

许变, 崔晓鹏, 高守亭, 等. 2015. 台风“鲇鱼”(1013) 路径突变过程的成因分析[J]. 大气科学学报, 38(5): 658-669. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20130301001.

Xu Luan, Cui Xiao-peng, Gao Shou-ting et al. 2015. Cause analysis of sudden track change of Typhoon Megi(1013) [J]. Trans Atmos Sci 38(5): 658-669. (in Chinese).

台风“鲇鱼”(1013) 路径突变过程的成因分析

许变^{1 2 3}, 崔晓鹏², 高守亭², 黄永杰²

(1. 气象灾害教育部重点实验室(南京信息工程大学) 江苏 南京 210044;

2. 中国科学院 大气物理研究所 云降水物理与强风暴实验室 北京 100029; 3. 浙江省气象科学研究所 浙江 杭州 310008)

摘要: 利用 NCEP 提供的 GFS(Global Forecast System) 再分析资料, 对 2010 年西北太平洋最强台风“鲇鱼”(1013) 路径突变的成因开展诊断分析, 研究其影响系统、引导气流的演变特征等, 并运用 CPS(Cyclone Phase Space) 方法对其生命史中的热力结构演变过程进行定量描述, 重点分析路径突变前后各因子的变化。结果表明, “鲇鱼”移入南海后, 冷空气南侵导致其热力结构发生变化, 台风环流右侧较暖, 此时引导气流微弱, “趋暖”运动占主导, 首先引起路径向右偏转, 随后引导气流转为西南气流并逐渐增强, 在二者共同作用下, “鲇鱼”路径持续右转, 逐渐向东北方向移动, 完成路径突变。

关键词: 台风“鲇鱼”; 路径突变; 引导气流; 热力结构; 诊断分析

文章编号: 1674-7097(2015)05-0658-12 中图分类号: P444 文献标志码: A

doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20130301001

Cause analysis of sudden track change of Typhoon Megi(1013)

XU Luan^{1 2 3}, CUI Xiao-peng², GAO Shou-ting², HUANG Yong-jie²

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster(NUIST), Ministry of Education, Nanjing 210044, China;

2. Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Zhejiang Institute of Meteorological Sciences, Hangzhou 310008, China)

Abstract: A diagnostic study is carried out on the causes of sudden track change of Typhoon Megi(1013) using the NCEP-GFS(National Centers for Environmental Prediction-Global Forecast System) analysis data. The evolution characteristics of circulation systems and steering flow are analyzed and the quantitative description for the thermodynamical structure variation during the lifetime of Megi is carried out by means of CPS(Cyclone Phase Space) method focusing on the changes of parameters around the northward shift of the track. Results show that after Megi moves over South China Sea, the cold air intrudes southward, leading to a shift of the thermodynamical structure of Megi, i. e., the right of its motion is warmer than the left. Meanwhile, the steering flow is rather weak. Under this circumstance, the movement toward the warm air area plays a primary part, which leads to rightward shift of motion track of Megi at first. The steering current becomes northeastward and grows stronger subsequently. The combination of the two factors results in a persistent rightward shift of the track. Thus, Megi gradually moves northeastward, and the sudden track change process is completed.

Key words: Typhoon Megi; sudden track change; steering flow; thermodynamical structure; diagnostic analysis

收稿日期: 2013-03-01; 改回日期: 2014-12-31

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2015CB452804); 国家自然科学基金资助项目(41175056); 上海台风研究基金课题(2013ST01); 气象灾害教育部重点实验室(南京信息工程大学) 开放课题(KLME1407); 浙江省科技计划项目(2014C33056); 浙江省气象科技计划项目(2013ZD01)

通信作者: 许变, 博士, 工程师, 研究方向为登陆台风数值模拟和动力诊断, xuluan_new@126.com.

0 引言

热带气旋(Tropical Cyclone,以下简称TC)移动路径、结构、强度等的预报及研究一直以来都是国内外气象学者关注的重点和难点问题(George and Gray,1976; Frank,1977; Chen and Luo,1995a; Black et al.,2002; Wang and Wu,2004; Chan,2005; Gao and Cao,2007; Gao and Zhou,2008; 周海光,2010; 沈新勇等,2012; 赵小平等,2012; 陶丽等,2012; 王伟和余锦华,2013; 周冠博等,2012)。对于TC的预报和预警而言,路径预报是基础。只有在路径预报准确的条件下,才可能对强风、暴雨和风暴潮的发生地点做出准确判断,才能有效地采取趋利避害的措施,减少其带来的损失(伍荣生,2007)。TC结构的变化也是TC研究的最基本的领域之一,结构变化会影响TC强度变化、路径偏折及暴雨落区等(陈联寿和孟智勇,2001)。

国内外学者在TC的运动规律及异常路径成因研究方面做出过许多有意义的工作。大量研究表明,TC路径的变化很大程度上受到大尺度环流背景场的引导(Chan and Gray,1982; Holland,1983; Wu and Wang,2001; Chan,2005)。Chan and Gray(1982)统计了西北太平洋、西大西洋和澳大利亚南太平洋三个海域的TC,按照移动方向和速度、纬度带、强度和范围进行分类,研究了TC路径与不同高度上环境流场的关系,发现对流层中层500~700 hPa、TC中心向外5~7个纬度范围内的大尺度流场与TC运动的相关关系最好。Chen and Luo(1995b)利用准地转正压模式,发现不同尺度涡旋相互作用可以激发出台风结构的非对称变化,进而引起路径的蛇行摆动及台风移速突变等异常现象。Wu et al.(2003)利用分段位涡反演的方法定量地揭示了热带风暴Bopha(2000)路径异常南折的原因: Bopha与同时存在的超强台风Saomai(2000)相互作用,在Saomai环流影响下,产生向南的异常路径。Zeng et al.(2007)统计分析了1981—2003年间西北太平洋热带气旋移动和垂直风切变对其强度的影响,发现绝大多数TC都在转向前达到其生命史中的最大强度,而这段时间内,环境引导气流和垂直风切变都比较弱。Wu et al.(2011)发现台风中心四个纬距范围内、850~300 hPa之间质量权重的整层平均风场(即引导气流)与Morakot(2009)的移动速度有相当高的一致性。李勋等(2010)利用WRF模式获得的高分辨率模拟资料,再现了

南海强台风Chanchu(0601)的强度和异常路径变化过程,并从涡旋罗斯贝波传播角度解释了Chanchu“急翘”转向后环境风垂直切变加大但其强度能够继续维持的现象。

选取研究的个例为2010年第13号超强台风“鲇鱼”,是2010年西北太平洋最强台风(中心附近最低气压895 hPa,最大风速72 m/s),也是1990年以来西北太平洋和南海同期的最强台风。“鲇鱼”具有强度强、路径复杂、登陆时间晚、登陆后减弱速度快、影响大等特点。最显著的特点是在菲律宾登陆并以西偏南路径移入南海后,突然北折,转折角度大于90°,该路径突变的预报难度极大,给业务预报和服务带来巨大挑战。全球各家业务数值模式对台风“鲇鱼”北翘路径的预报均出现偏差,与美日综合预报误差相比,中央气象台的预报误差较大,路径转折存在滞后现象(许映龙,2011)。主要利用每日四次的NCEP-GFS(National Centers for Environmental Prediction-Global Forecast System,NCEP-GFS)分析场资料和中国气象局上海台风所的热带气旋最佳路径资料对台风“鲇鱼”开展较为全面的观测分析,探究“鲇鱼”路径突变成因。

