

杨吉,郑媛媛,夏文梅,等,2020.东北冷涡影响下江淮地区一次飑线过程的模拟分析[J].气象,46(3):357-366. Yang J, Zheng Y Y, Xia W M, et al, 2020. Numerical analysis of a squall line case influenced by northeast cold vortex over Yangtze-Huaihe River Valley[J]. Meteor Mon, 46(3):357-366(in Chinese).

东北冷涡影响下江淮地区一次飑线过程的模拟分析*

杨吉^{1,2,3} 郑媛媛^{1,2,3} 夏文梅^{1,2,3} 孙康远^{1,2,3}

1 中国气象局交通气象重点开放实验室,南京 210009

2 江苏省气象科学研究所,南京 210009

3 南京气象科技创新研究院,南京 210009

提 要: 利用四维变分同化分析系统模拟和雷达拼图资料分析了2012年5月16日东北冷涡影响下的弱飑线过程。结果表明:较强的地面辐合线是该次过程在较弱稳定条件下被触发的重要原因,也是系统前期快速发展的重要原因;东北冷涡影响下中层不断输送干冷空气到江淮地区,飑线内对流部分由降水拖曳导致的下沉气流遇到夹卷进入下沉气流内的环境干空气,使得其中雨滴蒸发造成空气冷却,下沉到地面形成冷池;冷池形成之后,垂直风切变方向不垂直于系统,且切变值较弱,造成水平涡度不平衡,是该飑线发展相对较弱的主要原因,此外不稳定条件和湿度条件较差也可能是系统没有发展为强飑线的原因。该次飑线过程的重要特点是较强的地面辐合线;较干的环境条件,意味着凝结潜热释放较少,而系统中的垂直运动更多取决于冷池和垂直风切变之间的水平涡度平衡。

关键词: 飑线,东北冷涡,模拟

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.03.007

Numerical Analysis of a Squall Line Case Influenced by Northeast Cold Vortex over Yangtze-Huaihe River Valley

YANG Ji^{1,2,3} ZHENG Yuanyuan^{1,2,3} XIA Wenmei^{1,2,3} SUN Kangyuan^{1,2,3}

1 Key Laboratory of Transportation Meteorology, CMA, Nanjing 210009

2 Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210009

3 Nanjing Joint Institute for Atmospheric Sciences, Nanjing 210009

Abstract: Using four-dimensional variational Doppler radar assimilation system (VDRAS) simulation and radar mosaic data, a weak squall line influenced by northeast cold vortex on 16 May 2012 was analyzed. The result showed that strong convergence line on the surface was an important factor causing convective occurrence under the weak hydrostatic instability, and was also an important reason for the quickly developing of the system at the early stage. Cold air was continuously transported to Yangtze-Huaihe River Valley under the control of northeast cold vortex. Because of precipitation dragging by convection within squall line, the dry and cold air was entrained into convection and continuously moved downward, causing strong cold pool as the result of evaporation. The main reason for weak squall line is that after the formation of cool pool, vertical wind shear is not perpendicular to the squall line with weak magnitude, causing imbalance between them. Besides, weak hydrostatic instability and low relative humidity are part of reasons

* 国家重点研发计划(2018YFC1507503)、国家自然科学基金项目(41805025、41575036、41475042)、江苏省社会发展面上项目(BE2015731)、江苏省气象局重点项目(KZ201704)、江苏省气象局面上项目(KM201701)和北极阁开放研究基金(NJCAR2016ZD01)共同资助

2018年10月24日收稿; 2019年12月26日收修定稿

第一作者:杨吉,主要从事雷达气象研究. Email: yangji1986@163.com

通讯作者:郑媛媛,主要从事雷达气象研究. Email: zhengyy63@sina.com

for the weak squall line. The major difference between this case and other squall lines in eastern China is the strong convergence line and relative dry environment, which means less moisture content is delivered to middle level and less latent heating is released. Finally, upward motion is more dependent on balance between cool pool and vertical wind shear.

Key words: squall line, northeast cold vortex, simulation

引 言

飊线常常伴有强烈的大风、雷暴和冰雹等灾害天气,甚至是具有强破坏性的龙卷。经常造成严重的财产损失,甚至是人员伤亡。如 2009 年 6 月 3—4 日黄淮飊线,造成多达 27 人死亡。由于飊线的快速发展和移动,对于业务预报还是一个较大的挑战。

随观测技术的发展,学者们利用各种资料对飊线进行了分析(刘莲等,2015;王俊等,2016;高梦竹等,2017;唐明晖等,2017;徐燕等,2018)。丁一汇等(1982)分析了飊线发生的天气背景、触发条件和形成热动力条件。Meng et al(2013)统计了华东地区飊线日变化、月变化、生命史以及环境特征。随着数值模拟技术的发展,模拟分析在研究飊线触发和维持方面得到广泛的应用,由于降水拖曳作用和蒸发冷却导致对流下方形成的冷空气堆被叫做冷池,冷池向外扩散可以与环境气流相互作用,起到触发和维持对流的作用(Luo et al,2014;陈明轩等,2017;张宁等,2017;郑丽娜和刁秀广,2016)。在这个过程中,起关键作用的是环境垂直风切变与冷池的相互作用,它们决定了抬升气流的强度,从而决定了新单体的生成和系统的维持,被叫做 RKW 理论(Rotunno et al,1988;Weisman et al,1988;Weisman and Rotunno,2004)。以上结论在国内的研究中也被重点关注,陈明轩和王迎春(2012)利用多普勒雷达四维变分同化分析系统(VDRAS)模拟华北一次飊线过程发现,低层环境垂直风切变和冷池相互作用是该次飊线过程维持发展和传播的关键机制,且低层风切变和冷池相互作用达到平衡时,飊线发展最旺盛。Luo et al(2014)利用 WRF 模拟发现一次极端降水过程的触发机制,因为下午到晚上的对流活动产生冷池,晚上潮湿的西南气流沿冷池上升,触发了该次过程。此外还有针对不同地区、不同飊线过程的研究,得到许多有意义的结果(漆梁波等,2006;陶岚等,2009;俞小鼎,2012;杨珊珊等,2016;王俊等,2016;陈淑琴等,2017;周围等,2018;张哲等,2018)。

