

陈涛,代刊,张芳华. 2013. 一次华北飑线天气过程中环境条件与对流发展机制研究. 气象, 39(8):945-954.

一次华北飑线天气过程中环境条件 与对流发展机制研究^{*}

陈 涛 代 刊 张 芳 华

国家气象中心, 北京 100081

提 要: 利用多种观测和分析数据对 2008 年 6 月 23 日午后华北地区一次持续时间较长的强飑线天气过程进行了研究。分析表明这是一次在夏季冷涡背景下发生的强对流天气过程, 相对孤立的 MCSs 在副冷锋附近发生发展。此次飑线天气过程中强风暴对流单体、超级单体活跃, 对流组织化过程与地面风场辐合线以及锋面有紧密的关系。天气分析表明 22 日夜间主冷锋过境后, 变性高压后部的偏东风以及偏南回流导致在华北东部的锋区开始增强, 通过地面观测订正的探空分析表明, 对流天气发生前华北地区局地具有较明显的对流潜势。从 23 日午后开始, 河套地区对流层中低层有明显的短波槽扰动发展, 在冷涡后部有副冷锋向华北地区逼近, 对流的触发与副冷锋密切相关, 并通过次级环流方程进一步诊断了锋面所造成的垂直运动; 来自气旋后部对流层中高层的强下沉气流, 造成了华北地区垂直方向上干湿对比明显, 形成较强位势不稳定, 有利于对流的触发以及地面大风的形成。通过对垂直风廓线结构和飑线移动速度的分析, 表明在此次过程中冷池边界扩张速度与低层风垂直切变大致相当, 因此 MCS 具有较强的强度并维持较长时间。

关键词: 飑线, 对流环境条件, 锋面, 垂直切变

中图分类号: P442

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.08.001

Study on Ambient Condition and Initialization Mechanism of Convection in a Severe Squall Line Storm Event in North China

CHEN Tao DAI Kan ZHANG Fanghua

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: One long-lasting squall line storm that struck North China severely in the afternoon of 23 June 2008 is analyzed based on various observation and analysis data collected by radar, satellite, and auto-weather stations, etc. This severe convection developed in the background of cold vortex in summer, and an isolated MCS evolved near the sub-cold front. Strong convective cells and several super-cell storms were active in premature period of the squall line, and the organization of convection is attributed to the surface wind convergence line or front. After the main cold front left at the night of 22 June, the easterly and southerly wind rearside of the high pressure transported warm moist air into the increasing intensity of the frontal zone. On the other hand, from the afternoon of 23 June, a short wave trough near the Hetao Area with high relative humidity developed in the mid and lower levels of troposphere, corresponding to the sub-cold front moving towards North China and connecting to the initiation of the convection, and the updraft motion due to the front was diagnosed by the secondary circulation equations. In the rearside of the cyclone, the dry and cold air with obvious subsiding made strong potential instability which is favorable for the convection initiation and formation of strong surface wind. By analyzing the vertical wind profile and

^{*} 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906011)和国家气象中心暴雨预报团队项目共同资助

2012 年 7 月 5 日收稿; 2013 年 1 月 6 日收修定稿

第一作者: 陈涛, 主要从事中尺度天气诊断与预报. Email: chentao@cma.gov.cn

the movement of squall line, it is indicated that the boundary moves approximately at the same speed as the lower level vertical shear, so MCS maintains the strength and the lasting time.

Key words: squall line, convection ambient condition, front, vertical shear

引 言

华北地区夏初强对流天气活跃,强对流天气带来的冰雹、雷暴大风以及短时强降水经常带来严重的经济与社会损失。中尺度对流系统(MCSs)的组织与发展与其环境条件有密切的关系,环境场上热力、动力特征很大程度上决定了对流系统的组织结构和发展特征。对流不稳定条件、垂直切变以及水汽条件被认为是影响 MCSs 发展的最重要的关键环境因子。Weisman 等(1982;1984)利用数值试验,总结了在不同的浮力以及垂直切变条件下对流风暴发展的方式。Moller 等(1994)明确提出了强降水超级单体的发生环境需要具备一定的热力不稳定、高湿、弱至中等螺旋度、较低的抬升凝结高度,且发生在已经存在的热力边界附近。随着国内新一代多普勒天气雷达网投入业务使用,近年来国内针对强对流天气方面的观测研究和总结分析有了较大进展,郑媛媛等(2004)对一次较为典型的超级单体的发展过程、结构特征进行了详细分析,提出对应于冰雹、雷暴大风等强对流天气的显著雷达回波产品特征指标;王福侠等(2011)对一次强降水超级单体的环境场特征、回波结构演变做出较详尽的观测分析;慕熙昱等(2007)、潘玉洁等(2008)也针对典型的飑线过程进行了研究。俞小鼎等(2012)对雷暴大风、冰雹、龙卷等强对流天气的环境条件、雷达回波特征做出了分析概括,并对强对流天气的短时临近预报技术进行了总结和展望。在对中尺度对流系统的发展机制研究方面,在最近对 2009 年 6 月 3 日区域雷暴大风(王秀明等,2012)、2009 年 7 月 23 日华北强飑线天气分析过程中(陈明轩等,2012),国内对于边界层冷池、垂直切变结构对 MCSs 影响的研究也在逐步深入。然而,由于天气系统的复杂性,环境场上建立适合对流发展的热力、动力条件的过程可能相当复杂,一旦在适合的对流触发条件配合下,局地的 MCSs 往往呈现爆发性的快速发展,同时雷暴大风、冰雹、龙卷等多样化的对流天气发展给短时临近预报带来了极大的挑战。因此如何快速准确地分析出对流环境的热力、动力性质及其变化趋势,对于强对

流天气的预报与预警是需要深入关注研究的问题。2008 年 6 月 23 日华北地区出现一次强飑线天气过程,此次飑线天气过程发展过程快,造成灾害强,飑线结构复杂。通过此次强飑线天气过程的环境场热力、动力条件的分析,有助于进一步了解对流系统触发以及快速发展的物理机制,并有助于增强对华北地区 MCSs 特征以及环境条件的分析能力,提升针对区域性强对流天气系统的预报经验。

1 天气实况

2008 年 6 月 22 日晚间,华北北部出现了一次弱的阵雨过程,23 日早晨降水停止,然而到了 23 日午后,京津和河北中部地区出现了一次强飑线天气过程。飑线在全盛时期全长约 400 千米,历时约 6 h,给华北地区造成了雷暴大风、冰雹等严重的灾害。

