

张婉莹,花家嘉,侯书勋,等. 河北唐山一次飚线过程的中尺度天气分析[J]. 干旱气象,2014,32(4):636-641, [ZHANG Wanying, HUA Jiajia, HOU Shuxun, et al. Mesoscale Weather Analysis of a Squall Line in Tangshan of Hebei Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2014, 32(4):636-641], doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2014)-04-0636

河北唐山一次飚线过程的中尺度天气分析

张婉莹,花家嘉,侯书勋,马前进

(河北省唐山市气象局,河北 唐山 063000)

摘要:利用常规观测资料、自动气象站资料及雷达资料,对2013年8月4日影响唐山的一次飚线过程进行了中尺度分析。结果表明:500 hPa高空槽是产生这次飚线的主要影响系统,地面中尺度辐合线是这次过程的触发机制;对流层中层干冷空气入侵与低层暖湿气流的辐合增强了大气层结的不稳定;低层辐合、高层辐散进一步加强了垂直运动的发展;中低层垂直风切变则有利于飚线的发展、加强和维持。雷达回波图上可识别出中低空的中尺度辐合线、弓形回波、逆风区等中小尺度结构特征,对于此类强对流性天气的预报具有实际指示意义。

关键词:飚线;中尺度;不稳定层结;雷达回波特征

文章编号:1006-7639(2014)-04-0636-06 doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2014)-04-0636

中图分类号:P458.2

文献标识码:A

引言

飚线是一种带(线)状深厚的中尺度对流系统,是非锋面的或狭窄的活跃雷暴带,其水平尺度通常为几百千米,典型生命期约6~12 h,常引起局地暴雨和灾害性强风,有时还伴有冰雹甚至龙卷^[1]。由于飚线空间尺度小、生命期短,其产生的灾害性天气有一定的突发性和无规律性,在实际工作中常常只能通过雷达、卫星等对其进行监测和预报。因此以往的研究多重点分析雷达、卫星等资料^[2-5]。除此之外,还有从天气学诊断方面开展研究工作,也取得了卓有成效的成果,如张芳华等^[6]对飚线天气过程成因进行天气动力学诊断分析后发现,对流层上层干冷空气侵入和低层暖湿气流强烈辐合是飚线天气的触发机制。杨晓霞等^[7]对2006年4月28日山东省一次飚线天气过程进行了诊断分析,并应用湿位涡守恒理论研究了飚线的发展机制。梁建宇等^[8]对2009年6月3~4日一次产生地面大风的“人字形”强飚线过程进行了观测资料分析和数值模拟研究。2013年8月4日唐山市出现了一次破坏性较强的飚线天气过程,给当地的工农业生产及人们生活带来严重影响。本文利用常规观测资料、自动气象站资料以及雷达资料,采用天气学动力诊断方法,

对这次过程进行了中尺度分析,探讨飚线产生的环境条件,以此加强对飚线天气的认识,以期提高对此类强对流天气的监测和预报能力。

1 天气过程

2013年8月4日傍晚前后,华北中北部出现了多个对流单体并逐步发展成为典型飚线。在内蒙古南部、山西北部以及河北大部分地区先后出现了雷暴、大风、局地冰雹及短时强降水等强对流天气。飚线于21~23时自西北向东南袭击了整个唐山市,大部分县市风力(极大风)达6~7级,唐山西北部风力最大达9~10级,其中迁西瞬时风速高达28.4 m/s。遵化、迁西境内还出现局地冰雹(由于冰雹未出现在测站附近,因此没有具体的地面观测记录)。雷雨大风、短时强降水和局地冰雹导致多处房屋倒塌,1700多间房屋受损,农作物受灾面积超过2万hm²,共计直接经济损失近2×10⁴万元。