但是对东北冷涡影响下江淮飊线的模拟研究相对较少。

江淮地区地处我国华东地区,经济发达,人口密集,是我国飊线高发区之一(Meng et al,2013)。东北冷涡是在东北地区形成的深厚冷性低值系统,冷空气在其影响下被不断输送到江淮地区。郑媛媛等(2014)统计近 10 年东北冷涡背景下强对流天气特征,发现西北气流控制下冷空气与低层的暖温度脊配合,形成较强的静力不稳定条件,为飊线的发生发展提供了非常重要的条件,此外,所有个例都存在地面辐合线是一个重要的特征。吴海英等(2013)模拟分析了黄淮地区 2009 年 6 月 3—4 日飊线,结果表明东北冷涡环境下,冷平流叠加在低层暖脊之上,形成了不稳定条件,地面中尺度辐合线与飊线发生发展密切相关,水平涡管的倾斜和传播对飊线发展和传播有重要作用。以上研究表明,不稳定条件是江淮飊线的重要影响因子。

2012 年 5 月 16 日,江苏从北至南发生一次弱飊线过程,据民政等部门统计,大风造成小麦倒伏上万亩,树木倒伏或折断上千,经济总损失超过 2 000 万元。该次过程发生前,徐州、射阳 08 时探空 CAPE 值分别为 191.4、50.5 $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$,在不稳定条件较差的情况下,飊线如何被触发以及维持,是本文关注的一个重点。康红等(2016)从观测的角度重点分析了后方入流特征对飊线的作用。本文着重利用模拟分析热动力场,研究东北冷涡影响下,不稳定条件较差情况下飊线的触发和维持机制。

1 方法和模拟检验

1.1 模拟方法

文中使用多普勒雷达四维变分同化分析系统(VDRAS)、三维云模式和 4DVar 同化技术(Sun and Crook,1996;1997;2001;Chen et al,2007;Sun and Zhang,2008;Sun et al,2010),实现对多部多普勒雷达的快速更新循环同化,得到三维热动力场。

该次过程中,模式分辨率被设置为3 km,垂直分辨率为375 m,最底层为187.5 m,网格点范围为555 km×555 km,中心点在(33.0385°N,119.3466°E),同化南京、常州、南通、盐城、连云港和徐州6部多普勒天气雷达和江苏及周边地区10 min间隔加密自动站资料,中尺度背景场由逐小时输出的WRF模式得到,每18 min输出一次分析场。

对于雷达资料预处理,包括基数据插值、平滑处理和漏洞填补,以及两步径向速度退模糊算法的处理、地物回波和超折射地物回波(刘黎平等,2007)的处理等步骤,得到适用于同化的雷达资料。自动站资料经过基于9点平均的方差检查步骤,剔除可疑的站点。

1.2 模拟检验

采用中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室研发的多普勒天气雷达三维数字组网系统将上述6个雷达资料转化成雷达拼图资料,再利用拼图资料对VDRAS输出雷达回波进行检验(图1)。图1a~1d为观测,图1e~1h为模拟,对比分析可以看出,模拟前期(图1a,1e)两个系统的回波位置和强度,以及合并(图1b,1f)等主要特征都被较好地模拟。图1d中系统南侧的回波细线为阵风锋,因阵风锋一般高度较低,图1统一展示3 km高度回波,且

由于受组网拼图时插值的影响,导致图中阵风锋较弱,实况该次阵风锋较强,从图1h来看,该次过程中的阵风锋被成功模拟。根据以上对比分析,表明这次模拟过程具有一定可靠性,可以用于分析这次弱飑线过程。

2 结果与分析

2.1 系统识别分析

应用中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开发的多普勒天气雷达三维数字组网系统把原始雷达资料转化成雷达拼图资料。中尺度对流系统识别跟踪方法采用杨吉等(2012;2015)提出的方法,为了尽量展现该过程中系统随时间的变化,对识别阈值等参数进行了相应的调整。以35 dBz为阈值计算的层云中的对流面积 $\geq 50 \text{ km}^2$,识别为一个系统,相应识别参数被保留下来。

2012年5月16日14:48对流触发,其形成之后向东南方向传播,并演变成飑线。在触发之后的40 min内,对流最大反射率因子、第75%最大反射率因子和第50%最大反射率因子表现为一致的迅速增加,最大反射率因子达到65 dBz以上(图2)。面积增长(图2a)落后于反射率因子(图2b),在16:30

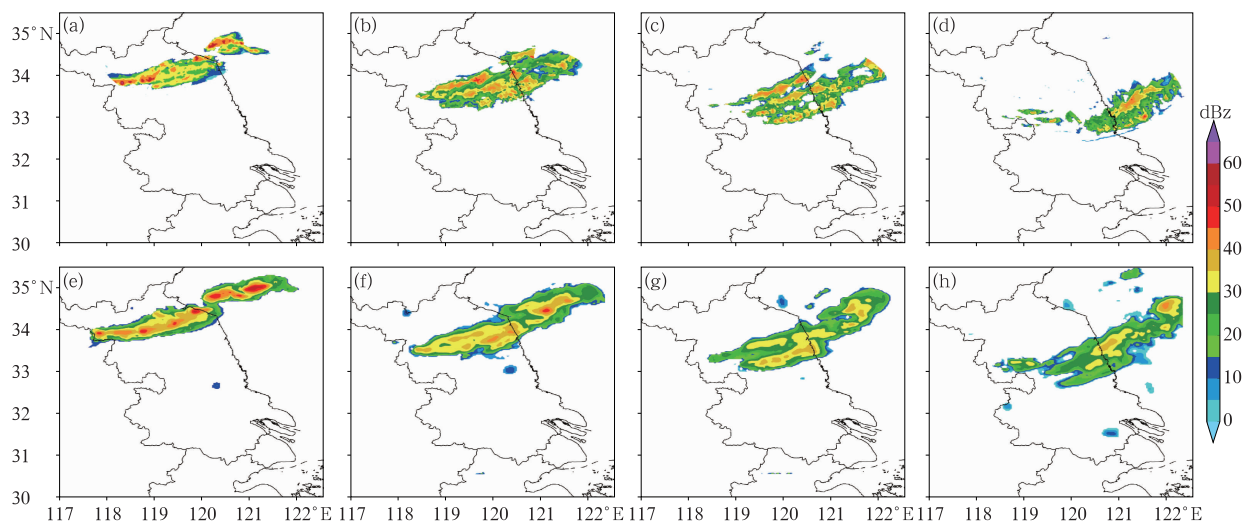


图1 2012年5月16日16:42(a,e),18:00(b,f),18:36(c,g),19:18(d,h)3 km高度雷达反射率
(a,b,c,d)三维组网系统,(e,f,g,h)VDRAS

