

周淑玲,王科,闫淑莲,等. 山东半岛两次秋季台风远距离大暴雨的特征分析[J].海洋气象学报,2019,39(2):84-93.
ZHOU Shuling, WANG Ke, YAN Shulian, et al. Characteristics of two torrential rainfall processes in Shandong Peninsula in autumn under the remote effect of typhoon[J].Journal of Marine Meteorology,2019,39(2):84-93. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.02.009.(in Chinese)

山东半岛两次秋季台风远距离大暴雨的特征分析

周淑玲¹,王科²,闫淑莲¹,刘澈¹

(1. 威海市气象局,山东 威海 264200;2. 中国科学院大气物理研究所,北京 100029)

摘要: 利用常规观测资料和 NCEP/NCAR FNL 资料对“狮子山”(1006)和“天兔”(1319)两个台风造成山东半岛秋季远距离大暴雨的特征进行了诊断分析。结果表明:1)造成两次大暴雨的天气形势和物理量特征有相似,也有差异。2)两个台风的生成源地、移动路径以及强度差别均很大,大暴雨发生在台风登陆后从广东移到广西的过程中,高空北支冷槽、台风倒槽和 850 hPa 切变线是造成山东半岛大暴雨的主要天气系统。3)台风东侧和副热带高压之间 850 hPa 偏强东南气流将东海、黄海的水汽源源不断输送到山东半岛并在此辐合;低层辐合、高层辐散和垂直上升运动均利于大暴雨的发生;大暴雨发生前大气处于不稳定大气层结;台风和中纬度系统相互作用形成两层或三层锋区的斜压性特殊结构及高空急流的增强是山东半岛秋季台风远距离大暴雨的重要特征。4)两次大暴雨过程中低空急流特征、锋区斜压性结构特征、不稳定大气层结特征存在较大差异。

关键词: 台风远距离大暴雨;水汽;不稳定大气层结;斜压性结构;高空急流

中图分类号: P457.8; P426.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2019)02-0084-10

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.02.009

Characteristics of two torrential rainfall processes in Shandong Peninsula in autumn under the remote effect of typhoon

ZHOU Shuling¹, WANG Ke², YAN Shulian¹, LIU Che¹

(1. Weihai Meteorological Bureau, Weihai 264200, China; 2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract The characteristics of two torrential rainfall processes in Shandong Peninsula in autumn affected by distant Typhoon LIONROCI (2010) and Typhoon USAGI (2013) respectively are diagnosed and analyzed by using conventional observation data and NCEP/NCAR FNL data. The results are as follows. 1) The synoptic situations and physical parameters that caused the two torrential rainfall processes are of similarities and differences. 2) There are significant differences in the origins, tracks, and intensities for the two typhoons. The heavy rainstorm happens as the typhoons move from Guangdong to Guangxi after their landings, the upper northern cold trough, typhoon inverted trough, and shear line at 850 hPa are the main synoptic systems leading to the rainstorms in Shandong Peninsula. 3) The stronger southeastern air flow between the east side of the typhoon and subtropical high continuously transports water vapor from the East China Sea and the Yellow Sea to Shandong Peninsula where the water vapor forms convergence; the convergence at lower layer, divergence at upper layer, and vertical

收稿日期:2018-11-29; 修订日期:2019-01-07

基金项目:中国气象局预报员专项(CMAYBY2015-041);山东省气象局预报员专项(SDYBY2014-06);威海市科技发展计划项目(2014GNS014);环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM201612);华东区域气象科技协同创新基金合作项目(QYHZ201812)

作者简介:周淑玲,女,正高级工程师,主要从事短期短临天气预报和暴雨雪的分析及研究,whzhoushul@qq.com。

ascending motion are favorable for the occurrence of the torrential rainfall; the atmospheric stratification is unstable before the rainstorms; the baroclinic structure in two-layer or three-layer frontal zone produced by the interaction between typhoon and synoptic system in the middle latitude and the intensification of upper-level jet stream are significant characteristics of the torrential rainfall in Shandong in autumn under the remote effect of typhoons. 4) For these two rainstorms, there are major differences in characteristics of low-level jet stream, baroclinic structure in frontal zone, and unstable atmospheric stratification.

Key words torrential rainfall under the remote effect of typhoon; water vapor; unstable atmospheric stratification; baroclinic structure; upper-level jet stream

引言

暴雨天气过程是多尺度系统相互作用的结果^[1-2],气旋、切变线、台风、冷锋等是造成山东暴雨的主要天气系统,常常造成洪涝并引发地质灾害^[3-7]。台风远距离暴雨是中低纬度系统相互作用的结果,许多气象工作者对台风远距离暴雨进行了总结和研究。分析表明,台风在远距离暴雨中的作用是向暴雨区输送能量和水汽,并与其周围系统相互作用^[8];台风直接通过低空急流将其附近的水汽、能量输送到暴雨区,降水效率高、强度大^[9];台风远距离暴雨的水汽是在台风环流和副热带高压环流的共同引导下从台风东部进入暴雨区^[10];台风远距离暴雨斜压不稳定较明显,有随高空急流的非纬向性增强而增强的趋势^[11],且与非纬向高空急流密切相关,在高空急流右后方 300 hPa 以下存在一支中尺度环流,该环流对暴雨的维持与加强有密切联系^[12-13];在暴雨区上空 β 中尺度对流系统的新生维持是强降水维持较长时间的重要原因^[14]。远距离台风造成山东暴雨年均 2.5 次^[15],低层增温、增湿且对流和对称不稳定并存,是 0807 号台风“海鸥”远距离造成山东半岛强降水的主要特征^[16];对 2004 年台风“艾利”远距离暴雨的数值模拟发现干冷空气从高层入侵使降水区对流不稳定增强,并使不饱和湿空气达到饱和,对降水具有增幅作用^[17]。以上研究均涉及夏季台风远距离暴雨,但对秋季台风远距离暴雨的研究还比较少,目前对此类天气还缺乏规律性认识。统计 2010—2017 年 9—11 月山东半岛秋季暴雨,共发生两次台风远距离大暴雨,即分别由 2010 年 6 号台风“狮子山”和 2013 年 19 号台风“天兔”造成的,这两次台风均在华南沿海地区登陆,却给山东半岛带来大范围暴雨,部分地区出现大暴雨,预报员对此类大暴雨预报的降水量级比实况明显偏小。本文拟通过对上述两个山东半岛秋季台风远距离大暴雨个例分析,寻找此类大暴

