

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.

# 台风鲸鱼(1508)路径和降水业务 预报偏差原因分析\*

郑 艳<sup>1,2</sup> 程守长<sup>1</sup> 蔡亲波<sup>1</sup> 任福民<sup>2</sup>

1 海南省气象台,海口 570203

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081

**提 要:** 1508号台风鲸鱼路径和降水业务预报均出现明显偏差,造成该台风预报服务效果很差。本文主要利用常规观测资料、卫星资料、EC模式预报结果和ERA-interim再分析资料( $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ),探讨“鲸鱼”路径和降水业务预报偏差的原因,同时对比分析与“鲸鱼”路径相似的两组夏季台风出现近乎反向的强降雨落区的成因。结果表明:(1)“鲸鱼”强度偏弱,业务定位出现较大偏差,同时EC模式对副热带高压预报明显偏弱偏东,是其路径及登陆点预报偏差的主要原因。(2)EC模式较好地预报出副热带西风急流加强、南海海域高层东北风加大的过程,但业务中却忽视了它们通过加强环境风垂直切变对台风非对称结构的作用,从而导致“鲸鱼”路径和降水预报出现偏差。(3)台风路径和降水预报要特别关注副热带西风急流和对流层高层西风槽的演变,副热带西风急流加强东进南落,台风中心附近高层东北风加大,环境风垂直切变随之加大,其南侧对流发展旺盛,台风移动路径偏西分量加大,强降雨主要位于其路径左侧;西风槽东移南压,且与台风环流靠近,台风中心附近环境风垂直切变明显减小,其北侧对流发展旺盛,台风移动路径偏北分量加大,强降雨主要位于其路径右侧。

**关键词:** 台风鲸鱼,预报偏差,副热带西风急流,对流层高层西风槽,非对称结构

**中图分类号:** P456,P458

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.01.015

## Analysis on the Forecast Deviation of Typhoon Kujira (1508) in Track and Rainfall Distribution

ZHENG Yan<sup>1,2</sup> CHENG Shouchang<sup>1</sup> CAI Qinbo<sup>1</sup> REN Fumin<sup>2</sup>

1 Hainan Meteorological Observatory, Haikou 570203

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

**Abstract:** In contrast to the observation, there was an obvious deviation in track and rainfall distributions in operational Typhoon Kujira (1508) forecasting in Hainan. It brought a great challenge to the operational typhoon warning service in Hainan. In this paper, the reasons of the track and rainfall forecast deviations for Typhoon Kujira are investigated by using conventional observation data, FY-2G satellite data and ECMWF ERA-interim reanalysis data ( $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ) and operational deterministic model products. Meanwhile, the reason of the reverse rainfall distributions, which was caused by two groups of tropical cyclones in summer with the similar tracks to Typhoon Kujira, is analyzed. The results show that (1) the larger deviation in operational positioning of Typhoon Kujira for its weak intensity, and a weaker and more eastward-located subtropical high predicted by ECMWF are the main reasons for the failure of Typhoon Kujira's track and landing point forecastings. (2) An enhanced subtropical westerly jet and upper-level north-

\* 海南省气象局重点项目(HNQXZD201410)、国家科技支撑计划项目(2013BAK05B03)及国家自然科学基金面上项目(41375056和41675042)共同资助

2017年5月4日收稿; 2017年10月18日收修定稿

第一作者:郑艳,主要从事强对流天气预警及台风预报研究. Email:hnzyan@126.com

easterly over South China Sea are well forecasted by ECMWF. However their roles in typhonic unsymmetrical structure via strong vertical shear are neglected, thus leading to the forecast deviation of Typhoon Kujira (1508) in track and rainfall distributions. (3) The evolution of the subtropical westerly jet and upper tropospheric westerly trough should be paid more attention in operational typhoon track and rainfall forecastings. When the subtropical westerly jet intensifies and moves southeastward, the vertical wind shear becomes greater accompanying the accelerating of upper-level northeasterly near the typhonic center. Severe convection tends to develop in the south side of the typhoon, which facilitates a westward-moving of typhoon with heavy rainfall occurring at the left side of its track. However when the westerly trough moves southeastward in the vicinity to the typhoon circulation, the vertical wind shear near the typhonic center weakens significantly. At this time, the convection tends to develop in the north side of typhoon, which leads to a northward-moving of typhoon with heavy rainfall occurring at the right side of its track.

**Key words:** Typhoon Kujira, forecast deviation, subtropical westerly jet, upper tropospheric westerly trough, asymmetric structure

## 引 言

在热带气旋(本文统称台风,下同)的预报中,目前面临的三大挑战是台风路径突变、强度突变以及登陆台风降水预报(WMO, 2014)。中央气象台对西折突变路径台风的平均预报误差小于北折突变路径(倪钟萍等, 2013), 而异常路径台风主要出现在南海,南海台风路径平均预报误差大于西北太平洋(余锦华等, 2012)。近年来,随着数值预报模式和集合预报系统的完善和改进及其在台风业务预报中的解释应用,我国台风路径预报水平得到显著提高(许映龙等, 2010; 钱传海等, 2012)。国内外学者在台风暴雨方面的研究成果颇丰。远距离台风暴雨往往与冷空气相关,是中低纬系统相互作用的过程(曹晓岗和王慧, 2016; 李改琴等, 2007; 张少林等, 2006); 双台风相互作用通过加强水汽输送导致其中一个台风暴雨增幅,甚至可以引发极端性降水(Wu et al, 2010; 谢惠敏等, 2016); 暴雨落区与台风非对称结构密切相关(刘爱鸣和何小宁, 2015)。台风暴雨还与台风路径、移速和强度等自身特征有关。针对台风强度、路径和降水等三大科学问题,台风强度业务预报误差呈现逐年波动状态,预报水平没有明显改善(张守峰等, 2015),提高台风路径和降水预报的准确率成为现阶段台风业务预报的关键。

2015 年上半年,海南岛南部和西部沿海地区遭遇冬春连旱,其中三亚市旱情最为严重。1508 号台风鲸鱼来临之前,三亚全市水库蓄水量仅为正常库容的 28.4%,近 5 万人饮水受影响,农作物受旱面积达 2 万多亩(1 亩  $\approx$  666.7 m<sup>2</sup>),其中重旱面积