Fig.1 Radar reflectivity at 3 km AGL at 16:42 BT (a, e), 18:00 BT (b, f),
18:36 BT (c, g), 19:18 BT (d, h) 16 May 2012
(a, b, c, d) 3-D digital mosaic system, (e, f, g, h) VDRAS

左右与东北方的一个对流系统发生合并,其后系统面积达到最大。由于系统内新生出一条新的带状对流,导致形成双带状的回波结构(康红等,2016),18:00—18:48 反射率因子和面积同时增加。其后,冷池进一步加强,形成阵风锋,并将辐合阻断在飑线系统外,飑线逐渐消亡。

在飑线经过的地区从北至南选取3个自动站,飑线分别在17时左右(图3a)、接近19时(图3b)和19时左右(图3c)经过站点。飑线过站风速明显增

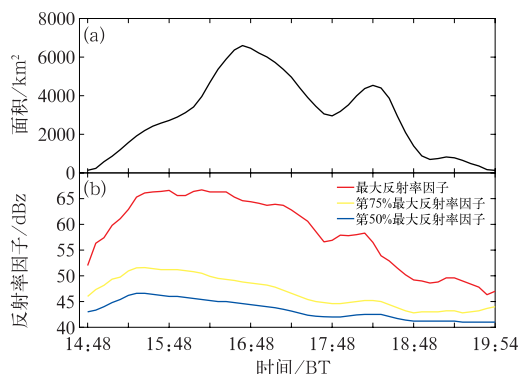


图2 2012年5月16日飑线(a)面积, (b)对流最大反射率因子、第75%最大反射率因子和第50%最大反射率因子

Fig. 2 (a) Area, (b) the 100 th, the 75 th and the 50 th percentile maximum radar reflectivity of squall line on 16 May 2012

加,温度下降,气压升高。温度下降接近 10°C ,图3b,3c 风速增加 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,达到近 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。这些要素的变化是飑线过境的重要特征。

2.2 大尺度环流背景及中尺度分析

从大尺度环流背景来看(图4),500 hPa(图4a)

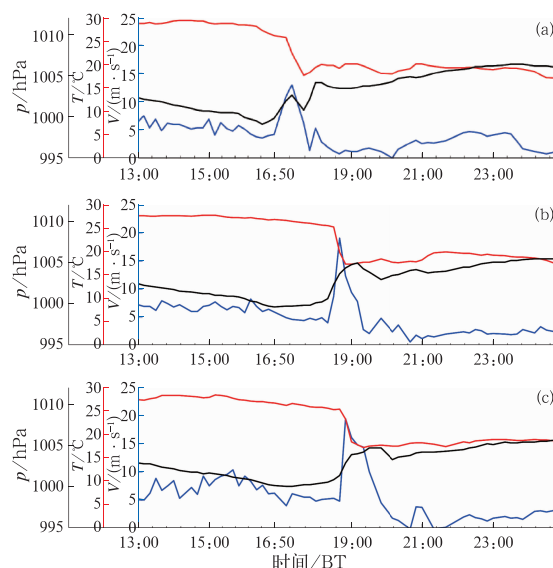


图3 2012年5月16日飑线过境时站点(a)M8032, (b)M8027 和(c)M8008 的风速、温度和气压变化

Fig. 3 Wind speed, temperature and pressure change with time at stations M8032 (a), M8027 (b) and M8008 (c) during the squall line process on 16 May 2012

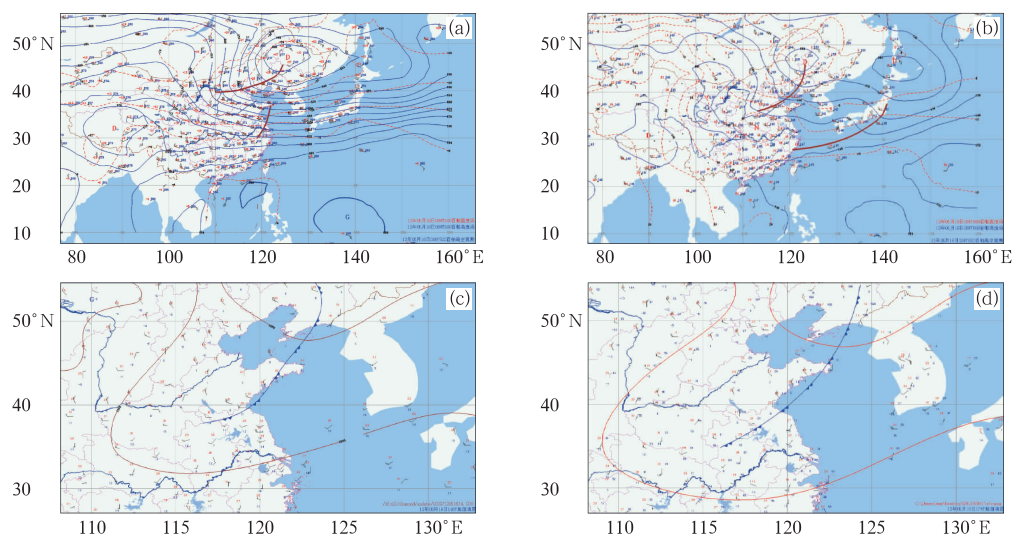


图4 2012年5月16日08时(a)500 hPa 位势高度(蓝线)、风场、温度(红线),

(b)850 hPa 位势高度(蓝线)、风场、温度露点差(红线), (c)14 时和(d)17 时地面图

Fig. 4 (a) Geopotential height (blue line), wind and temperature (red line) at 500 hPa, (b) geopotential height (blue line), wind and dewpoint depression (red line) at 850 hPa at 08:00 BT, surface weather charts at (c) 14:00 BT and (d) 17:00 BT 16 May 2012

上东北冷涡中心位于(18°N、126°E)附近,冷涡中心到内蒙古附近有一横槽,横槽下摆带动冷空气进入河南、山东和江淮地区,且在江淮地区有中空急流。850 hPa (图 4b)上也表现为东北冷涡控制,由于干冷空气输送,暖湿气流被限制在 30°N 以南,对比 NECP 14 时 850 hPa 江苏中南部相对湿度明显增加(图略),主要是低层南风加强,暖湿气流输送造成。16 日 08 时徐州探空(图 5a)的 CAPE 为 $191.4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,受东北冷涡影响,在 925 hPa 往上都非常干燥,最大温度露点差达到 30°C 。在 14 时地面图(图 4c)上,山东半岛到江苏北部存在冷锋,这与对流在江苏徐州触发有密切的联系。17 时(图 4d),地面冷锋继续往南推进,此时对流已经组织起来,冷锋有利于冷池的加强,并在前侧与环境气流碰撞,加强辐合。

