

纪彬,何静,张迎新,等,2020.北京地区两条线状对流相继下山发展的边界层条件对比研究[J].气象,46(5):643-654. Ji B, He J, Zhang Y X, et al, 2020. Study on two successive downhill line convections developing on different boundary layer conditions in Beijing area[J]. Meteor Mon, 46(5):643-654(in Chinese).

北京地区两条线状对流相继下山发展的 边界层条件对比研究^{*}

纪彬¹ 何静² 张迎新¹ 周璇¹

¹ 北京市气象台,北京 100089

² 北京城市气象研究院,北京 100089

提 要: 利用北京地区稠密的观测资料和变分多普勒雷达分析系统(VDRAS)再分析资料,分析了2017年7月7日相继影响北京地区并造成短时强降水、大风、小冰雹等的两条线状对流活动。两条对流均生成于北京西北的河北张家口山区,且在山脚和平原地区继续发展,但其边界层条件是不同的,第二条对流带在第一条影响后的冷垫上发展。结果表明:平原及山脚一带较好的热力、动力条件,包括高温高湿的边界层环境、低层环境风场与对流带前侧冷池出流形成的辐合,为第一条对流带在下山过程中快速组织化发展形成飑线提供了有利条件。飑线发展强盛阶段,冷池的发展与环境低层垂直风切变达到平衡,冷池前沿自地面至1.5 km高度处形成强辐合区,上升运动呈近乎垂直的形态。第二条对流带在前一条飑线形成的冷垫上继续发展,形成暖季高架对流,虽然风暴上升运动呈倾斜状且强度有所减弱,但是强回波(≥ 45 dBz)面积未减。一方面,第二条对流带受前一条飑线能量方面的抑制;但另一方面,两条对流带在合适的距离下,低层流场形成辐合,尤其是在第二条对流带的冷池与前一条飑线形成的冷垫靠近叠加以后低层辐合进一步加强,第二条对流带回波继续北上。本例高架对流发展的能量来源主要为边界层以上层结不稳定的大气,可能伴随在第一条飑线过境后由偏南暖湿气流带来的边界层以上对流能量重建过程。所以,在强对流短时临近预报业务中,需要综合考虑热力、动力等多重因素,而VDRAS快速更新同化的再分析资料可以提供有效参考。

关键词: 线状对流,高架对流,边界层,VDRAS,对流能量重建

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.05.005

Study on Two Successive Downhill Line Convections Developing on Different Boundary Layer Conditions in Beijing Area

Ji Bin¹ HE Jing² ZHANG Yingxin¹ ZHOU Xuan¹

¹ Beijing Weather Forecast Center, Beijing 100089

² Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

Abstract: Two line convections hit Beijing Area successively and caused short-time heavy rainfalls, gales and small hails on 7 July 2017. In this paper, the two cases were compared based on the high spatio-temporal resolution observations and the Variational Doppler Radar Analysis System (VDRAS) dataset. Both of the line convections were formed on the mountains in Zhangjiakou, located to the northwest of Beijing, and developed at the foothills and on the plains. However, they had different boundary layer conditions, as the second one developed on the cold mass caused by the first one. The results are shown as follows. The first line convection developed into a squall line benefited from both dynamic and thermodynamic conditions of

^{*} 国家重点研发计划(2018YFC1507305)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(IUMKY201812)共同资助

2019年1月16日收稿; 2020年2月9日收修定稿

第一作者:纪彬,主要从事天气预报技术工作. Email: jibinnju@163.com.

the foothills and the plains, which includes the hot and humid environment in the boundary layer, the convergence line generated by the outflows of the cold pool and the low-level environmental southerly wind. At its mature phase, the squall line had the strongest convergence from surface to the height of 1.5 km and an approximately vertical updraft. The second line convection developed into an elevated convection on the cold mass caused by the previous one. The area of strong echo (≥ 45 dBz) maintained, though the updraft tilted and had a certain decrease. The thermodynamic conditions seemed to be no longer beneficial due to the wide and strong cold mass caused by the first one. The outflows from the two lines formed a convergence line, and the convergence line intensified especially when the cold mass of the second one met the cold mass caused by the first one, which offered dynamic conditions for the second one. The unstable layer above the boundary layer provided convective energy for the elevated convection. Besides, the rebuilt of convective available potential energy (CAPE) after the first convection is possible as warm advection and positive water vapour transport did exist in Beijing Area. Above all, both dynamic and thermodynamic conditions should be considered in nowcasting of convective storms, where VDRAS could play a positive role.

Key words: line convection, elevated convection, boundary layer, Variational Doppler Radar Analysis System (VDRAS), rebuilt of CAPE

引 言

强对流天气系统由于其突发性、局地性及尺度小等特征,是天气预报中的一个技术难点(俞小鼎等,2012;何立富等,2011;郑永光等,2010)。中尺度观测网的建立对于认识强对流和预报具有重要意义。全国范围开发了基于加密自动气象站 WS 报、全国闪电定位监测网、FY 系列卫星以及雷达组网等多种实况观测资料的强对流实时监测产品(何立富等,2011),建立了强对流天气综合监测业务系统(郑永光等,2013)。截至 2019 年 12 月北京地区已建立 415 个加密自动站并进行实时数据质量控制(窦以文等,2008)、一部 S 波段雷达以及 9 部 X 波段雷达组网、微波辐射计组网、风廓线仪组网(张朝林和王迎春,2002)。加密观测网为北京地区强对流天气监测和研究提供了日趋完善的条件。

变分多普勒雷达分析系统(VDRAS)自 2008 年奥运会以来在北京已业务运行多年,实时为预报员提供高时空分辨率的多要素再分析场,用于强对流的短时临近主观预报,同时也用于华北区域模式的初值场(Sun and Crook, 1997; 1998; 2001; 陈明轩等,2011)。实例证明 VDRAS 反演的风场、温度场与实况误差在允许的范围之内,可以用于短时临近预报的实况分析和中尺度模式的初值场(Sun et al, 2010)。该资料近年来也用于强对流个例研究(陈明轩和王迎春,2012; Xiao et al, 2017; 孙密娜等,

2018;徐燕等,2018),对于捕捉中尺度信息,更好地认识强对流生消规律具有重要意义。

本文研究前后两个相继下山影响北京地区的线状对流个例,此个例无论是全球模式还是中尺度数值模式均没有提前预报。利用北京地区稠密的观测资料和 VDRAS 再分析资料诊断此次强对过程发展成因,并着重分析平原地区及山脚一带边界层完全不同的热力条件对线状对流发展的影响,尤其是第二条对流带在第一条对流带影响后的冷垫上继续发展的机制。

1 数据和方法

本文所用的资料主要有 VDRAS、加密自动站、风廓线、NCEP FNL $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析(<https://rda.ucar.edu/>)资料等。