5512 亩、干枯面积 1510 亩。“鲸鱼”给海南岛南部和西部沿海地区带来的充沛降水,彻底缓解了旱情,其利远大于弊。但中央气象台和海南省气象台对“鲸鱼”的路径和降水业务预报均出现明显偏差,预报服务效果不好、一度相当被动。

本文主要利用常规观测资料和卫星资料,结合 EC 模式预报结果,探讨“鲸鱼”路径和降水业务预报出现明显偏差的原因,同时利用 ERA-interim 再分析资料(0.25° $\times$ 0.25°)对比分析与“鲸鱼”路径相似的两组夏季台风出现不同强降水落区的预报为着眼点,以进一步提高这类台风路径和降水业务预报的准确率。

## 1 “鲸鱼”概况及业务预报情况

1508 号台风鲸鱼于 2015 年 6 月 21 日 08 时(北京时,下同)在西沙群岛西南海域生成,生成后向偏北方向移动,22 日 02 时加强为强热带风暴级,并逐渐转向西北方向移动向海南岛东南部海域靠近,18:20 前后在海南省万宁市沿海登陆,登陆后迅速减弱为热带风暴级,23 日上午移入北部湾北部,24 日 08 时再次加强为强热带风暴级,随后于 24 日下午在越南北部沿海再次登陆,之后在越南北部境内减弱消散(图略)。“鲸鱼”自东向西穿过海南岛,给海南岛大部带来了充沛降水,6 月 21 日 08 时至 24 日 08 时,海南岛西部和南部普遍出现了 100 mm 以上的降雨,其中乐东、三亚和东方 6 个乡镇雨量超过 300 mm,最大为乐东尖峰镇 392.1 mm,过程雨量呈现自北向南递增的分布特征(图 1a),强降水区位于“鲸鱼”移动路径左侧。

中央气象台针对“鲸鱼”的路径业务预报出现了较大预报偏差。6月21日14时,预报“鲸鱼”向偏北方向移动,将先后登陆海南文昌和广东雷州半岛然后进入广西南部减弱消失(图略)。22日18时在“鲸鱼”即将登陆海南万宁前,仍预报“鲸鱼”向偏北方向移动,将在海南琼海到文昌一带沿海登陆。中日美三家业务中心针对“鲸鱼”的路径预报误差均较大,24 h 预报误差均超过100 km,分别为116、107和155 km,48 h 预报误差则分别为238、215和331 km。而2015年中央气象台针对西北太平洋和南海所有27个台风的24和48 h 路径预报误差仅分别为66和121 km,可见“鲸鱼”路径预报误差明显偏大。海南省气象台预报的“鲸鱼”过程雨量(21日08时至24日08时)则为北部地区120~180 mm,局地超过200 mm,西部和南部地区40~80 mm,其余地区80~120 mm,过程雨量自北向南递减(图1b),强降水区位于台风移动路径右侧。“鲸鱼”过程雨量业务预报也出现了较大偏差。

“鲸鱼”路径业务预报出现明显偏差的原因是什么?“鲸鱼”降水业务预报的较大偏差与其路径偏差有关以外,还有哪些因素在预报中没有充分考虑?

## 2 “鲸鱼”路径预报偏差原因分析

### 2.1 业务定位偏差

在台风业务预报中,台风预报的质量依赖于台风初始定位和定强的精度,尤其当台风即将登陆时,高精度的台风定位和定强对台风业务预报至关重要(矫梅燕,2010),而较大的定位和定强误差往往导致台风业务预报出现重大偏差,如当台风初始定位误差为25 km时,48 h 路径预报误差可达300 km以上,且初始定位偏差可影响所有时效的路径预报结果,而一些大的、近乎灾难性的预报误差是由于使用卫星资料定位分析时追踪了不正确的特征或局部环流中心所致(裘国庆和方维模,1995)。

在1508号台风鲸鱼预报服务过程中,“鲸鱼”强度较弱,从卫星云图(图略)上很难确定其中心位置,因此包括中央气象台与日本气象厅和美国联合台风警报中心等国内外业务中心确定的“鲸鱼”中心位置存在较大差异,三家业务中心之间的定位差异达60~100 km(图2a)。由于“鲸鱼”定位存在困难,中央气象台自6月22日13时后的逐小时定位出现较大

偏差,“鲸鱼”本应是向西北移动,而逐小时实时定位则显示是先向东北、后向偏北移动,且移过海南万宁所在纬度,因此中央气象台22日18时发布的台风黄色预警预报“鲸鱼”将于22日夜间在海南琼海到文昌一带沿海登陆,而20分钟后却突然发现“鲸鱼”已在万宁登陆,出现奇异的西南折路径(图2b)。正是实时业务定位出现偏差,导致“鲸鱼”登陆地点预报错误,预报服务效果受到较大影响。

为了提高台风业务定位的精度,特别是台风登陆前的关键服务阶段的定位精度,在业务定位过程中,必须综合应用包括地面加密自动站、浮标、船舶以及卫星、雷达等各种观测资料,一旦出现定位不连续时必须密切关注,严密监视,而规范化的台风定位业务流程则十分注重台风定位的连续性(Dvorak and Smigielski,1996)。此外,为进一步加强台风业务定位的客观技术支撑,必须重视和加强基于多源观测资料的台风精细化定位技术的研发。

### 2.2 副热带高压预报明显偏东

“鲸鱼”于2015年6月22日18:20前后在海南万宁沿海登陆,准确预报22日08时500 hPa形势场对“鲸鱼”路径及登陆点预报极为重要。21日08时500 hPa高度场观测分析显示(图3a),西风槽东移至华北南部到贵州东部一带,副热带高压(以下简称副高,588 dagpm线)西脊点位于113°E附近,脊线介于22°~24°N;22日08时(图3b),西风槽东移北收,陕西西部至广西北部转受弱高压脊控制,且伴有24 h正变高区,虽然588 dagpm线略有东退,但弱高压脊与副高叠加后,586 dagpm线西脊点西进至109°E附近,广东沿岸的东南风则由4~8 m·s<sup>-1</sup>加大到8~12 m·s<sup>-1</sup>,”鲸鱼”折向西北方向移动。

