暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

一条长生命史飑线演变特征及触发与维持机制研究

段中夏 武威 朱枫 于海敬

Study of the evolution characteristics of a long-life squall line with its triggering and maintenance mechanism

DUAN Zhongxia，WU wei，ZHU Feng，YU Haijing

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-187

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

一次长生命史超级单体风暴的雷达观测特征

Characteristics of a supercell storm with long life cycle based on analysis of weather radar data

暴雨灾害. 2021, 40(4): 419-429 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.04.010

“利奇马”(2019)台前飑线过程演变和异常特征分析

Analysis of evolution and abnormal characteristics on the pre-TC squall line of typhoon Lekima (2019)

暴雨灾害. 2022, 41(2): 192-203 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.02.010

一次弱垂直风切变环境下飑线发展维持的成因分析

Development and maintenance of squall line in a weak vertical wind shear environment

暴雨灾害. 2021, 40(5): 466-473 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.05.003

初值场水汽含量对华南飑线升尺度增长过程的影响研究

Impact of initial water vapor on the upscale growing process of a squall line in South China

暴雨灾害. 2023, 42(6): 628-639 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-241

盛夏苏北地区一次飑线过程的数值模拟研究

Numerical simulation and study of a squall in the north of Jiangsu in midsummer

暴雨灾害. 2022, 41(1): 15-23 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.01.002

贵港市“5.20”下击暴流过程超级单体结构演变与环境特征分析

Analysis of supercell structure evolution and environmental characteristics of downburst in Guigang City of Guangxi On May 20, 2020

暴雨灾害. 2022, 41(6): 631-639 https://doi.org/10.12406/byzh.2021-024

关注微信公众号，获得更多资讯信息

段中夏,武威,朱枫,等.2025.一条长生命史飑线演变特征及触发与维持机制研究[J].暴雨灾害,44(4):461−472. DUAN Zhongxia, WU wei, ZHU Feng, et al. 2025. Study of the evolution characteristics of a long-life squall line with its triggering and maintenance mechanism [J]. Torrential Rain and Disasters,44(4):461−472 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−187

一条长生命史飑线演变特征及触发与维持机制研究

段中夏[1, 2, 3], 武威[4], 朱枫[1, 2, 3], 于海敬[1, 2, 3]

(1. 中国气象局·河南省农业气象保障与应用技术重点实验室, 郑州 450003; 2. 新乡市气象防灾减灾重点实验室, 新乡 453000; 3. 河南省新乡市气象局, 新乡 453000; 4. 河南省漯河市气象局, 漯河 462300)

摘　要: 利用地面、高空常规观测以及双偏振雷达、雷达拼图、FY-4A 卫星和 ERA5 再分析数据, 对河南省一次长生命史飑线的演变特征及环流背景、环境条件、触发与维持机制等进行了分析。结果表明: (1) 飑线演变过程可分为 4 个阶段: 一是初生阶段, 此阶段触发的零散孤立单体, 增强发展为镶嵌多个超级单体的雷暴单体群; 二是组织发展阶段, 此阶段雷暴群迅速合并增长形成线状对流, 后侧急流发展, 前向传播显著, 逐渐变为尺度较大的弓形结构; 三是成熟维持阶段, 飑线尺度进一步增大, 呈现典型弓形回波特征; 四是减弱断裂阶段, 飑线强度减弱并从中部断裂, 北段迅速东移移出, 南段缓慢南移略有发展。(2) 此次飑线过程发生在副热带高压稳定、低槽切变线东移的环流背景下, 显著的中层干空气、较大的对流有效位能、中等强度的深层垂直风切变为飑线前期提供有利条件; 强烈的垂直风切变为飑线后期维持起到重要作用。(3) 地形抬升和辐合触发零散孤立单体, 单体逐渐合并发展, 在地面辐合线附近加强组织为飑线; 冷池出流和温湿密集带可形成强上升气流并激发新生对流, 冷池和垂直风切变同步增强也有利于飑线维持; 对流系统移动时不断与其前侧对流合并是飑线发展和维持的重要原因; 水平方向上环境入流和系统出流共存, 垂直方向上中低层辐合和高层辐散共存的自组织结构, 也是飑线长时间维持的原因之一。

关键词: 飑线; 长生命史; 演变特征; 地面辐合线; 冷池出流; 自组织结构

中图法分类号: P458.2　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−187

Study of the evolution characteristics of a long-life squall line with its triggering and maintenance mechanism

DUAN Zhongxia[1, 2, 3], WU wei[4], ZHU Feng[1, 2, 3], YU Haijing[1, 2, 3]

(1. *CMA·Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique*, *Zhengzhou* 450003; 2. *Xinxiang Key Laboratory of Meterological Disaster Prevention and Mitigation*, *Xinxiang* 453000; 3. *Xinxiang Meteorological Burea of Henan Province*, *Xinxiang* 453000; 4. *Luohe Meteorological Burea of Henan Province*, *Luohe* 462300)

Abstract: Based on various data collected by surface and high conventional observation, FY-4A satellite, dual polarization radar, radar mosaic data and ERA5 reanalysis, this paper analyzed the evolution characteristics, circulation background, environmental conditions, triggering and maintenance mechanism of a long-life squall line in Henan. The results are as follows. (1) The evolution characteristics of the squall line can be divided into four stages. The first one is the initial stage, in which the scattered and isolated convective cells were triggered and then developed into non-organized thunderstorms embedded supercells. The second is organizational development stage, where multiple storms merged and grows rapidly into linear convective system, with significant rear inflow jet and forward propagation, gradually transitioning to a larger bow structure. The third is mature stage, during which the scale of the bow echo further increased, exhibiting a classical bow echo structure. The fourth is weakening stage, the intensity of the squall line weakening and breaking into two segments, the northern segment quickly moved eastward, while the southern segment moved southward slowly and developed slightly. (2) This squall line process occurred under the circulation background of stable Subtropical High, eastward moved low trough and lower shear line. The significant middle-level dry air, high convective available potential energy and moderate vertical wind shear provided favorable conditions in the early stage, strong vertical wind shear played an important role in the later stage. (3) Terrain triggered the scattered and

收稿日期: 2024−10−14; **定稿日期**: 2024−12−22

资助项目: 河南省气象局预报员专项 (KY202346); 河南省级科技研发计划联合基金项目 (242103810094); 中国气象局创新发展专项 (CXFZ2023J024)

第一作者: 段中夏, 主要从事强对流天气预报预警技术研究。E-mail: 791043440@qq.com

通信作者: 武威, 主要从事短期、短临天气预报技术研究。E-mail: ww-0824@163.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

isolated convection cells, which gradually merge and develop into a linear convection system near the surface convergence line. The cold pool outflow and the warm-wet dense zone can form a strong updraft and trigger the new convections, the synchronous enhancement of the cold pool and vertical wind shear also contributed to the maintenance of the squall line. The continuous merging of convections is a key factor for the development and maintenance. In additional, the squall line exhibited a self-organization structure of coexistence of ambient inflow and system outflow in horizontal direction while coexistence of lower-level convergence and higher-level divergence in vertical direction, which is also one of the reasons for the long-term maintenance of the squall line.

Key words: squall line; long-life cycle; evolution characteristics; surface convergence line; cold pool outflow; self-organization structure

引　言

飑线是一种由多个单体雷暴构成的线状中尺度对流系统，通常引发雷暴大风、冰雹及短时强降水等强对流天气，预报难度较大，受到众多气象学者们的关注。许多学者从环流背景、结构形态、环境条件、触发、组织等方面展开了深入研究，丁一汇等 (1982) 发现我国飑线出现的环流背景可分为槽前型、槽后型、高后型、台风倒槽型四类。Parker 和 Johnson (2010) 研究认为，飑线可按其结构形态分为拖尾层云型 (TS)、先导层云型 (LS) 和平行层云型 (PS) 三种，Zheng 等 (2013) 按类似方法将我国中东部飑线进一步分成七类。公衍铎等 (2019)、雷蕾等 (2021)、高彦青等 (2022) 发现飑线大多发生在上干下湿、强热力不稳定的环境条件中。竹利等 (2018)、夏羽等 (2023) 指出飑线的触发和对流组织化与地面辐合线、锋面、地形等密切相关。

长生命史的飑线往往更容易造成大范围灾害性天气。关于其维持机制，Mulholland 等 (2021) 研究认为，较强的低层垂直风切变是维持飑线发展的有利条件，较强的垂直于飑线的低层垂直风切变有利于冷池前沿阵风锋与飑线前部暖湿气流强烈辐合，从而维持上升气流发展；Rotunno 等 (1988)、陈涛等 (2013)、姬雪帅等研究 (2023) 指出，低层环境风垂直切变和冷池的相互作用决定了飑线的强度和生命史，是飑线维持发展的关键因子。Davis 等 (2007) 研究发现，飑线南北两端分别存在的气旋性和反气旋性涡旋结构可增强后侧入流从而有利于飑线维持。鲍旭炜和谈哲敏 (2010) 研究指出，系统内新对流的生成和发展是飑线系统维持的重要因素。张宁等 (2017)、屈梅芳等 (2021) 研究表明，对流合并及风暴自组织的正反馈机制对飑线维持起重要作用。

