

梁军, 李英, 张胜军, 等. 2015. 影响辽东半岛两个台风 Meari 和 Muifa 暴雨环流特征的对比分析 [J]. 大气科学, 39 (6): 1215–1224. Liang Jun, Li Ying, Zhang Shengjun, et al. 2015. Comparison on of synoptic circulations of heavy rain associated with typhoons Meari and Muifa over Liaodong Peninsula [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (6): 1215–1224, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14191.

影响辽东半岛两个台风 Meari 和 Muifa 暴雨 环流特征的对比分析

梁军¹ 李英² 张胜军² 刘晓初¹

¹ 大连市气象台, 大连 116001

² 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

摘 要 Meari (1105) 和 Muifa (1109) 是两个路径相似并在辽东半岛产生强降水的热带气旋。但 Meari 强降水持续时间长, 而 Muifa 时间短。利用中国气象局热带气旋年鉴、FY_2D ($0.1^\circ \times 0.1^\circ$) 云顶亮温资料、大连地区逐时自动气象站降雨量资料、常规观测资料和 NCEP/NCAR 再分析资料, 对两个台风影响辽东半岛的降水过程进行了对比分析。结果表明: (1) Meari 影响辽东半岛时强度较弱, 但与低空东南急流相连获得丰富水汽供应, 衰减缓慢; Muifa 影响时强度较强但与低空急流水汽通道快速断开而衰减迅速。(2) 两个台风均进入西风槽区而变性, 但两者影响辽东半岛时处于不同的变性阶段。Meari 为半冷半暖结构, 其北侧中尺度对流活动发展旺盛, 非对称结构明显; Muifa 低层环流已变性为冷中心, 云系结构孤立且无发展。(3) 两次过程中辽东半岛位于台风不同的对流发展区域是其降水强度差异的原因之一。辽东半岛位于 Meari 北侧, 低层的水平辐合较强, 水平风垂直切变较大, 深厚的上升运动维持; Muifa 影响下辽东半岛位于其西侧, 受偏北风下沉气流控制, 不稳定性与动力抬升条件减弱。

关键词 热带气旋 暴雨 环流特征 变性

文章编号 1006-9895(2015)06-1215-10

中图分类号 P457

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14191

Comparison of Synoptic Circulations of Heavy Rain Associated with Typhoons Meari and Muifa over Liaodong Peninsula

LIANG Jun¹, LI Ying², ZHANG Shengjun², and LIU Xiaochu¹

¹ Dalian Meteorological Observatory, Dalian 116001

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

Abstract Tropical cyclones (TC) Meari (1105) and Muifa (1109) had similar tracks and caused severe rainfall over Liaodong Peninsula. However, Meari produced heavy precipitation with a much longer time period, although with weaker intensity, than that of Muifa. Using the Tropical Cyclone Yearbook, Fengyun (FY_2D) $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ cloud top brightness temperature data, hourly rainfall observations from Dalian automated weather station, conventional observational data, and National Centers for Environmental Prediction–National Center for Atmospheric Research reanalysis data, the two TC cases that affected Liaodong Peninsula were compared and diagnosed. The results showed that (1) Meari had relatively weak intensity when affecting Liaodong Peninsula; however, it decayed slowly due to abundant moisture supply

收稿日期 2014-05-30; 网络预出版日期 2015-03-19

资助项目 国家自然科学基金项目 91215302、41475055、41175063, 中国气象局预报员专项 CMAYBY2014-013, 大连市科技计划项目 2013E15SF132、2014E21SF009

作者简介 梁军, 女, 1967 年出生, 正研级高级工程师, 主要从事短期天气预报和研究工作。E-mail: qinldj@163.com

from the low-level southeast jet. Muifa was stronger than Meari, but its strength decreased rapidly due to the cut-off with the low-level moisture jet. (2) Meari and Muifa experienced extratropical transition when approaching westerly troughs. However, they possessed different structures when affecting Liaodong Peninsula: Meari had a hybrid structure with remarkable baroclinic instability, and mesoscale convection developed on its north side; while Muifa transformed into a cold core in low-level circulation and its cloud structure showed isolated features. (3) One of the causes of the difference in precipitation amount over Liaodong Peninsula was their different locations in the typhoon circulation. Liaodong Peninsula was located in the north of Meari, possessing strong low-level convergence, vertical wind shear, and deep and persistent vertical motion. However, its location was in the west of Muifa, where the northerly wind produced downward motion and dynamic lifting was reduced.

Keywords Tropical cyclone, Heavy rainfall, Circulation characteristics, Extratropical transition

1 引言

北上影响辽东半岛的热带气旋(TC)灾害以暴雨最为严重(陈联寿和丁一汇, 1979; 陶诗言等, 1980; 梁军和陈联寿, 2005)。这类台风暴雨通常出现在台风与中纬度系统相互作用过程中。在此过程中若有低空急流将水汽输送至中纬度槽前, 有利于 TC 的维持和大范围强降水的产生(李英等, 2004; 杨晓霞等, 2008; 程正泉等, 2009); 同时 TC 与西风槽的相互作用也可获得斜压能量变性加强, 激发中尺度对流系统(MCS), 增加降水强度(丁治英等, 2001; 梁军等, 2008; 杜惠良等, 2011; 冀春晓等, 2012; 李英等, 2013)。而 TC 的变性过程的不同阶段具有不同的结构特征(Harr and Elsberry, 2000; Klein et al., 2002), 这使其降水强度和分布的因素更为复杂(Chen et al., 2006; 陈锴等, 2010; 周玲丽等, 2011)。因此北上路径相似的变性台风, 其所经地区的降水往往有较大差异(丁德平和李英, 2009), 成为预报中的难题。因此, 研究相似路径 TC 与环境流场相互作用及其对暴雨的影响具有重要意义。

2011 年的 1105 号台风(Meari)和 1109 号台风(Muifa)相继北上影响辽东半岛(图 1a)。其路径相似, 且均伴有变性过程。尽管开始影响时, Meari 距辽东半岛南部地区的距离(近 800 km)比 Muifa 的(近 400 km)远, 台风中心海平面气压(980 hPa)也比 Muifa 的(975 hPa)弱(图 1b), 但之后的降水却比 Muifa 的明显偏多。前者影响期间, 辽东半岛地区从 6 月 26 日凌晨开始至 27 日 10 时(北京时间, 下同), 普降暴雨(图 1c), 大连市区日降雨量最大, 为 171 mm, 突破 6 月份同期历史极值; 而后者影响期间, 辽东半岛的强降水主要集中在台