对流触发时间在 14:42,从上文天气形势分析

看,08—14 时南风加强暖湿空气输送有利于增加大气不稳定条件,另外由于太阳辐射作用也是贡献大气不稳定条件的重要因素之一。利用 11 时和 14 时(图 5b,5c)地面资料订正探空得到 CAPE 值分别达到约 800 和 $1100 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,低于 Meng et al(2013)统计东部飑线平均 CAPE 值($1480 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)。从其后模拟的 CAPE 分布来看,总体表现为江苏北部相对较弱,南部较强。

08 时徐州探空显示自由对流高度约为 2.7 km。对流触发时刻(图 6a),强辐合中心位置初形成强烈的上升气流达到 4 km 高度附近(图 6b),并触发对流,远高于 2.7 km。从时间演变上来看(图略),地面辐合一直处于维持加强的过程中,在对流触发后半小时内,该处的辐合维持导致着飑线系统迅速发展,雷达回波反射率因子迅速增加,系统面积增加

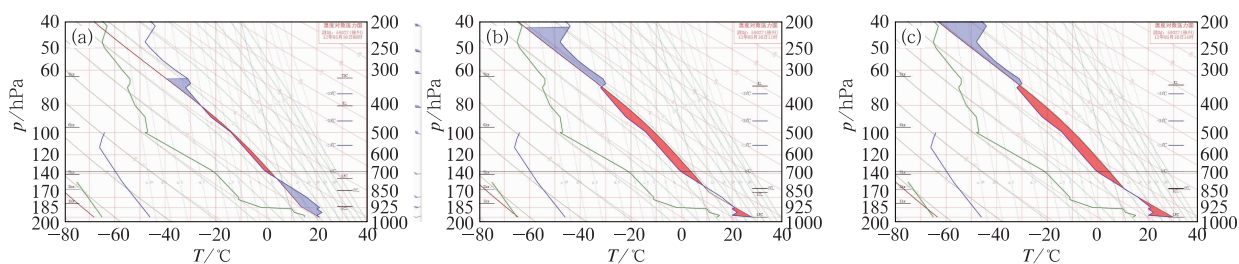


图 5 2012 年 5 月 16 日(a)08 时徐州探空,(b)11 时订正探空,(c)14 时订正探空

Fig. 5 $T\text{-log}p$ plot from Xuzhou sounding at 08:00 BT (a), revised $T\text{-log}p$ plots according to automatic weather station at 11:00 BT (b) and 14:00 BT (c) 16 May 2012

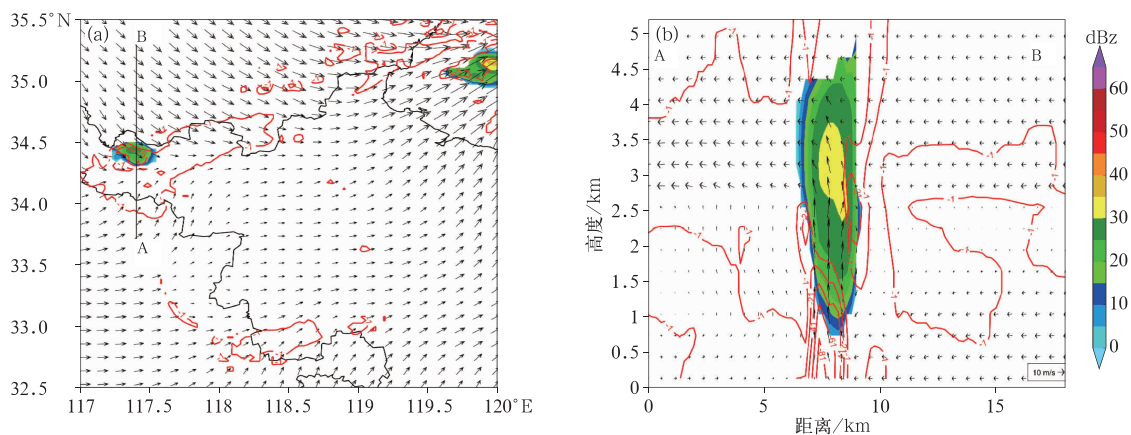


图 6 2012 年 5 月 16 日 14:48(a)风场、散度和雷达回波(填色为 3 km 高度反射率因子;红线为 187.5 m 高度散度,单位: 10^{-4} s^{-1} ;风场为 187.5 m 高度,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), (b)沿图 6a 中做 AB 剖面(红线为散度,单位: 10^{-4} s^{-1} ;风场垂直速度: $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;填色为反射率因子)

Fig. 6 (a) Wind, divergence and radar echo (color shading reflectivity at 3 km altitude; red line divergence at 187.5 m altitude, unit: 10^{-4} s^{-1} ; wind at 187.5 m altitude, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), (b) vertical cross section at AB in Fig. 6a (red line: divergence, unit: 10^{-4} s^{-1} ; vertical velocity: $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; color shading: reflectivity) at 14:48 BT 16 May 2012

(图2),基本达到雷达回波定义飑线的标准(Meng et al,2013),这一时期也是该系统在整个生命周期内强度发展最快的时期。郑媛媛等(2014)和吴海英等(2013)的研究指出,地面辐合线是东北冷涡背景条件下飑线发生发展的一个重要特征,该次过程触发和维持与他们的研究结果较为一致。

到16:12(图7),飑线向东南方向移动,原地面辐合线已消失。东北冷涡影响下中层不断输送干冷空气到江淮地区,探空表明925 hPa以上高度为干冷空气。飑线内对流部分由降水拖曳导致的下沉气流遇到夹卷进入下沉气流内的环境干空气,使得其中雨滴蒸发造成空气冷却,到地面附近形成冷池和强辐散风,而夹卷的干空气动量和移动的飑线本身动量在下沉气流中部分传送到地面附近,导致辐散

风在动量方向上大大加强并影响冷池的移动速度和方向(Zipser,1977;de Szoeke et al,2017),而形成地面大风。此结果与康红等(2016)的观测一致。模拟显示187.5 m高度最大风速达 $21.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从图7c中可以看出整个系统范围内都是冷空气,剖面图可以看到冷池最强到 -6°C 以下(图7d)。0~3 km垂直风切变不完全垂直于系统(图8a),约为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,与冷池相互作用,冷池形成水平涡度明显较强(Rotunno et al,1988;Weisman et al,1988),导致风暴向后方倾斜(图8b),但它们之间差异较小,仍然能够较好地维持系统发展,系统内主要为上升气流。

