

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.

2014 年一次飑线的发展维持原因分析^{*}

张 宁¹ 苏爱芳¹ 史一丛²

1 中国气象局(河南)农业气象保障与应用技术重点实验室, 郑州 450003

2 河南省气象台, 郑州 450003

提 要: 应用常规观测资料、区域自动站数据及多普勒雷达监测产品, 对 2014 年 7 月 29 日豫北飑线的形成机制、结构特征及发展维持原因进行研究。结果表明: 此次飑线过程发生在“槽前型”大尺度环流背景下。对流发生前, 冷空气侵入高空槽前与低层发展的暖湿气流在对流潜势区叠加建立了不稳定层结。根据飑线的演变特征将其生命史分为组织发展阶段和再生阶段。在其组织发展阶段, 东移高空槽和发展的地形辐合线是其主要驱动和组织触发机制。系统前沿阵风锋、主风暴及后部层云区形成的前侧入流与后侧出流共存、低层辐合与高层辐散共存的垂直环流, 与水平方向上环境入流与系统出流共存并错开的环流体现了成熟期飑线高度的自组织结构特征, 并形成了风暴发展的正反馈机制, 正反馈机制的建立使其得以长期维持。另外, 飑线与其他风暴发生对流合并也是其组织结构迅速增强的重要原因。在其再生阶段, 豫东地区适宜的热力条件及中等以上强度垂直风切变条件对飑线的组织发展极为有利。飑线与北上的弓形回波发生对流合并使近地面形成中尺度雷暴高压, 变压风与环境气流在中尺度湿区附近建立的辐合抬升运动为飑线再生提供了重要的触发机制。

关键词: 飑线, 环境条件, 组织结构, 触发机制

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.11.007

Causation Analysis of Evolution of a Squall Line in 2014

ZHANG Ning¹ SU Aifang¹ SHI Yicong²

1 Key Laboratory of Agrometeorological Safeguard Application Technique, CMA, Zhengzhou 450003

2 Henan Provincial Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003

Abstract: In this paper, conventional meteorological data, AWS data and Doppler radar data are used to analyze the organization and formation mechanism, structure characteristics and evolution causation of a squall line in northern Henan on 29 July 2014. The results show that the squall line formed under the synoptic situation of pre-trough. Before the convection, cold air invaded into the front of upper-level trough and laid over the lower-level warm airflow in potential convection area to form a favorable mesoscale unstable stratification. The process can be divided into organization-evolution stage and regeneration stage. In the organization-evolution stage, east-moving upper-level trough and mesoscale topographic convergence line are the main trigger systems. The vertical circulation structure of the coexistence of front inflow and back outflow, the coexistence of lower-level convergence and upper-level divergence, and the horizontal circulation structure of coexistence and derangement of ambient inflow and system outflow reflect the self-organization characteristics of the squall line. This positive feedback mechanism leads to develop and preserve for a long time. Moreover, convective cloud merging of squall line and other storms is the

^{*} 全国强对流预报专家团队、河南省强对流预报创新团队、中国气象局预报员专项(CMAYBY2015-043)和中国气象局气象关键技术集成与应用面上项目(CMAGJ2015M36)共同资助

2016 年 7 月 17 日收稿; 2017 年 2 月 23 日收修定稿

第一作者: 张宁, 主要从事中尺度天气研究. Email: zhangning139@sohu.com

通信作者: 苏爱芳, 主要从事强对流天气预报技术研究. Email: afsu011@sohu.com

important reason why its local organization structure boosts quickly. In regeneration stage, favorable thermodynamic condition and stratification characteristics, especially the vertical wind shear with stronger than moderate intensity are extremely advantageous to the development of organization structure of the squall line. Convective clouds merger where bow echo is intersected into squall line forming a mesoscale thunderstorm high near the ground. The convergence lifting motion formed by isallobaric wind and environment airflow in mesoscale wet region offered an important trigger mechanism for the regeneration of the squall line.

Key words: squall line, environment condition, organization structure, trigger mechanism

引 言

飊线作为一类具有特殊组织形式的风暴系统,一直是国内外强对流研究的热点。早期研究中,丁一汇等(1982)将华北飊线发生发展的环流背景分为槽后型、槽前型、高后型以及台风倒槽型四种。Bluestein and Jain(1985)根据雷达回波特征将飊线组织方式分为虚线型、后侧新生实线型、虚面型和实面型。Parker and Johnson(2000)将线状中尺度对流系统的层云分为拖尾层云型、先导层云型和平行层云型三类。这些理论完善了 20 世纪 70 年代之前相对简单的飊线概念模型。近年来,国内学者从飊线的发展演变(吴洪和林锦瑞,1997;吴海英等,2007;姚晨等,2012)、组织形式(马中元等,2014)和内部结构(何齐强等,1992;伍志方等,2014;孙建华等,2014)以及维持机制(李鸿洲等,1999)等方面开展研究并取得了若干阶段性成果。对于飊线的组织形成机制,针对不同地域飊线的研究结论存在许多相似之处。较一致的观点(于庚康等,2013;陈涛等,2013;郑媛媛等,2014;郭弘等,2014)认为,地面风场辐合线或干线对飊线的触发起着极其重要的作用,锋面、中空急流等中尺度扰动及地形因素与飊线的触发及对流组织化也有密切关系。姚建群等(2005)指出,地面锋生作用和低层辐合、高层辐散造成的强抬升运动是飊线的主要触发机制。肖现等(2013)认为,风暴降水产生的冷池边缘扰动气压和扰动温度导致风暴互相靠近且合并组织成带状回波。对于飊线的发展维持机制,许多学者指出,风暴自组织建立的正反馈机制(王秀明等,2012)、中低层中等强度以上的风垂直切变(袁子鹏等,2011;梁俊平和张一平,2015)及有利的大尺度背景和环境层结(农孟松等,2014;刘莲等,2015)对飊线的发展具有重要意义,当然,多系统耦合则更有利于风暴系统的长期维持。

