

冷空气对登陆台风变性发展与消亡的对比分析

王文典¹, 刘建勇², 高益波¹, 龚涛峰¹

¹余姚市气象局, 浙江 余姚

²宁波市气象局, 浙江 宁波

Email: 787341476@qq.com

收稿日期: 2020年10月20日; 录用日期: 2020年11月3日; 发布日期: 2020年11月10日

摘要

选取对华东造成严重灾害的2007年0716号超强台风“罗莎”和2013年1323号强台风“菲特”, 采用诊断分析方法, 分析台风环境场、要素场及暴雨分布情况, 研究两个台风个例变性期间的冷空气入侵过程, 探讨冷空气与台风相互作用的演变特征及与台风暴雨生消关系。分析表明, 变性台风会受到弱冷空气和海上环流系统的双重影响, 形成了有利于暴雨的水汽条件和热力、动力结构, 如台风“罗莎”受北部的温度浅槽和海上方头高压, 台风“菲特”北部的温度浅槽、高压带和海上丹尼斯台风。弱冷空气分别从不同层次入侵两个台风, 强迫台风低层暖空气抬升, 垂直上升运动加剧, 台风上暖下冷并向西倾, 大气斜压能增加并释放, 导致降水增幅。台风“罗莎”(“菲特”)台风高低层涡度、散度配置较好(不好), 有(不)利于台风系统强度的维持。

关键词

台风, 冷空气, 暴雨, 对比分析

Comparative Analysis on the Development and Extinction of Landfall Typhoons by Cold Air

Wendian Wang¹, Jianyong Liu², Yibo Gao¹, Taofeng Gong¹

¹Yuyao Meteorological Bureau, Yuyao Zhejiang

²Ningbo Meteorological Bureau, Ningbo Zhejiang

Email: 787341476@qq.com

Received: Oct. 20th, 2020; accepted: Nov. 3rd, 2020; published: Nov. 10th, 2020

Abstract

The selection of east China caused serious disasters in 2007 0716 super typhoon “Rosa” and “Fitow”

文章引用: 王文典, 刘建勇, 高益波, 龚涛峰. 冷空气对登陆台风变性发展与消亡的对比分析[J]. 气候变化研究快报, 2020, 9(6): 673-684. DOI: 10.12677/ccrl.2020.96074

powerful typhoon no. 1323, 2013, by using the way of diagnosis, analysis of typhoon environment field, elements and the distribution of the heavy rain, the two typhoon case study degeneration during the process of cold air invasion of cold air and typhoon evolution characteristics of interaction and the relationship between the typhoon rainstorm born away. The analysis shows that the denatur typhoon will be influenced by the weak cold air and the sea circulation system, forming the moisture condition and the thermal and dynamic structure which is favorable to the rainstorm. For example, the temperature shallow trough and the sea square high in the north of typhoon kro-sa and the temperature shallow trough, the high pressure zone and the sea Dennis typhoon in the north of typhoon Fitow. Weak cold air invaded the two typhoons from different levels, forced the warm air in the lower layer of the typhoon to lift, and intensified the vertical upward movement. The typhoon warmed up and cooled down and tilted westward, and the barocline pressure in the atmosphere increased and released, leading to the increase of precipitation. Typhoon "Rosa" ("Fitow") has good (bad) configuration of high and low layer vorticity and divergence, which is conducive to the strength of the typhoon system.

Keywords

Typhoon, Cold Air, Heavy Rain, Comparative Analysis

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

通常台风登陆后,受到地面摩擦影响,入流减弱,动量和水汽通量减小,强度会迅速减弱[1]。但是当登陆台风与中纬度冷空气相互作用,可以使减弱的台风低压环流获得能量,可以再次引起局地暴雨的发生。登陆台风的移动路径,持续时间和海上暖湿气流输送强度是影响台风暴雨的主要因子。双台风的相互作用与台风间距、台风半径和台风强度等因素有关[2] [3]。登陆台风受双台风相互作用的影响,其自身如外围环流、移动路径、移动速度和与入侵冷空气的作用过程都会发生改变。台风倒槽是我国东部沿海地区台风的主要降水天气型[4]。台风低压倒槽的空间结构、持续时间、移动速度和路径决定着暴雨的落区与强度。以往的研究关注重点是登陆台风变性后,大陆温带气旋的再发展阶段,而在台风变性阶段中,对引发暴雨的台风倒槽的结构演变的研究目前较少。在台风变性过程中,斜压冷空气与台风倒槽和台风残涡的结构影响和强度维持的机制还不清楚,其中冷空气的路径、斜压系统与台风相对位置对变性台风锋生作用有待进一步研究。因此,进一步加强对秋季登陆我国华南沿海台风的过程演变特征和暴雨发生发展机理与规律的研究,对提高此类台风及在该地区造成的暴雨的预报准确率、预防和减轻台风带来的灾害和损失具有深远意义。

本文主要关注浙江地区的台风暴雨情况。我们选取了 2007 年 0716 号台风“罗莎”和 2013 年 1323 号台风“菲特”,利用常规观测资料、自动气象站资料和分辨率 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 6 h 间隔的 ECMWF 再分析资料,对比分析两次台风变性期间的冷空气入侵过程,来进一步了解冷空气与台风相互作用的演变特征及与台风暴雨生消关系。

2. 台风个例概况对比

2.1. 台风主要特征和移动路径

台风“罗莎”是 2007 年 0716 号超强台风,台风“菲特”是 2013 年 1323 号强台风,我们总结两次台

风登陆前后的台风中心强度、台风尺度、移动路径等特征，分析发现两个台风在相近的季节给浙江沿海带来了严重的暴雨灾害，但它们的生消特征、暴雨强度和空间分布存在很大的差异。

相似点：1) 生成源地相近；2) 登陆月份相近，都属于秋台风，都为十月上旬；3) 登陆地相近，都在浙闽沿海附近登陆。不同点：1) 移动方向(图 1)：“罗莎”在台湾北部登陆后，朝西北偏北方向移动，穿过福建省境内北上再次进入浙江温州，强度继续减弱，穿过台州后，移入东海，向东北方向移动；“菲特”陆福建省后减弱为热带低压，停滞内陆，最后消散；2) 移动速度：“罗莎”整体较快，“菲特”慢；3) 台风强度：“罗莎”登陆台湾前位于西北太平洋洋面上，强度为超强台风，中心最低气压值 930 hPa，中心附近最大风力达到 55 米/秒(16 级)；“菲特”登陆前强度为强台风，中心最低气压值 945 hPa，近中心最大风力达 45 m/s (14 级)。

