离/km
0008(杰拉华)	8	13	32	35	492
0010(碧利斯)	14	-7	20	45	672
0102(飞燕)	18	-11	8	35	746
0108(桃芝)	15	2	22	35	843
0212(北冕)	21	-23	22	23	641
0311(环高)	12	-5	42	28	678
0414(云娜)	1	34	87	45	834
0509(麦莎)	7	18	-9	45	791
0515(卡努)	9	17	15	50	765
0709(圣帕)	27	-3	35	40	825
0713(韦帕)	9	3	18	55	812
0807(海鸥)	15	-3	-18	25	616
0808(凤凰)	17	9	22	28	665
0908(莫拉克)	13	8	19	35	708
1010(莫兰蒂)	36	-22	17	18	426
1210(达维)	19	7	-37	35	477
1211(海葵)	8	11	37	33	680
1410(麦德姆)	14	-8	13	25	632
1416(凤凰)	10	-5	21	28	551
1513(苏迪罗)	13	-5	28	38	712

登陆型台风在影响结束时(图 2c), B 值大多在 20~30 m,远大于非登陆型台风的 B 值 10~20 m,而 $-V_T^L$ 值都在 -40~20,说明台风影响结束时大部分水平热力性质已经出现不对称,台风低层暖心结构已经开始破坏,而登陆型台风热力不对称特征明显大于非登陆型台风。图 2d 中,非登陆型台风 $-V_T^U < 0$ 的比例较大,说明上下层均转为冷心结构的台风偏多。而登陆型台风 $-V_T^U$ 多集中在 0 值附近,表明其上下层冷暖心结构并不一致,具有斜压结构的特征。

通过比较 CPS 散点统计特征确定的和台风年鉴所确定的台风变性数量(图 3)可以发现:用 CPS

法分析得出非登陆型台风开始影响时只有 24% 的台风有变性趋势,而在年鉴中最终也认定变性的比例为 22%;登陆型台风有 75% 影响时就开始变性,年鉴中最终认定变性的比例为 60%,表明 CPS 法对影响江苏台风的变性过程确定是适用的。从图 1 显示的台风最终变性的区域可以发现,非登陆型台风最终变性的区域多在日本海域附近,登陆型台风最终变性的区域多在黄海海域。结合年鉴数据、路径(图 1c)以及表 1,可以发现在影响江苏的台风中,最终完全变性的台风多为路径北上、开始变性前强度较强的台风,显然登陆型台风的变性过程是最需要关注的。

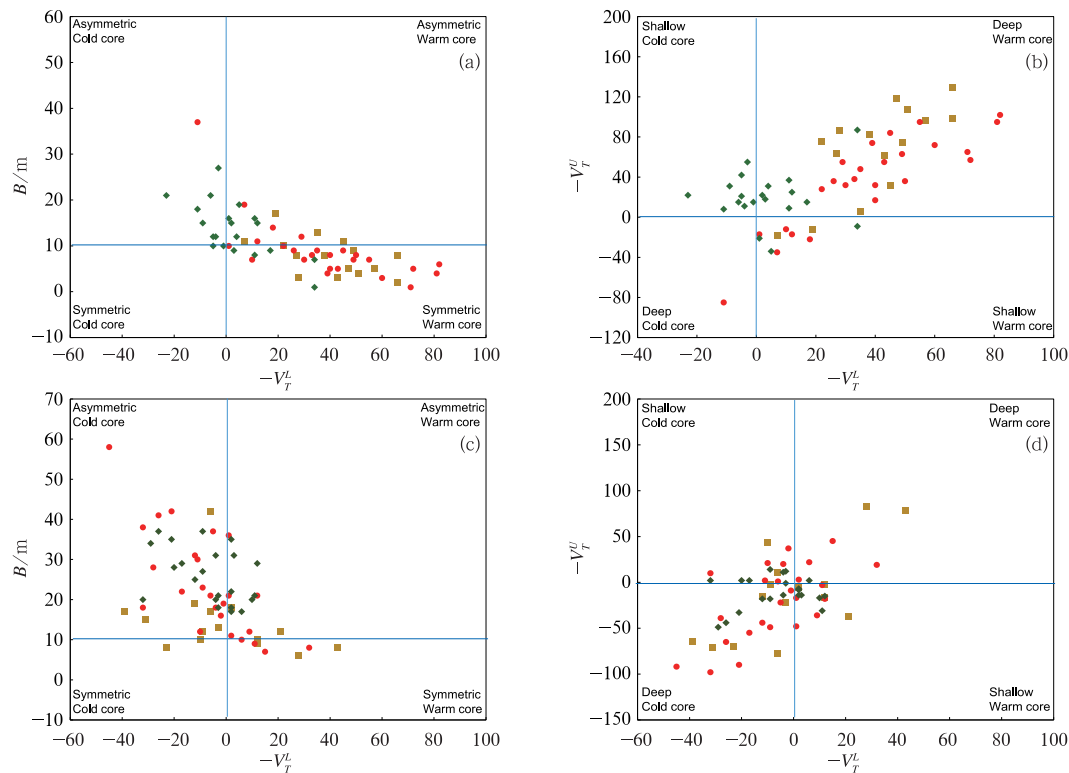


图 2 2000—2015 年影响江苏的台风相空间参数分布

(a)影响开始, B 和 $-V_T^L$, (b)影响开始, $-V_T^L$ 和 $-V_T^U$, (c)影响结束, B 和 $-V_T^L$, (d)影响结束, $-V_T^L$ 和 $-V_T^U$
(黄点、红点、绿点分别代表第一类、第二类和第三类台风)

