

Analysis of a Severe Convective Rainstorm in Langfang, Hebei Province

Na Li, Yanjie Liu, Min Xu

Langfang Meteorological Bureau, Langfang Hebei
Email: lina_nuist2011@163.com

Received: Sep. 5th, 2019; accepted: Sep. 19th, 2019; published: Sep. 26th, 2019

Abstract

With the data of micaps, automatic station, Doppler radar and satellite, a severe convective rainstorm on May 17, 2019 in Langfang was analyzed. The results show that: the process is an afternoon-vertical thermal convection in atypical circulation situation; the surface convergence line and gust front are the triggering mechanism of the process; the 925 hPa thetase energy front is an important forcing factor for the occurrence and development of the convection system; the southeasterly boundary-layer jet provides sufficient water vapor for the development of convection. The low-level cyclonic convergence and adverse wind area are beneficial to the maintenance and strengthening of the storm.

Keywords

Severe Convective Rainstorm, Convergence Line, Thetase Energy Front, Adverse Wind Area

河北廊坊一次强对流暴雨过程分析

李娜, 刘艳杰, 许敏

廊坊市气象局, 河北 廊坊
Email: lina_nuist2011@163.com

收稿日期: 2019年9月5日; 录用日期: 2019年9月19日; 发布日期: 2019年9月26日

摘要

利用micaps、自动站、多普勒雷达、卫星等资料对2019年5月17日廊坊地区一次强对流暴雨天气过程进行分析。结果表明: 该次过程是一次非典型环流形势下的午后垂直热对流, 地面辐合线和阵风锋是该次过程的触发机制, 925 hPa θ_{se} 能量锋区是本次强对流系统发生发展的重要强迫因子, 边界层东南风急流为对流发展提供了充足的水汽输送, 低层气旋性辐合、逆风区有利于风暴的维持和加强。

关键词

强对流暴雨, 辐合线, θ_{se} 能量锋区, 逆风区

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

强对流天气是廊坊主要灾害性天气之一, 廊坊强对流天气的发生具有明显的季节性分布特征, 每年的春末夏初(5~6月)是廊坊强对流天气多发的季节。强对流天气一般具有发展突然、局地性强、破坏力大等特点, 容易对农业生产和人民生活造成严重危害。廊坊位于京津走廊, 是京津两地重要的农产品生产供应基地, 强对流天气对设施农业的破坏常给廊坊带来巨大的经济损失, 2016年6月10日傍晚廊坊市出现短时强降水、雷暴大风、冰雹等强对流天气, 共导致3.52万人口不同程度受灾, 城市内涝严重, 香河县农作物受灾严重, 农作物受灾面积达3515.23公顷, 成灾面积2315.75公顷, 直接经济损失共计3126万元。并且据统计, 2000~2015年廊坊暴雨洪涝、冰雹和雷电造成灾情的站次总和占历年灾情总站次的61.7%, 因此做好强对流天气的预报预警服务工作, 有着重要意义。

强对流天气一直是天气预报中的重点和难点, 一直以来气象工作者对此方面做了大量研究[1][2][3][4][5], 其中杨晓亮等[6]研究表明, 高、低空急流及其耦合条件下急流和暴雨相互作用是2008年7月18日河北东北部局地暴雨的成因; 白先达[7]通过对桂林地区雷雨大风过程的分析得出, 桂林地区雷雨大风总对应着回波带中的强回波中心或午后分散孤立发展旺盛的对流回波单体; 丁永红[8]指出2005年5月30日横扫华北、东北大部地区的强对流天气过程, 是在高低层有高空急流和低空急流, 低层有暖湿舌伸展, 中层有干舌叠加在低层湿舌之上和大范围存在对流不稳定层结等诸多有利的温湿条件和动力条件下发展起来的; 张芹[9]对2016年6月13~14日发生在山东的一次飚线天气过程进行综合分析, 得出此次过程是东北冷涡背景下接连两次飚线影响而产生的, 地面中尺度辐合线是触发不稳定能量释放的重要机制; 尽管以数值预报模式及资料同化技术为标志的现代天气预报技术的发展极大地提高了天气预报的预报可用时效和气象要素预报的精细化水平, 但是, 对以突发性、局地性为特征的强对流天气的预报能力依然十分有限。近年来, 由突发性暴雨、雷电、大风所导致的次生灾害及严重人员伤亡事件的多发频发, 成为气象防灾减灾关注的重点问题之一, 提高强对流天气监测预警能力面临新的要求和挑战[10]。

2. 过程简述

2019年5月17日傍晚到夜间廊坊中北部地区出现一次局地强对流暴雨天气过程。17日傍晚16时左右开始, 廊坊自北向南陆续出现短时强降水, 局地伴有雷暴大风、冰雹等灾害性天气, 降雨持续到18日凌晨04时左右。降雨区平均雨量为31.6 mm, 其中廊坊市区中北部、固安中北部, 以及香河和永清部分乡镇达到50~80 mm, 三河和大厂普遍为10~30 mm, 其余地区多在10 mm以下, 最大雨量102.8 mm出现在廊坊市区西环路。降雨过程中最大风速21.0 m/s, 达到9级风力, 位于白家务国家气象观测站, 市区最大风速17.1 m/s, 北三县(三河、大厂、香河)、市区、固安局地出现冰雹, 观测站记录的最大冰雹直径为13 mm, 出现在三河, 市区最大冰雹直径8 mm, 具体情况见表1, 图1。

Table 1. The weather phenomena from 16:00 on 17 May 2019 to 04:00 on 18 May 2019
表 1. 2019 年 5 月 17 日 16 时至 18 日 04 时天气实况