姚建群等(2005)基于 BKW 理论进一步指出,在出流边界上方,环境风和雷暴出流各自存在的垂直切变形成了一对势力相当、方向相反的水平涡对,使得雷暴单体前侧低层的上升气流加强并维持且没有明显倾斜,保证了雷暴新生部分最大限度地垂直方向发展。

河南是我国强对流天气高发区,每年夏季,飊线常以不同时空尺度及影响范围造成雷暴大风、短时暴雨、冰雹等致灾天气,给该省工农业经济和生命财产安全造成重大威胁。2014 年 7 月 29 日,河南发生了一次飊线过程,受其影响,豫北多地农业、电力、城市交通等方面损失严重。虽然此次过程不属于极端天气,然而飊线自身结构、发展演变规律及所处环境均有其自身特点及代表性,具有研究价值。本文利用多种资料对此次过程进行了综合分析,为探明此类强天气系统的形成发展机制提供参考依据。

1 实况天气和灾情

2014 年 7 月 29 日下午到夜里,一次飊线过程影响了河南北部,多市县出现雷电、短时强降水及雷暴大风等强对流天气。统计表明,过程期间共有 83 站次雷暴及 9 站 8 级以上地面瞬时大风观测记录(图 1a),其中 16:40(北京时,下同)汤阴瞬时偏西风速达 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。同时,多地出现暴雨(图 1b),降水具有时间短、雨强大等特点,其中 12 站过程雨量超 100 mm,降水极值为新乡小店 139.2 mm。另外,有 249 站次短时强降水(雨强超过 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$),最大小时雨量为延津农场 $75.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (18:00—19:00)。据不完全统计,受暴雨洪涝、雷暴大风等灾害天气影响,豫北、豫东受灾作物达 1.2 万 hm^2 、损毁房屋 2775 座、受灾人口 6.2 万人,直接经济损失超过 1.4 亿元。

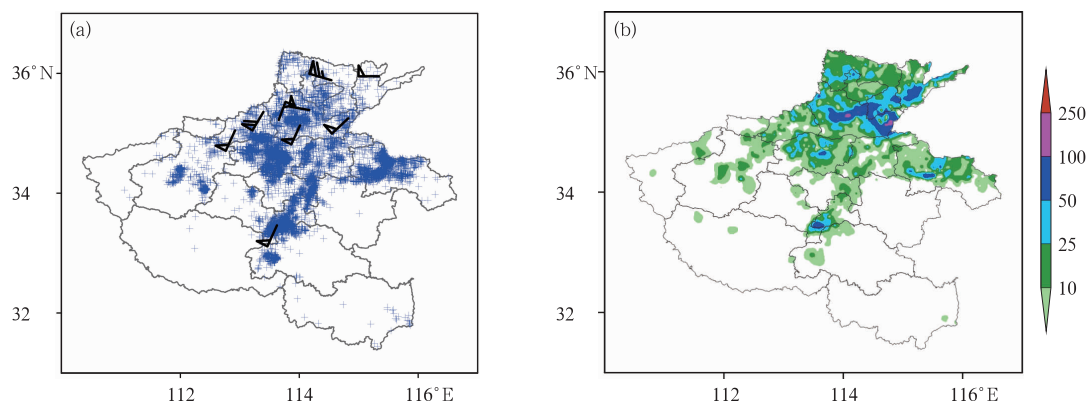


图 1 2014 年 7 月 29 日 13:00—22:00 闪电频次与 8 级以上瞬时大风分布(a)和 30 日 00:00 的 12 h 累积雨量(b,单位:mm)

Fig. 1 Distribution of lightning frequency and instant gale from 13:00 to 22:00 BT 29 (a) and 12 h accumulated rainfall at 00:00 BT 30 (b, unit: mm) July 2014

2 天气形势与飊线的形成发展

此次飊线发生发展在高空低槽系统东移的环流背景下(图 2),属“槽前”型飊线过程。分析常规高空资料可知,29 日,东亚高纬地区 500 hPa 呈“两槽一脊”的环流形势,中纬西风带有低槽东移,并逐渐向南发展为前倾槽。08:00(图 2a),低槽位于 110°E 附近,此时槽后冷空气已扩展至槽前的豫北上空。低层 850 hPa 上,豫南有一支 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的偏南显著气流发展,与低空急流作用相似(丁一汇等, 1982),偏南显著气流将暖湿空气向北输送使得暖湿舌强烈北伸,从而建立了豫北高空冷空气与低层暖湿空气相叠置的不稳定层结。20:00(图 2b),500 hPa 低槽东移至鲁西—豫东南沿线,槽前冷空气南下,与低层持续发展的暖脊建立了豫东不稳定

层结。风场上,豫东 700 hPa 由 08:00 的 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 偏西风演变为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 西南风,且存在风速辐合(图略);850 hPa 上武汉、阜阳、徐州则分别为 12、10 和 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的偏南风,即存在风速辐合。因此,豫东低层辐合运动的发展有利于系统性抬升增强。另外,东移的 850 hPa 偏南气流中心达到急流标准(郑州站偏南风速为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),对飊线也具有一定的触发作用。

综上所述,此次飊线发生在 500 hPa 东移低槽的槽前西南气流里,属“槽前型”飊线过程。对流发生前,高空冷空气扩展至 500 hPa 槽前,与低层逐渐发展的暖湿气团叠加,从而建立了上冷下暖的不稳定层结,低层显著偏南风速带的发展及辐合区的形成加强了系统抬升运动。在合适的环流背景下,29 日下午到夜里形成了此次飊线过程。