雨天气特征的共性与差异,给出一些对预报有指导意义的结论,提高对此类暴雨的认识,进而提高山东半岛秋季远距离大暴雨的预报和服务水平。

1 资料来源与个例选取

选取分辨率 6 h、 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 NCEP/NCAR FNL 资料及 2010—2017 年秋季(9—11 月)20 时—次日 20 时(北京时,下同)威海、文登、荣成、乳山 4 个国家气象观测站的日降水观测资料。只要有 1 个及以上站点日降水量 ≥ 100 mm,即定义为 1 个大暴雨日。台风资料选用中国气象局 CMA 的资料。

2 天气形势分析

本文对 2010 年 6 号台风“狮子山”(以下简称“狮子山”)和 2013 年 19 号台风“天兔”(以下简称“天兔”)两次台风远距离大暴雨个例天气背景进行分析,试图寻找造成山东半岛大暴雨的共性和差异。

2.1 台风远距离大暴雨降水特征

分析 20 时—次日 20 时降水量的空间分布(图 1),可以看出,两次大暴雨均发生在威海和青岛—日照的东部沿海,雨带呈 NE—SW 走向,且与海岸线走向一致;两次大暴雨都有两个强降水中心,一个位于威海附近,一个在青岛和日照沿海;“天兔”造成的大暴雨中心最大值大于“狮子山”造成的中心最大值。

分析两次大暴雨区域内每小时平均降水量,“狮子山”造成的降水持续时间长,1 h 最大平均降水量为 11 mm,“天兔”造成的降水持续时间比“狮子山”短,1 h 最大平均降水量为 24 mm。以两次大暴雨过程中日降水量最大站点的文登(“狮子山”过程)和威海(“天兔”过程)逐小时降水量变化(图 2)为例,可以看出:2010 年 9 月 3 日文登降水持续 22 h,1 h 最大降水量为 18 mm,2013 年 9 月 23 日威海市区降水持续 8 h,1 h 最大降水量为 75.5 mm,有 2 个小时降水量在 50 mm 以上。由此可见,两次大

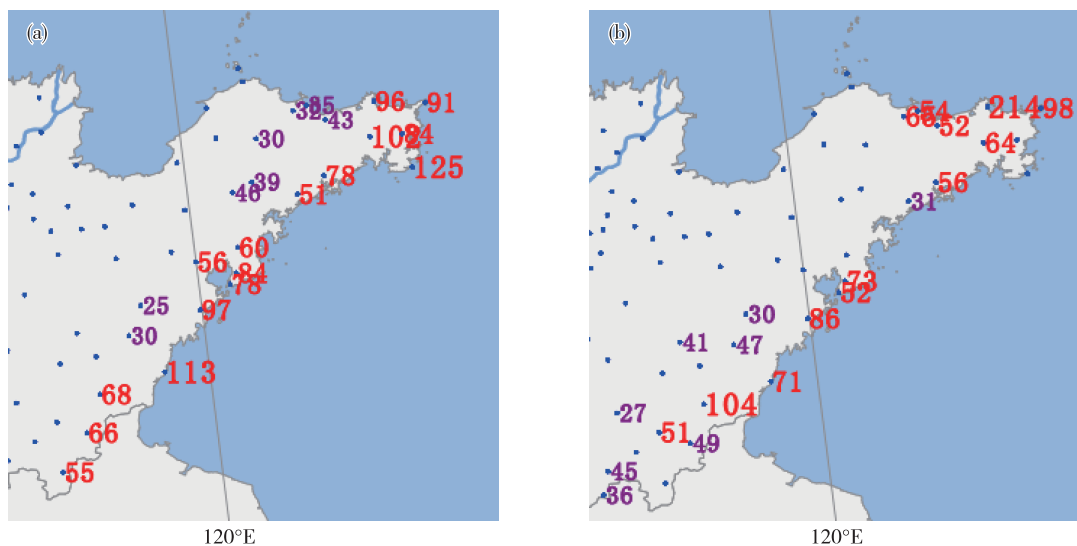


图1 山东半岛降水量 ≥ 25 mm的空间分布(a. 2010年9月2日20时—3日20时,b. 2013年9月22日20时—23日20时; 单位:mm)

Fig.1 Spatial distribution of observed 24-h accumulated precipitation equal to or greater than 25 mm (a. from 20:00 on 2 to 20:00 on 3 September 2010, b. from 20:00 on 22 to 20:00 on 23 September 2013; units: mm)

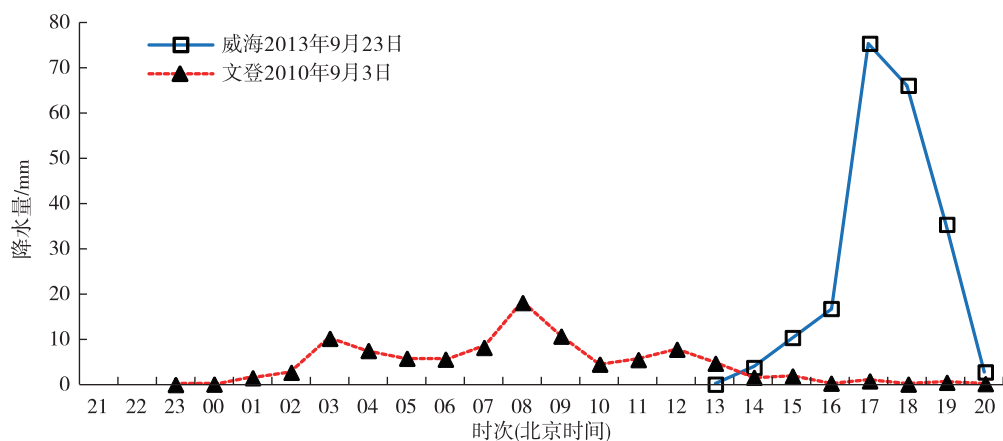


图2 2010年9月2日20时—3日20时文登和2013年9月22日20时—23日20时威海逐小时降水量(单位:mm)

Fig.2 Hourly precipitation in Wendeng Station from 20:00 on 2 to 20:00 on 3 September 2010 and in Weihai Station from 20:00 on 22 to 20:00 on 23 September 2013 (units: mm)