风登陆前(8 月 7 日 20 时~8 日 20 时), 最大日降水量也出现在大连市区, 为 104 mm(图 1d)。两者累计降水差异显著。这与两个台风的衰减速度有一定关系, Meari 影响期间中心海平面气压 24 h 仅升高 2 hPa(图 1b), 而 Muifa 影响期间, 台风中心海平面气压 24 h 升高 15 hPa(图 1b)。但两者影响的物理过程差异还不太清楚。利用 NCEP/NCAR 再分析资料、常规观测资料、每小时一次的 FY_2D ($0.1^\circ \times 0.1^\circ$) 云顶亮温资料、大连地区逐时自动气象站降雨量资料及上海台风所台风最佳路径资料, 对辽东半岛这两次台风暴雨天气过程进行对比分析。

2 大尺度环流特征对比

2.1 环流形势

两个台风影响辽东半岛(图 2 中三角形区域)期间, 其东部对流层中高层的环流特征基本相似(图 2a-d)。副热带高压与稳定在我国东北地区的大陆高压合并, 形成近南北向的混体高压带, 有利于台风在近海北上(图 2a, b); 但台风西侧的环流特征有明显差异。Meari 影响辽东半岛期间, 青藏高压中心在 95°E 以西(图 2a, c), 台风西侧与中高纬度蒙古国附近的西风槽底相连, 逐渐靠近高空急流(图 2c), 西风带冷空气逆时针卷入台风西南部(图 2a); 台风东南侧与副热带相连, 台风与副高之间所形成的东南风低空急流, 将我国东部海域的水汽向北输送至半岛地区(图 2e), 形成水汽辐合(图 2e 中阴影), 中心值超过 $30 \text{ g s}^{-1} \text{ hPa}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ 的水汽通量带和低于 $-15 \text{ g s}^{-1} \text{ hPa}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 的水汽辐合区与半岛地区连接近 22 h。Muifa 影响辽东半岛时, 青藏高压中心东移至 100°E 附近(图 2b, d), 并向华北西北部伸展, 贝加尔湖地区西风槽相对平

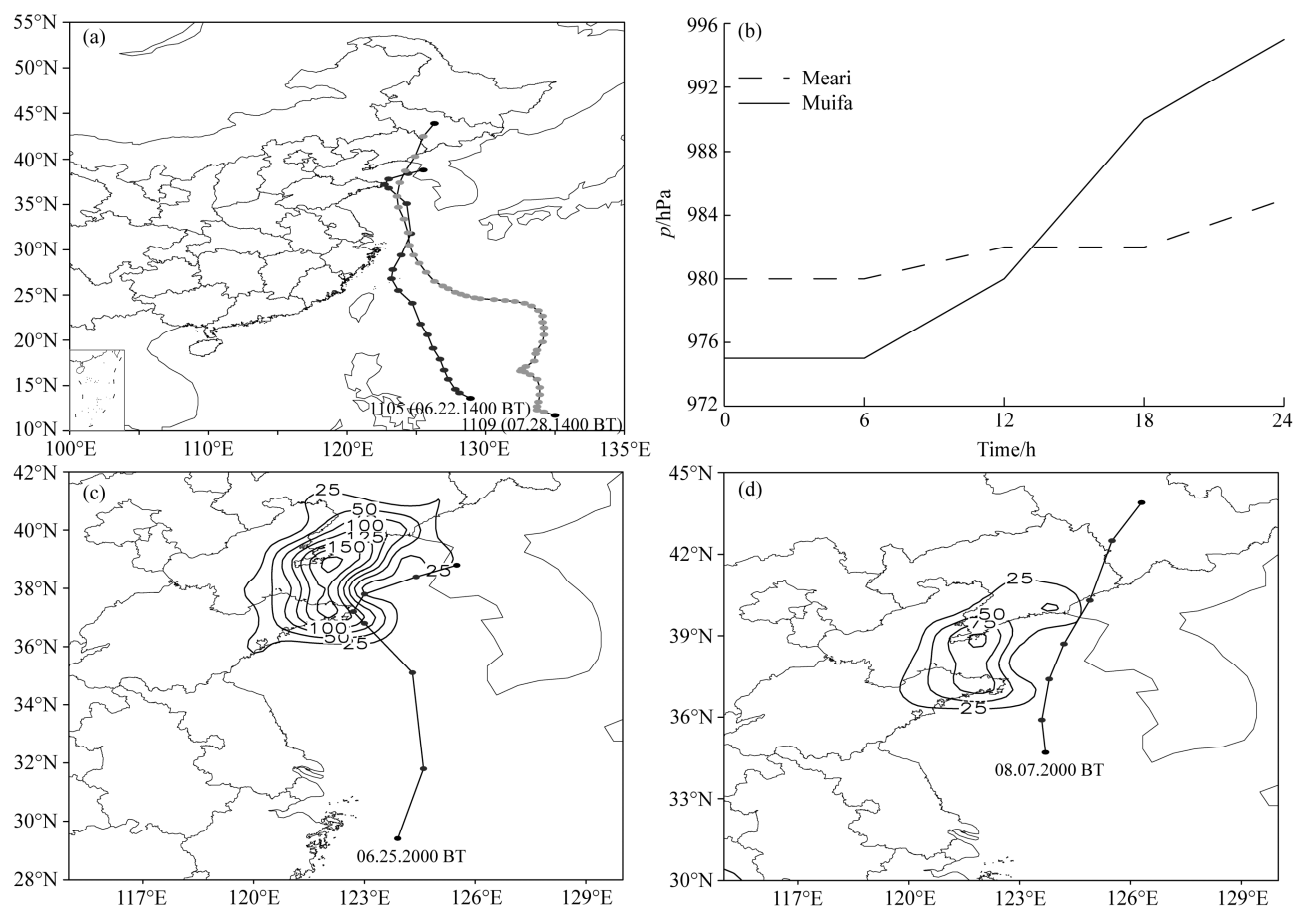


图1 (a) 台风 Meari 和 Muifa 的路径及其 (b) 影响辽东半岛期间的中心海平面气压变化(横坐标 0 表示影响辽东半岛的初始时刻); (c) Meari 2011 年 6 月 25 日 20 时(北京时间,下同)至 27 日 08 时和 (d) Muifa 2011 年 8 月 7 日 20 时至 8 日 20 时降水量和台风路径(单位: mm; 台风位置间隔 6 h)

Fig. 1 (a) The tracks of Meari and Muifa at 6-h interval; (b) the minimum sea level pressure curves of Meari and Muifa over Liaodong Peninsula (abscissa denotes the time affecting Liaodong Peninsula); (c, d) the rainfall amount and TC tracks (units: mm; track time interval: 6 h) of Meari during 2000 BT (Beijing Time, the same below) 25 June to 0800 BT 27 June 2011 and 2000 BT 7 August to 2000 BT 8 August 2011 for Muifa

