

张芹,王恬茹,张秀珍,等. 一次副热带高压边缘切变线暖区暴雨特征分析[J].海洋气象学报,2020,40(3):102-110.
ZHANG Qin, WANG Tianru, ZHANG Xiuzhen, et al. Features of a warm-sector shear line rainstorm on the edge of subtropical high [J].Journal of Marine Meteorology,2020,40(3):102-110. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.03.011. (in Chinese)

一次副热带高压边缘切变线暖区暴雨特征分析

张芹,王恬茹,张秀珍,袁静,王善芳
(潍坊市气象局,山东 潍坊 261011)

摘要: 利用常规气象观测资料、NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料以及卫星和雷达资料,对2018年6月25—26日副热带高压(简称“副高”)边缘切变线暖区暴雨的大尺度环流背景、雨带的移动与传播、中尺度特征以及温湿特征等方面进行分析。结果表明:此次暖区暴雨过程是在副高稳定维持,500 hPa西风槽东移,并有低空急流配合,低空暖切变线触发不稳定能量释放的有利背景下产生的;暴雨落区位于700 hPa暖切变线和925 hPa暖切变线之间;暴雨期间,小尺度对流单体在鲁南地区触发,云顶亮温 $t_{bb} \leq -60^\circ\text{C}$,并沿引导气流向东北方向移动;强降水区域有多个强回波中心持续影响,有明显的“列车效应”,强回波持续时间长;红外云图能很好地反映天气系统的发生、发展和消亡,而水汽图像上色调暗区不明显,冷空气活动较弱;低层暖湿气流强烈发展,是造成此次暖区暴雨过程层结不稳定的主要原因;暴雨的水汽源地是孟加拉湾和南海,且强降水期间,随着西南暖湿气流的增强,水汽通量有一个跃增现象;云顶 $t_{bb} \leq -70^\circ\text{C}$ 覆盖的区域、水汽通量散度负值中心可以作为暖区暴雨落区预报的参考点。

关键词: 暖区暴雨;副热带高压;暖切变线;云图

中图分类号: P458 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2020)03-0102-09

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.03.011

Features of a warm-sector shear line rainstorm on the edge of subtropical high

ZHANG Qin, WANG Tianru, ZHANG Xiuzhen, YUAN Jing, WANG Shanfang
(Weifang Meteorological Bureau, Weifang 261011, China)

Abstract Using conventional meteorological observation data, NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ reanalysis data, FY-2G cloud imagery, and radar data, the large-scale circulation background, the movement and propagation of the rainband, mesoscale characteristics, temperature, and humidity features of the warm-sector shear line rainstorm on the edge of subtropical high from 25 to 26 June 2018 in Shandong are analyzed. The results are shown below. 1) The warm-sector rainstorm process is generated under the favorable background of the stable and stationary subtropical high, the eastward movement of westerly trough at 500 hPa, the cooperation of low-level jet, and the unstable energy release triggered by low-level warm shear line. 2) The rainstorm area lies between warm shear lines at 700 hPa and 925 hPa. 3) During the rainstorm, small-scale convection cells are triggered in the south of Shandong Province and move northeastward along steering flow with the TBB at cloud top equal to or lower than 60°C . 4) Multiple strong echo centers continuously affect the strong precipitation area with obvious train-effect and long duration of strong echo.

收稿日期:2019-09-27; 修订日期:2019-11-14

基金项目:山东省气象局科研项目(2018sdqxm16);潍坊市气象局科研项目(2016wfaqxt01)

作者简介:张芹,女,硕士,高级工程师,主要从事中短期预报及气象服务工作,751202564@qq.com。

5) Infrared cloud imagery can reflect the occurrence, development, and extinction of weather systems. The dark tone area in water vapor image is not obvious and the cold air is weak. 6) The strong development of low-level warm and humid airflow is the main reason for the instability of stratification during the rainstorm process. 7) The main sources of water vapor are the Bay of Bengal and the South China Sea. During the heavy precipitation, there is a jump in water vapor flux with the enhancement of warm and humid southwest air flow. 8) The area covered by TBB at cloud top equal to or lower than 70 °C and the negative center of water vapor flux divergence can be used as reference for warm-sector rainstorm forecast.

Key words warm-sector rainstorm; subtropical high; warm shear line; cloud imagery

引言

每年因暴雨引发的洪涝灾害,都会给人民生命安全带来威胁,并给当地造成巨大经济损失,因此暴雨一直是气象研究的重中之重。暖区暴雨具有局地性和突发性强、降雨强度大的特点,同时由于暖区暴雨数值预报的可预报性差,使得暖区暴雨预报难度更大。近些年,对暖区暴雨进行了大量的研究,并取得一些有价值的结论^[1-8]。对华南暖区暴雨的天气动力学特征进行梳理和分析,将华南暖区暴雨分为边界层辐合线型、偏南风风速辐合型以及强西南急流型,并提炼出这三类暖区暴雨的天气系统配置及触发因子^[9];华南暖区暴雨主要出现在4—7月,6月最多,南风影响下的暖区暴雨发生频率较高^[10];在弱风场环境下,冷高压后部东南风或偏南风回流,经过城市热岛区域,转为偏暖气流,与山坡下滑冷气流在山前一带形成的水平风场辐合,结合山前强水平温度梯度,共同触发了暖区暴雨的初生对流单体^[11]。

以上研究成果主要是针对华南暖区暴雨的研究,而针对山东暖区暴雨的研究相对较少。近些年山东暖区暴雨过程时有发生,且数值预报对此类天气过程降雨量级的预报强度偏弱,预报难度大,因此急需对此类天气过程进行研究分析。本文利用常规气象观测资料、自动气象站资料、NCEP再分析资料、雷达资料和FY-2G资料相结合的方法,对2018年6月25—26日山东发生的一次副热带高压(简称“副高”)边缘暖区暴雨过程,从影响系统、雨带的移动与传播、中尺度特征以及温湿特征等方面进行了详细分析。

