

高安春,申高航,2022. 多源资料分析鲁西局地大暴雨成因及降水的微物理特征[J]. 气象,48(11):1475-1486. Gao A C, Shen G H, 2022. Causes and precipitation microphysical characteristics of localized heavy rainstorm in western Shandong based on multi-source data[J]. Meteor Mon, 48(11):1475-1486(in Chinese).

多源资料分析鲁西局地大暴雨成因及 降水的微物理特征^{*}

高安春 申高航

山东省临沂市气象局, 临沂 276004

提 要: 受西风槽、副热带高压和台风利奇马外围风场的共同影响,2019 年 8 月 9 日 20 时至 10 日 08 时(北京时),位于鲁西平原的山东省高唐县出现了局地大暴雨。以 FY-4A 卫星云图和 ECMWF 数值预报产品为参考,综合利用双偏振多普勒雷达、ADTD 雷电定位数据、分钟降水量、雨滴谱等资料,参考北京 3 km 区域模式产品,分析了高唐局地大暴雨过程的中尺度天气系统活动及降水的微物理特征,主要结论如下:局地大暴雨前,西风槽云带出现明显的断裂,断裂处底层有冷空气扩散到槽前,并与槽前暖湿气流形成了一条 α 中尺度的低空切变线。局地大暴雨前期,低空切变线触发的强对流下沉气流流出与底层扩散的冷空气叠加,出流边界回波带很快远离母体,使其后切变线触发的对流置于底层冷空气垫上,回波很快减弱。出流边界触发的对流降水及暖湿气流向西北推进形成的准线形对流降水,虽然降水强度大,但持续时间短,累计降水量较小,且由于底层性质的不同,其降水的雨滴谱分布存在明显差异。低空切变线长时间维持,使暖湿空气不断积聚,在切变线暖区一侧形成了假相当位温 θ_{se} 大值区;强降水开始时,切变线上垂直上升运动明显增强,925 hPa 最大上升速度大于 $1.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$,形成两个 β 中尺度的气旋性辐合中心;辐合中心在 500 hPa 槽前正涡度平流的作用下进一步加强,触发了环境不稳定能量的释放和深厚湿对流的产生;对流云团在高空槽前西南气流的引导下,沿切变线向东北方向逐次移过高唐,产生“列车效应”,导致高唐附近的较强降水。西风槽和切变线回波结合到一起后,在高唐上空 6~10 km 持续维持较丰富的过冷却水,促进了冰晶的繁生和降水质点的增长,在对应时间段内雨滴数(特别是大雨滴数)明显增多,降水强度变大,强降水峰变宽,地面累计雨量明显变大。鲁西局地大暴雨过程中,地面雨滴尺度谱存在明显的双峰结构,雨滴直径为 1.2 mm 处峰的位置比较稳定,另一个峰位于 0.3~0.5 mm 的小雨滴端;统计分析表明,大雨滴数序列与分钟降水量序时间同步,相关系数达到 0.9867;小雨滴数时间序列滞后分钟降水量时间序列 2 min。

关键词: 多源资料,局地大暴雨,微物理,特征

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.052601

Causes and Precipitation Microphysical Characteristics of Localized Heavy Rainstorm in Western Shandong Based on Multi-Source Data

GAO Anchun SHEN Gaohang

Linyi Meteorological Office of Shandong Province, Linyi 276004

Abstract: Affected by the westerly trough, subtropical high pressure and Typhoon Lichma, a localized heavy rainstorm occurred in Gaotang County on the West Shandong Plain from 20:00 BT 9 to 08:00 BT 10 August 2019. Based on FY-4A satellite cloud images, ECMWF numerical forecasts, dual-polarization Doppler radar data, ADTD lightning system positioning data, regional station minute rainfall, raindrop size distribution as well as the Beijing 3 km regional model products, this paper analyzes the causes for the

^{*} 山东省自然科学基金项目(ZR2016DM20)、山东省气象局预报员专项(SDYBY2018-14)和临沂市气象局自立课题(2022lyqx03)共同资助
2021 年 5 月 6 日收稿; 2022 年 5 月 26 日收修定稿

第一作者:高安春,主要从事天气预报与预警工作. E-mail: gacsdy@163.com

localized heavy rainstorm in Gaotang and the microphysical characteristics of the severe precipitation. The conclusions are as follows. Before the localized heavy rainstorm, obvious cracks appeared in the westerly trough cloud belt at the bottom of which cold airs diffused to the front of the trough, forming a meso- α scale low-altitude shear line with the warm and humid airflow in front of the trough. In the early stage of the localized heavy rainstorm, due to the superposition of the downdraft outflow of strong shear line convection and the cold air diffusing from the bottom layer, the outflow boundary echo zone quickly moved away from the parent body so that the strong shear line echo zone was placed on the bottom cold air cushion and weakened quickly. The convection triggered by the outflow boundary and the quasi-linear pair of echoes formed by the warm and humid air advancing to the northwest were all dominated by convective precipitation. The precipitation intensity was high, the duration was short and the accumulated rainfall was small, but due to the different properties of the bottom layer, there were obvious differences in their raindrop size distribution. The low-altitude shear line was maintained for a long time, causing warm and humid air to accumulate continuously and forming a large value area of θ_{se} on the warm side of the shear line. At the beginning of the severe precipitation, the vertical upward movement on the shear line was significantly enhanced, and the maximum upward speed at 925 hPa was higher than $1.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$, and two meso- β scale cyclone disturbances were formed, triggering the release of environmental instability energy and the deep moist convection. Cloud images and echoes show that the severe precipitation cloud clusters moved through the rainstorm area successively along the shear line, producing the “train effect” and thus resulting in the severe precipitation near Gaotang. After the westerly trough and shear line echoes combined, relatively abundant supercooled water kept maintaining at 6–10 km above Gaotang, promoting the growths of ice crystals and precipitation particles and making the precipitation intensity stronger, the peak of heavy precipitation widened, and the ground precipitation increased significantly. During the localized heavy rainstorm, there was an obvious double-peak structure in the scale spectrum of ground raindrops. The peak position with raindrop diameter at 1.2 mm was stable relatively while the other peak was at the end of the small raindrops with diameters at 0.3–0.5 mm. Statistical analysis suggests that the time series of large raindrops is synchronized with the time series of minute precipitation, and the correlation coefficient reaches 0.9867. The time series of small raindrops lags behind the time series of minute precipitation by 2 minutes.

Key words: multi-source information, localized heavy rainstorm, microphysics, characteristic

引言

暴雨常导致许多自然灾害,长期以来一直是气象研究关注的焦点。随着热带气旋研究的深入,热带气旋与中纬度环流系统相互作用的研究有了较大发展(陈联寿和丁一汇,1979;徐祥德等,1998;李英等,2006),热带气旋远距离暴雨也越来越受到关注。当台风东侧环流将水汽和能量输送到中高纬度槽前时,可导致台风远距离暴雨的发生(钮学新等,2005;陈久康和丁治英,2000;梁军等,2008;丛春华等,2012;赵思雄和孙建华,2013;朱红芳等,2019;孙力等,2015)。朱洪岩等(2000)数值研究表明:台风可

通过水汽和能量的输送直接影响远距离降水区的分布,西风槽可为台风远距离降水提供低层辐合、高层辐散以及槽前正涡度平流的大尺度背景,有利于垂直运动的发展和降水的维持。赵娴婷等(2020)在总结湖北省一次特大暴雨过程时,分析了其中的中小尺度天气系统及其在降水中的作用。

杨晓霞等(2008)应用历史资料统计分析发现:华南沿海登陆和活动的热带气旋与西风带环流系统和副热带高压(以下简称副高)相互作用在山东造成的远距离热带气旋暴雨年均均为2.5次,出现暴雨的时间较热带气旋登陆时间滞后1~3 d。在台风登陆后的12~48 h内,山东暴雨区上空大量的水汽和温湿能的净流入。暖湿气流与西风带气流相汇合,