1 台风“鲇鱼”路径变化不同阶段的识别

以某时刻台风中心位置为起点,将从该点指向下一时刻台风中心位置的矢量定义为该时刻台风运动方向。根据本个例的具体情况,取向西为正方向(即 x 轴正方向指向西),台风运动方向矢量与 x 轴正方向的夹角定义为运动方向角。台风路径向北偏转(顺转)时,运动方向角定义为正值(图2中 β 和 γ),反之为负值(图2中 α)。当正值超过90°时,表示台风运动方向已经转向北偏东。图2中A、B、C、D代表先后四个时刻的台风中心位置,灰色、白色、黑色箭头代表A、B、C三个时刻台风运动方向矢量 AB 、 BC 、 CD ,运动方向矢量与 x 轴正方向的夹角为运动方向角,分别为 α 、 β 、 γ 。利用运动方向角可以直接判断台风路径在何时、向何方向偏转。相邻两个时刻的运动方向矢量的夹角定义为转向角,图2中的转向角依次为 θ (AB 和 BC 的夹角)、 μ (BC 和 CD 的夹角)。相邻两个时刻台风运动方向矢量随着时间顺时针方向旋转时,转向角为正值(如图2中 θ),反之为负值(如图2中 μ)。若转向角维持正值(或负值),则表示台风运动方向持续顺转(或逆转)。

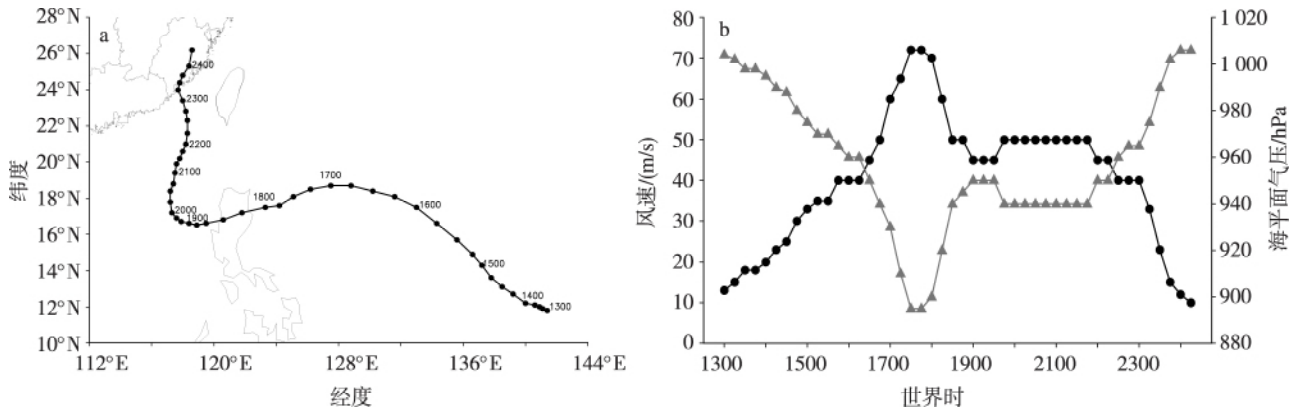


图 1 1013 号超强台风“鲇鱼”的路径 (a) 和强度 (b) (图 a 中黑色圆点表示逐 6 h 的台风中心位置; 图 b 中黑线和灰线分别为逐 6 h 的台风中心附近最大风速 (单位: m/s) 和最低海平面气压 (单位: hPa) 的演变曲线, 时间为 10 月 13 日 00 时—24 日 06 时 (世界时, 下同))

Fig. 1 (a) Track and (b) intensity of Super Typhoon Megi (1013) (The black dots in (a) indicate typhoon centers with 6-hr interval. The evolution for the maximum wind speed (units: m/s) and minimum sea level pressure (units: hPa) in vicinity of typhoon centers with 6-hr interval are shown as the black and gray lines in (b), respectively. The time range is from 0000 UTC 13 to 0600 UTC 24 October 2010)

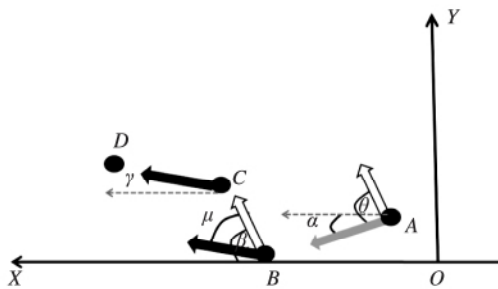


图 2 台风运动方向角 (α, β, γ) 和转向角 (θ, μ) 的示意图
Fig. 2 The sketch map of direction angles (α, β, γ) and steering angles (θ, μ) of typhoon motion

根据以上定义和上海台风所热带气旋最佳路径资料, 计算得到台风“鲇鱼”逐 6 h 的运动方向角和转向角 (图 3)。13 日 00 时至 16 日 18 时, “鲇鱼”运动方向角维持相对较小的正值, 向西偏北方向运动, 继而转为负值, 向西偏南方向运动。19 日 00 时运动方向角再次转为正值, 并持续增大到 90° 以上, 之后以偏北方向运动为主, 该角度持续增大 (即转向角维持非负值) 的时段为 18 日 12 时至 20 日 12 时, 运动方向由 -18.4° 顺转为 116.6° , 转向过程总的角度差达到 135° 。

从运动方向角的演变曲线可以清晰地识别出台风“鲇鱼”生命史中的五次路径转折过程, 这五次转折将其路径划分为六个阶段: A 西北行阶段 (13 日 00 时—16 日 18 时); B 首次登陆前的西南行阶段 (16 日 18 时—18 日 18 时); C 进入南海后的北翘阶段 (19 日 00 时—20 日 06 时, 也是“鲇鱼”最显著的转向阶段); D 东北行阶段 (20 日 06 时—22 日 06

时); E 二次登陆前的西北行阶段 (22 日 06 时—23 日 00 时); F 二次登陆后的东北行阶段 (23 日 06 时—24 日 06 时)。若相邻两个阶段有重合的时间点, 则表示该时刻台风运动方向为正西 (0°) 或正北 (90°)。转向角的大小可以较为直观地反映台风路径转折速率。“鲇鱼”处于 A 和 B 阶段时, 大部分时间移速较快, 峰值接近 8 m/s , 北翘发生之前, 移速迅速降低, 之后一直维持较慢的移动速度 (普遍介于 $2 \sim 3.5 \text{ m/s}$ 之间) 直至编号结束, 而转向角明显增大, 即路径转折较快, 在 30 h 之内便由西行转为北行 (图 3), “鲇鱼”路径北翘是其生命史中最重要的转折阶段, 不仅路径发生突变, 而且还伴有移速的显著变化, 预报难度大。

2 路径转折成因

大型气压场的分布及与此相应的大范围深厚的基本气流是台风路径预报的重要依据 (陈联寿和丁一汇, 1979), 下面分析台风“鲇鱼”路径转折的影响系统及引导气流的演变。

2.1 影响系统

台风“鲇鱼”编号初期的西北行阶段 (A 阶段), 其北侧为强大的副高带, 与陆地高压连为一体, 此时段“鲇鱼”尺度小, 强度弱, 沿着高压带外围向偏西方向运动; 中高纬度有较强的槽脊存在, 经向分量较大 (图 4a)。随着台风不断增强北进、西风槽的加强东移、南压和副高减弱东退, 台风运动的经向分量也逐渐减小 (图 1a、3)。16 日 18 时前后, 台风的经向

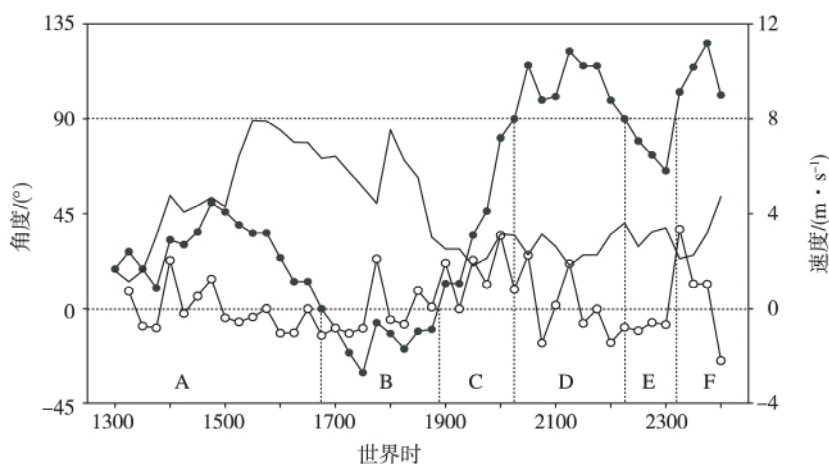


图3 台风“鲇鱼”的方向角(实心圆线;单位: $(^{\circ})$)和转向角(空心圆线;单位: $(^{\circ})/(6\text{ h})$)及逐6 h 台风平均移速(实线;单位: m/s) 随时间的演变(图中垂直虚线及A—F标识出台风“鲇鱼”路径的6个阶段)

