

梁军,张胜军,冯呈呈,等,2019. 台风 Polly(9216)和 Matmo(1410)对辽东半岛降水影响的对比分析[J]. 气象,45(6):766-776.  
Liang J,Zhang S J,Feng C C,et al,2019. Comparison of synoptic circulations of heavy rain associated with typhoons Polly and Matmo over Liaodong Peninsula[J]. Meteor Mon,45(6):766-776(in Chinese).

## 台风 Polly(9216)和 Matmo(1410)对 辽东半岛降水影响的对比分析\*

梁 军<sup>1</sup> 张胜军<sup>2</sup> 冯呈呈<sup>1</sup> 李婷婷<sup>1</sup> 黄 艇<sup>1</sup>

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

**提 要:** 台风 Matmo(1410)和 Polly(9216)影响辽东半岛时的路径近乎重合,但台风 Polly 造成了大范围的暴雨和大暴雨,而台风 Matmo 仅个别测站出现暴雨。利用中国气象局热带气旋年鉴、FY-2D 卫星的黑体亮度温度(TBB)产品( $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ )、日本气象厅 TBB 资料、大连地区逐时自动气象站降雨量资料、常规观测资料和欧洲中期数值预报中心 ERA-Interim 全球再分析资料( $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ ),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)两个台风均进入西风槽区而变性,在其西侧和北侧分别具有冷锋和暖锋锋生,辽东半岛的降水均发生在台风低压环流北侧的锋生区和环境风垂直切变明显增大过程中。但两个变性台风的大尺度环流背景却差异显著,台风 Polly 与西北侧较强冷空气相互作用,锋区随高度增加向西北倾斜,且与低空东南急流相连获得丰富水汽供应,强降水持续时间长,而台风 Matmo 与东北部对流层低层冷空气相互作用明显,锋区随高度增加略向东北倾斜,但其低空急流水汽通道被快速阻断,不稳定性动力抬升条件减弱,强降水持续时间短。(2)台风 Polly 和 Matmo 的降水分布非对称明显,均出现在顺垂直切变方向的左侧,但台风相对于高空槽的位置不同,对流活动发展的方位有所差异。台风 Polly 中尺度对流活动在其北侧发展旺盛,且向西南弯曲,而台风 Matmo 对流活动仅发生在台风环流东北侧。(3)台风的强降水落区还与其低层环流内冷、暖平流的活动密切相关。台风 Polly 西北侧的冷平流加强,辽东半岛位于台风北侧低层冷暖平流交汇区,水平辐合加强,深厚的上升运动维持,而台风 Matmo 东北侧的冷平流加强,辽东半岛逐渐位于台风西侧,低层为冷平流控制的下沉运动区,大气层结趋于稳定。

**关键词:** 热带气旋,暴雨,环流特征,变性

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.06.003

### Comparison of Synoptic Circulations of Heavy Rain Associated with Typhoons Polly and Matmo over Liaodong Peninsula

LIANG Jun<sup>1</sup> ZHANG Shengjun<sup>2</sup> FENG Chengcheng<sup>1</sup> LI Tingting<sup>1</sup> HUANG Ting<sup>1</sup>

1 Dalian Meteorological Observatory, Dalian 116001

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

**Abstract:** The tracks of tropical cyclones (TC) Matmo (1410) and Polly (9216) were very similar over Liaodong Peninsula. However, the former caused only scattered rainstorms, but the latter produced large-scale rainstorms. Using CMA Tropical Cyclone Yearbook, FY-2D temperature of brightness blackbody (TBB) product ( $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ ), satellite observed TBB data issued by Japanese Meteorological Administration, hourly rainfall observations from Dalian's automatic weather stations (AWSs), conventional observation

\* 国家自然科学基金项目(41775048 和 41575063)、环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM201615、QYXM201702、QYXM201711、QYXM201801、QYXM201805、QYXM201807)共同资助

2018 年 2 月 7 日收稿; 2019 年 3 月 18 日收修定稿

第一作者: 梁军,主要从事短期天气预报和研究工作. Email: qinldj@163.com

and ERA-Interim reanalysis data ( $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ ), the two TC cases that affected Liaodong Peninsula were compared and diagnosed. The results showed that (1) Polly and Matmo experienced extratropical transition when approaching westerly troughs. Frontogenesis zones were found in the lower layers of them. The western frontal zone had the cold frontal feature and the northern frontal zone had the warm frontal feature. Both of the precipitation over Liaodong Peninsula appeared in the northern frontogenesis processes. Meanwhile, the vertical wind shears were enhanced. But the characteristics of large-scale circulation of the two TCs were quite different. The cold air in the lower and middle troposphere invaded into Polly's northwest side, the frontal zone slanted towards northwest with height, Polly produced heavy precipitation with a much longer time period due to abundant moisture supply from the low-level southeast jet. However, the frontal zone slanted towards northeast with height under the interaction between Matmo and the low level cold air being from the northeast of the typhoon. It met with a weaker rain rate with poor dynamic lifting condition and being cut-off with the low-level moisture jet. (2) The distributions of rainfall of Polly and Matmo showed clear asymmetric structures when impacting Liaodong Peninsula. The locations of heavy rain mainly occurred in the left along with the direction of the vertical wind shear. However, when the upper-level trough was located over different quadrant of TC, it suffered from a very different formation and strengthening of mesoscale cloud cluster. The convection activity of Polly was located at the north quadrant of typhoon inclining to southwest afterwards, but for Matmo, the convection activity only occurred in the northeast quadrant of typhoon. (3) Severe rainfall was closely related to the cold and warm advections in the typhoon circulation. The cold advection on the northwest side of Polly was strengthened, and Liaodong Peninsula was just controlled by the north of typhoon, possessing the cold and warm advections intersection in low-level circulation, strong low-level convergence, and deep and persistent vertical motion. However, there existed strong cold advection on the northeast side of Matmo, and Liaodong Peninsula was gradually under the west of typhoon, where the cold advection produced downward motion, dynamic lifting was reduced and the atmospheric stratification tended to be stable.

**Key words:** tropical cyclone, heavy rain, circulation characteristics, extratropical transition

## 引言

热带气旋(tropical cyclone, TC)北上与中纬度系统相互作用可产生变性过程(陈联寿和丁一汇, 1979)。在变性过程中, TC 由一个热带正压对称结构演变为一个半冷半暖的温带斜压非对称结构(Harr and Elsberry, 2000; Klein et al, 2002), 其风雨强度和分布也会发生明显变化。TC 的变性过程可分为两个阶段(Klein et al, 2002), 即 TC 与中纬度斜压带相互作用过程中初始结构发生改变的第一阶段和变性发展为温带气旋的再加强的第二阶段。若 TC 低空有持续的水汽输送(李英等, 2004; 杨晓霞等, 2008; 程正泉等, 2009; 梁军等, 2015b), 或从斜压区获得能量(梁军等, 2008; 杜惠良等, 2011; 冀春晓等, 2012; 周玲丽等, 2011; 唐明晖等, 2017), 激发中尺度对流系统(MCS), TC 可变性发展为温带