EC模式20日08时预报21日08时副高西脊点位于116°E附近,与21日08时零场接近,较实况观测偏东约3个经距(图3a)。而对于22日08时副高西脊点,EC模式零场较实况观测仍偏东约3个经距,且24和48 h 预报588 dagpm线东退至120°E附近,较实况偏东6个经距左右(图3b),于是“鲸鱼”在副高西侧偏南气流的引导下向偏北方向移动。NCEP和JAPAN模式预报22日08时副高则较EC模式更为偏东(图略)。

台风业务预报主要参考的多家模式对22日08时副高预报较实况均明显偏东,是“鲸鱼”路径预报偏北的主要原因。值得注意的是,对于副高西脊点,

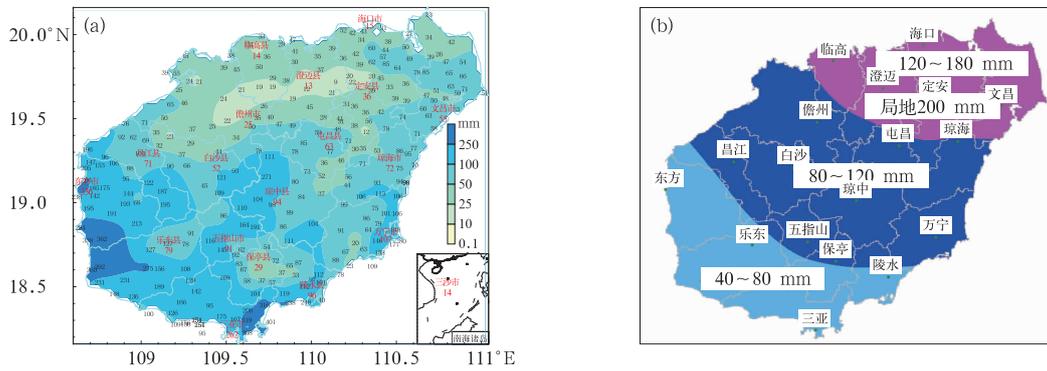


图 1 2015 年 6 月 21 日 08 时至 24 日 08 时海南岛雨量实况(a)和海南省气象台业务降水预报(b)对比

Fig. 1 Comparison of observed and simulated accumulative precipitation in Hainan from 08:00 BT 21 to 08:00 BT 24 June 2015

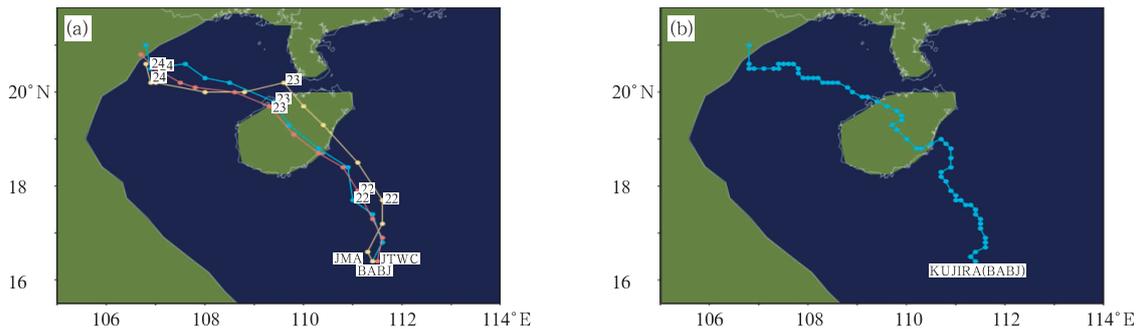


图 2 “鲸鱼”中国(蓝色)、日本(黄色)和美国(红色)6 h 间隔实时业务路径(a, 数字表示日期)以及中央气象台 1 h 间隔实时业务路径(b)

Fig. 2 The real time tracks of CMA (blue line), JMA (yellow) and JTWC (red) for Typhoon Kujira (1508) with 6 h interval (a, number represents date), the real-time track of CMA for Typhoon Kujira with 1 h interval (b)

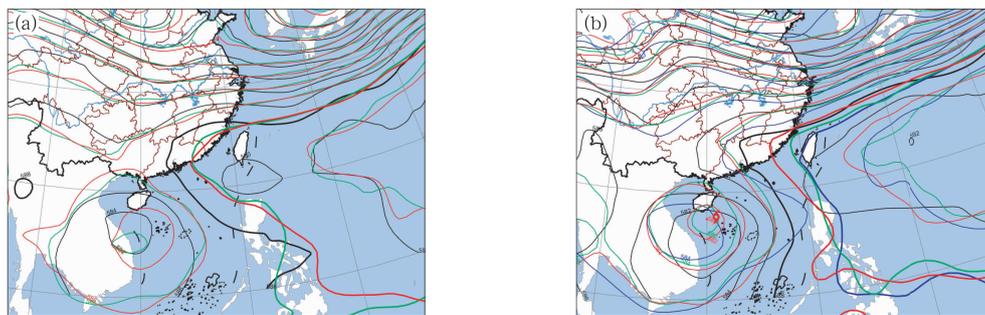


图 3 2015 年 6 月(a)21 日 08 时,(b)22 日 08 时 500 hPa 高度场观测分析(黑线)及 EC 模式零场分析(红线),24 h 预报场(绿线)和 48 h 预报场(蓝线)对比

Fig. 3 Comparison for the observed (black line), EC initial analysis (red line), 24 h (green line) and 48 h (blue line) forecast fields at 500 hPa at (a) 08:00 BT 21 and (b) 08:00 BT 22 June 2015

21 日 08 时和 22 日 08 时 EC 模式零场较实况分析场均偏东约 3 个经距,如果业务预报中能够对此加以关注,应用模式误差对预报场进行相应订正,那么一定程度上可以增加“鲸鱼”路径预报向西调整的信心。

### 2.3 对“鲸鱼”非对称结构估计不足

参照文献 DeMaria et al(2005),选取以台风中心为中心点的  $6^{\circ} \times 6^{\circ}$  经纬度范围的正方形区域,在

所选区域内某一层风的平均值作为台风在该层的环境风,再以 200 和 850 hPa 环境风的纬向风速( $u$ )矢量差以及经向风速( $v$ )矢量差的合成风速代表该台风的环境风垂直切变(下同)。21 日 08 时,“鲸鱼”生成时的环境风垂直切变约为  $10.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;22 日 20 时,“鲸鱼”位于万宁东部陆地时的环境风垂直切变增大至  $12.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;23 日 20 时,“鲸鱼”移入北部湾北部时的环境风垂直切变进一步增大至  $13.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。“鲸鱼”过程环境风垂直切变均为东北东风。

