

郑丽娜,于淑婷,焦洋,等.鲁中地区复杂下垫面在一次干环境强对流天气中的作用分析[J].海洋气象学报,2025,45(2):1-10.
ZHENG Lina, YU Shuting, JIAO Yang, et al. Analysis on role of complex underlying surfaces in a severe convection weather event in dry conditions in central part Shandong Province[J]. Journal of Marine Meteorology, 2025, 45(2): 1-10. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240111001. (in Chinese)

鲁中地区复杂下垫面在一次干环境强对流天气中的作用分析

郑丽娜,于淑婷,焦洋,褚颖佳,孙长征
(济南市气象局,山东 济南 250102)

摘要 利用加密自动气象观测站、闪电定位仪、多普勒天气雷达、风廓线雷达等监测资料及ERA5再分析产品,对2023年6月7日夜发生在鲁中的一次干环境条件下的强对流天气进行分析,重点探讨复杂下垫面在此次天气过程中的作用。研究表明:(1)此次强对流天气的误判是因为考虑对流层低层相对湿度不足40%、对流抑制能量较大、低层系统偏弱等因素,而对该区域具有类似典型干下击暴流的环境条件及复杂下垫面(黄河水面、大城市与泰山山脉)的作用认识不足。(2)对流单体首先在济南市区西侧黄河水面附近露点值偏高的区域产生,随后东移进入市区,在露点锋与地面中尺度辐合线的触发下,城市热岛效应积聚的能量得以释放,致使对流单体发展、增强,逐渐排列成一条东北—西南走向的回波带。(3)回波带的前方(即东侧)出现阵风锋,阵风锋与地面辐合线共同作用激发的对流单体不断并入回波带中,使得回波带强度维持并增强。到达泰山脚下后,受地形抬升作用,回波带爬坡,回波强度得以维持。随着地面辐合线消失,回波带越过山脉后强度减弱,强对流天气结束。(4)由泰山附近的局地流场来看,山脉西侧存在一个山体附近上升、更远的西侧下沉的纬向流场;而山脉北侧存在一个更远的北侧上升、山体附近下沉的经向流场。这两个流场的存在,配合地面中尺度系统的触发,使得对流单体首先在山脉西北侧发展、加强,而山脉南侧不利于对流云的发展,致使回波到达山脉南侧后减弱。

关键词 下垫面;强对流;泰山山脉;黄河水面

中图分类号: P434 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2025)02-0000-00

DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240111001

Analysis on role of complex underlying surfaces in a severe convection weather event in dry conditions in central part of Shandong Province

ZHENG Lina, YU Shuting, JIAO Yang, CHU Yingjia, SUN Changzheng

(Jinan Meteorological Service, Jinan 250102, China)

Abstract Using the data of intensive automatic meteorological observing stations, lightning location system, Doppler weather radar and wind profile radar, as well as ERA5 data, the severe convection weather event in dry conditions that occurred in the central part of Shandong Province on 7 June 2023 is analyzed with a focus on the role of complex underlying surfaces. The results are shown below. (1) Due to the consideration of the low relative humidity in the lower troposphere which is less than 40%, the larger convective inhibition and the weaker low-level system, the forecasters do not place enough attention

收稿日期: 2024-01-11; 修回日期: 2024-05-31

基金项目: 2023年中国气象局复盘专项(FPZJ2023-074); 泰山山脉气象科学试验团队(JN23TD01)

第一作者简介: 郑丽娜,女,博士,正高级工程师,主要从事灾害性天气研究, dongyingzn@163.com。

on the environmental conditions, which are similar to the typical dry downburst in this area, and the role of complex underlying surfaces (the Yellow River surface, the big city and Mount Tai). Therefore, there is misjudgment in the prediction of the convection weather. (2) The convection cells first appear in the area of higher dew point temperature near the west bank of the Yellow River west of Jinan City, and then move eastward into the city, where they are triggered by the dew point front and the ground mesoscale convergence line. The energy accumulated by the urban heat island effect is released, causing the convection cells to develop, intensify and eventually form a northwest-southeast echo band. (3) A gust front appears ahead of the echo band (i.e., on the east side), and the convection cells triggered by the interaction of the gust front and the ground convergence line are continuously merged into the echo band, maintaining and strengthening the intensity of the echo band. After reaching the foot of Mount Tai, the echo band climbs up under topographic uplift effect, and the elevation enhances the echo intensity. As the ground convergence line disappears, the echo band weakens after crossing the mountain range, and the severe convection weather ends. (4) There are two local flow fields near Mount Tai, namely a zonal flow field on the west side of the mountain that rises near the mountain but sinks farther west, and a meridional flow field on the north side of the mountain that rises farther north but sinks near the mountain. The existence of these two flow fields, together with the triggering of the ground mesoscale system, makes the convection cells first develop and strengthen on the northwest side of the mountain. The south side of the mountain is not conducive to the development of convective clouds, resulting in the weakening of echoes after reaching the south side of the mountain.

Keywords underlying surface; severe convection; Mount Tai; the Yellow River surface

引言

下垫面是大气与其下界的固态地面或者液态水面的分界面,是大气的主要热源和水汽源,也是低层大气运动的边界面。不同下垫面的粗糙度、辐射平衡、热量平衡和辐射差额等差别较大,对空气流动的影响也不一样,常常形成不同的小气候^[1-3]。下垫面对空气流动的影响主要体现在两个方面:一是动力作用。小地形起伏改变粗糙度可增加机械湍流,大地形起伏可改变局地流场和气流路径,从而改变降水落区^[4]。二是热力作用。地形起伏或水陆分布使得受热和散热不均匀,从而引起温度场和风场的变化,进而影响对流发生的区域^[5-6]。基于观测事实,气象学家们认识到,下垫面在一定程度上影响了降水的强度与分布^[7]。在以往的研究中,对于地形在降水过程中的作用研究得较多。Neiman 等^[8]和孙继松^[9]分别利用统计学方法和动力分析方法强调了边界层急流在地形降水中的作用,Alpert 等^[10]和孙继松^[11]就地形对大尺度环境风场的影响在地形雨落区中的作用问题进行了探讨。许多极端的强降水事件也与地形密切相关,如北京“7·21”极端暴雨过程^[12]、豫北“21·7”极端暴雨过程^[13]等。