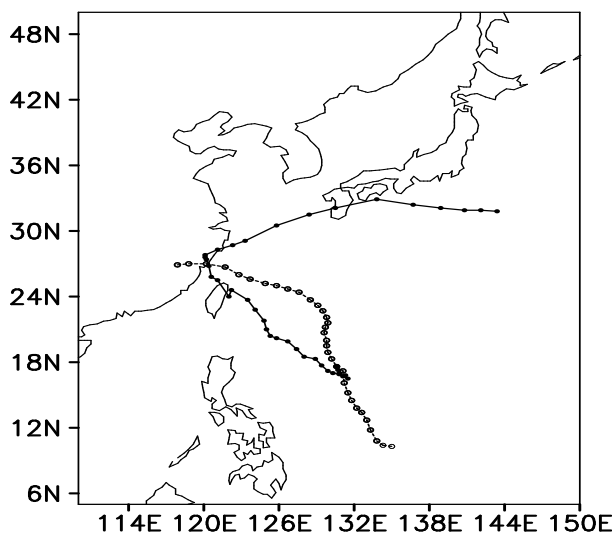


Figure 1. The moving paths of Typhoon Krosa (solid) and Typhoon Fitow (hollow) on 925 hPa

图 1. 925 hPa 上台风“罗莎”(实心)和台风“菲特”(空心)的移动路径

2.2. 台风过程降水情况

我们分别选取杭州站和余姚站作为代表站点来分析罗莎台风和菲特台风不同阶段的降水特征。

2007 年 10 月受台风“罗莎”和冷空气共同影响，浙江省东部沿海出现了 10~13 级大风，大部分地区暴雨到大暴雨，局部特大暴雨。6~8 日浙江省平均雨量为 163.0 mm，其中浙江东部和北部地区雨量超过 200 mm，舟山 8 日 233.8 mm [5]。6 日 08 时至 9 日 08 时浙江省累计雨量(图 2(a))分布特征为，从西到东增大，沿海大部分地区 3 日累计雨量达 100 mm 以上，局地甚至高达 600 mm，均打破当地历史之最。而台风“菲特”呈现了秋季登陆我国台风的降水特点：短时雨量大、影响范围大。6 至 8 日浙江省出现罕见的短期暴雨及以上级别的天气。6 日到 8 日(图 2(b))，浙江省平均雨量达 207 毫米，浙北、浙东、浙北和浙南大部分地区 3 日累计雨量达 200 mm 以上，其中沿海的奉化、余姚等地 3 日累计雨量超 500 mm 以上，均超当地历史之最。狂风暴雨过程，又逢天文大潮，城市内涝、山体滑坡和泥石流等次生灾害十分严重。

分析杭州单站 2007 年 10 月 6~9 日 3 h 降水情况，7 日 13 时至 8 日 00 时，受台风“罗莎”外围雨带的远距离降水影响，杭州出现累计 65 mm 以上连续降水。8 日 07 时起至 8 日 22 时，台风螺旋雨带云系和台风倒槽云系北移，杭州地区台风主体强降水过程开始。该台风过程强降水持续一定时间，降水效率高，杭州出现持续性暴雨，最大小时雨量超 40 mm 以上。之后由于附近环流场作用，台风倒槽移动速度

快，台风的强降水时间短，向东北方向移动入海(图 3(a))。

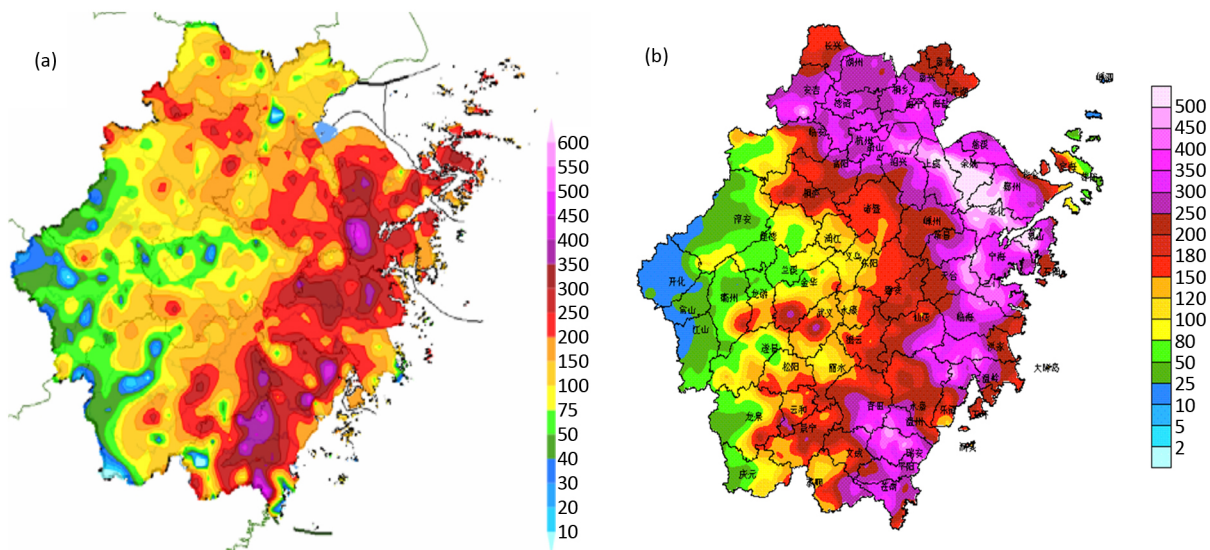


Figure 2. Cumulative rainfall in Zhejiang Province (unit: mm); (a). 08 a.m. to 08 p.m. on 6 October 2007; (b). 08 a.m. to 08 p.m. on 6 October 2013

图 2. 浙江省累计雨量(单位: mm); (a) 2007 年 10 月 6 日 08 时至 9 日 08 时; (b) 2013 年 10 月 6 日 08 时至 9 日 08 时

