

曲晓波, 王建捷, 杨晓霞, 等. 2009 年 6 月淮河中下游三次飚线过程的对比分析[J]. 气象, 2010, 36(7): 151-159.

2009 年 6 月淮河中下游三次飚线过程的对比分析^{* 1}

曲晓波¹ 王建捷² 杨晓霞³ 刘鑫华¹

1 国家气象中心, 北京 100081

2 北京市气象局, 北京 100089

3 山东省气象台, 济南 250031

提 要: 2009 年 6 月我国淮河中下游地区连续出现三次飚线天气过程, 作者应用常规和非常规气象观测资料、雷达和卫星监测、NCEP/NCAR $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 再分析资料和 NCEP/GFS 分析资料, 采用天气学方法和诊断分析方法, 对三次飚线的生成环境和形成机制进行对比分析。结果表明: 三次飚线具有类似的 500 hPa 环流形势、较强的不稳定能量积累、低层适量的水汽输送、相似的不稳定层结。在低层辐合抬升、高层干冷空气侵入和较强的风垂直切变产生次级环流动力作用下, 不稳定能量释放, 发展成有组织的飚线系统。通过卫星雷达的监视, 可以较好地预报飚线的影响。

关键词: 飚线, 东北低涡, 不稳定能量, 低层辐合, 中层干冷, 风垂直切变

Contrast Analysis of Three Squall Lines in Middle and Lower Reaches of the Huaihe River in June 2009

QU Xiaobo¹ WANG Jianjie² YANG Xiaoxia³ LIU Xinhua¹

1 National Meteorological Center, Beijing 100081

2 Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089

3 Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031

Abstract: The three squall lines happened in the middle and lower reaches of the Huaihe River in June 2009. The conventional and non-conventional data, radar and satellite observations, NCEP/NCAR $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ reanalysis and NCEP/GFS analysis data are used in the paper, to contrast and explore the genesis conditions and mechanisms for these squall lines. The results show that the three squall lines have similar circulation pattern at 500 hPa, the stronger accumulating unstable energy, the suitable transfer of water vapor in the low level, and thus forming the similar unstable atmospheric stratification. In the above situations the convergence rising occurred in low levels, the dry and cold air intruding in high levels and the stronger wind vertical shear made the cold and warm air writhing upper and down, the unstable energy was released, thus organized squall line systems were formed. The influence of the squall lines can be monitored and forecasted by the satellites and radars.

Key words: squall line, northeast low vortex, unstable energy, convergence at low levels, cold and dry air at middle-levels, wind vertical shear

引 言

飚线通常是由若干雷暴单体排列成的、狭窄的

对流云带组成, 具有突发性强, 移动速度快和演化迅速的特点, 常伴有雷暴、短时强降水、大风、冰雹和龙卷等严重的灾害性天气, 给国民经济和人民生命财产带来严重威胁。随着气象现代化监测技术的发

* 国家科技支撑计划“亚洲巨灾综合风险评估技术及其应用研究”(2008BAC44B03)的“亚洲台风-暴雨巨灾风险评估技术及其应用研究”项目资助

2009 年 7 月 13 日收稿; 2010 年 1 月 7 日收修定稿

第一作者: 曲晓波, 主要从事天气预报与服务研究. Email: quxb@cma.gov.cn

展,许多人对飏线系统进行了大量的分析和研究^[1-13]。陶祖钰等^[1]研究表明,2004年7月北京两次过程都发生在季风极度北涌,同时冷空气又强烈南下的经向环流背景下,前者发生在暖湿舌的北端,后者发生在大尺度云带的前沿。王东法等^[2]对飏线个例研究表明,在飏线系统附近辐合主要发生在850 hPa以下,由于高空槽线的前倾,位于飏线上空的对流层中低层是一辐散区。杨晓霞等^[3]对一次飏线的形成机制研究表明,在对流性不稳定大气中,高空高位势涡度下传使得中低层位势涡度增大,导致其垂直涡度增大,使得对流层低层中尺度涡旋发展,对流增强;较强的上升运动与风垂直切变相互作用,促使对流系统发展形成飏线。近年来随着多普勒雷达在天气分析和预报中的应用,对飏线系统的结构特征也有大量的研究^[4-10,13]。

但由于飏线等强风暴系统的时、空尺度相对较小,演变迅速和复杂,致使人们对这种中尺度系统的发生发展与演变机理还缺乏深入的了解,飏线和其带来的强对流天气的预报一直是天气预报中的难点之一,也是气象学者研究和关注的重点之一。飏线的形成机理和监测预报仍是目前气象学中亟待深入研究的重大课题。2009年6月3日、5日和14日接连在淮河中下游产生了三次飏线系统,都伴有雷雨、大风、冰雹等强对流天气,仅3日、5日,强对流天气造成河南、安徽、江苏等省59人死亡,受灾总人口达942万人,直接经济损失达36.8亿元。本文应用常规和非常规气象观测资料、雷达和卫星监测资料、NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料和NCEP/GFS分析资料,对这三次飏线过程的生成环境和形成机理进行对比分析,以期对飏线天气的预报提供客观依据。

1 三次飏线天气实况分析

2009年6月3日中午开始在山西南部、陕西中部和甘肃南部出现三片雷暴区,呈东北—西南向排列,之后加强向东南方向移动,到达河南北部时形成飏线。3日20—23时飏线在河南北部时发展最强,出现弓状雷达回波,向东偏南方向移动,影响安徽北部和江苏中北部。飏线所经之处造成 $17 \sim 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的雷雨大风、强降水($\geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)和局部冰雹等强对流天气,飏线4日05时在江苏中东部入海。这次飏线以雷暴大风为主,强降水较少,最大1

