温典,李英,魏娜,等. 2019. 高空冷涡影响台风 Meranti (1010) 北翘路径的集合预报分析 [J]. 大气科学, 43(4): 730-740. Wen Dian, Li Ying, We Na, et al. 2019. An ensemble analysis on abrupt northward turning of typhoon Meranti (1010) under the influence of an upper-tropospheric cold low [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(4): 730-740. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1810.18122

高空冷涡影响台风 Meranti(1010) 北翘路径的 集合预报分析

温典1,2 李英1 魏娜1 龚月婷3

1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京100081 2 北京市人工影响天气办公室,北京100089 3 广东省气象台,广州510080

摘 要 路径突变是台风路径预报中的一个难题。2010年第10号台风Meranti(1010)在台湾岛南部海域西移过 程中突然北折,而欧洲中期天气预报中心(ECMWF)集合预报对其北翘路径存在较大分歧。选取预报成功与不 成功两组集合成员各8例,对比分析台风Meranti路径变化的主要原因。结果表明:(1)一个来自热带对流层上 部槽的切断高空冷涡(UTCL)是该台风路径变化的一个重要影响系统。Meranti北翘路径跟它与UTCL的南北向 耦合有关;(2)UTCL通过改变台风上层的环境气流影响台风引导气流。在UTCL移至台风北部过程中,台风的 偏南风引导气流明显加强,有利于其路径北翘;(3)UTCL对台风Meranti北翘路径的影响还与其自身结构有关。 水平环流宽且气旋性涡旋向下垂直伸展更深的UTCL对台风路径变化影响更明显;(4)位涡倾向方程的诊断分析 表明,在TC与UTCL南北向耦合过程中,台风北部的正位涡水平平流项输送显著,有利于台风向北运动,且 UTCL影响下产生的非对称风场在其中起主要作用。

关键词 高空冷涡 北翘 台风Meranti 集合预报 文章编号 1006-9895(2019)04-0730-11 中图分类号 P444 文献标识码 A doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1810.18122

An Ensemble Analysis on Abrupt Northward Turning of Typhoon Meranti (1010) under the Influence of an Upper-Tropospheric Cold Low

WEN Dian^{1, 2}, LI Ying¹, WEI Na¹, and GONG Yueting³

State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081
 Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089

3 Guangdong Meteorological Observatory, Guangzhou 510080

Abstract The sudden change of typhoon track is a challenging issue in typhoon forecast. Typhoon "Meranti" (2010) experienced an abrupt northward turning when it moved westward to the south of Taiwan Island. Ensemble forecast

收稿日期 2018-02-05; 网络预出版日期 2018-11-27

作者简介 温典,男,1993年出生,硕士研究生,主要从事热带气旋研究。E-mail: camswendian@163.com

通讯作者 李英, E-mail: yli@cma.gov.cn

资助项目 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目2015CB452804,国家自然科学基金项目41475055、41775048、41475061,科技基础性 工作专项2013FY112400

Found by National Basic Research Program of China (973 Program) (Grant 2015CB452804), National Natural Science Foundation of China (Grants 41475055, 41775048, 41475061), Science and Technology Basic Project (Grant 2013FY112400)

based on the European Medium Range Weather Forecasts (ECMWF) presented a large spread for the northward turning. The good group that consisted of eight members and predicted the abrupt northward turning is compared to the poor group that didn't predict the unusual track to study the main influence factors on the northward turning of typhoon Meranti. Results show that: (1) An upper-tropospheric cold low (UTCL) cut off from the tropical upper-tropospheric trough (TUTT) was an important factor impacting the typhoon track change. The abrupt northward turning of typhoon Meranti was related to the coupling between Meranti and the nearby UTCL in the north-south direction. (2) The UTCL could change the upper-tropospheric environmental flow around the typhoon, and influence the typhoon steering flow. When the UTCL moved to the north of Meranti. (3) The northward turning of Meranti was also associated with the vertical structure of the UTCL. The UTCL with wide and deep cyclonic circulation in vertical direction was more favorable for the track change. (4) The diagnostic analysis based on the potential vorticity tendency equation shows that, under the coupling between Meranti and the UTCL in the north-south direction of potential vorticity to the north of the typhoon was strengthened, which was helpful for the northward movement of Meranti and the UTCL in the north-south direction of potential vorticity to the north of track change. (4) The diagnostic analysis based on the potential vorticity tendency equation shows that, under the coupling between Meranti and the UTCL in the north-south direction, horizontal advection of potential vorticity to the north of the typhoon was strengthened, which was helpful for the northward movement of Meranti. And the asymmetric advection of symmetric potential vorticity made a major contribution to the northward track under the influence of the UTCL.