Fig. 3 Temporal variations of direction angle(line with solid dots; units: $(^{\circ})$), steering angle (line with hollow dots; units: $(^{\circ})/(6\text{ h})$) and 6-hr average moving speed(solid line; units: m/s) of Typhoon Megi(Four vertical dashed lines and A—F indicate the six stages of the typhoon track)

运动分量降为0,移动方向转为西南,进入B阶段(图4b)。17日12时,“鲇鱼”达到生命史中的最强阶段,中心附近海平面气压低至895 hPa,最大风速达72 m/s;中高纬强大的西风槽继续东移,副高主体略有增强,与西风槽和“鲇鱼”发生明显相互作用。18日00时“鲇鱼”略有减弱,并于18日06时前登陆吕宋岛。此时,仍存在明显的东风引导。

18日18时,“鲇鱼”越过吕宋岛,进入南海海域。此时,副高在中高纬度西风槽及其后部浅槽的共同影响下快速东退,对“鲇鱼”的引导作用也迅速减小。台风的强度较登陆前明显变弱,纬向上位于副高与印度洋至中南半岛上空的小高压之间,北侧为短波浅槽。整体上来看,大尺度环境场的气压梯度力较小,引导气流不明显,为典型的弱环境流场。“鲇鱼”移速减慢,移动方向飘忽不定。在当时的业务预报中,预计其将持续西行,而实际情况是由于前期南半球冷空气向北爆发,越赤道气流逐步加强,赤道缓冲带东段北抬(许映龙,2011;曹晓岗等,2012),导致“鲇鱼”外围南风分量的有所增大。19日00时,赤道高压与副高位于“鲇鱼”以东,分列南北方向,副高略为加强西伸,二者趋于连为一体,使得“鲇鱼”在两个高压西侧的偏南气流引导下开始转向,进入C阶段(图4d、e)。此后,“鲇鱼”在副高以及北侧浅槽的共同影响下,向北偏东方向移动,即D阶段。22日,“鲇鱼”北侧存在一弱脊,副高略为增强北进,致使“鲇鱼”路径发生小幅摆动(图4f)

(E阶段)。23日,“鲇鱼”登陆我国福建漳浦,之后迅速减弱消亡(图略)(F阶段)。

综上所述,在“鲇鱼”路径突变前,副热带高压和中高纬度强大的西风槽相互作用,共同主导了此阶段台风“鲇鱼”路径的演变;越赤道气流突然增强、赤道高压与副高合并导致环境引导气流发生突变,促成台风“鲇鱼”路径转向;路径突变后,台风“鲇鱼”在副高和中低纬短波浅槽的共同影响下向偏北方向移动。

2.2 引导气流

大量研究认为,TC移动路径主要受到大尺度环境场的引导气流影响(Chan,2005)。基于此,我们计算了各层的平均风(图5a)以及引导气流随时间的演变(图5b)。选取的区域为距台风中心500 km的圆域。根据图3中定义的转向时间将平均风场同样划分为六个阶段,图5a中用蓝色矩形标出的区域为运动方向角为 0° (或 90°)的时段,计算引导气流的厚度层选取除边界层和流出层以外的对流层主体(850~300 hPa)(Holland,1984)。

“鲇鱼”的转向与引导气流的变化联系密切(图5)。在“鲇鱼”西北行阶段(A阶段),引导气流相对较弱,TC移速较慢。14日00时开始,引导气流逐渐增强,表现为东风和南风分量迅速增大,中低层引导气流与整层引导气流方向较为一致,这个时段内TC以较快的速度(约4 m/s)向西北方向移动,移速与移向均与整层引导气流相一致。对流层高层的平

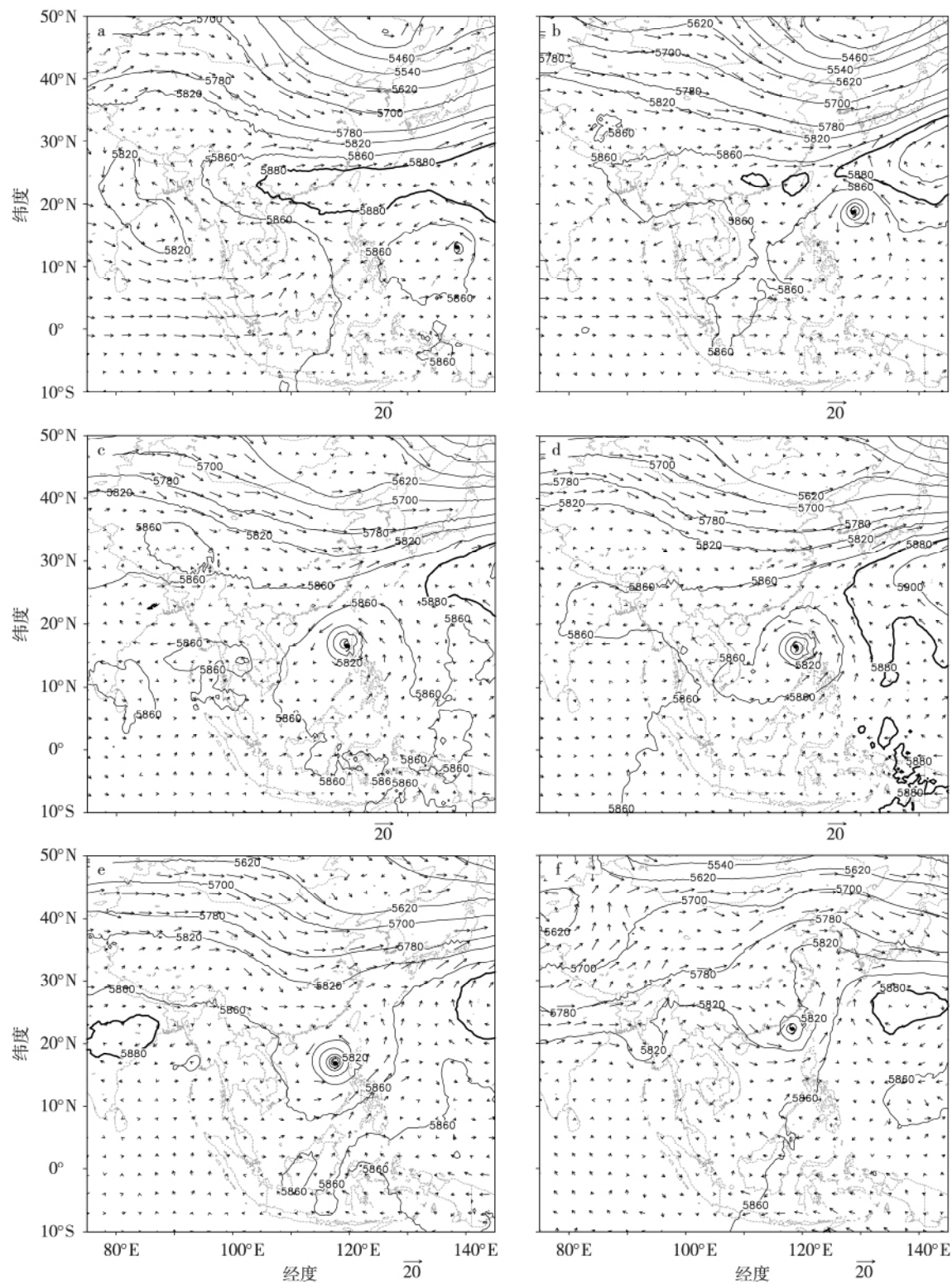


图 4 台风“鲑鱼”生命史中 500 hPa 位势高度场的演变(单位: gpm; 粗线为 5 880 gpm 等位势高度线; 大于 20 m/s 的风矢量未画出) a. 14 日 12 时; b. 16 日 18 时; c. 18 日 18 时; d. 19 日 00 时; e. 19 日 18 时; f. 22 日 12 时
Fig. 4 Evolution of 500 hPa geopotential height field(units: gpm) during the life cycle of Typhoon Megi(The thick lines indicate 5 880 gpm. The wind vectors with wind speed larger than 20 m/s are not shown) a. 1200 UTC 14; b. 1800 UTC 16; c. 1800 UTC 18; d. 0000 UTC 19; e. 1800 UTC 19; f. 1200 UTC 22