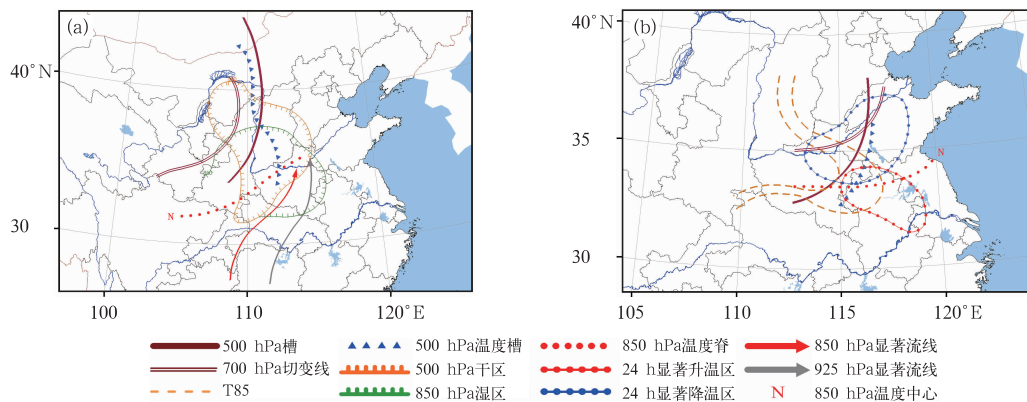


图 2 2014 年 7 月 29 日 08:00(a)和 20:00(b)高空分析综合图

Fig. 2 Upper-level composite chart at 08:00 BT (a) and 20:00 BT (b) 29 July 2014

结合雷达回波演变,将此次过程分为两个阶段:组织发展阶段和再生阶段。在组织发展阶段,29日中午,晋南山区有若干雷暴南下形成松散雷暴群。13:45,雷暴群逐渐演变为侧向排列的雷暴带,但结构较为松散且存在若干断裂处。当雷暴带翻越太行山进入豫北后,在有利的环境条件下对流系统组织程度迅速增高,雷暴带快速演变为飑线。飑线东移期间,豫西、豫中有大范围雷暴新生北上与飑线合并,对流云合并过程使得飑线局部迅速增强,安阳、鹤壁、焦作、新乡、济源共出现 30 站次短时强降水及 5 站瞬时大风。17:30,飑线发展为水平尺度约 320 km 的具有弓形结构风暴主体、前沿阵风锋及后侧层云区的 β 中尺度对流系统。在飑线再生阶段,18:00 以后,豫中两支弓形回波先后与飑线合并,使得新乡、濮阳等地出现 23 站次短时强降水及 3 站瞬时大风。随后,飑线主体逐渐减弱消亡,19:20 以后,仅豫东存在一定范围强度小于 45 dBz 的层云区。然而,20:04 以后,层云区前沿又重新发展出侧向排列的、强度超过 50 dBz 的线状对流,并再次发展为飑线影响商丘及鲁、苏等地。

3 环境条件

为研究飑线快速形成的原因,对豫北、豫东环境条件进行综合分析。结果表明,不稳定层结建立及对流不稳定能量发展为飑线的形成提供了有利的中尺度环境条件。由于风暴动力结构及潜在影响力很大程度上取决于层结不稳定程度、垂直风切变和水

汽等因素(俞小鼎等,2010),因此主要从这三方面进行分析。

从热力条件看,29日 08:00,500 hPa 温度槽与 850 hPa 温度脊在豫北叠加,郑州、邢台 850 hPa 与 500 hPa 温差(以下简称 dT_{85})分别为 27 和 26℃,豫北不稳定层结已经形成。探空资料显示,郑州上空对流有效位能(CAPE)为 $1105 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,925 hPa 以下存在逆温层,对流抑制能量(CIN)为 $119 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,表明此时豫北已具备一定的不稳定能量,而逆温层的存在预示着能量将进一步积累。鉴于飑线 15:00 前后影响豫北,利用郑州 14:00 地面温度和露点温度对本站探空数据进行订正,结果表明(图 3a),CIN 消失,CAPE 显著增至 $2602 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,自由对流高度由 08:00 的 683 hPa 迅速下降至 991 hPa。可见对流发生前,豫北层结不稳定度进一步发展,对流特征明显。从动力条件看,郑州中低层以偏南风至西南风为主,而西北气流集中在 300 hPa 以上,0~6 km 和 0~2 km 垂直风切变(以下简称 $W_{\text{sr6 km}}$ 、 $W_{\text{sr2 km}}$)仅为 7.0 和 $2.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,说明环境中低层垂直风切变较弱。郑州雷达反演风廓线产品显示(图 3b),14:00—15:00,虽然中层风速有所增大,但仍以西西南至偏西风为主,而中低层风场无明显变化。因此,至飑线发生时,豫北处于弱垂直风切变环境,不利于飑线的组织发展。

29日 20:00,随着系统东移,500 hPa 槽前冷空气南下,850 hPa 暖湿气团向东发展,郑州、徐州 dT_{85} 分别由 08:00 的 27 和 23℃增至 28 和 27℃,豫东层结不稳定度显著增高。19:00 商丘订正 CAPE

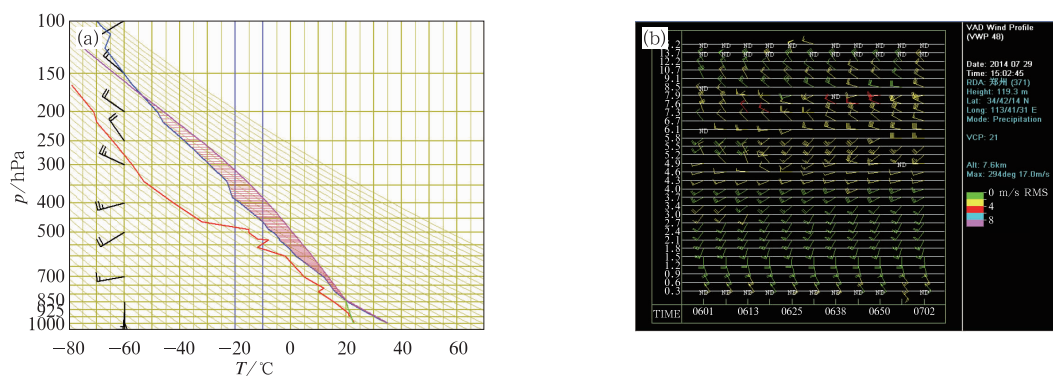


图 3 2014 年 7 月 29 日 14:00 郑州站订正探空曲线(a, 基于 08:00 郑州站探空资料)和 15:02 郑州雷达反演风廓线(b)

