

山东两次台风远距离暴雨对比分析*

丛春华¹, 雷小途², 陈佩燕²

(1. 山东省气象台, 山东 济南 250031; 2. 中国台风研究所, 上海 200030)

摘要: 基于气象要素高空探测、地面观测以及 NCEP 再分析资料, 针对 2003 年 8 月下旬(0312)和 2004 年 8 月下旬(0418)山东省两场发生在不同环流形势下的远距离暴雨过程进行了对比分析。结果显示, 台风在两次暴雨过程中均起了重要作用, 但机理不同。除台风东侧低空急流为大暴雨的发生提供充沛的水汽, 有利于构建不稳定的大气层结以及加强暴雨区的辐合上升运动等共同点之外, 还存在着显著的不同: (1)0312 台风远距离暴雨是台风与切变线相互作用的产物, 0418 台风远距离暴雨则是由台风与冷锋相互作用造成的; (2)在这两次暴雨过程中, 直接影响系统和台风所起的作用不同: 0312 台风远距离暴雨过程中, 切变线为暴雨的发生发展提供了原始的正涡度场, 而台风东侧的低空急流加强北推进一步加强了切变线附近正涡度和辐合强度, 加强了上升运动; 0418 台风远距离暴雨过程中, 台风倒槽顶端生成并分裂发展的气旋式涡旋为暴雨系统的原始涡源, 台风东侧低空急流北上在一定程度上加强了暴雨区的辐合和上升运动; (3)两次台风远距离暴雨中, 与台风相连的偏南风急流对暴雨区的水汽净流入贡献最大, 但最大水汽输送层不同, 0312 台风远距离暴雨的最大水汽输送层在 925 hPa 附近, 而 0418 台风远距离暴雨的最大水汽输送出现在 800 hPa 上下。

关键词: 台风; 远距离暴雨; 水汽输送; 涡度

中图分类号: P444 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-5174(2016)12-021-11

DOI: 10.16441/j.cnki.hdx.20160034

引用格式: 丛春华, 雷小途, 陈佩燕. 山东两次台风远距离暴雨对比分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(12): 21-31.

CONG Chun-Hua, LEI Xiao-Tu, CHEN Pei-Yan. A comparative study on two processes of typhoon remote rainfall over Shandong Province[J]. Periodical of Ocean University of China, 2016, 46(12): 21-31.

中国是登陆台风(泛指热带气旋, 包括热带低压、热带风暴、强热带风暴、台风、强台风及超强台风, 下同)最多的国家, 台风灾害非常严重^[1-3]。登陆台风所带来的直接灾害主要包括大风和暴雨, 又以雨灾最为普遍, 有时还伴有山洪、泥石流等次生灾害^[4]。当登陆台风与中纬度系统相互作用时可给中纬度地区造成更为显著的降水, 其中就包括台风的远距离暴雨^[5]。早在 1950 年代, 仇永炎^[6]就注意到了台风对北方汛期特大暴雨的影响。近些年相关的研究也陆续开展, 陈联寿等^[7-8]给出了台风的远距离降水的物理定义和概念模型, 并发现台风远距离暴雨遍及中国 27 个省(市、自治区), 其中环渤海地区和川陕交界处是台风远距离暴雨的高发区^[9], 陕西 87% 的暴雨极值事件与远距离台风有密切的联系^[10]。据统计^[11-14], 平均每年有 1~2 个台风直接影响山东, 数目不多, 但台风常与中纬度系统相互作用, 带给山东不同程度的降水, 台风暴雨是山

东省夏汛期主要的灾害性天气。杨晓霞等^[15]的研究结果显示, 在华南沿海登陆的台风可间接影响山东省的暴雨分布和强度; 在台风远距离暴雨形成机制方面, 丛春华等^[16]认为, 台风远距离暴雨能否发生的关键在于台风东侧是否有水汽输送到中纬度槽前; 朱洪岩^[17]、孟智勇^[18]等通过对 9406 号台风暴雨的数值实验, 研究了台风远距离暴雨过程的大尺度和中尺度特征, 并指出台风强度对暴雨区的水汽输送有影响, 而西风槽则提供了暴雨发生的大尺度背景场; 丛春华等^[9]通过对 0509 号台风暴雨的数值敏感性实验, 发现西风槽的强度与台风远距离暴雨的雨量存在着正相关性, 西风槽越强, 降水量越大。然而, 台风产生远距离暴雨的方式多种多样^[5], 如有的是台风倒槽使然、有的则与西风槽或切变线相关, 有时地形^[19]也是触发远距离暴雨的一个重要因素等。当前, 有关台风远距离暴雨的研究虽然取得一定进展, 但是因其机制复杂, 针对具有特色个

* 基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2013DQ009); 中国气象局预报员专项(MAYBY2012-031); 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB30300); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406010); 中国气象局关键技术与集成项目(CMAGJ2014M30)资助

Supported by the Shandong Provincial Natural Science Foundation, China(ZR2013DQ009); China Meteorological Bureau Special Forecaster Foundation(MAYBY2012-031); National Key Basic Research Development Program of China(2013CB430300); Public Welfare Industry (Meteorological) Research Projects, China(GYHY201406010); China Meteorological Bureau Key Technology and Integration Project(CMAGJ2014M30)

收稿日期: 2016-02-17; 修订日期: 2016-04-02

作者简介: 丛春华(1975-), 女, 高级工程师, 主要从事热带气旋方面的研究。E-mail: cch513@sina.com

例的深入分析研究仍十分必要。

2003年8月下旬(下简称0312台风远距离暴雨)风有着密切的关系,但台风在这两场暴雨中所起的作用存在显著的不同,各具特色。故本文对这两次过程进行了对比分析,以求加深对此类暴雨的了解和认识。

1 资料与方法

本文所用时间均为北京时间,所用气象资料为常规高空探测资料、地面观测资料及NCEP再分析资料,所用分析工具为MICAPS数据分析系统和GRADS数据分析软件,通过对不同物理量的诊断分析和对比分析,来探讨发生在山东省的两次台风远距离暴雨的异同。

2 降水实况和环流背景分析

0312号台风“科罗旺”与0418号台风“艾利”是在2003,2004年8月下旬分别登陆中国华南和华东沿海(见图1)。0312号台风于2003年8月25日凌晨5时在海南文昌登陆,0418号台风于2004年8月25日下午

和2004年8月下旬(下简称0418台风远距离暴雨)发生在山东省的两场大范围暴雨过程就与远在华南的台午在福建福清登陆,而后均继续向偏西方向移动影响华南华东地区。这两个台风不仅直接给中国华南沿海一带带来狂风暴雨,也给远在千里之外的山东带来了明显的降水(见图2(b),(d))。