可见在“鲸鱼”整个生命史中,其环境风垂直切变较大,导致其云系发展具有非常明显的非对称结构特征,具体表现为强对流云团主要覆盖于其中心附近及其西南侧,即环境风垂直切变下风方向的左侧,与文献 Black et al(2002)研究结果一致。从 FY-2G 卫星云图可以清楚地看到“鲸鱼”云系非对称结构的变化(图略),“鲸鱼”生成以后,就呈现出明显的非对称结构,强对流云团位于其中心西南侧;22 日 02—11 时,“鲸鱼”中心附近及其西南侧的对流云团发展旺盛,强度加强;22 日 11 时以后,“鲸鱼”高低层中心再次逐渐出现分离,低层中心位于强对流云团的东北侧,其非对称性结构特征更加明显。袁金南和王国民(1997)对西北行的 9205 号台风和西北转东北行的 9210 号台风的模拟结果表明,由非对称流函数计算得到的平均通风气流矢量与台风路径比较一致,说明台风深厚的非对称结构与台风移动关系比较密切;“鲸鱼”的非对称结构与文献中个例 C 的 00—24 h 结构基本一致,台风中心的通风流指向西北方向,台风也向西北方向移动。

“鲸鱼”的非对称结构特征是其高低层动力场作用的结果,正是这种高低层动力场环境条件导致了“鲸鱼”结构和降水的非对称性。图 3 给出了 22 日 20 时“鲸鱼”登陆后高低层散度场的分布情况,在 200 hPa 高层,海南岛南部为弱的辐散区,其余大部分为辐合区,辐散中心位于海南岛南部近海,散度值超过  $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (图 4a);而在 925 hPa 低层,海南岛东北部为弱的辐散区,其余大部分为辐合区,辐合中心位于海南岛西南部海面,散度值为  $-6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (图 4b);可见“鲸鱼”移动路径的左侧为低层辐合和高层辐散区,有利于垂直上升运动和对流发展,对应着海南岛南部的强降水落区;其右侧则为高层辐合和低层辐散区,不利于垂直上升运动和对流的发展,对应着海南岛北部的弱降水区。至 23 日 14 时,“鲸鱼”西北行穿过海南岛,移入北部湾北部海面,其移动路径左侧一直维持高层辐散、低层辐合区,而其移动路径右侧则为高层辐合、低层辐散区(图略),因此,“鲸鱼”路径左侧的海南岛西南部对流发展旺盛,降水出现明显增幅,而东北部则为弱降水区。

由上述分析可知,“鲸鱼”较大的环境风垂直切变导致其明显的非对称结构,从而使其向西北方向移动,降水落区呈现非对称分布,而降水落区的非对称分布特征则是高低层动力场作用的结果。业务预报中,不仅没有考虑“鲸鱼”非对称结构对其路径的影响,而且当 22 日中午前后“鲸鱼”出现明显的高低层中心分离后,没有考虑到“鲸鱼”非对称结构加大可能对降水落区带来的影响,这是“鲸鱼”路径和降水预报出现较大偏差的主要原因之一。

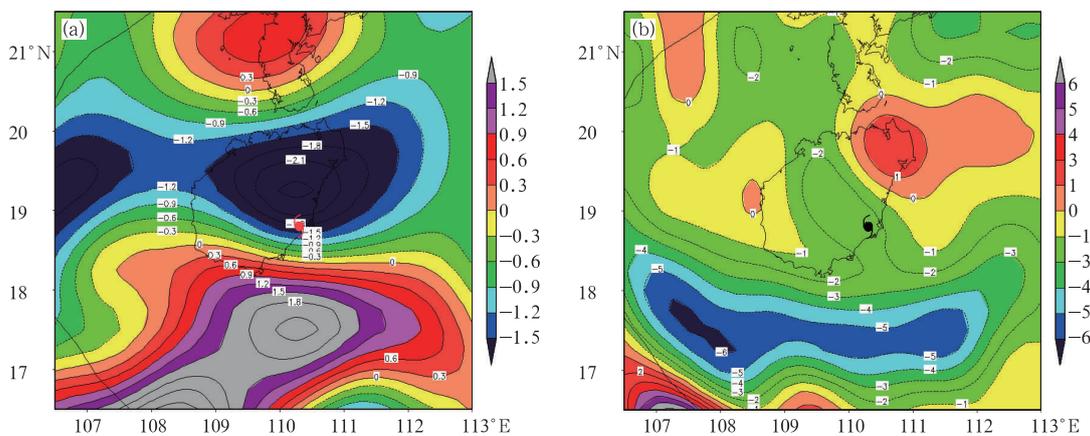


图 4 2015 年 6 月 22 日 20 时 200 hPa(a)和 925 hPa(b)散度场分析(单位:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )

Fig. 4 Analysis of the 200 hPa (a) and 925 hPa (b) divergence at 20:00 BT 22 June 2015 (unit:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )

## 2.4 忽视副热带西风急流作用

副热带西风急流与南亚高压的关系研究表明(杨莲梅和张庆云,2007;刘杰等,2010),南亚高压对应反气旋气流的北侧西风是副热带西风急流的主要部分,副热带西风急流位置偏南、强度偏强,则南亚高压位置偏东、强度加强。副热带西风急流加强,急流轴右侧负的相对涡度增大将导致其南侧的副高加强(许映龙等,2015;张玲等,2014)。“鲸鱼”过程 22 日副高加强和台风非对称结构加大主要是由于副热带西风急流加强所致。

200 hPa 风场和等风速线分析显示,21 日 08 时,副热带西风急流自新疆向朝鲜半岛伸展,急流轴上最大风速为  $48 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,南亚高压偏弱偏西,高压中心位于  $27^\circ \text{N}$ 、 $96^\circ \text{E}$  附近的喜马拉雅山南麓,“鲸鱼”中心附近的南海中部海域普遍为  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的偏东风(图略);22 日 08 时,200 hPa 西风槽东移至河北北部到湖北南部一带,副热带西风急流轴略有南压,最大风速加强至  $58 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,南亚高压加强东移控制两广地区,南海大部海域位于南亚高压东部脊下方,转为一致的东北风,“鲸鱼”中心附近的东北风增大到  $12 \sim 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 5a)。22 日 200 hPa “鲸鱼”中心附近东北风显著增大,受环境风垂直切变加大的影响,台风涡旋中心向下风方向倾斜(聂高臻等,2010;李勋等,2010a;2010b),非对称结构加强;另外,22 日副热带西风急流加强导致副高加强,也是“鲸鱼”移动路径偏西分量加大的主要原因。