VDRAS 是一个利用三维云模式和四维变分同化技术,融合了雷达径向风和反射率因子、地面观测、中尺度业务预报系统 BJ-RUC 等资料的高时空分辨率的模式反演数据,提供三维动力和热力场信息,如风场以及温度场、湿度场、散度场等物理量信息,自 2008 年奥运会以来在北京已业务运行多年,具体技术方案细节参见相关文献(Sun and Crook, 1997; 1998; 2001; 陈明轩等,2011)。本文所用 VDRAS 资料为地形跟随坐标系,垂直分辨率为 0.4 km, 0.2 ~ 5.8 km 共 15 层;水平分辨率为 2.5 km,格点数为 110×110 ,中心坐标为 40.152°N 、

116.209°E。涉及的变量主要为水平和垂直风矢量、扰动温度、露点温度、对流有效位能(CAPE)、水平散度等。

由于加密自动站所在海拔高度不同,进行如下订正:

$$T_0 = T_s + \gamma H,$$

式中: T_0 为海平面温度(单位:°C), T_s 为自动站地面气温(单位:°C), H 为自动站海拔高度(单位:m), γ 为7月7日20时北京南郊观象台(以下简称观象台)探空资料的850~1000 hPa平均温度递减率(单位:°C·m⁻¹),同孙继松和王华(2009)的工作。

2 天气过程概况与天气形势

2.1 对流发展概况

2017年7月7日傍晚至夜间,北京地区受上游河北张家口山区一带对流活动下山发展的影响——接连两次线状对流活动,过程雷达组合反射率变化见图1。全市大部分地区出现雷阵雨,平均降雨量为11.0 mm;并伴有局地8级以上短时大风,多地出现小冰雹。

第一条对流带在进入北京西北部的延庆地区后

快速发展加强,对流中心雷达反射率强度超过60 dBz,并可识别标志超级单体的中气旋特征。7日19:54(北京时,下同)在雷达径向速度图上,距离雷达中心约100 km、对应1.5°仰角反射率因子最大梯度区的位置,2.4°仰角存在19 m·s⁻¹的速度对(图2),达到中等强度中气旋的旋转速度,且垂直伸展高度达对流高度1/3以上,持续时间达两个体扫以上。随后,下山过程中向两侧伸展,强回波面积不断增大,组织性增强,最终形成东北—西南向的飑线,自西向东影响北京地区,并可观测到明显的阵风锋。受其影响,所经之处出现雷暴大风,区域自动站小时雨强达20 mm·h⁻¹有13站次,不仅山区有冰雹观测记录,北部的昌平、海淀、顺义平原地区也有冰雹观测记录。23:00第一条飑线主体东移出北京。

第二条对流带从北京西部的门头沟地区下山,下山后有所增强,以偏西路径影响北京地区。虽然相比第一条飑线组织性较差,未形成标准的弓状回波,但其下山后维持线状组织结构,中心强度仍达60 dBz以上。同样伴有雷暴大风,除山区外,在北部的昌平平原地区也观测到冰雹记录,但区域自动站小时雨强未达20 mm·h⁻¹及以上。

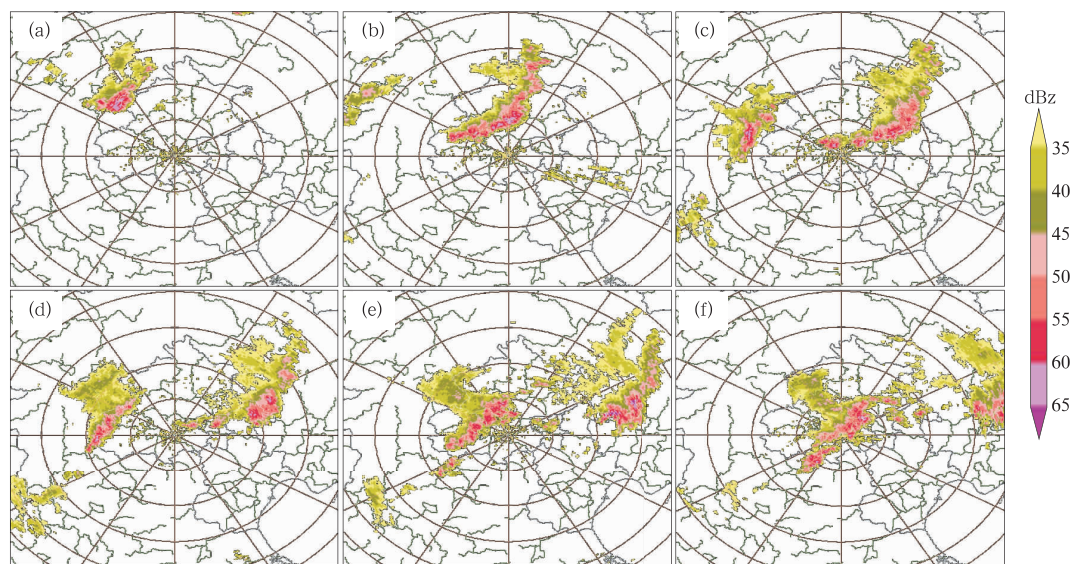


图1 2017年7月7日19:54(a)、21:00(b)、22:00(c)、22:30(d)、23:00(e)、23:30(f)北京SA雷达组合反射率30 dBz及以上填图

Fig. 1 Radar composite reflectivity above 30 dBz from Beijing CINRAD-SA Radar at (a) 19:54 BT, (b) 21:00 BT, (c) 22:00 BT, (d) 22:30 BT, (e) 23:00 BT and (f) 23:30 BT 7 July 2017

2.2 天气形势

前一日受冷涡南部低槽影响,华北出现了区域性暴雨。7日08时北京地区转至冷涡底部,高空转受偏西或西北气流控制(图3a),但受冷涡后部补充

冷空气影响,至20时,850 hPa 内蒙中部至河北、山西一带有切变线发展,北京地区转受切变线前部西南气流控制,风速达 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图3b)。风廓线资料(图4,自西北—东南依次为延庆、海淀、观象台)可以完整地反映高空风随时间的变化。08时高空为