暴雨降水强度和持续时间差别较大。

2.2 台风特点

图3给出了“狮子山”和“天兔”的移动路径及台风强度变化情况。台风“狮子山”于2010年9月2日06时50分前后在福建省漳浦县沿海登陆,登陆时中心附近最大风力为9级($23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),中心最低气压为990 hPa;登陆后逐渐转向西南偏西方向移动,强度逐渐减弱;2日23时在广东境内减弱为热带低压,减弱后的低压环流中心以 $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右的速度继续向西南偏西方向移动,强度继续减弱。山东半岛的大暴雨发生在2日20时—3日20时。台风“天兔”于2013年9月22日19时40分登陆广

东汕尾,登陆时强度为强台风,中心最低气压940 hPa,是20世纪70年代以来登陆粤东最强的台风,大风威力极强,登陆时主体降水云区范围直径达1 000 km,8级大风和10级大风范围半径分别达350 km和180 km;登陆后“天兔”继续以 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右的速度向西北偏西方向移动,强度持续减弱,23日中午以热带低压强度移出广东,进入广西东北部。山东半岛的大暴雨发生在23日12—20时。由此可见,两个台风生成位置、登陆强度相差很大,登陆后移动路径不同,山东半岛大暴雨都发生在台风登陆后从广东移到广西的过程中。

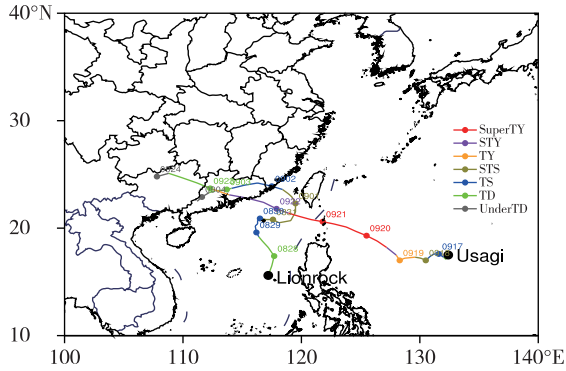


图 3 2010 年 6 号台风“狮子山”和 2013 年 19 号台风“天兔”的移动路径

Fig.3 Tracks of Typhoon LIONROCK (2010) and Typhoon USAGI (2013)

2.3 台风远距离大暴雨的天气背景

分析台风“狮子山”和“天兔”造成山东半岛秋季大暴雨的天气形势，发现大暴雨发生前，天气形势相似，但也存在一定差异。由 500 hPa 天气形势 (图 4a、c) 可知，副热带高压 (以下简称“副高”) 脊线都在 30°~31°N，且呈近东西走向，副高西脊点在 115°E 附近，台风环流位于副高西南侧，山东半岛处于副高北侧 (或西北侧) 偏强西南气流中，蒙古东部至河套一带有冷涡和北支冷槽，槽后为冷空气。但

“狮子山”影响时副高强，台风与副高之间的偏强东南气流向北到达山东半岛；“天兔”影响时副高弱，范围小，台风与副高之间的偏强东南气流向北仅到达 30°N 附近。北支槽后冷空气强度差别较大，“狮子山”冷中心弱，为 -12℃，“天兔”冷中心强，为 -28℃。850 hPa 形势场中，台风“狮子山”影响时 850 hPa 的副高中心位于日本群岛，山东半岛受台风倒槽北部影响，北支锋区不明显 (图 4b)；台风“天兔”影响时，在 50°~60°N，120°~130°E 存在冷涡，华北有一北支槽，槽后有较强冷平流，西北风风向和密集的等温线垂直，有较强的锋区，副高中心在日本群岛附近，152 dagpm 线的脊线在 30°N 附近，30°N 以南为台风和副高之间的偏强东南气流，山东半岛处于副热带高压西北侧，受西风槽前偏强西南气流影响 (图 4d)。在 925 hPa 图 (图 5) 上，两次大暴雨过程都有台风东北部的偏强东南气流到达青岛附近，在山东半岛东部沿海有东南风、南风与北风、东北风的风向辐合，同时，“狮子山”影响时海上东南风风速大于沿海风速，“天兔”影响时海上东南风风速大于陆地风速，这种东南风风速沿海岸线的辐合与海岸陆地摩擦有一定关系。通过上述分析可知，高空北支冷槽、台风倒槽和 850 hPa 切变线是

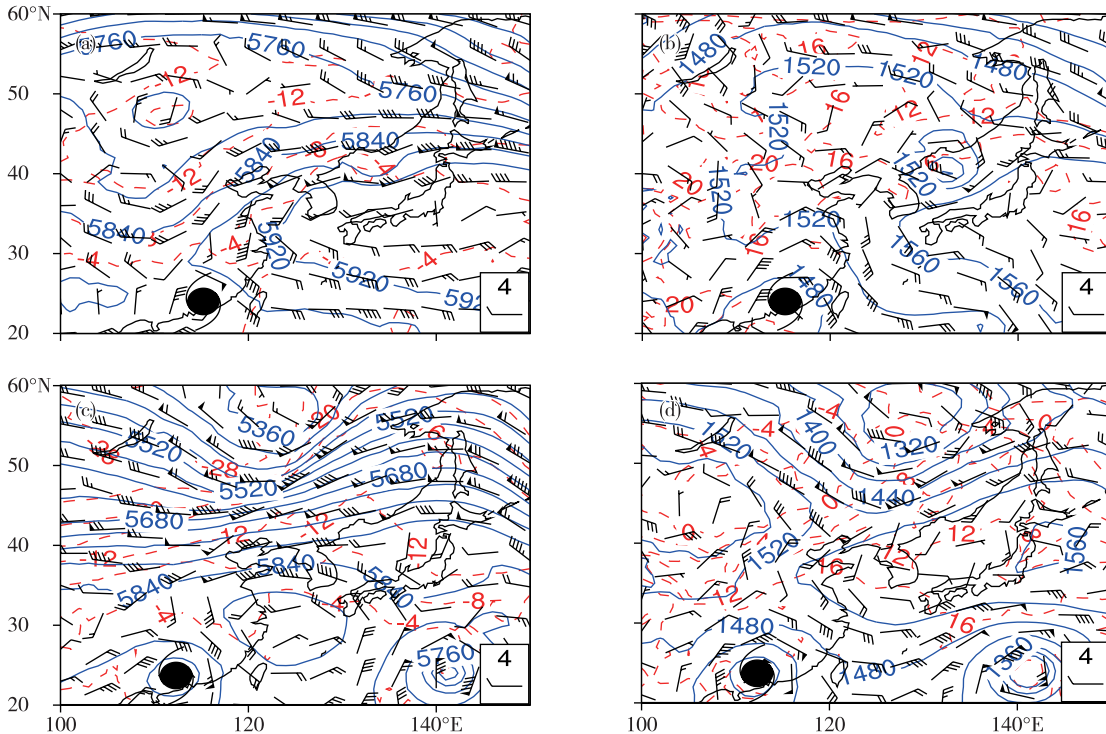


图 4 2010 年 9 月 2 日 20 时台风“狮子山” (a.500 hPa, b.850 hPa) 和 2013 年 9 月 23 日 08 时台风“天兔” (c.500 hPa, d.850 hPa) 天气形势