直, 台风远离高空急流(图 2d); 台风东南部的副高向西南侧伸展, 与东移的青藏高原趋于合并, 切断了台风与副热带暖湿输送带的连接, 水汽辐合带大值区仅维持在台风眼区周围(图 2f 中阴影), 中心值超过 $30 \text{ g s}^{-1} \text{ hPa}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ 的水汽通量仅在辽东半岛维持了 12 h。

可见, 相似路径台风 Meari 和 Muifa 影响辽东半岛期间其大尺度环流背景存在差异。Meari 获得水汽输送而衰减缓慢, Muifa 因其低空急流水汽通道被快速隔断而迅速衰减。

2.2 温湿场

环境场是台风降水的重要影响因子之一(丁治英等, 2001; 程正泉等, 2009; 张建海等, 2010)。分析两个台风影响辽东半岛期间的环境温度场发

现, Meari 700 hPa 以下台风中心以东的温度明显高于辽东半岛地区(图 3a 中粗线), 形成东暖西冷的温度结构, 辽东半岛地区的斜压性和低层的不稳定性增强。此时 Meari 已经变性, 台风低层中心附近 342 K 的暖湿中心与其西北侧 322 K 的冷中心形成半暖半冷的结构(图 4a), 气旋性环流中假相当位温密集, 这是台风变性的前期。辽东半岛处于其北侧密集区的偏东气流中, 锋区有利于抬升。Muifa 影响辽东半岛期间, 台风中心低层由于青藏高原东移期间弱冷空气逆时针卷入台风西南部而变性, 700 hPa 以下的弱冷空气已自台风西侧卷入中心区域, 影响辽东半岛时处于变性后期, 其眼区低层出现了 342 K 的冷中心(图 4b)。辽东半岛由台风西北侧转入西南侧, 风向由东南风转为西北风, 为冷

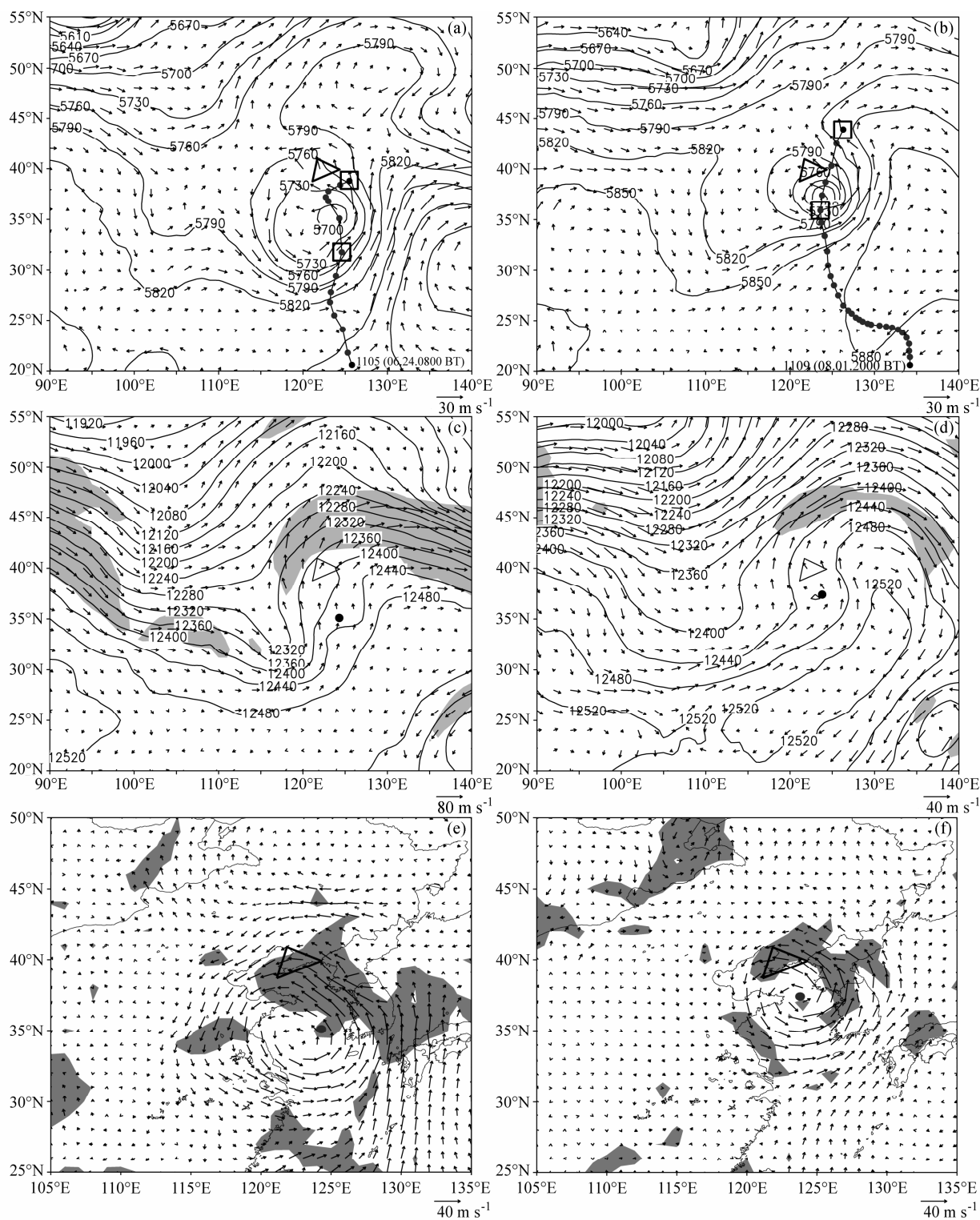


图2 (a, b) 500 hPa 风场、高度场 (gpm) 及 6 h 间隔的台风路径 (方框之间圆点为影响辽东半岛期间的台风位置); (c, d) 200 hPa 风场和高度场 (gpm, 阴影为水平全风速不小于 30 m s^{-1} 的风速区); (e, f) 850 hPa 风场和水汽通量散度 (阴影为小于 $-15 \text{ g s}^{-1} \text{ hPa}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 的水汽辐合区): (a, c, e) Meari, 2011 年 6 月 26 日 08 时; (b, d, f) Muifa, 2011 年 8 月 8 日 08 时。图中三角形区域为辽东半岛地区; 圆点为台风中心, 下同

Fig. 2 (a, b) Geopotential height (contours; units: gpm), wind vectors at 500 hPa, and typhoon track (dots between panes indicate the typhoon position affecting Liaodong Peninsula); (c, d) 200-hPa wind field (shaded areas indicate wind speed $\geq 30 \text{ m s}^{-1}$) and geopotential height (contours; units: gpm); (e, f) 850-hPa wind vectors and moisture flux divergence (shaded areas: $\leq -15 \text{ g s}^{-1} \text{ hPa}^{-1} \text{ cm}^{-2}$): (a, c, e) Meari, 0800 BT 26 June 2011; (b, d, f) Muifa, 0800 BT 8 August 2011. The triangles represent the Liaodong Peninsula and dots indicate typhoon center location, the same below