产生辐合上升,造成暴雨。

随着观测技术及手段的不断丰富,着眼于中小尺度天气系统在强对流和局地暴雨过程中的作用,科研人员进行了大量的观测分析和理论研究。梅垚等(2018)、杨忠林等(2019)、冯晋勤等(2018)、林文等(2020)采用双偏振多普勒雷达,分析了中国不同地区强对流天气的微物理结构和流场特征。俞小鼎等(2012)、王珏等(2019)、范元月等(2020)、孙密娜等(2018)、毛冬艳等(2018)基于多普勒雷达和高密度区域站对短时强降水的研究进行了大量工作,概括出了短时强降水的多普勒雷达回波特征和概念模型。陈磊等(2013)、周黎明等(2014)、申高航等(2020)将地面雨滴谱等资料应用于暴雨研究,分析了暴雨过程中地面雨滴谱的变化及微物理特征,加深了对暴雨过程的认识。

受西风槽、副高和台风利奇马外围风场的共同影响,2019年8月9日20时至10日08时,鲁西平原的高唐县出现了局地大暴雨。本文以FY-4A卫星云图和ECWMF数值预报为基础,综合利用山东省济南(齐河)双偏振多普勒雷达、中国ADTD雷电定位数据、区域站分钟降水量、雨滴谱等资料,参考北京3 km区域模式产品,分析了本次局地大暴雨的成因及降水的微物理过程,加深了对本次过程的理解,得出了许多有意义的结论,对于今后多源资料的应用研究及局地暴雨的预报预警服务都具有一定参考价值。

1 资料来源及说明

本文雨滴谱数据来自高唐国家气象站DSG5型降水天气现象仪,资料包括32个尺度通道和32个速度通道,其中降水粒子尺度测量范围为0.1~22.4 mm,降水粒子速度测量范围为0.125~26 m·s⁻¹。

高唐站位于济南(齐河)双偏振多普勒雷达站偏西方向44 km处(图1),能被雷达有效覆盖,本文选用齐河双偏振多普勒雷达观测的基数据,包括水平反射率因子(Z_H)、径向速度(V)、差分反射率因子(Z_{DR})、差分相移率(K_{DP})及相关系数(CC)等参量。其中 Z_H 经过了去地物杂波处理, Z_{DR} 和 K_{DP} 经过了偏差订正。除此之外未对数据进行其他质量控制。基数据采用VCP21扫描方式,6 min完成9个不同仰角的体扫。FY-4A云图资料、ECWMF数值预

报、北京3 km区域模式产品取自气象信息综合分析处理系统(MICAPS4)。区域自动气象站分钟雨量及中国ADTD雷电定位数据从气象数据统一服务接口(MUSIC)下载并解码,时间由世界时变换为北京时,文中采用北京时。

2 天气形势及降水量分布

图1a是高唐局地暴雨前,2019年8月9日20时FY-4A红外云图叠加ECWMF再分析500 hPa等高线和850 hPa风场。图中,台风中心位于浙江东部海面上,距离高唐1175 km;500 hPa副高位于台风东北侧,主体在山东半岛以东;受副高和台风阻挡,西风槽主体北收,850 hPa台风与副高之间的偏东气流直接输送到500 hPa槽前,并在高唐附近分为南北两支。红外云图上,高空槽前斜压叶状云系完整,但在高唐以北出现了断裂。对照9日20时北京3 km区域模式再分析925 hPa风场和济南20:03的0.48°仰角雷达回波(图1b)分析,云系断裂处对应着无回波区和成片的偏北风,说明槽后冷空气已经从底层扩散到槽前,并和东南暖湿气流形成了一条 α 中尺度的低空切变线,雷达观测到的强回波带沿切变线分布。

模式探空(图1c)显示:高唐站1000 hPa为西北风,925 hPa及以上均为西南风,对流有效位能为1141.4 J·kg⁻¹,抬升指数为-2.55℃,湿层厚度为4798.5 m,K指数为39℃。适中的对流有效位能及其长条形分布特征、深厚的湿层等参数都符合强降水产生的环境条件。

9日20时至10日08时,高唐站总降水量为165.5 mm,位于高唐西南8 km的姜店站降水量达185 mm。图1d是根据区域加密自动气象站观测和ADTD雷电定位数据绘制的过程降水量和闪电分布。图中降水区域范围较大,但降水量分布不均匀,较强降水主要沿平原—高唐—聊城一线分布,最大降水发生在高唐及其西南狭小的区域内。另外,高唐及其西南强降水区的闪电很少,闪电在其东北的平原县和西南的聊城市比较密集。

3 利用多源资料分析鲁西局地大暴雨

根据雷达回波和分钟降水量的时间变化特征,将鲁西局地大暴雨分为两个时间段。9日20时至

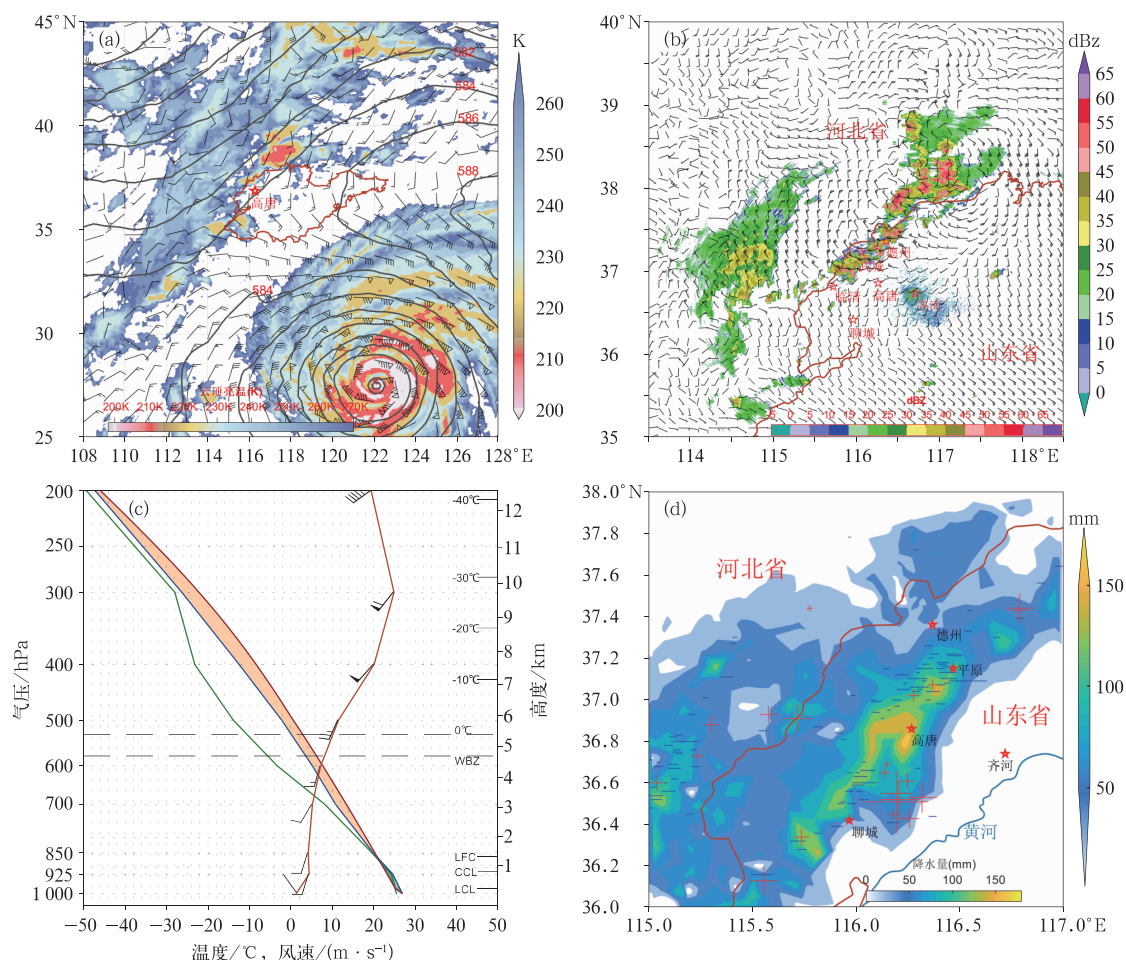


图 1 2019 年 8 月 9 日 20 时天气形势及过程降水量和闪电分布

(a) 红外云图(填色)、500 hPa 高度场(实线,单位:dagpm)和 850 hPa 风场(风羽), (b) 齐河雷达 20:03 0.48° 仰角的雷达反射率因子(填色)和 925 hPa 风场(风羽), (c) 高唐站 T - $\ln p$ 探空, (d) 9 日 20 时至 10 日 08 时降水量(填色)和闪电分布(“+”为正闪,“-”为负闪,符号大小为闪电相对强度)