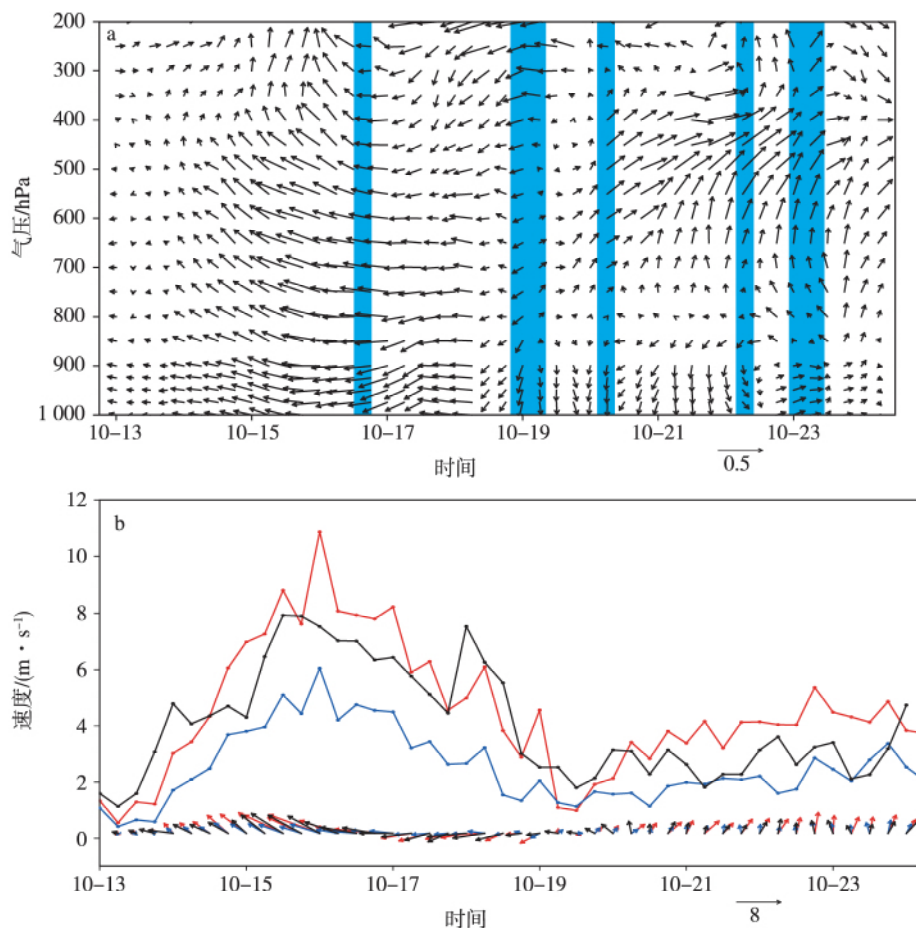


图5 13日00时—24日06时台风“鲇鱼”各层平均风场(a)和引导气流的时间演变(b)(图5a中蓝色矩形区域标识出TC路径发生转向的5个时段;图5b中黑色矢量和黑线分别代表TC逐6h平均运动方向和速度(单位:m/s)红色矢量和红线分别代表对流层整层(850~300 hPa)的引导气流方向和大小(单位:m/s)蓝色矢量和蓝线分别代表对流层低层(800~600 hPa)的引导气流方向和大小(单位:m/s))

Fig. 5 Temporal evolution of (a) average wind for each pressure level and (b) steering flow (b) of Typhoon Megi from 0000 UTC 13 to 0600 UTC 24 October (In (a) the blue strips identify the five time nodes when the track starts a transition. In (b) the black vectors and line indicate the 6-hr average motion direction and speed (units: m/s) the red ones for the steering flow direction and speed (units: m/s) of 850—300 hPa tropospheric layer and the blue ones the same as the red ones but for 800—600 hPa lower layer)

均风为偏南风,纬向分量较弱,与低层平均风存在一定切变。15—16日,引导气流继续增强,TC逐6h平均移速增大到7 m/s。因“鲇鱼”北进受到北侧高压带的阻挡,平均风逐渐转为偏东风。17日06时,引导气流首次转为东北风,其中整层引导气流的风向转变较为明显,而低层引导气流的北风分量较弱,在TC首次登陆前的路径向南偏折过程中未表现出显著的引导作用。

18日,“鲇鱼”登陆并以较快速度越过吕宋岛。进入南海海域后,TC继续向偏西方向移动。此时,

900 hPa以下的对流层低层平均风以偏北风为主导,TC西北侧出现明显冷平流区(图略)。整层及低层引导气流明显减弱且风向摆动较大,TC运动方向矢量与引导气流方向夹角增大,运动速度也随之减慢。19日00时,对流层各层均为偏东北风,“鲇鱼”向偏西南方向运动。06时,对流层中低层(800~600 hPa)的平均风首先转为西南风(图5a),导致该层引导气流和整层引导气流均出现明显的南风分量,对“鲇鱼”的移动产生了向北的引导作用,其运动方向由原来的西南向逐渐转为西北向。6 h后,

整层引导气流和低层引导气流均转为偏西风。又经过约 24 h 的调整,“鲇鱼”纬向速度降为 0,经向速度不断增大,完成路径北翘过程(图 5b)。19 日 18 时开始,中低层及整层引导气流均维持偏西南风(图 5b) 20 日 12 时,“鲇鱼”向东北方向移动。转向后,“鲇鱼”的引导气流略有增强,但由于其东西侧的高压系统及北侧西风槽都较弱,引导气流的增强十分有限。这个阶段内,“鲇鱼”的运动方向和速度与对流层中低层引导气流较为接近(图 5b),可能是由于其强度已明显减弱,气旋性环流厚度随之降低,与之相匹配的引导气流厚度也降低。

从引导气流的分析可知,“鲇鱼”路径突变前后,引导气流明显变化,于 19 日 00—06 时期间,由偏东风转为偏西南风。“鲇鱼”路径突变前,其运动速度和方向与整层引导气流(850~300 hPa)较为一致。“鲇鱼”越过吕宋岛后,对流层中低层(800~600 hPa)首先出现西南气流,这是路径发生突变的重要指示信号,随后,整层引导气流也转为偏西风,“鲇鱼”的转向趋势进一步稳固;引导气流发生变化后,TC 在其影响下,逐渐由向西运动转为向北运动;TC 完成转向后的移向移速与中低层(600~800 hPa)引导气流较为一致。

仔细观察可以发现,19 日 00 时,“鲇鱼”的运动矢量首次出现向北的分量,此后一直维持向北的运动趋势;而引导气流出现南风分量的时刻(19 日 06 时)晚于路径突变的开始时刻,表明引导气流的变化并不是引起“鲇鱼”路径北翘的首要原因,但是引导气流转向的确在“鲇鱼”完成路径突变过程中发挥了重要的作用。由于在弱环境场中,热带气旋的热力结构变化也会导致路径发生变化(陈联寿和孟智勇 2001),下节就进一步从“鲇鱼”路径突变前后热力结构演变的角度展开分析。

3 热力结构演变

台风“鲇鱼”路径突变发生在首次登陆以后,影响系统发生变化,引导气流转向并且引导层降低。Chen and Luo(1995a)指出,当引导气流发生变化,如引导气流由东风转为西风或者引导气流高度降低时,台风结构均会发生变化。下面利用气旋相空间(Cyclone Phase Space, CPS)方法对“鲇鱼”生命史中的热力结构演变、尤其是路径突变前后的热力结构变化进行分析。