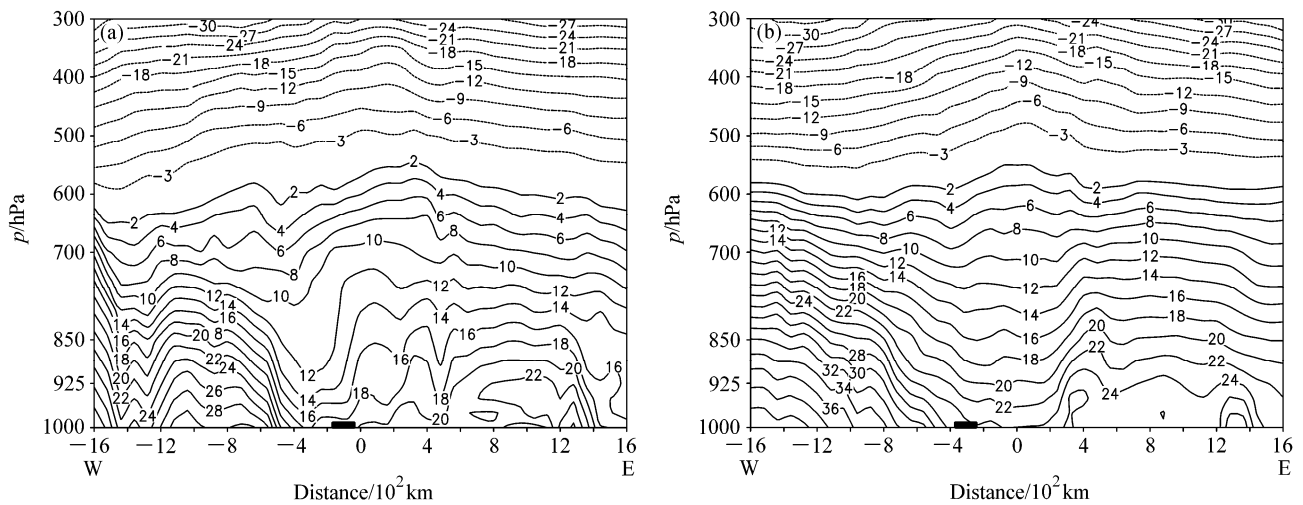


图3 (a) 2011年6月26日14时通过 Meari 中心 36.8°N 和 (b) 2011年8月8日14时通过 Muifa 中心 38.7°N 的温度 (单位: °C) 纬向—垂直剖面。图中横坐标是距台风中心 (0 点) 的距离, 单位: 10^2 km; 粗线段为辽东半岛暴雨区

Fig. 3 Zonal profiles of temperature (units: °C) through the centers of (a) Meari (36.8°N) at 1400 BT 26 June 2011 and (b) Muifa (38.7°N) at 1400 BT 8 August 2011. The abscissa shows the distance from the typhoon center (zero), units: 10^2 km; bold lines on the abscissa indicate the rainstorm area over the Liaodong Peninsula

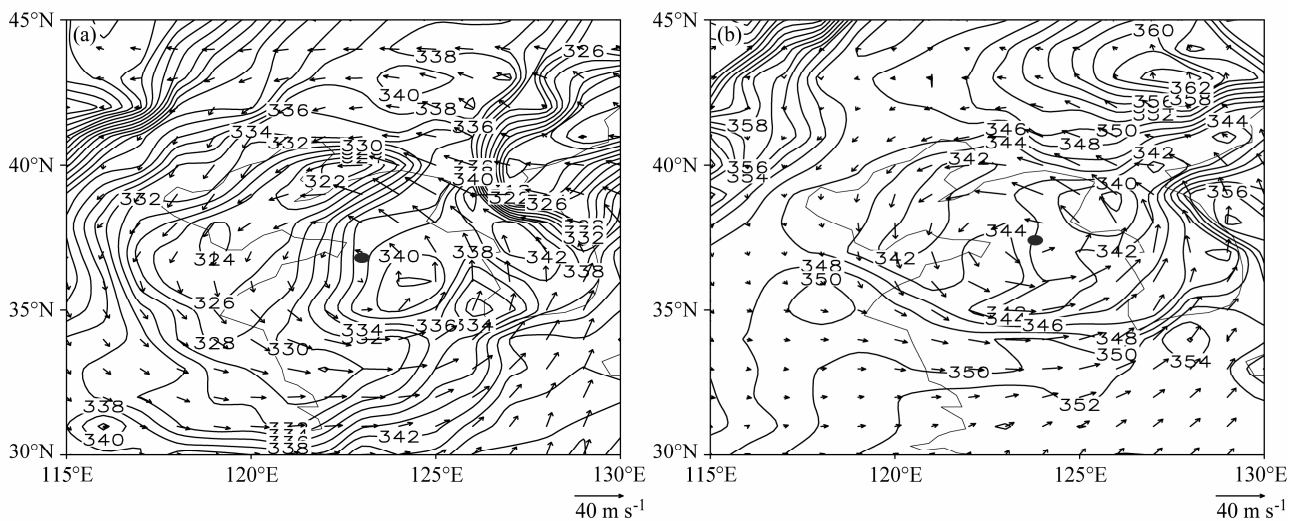


图4 850 hPa 风场和假相当位温 (K): (a) 2011年6月26日14时, Meari; (b) 2011年8月8日08时, Muifa。

Fig. 4 850-hPa wind vectors and pseudo-equivalent potential temperature (units: K) at (a) 1400 BT 26 June 2011 for Meari and (b) 0800 BT 8 August 2011 for Muifa

气团控制 (图 3b 中粗线), 其温度均低于周围环境温度, 低层大气层结趋于稳定, 不利于降水。

上述分析可以看出, 尽管台风 Meari 和 Muifa 均受冷空气影响而变性, 但影响辽东半岛期间两者处于不同阶段, 其温度场存在明显差异。Meari 低层台风环流仍保持暖中心, 半冷半暖的非对称结构明显, 辽东半岛位于台风环流北部锋区内, 对流发展; 而 Muifa 转变为冷中心, 辽东半岛位于台风环流西侧冷区内, 对流受到抑制。