小时降水量在 $20 \sim 36 \text{ mm}$,2站出现冰雹,飏线在内陆历经12小时。时隔1天,5日14时开始,在山东东南沿海和江苏东北部沿海生成飏线,向南偏西方向移动,在山东东南部、江苏、安徽、上海、浙江等地造成雷雨大风、强降水和冰雹等强对流天气,雷暴大风的极大风速在 $17 \sim 31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大1小时强降水在 $20 \sim 51 \text{ mm}$,21站出现冰雹,历时12个小时,6日02时在安徽南部和浙江中部减弱消失。6月14日14时开始,在安徽北部又生成飏线,向南移动,影响河南东部、安徽中东部和江苏西部。飏线带来雷雨、大风和冰雹等强对流天气,极大风速在 $17 \sim 29 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,1小时最大降水量 $20 \sim 65 \text{ mm}$,18站出现冰雹,冰雹最大直径30 mm。飏线在14日23时在江苏南部减弱消失。这次过程的极大风速稍偏小,强降水偏强,冰雹直径较大,历经仅7个小时。在这三次过程中,5日下午到夜间的雷暴大风的范围最大,强降水和冰雹也比6月3日的范围大、强度强,14日的强降水和冰雹范围较大。三次飏线都是在 $35^\circ \sim 36^\circ \text{N}$ 、 $115^\circ \sim 120^\circ \text{E}$ 区域内生成,向南移动,在 $29^\circ \sim 35^\circ \text{N}$ 、 $115^\circ \sim 122^\circ \text{E}$ 的范围内活动,在 $29^\circ \sim 31^\circ \text{N}$ 、 $115^\circ \sim 122^\circ \text{E}$ 区域内消失,主要影响河南北部和东部、安徽和江苏等省。

2 环流特征和影响系统分析

分析500 hPa高空环流形势可见,这三次飏线过程都是产生在当天08时东北低涡的西南部较强的西北气流控制下,西北风风速在 $12 \sim 18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,不同的是6月3日08时、14日08时在 $41^\circ \sim 42^\circ \text{N}$ 、 $110^\circ \sim 120^\circ \text{E}$ 附近范围内均有一横槽随西北气流南移下滑,而在5日的过程中则有持续的 $16 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 槽后西北气流。补充冷空气南下,分别在当日20时影响河南北部、安徽北部和江苏北部等地,在上述500 hPa温度场上均为冷槽区,温度在 $-12 \sim -14^\circ \text{C}$ 之间。低层850 hPa上,3日08时和14日08时在将来飏线活动区有明显的风切变,而5日08时850 hPa在将来强对流活动区为一致的西北气流(图略),三次过程在850 hPa温度场上都为暖脊控制,温度在 $16 \sim 20^\circ \text{C}$ 之间,风向都与等温线有一定的交角,从暖区吹向冷区,有暖平流,有利于大气向不稳定层结发展。850 hPa与500 hPa之间的温度差在 $31 \sim 35^\circ \text{C}$ 。大气上冷下暖,形成不稳定层结。高层为较强的西北风,低层风较弱,850~500 hPa

有较强的风向/风速垂直切变(图 1a、b)。不稳定层结和较强的风垂直切变都有利于对流产生。

在地面气压场和风场上,当天 08 时,三次过程的地面气压场非常相似,强对流都是产生在从西向东伸展的低压槽中,风场上有弱的气旋性环流和风向辐合,都为暖湿切变线(图 1c)。3 日 08 时在河套地区有一低压中心,低压槽向东南方向伸展到河南

北部,在淮河下游,也就是未来飊线经过的区域为鞍型场的中心;5 日 08 时华东北部为较深的低压槽区,14 时在低压槽和风的辐合线附近生成对流云团,发展南移形成飊线;14 日 08 时在飊线生成的黄淮地区也为低压槽区,在低压槽中心和风的辐合中心生成对流云团,向东南移动发展成飊线。

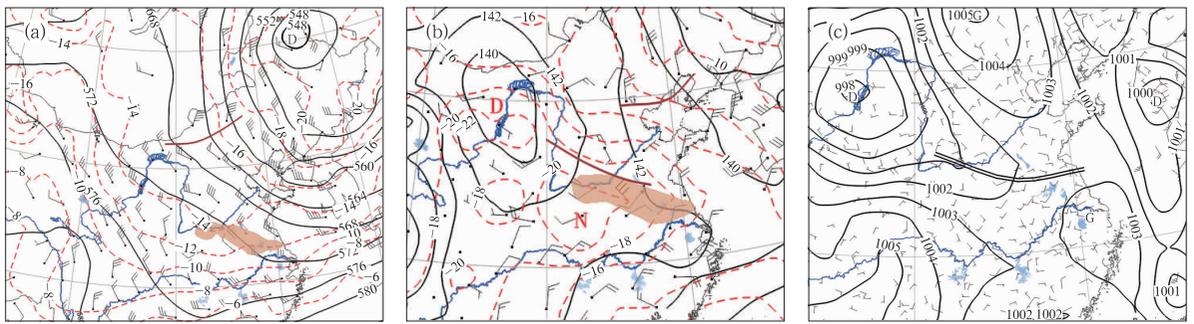


图 1 2009 年 6 月 3 日 08 时高空和地面图

(a) 500 hPa, (b) 850 hPa(实线:等高线,间隔 20 dagpm;虚线:等温线,间隔 2 °C;粗实线:槽线;阴影区:飊线影响区);(c) 地面(实线:等压线,间隔 1 hPa;双实线:风辐合线)

