

一次飑线翻山增强引发极端大风的观测研究

韦惠红 王秀明 孔海妹 韩汶君 章翠红 孙成龙

Observational study of extreme winds induced by a mountain-crossing intensified squall line

WEI Huihong, WANG Xiuming, KONG Haimei, HAN Wenjun, ZHANG Cuihong, SUN Chenglong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11676/qxxb2025.20240065>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

山东一次飑线双偏振结构与地面降水滴谱特征分析

Characteristics of the dual-polarization structure and raindrop size distribution of a squall line in Shandong

气象学报. 2023, 81(2): 328–339 doi: [10.11676/qxxb2023.20220070](https://doi.org/10.11676/qxxb2023.20220070)

山东半岛海风锋在一次飑线系统演变过程中的作用

Impacts of sea breeze front over Shandong Peninsula on the evolution of a squall line

气象学报. 2021, 79(5): 717–731 doi: [10.11676/qxxb2021.056](https://doi.org/10.11676/qxxb2021.056)

一次强降水超级单体的双偏振雷达观测分析

Analysis of a high precipitation supercell based on dual polarization radar observations

气象学报. 2020, 78(1): 86–100 doi: [10.11676/qxxb2020.003](https://doi.org/10.11676/qxxb2020.003)

副热带高压背景下极端短时强降水的双偏振相控阵雷达观测分析

Analysis of an extreme flash rain event under the background of subtropical high based on dual-polarization phased array radar observations

气象学报. 2022, 80(5): 748–764 doi: [10.11676/qxxb2022.060](https://doi.org/10.11676/qxxb2022.060)

超强台风“莫兰蒂”（2016）内核微物理特征的双偏振雷达观测分析

Analysis of microphysical features in the inner core of super typhoon Meranti (2016) based on dual-polarization radar observations

气象学报. 2025, 83(2): 366–388 doi: [10.11676/qxxb2025.20240103](https://doi.org/10.11676/qxxb2025.20240103)

C波段双偏振雷达降水估计的误差分析与建模

Error analysis and modeling of C-band dual polarization radar quantitative precipitation estimation

气象学报. 2022, 80(2): 224–242 doi: [10.11676/qxxb2022.016](https://doi.org/10.11676/qxxb2022.016)



扫码关注公众号，获取更多信息！

一次飑线翻山增强引发极端大风的观测研究*

韦惠红¹ 王秀明² 孔海妹¹ 韩汶君¹ 章翠红¹ 孙成龙¹

WEI Huihong¹ WANG Xiuming² KONG Haimei¹ HAN Wenjun¹ ZHANG Cuihong¹ SUN Chenglong¹

1. 湖北省气象台, 武汉, 430074

2. 中国气象局气象干部培训学院, 北京, 100081

1. Hubei Meteorological Observatory, Wuhan 430074, China

2. China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081, China

2024-06-04 收稿, 2025-02-08 改回.

韦惠红, 王秀明, 孔海妹, 韩汶君, 章翠红, 孙成龙. 2025. 一次飑线翻山增强引发极端大风的观测研究. 气象学报, 83(5): 1169-1185

Wei Huihong, Wang Xiuming, Kong Haimei, Han Wenjun, Zhang Cuihong, Sun Chenglong. 2025. Observational study of extreme winds induced by a mountain-crossing intensified squall line. *Acta Meteorologica Sinica*, 83(5):1169-1185

Abstract Based on dual-polarization radar observations, surface data and ERA5 reanalysis product, an extensive propagation high wind event in Hubei province triggered by squall line is studied. Results show that in the environment with typical thunderstorm temperature and humidity profiles (wet downburst), the squall line originating in Southwest Henan province significantly enhanced after crossing Tongbai mountain, and resulted in a Derecho event in Hubei province. The direct reason for the enhancement of the squall line is that several isolated storms on the south side merged into the squall line. Further analysis reveals that the key mesoscale systems for the enhancement of the squall line included a shallow cold outflow from another squall line, an boundary-layer jet forced by the topography and the cold pool outflow of the squall line. The topographic effects include the blocking of cold pool outflow, the valley penetration of outflow, and the orographic uplift, which triggered isolated storms and provided a mesoscale ascending environment. After the squall line crossed the mountain, extreme winds in Guangshui were mainly caused by downward momentum transfer and divergence of strong downdrafts. The intense convective cells in the squall line were composed of graupels or small hails above the melting layer, and many small solid particles melted into large water droplets or water-covered ice cores near the melting layer. Significant evaporation under the melting layer significantly reduced the diameter of raindrops and liquid water content. This indicates that significant melting and evaporation are the main mechanisms for the formation of strong downdrafts in the storm. The results enhance our understanding of the effects of mesoscale topography on storms and physical processes of the formation of extreme winds.

Key words Squall line, Extreme wind, Crossing mountain, Dual-polarization radar

摘要 为增加对飑线发展及形成大风过程的认识, 基于双偏振雷达、地面加密观测站观测资料以及 ERA5 再分析资料等, 对一次飑线翻山增强引发湖北大范围极端强风事件进行了研究, 结果表明: 在典型雷暴大风温、湿度廓线(湿下击暴流)环境下, 源于河南省西南部的飑线翻越桐柏山过程中显著增强, 在湖北省引发 Derecho 事件。飑线翻山增强的直接原因是其南侧多个孤立风暴向北移动逐渐并入飑线。进一步分析表明, 受桐柏山阻挡先于飑线主体从山谷和豁口渗入山南侧的另一飑线的浅薄出流、受地形抬升的边界层急流以及飑线本身的冷池出流是导致飑线翻山增强的关键中尺度系统。地形作用主要表现在对山北侧冷池出流的阻挡、豁口渗透、喇叭口地形和山南侧抬升, 从而触发了孤立风暴并提供风暴发展的中尺度上升环境。飑线翻山后雷达低仰角径向速度跃增至 30 m/s 以上, 广水 14 级极端大风主要由动量下传、强下沉气流辐散等共同造成。飑线内强对流单体在融

* 资助课题: 国家自然科学基金项目(U2142203、42375018)、中国气象局复盘总结专项(FPZJ2023-084)、全国暴雨研究开放基金(BYKJ2024Z05)。

作者简介: 韦惠红, 主要从事强对流天气预报预警技术研究。E-mail: 61309957@qq.com

通信作者: 王秀明, 主要从事雷暴与强对流天气短时临近预报及灾害性强对流天气形成机理研究。E-mail: wangxm@cma.gov.cn

化层之上由霰或者小冰雹组成,大量小的固态粒子在融化层附近迅速融化为大水滴或水包冰粒,融化层之下强烈的蒸发使得雨滴直径显著减小,液态含水量显著下降,这表明高浓度水凝物粒子的强烈融化和蒸发作用是风暴内强下沉气流形成的主要机制。研究结果增加了对中尺度地形影响风暴发展以及极端强风形成物理过程的认识。

关键词 飏线, 极端大风, 翻山, 双偏振雷达

中图法分类号 P425.4+7 P458.1+23

1 引言

飏线可产生破坏性大风、冰雹和强降水等强对流天气,中国中东部地区由飏线引发的强对流天气频繁发生,造成严重的人员伤亡和财产损失(王秀明等, 2012; 盛杰等, 2019; 吴海英等, 2023; 黎玥君等, 2024)。相较于美国飏线,中国飏线形成在更高的湿度和相对弱的风垂直切变环境下(Meng, et al, 2013)。“RKW理论”(Rotunno, et al, 1988)从本质上解释了飏线系统与环境风垂直切变的相互作用问题(孙继松, 2023),陈明轩等(2012)利用三维数值云模式基于RKW理论解释了一次华北飏线系统的演变。飏线或弓形回波产生的极端强风由多种物理过程共同作用生成,包括强单体的下沉辐散气流、冷池密度流和后侧入流急流的动量下传等,飏线不同部位强风形成机制有所不同(王秀明等, 2012, 2023; 高帆等, 2023; 许长义等, 2023),因而飏线引发的极端强风是预报、预警的难点。后侧入流急流在层云部分因蒸发作用增强,极端强风由后侧入流急流、强对流单体下沉辐散和冷池密度流共同作用形成(王秀明等, 2012)。镶嵌在弓形回波内的中尺度涡旋极易引发局地强风,灾害大风可由后侧入流急流和中涡旋的线性叠加造成(Schekman, et al, 2016; Xu, et al, 2024)。

强风形成与云微物理过程直接相关,基于双偏振雷达可获取云中水凝物粒子相态,并可大致估测其浓度,从微物理结构的变化可分析强下沉气流形成的物理过程(王秀明等, 2023)。湿下击暴流主要由冰雹融化和融化后冰雹的蒸发作用形成,可以通过差分反射率(Z_{DR})槽口判识下击暴流(Kuster, et al, 2016; Mahale, et al, 2016)。此外,对于伴随强降水的孤立风暴,冷池密度流作用亦不可忽视。基于 Z_{DR} 柱(1 dB)高度、冷云顶高度、最大反射率因子、下沉反射率因子核内 Z_{DR} 梯度和 Z_{DR} 增至3 dB的高度这5个偏振量可提前数十分钟预判湿下击暴流(Amiot, et al, 2019)。统计表明,融化层附近的

比差分相移(K_{DP})核以及 K_{DP} 垂直梯度再加上环境条件可识别不同强度的下击暴流(Kuster, et al, 2021),准线性对流系统内中涡旋出现前 K_{DP} 先下降,中层 K_{DP} 核是中涡旋的潜在先兆信号,且产生致灾强风或龙卷的 K_{DP} 核值更大(Kuster, et al, 2024)。目前中国基于双偏振雷达探测资料主要进行冰雹和龙卷等相关研究(潘佳文等, 2021; 袁潮等, 2022; 吴举秀等, 2023),分析极端强风的研究很少。郭飞燕等(2023b)对飏线微物理特征分析发现,在飏线前沿至对流主体之间, Z_{DR} 随高度降低明显增大,这主要是小冰粒下落时融化所致。郭飞燕等(2023a)分析了3次伴强降水的湿下击暴流个例,发现 K_{DP} 核很清晰,但 Z_{DR} 槽口均距地较高,融化层之上含大量水滴。

山脉阻挡可造成气流被迫抬升、绕流或从谷地穿过,地形热力差异产生的中尺度热力环流、背风波以及不同高度云层间的“播撒”作用等均可影响风暴强度(Morales, et al, 2018; 陈涛等, 2024; 郑丽娜等, 2024)。中尺度精细地形可改变局地环流,并对中尺度对流系统(MCS)的组织 and 传播产生影响,导致局地产生极端强降水(韦惠红等, 2022; 陈博宇等, 2023)。太行山东麓迎风坡和喇叭口地形、快速下山雷暴冷出流与暖湿气流在山前辐合、下山雷暴结构以及平原地区热、动力条件等均对雷暴下山增强产生影响(王丛梅等, 2017; 雷蕾等, 2020; 程文静等, 2023),李晓兰等(2025)研究发现,“杜苏芮”台风残涡东南风在中小尺度山脉构成的迎风坡喇叭口地形内侧形成辐合中心,在辐合中心内出现极端强降水中心。王瑾婷等(2017)通过地形敏感性试验发现,飏线东移至大别山东部时,其边缘的山谷地形有利于飏线发展,谷风使得低层风速增大、上升运动增强。

2022年7月26日凌晨至上午,湖北省中东部受飏线东移南压影响,出现大范围、长历时大风过程,造成大量房屋倒塌、农作物受损等,直接经济损失达1亿元。初步分析发现,飏线从桐柏山北侧到