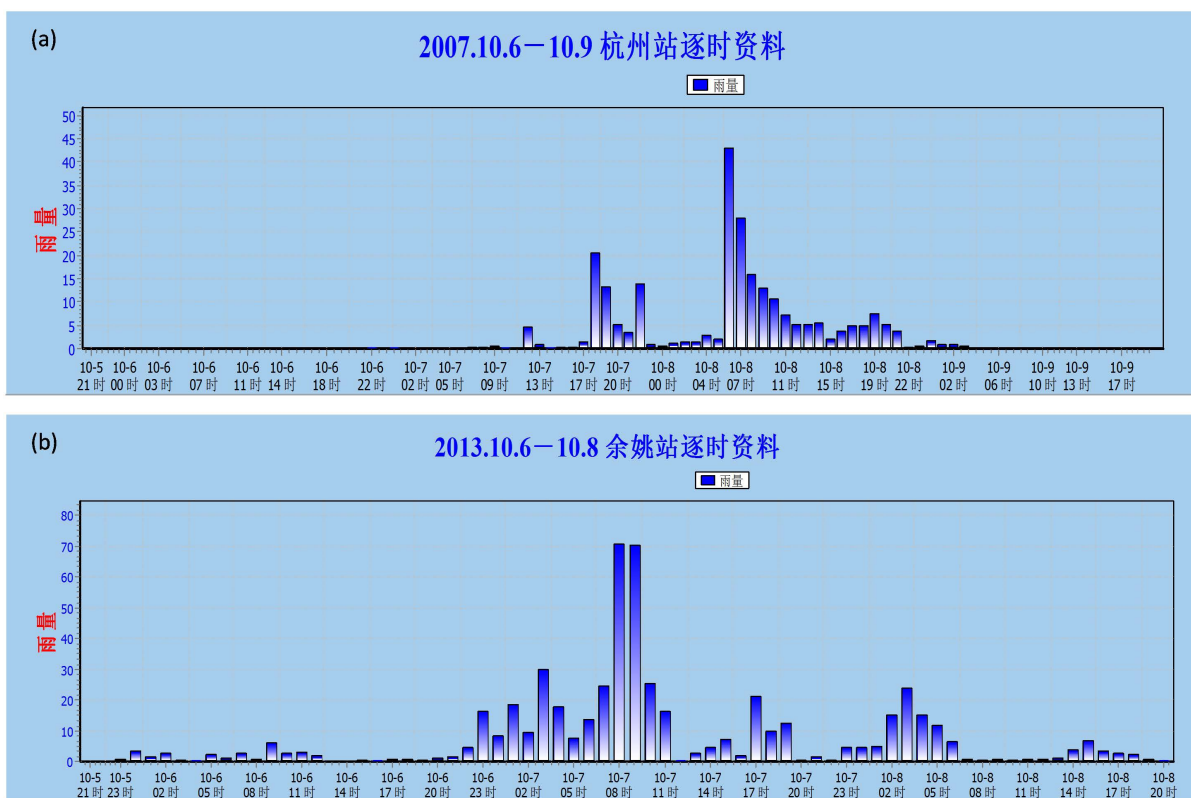


Figure 3. (a) The actual situation of cumulative precipitation in Hangzhou at 3 h at a single station during the typhoon rains-torm of Rosa; (b) The actual situation of cumulative precipitation in Yuyao single station 3 h during Typhoon Fitow

图 3. (a) 罗莎台风暴雨过程杭州单站 3 h 累计降水量实况; (b) 菲特台风过程余姚单站 3 h 累计降水量实况

分析余姚单站 2013 年 10 月 6~8 日 3 h 降水情况,通常在台风主体降水前约 24 h,在台风前缘 1000 km

左右、台风倒槽风切变下游地区,会发生台风外围降水[6]。如图 3(b),6 日 02 时前后,余姚出现 10~20 mm 连续降水。当西风槽后冷空气侵入台风倒槽时,会使台风降水的强度增加[7] [8],因而 7 日下午至晚上 20 时,受东南急流的影响,余姚出现第三次强降水,此次降水出现局地持续性暴雨。8 日凌晨菲特台风残留云系和南下冷空气相互作用,西移降水雨带缓慢东移。通过与冷空气相互作用[9] [10],台风逐渐变性为半冷、半暖的斜压系统,变性后冷锋结构主要决定台风暴雨的强度。

3. 台风环境场特征对比

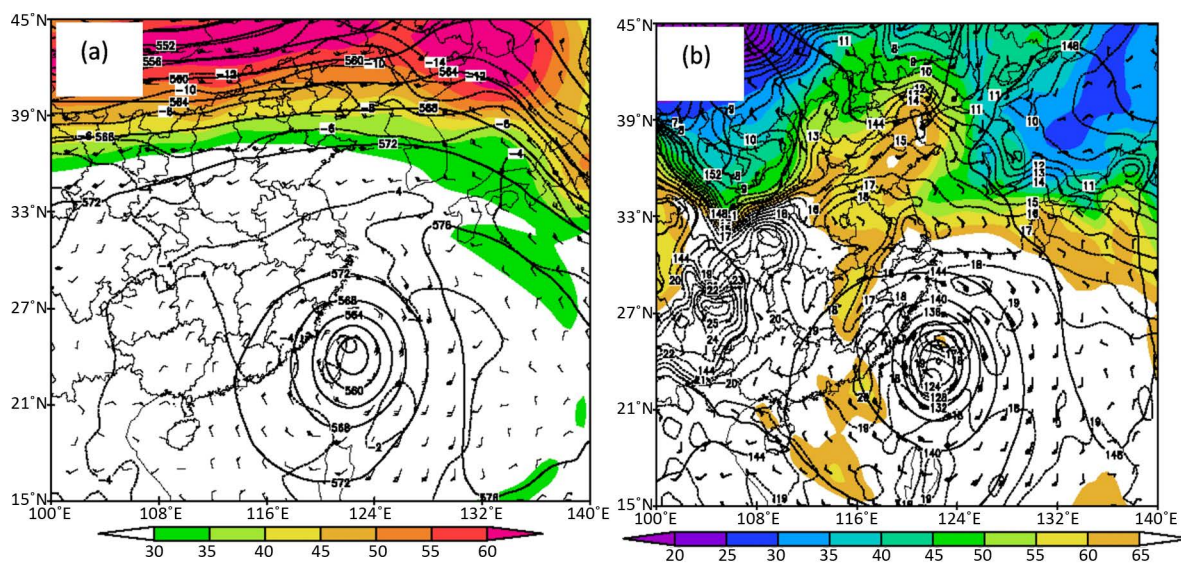
3.1. 罗莎台风环境场分析

罗莎台风登陆前,高层 200hPa 上,中高纬度以北有多条带状高空急流,西起中亚,东至日本,向南伸展至 36° N,稳定少动(图 4(a)、图 4(c)),急流中心最大风速超过 70 m/s。高空急流主体位置对应 500 hPa 为纬向低压槽(图 4(e)),低压槽相对台风登陆点,整体位置偏北。温度槽从台风北部南压,台风和冷空气在浙江中北部、安徽和江苏南部相遇(图 4(g))。西太平洋副高位置偏北,黄海海域有方头高压存在,登陆台风东侧有持续偏南气流,水汽条件充沛。之后黄海海域高压主体向东北移动,至日本海域附近,致使弱冷空气从东路下来,方头高压的影响范围被冷空气南压,海上高压中心强度稍有减弱,但西侧向台风靠近,成西北-东南走向,北侧与西风带重合,盛行西风。后期高压南侧明显西南伸展至湘粤大陆、登陆台风南侧,与台风低压之间的气压梯度增大。

对流层中低层(图 4(b)、图 4(d))上,西太副高主体东北移,其西侧西伸至日本西部。罗莎台风登陆前后,浙江省有台风倒槽维持,有较强偏北风并继续增强。台风倒槽前 850 hPa 上(图 4(f)),中高纬地区有低槽东移。对流层中高层,台风系统保持相对孤立,槽后的弱冷空气向台风低层北部渗透(图 4(h)),浙江北部的冷空气主要对应东北风与 500 hPa 上的东南风和台风东侧的东南低空急流相互作用。冷锋锋区南压至浙江北部至江西北部东北-西南走向,锋前台风东侧大量暖湿空气被迫抬升,对流不稳定加剧。锋区等温线更密集,强势向东南方向推进,加强了水汽在浙闽沿海的辐合,水汽能量堆积。