1 天气实况与环流形势

1.1 天气实况

受高空槽、副高边缘切变线和低空急流的共同

影响,2018年6月25—26日,山东省出现一次大范围暴雨天气过程。从25日00时—26日20时山东省123个国家级地面气象观测站的降水量(图1a)统计来看,全省平均降水量为73.8 mm,其中暴雨47个站,大暴雨33个站,最大降雨量为244.7 mm,出现在潍坊安丘。雨带呈东西向带状分布,暴雨点比较集中,且大暴雨点主要分布在鲁中地区。25日8个站、26日5个站的日降水量突破本站6月历史极值,其中安丘站26日的日降水量超过本站的历史极值。降雨强度之大,实属罕见。由单站小时雨量分布(图1b)来看,强降水时段主要集中在25日20时—26日04时,并伴有小时雨量超过20 mm的短时强降水,安丘连续2个时次小时降水量超过50 mm,有明显的中小尺度对流特性,而此次暴雨期间雷电活动相对较弱。

通过分析发现:此次暴雨天气过程具有降水强度大、暴雨范围广、降水效率高以及强降水持续时间长,暴雨期间雷电较弱、雷暴大风不强,对流特性主要表现为短时强降水等特点。此次过程标志着山东雨季开始。

1.2 大尺度环流背景和影响系统

由500 hPa环流形势来看,降水开始前,副高明显偏强。降水开始时,25日08时(图略),贝加尔湖东侧有一个高空冷涡,冷涡南部是宽广的高空槽区,河套附近有小浅槽,日本海附近维持高压脊,山东省位于副高北侧,副高脊线位于20°N附近,588 dagpm线的西脊点位于112°E附近,584 dagpm线横穿山东,鲁中及鲁南地区位于584 dagpm线和588 dagpm线之间,此时鲁南有多个小尺度对流单体生成并沿着西南引导气流向东北方向移动,影响鲁中地区,700 hPa从南海一直到东北地区为一致的西南风急流,而造成此时段对流单体触发的原因,主要是850 hPa低空西南急流在鲁南地区明显的风速辐合,引起鲁南地区的上升运动。

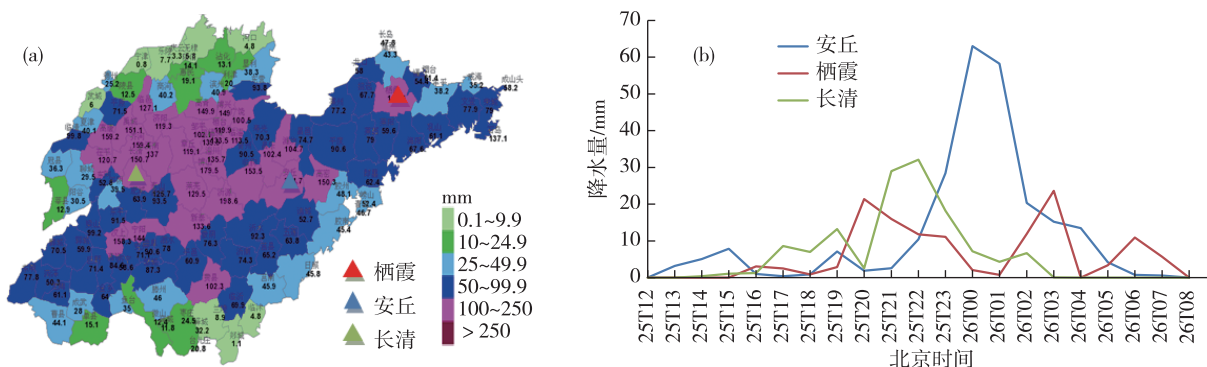


图1 2018年6月25日00时—26日20时山东省降水量(a)和安丘、栖霞以及长清逐小时降水量(b)(单位:mm)
Fig.1 Cumulative precipitation in Shandong (a) and hourly precipitation at Anqiu Station, Qixia Station, and Changqing Station (b) from 00:00 BST 25 to 20:00 BST 26 June 2018 (units: mm)

强降水时段,25日20时,500 hPa(图2a)河套附近的小浅槽东移加深,山东位于槽前,副高略有南落,受副高西北侧西南气流和槽前西南气流的共同影响,山东上空的西南气流强度明显增强,700 hPa(图2b)在渤海湾南岸形成一条东西向的暖式切变线,切变线南侧的低空西南急流进一步增强,风速超过 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,切变线附近不断有对流单体生成,850 hPa(图2c)低空急流也非常强盛,山东境内的风速辐合明显增强,925 hPa(图2d)存在一支风速超过 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的超低空西南急流,在河南东部至

鲁南地区形成一条东西向的暖式切变线,降水落区主要位于700 hPa暖式切变线与925 hPa暖式切变线之间的西南暖湿气流里。26日08时(图略),500 hPa西风槽东移,山东转为槽后西北气流影响,低层冷空气从鲁西北开始进入山东,随着冷空气的东移,雨带也随之向东南方向推进,此时段除鲁东南和半岛地区有降水外,其他地区降水结束。

