

文永仁,魏娜,张雪蓉,等. 2014. 1323 号强台风菲特登陆后迅速衰亡的原因分析. 气象, 40(11):1316-1323.

1323 号强台风菲特登陆后迅速衰亡的原因分析^{*}

文永仁¹ 魏娜² 张雪蓉² 麦子²

1 云南省气象服务中心,昆明 650034

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: 利用中国气象局上海台风研究所最佳路径资料和 NCEP-FNL $1^\circ \times 1^\circ$ 格点资料,分析了 1323 号强台风菲特(Fitow)登陆过程中环境条件、水汽和动能收支及其结构变化特征,研究其登陆后迅速消亡的原因。结果表明,“菲特”的消亡过程涉及与中纬度高空槽及另一台风的相互作用。登陆前,“菲特”从中纬度高空槽的相互作用中获得斜压位能,并从与另一台风丹娜丝(Danas)之间的偏东风低空急流中获得水汽输送,同时,高、低空急流的有利配置及较小的环境风垂直切变为其维持和发展提供有利条件。“菲特”登陆后,一方面与台风丹娜丝之间的水汽通道断裂失去潜热能的供应,另一方面冷空气侵入到台风中心,台风动能转化为斜压位能,同时高、低空风场配置加大其环境风的垂直切变,台风失去其结构特征而迅速消亡。

关键词: 台风菲特, 登陆, 迅速消亡, 双台风, 冷空气

中图分类号: P458

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.11.004

Analysis on Rapid Dissipation of Severe Typhoon Fitow (1323) After Its Landfall

WEN Yongren¹ WEI Na² ZHANG Xuerong² MAI Zi²

1 Yunnan Meteorological Service Centre, Kunming 650034

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

Abstract: Based on typhoon best track data from China Meteorological Administration—Shanghai Typhoon Institute and NCEP FNL $1^\circ \times 1^\circ$ grid data, causes for rapid dissipation of severe typhoon Fitow after its landfall are investigated by analyzing atmospheric environmental conditions, kinetic energy budgets and its structure change. The results suggest that the rapid decay of Fitow is associated with its interaction with a mid-latitude trough and another typhoon Danas (1324). Before Fitow makes landfall, it obtains water vapor transported from a lower layer easterly jet connecting typhoon Fitow and Danas to its east over ocean. Meanwhile, it gets kinetic energy from baroclinic potential energy transferring due to a mid-latitude trough approaching. Besides, a small vertical wind shear is also favorable for the development of Fitow. However, the moisture channel is broken after Fitow makes landfall and Danas moves northward. And the cold air invades into the center of typhoon, which causes the kinetic energy to convert into baroclinic potential energy. Meanwhile, the increase of vertical wind shear is also unfavorable for typhoon sustention. Fitow dissipates rapidly after its structure features lost.

Key words: typhoon Fitow, landfall, rapid dissipation, binary typhoons, cold air

* 国家自然科学基金项目(91215302、41175063 和 41275066)共同资助

2014 年 6 月 3 日收稿; 2014 年 9 月 19 日收修定稿

第一作者:文永仁,主要从事专业天气预报与科技服务. Email: wyr0888@163.com

引言

我国是台风登陆频率最高的国家之一,年均登陆约 7 个。台风登陆后的维持时间关系到台风的影响范围及其灾害防御。统计研究表明(魏娜等,2013),登陆我国大陆台风的维持时间一般为 25 h,长的可维持数天,短的仅几个小时。合成对比研究表明(李英等,2004),当一个台风登陆后,从其移动趋势、与水汽通道的联结、与斜压锋区的关系和高空流出气流等特征,可以初步判断其是长久维持还是迅速衰减。不少研究(陈联寿等,2004;许映龙等,2005;程正泉等,2012)表明,水汽输送和斜压能量对台风在陆上的增强或维持有积极作用。台风登陆后的下垫面也影响台风的维持时间。陆面摩擦是登陆台风衰减的关键因子,但其也可通过影响边界层通量分布影响台风强度(袁金南等,2005;闫敬华等,2005)。而内陆大型湖泊和饱和湿地(Shen et al,2002;李英等,2005;Wei et al,2013)可以为登陆台风提供潜热通量以延长其陆上维持时间。可见影响登陆台风维持的因子十分复杂。登陆维持时间短的台风的影响一般不如长久维持的广泛和严重,但同样也会引起严重灾害。1323 号台风菲特(Fitow)就是这样的例子,以强台风强度登陆,在上海、浙江、江苏南部引起了大暴雨,大于 250、100 和 50 mm 的暴