河南省位于我国中东部，地处黄河中下游，每年 6—7 月是飑线多发期，给当地人民群众的生命和财产造成重大危害。以往对河南省飑线的研究主要集中在天气学背景 (牛淑贞等, 2012；梁俊平和张一平, 2015)、环境条件诊断分析 (李姝霞等, 2023) 等，针对其精细化演变特征及触发与维持机制的分析涉及较少。2022 年 7 月 25 日下午至 26 日凌晨，河南省出现一次大范围极端强对流天气，直接经济损失超过 3 亿元。此次过程是由两条飑线相继影响河南造成的，其中第二条飑线在河南境内新生并强烈发展，生命史超过 7 h，影响范围大、强度强，68 个站点 (包括国家和区域气象观测站) 出现 10 级及以上大风，24 站出现 50 mm·h^{-1} 以上短时强降水，2 站出现直径 5 cm 以上的大冰雹。然而主客观预报均对第二条飑线的发展强度和维持时间估计不足，造成此次强对流天气存在不同程度漏报，无论是全球模式还是中尺度模式均漏报了河南中南部的强降水；另外，中央气象台及河南省气象台的强对流潜势预报也漏报了河南省中东部大范围的雷暴大风和短时强降水。基于此，本文利用地面、高空常规观测以及双偏振雷达、雷达拼图、FY-4A 卫星和 ERA5再分析数据，针对此飑线的演变特征及其环流形势、环境条件和触发与维持机制等进行了研究，以期为同类天气的预报预警提供参考依据。

1　资料说明

本文使用的资料主要有：(1) 2022 年 7 月 25 日 08 时—26 日 08 时 (北京时，下同) 国家气象中心提供的的地面气象要素观测资料，包括极大风速、逐小时降水、温度、露点温度等，用以分析此次飑线的伴随天气、地面气象要素变化及其触发与维持机制；同时段的高空常规观测资料，包括温度、位势高度、风向、风速等，用于分析环流背景及大气热动力结构；(2) 2022 年 7 月 25 日 08 时—26 日 08 时的欧洲中心第五代全球再分析资料 (ERA5)，时间分辨率 1 h，空间分辨率 0.25°×0.25°，用于分析飑线发生时的水汽、热力等环境条件；(3) 河南省气象台提供的河南省雷达拼图数据，用以分析飑线整体演变概况；(4) 河南省气象局大气探测中心提供的 2022 年 7 月 25 日 14 时—26 日 08 时郑州及洛阳双偏振雷达逐 6 min 体扫资料，用于分析飑线演变的精细化结构；(5) 国家卫星中心提供的 2022 年 7 月 25 日 14 时—26 日 08 时 FY-4A 可见光和红外云图资料，用于分析飑线的云团特征。

2 对流系统及天气概况

2022 年 7 月 25 日午后至 26 日凌晨, 河南省相继受两条飑线影响, 接连出现对流活动, 该过程雷达组合反射率因子拼图见图 1。第一条飑线为移入型飑线: 25 日午后零散对流单体在山西西南部触发, 东移过程中逐渐合并发展, 并在山西东南部组织为东北-西南向线状中尺度对流系统 (LMCS), 15 时该 LMCS 北段向东凸起, 表现出弓形特征 (图 1a), 进入豫北; 16 时 (图 1b) 线状对流系统断裂减弱, 其北段移出河南, 南段呈短带状平行对流在豫西北并有所发展。第二条飑线为河南本地新生型飑线: 25 日午后, 零散对流单体在山西南部和豫西触发, 东移过程中逐渐合并, 在河南中西部形成东北—西南向 LMCS, 并与第一条飑线南段残余对流系统合并增强发展为 LMCS (图 1a—d); 20 时 (图 1e) 该 LMCS 逐渐发展为典型的弓形回波结构, 曲率最大处指向豫东, 其西侧伴有大量层状云, 逐渐呈现出 TS 型特征; 21 时 (图 1f), 飑线西侧豫中西部再度形成一西北—东南向 LMCS, 整个中尺度对流系统呈现“弓箭”型结构, 与此同时, 其南段新生对流不断发展并入造成尺度显著大; 22 时 (图 1g) 飑线快速向东南移动至豫东南, 北段呈近南北走向, 南段近东西走向; 随后, 逐渐从中部断裂为南北两段, 北段减弱并快速移出河南, 南段缓慢南移且结构变松散; 26 日 01 时 (图 1h) 飑线西侧对流向南移动过程中, 其前方不断触发新单体, 与南段残余对流在豫南合并再度有所发展。

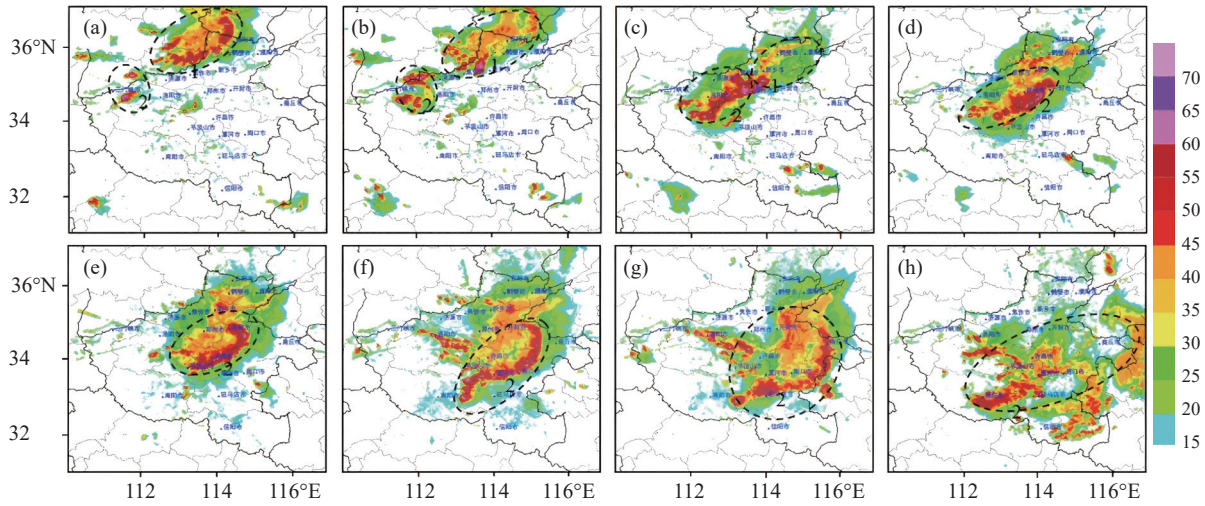


图 1 2022 年 7 月 25 日 15 时 (a)、16 时 (b)、18 时 (c)、19 时 (d)、20 时 (e)、21 时 (f)、22 时 (g) 和 26 日 01 时 (h) 河南省雷达组合反射率因子 (单位: dBz) 拼图 (图中圆圈 1、2 分别代表第一、二条飑线)

Fig. 1 Composite reflectivity mosaic (unit: dBz) at (a) 15:00 BT, (b) 16:00 BT, (c) 18:00 BT, (d) 19:00 BT, (e) 20:00 BT, (f) 21:00 BT, (g) 22:00 BT on 25 and (h) 01:00 BT on 26 July 2022 in Henan (The circles 1 and 2 represent the first and second squall lines, respectively)

受上述两条飑线相继影响, 河南省出现大范围强对流天气, 以雷暴大风和短时强降水为主, 局地伴有冰雹。过程期间共有 731 个地面自动气象观测站 (包括国家站和区域站) 出现 8 级以上的雷暴大风, 其中 77 站达 10 级以上, 最大风速出现在济源下冶, 为 38.4 $m·s^{-1}$ (13 级), 有 12 个国家站极大风速突破历史同期极值; 839 站出现 20 $mm·h^{-1}$ 以上短时强降水; 其中 45 站雨强超过 50 $mm·h^{-1}$, 最大为郑州市花园口站达 103.7 $mm·h^{-1}$; 豫西及豫北局部出现冰雹, 嵩县最大冰雹直径 6 cm。其中, 第一条飑线只影响到河南西北部, 造成以雷暴大风为主的强对流天气, 最大风速 34.3 $m·s^{-1}$, 最大雨强 31.3 $mm·h^{-1}$, 均出现在 25 日 14—15 时。第二条飑线影响河南大部地区, 其中豫西以风雹天气为主, 最大风速 38.4 $m·s^{-1}$, 最大冰雹直径达 6 cm, 均出现在 25 日 16—17 时; 豫中东以区域性雷雨大风为主, 最大风速 37.1 $m·s^{-1}$, 最大小时雨强 103.7 $mm·h^{-1}$, 均出现在 25 日 18—19 时; 豫南出现以短时强降水为主的强对流天气, 最大风速 21.3 $m·s^{-1}$, 最大小时雨强为 85 $mm·h^{-1}$, 均出现在 26 日 01—02 时。综上, 第二条飑线在河南生成并迅速发展, 影响范围大、持续时间长、强天气种类多、极端性显著。因此, 本文主要针对第二条飑线的演变特征及触发与维持机制进行详细分析。

3 飑线演变特征

第二条飑线在河南境内生成并强烈发展, 生命史超过 7 h, 具体分为 4 个阶段: 7 月 25 日 15—17 时为初生阶段, 零散孤立初始单体在河南西部被触发后逐渐合并, 加强发展为对流旺盛的雷暴单体群; 17—20 时为组织发展阶段, 雷暴群合并发展逐渐组