Fig. 3 Revised skew T -log p diagram for Zhengzhou at 14:00 BT (a, based on data for Zhengzhou at 08:00 BT) and retrieved wind profile of Zhengzhou Radar at 15:02 BT (b) 29 July 2014

为 $1305 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 具备对流发展所须的能量。商丘下游 137 km 的徐州 $W_{\text{sr6 km}}$ 为 $11.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 达到中等强度; 此时郑州处于 500 hPa 槽后, 中层以上转为明显的西北气流, $W_{\text{sr6 km}}$ 达 $24.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 徐州和郑州 $W_{\text{sr2 km}}$ 也增至 7.5 和 $8.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。豫东地区中层垂直风切变达到中等强度以上, 低层垂直风切变与前期相比也有明显改善。豫东地区垂直风切变环境的显著改善对于飊线发展极为有利。

环境分析表明, 晋南雷暴带进入豫北后, 在有利的层结及热力条件下迅速发展为飊线。飊线快速组织形成的原因是本文首先想要研究的问题。其次, 飊线形成后在弱环境动力条件下仍然维持超过 4 h, 其发展维持机制是什么? 第三, 飊线消亡后, 稳定层云区前沿又有对流单体迅速发展为飊线, 飊线的再生机制是什么?

4 飊线的触发机制及维持原因

自动站数据及雷达产品分析表明, 豫北地区中

尺度辐合线的建立和维持是飊线形成的重要触发机制, 而成熟期飊线系统自身高度的组织结构形成的正反馈机制及与其他对流系统相互作用是其得以发展维持的主要原因。

4.1 飊线的触发机制

地面分析表明, 豫北地区由于特殊地形作用形成并维持的中尺度辐合线为飊线快速组织形成提供了触发条件。自动站数据显示, 29 日早晨, 黄淮地区近地面盛行偏东风, 随着暖湿气团向北发展, 河南北中部的南风分量逐渐增大, 当风向与豫北太行山走向近似垂直时, 受地形影响, 风向在山前发生偏转, 地形辐合线形成, 随后不断向南北扩展(图 4a~4c)。至 14:00, 辐合线南至豫西山区、北至太行山北部, 尺度接近 300 km, 且基本与太行山走势一致(图 4d)。地形中尺度辐合线的建立使得其附近局地垂直风切变条件明显改善, 有利于对流的组织。分析露点温度可知, 地形辐合线发展期间, 其附近露点温度梯度不断增大, 即存在露点锋生, 由图可见露

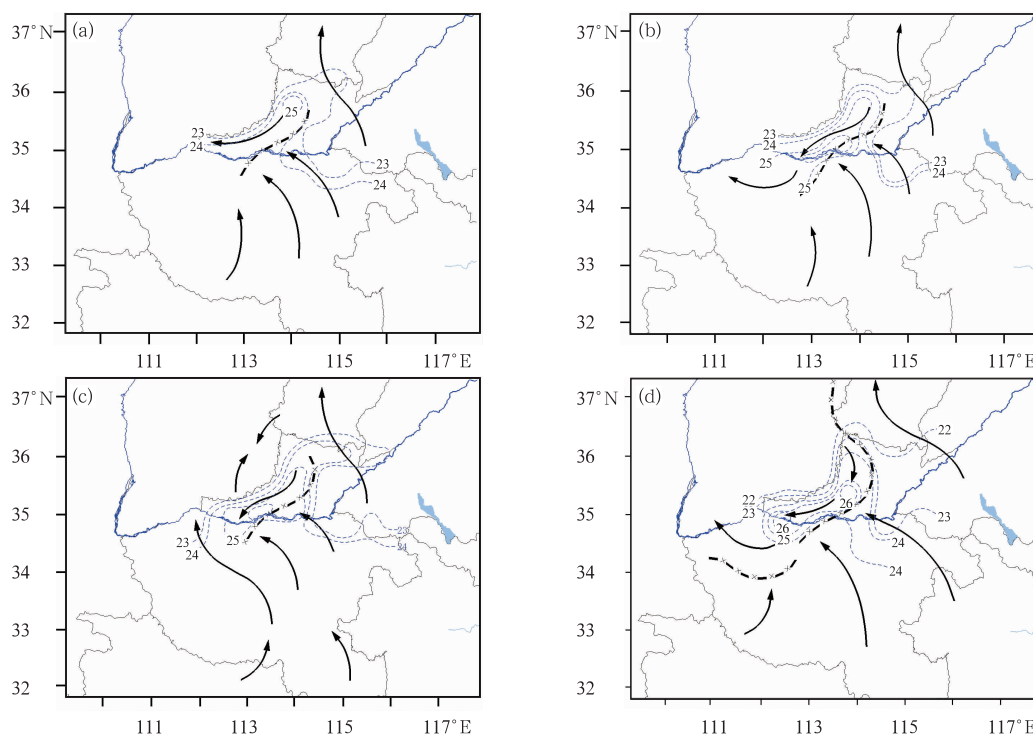


图 4 2014 年 7 月 29 日 11:00(a), 12:00(b), 13:00(c) 和 14:00(d) 地面中尺度分析综合图

(虚线为露点温度, 点划线为地面辐合线, 矢量箭头为地面显著流线)