2 环流形势和中尺度分析

2.1 环流形势

2013年8月4日08时500 hPa亚洲高纬地区(50°N以北)为2槽1脊,中纬度地区以纬向环流为主,仅华北上空有一短波槽,槽后有-12℃的冷中

心配合。4日20时(图1),500 hPa 华北高空槽有所加深,槽线由内蒙古东部到河北北部,经北京伸至河南北部,在东部日本海高压的阻挡下,槽东移不明显,但槽后西北风加大,风速达到16~20 m/s。在西北气流引导下,干冷空气由西北向东南扩散至京津冀大部,叠加在低层的暖气团上,在河北上空形成不稳定层结。700 hPa、850 hPa 切变线位置较500 hPa 槽线落后,系统呈现前倾结构,有利于加强大气垂直运动,促进对流发展。700 hPa 切变线前河套南部—山西—河北中部西南风达到12 m/s,在河北北部、北京一带形成明显气流辐合。850 hPa 切变线由内蒙古东北部经山西伸至河套南部,切变线前较强的西南风与黄河以南偏南风共同形成一条完整的水汽输送带,将南方暖湿空气源源不断地向北输送,加强了上干冷下暖湿的不稳定层结,为强对流天气的发展提供了大尺度环境条件。925 hPa 上超低空急流由湖北一直伸至河北中部,较强的低层辐合有利于垂直运动的发展,同时高空有急流存在,200 hPa 为明显的辐散区,高低空之间的相互作用更有利于深厚对流的形成。

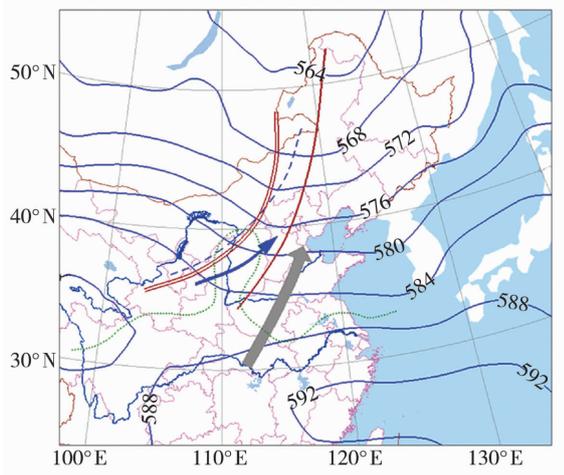


图1 2013年8月4日20时500 hPa 高度场(单位:dagpm)及高低层中尺度系统配置(单实线是500 hPa槽线,双实线是700 hPa切变线,虚线是850 hPa切变线,点线是700 hPa湿舌,细箭头是700 hPa大风速带,粗箭头是925 hPa急流)

Fig. 1 The 500 hPa height field (Unit:dagpm), high and low levels mesoscale system at 20:00 on August 4, 2013 (the single solid line is 500 hPa trough line, double solid line is 700 hPa shear line, dashed line is 850 hPa shear line, dotted line is 700 hPa moist tongue, thin line with arrow is 700 hPa gale belt, coarse line with arrow is 925 hPa jet)

8月4日白天,整个华北地区地面处于暖性高压控制下,高压脊由山西伸至蒙古南部。河北中南部维持轻度的雾霾天气,近地面能量积聚。4日17时地面风场上(图略),在河北西北部到山西存在明显的中尺度辐合,辐合加强了大气垂直运动,使对流云团得到发展。随后辐合线向东南方向移动,激发飊线形成、发展、加强。

2.2 水汽条件及动力条件

风暴发展要求低层有充足的水汽供应,常形成于低层有湿舌或强水汽辐合的地区。4日20时700 hPa水汽通量(图略)和水汽通量散度场(图2)显示,长江中下游存在2个 $16 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 水汽通量大值中心,水汽通量带由南向北伸至河北西南侧,在偏南气流的作用下,丰富的水汽源源不断向北输送。在河北东北部有较强的水汽通量辐合区, $-20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 辐合中心位于唐山西北部,使得大量水汽在唐山上空汇集。850 hPa水汽通量场上也有一条明显的湿舌(图略),由西南地区向北伸至河北北部, $22 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水汽通量中心位于山东北部,水汽通量辐合中心与700 hPa位置一致,山东半岛上空的水汽随着气流也向唐山西北部汇集,正好对应强降水落区。低层充足的水汽供应,为飊线的产生提供了有利的水汽条件。