南侧翻山的过程中显著增强,增强的飊线在桐柏山南侧的广水县境内出现极端大风,最强阵风风速达45.4 m/s。翻山过程中飊线的增强是引发极端强风的关键。文中基于地面常规和加密气象站观测资料以及ERA5再分析等资料,对飊线翻越桐柏山后增强的物理过程进行分析,重点分析中尺度地形的影响,进而探讨极端大风形成原因,并基于双偏振多普勒天气雷达产品分析水凝物粒子相变等微物理过程对强下沉气流的影响,目的是提高对对流大风形成物理过程的科学认识,为提升极端强风精细预报、预警能力提供依据。

2 资料与方法

所用资料包括:(1)2022年7月25—26日高空、地面等常规观测资料,湖北省地面加密自动气象观测站逐5 min和逐时资料,用于分析飊线产生的环境条件以及地面气象要素变化。(2)河南省南阳站、信阳站,湖北省武汉站S波段雷达以及随州站S波段双偏振雷达逐6 min产品,用于分析径向速度、风暴演变及极端大风成因等,特别是微物理过程对极端强风的影响。(3)欧洲中期天气预报中心第5代全球大气再分析资料(简称ERA5再分析资料),空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,时间分辨率为1 h。

3 飊线过山增强分析

3.1 飊线过山增强引发大范围地面大风

源于河南省西南部的飊线进入湖北省后,

26日02—08时具有弓形回波结构的飊线在湖北省境内维持时间长达7 h(图1a),产生大范围雷暴大风并伴有强降水,飊线结构减弱后雷暴大风还在湖北维持了数小时,地面加密气象站有438站·次出现17 m/s以上大风,36站·次出现10级以上大风(图1b)。飊线及其引发的雷暴大风从鄂西北向鄂东南推进,26日02—04时飊线位于桐柏山附近,回波强度显著增强,且04时前后飊线翻山后在桐柏山南侧产生极端大风天气,在30 min、30 km范围内,广水县境内先后有6站极大风力超过10级(图1b红色三角标记处),其中最强风出现在十里站,04时12分达到了14级(45.4 m/s)。05时后飊线及其引发的强风范围持续扩大,但回波强度远不如翻山阶段,08时飊线回波强度减弱但强风范围达到最大,8级以上大风达145站·次,随后飊线回波减弱,雷暴大风强度和范围也明显减小,10时之后飊线对湖北省的影响结束。

3.2 环境条件分析

由图2可见,飊线发生在副热带高压(副高)外围高空槽后西北气流背景下。从7月25日20时至26日08时,槽区风速增大,500 hPa西北气流显著增强,从甘肃北部、陕西一直延伸到湖北形成一条 >10 m/s的西北风带,该西北风带相对湿度 $<40\%$ (图2绿色阴影区),表明有干空气入侵;700 hPa切变线较500 hPa槽线偏西、偏北,850 hPa包括湖北在内的整个华中区域处于一致的偏南气流中,表明中、低层天气系统呈前倾结构,对流层中层干气流

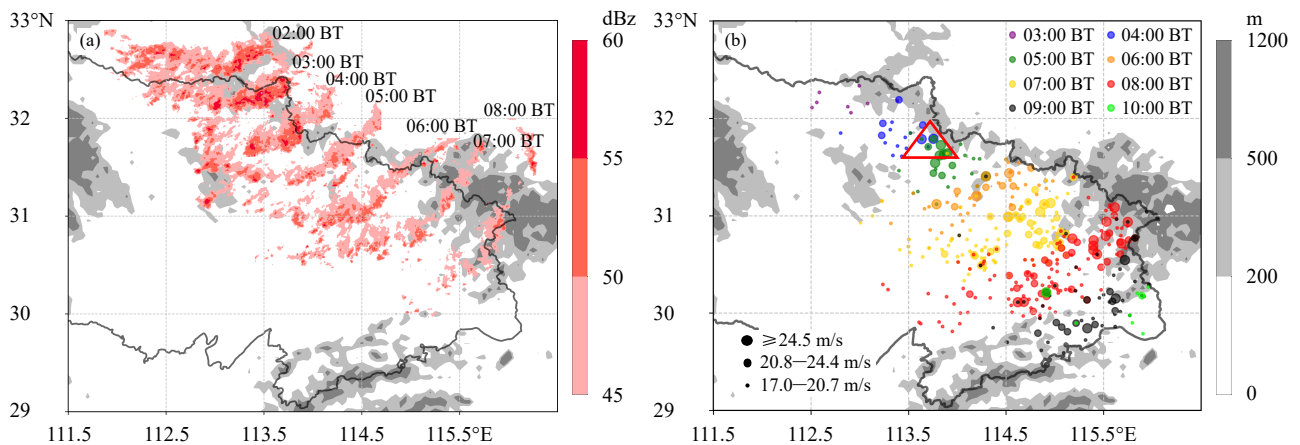


图1 2022年7月26日雷达回波(a,色阶)和地面极大风速(b)逐时演变(三角为广水极端大风位置)(灰阶为地形高度,下同)
 Fig. 1 Hourly evolution of radar echo (a, shaded) and ground maximum wind speed (b) in Hubei on 26 July 2022 (triangle represents the location of Guangshui extreme wind)(grayscale represents terrain height, the same hereafter)

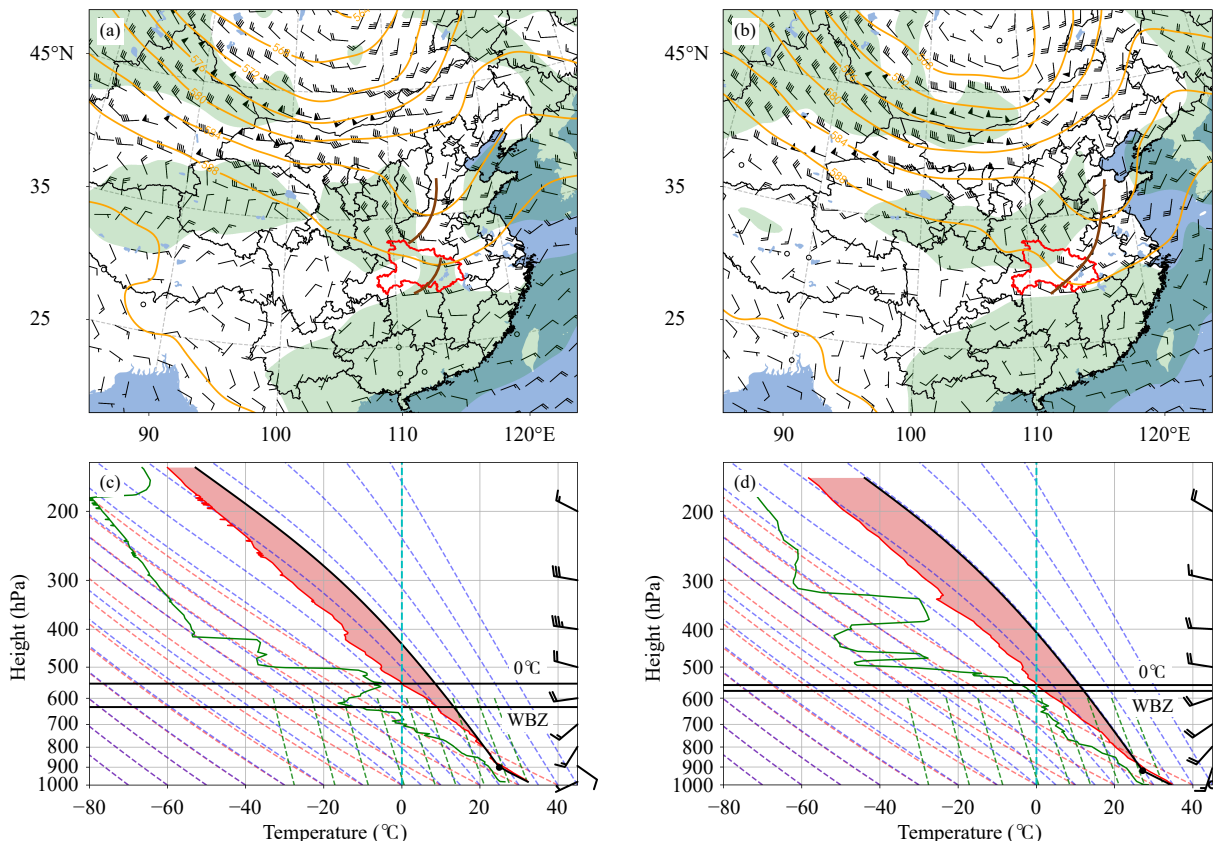


图2 2022年7月25—26日环流形势和探空分析(a、b分别为25日20时、26日08时500 hPa高度(黄色实线,单位: dagpm; 棕色实线为槽线)、风(风羽)和<40%相对湿度(绿色阴影),c、d分别为25日20时南阳、武汉探空)

Fig. 2 Analysis of circulation patterns and soundings during 25–26 July 2022 (a, b represent 500 hPa geopotential height at 20:00 BT 25 July and 08:00 BT 26 July (yellow solid contours, unit: dagpm; brown solid line represents trough line), wind (barb), and <40% relative humidity (green shaded), c, d represent soundings in Nanyang and Wuhan at 20:00 BT 25 July)

与低层西南暖湿气流叠置,环境条件有利于对流大风的形成。

25日20时南阳站和武汉站(图2c、d)探空显示,环境低层高湿,850 hPa露点均为20℃,8 g/kg比湿高度接近700 hPa,0℃层高度接近500 hPa,0℃层之上干层显著,500 hPa之上南阳站和武汉站最大温度露点差分别为39.3、42.6℃;加之边界层之上温度直减率大,850和500 hPa的温差分别为28.1、26.7℃,环境条件有利于雷暴大风形成,为典型雷暴大风的湿下击暴流形态(王秀明等,2013)。在低层高温、高湿且温度直减率大的环境条件下,大气层结极不稳定,南阳和武汉站对流有效位能(CAPE)分别达到了4220、6213 J/kg,对流抑制能量分别为25、35 J/kg,自由对流高度分别为875、875.4 hPa,表明对流极易触发。两站的0—3 km和0—6 km风垂直切变均小于10 m/s,一般来

说不利于有组织风暴的形成。但是该环境下形成较强阵风锋的概率高,在对流抑制能较小的环境下,阵风锋可持续触发对流从而使得风暴传播。

3.3 飊线翻山前后与孤立风暴合并增强

由图3可见,不同强度回波面积演变清晰地显示了飊线翻山增强过程(图3左侧坐标为 ≥ 35 dBz和 ≥ 45 dBz的面积,右侧坐标为 ≥ 55 dBz和 ≥ 60 dBz的面积),有两次明显跃增,第一次出现在02时36分,飊线翻山初期, ≥ 60 dBz回波面积增至38 km²,第二次出现在03时24分,飊线翻山后, ≥ 60 dBz回波面积增大至78 km²,最强回波强度达66 dBz,强回波面积和强度在飊线整个生命期最强;04时12分,广水极端大风发生后,55 dBz以上强回波面积骤减。由图4可见,26日01时18分飊线位于桐柏山(图4紫色实线区域)北侧,此时飊线东南侧的桐柏山上多个孤立强单体向北移动,翻山前到翻山