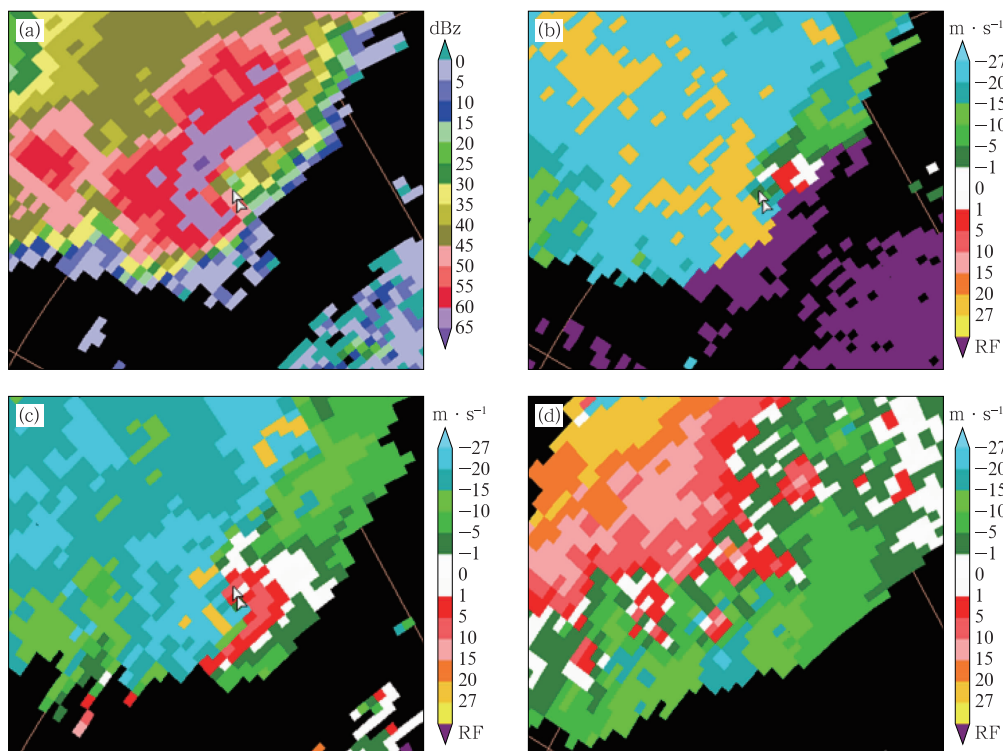


图2 2017年7月7日19:54北京SA雷达1.5°仰角反射率因子(a)及1.5°(b)、2.4°(c)、6.0°(d)仰角径向速度

Fig. 2 Radar base reflectivity (a) at 1.5° elevation and radar radial velocity at (b) 1.5°, (c) 2.4°, (d) 6.0° elevations from Beijing CINRAD-SA Radar at 19:54 BT 7 July 2017

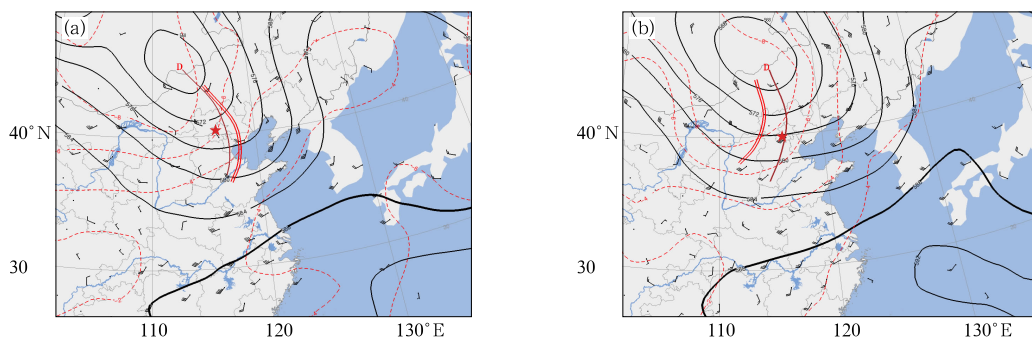


图3 2017年7月7日08时(a)、20时(b)500 hPa高度场(黑色实线)、温度场(红色虚线), 850 hPa风场及高空主要天气系统配置
(棕色实线:500 hPa槽线,红色双实线:850 hPa切变线,红色五角星:北京)

Fig. 3 The 500 hPa height field (black solid lines) and temperature field (red dashed lines), the 850 hPa wind field, and configuration of major weather systems at high levels at (a) 08:00 BT and (b) 20:00 BT 7 July 2017
(brown solid line: 500 hPa trough, red double solid line: 850 hPa wind shear, red star: Beijing)

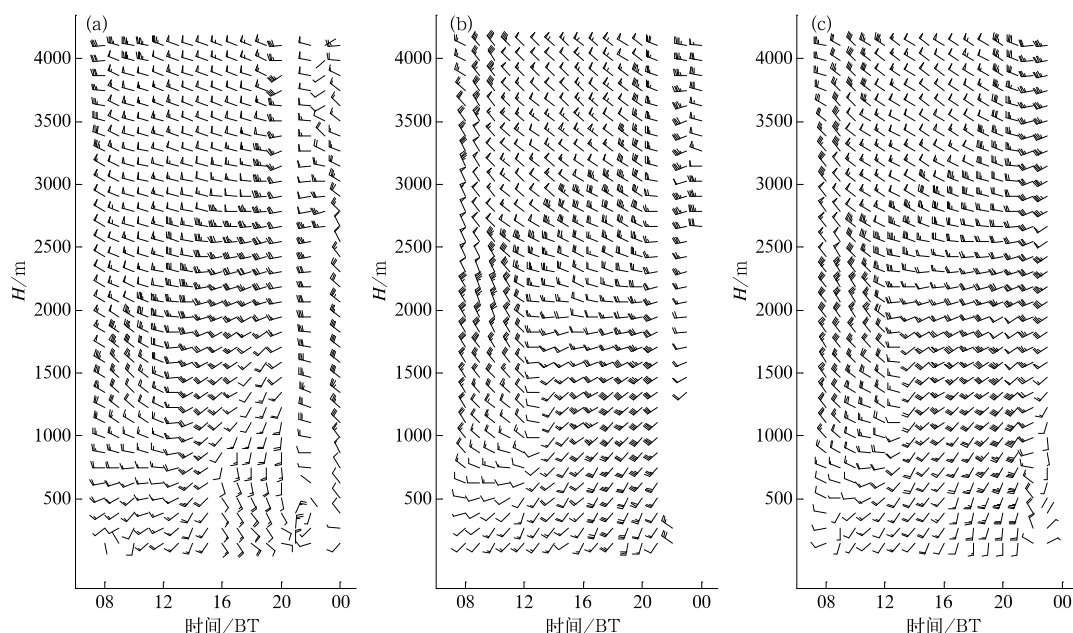


图4 2017年7月7日08时至8日00时延庆站(a,54406),海淀站(b,54399),观象台站(c,54511)

风廓线雷达各采样高度逐小时平均水平风时序图(对流影响时段部分数据存在缺失)

Fig. 4 Time series of wind profile at the stations of Yanqing (a, 54406), Haidian (b, 54399) and Nanjiao Observatory (c, 54511) from 08:00 BT 7 to 00:00 BT 8 July 2017

(Some observed data are in default during the occurrence of convections)

偏西或西北气流,但近地层为西南风,边界层内从中午开始转为西南风。由于地形阻挡的作用,西北部的延庆站在16时起至对流影响前500 m高度以下转为东南风,而分别位于平原地区南部和西部的观象台和海淀站风向主要表现为偏南风或西南风。北京地区加密自动站观测表明地面自16时起平原地区北部风向开始出现逆转,至18时,西部山区至平原中部一带建立西南风与东南风的辐合(图略)。

7日20时观象台探空(图5)表明虽然大气相对湿度条件一般,但是低层绝对湿度条件较好,850 hPa比湿为 $11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,层结曲线呈上干下湿的特征;且随着白天日照条件转好,地面辐射升温明显,以及高层冷空气入侵,CAPE达 $2715 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$;0~6 km垂直风切变达 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,0~3 km垂直风切变达 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,具备了强对流,尤其是雷暴大风、小冰雹发生的环境条件。