3.1 气旋相空间(CPS)方法简介

Hart(2003)在研究 1979—2001 年间北大西洋

气旋时,根据其热力结构差异,提出 CPS 方法,用于分析各类气旋热力结构的发展演变。该方法利用三个参数(B , $-V_T^L$ 和 $-V_T^U$, 其中 V_T 表示热成风, L 表示对流层低层, U 表示对流层高层)来描述气旋的三维热力结构,第一个参数 B 为热力对称性参数,可以反映气旋在对流层低层是否具有热力非对称结构,其表达式为:

$$B = h \left[\frac{(Z_{600 \text{ hPa}} - Z_{900 \text{ hPa}})_R}{(Z_{600 \text{ hPa}} - Z_{900 \text{ hPa}})_L} \right] - \quad (1)$$

Z 为等压面上的位势高度, R 和 L 分别指示气旋运动方向的右侧和左侧,上划线表示取以气旋中心为圆心、500 km 为半径、气旋运动方向做直径划分开的半圆区域的平均。 h 为常数,北半球取 1。为避免地形和边界层的影响,取 900 hPa 为下边界,其上可以认为是典型的自由大气,而 300 hPa 以上由于会受到平流层影响,在 CPS 方法分析中也不予考虑,对流层中 900~600 hPa 与 600~300 hPa 两层大气质量相当,适于进行自由大气中气旋结构的分析。

短时对流运动会引起等压面上温度的波动,因此这里避免直接利用温度场,而是选用区域平均的厚度场来表征气旋的热力性质。经过验证,参数 B 可以将热带气旋和具有类似锋面性质的气旋区分开来,一个成熟热带气旋的 B 值趋近于零,即为热力对称结构。 B 值为较大的正值时,表示北半球(南半球)气旋路径左侧(右侧)为冷空气(暖空气),符合热成风关系。取 $B = 10 \text{ m}$ 为临界值,典型热带气旋的 B 值通常小于 10 m,高于该阈值即说明气旋具有明显的热力非对称结构。

进一步定义:

$$\Delta Z = Z_{\text{MAX}} - Z_{\text{MIN}} \quad (2)$$

代表以气旋中心为圆心、半径 500 km 的圆域内等压面的位势高度扰动。将(2)式中两个极值的位势高度之差定义为 d ,那么 ΔZ 与地转风 V_g 成正比,即

$$\Delta Z = \frac{df |V_g|}{g} \quad (3)$$

其中 f 为科氏参数。而 CPS 方法中表征气旋垂直热力结构的两个参数定义为 ΔZ 在垂直方向上的导数,当 d 取常数时,由(3)可得:

$$-|V_T^L| \propto \frac{\partial(\Delta Z)}{\partial \ln p} \bigg|_{900 \text{ hPa}}^{600 \text{ hPa}}, \quad (4)$$

$$-|V_T^U| \propto \frac{\partial(\Delta Z)}{\partial \ln p} \bigg|_{600 \text{ hPa}}^{300 \text{ hPa}} \quad (5)$$

绝对值符号表示取热成风的模。(4)和(5)式的右

端分别为气旋在对流层低层和高层热力结构的实际判据。高度扰动 ΔZ 随高度的升高而减小时, $\frac{\partial(\Delta Z)}{\partial \ln p} > 0$, 该层为暖心结构; 反之, 为冷心结构。其绝对值大小与暖心(或冷心)的强度成正比。为简便, 用 $-V_T^L$ 和 $-V_T^U$ 来代表这两个判据。典型的具有暖心结构的热带气旋, 热成风参数 $-V_T^L$ 与 $-V_T^U$ 均为正值, 混合型气旋以及处于变性过程中的气旋, 其 $-V_T^L$ 与 $-V_T^U$ 符号可能相反。

3.2 台风“鲇鱼”对称结构及暖心强度演变分析

下面利用 NCEP-GFS 逐 6 h 的分析场资料及 CPS 方法, 定量分析“鲇鱼”的热力结构演变特征和

路径突变期间 CPS 参数的变化特点。

台风“鲇鱼”生命史中经历了五次转向以及两次登陆, 不同时段的影响系统有较大差异, 其热力结构演变也比较复杂(图 6)。热力对称性参数 B 和低层暖心强度参数 $-V_T^L$ 组成的相空间图上(图 6a), 台风“鲇鱼”基本符合典型热带气旋特征: 低层基本维持暖心结构, 多数时段的 B 值均在阈值以内。台风发展增强阶段, 低层暖心由弱变强, 途径岛屿地形时强度大幅减弱, 进入南海海域后又略有增强并稳定维持, 与台风强度的变化有较好的一致性(图 6a)。

值得注意的是, 对流层低层热力对称性参数 B 有一个较为显著的特征: 前期(13 日 06 时—18 日

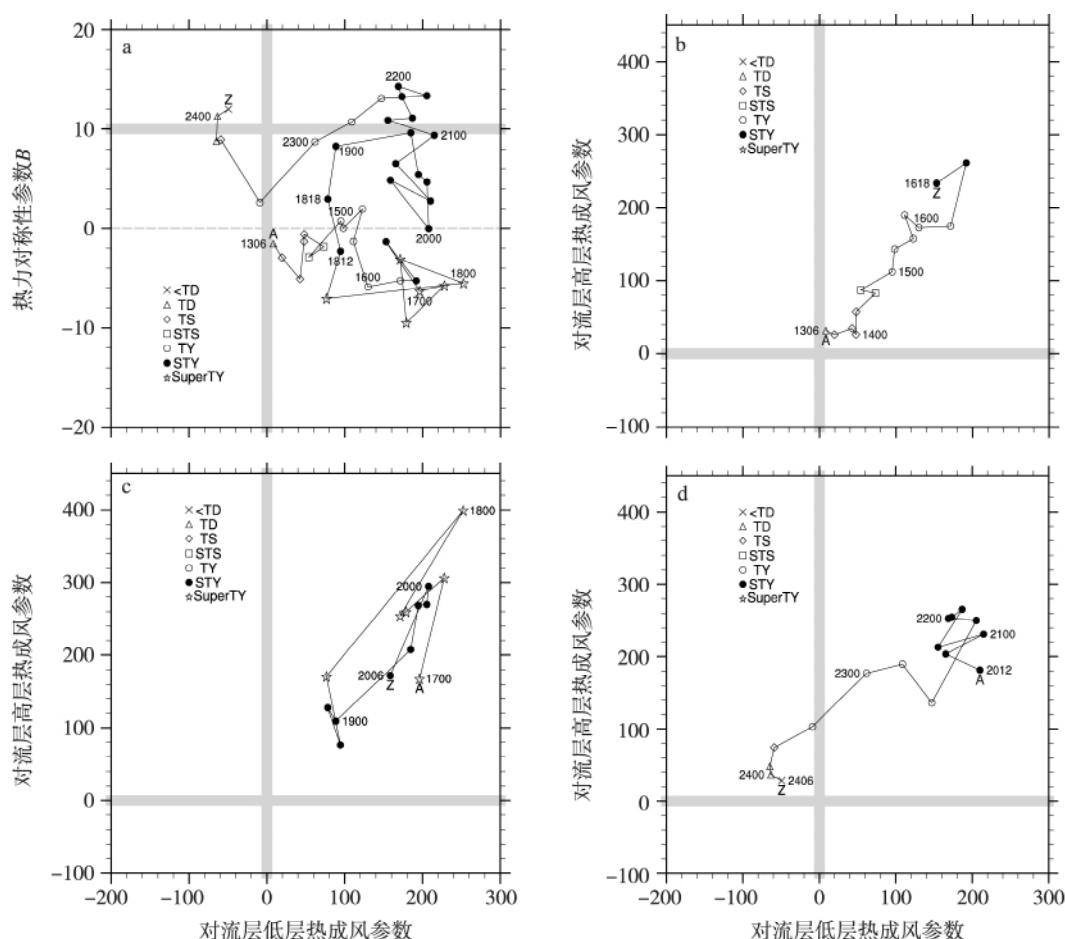


图 6 台风“鲇鱼”的相空间分布图(A 表示该时段的起始时刻, Z 表示结束时刻, 间隔 6 h) a. 对流层低层(900~600 hPa)热成风参数 $-V_T^L$ 和热力对称性参数 B 组成的相空间(13 日 06 时—24 日 06 时); b—d. 对流层低层(900~600 hPa)热成风参数 $-V_T^L$ 和对流层高层(600~300 hPa)热成风参数 $-V_T^U$ 组成的相空间(b. 13 日 06 时—16 日 18 时; c. 17 日 00 时—20 日 06 时; d. 20 日 12 时—24 日 06 时)