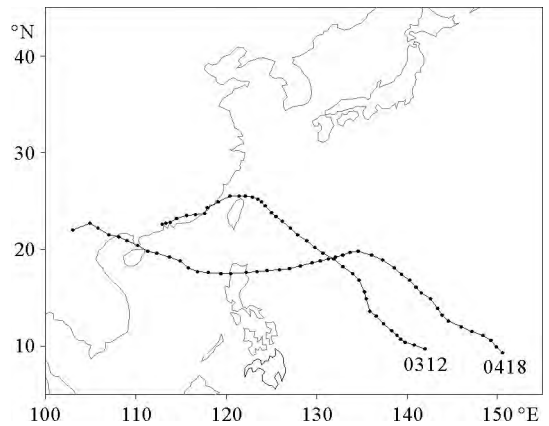


图1 0312和0418号台风路径图

Fig.1 Tracks of Typhoon-0312 and Typhoon-0418

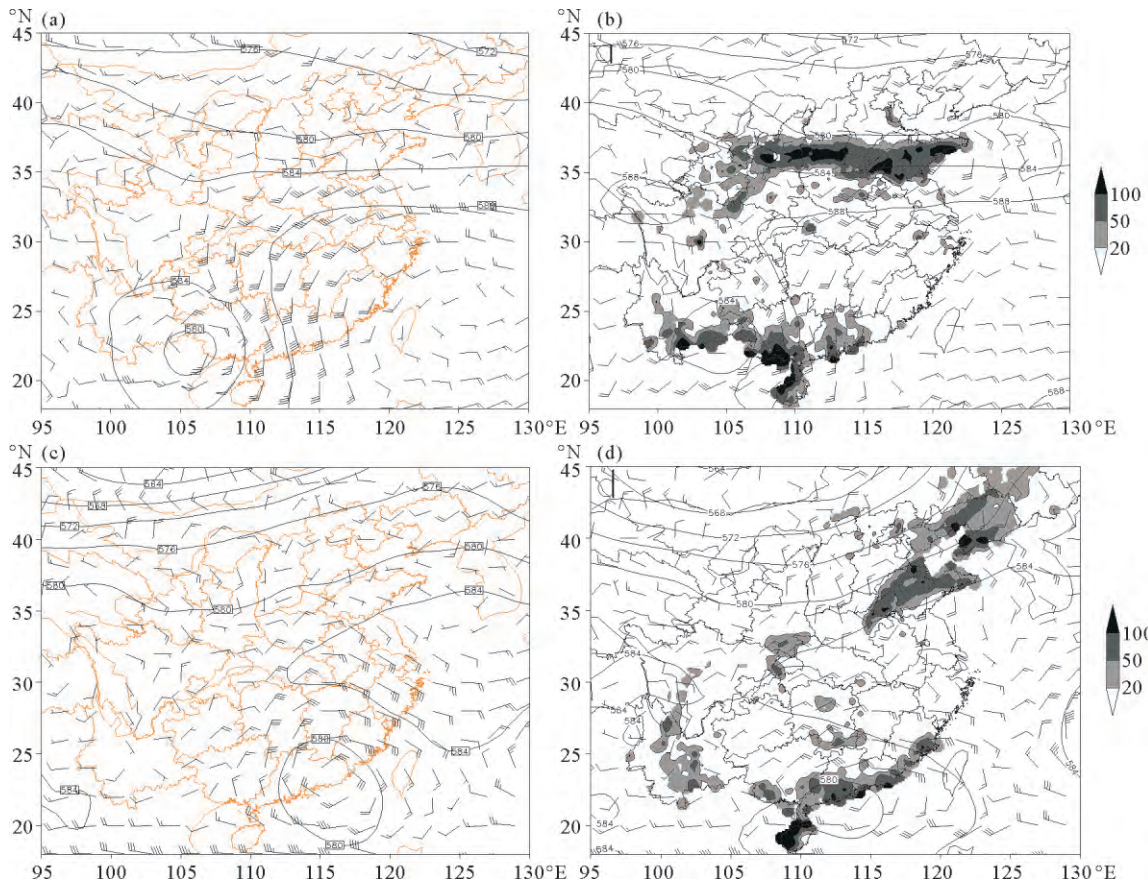


图2 2003年8月26日08时(a);2003年8月26日20时(b)500 hPa等高线;850 hPa风场和25日08时~27日08时过程降水量以及2004年8月26日20时(c);8月27日20时(d)500 hPa等高线,850 hPa风场和27日08时~29日08时过程降水量(实线为等高线,单位:dagpm;阴影区为降水量,单位:mm)

Fig.2 Geo-potential heights (solid line, unit: dagpm) at 500 hPa and winds (full bar= $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 850 hPa. (a)08 BJT 26 Aug, 2003; (b) 20 BJT 26 Aug, 2003; (c) 20 BJT 26 Aug, 2004; (d) 20 BJT 27 Aug, 2004. Precipitation (shaded, unit: mm) from 08 BJT 25 to 08 BJT 27 Aug, 2003(in b), and from 08 BJT 27 to 08 BJT 29 Aug, 2004(in d)

2.1 降水实况分析

受 0312 号台风和地面气旋的影响,2003 年 8 月 25 日夜间至 27 日,山东省中南部地区出现暴雨天气,降水量局部达到大暴雨。其中 70 个县(市、区)过程降水量超过 50 mm,24 个县(市、区)超过 100 mm,测站最大降水量为 244.0 mm,出现在巨野县。此次暴雨过程全省平均降水量高达 65.4 mm。

2004 年 8 月 26 日夜间至 28 日上午的暴雨过程是山东省当年最大的一场降水天气。全省共有 72 个县(市、区)过程降水量超过 50 mm,其中有 19 个县(市、区)超过 100 mm。测站降水极值为 210.10 mm,出现在济宁市金乡站,过程降雨量全省平均达 65.7 mm。

山东这两次暴雨过程的共同特点就是降水发生时华南均有登陆台风活动,华南地区有台风本体暴雨区,山东省远离台风环流,但区域内暴雨的发生发展与台风有着密切的联系。

2.2 高空环流背景分析

山东 0312 台风远距离暴雨发生前的 8 月 25 日 20 时,500 hPa 等压面上河套西部为一短波槽,26 日 08 时(见图 2(a))短波槽东移至河套地区中部上空,西太平洋副热带高压强盛、面积大,588 位势什米等高线(以下简称 588 线)控制了长江中下游流域及华南的东部地区,588 线西伸至 108°E,与 120°E 相交的脊线位于 28°N 附近。台风“科罗旺”西行至北部湾,其与副热带高压之间有一支西南气流伸至华东北部。相应时次,850 hPa 等压面上有纬向切变线伸至山东南部地区,在切变线南侧,台风与副热带高压之间的西南气流比较强。26 日 14~20 时,850 hPa 等压面上的西南急流迅速加强并向北涌进,大气环流的高低空垂直分布表现为典型的大暴雨的配置形式(见图 2(b))。台风与切变线相互作用,在切变线附近暖湿气流内产生纬向型分布的暴雨区。