Fig. 1 Synoptic situation and process precipitation and lightning distribution at 20:00 BT 9 August 2019

(a) infrared cloud image (colored), 500 hPa height (solid line, unit: dagpm) and 850 hPa wind (barb);

(b) products of Z_H at 0.48° elevation (colored) and 925 hPa wind (barb) from Qihe Radar at 20:03 BT;

(c) T - $\ln p$ sounding at Gaotang Station; (d) distribution of rainfall (colored)

and lightning number from 20:00 BT 9 to 08:00 BT 10

(In Fig. 1d, “+” means positive ground flash, “-” means negative ground flash, the size of the symbol indicates the relative strength of the lightning)

10 日 02 时为第一时段,主要是中小尺度对流活动,降水以局地短时强降水为主,降水量占过程总量的比例较小;10 日 02—08 时为第二时段,表现为连续的混合性降水,降水强度大,持续时间长,降水量构成了过程总降水量的主要部分。

3.1 第一时段冷暖空气的相互作用及雷达回波特征

3.1.1 窄带回波及其触发的小尺度对流

高唐局地大暴雨第一时段,在低空切变线强回

波带以东,雷达观测到一条弧状的窄带回波向东南方向移动,并逐渐远离其后的切变线强回波带。窄带回波高度为 1~2 km,回波强度较弱,一般在 15 dBZ 左右, Z_{DR} 值较大,CC 值一般小于 0.5,属于非降水回波。

9 日 21:01 齐河雷达 1.45° 仰角 Z_H 图像(图 2a)中,窄带回波已移到高唐和德州一线,并在高唐附近触发起对流,其回波强度介于 35~40 dBZ,降水效率较高,高唐站 15 min 降水量达 24 mm。随着窄带回波远离,切变线强回波带逐渐减弱为离散的对流

单体。0.48°仰角的径向速度图(图 2b)中,雷达站西北象限有一条明显的正负速度分界线,分界线与图 2a 窄带回波的位置一致,由西北向东南移动。

分析 9 日 21 时北京 3 km 区域模式产品发现,925 hPa(图 2c)上切变线有所南压,切变线后部的西北风已扩散到高唐附近。切变线上的假相当位温(θ_{se})梯度较大,切变线以南, θ_{se} 普遍大于 360 K,且多个 365 K 的极值中心;切变线以北, θ_{se} 普遍小于 355 K。沿图 2c 中的虚线制作 θ_{se} 和风场的距离高度廓线(图 2d)。图中,700 hPa 及以上为偏南风,切变线后部的西北风在 850~925 hPa 比较清楚,说明弱冷空气主要在低空存在,切变线辐合区随高度略向西北倾斜,高唐(横坐标 0 km 处)处于切变线辐

合区的前沿;高 θ_{se} 区域主要分布在 850 hPa 以下,尤其是 925 hPa 以下的边界层内。

综合以上分析发现:低空弱冷空气向东南扩散,与台风和副高之间的偏东气流交汇形成切变线,暖湿气流在切变线暖区一侧逐渐积聚,形成了一条高 θ_{se} 带,这里温湿条件较好,有利于强降水的产生,高唐及未来强降水区均处于高 θ_{se} 带中。低空中尺度切变线触发了强对流回波带,强对流下沉气流流出流叠加在底层向暖区扩散的冷空气上,使出流边界回波快速远离母体,从底层切断了母体的暖湿空气供应,并使母体处于一个稳定层结的低层冷空气垫上,而迅速减弱。

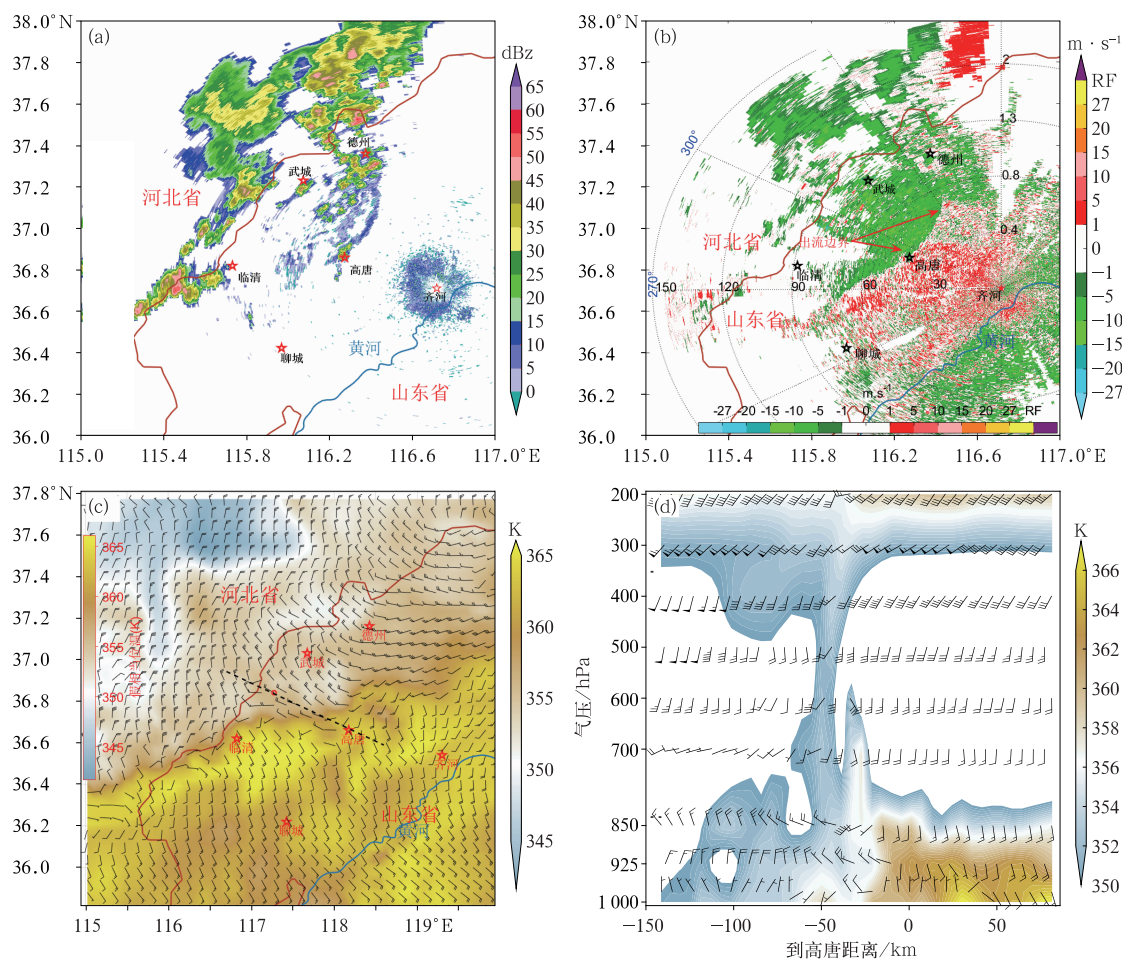


图 2 2019 年 8 月 9 日 21:01 齐河雷达(a)1.45°仰角的水平反射率因子 Z_H , (b)0.48°仰角的径向速度 V , 21:00(c)925 hPa 的 θ_{se} (填色)及风场(风羽), (d)沿图 2c 虚线剖面的 θ_{se} (填色)及风廓线(风羽)

Fig. 2 (a) Products of Z_H at elevation of 1.45° and (b) radial velocity at elevation of 0.48° from Qihe Radar at 21:01 BT, (c) θ_{se} (colored) and wind (barb) at 925 hPa and (d) θ_{se} (colored) and wind (barb) profile along the dashed line in Fig. 2c at 21:00 BT 9 August 2019