图 1 为 6 月 23 日 08 时至 24 日 08 时(北京时,以下均同)累积降水量,华北大部分地区都出现了中到大雨,25 mm 以上的区域主要集中在京津地区和河北南部,雨量的分布非常不均匀,降水时段主要出现在 23 日午后 14—20 时。从地面危险天气报的监测实况看,华北北部的内蒙古、河北和京津地区自西

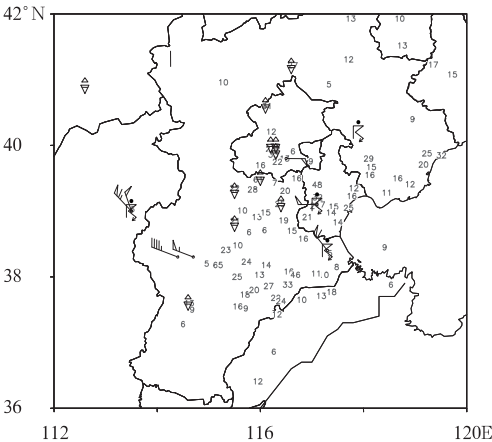


图 1 2008 年 6 月 23 日 08 时至 24 日 08 时
累积降水量与 WSCI 危险天气报
Fig. 1 Accumulated precipitation and
WSCI reports during 08:00 BT 23—
08:00 BT 24 June 2008

向东、自北向南出现雷雨大风和冰雹天气，河北、京津地区受灾较为严重。根据河北气象局的统计，全省有 142 站出现雷暴，24 站大风，12 站冰雹，9 站短时暴雨，大多数站点观测到的冰雹直径在 5～15 mm 之间。

此次飊线天气过程发展迅速，空间尺度较大，维持时间较长，对流发展的类型多样，在飊线上有多个超级单体风暴发展，京津地区、河北中部出现了较强的冰雹和雷暴大风天气，而在河北中部偏南地区的短时强降水较为明显。对流发展到弓形回波阶段后，河北东部、天津一带出现了 8 级以上的雷暴大风。从整个天气过程看，此次过程出现的对流天气复杂多变，在飊线发展的不同阶段，甚至飊线的不同部位出现的对流性天气都有着显著的差别。为研究这次过程，收集利用了常规地面和高空观测实况，风云 2 号卫星红外和水汽通道图像、北京、石家庄多普勒雷达以及地面自动站观测资料，进行中尺度天气分析；数值分析资料主要采用 NCEP FNL 逐 6 h 分析数据。

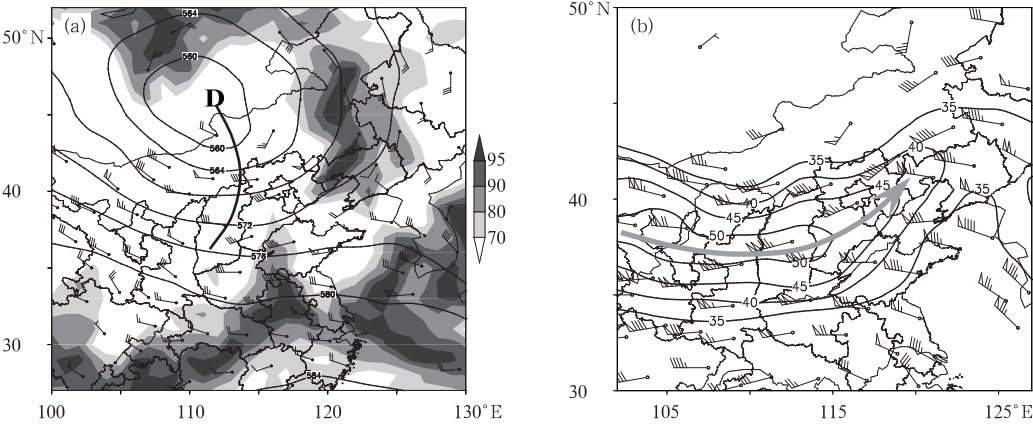


图 2 2008 年 6 月 23 日 08 时 500 hPa 高度场、探空风场及 925 hPa 相对湿度(阴影)(a) 和 200 hPa 风场和风速(b, 粗箭头为 200 hPa 急流轴)

Fig. 2 500 hPa height and wind from sounding stations with shaded for relative humidity (RH) at 925 hPa (a), 200 hPa wind barb and contour for wind speed (thick arrow for jet) (b) at 08:00 BT 23 June 2008

件较差，不利于强降水的发展。

2.2 局地热力、动力条件分析

22 日夜间至 23 日 08 时，受冷锋影响华北—东北自西向东出现了一次降水过程，但雨量不大，23 日清晨降水停止后，华北北部 05 和 08 时地面气温较 22 日有明显降低。从北京 23 日 08 时的探空分

2 天气背景与局地对流环境条件分析

2.1 天气背景

图 2a 为 2008 年 6 月 23 日 08 时 500 hPa 探空风场和高度场分析，在蒙古东部有一个较为深厚的冷涡，在日本海附近高压的阻挡下，冷涡稳定少动。我国北方夏季在低涡形势的控制下，当锋区上有斜压扰动传播发展时，在华北、东北地区就容易出现强对流天气。冷涡系统较为深厚，低涡底部存在明显的高空急流，从河套到华北西部地区高空受偏西或西北气流控制。华北地区东部处于 500 hPa 短波槽前，槽前的正涡度平流有利于低层低值系统的迅速发展。图 2b 表明 200 hPa 急流轴位于 38°N 附近，华北北部正处于高空急流出口左侧，较强的高空辐散条件有利于垂直运动的发展。但从低层 925 hPa 的相对湿度看，由于主冷锋已经过境，在冷空气影响下华北地区的低层整体相对较干，水汽条

析(图 3a)，600 hPa 以上是显著干区，600 hPa 以下中低层为相对湿区，其中 700～600 hPa 的湿度相对较高，而 850～925 hPa 略干一些，但弱降水过后地面附近湿度相对较高；石家庄探空也表明在边界层内具有一定的水汽，但在边界层之上的湿度都相对较低，从水汽条件上不利于深湿对流风暴(DMC)的发展。分析表明两站抬升凝结高度(LCL)都处于

900 hPa 以下,意味着只要有弱的抬升机制就可使气层达到饱和。由于存在中高层干层,一旦低层有足够的机制增湿增温,将会有位势不稳定的发展;对流发展起来以后,中高层干冷空气的下沉也有利于地面雷暴大风形成。