Fig. 2 Distribution of typhoon phase spatial parameters of typhoons affecting Jiangsu Province from 2000 to 2015
(a) start, B and $-V_T^L$, (b) start, $-V_T^L$ and $-V_T^U$, (c) end, B and $-V_T^L$, (d) end, $-V_T^L$ and $-V_T^U$
(Yellow, red and green dots represent the first, the second and the third types of typhoons, respectively)

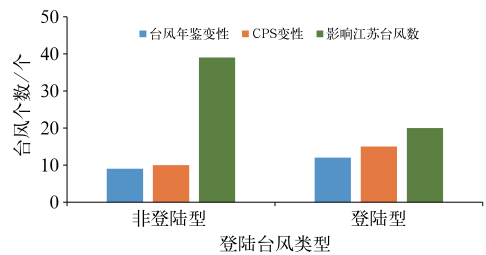


图 3 非登陆型和登陆型台风变性数量统计
Fig. 3 Quantitative statistics of non-landfall and landfall typhoon transition

3 台风海葵(1211)和麦德姆(1410)的相空间特征分析

3.1 相空间轨迹分析

“海葵”(1211)和“麦德姆”(1410)代表了影响江

苏台风路径中最严重的两种登陆型台风类型(图 4)。台风海葵生成后一路西北行直接登陆浙江中北地区,而在安徽南部地区长时间停滞后退消亡;台风麦德姆则在福建中部登陆后一路北上并从江苏东北部出海,移速较快且并未发生停滞。Hart (2003)认为台风生命史可以被描述为相空间轨迹,针对“海葵”和“麦德姆”的演变过程计算了描绘台风演变过程的参数 B 和 $-V_T^L$ 、 $-V_T^U$,每 6 h 记录一次台风相应的相空间参数,并随时间推移形成轨迹图, A 代表开始点, Z 代表结束点(图 5)。

图 5a, 5b 为“海葵”的相空间轨迹。“海葵”2012 年 8 月 7 日 12 时开始影响江苏, 10 日 00 时结束。4—6 日“海葵”都处于热力结构对称的深厚暖心阶段, 7 日 06 时开始 B 值达到临界值 10 m, 但在 8 日 06 时之前参数 $-V_T^L$ 和 $-V_T^U$ 都大于 0, 处于轻微水平热力性质不对称状态, 但高低层仍保持暖心结构。8 日 06 时开始, $-V_T^L$ 开始靠近临界值, 9 日

