

梁军,丛春华,张胜军,等.变性台风“麦德姆”(1410)环流中的锋生现象及其对降水的影响[J].海洋气象学报,2017,37(4):49-57.

Liang Jun, Cong Chunhua, Zhang Shengjun, et al. Frontogenesis phenomenon in circulation of typhoon Matmo (1410) during its extratropical transition process and its impact on precipitation [J]. Journal of Marine Meteorology, 2017, 37(4): 49-57. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.04.006. (in Chinese)

## 变性台风“麦德姆”(1410)环流中的锋生现象及其对降水的影响

梁军<sup>1</sup>,丛春华<sup>2</sup>,张胜军<sup>3</sup>,张黎红<sup>1</sup>,赛瀚<sup>1</sup>

(1. 大连市气象台,辽宁 大连 116001; 2. 山东省气象台,山东 济南 250031; 3. 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:** 利用中国气象局热带气旋年鉴、FY-2D(0.1°×0.1°)云顶亮温、逐时自动气象站降雨量、常规观测资料和NCEP/NCAR再分析资料,运用锋生函数对台风“麦德姆”(Matmo,1410)影响辽东半岛和山东半岛期间的降水特征进行了诊断分析。结果表明:1)Matmo影响辽东半岛和山东半岛期间,其低压环流与西风带高空槽相互作用,在其西侧和东北侧分别有冷锋和暖锋锋生,两条锋带均向东移。强锋生区首先在低层生成,随后尽管高空锋区向下延伸,但并未与低层冷锋重合,低层冷锋锋生强度减弱。2)山东半岛和辽东半岛的降水均发生在台风低压环流的锋生过程中,但山东半岛的降水明显多于辽东半岛。这与锋生强度密切相关,辽东半岛的锋生强度和垂直运动较山东半岛明显偏弱。3)强降水与台风环流内冷、暖平流活动密切相关,冷暖平流交汇之处对强降水有较好的示踪作用。山东半岛始终处于冷暖平流交汇处,其西侧斜压不稳定加强,上升运动发展,强降水出现在冷锋带上暖平流区内;而辽东半岛由冷平流转为暖平流时,对流运动向其东北方向发展,强降水位于辽东半岛东北部。

**关键词:** 台风;降水;变性过程;锋生

**中图分类号:** P458.124 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2017)04-0049-09

**DOI:**10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.04.006

## Frontogenesis phenomenon in circulation of typhoon Matmo(1410) during its extratropical transition process and its impact on precipitation

LIANG Jun<sup>1</sup>, CONG Chunhua<sup>2</sup>, ZHANG Shengjun<sup>3</sup>, ZHANG Lihong<sup>1</sup>, SAI Han<sup>1</sup>

(1. Dalian Meteorological Observatory, Dalian 116001, China; 2. Shandong Provincial Meteorological Observatory, Jinan 250031, China; 3. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract** Based on the Tropical Cyclone Yearbook of China Meteorological Administration, FY-2D 0.1°×0.1° cloud top brightness temperature data, hourly rainfall observations from automatic weather stations (AWS), conventional observational data and the NCEP/NCAR reanalysis data, the frontogenesis function is used to carry on the diagnostic analysis to the features of rainfall during typhoon Matmo(1410) affecting Liaodong Peninsula and Shandong Peninsula. Results show that: 1) Matmo experienced extratropical transition when approaching westerly trough and frontogenesis zones, which is found in the lower layer of typhoon circulation. During the Matmo impacts on Liaodong Peninsula and Shandong

收稿日期:2017-06-07; 修订日期:2017-08-08

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(2015CB452804);国家自然科学基金项目(41475055,41175063,41575063);环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM201501,QYXM201612,QYXM201615);大连市科技计划项目(2014E21SF009);山东省自然科学基金项目(ZR2013DQ009)

作者简介:梁军(1967—),女,研究员级高级工程师,主要从事短期天气预报和研究工作,qinldj@163.com。

Peninsula, there is an interaction of low pressure circulation and westerly trough. The characteristics are different between the northeastern frontal zone and the western frontal zone. The former has warm front feature and the later has the cold front feature. Both of the front zones move eastward. The frontogenesis zone in ring form that is wrapped up the typhoon center does not appear in the lower layer of typhoon circulation. The strong frontogenesis appears in the lower layer at the beginning, then the frontogenesis area in higher layer propagates downward, but it does not coincided with the lower layer cold front, weakening the frontogenesis intensity of lower layer cold front. 2) Both of the precipitation over Shandong Peninsula and Liaodong peninsula appear in the frontogenesis process of the typhoon low pressure circulation, but the precipitation in Shandong Peninsula is much more than that in Liaodong Peninsula. The close relationships between the precipitation and the frontogenesis are found. The frontogenesis and the ascending motion in Shandong Peninsula are stronger than those in Liaodong Peninsula, resulting in more severe precipitation correspondingly. 3) The strong rain belt is closely related to the thermal advection activities in the typhoon circulation, and the joint area of warm and cold air advection in the lower layer has good tracing effect on heavy rainfall. Shandong Peninsula always locates in the joint area of warm and cold air advection in the lower layer, possessing the remarkable baroclinic instability and the deep vertical motion, and the strong precipitation occurs in the warm air advection region of cold front zone. When it changes from cold advection to warm advection in the lower layer in Liaodong Peninsula, the strong rainfall and the convection activity mainly occurs in the northeast part of Liaodong Peninsula.