Keywords Upper tropospheric cold low (UTCL), Abrupt north turning, Typhoon Meranti, Ensemble forecast

1 引言

我国是世界上受台风(Tropical Cyclone,简称 TC)影响最严重的国家之一,准确预测台风路径 十分重要。借助于现代气象综合探测体系建设以及 数值预报模式技术的不断发展,自20世纪90年代 以来,我国台风业务预报取得了长足的进步。目前 我国台风路径预报准确率已与国际先进水平基本相 当(许映龙等, 2010),但对台风路径突变,数值 预报能力也十分不足(钱传海等, 2012), 大的预 报误差仍存在(Qian et al., 2013)。集合预报于 1990年代中期开始用于台风数值预报的研究(王 晨稀, 2013), 是减小各种不确定因素影响数值预 报结果的有效方法(Yamaguchi and Majumdar, 2010; 沈越婷等, 2015)。但对于突变路径预报, 数值集合预报结果仍常存在较大的分散性, 这与模 式对台风路径变化相关物理过程以及影响因子的描 述不足等因素有关。对比分析数值模式中集合成员 预报成功和不成功预报成员之间物理过程的差异, 是找出影响预报结果主要因子的一种有效方法。此 方法在多种天气的机理研究中被应用,如冬季气 旋、夏季中尺度对流气旋及台风等。Qian et al. (2013)将此方法应用到超强台风Megi(2010)的 突变路径分析中,从51个集合预报成员中挑选出 预报效果好和差的两组各10个成员,通过对比两 组的天气形势,探究北折台风与其周围环境的关 系。郭旭等(2014)也利用欧洲中期天气预报中心 (ECMWF)的集合预报资料,对比分析 Megi 北翘 组和西行组的环流特点,探讨其北翘成因。

台风路径突变预报的不确定性还与其受多种天 气系统、下垫面变化以及自身结构变化等复杂影响 因子有关, 这方面已有不少研究成果(罗哲贤和陈 联寿, 1995; 王斌等, 1998; 陈联寿和孟智勇, 2001; 雷小途和陈联寿, 2001; 项续康等, 2003; 黄荣辉和陈光华, 2007; 许映龙等, 2010; Li et al., 2012; 端义宏等, 2014; 文永仁等, 2017)。其 中,对流层高层天气系统对TC活动的影响近年来 受到关注。Fitzpatrick et al. (1995) 指出,对流层 高层的气流对TC生成、增强和运动的预报十分重 要。西北太平洋高空冷涡(UTCL)作为对流层高 层频繁活动的一个天气系统,对台风活动也具有重 要影响。Wang et al. (2012)将UTCL分为两类, 一类来自西风槽切断冷涡 (Palmer, 1953), 研究表 明该类冷涡对TC路径变化有所影响(陈联寿和丁 一汇, 1979; 张胜军等, 2005; 梁军等, 2012); 另一类来自热带对流层上部槽(简称 TUTT)产生 的涡旋 (Colton, 1973; Thorncroft et al., 1993), 此 类冷涡占台风活动期间 UTCL 的 83% (Wei et al., 2016)。Patla et al. (2009) 指出,此类UTCL在以 TC为中心15经纬距范围内对TC的运动和强度有影 响。Hodanish and Gray (1993) 发现,此类UTCL 产生的气旋性环流可以延伸到中低层,会影响到台 风的平均引导气流,引起台风突然偏折。许映龙等 (2015)发现一个来自TUTT的UTCL西移有利于

副高西伸,从而导致台风"菲特"(1323)突然西 折。可见第二类UTCL对TC活动有重要影响。

Li et al. (2012)发现台风 Meranti 路径突然北 折就与一个来自 TUTT 的 UTCL 影响有关。而集合 预报结果对 Meranti 的北翘路径有较大发散性,那 么集合预报对此 UTCL 活动预报情况如何,以及对 UTCL 预报结果的差异对台风路径变化有何影响, 都值得进一步探究。本文拟使用 ECMWF 提供的 TIGGE (THORPEX Interactive Grand Global Ensemble)集合预报资料,对比预报成功和失败两 组集合预报成员的环流形势、引导气流、高空冷涡 结构等差异特征,探讨 UTCL 在台风 Meranti 北折 中所起的作用。第2节介绍台风 Meranti 活动及集 合预报概况,第3节给出集合预报的对比结果,最 后一节给出总结和讨论。

2 台风 Meranti 活动及集合预报概况

台风资料来自于中国气象局上海台风研究所 (CMA-STI) 整编的西北太平洋最佳路径资料。 2010年第10号台风Meranti于9月7日00时(协调 世界时,下同)在台湾岛南部海域生成,后向西偏 南方向移动,8日12时移速减慢,18时路径开始北 折,9日00时进入台湾海峡并向北移动,9日19~ 20时在福建石狮市沿海登陆,登陆后继续北上, 强度开始减弱,10日18时停止编号(图1中右上 角小图)。在台风 Meranti 转向期间, 一个来自 TUTT 的 UTCL 一直在台风附近活动, UTCL 中心 确定方法参照 Wei et al. (2016) 文中方法, 根据 ECMWF 提供的 TIGGE 风场数据得到水平流场, 以200 hPa上气旋性环流中心为UTCL中心。UTCL 与台风中心的相对位置如图1所示,此间二者相距 10经纬距以内,最近约4个经纬距,说明两个系统 环流相互有所叠加,易发生相互作用。

集合预报数据来自 ECMWF 提供的 TIGGE 资料,包括51个集合预报成员。每12h起报一次,预报时长36~120h;提供水平分辨率为0.5°×0.5°,垂直方向8层(200、250、300、500、700、850、925、1000hPa)的高度场、风场、温度场和湿度场,以及全球TC路径集合预报产品,包括TC中心位置、中心最低气压及最大风速。在所有51个集合成员中,有12个成员在8日00时对台风Meranti的定位偏北约4经纬距,导致后期预报路