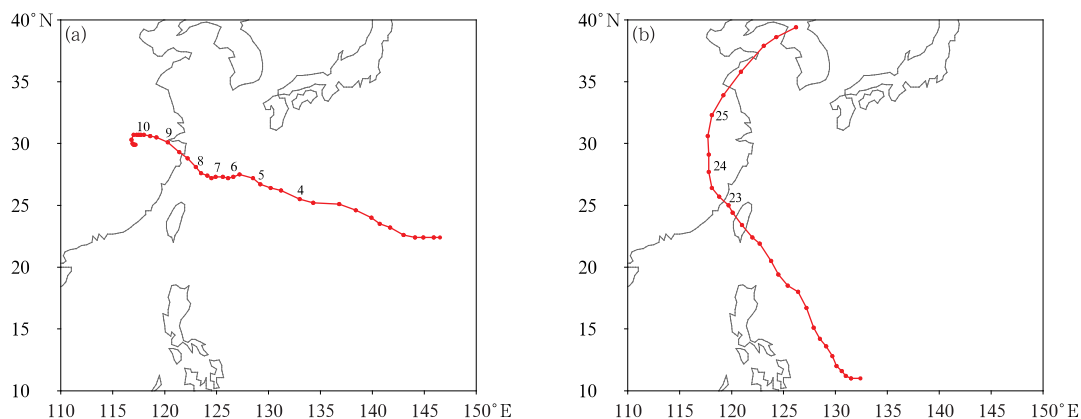


图 4 台风海葵(a)和麦德姆(b)每 6 h 移动路径

Fig. 4 Trajectories of Typhoon Haikui (a) and Typhoon Matmo (b), every 6 hours

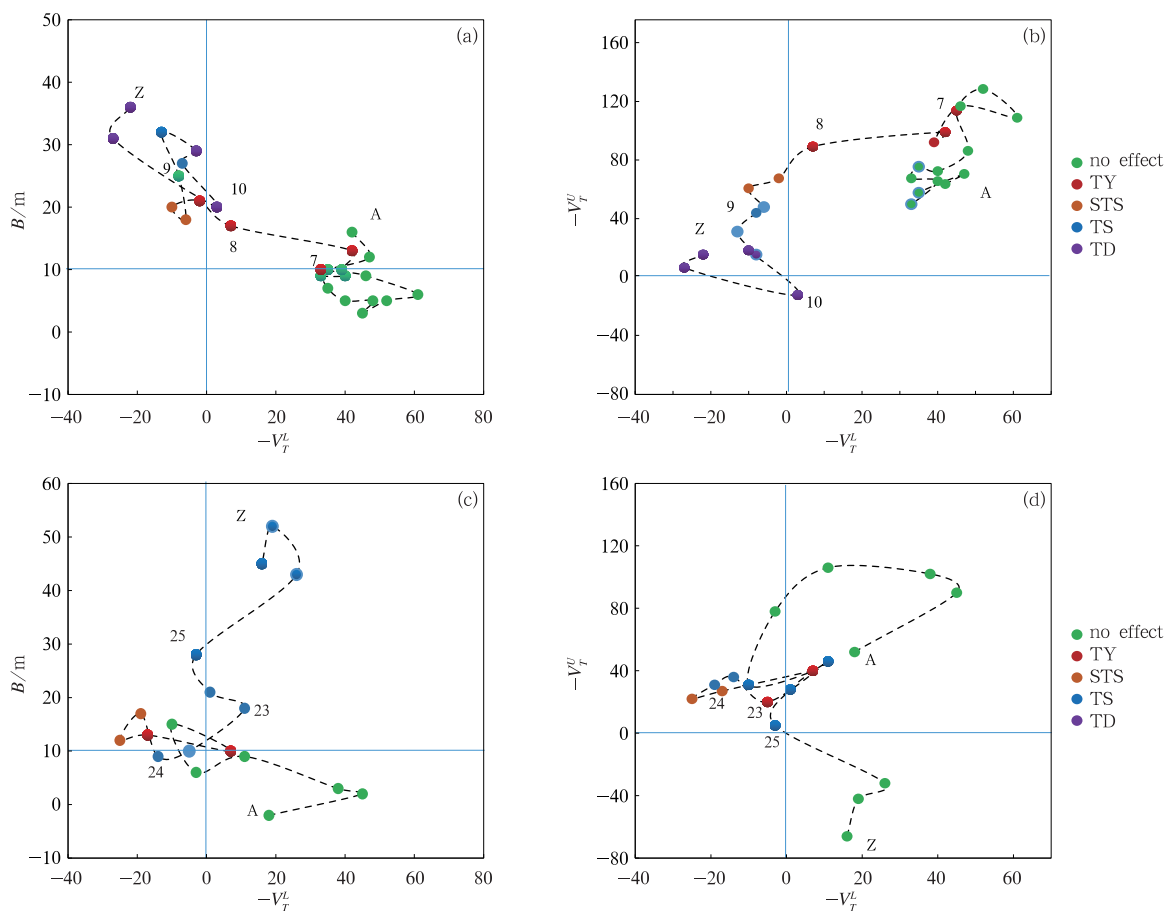


图 5 台风海葵(a,b)和麦德姆(c,d)相空间轨迹

(a,c) B 和 $-V_T^L$, (b,d) $-V_T^U$ 和 $-V_T^L$ Fig. 5 Trajectories of CPS B and $-V_T^L$ (a, c), $-V_T^U$ and $-V_T^L$ (b, d) of Typhoon Haikui (a, b) and Typhoon Matmo (c, d)

00 时后稳定处于负值阶段, $-V_T^U$ 仍处于正值但逐渐减小, 并且 B 参数在 9 日 12 时后迅速增大, 参数达到 20 m 以上, 水平热力性质不对称度加剧, 垂直

结构也由深厚的暖心结构逐渐变为浅薄的冷心结构(上暖下冷)。以上结果表明, “海葵”影响江苏后 12 h 即有明显变性的趋势。

图 5c, 5d 是“麦德姆”的相空间轨迹, 与“海葵”不同, “麦德姆”2014 年 7 月 23 日 06 时影响开始时 B 值大于 10 m, 且 $-V_T^L$ 值在 0 附近, 台风深厚的暖心结构就已经开始趋于破坏。24 日 06—18 时为台风北上影响江苏的主要时间段, $-V_T^L$ 在该时间段内仍然在正负值之间摆动, 但 B 值维持少变, $-V_T^U$ 始终大于 0, 表明其变性的趋势较缓。25 日 06 时以后“麦德姆”逐渐移出江苏, 此时 B 值迅速增大, $-V_T^U$ 变成负值, $-V_T^L$ 维持, 变性特征明显。以上变化说明, 在“麦德姆”影响江苏期间, 水平热力性质也出现了明显的不对称, 但高低层暖心减弱趋势较缓, 从江苏东北部出海后才最终变性, 整体并不像“海葵”那样有稳定的变性过程。

3.2 热力结构和相空间参数分析

为了具体反映台风变性过程中的相空间参数和热力结构关系, 图 6 给出了“海葵”和“麦德姆”的台风中心附近纬向温度距平垂直剖面演变。图 6a 显示“海葵”在 7 日 12 时高低层有着完整的暖心结构, 高低层暖心中心分别在 200 和 900 hPa 附近, 温度距平都达到 4°C , 但是西侧低层有明显的温度负距平区域往台风中心区域挤压, 8 日 12 时(图 6c) 900 hPa 以下负距平进入原低层暖心结构区, 同时高层暖心维持, 高度从 200 hPa 下降到 300 hPa 附近。这与“海葵”相空间图上一 V_T^L 逐渐变为负值, 而 $-V_T^U$ 维持正值相一致。9 日 12 时(图 6e) 低层转化为冷心结构, 冷心高度在 700 hPa 以下, 高层暖心明显减弱, 中心温度距平由 4°C 变为 2°C , 高度下降到 400 hPa 附近, 此时 $-V_T^L$ 维持负值, $-V_T^U$ 迅速向临界值 0 靠近。10 日 00 时(图 6g) 低层已经完全处于负距平区域, 高层暖心继续减弱且西北倾斜度加大(王尚宏等, 2018), 表现出明显的热力非对称结构。