EC 模式较好地预报出 22 日副热带西风急流加强、南海海域东北风加大的过程。20 日 20 时预报 21 日 08 时 200 hPa 副热带西风急流和南亚高压的

位置、强度与实况基本一致,副热带西风急流中心的最大风速也达到  $48 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,南海中部海域的偏东风风速为  $8 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略);21 日 20 时预报 22 日 08 时的 200 hPa 风场,西风槽东移至山东西部到河南南部,副热带西风急流轴最大风速为  $56 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,EC 模式预报的副热带西风急流和西风槽较实况略偏西、强度略偏弱,南亚高压也偏西偏弱,但对南海中北部海域风力预报较实况一致,“鲸鱼”中心附近东北风风速普遍为  $12 \sim 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 5b)。通过对 NCEP-GEFS 集合预报 200 hPa 形势场中南亚高压偏强和偏弱的成员进行分离,结果显示:南亚高压预报偏弱时,“鲸鱼”稳定向偏北方向移动;而南亚高压预报偏强时,“鲸鱼”移动路径偏西分量明显增大(图略)。

副热带西风急流一方面通过影响南亚高压强度和位置,从而影响高层风场的变化,高层风风速加大,环境风垂直切变随之加大,导致台风更加明显的非对称结构,最终影响台风路径和降水落区的非对称分布;另一方面通过影响副高强度而决定台风移向。EC 模式较准确地预报出 22 日 200 hPa 副热带西风急流加强东进过程,但台风业务预报中对副热带西风急流的作用不够重视,忽视高层引导气流对台风路径的影响,是“鲸鱼”路径预报失败的关键因素之一。

## 3 相似路径台风降水预报着眼点

为了进一步揭示对流层高层副热带西风急流对台风降水分布的影响,利用台风路径相似面积指数客观方法(Ren et al,2017),通过对中国气象局上

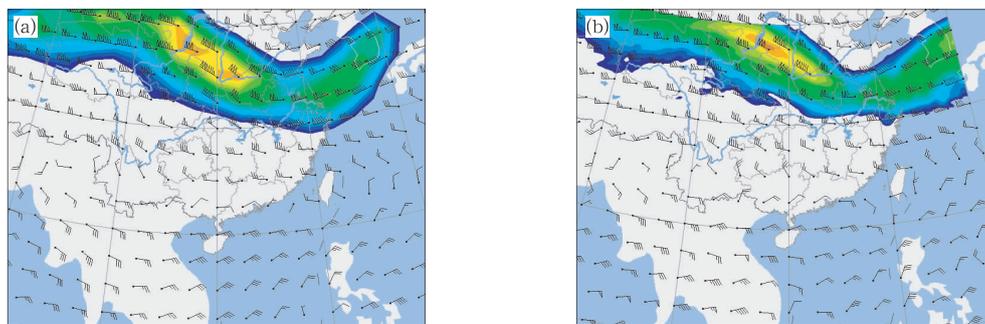


图 5 2015 年 6 月 22 日 08 时 200 hPa 风场和等风速线( $\geq 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 间隔  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 填色)观测(a)及 EC 12 h 预报场(b)分析

Fig. 5 Comparison of the observed (a) and the EC 12 h forecast (b) of 200 hPa wind and isotach ( $\geq 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , interval  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , shaded area) at 08:00 BT 22 June 2015

海台风所发布的1958—2015年台风最佳路径数据进行筛选,选取与“鲸鱼”路径相似,但降水落区不同的两组夏季(6—8月)台风进行对比分析。一组为与“鲸鱼”降水分布相近的1305号台风贝碧嘉、0703号台风桃芝以及2006年7月初的一个南海热带低压;另一组为与“鲸鱼”降水分布近乎反向的8503号台风(佚名)。

### 3.1 降水落区相近分析

1305号台风贝碧嘉、0703号台风桃芝和2006年南海热带低压的路径在海南岛附近关键区与“鲸鱼”相似(图6a矩形框),均在海南万宁附近沿海登陆后,向西北或偏西方向移动,穿过海南岛中部地区,进入北部湾北部。上述三个台风造成海南岛的过程降雨量平均分布如图6b所示,海南岛东北部小于50 mm,南部和西部沿海超过100 mm,其余地区普遍为50~100 mm,强降水区主要位于台风移动路径的左侧,总体呈现自东北向西南递增的分布特征,与“鲸鱼”降水落区基本一致。

图7为利用ERA-interim再分析资料制作的上述三个台风的200 hPa合成风场和等风速线分布图。可见台风登陆前,副热带西风急流轴位于40°N附近,南亚高压中心位于青藏高原东部,海南岛处于南亚高压东部脊下方,为弱的东北东风或东北风(图7a),此时平均环境风垂直切变约为东北东风 $13.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;台风登陆后,副热带西风急流加强东进,南亚高压东部脊随之东进至140°E附近,原位于朝鲜半岛东部的弱西风槽则加深东移至140°E附近,槽后的副热带西风急流产生分支,一支沿南亚高压东部脊流向南海及海南岛一带(图7b),南海北部

至海南岛一带的高空东北东风或东北风风速出现明显加大,环境风垂直切变也随之加大至 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,仍为东北东风。

图8为利用ERA-interim再分析资料制作的上述三个台风登陆后的高低层合成散度场,可以发现,散度场基本呈现南北不对称结构,高层辐散和低层辐合中心位于台风移动路径的左侧,右侧则相反,表明台风路径左侧对流发展旺盛,强降水落区也主要位于台风移动路径的左侧,右侧降水则明显偏弱。

### 3.2 降水落区反向分析

8503号台风为1985年6月一个未命名的编号南海台风,其路径在海南岛附近关键区也与“鲸鱼”相似(图9a矩形框),在海南陵水与万宁交界附近沿海登陆后,向西北偏西方向移动,穿过海南岛中部进入北部湾北部。海南岛过程雨量的分布为:海南岛西南部和北部内陆普遍小于50 mm,其余地区超过50 mm,其中,中东部地区大于100 mm(图9b),强降水区主要位于台风中心附近及台风移动路径的右侧,与“鲸鱼”降水落区大体呈反向分布。