织成飑线; 20—22 时为成熟维持阶段, 飑线快速向东南发展, 尺度逐渐增大, 逐渐呈现典型弓形回波结构; 22 时之后为减弱断裂阶段, 飑线东移中断裂为南北两段, 北段快速减弱移出, 南段减弱为零散对流后与其后侧的分散对流合并有所加强并缓慢南移。

3.1 初生阶段

7 月 25 日 15—17 时, 零散孤立对流在山西南部及豫西附近发生发展, 新生单体在老单体周围随机触发, 表现为对流旺盛的雷暴单体群 (图 1a—c); 对应豫中西部局地出现冰雹、雷暴大风和短时强降水。

15 时 30 分洛阳雷达组合反射率因子 (图 2a) 显示, 山西南部和河南西部有多个块状对流单体强烈发展, 中心强度超过 65 dBz, 并伴有三体散射和旁瓣回波, 表现出大冰雹的回波特征。速度场 (图略) 上, 豫西强对流中层出现中尺度涡旋, 最大旋转速度为 18 m·s^{-1}, 对应涡度值约为 1.8×10^{-2} s^{-1}, 具有超级单体特征。该强单体回波剖面显示 55 dBz 伸至 12 km 以上, 同时呈现高悬强回波结构, 65 dBz 以上位于 4—10 km (图 2b), 对应差分反射率因子 (ZDR) 近似为 0 的低值区 (ZDR 槽) (图 2c), 差分相移率 (KDP) 为缺测 (图 2d), 表明空中有直径 5 cm 以上的大冰雹存在; 此时, 风暴顶发展至 15 km 以上, 入流一侧 (右后侧) 中低层存在明显的有界弱回波区 (BWER) (图 2b), 对应 ZDR 高值区 (ZDR 柱) 扩展到 6 km 以上 (图 2c), 该位置 KDP 在 6 km 以下为缺测区, 7~9 km 为大值区 (图 2d), 说明中低层强上升气流将大量液态水输送至较高高度, 为冻结雨滴提供了动力抬升条件 (潘佳文等, 2021); 6 min 后, 该地区观测到直径为 5 cm 以上的大冰雹并伴局地雷暴大风。另外, 山西南部强单体速度剖面 (图略) 高仰角对应风暴顶辐散, 辐散中心高度在 12 km 左右, 速度差达 26 m·s^{-1}, 对应散度值约为 0.9×10^{-2} s^{-1}, 表明上升气流强烈 (唐明晖等, 2023); 中低层有深厚辐合区 (DCZ), 最大径向速度差达 24 m·s^{-1} 以上 (图略), 向东南移动造成豫西济源局部出现 10~13 级大风, 这印证了俞小鼎等 (2020) 的结论, 即 DCZ 的识别可用来预警地面极端大风。

该时段黑体亮温 (TBB) 上 (图 2e), 豫西附近存在两个孤立的 β 中尺度对流云团, 表现为具有明显的东西向长轴且边界光滑的椭圆型云团, 中心亮温低至−72 ℃, 亮温梯度大值区主要位于其西南一侧。

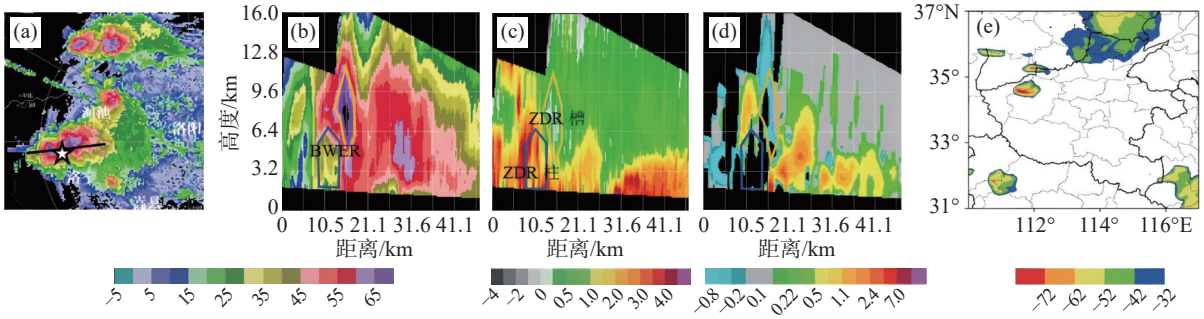


图 2 2022 年 7 月 25 日 15 时 30 分洛阳双偏振雷达组合反射率因子 (a, 单位: dBz) 及沿图 a 黑线的雷达反射率因子剖面 (b, 单位: dBz)、差分反射率因子 (c, 单位: dB)、差分相移率 (d, 单位: °·km^{-1}) 剖面和河南及其周边的黑体亮温 (TBB) (e, 单位: ℃) (图 a 中白色五角星为大冰雹位置, 图 b—d 中蓝色和黄色闭合区分别为强上升气流区和大冰雹区)

Fig. 2 The (a) composite reflectivity (unit: dBz) by Luoyang dual polarization and the cross section of (b) reflectivity (unit: dBz), (c) differential reflectivity (unit: dB) , (d) specific differential phase (unit: °·km^{-1}) along the black line in Fig. 2a, (e) TBB (unit:℃) in Henan and its vicinity at 15:30 BT on 25 July 2022 (The white pentagram in Fig. 1a represents location of huge hail, the blue and yellow closed areas in Fig. 2b-d represent strong updraft and huge hail regions, respectively)

3.2 组织发展阶段

7 月 25 日 17—20 时, 镶嵌强单体的雷暴群逐渐发展为东北—西南向高度组织化的线状 MCS (图 1d、e), 40 dBz 以上长度超过 100 km、长宽比大于 5∶1、生命史不低于 1 h, 满足俞小鼎 (2020) 定义的我国飑线标准。该阶段河南中部出现区域性雷暴大风和短时强降水。

17 时 53 分郑州雷达组合反射率因子 (图 3) 显示, 此时对流单体群逐渐连成一条强回波带, 北段镶嵌了一个尺度较小的弓形回波, 最强回波核超过 60 dBz, 弓形顶端回波剖面 (图 3b) 显示前侧风暴发展旺盛, 风暴顶超过 12 km, 55 dBz 回波高度伸展到 9~10 km, 呈现高悬强回波结构, 前侧伴 BWER, 对应 ZDR 柱伸展至 6~7 km, 较初生阶段伸展高度略偏低, 但中心值增大至 5 dB (图 3c)。ZDR 柱其上部 55~60 dBz 高值区对应 KDP 为 3~7 °·km^{-1} 的大值区 (图略), 表明有大量的液态水聚集; 而 ZDR 柱后侧出现 ZDR、KDP 及 Z 的小值区, 即表明液态水粒子和

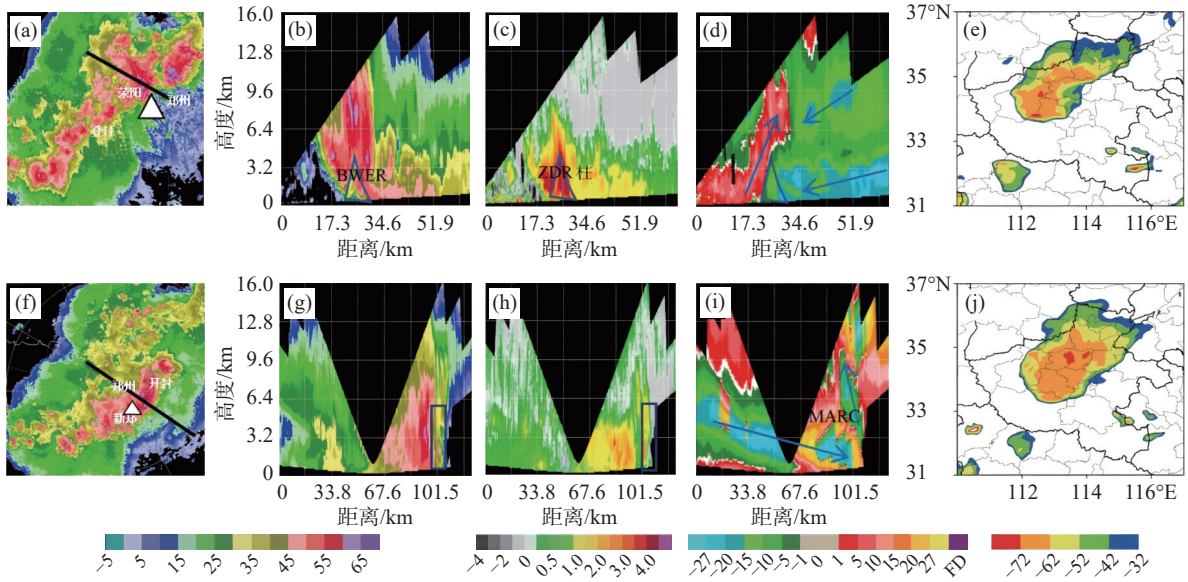


图 3 2022 年 7 月 25 日 17 时 54 分 (a—e)、18 时 53 分 (f—j) 郑州双偏振雷达组合反射率因子 (单位: dBz) 及分别沿图 a、f 中黑线的反射率因子 (b、g, 单位: dBz)、差分反射率因子 (c、h, 单位: dB)、径向速度 (d、i, 单位: m·s^{-1}) 剖面和河南及其周边的 TBB (e、j, 单位: ℃) (图 a、f 中白色三角形为灾害性大风位置, 图 d、i 中蓝色箭头为倾斜上升和下沉气流, 图 b、c、g、h 中蓝色闭合区为强上升气流区)