站点	三河	大厂	香河	固安	市区	永清	霸州	文安	大城
降雨量(mm)	17.7	19.4	43.4	61.1	67.1	6.6	5.7	0	0
最大冰雹直径(mm)	13	9	9	6	8	//	//	//	//
最大风速(m/s)	8.7	12.9	9.7	7.5	17.1	10.9	9.1	9.1	11.5

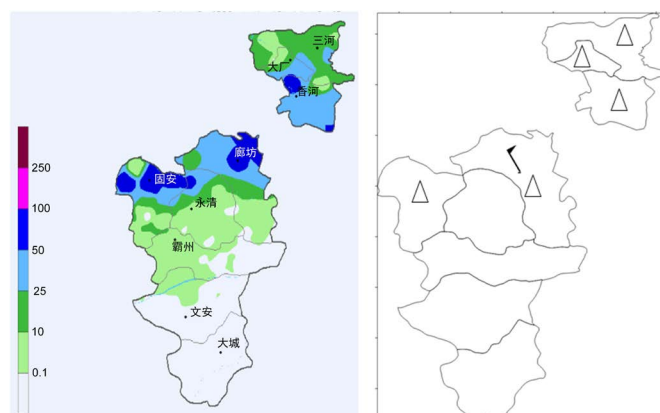


Figure 1. The distribution of rainfall, hail and high wind in Langfang from 16:00 on 17 May 2019 to 04:00 on 18 May 2019

图 1. 2019 年 5 月 17 日 16 时至 18 日 04 时廊坊市降雨量及冰雹、大风分布

图 2 可知，降水自 16:00 左右开始，首先出现在三河和大厂，之后自北向南影响市区以及固安等地，主要降水时段集中在 20:00~0:00，市区国家站最大小时雨强 54.7 mm/h，过程最大小时雨强 81.5 mm/h，位于市区西环路泵站。

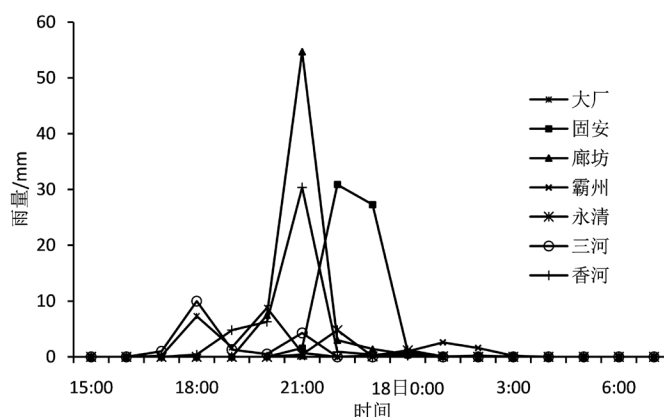


Figure 2. The hourly rainfall at each national station in Langfang from 15:00 on 17 May 2019 to 07:00 on 18 May 2019

图 2. 2019 年 5 月 17 日 15:00~18 日 07:00 廊坊各站小时降雨量

整体来看，本次过程具有突发性、分散性、局地性、降水强度大、时段集中和天气复杂的特点。此次强降水过程导致城市内涝严重，部分路段积水较深甚至造成断交。大风、冰雹使农业生产受损严重，对房屋、车辆、树木等也有一定影响。据统计，本次强对流天气共造成三河市 273.7 公顷小麦、玉米等农作物受灾，直接经济损失约 69.9 万元。

3. 环流形势分析

图 3 是 17 日 08 时环流形势, 500 hPa 上亚洲高纬地区为宽广的槽区, 中纬地区为平直西风环流, 西风带中有短波槽扰动, 500 hPa 风速较小, 河北上空温度平流不明显。700 hPa 有弱切变存在, t - td 在 15°C 左右, 湿度条件差。850/925 hPa 形势类似, 受暖脊控制, 风速小, 4 m/s , 无急流, 因此整层垂直风切变较小。850 hPa 比湿在 3 g/kg 左右, 有干舌伸向河北南部, 925 hPa 上有湿舌, 850 hPa 干舌位于 925 湿舌之上, 上干下湿, 为不稳定性层结。200 hPa 廊坊位于急流轴左侧, 地面气压场上为鞍形场, 有地面辐合线和冷锋。