随着飑线的东移南压,从16:30(图9a)到17:06(图9b),持续的蒸发导致冷池逐渐加强,并快速向系统前部移动。17:42(图9c)冷池加强到 -8°C 以

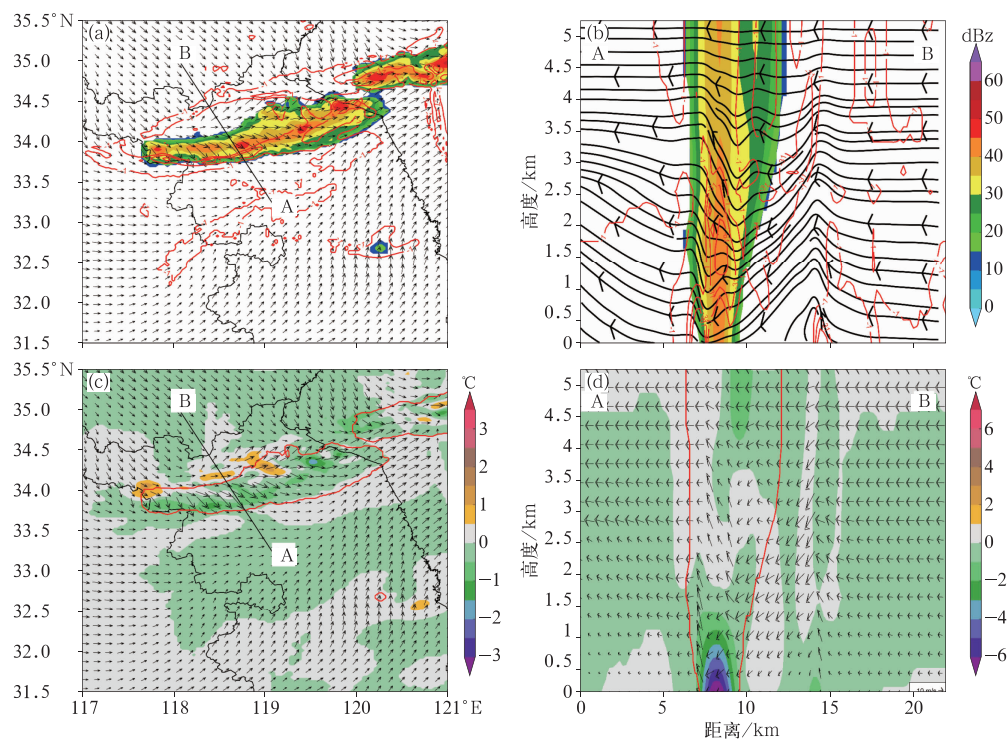


图7 2012年5月16日16:12(a)风场、散度和雷达回波(同图6a), (b)沿图7a中做AB剖面(红线为散度,单位: 10^{-4} s^{-1} ;风场为流线;填色为反射率因子)

(c)扰动温度(填色)、风场和3 km高度15 dBz回波等值线(红线),

(d)沿图7c中AB剖面扰动温度(填色),风场和15 dBz回波等值线(红线)

Fig.7 (a) Wind, divergence and radar echo (same as in Fig. 6a), (b) vertical cross section at AB in Fig. 7a of divergence (red line, unit: 10^{-4} s^{-1}), wind (stream line), reflectivity (color shading), (c) perturbation temperature (color shading) and wind, 15 dBz radar echo (red line) at 3 km altitude, (d) vertical cross section at AB in

Fig. 7c of perturbation temperature (color shading), wind (stream line),

15 dBz radar echo (red solid line) at 16:12 BT 16 May 2012

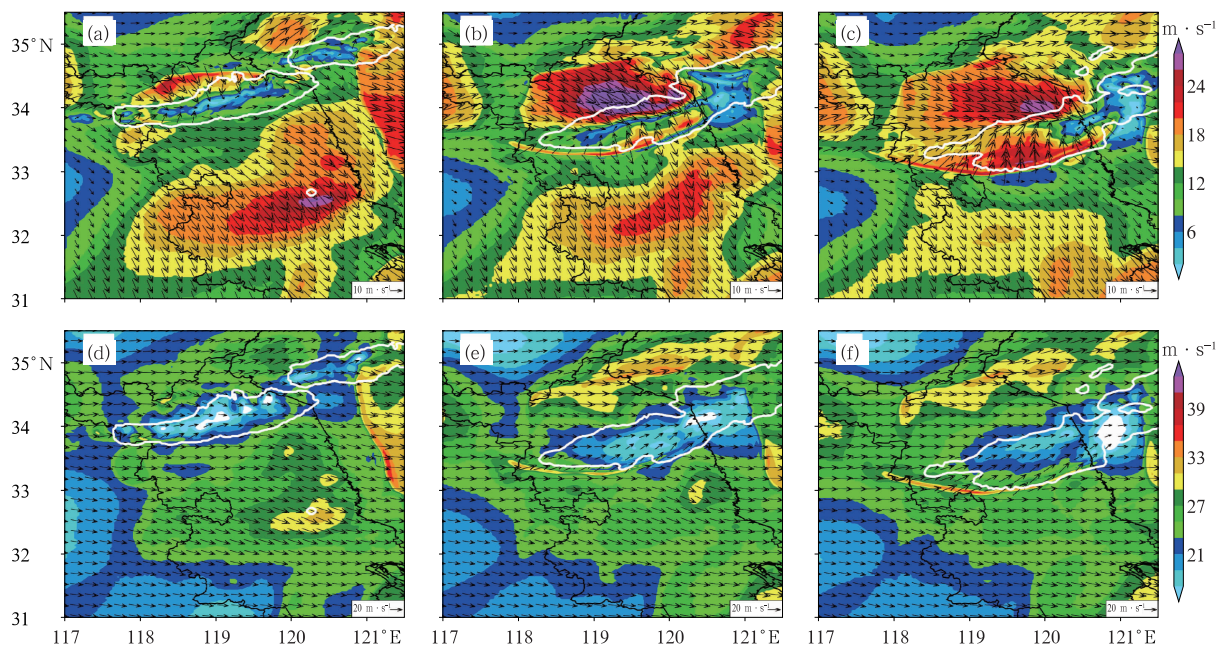


图8 2012年5月16日(a,d)16:42,(b,e)18:00,(c,f)18:36的0~3 km(a,b,c)和0~6 km(d,e,f)风切变矢量和风切变(填色)、3 km高度15 dBz雷达回波(白色实线)