Fig.4 Synoptic situation at 500 hPa (a/c) and 850hPa (b/d) at 20:00 on 2 September 2010 (Typhoon LIONROCK) and at 08:00 on 23 September 2013 (Typhoon USAGI)

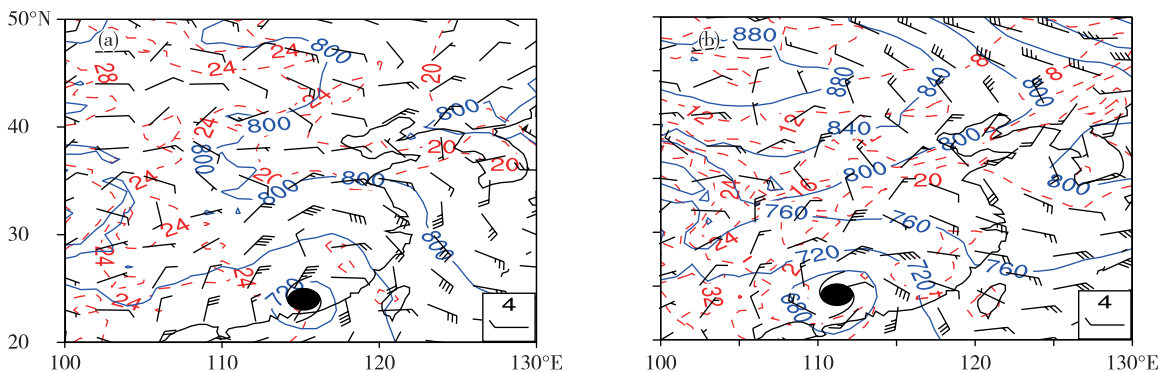


图5 925 hPa天气形势(a.2010年9月2日20时台风“狮子山”,b.2013年9月23日14时台风“天兔”)

Fig.5 Synoptic situation at 925 hPa at 20:00 on 2 September 2010 (a; Typhoon LIONROCK) and at 14:00 on 23 September 2013 (b; Typhoon USAGI)

造成山东半岛大暴雨的主要天气系统。

3 物理量特征分析

秋季台风远距离大暴雨的成因与水汽条件、动力条件、大气稳定性和斜压性、高空急流等密切相关,本文重点从这几方面分析。

3.1 水汽条件

在850 hPa上,台风“狮子山”影响时,2010年9月2日20时,暴雨发生前,台风环流周围水汽通量中心值在 $25\sim 28\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,台风倒槽向北伸到江苏北部,在台风东侧和副高之间有强的东南气流,风辐合主要位于苏北到黄海中部(图6a)。3日08时,降水较大时,在山东半岛南部海区有一个 $32\sim 35\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 的水汽通量大值区(图6b),台风东侧和副高之间强的东南气流向北到达山东半岛,将东海、黄海南部和中部的水汽源源不断输送到山东半岛并在此辐合。台风“天兔”影响时,2013年9月23日08时,暴雨发生前,台风环流周围水汽通量中心值大于 $32\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,台风环流周围水汽通量大值区顶端向北经江苏到达山东半岛,在台风东侧和副高之间的偏强东南气流位于江苏以南,风辐合也主要位于江苏以南(图6c);14时山东半岛的水汽通量仍为 $7\sim 10\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,台风东侧和副高之间偏强东南气流将东海、黄海南部和中部的水汽经过江苏输送到山东半岛并在此辐合(图6d)。可见,台风“狮子山”和台风“天兔”造成山东半岛大暴雨的水汽源地均来自东海、黄海南部和中部,台风倒槽向北伸展,台风倒槽东侧的偏强东南气流和副高西侧的偏南气流共同作用将水汽输送到山东半岛并在此辐合。

3.2 动力特征

分析2010年9月2日20时—3日20时和2013年9月22日20时—23日20时在大暴雨区附近($37^{\circ}\text{N}, 122^{\circ}\text{E}$)垂直上升运动和散度的时间垂直剖面。

台风“狮子山”影响时(图7a),2010年9月3日02—14时为上升运动,最强的上升运动发生在3日08时前后,达到 $-1.6\text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$,中心高度在800~750 hPa之间;分析散度的时间垂直剖面,低层辐合、高层辐散与上升运动相对应,最强的低层辐合、高层辐散出现在3日08时前后,低层辐合主要位于850 hPa以下,高层辐散在700~500 hPa之间。14时开始低层辐合、高层辐散减弱,低层850 hPa以下变为下沉运动,降水开始减弱。台风“天兔”影响时(图7b),2013年9月23日08时,暴雨发生前,山东半岛的上升运动很弱,散度场上为弱的低层辐合、高层辐散;14时,降水开始时,山东半岛出现上升运动,暴雨区的上升运动比较强,强上升运动在850~700 hPa之间,此时散度场上低层辐合主要在850 hPa以下,高层辐散在700~500 hPa之间。由此可见,两次大暴雨天气过程,都是低层850 hPa以下辐合,高层700~500 hPa之间辐散,强的上升运动在850~700 hPa之间。

3.3 大气层结不稳定特征

选取荣成站2010年9月2日20时和2013年9月23日08时的探空资料,分析 $t-\ln p$ 图,2010年9月2日20时850 hPa附近有逆温层,850 hPa以下大气接近饱和,850~600 hPa为干冷空气,对流不稳定能量很小,由风的垂直变化可知,1000 hPa为东南风,850 hPa为弱的西北风,700 hPa以上为西南风。由图4a、b和图5a可知,低层925 hPa和