雨面积分别为 3.8、12.2、17.5 万 km^2 。但衰减却十分迅速,登陆后仅维持约 12 h(王海平等,2014;周福等,2014)。

本文采用 $1^\circ \times 1^\circ$ 水平分辨率的 NCEP-FNL 格点资料、中国气象局台风最佳路径资料和降水资料,分析了台风菲特登陆后迅速衰亡的原因,包括其环境条件、水汽和动能收支及其结构变化特征等方面,为预报此类台风提供参考依据。

1 台风菲特概况

图 1a 和 1b 显示 2013 年西折强台风菲特的强度变化、路径和过程累计降水分布。“菲特”于 2013 年 9 月 29 日 12 时(世界时,下同)在菲律宾以东洋面生成,之后缓慢向偏北方向移动,10 月 3 日凌晨加强为台风,10 月 4 日下午加强为强台风。10 月 4 日晚,北上至我国台湾以东洋面后西折,向西偏北方向移动。经过台湾以北洋面,于 10 月 6 日 17:15 在福建省福鼎市沙埕镇登陆,其时中心附近最大风力 $42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最低气压 955 hPa。登陆后向西运动并迅速减弱,于 10 月 6 日 19 时减弱为台风,20 时减弱为强热带风暴,21 时减弱为热带风暴,7 日 01 时在福建省建瓯市境内减弱为热带低压,03 时中央气象台停止编号。可见台风菲特移近我国东部沿海至登陆时刻持续强台风强度,但登陆后仅维持约 12 h,

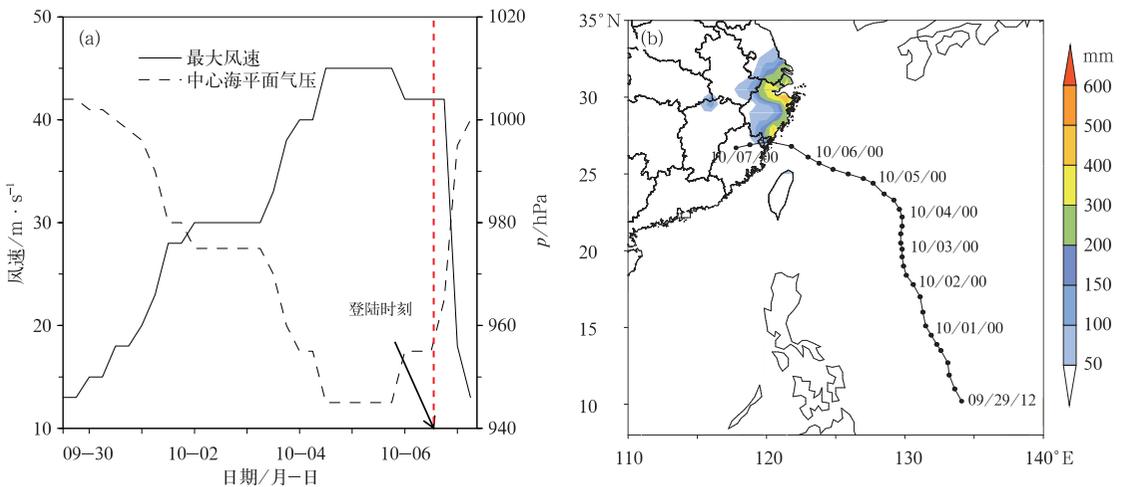


图 1 台风菲特中心海平面气压和最大风速的时间变化(a)以及路径(右侧数据表示月/日/时)和过程累计降水(b)

Fig. 1 Time series of minimum sea level pressure and surface maximum wind (a), and the track of Fitow (numbers indicate time, month/day/hour) and cumulative rainfall (shaded, unit: mm) (b)

其间中心气压迅速上升了约 45 hPa。而台风菲特仍引发了强降水,其环流中心北面约 5 个纬距处有大于 500 mm 的过程累计降水中心(阴影)。

2 大尺度环流背景

2.1 500 hPa 形势

台风菲特登陆前后的 500 hPa 环流形势(图 2a 和 2b)显示,2013 年 10 月 6 日 00 时台风菲特在西太平洋副热带高压(以下简称副高)西南侧趋近我国东部沿海,另一台风丹娜丝(1324, Danas)随后在副高南侧西行,相距约 15 个经距,两台风北侧与副高之间的强偏东气流相连。与此同时,亚洲中高纬度有西风槽东移至 110°E 附近,槽底位于 28°N 附近。西进的副高与西风槽前高压脊叠加,导致副高