与“海葵”不同, “麦德姆”影响时 700 hPa 以下暖心不强(图 6b), 而且台风中心西侧存在明显的负距平, 600~300 hPa 为 2°C 正距平, 与“麦德姆”相空间图上一 V_T^L 为负值、 $-V_T^U$ 维持正值相一致, 但是高层温度距平比“海葵”要弱。24 日 12—18 时(图 6d、6f) 低层的负距平不断减小而高层的正距平范围和高度维持, 强度减小。25 日 00 时(图 6h) 以后台风低层负距平区域仍然不明显, 高层正距平范围缩小。

分析表明热力结构转变过程和 CPS 参数变化

过程是一致的, 但“海葵”和“麦德姆”影响江苏时段内两者变化不同。“海葵”开始影响时, 台风上下层皆为暖心结构, CPS 参数特征表现为 B 值在 10 m 附近, $-V_T^L$ 和 $-V_T^U$ 皆为正值; 而后下层逐渐变为冷心结构, 上层暖心减弱, B 值维持增大趋势, $-V_T^L$ 值由正变负, $-V_T^U$ 值逐步减小为负值。“麦德姆”开始影响时, 台风为“上暖下冷”的结构, B 值较“海葵”略大, $-V_T^L$ 为负值, $-V_T^U$ 为正值, 但比“海葵”的 $-V_T^U$ 值小, 影响结束时台风仍维持“上暖下冷”的结构, B 值显著增大, $-V_T^L$ 维持负值, $-V_T^U$ 值为变化缓慢, 25 日后才变为负值。

3.3 相空间参数和环流特征分析

图 7 和图 8 分别给出了两个台风中心附近的水平风矢量、相当位温、雷达反射率因子(>20 dBZ)。“海葵”有两次强降水过程, 第一波强降水在 8 日 00 时至 9 日 12 时, 强降水回波主要在台风环流北侧, 与 500 hPa 相当位温暖舌高能区域相契合, 台风西侧相当位温低于 335 K 的较强能量锋区距离较远, 此为典型的台风本体降水(图 7a₁ 和 7b₁)。此时 CPS 参数都显示其上下层皆为暖心结构, $-V_T^U$ 值为 80~120, $-V_T^L$ 值为 0~20。9 日 12 时西侧的能量锋区明显减弱, 台风对称性较 8 日 12 时变差, 500 hPa 台风中心区域相当位温值维持, 但 850 hPa 相当位温值减弱较快, 降水回波有所减弱, 但仍维持在台风内部环流附近(图 7a₂ 和 7b₂)。CPS 参数显示 $-V_T^L$ 明显减小, $-V_T^U$ 减小较为平缓(仍在 80 附近), 此时台风已有变性的趋势; 10 日 00 时前后, 鲁南、苏北 500 hPa 有很明显的能量锋区迅速南下并且与台风北部的能量密集区叠加, 在离台风中心约 400 km 区域产生了强烈的降水回波(图 7a₃ 和 7b₃), 出现第二波强降水。

大气中温压场结构中, 两个等压面之间的厚度与其间的平均温度成正比, 等平均温度线即等厚度线。分析第二波强降水的相空间参数, 可见 $-V_T^L$ 和 $-V_T^U$ 值明显减小, $-V_T^U$ 减小较 $-V_T^L$ 缓慢, 表明低层平均温度减小, 有冷平流, B 值迅速增大, 台风两侧厚度增大, 等平均温度线差异大, 台风转为斜压结构而变性。西风带冷空气南下与台风结合过程中, 降水强度和范围都发生明显变化(唐明晖等, 2017), 陈联寿等(2002)认为强降水一般出现在西到西北行台风移动方向的东北象限。