3.1.2 低空暖湿气流的加强及准线形对流回波带

在窄带回波向东南移动的过程中,其后部的母体(切变线回波)逐渐减弱,出现了大片无回波区。9日22:40后,窄带回波消失。在窄带回波消失的位置及其东南不断有新的对流单体出现,并组成一个松散的准线形对流回波带,转而向西北方向移动。9日23:31(图3a),准线形对流回波带自东南向西北移过高唐,影响时间约为15 min,降水量为5.4 mm。到10日00:00(图3b),半个小时内回波带向西北移动了15 km左右,且有明显发展;回波带由多个对流单体组成,其中最强对流单体的 Z_H 达50 dBz,明显强于出流边界触发的对流单体;双偏振 Z_{DR} 大于

0.5 dB,部分区域大于3 dB,CC大于0.97,说明雨滴平均尺度较大。在回波带向西北移动的过程中,聊城周围对流逐渐活跃,回波明显增强。

10日00:00北京3 km区域模式925 hPa风场上(图3c), α 中低空切变线位置稳定少动,仍然维持在高唐—临清一线,但切变线以南转为一致的东南风,以北转为东北风和北风。沿图3c中虚线制作 θ_{se} 和风距离-高度廓线(图3d),比较图2d发现:切变线东南部,低层东南风明显增强;高唐西北约30 km范围内,850 hPa的 θ_{se} 明显高于低层,说明切变线西北,低层形成了一个层结稳定的冷垫。

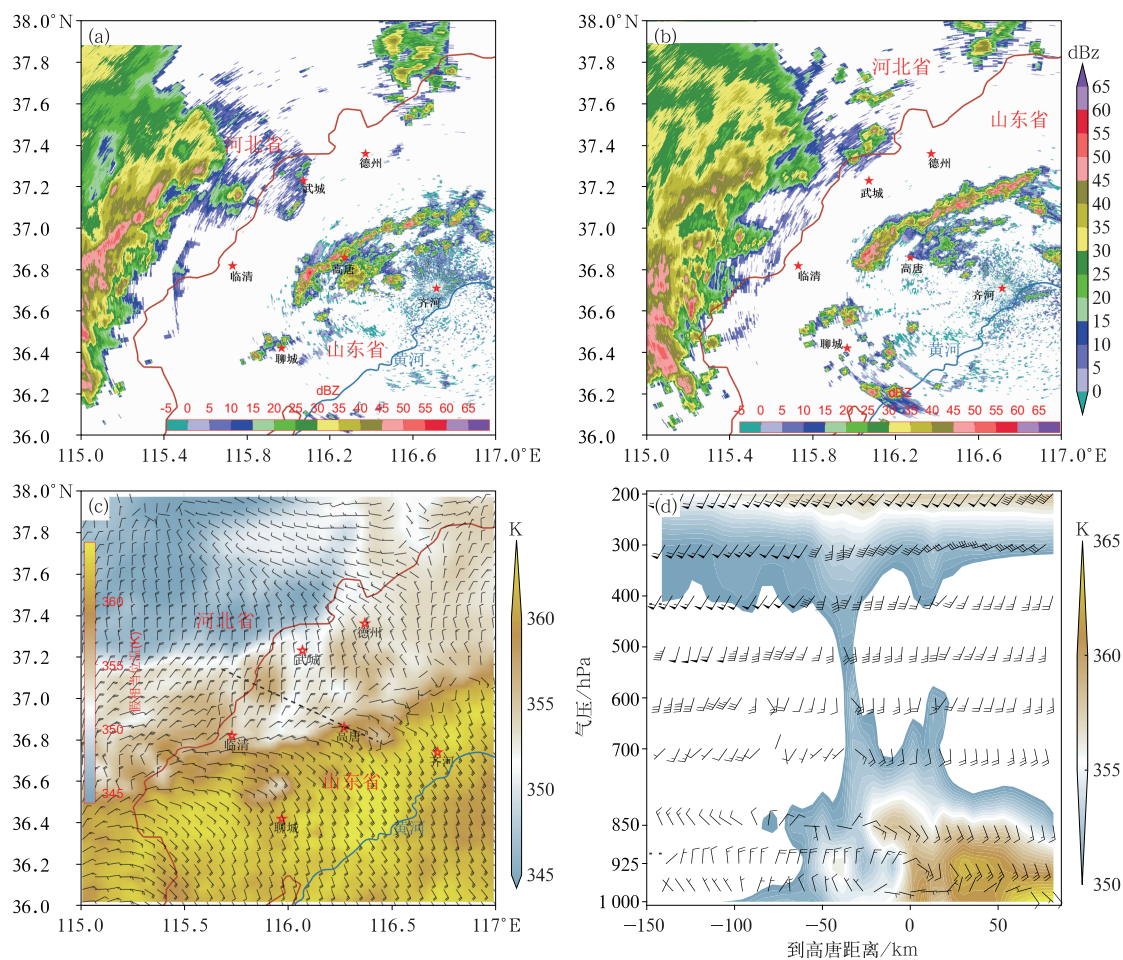


图3 2019年8月(a)9日23:31、(b)10日00:00齐河雷达 0.48° 仰角的 Z_H ;10日00:00(c)925 hPa的 θ_{se} (填色)及风场(风羽),(d)沿图2c虚线剖面的 θ_{se} 廓线(填色)及风廓线(风羽)

Fig. 3 Products of Z_H at elevation of 0.48° from Qihe Radar at (a) 23:31 BT 9 and (b) 00:00 BT 10, (c) θ_{se} (colored) and wind (barb) at 925 hPa and (d) θ_{se} (colored) and wind (barb) profile along the dashed line in Fig. 3c at 00:00 BT 10 August 2019

综合图 3 的分析发现,该时段 925 hPa 切变线位置稳定少动,但准线形对流回波带向西北方向移动,说明此时环境风场不再是偏西风主导,而是由副高与台风外围的东南气流主导,加强的东南气流输送暖湿空气在低空切变线附近不断堆积,并沿着 850 hPa 以下的冷垫向西北方向爬升,冷暖空气在切变线附近交汇触发对流,对流单体沿切变线排列形成准线形对流回波带。

3.2 第二时段的天气形势及雷达双偏振回波特征

3.2.1 天气形势及红外云图特征

高唐局地大暴雨第二时段开始于 10 日 02 时左右,02 时模式探空得出,高唐湿对流有效位能为 $465.7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,抬升指数 LI 达 -3.4°C ,湿层厚度增加到 12484 m,K 指数为 43.1°C 。环境有利于强降水的发生。

图 4a 是 02 时 FY-4A 红外云图叠加 ECWFM 再分析资料的 500 hPa 高度场和风场。图中西风槽南段缓慢移动到 112°E ,高唐处于 500 hPa 槽前西南气流中。此时,台风刚刚登陆,中心位置 (28.22°N , 121.50°E) 距离高唐 1040 km。与图 1a 对比,西风槽云系前沿对流发展旺盛,分布着多个处于不同发展阶段的对流云团,在槽前西南气流的引导下,对流云团依次向东北方向移动影响高唐。

同时次的 925 hPa (图 4b) 上,切变线仍位于高唐附近,切变线以南仍为暖湿的东南气流,但切变线

以北的东北风明显减弱,代之以北风与西北风,说明 500 hPa 西风槽缓慢移动到 112°E 时,冷空气在低空逐渐补充到切变线的北侧。加强的冷暖空气在切变线附近激烈交汇,形成两个 β 中尺度的气旋性辐合中心 (图 4b), β 中尺度辐合产生的上升运动在 500 hPa 槽前正涡度平流的作用下进一步加强。辐合中心与垂直上升速度中心相重合,高唐附近上升速度中心大于 $1.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

低空切变线及其上的辐合上升中心与强对流云带的位置相对应,对流云团在高空槽前西南气流的引导下,沿切变线向东北方向逐次移过高唐,产生“列车效应”,导致高唐附近发生较强降水。