近年来,有关城市热岛对局地天气气候事件的

影响越来越受到关注。研究^[14]表明,近30年北京城区降水量与郊区相比呈增加的趋势。据统计,城区及其下风方的年降水总量比周围农村地区高10%~17%,其中雷暴的增加可达到24%。同时,城市热岛造成的城乡温度梯度易产生 γ 中尺度对流系统,极易造成局地强天气的发生^[15-17]。当前,随着城市化进程的不断加快,城市热岛效应在一些大城市愈发明显。比如,济南城市热岛效应突显,平均而言,市区的年平均气温较郊区高2~3℃。再加上这座城市南依泰山山脉、北靠黄河,下垫面复杂,极易产生局地强天气。当有明显天气系统影响济南及其周围地区时,下垫面差异引起的局地环流容易被忽略;但当弱的天气系统影响时,下垫面对天气系统的作用会突显出来。但是由于下垫面对天气系统的影响机理比较复杂,且具有明显的地域性特点,有必要对其开展深入的研究。

2023年6月7日夜,山东半岛北岸与山东中部突发一次强对流天气。半岛北岸的强对流天气预报准确,而山东中部的强对流天气预报出现偏差,这给当地的气象服务带来很大困扰。山东中部的对流回波首先在济南及其西侧发展,随后回波沿泰山山脉北侧向东北方向延伸,对流天气持续2~3h,给所经之地带来大风、雷电等灾害性天气。在此次过程中,

复杂下垫面可能对对流天气的触发和发展起到关键作用,有必要对此次山东中部突发的强对流过程进行仔细分析,探寻复杂下垫面对强对流天气的影响机理,为今后准确预报此类天气提供参考。

1 资料

文中使用的资料包括:(1)欧洲中期天气预报中心提供的 ERA5 再分析资料,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,时间分辨率为 1 h,垂直方向从 1 000 hPa 到 10 hPa 共 16 层,主要是相对湿度、 U 风与 V 风数据。(2)高空和地面等常规观测资料以及山东自动气象观测站逐小时资料。(3)华北区域多普勒雷达组合反射率因子拼图资料,时间分辨率为 5 min。(4)山东闪电定位仪资料,时间分辨率为 1 min。(5)章丘站与平阴

站风廓线雷达资料,时间分辨率为 6 min。以上数据均已经过质量控制,由山东省气象数据中心提供。

2 天气实况与环流背景

2.1 天气实况

2023 年 6 月 7 日 21—24 时(北京时,下同),受对流回波带影响,山东境内自半岛北部经鲁中到鲁西南形成一条以强雷暴与大风为主、宽度超过 100 km 的对流天气区(图 1)。据统计,其间共发生 1 284 次闪电,有 6 个气象观测站(不包括泰山站)极大风速达到 10 级($24.5 \sim 28.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),这些站点多位于环渤海南岸与鲁西北的夏津附近。此次对流天气伴随的降雨不大,一般为小到中雨量级,最大降水出现在蓬莱开发区站,降水量为 24.7 mm。

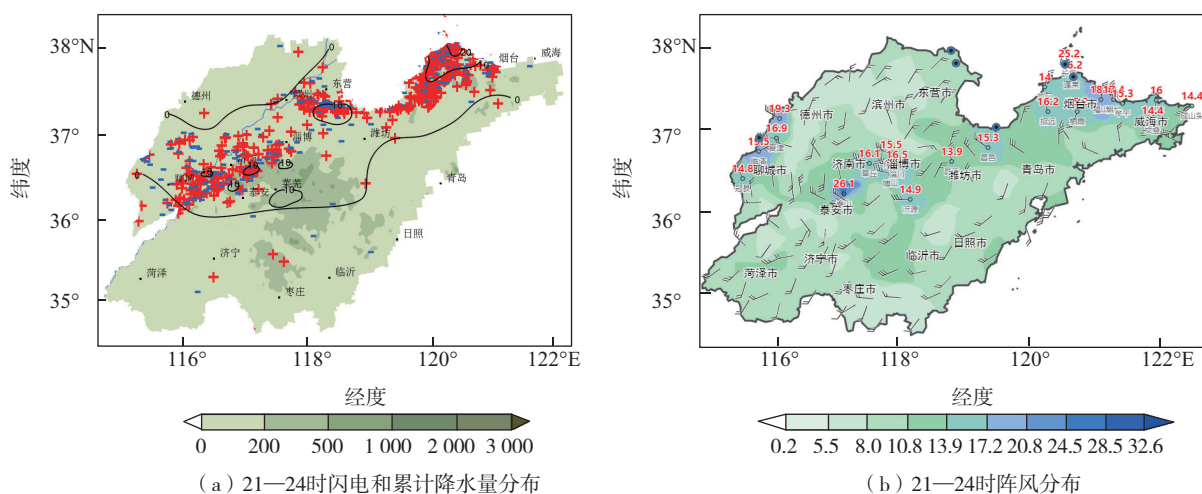


图 1 2023 年 6 月 7 日 21—24 时山东强对流天气分布
a 中黑色等值线—降水量,单位为 mm,红色正号—正地闪,蓝色负号—负地闪,色阶—地形高度,单位为 m; b 中色阶—风速,单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,红色数字—阵风风速,风矢—最大阵风,风速单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,黑色圆点—阵风达 10 级的站点。

图 1 2023 年 6 月 7 日 21—24 时山东强对流天气分布

Fig.1 Distribution of severe convection weather in Shandong from 21:00 BJT to 24:00 BJT 7 June 2023

此次对流天气的分布具有很强的地域特点,主要分布在泰山山脉的西侧与北侧以及半岛北岸两个区域。对于泰山山脉附近的对流天气,主观预报与客观预报均出现偏差,作为重点分析;而对于沿海岸线一带的对流天气,由于预报准确,不做分析。

2.2 环流背景

挑选距离对流天气发生最近的 7 日 20 时分析环流背景(图 2)。由图 2 可以看到,500 hPa 冷涡中心位于 123°E 、 48°N ,自冷涡中心向南伸出的高空槽影响 40°N 以北地区;850 hPa 河北境内存在冷式切变线,即将进入山东;地面图上,冷锋位于 500 hPa