进一步西伸,台风菲特继续西行登陆福建,之后西风槽继续东移并减弱北缩,副高东退,“丹娜丝”在副高西侧偏南气流引导北上,其“菲特”之间强偏东风气流断开,“菲特”与周围系统脱离逐渐孤立,之后消亡。

在西风槽东移影响下,冷空气在对流层低层向南扩散。图 2c 和 2d 显示相应时刻 925 hPa 的风矢量场和温度场(等值线,阴影显示气温 < 294 K 的区域),可见当台风菲特移到东海,冷空气已经影响到沿海地区,6 日 00 时已经进入台风外围环流,此时台风中心仍为暖中心。外围冷空气影响有利于冷、暖气团之间形成温度梯度,增加大气斜压位能。7 日 06 时“菲特”登陆后,由于高空槽东移北缩,南下冷空气强度有所减弱,但已经侵入到中心,台风中心低层从暖心转为冷心控制,大气层结稳定,抑制台风对流活动。

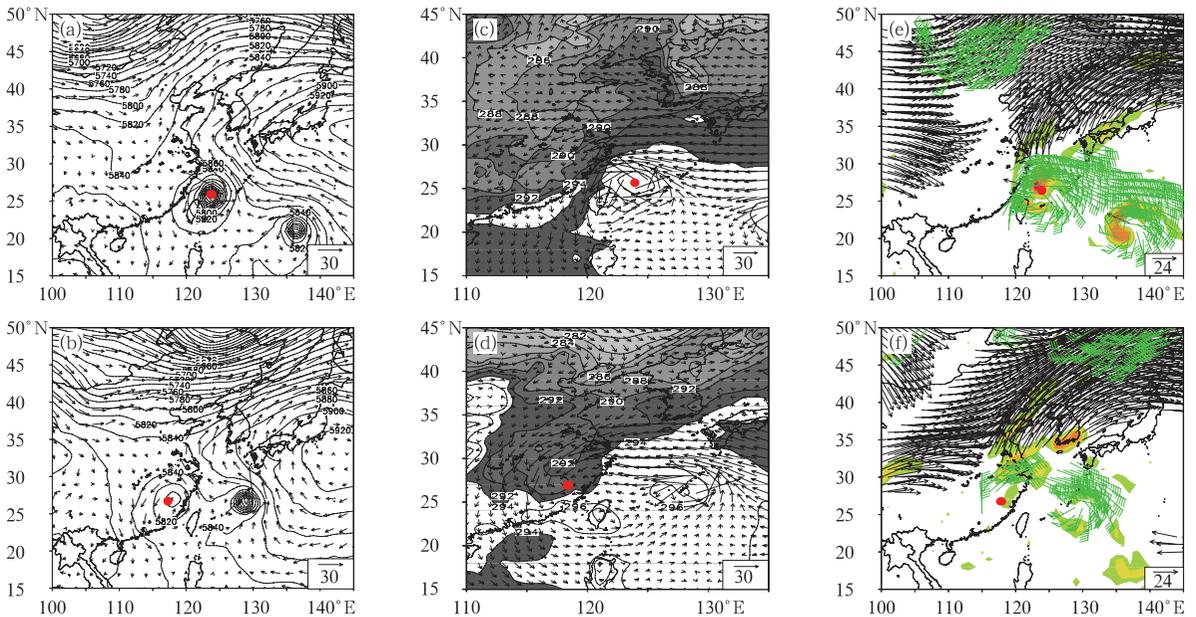


图 2 2013 年 10 月 6 日 00 时(a,c,e)和 7 日 06 时(b,d,f)台风菲特登陆前后的环流形势 (a,b)500 hPa 风矢量和高度场(等值线,单位: gpm), (c,d)925 hPa 风矢量和温度场(等值线, 填色显示 < 294 K 的区域)和 (e,f)200 hPa 强风矢量(箭头, $\geq 24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 填色为散度 $\geq 2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 区域)和 850 hPa 强风矢量(风向杆, 风速 $\geq 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 的分布 (红色圆点代表台风中心位置)

Fig. 2 Geopotential height field (ontour, unit: gpm) and wind field (vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 500 hPa (a, b), temperature field (contour, shaded area shows region with temperature < 294 K) and wind field (vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 925 hPa (c, d), and wind field at 200 hPa (vector, $\geq 24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, shaded area shows region with divergence $\geq 2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) and at 850 hPa (shaft, $\geq 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) (e, f) (a, c, e) 00 UTC 6 October 2013, (b, d, f) 06 UTC 7 October 2013 (Red dot indicated the location of typhoon)