气旋, 导致大范围强降水。影响辽东半岛的热带气旋变性率为64.3%, 远高于西北太平洋上 TC 的变性率(23.1%), 引发其区域性强降水的占变性台风总数的 50.0%(梁军和陈联寿, 2005; 钟颖旻等, 2009), 且多发生在 TC 变性的第一阶段(变性加强率为 26.5%, 略高于西北太平洋 TC 变性加强率的 25.0%), 变性 TC 影响下其降水强度和分布的影响因素更为复杂(Chen et al, 2006; 陈镭等, 2010; 张建海等, 2010; 李英等, 2013; 陈淑琴等, 2018)。登陆北上至  $30^\circ\text{N}$  以北转向东北进入黄海北部的 TC 易造成辽东半岛暴雨天气, 此类移动路径占台风暴雨总数的 53.6%, 降水区多出现在 TC 移动路径的左侧, 但即使北上路径相似的变性台风, 其变性不同时期对所经地区降水也会产生不同影响(丁德平和李英, 2009; 梁军等, 2015a)。因此, 相似路径 TC 与西风带系统相互作用及其对暴雨影响的预报技术尚需进一步提高(赵思雄和孙建华, 2009)。

1992 年的 9216 号台风 Polly 和 2014 年的 1410 号台风 Matmo 是两个变性北上台风(图 1a)。影响辽东半岛期间(图 1a 中  $30^{\circ}\text{N}$  以北路径)其路径近乎一致,且均变性减弱(中国气象局,1992;2014)。辽东半岛降水期间,两个台风中心海平面气压差为  $1\sim 2\text{ hPa}$ (图 1b),但台风 Polly 的降水相比却明显偏多。前者影响期间,其主中心已在福建北部消失,在安徽南部形成的副中心(徐夏囡,1996)继续北上,受其影响辽东半岛地区从 9 月 1 日凌晨开始至 2 日 00 时(北京时,下同)普降大暴雨(图 1c),大连市(  $38.9^{\circ}\text{N}$ 、 $121.6^{\circ}\text{E}$ )日降雨量为 232 mm,最大日降

雨量出现在大连东部的长海县(  $39.2^{\circ}\text{N}$ 、 $122.5^{\circ}\text{E}$ ),为 253 mm;而后者影响期间(24 日 20 时至 25 日 20 时),辽东半岛西北部地区的降水量不足 10 mm,其他地区为  $20\sim 40\text{ mm}$ ,基准站最大日雨量出现在大连市,为 38 mm,仅有一个海岛自动气象站(  $39.1^{\circ}\text{N}$ 、 $123.1^{\circ}\text{E}$ )日雨量达到暴雨量级,为 93 mm(图 1d)。各数值模式对台风 Matmo 降水预报偏强,均预报辽东半岛将有暴雨,其东部地区雨量可达 100 mm 以上,降雨预报出现了较大的偏差。两者累计降水差异如此显著,这其中的物理过程值得探讨。

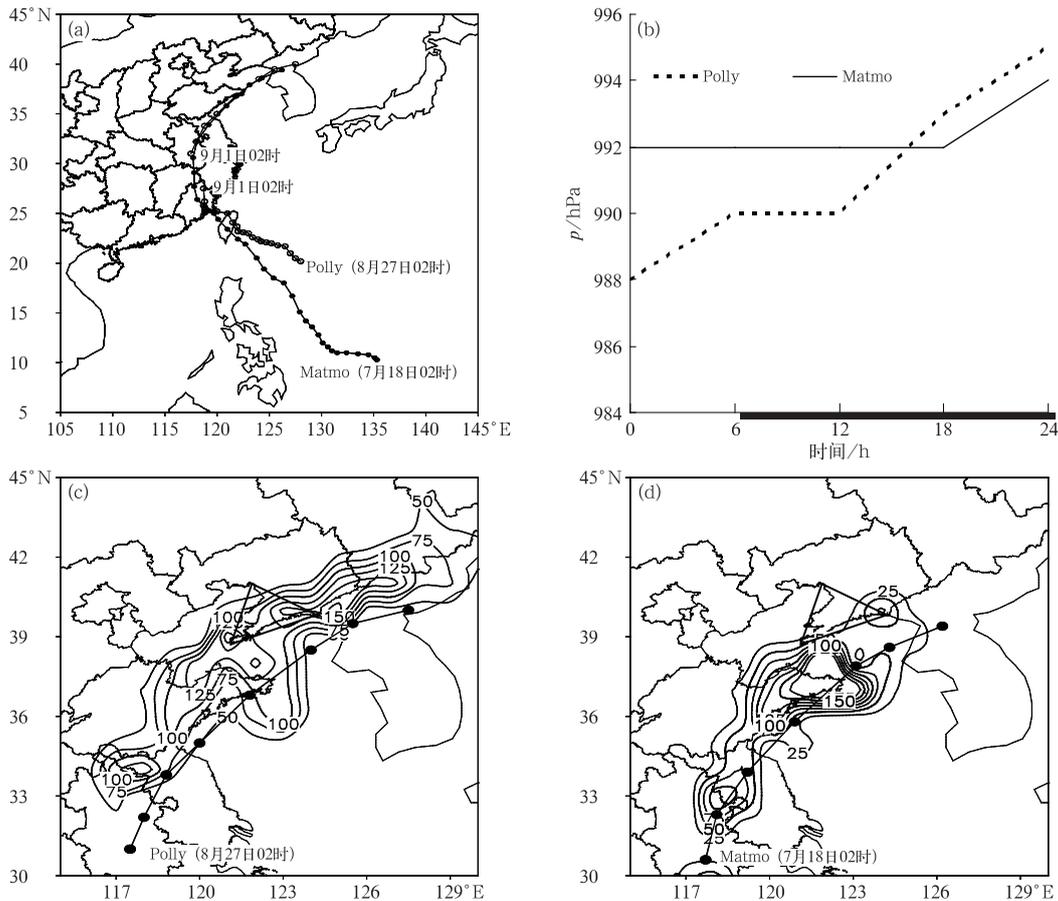


图 1 (a)台风 Matmo 和 Polly 的路径及其(b)影响辽东半岛期间的中心海平面气压变化;

(c)1992 年 8 月 31 日 20 时至 9 月 1 日 20 时台风 Polly,(d)2014 年 7 月 24 日 20 时至 25 日 20 时台风 Matmo 降水量(等值线,单位: mm)和相应台风路径(点线,台风位置间隔 6 h)

(图 1b 中横坐标 0 表示影响辽东半岛的初始时刻,横坐标上的粗线段为降水时间,

图 1c 和 1d 中三角形区域为辽东半岛地区)

Fig. 1 (a) Tracks of TCs Matmo and Polly at 6 h interval, (b) minimum sea level pressure curves of Matmo and Polly over Liaodong Peninsula; (c, d) rainfall (contour, unit: mm) and TC tracks (track time interval: 6 h) of (c) Polly from 20:00 BT 31 August to 20:00 BT 1 September 1992 and (d) Matmo from 20:00 BT 24 to 20:00 BT 25 July 2014

(In Fig. 1b, abscissa denotes the time affecting Liaodong Peninsula, thick line for the time of precipitation;

In Figs. 1c and 1d, the triangles show Liaodong Peninsula)

本文利用欧洲中期数值预报中心 ERA-Interim 全球再分析资料( $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ )、常规观测资料、逐时 FY-2D 卫星的黑体亮度温度(TBB)产品( $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ , Matmo)、日本气象厅 3 h 一次的 TBB 资料( $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ , Polly)、大连地区逐时自动气象站降雨量资料及《热带气旋年鉴》(中国气象局, 1992; 2014)资料, 对这两次相似路径北上变性台风影响下辽东半岛降水截然不同的天气过程进行对比分析。