高空槽东侧,其携带的冷空气主要影响渤海以北地区。另外,渤海附近还存在低压,在低压南侧可见一条东北—西南走向的地面辐合线。当日 08 时起报的全球模式,如欧洲中期天气预报中心细网格模式(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts-Fine Mesh Model,简记为“ECMWF-FM”)和中国气象局全球同化预报系统(China Meteorological Administration-Global Forecast System, CMA-GFS),以及中尺度模式如中国气象局中尺度模式(CMA MESOscale model,简记为“CMA-MESO”)、CMA-SH3(CMA ShangHai 3 km),均预测

850 hPa 切变线仅影响山东北部,且没有相对湿度大于或等于 60%的湿区与切变线配合,预测山东中部没有降水。7 日傍晚,从全国雷达组网产品中发现,自华北中部南移的回波带强度减弱,这与数值模式的预报结果一致。

7 日 20 时章丘探空站的 t - $\ln p$ 图(图 2b)显示对流有效位能(convective available potential energy, CAPE)为 $645.3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,对流抑制能量为 $176.2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,说明需要很强的动力抬升才能使不稳定能量释放;K 指数为 $29.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$,刚达到山东对流天气发

生的热力指标^[18]。550 hPa 以下温度露点曲线呈倒“V”字形,850 hPa 以下温度递减率接近干绝热线,有利于大风产生^[19]。地面温度露点差为 $22 \text{ }^{\circ}\text{C}$,表明环境场非常干^[20],0~1 km、0~3 km 与 0~6 km 的垂直风切变较弱,数值均在 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,这些特征与典型的干下击暴流产生的环境条件^[21-22]类似。这表明鲁中地区并不似数值模式预测的那样没有对流发生的可能,而是取决于是否有适时的触发机制使不稳定能量释放。当日的天气预报忽略了这点,导致预报出现偏差。

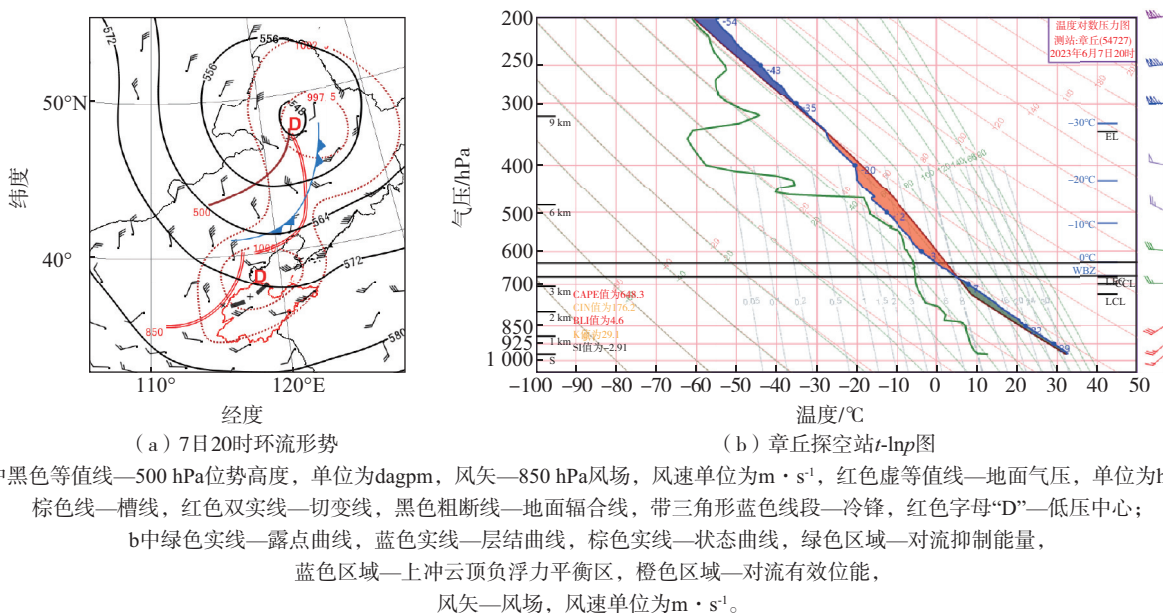


图2 2023年6月7日20时环流形势及章丘探空站 t - $\ln p$ 图

Fig.2 Synoptic situation and t - $\ln p$ diagram of Zhangqiu sounding station at 20:00 BJT 7 June 2023

3 复杂下垫面下回波带的演变

3.1 回波带的演变

7 日 20 时,对应地面中尺度辐合线与对流层低层 850 hPa 切变线(图 2a)可见两条间距约 100 km 的弱回波带(图 3a);回波带 A 与回波带 B。由于渤海附近近地层水汽充沛,相对湿度在 70% 以上,因而两条回波带均为在渤海的那段强度强,而位于内陆的这段强度弱。两条回波带自华北向东南方向移动,强度逐渐减弱,与数值模式的预报结论一致。21 时(图 3b),回波带 A 在山东内陆的这段移速减缓,与回波带 B 之间的距离缩小,且在泰山山脉的西北侧地面中尺度辐合线上,原来趋于减弱的回波带中出现星星点点的对流单体,个别单体发展迅猛,强度接近 50 dBZ。

22 时(图 3c),与切变线对应的回波带 B 已很弱,而回波带 A 内陆的这段却在山脉西侧与北侧得到加强。越靠近泰山山脉,回波带移动越慢,并在山脚下出现停滞现象。受地形和地面辐合线的共同影响,回波带不断发展并沿辐合线向南北两侧延伸,形成一条横亘在泰山山脉脚下的线状对流回波带,最大回波强度超 55 dBZ。23 时(图 3d),回波带 B 减弱消失,而回波带 A 位于山东内陆的这段开始爬坡,受地形影响,回波带与地面辐合线紧靠,回波带宽度较 22 时有所增加,但强度变化不大。而回波带的南段,在其东移过程中,无地形阻挡,地面辐合线移动偏快,出现地面辐合线与回波带分离的现象,这也显示出山脉地形对系统的影响。24 时之后,地面辐合线消失,回波带越过山脉后强度减弱,影响山东中部的强对流过程结束。为