3.2. 菲特台风环境场分析

菲特台风登陆前,高层 500 hPa 上蒙古高原有冷槽(图 5(a)),弱冷空气活动南压,它与西太平洋副热



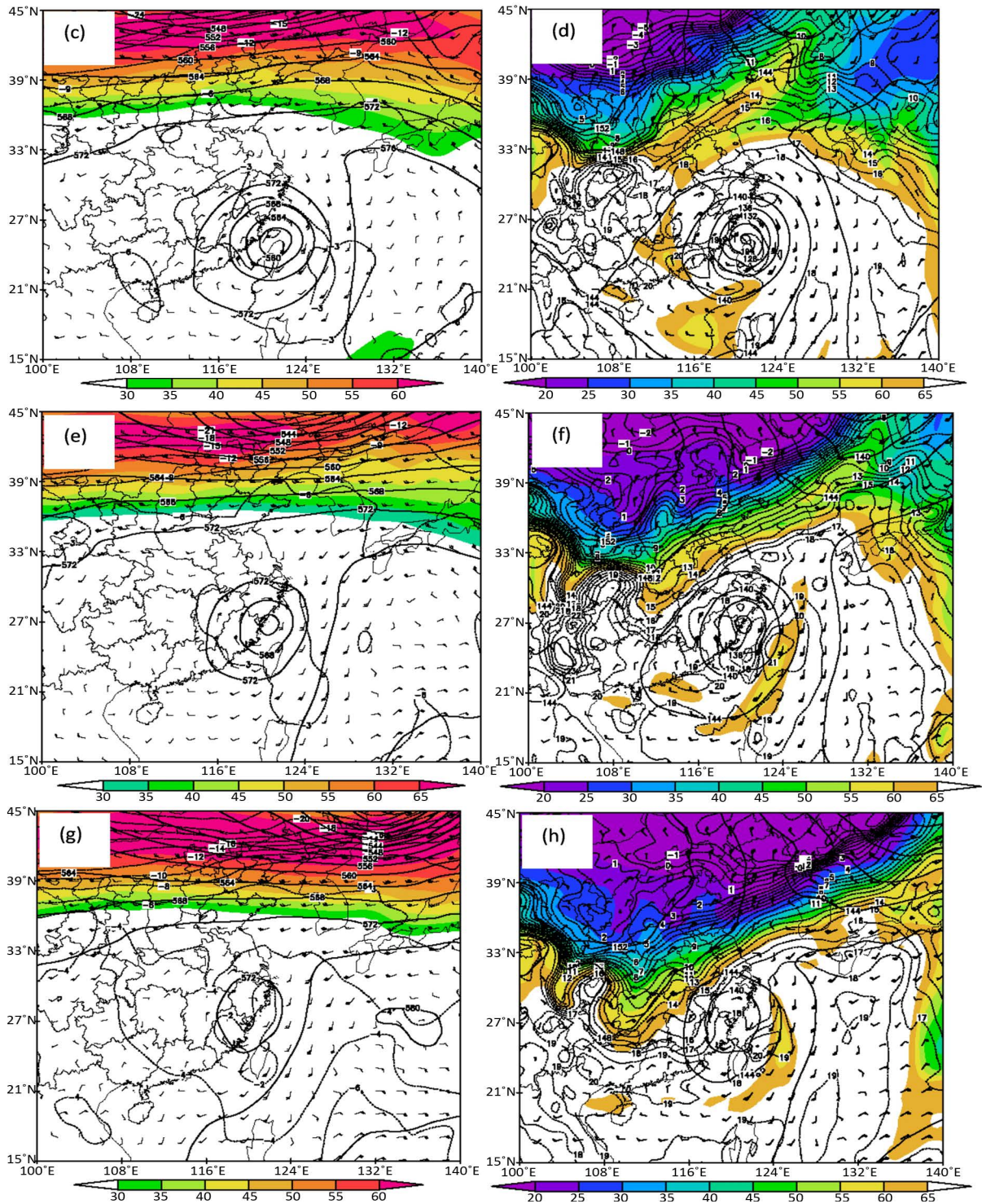
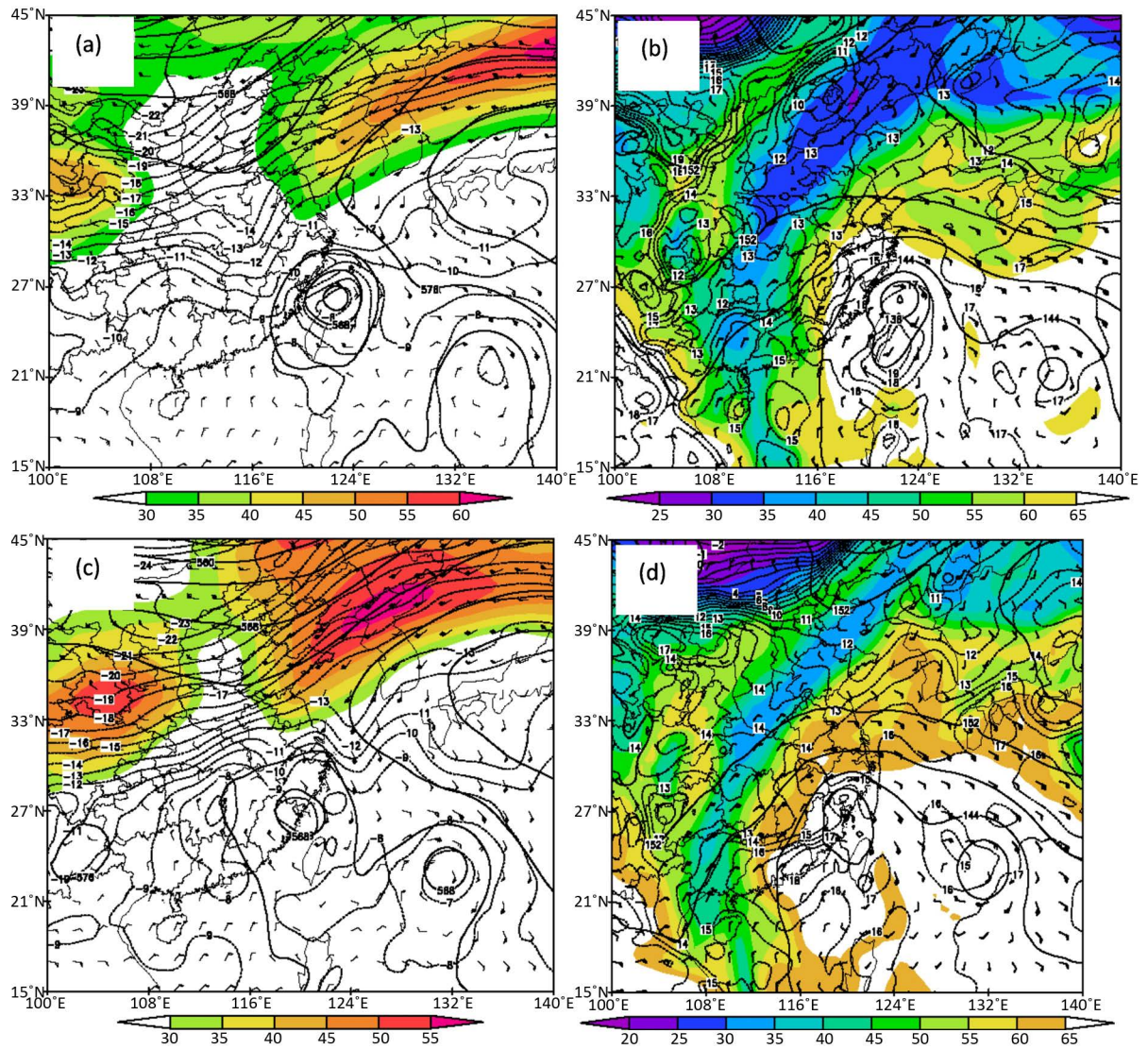