## 1 台风降水的卫星云图特征

1992 年 9 月 1 日 02 时, 台风 Polly 已在安徽南部形成副中心。从此时 TBB 分布可以看出(图 2a), 台风南部的云系随着主中心的消失逐渐松散, 较强的 TBB 负值区出现在台风北部。与此同时, 位于台风西侧的西风槽云带逆时针卷入台风, 台风北部的对流发展旺盛, 东西向的云带明显向南弯曲, 而低于  $-52^{\circ}\text{C}$  的中尺度对流云团则向西南弯曲明显(图 2b, 2c), 在辽东半岛地区维持了近 15 h。23 时后, 低于  $-32^{\circ}\text{C}$  的中尺度云带移出辽东半岛。此时, 辽东半岛转入高空槽后, 热带气旋云系沿高空槽前

明显向东北伸展, 于 2 日 08 时在朝鲜半岛西北部海面上( $38.5^{\circ}\text{N}, 124^{\circ}\text{E}$ )减弱为温带气旋(中国气象局, 1992)。台风影响辽东半岛期间, 其东南部始终与副热带暖湿输送带相连, 在其北部东西向准对称的对流云系的持续影响下, 辽东半岛地区的强降水也长时间维持(1 日 07—21 时)。

台风 Matmo 登陆后初期(图略), 台风主体云系明显减弱, 分布呈椭圆形, 强对流云区主要分布在台风中心南侧, 其西北侧  $40^{\circ}\text{N}$  附近有一条东北—西南向的高空槽前云带。24 日 20 时(图 2d), 台风云系与西风槽前云带合并, 强对流云在台风北部发展, 外围云系已影响到辽东半岛。之后, 台风南部的云系趋于松散, 其东北部的云带发展(图 2e), 具有明显的非对称性斜压云系特征, 但辽东半岛仍处于反气旋环流内(图 3f), 其逐时雨量多不足 1 mm。随着台风南侧暖湿输送带的断裂, 进一步抑制了其对流运动的发展, 台风南部的螺旋云系逐渐消散(图 2f), 东北侧的中尺度云团强度略有加强, 但辽东半岛位于华北高压脊前, 云带沿其东北部高空槽前向东北偏东方向伸展。此时, 台风 Matmo 已减弱为温带气旋(中国气象局, 2014), 3 h 后辽东半岛的降水

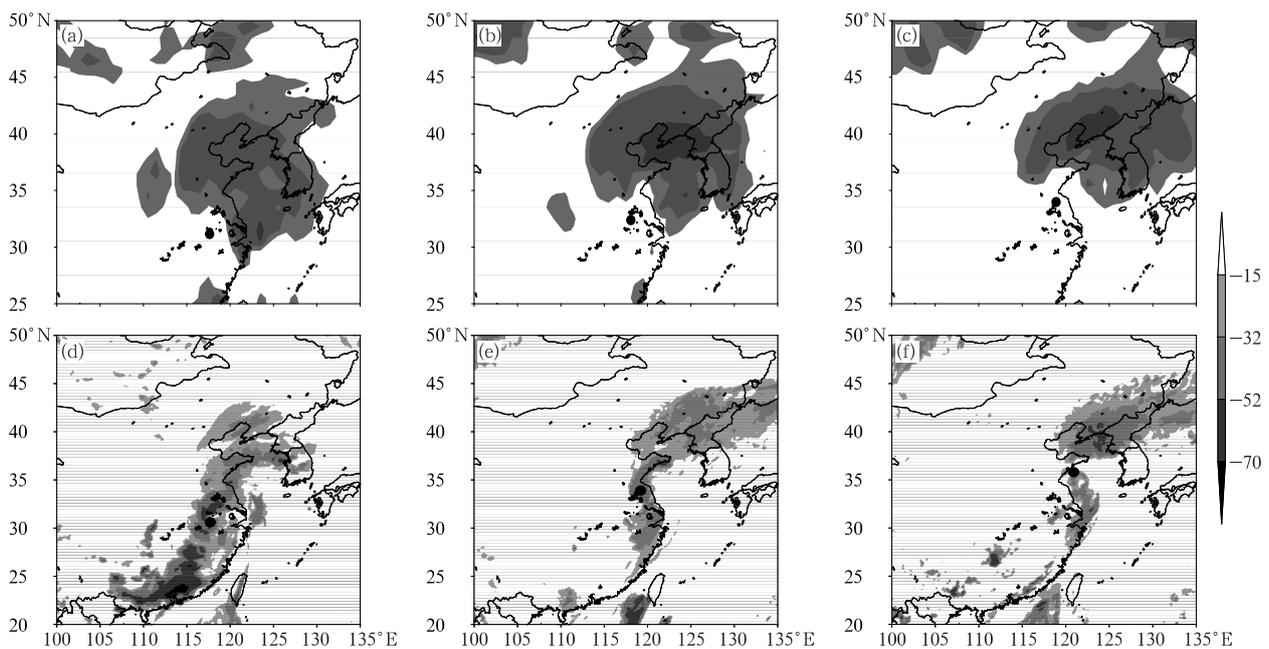


图 2 1992 年 9 月 1 日 02 时(a), 08 时(b), 14 时(c)台风 Polly 和 2014 年 7 月 24 日 20 时(d), 25 日 08 时(e), 14 时(f)台风 Matmo 的 TBB 分布(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 2 The distributions of TBB (unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) for TC Polly at (a) 02:00 BT, (b) 08:00 BT and (c) 14:00 BT 1 September 1992, for TC Matmo at (d) 20:00 BT 24, (e) 08:00 BT and (f) 14:00 BT 25 July 2014

逐渐停止。辽东半岛强降水持续时间短(25日13—18时),降水量小。

上述分析表明,在辽东半岛强降水期间,两个台风 Polly 和 Matmo 均发生变性,其北部围绕眼区均有低于 $-32^{\circ}\text{C}$ 的螺旋云带(图2),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,云带内的对流发展特征差异显著,辽东半岛所产生的降水强度明显不同。前者位于高空槽前,中尺度对流云团在其北侧发展并向南弯曲;后者位于高压脊前,中尺度对流云团仅维持在其东北部,逐渐孤立和减弱。辽东半岛分别位于影响台风的两个不同对流运动发展区域,降水强度明显不同。

## 2 大尺度环流特征对比

在两个台风影响辽东半岛期间,对流层中高层 $40^{\circ}\text{N}$ 以南的环流特征基本相似(图3a~3d)。副热

带高压(以下简称副高)近南北向稳定在日本海附近,大陆高压中心在 $100^{\circ}\text{E}$ 以西,有利于台风北上(图3a,3b),但 $40^{\circ}\text{N}$ 以北的环流特征有明显差异。在台风 Polly 影响辽东半岛期间,500 hPa 东北地区为高压脊,脊后为一明显西风槽,台风进入深厚的西风槽底部,西风带冷空气自台风西部逆时针卷入(图3a)。对流层高层200 hPa 台风逐渐移近高空偏南风急流入口区南侧(图3c),有利于高层辐散加强,垂直上升运动发展;而低层850 hPa 台风东侧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辽东半岛地区,形成水汽辐合(图3e中阴影),低于 $-55\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的水汽辐合区与半岛地区连接近18h(图略),降水期间辽东半岛比湿均超过 $11\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。沿台风路径从山东至东北东南部均出现了100 mm以上的大暴雨(图1c),最大日雨量在辽东半岛。台风 Matmo 影响辽东半岛时,东北地区为低压槽,华北地区为高