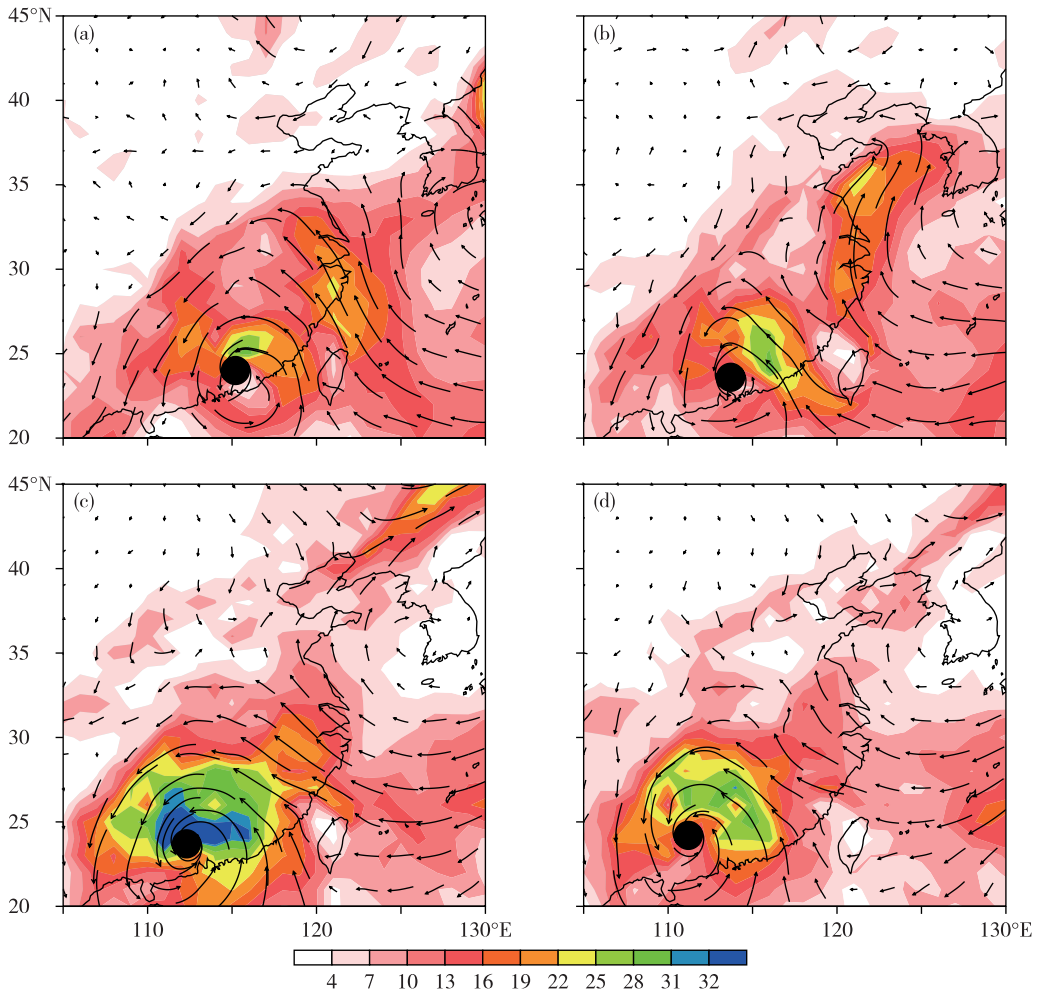


图 6 850 hPa 水汽通量分布(a.2010 年 9 月 2 日 20 时,b.2010 年 9 月 3 日 08 时,c.2013 年 9 月 23 日 08 时,d.2013 年 9 月 23 日 14 时;单位: $g \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$)

Fig.6 Distribution of water vapor flux at 850 hPa (a. 20:00 on 2 September 2010, b. 08:00 on 3 September 2010, c. 08:00 on 23 September 2013, d. 14:00 on 23 September 2013; units: $g \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$)

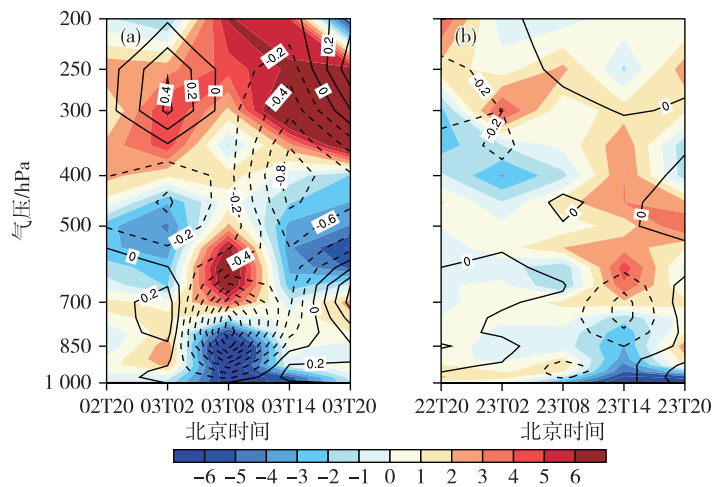


图 7 两次大暴雨区附近($37^{\circ}N, 122^{\circ}E$)垂直上升运动(黑线,单位: $Pa \cdot s^{-1}$)和散度(填色,单位: $10^{-5} s^{-1}$)时间垂直剖面(a. 2010 年 9 月 2 日 20 时—3 日 20 时,b. 2013 年 9 月 22 日 20 时—23 日 20 时)

Fig.7 Time-height cross section of vertical velocity (black line, units: $Pa \cdot s^{-1}$) and horizontal divergence (colored, units: $10^{-5} s^{-1}$) over the very torrential rainfall area ($37^{\circ}N, 122^{\circ}E$) (a. from 20:00 on 2 to 20:00 on 3 September 2010, b. from 20:00 on 22 to 20:00 on 23 September 2013)

850 hPa山东半岛受切变线影响,东南气流将暖湿空气输送到山东半岛,西风槽后有弱冷空气侵入,大气层结为弱的对流不稳定(图8a);2013年9月23日08时,600 hPa以下接近饱和,600~400 hPa为干冷空气,400 hPa以下有较大的对流不稳定能量,由风的垂直变化可知,1 000 hPa为东南风,925~850 hPa为西南风,700 hPa以上为偏西风(图8b)。由图4c、d和图5b可知,500 hPa西风槽后冷空气较强,高层有较强冷空气侵入,低层925 hPa和

850 hPa台风倒槽东侧东南气流和北支槽前偏南气流共同影响山东半岛,东南气流将暖湿空气输送到山东半岛,850 hPa华北密集的等温线带与西北风近乎垂直,具有上干冷、下暖湿的不稳定大气层结构特征,利于强对流的发生。可见,两次台风影响前山东半岛大气层结都是不稳定的,台风“天兔”影响时具有更大的对流不稳定能量和更不稳定的大气层结。