**Key words** typhoon; precipitation; extratropical transition process; frontogenesis

## 引言

热带气旋(tropical cyclone, TC)暴雨具有较明显的非对称结构<sup>[1]</sup>,  $\beta$ 效应是其重要影响因素之一<sup>[2]</sup>。台风登陆前后螺旋雨带断裂<sup>[3]</sup>、登陆后下垫面的摩擦和地形抬升等作用<sup>[4-5]</sup>使台风降水分布非对称性更加明显。登陆浙闽的台风最大降水中心主要出现在登陆点的北到东北侧<sup>[6]</sup>,这与浙闽沿海东北至西南走向的山脉有关。台风降水的分布还与其本身的强度密切相关<sup>[7]</sup>。通常情况下,强度较强的台风最大降水出现在其右前侧,强度较弱的则出现在其左前侧,且具有更明显的非对称性<sup>[7]</sup>。而对于北上TC,由于与中纬度系统的相互作用,台风结构变化明显,其风雨分布就更为复杂。此间垂直风切变的加大<sup>[8-9]</sup>、冷空气的入侵<sup>[10-13]</sup>、活跃的中尺度系统<sup>[14-16]</sup>等因素均可使台风降水分布发生复杂变化。不仅路径相似的台风,其所经地区的降水可能存在较大差异<sup>[6,17-18]</sup>,即使是同一台风的不同地区的降水分布也存在明显不同,往往造成台风暴雨落区预报的较大偏差,至今仍是预报中的难题。尤其是北上至渤海、渤海海峡和黄海北部的台风,由

于其个数少、且常常变性减弱,针对性研究不多,但其风雨影响严重,预报和服务要求高,此类台风降水分布的研究亟需深入。

2014年的1410号台风(Matmo,麦德姆)就是一个登陆我国北上影响环黄渤海地区并造成显著不均匀降水的例子(图1)。该台风7月24日夜开始影响山东半岛(四边形区域)和辽东半岛(三角形区域),山东半岛出现大暴雨,其东北部的成山头(37.4°N,122.7°E)日雨量最大,为163 mm;而同时期辽东半岛西北部地区的降水量不足10 mm,其他地区为20~40 mm,基准站最大日雨量出现在大连(38.9°N,121.6°E),为38 mm,仅有一个海岛自动气象站(39.1°N,123.1°E)日雨量达到暴雨量级,为93 mm(图1b)。辽东半岛与山东半岛仅相隔约160 km,与影响台风中心相距160~450 km,但两地降水差异如此显著(图1c),这其中的物理过程值得探讨。本文利用NCEP/NCAR再分析资料、常规观测资料、FY-2D每小时一次的 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 云顶亮温(TBB)资料及逐时自动气象站降雨量资料,对Matmo影响下辽东半岛和山东半岛降水强度和分布的差异特征进行分析。

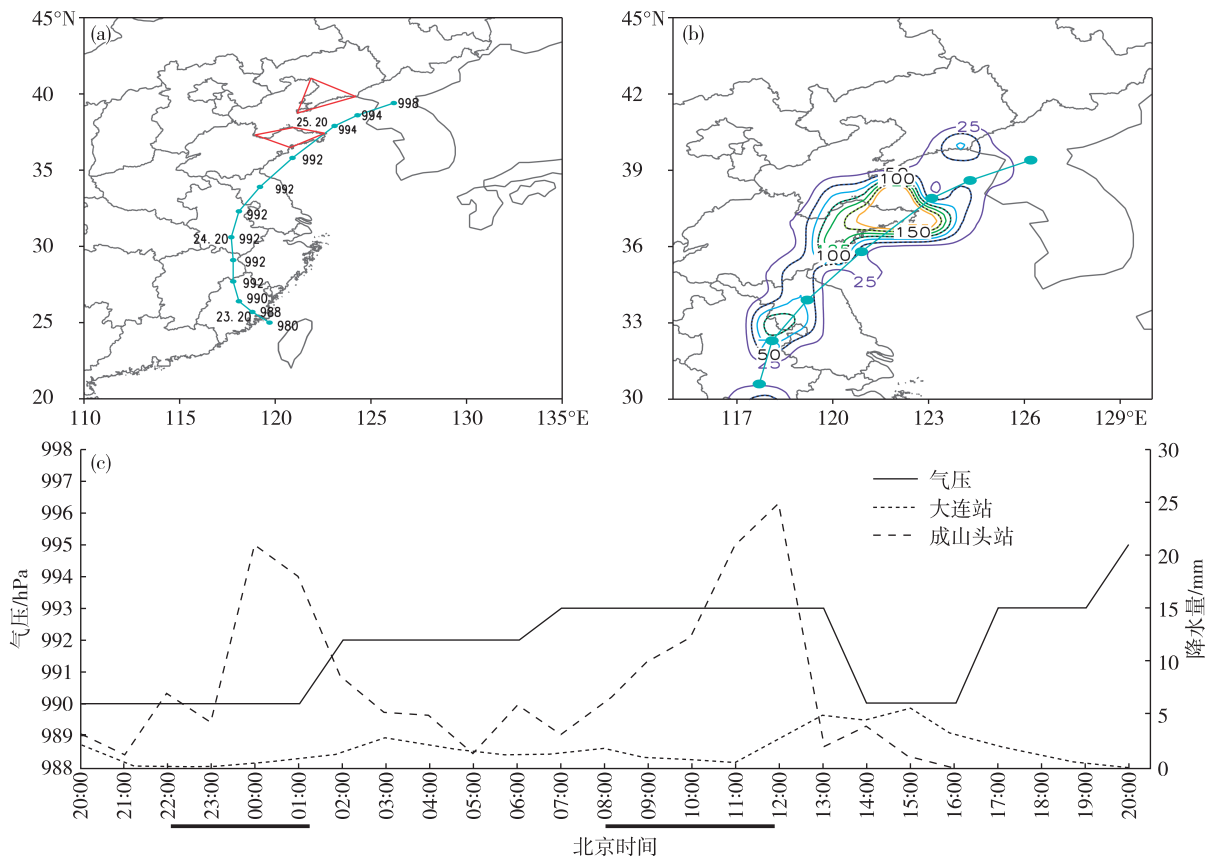


图 1 台风 Matmo 的路径(a; 台风位置间隔 6 h, 三角形和四边形区域分别为辽东半岛和山东半岛地区), 2014 年 7 月 24 日 20 时—25 日 20 时降水量(b; 单位: mm), 以及台风影响期间中心海平面气压和大连、成山头的逐时雨量(c; 横坐标上的粗线段为山东半岛强降水时间)