了观察对流单体发展的细节,利用济南多普勒天气雷达0.5°产品进行分析。由图4可以看到,20时之前,在鲁西北可见一条窄带回波(图4a),与地面中尺度辐合线(图3a)相对应,正以 $12\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的速度向东南方向移动。利用商河站(117.1°E , 37.3°N)观察窄带回波经过时的要素变化,19:25—19:30窄带回波经过该站,气温由 32.1°C 下降至 31.1°C ,风速由南风的 $1.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 转为北风的 $4.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,相对湿度由37%下降至33%,气压上升了1.0 hPa。20:07,窄带回波的前沿位于济南市区西侧,在其南半段上可见有激发的弱降水回波,紧挨着窄带回波的西北侧存在一条与之近乎平行的弱回波带(图4b),此回波带对应图3a中的回波带A。随着系统东移进入济南市区,地面中尺度辐合线上的对流单体迅猛发展,并与其后的弱回波带合

并,个别单体强度达55 dBZ,紧贴回波带的前沿可见有阵风锋,且不止一条(图4c)。21:44(图4d),进入济南市区后的回波带已发展成一条东北—西南走向的带状,其上单体排列紧密,紧靠回波带前沿的阵风锋有叠加现象,其上不断有新对流单体出现,此时阵风锋的强度约为17 dBZ,对应的径向速度为 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图4e、f)。由此可以发现,回波带在山脉之前逐渐增强的原因是,在强回波带的前沿存在着多条阵风锋,阵风锋与地面中尺度辐合线共同作用,不断激发出新的对流单体,这些新生单体不断并入带状回波中,使得带状回波不断加强。可见,阵风锋的触发作用在回波带的维持与增强过程中起到了重要作用。最终,回波带前沿的阵风锋移速加快,远离回波带并逐渐消失。对流天气趋于减弱。

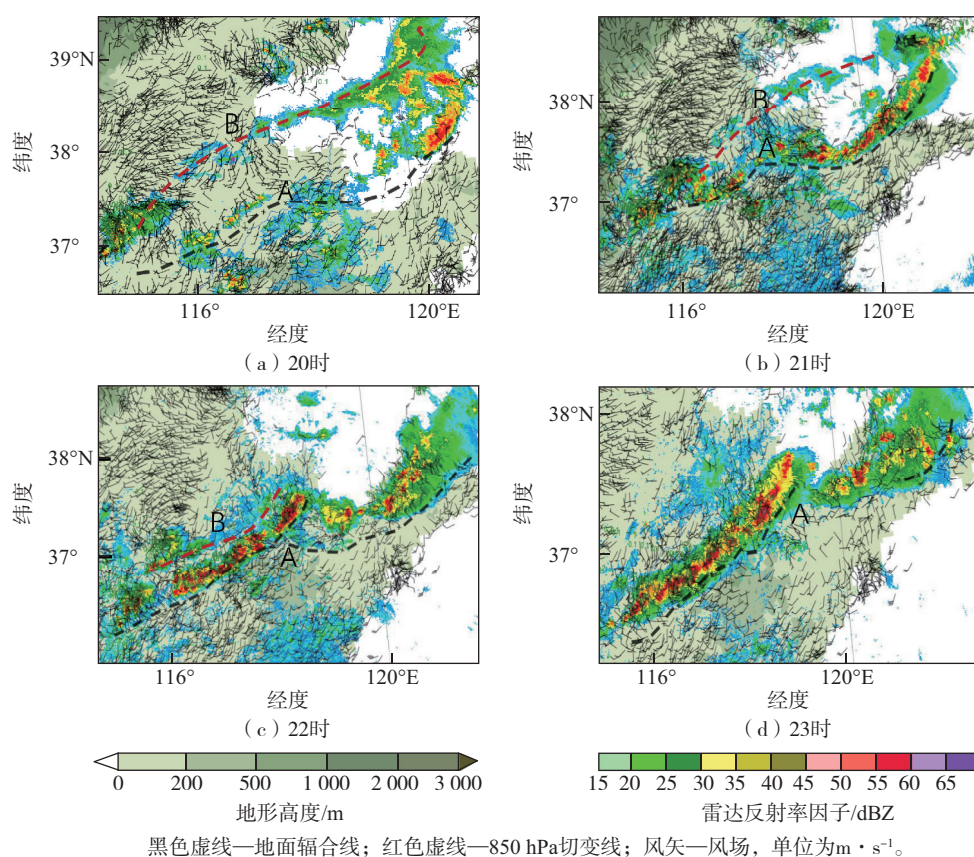
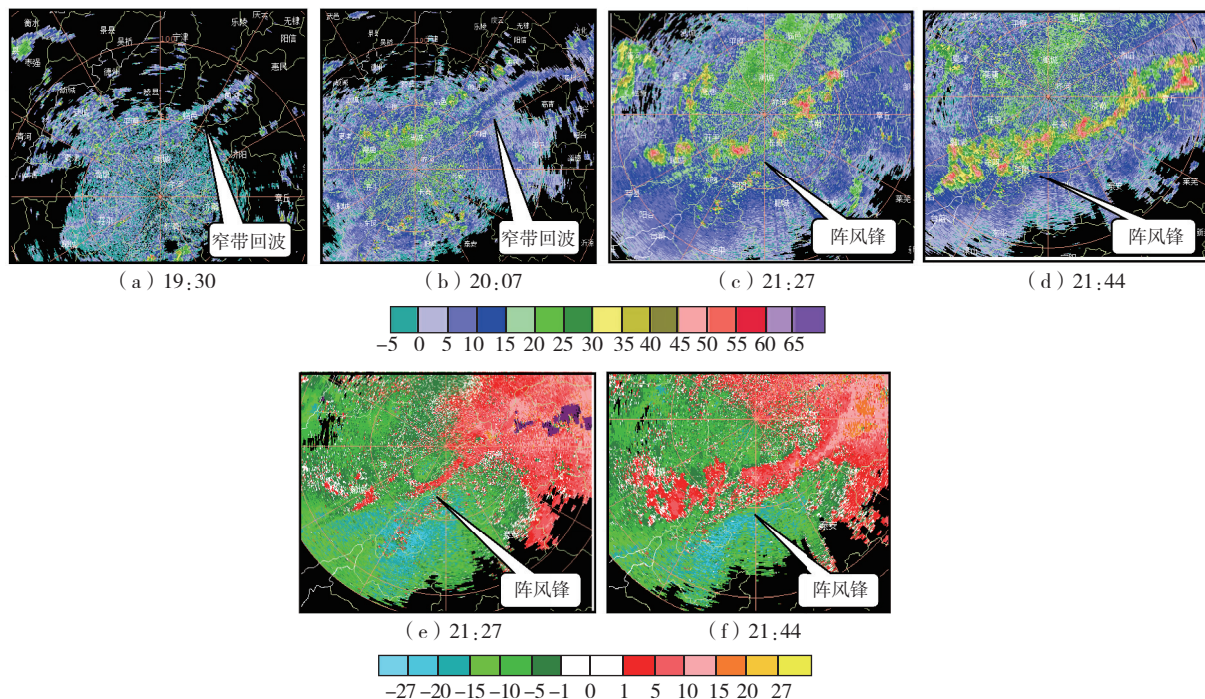