3 中尺度系统活动特征对比

3.1 云顶亮温特征

辽东半岛强降水期间, Meari 和 Muifa 北部围绕眼区均有低于 -32°C 的螺旋云带 (图 5), 但云带内具有不同的对流发展特征。

2011年6月26日02时 (图 5a), Meari 远在长江口以东的海面上, 其北部的螺旋云带已影响辽

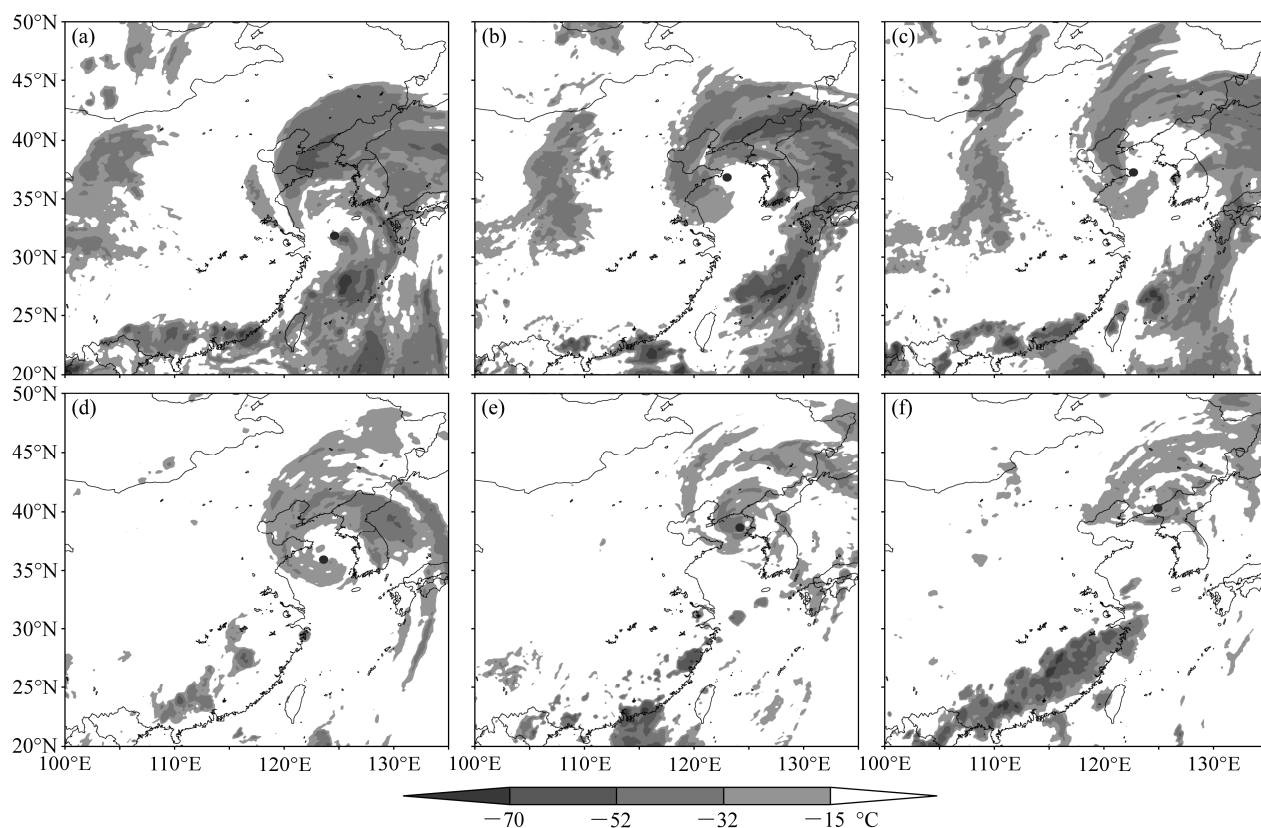


图5 台风(a-c) Meari 和(d-f) Muifa 云顶亮温(°C)分布:(a) 2011年6月26日02时;(b) 2011年6月26日14时;(c) 2011年6月26日20时;(d) 2011年8月8日02时;(e) 2011年8月8日14时;(f) 2011年8月8日20时

Fig. 5 The distributions of blackbody temperature (units: °C) for Meari at (a) 0200 BT, (b) 1400 BT, and (c) 2000 BT 26 June 2011, and for Muifa at (d) 0200 BT, (e) 1400 BT, and (f) 2000 BT 8 August 2011

东半岛。螺旋云带在东北—西南的径向上已被拉长, 低于 -32°C 的云体呈“9”字型非对称结构分布, 显示了变性台风的一般结构特征。台风东南象限始终与副热带暖湿输送带相连(图5b)。此时, 西风槽云带位于台风西侧的河套地区, 随着其逐渐东移, 有冷空气逆时针卷入台风西侧, 台风北部的对流发展旺盛, 西侧的云带明显向南弯曲, 西北侧的螺旋状云带拉长, 低于 -52°C 的中尺度对流云团在半岛地区维持了近9 h。随着台风的东北移(图5c), 低于 -32°C 的中尺度云带逐渐移出辽东半岛。在中尺度对流云带的持续影响下, 辽东半岛地区的强降水也长时间维持。

Muifa 的云系演变与 Meari 有所差异。2011年8月8日02时(图5d), 台风到达黄海北部海域时, 辽东半岛的降水开始。台风西侧低层冷空气的侵入及南侧暖湿输送带的断裂抑制了对流运动的发展, 其对流云带虽也有向北部伸展、西侧云带向南弯曲的过程, 但螺旋云系逐渐趋于松散, 低于 -32°C 的

中尺度云团仅维持在眼区附近(图5e), 辽东半岛上空的中尺度对流云团逐渐减弱(5f)。台风强对流云带在辽东半岛地区的影响时间短, 强降水持续时间短, 降水量小。

上述分析表明, 尽管两个台风均发生变性, 但由于北上过程中水汽输送条件及其与冷空气的相互作用不同, 两者的对流结构差异显著, 对辽东半岛产生的降水强度不同。Meari 变性非对称结构明显, 中尺度对流云团在其北侧和东侧发展, 而 Muifa 中尺度对流云团环绕眼区分布, 相对孤立且减弱。辽东半岛分别位于影响台风的对流运动发展区域, 产生了强度不同的降水。

3.2 环境风垂直切变

台风南侧副热带水汽输送带的切断与否直接影响了其南部外围螺旋云带的结构, 而台风环流区域内中尺度云团的分布与环境风垂直切变密切相关。在北半球, TC 的垂直切变大于 7.5 m s^{-1} , 台风的强降水区和中尺度对流云团主要出现在顺切变