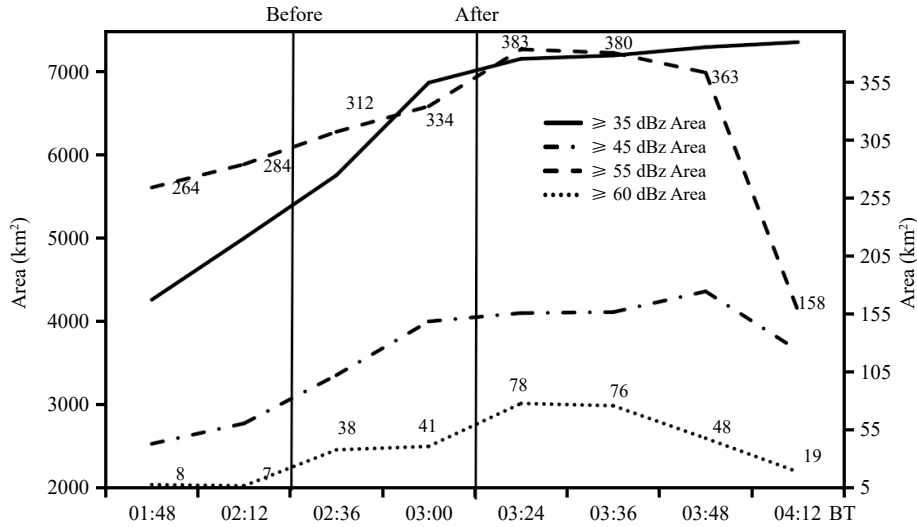


图3 飊线翻山前后不同强度回波面积时间演变 (35 和 45 dBz 对应左侧坐标轴, 55 和 60 dBz 对应右侧坐标轴)
 Fig. 3 Evolution of different intensity areas before and after the squall line crossing the mountain (35 和 45 dBz corresponding to the left coordinate axis, 55 和 60 dBz corresponding to the right coordinate axis)

后(01时48分到03时24分), 飊线与北上孤立强单体经历了多次合并增强过程, 同时山南侧迎风坡不断有对流单体触发向北移动。

04—06时, 飊线继续向东南方向移动, 与前沿单体又发生了多次合并, 飊线尺度维持, 引发了大范围雷暴大风, 满足 Derecho 事件标准。值得注意的是, 后续平原地区阵风锋触发的对流单体远不如桐柏山附近的孤立风暴强, 因而飊线内 55 dBz 以上强回波面积无明显增大, 亦未再引发 12 级以上极端大风。

综上所述, 飊线过山阶段因前方孤立风暴持续并入而强烈发展引发山后极端强风, 下面将分析孤

立风暴触发增强机制以及地形的影响。

3.4 地形影响分析

3.4.1 阵风出流与地形相互作用触发对流

桐柏山位于豫鄂交界、大别山西侧, 海拔高度大部分大于 300 m, 局部 500—800 m, 东西向约 150 km, 属于中尺度地形。图 4 给出的飊线(湖北飊线)翻山影响湖北前, 还有一条即将在河南东南部减弱消亡的飊线(简称河南飊线), 在有利于雷暴大风产生的环境下, 即使回波即将衰亡, 河南飊线的阵风锋依然明显。图 5 为地面加密站极大风表征的两条飊线阵风锋演变。26 日 00—02 时, 河南飊线的阵风锋(图 5 黑色实线)从桐柏山北侧进入桐

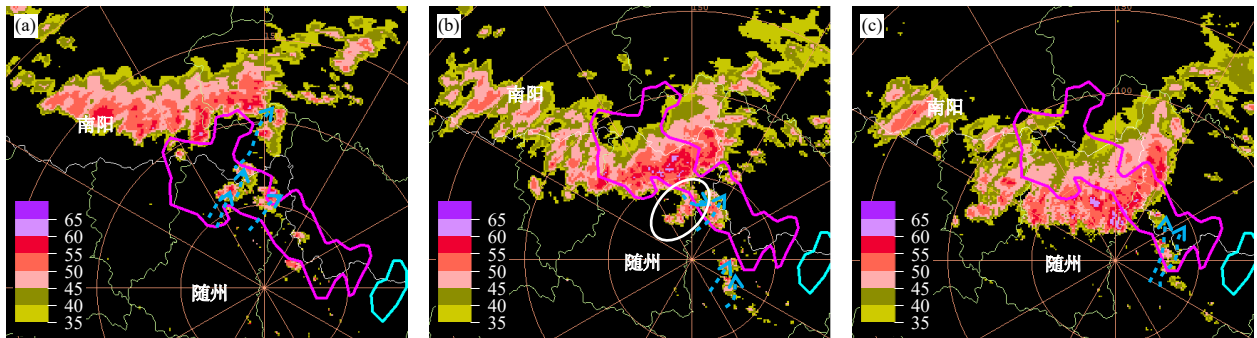


图4 2022年7月26日01—04时随州雷达组合反射率因子演变 (a. 01时48分, b. 03时00分, c. 03时24分, 单位: dBz; 箭头起点和方向为单体新位置 and 移动方向; 紫色、蓝色线包围区分别为豫鄂接壤海拔高度≥200 m 桐柏山、大别山, 下同)
 Fig. 4 Evolution of composite radar reflectivity in Suizhou from 01:00 BT to 04:00 BT 26 July 2022 (a. 01:48 BT, b. 03:00 BT, c. 03:24 BT, unit: dBz; arrow starting point and direction represent newborn cell position and movement, areas enclosed by solid purple and blue lines represent ≥200 m altitude in Tongbai mountain and Dabie mountain, respectively; the same hereafter)

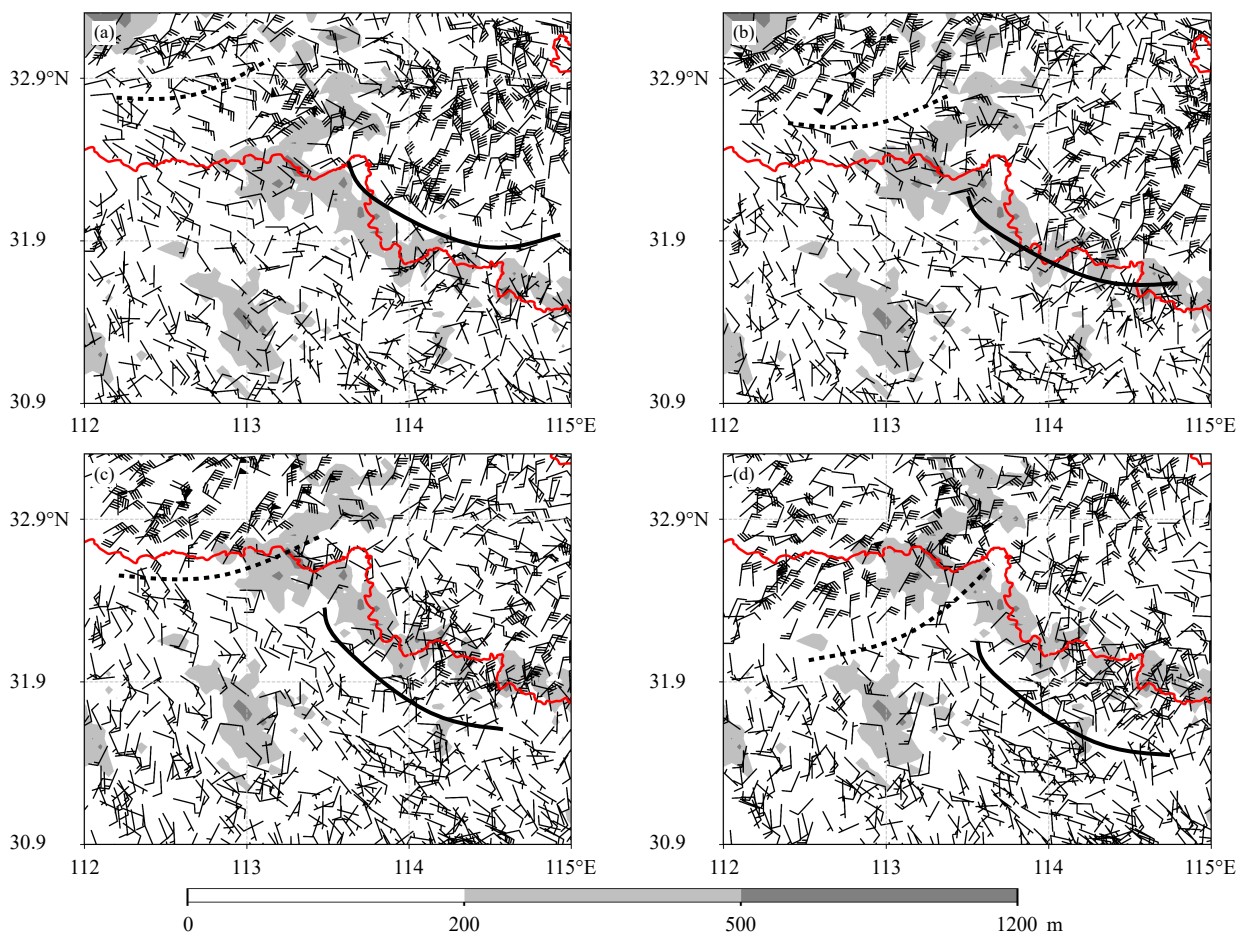


图5 2022年7月26日00—03时地面极大风速演变(a. 00时, b. 01时, c. 02时, d. 03时; 虚线、实线分为湖北飑线阵风锋、河南飑线阵风锋)

Fig. 5 Evolution of ground maximum wind speed from 00:00 BT to 03:00 BT 26 July 2022 (a. 00:00 BT, b. 01:00 BT, c. 02:00 BT, d. 03:00 BT; dotted and solid lines represent Hubei squall line gust front and Henan squall line gust front, respectively)

柏山南侧, 由于地形阻挡, 阵风出流主要从地势低洼处分流过山, 有一股出流向西进入桐柏山北侧的喇叭口地形。随着阵风出流南压, 在桐柏山附近触发多个对流单体, 图6为26日00—05时桐柏山附近对流触发位置(对流触发位置指新生单体回波强度 ≥ 40 dBz所在位置, 且该单体最强回波 ≥ 50 dBz, 01时指00—01时触发单体), 共触发了32个对流单体, 绝大部分位于山南侧迎风坡, 山北侧仅在喇叭口地形处触发了2个单体。

为进一步说明河南飑线阵风锋在桐柏山附近触发对流系统情况, 表1给出了桐柏山北侧、南侧、桐柏山与大别山之间(图6三角标注)对流触发前后地面站要素变化。26日00时36分, 桐柏山北侧喇叭口地形内开始有对流单体触发(图6红色三角处的红点), 26日00—01时, 桐柏站东北风由

4 m/s增大至10 m/s, 气温下降了 2°C , 表明山北侧的孤立对流风暴由增强的阵风出流触发。01时, 桐柏山南侧开始有对流新生(图6黑色三角处的红点), 此时距离新生单体最近的天河口站由偏南风3 m/s转为东北风8 m/s, 气温下降了 3.8°C , 飑线出流进入桐柏山南侧。值得一提的是, 上述山两侧触发孤立风暴之间为地势相对低的豁口(海拔高度在350 m左右), 表明冷出流先从桐柏山豁口或山谷渗透进入山南侧, 中尺度地形精细结构影响阵风锋进而影响后续风暴发展。

26日02时, 河南飑线阵风出流从桐柏山和大别山之间的豁口处(图6红色箭头)进入鄂东北, 02时24分, 多个对流单体在赵鹏站附近触发(图6紫色三角处的蓝点), 赵鹏站位于两山豁口西南方向50 km处, 26日02—03时, 赵鹏站由西北风

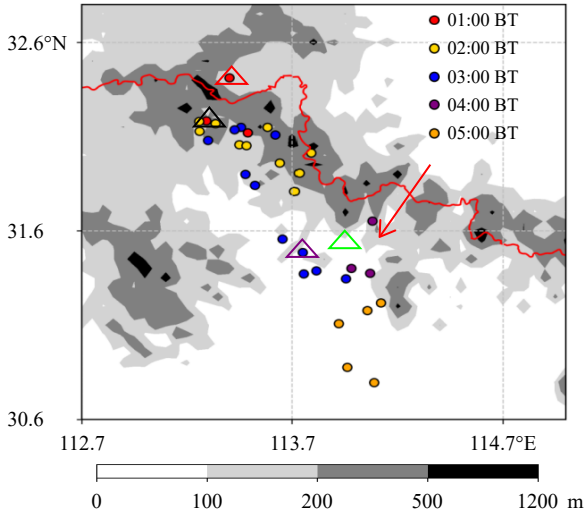


图6 2022年7月26日01—05时桐柏山附近对流单体触发位置(圆点为对流触发位置,红色、黑色、紫色和绿色三角分别为桐柏站、天河口站、赵鹏站和李店站位置)
 Fig. 6 Locations of newly triggered convective cells near Tongbai mountain from 01:00 BT to 05:00 BT 26 July 2022 (dots indicate convection triggering location; red, black, purple, and green triangles represent Tongbai station, Tianhekou station, Zhaopeng station, and Lidian station, respectively)