23 日 08 时北京和河北邢台探空表明华北地区虽然有对流有效位能(CAPE)累积,但对流抑制能量(CIN)也较为明显,这表明需要有一定的外在机制作用下,才能够触发对流天气产生。两站探空均表明在 900 hPa 以下的边界层内存在弱的逆温,逆温层的存在抑制了浅对流的发生,被认为有利于不稳定能量的积累(图 3)。

受日照的影响华北地面温度开始攀升,到 23 日 11 时北京地面气温上升到 28°C ,而邢台气温上升到 32°C ,若结合 08 时的层结曲线改善探空分析,北京局地 CAPE 可达 $1104 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,CIN 减少到 $6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$;而邢台站因地面露点温度较低,CAPE 并没

有明显的增长,但到 14 时邢台附近的石家庄站地面温度攀升到 36°C ,远高于 08 时邢台探空确定的地面对流温度 32°C ,地面附近热对流发生发展的条件相当优越。因此从热力条件分析,23 日午后华北地区的对流潜势得到增强,对流发展的条件进一步优化。因此对于午后对流来说,中午一段时间热力情况变化快速,因此单纯依靠早上 08 时的探空不能确定对流环境条件的变化,而临近时刻的地面观测就显得尤为重要。Johnson 等(1991)利用中午的地面观测资料对早上的探空进行修正,以获取雷暴发生前的热力环境,对于雷暴中尺度系统分析相当有效。

从两站地面至 500 hPa 垂直切变条件看,华北具有 $15 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右中等偏强的垂直切变,有利于组织化的强对流风暴发展。总体来说,探空资料反映出华北地区的动力、热力条件上具有一定的对流发展潜势,在一定的外强迫机制下能够支持强对流风暴的发展。

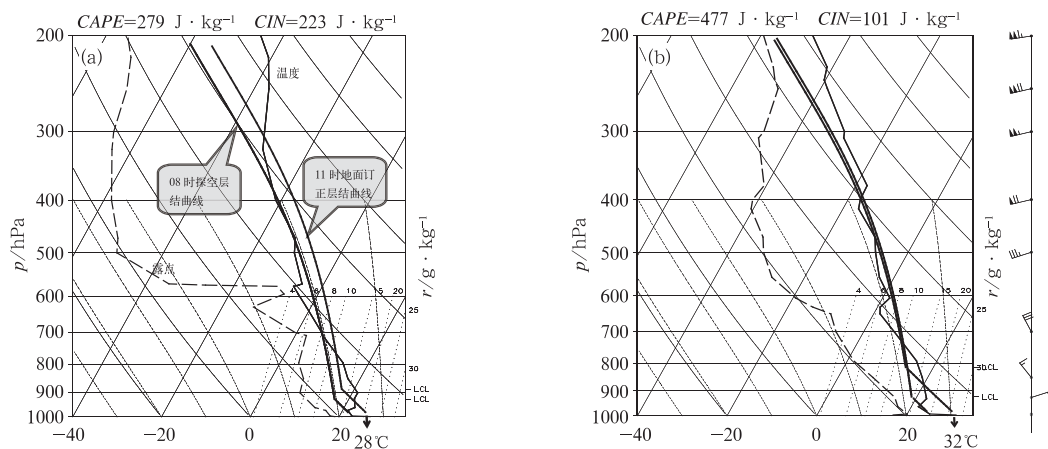


图 3 2008 年 6 月 23 日 08 时北京(a)和邢台(b)探空曲线以及根据 11 时地面实况构造的层结曲线

Fig. 3 Skew-T plot of Beijing (a) and Xingtai (b) at 08:00 BT 23 June 2008 with pseudo parcel updraft path from surface according to the surface observation at 11:00 BT 23 2008

2.3 对流天气发展过程

图 4 为 23 日 14 时的 500 hPa 高度场以及 850 hPa 分析风场,图中表明从 14—20 时 6 h 之内,从华北西部东移的 500 hPa 短波槽迅速加深,位置上从与 850 hPa 切变接近演变为逐渐超前于低层切变,而这种天气系统的前倾结构通常被认为有利于增加对流不稳定。根据同时刻 FY-2C 卫星红外通道云顶亮温监测,14 时主冷锋云带已经移出华北地区,而在主冷锋后部,距离主冷锋云系有一定距离的河北西北部、北京地区附近,又有若干孤立的对流云

团发展。在随后的几个小时内,对流系统迅速发展并合并接在一起,到 20 时在冷锋后部形成一个长 500 km,宽 200 km 左右的 α 中尺度的 MCS,空间位置相对孤立。该 MCS 生命史共约 6 h 左右,在 14—17 时内迅速发展达到最强的阶段,24 日 02 时后 MCS 在东移过程中明显减弱。MCS 的突发性增长给短期、短时预报都带来了较大的难度,其对流触发机制,对流迅速发展的原因都需要深入进行分析。

从图 5a 中 23 日 08 时地面锋面分析,造成 22 日夜间华北降水过程的冷锋已经移动到华北东部地区并向东北方向收缩,华北地区锋消较为明显;同时

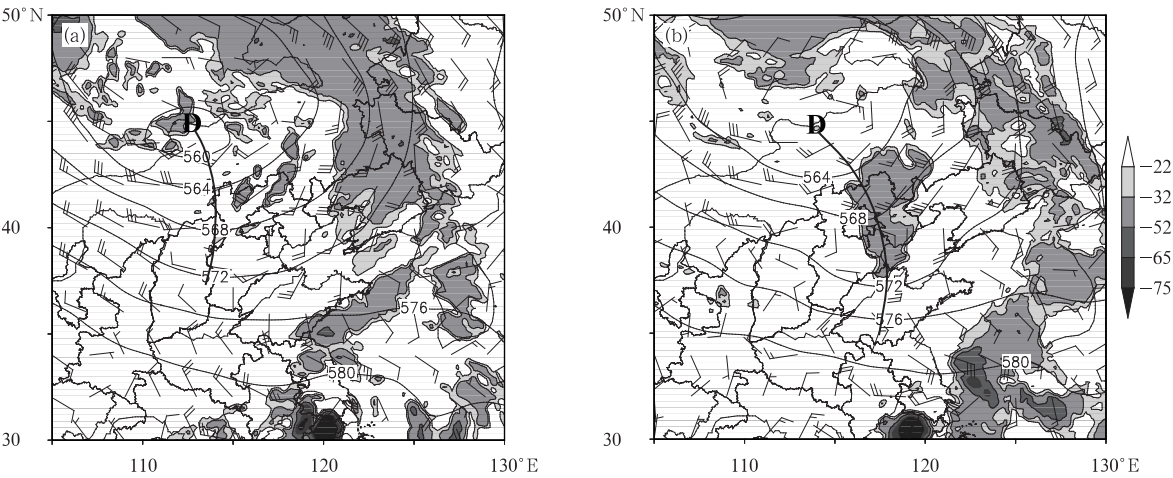


图 4 2008 年 6 月 23 日 500 hPa 高度场与 850 hPa 风场[阴影 $TBB < -22^{\circ}\text{C}$ (FY-2C)]