8月4日08~20时涡度、散度(图略)及垂直速度场(图2)的发展演变可见,4日08时唐山处于高空槽前正涡度平流区,500 hPa正涡度中心位于河北

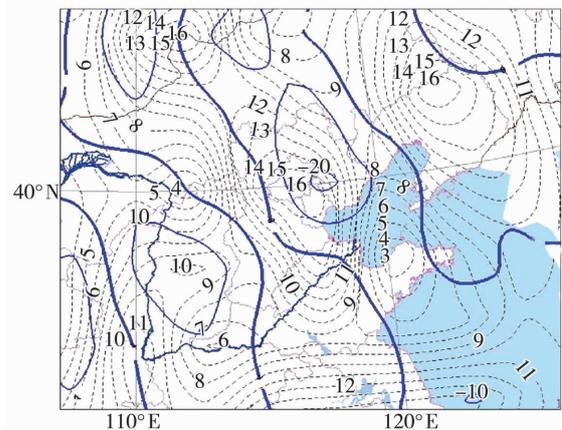


图2 2013年8月4日20时700 hPa水汽通量散度(单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)和垂直速度(单位:m/s)(实线是水汽通量散度场,虚线是垂直速度场)

Fig. 2 The 700 hPa water vapor flux divergence (Unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and vertical velocity (Unit:m/s) at 20:00 on August 4, 2013 (the solid line is the water vapor flux divergence field, dotted line is vertical velocity field)

北部。此时低层大气辐合并不明显,高空正涡度平流促使低层气流辐合加强,到 20 时,由地面至 400 hPa 大气为辐合,且在 1 000 hPa、700 hPa 上唐山均处于辐合大值中心区,200 ~ 300 hPa 有较强的辐散,对低层产生抽吸作用,加强低层辐合,因此上升运动得以发展,在北京上空形成一个 16 m/s 的垂直上升运动中心,有利于强对流天气的产生。

3 自动站要素场分析

飊线出现会引起风向突变、风力猛增、气压涌升、气温急降、相对湿度大幅上升。这次飊线过境前后,唐山自西北向东南多个测站气象要素记录先后出现了明显的不连续变化。以迁西站为例,分析此次过程前后各要素的变化情况(图 3)。在强降水出现前,气压便开始升高,在飊线过境期间的 21:00 ~ 22:00 内气压上升近 5 hPa,“气压鼻”呈双峰状(图 3a)。21:15,风速由 7.9 m/s 增大至 17.2 m/s,此时

尚未出现明显降水。风速的增大超前于降水,表明该飊线的前冲冷流与强降水有一定时间间隔^[4]。统计 10 min 降水量发现,最强降水发生在 21:20 ~ 21:30 之间,降水量达 10.6 mm,随着强降水的出现,风速陡增,1 min 平均风速急剧上升到 19.4 m/s,21:26 瞬时极大风速达到了 28.4 m/s,且风向由原来的偏南风转为偏西到西北风(图 3b)。刘香娥等^[10]通过数值模拟探讨了地面大风的成因,发现在融化层之下雨水的拖曳作用会使下沉气流得到加强。迁西境内最大风速出现在强降水发生后,也证明了强降水在地面大风形成中所起的重要作用。与强降水相对应,气温和相对湿度也发生了大幅变化,1 h 内气温由 28.9 °C 降至 19.9 °C,降温幅度达 9 °C;相对湿度呈现出先减小后增大的趋势,由于前期风力加大,相对湿度一度急剧下降,后期由于降水的出现,相对湿度又迅速增大并维持。这次过程中,强降水集中在唐山西北部,表现出明显的突发性和局地性。