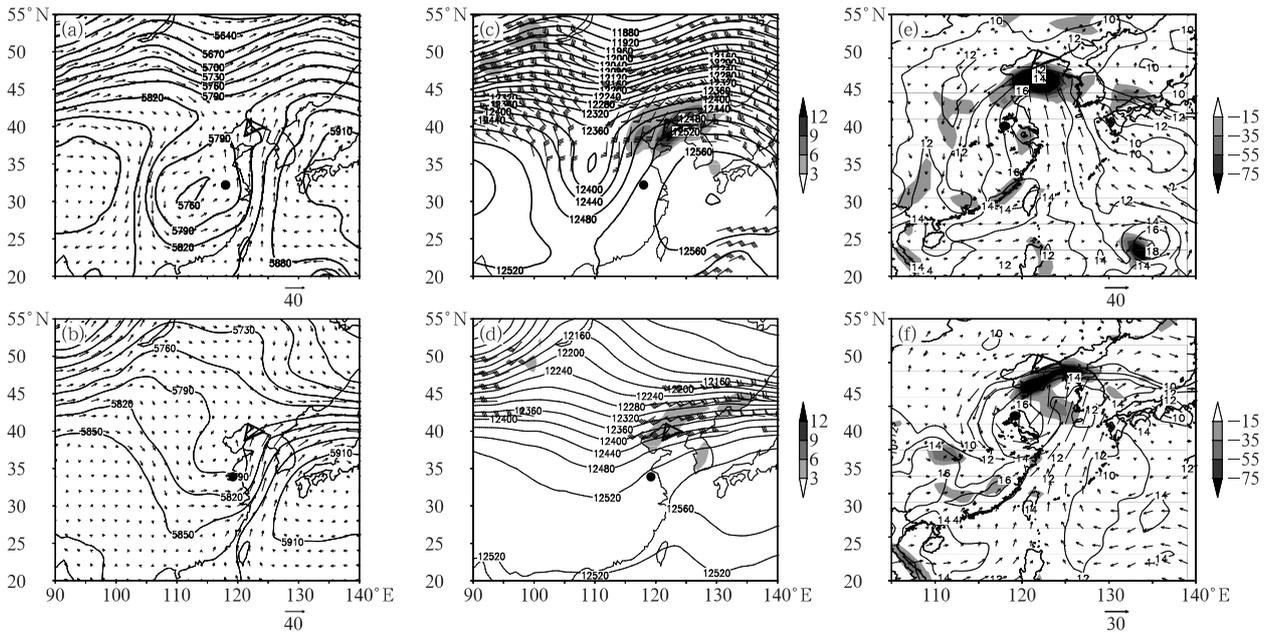


图3 1992年9月1日08时台风Polly(a,c,e)和2014年7月25日08时台风Matmo(b,d,f)的(a,b)500 hPa风场和高度场(等值线,单位:gpm),(c,d)200 hPa风场( $\geq 25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )、高度场(等值线,gpm)和散度场(阴影为 $\geq 3\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 的散度区),(e,f)850 hPa风场、比湿(等值线,仅给出 $\geq 10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的区域)和水汽通量散度(阴影为 $\leq -15\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的水汽辐合区)  
(图中三角形为辽东半岛,圆点为台风中心,下同)

Fig. 3 (a, b) Geopotential height (contours, unit: gpm) and wind vectors at 500 hPa; (c, d) 200 hPa wind field ( $\geq 25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) and geopotential height (contours, unit: gpm), and divergence (shaded areas:  $\geq 3\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ ); (e, f) 850 hPa wind vectors and specific humidity (contours,  $\geq 10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), and moisture flux divergence (shaded areas:  $\leq -15\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) of (a, c, e) TC Polly at 08:00 BT 1 September 1992, (b, d, f) TC Matmo at 08:00 BT 25 July 2014 (Triangles represent Liaodong Peninsula and dots indicate typhoon center location)

压脊(图 3b),影响台风的西风槽较浅,冷平流较弱。台风北上过程中也与西风槽靠近,但离高空急流较远,高空辐散较弱,不利于底层垂直上升运动发展(图 3d);由于影响台风的西风槽较浅,其东南部的副高向西南侧伸展,与东移的大陆高压趋于合并,切断了台风与副高之间的暖湿输送带,不利于持续获取低纬洋面上的水汽(图略)。850 hPa 低层超过  $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  的比湿在辽东半岛维持了 6 h,低于  $-55 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$  的水汽辐合区仅在半岛东部地区维持不足 12 h(图 3f 中阴影)。沿台风路径从苏皖交界处至山东东部有一条 50 mm 以上的降水带(图 1d),最大日雨量在山东半岛东北部的成山头 ( $37.4^\circ\text{N}$ 、 $122.7^\circ\text{E}$ ),为 163 mm,而辽东半岛大部分地区雨量为 20~40 mm。

从上述分析可以看出,台风 Polly 和 Matmo 影响辽东半岛期间路径相似,但其大尺度环流背景存在明显差异。前者靠近高空急流,与较深高空槽相互作用,获得持续的水汽输送,台风强降水持续时间长;后者远离高空急流,相互作用的高空槽较浅,其低空急流水汽通道被快速隔断,台风强降水持续时间短。

### 3 变性过程中台风降水的主要影响因素对比

#### 3.1 环境风垂直切变

台风 Polly 和 Matmo 影响辽东半岛期间,台风

外围的对流云团和降水分布具有明显的非对称性,这与环境风垂直切变密切相关。研究表明,在北半球,TC 的垂直切变大于  $7.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,台风的强降水区和中尺度对流云团主要出现在顺切变方向及其左侧(Chen et al, 2006)。

图 4 是台风区域(以台风中心为中心的 10 个经纬度范围)平均 200 与 850 hPa 水平风垂直切变随时间的演变图。可以看出,台风 Polly(图 4a)和 Matmo(图 4b)影响辽东半岛期间,台风区域环境风垂直切变大小差异显著。在 1992 年 9 月 1 日 08 时辽东半岛强降水初期,台风 Polly 逐渐移近对流层高层偏南风大值区,环境风垂直切变已增至  $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,降水期间环境风垂直切变逐渐增至  $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,始终对台风降水的非对称分布起决定性作用;在台风 Matmo 引发辽东半岛强降水期间,其环境风垂直切变大小变化趋势与台风 Polly 相同,由于其距西风带高空槽较远,环境风垂直切变偏弱,但降水期间量值均  $>16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,同样对降水的非对称分布有决定作用。辽东半岛降水期间,台风 Polly 的垂直切变方向由西南偏南顺转为西南偏西,而台风 Matmo 环境风垂直切变的风向始终为西南风,两个台风的垂直切变方向差异不明显,故台风区域的对流云团均出现在台风的东北部,但前者北侧中尺度云团近纬向维持在辽东半岛,而后者的则主要在其东北部发展,这还与台风环流内的动力、热力条件密切相关。