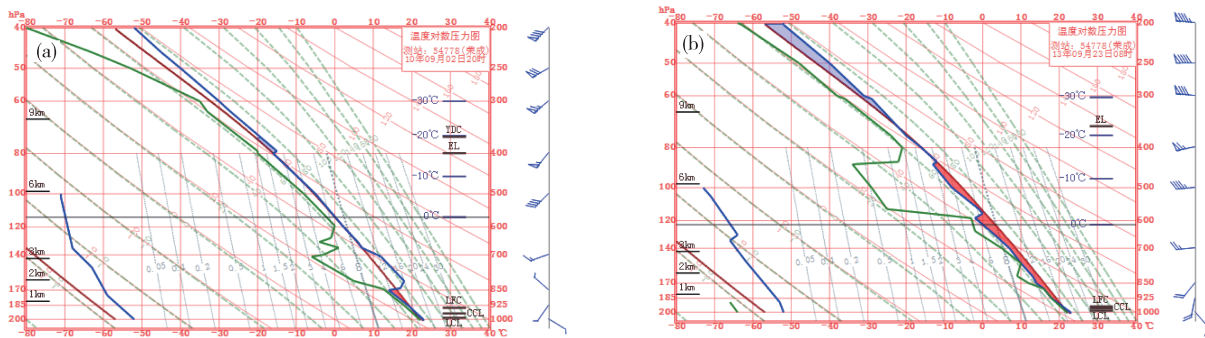


图8 荣成探空站的 t - $\ln p$ 图(a.2010年9月2日20时,b.2013年9月23日08时)

Fig.8 The t - $\ln p$ diagram at Rongcheng Station at 20:00 on 2 September 2010 (a) and at 08:00 on 23 September 2013 (b)

3.4 大暴雨区锋区的结构特征

蒋尚城^[18]利用离散探空站资料研究分析了7月两次远距离台风特大暴雨的锋区结构特征,表明:中低纬系统相互作用下经常造成特大暴雨,在水平等压面上造成暴雨的系统特征与一般强降雨的系统特征往往相似,但在垂直方向上暴雨区的锋区具有三层结构特征。沿122°E做 θ_{se} 、温度、高空急流的垂直剖面,对秋季台风远距离大暴雨区的锋区结构特征进行分析。

台风“狮子山”影响时,2010年9月2日20时暴雨发生前,暴雨区锋区的结构如下:在36°~38°N暴雨区上空,925 hPa有一个低值中心,850~700 hPa之间 θ_{se} 存在一大值中心,925 hPa以下 θ_{se} 随高度逐渐减小,表现为不稳定层结,925~850 hPa之间 θ_{se} 随高度逐渐增大,这一特征与文中3.3节探空曲线的分析结果一致,850 hPa有逆温层,925~850 hPa层结相对稳定;700~500 hPa存在向暖区一侧倾斜的弱锋区,湿斜压性较明显,这是由偏强东南气流带来的暖湿空气与弱冷空气之间形成的锋区;在500~300 hPa有一向冷区倾斜弱的高空锋区,并伴有中心值为55 m·s⁻¹的高空急流,与图7a中500~300 hPa散度的弱辐散相对应(图9a)。这类结构斜压性不强,与文献[18]的研究结果在850 hPa

以下锋区特征有差异。由图4a、b可知,500 hPa冷空气较弱,850 hPa锋区不强,所以暴雨区上空只具有两层弱的锋区结构,高空辐散较弱。

台风“天兔”影响时,2013年9月23日14时暴雨发生前后,暴雨区锋区的结构如下:在36°~38°N暴雨区上空,900 hPa以下 θ_{se} 近地面有一大值中心,其随高度逐渐减小,说明低层为不稳定层结。在大值区南侧,有一向冷侧略倾斜的能量锋区,北侧40°N有一冷舌从高层到低层,由北向南伸,暴雨区低层为暖脊控制;在900~700 hPa有一强烈锋区,向暖区一侧倾斜,湿斜压性明显;在600~300 hPa有一向冷区倾斜的高空锋区,温度对比比较明显,其上伴随中心值为65 m·s⁻¹的高空急流,冷暖平流比较明显,这支锋区与西风槽相伴,与图7b中500~300 hPa散度的辐散相对应。低层暖湿空气在暴雨区锋区附近辐合抬升,在900~700 hPa对流不稳定能量释放,使上升运动在800~700 hPa加强,高层的斜压锋区和急流加大了高层的辐散,利于强对流的发生和维持(图9b)。暴雨区上空锋区具有的三层结构特征与文献[18]的研究结果类似,其原因为:北支槽携带的强冷空气东移南下(图4c、d),与台风和副高之间的南到东南气流叠加,在山东半岛形成上干冷、下暖湿的不稳定层结结构,该结构是台风“天兔”造成山东半岛强对流天气的重要特征。

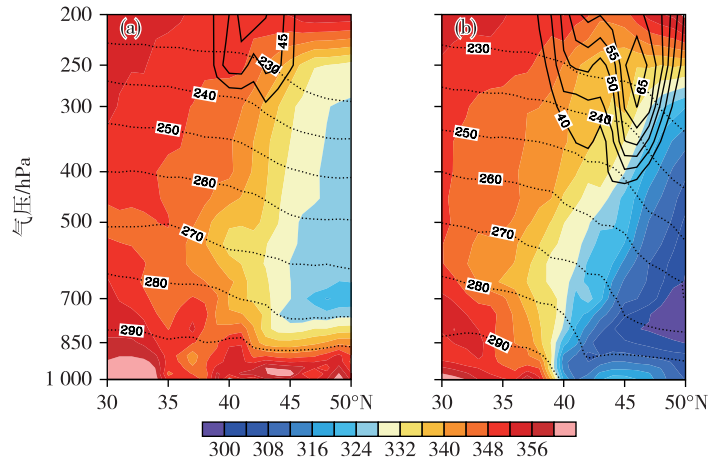


图9 沿122°E做 θ_{se} (填色,单位:K)、温度(虚线,单位:K)和大于 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的高空急流位置(实线)的垂直剖面(a.2010年9月2日20时,b.2013年9月23日14时)

Fig.9 Vertical cross section of θ_{se} (colored, units: K), temperature (dashed line, units: K), and upper-level jet stream greater than $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (solid line) along 122°E (a. 20:00 on 2 September 2010, b. 14:00 on 23 September 2013)