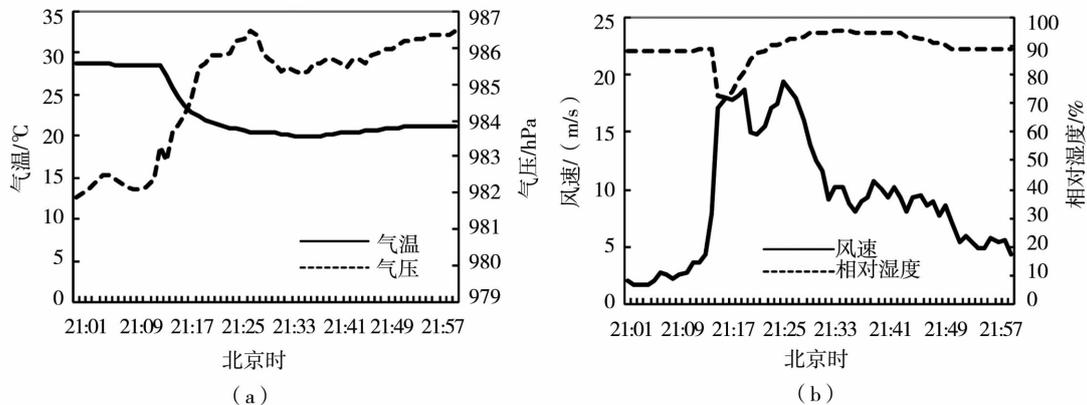


图3 2013年8月4日21:01~22:00迁西站逐分钟
气压和气温(a)以及风速和相对湿度(b)的变化

Fig. 3 The minutely variation of the pressure, temperature (a), wind speed and relative humidity (b) at Qianxi station from 21:01 to 22:00 on August 4, 2013

4 探空资料分析

图4是乐亭站4日08时的探空图。可以看出,1 000 ~ 900 hPa 范围内大气相对湿度在 90% 以上,900 ~ 550 hPa 之间相对湿度维持在 40% ~ 70%,500 hPa 以上相对湿度低于 10%,表现出明显的上干、下湿对流不稳定层结。沙氏指数 SI 为 -0.5 , K 指数为 32,对流有效位能 $CAPE$ 达 3 111.5 J/kg,大气层结不稳定,十分有利于形成较强的飊线系统。700 hPa 以下风向随高度顺转,500 ~ 250 hPa 风向随高度逆转,说明低层有暖平流,中高层有冷平流,冷平流叠置在暖平流之上,增加了气层不稳定性。此

外,抬升凝结高度 LCL 为 972.2 hPa,表明只需要弱的抬升机制气层就可达到饱和,而大气的中高层干冷、低层暖湿的结构,将促使对流发展,同时中高层干冷空气的下沉也有利于地面雷暴大风的形成。850 ~ 700 hPa 偏西风急流与 200 hPa 西南风急流共同促进了大气垂直运动的发展。0 ~ 3 km 垂直风切变达到 18 m/s,这种中等强度的垂直风切变有利于风暴的发展、加强和维持^[11]。

由于白天受太阳辐射作用,地面迅速加热,且在暖平流的作用下,低层大气迅速增暖,并向有利于对流不稳定层结方向发展。4日20时(图略),大气表现得更为不稳定,沙氏指数 SI 为 -5.6 , K 指数为

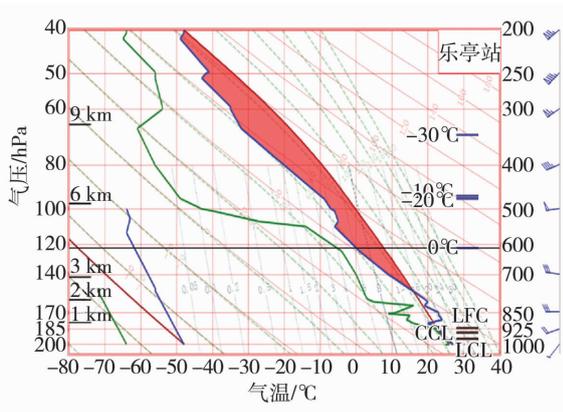


图4 2013年8月4日08时乐亭站探空图
Fig. 4 The $T - \ln P$ diagram at Laoting station at 08:00 on August 4, 2013

33, 对流有效位能 $CAPE$ 增至 $4\ 976.3\ \text{J/kg}$, $0\ ^\circ\text{C}$ 等温线高度达到 $600\ \text{hPa}$, $-20\ ^\circ\text{C}$ 等温线高度位于 $400\ \text{hPa}$ 附近, 为降雹适宜高度。这种异常不稳定的大气条件将有利对流风暴的产生。