Fig. 4 Surface composite chart at 11:00 BT (a), 12:00 BT (b), 13:00 BT (c) and 14:00 BT (d) 29 July 2014

(Dotted line represents dewpoint temperature, dot dashed line represents convergence line, vector represents significant streamline)

点锋沿着辐合线的走向发展。雷达回波显示,雷暴带进入豫北后,在辐合线附近迅速发展,形态与辐合线走向基本一致。可见,豫北中尺度地形辐合线的形成明显改善了一局部环境,在触发对流的同时能够对对流系统起到组织的作用,是促使飑线快速形成的重要机制。

4.2 飑线发展维持原因

分析雷达产品可以发现,在弱垂直风切变条件下,飑线自身高度的自组织结构(王秀明等,2012)建立的正反馈机制是其发展维持的主要原因。

濮阳雷达显示,15:58以后(图略),飑线已具有线状排列主回波区、前沿阵风锋及后部层云区。16:34,飑线水平尺度达300 km并具有弓形结构(图5a),风暴高度超过12 km,风暴核强度55 dBz左右,高度接近6 km(图5b),对流塔具有明显的前悬结构,回波前侧梯度较大。对应径向速度剖面(图5c)上斜升气流径向速度超过 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,说明低层环境入流较强。在层云区,由降水粒子拖曳和蒸发

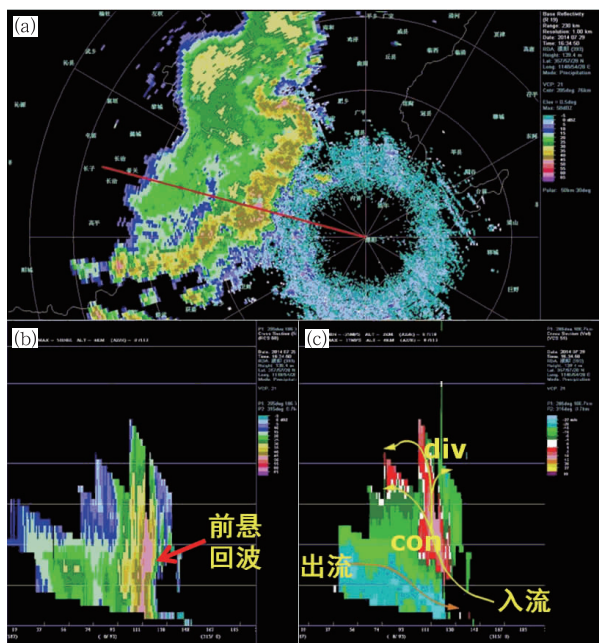


图5 2014年7月29日16:34濮阳雷达 0.5° 仰角基本反射率因子(a,单位:dBz)及基本反射率因子(b,单位:dBz)和径向速度(c,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)剖面

Fig. 5 Base reflectivity at 0.5° elevation angle (a, unit: dBz) and cross section of base reflectivity (b, unit: dBz) and radial velocity (c, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) of Puyang Radar

at 16:34 BT 29 July 2014

形成的下沉运动,在近地面产生强辐散,并能够到达风暴前沿形成径向速度达 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的阵风出流。同时,在风暴前方,环境气流经阵风锋抬升,以很陡的角度进入风暴并在风暴顶形成辐散,斜升气流(径向速度达 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上)与倾斜下沉气流形成了风暴主体内部深厚的辐合区。因此,成熟期的飑线,形成了环境入流与系统出流共存、低层辐合与高层辐散共存的完整环流结构,阵风锋决定着环境入流强度,从而影响风暴顶辐散运动,而辐散运动与飑后层云区的补偿下沉气流存在联系,斜升气流与系统出流的相对强度又决定了低层辐合区的范围和强度。可见,飑线垂直环流具有高度的自组织结构特征。

水平方向上,成熟期飑线也表现出完整的自组织结构特征。濮阳雷达(图6)显示,17:17,飑线主风暴已演变为经典弓形(BE)结构,从对应的径向速度产品(图6b)中可以发现,自层云区发展的系统出流形成的强风带到达弓形回波顶点,形成系统的显著出流区,主回波上明显的入流缺口(蓝圈)说明出流区风速极强。在出流区以北,中低层各仰角上均存在相对风暴移向的入流(图6b中红色区域),在各层上系统出流与环境入流均能共存。环境显著入流区对应着飑线北部反向弯曲(红圈)处,说明入流具有一定势力。以上分析可见,飑线风暴系统显著出流与其北部显著入流共存并相互错开的水平流场结构,体现了其水平方向上完整的自组织结构特征。

综上所述,成熟期飑线在垂直方向上具有环境入流与系统出流共存、低层辐合与高层辐散共存的环流结构,同时在水平方向上也表现出系统出流与显著入流相互依存的结构。飑线风暴系统空间上高度的自组织结构形成的正反馈机制是其在弱垂直风切变条件下发展维持的主要原因。

4.3 飑线与其他风暴相互作用

飑线发展期间,豫西、豫中有若干积云对流生成并北移发展,逐渐与飑线发生对流云合并过程,为飑线提供了“能量”。可将对流云合并过程分为两个时段:第一时段为15:39—17:54,为地形辐合线附近发展的若干对流单体北上与飑线发生的合并过程。第二时段为17:54—19:39,为弓形回波系统(简称北弓形回波、南弓形回波)北上与飑线发生的对流合并过程。

在第一时段,有对流云团自豫西山区北部生成

并沿辐合线北上,15:57,对流移至淇县、卫辉至修武一带(图 7a),随后与飊线发生对流云合并。16:22,鹤壁北部和辉县西部的飊线回波发展为小尺度弓形结构(图 7b 中黑圈区域),中心强度超过 65 dBz,合并处液态含水量迅速增至 $65 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (图 7e、7f)。地面观测显示,16:00—17:00,鹤壁市鹤山区政府及林州石大沟雨量分别为 60.8 和 39.7 mm,16:45 汤阴出现 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 偏西大风,与回波增强处均有很好的对应。由此可知,对流云合并过程使得飊线局