由以上分析发现,造成此次暴雨过程的影响系统主要有副高、500 hPa西风槽、低空暖切变线和低空急流。其中低空和超低空急流向暴雨区输送水

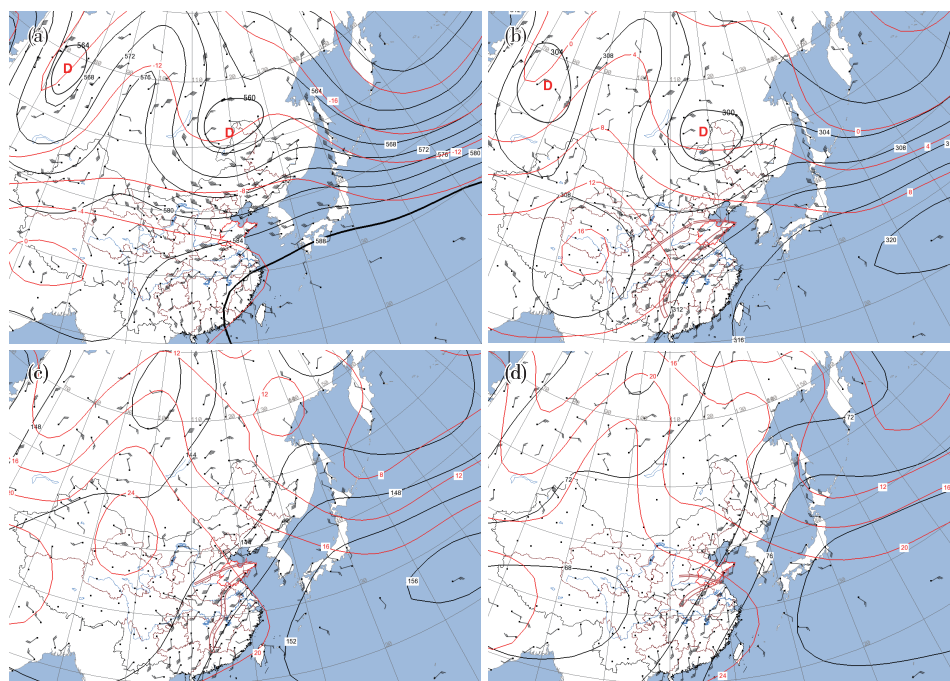


图2 2018年6月25日20时高度场(黑色实线,单位:dagpm)、温度场(红色实线,单位:℃)和风场(风矢,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) (a. 500 hPa, b. 700 hPa, c. 850 hPa, d. 925 hPa;棕色箭头线:风速 $v \geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;棕色双实线:切变线)
Fig.2 Geopotential height (black solid line, units: dagpm), temperature (red solid line, units: $^{\circ}\text{C}$), and wind field (wind barb, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 20:00 BST 25 June 2018 (a. 500 hPa, b. 700 hPa, c. 850 hPa, d. 925 hPa; brown arrow line for wind speed equal to or higher than $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; brown double solid line for shear line)

汽和不稳定能量,为暴雨的产生提供充足的水汽条件;暖式切变线上的辐合上升运动触发不稳定能量的释放,为暴雨的产生提供动力抬升条件。暴雨落区位于700 hPa 暖式切变线以南,925 hPa 暖切变线以北的西南暖湿气流里。地面上,山东一直处于东北—西南向的低压带中,冷空气活动较弱,属于一次典型暖区暴雨过程,同时也是2018年山东雨季的首场大范围暴雨。

1.3 雨带的移动与传播

对雷达反射率因子的发展演变进行分析,25日03:42(图略)在鲁西南有多个小尺度对流单体,并沿着高层西南气流向东北方向快速移动,05:00(图3a)对流单体在向东北方向移动的过程中合并加强,之后在此对流云团移动方向的前方,不断有新的对流单体产生,并与原单体合并加强,移动过程中影响泰安、莱芜以及临沂等地,08:00(图3b)之后对流云团开始减弱,在菏泽、济宁以及枣庄等地又有新的小尺度对流单体产生,10:00(图略)新产生的对流单体在向东北方向快速移动的过程中,连接在一起,形成一条西北—东南向的带状回波,12:00(图3c)带状回波影响滨州、淄博至日照一带,造成这些地区此时段的强降水,13:00(图3d)鲁南地区

又有多个小尺度对流单体的触发,强度均在55 dBZ以上,同时在鲁西聊城境内也有一个小尺度对流单体形成,15:00(图3e)位于德州、济南和淄博地区的对流回波进一步发展,与前一波影响鲁中东部及半岛地区的对流回波有合并发展的趋势,且回波的位置与850 hPa 暖切变线的位置吻合度较高,与此同时鲁南地区又出现多个小尺度对流单体,并有序排列成四条南北向的中尺度雨带回波,造成此区域的短时强降水,17:00(图3f)850 hPa 暖切变附近的回波,东移过程中发展加强,形成一条东西向带状回波,而位于南侧的四条中尺度雨带回波,合并加强成团状,此团状回波与北侧的带状回波连接在一起,一直到20:00,回波带在此地长时间维持,带状回波上不断有强的对流单体向东北偏东方向移动,产生“列车效应”,带状回波的北界与700 hPa暖切变线的位置相吻合,降水落区位于此暖切变线附近及其南侧,在菏泽、枣庄以及济宁上空仍不断有新的小尺度对流单体形成,触发位置与低空925 hPa暖切变位置吻合度比较高,23:00(图3g)回波带上的强回波中心位于潍坊—淄博—莱芜一线,强回波中心在此区域维持了近5 h,造成持续性强降水,26日03:00(图3h),回波带向东南方向移动,影响鲁