3 暖湿边界层对第一条飑线的影响

3.1 暖湿边界层概况

在对流发生前,北京地区边界层维持高温高湿

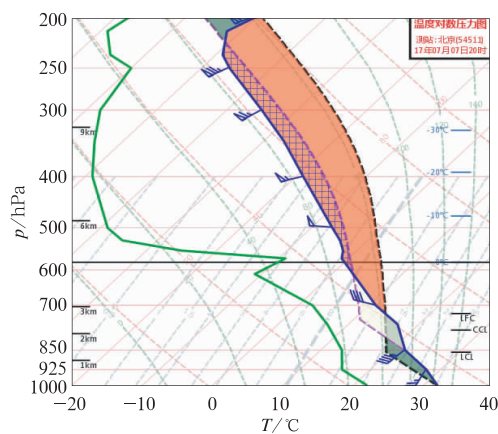


图5 2017年7月7日20时观象台T-logp图

(蓝色实线:温度,绿色实线:露点温度,黑色、紫色虚线分别为从地面、850 hPa抬升的状态曲线)

Fig. 5 Skew T-log p profile taken at Beijing Nanjiao

Observatory at 20:00 BT 7 July 2017

(blue line: temperature, green line: dew-point temperature. Black and purple dashed lines are status curves of parcels ascending adiabatically from surface and 850 hPa respectively)

的状态。如图6所示,大部分地区温度在 30°C 以上,城区更是达到了 32°C ;除山区外,大部分地区露点温度在 21°C 以上,并形成东南部平原至西北部迎

风坡一带大于 23°C 的露点大值区。同时,通过 VDRAS 资料诊断的 200 m 高度 CAPE 在平原及山脚一带大部分地区大于 $600\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 6c),虽然明显小于 20 时探空从 200 m 高度订正的 CAPE 值 (图略),但同样指示了有利的对流条件。高温高湿的边界层为第一条对流带在下山过程中加强发展提供了有利的热力条件。

3.2 偏南风与冷池出流辐合

东移南压的第一条对流带在下山发展的过程中,对流前侧出流与环境风场的偏南气流之间形成辐合线。如图 7 所示,20 时,第一条对流带到达北京西北部山区,其前侧出流与当地偏南风之间存在一条辐合线,尤其是在辐合线北侧一端西北来向的出流与环境东南风之间的气旋式辐合更加明显;随

着对流带的东移,辐合线也逐渐东移。此辐合线在雷达 0.5° 、 1.5° 仰角反射率因子图上也可以辨别,一直存在于对流带前方,其移动方向与对流带移动方向一致,这种与垂直上升运动配合的辐合线可能诱发新的对流,引导着雷暴向前发展,是一种重要的传播机制(孙继松和陶祖钰,2012)。

3.3 温度场与垂直运动特征

为了研究第一条飚线在热力、动力方面的特征,沿其移动方向(图 7c 中红色实线)做垂直剖面,其特征如图 8 所示。扰动温度场表明由于干空气卷入导致的下沉气流中雨滴的蒸发冷却,在地面附近形成低于周边暖湿气流 -6°C 的冷池,而前方平原地区为相对暖区,冷池前沿等温度线密集带呈近乎垂直形态,冷暖空气形成强烈交汇。低层最大辐合区位于

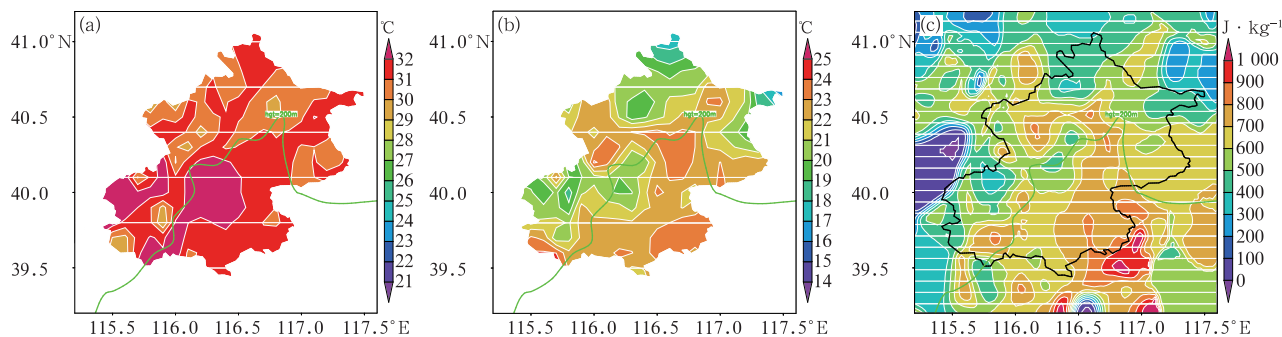


图 6 2017 年 7 月 7 日 19 时北京区域自动站温度(a),露点温度(b)和 19:06 VDRAS 资料 200 m 高度抬升 CAPE(c)分布
(绿色实线:200 m 等高线,用于区分平原和山地,下同)

Fig. 6 Surface temperature (a) and dew-point temperature (b) from AWS at 19:00 BT; (c) CAPE from 200 m level from VDRAS at 19:06 BT 7 July 2017
(Green line is the 200 m isoline used for distinguishing mountains from plains, same as below)

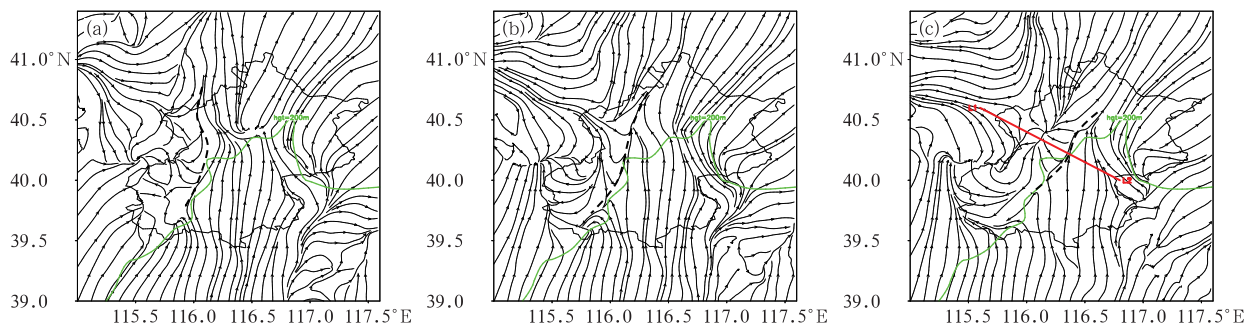


图 7 2017 年 7 月 7 日 20:00(a),20:18(b),20:36(c)200 m 高度流场
(黑色短划线:辐合线,图 7c 中红色实线:图 8 所对应剖面的位置)

Fig. 7 Streamline analysis of horizontal wind at 200 m level from VDRAS at (a) 20:00 BT, (b) 20:18 BT, (c) 20:36 BT of 7 July 2017

(Black dashed line is convergence line, red line L1—L2 in Fig. 7c is the cross section direction as in Fig. 8)