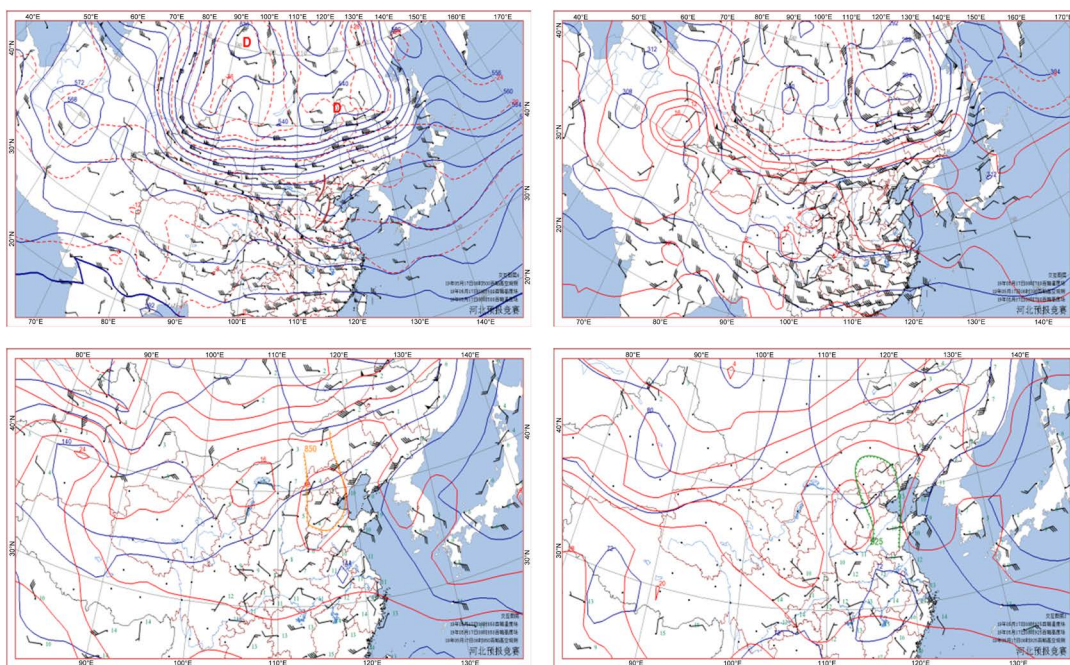


Figure 3. The circulation situation of 500, 700, 850 and 925 hPa at 8:00 on 17 May 2019

图 3. 2019 年 5 月 17 日 08 时 500、700、850、925 hPa 环流形势

根据 2000 年以后廊坊出现的强对流天气个例分型, 廊坊发生强对流过程的高空影响系统类型主要分为北涡南槽型、短波槽型、西北气流型和横槽型。其中, 出现次数最多的是北涡南槽型, 占 43.1%, 但本次过程不属于以上任何一种, 因此是一次非典型环流形势下的强对流暴雨天气过程[11]。

对各家数值模式和本地主观预报 17 日 08 时起报的 24 h 降水预报进行检验, 表 2 是一般性降水和暴雨的预报准确率。可以看到, 一般性降水的预报准确率均偏低, 普遍在 30% 以下, 中央台最低为 4.17%, Rmaps 的准确率最高也只有 39.51%, 暴雨则全部漏报。说明类似于本次非典型环流形势下的局地垂直热对流过程的可预报性差, 预报难度大, 数值产品对于此类局地突发性强对流天气的把握不准。也就是说, 常规短期预报只能预报出强对流发生发展的大概趋势和区域, 不能确切预报出其发生的地点、时间和强度, 要做好此类预报还是需要加强短时临近预报和对数值预报的订正。

Table 2. The accuracy of numerical models and subjective forecasts

表 2. 各家数值模式和本地预报准确率

预报准确率(%)		本地	中央台	EC	福建 MOS	河北 MOS	Rmaps
17 日 08 时起报	一般性降水	10.64	4.17	34.43	10.64	28.51	39.51
	暴雨	0	0	0	0	0	0

4. 物理量场诊断分析

4.1. 水汽条件

持续不断的水汽输送是强对流发生发展的重要条件,从廊坊比湿垂直剖面来看(图4),水汽主要集中在925 hPa以下,925 hPa以下比湿在10 g/kg以上,满足廊坊本地的暴雨指标,925 hPa之上等比湿线密集,比湿迅速减小,850 hPa在4 g/kg左右,上干下湿,层结不稳定;其次,从水汽通量散度的垂直剖面来看,17日之前整层水汽通量散度也很小,说明整层水汽输送较小,没有天气尺度的水汽输送。并且从大气可降水量来看(图5),17日20时廊坊地区的大气可降水量只有30 kg/m²左右,不满足本地的暴雨指标,因此短期预报中当天没有考虑大的降水,导致此次过程漏报。

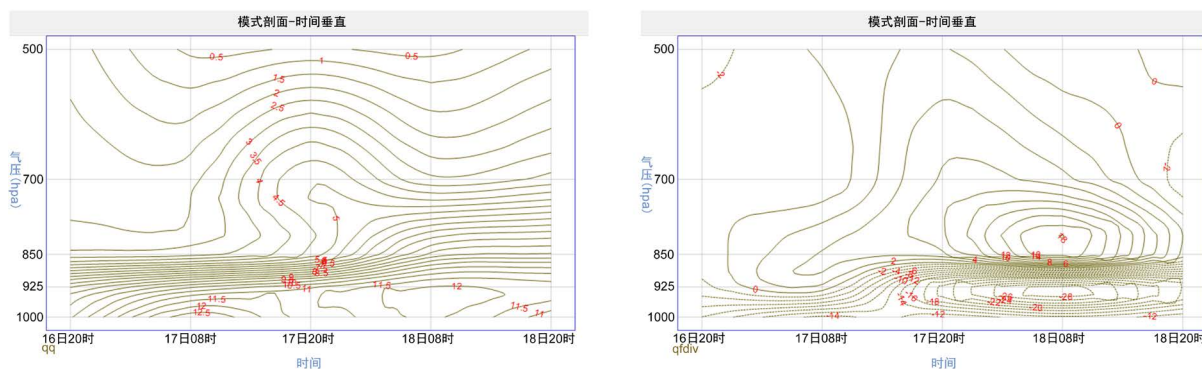


Figure 4. The vertical profile of specific humidity and vapor flux divergence from 20:00 on 16 May to 20:00 on 18 May
图4. 5月16日20时~18日20时比湿、水汽通量散度垂直剖面