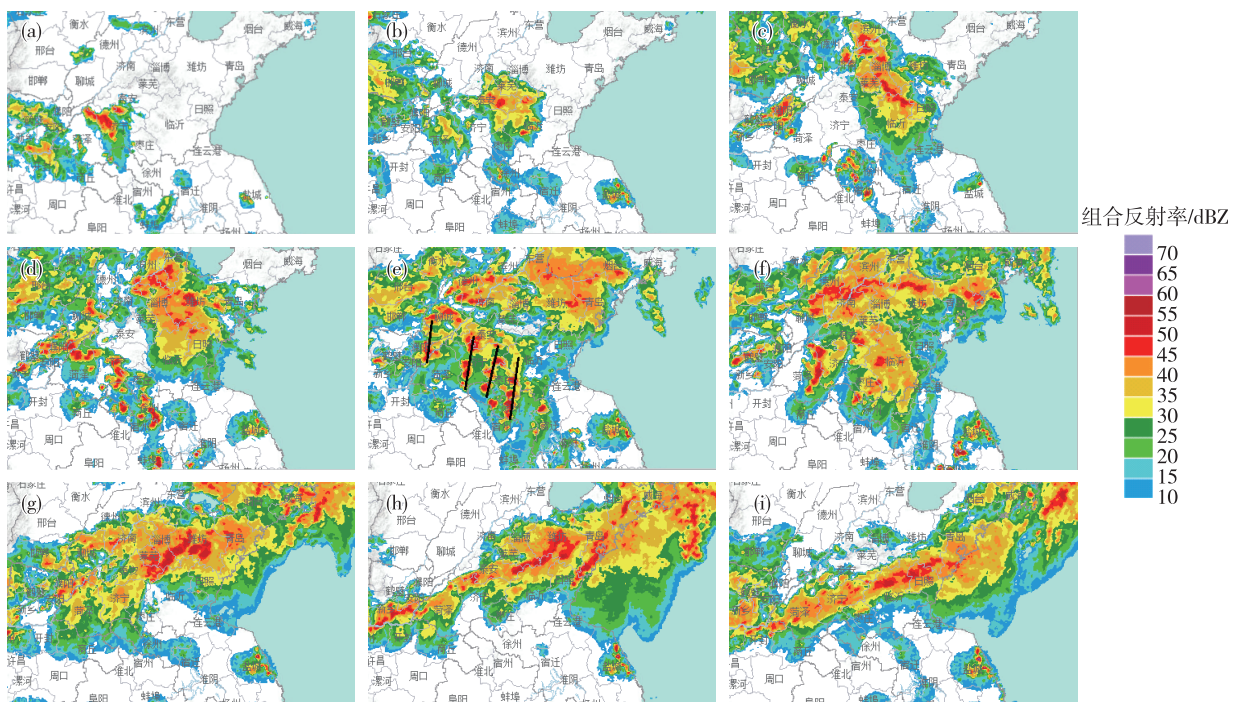


图3 2018年6月25日05:00(a)、08:00(b)、12:00(c)、13:00(d)、15:00(e)、17:00(f)、23:00(g)以及26日03:00(h)、06:00(i)华北雷达拼图(单位:dBZ,黑色线:中尺度雨带)

Fig.3 Radar mosaic (units: dBZ, black line for mesoscale rain band) of North China at 05:00 BST (a), 08:00 BST (b), 12:00 BST (c), 13:00 BST (d), 15:00 BST (e), 17:00 BST (f), and 23:00 BST (g) 25 and 03:00 BST (h) and 06:00 BST (i) 26 June 2018

中东部、半岛及鲁东南地区,06:00(图 3i)回波带迅速南落,强回波位于青岛—日照—菏泽一线,造成此地区的强降水,08:00 之后雨带进一步南推,山东降水也随之结束。

此次暖区暴雨具有明显的中小尺度特征,小尺度对流单体在鲁南地区触发,而后沿引导气流向东北方向快速移动,影响鲁中及半岛等地,强降水区域有多个强回波中心持续影响,具有明显的“列车效应”,强回波影响时间长,且强降水回波位于 700 hPa 暖式切变线和 925 hPa 暖式切变线之间,雨带走向与 700 hPa 暖式切变线吻合度比较高。

2 中尺度特征分析

2.1 云图特征

红外云图能很好地反映天气系统的发生、发展和消亡,色调越暗,温度越高,卫星接收到的红外辐射越大;色调越浅,温度越低,辐射越小;水汽云图能直观地反映大气中水汽的分布^[12-15],色调浅白的地区是对流层上部的湿区,一般与上升运动相联系;色调黑区是大气中的干区,对应大气中的下沉运动。

由 FY-2G 的红外云图和水汽图的逐时演变来看,降水开始前,25 日 08:00 的红外云图(图 4a)上,500 hPa 高空冷涡云系清楚,主要影响内蒙古和东北地区;山东主要受副高边缘的对流云团影响,鲁

中南部及鲁东南地区有一个中尺度对流云团,云团发展高度较高,同时在鲁西南地区不断有小尺度对流单体发展;此时水汽图像(图 4d)上,沿着副高边缘有一条水汽输送带,色调白亮,说明此处的上升运动较强烈。强降水时段,25 日 20:00(图 4b),副高稳定维持,随着低空 850 hPa 西南暖湿气流的加强,鲁西北至渤海湾南侧的暖切变增强,色调明亮的云团主要位于 850 hPa 切变线附近及其南侧 2 个纬距范围内,强对流云团不断发展壮大,济南、德州附近有一个小尺度对流云团新生,而且河南北部不断有新生发展的对流云团进入山东,影响鲁西南地区;水汽图像(图 4e)上,整个山东均为色调白亮的区域,说明山东上空是大片的上升运动区。鲁西及鲁西南地区的小尺度对流云团不断发展,并快速向东北偏东方向移动,与鲁中地区的中尺度对流云团合并加强,25 日 23:00(图 4c),对流云团的中心强烈发展,影响鲁中东部及鲁东南地区,造成此时段该区域的强降水,持续时间将近 6 h。水汽图(图 4f)上,鲁西北地区出现暗区,并不断向东南方向推进,结合前面形势分析,判断有冷空气自鲁西北地区入侵,并伴有下沉运动。随着冷空气的不断推进,强对流云团向东移动的过程中,强度减弱,范围变小,降水也随之结束。