图1 2010年9月8日00时(协调世界时,下同)至9日18时(间隔6小时)的台风Meranti(黑色圆圈线)与高空冷涡(UTCL,蓝色圆圈线)相对路径图。红色点线为同一时刻两者中心连线,右上角小图显示台风路径

Fig. 1 Tracks of typhoon Meranti (black circle line) and the upper tropospheric cold low (UTCL, blue circle line) at 6-h intervals from 0000 UTC 8 Sept to 1800 UTC 9 Sept 2010. The red dotted line links the centers of typhoon and UTCL at the same time. The figure in the top right corner shows the track of Meranti

径发生较大偏差。说明台风初始位置误差对其以后 的预报结果影响不容忽视。由不同时刻起报的所有 成员预报平均误差可见(图2a),随着预报时长的 增加,集合成员的路径误差均有所增加。其中,在 台风Meranti路径北折完毕(9日00时)之前起报 (8日00时蓝线、8日12时红线、9日00时黄线) 的集合成员平均路径误差较大,误差最大达约 1100 km,而之后时次起报(9日12时和10日00 时)的成员平均路径误差较小。这表明台风 Meranti北翘路径预报难度较大。

比较日本气象厅(JMA)、美国联合台风警报 中心(JTWC)及中国气象局(CMA)的最佳路径 资料,发现三家机构给出的北折点时刻有所不同, 但均发生在8日06~18时期间,故将北折点时刻在 此时段之内且路径与实况相似的成员判定为预报成 功。而在三家结果中,CMA的北折时刻(8日18 时)最晚,本研究将其作为本文中台风Meranti的 北折时刻,将北折点晚于此时刻6h以上或路径趋 向与实况偏离较大的成员判定为预报失败。考察8 日00时起报的各集合成员,从预报成功(失败)



图2 (a) 2010年9月8~10日不同起报时刻所有集合成员预报平均路径误差(纵轴为误差大小,单位: km; 横轴代表预报时长,单位: h, 不同颜色的线代表不同时刻起报结果); (b) 2010年9月8日00时起报的成功组(红线)及失败组(蓝线)集合成员路径(黑线为集合平均路径)

Fig. 2 (a) Mean track forecast errors (left *y*-axis, units: km) for all ensemble members at different initial times (bottom *x*-axis) from 8 to 10 Sept 2010, lines in different colors represent the results forecasted from different initial times (UTC); (b) the lines are tracks of good/poor (red/blue) groups members selected from the ECMWF initialized at 0000 UTC 8 Sept 2010, and the black lines are the ensemble mean tracks for the good and poor groups, respectively

成员中,分别选取8个预报效果较好(差)的成员 作为预报成功(失败)组进行对比分析,并将8日 12时至9日00时定义为北折时段,其中8日12时、 18时、9日00时三个时刻分别对应北折前、北折 时、北折后。

图 2b 显示,成功组(红线,下同)预报台风路径与实况(参见图1)对应较好;而失败组(蓝线,下同)预报的台风路径的北折时刻偏晚或北折不明显,与实况有较大偏离。两组成员的平均路径(黑色实线)差异明显。采用 TC 动态合成方法(李英等,2004),对两组集合成员的大尺度环流进行合成对比分析。

3 集合预报对比分析

3.1 环流形势差异

图3给出北折时段两组台风所对应的200 hPa (图3a-c)、500 hPa (图3d-f)平均环流形势。起 报时刻8日00时(图略),两组环流形势相似, UTCL均位于台风中心东侧,距台风中心约6个经 纬距,强度均为1248 dagpm。台风北侧副热带高 压(副高)的1254 dagpm 等高度线均与大陆高压 连接。北折前(图3a), 200 hPa上两组UTCL均向 西北移至台风中心东北侧,但成功组UTCL 略超前 于失败组,且其半径更大,环流距台风中心的距离 更近。500 hPa上(图3d),失败组副高脊点伸至 110°E以西,成功组与之相比偏东约2个经纬距。 北折时(图3b),200 hPa成功组UTCL半径明显大 于失败组,且已移至台风中心北侧,其1248 dagpm高度线扩展到台风中心附近上空。而失败组 UTCL 仍位于台风中心东北侧, 且其半径较小, 距 台风中心较远。相应500 hPa上(图3e),两组成 员副高均明显东退,但成功组东退更多,脊点与失 败组相差2~3个经纬距。北折后(图3c),两组 200 hPa上UTCL均北上减弱,半径相差不大。成 功组UTCL位于台风中心正北侧,失败组仍滞后偏 东。9日00时(图3f),500hPa上副高继续东退, 成功组的副高已东退到120°E附近,而失败组588 dagpm脊点相对于成功组东退较慢,比前者偏西约 3个经纬距。这说明两组UTCL的活动、强度和副 高位置均有所差异。成功组UTCL对台风影响更大, 副高东退更明显,这直接影响了台风的运动情况。



图3 2010年9月8~9日集合预报成功组(红线,下同)和失败组(蓝线,下同)200 hPa(上)及500 hPa(下)平均位势高度场(单位: dagpm,间隔:2 dagpm)。其中,台风符号为台风中心,(a)、(d)为8日12时(北折前),(b)、(e)为8日18时(北折时),(c)、(f)为 9日00时(北折后)

Fig. 3 Averaged 200 hPa (top) and 500 hPa (bottom) geopotential heights (dagpm, contours at interval of 2 dagpm) for the 8 good/poor (red/blue) members at (a, d) 1200 UTC 8 Sept 2010, (b, e) 1800 UTC 8 Sept 2010, and (c, f) 0000 UTC 9 Sept 2010. The TC symbol indicates the TC center.