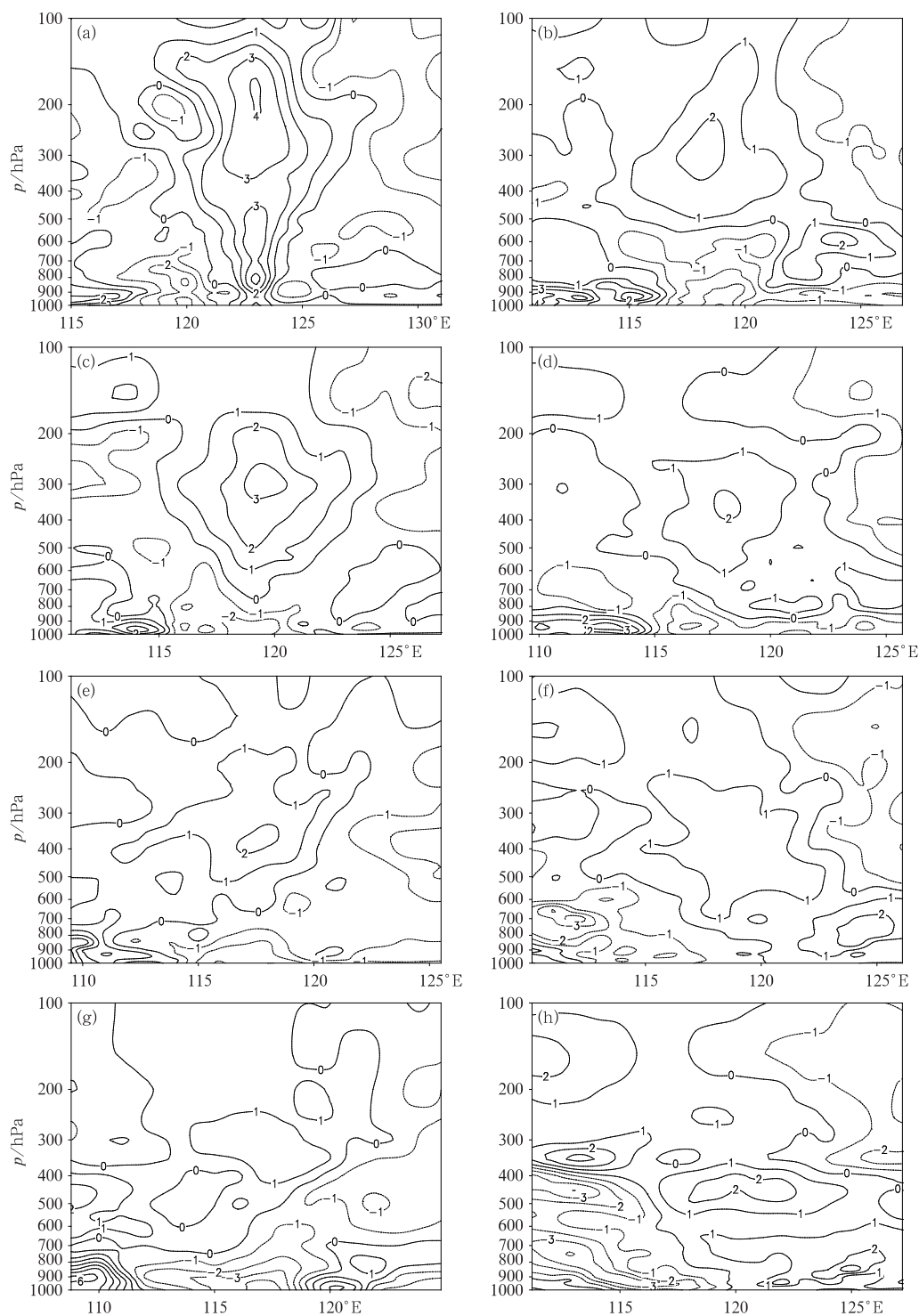


图 6 2012 年 8 月“海葵”(a,c,e,g)和 2014 年 7 月“麦德姆”(b,d,f,h)

台风中心附近纬向温度距平垂直剖面(单位:°C)

(a)7 日 12 时,(c)8 日 12 时,(e)9 日 12 时,(g)10 日 00 时,(b)23 日 12 时,
(d)24 日 12 时,(f)24 日 18 时,(h)25 日 00 时

Fig. 6 Vertical profiles of zonal temperature anomalies near the centers of Typhoon Haikui in August 2012 and Typhoon Matmo in July 2014 (unit:°C)

(a) 1200 UTC 7, (c) 1200 UTC 8, (e) 1200 UTC 9, (g) 0000 UTC 10, (b) 1200 UTC 23,
(d) 1200 UTC 24, (f) 1800 UTC 24, (h) 0000 UTC 25