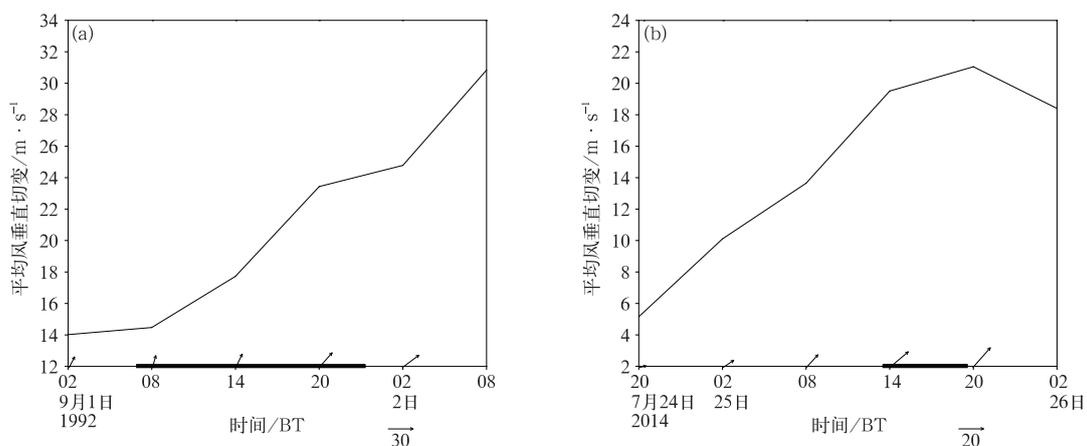


图 4 台风 Polly(a)和 Matmo(b)区域平均风垂直切变时间演变  
(箭头为风向,横坐标上的粗线段为强降水时间)

Fig. 4 Temporal variation of vertical wind shear for TCs Polly (a) and Matmo (b)  
(Arrows are wind direction; bold regions on the abscissa indicate the time of heavy precipitation)

### 3.2 台风低层环流内的锋生过程

在强环境风垂直切变作用下,造成这两个台风降水的非对称分布有所不同,但不能完全说明其降水强度和分布差异显著的原因。两个台风均与西风槽冷空气相互作用发生变性,在其变性过程中,台风环流内可见中尺度的锋生现象,锋生过程对其降水有怎样的影响?

分析台风 Polly 影响辽东半岛期间 850 hPa 风场和相当位温( $\theta_e$ )的分布发现(图 5a~5c),9月1日08时台风副中心形成后(图 5a),高空槽已靠近其西侧,台风东部 357 K 的暖气团与其西侧 333 K 和北侧 336 K 的冷气团之间  $\theta_e$  等值线逐渐密集,在台风的西侧和东北侧分别形成近南北向和近东西向的锋带,具有明显的半冷半暖的热力特征,台风已经发生变性。辽东半岛受东北部锋区影响,强降水开始。1日14时(图 5b),台风西北部冷空气继续逆时针卷入其西南部,即西侧冷空气向暖空气运动,具有冷锋特征(图 5b 中台风西侧粗箭头);台风东部暖中心明显北移,暖气团向冷气团爬升,暖锋特征明显(图 5b 中台风北侧粗箭头),暖锋带上  $\theta_e$  等值线更

加密集。1日20时(图 5c),50°N 附近上空 500 hPa 的高空槽由辽东半岛西部移至其东部,低层相当位温等值线密集区东移至朝鲜半岛东北部,辽东半岛  $\theta_e$  等值线逐渐稀疏。受加强的暖锋影响,大连站 1日09—20时,小时雨量均超过 10 mm,其中最大为 47.9 mm(1日13—14时)。

由于辽东半岛(38°~41°N,122°~124°E)降水主要受台风北侧锋区影响,因此过台风中心做相当位温和垂直流场的经向剖面,其中垂直风矢量由经向风  $v$  与  $-100 \times \omega$  合成(图 5d~5f)。9月1日08时(图 5d),35°~40°N 在 700 hPa 以下已有冷空气,台风中心附近至 37°N、台风南侧 25°~30°N 之间已存在  $\theta_e$  等值线密集区;与此同时,台风上空 500~200 hPa 向下伸展的暖舌与其北侧中低层的冷空气所形成的高空锋区也逐渐加强;台风中心北侧自低层到高层出现向北、向西倾斜(图略)的强锋区和正涡度区,强上升运动区在台风中心的北侧,该区域对流发展旺盛,而台风南侧锋区仅在低层有弱的上升运动,云系逐渐松散消失。1日14时(图 5e),500 hPa 高空槽叠置在台风低压上,台风中心上空 600 hPa 以上已为下沉冷气流控制,其两侧低层下沉

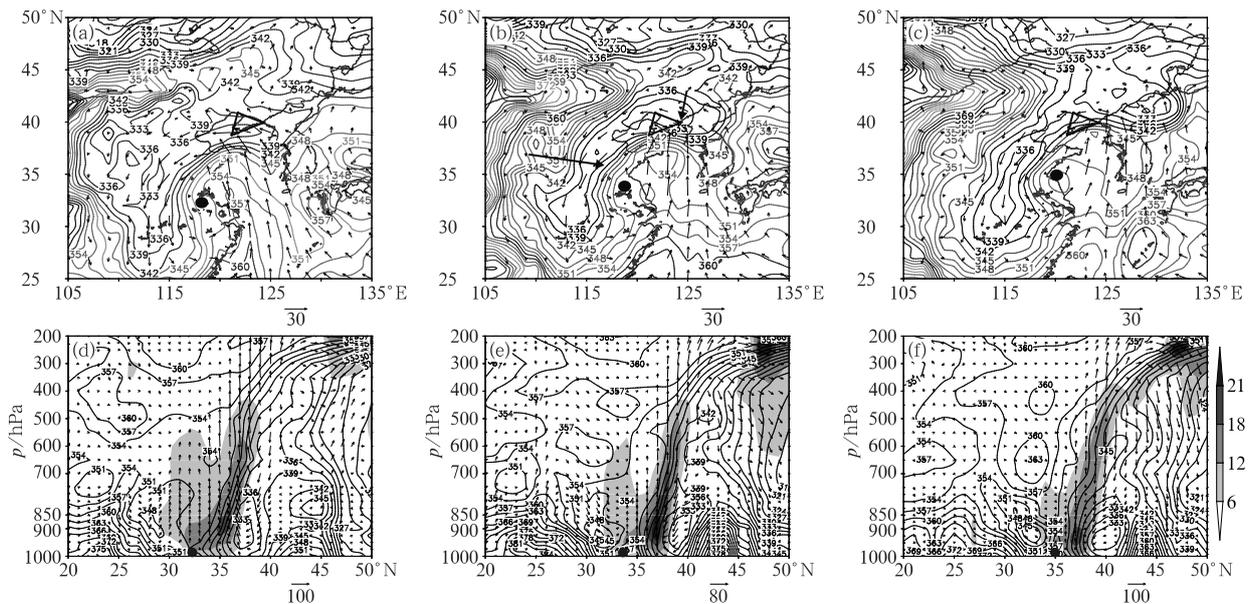


图 5 1992 年 9 月 1 日台风 Polly 变性过程中(a~c)850 hPa 风场和相当位温(等值线,单位:K), (d~f)过台风中心相当位温(等值线,单位:K)和垂直流场(阴影为涡度  $\geq 6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  区域)  
(a, d)08 时, (b, e)14 时, (c, f)20 时