图4给出两组200 hPa平均流场,进一步显示 台风高层与UTCL流场的耦合过程(红、蓝色圆点 和流线分别为成功组及失败组,黑色虚线为各组台 风中心与UTCL中心连线)。图中成功(失败)组 冷涡的中心位置是由8个预报效果较好(差)样本 地理位置的算术平均得出;而图4中流场中心是对 样本流场直接叠加得出。由于每个样本流场强度、 分布均有一定不同, 故得出的平均流场中心位置与 样本中心的平均位置存在一定偏差,但不影响讨论 结果。北折前(图4a),两组成员流场均耦合为一 个东北一西南向的气旋性流场,且两组台风与 UTCL 中心均处于此流场内。但成功组台风中心与 UTCL中心距离较近,失败组则较远,且前者UTCL 位置比后者偏西; 北折时 (图4b), 成功组UTCL位 于台风北偏东侧,与台风中心距离更近,其东侧的 西南气流与台风中心东侧的偏南气流相连, 偏南分 量增大,有利于台风北折。而失败组两中心距离较 远,二者流场耦合效果不好,台风中心附近未见明 显偏南气流;北折后(图4c),成功组UTCL中心移 至台风北侧,台风与UTCL的耦合流场更明显,台 风东侧偏南气流明显增强。随着UTCL向西北移动, 失败组UTCL与台风的气旋环流耦合较好,TC东 侧出现偏南气流,但与成功组相比十分微弱。

综上所述,较强冷涡西北移过程中,与台风环 流发生耦合,使台风东侧气流偏南分量增强,有利 于其北上。强UTCL北移对应副高东退更明显,对 台风北折也起有利作用。许映龙等(2015)的研究 也表明,UTCL西北移动有利于副高东退。

3.2 引导气流差异

上述分析表明,UTCL的出现改变了台风的高 层流场,这也会影响台风的引导气流。以台风 Meranti为中心,选取距台风中心3~7经纬距圆 环,计算1000~200 hPa各高度层引导气流,再进 行各层平均得到整层引导气流。比较两组成员的整 层引导气流矢量与台风移动方向的差异发现(图 略),大多数成员引导气流方向与路径交角较小,



114°E 116°E 118°E 120°E 122°E 124°E 114°E 116°E 118°E 120°E 122°E 124°E 114°E 116°E 118°E 120°E 122°E 124°E

图4 2010年9月8~9日集合预报成功组(红色圆点)和失败组(蓝色圆点)200 hPa平均流场(台风符号为台风中心平均位置,红、蓝圆 点为冷涡中心平均位置,黑色虚线为台风中心与UTCL中心连线):(a)8日12时;(b)8日18时;(c)9日00时 Fig. 4 Averaged 200 hPa stream fields of the 8 good and poor members at (a) 1200 UTC 8, (b) 1800 UTC 8, and (c) 0000 UTC 9 Sept 2010. The TC symbol (dot) is the mean position of TC (UTCL) center, and the black dashed line links the centers of typhoon and UTCL



图5 2010年9月8~10日集合预报(a)成功组和(b)失败组平均各层引导气流(箭头,填色为其大小,单位:ms⁻¹)随时间变化(红框标示北折时段8日12时至9日00时,图下内黑框为整层引导气流矢量)

Fig. 5 Time series of mean steering flow (vectors) and its magnitude (shaded, units: $m s^{-1}$) of (a) good and (b) poor members between 1000 hPa and 200 hPa from 8 to 10 Sept 2010. The red box indicates the abrupt northward turning period from 1200 UTC 8 to 0000 UTC 9 Sept 2010. The vectors in black box show the mean steering flow between 1000 hPa and 200 hPa

对台风移动有较好的指示作用,说明环境气流是 Meranti运动变化的主要原因。下面分析 UTCL 活 动对台风引导气流的影响。

图5为集合预报成功组及失败组各层引导气流 随时间变化,其中红色方框标示台风Meranti的北 折时段。可见成功组与失败组低层流场差异较小, 700 hPa以下均为偏南风。而300 hPa以上气流方向 转变明显,成功组由北折前的东北风转为北折后的 东南风,偏南风分量增强;而失败组高层仍维持偏 东风,偏南分量十分微弱。在500 hPa引导层上, 两组均为偏南风引导气流,但成功组偏南气流更为 明显。与失败组相比,成功组UTCL的存在增强了 高层引导气流的偏南分量,通过与低层偏南引导气 流的配合,有利于台风向北运动;此外,成功组 UTCL偏西,台风位置偏东,副高西侧偏南风分量 更强也有利于台风北折。图5下方黑色方框给出整 层引导气流的时间演变,可见在北折时段,成功组 偏南气流明显大于失败组。说明UTCL加大了高层 偏南气流影响到台风整层引导气流,从而改变其 移向。