Fig. 8 The 0-3 km (a,b,c) and 0-6 km (d,e,f) vertical wind shear vectors, vertical wind shear (color shading) and 15 dBz radar echo (white solid line) at 3 km altitude at 16:42 BT (a,d), 18:00 BT (b,e), 18:36 BT (c,f) 16 May 2012

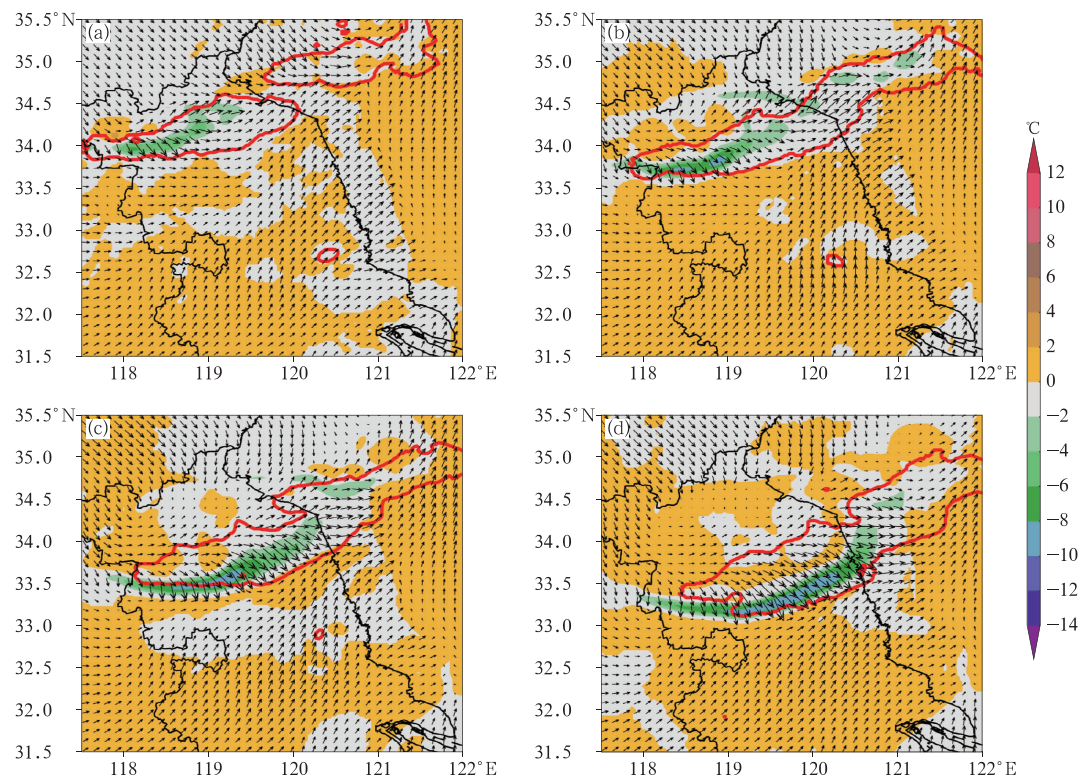


图9 2012年5月16日(a)16:30,(b)17:06,(c)17:42,(d)18:18的187.5 m扰动温度(填色)、风场和3 km高度15 dBz雷达回波(红线)

Fig. 9 Perturbation temperature (color shading) and wind at 187.5 m altitude, radar echo of 15 dBz (red line) at 3 km altitude at 16:30 BT (a), 17:06 BT (b), 17:42 BT (c), 18:18 BT (d) 16 May 2012

下,主要部分位于系统前部,西南侧的冷池甚至已经部分领先于系统,而冷池前沿的西南侧和南侧出流边界更是领先于系统前沿,此时出流边界与环境气流的低层辐合区也位于系统前沿(图略),17:42 风切变方向发生偏转,与系统接近于垂直(图 8b),0~6 km 垂直风切变(图 8e)方向与系统夹角略有增加,有利于冷池和风切变形成水平涡度的平衡,造成上升气流旺盛。强上升气流在系统前沿引发新的对流,逐渐形成一条新生带状对流,从而导致“双带状”结构形成。“双带状”结构在康红等(2016)的研究中也被关注到,是造成图 2 中反射率因子和系统面积增大的原因。冷池加强并前移虽然有利于新对流带生成,但同时也影响了“老”回波带的低层辐合来源,导致“老”回波带逐渐减弱。

18:18 开始风切变方向再次向原来的方向偏转(图 8c),且风切变减弱,造成冷池和风切变形成水平涡度不平衡加剧,系统再一次减弱,面积和反射率因子减小(图 2)。系统再次减弱之后,冷池不断加

强,并将冷池向前推进,出流边界与环境气流形成的辐合气流在系统主体之外,飚线内主要为下沉气流(图 10)。中层后方入流进入系统后,下沉气流更加旺盛,形成地面冷池达到 -8°C 以下(图 10d),在盐城多个站点观测到灾害性大风(康红等,2016)。风切变方向偏转后与飚线不再垂直,并且减弱到 $6\sim 10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 8c),形成的水平涡度不平衡,不利于风暴继续维持,造成飚线向后倾斜。随后冷池继续加强,并在系统前沿形成阵风锋,系统逐渐消亡。

3 结 论

利用 VDRAS 模拟 2012 年 5 月 16 日东北冷涡影响下的一次弱飚线过程,结合雷达资料,分析在较差的不稳定条件下该过程如何触发与维持。通过分析研究得出以下结论。