3.2.2 双偏振多普勒雷达回波特征

降水过程进入第二时段后,10 日 02:17 齐河雷达 1.43° 仰角的雷达反射率 (图 5a) 显示,在高唐至聊城间相应中尺度切变线 (图 4b) 的位置上,有一条强回波带,其与西部的西风槽降水回波带间存在明显的无回波间隙。西风槽降水回波带结构均匀, Z_H 小于 45 dBz; 切变线回波带 Z_H 一般大于 45 dBz,其中分布着几个 Z_H 超过 55 dBz 的 γ 中尺度强回波块,高唐在这个回波带的东北端。此外,临清附近,西风槽降水回波与切变线降水回波相连处,回波较强。分析同时次齐河雷达 1.49° 仰角的径向速度 (图 5b),高唐、聊城等地的强回波区多与径向速度辐合区相联系,该结果也与图 4b 的数值预报模式产品相吻合。切变线降水回波带上 Z_{DR} 较大 (图 5c),最大值

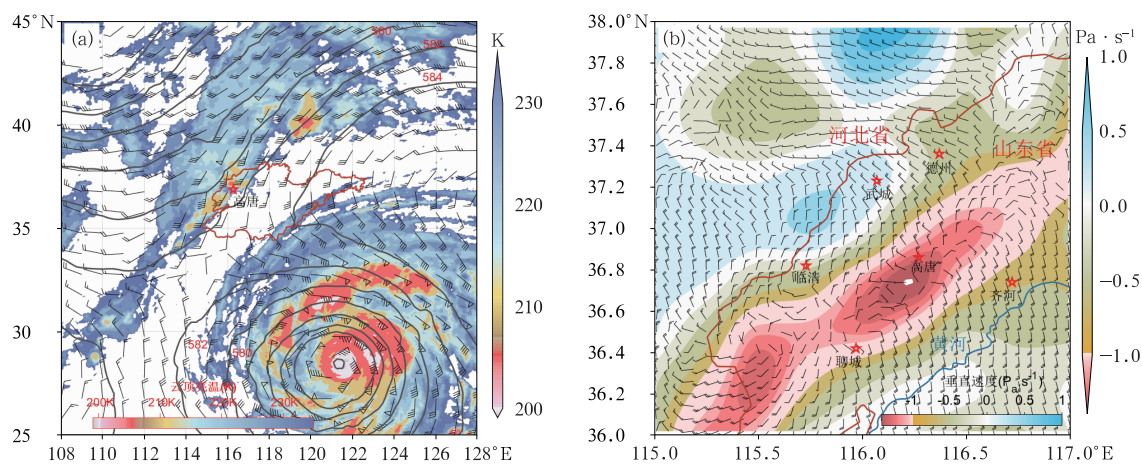


图 4 2019 年 8 月 10 日 02 时 (a) FY-4A 红外云图 (填色) 和 500 hPa 高度场 (实线, 单位: dagpm)

及风场 (风羽), (b) 925 hPa 风场 (风羽) 和垂直速度 (填色)

Fig. 4 (a) FY-4A infrared cloud image (colored), height (solid line, unit: dagpm) and wind (barb) at 500 hPa, (b) wind (barb) and vertical velocity (colored) at 925 hPa at 02:00 BT 10 August 2019

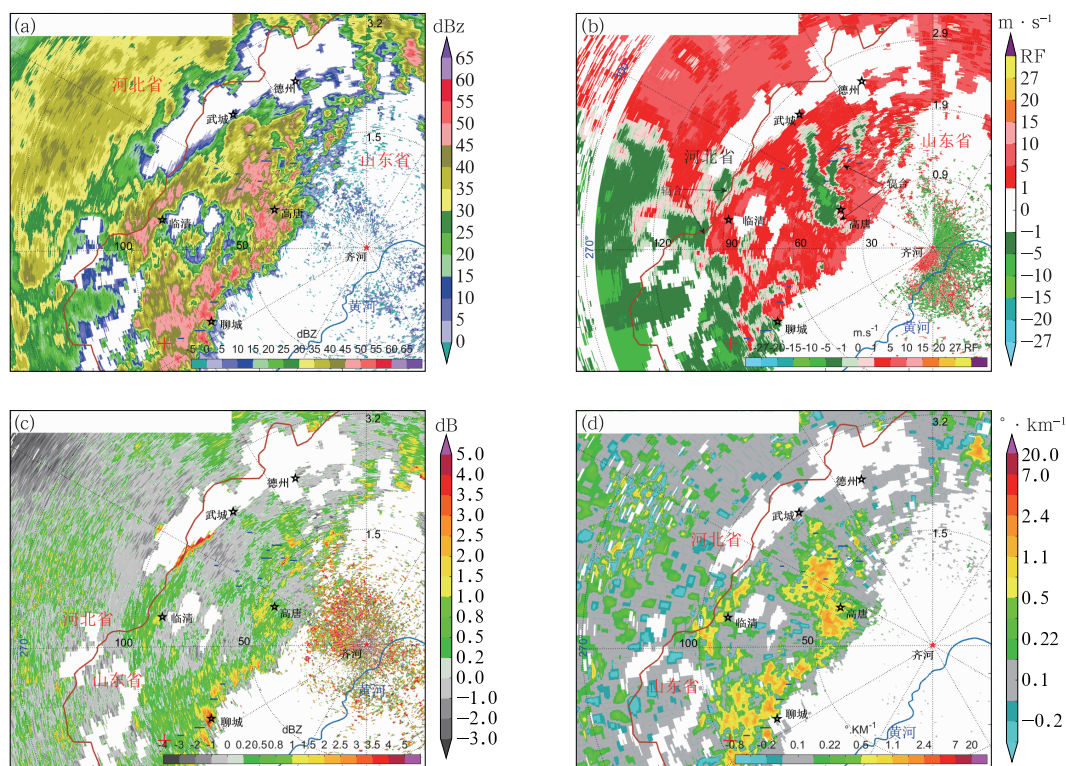


图5 2019年8月10日02:17齐河雷达1.43°仰角的(a)雷达反射率因子 Z_H ,
(c)差分反射率因子 Z_{DR} , (d)差分比相率 K_{DP} 及(b)1.49°仰角的径向速度 V
(“+”为正地闪,“-”为负地闪,符号大小为闪电相对强度)

Fig. 5 Products of (a) Z_H , (c) Z_{DR} , (d) K_{DP} at 1.43° elevation
and (b) V at 1.49° elevation from Qihe Radar at 02:17 BT 10 August 2019
(“+” indicates a positive ground flash, “-” indicates a negative ground flash,
the symbol size indicates the relative strength of lightning)

大于3.5 dB,说明雨滴平均直径较大;西风槽降水回波区域 Z_{DR} 较小,最大值小于1.5 dB,说明雨滴平均直径较小。切变线降水回波带上 K_{DP} 值普遍大于 $0.5^\circ \cdot \text{km}^{-1}$ (图5d),最大值大于 $2.4^\circ \cdot \text{km}^{-1}$,说明有丰富的液态水;西风槽降水回波 K_{DP} 值普遍小于 $0.2^\circ \cdot \text{km}^{-1}$,液态水含量明显低于切变线降水强回波区。

综合第二时段初期的雷达观测发现,强回波带与低空切变线位置一致,强降水主要发生在低空切变线暖区一侧,由于回波强度大、雨滴平均尺度大、液态水含量丰富,降水强度也大。强降水开始时,切变线回波带与后部的西风槽降水回波带间存在明显的无回波间隙,在切变线回波与西风槽回波结合处,回波较强,降水强度明显增大;到10日04时左右,切变线回波与西风槽回波基本融合在一起。

3.3 局地大暴雨过程中的微物理特征

双偏振多普勒雷达 Z_{DR} 表示一个探测空间体

(距离库)平均的粒子形状, Z_{DR} 值与雨滴平均大小密切相关; K_{DP} 表示一个探测空间体平均的液态水含量,与降水率成比例; CC 反映探测空间体中降水粒子相态相似度。国内外气象工作者综合利用雷达双偏振参量对水凝物相态进行分类,成功研究了强对流天气的微物理机制和微物理过程(Carey and Rutledge, 2000)。地面降水是天气系统热力、动力、水汽等相互作用的综合结果,其中包含云降水微物理过程的复杂信息。对照分析局地暴雨过程中高唐站雷达双偏振参量垂直廓线、雨滴谱和分钟降水量时间序列,有助于加深对本次暴雨微物理过程的认识,更好地理解天气过程的演变特征。