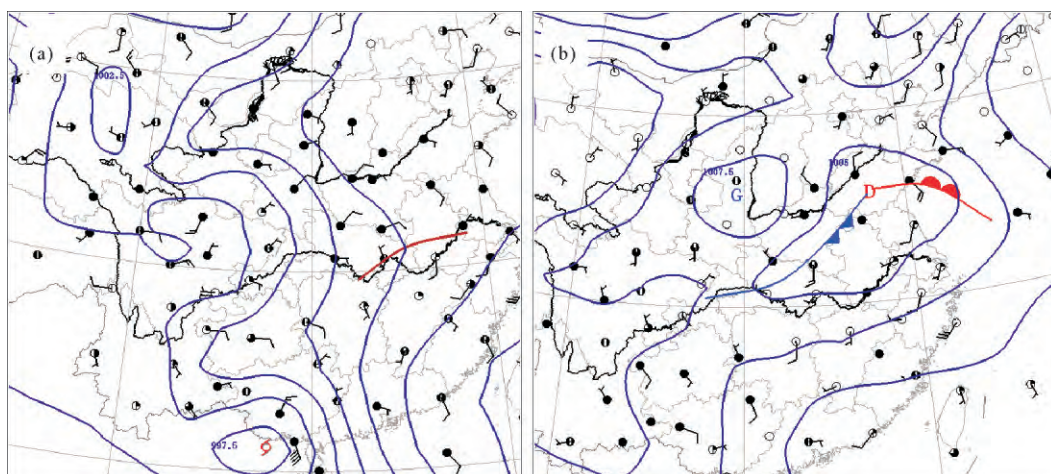
台风“艾利”于 2004 年 8 月 25 日下午在福建福清

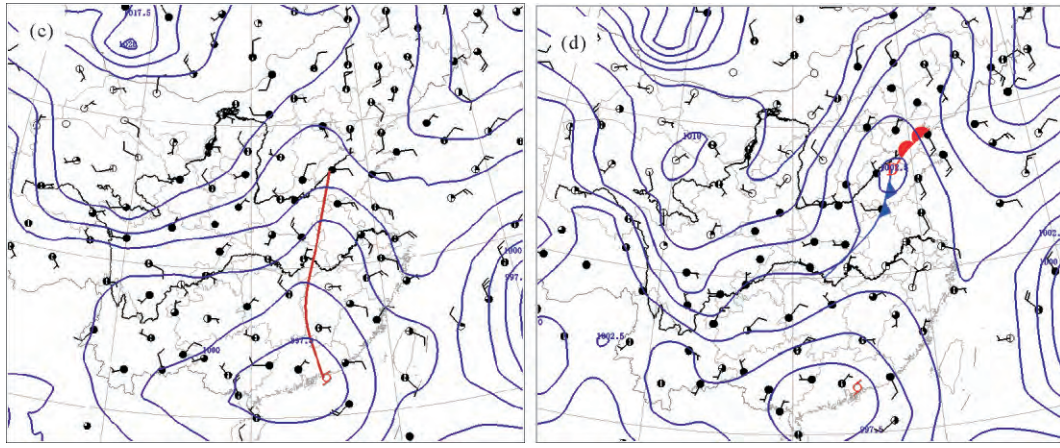
市登陆后继续西行。26 日 20 时(见图 2(c)),亚欧大陆中高纬地区 500 hPa 等压面上,大气环流呈现两脊一槽的形态分布,黄河中下游一带为宽广的槽区所覆盖,副热带高压位于台风与西风槽之间。850 hPa 等压面上台风倒槽北端到达山东南部,倒槽东侧的东南风急流显著。27 日 14 时(图略)台风倒槽顶端有涡旋快速发展,低层风场上呈现出明显的气旋式环流。27 日 20 时(见图 2(d))倒槽顶端新生涡旋脱离台风环流,移到中纬度槽前,靠近华北锋区,后期逐渐演变成温带气旋。山东的暴雨过程就是发生在该气旋新生、发展、北移的过程中,降水落区随涡旋中心向东北方向扩展,呈径向型分布。

2.3 地面影响系统分析

从地面影响系统的演变分析来看,0312 台风远距离暴雨的发生发展过程是一个波动类气旋酝酿和发展的过程。25 日 20 时(见图 3(a))在 0312 号台风西移的过程中,台风东侧副热带高压和华北高压之间存在一个纬向切变线,台风与副热带高压之间的偏南气流有一个加强北进的过程,华北地区高压坝内有冷空气向南渗入,南北两支气流一方面促使纬向切变线向北移动并逐渐转为径向切变线,继而发展成地面气旋(见图 3(b)),演绎了一个典型的波动类气旋的发生发展过程。台风对于切变线的加强北移及山东附近暴雨的发生起了决定性作用。

从地面影响系统分析来看,0418 台风远距离暴雨的发生发展过程是 0418 号台风倒槽北端有气旋性环流生成,并逐步脱离台风倒槽,北上与冷空气相互作用,最终形成温带气旋。8 月 27 日 11 时地图上(见图 3(c))显示 0418 号台风的倒槽一直向北伸展到山东南部地区。至 27 日 20 时(图略)地面填图上台风倒槽北端风场已出现完整的气旋性环流,中心位于山东南部地区。28 日 02 时(图 3(d))环流内有暖锋锋生,而后北部冷锋进入气旋低压,地面图上已分析出明显的





((a)2003年8月25日20时;(b)2003年8月27日02时;(c)2004年8月27日11时;(d)2004年8月28日20时实线为等压线,单位:hPa。(a) 20 BJT 25, Aug 2003; (b)02 BJT 27, Aug 2003; (c)11 BJT 27, Aug 2004; (d) 20 BJT 28, Aug 2004 (Solid line is constant pressure line, unit: hPa.)

图3 地面天气图和海平面气压场

Fig3 Surface weather chart (full bar= $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) and sea level pressure

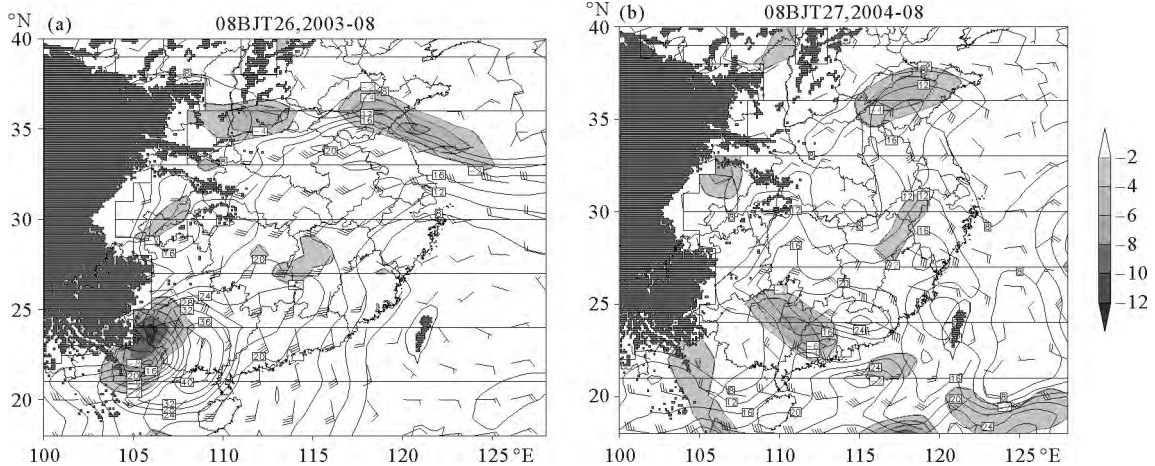
冷锋和暖锋,温带气旋结构完整。气旋的发生发展过程伴随着强降水的发生,暴雨发生在气旋的东侧象限,随气旋中心的移动,呈径向型分布。0418号台风在此次暴雨过程中,既为气旋的发展提供了原始的动力场,同时,其东侧的偏南气流也为地面气旋的发展及暴雨的发生提供了水汽和能量。

3 物理量诊断分析

3.1 水汽和能量分析

2003年8月25日20时,850 hPa等压面上大于

$12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西南急流主要集中在两广一带,徐州探空站850 hPa测风为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,随后,低空急流加强北进过程显著,26日08时,急流前端到达鲁南,汇入暖式切变线内,徐州西南风迅速增强到 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,附近存在较强的风向和风速的辐合。26日08时850 hPa的水汽通量分布(见图4(a))显示,存在一个西南-东北走向的水汽通道由广西一直伸向山东南部,在鲁皖苏三省交界处形成一个大于 $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的高值中心,对应着一个小于 $-6.0 \times 10^{-7} \cdot \text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的辐合中心。



(本图西边界处的阴影部分为青藏高原。Shaded region on left boundary shows the Tibetan Plateau.)

图4 2003年8月26日08时(a)和2004年8月27日08时(b)850 hPa水汽通量(实线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和水汽通量散度(阴影,单位: $10^{-7} \cdot \text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)分布

Fig. 4 Moisture flux (solid line, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and divergence of moisture flux at 850 hPa (shaded, unit: $10^{-7} \cdot \text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

0418台风远距离暴雨过程,低层850~700 hPa等压面上台风倒槽北伸最为明显。8月26日20时,850 hPa

台风倒槽顶端已达山东南部地区,其东侧大于 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的急流已到达南京。随着台风倒槽的西移和向北发展,

850 hPa 等压面上东南急流向北移动, 27 日 08 时徐州探空站风速达 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 济南探空站也达到 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 在 27 日 08 时 850 hPa 面上水汽通道(见图 4(b))呈南北走向, 由广东省一直伸向山东, 并在苏鲁交界处形成一个大于 $16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大值中心, 对应着一个小于 $-4 \times 10^{-7} \cdot \text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的辐合中心。

用水汽通量的整层积分来分析大气整层的水汽输送情况^[16]。将地面至 100 hPa 高度的大气矩形柱体作为一个“箱体”(见图 5(a))。不考虑水汽的垂直输送, 依据 u 、 v 风向, 规定流入(出)“箱体”内的水汽通量为正(负)。对水汽通量作面积分可得出流经“箱体”4 个面的水汽通量和整个“箱体”内的水汽收支情况(具体计算方法, 详见文献[16])。