Fig. 6 The CPS (Cyclone Phase Space) diagram for Typhoon Megi (The dots are at 6-hr interval, in which A indicates the beginning of the plotted life cycle and Z indicates the end) a. $-V_T^L$ vs B (0600 UTC 13—0600 UTC 24 October); b—d. $-V_T^L$ vs $-V_T^U$ (b. 0600 UTC 13—1800 UTC 16 October; c. 0000 UTC 17—0600 UTC 20 October; d. 1200 UTC 20—0600 UTC 24 October)

12 时) B 基本为非正值,前进方向右侧(即北侧)厚度较小;后期(18 日 18 时—24 日 06 时) B 维持非负值,前进方向右侧厚度较大(图 6a),表明其右侧较暖而左侧较冷。 B 符号反转的临界点与“鲇鱼”途经吕宋岛后进入南海区域时间相吻合(图 1),此时路径突变过程即将开始,说明“鲇鱼”进入南海区域后,随着环境影响系统发生变化,其热力结构也有显著改变。在弱环境流场中,TC 热力结构的改变会影响其运动(陈联寿和孟智勇 2001)。大量观测事实表明,台风有“趋暖”运动的特性,即台风有朝着暖海温区或者暖气温区移动的趋势。引导气流很弱时,这种特性会表现得比较明显(陈联寿和丁一汇 1979)。18 日 18 时,“鲇鱼”移入南海上空,描述热力非对称结构的 B 参数较前一时刻出现显著变化,符号发生反转,即台风路径右侧变为暖区,并一直维持至台风消亡。 B 由负转正的时刻早于“鲇鱼”路径转折起始时间(19 日 00 时) 6 h,更早于引导气流的转向时间(19 日 06 时); B 参数符号发生转变,直接反映出 TC 热力结构的改变。结合特殊的环境场(引导气流微弱)可以得到,18 日 18 时—19 日 06 时这个阶段内台风的“趋暖”特性起主要作用。这可以有力地解释向西移入南海、处于弱环境场的“鲇鱼”路径向右侧(即向北)偏折的原因。综上所述表明 B 参数符号发生转变对处于特殊环境场(引导气流微弱)中的台风“鲇鱼”的路径突变具有重要指示意义。

在指示高、低层暖(冷)心强度的参数 $-V_T^U$ 和 $-V_T^L$ 组成的相空间图上(图 6b—d),两参数主要分布在第一象限,“鲇鱼”高层一直维持暖心结构,低层在二次登陆之后转变为冷心结构。“鲇鱼”西北行阶段(图 6b),高低层暖心随着台风的不断增强而发展起来。 B 参数基本维持在 0 附近,符合典型热带气旋热力对称结构特征。16 日 12 时,“鲇鱼”达到强台风级别(相应的三个参数为 $B = -5.28$, $-V_T^L = 191.8$, $-V_T^U = 261.4$),仅 12 h 后,“鲇鱼”成为超强台风。图 6c 描述了“鲇鱼”首次登陆前的西南行阶段和进入南海后北翘阶段的暖心结构强度演变特征,TC 于 17 日 12 时达到最大强度(中心最低气压 895 hPa),高低层暖心均较强,参数 B 降低到负极大值 -9.5 ,其运动方向右侧厚度明显降低,非对称结构较强。6 h 后,“鲇鱼”强度继续维持,热力结构趋于对称($B = -3.1$)。由于 TC 发展迅速,其强烈的深对流运动促使暖心急速增强,18 日 00 时,“鲇鱼”的高低层暖心同时达到生命史中的最强值($-V_T^L =$

252.4, $-V_T^U = 399.2$),中心最低气压 900 hPa。Hart (2003) 计算大西洋飓风 Mitch 的 CPS 参数后,推测强度达到 900 hPa 的热带气旋,其热成风参数有可能超过 500。由于此时“鲇鱼”外围环流已经受到吕宋岛地形影响,即将登陆,强度已略有减弱,暖心继续增强的态势受到了抑制,其热成风参数并未达到预估值。

伴随着“鲇鱼”首次登陆,高低层暖心迅速衰减。跨过吕宋岛后,低层热力非对称结构较强($B = 8.3 \sim 9.6$)。进入南海后,洋面温度较高(19 日平均 $T_{ss} > 29^\circ\text{C}$,图略),台风“鲇鱼”有所增强,高低层暖心也表现出增强趋势。900 hPa 上,18—21 日,“鲇鱼”以北有东北气流向台风环流西侧输送,并逐渐加强,一条冷平流带发展起来(图 7)。台风低层暖心在维持一段时间后,于 22 日 06 时开始迅速减弱。受该支冷平流影响,21 日 06 时—22 日 18 时, B 参数已经超过阈值 10,“鲇鱼”西侧的厚度显著低于东侧,显示出较强的非对称性。由于该时段内“鲇鱼”仍然维持强台风—台风级别,高低层仍维持暖心结构,“鲇鱼”并未转为变性气旋。22 日“鲇鱼”途经海域的日平均海表温度普遍低于 26°C (图略),不利于其暖心继续发展(Chan et al. (2001) 提出热带气旋增强的 SST 临界值约为 27°C),TC 强度逐渐减弱。23 日,“鲇鱼”登陆我国福建,高低层暖心进一步衰减,06 时,低层转为冷心结构。24 日,台风“鲇鱼”填塞消亡。

从 CPS 方法的三个参数时间演变图上看(图 8),高低层热成风参数 $-V_T^U$ 和 $-V_T^L$ 与台风强度的关系较为密切,登陆期间,高低层暖心大幅减弱,TC 移至南海后强度又有所增强,相应的,暖心也随之增强。TC 强度维持期间,高低层暖心强度波动也较小。随着台风登陆减弱填塞,暖心结构逐渐消失。热成风参数对路径突变没有表现出明显的指示意义。

“鲇鱼”路径北翘阶段开始前,热力对称性参数 B 基本维持负值,“鲇鱼”越过吕宋岛进入南海时(18 日 18 时) B 符号发生反转,超前于路径突变起始时间约 6 h,并一直稳定维持非负值。这是由于“鲇鱼”登陆前和进入南海后,环境影响系统(或因子)有较为显著的变化,尤其 20 日至 21 日由于“鲇鱼”西侧的低层受到较强冷空气的影响,导致 B 参数维持较大的正值,甚至超过阈值。 B 参数可以集中体现环境系统(或因子)对“鲇鱼”热力非对称结构的综合影响结果,其符号发生改变即“鲇鱼”热力