2.2 高、低空环流

由于西风槽和台风丹娜丝的影响,“菲特”受到高、低空急流的共同作用。图 2e 和 2f 给出 200 hPa 强风场(矢量箭头, $\geq 24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)和 850 hPa 强风场(风向杆, $\geq 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)以及 200 hPa 散度场(填色, $\geq 2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)。可以看出,登陆前(图 2e)台风菲特和丹娜丝北侧低层为副高南侧的偏东风急流控制,这支偏东风向西汇入“菲特”环流,此时 200 hPa 高空也存在一支槽前的西南风高空急流,台风菲特处于高空急流入口右侧。高空急流有利于台风上空气流流出,形成强的流出辐散(填色),而低空急流不仅将洋面上水汽向西输送到台风菲特,还加强了“菲特”的低层辐合。“菲特”上空高、低空急流均有利于其加强和维持。随着“菲特”西行登陆以及“丹娜丝”向北移动(图 2f),高空急流也有所北缩,其入口区右侧较强辐散相对于台风中心偏北,台风上空的辐散明显减弱。而同时两台风之间偏东风低空急流断开,“菲特”水汽通道被阻断。“菲特”失去了有利于其发展的高、低空急流配置环境。

2.3 水平风垂直切变

水平风的垂直切变(VWS)是影响台风发展的一个重要因子。一般认为强垂直切变对热带气旋(TC)强度具有抑制作用,弱垂直切变有利于 TC 暖心结构,从而有利于 TC 维持和发展。研究表明,VWS 对台风内核区结构和台风强度变化具有较大的影响(Frank et al, 1999; Chen et al, 2006; Braun et al, 2007, 高栓柱等, 2012)。最近 Zeng 等(2010)统计北大西洋台风强度与 VWS 关系指出,台风强度变化一般与 VWS 呈负相关。

以台风菲特中心为中心选取 8 个经纬距范围作为台风区域,计算区域平均的 200 与 850 hPa 纬向风之差代表台风环境风垂直切变,时间从 2013 年 10 月 4 日 00 时至 8 日 00 时。这里台风最佳路径记录仅到 7 日 06 时,为了比较登陆后台风菲特的条件变化,记录结束之后的台风中心位置根据其残余低层环流中心定出(下同)。图 3a 显示台风菲特垂直剖面各层水平风矢量和风速分布,10 月 4—6 日是台风菲特趋近东海发展维持阶段,对流层低层可见逐渐增强的偏东风,同时高层 200 hPa 附近偏南风增强,它们分别与副高南侧低空急流的建立和台风菲特移近槽前高空急流有关。在此过程中

(图 3b),水平风垂直切变保持较低值,维持在 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,台风菲特临近登陆时(6 日 12 时),垂直切变明显增强,7 日 00 时增大至 $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,这对台风维持不利。此时高空偏南气流与低空偏东气流之间形成的垂直切变方向指向东北,有利于对流运动在台风中心北侧发展。台风菲特环境风垂直切变的增大与其登陆前后环流衰减,而其北侧仍保留较大的高、低层风有关(图 2),这种不对称分布造成了台风区域高、低层平均纬向风的差异增大,使垂直切变增强。虽然登陆后垂直切变又迅速减弱,但台风结构已被破坏,这将在第四部分进一步阐述。

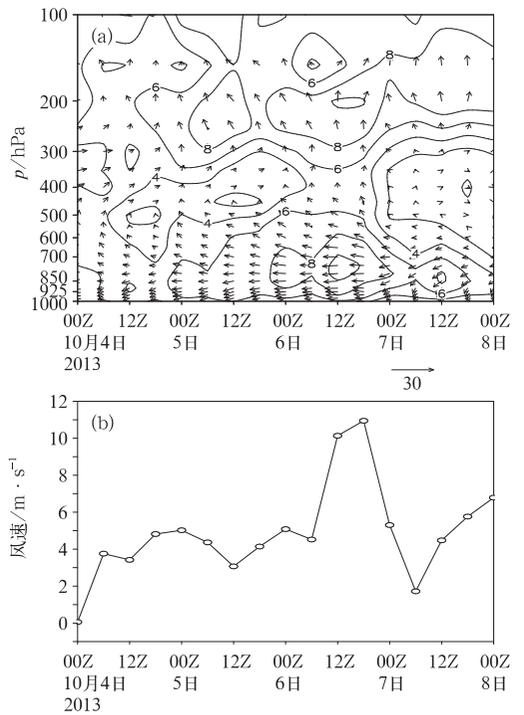


图 3 2013 年 10 月 4 日 00 时至 8 日 00 时

(a) 台风区域平均的水平风矢量和风速(等值线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)垂直分布以及(b)环境风垂直切变的时间演变

