

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. 气象, 41(11):1328-1340.

2013 年 8 月河南三次西南气流型强对流天气分析^{*}

梁俊平^{1,2} 张一平^{1,3}

1 河南省农业气象保障与应用技术重点实验室, 郑州 450003
2 河南省气象局, 郑州 450003
3 河南省气象台, 郑州 450003

提 要: 利用常规气象观测、区域加密自动站、NCEP/NCAR 逐 6 h $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 再分析资料和多普勒雷达探测资料,对 2013 年 8 月河南三次西南气流型强对流天气的环境条件、回波特征和成因进行了分析,结果表明:(1)三次强对流天气均发生在中纬度低槽和副热带高压相互作用,河南高、中、低层受一致西南气流影响的环流背景下,地面存在温度和露点温度梯度及辐合线,大范围强对流天气是在高空槽动力作用和地面辐合线的触发作用下,使得不稳定能量释放而引起。(2)三次强对流天气对流层中下层有比较深厚的暖湿层结,热力和水汽条件充分,对流层中上层有明显干层,从而形成了低层暖湿、上层比较干冷的对流不稳定大气层结。强的垂直风切变位于对流层中下层,对流有效位能非常大,配合一定的动力抬升条件,有利于超级单体和飑线的发生和发展。综合来看,8 月 1 日不稳定、水汽、垂直切变和动力条件最强,11 日次之,7 日相对较弱。强对流形成条件的强弱对对流系统的组织结构有一定影响。(3)雷达和自动站加密观测资料显示,强天气过程初始阶段,主要表现为多单体回波结构,初始对流都在河南西南部和西部到山西南部的辐合线、干线附近生成,随后逐渐加强,形成多单体回波群(其中部分发展成为非典型超级单体)。成熟阶段,都发展成为线状对流系统,8 月 7 日在河南北部形成由强对流单体组成的不连续的东北—西南向线状对流回波,8 月 1 和 11 日在河南黄淮平原和华北平原高温高湿环境中形成了有组织的飑线。飑线东移过程中其前侧不断有暖湿空气辐合上升、后侧冷空气下沉辐散,互为对峙的上升和下沉气流相互作用是飑线得以发展和维持的主要原因。(4)对流层中低层相对深厚的暖湿层结及其以上的干层是盛夏西南气流形势下河南强对流天气预报值得关注的內容,CAPE、 $\Delta\theta_{se(850-500)}$ 、 $\Delta T_{850-500}$ 、K 指数、对流层中低层垂直风切变等对西南气流超级单体、飑线等强风暴的形成具有很好的指示意义。

关键词: 西南气流, 低层垂直风切变, 高温高湿, 对流有效位能, 线状对流

中图分类号: P458 **文献标志码:** A **doi:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2015. 11. 003

Analysis on Three Severe Convective Weather Events of Southwest Flow Type in Henan August 2013

LIANG Junping^{1,2} ZHANG Yiping^{1,3}

1 Henan Key Laboratory of Agrometeorological Ensuring and Applied Technique, Zhengzhou 450003
2 Henan Meteorological Bureau, Zhengzhou 450003
3 Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003

Abstract: Using conventional meteorological observations, regional dense automatic weather station data, NCEP/NCAR $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ reanalysis data with 6 h interval and Doppler radar data, this paper analyzed environmental conditions, echo characteristics and causes of three severe convective weather processes of southwest flow type in Henan in August 2013. The results show that: (1) Three severe convections all occur in

^{*} 中国气象局关键技术集成与应用项目(CMAGJ2015M36)、河南省气象局项目(Z201401)和河南省强对流创新团队和商丘市科技公关项目(141061)共同资助

2014 年 10 月 19 日收稿; 2015 年 7 月 9 日收修定稿

第一作者:梁俊平,主要从事天气预报和强对流天气研究. Email:jp01.08@163.com

通信作者:张一平,主要从事天气预报和强对流天气研究. Email:zhangyiping618@163.com

the interactions between mid-latitude trough and subtropical high. Under the effect of southwest flows from low to high levels, there are temperature and dew-point gradients and convergence line on the surface. The dynamic effect of high-level trough and the trigger of convergence line on the surface lead to the convective weather. (2) There are unstable stratifications which are warm and wet in high level and dry and cold in low level. Strong vertical wind shear in the lower troposphere, and the large *CAPE* and lifting conditions are conducive to occurrence and development of squall lines and super cells. The conditions for the three events are the best on 1 August, better on 11 August and the worst on 7 August. There is a relationship between structure of convective system and the strength of convection forming condition. (3) Monitoring data from radar and dense automatic weather station show that in the initial stage multi-cell echo structures are dominant, and then gradually strengthen and form multi-cell echo groups. In the mature stage, they all develop into linear convective systems and even form organized squall lines. The interaction of updraft and downdraft is the main cause for the development and maintenance of squall lines. (4) The deep warm and moist stratification in the lower and the dry layer above that is important to the forecast of severe convective weather in summer in Henan. The indexes such as *CAPE*, $\Delta\theta_{se(850-500)}$, $\Delta T_{850-500}$, *K* index, and vertical wind shear in the lower troposphere have good indication for southwest flow super cell, squall lines and other severe storms to develop and form.

Key words: southwest flow, low-level vertical wind shear, high temperature and humidity, *CAPE*, linear convection

引 言

雷暴大风、冰雹等强对流天气能够形成严重的自然灾害,给国民经济和人民生命财产造成重大损失。因其时空尺度小,局地性强,天气剧烈,一直是天气预报业务中的重点和难点,受到中外气象学者的重点关注。多年来人们对强对流天气进行了大量分析和研究(Miller, 1972; Crisp, 1979; Lemon et al, 1979; Maddox et al, 1979; Doswell et al, 1996; Yu et al, 2012; Meng et al, 2013)。随着我国气象现代化的发展和技术水平的提高,许多气象工作者对强对流天气进行了专项研究(张小玲等, 2010; 何立富等, 2011; 俞小鼎等, 2012; 孙继松等, 2012; 张涛等, 2013; 蓝渝等, 2013),提高了我国强对流天气分析预报水平。线状风暴多为快速移动的强飑线(常呈现弓形回波)构成的中尺度对流系统,其发生时往往持续时间较长,影响范围大,并常伴有大风、冰雹,爆发强降水等剧烈的灾害性天气。孙建华等(2014)通过数值试验研究了水汽含量对飑线组织结构和强度的影响。陈明轩等(2012)研究了低层垂直风切变和冷池相互作用对飑线发展维持的影响。王秀明等(2012; 2013)分析了区域致灾雷暴大风形成及维持的原因,并对雷暴大风环境特征及其对风暴结构的影响进行

了对比研究。陈涛等(2013)、农孟松等(2014)对飑线天气过程中的环境条件和对流发展机制及天气成因进行了分析和研究。强对流天气发生环境特征方面的研究也很多,郑淋淋等(2013)对江淮和黄淮流域对流天气过程的环流背景和地面特征进行研究,找出了干、湿环境下强对流系统在触发和维持机制方面存在的差异。许爱华等(2014)对中国近百次强对流天气个例的环境场进行分析,归纳出了冷平流强迫、暖平流强迫、斜压锋生、准正压、高架对流等五种中国强对流天气类别,并给出了基本解释。樊李苗等(2013)研究了中国短时强降水、强冰雹、雷暴大风以及混合型强对流天气的环境参数特征,并将四种强对流天气探空数据和环境参数进行了分类和对比。郑媛媛等(2011)对安徽省强对流天气过程的物理机制、中尺度特征进行分析,将强对流天气分为冷涡、槽后、槽前等几种类型,总结了不同大尺度环流背景下水汽、不稳定层结、抬升、垂直风切变等条件的相对重要性。张一平等(2013a)对河南区域雷雨大风和冰雹天气发生、发展的环境条件进行中尺度天气综合分析和物理量要素分析,归纳出了河南强对流天气的典型特征,初步建立了东北低涡槽后、华北低涡、低槽和副热带高压边缘西南气流四种中尺度天气分析概念模型,给出了各类型强天气分析的关键内容和量化参考指标。张素芬等(1999)总结了