5 雷达回波特征

5.1 基本反射率因子特征

通过分析北京和天津雷达站的雷达回波看出, 此次飏线影响范围十分广, 给多地带来了灾害性天

气, 所到之处造成大风天气, 阵风风速达到 $28.4\ \text{m/s}$ 。北京雷达站 1.5° 仰角基本反射率因子图上显示, 8月4日 18:30 (图 5a), 河北省西北部已被层积混合状回波所覆盖, 大片回波中镶嵌有多个较强的对流单体。随后, 回波向东南方向发展, 19:00 (图 5b) 在降水回波前沿, 雷暴单体侧向排列成东北—西南向线状强回波带, 形成断续性线型飏线。在回波移动过程中, 强回波带中对流单体合并加强, 且其南段增强为弓形回波, 最大回波强度达到 $58\ \text{dBZ}$ 。随后, 强回波带继续向东南方向移动, 右前方不断有新生单体生成, 并与其合并发展, 水平尺度不断扩大, 到 20:30 (图 5c) 东北—西南向飏线回波弥合成带状, 水平尺度超过 $300\ \text{km}$ 。此时飏线北端已开始影响唐山西北部遵化市, 其移速也开始加快。天津雷达站 21:00 (图 5d) 观测到的飏线已发展至成熟阶段, 呈现出弓形特征, 回波带横跨整个河北省, 风暴移速约为 $60\ \text{km/h}$ 。位于迁西县的强回波中心为 $63\ \text{dBZ}$, 回波顶达 $18\ \text{km}$, 垂直累积液态含水量 VIL 最大值达 $63\ \text{kg/m}^2$, 21:00 ~ 22:00 迁西县出现冰雹、大风、短时强降水, 其中三屯 $1\ \text{h}$ 降水量达 $44.3\ \text{mm}$ 。之后, 飏线开始减弱, 对唐山地区造成的大风也自北向南随之减弱, 23:00 以后对唐山的影响基本结束。

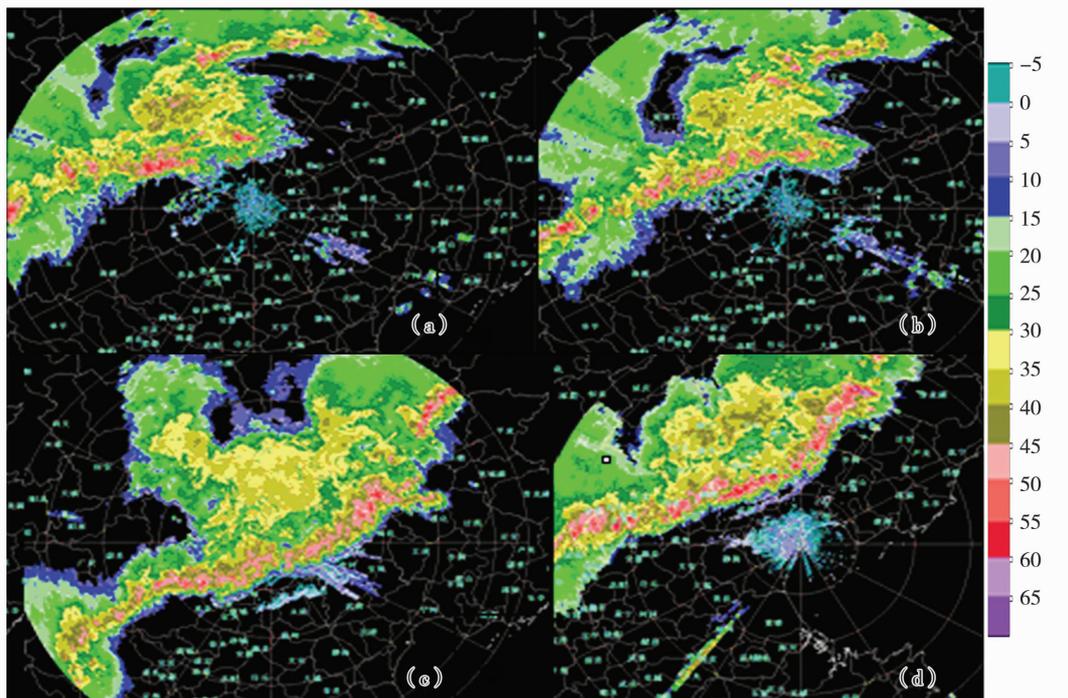


图5 2013年8月4日北京站雷达 18:30 (a)、19:00 (b)、20:30 (c) 及天津站雷达 21:00 (d) 1.5° 仰角基本反射率因子演变 (单位: dBZ)