Figure 4. Superposition of geopotential height (solid line), temperature (dotted line), wind field and 200 hPa upper jet (shaded part) of Typhoon Rosa 500 hPa; (B) (D) (F) (H) Superposition diagram of geopotential height (solid line), temperature (dashed line), false potential temperature (shaded area $\leq 65^{\circ}\text{C}$) and wind field of Rosa Typhoon 850 hPa; (a) (B) 6 October 2007 at 08:00; (C) (D) at 20:00 on 6 October 2007; (e) (F) on 7 October 2007 at 08:00; (G) (H) 20:00 on 7 October 2007

图 4. (a) (c) (e) (g) 罗莎台风 500 hPa 位势高度(实线)、温度(虚线)、风场和 200 hPa 高空急流(阴影部分)叠加图; (b) (d) (f) (h) 罗莎台风 850 hPa 位势高度(实线)、温度(虚线)、假相当位温(阴影区 $\leq 65^{\circ}\text{C}$)和风场叠加图; (a) (b) 2007 年 10 月 6 日 08:00; (c) (d) 2007 年 10 月 6 日 20:00; (e) (f) 2007 年 10 月 7 日 08:00; (g) (h) 2007 年 10 月 7 日 20:00

带高压间的气压梯度加大。台风低压北部是风速很小的鞍形场(图 5(c))，中纬度地区新疆北部至蒙古国西部为低压槽后部，槽后与副高西北侧的西南气流汇合增强，在对流层中高层形成西南风急流，且急流风速随着位势高度的增加而增大，200 hPa 急流中心最大风速超过 60 m/s。Grams 等[11]指出高空急流会增加台风倒槽的强度和水平尺度。菲特台风登陆后(图 5(e)、图 5(g))，200 hPa 高空急流一直位于日本海峡上空，且稳定少动，其入口区位于胶东半岛以南，与台风外围环流距离较近。高空急流对台风的水汽补充和抽吸作用，有利于台风低压强度增强，台风暴雨增幅。

菲特台风登陆前后，西太副高主体位于海上，高压系统深厚。中低层 850 hPa 上(图 5(b))，台风北部有浅薄的温度槽，大陆上的 152 dagpm 等高线与副高西侧打通形成高压带，带状高压在内陆地区温度低，比海上同纬度地区低 2°C~3°C，属于浅薄的冷性高压带。高压带南部和台风之间吹偏东气流(图 5(d))，台风北部和西部有弱冷性温度槽，不利于登陆台风向西向北移动，致使台风停留在福建、浙江靠近海岸的地区。冷空气南压时(图 5(f)、图 5(h))，杭州湾南部沿海存在偏东风，内陆地区东北风，对应 500 hPa 吹东南风，在对流层中低层有明显的切变辐合，干冷空气渗进台风低压，抬升作用加强。台风倒槽始终位于浙沪地区。



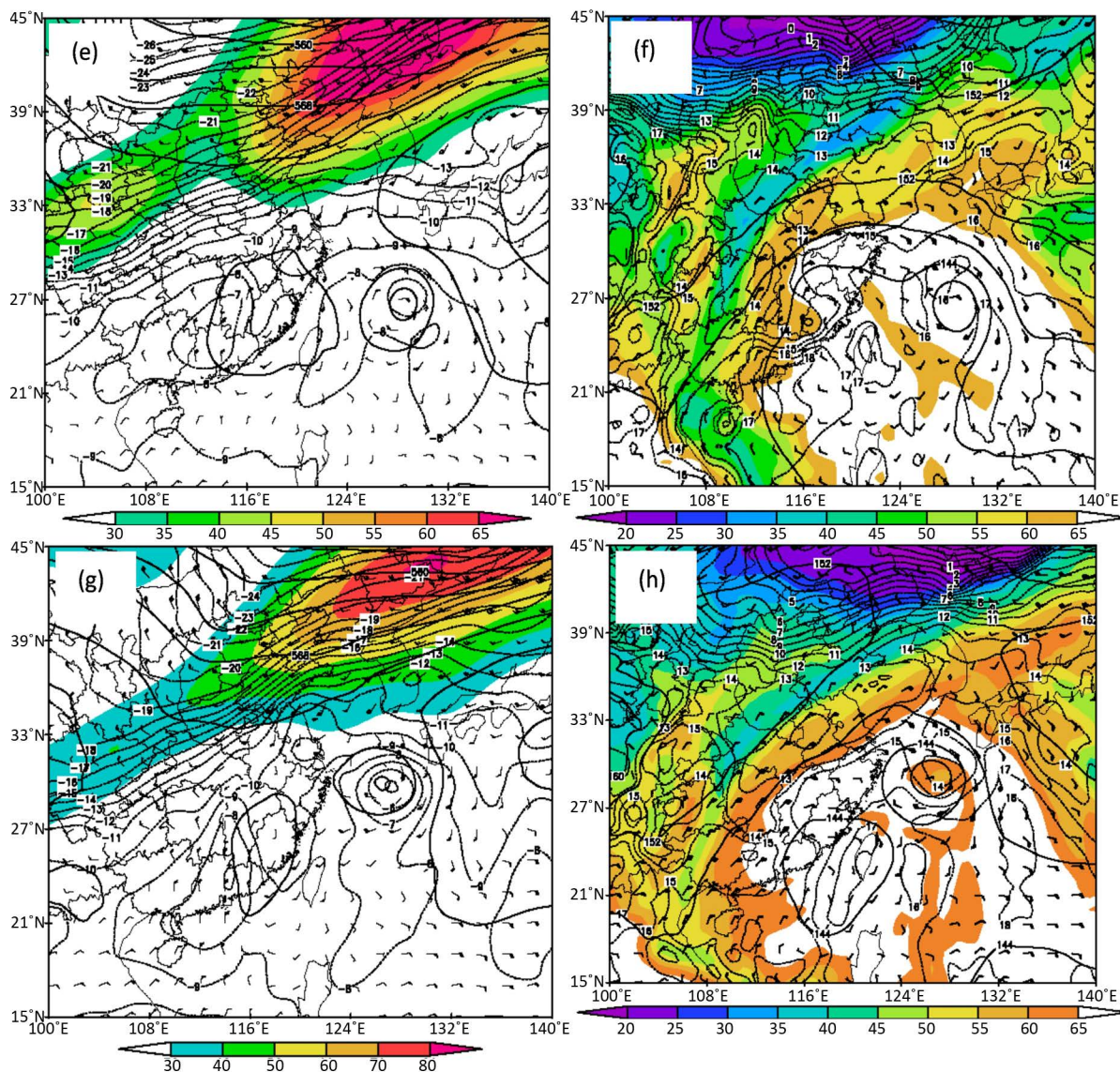


Figure 5. Superposition of typhoon fitot at 500 hPa (solid line), temperature (dotted line), wind field and 200 hPa upper jet (shaded part); (B) (D) (F) (H) Superposition diagram of the geopotential height (solid line), temperature (dashed line), false potential temperature (shaded area $\leq 65^{\circ}\text{C}$) and wind field of Fitot Typhoon 850 hPa; (a) (b) 08:00 on 6 October 2013; (C) (D) at 20:00 on 6 October 2013; (e) (f) 7 October 2013 at 08:00; (G) (H) October 7, 2013 at 20:00