图3 2023年6月7日不同时刻组合反射率因子拼图与地面区域站水平风场

Fig.3 Radar reflectivity mosaic and horizontal wind field of surface regional stations at different times on 7 June 2023

由图3还可以看到,回波带A在半岛北岸存在强度突增现象。通过普查雷达回波与地面加密观测数据发现,回波带A自渤海北岸向南移动的过程中,其携带的弱冷空气与半岛北岸的偏南风形成了一条沿着海岸线分布的风场辐合线,即海风锋。当

回波带强度超过50 dBZ时,强回波的南侧出现阵风锋。阵风锋与海风锋在半岛北岸附近叠加,致使回波带强度增强。21时之后,回波带主体南移至岸上,岸边站点的风向随之转为偏北风,地面辐合线逐渐减弱消失,回波带强度也趋于减弱。



a、b、c、d中色阶—雷达反射率因子, 单位为dBZ; e、f中色阶—径向速度, 单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

图4 2023年6月7日不同时刻济南雷达0.5°仰角反射率因子与径向速度

Fig.4 Reflectivity and meridional velocity of Jinan radar at 0.5° elevation at different times on 7 June 2023

3.2 下垫面对中尺度对流系统触发、加强位置的影响

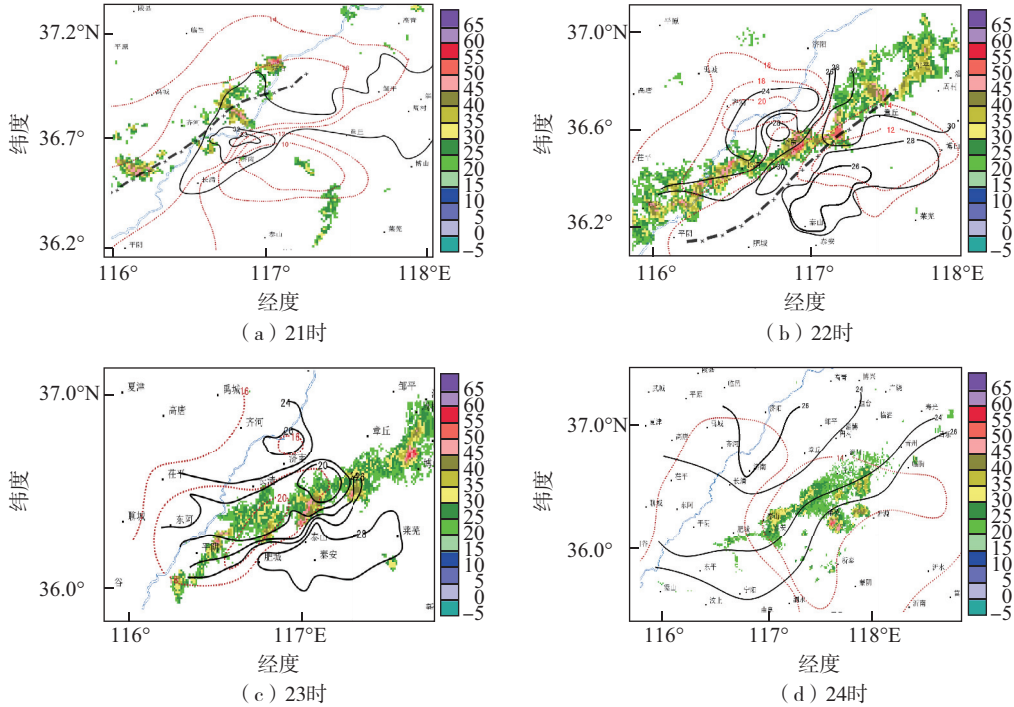
由3.1节的分析可知,21时泰山山脉的西北侧有对流单体生成。利用加密自动气象观测数据分析可知,21时(图5a)济南站北侧存在高温区,中心值为 33°C (位于市区);济南西侧沿着黄河的露点值较高,超过 16°C ,而济南市区内露点值迅速下降,露点线密集,形成南北走向的露点锋。对流单体先在济南市区西侧黄河岸边露点值较高的区域,在地面中尺度辐合线的触发下产生。之后随着辐合线东移,越过黄河进入市区,对流单体处于高温区内,高温区不仅能提供能量,而且其内暖空气上升,易在贴地层形成气压低值区,有利于低值系统发展,加之露点锋与地面中尺度辐合线的共同作用,使得对流单体逐渐沿地面辐合线排列成带状,最大回波强度超过 50 dBZ 。22时(图5b),对流回波带呈东北—西南向,已发展得相当完整,其上镶嵌着多个回波强度超过 50 dBZ 的对流单体。结合温度场,地面辐合线仍处于高温区内,其北段与回波带紧靠,南段与回波带分离,位于回波带东侧。高温区前后均是相对低温区。但是,济南市区仍可见 28°C 小的高温中心,表明城市热岛真实存在。由于受大风、降水等天气影响, 28°C 高温中心西侧出