Fig. 5 The evolution of the base reflectivity on 1.5° elevation at 18:30 (a), 19:00 (b) and 20:30 (c) at Beijing radar station and 21:00 (d) at Tianjin radar station on August 4, 2013 (Unit: dBZ)

5.2 径向速度特征

天津雷达站 1.5° 仰角的径向速度图可见, 20:18(图 6a) 风场上存在明显的辐合, 辐合线位于承德至天津、北京交界一带, 并且在大面积负速度区内有零散的小块正速度区, 表明在强的入流气流中有小涡旋正在生成, 存在明显辐合区, 可能会出现冰雹及地面大风。中尺度辐合线促进了对流风暴的发展, 风场不断加强, 正速度区

也不断增大。21:36(图 6b) 唐山西北部被正速度大值区所覆盖, 强中心位于迁西, 中心值达 24 m/s , 与地面大风区相对应。负速度大值中心位于雷达站西北方向, 中心值 $\leq -27 \text{ m/s}$, 并出现了逆风区。同时, 低空急流的存在进一步促进了强对流天气的发生。随着飚线的移经, 其后部冷空气大幅入侵, 22:30 的速度图(图 6c) 上表现出明显的反“S”型的冷平流回波特征。

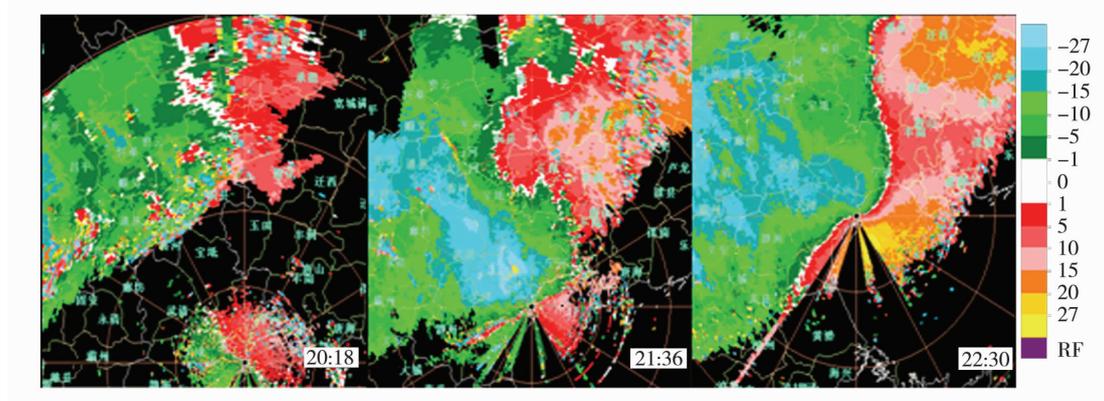


图 6 2013 年 8 月 4 日天津站雷达 1.5° 仰角径向速度时间演变(单位:m/s)

Fig. 6 The evolution of radial velocity on 1.5° elevation at Tianjin station on August 4, 2013 (Unit:m/s)

5.3 垂直累积液态水含量

垂直累积液态水含量(VIL)是指将反射率因子数据转换成等价的液态水值^[11], 是用来判断对流风暴的一个重要参量。分析本次过程中 VIL 的变化(图略)发现, 其大值区的分布、变化趋势以及强中心位置与反射率因子表现特征基本一致, 但其变化幅度更为剧烈。降水出现前 20:48, VIL 最大值出现在迁西境内, 其值由 50 kg/m^2 跃增至 60 kg/m^2 ; 到 21:06, VIL 最大值突然降至 35 kg/m^2 , 迁西风力开始增大, 21:18 出现降水。降水发生后的 21:24, VIL 再次出现大幅下降, 最大值降至 25 kg/m^2 , 之后迁西出现短时强降水。由此看出, VIL 值增大后的突然下降预示着破坏性大风的开始以及短时强降水的出现, 因此 VIL 值的变化对此类强对流性天气的预报具有实际指示意义。