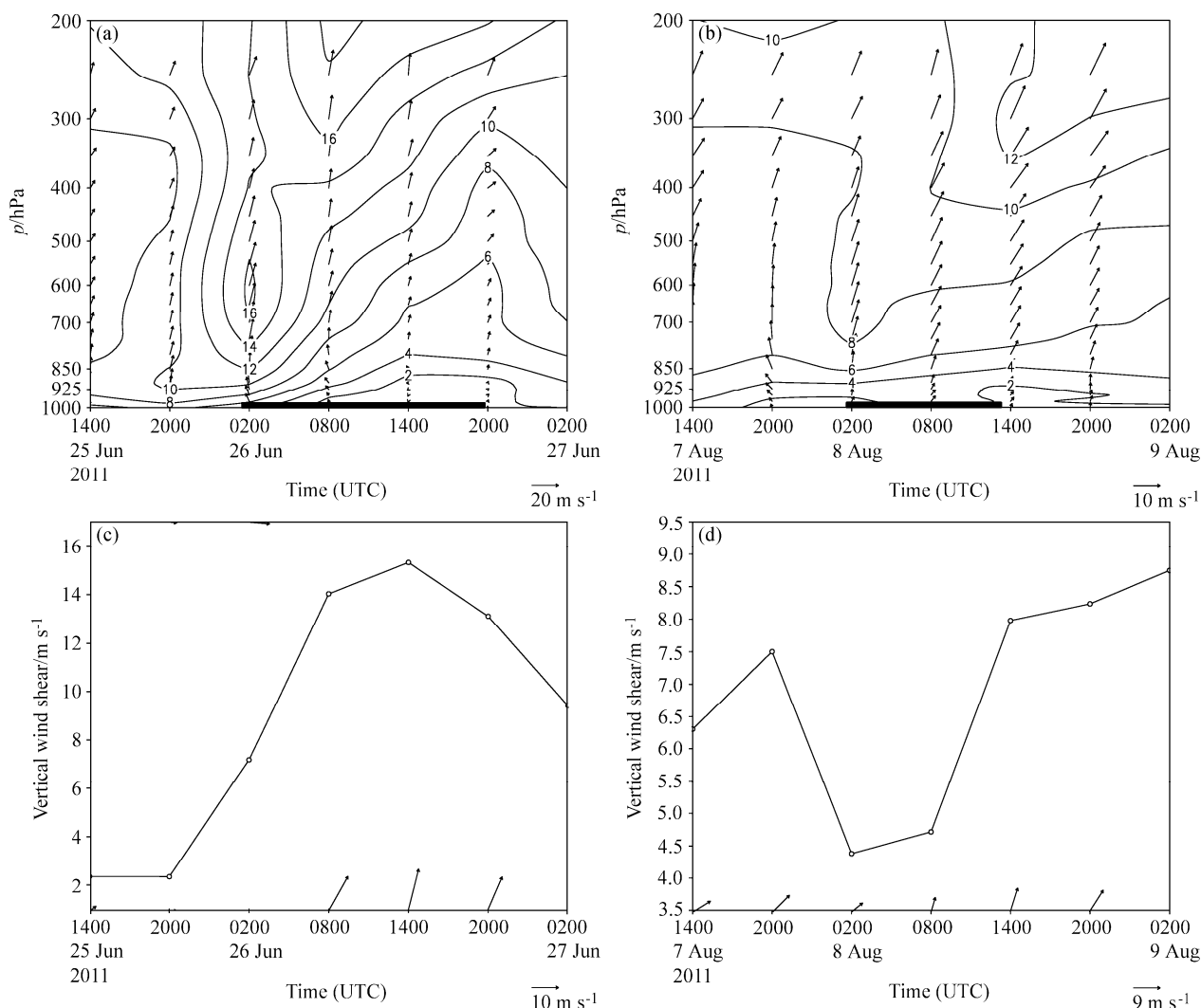


图6 台风区域 (a, b) 平均风矢量(箭头)和风速(等值线, $m s^{-1}$) 高度—时间变化, (c, d) 风垂直切变时间演变(箭头为方向, 曲线为量值, 单位: $m s^{-1}$): (a, c) Meari; (b, d) Muifa. 横坐标上的粗线段为强降水时间

Fig. 6 (a, b) Height-time cross sections of wind vectors (arrows) and wind speed (contours, units: $m s^{-1}$) averaged over the areas of (a) Meari and (b) Muifa; (c, d) temporal variation of vertical wind shear (arrows indicate the vector of vertical wind shear and curves show their magnitude in units of $m s^{-1}$) averaged over the areas of (c) Meari and (d) Muifa. Bold lines on the abscissa in (a, b) indicate the time of heavy precipitation

方向及其左侧 (Chen et al., 2006)。

图6是台风区域(以台风中心为中心的10个经纬度范围)平均风速和风矢量的垂直分布(图6a, b)及台风区域平均200 hPa与850 hPa风垂直切变(图6c, d)随时间的演变图。可以看出, Meari(图6a)和 Muifa(图6b)影响辽东半岛期间(图中横坐标上的粗线段为强降水时间), 台风区域平均风速分布差异显著。2011年6月26日02时辽东半岛强降水前期, Meari穿过600 hPa高空槽前的偏南风急流轴且逐渐移近对流层高层偏南风大值区, 08时穿过200 hPa的强风速区, 环境风垂直切变增

至 $14 m s^{-1}$, 风向为西南风(图6c), Meari的涡旋环流向西南伸展(图略), 各层偏离最大, 高层比低层偏离更大, 各高度层的台风环流非对称结构明显; 14时后, 垂直切变减弱, 台风强度最强, 各层偏离最小。降水期间垂直切变均大于 $12 m s^{-1}$, 垂直切变的风向为西南偏南风。台风区域的对流云团沿垂直切变的方向主要出现在台风北部(图5a-c)。而 Muifa引发辽东半岛强降水期间, 台风远离西风带高空槽, 环境风垂直切变的风向为西南到偏南风(图6d), 但量值均小于 $7.5 m s^{-1}$, 故台风区域的对流云团分布非对称性不明显, 主要出现在台风眼