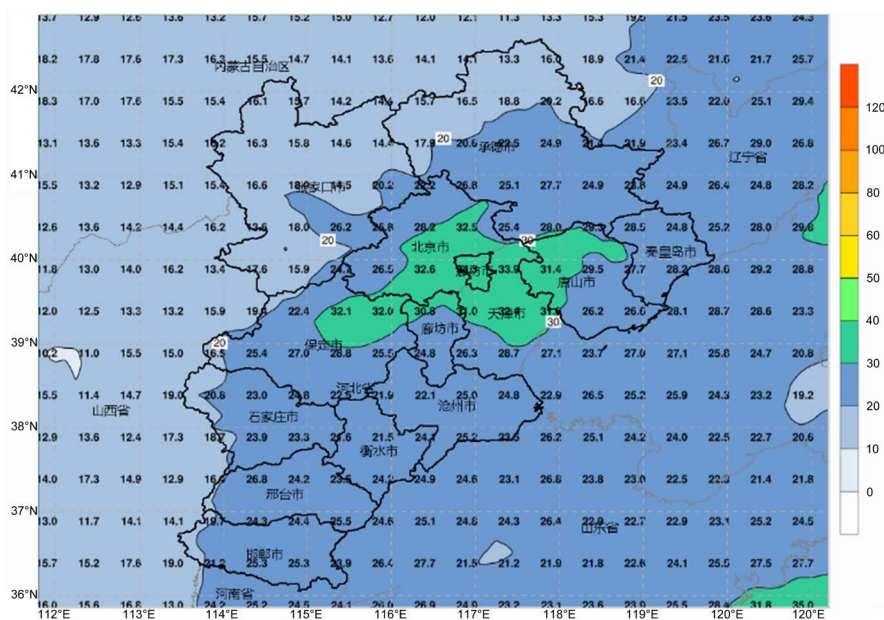


Figure 5. The precipitable water at 20:00 on 17 May 2019 (unit: kg/m²)

图5. 2019年5月17日20时大气可降水量(单位: kg/m²)

4.2. 不稳定条件

5月17日08时廊坊850 hPa与500 hPa温差为34℃,河北本地指标当(T850-500) > 28℃时,就表明

有强的位势不稳定，并且从红外云图来看(图略)，白天河北大部为晴空区，辐射升温有利于午后热对流出现， $T_{max} = 33^{\circ}\text{C}$ ，接近当天的对流温度 35°C ，说明午后出现局地热对流的可能性大。图 6 为 5 月 17 日 08 时北京探空，可以看到 925 hPa 和 1000 hPa 之间为浅薄湿层，850 hPa 和 500 hPa 附近分别有两个喇叭口，上干下湿，层结不稳定，925 hPa 附近有逆温层存在，逆温层使低层增暖增湿，并贮存能量，加大层结不稳定度；低层大气接近干绝热递减，且具有一定的 D_{CAPE} ，利于雷暴大风出现； 0°C 层高度 3.8 km， -20°C 层高度 6.4 km，高度适宜，利于冰雹出现；08 时 $\text{CAPE} = 1113 \text{ J/kg}$ ，14 时修订后在 2000 J/kg 以上，能量条件有利； $K = 12^{\circ}\text{C}$ ， $\text{SI} = 4.39^{\circ}\text{C}$ ，对流指数相对较小，0~6 km 垂直风切变为 10 m/s ，相对较小，不利于雷暴的加强和转换。综合分析探空资料，本次过程是一次雷暴大风、冰雹和短时强降水的综合性强对流天气过程。

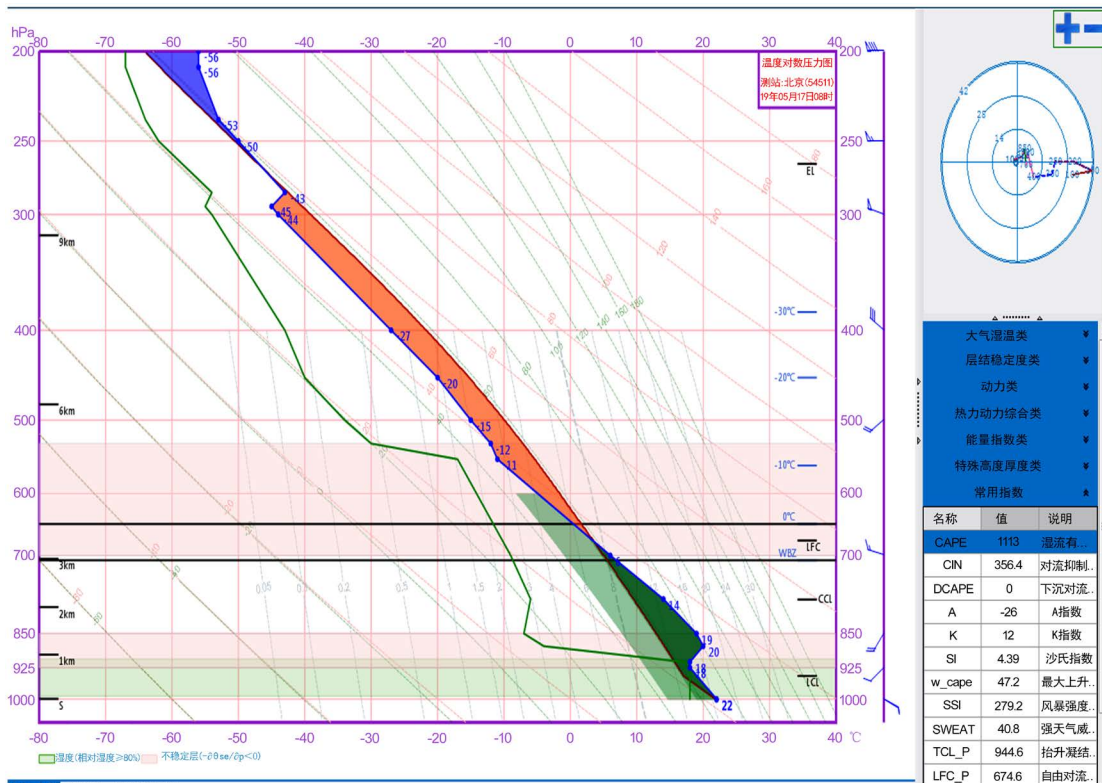


Figure 6. The T-lnP chart of Beijing at 8:00 on 17 May 2019
图 6. 2019 年 5 月 17 日 08 时北京温度对数压力图