Fig. 1 The upper-air and surface charts at 0800 BT 3 June 2009

(a) 500 hPa, (b) 850 hPa(solid lines: isohypse, interval 20 dagpm; dotted lines: isotherm, interval 2 °C; thick solid lines: trough line; shaded: squall line area);(c) surface (solid lines: isobar, interval: 1 hPa; double solid line: wind convergence line)

3 卫星云图和雷达回波特征

在三次飊线的 FY2D-IR1 卫星云图上都是由近于圆形的对流云团产生,边缘整齐。2009 年 6 月 3 日 12:00 时在山西中部生成对流云团,发展并向东南方向移动,16:00 时移到河北南部和河南北部,19:00 时演变成由多个小对流云团组成的东北—西南向的云带,一椭圆形的小尺度的对流云团位于商丘上空,快速发展,21:00 时在河南北部和山东西南部发展成边缘整齐的椭圆形的中尺度对流云团,向东偏南方向移动,4 日 03:00 时在连云港附近进入黄海,之后减弱消失。在对流云团的东南部产生雷雨、大风、局部地区冰雹。从雷达组合反射率拼图图中可以看到,3 日 19:00 时在郑州的东北方向生成块状回波,最强回波强度达到 60 dBz,快速发展并向东偏南方向移动,19:50 时在河南与山东交界处发展成带状回波(图 2a、b、c),21:50 时移到商丘附近时发展成弓状回波,产生雷雨大风。22:30 时开始,在江苏北部生成由多个小对流单体组成的东南—西北向的对流回波带,与弓状回波的北端相衔接,23:00 时在安徽和江苏境内形成人字型回波。4 日 00:

00 时发展到最强,4 日 00:40 时开始减弱。回波在江苏境内向东南方向移动,05:50 时移出江苏到达东海。受弓状回波和人字形回波的影响,河南北部、安徽北部和江苏中北部产生雷雨大风。

6 月 5 日产生强对流天气的对流云团是在自西向东移动的东北—西南向的对流云带的南端发展起来的。5 日 11:00 时,对流云团移到山东半岛的南部时重新发展,并且沿着山东半岛南部的海岸线向西移动发展。与此同时,在江苏中部新生对流云团,快速发展。13:00 时分别在鲁东南和江苏中部发展成两个近于圆形的对流云团,分别向西南和东南方向移动,15:00 时两个云团在江苏中部沿海相衔接,北部的云团向西南方向移动,南部的云团向东南方向移动。南部的云团 18:00 时在长江入海口进入东海,减弱消失。北部的云团在向西移的过程中加强,19:00 时在安徽和江苏交界处发展成近于圆形的对流云团,向南偏西方向移动,22:00 时在安徽南部和江苏南部明显减弱,23:00 时以后减弱消失。对流发展期间有三个圆形的对流云团生成,经历了合并、分离、再生的过程。在雷达回波上,5 日 14:30 时在山东东南沿海和江苏沿海及中部发展成条状和带状回波,向偏南方向移动,14:50 时,江苏南部的回波

发展成弓状(图 2d,e,f),向东南方向移动,17:00 时弓状回波到达长江口时,在其回波的西部太湖附近生成新的回波单体,迅速发展。与此同时,16:40 时在江苏和安徽中部新生大片的回波单体,向偏南方向移动发展。17:20 时,在上海与杭州之间新的弓状回波发展,其东段回波移到东海减弱。18:00 时弓状回波移到杭州湾上空,在江苏西部的北段回波已进入安徽境内。18:20 时在安徽东北部的回波发展成弓状,19:30 时弓状回波消失,发展成由多个对

流单体组成的片状回波。20:10 时,在南京至马鞍山一线又有弓状回波发展,向南移动,在 21:00 时达到最强,在弓形回波的西北部有多个新生的回波单体发展,21:40 时,在弓形回波的西北部形成强的带状回波,同时在合肥附近又有弓状回波发展,两个回波同时向南移动,在 22:30 时开始减弱。23:00 时以后在浙江北部和安徽南部消失。对流期间有三个弓状回波发展。