3.3.1 高唐站局地大暴雨第二时段雷达双偏振参量的廓线特征

高唐局地大暴雨第二时段从10日02时开始,选取10日01:25—08:00齐河双偏振多普勒雷达的观测资料,读取高唐上空的各偏振参量,分别制作

Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 和 CC 的高度-时间廓线。

在第二时段内,红外云图(图 4a)上先后有 3 个强云团移过高唐,相应地在反射率因子廓线(图 6a)中出现了 3 个反射率因子大值区;04:00 之前,廓线表现出明显的对流特征,强度 15 dBz 的回波顶较高,最大高度大于 11 km;04:00 之后,强度 15 dBz 的回波顶高度明显变低,基本小于 10 km。总体看回波质心较低,大于 30 dBz 的回波分布在 8 km 以下,大于 45 dBz 的强回波均在干球 0℃ 层以下,高度不超过 6 km。说明过程中降水强度较大,但对流不强,所以高唐附近降水较强但没有闪电(图 5a)。

高唐 Z_{DR} 廓线(图 6b)总体上表现出分层结构,干球 0℃ 层以上降水粒子以冰相为主,可能多为冰晶聚集体, Z_{DR} 较小;干球 0℃ 层以下冰晶融化,降水粒子以雨滴为主, Z_{DR} 变大。在对应图 6a 的强回波区域内, Z_{DR} 较大,说明雨滴平均尺度大,大雨滴较多。

K_{DP} 廓线(图 6c)中,03:10—07:00,高度 6~10 km 持续存在一个 K_{DP} 较大层次。从 3.2.2 节的分析来看,这一较大 K_{DP} 层的出现与西风槽回波和切变线回波的合并有关。考虑到该层次所在的环境温度,这里有较丰富的过冷却水和冻滴。在对应图

6a 的强回波区域内, K_{DP} 较大,说明降水强度较大。

03:48 后, CC 廓线(图 6d)在 8 km 高度附近出现了平顶结构,该位置附近存在很大的 CC 垂直梯度;在此之前,廓线顶存在比较大的起伏,表现出较强的对流特征。

综合图 6 分析发现,高唐局地大暴雨第二时段雷达双偏振参量廓线的分布与该阶段强降水特征相吻合。从时间变化上看,04:00 前,西风槽降水回波和切变线降水回波还没有完全结合到一起,由于中尺度切变线上较强的上升运动,对流发展旺盛,回波顶高存在很大的起伏,各参量廓线更多地表现为对流降水特征;04:00 后,西风槽降水回波和切变线降水回波结合到一起,回波高度明显降低,回波顶变平,起伏不大,更多表现为稳定的混合性降水特征。西风槽降水回波和切变线降水回波结合到一起后,高唐上空高度 6~10 km 持续存在一个 K_{DP} 较大层次,结合该高度层次所处的温度,应当有较丰富的过冷却水存在,非常有利于强降水的产生。一是过冷却水滴在低于 -20℃ 的环境下能够迅速冻结,较大的冻滴破碎,促进了冰晶繁生,增大了降水质点的数浓度(Carey and Rutledge, 2000);二是环境温度在 -12℃ 左右,冰面饱和水汽压和水面饱和水汽压差

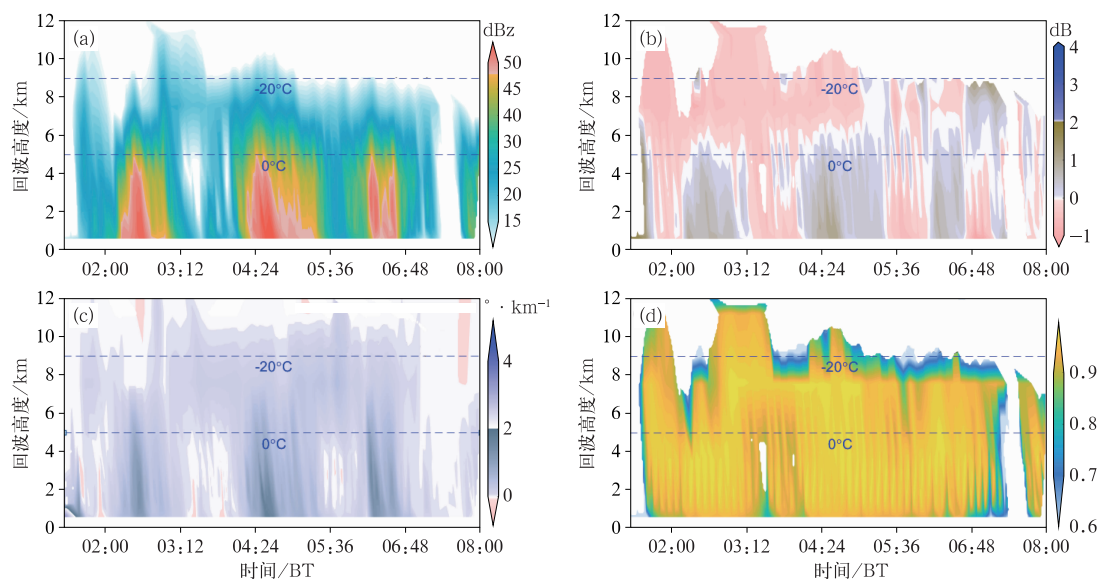


图 6 2019 年 8 月 10 日 02—08 时高唐站多普勒雷达回波参量的时间变化
(a) 反射率因子 Z_H , (b) 差分反射率因子 Z_{DR} , (c) 差分相移率 K_{DP} , (d) 相关系数 CC

Fig. 6 Time variation of echo parameters of Doppler Radar at Gaotang Station

from 02:00 BT to 08:00 BT 10 August 2019

(a) Z_H , (b) Z_{DR} , (c) K_{DP} , (d) CC

值较大,冰-水转化效率较高,丰富的过冷却水存在,特别适合冰晶效应的进行,有利于冰晶快速增长。从CC廓线(图6d)看,在 -20°C 层附近,由于冰晶、过冷却水、霰、雪等多种粒子共存,CC小于0.6;向下不到1 km的距离CC快速增加到0.9以上,说明冰晶效应迅速,至8 km高度处,冰晶数密度已快速占据主导地位了。

3.3.2 局地大暴雨过程中高唐分钟雨滴谱和降水量时间序列对照分析

局地暴雨开始后的第一时段,高唐主要受出流边界触发的对流和准线形对流影响,降水尺度小(图7a),持续时间短(约为14.4 min);准线形对流降水中直径0.5 mm左右的雨滴比例明显少于出流边界触发的降水,这可能是由于准线形对流带在向西北移动的过程中,其下已经是冷空气垫,底层的蒸发改变了降水的雨滴尺度分布,使小雨滴(直径 ≤ 1 mm)比例明显减小。

从10日02:00开始,第二时段的雨滴谱分布比较连续,明显不同于第一时段;较连续的雨滴谱分布中存在3个雨滴相对集中的区间,区间尺度约为

75 min,每个区间中又包含多个时间尺度更小的结构,反映出第二时间段降水中各种中小尺度天气系统的影响;02:15—03:25,西风槽降水回波和切变线降水回波还没有结合到一起,雨滴谱分布中小结构的时间尺度与前期小尺度对流相近(14.4 min);04:25后,西风槽降水回波和切变线降水回波结合到一起,小结构的时间尺度明显变大,达到30 min。

整个局地大暴雨期间,雨滴尺度谱存在明显的双峰结构,雨滴直径1.2 mm处峰的位置比较清晰,另一个峰在0.3~0.5 mm的小雨滴端。

由于较强降水主要与直径 >1 mm的雨滴贡献有关(申高航等,2020),本文以1 mm直径为界,将雨滴分为小雨滴(直径 ≤ 1 mm)和大雨滴(直径 >1 mm),分析了大小雨滴数及分钟降水量之间的关系(图7b)。从整个降水过程来看,小雨滴数明显多于大雨滴数,小雨滴数与大雨滴数的两条曲线走向吻合,峰值相对应,两序列的相关系数为0.9479,置信水平小于0.001;小雨滴数时间序列变化滞后分钟降水量时间序列2 min,大雨滴数时间序列与分钟降水量序列时间同步,大雨滴数时间序列与分钟