冷池前沿地面至 1.5 km 高度处(地形跟随高度,下同),经过该辐合区、沿着最大垂直上升运动区和低层最大入流所在位置为主要上升支和对应入流,如图中红色箭头所示(下同),飊线前部低层暖空气自地面被剧烈抬升,上升运动大值区沿着等温线密集带形成近乎垂直形态。本例中第一条飊线低于 -6°C 的冷池与环境 $0\sim 3\text{ km}$ 的 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 垂直风切变达到平衡,上升运动形成近乎垂直抬升的状态,在雷达回波图上表现为窄带回波,依据 RKW 理论(Rotunno et al, 1988; Bryan et al, 2006; Weisman and Rotunno, 2004),这是一种飊线发展强盛的有利组织形式。

平原及山脚一带高温高湿的边界层环境为第一条飊线下山发展提供了良好的热力条件;另外,环境低层风场在风向上也与飊线前侧冷池出流形成辐合;冷池的发展与环境低层垂直风切变达到平衡,飊线前沿自地面至 1.5 km 高度处形成强辐合区和近乎垂直的上升状态。这样一种良好的热力、动力双重条件为对流在下山过程中快速组织化发展形成飊线提供了非常有利的条件。

4 冷垫对第二条线状对流的影响

4.1 冷垫的范围、强度、特征

北京地区加密自动站资料表明在第一条飊线过境之后,在受其影响的区域 A 内(图 9 中虚线框所示,下同)大部分地面自动站温度下降至 22°C 以下、露点温度下降至 21°C 以下,形成冷垫。VDRAS 资料也表明对应地区 200 m 高度的 CAPE 值也急剧下降至 $100\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下(图 9c)。相较于第一条飊线,有利于对流发展的热力条件大部分被消耗掉。但是,当第二条对流带从西部下山后,再次向两侧发展,并继续北上影响区域 A,且雷达强回波($\geq 45\text{ dBz}$,下同)面积未减。下文将着重分析第二条对流带发展的局地热力、动力条件。

4.2 两条对流带冷池出流辐合

第一条飊线消耗掉了大部分的对流能量,但是其后侧冷池出流正好与从西部下山的第二条对流带前侧出流形成辐合。从图 10 可以分别看到 22:18、22:36、22:54 两条对流带出流形成的辐合线自西向东推进,并且于 22:54 在区域 A 形成气旋式辐合中

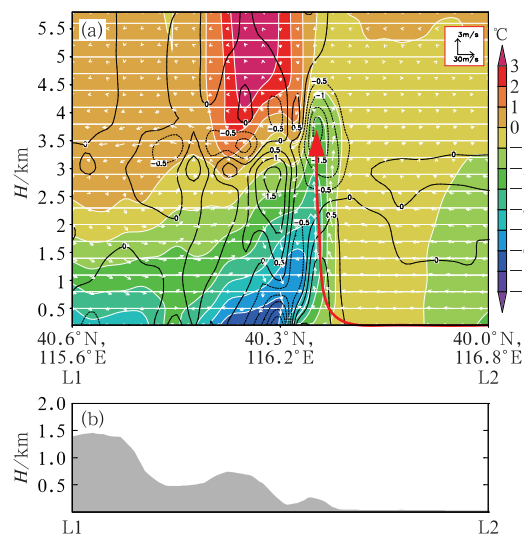


图 8 (a)2017 年 7 月 7 日 20:36 沿图 7c L1—L2

剖面的扰动温度(填色)、垂直速度和水平相对速度矢量(箭头,减去第一条对流带移动速度估值为 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)、水平散度(等值线,单位: 10^{-3} s^{-1} ,正值表示辐合);

(b)沿 L1—L2 剖面的地形高度(红色带箭头曲线:主要上升支和入流,下同)

Fig. 8 (a) Cross section of perturbation temperature field (color shaded), vector sum of vertical velocity and storm relative velocity (vector, the first storm moving speed about $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) and divergence field (contours, unit: 10^{-3} s^{-1} ; positive value; convergence) along L1—L2 at 20:36 BT 7 July 2017; (b) corresponding terrain of L1—L2 (red arrow line: the main inflow and ascending motion, same as below)

心 D,与回波反射率因子图上两条对流带首尾接近相对应(图 1e)。两条对流带冷池出流形成的低层辐合线的存在为第二条线状对流的向前传播和发展提供了有利条件。

4.3 温度场与垂直运动特征

为了研究第二条线状对流在冷垫上发展的热力、动力特征,沿图 10 中 M1、M2 两点所示即沿着第二条对流带移动方向且经过低层冷中心做垂直剖面,剖面特征如图 11 所示。7 日 22:18,在下山过程中还未进入区域 A(图 10a)的第二条对流带与第一条飊线造成的位于 116.3°E 以东、高度约 500 m 的低于周边暖湿气流 -7°C 的地面冷中心还有一定距离(图 11a)。不同于第一条飊线前部低层最大辐合区位于近地面层的结构特征,第二条对流带前部的

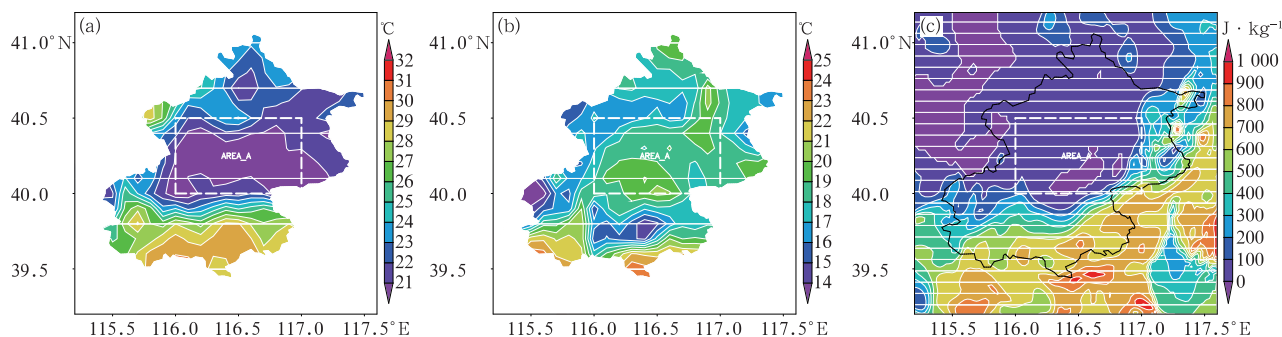


图 9 同图 6, 但为 7 日 22:30(a, b) 和 22:36 VDRAS 资料(c)

(方框内区域 A: 第一条飊线影响的主要区域, 下同)

Fig. 9 Same as Fig. 6, but at 22:30 BT (a, b) and CAPE from VDRAS at 22:36 BT (c) 7 July 2017

(Area A in the quadrangle is the main region affected by the first convective line, same as below)