Fig. 3 Vertical distribution of horizontal wind vector and speed (contour, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) (a), and time series of vertical wind shear (b) during 00 UTC 4 to 00 UTC 8 October 2013

上述分析表明,台风菲特登陆过程中与中纬度高空槽以及另一台风发生相互作用。登陆前,台风菲特从与另一台风之间的偏东风低空急流中获得水汽输送,同时,高低空急流的配置以及较小的环境风垂直切变,也有利于台风对流运动的维持和发展。登陆后,台风菲特水汽通道断裂,冷空气侵入台风中

心,高低空风场配置加大环境风垂直切变,均不利于台风维持。

3 台风菲特的水汽输送和动能收支

台风登陆后,下垫面海洋转为陆地,其是否继续获得水汽供应至关重要。同时,台风趋近中高纬度西风槽区时若能获得斜压位能的转换,也能减缓衰减,维持其强度。下面对“菲特”的水汽和动能收支进行诊断分析。

3.1 水汽输送

图4给出台风区域4个侧边界(垂直高度1000

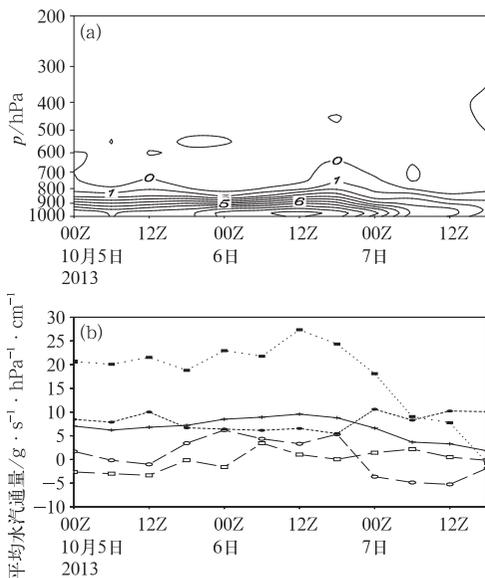


图4 2013年10月5日00时至7日18时台风菲特4个侧边界平均的水汽通量(a,单位: $g \cdot s^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot cm^{-1}$)以及各侧边界平均水汽通量(b)的时间演变(黑色实线为总水汽通量,方块虚线为西边界值,圆圈虚线为南边界值,实心方块点线为东边界值,圆点点线为北边界值)

Fig. 4 Time series of vertical distribution of moisture flux (unit: $g \cdot s^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot cm^{-1}$) averaged on four lateral boundaries (a) and averaged vertically at every lateral boundary (b) during 00 UTC 5 to 18 UTC 7 October 2013

(Black solid line indicates the whole moisture flux, broken line with box indicates moisture flux from west boundary, broken line with circle is the one from south boundary, dashed line with block indicates moisture flux from east boundary, and dashed line with dot denotes the one flux from north boundary)

~200 hPa)平均的水汽通量($Vq/g, q$ 为比湿, V 为风矢量,流入台风区域为正)时间演变。可以发现,台风趋近大陆过程中,从侧边界获得了水汽供应,700 hPa以下可见正的水汽通量区域,并在6日12时出现最强水汽通量中心。这与台风菲特北侧与“丹娜丝”偏东风低空急流相连、水汽汇入增强有关。随着“丹娜丝”北上,台风菲特的偏东风急流迅速减小,水汽通道被断开,侧边界水汽流入量明显减少。同时台风菲特下垫面从海洋逐渐转为陆地,其水汽来源趋于断绝。从4个侧边界的贡献来看,西界(方块虚线)和南界(圆圈虚线)除了在6日00时至7日00时之间有微弱水汽流入(正值)外,其余时间均基本为水汽流出,而东边界(方块点线)和北边界(圆点线)基本为正值,尤其是东边界的水汽流入尤为显著,登陆前其量值大约是北界的两倍,于6日12时达到最强,成为台风菲特总水汽量收入(实线)的主要贡献项。台风菲特登陆后东界水汽流入迅速减少,尽管北界流入有所增加,但总水汽流入量也明显减少,趋于0值。说明偏东低空急流对台风菲特水汽输送至关重要。

3.2 动能收支

采用准Lagrange坐标系考察台风的动能变化,方程如下:

$$\frac{\partial K}{\partial t} = -\mathbf{V}_{TC} \cdot \nabla K - \omega \frac{\partial K}{\partial p} - \mathbf{V}_{TC} \cdot \nabla \Phi - D \quad (1)$$