对两次远距离暴雨发生前及发展过程中, “箱体”内

水汽收支进行了计算, 结果表明, 在远距离暴雨发生前 24 h 均存在“箱体”内水汽净收入快速增加的现象, 且在暴雨发生发展过程中一直伴随着水汽的净流入(见图 5(b))。0312 台风远距离暴雨发生前, 25 日 14 时“箱体”内还是水汽的净流出, 25 日 20 时“箱体”内水汽的收支逆转为净流入, 且一直维持到 27 日。期间 26 日 02 时的单位时间净流入量为最大, 达 $24.1 \times 10^{13} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 。0418 台风远距离暴雨发生前后“箱体”内水汽收支总体也表现出相同的特征, “箱体”净的水汽流入出现在 26 日 20 时, 且一直维持到 28 日, 27 日净水汽流入最为显著。其中, 27 日 14 时的单位时间净流入量为最大, 达 $13.07 \times 10^{13} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$, 与 0312 台风远距离暴雨的单位时间最大净流入量相比要小一些。

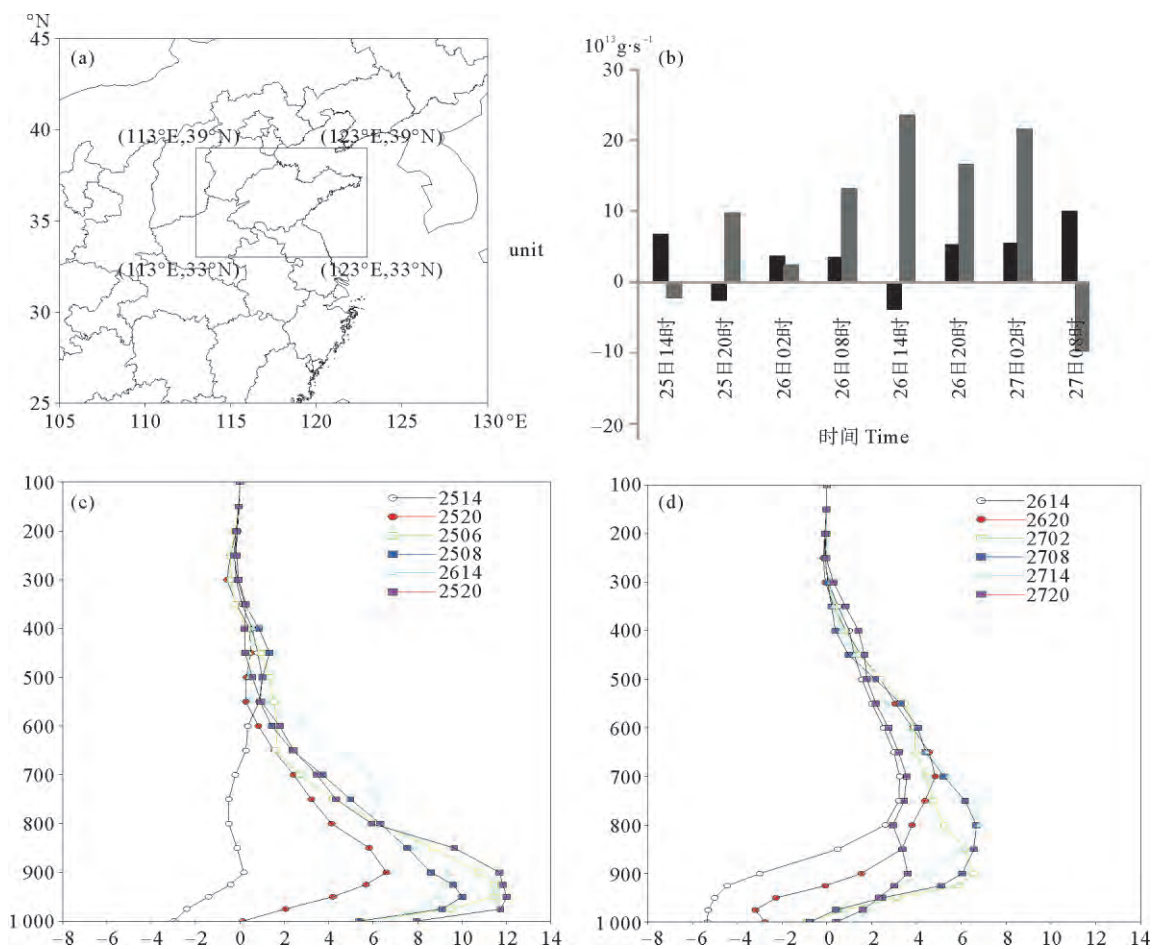


图 5 箱体示意图(a), 箱体内水汽收支(b)(黑色为 0418, 灰色为 0312, 单位: $10^{13} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$)及 0312(c), 0418(d)箱体南边界水汽通量垂直分布及随时间的演变(单位: $10^8 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$)

Fig. 5 (a)Box, (b)moisture budget (unit: $10^{13} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$)of the box during Typhoon (black is 0418 and gray is 0312) and moisture flux (unit: $10^8 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$) through the south boundary on different pressure levels during Typhoon-0312(c) and Typhoon-0418(d)

分别计算和分析“箱体”南、北、东、西 4 个边界的水汽净流入发现, 南边界水汽输送对“箱体”内的水汽净流入贡献最大, 水汽输送的大值区均发生在 700 hPa 等压面以下的对流层底层。0312 台风远距离暴雨的南

边界水汽输送主要集中在 800~925 hPa 等压面之间, 以 925 hPa 等压面附近最大(见图 5(c))。0418 远距离暴雨的南边界水汽输送则主要集中在 700~900 hPa 等压面之间, 又以 800 hPa 等压面附近为最大(见图 5

(d)。0418 台风远距离暴雨的最大水汽输送层高于 0312 台风远距离暴雨的最大水汽输送层。根本原因在于与 0312 台风远距离暴雨相联系的西南急流主要位于 850 hPa 等压面及以下的低层,与 0418 台风远距离暴雨相联系的台风倒槽东侧的东南急流则是在 700~850 hPa 等压面之间最为显著。

上述对两次远距离暴雨区水汽输送综合分析结果表明,与台风相联的偏南气流对暴雨区的水汽输送和辐合起了关键作用。台风“科罗旺”东侧的低空或超低空急流将大量的暖湿空气源源不断的输送到暴雨区,使得切变线附近的低层不断增湿,大气可降水量骤增(图略),为 0312 台风远距离暴雨的发生发展提供了丰沛的水汽条件。台风“艾利”倒槽东侧的东南风急流为山东区域内暴雨的发生发展提供源源不断的水汽输

送,造成暴雨区内大气可降水量的急剧增加(图略),为暴雨的持续发展提供丰富的水汽来源。

2003 年 8 月 26 日 08 时,850 hPa 等压面上(见图 6a)鲁皖苏交界处表现为等假相当位温线趋于密集,形成能量锋区,近乎与 35°N 等纬度线平行。在能量锋区附近 925~700 hPa 等压面上存在假相当位温随高度减小的对流层结不稳定区。2004 年 8 月 27 日 08 时,850 hPa 等压面上假相当位温等值线则呈现出一个南北向的高能舌(见图 6b),高能舌附近的大气中低层也存在假相当位温随高度增加而减小的对流不稳定层结区。可见此两次暴雨过程中,与台风相连的偏南风急流还参与了远距离暴雨区大气不稳定层结的构建过程,使得暴雨区不稳定能量不断积累,确保有足够的能量来支撑暴雨天气的发生和发展。