现了温度为 24°C 的冷池,冷池绕过市区高温区与前侧高温区形成较强的温度梯度。露点温度场中, 18°C 的湿舌仍位于黄河流经之地,并未随地面辐合线东移,说明此湿舌是因黄河水面而存在的。22:20,回波带前沿(即东侧)的阵风锋到达章丘站,该站风速由 $6\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 上升至 $9.6\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,但并未激发出对流回波。10 min后,地面中尺度辐合线与其后的回波带移至章丘站,地面风速迅速增加,在地面中尺度辐合线的触发下,该站对流抑制能量消失,不稳定能量得以释放,回波发展,地面随之观测到 $16.1\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风天气。这也验证了该站在对流天气发生前所具有的对流一旦被触发,可引发较强的下沉出流和明显的阵风锋。随着回波带移近泰山山脉,受其阻挡,回波带移速减缓。23时(图5c),地面辐合线已消失,此时冷池移动到市区高温区与泰山之间,范围扩大,冷池的前方与山顶之间存在等温线密集的锋区。回波带开始爬坡,受地形抬升与锋区影响,回波强度再次增强。而南北两侧不爬坡的回波带,强度减弱且移动加快,使得东北—西南走向的回波带略呈向西北突的反弓形。24时(图5d),回波带已到达山顶,不仅长度缩短,而且强度明显减弱,最强回波仅为 35 dBZ 。这是因为此时阵

风锋与地面辐合线均已消失,回波带已远离暖湿的环境,因地形抬升造成的上升运动也逐渐趋于零。影响鲁中的强对流天气趋于结束。

为了回答对流单体为何进入济南市区后得到迅

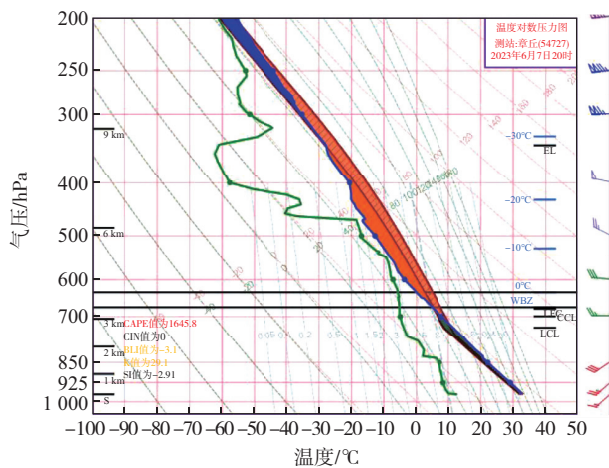
猛发展,用市区高温中心附近站点数据($t = 33.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_d = 16.0\text{ }^{\circ}\text{C}$)订正章丘探空数据(图6),此时CAPE值猛增至 $1\,645.8\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,CIN 为 0,表明市区内高温与相对湿的环境为对流产生提供了有利条件。



色阶—雷达反射率因子,单位为dBZ;黑色等值线—温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$;红色虚等值线—露点温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

图5 2023年6月7日不同时刻地面温度、露点温度与雷达反射率因子

Fig.5 Surface temperature, dew point temperature and radar reflectivity at different times on 7 June 2023



绿色实线—露点曲线,蓝色实线—层结曲线,棕色实线—状态曲线,橙色区域—对流有效位能,蓝色区域—上冲云顶负浮力平衡区,风矢—风场,风速单位为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

图6 2023年6月7日21时济南市区(116.9°E , 36.6°N)订正 $t\text{-ln}p$ 图

Fig.6 Revised $t\text{-ln}p$ diagram of Jinan urban area (116.9°E , 36.6°N) at 21:00 BJT 7 June 2023

3.3 地形形成的局地环流对对流系统的影响

利用泰山西侧平阴与泰山北侧章丘的两部风廓线雷达资料观察局地环流的演变。由图7a可以看到,平阴站,19:00—21:30,2 km 高度存在风向切变,2 km 以下为偏南风,以上为西北风。19:24—21:00,0.5 km 高度西南风加大,超过 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 21:00—21:52,随着850 hPa 切变线逼近,西南气流加大,0.5~1.5 km 高度西南风加大至急流强度。21:30—22:30,贴地层风向的演变为西南风—西风—西北风,表明原来位于长清、平阴西侧的地面中尺度辐合线(图5a)正经过该站,该系统向上发展的高度到1.3 km 左右。22:30—23:30,受地面辐合线后部发展的回波(见图5b)影响,该站出现降水、雷电与大风天气。

由图7b可以看出,位于山脉北侧的章丘站0.5 km 高度西南风加大的时间较平阴站晚近1 h。章丘与平阴1 km 高度附近西南风的加大与环境场925

hPa 风速达到急流强度有关(图8),但章丘站急流强度较平阴站强,最大风速达 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,急流厚度接近 1.3 km ,维持时间也较平阴站长,可能与越山气流有关^[9];平阴站在 21 时之后, 1.5 km 高度以下西南风增大,风随高度增大会产生越山气流。同时,由泰山站的风场数据看,21 时泰山站为西南风,风速为 $7.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,40 min 后,风速增大至 $11.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。受山顶附近西南气流与越山气流的共同影响,章丘站的

西南风不仅风速加大,而且厚度增厚,但由于该西南气流较干,该站上空相对湿度值并未发生改变,只是上升速度提高了 $0.3 \times 10^{-2} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。22—23 时,章丘站的地面辐合线过境,该辐合线两侧的风速超过 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,发展高度达 1.6 km ,对对流天气的发生起到较强的触发作用,使其抵消了该站 $176.2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的对流抑制能量,对流云得以发展。该站也在此时间段出现强雷电、大风与少量降水。