式中,动能 $K = \frac{u^2 + v^2}{2}$,重力位势 $\Phi = g \times z$ 。平流项中的速度 $\mathbf{V}_{TC} = \mathbf{V} - \mathbf{C}$,其中 \mathbf{C} 为台风系统的移动速度, \mathbf{V} 为水平全风速。方程左边为台风动能的局地变化项,右边分别为动能的水平平流项,垂直交换项,动能制造项和摩擦耗散项。

图5给出台风菲特区域平均动能各项的垂直时间演变。可以看出,台风菲特进入东海后动能的局地变化为正(图5a),台风获得动能,6日12时之后,即台风登陆后,台风上空几乎整层转为负值,并在对流层中低层出现 $-3 \times 10^{-3} m^2 \cdot s^{-3}$ 的强负值中心,说明台风动能减少。从动能局地变化各贡献项来看,水平平流项在对流层低层和高层为负值(图5b),400 hPa附近中层为正值,整层平均为负贡献。垂直运动项使台风低层失去动能(图5c),中高层获得动能,以正贡献为主。动能制造项(图5d)在

700 hPa 以下对流层低层具有很强的正值,尤其在台风登陆及以前,6 日 12 时以前动能制造的贡献达到 $20 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ 。200 hPa 以上高层为弱的正值,其余对流层中层为负值,6 日 12 时出现强负值中心,为 $-9 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ 。摩擦耗散(图 5e)体现摩擦效应和次天气系统的作用,其作为余差求出,也包括了计算误差。其表现为低层耗散台风动能,中高层则为较弱的正值区,登陆后耗散层增厚,可至 500 hPa 高度以上。以上动能收支各项量级相同,

动能制造项较强于其他各项。综合各项贡献,台风在登陆期间低层动能耗散一方面是由于下垫面摩擦,水平平流以及垂直运动的作用,同时动能的主要源项即动能制造项却明显减弱。中高层的动能耗散主要是动能制造项和平流项的负贡献。可以看出,动能制造项对台风菲特的维持至关重要,登陆前对流层低层冷空气与等压线形成力管,斜压位能可转换为台风动能,登陆后冷空气逐渐堵塞台风中心,其区域层结稳定,台风动能转化为位能。