Fig. 5 (a, b, c) the 850 hPa wind vectors and equivalent potential temperature (contour, unit: K), (d, e, f) meridional vertical sections for equivalent potential temperature (contour, unit: K) and wind vectors (made by  $v$  与  $-100 \times \omega$ ) across the typhoon center (shaded areas: vorticity  $\geq 6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) for TC Polly at (a, d) 08:00 BT, (b, e) 14:00 BT and (c, f) 20:00 BT 1 September 1992

冷空气明显加强(向下箭头增长),而台风东侧低层的暖湿输送维持,高空暖舌继续下伸,台风中心与辽东半岛间的锋区维持,锋区上低层正涡度增大, $18 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的正涡度柱由 750 hPa 发展到近 600 hPa,且始终随高度向西北倾斜,有持续的正涡度输送,在强上升运动区的北侧( $35^\circ \sim 40^\circ \text{ N}$ )有明显的垂直环流,将中低层冷空气卷入强辐合中心,半岛地区  $\theta_e$  等值线更加密集,对流发展持续,而台风南侧锋区低层转为下沉气流,抑制对流发展。1 日 20 时(图 5f),台风 Polly 东北移靠近高空急流轴南端,低层涡度柱持续向上伸展,但台风中心已为下沉气流控制, $18 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的正涡度柱由 600 hPa 降至 850 hPa 以下,其北侧锋区上 700 hPa 以下的上升气流明显减弱,相对应的中尺度对流云团逐渐减弱,辽东半岛降水趋于停止。

2014 年 7 月 24 日 20 时(图略),500 hPa 西风槽已位于渤海西岸,华北东部沿海 700 hPa 以下已为东北风,台风 Matmo 北部螺旋云系与西风槽前云带合并,强对流云向台风北部发展,辽东半岛降水开始。随着台风的继续北移,低层冷空气自台风东北部逆时针卷入台风西部(图 6a),形成东暖湿西干冷的热力结构。此时台风已经变性,台风东部 354 K 的暖气团与其西侧 336 K 和北侧 333 K 的冷气团之

间相当位温等值线逐渐密集。与台风 Polly 相似,在台风 Matmo 的西侧和东北侧,也分别形成东北—西南向和近东西向的锋带。台风中心北侧的锋区和正涡度区自低层到高层略向北、向东倾斜(图略),表明中高层的涡度加强快于低层,不利于局地涡度的整层加强,台风中心  $12 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的正涡度柱高度由 6 h 前的 350 hPa 降至 700 hPa 以下(图 6d)。25 日 14—20 时(图 6b,6c),华北地区的温度脊已向东北伸展至东北地区中西部,台风北侧上空 800~500 hPa 为暖气团(图 6e,6f),800 hPa 以下的冷空气随台风北侧的东北气流进一步向西南侵入,台风东部暖湿气团与其北侧冷气团之间的  $\theta_e$  等值线更加密集且近于陡立,强上升运动区在台风中心的东北方,该区域的垂直对流明显加强,台风中心  $12 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的正涡度柱高度也由 700 hPa 以下抬升至 500 hPa,辽东半岛东部降水加强,但台风中心附近暖空气层浅薄,上升运动仅在 850 hPa 以下,台风中心以南、以西(图略)的低层已为冷气团,辽东半岛中西部低层以下沉冷气流为主,大气层结趋于稳定,小时雨量超过 10 mm 的降水仅在半岛东部持续了 4 h(25 日 13—17 时),其中最大为 16 mm(25 日 15—16 时)。

由此可见,辽东半岛的两次降水均与台风北部

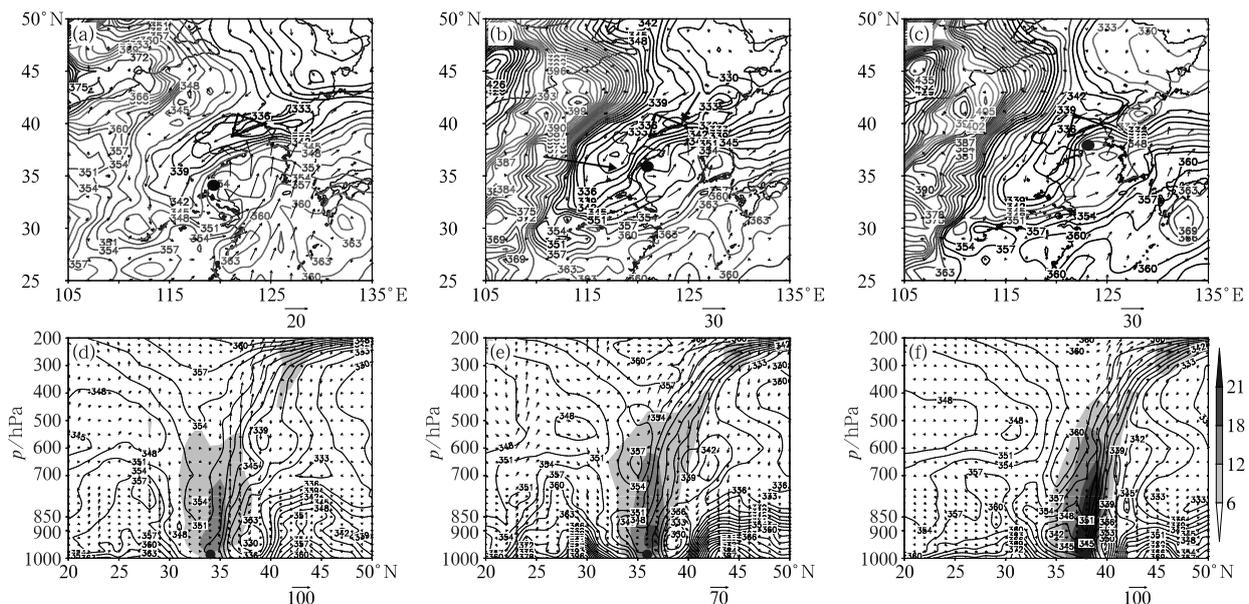


图 6 同图 5,但为 2014 年 7 月 25 日 08 时(a,d),14 时(b,e),20 时(c,f)台风 Matmo (图 6a~6c 中阴影为风速  $\geq 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  区域)

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for TC Matmo at (a, d) 08:00 BT, (b, e) 14:00 BT and (c, f) 20:00 BT 25 July 2014

(Shaded areas in Figs. 6a—6c indicate wind velocity  $\geq 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

环流中的中尺度锋生过程密切相关。台风 Polly 影响期间,冷空气自台风西北侧对流层中高层倾斜下沉,锋区自低层到高层向西北倾斜,深厚的上升运动主要在其气柱的西北侧发展,辽东半岛处于其北侧中尺度对流区,降水强度大、持续时间长;而台风 Matmo 影响期间,冷空气从台风东北侧对流层低层侵入,锋区自低层到高层略向东北倾斜,上升运动仅维持在台风东北侧,辽东半岛处于其西侧中尺度对流减弱的区域,降水强度小、持续时间短。

### 3.3 台风环流内的热力特征

上述分析表明,在台风 Polly 和 Matmo 影响辽东半岛期间,强环境风垂直切变影响降水分布,但强降水只出现在台风北部锋区附近的一定位置,这与台风低层环流中的冷暖平流密切相关(Bonell and Callaghan, 2008)。