Fig.1 Tracks of typhoon Matmo (a; The interval of Typhoon location is 6 h; Triangular and quadrilateral regions are Liaodong Peninsula and Shandong Peninsula respectively), and rainfall amount from 20:00 BST 24 to 20:00 BST 25 July 2014 (b; units: mm), as well as the central sea level pressure during typhoon impact and hourly precipitation of Dalian and Chengshantou (c; Thick line segments in abscissa indicate the strong precipitation time in Shandong Peninsula)

## 1 Matmo 登陆活动和降水特征

Matmo 于 2014 年 7 月 17 日生成于菲律宾以东的洋面上, 在向西北方向移动的过程中加强为强台风。23 日 04 时(北京时间, 下同)穿过台湾岛后减弱为台风, 并于 16 时在福建南部登陆, 强度减弱为强热带风暴, 之后向偏北方向移动, 24 日 08 时后经江西东北部进入安徽, 逐渐转向东北偏北方向移动, 进入江苏境内, 并于 25 日 10 时在连云港东部再次入海后向东北方向移动, 18 时穿过山东半岛东北部的成山头进入黄海北部, 于 26 日 08 时在朝鲜半岛北部停止编号(图 1a)。24 日 08 时至停编前, Matmo 强度为热带风暴。受其影响, 自 24 日 20 时起, 山东半岛和辽东半岛的台风降水开始。山东半岛出现大暴雨, 而辽东半岛大部分地区雨量为 20~40 mm(图 1b)。

从 TBB 的分布(图 2)可以看出, Matmo 登陆初期(图 2a), 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。此时, 40°N 附近有一条东北—西南向的高空槽前云带。24 日 20 时(图 2b), 台风云系与西风槽前云带合并, 强对流云系向台风北部发展, 外围云系已影响到山东半岛和辽东半岛。之后, 北部的云带发展(图 2c), 受其影响, 山东半岛东北部已出现短时强降水, 而辽东半岛仍处于反气旋环流内(图 3d), 其逐时雨量多不足 1 mm; 此时, 台风南部的云系趋于松散, 这与台风东南部的副热带高压(以下简称“副高”)向西南侧伸展, 与东移的大陆高压趋于合并, 台风与副热带暖湿输送带被切断有关。25 日 08 时(图 2d), 台风东北方向云带继续发展, 其南部云带明显减弱, 不对称结构更加明显; 山东半岛对流发展, 再次引发短时强降水, 而辽东半岛的逐时雨量大多不超过

3 mm。随后,台风东北部发展的中尺度对流云团移至辽东半岛东部(图 2e),山东半岛的降水逐渐停止,辽东半岛的降水开始加强。25 日 14 时开始(图 2f),台风南部的螺旋云系逐渐消散,与其连接的东北侧云带断裂,东北侧的中尺度云团强度减弱,仅

在辽东半岛维持 3 h,降水普遍偏弱。

分析表明,Matmo 北上期间,云系由基本对称演变为非对称斜压结构,中尺度对流云团在其东北侧发展,降水分布具有明显的不对称性,但同样位于台风北侧,山东半岛的降水量明显多于辽东半岛。