河南冰雹天气特征,将河南冰雹天气分为华北冷涡、槽后西北气流、槽前西南气流和气团内部四种类型。河南处于亚热带向暖温带过渡的中原地带,初夏季节东北和华北地区常有深厚低涡维持,在低涡后部、河套高压脊前的西北气流或横槽影响的环流形势下,河南易出现雷雨大风、冰雹、局地强降水等灾害性强对流天气。如 2009 年 6 月 3 日,受东北低涡后部横槽携带冷空气南下影响,河南北中部、东部多地区出现了强飑线过程,造成 19 个县、市出现了 $17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的雷雨大风,最大风力达 11 级,因灾死亡 22 人,直接经济损失达 16.09 亿元。槽后西北气流形势相对干的环境条件下河南出现强对流天气的分析和研究较多,其形成机制主要是高空扩散南下冷空气和近地面强烈辐射增温而形成上干冷下暖湿的不稳定层结,结合边界层一定的水汽、辐合等在较强的垂直风切变条件下而产生(张霞等,2005;吴蓁等,2011;牛淑贞等,2008;2012;张一平等,2014)。而在 7—8 月,受副热带系统北抬影响,在西南气流环境条件下,河南出现区域暴雨、大暴雨和短时强降水较多,出现线状强对流回波导致大范围雷雨大风、冰雹等强对流天气比较少见,其相关分析和研究更不多见。

2013 年 8 月 1、7 和 11 日,受西南气流影响,河南出现了三次强对流天气过程,都伴有雷雨大风、局地冰雹等,给河南国民经济和人民生命财产安全带来了严重损失,三次过程中飑线、线状对流回波的形成给预报预警也带来了较大难度。为了提高对西南气流形势下河南强对流天气的认识,总结预报预警经验,本文利用常规气象观测、区域加密自动站、NCEP/NCAR 逐 $6\text{ h } 1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 再分析资料和多普勒雷

达等资料,对这三次西南气流形势下严重致灾强对流天气过程的影响系统、环境条件等进行了详细分析,归纳出了河南西南气流型强对流天气的一些特征,探讨了西南气流型飑线形成和维持的原因,为今后同类形势下河南强对流天气的预报预警业务工作提供一些参考结论。

1 天气概况与大尺度环流背景

1.1 天气概况

2013 年 8 月 1 日强对流天气主要出现在豫西南到豫东一带,有 76 站(国家自动站,下同)出现雷暴,15 站出现雷暴大风,南阳市内乡、唐河和驻马店市泌阳出现冰雹,多地伴有短时强降水,小时雨量最大达 $70\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ (社旗县),雨带主要位于黄淮之间。7 和 11 日的强天气过程都出现在豫西、豫北地区,7 日有 64 站出现雷暴,西、北部 10 个县、市遭受风雹、雷电和短时强降水袭击,嵩县最大冰雹直径达 4 cm,郑州市区西郊出现花生米大小的冰雹,濮阳县最大累积降雨量达 260 mm,3 站出现雷暴大风;11 日有 73 站出现雷暴,多地伴有短时强降水,18 站出现大风,辉县最大风速 $26\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,灵宝和孟州出现冰雹,最大冰雹直径分别为 20 和 16 mm。从天气实况看,三次强对流天气都出现在 12:30—22:30,雷暴、短时大风等范围广,雨量分布不均,图 1 给出了三次过程雨量(雷暴、短时大风和局地冰雹落区见图 2b、2d、2f)。比较来看,8 月 1 和 11 日出现雷暴大风和冰雹的站数较 8 月 7 日多。三次强对流天气使农作物(特别是夏玉米)大量倒伏,部分农田绝

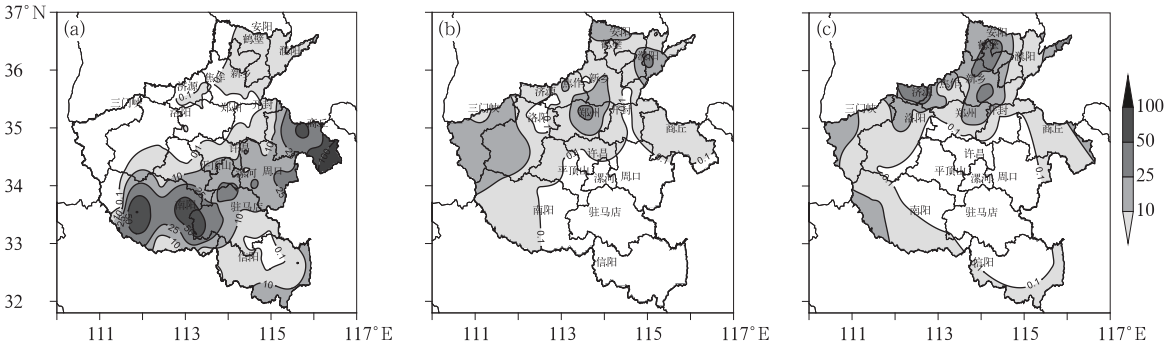


图 1 2013 年 8 月三次强对流过程 24 h 降雨量(单位: mm)

(a) 1 日 08 时至 2 日 08 时, (b) 7 日 08 时至 8 日 08 时, (c) 11 日 08 时至 12 日 08 时

Fig. 1 24 h precipitation of three severe convection processes in Henan in August 2013 (unit: mm)

(a) 08:00 BT 1—08:00 BT 2, (b) 08:00 BT 7—08:00 BT 8, (c) 08:00 BT 11—08:00 BT 12 August 2013

收,大量房屋受损、树木折断,共 7 人死亡,经济损失达 5.16 亿元,给河南造成了严重的经济损失和人员伤亡。

1.2 大尺度环流背景

2013 年 8 月 1 日 08 时,西太平洋副热带高压(简称副高,下同)位于东海,河南东南部位于 584 dagpm 线边缘。未来副高稳定略西进,同时在河套东部和四川东部分别有低槽发展东移,河南处于低槽前和 584 dagpm 线边缘的西南气流中,受槽前西南气流影响,河南南部出现了大范围强对流天气。8 月 7 日,588 dagpm 线呈东北—西南向穿过河南北部,副高脊线位于 30°N 附近,河套南部有一低槽,受副高稳定阻挡,河套低槽收缩东移,低槽携带冷空气和副高边缘西南暖湿气流主要交汇于山西南部到河北南部,这一带出现了大范围强降水天气,河南中西部和北部部分地区出现了雷阵雨,局部出现了雷雨大风、冰雹等强对流天气。8 月 11 日,控制我国中东部地区的副高东退,河套地区有低槽东移,受副高东退和低槽东移影响,河南西部、北部再次出现了大范围强对流天气。以上分析可见,2013 年 8 月河南这三次强对流天气均发生在中纬度低槽和副高相互作用,河南受西南气流影响的环流背景下(图 2a、2c 和 2e)。但 8 月 1、11 日两次强对流过程发生在低槽发展东移、配合副高的西进或东退过程中,更有利于系统性对流天气产生,而 8 月 7 日强对流过程则出现在低槽收缩东移,副高稳定维持的过程中,冷暖空气相互作用和强降水的落区主要位于山西南部和河北南部,豫北出现了局地强对流。可见大尺度天气影响系统对三次强对流天气落区有明显制约作用。

2 中尺度对流天气分析

2.1 常规观测分析

对三次过程高空、地面天气图进行中尺度综合分析发现,1 日 08 时(图 2a)500 hPa 河套地区高空槽深厚,从内蒙古经山西到河南西南部存在南北向温度槽,河南中东部、南部均处于 584 dagpm 线边缘的西南气流中。700 hPa 低槽位于太原到安康一线,温度槽自华北伸向河南西南部。850 hPa 低空急流自广西经湖南、湖北伸向河南东南部。925 hPa

河南东南部有明显冷式切变线,并位于超低空急流出口区左前侧,为河南东南部提供了有利的辐合条件。河南大部 $\Delta T_{850-500}$ ($\Delta T_{850-500}$ 表示 850 hPa 和 500 hPa 之间的温度差,下同)在 27°C 及以上,有利于对流天气产生。14 时地面图上,河南西南部有南北向地面辐合线,河南西南部到东部也存在准东西向的地面中尺度辐合线。黄淮之间有明显的温度和露点温度梯度,南部气温较高,在 $34\sim 38^{\circ}\text{C}$ (南阳附近为 38°C 的高温中心),露点温度多在 $24\sim 26^{\circ}\text{C}$,表明地面处于一种高温高湿的状态。强对流天气首先在河南西南部地面辐合线附近的高温、高湿区出现,而后沿着地面中尺度辐合线向高温、高露点方向移动造成了此次强天气过程(图 2b)。