3.3 UTCL 垂直伸展性

前述研究表明,成功组的UTCL水平范围大于 失败组,从垂直方向来看,转折期间两组UTCL在 垂直方向的强度也有所不同,可体现在其闭合涡旋 的垂直伸展程度上。图6给出为8日18时(北折 时)200 hPa、250 hPa、300 hPa合成形势场,原点 表示合成TC的中心,横纵坐标均表示距离合成TC 中心的距离(格距为1°经纬距),可见成功组(红 色)UTCL闭合涡旋环流从200 hPa高层至下可延 伸至300 hPa,而失败组的UTCL仅延伸至250 hPa。表明在台风北侧的成功组UTCL较失败组更 为深厚,其气旋性环流在垂直方向上的伸展性更 大,对台风环流影响更为明显。实际上高空冷涡的 气旋性环流还可下伸至500 hPa以下,成功组比失 败组更为深厚(图略)。

3.4 UTCL影响下位涡及能量的变化

Wu and Wang (2000) 指出,与TC的环流背 景相比,可将TC当作一个三维正位涡异常的系 统,台风移动会趋于位涡(*P*)的1波分量正异常大 值区。故TC的运动趋势可根据位涡倾向方程 $-C \cdot \nabla P_s = \partial P_1 / \partial t$ 进行诊断,其中,*C*为TC运动向 量,*P_s*和*P_1*分别为*P*的对称分量和1波分量。*P*由 公式*P*=-g(*kf*+ $\nabla_p \times V$)· $\nabla_p \theta$ (其中,*V*=*u*i+ $vj, \nabla_p = \partial i/\partial x + \partial j/\partial y + \partial k/\partial p, \theta$ 为位温)得出,然 后在柱坐标系中分离出 $P_s \mathcal{D} P_1$,通过计算位涡1波 分量的变化 $\partial P_1/\partial t$,就可以诊断出TC的运动趋向, Chan et al. (2002)、李勋等(2010)、吴玉琴等 (2015)也用过这种方法对TC运动进行诊断。其 中, $\partial P_1/\partial t$ 由水平平流项、垂直运动项、非绝热加 热项、摩擦项的1波分量组成,这里我们略去其他 较小项,仅探讨位涡水平平流项的1波分量(以下 简称"平流项")对台风运动的影响,即 $\partial P_1/\partial t = \Lambda_1(-V \cdot \nabla P)_o$

图 7a 和 d 分别为北折时(8 日 18 时) 500 hPa 成功组及失败组成员位涡水平平流项的 1 波分量 (以下简称"平流项")的分布。可见成功组台风 中心西北侧存在平流项正值区,而东南侧为负值 区,根据位涡倾向理论,这样的平流项分布有利于 TC向西北方向运动。而失败组平流项分布呈台风 中心西偏南一侧为正、东偏北一侧为负的特征,有 利于TC向西偏南方向运动。可见,500 hPa位涡水 平平流项 1 波分量对台风 Meranti 北折有较好的指 示作用。

Wu and Wang (2001) 将平流项分解为: $\Lambda_1(-V\cdot\nabla P)\approx -V_1\cdot\nabla P_s - V_s\cdot\nabla P_1$,其中, V_s 和 V_1 分别为风场的对称分量及1波分量,右侧第一项为 非对称气流引起的对称位涡的平流,主要包含大尺 度引导气流、通风流等作用;第二项为对称气流引 起的非对称位涡的平流,主要包含β涡度对、垂直 切变等作用。图7b, e和图7c,f分别显示了两组



图 6 2010 年 9 月 8 日 18 时集合预报成功组(红线)和失败组(蓝线)两组成员(a) 200 hPa、(b) 250 hPa和(c) 300 hPa 合成高度场(单位: dagpm,间隔: 2 dagpm),黑色台风符号为台风中心

Fig. 6 (a) Geopotential heights (units: dagpm, contours at interval of 2 dagpm) of good (red) and poor (blue) groups on (a) 200 hPa, (b) 250 hPa, and (c) 300 hPa at 1800 UTC 8 Sept 2010. The black TC symbol is the TC center. Horizontal and vertical axes indicate the distance from the composite TC center



图7 2010年9月8日18时台风Meranti北折时500 hPa (a-c) 成功组和 (d-f) 失败组位涡水平平流项 (阴影,单位: $10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K kg}^{-1}$): (a, d) 1 波分量; (b, e) 平流项第一项 ($-V_1 \cdot \nabla P_s$); (c, f) 平流项第二项 ($-V_s \cdot \nabla P_1$)。黑色台风符号为台风中心,黑色箭头为北折时刻 台风的移动方向

Fig. 7 The potential vorticity horizontal advection (shadings, units: $10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K kg}^{-1}$) of (a-c) good and (d-f) poor groups on 500 hPa at 1800 UTC 8 Sept 2010: (a, d) The wavenumber one; (b, e) the first term ($-V_1 \cdot \nabla P_s$); (c, f) the second term ($-V_s \cdot \nabla P_1$). The black TC symbol is the TC center, and the black vector is the direction of TC movement