部迅速发展增强(黄勇等,2016)。在第二阶段,弓形回波发展北上与飊线发生对流云合并。18:06(图 7c),北弓形回波位于延津、兰考附近,与飊线逐渐发生对流云合并。18:37,滑县、长垣附近的合并区回波强度较之前明显增大,液态含水量由 $55 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 跃增至 $70 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (图 7g、7h),对应 18:00—19:00 延津农场雨量达 75.6 mm,长垣、原阳、南乐相继出现 8 级瞬时大风。以上分析可知,对流云合并过程使得飊线系统局部迅速发展,组织结构迅速发展,为

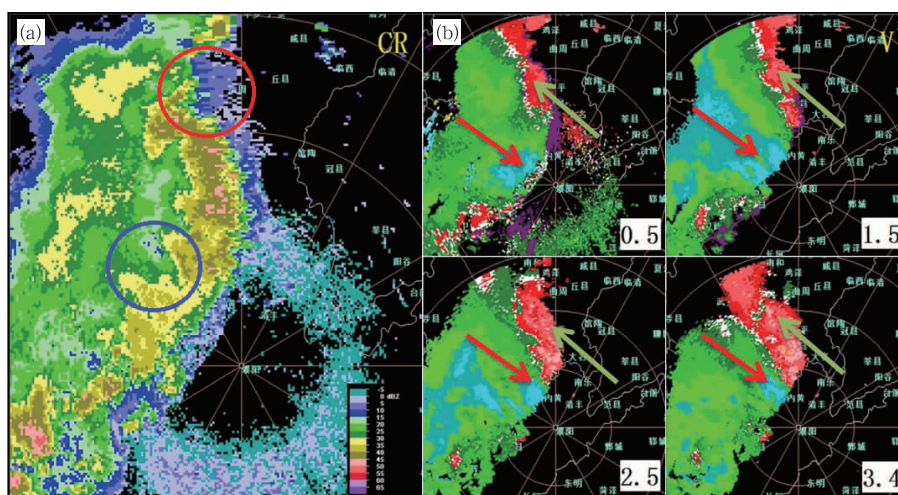


图 6 2014 年 7 月 29 日 17:17 濮阳雷达 0.5° 仰角基本反射率因子(a,单位: dBz)和径向速度(b,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 6 Base reflectivity at 0.5° elevation angle (a, unit: dBz) and radial velocity (b, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) of Puyang Radar at 17:17 BT 29 July 2014

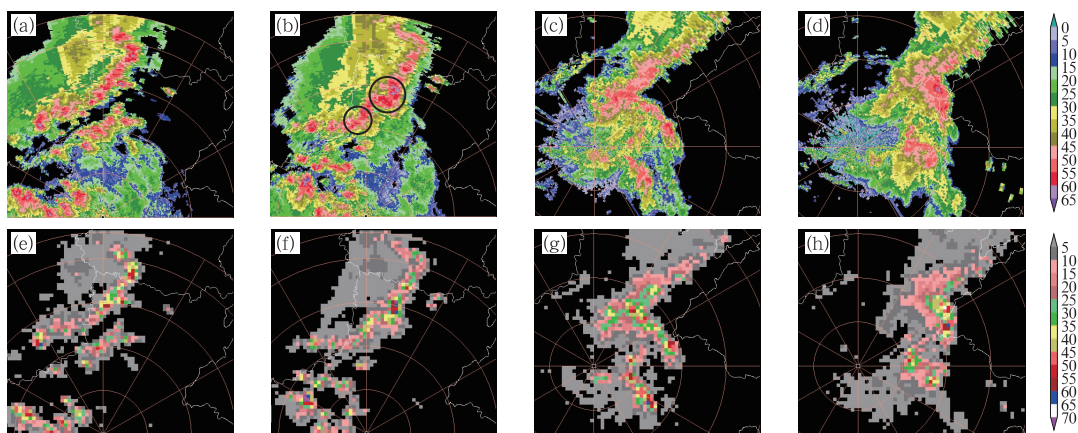


图 7 2014 年 7 月 29 日 15:57(a),16:22(b),18:06(c)及 18:37(d)郑州雷达产品 (a, b) 0.5° 仰角基本反射率因子, (c, d) 组合反射率因子(单位: dBz), (e—h) 与图 7a~7d 相应时次的垂直积分液态水含量(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig. 7 Zhengzhou Radar products at 15:57 BT (a), 16:22 BT (b), 18:06 BT (c) and 18:37 BT (d) 29 July 2014

(a, b) base reflectivity at 0.5° elevation angle, (c, d) composite reflectivity (unit: dBz), (e—h) vertical integrated liquid water content at corresponding times of Figs. 7a—7d (unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)

飊线的发展维持提供了“能量”。

5 飊线再发展机制分析

7月29日19:20后,飊线逐渐减弱消亡,至19:33,豫东地区仅存在稳定层云回波。值得关注的是,20:10,东移层云区前沿有对流单体迅速发展,4个体扫后(20:35)再次形成飊线。分析其环流背景及环境条件发现,飊线再次发展的原因主要有以下几点。

5.1 大尺度系统驱动及中尺度环境改善

高空分析表明,20:00,豫东恰处于500 hPa槽区,与飊线再次发展区域对应,可见高空低槽系统的移动与飊线位置有很好的相关性,天气尺度系统的驱动具有重要作用。其次,低层偏南显著气流进一步发展,郑州850 hPa偏南风达 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,中尺度环流扰动对飊线具有一定的触发作用。第三,豫东低层由弱辐散转为明显辐合运动,有利于强对流发展。可见,大尺度系统的驱动及与中尺度系统耦合