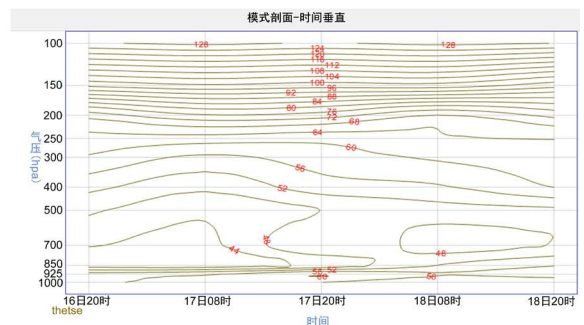
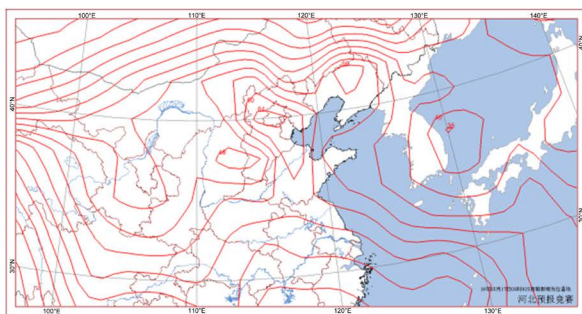


Figure 7. The θ_{se} of 925hPa at 8:00 on 17 May and the vertical profile of θ_{se} from 20:00 on 16 to 20:00 on 18 May
图 7. 5 月 17 日 08 时 925 hPa θ_{se} 、5 月 16 日 20 时-18 日 20 时 θ_{se} 垂直剖面

θ_{se} 假相当位温, 又称绝热相当位温, 能同时表征大气的水汽和热力状况, 从图 7 来看, 17 日 08 时在河北北部地区形成等 θ_{se} 的密集带, 也就是能量锋区, 能量锋区内有丰富的水汽和能量的聚集, 另外等 θ_{se} 的密集带附近也是强上升运动区, 强对流天气一般出现在等 θ_{se} 的密集处的高温高湿区中。从垂直剖面来看 17 日 20 时, 850 hPa 以下 θ_{se} 有显著增加, 低层假相当位温的显著增加可以造成很强的对流不稳定。并且根据李江波等[12]分析, 850 hPa θ_{se} 密集区的高能舌与强对流天气有很好的对应关系, θ_{se} 能量锋区是本次强对流系统发生发展的重要强迫因子。

4.3. 触发机制

逆温层的存在使得低层积聚了大量水汽和能量, 一经触发, 严重的对流性天气就会发生。午后从地面加密风场来看(图 8), 有辐合线存在, 地面辐合线是重要的触发条件之一, 17 日 16:00 到 19:00, 辐合线自北向南移动, 先后在张家口、北京、廊坊与北京南部山区交界触发对流云, 辐合线的位置与对流云带的位置基本一致, 并且对流云团在北京南部生成后, 雷暴前沿有阵风锋移出, 在阵风锋和地面辐合线相遇的地方, 激发了新的对流并使原来的对流风暴加强, 因此地面辐合线和阵风锋是本次过程的触发机制。

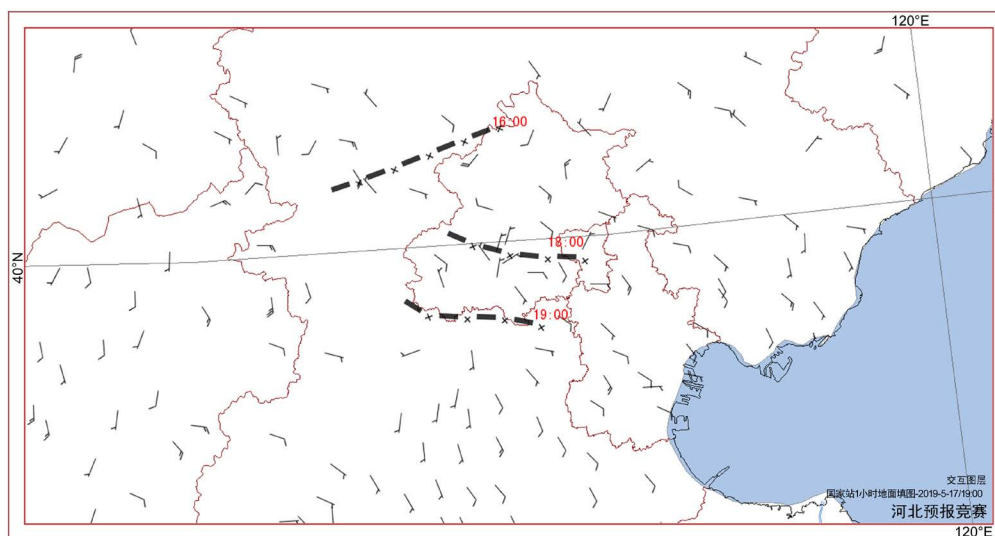


Figure 8. The surface encrypted wind at 19:00 on 17 May 2019
图 8. 5 月 17 日 19 时地面加密风场

5. 雷达资料分析

分析前期条件, 低层高温高湿, 有能量积累, 午后经地面辐合线触发后, 产生垂直热对流, 并在阵风锋作用下加强, 这类强对流天气系统尺度小、生命史短、突发性强, 常规观测资料时空分辨率低, 而多普勒雷达产品的时空分辨率相对较高, 可以进一步分析雷暴的内部组织和结构。