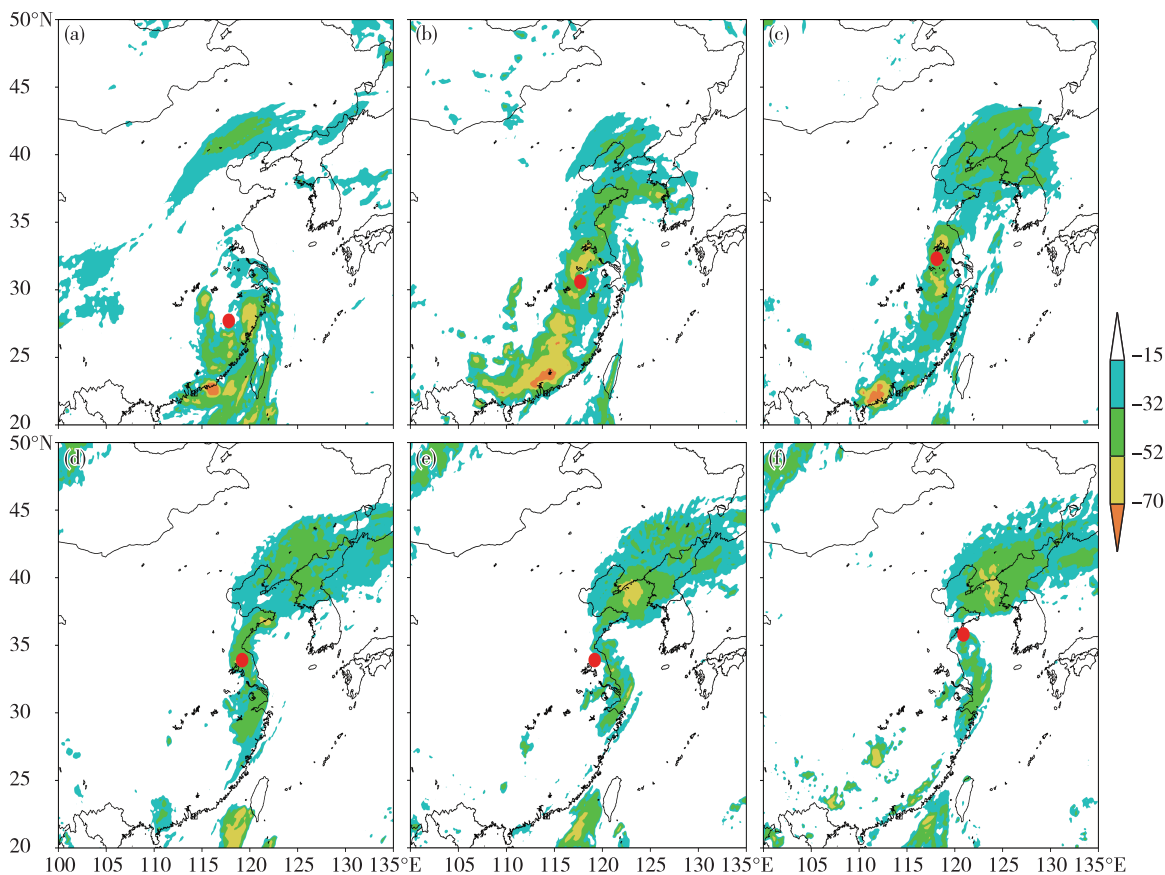


图2 2014年7月24日08时(a)、24日20时(b)、25日02时(c)、25日08时(d)、25日12时(e)、25日14时(f)台风Matmo的TBB分布(单位:°C)

Fig.2 TBB distributions of typhoon Matmo at 08:00 BST 24(a), 20:00 BST 24(b), 02:00 BST 25(c), 08:00 BST 25(d), 12:00 BST 25(e) and 14:00 BST 25(f) July 2014(units:°C)

## 2 山东半岛和辽东半岛降水条件的差异分析

### 2.1 大尺度环流背景和台风变性过程

Matmo 登陆北上影响辽东半岛(图 3 中的三角形区域)和山东半岛(图 3 中的四边形区域)期间,副高稳定在日本海南部(图 3a-c),华北南部有明显的西风槽东移。随着西风槽的东移和台风的北上,Matmo 逐渐靠近高空急流(图 3b、c),西风带冷空气逆时针卷入台风西部(图 3d-f),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 351 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(图 3d),在 Matmo 的西

侧和东北侧,分别形成东北西南向和近东西向的锋带。至 25 日 14 时(图 3e),西侧冷空气加强,逆时针侵入暖气团,形成一条过台风中心近南北向伸展的锋带,其上的相当位温等值线更加密集,具有明显的冷锋锋生特征(图 3e 中台风西侧粗箭头);台风东北部的锋带上南侧暖气团向北侧冷气团爬升,具有暖锋的特点(图 3e 中台风北侧粗箭头);降水期间,山东半岛始终位于冷锋带上,辽东半岛则由冷锋锋带转入暖锋锋带。可见在台风 Matmo 变性过程中其环流内出现了中尺度冷锋和暖锋锋生现象。但两条锋区并未相向而行(图 3e、f),形成环绕台风中心的环状锋生现象<sup>[13]</sup>,故 Matmo 变性过程中没有出现温带气旋在锋面上强烈发展过程。