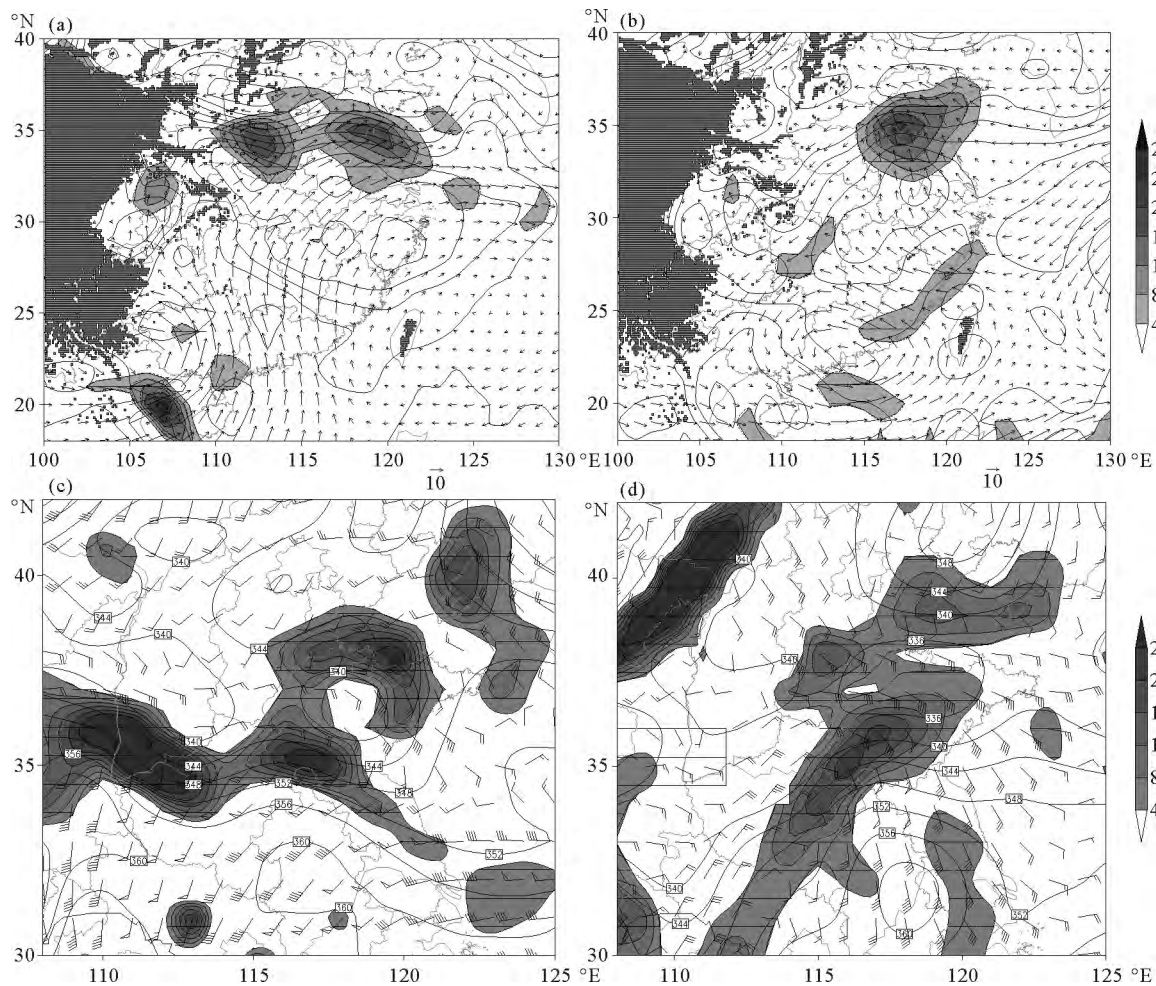


图 6 2003 年 8 月 26 日 08 时(a)和 2004 年 8 月 27 日 08 时(b)850 hPa 温度平流(阴影区为正,单位: $10^{-5} \cdot K \cdot s^{-1}$),风矢量(箭头)和假相当位温等值线(实线,单位:K;西边界阴影部分为青藏高原);2003 年 8 月 26 日 02 时(c)和 04 年 8 月 27 日 08 时(d)锋生函数(阴影区 ≥ 4 ,单位: $10^{-10} \cdot km^{-1} \cdot s^{-1}$),850 hPa 风矢量(风标)和假相当位温等值线(实线,单位:K)

Fig. 6 Temperature advections (shaded area ≥ 0 , unit: $10^{-5} \cdot K \cdot s^{-1}$), winds (arrow), potential pseudo-equivalent temperature (solid line, unit: K) at 850 hPa in (a) 08 BJT 26 Aug, 2003; (b) 08 BJT 27 Aug, 2004 and function of frontogenesis (shaded area ≥ 4 , unit: $10^{-10} \cdot K \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$), winds (full bar= $4 m \cdot s^{-1}$) and potential pseudo-equivalent temperature (solid line, unit: K) at 850 hPa in (c) 02 BJT 26 Aug, 2003; (d) 08 BJT 27 Aug, 2004

3.2 动力条件

图 7 给出 2003 年 8 月 25 日 20 时、26 日 08 时和 2004 年 8 月 27 日 08 时及 27 日 20 时 850 hPa 等压面上的涡度和风场分布。可以看出, 2003 年 8 月 25 日 20 时在 35°N 附近 $110^{\circ}\text{E}\sim 130^{\circ}\text{E}$ 的位置上存在一个东西向的正涡度区。这片正涡度区与切变线相对应, 和台风本体涡度区(广西附近)相互独立, 两者之间为大片

的负涡度区。对比 25 日 20 时和 26 日 08 时的 850 hPa 风场和涡度场变化来看, 随着台风东侧低空西南急流向北涌进, 切变线附近气旋式切变和涡度均明显增大, 25 日 20 时, 山东南部正涡度中心大于 $4 \times 10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$ (见图 7(a)), 至 26 日 08 时快速增加到 $10 \times 10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上(见图 7(b))。

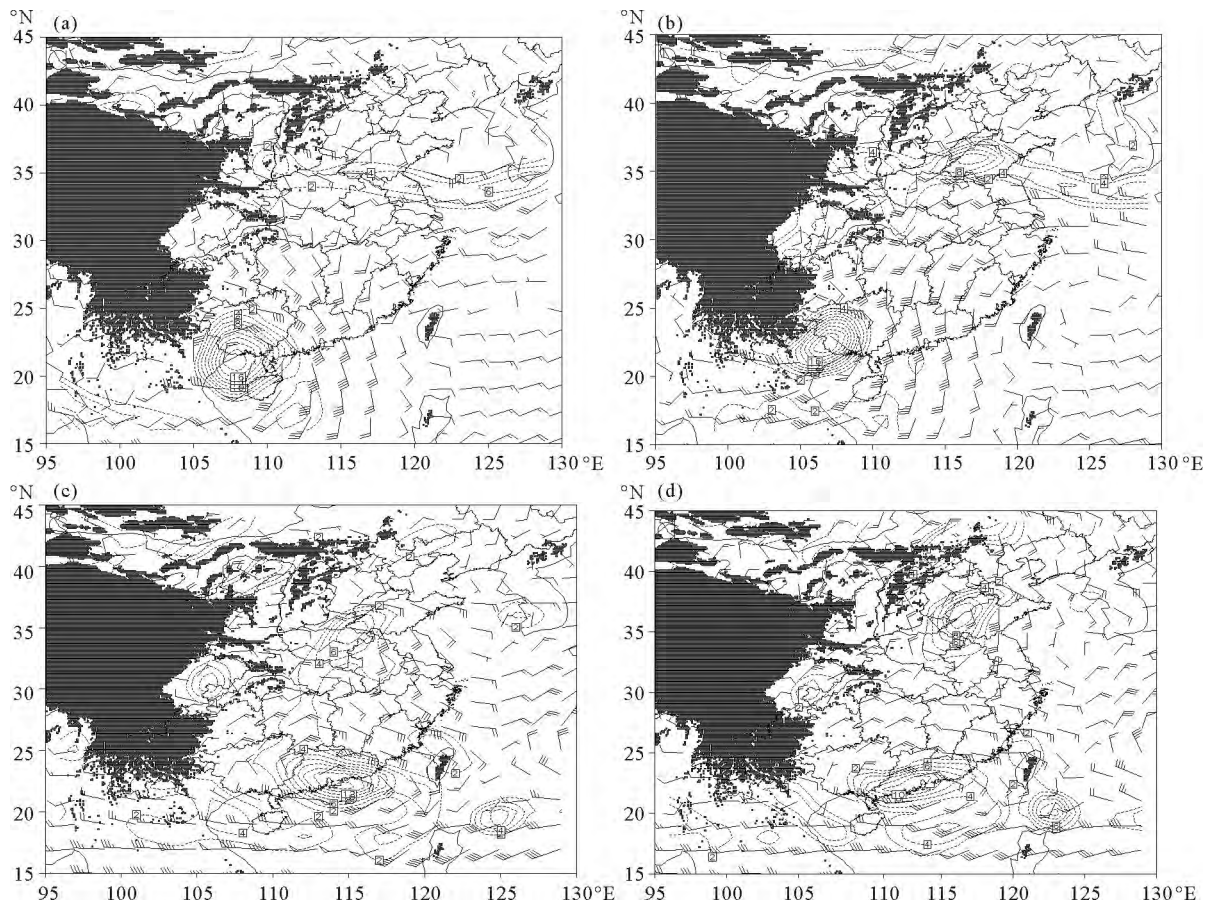


图 7 2003 年 8 月 25 日 20 时(a)、8 月 26 日 08 时(b)、2004 年 8 月 27 日 08 时(c)及 8 月 27 日 20 时(d)850 hPa 的涡度(虚线, 单位: $10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$)和风场(阴影部分为青藏高原)