第一、二项的分布情况。成功组(图7b)平流项 第一项的正值区出现在台风中心西北部,而失败组 (图7e)出现在台风中心西偏南部,均与各自平流 项的分布相似。而平流项第二项(图7c和f)分布 也与平流项分布类似,但量值和范围均小于第一 项,说明大尺度引导气流引起的对称位涡平流对位 涡水平平流项的1波分量分布起主要贡献。而成功 组UTCL较强,垂直向下延伸较深,对台风环境引 导气流的影响比较明显,失败组UTCL较弱较浅, 对台风环境引导气流影响较小,从而对Meranti的 北折产生不同作用。

研究表明,台风中心趋于不稳定层结区域(陈 联寿等,1997),即对流发展区域。图8a,b分别 为北折时成功组和失败组北折时沿台风—UTCL中 心的相当位温剖面,这里θ_e的计算采用 Davies-Jones (2009)的方法。可见,两组成员冷涡中心 位置(黑色三角)附近,θ_e低值中心均出现在700 hPa高度附近,以下低层则为θ_e的大值区,表明两 组成员在对流层中低层均为对流不稳定状态,但成 功组 850 hPa以下对流层低层的θ_e值较失败组偏 大,表明其不稳定能量较高。另外,成功组(图 8a)UTCL位于台风北偏东约13°,台风中心和 UTCL中心距离较近,约4.6经纬距。而失败组 UTCL中心相距较远,约6.4经纬距,对台风的影 响小于前者。因此,成功组台风中心北侧、UTCL 下方对流层中低层的高不稳定能量环境更有利于台 风Meranti向北运动。



图8 2010年9月8日18时台风Meranti北折时(a)成功组和(b)失败组在极坐标中沿台风—UTCL中心的相当位温剖面(填色,单位:K,间隔:2K)。原点为台风中心位置,横坐标为台风和UTCL的中心距离,黑色三角为UTCL中心位置 Fig. 8 Vertical cross sections of equivalent potential temperature (units: K, shadings at interval of 2 K) of the (a) good and (b) poor groups through

the TC-UTCL center in polar coordinate at 1800 UTC 8 Sept 2010. The origin is the TC center, the horizontal axes indicate the distance between the TC and UTCL, the black triangle is the UTCL center

综上所述,在较强UTCL影响下,台风中心西 北部的位涡水平平流项的1波分量大值区较明显, 有利于台风 Meranti 北折。同时,较强UTCL控制 下台风北侧对流层中低层有不稳定能量增加,也对 台风北移有利。

4 总结和讨论

本文采用TIGGE数据资料,对比分析集合成员对台风Meranti(1010)北翘路径预报成功组和失败组的大气环流形势、演变过程及大气系统结构,探讨高空冷涡活动对台风Meranti北翘路径的影响,获得以下认识:

(1)集合预报对台风Meranti北翘路径的预报结 果具有较大离散性,预报时效越长误差越大。集合 预报成员的分歧与模式对UTCL活动的预报差异 有关。

(2) 台风 Meranti 北翘路径与其和附近 UTCL 的南北向耦合有关。UTCL 北移至台风 Meranti 北部过程中,增强了台风偏南引导气流,有利于其北折。UTCL 主要通过改变台风上层环境引导气流来影响台风路径变化。

(3) 台风 Meranti 北翘路径还与 UTCL 结构有

关。水平范围大、垂直伸展深的UTCL对台风运动 变化影响更为明显。

(4)根据位涡倾向方程,在TC与UTCL南北 耦合过程中,台风西北侧存在位涡水平平流项的正 值区,有利于台风向西北方向运动。同时台风中心 北侧、位于冷涡下方的对流层中低层具有较大不稳 定能量,也有利于台风北翘。

UTCL对台风路径的影响与两者相互作用过程 中的配置有关,包括两者之间的距离、方位以及强 度等,其物理过程和机理比较复杂,还有待于深入 探讨。本文仅探讨了一个西北移动UTCL对其南侧 台风Meranti路径变化的影响,一些结论还需更多 个例以及数值敏感性试验进一步验证。

参考文献 (References)

- Chan J C L, Ko F M F, Lei Y M. 2002. Relationship between potential vorticity tendency and tropical cyclone motion [J]. J. Atmos. Sci., 59 (8): 1317–1336. doi:10.1175/1520-0469(2002)059<1317:RBPVTA> 2.0.CO;2
- 陈联寿, 丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论 [M]. 北京: 科学出版社, 491pp. Chen Lianshou, Ding Yihui. 1979. Overview of the Typhoon in Northwest Pacific (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 491pp

陈联寿,徐祥德,解以扬,等.1997.台风异常运动及其外区热力不稳

定非对称结构的影响效应 [J]. 大气科学, 21 (1): 83-90. Chen Lianshou, Xu Xiangde, Xie Yiyang, et al. 1997. The effect of tropical cyclone asymmetric thermodynamic structure on its unusual motion [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 21 (1): 83-90. doi: 10.3878/j.issn. 1006-9895. 1997.01.09