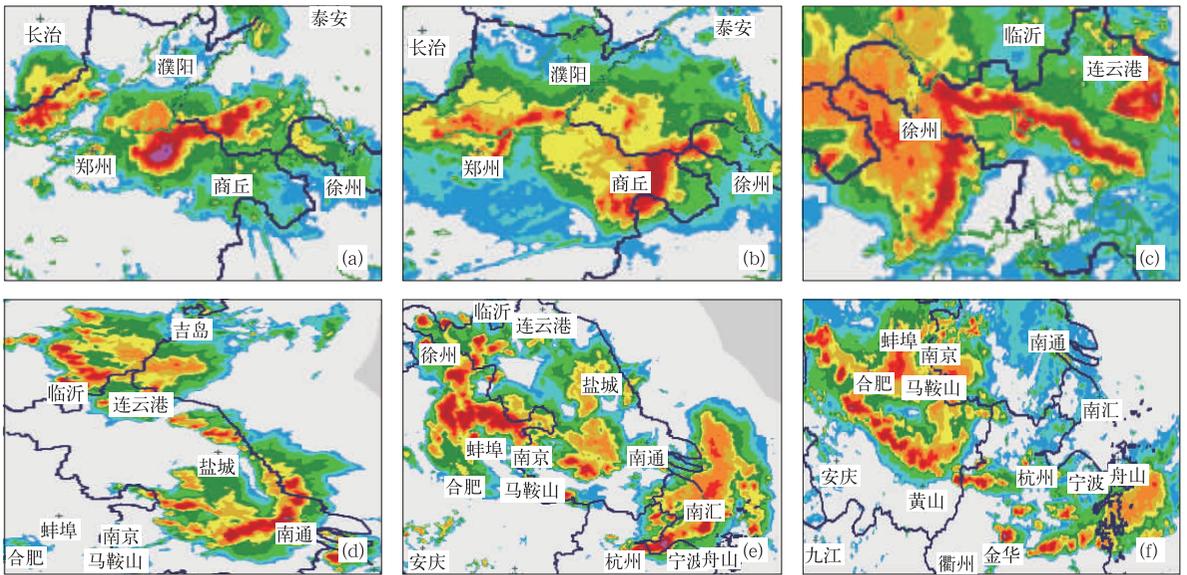


图 2 2009 年 6 月飚线天气过程雷达组合反射率拼图

(a) 3 日 19:50;(b) 3 日 21:50;(c) 4 日 00:00;(d) 5 日 14:50;(e) 5 日 18:20;(f) 5 日 21:40 时

Fig. 2 The radar composite reflectivity images during the squall synoptic process in June 2009

(a) at 19:50 BT June 3, (b) at 21:50 BT June 3, (c) at 00:00 BT June 4,

(d) at 14:50 BT, June 5, (e) at 18:20 BT, June 5, (f) at 21:40 BT, June 5

6 月 14 日的对流云团,12:00 时在山东南部发展,向东南方向移动,13:00 时进入江苏境内,14:00 时开始在江苏北部和安徽北部迅速发展,15:00 时开始形成椭圆形的边缘整齐的对流云团,18:00 时移到江苏中部时发展成近圆形的对流云团,强度达到最强,19:00 时开始减弱,20:00 时以后在江苏南部减弱消失。18:00 时开始在河南东部又有对流云团发展,19:00 时发展成近圆形,向东南方向移动,影响安徽北部,23:00 时开始减弱,15 日 02:00 时以后在安徽和江苏中部减弱消失。由 6 月 14 日的雷达组合反射率拼图可见,12:20 时在鲁南和鲁中有多个小对流单体发展,形成东北—西南向的对流回波带,向东南方向移动。13:00 时其西南端进入江苏北部,13:30 时在回波带的西部即安徽北部有回

波发展。16:30 时,在江苏和安徽的北部发展成由多个回波单体排列成的弓形回波(图略),在安徽和江苏的交界处发展向南偏东方向移动,17:50 时到达蚌埠附近,继续南移,18:50 时弓状回波到达南京附近时有所减弱,之后在向东南移动的过程中弓形回波变得越来越不明显,回波强度逐渐减弱,回波范围逐渐减小。23:40 时回波在浙江北部减弱消失。历时约 10 个小时。

从三次强对流期间的云图演变可见(图略),这些对流云团的生命史在 2~6 个小时,在其移动方向的前部产生雷雨大风、短时强降水和冰雹。成熟期的对流云团边界的云顶亮温梯度较大。在对流云团成熟期,3 日 23:15 时近于圆形的冷云盖为 TBB 小于 -42°C 的等值线所包围,云顶最低亮温为

-52℃,5日20:15时和14日18:15时近于圆形的冷云盖为TBB小于-52℃的等值线所包围,云顶最低亮温为-62℃。可见3日的对流云团云顶高度低于后两次云顶高度。在雷达回波上都有弓状回波发展,3日和14日的强对流天气只有1个弓状回波系统,而5日强对流期间则有3个弓状回波系统发展。

4 水汽和不稳定条件分析

4.1 水汽条件分析

形成强对流的三个重要条件为:水汽、不稳定和抬升。分析反映大气中水汽条件的物理量参数水汽

通量、比湿和相对湿度可见,在三次飊线过程中,水汽主要集中在850 hPa以下,在飊线产生前12小时内,向飊线活动区输送的水汽较少,水汽通量基本上都小于 $5 \text{ g} \cdot (\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})^{-1}$ 。6月3日飊线活动区的水汽来源于低层江苏东部沿海的偏东气流的输送,水汽通量的高值舌从江苏东部沿海伸向飊线活动区;5日飊线活动区的水汽来源于渤海,由偏北气流输送,水汽通量的高值舌从山东北部伸向江苏和安徽;14日的水汽来源于东部沿海,由东南气流输送,江苏南部为水汽通量的高值中心(图3)。大气湿度较低,在飊线活动区低层850 hPa以下为弱湿舌区或等湿线梯度密集区,比湿在 $6 \sim 12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,相对湿度在40%~70%的区域(图略)。