(a) 14 时, (b) 20 时

Fig. 4 500 hPa height and 850 hPa wind (shaded for $TBB < -22^{\circ}\text{C}$ from FY-2C)

(a) 14:00 BT 23 June, (b) 20:00 BT 23 June 2008

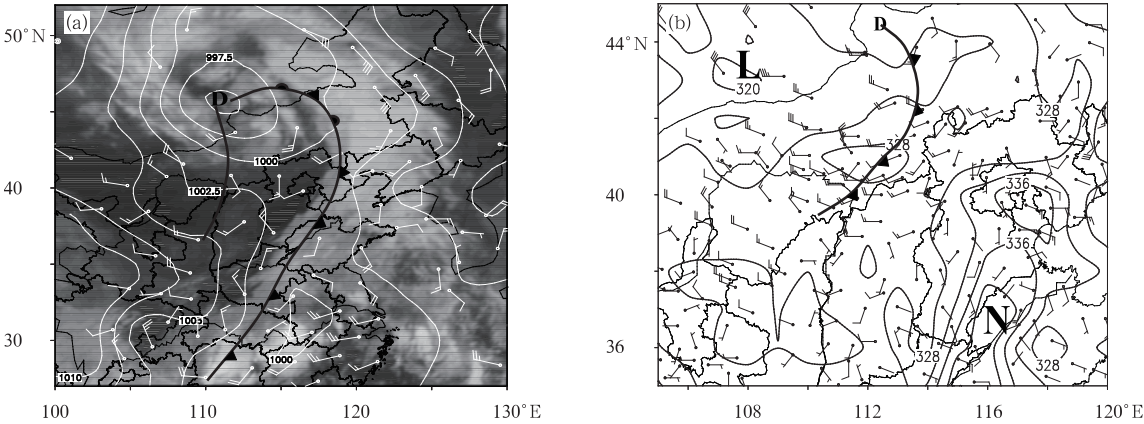


图 5 (a)2008 年 6 月 23 日 08 时 FY-2C 红外通道亮温、海平面气压场与 850 hPa 探空风场 (粗实线为 850 hPa 短波槽), (b)23 日 11 时地面观测风场(等值线为 14 时 925 hPa 的 θ_{se} 分析)

Fig. 5 The sea-level pressure and 850 hPa wind from sounding with brightness temperature of infrared channel of FY-2C, and the thick bold line is for trough at 850 hPa (a); Surface wind at 11:00 BT 23 June, thick contour line is for θ_{se} analysis at 925 hPa (b)

刻 FY-2C 红外通道云顶亮温表明,紧贴冷锋后部干冷空气侵入所造成的裂缝暗带已经卷入气旋中心附近,意味着蒙古气旋即将或者已经锢囚,锋面气旋低压系统整体上处于减弱阶段。但从海平面气压场分析,在气旋底部的河套地区附近有低压槽扰动,对应 850 和 700 hPa 上都有短波槽系统,红外云图上伴随有一些单薄的中高云系。这类短波系统往往具有较高的不确定性,有时能够造成较强的对流性天气,有时又没有明显天气产生,在预报中难以把握。事实证明这是触发华北地区强 MCSs 发展的关键中尺度系统。

中低层的短波系统在地面上与气旋后部低压槽

相对应,从 23 日 11 时地面观测(图 5b)看,在主锋面后部内蒙古中部—河套东部一带出现了较强的 $10\sim 12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上西北风区,地面风场有明显的气旋性切变以及风速辐合,锋面过境时主要表现为云量增多、风速加大,温度、露点都有所降低,基本无地面降水以及 MCS 发展,因此在动力、热力性质上更类似于干副冷锋。从 925 hPa 上的 θ_{se} 分布也可看到,在副冷锋后部都是 θ_{se} 低值区,对应着干冷气流。另一方面,随着主冷锋移出华北,23 日上午一段时间内华北地区地面转受变性高压后部控制,地面偏东风以及东南风逐步加强,同时地面倒槽从黄淮向华北地区伸展,两者的共同作用使得华北东部边界

层内的增温增湿显著, 925 hPa 上 θ_{se} 高值舌从黄淮伸展到华北地区, 河北、京津地区处于 θ_{se} 高值舌区内, 对流天气发生发展的所需的不稳定条件进一步得到改善。

3 飊线发展过程

根据石家庄多普勒雷达 1 km 高度上雷达回波综合观测分析表明, 从 23 日 13 时起, 河北西北部、山西北部地区有零星回波发展, 并且发展较为迅速。图 6a 为 14 时地面自动站风场, 北京到山西西北部附近出现了由西北风与偏东风构成的中尺度辐合线, 在辐合线附近的北京西南部、河北出现了若干类似于超级单体的强对流风暴系统, 其中 S1、S2 对流风暴相对清楚, 具有强回波悬垂以及弱回波区等结构特征。这几个强对流风暴在空间位置上相对孤立, 在发展了一段时间之后出现较小尺度的弓状回波, 并相互连接为一条整体的线状回波; 而山西北部到河北境内风场辐合线附近的线状回波带还相对较弱。中尺度风场辐合线与对流风暴的组织化乃至与飊线的形成直接相关, 但实际上因为对流风暴造成的出流与入流之间的平衡关系, 风场辐合线与对流系统之间也可能存在相互维持的关系。