通过上述分析可见,两次大暴雨区上空锋区结构特征存在差异,这是中纬度西风槽和低纬度台风环流相互作用的结果。垂直方向上三层特殊结构锋区的斜压性有利于台风“天兔”远距离大暴雨中强对流天气的发生。

3.5 高低空急流特征

丁治英等^[13]对非纬向高空急流与远距离台风暴雨的相关性进行统计得出:暴雨发生时,200 hPa高空一般为西南风急流(90%),暴雨区位于高空急流右后方。暴雨增强时,200 hPa高空急流有一个增强转竖的趋势。蒋尚城^[18]分析了7月低空急流和高空急流对台风远距离特大暴雨的作用,认为东南低空急流所带的水汽在暴雨区上升、转向、加速并与高空急流合并加强,高低空急流相互作用是暴雨产生的重要条件。本文对秋季台风远距离大暴雨中的高低空急流特征进行分析。

台风“狮子山”影响时,2010年9月2日20时(图10a)暴雨发生前,200 hPa急流轴呈NE—SW走向,中心值 $\geq 58 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,但范围很小,山东半岛暴雨区位于高空200 hPa急流中心右方,850 hPa低空急流离暴雨区较远;降水增强时,3日08时(图10b),200 hPa急流增强,中心值 $\geq 58 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的范围增大,850 hPa低空急流增强并北移至黄海中部、南部,山东半岛暴雨区位于高空200 hPa急流入口区的右侧,850 hPa低空急流出口区的左侧,此类高、低空急流耦合与暴雨的相关性与以往众多研究夏季台风远距离暴雨结论和观测事实相符。

台风“天兔”影响时,2013年9月23日08时(图10c)暴雨发生前,高空200 hPa在 $40^\circ \sim 50^\circ \text{N}$, $112^\circ \sim 122^\circ \text{E}$ 有一近ENE—WSW向的风速 $\geq 58 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 急流大值区,850 hPa低空急流在 30°N 以南,离暴雨区较远;降水开始时,14时(图10d)高空200 hPa上,风速 $\geq 58 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的急流大值区东移至 $40^\circ \sim 50^\circ \text{N}$, $113^\circ \sim 130^\circ \text{E}$,仍为ENE—WSW走向,中心东移,且出现风速 $\geq 62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的急流中心,急流轴明显伸长,其中心稍有南压,850 hPa低空急流仍在 30°N 以南,山东半岛位于高空急流入口区的右侧,强降水发生在急流轴伸长、中心值南压的过程中。

为了进一步分析高空急流和低空急流与暴雨的关系,沿122°E做风速 $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 v 与 ω 合成流场的垂直剖面图。台风“狮子山”影响时,2010年9月3日08时较强降水发生时,较强的偏南气流到达暴雨区并产生强盛上升运动至500 hPa,与图7a散度场的辐散相对应;500 hPa以上上升运动较弱,在高空急流入口区右侧为辐散,左侧为下沉运动,围绕急流轴形成了一个弱的次级环流,同时在500 hPa附近存在高低空急流相互作用的次级环流,在这种耦合作用下,较强降水得以维持(图11a)。台风“天兔”影响时,2013年9月23日14时(降水开始),低空没有较强的偏南气流,暖湿空气到达暴雨区后由于低层切变辐合上升,从600 hPa往上,在高空急流入口区右侧上升运动增大,左侧为下沉运动,围绕急流轴形成了一个次级环流,此环流使高空辐散加强(图11b)。由图4可知,14时后地面冷锋经过暴

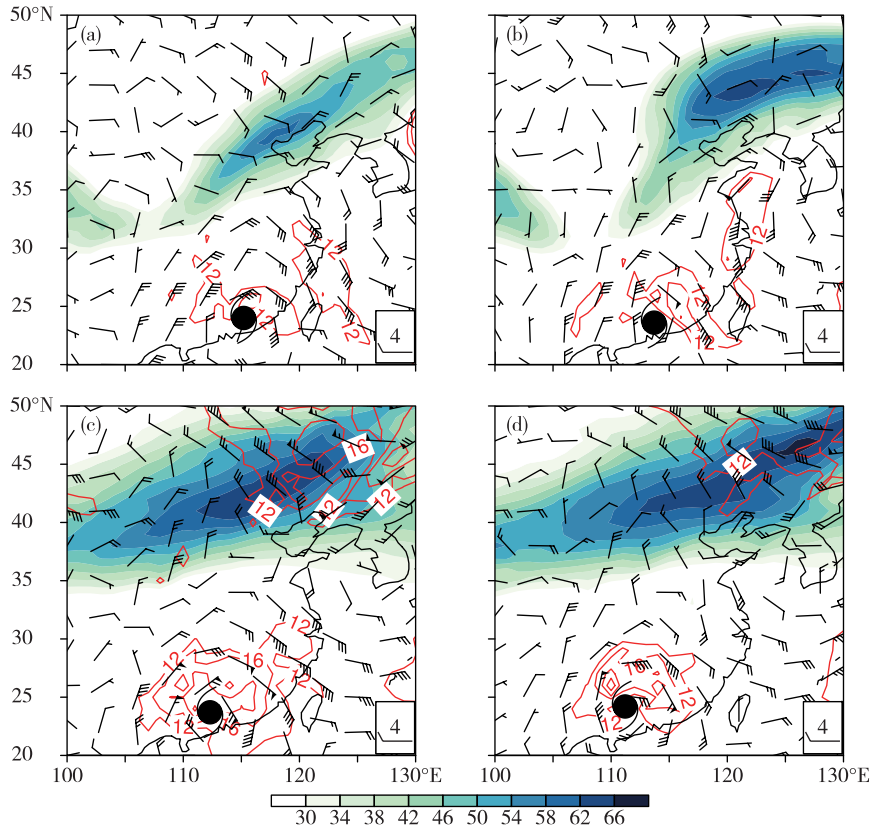


图 10 200 hPa 高空急流(填色, 风速 $\geq 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和 850 hPa 低空急流(等值线和风场, 风速 $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) (a. 2010 年 9 月 2 日 20 时, b. 2010 年 9 月 3 日 08 时, c. 2013 年 9 月 23 日 08 时, d. 2013 年 9 月 23 日 14 时)

Fig.10 Upper-level (200 hPa) jet stream (colored, wind speed equal to or greater than $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) and low-level (850 hPa) jet stream (isoline and wind field, wind speed equal to or greater than $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) (a. 20:00 on 2 September 2010, b. 08:00 on 3 September 2010, c. 08:00 on 23 September 2013, d. 14:00 on 23 September 2013)