Fig. 7 Vorticities(dotted line, unit: $10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$) and winds(full bar= $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) at the 850 hPa (PS: shaded region on left boundary shows the Tibetan Plateau) in (a) 20 BJT 25 Aug, 2003, (b) 08 BJT 26 Aug, 2003, (c)08 BJT 27 Aug, 2004 and (d) 20 BJT 27 Aug, 2004

0418 台风远距离暴雨过程中涡度的变化较之 0312 台风远距离暴雨过程有着显著的不同。2004 年 8 月 27 日 08 时 850 hPa 等压面上台风倒槽明显北伸至鲁南地区, 由于倒槽内部风场的非均匀性, 在倒槽北端(鲁皖交界处)出现一个大于 $8 \times 10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$ 涡度中心(见图 7(c)), 此时, 该涡度中心仍处于台风倒槽的涡度区内, 隶属于台风本体, 是台风系统的一部分。随着低层东南风急流的加强北抬, 台风倒槽顶端附近风场的气旋式切变加强, 涡旋加强迅速, 27 日 20 时相应涡度中心超过 $10 \times 10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$ 。可以清楚看出, 此时该涡度中心已与台风本体的涡度区完全分离, 中心正涡度数值与华

南沿海的台风“艾利”中心涡度值相当(见图 7(d)), 而在 850 hPa 等压面上, 皖鲁苏交界处风场出现了独立的气旋式环流。至此, 原台风倒槽顶端的涡旋完全从台风本体脱离出来, 发展为一个独立的新生气旋涡, 而后, 随着华北地区冷空气的入侵和气旋涡内部的暖锋锋生、冷、暖锋相结合, 气旋涡最终发展为温带气旋向东北移动。也就是说, 此次暴雨过程中, 0418 号台风是引发暴雨的温带气旋的“母体”, 这是在以往的研究结果中很少有提及。

对比分析清晰可见, 0312 台风远距离暴雨过程中, 引发暴雨过程的涡度实质上是切变线的切变涡度, 而

台风东侧的低层西南急流北涌在一定程度上加强了北部切变线附近的辐合,进而加强了该区的正涡度,0312号台风是一个“助力者”。而0418台风远距离暴雨过程中,引发暴雨天气的初始涡度实质上是台风倒槽顶端的正涡度中心脱离台风而来,也就是说为0418台风远距离暴雨的发生提供原始涡度的是台风本身,台风是暴雨系统的“母体”。两场暴雨在此点上存在着显著的不同。

3.3 低层暖锋锋生和地面气旋发展

0312台风远距离暴雨发生前,整层大气的等温线呈纬向型分布,30°N附近为一温度脊,低层西南气流穿过温度脊直达鲁南地区,纬向分布的暖平流显著,25日20时暖平流中心位于长江下游。随着低空西南急流的北涌,暖平流中心北移,26日08时850 hPa等压面上最大暖平流数值超过 $28 \times 10^{-5} \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$,位于鲁南和苏北交界处(见图6(a))。切变线也逆转为西南—东北走向,在切变线北侧由于东北风的存在,其携带华北地区弱冷空气南下与西南急流携带的暖湿空气相遇,使得切变线附近假相当位温梯度加大,有明显的冷暖锋生现象。锋生函数^[20]表现更为明显(锋生函数具体计算方法,详见文献20),850 hPa等压面上鲁苏皖豫交界处锋生函数的值超过 $24 \times 10^{-5} \text{K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 且暖锋锋生最为显著(见图6(c)),锋生函数大值区走向与风的切变线方向一致。沿锋生函数中心作垂直剖面,可以看出锋生过程和垂直运动的发展。从26日02时假相当位温、垂直速度和锋生函数沿117°E剖面图(见图8(a))上可以看出,35°N附近,假相当位温线在地面至800 hPa等压面之间呈垂直状态分布,暖锋锋生主要集中在700 hPa等压面以下的对流层低层,暖锋锋生上空对应强的垂直上升运动的发展,37°N附近也有因北方弱冷空气南侵造成的冷锋锋生,但强度要弱一些。26日08时锋生函数和垂直上升运动均随高度向冷空气一侧倾斜,表明锋区附近大气斜压性增强。地面图上则表现为准静止锋上出现了气旋波动,激发0312台风远距离暴雨对流云团的发生、发展和不稳定能量的释放。可见,引发0312号台风远距离暴雨的温带气旋来源于对流层低层暖式切变线上的一个小波动,温带气旋是在切变线上发展起来。

0418台风远距离暴雨发生前,8月26日20时大气低层,中国中东部地区温度以台风倒槽为界呈东暖西冷的径向型分布。华东地区假相当位温场呈南北向的分布,高能舌轴线位于118°E,北部存在中纬度锋区。27日08时850 hPa等压面上,在台风倒槽北端东侧出现较强的暖平流区,中心位于皖苏中部,中心数值在 $28 \times 10^{-5} \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。鲁南和苏北地区假相当位温梯度加大(见图6(b)),锋生函数清楚显示,东南风急流

前暖锋锋生现象显著,华北冷锋位于内蒙和山西交界处(见图6(d))。27日20时至28日20时,华北冷空气前沿形成副冷锋从主冷锋中分裂南下,进入台风倒槽西北侧,副冷锋与新生暖锋相结合,逐步形成焊接类温带气旋。过锋生函数中心的垂直剖面也能反映出新生锋面的发展过程。27日08时假相当位温、垂直速度和锋生函数沿117°E剖面图(见图8(c))显示,35°N~37°N之间的对流层低层也存在明显的锋生过程,同时也伴随着强的上升运动的发展。27日14时,新生锋面随高度发生倾斜(见图8(d))。分析显示是低层台风倒槽东侧东南急流向倒槽顶端源源不断输送暖湿空气使得锋生加强,暴雨区空气上升,低层减压诱发中尺度低压系统,产生气旋式辐合上升运动,后有西风槽携带冷空气南下的副冷锋进入倒槽加剧对流发展,冷暖锋结合,中尺度低压向温带气旋转变。

可见,两次暴雨的发生发展过程中均表现出显著的中低纬系统相互作用的特点。但引发两次台风远距离暴雨的温带气旋的形成和发展存在着明显的差别。引发0312台风远距离暴雨的温带气旋源于对流层中低层暖式切变线上的一个小扰动,而引发0418台风远距离暴雨的温带气旋则是原台风倒槽顶端的新生暖锋与北方南下的冷锋相遇,继而结合形成的。也即两次远距离暴雨中,中低纬系统相互作用的形式存在显著不同。

4 中低纬系统的相互作用

从以上分析可见,发生在山东的两次台风远距离暴雨过程存在着明显的中低纬系统相互作用的特征。

0312台风远距离暴雨是发生在切变线和在华南沿海登陆西行台风相互作用的背景下,热带低压东侧低空西南急流通过向切变线南侧源源不断输送暖湿空气,使得该地区增温增湿。一方面有利于暴雨区水汽的累积;另一方面使得大气层结趋于不稳定、促使低层锋生。切变线附近辐合上升运动,为暴雨天气的发生提供了天气尺度的动力条件。低层锋生作用则加剧了暴雨区的上升运动,使得不稳定能量得以释放,进而增强和维持上升运动的发展和降水的持续。