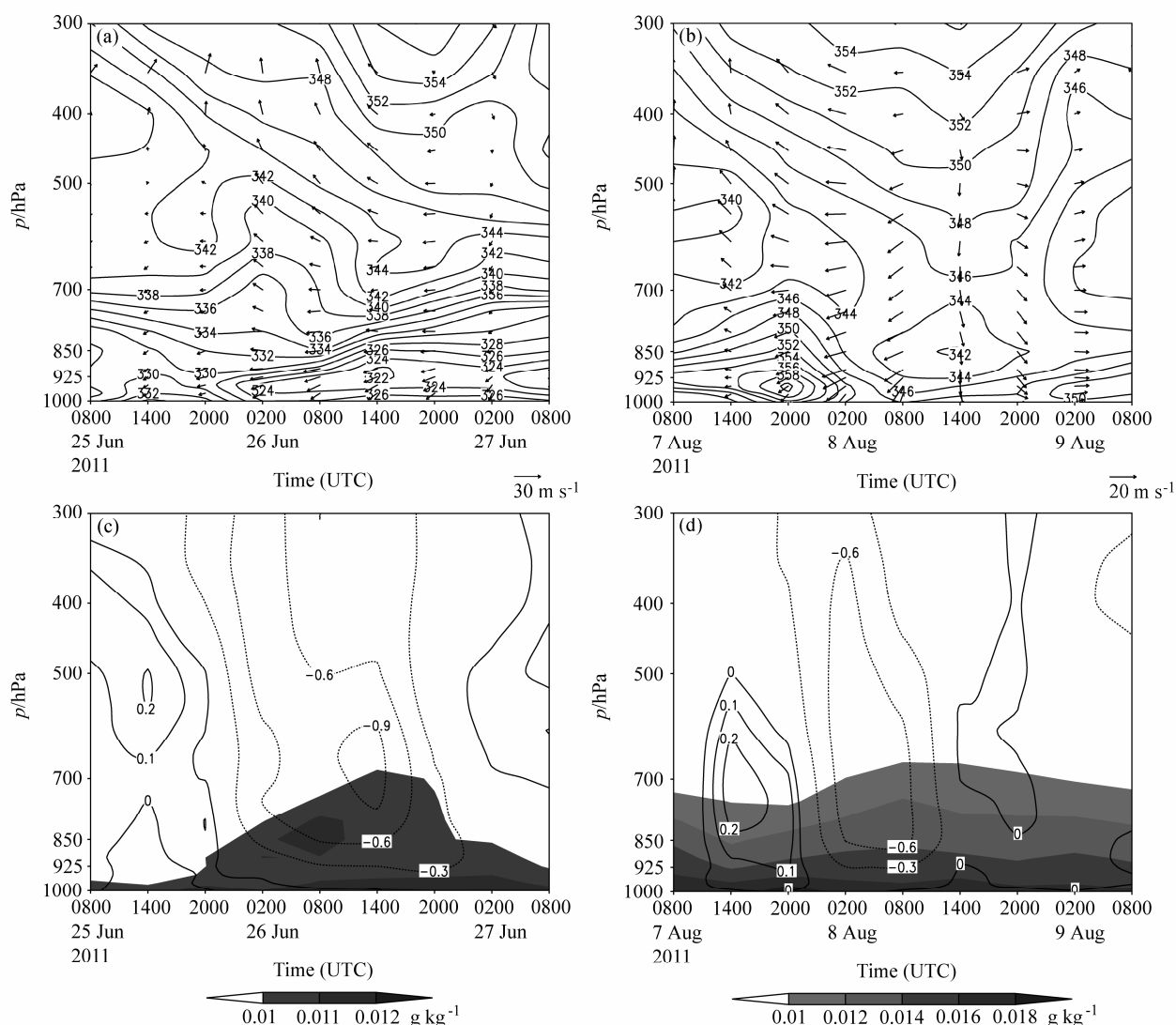


图7 辽东半岛上空 (38°~40°N, 121°~123°E) 平均 (a、b) 相当位温 (K) 和水平风矢量 (单位: m s^{-1})、(c、d) 比湿 (阴影为不小于 0.01 g kg^{-1} 的比湿区) 和垂直速度 (Pa s^{-1}) 的高度—时间变化。(a、c) Meari; (b、d) Muifa

Fig. 7 (a, b) Height-time cross sections of equivalent temperature and horizontal wind vectors (units: m s^{-1}) averaged over the Liaodong Peninsula region (38°–40°N, 121°–123°E); (c, d) height-time cross sections of specific humidity (shaded areas indicate specific humidity $\geq 0.01 \text{ g kg}^{-1}$) and vertical speed (units: Pa s^{-1}) averaged over the Liaodong Peninsula region (38°–40°N, 121°–123°E). (a, c) Meari; (b, d) Muifa

区的北部 (图 5d–f)。

由此可见, 两个台风在变性过程中环境风垂直切变的变化差异明显, Meari 的垂直切变比 Muifa 强的多, 其对流云团主要分布在顺切变方向的左侧, 而 Muifa 对流云团分布非对称性不显著, 主要集中在台风眼区附近。

4 暴雨区的降水条件对比

Meari 和 Muifa 在辽东半岛引发的降水量不同, 是由于不同变性过程中的台风造成了降水区的大

气动力、热力条件差异。

图 7 是两个台风影响期间 (图中横坐标上的粗线段为强降水时间), 辽东半岛 (38°~40°N, 121°~123°E) 区域平均的气象要素垂直分布随时间的演变图。从相当位温和水平风场的演变可以看出, 2011 年 6 月 25 日 Meari 影响前期 (图 7a), 由于东北高压南侧的东北气流已将鄂霍次克海的冷空气向西南输送, 此时辽东半岛位于台风北部冷中心一侧; 随着高空槽的东移, 向西南扩散的冷空气强度加大, 与台风东侧的暖湿气流相互作用, 温度梯度加大, 斜压性明显, 对流层低层可见锋区, 台风已

具有西侧冷东侧暖的结构特征,处于变性前期;与此同时,辽东半岛中高层处于西风槽前,由东南风转为南风,而低层东南风也明显加强(图 7a 中 26 日 08 时低层风矢量增长最明显),高低层风垂直切变加强。水平辐合、冷空气的强迫抬升及强风垂直切变这加剧了半岛的上升运动,上升运动中心由 925 hPa 升至 700 hPa, 0.01 g kg^{-1} 等值线高度抬升至 700 hPa (图 7c), 对称不稳定能量释放,产生暴雨。26 日 20 时后,半岛中高层转为槽后的偏北气流,低层也转为台风西侧的偏北气流,风垂直切变减小,半岛上空为下沉运动区,降水逐渐减少。

2011 年 8 月 7 日 Muifa 影响前(图 7b),辽东半岛处于东北地区大陆暖高压内,其低层为相当位温大值中心,而 700~500 hPa 由于华北东北部弱西风槽东移,出现降温,中低层大气垂直对流不稳定性加大。7 日 20 时后, Muifa 开始影响辽东半岛。此时,华北东北部东移的弱西风槽快速北收且强度明显减弱,低层青海至内蒙古中部的暖温度脊持续向东北伸展,阻挡了北方冷空气向东南扩散,辽东半岛边界层仍为相当位温大值区,但台风已处于变性后期,眼区低层为冷中心控制,辽东半岛上空中低层均转为东北风,气温下降,辽东半岛仍处于对流不稳定区域内。与此同时,半岛东侧的暖湿气流随台风的靠近明显增强(图 7b 中 8 日 02 时各层风矢量均达到最大值),水平辐合加大,半岛上空的垂直运动和水汽抬升加强(图 7d),冷空气强迫使辽东半岛前期不稳定能量释放,产生强降水。随着 Muifa 继续东北移,8 日 14 时半岛转至台风西侧,各层由东北风转为北风,对流层低层为冷气团控制,大气层结趋于稳定,半岛的降水停止。

分析表明,尽管两个台风影响时辽东半岛均具备了充沛的水汽,但受 Meari 影响期间,台风为半冷半暖结构,斜压不稳定明显,辽东半岛低层锋面辐合强,强降水持续时间长;而受 Muifa 影响期间,台风已变性为冷心结构,辽东半岛上空不稳定性减弱,低层环流中无锋面出现,强降水持续时间短。