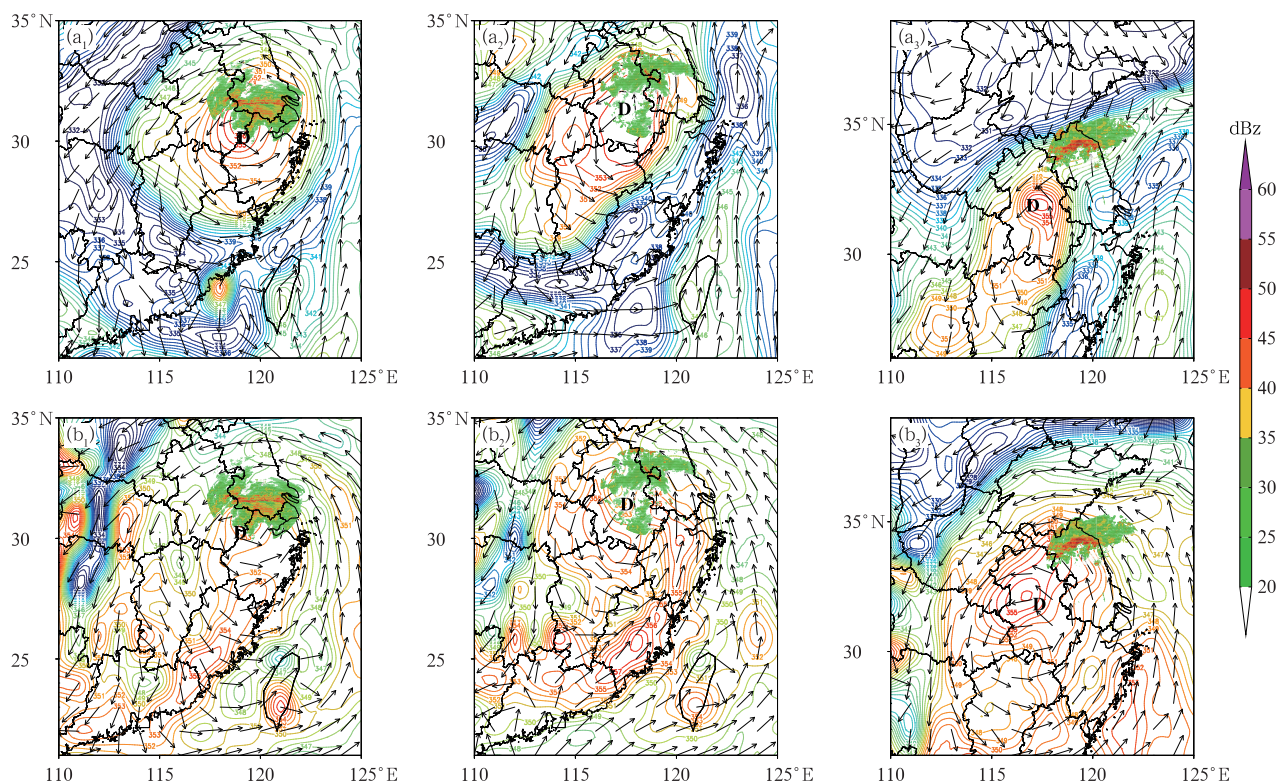


图7 2012年8月(a₁, b₁)8日12时, (a₂, b₂)9日12时, (a₃, b₃)10日00时“海葵”台风环流附近水平风矢量(箭头)、相当位温(等值线, 单位: K)、雷达反射率因子(>20 dBz, 阴影)
(a)500 hPa, (b)850 hPa
(图中D为台风中心位置, 下同)

Fig. 7 The 500 hPa (a) and 850 hPa (b) horizontal wind vectors (arrow), equivalent temperature (contour, unit: K) and radar reflectivity factor (>20 dBz, shadow) near Typhoon Haikui at 1200 UTC 8 (a₁, b₁), 1200 UTC 9 (a₂, b₂), and 0000 UTC 10 (a₃, b₃) August 2012
(D is the central location of typhoon, the same below)

“麦德姆”24日12时至25日00时影响江苏, 时间较短。24日12时其降水回波分布和850 hPa高能区契合度较好, 高能区中心达到360 K, 在其西南方向有340 K的低值中心靠近(图8a₁, 8b₁)。24日18时, 850 hPa高能区明显减弱, 而500 hPa高能区有所增强, 降水回波契合于500 hPa(图8a₂, 8b₂)。500 hPa台风西北方向的能量锋区离台风较远, 降水区一直维持一定的强度跟随台风的高能区移动(图8a₃, 8b₃)。

对应CPS参数, 影响江苏期间“麦德姆”的 $-V_T^L$ 和 $-V_T^U$ 变化不如“海葵”明显, B 值变化小, 台风斜压结构不明显, 造成的降水为台风本体降水且主要位于台风周边。“麦德姆”从江苏东北部出海后 $-V_T^U$ 才变为负值而最终变性。

4 结 论

本文利用NCEP FNL $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料、江苏省地面自动站资料以及长三角地区新一代天气雷达资料, 使用CPS法对2000—2015年影响江苏台风的变性特征进行了分类统计, 并进一步分析“海葵”和“麦德姆”台风相空间参数轨迹及与热力结构和环流特征的关系, 得出以下结论。

(1) CPS法适用于影响江苏台风的变性过程。对比2000—2015年CPS法所定义的变性台风与台风年鉴确定的变性台风, 用CPS法分析得出影响江苏的非登陆型台风开始时只有24%的台风有变性趋势, 而在年鉴中最终也认定变性的比例也为22%; 而登陆型台风有75%影响时就有变性趋势,