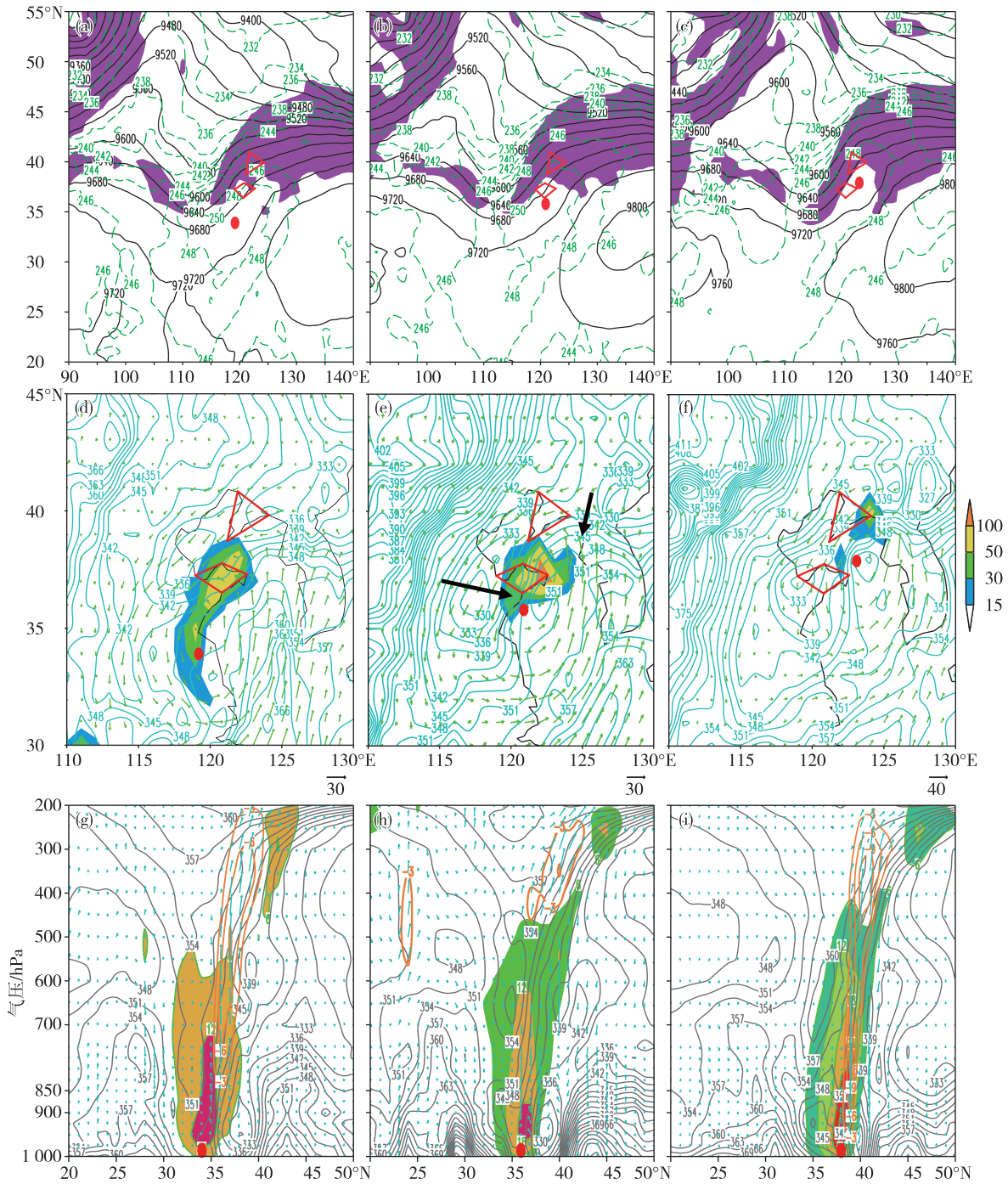


图 3 2014 年 7 月 25 日 08 时(a)、14 时(b)、20 时(c) 300 hPa 高度场(实线,单位:gpm)和温度场(虚线,单位:K)( 填色表示风速  $\geq 20$  m/s);08 时(d)、14 时(e)、20 时(f) 850 hPa 风矢量场和相当位温场(单位:K; 填色表示 6 h 降水量  $\geq 15$  mm,间隔 15 mm);08 时(g)、14 时(h)、20 时(i) 相当位温(实线,单位:K)过台风中心的经向垂直剖面 and 垂直流场( 填色表示涡度  $\geq 6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )( 三角形和四边形区域分别为辽东半岛和山东半岛地区;圆点为台风中心)

Fig.3 Geopotential height (solid lines; units: gpm) and temperature (dashed lines; units: K) fields at 300 hPa (Shaded areas indicate wind speed  $\geq 20$  m/s) at 08:00 BST (a), 14:00 BST (b) and 20:00 BST (c) 25 July 2014; Wind vectors and equivalent potential temperature (units: K) fields at 850 hPa (Shaded areas indicate 6 h accumulated precipitation  $\geq 15$  mm, with 15 mm interval) at 08:00 BST (d), 14:00 BST (e) and 20:00 BST (f) 25 July 2014; Meridional vertical profiles of equivalent potential temperature (solid lines; units: K) through the typhoon center and vertical flow field (Shaded areas indicate vorticity  $\geq 6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) at 08:00 BST (g), 14:00 BST (h) and 20:00 BST (i) 25 July 2014 (Triangular and quadrilateral regions are Liaodong Peninsula and Shandong Peninsula respectively; The dot is the typhoon center)

由于辽东半岛和山东半岛的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 $\theta_{se}$ 和垂直流场的经向剖面(图3g-i,垂直风矢量由经向风 $v$ 与 $-100\times\omega$ 合成),进一步分析台风环流内的中尺度锋生对两个半岛降水的影响。2014年7月25日08时(图3g), $35\sim 40^\circ\text{N}$ 之间700 hPa以下已有冷空气,辽东半岛( $38\sim 40^\circ\text{N}$ )低层为冷空气控制,大气层结稳定,为下沉运动区;而台风中心附近至 $37^\circ\text{N}$ 的山东半岛南部地区已存在 $\theta_{se}$ 等值线密集区,Matmo上空200~850 hPa之间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,锋生作用加强了该区域的上升运动, $-6\times 10^{-3}\text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ 的上升运动中心由6 h前的700 hPa伸展至250 hPa,锋区上有整层上升运动区和正涡度区,山东半岛对流发展旺盛;此时成山头的12 h降水量近100 mm,大连南部地区的12 h降水量仅10 mm左右。25日14时(图3h),由于台风的北移,台风北侧锋区移至山东半岛北部,锋区上600 hPa以下已转为下沉气流,山东半岛的强降水逐渐停止;此时, $39\sim 40^\circ\text{N}$ 附近辽东半岛低层的上升运动开始加强(向上箭头增长),其南部和东部的小时雨量由1~2 mm增至5 mm左右。25日20时(图3i),台风更加靠近高空槽,354 K等值线从6 h前的500 hPa下伸至700 hPa,锋区上的等值线更加密集和陡立,垂直涡度持续发展, $39^\circ\text{N}$ 附近辽东半岛上空整层为上升运动区,辽东半岛降水增强,大连东部的自动气象站( $39.1^\circ\text{N}, 123.1^\circ\text{E}$ )6 h雨量近60 mm;此时,山东半岛( $36\sim 38^\circ\text{N}$ )低层已为冷气团控制,层结趋于稳定,为下沉运动区,降水停止。之后,锋区东移,辽东半岛转入下沉运动区,锋生强度减弱,逐渐转为锋消区,降水完全停止。