- 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): 420-431. Chen Lianshou, Meng Zhiyong. 2001. An overview on tropical cyclone research progress in China during the past ten years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 25(3): 420-431. doi: 10.3878/j. issn.1006-9895.2001.03.11
- Colton D E. 1973. Barotropic scale interactions in the tropical upper troposphere during the northern summer [J]. J. Atmos. Sci., 30(7): 1287-1302. doi: 10.1175/1520-0469(1973)030<1287: BSIITT>2.0. CO;2
- Davies-Jones R. 2009. On formulas for equivalent potential temperature [J]. Mon. Wea. Rev., 137(9): 3137–3148. doi:10.1175/ 2009MWR2774.1
- 端义宏, 陈联寿, 梁建茵, 等. 2014. 台风登陆前后异常变化的研究进展 [J]. 气象学报, 72(5): 969–986. Duan Yihong, Chen Lianshou, Liang Jianyin, et al. 2014. Research progress in the unusual variations of typhoons before and after landfalling [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 72(5): 969–986. doi:10.11676/qxxb2014.085
- Fitzpatrick P J, Knaff J A, Landsea C W, et al. 1995. Documentation of a systematic bias in the aviation model's forecast of the Atlantic tropical upper-tropospheric trough: Implications for tropical cyclone forecasting [J]. Wea. Forecasting, 10(2): 433–446. doi:10.1175/1520-0434(1995)010<0433:DOASBI>2.0.CO;2
- 郭旭, 麻素红, 吴俞, 等. 2014. 基于 TIGGE 资料的台风"鲇鱼"路径 北翘成因分析 [J]. 热带气象学报, 30(1): 55-63. Guo Xu, Ma Suhong, Wu Yu, et al. 2014. An analysis of abrupt northward turning of typhoon Megi (1013) using TIGGE data [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 30(1): 55-63. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2014.01.06
- Hodanish S, Gray W M. 1993. An observational analysis of tropical cyclone recurvature [J]. Mon. Wea. Rev., 121(10): 2665–2689. doi: 10.1175/1520-0493(1993)121<2665:AOAOTC>2.0.CO;2
- 黄荣辉,陈光华. 2007. 西北太平洋热带气旋移动路径的年际变化及 其机理研究 [J]. 气象学报, 65(5): 683-694. Huang Ronghui, Chen Guanghua. 2007. Research on interannual variations of tracks of tropical cyclones over Northwest Pacific and their physical mechanism [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 65(5): 683-694. doi:10.11676/qxxb2007.064
- 雷小途, 陈联寿. 2001. 热带气旋与中纬度环流系统相互作用的研究 进展 [J]. 热带气象学报, 17(4): 452-461. Lei Xiaotu, Chen Lianshou. 2001. An overview on the interaction between tropical cyclone and mid-latitude weather systems [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 17(4): 452-461. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2001.04.015
- 李勋, 李泽椿, 赵声蓉, 等. 2010. "珍珠"(0601) 异常急翘路径和 内核结构变化的诊断分析及数值研究 [J]. 气象, 36(9): 1-8. Li Xun, Li Zechun, Zhao Shengrong, et al. 2010. A diagnosis and

numerical study of an abrupt recurved typhoon Chanchu and its inner core structure evolution [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 36(9): 1–8. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2010.9.001

- 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. Li Ying, Chen Lianshou, Wang Jizhi. 2004. The diagnostic analysis on the characteristics of large scale circulation corresponding to the sustaining and decaying of tropical cyclone after its landfall [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 60 (2): 167–179. doi: 10.3321/j. issn:0577-6619.2004.02.004
- Li Y, Guo L X, Xu Y L, et al. 2012. Impacts of upper-level cold vortex on the rapid change of intensity and motion of typhoon Meranti (2010) [J]. J. Trop. Meteor., 18(2): 207–219. doi:10.3969/j.issn.1006-8775.2012.02.010
- 梁军,李英,张胜军,等. 2012. 黄海西移台风的环流特征及其对辽东 半岛降水影响的对比分析 [J]. 热带气象学报, 28(6): 861-872. Liang Jun, Li Ying, Zhang Shengjun, et al. 2012. The comparative analyses of circulation characteristics and their effect on precipitation over Liaodong Peninsula associated with typhoons turning westward over Yellow sea [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 28(6): 861-872. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2012.06.008
- 罗哲贤,陈联寿. 1995. 台湾岛地形对台风移动路径的作用 [J]. 大气 科学, 19(6): 701-706. Luo Zhexian, Chen Lianshou. 1995. Effect of the orography of Taiwan Island on typhoon tracks [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 19(6): 701-706. doi: 10.3878/j.issn. 1006-9895.1995. 06.06
- Palmer C E. 1953. The impulsive generation of certain changes in the tropospheric circulation [J]. J. Atmos. Sci., 10(1): 1–9. doi:10.1175/ 1520-0469(1953)010<0001:TIGOCC>2.0.CO;2
- Patla J E, Stevens D, Barnes G M. 2009. A conceptual model for the influence of TUTT cells on tropical cyclone motion in the northwest Pacific Ocean [J]. Wea. Forecasting, 24(5): 1215–1235. doi:10.1175/ 2009WAF2222181.1
- 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. Qian Chuanhai, Duan Yihong, Ma Suhong, et al. 2012. The current status and future development of China operational typhoon forecasting and its key technologies [J]. Adv. Meteor. Sci. Technol. (in Chinese), 2(5): 36-43. doi:10.3969/j. issn.2095-1973.2012.05.005
- Qian C H, Zhang F Q, Green B W, et al. 2013. Probabilistic evaluation of the dynamics and prediction of supertyphoon Megi (2010) [J].
 Wea. Forecasting, 28(6): 1562–1577. doi: 10.1175/WAF-D-12-00121.1
- 沈越婷, 钱传海, 李泽椿, 等. 2015. 热带气旋集合预报技术的应用情况简介 [J]. 气象科技进展, 5(5): 33-42. Shen Yueting, Qian Chuanhai, Li Zechun, et al. 2015. A review on applications of tropical cyclones ensemble prediction technologies [J]. Adv. Meteor. Sci. Technol. (in Chinese), 5(5): 33-42. doi: 10.3969/j. issn. 2095-1973.2015.05.004