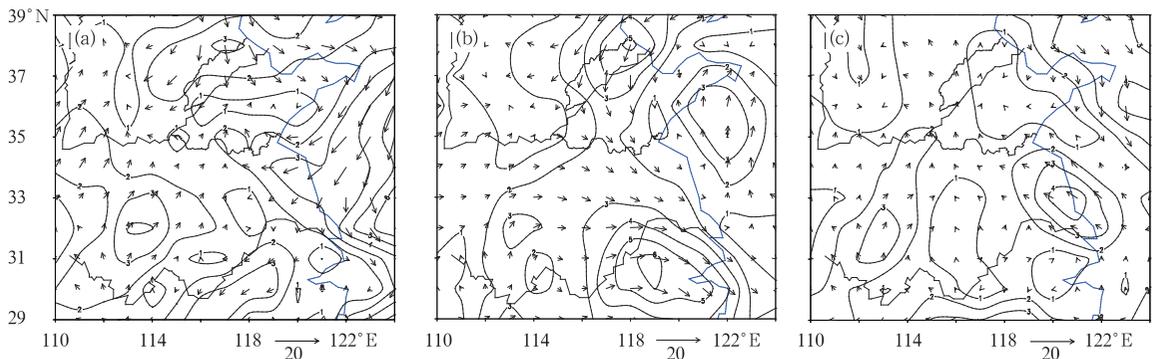


图3 2009年6月925 hPa风场(u, v)和水汽通量(单位: $\text{g} \cdot (\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})^{-1}$)

(a) 3日14时; (b) 5日14时; (c) 14日14时

Fig. 3 The 925 hPa wind field (u, v) and vapor flux (u_{int} ; $\text{g} \cdot (\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})^{-1}$)

(a) at 14:00 BT, June 3, (b) at 14:00 BT, June 14, and (c) at 14:00 BT, June 14

4.2 不稳定条件分析

分析三次飊线活动区对流不稳定能量(CAPE)和抬升指数(LI)的分布和变化可见,2009年6月3日08时在河南东部和安徽为高能区和对流不稳定区,河南东北部的商丘附近为高能中心,CAPE的中心值达到 $1300 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图4a),LI达到 $-6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (图略)。3日下午到夜间的飊线产生在中心和高能舌区及层结不稳定区。5日08时(图4b)在山东东南部、江苏、浙江北部为高能区,两个高能中心分别位于江苏北部和南部,CAPE的高值中心的中心值分别为 $1100 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1600 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,在安徽北部为低值区,低值中心为 $100 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,14时,山东东南部、安徽北部和江苏的能量升高,江苏北部的CAPE中心值达到 $1300 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,安徽北部变成了CAPE在 $500 \sim 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的高能舌区,说明有能量积累;5日08时,在山东、江苏、

安徽、浙江北部和河南上空LI为负值区,负值中心位于浙江北部和河南上空,中心值达到 $-5 \sim -6 \text{ }^{\circ}\text{C}$,大气强烈的不稳定,非常有利于强对流发展。5日下午到夜间,在中心和高能舌区及层结不稳定中心产生强对流,6日08时,江苏和安徽北部的对流不稳定能量明显减弱,高能中心移到安徽南部,在江苏和安徽境内LI变成了正值。说明有能量释放,大气由不稳定层结变成了稳定层结;14日08时(图4c),在江苏和安徽也为高能中心和不稳定中心,但对流不稳定能量比前两次小,高能中心位于安徽和江苏两省交界处,中心值为 $900 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在江淮流域抬升指数为负值(图略),中心位于长江下游,中心值达到 $-5 \text{ }^{\circ}\text{C}$,大气层结不稳定。14日下午到夜间,在中心和高能舌区及层结不稳定中心产生强对流天气。由此可见,三次强对流天气都是产生在对流有效位能的高值区和抬升指数的负值区。CAPE的中心值在 $900 \sim 1600 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,LI的中心值在 $-5 \sim -6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

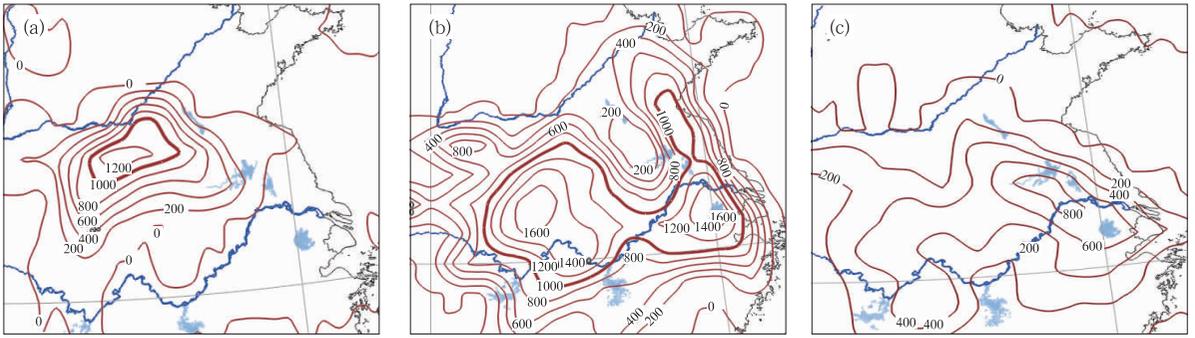


图 4 2009 年 6 月飊线天气产生前对流有效位能分布图
 (a) 3 日 08 时; (b) 5 日 08 时; (c) 14 日 08 时(单位: $J \cdot kg^{-1}$, 等值线间隔: 200)

Fig. 4 The CAPE ($J \cdot kg^{-1}$, interval: 200) before the formation of these severe convective weather processes in June 2009 (NCEP/GFS)

(a) 08:00 BT, June 3, (b) 08:00 BT, June 5, and (c) 08:00 BT, June 14

5 动力条件分析

5.1 低层辐合触发条件

从以上分析可见,在强对流发生的区域,大气中储备了较高的对流有效位能,大气层结不稳定度也较高,这是产生强对流天气的内因,动力触发作用是产生强对流天气的外因。分析散度场的分布可见,三次强对流过程,低层 850 hPa 以下都有明显的辐合,在 700 hPa 附近有明显的辐散,高层又有辐合和辐散相间出现。6 月 3 日 20 时 925 hPa 辐合中心在河南北部(图 5a),正位于对流有效位能的高值中心和抬升指数的负值中心附近。辐合产生的上升运动