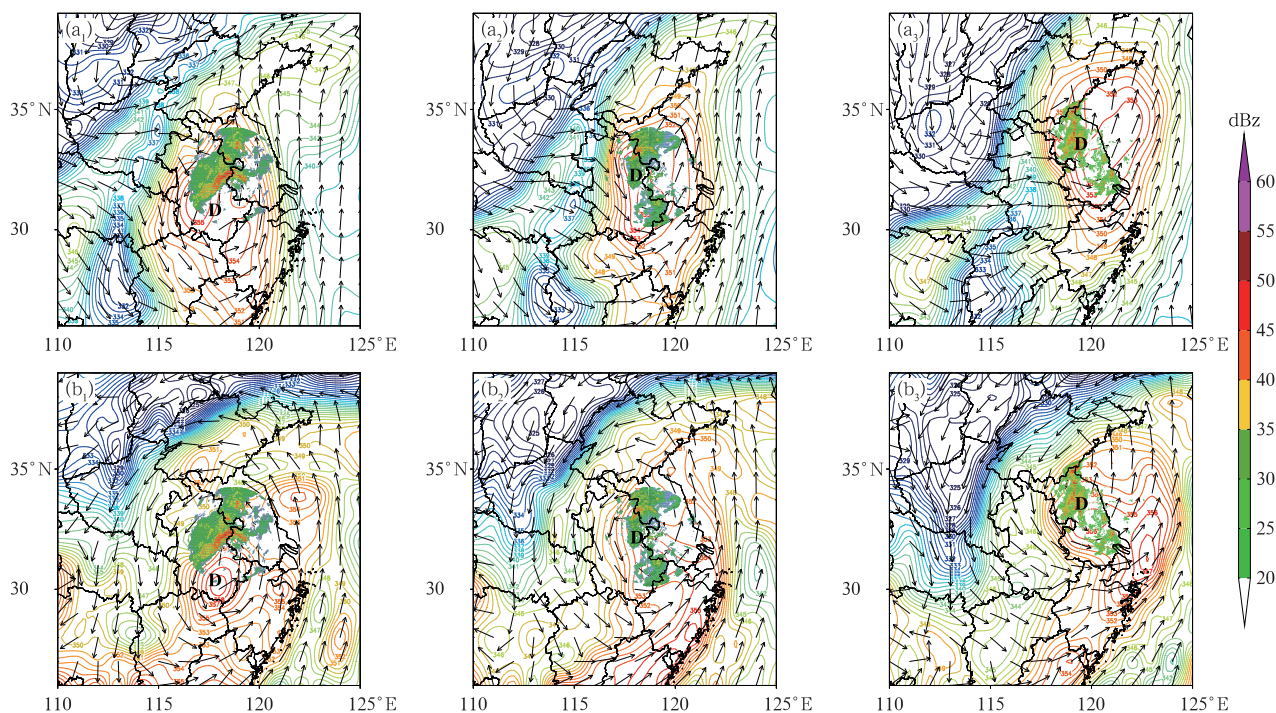


图 8 2014 年 7 月 (a₁, b₁) 24 日 12 时, (a₂, b₂) 24 日 18 时, (a₃, b₃) 25 日 00 时“麦德姆”台风环流附近水平风矢量(箭头)、相当位温(等值线, 单位: K)、雷达反射率因子(>20 dBz, 阴影)
(a) 500 hPa, (b) 850 hPa

Fig. 8 The 500 hPa (a) and 850 hPa (b) horizontal wind vectors (arrow), equivalent temperature (contour, unit: K) and radar reflectivity factor (>20 dBz, shadow) near Typhoon Matmo at 1200 UTC 24 (a₁, b₁), 1800 UTC 24 (a₂, b₂), 0000 UTC 25 (a₃, b₃) July 2014

年鉴中最终认定变性的比例也达到 60%。

(2) 非登陆型(第一、二类)台风开始影响江苏时, 大多未开始发生变性, 而绝大多数登陆型台风(第三类)开始影响江苏时已经有变性的趋势, 而最终完全变性的多为登陆北上、变性前强度较强的台风。

(3) 个例分析表明 CPS 参数轨迹能够很好地对应垂直热力结构所反映的变性过程。“海葵”开始影响江苏时台风上下层皆为暖心结构, 而后下层逐渐变为冷心结构, 上层暖心减弱但到影响结束时未变为冷心, 而“麦德姆”影响期间一直维持“上暖下冷”的结构。

(4) CPS 参数演变与台风降水的落区和强度有一定关联。“海葵”的 CPS 参数变化明显, 其降水范围和强度变化较大; “麦德姆”的 CPS 参数变化较小, 其降水基本位于台风本体周边。

参考文献

曹晓岗, 王慧, 2016. “8·23—24”上海远距离台风大暴雨影响分析

- [J]. 气象, 42(10): 1184-1196. Cao X G, Wang H, 2016. Analysis on a tropical cyclone remote rain event in Shanghai in 23—24 August 2015[J]. Meteor Mon, 42(10): 1184-1196(in Chinese).
- 陈联寿, 徐祥德, 罗哲贤, 等, 2002. 热带气旋台风动力学引论[M]. 北京: 气象出版社: 155-178. Chen L S, Xu X D, Luo Z X, et al, 2002. Introduction to Tropical Cyclone Dynamics[M]. Beijing: China Meteorological Press: 155-178(in Chinese).
- 郭蓉, 雷小途, 郭品文, 2011. “相空间”方法判断西北太平洋热带气旋变性适用性研究[J]. 热带气象学报, 27(2): 257-263. Guo R, Lei X T, Guo P W, 2011. A study on the criterion of extratropical transition of western North Pacific tropical cyclones[J]. J Trop Meteor, 27(2): 257-263(in Chinese).
- 韩桂荣, 何金海, 樊永富, 等, 2005. 变形场锋生对 0108 登陆台风温带变性和暴雨形成作用的诊断分析[J]. 气象学报, 63(4): 468-476. Han G R, He J H, Fan Y F, et al, 2005. The transfiguration frontogenesis analysis on 0108 landfall typhoon extratropical transition and heavy rain structure[J]. Acta Meteor Sin, 63(4): 468-476(in Chinese).
- 黄蔚薇, 董静舒, 王洁, 等, 2015. 飓风“桑迪”温带变性过程特征分析[J]. 气象与环境学报, 31(5): 53-62. Huang W W, Dong J S, Wang J, et al, 2015. Characteristics of extratropical transition of Hurricane Sandy[J]. J Meteor Environ, 31(5): 53-62(in Chinese).