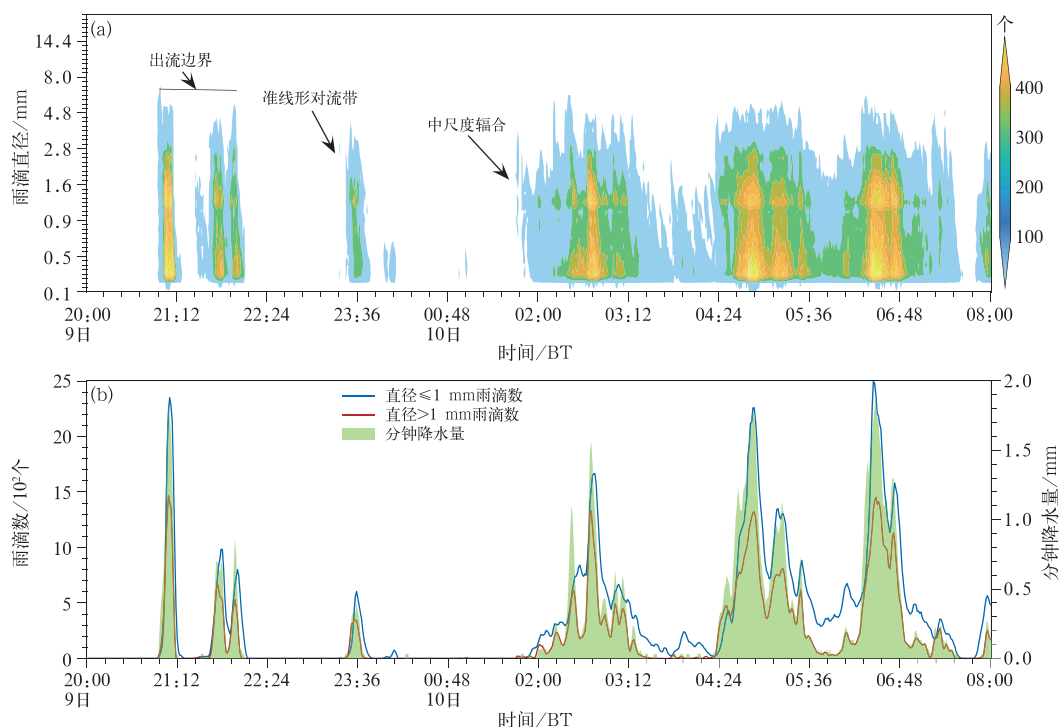


图7 2019年8月9日20:00至10日08:00高唐站(a)雨滴谱,(b)分钟降水量、大雨滴数(直径 >1 mm)、小雨滴数(直径 ≤ 1 mm)的时间变化

Fig. 7 Time variations of (a) raindrop spectrum, (b) minute precipitation, number of large ($D>1$ mm) and small ($D\leq 1$ mm) raindrops at Gaotang Station from 20:00 BT 9 to 08:00 BT 10 August 2019

降水量序列表现出非常强的相关性,两序列的相关系数达到 0.9867,置信水平小于 0.001。小雨滴数曲线较好地包络了大雨滴数和分钟降水量的时间变化,但大雨滴数曲线可以更精细地表述分钟降水量的变化。

分析图 7b 可以发现,西风槽降水回波和切变线降水回波结合到一起(10 日 03:25 前),小雨滴数与大雨滴数的两条曲线前沿贴合,大雨滴数峰的位置比小雨滴超前;这种分布反映出该阶段降水更多地表现出对流特征。对流开始时,云中上升气流较强,下落的雨滴较大,随着降水拖曳产生的下沉气流增大和扩展,上升气流减弱,有更多的小雨滴下落。西风槽降水回波和切变线降水回波结合到一起(10 日 04:00 后),小雨滴数与大雨滴数的两条曲线基本同步,雨滴数(特别是大雨滴数)明显增多,降水强度变大,强降水峰变宽(30 min),累计降水量明显变大。

4 结 论

高唐局地大暴雨发生在西风槽和副高与台风利奇马外围风场相互作用的环流背景下,高时空分辨率的多源资料为更好地分析本次过程提供了有利条件。本文以 FY-4A 卫星云图和 ECWMT 数值预报为参考,综合利用双偏振多普勒雷达、中国雷电定位数据,区域站分钟降水量、雨滴谱等资料,参考北京 3 km 高分辨率区域模式产品,分析了高唐局地大暴雨的成因、中小尺度系统的活动及降水的微物理特征,加深了对本次鲁西局地大暴雨过程许多细节的了解,主要结论如下:

(1) 局地大暴雨前,西风槽云带出现明显的断裂,断裂处底层有冷空气扩散到槽前,并与槽前暖湿气流形成了一条 α 中尺度的低空切变线。局地大暴雨前期,由于切变线触发的强对流下沉气流流出与底层扩散的冷空气叠加,出流边界回波带很快远离母体,使切变线强回波带置于底层冷空气垫上,切变线强回波很快减弱。出流边界触发的对流降水及暖湿气流向西北推进形成的准线形对流降水,虽然降水强度大,但持续时间短,累计雨量较小,且由于底层性质的不同,其降水的雨滴谱分布存在明显差异。

(2) 低空切变线长时间维持,使暖湿空气不断积聚,在切变线暖区一侧形成了 θ_{se} 大值区。强降水开始时,切变线上垂直上升运动明显增强,925 hPa 最大上升速度大于 $1.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$,形成两个 β 中尺度的气旋性辐合中心。辐合中心在 500 hPa 槽前正涡

度平流的作用下进一步加强。触发了环境不稳定能量的释放和深厚湿对流的产生。对流云团在高空槽前西南气流的引导下,沿切变线向东北方向逐次移过高唐,产生“列车效应”,导致高唐附近的较强降水。

(3) 西风槽和切变线回波结合到一起后,在高唐上空 6~10 km 持续维持较丰富的过冷却水,促进了冰晶的繁生和降水质点的增长,在对应时间段内雨滴数(特别是大雨滴数)明显增多,降水强度变大,强降水峰变宽,地面累计雨量明显变大。

(4) 鲁西局地大暴雨过程中,地面雨滴尺度谱存在明显的双峰结构,雨滴直径 1.2 mm 处峰的位置比较清晰,另一个峰在 0.3~0.5 mm 的小雨滴端;统计表明,大雨滴数序列与分钟降水量序时间同步,相关系数达到 0.9867;小雨滴数时间序列滞后分钟降水量时间序列 2 min。

致谢:感谢山东省人工影响天气办公室龚佃利正研级高工对本文的指导。

参考文献

- 陈久康,丁治英,2000. 高低空急流与台风环流耦合下的中尺度暴雨系统[J]. 应用气象学报,11(3):271-281. Chen J K, Ding Z Y, 2000. Mesoscale rainstorm system under the coupling of low-and upper-level jets and typhoon circulation[J]. Quart J Appl Meteor, 11(3):271-281(in Chinese).
- 陈磊,陈宝君,杨军,等,2013. 2009—2010 年梅雨锋暴雨雨滴谱特征[J]. 大气科学学报,36(4):481-488. Chen L, Chen B J, Yang J, et al, 2013. Characteristics of raindrop size distribution of rainstorm on Meiyu front during 2009—2010[J]. Trans Atmos Sci, 36(4):481-488(in Chinese).
- 陈联寿,丁一汇,1979. 西太平洋台风概论[M]. 北京:科学出版社:491. Chen L S, Ding Y H, 1979. An Introduction to Western Pacific Typhoons[M]. Beijing: Science Press:491(in Chinese).
- 丛春华,陈联寿,雷小途,等,2012. 热带气旋远距离暴雨的研究[J]. 气象学报,70(4):717-727. Cong C H, Chen L S, Lei X T, et al, 2012. A study on the mechanism of the tropical cyclone remote precipitation[J]. Acta Meteor Sin, 70(4):717-727(in Chinese).
- 范元月,罗剑琴,张家国,等,2020. 宜昌极端短时强降雨中尺度对流系统特征分析[J]. 气象,46(6):776-791. Fan Y Y, Luo J Q, Zhang J G, et al, 2020. Characteristics analysis of mesoscale convective system causing the extreme flash rain in Yichang[J]. Meteor Mon, 46(6):776-791(in Chinese).
- 冯晋勤,张深寿,吴陈锋,等,2018. 双偏振雷达产品在福建强对流天气过程中的应用分析[J]. 气象,44(12):1565-1574. Feng J Q, Zhang S S, Wu C F, et al, 2018. Application of dual polarization weather radar products to severe convective weather in Fujian[J]. Meteor Mon, 44(12):1565-1574(in Chinese).
- 李英,陈联寿,雷小途,2006. 高空槽对 9711 号台风变性加强影响的数值研究[J]. 气象学报,64(5):552-563. Li Y, Chen L S, Lei X T, 2006. Numerical study on impacts of upper-level westerly