由此可见,两个半岛的降水与台风环流中的中尺度锋生过程密切相关。Matmo影响期间,山东半岛处于台风环流的锋带上,且位于西风槽前高空急流出口区的上升运动区与冷锋前的上升运动区,锋生强度和垂直运动较辽东半岛明显偏强。

## 2.2 台风环流内的锋生分析

上述分析表明,Matmo环流西侧和东北侧分别具有冷锋和暖锋锋生特征,山东半岛和辽东半岛的降水均发生在台风低压环流内锋生过程中。

以 $u$ 、 $v$ 表示水平风速的纬向和经向分量, $\theta_{se}$ 表示假相当位温,在 $p$ 坐标系中略去非绝热加热项后,锋生函数<sup>[19-20]</sup>为:

$$F_n = \frac{d|\nabla\theta_{se}|}{dt} \quad (1)$$

$$F_{n1} = -\frac{|\nabla\theta_{se}|}{2}D$$

$$F_{n2} = \frac{|\nabla\theta_{se}|}{2}(E_{st}^2 + E_{sh}^2)\frac{1}{2}\cos\beta \quad (2)$$

$$F_{n3} = -\frac{1}{|\nabla\theta_{se}|}\frac{\partial\theta_{se}}{\partial p}\left(\frac{\partial\theta_{se}}{\partial x}\frac{\partial\omega}{\partial x} + \frac{\partial\theta_{se}}{\partial y}\frac{\partial\omega}{\partial y}\right)$$

$$F_n = F_{n1} + F_{n2} + F_{n3} \quad (3)$$

其中: $D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$ 为水平散度; $E_{st} = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}$ 为伸展

形变; $E_{sh} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$ 为切变形变。散度项 $F_{n1}$ 表示在

水平辐合( $D < 0$ )或水平辐散( $D > 0$ )产生的水平温度梯度的增加或减弱;变形项 $F_{n2}$ 表示整个水平变形产生的锋生作用,其中 $\beta$ 为 $\theta_{se}$ 等值线与伸长轴之间的夹角, $\beta$ 小于 $45^\circ$ 时,沿伸长轴有锋生,即风场的变形项总是有锋生作用;倾斜项(或扭转项) $F_{n3}$ 是由于水平分布不均匀的垂直速度和假相当位温造成的。式(3)中每一项为正值时表示锋生,为负时表示锋消。

2014年7月25日08时,冷空气已侵入台风环流, $\theta_{se}$ 等值线密集带分别位于山东半岛东部和朝鲜半岛北部(图3d),相应地两个区域出现锋生函数大值中心(图4a),强度分别约为 $30\times 10^{-10}\text{ K}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $84\times 10^{-10}\text{ K}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。即台风环流内北侧锋生强度明显偏强,而辽东半岛处于2个大值中心之间区域,锋生强度不足 $6\times 10^{-10}\text{ K}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ,12 h降水量仅10 mm左右,山东半岛处于西侧冷锋上,其锋生函数中心值为 $30\times 10^{-10}\text{ K}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ,位于台风北侧冷暖风的交汇处,附近出现强降水区(图4a中填色区),该地区降水增幅持续5 h。至25日14时(图4b),随着华北西风槽后冷空气东南移,位于山东半岛锋区的南段逐渐加强,北段迅速减弱,位置略向东移;同时,北移的Matmo偏南暖湿气流与东北地区向西南扩散的干冷空气在朝鲜半岛北部形成辐合,锋生明显加强;相应山东半岛强降水中心东移,仍出现在冷风与暖风交汇的锋区上,逐渐靠近北侧锋区西段。25日20时(图4c),山东半岛锋区向东移出,其锋生作用减弱,而辽东半岛南部的大连已为锋消区。强降水区出现台风东北侧暖锋带上。可见Matmo影响期间,辽东半岛的锋生作用较山东半岛明显偏弱。

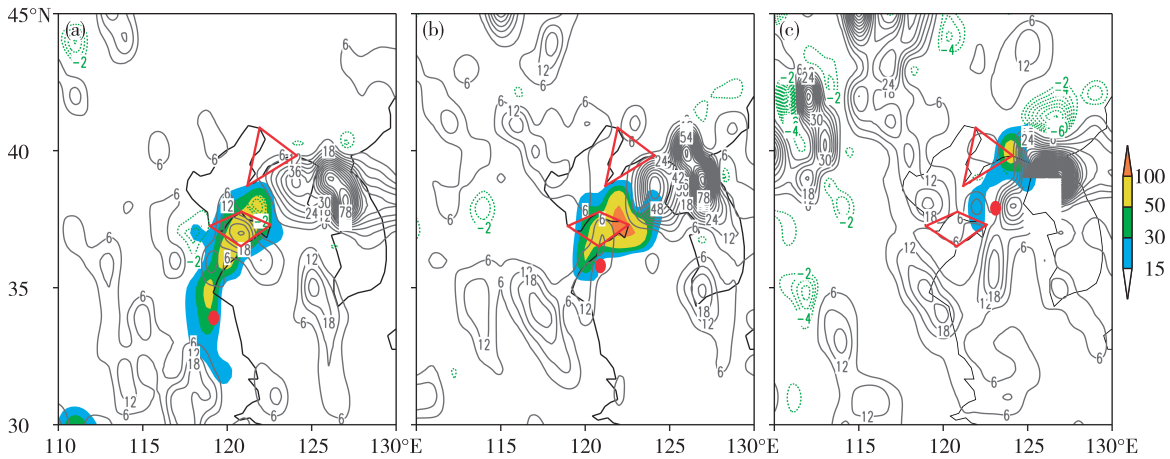


图4 2014年7月25日08时(a)、14时(b)、20时(c)850 hPa锋生函数场(等值线;单位: $10^{-10} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )和6 h累计雨量(填色表示雨量 $\geq 15 \text{ mm}$ ) (圆点为台风中心)