7 日 08 时(图 2c)500 hPa 受副高阻挡,河套西部低槽未来收缩东移,700 和 850 hPa 河套及以东地区有低槽和切变线,700~925 hPa 低空西南急流位于切变线东南侧,河南西部、北部处于西南气流风速辐合区内。豫西、豫北 $\Delta T_{850-500}$ 多在 27°C 以上,850 hPa 郑州温度高达 26°C ,垂直温度递减率大。14 时地面图上,河南处在低压带里,温度在 $35\sim 39^{\circ}\text{C}$,郑州为 39°C 暖中心,河南北部为 $25\sim 28^{\circ}\text{C}$ 的露点温度高值区,在山西和河南交界处有明显的温度和露点温度梯度。河南西北部太行山附近和河南西部分别有地面中尺度辐合线,7 日的强对流天气首先在河南西部辐合线、露点锋附近发生,随后在槽前西南气流引导下沿着河南北部的高温、高湿区移动(图 2d)。

11 日 08 时(图 2e)588 dagpm 线北界呈东北—西南向控制河南,未来副高东退,河套西部有低槽东移,河南西部、北部位于低槽前部和副高西北边缘之间的西南气流中,700 hPa 低槽略超前于 500 hPa,850 hPa 在山西北部 and 陕西西部分别有一切变线,从高层到低层河南都处于西南气流中,河南大部 $\Delta T_{850-500}$ 仍在 27°C 以上。14 时地面图上,河南处于东南高、西北低的气压场中,受副高控制,河南为 $35\sim 39^{\circ}\text{C}$ 高温区,豫西、豫北大部地区露点温度高达 $26\sim 29^{\circ}\text{C}$,地面温度高、湿度大,有利于形成较大的不稳定能量。豫西山区和太行山东侧分别有地面辐合线和露点锋,在强的热力条件和地面辐合抬升作用下,11 日的强对流天气也首先在河南西部辐合线附近发生,随后在副高边缘西南气流引导下沿着河南北部高温、高湿区移动(图 2f)。

以上分析可见,三次大范围强对流天气是在高

空槽前动力作用和地面辐合线的触发作用下,使得不稳定能量释放而引起。但1日副高偏东偏弱,西伸脊点在东南沿海,主要是584 dagpm线的摆动引起低槽的变化,且配合中低层切变线、急流影响而造成。7和11日环流形势比较相似,副高强盛,河南西部、北部位于副高西北侧边缘的西南气流中。尽管三次过程都发生在高、中、低层一致的西南气流形势下,但对流层中层或以上有明显干区和24 h降温区(图略),有利于建立上干冷、下暖湿的不稳定大气层结。前述对流层中下层较大的温度垂直递减率有利于产生强烈上升气流(俞小鼎等,2012)。高空综合分析能够对河南出现强对流天气的潜势有一定的估计,但不易确定强天气发生、发展的落区和对流天气的类型。从地面图来看,三次过程发生之前,地面都处于高温高湿状态,温度和露点温度梯度以及地面辐合线等对对流天气的产生具有触发作用,雷暴、短时大风(以西南到偏西为主)、短时强降水和局地冰雹等强对流天气首先发生在地面辐合线附近并在地面高温高湿区中向东偏北方向移动和发展。可见,在具备大范围强天气潜势条件下,详细的地面图综合分析可以为确定强天气发生、发展区域提供重要线索。

2.2 探空资料分析

$T\text{-}\ln p$ 图能够反映探空站及其附近上空气象要素的垂直分布,分析单站探空资料能够比较有效地判断发生对流的条件和类型。从风随高度的变化看,1日08时南阳 $T\text{-}\ln p$ 图上(图3a)低层为西南风,风随高度顺时针旋转;7日08时(图3b)郑州站500 hPa以下为西南风;11日08时(图3c)郑州站上空700 hPa以下为西南风,可以看出三次过程中、低层都有暖平流特征,有利于低层增暖和层结不稳定性增大。从0~6 km垂直风切变看(图3、表1),1日08时南阳站上空风切变值为 $13.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,20时增强为 $18.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,7日20时郑州0~6 km垂直风切变为 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,而8月11日垂直风切变较弱,可以看出三次过程深层垂直风切变并不很强。但从0~3 km垂直风切变看,8月1日南阳站为 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,7日08时郑州站为 $13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,11日08时为 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,20时增大到 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,切变值基本在 $4.3\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 以上。强的风垂直切变存在较大的水平涡度,风暴内外的垂直速度差异使得涡度扭曲,产生风暴内垂直涡度,从而有利于超级单体发展,风垂

直切变可以是0~6 km深层的,也可以是集中在某一高度区间(王秀明等,2012)。本文分析的三次强风暴正是发生在中低层垂直风切变非常强的环境条件下,特别是1和7日大的中低层垂直风切变非常有利于超级单体的产生。从温度露点差看,1、7和11日08时分别在700、750和550 hPa以下温度露点差比较小,对流层中下层湿度大且湿层相对深厚,向上湿度逐渐减小,上层为明显干层。11日08时700~925 hPa温度廓线基本平行于干绝热线,表明下沉对流有效位能(DCAPE)很大,有利于下沉气流加速。基于垂直运动方程中下沉运动的强迫机制而引入的大风指数(WINDEX)能够更好地反映雷暴大风潜势,其值越大,表示出现雷暴大风的可能性越大(王秀明,2012)。三次过程08时大风指数均在 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,表明三次过程在雷暴发展的同时,出现雷暴大风甚至飑线区域大风的可能性大。

从表1计算的南阳、郑州探空站其他常用物理量还可以看出,三次过程发生前当天08时 K 指数均在 30°C 以上,8月1日08时,南阳站 K 指数高达 41°C ;850和500 hPa θ_{se} 之差($\Delta\theta_{\text{se}(850-500)}$,下同)基本在 15°C 以上,1日08时,南阳站 $\Delta\theta_{\text{se}(850-500)}$ 高达 30.5°C ,7日08、20时,郑州站分别为22.1和 31.6°C ,11日08、20时,郑州站分别为14.9和 38.2°C ,如此大的 $\Delta\theta_{\text{se}(850-500)}$ 在河南是非常少见的,表明了三次过程对流不稳定性非常强。1和11日对流有效位能(CAPE)分别达2703.4和 $2936.1\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,比7日大很多,而7日对流抑制较大,这也是1和11日出现飑线和区域强风暴而8月7日出现局地强风暴的原因之一。沙氏指数 SI 均小于 0°C ,特别是8月1日08时低至 -6.4°C 。

850和500 hPa温度差在 27°C 以上,虽然没有西北气流干环境条件下河南出现强对流天气的垂直温度梯度大,但也达到并超过了出现强对流天气的指标(许爱华等,2006;张一平等,2013b)。从大气可降水量(P_w ,下同)看,三次过程基本都在5.0 cm以上,8月1日08时南阳更是达到了5.6 cm,水汽条件非常充足,是比较典型的湿环境条件下的对流天气过程(郑淋淋等,2013)。另外,三次过程 0°C 层高度($H_{0^\circ\text{C}}$,下同)大都超过5 km, -20°C 层高度($H_{-20^\circ\text{C}}$,下同)在8 km以上。一般来说,产生冰雹有利的 $H_{0^\circ\text{C}}$ 高度在4~5 km, $H_{-20^\circ\text{C}}$ 高度在7.5 km(400 hPa)附近或以下,有利于强冰雹生长,超过5 km,难以产生强冰雹天气(俞小鼎等,2012)。从