上述分析表明,此次暖区暴雨过程有多个副高边缘中小尺度对流云团的生成、合并加强和东移影

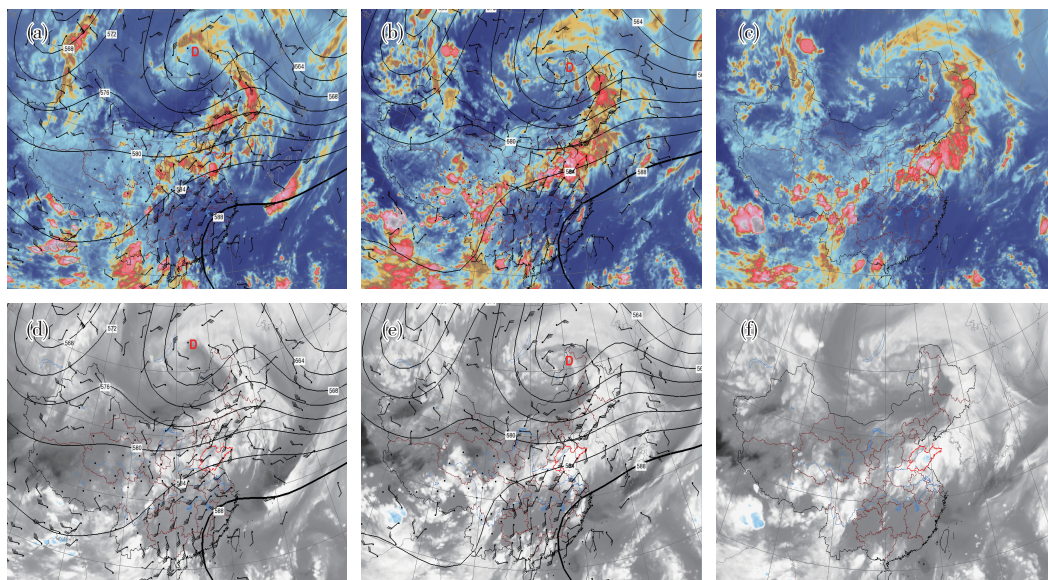


图 4 2018 年 6 月 25 日 FY-2G 卫星云图与 500 hPa 高度场(实线,单位: dagpm)、850 hPa 风场(风矢,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)叠加 (a. 08:00 红外云图, b. 20:00 红外云图, c. 23:00 红外云图, d. 08:00 水汽图, e. 20:00 水汽图, f. 23:00 水汽图)

Fig.4 FY-2G cloud imagery (a, b, and c for infrared imagery at 08:00 BST, 20:00 BST, and 23:00 BST, respectively; d, e, and f for water vapor image at 08:00 BST, 20:00 BST, and 23:00 BST, respectively) overlaid with geopotential height (solid line, units: dagpm) at 500 hPa and wind field (wind barb, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 850 hPa on 25 June 2018

响;水汽图上没有明显的色调暗区,说明暖区暴雨期间没有冷空气相配合,然而降水结束时段,鲁西北开始出现暗区,并向东南方向推进。

2.2 云顶亮温特征

由云顶亮温(TBB)的发展演变来看,25日08:00(图5a),云顶亮温 $t_{bb} \leq -60^\circ\text{C}$ 的冷云顶影响临沂、枣庄地区,并有小范围的 $t_{bb} \leq -70^\circ\text{C}$ 的冷云顶,对流发展高度较高。之后此对流云团向东北方向移动的过程中不断发展加强,25日12:00(图5b), $t_{bb} \leq -60^\circ\text{C}$ 和 $t_{bb} \leq -70^\circ\text{C}$ 的冷云顶面积明显加大,影响鲁中东部和鲁东南地区,与此同时,在鲁西南与河南东北部接壤地带有小尺度对流云团不断发展新生,结合雷达回波发现,雨带主要位于 $t_{bb} \leq -70^\circ\text{C}$ 的冷云顶覆盖的区域。15:00(图略),位于鲁中东部的对流云团随着降水的产生,能量释放,云团发展高度有所降低,但位于鲁西南的对流

云团东移过程中 $t_{bb} \leq -60^\circ\text{C}$ 的冷云顶面积不断扩大。17:00(图5c),位于鲁南的对流云团不断东移, $t_{bb} \leq -60^\circ\text{C}$ 的冷云顶面积进一步扩大,并且在强对流云团的内部又有两个 $t_{bb} \leq -70^\circ\text{C}$ 的强冷云顶中心。值得注意的是,在此对流云团的北侧,又有两个小尺度对流云团新生,造成此时段鲁西北地区的强降水。23:00(图5d),位于鲁南的云团沿引导气流迅速向东北方向移动与鲁西北的对流云团东移过程中连成一条东西向的强对流云带,影响鲁中及半岛地区,之后的四个小时,潍坊安丘逐小时降水量均超过20mm,强降水持续时间比较长,是造成此时段鲁中及半岛地区降水量较大的原因。随着冷空气的东移,26日03:00(图略),对流云团向东南方向推进,雨带也随之向东南方向移动,影响鲁东南及半岛南部地区,其他地区的降水基本趋于结束。