1992 年 9 月 1 日 08 时(图 7a),台风 Polly(图中圆点)东部的暖平流向西北偏北方向移动,暖平流大值中心移至山东半岛东部,暖平流西侧和北侧已

有弱的冷平流,暖平流大值区的走向与台风北侧锋区分布基本吻合,沿着冷暖平流交汇处辐合上升运动加强(图中阴影),中尺度对流云团发展,辽东半岛南部已出现较强降水。随着台风的北移和西风槽的靠近(图 7b),辽东半岛附近的冷暖平流及上升运动均明显加强,中尺度对流云团西段由于西侧冷平流的加强而向南弯曲,环状强对流云团仍维持在辽东半岛(图 2c),半岛的强降水持续。至 20 时(图 7c),暖平流大值中心随台风东北移至辽东半岛东部,辽东半岛低层已处于冷平流控制的下沉运动区,抑制了对流运动的发展,环状云系的西段逐渐松散,对流发展仅维持在云系的东段,辽东半岛的降水逐渐结束。

台风 Matmo 影响辽东半岛期间暖平流带的分布和变化与台风 Polly 相似,但暖平流的强度及冷平流的变化有所差异。2014 年 7 月 25 日 08 时(图 7d),暖平流的强度增至 6 h 前的 2 倍,华北和东北地区的冷空气分别移至台风的西侧和辽东半岛地区,冷暖平流交汇区呈东北—西南向分布,与台风北

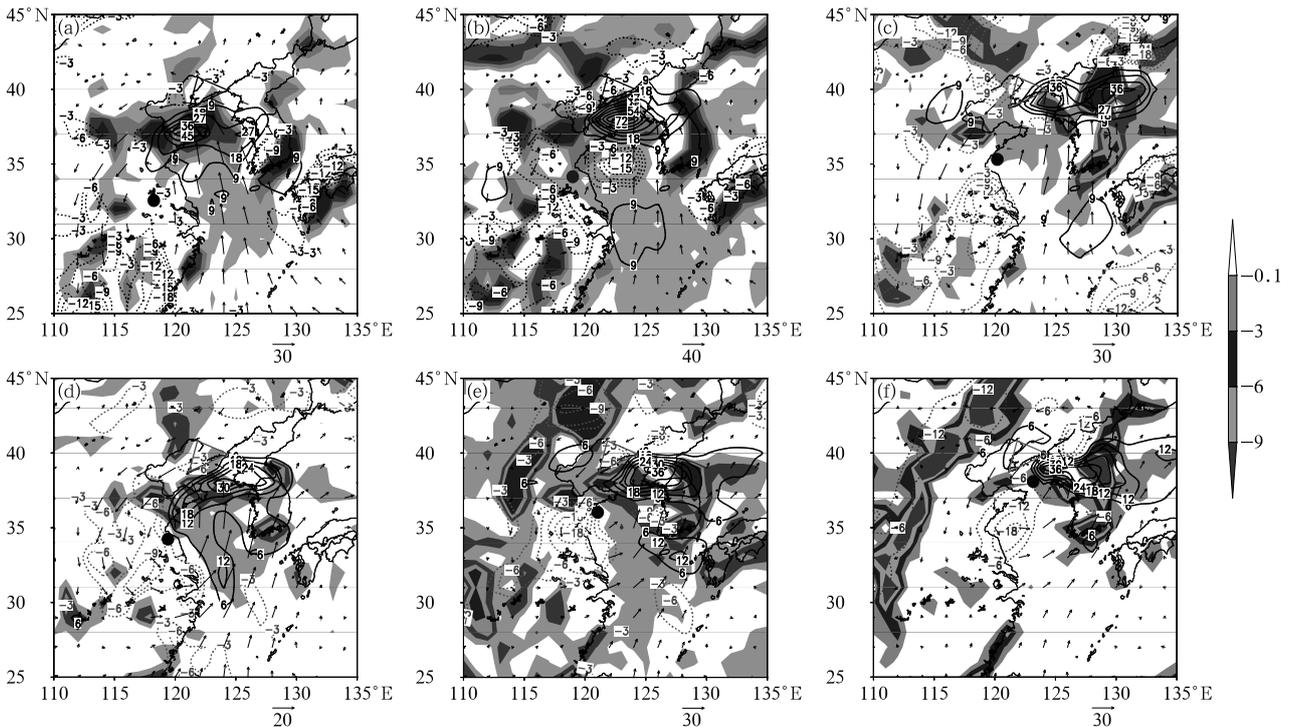


图 7 1992 年 9 月 1 日 08 时(a), 14 时(b), 20 时(c)台风 Polly 和 2014 年 7 月 25 日 08 时(d), 14 时(e), 20 时(f)台风 Matmo 850 hPa 风矢量场、垂直速度(阴影为  $\leq -0.1 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$  的区域)和温度平流(等值线, 单位:  $10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 7 The 850 hPa wind vectors (arrows) and vertical speed (shading:  $\leq -0.1 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ), and temperature advection (contour, unit:  $10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ ) for TC Polly at (a) 08:00 BT, (b) 14:00 BT and (c) 20:00 BT 1 September 1992 and for TC Matmo at (d) 08:00 BT 24, (e) 14:00 BT and (f) 20:00 BT 25 July 2014

侧的锋区相吻合,锋带上的强辐合抬升出现在暖气团前端的山东半岛东北部,此时辽东半岛为冷平流控制的下沉运动区,仅在其南部有小雨。25日14时(图7e),西侧冷平流持续卷入台风环流中心附近,冷平流影响区的降水云系逐渐松散、消失,山东半岛的降水逐渐停止;而辽东半岛东部的暖平流随台风的东北移略有加强,低层冷暖平流交汇处的辐合抬升加强,其降水加强。25日20时(图7f),台风东北移至黄海北部洋面上,华北地区的暖气团东移至辽东半岛,活跃的冷暖平流出现在台风环流东北部,该区域的中尺度对流发展,但相对于辽东半岛偏东,半岛东部的降水逐渐停止。

由此可见,台风 Polly 和 Matmo 变性过程中低层环流均伴随着冷、暖平流的活动,两者北侧锋带上冷平流的变化过程不同,辽东半岛降水强度差异显著。前者西北侧的冷平流加强,对流云团趋于对称的环状,长时间维持在辽东半岛,降水强度大;后者东北侧的冷平流加强,非对称斜压云系向台风东北部发展,仅短时间影响辽东半岛东部,降水强度小。冷暖平流交汇之处对强降水有较好的示踪作用,这也揭示了强降水落区在锋面的一定区域出现。

## 4 结 论

本文对比分析了路径近乎一致且均变性减弱的台风 Polly 和 Matmo 对辽东半岛降水的不同影响,得到以下结论:

(1) 两个台风均与西风带高空槽相互作用产生变性。在变性过程中,台风环流的西侧和北侧均伴随着中尺度锋生过程,辽东半岛的两次降水均发生在台风北部环流中的中尺度锋生过程中。但两个变性台风的大尺度环流背景却不尽相同。前者与较深的高空西风槽相互作用,冷空气自台风西北侧对流层中高层倾斜下沉,锋区自低层到高层向西北倾斜,且始终与东南部水汽输送带相连,对流层低层的辐合中心与高层的强辐散中心相耦合,获得较多的水汽能量,上升运动至对流层高层,降水强度大、持续时间长;而后者影响期间,冷空气从台风东北侧对流层低层侵入,锋区自低层到高层略向东北倾斜,台风中心被冷空气迅速填塞,其低空急流水汽通道被快速隔断,上升运动仅维持在对流层低层,降水强度小、持续时间短。