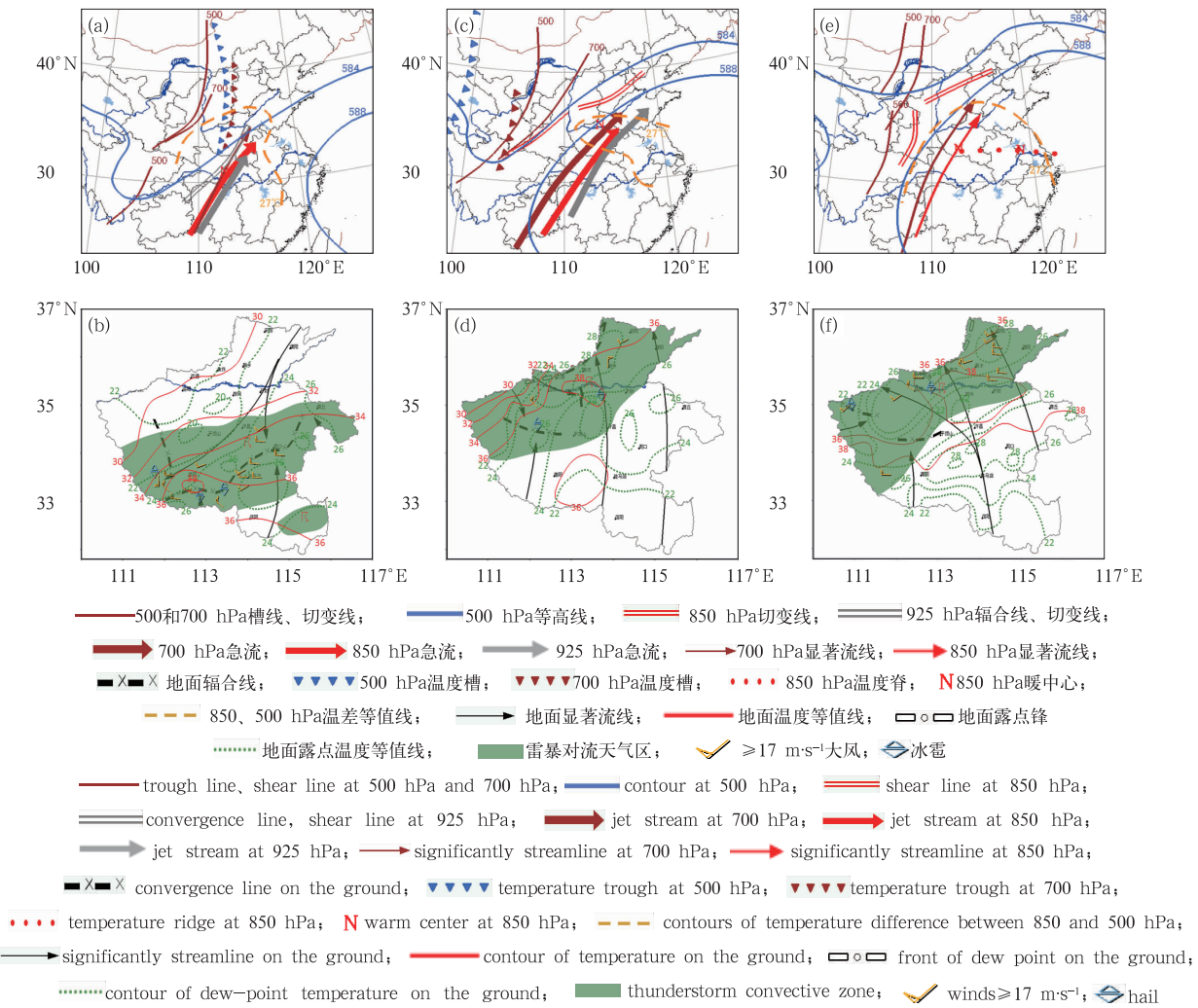


图 2 2013 年 8 月 1 日(a, b)、7 日(c, d)和 11 日(e, f)三次过程当天 08 时高空尺度天气分析综合图(a, c, e)及 14 时地面中尺度天气分析综合图(b, d, f)

Fig. 2 Comprehensive mesoscale weather analysis graphs at 08:00 BT at upper level (a, c, e) and at 14:00 BT on the ground (b, d, f) on 1 (a, b), 7 (c, d) and 11 (e, f) August 2013

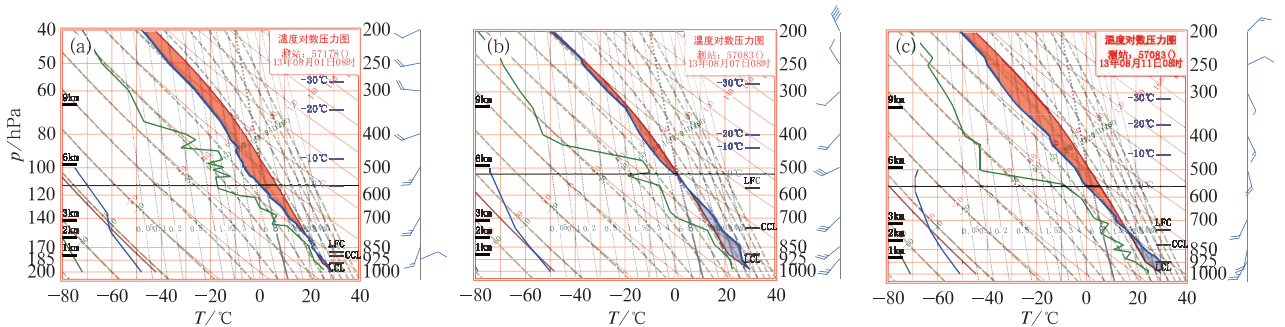


图 3 2013 年 8 月三次过程当日 08 时临近探空图

(a) 8 月 1 日南阳站, (b) 8 月 7 日郑州站, (c) 8 月 11 日郑州站

Fig. 3 The 08:00 BT around sounding graphs on the days with three processes in August 2013

(a) 1 August at Nanyang, (b) 7 August at Zhengzhou, (c) 11 August at Zhengzhou

实况看,三次过程都出现了局地冰雹(冰雹直径多在 2 cm 以下),其主要原因除了前面所述较强的热力不稳定条件外,局地冰雹和嵩县较大冰雹多出现在山区, H_{0C} 距地面实际高度小于 5 km,不利于冰雹在降落过程中融化而降雹;平原地区局地也有小冰雹,但无强冰雹的发生。

表 1 2013 年 8 月 1 日南阳站、7 和 11 日郑州站探空物理量
Table 1 Sounding physical quantities on 1 August at Nanyang, 7 and 11 August at Zhengzhou

站点	时间/ (时/日)	$K/^{\circ}C$	$SI/^{\circ}C$	$\Delta\theta_{se(850-500)}/^{\circ}C$	$\Delta T_{850-500}/^{\circ}C$	$CAPE/J\cdot kg^{-1}$	P_w/cm	0~6 km/ $m\cdot s^{-1}$	0~3 km/ $m\cdot s^{-1}$	WINDEX/ $m\cdot s^{-1}$	H_{0C}/m	$H_{-20^{\circ}C}/m$
南阳	08/01	41	-6.4	30.5	27	2703.4	5.6	13.2	14.0	33.6	4923.3	8706.9
南阳	20/01	23	4.0	-4.1	27	38.0	4.5	18.1	14.0	14.7	5241.1	8818.6
郑州	08/07	31	-2.6	22.1	29	735.0	5.1	7.1	13.1	36.8	5454.2	8603.1
郑州	20/07	42	-3.2	31.6	25	598.7	6.4	14.0	10.0	26.6	5555.0	8537.1
郑州	08/11	32	2.0	14.9	28	2936.1	4.8	4.9	8.0	31.8	5207.5	8227.6
郑州	20/11	47	-6.6	38.2	28	3014.2	6.4	6.7	15.1	30.5	5142.0	8347.1

以上探空资料分析来看,三次过程既不同于湿层深厚、典型区域暴雨的狭长型正不稳定能量探空(张一平等,2012;2013b),也不同于相对干环境条件下的喇叭口雷暴大风探空(牛淑贞等,2008;2012;张一平等,2014),更不同于温、湿廓线呈倒 V 型干下击暴流探空图一(王秀明等,2013),对流层中低层相对深厚的湿层及其以上的干层是这三次西南气流型强对流天气主要的共同特征。对于中纬度内陆的河南来说,不同天气形势下强对流天气的物理量参数有明显差异(张一平等,2013b),以上分析不难看出,对于西南气流形势下河南强对流天气来说,CAPE、850 和 500 hPa θ_{se} 差 $\Delta\theta_{se(850-500)}$ 、 $\Delta T_{850-500}$ 、K 指数等能够非常好地反映发生强对流天气所具有的热力不稳定条件,强的对流层中低层垂直风切变和大风指数等对强风暴的形成具有很好的指示意义。这些可以作为今后分析预报河南同类强对流天气重点关注的物理量。

2.3 物理量场诊断分析

上述探空资料分析表明,本文分析的三次强对流天气都发生在充分的水汽和不稳定条件下,为了进一步分析三次西南气流型强对流天气发生发展的环境场特征,利用 NCEP 资料比较了三次强对流天气过程发生发展的环境条件及其之间的差异。

2.3.1 水汽条件

在初夏西北气流相对干的环境条件下,强对流天气往往发生在近地面有一定水汽但没有明显水汽输送的条件下(张一平等,2013b)。本文分析的三次强对流天气中低层有明显的水汽输送,从 1 日 14 时 850 hPa 比湿场(图 4a)看,除豫北地区以外,比湿