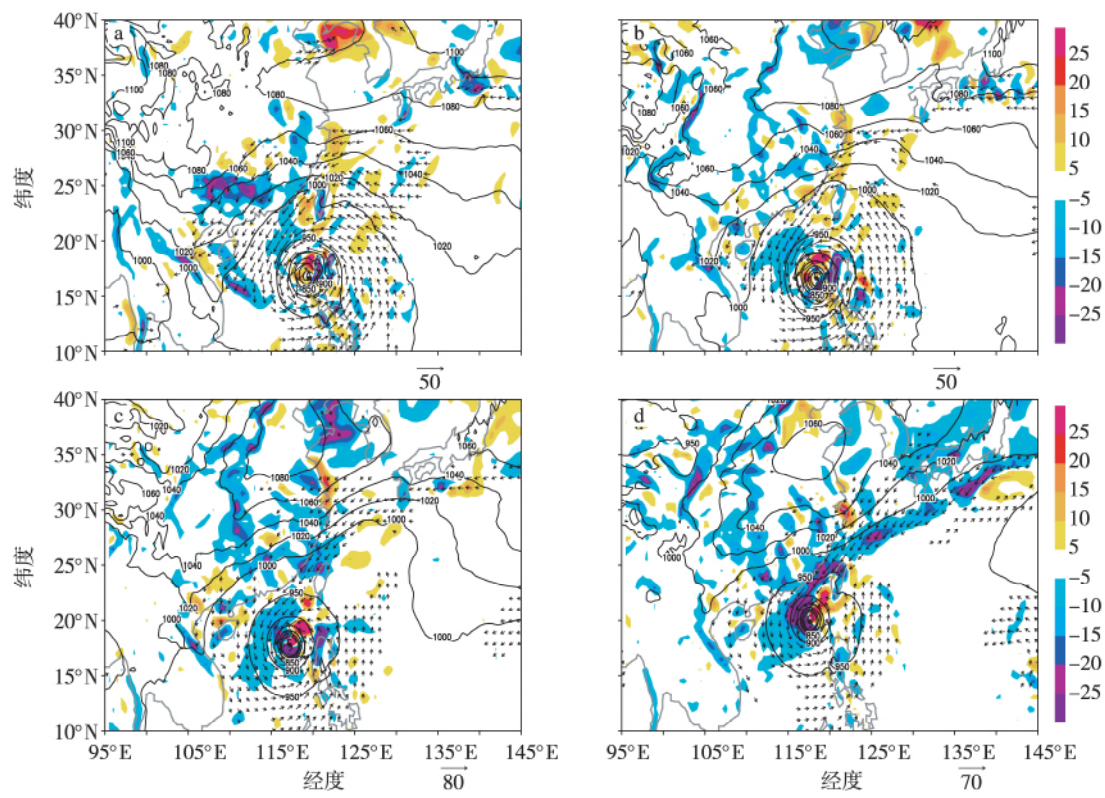


图 7 900 hPa 温度平流(阴影区 单位: $^{\circ}\text{C}$; 黑色台风符号为台风中心位置) a. 18 日 18 时; b. 19 日 06 时; c. 20 日 06 时; d. 21 日 06 时

Fig. 7 Temperature advection at 900 hPa(shadings units: $^{\circ}\text{C}$; the black symbol identifies the center of Megi) a. 1800 UTC 18 October; b. 0600 UTC 19 October; c. 0600 UTC 20 October; d. 0600 UTC 21 October

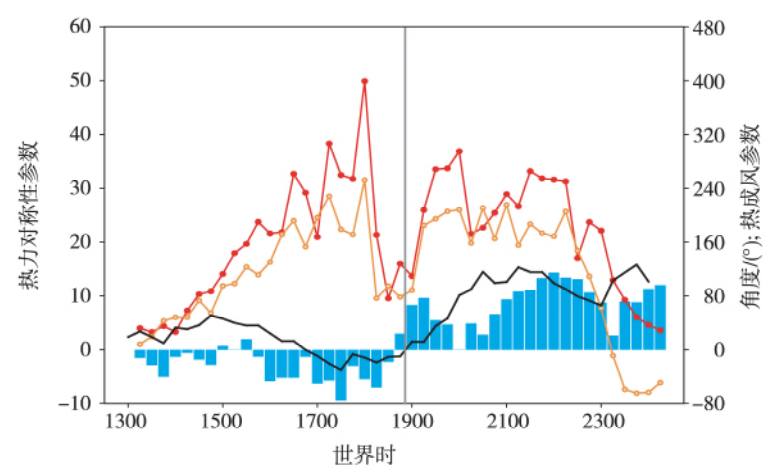


图 8 “鲇鱼”运动方向角和相空间参数的变化(黑线为“鲇鱼”运动方向角; 红线为高层热成风参数 $-V_T^U$; 橙线为低层热成风参数 $-V_T^L$; 蓝色柱状图为热力对称性参数 B ; 灰色点线标出路径突变的起始时刻)

Fig. 8 Temporal evolutions of the motion direction angle of Megi and the three parameters from CPS method(Black line indicates the direction angle. Red and orange lines identify the upper and lower level thermal wind parameters respectively. Blue bars represent parameter B ; Gray dotted line indicates initial time of the sudden track change)

非对称结构发生改变,台风前进方向左侧较冷而右侧较暖。由于台风具有“趋暖”运动的特性, B 的符号反转对于移入南海后处于弱环境流场的“鲇鱼”来说,是其路径突变的一个重要指示信号。

4 结论

本文利用 NCEP-GFS 分析场资料等,对 2010 年西北太平洋最强台风“鲇鱼”(1013)展开分析,主要关注路径突变前后其影响系统、引导气流及热力结构等的变化,得到以下结论:

1) 利用运动方向角定量识别出了台风“鲇鱼”路径的五次转折和六个阶段,其中进入南海后的路径北翘阶段是其生命史中最突出的特点之一,30 h 之内“鲇鱼”便由西行转为北行。从“鲇鱼”的移速来看,其生命史大致划分为两个阶段,首次登陆前的快速西移阶段和进入南海后的缓慢北进阶段,路径发生突变的同时,移速也发生显著的变化,进一步说明“鲇鱼”路径北翘是其生命史中最重要的转折阶段。

2) 环境影响系统方面,在“鲇鱼”路径突变发生前,副热带高压和中高纬度强大的西风槽二者相互作用,共同影响其移动路径;越赤道气流的突然增强、赤道高压与副高在“鲇鱼”东侧趋于合并,导致环境引导气流发生改变,“鲇鱼”转向;转向后,“鲇鱼”在副高和中低纬度短波槽的共同影响下,向偏北方向移动。

3) 台风“鲇鱼”路径突变前,引导气流以偏东风为主,“鲇鱼”移向移速与对流层整层(850~300 hPa)的引导气流较为一致;路径突变期间,对流层低层(800~600 hPa)引导气流首先由偏东风转为偏西南风,随后整层引导气流也转为偏西南风。完成路径北折之后,台风“鲇鱼”的移向和移速与低层气流较为一致。

4) 运用 CPS 方法对“鲇鱼”的热力结构进行分析,发现指示热力非对称结构的 B 参数在路径突变开始前 6 h 符号发生反转,并一直维持符号不变至编号结束($B > 0$ 表示台风前进方向右侧为暖区)。 B 的变化表明“鲇鱼”进入南海后,影响“鲇鱼”的天气系统(或因子)成员发生了变化,或者各成员间的相对重要性发生了变化,导致环境天气系统(或因子)对“鲇鱼”热力结构的综合影响发生改变,而台风热力结构的改变也会影响其运动,加之“鲇鱼”正处于弱环境场中,“趋暖”特性会表现得更加明显,促使其路径向较暖的右侧偏转。因此, B 参数的符号转变对“鲇鱼”路径突变具有重要指示意义。反映高低层暖心结构强弱的热成风参数与台风强度相关更为密切,对于路径突变而言无明显指示意义。

综上,从时间先后上看,“鲇鱼”路径突变始于

19 日 00 时(运动矢量出现向北分量);引导气流在 18 日 12 时“鲇鱼”尚未进入南海时已经十分微弱,并于 19 日 00—06 时之间转向(19 日 06 时出现南风分量),直至 20 日前后才有明显增强。“鲇鱼”热力结构变化发生于 18 日 12—18 时之间,由台风前进方向上由左暖右冷变为左冷右暖,较路径突变开始提前 6 h,更早于引导气流的转向。综合前文的分析,本文最终将台风“鲇鱼”路径突变成因归结为:“鲇鱼”移入南海后,冷空气南侵导致其热力结构发生变化,台风环流右侧较暖而左侧较冷。此时引导气流微弱,“趋暖”运动占主导,首先引起路径向右偏转;冷空气持续入侵台风环流左侧,随后引导气流转为西南气流并逐渐增强,在二者的共同作用下,“鲇鱼”路径持续右转,完成路径突变过程。

参考文献(References):