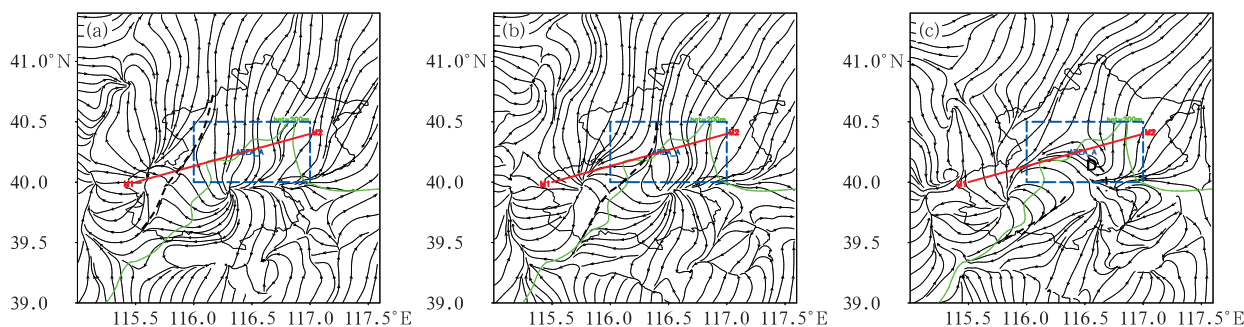


图 10 2017 年 7 月 7 日 22:18(a), 22:36(b), 22:54(c) 200 m 高度流场

(D 点: 气旋式辐合中心, 红色实线 M1—M2: 图 11 所对应剖面的位置)

Fig. 10 Streamline analysis of horizontal wind at 200 m level from VDRAS at

22:18 BT (a), 22:36 BT (b), 22:54 BT (c) 7 July 2017

(Dot D is for the center of cyclonic circulation, red solid line M1—M2 is the cross section direction as in Fig. 11)

低层最大水平风速辐合区此时位于 1.7 km 高度处。由于前方冷垫的存在, 对流前方相对较暖气团沿着其前部冷空气边缘倾斜上升, 与对流前部最大辐合上升运动配合的入流被抬高至 500 m 以上高度。22:36(图 11b), 第二条对流带主体进一步向东北方向移动进入区域 A, 逐渐靠近前一条飊线形成的冷垫主体。此时第二条对流带前部的低层最大水平风速辐合区位于 1.5 km 高度处, 较上一时次高度有所降低且辐合强度有所下降, 与对流前部最大辐合上升运动配合的入流维持在 500 m 以上高度, 对流前方相对较暖气团沿着其前部冷空气边缘倾斜上升, 但较上一时次垂直上升速度略小。22:54, 在雷达反射率因子图上可见两条对流带首尾接近(图 1e), 并在低层流场上形成气旋式辐合中心(图 10c), 剖面结构(图 11c)显示此时第二条对流带形成的冷池与前一条飊线形成的冷垫开始叠加, 第二条对流带

在叠加的冷垫上继续发展。此时第二条对流带前部的低层最大水平风速辐合区位于 1.2 km 高度处, 较上一时次高度进一步降低、辐合强度进一步下降, 与对流前部最大辐合上升运动配合的入流依旧维持在 500 m 以上高度, 同样对流前方相对较暖气团沿着其前部冷空气边缘倾斜上升, 较上一时次垂直上升速度没有明显减小。

在第二条对流带的冷池与第一条飊线形成的冷垫叠加之后, 此时边界层是层结稳定的冷垫, 配合上升运动的最大辐合区位于 1~2 km, 不同于传统的基于地面的对流。高架对流是指在大气边界层以上被触发的深厚湿对流(俞小鼎等, 2016; Colman, 1990a; 1990b)。Wilson and Roberts(2006)认为分辨高架对流最理想的方法是依据上升运动源所在高度, 而目前常规观测无法实现。目前国内外高架对流研究多见于冷季(俞小鼎等, 2016; 黄小刚等, 2017;

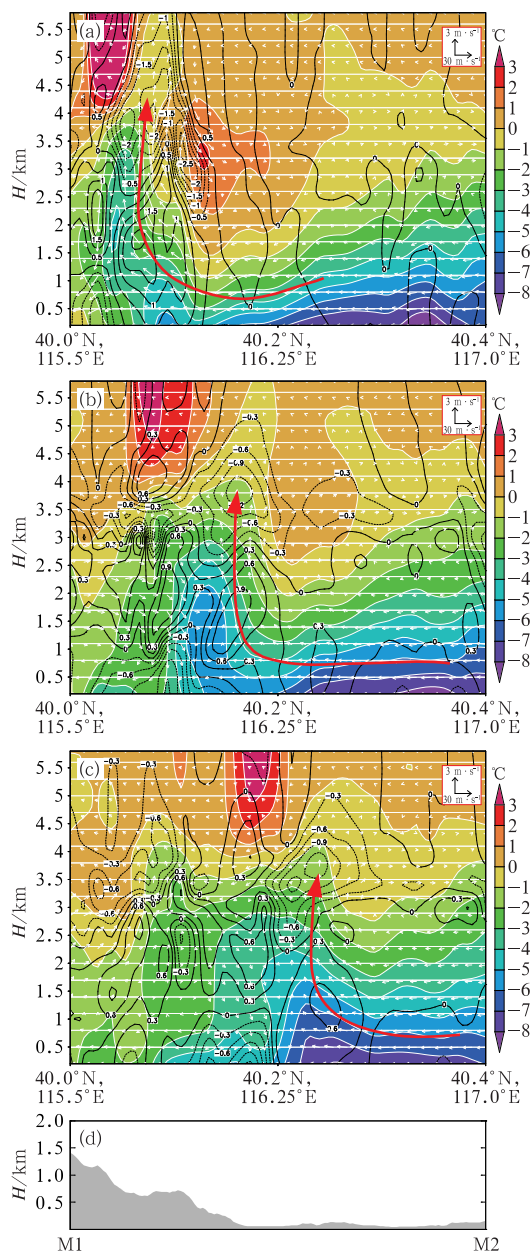


图 11 2017 年 7 月 7 日 22:18(a), 22:36(b) 和 22:54(c) 沿图 10 M1—M2 剖面的扰动温度(填色)、垂直速度和水平相对速度矢量和(箭头, 减去第二条对流带移动速度估值为 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)、水平散度(等值线, 单位: 10^{-3} s^{-1} , 正值表示辐合), 以及沿 M1—M2 剖面的地形高度(d)

Fig. 11 Cross sections of perturbation temperature field (color shaded), vector sum of vertical velocity and storm relative velocity (vector, the second storm moving speed about $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) and divergence field (contours, unit: 10^{-3} s^{-1} ; positive value is for convergence) at 22:18 BT (a), 22:36 BT (b) and 22:54 BT (c) 7 July 2017 along M1—M2 in Fig. 10; (d) corresponding terrain of M1—M2

郭大梅等, 2018; 刘洲洋等, 2018), 而本例发生在盛夏, 在地面天气图无法识别明显地面冷锋特征, 但是利用高分辨率资料识别第二条对流带移至边界层稳定的冷垫上发展后, 配合上升运动的最大辐合区位于高度 $1\sim 2\text{ km}$, 属于暖季高架对流。