对于飊线再次发展具有重要意义。

环境分析表明,29日下午到夜里,高空冷空气东移与低层暖湿气团向东发展使得豫东层结不稳定度显著提高,而商丘附近一定的能量累积对于对流的发生发展是必要的。更重要的是,环境动力条件的改善,尤其是中等强度以上的中层垂直风切变,对于飊线的组织发展具有重要作用。因此,豫东环境的改善,尤其是动力条件的显著改善为飊线再次发展提供了十分有利的条件。

另外,豫东属于我国第二、第三阶梯过渡区,统计经验指出,豫东为线性风害多发地区,平坦的下垫面有利于飊线风暴的组织发展。有关豫东平坦地形利于线性大风形成的原因将在今后做进一步研究。

5.2 地面触发机制的建立

自动站数据分析表明,豫东中尺度辐合线的形成成为飊线再次组织发展提供了触发条件。分析小时变压和露点温度的演变特征可以发现,29日傍晚,豫东地面盛行东南至偏东风(图略),18:00(图8a),郑州北部出现 $2 \text{ hPa} \cdot \text{h}^{-1}$ 的正变压中心,18:03郑

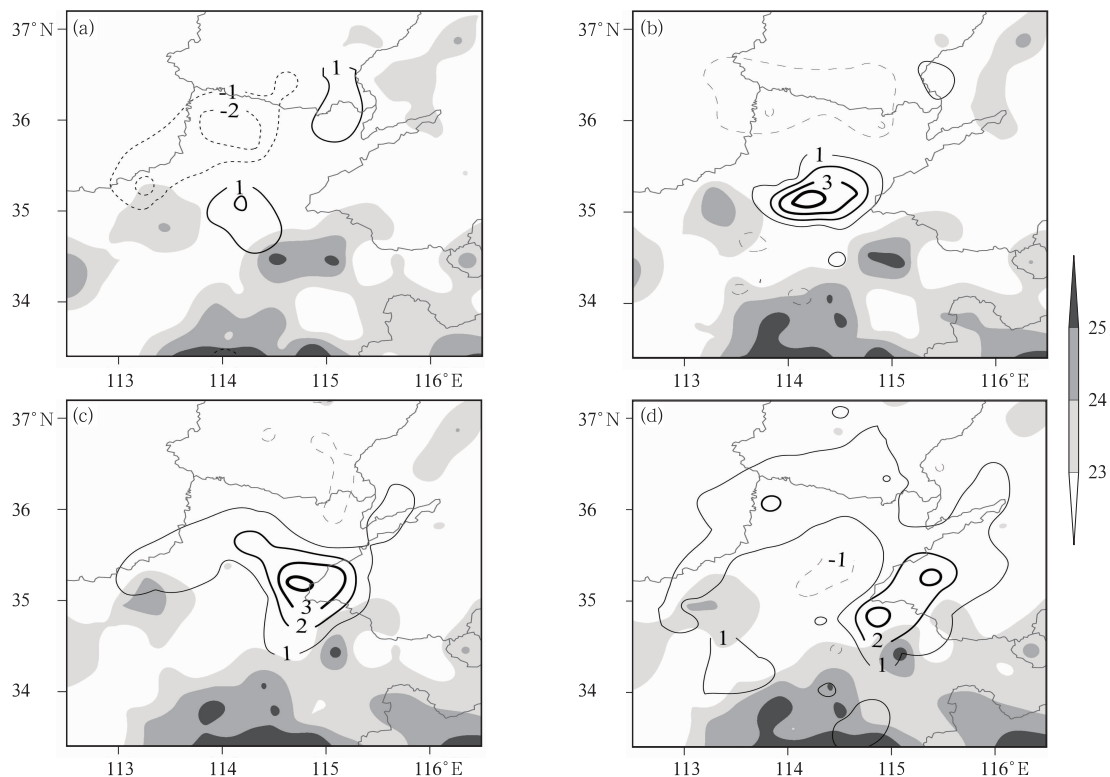


图8 2014年7月29日18:00(a),18:30(b),19:00(c)及19:30(d)地面1 h变压

(实线为正变压,虚线为负变压,单位:hPa)与露点温度(阴影,单位:℃)叠加图

Fig. 8 The superposition chart of 1 h surface allobaric field (solid line: positive allobaric field, dotted line: negative allobaric field, unit: hPa) and dewpoint temperature (shaded area, unit: $^{\circ}\text{C}$) at 18:00 BT (a), 18:30 BT (b), 19:00 BT (c) and 19:30 BT (d) 29 July 2014

州雷达上可以看到北弓形回波与飊线发生对流云合并,正变压区恰位于两者交汇处附近(图略)。地面实况显示,正变压区附近出现了短时强降水和雷暴大风(18:00—19:00 长垣和原阳小时雨量为 36.1 和 28.1 mm,长垣 18:28 出现 8 级西南大风)。可见,对流云合并过程使得风暴在局地产生强天气,形成了中尺度雷暴高压。18:05,位于正变压区东部的开封转为偏西风,通许随后转为 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 偏西风(图略),在变压风(偏西风)与偏东风之间形成了中尺度辐合线。与此同时,商丘北部有显著湿区($T_d > 25^\circ\text{C}$)发展。随着弓形回波与飊线对流云合并的范围不断扩大,雷暴高压随之向东北发展,变压中心不断增强,18:30(图 8b),雷暴高压中心增至 $4 \text{ hPa} \cdot \text{h}^{-1}$,范围较之前有所扩大。随着南弓形回波的逐渐并入,19:00(图 8c),雷暴高压范围已扩展至整个豫东北地区,高压走向演变为近南北向,雷暴高压中心逐渐向显著湿区靠近。19:30(图 8d),准南北向的雷暴高压位于濮阳东部至商丘北部一线,变压中心(中心强度 $3 \text{ hPa} \cdot \text{h}^{-1}$)移近显著湿区,说明地面中尺度辐合线发展的同时,辐合线附近存在明显的水汽辐合。地面中尺度辐合线的形成为飊线再次发展提供了重要的触发机制。