- Black M L, Gamache J F, Marks F D Jr et al. 2002. Eastern Pacific hurricanes Jimena of 1991 and Olivia of 1994: The effect of vertical shear on structure and intensity [J]. *Mon Wea Rev*, 130(9): 2291-2312.
- 曹晓岗, 王慧, 漆梁波. 2012. 台风珍珠和鲇鱼北折路径对比分析 [J]. *气象* 38(7): 841-847.
- Cao Xiaogang, Wang Hui, Qi Liangbo. 2012. A comparative analysis on sharp recurving tracks of typhoons Chanchu and Megi [J]. *Meteor Mon* 38(7): 841-847. (in Chinese).
- Chan J C. 2005. The physics of tropical cyclone motion [J]. *Annu Rev Fluid Mech* 37: 99-128.
- Chan J C L, Gray W M. 1982. Tropical cyclone movement and surrounding flow relationships [J]. *Mon Wea Rev* 110(10): 1354-1374.
- Chan J C, Duan Y H, Shay L K. 2001. Tropical cyclone intensity change from a simple ocean-atmosphere coupled model [J]. *J Atmos Sci* 58(2): 154-172.
- 陈联寿, 丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论 [M]. 北京: 科学出版社.
- Chen Lianshou, Ding Yihui. 1979. Introduction to the Western Pacific Typhoons [M]. Beijing: Science Press. (in Chinese).
- Chen L S, Luo Z X. 1995a. Some relations between asymmetric structure and motion of typhoons [J]. *Acta Meteor Sinica* 9(4): 412-419.
- Chen L S, Luo Z X. 1995b. Effect of the interaction of different scale vortices on the structure and motion of typhoons [J]. *Adv Atmos Sci* 12(2): 207-214.
- 陈联寿, 孟智勇. 2001. 我国热带气旋研究十年进展 [J]. *大气科学*, 25(3): 420-432.
- Chen Lianshou, Meng Zhiyong. 2001. An overview on tropical cyclone research progress in China during the past ten years [J]. *Chinese J Atmos Sci* 25(3): 420-432. (in Chinese).
- Frank W M. 1977. The structure and energetics of the tropical cyclone I. Storm structure [J]. *Mon Wea Rev* 105(9): 1119-1135.
- Gao S T, Cao J. 2007. Physical basis of generalized potential temperature and its application to cyclone tracks in nonuniformly saturated atmosphere [J]. *J Geophys Res* 112: D18101.
- Gao S T, Zhou F F. 2008. Water vapour potential vorticity and its applications in tropical cyclones [J]. *Chin Phys Lett* 25(10): 3830-3833.

- George J E ,Gray W M. 1976. Tropical cyclone motion and surrounding parameter relationships [J]. *J Appl Meteor* ,15(12) : 1252-1264.
- Hart R E. 2003. A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry [J]. *Mon Wea Rev* ,131:585-616.
- Holland G J. 1983. Tropical cyclone motion: Environmental interaction plus a beta effect [J]. *J Atmos Sci* ,40(2) : 328-342.
- Holland G J. 1984. Tropical cyclone motion: a comparison of theory and observation [J]. *J Atmos Sci* ,41(1) : 68-75.
- 李勋,李泽椿,赵声蓉,等. 2010. 强台风 Chanchu(0601) 的数值研究: 转向前后内核结构和强度变化 [J]. *气象学报* ,68(5) : 598-611.
- Li Xun ,Li Zechun ,Zhao Shengrong ,et al. 2010. A numerical study of typhoon Chanchu(0601) : The inner core structure evolution and intensity changes around its northward turn [J]. *Acta Meteor Sinica* , 68(5) : 598-611. (in Chinese) .
- 沈新勇,刘佳,秦南南,等. 2012. 台风麦莎的正压特征波动结构及其稳定性 [J]. *大气科学学报* ,35(3) : 257-271.
- Shen Xinyong ,Liu Jia ,Qin Nannan ,et al. 2012. Barotropic eigenvalue wave structure and stability of typhoon Matsa [J]. *Trans Atmos Sci* ,35(3) : 257-271. (in Chinese) .
- 陶丽,李双君,濮梅娟,等. 2012. 热带大气准双周振荡对西北太平洋地区热带气旋路径的影响 [J]. *大气科学学报* ,35(4) : 404-414.
- Tao Li ,Li Shuangjun ,Pu Meijuan ,et al. 2012. Impact of QBW on TC's track change over the western North Pacific [J]. *Trans Atmos Sci* ,35(4) : 404-414. (in Chinese) .
- 王伟,余锦华. 2013. 东风和西风切变环境下西北太平洋热带气旋快速增强特征的对比 [J]. *大气科学学报* ,36(3) : 337-345.
- Wang Wei ,Yu Jinhua. 2013. Characteristic comparison between the rapid intensification of tropical cyclones in easterly and westerly wind shear over the Northwest Pacific [J]. *Trans Atmos Sci* ,36(3) : 337-345. (in Chinese) .
- Wang Y ,Wu C C. 2004. Current understanding of tropical cyclone structure and intensity changes——A review [J]. *Meteor Atmos Phys* ,87(4) : 257-278.
- Wu C C ,Huang T S ,Huang W P. 2003. A new look at the binary interaction: Potential vorticity diagnosis of the unusual southward movement of tropical storm Bopha(2000) and its interaction with supertyphoon Saomai (2000) [J]. *Mon Wea Rev* ,131(7) : 1289-1300.
- Wu L G ,Liang J ,Wu C C. 2011. Monsoonal influence on typhoon Morakot (2009) . Part I: Observational analysis [J]. *J Atmos Sci* ,68(10) : 2208-2221.
- Wu L ,Wang B. 2001. Effects of convective heating on movement and vertical coupling of tropical cyclones: A numerical study [J]. *J Atmos Sci* ,58(23) : 3639-3649.
- 伍荣生. 2007. 台风研究中的一些科学问题 [J]. *南京大学学报: 自然科学* ,43(6) : 567-571.
- Wu Rongsheng. 2007. Some problems of typhoon study [J]. *Journal of Nanjing University(Natural Sciences)* , 43(6) : 567-571. (in Chinese) .
- 许映龙. 2011. 超强台风鲇鱼路径北翘预报分析 [J]. *气象* ,37(7) : 821-826.
- Xu Yinglong. 2011. Forecast analysis on the abrupt northward recurvature of super typhoon Megi(1013) [J]. *Meteor Mon* ,37(7) : 821-826. (in Chinese) .
- Zeng Z H ,Wang Y ,Wu C C. 2007. Environmental dynamical control of tropical cyclone intensity——An observational study [J]. *Mon Wea Rev* ,135(1) : 38-59.
- 赵小平,沈新勇,王咏青,等. 2012. 越赤道气流准双周振荡对西北太平洋台风路径的调制作用 [J]. *大气科学学报* ,35(5) : 603-619.
- Zhao Xiaoping ,Shen Xinyong ,Wang Yongqing ,et al. 2012. The modulation of quasi-biweekly oscillation of cross-equatorial flow on typhoon tracks over the western North Pacific [J]. *Trans Atmos Sci* , 35(5) : 603-619. (in Chinese) .
- 周冠博,崔晓鹏,高守亭. 2012. 台风“凤凰”登陆过程的高分辨率数值模拟及其降水的诊断分析 [J]. *大气科学* ,36(1) : 23-34.
- Zhou Guanbo ,Cui Xiaopeng ,Gao Shouting. 2012. The high-resolution numerical simulation and diagnostic analysis of the landfall process of typhoon “Fungwong” [J]. *Chinese J Atmos Sci* ,36(1) : 23-34. (in Chinese) .
- 周海光. 2010. 超强台风韦帕(0713) 螺旋雨带中尺度结构双多普勒雷达研究 [J]. *大气科学学报* ,33(3) : 271-284.
- Zhou Haiguang. Mesoscale spiral rainband structure of super typhoon Wipha(0713) observed by dual-Doppler radar [J]. *Trans Atmos Sci* ,2010 ,33(3) : 271-284. (in Chinese) .

(责任编辑: 孙宁)