Fig.4 Frontogenesis function(contours; units:  $10^{-10} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) fields at 850 hPa and 6 h accumulated rainfall(Shaded areas indicate rainfall  $\geq 15 \text{ mm}$ ) at 08:00 BST(a), 14:00 BST(b) and 20:00 BST(c) 25 July 2014(The dot is the typhoon center)

### 2.3 台风环流内热力条件分析

上述分析表明, Matmo 影响山东半岛和辽东半岛期间, 锋生强度的变化直接影响了两地的降水强度, 但强降水落区只出现在锋生带附近的一定位置, 这与台风低层环流中的冷暖平流密切相关<sup>[21-22]</sup>。

2014年7月25日02时(图5a), Matmo(图中圆点)东部为暖平流大值中心, 在偏南风的输送下, 山东半岛暖平流逐渐加强, 西风槽后的冷平流已移至其西侧, 山东半岛位于暖平流区域, 已出现较强降水。随着台风的北移(图5b), 山东半岛附近的冷、暖平流均明显加强, 但此时辽东半岛由西南风转为东北风, 受冷平流控制, 降水不明显, 而山东半岛位于强暖平流与冷平流中心之间区域, 强降水仍维持。25日14时(图5c), 台风北移靠近山东半岛, 辽东半岛暖平流加强, 暖平流大值中心位于山东半岛东北部洋面上, 呈纬向分布; 同时冷平流持续卷入台风环流南侧, 故山东半岛仍位于冷暖平流交汇之处, 强降水维持。此时辽东半岛由之前的冷平流转为暖平流, 对流不稳定性加大, 其南部大连站25日11—15时持续出现降水增幅。此后, 台风穿过山东半岛成山头移至黄海北部洋面上(图5d), 其东部仍有强暖平流向台风环流东北部锋面上输送, 但降水区相对于辽东半岛偏东。而山东半岛已为冷平流影响区, 降水停止。由此可见, Matmo 变性过程中

低层环流伴随着冷、暖平流的活动, 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。

### 3 结论

本文诊断了北上台风 Matmo 台风环流内锋生过程及其三维结构, 分析了 Matmo 影响下辽东半岛和山东半岛降水分布差异的特征, 得到以下结论:

1) Matmo 影响两个半岛期间, 其低压环流与西风带高空槽相互作用, 卷入的冷空气与台风环流的暖湿空气相互作用, 在其环流内形成中尺度冷锋和暖锋。山东半岛和辽东半岛的降水均发生在台风低压环流的锋生过程中。

2) 两个半岛降水强度的差异与 Matmo 环流内的锋生强度相关。影响期间, 辽东半岛的锋生强度和垂直运动较山东半岛明显偏弱, 降水量也明显小于山东半岛。

3) 强降水落区与台风低层冷、暖平流活动密切相关。冷暖平流交汇之处锋生明显, 对强降水有较好的指示作用。

辽东半岛和山东半岛降水强度差异的对比研究表明, 即使 TC 的变性环境以及变性阶段相同, 相邻地区的降水也不尽相同。Matmo 低层环流内锋生强度及冷、暖平流活动, 对强降水落区有较好的指示意义。