台风倒槽东侧的东南急流和倒槽顶端新生的涡旋中心在0418台风远距离暴雨发生前期起了至关重要的作用。正是倒槽东侧东南急流源源不断将东南海区暖湿空气输送到倒槽顶端:一方面使得倒槽顶端东侧增温增湿,大气柱膨胀,使得低层减压,暖区有锋生现象,导致暴雨区辐合增强;另一方面东南急流左前方的气旋性切变加强了台风倒槽顶端的气旋性辐合,导致涡旋增强,最终脱离台风倒槽,形成独立的气旋式涡旋并进入西风带,与华北冷锋相互作用,发展成温带气旋,引发暴雨天气的发生。

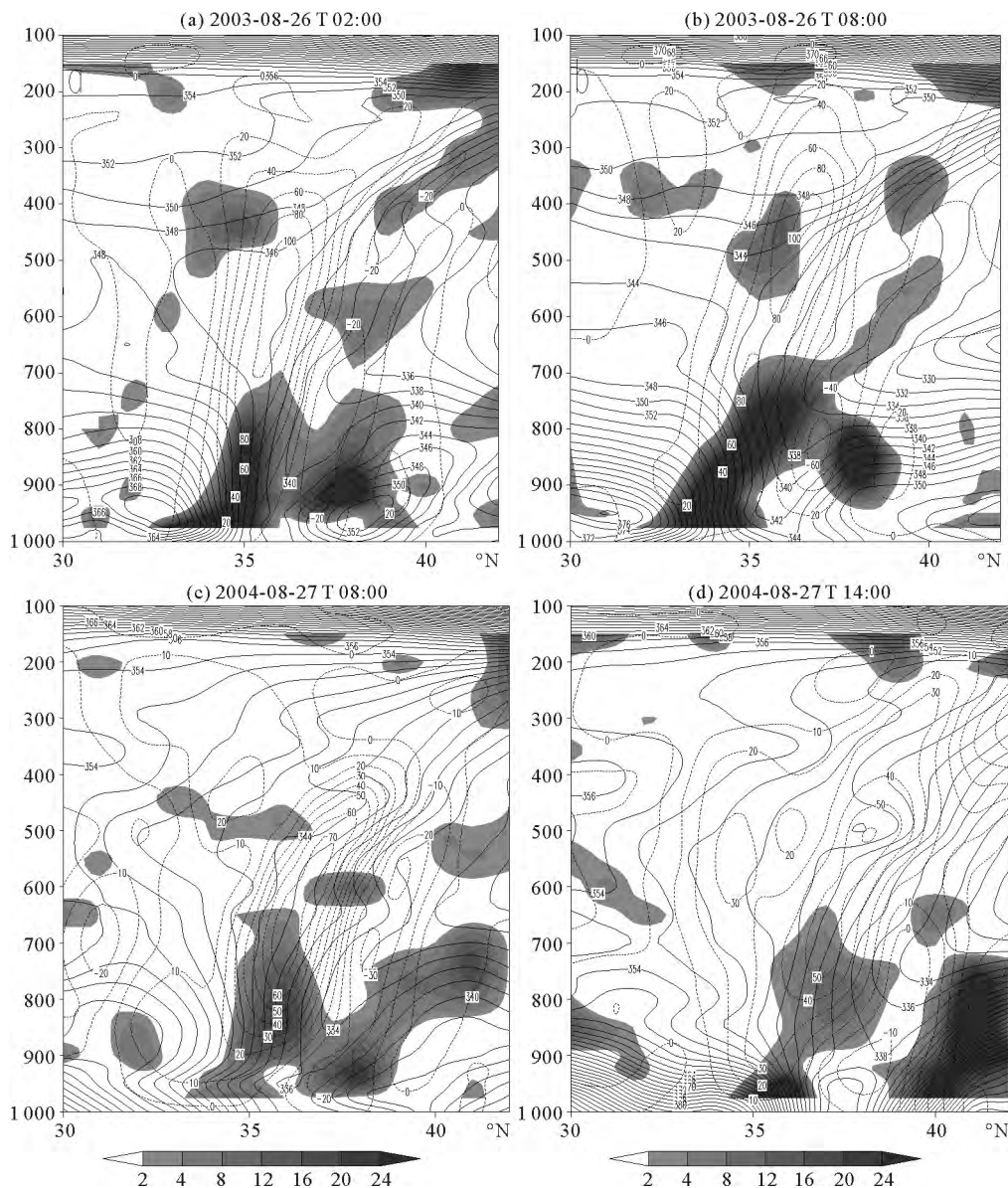


图 8 锋生函数(阴影区 ≥ 2 , 单位: $10^{-10} \cdot \text{K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)、垂直速度(虚线, 单位: $\text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$)和假相当位温等值线(实线, 单位: K)
 Fig. 8 Function of frontogenesis (shadow area ≥ 2 , unit: $\text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$), vertical velocity (dotted line, unit: $\text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$) and potential pseudo-equivalent temperature (solid line, unit: K)

5 结论与讨论

综合以上分析可见, 0312 台风远距离暴雨和 0418 台风远距离暴雨过程是发生在不同的大气环流背景下的台风远距离暴雨, 两者既有相同点, 又存在着显著的不同。

(1) 两次暴雨发生时华南均有台风登陆西行, 西风带有低槽东移, 台风东侧有低层偏南风急流, 在急流的前端暖区均伴有暖锋锋生现象; 两次暴雨的发生发展过程中, 中低纬系统相互作用特征显著, 均是中低纬系统相互作用的产物, 具有降水强度大, 影响范围广的特点。
 (2) 台风东侧低空偏南急流是中低纬度系统相互作用的纽带和桥梁。它一方面将低层的暖湿空气向暴雨区输送和汇合, 为暴雨天气的发生提供充沛的水汽并使

大气层结趋于不稳定; 另一方面急流左前方的气旋性切变使得暴雨区的气旋性涡度加强, 最终导致暴雨区的辐合上升运动加强。

(3) 台风在两次暴雨过程中扮演的角色不同。0312 台风远距离暴雨的发生发展原始动力条件(气旋性涡度)是中纬度切变线提供的, 而台风东侧低空西南急流的北涌加强了正涡度和辐合, 增强了动力条件。而 0418 台风远距离暴雨的原始动力条件是从台风倒槽顶端脱离出的气旋性涡旋, 台风本质上是温带气旋的“母体”, 这一点在以往的研究中少有提及。后期, 倒槽东侧低空东南急流北上, 则在一定程度上加强了暴雨区的气旋性涡度及低层辐合上升运动。

(4) 中低纬系统相互作用的形式不同。0312 台风远距离暴雨发生时在海平面气压场上表现为准东西向的静

止锋上先有暖锋锋生,而后切变线逆转为西南-东北走向,切变线北侧转为东北风携带弱冷空气南侵,进而在静止锋上形成气旋性波动。0418 台风远距离暴雨发生前期,在海平面气压场上,内蒙东部至河套一带为一明显的冷锋,其随着时间东移南压,逐渐靠近并进入脱离台风倒槽的气旋性环流内与新生暖锋相焊接形成温带气旋。在此次过程中冷暖锋相互作用明显。台风作为温带气旋发展的“母体”,这种情况日常预报中少见,是一种另类的中低纬系统相互作用的形式。

(5) 台风向暴雨区输送水汽的最大层分布不同。两次台风远距离暴雨中,与台风相连的偏南风急流对暴雨区的水汽净流入贡献最大,但最大水汽输送层不同,0312 台风远距离暴雨的最大水汽层在 925 hPa 附近,而 0418 台风远距离暴雨的最大水汽输送出现在 800 hPa 上下。

参考文献:

- [1] 陈联寿. 登陆台风中的科学问题[R]. 北京: 香山会议, 2006: 8-15.
Chen Lianshou. The Scientific Problems of Landing Typhoons[R]. Beijing: Xiangshan Science Conference (207th Scientific Programme), 2006: 8-15.
- [2] 雷小途, 陈佩燕, 杨玉华, 等. 中国台风灾情特征及其客观评估方法[J]. 气象学报, 2009, 67(5): 875-883.
Lei Xiaotu, Chen Peiyan, Yang Yuhuan, et al. Charaters and objective assessment of disasters caused by typhoons in China [J]. Acta Meteor Sinica, 2009, 67(5): 875-883.
- [3] Chen Peiyan, Lei Xiaotu, Ying Ming, Introduction and application of a new comprehensive assessment index for damage caused by tropical cyclones [J]. Tropical Cyclone Research and Review, 2013, 2(3): 176-183.
- [4] 李英, 陈联寿, 张胜军. 登陆我国热带气旋的统计特征[J]. 热带气象学报, 2004, 20(1): 14-23.
Li Ying, Chen Lianshou, Zhang Shengjun. Statistical characteristics of tropical cyclone making landfalls on China[J]. J Tropical Meteor, 2004, 20(1): 14-23.
- [5] 丛春华, 陈联寿, 雷小途 等. 台风远距离暴雨研究进展 [J]. 热带气象学报, 2011, 27(2): 264-270.
Cong Chunhua, Chen Lianshou, Lei Xiaotu, et al. An overview on the study of typhoon remote rainfall[J]. J Tropical Meteor, 2011, 27(2): 264-270.
- [6] 仇永炎. 北方盛夏台风暴雨的天气型及其年际变率 [J]. 中国: 气象, 1997, 23(7): 3-9.
Chou Yongyan. Weather patterns and interannual variations of typhoon torrential rain during midsummer in North China [J]. China: Meteorological Monthly, 1997, 23(7): 3-9.
- [7] Chen Lianshou, Li Ying, Cheng Zhengquan. An overview of research and forecasting on rainfall associated with landfalling tropical cyclones [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2010, 27(5): 967-976.
- [8] 陈联寿. 登陆热带气旋暴雨的研究和预报 [C]. 中国: 第十四届全国热带气旋科学讨论会论文摘要集, 2007: 3-7.
Chen Lianshou. The Studies and Predictions of Heavy Rainfall Related to the Landing Tropical Cyclones [C]. China: The Abstracts of Papers on the Fourteenth Symposium on the Tropical Cyclones (in Chinese), 2007: 3-7.
- [9] 丛春华. 热带气旋远距离暴雨的研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011.
Cong Chun-Hua. A Study on the Mechanism of the Tropical Cyclone Remote Precipitation [D]. Nanning: Nanjing University of Information Science and Technology, 2011.
- [10] 侯建忠, 王川, 鲁渊平, 等. 台风活动与陕西极端暴雨的相关特征分析 [J]. 热带气象学报, 2006, 22(2): 203-208.
Hou Jianzhong, Wang Chuan, Lu Zhouping, et al. Activity of typhoons and extreme rainstorms in Shanxi Province [J]. J Tropical Meteor, 2006, 22(2): 203-208.
- [11] 朱官忠, 赵从兰. 登陆北上热带气旋的特大暴雨落区探讨 [J]. 气象, 1998(11): 16-21.
Zhu Guanzhong, Zhao Conglan. Discussion on the heavy torrential rain area caused by the landing northward tropical cyclone [J]. Meteorological Monthly, 1998(11): 16-21.
- [12] 曹钢锋, 张善君, 朱官忠, 等. 山东天气分析与预报 [M]. 北京: 气象出版社, 1988.
Cao Gangfeng, Zhang Shanjun, Zhu Guanzhong, et al. Weather Analysis and Forecast of Shan Dong Province [M]. Beijing: Meteorology Press, 1988.
- [13] 张少林, 盖世民, 顾润源, 等. 造成我国北方暴雨的热带气旋天气学特征分析 [J]. 海洋预报, 2001(1): 40-47.
Zhang Shaolin, Gai Shimin, Gu Runyuan, et al. Tropical cyclone caused storm climatology characteristic analyse [J]. Marine Forecasts, 2001(1): 40-47.
- [14] 张少林, 顾润源, 邹树峰, 等. 导致北方暴雨的热带气旋的气候特征 [J]. 大气科学研究与应用, 2002(2): 111-113.
Zhang Shaolin, Gu Runyuan, Zou Shufeng, et al. Climatic characteristics of tropical cyclone caused storm in North China [J]. Atmospheric Science Research and Application, 2002(2): 111-113.
- [15] 杨晓霞, 陈联寿, 刘诗军, 等 [J]. 山东省远距离热带气旋暴雨研究 [J]. 气象学报, 2008, 66(2): 236-250.
Yang Xiaoxia, Chen Lianshou, Liu Shijun, et al. A study of the far distance tropical cyclone torrential rainfall in Shandong province [J]. Acta Meteor Sinica, 2008, 66(2): 236-250.
- [16] 丛春华, 陈联寿, 雷小途, 等. 热带气旋远距离暴雨的研究 [J]. 气象学报, 2012, 70(4): 717-727.
Cong Chunhua, Chen Lianshou, Lei Xiaotu, et al. A study on the mechanism of the tropical cyclone remote precipitation [J]. Acta Meteor Sinica, 2012, 70(4): 717-727.
- [17] 朱洪岩, 陈联寿, 徐祥德. 中低纬度环流系统的相互作用及其暴雨特征的模拟研究 [J]. 大气科学, 2000, 24(5): 669-675.
Zhu Hongyan, Chen Lianshou, Xu Xiangde. A numerical study of the interactions between typhoon and mid-latitude circulation and its rainfall characteristics [J]. Chinese J Atmos Sci, 2000, 24(5): 669-675.
- [18] 孟智勇, 徐祥德, 陈联寿. 9406 号台风与中纬度系统相互作用的中尺度特征 [J]. 气象学报, 2002, 60(1): 31-38.
Meng Zhiyong, Xu Xiangde, Chen Lianshou. Mesoscale characteristics of the interaction between TC Tim (9406) and mid-latitude circulation [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese),

- 2002, 60(1): 31-38.
- [19] Akihiko M. A cloud-resolving numerical simulation for characteristic rainfall induced by typhoon Meari [R]. [s. l.]: Sixth WMO International Workshop on Tropical, 2004.
- [20] 张芳华, 陈涛, 杨舒楠, 等. 一次冬季暴雨过程中的锋生和条件对称不稳定分析气象 [J]. 气象, 2014, 40(9): 1048-1057.
- Zhang Fanghua, Chen Tao, Yang Shunan, et al. Diagnosis of the frontogenesis and CSI features during a torrential rainfall event in winter [J]. Meteorological Monthly, 2014, 40(9): 1048-1057.

A Comparative Study on Two Processes of Typhoon Remote Rainfall over Shandong Province

CONG Chun-Hua¹, LEI Xiao-Tu², CHEN Pei-Yan²

(1. Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China; 2. Shanghai Typhoon Institute, Shanghai 200030, China)

Abstract: In this paper, a comparative study on two processes of Typhoon Remote Rainfall (TRR) is carried out based on in-situ, sounding data, and NCEP reanalysis data. The two rain processes were occurred during August 25—27, 2003 (named rainstorm-2003) and August 26—28, 2004 (named rainstorm-2004) over Shandong Province. It is shown that the southerly Low Level Jets (LLJ) on the east of typhoons play an important role in formation of rainstorms. The LLJs converge and transport great amount of low level water vapor to rainstorm area, which provide plenty of water vapor and strong instability condition, leading significant warm-front frontogenesis. Moreover, the cyclonic shears, which was on the front-left of the jet, intensified the cyclonic vorticity, give rise to stronger convergence and ascending motion in rainstorm area. The interactions between mid and low-latitude systems were strong in both cases. However, there are distinct differences in mechanisms of the two processes; (1) the rainstorm-2003 is the consequence of interaction among typhoon, Northwest China vortex, and its warm shear-line on the east. While rainstorm-2004 is generated by the interaction between typhoon and cold front; (2) Typhoons also play different roles in the two cases of TRR. In rainstorm-2003, the vortex over Northwestern China and its warm shear-line on the east provided initial dynamic background, i. e. favorable cyclonic vorticity fields, and the northward invading LLJ on the left of typhoon further strengthens the vorticity, convergence, and ascending motion. However, in case of rainstorm-2004, the cyclonic vorticity fields, which generated initially at the top of the typhoon inverted trough and entered westerly belt later, provide favorable dynamic background to the rainstorm. The northward invading LLJ which is on the east side of the inverted trough, intensifies the cyclonic vorticity, low level convergence, and ascending motion in the rainstorm area to some extent.

Key words: typhoon; remote rainfall; water vapor transport; vorticity

责任编辑 庞 旻