4 m/s 转为东北风 7 m/s, 气温下降 1.3℃, 从两山豁口处进入的阵风锋在赵鹏站附近触发对流。

随着湖北飚线的发展, 其阵风出流显著增强(图5黑色虚线)。由图5c可见, 02时地面出流前沿的阵风达 16 m/s, 强的阵风出流亦可先于飚线通过山的豁口进入山南侧触发对流。02时48分, 在飚线前沿 10—30 km 处有多个对流单体新生, 03时合并发展成孤立的多单体强风暴(图4b白色圆圈

处), 从风暴追踪信息来看, 此处对流单体触发后向东南方向移动, 与山南侧其他孤立单体向北移动不同, 由图5d可见, 03时湖北飚线阵风出流已影响单体触发处, 表明该孤立多单体风暴由湖北飚线的阵风出流触发。

值得一提的是, 位于赵鹏站东北方 15 km 处的李店站(图6绿色三角)离两山豁口(图6红箭头处)更近, 02和03时李店站东北风均在 12 m/s 以上, 对流单体却未在其附近触发。由图6可见, 阵风出流触发的对流单体主要分布在桐柏山南侧, 一部分位于桐柏山迎风坡, 一部分位于两山豁口南侧 50 km 处的平原地区, 对流单体的触发不仅与风暴出流密切相关, 还与山南侧低空急流有关。

3.4.2 边界层急流与地形抬升

由表2给出的7月25日20时至26日06时湖北中东部 925 hPa 西南急流范围和强度变化可知, 桐柏山附近对流单体触发期间, 边界层急流显著增强。25日20时—26日02时, 边界层西南急流显著增强, 02时达到峰值, 急流核达 16 m/s, 风速 14 m/s 以上的格点数增至 40 个。02—05时, 边界层西南急流稳定维持, 急流出口区位于湖北省中北部地区。夜间边界层急流增强过程亦可从随州雷达径向速度图上看到, 26日01—03时, 雷达站南侧 30 km 附近低层(距地高度 1.3 km)存在 17 m/s 以上的径向速度大值区, 且强风范围逐渐增大并向边界层(距地高度 0.8 km)发展(图略)。

飚线阵风出流触发的对流单体集中在桐柏山南侧, 距地高度在 100—200 m, 与桐柏山地形走向

表1 桐柏山北、南侧和桐柏山与大别山之间初始对流触发时间及邻近站点地面要素变化

Table 1 Initial convection trigger time and surface element changes at adjacent stations on the north and south sides of Tongbai mountain and between the two mountains

地点	触发时间(BT)	统计邻近站点	触发前风向	触发后风向	触发前风速 (m/s)	触发后风速 (m/s)	触发前温度 (°C)	触发后温度 (°C)
桐柏山北侧	00:36	桐柏	东北	东北	4	10	26.8	24.8
桐柏山南侧	01:00	天河口	偏南	东北	3	8	30.1	26.3
桐柏山与大别山之间	02:24	赵鹏	西北	东北	4	7	28.9	27.6

表2 2022年7月25日20时—26日06时湖北925 hPa西南急流强度和范围

Table 2 Intensity and range of 925 hPa southwesterly jet in Hubei from 20:00 BT 25 July to 06:00 BT 26 July 2022

参量	25日20时	25日21时	25日22时	25日23时	26日00时	26日01时	26日02时	26日03时	26日04时	26日05时	26日06时
急流强度(m/s)	12	13	14	14	14	14	16	15	16	16	10
急流范围(个数)	0	0	5	7	6	26	40	32	30	34	0

一致(图6)。桐柏山高度在975 hPa(海拔高度约250 m)和925 hPa(海拔高度约800 m)之间,26日01和02时随着边界层急流增强,在桐柏山南侧975和925 hPa均有上升运动(图7),且925 hPa上升运动随低空急流增强而有所增强,结合图6分析,02—03时为山南侧对流单体集中触发时段,也正是低空急流增强维持阶段,04—05时触发的对流距离山略远,但依然位于山前上升气流区,阵风出流与低空急流构成的强辐合叠加山前迎风坡抬升导致山南侧对流触发和增强。而02时李店站位于975 hPa下沉气流区(图7b),因而尽管有较强的阵风出流从豁口处南下却未能触发对流。

3.4.3 桐柏山对阵风出流的阻挡

由信阳雷达观测资料可见,26日00时河南飊线仅残留少量积云回波,位于雷达站以北50 km处

(图8a),而阵风出流前沿(径向速度图上北风与南风的不连续线处)远离母体风暴,位于雷达站以南23 km处;1.5°仰角东北风出流极大值10—14 m/s距地0.2—0.4 km,出流厚度低、强度不强(图8b)。随着风暴减弱,00—01时河南飊线阵风出流向南推进不明显,主体仍位于桐柏山北侧,且出流强度减弱(图8b、c),浅薄且相对弱的河南飊线出流受桐柏山阻挡,主要从山谷或豁口以渗透方式缓慢过山,导致在山南侧对流触发长达5 h,进一步从雷达资料证实了衰亡阶段的河南飊线阵风出流从山的豁口过山触发对流。

由于翻山前湖北飊线已显著加强(图9),其出流强而深厚,26日02时48分翻越桐柏山时,后侧偏北出流厚度接近5 km,径向速度图上极大值超过27 m/s,在强对流回波下方距地约3 km高度出

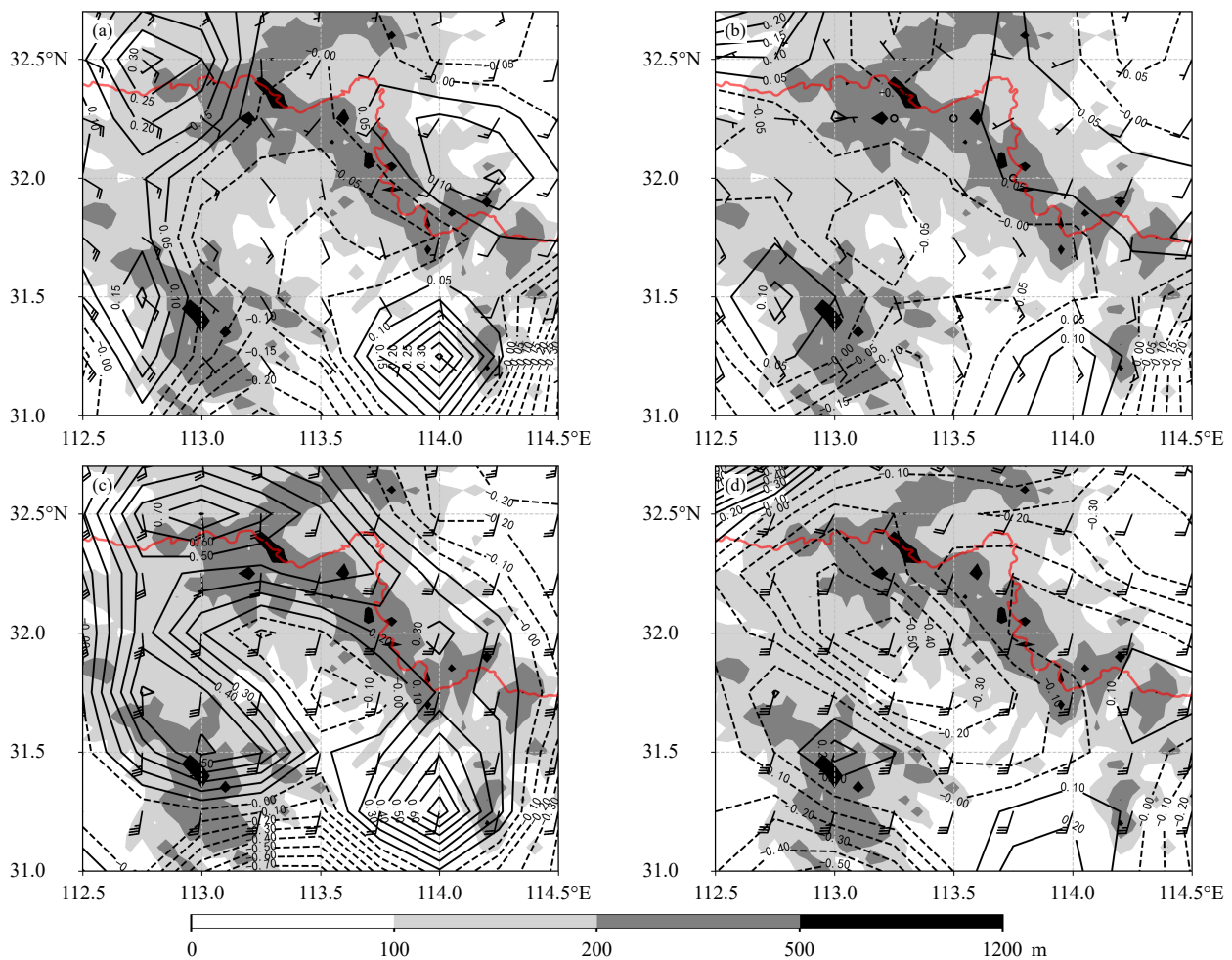


图7 2022年7月26日975(a、b)和925 hPa(c、d)风场(风羽)和垂直上升运动(a、c.01时;b、d.02时;等值线,单位:Pa/s)
Fig. 7 Wind field (barb) and vertical motions (contour line, unit: Pa/s) at 975 (a, b) and 925 hPa (c, d) on 26 July 2022 (a, c. 01:00 BT; b, d. 02:00 BT)

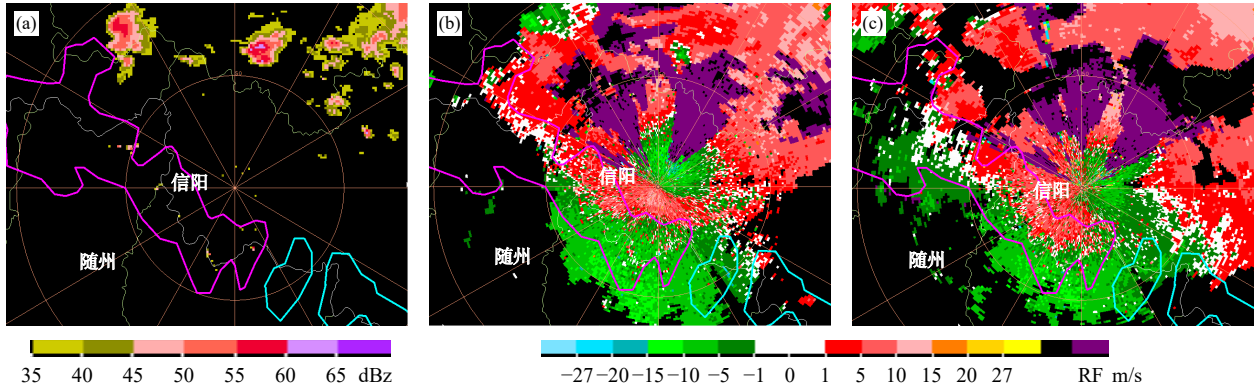


图 8 2022 年 7 月 26 日 00 时信阳雷达组合反射率因子 (a)、1.5°径向速度 (b) 和 01 时 1.5°径向速度 (c)
 Fig. 8 Composite radar reflectivity (a), radial velocity at 1.5° elevation (b) at 00:00 BT and radial velocity at 1.5° elevation (c) in Xinyang at 01:00 BT 26 July 2022