4.4 暖季高架对流发展的不稳定机制

第二条对流带在河北西北部山区生成、发展, 从云图上可以判断其下山前未与第一条对流带的云团叠加(卫星云图略)。接近对流发生时间的 7 日 20 时 NCEP FNL 再分析资料的 CAPE (图 12), 证明此时在华北平原及北京周边山区普遍存在大于 $1400\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 CAPE (自地面抬升), 虽然其数值小于 20 时观象台实况探空计算的数值 $2715\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, 但依据 FNL 资料 CAPE 的平面分布特征可以推断第二条对流带下山前在西部山区一带具有不亚于平原地区的热力条件。而在东移过程中, 受第一条飢线形成的冷垫影响, 对流的上升运动已有所减弱, 但雷达强回波面积未减, 保持线状对流的回波特征。本节重点探讨第二条对流带在冷垫上形成高架对流的不稳定机制。

限于目前探空资料和常规再分析资料时间分辨率不够、VDRAS 资料反演的高空各层 CAPE 值的可信度有限, 无法直接用 CAPE 判别第二条对流带在冷垫上发展的对流能量来源, 但 VDRAS 反演的高时空分辨率的风场、温度场与实况误差在允许的范围之内, 可以用于短时临近预报的实况分析, 以弥补实测资料时间分辨率的不足 (Sun et al, 2010)。因

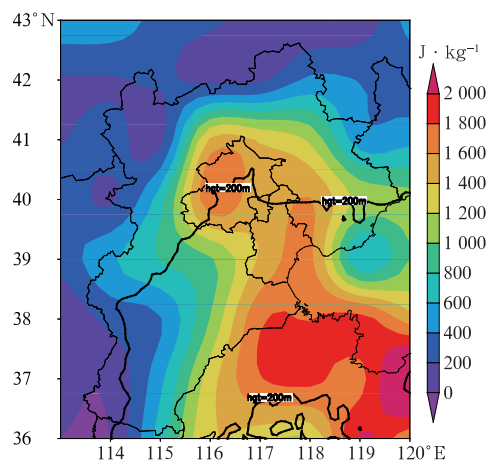


图 12 2017 年 7 月 7 日 20 时 FNL 再分析资料 CAPE 分布

Fig. 12 CAPE from FNL reanalysis data at 20:00 BT 7 July 2017

此,利用7日20时54511站探空的气压、高度关系和VDRAS资料中的温度、水汽压等计算假相当位温,以粗略探究大气的垂直层结性质。

如图13所示,对应图10中M1—M2剖面, θ_{se} 在两条对流带之间的区域(图13中虚线框所示),7日22:18(第二条对流到达前)相对于20:00(对流未发生时)的变化主要表现在1.5 m以下,越靠近地面减小的幅度越大,达-10 K以下。所以两条对流前后在相同区域发展时热力条件的变化可以近似认为发生在边界层内,而边界层以上区域的热力条件变化不大。22:18 θ_{se} 表现为在1.5 km以下随高度增加、1.5~5 km随高度减小,这说明在1.5 km以下大气层结为稳定的,而在1.5 km以上大气层结为不稳定的。边界层以上的不稳定层结为高架对流的发展提供了热力条件。

θ_{se} 剖面资料可以粗略估计两条对流前后在区域A发展时,环境大气边界层以上层结变化不大,修正54511站20时探空抬升点为850 hPa,如图5所示,CAPE值只有 $622.4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,虽然可以证明边界层以上确实存在有效的对流不稳定能量,但较第一条飢线在区域A或第二条线状对流下山前所具备的CAPE($2715 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)锐减,这不足以维持第二条线

状对流的强回波发展。目前局限于资料的精度,无法准确计算边界层以上对流不稳定能量的大小,但从对流回波情况可以推断必然大于54511站20时探空从850 hPa抬升所需能量($622.4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)。虽然第一条飢线过境消耗了大部分的对流能量,但是当日20时850 hPa处于很强的偏南气流中,54511站西南风风速达 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,实况物理量场850 hPa正的温度平流和负的水汽通量散度(MI-CAPS 4.0系统物理量实况分析,图略)共同证明北京地区存在暖湿平流,以及500 hPa存在负温度平流,这可能是边界层以上对流不稳定能量重建的一种机制,使得第二条线状对流回波强度得以维持。

5 结 论

本文选取两条线状对流相继影响北京地区的个例,其发展的边界层条件是不同的,但其在下山过程中或平原地区继续发展,尤其是第二条对流带在冷垫上继续发展,是短时临近预报中的难点,中尺度环境场对判断对流下山增强或减弱至关重要。

平原及山脚一带高温高湿的环境为第一条对流的下山发展提供了良好的热力条件;低层环境风场在风向上也与对流前侧冷池出流形成辐合,为第一条对流带在下山过程中快速组织化发展形成飢线提供了有利条件。飢线发展强盛阶段,冷池的发展与环境低层垂直风切变达到平衡,冷池前沿自地面至1.5 km高度处形成强辐合区,上升运动呈近乎垂直的形态。

第二条对流带在前一条飢线形成的冷垫上继续发展,虽然风暴上升运动呈倾斜状且强度有所减弱,但是强回波面积未减。一方面,第二条对流带受前一条飢线能量方面的抑制;但另一方面,两条对流带的低层冷池出流在流场上形成辐合,尤其是在第二条对流带的冷池与前一条飢线形成的冷垫靠近叠加以后低层辐合进一步加强,第二条对流带回波继续北上。第二条线状对流前沿配合上升运动的最大辐合区位于高度1~2 km,属于暖季高架对流。本例高架对流发展的能量来源主要为边界层以上层结不稳定的大气,可能伴随在第一条飢线过境后由偏南暖湿气流带来的边界层以上对流能量的重建过程。

在强对流短时临近预报业务中,需要综合考虑

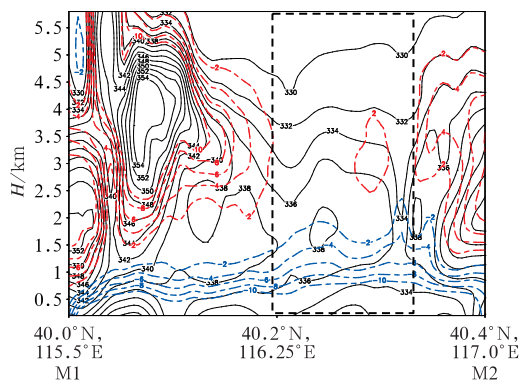


图13 2017年7月7日22:18沿图10 M1—M2

剖面的假相当位温 θ_{se} (黑色实线,单位:K)、

$\Delta\theta_{se}$ (22:18的 θ_{se} 减去20:00的 θ_{se} 、

红色虚线;正值,蓝色虚线:负值,单位:K)

(黑色虚线框代表两条对流带之间的区域)

Fig. 13 Cross section of θ_{se} at 22:18 BT

(black solid lines, unit: K) and $\Delta\theta_{se}$

(θ_{se} at 22:18 BT minus θ_{se} at 20:00 BT,

red dashed lines; positive, blue dashed lines;

negative, unit: K) along M1—M2 Fig. 10

(Black quadrangle in dashed lines is the

area between two convections)