(2) 降水云系的非对称分布与环境风垂直切变

方向密切相关。在强环境风垂直切变的作用下,台风降水分布在垂直切变下风方左侧。但台风 Polly 中尺度对流云团在其北侧发展并向南弯曲,而台风 Matmo 螺旋云系始终沿垂直风切左侧在台风东北部发展,还受台风低层环流内冷暖平流活动的直接影响。前者西北侧的冷平流加强,辽东半岛处于台风环流低层北侧的冷暖平流交汇区,水平辐合加强,深厚的上升运动维持,中尺度对流发展;后者东北侧的冷平流加强,辽东半岛逐渐位于台风西侧,其低层转为冷平流控制的下沉运动区,大气层结趋于稳定,中尺度对流运动减弱。

## 参考文献

- 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 L, Xu H M, Yu H, et al, 2010. Temporal and spatial variations in precipitation of Typhoon Saomai (0608) before and after its landfall [J]. Chin J Atmos Sci, 34(1):105-119(in Chinese).
- 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 L S, Ding Y H, 1979. An Introduction to the Western Pacific Typhoon[M]. Beijing: Science Press:305-310,331-333,462-474(in Chinese).
- 陈淑琴,徐斌,曹宗元,等,2018. 冷空气和热带低压共同作用下的一次暴雨预报失败原因分析[J]. 气象,44(1):142-150. Chen S Q, Xu Y, Cao Z Y, et al, 2018. Results of a failure forecast about a rainstorm caused by cold air and tropical low pressure[J]. Meteor Mon, 44(1):142-150(in Chinese).
- 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 Z Q, Chen L S, Li Y, 2009. Diagnostic analysis of large-scale circulation features associated with strong and weak landfalling typhoon precipitation events[J]. Acta Meteor Sin, 67(5):840-850(in Chinese).
- 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 D P, Li Y, 2009. A study on rainfall features of Beijing associated with typhoons[J]. Acta Meteor Sin, 67(5):864-874(in Chinese).
- 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 H L, Huang X Q, Feng X W, et al, 2011. The effect of the interaction between weak cold flow and typhoon depression on a rainstorm [J]. Meteor Mon, 37(7):847-856(in Chinese).
- 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 C X, Zhao F, Gao S T, et al, 2012. Analysis of the characteristics of mesoscale disturbance for landfalling Typhoon Matsa[J]. Chin J Atmos Sci, 36(3):551-563(in Chinese).
- 李英,陈联寿,雷小途,2013. Winnie(9711)台风变性加强过程中的降水变化研究[J]. 大气科学,37(3):623-633. Li Y, Chen L S, Lei X T, 2013. Study on rainfall variation associated with Typhoon

- Winnie (9711) during its extratropical transition process[J]. *Chin J Atmos Sci*, 37(3):623-633(in Chinese).
- 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 Y, Chen L S, Wang J Z, 2004. The diagnostic analysis on the characteristics of large scale circulation corresponding to the sustaining and decaying of tropical cyclone after it's landfall[J]. *Acta Meteor Sin*, 62(2):167-179(in Chinese).
- 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 J, Chen L S, 2005. Motion and intensity and impact characteristics of tropical cyclone affecting the Liaodong Peninsula[J]. *J Trop Meteor*, 21(4):410-419(in Chinese).
- 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 J, Chen L S, Zhang S J, et al, 2008. Numerical study of impact of cold air on rainfall of tropical cyclone over Liaodong Peninsula[J]. *Chin J Atmos Sci*, 32(5):1107-1118(in Chinese).
- 梁军,李英,张胜军,等,2015a. 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 J, Li Y, Zhang S J, et al, 2015a. Comparison of synoptic circulations of heavy rain associated with typhoons Meari and Muifa over Liaodong Peninsula[J]. *Chin J Atmos Sci*, 39(6):1215-1224(in Chinese).
- 梁军,张胜军,黄艇,等,2015b. 辽东半岛“达维”(1210)台风暴雨的诊断分析[J]. *气象*, 41(3):364-371. Liang J, Zhang S J, Huang T, et al, 2015b. Diagnostic analyses of typhoon torrential rain over Liaodong peninsula[J]. *Meteor Mon*, 41(3):364-371(in Chinese).
- 唐明晖,姚秀萍,王强,等,2017. 不同强度台风相伴随的内陆台前飑线对比分析[J]. *气象*, 43(8):912-923. Tang M H, Yao X P, Wang Q, et al, 2017. Contrastive analysis of inland Pre-TC squall line accompanied by typhoons with different intensities[J]. *Meteor Mon*, 43(8):912-923(in Chinese).
- 徐夏因,1996. Polly(9216)台风登陆后的地面中尺度系统分析[J]. *应用气象学报*, 7(3):267-274. Xu X N, 1996. A study on the surface mesoscale systems of the landed typhoon Polly (No. 9216)[J]. *Quart J Appl Meteor*, 7(3):267-274(in Chinese).
- 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 X X, Chen L S, Liu S J, et al, 2008. A study of the far distance tropical cyclone torrential rainfalls in Shandong Province[J]. *Acta Meteor Sin*, 66(2):236-250(in Chinese).
- 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 J H, Yu Z K, He Y, 2010. Analysis of a simulation of heavy rainfall associated with two typhoons with similar routes[J]. *J Trop Meteor*, 26(4):392-400(in Chinese).
- 赵思雄,孙建华,2013. 近年来灾害天气机理和预测研究的进展[J]. *大气科学*, 37(2):297-312. Zhao S X, Sun J H, 2013. Study on mechanism and prediction of disastrous weathers during recent years[J]. *Chin J Atmos Sci*, 37(2):297-312(in Chinese).
- 中国气象局,1992. 热带气旋年鉴 1992[M]. 北京:气象出版社:36-38. China Meteorological Administration, 1992. *Typhoon Yearbooks (1992)*[M]. Beijing:China Meteorological Press:36-38(in Chinese).
- 中国气象局,2014. 热带气旋年鉴 2012[M]. 北京:气象出版社:75-86. China Meteorological Administration, 2014. *Typhoon Yearbooks (2012)*[M]. Beijing:China Meteorological Press:75-86(in Chinese).
- 钟颖旻,徐明,王元,2009. 西北太平洋变性台风时空分布特征[J]. *气象学报*, 67(5):697-707. Zhong Y M, Xu M, Wang Y, 2009. Spatio-temporal distributive characteristics of extratropically transitioning tropical cyclones over the Northwest Pacific[J]. *Acta Meteor Sin*, 67(5):697-707(in Chinese).
- 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 L L, Zhai G Q, Wang D H, et al, 2011. Mesoscale numerical study of the rainstorm and asymmetric structure of 0713 Typhoon Wipha[J]. *Chin J Atmos Sci*, 35(6):1046-1056(in Chinese).
- Bonell M, Callaghan J, 2008. The synoptic meteorology of high rainfalls and the storm run-off response in the wet tropics[C]//Stork N E, Turton S M. *Living in a Dynamic Tropical Forest Landscape*. Oxford:Blackwell Press:1-488.
- 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.
- 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(8):2613-2633.
- 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.