图 5. (a) (c) (e) (g) 菲特台风 500 hPa 位势高度(实线)、温度(虚线)、风场和 200hPa 高空急流(阴影部分)叠加图; (b) (d) (f) (h) 菲特台风 850 hPa 位势高度(实线)、温度(虚线)、假相当位温(阴影区 $\leq 65^{\circ}\text{C}$)和 风场叠加图; (a) (b) 2013 年 10 月 6 日 08:00; (c) (d) 2013 年 10 月 6 日 20:00; (e) (f) 2013 年 10 月 7 日 08:00; (g) (h) 2013 年 10 月 7 日 20:00

对流层中低层,丹娜丝台风逐渐靠近,受其影响双台风产生一定程度的互旋作用,菲特台风稍有南折,其东侧海上东南气流加强,东南气流将西太平洋上的水汽持续输进台风低压环流中,水汽条件得以持续增强,暴雨增幅。

综上所述,结合表 1 的罗莎台风与菲特台风的冷空气特征的不同点可知,冷空气是从罗莎台风外围西北侧接触并入侵台风内部的。而冷空气从菲特台风外围北侧和西侧接触并入侵台风内部的,菲特台风的低层环流基本被冷空气破坏,双台风之间的相互作用也使菲特台风高层暖型低压环流维持,使位势不稳定加剧,充沛的水汽条件得以维持,造成了短时局地暴雨的发生。

Table 1. Comparison of cold air differences between Typhoon Rosa and Typhoon Fitow
表 1. 罗莎台风与菲特台风的冷空气不同点对比

台风	200 hPa 急流	与 500 hPa 冷空气	台风北部	500 hPa 环流	500 hPa 环流
名称	南界(°N)	南界纬距(°N)	有无冷槽	系统(大陆)	系统(洋面)
罗莎	36	14	不明显	温度槽	方头高压
菲特	33	7	明显	温度槽和高空槽	台风

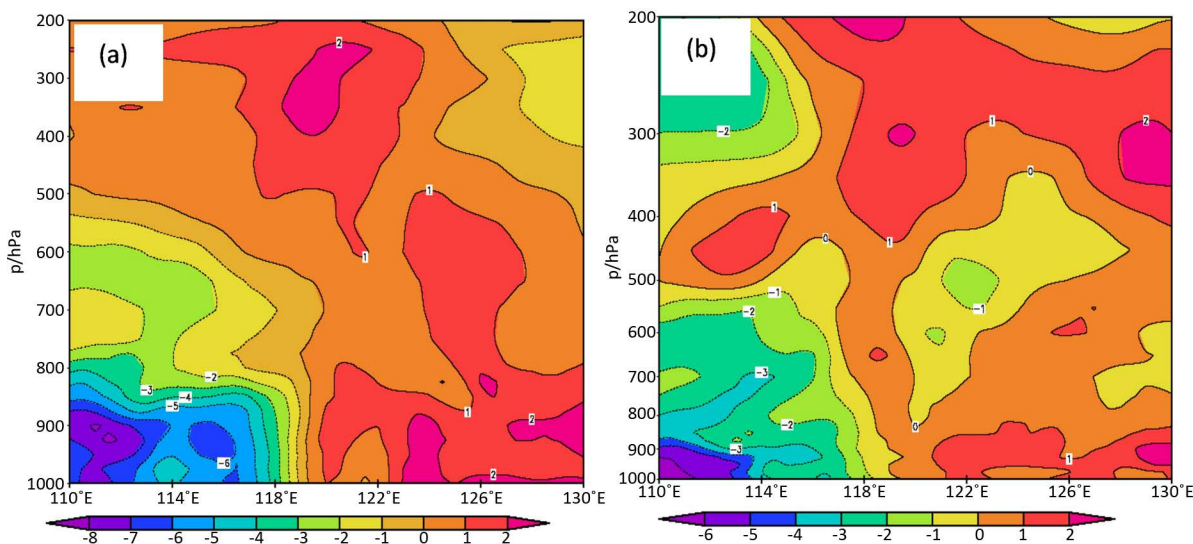
4. 台风要素场特征对比

4.1. 垂直温度距平场

丁治英等[12]研究冷空气与台风的相互作用发现弱冷空气的侵入有利于台风的发展和维持,而强冷空气则使台风低压快速减弱消亡。张兴强等[13],陆佳麟和郭品文[14]指出台风变性的基本特征为台风受到冷空气入侵的热力结构倾斜不对称,呈特征为半冷、半暖的温带气旋。

罗莎台风变性期间,停滞于 27°N 有小波动。在 8 日 02 时(图 6(a)),罗莎台风登陆后,在边界层摩擦作用下,暖中心随高度向西倾斜。温度距平小值区代表的冷空气从 900 hPa 附近,罗莎台风的西北部侵入,迫使该处暖空气抬升,热力结构变成对称不稳定结构。到 8 日 14 时(图 6(c))入侵冷空气主体强度加大,逐渐占据台风低压底部,暖中心环流进一步抬升,高层暖空气稍有减弱。到 8 日 20 时(图 6(e)),高层暖中心变弱,台风低压底部被冷空气占据,变性成半冷、半暖的温带气旋。

菲特台风在登录后高空向西侧倾斜。台风气柱位于 120°E 附近(图 6(b)),暖中心位于 350 hPa 附近,500 hPa 以下暖空气强度较台风高层偏弱,冷空气主体在对流层底层,114°E 以西。菲特台风变性期间,冷空气入侵至台风中低层(图 6(d)),强迫该处暖空气抬升,高层暖中心被抬至 300 hPa 以上,台风气柱的热力结构变成对称不稳定结构。由于丹娜丝台风的靠近,菲特台风暖空气强度略有补充。到 7 日 20 时(图 6(f)),冷空气继续向台风中低层入侵,台风低层被堵塞,台风气柱被冷空气切断成两个弱暖中心,一个位于大陆上空的 300 hPa 左右,另一个位于洋面上 800 hPa 附近。台风附近出现三个冷空气中心,台风高层暖中心的西侧。冷、暖空气相互作用,高层暖中心变弱,台风低压底部环流被冷空气占据,变性发展成为半冷、半暖的温带气旋。