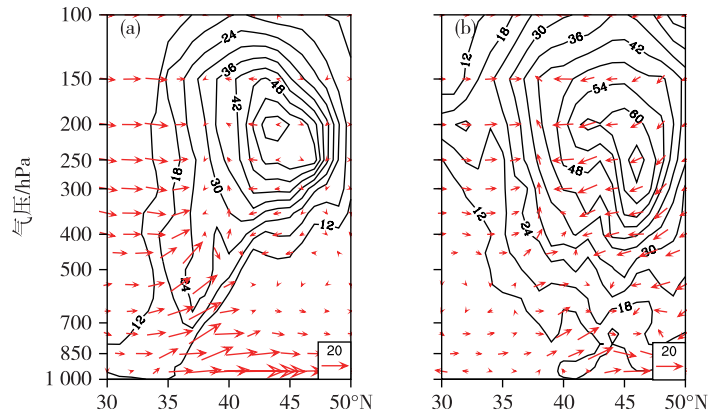


图 11 沿 122°E 做风速 $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (实线, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、 v 与 ω (单位: $-10 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) 流场合成的垂直剖面 (a. 2010 年 9 月 3 日 08 时, b. 2013 年 9 月 23 日 14 时)

Fig.11 Vertical cross section of wind speed equal to or greater than $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (solid line, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and flow field composed of v and ω (units: $-10 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) along 122°E (a. 08:00 on 3 September 2010, b. 14:00 on 23 September 2013)

雨区, 锋区比较深厚, 冷空气比较强, 高空急流和深厚锋区的耦合作用, 使高空急流加速, 在高空急流入口区产生间接环流, 入口区右侧辐散加强, 产生强对流天气。

分析可知, 台风“狮子山”和“天兔”造成远距离大暴雨的过程中均伴有高空急流的增强, 但高低空急流相互作用产生暴雨的机制在两次大暴雨的过程中存在明显差异。

4 结论

通过对2010—2017年山东半岛两个台风远距离大暴雨个例特征的诊断分析,得出如下结论:

1) 台风生成位置、登陆强度相差很大,登陆后移动路径不同,但移到广东中西部时位置比较靠近,山东半岛大暴雨发生在台风登陆后从广东移到广西的过程中。高空北支冷槽、台风倒槽和850 hPa切变线是造成山东半岛大暴雨的主要天气系统。但两次大暴雨过程副高的强度、台风环流、北支锋区强度差别较大。

2) 台风东侧和副热带高压之间850 hPa偏强东南气流将东海、黄海南部和中部的水汽源源不断输送到山东半岛并在这里辐合;存在低层850 hPa以下辐合、高层700~500 hPa辐散,强的上升运动在850~700 hPa之间;大暴雨发生前大气处于不稳定大气层结;有两层或三层锋区的斜压性特殊结构,这种特殊结构锋区的斜压性是造成台风远距离大暴雨的重要特征;台风“狮子山”和“天兔”造成远距离大暴雨的过程中均伴有高空急流的加速增强。

3) 台风“狮子山”和“天兔”造成山东半岛大暴雨的水汽条件稍有不同,“狮子山”影响时水汽更充足;高低空急流相互作用产生暴雨的机制、锋区斜压性结构特征、不稳定大气层结特征在两次大暴雨过程中都存在明显差异。

4) 秋季台风远距离暴雨和夏季台风远距离暴雨的差异:“狮子山”造成远距离大暴雨在水汽特征、动力和热力特征、高低空急流耦合、高空急流特征方面与夏季台风远距离暴雨特征研究结果相似,但大气稳定性和三层锋区结构特征与夏季台风远距离暴雨研究结果有一定区别;台风“天兔”影响时,在水汽特征、高空急流特征、大气稳定性、三层锋区结构特征方面与夏季台风远距离暴雨的研究结果类似,但动力特征、高低空急流耦合、冷锋和冷空气特征与夏季台风远距离暴雨的研究结果有一定区别。

参考文献:

- [1] 朱洪岩,陈联寿,徐祥德.中低纬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.
- [2] 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):31-39.
- [3] 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.
- [4] 杨晓霞,高留喜,宋佳嘉,等.山东夏季强降水的影响系统和物理量特征[J].海洋气象学报,2018,38(3):57-66.
- [5] 孙兴池.地面倒槽暴雨的形成机制研究[J].海洋气象学报,2018,38(3):39-46.
- [6] 周淑玲,吴增茂,闫丽凤.山东半岛一次强暴雨的分析和数值模拟[J].高原气象,2008,27(5):1149-1160.
- [7] 周淑玲,闫淑莲,张灿.2007年8月10—12日山东半岛持续性特大暴雨的维持机制分析[J].热带气象学报,2009,25(5):628-634.
- [8] 丛春华,陈联寿,雷小途,等.台风远距离暴雨的研究进展[J].热带气象学报,2011,27(2):264-270.
- [9] 武麦凤,肖湘卉,曹玲玲,等.两次台风远距离暴雨过程的对比分析[J].暴雨灾害,2013,32(1):32-37.
- [10] 单磊,谭桂容,姚叶青,等.一次台风远距离暴雨水汽条件及输送过程研究[J].热带气象学报,2014,30(2):353-360.
- [11] 张兴强,孙兴池,丁治英.远距离台风暴雨过程的正/斜压不稳定[J].南京气象学院学报,2005,28(1):78-85.
- [12] 张兴强,丁治英,何金海.非纬向高空急流与远距离台风中尺度暴雨的相关统计特征[J].山东气象,2004,24(增刊):7-9.
- [13] 丁治英,张兴强,何金海,等.非纬向高空急流与远距离台风中尺度暴雨的研究[J].热带气象学报,2001,17(2):144-154.
- [14] 张雪晨,郑媛媛,姚晨,等.一次远距离台风暴雨中尺度对流系统的分析[J].大气科学学报,2013,36(3):346-353.
- [15] 杨晓霞,陈联寿,刘诗军,等.山东省远距离热带气旋暴雨研究[J].气象学报,2008,66(2):236-250.
- [16] 孙兴池,陈金敏,刁秀广,等.一次远距离台风暴雨过程分析[J].气象,2009,35(5):34-41.
- [17] 李春虎,赵宇,龚佃利,等.“04·8”山东远距离台风暴雨成因的数值模拟[J].南京气象学院学报,2007,30(4):503-511.
- [18] 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.