从北京雷达回波演变来看(图 9), 17 日 16 时 18 分, 先是在顺义生成回波, 回波发展迅速, 到 16 时 30 分移入三河西部, 之后范围进一步扩大到北三县, 强回波在北三县持续将近 4 个半小时, 最大反射率因子 65 dBz, 北三县均观测到冰雹, 最大冰雹直径 13 mm。市区 19 时左右在地面辐合线的触发下生成回波, 后在阵风锋作用下迅速加强为超级单体, 受其影响, 市区出现 54.7 毫米/h 的短时暴雨, 并在 19:52 观测到冰雹, 直径 8 mm, 冰雹持续时间 52 分钟, 据统计, 廊坊冰雹持续时间普遍在 30 分钟以下, 30 分钟以上的冰雹极为罕见, 仅占 1.18%, 并出现 17 m/s 以上的大风, 21 时左右强回波主体西移到固安,

固安最大小时雨强 30.9 毫米/h，此外永清和霸州也出现分散性降水，22 时后北三县降水基本结束，18 日 04 时全区降水结束[9]。

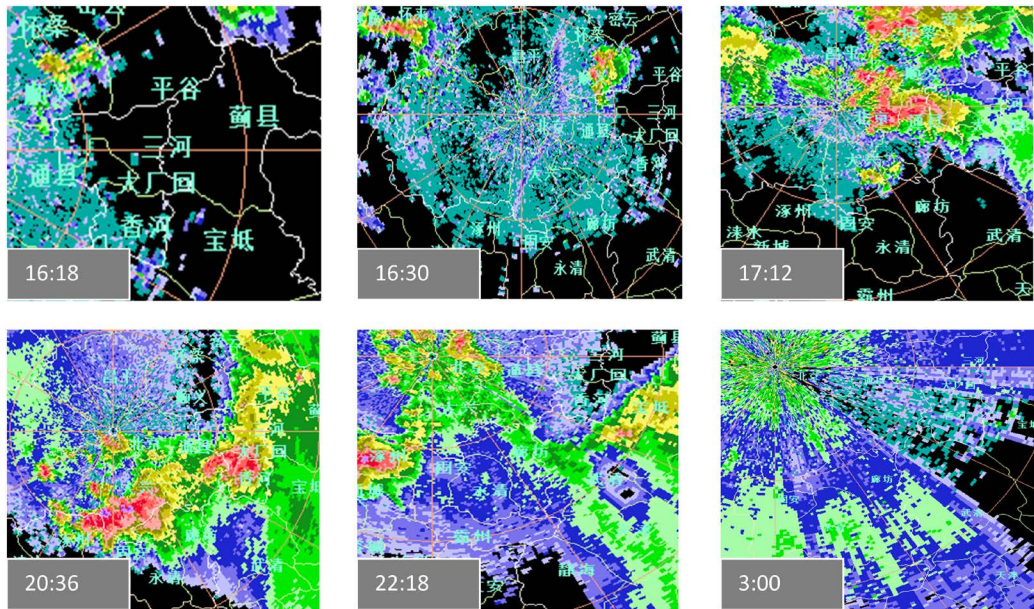


Figure 9. The reflectivity factor charts of 1.5° elevation of Beijing radar at different times
图 9. 各个时次北京雷达 1.5°仰角反射率因子图

19 时 54 分 2.4°和 4.3°仰角反射率因子上出现三体散射长钉特征(图 10)，2.4°仰角上最大反射率因子 70dbz，回波呈块状，结构紧密，为积状云降水，低层 0.5°和 1.5°仰角上有反射率因子梯度大值区，并能看出明显的钩状回波和有界弱回波区特征，抬高仰角有回波悬垂结构的特点，这些都表明此时风暴已发

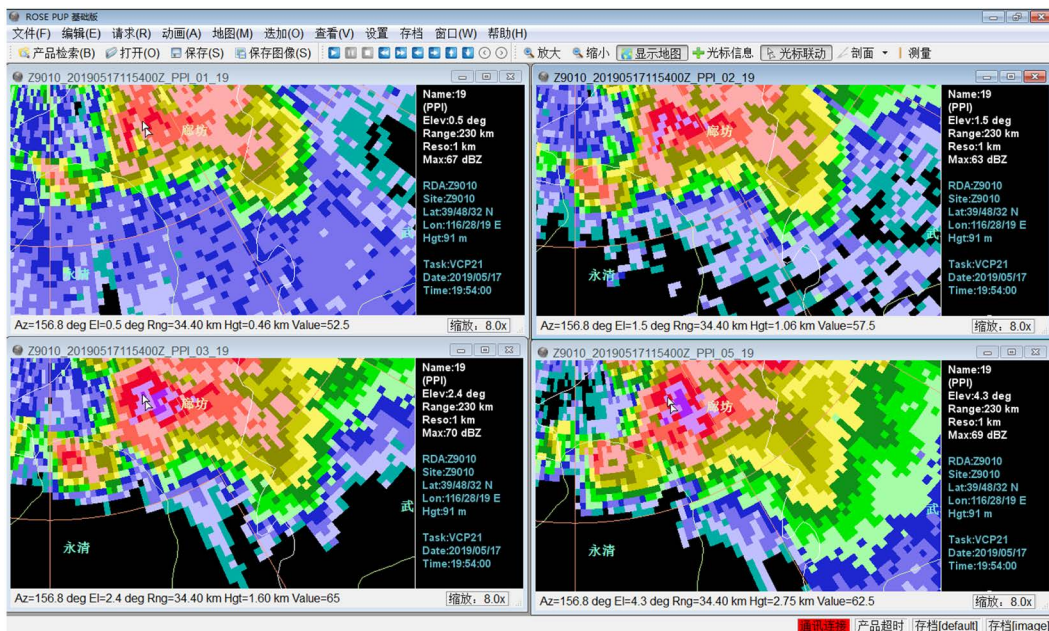


Figure 10. The reflectivity factor charts of 0.5°, 1.5°, 2.4°and 4.3°elevation of Beijing radar at 19:54
图 10. 19 时 54 分北京雷达 R19 0.5°/1.5°/2.4°/4.3°仰角反射率因子