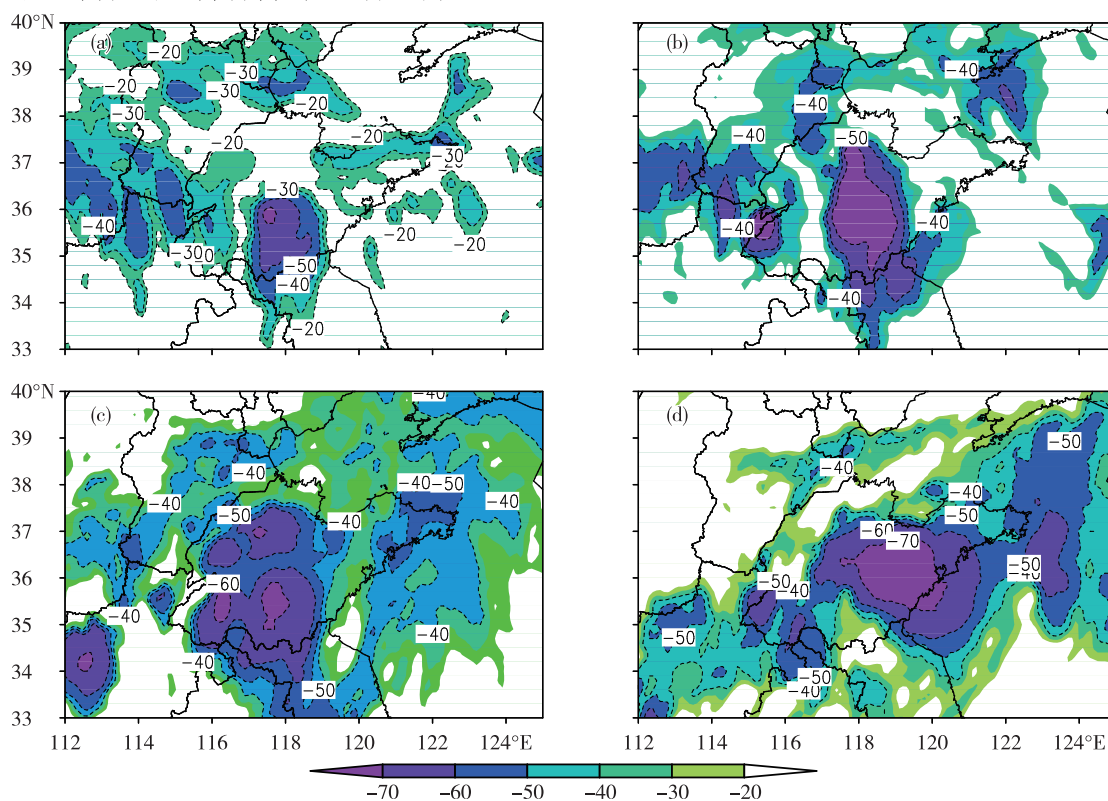


图5 2018年6月25日FY-2G的TBB演变(a. 08:00, b. 12:00, c. 17:00, d. 23:00;单位:°C)

Fig.5 Evolution of TBB (units: °C) retrieved from FY-2G at 08:00 BST (a), 12:00 BST (b), 17:00 BST (c), and 23:00 BST (d) 25 June 2018

以上研究表明,此次暖区暴雨过程存在多个小尺度对流单体的不断新生发展,形成中尺度对流云团,影响山东大部地区,有明显的中小尺度特征;强对流云团持续时间长也是造成此次暖区暴雨强度较强的原因。

3 温湿特征

3.1 热力垂直结构及不稳定层结分析

强降水开始时,25日14:00(图6a),暴雨区(34.5°~38°N)800 hPa以下是假相当位温高值区,

向北伸展到 38°N 附近,与北侧假相当位温的低值区形成假相当位温梯度的密集区,即锋区所在,结合雷达回波来看,此时的降水除了位于锋区附近外,在锋区南侧的西南暖湿气流里也出现 4 条与西南急流走向大体一致的中尺度雨带。由锋区南侧假相当位温的垂直分布可以看出,800 hPa 以下是假相当位温的高值区,对流层中高层(700~400 hPa)是假相当位温的相对低值区,再往上又转为假相当位温的高值区,说明大气层结处于不稳定层结状态。结合风场和温度平流的垂直分布来看,虽然暴雨区上空均为西南气流,但 850 hPa 以下暖平流更强,中心在 $12 \times 10^{-5} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,而 800~400 hPa

之间均在 $4 \times 10^{-5} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,说明对流层低层变暖湿的程度远远强于对流层中上层,大气不稳定层结会变得更加明显,这也说明锋区南侧的暖区里有产生强对流的环境条件;强降水期间,25 日 20:00(图 6b),随着西南急流的进一步加强,700 hPa 以下假相当位温高值区进一步增强,锋区往南推至 $37^{\circ} \sim 38^{\circ}\text{N}$ 之间,800 hPa 以下锋面近乎垂直,冷暖空气交汇变得剧烈,锋区降水强度加强,位于锋区南侧的暖区内,暖平流明显增强,中心值超过 $20 \times 10^{-5} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$,低层暖湿强烈发展,大气层结不稳定急剧增加,在此后的 6 h 内,潍坊安丘出现连续强降水,6 h 雨量达到 180.9 mm。