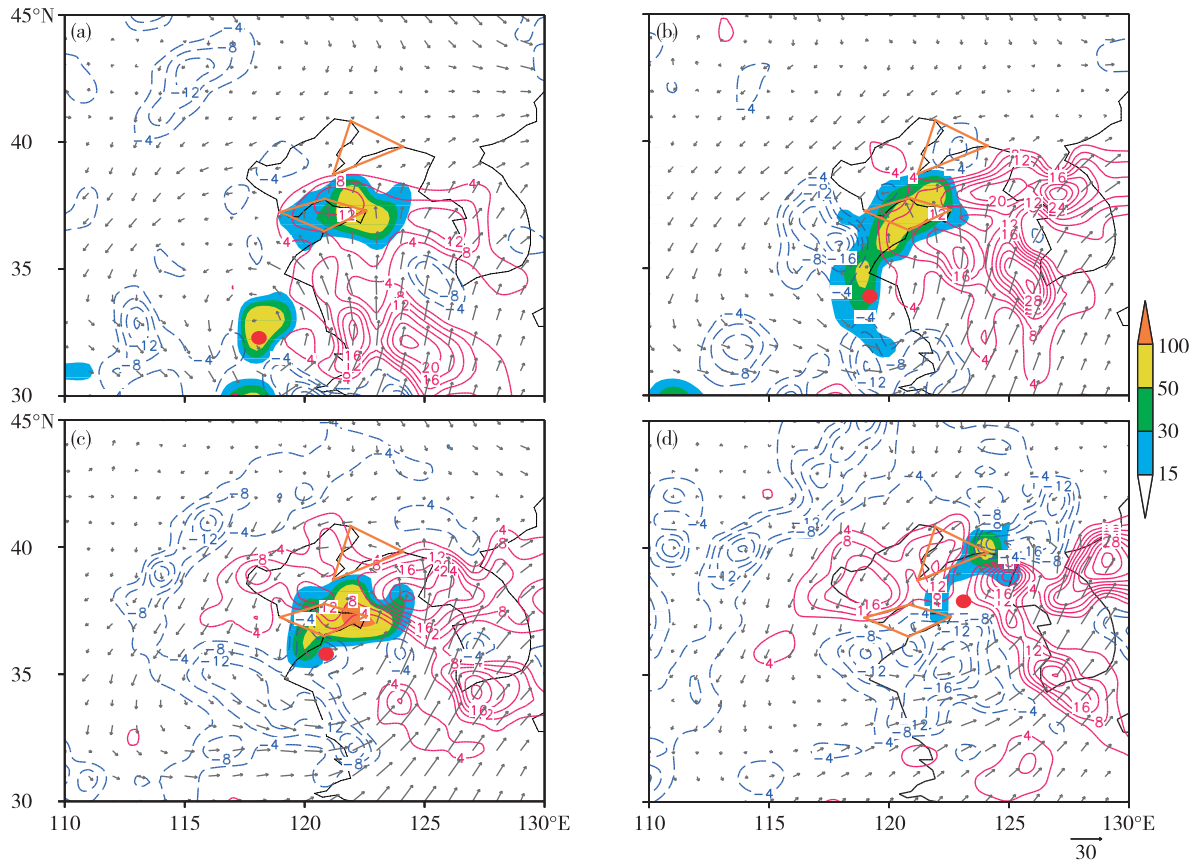


图5 2014年7月25日02时(a)、08时(b)、14时(c)、20时(d)700 hPa风矢量场、850 hPa温度平流(等值线;单位: $10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ )和6 h累计雨量(填色表示雨量 $\geq 15 \text{ mm}$ )(圆点为台风中心)

Fig.5 Wind vector fields at 700 hPa, temperature advection (units:  $10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at 850 hPa, and 6 h accumulated rainfall (Shaded areas indicate rainfall  $\geq 15 \text{ mm}$ ) at 02:00 BST (a), 08:00 BST (b), 14:00 BST (c) and 20:00 BST (d) 25 July 2014 (The dot is the typhoon center)

## 参考文献:

- [1] 陈联寿,丁一汇.西太平洋台风概论[M].北京:科学出版社,1979:305-310,331-333,462-474.
- [2] Chen L S, Luo Z X. The impact of the eastward shifting of dipole system over large-scale terrain on tropical cyclone tracks[J]. *Adv Atmos Sci*, 2002,19(6):1069-1078.
- [3] 丁治英,王勇,沈新勇,等.台风登陆前后雨带断裂与非对称降水的成因分析[J].*热带气象学报*,2009,25(5):513-520.
- [4] Cangialosi J. A numerical study of the topographic effects on the structure and rainfall in hurricane Georges(1998) [D]. Florida: University of Miami,2004.
- [5] 岳彩军.“海棠”台风降水非对称分布特征成因的定量分析[J].*大气科学*,2009,33(1):51-70.
- [6] 张建海,于忠凯,何勇.两个路径相似台风暴雨过程的模拟分析[J].*热带气象学报*,2010,26(4):390-400.
- [7] Lonfat M, Marks F D Jr, Chen S S. Precipitation distribution in tropical cyclones using the tropical rainfall measuring mission (TRMM) microwave imager: A global perspective [J]. *Mon Wea Rev*, 2004, 132 (7): 1645-1660.
- [8] Chen S Y, Knaff J A, Marks F D Jr. Effects of vertical wind shear and storm motion on tropical cyclone rainfall asymmetries deduced from TRMM [J]. *Mon Wea Rev*, 2006,134(11):3190-3208.
- [9] 石顺吉,余锦华,张大林.热带风暴 Bilis(2006)登陆期间一波非对称降水分布成因的探讨[J].*热带气象学报*,2009,28(1):34-42.
- [10] Harr P A, Elsberry E L. Extratropical transition of tropical cyclones over the western North Pacific. Part I: Evolution of structural characteristics during the transition process [J]. *Mon Wea Rev*, 2000,128(8):2613-2633.
- [11] Klein P M, Harr P A, Elsberry R L. Extratropical transition of western North Pacific tropical cyclones: Midlatitude contributions to intensification [J]. *Mon Wea Rev*, 2002,130(9):2240-2259.
- [12] 梁军,陈联寿,张胜军,等.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, 2008, 32(5): 1107-1118.
- [13] 李英, 陈联寿, 雷小途. Winnie(9711)台风变性加强过程中的降水变化研究[J]. 大气科学, 2013, 37(3): 623-633.
- [14] 陈镭, 徐海明, 余晖, 等. 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, 2010, 34(1): 105-119.
- [15] 周玲丽, 翟国庆, 王东海, 等. 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, 2011, 35(6): 1046-1056.
- [16] 冀春晓, 赵放, 高守亭, 等. 登陆台风 Matsa(麦莎)中尺度扰动特征分析[J]. 大气科学, 2012, 36(3): 551-563.
- [17] 丁德平, 李英. 北京地区的台风降水特征研究[J]. 气象学报, 2009, 67(5): 864-874.
- [18] 梁军, 李英, 张胜军, 等. 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, 2015, 39(6): 1215-1224.
- [19] 丁一汇. 天气动力学中的诊断分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 87-88.
- [20] 侯俊, 管兆勇. 华东地区6—7月锋生的气候学特征及环流结构[J]. 气象学报, 2013, 71(1): 1-22.
- [21] Bonell M, Callaghan J. The synoptic meteorology of high rainfalls and the storm run-off response wet tropics[M]// Stork N, Turton S. Living in a dynamic tropical forecast landscape. Oxford: Blackwell Press, 2009: 23-47.
- [22] Gao S Z, Meng Z Y, Zhang F Q, et al. Observational analysis of heavy rainfall mechanisms associated with severe tropical cyclone storm Bilis (2006) after its landfall[J]. Mon Wea Rev, 2009, 137(6): 1881-1897.