(1)与郑媛媛等(2014)和吴海英等(2013)的研究结果一致,地面辐合线是触发该次飚线过程的非

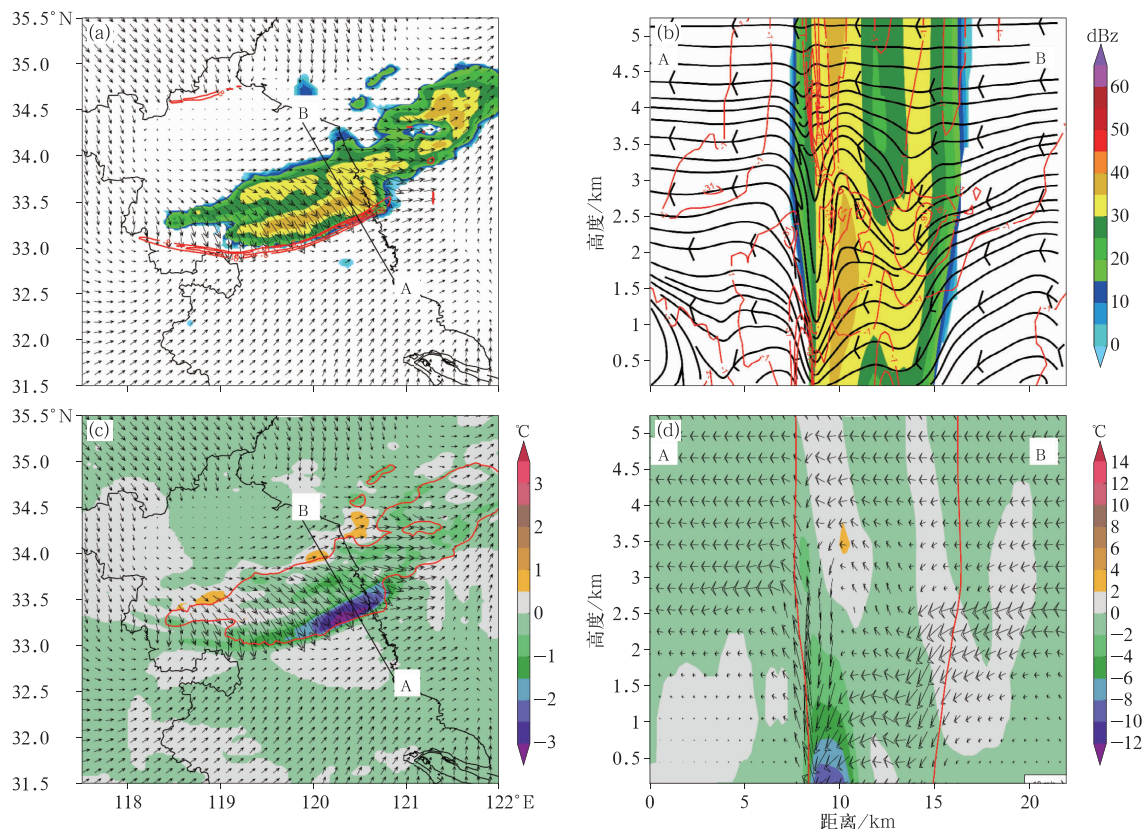


图 10 同图 7,但为 5 月 16 日 18:36

Fig. 10 Same as Fig. 7, but at 18:36 BT 16 May 2012

常重要的触发机制,而且该过程中地面辐合持久和强盛,上升气流达到4 km高度附近,是系统前期快速发展的重要因素。

(2)系统冷池增强之后,冷池前沿出流边界与环境气流的辐合是飢线维持的重要因素,但较弱的底层垂直风切变,且大部分时间段风切变方向不与系统垂直,影响了系统的发展。此外,较差的不稳定条件和水汽条件也是重要因素之一。

(3)在该次过程中,东北冷涡影响下中层不断输送干冷空气到江淮地区,降水拖曳导致的下沉气流遇到夹卷进入下沉气流内的环境干空气,使得其中雨滴蒸发,导致空气冷却,到达地面附近形成冷池,而夹卷的干空气动量和移动的飢线本身动量在下沉气流中部分传送到地面附近,导致辐散风在动量方向上大大加强并影响冷池的移动速度和方向。

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飢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,肖现,高峰,2017. 出流边界对京津冀地区强对流局地新生及快速增强的动力效应[J]. 大气科学,41(5):897-917. Chen M X, Xiao X, Gao F, 2017. Dynamical effect of outflow boundary on localized initiation and rapid enhancement of severe convection over Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Chin J Atmos Sci,41(5):897-917(in Chinese).
- 陈淑琴,章丽娜,俞小鼎,等,2017. 浙北沿海连续3次飢线演变过程的环境条件[J]. 应用气象学报,28(3):357-368. Chen S Q, Zhang L N, Yu X D, et al, 2017. Environmental conditions of three squall lines in the north part of Zhejiang Province[J]. J Appl Meteor Sci,28(3):357-368(in Chinese).
- 丁一汇,李鸿洲,章名立,等,1982. 我国飢线发生条件的研究[J]. 大气科学,6(1):18-27. Ding Y H, Li H Z, Zhang M L, et al, 1982. A study on the genesis conditions of squall-line in China[J]. Chin J Atmos Sci,6(1):18-27(in Chinese).
- 高梦竹,陈耀登,章丽娜,等,2017. 对流移入杭州湾后飢线发展机制分析[J]. 气象,43(1):56-66. Gao M Z, Chen Y D, Zhang L N, et al, 2017. Analysis on influence of convection after moving into Hangzhou Bay on the development of squall line[J]. Meteor Mon,43(1):56-66(in Chinese).
- 康红,费建芳,黄小刚,等,2016. 一次弱弓形飢线后方入流特征的观测分析[J]. 气象学报,74(2):176-188. Kang H, Fei J F, Huang X G, et al, 2016. The observational analysis of the characteristics of rear inflow in a weak-bow squall line[J]. Acta Meteor Sin,74(2):176-188(in Chinese).
- 刘黎平,吴林林,杨引明,2007. 基于模糊逻辑的分步式超折射地物回波识别方法的建立和效果分析[J]. 气象学报,65(2):252-260. Liu L P, Wu L L, Yang Y M, 2007. Development of fuzzy-logical two-step ground clutter detection algorithm[J]. Acta Meteor Sin,65(2):252-260(in Chinese).
- 刘莲,王迎春,陈明轩,2015. 京津冀一次飢线过程的精细时空演变特征分析[J]. 气象,41(12):1433-1446. Liu L, Wang Y C, Chen M X, 2015. Spatio-temporal evolution characteristics of a squall line in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Meteor Mon,41(12):1433-1446(in Chinese).
- 漆梁波,陈春红,刘强军,2006. 弱窄带回波在分析和预报强对流天气中的应用[J]. 气象学报,64(1):112-120. Qi L B, Chen C H, Liu Q J, 2006. Application of narrow-band echo in severe weather prediction and analysis[J]. Acta Meteor Sin,64(1):112-120(in Chinese).
- 唐明晖,姚秀萍,王强,等,2017. 不同强度台风相伴随的内陆台前飢线对比分析[J]. 气象,43(8):912-923. Tang M H, Yao X P, Wang Q, et al, 2017. Contrastive analysis of inland pre-TC squall line accompanied by typhoons with different intensities[J]. Meteor Mon,43(8):912-923(in Chinese).
- 陶岚,戴建华,陈雷,等,2009. 一次雷暴冷流出流中新生强脉冲风暴的分析[J]. 气象,35(3):29-35. Tao L, Dai J H, Chen L, et al, 2009. Case analysis of a severe pulse thunderstorm triggered in the outflow of the previous thunderstorms[J]. Meteor Mon,35(3):29-35(in Chinese).
- 王俊,姚展予,侯淑梅,等,2016. 一次飢线过程的雨滴谱特征研究[J]. 气象学报,74(3):450-464. Wang J, Yao Z Y, Hou S M, et al, 2016. Characteristics of the raindrop size distribution in a squall line measured by Thies optical disdrometers[J]. Acta Meteor Sin,74(3):450-464(in Chinese).
- 吴海英,陈海山,蒋义芳,等,2013. “090603”强飢线过程动力结构特征的观测与模拟分析[J]. 高原气象,32(4):1084-1094. Wu H Y, Chen H S, Jiang Y F, et al, 2013. Observation and simulation analyses on dynamical structure features in a severe squall line process on 3 June 2009[J]. Plateau Meteor,32(4):1084-1094(in Chinese).
- 徐燕,孙竹玲,周筠珺,等,2018. 一次具有对流合并现象的强飢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).
- 杨吉,刘黎平,李国平,等,2012. 基于雷达回波拼图资料的风暴单体和中尺度对流系统识别、跟踪及预报技术[J]. 气象学报,70(6):1347-1355. Yang J, Liu L P, Li G P, et al, 2012. A new techniques for storm cell and mesoscale convective systems identification, tracking and nowcasting based on the radar mosaic data[J]. Acta Meteor Sin,70(6):1347-1355(in Chinese).
- 杨吉,郑媛媛,夏文梅,等,2015. 雷达拼图资料上中尺度对流系统的跟踪与预报[J]. 气象,41(6):738-744. Yang J, Zheng Y Y, Xia W M, et al, 2015. Mesoscale convective systems (MCSs) trac-