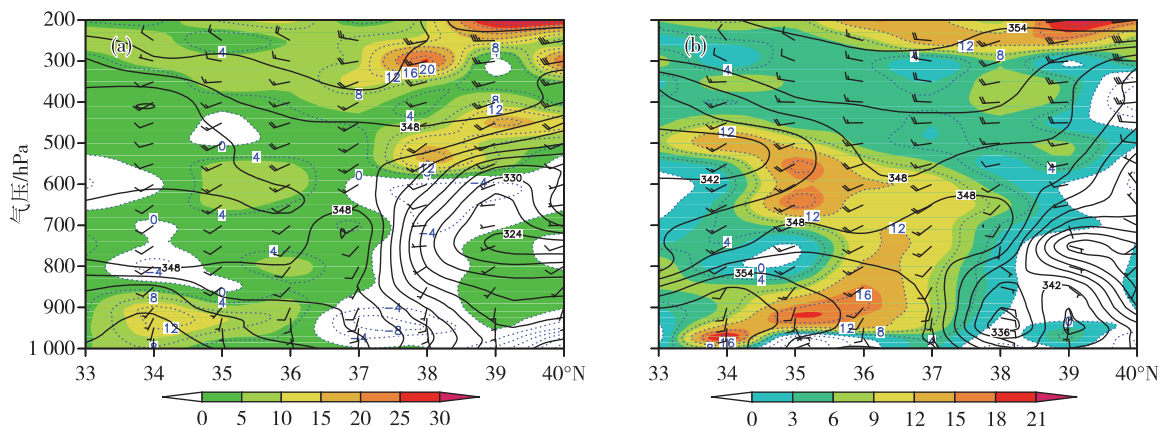


图 6 2018 年 6 月 25 日假相当位温(实线,单位:K)、温度平流(虚线,单位: $10^{-5} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$,填色区域是正温度平流区)和水平风(风矢,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)沿 119.2°E 经向剖面(a. 14:00, b. 20:00)

Fig.6 Meridional cross section of pseudo-equivalent potential temperature (solid line, units: K), temperature advection (dotted line, units: $10^{-5} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$, colored area for positive temperature advection), and horizontal wind (wind barb, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) along 119.2°E at 14:00 BST (a) and 20:00 BST (b) 25 June 2018

通过分析得知:此次暖区暴雨过程以短时强降水为主。强降水期间,大气层结明显不稳定,且低层暖湿气流强烈发展是造成此次暴雨过程层结不稳定的主要原因。暴雨落区位于锋区附近以及锋前西南暖湿气流里。

3.2 水汽输送及来源

沿暴雨中心安丘(36.4°N , 119.2°E)作比湿和相对湿度的经向剖面,由其分布(图 7)来看,强降水期间,暴雨区上空整层大气相对湿度均在 90% 以上(图 7a),整层大气都处于高湿状态。700 hPa 以下比湿均大于 $10 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,850 hPa 附近比湿在 $14 \sim 16 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间(图 7b),说明对流层低层水汽含量更加充沛。

分析 850 hPa 的水汽通量和水汽通量散度可见,强降水时,25 日 20 时(图 8a),有一条自南向北伸展的水汽通量大值带,说明暴雨区上空有明显的

水汽输送通道,水汽主要来自孟加拉湾和南海;整个山东都处于水汽辐合区,辐合区呈东西向带状分布,辐合中心位于鲁中地区,此时的强降水中心亦出现在此处。26 日 02 时(图 8b),随着西南急流的加强,水汽通量大值带东移的同时,强度也明显加强;山东除鲁西北和鲁中部分地区是水汽辐散外,其他地区均为水汽的辐合区,辐合中心位于半岛及其北侧海区,强降水落区位于辐合中心附近。

孟加拉湾和南海是此次副高边缘暖区暴雨过程的主要水汽来源。强降水期间,整层大气都处于高湿状态,同时随着西南暖湿气流的增强,水汽通量也明显加强。暴雨落区主要位于水汽辐合中心附近。

4 结论

通过对 2018 年 6 月 25—26 日副高边缘切变线

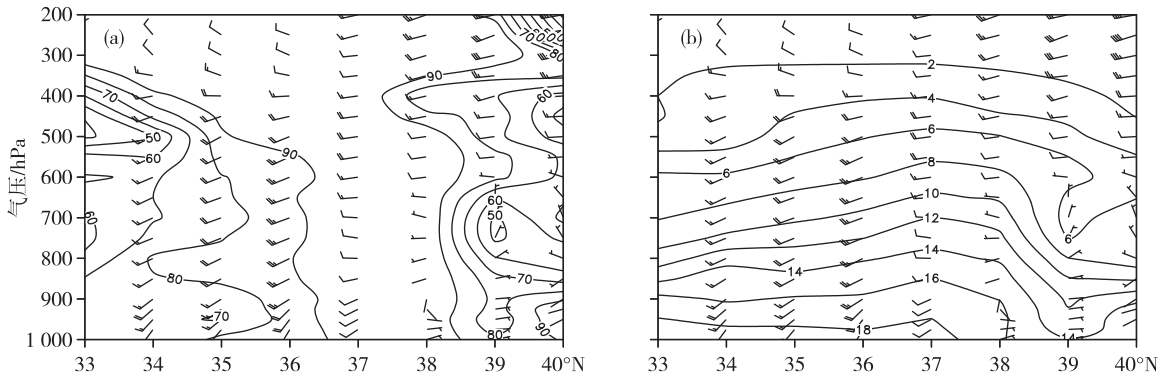


图7 2018年6月26日02:00相对湿度(a,实线,单位:%)、比湿(b,实线,单位: $g \cdot kg^{-1}$)和水平风(风矢,单位: $m \cdot s^{-1}$)沿119.2°E经向剖面

Fig.7 Meridional cross section of relative humidity (a, solid line, units: %), specific humidity (b, solid line, units: $g \cdot kg^{-1}$), and horizontal wind (wind barb, units: $m \cdot s^{-1}$) along 119.2°E at 02:00 BST 26 June 2018