Fig. 3 The (a, f) composite reflectivity (unit: dBz) by Zhengzhou dual polarization and the cross section of (b, g) reflectivity (unit: dBz), (c, h) differential reflectivity (unit: dB), (d, i) radial velocity (unit: m·s^{-1}) along the black line in Fig. 3a, 3f, (e, j) TBB (unit:℃) in Henan and its vicinity at (a-e) 17:54 BT and (f-j) 18:53 BT on 25 July 2022 (The white triangles in Fig. 3a and Fig. 3f represent location of hazardous gale. The blue arrows in Fig. 3d and Fig. 3i represent slantwise ascending and descending stream, and the blue closed areas in Fig. 3b, Fig. 3c, Fig. 3g and Fig. 3h represent strong updraft region)

数量少。此时速度剖面 (图 3d) 显示 3 km 以下伴有 27 m·s^{-1} 的后侧入流急流并延伸至近地面, 有利于地面大风出现; 且中上层也有较强的干冷空气入侵, 可促进雨滴粒子蒸发, 有利于下沉气流进一步增强; 此时地面出现 10 级以上的灾害性大风。该时段 TBB 上 (图 3e), 云团尺度迅速增大, −62 ℃ 以下亮温低值区爆发性增长为 α 中尺度云团, 低值中心从西南侧移至中心, 东北侧出现卷云砧。

18 时 53 分飑线整体呈现出弓形雏形, 对流强回波带水平长度达 150 km 以上, 宽度约为 20~30 km, 层状云主要位于 LMCS 的后侧 (图 3f); 剖面显示强风暴呈竖直结构, 质心高度较前期下降至 3~4 km (图 3g), 前侧仍对应 ZDR 柱, 但中心值减小至 1.5~2.5 dB (图 3h), 说明雨滴粒子直径较前期明显减小。图 3i 显示此时低层后侧入流急流明显增强, 4~6 km 高度处 27 m·s^{-1} 的后侧环境入流倾斜下沉进入飑线后侧层状云区, 到 3 km 以下出现速度模糊, 经退模糊计算 (俞小鼎等, 2012), 1.2 km 高度以下的最大径向风速约 31 m·s^{-1}。强的后侧倾斜下沉气流不仅有利于推动飑线系统快速移动, 还有利于降水粒子蒸发产生负浮力, 促进下沉气流进一步增强。在低层速度模糊区之上存在显著的中层径向辐合 (MARC), 最大速度差约 35 m·s^{-1}, 有利于对流向弓形回波演变并随着风暴移动路径形成地面灾害性大风 (俞小鼎等, 2020); 对应此时红外亮温 (图 3j) 显示, 河南北中部−52℃ 以下 TBB 面积达 5×10^4 m^2 以上, 中心值达−72 ℃ 以下。18—19 时, 24 个国家站和区域站站出现 10 级以上大风, 13 站出现 50 mm·h^{-1} 以上短时强降水。

3.3 成熟维持阶段

7 月 25 日 20—22 时飑线系统逐渐表现为高度组织化的典型弓形回波结构, 快速向东偏南移动 (图 1f—h), 造成河南中东部大范围的雷暴大风和局地短降水。由 20 时 30 分雷达组合反射率因子 (图 4a) 可见, 飑线移至豫东开封、商丘、周口至豫中漯河、平顶山一带, 呈东北—西南向, 水平长度超过 300 km, 中心回波强度达 55~60 dBz, 移速达 60~100 km·h^{-1}, 后侧存在宽广的层状云回波区, 回波强度达到 35~45 dBz。沿弓形顶点附近强单体做剖面 (图 4b) 可见, 风暴顶仍达 12km, 呈竖直结构, 但雷达回波中心强度较上阶段有所减弱, 强回波区宽度变窄和高度也逐渐下降, 说明此时弓形回波上前侧对流单体发展强度有所减弱; 通过 ERA5 再分析资料诊断的垂直运动 (图略) 也可验证这一点。速度图 (图略) 上南北两端分别呈现出显著的反气旋和气旋式切变, 其剖面上 (图 4c) 后侧入流急流高度自 7 km 附近伸至

2~3 km, 不仅推动系统快速东移, 其造成的动量下传作用还有利于产生大范围大风 (徐晓芳和邹玲, 2024)。此时, 前侧入流虽逐渐跃居深厚强出流之上, 可能导致主体前侧暖湿入流被切断, 但强冷池出流不断触发前侧零散对流新生, 对流系统新陈代谢作用使之快速向前传播。TBB 上显示−52 ℃ 以下云顶面积继续增大, 而−62 ℃ 以下低亮温区却有所减小; 除了上风方, 云团四周均出现了明显的卷云羽 (图 4d)。

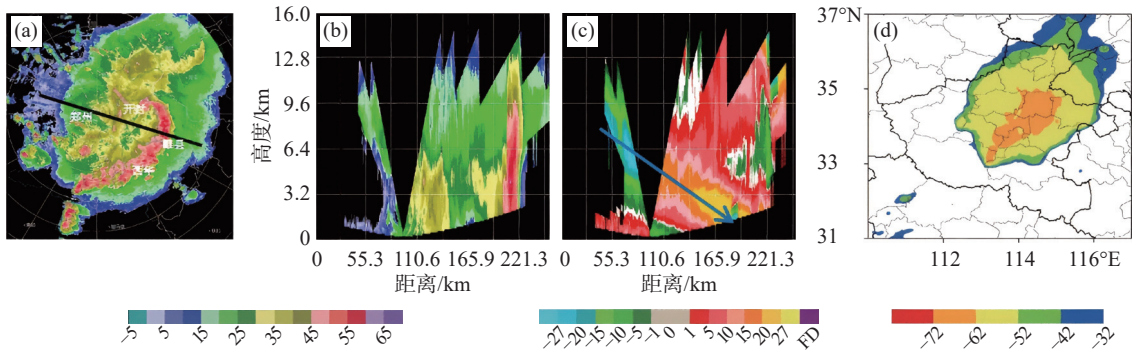


图 4 2022 年 7 月 25 日 20 时 30 分郑州站雷达组合反射率因子 (a, 单位: dBz) 及沿图 a 黑线所作的雷达反射率因子 (b, 单位: dBz)、径向速度 (d, 单位: m·s^{-1}) 剖面和该时刻河南及其周边 TBB (d) (图 c 中蓝色箭头为倾斜下沉气流)

Fig. 4 (a) Composite reflectivity (unit: dBz) by Zhengzhou dual polarization and the cross section of (b) reflectivity (unit: dBz), (c) radial velocity (unit: m·s^{-1}) along the black line in Fig. 4a, (d) TBB (unit: ℃) in Henan and its vicinity at 20:30 BT on 25 July 2022 (The blue arrow is slantwise descending stream)

3.4 减弱断裂阶段

7 月 25 日 22 时之后该飑线系统东移过程中强度逐渐减弱, 并从中部开始断裂。北段呈南北向, 快速自豫东移出河南移入安徽; 南段与西侧零散对流略有合并发展, 呈准东西走向, 并缓慢向南移动。26 日 00 时 30 分雷达组合反射率因子 (图略) 表明, 大尺度弓状回波已经断裂为南北两段, 北段回波移速较快, 南段回波移速缓慢, 南移过程中与其后侧对流有所合并, 在豫西南再度缓慢发展, 造成短时强降水和局地大风; 垂直剖面图 (图略) 显示, 强回波高度下降且强度减弱, 强回波后侧在 2.5~3.0 km 高度上已出现明显的零度层亮带, 也表明系统整体强度逐渐减弱。

综上, 零散对流单体在河南中西部快速组织发展成飑线并向东移动过程中长时间维持是造成此次大范围强对流天气的主要原因, 而对其发展程度和维持时间的估计不足是造成此次预报失误的主要原因, 以下将针对其触发与维持的天气背景、环境条件及中尺度机制进行分析。

4 环流背景及环境条件

4.1 环流背景

2022 年 7 月 25 日 08 时 (图 5a), 西太平洋副热带高压 (以下简称副高) 呈东西带状分布, 588 dagpm 等高线北界稳定维持在 32°N 附近, 河南位于副高北