触发对流不稳定能量释放,产生强对流。5 日 08 时 925 hPa 在山东中部和长江口附近生成中尺度辐合中心,14 时(图 5b)辐合区扩大,覆盖山东、江苏和安徽。辐合区也与对流有效位能高值区和抬升指数的负值中心相叠。5 日下午到夜间的强对流也在辐合区和对流有效位能高值区及抬升指数负值区发展。14 日 14 时华东沿海的东南风增大,在山东、江苏、安徽和河南境内产生风速辐合(图略),辐合区也与对流有效位能的高值区和抬升指数的负值中心相对应,14 日下午到夜间也在三者相重合的区域产生强对流天气。三次强对流都是产生在辐合区与高能区及层结不稳定相重合的区域,说明低层辐合产生的上升运动触发对流不稳定能量释放,产生强对流。

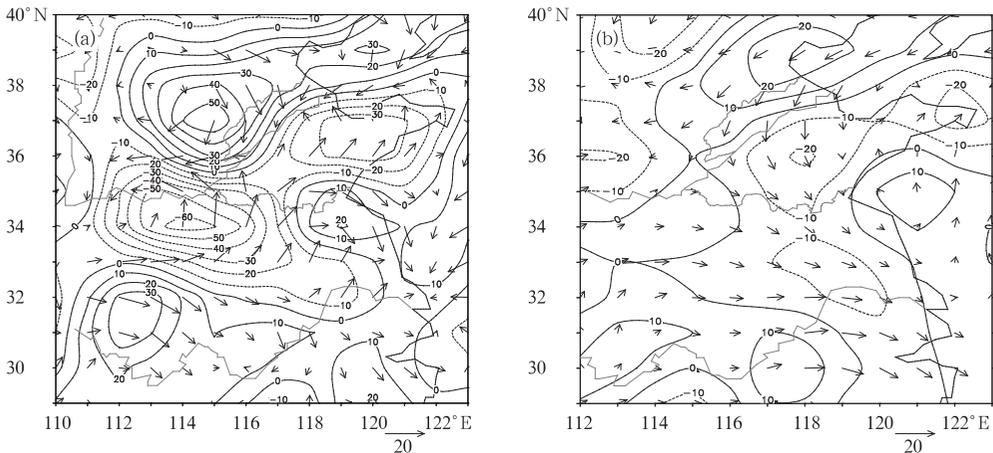


图 5 2009 年 6 月飊线天气过程 925 hPa 散度(等值线)和风场(u, v)分布

(a) 3 日 20 时; (b) 5 日 14 时

Fig. 5 Divergence (contour) and wind field (u, v) at 925 hPa in 2009 (NCEP/NCAR)

(a) 20:00 BT, June 3, (b) 14:00 BT, June 5

分析垂直速度分布可见,在强对流期间,低层有明显的上升运动发展。3日20时沿 116°E 垂直剖面中,在强对流发展区 34°N 附近,850 hPa附近为上升运动中心,中心值达到 $-9 \times 10^{-4} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$,上升运动持续到600 hPa,两侧为下沉气流,形成经向垂直环流圈,强对流产生在两个中尺度垂直环流圈的上升支气流中,低层900 hPa以下为辐合,高层600 hPa附近为辐散中心(图6a)。5日20时沿 117°E 的垂直剖面中,在强对流区的 34°N 附近,强对流区为较强的向南和向东的斜升运动,上升运动从低层一直伸展到200 hPa,中心在750 hPa附近,中心值 $-7 \times 10^{-4} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$,上升运动的两侧为下沉运动,高层为较强的西北气流,在强对流区的南部和东部形成垂直环流,中心在850 hPa附近

(图6b),在低层900 hPa以下有东南气流汇入到强对流区的上升运动中。在14日20时沿 117°E 的垂直剖面中, 33°N 附近强对流区上空上升运动中心在850 hPa附近(图略),在 33°N 的中心值为 $-5 \times 10^{-4} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$,上升运动同样一直到达200 hPa。强对流发展区的周围为下沉运动,在其南部和东部形成垂直环流圈,中心在850 hPa附近,900 hPa以下的偏东和偏南气流汇入到上升气流中。三次过程对比来看,都有中尺度垂直环流圈,强对流的上升运动区范围在2~4个纬度,即200~500 km。辐合都在850 hPa以下的低层,高层有辐散相对应。3日的上升运动中心高度较低,但上升运动强,5日和14日的上升运动虽然强度略小,但向上的伸展高度都达到大气顶层。