Thorncroft C D, Hoskins B J, Mcintyre M E, 1993. Two paradigms of

baroclinic-wave life-cycle behaviour [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 119(509): 17-55. doi:10.1002/qj.49711950903

- 王斌, Elsberry R L, 王玉清, 等. 1998. 热带气旋运动的动力学研究进展 [J]. 大气科学, 22(4): 535-547. Wang Bin, Elsberry R L, Wang Yuqing, et al. 1998. Dynamics in tropical cyclone motion: A review [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 22(4): 535-547. doi: 10.3878/j. issn.1006-9895.1998.04.15
- 王晨稀. 2013. 热带气旋集合预报研究进展 [J]. 热带气象学报, 29 (4): 698-704. Wang Chenxi. 2013. Advances in tropical cyclone ensemble prediction [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 29(4): 698-704. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2013.04.020
- Wang M Y M, Chen G T J, Wang C C, et al. 2012. A case study of the cutoff process and latent heating effect in an upper-level cold-core low during the Mei-Yu season in East Asia [J]. Mon. Wea. Rev., 140 (6): 1725–1747. doi:10.1175/MWR-D-11-00306.1
- Wei N, Li Y, Zhang D L, et al. 2016. A statistical analysis of the relationship between upper-tropospheric cold low and tropical cyclone track and intensity change over the western North Pacific [J]. Mon. Wea. Rev., 144(5): 1805–1822. doi:10.1175/MWR-D-15-0370.1
- 文永仁, 戴高菊, 龚月婷, 等. 2017. 我国台风路径突变研究进展 [J]. 气象科技, 45(6): 1027-1035. Wen Yongren, Dai Gaoju, Gong Yueting, et al. 2017. Advances in research on sudden track change of typhoons in China [J]. Meteor. Sci. Technol. (in Chinese), 45(6): 1027-1035. doi:10.19517/j.1671-6345.20160564
- Wu L G, Wang B. 2000. A potential vorticity tendency diagnostic approach for tropical cyclone motion [J]. Mon. Wea. Rev., 128(6): 1899–1911. doi:10.1175/1520-0493(2000)128<1899: APVTDA>2.0. CO;2
- Wu L G, Wang B. 2001. Movement and vertical coupling of adiabatic baroclinic tropical cyclones [J]. J. Atmos. Sci., 58(13): 1801–1814.

doi:10.1175/1520-0469(2001)058<1801:MAVCOA>2.0.CO;2

- 吴玉琴, 吴立广, 梁佳. 2015. 利用位涡趋势法诊断台风"莫拉 克"(2009)的移动 [J]. 气象学报, 73(2): 236-246. Wu Yuqin, Wu Liguang, Liang Jia. 2015. Diagnosis of the movement of typhoon Morakot (2009) using the potential vorticity tendency approach [J]. Acta Meteor. Sinica, 73(2): 236-246. doi: 10.11676/ qxxb2015.020
- 项续康, 陆文杰, 刘征. 2003. 0116 号台风异常移动路径分析 [J]. 气 象, 29(5): 34-36, 57. Xiang Xukang, Lu Wenjie, Liu Zheng. 2003. Analysis of anomalous moving track of typhoon 0116 (Nari) [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 29(5): 34-36, 57. doi: 10.3969/j. issn. 1000-0526.2003.05.008
- 许映龙, 张玲, 高拴柱. 2010. 我国台风预报业务的现状及思考 [J]. 气象, 36(7): 43-49. Xu Yinglong, Zhang Ling, Gao Shuanzhu. 2010. The advances and discussions on China operational typhoon forecasting [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 36(7): 43-49.
- 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. Xu Yinglong, Lü Xinyan, Zhang Ling, et al. 2015. Analysis on the characteristics and forecasting difficulty of severe typhoon Fitow (No. 1323) [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 41(10): 1222-1231. doi: 10.7519/j.issn. 1000-0526.2015.10.005
- Yamaguchi M, Majumdar S J. 2010. Using TIGGE data to diagnose initial perturbations and their growth for tropical cyclone ensemble forecasts [J]. Mon. Wea. Rev., 138(9): 3634–3655. doi: 10.1175/ 2010MWR3176.1
- 张胜军, 陈联寿, 徐祥德. 2005. Helen 台风(9505)异常路径的诊断分 析与数值模拟 [J]. 大气科学, 29(6): 937-946. Zhang Shengjun, Chen Lianshou, Xu Xiangde. 2005. The diagnoses and numerical simulation on the unusual track of Helen (9505) [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29(6): 937-946. doi:10.3878/ j.issn.1006-9895.2005.06.09