都 $\geq 12 g\cdot kg^{-1}$,南阳西部有一 $16 g\cdot kg^{-1}$ 的比湿大值中心,而强对流天气正是从南阳西部开始出现,随着西南气流水汽源源不断向东北方向输送,20 时,整个河南上空比湿都在 $12 g\cdot kg^{-1}$ 以上,而 $16 g\cdot kg^{-1}$ 的大值区东移到南阳以东地区。7 日 14 时(图 4b),除河南中南部外,其他地区 850 hPa 比湿都 $\geq 12 g\cdot kg^{-1}$,豫西和豫西北地区比湿 $\geq 15 g\cdot kg^{-1}$,强对流天气在豫西北和三门峡、洛阳一带首先出现,20 时,在西南气流水汽输送的有利条件下,除豫南外,全省都处于比湿 $\geq 12 g\cdot kg^{-1}$ 的大值区中,北中部、西部比湿 $\geq 15 g\cdot kg^{-1}$,郑州附近出现 $17 g\cdot kg^{-1}$ 的大值中心,为强对流天气的发展提供了充分的水汽条件。11 日 14 时(图 4c),河南大部 850 hPa 比湿在 $14 g\cdot kg^{-1}$ 以上,豫西和北中部在 $15 g\cdot kg^{-1}$ 以上,此时豫西北和豫西已经出现分散的强对流天气。20 时,大部分地区比湿仍在 $14 g\cdot kg^{-1}$ 以上,此时北中部正在发生有组织的强对流天气。由此可见,三次强对流天气发生之前和发生过程中,850 hPa 比湿都在 $12 g\cdot kg^{-1}$ 以上(达到了河南出现区域暴雨指标),低层水汽非常充沛,短时大风、强降水和局地冰雹等强对流发生区域更是超过了 $14 g\cdot kg^{-1}$ 。从三次过程比湿垂直分布(图略)可知,地面到 900 hPa 比湿在 $16\sim 19 g\cdot kg^{-1}$,800~900 hPa 上比湿为 $14\sim 16 g\cdot kg^{-1}$,600 hPa 以上比湿随高度迅速减小,形成了显著的上干下湿层结结构。对流层低层非常充分的水汽不但满足了强对流天气发生的水汽条件,而且对出现强降水也非常有利,这也是三次强对流天气过程中降水也非常明显的主要原因。

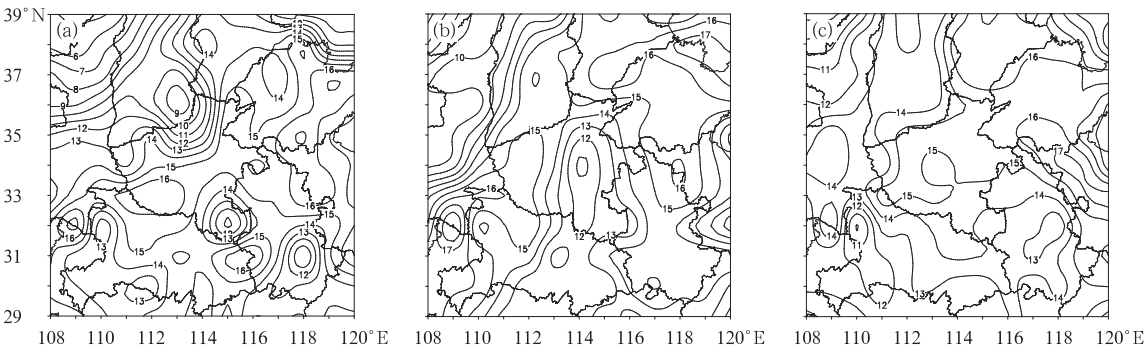


图 4 2013 年 8 月三次强对流天气 850 hPa 比湿(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
(a) 1 日 14 时, (b) 7 日 14 时, (c) 11 日 14 时

Fig. 4 Specific humidity at 850 hPa of three severe convective processes in August 2013 (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
(a) 14:00 BT 1, (b) 14:00 BT 7, (c) 14:00 BT 11

2.3.2 动力抬升条件

水汽和不稳定层结是强对流天气发生的必要条件,但还需要一定的抬升力才能触发对流的产生。从三次过程的高低层涡度场看(图略),8 月 1、7 和 11 日 14 时 850 hPa 分别有 $+3 \times 10^{-5}$ 、 $+7 \times 10^{-5}$ 和 $+2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的正涡度区(或中心),200 hPa 分别有 -7×10^{-5} 、 -9×10^{-5} 和 $-11 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的负涡度中心。20 时,低层正涡度、高层负涡度区仍然维持并略向东移。这种低层辐合、高层辐散的耦合作用有利于上升运动的产生。8 月 1 日 14 时沿 34°N (图 5a)、7 日 14 时沿 35°N (图 5b)和 11 日 14 时沿 35°N (图 5c)的垂直速度剖面图上, $114^\circ \sim 115^\circ\text{E}$ (对应强对流天气区)附近上空均有上升运动区,8 月 1 日 14 时上升运动最强,达 $(-6 \sim -5) \times 10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$,最大上升运动区自 850 hPa 伸向 200 hPa,8 月 7 和 11 日垂直速度较小,其值在 $(-2 \sim -1) \times 10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$,有弱的上升运动。可见,三次强对流天气过程均发生在低层辐合、高层辐散的天气尺度上升运动环境条件下。

以上单站探空和物理量场诊断分析表明,盛夏西南气流形势下河南三次强对流天气过程相对于区域暴雨来看,对流层中上层比较干,对流层中下层为高温高湿环境,热力不稳定和水汽条件充分,CAPE 非常大,深层垂直风切变并不很强,但对流层中下层垂直风切变非常强,配合一定的动力抬升条件,非常有利于超级单体和飑线等强风暴的形成和发展。综合来看,8 月 1 日不稳定、水汽、垂直切变和动力条件最强,11 日次之,7 日相对较弱。雷达监测和实况也显示 8 月 1 和 11 日出现了较明显的飑线和较大范围的强对流天气,而 8 月 7 日只出现了线状回波

和局地强对流天气。可见,热力不稳定、水汽、垂直风切变及触发抬升是发生强风暴所具备的条件,在强风暴的发展演变过程中都具有重要作用,但这些条件的强弱对对流系统的组织结构也有一定影响。

3 雷达回波演变特征

新一代天气雷达是监测和临近预报预警强对流天气的主要工具,根据不同的雷达产品图像能够比较直观判断强风暴的类型,从而有效地对各种强对流天气进行分类预警。

8 月 1 日强对流天气主要发生在黄淮之间,受高空槽东移和地面辐合线影响,13:26 驻马店雷达 1.5° 仰角(图略)监测到初始小块对流回波在河南西南部生成,该回波快速发展,其前部有对流单体不断生成,14:02 南阳市和社旗县交界处已增至 5 个对流单体。同时内乡县有对流单体局地生成并快速发展、迅速加强,形成一个范围较大的多单体回波群(其中部分伴有中尺度气旋,发展成为非典型超级单体),回波强度达 53~58 dBz。16:30 多单体回波逐渐向东北方向移动、合并增强,形成西北—东南向强对流回波带,自西向东影响南阳大部分县市,实况为 14:05—17:39 南阳先后有 10 个县、市出现雷暴,7 个县、市出现大风,内乡和唐河出现局地冰雹,南阳大部分地区出现短时强降水天气。从郑州雷达上看(为了便于和其他两次过程比较,图 6 统一用郑州雷达 0.5° 基本反射率因子 20 产品)本次过程主要分为以下几个阶段:初始阶段(13:26—16:30),主要表现为前述南阳多单体回波阶段,图 6a₁ 为郑州雷达 15:30 南阳多单体回波基本反射率;第二阶段是多单

体逐渐加强为飑线阶段,16:30后带状回波逐渐演变为飑线回波(图6a₂),强度53~58 dBz,回波顶高多在11~14 km,飑线回波和图2b中地面辐合线相交处发展旺盛,移动较快,18:30后飑线回波逐渐演变为一条长约200 km、宽约30~50 km的西北—东南向 β 中尺度弓形回波带(图6a₃),该回波自西南以 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度继续向东北方向移动,使驻马

店、周口两地区多站出现了区域雷暴大风、局地短时强降水天气,泌阳出现了冰雹。22:00后该弓形回波逐渐减弱,于22:30基本移出河南(图6a₄)。以上分析可以看出,8月1日强对流回波主要经历了多单体回波、超级单体、线状飑线回波之后又演变为弓形回波几个阶段,强天气主要由河南西南部多单体回波和弓形飑线回波受西南气流引导,在地面高温