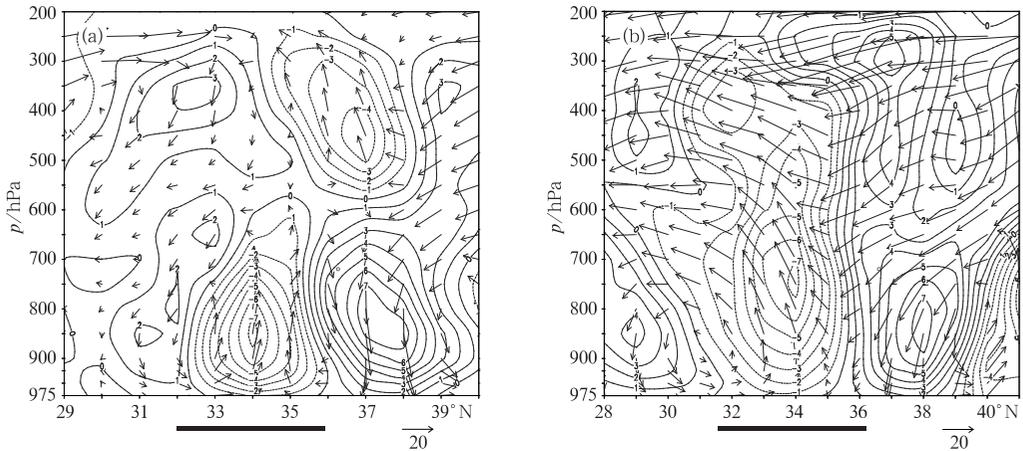


图6 2009年6月飊线天气过程(v, ω)垂直剖面图垂直速度 ω
(单位: $10^{-4} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$,等直线间隔1;图下实线为强对流横跨的区域)

(a) 3日20时沿 116°E ; (b) 5日20时沿 117°E

Fig. 6 Vertical cross section of vertical velocity ($\omega, 10^{-4} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$) and (v, ω) during the squall synoptic process

the dark lines under the figures are the area that the severe convective weather crosses (NCEP/NCAR)

(a) along 116°E at 20:00 BT, June 3, (b) along 117°E at 20:00 BT, June 5

5.2 中高层干冷空气侵入

分析 θ_{sc} 的垂直分布可见,在对流产生的当日08—14时,中高层700~500 hPa都有一股干冷的偏北下沉气流叠置在低层的暖湿空气之上,干冷空气对应着 θ_{sc} 的低值区,低值中心在600~550 hPa,中心值在 $-44 \sim -48^{\circ}\text{C}$ (图7)。上午随着地面的辐射加热,低层空气迅速增暖,850 hPa以下的 θ_{sc} 迅速增大,14时在低层形成高值中心,高值舌向北向上伸展,到达700 hPa附近。低层与中高层之间的 θ_{sc} 之差也迅速增大,14时低层近地面附近975 hPa与

中层550 hPa附近的 θ_{sc} 之差达到 12°C 以上。高层干冷的偏北下沉气流叠置在低层较暖的弱上升空气之上,使得上冷下暖的空气产生不稳定层结。

5.3 较强的风垂直切变

以往的研究表明^[10],强的风垂直切变对一般雷暴不利,而对有组织的雷暴系统发展有利。选取对流发生区域的郑州和南京两探空站,分析对流产生前当日08时风的垂直分布(图8)可见,500 hPa以下的风速都较小,在 $4 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,500 hPa以上风速随高度迅速增大,在250~200 hPa风速达到最大,

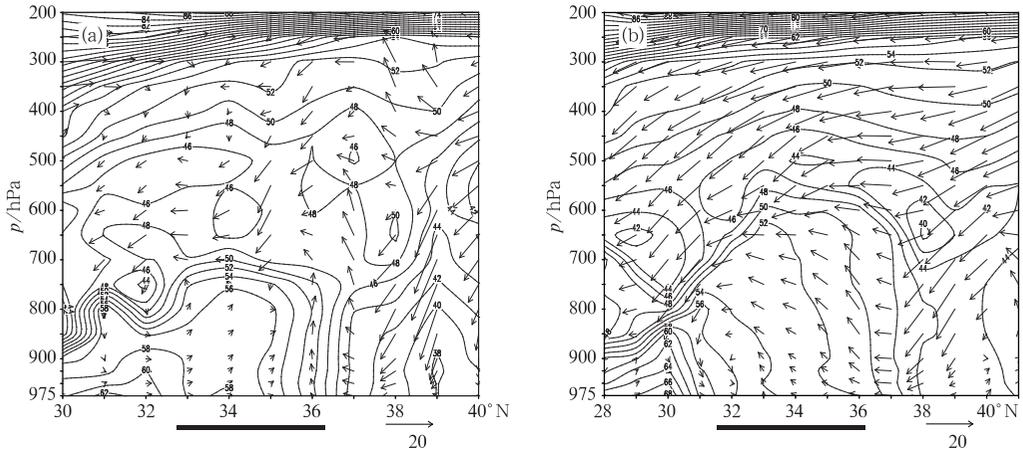


图 7 2009 年 6 月飊线天气过程的 θ_{se} (单位: $^{\circ}\text{C}$, 等直线间隔 2) 和 (v, ω) 垂直剖面图

(图下实线为强对流横跨的区域)

(a) 3 日 14 时沿 116°E ; (b) 5 日 14 时沿 117°E

Fig. 7 Vertical cross section of θ_{se} (unit: $^{\circ}\text{C}$, interval 2) and (v, ω) during the squall synoptic process

(the dark lines under the figures are the area that the severe convective weather crosses)

(a) along 116°E at 14:00 BT, June 3, (b) along 117°E at 14:00 BT, June 5

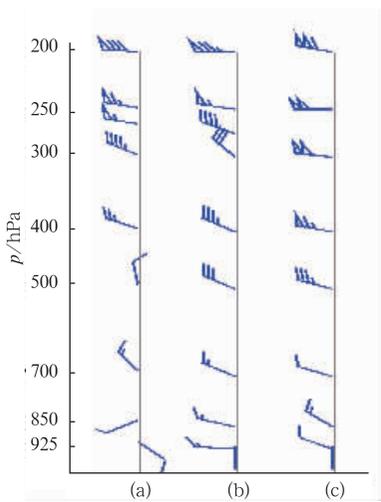


图 8 2009 年 6 月飊线天气过程

探空站的风垂直分布

(a) 3 日 08 时郑州; (b) 5 日 08 时南京;