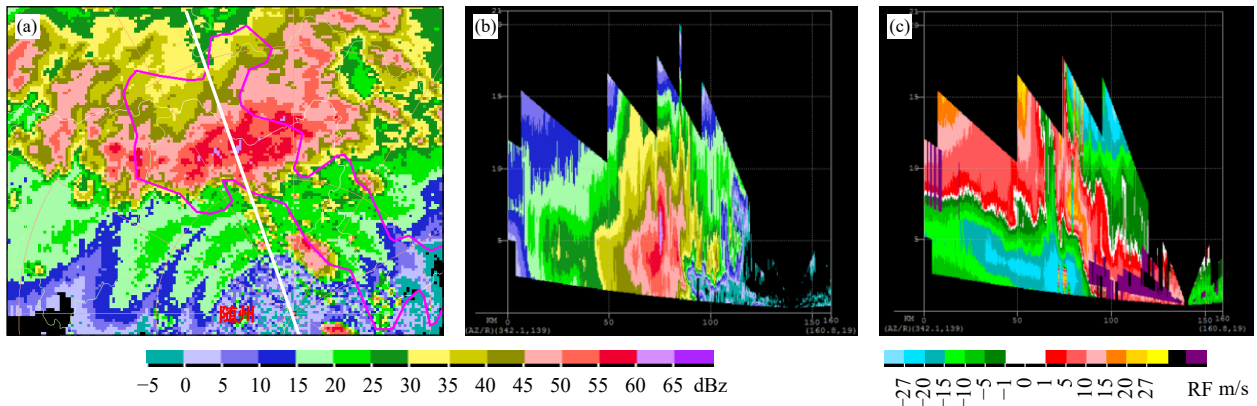


图 9 2022 年 7 月 26 日 02 时 48 分随州雷达组合反射率因子 (a) 和沿白色实线的反射率因子 (b)、径向速度 (c) 垂直剖面
 Fig. 9 Composite radar reflectivity (a) and vertical profile of reflectivity (b) and radial velocity (c) along the white solid line in Suizhou at 02:48 BT 26 July 2022

现了速度模糊(图 9b、c)，出流强且厚度远超桐柏山高度，因而飊线出流整体快速翻过桐柏山，同时强的阵风出流与低空急流构成强而深厚的辐合，使得飊线在翻山过程中持续增强。

综上所述，受地形影响，湖北飊线在桐柏山附近显著增强，直接原因是其前侧孤立风暴持续并入使其增强，且飊线自身出流与低空急流构成强而深厚的辐合使得其继续发展。地形影响主要体现在对河南飊线出流的阻挡和渗透作用以及迎风坡对夜间增强的边界层急流的抬升作用。

4 强雷暴大风成因分析

4.1 飊线合并增强、低层径向风跃增

表 3 给出广水境内极端大风发生前 1 h 逐 6 min

湖北飊线低层径向速度演变，包括大风核强度、27 m/s 大风距地高度以及 27 m/s 以上大风面积。飊线翻山时与前方孤立风暴第一次合并后低层大风核增强，02 时 48 分接近 30 m/s，同时大风面积明显扩大，底高下降至距地面 1.0 km。飊线翻山后与前方孤立风暴再次合并(03 时 18—36 分)，低层大风面积再次显著增大，从 50 km² 骤增至 370 km²，同时大风核增强至 37 m/s 且距地仅 0.4 km，此时飊线主体下山向平原移动。上述分析表明，飊线与其前方孤立风暴合并增强的同时低层大风核增强、范围增大且底高下降，广水县极端强风发生在第二次跃增后。

图 10 给出了飊线翻山增强时(03 时 24 分)沿着雷达径向的反射率因子和径向速度垂直剖面，飊

表3 2022年7月26日02时36分至03时36分低层径向速度演变

Table 3 Low-level radial velocity evolution from 02:36 BT to 03:36 BT 26 July 2022

参量	02时36分	02时42分	02时48分	02时54分	03时	03时06分	03时12分	03时18分	03时24分	03时30分	03时36分
大风核强度(m/s)	24	28	29	30	31	31	30	31	34	36	37
27 m/s大风距地高度(km)	0	2.4	1.0*	0.9*	0.8*	0.7*	0.6*	0.5*	0.5*	0.5*	0.4
27 m/s以上大风面积(km ²)	0	4	39	50	62	63	50	110	350	360	370

注: *代表低层急流底高位于最低仰角。

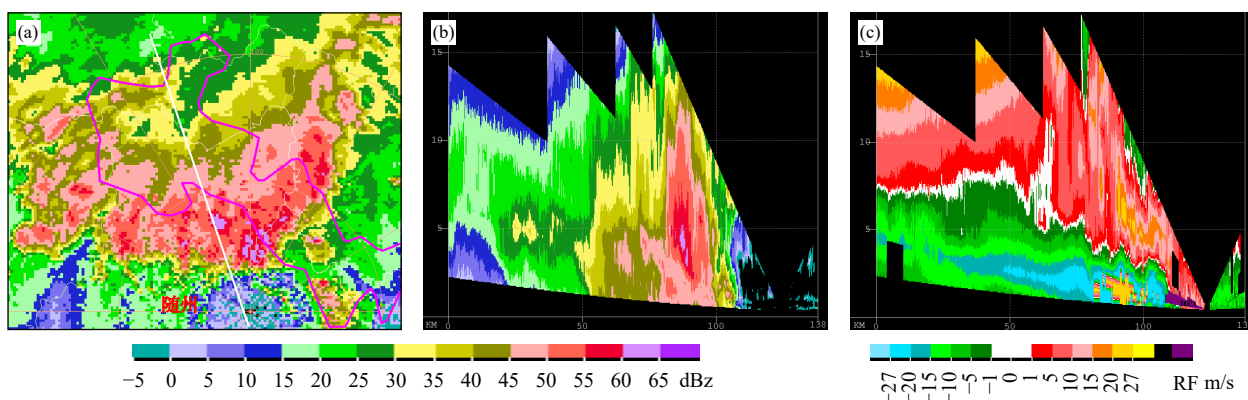


图10 2022年7月26日03时24分随州雷达组合反射率因子(a)和沿白色实线的反射率因子(b)、径向速度(c)垂直剖面

Fig. 10 Composite radar reflectivity (a) and vertical profile of reflectivity (b) and radial velocity (c) along the white solid line in Suizhou at 03:24 BT 26 July 2022

线呈现出多单体风暴结构, 飑线后侧层云部分(回波强度 35 dBz 以下)存在后侧入流急流(RIJ, Rear Inflow Jet), RIJ从距地 5 km 下降至 3 km, 径向速度从 14 m/s 增大至 24 m/s。层云区 K_{DP} 在 0.9—1.5 °/km, Z_{DR} 在 0.5—1.4 dB, 表明粒子直径小而密, 有利于蒸发和下沉气流发展, 层云区后侧入流急流的增幅与大量的小水滴蒸发密切相关。此外, 飑线对流云区的扰动低压引发水平方向的扰动气压梯度力常被认为是后侧入流急流的形成机制(Weisman, 1993)。飑线强回波区及对流云区(回波强度 ≥ 50 dBz)下方, 雷达径向速度再次显著增大, 由 24 m/s 增大至 34 m/s, 增幅 10 m/s, 距地 1.5 km, 强回波区径向速度增幅由对流云区强下沉辐散气流造成。

随着飑线发展, 阵风出流增强, 图 10 给出的阵风前沿推进至强回波区前侧十余千米处, 其上方有新的小积云触发, 结合图 9 共同表明, 飑线自身阵风出流前沿强辐合持续对流触发发展亦是湖北飑线过山增强的关键影响因素。由图 10 可见, RIJ 由高层到低层逐渐下降, 结合表 3 分析, 飑线翻山后、广水极端大风发生前, 后侧低层入流急流强度和范

围急剧增大, 表明广水极端大风发生前 RIJ 形成强动量下传。

4.2 水凝物粒子相变引发强下沉气流

飑线翻过桐柏山在广水县造成多站 10 级以上强风, 其中 26 日 03 时 39 分余店首先出现 27.1 m/s 强雷暴大风。03 时 48 分至 04 时 08 分, 飑线内镶嵌的强单体先后又引发多个下击暴流, 造成郝店站、广水站和蔡河站 11 级以上极大风, 04 时 11 分十里站监测到 45.4 m/s 的极端强风。下面基于随州双偏振雷达探测资料从微物理角度对强下沉气流形成原因进行分析。

分析 03 时 24 分引发余店强风的风暴(简称余店风暴, 图 11a₁—e₁)表明, 大于 60 dBz 强回波高度在 6.5—8.5 km(图 11b₁ 黑色方框), 位于 -10°C 层以上, 强回波范围较大, 对应区域 Z_{DR} 接近 0(图 11c₁ 灰色), 表明在融化层之上风暴主要由冰雹等固态粒子构成, 相关系数(CC)在 0.92—0.96, K_{DP} 在 0—1.5 °/km, 表明强回波区为固、液混合的非均匀相态, 云中过冷水含量较高, 未出现明显三体散射特征, 表明冰雹等固态粒子直径在 2 cm 以下, 为小