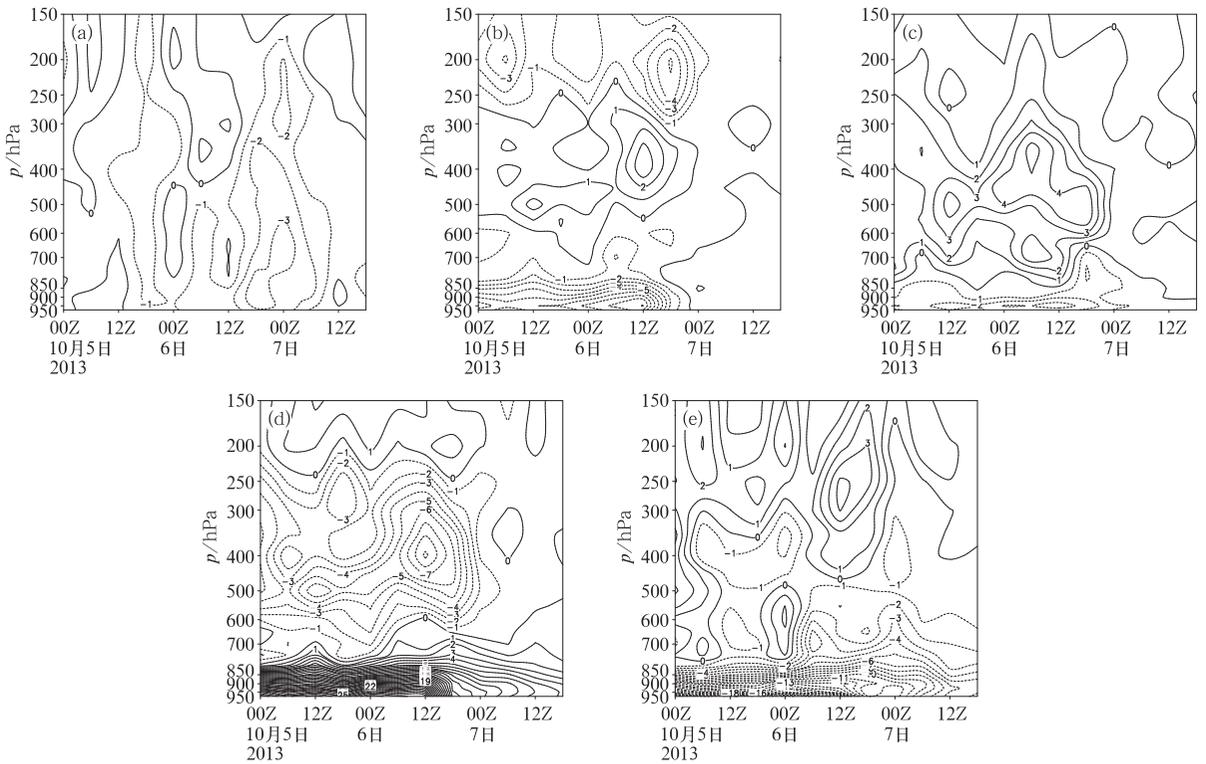


图 5 2013 年 10 月 5 日 00 时至 7 日 18 时台风动能方程各项(单位: $10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$)的垂直-时间演变图

(a)局地变化项,(b)水平平流项,(c)垂直交换项,(d)动能制造项,(e)摩擦耗散项

Fig. 5 Time series of every term in kinetic energy budget equation (unit: $10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$)

during 00 UTC 5 to 18 UTC 7 October 2013

(a) local variation term, (b) horizontal advection term, (c) vertical transport term,

(d) generation and (e) residual terms

4 台风菲特迅速衰亡的结构特征

从台风菲特登陆后的环境条件来看,其水汽供应、动能收支以及环境风垂直切变都不利于其维持。但台风消失还与其结构特征的丧失有关。

图 6 为过台风中心相当位温和垂直流场(用 v

与 $-10 \times \omega$ 制作)的经向垂直剖面。可以看出,2013 年 10 月 6 日 12 时,台风中心上空具有弱下沉气流,对流层高层、低层相当位温线分别有向下、上伸的暖舌,表现出台风的暖中心。台风中心两侧约 1 个纬距处相当位温线陡立密集区域上升运动显著,对应台风眼壁区。两侧再向外围 600 hPa 高度附近各有一干冷中心,垂直上升和下沉运动交替出

现,体现了螺旋云带区的结构特征。登陆后,2013年10月7日06时,由于冷空气侵入,台风中心上空低层出现了干冷中心,眼壁区密集陡立的相当位温线消失,原眼壁区至台风眼区均为下沉气流控制。

仅在台风中心北侧、环境风垂直切变的下风方4~5纬距处还有较弱上升运动,对应着台风北部的降水区域。但台风的典型结构特征消失。

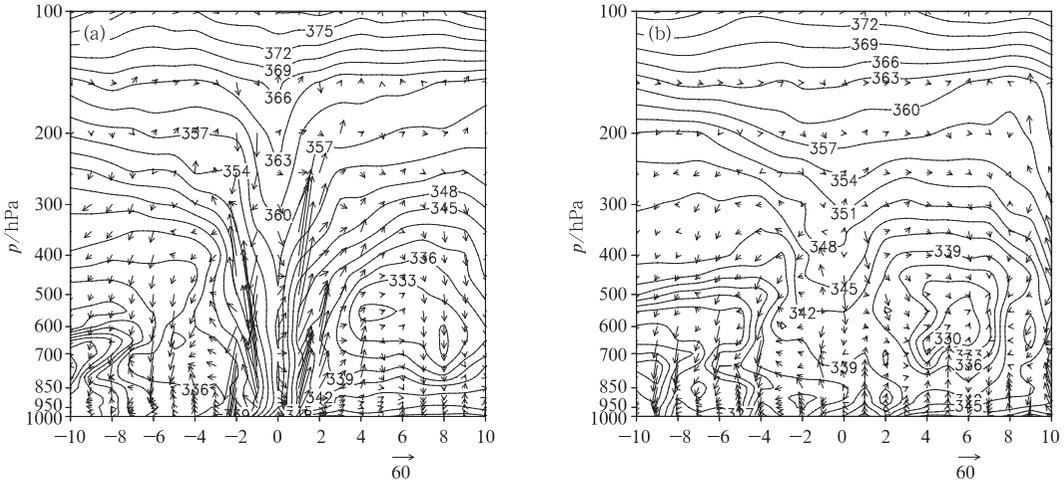


图6 2013年10月6日12时(a)和7日06时(b)过台风中心相当位温(单位:K)和垂直流场(用 v 与 $-10 \times \omega$ 制作, v 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, ω 单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)的经向垂直剖面(横坐标0为台风中心,正为向北,负为向南,一个单位为一个纬距)