- king and nowcasting based on radar mosaic data[J]. Meteor Mon, 41(6): 738-744. (in Chinese).
- 杨珊珊, 谌芸, 李晟祺, 等, 2016. 冷涡背景下飑线过程统计分析[J]. 气象, 42(9): 1079-1089. Yang S S, Chen Y, Li S Q, et al, 2016. Analysis of squall lines under the background of cold vortex[J]. Meteor Mon, 42(9): 1079-1089 (in Chinese).
- 俞小鼎, 2012. 2012年7月21日北京特大暴雨成因分析[J]. 气象, 38(11): 1313-1329. Yu X D, 2012. Investigation of Beijing extreme flooding event on 21 July 2012[J]. Meteor Mon, 38(11): 1313-1329 (in Chinese).
- 张宁, 苏爱芳, 史一丛, 2017. 2014年一次飑线的发展维持原因分析[J]. 气象, 43(11): 1383-1392. Zhang N, Su A F, Shi Y C, 2017. Causation analysis of evolution of a squall line in 2014[J]. Meteor Mon, 43(11): 1383-1392 (in Chinese).
- 张哲, 周玉淑, 高守亭, 2018. 一次辽东湾飑线过程的观测与数值模拟分析[J]. 大气科学, 42(5): 1157-1174. Zhang Z, Zhou Y S, Gao S T, 2018. Observational and numerical analyses of a squall line occurring over Liaodong Gulf of China[J]. Chin J Atmos Sci, 42(5): 1157-1174 (in Chinese).
- 郑丽娜, 刁秀广, 2016. 一次华北飑线的阵风锋天气过程分析[J]. 气象, 42(2): 174-182. Zheng L N, Diao X G, 2016. Analysis on a gust front of squall line event in North China[J]. Meteor Mon, 42(2): 174-182 (in Chinese).
- 郑媛媛, 张雪晨, 朱红芳, 等, 2014. 东北冷涡对江淮飑线生成的影响研究[J]. 高原气象, 33(1): 261-269. Zheng Y Y, Zhang X C, Zhu H F, et al, 2014. Study of squall line genesis with northeast cold vortex[J]. Plateau Meteor, 33(1): 261-269 (in Chinese).
- 周围, 包云轩, 冉令坤, 等, 2018. 一次飑线过程对流稳定度演变的诊断分析[J]. 大气科学, 42(2): 339-356. Zhou W, Bao Y X, Ran L K, et al, 2018. Diagnostic analysis of convective stability evolution during a squall line process[J]. Chin J Atmos Sci, 42(2): 339-356 (in Chinese).
- Chen M X, Sun J, Wang Y C, 2007. A frequent-updating high-resolution analysis system based on radar data for the 2008 summer Olympics//Preprint. The 33rd International Conference on Radar Meteorology. Cairns, Australia.
- de Szoeke S P, Skillingstad E D, Zuidema P, et al, 2017. Cold pools and their influence on the tropical marine boundary layer[J]. J Atmos Sci, 74(4): 1149-1168.
- Luo Y L, Gong Y, Zhang D L, 2014. Initiation and organizational modes of an extreme-rain-producing mesoscale convective system along a Mei-Yu front in East China[J]. Mon Wea Rev, 142(1): 203-221.
- Meng Z Y, Yan D C, Zhang Y J, 2013. General features of squall lines in East China[J]. Mon Wea Rev, 141(5): 1629-1647.
- 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, Chen M, Wang Y, 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, Crook N A, 1996. Comparison of thermodynamic retrieval by the adjoint method with the traditional retrieval method. Mon Wea Rev, 124(2): 308-324.
- Sun J, 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, Crook N A, 2001. Real-time low-level wind and temperature analysis using single WSR-88D data[J]. Wea Forecasting, 16(1): 117-132.
- Sun J, Zhang Y, 2008. Analysis and prediction of a squall line observed during IHOP using multiple WSR-88D observations[J]. Mon Wea Rev, 136(6): 2364-2388.
- Weisman M L, Klemp J B, Rotunno R, 1988. Structure and evolution of numerically simulated squall lines[J]. J Atmos Sci, 45(14): 1990-2013.
- Weisman M L, Rotunno R, 2004. "A theory for strong long-lived squall lines" revisited[J]. J Atmos Sci, 61(4): 361-382.
- Zipser E J, 1977. Mesoscale and convective-scale downdrafts as distinct components of squall-line structure[J]. Mon Wea Rev, 105(12): 1568-1589.