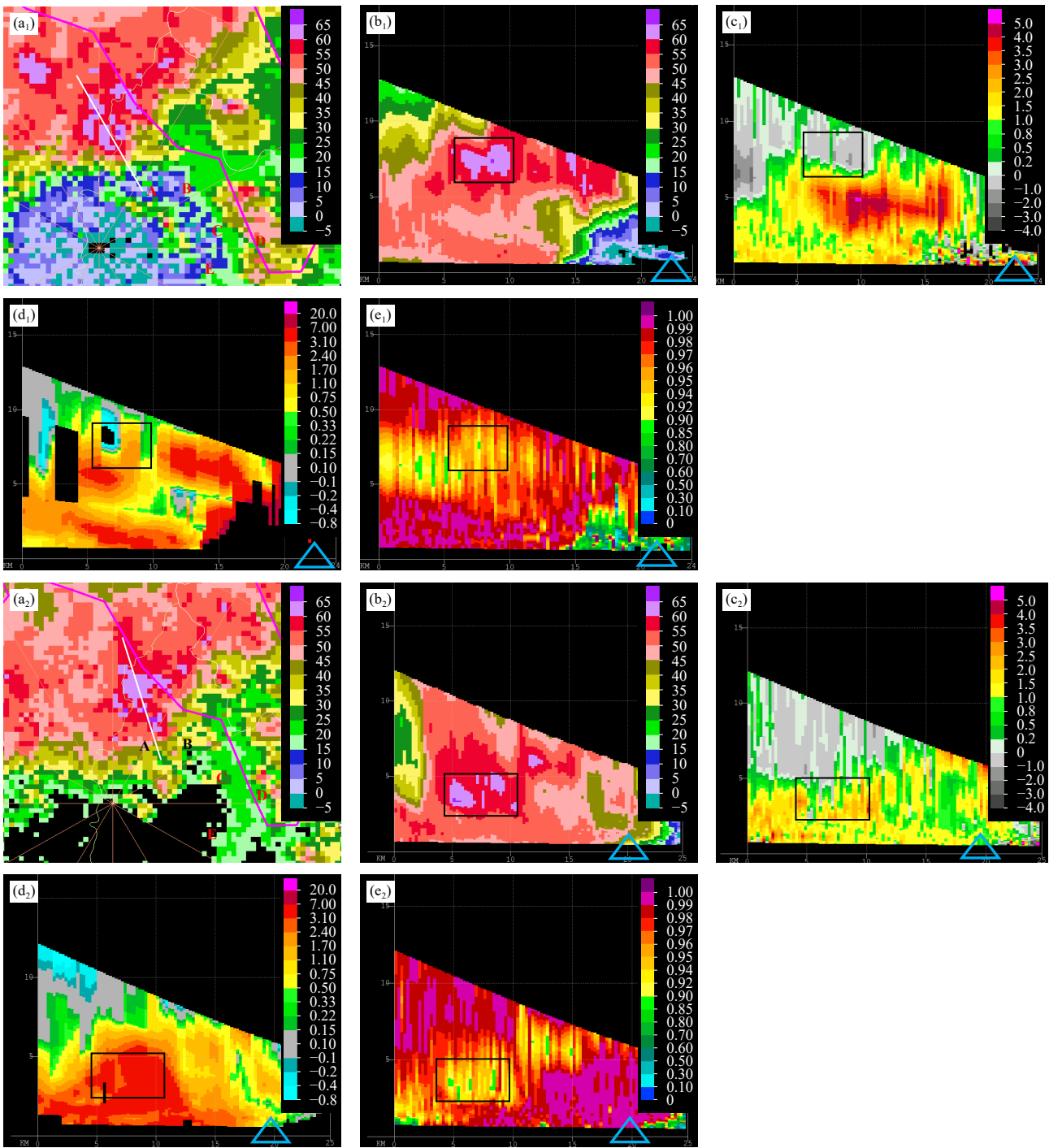


图 11 2022 年 7 月 26 日 03 时 24 分 (a₁—e₁)、03 时 36 分 (a₂—e₂) 随州雷达组合反射率因子 (a₁, a₂, 单位: dBZ) 和沿白色实线的反射率因子 (b₁, b₂, 单位: dBZ), 差分反射率 (c₁, c₂, 单位: dB), 比差分相移 (d₁, d₂, 单位: °/km), 相关系数 (e₁, e₂) 垂直剖面 (a 中 A、B、C、D、E 分别为余店、郝店、蔡河、十里、广水站位置, b—e 中蓝色三角为余店站位置)

Fig. 11 Composite radar reflectivity (a₁, a₂, unit: dBZ) and vertical profiles of reflectivity (b₁, b₂, unit: dBZ), Z_{DR} (c₁, c₂, unit: dB), K_{DP} (d₁, d₂, unit: °/km), CC (e₁, e₂) along the white solid line at 03:24 BT (a₁—e₁) and 03:36 BT (a₂—e₂) 26 July (A, B, C, D, E in Fig. a represent the positions of Yudian, Haodian, Caihe, Shili, and Guangshui stations, respectively; blue triangles in Figs. b—e represent the position of Yudian station)

冰雹和霰。在反射率因子核下方的融化层附近, Z_{DR} 迅速增大至 3.5—5 dB, CC 值在 0.92—0.98, K_{DP} 在 0.75—3.2 °/km, K_{DP} 显著增大, 表明在融化层附近小冰雹和霰融化显著, 异常大的 Z_{DR} 值表明还有些雨滴内有冰核。

03 时 36 分(图 11a₂—e₂), 余店风暴大于 60 dBz 反射率因子核(图中黑色方框)下降至融化层及以下(距地高度 3—5 km)且范围缩小, 反射率因子核处 Z_{DR} 较小, 同时 K_{DP} 异常大, 最大值为 6.2 °/km, CC 在 0.92—0.98, 表明强回波区冰雹即将融化, 表现为液态水滴内含小冰核, 个别大的冰雹到距地 2.5 km 左右才完全融化。强回波周围 Z_{DR} 最大值约 3 dB, K_{DP} 为 2.4—4.6 °/km, 表明融化后云中液态含水量非常高。03 时 42 分(图略), 余店风暴坍塌, 下击暴流及地, 近地面回波核强度减弱至 50 dBz 以下, CC 接近 1, 表明此时风暴中均为雨滴, Z_{DR} 减小至 1.5 dB 以下, 雨滴直径显著减小。

对产生极端强风前一个体扫的十里风暴进行偏振参量分析(图 12a₁—e₁), 风暴 60 dBz 以上强回波核在融化层附近(黑色方框)且范围小, 强回波附近 K_{DP} 和 Z_{DR} 均较大, 分别在 2.2—4.6 °/km、1.7—3.3 dB, CC 为 0.92—0.98, 表明风暴内以雨滴为主, 冰雹融化非常显著, 仅在强回波核附近存在即将全部融化的小冰核。强风发生时, 十里风暴迅速坍塌、减弱, 04 时 12 分(图 12a₂—e₂), 下击暴流及地, K_{DP} 减小至 2.4 °/km 以下, Z_{DR} 多在 1 dB 以下, 表明近地面雨滴直径减小明显, 雨滴直径在 1 mm 以下。与余店风暴相比, 十里站极端强风产生时, 风暴整体衰亡, 云内回波更弱, 粒子直径更小, 蒸发作用使得粒子直径减小更显著。

综上所述, 引发极端强风的下击暴流发生前, 融化层之上冷云内以小冰雹或霰为主, 冰雹下降时出现明显蒸发、融化过程, 冰雹在落地之前完全融化为雨滴; 融化层之下雨滴直径快速减小, 对应回波强度、 Z_{DR} 和 K_{DP} 减小, 融化的冰雹或雨滴经历了强烈的蒸发, 液态水含量显著下降, 大量的融化和蒸发吸热引发强下沉气流。

4.3 弓形回波前端中涡旋影响

近年来观测和数值模拟研究表明, 弓形回波内水平尺度 2—20 km 的 γ 中尺度涡旋(中涡旋)与地面极端强风密切相关, 尤其是中涡旋与弓形回波后

侧的入流急流叠加时, 可以产生极端直线型雷暴大风(Wakimoto, et al, 2006; Atkins, et al, 2009)。十里站最大阵风出现前风暴内可识别出 γ 中尺度涡旋。04 时, 十里站位于飑线弓形前侧(图 13a), 中涡旋开始在弓形回波前侧发展(图 13b 中白色圆圈), 尺度(涡旋正负径向速度极大值之间的距离)约 10 km, 涡旋距地 2 km 左右, 最大入流速度和流出速度分别为 13 和 17 m/s。强风产生前一个体扫(04 时 06 分), 中涡旋移动至十里站附近(图 13c 中白色圆圈), 在 4.3° 仰角、距地 2 km 高度涡旋最大入流、流出分别为 27 和 17 m/s, 旋转速度增大。

中涡旋附近地面大风强度增大, 蔡河站(04 时 07 分)、广水站(04 时 11 分)、十里站(04 时 12 分)先后出现 11 级以上强风, 3 个站极端大风发生期间正是中涡旋发展增强阶段, 说明中涡旋对十里站附近出现的极端大风有一定作用, 由于极端强风发生时风向与雷达径向近乎垂直, 无法分析其对低层强风的影响或量化增幅。4.2 节分析表明, 十里风暴反射率因子核从融化层(距地高度 5 km)迅速下降至近地面, 表明下沉气流发展迅速, 中涡旋很可能通过垂直向下的扰动气压梯度力增强了其上方的下沉气流(Xu, et al, 2015), 从而对下沉气流发动或增强产生正贡献。

4.4 冷出流作用

一般来说, 飑线或弓形回波等中尺度对流系统形成的冷池出流对地面大风有正贡献。图 14 给出了飑线翻山前后小时最大温度降幅和地面 17 m/s 以上极大风。山北侧冷池不强, 翻山前地面小时降温幅度 2—5°C, 17 m/s 以上极大风站数少, 山南侧降温幅度 4—9°C, 极大风显著增强, 表明飑线翻山增强冷池亦增强。翻山后飑线产生的 10 级大风站(图 14 红色风羽)的小时降温幅度为 4—6°C, 温度降幅并不大, 这可能与夜间基础气温下降以及河南飑线弱冷出流已经进入桐柏山南侧有关。04 时前后冷池中心与其前方温差增大, 十里站最低为 21.2°C, 与前沿 50 km 距离处的暖区温差达 7—9°C, 可形成较强的冷池密度流。

图 15(最后显示风羽为该站最强阵风)为广水境内极端大风发生前期(余店站)和后期(十里站)逐 5 min 地面观测, 偏北阵风开始的同时气温下降, 最强风出现后气温继续下降, 5 min 最大降幅约

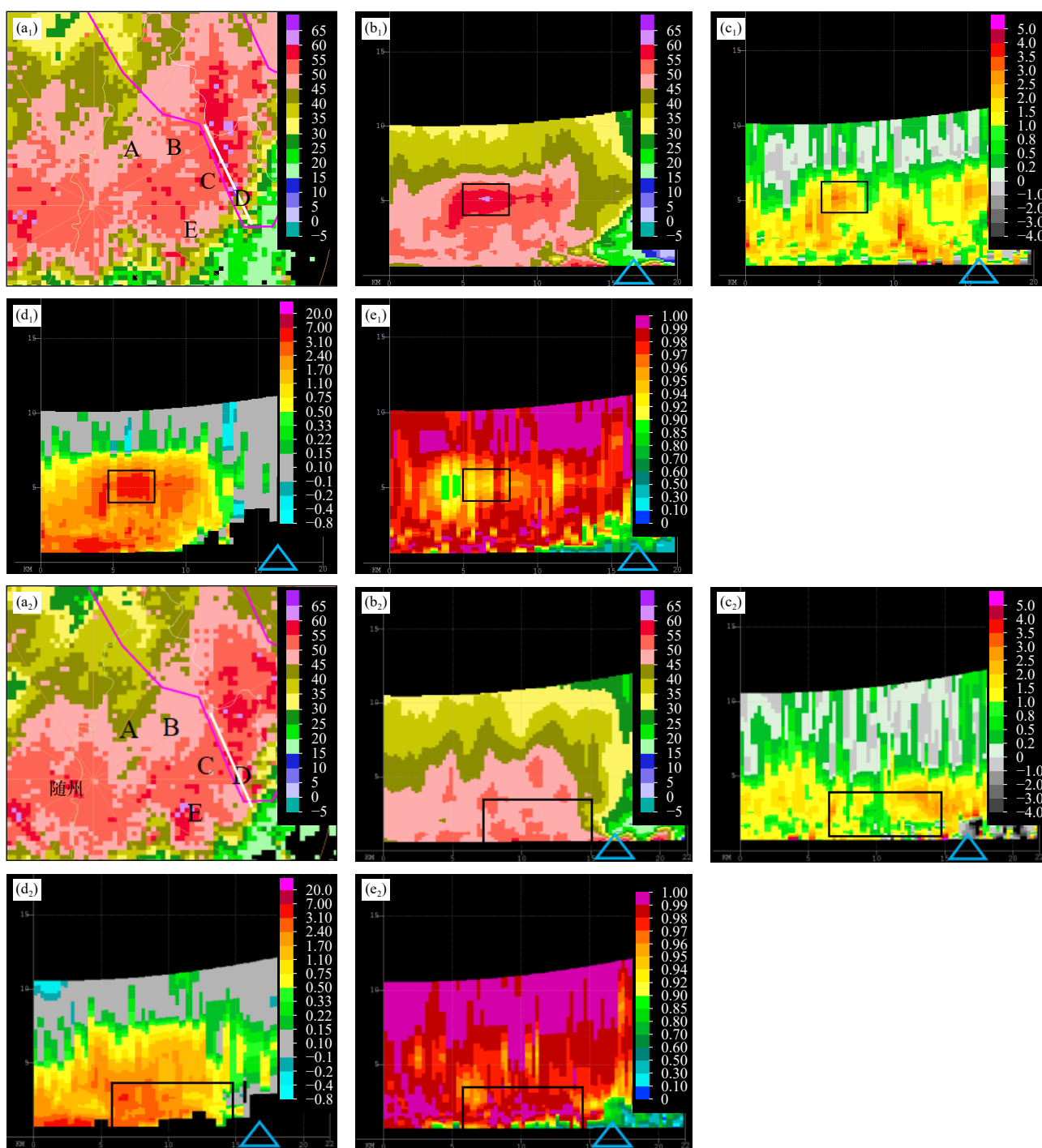


图 12 2022 年 7 月 26 日 04 时 06 分 (a₁—e₁)、04 时 12 分 (a₂—e₂) 随州雷达组合反射率因子 (a₁、a₂, 单位: dBZ) 和沿白色实线的反射率因子 (b₁、b₂, 单位: dBZ)、差分反射率 (c₁、c₂, 单位: dB)、比差分相移 (d₁、d₂, 单位: °/km)、相关系数 (e₁、e₂) 垂直剖面 (a 中 A、B、C、D、E 分别为余店、郝店、蔡河、十里、广水站位置, b—e 中蓝色三角为十里站位置)