(c) 14 日 08 时南京

Fig. 8 Wind profiles at radiosounding stations

(a) at Zhengzhou 08:00 BT, June 3,

(b) at Nanjing 08:00 BT, June 5,

(c) at Nanjing 08:00 BT, June 14

700 hPa 以上风速随高度迅速增大。环境场的风随高度增大, 有较强的风垂直切变, 水平涡度发展, 形成水平涡管。上升气流和垂直风切变相互作用, 使得水平涡管向垂直方向倾斜, 垂直涡度增大, 有利于形成有组织的对流风暴。较强的风垂直切变能够使上升气流倾斜, 使上升气流中形成的降水质点向前脱离上升气流, 而不会因拖带作用减弱上升气流的浮力; 垂直风切变还增强中层干冷空气的侵入, 加强风暴中的下沉气流和低层冷空气外流, 再通过强迫抬升使得入流的暖湿气流更强烈地上升, 从而加强对流。风垂直切变和上升运动相互作用, 使得对流进一步加强, 发展成有组织的飊线系统。

6 小 结

上述分析表明, 2009 年 6 月三次飊线天气过程存在如下共同特点, 可以为今后同样条件下飊线天气预报提供依据。

(1) 有利的天气形势: 关注在 500 hPa 东北低涡的西南部弱的横槽南下时, 中高层冷空气叠置在 850 hPa 暖脊之上, 850 hPa 上有暖平流和弱的风切变或风辐合, 地面上为从西向东伸展的低压槽。

(2) 较强的不稳定能量积累: 飊线产生在对流有效位能 CAPE 的高能中心和抬升指数 LI 的负值中心附近, CAPE 的中心值在 $900 \sim 1600 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, LI 的中心值在 $-5 \sim -6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

$26 \sim 44 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。3 日 08 时在郑州上空, 低层为东南风, 风随高度顺时针旋转, 到 700 hPa 转为西北风, 风向随高度顺时针旋转有暖平流, 说明低层在增暖, 层结不稳定度增大, 有利于产生对流。5 日 08 时和 14 日 08 时南京上空都为一致的西北气流, 低层风较小,

(3) 适量的水汽条件:在飏线活动区,低层850 hPa以下有弱的水汽输送,飏线形成在弱湿舌区或等湿线梯度密集区,比湿在 $6\sim 12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,相对湿度在40%~70%的区域。

(4) 适当的触发机制:对流产生前和对流期间,低层辐合上升触发对流不稳定能量释放产生剧烈的上升运动;中高层700~500 hPa有干冷的弱下沉气流,叠置在低层暖空气之上导致上下层温差迅速增大,形成明显的不稳定层结现象。

(5) 合适的动力条件:较强的风垂直切变,水平涡度增大,形成水平涡管,使得对流进一步加强,发展成有组织的飏线系统。

(6) 直观的观测事实:在卫星云图上,有近于圆形的对流云团发展,边缘整齐;在雷达回波上,有弓状回波发展。

参考文献

- [1] 陶祖钰,葛国庆,郑永光,等. 2004年7月北京和上海两次重大气象事件的异同及其科学问题[J]. 气象学报,2004,62(6):882-887.
- [2] 王东法,沈杭锋,高领花,等. 浙江“6. 10”飏线过程中尺度分析[J]. 浙江大学学报(理学版),2009,36(2):216-223.
- [3] 杨晓霞,李春虎,杨成芳,等. 山东省2006年4月28日飏线天气过程分析[J]. 气象,2007,33(1):74-80.
- [4] 吴非洋,曲楠,马红云,等. 2006年6月28日强对流天气过程中风垂直切变分析[J]. 气象与环境科学,2008,31(增刊):30-33.
- [5] 韩经纬,孟雪峰,宋桂英. 一次伴随强沙尘暴天气飏线的多普勒雷达回波特征[J]. 气象,2006,32(10):57-63.
- [6] 王莉萍,崔晓东,常英,等. 一次飏线天气的非常规气象资料特征分析[J]. 气象,2006,32(10):88-93.
- [7] 伍志芳. CINRAD/ SA 新一代天气雷达观测夏季热带飏线的特征分析[J]. 气象,2003,29(3):38-40.
- [8] 李云川,王福侠,裴宇杰,等. 用CINRAD2SA 雷达产品识别冰雹、大风和强降水[J]. 气象,2006,32(10):64-69.
- [9] 郭艳,应冬梅,刘冬梅. 江西“4. 12”降雹过程的多普勒雷达资料分析[J]. 气象,2005,31(11):47-51.
- [10] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等. 新一代天气雷达原理与应用讲义[R]. 中国气象局培训中心,2004:101-185.
- [11] 陈业国,农孟松,黄海洪,等. 山东一次飏线过程的中尺度分析[J]. 气象,2009,25(9):91-97.
- [12] 钱莉,杨永龙,殷玉春,等. 一次飏线引发的大风强度沙尘暴诊断分析[J]. 气象,2009,35(3):42-48.
- [13] 李淑玲,刁秀广,朱敏,等. 一次飏线过程多普勒雷达资料分析[J]. 气象,2009,35(3):60-65.