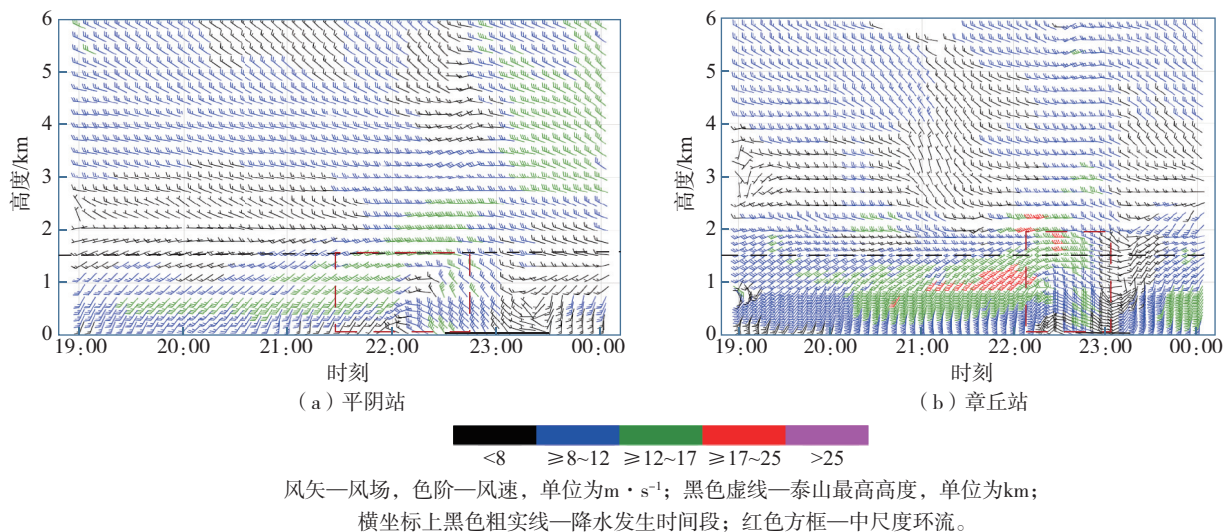


图7 2023年6月7日19—24时平阴站与章丘站垂直风廓线水平风场时间演变

Fig.7 Evolution of horizontal wind fields at Pingyin station and Zhangqiu station from 19:00 BJT to 24:00 BJT 7 June 2023

为了表征泰山山脉周围的流场情况,利用 ERA5 资料(空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$),过 36.2°N 与 117.2°E 分别做经过泰山山脉的纬向与经向剖面。由图 8a 可以看到,6 月 7 日 22 时,山脉西侧山顶高度以下为暖脊,900 hPa 以下相对湿度值在 60% 左右,表明湿层浅薄且空气未达到饱和。山体西侧存在显著的气流辐合区,气流辐合的高度到 925 hPa,处于暖脊下方,此气流辐合可能与山脉地形抬升有关。因此,山脉西侧形成山坡上升、更远的西侧下沉的纬向流场。此流场的存在有利于对流单体在山前发展、加强与维持。在山脉北侧,济南(37°N 附近)上空存在明显的暖脊(图 5b),此暖脊与两方面作用有关:一是城市热岛作用。由图 5 可以看出,无论有无对流天气,市区均存在较周围高 $2 \sim 4^\circ \text{C}$ 的暖中心;二是西南气流越山后产生的下沉增温。这点由图 8b 中山北侧近地层浅薄的辐散区可证实。暖脊向上发展的高度至 840 hPa,且随高度的

增加向南倾斜。此暖脊明显较山脉西侧的强,但此处的水汽较山脉西侧少。另外,山脉北侧存在一个北侧上升、山脉附近下沉的经向流场。此经向流场与山脉西侧的纬向流场的存在使得对流单体首先在山脉西北侧触发、发展。而山脉南侧空气辐合较弱,且集中在贴地层,不利于对流云发展,使得对流回波到达山南侧后减弱。

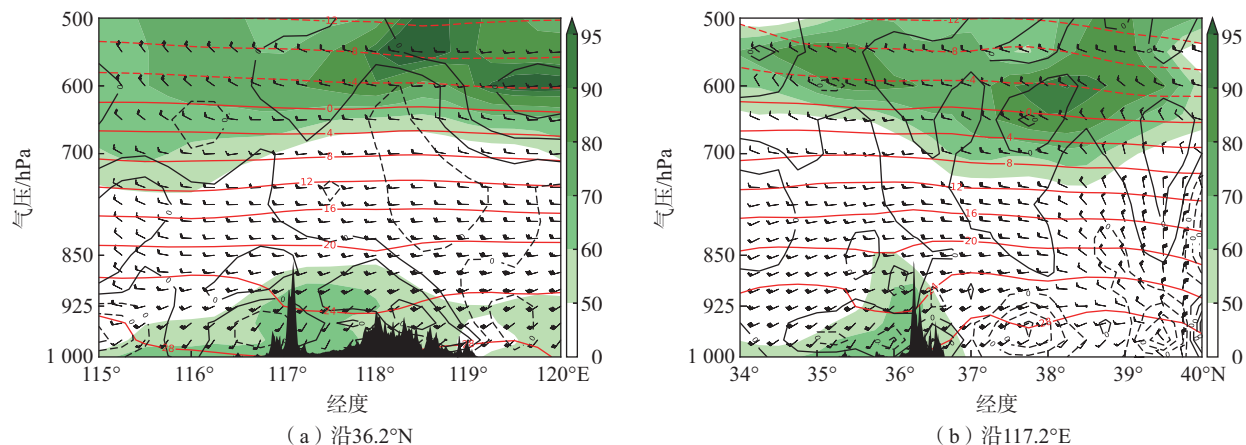
4 结论

2023 年 6 月 7 日夜发生在山东中部的强对流天气以强雷电、大风为主,雨量不大,但恰逢冬小麦收获时节,突发的对流天气给气象服务带来很大困扰。由于数值模式与主观预报均未正确预报此次过程,因此对此次干环境条件下的强对流天气进行了分析。主要结论如下:

(1) 此次对流天气发生在东北冷涡及其高空槽偏北偏东的环流背景下。山东中部大尺度环境场较

干,对流抑制能量偏大,主观预报认可全球模式与区域模式的预测结论,预报鲁中无降水。实际上,在临

近对流发生之前,鲁中存在类似于典型干下击暴流的环境条件,这点应引起足够重视。



色阶—相对湿度,单位为%;风矢—水平风场,单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;红色等值线—温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$;黑色实等值线—正散度,单位为 10^{-5} s^{-1} ;黑色虚等值线—负散度,单位为 10^{-5} s^{-1} ;黑色区域—地形;红色箭头—泰山附近局地环流