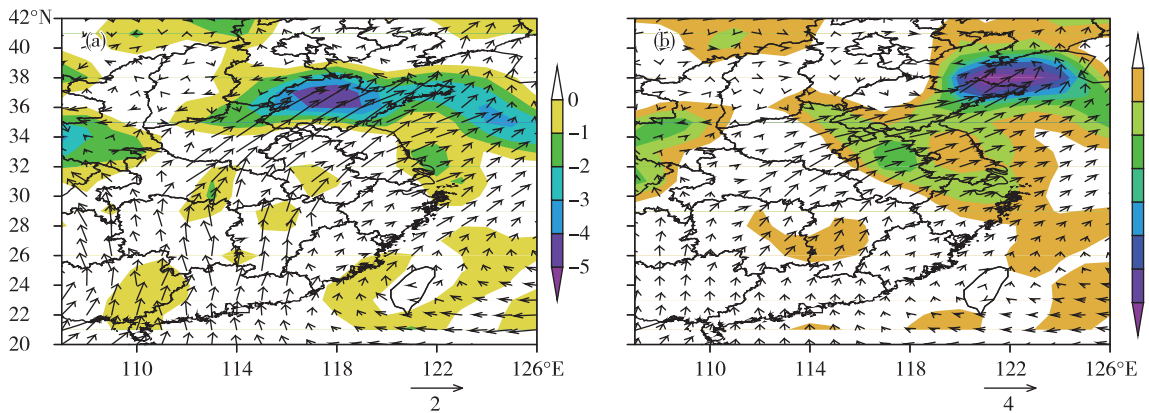


图8 2018年6月25日20:00(a)、26日02:00(b)850 hPa水汽通量(箭矢,单位: $g \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$)和水汽通量散度(填色区域,单位: $10^{-6} g \cdot cm^{-2} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$)分布

Fig.8 Distribution of water vapor flux (arrow, units: $g \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$) and water vapor flux divergence (colored area, units: $10^{-6} g \cdot cm^{-2} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$) at 850 hPa at 20:00 BST 25 (a) and 02:00 BST 26 (b) June 2018

暖区暴雨大尺度环流背景、雨带的移动与传播、中尺度特征以及温湿特征的诊断分析,得出了一些有意义的结论:

1)此次暴雨是2018年山东雨季首场暴雨,是在副高稳定维持,500 hPa西风槽东移,并有低空急流配合,低空暖切变线触发不稳定能量释放的有利背景下产生的。暴雨落区位于700 hPa暖切变线以南,925 hPa暖切变线以北的西南暖湿气流里,是一次典型的副高边缘暖切变线造成的暖区暴雨过程。

2)此次暖区暴雨的水汽源地主要是孟加拉湾和南海。强降水期间,随着西南暖湿气流的增强,水汽通量有一个跃增现象,暴雨落区位于水汽通量散度负值中心附近。

3)暴雨具有明显的中小尺度特征,小尺度对流单体在鲁南地区触发,而后沿引导气流向东北方向

移动;强降水区域有多个强回波中心持续影响,具有明显的“列车效应”;低层暖湿气流强烈发展是造成此次暴雨过程层结不稳定的主要原因。

4)新触发的对流单体,冷云顶 $t_{bb} \leq -60 \text{ } ^\circ\text{C}$,并有小范围的 $t_{bb} \leq -70 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的冷云顶,对流发展高度高,强降雨带主要位于 $t_{bb} \leq -70 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的冷云顶覆盖的区域。暴雨过程有多个小尺度对流单体不断新生发展,并形成中尺度对流云团,影响山东大部分地区。红外云图能很好地反映天气系统的发生、发展和消亡;而水汽图像上色调暗区不明显,说明暖区暴雨期间冷空气活动较弱。

参考文献:

[1] 黄士松.华南暖区暴雨[M].广州:广东科技出版社,1986:1-7.

- [2] 叶朗明,徐碧裕.两次不同类型暖区暴雨的对比分析[J].气象研究与应用,2014,35(4):5-10.
- [3] 丁治英,刘彩虹,沈新勇.2005—2008年5、6月华南暖区暴雨与高、低空急流和南亚高压关系的统计分析[J].热带气象学报,2011,27(3):307-316.
- [4] 赵庆云,傅朝,刘新伟,等.西北东部暖区大暴雨中尺度系统演变特征[J].高原气象,2017,36(3):697-704.
- [5] 张芹,王洪明,张秀珍,等.2017年山东雨季首场暖区暴雨的特征分析[J].高原气象,2018,37(6):1696-1704.
- [6] 孙兴池,王业宏,迟竹萍.气旋冷暖区暴雨对比分析[J].气象,2006,32(6):59-65.
- [7] 汪玲瑶,谌芸,肖天贵,等.夏季江南地区暖区暴雨的统计分析[J].气象,2018,44(6):771-780.
- [8] 陈玥,谌芸,陈涛,等.长江中下游地区暖区暴雨特征分析[J].气象,2016,42(6):724-731.
- [9] 何立富,陈涛,孔期.华南暖区暴雨研究进展[J].应用气象学报,2016,27(5):559-569.
- [10] 刘瑞鑫,孙建华,陈鲍发.华南暖区暴雨事件的筛选与分类研究[J].大气科学,2019,43(1):119-130.
- [11] 伍志方,蔡景就,林良勋,等.2017年广州“5·7”暖区特大暴雨的中尺度系统和可预报性[J].气象,2018,44(4):485-499.
- [12] 金巍,俞小鼎,曲姝霖,等.辽宁地区一次大暴雨过程干侵入和卫星云图演变特征[J].气象与环境学报,2015,31(6):51-58.
- [13] 张芹,王洪明.一次东北冷涡背景下的飏线天气过程诊断分析[J].气象与环境科学,2018,41(2):43-51.
- [14] 余晖,罗哲贤,朱雪松,等.热带风暴形成过程中的涡旋自组织及其复杂性:一个典型个例的红外云图分析[J].海洋气象学报,2017,37(2):22-30.
- [15] 吴志彦,闵锦忠,赵海军.冷涡背景下一次强对流过程的卫星水汽图像特征[J].海洋气象学报,2017,37(3):54-61.