由200 hPa风场和等风速线分布图可见,1985年6月19日20时,8503号台风登陆海南万宁前,西风槽位于日本海西部至广东东部一线,副热带西风急流分为东西两支,分别位于西风槽槽前和槽后,急流轴在40°N附近,中心风力超过 $54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,南亚高压位置偏西,中心位于青藏高原西部,海南岛为偏东风(图10a),此时环境风垂直切变约为东北东风 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;6月20日08时,8503号台风登陆后,西风槽东移南压,槽后的副热带西风急流东进,但强度有所减弱,南亚高压中心略有东进,但主体仍位于

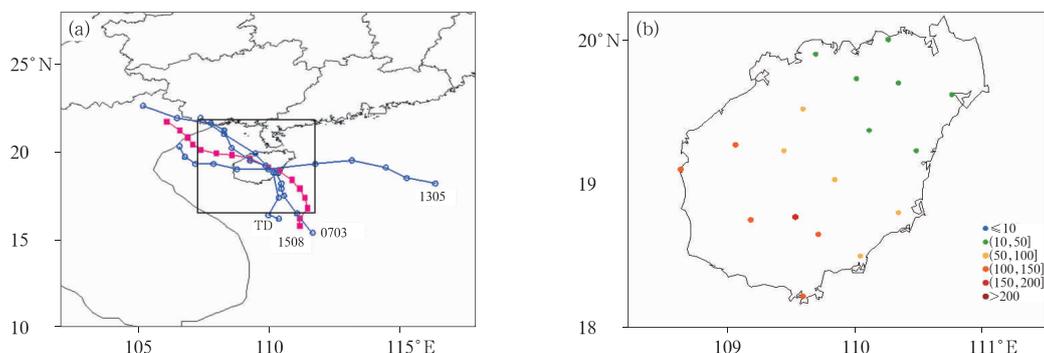


图6 1305号台风贝碧嘉、0703号台风桃芝和2006年南海热带低压路径(a,蓝色)和海南岛平均过程雨量分布图(b,单位:mm)

(图6a中的红线为1508号台风鲸鱼路径)

Fig. 6 The tracks (a) and the mean accumulative rainfall (unit: mm) (b) of Typhoons Bebinca (1305), Toraji (0703) and a tropical depression over South China Sea in 2006 (The red line in Fig. 6a indicates the track of Typhoon Kujira)

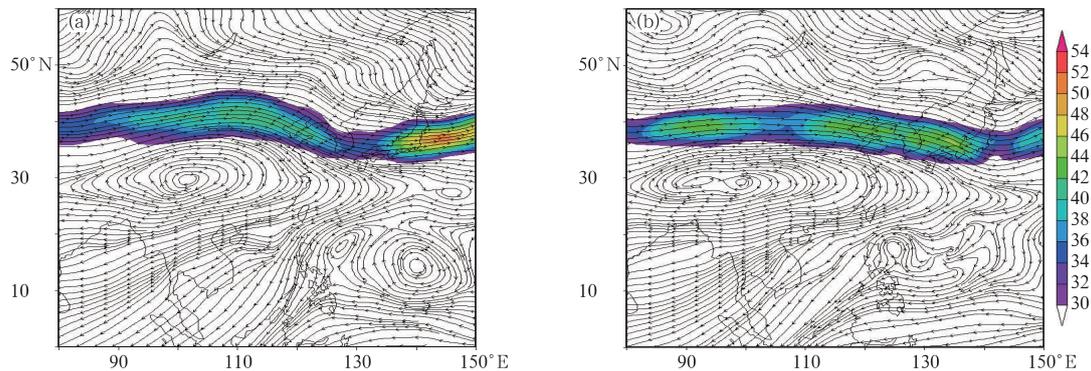


图 7 1305 号台风贝碧嘉、0703 号台风桃芝和 2006 年南海热带低压  
200 hPa 合成风场和等风速线( $\geq 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 填色)图  
(a) 登陆前, (b) 登陆后

Fig. 7 The composite analysis of 200 hPa wind and isotach ( $\geq 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , shaded area) by Typhoons Bebinca (1305), Toraji (0703) and a tropical depression over South China Sea in 2006  
(a) before landfalling, (b) after landfalling

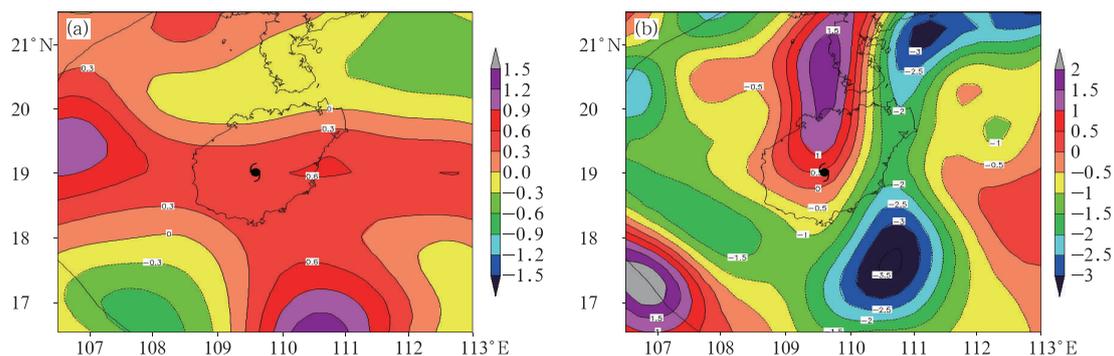


图 8 台风登陆后的 200 hPa(a)和 1000 hPa(b)合成散度场分析(单位: $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )  
Fig. 8 The composite analysis of 200 hPa (a) and 1000 hPa (b)  
divergence (unit:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) after the typhoon's landfalling