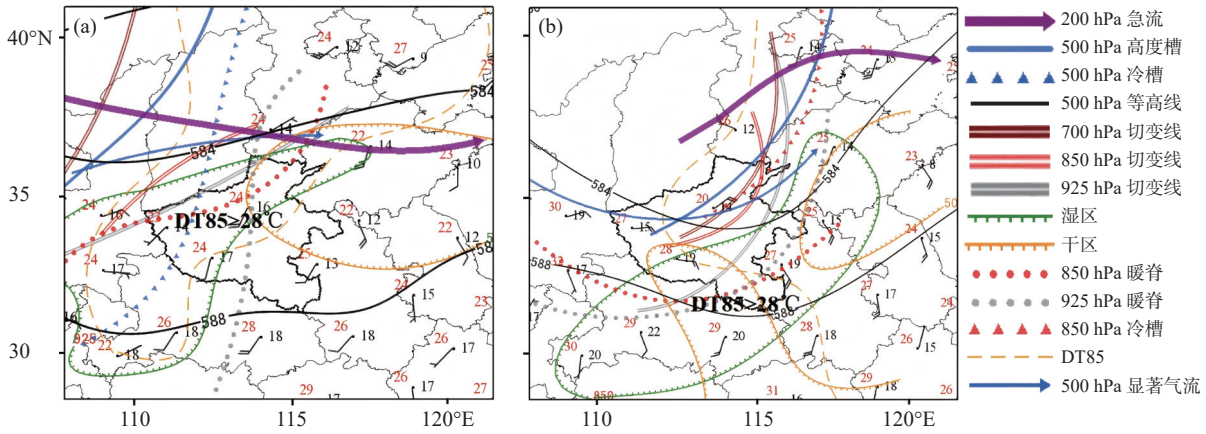


图 5 2022 年 7 月 25 日 08 时 (a)、20 时 (b) 高空综合分析叠加 925 hPa 风场 (风羽, 单位: m·s^{-1}) 及温度 (红色数字, 单位: ℃)、比湿 (黑色数字, 单位: g·kg^{-1})

Fig. 5 Distribution of upper-level composite chart added with the wind (wind barb, unit: m·s^{-1}), temperature (red numbers, unit: ℃) and specific humidity (black numbers, unit: g·kg^{-1}) of 925 hPa at (a) 08:00 BT and (b) 20:00 BT on 25 July 2022

部, 上游河套地区 500 hPa 高空槽携带冷空气东移, 温度槽超前于高度槽, 且超前于 700 hPa 切变线, 前倾结构明显; 850 hPa 暖脊伸向河南西北部, 850 与 500 hPa 温度差 (DT85) 超过 29 ℃, 显著的热力不稳定对强对流天气的发生有利; 925 hPa 河南大部温度露点差 (T-T_d) ≤2 ℃, 中东部 500 hPa 有干层, 上干下湿有利于风雹天气; 此外, 河南位于 200 hPa 急流南侧的辐散区中, 提供有利的动力抬升条件。25 日 20 时 (图 5b), 500 hPa 副高稳定, 河套低槽东移至豫中地区, 河南中东部位于 500 hPa 槽前, 500 hPa 显著气流、低层 925 和 850 hPa 切变线附近, 动力条件增强; 700 hPa 冷槽伴低槽切变东移, 郑州站 12 h 降温达 5 ℃, 与豫南地区形成 7~8 ℃ 的强温度梯度, 锋生作用有利于垂直运动进一步增强; 与此同时, 豫西南湿层增厚至 850 hPa, 500 hPa 干层与其叠置, 南阳站 DT85 由 26 ℃ 增至 28 ℃, 其南侧 925 hPa 切变建立, 豫南水汽、热力及动力条件均有所加强。

4.2 环境条件

图 6 为基于 ERA5 计算的 25 日 17 时对流不稳定能量 (CAPE) 和 850 hPa 比湿, 可见河南大部处于 1 200 J·kg^{-1} 以上的高 CAPE 区, 豫中南地区 CAPE 高达 2 500 J·kg^{-1} 以上 (图 6a); 850 hPa 比湿上河南中南部大于 18 g·kg^{-1} (图 6b), 低层有利的水汽条件不仅仅为飑线提供充足的“燃料”, 也有利于短时强降水的发生; 此时豫西北 850 hPa 辐合线附近散度达 -8×10^{-5} s^{-1}, 对应垂直速度达−0.6 Pa·s^{-1} (图略), 为强对流天气的发生发展提供了一定的天气尺度强迫抬升作用。此外, FY-4A 高分辨率可见光图像 (图 6c) 显示, 25 日午后在低空切变线附近不断有积云在豫西地区形成发展, 河南大部存在对流云街, 也表明此时河南大部具有一定的水汽和条件不稳定, 有利于深厚湿对流发生发展 (俞小鼎等, 2012, 2020)。

图 7 为 7 月 25 日 08 时、20 时郑州探空图, 可见 25 日 08 时 (图 7a) 郑州 925—850 hPa 有浅薄湿层, 700—300 hPa 上多层有明显干空气存在, 郑州站 CAPE 为 350 J·kg^{-1}, 具备一定的水汽和条件不稳定条件; 最有利抬升指数 (BLI) 为-4.1 ℃, 达到典型飑线发生前的抬升指数阈值 (Meng et al, 2013)。但是对流抑制能量 (CIN) 较大 (469 J·kg^{-1}), 需要较强的抬

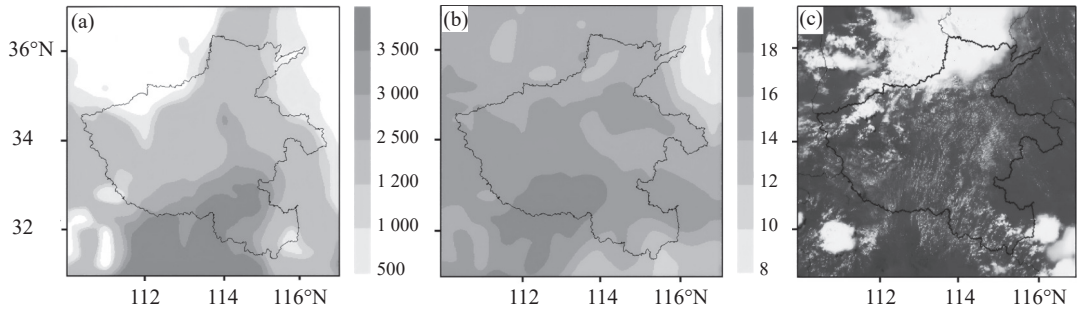


图 6 基于 ERA5 资料的 2022 年 7 月 25 日 17 时河南省对流不稳定能量 (a, 单位: J·kg^{-1})、850 hPa 比湿 (b, 单位: g·kg^{-1}) 场和 15 时可见光云图 (c)

Fig. 6 (a) Convective available potential energy (unit: J·kg^{-1}) and (b) specific humidity (unit: g·kg^{-1}) of 850 hPafield calculated by ERA5 at 17:00 BT, (c) visible cloud image at 15:00 BT on 25 July 2022 in Henan

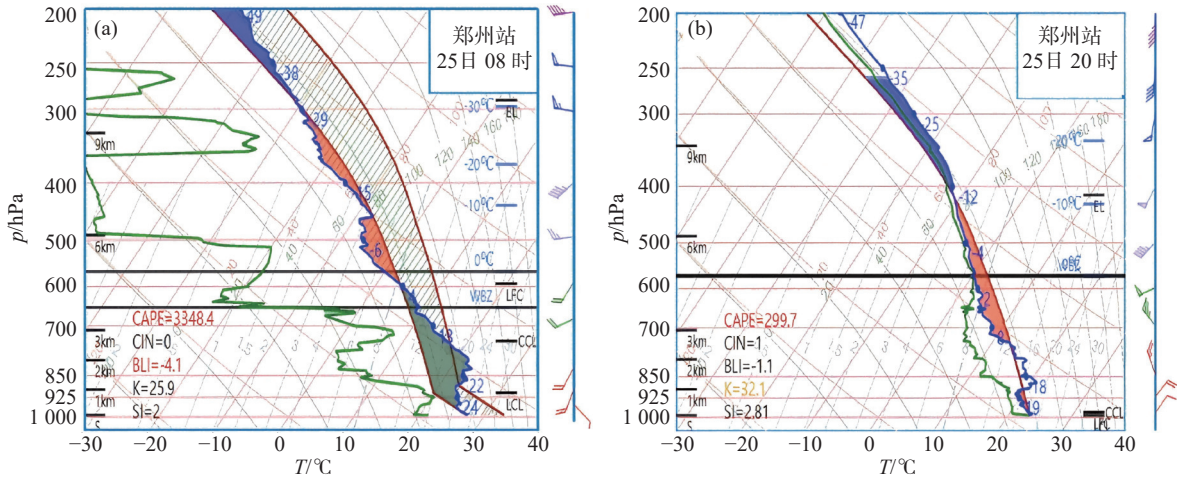


图 7 2022 年 7 月 25 日 08 时 (a)、20 时 (d) 郑州站 T-ln$p$ 图

Fig. 7 T-ln$p$ map of Zhengzhou station at (a) 08:00 BT, (b) 20:00 BT on 25 July 2022

升触发机制才能触发对流。考虑到午后近地面的增温增湿，使用对流前夕 17 时该站温度和露点订正探空，CAPE 增大至 3 348 J·kg^{-1}，CIN 减小至 0 J·kg^{-1}，表明经过辐射加热和平流作用，河南中部的大气不稳定度显著增大，大气层结具有显著的深厚对流潜势，为强对流发展提供了有利的能量条件。0~3 km 和 0~6 km 垂直风切变分别为 8.7 m·s^{-1} 和 10.7 m·s^{-1}，属于中等强度。20 时 (图 7b)，随着飑线过境，CAPE 迅速减弱至 299 J·kg^{-1}，而 0~3 km 和 0~6 km 垂直风切变分别增至 26.6 m·s^{-1} 和 23.1 m·s^{-1}，925—700 hPa 垂直风切变更是高达 34 m·s^{-1}，非常有利于对流组织化发展，此时显著的垂直风切变是造成飑线系统维持和发展的重要条件。另外，此时中高层湿层近饱和，700—900 hPa 存在干空气层，低层干空气的夹卷作用可加快中高层降水粒子的蒸发降温，有利于下沉气流增强以及地面大风的出现。