飊线发展初期南北两条回波带相互独立, 但南段回波带进入河北境内后有迅速发展, 在回波带上也出现了多个强对流风暴。到 23 日 15 时(图 6b), 南北两条回波带连接在一起, 构成较为清楚的弓形回波。其中在回波北段箭头所指处, 靠近北京城区以及河北易县附近, 超级单体风暴 S1、S2 反射率因子结构密实, 反射率因子梯度结构特征清晰, 造成了较为严重的冰雹和雷暴大风。另外值得注意的是在石家庄以南, 有相对孤立的强对流风暴发展, 其后期的风暴出流与飊线出流外界发生碰撞后, 导致 16 时(图 6c)在飊线前方箭头所指处有类似于超级单体的强对流风暴迅速发展, 最强回波达到了 60 dBz, 虽然没有观测到对应的冰雹地面观测记录, 但不能排除有冰雹出现的可能性; 另外一个突出特点是伴有相对清楚的短时强降水天气。整体来看, 在 17 时前, 飊线不同部位出现的主要对流性天气有所差异, 在飊线北段由于高低层干湿对比明显, 较早出现的若干超级单体较为活跃, 并且超级单体或者强风暴造成的冰雹和雷暴大风天气更为突出; 而在飊线南段的对流发展高度相对较低, 对流性天气相对较弱, 一般以零星的冰雹以及短时强降水为主。

图 6d 表明到 17:30 左右形成了较为清楚的弓形回波, 弓形回波后部具有明显的 V 型入流缺口, 表明存在较强的后方入流, 而从云体后部侵入的干冷气流有利于地面大风的形成, 实况观测也表明在 17 时以后飊线伴随的地面雷暴大风较为显著; 在密实的线状对流墙后部, 拖曳有较大范围的低反射率构成的层云回波。随着对流系统的进一步发展, 层云回波范围扩大, 回波强度逐渐减弱, 到 21 时回波基本移出华北地区, 强对流天气过程结束。

通过雷达径向速度以及垂直剖面的分析能够获得更多的飊线结构信息。在 23 日 15 时的 1.5° 仰角的径向速度图(图 6e)上可以看到, 对应于 S1、S2 超级单体风暴, 河北易县附近有明显的中气旋, 正负速度差可达 $54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 而北京城区附近有明显的大风区, 中气旋速度对结构在 4.3° 仰角上较为清楚(图 6f)。图 7 为 23 日 15 时过飊线某一段的反射率垂直剖面, 回波具有强回波悬垂、弱回波区等特征, 而从径向速度场的垂直剖面看, 飊线前的入流相当清楚并几乎直立, 高层有明显的辐散, 而飊线后侧的中层流入以及低层冷池边界附近的辐合也较为清楚。

从此次对流发展的特征来看, 在对流活动早期, 在地面风场辐合线或者温湿锋区边界附近, 有若干强对流风暴先发展起来并迅速发展为超级单体风暴, 强对流风暴初始发生的地点具有一定随机性, 这些较为清楚的强对流风暴逐渐构成了北段弓形回波; 南北两支回波带对接在一起后, 最终组织为空间尺度较大的飊线。相对来说在弓形回波北段超级单体较为活跃, 冰雹天气也更为严重一些。Funk 等(1999)以及 Atkins 等(2005)在观测研究中注意到, 一些超级单体常常嵌入在中尺度对流系统中如飊线、弓状回波, 这类风暴常常造成更强的灾害, 并具有更长的生命期。此次华北飊线的结构演变进一步表明, 早期飊线可能由若干线性离散排列的超级单体构成, 而较强的弓形回波形成于超级单体成熟后期; 这种结构的飊线在数值试验中得到了部分验证。