图8 2023年6月7日22时沿36.2°N与沿117.2°E散度、水平风场与相对湿度剖面

Fig.8 Profile of divergence, horizontal wind field and relative humidity along 36.2°N and 117.2°E at 22:00 BJT 7 June 2023

(2)与地面辐合线、850 hPa切变线配合的两条弱回波带(A、B)初进入山东时强度减弱。回波带B进入山东境内很快减弱消失,受地形影响不明显,而回波带A在济南市区西侧黄河岸边露点高值区,在地面中尺度辐合线的作用下对流单体强烈发展。越过黄河后,对流单体受城市热岛高温区与露点锋的共同影响进一步发展,并沿地面辐合线的走向逐渐发展成一条东北—西南走向的回波带。在回波带强对流单体的前方(即东侧)出现阵风锋,阵风锋上不断激发出新生单体,这些单体并入回波带中,使得回波带维持且有所发展。

(3)阵风锋与地面中尺度辐合线东移,受山脉阻挡,在山脚下二者停滞叠加,致使紧跟其后的回波带强度不减。随后,回波带爬山,受地形抬升作用影响,回波强度维持。当回波带到达山顶后,因地形抬升造成的上升运动减弱,地面辐合线消失,回波带强度减弱,影响鲁中的强对流天气趋于结束。而回波带南侧不爬山的那段,移速较地面辐合线偏慢,逐渐与其分离,在东移过程中逐渐减弱消失。

(4)随着850 hPa切变线逼近泰山山脉,西南气流加速,形成越山气流,造成山北侧西南气流增速、增厚,加上地面辐合线的触发,使得对流云在山脉北侧发展。需要指出的是,此西南气流较干,对强对流

的发生以动力作用为主。同时,半岛北岸也存在因特殊下垫面引起的海风锋与阵风锋叠加促使对流回波增强的现象。

(5)复杂的下垫面在此次强对流天气触发、发展与增强中均起到一定作用,在今后天气预报中应引起足够重视。

参考文献:

- [1] LECLERC M Y, THURTELL G W. Footprint prediction of scalar fluxes using a Markovian analysis[J]. Bound-Layer Meteor, 1990, 52(3): 247-258.
- [2] HORST T W, WEIL J C. Footprint estimation for scalar flux measurements in the atmospheric surfacelayer[J]. Bound-Layer Meteor, 1992, 59(3): 279-296.
- [3] 柯宗贤,王东海,曾智琳,等.粤港澳大湾区下垫面对“5·22”极端强降水过程影响的研究[J].气象, 2023, 49(1): 12-26.
- [4] 朱浩楠,刘晓冉,李永华,等.考虑地形的空间插值算法在复杂下垫面地区气温和降水精细化插值的评估[J].气象, 2020, 46(5): 655-665.
- [5] JIANG Q F, SMITH R B. Cloud timescales and orographic precipitation[J]. J Atmos Sci, 2003, 60(13): 1543-1559.
- [6] SMITH R B, BARSTAD I. A linear theory of orographic

- precipitation[J]. *J Atmos Sci*, 2004, 61(12): 1377-1391.
- [7] 丁仁海, 周后福. 九华山区下垫面对局地降水的影响分析[J]. *气象*, 2010, 36(3): 47-53.
- [8] NEIMAN P J, RALPH F M, WHITE A B, et al. The statistical relationship between upslope flow and rainfall in California's coastal mountains: observations during CALJET[J]. *Mon Wea Rev*, 2002, 130(6): 1468-1492.
- [9] 孙继松. 气流的垂直分布对地形雨落区的影响[J]. *高原气象*, 2005, 24(1): 62-69.
- [10] ALPERT P, SHAFIR H. Role of detailed wind-topography interaction in orographic rainfall[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1991, 117(498): 421-426.
- [11] 孙继松. 北京地区夏季边界层急流的基本特征及形成机理研究[J]. *大气科学*, 2005, 29(3): 445-452.
- [12] 孙军, 谌芸, 杨舒楠, 等. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(二) 极端性降水成因初探及思考[J]. *气象*, 2012, 38(10): 1267-1277.
- [13] 苏爱芳, 席乐, 吕晓娜, 等. 豫北“21·7”极端暴雨过程特征及成因分析[J]. *气象*, 2022, 48(5): 556-570.
- [14] 孙继松, 王华, 王令, 等. 城市边界层过程在北京 2004 年 7 月 10 日局地暴雨过程中的作用[J]. *大气科学*, 2006, 30(2): 221-234.
- [15] CHANGNON S A Jr, HUFF F A, SEMONIN R G. METROMEX: an investigation of inadvertent weather modification[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1971, 52(10): 958-968.
- [16] THIELEN J, WOBROCK W, GADIAN A, et al. The possible influence of urban surfaces on rainfall development: a sensitivity study in 2D in the meso- γ -scale[J]. *Atmos Res*, 2000, 54(1): 15-39.
- [17] 蒙伟光, 闫敬华, 扈海波. 城市化对珠江三角洲强雷暴天气的可能影响[J]. *大气科学*, 2007, 31(2): 364-376.
- [18] 刁秀广. 2020 年 5 月 17 日和 6 月 1 日山东强冰雹风暴双极化特征分析[J]. *海洋气象学报*, 2021, 41(1): 68-81.
- [19] 孙虎林, 罗亚丽, 张人禾, 等. 2009 年 6 月 3~4 日黄淮地区强飑线成熟阶段特征分析[J]. *大气科学*, 2011, 35(1): 105-120.
- [20] 褚颖佳, 高帆, 张永婧, 等. 一次由线状风暴和阵风锋引发的致灾大风成因[J]. *海洋气象学报*, 2023, 43(2): 53-63.
- [21] 谷山青, 王凤娇, 魏振东, 等. 黄河三角洲一次非中气旋龙卷观测分析[J]. *海洋气象学报*, 2023, 43(3): 59-70.
- [22] 梅婵娟, 张灿, 许可, 等. 山东半岛秋季一次脉冲风暴下击暴流观测分析[J]. *海洋气象学报*, 2020, 40(2): 131-139.