展成为超级单体[13]。图 11 是 19 时 54 分北京雷达反射率因子剖面 and 风暴趋势，可以看到超过 55 dbz 的回波在 10 km 以上，回波顶高在 15 km 左右，回波悬垂特征明显，中低层有有界弱回波区(BWER)，并且强回波即将及地，风暴趋势上，19 时 30 分，VIL 出现跃增，超过 30 kg/m² 一个体扫，“三体散射”、强回波及地、VIL 跃增均对冰雹有很好的指示意义，并且冰雹、大冰雹出现概率都达到 100%，此时应及时发布冰雹预警，事实上市区 19 时 52 分时观测到冰雹，而当探测到“三体散射”再发预警，已经滞后，因此要综合判断识别冰雹的各种回波特征，及早发布预警，预警越早及时准确发布，就能避免更多的人员财产损失。

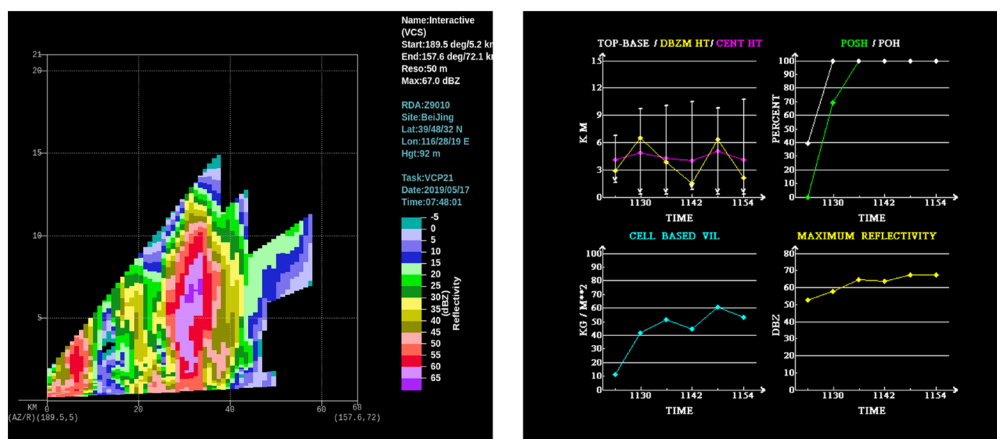


Figure 11. The vertical profile of reflectivity factor and Storm-Trend Product of Beijing radar at 19:54
图 11. 19 时 54 分北京雷达反射率因子剖面 and 风暴趋势

此外，由图 12 来看，19:54 分 0.5°速度图上有气旋性辐合和逆风区，在靠近雷达一侧辐散，远离雷达一侧辐合，强降水出现在辐合区一侧。根据梁红等[14]研究，逆风区是前侧为辐合上升，后侧为辐散下沉的涡管，当回波进入逆风区时，往往要加强，并且逆风区和强回波中心、强降水中心是相对应的。逆风区和气旋性辐合区的存在说明低层有强的径向辐合，低层径向辐合有利于风暴的维持和加强，利于风暴发展成为强的对流单体，并且逆风区对未来回波的变化有一定的指示意义[15]。

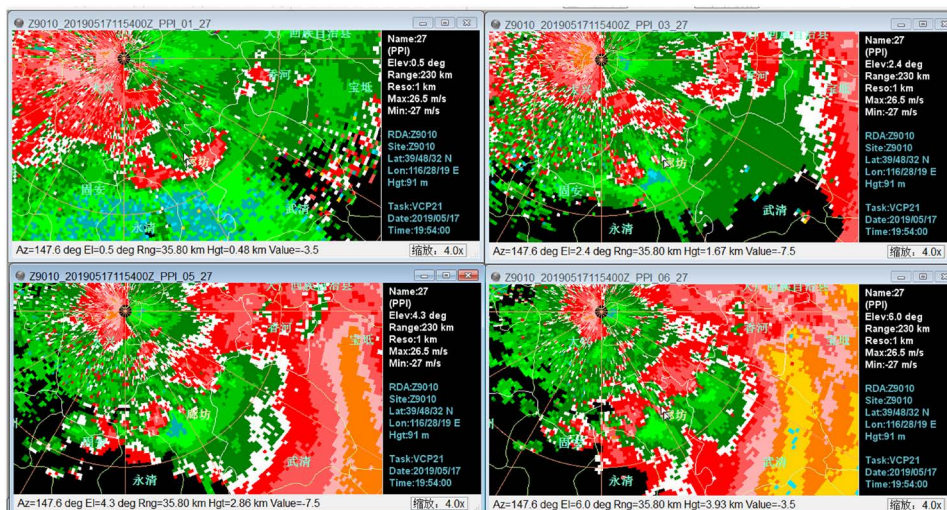


Figure 12. The radial velocity of 0.5°, 1.5°, 2.4° and 4.3° elevation of Beijing radar at 19:54
图 12. 19 时 54 分北京雷达 V27 0.5°/2.4°/4.3°/6.0°仰角径向速度

图 13 是北京雷达 19:00~21:00 垂直风廓线, 可以看到 19 时 24 分左右降水开始, 降水开始前整层风速较小, 3 km 处风速在 6 m/s 左右, 垂直风切变也较小, 不利于强对流风暴的发展; 而降水开始后, 在降水物的拖曳作用和蒸发冷却形成的冷而重的下沉气流的双重作用下, 风速随之增大, 0~6 km 垂直风切变增大到 20 m/s 以上, 并且边界层东南风风速达到急流强度, 在急流强有力的水汽输送作用下, 水汽在暴雨区聚集辐合上升, 形成此次短时暴雨。