4 环境场三维结构与对流触发、发展机制分析

4.1 低层锋面强迫

此次强对流天气过程中, 环境条件的迅速调整导致华北东部建立起高对流潜势区, 这是 MCS 快速发展的重要前提; 而对流过程的触发与从河套东

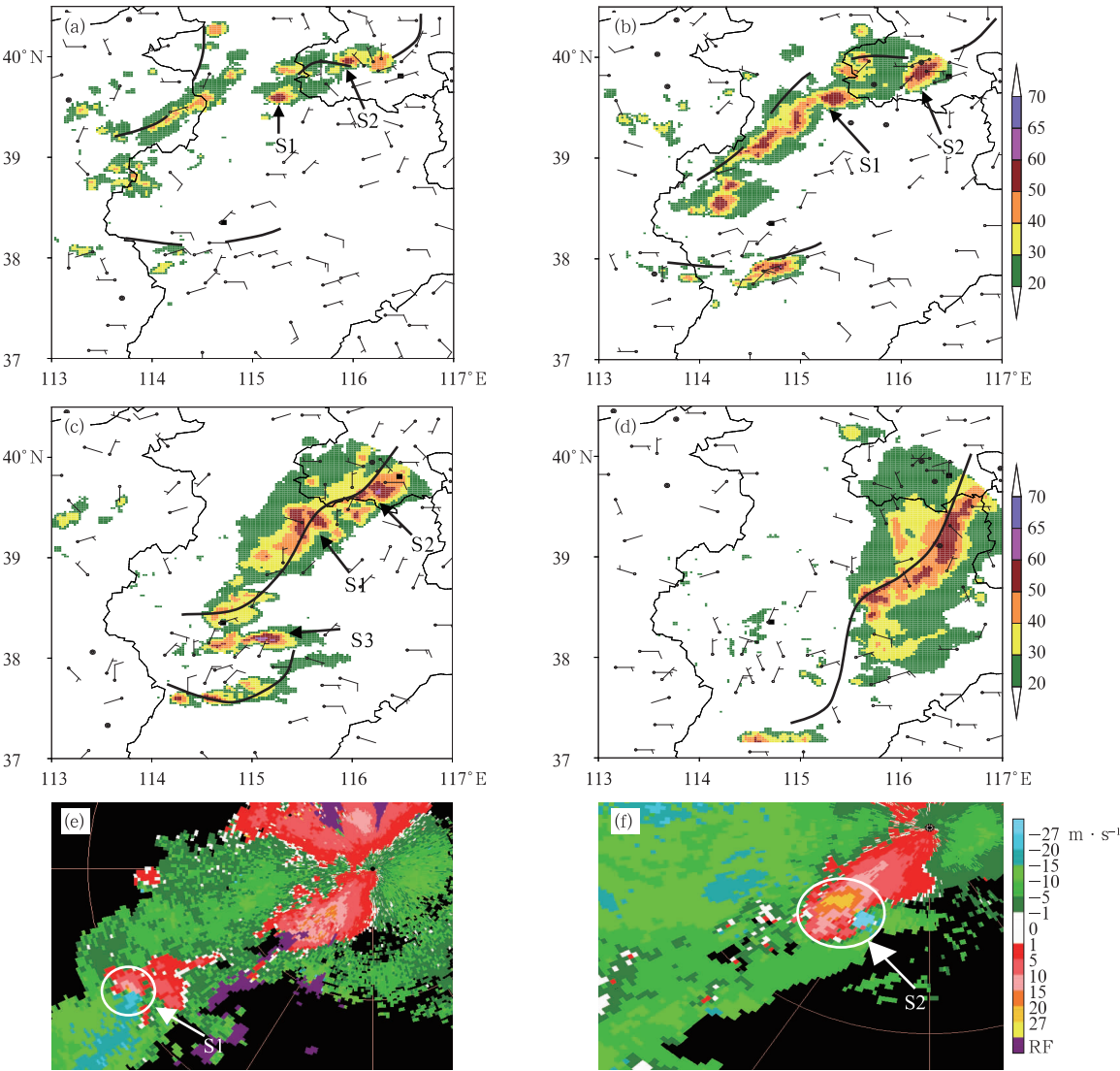


图 6 2008 年 6 月 23 日地面自动站风场与石家庄多普勒雷达 1 km 高度雷达反射率
(箭头所指均为先后发展起来的超级单体对流风暴)

(a) 14 时, (b) 15 时, (c) 16 时, (d) 17:30, (e) 15 时 1.5°仰角上径向速度,
(f) 15 时 4.3°仰角上的径向速度

Fig. 6 Wind of surface auto-weather stations network and radar reflectivity at 1 km height from Shijiazhuang Doppler Radar, and the arrow points to the super cell convective storms at (a) 14:00, (b) 15:00, (c) 16:00, (d) 17:30 BT 23 June 2008, (e) the radial velocity at 1.5° elevation at 15:00 BT, (f) the radial velocity at 4.3° evevation at 15:00 BT

移的副冷锋有直接联系。23 日上午在河套地区,水汽条件较差,并且在相对稳定的层结条件限制下,副冷锋锋面附近没有产生对流性系统。但从 23 日 14 时地面观测(图 8a)分析,从河套地区东移的锋面已经到达河北西北部,锋后是较为一致的西北气流,而锋前京津地区以偏东气流为主,河北南部盛行偏南气流,三支气流在锋面附近形成了较为清楚的动力辐合。从热力条件看,在华北中西部形成了显著的

温度、露点梯度密集区,尤其是在锋后大风区中相对湿度很低,造成华北西部的干湿梯度尤为清楚;锋面的动力作用使华北东部低层湿空气被强迫上升达到饱和,对初始对流触发起关键性的作用。

利用锋面次级环流的环流方程,能够定量地计算锋面强迫的次级环流,在垂直锋面的垂直剖面上,包含水汽因素的横向次级环流方程(Sawyer-Eliassen 方程)为(Shapiro, 1988):

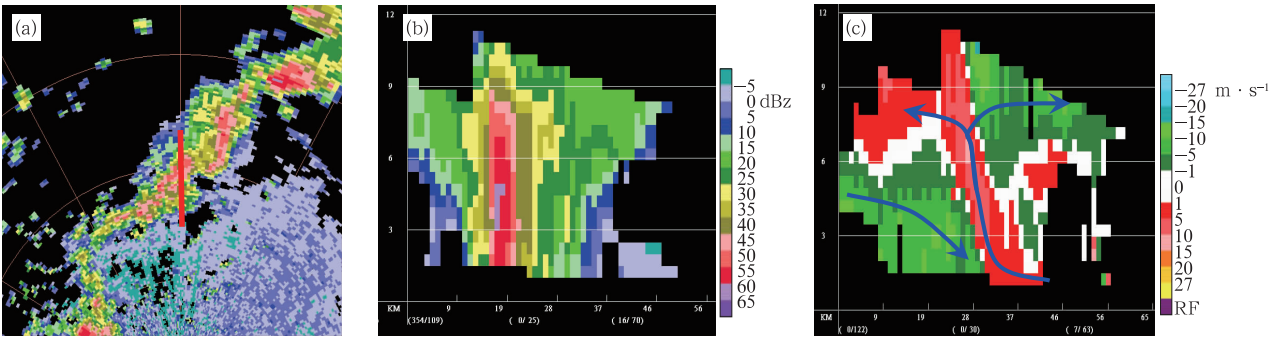


图 7 2008 年 6 月 23 日 15 时 01 分组合反射率(a),沿图(a)中红色线所取得反射率垂直截面(b),径向速度剖面(c)
Fig. 7 (a) Composite reflectivity at 15:01 BT 23 June 2008, (b) vertical section of reflectivity factor along the red line in (a), (c) vertical section of radial velocity

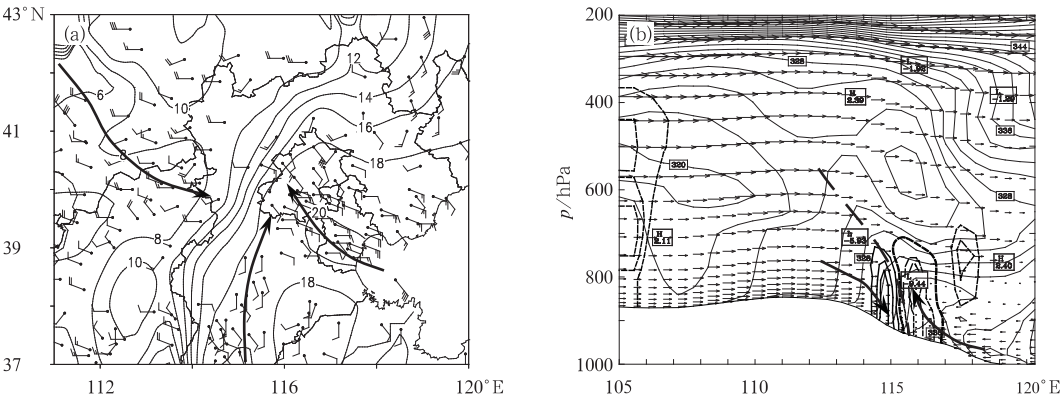


图 8 2008 年 6 月 23 日 14 时(a)地面风场与露点分析(箭头为显著气流), (b)过 38°N 垂直环流
(细实线为相当位温,细虚线为次级环流强迫的垂直运动,粗断线为锋面位置)
Fig. 8 Surface wind and dewpoint analysis at 14:00 BT 23 June 2008 (arrow for dominant flow) (a), vertical circulation along 38°N (thin line for equivalent potential temperature, and thin dashed line for vertical motion from secondary circulation, and thick dashed line for front) (b)

$$\frac{1}{\gamma} \left(f - \frac{\partial u_g}{\partial y} \right) \frac{\partial^2 \Psi}{\partial p^2} + 2 \frac{\partial \theta_c}{\partial y} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial p \partial x} - \frac{\partial \theta_c}{\partial p} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = -2 \left(\frac{\partial u_g}{\partial x} \frac{\partial \theta_c}{\partial y} - \frac{\partial u_g}{\partial y} \frac{\partial \theta_c}{\partial x} \right)$$