热力、动力等多重因素,而 VDRAS 快速更新的再分析资料可以提供平面以及垂直剖面等多要素的更有效的参考,为强对流的临近主观外推预报提供有效参考。

参考文献

- 陈明轩,王迎春,2012. 低层垂直风切变和冷池相互作用影响华北地区一次飑线过程发展维持的数值模拟[J]. 气象学报, 70(3): 371-386. Chen M X, Wang Y C, 2012. Numerical simulation study of interactional effects of the low-level vertical wind shear with the cold pool on a squall line evolution in North China[J]. Acta Meteor Sin, 70(3): 371-386(in Chinese).
- 陈明轩,王迎春,高峰,等,2011. 基于雷达资料 4DVar 的低层热动力反演系统及其在北京奥运期间的初步应用分析[J]. 气象学报, 69(1): 64-78. Chen M X, Wang Y C, Gao F, et al, 2011. A low-level thermodynamical retrieval system based on the radar data 4DVar and a preliminary analysis of its applications in support of the Beijing 2008 Olympics[J]. Acta Meteor Sin, 69(1): 64-78(in Chinese).
- 窦以文,屈玉贵,陶士伟,等,2008. 北京自动气象站实时数据质量控制应用[J]. 气象, 34(8): 77-81. Dou Y W, Qu Y G, Tao S W, et al, 2008. The application of quality control procedures for real-time data from automatic weather stations[J]. Meteor Mon, 34(8): 77-81(in Chinese).
- 郭大梅,章丽娜,王秀明,等,2018. 2016 年初冬陕西一次高架雷暴天气过程分析[J]. 气象, 44(11): 1404-1413. Guo D M, Zhang L N, Wang X M, et al, 2018. Analysis on elevated thunderstorm in Shaanxi in early winter of 2016[J]. Meteor Mon, 44(11): 1404-1413(in Chinese).
- 何立富,周庆亮,谌芸,等,2011. 国家级强对流潜势预报业务进展与检验评估[J]. 气象, 37(7): 777-784. He L F, Zhou Q L, Chen Y, et al, 2011. Introduction and examination of potential forecast for strong convective weather at national level[J]. Meteor Mon, 37(7): 777-784(in Chinese).
- 黄小刚,费建芳,孙吉明,等,2017. 2013 年冬季长江中下游地区一次高架雷暴过程的成因分析[J]. 气象学报, 75(3): 429-441. Huang X G, Fei J F, Sun J M, et al, 2017. Analysis on the formation mechanism of an elevated thunderstorm over the middle and lower Yangtze Basin in February 2013[J]. Acta Meteor Sin, 75(3): 429-441(in Chinese).
- 刘洲洋,俞小鼎,王秀明,等,2018. 中国泛华北地区冷季高架对流特征气候统计分析[J]. 气象, 44(2): 258-267. Liu Z Y, Yu X D, Wang X M, et al, 2018. Climatology of cold season elevated convection in northern China[J]. Meteor Mon, 44(2): 258-267(in Chinese).
- 孙继松,陶祖钰,2012. 强对流天气分析与预报中的若干基本问题[J]. 气象, 38(2): 164-173. Sun J S, Tao Z Y, 2012. Some essential issues connected with severe convective weather analysis and forecast[J]. Meteor Mon, 38(2): 164-173(in Chinese).
- 孙继松,王华,2009. 重力波对一次雹暴天气过程演变的影响[J]. 高原气象, 28(1): 165-172. Sun J S, Wang H, 2009. The impact of gravity wave on a hailstorm weather process evolution[J]. Plateau Meteor, 28(1): 165-172(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).
- 徐燕,孙竹玲,周筠珩,等,2018. 一次具有对流合并现象的强飑线系统的闪电活动特征及其与动力场的关系[J]. 大气科学, 42(6): 1393-1406. Xu Y, Sun Z L, Zhou Y J, et al, 2018. Lightning activity of a severe squall line with cell merging process and its relationships with dynamic fields[J]. Chin J Atmos Sci, 42(6): 1393-1406(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).
- 俞小鼎,周小刚,王秀明,2016. 中国冷季高架对流个例初步分析[J]. 气象学报, 74(6): 902-918. Yu X D, Zhou X G, Wang X M, 2016. A preliminary case study of elevated convection in China[J]. Acta Meteor Sin, 74(6): 902-918(in Chinese).
- 张朝林,王迎春,2002. 北京地区风廓线仪布网方案的数值研究[J]. 气象学报, 60(6): 786-791. Zhang C L, Wang Y C, 2002. Numerical study on weather influences of location design of wind-profiler network for Beijing Area[J]. Acta Meteor Sin, 60(6): 786-791(in Chinese).
- 郑永光,林静静,朱文剑,等,2013. 强对流天气综合监测业务系统建设[J]. 气象, 39(2): 234-240. Zheng Y G, Lin Y J, Zhu W J, et al, 2013. Operational system of severe convective weather comprehensive monitoring[J]. Meteor Mon, 39(2): 234-240(in Chinese).
- 郑永光,张小玲,周庆亮,等,2010. 强对流天气短时临近预报业务技术进展与挑战[J]. 气象, 36(7): 33-42. Zheng Y G, Zhang X L, Zhou Q L, et al, 2010. Review on severe convective weather short-term forecasting and nowcasting[J]. Meteor Mon, 36(7): 33-42(in Chinese).
- Bryan G H, Kniviel J C, Parker M D, 2006. A multimodel assessment of RKW theory's relevance to squall-line characteristics[J]. Mon Wea Rev, 134(10): 2772-2792.
- Colman B R, 1990a. Thunderstorms above frontal surfaces in environments without positive CAPE. Part I: a climatology[J]. Mon Wea Rev, 118(5): 1103-1122.
- Colman B R, 1990b. Thunderstorms above frontal surfaces in environments without positive CAPE. Part II: organization and instability mechanisms[J]. Mon Wea Rev, 118(5): 1123-1144.
- Rotunno R, Klemp J B, Weisman M L, 1988. A theory for strong,

- long-lived squall lines[J]. *J Atmos Sci*, 45(3):463-485.
- Sun J Z, Chen M X, Wang Y C, 2010. A frequent-updating analysis system based on radar, surface, and mesoscale model data for the Beijing 2008 forecast demonstration project[J]. *Wea Forecasting*, 25(6):1715-1735.
- Sun J Z, Crook N A, 1997. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part I: model development and simulated data experiments [J]. *J Atmos Sci*, 54(12):1642-1661.
- Sun J Z, Crook N A, 1998. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part II: retrieval experiments of an observed Florida convective storm[J]. *J Atmos Sci*, 55(5):835-852.
- Sun J Z, Crook N A, 2001. Real-time low-level wind and temperature analysis using single WSR-88D data[J]. *Wea Forecasting*, 16(1):117-132.
- Weisman M L, Rotunno R, 2004. "A theory for strong long-lived squall lines" revisited[J]. *J Atmos Sci*, 61(4):361-382.
- Wilson J W, Roberts R D, 2006. Summary of convective storm initiation and evolution during IHOP: observational and modeling perspective[J]. *Mon Wea Rev*, 134(1):23-47.
- Xiao X, Sun J Z, Chen M X, et al, 2017. The characteristics of weakly forced mountain-to-plain precipitation systems based on radar observations and high-resolution reanalysis[J]. *J Geophys Res Atmos*, 122(6):3193-3213.