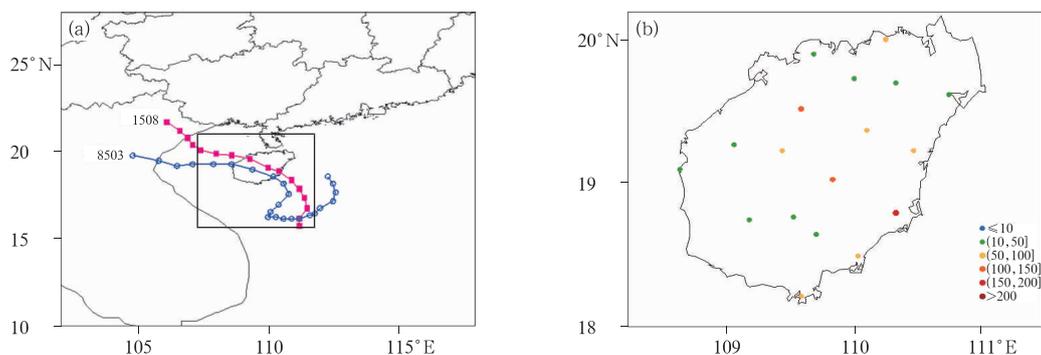


图 9 8503 号台风路径(蓝色)、“鲸鱼”路径(红色)对比(a)及  
8503 号台风海南岛过程雨量分布(b, 单位: mm)

Fig. 9 The track (a) and accumulative rainfall (unit: mm) (b) of a nameless Typhoon 8503  
(Red and blue lines in Fig. 9a indicate the tracks of Typhoon Kujira and Typhoon 8503, respectively)

110°E 以西的地区,且我国东部海区为较宽广的槽区,副热带西风急流并没有出现向南的明显分支,其主体偏北向东传播,南海北部至海南岛一带的高空东北东风风速没有出现加大的变化(图 10b),环境

风垂直切变减小至东北东风  $7.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。8503 号台风环境垂直风切变方向与“鲸鱼”及与其降水落区相近的台风一致,但数值明显偏小,导致 8503 号台风非对称结构不明显,且华南沿海为弱的槽区,与台

风环流相连,台风北侧有云系发展(图略),降水主要位于台风移动路径右侧。从高低层散度场分布图可以看出,6月20日08时,8503号台风中心位于海南岛中部地区,其散度场具有较明显的非对称结构特征,在200 hPa上,台风路径右侧辐散、南侧辐合(图11a);而在1000 hPa的低层,海南岛东北部为辐合区,辐散中心位于海南岛西南部,即台风路径左侧(图11b),强降水落区主要位于台风中心及其移动路径的右侧。

上述分析表明,两组夏季(6—8月)台风所致降水落区的不同,是由于其高低层散度场不同的非对称分布所导致,而高低层散度场不同的非对称分布则是由于南亚高压和副热带西风急流的位置和强度不同所造成。当副热带西风急流加强东进时,南亚高压随之加强东进,若有副热带西风急流沿南亚高压东部脊流向南海及海南岛一带,则南海北部及海南岛上空东北风出现明显加大,环境风垂直切变也明显加大,导致台风南侧对流发展旺盛,台风移动路

径左侧低层辐合、高层辐散,强降水将出现在台风路径左侧;若南亚高压没有明显东进,南海北部至海南岛一带的高空东北东风风速没有出现加大的变化,环境风垂直切变明显减小,且有西风槽南压与台风环流靠近,则台风北侧对流发展旺盛,台风移动路径右侧低层辐合、高层辐散,强降水将出现在台风路径右侧。

#### 4 结论和讨论

1508号台风鲸鱼路径和降水业务预报均出现较大偏差,造成该台风预报服务效果很差。通过对“鲸鱼”预报偏差原因的探讨和分析,得到以下主要结论:

- (1) “鲸鱼”强度偏弱,业务定位出现较大偏差,是造成“鲸鱼”路径及登陆点预报偏差的主要原因。
- (2) “鲸鱼”登陆前,台风业务预报主要参考的EC、NCEP和JMA等多家模式连续2天对副高预

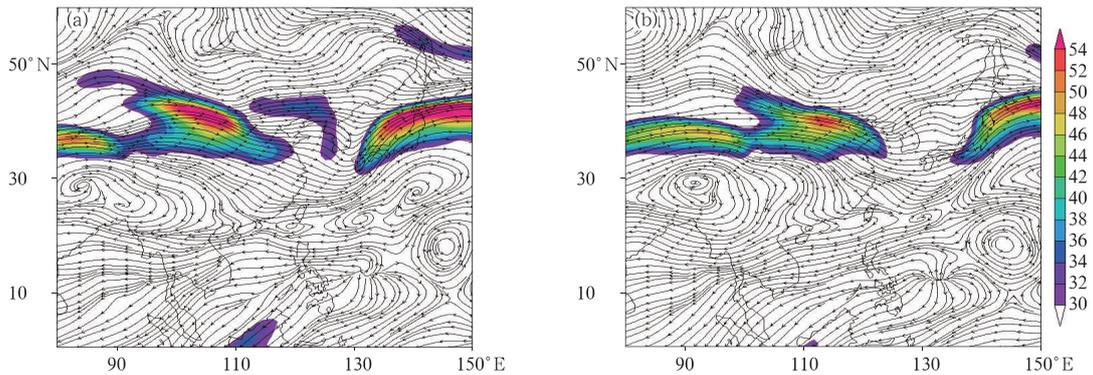


图 10 1985年6月19日20时(a),20日08时(b)200 hPa风场和等风速线( $\geq 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 填色)分析

Fig. 10 The 200 hPa wind and isotach ( $\geq 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , shade)  
(a) 20:00 BT 19, (b) 08:00 BT 20 June 1985

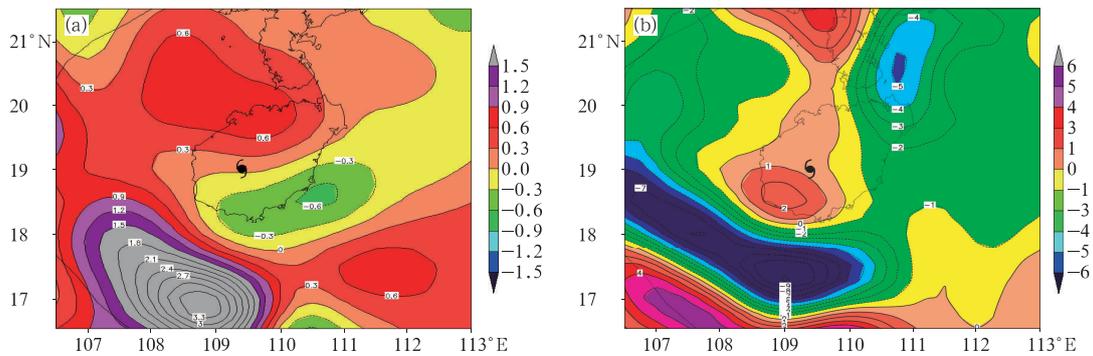


图 11 1985年6月20日08时200 hPa(a)和1000 hPa(b)散度场(单位: $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )

Fig. 11 The 200 hPa (a) and 1000 hPa (b) divergence (unit:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) at 08:00 BT 20 June 1985

报较实况均偏东 3 个经距以上,是“鲸鱼”路径业务预报偏北的又一主要原因。业务中若能合理应用模式误差对模式预报场进行相应订正,一定程度上可以增加“鲸鱼”路径预报向西调整的信心。

(3) 副热带西风急流加强东进使得“鲸鱼”对流层高层东北风加强,台风中心附近环境风垂直切变加大,高层东北风下风方向对流发展旺盛,“鲸鱼”非对称结构加大。台风业务预报中对副热带西风急流的作用重视不够,尤其没有考虑“鲸鱼”非对称结构对其路径的可能影响,是导致“鲸鱼”路径预报偏差的又一原因。

(4) “鲸鱼”非对称结构加大是其降水落区非对称分布的主要原因,而这种非对称分布特征则是高低层动力场作用的结果。台风降水预报要特别关注副热带西风急流和对流层高层西风槽的变化,副热带西风急流东进南落,台风中心附近高层东北风加大,环境风垂直切变随之加大,其南侧对流发展旺盛,台风移动路径左侧低层辐合、高层辐散;西风槽南压与台风环流靠近,台风中心附近环境风垂直切变明显减小,其北侧对流发展旺盛,台风移动路径右侧低层辐合、高层辐散,从而导致相似路径台风强降水近乎反向的不对称分布特征。

(5) 台风业务预报中经常关注对流层中层(500 hPa)的引导气流、对流层中低层(850~925 hPa)的水汽输送以及近地面层的冷平流作用,而忽视对流层高层(100~200 hPa)副热带西风急流和西风槽的演变对台风路径和结构的影响。相对于对流层中层,对流层高层的引导气流有时更为重要;对流层高层副热带西风急流和西风槽可以通过改变高层风场而影响环境风垂直切变,从而决定台风结构,并影响台风路径和降水分布。

## 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.

Dvorak V F, Smigielski F, 1996. 美国国家海洋和大气局 NOAA 培训教材:卫星观测的热带云和云系[M]. 郭炜,卢乃锰,孙冬联,等译.北京:气象出版社:239.

矫梅燕,2010.现代天气业务(上)[M].北京:气象出版社:122.

李改琴,梁海河,王树文,等,2007.台风海棠远距离暴雨中尺度系统特征[J].气象,33(8):17-22,129.

李勋,李泽椿,赵声蓉,等,2010a.强台风 Chancho(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.

李勋,李泽椿,赵声蓉,等,2010b.“珍珠”(0601)异常急翘路径和内核结构变化的诊断及数值研究[J].气象,36(9):1-8.

刘爱鸣,何小宁,2015.1209号台风“苏拉”登陆福建后垂直结构和暴雨落区关系[J].应用海洋学学报,34(4):451-458.

刘杰,况雪源,张耀存,2010.对流层上层东半球副热带西风急流与副热带(南亚)高压的关系[J].气象科学,30(1):34-41.

倪钟萍,吴立广,张玲,2013.2005—2010年台风突变路径的预报误差及其环流背景[J].气象,39(6):719-727.

聂高臻,谈哲敏,仇欣,2010.台风“云娜”(2004)的数值模拟:眼墙对流与环境风切变的关系[J].南京大学学报(自然科学版),46(3):317-327.

钱传海,端义宏,麻素红,等,2012.我国台风业务现状及其关键技术[J].气象科技进展,2(5):36-43.

裘国庆,方维模,1995.全球热带气旋预报指南—世界气象组织技术文件(WMO/TD-NO.560)[M].北京:气象出版社:71-72.

谢惠敏,任福民,李国平,等,2016.超强台风丹娜丝对1323号强台风菲特极端降水的作用[J].气象,42(2):156-165.

许映龙,吕心艳,张玲,等,2015.1323号强台风菲特特点及预报难点分析[J].气象,41(10):1222-1231.

许映龙,张玲,高栓柱,2010.我国台风预报业务的现状及思考[J].气象,36(7):43-49.

杨莲梅,张庆云,2007.夏季东亚西风急流扰动异常与副热带高压关系研究[J].应用气象学报,18(4):452-459.

余锦华,唐家翔,戴雨涵,等,2012.我国台风路径业务预报误差及成因分析[J].气象,38(6):695-700.

袁金南,王国民,1997.关于台风非对称结构与台风路径的数值分析[J].热带气象学报,13(3):208-216.

张玲,许映龙,黄奕武,2014.1330号台风海燕强烈发展和快速移动原因分析[J].气象,40(12):1464-1480.

张少林,龚佃利,陈晓红,等,2006.热带气旋远距离暴雨过程的诊断分析[J].气象,32(4):29-33.

张守峰,余晖,向纯怡,2015.中央气象台台风强度综合预报误差分析[J].气象,41(10):1278-1285.

Black M L, Gamache J F, Marks F D, 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.

DeMaria M, Mainelli M, Shay L K, et al, 2005. Further improvements to the statistical hurricane intensity prediction scheme (SHIPS)[J]. Mon Wea Rev, 20(4): 531-543.

Ren F M, Qiu W Y, Jiang X L, et al, 2017. An objective index for identifying tropical cyclone track similarity[J]. Wea Forecasting (in press).

WMO, 2014. 2014: Pre-Workshop Topic Reports: Eighth WMO International Workshop on Tropical Cyclones(IWTC-III)[M]. Jeju, Republic of Korea.

Wu C C, Cheung K K W, Chen J H, et al, 2010. The impact of tropical storm Paul (1999) on the motion and rainfall associated with tropical storm Rachel (1999) near Taiwan[J]. Mon Wea Rev, 138(5): 1635-1650.