- 李英,陈联寿,雷小途,2013. Winnie(9711)台风变性加强过程中的降水变化研究[J]. 大气科学, 37(3): 623-633. Li Y, Chen L S, Lei X T, 2013. Study on rainfall variation associated with Typhoon Winnie (9711) during its extratropical transition process[J]. Chin J Atmos Sci, 37(3): 623-633(in Chinese).
- 梁红丽,程正泉,2017. 2014年两次相似路径影响云南台风降水差异成因分析[J]. 气象, 43(11): 1339-1353. Liang H L, Cheng Z Q, 2017. Cause analysis of precipitation difference between two typhoons influencing Yunnan along similar tracks in 2014[J]. Meteor Mon, 43(11): 1339-1353(in Chinese).
- 钱燕珍,高栓柱,黄思源,等,2013. 强台风海葵登陆前后强度变化的观测分析[J]. 气象, 39(10): 1265-1274. Qian Y Z, Gao S Z, Huang S Y, et al, 2013. Analysis on intensity variation of Haikui before and after its landing[J]. Meteor Mon, 39(10): 1265-1274(in Chinese).
- 宋金杰,王元,2010. 西北太平洋变性热带气旋的若干特征[J]. 南京大学学报(自然科学), 46(3): 328-336. Song J J, Wang Y, 2010. Some characteristics on extratropical transition of tropical cyclones over the western North Pacific[J]. J Nanjing Univ (Nat Sci), 46(3): 328-336(in Chinese).
- 孙泓川,魏建苏,李超,2015. 气旋客观判别方法在两次江淮气旋过程中的应用[J]. 大气科学学报, 38(1): 46-54. Sun H C, Wei J S, Li C, 2015. Application of an objective discriminating method in the processes of two Jiang-Huai cyclones[J]. Trans Atmos Sci, 38(1): 46-54(in Chinese).
- 唐明晖,姚秀萍,王强,等,2017. 不同强度台风相伴随的内陆台前飑线对比分析[J]. 气象, 43(8): 912-923. Tang M H, Yao X P, Wang Q, et al, 2017. Contrastive analysis of inland pre-TC squall line accompanied by typhoons with different intensities[J]. Meteor Mon, 43(8): 912-923(in Chinese).
- 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. Wang S H, Tang J, Lei X T, 2018. Evolution of warm-core structure in upper level of land-falling typhoons[J]. Meteor Mon, 44(5): 612-620(in Chinese).
- 危国飞,朱佩君,江佳,2014. 西北太平洋热带气旋变性过程结构演变及其环境分析[J]. 热带气象学报, 30(3): 473-482. Wei G F, Zhu P J, Jiang J, 2014. Analysis of structure evolution and environmental conditions of tropical cyclones over the western North Pacific during extratropical transition[J]. J Trop Meteor, 30(3): 473-482(in Chinese).
- 徐祥德,陈联寿,解以扬,等,1998. 环境场大尺度锋面系统与变性台风结构特征及其暴雨的形成[J]. 大气科学, 22(5): 744-752. Xu X D, Chen L S, Xie Y Y, et al, 1998. Typhoon transition and its impact on heavy rain[J]. Sci Atmos Sin, 22(5): 744-752(in Chinese).
- 许爱华,陈涛,朱光宇,等,2006. “泰利”台风低压大暴雨过程分析和数值模拟试验[J]. 气象与减灾研究, 29(2): 25-31. Xu A H, Chen T, Zhu G Y, et al, 2006. Strong precipitation analysis and numerical simulation of Typhoon “Telim” depression[J]. Meteor Dis Reduct Res, 29(2): 25-31(in Chinese).
- 张雪蓉,陈联寿,濮梅娟,等,2013. 登陆台风变性过程的物理机制分析[J]. 气象科学, 33(6): 685-692. Zhang X R, Chen L S, Pu M J, et al, 2013. Physical mechanism of typhoon extratropical transition[J]. J Meteor Sci, 33(6): 685-692(in Chinese).
- 张迎新,张守保,王福侠,2008. 热带气旋变性过程客观判别方法在“海马”变性过程中的应用[J]. 热带气象学报, 24(4): 341-348. Zhang Y X, Zhang S B, Wang F X, 2008. Application of an objective discriminating method in the evolution of tropical cyclone “Haima” during extratropical transition[J]. J Trop Meteor, 24(4): 341-348(in Chinese).
- 郑艳,程守长,蔡亲波,等,2018. 台风鲸鱼(1508)路径和降水业务预报偏差原因分析[J]. 气象, 44(1): 170-179. Zheng Y, Cheng S C, Cai Q B, et al, 2018. Analysis on the forecast deviation of Typhoon Kujira(1508) in track and rainfall distribution[J]. Meteor Mon, 44(1): 170-179(in Chinese).
- 中国气象局,2000—2015,热带气旋年鉴[Z]. 北京:气象出版社. China Meteorological Administration, 2000—2015. Yearbook of Tropical Cyclone [Z]. Beijing: Meteorological Press (in Chinese).
- Demirci O, Tyo J S, Ritchie E A, 2007. Spatial and spatio-temporal projection pursuit techniques to predict the extratropical transition of tropical cyclones[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 45(2): 418-425.
- Evans J L, Hart R E, 2003. Objective indicators of the life cycle evolution of extratropical transition for Atlantic tropical cyclones [J]. Mon Wea Rev, 131(5): 909-925.
- Harr P A, Elsberry R L, 2000. Extratropical transition of tropical cyclones over the western North Pacific. Part I: Evolution of structural characteristics during the transition process[J]. Mon Wea Rev, 128(8): 2613-2633.
- Hart R E, 2003. A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry[J]. Mon Wea Rev, 131: 585-616.
- Hirschberg P A, Fritsch J M, 1993. On understanding height tendency[J]. Mon Wea Rev, 121(9): 2646-2661.
- Klein P M, Harr P A, Elsberry R L, 2002. Extratropical transition of western North Pacific tropical cyclones; midlatitude and tropical cyclone contributions to reintensification[J]. Mon Wea Rev, 130(9): 2240-2259.
- Sekioka M, 1956. A hypothesis on complex of tropical and extratropical cyclones for typhoon in the middle latitudes. I synoptic structure of typhoon marie passing over the Japan Sea[J]. J Meteor Soc Japan, 34(5): 276-287.