6 结论和讨论

本文利用常规观测资料、区域自动站观测数据及雷达监测产品,对 2014 年 7 月 29 日豫北飊线过程的发展演变规律、环境条件、发展维持原因及再生机制进行了综合分析。得到以下主要结论:

(1) 此次飊线过程发生发展于“槽前型”天气系统背景下,飊线的移动演变与 500 hPa 低槽位置密切相关。对流发生前,高空冷空气扩展至 500 hPa 槽前,与 850 hPa 强烈发展的暖湿气团叠加,建立了有利的不稳定层结。而低层风场中尺度扰动的形成及风速辐合区的发展则有利于强对流天气的发展,多尺度系统耦合对于飊线再次发展具有重要意义。

(2) 由于特殊地形及地面东南风的发展,对流发生前,豫北地区形成的中尺度地形辐合线具有组织和触发对流的作用,是飊线风暴系统快速形成的重要触发机制。

(3) 成熟阶段的飊线在垂直方向上具有环境入

流与系统出流共存、低层辐合与高层辐散共存的环流结构,同时在水平方向上也表现为系统出流与显著入流相互依存的结构。飊线风暴系统空间上高度的自组织结构形成的正反馈机制,是其在弱垂直风切变条件下发展维持的主要原因。

(4) 飊线东移期间,飊线与其他对流发生的对流云合并过程使得飊线系统局部迅速增强,组织结构迅速发展,为飊线的发展维持提供了重要的“能量”。

(5) 在天气尺度系统东移背景下,豫东地区不稳定层结的发展、理想的环境条件、垂直风切变条件的明显改善以及平坦的下垫面,特别是环境动力条件的改善,为飊线的组织发展创造了重要条件。消亡期飊线与其他对流系统发生对流合并,形成了中尺度雷暴高压,变压风与环境风在显著湿区形成的地面中尺度辐合线为飊线的再次形成提供了重要的触发机制。

参考文献

- 陈涛,代刊,张芳华,2013. 一次华北飊线天气过程中环境条件与对流发展机制研究[J]. 气象,39(8):945-954.
- 丁一汇,李鸿洲,章名立,等,1982. 我国飊线发生条件的研究[J]. 大气科学,6(1):18-27.
- 郭弘,林永辉,周森,等,2014. 华南暖区暴雨中一次飊线的中尺度分析[J]. 暴雨灾害,33(2):171-180.
- 何齐强,陆汉城,张铭,1992. 江淮地区暖区飊线中尺度观测研究[J]. 气象学报,50(3):290-300.
- 黄勇,冯妍,翟菁,2016. 对流云合并的国内外研究进展[J]. 暴雨灾害,35(1):91-96.
- 李鸿洲,蔡则怡,徐元泰,1999. 华北强飊线生成环境与地形作用的数值试验研究[J]. 大气科学,23(6):713-721.
- 梁俊平,张一平,2015. 2013 年 8 月河南三次西南气流型强对流天气分析[J]. 气象,41(11):1328-1340.
- 刘莲,王迎春,陈明轩,2015. 京津冀一次飊线过程的精细时空演变特征分析[J]. 气象,41(12):1433-1446.
- 马中元,苏俐敏,湛芸,等,2014. 一次强飊线及飊前中小尺度系统特征分析[J]. 气象,40(8):916-929.
- 农孟松,翟丽萍,屈梅芳,等,2014. 广西一次飊线大风天气的成因和预警分析[J]. 气象,40(12):1491-1499.
- 孙建华,郑淋淋,赵思雄,2014. 水汽含量对飊线组织结构和强度影响的数值试验[J]. 大气科学,38(4):742-755.
- 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[J]. 高原气象,31(2):504-514.
- 吴洪,林锦瑞,1997. 垂直切变和地形影响下惯性重力波的发展[J]. 气象学报,55(4):499-505.

- 吴海英,裴海瑛,沈树勤,等,2007. 飊线传播与发展及其引发地面强风过程个例分析[J]. 气象科技,35(5):676-680.
- 伍志方,庞古乾,贺汉青,等,2014. 2012 年 4 月广东左移和飊线内超级单体的环境条件和结构对比分析[J]. 气象,40(6):655-667.
- 肖现,王迎春,陈明轩,等,2013. 基于雷达资料四维变分同化技术对北京地区一次下山突发性增强风暴热动力机制的模拟分析[J]. 气象学报,71(5):797-816.
- 姚晨,郑媛媛,张雪晨,2012. 长生命史飊线在强、弱对流降水过程中的异同点分析[J]. 高原气象,31(5):1366-1375.
- 姚建群,戴建华,姚祖庆,2005. 一次强飊线的成因及维持和加强机制分析[J]. 应用气象学报,16(6):746-753.
- 于庚康,吴海英,曾明剑,等,2013. 江苏地区两次强飊线天气过程的特征分析[J]. 大气科学学报,36(1):47-59.
- 俞小鼎,姚秀萍,熊延南,等,2010. 多普勒天气雷达原理与业务应用:第 2 版[M]. 北京:气象出版社:90-129.
- 袁子鹏,王瀛,崔胜权,等,2011. 一次中纬度飊线的阵风锋发展特征分析[J]. 气象,37(7):814-820.
- 郑媛媛,张雪晨,朱红芳,等,2014. 东北冷涡对江淮飊线生成的影响研究[J]. 高原气象,33(1):261-269.
- Bluestein H B, Jain M H, 1985. Formation of mesoscale lines of precipitation: severe squall lines in Oklahoma during the spring [J]. J Atmos Sci,42(16):1711-1732.
- Parker M D, Johnson R H, 2000. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems[J]. Mon Wea Rev,128(10):3413-3436.