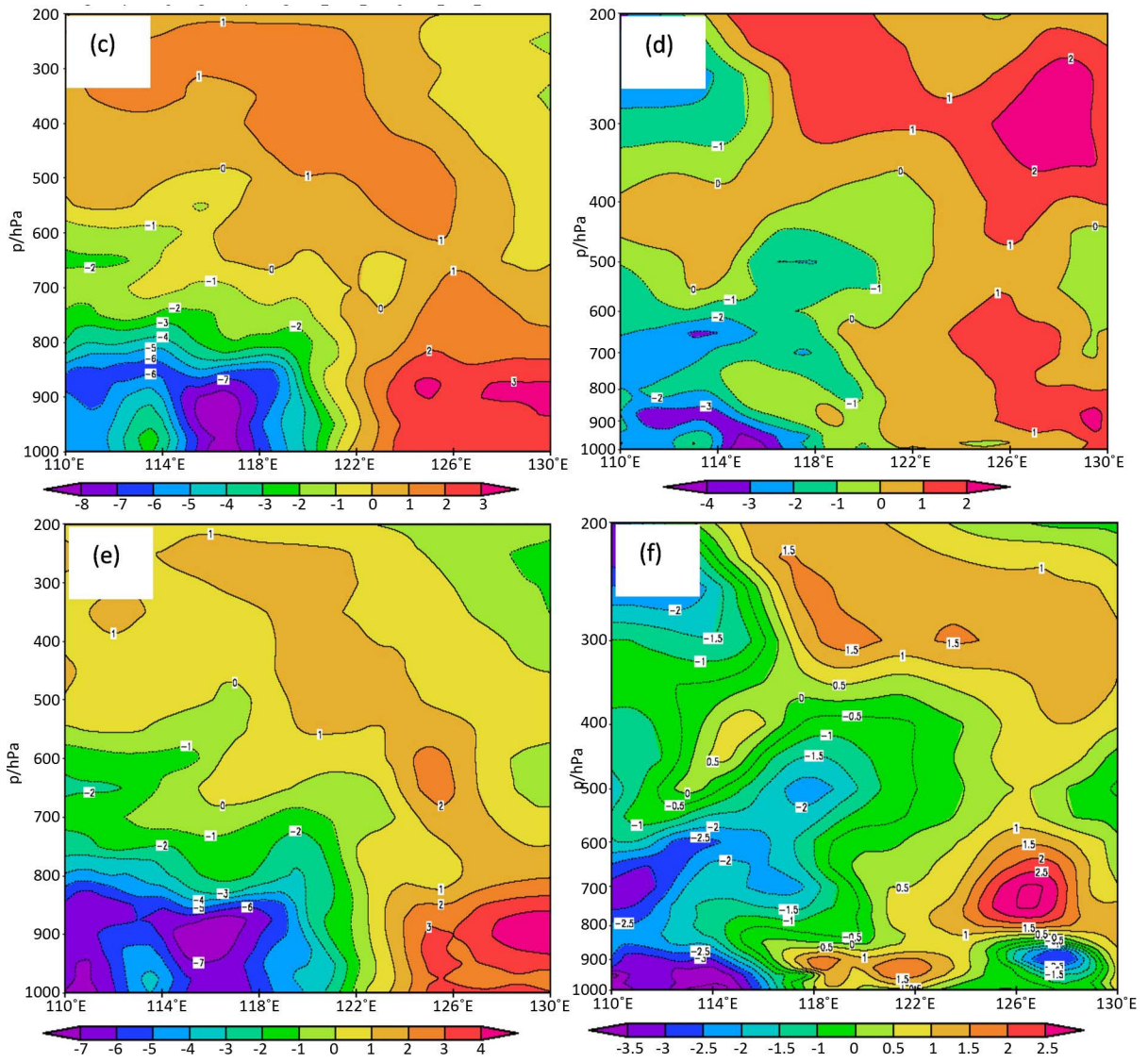


Figure 6. Temperature anomaly ($^{\circ}\text{C}$) longitudinal-vertical profile (A) (C) (E) across the typhoon center during the typhoon denaturation period (A). (c) At 1400 hours on 8 August; (e) At 1200 hours on 8 August; (B.D.F) Typhoon Fitow at 02:00 on October 7, 2013; (d) at 1400 hours on 7 Days; (f) At 2000 hours on 7 July

图 6. 台风变性时期, 过台风中心的温度距平($^{\circ}\text{C}$)纬向垂直剖面图(a) (c) (e)罗莎台风 2007 年 10 月(a)8 日 02 时; (c) 8 日 14 时; (e) 8 日 12 时;(b) (d) (f)菲特台风 2013 年 10 月(b)7 日 02 时; (d)7 日 14 时; (f) 7 日 20 时

4.2. 台风内部对流活动

罗莎台风登陆后, 低层正涡度中心一直位于 121°E 左右(图 7(a)), 高层正散度中心一直位于 123°E 左右(图 7(c)), 对称的动力结构发生倾斜。6 日 20 时至 9 日 08 时, 低层一直保持大于 $1 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ 的正涡度高值, 从罗莎台风第二次登陆到出海, 高层散度稍有减弱后加强, 一直保持大于 $0.2 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ 的正散度高值。涡度与散度最大值均有增加, 表明低层涡度与高层散度区范围不断扩大加深, 造成低层扰动加剧, 垂直上升运动变强, 降水增幅。而菲特台风 6 日 14 时之前正涡度中心及正散度中心均与各层台风环流中心存在较好的对应关系(图 7(b), 图 7(d))。14 时之后, 低层涡度与高层散度的位置发生偏差, 散度中心向西偏。上下层中心发生偏离, 此时台风强度开始迅速减弱。台风登陆后到 7 日 20 时, 低层一直保持大于 $3 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ 的正涡度高值, 7 日 08 时到 8 日 20 时, 高层一直保持大于 $0.2 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ 的正散度高值。低层正