其中 $\gamma = \frac{R}{f p_0} \left(\frac{p_0}{p} \right)^{c_v/c_p}$, Ψ 为垂直剖面上的流函数,

对应锋面强迫的垂直运动 $\omega = -\frac{\partial \Psi}{\partial y}$ 。

通过上述方程的迭代求解,可以求得垂直于锋面的次级环流。图 8b 为 23 日 08 时过 38°N 的环流剖面,锋区强迫的次级环流主要位于 115°E 附近低层的山脉迎风坡前,强迫上升运动位于 700 hPa 以下,最大值在 $-9.4 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,大致等于 $10 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右的上升速度,对应引起的降水率在 $10 \sim 20 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。虽然这种运动量级仅反映了天气尺度的抬升运动,但即使按照此上升速度,只需要 1~3 h 就足以使得地面气块上升到抬升凝结高度

之上并突破对流抑制能量(CIN)的限制,从而触发对流,因此锋面的动力抬升作用是触发对流的直接原因。

4.2 中高层系统影响

图 9a 为 23 日 14 时 500 hPa 风场,在河套高空槽附近相对湿度普遍在 60% 以上,槽前山西北部、河北西北部的相对湿度在 80% 以上,在云图上也对应着一定的中高云系。500 hPa 上有两支较明显的西北急流:其中偏北一支急流空间尺度相对较小,急流核位于 500 hPa 短波槽后,风速中心在 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,与急流伴随的相对湿度普遍在 40% 以下,湿度场上具有明显的干湿对比。

从气流的垂直结构分析(图 9b),自对流层高层有明显的干下沉气流,而图 9a 中的西北急流正是这支源自对流层顶附近的强下沉气流在中层的反映,

这支下沉气流达到 600~700 hPa 左右的相对湿度区后其中一支又转为上升,与典型的干侵入过程的气流结构较为一致。在华北地区 115°~118°E 之间,垂直方向上干冷气流叠加在低层暖湿层结上,计算表明 23 日 14 时华北东部对流稳定度指数 I_{conv} ($I_{\text{conv}} = \theta_{\text{se}}^{500 \text{ hPa}} - \theta_{\text{se}}^{850 \text{ hPa}}$) 达到 12~16 K,具有相当高的对流潜势,有利于对流过程的触发以及快速增长。

虽然从低层锋面的动力条件有利于对流触发,

垂直方向上也具有较强的对流不稳定,但这些条件并不能完全确定对流系统的组织方式和发展过程。垂直切变的结构被认为与 MCS 的结构与发展过程密切相关,利用矢量端迹图,能够细致地分析层结的动力结构。根据图 10a 中 23 日 15—18 时之间的回波连续演变可以估计,成熟期飊线中段的移动速度约为 50~60 km·h⁻¹ (13.8~16.7 m·s⁻¹),取均值为 15 m·s⁻¹,向东南(ESE)方向移动。图 10b

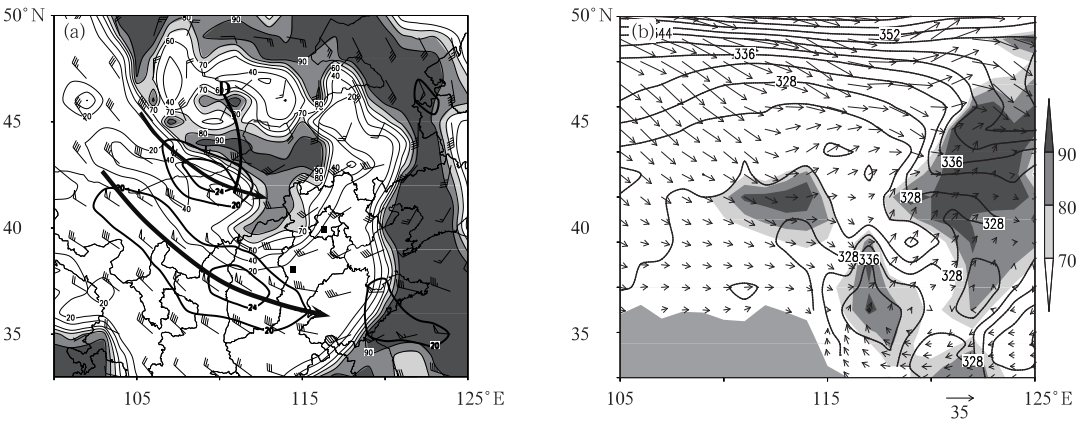


图 9 2008 年 6 月 23 日 14 时(a)500 hPa 风场(粗实线为风速),相对湿度(细实线,阴影区相对湿度>70%,箭头为显著流线),(b)过 40°N 垂直环流与相当位温(阴影区相对湿度>70%)

Fig. 9 (a) Wind at 500 hPa (thick line for wind speed, shaded for RH>70%, arrows for dominant flow), (b) vertical circulation and θ_{se} section across 40°N (shaded for RH>70%) at 14:00 BT 23 June 2008

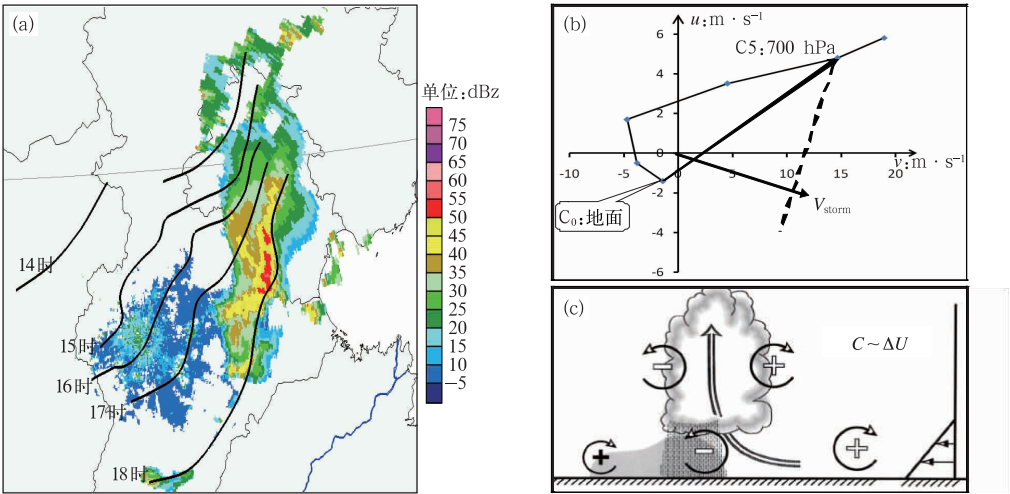


图 10 (a)2008 年 6 月 23 日 14—18 时飊线移动路径以及 18 时 0.5°仰角上的雷达回波, (b)23 日 08 时中低层风矢量端迹图, (c)低层垂直切变与冷池边界扩张速度 C 的关系