6 结 论

(1) 低层对流性不稳定是此次飚线产生的环境背景, 对流层中层干冷空气南下以及低层暖湿气流的辐合增强是强对流天气出现的重要原因。

(2) 高低空急流共同作用, 促使低层辐合、高层辐散, 加强了大气垂直运动的发展, 为强对流天气的出现提供了动力条件。

(3) 地面中尺度辐合线触发对流不稳定能量释放, 使对流云团得到发展, 并进一步激发飚线的形成。

(4) 充足的水汽供应以及中等强度的垂直风切变有利于对流风暴的发展、加强和维持。

(5) 飚线过境时, 唐山自动站气象要素显示“气压鼻”呈双峰状、风速猛增、气温骤降、相对湿度大幅上升, 并出现短时强降水。风速的增大超前于降水, 表明该飚线的前冲冷流与强降水有一定时间间隔, 而强降水的出现, 使下沉气流在雨水的拖曳作用下得到加强, 对大风的出现起到了重要作用。

(6) 雷达回波图上可识别出中低空的中尺度辐合线、弓形回波、逆风区等中小尺度结构特征以及高 VIL 值及其突变等特征, 这对此类强对流性天气的预报具有实际指示意义。

参考文献:

- [1] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 雷达气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2001. 420-426.
- [2] 姚叶青, 俞小鼎, 张义军, 等. 一次典型飚线过程多普勒天气雷达资料分析[J]. 高原气象, 2008, 27(2): 373-381.
- [3] 李淑玲, 刁秀广, 朱敏, 等. 一次飚线过程多普勒雷达资料分析[J]. 气象, 2009, 35(3): 60-65.
- [4] 武麦凤, 毛玉琴. 一次强飚线过程的卫星云图及天气雷达回波特

- 征分析[J]. 干旱气象, 2006, 24(4): 45-50.
- [5] 王宏, 马凤莲, 王万筠. 河北承德一次飑线过程的多普勒雷达资料分析[J]. 干旱气象, 2009, 27(1): 29-33.
- [6] 张芳华, 张涛, 周庆亮, 等. 2004年7月12日上海飑线天气过程分析[J]. 气象, 2005, 31(5): 47-51.
- [7] 杨晓霞, 李春虎, 杨成芳, 等. 山东省2006年4月28日飑线天气过程分析[J]. 气象, 2007, 33(1): 74-80.
- [8] 梁建宇, 孙建华. 2009年6月一次飑线过程灾害性大风的形成机制[J]. 大气科学, 2012, 36(2): 316-336.
- [9] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 2000. 406-411.
- [10] 刘香娥, 郭学良. 灾害性大风发生机理与飑线结构特征的个例分析模拟研究[J]. 大气科学, 2012, 36(6): 1151-1164.
- [11] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006. 93-94.

Mesoscale Weather Analysis of a Squall Line in Tangshan of Hebei Province

ZHANG Wanying, HUA Jiajia, HOU Shuxun, MA Qianjin

(Tangshan Meteorological Bureau of Hebei Province, Tangshan 063000, China)

Abstract: Based on conventional observation data, automatic meteorological station data and radar data, the mesoscale analysis of a squall line process influenced on Tangshan area on August 4, 2013 was performed. The results showed that the 500 hPa upper trough was the main effect system on the squall line induced by a ground mesoscale convergence line. The invasion of dry and cold air from the middle troposphere and the convergence of warm and moist air from the low-level troposphere enhanced the instability of atmosphere. The low-level convergence and high-level divergence further strengthened the vertical movement. The vertical wind shear at the middle and low layer was beneficial to the development, enhance and maintain of the squall line. Some mesoscale structure features can be identified on the radar echo map, such as mesoscale convergence line in middle and low level, bow echo, head wind areas, which were all actual indicative to the severe convective weather.

Key words: squall line; mesoscale; instability stratification; radar echo characteristic