涡度中心和高层正散度中心对应关系不好, 对称的动力结构发生倾斜, 大气斜压能增加, 上升下沉运动加剧, 降水增幅。

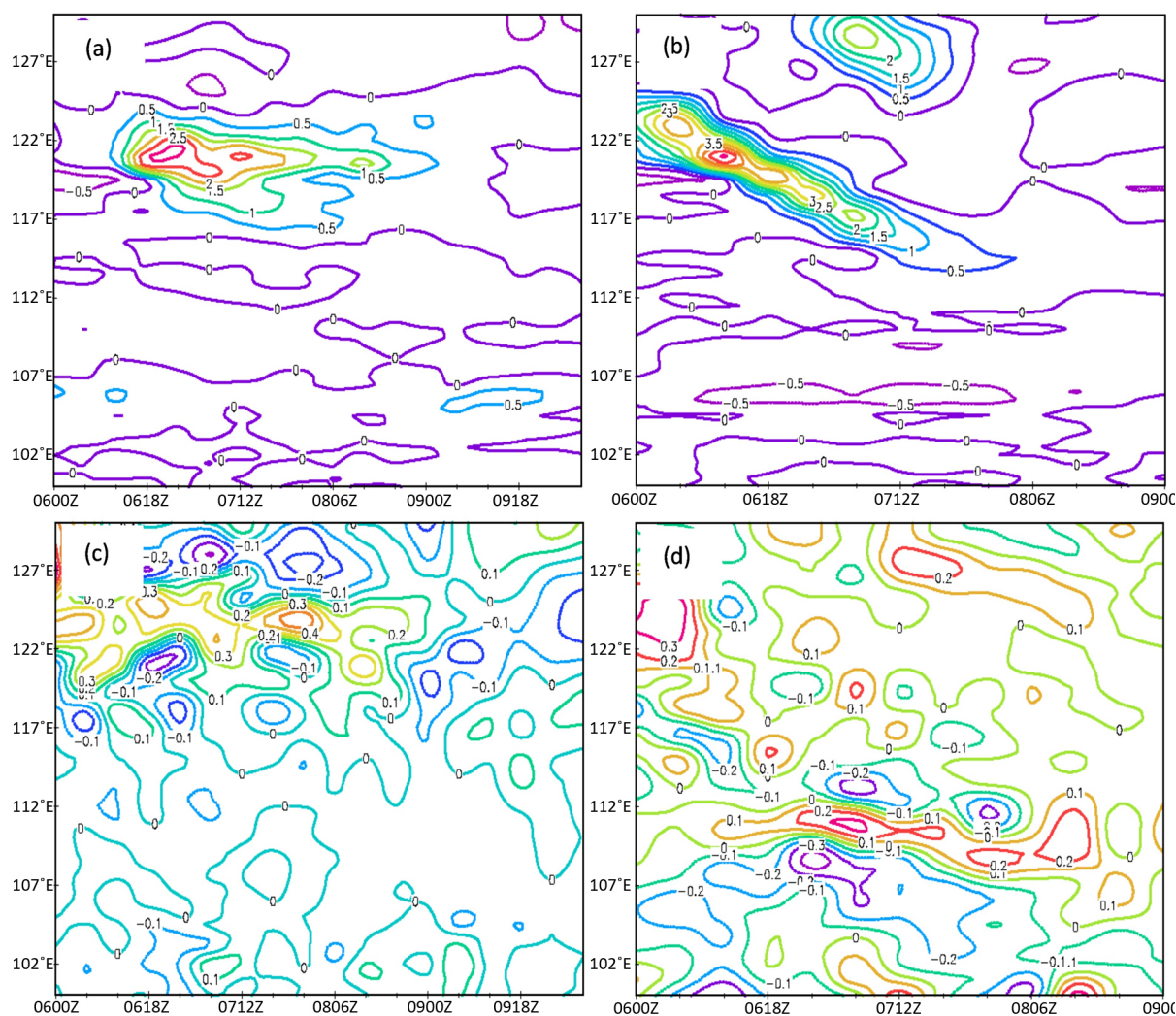


Figure 7. 850 hPa vorticity and 200 hPa divergence distribution along 27°N time zonal direction (10^{-5}s^{-1} , universal time). (A) (C) Typhoon Rosa; (B) (D) Typhoon Fitow

图 7. 850 hPa 涡度与 200 hPa 散度沿 27°N 时间纬向分布(10^{-5}s^{-1} , 世界时); (a) (c) 罗莎台风; (b) (d) 菲特台风

5. 结论

1) 罗莎台风受引导气流的影响, 整体移速较快, 弱冷空气与暖空气交绥, 台风低层温度有所降低; 菲特台风由于北侧的高压带, 移动速度较慢, 菲特台风登陆后则停滞内陆少动, 弱冷空气逐渐占据台风低层环流, 而高层仍残留大量暖湿云系, 并且在双台风相互作用的影响下, 暖空气强度略有补充。受冷空气抬升作用, 低层的切变辐合, 与台风高层残留的暖心形成热力不对称系统, 位势不稳定增加并得到释放。

2) 台风登陆后低层环流均衰减且高空向西侧倾斜。冷中心分别从 900 hPa、1000 hPa 附近入侵罗莎台风和菲特台风, 填塞台风低层, 强迫该处暖空气抬升, 台风暖中心变弱, 热力结构不对称, 位势不稳定能量增加, 变性成具有半冷、半暖特征的温带气旋。

3) 台风西北部等温线、等 θ_{se} 线密集, 台风高低层冷暖空气团梯度加大, 冷暖空气相互作用释放斜压能。罗莎(菲特)台风高低层涡度、散度配置较好(不好), 有(不)利于台风系统强度的维持。

参考文献

- [1] 雷小途, 陈连寿. 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, 2001, 17(4): 452-461.
- [2] Dritschel, D.G. and Waugh, D.W. (1992) Quantification of the Inelastic Interaction on Unequal Vortices in Two-Dimensional Vortex Dynamics. *Physics of Fluids*, **4A**, 1737-1744. <https://doi.org/10.1063/1.858394>
- [3] Prieto, R., McNoldy, B.D., Fulton, S.R., et al. (2003) A Classification of Binary Tropical Cyclone-Like Vortex Interactions. *Monthly Weather Review*, **131**, 2656-2666. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2003\)131%3C2656:ACOBTC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2003)131%3C2656:ACOBTC%3E2.0.CO;2)
- [4] Chen, L.S., Li, Y. and Cheng, Z.Q. (2010) An Overview of Research and Forecasting on Rainfall Associated with Landfalling Tropical Cyclones. *Advances in Atmospheric Sciences*, **27**, 967-976. <https://doi.org/10.1007/s00376-010-8171-y>
- [5] 刘秋锋. 强台风罗莎登陆浙闽北方出现罕见连阴雨(雪) [J]. 气象, 2008, 34(1): 124-125.
- [6] Schumacher, R.S., Galarneau, T.J. and Lance, F.B. (2011) Distant Effects of a Recurring Tropical Cyclone on Rainfall in a Midlatitude Convective System: A High-Impact Predecessor Rain Event. *Monthly Weather Review*, **139**, 650-667. <https://doi.org/10.1175/2010MWR3453.1>
- [7] 钮学新, 杜惠良, 刘建勇. 0216 台风降水及其影响机制的数值模拟实验[J]. 气象学报, 2005, 63(1): 57-68.
- [8] 孙建华, 赵思雄. 登陆台风引发的暴雨过程之诊断研究[J]. 大气科学, 2000, 24(2): 223-237.
- [9] 徐祥德, 陈联寿, 解以扬, 等. 环境场大尺度锋面系统与变性台风结构特征及其暴雨特征[J]. 大气科学, 1998, 22(5): 744-752.
- [10] 蒋尚城. 远距离台风影响西风带特大暴雨的过程模式[J]. 气象学报, 1983, 41(2): 147-158.
- [11] Grams, C.M., Jones, S.C. and Davis, C.A. (2013) The Impact of Typhoon Jangmi (2008) on the Midlatitude Flow, Part II: Downstream Evolution. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **139**, 2165-2180. <https://doi.org/10.1002/qj.2119>
- [12] 丁治英, 陈久康. 有效位能和冷空气活动与台风暴雨增幅的研究[J]. 热带气象学报, 1995, 11(1): 80-85.
- [13] 张兴强, 孙兴池, 丁治英. 远距离台风暴雨的正/斜压不稳定[J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(1): 78-85.
- [14] 陆佳麟, 郭品文. 入侵冷空气强度对台风变性过程的影响[J]. 气象科学, 2012, 32(4): 355-364.