5 飑线触发与维持的机制

5.1 地形与地面辐合线的作用

地面辐合线在触发对流的同时也能够对对流系统起到组织作用，是飑线快速形成并长时间维持的重要原因。图 8a 为 25 日 14 时 30 分河南省地面显著流线、雷达组合反射率因子拼图与地形高度配置。从中可知，豫西附近地形西高东低，由于地形坡度的存在，造成边界层水平热力不均匀，形成较强的由东向西的温度梯度和上坡风，地面东南风增强与豫西山区形成的地形辐合及强迫抬升，有利于在山脉附近触发对流。此外，25 日午后至下午，受地面辐射及平流增温和北部弱冷空气扩散的共同影响，持续增强的东南风与偏北风在豫中西附近形成一条东北—西南向的地面辐合线，16—18 时对应辐合中心强度达 10^{-4} s^{-1} (图 8b)，豫西零散对流群在向东移动发展过程中，移至此辐合线附近迅速加强发展，组织化为线状中尺度对流系统，走向与辐合带基本一致。在飑线维持期间，出流边界 (地面辐合线) 始终位于飑线强回波前侧 (图 8c)，不断在飑线前侧触发新生对流，从而有利于飑线的长时间维持和前向传播。因此，地面辐合线对于此次飑线的触发、组织和长时间维持及传播均起到重要作用。

5.2 冷池效应

图 9 为飑线发生发展期间地面站点温度、露点及风场的分布，可见 25 日 16 时 (图 9a) 山西南部有零散对流向豫西北移动发展，雷暴下沉气流中降水粒子蒸发冷却在地面形成明显的冷池，地面降温幅度达 10 ℃ 左右；而对流系统南部豫中附近地面因辐射和平流的共同作用形成显著的高温高湿区，地面温度升至 34 ℃，露点温度增至 26 ℃ 左右。对流系统处于冷池前侧和高温高湿区后侧的温度梯度高值带/能量锋区中。18 时 (图 9b)冷池南压发展，豫西北及豫西分别出现 8 ℃ 以上的负变温中心，且豫西北伴有+3.0 hPa 以上的正变压中心 (图略)。冷池前侧偏北风增大，地面辐合增强，零散单体迅速沿冷池出流辐合线组织加强。另外，冷池前沿的温湿密集带不断激发不稳定能量释放，有利于强烈上升气流的维持。19 时上述两个显著降温区合并加强，中心达 −10 ℃，对应正变压区也随之增强，中心达到+5.9 hPa (图略)；与此同时，郑州雷达风廓线 (VWP) 产品 (图略) 显示 3 km 偏西/西北风逐渐增至 20 m·s^{-1} 以上，近地面偏东风也逐渐增强。冷池和垂直风切变同步增强的动态平衡有利于对流系统发展。此时，飑线

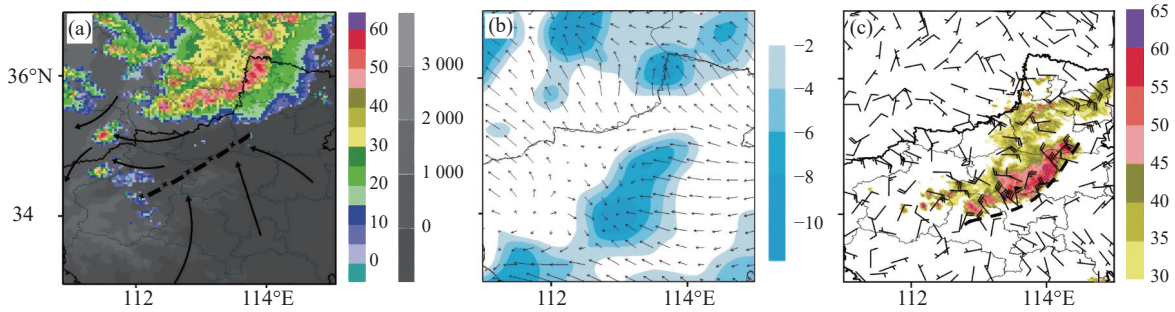


图 8 2022 年 7 月 25 日 14 时 30 分河南省地面显著流线 (黑色箭头线)、雷达组合反射率因子拼图 (填色, 单位: dBz) 与地形高度 (阴影, 单位: m) (a), 18 时地面风场 (风矢量) 与散度场 (填色, 单位: 10^{-5}s^{-1}) (b), 19 时郑州雷达组合反射率因子 (填色, 单位: dBz) 及地面风场 (风羽, 单位: m·s^{-1}) (c) (图 a、c 中虚线为地面辐合线)

Fig. 8 Distribution of (a) surface significant stream(black arrow line) and composite reflectivity mosaic (color-filled, unit: dBz) at 14:30 BT added with terrain height (shaded, unit: m), (b) surface wind field (wind vector) and divergence field (color-filled, unit:10^{-5}s^{-1}) at 16:00 BT, (c) composite reflectivity (color-filled, unit: dBz) by Zhengzhou radar added with surface wind field (wind barb, unit: m·s^{-1}) at 19:00 BT on 25 July 2022 in Henan (dashed line in Fig. 8a and Fig. 8c represent the surface convergence line)

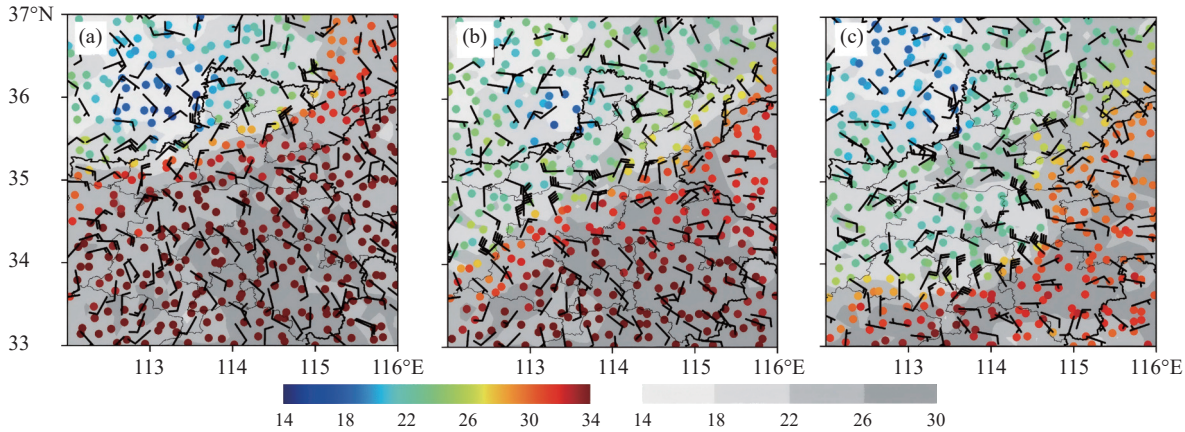


图 9 河南省 2022 年 7 月 25 日 16 时 (a)、18 时 (b)、20 时 (c) 地面站点温度 (彩色散点, 单位: ℃)、露点 (灰色阴影, 单位: ℃)、风场 (风羽, 单位: m·s^{-1}) 分布

Fig. 9 Distribution of surface temperature (color scatters, unit: ℃) and dew point (gray shaded, unit: ℃) and wind field (wind barb, unit: m·s^{-1}) at (a) 16:00 BT, (b) 18:00 BT, (c) 20:00 BT on 25 July 2022 in Henan

在豫中附近强烈发展。20 时 (图 9c) 冷池范围显著向东南方向扩张, 使得冷池出流与偏东暖湿入流持续辐合。另外, 虽正变压中心和负变温中心略有减弱, 但 9 ℃ 左右的负变温范围明显增大, 0—3 km 垂直风切变也逐渐增至 24 m·s^{-1} (图略), 冷池和垂直风切变形成的涡度平衡有利于系统的维持。之后, 西北风持续增强, 导致温湿高梯度带和弓状回波向东南凸起, 并推动飑线快速向东南移动。

5.3 对流合并

对流合并包括相邻孤立对流单体合并、对流单体与对流系统合并等, 有利于对流系统发展和生命期增长 (侯淑梅等, 2018)。苗爱梅等 (2017)、俞小鼎等 (2020) 指出新生积云带并入飑线风暴是飑线系统发展、维持不可或缺的因素。飑线形成初期, 零散对流在山西南部和豫西弱辐合区形成后移速较慢, 其外围出流在附近的高温高湿区无规则地触发新单体, 形成组织性较差的雷暴群; 17 时 (图 10a) 豫西地区多单体在辐合线附近合并, 演变为东北—西南向 LMCS, 强回波前侧有南北走向的小积云线。这种由对流单体组成的积云线是冷池出流与东南暖湿入流辐合触发, 位于飑线前部。随着 LMCS 东移, 逐渐与小积云线合并发展, 有利于飑线进一步发展增强。18—19 时 (图 10b) , 飑线北段与豫北残余强回波合并, 致使其强烈发展, 此时实况上多站出现 10 级以上大风和 50 mm 以上的短时强降水。20 时 (图 10c) 飑线前侧不断有新生对流与东移飑线合并, 有利于快速向前传播并长时间维持。