[引自 Weisman(2004)Fig. 2b]

Fig. 10 (a) Path of squall line during 14:00—18:00 BT 23 June 2008 and the radar echoes on 0.5° elevation at 18:00 BT 23 June, (b) the lower level hodograph at 08:00 BT 23 June, (c) relation between cold pool boundary moving velocity C and low-level vertical shear [from Weisman (2004) Fig. 2b]

为 23 日 08 时北京站探空风矢量端迹图分析,而北京附近其 $0\sim 3\text{ km}$ 风切变 $\overline{C_0 C_5}$ 为 $17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,投影在风暴移动矢量 $\mathbf{V}_{\text{storm}}$ 上约为 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,与飑线移动速度相近。若将飑线的移动速度近似认为是冷池边界的扩张速度,则相对于飑线的低层风垂直切变与冷池边界速度是相当的,这样在风暴前方就能够维持稳定的暖湿入流,从而使得 MCS 维持较长的时间(如图 10c 所示),否则迅速前推的冷池将会阻断入流,MCS 将迅速减弱消亡。Richard 等(1988)通过数值试验以及理论解析证明指出,低层垂直切变与冷池边界扩张速度的平衡关系是决定飑线结构的重要物理条件,并且仅仅当两者大小基本平衡时飑线才能够维持相对稳定的结构以及相对较长的生命史,Weisman 等(2004)最近通过更完善的数值试验进一步验证了这一结论。通过图 7c 中反射率和径向速度的垂直剖面可以看出,气流结构实际上与图 10c 相近,但进一步的定量分析需要有更细致的中尺度风场信息,留待进一步讨论。

5 小 结

(1) 2008 年“6.23”强对流天气是一次冷涡背景下产生的强对流天气过程,通过对订正探空的分析,23 日午后的对流潜势有明显增强,在一定的强迫机制下能够支持对流系统发展。

(2) 从对环境气流的分析表明,在蒙古冷涡后部有副冷锋从河套地区东移,气旋后部的中高层干冷急流侵入与短波槽相关的低层湿区,导致了较强的位势不稳定发展,同时中层干层也有利于出现雷暴大风;而从低层环境看,主冷锋过境后华北地区地面迅速转为偏东或东南风,有利于边界层内的增温增湿,从而在华北东部形成湿度锋区。在两者的共同作用下,可导致在华北地区触发较强的 MCSs 发展。

(3) 从此次对流发展的特征来看,强对流风暴和超级单体风暴相当活跃,早期飑线由若干离散的超级单体风暴逐步发展构成,而成熟阶段的弓形回波由南北两支对流带合并构成;强对流风暴或者超级单体出现的地点具有一定的随机性,但飑线整体的组织结构与锋面或者地面风场辐合线关系密切。

(4) 初始对流的触发与从河套地区东移的副冷锋有直接关系,通过锋面次级环流的诊断分析了锋

面造成的动力抬升运动。根据雷达观测估计了冷池边界扩张速度与低层风垂直切变之间的关系,表明了两者之间存在平衡关系,并从理论角度表明只有两者大致平衡时,才能使得强飑线维持较长的时间。

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. *气象学报*, 70(3): 371-386.
- 慕熙昱,党人庆,陈秋萍,等. 2007. 一次飑线过程的雷达回波分析与数值模拟. *应用气象学报*, 18(1): 42-49.
- 潘玉洁,赵坤,潘益农. 2008. 一次强飑线内强降水超级单体风暴的多普勒雷达分析. *气象学报*, 66(4): 621-635.
- 王福侠,裴宇杰,杨晓亮,等. 2011. “090723”强降水超级单体风暴特征及强风原因分析. *高原气象*, 30(6): 1690-1700.
- 王秀明,俞小鼎,周小刚,等. 2012. “6.3”区域致灾雷暴大风形成及维持原因分析. *高原气象*, 31(2): 504-514.
- 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. *气象学报*, 70(3): 311-337.
- 郑媛媛,俞小鼎,方翀,等. 2004. 一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析. *气象学报*, 62(3): 317-238.
- Atkins N T, Christopher S B, Ron W P, et al. 2005. Damaging surface wind mechanisms within the 10 June 2003 saint louis bow echo during bamex. *Mon Wea Rev*, 133(8): 2275-2296.
- Funk T W, Kevin E D, Joseph D K, et al. 1999. Storm reflectivity and mesocyclone evolution associated with the 15 April 1994 squall line over kentucky and southern Indiana. *Wea Forecasting*, 14(6): 976-993.
- Johnson R H, Bresch J F. 1991. Diagnosed characteristics of precipitation systems over Taiwan during the may June 1987 TAMEX. *Mon Wea Rev*, 119(11): 2540-2557.
- Moller A R, Doswell III C A, Foster M P, et al. 1994. The operational recognition of supercell thunderstorm environments and storm structures. *Wea Forecasting*, 9(3): 327-347.
- Richard R J B Klemp, Weisman M L. 1988. A theory for strong, long-lived squall lines. *J Atmos Sci*, 45(3): 463-485.
- Shapiro M A. 1988. Forntogenesis and geostrophically forced secondary circulations in the vicinity of jet stream-frontal zone systems. *J Atmos Sci*, 45(6): 915-930.
- Weisman M L, Klemp J B. 1982. The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy. *Mon Wea Rev*, 110(6): 504-520.
- Weisman M L, Klemp J B. 1984. The structure and classification of numerically simulated convective storms in directionally varying wind shears. *Mon Wea Rev*, 112(12): 2479-2498.
- Weisman M L, Richard R. 2004. A theory for strong long-lived squall lines revisited. *J Atmos Sci*, 61(4): 361-382.