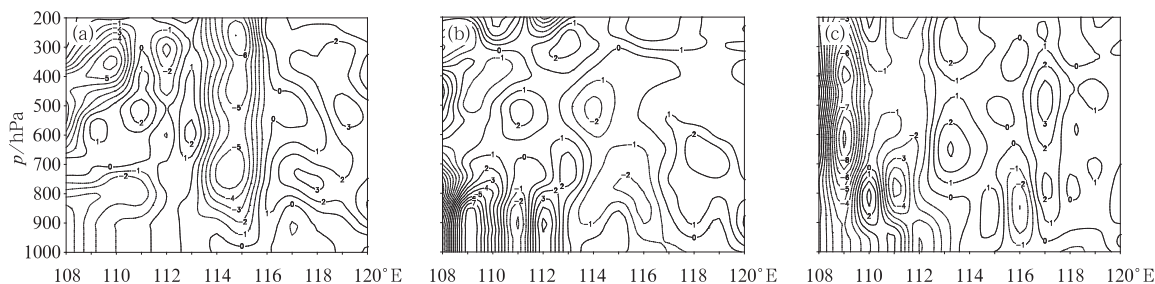


图5 2013年8月三次过程垂直速度纬向剖面图(单位: $10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

(a) 1日14时沿 34°N , (b) 7日14时沿 35°N , (c) 11日14时沿 35°N

Fig. 5 The zonal profile of vertical velocity of the three processes in August 2013 (unit: $10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

(a) along 34°N at 14:00 BT 1, (b) along 35°N at 14:00 BT 7, (c) along 35°N at 14:00 BT 11

高湿环境中沿预先存在的地面辐合线自西南向东北移动而造成。

受高空槽收缩东移影响,8月7日12:04郑州雷达监测到山西境内有多块分散性的对流回波生成,随后不断发展并向偏东方向移动。13:10河南西北部也有分散对流回波生成。15:03洛阳与平顶山交界处有块状局地对流回波初生并快速发展增强(图6b₁),之后向东移动,15:44从安阳经鹤壁、焦作西部一直到平顶山北部,形成一条不连续线状对流回波带,16:32该回波带东移到安阳、鹤壁、焦作、郑州西部到平顶山西北部,呈东北—西南向(图6b₂)。18:01线状回波以约 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度继续向东移至安阳东部到郑州一带(图6b₃),回波强度达到53~58 dBz以上,回波顶高13~16 km,垂直液态含水量 $13 \sim 28 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,局部 $53 \sim 70 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。19:06线状回波断裂,郑州附近的南段回波强度减弱东移,河南北部的北段回波宽度增加,影响河南东北部。随后回波继续东移,主体逐渐移出河南(图6b₄)。可见8月7日的强对流天气主要由块状单体组成的准线状强回波带自西向东移动造成,和8月1日相比,局地对流回波发展旺盛,但回波带组织性较差,移动比较慢。

受副高东退和低槽东移影响,11日12时初始

对流单体回波在三门峡灵宝附近生成,随后其周围有较多分散且发展迅猛的多单体对流回波出现。该回波在三门峡、洛阳一带聚集、发展、加强,至13:00前后达到60 dBz以上,回波顶高达15 km,使三门峡灵宝、卢氏和洛阳宜阳以及汝阳局地出现了小冰雹。豫西大范围多单体回波持续加强至16:32(图6c₁),之后多单体回波在继续东移过程中不断生消发展,17:33到达山西南部到焦作、济源一带,最大回波强度为63 dBz,对流发展旺盛,造成济源出现39.8 mm降水和短时大风,孟州出现直径16 mm的冰雹。18:30初步形成一个中间向前突起,类似弓状的多单体回波带,该回波继续东移,19:53在河南北部高能区(图2f)中演变成成长200 km,宽30~40 km的近南北向的 β 中尺度弓形飑线回波带,回波带强度55 dBz左右,回波顶高多在11~14 km,最高达16 km,VIL多在 $13 \sim 28 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,最大达 $53 \sim 70 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。20—21时飑线始终保持完整的弓形以约 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度继续东移,使豫北多站出现了 $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的西西南大风和短时强降水天气(图6c₂和6c₃)。21时后弓形回波强度逐渐减弱,结构开始变得松散,随后弓形回波带从中间断裂,西南段在郑州附近逐渐减弱,北段快速东移出河南到山东境内(图6c₄)。可见,8月11日

强对流天气主要是由河南西部山区多单体回波发展东移过程中组织成弓形飑线回波,受西南气流引导在河南北部地面辐合线南侧的高温高湿区自西南向东北移动而造成。

从平均径向速度产品(图略)看,8月1日15:16—17:06 南阳新一代天气雷达在内乡、镇平、唐河、社旗等地出现了中尺度气旋(多出现在大风区边缘,没有明显的正负速度对,持续时间较短,下同),也即8月1日强回波在南阳发展的多单体阶段(图 6a₁),有较多单体发展成为超级单体,使南阳多个县市出现了雷暴大风和局地冰雹天气。18—20 时线状回波和弓形飑线回波阶段(图 6a₂ 和 6a₃),驻马店雷达监测到其后侧有显著大风区。8月7日16—18 时线状回波阶段(图 6b₂ 和 6b₃),新乡、淇县

等地也出现多个中气旋并带来了大风和冰雹天气。8月11日相关雷达没有监测到中尺度气旋,但在飑线阶段(图 6c₃),郑州和濮阳雷达均显示,在强回波后侧均出现了明显的大风区。

以上雷达回波结合天气图分析可知,三次西南气流强对流天气过程初始对流都从河南西南部 and 西部到山西南部一带的辐合线、干线附近生成后逐渐加强,东移过程中组织成线状对流回波和飑线,受西南气流引导沿地面辐合线及其附近的高温高湿区自西南向东北方向移动,对流回波主要表现为多单体、局地超级单体、线状、飑线回波等,强回波路径之处大都出现了雷电、部分县市出现短时强降水、短时大风和局地冰雹等灾害天气。

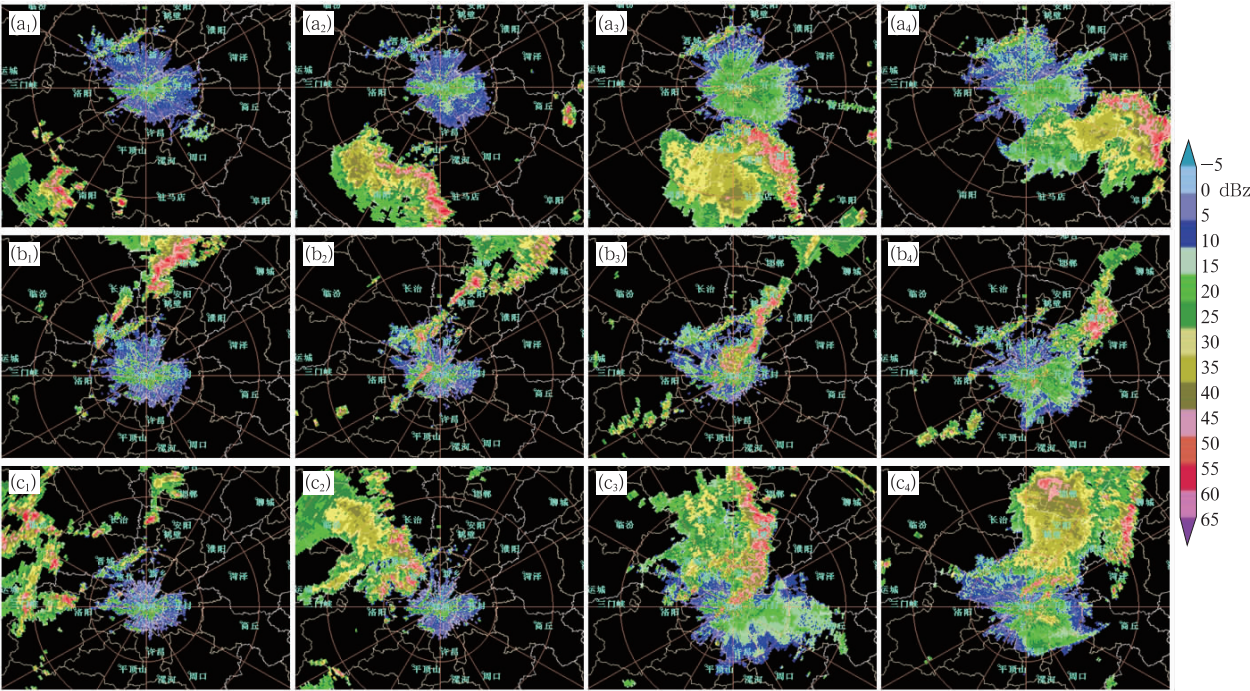


图 6 2013 年 8 月三次强对流天气郑州 CINRAD-SA 0.5°基本反射率因子演变特征
(a) 1 日 15:30(a₁)、18:03(a₂)、20:02(a₃)、22:31(a₄), (b) 7 日 15:03(b₁)、16:32(b₂)、
18:01(b₃)、19:30(b₄), (c) 11 日 16:32(c₁)、18:30(c₂)、20:36(c₃)、22:34(c₄)