Fig. 12 Composite radar reflectivity (a₁, a₂, unit: dBZ) and vertical profiles of reflectivity (b₁, b₂, unit: dBZ), Z_{DR} (c₁, c₂, unit: dB), K_{DP} (d₁, d₂, unit: °/km), CC (e₁, e₂) along the white solid line at 04:06 BT (a₁—e₁) and 04:12 BT (a₂—e₂) 26 July 2022 (A, B, C, D, E in Fig. a represent the positions of Yudian, Haodian, Caihe, Shili, and Guangshui stations, respectively; blue triangles in Fig. b—e represent the position of Shili station)

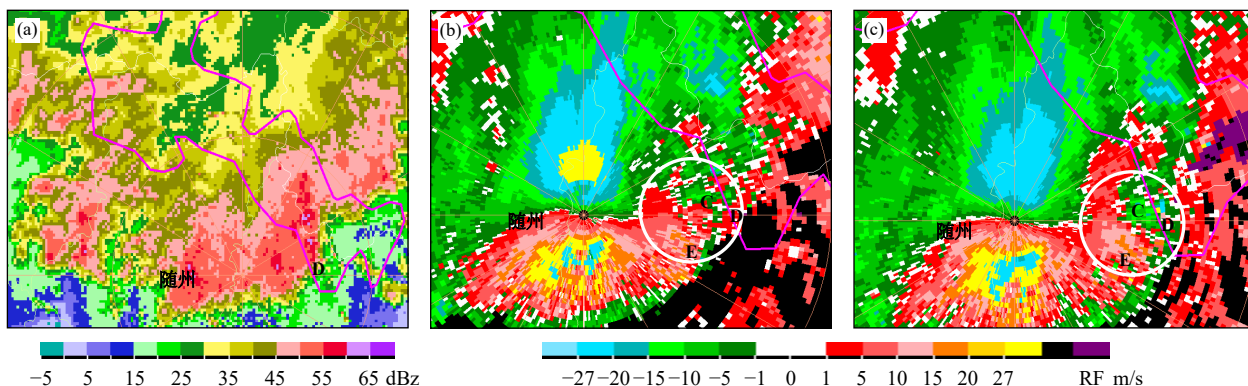


图 13 2022 年 7 月 26 日 04 时随州雷达组合反射率因子 (a)、4.3° 仰角径向速度 (b) 和 04 时 06 分 4.3° 仰角径向速度 (c) (白圈为中涡旋位置; C、D、E 分别为蔡河、十里、广水站位置)

Fig. 13 Composite radar reflectivity (a), radial velocity at 4.3° elevation (b) at 04:00 BT and radial velocity at 4.3° elevation (c) in Suizhou at 04:06 BT 26 July 2022 (white circle represents vortex position; C, D, E represent the positions of Caihe, Shili, and Guangshui stations, respectively)

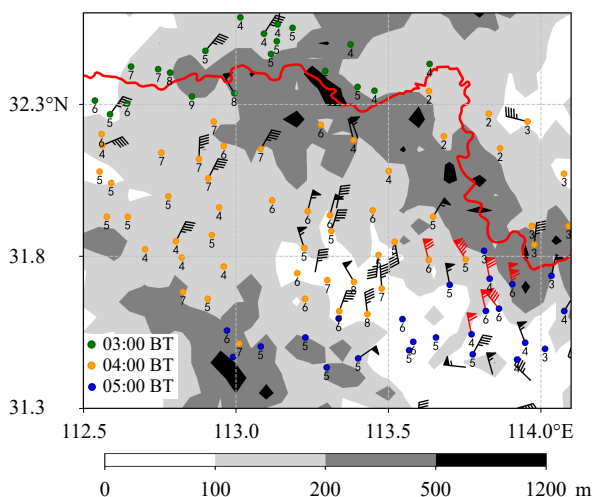


图 14 飊线翻山前后地面加密站极大风速和小时最大温度降幅 (黑色/红色风羽表示风速小于/大于 24.5 m/s; 灰阶为地形高度)

Fig. 14 Maximum wind speed and hourly maximum temperature decrease from ground intense observations before and after the squall line crossed the mountain (black/red barbs indicate wind speed less than/greater than 24.5 m/s; grayscale represents terrain height)

2℃, 表明强风出现在冷池阵风锋过境至冷池中心到达前, 冷池出流对大风有正贡献; 余店站和十里站强降水均发生在极大风出现后, 先风后雨表明, 极大风受冷池出流影响, 同时表明阵风锋前沿距离降水核区较远, 极大风出现在阵风锋前沿和降水核之间, 降水拖曳对强下沉气流影响不大, 下沉气流主要由水凝物粒子融化、蒸发负浮力引发, 进一步说明了水凝物粒子相变对广水极端强风的作用。

5 结论与讨论

2022 年 7 月 26 日凌晨至上午, 受翻越桐柏山的飊线影响, 湖北中东部出现大范围、长历时大风过程, 引发了 Derecho 事件, 飊线翻山增强在山南侧广水境内产生 45.4 m/s 极端大风, 文中重点对飊线翻山增强以及极端大风机理进行分析, 并给出了湖北飊线翻山后增强以及广水极端大风形成机制示意(图 16), 结论如下:

(1) 飊线形成前华中地区处在副热带高压外围前倾槽后西北气流中, 低层高温、高湿, 温度直减率大, 融化层之上干层明显, 环境条件有利于雷暴大风形成, 探空廓线为典型湿下击暴流形态。

(2) 飊线翻山增强的关键中尺度系统是夜间增强的边界层急流、在桐柏山北侧消亡的另一飊线(河南飊线)的浅薄出流以及影响湖北的飊线自身的深厚冷池出流。地形对飊线增强的影响为: (a) 桐柏山阻挡山北侧相对浅薄弱出流, 使其从山谷或豁口过山, 在山南侧自由对流高度低、对流抑制能小的条件下持续触发孤立风暴; (b) 山体对气流的抬升作用, 包括南侧山坡对夜间增强的低空急流的抬升, 为飊线过山增强准备了中尺度上升环境, 而山北侧喇叭口地形对偏东气流的抬升触发孤立风暴。飊线与其前方孤立风暴的多次合并是飊线过山增强的主要原因。

(3) 飊线翻山过程中两次合并增强均伴随雷达径向速度图上低层大风增强, 表现为大风核显著增大, 强风面积跃增、底高降低。广水附近极端强风

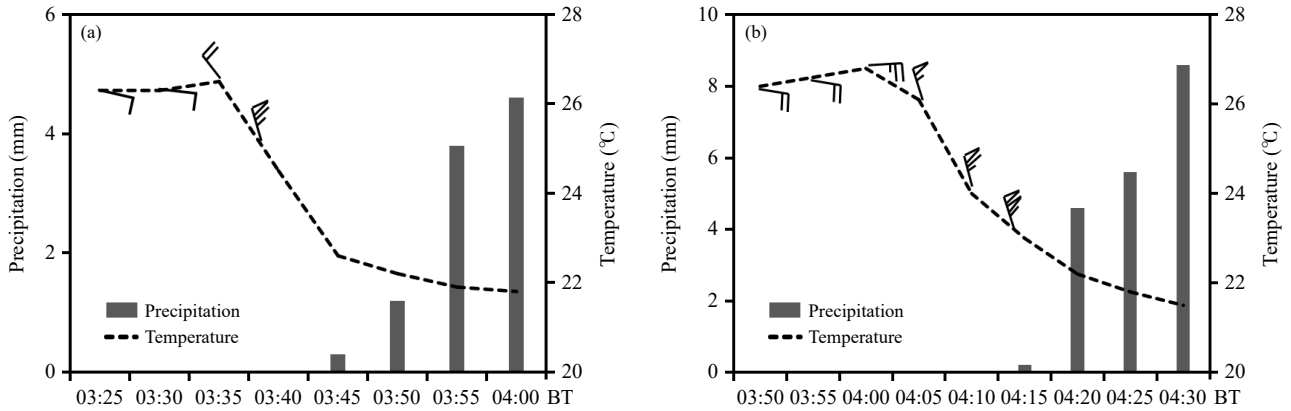


图 15 下击暴流发生前后余店站 (a) 和十里站 (b) 地面降水 (柱)、气温 (虚线)、极大风 (风羽) 演变
 Fig. 15 Evolution of surface precipitation (histograms), temperature (dotted line), and maximum wind (barb) at Yudian station (a) and Shili station (b) before and after the downburst occurrence

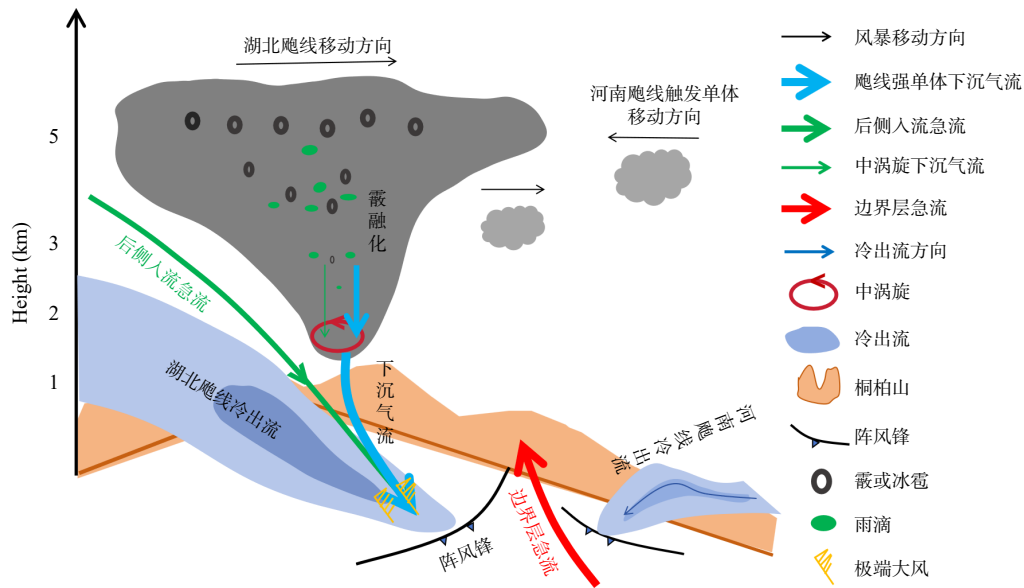


图 16 湖北飊线翻山增强和极端大风形成机制示意
 Fig. 16 Diagram of strengthen of Hubei squall line crossing mountain and formation mechanism of extreme wind

主要由后侧强风动量下传、飊线内镶嵌强单体的下沉气流辐散以及冷池出流造成，低层 γ 中尺度涡旋引发垂直向下的扰动气压梯度力或对下沉气流的发动和增强有影响。

(4) 飊线内强对流单体引发的下沉气流是极端强风形成的关键，基于双偏振参量分析表明，风暴融化层之上冷云部分主要为小冰雹和霰等小的固态粒子，在融化层高度较高的环境下，大量小冰雹和霰明显融化。雨滴下落过程中直径明显减小，近地面雨滴直径在 1 mm 以下，对应回波强度、 Z_{DR} 和 K_{DP} 减小，大量小的固态粒子融化以及明显的水滴蒸发在对流云区形成强下沉气流。一般来说，在