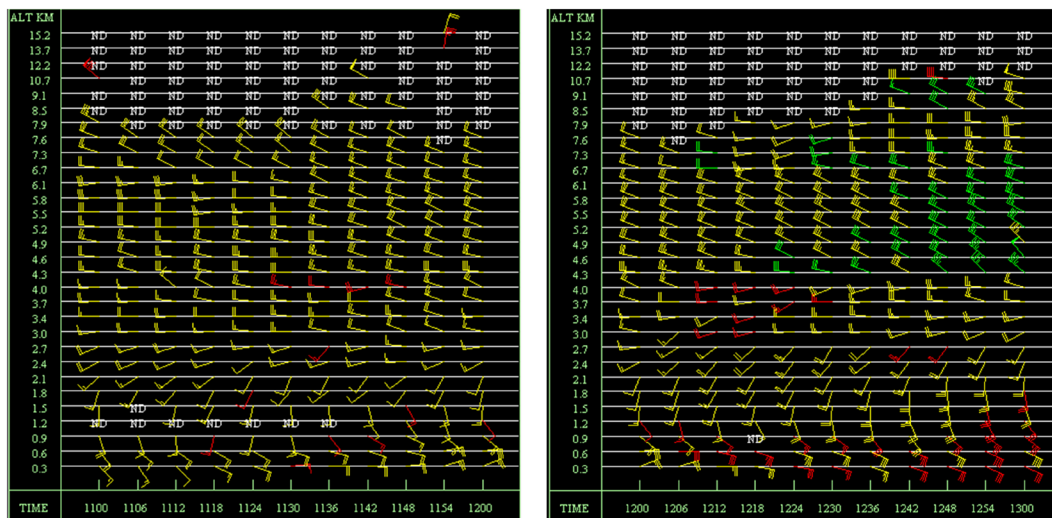


Figure 13. The VWP of Beijing radar from 19:00 to 21:00 on 17 May

图 13. 北京雷达 5 月 17 日 19:00~21:00 垂直风廓线产品

6. 结论

- 1) 本次过程是一次午后垂直热对流, 具有分散性、局地性、降水强度大、时段集中和天气复杂的特点;
- 2) 廊坊强对流天气的高空影响系统类型主要分为北涡南槽型、短波槽型、西北气流型和横槽型, 本次过程的环流形势不属于廊坊强对流天气分型中的经典类型, 是一次非典型环流形势下的强对流天气过程, 具有一定的预报难度;
- 3) 地面辐合线和阵风锋是该次过程的触发机制, 925 hPa θ_{se} 能量锋区是本次强对流系统发生发展的重要强迫因子, 边界层东南风急流为对流发展提供了充足的水汽输送;
- 4) 主要影响系统是中小尺度对流系统, 在北京雷达上探测到“三体散射”长钉、逆风区、中气旋、钩状回波、回波悬垂等特征, 低层气旋性辐合、逆风区的存在有利于风暴的维持和加强。

基金项目

廊坊市气象局项目“强对流预报预警创新团队”, 廊坊市科技局项目(2019013073)。

参考文献

- [1] 陈晓红, 郝莹, 周后福, 等. 一次罕见冰雹天气过程的对流参数分析[J]. 气象科学, 2007, 27(3): 335-341.
- [2] 廖移山, 李俊, 王晓芳. 2007 年 7 月 18 日济南大暴雨的 β 中尺度分析[J]. 气象学报, 2010, 68(6): 944-955.
- [3] 梁建宇, 孙建华. 2009 年 6 月一次飚线过程灾害性大风的形成机制[J]. 大气科学, 2012, 36(2): 316-336.
- [4] 高维英, 李明, 宁海文, 等. 2004-06-29 西安地区强对流天气过程分析[J]. 陕西气象, 2005(6): 69.
- [5] 张有洋, 谢文锋, 陈美玲. 2015 年 6 月广东一次暖区强对流过程分析[J]. 广东气象, 2018, 40(3): 24-28.

-
- [6] 杨晓亮, 李江波, 杨敏. 河北 2007 年 7 月 18 日局地暴雨成因分析[J]. 气象, 2008, 34(9): 47-56.
- [7] 白先达, 莫志祥. 桂林地区雷雨大风分析及预报[J]. 广西气象, 1993, 14(4): 7-10.
- [8] 丁永红, 马金仁, 纪晓玲. 一次大范围强对流天气的成因分析[J]. 干旱气象, 2006, 24(1): 28-33.
- [9] 张芹, 王洪明. 一次东北冷涡背景下的爬线天气过程诊断分析[J]. 气象与环境科学, 2018, 41(2): 43-51.
- [10] 孙继松, 戴建华, 何立富, 等. 强对流天气预报的基本原理与技术方法[M]. 北京: 气象出版社, 2014: 282.
- [11] 杜海涛, 郭立平, 王清川, 等. 廊坊市灾害性天气预报手册[M]. 北京: 气象出版社, 2019: 192.
- [12] 李江波, 闫巨盛, 马凤莲. 河北平原一次春季强对流天气分析[J]. 气象, 2007, 33(9): 74-82.
- [13] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 多普雷天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 314.
- [14] 梁红, 陈立德, 李大为, 等. 沈阳一次局地大暴雨过程中逆风区的回波演变[J]. 气象与环境学报, 2011, 27(3): 12-17.
- [15] 赵海军, 李柏, 潘玲, 等. 暴雨过程中逆风区特征及应用判据研究[J]. 海洋气象学报, 2019, 39(2): 126-133.