5 结论

本文对比分析了路径相似并均发生变性的两个台风 Meari 和 Muifa 对辽东半岛降水的不同影响,结果表明,两个台风影响辽东半岛时结构特征有明显的差异。

(1) 两个台风变性的大尺度环流背景不同。Meari 与高空西风槽相互作用,且始终与东南水汽急流相连,获得较多的水汽能量和斜压位能,强度衰减缓慢;而 Muifa 因其低空急流水汽通道快速隔断以及冷空气填塞而迅速衰减。

(2) 中尺度结构不同。在变性过程中, Meari 为半冷半暖斜压结构,西风带系统以及低空水汽急流活动有利于其北侧中尺度对流活动发展;而 Muifa 则为冷中心,云系结构相对孤立,螺旋云系仅维持在眼区且无发展。

(3) 中尺度对流系统发展的动力、热力结构不同。Meari 影响下辽东半岛低层的水平辐合较强,水平风垂直切变较大,深厚的上升运动维持;而 Muifa 影响下辽东半岛转为偏北风下沉气流,动力抬升条件弱,不稳定层结趋于稳定。

(4) 辽东半岛处于台风对流运动发展的不同区域。Meari 影响下辽东半岛处于其北侧发展的中尺度对流区;而位于 Muifa 西侧中尺度对流运动减弱的区域。

两个台风的对比研究表明,TC 不同的变性环境以及变性不同阶段有不同的对流分布特征,对流结构不同,对辽东半岛的降水影响也不同。另外,垂直切变影响变性台风的垂直结构及其对流分布,对强降水落区有较好的指示意义,这可为实际预报提供参考。

参考文献 (References)

- 陈镭,徐海明,余晖,等. 2010. 台风“桑美”(0608) 登陆前后降水结构的时空演变特征 [J]. 大气科学, 34 (1): 105–119. Chen Lei, Xu Haiming, Yu Hui, et al. 2010. Temporal and spatial variations in precipitation of Typhoon Saomai (0608) before and after its landfall [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (1): 105–119.
- 陈联寿,丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论 [M]. 北京: 科学出版社, 305–310, 331–333, 462–474. Chen Lianshou, Ding Yihui. 1979. An Introduction to the Western Pacific Typhoon (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 305–310, 331–333, 462–474.
- Chen S Y, Knaff J A, Marks F D Jr. 2006. Effects of vertical wind shear and storm motion on tropical cyclone rainfall asymmetries deduced from TRMM [J]. Mon. Wea. Rev., 134 (11): 3190–3208.
- 程正泉,陈联寿,李英. 2009. 登陆台风降水的大尺度环流诊断分析 [J]. 气象学报, 67 (5): 840–850. Cheng Zhengquan, Chen Lianshou, Li Ying. 2009. Diagnostic analysis of large-scale circulation features associated with strong and weak landfalling typhoon precipitation events [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67 (5): 840–850.
- 丁德平,李英. 2009. 北京地区的台风降水特征研究 [J]. 气象学报, 67

- (5): 864–874. Ding Deping, Li Ying. 2009. A study on rainfall features of Beijing associated with typhoon [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 60 (5): 864–874.
- 丁治英, 张兴强, 何金海, 等. 2001. 非纬向高空急流与远距离台风中尺度暴雨的研究 [J]. *热带气象学报*, 17 (2): 144–154. Ding Zhiying, Zhang Xingqiang, He Jinhai, et al. 2001. The study of storm rainfall caused by interaction between the non-zonal high level jet streak and the far distant typhoon [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 17 (2): 144–154.
- 杜惠良, 黄新晴, 冯晓伟, 等. 2011. 弱冷空气与台风残留低压相互作用对一次大暴雨过程的影响 [J]. *气象*, 37 (7): 847–856. Du Huiliang, Huang Xinqing, Feng Xiaowei, et al. The effect of the interaction between weak cold flow and typhoon depression on a rainstorm [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 37 (7): 847–856.
- Harr P A, Elsberry E 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 (6): 2613–2633.
- 冀春晓, 赵放, 高守亭, 等. 2012. 登陆台风 Matsa (麦莎) 中尺度扰动特征分析 [J]. *大气科学*, 36 (3): 551–563. Ji Chunxiao, Zhao Fang, Gao Shouting, et al. 2012. Analysis of the characteristics of mesoscale disturbance for landfalling Typhoon Matsa [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36 (3): 551–563.
- 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.
- 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*, 60 (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.
- 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 Ying, Chen Lianshou, Lei Xiaotu. 2013. Study on rainfall variation associated with Typhoon Winnie (9711) during its extratropical transition process [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37 (3): 623–633.
- 梁军, 陈联寿. 2005. 影响辽东半岛热带气旋运动、强度和影响的特征 [J]. *热带气象学报*, 21 (4): 410–419. Liang Jun, Chen Lianshou. 2005. Motion and intensity and impact characteristics of tropical cyclone affecting the Liaodong Peninsula [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 21 (4): 410–419.
- 梁军, 陈联寿, 张胜军, 等. 2008. 冷空气影响辽东半岛热带气旋降水的数值试验 [J]. *大气科学*, 32 (5): 1107–1118. Liang Jun, Chen Lianshou, Zhang Shengjun, et al. 2008. Numerical study of impact of cold air on rainfall of tropical cyclone over Liaodong Peninsula [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 32 (5): 1107–1118.
- 陶诗言, 蔡则怡, 丁一汇, 等. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 225pp. Tao Shiyang, Cai Zeyi, Ding Yihui, et al. 1980. *Torrential Rain of China* (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 225pp.
- 杨晓霞, 陈联寿, 刘诗军, 等. 2008. 山东省远距离热带气旋暴雨研究 [J]. *气象学报*, 66 (2): 236–250. Yang Xiaoxia, Chen Lianshou, Liu Shijun, et al. 2008. A study of the far distance tropical cyclone torrential rainfalls in Shandong Province [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 66 (2): 236–250.
- 张建华, 于忠凯, 何勇. 2010. 两个路径相似台风暴雨过程的模拟分析 [J]. *热带气象学报*, 26 (4): 392–400. Zhang Jianhai, Yu Zhongkai, He Yong. 2010. Analysis of simulation of heavy rainfall associated with two typhoons with similar routes [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 26 (4): 392–400.
- 周玲丽, 翟国庆, 王东海, 等. 2011. 0713 号“韦帕”台风暴雨的中尺度数值研究和非对称性结构分析 [J]. *大气科学*, 35 (6): 1046–1056. Zhou Lingli, Zhai Guoqing, Wang Donghai, et al. 2011. Mesoscale numerical study of the rainstorm and asymmetric structure of 0713 Typhoon Wipha [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 35 (6): 1046–1056.