5.4 对流自组织

飑线自身高度的自组织结构建立的正反馈机制有利于其发展和维持 (王秀明等, 2012)。25 日夜里, LMCS 已经发展为组织性较强的对流系统, 但此时近地面热力条件由于日变化不稳定度显著减小。19 时 30 分 (图 11a), 弓形回波顶点曲率最大处西侧出现明显的后侧入流缺口, 速度图上对应显著出流区 (主出流), 最大径向速度达到 31 m·s^{-1} (图 11b)。在主出流以北, 中低层存在相对风暴移向的入流 (主入流), 对应飑线北段入流缺口。以上分析可见, 飑线系统主出流和北部主入流相互错开的水平结构表现出水平

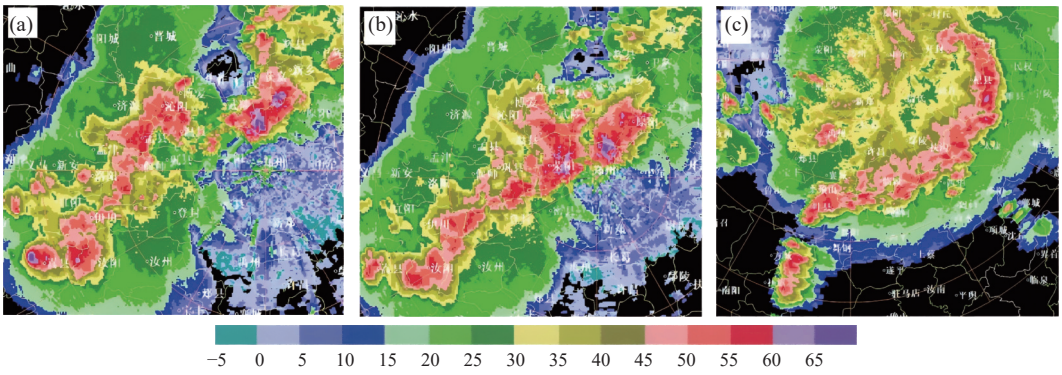


图 10 2022 年 7 月 25 日 17 时 (a)、18 时 (b) 及 20 时 (c) 郑州雷达组合反射率因子 (单位: dBz)

Fig. 10 Composite reflectivity (unit: dBz) by Zhengzhou radar at (a) 17:00 BT, (b) 18:00 BT, (c) 20:00 BT on 25 July 2022

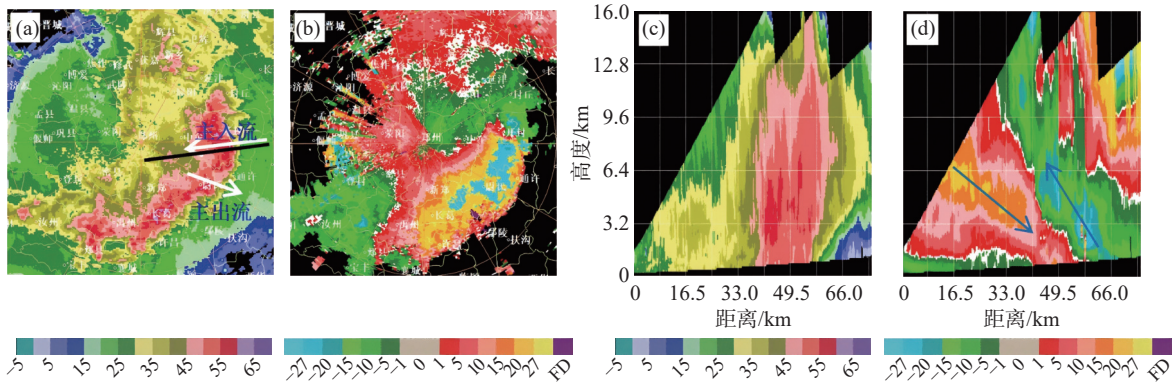


图 11 2022 年 7 月 25 日 19 时 30 分郑州雷达组合反射率因子 (a, 单位: dBz), 0.5°仰角径向速度 (b, 单位: m·s^{-1}) 及沿图 a 黑线所做的雷达反射率因子 (c, 单位: dBz) 和径向速度 (d, 单位: m·s^{-1}) 剖面 (图 a 中白色箭头为主入流和主出流, 图 d 中蓝色箭头为倾斜上升和下沉气流)

Fig. 11 (a) Composite reflectivity (unit: dBz), (b) radial velocity (unit: m·s^{-1}) at 0.5 elevation angle and the cross section of (c) reflectivity (unit: dBz), (d) radial velocity (unit: m·s^{-1}) along the black line in Fig. 11a by Zhengzhou dual polarization at 19:30 BT on 25 July 2022 (The white arrows are main inflow and outflow in Fig. 11a and Fig. 11b. The blue arrows are slantwise ascending and descending stream in Fig. 11d)

方向的自组织结构 (张宁等, 2017)。垂直方向上, 强风暴剖面显示对流前侧低层存在弱回波区 (图 11c), 对应前侧斜升气流径向速度超过 20 m·s^{-1}, 表明环境入流较强。强风暴后侧的降水粒子拖曳和蒸发作用加强了下沉气流, 在近地面风暴前沿形成 20 m·s^{-1} 的阵风出流和阵风锋。环境暖湿气流经阵风锋以较陡的角度倾斜进入飑线, 并在风暴顶形成强辐散, 有利于风暴发展; 同时, 斜升气流与倾斜下沉气流在中层形成了 MARC, 3—6 km 径向速度差达 35 m·s^{-1} (图 11d), 中层辐合带的存在加速了风暴向带状飑线发展 (俞小鼎, 2020)。

飑线的这种环境入流和系统出流共存的水平结构、中低层辐合和高层辐散共存的垂直结构体现了高度的自组织结构: 系统出流形成的阵风锋决定了暖湿入流强度, 而暖湿入流的增强又进一步促进了高层辐散和中层辐合的强度, 形成正反馈机制; 中层辐合不仅增强了飑线系统的垂直运动, 还通过补偿下沉运动影响系统出流和低层辐合的范围及强度, 进一步巩固了飑线的自组织结构。

6 结论与讨论

本文综合利用地面、高空常规观测、双偏振雷达、雷达拼图、FY-4A 卫星和 ERA5 再分析数据, 对 2022 年 7 月 25 日河南一条长生命史飑线的演变特征、环流形势、环境条件及触发与维持机制等进行研究, 得到的主要结论如下:

(1) 飑线演变分为初生阶段、组织发展、成熟维持和减弱断裂 4 个阶段。初生阶段零散孤立单体触发并逐渐发展为对流旺盛的雷暴单体群, 强单体发展高度最高、中心强度最强, 其右后侧伴有界弱回波区、显著 ZDR 柱; 组织发展期雷暴群迅速合并组织成飑线, 强单体发展高度、中心强度均较前一阶段稍弱, 有界弱回波区和 ZDR 柱位于其前侧, 前向传播显著, 后侧入流急流发展; 成熟维持期飑线尺度进一步增大, 呈现典型弓形结构, 南北两端分别呈现气旋性和反气旋性切变; 减弱断裂阶段飑线强度减弱并从中部断裂为南北两段, 北段迅速东移移出, 南段移速缓慢并略有发展。

(2) 飑线过程发生在副高稳定、低槽切变东移的环流形势下, 午后近地面辐射和平流作用为飑线提供了能量。显著的中层干空气、较大的对流层中低层垂直减温率和对流有效位能、中等强度的深层垂直风切变, 为飑线前期发生发展提供了有利条件; 强烈的垂直风切变为飑线后期维持起到重要作用, 这也是飑线系统生命史较长的原因之一。

(3) 地形抬升和地形辐合对飑线初生起到重要作用, 零散对流在地面辐合线附近组织成线状对流系统。冷池出流及中尺度温湿密集带加强地面辐合, 激发新生单体; 另外, 冷池和垂直风切变同步增强的动态平衡也有利于飑线维持。线状对流系统移动中与其前方的积云线、对流单体的合并是飑线发展和维持的重要因素。水平方向上环境入流和系统出流共存、垂直方向上中低层辐合和高层辐散共存的高度自组织化结构, 也有利于飑线长时间维持。

值得注意的是, 本次飑线过程既不同于常出现于河南地区的冷涡/西北气流型飑线 (王秀明等, 2012; 牛淑贞等, 2012), 也不同于槽前西南气流型飑线 (梁俊平和张一平, 2015)。冷涡/西北气流型飑线