RIJ 之上上升、下沉气流基本是直立的，但是 RIJ 开始发展的高度之下，水平气流因动量下传和冷池密度流等增强，下沉气流不再直立，而是向风暴前侧倾斜。

参考文献

陈博宇, 谌芸, 孙继松等. 2023. 诱发四川冕宁“6.26”山洪灾害的突发性暴雨特征及其形成机制. *大气科学*, 47(1): 1-19. Chen B Y, Chen Y, Sun J S, et al. 2023. Characteristics and formation mechanism of the sudden rainstorm inducing the "6.26" mountain torrent disaster in Mianning, Sichuan province. *Chinese J Atmos Sci*, 47(1): 1-19 (in Chinese)
 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

- 飊线过程发展维持的数值模拟. *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. *Acta Meteor Sinica*, 70(3): 371-386 (in Chinese)
- 陈涛, 湛芸, 郑丽娜等. 2024. 5—7月大别山地区降水与边界层风场日变化特征关系研究. *气象学报*, 82(5): 615-631. Chen T, Chen Y, Zheng L N, et al. 2024. The relationship between diurnal variations of precipitation and boundary layer winds over the Dabie mountains during May—July. *Acta Meteor Sinica*, 82(5): 615-631 (in Chinese)
- 程文静, 俞小鼎, 王秀明等. 2023. 太行山东麓对流风暴下山演变气候特征. *气象*, 49(6): 641-656. Cheng W J, Yu X D, Wang X M, et al. 2023. Climatic characteristics of convective storms moving from Taihang Mountains to North China plain. *Meteor Mon*, 49(6): 641-656 (in Chinese)
- 高帆, 俞小鼎, 王秀明. 2023. 山东较大范围致灾雷暴大风的多普勒天气雷达特征. *气象*, 49(7): 790-804. Gao F, Yu X D, Wang X M. 2023. Doppler radar characteristics of wide-range damaging thunderstorm gales in Shandong province. *Meteor Mon*, 49(7): 790-804 (in Chinese)
- 郭飞燕, 刁秀广, 褚颖佳等. 2023a. 弱垂直风切变环境下强下击暴流双偏振雷达特征. *应用气象学报*, 34(6): 681-693. Guo F Y, Diao X G, Chu Y J, et al. 2023a. Dual polarization radar characteristics of severe downburst occurred in weak vertical wind shear. *J Appl Meteor Sci*, 34(6): 681-693 (in Chinese)
- 郭飞燕, 刁秀广, 马艳等. 2023b. 山东一次飊线双偏振结构与地面降水滴谱特征分析. *气象学报*, 81(2): 328-339. Guo F Y, Diao X G, Ma Y, et al. 2023b. Characteristics of the dual-polarization structure and raindrop size distribution of a squall line in Shandong. *Acta Meteor Sinica*, 81(2): 328-339 (in Chinese)
- 雷蕾, 邢楠, 周璇等. 2020. 2018年北京“7.16”暖区特大暴雨特征及形成机制研究. *气象学报*, 78(1): 1-17. Lei L, Xing N, Zhou X, et al. 2020. A study on the warm-sector torrential rainfall during 15—16 July 2018 in Beijing area. *Acta Meteor Sinica*, 78(1): 1-17 (in Chinese)
- 黎玥君, 马昊, 勾亚彬等. 2024. 冷涡影响下杭州湾一次区域性极端大风的演变和机制分析. *气象*, 50(1): 71-83. Li Y J, Ma H, Gou Y B, et al. 2024. Evolution and formation mechanism of a regional extreme thunderstorm gale in Hangzhou bay affected by cold vortex. *Meteor Mon*, 50(1): 71-83 (in Chinese)
- 李晓兰, 陈涛, 赵玮等. 2025. 太行山精细地形对“23.7”华北极端暴雨特征影响的观测分析. *大气科学*, 1(1): 1-22. Li X L, Chen T, Zhao W, et al. 2025. Observational analysis of Mount Taihang's orographic effects on the "23.7" extreme precipitation event in North China. *Chinese J Atmos Sci*, 1(1): 1-22 (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. *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 S band dual polarization radar observations. *Acta Meteor Sinica*, 79(1): 168-180 (in Chinese)
- 盛杰, 郑永光, 沈新勇等. 2019. 2018年一次罕见早春飊线大风过程演变和机理分析. *气象*, 45(2): 141-154. Sheng J, Zheng Y G, Shen X Y, et al. 2019. Evolution and mechanism of a rare squall line in early spring of 2018. *Meteor Mon*, 45(2): 141-154 (in Chinese)
- 孙继松. 2023. 与直线型对流大风相关的强风暴形态结构和热动力学过程. *气象*, 49(1): 1-11. Sun J S. 2023. The pattern structure and thermodynamic and dynamic processes of severe storms associated with linear convective gales. *Meteor Mon*, 49(1): 1-11 (in Chinese)
- 王丛梅, 俞小鼎, 李芷霞等. 2017. 太行山地形影响下的极端短时强降雨分析. *气象*, 43(4): 425-433. Wang C M, Yu X D, Li Z X, et al. 2017. Investigation of extreme flash-rain events on the impact of Taihang mountain. *Meteor Mon*, 43(4): 425-433 (in Chinese)
- 王瑾婷, 丁治英, 赵向军等. 2017. 大别山地形对江淮飊线发展变化及组织结构的影响研究. *气象科学*, 37(5): 639-651. Wang J T, Ding Z Y, Zhao X J, et al. 2017. Study of the orographic effects of the Dabie mountain on the development and structure of squall line. *J Meteor Sci*, 37(5): 639-651 (in Chinese)
- 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. *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. *Plateau Meteor*, 31(2): 504-514 (in Chinese)
- 王秀明, 周小刚, 俞小鼎. 2013. 雷暴大风环境特征及其对风暴结构影响的对比研究. *气象学报*, 71(5): 839-852. Wang X M, Zhou X G, Yu X D. 2013. Comparative study of environmental characteristics of a windstorm and their impacts on storm structures. *Acta Meteor Sinica*, 71(5): 839-852 (in Chinese)
- 王秀明, 俞小鼎, 费海燕等. 2023. 下击暴流形成机理及监测预警研究进展. *气象*, 49(2): 129-145. Wang X M, Yu X D, Fei H Y, et al. 2023. A review of downburst genesis mechanism and warning. *Meteor Mon*, 49(2): 129-145 (in Chinese)
- 韦惠红, 黄小彦, 刘文婷等. 2022. 复杂山地下引发特大暴雨的准静止MCS观测分析. *暴雨灾害*, 41(3): 241-253. Wei H H, Huang X Y, Liu W T, et al. 2022. Analysis of quasi-stationary MCS causing extreme torrential rain event under complex mountains in Southwest Hubei. *Torrential Rain Disaster*, 41(3): 241-253 (in Chinese)
- 吴海英, 孙继松, 慕瑞琪等. 2023. 一次强对流过程中两种不同类型风暴导致的极端对流大风分析. *气象学报*, 81(2): 205-217. Wu H Y, Sun J S, Mu R Q, et al. 2023. Analysis of extreme convective gusts caused by two types of weather storms during a strong convection event. *Acta Meteor Sinica*, 81(2): 205-217 (in Chinese)
- 吴举秀, 胡志群, 夏凡等. 2023. 基于贝叶斯方法的冰雹大小识别研究. *气象学报*, 81(5): 801-814. Wu J X, Hu Z Q, Xia F, et al. 2023. Hail size discrimination based on the Bayesian method. *Acta Meteor Sinica*, 81(5): 801-814 (in Chinese)
- 许长义, 章丽娜, 肖现等. 2023. 冷涡背景下华北平原一次弓形回波致灾大风过程分析. *气象学报*, 81(1): 40-57. Xu C Y, Zhang L N, Xiao X, et

- al. 2023. Case analysis of damaging high winds generated by bow echoes in the presence of a cold vortex over the North China plain. *Acta Meteor Sinica*, 81(1): 40-57 (in Chinese)
- 袁潮, 李得勤, 杨磊等. 2022. 冷涡背景下一次微型超级单体龙卷的雷达特征和物理过程探究. *气象学报*, 80(6): 878-895. Yuan C, Li D Q, Yang L, et al. 2022. A case study on the radar characteristics and physical process involved in the genesis of a mini supercell tornado under the background of cold vortex. *Acta Meteor Sinica*, 80(6): 878-895 (in Chinese)
- 郑丽娜, 孙继松. 2024. 泰山地形对一次副高边缘大暴雨过程影响的观测分析. *气象学报*, 82(2): 155-167. Zheng L N, Sun J S. 2024. Observational analysis of the topographic effect of Mount Tai on an extreme rainfall event occurring at the edge of the subtropical high. *Acta Meteor Sinica*, 82(2): 155-167 (in Chinese)
- Amiot C G, Carey L D, Roeder W P, et al. 2019. C-band dual-polarization radar signatures of wet downbursts around Cape Canaveral, Florida. *Wea Forecasting*, 34(1): 103-131
- Atkins N T, Laurent M S. 2009. Bow echo mesovortices. Part I: Processes that influence their damaging potential. *Mon Wea Rev*, 137(5): 1497-1513
- Kuster C M, Heinselman P L, Schuur T J. 2016. Rapid-update radar observations of downbursts occurring within an intense multicell thunderstorm on 14 June 2011. *Wea Forecasting*, 31(3): 827-851
- Kuster C M, Bowers B R, Carlin J T, et al. 2021. Using K_{DP} cores as a downburst precursor signature. *Wea Forecasting*, 36(4): 1183-1198
- Kuster C M, Sherburn K D, Mahale V N, et al. 2024. Radar signatures associated with quasi-linear convective system mesovortices. *Wea Forecasting*, 39(8): 1143-1161
- Mahale V N, Zhang G F, Xue M. 2016. Characterization of the 14 June 2011 Norman, Oklahoma, downburst through dual-polarization radar observations and hydrometeor classification. *J Appl Meteor Climatol*, 55(12): 2635-2655
- Meng Z Y, Yan D C, Zhang Y J. 2013. General features of squall lines in East China. *Mon Wea Rev*, 141(5): 1629-1647
- Morales A, Morrison H, Posselt D J. 2018. Orographic precipitation response to microphysical parameter perturbations for idealized moist nearly neutral flow. *J Atmos Sci*, 75(6): 1933-1953
- Rotunno R, Klemp J B, Weisman M L. 1998. A theory for strong, long-lived squall lines. *J Atmos Sci*, 45(3): 463-485
- Schenkman A D, Xue M. 2016. Bow-echo mesovortices: A review. *Atmos Res*, 170: 1-13
- Wakimoto R M, Murphey H V, Davis C A, et al. 2006. High winds generated by bow echoes. Part II: The relationship between the mesovortices and damaging straight-line winds. *Mon Wea Rev*, 134(10): 2813-2829
- Weisman M L. 1993. The genesis of severe, long-lived bow echoes. *J Atmos Sci*, 50(4): 645-670
- Xu X, Xue M, Wang Y. 2015. Mesovortices within the 8 May 2009 bow echo over the central United States: Analyses of the characteristics and evolution based on Doppler radar observations and a high-resolution model simulation. *Mon Wea Rev*, 143(6): 2266-2290
- Xu X, Ju Y Y, Liu Q Q, et al. 2024. Dynamics of two episodes of high winds produced by an unusually long-lived quasi-linear convective system in South China. *J Atmos Sci*, 81(8): 1449-1473