Fig. 6 Evolution characteristics of CINRAD-SA 0.5° base reflectivity factor of
three processes in Zhengzhou in August 2013
(a₁, a₂, a₃, a₄) for 15:30, 18:03, 20:02, 22:31 BT 1; (b₁, b₂, b₃, b₄) for 15:03, 16:32,
18:01, 19:30 BT 7; (c₁, c₂, c₃, c₄) for 16:32, 18:30, 20:36, 22:34 BT 11 August 2013

4 飑线形成原因分析

在西南气流形势下,河南出现飑线回波形式的

强对流天气比较少见。本文分析的三次强天气有两次出现了比较完整的飑线。前面分析可以看出,飑线都由多单体(部分发展为超级单体)发展东移演变而形成。8月1日飑线维持时间长达 5 h,移动速度

快,约 $50\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$;8 月 11 日飊线维持 $2\sim3\text{ h}$,时间短,移速较慢,约 $30\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。结合图 2b、2f 可以看出,8 月 1 日飊线主要在河南西南部形成,并在豫南黄淮平原的高温高湿辐合区内逐渐发展、维持和东移;8 月 11 日飊线形成前,多单体结构的强回波主要在山西南部 and 河南西部山区发展,多单体阶段维持时间长,在其发展、东移到豫北平原后在高温高湿区内逐渐形成了比较完整的飊线回波,移动较慢的原因主要是高空风暴承载层的风速比 8 月 1 日小(图 3a 和 3c)。雷达回波图上,两次飊线前侧都有明显的出流边界、后侧有大范围稳定性弱降水回波(图 7a₁ 和 7b₁)。出流边界是后侧飊线的雷暴群中强烈的下沉气流出流汇合在一起的冷池前沿与其前侧暖湿环境大气的交界面,它的出现表明后侧飊线回波发展旺盛(张一平等,2005)。结合飊线 and 对应时次的地面加密自动站风场(图 7a₂ 和 7b₂)看,飊

线的走向和地面辐合线走向非常一致,地面辐合线正对应雷达回波出流边界处,1 日的出流边界紧贴其后侧的强回波,11 日的出流边界位于强回波前沿约 20 km 处(这可能也是 1 日飊线较 11 日维持时间长的原因之一),两次过程出流边界和其后侧的飊线回波都保持了较近的距离,飊线回波前沿辐合上升的暖湿空气不断补充使得飊线得以维持。从飊线和出流边界路经之地大风出现时间来看, $\geq 17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大风主要由飊线强回波经过时造成的。以上分析可知,地面辐合线既是飊线对流系统的产物,也是线状对流系统的维持者。另外,飊线后侧大范围稳定性降水回波的形成可能与强回波的后侧仍有西南低空水汽输送和上升运动有关,因此,两次过程在其前沿出现区域大风、局地冰雹的同时,多地还出现了较强降水。

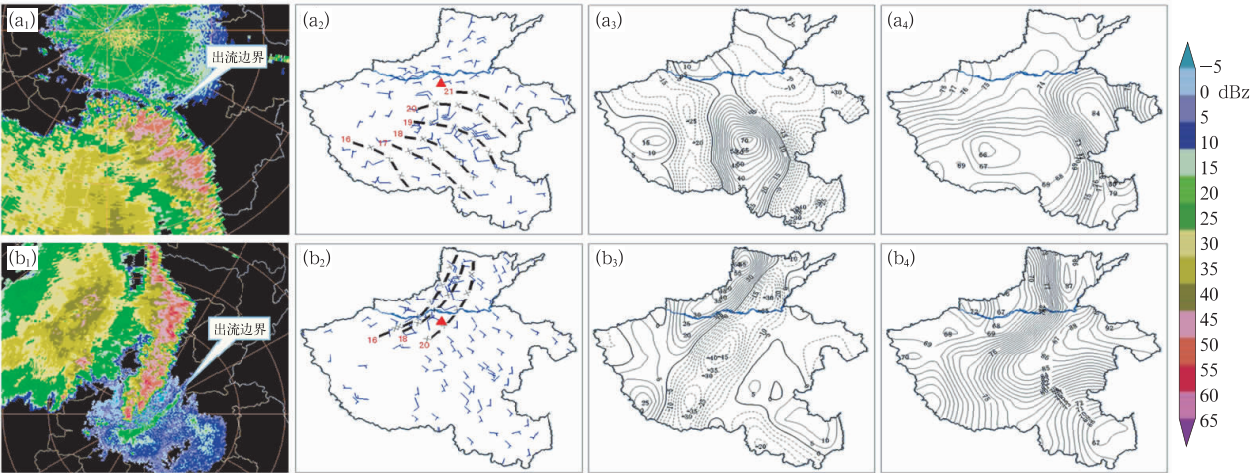


图 7 2013 年 8 月飊线回波基本反射率因子、地面辐合线动态、地面散度和总温度
(a₁, b₁) 1 日 19:56 郑州雷达 0.5°、11 日 20:00 郑州雷达 1.5°仰角, (a₂, b₂) 1 和 11 日 20 时河南加密自动站风场和地面辐合线动态(—×—×逐时地面辐合线,红色数字为北京时间,红色三角为郑州站),
(a₃, b₃) 1 和 11 日 20 时地面散度(单位: 10^{-6} s^{-1}), (a₄, b₄) 1 和 11 日 20 时总温度(单位:℃)
Fig. 7 Base reflectivity factor of squall line echo, development of convergence line on the ground, divergence on the ground and total temperature of three processes in August 2013
(a₁, b₁) 0.5° of Zhengzhou Radar at 19:56 BT 1 and 1.5° of Zhengzhou Radar at 20:00 BT 11, (a₂, b₂) winds of Henan encrypted automatic station and development of convergence line on the ground at 20:00 BT 1 and 11 (—×—× hourly convergence line on the ground, red number stands for Beijing time and red triangle for Zhengzhou Station), (a₃, b₃) divergence on the ground at 20:00 BT 1 and 11 (unit: 10^{-6} s^{-1}), (a₄, b₄) total temperature at 20:00 BT 1 and 11 (unit:℃)

为了进一步分析两次飊线发展、维持的原因,利用国家自动站加密探测资料计算了 8 月 1 和 11 日两次强天气过程飊线成熟阶段的地面散度和总

温度(单位质量的湿空气,其总能量包括感热能、潜热能、位能和动能,根据能量、热量、温度之间的关系,可以求得在定压情况下所相当的温度即总温度

(寿绍文等,2002),总温度能够反映湿空气能量的大小)。从 $7a_1 \sim 7a_4$ 对应分析看,散度场零线位置与飑线强回波前沿及地面辐合线位置一致,其前后分别有 -40×10^{-6} 和 $+70 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 的辐合、辐散中心,表明飑线前侧为强辐合上升运动区,而其后的下沉气流辐散区;从图 $7a_4$ 看,飑线强回波位于总温度锋区梯度最大处,锋区前后两侧分别有 84°C 的高能中心和 66°C 的低能中心。同样,11 日飑线回波两侧也分别有 -30×10^{-6} 和 $+55 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 的辐合、辐散中心(图 $7b_3$),总温度图上(图 $7b_4$),飑线两侧分别有 87°C 的高能中心和 67°C 的低能中心,飑线强回波带正位于能量锋区密集带处。可见,两次强对流天气飑线东移过程中,其移动方向前侧不断有暖湿空气辐合上升、后侧冷空气下沉辐散,这种互为对峙的上升和下沉气流相互作用是飑线得以发展和维持的原因。随着 20 时后地面逐渐辐射降温,两次过程当飑线分别移至河南东部、东北部时,上升气流减弱,飑线随之减弱。

以上分析可见,两次强对流过程主要由多单体回波形成较强的下沉气流,从而使多单体回波发展成为有组织的线状回波带,线状回波在河南黄淮平原和华北平原的高温高湿环境中进一步发展形成飑线,其前侧不断供应的暖湿空气使得飑线维持,导致河南南部和北部出现了两次区域雷暴大风天气。

5 结论与讨论

通过对 2013 年 8 月西南气流形势下河南三次强对流天气过程分析,得出如下结论:

(1) 三次强对流天气均发生在中纬度低槽和副高相互作用、河南高低层受一致西南气流影响的环流背景下,河套地区有低槽东移,1 日河南南部强对流天气出现在 584 dagpm 线附近,7、11 日河南西部、北部强对流天气出现在 588 dagpm 线附近,天气尺度影响系统对强对流天气落区有明显制约作用。大范围强对流天气是在高空槽动力作用和地面辐合线的触发作用下,使得不稳定能量释放而引起。

(2) 中尺度天气分析表明,盛夏三次强对流天气对流层中上层有明显干层,对流层中下层为高温高湿环境,热力不稳定和水汽条件充分,形成了低层暖湿、上层比较干冷的对流不稳定大气层结。地面温度和露点温度高,对流有效位能非常大。深层垂直风切变并不很强,对流层中下层有较强的垂直风

切变。配合一定的动力抬升条件,非常有利于超级单体和飑线的形成和发展。综合来看,8 月 1 日不稳定、水汽、垂直切变和动力条件最强,11 日次之,7 日相对较弱。热力不稳定、水汽、垂直风切变及触发抬升等条件的强弱对对流系统的组织结构有一定影响。中低层充沛的水汽和强的垂直风切变表明在出现雷雨的同时,非常有利于短时强降水、短时大风和局地冰雹的产生。

(3) 雷达资料分析来看,三次强对流天气都出现在午后到前半夜,与河南强对流天气日变化特征一致。1 日初始对流在河南西南部山区和南阳盆地交界处形成,7 和 11 日初始对流出现在河南西部山区和山西南部,三次强对流天气过程初始对流都从河南西南部和西部辐合线、干线附近生成。初生阶段,都表现为多单体回波结构,对流单体回波发展迅速(其中部分发展成为超级单体),强度很快达到 60 dBz 以上,高度在 14 km 以上,造成了局地雷暴大风、冰雹和短时强降水天气。成熟阶段,三次过程都发展成线状对流系统,8 月 1 和 11 日两次过程在豫南和豫北平原地带的高温高湿环境中形成有组织的飑线,其后侧有明显大风区,受西南气流引导,飑线自西南向东略偏北方向移动,路经之处大都出现了雷电、部分县市出现了区域雷暴大风,局地冰雹和短时强降水等灾害天气;8 月 7 日组织化较差,形成了不连续的东北—西南向线状回波。三次过程东移至河南东部、东北部后逐渐减弱。

(4) 8 月 1 和 11 日两次强对流过程主要由多单体回波发展过程中形成较强的下沉气流,多单体回波加强东移过程中演变成有组织的线状对流回波,线状回波在河南黄淮平原和华北平原的高温高湿环境中进一步发展形成飑线。飑线东移过程中其前侧不断有暖湿空气辐合上升、后侧冷空气下沉辐散,这种互为对峙的上升和下沉气流相互作用是飑线得以维持的原因。

(5) 在今后强对流天气预报预警实时业务中,对流层中低层相对深厚的暖湿层结及其以上的干层是西南气流形势下河南强对流天气预报值得关注的內容,CAPE、 $\Delta\theta_{\text{se}(850-500)}$ 、 $\Delta T_{850-500}$ 、K 指数等能够很好地反映此类强对流天气所具有的热力不稳定条件,强的对流层中低层垂直风切变和大风指数对超级单体、飑线等强风暴的形成具有很好的指示意义,这些物理量可以作为今后预报预警同类强对流天气比较可靠的参考。

致谢:本文得到俞小鼎教授指导和帮助,在此深表谢意!

参考文献

陈明轩,王迎春. 2012. 低层垂直风切变和冷池相互作用影响华北地区一次飰线过程发展持续的数值模拟. 气象学报, 70(3): 371-386.

陈涛,代刊,张芳华,等. 2013. 一次华北飰线天气过程中环境条件与对流发展机制研究. 气象, 39(8): 945-954.

樊李苗,俞小鼎. 2013. 中国短时强对流天气的若干环境参数特征分析. 高原气象, 32(1): 156-165.

何立富,周庆亮,谌芸,等. 2011. 国家级强对流潜势预报业务进展与检验评估. 气象, 37(7): 777-784.

蓝渝,张涛,郑永光,等. 2013. 国家级中尺度天气分析业务技术进展 II: 对流天气中尺度过程分析规范和支撑技术. 气象, 39(7): 901-910.

牛淑贞,鲍向东,乔春贵,等. 2008. 强对流风暴新一代雷达产品特征分析. 气象, 34(7): 92-100.

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 日商丘强飰线形成机制. 暴雨灾害, 31(3): 255-263.

农孟松,翟丽萍,屈梅芳,等. 2014. 广西一次飰线大风天气的成因和预警分析. 气象, 40(12): 1491-1499.

寿绍文,励申申,王善华,等. 2002. 天气学分析. 北京: 气象出版社, 180-181.

孙继松,陶祖钰. 2012. 强对流天气分析与预报中的若干基本问题. 气象, 38(2): 164-173.

孙建华,郑淋淋,赵思雄. 2014. 水汽含量对飰线组织结构和强度影响的数值试验. 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. 高原气象, 31(2): 504-514.

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.

吴蓁,俞小鼎,席世平,等. 2011. 基于配料法的“08. 06. 03”河南强对流天气分析和短时预报. 气象, 37(1): 48-58.

许爱华,孙继松,许东蓓,等. 2014. 中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征. 气象, 40(4): 400-411.

许爱华,詹丰兴,刘晓晖,等. 2006. 强垂直温度梯度条件下强对流天气分析与潜势预报. 气象科技, 34(4): 376-380.

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. 气象学报, 70(3): 311-337.

张素芬,鲍向东,牛淑贞. 1999. 河南省人工消雹作业判据研究. 气象, 26(4): 50-54.

张涛,蓝渝,毛冬艳,等. 2013. 国家级中尺度天气分析业务技术进展

I: 对流天气环境场分析业务技术规范改进与产品集成系统支撑技术. 气象, 39(7): 894-900.

张霞,周建群,申永辰,等. 2005. 一次强冰雹过程的物理机制分析. 气象, 31(4): 13-17.

张小玲,张涛,刘鑫华,等. 2010. 中尺度天气的高空地面综合分析. 气象, 36(7): 143-150.

张一平,牛淑贞,席世平,等. 2005. 雷暴外流边界与郑州强对流天气. 气象, 31(8): 54-56.

张一平,王新敏,梁俊平,等. 2013a. 黄淮地区两次低涡暴雨的中尺度特征分析. 暴雨灾害, 32(4): 303-313.

张一平,吴蓁,苏爱芳,等. 2013b. 基于流型识别和物理量要素分析河南强对流天气特征. 高原气象, 32(5): 1492-1502.

张一平,俞小鼎,孙景兰,等. 2014. 一次槽后型大暴雨伴冰雹的形成机制和雷达观测分析. 高原气象, 34(4): 1093-1104.

张一平,俞小鼎,吴蓁,等. 2012. 区域暴雨过程中两次龙卷风事件分析. 气象学报, 70(5): 961-973.

郑淋淋,孙建华. 2013. 干、湿环境下中尺度对流系统发生的环流背景和地面特征分析. 大气科学, 37(4): 891-904.

郑媛媛,姚晨,郝莹,等. 2011. 不同类型大尺度环流背景下强对流天气的短时临近预报预警研究. 气象, 37(7): 795-801.

Crisp M C A. 1979. Training guide for severe weather forecasters. AFGWCTN-79/002. United States Air Force, Air Weather Service(MAC), Air Force Global Weather Central.

Doswell III C A, Brooks H E, Maddox R A. 1996. Flash flood forecasting: An ingredients based methodology. Wea Forecasting, 11: 560-581.

Lemon L R, Doswell III C A. 1979. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis. Mon Wea Rev, 107: 1184-1197.

Maddox R A, Chappell C F, Hoxit L R. 1979. Synoptic and Meso aspects of flash flooding events. Bull Amer Met Soc, 60: 115-123.

Meng Z, Yan D, Zhang Y. 2013. General features of squall lines in East China. Mon Wea Rev, 141: 1629-1647.

Miller R C. 1972. Notes on analysis and severe-storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central, Technical Report 200 (Rev). Air Weather Service (MAC) United States Air Force.

Yu X, Wang X, Zhao J, et al. 2012. Investigation of Supercells in China-Environmental and Storm Characteristics. Preprints, 26th Conf on Severe Local Storms, Nashville, TN, Amer Meteor Soc.