常伴中高层强干冷空气南下发生, 中高层西北或偏西急流形成强烈的深层垂直风切变, 边界层存在浅薄湿层, 产生的强对流天气以雷暴大风、冰雹天气为主, 可能局部伴有短时强降水; 西南气流型飑线主要发生在高空槽前, 低层暖平流明显且水汽充沛, 配合中上层有一定干层, 低空急流造成对流层中下层存在较强的垂直风切变, 产生的强对流天气以短时强降水和雷暴大风为主; 而本次飑线过程发生在副高稳定、低槽切变东移背景下, 过程前期动力强迫弱, 不存在中低空急流, 冷暖平流也不及上述两类明显, 预报难度大。研究发现, 地形抬升和地形辐合线为飑线初生提供了触发机制, 冷池出流、对流合并以及成熟阶段飑线呈现的自身高度组织结构造成飑线强烈发展并长时间维持。另外, 双偏振雷达产品有助于深入分析对流系统演变的精细化结构。然而, 本文立足河南地区, 并未对移出河南后的飑线残余系统以及对下游地区的影响进行分析, 基于数值模拟的飑线精细化结构研究和下垫面影响研究也有待在未来开展。此外, 本次过程中多站出现极端强对流天气, 其形成机制将在今后的研究中进一步分析。

参考文献 (References):

鲍旭炜, 谈哲敏.2010.二维多单体雷暴系统中对流单体生成和发展的新机制[J].气象学报,68(3):296−308. Bao X W, Tan Z M. 2010. A mechanism for the convective cell regeneration and development within a two-dimensional multicell storm [J]. Acta Meteorological Sinica,68(3):296−308 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2010.030

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[J].气象,39(8):945−954. Chen T, Dai K, Zhang F H. 2013. Study on ambient condition and initialization mechanism of convection in a severe squall line storm event in North China [J]. Meterological Monthly,39(8):945−954 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0525.2013.08.001

丁一汇,李鸿洲,章名立,等.1982.我国飑线发生条件的研究[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 lines in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,6(1):18−27 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1982.01.03

高彦青,孙璐,马旭林,等.2022.飑线结构和强度对低层湿度和环境垂直风切变的敏感性研究[J].大气科学学报,45(6):938−947. Gao Y Q, Sun L, Ma X L, et al. 2022. The sensitivity of the structure and strength of squall line to low-level humidity and environmental vertical wind shear [J]. Transactions Atmospheric Sciences,45(6):938−947 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191014001

公衍铎,郑永光,罗琪.2019.冷涡底部一次弓状强飑线的演变和机理[J].气象,45(4):483−495. Gong Y D, Zheng Y G, Luo Q. 2019. Evolution and development mechanisms of an arc-shaped strong squall line occurring along the south side of a cold vortex [J]. Meteorological Monthly,45(4):483−495 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2019.04.004

侯淑梅,闵锦忠,刁秀广,等.2018.飑线发展过程中回波合并的特征分析[J].大气科学学报,41(3):367−376. Hou S M, Min J Z, Diao X G, et al. 2018. Analysis of echoes merging characteristics during squall line development process [J]. Transactions Atmospheric Sciences,41(3):367−376 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20171021004

姬雪帅,杜晖,张曦丹,等.2023.基于 VDRAS 资料探究河北中南部一次弓状强飑线的演变和机理[J].沙漠与绿洲气象,17(3):44−51. Ji X S, Du H, Zhang X D, et al. 2023. Evolution and development mechanisms of an arc-shaped strong squall line occurring in the center-south part of Hebei Province based on VDRAS data [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(3):44−51 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2023.03.006

雷蕾,孙继松,陈明轩,等,2021.北京地区一次飑线的组织化过程及热动力结构特征[J].大气科学,45(2):287-299. Lei L, Sun J S, Chen M X, et al. 2021. Organization process and thermal dynamic structure of a squall line in Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,45(2):287-299 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2005.19198

李姝霞,冀翠华,朱斌,等.2023. 2022 年河南“7·25” 雷暴大风天气成因分析[J].气象与环境科学,46(4):49−58. Li S X, Ji C H, Zhu B, et al. 2023. Analysis of the causes of thunderstorm and windy weather in Henan on July 25, 2022s [J]. Meteorological and Envi-ronmental Science,46(4):49−58 (in Chinese). doi:10.16765/j.cnki.1673−7148.2023.04.006

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. Lang J P, Zhang Y P. 2015. Analysis on three severe convective weather events of southwest flow type in Henan August 2013 [J]. Meteorological Monthly,41(11):1328−1340 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−2015.11.003

苗爱梅,董春卿,王洪霞,等.2017. “0613”华北飑线过程的多普勒雷达回波特征[J].干旱气象,35(6):1015−1026. Miao A M, Dong C Q, Wang H X, et al. 2017. Characteristics of doppler radars echo during the squall line process in North China on 13 June 2016 [J]. Journal of Arid Meteorology,35(6):1015−1026 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006−7639(2017)−06−1015

牛淑贞,张一平,席世平,等.2012.基于加密探测资料解析 2009 年 6 月 3 日商丘强飑线形成机制[J].暴雨灾害,31(3):255−263. Niu S Z, Zhang Y P, Xi S P, et al. 2012. Analysis on the formation mechanism of a strong squall line based on intensive observation data in Shangqiu on June 3, 2009 [J]. Torrential Rain and Disasters,31(3):255−263 (in Chinese)

潘佳文,高丽,魏鸣,等.2021.基于 S 波段双偏振雷达观测的雹暴偏振特征分析[J].气象学报,79(1):168−180. Pan J W, Gao L, Wei M, et al. 2021. Analysis of the polarimetric characteristics of hail storm from Sband dual polarization radar observations [J]. Acta Meteorologica Sinica,79(1):168−180 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2021.001

屈梅芳,俞小鼎,农孟松,等.2021.一次弱垂直风切变环境下飑线发展维持的成因分析[J].暴雨灾害,40(5):466−473. Qu M F, Yu X D, Nong M S, et al. 2021. Development and maintenance of squall line in a weak vertical wind shear environment [J]. Torrential Rain and Disasters,40(5):466−473 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2021.05.003

唐明晖,陈龙,陈鹤,等.2023.基于双偏振雷达资料的洞庭湖区一次强对

流过程的分阶段特征分析[J].暴雨灾害,42(6):692−703. Tang M H, Chen L, Chen H, et al. 2023. Staged characteristics analysis of a severe convection over the Dongting Lake area based on dual-polarization Doppler weather radar data [J]. Torrential Rain and Disasters,42(6):692−703 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−170

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. Wang X M, Yu X D, Zhou X G, et al. 2012. Study on the formation and evolution of“6.3”damage wind [J]. Plateau Meteorology,31(2):504−514 (in Chinese) doi:1000−0534(2012)02−0504−11

夏羽,李芳,汤淼,等.2023. 2017 年 7 月 29 日宜昌三峡坝区一次下击暴流过程的中尺度分析[J].暴雨灾害,42(2):200−210. Xia Y, Li F, Tang N, et al. 2023. Mesoscale analysis of a downburst process in Yichang three gorges dam area on 29 July 2017 [J]. Torrential Rain and Disasters,42(2):200−210 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2020−202

徐晓芳,邹玲.2024.阿坝州 2023 年一次弱降水雷暴大风天气过程分析[J].高原山地气象研究,44(S1):65-70. Xu X F, Zou L. 2024.Analysis of the Weather process of a weak precipitation and thunderstorm gale in Aba 2023 [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,44(S1):65-70 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2024.Z1.009

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[J].气象学报,70(3):311−337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M. 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection [J]. Acta Meteorologica Sinica,70(3):311−337 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2012.030

俞小鼎,王秀明,李万莉,等.2020.雷暴与强对流临近预报[M].北京:气象出版社. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al. 2020. The Nowcasting on Thunderstorms and Severe Convection [M]. Beijing:China Meteorological Press (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]. Meteorological Monthly,43(11):1383−1392 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2017.11.007

竹利,陈朝平,陈茂强,等.2018.川北飑线成熟阶段灾害性大风成因个例分析[J].暴雨灾害,37(2):164−173. Zhu L, Chen C P, Chen M Q, et al. 2018. Cause analysis of a disastrous gale event induced by squall line in the mature stage in northern Sichuan [J]. Torrential Rain and Disasters,37(2):164−173 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2018.02.008

Davis C A, Trier S B. 2007. Mesoscale convective vortices observed during BAMEX. Part I: Knematic and thermodynamic structure [J]. Monthly Weather Review,135(6):2029−2049. doi:10.1175/MWR3398.1

Meng Z Y, Yan D C, Zhang Y J. 2013. General features of squall lines in East China [J]. Monthly Weather Review,141(5):1629−1647. doi:10.1175/MWR−D−12−00208.1

Mulholland J P, Peters J M, Morrison H. 2021. How does vertical wind shear influence entrainment in squall lines [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,78(6):1931−1946. doi:10.1175/JAS−D−20−0299.1

Parker M D, Johnson R H. 2010. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems [J]. Monthly Weather Review,128:3413−3436 doi:10.1175/1520−0493(2001)129<3413:OMOMMC>2.0.CO;2

Rotunno R, Klemp J B, Weisman M L. 1988. A theory for strong, long-lived squall lines [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,45(3):463−485. doi:10.1175/1520−0469(1988)045<0463:ATFSLL>2.0.CO;2

Zheng L L, Sun J H, Zhang X L, et al. 2013. Organizational modes of mesoscale convective systems over central East China [J]. Weather Forecast,28:1081−1098. doi:10.1175/WAF−D−12−00088.1

(责任编辑 唐国瑛)