- trough on the extratropical transition process of Typhoon Winnie(1997)[J]. *Acta Meteor Sin*, 64(5):552-563(in Chinese).
- 梁军,陈联寿,张胜军,等,2008.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*, 32(5):1107-1118. Liang J, Chen L S, Zhang S J, et al, 2008. Numerical study of impact of cold air on rainfall of tropical cyclone over Liaodong Peninsula[J]. *Chin J Atmos Sci*, 32(5):1107-1118(in Chinese).
- 林文,张深寿,罗昌荣,等,2020.不同强度强对流云系S波段双偏振雷达观测分析[J]. *气象*, 46(1):63-72. Lin W, Zhang S S, Luo C R, et al, 2020. Observational analysis of different intensity severe convective clouds by S-band dual-polarization radar[J]. *Meteor Mon*, 46(1):63-72(in Chinese).
- 毛冬艳,曹艳察,朱文剑,等,2018.西南地区短时强降水的气候特征分析[J]. *气象*, 44(8):1042-1050. Mao D Y, Cao Y C, Zhu W J, et al, 2018. Climatic characteristics of short-time severe precipitation in Southwest China[J]. *Meteor Mon*, 44(8):1042-1050(in Chinese).
- 梅垚,胡志群,黄兴友,等,2018.青藏高原对流云的偏振雷达观测研究[J]. *气象学报*, 76(6):1014-1028. Mei Y, Hu Z Q, Huang X Y, et al, 2018. A study of convective clouds in the Tibetan Plateau based on dual polarimetric radar observations[J]. *Acta Meteor Sin*, 76(6):1014-1028(in Chinese).
- 钮学新,杜惠良,刘建勇,2005.0216号台风降水及其影响降水机制的数值模拟试验[J]. *气象学报*, 63(1):57-68. Niu X X, Du H L, Liu J Y, 2005. The numerical simulation of rainfall and precipitation mechanism associated with Typhoons Sinlaku(0216)[J]. *Acta Meteor Sin*, 63(1):57-68(in Chinese).
- 申高航,高安春,李君,2020.台风“利奇马”不同强降水中心的雨滴谱特征分析[J]. *气象科学*, 40(1):106-113. Shen G H, Gao A C, Li J, 2020. Analysis of the characteristics of raindrop spectrum in different heavy precipitation centers caused by Typhoon “Lekima”[J]. *J Meteor Sci*, 40(1):106-113(in Chinese).
- 孙力,董伟,药明,等,2015.1215号“布拉万”台风暴雨及降水非对称性分布的成因分析[J]. *气象学报*, 73(1):36-49. Sun L, Dong W, Yao M, et al, 2015. A diagnostic analysis of the causes of the torrential rain and precipitation asymmetric distribution of Typhoon Bolaven(2012)[J]. *Acta Meteor Sin*, 73(1):36-49(in Chinese).
- 孙密娜,王秀明,胡玲,等,2018.华北一次暖区暴雨雷暴触发及传播机制研究[J]. *气象*, 44(10):1255-1266. Sun M N, Wang X M, Hu L, et al, 2018. Study on initiation and propagation mechanism of a warm-sector torrential rain in North China[J]. *Meteor Mon*, 44(10):1255-1266(in Chinese).
- 王珏,张家国,吴涛,等,2019.湖北省极端短时强降水MCS类型及特征分析[J]. *气象*, 45(7):931-944. Wang J, Zhang J G, Wu T, et al, 2019. MCS classification and characteristic analyses of extreme short-time severe rainfall in Hubei Province[J]. *Meteor Mon*, 45(7):931-944(in Chinese).
- 徐祥德,陈联寿,解以扬,等,1998.环境场大尺度锋面系统与变性台风结构特征及其暴雨的形成[J]. *大气科学*, 22(5):744-752. Xu X D, Chen L S, Xie Y Y, et al, 1998. Typhoon transition and its impact on heavy rain[J]. *Sci Atmos Sin*, 22(5):744-752(in Chinese).
- 杨晓霞,陈联寿,刘诗军,等,2008.山东省远距热带气旋暴雨研究[J]. *气象学报*, 66(2):236-250. Yang X X, Chen L S, Liu S J, et al, 2008. A study of the far distance tropical cyclone torrential rainfalls in Shandong Province[J]. *Acta Meteor Sin*, 66(2):236-250(in Chinese).
- 杨忠林,赵坤,徐坤,等,2019.江淮梅雨期极端对流微物理特征的双偏振雷达观测研究[J]. *气象学报*, 77(1):58-72. Yang Z L, Zhao K, Xu K, et al, 2019. Microphysical characteristics of extreme convective precipitation over the Yangtze-Huaihe River Basin during the Meiyu season based on polarimetric radar data[J]. *Acta Meteor Sin*, 77(1):58-72(in Chinese).
- 俞小鼎,周小刚,王秀明,2012.雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. *气象学报*, 70(3):311-337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M, 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection[J]. *Acta Meteor Sin*, 70(3):311-337(in Chinese).
- 赵思雄,孙建华,2013.近年来灾害天气机理和预测研究的进展[J]. *大气科学*, 37(2):297-312. Zhao S X, Sun J H, 2013. Study on mechanism and prediction of disastrous weathers during recent years[J]. *Chin J Atmos Sci*, 37(2):297-312(in Chinese).
- 赵嫻婷,王晓芳,王珏,等,2020.2016年7月18—20日湖北省特大暴雨过程的中尺度特征分析[J]. *气象*, 46(4):490-502. Zhao X T, Wang X F, Wang J, et al, 2020. Analysis of mesoscale characteristics of torrential rainfall in Hubei Province during 18—20 July 2016[J]. *Meteor Mon*, 46(4):490-502(in Chinese).
- 周黎明,王俊,龚佃利,等,2014.山东三类降水云雨滴谱分布特征的观测研究[J]. *大气科学学报*, 37(2):216-222. Zhou L M, Wang J, Gong D L, et al, 2014. A study on the distribution of raindrop size in three types of precipitation in Shandong Province[J]. *Trans Atmos Sci*, 37(2):216-222(in Chinese).
- 朱红芳,杨祖祥,王东勇,等,2019.进入内陆的两个台风降水特征对比分析[J]. *气象学报*, 77(2):268-281. Zhu H F, Yang Z X, Wang D Y, et al, 2019. Comparative analysis of the rainstorms caused by two typhoons in inland China[J]. *Acta Meteor Sin*, 77(2):268-281(in Chinese).
- 朱洪岩,陈联寿,徐祥德,2000.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*, 24(5):669-675. Zhu H Y, Chen L S, Xu X D, 2000. A numerical study of the interactions between typhoon and mid-latitude circulation and its rainfall characteristics[J]. *Chin J Atmos Sci*, 24(5):669-675(in Chinese).
- Carey L D, Rutledge S A, 2000. The relationship between precipitation and lightning in tropical island convection: a C-band polarimetric radar study[J]. *Mon Wea Rev*, 128(8):2687-2710.

(本文责编:王婷波)