Fig. 6 Meridional-vertical sections of potential temperature (unit: K) and vertical stream (made with v and -10ω , v unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, ω unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) across typhoon center [0 indicates the location of typhoon center, the values show latitudinal degrees from the center, and positive (negative) ones indicate the north (south)]

5 结 论

2013年23号台风菲特是个登陆后迅速消失的台风,通过环境条件、水汽和动能收支以及结构变化特征的分析,对其迅速消亡原因获得以下认识:

台风菲特登陆过程涉及其与中纬度西风槽以及另一台风丹娜丝相互作用。登陆前,“菲特”一方面从与台风丹娜丝之间的偏东风低空急流中获得水汽输送,另一方面从斜压系统中获得动能转换,同时,高、低空急流的配置以及较小的环境风垂直切变有利于台风的维持和发展。台风菲特登陆后,一方面水汽通道断裂失去了外界潜热能的供应,另一方面冷空气侵入台风中心,台风动能转化为斜压位能,同时,高、低空风场配置加大环境风垂直切变,台风失去其结构特征而消亡。

分析表明,不利于台风菲特维持的因素很多,但在外界水汽供应断绝的情况下,冷空气侵入台风中

心是其丧失结构特征迅速消亡的主要原因。吴雪等(2013)分析超强台风梅花(1109)强度异常减弱的成因指出,冷平流从低层侵入台风中心,破坏台风结构,阻碍热量向上输送,是其异常减弱的主要原因。值得注意的是,台风迅速消亡过程也是其北部浙江附近发生严重降水的过程。本文研究发现,强降雨通过平流项消耗台风动能,同时降水区垂直运动的发展,造成台风结构不对称,这都不利于台风菲特的维持。但两者的关系尚需进一步探讨。

参考文献

- 陈联寿,罗哲贤,李英. 2004. 登陆热带气旋研究的进展. 气象学报, 62(5): 541-549.
- 程正泉,陈联寿,李英. 2012. 登陆热带气旋与夏季风相互作用对暴雨的影响. 应用气象学报, 23(6): 660-671.
- 高栓柱,吕心艳,王海平,等. 2012. 热带气旋莫兰蒂(1010)强度的观测研究和增强条件的诊断分析. 气象, 38(7): 834-840.
- 李英,陈联寿. 2005. 湿地边界层通量影响热带气旋登陆维持和降水的数值试验. 气象学报, 63(5): 683-693.

- 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. *气象学报*, 61(2):167-179.
- 王海平,高拴柱. 2014. 2013 年 10 月大气环流和天气分析. *气象*, 40(1):126-131.
- 魏娜,李英,胡妹. 2013. 1949—2008 年热带气旋在中国大陆活动的统计特征及环流背景. *热带气象学报*, 29(1):17-27.
- 吴雪,端义宏. 2013. 超强台风梅花(1109)强度异常减弱成因分析. *气象*, 39(8):965-974.
- 许映龙,高拴柱,刘震坤. 2005. 台风云娜陆上维持原因浅析. *气象*, 31(5):32-36.
- 闫敬华,徐建平,丁伟钰,等. 2005. 地形对登陆热带气旋黄蜂(2002)强度影响的模拟研究. *大气科学*, 29(2):205-212.
- 袁金南,谷德军,梁建茵. 2005. 地形和边界层摩擦对登陆热带气旋路径和强度影响的研究. *大气科学*, 29(3):429-437.
- 周福,钱燕珍,朱宪春,等. 2014. “菲特”减弱时浙江大暴雨过程成因分析. *气象*, 40(8):930-939.
- Braun S A, Wu L G. 2007. A numerical study of Hurricane Erin (2001). Part II: Shear and the organization of eyewall vertical motion. *Mon Wea Rev*, 135(4):1179-1194.
- Chen S Y S, Knaff J A, Macks F D Jr. 2006. Effect of vertical wind shear and storm motion on tropical cyclone rainfall asymmetries deduced from TRMM. *Mon Wea Rev*, 134(11):3190-3208.
- Frank W M, Ritchie E A. 1999. Effects of environmental flow upon tropical cyclone structure. *Mon Wea Rev*, 127(9):2044-2061.
- Shen W, Ginis I. 2002. A numerical investigation of land surface water on landfalling hurricanes. *J Atmos Sci*, 59(4):789-802.
- Wei N, Li Y. 2013. A modeling study of land surface process impacts on inland behavior of Typhoon Ranim (2004). *Adv Atmos Sci*, 30(2):367-381.
- Zeng Z, Wang Y, Chen L. 2010. A statistical analysis of vertical shear effect on tropical cyclone intensity change in the North Atlantic. *Geophys Res Lett*, 37, L02802.